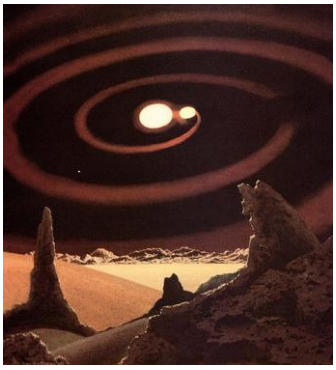
INVESTIGACIÓN FILOSÓFICO-CIENTÍFICA



Filosofía para cosmólogos y escultores del tiempo

Atlas histórico, matemático, científico y filosófico del cosmos, sus teorías, sus instrumentos y sus límites

Ensayo monográfico

Ciudad de México, octubre de 2026, Julio David Rojas

Atelier Velázquez

¿Qué es, pues, el tiempo? Si nadie me lo pregunta, lo sé; si quiero explicárselo a quien me lo pregunta, no lo sé.

— Agustín de Hipona, Confesiones, XI, 14, 17

En adelante, el espacio por sí mismo y el tiempo por sí mismo están condenados a desvanecerse como meras sombras, y solo una especie de unión de ambos conservará una realidad independiente.

— Hermann Minkowski, «Raum und Zeit», 1908

Atelier Velázquez

Resumen

Este ensayo investiga cómo se ha constituido históricamente el conocimiento físico del cosmos y qué significa, en cada etapa de ese proceso, que algo ocurra en el tiempo. El recorrido parte de la etimología y la historia de la palabra *phýsis*, atraviesa las cosmologías antiguas de Mesopotamia, Egipto, Grecia, la India, China, el mundo nórdico, Mesoamérica y la tradición hebreo-cristiana, y reconstruye la matematización del cielo desde Eudoxo y Ptolomeo hasta la astronomía india, islámica y medieval, Copérnico, Kepler, Galileo y Newton. Examina después la mecánica analítica, la termodinámica, la física estadística, el electromagnetismo, la relatividad especial y general, el teorema de Noether, la mecánica cuántica y sus interpretaciones, la teoría cuántica de campos, el Modelo Estándar, la cosmología relativista, el modelo ΛCDM, la inflación, los agujeros negros y los principales programas de gravedad cuántica. Cada teoría se analiza a partir del problema que intentaba resolver, su construcción matemática, la evidencia que la sostiene, su capacidad operatoria y sus límites, con ejemplos numéricos verificados. Una parte dedicada a las máquinas —cohetes, aceleradores, GPS, telescopios, interferómetros y computadoras— muestra cómo las teorías se entretejen en dispositivos concretos.

El análisis filosófico emplea herramientas del materialismo filosófico de Gustavo Bueno —symploké, dialéctica, géneros de materialidad, teoría del cierre categorial— junto con otras tradiciones de filosofía de la ciencia y del tiempo. La tesis defendida sostiene que el conocimiento cosmológico resulta de articulaciones específicas entre fenómenos, instrumentos, operaciones, construcciones matemáticas e inferencias, y que el tiempo de la física se presenta bajo funciones heterogéneas —parámetro dinámico, magnitud metrológica, tiempo propio, orden causal, tiempo termodinámico, tiempo cosmológico, tiempo reconstruido y problema del tiempo en gravedad cuántica— cuyas conexiones son parciales. Como contribución propia se propone una cartografía gnoseológica de las temporalidades científicas, que distingue esas funciones, identifica las operaciones que las relacionan y señala dónde su identificación sería una extrapolación injustificada.

Atelier Velázquez

Palabras clave: filosofía de la física; cosmología; filosofía del tiempo; historia de la ciencia; materialismo filosófico; cierre categorial; symploké; relatividad; mecánica cuántica; gravedad cuántica.

Abstract

This essay examines how physical knowledge of the cosmos has been historically constituted and what it means, at each stage, for something to happen in time. Starting from the etymology of *phýsis* and ancient cosmologies, it reconstructs the mathematization of the heavens, classical mechanics, thermodynamics, electromagnetism, relativity, quantum theory, the Standard Model, relativistic cosmology and quantum gravity programmes, together with the instruments and machines in which these theories are interwoven. Using tools from Gustavo Bueno's philosophical materialism and from contemporary philosophy of physics and of time, it argues that scientific time appears under heterogeneous functions whose connections are partial, and proposes a gnoseological map of scientific temporalities.

Keywords: philosophy of physics; cosmology; philosophy of time; history of science; philosophical materialism; categorial closure.

Atelier Velázquez

Índice

Resumen **3**

Introducción **8**

Pórtico **12**

Capítulo 0. ¿Qué es la física? De la phýsis antigua a las ciencias contemporáneas de la materia, los campos y el espaciotiempo 13

Parte I. El cosmos antes de la física **27**

Capítulo 1. El ser humano ante el cosmos 28
Capítulo 2. Atlas de cosmologías antiguas 32
Capítulo 3. De la phýsis a la astronomía racional 41

Parte II. La matematización del cielo **49**

Capítulo 4. Número, geometría y medida 50
Capítulo 5. Astronomía matemática antigua 55
Capítulo 6. De Ptolomeo a Copérnico: una historia de transmisión 58
Capítulo 7. Newton y la unificación mecánica 67

Parte III. Medir el cambio y comprender el tiempo **74**

Capítulo 8. Cálculo, movimiento y relojes 75
Capítulo 9. Lagrange, Hamilton y la arquitectura matemática del movimiento 80
Capítulo 10. Termodinámica: del motor al principio físico 87
Capítulo 11. Boltzmann, Gibbs y la física estadística 92
Capítulo 12. La flecha del tiempo 98

Parte IV. Campos, simetrías y espaciotiempo **103**

Capítulo 13. Faraday y Maxwell 104
Capítulo 14. Einstein y la relatividad especial 109
Capítulo 15. Minkowski y el espaciotiempo 116
Capítulo 16. Emmy Noether y las leyes de conservación 120
Capítulo 17. Relatividad general 125

Parte V. La arquitectura cuántica **133**

Capítulo 18. La revolución cuántica 134
Capítulo 19. Medición cuántica y entrelazamiento 143
Capítulo 20. Interpretaciones cuánticas 148
Capítulo 21. Teoría cuántica de campos y fenómenos colectivos 153
Capítulo 22. El Modelo Estándar y sus límites 160

Parte VI. La biografía física del universo **167**

Atelier Velázquez

Capítulo 23. Instrumentos, observaciones y escalera de distancias 168
Capítulo 24. Estrellas, elementos y tiempo profundo 175
Capítulo 25. Galaxias y estructuras cósmicas 182
Capítulo 26. Expansión del universo 186
Capítulo 27. El universo temprano 192
Capítulo 28. El modelo ΛCDM 197
Capítulo 29. Inflación 201

Parte VII. Agujeros negros y el encuentro de las teorías 205
Capítulo 30. Agujeros negros 206
Capítulo 31. Hawking y Bekenstein 211
Capítulo 32. Qué significa existir en física 215

Parte VIII. Gravedad cuántica y problemas de fundamento 220
Capítulo 33. El conflicto entre relatividad y cuántica 221
Capítulo 34. Teoría de cuerdas 225
Capítulo 35. Teoría M y holografía 229
Capítulo 36. Programas alternativos 231
Capítulo 37. ¿Es fundamental el espaciotiempo? 235

Parte IX. De las ecuaciones a las máquinas 238
Capítulo 38. Cómo se construye un cohete 239
Capítulo 39. Cómo funciona un acelerador 242
Capítulo 40. Cómo funciona el GPS 246
Capítulo 41. Telescopios, LIGO y computadoras 250

Parte X. Mapa de los límites 253
Capítulo 42. Atlas de escalas y teorías efectivas 254
Capítulo 43. Ley, teoría, modelo y simulación 257
Capítulo 44. La filosofía del error científico 259
Capítulo 45. Falacias gnoseológicas 262
Capítulo 46. Lo que todavía no sabemos 266

Parte XI. Observatorio de ciencia contemporánea 274
Capítulo 47. El conocimiento científico en movimiento 275

Parte XII. Escultores del tiempo 280
Capítulo 48. Las múltiples formas de entender el tiempo 281
Capítulo 49. Huellas materiales, historia y representación del tiempo 285
Capítulo 50. Materia investigando materia 290

Conclusión 300

Glosario conceptual y etimológico 303

Anexos 308
Anexo A. Atlas biográfico e índice de exponentes 309
Anexo B. Atlas de ecuaciones 313
Anexo C. Atlas de instrumentos 315

Atelier Velázquez

Anexo D. Cronología 317
Anexo E. Constantes, magnitudes, símbolos y unidades 319
Anexo F. Siglas y abreviaturas científicas 324
Anexo G. Índice analítico temático 326
Bibliografía 330

Atelier Velázquez

Introducción

Dos preguntas

Este libro se organiza alrededor de dos preguntas que no pueden separarse sin empobrecer a ambas. La primera es física y filosófica: ¿qué significa que algo ocurra en el tiempo, y cómo ha cambiado esa noción a medida que se transformaron las teorías físicas? La segunda es gnoseológica: ¿cómo consiguió un animal situado en un planeta mediano, en la periferia de una galaxia ordinaria, reconstruir mediante observaciones, cálculos, instrumentos y teorías una historia física que va desde las interacciones entre quarks hasta la formación de los cúmulos de galaxias?

La primera pregunta parece metafísica y la segunda parece histórica. Ninguna de las dos lo es por completo. Para saber qué significa que algo ocurra en el tiempo hay que saber cómo se mide el tiempo, qué papel cumple la variable t en una ecuación diferencial, por qué un reloj en órbita marcha a un ritmo distinto del de un reloj en la superficie terrestre, por qué un vaso que se rompe no se recompone y por qué la ecuación fundamental de la gravedad cuántica canónica no contiene ninguna variable temporal. Y para saber cómo hemos reconstruido la historia del universo hay que entender qué es una paralaje, cómo se calibra una cefeida, qué mide un espectrógrafo, cómo se infiere una temperatura de 3 000 kelvin a partir de microondas que hoy registramos a 2.7 kelvin. Las dos preguntas se cruzan en cada capítulo.

Atelier Velázquez

Tesis

La tesis que el ensayo pone a prueba puede formularse en tres proposiciones.

Primera: el conocimiento físico del cosmos se constituye históricamente mediante articulaciones específicas entre fenómenos, instrumentos, operaciones, construcciones matemáticas, experimentos e inferencias. Ninguno de esos componentes basta por sí solo. Un telescopio sin teoría óptica produce manchas; una ecuación sin magnitudes medibles produce ejercicios; una observación sin modelo produce catálogos que nadie sabe leer.

Segunda: las grandes teorías físicas poseen dominios de validez, capacidades operatorias y límites determinados. Algunas se relacionan mediante reducciones, aproximaciones, correspondencias o teorías efectivas —la mecánica newtoniana como límite de la relativista para velocidades pequeñas frente a la de la luz, la termodinámica como descripción efectiva de la mecánica estadística, la electrodinámica cuántica como teoría efectiva por debajo de cierta energía—; otras permanecen en conflicto abierto, como la relatividad general y la teoría cuántica cuando ambas deberían aplicarse a la vez.

Tercera: el tiempo constituye un problema filosófico privilegiado porque aparece en la física bajo funciones diferentes —parámetro dinámico, magnitud metrológica, tiempo propio relativista, orden causal, temporalidad cosmológica, irreversibilidad termodinámica, tiempo reconstruido a partir de huellas y problema de fundamentación en gravedad cuántica—, y esas funciones no se dejan identificar sin pérdida. Están conectadas, pero no todas con todas ni del mismo modo.

Alcance y aportación de la investigación

Atelier Velázquez

La aportación de este ensayo no consiste en proponer una nueva teoría física del tiempo ni en atribuir unidad sustancial a sus distintas manifestaciones. Consiste en elaborar una cartografía gnoseológica capaz de distinguir las funciones temporales que intervienen en las ciencias, identificar las operaciones mediante las cuales se accede a ellas y determinar bajo qué condiciones pueden relacionarse sin confundirse.

El criterio de articulación propuesto exige precisar, para cada relación, el dominio de aplicación, las magnitudes o propiedades implicadas, los procedimientos de medición o reconstrucción, las transformaciones matemáticas pertinentes y los supuestos que permiten establecer la conexión. También exige reconocer aquello que no se conserva al pasar de una descripción a otra. La unidad de análisis no es, por tanto, un supuesto tiempo universal situado detrás de las teorías, sino la relación operatoria entre funciones temporalmente determinadas.

Este procedimiento no pretende resolver por sí mismo controversias ontológicas como el presentismo, el eternalismo o la emergencia del tiempo. Su alcance es crítico y constructivo: reconstruir conexiones justificadas, distinguir grados de dependencia entre teorías y detectar extrapolaciones que convierten una propiedad local en una afirmación acerca del tiempo en general. La propuesta se desarrolla y somete a examen en el capítulo 50.

La tesis no se acepta como punto de partida dogmático. Se contrasta con objeciones de peso: la del reduccionista, para quien todas esas funciones se derivan en principio de una teoría fundamental; la del eternalista, para quien la relatividad muestra que el paso del tiempo es una ilusión; la del presentista, para quien solo el presente existe y la física describe relaciones entre presentes; la del instrumentalista, para quien las teorías son herramientas de cálculo sin compromiso ontológico; y la del constructivista social, para quien los hechos científicos son productos de negociación. Cada una de estas posiciones captura algo verdadero sobre ciertos materiales, y el trabajo consiste en mostrar dónde lo captura y dónde extrapola.

Herramientas y método

El análisis combina cinco perspectivas. La histórica reconstruye qué problema recibió cada exponente, qué herramientas tenía y qué transformó. La matemática introduce las técnicas formales en el momento en que una necesidad física las exige, de la proporción y la trigonometría al cálculo, las ecuaciones diferenciales, los tensores, los grupos de simetría y los espacios de Hilbert. La experimental muestra qué observaciones e instrumentos sostienen cada resultado y con qué incertidumbre. La operatoria pregunta qué permite calcular o construir cada teoría. La filosófica distingue lo que la física autoriza a concluir de lo que se le atribuye por extrapolación.

Atelier Velázquez

En la dimensión filosófica se utilizan con especial frecuencia algunas Ideas elaboradas por el materialismo filosófico de Gustavo Bueno: la symploké, entendida como principio según el cual unas cosas están conectadas con otras pero no todas con todas; la dialéctica, como análisis de las contradicciones y su resolución en procesos materiales concretos; la distinción entre tres géneros de materialidad; y la teoría del cierre categorial, según la cual las ciencias se constituyen al establecer, mediante operaciones sobre un campo de términos, identidades sintéticas que se sostienen con independencia del sujeto que las obtuvo. Estas Ideas se definen cuando se necesitan, se aplican a problemas concretos y se someten a sus propios límites. El ensayo dialoga también con la filosofía de la ciencia de Duhem, Popper, Kuhn, Lakatos, Hacking, Cartwright y van Fraassen, y con la filosofía contemporánea del tiempo de Reichenbach, Price, Albert, Maudlin, Callender y Rovelli. Ninguna escuela filosófica tiene aquí el privilegio de juzgar sin ser juzgada.

Las ecuaciones aparecen con su contexto, la definición de sus símbolos, sus unidades, sus supuestos y, siempre que es viable, un ejemplo numérico cuyas operaciones han sido verificadas. Las afirmaciones históricas y empíricas concretas se citan según las normas APA (7.ª edición). Las afirmaciones sobre el estado actual de la investigación tienen como fecha de corte el 9 de octubre de 2026; se indica en cada caso si se trata de resultados publicados, preprints o proyectos en curso.

Arquitectura de la obra

El capítulo inicial pregunta qué es la física y fija el vocabulario. La Parte I examina el cosmos antes de la física: las cosmologías antiguas y el tránsito, nada lineal, hacia la investigación racional de la *phýsis*. La Parte II sigue la matematización del cielo desde la geometría griega hasta Newton, pasando por la astronomía india, islámica, china y medieval. La Parte III aborda la medida del cambio: cálculo, relojes, mecánica analítica, caos, termodinámica, física estadística y flecha del tiempo. La Parte IV recorre los campos, las simetrías y el espaciotiempo, de Faraday y Maxwell a la relatividad general, con un capítulo dedicado a Emmy Noether. La Parte V construye la arquitectura cuántica, desde Planck hasta el Modelo Estándar. La Parte VI narra la biografía física del universo tal como hoy se reconstruye. La Parte VII trata los agujeros negros, lugar de encuentro de gravitación, termodinámica y teoría cuántica, y la pregunta por lo que significa existir en física. La Parte VIII examina los programas de gravedad cuántica. La Parte IX desciende a las máquinas. La Parte X traza el mapa de los límites. La Parte XI ofrece un observatorio de la investigación en curso. La Parte XII vuelve sobre el tiempo y formula la síntesis.

La extensión de cada parte no es simétrica. La relatividad, la termodinámica, la mecánica cuántica, la cosmología y la gravedad cuántica reciben más espacio porque en ellas se juegan las preguntas principales. El título alude a una expresión de Andréi Tarkovski, quien describió el trabajo del cineasta como un modo de esculpir en el tiempo (Tarkovski, 1986/1991). La física no esculpe el tiempo en el mismo sentido, pero sus instrumentos tallan intervalos, registran huellas y fijan sucesiones con una precisión que obliga a preguntarse qué es exactamente lo que se talla.

Atelier Velázquez

Pórtico

Atelier Velázquez

Capítulo 0. ¿Qué es la física? De la phýsis antigua a las ciencias contemporáneas de la materia, los campos y el espaciotiempo

0.1 La palabra y sus capas

La palabra *física* procede del griego, pero el griego no contenía la física. Conviene separar desde el principio cuatro capas que suelen confundirse: la etimología, que reconstruye la formación de una palabra; el uso antiguo, que muestra qué hacían con ella quienes la empleaban; la transformación histórica, por la cual el término fue adquiriendo nuevos referentes; y la acepción contemporánea, que designa una ciencia experimental y matematizada con instituciones, instrumentos y revistas propias. La filología permite recorrer esa historia conceptual. No puede, en cambio, decidir qué es hoy la física, del mismo modo que la etimología de *átomo* («indivisible») no impide que los átomos se dividan.

Phýsis

El sustantivo **φύσις** (*phýsis*) deriva del verbo **φύω** (*phýō*), cuyos sentidos documentados son «hacer crecer», «producir» y, en voz media, «crecer», «nacer», «brotar» (Liddell et al., 1940). La raíz indoeuropea que los lingüistas reconstruyen como **bʰuH-* («llegar a ser», «crecer») está emparentada con el latín *fui* y con el inglés *be* (Beekes, 2010; Chantraine, 1968–1980). El sufijo *-sis* forma nombres de acción o de resultado, de modo que *phýsis* designa tanto el proceso de crecer como lo que ha crecido y la constitución que una cosa tiene por haber crecido así.

Atelier Velázquez

En Homero aparece una sola vez: en el canto X de la *Odisea*, Hermes muestra a Odiseo la *phýsis* de una planta, el *moly*, es decir, su aspecto o constitución característica, la raíz negra y la flor blanca que permiten reconocerla (Homero, *Odisea*, X, 302–303). El sentido es concreto: la *phýsis* de algo es lo que permite identificarlo. Con los primeros investigadores jonios la palabra se amplía hasta designar el modo de ser de todas las cosas o el proceso por el cual las cosas llegan a ser lo que son. Los doxógrafos posteriores atribuyeron a muchos de ellos obras tituladas *Perì phýseōs* («Sobre la naturaleza»), aunque es probable que el título fuera puesto por la tradición y no por los autores (Kirk et al., 1983).

Un fragmento de Heráclito, transmitido sin contexto, afirma que la *phýsis* gusta de ocultarse (DK 22 B 123). La frase ha alimentado veinticinco siglos de interpretaciones, desde lecturas físicas («la constitución de las cosas no es visible a simple vista») hasta lecturas místicas («la Natu-

raleza oculta sus secretos»). Pierre Hadot reconstruyó esa historia y mostró que la personificación de la Naturaleza como diosa velada es muy posterior al uso heraclíteo (Hadot, 2004). La lección metodológica es útil para todo el ensayo: una palabra griega antigua no autoriza a proyectar sobre su autor los sentidos que adquirió siglos después.

Aristóteles sistematizó los usos. En el libro Δ de la *Metafísica* enumera siete acepciones de *phýsis*: la génesis de lo que crece, aquello primero de lo que algo crece, el principio del movimiento inherente a cada ente natural, la materia primera de la que algo está hecho, la sustancia o forma de los entes naturales, la sustancia en general y, por extensión, toda esencia (Aristóteles, *Metafísica*, Δ 4, 1014b16–1015a19). En el libro II de la *Física* ofrece la definición técnica que dominará la tradición: la naturaleza es un principio y causa de movimiento y reposo en aquello en lo que está primariamente, por sí y no por accidente (Aristóteles, *Física*, II 1, 192b21–23). Una piedra cae porque su naturaleza la lleva hacia el centro; una cama no crece porque el principio de su forma está fuera de ella, en el carpintero. La distinción entre lo natural y lo artificial forma parte de la definición misma.

Atelier Velázquez

Physikós y physikḗ

El adjetivo **φυσικός** (*physikós*) significa «perteneciente a la naturaleza» o «natural». Sustantivado, *ho physikós* designa al investigador de la naturaleza: Aristóteles llama *physikoí* o *physiológoi* a los pensadores que, desde Tales, buscaron los principios de las cosas naturales. El plural neutro **τὰ φυσικά** (*tà physiká*), «las cosas naturales», dio título al conjunto de los tratados aristotélicos sobre el cambio y el movimiento. La forma femenina **φυσική** (*physikḗ*) se usa con un sustantivo sobreentendido —*epistḗmē*, «saber»— para designar el conocimiento de la naturaleza. Los estoicos dividieron la filosofía en lógica, física y ética, y en ese esquema la física incluía la teología y la cosmología: era el estudio de todo lo que existe en el cosmos, dioses incluidos.

Del latín physica a la física moderna

El latín tradujo *phýsis* por *natura*, formado sobre *nasci*, «nacer», y por eso la correspondencia es casi un calco semántico: ambas palabras remiten al nacimiento y al crecimiento (de Vaan, 2008). Cicerón usa *physica* y *physicus* como préstamos para referirse a la filosofía natural de los griegos. En la Edad Media latina, *physica* y *philosophia naturalis* designan la parte del currículo universitario que comentaba los *libri naturales* de Aristóteles; al mismo tiempo, *physicus* pasó a significar «médico», sentido que sobrevive en el inglés *physician*. Durante siglos, por tanto, el

término nombró una rama de la filosofía y una profesión sanitaria antes de nombrar una ciencia experimental.

El título de la obra de Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica* (1687), conserva todavía la expresión «filosofía natural». La palabra inglesa *physicist* fue acuñada por William Whewell en 1840, en su *Philosophy of the Inductive Sciences*, con el propósito explícito de nombrar a quienes cultivaban la física como disciplina distinta de la filosofía (Whewell, 1840). En el siglo XIX la física se institucionaliza: cátedras, laboratorios universitarios como el Cavendish de Cambridge (1874), sociedades y revistas especializadas. La palabra antigua sirve entonces para un objeto nuevo.

Las consecuencias para el argumento son dos. La primera es negativa: el significado moderno de «física» no estaba contenido en la palabra griega, y quien busca en *phýsis* la esencia oculta de la física contemporánea practica una etimología mítica. La segunda es positiva: la historia de la palabra registra desplazamientos reales del campo de investigación —de las cosas que crecen a los principios del movimiento, de los cuerpos al conjunto de los fenómenos medibles—, y esos desplazamientos son el tema de este libro.

Atelier Velázquez

0.2 Nueve físicas en la historia

La pregunta «¿qué estudia la física?» recibió respuestas incompatibles a lo largo de veinticinco siglos. Un ejemplo permite seguirlas: la caída de una piedra.

Investigación presocrática. Los primeros *physikoí* no estudiaban la caída de una piedra aislada, sino la constitución del todo. Preguntaban de qué está hecho el mundo y cómo surgió (agua, lo indefinido, aire, fuego, cuatro raíces, átomos y vacío). La caída era un caso de un proceso cósmico: para los atomistas, los átomos se mueven en el vacío y los más pesados tienden a agruparse; para Empédocles, el Amor y el Odio mezclan y separan los elementos. La técnica era la argumentación y la analogía con procesos observables; no había medida.

Física aristotélica. Aristóteles convierte la caída en un movimiento natural: los cuerpos graves se dirigen hacia su lugar propio, el centro del universo, que coincide con el de la Tierra. El movimiento violento, como el de una piedra lanzada, requiere un motor que actúe continuamente. La física aristotélica es cualitativa y teleológica, pero no es arbitraria: organiza un enorme

repertorio de observaciones en un sistema de causas (material, formal, eficiente y final) y de distinciones (natural y violento, sublunar y celeste, acto y potencia).

Filosofía natural antigua posterior. Estoicos, epicúreos y comentaristas como Juan Filópono (siglo VI) discutieron el sistema aristotélico. Filópono propuso que el proyectil recibe del lanzador una fuerza impresa que se agota, y afirmó que los cuerpos de distinto peso caen en tiempos que no difieren tanto como suponía Aristóteles, apelando a la experiencia (Lindberg, 2007).

Filosofía natural medieval. En el siglo XIV los calculadores del Merton College de Oxford y los maestros parisinos introdujeron la cuantificación de las cualidades. Jean Buridan desarrolló la teoría del *impetus*, una cualidad impresa al proyectil, proporcional a la cantidad de materia y a la velocidad, que se conserva salvo resistencia. Nicole Oresme representó gráficamente la intensidad de una cualidad que varía con el tiempo y demostró geométricamente el teorema de la velocidad media para el movimiento uniformemente acelerado (Clagett, 1959). Faltaba aún aplicar ese teorema a la caída real.

Atelier Velázquez

Filosofía natural mecanicista. En el siglo XVII Descartes, Gassendi, Boyle y otros redujeron los fenómenos naturales a materia en movimiento y choques. Las cualidades aristotélicas desaparecen; la caída debe explicarse por presiones de materia sutil, por ejemplo mediante los vórtices cartesianos. El mecanicismo eliminó las causas finales, pero no proporcionó todavía una ley cuantitativa de la gravedad.

Física newtoniana. Galileo había medido la caída en planos inclinados y establecido que las distancias crecen como los cuadrados de los tiempos. Newton integró esa ley en un sistema en el que la misma fuerza que acelera la piedra mantiene a la Luna en su órbita. La caída se convierte en un caso de una interacción universal descrita por ecuaciones diferenciales.

Física experimental moderna. En el siglo XVIII se multiplicaron los gabinetes de física, los instrumentos de precisión y las demostraciones públicas; la electricidad, el calor, el magnetismo y la luz se convirtieron en campos de experimentación sistemática. La caída de los cuerpos se mide en el vacío de la bomba de aire, donde una pluma y una moneda llegan juntas al fondo del tubo.

Física matemática. Euler, Lagrange, Laplace, Fourier y Hamilton transformaron la mecánica en un sistema de principios variacionales y ecuaciones en derivadas parciales. Fourier, en su *Théorie analytique de la chaleur* (1822), mostró que fenómenos no mecánicos podían recibir un tratamiento matemático riguroso sin una hipótesis sobre la naturaleza íntima del calor.

Física contemporánea. En el siglo XX la caída de la piedra se reinterpreta como movimiento geodésico en un espaciotiempo curvo: la piedra no es empujada por ninguna fuerza; sigue la trayectoria más «recta» posible en una geometría deformada por la masa de la Tierra. La teoría cuántica, por su parte, describe los átomos de la piedra, y la teoría cuántica de campos sus constituyentes. La física contemporánea es una federación de teorías con dominios de validez distintos.

En este recorrido cambian el objeto (el todo, los movimientos naturales, la cantidad de cualidades, la materia en movimiento, las fuerzas, los campos, la geometría del espaciotiempo), las técnicas (argumento, observación cualitativa, cálculo geométrico, experimento con instrumentos, análisis matemático, aceleradores y detectores) y los conceptos (lugar natural, ímpetu, inercia, fuerza, energía, campo, curvatura). Ninguna de las etapas es la versión primitiva de la siguiente: cada una responde a problemas y dispone de herramientas propias.

Atelier Velázquez

0.3 Definir la física

Género y diferencia

La tradición aristotélica define una especie indicando el género próximo al que pertenece y la diferencia específica que la distingue de las demás especies de ese género. El hombre es un animal (género) racional (diferencia). Aplicado a la física, el procedimiento obliga a decidir cuál es el género: ¿ciencia natural, ciencia empírica, ciencia matemática? Y obliga a buscar una diferencia que no incluya a la química ni a la astronomía. El resultado nunca es perfecto, porque las disciplinas no son especies naturales fijas sino formaciones históricas con fronteras móviles. Aun así, el ejercicio es útil: obliga a explicitar qué se incluye y qué se excluye.

Cuatro modos de definición

Pueden distinguirse cuatro maneras de definir la física, cada una con ventajas y peligros.

La **definición por objeto** dice qué clase de cosas estudia: materia, radiación, energía, interacciones, movimiento, campos, espacio y tiempo. Es intuitiva, pero corre el riesgo de volverse

tan amplia que equivalga a «el estudio de todo cuanto existe», puesto que los organismos, los cerebros y las sociedades también están hechos de materia. Una definición que lo abarca todo no distingue nada.

La **definición metodológica** dice qué operaciones realiza: medición, experimento controlado, modelización matemática, contrastación de predicciones cuantitativas. Es más precisa, pero no distingue a la física de otras ciencias experimentales cuantitativas como la química física o la fisiología.

La **definición disciplinaria** atiende a la organización académica: la física es lo que se enseña en las facultades de física, se publica en las revistas de física y se discute en los congresos de física. Es útil para describir instituciones, pero circular como definición conceptual.

La **definición gnoseológica** pregunta cómo se construyen y justifican sus resultados: qué términos manipula, qué operaciones ejecuta sobre ellos, qué relaciones establece y cómo esas relaciones se confirman con independencia de quien las obtiene. Es la más exigente y la que este ensayo privilegia.

Atelier Velázquez

Combinando las cuatro, puede proponerse la siguiente definición de trabajo: la física es la ciencia experimental y matematizada que estudia los sistemas materiales en cuanto sus estados y cambios pueden expresarse mediante magnitudes medibles relacionadas por leyes de alcance general, con especial atención a las interacciones fundamentales, a la estructura del espacio y del tiempo y a los principios de conservación y simetría que gobiernan esos cambios. La definición tiene género (ciencia experimental y matematizada), objeto (sistemas materiales), modo de acceso (magnitudes medibles) y diferencia (leyes de alcance general, interacciones fundamentales, espaciotiempo, simetrías). No resuelve los casos de frontera, y no lo pretende.

Definiciones operacionales y sus límites

En 1927 el físico estadounidense Percy W. Bridgman propuso que el significado de un concepto físico es el conjunto de operaciones mediante las cuales se mide: «longitud» significa lo que hacemos al aplicar sucesivamente una regla; «tiempo», lo que hacemos al contar las oscilaciones de un reloj (Bridgman, 1927). El operacionalismo surgió de la experiencia de la relatividad: Einstein había mostrado que la simultaneidad a distancia carece de sentido mientras no se especifique un procedimiento para sincronizar relojes.

La propuesta es indispensable en un aspecto e insuficiente en otro. Es indispensable porque sin procedimientos de medida no hay magnitudes físicas: la definición del segundo como 9 192 631 770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre dos niveles hiperfinos del cesio-133 es una definición operacional y constituye la base de toda la metrología temporal (BIPM, 2019). Es insuficiente porque, si cada procedimiento definiera un concepto distinto, la longitud medida con una regla y la medida por triangulación serían magnitudes diferentes, y la física se desintegraría en una multitud de conceptos sin relación. La física supone que distintos procedimientos miden la misma magnitud, y esa suposición se justifica cuando los procedimientos convergen dentro de sus incertidumbres. Una definición operacional fija el acceso a una magnitud; no agota la pregunta por lo que esa magnitud es ni por qué distintos accesos coinciden.

0.4 Fronteras e intersecciones

La física comparte frontera con muchas disciplinas, y cada frontera tiene una forma distinta.

Atelier Velázquez

Con la **astronomía** comparte objetos, pero no siempre preguntas ni métodos. La astronomía observa y cataloga cuerpos celestes y sus movimientos, y durante milenios lo hizo sin física, como se verá en la Parte II. La astrofísica nace cuando la espectroscopia, en el siglo XIX, permite aplicar la física de laboratorio a la composición y la temperatura de las estrellas.

Con la **cosmología** comparte las teorías fundamentales, pero la cosmología tiene un objeto singular —el universo en su conjunto o, con más precisión, el universo observable y su extrapolación— que no admite repetición experimental ni comparación con otros universos. Esta singularidad obliga a métodos de inferencia propios.

Con la **química** la frontera es histórica. La mecánica cuántica explica en principio el enlace químico, y sin embargo la química conserva conceptos (grupo funcional, mecanismo de reacción, aromaticidad) que no se obtienen por deducción directa de la ecuación de Schrödinger, sino mediante aproximaciones, modelos y reglas propias.

Con las **matemáticas** la relación es de dependencia mutua y diferencia irreductible. La física utiliza estructuras matemáticas y a veces las inspira —el cálculo, el análisis de Fourier, la teoría de distribuciones, partes de la geometría y la topología—, pero un teorema matemático no necesita contrastación empírica y una ley física sí.

Con la **biología** la física comparte los procesos materiales que ocurren en los organismos, pero la biología estudia sistemas con historia evolutiva, reproducción y funciones, conceptos que no forman parte del vocabulario de la física.

Con la **ingeniería** comparte leyes y cálculos, pero la ingeniería se orienta al diseño de artefactos bajo restricciones de coste, seguridad y fabricación. Un puente bien calculado según la mecánica newtoniana puede ser un mal puente por razones que no son físicas.

Con la **filosofía de la naturaleza** comparte la pregunta por lo que hay. La filosofía natural antigua y medieval era un saber unificado; hoy la filosofía de la naturaleza reflexiona sobre las categorías que las ciencias presuponen (causalidad, ley, materia, tiempo) sin producir resultados experimentales propios.

Con la **filosofía de la ciencia** comparte la reflexión sobre el método, la explicación y la verdad, pero desde fuera: la filosofía de la ciencia toma las ciencias como objeto.

Las intersecciones son reales y abundantes —astrofísica, fisicoquímica, biofísica, física matemática, física aplicada—, y no borran las especificidades. Un mismo fenómeno, como la fotosíntesis, puede estudiarse desde la física cuántica de la transferencia de energía, la bioquímica de los pigmentos y la ecología de las plantas, y cada estudio establece relaciones que los otros no pueden sustituir.

Atelier Velázquez

0.5 Mapa de la física contemporánea

La Tabla 1 sitúa las principales disciplinas de la física contemporánea. No es un tratado; su función es orientar al lector y preparar los desarrollos posteriores.

Tabla 1. Disciplinas de la física contemporánea: objeto, régimen, instrumentos y resultados característicos

Disciplina	Qué estudia	Escala o régimen	Instrumentos típicos	Resultados característicos
Mecánica clásica	Movimiento de cuerpos bajo fuerzas	Velocidades $\ll c$, acciones $\gg \hbar$	Cronómetros, sensores de posición	Órbitas, balística, mecánica celeste
Mecánica analítica	Formulación variacional del movimiento	Sistemas con ligaduras	Cálculo variacional, simulación	Principio de mínima acción, simetrías
Termodinámica	Calor, trabajo, equilibrio	Sistemas macroscópicos	Termómetros, calorímetros	Leyes de la termodinámica, eficiencia de Carnot

Disciplina	Qué estudia	Escala o régimen	Instrumentos típicos	Resultados característicos
Física estadística	Propiedades colectivas a partir de constituyentes	Muchos grados de libertad	Simulación, dispersión de neutrones	Entropía estadística, transiciones de fase
Electromagnetismo	Cargas, corrientes, campos	Del átomo a la galaxia	Galvanómetros, osciloscopios	Ecuaciones de Maxwell, ondas de radio
Óptica	Luz y su interacción con la materia	Longitudes de onda de nm a mm	Lentes, interferómetros, láseres	Interferometría, holografía, fibra óptica
Acústica	Ondas mecánicas en medios	Hz a GHz	Micrófonos, transductores	Ultrasonido médico, sonar
Mecánica de fluidos	Líquidos y gases en movimiento	Del capilar a la atmósfera	Túneles de viento, CFD	Turbulencia, aerodinámica, meteorología
Relatividad especial	Espacio y tiempo para observadores inerciales	Velocidades comparables a c	Aceleradores, relojes atómicos	Dilatación temporal, $E = mc^2$
Relatividad general	Gravitación como geometría	Campos gravitatorios intensos o escalas cósmicas	Interferómetros, VLBI, relojes	Lentes gravitacionales, ondas gravitacionales
Mecánica cuántica	Sistemas atómicos y subatómicos	Acciones del orden de $\hbar$	Espectrómetros, trampas de iones	Espectros atómicos, entrelazamiento
Física atómica y molecular	Estructura y dinámica de átomos y moléculas	eV, Å	Láseres, trampas magnetoópticas	Relojes ópticos, condensados de Bose-Einstein
Física nuclear	Núcleos atómicos	MeV, fm	Ciclotrones, detectores gamma	Fisión, fusión, datación radiométrica
Física de partículas	Constituyentes y fuerzas fundamentales	GeV–TeV	Colisionadores, calorímetros	Modelo Estándar, bosón de Higgs
Teoría cuántica de campos	Campos cuantizados y sus excitaciones	Relativista y cuántico	Cálculo perturbativo, retículo	QED, QCD, renormalización
Materia condensada	Sólidos, líquidos, materiales cuánticos	10^{23} constituyentes	Rayos X, microscopía de túnel	Semiconductores, superconductividad
Física de plasmas	Gases ionizados	Del laboratorio a la corona solar	Tokamaks, sondas	Fusión por confinamiento, viento solar
Astrofísica	Física de estrellas, galaxias, medio interestelar	Astronómica	Telescopios en todo el espectro	Evolución estelar, nucleosíntesis
Cosmología	Estructura y evolución del universo observable	Gigaparsecs, ~13 800 Ma	Mapas del fondo cósmico, censos de galaxias	Modelo ΛCDM, expansión acelerada
Física computacional	Simulación numérica de sistemas físicos	Todas	Supercomputadoras	Simulaciones de formación de estructuras, QCD en retículo
Física matemática	Estructuras y rigor de las teorías	Formal	Análisis, geometría, álgebra	Teoremas de existencia, teoría espectral
Metrología física	Unidades, patrones	Todas	Relojes atómicos, ba-	Redefinición del SI en

Atelier Velázquez

Disciplina	Qué estudia	Escala o régimen	Instrumentos típicos	Resultados característicos
	y medida		lanza de Kibble	2019
Fundamentos de la física	Interpretación y coherencia de las teorías	Conceptual	Experimentos de precisión, análisis lógico	Teorema de Bell, problema de la medida

Nota. Elaboración propia. ħ es la constante de Planck reducida; c, la velocidad de la luz en el vacío; CFD, dinámica de fluidos computacional.

Las relaciones entre estas disciplinas no forman una pirámide con la física de partículas en la cúspide. Forman una red con nudos densos y conexiones laxas. La física estadística conecta la mecánica con la termodinámica; la teoría cuántica de campos conecta la física de partículas con la materia condensada, porque las mismas técnicas matemáticas sirven para describir el bosón de Higgs y la superconductividad; la metrología conecta a todas, porque ninguna puede prescindir de unidades. La cosmología depende de casi todas: de la relatividad general para el marco, de la física nuclear para la síntesis de elementos, de la física atómica para la recombinación, de la física de partículas para la materia oscura, de la estadística para la inferencia.

Atelier Velázquez

0.6 Primeras herramientas filosóficas

Algunos conceptos filosóficos acompañarán todo el ensayo. Se introducen aquí en su forma mínima, y cada uno se desarrollará cuando un problema concreto lo exija.

Symploké

En el diálogo *El sofista*, Platón examina si las Formas pueden combinarse entre sí. Rechaza dos tesis extremas: que ninguna Forma se combine con ninguna, porque entonces no sería posible decir nada, y que todas se combinen con todas, porque entonces el movimiento estaría en reposo y el reposo en movimiento. Concluye que algunas se combinan y otras no, como ocurre con las letras, entre las que unas se ajustan a otras y otras no (Platón, *Sofista*, 251d–253a). Unas líneas más adelante afirma que el discurso surge precisamente por el entretejimiento —*symplokḗ*— de las Formas entre sí (*Sofista*, 259e). La palabra **συμπλοκή** (*symplokḗ*), de *syn*, «con», y *plékō*, «trenzar», significa entrelazamiento, combinación, y también, en contextos militares, el choque de dos ejércitos que se traban en combate (Liddell et al., 1940).

Gustavo Bueno convirtió esta idea platónica en un principio ontológico y gnoseológico: si todo estuviera conectado con todo, no podríamos conocer nada sin conocerlo todo; si nada estu-

viera conectado con nada, tampoco podríamos conocer, porque no habría relaciones. El conocimiento es posible porque unas cosas están vinculadas con otras y no con todas (Bueno, 1972). El principio de symploké se opone tanto al monismo holista («todo está relacionado con todo») como al atomismo absoluto («cada cosa existe aislada»).

Un ejemplo físico lo muestra mejor que una definición. El periodo de un péndulo simple de pequeña amplitud depende de su longitud y de la aceleración de la gravedad local, $T = 2\pi\sqrt{L/g}$, pero no depende de la masa del péndulo, ni del color de la lenteja, ni de la posición de Júpiter (salvo en un grado despreciable a través de la marea). La ley es posible porque el péndulo está conectado con algunas magnitudes y desconectado, a efectos prácticos, de otras. Si el periodo dependiera de todo, no habría ley.

El ejemplo complementario es el acelerador de partículas, que se examinará en el capítulo 39. Un acelerador articula electromagnetismo (para guiar y acelerar los haces), relatividad especial (para calcular sus trayectorias), óptica de haces (para enfocarlos), física de detectores (para registrar las colisiones), estadística (para separar señales del ruido), criogenia (para mantener los imanes superconductores a 1.9 K) y computación (para procesar los datos). Cada disciplina aporta resultados específicos, y ninguna puede sustituir a las demás. Pero tampoco todo se relaciona con todo: el funcionamiento de los criostatos no depende de la teoría electrodébil, y la estadística de las señales no depende de la metalurgia de los imanes. La symploké del acelerador es un entramado de dependencias específicas.

El límite de la idea también debe señalarse. El principio de symploké no dice qué está conectado con qué. Esa determinación es tarea de las ciencias. Lo que el principio aporta es una guardia contra dos tentaciones recurrentes: la de convertir una teoría exitosa en explicación de todo y la de declarar inconmensurables dominios que de hecho comparten resultados.

Materia y géneros de materialidad

La palabra **materia** procede del latín *materia*, «madera de construcción», «sustancia de la que algo está hecho», derivada de *mater*, «madre», probablemente por referencia a la parte del árbol que produce los brotes (de Vaan, 2008). Cicerón la utilizó para traducir el griego **ὕλη** (*hýlē*), que también significaba primero «bosque» o «madera» y que Aristóteles convirtió en término técnico para designar aquello de lo que algo está hecho, opuesto a la forma.

Atelier Velázquez

Conviene distinguir dos conceptos. La **materia física** es lo que estudia la física: cuerpos, partículas, campos, radiación, en la medida en que poseen energía, momento, carga y otras magnitudes. La **materia filosófica**, en el sentido del materialismo de Bueno, es una Idea más amplia que incluye la materia física pero también otras formas de realidad irreductibles a cuerpos (Bueno, 1972, 1990). Bueno distingue tres géneros de materialidad. El primero (M_1) comprende las realidades físico-exteriores: cuerpos, procesos, campos electromagnéticos, estrellas. El segundo (M_2) comprende las realidades de carácter subjetivo o vivencial: percepciones, recuerdos, deseos, conductas, procesos psicológicos y sociales en cuanto vividos, que no por ello son sustancias espirituales separadas. El tercero (M_3) comprende las objetividades abstractas: relaciones geométricas, estructuras lógicas y matemáticas, como la relación entre los lados de un triángulo rectángulo o la infinitud de los números primos, que no son ni cuerpos ni vivencias.

La distinción tiene un uso preciso: impide reducciones precipitadas. Cuando un físico afirma que la realidad está hecha «solo de partículas», trata como evidente algo que no lo es, porque las leyes que enuncia, las relaciones matemáticas que utiliza y las observaciones que realiza no son partículas. Cuando un divulgador sostiene que el universo «es» una estructura matemática, confunde el tercer género con el primero. Los tres géneros se entretejen en cada práctica científica sin identificarse. Pero sería un error convertirlos en un inventario administrativo según el cual los instrumentos serían M_1, las instituciones M_2 y las ecuaciones M_3. Un instrumento incorpora relaciones matemáticas en su diseño y procesos psicológicos en su lectura; una ecuación escrita en una pizarra es también una mancha de tiza. La clasificación aclara conceptos; no reparte objetos en cajones.

Atelier Velázquez

Cierre categorial y verdad científica

La teoría del cierre categorial es la teoría de la ciencia elaborada por Gustavo Bueno en una obra de varios volúmenes (Bueno, 1992). Su punto de partida es que una ciencia no es un conjunto de proposiciones verdaderas ni una representación mental del mundo, sino un sistema de operaciones realizadas por sujetos sobre un campo material de términos. Las operaciones componen términos para obtener otros términos del mismo campo —sumar números da números, combinar sustancias químicas da sustancias químicas—, y cuando esas composiciones se cierran sobre el campo establecen relaciones estables. La ciencia se constituye cuando consigue **identidades sin-**

téticas: igualdades entre términos obtenidos por cursos operatorios diferentes, que no podían preverse por mera definición.

El ejemplo clásico pertenece a la historia de Newton y se desarrollará en el capítulo 7. La aceleración de la Luna en su órbita puede calcularse geométricamente a partir de su distancia y su periodo; la aceleración que tendría un cuerpo a esa distancia si la gravedad terrestre disminuyera con el cuadrado de la distancia puede calcularse a partir de la aceleración medida en la superficie. Los dos cursos operatorios son distintos —uno usa datos astronómicos, el otro péndulos y caídas—, y sin embargo arrojan el mismo valor, unos 2.7 milímetros por segundo al cuadrado. Esa coincidencia no es una definición: es una identidad sintética que enlaza el cielo con la Tierra.

En la teoría del cierre se distinguen tres ejes de análisis. El eje sintáctico considera los términos (magnitudes, cuerpos, partículas), las operaciones (medir, sumar, integrar, colisionar) y las relaciones (leyes, ecuaciones). El eje semántico considera los referenciales materiales (los cuerpos y aparatos efectivos), los fenómenos (lo que aparece a los sujetos) y las esencias o estructuras (lo que la teoría reconstruye como invariante). El eje pragmático considera a los sujetos, sus diálogos y las normas de la comunidad. La verdad científica, en esta teoría, es la identidad sintética misma, en la medida en que las operaciones que la producen pueden ser repetidas por cualquier sujeto competente y el resultado no depende de quién las realice: el sujeto operatorio queda neutralizado en el resultado.

Atelier Velázquez

La teoría tiene un alcance y un límite que conviene declarar desde el comienzo. Es una teoría filosófica de la ciencia; no ha sido demostrada experimentalmente como se demuestra una ecuación física, y compite con otras —el falsacionismo de Popper, las revoluciones de Kuhn, los programas de investigación de Lakatos, el empirismo constructivo de van Fraassen, el realismo experimental de Hacking—. Su utilidad debe juzgarse por su capacidad para aclarar casos concretos: por qué la identidad entre la aceleración lunar y la gravedad terrestre tiene un estatuto distinto que un ajuste de parámetros; por qué una teoría puede tener éxito predictivo sin cierre; por qué ciertas disciplinas que manipulan fórmulas no producen identidades sintéticas. A lo largo del ensayo se pondrá a prueba en esos términos.

Definición, aplicación, límite

Las herramientas filosóficas de este ensayo se someten a una disciplina triple: se definen con precisión, se aplican a un problema concreto y se declara lo que dejan abierto. Una Idea filosófi-

ca que no esclarece ningún material científico no ha ganado su lugar en el texto. Una Idea que pretende resolverlo todo ha perdido su utilidad. El resto del libro intenta mantenerse entre esos dos fracasos.

Atelier Velázquez

Parte I. El cosmos antes de la física

Atelier Velázquez

Capítulo 1. El ser humano ante el cosmos

1.1 Cosmología y cosmogonía

Dos palabras griegas, formadas en época moderna a partir de raíces antiguas, sirven para distinguir dos empresas que durante milenios estuvieron mezcladas. La **cosmogonía** (de *kósmos* y *gígnomai*, «llegar a ser», «nacer») narra el origen del mundo: cómo surgió el orden a partir de un estado anterior, quién lo produjo, en qué secuencia aparecieron los cielos, la tierra, los dioses y los hombres. La **cosmología** (de *kósmos* y *lógos*) describe la estructura del mundo ordenado: su forma, sus partes, sus movimientos y sus leyes. El término *cosmologia* fue difundido por Christian Wolff en su *Cosmologia generalis* (1731) como parte de la metafísica especial; su sentido actual de ciencia física del universo se consolida en el siglo XX.

La palabra **κόσμος** (*kósmos*) significaba originalmente «orden», «disposición adecuada» y también «adorno». En Homero, hacer algo *katà kósmon* es hacerlo en orden, y el *kósmos* de una mujer son sus adornos; de ahí procede «cosmética» (Liddell et al., 1940). La transferencia del término al mundo como totalidad ordenada aparece en la filosofía jonia. Un fragmento de Heráclito habla de «este cosmos, el mismo para todos», que no hizo ningún dios ni ningún hombre, sino que fue siempre, es y será fuego siempre vivo (DK 22 B 30). La tradición antigua atribuyó a Pitágoras el primer uso de *kósmos* para el universo, pero la noticia procede de doxógrafos tardíos y no puede confirmarse (Kirk et al., 1983). Lo importante es el desplazamiento semántico: el universo es nombrado por su orden y, a la vez, por su belleza. Llamar *kósmos* al mundo ya era una tesis.

La distinción entre cosmogonía y cosmología no coincide con la distinción entre mito y ciencia. El *Timeo* de Platón es una cosmogonía filosófica, y la cosmología física contemporánea contiene una cosmogonía en sentido estricto: una reconstrucción de cómo surgieron los núcleos, los átomos, las galaxias y las estrellas. Lo que separa a una cosmogonía mítica de una reconstrucción física no es el tema, sino el tipo de operaciones que la sostienen.

1.2 Calendario, agricultura, ritual y poder

Antes de cualquier teoría del cosmos hubo una necesidad: coordinar actividades humanas con ciclos naturales. La siembra y la cosecha dependen de las estaciones; la navegación, de las estrellas y los vientos; las ceremonias colectivas, de fechas fijas. Tres ciclos astronómicos se imponen

Atelier Velázquez

a la observación con particular claridad. El día solar, de unas 24 horas, ordena el trabajo. El mes sinódico, el intervalo entre dos lunas nuevas, dura en promedio 29.53 días. El año trópico, el intervalo entre dos equinoccios de primavera, dura unos 365.24 días. Estos ciclos no son conmensurables: doce meses lunares suman unos 354 días, once menos que un año solar. Todo calendario es una negociación con esa inconmensurabilidad.

Las sociedades resolvieron el problema de maneras distintas. Los egipcios adoptaron un año civil de 365 días, compuesto por doce meses de treinta días más cinco días adicionales, y dejaron que deslizara frente a las estaciones a razón de un día cada cuatro años. Los babilonios mantuvieron meses lunares e intercalaron un mes adicional cuando el desfase lo exigía; desde el siglo V a. n. e. la intercalación siguió un ciclo regular de diecinueve años, en el que 235 meses lunares equivalen casi exactamente a diecinueve años solares (Hunger y Pingree, 1999). Los mesoamericanos combinaron un ciclo ritual de 260 días con un año de 365, como se verá en el capítulo siguiente.

Quien controlaba el calendario controlaba el tiempo social. En China, la promulgación del calendario era una prerrogativa imperial vinculada al mandato del Cielo; en Roma, los pontífices manipularon durante siglos la intercalación con fines políticos, hasta que Julio César impuso la reforma del 46 a. n. e. La astronomía nació, en buena medida, como técnica de gobierno.

Atelier Velázquez

1.3 Construcciones orientadas

Algunas construcciones prehistóricas y antiguas muestran alineamientos astronómicos deliberados. En Newgrange, Irlanda, una tumba de corredor construida hacia el 3200 a. n. e. posee sobre la entrada una abertura que deja penetrar la luz del sol naciente hasta la cámara interior durante unos diecisiete minutos alrededor del solsticio de invierno (O'Kelly, 1982). El eje principal de Stonehenge está orientado hacia la salida del sol en el solsticio de verano y la puesta en el de invierno (Ruggles, 1999). En Chankillo, Perú, una hilera de trece torres construida hacia el siglo IV a. n. e. marca, vista desde dos puntos de observación, las posiciones del sol naciente y poniente a lo largo del año, y funcionó como un calendario solar de horizonte (Ghezzi y Ruggles, 2007).

La arqueoastronomía exige cautela. Con suficientes piedras y suficientes direcciones posibles, siempre aparecerá algún alineamiento con algún astro; el investigador debe mostrar que la

orientación es intencional y no casual, mediante consideraciones estadísticas, contextuales y documentales. Los casos citados resisten esa prueba; muchos otros alineamientos propuestos no la resisten.

1.4 Sol, Luna, planetas y estrellas

La observación a simple vista, sostenida durante generaciones, permitió reconocer regularidades notables. El Sol se desplaza respecto de las estrellas a lo largo de una banda, la eclíptica, y su punto de salida en el horizonte oscila entre dos extremos, los solsticios. La Luna recorre la misma franja con fases periódicas. Cinco astros brillantes —los que hoy llamamos Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno— se mueven también por esa banda, pero con irregularidades: a veces se detienen y retroceden durante semanas antes de reanudar su marcha. El griego llamó a estos astros *planḗtes*, «errantes». Las estrellas, en cambio, mantienen sus posiciones relativas y giran juntas en torno al polo celeste.

Los eclipses, que parecen el fenómeno más irregular, obedecen a ciclos. Los astrónomos babilonios descubrieron que los eclipses lunares se repiten con un periodo de 223 meses sinódicos, unos dieciocho años y once días, que los modernos llaman saros. Un ciclo así permite predecir eclipses sin ninguna teoría geométrica sobre sus causas.

Atelier Velázquez

1.5 Mito, saber práctico y astronomía matemática

Tres formas de relación con el cielo coexistieron durante milenios y deben distinguirse.

El **mito** articula una representación global del mundo, sus orígenes y su sentido. Su función es religiosa, política y moral: legitima un orden social, explica la posición del ser humano, organiza el ritual. No pretende predecir el próximo eclipse.

El **saber práctico** consiste en técnicas eficaces sin teoría sistemática: el agricultor que siembra cuando las Pléyades aparecen al amanecer, el navegante polinesio que se orienta por la salida de ciertas estrellas, el sacerdote que anuncia la crecida del Nilo por la aparición de Sirio. Es conocimiento operatorio, transmitido por aprendizaje.

La **astronomía matemática** construye modelos cuantitativos que permiten calcular posiciones futuras. Su primer desarrollo pleno es babilonio: en los últimos siglos antes de nuestra era, los escribas de Babilonia y Uruk elaboraron sistemas aritméticos —los llamados sistemas A y

B— que describían las variaciones de la velocidad de la Luna y los planetas mediante funciones en zigzag y en escalón, y permitían predecir sus posiciones con notable precisión (Neugebauer, 1975). Esos sistemas no incluían ninguna representación geométrica del cosmos: eran algoritmos.

Las tres formas se entrelazan. Los astrónomos babilonios eran a la vez sacerdotes y adivinos que interpretaban presagios celestes para el rey; la serie de presagios *Enūma Anu Enlil* recoge miles de augurios basados en fenómenos astronómicos. La astronomía matemática surgió dentro de una práctica adivinatoria sin confundirse con ella, porque la exactitud de una predicción podía comprobarse con independencia de su interpretación ominosa.

1.6 ¿Qué significa construir una imagen ordenada del mundo?

La pregunta que recorre esta Parte no es si los antiguos «sabían» lo que nosotros sabemos. Es qué operaciones les permitían ordenar el mundo y qué tipo de orden resultaba. Un mito establece un orden genealógico y moral: los dioses engendran a otros dioses, los vencedores imponen su ley. Un calendario establece un orden cíclico y práctico. Una tabla astronómica establece un orden numérico y predictivo. Una teoría física establecerá, más tarde, un orden causal y matemático contrastable. Construir una imagen ordenada del mundo es siempre seleccionar unas relaciones y dejar otras fuera, y la historia de la cosmología es la historia de esas selecciones.

Atelier Velázquez

Capítulo 2. Atlas de cosmologías antiguas

Las tradiciones examinadas en este capítulo no son etapas de un mismo proceso ni anticipaciones de la cosmología moderna. Son sistemas distintos, producidos por sociedades con intereses distintos y transmitidos por fuentes de muy desigual fiabilidad. El análisis atiende a siete aspectos en cada caso: contexto, fuentes, conceptos, estructura del cosmos, idea de tiempo, función cultural y problemas de interpretación. La Tabla 2 resume los resultados.

2.1 Mesopotamia

El *Enūma eliš* («Cuando en lo alto»), poema babilonio de unas mil cien líneas en siete tablillas, narra cómo en el principio solo existían Apsû, las aguas dulces, y Tiamat, las aguas saladas, mezcladas. De ellos nacen generaciones de dioses cuyo ruido perturba a los progenitores. El conflicto culmina en la guerra entre Tiamat y los dioses jóvenes, que eligen como campeón a Marduk, dios de Babilonia. Marduk vence a Tiamat, parte su cuerpo en dos como si fuera un pez seco y con una mitad forma el cielo y con la otra la tierra. En la tablilla V establece las estaciones de los grandes dioses como constelaciones, fija el año, asigna tres estrellas a cada uno de los doce meses y encarga a la Luna marcar los días con sus fases (Lambert, 2013).

Atelier Velázquez

Las copias más completas proceden de la biblioteca de Asurbanipal en Nínive (siglo VII a. n. e.), aunque la composición es anterior; su datación se discute entre el periodo paleobabilónico tardío y finales del segundo milenio a. n. e. El poema se recitaba durante el festival de Año Nuevo en Babilonia y tenía una función política evidente: justificaba la supremacía de Marduk y, por tanto, de su ciudad.

El orden cósmico del *Enūma eliš* es un orden impuesto por la victoria, y el calendario forma parte de ese orden. La astronomía mesopotámica, por su parte, se desarrolló en textos de otra naturaleza: el compendio *MUL.APIN*, cuyas copias más antiguas datan del siglo VII a. n. e. pero cuyo contenido es anterior, cataloga estrellas, fechas de salida helíaca y reglas de intercalación (Hunger y Pingree, 1989); los *Diarios astronómicos*, registros sistemáticos de observaciones nocturnas mantenidos en Babilonia desde mediados del siglo VII a. n. e. hasta el siglo I a. n. e., constituyen la serie de observaciones científicas más larga de la Antigüedad (Sachs y Hunger, 1988).

El problema de interpretación principal es la tentación de leer el *Enūma eliš* como una descripción física disfrazada. Que el cielo y la tierra procedan de la división de un cuerpo acuático no anticipa nada; expresa la experiencia de un territorio entre dos ríos donde la tierra firme emerge de las aguas.

2.2 Egipto

La religión egipcia produjo varias cosmogonías asociadas a centros de culto. En la de Heliópolis, en el principio existían las aguas inertes de Nun. De ellas emergió Atum, que se creó a sí mismo y engendró a Shu, el aire, y a Tefnut, la humedad. Estos engendraron a Geb, la tierra, y a Nut, el cielo, padres a su vez de Osiris, Isis, Set y Neftis. Las nueve divinidades forman la Enéada. En Hermópolis se veneraba una Ogdóada de ocho divinidades primordiales que representaban cualidades del caos inicial; en Menfis, la llamada teología menfita atribuía la creación a la palabra y el pensamiento del dios Ptah (Allen, 1988).

La imagen del cosmos más difundida representa a Nut arqueada sobre Geb, sostenida por Shu. El Sol, identificado con Ra, navega en una barca por el cuerpo de Nut durante el día; al atardecer, Nut lo traga y durante la noche recorre la Duat, el mundo subterráneo, para renacer cada mañana. Los textos funerarios del Imperio Nuevo, como el *Amduat*, describen las doce horas de ese viaje nocturno. El llamado *Libro de Nut*, conservado en el cenotafio de Seti I en Abidos, combina esta imagen con datos astronómicos sobre los decanos, treinta y seis grupos de estrellas cuyas salidas sucesivas servían para medir las horas de la noche (Clagett, 1995).

El tiempo egipcio combinaba dos dimensiones que la egiptología ha descrito con los términos *neheh*, el tiempo cíclico de la renovación diaria y estacional, y *djet*, la duración inmutable de lo que ha alcanzado su forma definitiva (Assmann, 2001). El calendario civil de 365 días se desplazaba frente al año solar, y la salida helíaca de Sirio, que anunciaba la crecida del Nilo, servía de referencia. La astronomía egipcia fue técnica y calendárica antes que teórica; su aportación más duradera fue el año de 365 días, que los astrónomos helenísticos adoptaron como unidad de cálculo precisamente por su regularidad.

2.3 Grecia

La *Teogonía* de Hesíodo, compuesta hacia el 700 a. n. e., afirma que primero de todo nació Caos, y después Gea, el Tártaro y Eros (Hesíodo, *Teogonía*, 116–122). **Χάος** (*cháos*) no significa des-

Atelier Velázquez

orden, sino «abertura», «hueco», «espacio vacío»; la palabra está relacionada con el verbo *cháskō*, «abrirse», «bostezar» (Beekes, 2010). El sentido moderno de desorden procede de la interpretación estoica y de Ovidio. Gea engendra a Urano, el cielo estrellado, y de su unión nacen los titanes. Crono, el más joven, castra a Urano; Zeus, hijo de Crono, derroca después a su padre y establece el orden olímpico. Las Moiras, que asignan a cada uno su parte, aparecen como hijas de la Noche en un pasaje y como hijas de Zeus y Temis en otro (*Teogonía*, 217 y 904), indicio de la plasticidad de la tradición.

Aquí se impone una distinción filológica que el lector encontrará reiteradamente confundida. **Κρόνος** (*Krónos*), el titán, y **χρόνος** (*chrónos*), el tiempo, son palabras distintas. La etimología de *Krónos* es desconocida, y la de *chrónos* también carece de explicación convincente (Beekes, 2010). La identificación entre ambos es un juego de semejanza fonética que aparece en época clásica tardía y helenística; Plutarco la menciona como interpretación alegórica de los griegos (Plutarco, *Sobre Isis y Osiris*, 32), y Cicerón la recoge al explicar el mito de Saturno devorando a sus hijos como imagen del tiempo que consume los años (*Sobre la naturaleza de los dioses*, II, 64). La figura renacentista del Padre Tiempo con su guadaña combina rasgos de Crono-Saturno y de la personificación de *Chrónos* (Panofsky, 1939). En Hesíodo, Crono no es el tiempo. Una personificación de *Chrónos* como principio primordial sí aparece en Ferécides de Siros, en el siglo VI a. n. e., y en las teogonías órficas posteriores, independientes de la genealogía hesiódica (Kirk et al., 1983).

El griego distinguía además otras dos palabras para dimensiones temporales. **Αἰών** (*aiṓn*) designaba primero la fuerza vital y la duración de una vida, emparentada con el latín *aevum*, y después la edad, la época y, en Platón, la eternidad: en el *Timeo*, el demiurgo hace el tiempo como imagen móvil de la eternidad, *eikṑ kinētón tina aiōnos* (Platón, *Timeo*, 37d). **Καιρός** (*kairós*) designaba la medida justa y el momento oportuno; Hesíodo aconseja guardar la medida, pues el *kairós* es lo mejor en todo (*Trabajos y días*, 694). La lengua separaba así el tiempo como sucesión medible, el tiempo como duración de una vida o de lo eterno y el tiempo como ocasión. La física moderna ha hecho de la primera dimensión su objeto, y las otras dos han quedado para la biografía, la ética y la historia.

Ἀνάγκη (*anánkē*), la necesidad, recibe también personificación. En el poema de Parménides, la poderosa Necesidad mantiene al ser en los lazos del límite (DK 28 B 8.30–31); en el mito de

Atelier Velázquez

Er que cierra la *República*, el huso de Ananké hace girar las esferas celestes (Platón, *República*, X, 616c–617d). La necesidad cósmica tiene en Grecia una genealogía mítica antes de convertirse en necesidad lógica o física.

2.4 Roma

Roma adoptó en gran parte la mitología griega e identificó a Crono con Saturno, antiguo dios agrícola cuya fiesta, las Saturnales de diciembre, invertía temporalmente el orden social. Jano, dios de las puertas y los comienzos, representado con dos rostros que miran en direcciones opuestas, dio nombre al primer mes del año (*Ianuarius*). El *fatum*, el destino, procede de *fari*, «hablar»: es lo que ha sido dicho, la palabra divina que fija lo que ocurrirá (de Vaan, 2008). Ovidio dedicó un poema, los *Fastos*, a recorrer el calendario religioso romano mes a mes.

La contribución romana más duradera fue administrativa. El calendario republicano, lunisolar y manipulado por los pontífices, había acumulado un desfase de casi tres meses. En el 46 a. n. e., Julio César, asesorado según Plinio el Viejo por el astrónomo alejandrino Sosígenes, impuso un año de 365 días con un día bisiesto cada cuatro años; para corregir el desfase, ese año de transición tuvo 445 días (Plinio, *Historia natural*, XVIII, 211). El año juliano, de 365.25 días, excede al trópico en unos once minutos, y el error acumulado motivó la reforma gregoriana de 1582. La gran síntesis de la astronomía griega, el *Almagesto* de Ptolomeo, fue escrita en la Alejandría romana del siglo II.

Atelier Velázquez

2.5 India védica e hinduismo

El décimo libro del *Rigveda*, colección de himnos compuestos probablemente entre 1500 y 1000 a. n. e., contiene varios himnos cosmogónicos. El más citado, el *Nāsadīya Sūkta* (X, 129), comienza afirmando que entonces no había ni no-ser ni ser, ni espacio ni cielo, y termina con una sucesión de preguntas: ¿quién sabe de dónde surgió esta creación? El que la vigila desde el cielo más alto quizá lo sabe, o quizá no lo sabe (Jamison y Brereton, 2014). Otros himnos describen la creación a partir del sacrificio de un hombre cósmico, Puruṣa (X, 90), o de un embrión de oro (X, 121).

La cosmología hindú posterior, desarrollada en las épicas y los *Purāṇa*, elaboró un sistema de ciclos temporales de dimensiones vertiginosas. Cuatro edades o *yuga* —Kṛta, Tretā, Dvāpara y Kali— de duración y virtud decrecientes forman un *mahāyuga* de 4 320 000 años. Mil

mahāyuga constituyen un *kalpa*, un día de Brahmā, de 4 320 millones de años, seguido de una noche de igual duración en la que los mundos se disuelven en el *pralaya* antes de ser recreados (González-Reimann, 2002). La edad actual sería el Kali-yuga, cuyo comienzo los astrónomos indios fijaron en el 3102 a. n. e.

El parecido numérico entre el *kalpa* y la edad de la Tierra, unos 4 540 millones de años, es una coincidencia, no una anticipación. Los números de los *yuga* proceden de la multiplicación de unidades astronómicas y rituales (360 años humanos forman un año divino; 12 000 años divinos forman un *mahāyuga*), no de ninguna medida geológica. La tradición astronómica india, por su parte, desarrolló desde los *Vedāṅga Jyotiṣa* hasta los *Siddhānta* una astronomía matemática de primer orden, examinada en el capítulo 6 (Pingree, 1981).

2.6 Budismo

El budismo heredó el marco cíclico indio y lo transformó según sus intereses doctrinales. En la sistematización del *Abhidharmakośa* de Vasubandhu (siglo IV o V), un gran *kalpa* se divide en cuatro fases de igual duración: formación, permanencia, destrucción y vacuidad, cada una de veinte *kalpa* intermedios. Un sistema de mundos se forma alrededor del monte Meru, persiste, es destruido por el fuego, el agua o el viento y queda vacío hasta un nuevo ciclo (Sadakata, 1997).

Atelier Velázquez

La función de esta cosmología es soteriológica: la inmensidad de los ciclos y la impermanencia (*anicca*) de todo lo compuesto enseñan que nada condicionado ofrece refugio definitivo. La doctrina del surgimiento condicionado (*pratītyasamutpāda*), según la cual todo fenómeno surge en dependencia de condiciones, ha sido comparada con nociones relacionales de la física contemporánea. La comparación puede ser sugerente como analogía, pero carece de valor demostrativo: la doctrina budista se refiere a la génesis del sufrimiento y la existencia condicionada, no a magnitudes físicas.

2.7 China

La cosmología china clásica se organizó alrededor de **Tian** (天), el Cielo, a la vez bóveda física, principio de orden y fuente de legitimidad política. Desde la dinastía Zhou, el gobernante recibía el mandato del Cielo, y las anomalías celestes podían interpretarse como signos de su pérdida.

Por ello el Estado mantuvo durante más de dos milenios una oficina astronómica dedicada a observar el cielo y elaborar el calendario.

La síntesis cosmológica de la dinastía Han combinó las fuerzas complementarias del yin y el yang con las cinco fases (*wuxing*: madera, fuego, tierra, metal, agua), cuya sucesión explicaba los ciclos naturales y políticos. El tercer capítulo del *Huainanzi* (139 a. n. e.) narra cómo, antes de que se formaran el cielo y la tierra, todo era informe, y cómo la materia ligera ascendió para formar el cielo y la pesada se asentó para formar la tierra (Major et al., 2010). Los astrónomos chinos discutieron tres modelos de la estructura celeste: el *gaitian*, que imaginaba el cielo como un dosel sobre una tierra plana y se expone en el *Zhoubi suanjing*; el *huntian*, que lo concebía como una esfera que envuelve a la tierra, asociado a Zhang Heng (78–139); y el *xuanye*, según el cual los astros flotan en un espacio vacío ilimitado (Cullen, 1996).

La astronomía imperial china produjo registros de valor duradero: observaciones de eclipses, cometas y «estrellas invitadas», entre ellas la supernova de 1054 cuyos restos forman la Nebulosa del Cangrejo. El tiempo cosmológico chino se pensó en términos de ciclos —el ciclo sexagesimal de los días y los años, las alternancias del yin y el yang— más que de una creación única.

Atelier Velázquez

2.8 Tradiciones nórdicas

Las fuentes principales de la mitología nórdica son dos compilaciones islandesas del siglo XIII: la *Edda poética*, conservada en el *Codex Regius* de hacia 1270, que incluye el poema *Völuspá* («La profecía de la vidente»), y la *Edda en prosa* de Snorri Sturluson, escrita hacia 1220 (Faulkes, 1987). Ambas son posteriores a la cristianización de Islandia, y Snorri escribía como anticuario cristiano que organizaba una tradición ya en parte extinta. Toda reconstrucción de la cosmología precristiana a partir de ellas es hipotética.

Según Snorri, en el principio existía Ginnungagap, un abismo vacío entre Niflheim, mundo de hielo, y Muspelheim, mundo de fuego. Del encuentro del hielo y el calor surgió el gigante Ymir, de cuyo cuerpo, una vez muerto por Odín y sus hermanos, se formó el mundo: la carne fue la tierra, la sangre el mar, el cráneo el cielo. El fresno Yggdrasil une los nueve mundos. Junto a su raíz habitan las Nornas, que tejen el destino; sus nombres, Urðr, Verðandi y Skuld, se han interpretado como relacionados con lo que ha sido, lo que está llegando a ser y lo que debe ser, aunque esta tripartición temporal puede deberse en parte a la sistematización de Snorri. El mun-

do terminará en el Ragnarök, la batalla final en que mueren los dioses, tras la cual, según la *Völuspá*, una tierra verde surgirá de nuevo del mar.

2.9 Mundo maya y mexica

Los mayas del periodo clásico (250–900) desarrollaron el sistema calendárico más elaborado de la América precolombina. Combinaban un ciclo ritual de 260 días (*tzolk'in*), un año aproximado de 365 días (*haab'*) y la Cuenta Larga, que contaba los días transcurridos desde una fecha origen mediante unidades de base mixta: 20 días forman un *winal*, 18 *winal* un *tun* de 360 días, 20 *tun* un *k'atun* y 20 *k'atun* un *b'ak'tun* de 144 000 días. La fecha origen, 13.0.0.0.0 4 Ajaw 8 Kumk'u, corresponde, según la correlación más aceptada, al 11 de agosto del 3114 a. n. e. del calendario gregoriano proléptico. El fin del decimotercer *b'ak'tun* el 21 de diciembre de 2012 fue objeto de interpretaciones apocalípticas sin ningún fundamento en las fuentes mayas.

El Códice de Dresde, uno de los cuatro códices mayas conservados, contiene una tabla de Venus que utiliza un periodo sinódico medio de 584 días y aprovecha que cinco ciclos de Venus (2 920 días) equivalen a ocho años de 365 días, así como tablas de eclipses que agrupan las lunaciones en series que señalan los momentos de riesgo de eclipse (Bricker y Bricker, 2011; Aveni, 2001). El *Popol Vuh*, texto k'iche' redactado en alfabeto latino en el siglo XVI, narra sucesivos intentos de los dioses por crear seres humanos capaces de venerarlos (Tedlock, 1996).

Los mexicas compartían el calendario mesoamericano de 260 y 365 días, cuya combinación produce un ciclo de 52 años, el *xiuhmolpilli*. Al final de cada ciclo se celebraba la ceremonia del Fuego Nuevo en el cerro de Huixachtécatl, hoy Cerro de la Estrella en Iztapalapa, para asegurar que el sol volviera a salir. La *Leyenda de los Soles*, manuscrito náhuatl de 1558, y otras fuentes coloniales narran cuatro edades o soles anteriores, destruidos sucesivamente, y una quinta edad, la del sol de Movimiento (*Nahui Ollin*), nacido en Teotihuacan del sacrificio de los dioses (León-Portilla, 1956). El orden de los soles anteriores varía entre las fuentes. La llamada Piedra del Sol, descubierta en la Plaza Mayor de la Ciudad de México en 1790, condensa en su iconografía esta cosmología de edades sucesivas.

El tiempo mesoamericano era cíclico y cualitativo: cada día tenía un carácter determinado por la combinación de sus signos, y la repetición de combinaciones permitía pronósticos. Su precisión aritmética era notable; su finalidad, ritual y adivinatoria.

Atelier Velázquez

2.10 Tradición hebrea y cristiana

Los dos primeros capítulos del Génesis contienen dos relatos de creación que la crítica bíblica atribuye a fuentes distintas. El primero (Gn 1:1–2:4a) presenta la creación en seis días, en orden solemne: la luz, el firmamento que separa las aguas de arriba y las de abajo, la tierra seca y las plantas, las lumbreras del cielo, los animales y el ser humano. El segundo (Gn 2:4b–25) se centra en la formación del hombre del polvo y en el jardín del Edén. El texto inicial describe la tierra como *tohu wa-bohu*, «informe y vacía», y menciona el abismo, *tehom*, palabra que algunos estudiosos han relacionado con la Tiamat mesopotámica, aunque la relación lingüística es discutida.

La doctrina de la creación a partir de la nada (*creatio ex nihilo*) no está formulada explícitamente en el Génesis; se elaboró en el cristianismo del siglo II, en polémica con las cosmologías platónicas y gnósticas que suponían una materia preexistente (May, 1994). Fue Agustín de Hipona quien dio a la relación entre creación y tiempo su formulación más influyente. En el libro XI de las *Confesiones* responde a quienes preguntaban qué hacía Dios antes de crear el cielo y la tierra: la pregunta carece de sentido porque no había un «antes», ya que el tiempo mismo fue creado con el mundo (Agustín, *Confesiones*, XI, 13, 15). En *La ciudad de Dios* lo resume: el mundo no fue hecho en el tiempo, sino con el tiempo (XI, 6).

Atelier Velázquez

Agustín no se limitó a la teología. Analizó la paradoja del tiempo presente: el pasado ya no es, el futuro aún no es, y el presente, si permaneciera, sería eternidad. Concluyó que medimos el tiempo en el alma, como distensión (*distentio animi*) entre la memoria, la atención y la expectativa (*Confesiones*, XI, 26, 33; XI, 28, 37). Este análisis, que se examinará en el capítulo 48, sigue siendo un punto de referencia para la filosofía del tiempo.

Se ha repetido que el pensamiento hebreo y cristiano introdujo un tiempo lineal frente al tiempo cíclico de los griegos. La dicotomía es demasiado simple: hay concepciones lineales en Grecia y cíclicas en la tradición bíblica, y la diferencia afecta más a la historia de la salvación que al tiempo físico.

2.11 Comparación

Tabla 2. Cosmologías antiguas: fuentes, estructura del cosmos, concepción del tiempo y función cultural

Tradición	Fuentes principales	Estructura del cosmos	Tiempo	Función dominante	Riesgo de interpretación

Tradición	Fuentes principales	Estructura del cosmos	Tiempo	Función dominante	Riesgo de interpretación
Mesopotamia	*Enūma eliš*; *MUL.APIN*; *Diarios astronómicos*	Cielo y tierra formados del cuerpo de Tiamat	Calendario lunisolar; ciclos de eclipses	Legitimación política; adivinación; cálculo	Leer el mito como física
Egipto	Textos de las Pirámides; teología menfita; *Libro de Nut*	Nut sobre Geb; Duat subterránea	*Neheh* cíclico y *djet* perdurable	Culto solar; funeraria; calendario	Proyectar una teoría unificada
Grecia arcaica	Hesíodo; Ferécides; órficos	Caos, Gea, Urano; orden olímpico	Genealógico; Moiras y Ananké	Teológica, moral, poética	Identificar Crono con Chrónos
Roma	Ovidio, *Fastos*; Plinio; Cicerón	Herencia griega	Calendario civil y religioso	Administrativa, ritual	Atribuir originalidad astronómica
India	*Rigveda* X; *Purāṇa*; *Siddhānta*	Huevo cósmico, Puruṣa; mundos sucesivos	*Yuga*, *kalpa*, *pralaya*	Ritual, soteriológica	Ver anticipaciones de la geocronología
Budismo	*Abhidharmakośa*	Sistemas de mundos en torno a Meru	Formación, permanencia, destrucción, vacuidad	Soteriológica	Equiparar con física relacional
China	*Huainanzi*; *Zhoubi suanjing*; anales	*Gaitian*, *huntian*, *xuanye*	Ciclos sexagesimales; yin-yang	Política (mandato del Cielo)	Suponer ausencia de astronomía teórica
Nórdica	*Edda poética*; *Edda en prosa*	Nueve mundos unidos por Yggdrasil	Destrucción y renovación (Ragnarök)	Religiosa, heroica	Ignorar el filtro cristiano del siglo XIII
Maya y mexica	Códice de Dresde; *Popol Vuh*; *Leyenda de los Soles*	Niveles celestes e inframundo; soles sucesivos	Cuenta Larga; ciclo de 52 años	Ritual, adivinatoria, política	Lecturas apocalípticas
Hebrea y cristiana	Génesis; Agustín	Firmamento que separa las aguas	Creación con el tiempo; historia de salvación	Teológica, moral	Dicotomía simple lineal/cíclico

Nota. Elaboración propia a partir de las fuentes citadas en el capítulo.

Atelier Velázquez

Capítulo 3. De la phýsis a la astronomía racional

3.1 Un tránsito sin línea recta

La fórmula «del mito al lógos» resume de manera engañosa lo ocurrido en las ciudades griegas de Jonia a partir del siglo VI a. n. e. Los primeros filósofos no abandonaron de golpe el mito: Tales afirmaba que todo está lleno de dioses, Parménides expuso su doctrina en un poema donde una diosa le revela la verdad, y Platón compuso mitos filosóficos deliberadamente. Lo que cambió fue el tipo de explicación aceptable y el modo de discutirla. Las explicaciones pasaron a apelar a principios impersonales y a procesos que operan en el presente, y se sometieron a la crítica pública de otros investigadores. Ese cambio no fue un milagro griego: se produjo en ciudades comerciales que conocían la astronomía babilonia, la geometría práctica egipcia y la escritura alfabética, y donde la discusión en la asamblea era una práctica política cotidiana (Lloyd, 1970).

Varias palabras griegas registran las nuevas operaciones. **Ἀρχή** (*archḗ*) significaba «comienzo» y «mando»; los doxógrafos atribuyeron a Anaximandro su uso para designar el principio de todas las cosas, aunque la noticia podría reflejar el vocabulario de Aristóteles y Teofrasto más que el de Anaximandro (Kirk et al., 1983). **Λόγος** (*lógos*), del verbo *légō*, que significa «recoger», «contar» y «decir», abarcaba la palabra, el discurso, la cuenta, la razón y la proporción. En los *Elementos* de Euclides, *lógos* es el término técnico para la razón entre dos magnitudes (libro V, definición 3), sentido que pasó al latín como *ratio*. Esa polisemia no es un accidente: para los griegos, dar razón de algo, contarlo y establecer su proporción eran operaciones emparentadas.

Atelier Velázquez

3.2 Los jonios

Tales de Mileto (activo hacia el 585 a. n. e.) recibió la pregunta mítica por el origen y la transformó en pregunta por el principio material: según Aristóteles, sostuvo que el agua es el principio de todas las cosas y que la tierra flota sobre el agua (*Metafísica*, A 3, 983b20–27). Heródoto le atribuye la predicción del eclipse solar del 585 a. n. e. (*Historias*, I, 74), pero los historiadores dudan de que dispusiera de los medios para una predicción semejante; quizá conocía ciclos babilonios que indicaban fechas posibles. Lo transformador no fue la tesis del agua, sino la forma de la explicación: una sustancia observable que, transformándose, da cuenta de la diversidad.

Anaximandro de Mileto (hacia 610–546 a. n. e.) introdujo varias novedades decisivas. Propuso como principio lo *ápeiron*, lo ilimitado o indefinido, a partir del cual se separan los opuestos. El único fragmento conservado afirma que las cosas perecen en aquello de lo que se generan, según la necesidad, pues pagan unas a otras pena y retribución por su injusticia según el orden del tiempo (DK 12 B 1). Es la primera aparición conocida del tiempo como ordenador de un proceso natural. Anaximandro sostuvo además que la Tierra, de forma cilíndrica, permanece en el centro sin apoyo alguno porque, al estar equidistante de todos los extremos, no tiene razón para moverse en una dirección más que en otra (Aristóteles, *Acerca del cielo*, II 13, 295b10–16). El argumento de simetría que sustituye al apoyo material es una de las ideas más audaces de la Antigüedad, y Carlo Rovelli ha defendido que Anaximandro merece ser considerado el primer científico por haber concebido la Tierra suspendida en el espacio y haber sometido a crítica la doctrina de su maestro (Rovelli, 2011).

Anaxímenes (activo hacia el 545 a. n. e.) propuso el aire como principio y explicó la diversidad mediante condensación y rarefacción, un mecanismo cuantitativo en germen: las diferencias cualitativas dependen de grados de densidad.

Atelier Velázquez

3.3 Pitagóricos

Sobre Pitágoras de Samos (hacia 570–495 a. n. e.) casi todo es leyenda tardía. Lo que puede atribuirse a la escuela pitagórica, especialmente a Filolao de Crotona (hacia 470–385 a. n. e.), es la tesis de que las cosas están constituidas por el límite y lo ilimitado y de que todo lo cognoscible tiene número (Burkert, 1972). El descubrimiento que los antiguos asociaron a los pitagóricos fue la correspondencia entre las consonancias musicales y las razones numéricas simples: la octava corresponde a la razón 2:1 entre las longitudes de cuerda, la quinta a 3:2, la cuarta a 4:3. Era una identidad entre un fenómeno sensible (la consonancia que el oído percibe) y una relación numérica (la razón de longitudes), obtenida por operaciones con un monocordio.

Filolao propuso además que la Tierra no está en el centro, sino que gira, como los demás astros, alrededor de un fuego central invisible, y postuló una Antitierra para completar el número diez de cuerpos celestes. El modelo era numerológico más que observacional, pero rompía con la evidencia sensible de una Tierra inmóvil.

3.4 Heráclito y Parménides

Heráclito de Éfeso (activo hacia el 500 a. n. e.) sostuvo que el cosmos es un fuego siempre vivo que se enciende y se apaga según medidas, y que todo sucede conforme al *lógos*, común a todos aunque la mayoría vive como si tuviera una inteligencia privada (DK 22 B 1, B 2, B 30). La imagen del río en el que no puede uno bañarse dos veces procede de Platón (*Crátilo*, 402a), y la fórmula *pánta rheî*, «todo fluye», no aparece en los fragmentos conservados. Lo que sí está documentado es su insistencia en la unidad de los opuestos y en la medida que regula sus transformaciones: el camino arriba y abajo es uno y el mismo (B 60).

Parménides de Elea (activo hacia el 475 a. n. e.) planteó el desafío más radical. En su poema, la diosa revela que solo el ser es y el no ser no es; de ahí se sigue que el ser no puede haber nacido ni perecer, que es uno, continuo e inmóvil (DK 28 B 8). El cambio y la pluralidad pertenecen a la opinión de los mortales. Su discípulo Zenón elaboró paradojas para mostrar las dificultades del movimiento: Aquiles nunca alcanzará a la tortuga, porque cuando llegue adonde ella estaba, ella habrá avanzado; la flecha en vuelo está en reposo en cada instante (Aristóteles, *Física*, VI 9, 239b5–240a18).

Atelier Velázquez

La respuesta matemática moderna al Aquiles utiliza la suma de series convergentes: si la tortuga tiene una ventaja de 100 metros y Aquiles corre diez veces más rápido, las distancias sucesivas que debe cubrir forman la serie $100 + 10 + 1 + 0.1 + \cdots$, cuya suma es

$$\sum_{n=0}^{\infty} 100\left(\frac{1}{10}\right)^{n} = \frac{100}{1 - 1/10} = 111.\overline{1}\ \text{m},$$

distancia que recorre en un tiempo finito. La respuesta muestra que la paradoja no prueba la imposibilidad del movimiento, pero no disuelve todas las cuestiones que plantea sobre la estructura del continuo; esas cuestiones reaparecerán con la teoría de conjuntos y, en otra forma, en la física de la escala de Planck.

La importancia de Parménides para la física es indirecta y enorme. Al negar el cambio, obligó a sus sucesores a explicar cómo es posible sin violar el principio de que nada surge de la nada. Las respuestas de Empédocles y los atomistas fueron, en esencia, que nada nace ni perece absolutamente, sino que las cosas se componen y descomponen a partir de elementos permanentes. Es el antecedente remoto de las leyes de conservación.

3.5 Empédocles, Anaxágoras y los atomistas

Empédocles de Acragante (hacia 494–434 a. n. e.) postuló cuatro raíces eternas —fuego, aire, agua y tierra— y dos fuerzas, el Amor, que une, y el Odio, que separa, cuya alternancia produce un ciclo cósmico. Uno de sus fragmentos describe una clepsidra: si se tapa con el dedo el orificio superior, el agua no entra por los agujeros inferiores, porque el aire lo impide (DK 31 B 100). Es una de las primeras descripciones de un experimento que muestra la corporeidad del aire.

Anaxágoras de Clazómenas (hacia 500–428 a. n. e.) introdujo el *noûs*, el intelecto, como principio que inicia la rotación cósmica, y sostuvo que la Luna recibe su luz del Sol y que el Sol es una piedra incandescente mayor que el Peloponeso. Fue acusado de impiedad en Atenas.

Leucipo y **Demócrito de Abdera** (hacia 460–370 a. n. e.) propusieron que solo existen los átomos y el vacío. Los átomos (de *átomos*, «que no puede cortarse») son infinitos en número, indivisibles, diferentes en forma, orden y posición, y se mueven eternamente en el vacío. Las cualidades sensibles son convencionales: por convención lo dulce, por convención lo amargo; en realidad, átomos y vacío (DK 68 B 9). Leucipo afirmó que nada ocurre al azar, sino todo por una razón y por necesidad (DK 67 B 2). El atomismo antiguo era una hipótesis sin medios de contrastación: ninguna operación permitía entonces aislar un átomo. Pasarían más de dos mil años hasta que Einstein y Perrin convirtieran la hipótesis atómica en una teoría con identidades sintéticas, como se verá en el capítulo 11.

Atelier Velázquez

3.6 Platón

Platón (427–347 a. n. e.) expone su cosmología en el *Timeo* como un relato verosímil, no como una demostración. Un artesano divino, el demiurgo, contempla las Formas eternas y ordena según ellas un receptáculo informe, la *chṓra*. Los cuatro elementos están compuestos de triángulos que forman cuatro de los cinco poliedros regulares: el fuego, el tetraedro; el aire, el octaedro; el agua, el icosaedro; la tierra, el cubo. El quinto, el dodecaedro, sirve para el todo. El tiempo nace con el cielo como imagen móvil de la eternidad que procede según el número, y los planetas fueron creados para distinguir y custodiar los números del tiempo (*Timeo*, 37c–39e).

El proyecto platónico es una matematización del cosmos con fines teológicos y éticos. Su legado astronómico más duradero procede de una noticia tardía: según Simplicio, que cita a Sosígenes, quien a su vez se apoya en Eudemo, Platón habría propuesto a los astrónomos el pro-

blema de explicar los movimientos aparentes de los planetas mediante movimientos circulares y uniformes. La expresión «salvar los fenómenos» resume ese programa, aunque la atribución a Platón es dudosa. Eudoxo de Cnido fue el primero en ofrecer una respuesta matemática, examinada en el capítulo 5.

3.7 Aristóteles

Aristóteles de Estagira (384–322 a. n. e.) construyó el sistema de filosofía natural que dominó el pensamiento europeo e islámico durante casi dos milenios. Su importancia no reside en que tuviera razón —se equivocó en mucho de lo que hoy consideramos física—, sino en que fijó el repertorio de problemas y conceptos con los que trabajaron sus sucesores y sus críticos.

Movimiento, potencia y acto

Aristóteles define el movimiento, **κίνησις** (*kínēsis*), como la actualización de lo que está en potencia en cuanto tal (*Física*, III 1, 201a10–11). La definición utiliza dos términos que él mismo forjó o resignificó. **Δύναμις** (*dýnamis*), que en el griego común significaba «fuerza» o «capacidad», designa en Aristóteles la potencia, la capacidad de llegar a ser algo. **Ἐνέργεια** (*enérgeia*), término probablemente acuñado por él a partir de *érgon*, «obra», designa la actividad o la actualidad, el estar en acto (*Metafísica*, Θ 6). El concepto moderno de energía tiene poco que ver con este: la palabra inglesa *energy* fue empleada por Thomas Young en 1807 para designar la cantidad que hoy llamamos energía cinética, y el concepto físico de energía como magnitud conservada se constituyó en las décadas de 1840 y 1850, como se verá en el capítulo 10. La *kínēsis* aristotélica abarca además el cambio de cualidad, de cantidad y de lugar; el movimiento local es solo una de sus especies.

Las cuatro causas

Para Aristóteles, conocer algo es conocer sus causas, y hay cuatro sentidos de causa (*aitía*): aquello de lo que algo está hecho (material), la forma o definición (formal), aquello que inicia el cambio (eficiente) y aquello para lo cual se produce (final) (*Física*, II 3, 194b16–195a3). En el caso de una estatua, son el bronce, la figura, el escultor y el fin de honrar a alguien. La física moderna eliminó las causas finales de la descripción de la naturaleza inanimada y redujo la causalidad, en la práctica, a relaciones entre estados descritas por ecuaciones. La pregunta por qué sea la causalidad en física se examinará en el capítulo 9; aquí basta señalar que la palabra latina

Atelier Velázquez

causa, de origen incierto, tuvo primero un sentido jurídico —el asunto que se litiga en un tribunal— antes de traducir la *aitía* griega, que también significaba «responsabilidad» o «acusación».

Lugares naturales, éter y vacío

El cosmos aristotélico es finito, esférico y eterno. En la región sublunar, los cuatro elementos tienen lugares naturales: la tierra en el centro, después el agua, el aire y el fuego. Cada elemento se mueve naturalmente hacia su lugar en línea recta. En la región celeste, los astros están hechos de un quinto elemento, el éter, cuyo movimiento natural es circular y eterno (*Acerca del cielo*, I 2–3). Las esferas celestes son movidas, en el término de la cadena, por un primer motor inmóvil que mueve como objeto de deseo (*Metafísica*, Λ 7–8).

Aristóteles negó la existencia del vacío con un argumento cuantitativo. Si la velocidad de un cuerpo es proporcional a su peso e inversamente proporcional a la resistencia del medio, en el vacío, donde la resistencia es nula, la velocidad sería infinita, lo cual es absurdo (*Física*, IV 8, 215a24–216a26). El argumento es válido dentro de sus supuestos; lo falso es la ley de proporcionalidad.

Atelier Velázquez

El tiempo como número del movimiento

La definición aristotélica del tiempo es una de las más estudiadas de la historia de la filosofía: el tiempo es el número del movimiento según el antes y el después (*Física*, IV 11, 219b1–2). El tiempo no es el movimiento, porque el movimiento puede ser más rápido o más lento y el tiempo no; pero no existe sin movimiento, porque cuando no percibimos ningún cambio no percibimos que haya pasado el tiempo. Es lo que se cuenta en el movimiento cuando se distingue un antes y un después. La medida privilegiada es el movimiento circular uniforme de la esfera celeste.

Aristóteles se pregunta además si habría tiempo si no existiera el alma, porque si no hay nadie capaz de contar, no habrá nada contado (*Física*, IV 14, 223a21–29). Deja la cuestión en suspenso: el sustrato del tiempo, el movimiento, existiría, pero el tiempo como número requiere a alguien que numere. La pregunta anticipa uno de los problemas centrales de la filosofía del tiempo: la relación entre el orden físico de los procesos y la experiencia temporal de los sujetos. En términos de los géneros de materialidad, el tiempo aristotélico tiene un pie en el movimiento de los cuerpos (M_1), otro en la operación de contar (M_2) y otro en la estructura numérica del antes y el después (M_3).

3.8 Dialéctica y controversias

La palabra **διαλεκτική** (*dialektikḗ*) procede de *dialégesthai*, «conversar», «discutir». En Platón designa el método supremo del filósofo, que asciende mediante preguntas y respuestas desde las hipótesis hasta los principios (*República*, VII, 533c–534c). En Aristóteles, la dialéctica es el razonamiento que parte de opiniones aceptadas (*éndoxa*) y sirve para examinar los principios de las ciencias, que no pueden demostrarse dentro de ellas (*Tópicos*, I 1–2, 100a18–101b4). Hegel convertiría la dialéctica en el movimiento mismo de la realidad y del pensamiento; el materialismo dialéctico de Engels la aplicó a la naturaleza; Gustavo Bueno la entiende como el tratamiento de las contradicciones que surgen en procesos materiales concretos, cuando los resultados de unas operaciones chocan con los de otras, y como el análisis de los modos en que esas contradicciones se resuelven o persisten (Bueno, 1992). Estas tradiciones no dicen lo mismo, y este ensayo no las funde en una definición universal.

La controversia sobre el vacío ilustra el uso que aquí se hará del término. Los atomistas necesitaban el vacío para que los átomos pudieran moverse; Aristóteles lo negaba por razones dinámicas y conceptuales. Durante siglos la oposición se mantuvo como confrontación de argumentos. Se resolvió, en parte, en el siglo XVII por medios que ninguno de los contendientes había previsto: Evangelista Torricelli produjo en 1643 un espacio aparentemente vacío en el extremo de un tubo de mercurio invertido; Blaise Pascal hizo medir en 1648 la altura de la columna de mercurio al pie y en la cima del Puy de Dôme y mostró que disminuía con la altitud; Otto von Guericke construyó bombas de aire en la década de 1650. La contradicción no se resolvió por el triunfo de uno de los dos argumentos, sino por la construcción de instrumentos que transformaron el problema: el vacío dejó de ser una entidad metafísica y pasó a ser una presión reducida, medible en una escala continua. Que la física contemporánea atribuya al vacío cuántico propiedades físicas, como se verá en el capítulo 21, muestra que el concepto siguió transformándose.

Una oposición histórica no es automáticamente una contradicción lógica. Aristóteles y los atomistas no se contradecían en el sentido de afirmar y negar la misma proposición sobre el mismo objeto en el mismo respecto; sostenían sistemas con supuestos diferentes sobre qué es un cuerpo, qué es el lugar y cómo se relacionan fuerza y velocidad. La tarea dialéctica consiste en reconstruir esos supuestos, identificar el punto material en que chocan y mostrar qué operaciones

Atelier Velázquez

posteriores modificaron el campo de la discusión. Leer la historia de la ciencia como una secuencia de tesis, antítesis y síntesis sería imponerle un esquema que los materiales no confirman.

3.9 Hacia la astronomía matemática

Mientras los filósofos discutían los principios, otra tradición griega se dedicaba a medir y calcular. Eudoxo de Cnido construyó el primer modelo matemático del movimiento planetario; Aristarco de Samos estimó las distancias relativas del Sol y la Luna y propuso un universo heliocéntrico; Eratóstenes de Cirene midió la circunferencia de la Tierra; Hiparco de Nicea descubrió la precesión de los equinoccios y elaboró la trigonometría de las cuerdas; Claudio Ptolomeo compuso la síntesis que dominó la astronomía durante catorce siglos. Sus trabajos pertenecen a otra historia, la de la matematización del cielo, y ocupan la Parte siguiente.

Atelier Velázquez

Parte II. La matematización del cielo

Atelier Velázquez

Capítulo 4. Número, geometría y medida

4.1 Euclides y la forma demostrativa

Los *Elementos* de Euclides, compuestos en Alejandría hacia el 300 a. n. e., no son un tratado de astronomía, pero proporcionaron a la astronomía su forma de razonar. A partir de definiciones, postulados y nociones comunes, Euclides demuestra en trece libros cerca de quinientas proposiciones sobre figuras planas, proporciones, números y sólidos. Su método consiste en construir figuras mediante operaciones permitidas —trazar una recta entre dos puntos, describir un círculo con un centro y un radio dados— y en mostrar que ciertas relaciones se siguen necesariamente de esas construcciones. La proposición I.47, el teorema de Pitágoras, establece que en todo triángulo rectángulo el cuadrado construido sobre la hipotenusa es igual a la suma de los cuadrados construidos sobre los catetos. La igualdad no es una definición: es una identidad entre dos áreas obtenidas por construcciones distintas, demostrada mediante descomposiciones y equivalencias de figuras.

El libro V, que la tradición atribuye en sustancia a Eudoxo, desarrolla una teoría de las proporciones aplicable a magnitudes inconmensurables, como la diagonal y el lado del cuadrado. Esta teoría permitió a los astrónomos trabajar con razones entre distancias y periodos sin necesidad de números reales en el sentido moderno.

Atelier Velázquez

4.2 Eratóstenes mide la Tierra

Eratóstenes de Cirene (hacia 276–194 a. n. e.), director de la Biblioteca de Alejandría, realizó la medición más célebre de la Antigüedad. El procedimiento nos llega a través de un manual de astronomía de Cleomedes, escrito siglos después (Cleomedes, *Caelestia*, I, 7). En Siene, la actual Asuán, el Sol del mediodía del solsticio de verano iluminaba el fondo de los pozos, es decir, estaba en el cenit. En Alejandría, supuesta en el mismo meridiano al norte, ese mismo mediodía un gnomon proyectaba una sombra que indicaba que los rayos solares formaban con la vertical un ángulo de una quincuagésima parte del círculo completo, es decir, 7.2°. Si los rayos del Sol llegan paralelos a la Tierra, ese ángulo es igual al ángulo central que subtiende el arco entre ambas ciudades.

La distancia entre Siene y Alejandría se estimaba en 5 000 estadios. La proporción da la circunferencia C:

$$\frac{C}{5\,000 \text{ estadios}} = \frac{360^\circ}{7.2^\circ} = 50 \quad \Rightarrow \quad C = 250\,000 \text{ estadios.}$$

Eratóstenes habría corregido después la cifra a 252 000 estadios, quizá para obtener un número divisible por sesenta. El valor del estadio que utilizó es incierto: si se toma un estadio de 157.5 m, la circunferencia resulta de 39 375 km; si se toma el estadio ático de unos 185 m, de 46 250 km. La circunferencia meridiana real es de unos 40 008 km. La discusión sobre la precisión del resultado depende, por tanto, de una incógnita metrológica que no puede resolverse con las fuentes disponibles.

El procedimiento contenía cuatro supuestos: que la Tierra es esférica, que los rayos solares son paralelos, que Siene está exactamente en el trópico y que ambas ciudades están en el mismo meridiano. Los dos últimos son aproximados: Asuán está unos 3° al este de Alejandría y algo al norte del trópico. El valor del método no reside en la exactitud del número, sino en la operación: una magnitud inaccesible a la medida directa, la circunferencia de la Tierra, se obtiene a partir de un ángulo medido con un instrumento sencillo y una distancia terrestre, mediante una relación geométrica demostrada.

Atelier Velázquez

4.3 Aristarco y las distancias del Sol y la Luna

Aristarco de Samos (hacia 310–230 a. n. e.) es el autor del único tratado conservado que intenta medir distancias celestes, *Sobre los tamaños y distancias del Sol y la Luna* (Heath, 1913). Su razonamiento central es elegante. Cuando la Luna está exactamente en cuarto, la mitad de su disco iluminada, el ángulo Tierra–Luna–Sol es recto. Si en ese momento se mide el ángulo Luna–Tierra–Sol, θ, el triángulo queda determinado, y la razón entre la distancia de la Tierra al Sol, $d_\odot$, y la distancia de la Tierra a la Luna, d_L, es

$$\frac{d_\odot}{d_L} = \frac{1}{\cos\theta}.$$

Aristarco supuso que el ángulo era de 87°. Sin trigonometría —que todavía no existía—, acotó la razón mediante desigualdades geométricas entre 18 y 20. Con trigonometría moderna, $1/\cos 87^\circ \approx 19.1$. El ángulo real es de unos 89.85°, lo que da una razón cercana a 390. El error no está en el método, sino en la medida: es casi imposible determinar a simple vista el instante exacto del cuarto y medir un ángulo con una precisión de una décima de grado. El ejemplo muestra

cómo un procedimiento geométricamente correcto puede amplificar enormemente un pequeño error de observación cuando el ángulo está cerca de 90°: la función $1/\cos\theta$ crece sin límite en ese entorno.

Aun con el valor erróneo, Aristarco concluyó que el Sol es mucho mayor que la Tierra. Según Arquímedes, en *El arenario*, Aristarco propuso que las estrellas fijas y el Sol permanecen inmóviles y que la Tierra gira alrededor del Sol en un círculo (Heath, 1913). Es posible que la desproporción de tamaños lo llevara a considerar más razonable que el cuerpo pequeño girara en torno al grande. La hipótesis no prosperó, por razones que se examinarán con la paralaje.

4.4 De la cuerda al seno

La trigonometría nació como instrumento astronómico. Hiparco de Nicea (hacia 190–120 a. n. e.) elaboró, según las fuentes antiguas, una tabla de cuerdas: para cada ángulo central de un círculo, la longitud de la cuerda que lo subtiende. Ptolomeo, en el libro I del *Almagesto*, construyó una tabla de cuerdas de medio grado en medio grado para un círculo de radio 60 (Toomer, 1984). La cuerda de un ángulo α en un círculo de radio R es $\operatorname{crd}\alpha = 2R\sin(\alpha/2)$.

Atelier Velázquez

Los astrónomos indios introdujeron la semicuerda, que simplificaba los cálculos. La llamaron *jyā* o *jīvā*, «cuerda de arco». Los traductores árabes transcribieron la palabra como *jība*, término sin significado en árabe que, escrito sin vocales, se confundió con *jayb*, «bolsillo» o «pliegue». Los traductores latinos del siglo XII tradujeron *jayb* por *sinus*, «pliegue», «seno». El nombre de la función seno es así el resultado de una cadena de transmisiones y malentendidos que atraviesa tres lenguas, y registra materialmente la ruta de la trigonometría de la India al mundo islámico y a Europa (Katz, 2009).

4.5 Paralaje

La **paralaje** (del griego *parállaxis*, «alternancia», «desviación») es el desplazamiento aparente de un objeto cuando se observa desde dos posiciones diferentes. Extienda el lector un brazo, levante un dedo y mírelo alternativamente con cada ojo: el dedo parece saltar respecto del fondo. Cuanto más cerca está el objeto, mayor es el salto. Si se conoce la distancia entre los dos puntos de observación, la línea de base b, y se mide el ángulo de paralaje p, la distancia d al objeto se obtiene, para ángulos pequeños, de

$$d \approx \frac{b}{p} \quad (p \text{ en radianes}).$$

La paralaje de la Luna, observada desde dos lugares distantes de la Tierra, es de alrededor de un grado, y permitió a Hiparco y Ptolomeo estimar su distancia en unos sesenta radios terrestres, un valor muy próximo al real de 60.3. Las estrellas, en cambio, no mostraban paralaje alguna. Si la Tierra girara alrededor del Sol, la línea de base sería el diámetro de su órbita y las estrellas cercanas deberían desplazarse a lo largo del año. La ausencia de paralaje estelar era un argumento serio contra el heliocentrismo, y Aristarco solo podía responder suponiendo que las estrellas estaban a distancias inmensas. Era una hipótesis *ad hoc* respecto de los datos disponibles, aunque resultó cierta.

La paralaje estelar fue medida por primera vez por Friedrich Wilhelm Bessel en 1838, para la estrella 61 Cygni, con un valor de unos 0.31 segundos de arco (Bessel, 1838). La moderna unidad astronómica de distancia, el **pársec**, se define precisamente a partir de esta operación: es la distancia a la que una unidad astronómica (la distancia media Tierra–Sol) subtiende un ángulo de un segundo de arco. Así,

Atelier Velázquez

$$d\,[\text{pc}] = \frac{1}{p\,[\text{segundos de arco}]}.$$

Ejemplo. La estrella más cercana al Sol, Próxima Centauri, tiene una paralaje de 0.7685 segundos de arco. Su distancia es $1/0.7685 \approx 1.301$ pc. Como un pársec equivale a 3.086×10^{16} m y un año luz a 9.461×10^{15} m, la distancia es de 4.24 años luz, unos 4.0×10^{16} m. La medida de Bessel para 61 Cygni, 0.314″, da 3.18 pc; el valor moderno de la paralaje, 0.286″, da 3.50 pc. El error de Bessel, de una centésima de segundo de arco, equivale al grosor de un cabello visto a dos kilómetros.

El límite del método es instrumental. Desde la superficie terrestre, la atmósfera limita las medidas de paralaje a unas pocas centésimas de segundo de arco, es decir, a distancias de algunas decenas de pársecs. Los satélites Hipparcos (1989–1993) y Gaia (2013–2025) llevaron la precisión hasta las decenas de microsegundos de arco para estrellas brillantes, y extendieron la medida directa de distancias a buena parte de la Vía Láctea (Gaia Collaboration, 2023). Más allá, las distancias se obtienen mediante una cadena de inferencias que se examinará en el capítulo 23.

4.6 Escalas astronómicas y notación científica

Las distancias astronómicas exigen una notación que permita manejar números de muchos órdenes de magnitud. La **notación científica** expresa un número como el producto de una mantisa entre 1 y 10 por una potencia de diez: la distancia media Tierra–Sol es 1.496×10^{11} m; el radio terrestre medio, 6.371×10^{6} m. Multiplicar y dividir se reduce a operar con las mantisas y sumar o restar los exponentes, una ventaja que John Napier explotó en 1614 con la invención de los logaritmos, que, según una frase atribuida a Laplace, duplicaron la vida de los astrónomos al abreviar sus cálculos.

Algunas equivalencias permiten orientarse: la luz tarda $1.496 \times 10^{11} / 2.998 \times 10^{8} \approx 499$ s, unos 8.3 minutos, en llegar del Sol a la Tierra; un año luz equivale a unas 63 000 unidades astronómicas; un pársec, a 3.26 años luz; el centro de la Vía Láctea está a unos 8 kiloparsecs; la galaxia de Andrómeda, a unos 765 kiloparsecs; el radio comóvil del universo observable es de unos 14 gigapársecs. La primera operación cosmológica es aprender a moverse con soltura entre estos números sin perder el sentido de lo que significan.

Atelier Velázquez

Capítulo 5. Astronomía matemática antigua

5.1 Las esferas de Eudoxo

Eudoxo de Cnido (hacia 390–337 a. n. e.), matemático, médico y astrónomo, construyó el primer modelo geométrico del movimiento de los planetas. Cada astro era transportado por un sistema de esferas concéntricas centradas en la Tierra, cada una girando uniformemente alrededor de un eje fijado en la esfera exterior. Para los planetas utilizó cuatro esferas: la exterior reproducía el movimiento diario; la segunda, el desplazamiento a lo largo del zodíaco; las dos interiores, con ejes inclinados y girando en sentidos opuestos a la misma velocidad, hacían que el planeta describiera una curva en forma de ocho alargado, la *hipópede*, que superpuesta al movimiento zodiacal producía las retrogradaciones (Neugebauer, 1975). El sistema completo tenía 27 esferas.

El modelo de Eudoxo era un logro matemático extraordinario, pero tenía un defecto observacional que los antiguos conocían: como cada planeta permanecía siempre a la misma distancia de la Tierra, no podía explicar las variaciones de brillo de Marte y Venus, que se ven mucho más brillantes en ciertas épocas. Calipo añadió esferas para mejorar el acuerdo, y Aristóteles convirtió el sistema matemático en un mecanismo físico de 55 esferas, añadiendo esferas compensadoras para que el movimiento de cada planeta no se transmitiera al siguiente (*Metafísica*, Λ 8, 1073b–1074a).

Atelier Velázquez

5.2 Epiciclos y excéntricas

A finales del siglo III a. n. e., Apolonio de Perga mostró que dos construcciones geométricas distintas podían producir los mismos movimientos aparentes. En el modelo de la **excéntrica**, el planeta gira uniformemente en un círculo cuyo centro está desplazado respecto de la Tierra. En el modelo del **epiciclo**, el planeta gira en un círculo pequeño cuyo centro, a su vez, gira sobre un círculo mayor, el deferente, centrado en la Tierra. Ambas construcciones explican de inmediato las variaciones de distancia, y el epiciclo explica además las retrogradaciones: cuando el movimiento sobre el epiciclo es opuesto al del deferente y más rápido, el planeta parece retroceder.

Hiparco aplicó estas construcciones al Sol. Las estaciones no tienen la misma duración: la primavera boreal dura unos 94.5 días y el verano unos 92.5. Hiparco explicó la diferencia colocando la Tierra fuera del centro de la órbita circular del Sol, con una excentricidad de alrededor

de una vigésima cuarta parte del radio. Al comparar sus observaciones con las de Timócaris, realizadas siglo y medio antes, descubrió además que las longitudes de las estrellas habían aumentado unos dos grados: los puntos equinocciales se desplazan lentamente respecto de las estrellas. Es la **precesión de los equinoccios**, que Hiparco estimó en al menos un grado por siglo; el valor actual es de un grado cada 71.6 años (Toomer, 1984). La explicación física de la precesión tendría que esperar a Newton.

5.3 Ptolomeo

Claudio Ptolomeo (hacia 100–170) compuso en Alejandría la *Sintaxis matemática*, conocida por su nombre árabe *Almagesto* («el más grande»). En trece libros expone un sistema completo: los argumentos para la esfericidad y la inmovilidad de la Tierra, la trigonometría necesaria, la teoría del Sol, la de la Luna, el cálculo de eclipses, un catálogo de 1 022 estrellas agrupadas en 48 constelaciones y las teorías de los cinco planetas (Toomer, 1984).

Para los planetas, Ptolomeo introdujo un dispositivo que los astrónomos posteriores encontrarían escandaloso: el **ecuante**. El centro del epiciclo recorre el deferente, pero su movimiento no es uniforme respecto del centro del deferente ni respecto de la Tierra, sino respecto de un tercer punto, el ecuante, situado simétricamente a la Tierra respecto del centro. Con este artificio, el modelo reproducía las observaciones con un error típico de pocos minutos de arco en la mayoría de los casos, aunque con discrepancias mayores en algunos planetas, especialmente Marte. Pero violaba el principio de que los movimientos celestes debían ser circulares y uniformes respecto de su propio centro.

Ptolomeo escribió también las *Tablas manuales*, que facilitaban el cálculo, y las *Hipótesis planetarias*, donde intentó convertir sus modelos en un sistema físico de capas esféricas encajadas unas en otras. Suponiendo que no hay espacios vacíos entre ellas, estimó la distancia máxima de Saturno en unos veinte mil radios terrestres, la primera estimación del tamaño del cosmos basada en un modelo cuantitativo.

5.4 Éxito predictivo, realidad física e interpretación causal

La astronomía ptolemaica plantea con nitidez un problema que recorrerá todo este libro: ¿qué relación hay entre la capacidad de un modelo para predecir y su pretensión de describir la realidad?

Atelier Velázquez

Matemáticamente, la flexibilidad de los epiciclos es enorme. Una combinación suficiente de círculos superpuestos, cada uno girando uniformemente, puede aproximar cualquier trayectoria cerrada y periódica, de modo análogo a como una serie de Fourier aproxima una función periódica mediante senos y cosenos (Hanson, 1960). Esa flexibilidad es a la vez una virtud predictiva y un riesgo explicativo: un modelo capaz de reproducir cualquier trayectoria no explica por qué la trayectoria es la que es.

Los propios astrónomos antiguos discutieron el estatuto de sus modelos. Para unos, los círculos eran estructuras reales; para otros, artificios de cálculo. El filósofo Proclo, en el siglo V, consideraba los epiciclos ficciones útiles. Pierre Duhem, en un ensayo de 1908, reconstruyó esta tradición bajo el lema de «salvar los fenómenos» y la presentó como antecedente de su propia concepción instrumentalista de la física (Duhem, 1908). La reconstrucción de Duhem es en parte tendenciosa: Ptolomeo sí intentó dar contenido físico a sus modelos en las *Hipótesis*. Pero la tensión era real: los modelos matemáticos del *Almagesto* y el sistema físico de las *Hipótesis* no encajaban del todo.

Atelier Velázquez

Desde la teoría del cierre categorial, puede decirse que la astronomía ptolemaica alcanzó un alto grado de cierre operatorio en el plano de las posiciones aparentes —sus términos (longitudes, latitudes, tiempos) se relacionaban mediante operaciones geométricas que permitían obtener resultados comparables con las observaciones de cualquier astrónomo competente—, pero no consiguió identidades sintéticas que conectaran ese plano con una dinámica de los cuerpos. Los círculos predecían dónde estaría un planeta; no decían por qué. Esa conexión entre posiciones aparentes y causas físicas sería la tarea de Kepler y Newton, y requirió abandonar el principio mismo que había hecho posible el éxito ptolemaico: la uniformidad circular.

Capítulo 6. De Ptolomeo a Copérnico: una historia de transmisión

6.1 Astronomía india

La astronomía matemática india alcanzó su forma clásica con Āryabhaṭa (476–hacia 550), que en el año 499 compuso en Kusumapura, cerca de la actual Patna, el *Āryabhaṭīya*, un tratado en verso de 121 estrofas. Āryabhaṭa sostuvo que la rotación diaria de la Tierra, y no la de la esfera celeste, produce la salida y la puesta de los astros, y la comparó con la experiencia de quien viaja en un barco y ve moverse la orilla en sentido contrario. Explicó los eclipses por las sombras de la Tierra y la Luna, no por demonios. Dio una tabla de 24 semicuerdas para un círculo de radio 3 438 —el número de minutos de arco en un radián— y un valor de π de $62\,832/20\,000 = 3.1416$ (Plofker, 2009).

Brahmagupta (598–hacia 668) compuso en 628 el *Brāhmasphuṭasiddhānta*, que incluye las primeras reglas sistemáticas para operar con el cero y con números negativos, entendidos como deudas. Criticó la rotación de la Tierra de Āryabhaṭa. Bhāskara II (1114–1185) escribió el *Siddhānta Śiromaṇi* (1150), donde utilizó una noción de velocidad instantánea de los planetas (*tātkālika gati*) en el cálculo de sus movimientos; la comparación con el cálculo diferencial debe hacerse con cuidado, porque no hay en Bhāskara una teoría general de los límites ni de las derivadas.

Hacia 770, una embajada india llevó a Bagdad un tratado astronómico basado en Brahmagupta, que fue traducido al árabe y dio origen al llamado *Zīj al-Sindhind*. La astronomía india entró así en el mundo islámico junto con la numeración posicional decimal, que al-Jwārizmī expuso hacia 825 en un tratado cuya versión latina popularizó en Europa las cifras «arábigas» y cuyo autor dio nombre al algoritmo.

6.2 Astronomía islámica

La Casa de la Sabiduría de Bagdad, en el siglo IX, tradujo al árabe el *Almagesto* y gran parte de la ciencia griega. Pero los astrónomos de lengua árabe y persa no se limitaron a conservar: corrigieron parámetros, construyeron observatorios, mejoraron instrumentos y criticaron los fundamentos del sistema ptolemaico (Saliba, 2007).

Atelier Velázquez

Al-Battānī (hacia 858–929), que trabajó en Raqqa, en la actual Siria, compuso un tratado astronómico con tablas, el *Zīj al-Ṣābiʾ*, basado en observaciones propias de gran precisión. Determinó la longitud del año trópico en 365 días, 5 horas, 46 minutos y 24 segundos —unos dos minutos menos que el valor real— y midió la oblicuidad de la eclíptica y el movimiento del apogeo solar. Traducido al latín en el siglo XII, su obra fue citada repetidamente por Copérnico (Swerdlow y Neugebauer, 1984).

Ibn al-Haytham (hacia 965–1040), conocido en Europa como Alhacén, escribió en El Cairo el *Kitāb al-Manāẓir* (*Libro de óptica*), que sustituyó la teoría antigua de los rayos visuales emitidos por el ojo por una teoría de la intromisión, según la cual la visión resulta de la luz que, procedente de cada punto del objeto, entra en el ojo. Su método combinaba geometría y experimentación sistemática con cámaras oscuras, espejos y lentes. Traducido al latín como *De aspectibus* o *Perspectiva*, influyó en Roger Bacon, en Witelo, en la teoría de la perspectiva de los pintores del Renacimiento y en Kepler (Smith, 2001). En sus *Dudas sobre Ptolomeo* argumentó que el ecuante era físicamente imposible, porque ningún cuerpo puede moverse uniformemente respecto de un punto que no es su centro.

Atelier Velázquez

Al-Bīrūnī (973–hacia 1050), polímata de Corasmia, discutió si la Tierra rota y concluyó que la cuestión no podía decidirse con los datos astronómicos disponibles, porque ambas hipótesis producen las mismas apariencias. Ideó un método para medir el radio terrestre a partir del ángulo de depresión del horizonte observado desde la cima de una montaña de altura conocida, y escribió un estudio monumental sobre la India que incluye una exposición crítica de su astronomía.

Naṣīr al-Dīn al-Ṭūsī (1201–1274) dirigió el observatorio de Maragha, en el noroeste de Irán, fundado en 1259 bajo el patrocinio del gobernante mongol Hülegü. Maragha reunió astrónomos de todo el mundo islámico, una biblioteca considerable e instrumentos de gran tamaño, y produjo las *Tablas iljánicas* (1272). En su *Memoria sobre astronomía* (*al-Tadhkira*, 1261), al-Ṭūsī presentó un dispositivo que permitía eliminar el ecuante: el **par de Ṭūsī** (Ragep, 1993).

El par de Ṭūsī es una construcción de dos círculos. Un círculo de radio r rueda sin deslizar por el interior de otro de radio $2r$. Un punto del círculo pequeño describe entonces una línea recta: oscila a lo largo de un diámetro del círculo grande. Puede verificarse con vectores. Si el centro C del círculo pequeño gira alrededor del centro O del grande con ángulo θ, su posición es

$\overrightarrow{OC} = r(\cos\theta, \sin\theta)$. Al rodar sin deslizar, el punto P gira respecto de C con ángulo $-\theta$ medido en el sistema fijo, de modo que $\overrightarrow{CP} = r(\cos\theta, -\sin\theta)$. La suma es

$$\overrightarrow{OP} = \overrightarrow{OC} + \overrightarrow{CP} = (2r\cos\theta,\ 0),$$

un movimiento rectilíneo armónico producido por dos movimientos circulares uniformes. El dispositivo permitía generar variaciones de distancia y velocidad sin abandonar el principio de uniformidad circular.

Ibn al-Shāṭir (1304–1375), encargado de la medida del tiempo en la gran mezquita de Damasco, construyó modelos planetarios y lunares sin ecuante, utilizando epiciclos adicionales. Su modelo lunar corregía un defecto grave del de Ptolomeo, que hacía variar la distancia de la Luna casi al doble entre sus extremos, lo que debería haber producido variaciones de su tamaño aparente que no se observan. En 1957 se mostró que los modelos de Ibn al-Shāṭir para la Luna, y después los de otros planetas, son matemáticamente equivalentes a los que Copérnico utilizó dos siglos más tarde (Roberts, 1957; Kennedy y Roberts, 1959).

Al-Kāshī (hacia 1380–1429) y **Ulugh Beg** (1394–1449) trabajaron en Samarcanda, donde Ulugh Beg, nieto de Tamerlán y gobernante de la ciudad, construyó hacia 1420 un observatorio cuyo instrumento principal era un sextante meridiano de unos cuarenta metros de radio excavado en la roca. Al-Kāshī calculó en 1424 el valor de 2π con dieciséis cifras decimales correctas mediante polígonos inscritos y circunscritos de 3×2^{28} lados, y expuso sistemáticamente las fracciones decimales. Las *Tablas del sultán* (*Zīj-i Sulṭānī*) de Ulugh Beg incluían un catálogo de más de mil estrellas, el primero independiente de Ptolomeo desde la Antigüedad, y una longitud del año de 365 días, 5 horas, 49 minutos y 15 segundos, con un error de unos 25 segundos.

Atelier Velázquez

6.3 Astronomía china

Guo Shoujing (1231–1316) dirigió, con Wang Xun y otros, la reforma calendárica de la dinastía Yuan. Construyó instrumentos de bronce de gran precisión, entre ellos una armilla simplificada (*jianyi*), y un gnomon de cuarenta *chi*, unos doce metros, en Gaocheng, cerca de la actual Dengfeng, cinco veces más alto que los tradicionales, con un dispositivo de cámara oscura que permitía medir con nitidez la sombra. El calendario resultante, el *Shoushi li* (1281), adoptó para el año trópico un valor de 365.2425 días, idéntico al que el calendario gregoriano adoptaría tres siglos después (Sivin, 2009). El caso muestra que la precisión observacional y la sofisticación numérica

no fueron patrimonio de una sola tradición, y que tampoco bastaban para producir una física celeste: la astronomía china, centrada en el calendario, no se planteó la pregunta por la estructura física de los movimientos planetarios en los términos en que lo hicieron la tradición griega e islámica.

La importancia de esta tradición se aprecia mejor al examinar sus procedimientos de observación y cálculo. La reforma calendárica dirigida por Guo Shoujing y sus colaboradores combinó mediciones de sombras, observaciones solares y lunares, trabajos efectuados en emplazamientos diferentes y métodos de interpolación para mejorar las predicciones. El calendario Shoushi adoptó un año trópico de 365,2425 días, valor que la astronomía china ya había empleado anteriormente y que coincide numéricamente con la duración media del año gregoriano. Esa coincidencia no supone identidad de fundamentos ni transmisión entre ambas reformas. La tradición china también produjo una ingeniería astronómica singular: en la época Song, Su Song y Han Gong-Lian dirigieron la construcción de una torre astronómica movida por agua que integraba una esfera armilar, un globo celeste y dispositivos para indicar el tiempo; su desarrollo se documentó en un tratado publicado a finales del siglo XI (Yan y Lin, 2002). Estos casos muestran que la precisión en el registro de fenómenos, la elaboración de algoritmos y la construcción de instrumentos podían alcanzar gran sofisticación sin depender de una dinámica gravitatoria semejante a la de Newton.

Atelier Velázquez

6.4 Buridan, Oresme y la cuantificación del movimiento

En la Universidad de París del siglo XIV, **Jean Buridan** (hacia 1301–hacia 1360) desarrolló la teoría del *impetus*. Un proyectil sigue moviéndose después de abandonar la mano porque el lanzador le ha impreso una cualidad motriz, proporcional a la cantidad de materia y a la velocidad, que se conservaría indefinidamente si no fuera disminuida por la resistencia del aire y la tendencia del grave hacia abajo. Buridan sugirió que Dios podría haber impreso a las esferas celestes un ímpetu que, en ausencia de resistencia, las mantiene girando sin necesidad de inteligencias motrices. La teoría no es la ley de inercia —el ímpetu es una causa interna del movimiento, no un estado que no requiere causa—, pero cuantifica la persistencia del movimiento.

Nicole Oresme (hacia 1320–1382), obispo de Lisieux, representó gráficamente la «intensidad» de una cualidad que varía a lo largo de un sujeto o del tiempo: la velocidad de un movimiento puede representarse por la altura de una figura cuya base es el tiempo, de modo que el área de la figura corresponde a la distancia recorrida. Con este método demostró geométricamen-

te la regla que los calculadores de Oxford habían formulado: un cuerpo uniformemente acelerado recorre en un tiempo dado la misma distancia que recorrería moviéndose uniformemente con la velocidad media,

$$d = \frac{v_0 + v_f}{2}\, t.$$

En su *Libro del cielo y del mundo* (1377), Oresme examinó los argumentos contra la rotación diaria de la Tierra y mostró que ninguno era concluyente, aunque terminó aceptando la Tierra inmóvil por razones de fe y de sentido común (Clagett, 1959). Ni Buridan ni Oresme aplicaron sus resultados a la caída real de los cuerpos; esa conexión la establecería Galileo.

6.5 Copérnico

Nicolás Copérnico (1473–1543), canónigo de Frombork, en Varmia, formuló primero su sistema en un breve manuscrito, el *Commentariolus* (hacia 1514), y lo desarrolló en *De revolutionibus orbium coelestium*, impreso en Núremberg en 1543, el año de su muerte. El libro iba precedido por un prefacio anónimo, escrito por el teólogo luterano Andreas Osiander, que presentaba el sistema como una hipótesis de cálculo sin pretensión de verdad, contra la convicción del propio Copérnico.

Atelier Velázquez

El problema que Copérnico recibió no era de precisión predictiva: las tablas basadas en Ptolomeo funcionaban razonablemente. Era un problema de coherencia: el ecuante violaba la uniformidad circular, y el sistema carecía de una estructura que fijara el orden y las distancias de los planetas. Su contribución fue doble. En primer lugar, al colocar el Sol en el centro y hacer girar la Tierra, explicó las retrogradaciones como un efecto de perspectiva: cuando la Tierra adelanta a un planeta exterior, este parece retroceder. En segundo lugar, el sistema heliocéntrico determina las distancias relativas de los planetas al Sol a partir de observaciones: los valores de Copérnico, en unidades de la distancia Tierra–Sol, eran 0.38 para Mercurio, 0.72 para Venus, 1.52 para Marte, 5.22 para Júpiter y 9.17 para Saturno, muy cercanos a los actuales (Kuhn, 1957). Ptolomeo no podía obtener esos valores porque en su sistema el tamaño de cada deferente era arbitrario.

Para eliminar el ecuante, Copérnico utilizó dispositivos equivalentes al par de Ṭūsī, que describe en el libro III de *De revolutionibus*, y modelos lunares equivalentes a los de Ibn al-Shāṭir. Su sistema seguía usando epiciclos, y sus predicciones no eran claramente mejores que las pto-

lemaicas. Las *Tablas prusianas* (1551), calculadas por Erasmus Reinhold con los parámetros copernicanos, no superaron de manera decisiva a las anteriores.

6.6 Transmisión comprobada, similitud matemática e hipótesis historiográfica

La relación entre la astronomía islámica y Copérnico exige distinguir tres tipos de afirmación. Hay **transmisión comprobada** cuando existe evidencia documental de que un texto o un resultado llegó de un autor a otro: Copérnico cita por su nombre a al-Battānī y a al-Biṭrūjī; la óptica de Ibn al-Haytham circuló en latín desde el siglo XIII. Hay **similitud matemática** cuando dos modelos son equivalentes, como ocurre con los de Ibn al-Shāṭir y Copérnico. Y hay **hipótesis historiográfica** cuando se propone una vía de transmisión plausible pero no documentada.

Para el par de Ṭūsī, existe un manuscrito griego bizantino de hacia 1300 que contiene un diagrama del dispositivo, y es posible que llegara a Italia, donde Copérnico estudió entre 1496 y 1503 (Swerdlow y Neugebauer, 1984). Para los modelos de Ibn al-Shāṭir no se ha encontrado ninguna vía documental. Historiadores como George Saliba y F. Jamil Ragep sostienen que la acumulación de coincidencias hace muy improbable una invención independiente (Saliba, 2007; Ragep, 2007); otros consideran que Copérnico pudo llegar a los mismos dispositivos por su cuenta, puesto que resolvían el mismo problema con las mismas herramientas. La cuestión permanece abierta, y es un buen ejemplo de un problema historiográfico delimitado: se sabe qué evidencia lo resolvería —un manuscrito en el entorno de Copérnico que contenga los modelos— y se sabe que no se ha encontrado todavía.

Atelier Velázquez

Tabla 3. Contribuciones astronómicas y matemáticas entre Ptolomeo y Copérnico

Autor	Época y lugar	Problema recibido	Contribución principal	Vía hacia Europa
Āryabhaṭa	499, Kusumapura	Cálculo de posiciones; eclipses	Rotación terrestre; tabla de senos; $\pi \approx 3.1416$	Indirecta, vía tradición árabe
Brahmagupta	628, Bhillamāla	Aritmética astronómica	Reglas del cero y los negativos	*Zīj al-Sindhind* (siglo VIII)
Al-Battānī	c. 900, Raqqa	Parámetros ptolemaicos desactualizados	Año trópico, oblicuidad, apogeo solar	Traducción latina; citado por Copérnico
Ibn al-Haytham	c. 1020, El Cairo	Teoría de la visión; coherencia física de Ptolomeo	Óptica experimental; crítica del ecuante	*De aspectibus* (traducción latina)
Al-Bīrūnī	c. 1030, Gazni	Rotación terrestre; geodesia	Radio terrestre por depresión del horizonte	Escasa difusión latina
Al-Ṭūsī	1261, Maragha	Ecuante	Par de Ṭūsī	Posible vía bizantina; hipótesis

Autor	Época y lugar	Problema recibido	Contribución principal	Vía hacia Europa
Ibn al-Shāṭir	c. 1350, Damasco	Ecuante; distancia lunar	Modelos sin ecuante	Equivalencia matemática; vía no documentada
Guo Shoujing	1281, Dadu	Reforma calendárica	Año de 365.2425 días; gnomon de 12 m	Sin transmisión documentada
Al-Kāshī y Ulugh Beg	c. 1420–1437, Samarcanda	Precisión de tablas	2π con 16 decimales; catálogo estelar	Conocimiento tardío en Europa (siglo XVII)
Buridan y Oresme	Siglo XIV, París	Movimiento de proyectiles; rotación terrestre	Ímpetu; representación gráfica; velocidad media	Tradición universitaria latina

Nota. Elaboración propia a partir de Plofker (2009), Saliba (2007), Ragep (1993, 2007), Sivin (2009), Clagett (1959) y Swerdlow y Neugebauer (1984).

6.7 Tycho Brahe

Tycho Brahe (1546–1601), noble danés, transformó la astronomía observacional. En 1572 observó una estrella nueva en Casiopea y mostró que no tenía paralaje diaria apreciable, de modo que estaba más allá de la Luna: el cielo aristotélico, supuestamente inmutable, cambiaba. En 1577 hizo lo mismo con un cometa, que además atravesaba las regiones donde debían estar las esferas sólidas de los planetas. En la isla de Hven, con financiación de la corona danesa, construyó los observatorios de Uraniborg y Stjerneborg y dotó a sus instrumentos —cuadrantes murales, sextantes, armillas— de escalas finamente graduadas y procedimientos de corrección de errores. Sus observaciones alcanzaron una precisión de alrededor de un minuto de arco, unas diez veces mejor que la de sus predecesores (Thoren, 1990).

Atelier Velázquez

Tycho no aceptó el sistema copernicano. Uno de sus argumentos era la paralaje: con su precisión, debería haber detectado paralaje estelar si la Tierra se moviera, salvo que las estrellas estuvieran a distancias que le parecían absurdas. Propuso un sistema geoheliocéntrico en el que los planetas giran alrededor del Sol y el Sol alrededor de la Tierra inmóvil, geométricamente equivalente al copernicano en cuanto a posiciones relativas.

6.8 Kepler

Johannes Kepler (1571–1630) comenzó su carrera con una especulación: en el *Mysterium cosmographicum* (1596) explicó el número y las distancias de los planetas encajando los cinco poliedros regulares entre sus esferas. En 1600 se incorporó como ayudante de Tycho en Praga y, a su muerte, heredó sus observaciones. Se impuso la tarea de determinar la órbita de Marte, el planeta con mayor desviación respecto de los modelos circulares.

Tras años de cálculos, obtuvo un modelo circular con un ecuante ajustado que reproducía las longitudes de Marte en las oposiciones con un error de solo dos minutos de arco, pero que discrepaba en ocho minutos en otras posiciones. Ptolomeo o Copérnico habrían atribuido esa diferencia al error de observación; Kepler sabía que las observaciones de Tycho no admitían un error de ese tamaño. Escribió que esos ocho minutos abrían el camino a la reforma completa de la astronomía (Kepler, 1609/1992). Abandonó el círculo y llegó, en la *Astronomia nova* (1609), a sus dos primeras leyes; la tercera apareció en *Harmonices mundi* (1619):

1. Cada planeta describe una elipse con el Sol en uno de sus focos.
2. La línea que une el Sol con el planeta barre áreas iguales en tiempos iguales.
3. Los cuadrados de los periodos son proporcionales a los cubos de los semiejes mayores: $T^2 \propto a^3$.

Ejemplo. Si se mide el periodo en años y el semieje mayor en unidades astronómicas, para cualquier planeta del sistema solar $T^2 = a^3$. Marte tiene un semieje mayor de 1.524 UA; su periodo es $T = 1.524^{3/2} \approx 1.88$ años, que es el valor observado.

Atelier Velázquez

Las leyes de Kepler son una identidad sintética entre datos observacionales de procedencia muy distinta —posiciones de seis planetas registradas durante décadas— y una forma geométrica única. La segunda ley, además, introduce una relación entre geometría y tiempo: la velocidad del planeta varía de modo que el área barrida es proporcional al tiempo transcurrido. Kepler buscó una causa física de esas leyes en una fuerza emanada del Sol, que imaginó de naturaleza magnética y que disminuía con la distancia. No dio con la ley correcta, pero fue el primero en exigir que la astronomía fuera física celeste, como anunciaba el subtítulo de la *Astronomia nova*. Las *Tablas rudolfinas* (1627), basadas en sus leyes, mejoraron la precisión de las predicciones en un orden de magnitud y resultaron decisivas para la aceptación del heliocentrismo kepleriano.

6.9 Galileo y el telescopio

Galileo Galilei (1564–1642), profesor en Padua, supo en 1609 de la existencia de un anteojo construido en los Países Bajos y fabricó sus propios instrumentos, de hasta veinte aumentos. En marzo de 1610 publicó el *Sidereus nuncius*, donde describía montañas y valles en la Luna, cuya altura estimó midiendo las sombras; un número inmenso de estrellas invisibles a simple vista, que resolvían la Vía Láctea; y cuatro «planetas» que giraban alrededor de Júpiter (Galilei,

1610/2007). A finales de 1610 observó que Venus presenta un ciclo completo de fases, incluida una fase casi llena con un diámetro aparente pequeño, lo que es incompatible con el sistema ptolemaico, en el que Venus permanece siempre entre la Tierra y el Sol, pero compatible tanto con el copernicano como con el de Tycho.

El telescopio planteó un problema gnoseológico inédito: ¿por qué fiarse de un instrumento que muestra lo que el ojo no ve? Algunos contemporáneos se negaron a mirar o sospecharon que las imágenes eran artefactos de las lentes. La respuesta no podía venir de una teoría óptica completa, que Galileo no tenía; vino de la convergencia de operaciones: el telescopio mostraba correctamente objetos terrestres lejanos que podían verificarse acercándose a ellos, distintos observadores con distintos instrumentos veían los mismos satélites de Júpiter en las mismas posiciones, y esas posiciones obedecían una regularidad periódica que permitía predecirlas. La fiabilidad de un instrumento se construye mediante identidades entre cursos operatorios independientes. Kepler publicó en 1611 la *Dioptrice*, la primera teoría del telescopio.

Galileo defendió el copernicanismo en el *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo* (1632) y fue condenado por la Inquisición en 1633. Su contribución más duradera a la física, la ciencia del movimiento expuesta en los *Discursos* de 1638, se examinará en el capítulo 8.

Atelier Velázquez

Capítulo 7. Newton y la unificación mecánica

7.1 El problema recibido

En la década de 1680 la situación era la siguiente. Las leyes de Kepler describían con precisión los movimientos planetarios, pero no tenían una causa aceptada. Galileo había establecido las leyes de la caída y del movimiento de los proyectiles en la Tierra. Descartes había formulado un principio de inercia rectilínea y explicaba los movimientos celestes mediante torbellinos de materia sutil, sin obtener de ellos ninguna ley cuantitativa. Varios miembros de la Royal Society de Londres —Robert Hooke, Christopher Wren, Edmond Halley— sospechaban que una fuerza atractiva hacia el Sol que disminuyera con el cuadrado de la distancia podía explicar las órbitas, pero ninguno sabía demostrarlo.

En agosto de 1684, Halley visitó a Isaac Newton (1642–1727) en Cambridge y le preguntó qué curva describiría un planeta atraído por el Sol con una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Newton respondió que una elipse, y que lo había calculado. Meses después le envió un breve tratado, *De motu corporum in gyrum*, que en tres años se convirtió en los *Philosophiae naturalis principia mathematica* (1687).

Atelier Velázquez

7.2 Cálculo: Newton y Leibniz

Newton había desarrollado entre 1664 y 1666 su método de fluxiones: una cantidad que fluye con el tiempo tiene una velocidad de cambio, su fluxión. Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) desarrolló de manera independiente, a partir de 1675, un cálculo diferencial e integral con una notación —dx, $\int$ — que se demostró más fecunda, y lo publicó en 1684 en las *Acta Eruditorum*. La disputa de prioridad que siguió fue amarga; el informe de la Royal Society de 1712 que dio la razón a Newton fue redactado en buena parte por el propio Newton, presidente de la sociedad. Los historiadores coinciden hoy en que ambos inventaron el cálculo independientemente (Hall, 1980). Los *Principia* están escritos casi enteramente en lenguaje geométrico, aunque sus demostraciones utilizan razonamientos sobre razones últimas de cantidades evanescentes que equivalen a límites.

La **derivada** de una función $x(t)$ es el límite de la razón entre el cambio de x y el cambio de t cuando este tiende a cero:

$$\frac{dx}{dt} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t}.$$

Si $x(t)$ es la posición de un cuerpo, su derivada es la velocidad v, y la derivada de la velocidad es la aceleración a. La **integral** realiza la operación inversa: dada la velocidad en cada instante, reconstruye la posición. Estas dos operaciones, cuyo carácter inverso es el contenido del teorema fundamental del cálculo, permiten pasar de relaciones entre magnitudes instantáneas a trayectorias completas. El capítulo 8 vuelve sobre ellas.

7.3 Las leyes del movimiento

Newton enunció tres leyes. La primera, de inercia: todo cuerpo persevera en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme mientras no sea obligado a cambiarlo por fuerzas impresas. La segunda: el cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa y ocurre según la línea recta en que se imprime. En notación moderna,

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\,\vec{a} \quad \text{(para masa constante)},$$

donde $\vec{F}$ es la fuerza neta en newtons, $\vec{p} = m\vec{v}$ el momento lineal, m la masa en kilogramos y $\vec{a}$ la aceleración en metros por segundo al cuadrado. La tercera: a toda acción se opone una reacción igual y contraria.

Atelier Velázquez

La palabra **inercia** procede del latín *iners*, «sin arte», «perezoso», y Kepler la había usado para designar la resistencia de los cuerpos al movimiento; Newton la convirtió en la tendencia a perseverar en cualquier estado de movimiento uniforme. **Gravedad** procede de *gravitas*, «pesadez», cualidad de los cuerpos graves en la física aristotélica; Newton la transformó en el nombre de una interacción universal entre todos los cuerpos.

La segunda ley no es una definición de fuerza, aunque así se haya presentado a veces. Adquiere contenido empírico cuando se especifica una ley de fuerza independiente —la gravitación, la ley de Hooke de los resortes, la fuerza de Lorentz— y se comprueba que las aceleraciones resultantes coinciden con las observadas.

7.4 Gravitación universal

La ley de gravitación establece que dos cuerpos de masas m_1 y m_2 separados por una distancia r se atraen con una fuerza

$$F = G\,\frac{m_1 m_2}{r^2},$$

dirigida a lo largo de la línea que los une, donde $G = 6.674 \times 10^{-11}\ \mathrm{N\,m^2\,kg^{-2}}$ es la constante de gravitación. Newton no conoció el valor de G, que Henry Cavendish obtuvo indirectamente en 1798 con una balanza de torsión al medir la densidad media de la Tierra (Cavendish, 1798). En los *Principia*, la ley se expresa como proporcionalidad.

Newton demostró que de esta ley se siguen las tres leyes de Kepler, con una corrección: en la tercera ley interviene la suma de las masas del Sol y el planeta, de modo que $T^2 = 4\pi^2 a^3/[G(M+m)]$. Demostró también que una esfera homogénea atrae a los cuerpos exteriores como si toda su masa estuviera concentrada en su centro, un teorema sin el cual la ley no podría aplicarse a planetas extensos.

Atelier Velázquez

7.5 La prueba de la Luna

El argumento más célebre de los *Principia* (libro III, proposición IV) es la identificación de la gravedad terrestre con la fuerza que retiene a la Luna. Se puede reconstruir con números modernos.

Primer curso operatorio: astronomía. La Luna gira alrededor de la Tierra a una distancia media $r = 3.844 \times 10^8$ m con un periodo sideral $T = 27.32$ días $= 2.360 \times 10^6$ s. Su aceleración centrípeta es

$$a_L = \frac{4\pi^2 r}{T^2} = \frac{4\pi^2 \times 3.844 \times 10^8}{(2.360 \times 10^6)^2} \approx 2.72 \times 10^{-3}\ \mathrm{m\,s^{-2}}.$$

Segundo curso operatorio: mecánica terrestre. En la superficie, la aceleración de caída es $g = 9.81\ \mathrm{m\,s^{-2}}$, medida con péndulos y caídas. Si la gravedad disminuye con el cuadrado de la distancia al centro de la Tierra y la Luna está a unos 60 radios terrestres, la aceleración a esa distancia debería ser

$$\frac{g}{60^2} = \frac{9.81}{3\,600} \approx 2.72 \times 10^{-3}\ \mathrm{m\,s^{-2}}.$$

Las dos cifras coinciden. Newton, con los datos de su tiempo, obtuvo un acuerdo similar. La coincidencia no es trivial: los dos cursos operatorios utilizan instrumentos, datos y procedimientos distintos —observaciones astronómicas en un caso, péndulos en otro—, y nada en la definición de los términos obligaba a que coincidieran. Esta es una identidad sintética en el sentido de la teoría del cierre categorial, y es por eso que la gravitación newtoniana no es una hipótesis entre otras: enlaza mediante una relación invariante dos dominios que la física aristotélica había declarado ontológicamente distintos, el sublunar y el celeste.

7.6 Éxitos

La mecánica newtoniana explicó en una sola teoría las mareas, como efecto de la diferencia de atracción de la Luna y el Sol sobre distintas partes de la Tierra; la precesión de los equinoccios, como efecto del par que el Sol y la Luna ejercen sobre el abultamiento ecuatorial terrestre; y el achatamiento de la Tierra en los polos, que Newton predijo. Las expediciones francesas a Laponia (1736–1737) y a Perú (1735–1744), esta última con participación de los españoles Jorge Juan y Antonio de Ulloa, confirmaron el achatamiento frente a la hipótesis contraria de los Cassini.

Atelier Velázquez

Halley aplicó la teoría a los cometas y predijo el regreso, hacia 1758, del que hoy lleva su nombre. Alexis Clairaut calculó las perturbaciones de Júpiter y Saturno y predijo el paso por el perihelio para mediados de abril de 1759, con un margen de un mes; el cometa pasó el 13 de marzo. En 1846, Urbain Le Verrier y, de manera independiente, John Couch Adams calcularon la posición de un planeta desconocido a partir de las perturbaciones de la órbita de Urano; Johann Galle lo encontró el 23 de septiembre de 1846 a menos de un grado de la posición predicha por Le Verrier. Neptuno fue el primer cuerpo celeste descubierto por cálculo antes que por observación.

7.7 Espacio absoluto y tiempo absoluto

En un escolio a las definiciones iniciales de los *Principia*, Newton distingue el tiempo, el espacio, el lugar y el movimiento absolutos de los relativos. El tiempo absoluto, verdadero y matemático, fluye en sí mismo y por su propia naturaleza uniformemente, sin relación con nada externo; el tiempo relativo, aparente y vulgar, es una medida sensible y externa de la duración mediante el movimiento, como la hora, el día, el mes o el año (Newton, 1687/1999). Newton reconoce que quizá no exista ningún movimiento perfectamente uniforme con el que medir exactamente el

tiempo absoluto; los astrónomos corrigen el tiempo solar aparente mediante la ecuación del tiempo precisamente porque los días solares no son iguales.

Para defender el espacio absoluto, Newton propuso el experimento del cubo. Un cubo con agua cuelga de una cuerda retorcida. Al soltarlo, el cubo empieza a girar mientras el agua permanece en reposo con su superficie plana; poco a poco el agua adquiere la rotación del cubo y su superficie se vuelve cóncava. La concavidad no depende del movimiento relativo entre el agua y el cubo, que es máximo al principio y nulo al final, sino de la rotación del agua respecto de algo, y ese algo sería el espacio absoluto.

Leibniz respondió, en su correspondencia de 1715–1716 con Samuel Clarke, portavoz de Newton, que el espacio es solo el orden de las cosas que coexisten y el tiempo el orden de las cosas que se suceden. Si el espacio fuera una entidad absoluta, Dios habría tenido que elegir dónde colocar el universo, y no habría razón suficiente para elegir un lugar en vez de otro, puesto que todos son indiscernibles (Leibniz y Clarke, 1717/2000). La controversia no se resolvió en su época. Ernst Mach, en 1883, propuso que la concavidad del agua se debía a la rotación respecto de las masas lejanas del universo y no respecto del espacio absoluto (Mach, 1883/1919). Einstein tomó la idea de Mach como inspiración para la relatividad general, aunque la teoría resultante no la incorpora plenamente. El problema del cubo reaparecerá en los capítulos 15 y 17.

Atelier Velázquez

7.8 Acción a distancia

La ley de gravitación implicaba que la Tierra atrae a la Luna instantáneamente a través del espacio vacío, sin intermediario. Newton mismo consideraba inconcebible que la materia inanimada actuara sobre otra materia sin contacto, y así lo expresó en una carta a Richard Bentley de 1693, donde afirmaba que la gravedad debe ser causada por un agente que actúe según ciertas leyes, dejando a sus lectores la cuestión de si ese agente es material o inmaterial (Newton, 1693/1961). En el escolio general añadido a la segunda edición de los *Principia* (1713) declaró que no había podido deducir de los fenómenos la causa de las propiedades de la gravedad y que no fingía hipótesis.

La fórmula *hypotheses non fingo* expresa una actitud gnoseológica precisa: la ley está justificada por las identidades que establece entre fenómenos, aunque no se conozca su mecanismo. Los cartesianos lo acusaron de reintroducir cualidades ocultas. La acción a distancia instantánea

sería sustituida por el concepto de campo en el siglo XIX y por la curvatura del espaciotiempo en el XX.

7.9 Navegación

La relación entre la mecánica newtoniana y la navegación muestra cómo una teoría se convierte en técnica. Para determinar la longitud en el mar, un navegante necesita conocer la diferencia entre la hora local, que obtiene observando el Sol, y la hora de un meridiano de referencia en el mismo instante: cada hora de diferencia corresponde a quince grados de longitud. El Parlamento británico ofreció en 1714 un premio a quien resolviera el problema.

Hubo dos soluciones rivales. La astronómica, el método de las distancias lunares, usaba la Luna como reloj celeste: medida su distancia angular a ciertas estrellas, unas tablas permitían saber qué hora era en Greenwich. Exigía una teoría lunar de gran precisión, que la mecánica newtoniana proporcionó a través de las tablas de Tobias Mayer (1755). La mecánica, el cronómetro marino, transportaba directamente la hora de referencia. John Harrison construyó una serie de cronómetros; el cuarto, H4, en un viaje a Jamaica en 1761–1762, acumuló un error de unos cinco segundos tras más de ochenta días (Andrewes, 1996). Las dos soluciones convivieron hasta el siglo XIX. Ambas dependían de la medida precisa del tiempo, y la segunda anticipa la lógica del GPS: conocer la posición es, en el fondo, comparar relojes.

Atelier Velázquez

7.10 Límites y vigencia

La mecánica newtoniana tiene límites precisos. Falla para velocidades comparables a la de la luz, para campos gravitatorios intensos y para sistemas atómicos. Incluso en el sistema solar deja un residuo: el perihelio de Mercurio avanza unos 43 segundos de arco por siglo más de lo que predicen las perturbaciones newtonianas de los demás planetas, anomalía señalada por Le Verrier en 1859 y explicada por la relatividad general en 1915.

Sin embargo, las ecuaciones newtonianas siguen siendo útiles, y la razón puede cuantificarse. Las correcciones relativistas a la órbita terrestre son del orden de v^2/c^2 y de $GM_\odot/(rc^2)$, ambas en torno a 10^{-8}. Para lanzar un satélite, calcular la trayectoria de una sonda a Júpiter o diseñar un puente, la teoría newtoniana es exacta dentro de las tolerancias requeridas, y las efemérides planetarias modernas utilizan las ecuaciones newtonianas con correcciones relativistas

añadidas como términos pequeños. Una teoría que ha sido superada en su fundamento puede seguir siendo verdadera en su dominio, en el sentido de que las identidades que estableció —la prueba de la Luna, las leyes de Kepler como consecuencias de la gravitación— siguen valiendo dentro de las precisiones correspondientes. La relatividad general no las refuta; las incluye como límite.

Newton no fue el héroe solitario de la leyenda. Dedicó más tiempo a la alquimia y a la interpretación de las profecías bíblicas que a la física; trató con dureza a sus rivales; se apoyó en datos de Flamsteed, en problemas planteados por Hooke y Halley y en una tradición matemática de siglos. Su obra muestra, precisamente por eso, cómo una síntesis científica se produce dentro de una red de operaciones, instrumentos y problemas compartidos.

Atelier Velázquez

Parte III. Medir el cambio y comprender el tiempo

Atelier Velázquez

Capítulo 8. Cálculo, movimiento y relojes

8.1 Galileo y la caída de los cuerpos

En la tercera jornada de los *Discursos y demostraciones matemáticas en torno a dos nuevas ciencias* (1638), Galileo expone una ciencia del movimiento local fundada en una definición: el movimiento uniformemente acelerado es aquel en que la velocidad recibe incrementos iguales en tiempos iguales (Galilei, 1638/1976). De la definición, mediante un razonamiento geométrico equivalente al teorema de la velocidad media de Oresme, deduce que las distancias recorridas desde el reposo crecen como los cuadrados de los tiempos, y que las distancias recorridas en intervalos sucesivos iguales están entre sí como los números impares 1, 3, 5, 7…

Galileo afirma haber comprobado la ley haciendo rodar una bola de bronce por un canal de unos doce codos de largo, inclinado para retardar el movimiento, y midiendo el tiempo mediante el peso del agua que escapaba por un tubo fino de un recipiente durante el descenso. Durante un tiempo se dudó de que hubiera realizado esos experimentos; el estudio de sus manuscritos, especialmente del folio 116v, mostró que registró medidas de distancias y tiempos que concuerdan con la ley (Drake, 1973). La operación clave fue diluir la gravedad: en un plano inclinado de ángulo α la aceleración es $g \sin\alpha$, y para ángulos pequeños el movimiento es lo bastante lento como para medirse con un reloj de agua.

Atelier Velázquez

En notación moderna, la caída libre desde el reposo obedece

$$d = \tfrac{1}{2}\, g\, t^2, \qquad v = g\, t,$$

con $g \approx 9.81\ \mathrm{m\,s^{-2}}$ en la superficie terrestre. *Ejemplo.* Un objeto que cae desde 20 m en ausencia de aire tarda $t = \sqrt{2d/g} = \sqrt{40/9.81} \approx 2.02$ s y llega con una velocidad de $9.81 \times 2.02 \approx 19.8\ \mathrm{m\,s^{-1}}$, unos 71 km/h. La masa no aparece en ninguna de estas fórmulas: todos los cuerpos caen con la misma aceleración en ausencia de resistencia. Esta universalidad, que en la mecánica newtoniana expresa la igualdad entre la masa inercial y la gravitatoria, se convertirá en el punto de partida de la relatividad general.

8.2 Derivadas, integrales y ecuaciones diferenciales

El cálculo convierte la ley de Galileo en un caso de un procedimiento general. Si la aceleración es constante, $a = -g$ (tomando el eje vertical hacia arriba), una primera integración da la velocidad y una segunda la posición:

$$\frac{dv}{dt} = -g \;\Rightarrow\; v(t) = v_0 - g\,t, \qquad \frac{dx}{dt} = v(t) \;\Rightarrow\; x(t) = x_0 + v_0\,t - 1/2\,g\,t^2.$$

Las constantes x_0 y v_0, posición y velocidad iniciales, no las determina la ley: deben añadirse como datos. Aquí aparece una estructura que será decisiva para toda la física posterior. La segunda ley de Newton es una **ecuación diferencial** de segundo orden,

$$m\,\frac{d^2x}{dt^2} = F\left(x, \frac{dx}{dt}, t\right),$$

que relaciona la segunda derivada de la posición con la posición, la velocidad y el tiempo. Sus soluciones no quedan fijadas por la ecuación sola, sino por la ecuación más las condiciones iniciales. Bajo condiciones matemáticas razonables sobre F —que sea continua y no varíe demasiado bruscamente—, el teorema de existencia y unicidad de Picard y Lindelöf garantiza que para cada estado inicial existe una única solución durante un intervalo de tiempo. Las leyes de la física no dicen qué ocurre; dicen qué ocurre dado lo que ocurría.

Atelier Velázquez

El caso más importante de la física entera es el **oscilador armónico**: una fuerza proporcional al desplazamiento y opuesta a él, $F = -kx$, como la de un resorte ideal. La ecuación $m\ddot{x} = -kx$ tiene por solución

$$x(t) = A\cos(\omega t + \varphi), \qquad \omega = \sqrt{k/m},$$

donde la amplitud A y la fase φ dependen de las condiciones iniciales, pero la frecuencia angular ω y el periodo $T = 2\pi/\omega$ no. Esta independencia es lo que hace del oscilador un reloj. Un péndulo de longitud L que oscila con amplitud pequeña se comporta como un oscilador armónico con $\omega = \sqrt{g/L}$, de modo que su periodo es

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}.$$

Ejemplo. Un péndulo de 0.994 m en un lugar donde $g = 9.81\ \mathrm{m\,s^{-2}}$ tiene un periodo de $2\pi\sqrt{0.994/9.81} \approx 2.000$ s: cada oscilación simple dura un segundo. Es el «péndulo de segundos», que en el siglo XVIII se propuso como patrón de longitud.

8.3 Una breve historia de los relojes

Todo reloj es un sistema que reproduce un proceso periódico o uniforme y un dispositivo que cuenta sus repeticiones. La historia de la medida del tiempo es la historia de la búsqueda de procesos cada vez más regulares y de contadores cada vez más fiables.

Los relojes de sol y los gnómones medían el tiempo por la sombra, con horas desiguales según la estación en muchas culturas antiguas. Las clepsidras medían el tiempo por el flujo del agua; Ctesibio de Alejandría, en el siglo III a. n. e., construyó clepsidras con flotadores y mecanismos de regulación. En 1088, Su Song terminó en Kaifeng una torre astronómica de unos doce metros movida por una rueda hidráulica con un mecanismo de escape que dividía el flujo continuo del agua en pasos discretos (Needham et al., 1960).

Atelier Velázquez

Los relojes mecánicos de pesas con escape de verga y foliot aparecieron en Europa a finales del siglo XIII. Su regulador, un brazo horizontal que oscilaba sin periodo propio, hacía que el error diario fuera del orden de un cuarto de hora. El salto cualitativo se produjo con el péndulo. Galileo había observado la aproximada independencia del periodo respecto de la amplitud; Christiaan Huygens (1629–1695) construyó en 1656 el primer reloj de péndulo y lo describió en *Horologium* (1658). En *Horologium oscillatorium* (1673) demostró que el péndulo circular solo es isócrono para oscilaciones pequeñas, y que la curva estrictamente isócrona —aquella en la que el tiempo de descenso hasta el punto más bajo no depende del punto de partida— es la cicloide. Diseñó guías cicloidales para forzar al hilo a seguir esa curva. En la misma obra obtuvo la expresión de la fuerza centrífuga, proporcional a v^2/r. Los relojes de péndulo redujeron el error a unos diez segundos diarios y después a menos.

Los cronómetros marinos de Harrison, mencionados en el capítulo anterior, resolvieron el problema de transportar un reloj preciso en un barco que se balancea, sin péndulo, mediante volantes compensados por temperatura. En 1927 Warren Marrison y J. W. Horton construyeron en los laboratorios Bell el primer reloj de cuarzo, que aprovechaba la piezoelectricidad: un cristal de cuarzo cortado adecuadamente vibra con una frecuencia muy estable cuando se le aplica un vol-

taje oscilante. Los relojes de cuarzo alcanzaron estabilidades de una parte en 10^9 y revelaron que la rotación de la Tierra no es uniforme.

8.4 Relojes atómicos y el segundo del SI

Los átomos ofrecen un oscilador natural más estable que cualquier artefacto: la frecuencia de la radiación absorbida o emitida en una transición entre dos niveles de energía está fijada por la estructura del átomo y es la misma para todos los átomos de la misma especie. En 1955, Louis Essen y Jack Parry pusieron en funcionamiento en el Laboratorio Nacional de Física del Reino Unido el primer reloj atómico de cesio operativo (Essen y Parry, 1955). En 1967, la XIII Conferencia General de Pesas y Medidas definió el segundo como la duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio-133. Desde la revisión del Sistema Internacional de 2019, la definición se expresa fijando el valor numérico de esa frecuencia, $\Delta\nu_{\mathrm{Cs}}$ (BIPM, 2019).

El cambio de 1967 tuvo una consecuencia filosófica notable. Hasta entonces el segundo se definía astronómicamente, como fracción del día solar medio y, desde 1960, como fracción del año trópico de 1900. Desde 1967 se define por un proceso atómico, y el tiempo astronómico pasó a medirse con relojes atómicos. La Tierra dejó de ser el reloj patrón para convertirse en un reloj imperfecto cuya rotación se frena lentamente y fluctúa. El Tiempo Atómico Internacional (TAI) se calcula a partir de unos cuatrocientos relojes de laboratorios de todo el mundo; el Tiempo Universal Coordinado (UTC), que regula la vida civil, se mantiene cerca de la rotación terrestre mediante segundos intercalares. Entre 1972 y 2016 se añadieron 27. En 2022, la Conferencia General resolvió aumentar la tolerancia entre ambos tiempos a más tardar en 2035, lo que en la práctica suprime los segundos intercalares durante al menos un siglo.

Los relojes ópticos, basados en transiciones atómicas de frecuencias unas cien mil veces mayores que la del cesio, han alcanzado incertidumbres sistemáticas de una parte en 10^{18} (Bothwell et al., 2019; Brewer et al., 2019). Un reloj así, si hubiera funcionado desde el origen del universo, se habría desviado menos de un segundo. La comunidad metrológica prepara una redefinición del segundo basada en transiciones ópticas, para la cual aún deben cumplirse criterios de comparación entre relojes y de continuidad del servicio.

Atelier Velázquez

Tabla 4. Evolución de la exactitud de los relojes

Tipo de reloj	Época	Proceso regulador	Error relativo aproximado	Equivalente
Reloj de sol, clepsidra	Antigüedad	Sombra, flujo de agua	10^{-2}	Un cuarto de hora al día
Reloj mecánico de foliot	Siglo XIV	Oscilación sin periodo propio	10^{-2}	Un cuarto de hora al día
Reloj de péndulo de Huygens	1656	Péndulo	10^{-4}	Diez segundos al día
Cronómetro marino (H4)	1761	Volante compensado	10^{-6}	Cinco segundos en 80 días
Péndulos de precisión (Shortt)	1920s	Péndulo libre	10^{-8}	Un segundo al año
Reloj de cuarzo	1927	Cristal piezoeléctrico	10^{-9}	Una milésima de segundo al día
Reloj de cesio	1955	Transición hiperfina	10^{-10} (hoy 10^{-16})	Un segundo en 300 millones de años (hoy)
Reloj óptico	Siglo XXI	Transición óptica	10^{-18}	Un segundo en la edad del universo

Nota. Elaboración propia. Los órdenes de magnitud son aproximados y se refieren a los mejores instrumentos de cada tipo en su época.

Atelier Velázquez

8.5 Tiempo medido y tiempo propio

Los relojes ópticos son tan precisos que detectan efectos relativistas en el laboratorio. Dos relojes situados a alturas que difieren en un metro marchan a ritmos que difieren en una fracción $gh/c^2 \approx 1.1 \times 10^{-16}$, porque el más alto está en un potencial gravitatorio mayor. En 2010 se midió el efecto con dos relojes de aluminio separados por 33 centímetros de altura (Chou et al., 2010), y en 2022 se detectó la diferencia de ritmo a lo largo de una sola nube de átomos de estroncio de un milímetro de altura (Bothwell et al., 2022).

Estos resultados obligan a reformular la pregunta por lo que mide un reloj. Un reloj no mide un tiempo absoluto que fluye uniformemente en todas partes, como el de Newton, sino el **tiempo propio** a lo largo de su propia trayectoria por el espaciotiempo, que depende de su velocidad y de su posición en el campo gravitatorio. La comparación de relojes distantes exige, además, un procedimiento de sincronización, y ese procedimiento supone convenciones sobre la propagación de señales. Henri Poincaré lo había advertido en 1898, en un artículo sobre la medida del tiempo: la simultaneidad de dos acontecimientos distantes no es un dato inmediato, sino el resultado de una convención elegida por su comodidad (Poincaré, 1898). La relatividad, en los capítulos 14 y 15, transformará esta observación en una teoría física.

Capítulo 9. Lagrange, Hamilton y la arquitectura matemática del movimiento

9.1 De las fuerzas a la acción

La mecánica de Newton se formula en términos de fuerzas y aceleraciones, vectores que deben descomponerse en coordenadas cartesianas. Para sistemas con ligaduras —un péndulo cuya lenteja debe permanecer a distancia fija del punto de suspensión, una cuenta que se desliza por un alambre— esa formulación resulta engorrosa, porque obliga a calcular las fuerzas de ligadura, que no interesan. Durante el siglo XVIII, Leonhard Euler (1707–1783) y Joseph-Louis Lagrange (1736–1813) desarrollaron otra arquitectura.

Pierre-Louis Moreau de Maupertuis propuso en 1744 un principio de mínima acción con motivaciones teológicas: la naturaleza actúa siempre por los caminos más económicos. Euler lo formuló con mayor rigor para el movimiento de una partícula y, con Lagrange, desarrolló el **cálculo de variaciones**, que busca no el valor de una variable que hace extrema una función, sino la función entera que hace extrema una cantidad que depende de ella. El problema de la braquistócrona —la curva de descenso más rápido entre dos puntos—, planteado por Johann Bernoulli en 1696 y resuelto por varios matemáticos (la respuesta es una cicloide), había sido el primer gran ejemplo.

Atelier Velázquez

En la *Mécanique analytique* (1788), Lagrange expuso la mecánica entera sin una sola figura, como él mismo advirtió en el prefacio. El estado de un sistema se describe mediante **coordenadas generalizadas** q_i, tantas como grados de libertad, elegidas de manera que las ligaduras queden incorporadas: para el péndulo basta un ángulo. Se define el **lagrangiano** como la diferencia entre la energía cinética y la potencial,

$$L(q, \dot{q}, t) = T - V,$$

y la **acción** como su integral a lo largo de una trayectoria entre dos instantes,

$$S[q] = \int_{t_1}^{t_2} L\left(q(t), \dot{q}(t), t\right) dt.$$

El principio de Hamilton establece que la trayectoria real es aquella para la cual la acción es estacionaria: pequeñas variaciones de la trayectoria con extremos fijos no cambian S en primer orden, $\delta S = 0$. De esa condición se siguen las **ecuaciones de Euler-Lagrange**:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0.$$

Ejemplo. Para un péndulo de longitud l y masa m, con ángulo θ respecto de la vertical, $T = 1/2\, ml^2\dot{\theta}^2$ y $V = -mgl\cos\theta$, de modo que $L = 1/2\, ml^2\dot{\theta}^2 + mgl\cos\theta$. La ecuación de Euler-Lagrange da $ml^2\ddot{\theta} + mgl\sin\theta = 0$, es decir, $\ddot{\theta} = -(g/l)\sin\theta$, sin haber calculado la tensión del hilo. Para ángulos pequeños, $\sin\theta \approx \theta$ y se recupera el oscilador armónico.

La formulación lagrangiana es equivalente a la newtoniana en su dominio, pero no es una mera reescritura. Hace visibles las simetrías del sistema —si L no depende de una coordenada, la cantidad $\partial L/\,\partial \dot{q}$ asociada se conserva—, se generaliza sin esfuerzo a campos y a la relatividad, y fue el puente hacia la mecánica cuántica a través de la formulación de Feynman, como se verá en el capítulo 21. Su relación con las simetrías es el tema del capítulo 16.

Atelier Velázquez

9.2 Hamilton y el espacio de fases

William Rowan Hamilton (1805–1865) introdujo en 1834–1835 otra reformulación. En lugar de posiciones y velocidades, utiliza posiciones q_i y **momentos conjugados** $p_i = \partial L/\,\partial \dot{q}_i$. La función que gobierna la evolución es el **hamiltoniano**, que en los casos habituales coincide con la energía total:

$$H(q,p) = \sum_i p_i\, \dot{q}_i - L = T + V.$$

Las ecuaciones del movimiento se convierten en un sistema de primer orden, simétrico en posiciones y momentos:

$$\dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i}, \qquad \dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial q_i}.$$

El estado de un sistema con n grados de libertad es un punto de un espacio de $2n$ dimensiones, el **espacio de fases**, y su evolución es una trayectoria en ese espacio, determinada por el punto inicial. Para un oscilador armónico, las trayectorias son elipses: la energía $H = p^2/2m + 1/2\, kx^2$

es constante en cada una. Para un gas de 10^{23} moléculas, el espacio de fases tiene unas 6×10^{23} dimensiones, y el estado del gas es un punto en él.

Joseph Liouville demostró en 1838 un resultado que será esencial en la física estadística: el flujo hamiltoniano conserva el volumen en el espacio de fases. Una región de estados iniciales puede deformarse de manera extraordinaria a lo largo del tiempo, estirándose en filamentos, pero su volumen total permanece constante.

9.3 El demonio de Laplace y el problema de los tres cuerpos

En el *Ensayo filosófico sobre las probabilidades* (1814), Pierre-Simon Laplace formuló la versión más célebre del determinismo: una inteligencia que conociera en un instante todas las fuerzas que animan la naturaleza y la situación de todos los seres que la componen, y que fuera lo bastante vasta para someter esos datos al análisis, abarcaría en una misma fórmula los movimientos de los mayores cuerpos y del átomo más ligero; para ella nada sería incierto, y el futuro, como el pasado, estaría presente ante sus ojos (Laplace, 1814/1995).

Atelier Velázquez

El texto aparece en un tratado sobre probabilidades, y su función es justificar el uso del cálculo de probabilidades como remedio a nuestra ignorancia. Pero ya en la mecánica celeste había un problema que comprometía la imagen de la previsibilidad perfecta. El movimiento de dos cuerpos bajo atracción gravitatoria mutua tiene solución exacta: las cónicas de Kepler. El de tres cuerpos no tiene, en general, solución expresable mediante funciones conocidas.

En 1885 el rey Óscar II de Suecia convocó un premio para quien demostrara la estabilidad del sistema solar o, al menos, encontrara una solución del problema de n cuerpos en forma de serie convergente. Henri Poincaré (1854–1912) obtuvo el premio en 1889 con una memoria sobre el problema de los tres cuerpos. Mientras se imprimía, el matemático Lars Edvard Phragmén señaló un pasaje oscuro; al revisarlo, Poincaré descubrió un error grave. Lo que había creído una demostración de estabilidad ocultaba un comportamiento de complejidad inaudita: ciertas trayectorias se entrelazan en una red infinitamente plegada, de modo que órbitas que parten de condiciones casi idénticas pueden terminar en comportamientos completamente distintos. La edición impresa fue retirada y destruida, y Poincaré publicó una versión corregida en 1890 (Barrow-Green, 1997). Ese error corregido inauguró la teoría moderna de los sistemas dinámicos.

En *Ciencia y método* (1908), Poincaré extrajo la consecuencia: una causa muy pequeña, que nos pasa desapercibida, puede determinar un efecto considerable que no podemos dejar de ver, y entonces decimos que ese efecto se debe al azar. Mencionó como ejemplo la meteorología.

9.4 Lorenz y el caos determinista

En 1961, el meteorólogo Edward Lorenz (1917–2008), del Instituto Tecnológico de Massachusetts, simulaba la atmósfera con un modelo simplificado en una computadora. Para repetir un cálculo, introdujo como condición inicial un valor impreso, 0.506, en lugar del valor completo almacenado en memoria, 0.506127. Al volver tras una hora, la nueva simulación se había apartado completamente de la anterior. Lorenz publicó en 1963 un sistema de tres ecuaciones diferenciales, derivado de un modelo de convección, que exhibía el mismo comportamiento (Lorenz, 1963):

$$\dot{x} = \sigma(y - x), \qquad \dot{y} = x(\rho - z) - y, \qquad \dot{z} = xy - \beta z.$$

Con los parámetros $\sigma = 10$, $\rho = 28$ y $\beta = 8/3$, las trayectorias no se cierran ni divergen al infinito: quedan confinadas en una región del espacio con forma de alas de mariposa, el **atractor de Lorenz**, que recorren sin repetirse nunca (Figura 1). Dos trayectorias que parten de puntos muy próximos se separan exponencialmente: la distancia entre ellas crece en promedio como $\delta(t) \approx \delta_0 \, e^{\lambda t}$, donde λ es el **exponente de Lyapunov**, que para este sistema vale aproximadamente 0.9 en las unidades del modelo.

Atelier Velázquez

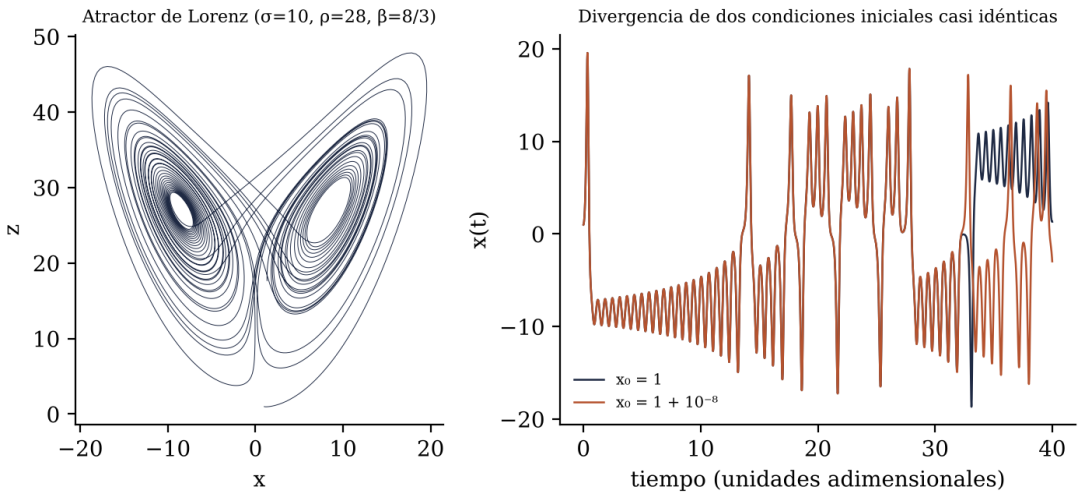


Figura 1. El atractor de Lorenz y la sensibilidad a las condiciones iniciales. A la derecha, la coordenada x(t) de dos soluciones cuyas condiciones iniciales difieren en una parte en cien millones: las curvas son indistinguibles durante un largo intervalo y después divergen por completo.

Fuente. Elaboración propia mediante integración numérica (Runge-Kutta de cuarto orden, paso 0.005) de las ecuaciones de Lorenz (1963).

Atelier Velázquez

De la ley exponencial se sigue un **horizonte de predictibilidad**. Si el error inicial es δ_0 y se tolera un error máximo Δ, el tiempo durante el cual la predicción es útil es aproximadamente

$$t_{\text{pred}} \approx \frac{1}{\lambda} \ln \frac{\Delta}{\delta_0}.$$

Ejemplo. Con $\delta_0 = 10^{-8}$, $\Delta = 1$ y $\lambda \approx 0.9$, resulta $t_{\text{pred}} \approx \ln(10^8)/0.9 \approx 20$ unidades de tiempo del modelo. Lo decisivo es la dependencia logarítmica: mejorar la precisión inicial en un factor de un millón solo prolonga el horizonte en $\ln(10^6)/0.9 \approx 15$ unidades. Este es el motivo por el que las predicciones meteorológicas detalladas no se extienden mucho más allá de dos semanas por mucho que se mejoren las observaciones.

El sistema solar mismo es caótico. Jacques Laskar mostró en 1989, mediante integraciones numéricas de las ecuaciones promediadas del movimiento planetario, que el sistema solar interior tiene un tiempo de Lyapunov de unos cinco millones de años, de modo que las posiciones precisas de los planetas no pueden predecirse más allá de unos cien millones de años (Laskar, 1989). Simulaciones posteriores estimaron que existe una probabilidad del orden del uno por ciento de que la órbita de Mercurio se desestabilice antes de que el Sol agote su combustible (Laskar y Gastineau, 2009).

9.5 Determinismo, predictibilidad y causalidad

El caos determinista obliga a separar conceptos que el lenguaje común confunde. Conviene definirlos uno por uno.

Ley física es una relación invariante entre magnitudes, válida en un dominio determinado. **Determinismo** es una propiedad de una teoría: una teoría es determinista si el estado completo en un instante, junto con las leyes, fija un único estado en cualquier otro instante (Earman, 1986). **Predictibilidad** es una propiedad de nuestra relación operatoria con un sistema: un sistema es predecible si podemos calcular su estado futuro con la precisión deseada a partir de datos que podemos obtener. El caos muestra que un sistema puede ser determinista e impredecible: las ecuaciones de Lorenz son deterministas, pero su predicción exige una precisión inicial que crece exponencialmente con el horizonte.

El determinismo tampoco está garantizado en la mecánica newtoniana. John Norton propuso en 2008 un ejemplo, la «cúpula de Norton»: una masa en reposo en la cima de una superficie de forma particular puede, según las ecuaciones de Newton, permanecer en reposo indefinidamente o empezar a deslizarse en cualquier instante y en cualquier dirección, porque la ecuación diferencial no satisface en ese punto las condiciones de unicidad (Norton, 2008). El ejemplo es idealizado y discutido, pero muestra que el determinismo de la mecánica clásica es una propiedad que depende de condiciones matemáticas, no una consecuencia automática de la forma de sus leyes.

Atelier Velázquez

Probabilidad es una medida, entre cero y uno, asignada a sucesos de un espacio de posibilidades según axiomas determinados; su interpretación —frecuencia, grado de creencia, propensión física— es objeto de debate. **Azar** designa la ausencia de un patrón predecible en una secuencia de resultados, y puede deberse a ignorancia de las condiciones (azar epistémico) o, si la mecánica cuántica es fundamentalmente indeterminista, a la naturaleza misma del proceso. **Contingencia** se opone a **necesidad**: es contingente lo que podría haber sido de otro modo. Que la constante de gravitación tenga el valor que tiene es contingente respecto de las leyes conocidas, que no lo fijan.

Causalidad es la más difícil. En 1913, Bertrand Russell sostuvo que la palabra «causa» había sido desterrada de las ciencias avanzadas y sustituida por leyes funcionales que relacionan magnitudes de manera simétrica, sin distinguir causas de efectos (Russell, 1913). Las ecuaciones

de Newton, en efecto, no distinguen pasado de futuro, y en una ecuación funcional no hay causa ni efecto. Sin embargo, la noción de causa persiste en la práctica científica cuando se interviene en un sistema: el experimentador que manipula una variable y observa el cambio en otra establece una relación asimétrica. La teoría intervencionista de la causalidad, desarrollada por James Woodward y otros, define la causalidad precisamente así: X causa Y si una intervención sobre X cambiaría Y (Woodward, 2003). Las técnicas de **inferencia causal** formalizadas por Judea Pearl permiten distinguir, bajo supuestos explícitos, entre **correlación** —una asociación estadística entre variables— y causalidad (Pearl, 2009). Que dos variables estén correlacionadas no indica cuál causa a cuál, ni si ambas dependen de una tercera.

La causalidad aristotélica, con sus cuatro sentidos, y la causalidad moderna no son la misma noción. La física moderna conserva, en cierto modo, la causa eficiente como interacción y la causa material como constitución; ha eliminado la final en los procesos inanimados y ha transformado la formal en estructura matemática de las leyes. En relatividad, como se verá, la causalidad adquiere una estructura geométrica precisa: los conos de luz. En física estadística aparece la asimetría temporal. En mecánica cuántica, el problema se complica de nuevo.

Atelier Velázquez

Capítulo 10. Termodinámica: del motor al principio físico

10.1 Máquinas de vapor y teoría del calórico

La termodinámica no nació de la contemplación del cosmos, sino del intento de mejorar las máquinas que bombeaban agua de las minas de carbón inglesas. La máquina atmosférica de Thomas Newcomen (1712) aprovechaba la condensación del vapor en un cilindro para producir un vacío parcial que hacía descender un pistón. James Watt, a partir de 1769, separó el condensador del cilindro y multiplicó la eficiencia. Aun así, las mejores máquinas convertían en trabajo apenas unos pocos por ciento de la energía química del carbón.

A principios del siglo XIX la teoría dominante del calor era la del **calórico**, un fluido sutil e indestructible que fluía de los cuerpos calientes a los fríos. Antoine Lavoisier lo había incluido en su tabla de elementos químicos. Benjamin Thompson, conde de Rumford, observó en 1798 que el taladrado de cañones producía calor de manera aparentemente inagotable, lo cual era difícil de conciliar con un fluido conservado, pero la teoría siguió siendo útil.

Atelier Velázquez

10.2 Carnot

Sadi Carnot (1796–1832), ingeniero militar francés, publicó en 1824 *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*. Su pregunta era general: ¿existe un límite a la cantidad de trabajo que puede obtenerse del calor, cualquiera que sea la máquina y la sustancia que utilice? Su respuesta, obtenida dentro de la teoría del calórico, fue que la potencia motriz depende solo de las temperaturas de los cuerpos entre los cuales se transporta el calor, y que la máquina más eficiente es una máquina reversible, que puede funcionar en ambos sentidos (Carnot, 1824/1987).

Carnot imaginó un ciclo ideal en cuatro etapas: expansión a temperatura constante en contacto con un foco caliente, expansión sin intercambio de calor hasta que el gas se enfría a la temperatura del foco frío, compresión a esa temperatura, y compresión sin intercambio de calor hasta volver al estado inicial (Figura 2). Argumentó que si existiera una máquina más eficiente que la reversible, podría acoplarse a una máquina reversible funcionando en sentido inverso y producir trabajo sin consumo neto de calor, lo cual sería un movimiento perpetuo.

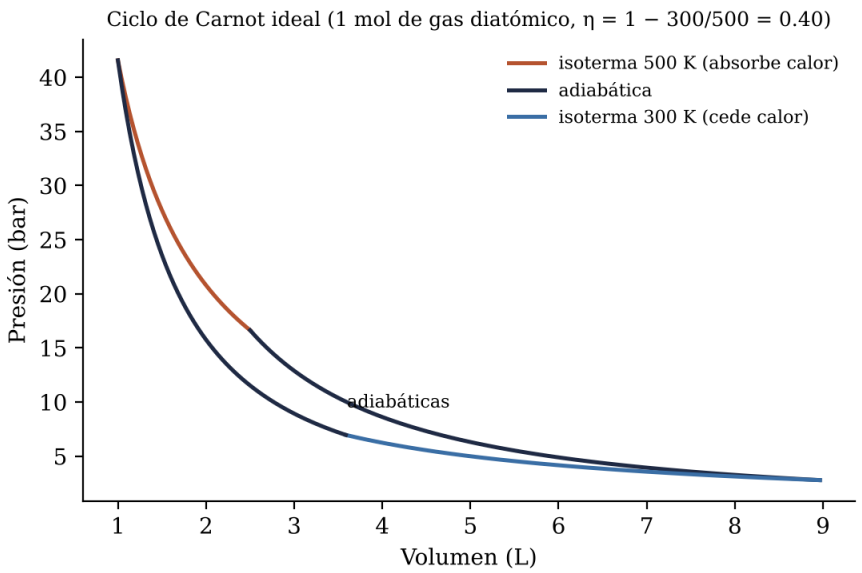


Figura 2. Ciclo de Carnot ideal en el diagrama presión–volumen para un mol de gas ideal diatómico entre 500 K y 300 K. El área encerrada es el trabajo neto obtenido en cada ciclo.

Fuente. Elaboración propia a partir de la ecuación de los gases ideales y de la relación adiabática PV^{γ} = constante, con $\gamma = 1.4$.

Atelier Velázquez

Lo notable es que el resultado de Carnot sobrevivió a la teoría del calórico que lo había inspirado. Su demostración utilizaba la conservación del calórico; la versión correcta, establecida por Clausius y Kelvin, utiliza la segunda ley de la termodinámica, pero el resultado es el mismo. La historia de la ciencia ofrece pocos ejemplos tan claros de una verdad obtenida a partir de un supuesto falso, lo cual muestra que el cierre de un resultado no depende de la ontología con la que el investigador lo concibió, sino de las operaciones que lo sostienen. Émile Clapeyron reformuló el ciclo en 1834 con el diagrama de presión y volumen que todavía se utiliza.

10.3 Joule y la equivalencia entre trabajo y calor

En la década de 1840 varios investigadores llegaron de manera independiente a la idea de que el calor y el trabajo son formas intercambiables de una misma magnitud conservada. Julius Robert Mayer, médico alemán, publicó en 1842 una estimación del equivalente mecánico del calor. Hermann von Helmholtz formuló en 1847 el principio general de conservación de la «fuerza», lo que hoy llamamos energía. James Prescott Joule (1818–1889), cervecero de Mánchester, realizó las medidas más convincentes.

En su experimento más conocido, unas pesas que descendían hacían girar unas paletas dentro de un recipiente con agua aislado térmicamente. El trabajo realizado por las pesas, mgh, se convertía por fricción en calor, que elevaba la temperatura del agua. En 1850 publicó un equivalente de 772 pies-libra por unidad térmica británica, que corresponde a unos 4.15 julios por caloría; el valor moderno es de 4.184 (Joule, 1850). La dificultad del experimento se aprecia con un cálculo: una masa de 1 kg que cae un metro realiza un trabajo de 9.81 J, que calienta un kilogramo de agua en apenas $9.81/4\,186 \approx 0.0023$ K. Joule necesitaba termómetros capaces de detectar centésimas de grado y repeticiones cuidadosas.

La **primera ley de la termodinámica** establece que la energía interna U de un sistema cambia según el calor Q que recibe y el trabajo W que realiza:

$$\Delta U = Q - W.$$

La energía no se crea ni se destruye; se transforma. En el capítulo 16 se verá que esta conservación tiene un fundamento más profundo en la simetría de las leyes respecto de traslaciones en el tiempo.

Atelier Velázquez

10.4 Clausius, Kelvin y la segunda ley

Rudolf Clausius (1822–1888) reconcilió en 1850 a Carnot con Joule. Mostró que el resultado de Carnot podía conservarse si se sustituía la conservación del calórico por un nuevo principio: el calor no pasa por sí mismo de un cuerpo más frío a uno más caliente (Clausius, 1850). William Thomson, futuro lord Kelvin (1824–1907), formuló el principio de otra manera equivalente: es imposible construir una máquina cíclica cuyo único efecto sea extraer calor de un foco y convertirlo íntegramente en trabajo. En 1848, Thomson había utilizado el ciclo de Carnot para definir una escala de temperatura absoluta, independiente de las propiedades de cualquier sustancia, que hoy lleva su nombre.

De la segunda ley se sigue la eficiencia máxima de cualquier máquina térmica que opere entre un foco caliente a temperatura absoluta T_c y uno frío a T_f:

$$\eta_{\max} = \frac{W}{Q_c} = 1 - \frac{T_f}{T_c}.$$

Ejemplo. Una central de vapor cuyo vapor alcanza 565 °C (838 K) y cuyo condensador está a unos 300 K tiene una eficiencia de Carnot de $1 - 300/838 \approx 0.64$. Las centrales reales alcanzan alrededor del 40 por ciento, por las irreversibilidades inevitables: fricción, transferencia de calor con diferencias finitas de temperatura, pérdidas en las turbinas. Un motor de automóvil convierte en trabajo alrededor de un 25 a 35 por ciento de la energía del combustible. Una bomba de calor, que funciona como una máquina térmica invertida, puede entregar al interior de una casa más energía térmica que la eléctrica que consume, porque extrae calor del exterior; no viola ninguna ley, porque el calor fluye hacia el foco caliente gracias al trabajo aportado.

10.5 Entropía

En 1865 Clausius introdujo una nueva magnitud y le dio nombre. Para cualquier ciclo reversible, la suma de los calores intercambiados divididos por las temperaturas a las que se intercambian es nula; existe, por tanto, una función de estado cuyo cambio entre dos estados es

$$dS = \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T}.$$

Atelier Velázquez

Clausius la llamó **entropía**, del griego **τροπή** (*tropḗ*), «transformación», «vuelta», con el prefijo *en-*, y explicó que eligió una palabra semejante a «energía» porque ambas magnitudes estaban emparentadas en su significado físico (Clausius, 1865). La **segunda ley** adopta entonces su forma más general: en un sistema aislado, la entropía nunca disminuye,

$$\Delta S \geq 0,$$

y la igualdad solo se cumple en procesos reversibles. Clausius terminó su memoria de 1865 con dos frases que resumían la termodinámica del universo: la energía del mundo es constante; la entropía del mundo tiende a un máximo.

Primer ejemplo. Para fundir un kilogramo de hielo a 0 °C (273.15 K) hay que suministrarle 334 000 J de calor latente. Como el proceso ocurre a temperatura constante, $\Delta S = Q/T = 334\,000/273.15 \approx 1\,223\ \text{J K}^{-1}$.

Segundo ejemplo. Se mezclan un kilogramo de agua a 80 °C y otro a 20 °C en un recipiente aislado; la mezcla alcanza 50 °C. Para calcular el cambio de entropía se imagina un camino reversible para cada masa: $\Delta S = mc\ln(T_f/T_i)$, con $c = 4\,186\ \text{J kg}^{-1}\ \text{K}^{-1}$. El agua caliente pierde entropía, $4\,186\ln(323.15/353.15) \approx -372\ \text{J K}^{-1}$; la fría gana $4\,186\ln(323.15/293.15) \approx$

$+408\ \mathrm{J\,K^{-1}}$. El balance es positivo, unos $+36\ \mathrm{J\,K^{-1}}$. La energía se ha conservado; la entropía ha aumentado. Nadie ha visto nunca una mezcla tibia separarse espontáneamente en una parte caliente y otra fría.

En 1852, Thomson había publicado una nota sobre la tendencia universal de la naturaleza a la disipación de la energía mecánica, y había concluido que la Tierra sería, dentro de un periodo finito, inhabitable (Thomson, 1852). La extrapolación de la segunda ley al universo entero dio lugar a la idea de la «muerte térmica»: un estado final de temperatura uniforme en el que ningún trabajo sería ya posible. La extrapolación suponía que el universo es un sistema aislado finito en equilibrio alcanzable, supuestos que la cosmología relativista y la física gravitatoria, como se verá en el capítulo 12, han vuelto problemáticos.

10.6 Irreversibilidad

La termodinámica clásica describe la irreversibilidad, pero no la explica. Que la entropía de un sistema aislado aumente es un principio, establecido por inducción a partir de la imposibilidad de construir ciertas máquinas. La entropía se define operativamente mediante calores y temperaturas medidos en procesos reversibles ideales. La teoría no dice qué es la entropía en términos de los constituyentes de la materia, ni por qué aumenta.

Atelier Velázquez

La palabra «desorden», con la que a menudo se explica la entropía, induce a confusión. Un cristal de hielo es más ordenado que el agua líquida y tiene menos entropía, de acuerdo; pero cuando una solución sobresaturada cristaliza, o cuando una nube de gas se contrae gravitatoriamente para formar una estrella, el orden aparente aumenta y la entropía total también. La entropía no mide el desorden visible; mide, como se verá enseguida, el número de configuraciones microscópicas compatibles con un estado macroscópico. Esa definición requiere atribuir a la materia una estructura microscópica, y ese fue el paso de Boltzmann.

Capítulo 11. Boltzmann, Gibbs y la física estadística

11.1 Microestados y macroestados

La teoría cinética de los gases, desarrollada por Daniel Bernoulli en 1738 y retomada por Clausius en la década de 1850, explicaba la presión de un gas como el efecto de los choques de sus moléculas contra las paredes. James Clerk Maxwell obtuvo en 1860 la distribución de velocidades de las moléculas de un gas en equilibrio, introduciendo por primera vez la probabilidad como componente de una ley física (Maxwell, 1860). Para un gas de moléculas de masa m a temperatura T, la fracción de moléculas con velocidad entre v y $v + dv$ es

$$f(v)\,dv = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi k_B T}\right)^{3/2} v^2\, e^{-mv^2/2k_B T}\, dv,$$

donde $k_B = 1.380649 \times 10^{-23}\ \mathrm{J\,K^{-1}}$ es la constante de Boltzmann. *Ejemplo.* Para el nitrógeno a 300 K, con $m = 28 \times 1.661 \times 10^{-27}$ kg, la velocidad más probable es $v_p = \sqrt{2k_B T/m} \approx 422\ \mathrm{m\,s^{-1}}$, y la velocidad cuadrática media, $\sqrt{3k_B T/m} \approx 517\ \mathrm{m\,s^{-1}}$, del orden de la velocidad del sonido en el aire, lo cual no es casual.

Ludwig Boltzmann (1844–1906), físico austriaco, convirtió la teoría cinética en una teoría general de la irreversibilidad. La distinción clave es entre **microestado** —la especificación completa de las posiciones y velocidades de todas las moléculas— y **macroestado** —la especificación de unas pocas magnitudes medibles, como la presión, el volumen y la temperatura—. A cada macroestado le corresponde un número enorme de microestados.

Un ejemplo con monedas aclara la idea. Si se lanzan cien monedas, el macroestado «cincuenta caras» puede realizarse de $\binom{100}{50} \approx 1.01 \times 10^{29}$ maneras distintas, mientras que el macroestado «cien caras» solo puede realizarse de una manera. Si todas las configuraciones son igualmente probables, observar cien caras es unas 10^{29} veces menos probable que observar cincuenta. Con 10^{23} moléculas en lugar de cien monedas, las desproporciones se vuelven inconcebiblemente mayores.

Atelier Velázquez

11.2 La fórmula de Boltzmann

En 1877, Boltzmann propuso que la entropía de un macroestado es proporcional al logaritmo del número W de microestados compatibles con él (Boltzmann, 1877). En la forma que le dio Max Planck en 1900 y que figura grabada en la tumba de Boltzmann en Viena,

$$S = k_B \ln W.$$

El logaritmo garantiza que la entropía sea aditiva: si dos sistemas independientes tienen W_1 y W_2 microestados, el conjunto tiene $W_1 W_2$, y $\ln(W_1 W_2) = \ln W_1 + \ln W_2$. La constante k_B convierte un número puro en julios por kelvin, y conecta la definición estadística con la termodinámica de Clausius.

Ejemplo. Un mol de gas ideal ocupa la mitad de un recipiente separada por un tabique; se retira el tabique y el gas se expande libremente hasta ocupar el doble de volumen. Cada molécula tiene ahora el doble de posiciones disponibles, de modo que W se multiplica por 2^{N_A}, con $N_A = 6.022 \times 10^{23}$. El aumento de entropía es

$$\Delta S = k_B \ln 2^{N_A} = N_A k_B \ln 2 = R \ln 2 \approx 5.76 \ \mathrm{J\,K^{-1}},$$

el mismo valor que se obtiene con la fórmula termodinámica de Clausius para una expansión isoterma reversible entre los mismos estados. La probabilidad de que el gas vuelva espontáneamente a la mitad inicial es del orden de $2^{-6\times10^{23}}$, un número cuyo inverso tiene unos 1.8×10^{23} dígitos. No es imposible; es tan improbable que la diferencia con lo imposible carece de consecuencias operatorias.

Esta es la explicación estadística de la segunda ley. La entropía aumenta porque los macroestados de alta entropía ocupan una fracción abrumadoramente mayor del espacio de fases que los de baja entropía, de modo que un sistema que parte de un macroestado de baja entropía y evoluciona según una dinámica suficientemente complicada tiene una probabilidad abrumadora de pasar a macroestados de entropía mayor.

11.3 Las objeciones de Loschmidt y Zermelo

La explicación de Boltzmann suscitó dos objeciones que siguen siendo instructivas.

En 1876, Josef Loschmidt, colega y amigo de Boltzmann, planteó la **objeción de reversibilidad**. Las leyes de la mecánica son simétricas respecto de la inversión temporal: si se invierten

Atelier Velázquez

todas las velocidades de las moléculas de un gas en un instante, el gas recorre hacia atrás exactamente la historia que lo había llevado hasta allí (Loschmidt, 1876). Para cada evolución en que la entropía aumenta existe otra, igualmente compatible con las leyes, en que disminuye. ¿Cómo puede una dinámica simétrica en el tiempo producir un comportamiento asimétrico?

En 1896, Ernst Zermelo planteó la **objeción de recurrencia**, basada en un teorema de Poincaré de 1890: en un sistema mecánico confinado en una región finita del espacio de fases, casi toda trayectoria vuelve arbitrariamente cerca de su estado inicial al cabo de un tiempo suficiente. Un gas encerrado acabaría volviendo a concentrarse en la mitad del recipiente.

Boltzmann respondió a Loschmidt que su teorema no afirmaba que la entropía aumente necesariamente, sino con abrumadora probabilidad, dado que el estado inicial es de baja entropía; y que las condiciones iniciales que conducen a una disminución son una fracción minúscula del conjunto. Respondió a Zermelo que los tiempos de recurrencia son tan inmensos —para un centímetro cúbico de gas, estimó un número de años con unos 10^{19} dígitos— que la recurrencia carece de significado práctico. Ambas respuestas son correctas, y ambas desplazan el problema: la asimetría temporal no está en las leyes dinámicas, sino en las condiciones iniciales. ¿Por qué los sistemas que observamos parten de estados de baja entropía? Esta pregunta conduce directamente a la cosmología, y es el tema del capítulo 12.

Atelier Velázquez

Boltzmann defendió la realidad de los átomos contra la escuela energetista de Wilhelm Ostwald y contra el fenomenismo de Ernst Mach, que consideraba los átomos ficciones útiles. Se suicidó en 1906, en un periodo de depresión cuyas causas no deben reducirse a la controversia científica.

11.4 Gibbs y los conjuntos estadísticos

Josiah Willard Gibbs (1839–1903), profesor de física matemática en Yale, dio a la mecánica estadística su formulación general en *Elementary Principles in Statistical Mechanics* (1902). En lugar de seguir la evolución de un único sistema, Gibbs consideró **conjuntos** de copias mentales del sistema distribuidas en el espacio de fases según una densidad de probabilidad. Para un sistema en contacto con un foco térmico a temperatura T, la probabilidad de encontrarlo en un microestado de energía E_i es proporcional al factor de Boltzmann,

$$p_i = \frac{e^{-E_i/k_B T}}{Z}, \qquad Z = \sum_j e^{-E_j/k_B T},$$

donde la **función de partición** Z contiene, en forma condensada, toda la termodinámica del sistema: de ella se derivan la energía media, la presión, el calor específico. La entropía de Gibbs, $S = -k_B \sum_i p_i \ln p_i$, coincide con la de Boltzmann cuando todos los microestados accesibles son equiprobables (Gibbs, 1902).

La formulación de Gibbs desplazó la pregunta. Ya no se trata de explicar por qué un sistema individual evoluciona hacia el equilibrio, sino de calcular propiedades de equilibrio como promedios sobre conjuntos. Esta estrategia fue enormemente fecunda —sin ella no habría física de la materia condensada— y dejó intacto el problema de la irreversibilidad, que en la versión de Gibbs reaparece como la pregunta por qué el conjunto, cuyo volumen en el espacio de fases se conserva según el teorema de Liouville, parece extenderse hasta ocupar toda la región de equilibrio. La respuesta habitual recurre al «grano grueso»: la región inicial se deforma en filamentos tan finos que, a la resolución de cualquier medida macroscópica, parece ocupar un volumen mayor.

Atelier Velázquez

11.5 Los átomos se vuelven reales

La hipótesis atómica permaneció controvertida hasta comienzos del siglo XX. En 1905, Albert Einstein mostró que, si los átomos existen, una partícula microscópica suspendida en un líquido debe moverse erráticamente por los choques de las moléculas, y que el desplazamiento cuadrático medio de la partícula crece proporcionalmente al tiempo con un coeficiente que depende del número de Avogadro (Einstein, 1905b). El movimiento browniano, observado por el botánico Robert Brown en 1827, se convertía en un instrumento para contar moléculas. Jean Perrin realizó entre 1908 y 1909 las medidas correspondientes con suspensiones de gutagamba y obtuvo valores del número de Avogadro en torno a 6×10^{23} (Perrin, 1909).

En su libro *Los átomos* (1913), Perrin enumeró trece métodos independientes —el movimiento browniano, la viscosidad de los gases, la radiación del cuerpo negro, la carga del electrón, la radiactividad, el azul del cielo, entre otros— que daban valores concordantes del número de Avogadro (Perrin, 1913). Esa convergencia es el caso paradigmático de una identidad sintética obtenida por cursos operatorios independientes. Ostwald aceptó la existencia de los átomos en

1909. La realidad de los átomos no se estableció al verlos —eso ocurriría mucho después, con la microscopía de efecto túnel—, sino al comprobar que la misma magnitud, inaccesible a la medida directa, se obtenía por caminos que no compartían supuestos.

11.6 El demonio de Maxwell

En 1867, en una carta, y en 1871, en su *Teoría del calor*, Maxwell imaginó un ser minúsculo que controla una compuerta entre dos recipientes de gas a la misma temperatura y solo deja pasar las moléculas rápidas en un sentido y las lentas en el otro. Sin gastar trabajo, el demonio crearía una diferencia de temperatura y violaría la segunda ley. El propósito de Maxwell era mostrar que la segunda ley tiene un carácter estadístico.

La resolución del problema requirió casi un siglo. Leó Szilárd analizó en 1929 una versión simplificada con una sola molécula y concluyó que la adquisición de información por el demonio debe tener un coste entrópico. Rolf Landauer mostró en 1961 que lo irreducible no es la medición, sino el borrado de la información: borrar un bit de memoria en un entorno a temperatura T disipa al menos

$$E_{\min} = k_B T \ln 2 \approx 2.87 \times 10^{-21}\ \text{J} \quad (T = 300\ \text{K})$$

(Landauer, 1961). Charles Bennett completó el argumento en 1982: el demonio debe borrar su memoria para operar cíclicamente, y ese borrado restituye la entropía. En 2012 se midió experimentalmente el límite de Landauer con una partícula coloidal atrapada en un pozo de potencial doble (Bérut et al., 2012). El caso muestra una conexión real entre termodinámica e información, que no autoriza la afirmación de que «todo es información»: el límite de Landauer conecta una magnitud física (la energía disipada) con una operación lógica (el borrado) mediante un mecanismo físico específico.

11.7 Reversibilidad microscópica e irreversibilidad macroscópica

La relación entre la dinámica reversible de los constituyentes y el comportamiento irreversible de los sistemas macroscópicos es un caso ejemplar de análisis dialéctico. Las dos descripciones parecen contradictorias: una dice que las leyes son simétricas en el tiempo; la otra, que los procesos tienen una dirección. La contradicción se disuelve cuando se identifican los términos que cada descripción pone en juego. La dinámica microscópica se refiere a trayectorias individuales en el

Atelier Velázquez

espacio de fases; la termodinámica, a macroestados definidos por un número pequeño de magnitudes medibles. La asimetría no está en ninguna de las dos teorías por separado, sino en la relación entre ellas cuando se añade un tercer elemento: una condición inicial de baja entropía.

El resultado es que la segunda ley no es una ley fundamental en el mismo sentido que las ecuaciones de Hamilton, sino una consecuencia de la dinámica, de una medida de probabilidad sobre el espacio de fases y de una condición de frontera. Ninguno de los tres elementos puede eliminarse sin perder la explicación. Esta es una conexión parcial, una symploké en sentido estricto: la termodinámica depende de la mecánica, pero no se reduce a ella sin añadir algo que la mecánica no contiene.

Atelier Velázquez

Capítulo 12. La flecha del tiempo

12.1 Varias flechas

La expresión «flecha del tiempo» fue acuñada por Arthur Eddington en 1928 para designar la asimetría entre pasado y futuro que se manifiesta en ciertos procesos (Eddington, 1928). No hay una sola flecha, sino varias asimetrías temporales de naturaleza distinta, y la pregunta filosófica central es si se reducen a una.

Tabla 5. Asimetrías temporales en la física y en la experiencia

Flecha	Manifestación	Fundamento propuesto	Relación con la termodinámica
Termodinámica	La entropía de los sistemas aislados aumenta	Condición inicial de baja entropía y conteo de microestados	Es la referencia
Radiativa	Las ondas se propagan desde las fuentes hacia fuera, no convergen hacia ellas	Condiciones de contorno sin radiación entrante coordinada	Se discute si deriva de ella
Cosmológica	El universo se expande	Solución particular de las ecuaciones de Einstein	No implica la termodinámica por sí sola
De los registros	Hay huellas del pasado, no del futuro	Sistemas de registro que parten de estados preparados de baja entropía	Deriva de ella según Albert y Reichenbach
Psicológica	Recordamos el pasado, anticipamos el futuro	Funcionamiento de la memoria como registro físico	Deriva de la de los registros
Causal o de intervención	Podemos influir en el futuro, no en el pasado	Estructura de la acción y la intervención	Controvertida
Cuántica de la medida	El resultado de una medida queda registrado irreversiblemente	Decoherencia y amplificación	Asociada a la irreversibilidad del registro
De la interacción débil	Ciertas desintegraciones de mesones violan la simetría T	Fase compleja en la matriz CKM	Independiente; efecto pequeño

Nota. Elaboración propia a partir de Reichenbach (1956), Price (1996), Albert (2000) y Callender (2017).

La última fila merece una aclaración. Las leyes del Modelo Estándar no son exactamente simétricas respecto de la inversión temporal: la interacción débil viola la simetría T en ciertas desintegraciones de mesones K y B. En 2012 la colaboración BaBar observó de manera directa esa violación (Lees et al., 2012). Pero el efecto es minúsculo y afecta a procesos de partículas muy específicos; no parece tener relación con la irreversibilidad termodinámica, que se manifiesta en sistemas cuyas interacciones relevantes son electromagnéticas y, a efectos prácticos, simétricas.

Atelier Velázquez

12.2 La hipótesis del pasado

Si la segunda ley se explica estadísticamente a partir de una condición de baja entropía, la pregunta se desplaza hacia el origen de esa condición. Cada sistema que hoy está fuera del equilibrio —una taza de café caliente, un ser vivo, una estrella— lo está porque fue preparado por un sistema mayor que también lo estaba. La regresión lleva hasta el universo temprano. David Albert llamó **hipótesis del pasado** a la propuesta de añadir a las leyes dinámicas un postulado según el cual el universo comenzó en un macroestado de muy baja entropía, y a la hipótesis estadística de que, dentro de ese macroestado, los microestados son equiprobables (Albert, 2000).

Pero la radiación cósmica de fondo, como se verá en el capítulo 27, muestra que hace unos 13 800 millones de años la materia y la radiación estaban en un estado muy próximo al equilibrio térmico, con una temperatura casi uniforme. ¿Cómo puede un estado de equilibrio ser de baja entropía? La respuesta, que Roger Penrose ha subrayado, está en la gravedad (Penrose, 1979). Para un gas ordinario, la uniformidad es el estado de máxima entropía. Para un sistema autogravitante, es al revés: la gravedad tiende a agrupar la materia, y los estados agrupados —estrellas, galaxias, en el extremo agujeros negros— tienen más entropía que los uniformes. El universo temprano era térmicamente uniforme pero gravitatoriamente liso, y esa lisura es la fuente de la baja entropía. Penrose estimó que la probabilidad de que un universo como el nuestro comenzara con una geometría tan lisa, si se eligiera al azar entre las posibilidades compatibles con su contenido, es del orden de una parte en $10^{10^{123}}$, cifra que se apoya en la entropía de los agujeros negros que se examinará en el capítulo 31 (Penrose, 1989).

La Tierra muestra a pequeña escala cómo la baja entropía del pasado alimenta los procesos del presente. El planeta recibe del Sol radiación emitida a unos 5 800 K y devuelve al espacio, en promedio, la misma energía en forma de radiación infrarroja a unos 255 K. Como la energía de un fotón es proporcional a la temperatura de la radiación, por cada fotón solar la Tierra emite del orden de veinte fotones infrarrojos. La energía se conserva, pero la entropía exportada es mucho mayor que la importada. Los procesos que construyen orden local —la fotosíntesis, la vida, la civilización— se alimentan de ese flujo. Y el Sol puede brillar porque es una concentración de materia que la gravedad formó a partir de una nube difusa, lo cual remite de nuevo a la lisura inicial.

Atelier Velázquez

12.3 Registros y memoria

¿Por qué conocemos el pasado de una manera en que no conocemos el futuro? Hans Reichenbach propuso que los registros son posibles porque el mundo contiene **sistemas ramificados**: subsistemas que se separan del entorno en un estado de baja entropía, evolucionan casi aislados y se reintegran después. Una huella en la arena es un estado de baja entropía de la superficie que solo se explica por una interacción anterior; su existencia permite inferir el pasado (Reichenbach, 1956). Albert ha desarrollado el argumento: un registro es un sistema que, en una condición de partida conocida —la arena lisa, la placa fotográfica sin exponer, la memoria en blanco—, interactúa con otro y queda en un estado correlacionado con el de este. La condición de partida debe ser de baja entropía y preparada antes, lo cual vuelve a remitir a la hipótesis del pasado (Albert, 2000).

Si esto es correcto, la asimetría de nuestro conocimiento —registros del pasado, ninguno del futuro— no es una propiedad de la mente, sino una consecuencia de la termodinámica de los sistemas de registro. La memoria humana sería un caso particular. Esta conexión es uno de los resultados más importantes de la filosofía del tiempo del siglo XX, y fundamenta lo que en el capítulo 49 se llamará tiempo reconstruido.

Atelier Velázquez

La hipótesis plantea, sin embargo, una dificultad. Si el estado presente se elige al azar entre los compatibles con lo que observamos, la estadística de Boltzmann sugiere que es mucho más probable que el presente sea una fluctuación aleatoria a partir del equilibrio que el resultado de una evolución desde un pasado de entropía aún más baja. En el límite, sería más probable que existiera un cerebro aislado con falsos recuerdos —un «cerebro de Boltzmann»— que un universo entero con su historia (Albrecht y Sorbo, 2004). La hipótesis del pasado bloquea esta conclusión al postular la condición inicial; el precio es que la condición queda sin explicar dentro de la teoría, y algunos cosmólogos consideran que una teoría que predice abrumadoramente observadores fluctuantes es inaceptable.

12.4 Controversias contemporáneas

El debate sobre la flecha del tiempo enfrenta varias posiciones bien argumentadas.

Huw Price sostiene que la asimetría temporal está en los contenidos del mundo, no en el tiempo mismo, y propone examinar la física desde un «punto de vista de ningún momento», sin

privilegiar ninguna dirección. Desde esa perspectiva, lo que necesita explicación no es por qué la entropía aumenta hacia el futuro, sino por qué era baja en el pasado; y muchas asimetrías que atribuimos a la naturaleza, incluida la causal, serían proyecciones de nuestra perspectiva de agentes que deliberan sobre el futuro (Price, 1996).

Albert y Barry Loewer defienden que la hipótesis del pasado, junto con las leyes dinámicas y el postulado estadístico, explica todas las asimetrías temporales relevantes, incluidas las de los registros, la causalidad y la intervención (Albert, 2000). Craig Callender ha discutido si la hipótesis del pasado debe considerarse una ley o un hecho bruto sin explicación, y ha examinado cómo el tiempo de la física se relaciona con el tiempo manifiesto de la experiencia (Callender, 2017).

Tim Maudlin, en cambio, sostiene que el paso del tiempo es un rasgo intrínseco y fundamental de la estructura del mundo, no una consecuencia de la termodinámica ni una ilusión, y que la dirección temporal es más básica que cualquier asimetría en los contenidos (Maudlin, 2007). Ilya Prigogine defendió que la irreversibilidad debe incorporarse en las leyes fundamentales mediante formulaciones de la dinámica de sistemas inestables (Prigogine, 1980), aunque su propuesta no ha sido aceptada por la mayoría de los físicos.

Atelier Velázquez

Una distinción ayuda a ordenar el debate. Una cosa es la **anisotropía de los procesos en el tiempo**: el hecho de que la distribución de procesos a lo largo del eje temporal no sea simétrica, porque las entropías son bajas en un extremo y altas en el otro. Otra es el **paso del tiempo**: la idea de que el presente avanza, de que el futuro se vuelve presente y el presente pasado. La física estadística explica, con la hipótesis del pasado, la primera. No dice nada directamente sobre la segunda. Que la entropía crezca en una dirección no implica que haya un presente objetivo que avanza en esa dirección, ni lo excluye. Las dos cuestiones se separarán con más precisión en el capítulo 48, después de examinar lo que la relatividad dice sobre la simultaneidad.

Lo que puede afirmarse con seguridad en este punto es limitado y firme a la vez. La irreversibilidad termodinámica es real y operatoriamente fundamental: ningún procedimiento conocido permite invertirla en sistemas macroscópicos. Su explicación estadística es sólida dentro de sus supuestos. La condición de baja entropía inicial es un dato cosmológico que todavía no tiene explicación aceptada. Y el tiempo de la termodinámica —un tiempo con dirección— es distinto del tiempo de las ecuaciones de Hamilton —un parámetro sin dirección privilegiada—, aunque am-

bos se midan con los mismos relojes. Es la primera fractura en la noción unitaria de tiempo que Newton había postulado.

Atelier Velázquez

Parte IV. Campos, simetrías y espaciotiempo

Atelier Velázquez

Capítulo 13. Faraday y Maxwell

13.1 Electricidad y magnetismo antes del campo

A finales del siglo XVIII la electricidad y el magnetismo eran dos dominios separados, cada uno con su ley de fuerza. Charles-Augustin de Coulomb mostró en 1785, con una balanza de torsión, que la fuerza entre dos cargas eléctricas disminuye con el cuadrado de la distancia, como la gravitación. Alessandro Volta construyó en 1800 la pila que proporcionó por primera vez una corriente eléctrica continua. En 1820, Hans Christian Ørsted observó en Copenhague que una corriente eléctrica desviaba la aguja de una brújula situada en sus proximidades, y en pocas semanas André-Marie Ampère, en París, estableció las leyes de la fuerza entre corrientes. La electricidad en movimiento producía magnetismo. La pregunta inversa era obvia: ¿podía el magnetismo producir electricidad?

13.2 Faraday

Michael Faraday (1791–1867) era hijo de un herrero y aprendiz de encuadernador cuando asistió a unas conferencias de Humphry Davy en la Royal Institution de Londres y consiguió entrar como su ayudante. Carecía de formación matemática, y nunca la adquirió. Su obra es la de un experimentador que pensaba con imágenes espaciales.

Atelier Velázquez

El 29 de agosto de 1831, Faraday enrolló dos bobinas de alambre en lados opuestos de un anillo de hierro. Al cerrar el circuito de una, un galvanómetro conectado a la otra se desvió brevemente; al abrirlo, se desvió en sentido contrario. Mientras la corriente era constante, nada ocurría. Faraday había descubierto la **inducción electromagnética**: no es el magnetismo, sino su variación, lo que produce una corriente (Faraday, 1832). En las semanas siguientes mostró que mover un imán dentro de una bobina tiene el mismo efecto y construyó un disco de cobre que, girando entre los polos de un imán, producía una corriente continua: el primer generador eléctrico.

En notación moderna, la ley de Faraday establece que la fuerza electromotriz $\mathcal{E}$ inducida en un circuito es igual a menos la tasa de cambio del flujo magnético Φ_B que lo atraviesa:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}.$$

El signo menos expresa que la corriente inducida se opone a la variación que la produce, regla que Heinrich Lenz formuló en 1834. Toda la generación de electricidad en centrales hidroeléctricas, térmicas, nucleares o eólicas descansa en esta ecuación: se hace girar una bobina en un campo magnético, o un imán dentro de una bobina, y el flujo variable induce una corriente. El transformador, que permite elevar el voltaje para transportar la electricidad a grandes distancias y reducirlo para el consumo, aplica la misma ley a dos bobinas acopladas por un núcleo de hierro, como en el anillo de 1831.

13.3 Líneas de fuerza y la idea de campo

Para representar la acción de imanes y corrientes, Faraday utilizó las **líneas de fuerza**, que se hacen visibles al esparcir limaduras de hierro sobre un papel colocado encima de un imán. Para la mayoría de sus contemporáneos eran un recurso visual. Para Faraday eran algo más: describían un estado físico del espacio que rodea a los imanes y las corrientes. La acción de un imán sobre otro no saltaría a distancia, sino que se transmitiría a través de ese estado.

Varias observaciones reforzaron su convicción. En 1845 descubrió que un campo magnético intenso hace girar el plano de polarización de la luz que atraviesa un vidrio pesado, el efecto que lleva su nombre: el magnetismo y la luz estaban relacionados. En una breve nota de 1846, «Pensamientos sobre vibraciones de rayos», especuló con que la luz podría ser una vibración de las líneas de fuerza. Durante la década de 1840 comenzó a hablar del «campo magnético» para designar la región en la que se manifiestan esas acciones.

La palabra **campo** procede del latín *campus*, «llanura», «terreno abierto», y por extensión el terreno donde se libra una batalla o se desarrolla una actividad. En la física adquirió un sentido técnico preciso: una magnitud física definida en cada punto del espacio y en cada instante. La temperatura de una habitación es un campo escalar, porque asigna un número a cada punto; el campo eléctrico es un campo vectorial, porque asigna un vector. Lo que convirtió el campo en una entidad física, y no solo en una manera de hablar, fue el descubrimiento de que los campos tienen dinámica propia, se propagan con velocidad finita y transportan energía y momento.

13.4 Maxwell

James Clerk Maxwell (1831–1879) tradujo las imágenes de Faraday a ecuaciones. En tres memorias sucesivas —«Sobre las líneas de fuerza de Faraday» (1855–1856), «Sobre las líneas físicas

Atelier Velázquez

de fuerza» (1861–1862) y «Una teoría dinámica del campo electromagnético» (1865)— pasó de una analogía hidrodinámica a un modelo mecánico de vórtices moleculares y, finalmente, a una teoría formulada sin compromiso con ningún mecanismo particular (Maxwell, 1865).

En el modelo de 1861–1862, Maxwell introdujo una innovación decisiva: la **corriente de desplazamiento**. La ley de Ampère relacionaba el campo magnético con la corriente eléctrica, pero era inconsistente con la conservación de la carga cuando las corrientes variaban en el tiempo, como en un condensador que se carga: entre sus placas no circula corriente, y sin embargo el campo magnético alrededor del circuito es continuo. Maxwell añadió un término proporcional a la variación temporal del campo eléctrico, que actúa como fuente del campo magnético igual que una corriente. Con ese término, el sistema de ecuaciones admitía soluciones ondulatorias que se propagaban con una velocidad determinada por dos constantes medidas en el laboratorio con condensadores e imanes. Maxwell calculó esa velocidad a partir de las medidas de Wilhelm Weber y Rudolf Kohlrausch y obtuvo un valor muy cercano a las medidas de la velocidad de la luz realizadas por Fizeau. Concluyó que difícilmente podía evitarse la inferencia de que la luz consiste en ondulaciones transversales del mismo medio que causa los fenómenos eléctricos y magnéticos.

Atelier Velázquez

13.5 Las ecuaciones

Maxwell escribió sus ecuaciones en forma de veinte relaciones entre componentes. Oliver Heaviside y Heinrich Hertz las reformularon en la década de 1880 con notación vectorial en las cuatro ecuaciones que hoy se enseñan. En el Sistema Internacional y en forma diferencial:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \qquad \nabla \cdot \vec{B} = 0,$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \qquad \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}.$$

$\vec{E}$ es el campo eléctrico (en voltios por metro), $\vec{B}$ el campo magnético (en teslas), ρ la densidad de carga (culombios por metro cúbico) y $\vec{J}$ la densidad de corriente (amperios por metro cuadrado). Las constantes $\varepsilon_0 \approx 8.854 \times 10^{-12}\ \mathrm{F\,m^{-1}}$ y $\mu_0 \approx 1.257 \times 10^{-6}\ \mathrm{N\,A^{-2}}$ caracterizan el vacío. El símbolo $\nabla \cdot$ (divergencia) mide cuánto «brota» un campo de un punto; $\nabla \times$ (rotacional) mide cuánto «gira» alrededor de él.

Cada ecuación tiene un contenido físico preciso. La primera, ley de Gauss, dice que las cargas eléctricas son fuentes del campo eléctrico. La segunda, que no existen cargas magnéticas aisladas: las líneas del campo magnético siempre se cierran. La tercera es la ley de Faraday. La cuarta, la ley de Ampère con la corrección de Maxwell. La fuerza que los campos ejercen sobre una carga q con velocidad $\vec{v}$ es la **fuerza de Lorentz**,

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right),$$

que completa la teoría al conectar los campos con el movimiento de la materia.

13.6 Ondas electromagnéticas

En el vacío, sin cargas ni corrientes, se toma el rotacional de la tercera ecuación y se usa la cuarta. Con una identidad del cálculo vectorial y la segunda ecuación, resulta

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2},$$

y lo mismo para $\vec{B}$. Es la ecuación de ondas, cuyas soluciones se propagan con velocidad

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \approx \frac{1}{\sqrt{(1.2566 \times 10^{-6})(8.8542 \times 10^{-12})}} \approx 2.998 \times 10^8 \ \mathrm{m\,s^{-1}}.$$

Atelier Velázquez

Dos constantes medidas con aparatos eléctricos y magnéticos estáticos predicen la velocidad de la luz, medida con espejos giratorios. Es otra identidad sintética de gran alcance: la óptica quedó incluida en el electromagnetismo.

La predicción de que debían existir ondas electromagnéticas de cualquier longitud de onda fue confirmada por Heinrich Hertz entre 1886 y 1888 en Karlsruhe. Con un circuito oscilante que producía chispas y un anillo detector con una pequeña abertura, generó ondas de algunos metros de longitud, mostró que se reflejaban, se refractaban y formaban ondas estacionarias, y midió su velocidad, que coincidía con la de la luz (Hertz, 1893). Hertz no les vio aplicación práctica. Guglielmo Marconi transmitió en 1901 una señal de radio a través del Atlántico.

La relación entre frecuencia f y longitud de onda λ de una onda electromagnética en el vacío es $c = \lambda f$. *Ejemplos.* Una emisora de FM a 100 MHz emite ondas de $c/f = 2.998 \times 10^8 / 10^8 \approx 3.0$ m. La señal L1 del GPS, a 1 575.42 MHz, tiene una longitud de onda de unos 19.0 cm. La línea roja del hidrógeno, H-alfa, de 656.3 nm, corresponde a una frecuencia de $2.998 \times$

$10^8/656.3 \times 10^{-9} \approx 4.57 \times 10^{14}$ Hz. El espectro electromagnético entero —ondas de radio, microondas, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X y gamma— es un solo fenómeno con longitudes de onda que abarcan más de veinte órdenes de magnitud.

13.7 La transformación de la idea de interacción

Con el electromagnetismo de Maxwell, la noción de interacción física cambió de naturaleza. En la gravitación newtoniana, la fuerza entre dos cuerpos depende de sus posiciones en el mismo instante y actúa sin intermediario. En la teoría de Maxwell, una carga crea un campo, el campo se propaga con velocidad finita y actúa localmente sobre otra carga. Si una carga se mueve bruscamente, otra carga distante no lo «nota» hasta que la perturbación del campo la alcanza.

John Henry Poynting mostró en 1884 que el campo electromagnético almacena energía, con densidad $u = 1/2\,(\varepsilon_0 E^2 + B^2/\mu_0)$, y que la transporta según un vector de flujo, $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{B}/\mu_0$. Los campos también transportan momento: la luz ejerce presión sobre las superficies que la absorben o reflejan, efecto medido por Piotr Lébedev en 1900 y por Ernest Nichols y Gordon Hull en 1901. Un ente que almacena y transporta energía y momento no es un artificio de cálculo, sino una realidad física con la misma dignidad que la materia ponderable.

Atelier Velázquez

Maxwell y sus contemporáneos, sin embargo, concebían el campo como estado de un medio, el **éter**, del mismo modo que el sonido es una vibración del aire. La pregunta inevitable era cómo se mueve la Tierra a través de ese éter. Esa pregunta condujo a la relatividad.

Capítulo 14. Einstein y la relatividad especial

14.1 El problema del éter

Las ecuaciones de Maxwell predicen que las ondas electromagnéticas se propagan con velocidad c. ¿Respecto de qué? Si la luz es una vibración del éter, c es su velocidad respecto del éter, y un observador que se mueve a través de él debería medir velocidades distintas según la dirección. La Tierra recorre su órbita a unos 30 km/s; el efecto sobre la velocidad de la luz sería de una parte en diez mil, y en los experimentos que comparaban dos trayectos de ida y vuelta se reducía a efectos de segundo orden, de una parte en cien millones.

Albert A. Michelson diseñó un interferómetro capaz de detectar ese efecto. Un haz de luz se divide en dos que recorren brazos perpendiculares, se reflejan en espejos y se recombinan; cualquier diferencia en el tiempo de recorrido se manifiesta como un desplazamiento de las franjas de interferencia. Con Edward Morley, en Cleveland, en 1887, utilizó un aparato montado sobre una losa de piedra que flotaba en mercurio y podía girarse lentamente, con brazos efectivos de unos once metros gracias a múltiples reflexiones. El desplazamiento esperado, $\Delta N = 2Lv^2/(\lambda c^2)$, con $L = 11$ m, $v = 30$ km/s y $\lambda = 590$ nm, es de unas 0.37 franjas. El observado fue menor que una vigésima parte de lo esperado y, probablemente, que una cuadragésima parte (Michelson y Morley, 1887).

Atelier Velázquez

14.2 Lorentz, FitzGerald y Poincaré

George FitzGerald en 1889 y Hendrik Antoon Lorentz en 1892 propusieron independientemente que los cuerpos que se mueven a través del éter se contraen en la dirección del movimiento en un factor $\sqrt{1 - v^2/c^2}$, justo lo necesario para anular el efecto. Lorentz no consideró la contracción una hipótesis ad hoc: intentó derivarla de la teoría electrónica de la materia, suponiendo que las fuerzas moleculares se transforman como las electromagnéticas. Para explicar la ausencia de efectos de primer orden introdujo en 1895 un «tiempo local», una variable auxiliar que dependía de la posición, y en 1904 obtuvo el conjunto completo de transformaciones que llevan su nombre (Lorentz, 1904). Joseph Larmor había obtenido resultados similares.

Henri Poincaré contribuyó de manera decisiva. En 1898 había argumentado que la simultaneidad de acontecimientos distantes depende de una convención. En 1900 interpretó el tiempo

local de Lorentz como el tiempo que marcan relojes sincronizados mediante señales luminosas por observadores que ignoran su movimiento. En 1904, en una conferencia en San Luis, formuló un «principio de relatividad» según el cual las leyes de los fenómenos físicos deben ser las mismas para un observador fijo y para uno en movimiento uniforme. En 1905 y 1906, en una memoria sobre la dinámica del electrón, mostró que las transformaciones de Lorentz forman un grupo y que dejan invariante la expresión $x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2$, para lo cual trató el tiempo como una cuarta coordenada imaginaria (Poincaré, 1906).

14.3 Einstein

Albert Einstein (1879–1955), empleado de tercera clase en la Oficina de Patentes de Berna, envió el 30 de junio de 1905 a la revista *Annalen der Physik* un artículo titulado «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento» (Einstein, 1905d). No citaba a Michelson ni a Poincaré, aunque conocía la obra de Lorentz y había leído *La ciencia y la hipótesis* de Poincaré. Su punto de partida no era el experimento de Michelson, sino una asimetría teórica: en la electrodinámica de Maxwell, la corriente inducida en un conductor por un imán se explica de manera distinta según se mueva el imán o el conductor, aunque el fenómeno observable dependa solo del movimiento relativo.

Atelier Velázquez

Einstein elevó a postulados dos principios. Primero, el **principio de relatividad**: las leyes de la física tienen la misma forma en todos los sistemas de referencia inerciales. Segundo, la **constancia de la velocidad de la luz**: la luz se propaga en el vacío con una velocidad c independiente del estado de movimiento de la fuente. Los dos parecen incompatibles: si un observador persigue un rayo de luz, ¿no debería verlo más lento? Einstein mostró que la incompatibilidad desaparece si se revisa el concepto de simultaneidad.

14.4 Simultaneidad

Para comparar la hora de dos relojes situados en lugares distintos, A y B, Einstein propuso un procedimiento operativo. En el instante t_A, según el reloj de A, se envía una señal luminosa hacia B, donde se refleja en el instante t_B según el reloj de B, y vuelve a A en el instante $t_A{}'$. Los relojes están sincronizados, por definición, si

$$t_B = \frac{t_A + t_A{}'}{2},$$

es decir, si el instante de reflexión está a medio camino entre la emisión y la recepción. La definición supone que la luz tarda lo mismo en ir que en volver, lo cual no puede verificarse sin relojes ya sincronizados; es, como había visto Poincaré, una convención, aunque una convención que el principio de relatividad vuelve natural.

Aplicando el procedimiento a observadores en movimiento relativo, resulta que dos acontecimientos simultáneos para uno no lo son para otro. El ejemplo clásico es un tren que pasa por un andén. Dos rayos caen en los extremos del tren en el instante en que su centro pasa junto a un observador del andén, y la luz de ambos le llega a la vez: para él, los rayos fueron simultáneos. Un viajero sentado en el centro del tren se mueve hacia uno de los rayos y se aleja del otro, de modo que recibe antes la luz del delantero. Como para él la luz también viaja con velocidad c y él está a la misma distancia de ambos extremos, debe concluir que el rayo delantero cayó antes. Ninguno de los dos se equivoca: la simultaneidad de acontecimientos distantes es relativa al sistema de referencia.

Atelier Velázquez

14.5 Transformaciones de Lorentz

De los dos postulados, Einstein derivó las transformaciones que relacionan las coordenadas de un acontecimiento en dos sistemas inerciales, S y S', donde S' se mueve con velocidad v a lo largo del eje x de S:

$$x' = \gamma\,(x - vt), \qquad y' = y, \qquad z' = z, \qquad t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right),$$

con el **factor de Lorentz**

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Para velocidades pequeñas frente a c, $\gamma \approx 1$ y $vx/c^2 \approx 0$, de modo que las transformaciones se reducen a las de Galileo, $x' = x - vt$, $t' = t$. La mecánica newtoniana aparece como límite de la relativista, no como un error.

El término vx/c^2 en la transformación del tiempo es la expresión matemática de la relatividad de la simultaneidad: dos acontecimientos con el mismo t pero distinto x tienen distinto t'.

De las transformaciones se sigue una cantidad que todos los observadores inerciales calculan igual, el **intervalo**:

$$s^2 = c^2\,\Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2.$$

Tiempo y espacio, por separado, son relativos; esta combinación es invariante. Minkowski la convertirá en el fundamento de una geometría.

14.6 Dilatación temporal

La consecuencia más contraintuitiva de la teoría se obtiene con un reloj de luz: un pulso luminoso que rebota entre dos espejos separados por una distancia d. En el sistema en que el reloj está en reposo, cada ida y vuelta dura $\Delta\tau = 2d/c$. Para un observador respecto del cual el reloj se mueve con velocidad v perpendicular a los espejos, el pulso recorre una trayectoria en zigzag más larga. Si en ese sistema el tiempo de ida y vuelta es Δt, la luz recorre en cada tramo una distancia $c\Delta t/2$, que es la hipotenusa de un triángulo cuyos catetos son d y $v\Delta t/2$. Por el teorema de Pitágoras,

$$\left(\frac{c\,\Delta t}{2}\right)^2 = d^2 + \left(\frac{v\,\Delta t}{2}\right)^2 \;\Rightarrow\; \Delta t = \frac{2d/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma\,\Delta\tau.$$

El tiempo entre dos tictacs del reloj en movimiento, medido por el observador respecto del cual se mueve, es mayor que el medido en reposo. Como el argumento vale para cualquier proceso físico —si no fuera así, comparando el reloj de luz con otro de distinto mecanismo se podría detectar el movimiento absoluto—, todos los procesos de un sistema en movimiento transcurren más despacio vistos desde otro. $\Delta\tau$ es el **tiempo propio**: el que marca un reloj que acompaña al sistema.

Ejemplo con muones. Los muones son partículas inestables producidas en la alta atmósfera por rayos cósmicos, con una vida media en reposo de 2.197 µs. Si se mueven a $v = 0.998c$, sin dilatación temporal recorrerían en promedio $c\tau \approx 659$ m antes de desintegrarse, y casi ninguno alcanzaría el suelo desde los diez o quince kilómetros de altura donde se producen. Con $\gamma = 1/\sqrt{1 - 0.998^2} \approx 15.8$, recorren en promedio $\gamma v\tau \approx 10.4$ km. Bruno Rossi y David Hall midieron el efecto en 1941 comparando flujos de muones a distintas alturas (Rossi y Hall, 1941), y David Frisch y James Smith lo repitieron con más precisión en 1963 en el monte Washington (Frisch y Smith, 1963). En 1977, en un anillo de almacenamiento del CERN, se midió la vida media de muones que circulaban con $\gamma \approx 29.3$ y se confirmó la predicción con una precisión de una parte en mil (Bailey et al., 1977).

Atelier Velázquez

Ejemplo con aviones. Un avión a 900 km/h ($v = 250\ \mathrm{m\,s^{-1}}$) tiene $\gamma - 1 \approx v^2/2c^2 \approx 3.5 \times 10^{-13}$, de modo que un reloj a bordo atrasaría unos 30 nanosegundos por día respecto de uno en reposo, despreciando los efectos gravitatorios. En octubre de 1971, Joseph Hafele y Richard Keating dieron la vuelta al mundo en aviones comerciales con cuatro relojes de cesio, primero hacia el este y después hacia el oeste. Combinando el efecto cinemático (respecto de un sistema no rotante centrado en la Tierra) y el gravitatorio, la teoría predecía una pérdida de 40 ± 23 ns en el viaje hacia el este y una ganancia de 275 ± 21 ns en el viaje hacia el oeste; se observaron 59 ± 10 ns de pérdida y 273 ± 7 ns de ganancia (Hafele y Keating, 1972).

14.7 Contracción longitudinal y composición de velocidades

Una regla que se mueve en la dirección de su longitud mide, para el observador respecto del cual se mueve, $L = L_0/\gamma$, donde L_0 es su longitud en reposo. La contracción es recíproca: cada observador ve contraídas las reglas del otro. No es una compresión física producida por el éter, como pensaba Lorentz, sino una consecuencia de que medir la longitud de un objeto en movimiento exige determinar las posiciones de sus extremos simultáneamente, y la simultaneidad es relativa.

Atelier Velázquez

Las velocidades no se suman como en la mecánica newtoniana. Si un objeto se mueve con velocidad u' en S', su velocidad en S es

$$u = \frac{u' + v}{1 + u'v/c^2}.$$

Si $u' = c$, entonces $u = c$ para cualquier v: la velocidad de la luz es la misma para todos. Ninguna composición de velocidades inferiores a c produce una velocidad superior.

14.8 Equivalencia entre masa y energía

En septiembre de 1905, Einstein publicó una nota de tres páginas con una pregunta por título: ¿depende la inercia de un cuerpo de su contenido de energía? Analizando un cuerpo que emite dos pulsos de luz en direcciones opuestas, visto desde dos sistemas de referencia, concluyó que si un cuerpo cede una energía L en forma de radiación, su masa disminuye en L/c^2 (Einstein, 1905a). Generalizada, la conclusión es la relación más famosa de la física,

$$E_0 = mc^2,$$

donde E_0 es la energía en reposo de un cuerpo de masa m. Para un cuerpo en movimiento con momento p, la relación completa es $E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$, y la energía cinética es $(\gamma - 1)mc^2$, que para velocidades pequeñas se reduce a la expresión newtoniana $1/2\, mv^2$.

Ejemplos. Un gramo de materia tiene una energía en reposo de $10^{-3} \times (2.998 \times 10^8)^2 \approx 9.0 \times 10^{13}$ J, equivalente a unas 21.5 kilotoneladas de TNT. El Sol emite 3.83×10^{26} W, lo que significa que pierde cada segundo $3.83 \times 10^{26}/c^2 \approx 4.3 \times 10^9$ kg de masa en forma de radiación. La energía procede de la fusión del hidrógeno: un núcleo de helio-4 tiene una masa menor que la de los dos protones y dos neutrones que lo forman, y la diferencia, unos 28.3 MeV, es aproximadamente el 0.75 por ciento de la masa de los nucleones. En la cadena de fusión solar, alrededor del 0.7 por ciento de la masa del hidrógeno consumido se convierte en energía.

John Cockcroft y Ernest Walton bombardearon en 1932 núcleos de litio-7 con protones acelerados y obtuvieron dos núcleos de helio con una energía cinética total de unos 17 MeV, que coincidía con la diferencia de masas calculada con la relación de Einstein, unos 17.3 MeV (Cockcroft y Walton, 1932). En 2005 se verificó la relación con una precisión de cuatro partes en diez millones comparando la energía de los rayos gamma emitidos en ciertas capturas de neutrones con las diferencias de masa medidas en trampas de iones (Rainville et al., 2005).

Atelier Velázquez

La relación $E = mc^2$ no dice que la masa «se convierta» en energía como si fueran sustancias distintas. Dice que la masa de un sistema es una medida de su energía en reposo. Un resorte comprimido pesa más que uno relajado; una taza de café caliente, más que una fría; las diferencias son inmedibles en esos casos, pero no en los núcleos. La mayor parte de la masa de los protones y neutrones, y por tanto de la materia ordinaria, no procede de la masa de los quarks, sino de la energía de la interacción fuerte que los confina, como se verá en el capítulo 22.

14.9 ¿Quién descubrió la relatividad?

La pregunta por la prioridad se ha discutido mucho. Lorentz obtuvo las transformaciones; Poincaré formuló el principio de relatividad, la convencionalidad de la simultaneidad y la estructura de grupo antes o casi a la vez que Einstein. Lo que distingue el trabajo de Einstein es la reorganización conceptual: los efectos relativistas se deducen de dos postulados cinemáticos y de un análisis operativo de la medida del tiempo, no de hipótesis sobre la estructura de la materia; el éter se declara superfluo; las transformaciones dejan de ser artificios para salvar un éter indetectable

y pasan a describir relaciones reales entre medidas. Poincaré mantuvo hasta el final un éter y un sistema de referencia privilegiado, aunque indetectable (Darrigol, 2004). Los resultados formales eran casi idénticos; las teorías, en su arquitectura, no lo eran.

Atelier Velázquez

Capítulo 15. Minkowski y el espaciotiempo

15.1 «Raum und Zeit»

Hermann Minkowski (1864–1909) había sido profesor de Einstein en el Politécnico de Zúrich. El 21 de septiembre de 1908 pronunció en Colonia, ante la Asamblea de Naturalistas y Médicos Alemanes, una conferencia titulada «Espacio y tiempo», que comenzaba con la declaración citada como epígrafe de este libro: en adelante, el espacio por sí mismo y el tiempo por sí mismo estaban condenados a desvanecerse como sombras, y solo una especie de unión de ambos conservaría una realidad independiente (Minkowski, 1909). Minkowski murió de apendicitis en enero de 1909, a los 44 años.

Minkowski reformuló la relatividad especial como la geometría de un continuo de cuatro dimensiones, al que llamó «mundo» y que hoy llamamos **espaciotiempo**. Cada acontecimiento es un punto del mundo, especificado por cuatro coordenadas. La historia de una partícula es una curva en ese continuo, su **línea de universo** (*Weltlinie*). Las transformaciones de Lorentz son rotaciones generalizadas en ese espacio, del mismo modo que las rotaciones ordinarias cambian las coordenadas de un punto sin cambiar su distancia al origen.

Atelier Velázquez

15.2 La métrica

La geometría de Minkowski está definida por su **métrica**, la expresión del intervalo entre dos acontecimientos infinitesimalmente próximos. Con la convención de signos que se usará en adelante,

$$ds^2 = -c^2\,dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2.$$

A diferencia de la geometría euclidiana, en la que la distancia al cuadrado es siempre positiva, aquí ds^2 puede ser negativo, nulo o positivo, y esa diferencia clasifica las relaciones entre acontecimientos. Si $ds^2 < 0$, el intervalo es **temporal**: un cuerpo material puede viajar de un acontecimiento al otro, y existe un sistema de referencia en que ambos ocurren en el mismo lugar. Si $ds^2 = 0$, es **luminoso**: solo una señal de luz puede conectarlos. Si $ds^2 > 0$, es **espacial**: ninguna señal puede conectarlos, y existe un sistema de referencia en que son simultáneos.

15.3 Tiempo propio

Para una partícula que se mueve a lo largo de una línea de universo temporal, el **tiempo propio** se define como

$$d\tau = \frac{\sqrt{-ds^2}}{c} = dt\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}, \qquad \tau = \int \sqrt{1-\frac{v(t)^2}{c^2}}\; dt.$$

Es el tiempo que marca un reloj transportado por la partícula, y es un invariante: todos los observadores calculan el mismo valor. El tiempo coordenado t depende del sistema de referencia; el tiempo propio depende de la trayectoria.

Aquí se resuelve la llamada paradoja de los gemelos. Uno de dos gemelos viaja a $0.8c$ hasta una estrella a 4 años luz y regresa; el otro permanece en la Tierra. Para el gemelo terrestre, el viaje dura $2 \times 4/0.8 = 10$ años. El tiempo propio del viajero, en cada tramo, es $\Delta t\sqrt{1-0.8^2} = 0.6\,\Delta t$, de modo que envejece 6 años. La aparente paradoja —¿no podría el viajero considerar que es el terrestre quien se mueve?— se disuelve al advertir que las dos líneas de universo no son equivalentes: la del gemelo terrestre es recta (inercial) y la del viajero es quebrada, porque cambia de sistema inercial al dar la vuelta. En la geometría de Minkowski, la línea recta entre dos acontecimientos con separación temporal es la de **máximo** tiempo propio: lo contrario de la geometría euclidiana, donde la recta es la más corta. Toda desviación de la inercia reduce el tiempo propio acumulado.

Atelier Velázquez

15.4 Conos de luz y orden causal

Por cada acontecimiento pasan las líneas de universo de todos los rayos de luz que se emiten desde él o llegan a él. Su conjunto forma un doble cono, el **cono de luz** (Figura 3). El interior del cono futuro contiene todos los acontecimientos que pueden ser influidos por el acontecimiento del vértice; el interior del cono pasado, todos los que pueden haberlo influido. El exterior, la región de separación espacial, contiene acontecimientos que no pueden tener relación causal con él.

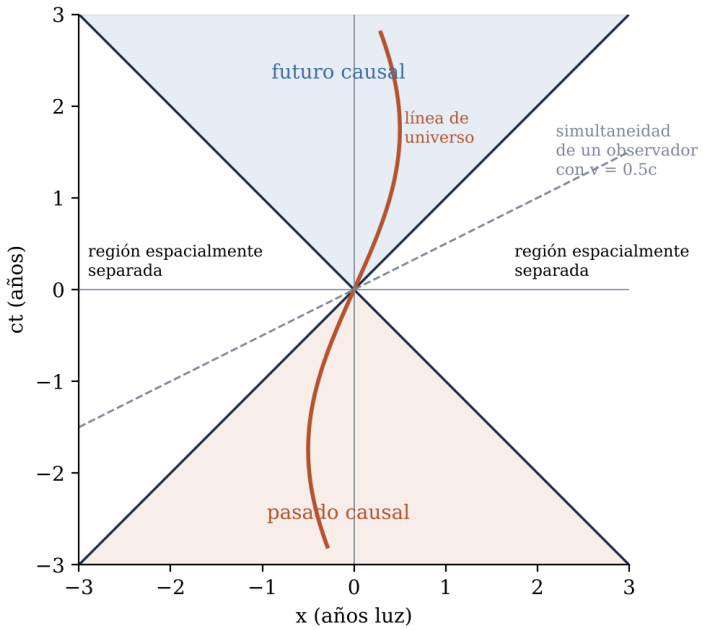


Figura 3. Diagrama de Minkowski con los conos de luz de un acontecimiento situado en el origen. La línea de universo de un cuerpo material permanece dentro del cono. La recta discontinua representa los acontecimientos simultáneos con el origen para un observador que se mueve a 0.5c: atraviesa la región espacialmente separada, cuyo orden temporal respecto del origen depende del observador.

Fuente. Elaboración propia. Unidades en que c = 1 año luz por año.

Atelier Velázquez

La estructura de conos es invariante: todos los observadores inerciales coinciden en qué acontecimientos están dentro del cono futuro o pasado de otro. Para acontecimientos con separación temporal, el orden temporal es absoluto: si B está en el cono futuro de A, todos los observadores ven A antes que B. Para acontecimientos con separación espacial, el orden temporal depende del observador. Por eso la relatividad prohíbe las señales más rápidas que la luz: si existieran, habría observadores para quienes el efecto precede a la causa. La relatividad conserva así una noción de causalidad, pero la inscribe en la geometría.

15.5 Diagramas espaciotemporales

Los diagramas de Minkowski se convirtieron en una herramienta de razonamiento tan poderosa como las figuras de Euclides. Representan el tiempo en el eje vertical y una dimensión espacial en el horizontal, con unidades tales que la luz se mueve a 45°. El eje temporal de un observador en movimiento se inclina hacia la línea de luz, y su eje de simultaneidad se inclina simétricamente, de modo que los dos ejes se cierran como unas tijeras a medida que la velocidad se acerca a la

de la luz. Muchas «paradojas» relativistas, como la del tren y el túnel o la de los gemelos, se resuelven dibujando las líneas de universo.

15.6 Formulación geométrica e interpretación ontológica

Einstein recibió al principio con desdén la formulación de Minkowski, a la que, según los testimonios recogidos por su biógrafo, llamó erudición superflua (Pais, 1982). Pocos años después, la geometría del espaciotiempo resultó indispensable para la relatividad general. Pero la formulación geométrica no impone por sí sola una ontología.

Pueden distinguirse al menos tres lecturas. Según la lectura **substantivista**, el espaciotiempo es una entidad real con estructura propia, en la que ocurren los acontecimientos. Según la **relacional**, el espaciotiempo es solo el sistema de relaciones entre acontecimientos y cuerpos, sin existencia independiente, en la línea de Leibniz. Según la lectura **dinámica**, defendida por Harvey Brown, los efectos relativistas como la contracción de las reglas deben explicarse por las leyes dinámicas de la materia que compone las reglas y los relojes —leyes que tienen la simetría de Lorentz—, y la geometría de Minkowski codifica esa simetría en lugar de explicarla (Brown, 2005).

Atelier Velázquez

Una cuarta cuestión, distinta de las anteriores, es si la relatividad implica el **universo-bloque**, es decir, la tesis de que todos los acontecimientos pasados, presentes y futuros existen por igual. El argumento de Rietdijk y Putnam razona así: si lo simultáneo con el presente de un observador es real, y si la realidad debe ser la misma para todos los observadores, entonces, como la simultaneidad es relativa, acontecimientos del futuro de un observador son simultáneos con el presente de otro situado en el mismo lugar, y por tanto reales (Putnam, 1967). Howard Stein respondió que el argumento supone algo que la relatividad no autoriza: que «real para mí» deba definirse por la simultaneidad. En la estructura de Minkowski, el único «presente» definido sin elegir un sistema de referencia es el acontecimiento mismo; las relaciones invariantes son las de los conos (Stein, 1968). La relatividad es compatible con el eternalismo, pero también con interpretaciones que atribuyen realidad al cono pasado o que consideran el «devenir» una relación local a lo largo de cada línea de universo. El capítulo 48 volverá sobre el debate. Aquí basta establecer la distinción: una cosa es lo que la teoría afirma sobre las relaciones entre medidas, que está confirmado con enorme precisión; otra, lo que se infiere sobre la naturaleza de la existencia, que depende de premisas filosóficas adicionales.

Capítulo 16. Emmy Noether y las leyes de conservación

16.1 Una biografía intelectual

Emmy Noether (1882–1935) nació en Erlangen, hija del matemático Max Noether. En una época en que las universidades alemanas solo admitían mujeres como oyentes con permiso de cada profesor, obtuvo en 1907 un doctorado bajo la dirección de Paul Gordan con una tesis de teoría de invariantes de carácter puramente computacional, que ella misma calificaría después con dureza. Durante años enseñó en Erlangen sin cargo ni salario. En 1915, David Hilbert y Felix Klein la invitaron a Gotinga, donde trabajaban en los fundamentos matemáticos de la recién nacida relatividad general y necesitaban su dominio de la teoría de invariantes. La facultad se opuso a su habilitación por ser mujer; Hilbert hizo que dictara cursos bajo su propio nombre. La habilitación llegó en 1919, tras los cambios legales de la república de Weimar (Kosmann-Schwarzbach, 2011).

Atelier Velázquez

El problema que se le planteó en Gotinga era preciso. En la relatividad general, la conservación de la energía parecía tener un estatuto extraño: la ecuación que la expresaba se cumplía de manera idéntica, como consecuencia de la estructura de la teoría, y no como resultado de las ecuaciones del movimiento. Hilbert había notado el fenómeno sin comprenderlo. El 26 de julio de 1918, Klein presentó ante la Sociedad Real de Ciencias de Gotinga el artículo de Noether «Problemas variacionales invariantes» (Noether, 1918), que contenía dos teoremas. El primero relaciona simetrías y leyes de conservación en general; el segundo explica el caso de la relatividad general.

A partir de 1920, Noether se dedicó al álgebra abstracta y transformó la disciplina: la teoría de ideales y los anillos que llevan su nombre forman parte del vocabulario básico de la matemática contemporánea. Formó una escuela, los «chicos de Noether», que incluía a Bartel van der Waerden, cuyo libro *Álgebra moderna* difundió sus métodos. En abril de 1933, la ley nazi de restauración de la función pública la expulsó de la universidad por ser judía. Emigró a Estados Unidos, enseñó en el Bryn Mawr College y en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, y murió en abril de 1935 tras una operación quirúrgica.

16.2 Simetría e invariancia

La palabra **simetría** procede del griego **συμμετρία** (*symmetría*), formada por *syn*, «con», y **μέτρον** (*métron*), «medida». Significaba «conmensurabilidad», «proporción debida entre las partes»; Vitrubio la usó para la proporción arquitectónica. El sentido actual de invariancia bajo una transformación es moderno. **Invariancia** y el término matemático *invariante* fueron difundidos por James Joseph Sylvester a mediados del siglo XIX en la teoría algebraica de invariantes, el campo en que Noether se había formado.

En física, una **simetría** es una transformación que deja invariante la forma de las leyes. Si un experimento da el mismo resultado hoy que mañana, las leyes son invariantes bajo traslaciones en el tiempo. Si da el mismo resultado aquí que en otro laboratorio, son invariantes bajo traslaciones espaciales. Si da el mismo resultado con el aparato orientado al norte o al este, son invariantes bajo rotaciones. Estas simetrías forman **grupos**: la composición de dos traslaciones es una traslación, cada traslación tiene una inversa. Las simetrías continuas, que dependen de un parámetro que puede variar de manera continua (una distancia, un ángulo, un intervalo de tiempo), forman grupos de Lie, nombre del matemático noruego Sophus Lie, que los estudió en el siglo XIX.

Atelier Velázquez

16.3 El teorema

En la formulación lagrangiana, una transformación es una simetría si deja invariante la acción $S = \int L\,dt$ (o la cambia a lo sumo en un término de frontera que no afecta a las ecuaciones del movimiento). El **primer teorema de Noether** afirma: a cada simetría continua de la acción corresponde una cantidad conservada.

La demostración, en el caso más sencillo, ocupa unas pocas líneas. Supóngase que el lagrangiano $L(q, \dot{q})$ no cambia cuando se desplaza la coordenada q una cantidad infinitesimal $\varepsilon K(q)$. Defínase

$$Q = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\, K(q).$$

Su derivada temporal es

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\right) K + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\, \dot{K} = \frac{\partial L}{\partial q}\, K + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\, \dot{K},$$

donde en la segunda igualdad se ha usado la ecuación de Euler-Lagrange. El último miembro es exactamente el cambio de L bajo la transformación dividido por ε, que es nulo por hipótesis. Por tanto, $dQ/dt = 0$: la cantidad Q se conserva a lo largo de toda trayectoria real.

Aplicado a las simetrías del espacio y del tiempo, el teorema produce las leyes de conservación fundamentales de la mecánica.

Traslaciones espaciales. Si el lagrangiano no cambia cuando todas las posiciones se desplazan en la misma cantidad —es decir, si no hay un lugar privilegiado—, $K = 1$ para cada coordenada de posición y se conserva el **momento lineal** total $p = \partial L/\,\partial \dot{x}$.

Rotaciones. Si el lagrangiano no cambia al girar el sistema un ángulo alrededor de un eje, se conserva el **momento angular** respecto de ese eje, $L_z = xp_y - yp_x$. Un planeta que se mueve bajo una fuerza central dirigida hacia el Sol conserva su momento angular respecto del Sol, y eso es exactamente la segunda ley de Kepler: el área barrida por unidad de tiempo es $L_z/2m$. La ley de las áreas, obtenida por Kepler a partir de las observaciones de Tycho, resulta ser la expresión de la simetría rotacional de la gravitación.

Atelier Velázquez

Traslaciones temporales. Si el lagrangiano no depende explícitamente del tiempo, la cantidad

$$E = \sum_i \dot{q}_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - L$$

satisface $dE/dt = -\partial L/\,\partial t = 0$. Esa cantidad es el hamiltoniano, que en los casos usuales coincide con la **energía** total. La conservación de la energía, que Joule, Mayer y Helmholtz habían establecido por vías experimentales y que los físicos del siglo XIX habían elevado a principio, resulta ser la consecuencia de que las leyes de la física no cambian con el tiempo.

En la teoría cuántica de campos, el teorema se aplica a simetrías internas, que no actúan sobre el espacio ni el tiempo. La invariancia de la acción de la electrodinámica bajo un cambio de fase global de los campos de los electrones produce la **conservación de la carga eléctrica**.

16.4 Condiciones de aplicación

El teorema tiene condiciones que conviene precisar, porque se cita a menudo de manera imprecisa.

Primera: se aplica a simetrías **continuas**. Las simetrías discretas, como la reflexión especular (paridad) o la inversión temporal, no producen cantidades conservadas en el sentido de Noether, aunque en mecánica cuántica pueden asociarse a números cuánticos que se conservan multiplicativamente.

Segunda: requiere que el sistema admita una formulación variacional, mediante un lagrangiano y una acción. Los sistemas disipativos, con fricción, no la admiten en general, y no tienen por qué conservar la energía mecánica.

Tercera: la simetría debe serlo de la acción, no solo de las ecuaciones del movimiento. Hay ecuaciones con simetrías que no proceden de simetrías de ninguna acción, y entonces el teorema no garantiza una cantidad conservada.

Cuarta, y más importante para la cosmología: si las leyes **no** son invariantes bajo traslaciones temporales, la energía no tiene por qué conservarse globalmente. En un universo en expansión descrito por la relatividad general no existe, en general, una simetría de traslación temporal global, y por tanto no existe una energía total conservada definida de manera única. Un fotón que viaja por el universo en expansión ve aumentar su longitud de onda y disminuir su energía, y esa energía no «va» a ninguna parte. La conservación local, expresada por la ecuación $\nabla_\mu T^{\mu\nu} = 0$, sigue valiendo en cada punto; lo que falla es la posibilidad de sumar las energías de regiones distantes en un total conservado.

Atelier Velázquez

16.5 El segundo teorema

El segundo teorema de Noether se aplica a simetrías que dependen de funciones arbitrarias del espacio y el tiempo, no de parámetros constantes. Tales simetrías **locales** son características de la relatividad general, que es invariante bajo cambios arbitrarios de coordenadas, y de las teorías gauge, que son invariantes bajo cambios de fase que varían de un punto a otro. El segundo teorema establece que, en esos casos, las ecuaciones del movimiento satisfacen identidades —en la relatividad general, las identidades de Bianchi— y que las leyes de conservación asociadas se cumplen idénticamente. Esto explicaba el fenómeno que había desconcertado a Hilbert: en la relatividad general, la «conservación de la energía» que se obtiene de la invariancia general es una identidad matemática, no una ley física con contenido propio (Brading y Brown, 2003).

16.6 Importancia contemporánea

El teorema de Noether invirtió la relación entre leyes de conservación y simetrías. En el siglo XIX, las leyes de conservación eran principios empíricos generales. Después de Noether, se entienden como consecuencias de simetrías, y las simetrías se convirtieron en el principio heurístico central de la física teórica. El Modelo Estándar de las partículas, examinado en el capítulo 22, se construye exigiendo invariancia bajo ciertos grupos de simetría locales; las interacciones aparecen como consecuencia de esa exigencia.

La consecuencia filosófica merece atención, porque se presta a sobreinterpretación. El teorema establece una correspondencia matemática entre dos estructuras de una teoría formulada variacionalmente: una simetría de la acción y una cantidad conservada. No dice cuál de las dos es más fundamental, ni que la simetría «cause» la conservación. Lo que puede afirmarse es que la homogeneidad del tiempo en las leyes y la conservación de la energía son dos caras de un mismo hecho estructural. Esta es una conexión entre la temporalidad física y la metrología: si un experimento repetido hoy y mañana da el mismo resultado —lo cual es la condición misma de la medida reproducible—, la energía se conserva. El tiempo como parámetro homogéneo de las leyes, la energía como cantidad conservada y la reproducibilidad de las operaciones de medida forman un nudo que Noether ayudó a desatar.

Atelier Velázquez

Capítulo 17. Relatividad general

17.1 El problema

La relatividad especial dejó un problema pendiente: la gravitación newtoniana actúa instantáneamente a distancia, lo que es incompatible con la estructura causal de los conos de luz. Además, la teoría especial privilegia los sistemas de referencia inerciales, y no hay manera física de identificarlos si en todas partes hay gravedad.

En 1907, mientras preparaba un artículo de revisión sobre la relatividad, Einstein tuvo la idea que él mismo describió después como la más feliz de su vida (Pais, 1982): un observador que cae libremente no siente su propio peso. En un ascensor en caída libre, todos los objetos flotan; en una nave espacial que acelera lejos de toda masa, los objetos caen hacia el suelo exactamente como en la superficie terrestre. Einstein elevó esta observación a principio, el **principio de equivalencia**: en una región suficientemente pequeña, los efectos de un campo gravitatorio son indistinguibles de los de una aceleración del sistema de referencia (Einstein, 1907). El principio explica por qué todos los cuerpos caen con la misma aceleración, hecho que en la teoría newtoniana es una coincidencia entre la masa inercial y la gravitatoria. El satélite MICROSCOPE verificó esa igualdad en 2022 con una precisión de una parte en 10^{15} (Touboul et al., 2022).

Atelier Velázquez

Del principio de equivalencia se siguen dos predicciones cualitativas: la luz debe curvarse en un campo gravitatorio, y los relojes situados más abajo en un potencial gravitatorio deben marchar más despacio. Para cuantificarlas y construir una teoría completa, Einstein necesitaba un lenguaje matemático que no conocía.

17.2 Riemann y la geometría diferencial

Carl Friedrich Gauss había mostrado en 1827 que la curvatura de una superficie puede determinarse mediante medidas realizadas exclusivamente sobre ella, sin referencia al espacio que la contiene: un ser bidimensional que midiera triángulos sobre una esfera descubriría que sus ángulos suman más de 180°. En 1854, Bernhard Riemann (1826–1866) generalizó la idea en su lección de habilitación, «Sobre las hipótesis en que se funda la geometría», a espacios de cualquier número de dimensiones —las **variedades**— cuya geometría está determinada en cada punto por una **métrica** que da la distancia infinitesimal entre puntos próximos:

$$ds^2 = \sum_{i,j} g_{ij}\,(x)\,dx^i\,dx^j.$$

Riemann sugirió que la geometría del espacio físico podría depender de las fuerzas que actúan en él y que la cuestión debía decidirse empíricamente (Riemann, 1868). Elwin Christoffel, Gregorio Ricci-Curbastro y Tullio Levi-Civita desarrollaron en las décadas siguientes el **cálculo diferencial absoluto**, hoy llamado cálculo tensorial, que permite escribir ecuaciones con la misma forma en cualquier sistema de coordenadas.

Un **tensor** es un objeto matemático que se transforma de manera determinada bajo cambios de coordenadas: sus componentes cambian, pero de forma que las relaciones tensoriales se mantienen. Un escalar (un número) es un tensor de orden cero; un vector, de orden uno; la métrica $g_{\mu\nu}$, una tabla de dieciséis componentes (diez independientes, por simetría) en cuatro dimensiones, es un tensor de orden dos. Si una ecuación entre tensores vale en un sistema de coordenadas, vale en todos. Esa propiedad era la que Einstein necesitaba para formular leyes válidas para cualquier observador.

Atelier Velázquez

Einstein aprendió estas herramientas con su amigo Marcel Grossmann, matemático en Zúrich. En 1913 publicaron juntos un primer esbozo de la teoría, la llamada teoría *Entwurf*. Durante dos años Einstein se desvió por un camino equivocado, convencido por un argumento —el argumento del agujero— de que ecuaciones plenamente covariantes no podían determinar el campo gravitatorio de manera única. En noviembre de 1915, en cuatro comunicaciones sucesivas a la Academia Prusiana de Ciencias, llegó a la forma final. El 18 de noviembre mostró que la teoría explicaba el avance del perihelio de Mercurio; el 25 presentó las ecuaciones de campo definitivas (Einstein, 1915). David Hilbert presentó el 20 de noviembre una deducción variacional de ecuaciones equivalentes; el análisis de las pruebas de imprenta de su artículo ha mostrado que la versión original de Hilbert no contenía las ecuaciones finales en forma explícita (Corry et al., 1997).

17.3 Curvatura, geodésicas y las ecuaciones de campo

En la relatividad general, la gravitación no es una fuerza, sino la curvatura del espaciotiempo. Un cuerpo en caída libre sigue una **geodésica**, la generalización de la línea recta a un espacio curvo, determinada por la ecuación

$$\frac{d^2x^\mu}{d\tau^2} + \Gamma^\mu_{\alpha\beta}\,\frac{dx^\alpha}{d\tau}\,\frac{dx^\beta}{d\tau} = 0,$$

donde los símbolos de Christoffel $\Gamma^\mu_{\alpha\beta}$ se calculan a partir de las derivadas de la métrica. La Tierra no gira alrededor del Sol porque una fuerza la desvíe de una línea recta, sino porque sigue la trayectoria más recta posible en un espaciotiempo curvado por la masa del Sol.

La curvatura se mide con el **tensor de Riemann**, que indica cuánto cambia un vector al transportarlo paralelamente a lo largo de un pequeño circuito cerrado. De él se obtienen por contracción el **tensor de Ricci** $R_{\mu\nu}$ y el **escalar de curvatura** R. Las **ecuaciones de campo de Einstein** relacionan la curvatura con el contenido de materia y energía:

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}\,T_{\mu\nu}, \qquad G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - 1/2\,R\,g_{\mu\nu}.$$

El lado izquierdo describe la geometría: el **tensor de Einstein** $G_{\mu\nu}$ y, si se incluye, el término de la **constante cosmológica** Λ, que Einstein añadió en 1917 y que se examinará en el capítulo 28. El lado derecho describe la materia: el **tensor de energía-momento** $T_{\mu\nu}$, que incluye densidad de energía, flujos de momento y presiones. El factor $8\pi G/c^4 \approx 2.08 \times 10^{-43}\ \mathrm{N}^{-1}$ es extraordinariamente pequeño: hace falta mucha energía para curvar apreciablemente el espaciotiempo. Una síntesis frecuente, debida a John Wheeler, resume la teoría diciendo que la materia indica al espaciotiempo cómo curvarse y el espaciotiempo indica a la materia cómo moverse (Misner et al., 1973).

Atelier Velázquez

Son diez ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, no lineales y acopladas. La no linealidad tiene un significado físico: la energía del campo gravitatorio es ella misma fuente de gravedad. En el límite de campos débiles y velocidades pequeñas, la componente temporal de la métrica es $g_{00} \approx -(1 + 2\Phi/c^2)$, donde Φ es el potencial newtoniano, y las ecuaciones de Einstein se reducen a la ecuación de Poisson de la gravitación newtoniana, $\nabla^2\Phi = 4\pi G\rho$. La teoría de Newton es, de nuevo, un límite.

17.4 Mercurio

Karl Schwarzschild, astrónomo alemán que servía como oficial en el frente ruso, encontró en diciembre de 1915, semanas después de la publicación de las ecuaciones, la primera solución exac-

ta: el campo gravitatorio en el exterior de una masa esférica sin rotación (Schwarzschild, 1916). Murió en mayo de 1916 a causa de una enfermedad contraída en el frente.

Aplicada a la órbita de un planeta, la solución de Schwarzschild produce un avance del perihelio por cada órbita de

$$\Delta\varphi = \frac{6\pi G M_\odot}{c^2\, a\,(1-e^2)},$$

donde a es el semieje mayor y e la excentricidad. Para Mercurio, con $a = 5.79 \times 10^{10}$ m, $e = 0.2056$ y un periodo de 87.97 días, el avance es de unos 5.0×10^{-7} radianes por órbita, que en un siglo de 415 órbitas suman unos 43 segundos de arco. Es exactamente la anomalía que Le Verrier había identificado en 1859 y que se había intentado explicar con un planeta intramercurial, Vulcano, nunca encontrado. Einstein confesó a Paul Ehrenfest que el resultado le había producido palpitaciones (Pais, 1982).

17.5 La desviación de la luz y el eclipse de 1919

Un rayo de luz que pasa rozando el Sol debe desviarse un ángulo $\delta = 4GM_\odot/(c^2 R_\odot) \approx 8.49 \times 10^{-6}$ radianes, unos 1.75 segundos de arco, el doble del valor que se obtiene con un cálculo newtoniano o con el principio de equivalencia solo. La mitad del efecto procede de la curvatura del espacio, que la teoría newtoniana no contempla.

El 29 de mayo de 1919 dos expediciones británicas fotografiaron el campo de estrellas en torno al Sol eclipsado, una en Sobral, Brasil, y otra en la isla de Príncipe, frente a la costa africana. Comparando las posiciones con fotografías del mismo campo tomadas meses antes, cuando el Sol estaba en otra parte del cielo, obtuvieron desviaciones de 1.98 ± 0.12 segundos de arco en Sobral y de 1.61 ± 0.30 en Príncipe (Dyson et al., 1920). El anuncio en noviembre de 1919 convirtió a Einstein en una celebridad mundial.

El episodio ha sido objeto de controversia historiográfica. En 1980, John Earman y Clark Glymour argumentaron que Arthur Eddington, defensor entusiasta de la teoría, había descartado sin justificación suficiente las placas de un segundo telescopio de Sobral, que daban un valor cercano al newtoniano (Earman y Glymour, 1980). Una reevaluación posterior, basada en un nuevo análisis de las placas realizado en 1979 y en la documentación de la expedición, concluyó que el descarte respondía a defectos reales del telescopio, cuyo espejo se había deformado por el

Atelier Velázquez

calor (Kennefick, 2009). En cualquier caso, la confirmación decisiva no vino de 1919, sino de las medidas radioastronómicas posteriores. La interferometría de muy larga base ha medido la desviación de las ondas de radio de cuásares con una precisión de una parte en diez mil, y el retardo de las señales de la sonda Cassini al pasar junto al Sol en 2002 confirmó la predicción de la relatividad general con una precisión de dos partes en cien mil (Bertotti et al., 2003).

17.6 Tiempo gravitacional

Un reloj situado en un potencial gravitatorio más bajo marcha más despacio que uno situado más arriba. En un campo débil, la diferencia de ritmos entre dos relojes separados por una diferencia de potencial $\Delta\Phi$ es

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} \approx \frac{\Delta\Phi}{c^2},$$

que cerca de la superficie terrestre, con $\Delta\Phi = gh$, vale gh/c^2. Robert Pound y Glen Rebka midieron el efecto en 1960 en una torre de la Universidad de Harvard de 22.5 m de altura, donde la diferencia esperada es de $9.81 \times 22.5/c^2 \approx 2.5 \times 10^{-15}$, utilizando la absorción resonante de rayos gamma (efecto Mössbauer); obtuvieron un acuerdo del diez por ciento, mejorado al uno por ciento en 1964 (Pound y Rebka, 1960). En 1976, un máser de hidrógeno lanzado en un cohete a 10 000 km de altura confirmó la predicción con una precisión de siete partes en cien mil (Vessot et al., 1980), y en 2018 dos satélites del sistema Galileo puestos accidentalmente en órbitas excéntricas permitieron mejorarla en un factor de cuatro (Delva et al., 2018). En la actualidad, como se vio en el capítulo 8, los relojes ópticos detectan la diferencia en un milímetro de altura.

El efecto acumulado puede ser apreciable. Un cálculo basado en el perfil de densidad de la Tierra muestra que su centro es unos dos años y medio más joven que su superficie, porque ha permanecido durante 4 500 millones de años en un potencial gravitatorio más bajo (Uggerhøj et al., 2016). El tiempo propio, como se dijo en el capítulo anterior, depende de la trayectoria; en la relatividad general depende también del lugar.

17.7 Lentes, horizontes y ondas

La curvatura de la luz convierte a las galaxias y los cúmulos en **lentes gravitacionales**. En 1979 se observó la primera, un cuásar duplicado por una galaxia interpuesta (Walsh et al., 1979). Hoy

Atelier Velázquez

las lentes gravitacionales fuertes producen arcos y anillos completos, y el lente débil, la distorsión estadística sutil de las formas de miles de galaxias de fondo, es uno de los métodos principales para cartografiar la materia oscura, como se verá en el capítulo 25.

La solución de Schwarzschild contiene una superficie singular a un radio $r_s = 2GM/c^2$, el **radio de Schwarzschild**: unos 2.95 km para el Sol y 8.9 mm para la Tierra. Durante décadas se discutió si esa superficie tenía significado físico. Se entendió después que no es una singularidad de la geometría, sino de las coordenadas, y que marca un **horizonte de sucesos**: una frontera que la luz no puede cruzar desde dentro hacia fuera. Los objetos compactos cuya masa cabe dentro de su radio de Schwarzschild son los agujeros negros, tema del capítulo 30.

Einstein mostró en 1916 que la teoría admite soluciones ondulatorias, y en 1918 calculó la potencia emitida por un sistema cuyo momento cuadrupolar varía en el tiempo. Durante años dudó de que las ondas gravitacionales fueran reales; en 1936 envió con Nathan Rosen un artículo a *Physical Review* que concluía que no existían, y el informe anónimo del árbitro, Howard Robertson, señaló un error que Einstein acabó reconociendo. La primera prueba indirecta llegó en 1974, cuando Russell Hulse y Joseph Taylor descubrieron un púlsar en un sistema binario (Hulse y Taylor, 1975). El periodo orbital del sistema disminuye por la energía que se lleva la radiación gravitatoria, y décadas de observación muestran que la disminución coincide con la predicción con una precisión de unas pocas partes en mil (Weisberg y Huang, 2016).

Atelier Velázquez

El 14 de septiembre de 2015, los dos detectores de LIGO, en Hanford y Livingston, registraron la señal de la fusión de dos agujeros negros de unas 36 y 29 masas solares a unos 410 megapársecs; unas tres masas solares se convirtieron en energía de ondas gravitacionales en una fracción de segundo. La deformación relativa máxima del espacio que midieron los detectores fue de 10^{-21}: en un brazo de 4 km, una variación de longitud de unos 4×10^{-18} m, una milésima del diámetro de un protón (Abbott et al., 2016). El 17 de agosto de 2017 se detectó la fusión de dos estrellas de neutrones, acompañada 1.7 segundos después por un estallido de rayos gamma registrado por el satélite Fermi. Tras un viaje de unos 130 millones de años, la diferencia de llegada permitió concluir que la velocidad de las ondas gravitacionales coincide con la de la luz con una precisión mejor que una parte en 10^{15} (Abbott et al., 2017). El funcionamiento de los detectores se examina en el capítulo 41.

Tabla 6. Pruebas experimentales seleccionadas de la relatividad general

Efecto	Predicción	Primera medida	Precisión actual aproximada
Igualdad de masa inercial y gravitatoria	Exacta	Eötvös (1889–1908)	10^{-15} (MICROSCOPE, 2022)
Avance del perihelio de Mercurio	43″ por siglo	Le Verrier (anomalía, 1859)	10^{-3} (radar, sondas)
Desviación de la luz	1.75″ en el limbo solar	Eclipse de 1919	10^{-4} (VLBI)
Retardo de Shapiro	Retraso de señales junto al Sol	Radar planetario (1968)	2×10^{-5} (Cassini, 2003)
Corrimiento gravitacional al rojo	$\Delta\Phi/c^2$	Pound y Rebka (1960)	2.5×10^{-5} (Galileo, 2018)
Arrastre de sistemas inerciales	39 mas/año (Gravity Probe B)	Gravity Probe B (2011)	≈20 % (GP-B); mejor con satélites LAGEOS
Emisión de ondas gravitacionales	Fórmula cuadrupolar	Púlsar binario (1974)	$\approx 10^{-3}$
Detección directa de ondas	Formas de onda de fusiones	GW150914 (2015)	Pruebas de consistencia en cientos de eventos
Velocidad de las ondas gravitacionales	c	GW170817 (2017)	10^{-15}

Nota. Elaboración propia a partir de Will (2014), Touboul et al. (2022), Bertotti et al. (2003), Delva et al. (2018), Everitt et al. (2011) y Abbott et al. (2016, 2017). mas: milisegundos de arco.

Atelier Velázquez

17.8 Aplicaciones y límites

La relatividad general, que durante medio siglo pareció una teoría hermosa con pocas consecuencias prácticas, es hoy indispensable para el sistema de posicionamiento global (capítulo 40), para la cartografía de la materia oscura mediante lentes, para la interpretación de las ondas gravitacionales y para la cosmología entera. Es la teoría física mejor contrastada en el dominio de los campos gravitatorios débiles y, desde 2015, también en el de los campos intensos y dinámicos.

Sus límites son de dos clases. Hay límites internos: la teoría predice, bajo condiciones muy generales, la formación de **singularidades**, puntos donde la curvatura y la densidad divergen y las ecuaciones dejan de tener sentido, en el interior de los agujeros negros y quizá en el origen del universo (capítulo 30). Y hay límites externos: la teoría es clásica, en el sentido de que no incorpora los principios cuánticos, y no se sabe cómo combinarla con ellos de manera consistente (capítulo 33).

Una cuestión filosófica queda planteada por la propia construcción de la teoría. El argumento del agujero que extravió a Einstein en 1913 muestra que, si se considera que los puntos del espaciotiempo tienen identidad propia independiente de los campos, las ecuaciones no determi-

nan qué ocurre en cada punto. Einstein resolvió la dificultad aceptando que los puntos no tienen identidad física al margen de lo que ocurre en ellos: lo que tiene significado son las coincidencias entre acontecimientos. John Earman y John Norton reavivaron en 1987 la discusión al argumentar que el substantivismo ingenuo sobre el espaciotiempo conduce a un indeterminismo inaceptable (Earman y Norton, 1987). La relatividad general es, en este sentido, más relacional que la relatividad especial: la métrica no es un escenario fijo sobre el que ocurren los procesos, sino un campo dinámico que interactúa con la materia. Esta propiedad, llamada independencia del fondo, será una de las exigencias que los programas de gravedad cuántica, en la Parte VIII, intentarán respetar o reinterpretar.

Con la relatividad general, el tiempo se ha descompuesto en varias nociones. Hay un tiempo propio, invariante, asociado a cada línea de universo, que es lo que miden los relojes. Hay tiempos coordenados, que dependen de la elección de coordenadas y carecen de significado físico directo. Hay una estructura causal, dada por los conos de luz, que en un espaciotiempo curvo se inclinan y deforman de un punto a otro. Y no hay, en general, un tiempo global privilegiado que permita definir «el estado del universo en un instante». Que en cosmología pueda definirse un tiempo cósmico, como se verá en el capítulo 26, es una propiedad de soluciones particulares con alta simetría, no de la teoría en general.

Atelier Velázquez

Parte V. La arquitectura cuántica

Atelier Velázquez

Capítulo 18. La revolución cuántica

18.1 El cuerpo negro

La física cuántica no nació de una especulación sobre los fundamentos, sino de un problema de medida industrial y académica: la radiación que emiten los cuerpos calientes. Gustav Kirchhoff había mostrado en 1859–1860 que un cuerpo ideal que absorbe toda la radiación que recibe —un **cuerpo negro**— emite una radiación cuya distribución entre las distintas longitudes de onda depende solo de su temperatura, no de su material. Esa función universal debía poder derivarse de primeros principios. Su determinación experimental interesaba también a la industria de la iluminación eléctrica, y el Instituto Imperial de Física y Técnica de Berlín construyó cavidades calentadas con un pequeño orificio que se comportaban como cuerpos negros casi perfectos.

Hacia 1900 había dos fórmulas teóricas. La ley de Wilhelm Wien (1896) se ajustaba bien a las longitudes de onda cortas y fallaba en las largas. La de Lord Rayleigh (1900), derivada de la física estadística clásica y completada por James Jeans en 1905, se ajustaba en las longitudes largas pero predecía que la energía emitida crece sin límite al disminuir la longitud de onda: una cavidad a cualquier temperatura debería emitir una cantidad infinita de energía en el ultravioleta. Paul Ehrenfest llamó después a este resultado la «catástrofe ultravioleta».

Atelier Velázquez

En octubre de 1900, Heinrich Rubens y Ferdinand Kurlbaum comunicaron a Max Planck (1858–1947) medidas precisas en el infrarrojo lejano. Planck encontró en pocas horas una fórmula que interpolaba entre las de Wien y Rayleigh y que se ajustaba a todos los datos. Para derivarla, en una sesión de la Sociedad Alemana de Física del 14 de diciembre de 1900, tuvo que suponer que los osciladores materiales de las paredes de la cavidad solo pueden intercambiar energía con la radiación en múltiplos enteros de una cantidad mínima, proporcional a la frecuencia:

$$\varepsilon = h\nu,$$

con $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s, la constante que lleva su nombre (Planck, 1901). Años después, Planck describió aquel supuesto como un acto de desesperación, al que se resignó para obtener a cualquier precio un resultado positivo. La **ley de Planck** para la radiancia espectral en función de la longitud de onda es

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5}\,\frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1}.$$

Para longitudes de onda largas, el exponente es pequeño y la ley se reduce a la de Rayleigh-Jeans; para cortas, el término exponencial domina y la ley se reduce a la de Wien. La Figura 4 muestra las curvas para tres temperaturas y la divergencia clásica.

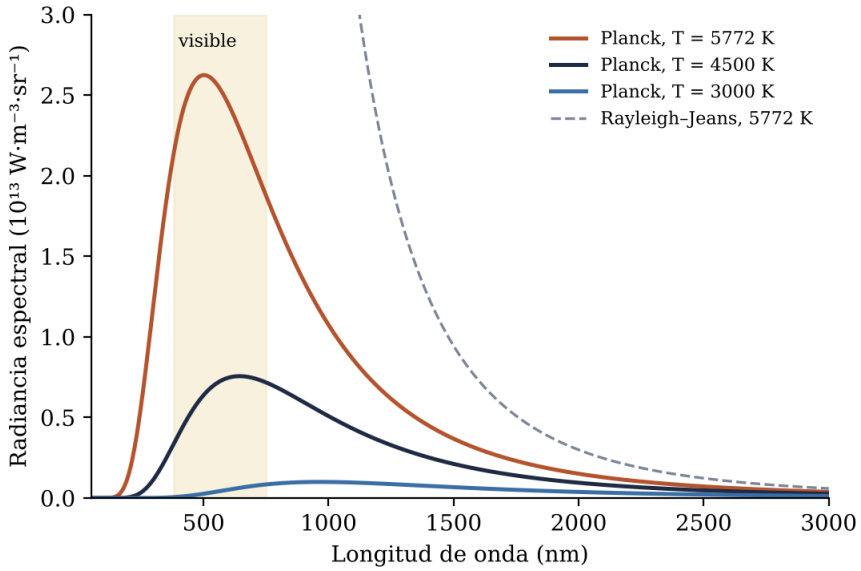


Figura 4. Radiancia espectral de un cuerpo negro según la ley de Planck para tres temperaturas, comparada con la predicción clásica de Rayleigh-Jeans a 5 772 K, que diverge en las longitudes de onda cortas.

Atelier velazquez

Fuente. Elaboración propia a partir de la ley de Planck. La temperatura de 5 772 K corresponde a la temperatura efectiva de la fotosfera solar.

La longitud de onda del máximo es inversamente proporcional a la temperatura (ley de desplazamiento de Wien): $\lambda_{\max} = 2.898 \times 10^{-3}\ \mathrm{m\,K}/T$. *Ejemplos.* Para el Sol, con $T = 5\,772$ K, $\lambda_{\max} \approx 502$ nm, en el verde-azul del espectro visible. Para la radiación cósmica de fondo, con $T = 2.7255$ K, $\lambda_{\max} \approx 1.06$ mm, en las microondas. La misma fórmula describe la luz del Sol y el eco del universo temprano, y es la herramienta con la que se mide la temperatura de ambos.

La palabra **quantum** es el neutro del adjetivo latino *quantus*, «cuán grande», «cuánto». En latín escolástico y moderno designaba una cantidad determinada. Planck habló de «elementos de energía»; Einstein, en 1905, de «cuantos de luz» (*Lichtquanten*). El término «fotón» fue propuesto en 1926 por el químico Gilbert Lewis.

18.2 El efecto fotoeléctrico

Planck había cuantizado el intercambio de energía entre materia y radiación, no la radiación misma. Einstein dio el paso en 1905, en el artículo que él mismo consideró el más revolucionario de los de aquel año: la luz se comporta, en ciertos fenómenos, como si estuviera formada por cuantos independientes de energía $h\nu$ (Einstein, 1905c). Entre las consecuencias que extrajo estaba una explicación del efecto fotoeléctrico, la emisión de electrones por un metal iluminado, estudiado por Philipp Lenard en 1902. La energía de los electrones emitidos no depende de la intensidad de la luz, sino de su frecuencia, y por debajo de cierta frecuencia no se emite ninguno, por intensa que sea la iluminación. Si cada cuanto cede toda su energía a un electrón, y el electrón necesita una energía W para escapar del metal, la energía cinética máxima de los electrones es

$$E_{k,\max} = h\nu - W.$$

Ejemplo. Luz ultravioleta de 250 nm transporta fotones de $hc/\lambda \approx 4.96$ eV. Sobre sodio, cuya función de trabajo es de unos 2.28 eV, produce electrones con una energía cinética máxima de unos 2.68 eV. Luz roja de 700 nm, con fotones de 1.77 eV, no arranca ninguno.

Atelier Velázquez

Robert Millikan, convencido de que la hipótesis de Einstein era insostenible, dedicó diez años a medir el efecto con precisión y en 1916 confirmó la relación lineal y obtuvo un valor de h coincidente con el de Planck (Millikan, 1916). Einstein recibió el premio Nobel de 1921 por esta ley, no por la relatividad. Arthur Compton mostró en 1923 que los rayos X dispersados por electrones cambian de longitud de onda como si fueran partículas con momento $p = h/\lambda$ que chocan elásticamente.

18.3 Espectros y el átomo de Bohr

Desde mediados del siglo XIX se sabía que cada elemento químico emite y absorbe luz en un conjunto característico de longitudes de onda, sus líneas espectrales. Gustav Kirchhoff y Robert Bunsen convirtieron en 1859–1860 la espectroscopia en un método de análisis químico, con el cual identificaron elementos en el Sol. En 1885, Johann Balmer, profesor de un colegio de niñas en Basilea, encontró una fórmula empírica para las líneas visibles del hidrógeno, que Johannes Rydberg generalizó:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right),$$

con $R_H \approx 1.097 \times 10^7\ \mathrm{m}^{-1}$ y $n_2 > n_1$ enteros. La fórmula funcionaba, pero nadie sabía por qué.

En 1911, Ernest Rutherford interpretó los experimentos de dispersión de partículas alfa realizados por Hans Geiger y Ernest Marsden como prueba de que el átomo tiene un núcleo diminuto y masivo rodeado de electrones. Pero un electrón en órbita alrededor de un núcleo, según la electrodinámica de Maxwell, debería radiar continuamente y precipitarse sobre el núcleo en una fracción de microsegundo. El átomo de Rutherford era clásicamente imposible.

Niels Bohr (1885–1962), joven físico danés que trabajaba con Rutherford en Mánchester, propuso en 1913 un modelo híbrido. Los electrones solo pueden ocupar ciertas órbitas estacionarias, en las que no radian, caracterizadas por un momento angular múltiplo entero de $\hbar = h/2\pi$. Solo emiten o absorben radiación al saltar entre órbitas, con una frecuencia dada por la diferencia de energías dividida por h (Bohr, 1913). Para el hidrógeno, las energías permitidas resultan ser

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}\,\frac{1}{n^2} \approx -\frac{13.6\ \mathrm{eV}}{n^2}.$$

Atelier Velázquez

Ejemplo. Un electrón que salta del nivel $n = 3$ al $n = 2$ emite un fotón de energía $13.6\,(1/4 - 1/9) \approx 1.89$ eV, cuya longitud de onda es $hc/E \approx 656$ nm: la línea roja H-alfa de la serie de Balmer. La constante de Rydberg, que Balmer había ajustado empíricamente, quedaba expresada en términos de la masa y la carga del electrón, la constante de Planck y la permitividad del vacío. Es una identidad sintética espectacular: la posición de una línea en un espectro coincide con un número construido a partir de constantes medidas por procedimientos completamente distintos.

James Franck y Gustav Hertz mostraron en 1914 que los electrones que atraviesan vapor de mercurio pierden energía solo en cantidades discretas de unos 4.9 eV, en acuerdo con los niveles atómicos. El modelo de Bohr funcionaba para el hidrógeno, pero fracasaba con el helio y no explicaba las intensidades de las líneas. Era un andamio, no una teoría.

18.4 Ondas de materia

En su tesis doctoral de 1924, Louis de Broglie (1892–1987) propuso extender a la materia la dualidad que Einstein había atribuido a la luz: si la luz, que es una onda, se comporta en ciertos ca-

sos como partícula, quizá los electrones, que son partículas, se comporten en ciertos casos como ondas, con una longitud de onda

$$\lambda = \frac{h}{p}.$$

Las órbitas estacionarias de Bohr serían aquellas en las que cabe un número entero de longitudes de onda del electrón. *Ejemplo.* Un electrón acelerado por una diferencia de potencial de 100 V tiene una longitud de onda de $h/\sqrt{2m_e eV} \approx 0.123$ nm, comparable a la separación entre los átomos de un cristal. En 1927, Clinton Davisson y Lester Germer, en los laboratorios Bell, observaron la difracción de electrones de 54 eV ($\lambda \approx 0.167$ nm) por un cristal de níquel, con picos en los ángulos predichos (Davisson y Germer, 1927); George Paget Thomson lo observó independientemente con láminas delgadas. En 1989, Akira Tonomura y sus colaboradores mostraron cómo se forma un patrón de interferencia de doble rendija enviando los electrones uno a uno: cada electrón deja un punto en la pantalla, aparentemente al azar, y la acumulación de miles de puntos reproduce las franjas (Tonomura et al., 1989). En 1999 se observó interferencia con moléculas de fullereno de sesenta átomos de carbono (Arndt et al., 1999).

Atelier Velázquez

18.5 Bose, Pauli y el espín

En 1924, el físico indio Satyendra Nath Bose envió a Einstein un artículo en el que derivaba la ley de Planck contando los estados de la radiación de una manera nueva, que trataba los cuantos como indistinguibles. Einstein lo tradujo al alemán, lo hizo publicar y extendió el método a los átomos de un gas, prediciendo que, a temperaturas suficientemente bajas, una fracción macroscópica de los átomos se acumularía en el estado de menor energía (Bose, 1924). El condensado de Bose-Einstein fue obtenido en 1995 con átomos de rubidio y sodio enfriados a menos de una millonésima de kelvin (M. H. Anderson et al., 1995; Davis et al., 1995).

Wolfgang Pauli (1900–1958) formuló en 1925 el **principio de exclusión**: dos electrones de un átomo no pueden tener todos sus números cuánticos iguales. El principio explicaba la estructura de capas de los átomos y, con ella, la tabla periódica de los elementos. Requería un cuarto número cuántico, de dos valores. Ese mismo año, George Uhlenbeck y Samuel Goudsmit lo interpretaron como un momento angular intrínseco del electrón, el **espín**, que solo puede tomar dos valores al medirse a lo largo de cualquier eje: $+\hbar/2$ o $-\hbar/2$. Otto Stern y Walther Gerlach ha-

bían observado en 1922 que un haz de átomos de plata que atraviesa un campo magnético no uniforme se divide en dos haces discretos, en lugar de extenderse continuamente como predecía la física clásica. El espín no es una rotación literal: un electrón no es una bolita que gira, y su espín no tiene análogo clásico exacto.

18.6 Heisenberg y Schrödinger

La teoría que sustituyó al andamio de Bohr surgió en dos formas aparentemente incompatibles. En junio de 1925, Werner Heisenberg (1901–1976), retirado en la isla de Heligoland por una fiebre del heno, construyó un formalismo que solo empleaba magnitudes observables —frecuencias e intensidades de las líneas espectrales— y renunciaba a las órbitas. Max Born reconoció que las tablas de números de Heisenberg obedecían las reglas del álgebra de matrices, y con Pascual Jordan y el propio Heisenberg desarrolló la **mecánica matricial** (Heisenberg, 1925). Su rasgo central es que la posición y el momento no conmutan: el resultado de multiplicarlos depende del orden,

$$\hat{x}\hat{p} - \hat{p}\hat{x} = i\hbar.$$

Atelier Velázquez

En enero de 1926, Erwin Schrödinger (1887–1961), profesor en Zúrich, publicó la primera de cuatro memorias en las que el electrón se describe mediante una **función de onda** $\psi(\vec{r}, t)$ que obedece una ecuación de ondas (Schrödinger, 1926):

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H}\psi = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi + V\psi.$$

Para estados de energía definida, ψ oscila con frecuencia E/h y la ecuación se reduce a $\hat{H}\psi = E\psi$, un problema de valores propios. Para el potencial de Coulomb del hidrógeno, solo existen soluciones aceptables —finitas y normalizables— para ciertos valores de E, que resultan ser exactamente los de Bohr. La cuantización ya no era un postulado, sino una consecuencia de las condiciones de contorno, como las frecuencias de una cuerda de violín fija en sus extremos. Schrödinger demostró ese mismo año que su mecánica ondulatoria y la matricial eran matemáticamente equivalentes.

La ecuación contiene la unidad imaginaria i, y sus soluciones son funciones complejas. Los **números complejos**, introducidos en el siglo XVI para resolver ecuaciones cúbicas y considera-

dos durante siglos ficciones útiles, se volvieron indispensables: la función de onda no puede ser real si ha de describir la interferencia y la evolución temporal de los estados cuánticos.

18.7 La regla de Born y la incertidumbre

¿Qué representa ψ? Schrödinger pensó al principio que describía una distribución real de la carga del electrón. Max Born propuso en 1926, en una nota a pie de página de un artículo sobre colisiones, que el cuadrado del módulo de la función de onda da la probabilidad de encontrar la partícula en una región (Born, 1926):

$$P(\vec{r})\, d^3r = |\psi(\vec{r}, t)|^2\, d^3r.$$

La regla introdujo la probabilidad en el nivel fundamental de la teoría, no como expresión de nuestra ignorancia de los detalles, como en la física estadística, sino como contenido mismo de las predicciones. Einstein nunca la aceptó como descripción completa.

En 1927, Heisenberg mostró que la no conmutatividad de posición y momento implica un límite a la precisión con que ambas pueden determinarse simultáneamente. En la forma rigurosa obtenida por Earle Kennard ese mismo año,

Atelier Velázquez

$$\Delta x\, \Delta p \geq \frac{\hbar}{2},$$

donde Δx y Δp son las desviaciones típicas de las distribuciones de resultados de medidas de posición y momento sobre sistemas preparados en el mismo estado (Heisenberg, 1927). *Ejemplo.* Un electrón confinado en una región de 0.1 nm, el tamaño de un átomo, tiene una incertidumbre de momento de al menos $\hbar/(2 \times 10^{-10}\ \text{m}) \approx 5.3 \times 10^{-25}$ kg·m/s, que corresponde a una incertidumbre de velocidad de unos 580 km/s. Las relaciones de incertidumbre explican por qué el electrón no cae al núcleo: confinarlo en una región más pequeña aumentaría su energía cinética más de lo que disminuiría su energía potencial. La estabilidad y el tamaño de los átomos, y por tanto de toda la materia ordinaria, son consecuencias cuánticas.

Se escribe también una relación entre energía y tiempo, $\Delta E\, \Delta t \gtrsim \hbar$, pero su estatuto es distinto. En la mecánica cuántica, el tiempo no es un observable representado por un operador, sino un parámetro externo, medido por relojes que la teoría no describe. Pauli mostró en 1933 que no puede existir un operador de tiempo autoadjunto conjugado a un hamiltoniano cuya energía tenga un valor mínimo (Pauli, 1933/1980). La relación energía-tiempo relaciona la dispersión de

energía de un estado con el tiempo característico en que cambia apreciablemente; no es una consecuencia de un conmutador. Esta asimetría entre el espacio, cuyas coordenadas son observables, y el tiempo, que es un parámetro, es una de las tensiones que se agudizarán al intentar combinar la mecánica cuántica con la relatividad general.

18.8 El formalismo

John von Neumann dio en 1932, en *Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica*, la formulación axiomática que se enseña todavía (von Neumann, 1932). El estado de un sistema es un vector $|\psi\rangle$ de un espacio de Hilbert, un espacio vectorial complejo con producto escalar, posiblemente de dimensión infinita. Los **observables** —posición, momento, energía, espín— se representan mediante operadores autoadjuntos; los resultados posibles de una medida son sus valores propios. Si el sistema está en el estado $|\psi\rangle$ y se mide un observable con vectores propios $|a_k\rangle$, la probabilidad de obtener el valor a_k es $|\langle a_k|\psi\rangle|^2$. Entre medidas, el estado evoluciona según la ecuación de Schrödinger, de manera determinista, lineal y reversible.

El **principio de superposición** es consecuencia de la linealidad: si $|\psi_1\rangle$ y $|\psi_2\rangle$ son estados posibles, también lo es cualquier combinación $\alpha|\psi_1\rangle + \beta|\psi_2\rangle$ con $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. *Ejemplo.* Un electrón preparado con espín hacia arriba a lo largo del eje x está en el estado $(|\uparrow_z\rangle + |\downarrow_z\rangle)/\sqrt{2}$ respecto del eje z. Si se mide el espín a lo largo de z, se obtiene «arriba» con probabilidad $\left|1/\sqrt{2}\right|^2 = 1/2$ y «abajo» con probabilidad $1/2$. Antes de la medida, el electrón no tiene un valor definido del espín en z, según la interpretación más extendida; o lo tiene sin que podamos conocerlo, según otras. Esa diferencia es el tema del capítulo 20.

18.9 Dirac

Paul Adrien Maurice Dirac (1902–1984) buscó en 1928 una ecuación para el electrón compatible con la relatividad especial. La ecuación de Schrödinger trata el tiempo y el espacio de manera asimétrica: primera derivada en el tiempo, segunda en el espacio. Dirac exigió una ecuación de primer orden en ambos, y para conseguirlo tuvo que introducir matrices de cuatro por cuatro y una función de onda de cuatro componentes (Dirac, 1928):

$$\left(i\hbar\,\gamma^{\mu}\,\partial_{\mu} - mc\right)\psi = 0.$$

Atelier Velázquez

La ecuación producía automáticamente el espín $1/2$ del electrón y su momento magnético, con el valor correcto del factor $g = 2$, que había que introducir a mano en la teoría de Pauli. Pero también tenía soluciones de energía negativa. Tras varios intentos de interpretación, Dirac propuso en 1931 que correspondían a una partícula de la misma masa que el electrón y carga opuesta. En 1932, Carl Anderson observó en una cámara de niebla, expuesta a rayos cósmicos, la traza de una partícula así: el **positrón**, la primera antipartícula (C. D. Anderson, 1933). La existencia de la antimateria fue deducida de la exigencia de compatibilidad entre dos teorías antes de ser observada.

Atelier Velázquez

Capítulo 19. Medición cuántica y entrelazamiento

19.1 El problema de la medida

El formalismo de von Neumann contiene dos tipos de evolución. Mientras nadie mide, el estado evoluciona según la ecuación de Schrödinger, de manera continua, determinista y reversible. Cuando se mide, el estado salta de manera discontinua, aleatoria e irreversible a uno de los estados propios del observable medido: es el llamado **colapso** o reducción del estado. El formalismo no dice qué es una medida, ni cuándo ocurre el salto, ni por qué los aparatos de medida, que también están hechos de átomos, no obedecen la ecuación de Schrödinger como el resto.

Schrödinger expuso la dificultad en 1935 con un ejemplo deliberadamente grotesco. Un gato está encerrado en una caja con un átomo radiactivo que tiene una probabilidad del cincuenta por ciento de desintegrarse en una hora; si se desintegra, un mecanismo rompe un frasco de veneno. Si se aplica la ecuación de Schrödinger al sistema entero, al cabo de una hora el estado es una superposición de gato vivo y gato muerto (Schrödinger, 1935). Nadie ha observado nunca un gato en superposición. El problema es explicar por qué.

Atelier Velázquez

19.2 Decoherencia

En 1970, Hans Dieter Zeh observó que ningún sistema macroscópico está aislado: interactúa continuamente con su entorno —moléculas de aire, fotones, vibraciones—, y esas interacciones correlacionan su estado con el de un número enorme de grados de libertad (Zeh, 1970). Wojciech Zurek desarrolló la idea a partir de 1981 (Zurek, 2003). El resultado es la **decoherencia**: las relaciones de fase entre las componentes de una superposición macroscópica se dispersan en el entorno con extraordinaria rapidez, de modo que, para cualquier observación local del sistema, la superposición se comporta como una mezcla estadística de alternativas. Las interferencias entre «gato vivo» y «gato muerto» no desaparecen del estado global, pero se vuelven inaccesibles en la práctica.

La decoherencia ha sido observada de manera controlada. En 1996, el grupo de Serge Haroche en París preparó superposiciones de estados de un campo electromagnético en una cavidad y midió cómo se perdía la coherencia en un tiempo que disminuía al aumentar la separación entre las componentes, como predice la teoría (Brune et al., 1996).

La decoherencia explica por qué no observamos interferencias entre alternativas macroscópicas, y por qué ciertos estados —los de posición bien definida para objetos grandes— son estables frente al entorno. No explica, por sí sola, por qué una medida particular da un resultado particular y no otro. Después de la decoherencia, el estado global sigue siendo una superposición de todas las alternativas, cada una correlacionada con un estado distinto del entorno. Que solo una se realice es un añadido de la interpretación, como se verá en el capítulo siguiente.

19.3 EPR

En mayo de 1935, Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen publicaron un artículo con una pregunta por título: ¿puede considerarse completa la descripción mecanocuántica de la realidad física? (Einstein et al., 1935). Propusieron un criterio de realidad: si, sin perturbar en modo alguno un sistema, podemos predecir con certeza el valor de una magnitud física, entonces existe un elemento de realidad correspondiente a esa magnitud. Consideraron dos partículas que han interactuado y se han separado, en un estado tal que sus posiciones y sus momentos están perfectamente correlacionados. Midiendo la posición de la primera, se puede predecir con certeza la de la segunda; midiendo el momento de la primera, el de la segunda. Como la medida sobre la primera no puede perturbar a la segunda, situada lejos, ambas magnitudes deberían tener valores definidos en la segunda. Pero la mecánica cuántica no asigna valores simultáneos a la posición y el momento. Luego es incompleta.

Atelier Velázquez

Bohr respondió meses después que el criterio de realidad de EPR contenía una ambigüedad: la medida sobre la primera partícula no perturba mecánicamente a la segunda, pero sí influye en las condiciones que definen qué predicciones son posibles sobre ella (Bohr, 1935). La respuesta, oscura para muchos lectores, dejó el debate en un terreno filosófico. Schrödinger, en el mismo año, llamó **entrelazamiento** (*Verschränkung*) a la propiedad de esos estados compuestos y la consideró el rasgo característico de la mecánica cuántica.

David Bohm reformuló en 1951 el argumento con dos partículas de espín $1/2$ en el estado singlete, $(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)/\sqrt{2}$: si se mide el espín de ambas a lo largo del mismo eje, cualquiera que sea, los resultados son siempre opuestos.

19.4 Bell

Durante tres décadas, la controversia pareció indecidible: las teorías de **variables ocultas**, que completarían la mecánica cuántica asignando valores definidos a todas las magnitudes, podían construirse de modo que reproducjeran las mismas predicciones. En 1964, John Stewart Bell (1928–1990), físico norirlandés del CERN que estudiaba los fundamentos en su tiempo libre, demostró que eso no es posible si las variables ocultas son **locales**: si el resultado de una medida en un lugar depende solo de las variables ocultas y del ajuste del aparato en ese lugar, no del ajuste del aparato distante (Bell, 1964).

Bell derivó una desigualdad que deben satisfacer las correlaciones de cualquier teoría local de ese tipo y que la mecánica cuántica viola. La forma más útil para los experimentos es la de John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony y Richard Holt (Clauser et al., 1969). Dos observadores, Alicia y Benito, miden cada uno el espín de una partícula de un par a lo largo de uno de dos ejes, a o a' para ella, b o b' para él. Cada resultado es $+1$ o -1. Sea $E(a,b)$ el promedio del producto de sus resultados. Se define

$$S = E(a,b) + E(a,b') + E(a',b) - E(a',b').$$

Atelier Velázquez

Para cualquier teoría de variables ocultas locales, $|S| \leq 2$. Para el estado singlete, la mecánica cuántica predice $E(a,b) = -\cos\theta_{ab}$, donde θ_{ab} es el ángulo entre los ejes. Con $a = 0°$, $a' = 90°$, $b = 45°$ y $b' = -45°$,

$$S = -\cos 45° - \cos 45° - \cos 45° + \cos 135° = -\frac{4}{\sqrt{2}} = -2\sqrt{2} \approx -2.83,$$

cuyo valor absoluto supera el límite local. El valor $2\sqrt{2}$ es el máximo cuántico posible, como demostró Boris Tsirelson en 1980.

19.5 Clauser, Aspect, Zeilinger

John Clauser y Stuart Freedman realizaron en 1972 la primera prueba con pares de fotones emitidos en cascada por átomos de calcio, cuyas polarizaciones están entrelazadas; el resultado violó la desigualdad y concordó con la mecánica cuántica (Freedman y Clauser, 1972). Pero los ajustes de los polarizadores se fijaban antes de la emisión, de modo que una señal lenta podría, en principio, haber informado a cada fotón del ajuste del otro lado.

Alain Aspect y sus colaboradores, en Orsay, cerraron parcialmente esa vía en 1982 con conmutadores ópticos que cambiaban la orientación de los analizadores mientras los fotones estaban en vuelo, en intervalos más cortos que el tiempo que tarda la luz en recorrer la distancia entre ellos (Aspect et al., 1982). El grupo de Anton Zeilinger, en Innsbruck, realizó en 1998 un experimento con elección aleatoria y ultrarrápida de los ajustes y estaciones separadas por 400 metros (Weihs et al., 1998).

Quedaban abiertas otras vías, llamadas lagunas (*loopholes*). La laguna de detección consiste en que, si solo se detecta una fracción de los pares, la muestra detectada podría no ser representativa. La laguna de la libertad de elección consiste en que los ajustes podrían estar correlacionados con las variables ocultas por un origen común en el pasado. En 2015, tres experimentos cerraron simultáneamente las lagunas de localidad y de detección: uno en Delft, con espines electrónicos en diamantes separados por 1.3 km (Hensen et al., 2015), y dos con fotones, en Viena y en el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de Estados Unidos (Giustina et al., 2015; Shalm et al., 2015). Otros experimentos utilizaron la luz de estrellas lejanas para elegir los ajustes, desplazando el posible origen común siglos atrás (Handsteiner et al., 2017). Clauser, Aspect y Zeilinger recibieron el premio Nobel de 2022.

Atelier Velázquez

19.6 Qué muestran los experimentos y qué no

La conclusión debe enunciarse con precisión, porque es una de las más tergiversadas de la física. Los experimentos muestran que ninguna teoría que satisfaga simultáneamente tres supuestos puede reproducir las correlaciones observadas: que los resultados estén determinados por variables que el sistema lleva consigo o, más en general, que las correlaciones se expliquen por causas comunes locales (lo que Bell llamó **causalidad local**); que las influencias no viajen más rápido que la luz; y que los ajustes de los aparatos sean independientes de las variables ocultas (**independencia de la medida**). Al menos uno de los tres debe abandonarse.

No muestran que exista comunicación más rápida que la luz. El **teorema de no señalización** garantiza que, en la mecánica cuántica, las estadísticas de los resultados de Alicia no dependen del ajuste que elija Benito: cada uno, por separado, observa una secuencia aleatoria de resultados. La correlación solo aparece al comparar las dos listas, lo cual requiere un canal clásico que no supera la velocidad de la luz. El entrelazamiento no permite enviar mensajes.

Tampoco muestran por sí solos que la realidad no exista o que dependa del observador. Hay teorías no locales, como la de Bohm, que asignan valores definidos y reproducen las predicciones cuánticas; hay interpretaciones que mantienen la localidad renunciando a que las medidas tengan un único resultado, como la de los muchos mundos; y hay propuestas, llamadas superdeterministas, que abandonan la independencia de la medida, aunque la mayoría de los físicos las consideran incompatibles con la práctica experimental. Lo que los experimentos establecen es una restricción: el mundo no es local en el sentido de Bell. Cuál de las alternativas es correcta no lo deciden los datos actuales.

Las aplicaciones del entrelazamiento son reales. La distribución cuántica de claves, propuesta en una de sus versiones por Artur Ekert en 1991 a partir de la desigualdad de Bell, permite detectar cualquier intento de interceptación. En 2017, el satélite chino Micius distribuyó pares de fotones entrelazados entre estaciones terrestres separadas por 1 200 km (Yin et al., 2017). La teleportación cuántica, demostrada en 1997, transfiere el estado de un sistema a otro distante, siempre con la ayuda de un canal clásico; no transporta materia ni información más rápido que la luz.

Atelier Velázquez

Capítulo 20. Interpretaciones cuánticas

20.1 Formalismo, interpretación y predicción

La mecánica cuántica es, desde el punto de vista operatorio, la teoría física de mayor éxito: sus predicciones se han confirmado en todos los dominios en que se han puesto a prueba. Y sin embargo no hay acuerdo sobre qué describe. Es necesario distinguir tres niveles. El **formalismo** es el aparato matemático: espacios de Hilbert, operadores, ecuación de Schrödinger. Las **reglas de predicción** conectan el formalismo con los experimentos: la regla de Born y la prescripción de qué operador corresponde a qué aparato. La **interpretación** dice qué existe según la teoría y qué ocurre en una medida. Las principales interpretaciones comparten el formalismo y las predicciones en todos los experimentos realizados hasta ahora, con una excepción importante que se señalará.

20.2 Copenhague

Atelier Velázquez

Lo que se llama «interpretación de Copenhague» no es una doctrina única, sino un conjunto de posiciones de Bohr, Heisenberg, Born, Pauli y otros, que divergían en puntos importantes; la expresión misma parece haber sido popularizada por Heisenberg en la década de 1950 (Howard, 2004). Su núcleo común puede resumirse así: los fenómenos cuánticos solo pueden describirse en relación con dispositivos experimentales descritos en términos clásicos; distintos dispositivos dan acceso a aspectos complementarios —onda y partícula, posición y momento— que no pueden manifestarse simultáneamente; la función de onda es un instrumento para calcular probabilidades de resultados de medidas, no una descripción de una realidad independiente. La **complementariedad**, presentada por Bohr en Como en 1927, era para él una lección epistemológica general.

La fuerza de esta posición es su sobriedad operatoria: se atiene a lo que puede medirse. Su debilidad es que no especifica dónde está la frontera entre el sistema cuántico y el aparato clásico, ni qué la justifica, de modo que deja el problema de la medida sin resolver.

20.3 Bohm

En 1952, David Bohm (1917–1992) mostró que puede construirse una teoría en la que las partículas tienen siempre posiciones definidas y siguen trayectorias continuas, guiadas por la función de onda (Bohm, 1952). La idea había sido propuesta por de Broglie en 1927 y abandonada. En la **mecánica de Bohm**, la función de onda evoluciona según la ecuación de Schrödinger y nunca colapsa; la velocidad de cada partícula está determinada por la función de onda en su posición. Si las posiciones iniciales se distribuyen según $|\psi|^2$, la teoría reproduce exactamente las predicciones estadísticas de la mecánica cuántica, y la distribución se mantiene en el tiempo.

La teoría es determinista y resuelve el problema de la medida: cada medida tiene un resultado definido porque las partículas siempre tienen posiciones. Su precio es la no localidad explícita: la velocidad de una partícula depende de las posiciones de todas las demás, por lejos que estén. Bell, que la admiraba, subrayó que esa no localidad no era un defecto, sino lo que el teorema que lleva su nombre exige a cualquier teoría de este tipo. Su principal dificultad es la extensión a la teoría cuántica de campos relativista, que exige una foliación privilegiada del espaciotiempo, aunque indetectable.

Atelier Velázquez

20.4 Muchos mundos

Hugh Everett III propuso en su tesis doctoral de 1957 eliminar el colapso por completo y aplicar la ecuación de Schrödinger a todo, incluidos los aparatos y los observadores (Everett, 1957). Después de una medida, el estado del universo es una superposición de ramas, en cada una de las cuales el aparato registra un resultado distinto y el observador ve ese resultado. Bryce DeWitt popularizó la propuesta en la década de 1970 bajo el nombre de «interpretación de los muchos mundos». La decoherencia proporciona la definición de las ramas: son las componentes que, por la interacción con el entorno, ya no pueden interferir entre sí.

La teoría tiene la virtud de la economía formal: no añade nada a la ecuación de Schrödinger. Su dificultad principal es la probabilidad: si todos los resultados ocurren, ¿qué significa que uno tenga probabilidad de un tercio? David Deutsch y David Wallace han argumentado que un agente racional que se sabe en un universo ramificado debe asignar a sus expectativas pesos dados por la regla de Born (Wallace, 2012); los críticos consideran que el argumento presupone lo que quiere demostrar.

20.5 Colapso objetivo

Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini y Tullio Weber propusieron en 1986 modificar la ecuación de Schrödinger añadiendo un proceso aleatorio de localización espontánea (Ghirardi et al., 1986). Cada partícula sufre, en promedio cada cien millones de años, un colapso espontáneo de su función de onda. Para una partícula aislada el efecto es indetectable, pero en un objeto macroscópico con 10^{23} partículas entrelazadas, alguna colapsa en una fracción de microsegundo y arrastra a las demás. Roger Penrose y Lajos Diósi propusieron que el colapso está relacionado con la gravedad.

Estas teorías son la excepción mencionada: no son interpretaciones, sino teorías distintas con predicciones distintas. Predicen, por ejemplo, un calentamiento minúsculo de la materia y una emisión espontánea de radiación por las partículas cargadas. Varios experimentos han acotado sus parámetros, y en 2021 una búsqueda de esa radiación en un detector de germanio subterráneo descartó la versión más simple del modelo gravitatorio de Diósi y Penrose (Donadi et al., 2021). Que se puedan contrastar es su mérito.

Atelier Velázquez

20.6 Historias consistentes, enfoques relacionales y QBism

La formulación de **historias consistentes**, desarrollada por Robert Griffiths, Roland Omnès, Murray Gell-Mann y James Hartle desde 1984, asigna probabilidades a secuencias de acontecimientos en distintos instantes, siempre que esas secuencias satisfagan una condición de consistencia que impide la interferencia entre ellas (Griffiths, 1984). Prescinde del colapso y de los observadores, y fue diseñada en parte para la cosmología cuántica, donde no hay observador externo al universo. Su dificultad es que existen muchos conjuntos de historias consistentes incompatibles entre sí, y la teoría no elige uno.

La **interpretación relacional** de Carlo Rovelli, de 1996, sostiene que el estado de un sistema no es una propiedad absoluta, sino relativa a otro sistema con el que interactúa (Rovelli, 1996). Un resultado de medida existe para el aparato que lo registra, pero no necesariamente para un tercero que no ha interactuado. Las propiedades físicas serían relaciones. El **QBism**, defendido por Christopher Fuchs, N. David Mermin y Rüdiger Schack, interpreta la función de onda como una expresión de los grados de creencia de un agente sobre los resultados de sus futuras experiencias, en sentido bayesiano (Fuchs et al., 2014).

Tabla 7. Principales interpretaciones y teorías alternativas de la mecánica cuántica

Propuesta	¿La función de onda es real?	¿Hay colapso?	¿Resultados únicos?	¿Determinista?	¿Predicciones distintas?
Copenhague (familia)	Instrumento de cálculo	Sí, como regla	Sí	No	No
Bohm (onda piloto)	Sí, junto con las partículas	No	Sí	Sí	No (régimen no relativista)
Muchos mundos	Sí, es todo lo que hay	No	No (ramas)	Sí	No
Colapso objetivo (GRW, CSL, Diósi-Penrose)	Sí	Sí, físico y espontáneo	Sí	No	Sí, contrastables
Historias consistentes	Herramienta para probabilidades de historias	No	Relativo al conjunto de historias	No	No
Relacional	Relativa a otro sistema	Relativo	Relativos	No	No
QBism	Grados de creencia de un agente	Actualización de creencias	Para cada agente	No	No

Nota. Elaboración propia. Las respuestas resumen posiciones con variantes internas; «No» en la última columna significa que no hay diferencias en los experimentos realizados hasta la fecha.

Atelier Velázquez

20.7 Controversias filosóficas y resultados establecidos

El estado de la cuestión puede resumirse con la distinción entre lo establecido y lo abierto. Está establecido que el formalismo, con la regla de Born, predice correctamente las estadísticas de todos los experimentos realizados. Está establecido que las correlaciones de los estados entrelazados violan las desigualdades de Bell. Está establecido que la decoherencia suprime las interferencias macroscópicas en tiempos muy cortos. Está establecido que las versiones más simples de algunos modelos de colapso objetivo son incompatibles con los datos.

Está abierto si la función de onda describe una realidad física, un estado de información o un instrumento de cálculo; si las medidas tienen resultados únicos; si el mundo es determinista o indeterminista en su nivel fundamental. Estas preguntas no son ociosas: de la respuesta depende qué se busca al intentar cuantizar la gravedad. Pero la dificultad de decidirlas no se debe a la falta de rigor de los físicos, sino a que las alternativas son empíricamente equivalentes en el dominio explorado. Es un caso claro de **subdeterminación** de la teoría por los datos.

Desde la teoría del cierre categorial, la situación puede describirse así: la mecánica cuántica ha alcanzado un cierre operatorio muy alto en el plano de las relaciones entre preparaciones y resultados de medida; las identidades sintéticas que establece —espectros, secciones eficaces,

momentos magnéticos— alcanzan precisiones de partes por billón. Lo que no ha alcanzado es una interpretación compartida de los términos del formalismo en el eje semántico: qué referenciales materiales corresponden a la función de onda. Confundir ambos planos lleva a dos errores simétricos. El primero es declarar, a partir del éxito operatorio, que la cuestión interpretativa carece de sentido. El segundo es inferir de la falta de acuerdo interpretativo que la teoría es «misteriosa» o que autoriza cualquier especulación sobre la conciencia o el papel del observador. La teoría no autoriza esas especulaciones; las admite tanto como admite cualquier otra cosa que no contradiga sus predicciones, es decir, sin apoyo alguno.

Atelier Velázquez

Capítulo 21. Teoría cuántica de campos y fenómenos colectivos

21.1 Por qué campos

La mecánica cuántica de Schrödinger trata un número fijo de partículas. Pero la relatividad especial, a través de $E = mc^2$, permite que la energía se convierta en pares de partícula y antipartícula, y que estos se aniquilen. Una teoría que combine la relatividad con la mecánica cuántica debe permitir que el número de partículas varíe. La solución consistió en cuantizar campos.

Dirac cuantizó en 1927 el campo electromagnético, tratando cada modo de oscilación de la radiación en una cavidad como un oscilador armónico cuántico. Un oscilador cuántico de frecuencia ω solo puede tener energías

$$E_n = \hbar\omega(n + 1/2), \qquad n = 0,1,2,\ldots$$

El número n de cuantos de excitación de cada modo se interpreta como el número de fotones de esa frecuencia. Pascual Jordan, Werner Heisenberg y Wolfgang Pauli extendieron el procedimiento a los campos de materia. En la **teoría cuántica de campos**, las entidades fundamentales son campos definidos en todo el espaciotiempo, y las partículas son sus excitaciones cuantizadas: un electrón es un cuanto del campo electrónico, un fotón un cuanto del campo electromagnético. La indistinguibilidad de las partículas idénticas, que en la mecánica de Schrödinger era un postulado adicional, se vuelve natural: todos los electrones son excitaciones del mismo campo.

Atelier Velázquez

21.2 Infinitos, Lamb y la renormalización

Los primeros cálculos de la electrodinámica cuántica, en la década de 1930, chocaron con un obstáculo: las correcciones a las magnitudes físicas debidas a la interacción del electrón con su propio campo resultaban infinitas. La teoría parecía inutilizable más allá de la primera aproximación.

La situación cambió en 1947 por dos medidas. Willis Lamb y Robert Retherford, usando técnicas de microondas desarrolladas para el radar, mostraron que dos niveles del hidrógeno que la ecuación de Dirac predice degenerados están separados por una frecuencia de unos 1 058 MHz (Lamb y Retherford, 1947). Polykarp Kusch y Henry Foley midieron que el momento magnético del electrón es ligeramente mayor que el valor de Dirac. Los efectos eran pequeños y finitos: la

naturaleza no producía infinitos. Hans Bethe calculó en un viaje en tren, con una aproximación no relativista, un valor del desplazamiento de Lamb cercano al medido, mediante un procedimiento que consistía en restar el infinito correspondiente a la masa del electrón libre.

Entre 1946 y 1949, Sin-Itiro Tomonaga en Japón, Julian Schwinger y Richard Feynman en Estados Unidos desarrollaron formulaciones sistemáticas y covariantes de la **renormalización**, y Freeman Dyson demostró en 1949 que eran equivalentes y que el procedimiento funcionaba a todos los órdenes de la teoría de perturbaciones (Dyson, 1949). La idea es que la masa y la carga que aparecen en las ecuaciones no son las que se miden: las medidas incluyen el efecto de la interacción. Si se expresan todas las predicciones en términos de la masa y la carga medidas, los infinitos se cancelan. Schwinger obtuvo en 1948 la primera corrección al momento magnético del electrón: la anomalía $a_e = (g-2)/2$ vale, en primer orden, $\alpha/2\pi \approx 0.0011614$, donde $\alpha \approx 1/137.036$ es la constante de estructura fina.

La electrodinámica cuántica (QED) es la teoría física con predicciones más precisas. La anomalía magnética del electrón se ha medido con una incertidumbre de una décima de parte por billón, y concuerda con el cálculo teórico, que incluye miles de diagramas de Feynman hasta el quinto orden, dentro de la incertidumbre con que se conoce el valor de α (Fan et al., 2023). Las dos determinaciones independientes más precisas de α, a partir de átomos de cesio y de rubidio, discrepan entre sí en varias desviaciones típicas, de modo que el límite actual de la comparación lo pone una cuestión metrológica todavía no resuelta.

Atelier Velázquez

21.3 Diagramas de Feynman e integrales de camino

Feynman (1918–1988) introdujo en 1948 una formulación de la mecánica cuántica que conecta directamente con la mecánica analítica del capítulo 9. Para calcular la amplitud de probabilidad de que una partícula vaya de un punto a otro, se suman contribuciones de **todos** los caminos posibles entre ellos, cada uno con un factor de fase determinado por su acción clásica (Feynman, 1948):

$$\langle x_f, t_f \mid x_i, t_i \rangle = \int \mathcal{D}[x(t)]\; e^{\,iS[x(t)]/\hbar}.$$

Cuando la acción es mucho mayor que $\hbar$, como en los objetos macroscópicos, las fases de caminos vecinos oscilan rápidamente y se cancelan, salvo en torno al camino para el que la acción es estacionaria: el camino clásico. El principio de mínima acción de Maupertuis, Euler y Lagrange

resulta ser el límite de una suma cuántica sobre historias. Es otro ejemplo de una teoría anterior que reaparece como límite de una posterior, no como un error.

Los **diagramas de Feynman** son una notación gráfica para los términos de la serie de perturbaciones: líneas externas para las partículas que entran y salen, líneas internas para propagadores, vértices para las interacciones. Las líneas internas se llaman a menudo «partículas virtuales». La expresión induce a error si se toma literalmente: no designa partículas que existen fugazmente y violan la conservación de la energía, sino términos de un desarrollo matemático. Los diagramas son una herramienta de cálculo extremadamente eficaz; leerlos como películas de lo que ocurre es una extrapolación.

21.4 El vacío

En la teoría cuántica de campos, el estado de mínima energía —el **vacío**— no es la nada. Cada modo del campo, como oscilador cuántico, conserva una energía de punto cero $1/2\,\hbar\omega$, y las magnitudes del campo fluctúan alrededor de cero. En 1948, Hendrik Casimir predijo que dos placas metálicas paralelas sin carga, en el vacío, se atraen, porque entre ellas solo caben ciertos modos del campo electromagnético (Casimir, 1948). La fuerza, muy pequeña, fue medida con precisión en 1997 por Steven Lamoreaux (Lamoreaux, 1997).

Atelier Velázquez

El efecto Casimir se presenta a menudo como prueba de la realidad de la energía del vacío. Robert Jaffe mostró en 2005 que la fuerza puede calcularse sin referencia a la energía del vacío, como una fuerza relativista de van der Waals entre los átomos de las placas, que tiende a cero cuando la constante de estructura fina tiende a cero (Jaffe, 2005). La cuestión importa porque la suma de las energías de punto cero de todos los modos, si se toma en serio, produce una densidad de energía del vacío que, comparada con la que la cosmología infiere para la constante cosmológica, es mayor en un factor que según la estimación oscila entre 10^{55} y 10^{120}. Es el **problema de la constante cosmológica**, tema del capítulo 28.

21.5 Simetrías gauge

En 1929, Hermann Weyl mostró que la electrodinámica puede deducirse de un principio de simetría. La ecuación de Dirac para un electrón libre no cambia si se multiplica la función de onda por un factor de fase constante, $\psi \to e^{i\alpha}\psi$. Si se exige que la ecuación siga sin cambiar cuando

la fase varía de un punto a otro del espaciotiempo, $\alpha = \alpha(x)$, es necesario introducir un campo adicional que compense las derivadas de α, con propiedades de transformación precisas. Ese campo es el potencial electromagnético, y su cuanto es el fotón. La exigencia de **invariancia gauge local** genera la interacción. El nombre «gauge» (en alemán *Eich*, «calibre») procede de un intento anterior de Weyl, fallido, de unificar la gravitación y el electromagnetismo mediante una invariancia de escala.

La simetría gauge del electromagnetismo corresponde al grupo $U(1)$ de las rotaciones de fase. En 1954, Chen Ning Yang y Robert Mills generalizaron la construcción a grupos no conmutativos, como $SU(2)$, en los que el orden de las transformaciones importa (Yang y Mills, 1954). Las teorías de Yang-Mills son la base del Modelo Estándar.

21.6 Escalas, renormalización y teorías efectivas

Durante dos décadas, la renormalización se consideró un procedimiento eficaz pero sospechoso; Dirac nunca lo aceptó. Su significado cambió con el trabajo de Kenneth G. Wilson (1936–2013) a principios de la década de 1970, inspirado en el estudio de las transiciones de fase.

Atelier Velázquez

Wilson partió de una idea de Leo Kadanoff de 1966. Cerca del punto crítico de una transición de fase —por ejemplo, la temperatura a la que un imán pierde su magnetización—, las fluctuaciones se correlacionan a todas las escalas de longitud. Kadanoff propuso agrupar los espines microscópicos en bloques, sustituir cada bloque por un espín efectivo y repetir la operación. Wilson convirtió esa idea en un método matemático, el **grupo de renormalización**: una transformación que integra los grados de libertad de corta longitud de onda y describe cómo cambian los parámetros efectivos de la teoría al cambiar la escala de observación (Wilson, 1971). Recibió el premio Nobel en 1982.

El método explicó un hecho experimental sorprendente, la **universalidad**: sistemas físicos completamente distintos —el punto crítico líquido-vapor del agua, del dióxido de carbono o del xenón, y ciertos imanes uniaxiales— tienen exactamente los mismos exponentes críticos, que describen cómo divergen sus magnitudes cerca de la transición. Al cambiar de escala, los detalles microscópicos se vuelven irrelevantes y solo sobreviven unas pocas propiedades: la dimensión del espacio, el tipo de simetría del parámetro de orden. Sistemas con microfísicas distintas comparten la misma física de gran escala.

En la teoría cuántica de campos, el grupo de renormalización transformó la comprensión de las teorías mismas. Toda teoría cuántica de campos es una **teoría efectiva**, válida por debajo de cierta escala de energía, cuyos parámetros dependen de la escala a la que se observan. La constante de estructura fina vale aproximadamente 1/137 a bajas energías y aproximadamente 1/128 a la energía de la masa del bosón Z, porque las fluctuaciones del vacío apantallan la carga del electrón a grandes distancias. Los infinitos de los cálculos indicaban que se estaba extrapolando la teoría más allá de su dominio; la renormalización expresa que las predicciones de baja energía no dependen de los detalles de la física de muy alta energía, salvo a través de unos pocos parámetros.

La teoría de Fermi de la desintegración beta, de 1934, es un ejemplo: funciona a bajas energías, pero sus predicciones pierden sentido a energías del orden de cien GeV. Se entiende hoy como la teoría efectiva de baja energía de la teoría electrodébil, en la que el intercambio de un bosón W muy masivo se aproxima por una interacción puntual. Las ecuaciones de Navier-Stokes de la hidrodinámica son, del mismo modo, una teoría efectiva de la dinámica molecular de un fluido. Steven Weinberg sistematizó en 1979 la construcción de teorías efectivas a partir de las simetrías de un sistema (Weinberg, 1979a).

Atelier Velázquez

21.7 Materia condensada, rotura de simetría y emergencia

La física de la materia condensada, que estudia sólidos, líquidos y materiales cuánticos, es la mayor rama de la física por número de investigadores, y es el campo donde la relación entre niveles de descripción se presenta con más claridad.

En 1911, Heike Kamerlingh Onnes descubrió en Leiden que la resistencia eléctrica del mercurio desaparece por completo por debajo de 4.2 K: la **superconductividad**. Durante casi medio siglo no hubo explicación. En 1957, John Bardeen, Leon Cooper y Robert Schrieffer mostraron que, a baja temperatura, los electrones de un metal pueden formar pares ligados por su interacción con las vibraciones de la red cristalina, y que esos pares se condensan en un estado cuántico colectivo coherente (Bardeen et al., 1957). La superconductividad es un fenómeno cuántico macroscópico: un estado de 10^{23} electrones descrito por una sola función de onda. El premio Nobel de 2025 reconoció a John Clarke, Michel Devoret y John Martinis por haber mostrado, en experimentos de mediados de la década de 1980, que un circuito superconductor de tamaño macros-

cópico puede atravesar por efecto túnel una barrera de energía y tiene niveles de energía cuantizados, base de los cúbits superconductores actuales.

El efecto Hall cuántico, descubierto por Klaus von Klitzing en 1980, muestra otro rasgo de los fenómenos colectivos. En un gas bidimensional de electrones a baja temperatura y campo magnético intenso, la resistencia transversal toma valores exactamente iguales a $h/(ie^2)$, con i entero, independientemente de las impurezas y la geometría de la muestra (von Klitzing et al., 1980). La precisión es tal que el efecto se usa como patrón metrológico de resistencia. Una propiedad exacta y universal emerge en un sistema sucio y desordenado: su exactitud procede de una propiedad topológica del estado colectivo, no de los detalles microscópicos.

Philip W. Anderson (1923–2020), que contribuyó a la teoría de la localización electrónica en sistemas desordenados y, en 1963, mostró cómo en un superconductor el fotón adquiere efectivamente masa —un antecedente directo del mecanismo de Higgs—, publicó en 1972 un artículo titulado «Más es diferente» (P. W. Anderson, 1972). Su tesis es precisa. Anderson acepta la **hipótesis reduccionista**: todo lo que ocurre en un sistema obedece las mismas leyes fundamentales que sus constituyentes. Rechaza la **hipótesis construccionista**: que a partir de esas leyes pueda reconstruirse el comportamiento de los sistemas complejos. En cada nivel de complejidad aparecen propiedades nuevas, como la rigidez de un sólido o la superconductividad, que requieren conceptos propios. El mecanismo central es la **rotura espontánea de simetría**: las leyes de los constituyentes tienen una simetría que el estado colectivo no tiene. Las leyes de los átomos de un cristal son invariantes bajo traslaciones arbitrarias; el cristal solo lo es bajo traslaciones de la red.

Atelier Velázquez

21.8 Reducción, emergencia y niveles

Los casos anteriores permiten precisar un vocabulario que se usa con frecuencia de modo impreciso.

Reducción, en sentido clásico, es la derivación de las leyes de una teoría a partir de las de otra más fundamental, con la ayuda de definiciones puente que conectan sus términos (Nagel, 1961). La derivación de las leyes de los gases ideales a partir de la mecánica estadística es un caso aproximado. **Fundamentación** designa la relación por la cual los hechos de un nivel dependen de los de otro. **Superveniencia** es una relación de covariación: las propiedades de un nivel supervienen a las de otro si no puede haber diferencia en las primeras sin diferencia en las

segundas. **Emergencia** designa la aparición de propiedades en un sistema que no poseen sus componentes; se distingue una emergencia débil, en la que esas propiedades son deducibles en principio aunque no en la práctica, de una emergencia fuerte, en la que no lo serían ni en principio. **Nivel de descripción** es un conjunto de magnitudes y relaciones adecuado para una escala y un tipo de preguntas. **Teoría efectiva** es una teoría válida en un dominio delimitado de escalas, que incorpora el efecto de la física de otras escalas a través de unos pocos parámetros. **Aproximación** es la sustitución de una expresión por otra más simple con un error controlado. **Límite** es el comportamiento de una teoría cuando un parámetro tiende a un valor extremo; Robert Batterman ha mostrado que muchos límites importantes en física son **singulares**: el comportamiento en el límite no se obtiene suavemente del comportamiento cerca de él, como ocurre con la transición de la óptica ondulatoria a la geométrica o con los puntos críticos (Batterman, 2002). **Universalidad** es la independencia del comportamiento de gran escala respecto de los detalles microscópicos. **Escala** es el orden de magnitud característico de una longitud, una energía o un tiempo.

Atelier Velázquez

Con este vocabulario puede formularse una posición equilibrada. La física de la materia condensada no viola la mecánica cuántica: los superconductores obedecen la ecuación de Schrödinger. Pero las identidades sintéticas que establece —la cuantización exacta de la resistencia Hall, los exponentes críticos universales— no se obtienen deduciéndolas de la ecuación de Schrödinger para 10^{23} partículas, sino construyendo descripciones efectivas en las que aparecen términos nuevos (parámetros de orden, cuasipartículas, invariantes topológicos) y operaciones nuevas (cambios de escala, promedios sobre configuraciones). El grupo de renormalización explica por qué esas descripciones son posibles y por qué no dependen de los detalles. Esto no es una emergencia fuerte, que añada fuerzas o leyes nuevas; tampoco es una reducción en el sentido de Nagel. Es una conexión parcial entre niveles que mantienen cierta autonomía relativa: un caso más de symploké. Adoptar de antemano una ontología emergentista —según la cual el mundo estaría hecho de niveles autónomos con leyes propias— sería tan precipitado como adoptar un reduccionismo fundamentalista según el cual solo existen las partículas elementales y todo lo demás es apariencia.

Capítulo 22. El Modelo Estándar y sus límites

22.1 Del zoológico de partículas a los quarks

En la década de 1950, los aceleradores y los rayos cósmicos produjeron decenas de partículas nuevas —piones, kaones, lambdas, sigmas—, lo que Fermi, según se cuenta, comentó diciendo que si pudiera recordar sus nombres habría sido botánico. En 1961, Murray Gell-Mann y, de manera independiente, Yuval Ne'eman las organizaron mediante un esquema de simetría basado en el grupo $SU(3)$, que Gell-Mann llamó «óctuple camino». El esquema predecía una partícula con propiedades determinadas, la omega menos, descubierta en Brookhaven en 1964 (Barnes et al., 1964).

En 1964, Gell-Mann y George Zweig propusieron que las partículas que sienten la interacción fuerte —los **hadrones**— están compuestas por constituyentes más pequeños con carga fraccionaria, que Gell-Mann llamó **quarks** con una palabra tomada de *Finnegans Wake* de Joyce (Gell-Mann, 1964). Durante años se discutió si eran entidades reales o artificios de clasificación, porque nunca se observaban aislados. Los experimentos de dispersión inelástica profunda de electrones sobre protones, realizados en el Acelerador Lineal de Stanford entre 1967 y 1973, mostraron que los protones contienen centros de dispersión puntuales, de manera análoga a como el experimento de Rutherford había mostrado el núcleo atómico (Bloom et al., 1969).

Atelier Velázquez

22.2 La cromodinámica cuántica

Los quarks llevan una carga de un tipo nuevo, el **color**, que puede tomar tres valores. La teoría de su interacción, la **cromodinámica cuántica** (QCD), es una teoría de Yang-Mills con grupo $SU(3)$, cuyos cuantos, los **gluones**, también llevan color y, por tanto, interactúan entre sí. En 1973, David Gross y Frank Wilczek, y por separado David Politzer, mostraron que en esta teoría la intensidad de la interacción disminuye a altas energías, propiedad llamada **libertad asintótica** (Gross y Wilczek, 1973; Politzer, 1973). A cortas distancias, los quarks se comportan casi como partículas libres; a distancias del orden del tamaño de un protón, la interacción se vuelve tan intensa que es imposible separarlos: el **confinamiento**. Si se intenta arrancar un quark, la energía del campo de color crece hasta que se crea un nuevo par quark-antiquark, y lo que se obtiene son hadrones.

Una consecuencia ilumina la cuestión de qué es la masa. Los quarks arriba y abajo que forman protones y neutrones tienen masas de pocos MeV; la suma de las masas de los tres quarks de un protón es del orden de diez MeV, alrededor del uno por ciento de su masa de 938 MeV. El resto es energía de los gluones y del movimiento de los quarks confinados. Los cálculos de QCD en retículo, que resuelven la teoría numéricamente en una red discreta de puntos del espacio-tiempo, reproducen las masas de los hadrones ligeros con una precisión de pocos por ciento a partir de muy pocos parámetros (Dürr et al., 2008). La masa de la materia ordinaria es, en su mayor parte, energía de interacción.

22.3 La teoría electrodébil

La interacción débil, responsable de la desintegración beta, tenía rasgos extraños. En 1956, Tsung-Dao Lee y Chen Ning Yang señalaron que no había pruebas de que respetara la simetría especular (paridad); en 1957, Chien-Shiung Wu y sus colaboradores mostraron con núcleos de cobalto-60 polarizados que los electrones de la desintegración se emiten preferentemente en una dirección, violando la paridad (Wu et al., 1957). La naturaleza distingue entre izquierda y derecha en la interacción débil.

Atelier Velázquez

Sheldon Glashow propuso en 1961 unificar las interacciones débil y electromagnética en una teoría con grupo $SU(2) \times U(1)$, pero los bosones mediadores de la interacción débil debían tener masa, y añadirla a mano destruía la consistencia de la teoría (Glashow, 1961). Steven Weinberg en 1967 y Abdus Salam en 1968 resolvieron la dificultad incorporando el mecanismo de Higgs (Weinberg, 1967). En 1971, Gerardus ’t Hooft, estudiante de Martinus Veltman en Utrecht, demostró que la teoría resultante es renormalizable (’t Hooft, 1971).

La teoría predecía corrientes débiles neutras, interacciones sin intercambio de carga eléctrica, observadas en 1973 en la cámara de burbujas Gargamelle del CERN (Hasert et al., 1973), y bosones $W^{\pm}$ y Z^{0} con masas de unos 80 y 91 GeV, descubiertos en 1983 por las colaboraciones UA1 y UA2 en el colisionador de protones y antiprotones del CERN (Arnison et al., 1983). El colisionador LEP, entre 1989 y 2000, midió las propiedades del Z con una precisión de partes por diez mil y estableció, a partir de su anchura de desintegración, que hay exactamente tres tipos de neutrinos ligeros (ALEPH Collaboration et al., 2006).

22.4 El mecanismo de Higgs

El problema que resolvió el mecanismo de Higgs es el siguiente: la simetría gauge exige que los bosones mediadores no tengan masa, pero los bosones W y Z la tienen. La solución, propuesta en 1964 por François Englert y Robert Brout, por Peter Higgs y por Gerald Guralnik, Carl Hagen y Tom Kibble, utiliza la rotura espontánea de simetría (Englert y Brout, 1964; Guralnik et al., 1964; Higgs, 1964). Se introduce un campo escalar con una energía potencial de la forma

$$V(\phi) = -\mu^2|\phi|^2 + \lambda|\phi|^4,$$

cuya gráfica tiene forma de sombrero mexicano: el valor $\phi = 0$ es un máximo local, y los mínimos forman un círculo de valores con $|\phi| = \mu/\sqrt{2\lambda}$. Las leyes son simétricas, pero el estado de mínima energía no: el campo adquiere en todo el universo un valor no nulo, el **valor esperado del vacío**, $v \approx 246$ GeV. Los bosones W y Z, al interactuar con ese fondo, adquieren masa. Los quarks y leptones adquieren la suya mediante interacciones con el campo de Higgs cuyas intensidades, los acoplamientos de Yukawa, son parámetros libres de la teoría. Higgs señaló explícitamente que el mecanismo predice una partícula nueva, una excitación del campo alrededor de su mínimo.

Atelier Velázquez

El 4 de julio de 2012, las colaboraciones ATLAS y CMS anunciaron en el CERN la observación de una partícula de unos 125 GeV con las propiedades esperadas del bosón de Higgs, con una significación estadística de cinco desviaciones típicas en cada experimento (ATLAS Collaboration, 2012; CMS Collaboration, 2012). Englert y Higgs recibieron el premio Nobel de 2013; Brout había muerto en 2011. Las medidas posteriores han confirmado que sus acoplamientos con las demás partículas son proporcionales a sus masas, como predice el Modelo Estándar, con precisiones de entre el cinco y el veinte por ciento según el canal.

El mecanismo de Higgs no explica «el origen de la masa» en general, como a veces se dice: explica la masa de las partículas elementales del Modelo Estándar, pero no la mayor parte de la masa de la materia ordinaria, que procede de la QCD; y no explica por qué los acoplamientos de Yukawa tienen los valores que tienen, que van desde el del electrón hasta el del quark top, cuya masa es unas 340 000 veces mayor.

Tabla 8. Partículas elementales del Modelo Estándar

Tipo	Partícula	Carga eléctrica (e)	Masa aproximada	Interacciones
Quarks, 1.ª generación	arriba (u), abajo (d)	+2/3, −1/3	2.2 MeV, 4.7 MeV	Fuerte, electromagnética, débil
Quarks, 2.ª generación	encanto (c), extraño (s)	+2/3, −1/3	1.27 GeV, 93 MeV	Fuerte, electromagnética, débil
Quarks, 3.ª generación	cima (t), fondo (b)	+2/3, −1/3	172.6 GeV, 4.18 GeV	Fuerte, electromagnética, débil
Leptones cargados	electrón, muon, tau	−1	0.511 MeV, 105.7 MeV, 1.777 GeV	Electromagnética, débil
Neutrinos	ν_e, ν_μ, ν_τ	0	< 0.45 eV (escala absoluta)	Débil
Bosones gauge	fotón (γ)	0	0	Media la electromagnética
	gluones (8)	0	0	Median la fuerte
	W± , Z⁰	±1, 0	80.4 GeV, 91.2 GeV	Median la débil
Escalar	Higgs (H)	0	125.2 GeV	Acoplamiento proporcional a la masa

Nota. Valores redondeados según el Particle Data Group (Navas et al., 2024). Las masas de los quarks ligeros dependen del esquema de renormalización. La cota de la masa de los neutrinos procede de KATRIN (2025).

Atelier Velázquez

22.5 Neutrinos

El neutrino nació de una carta. En diciembre de 1930, Pauli escribió a los asistentes a un congreso en Tubinga, a quienes se dirigía como «queridas señoras y señores radiactivos», proponiendo un «remedio desesperado» para un problema de la desintegración beta: los electrones emitidos tenían un espectro continuo de energías, como si una parte de la energía desapareciera. Pauli propuso que una partícula neutra y muy ligera se llevaba la energía restante. Enrico Fermi construyó en 1934 la teoría de la desintegración beta con esa partícula, a la que llamó neutrino, «neutroncito» en italiano (Fermi, 1934). Frederick Reines y Clyde Cowan lo detectaron en 1956 cerca del reactor nuclear de Savannah River (Cowan et al., 1956).

En 1957 y de nuevo en 1967, Bruno Pontecorvo propuso que los neutrinos podrían transformarse unos en otros mientras viajan, si tenían masa (Pontecorvo, 1968). Desde 1968, el experimento de Raymond Davis en la mina Homestake detectaba solo alrededor de un tercio de los neutrinos solares que predecían los modelos del Sol de John Bahcall (Davis et al., 1968). Durante tres décadas, el «problema de los neutrinos solares» pudo deberse a un error en el modelo solar, en el experimento o en la física de los neutrinos.

La resolución llegó con dos experimentos. En 1998, Super-Kamiokande, un tanque de 50 000 toneladas de agua ultrapura en Japón, mostró que el número de neutrinos muónicos producidos por rayos cósmicos en la atmósfera dependía de la distancia que habían recorrido: los que atravesaban la Tierra llegaban en menor número (Fukuda et al., 1998). En 2001–2002, el Observatorio de Neutrinos de Sudbury, en Canadá, con agua pesada, midió por separado el flujo de neutrinos electrónicos y el flujo total de los tres tipos: el total coincidía con el modelo solar, y los electrónicos eran alrededor de un tercio (Ahmad et al., 2002). Los neutrinos oscilan, y por tanto tienen masa. Takaaki Kajita y Arthur McDonald recibieron el premio Nobel de 2015.

En el caso de dos tipos, la probabilidad de que un neutrino producido con un sabor se detecte con otro, tras recorrer una distancia L con energía E, es

$$P = \sin^2(2\theta)\,\sin^2\left(1.27\,\frac{\Delta m^2\ [\mathrm{eV}^2]\ L\ [\mathrm{km}]}{E\ [\mathrm{GeV}]}\right),$$

donde θ es el ángulo de mezcla y Δm^2 la diferencia de los cuadrados de las masas. *Ejemplo.* En el experimento JUNO, en China, los antineutrinos de reactores nucleares situados a unos 52.5 km tienen energías típicas de 4 MeV. Con $\Delta m^2_{21} = 7.5 \times 10^{-5}\ \mathrm{eV}^2$, el argumento del segundo seno vale aproximadamente $1.27 \times 7.5 \times 10^{-5} \times 52.5/0.004 \approx 1.25$, y su seno al cuadrado, 0.90: la distancia está elegida cerca del primer máximo de oscilación. Con sus primeros 59 días de datos, en noviembre de 2025 JUNO midió $\sin^2\theta_{12} = 0.3092 \pm 0.0087$ y $\Delta m^2_{21} = (7.50 \pm 0.12) \times 10^{-5}\ \mathrm{eV}^2$, mejorando en un factor 1.6 la precisión de todas las medidas anteriores combinadas (JUNO Collaboration, 2026).

Las oscilaciones solo miden diferencias de masas. La masa absoluta se acota de otro modo. El experimento KATRIN, que mide con un espectrómetro de 23 metros el extremo del espectro de la desintegración beta del tritio, estableció en 2025 que la masa del neutrino electrónico es menor de 0.45 eV con un 90 por ciento de confianza (KATRIN Collaboration, 2025). La cosmología proporciona cotas más estrictas pero dependientes del modelo, que se examinan en el capítulo 28. Se ignora todavía el orden de las masas, si los neutrinos son sus propias antipartículas y por qué sus masas son al menos un millón de veces menores que la del electrón.

Atelier Velázquez

22.6 Violación CP y asimetría entre materia y antimateria

En 1964, James Cronin, Val Fitch y sus colaboradores observaron que ciertos mesones K neutros se desintegran de una manera que viola la simetría CP, la combinación de conjugación de carga y paridad (Christenson et al., 1964). Makoto Kobayashi y Toshihide Maskawa mostraron en 1973 que la violación CP podía incorporarse en el Modelo Estándar si había al menos tres generaciones de quarks, cuando solo se conocían tres quarks (Kobayashi y Maskawa, 1973). Los quarks fondo y cima se descubrieron en 1977 y 1995. Los experimentos BaBar y Belle confirmaron la teoría en los mesones B a partir de 2001. En 2025, la colaboración LHCb informó de la primera observación de violación CP en desintegraciones de bariones (LHCb Collaboration, 2025).

La cuestión tiene alcance cosmológico. El universo observable contiene materia y prácticamente nada de antimateria. La razón entre el número de bariones y el de fotones de la radiación de fondo es de unos 6×10^{-10}: por cada mil millones de pares de partícula y antipartícula que se aniquilaron en el universo temprano, sobrevivió aproximadamente una partícula. En 1967, Andréi Sájarov estableció las tres condiciones necesarias para que una asimetría así se genere a partir de un estado simétrico: procesos que violen el número bariónico, violación de las simetrías C y CP, y un periodo fuera del equilibrio térmico (Sakharov, 1967). El Modelo Estándar satisface las tres en principio, pero su violación CP es demasiado pequeña, en muchos órdenes de magnitud, para producir la asimetría observada. Hace falta física adicional.

Atelier Velázquez

22.7 Problemas abiertos

El Modelo Estándar es una de las construcciones más logradas de la historia de la ciencia. Ningún experimento de aceleradores ha encontrado una desviación sólida de sus predicciones. El caso del momento magnético anómalo del muon es instructivo. Durante dos décadas, la medida discrepó de la predicción teórica en más de cuatro desviaciones típicas, y se presentó como posible señal de física nueva. En junio de 2025, el experimento Muon g-2 de Fermilab publicó su resultado final, con una precisión de 127 partes por mil millones; ese mismo año, una nueva evaluación teórica que incorpora cálculos de QCD en retículo para la contribución hadrónica dio un valor compatible con la medida (Muon g-2 Collaboration, 2025; Aliberti et al., 2025). La anomalía desapareció al mejorar la teoría, no el experimento. Algo análogo ocurrió con la masa del bosón W: la medida de la colaboración CDF en 2022, muy discrepante, no fue confirmada por las de ATLAS y CMS en 2024.

Los problemas abiertos son, sin embargo, considerables. El Modelo Estándar tiene diecinueve parámetros libres, que se elevan a unos veintiséis con las masas y mezclas de los neutrinos, y no explica sus valores. No explica por qué hay tres generaciones. No contiene la gravitación. No contiene una partícula que pueda constituir la materia oscura. No explica la asimetría entre materia y antimateria. La interacción fuerte podría violar la simetría CP mediante un parámetro que los experimentos acotan por debajo de 10^{-10}, sin que se sepa por qué es tan pequeño; la solución más estudiada, el axión, es también candidata a materia oscura. Y la masa del bosón de Higgs es extraordinariamente sensible a la física de altas energías, de modo que su valor de 125 GeV parece requerir cancelaciones finamente ajustadas, el **problema de la jerarquía**. La supersimetría, que lo resolvía, predecía partículas nuevas a energías accesibles al LHC; no se han encontrado. El capítulo 46 retoma estos problemas.

Atelier Velázquez

Parte VI. La biografía física del universo

Atelier Velázquez

Capítulo 23. Instrumentos, observaciones y escalera de distancias

23.1 Del ojo al detector

Toda la información astronómica, con la excepción de los meteoritos, las muestras traídas por sondas, los rayos cósmicos, los neutrinos y las ondas gravitacionales, llega en forma de radiación electromagnética. Un telescopio cumple dos funciones: recoger más luz que el ojo y separar mejor los detalles. La cantidad de luz recogida es proporcional al área de la abertura, es decir, al cuadrado del diámetro D. El poder de resolución está limitado por la difracción, y el ángulo mínimo distinguible es aproximadamente

$$\theta \approx 1.22\,\frac{\lambda}{D}.$$

Ejemplo. El telescopio espacial James Webb, con un espejo de 6.5 m, observando en el infrarrojo a 2 µm, alcanza una resolución de $1.22 \times 2 \times 10^{-6}/6.5 \approx 3.8 \times 10^{-7}$ rad, unas 0.08 segundos de arco. Desde la superficie terrestre, la turbulencia atmosférica limita la resolución de los telescopios ópticos a alrededor de medio segundo de arco, salvo que se use óptica adaptativa, que corrige en tiempo real las distorsiones mediante espejos deformables.

Atelier Velázquez

Los telescopios refractores de Galileo y Kepler fueron sustituidos para la investigación por reflectores, desde el que Newton construyó en 1668, porque los espejos no sufren aberración cromática y pueden fabricarse más grandes. Los detectores cambiaron también: el ojo, la placa fotográfica desde finales del siglo XIX, el fotomultiplicador y, desde la década de 1970, el **dispositivo de carga acoplada** (CCD), un chip de silicio que convierte los fotones en electrones con una eficiencia cuántica superior al 90 por ciento y registra su número en cada píxel. La astronomía se convirtió en una ciencia de conteo de fotones.

En 1932, Karl Jansky, ingeniero de los laboratorios Bell que estudiaba interferencias en las comunicaciones de radio, detectó una emisión procedente de la dirección del centro de la Vía Láctea. Grote Reber construyó en 1937 el primer radiotelescopio parabólico en el jardín de su casa. Después de la Segunda Guerra Mundial, la tecnología del radar permitió el desarrollo de la radioastronomía, que descubrió los cuásares, los púlsares y la radiación cósmica de fondo. Los telescopios espaciales abrieron las ventanas que la atmósfera cierra: el ultravioleta, los rayos X, los rayos gamma y buena parte del infrarrojo.

La **interferometría** combina las señales de varios telescopios separados para obtener la resolución de un instrumento cuyo diámetro es la separación entre ellos. En la interferometría de muy larga base, radiotelescopios de distintos continentes registran simultáneamente las señales con relojes atómicos, y las grabaciones se combinan después en una computadora. El Event Horizon Telescope, que obtuvo las primeras imágenes del entorno de agujeros negros, observa a 1.3 mm con una línea de base de hasta el diámetro terrestre, unos 1.27×10^7 m, lo que da una resolución de $1.3 \times 10^{-3} / 1.27 \times 10^7 \approx 10^{-10}$ rad, unos 20 microsegundos de arco: la de un ojo capaz de distinguir desde la Tierra una naranja en la superficie de la Luna.

23.2 Espectroscopia

Si la imagen dice dónde está un objeto, el espectro dice qué es. En 1814, Joseph von Fraunhofer catalogó cientos de líneas oscuras en el espectro solar. Kirchhoff y Bunsen mostraron en 1859–1860 que cada elemento químico produce líneas a longitudes de onda características, en emisión cuando está caliente y en absorción cuando un gas más frío se interpone ante una fuente continua (Kirchhoff y Bunsen, 1860). En 1835, Auguste Comte había escrito que nunca podríamos conocer la composición química de las estrellas; un cuarto de siglo después, Kirchhoff identificó en el Sol el sodio, el hierro, el magnesio y otros elementos. En 1868 se observó en el espectro de la cromosfera solar una línea que no correspondía a ningún elemento conocido; se atribuyó a un elemento nuevo, el helio, que no se aisló en la Tierra hasta 1895.

Atelier Velázquez

La espectroscopia proporciona varias magnitudes a la vez. La posición de las líneas identifica la composición. Su desplazamiento por el efecto Doppler mide la velocidad a lo largo de la línea de visión. Sus anchuras y formas informan de la temperatura, la presión, la rotación y los campos magnéticos. Las intensidades relativas de líneas del mismo elemento en distintos estados de ionización miden la temperatura. Un espectro es un registro físico de condiciones a distancias inalcanzables.

23.3 Mensajeros no electromagnéticos

Los **detectores de neutrinos** registran la luz Cherenkov, un destello azulado que emiten las partículas cargadas cuando atraviesan un medio a mayor velocidad que la de la luz en ese medio, producidas por las raras interacciones de neutrinos en grandes volúmenes de agua o de hielo. El observatorio IceCube, en el Polo Sur, utiliza un kilómetro cúbico de hielo antártico instrumenta-

do con 5 160 sensores ópticos. Los **interferómetros de ondas gravitacionales**, examinados en el capítulo 41, miden variaciones relativas de longitud de 10^{-21}. La combinación de varios mensajeros —luz, neutrinos, ondas gravitacionales— constituye la astronomía multimensajero, cuyo primer gran resultado fue la observación de la fusión de estrellas de neutrones GW170817.

23.4 Regresión y progresión: cómo se construye un dato

Una imagen astronómica no es una fotografía en el sentido ingenuo. Puede examinarse retrocediendo desde el resultado hacia las condiciones que lo hacen posible, y después avanzando desde esas condiciones hacia las inferencias que autorizan.

En el movimiento regresivo, el punto de partida es una tabla de números: cuentas por píxel en un archivo digital. Esas cuentas proceden de electrones liberados en el silicio del CCD por fotones de cierto intervalo de longitudes de onda seleccionado por un filtro. A las cuentas se les ha restado una señal de fondo electrónica (*bias*) y una corriente térmica (*dark*), medidas con exposiciones de calibración. Se han dividido por un campo plano, una exposición de una superficie uniformemente iluminada que corrige las diferencias de sensibilidad entre píxeles. La luz atravesó el espejo y la óptica del telescopio, cuya respuesta se caracteriza por una función de dispersión de punto, y antes la atmósfera, que absorbe una fracción dependiente de la altura del objeto y de la longitud de onda. La teoría de cada paso —la física de semiconductores del CCD, la óptica del telescopio, la transferencia radiativa en la atmósfera— está incorporada en el dato.

Atelier Velázquez

En el movimiento progresivo, las cuentas calibradas se convierten en flujos mediante estrellas patrón de brillo conocido. El flujo, comparado en varios filtros, da un color, que indica una temperatura según la ley de Planck. Si el espectro está disponible, las líneas dan la composición y el desplazamiento al rojo. Si se conoce la luminosidad intrínseca de ese tipo de objeto, el flujo da la distancia. La distancia, el desplazamiento al rojo y la luminosidad permiten situar el objeto en un modelo cosmológico. Cada inferencia depende de las anteriores y de modelos adicionales. Llamar «observación» al resultado final es legítimo si no se olvida la cadena.

23.5 Magnitudes y luminosidad

Los astrónomos miden el brillo aparente en **magnitudes**, una escala heredada de Hiparco, que clasificaba las estrellas visibles en seis clases. Norman Pogson la formalizó en 1856 de modo que una diferencia de cinco magnitudes corresponde a un factor cien en flujo:

$$m_1 - m_2 = -2.5\log_{10}\frac{F_1}{F_2}.$$

Como el flujo de una fuente de luminosidad L a distancia d es $F = L/4\pi d^2$, la **magnitud absoluta** M —la magnitud aparente que tendría el objeto a 10 párstecs— se relaciona con la aparente m mediante el **módulo de distancia**:

$$m - M = 5\log_{10}\frac{d}{10\ \text{pc}}.$$

Si se conoce M y se mide m, se obtiene d. Un objeto de luminosidad conocida es una **candela estándar**.

23.6 Henrietta Swan Leavitt y las cefeidas

Henrietta Swan Leavitt (1868–1921) trabajaba en el Observatorio del Harvard College como una de las «computadoras», mujeres contratadas para medir y catalogar estrellas en placas fotográficas por un salario inferior al de un empleado administrativo. En 1908 publicó un catálogo de 1 777 estrellas variables en las Nubes de Magallanes, y observó que las variables más brillantes tenían periodos más largos (Leavitt, 1908). En 1912, con 25 cefeidas de la Pequeña Nube de Magallanes, estableció que la magnitud aparente varía linealmente con el logaritmo del periodo (Leavitt y Pickering, 1912). Como todas las estrellas de la Nube están aproximadamente a la misma distancia de nosotros, la relación entre periodo y brillo aparente es una relación entre periodo y luminosidad intrínseca.

Atelier Velázquez

El descubrimiento convirtió a las cefeidas en candelas estándar: basta medir el periodo de una cefeida para conocer su luminosidad y, comparándola con su brillo aparente, su distancia. Faltaba calibrar la relación con alguna cefeida de distancia conocida, lo que Ejnar Hertzsprung intentó en 1913 mediante métodos estadísticos. La física de las cefeidas se entendió más tarde: son estrellas gigantes que pulsan porque una capa de helio parcialmente ionizado actúa como una válvula que retiene y libera calor, mecanismo descrito por Eddington y precisado por Serguéi Zhevakin en 1953.

Ejemplo. Si la relación periodo-luminosidad indica que una cefeida tiene magnitud absoluta $M = -4$ y se observa con magnitud aparente $m = 21$, el módulo de distancia es 25, y $d =$

$10^{(25+5)/5}$ pc $= 10^6$ pc, un megapársec. Edwin Hubble hizo exactamente este tipo de cálculo en 1925 con cefeidas de la nebulosa de Andrómeda.

Leavitt murió de cáncer en 1921. El matemático sueco Gösta Mittag-Leffler, que desconocía su muerte, le escribió en 1925 para proponerla al premio Nobel.

23.7 Supernovas y otras candelas

Las cefeidas son visibles hasta unas pocas decenas de megapársecs. Para distancias mayores se necesitan objetos más luminosos. Las **supernovas de tipo Ia** son explosiones termonucleares de enanas blancas que alcanzan una magnitud absoluta máxima de alrededor de -19.3, miles de millones de veces la luminosidad del Sol. No son exactamente iguales: las más luminosas declinan más despacio. Mark Phillips mostró en 1993 que esa correlación permite estandarizarlas, convirtiéndolas en candelas con una dispersión de alrededor del diez por ciento en distancia (Phillips, 1993). Otros indicadores son la punta de la rama de las gigantes rojas, un brillo máximo bien definido que alcanzan las estrellas viejas antes de encender el helio en su núcleo, y las estrellas de carbono de la rama asintótica.

Atelier Velázquez

Existen también **reglas estándar**, objetos de tamaño conocido. Las **oscilaciones acústicas de bariones** son una huella de las ondas de sonido que recorrieron el plasma del universo temprano hasta la recombinación, y que dejaron una escala preferente en la distribución de galaxias, de unos 147 megapársecs comóviles (Eisenstein et al., 2005). Medida a distintos desplazamientos al rojo, esa escala permite reconstruir la historia de la expansión. Las **sirenas estándar** son las fusiones de objetos compactos detectadas por ondas gravitacionales, cuya forma de onda proporciona directamente la distancia de luminosidad sin necesidad de calibración, como propuso Bernard Schutz en 1986.

23.8 La escalera de distancias

Las distancias cósmicas se obtienen mediante una cadena de métodos, cada uno calibrado con el anterior. La Tabla 9 la resume.

Tabla 9. La escalera de distancias cosmológicas

Peldaño	Método	Alcance aproximado	Calibración	Fuente principal de error

Peldaño	Método	Alcance aproximado	Calibración	Fuente principal de error
0	Radar y telemetría de sondas	Sistema solar	Velocidad de la luz	Despreciable
1	Paralaje trigonométrica (Gaia)	Hasta ~10 kpc	Órbita terrestre	Precisión astrométrica, sesgos sistemáticos
1′	Máser en NGC 4258 (geométrica)	7.6 Mpc	Dinámica del disco de agua	Modelo del disco
2	Cefeidas, punta de la rama de gigantes rojas	Hasta ~40 Mpc	Paralajes, NGC 4258, Nubes de Magallanes	Metalicidad, extinción, contaminación por estrellas vecinas
3	Supernovas Ia	Hasta ~3 000 Mpc	Cefeidas o gigantes rojas en galaxias anfitrionas	Estandarización, evolución con la época, polvo
—	Oscilaciones acústicas de bariones	$0.1 < z < 3$	Física del plasma primordial	Modelo del horizonte sonoro
—	Sirenas estándar	Hasta cientos de Mpc (hoy)	Relatividad general	Inclinación del sistema, identificación de la galaxia anfitriona
—	Retardos de lentes gravitacionales	$z \sim 0.5$–1	Modelo de masa de la lente	Degeneraciones del modelo de masa

Nota. Elaboración propia. Los métodos sin número de peldaño no dependen de la escalera, lo que permite contrastarla.

Atelier Velázquez

La virtud de la escalera es que extiende la medida directa mediante calibraciones sucesivas; su vulnerabilidad es que un error sistemático en un peldaño se propaga a todos los siguientes. Por eso es esencial la existencia de métodos independientes. Que distintos métodos coincidan o no coincidan es la prueba más fuerte de que la escalera funciona, y la discrepancia actual en el valor de la constante de Hubble, examinada en el capítulo 26, es precisamente un desacuerdo entre la escalera y métodos que no dependen de ella.

23.9 Errores sistemáticos e inferencia

Todo resultado astronómico tiene dos tipos de error. El **error estadístico** procede de la cantidad limitada de datos y disminuye al acumular más; se trata con la estadística de muestras. El **error sistemático** procede de efectos que desplazan todas las medidas en la misma dirección —una calibración errónea, polvo no corregido, una población de objetos distinta de la supuesta— y no disminuye al acumular datos. Las tensiones en cosmología suelen enfrentar a medidas cuyos errores estadísticos son ya muy pequeños, de modo que la cuestión decisiva es si se han subestimado los sistemáticos.

La inferencia de parámetros cosmológicos se formula hoy casi siempre en términos **bayesianos**. Si θ son los parámetros de un modelo y D los datos, el teorema de Bayes establece que

$$P(\theta \mid D) = \frac{P(D \mid \theta)\, P(\theta)}{P(D)},$$

donde $P(D|\theta)$ es la verosimilitud —la probabilidad de los datos si los parámetros son θ—, $P(\theta)$ la distribución previa y $P(\theta|D)$ la posterior. En la práctica, la posterior se explora con algoritmos de Monte Carlo por cadenas de Markov, que recorren el espacio de parámetros visitando cada región con una frecuencia proporcional a su probabilidad.

La cosmología es, además, una disciplina de **problemas inversos**: se observan los efectos y se infieren las causas. Muchos problemas inversos están mal planteados en el sentido de Jacques Hadamard: pequeñas variaciones de los datos producen grandes variaciones de la solución, o varias causas producen los mismos efectos. Reconstruir la distribución de materia oscura a partir de las distorsiones de las galaxias de fondo, o el espectro de las fluctuaciones primordiales a partir del fondo cósmico, exige regularizar el problema con supuestos adicionales. El dato cosmológico es un producto de operaciones con supuestos explícitos, y su fiabilidad depende de la independencia de las cadenas que lo producen.

Atelier Velázquez

Capítulo 24. Estrellas, elementos y tiempo profundo

24.1 Cecilia Payne-Gaposchkin y la composición de las estrellas

En la década de 1920 se daba por supuesto que las estrellas tenían una composición similar a la de la corteza terrestre. Cecilia Payne (1900–1979), formada en Cambridge y doctorada en Harvard en 1925, aplicó a los espectros estelares la teoría de la ionización térmica que el físico indio Meghnad Saha había formulado en 1920. La ecuación de Saha relaciona la fracción de átomos de un elemento en cada estado de ionización con la temperatura y la presión. Payne mostró que las enormes diferencias entre los espectros de las estrellas se deben principalmente a diferencias de temperatura, no de composición, y que, una vez corregido el efecto de la ionización, el hidrógeno y el helio son con mucho los elementos más abundantes (Payne, 1925). Henry Norris Russell, el astrónomo más influyente de Estados Unidos, la persuadió de que calificara el resultado de probablemente espurio; en 1929, por otro método, llegó él mismo a la misma conclusión. Hoy sabemos que el hidrógeno constituye alrededor del 74 por ciento de la masa de la materia bariónica y el helio el 24 por ciento.

Atelier Velázquez

24.2 Estructura y energía de las estrellas

Una estrella es una esfera de gas en **equilibrio hidrostático**: en cada capa, la presión del gas compensa el peso de las capas superiores,

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{G\,m(r)\,\rho(r)}{r^2},$$

donde $m(r)$ es la masa contenida dentro del radio r y ρ la densidad. La presión procede de la temperatura del gas, que en el centro del Sol alcanza unos 15.7 millones de kelvin. Arthur Eddington, en *La constitución interna de las estrellas* (1926), sistematizó la teoría y propuso que la energía estelar procede de la transmutación de hidrógeno en helio, aunque la temperatura central parecía insuficiente para vencer la repulsión eléctrica entre protones. La solución fue cuántica: el efecto túnel, descrito por George Gamow en 1928, permite a los protones atravesar la barrera de repulsión con una probabilidad pequeña pero suficiente.

Hans Bethe describió en 1939 los dos mecanismos de fusión del hidrógeno: la cadena protón-protón, dominante en estrellas como el Sol, y el ciclo del carbono-nitrógeno-oxígeno, domi-

nante en estrellas más masivas (Bethe, 1939). En ambos, cuatro protones se convierten en un núcleo de helio, y alrededor del 0.7 por ciento de la masa se libera como energía. El Sol, con sus 2×10^{30} kg, puede mantener su luminosidad actual unos diez mil millones de años; lleva unos 4 600 millones. Las predicciones de la teoría sobre los neutrinos producidos en el núcleo solar condujeron, como se vio en el capítulo 22, al descubrimiento de las oscilaciones de neutrinos.

24.3 Chandrasekhar y el destino de las estrellas

Subrahmanyan Chandrasekhar (1910–1995) calculó en 1930, durante su viaje en barco de la India a Inglaterra, la estructura de las enanas blancas, estrellas extinguidas que se sostienen por la presión de degeneración de los electrones, consecuencia del principio de exclusión de Pauli. Al incluir los efectos relativistas, encontró que existe una masa máxima, hoy estimada en unas 1.4 masas solares, por encima de la cual la presión de los electrones no puede detener el colapso (Chandrasekhar, 1931). Eddington se opuso públicamente al resultado en 1935, en una sesión de la Royal Astronomical Society, por considerar absurda su consecuencia: una estrella masiva debería colapsar indefinidamente. Chandrasekhar recibió el premio Nobel en 1983.

Atelier Velázquez

Las estrellas de más de unas ocho masas solares terminan con el colapso de su núcleo de hierro, que libera una energía gravitatoria colosal, en su mayor parte en forma de neutrinos, y expulsa las capas exteriores en una **supernova**. El 23 de febrero de 1987, la supernova 1987A en la Gran Nube de Magallanes fue precedida por un pulso de neutrinos detectado simultáneamente por los experimentos Kamiokande II, IMB y Baksan: unas dos docenas de neutrinos en trece segundos, que confirmaron el modelo de colapso (Hirata et al., 1987). El núcleo colapsado forma una **estrella de neutrones**, una esfera de unos veinte kilómetros con más masa que el Sol, o un agujero negro. Walter Baade y Fritz Zwicky habían propuesto la existencia de estrellas de neutrones en 1934. En 1967, Jocelyn Bell, estudiante de doctorado en Cambridge, detectó en los registros de un radiotelescopio una señal que se repetía cada 1.337 segundos con regularidad de reloj: el primer **púlsar**, una estrella de neutrones en rotación que emite haces de radiación como un faro (Hewish et al., 1968). El premio Nobel de 1974 se concedió a su director de tesis, Antony Hewish, y a Martin Ryle, no a ella.

24.4 Nucleosíntesis

¿De dónde proceden los elementos químicos? En 1957, Margaret Burbidge, Geoffrey Burbidge, William Fowler y Fred Hoyle publicaron una síntesis, conocida por las iniciales de sus autores como B²FH, que explicaba la formación de los elementos en las estrellas mediante una serie de procesos (Burbidge et al., 1957); Alastair Cameron llegó independientemente a conclusiones similares. Los elementos hasta el hierro se forman por fusión en los núcleos estelares. El carbono se produce por el proceso triple alfa, en el que tres núcleos de helio se combinan. Hoyle había argumentado en 1953 que este proceso solo podía ser eficiente si el carbono-12 tenía un estado excitado con una energía determinada, cerca de 7.65 MeV, y ese estado fue encontrado experimentalmente ese mismo año. El episodio se ha citado como predicción «antrópica», pero el análisis histórico muestra que Hoyle razonó a partir de la abundancia observada del carbono, no de la existencia de la vida (Kragh, 2010).

Los elementos más pesados que el hierro se forman por captura de neutrones: lenta, en el proceso *s*, en estrellas gigantes; rápida, en el proceso *r*, en entornos extremos. La observación de la fusión de estrellas de neutrones GW170817 en 2017 mostró en su brillo posterior, la kilonova, la firma de la producción de elementos pesados por el proceso *r* (Kasen et al., 2017). El oro y el platino de la Tierra se formaron, al menos en parte, en colisiones de estrellas de neutrones anteriores a la formación del sistema solar.

Atelier Velázquez

24.5 Discos y planetas

La hipótesis nebular, formulada por Kant en 1755 y por Laplace en 1796, propone que el Sol y los planetas se formaron a partir de una nube de gas y polvo en rotación que se aplanó en un disco. El radiotelescopio ALMA obtuvo en 2014 una imagen del disco que rodea a la joven estrella HL Tauri, con anillos y huecos concéntricos probablemente abiertos por planetas en formación (ALMA Partnership, 2015). En los discos protoplanetarios, los granos de polvo se agregan en cuerpos cada vez mayores que, al alcanzar algunas masas terrestres, pueden capturar gas y formar planetas gigantes.

En 1992, Aleksander Wolszczan y Dale Frail descubrieron planetas alrededor de un púlsar (Wolszczan y Frail, 1992), y en 1995 Michel Mayor y Didier Queloz descubrieron el primer planeta alrededor de una estrella como el Sol, 51 Pegasi b, midiendo las pequeñas oscilaciones de la

velocidad de la estrella producidas por el tirón gravitatorio del planeta (Mayor y Queloz, 1995). Desde entonces, los métodos de velocidad radial y de tránsito —la disminución del brillo de una estrella cuando un planeta pasa por delante— han identificado más de seis mil exoplanetas. El telescopio James Webb analiza la composición de sus atmósferas: en 2022 detectó dióxido de carbono en la del gigante gaseoso WASP-39b (JWST Transiting Exoplanet Community Early Release Science Team, 2023).

24.6 El descubrimiento del tiempo profundo

La reconstrucción del tiempo terrestre siguió un camino paralelo al astronómico, con instrumentos y supuestos distintos.

En 1669, Nicolás Steno formuló los principios de la estratigrafía: las capas de roca sedimentaria se depositan horizontalmente, y en una secuencia no alterada las inferiores son más antiguas. James Hutton, en 1788, argumentó que los procesos geológicos observables en el presente —erosión, sedimentación, levantamiento— bastan para explicar las formaciones rocosas si se les concede tiempo suficiente, y concluyó que en la historia de la Tierra no encontraba vestigios de un comienzo ni perspectiva de un fin (Hutton, 1788). Charles Lyell convirtió esa idea en el programa del uniformismo en sus *Principios de geología* (1830–1833), que Darwin llevó consigo en el *Beagle*. La teoría de la evolución por selección natural necesitaba cientos de millones de años.

William Thomson, lord Kelvin, se opuso con un argumento físico. Si la Tierra se formó caliente y se ha enfriado por conducción, el gradiente de temperatura medido en las minas permite calcular cuánto tiempo lleva enfriándose. En 1862 obtuvo entre 20 y 400 millones de años, y en trabajos posteriores restringió la estimación a unas pocas decenas de millones (Thomson, 1862). El argumento parecía irrefutable: aplicaba la ley de Fourier a datos medidos. Dejaba a los geólogos y a Darwin en una posición incómoda.

El argumento falló por dos supuestos. El más conocido es que ignoraba una fuente de calor desconocida en 1862: la radiactividad, descubierta por Henri Becquerel en 1896. El segundo, señalado por John Perry, antiguo ayudante de Kelvin, ya en 1895, antes de que se conociera la radiactividad, es que el interior terrestre podría conducir el calor más eficazmente que la corteza, por convección, lo que alarga considerablemente la edad calculada (England et al., 2007). El caso es una lección dialéctica: un cálculo correcto a partir de premisas que parecían físicamente

Atelier Velázquez

evidentes produjo una conclusión falsa, y fue la contradicción entre dos ciencias —la física y la geología— lo que obligó a revisar las premisas.

24.7 Datación radiométrica

La radiactividad no solo eliminó el argumento de Kelvin: proporcionó un reloj. Ernest Rutherford y Frederick Soddy mostraron en 1902 que la radiactividad es la transmutación de un elemento en otro, y que el número de átomos que se desintegran por unidad de tiempo es proporcional al número presente. De ahí se sigue la **ley de desintegración exponencial**:

$$N(t) = N_0\, e^{-\lambda t}, \qquad t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda},$$

donde λ es la constante de desintegración y $t_{1/2}$ el periodo de semidesintegración (Figura 5). Si un mineral contenía al formarse solo el isótopo padre y no ha ganado ni perdido átomos desde entonces, la razón entre el número de átomos hijos D y el de padres P que quedan da su edad:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(1 + \frac{D}{P}\right).$$

Atelier Velázquez

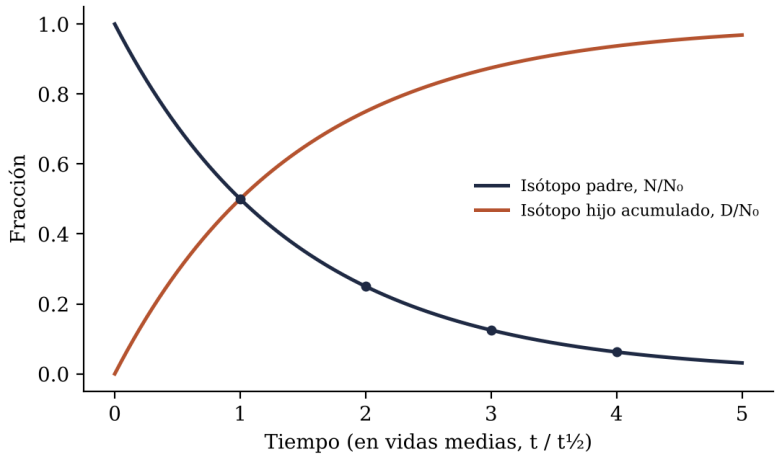


Figura 5. Desintegración radiactiva: fracción de isótopo padre que permanece y fracción de isótopo hijo acumulado en función del tiempo, medido en periodos de semidesintegración.

Fuente. Elaboración propia a partir de la ley de desintegración exponencial.

Ejemplos. El carbono-14, con un periodo de 5 730 años, se usa para restos orgánicos de hasta unos cincuenta mil años; una muestra que conserva el 25 por ciento de su carbono-14 original ha pasado por dos periodos y tiene unos 11 460 años. El uranio-238, con un periodo de 4 468

millones de años, se desintegra en plomo-206; un mineral en el que hay tantos átomos de plomo radiogénico como de uranio tiene exactamente un periodo de edad, 4 468 millones de años, y uno formado hace 4 540 millones de años tiene una razón $D/P \approx 1.02$.

Bertram Boltwood obtuvo en 1907 las primeras edades por el método uranio-plomo, de hasta 2 200 millones de años (Boltwood, 1907), y Arthur Holmes sistematizó la geocronología en las décadas siguientes. En 1956, Clair Patterson determinó la edad de la Tierra midiendo las razones isotópicas del plomo en meteoritos, supuestos formados al mismo tiempo que la Tierra a partir del mismo material: 4 550 ± 70 millones de años (Patterson, 1956). Las inclusiones refractarias de ciertos meteoritos, los primeros sólidos condensados en el sistema solar, tienen edades de 4 567 millones de años (Connelly et al., 2012), y los cristales de circón más antiguos de la Tierra, de Jack Hills en Australia, unos 4 400 millones (Wilde et al., 2001).

Los métodos se apoyan en supuestos que pueden comprobarse. Que el sistema haya permanecido cerrado se verifica comparando varios minerales de una misma roca: si todos dan la misma edad, el sistema es coherente. El método de la isócrona elimina la necesidad de conocer la cantidad inicial de isótopo hijo. Que las constantes de desintegración no hayan cambiado se apoya en la física nuclear y en pruebas indirectas, como el reactor nuclear natural de Oklo, en Gabón, que funcionó hace unos 2 000 millones de años y cuyos productos permiten acotar posibles variaciones de las constantes fundamentales.

Atelier Velázquez

24.8 Datación geológica y datación cosmológica

Las edades geológicas y las cosmológicas se expresan en las mismas unidades, pero se obtienen por procedimientos diferentes, y conviene no equipararlas sin análisis. La edad de un mineral se obtiene de una razón isotópica medida en el laboratorio, una constante de desintegración medida en el laboratorio y un supuesto de sistema cerrado comprobable en la propia muestra; la relatividad apenas interviene. La edad del universo se obtiene integrando las ecuaciones de Friedmann con parámetros ajustados a observaciones del fondo cósmico, las oscilaciones acústicas y las supernovas; depende del modelo cosmológico y de su validez hasta el universo muy temprano.

Precisamente porque los procedimientos son independientes, su concordancia tiene valor. Las estrellas más viejas de la galaxia, datadas por la física de la evolución estelar en cúmulos globulares, tienen entre 12 000 y 13 000 millones de años; la desintegración del uranio y el torio

en estrellas pobres en metales da edades del orden de 12 500 millones de años con incertidumbres de unos 3 000 millones (Cayrel et al., 2001). Ambas son menores que la edad cosmológica de 13 800 millones de años, como debe ser. En la década de 1990, cuando algunas medidas de la constante de Hubble daban valores altos, la edad del universo calculada resultaba menor que la de las estrellas más antiguas: la «crisis de la edad» se resolvió con la recalibración de las distancias por el satélite Hipparcos y con el descubrimiento de la aceleración cósmica, que aumenta la edad calculada. Una contradicción entre la física estelar y la cosmología obligó a revisar ambas.

Atelier Velázquez

Capítulo 25. Galaxias y estructuras cósmicas

25.1 Universos isla

Que la Vía Láctea sea una entre muchas galaxias es un resultado del siglo XX. Kant había sugerido en 1755 que ciertas nebulosas eran «universos isla» semejantes a la Vía Láctea. En abril de 1920, en el llamado Gran Debate en Washington, Harlow Shapley defendió que las nebulosas espirales eran objetos de nuestra propia galaxia, que según sus medidas con cefeidas en cúmulos globulares era enorme; Heber Curtis, que eran galaxias independientes. Ambos tenían razón en parte. Shapley acertó al situar el Sol lejos del centro galáctico; Curtis, en la naturaleza de las espirales.

La cuestión se decidió en 1925, cuando Edwin Hubble (1889–1953), con el telescopio de 2.5 m de Monte Wilson, identificó cefeidas en las nebulosas de Andrómeda y del Triángulo y, con la relación de Leavitt, obtuvo para Andrómeda una distancia de unos 900 000 años luz, muy superior al tamaño de la Vía Láctea (Hubble, 1929b). La cifra estaba subestimada en un factor de más de dos porque las cefeidas de la Vía Láctea usadas para calibrar pertenecían a una población estelar distinta, error corregido por Walter Baade en 1952; la conclusión, en cambio, era correcta. Hubble clasificó después las galaxias en elípticas, espirales e irregulares.

Atelier Velázquez

25.2 Zwicky y la masa faltante

En 1933, Fritz Zwicky (1898–1974), astrónomo suizo del Instituto de Tecnología de California, midió las velocidades de las galaxias del cúmulo de Coma. El **teorema del virial** establece que, en un sistema gravitatorio en equilibrio, la energía cinética media es la mitad del valor absoluto de la potencial, de modo que la masa total puede estimarse como $M \approx \sigma^2 R / G$, donde σ es la dispersión de velocidades y R el radio. Con una dispersión de unos 1 000 km/s y un radio de algunos megapársecs, la masa necesaria para mantener ligado el cúmulo es del orden de 10^{15} masas solares, mucho mayor que la que corresponde a la luz de sus galaxias. Zwicky concluyó que debía haber una gran cantidad de materia invisible, para la que usó la expresión *dunkle Materie*, «materia oscura» (Zwicky, 1933). El resultado fue durante décadas una anomalía aislada.

25.3 Vera Rubin y las curvas de rotación

Vera Rubin (1928–2016), astrónoma de la Institución Carnegie de Washington, estudió con Kent Ford las velocidades de rotación del gas y las estrellas en galaxias espirales, usando un espectrógrafo con un intensificador de imagen construido por Ford. Si la masa de una galaxia estuviera concentrada donde está la luz, en su parte central, la velocidad de rotación de las regiones exteriores debería disminuir con la distancia como en el sistema solar, $v \propto r^{-1/2}$. Rubin y Ford encontraron en Andrómeda, en 1970, y en decenas de galaxias espirales a finales de esa década, que las curvas de rotación permanecen planas hasta las regiones más exteriores observables (Rubin y Ford, 1970; Rubin et al., 1980). Las observaciones de radio del hidrógeno neutro, que se extiende más allá de las estrellas, confirmaron el resultado.

Para una órbita circular, la masa contenida dentro del radio r es $M(r) = v^2 r/G$. *Ejemplo.* El Sol gira alrededor del centro de la Vía Láctea a unos 220 km/s a una distancia de unos 8 kpc; la masa interior a su órbita es $M \approx (2.2 \times 10^5)^2 \times 8 \times 3.086 \times 10^{19}/G \approx 9 \times 10^{10}$ masas solares. Si la velocidad se mantiene constante a radios mayores, $M(r)$ crece proporcionalmente a r, aunque la luz no crezca. Las galaxias parecen estar inmersas en **halos** de materia invisible que se extienden mucho más allá de su disco luminoso. En 1973, Jeremiah Ostriker y James Peebles habían mostrado que los discos galácticos fríos solo son estables si están rodeados por un halo masivo (Ostriker y Peebles, 1973).

Atelier Velázquez

25.4 Separar observación, inferencia y modelo

El problema de la materia oscura exige distinguir tres niveles. Lo **observado** son velocidades de rotación, dispersiones de velocidades, distorsiones de imágenes de galaxias de fondo, temperaturas del gas en los cúmulos, el espectro de las fluctuaciones del fondo cósmico. Lo **inferido**, si se aplica la gravitación newtoniana o la relatividad general, es que hay más masa de la que emite luz. El **modelo** propone qué es esa masa: partículas frías, sin interacción electromagnética, que no forman parte del Modelo Estándar.

Hay una alternativa a la inferencia: en lugar de añadir masa, modificar la ley de la gravedad. En 1983, Mordehai Milgrom propuso la **dinámica newtoniana modificada** (MOND), según la cual por debajo de una aceleración característica de unos $1.2 \times 10^{-10}\ \mathrm{m\,s^{-2}}$ la gravedad decae más lentamente que con el cuadrado de la distancia (Milgrom, 1983). MOND explica con un so-

lo parámetro las curvas de rotación de cientos de galaxias y la relación de Tully-Fisher entre la masa bariónica y la velocidad de rotación, con una precisión notable. Pero falla en los cúmulos de galaxias, donde sigue necesitando masa adicional, y no explica de manera natural el espectro del fondo cósmico.

La observación que muchos consideraron decisiva es la del **cúmulo Bala** (1E 0657-56), resultado de la colisión de dos cúmulos. El gas caliente, que contiene la mayor parte de la masa bariónica, se ha frenado en la colisión y está concentrado en el centro, visible en rayos X; la masa total, cartografiada por lente gravitacional débil, sigue a las galaxias, que han atravesado la colisión sin frenarse (Clowe et al., 2006). La masa dominante no está donde está la materia bariónica. La evidencia más fuerte, sin embargo, es la cosmológica: las alturas relativas de los picos acústicos del fondo cósmico requieren una componente de materia que no interactúa con los fotones, unas cinco veces más abundante que la bariónica.

Ninguna de las búsquedas directas ha detectado partículas de materia oscura. El experimento LUX-ZEPLIN, con siete toneladas de xenón líquido a 1.5 km de profundidad en Dakota del Sur, estableció en 2025, con una exposición de 4.2 toneladas-año, los límites más estrictos sobre partículas masivas de interacción débil con masas superiores a unos 9 GeV (LZ Collaboration, 2025). Los experimentos que buscan axiones, otra candidata, tampoco han encontrado señales. La materia oscura es una entidad inferida con gran solidez a partir de múltiples líneas de evidencia independientes, cuya naturaleza física se desconoce.

Atelier Velázquez

25.5 La red cósmica y las simulaciones

Los censos de desplazamientos al rojo, desde el del Centro de Astrofísica de Harvard en la década de 1980 hasta el Sloan Digital Sky Survey y DESI, han mostrado que las galaxias no se distribuyen uniformemente: forman filamentos y paredes que rodean grandes vacíos de decenas de megapársecs, una estructura llamada **red cósmica** (Geller y Huchra, 1989; Bond et al., 1996). La estructura surgió por crecimiento gravitatorio de las pequeñas fluctuaciones de densidad primordiales. En el modelo de **materia oscura fría**, las estructuras se forman jerárquicamente: primero los halos pequeños, que se fusionan en otros mayores (Blumenthal et al., 1984).

Las **simulaciones** de N cuerpos siguen la evolución gravitatoria de miles de millones de partículas desde condiciones iniciales extraídas del fondo cósmico. La simulación Millennium, pu-

blicada en 2005, siguió diez mil millones de partículas en un cubo de 500 megapársecs (Springel et al., 2005), y reprodujo estadísticamente la red cósmica observada. Las simulaciones posteriores incluyen la física del gas, la formación estelar y la retroalimentación de las supernovas y los agujeros negros, procesos que se introducen mediante modelos efectivos calibrados con observaciones, porque ocurren a escalas mucho menores que la resolución.

A escalas galácticas, el modelo de materia oscura fría tuvo dificultades: predecía halos con densidades centrales más altas y más galaxias satélite de las observadas. Buena parte de esas discrepancias se han reducido al incluir los efectos de los bariones y al descubrir galaxias enanas muy débiles, aunque la cuestión no está cerrada. Las simulaciones no son experimentos: son cálculos de las consecuencias de un modelo. Su acuerdo con las observaciones apoya el modelo en la medida en que los parámetros efectivos no se han ajustado para obtener precisamente el resultado comparado.

Atelier Velázquez

Capítulo 26. Expansión del universo

26.1 Slipher, Friedmann y Lemaître

Vesto Slipher (1875–1969), del Observatorio Lowell en Arizona, midió entre 1912 y 1917 los desplazamientos espectrales de las nebulosas espirales con exposiciones de decenas de horas. Andrómeda se acercaba a unos 300 km/s, pero de las 25 nebulosas que había medido en 1917, 21 se alejaban, algunas a más de 1 000 km/s (Slipher, 1917). Sus medidas fueron la base empírica de todo lo que siguió.

Aleksandr Friedmann (1888–1925), matemático y meteorólogo de Petrogrado, encontró en 1922 soluciones de las ecuaciones de Einstein que describen un universo homogéneo e isótropo cuyo radio cambia con el tiempo (Friedmann, 1922), y en 1924 extendió el análisis a espacios de curvatura negativa. Einstein objetó primero que había un error y después reconoció que las soluciones eran correctas. Friedmann murió en 1925 de fiebre tifoidea.

Atelier Velázquez

Georges Lemaître (1894–1966), sacerdote católico y físico belga, obtuvo independientemente en 1927 soluciones de universo en expansión y las comparó con los datos: utilizando las velocidades de Slipher y distancias derivadas de las magnitudes de las galaxias según Hubble, obtuvo una razón entre velocidad y distancia de unos 625 km/s por megapársec (Lemaître, 1927). El artículo, publicado en francés en una revista belga de escasa difusión, pasó inadvertido. En la traducción inglesa de 1931, el párrafo con la estimación fue omitido; durante años se especuló sobre una censura, hasta que se encontró la correspondencia que muestra que fue el propio Lemaître quien lo suprimió, considerando superados sus datos (Livio, 2011). En 1931 propuso que el universo había comenzado a partir de un «átomo primitivo» (Lemaître, 1931).

Hubble publicó en 1929 la relación lineal entre la velocidad de recesión de las galaxias y su distancia, con un coeficiente de unos 500 km/s por megapársec, utilizando distancias propias y, en su mayor parte, velocidades de Slipher (Hubble, 1929a). Con Milton Humason extendió la relación en 1931 a distancias mayores. Hubble se mantuvo cauteloso sobre la interpretación de los desplazamientos como velocidades. En 2018, la Unión Astronómica Internacional recomendó llamar a la relación **ley de Hubble-Lemaître**:

$$v = H_0\, d.$$

Las primeras determinaciones de H_0 eran unas siete veces mayores que el valor actual, por errores de calibración de las distancias; con ellas, el inverso de la constante de Hubble —una estimación de la edad del universo— daba unos 2 000 millones de años, menos que la edad de la Tierra que la radiactividad estaba revelando. Fue otra contradicción entre ciencias que se resolvió revisando las calibraciones.

26.2 La métrica y el factor de escala

Si el universo es, a grandes escalas, homogéneo (igual en todos los lugares) e isótropo (igual en todas las direcciones) —el **principio cosmológico**—, su geometría se describe mediante la métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker:

$$ds^2 = -c^2dt^2 + a(t)^2\left[\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\phi^2)\right].$$

k indica la curvatura espacial (positiva, nula o negativa) y $a(t)$ es el **factor de escala**, que multiplica todas las distancias entre puntos que se mueven con el flujo cósmico; se normaliza a $a(t_0) = 1$ en el presente. La coordenada t es el **tiempo cósmico**: el tiempo propio de los observadores que se mueven con ese flujo, los observadores comóviles. Aquí aparece una noción de tiempo global que la relatividad general, en general, no proporciona: es posible porque la solución tiene una simetría muy alta. El tiempo cósmico es una propiedad de un modelo, no una estructura de la teoría.

El principio cosmológico es un supuesto contrastable. El fondo cósmico es isótropo con una precisión de una parte en cien mil, una vez descontado el movimiento de la Tierra, y los censos de galaxias muestran que la distribución de materia se vuelve homogénea en escalas superiores a unos cien megapársecs (Scrimgeour et al., 2012).

26.3 Corrimiento al rojo

En un universo en expansión, la longitud de onda de la luz se estira en la misma proporción que las distancias entre galaxias durante el viaje. Si la luz se emite cuando el factor de escala es $a(t_e)$ y se recibe hoy, el **corrimiento al rojo** z satisface

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_{\text{em}}} = \frac{a(t_0)}{a(t_e)} = \frac{1}{a(t_e)}.$$

Atelier Velázquez

Ejemplo. Si la línea H-alfa, emitida a 656.3 nm, se observa a 721.9 nm, $z = (721.9 - 656.3)/656.3 = 0.10$: la luz salió cuando el universo tenía el 91 por ciento de su tamaño actual. Para z pequeño, la velocidad de recesión es aproximadamente $cz \approx 30\,000$ km/s y, con $H_0 = 70$ km/s/Mpc, la distancia es de unos 430 Mpc. El fondo cósmico de microondas se emitió a $z \approx 1\,090$.

El corrimiento al rojo cosmológico no es, en sentido estricto, un efecto Doppler. El efecto Doppler local depende de la velocidad relativa de la fuente y el receptor en el momento de la emisión; el cosmológico depende de la expansión acumulada durante todo el trayecto. Para z pequeños ambos coinciden aproximadamente; para z grandes, la fórmula Doppler relativista da resultados incorrectos. Tampoco es correcto imaginar la expansión como un movimiento de las galaxias a través de un espacio exterior preexistente, como fragmentos de una explosión. No hay un centro ni un exterior. Lo que cambia es la escala de las distancias entre puntos comóviles. Los sistemas ligados gravitatoria o eléctricamente —galaxias, sistemas solares, átomos, reglas— no se expanden. Las galaxias suficientemente lejanas se alejan de nosotros a velocidades de recesión mayores que la de la luz, lo cual no viola la relatividad especial, que limita la velocidad relativa de objetos en un mismo lugar, no el ritmo de cambio de las distancias en un espaciotiempo curvo (Davis y Lineweaver, 2004).

Atelier Velázquez

26.4 Las ecuaciones de Friedmann

Aplicadas a la métrica anterior, las ecuaciones de Einstein se reducen a dos ecuaciones para el factor de escala. La primera es

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3},$$

donde $H = \dot{a}/a$ es el parámetro de Hubble, cuyo valor actual es H_0, y ρ la densidad total de masa-energía. La segunda determina la aceleración:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3}.$$

La materia y la radiación frenan la expansión; una constante cosmológica positiva la acelera. Para un universo plano sin constante cosmológica, la densidad debe ser exactamente la **densidad crítica**:

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}.$$

Ejemplo. Con $H_0 = 67.4$ km/s/Mpc $= 2.18 \times 10^{-18}\ \mathrm{s}^{-1}$, $\rho_c \approx 8.5 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg\,m}^{-3}$, el equivalente a unos cinco átomos de hidrógeno por metro cúbico. Las densidades de cada componente se expresan como fracciones de la crítica, $\Omega_i = \rho_i/\rho_c$.

Cada componente evoluciona de manera diferente con la expansión. La densidad de materia disminuye como a^{-3}, porque el número de partículas se conserva y el volumen crece como el cubo; la de radiación, como a^{-4}, porque además cada fotón pierde energía al estirarse su longitud de onda; la de una constante cosmológica permanece constante. Por eso el universo temprano estuvo dominado por la radiación, después por la materia y, desde hace unos cinco mil millones de años, por la constante cosmológica.

La Figura 6 muestra la evolución del factor de escala obtenida al integrar numéricamente la primera ecuación de Friedmann para dos modelos: uno con las proporciones del modelo cosmológico estándar y otro con solo materia.

Atelier Velázquez

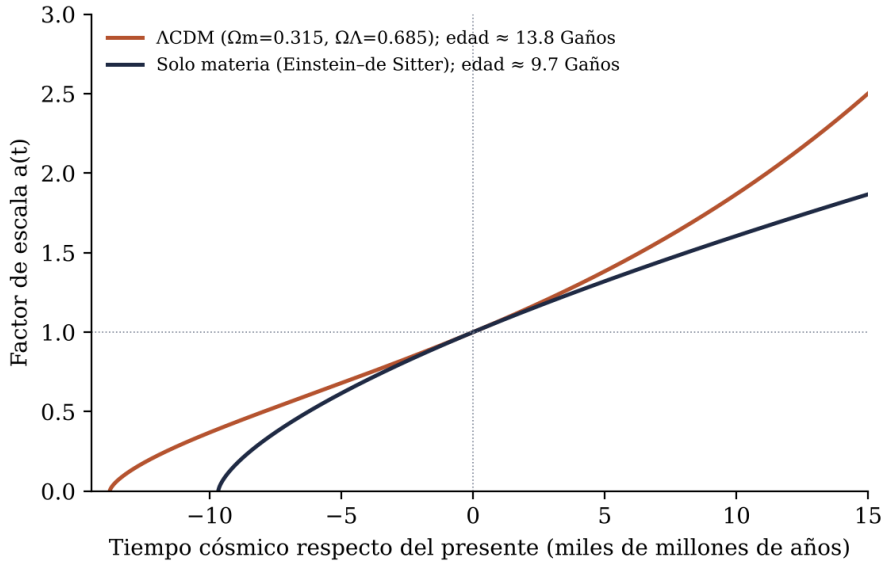


Figura 6. Evolución del factor de escala a(t) para el modelo ΛCDM y para un universo plano de solo materia (Einstein-de Sitter), ambos con H₀ = 67.4 km s⁻¹ Mpc⁻¹. La constante cosmológica aumenta la edad y produce una aceleración que comienza hace unos cinco mil millones de años.

Fuente. Elaboración propia mediante integración numérica de la ecuación de Friedmann con los parámetros indicados.

La edad del universo en cada modelo es la integral $t_0 = \int_0^1 d\,a/\big(aH(a)\big)$. Para el modelo estándar resulta de unos 13 800 millones de años; para el de solo materia, de unos 9 700 millones, menos que la edad de las estrellas más viejas. Este sencillo cálculo muestra por qué un universo sin energía oscura es incompatible con la física estelar si H_0 es próximo a 70. El inverso de la constante de Hubble, el **tiempo de Hubble**, vale $1/H_0 \approx 14.5$ mil millones de años para $H_0 = 67.4$.

26.5 Horizontes

En un universo de edad finita, la luz solo ha podido recorrer una distancia finita. El **horizonte de partículas** es la distancia comóvil máxima de la que podría habernos llegado alguna señal desde el comienzo de la expansión; en el modelo estándar es de unos 46 000 millones de años luz, mucho más que 13 800 millones porque las regiones de las que procede la luz más antigua se han alejado mientras la luz viajaba. El diámetro del **universo observable** es, por tanto, de unos 93 000 millones de años luz. La **esfera de Hubble**, a una distancia $c/H_0 \approx 14\,500$ millones de años luz, separa las regiones que hoy se alejan más despacio que la luz de las que se alejan más deprisa. El **horizonte de sucesos** cosmológico, unos 16 700 millones de años luz, limita las regiones a las que una señal emitida hoy podrá llegar alguna vez, debido a la aceleración.

Atelier Velázquez

El universo observable no es la totalidad cosmológica. El modelo no dice si el universo es finito o infinito; la curvatura medida es compatible con cero dentro de una incertidumbre de unas milésimas, lo que es compatible con un universo infinito o con uno finito muchísimo mayor que la región observable. Todo lo que la cosmología afirma sobre las regiones situadas más allá del horizonte es extrapolación.

26.6 La tensión de Hubble

El valor de H_0 puede obtenerse por dos clases de procedimientos. Los **directos** miden distancias y velocidades de galaxias cercanas mediante la escalera de distancias. Los **indirectos** infieren H_0 a partir del universo temprano: el fondo cósmico fija con gran precisión ciertas escalas físicas, y el modelo ΛCDM las extrapola hasta el presente. Durante la última década, ambos procedimientos han dado valores incompatibles.

El satélite Planck, con el modelo ΛCDM, obtuvo $H_0 = 67.4 \pm 0.5$ km/s/Mpc (Planck Collaboration, 2020). El equipo SH0ES, dirigido por Adam Riess, con cefeidas calibradas por paralajes de Gaia, el máser de NGC 4258 y las Nubes de Magallanes, y supernovas Ia, obtuvo 73.0 ± 1.0 km/s/Mpc (Riess et al., 2022). La diferencia supera las cinco desviaciones típicas. Las observaciones del telescopio James Webb, con mejor resolución en el infrarrojo, confirmaron que la fotometría de las cefeidas del telescopio Hubble no estaba afectada por la contaminación de estrellas vecinas (Riess et al., 2024). El programa Chicago-Carnegie dirigido por Wendy Freedman, utilizando la punta de la rama de las gigantes rojas y otras estrellas calibradas con el Webb, obtuvo en 2025 un valor intermedio de 70.4 km/s/Mpc con una incertidumbre de unos 2 km/s/Mpc, compatible con ambos extremos (Freedman et al., 2025).

Un análisis publicado a comienzos de 2026, que reúne 88 determinaciones que no dependen del horizonte sonoro del universo temprano, encontró que las 30 basadas en la escalera de distancias dan en promedio 72.7 ± 0.4 km/s/Mpc, mientras que las 58 restantes, independientes de la escalera —lentes con retardo temporal, sirenas estándar, métodos que usan edades de galaxias, entre otros—, dan 69.4 ± 0.3. La diferencia entre ambos grupos es de unas cuatro desviaciones típicas una vez consideradas las correlaciones. Los autores proponen que la tensión debería describirse como un desacuerdo entre la escalera de distancias y todos los demás métodos, más que entre el universo temprano y el tardío (Pantos y Perivolaropoulos, 2026).

Las explicaciones posibles son tres: un error sistemático no identificado en la escalera, física nueva que modifique la historia de la expansión —por ejemplo, una componente de energía oscura temprana que aumentaría ligeramente la tasa de expansión antes de la recombinación— o ambas cosas. Ninguna propuesta teórica ha resuelto la tensión sin crear otras. La situación ilustra cómo se trabaja con un problema abierto bien delimitado: se sabe exactamente qué medidas discrepan, qué supuestos intervienen en cada una y qué observaciones permitirían decidir.

Atelier Velázquez

Capítulo 27. El universo temprano

27.1 Gamow, Alpher y Herman

Si el universo se expande, en el pasado fue más denso y, por la compresión, más caliente. George Gamow (1904–1968) se preguntó en 1946 si en esa fase caliente pudieron formarse los elementos químicos. En 1948, con su estudiante Ralph Alpher, publicó un artículo sobre el origen de los elementos al que añadió como coautor a Hans Bethe, sin que este hubiera participado, para formar el juego de palabras «alfa, beta, gamma» (Alpher et al., 1948). Ese mismo año, Alpher y Robert Herman calcularon que la radiación de esa época debería persistir, enfriada por la expansión, con una temperatura actual de unos 5 K (Alpher y Herman, 1948). La predicción no despertó interés, en parte porque no estaba claro que pudiera detectarse.

El programa de Gamow fracasó en un punto: no hay núcleos estables de masa 5 ni 8, de modo que en el universo temprano la síntesis se detiene en el helio y unos pocos elementos ligeros. Los demás se forman en las estrellas, como se vio en el capítulo 24. Pero acertó en lo esencial: el helio y el deuterio del universo proceden en gran parte de sus primeros minutos.

Atelier Velázquez

27.2 Penzias, Wilson y el fondo cósmico

En 1964, Arno Penzias y Robert Wilson, radioastrónomos de los laboratorios Bell en Holmdel, Nueva Jersey, preparaban una antena de bocina construida para comunicaciones por satélite para hacer medidas radioastronómicas. Encontraron un exceso de ruido, equivalente a una temperatura de unos 3.5 K a una longitud de onda de 7.35 cm, que no dependía de la dirección, ni de la hora, ni de la estación (Penzias y Wilson, 1965). Revisaron la antena, la desmontaron, expulsaron a unas palomas que anidaban en ella y limpiaron lo que habían dejado. El ruido persistió. A pocos kilómetros, en Princeton, Robert Dicke, James Peebles, Peter Roll y David Wilkinson preparaban un experimento para buscar precisamente esa radiación, cuya existencia habían deducido independientemente. Los dos grupos publicaron artículos consecutivos en el mismo número del *Astrophysical Journal* (Dicke et al., 1965). Penzias y Wilson recibieron el premio Nobel en 1978.

El descubrimiento decidió la controversia entre el modelo de la gran explosión y el del **estado estacionario**, propuesto en 1948 por Hermann Bondi, Thomas Gold y Fred Hoyle, según el cual el universo se expande pero mantiene una densidad constante gracias a la creación continua

de materia (Bondi y Gold, 1948; Hoyle, 1948). El estado estacionario no tenía un pasado caliente y no podía explicar una radiación térmica de fondo. Hoyle había acuñado la expresión «Big Bang» en 1949, en un programa de radio de la BBC, para describir el modelo rival. Las propuestas que intentaron después explicar el fondo dentro del estado estacionario no lograron reproducir su espectro.

27.3 El espectro más perfecto

El satélite COBE, lanzado en 1989, midió con el instrumento FIRAS el espectro del fondo cósmico y encontró que es un cuerpo negro casi perfecto, con desviaciones inferiores a 50 partes por millón respecto de la ley de Planck. El valor actual de su temperatura es $T_0 = 2.72548 \pm 0.00057$ K (Fixsen, 2009). El instrumento DMR del mismo satélite detectó en 1992 las primeras anisotropías, variaciones de temperatura entre distintas direcciones de una parte en cien mil (Smoot et al., 1992). John Mather y George Smoot recibieron el premio Nobel en 2006. Los satélites WMAP (2001–2010) y Planck (2009–2013) cartografiaron esas anisotropías con resolución y sensibilidad crecientes.

Atelier Velázquez

27.4 Recombinación

En el universo temprano, el hidrógeno estaba ionizado: protones y electrones libres en un plasma opaco, en el que los fotones se dispersaban continuamente. A medida que el universo se enfrió, los electrones se combinaron con los protones para formar átomos neutros, y el universo se volvió transparente. Ese momento, la **recombinación**, ocurrió a un corrimiento al rojo $z \approx 1\,090$, unos 380 000 años después del comienzo de la expansión. La temperatura de la radiación era entonces $T_0(1+z) \approx 2.7255 \times 1\,091 \approx 3\,000$ K.

Puede sorprender que la recombinación ocurra a 3 000 K, cuando la energía de ionización del hidrógeno, 13.6 eV, corresponde a una temperatura de más de 150 000 K. La razón es el enorme número de fotones: hay unos 1 600 millones de fotones por cada barión. Aunque la energía media de los fotones sea muy inferior a 13.6 eV, la cola de alta energía de la distribución de Planck contiene suficientes fotones para reionizar cualquier átomo que se forme, hasta que la temperatura desciende mucho.

El fondo cósmico es, por tanto, una fotografía del universo a los 380 000 años, la superficie de última dispersión. Pero es a la vez un fenómeno presente: los fotones que llegan hoy a los de-

tectores son actuales. Toda reconstrucción del pasado parte de huellas presentes interpretadas mediante leyes, y el fondo cósmico es la huella más antigua directamente observable mediante luz.

27.5 Nucleosíntesis primordial

Durante el primer segundo, la temperatura superaba los diez mil millones de kelvin, y las interacciones débiles mantenían en equilibrio la proporción entre neutrones y protones. Al enfriarse el universo, esas interacciones se volvieron demasiado lentas y la proporción se congeló en aproximadamente un neutrón por cada seis protones, que la desintegración de los neutrones libres redujo a uno por cada siete cuando, a los pocos minutos, los núcleos pudieron formarse sin ser destruidos por los fotones. Casi todos los neutrones terminaron en núcleos de helio-4. Si por cada siete protones hay un neutrón, la fracción de la masa en forma de helio es

$$Y_p \approx \frac{2(n/p)}{1 + n/p} = \frac{2/7}{8/7} = 0.25,$$

valor muy próximo al observado en las regiones del universo menos contaminadas por las estrellas, $Y_p \approx 0.245$. Jim Peebles calculó en 1966 la producción de helio con precisión (Peebles, 1966), y Robert Wagoner, William Fowler y Fred Hoyle elaboraron en 1967 los cálculos completos de las abundancias de los elementos ligeros.

La cantidad de deuterio producida depende con sensibilidad de la densidad de bariones: cuanto más densos son los bariones, más eficientemente el deuterio se convierte en helio. La razón entre deuterio e hidrógeno medida en nubes de gas casi primordial, iluminadas por cuásares lejanos, es de $2.527 \pm 0.030 \times 10^{-5}$ (Cooke et al., 2018). De ella se infiere una densidad de bariones $\Omega_b h^2 \approx 0.022$, que coincide con la que se obtiene, por un procedimiento completamente independiente, de las alturas relativas de los picos acústicos del fondo cósmico. Dos fenómenos físicos separados por 380 000 años —las reacciones nucleares de los primeros minutos y las oscilaciones del plasma antes de la recombinación—, medidos con instrumentos diferentes, dan el mismo número. Es una de las identidades sintéticas más sólidas de la cosmología.

Hay una discrepancia persistente: la abundancia de litio-7 observada en las estrellas más viejas de la galaxia es unas tres veces menor que la predicha. El «problema del litio» puede deberse

Atelier Velázquez

a procesos de destrucción del litio en las atmósferas estelares o a física desconocida, y no se ha resuelto.

27.6 Fluctuaciones y formación de estructuras

Las pequeñas variaciones de temperatura del fondo cósmico reflejan variaciones de densidad del plasma primordial. Antes de la recombinación, la gravedad tendía a comprimir las regiones más densas y la presión de la radiación a expandirlas, de modo que el plasma oscilaba como un fluido acústico. Las oscilaciones que estaban en un máximo de compresión o expansión en el momento de la recombinación quedaron congeladas, y producen una serie de picos en el espectro de potencias de las anisotropías en función de la escala angular. El primer pico, a una escala de alrededor de un grado, corresponde al horizonte sonoro en la recombinación, y su posición mide la geometría del universo: indica que es espacialmente plano. Las alturas relativas de los picos miden la densidad de bariones y de materia oscura.

Tras la recombinación, las regiones más densas siguieron atrayendo materia. En la época dominada por la materia, el contraste de densidad crece proporcionalmente al factor de escala. Pero un crecimiento por un factor de 1 100 desde 10^{-5} no basta para producir galaxias, con contrastes de densidad mayores que uno. La materia oscura, que no interactuaba con los fotones, había empezado a agruparse antes de la recombinación, y los bariones cayeron después en esos pozos de potencial ya formados. Sin materia oscura no habría galaxias a tiempo.

Atelier Velázquez

27.7 Reconstrucción del pasado cosmológico

La historia del universo que se ha reconstruido —un plasma caliente y casi homogéneo hace 13 800 millones de años, la síntesis de los elementos ligeros en los primeros minutos, la recombinación a los 380 000 años, la formación de las primeras estrellas en algunos cientos de millones de años, el crecimiento de la red cósmica— no es un relato contado por un testigo. Es una retrodicción: a partir de huellas presentes (fotones de microondas, abundancias de elementos, posiciones de galaxias) y de leyes físicas comprobadas en el laboratorio (física atómica, nuclear, gravitación), se infiere un estado pasado del que esas huellas son consecuencia. La solidez de la reconstrucción depende de que las leyes sean válidas en las condiciones del pasado y de que distintas huellas, interpretadas por distintas leyes, converjan. Más allá de la nucleosíntesis, a temperaturas

superiores a las que se alcanzan en los aceleradores, la reconstrucción pierde apoyo empírico directo y pasa a depender de extrapolaciones teóricas.

Atelier Velázquez

Capítulo 28. El modelo ΛCDM

28.1 Seis parámetros

El modelo cosmológico estándar, llamado ΛCDM por sus dos componentes dominantes —la constante cosmológica Λ y la materia oscura fría (*cold dark matter*)—, describe el universo observable con solo seis parámetros independientes, además de supuestos como el principio cosmológico y la validez de la relatividad general. La Tabla 10 recoge los valores obtenidos por el satélite Planck.

Tabla 10. Parámetros del modelo ΛCDM según Planck (2018)

Parámetro	Significado	Valor
$\Omega_b h^2$	Densidad física de bariones	0.02237 ± 0.00015
$\Omega_c h^2$	Densidad física de materia oscura fría	0.1200 ± 0.0012
$100\,\theta^*$	Tamaño angular del horizonte sonoro en la recombinación	1.04092 ± 0.00031
τ	Profundidad óptica de reionización	0.054 ± 0.007
$\ln(10^{10} A_s)$	Amplitud de las fluctuaciones primordiales	3.044 ± 0.014
n_s	Índice espectral de las fluctuaciones primordiales	0.965 ± 0.004
Derivados		
H_0	Constante de Hubble (km s⁻¹ Mpc⁻¹)	67.4 ± 0.5
Ω_m	Fracción de materia total	0.315 ± 0.007
Ω_Λ	Fracción de constante cosmológica	0.685 ± 0.007
t_0	Edad del universo (Ga)	13.79 ± 0.02
Ω_k	Curvatura espacial (con BAO)	0.001 ± 0.002

Nota. Planck Collaboration (2020), combinación TT, TE, EE + lowE + lensing; $h = H_0 / (100\ \text{km s}^{-1}\ \text{Mpc}^{-1})$.

El contenido del universo, según estos valores, es de un 4.9 por ciento de materia bariónica —la que forma estrellas, planetas y personas—, un 26.6 por ciento de materia oscura y un 68.5 por ciento de energía asociada a la constante cosmológica. Los neutrinos y la radiación contribuyen hoy con fracciones minúsculas.

28.2 La constante cosmológica

Einstein introdujo en 1917 el término Λ en sus ecuaciones para obtener un universo estático, como se creía entonces que era (Einstein, 1917). Ese mismo año, Willem de Sitter mostró que las ecuaciones con Λ y sin materia describen un universo en expansión. Tras el descubrimiento de la

Atelier Velázquez

expansión, Einstein abandonó el término en 1931. La anécdota según la cual lo habría llamado «el mayor error de su vida» procede de un relato de Gamow y no está documentada en los escritos de Einstein.

En 1998 y 1999, dos equipos que medían distancias con supernovas Ia a corrimientos al rojo de hasta casi uno —el Supernova Cosmology Project, dirigido por Saul Perlmutter, y el High-z Supernova Search Team, con Brian Schmidt y Adam Riess— encontraron que las supernovas lejanas eran más débiles de lo esperado en un universo que se frena: la expansión se acelera (Riess et al., 1998; Perlmutter et al., 1999). La explicación más simple es una constante cosmológica positiva. Perlmutter, Schmidt y Riess recibieron el premio Nobel de 2011. La aceleración ha sido confirmada por las oscilaciones acústicas de bariones y el fondo cósmico, de modo que no depende ya de las supernovas.

28.3 Componente matemático, parámetro físico y entidad inferida

En la discusión sobre la energía oscura se confunden tres cosas. Λ es un **componente matemático** de las ecuaciones de Einstein: el término más simple que puede añadirse respetando su estructura. Ω_Λ es un **parámetro físico** medido: la fracción de la densidad crítica que hay que asignar a ese término para ajustar los datos, conocida con una precisión de un uno por ciento. La **energía oscura** es una **entidad inferida**: el nombre de aquello, sea lo que sea, que produce la aceleración. Puede ser una constante de la naturaleza sin más explicación, la energía del vacío cuántico, un campo dinámico que varía con el tiempo o el síntoma de que la relatividad general falla a escalas cosmológicas.

Si se interpreta como energía del vacío cuántico, aparece el problema señalado en el capítulo 21. Las estimaciones de la energía de punto cero de los campos cuánticos, cortadas a la escala de Planck, superan la densidad observada en unos 120 órdenes de magnitud; cortadas a escalas menores, en unos 55 a 60. Steven Weinberg lo llamó el peor fracaso de la física teórica (Weinberg, 1989). Ninguna solución propuesta es aceptada.

28.4 Evidencias y predicciones

El modelo ΛCDM se apoya en líneas de evidencia independientes que convergen: el espectro de anisotropías del fondo cósmico, con sus siete picos acústicos medidos; las abundancias de elementos ligeros; la distribución de galaxias a gran escala y las oscilaciones acústicas de bariones;

Atelier Velázquez

las supernovas Ia; el efecto de lente gravitacional sobre el fondo cósmico; la abundancia de cúmulos de galaxias. Ha hecho predicciones verificadas después de formuladas, como la amplitud de la polarización del fondo cósmico, la escala de las oscilaciones acústicas en la distribución de galaxias, detectada en 2005, y la forma del espectro de potencias del efecto de lente.

28.5 Limitaciones y anomalías

El modelo tiene limitaciones de principio: sus dos componentes dominantes son de naturaleza desconocida, y su constante cosmológica plantea un problema de ajuste fino. Tiene además tensiones observacionales que deben enumerarse con su peso.

La **tensión de Hubble**, examinada en el capítulo 26, es la más significativa. La **tensión de** S_8, una medida de la amplitud de las fluctuaciones de materia en el universo reciente, enfrentó durante años a los censos de lentes débiles, que daban valores algo menores, con el fondo cósmico; los análisis más recientes, como el del censo KiDS-Legacy en 2025, la han reducido considerablemente. Hay anomalías en las escalas angulares más grandes del fondo cósmico —una potencia baja en los primeros multipolos, una ligera asimetría entre hemisferios, una mancha fría— de significación modesta y quizá debidas al azar estadístico, dado que en esas escalas hay pocas muestras independientes. El telescopio James Webb encontró galaxias muy brillantes a corrimientos al rojo superiores a 10, en número mayor del esperado; en lugar de refutar el modelo, el resultado ha obligado a revisar los modelos de formación estelar temprana, que dependen de la física de los bariones.

El resultado más discutido de los últimos dos años procede del instrumento DESI, que mide los espectros de decenas de millones de galaxias y cuásares para cartografiar las oscilaciones acústicas de bariones. En marzo de 2025, el análisis de sus tres primeros años de datos, combinado con el fondo cósmico y con distintos catálogos de supernovas, mostró una preferencia de entre 2.8 y 4.2 desviaciones típicas, según el catálogo de supernovas, por una energía oscura cuya ecuación de estado cambia con el tiempo frente a una constante cosmológica (DESI Collaboration, 2025). La significación no alcanza el umbral convencional de un descubrimiento, y su dependencia del catálogo de supernovas sugiere precaución. El mismo análisis acota la suma de las masas de los neutrinos, dentro de ΛCDM, por debajo de unos 0.064 eV, un valor cercano al mínimo de 0.059 eV que exigen las oscilaciones; si la cota se endurece, la tensión entre cosmología y física de neutrinos se convertiría en un problema serio. DESI completó en abril de 2026

Atelier Velázquez

su programa de cinco años de observaciones, antes de lo previsto, con más de 47 millones de galaxias y cuásares; los primeros resultados sobre la energía oscura con el conjunto completo de datos se esperan para 2027.

Atelier Velázquez

Capítulo 29. Inflación

29.1 Tres problemas

A finales de la década de 1970, el modelo de la gran explosión caliente tenía tres problemas que no eran contradicciones, sino coincidencias sin explicación.

El **problema del horizonte**: en el modelo estándar, regiones del fondo cósmico separadas por más de un par de grados en el cielo nunca estuvieron en contacto causal antes de la recombinación, porque la luz no había tenido tiempo de viajar entre ellas. Sin embargo, tienen la misma temperatura con una precisión de una parte en cien mil. ¿Cómo se pusieron de acuerdo?

El **problema de la planitud**: la densidad del universo es hoy muy próxima a la crítica. Como cualquier desviación de la planitud crece con el tiempo en un universo dominado por materia o radiación, en el pasado la densidad debió estar todavía más próxima a la crítica: en la época de la nucleosíntesis, con una precisión de una parte en 10^{15}; extrapolando a la escala de Planck, de una parte en 10^{60}.

El **problema de los monopolos**: las teorías de gran unificación, que proponían unificar las interacciones fuerte, débil y electromagnética a energías muy altas, predecían la producción abundante de monopolos magnéticos en el universo temprano, que nunca se han observado.

Atelier Velázquez

29.2 Guth, Starobinsky, Linde

Alan Guth, investigador posdoctoral en Stanford, propuso en 1980 que el universo temprano pasó por un periodo de expansión exponencial, que llamó **inflación**, impulsado por la energía de un campo atrapado en un estado de alta energía (Guth, 1981). Si durante una fracción minúscula de segundo el factor de escala se multiplicó por al menos $e^{60} \approx 10^{26}$, una región minúscula y causalmente conectada se convirtió en todo el universo observable, lo cual explica su uniformidad; cualquier curvatura inicial quedó diluida, como la superficie de un globo inflado hasta un tamaño gigantesco parece plana localmente; y los monopolos se diluyeron hasta hacerse indetectables.

Alexéi Starobinsky había propuesto en Moscú, en 1979–1980, un modelo de expansión exponencial basado en correcciones cuánticas a la gravedad, con un término proporcional al cuadrado de la curvatura (Starobinsky, 1980). Viatcheslav Mukhanov y Gennadi Chibisov calcula-

ron en 1981 que las fluctuaciones cuánticas durante esa fase producirían perturbaciones de densidad con un espectro casi invariante de escala (Mukhanov y Chibisov, 1981). Katsuhiko Sato y Demosthenes Kazanas formularon ideas relacionadas.

El modelo original de Guth tenía un defecto: la transición al final de la inflación producía un universo extremadamente inhomogéneo. Andréi Linde en 1982 y, de manera independiente, Andreas Albrecht y Paul Steinhardt propusieron la «nueva inflación», en la que el campo, llamado **inflatón**, rueda lentamente por un potencial casi plano antes de caer al mínimo y convertir su energía en partículas, recalentando el universo (Linde, 1982; Albrecht y Steinhardt, 1982). En 1983, Linde propuso la inflación caótica, en la que basta un potencial simple y condiciones iniciales genéricas.

29.3 Mecanismo y predicciones

Durante la inflación, la densidad de energía está dominada por la energía potencial $V(\phi)$ del inflatón, que cambia muy lentamente. Su ecuación de estado es próxima a $p = -\rho c^2$, la de una constante cosmológica, de modo que la expansión es casi exponencial, $a \propto e^{Ht}$. Las fluctuaciones cuánticas del inflatón, estiradas por la expansión hasta escalas cosmológicas, se convierten en las semillas de las estructuras. En los modelos de rodadura lenta, las propiedades de esas semillas dependen de la forma del potencial a través de dos parámetros, ϵ y η, que miden su pendiente y su curvatura. El índice espectral de las perturbaciones de densidad es aproximadamente $n_s \approx 1 - 6\epsilon + 2\eta$, ligeramente menor que uno, y la razón entre las amplitudes de las ondas gravitacionales primordiales y las perturbaciones de densidad es $r \approx 16\epsilon$.

La inflación genérica predice un universo espacialmente plano, fluctuaciones primordiales casi gaussianas, adiabáticas y con un espectro casi invariante de escala pero no exactamente, y correlaciones en escalas mayores que el horizonte en el momento de la recombinación. Todas estas predicciones han sido confirmadas: la curvatura es compatible con cero, la no gaussianidad es nula dentro de los errores, y Planck midió $n_s = 0.965 \pm 0.004$, inferior a uno con más de ocho desviaciones típicas (Planck Collaboration, 2020).

Ejemplo. En el modelo de Starobinsky, para $N = 60$ multiplicaciones por e del factor de escala entre la salida del horizonte de las escalas observadas y el final de la inflación, $n_s \approx 1 - 2/N \approx 0.967$ y $r \approx 12/N^2 \approx 0.003$. En el modelo caótico más simple, con potencial $V \propto \phi^2$,

Atelier Velázquez

$n_s \approx 0.967$ también, pero $r \approx 8/N \approx 0.13$. La búsqueda de la huella de las ondas gravitacionales primordiales en la polarización del fondo cósmico ha establecido $r < 0.036$ (BICEP/Keck Collaboration, 2021), lo que excluye el modelo cuadrático y favorece potenciales como el de Starobinsky.

En marzo de 2014, la colaboración BICEP2 anunció la detección de esas ondas gravitacionales con $r \approx 0.2$. El análisis conjunto con los datos de Planck mostró que la señal podía explicarse por la emisión polarizada del polvo de nuestra galaxia (BICEP2/Keck Array and Planck Collaborations, 2015). El episodio, examinado en el capítulo 44, ilustra la diferencia entre una señal estadísticamente significativa y una señal correctamente atribuida.

29.4 Limitaciones

La inflación es hoy el paradigma dominante para el universo muy temprano, pero conviene precisar qué está confirmado. Están confirmadas varias predicciones genéricas de una clase de modelos. No está confirmado ningún modelo específico: no se ha identificado el inflatón con ningún campo conocido, ni se ha detectado la señal de ondas gravitacionales primordiales que permitiría medir la escala de energía de la inflación. El número de modelos propuestos es de cientos (Martin et al., 2014). En muchos de ellos la inflación, una vez iniciada, no termina en todas partes a la vez, sino que continúa eternamente en regiones del espacio mientras en otras se detiene, produciendo una multiplicidad de universos burbuja. La **inflación eterna** plantea el **problema de la medida**: si todo lo que puede ocurrir ocurre infinitas veces, ¿cómo se asignan probabilidades a las observaciones? Paul Steinhardt, uno de los creadores de la nueva inflación, se ha convertido en su crítico más severo, y ha argumentado que la flexibilidad del paradigma lo hace prácticamente infalsable (Ijjas et al., 2013). Sus defensores responden que los modelos concretos hacen predicciones precisas y que muchos han sido descartados.

29.5 Alternativas

Existen propuestas alternativas que intentan explicar los mismos datos. Los modelos **ecpiróticos** y cíclicos, desarrollados por Justin Khoury, Burt Ovrut, Paul Steinhardt y Neil Turok, sustituyen la expansión rápida por una fase de contracción lenta previa a un rebote (Khoury et al., 2001). La **cosmología de gas de cuerdas** de Robert Brandenberger y Cumrun Vafa propone una fase térmica de cuerdas en el universo primitivo. La **cosmología cíclica conforme** de Roger Penrose

Atelier Velázquez

postula una sucesión infinita de eones, cada uno de los cuales nace del futuro remoto del anterior (Penrose, 2010). Los modelos de rebote de la cosmología cuántica de bucles se examinarán en el capítulo 36. La mayoría de estas alternativas predicen una amplitud de ondas gravitacionales primordiales mucho menor que la inflación de gran escala de energía, de modo que una detección de r cercano a 0.003 favorecería la inflación de tipo Starobinsky, mientras que una cota muy inferior no decidiría entre todas. El Observatorio Simons, que comenzó a observar en Chile en 2024, y la misión espacial japonesa LiteBIRD, en preparación, buscarán esa señal con una sensibilidad en r del orden de 0.001.

Atelier Velázquez

Parte VII. Agujeros negros y el encuentro de las teorías

Atelier Velázquez

Capítulo 30. Agujeros negros

30.1 Estrellas oscuras y una solución incómoda

En 1784, el clérigo y filósofo natural inglés John Michell calculó, con la teoría newtoniana y suponiendo que la luz está formada por corpúsculos sometidos a la gravedad, que una estrella con la densidad del Sol y quinientas veces su radio tendría una velocidad de escape mayor que la de la luz, de modo que su luz no podría salir de ella (Michell, 1784). Laplace llegó a la misma conclusión en 1796. La idea desapareció en el siglo XIX, cuando triunfó la teoría ondulatoria de la luz.

La solución de Schwarzschild de 1916 contenía una superficie peculiar en $r_s = 2GM/c^2$. Durante décadas se pensó que carecía de significado físico, porque ningún cuerpo real sería tan compacto. Eddington y el propio Einstein argumentaron que la naturaleza impediría su formación. En 1939, J. Robert Oppenheimer y su estudiante Hartland Snyder calcularon el colapso de una nube de polvo esférica sin presión y mostraron que, para un observador lejano, el colapso parece detenerse asintóticamente en el radio de Schwarzschild, mientras que para un observador que cae con la nube el radio se cruza en un tiempo finito y el colapso continúa hasta un punto de densidad infinita (Oppenheimer y Snyder, 1939). El trabajo pasó casi inadvertido: se publicó el mismo día en que Alemania invadió Polonia.

Atelier Velázquez

En 1958, David Finkelstein mostró con un cambio de coordenadas que el radio de Schwarzschild es una membrana de un solo sentido: puede cruzarse hacia dentro, pero nada puede salir. Martin Kruskal y George Szekeres construyeron en 1960 coordenadas que describen la geometría completa. La superficie es un **horizonte de sucesos**, y su singularidad aparente era un artefacto de las coordenadas originales. John Wheeler popularizó en 1967 la expresión «agujero negro», que había aparecido en la prensa científica unos años antes.

30.2 Kerr, Penrose y las singularidades

En 1963, el matemático neozelandés Roy Kerr encontró la solución exacta para un agujero negro en rotación (Kerr, 1963), y Ezra Newman la extendió en 1965 al caso con carga eléctrica. Una serie de teoremas de Werner Israel, Brandon Carter y otros estableció que un agujero negro estacionario queda completamente caracterizado por tres números: masa, momento angular y carga.

Wheeler lo resumió diciendo que los agujeros negros no tienen pelo. Toda la información sobre la composición y la forma de lo que cayó en él parece perderse para el exterior.

Un agujero negro en rotación tiene alrededor del horizonte una región, la **ergosfera**, en la que el espaciotiempo es arrastrado con tal intensidad que nada puede permanecer en reposo respecto de las estrellas lejanas. En 1969, Roger Penrose mostró que es posible extraer energía de la rotación de un agujero negro haciendo que una partícula que entra en la ergosfera se divida en dos, una de las cuales cae con energía negativa mientras la otra escapa con más energía de la que tenía la original. Para un agujero negro en rotación máxima, puede extraerse hasta un 29 por ciento de su masa-energía.

La pregunta de si las singularidades eran un artefacto de la simetría esférica perfecta de los modelos fue respondida por Penrose en 1965. Introdujo el concepto de **superficie atrapada**, una superficie cerrada de la que incluso los rayos de luz que se dirigen hacia fuera convergen, y demostró, con técnicas topológicas y sin suponer ninguna simetría, que si se forma una superficie atrapada y la materia satisface condiciones de energía razonables, el espaciotiempo contiene necesariamente una singularidad, en el sentido de que alguna trayectoria de caída libre termina en un tiempo propio finito (Penrose, 1965). Hawking y Penrose extendieron en 1970 el resultado a la cosmología: bajo condiciones generales, un universo en expansión como el nuestro tuvo una singularidad en su pasado (Hawking y Penrose, 1970). Penrose recibió el premio Nobel de 2020.

Atelier Velázquez

Los teoremas de singularidad dicen algo preciso: la relatividad general predice su propio límite de validez. No dicen que en el centro de los agujeros negros o en el origen del universo exista un objeto físico de densidad infinita. Una singularidad, en este sentido técnico, es un lugar donde la teoría deja de proporcionar descripción. Se espera que una teoría cuántica de la gravedad sustituya esa predicción por otra cosa. Penrose conjeturó también que las singularidades formadas por colapso gravitatorio siempre quedan ocultas tras un horizonte, la **censura cósmica**, conjetura que no ha sido demostrada en general.

30.3 Acreción y evidencias astrofísicas

Un agujero negro aislado es invisible. Los que se conocen se detectan por sus efectos sobre la materia cercana. Cuando el gas cae hacia un agujero negro, su momento angular le impide caer directamente y forma un **disco de acreción** en el que la fricción y los campos magnéticos lo ca-

lientan hasta millones de grados. La eficiencia de conversión de masa en radiación es enorme: alrededor del 6 por ciento de la energía en reposo para un agujero negro sin rotación y hasta un 42 por ciento para uno en rotación máxima, frente al 0.7 por ciento de la fusión del hidrógeno.

En 1963, Maarten Schmidt identificó en el espectro de la radiofuente 3C 273 líneas del hidrógeno desplazadas al rojo con $z = 0.158$, lo que la situaba a una distancia de unos dos mil millones de años luz y le atribuía una luminosidad cien veces superior a la de una galaxia entera, procedente de una región no mayor que el sistema solar. Donald Lynden-Bell propuso en 1969 que estos **cuásares** son discos de acreción alrededor de agujeros negros de millones o miles de millones de masas solares en los centros de las galaxias. En 1972, las observaciones de la estrella compañera de la fuente de rayos X Cygnus X-1 revelaron un objeto compacto invisible cuya masa, según estimaciones posteriores, supera con holgura el límite de cualquier estrella de neutrones (Webster y Murdin, 1972).

La prueba más directa de la existencia de un agujero negro supermasivo procede del centro de nuestra galaxia. Durante más de dos décadas, los equipos de Andrea Ghez en California y Reinhard Genzel en Alemania siguieron con óptica adaptativa las órbitas de estrellas en torno a la fuente de radio Sagitario A*. La estrella S2 completa una órbita cada dieciséis años y se acerca hasta 120 unidades astronómicas del centro; su órbita kepleriana implica una masa de unos cuatro millones de masas solares en un volumen menor que su periastro. En 2018 y 2020, la colaboración GRAVITY detectó en la órbita de S2 el corrimiento gravitacional al rojo y la precesión de Schwarzschild predichos por la relatividad general (GRAVITY Collaboration, 2020). Ghez y Genzel compartieron con Penrose el premio Nobel de 2020.

Atelier Velázquez

Ejemplos de radios de Schwarzschild. Para el Sol, $r_s = 2GM_\odot/c^2 \approx 2.95$ km; para la Tierra, unos 8.9 mm. Para Sagitario A*, con 4.3×10^6 masas solares, $r_s \approx 1.27 \times 10^{10}$ m, unas 0.085 unidades astronómicas, menos que el radio de la órbita de Mercurio. Para el agujero negro de la galaxia M87, con unos 6.5×10^9 masas solares, $r_s \approx 1.9 \times 10^{13}$ m, unas 128 unidades astronómicas, más de tres veces la distancia de Plutón al Sol. Como r_s es proporcional a la masa, la densidad media dentro del horizonte disminuye con el cuadrado de la masa: un agujero negro supermasivo tiene una densidad media dentro de su horizonte comparable a la del agua o menor.

30.4 Ondas gravitacionales

Las fusiones de agujeros negros detectadas por LIGO y Virgo desde 2015 proporcionan la prueba más directa de la dinámica de los horizontes. La forma de onda de una fusión tiene tres fases: la espiral, en la que los dos objetos orbitan cada vez más deprisa; la fusión; y la relajación (*ringdown*), en la que el agujero negro resultante vibra como una campana amortiguada hasta adoptar la forma de Kerr. Las frecuencias y los tiempos de amortiguamiento de la relajación dependen solo de la masa y el giro del agujero negro final, de modo que medirlos es comprobar el teorema de que los agujeros negros no tienen pelo.

El 14 de enero de 2025, los detectores de LIGO registraron la señal GW250114, la más intensa hasta la fecha, con una razón señal-ruido cercana a 80, producida por la fusión de dos agujeros negros de unas 33 y 32 masas solares en uno de unas 63. La claridad de la señal permitió medir por separado las áreas de los horizontes antes y después de la fusión y confirmar el teorema de las áreas de Hawking, según el cual el área total de los horizontes no puede disminuir: pasó de unos 240 000 a unos 400 000 kilómetros cuadrados. Se identificó además, con una significación de más de cuatro desviaciones típicas, un segundo modo de vibración del agujero negro final, en acuerdo con la solución de Kerr (LIGO Scientific Collaboration et al., 2025a). Los catálogos publicados por la colaboración LIGO-Virgo-KAGRA entre 2025 y 2026, con los datos de su cuarta campaña de observación, elevaron a varios centenares el número de fusiones confirmadas.

Atelier Velázquez

30.5 Imágenes del entorno de agujeros negros

El 10 de abril de 2019, la colaboración del Event Horizon Telescope presentó la imagen de un anillo brillante de emisión en torno a una región oscura en el centro de la galaxia M87, a unos 16.8 megapársecs (Event Horizon Telescope Collaboration, 2019). El 12 de mayo de 2022 presentó la de Sagitario A* (Event Horizon Telescope Collaboration, 2022).

Conviene precisar qué muestran. La relatividad general predice que un agujero negro rodeado de gas luminoso proyecta una «sombra» de diámetro aproximadamente $\sqrt{27}\, r_s$, rodeada por un anillo donde los fotones orbitan antes de escapar. *Ejemplo.* Para M87*, con $r_s \approx 1.9 \times 10^{13}$ m, la sombra tendría un diámetro de unos 10^{14} m; a una distancia de 5.2×10^{23} m subtiende unos 1.9×10^{-10} rad, unos 40 microsegundos de arco. El anillo medido tiene unos 42 microse-

gundos de arco. La concordancia entre la masa inferida de la dinámica estelar y la inferida del tamaño del anillo es una identidad entre cursos operatorios independientes.

Pero la imagen no es una fotografía del horizonte. Es una reconstrucción a partir de medidas interferométricas muy incompletas: con ocho radiotelescopios solo se muestrea una pequeña fracción de las frecuencias espaciales necesarias para una imagen completa. El equipo dividió los datos entre grupos independientes que los procesaron con algoritmos diferentes —métodos clásicos de deconvolución, métodos de máxima verosimilitud regularizada, métodos bayesianos— sin comunicarse los resultados, para evitar sesgos. Las imágenes coincidieron en lo esencial: un anillo de diámetro determinado con una asimetría de brillo. Los detalles finos dependen del algoritmo. Las propiedades físicas del gas se infirieron comparando los datos con miles de simulaciones magnetohidrodinámicas en relatividad general. El horizonte mismo no emite: lo que se ve es la luz curvada del gas exterior y la ausencia de luz donde el horizonte la captura.

30.6 Teoría y observación

Atelier Velázquez

Lo que se sabe sobre los agujeros negros puede ordenarse por grados de apoyo. Está **observado** que existen objetos compactos que no emiten luz, con masas de entre unas pocas y miles de millones de masas solares, alrededor de los cuales la materia y la luz se comportan como predice la relatividad general en la geometría de Kerr, y cuyas fusiones producen ondas gravitacionales con las formas de onda predichas. Está **inferido con gran solidez** que esos objetos tienen horizontes de sucesos, por la ausencia de una superficie material que emitiría radiación al recibir la materia que cae. Es **teórico**, sin acceso observacional posible, lo que ocurre en el interior del horizonte, y en particular la singularidad, que la teoría misma señala como su límite. Confundir estos niveles —hablar de la singularidad como de un objeto observado o, en sentido contrario, tratar la existencia de los agujeros negros como mera especulación— es desconocer el estado de la evidencia.

Capítulo 31. Hawking y Bekenstein

31.1 El área que no disminuye

En 1971, Stephen Hawking (1942–2018) demostró que, en la relatividad general clásica y con materia de energía positiva, el área total de los horizontes de los agujeros negros nunca disminuye (Hawking, 1971). Cuando dos agujeros negros se fusionan, el área del horizonte resultante es mayor que la suma de las áreas iniciales, aunque se pierda masa en forma de ondas gravitacionales. El parecido con la segunda ley de la termodinámica era evidente, pero se consideraba una analogía formal.

Jacob Bekenstein (1947–2015), estudiante de doctorado de Wheeler en Princeton, lo tomó en serio. Si se arroja una taza de té caliente a un agujero negro, su entropía desaparece del universo exterior, y la segunda ley parece violarse. Bekenstein propuso en 1972 que los agujeros negros tienen una entropía proporcional al área de su horizonte, de modo que la entropía total —la del exterior más la del agujero negro— nunca disminuye: una **segunda ley generalizada** (Bekenstein, 1973). Hawking se opuso: si un agujero negro tiene entropía, tiene temperatura, y si tiene temperatura debe radiar, lo cual es imposible para un objeto del que nada puede salir. En 1973, James Bardeen, Brandon Carter y Hawking formularon cuatro leyes de la mecánica de los agujeros negros que son formalmente idénticas a las cuatro leyes de la termodinámica, con la gravedad superficial del horizonte en el lugar de la temperatura y el área en el de la entropía (Bardeen et al., 1973), pero insistieron en que la analogía era solo matemática.

Atelier Velázquez

31.2 La radiación de Hawking

En 1974, Hawking aplicó la teoría cuántica de campos a un espaciotiempo curvo que contiene un agujero negro formado por colapso, y encontró, para su propia sorpresa, que el agujero negro emite partículas con un espectro térmico (Hawking, 1974, 1975). La temperatura es

$$T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k_B} \approx 6.2 \times 10^{-8}\ \mathrm{K} \times \frac{M_\odot}{M}.$$

La fórmula contiene cuatro constantes fundamentales: $\hbar$ (cuántica), c (relatividad), G (gravitación) y k_B (termodinámica). Es quizá la única fórmula de la física que reúne así cuatro teorías. Con la temperatura, la relación termodinámica fija el coeficiente de la entropía de Bekenstein:

$$S_{BH} = \frac{k_B c^3 A}{4G\hbar} = k_B \, \frac{A}{4\ell_P^2},$$

donde A es el área del horizonte y $\ell_P = \sqrt{G\hbar/c^3} \approx 1.6 \times 10^{-35}$ m la longitud de Planck. La entropía es un cuarto del área medida en unidades de Planck.

Ejemplo. Un agujero negro de una masa solar tiene un horizonte de radio 2.95 km y área $4\pi r_s^2 \approx 1.1 \times 10^8$ m^2, de modo que su entropía es $S/k_B \approx 1.1 \times 10^8/[4 \times (1.6 \times 10^{-35})^2] \approx 10^{77}$, unos veinte órdenes de magnitud mayor que la entropía del Sol. Su temperatura, 6×10^{-8} K, es mucho menor que la del fondo cósmico, de 2.7 K, de modo que hoy absorbe más radiación de la que emite. Si estuviera aislado, tardaría unos 2×10^{67} años en evaporarse completamente, frente a los 1.4×10^{10} años de edad del universo. Solo agujeros negros muy pequeños, de unos 10^{12} kg, que podrían haberse formado en el universo temprano, estarían evaporándose ahora; no se ha observado ninguna señal de ello.

La radiación de Hawking está relacionada con un efecto descubierto por William Unruh en 1976: un observador uniformemente acelerado en el vacío del espaciotiempo plano detecta un baño térmico de partículas a una temperatura proporcional a su aceleración (Unruh, 1976). El concepto de partícula no es invariante: depende del estado de movimiento del detector.

Atelier Velázquez

31.3 Resultados robustos y verificación empírica

La radiación de Hawking no ha sido observada en ningún agujero negro astrofísico, y es casi seguro que no lo será, porque su temperatura es despreciable. ¿Qué estatuto tiene entonces? La derivación de Hawking utiliza la teoría cuántica de campos en un espaciotiempo curvo fijo, una aproximación que se considera fiable mientras la curvatura sea pequeña comparada con la escala de Planck. Ha sido rederivada por muchos métodos independientes, lo que hace de ella uno de los resultados teóricos más sólidos de la física de las últimas décadas. Además, la entropía de Bekenstein-Hawking es necesaria para la consistencia de la segunda ley de la termodinámica en presencia de agujeros negros.

Existen experimentos con **análogos**: sistemas de laboratorio, como condensados de Bose-Einstein que fluyen más deprisa que la velocidad del sonido en ellos, en los que aparece un horizonte acústico. En 2016 y 2019, Jeff Steinhauer y sus colaboradores observaron en un condensado la emisión espontánea de pares de fonones correlacionados con un espectro térmico a la tem-

peratura predicha por el análogo de la fórmula de Hawking (Muñoz de Nova et al., 2019). Estos experimentos confirman que el mecanismo matemático de Hawking funciona en sistemas físicos con horizontes; no confirman que los agujeros negros gravitatorios radien, porque la física subyacente es distinta. La observación de GW250114 confirmó el teorema clásico del área, no la radiación cuántica.

El estatuto epistémico es, por tanto, peculiar: un resultado teórico robusto, consistente con todo lo que se sabe y sin verificación empírica directa en el sistema al que se refiere. Distinguir este estatuto del de una hipótesis especulativa, por un lado, y del de un resultado confirmado, por otro, es indispensable para no sobrevalorar ni infravalorar la física de los agujeros negros.

31.4 El problema de la información

En 1976, Hawking extrajo una consecuencia inquietante (Hawking, 1976). Si un agujero negro se forma a partir de materia en un estado cuántico puro —un estado completamente especificado— y después se evapora en radiación exactamente térmica, la radiación final está en un estado mixto, que no contiene la información sobre el estado inicial. La evolución habría transformado un estado puro en uno mixto, lo que viola la **unitariedad** de la mecánica cuántica, según la cual la información sobre el estado inicial siempre se conserva, aunque quede codificada de manera inaccesible. O falla la mecánica cuántica, o falla el cálculo de Hawking.

Atelier Velázquez

Durante tres décadas, la comunidad se dividió. Muchos relativistas aceptaron la pérdida de información; muchos físicos de partículas, educados en la unitariedad, la rechazaron. Don Page mostró en 1993 que, si la evaporación es unitaria, la entropía de entrelazamiento de la radiación emitida debe crecer al principio y decrecer después de que el agujero negro haya perdido la mitad de su entropía, siguiendo la llamada **curva de Page** (Page, 1993). El cálculo de Hawking da una entropía que crece siempre. En 1996, Andrew Strominger y Cumrun Vafa calcularon en teoría de cuerdas el número de estados microscópicos de cierta clase de agujeros negros extremos y obtuvieron exactamente un cuarto del área en unidades de Planck (Strominger y Vafa, 1996): la entropía de Bekenstein-Hawking parecía contar estados cuánticos reales. La correspondencia AdS/CFT de 1997, que se examinará en el capítulo 35, convenció a muchos de que la evaporación es unitaria, puesto que es equivalente a una teoría cuántica ordinaria. En 2004 Hawking cambió de posición públicamente.

Saber que la información se conserva no es saber cómo sale. En 2012, Ahmed Almheiri, Donald Marolf, Joseph Polchinski y James Sully argumentaron que la unitariedad, la validez de la teoría de campos fuera del horizonte y el principio de equivalencia para un observador que cae no pueden ser compatibles a la vez, y que quizá el horizonte de un agujero negro viejo es un «muro de fuego» que destruye lo que lo cruza (Almheiri et al., 2013). En 2019, dos grupos mostraron, mediante cálculos de gravedad semiclásica que incorporan nuevas configuraciones geométricas —«islas» y agujeros de gusano de réplica—, que la entropía de la radiación sigue la curva de Page (Penington, 2020; Almheiri et al., 2019). Los cálculos se realizaron sobre todo en modelos simplificados, en espaciotiempos de dos dimensiones o con condiciones de contorno anti-de Sitter, y la extensión a agujeros negros realistas está en discusión. Que la información se conserva es hoy la opinión mayoritaria; cómo exactamente, y qué dice esto sobre la estructura del espaciotiempo, sigue abierto.

31.5 El nudo de las teorías

Atelier Velázquez

Los agujeros negros son el lugar donde la relatividad general, la teoría cuántica de campos y la termodinámica se encuentran y, a la vez, entran en tensión. Son el ejemplo más claro de sym-ploké entre teorías: no todas se conectan con todas en todos los dominios, pero en el horizonte de un agujero negro las tres deben valer a la vez, y las identidades que resultan —la temperatura de Hawking, la entropía de Bekenstein— son consecuencias que ninguna de ellas habría producido sola. La conexión es parcial y conflictiva: el cálculo que la establece sugiere a la vez que una de las tres debe modificarse. En ese conflicto se apoyan los programas de gravedad cuántica examinados en la Parte VIII, y el principio holográfico, según el cual el número de grados de libertad de una región está acotado por el área de su frontera y no por su volumen, formulado por Gerard ’t Hooft y Leonard Susskind a partir de la entropía de Bekenstein (’t Hooft, 1993; Susskind, 1995).

Capítulo 32. Qué significa existir en física

32.1 Una pregunta mal planteada y una pregunta necesaria

«¿Existen los quarks?» «¿Existe la materia oscura?» «¿Existen las cuerdas?» La palabra «existir» se usa en estas preguntas como si tuviera un solo sentido, y como si las respuestas fueran «sí» o «no». La historia y la práctica de la física muestran, en cambio, una gradación de modos de acceso a las entidades de las que habla la teoría. Distinguirlos no resuelve el debate filosófico sobre el realismo, pero lo vuelve preciso.

32.2 Una tipología

Pueden distinguirse al menos diez tipos de términos, según el modo en que las operaciones científicas los alcanzan.

Un **objeto observado** es accesible a la percepción con o sin instrumentos que amplían la percepción: la Luna, los satélites de Júpiter, una célula al microscopio.

Una **entidad detectada** produce efectos individuales registrables por instrumentos cuyo funcionamiento se entiende: un electrón deja una traza en una cámara de niebla; un fotón produce un clic en un fotodetector; una onda gravitacional produce una variación de longitud en un interferómetro con una forma de onda predicha.

Una **entidad inferida** no se detecta individualmente, pero su existencia se infiere de efectos sistemáticos mediante teorías aceptadas: los quarks, confinados dentro de los hadrones; la materia oscura, inferida por sus efectos gravitatorios.

Un **parámetro** es un número que aparece en una teoría y se ajusta a los datos: la constante de Hubble, la densidad de materia, la constante cosmológica. Un parámetro puede medirse con gran precisión sin que se sepa a qué entidad corresponde.

Una **partícula**, en la teoría cuántica de campos, es una excitación cuantizada de un campo. Un **campo** es una magnitud definida en cada punto del espaciotiempo, con dinámica propia, que almacena energía y momento.

Una **partícula virtual** es un término interno de un desarrollo perturbativo; atribuirle existencia propia es leer literalmente una notación.

Atelier Velázquez

Un **estado cuántico** es un elemento del formalismo cuyo estatuto ontológico es, como se vio en el capítulo 20, objeto de controversia.

Una **entidad de un modelo efectivo** es un término que solo tiene sentido en una descripción válida a cierta escala: un fonón, cuanto de vibración de una red cristalina; un hueco en un semiconductor; un par de Cooper. Son reales en su nivel —se dispersan, transportan energía, tienen masa efectiva—, pero no son constituyentes fundamentales.

Una **estructura matemática** es un elemento del formalismo que no tiene contrapartida física directa: el espacio de Hilbert completo, una elección de gauge, un sistema de coordenadas. El potencial electromagnético es un caso fronterizo. Durante mucho tiempo se consideró un artificio, porque solo los campos son medibles y el potencial puede cambiarse mediante una transformación gauge sin efecto físico. En 1959, Yakir Aharonov y David Bohm mostraron que un electrón que rodea una región con campo magnético, sin atravesarla, sufre un desfase medible que depende del potencial a lo largo de su camino (Aharonov y Bohm, 1959). El efecto, confirmado experimentalmente, mostró que el potencial tiene efectos físicos, pero solo a través de cantidades invariantes bajo transformaciones gauge, como la integral del potencial a lo largo de un camino cerrado.

Atelier Velázquez

Una **entidad hipotética** es postulada por una teoría sin evidencia empírica de su existencia: el inflatón, las cuerdas, las partículas supersimétricas.

32.3 Aplicación

Los **quarks** son entidades inferidas con una solidez comparable a la de las detectadas. No se observan aislados, pero los experimentos de dispersión muestran centros puntuales de carga fraccionaria dentro del protón; los chorros de hadrones en los colisionadores reproducen la dinámica de quarks y gluones; los cálculos de QCD en retículo, que solo usan quarks y gluones, reproducen las masas de los hadrones. Que no puedan aislarse es una consecuencia de la teoría que los describe, no una debilidad de la evidencia.

El **bosón de Higgs** es una entidad detectada en un sentido estadístico. No se ve ningún Higgs individual: se observan sus productos de desintegración —dos fotones, cuatro leptones— y se acumula un exceso de sucesos con una masa invariante de 125 GeV sobre un fondo de procesos que imitan la señal. La detección es una inferencia estadística con una probabilidad de fal-

so positivo inferior a una en tres millones, confirmada por dos experimentos independientes y por medidas posteriores de sus acoplamientos.

Las **ondas gravitacionales** son entidades detectadas: cada evento produce una señal individual cuya forma coincide con la predicha, en detectores separados miles de kilómetros, con un retardo compatible con la velocidad de la luz.

Los **agujeros negros** son entidades inferidas a partir de múltiples líneas independientes —órbitas estelares, imágenes del Event Horizon Telescope, ondas gravitacionales, binarias de rayos X—; su interior es teórico.

La **materia oscura** es una entidad inferida con evidencia gravitatoria múltiple y convergente, cuya naturaleza física es desconocida y que nunca se ha detectado por medios no gravitatorios. Es posible, aunque improbable a la luz del conjunto de evidencias, que la inferencia se deba a una modificación de la gravedad.

La **energía oscura** es, por ahora, un parámetro bien medido y una etiqueta para su causa desconocida.

Atelier Velázquez

El **gravitón**, el cuanto hipotético del campo gravitatorio, es una entidad hipotética con un estatuto especial. Si la gravedad es un campo cuántico, debe tener cuantos; pero su interacción con la materia es tan débil que, según estimaciones de Freeman Dyson y otros, un detector capaz de registrar gravitones individuales tendría que ser tan masivo que colapsaría en un agujero negro (Rothman y Boughn, 2006). Puede que su existencia sea indetectable en principio, lo cual plantea la pregunta de qué significaría afirmarla.

Las **cuerdas** son entidades hipotéticas sin evidencia empírica directa. La teoría que las postula tiene consecuencias matemáticas fecundas, como se verá en el capítulo 34, pero esas consecuencias no son evidencia de su existencia física.

32.4 Realismo, instrumentalismo y sus variantes

La filosofía de la ciencia del siglo XX ofreció varias respuestas generales a la pregunta por la existencia de las entidades teóricas.

El **realismo científico** sostiene que las teorías maduras y exitosas son aproximadamente verdaderas y que sus términos teóricos se refieren a entidades reales. Su argumento principal,

formulado por Hilary Putnam, es que el realismo es la única filosofía que no convierte el éxito de la ciencia en un milagro (Putnam, 1975). Su principal objeción es la **metainducción pesimista** de Larry Laudan: la historia está llena de teorías exitosas cuyos términos centrales, como el éter o el calórico, resultaron no referirse a nada; ¿por qué habrían de ser distintas las actuales? (Laudan, 1981).

El **instrumentalismo**, cuya genealogía se remonta al prefacio de Osiander a Copérnico y que Duhem defendió para la física, sostiene que las teorías son instrumentos de cálculo y predicción, sin pretensión de describir una realidad inobservable.

El **empirismo constructivo** de Bas van Fraassen sostiene que la ciencia aspira a teorías empíricamente adecuadas —verdaderas en lo que dicen sobre lo observable—, y que aceptar una teoría no exige creer en sus entidades inobservables (van Fraassen, 1980). La distinción entre observable e inobservable, sin embargo, se vuelve difícil de trazar cuando los instrumentos median toda observación.

Atelier Velázquez

El **realismo de entidades** de Ian Hacking propone un criterio operatorio: creemos en los electrones no porque una teoría los postule, sino porque los manipulamos para producir efectos en otros sistemas. Si una entidad puede usarse como herramienta para investigar otra cosa, es real (Hacking, 1983). Nancy Cartwright defendió una posición próxima: hay que creer en las entidades y las capacidades causales que las ciencias manipulan, pero desconfiar de las leyes fundamentales, que solo valen en condiciones idealizadas (Cartwright, 1983).

El **realismo estructural** de John Worrall sostiene que lo que sobrevive a los cambios de teoría no son las entidades, sino las estructuras matemáticas: las ecuaciones de Fresnel para la luz sobrevivieron a la desaparición del éter, reinterpretadas en la teoría de Maxwell (Worrall, 1989).

32.5 Existencia y operaciones

La teoría del cierre categorial sugiere un enfoque que se aproxima al de Hacking sin coincidir con él. Las entidades de una ciencia existen, en el sentido gnoseológico, en la medida en que intervienen como términos en operaciones que producen identidades sintéticas estables: cuando cursos operatorios independientes convergen en el mismo término. El número de Avogadro, obtenido por trece métodos distintos, garantizó la existencia de los átomos antes de que pudiera manipularse ninguno individualmente. Los quarks existen en este sentido, porque la misma es-

tructura aparece en la dispersión profunda, en los chorros, en la espectroscopia de hadrones y en los cálculos de retículo. Las cuerdas no, todavía, porque no hay ningún curso operatorio empírico que las alcance.

Este enfoque tiene una consecuencia sobre la relación entre existencia matemática y existencia física. Que una estructura matemática sea consistente —que exista como objetividad del tercer género— no implica que exista una realidad física correspondiente. Una ecuación puede tener soluciones —agujeros de gusano atravesables, universos con curvas temporales cerradas, dimensiones adicionales compactas— que no se realizan en el mundo. La existencia física requiere operaciones empíricas que la teoría matemática, por sí sola, no proporciona. Confundir ambos planos —tratar la consistencia de un formalismo como evidencia de su realidad física, o declarar que el universo «es» matemática— es una de las extrapolaciones más frecuentes en la física especulativa contemporánea, y se examinará como falacia en el capítulo 45.

Atelier Velázquez

Parte VIII. Gravedad cuántica y problemas de fundamento

Atelier Velázquez

Capítulo 33. El conflicto entre relatividad y cuántica

33.1 Por qué cuantizar la gravedad

La relatividad general describe un espaciotiempo clásico, con una geometría definida en cada punto, cuya curvatura está determinada por el tensor de energía-momento de la materia. La materia, sin embargo, es cuántica. Un electrón puede estar en una superposición de dos posiciones. ¿Qué geometría produce? Una posibilidad es que la geometría responda al valor esperado de la energía, promediando las dos alternativas: es la gravedad semiclásica, propuesta por Christian Møller y Léon Rosenfeld en la década de 1960. En 1981, Don Page y C. D. Geilker realizaron un experimento con una masa de prueba cuya posición dependía del resultado de un proceso cuántico aleatorio, y mostraron que la gravedad seguía a la masa en su posición efectiva y no al promedio de posiciones, en contra de la versión más ingenua de la gravedad semiclásica (Page y Geilker, 1981). El experimento no prueba que la gravedad deba cuantizarse, pero ilustra la dificultad de acoplar una geometría clásica a una materia cuántica.

Matvéi Bronstein, físico soviético fusilado en 1938 durante las purgas de Stalin, fue el primero en analizar, en 1936, los límites que la gravedad impone a la medida de un campo gravitatorio cuántico: para medir con precisión creciente una región pequeña hay que concentrar en ella energía, que acaba formando un agujero negro y ocultando lo que se quería medir. De este tipo de argumentos procede la idea de que existe una escala mínima de longitud con significado operatorio.

Atelier Velázquez

33.2 La escala de Planck

Max Planck observó en 1899 que con las constantes G, c y h pueden formarse unidades naturales de longitud, tiempo y masa que no dependen de ningún objeto particular. Con la constante reducida $\hbar$,

$$\ell_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1.62 \times 10^{-35}\ \text{m}, \qquad t_P = \frac{\ell_P}{c} \approx 5.39 \times 10^{-44}\ \text{s}, \qquad E_P = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} \approx 1.22 \times 10^{19}\ \text{GeV}.$$

La energía de Planck equivale a unos dos mil millones de julios, la energía química de unos cincuenta litros de gasolina, pero concentrada en una sola partícula. Es unos mil billones de veces

mayor que la energía de las colisiones del LHC. A esa escala, se espera que los efectos cuánticos de la gravedad sean tan importantes como los de las otras interacciones. Que la escala de Planck tenga significado físico es una expectativa razonable; que el espacio sea granular a esa escala, como a veces se afirma, no ha sido establecido por ningún experimento ni se sigue de la mera existencia de la escala.

33.3 Dificultades técnicas

El procedimiento que funcionó para el electromagnetismo —cuantizar las pequeñas ondulaciones del campo alrededor de un fondo fijo— falla para la gravedad. La constante de Newton tiene dimensiones de inversa de una masa al cuadrado en unidades naturales, y eso hace que las correcciones cuánticas crezcan con la energía sin control. Gerard ’t Hooft y Martinus Veltman mostraron en 1974 que la gravedad cuántica acoplada a materia produce, en el primer orden de correcciones, infinitos que no pueden absorberse en un número finito de parámetros, y Marc Goroff y Augusto Sagnotti mostraron en 1986 que lo mismo ocurre con la gravedad pura en el segundo orden (’t Hooft y Veltman, 1974; Goroff y Sagnotti, 1986). La gravedad cuántica perturbativa no es renormalizable.

Atelier Velázquez

Esto no significa que la gravedad cuántica sea incalculable. Como teoría efectiva, válida muy por debajo de la escala de Planck, la cuantización de la relatividad general produce predicciones finitas y únicas para las correcciones cuánticas de baja energía, como la corrección cuántica al potencial newtoniano entre dos masas, aunque esas correcciones son tan pequeñas que no pueden medirse (Donoghue, 1994). El problema es que la teoría efectiva no dice nada sobre lo que ocurre cerca de la escala de Planck, que es precisamente donde están las singularidades y el origen del universo.

33.4 El problema del tiempo

La dificultad más profunda, y la más relevante para este libro, es conceptual. En la mecánica cuántica ordinaria, el tiempo es un parámetro externo: la ecuación de Schrödinger describe cómo cambia el estado del sistema respecto de un tiempo medido por relojes que no forman parte del sistema. En la relatividad general, no hay un tiempo externo privilegiado: la teoría es invariante bajo cambios arbitrarios de coordenadas, incluida la coordenada temporal, y el tiempo es una parte dinámica de la geometría.

Cuando se intenta cuantizar la relatividad general de forma canónica, separando el espacio-tiempo en espacio y tiempo, la invariancia bajo reparametrizaciones temporales aparece como una ligadura: el hamiltoniano total, que en mecánica genera la evolución temporal, debe anularse. Bryce DeWitt obtuvo en 1967 la ecuación resultante para la función de onda del universo, la **ecuación de Wheeler-DeWitt** (DeWitt, 1967):

$$\hat{H}\,\Psi = 0.$$

No hay derivada temporal. La función de onda del universo no evoluciona: es una función de la geometría del espacio y de los campos de materia, pero no del tiempo. Es el llamado formalismo congelado. Christopher Isham clasificó en 1993 las estrategias para recuperar el tiempo en tres familias: identificar un tiempo antes de cuantizar, por ejemplo eligiendo un campo de materia como reloj; recuperar el tiempo después de cuantizar, como una aproximación válida en ciertos regímenes; o aceptar que el tiempo no es fundamental (Isham, 1993).

Don Page y William Wootters propusieron en 1983 una solución de la segunda familia que ilumina el problema (Page y Wootters, 1983). Si el universo está en un estado estacionario, pero contiene un subsistema que funciona como reloj y otro que es el resto, los dos pueden estar entrelazados de manera que, condicionado a que el reloj marque un valor t, el resto está en un estado $|\psi(t)\rangle$ que evoluciona según la ecuación de Schrödinger. El tiempo sería una correlación entre subsistemas, no un parámetro global. En 2014 se realizó una demostración de laboratorio del mecanismo con fotones entrelazados (Moreva et al., 2014), que ilustra la idea sin probar que sea la que rige el universo. Alain Connes y Carlo Rovelli propusieron en 1994 la **hipótesis del tiempo térmico**: en un sistema generalmente covariante, el flujo temporal que experimentan los observadores está determinado por el estado estadístico del sistema, de modo que el tiempo tendría un origen termodinámico (Connes y Rovelli, 1994). Julian Barbour defendió que el tiempo no existe y que solo hay configuraciones instantáneas (Barbour, 1999).

El problema del tiempo no es un tecnicismo: obliga a preguntarse qué es lo que mide un reloj cuando no hay un tiempo externo en el que situarlo. En el capítulo 50 se propondrá que la respuesta exige distinguir funciones del tiempo que la física clásica había mantenido unidas.

Atelier Velázquez

33.5 Qué significa buscar una teoría de gravedad cuántica

Una teoría cuántica de la gravedad debería satisfacer varias condiciones. Debe ser matemáticamente consistente. Debe reproducir la relatividad general en el límite de bajas energías y la teoría cuántica de campos en el límite de gravedad despreciable. Debe dar sentido a las situaciones en que la relatividad general predice singularidades. Debe explicar la entropía de los agujeros negros. Y, para ser una teoría física y no solo matemática, debe hacer alguna predicción contrastable.

La última condición es la más difícil. Ningún acelerador alcanzará la escala de Planck. Las vías de contrastación son indirectas. Algunas teorías predicen que la velocidad de la luz depende ligeramente de su energía, efecto que se acumularía en fotones que viajan miles de millones de años; las observaciones del estallido de rayos gamma GRB 090510 mostraron que los fotones de distintas energías llegaron juntos y excluyeron esa dependencia lineal hasta energías superiores a la de Planck (Abdo et al., 2009). Se han propuesto experimentos de mesa para comprobar si la gravedad puede entrelazar dos masas en superposición, lo que mostraría que el campo gravitatorio tiene propiedades cuánticas (Bose et al., 2017; Marletto y Vedral, 2017); no se han realizado todavía. La cosmología del universo temprano, las ondas gravitacionales primordiales y las posibles desviaciones en la relajación de los agujeros negros fusionados son otras vías. Ninguna ha producido hasta ahora evidencia a favor de un programa concreto.

Atelier Velázquez

Capítulo 34. Teoría de cuerdas

34.1 De los hadrones a la gravedad

La teoría de cuerdas no nació como teoría de la gravedad. En 1968, Gabriele Veneziano, joven físico en el CERN, buscaba una fórmula para las amplitudes de dispersión de los hadrones que satisficiera ciertas propiedades de simetría, y encontró que la función beta de Euler, conocida desde el siglo XVIII, las cumplía (Veneziano, 1968). En 1969–1970, Yoichiro Nambu, Holger Bech Nielsen y Leonard Susskind mostraron de manera independiente que la fórmula de Veneziano describía la dispersión de objetos extensos unidimensionales, cuerdas vibrantes. La acción de una cuerda relativista, formulada por Nambu y Tetsuo Goto, es proporcional al área de la superficie que la cuerda barre en el espaciotiempo, su **hoja de mundo**:

$$S = -T \int dA,$$

donde T es la tensión de la cuerda. Es la generalización natural de la acción de una partícula, proporcional a la longitud de su línea de universo.

Atelier Velázquez

La teoría tenía rasgos extraños. Solo era consistente en un espaciotiempo de 26 dimensiones; incluía un taquión, una partícula con masa al cuadrado negativa que indicaba una inestabilidad; y predecía una partícula sin masa de espín 2 que no aparecía entre los hadrones. Pierre Ramond, André Neveu y John Schwarz incorporaron en 1971 fermiones, lo que redujo la dimensión crítica a diez. Pero en 1973 la cromodinámica cuántica explicó con éxito la interacción fuerte, y las cuerdas quedaron abandonadas por casi todos.

En 1974, Joël Scherk y John Schwarz, y de manera independiente Tamiaki Yoneya, propusieron invertir la interpretación: la partícula de espín 2 sin masa que sobraba en la teoría hadrónica tenía exactamente las propiedades del gravitón. La teoría de cuerdas podía ser una teoría cuántica de la gravedad, con una tensión correspondiente a la escala de Planck (Scherk y Schwarz, 1974). La propuesta interesó a muy pocos durante una década.

34.2 La primera revolución

En 1984, Michael Green y John Schwarz mostraron que en una de las teorías de supercuerdas, con grupo gauge $SO(32)$, ciertas anomalías cuánticas que la habrían vuelto inconsistente se can-

celaban exactamente (Green y Schwarz, 1984). El resultado convenció a muchos de que la teoría de cuerdas era un candidato serio a teoría unificada. En 1985, David Gross, Jeffrey Harvey, Emil Martinec y Ryan Rohm construyeron la cuerda heterótica, y Philip Candelas, Gary Horowitz, Andrew Strominger y Edward Witten mostraron cómo compactificar las seis dimensiones adicionales en espacios de Calabi-Yau para obtener teorías en cuatro dimensiones con estructuras parecidas a las del Modelo Estándar (Candelas et al., 1985). Se conocían cinco teorías de supercuerdas consistentes: tipo I, tipo IIA, tipo IIB y dos heteróticas.

34.3 Cuerdas, modos y dimensiones

En la teoría, los objetos fundamentales son cuerdas, abiertas (con dos extremos) o cerradas (formando un lazo), con una longitud característica del orden de la longitud de Planck. Cada modo de vibración de la cuerda corresponde, a escalas mucho mayores, a una partícula con cierta masa y espín. Los modos sin masa de las cuerdas cerradas incluyen el gravitón; los de las abiertas, bosones gauge. Los modos excitados tienen masas del orden de la masa de Planck. La teoría contiene así, en principio, todas las partículas y todas las interacciones como manifestaciones de un solo tipo de objeto.

Atelier Velázquez

Las teorías de supercuerdas requieren **supersimetría**, una simetría que relaciona bosones y fermiones, propuesta independientemente de las cuerdas en la década de 1970 por Yuri Golfand, Evgeny Likhtman, Julius Wess y Bruno Zumino. Si la supersimetría existiera a escalas de energía accesibles, cada partícula conocida tendría un compañero supersimétrico. Requieren también **dimensiones adicionales**. La idea de que el espacio tenga más de tres dimensiones, ocultas por ser muy pequeñas, procede de Theodor Kaluza, que en 1921 mostró que la relatividad general en cinco dimensiones contiene el electromagnetismo, y de Oskar Klein, que en 1926 propuso que la quinta dimensión es un círculo minúsculo. En la teoría de cuerdas, las seis dimensiones adicionales se **compactifican** en una variedad de forma determinada, y la forma de esa variedad fija la física observable en cuatro dimensiones: las partículas, sus masas, sus interacciones.

34.4 D-branas y dualidades

En 1995, Joseph Polchinski mostró que la teoría de cuerdas contiene, además de cuerdas, objetos extensos de varias dimensiones sobre los que pueden terminar las cuerdas abiertas, las **D-branas**, y que son fuentes de ciertos campos de la teoría (Polchinski, 1995). Las D-branas permitieron

calcular la entropía de agujeros negros, como se vio en el capítulo 31, y construir modelos en los que nuestro universo de cuatro dimensiones sería una brana dentro de un espacio de más dimensiones.

Las **dualidades** mostraron que teorías aparentemente distintas son equivalentes. La dualidad T establece que una cuerda en un círculo de radio R es físicamente indistinguible de una cuerda en un círculo de radio α'/R, donde α' es el cuadrado de la longitud de la cuerda: por debajo de cierta longitud, el concepto mismo de distancia pierde su significado ordinario. La dualidad S relaciona una teoría con acoplamiento fuerte con otra con acoplamiento débil, lo que permite calcular en regímenes antes inaccesibles.

34.5 El paisaje

La teoría de cuerdas tiene, en principio, un único parámetro, la tensión de la cuerda. Pero el número de maneras de compactificar las dimensiones adicionales, con distintos flujos de campos que las estabilizan, es inmenso. Raphael Bousso y Joseph Polchinski mostraron en 2000 que la teoría podría admitir un número enorme de vacíos con distintos valores de la constante cosmológica (Bousso y Polchinski, 2000), y Shamit Kachru, Renata Kallosh, Andrei Linde y Sandip Trivedi propusieron en 2003 un mecanismo para construir vacíos con constante cosmológica positiva (Kachru et al., 2003). Las estimaciones del número de vacíos llegaron a cifras como 10^{500} (Douglas, 2003). Leonard Susskind llamó a ese conjunto el **paisaje** de la teoría de cuerdas.

Atelier Velázquez

Si existe un paisaje así y la inflación eterna puebla sus vacíos, los valores de las constantes de la naturaleza podrían variar de una región del universo a otra, y los que observamos serían los compatibles con la existencia de observadores. Steven Weinberg había argumentado en 1987 que, si la constante cosmológica pudiera tomar valores distintos en distintas regiones, solo en las regiones con un valor pequeño se formarían galaxias, y estimó así una cota superior para el valor observable, del orden del que se mediría once años después (Weinberg, 1987). El razonamiento antrópico es para unos la única explicación posible de las constantes; para otros, una renuncia a la explicación.

Cumrun Vafa propuso en 2005 que muchas teorías efectivas aparentemente consistentes no pueden obtenerse de la teoría de cuerdas y forman un «pantano» (*swampland*). Algunas de las conjeturas que delimitan el pantano sugieren que los vacíos con constante cosmológica positiva y

estable podrían no existir en la teoría, lo que, si fuera cierto, la pondría en tensión con la observación de la aceleración cósmica, salvo que la energía oscura varíe con el tiempo (Obied et al., 2018). Los resultados de DESI examinados en el capítulo 28 han reavivado la discusión.

34.6 Problemas experimentales

El estatuto empírico de la teoría de cuerdas es el problema central. No ha hecho ninguna predicción contrastada que la distinga de otras teorías. La supersimetría a escalas de energía de pocos TeV, que muchos esperaban encontrar en el LHC, no ha aparecido. Las dimensiones adicionales grandes, que algunos modelos proponían para resolver el problema de la jerarquía, han sido acotadas por experimentos que miden la gravedad a distancias inferiores a una décima de milímetro: la ley del inverso del cuadrado se cumple hasta unos 50 micrómetros (Lee et al., 2020). La teoría es compatible con estas ausencias, porque la escala de la supersimetría y el tamaño de las dimensiones adicionales no están fijados.

El debate sobre la cientificidad de la teoría se intensificó a partir de 2006 con libros críticos de Lee Smolin y Peter Woit (Smolin, 2006; Woit, 2006). Richard Dawid propuso que existen formas de confirmación no empírica —la ausencia de alternativas, la unificación inesperada de resultados, la continuidad con programas exitosos— que justifican la confianza en la teoría (Dawid, 2013). George Ellis y Joseph Silk respondieron que debilitar el requisito de contrastación empírica pone en peligro la integridad de la física (Ellis y Silk, 2014).

Lo que no puede negarse es su fecundidad matemática. La simetría especular entre variedades de Calabi-Yau, descubierta en el contexto de la teoría de cuerdas, permitió en 1991 a Candelas y sus colaboradores calcular el número de curvas racionales en una variedad quíntica, un problema de geometría enumerativa que los matemáticos no habían resuelto. Witten recibió en 1990 la medalla Fields, el máximo galardón matemático. Pero la fecundidad matemática es una relación entre la teoría y las matemáticas, no entre la teoría y el mundo físico. En términos de los géneros de materialidad, la teoría de cuerdas ha producido abundantes resultados en el tercer género y ninguno todavía que se cierre sobre el primero.

Atelier Velázquez

Capítulo 35. Teoría M y holografía

35.1 La segunda revolución

En marzo de 1995, en un congreso en la Universidad del Sur de California, Edward Witten presentó un conjunto de argumentos según los cuales las cinco teorías de supercuerdas y la supergravedad en once dimensiones son límites distintos de una única teoría, que llamó **teoría M** (Witten, 1995). La letra quedó deliberadamente indefinida: membrana, matriz, misterio. La red de dualidades que conectaba las teorías mostró que no había cinco candidatas a teoría unificada, sino una. Pero la teoría M no tiene, todavía, una formulación completa: se conocen sus límites, no su forma general.

35.2 Maldacena y AdS/CFT

En noviembre de 1997, Juan Maldacena, entonces en Harvard, propuso una correspondencia que se convirtió en el resultado más citado de la física teórica de las últimas décadas (Maldacena, 1998). Según la conjetura, la teoría de cuerdas de tipo IIB en un espaciotiempo de cinco dimensiones con curvatura negativa constante —el espacio anti-de Sitter, AdS— multiplicado por una esfera de cinco dimensiones es exactamente equivalente a una teoría cuántica de campos sin gravedad, la teoría de Yang-Mills supersimétrica con cuatro supersimetrías, que vive en la frontera de cuatro dimensiones de ese espacio y tiene simetría conforme (CFT). Steven Gubser, Igor Klebanov y Alexander Polyakov, y Witten, establecieron en 1998 el diccionario que traduce las magnitudes de un lado a las del otro (Gubser et al., 1998; Witten, 1998).

La correspondencia realiza el **principio holográfico** propuesto por ’t Hooft y Susskind: toda la física de un volumen con gravedad está codificada en una teoría sin gravedad en su frontera, de una dimensión menos, como una imagen tridimensional está codificada en la superficie bidimensional de un holograma. Implica que la evaporación de los agujeros negros en AdS es unitaria, porque la teoría de la frontera lo es.

35.3 Resultados

La correspondencia es una dualidad entre acoplamientos fuertes y débiles: cuando la teoría de campos de la frontera está fuertemente acoplada y es intratable, la gravedad del interior es débil

Atelier Velázquez

y calculable, y viceversa. Esto la convirtió en una herramienta para estudiar sistemas fuertemente acoplados. En 2005, Pavel Kovtun, Dam Son y Andrei Starinets calcularon con ella que la razón entre la viscosidad y la densidad de entropía de una amplia clase de fluidos fuertemente acoplados vale $\hbar/(4\pi k_B)$ (Kovtun et al., 2005). El plasma de quarks y gluones producido en colisiones de iones pesados en los aceleradores RHIC y LHC tiene una viscosidad por unidad de entropía cercana a ese valor, mucho menor que la de cualquier fluido conocido. La coincidencia es sugerente, aunque la teoría de campos del lado holográfico no es la cromodinámica cuántica.

En 2006, Shinsei Ryu y Tadashi Takayanagi mostraron que la entropía de entrelazamiento de una región de la teoría de la frontera es igual al área de una superficie mínima en el interior, dividida por $4G\hbar$: una generalización de la fórmula de Bekenstein-Hawking que conecta directamente el entrelazamiento cuántico con la geometría (Ryu y Takayanagi, 2006). Este resultado es la base de los programas que, como se verá en el capítulo 37, intentan derivar la geometría del entrelazamiento.

Atelier Velázquez

35.4 Problemas de extrapolación

La correspondencia AdS/CFT es una conjetura, no un teorema, aunque ha superado miles de comprobaciones en los casos en que ambos lados pueden calcularse. Su campo de validez establecido tiene límites precisos. Se ha formulado para espaciotiempos con constante cosmológica negativa, mientras que el universo observado tiene una constante cosmológica positiva, con una geometría asintótica de tipo de Sitter. La teoría de campos de la frontera, en el caso mejor estudiado, tiene supersimetría y simetría conforme, propiedades que la física de partículas real no tiene. Hay propuestas de holografía para espacios de Sitter y para espacios planos, pero ninguna está desarrollada con un grado comparable de control.

Es necesario distinguir, por tanto, entre una correspondencia matemáticamente bien establecida en modelos específicos y afirmaciones universales como que «el universo es un holograma» o que «el espacio es una ilusión». Las primeras son resultados de física matemática con un alto grado de cierre en su dominio; las segundas son extrapolaciones a un dominio en el que no se ha establecido la correspondencia. Lo que la holografía muestra es que, en ciertas teorías, una descripción con gravedad y una sin ella pueden ser equivalentes. Que nuestro universo admita una descripción así es una hipótesis abierta.

Capítulo 36. Programas alternativos

36.1 Gravedad cuántica de bucles

En 1986, Abhay Ashtekar reformuló la relatividad general en términos de nuevas variables, una conexión y un campo de tríadas, que hacían que las ecuaciones de la cuantización canónica se parecieran a las de las teorías de Yang-Mills (Ashtekar, 1986). Ted Jacobson y Lee Smolin encontraron en 1988 soluciones de la ecuación de Wheeler-DeWitt asociadas a lazos cerrados, y Carlo Rovelli y Smolin construyeron a partir de ellas la representación de lazos de la gravedad cuántica (Rovelli y Smolin, 1990). En 1995 mostraron que los operadores que miden el área y el volumen de una región tienen espectros discretos (Rovelli y Smolin, 1995a). El área de una superficie atravesada por líneas que llevan valores j de espín es

$$A = 8\pi\gamma\,\ell_P^2 \sum_i \sqrt{j_i(j_i+1)},$$

donde γ es un parámetro libre de la teoría, el parámetro de Barbero-Immirzi. Los estados de la geometría se describen mediante **redes de espín**, grafos con espines en las aristas, un concepto que Roger Penrose había introducido en 1971 con otros fines (Rovelli y Smolin, 1995b). La dinámica se formula mediante **espumas de espín**, que describen la evolución de las redes como superficies.

La gravedad cuántica de bucles es una cuantización no perturbativa e independiente del fondo: no presupone una geometría de fondo, sino que construye la geometría a partir de sus estados cuánticos. Su aplicación a modelos cosmológicos simplificados, la **cosmología cuántica de bucles**, iniciada por Martin Bojowald en 2001, produjo un resultado notable: la singularidad inicial es sustituida por un **rebote**, en el que un universo en contracción alcanza una densidad máxima del orden de la de Planck y empieza a expandirse (Ashtekar et al., 2006). Las dificultades del programa son la recuperación de la relatividad general como límite semiclásico, la ambigüedad en la definición de la dinámica y la falta de predicciones contrastables; los cálculos de efectos del rebote sobre el fondo cósmico dependen de supuestos sobre el estado cuántico inicial.

Atelier Velázquez

36.2 Seguridad asintótica

Steven Weinberg propuso en 1979 una posibilidad diferente: que la gravedad cuántica sea una teoría de campos ordinaria, no renormalizable en el sentido perturbativo pero bien definida a todas las energías porque sus constantes de acoplamiento tienden a un **punto fijo** del grupo de renormalización en el límite de altas energías (Weinberg, 1979b). Si el punto fijo existe y tiene pocas direcciones atractivas, la teoría tendría un número finito de parámetros y sería predictiva. Martin Reuter desarrolló en 1998 un método para calcular el flujo del grupo de renormalización en gravedad mediante una ecuación funcional (Reuter, 1998), y los cálculos posteriores, con aproximaciones cada vez más refinadas, han encontrado indicios consistentes de la existencia del punto fijo.

En 2009, antes del descubrimiento del bosón de Higgs, Mikhail Shaposhnikov y Christof Wetterich argumentaron que si la gravedad es asintóticamente segura y no hay física nueva entre la escala electrodébil y la de Planck, la masa del Higgs debería ser de unos 126 GeV, con una incertidumbre de pocos GeV (Shaposhnikov y Wetterich, 2010). La masa medida es 125.2 GeV. El acierto es notable, aunque depende de supuestos fuertes. Las dificultades del programa son la dependencia de los resultados respecto de las aproximaciones utilizadas, la formulación en espaciotiempos de signatura lorentziana y la cuestión de la unitariedad.

Atelier Velázquez

36.3 Conjuntos causales

Rafael Sorkin y sus colaboradores propusieron en 1987 que el espaciotiempo es fundamentalmente un **conjunto causal**: un conjunto discreto de elementos con una relación de orden parcial que representa la causalidad (Bombelli et al., 1987). La idea se apoya en un resultado de la relatividad: la estructura causal de un espaciotiempo determina su geometría salvo un factor de escala local, y ese factor puede obtenerse contando elementos si el espaciotiempo es discreto. El lema del programa es que el orden más el número da la geometría. Si los elementos se distribuyen al azar en el espaciotiempo, como un proceso de Poisson, la discreción no viola la invariancia de Lorentz, a diferencia de una red regular.

El programa hizo una predicción con antelación. Sorkin argumentó desde principios de la década de 1990 que, si el número de elementos fluctúa como en un proceso de Poisson, la constante cosmológica debería fluctuar con una magnitud del orden del inverso de la raíz cuadrada

del volumen del universo, lo que da un valor del orden de la densidad crítica actual (Ahmed et al., 2004). La predicción se refiere al orden de magnitud, y su derivación depende de supuestos sobre la relación entre la constante cosmológica y el volumen. La principal dificultad del programa es formular una dinámica cuántica que produzca conjuntos causales parecidos a espaciotiempos continuos de cuatro dimensiones.

36.4 Triangulaciones dinámicas causales

Jan Ambjørn, Jerzy Jurkiewicz y Renate Loll desarrollaron desde 1998 un método para calcular la integral de camino de la gravedad aproximando el espaciotiempo por un mosaico de símplices cuadridimensionales, de los cuales se suman todas las configuraciones posibles con una regla que preserva la estructura causal (Ambjørn y Loll, 1998). Las simulaciones por computadora mostraron en 2004 que, en una fase de los parámetros, emerge dinámicamente un universo de cuatro dimensiones a gran escala cuya forma se aproxima a la de un espaciotiempo de Sitter (Ambjørn et al., 2004). En 2005 encontraron que la **dimensión espectral** —la dimensión efectiva que percibiría un proceso de difusión— disminuye de cuatro a dos a escalas cercanas a la de Planck (Ambjørn et al., 2005). La misma reducción dimensional aparece en la seguridad asintótica, en la gravedad cuántica de bucles y en algunos modelos de conjuntos causales, lo que sugiere un rasgo genérico de la gravedad cuántica. La dificultad es demostrar la existencia de un límite continuo.

Atelier Velázquez

36.5 Cosmología cuántica

La ecuación de Wheeler-DeWitt, restringida a modelos con pocos grados de libertad —por ejemplo, un universo homogéneo descrito solo por su factor de escala y un campo—, da lugar a la **cosmología cuántica**. James Hartle y Stephen Hawking propusieron en 1983 una condición de contorno para la función de onda del universo, la **propuesta sin frontera**: la función de onda se define mediante una integral de camino sobre geometrías euclídeas compactas, sin frontera inicial, de modo que la pregunta por lo que había antes del comienzo carece de sentido, como la pregunta por lo que está al norte del polo norte (Hartle y Hawking, 1983). Alexander Vilenkin propuso en 1982 una condición alternativa, la creación del universo por efecto túnel «desde la nada» (Vilenkin, 1982). En ambos casos, «nada» designa la ausencia de geometría clásica, no la ausencia de leyes físicas, de un espacio de estados o de una función de onda; presentar estas propuestas como explicaciones de la creación del universo a partir de la nada en sentido absoluto es

una extrapolación. En 2017, Job Feldbrugge, Jean-Luc Lehners y Neil Turok argumentaron, con una definición más rigurosa de la integral de camino, que ambas propuestas producen fluctuaciones inestables (Feldbrugge et al., 2017); la discusión continúa.

Tabla 11. Programas de gravedad cuántica: comparación

Programa	Exponentes principales	Idea central	Resultado destacado	Contacto con la observación	Dificultad principal
Teoría de cuerdas / M	Veneziano, Nambu, Scherk, Schwarz, Green, Witten, Polchinski, Maldacena	Objetos extensos; supersimetría; dimensiones adicionales	Entropía de agujeros negros extremos; AdS/CFT	Ninguno directo; no hay supersimetría en el LHC	Paisaje de vacíos; falta de predicciones
Gravedad cuántica de bucles	Ashtekar, Rovelli, Smolin	Cuantización canónica independiente del fondo	Espectros discretos de área y volumen; rebote cosmológico	Propuestas para el fondo cósmico, dependientes de supuestos	Límite semiclásico; dinámica
Seguridad asintótica	Weinberg, Reuter	Punto fijo ultravioleta del grupo de renormalización	Masa del Higgs ~126 GeV (2009)	Indirecto	Dependencia de truncamientos
Conjuntos causales	Sorkin, Bombelli, Lee, Meyer	Espaciotiempo como orden parcial discreto	Orden de magnitud de Λ	Fluctuaciones de Λ	Dinámica cuántica
Triangulaciones dinámicas causales	Ambjørn, Jurkiewicz, Loll	Integral de camino discretizada causal	Emergencia de un universo 4D; dimensión espectral 2	Ninguno directo	Límite continuo
Cosmología cuántica canónica	Wheeler, DeWitt, Hartle, Hawking, Vilenkin	Función de onda del universo	Propuestas sin frontera y de efecto túnel	Condiciones iniciales de la inflación	Problema del tiempo; definición de la integral

Nota. Elaboración propia a partir de las fuentes citadas en los capítulos 33–36.

Atelier Velázquez

Capítulo 37. ¿Es fundamental el espaciotiempo?

37.1 Indicios de emergencia

Varios resultados independientes sugieren que el espaciotiempo podría no ser una estructura fundamental, sino una descripción efectiva de algo más básico, del mismo modo que la hidrodinámica es una descripción efectiva de la dinámica molecular.

Ted Jacobson mostró en 1995 que las ecuaciones de Einstein pueden derivarse suponiendo que la relación termodinámica $\delta Q = T\, dS$ se cumple en todos los horizontes locales, con la entropía proporcional al área y la temperatura de Unruh (Jacobson, 1995). Si es así, las ecuaciones de campo serían una ecuación de estado, como la de los gases ideales, que no se cuantiza porque no describe grados de libertad fundamentales. Erik Verlinde propuso en 2011 que la gravedad es una fuerza entrópica (Verlinde, 2011), y en 2017 extendió la propuesta para obtener efectos parecidos a los de la materia oscura (Verlinde, 2017); las contrastaciones con observaciones de lentes débiles han dado resultados mixtos.

Atelier Velázquez

Mark Van Raamsdonk argumentó en 2010, a partir de la fórmula de Ryu-Takayanagi, que en la correspondencia holográfica el entrelazamiento entre partes de la teoría de la frontera es lo que mantiene conectado el espacio del interior: si se reduce el entrelazamiento entre dos mitades, el espacio correspondiente se estira y se separa (Van Raamsdonk, 2010). Maldacena y Susskind propusieron en 2013 la conjetura ER=EPR, según la cual dos sistemas entrelazados están conectados por un puente de Einstein-Rosen, un agujero de gusano no atravesable (Maldacena y Susskind, 2013). Brian Swingle mostró en 2012 que ciertas redes tensoriales usadas para describir estados entrelazados de sistemas cuánticos tienen una geometría que recuerda a la del espacio anti-de Sitter (Swingle, 2012), y Ahmed Almheiri, Xi Dong y Daniel Harlow mostraron en 2015 que la reconstrucción del interior a partir de la frontera tiene la estructura de un código cuántico de corrección de errores (Almheiri et al., 2015).

La reducción de la dimensión espectral a escalas pequeñas, encontrada en varios programas, apunta en la misma dirección: el espaciotiempo de cuatro dimensiones podría ser una propiedad de gran escala.

37.2 Controversias

Estos resultados han dado lugar a afirmaciones como «el espacio está hecho de entrelazamiento» o «todo es información». Conviene examinarlas con cuidado.

En primer lugar, casi todos los resultados se han obtenido en contextos holográficos con constante cosmológica negativa o en modelos simplificados. Ninguna teoría ha derivado el espaciotiempo de cuatro dimensiones, con constante cosmológica positiva y con la materia del Modelo Estándar, a partir de grados de libertad no espaciotemporales.

En segundo lugar, el entrelazamiento es una propiedad de estados cuánticos de sistemas que ya tienen una estructura de partes, y en los cálculos holográficos esa estructura procede de la teoría de la frontera, que vive en un espaciotiempo. La emergencia del interior no es emergencia del espaciotiempo a partir de nada espaciotemporal.

En tercer lugar, Nick Huggett y Christian Wüthrich han señalado un problema de coherencia empírica: si una teoría niega que el espacio y el tiempo existan fundamentalmente, debe explicar cómo pueden existir las observaciones, que son acontecimientos localizados en el espacio y el tiempo, y que constituyen la evidencia de la propia teoría (Huggett y Wüthrich, 2013). La teoría debe recuperar el espaciotiempo no solo como límite matemático, sino como el escenario en el que ocurren las operaciones que la confirman.

Atelier Velázquez

Un episodio reciente ilustra el riesgo de sobreinterpretación. En 2022, un grupo de investigadores publicó en *Nature* la simulación, en un procesador cuántico de nueve cúbits, de un protocolo de teleportación cuya dinámica, en un modelo holográfico simplificado, corresponde a la de un mensaje que atraviesa un agujero de gusano (Jafferis et al., 2022). La prensa anunció la creación de un agujero de gusano en un ordenador cuántico. El experimento simulaba un sistema cuántico cuyo dual holográfico, en ciertas aproximaciones, tiene esa interpretación; no creó ninguna geometría. Un análisis posterior argumentó además que el modelo simplificado utilizado no reproducía de manera robusta las propiedades que justificaban la interpretación gravitatoria (Kobrin et al., 2023). El caso muestra cómo una metáfora, legítima en el contexto técnico de una dualidad, se convierte en afirmación ontológica en el tránsito a la divulgación.

37.3 Lo que puede afirmarse

El estado de la cuestión puede resumirse en cuatro afirmaciones. Es un resultado establecido que en la relatividad general la geometría es dinámica y no un escenario fijo. Es un resultado establecido en contextos holográficos que existen relaciones cuantitativas precisas entre entrelazamiento y geometría. Es una hipótesis de investigación, apoyada por varios indicios convergentes, que el espaciotiempo de nuestro universo sea una descripción efectiva de grados de libertad más fundamentales. Y es una extrapolación sin apoyo suficiente afirmar que el universo «es» información o que el espacio «es» una ilusión. Las metáforas informacionales pueden orientar la investigación; no sustituyen a una teoría con identidades contrastables.

Atelier Velázquez

Parte IX. De las ecuaciones a las máquinas

Atelier Velázquez

Capítulo 38. Cómo se construye un cohete

38.1 La ecuación de Tsiolkovski

Un cohete avanza expulsando masa hacia atrás. No empuja contra el aire, como a veces se cree: funciona mejor en el vacío. Su principio es la conservación del momento, consecuencia, según el teorema de Noether, de la homogeneidad del espacio. Si un cohete de masa m expulsa una pequeña masa dm de gases con velocidad v_e respecto de sí mismo, su velocidad aumenta en dv de modo que $m\,dv = -v_e\,dm$. Integrando desde la masa inicial m_0 hasta la final m_f:

$$\Delta v = v_e \ln \frac{m_0}{m_f}.$$

La ecuación fue publicada en 1903 por Konstantín Tsiolkovski (1857–1935), maestro de escuela en Kaluga, en un artículo sobre la exploración del espacio mediante aparatos de reacción (Tsiolkovski, 1903). La velocidad de los gases se expresa a menudo mediante el **impulso específico** $I_{sp} = v_e / g_0$, en segundos, con $g_0 = 9.80665\ \mathrm{m\,s^{-2}}$.

Ejemplo. Un motor de hidrógeno y oxígeno líquidos tiene en el vacío un impulso específico de unos 450 s, de modo que $v_e \approx 4\,410\ \mathrm{m\,s^{-1}}$. Si el cohete lleno pesa ocho veces lo que pesa vacío, $\Delta v = 4\,410 \times \ln 8 \approx 9\,180\ \mathrm{m\,s^{-1}}$. Para alcanzar una órbita baja hay que llegar a unos 7.8 km/s, pero las pérdidas por la gravedad durante el ascenso y por la resistencia del aire elevan el presupuesto necesario a unos 9.3–9.5 km/s. Un cohete de una sola etapa apenas puede llegar, y solo si casi toda su masa es combustible. El logaritmo es implacable: duplicar el Δv exige elevar al cuadrado la razón de masas. Tsiolkovski propuso la solución: los «trenes de cohetes», hoy llamados cohetes de varias etapas, que desprenden los depósitos vacíos y reinician la ecuación con una masa menor.

38.2 Termodinámica y fluidos

La velocidad de los gases de escape procede de la termodinámica de la combustión y de la mecánica de fluidos de la tobera. En la cámara de combustión, los propelentes reaccionan y producen gases a unos 3 500 K y presiones de decenas o cientos de atmósferas. La tobera, de forma convergente-divergente —la tobera de Laval, inventada por el ingeniero sueco Gustaf de Laval

Atelier Velázquez

en la década de 1880 para turbinas de vapor—, acelera los gases hasta velocidades supersónicas convirtiendo su entalpía en energía cinética. En el caso ideal, la velocidad de salida es

$$v_e = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}\,\frac{R\,T_c}{\mathcal{M}}\left[1 - \left(\frac{p_e}{p_c}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right]},$$

donde T_c es la temperatura de la cámara, $\mathcal{M}$ la masa molar de los gases, γ la razón de calores específicos y p_e/p_c la razón entre la presión de salida y la de la cámara. La fórmula explica por qué el hidrógeno es un combustible excelente: los gases de su combustión, sobre todo vapor de agua y algo de hidrógeno sin quemar, tienen una masa molar baja. Es la eficiencia de Carnot del capítulo 10, aplicada a una máquina que convierte calor en energía cinética de un chorro.

Las paredes de la cámara y la tobera no podrían soportar esas temperaturas si no se refrigeraran. En la refrigeración regenerativa, el propio combustible criogénico circula por canales en las paredes antes de inyectarse en la cámara. La ciencia de materiales —aleaciones de níquel y cobre, cerámicas, compuestos— y la transferencia de calor son tan decisivas como la mecánica.

Atelier Velázquez

38.3 Mecánica orbital

Una vez en el espacio, el movimiento de una nave obedece la mecánica de Newton y Kepler. La velocidad en cada punto de una órbita kepleriana de semieje mayor a alrededor de un cuerpo de masa M está dada por la ecuación de la fuerza viva:

$$v^2 = GM\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right).$$

El método más económico para pasar de una órbita circular a otra es la **transferencia de Hohmann**, propuesta por el ingeniero alemán Walter Hohmann en 1925: una elipse tangente a ambas órbitas. *Ejemplo.* Para ir de la órbita de la Tierra (1 UA) a la de Marte (1.524 UA) alrededor del Sol, la elipse de transferencia tiene un semieje mayor de 1.262 UA. Con la ecuación de la fuerza viva, el impulso inicial necesario, respecto de la velocidad orbital de la Tierra, es de unos 2.9 km/s, y el de llegada para igualar la velocidad de Marte, de unos 2.6 km/s. El viaje dura medio periodo de la elipse: según la tercera ley de Kepler, $1/2 \times 1.262^{3/2}$ años, unos 259 días. Por eso las misiones a Marte parten cada 26 meses, cuando la posición relativa de los planetas es la adecuada.

Las sondas Voyager, lanzadas en 1977, aprovecharon una alineación de los planetas exteriores que se repite cada 175 años para realizar **asistencias gravitatorias**: al pasar cerca de un planeta, la nave intercambia momento con él y gana velocidad respecto del Sol, como una pelota que rebota en un tren en movimiento.

38.4 Control y computación

Un cohete es un sistema inestable que debe ser estabilizado activamente: su empuje se orienta mediante toberas basculantes controladas por computadoras que reciben datos de giróscopos y acelerómetros. La navegación del programa Apolo utilizó una de las primeras computadoras de circuitos integrados y un algoritmo de estimación desarrollado por Rudolf Kálmán en 1960, el filtro de Kalman, que combina predicciones del modelo dinámico con medidas ruidosas para obtener la mejor estimación posible del estado. El filtro de Kalman, hoy omnipresente en navegación, robótica y economía, es una aplicación de la estadística bayesiana del capítulo 23 a sistemas que evolucionan en el tiempo.

Atelier Velázquez

38.5 Historia documentada

Robert Goddard lanzó el 16 de marzo de 1926, en Auburn, Massachusetts, el primer cohete de combustible líquido, que alcanzó doce metros de altura en dos segundos y medio. Hermann Oberth publicó en 1923 un tratado sobre cohetes para viajes interplanetarios. El primer cohete en alcanzar el espacio fue un arma: el V-2 alemán, desarrollado bajo la dirección de Wernher von Braun con trabajo forzado de prisioneros de campos de concentración. Tras la guerra, los programas soviético y estadounidense, dirigidos por Serguéi Koroliov y por el propio von Braun, pusieron en órbita el Sputnik el 4 de octubre de 1957 y llevaron a Yuri Gagarin al espacio el 12 de abril de 1961. El Saturno V, que llevó a la Luna a la tripulación del Apolo 11 en julio de 1969, tenía en su primera etapa cinco motores F-1 de queroseno y oxígeno líquido con un empuje total de unos 34 meganewtons. Desde diciembre de 2015, las primeras etapas de los cohetes Falcon 9 regresan y aterrizan verticalmente para ser reutilizadas.

Un cohete muestra la symploké de las teorías físicas con particular claridad: mecánica newtoniana y kepleriana, termodinámica, mecánica de fluidos, química de la combustión, ciencia de materiales, teoría del control, estadística y computación. Ninguna es prescindible, y ninguna se deduce de las demás.

Capítulo 39. Cómo funciona un acelerador

39.1 Acelerar y curvar

Una partícula cargada se acelera con campos eléctricos y se curva con campos magnéticos, según la fuerza de Lorentz del capítulo 13. En un campo magnético uniforme B perpendicular a su velocidad, una partícula de carga q y momento p describe un círculo de radio

$$\rho = \frac{p}{qB}.$$

El producto $B\rho$, la **rigidez magnética**, indica qué campo hace falta para curvar un haz de cierta energía en un anillo de cierto radio. Ernest Lawrence construyó en 1931 el primer ciclotrón, en el que las partículas giran en espiral entre dos electrodos en forma de D, recibiendo un impulso eléctrico en cada media vuelta. El método funciona mientras la frecuencia de giro, $f = qB/(2\pi m)$, sea constante; a velocidades relativistas, la masa efectiva aumenta y la sincronía se pierde. Vladímir Veksler en 1944 y Edwin McMillan en 1945 descubrieron el principio de estabilidad de fase que permite construir **sincrotrones**, en los que el campo magnético aumenta a medida que crece la energía para mantener el haz en una órbita de radio fijo. En 1952, Ernest Courant, M. Stanley Livingston y Hartland Snyder inventaron el enfoque fuerte, que alterna imanes que enfocan y desenfocan en direcciones perpendiculares y produce un enfoque neto, de modo análogo a como una combinación de lentes convergentes y divergentes puede formar una imagen (Courant et al., 1952).

Atelier Velázquez

39.2 El LHC

El Gran Colisionador de Hadrones del CERN, en funcionamiento desde 2008, ocupa un túnel de 26.7 km de circunferencia a unos cien metros bajo la frontera franco-suiza. Dos haces de protones circulan en sentidos opuestos en tubos separados y se cruzan en cuatro puntos donde están los grandes detectores. Durante su tercera campaña de funcionamiento, iniciada en 2022, cada haz llevaba protones de 6.8 TeV.

Ejemplo. Un protón de 6.8 TeV tiene un factor de Lorentz $\gamma = E/(m_p c^2) = 6\,800/0.938 \approx 7\,250$. Su velocidad es inferior a la de la luz en una fracción $\approx 1/(2\gamma^2) \approx 9.5 \times 10^{-9}$: unos tres metros por segundo menos que c. Para curvar ese haz en los tramos curvos del anillo,

con un radio de curvatura de unos 2 800 m, la rigidez necesaria es $B\rho = p/e \approx 6.8 \times 10^{12}$ V/$c \approx 22\,700$ T m, de modo que $B \approx 8.1$ T. Los 1 232 imanes dipolares del LHC, de quince metros de longitud cada uno, están diseñados para 8.3 T. Ningún imán convencional alcanza ese campo de manera sostenida; los del LHC son superconductores, con bobinas de niobio-titanio enfriadas a 1.9 K con helio superfluido, más frío que el espacio interestelar.

Los protones se aceleran mediante cavidades de radiofrecuencia superconductoras que oscilan a 400 MHz, y viajan en paquetes de unos cien mil millones de protones; los paquetes se cruzan cada 25 nanosegundos en los puntos de colisión. Para que los protones no choquen con moléculas de gas, los tubos del haz se mantienen en un vacío comparable al de la superficie lunar. La óptica de los haces es una aplicación de la mecánica hamiltoniana del capítulo 9: el teorema de Liouville garantiza que el volumen que ocupa el haz en el espacio de fases, su emitancia, no puede reducirse mediante campos magnéticos.

Un colisionador circular de protones puede alcanzar energías mucho mayores que uno de electrones del mismo tamaño porque una partícula cargada que se curva emite **radiación sincrotrón**, con una potencia proporcional a γ^4/ρ^2. A igual energía, un electrón tiene un factor γ unas 1 836 veces mayor que un protón, y radia unas 10^{13} veces más. El colisionador LEP, que ocupó el mismo túnel con electrones y positrones hasta el año 2000, perdía en cada vuelta una fracción considerable de su energía de 104.5 GeV por haz.

Atelier Velázquez

39.3 Detectores, estadística y teoría

Los detectores ATLAS y CMS son instrumentos del tamaño de edificios, organizados en capas concéntricas. En el centro, detectores de silicio reconstruyen las trayectorias de las partículas cargadas, curvadas por un intenso campo magnético que permite medir su momento. Alrededor, calorímetros electromagnéticos y hadrónicos absorben las partículas y miden su energía. En el exterior, cámaras de muones identifican las únicas partículas cargadas que atraviesan todo el detector. Los neutrinos escapan sin ser detectados y se infieren por el desequilibrio de momento.

En cada cruce de paquetes se producen decenas de colisiones simultáneas. La inmensa mayoría son procesos conocidos. Un sistema de selección en tiempo real, el *trigger*, decide en microsegundos qué sucesos merecen guardarse, y reduce la tasa de cuarenta millones de cruces por

segundo a unos mil sucesos registrados por segundo. Los datos se analizan en la red mundial de computación del LHC, que reúne más de ciento setenta centros en unos cuarenta países.

Un descubrimiento es una afirmación estadística. La convención de la física de partículas exige una significación de cinco desviaciones típicas: la probabilidad de que el fondo produzca por azar un exceso al menos tan grande debe ser inferior a 2.9×10^{-7}. El umbral es severo porque, al buscar una señal en muchos lugares a la vez, la probabilidad de encontrar una fluctuación en alguno de ellos aumenta —el llamado efecto de mirar en otra parte—, y porque la historia está llena de excesos de tres desviaciones típicas que desaparecieron. Los análisis se realizan con frecuencia «a ciegas», sin mirar la región de la señal hasta haber fijado el procedimiento.

Para interpretar los datos, cada colisión simulada se calcula mediante la teoría cuántica de campos —secciones eficaces del Modelo Estándar, funciones de distribución de los partones dentro del protón, modelos de hadronización— y se hace pasar por una simulación detallada del detector. La señal del bosón de Higgs se definió como un exceso sobre esa predicción. Sin la teoría, el dato no significa nada; sin el dato, la teoría no se contrasta.

Atelier Velázquez

39.4 El acelerador como symploké

El acelerador es el ejemplo que en el capítulo inicial sirvió para introducir la symploké, y puede ahora examinarse con detalle. Su diseño requiere el electromagnetismo de Maxwell, la fuerza de Lorentz, la relatividad especial para la dinámica de partículas con $\gamma \approx 7\,000$, la mecánica hamiltoniana para la óptica de haces, la física de la superconductividad y la criogenia, la tecnología del vacío y la ingeniería de radiofrecuencia. Su funcionamiento requiere sistemas de control, computación en tiempo real y metrología. La interpretación de sus resultados requiere la teoría cuántica de campos, la física de las interacciones de partículas con la materia y la estadística. Las conexiones son específicas: la teoría electrodébil no interviene en el diseño de los criostatos, y la metalurgia del niobio-titanio no interviene en la interpretación de las secciones eficaces. Hay dependencias indispensables (sin superconductividad no hay campo de 8 T en un anillo de 27 km), dependencias contingentes (la elección del túnel del LEP condicionó el radio) y diferencias que ninguna explicación totalizante borra: el ingeniero criogénico y el teórico de la QCD trabajan sobre campos distintos con operaciones distintas.

39.5 Ampliación y futuro

Según el calendario aprobado, la tercera campaña del LHC debía concluir a mediados de 2026 para dar paso a una parada prolongada para instalar el **LHC de alta luminosidad**, que deberá aumentar en un factor de cinco a siete la tasa instantánea de colisiones y multiplicar por diez los datos acumulados a lo largo de la década de 2030, con imanes de enfoque de niobio-estaño y nuevas cavidades. En mayo de 2026, el Consejo del CERN actualizó la Estrategia Europea de Física de Partículas, mantuvo la finalización del LHC de alta luminosidad como prioridad de medio plazo y designó como proyecto preferido para el futuro un colisionador circular de electrones y positrones de unos noventa kilómetros, el FCC-ee, concebido como fábrica de bosones de Higgs; la decisión sobre su construcción se prevé para 2028 (CERN, 2026).

Atelier Velázquez

Capítulo 40. Cómo funciona el GPS

40.1 Posición a partir del tiempo

El Sistema de Posicionamiento Global consta de una constelación de unos treinta satélites en órbitas a unos 20 200 km de altura —un radio orbital de unos 26 560 km—, con periodos de casi doce horas, de modo que cada satélite pasa dos veces al día sobre los mismos lugares. Cada satélite lleva relojes atómicos y emite continuamente señales que indican la hora de emisión y los parámetros de su órbita.

Un receptor en la Tierra mide el instante de llegada de cada señal con su propio reloj. Si los relojes del receptor y del satélite estuvieran perfectamente sincronizados, la diferencia entre los instantes de emisión y recepción, multiplicada por la velocidad de la luz, daría la distancia al satélite. Con tres distancias, la posición queda determinada como la intersección de tres esferas. Pero el reloj de un receptor comercial es de cuarzo y tiene un desfase desconocido b. Cada medida da entonces una **pseudodistancia**:

$$\rho_i = |\vec{r}_i - \vec{r}\,| + c\,b,$$

donde $\vec{r}_i$ es la posición conocida del satélite i y $\vec{r}$ la posición desconocida del receptor. Hay cuatro incógnitas —tres coordenadas y el desfase del reloj—, de modo que se necesitan al menos cuatro satélites. El receptor resuelve el sistema de ecuaciones no lineales por aproximaciones sucesivas. El GPS es, en esencia, un sistema de transferencia de tiempo: la posición se obtiene comparando relojes. Un error de un microsegundo en el tiempo produce un error de 300 metros en la distancia.

40.2 Relatividad especial y general

Los relojes de los satélites están sometidos a dos efectos relativistas de signo opuesto, examinados en los capítulos 14 y 17. Por su velocidad orbital, de unos 3.87 km/s, marchan más despacio que los relojes en tierra según la relatividad especial:

$$\frac{\Delta\tau}{\tau}\Big|_{\text{RE}} \approx -\frac{v^2}{2c^2} = -\frac{(3\,874)^2}{2\,(2.998\times 10^8)^2} \approx -8.35\times 10^{-11},$$

Atelier Velázquez

es decir, unos -7.2 microsegundos por día. Por estar en un potencial gravitatorio más alto, marchan más deprisa según la relatividad general:

$$\frac{\Delta\tau}{\tau}\Big|_{\mathrm{RG}} \approx \frac{GM_\oplus}{c^2}\left(\frac{1}{R_\oplus}-\frac{1}{r}\right) = 4.435\times10^{-3}\ \mathrm{m}\times\left(\frac{1}{6.371\times10^{6}}-\frac{1}{2.656\times10^{7}}\right)\mathrm{m}^{-1}$$
$$\approx 5.29\times10^{-10},$$

unos $+45.7$ microsegundos por día. (Se ha despreciado aquí, por simplicidad, el efecto de la rotación terrestre sobre los relojes en tierra.) El efecto neto es de unos **+38.5 microsegundos por día**: los relojes de los satélites adelantan. Si no se corrigiera, el desfase acumulado entre los relojes de los satélites y el tiempo del sistema produciría errores de posición que crecerían del orden de diez kilómetros por día.

La corrección se aplica antes del lanzamiento: la frecuencia nominal de los osciladores de los satélites, 10.23 MHz, se ajusta a 10.229 999 995 43 MHz, una reducción relativa de 4.46×10^{-10}, de modo que, una vez en órbita, los relojes marchan al ritmo correcto vistos desde tierra (Ashby, 2003). Como las órbitas no son perfectamente circulares, queda un efecto periódico adicional que el receptor corrige mediante una fórmula; para una excentricidad de 0.02 su amplitud es de unos 46 nanosegundos, equivalentes a unos 14 metros. La Figura 7 muestra cómo varían los dos efectos con el radio orbital: por debajo de unos 9 600 km de radio, el efecto de velocidad domina y los relojes atrasan; por encima, domina el gravitatorio.

Atelier Velázquez

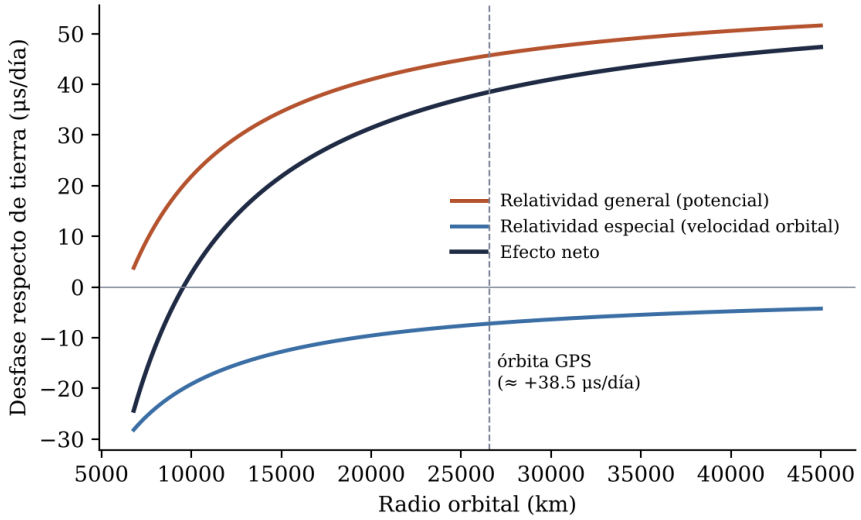


Figura 7. Desfase diario de un reloj en órbita circular respecto de uno en la superficie terrestre, en función del radio orbital: contribución gravitatoria (relatividad general), cinemática (relatividad especial) y efecto neto.

Fuente. Elaboración propia a partir de las fórmulas del texto, sin incluir la rotación terrestre.

Atelier Velázquez

40.3 Errores y procesamiento de señales

La relatividad no es la única fuente de error. La ionosfera retrasa las señales en una cantidad que depende de la densidad de electrones y de la frecuencia; como el retraso es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia, los receptores que miden dos frecuencias pueden eliminarlo. La troposfera añade un retraso de unos metros que se modela. Las reflexiones de la señal en edificios producen trayectos múltiples. Las efemérides de los satélites tienen errores de pocos metros. Hasta el 2 de mayo de 2000, el gobierno de Estados Unidos degradaba deliberadamente la señal civil; desde entonces, un receptor común obtiene precisiones de pocos metros, y los receptores geodésicos que procesan la fase de la portadora alcanzan precisiones de milímetros. Las señales llegan con potencias de unos 10^{-16} W, por debajo del ruido térmico del receptor; se recuperan correlacionándolas con códigos pseudoaleatorios conocidos, una aplicación del análisis de señales y de la teoría de la información.

El GPS es la aplicación cotidiana más clara de la relatividad. Cada vez que un teléfono indica una posición, utiliza la constancia de la velocidad de la luz, la dilatación temporal cinemática y el corrimiento gravitacional al rojo, además de la mecánica orbital, la física atómica de los re-

lojes de cesio y rubidio, la electrónica y el procesamiento de señales. Los sistemas europeo Galileo, ruso GLONASS y chino BeiDou funcionan según los mismos principios.

Atelier Velázquez

Capítulo 41. Telescopios, LIGO y computadoras

41.1 LIGO

El Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser consiste en dos instrumentos idénticos, en Hanford, Washington, y Livingston, Luisiana, separados por unos 3 000 km. Cada uno es un interferómetro de Michelson, como el de 1887, con brazos de 4 km en forma de L. Una onda gravitacional que atraviesa el detector estira un brazo y comprime el otro alternativamente, y la diferencia de longitudes se manifiesta en la interferencia de los haces láser recombinados.

La deformación relativa de una onda típica es de 10^{-21}: en 4 km, unos 4×10^{-18} m. Detectar ese desplazamiento exige un conjunto de soluciones técnicas, cada una con su física. Los espejos, masas de prueba de 40 kg de sílice fundida, cuelgan de péndulos cuádruples sobre sistemas de aislamiento sísmico activo, de modo que a las frecuencias de interés se comportan como masas libres. Cada brazo contiene una cavidad óptica en la que la luz rebota cientos de veces, aumentando la longitud efectiva. Un espejo de reciclado de potencia devuelve la luz al interferómetro, elevando la potencia circulante a cientos de kilovatios. Todo el camino óptico está en uno de los mayores sistemas de vacío del mundo. A altas frecuencias, el límite lo pone el ruido cuántico de la luz, la granularidad de los fotones; desde 2019, los detectores inyectan **luz comprimida**, un estado cuántico en el que las fluctuaciones de una propiedad se reducen a costa de aumentar las de otra, aplicación directa de las relaciones de incertidumbre del capítulo 18.

Rainer Weiss analizó en 1972 las fuentes de ruido de un detector así; Ronald Drever y Kip Thorne contribuyeron al diseño y a la teoría de las fuentes; Barry Barish dirigió la construcción. Weiss, Barish y Thorne recibieron el premio Nobel de 2017. La red incluye el detector Virgo, en Italia, y KAGRA, en Japón, subterráneo y criogénico. La agencia espacial europea aprobó en 2024 la misión LISA, tres naves separadas por 2.5 millones de kilómetros, para detectar ondas de menor frecuencia a partir de la década de 2030. Los sistemas de cronometraje de púlsares, como NANOGrav, encontraron en 2023 evidencia de un fondo de ondas gravitacionales de frecuencias de nanohercios, probablemente producido por pares de agujeros negros supermasivos (Agazie et al., 2023).

Atelier Velázquez

41.2 Semiconductores y computadoras

La computación digital descansa sobre la mecánica cuántica de los sólidos. Felix Bloch mostró en 1928 que los electrones en una red cristalina periódica ocupan **bandas** de energía permitidas separadas por bandas prohibidas, y Alan Wilson explicó en 1931 la diferencia entre conductores, aislantes y semiconductores: en un semiconductor, la banda prohibida es lo bastante estrecha como para que la conductividad pueda controlarse añadiendo impurezas. El 16 de diciembre de 1947, John Bardeen y Walter Brattain, en los laboratorios Bell, construyeron el primer transistor de contacto puntual, y William Shockley desarrolló poco después el transistor de unión. Jack Kilby y Robert Noyce inventaron independientemente en 1958–1959 el circuito integrado. Los transistores de los procesadores actuales, de efecto de campo y con dimensiones características de pocos nanómetros, se cuentan por decenas de miles de millones en un solo chip. A esas escalas, el efecto túnel cuántico, que permite a los electrones atravesar barreras aislantes delgadas, es a la vez una limitación y un recurso del diseño.

Pero una computadora no es solo física de semiconductores. Requiere la lógica de George Boole, que redujo el razonamiento a operaciones algebraicas con dos valores (Boole, 1854); la teoría de la computabilidad de Alan Turing, que definió qué significa calcular mediante una máquina abstracta (Turing, 1936); la arquitectura de John von Neumann (1945), que almacena programas y datos en la misma memoria; y la teoría de la información de Claude Shannon (1948), que definió la cantidad de información y los límites de su transmisión por canales ruidosos (Shannon, 1948). La mecánica cuántica es indispensable para entender por qué funciona un transistor; no dice nada sobre por qué un programa es correcto. Esta es la segunda ilustración de la symploké propuesta en el capítulo inicial.

El límite de Landauer, examinado en el capítulo 11, fija el coste energético mínimo de borrar un bit, unos 3×10^{-21} J a temperatura ambiente. Los circuitos actuales disipan por operación varios órdenes de magnitud más, de modo que el límite termodinámico no es todavía el factor que restringe la eficiencia, aunque lo será si la tendencia continúa.

41.3 Diseñar, operar, interpretar

Una máquina científica involucra teorías en tres momentos distintos, y no siempre las mismas. Para **diseñarla** hacen falta las teorías que predicen cómo se comportarán sus componentes. Para

Atelier Velázquez

operarla hacen falta las que permiten controlar su funcionamiento y calibrar sus medidas. Para **interpretar** sus resultados hacen falta las que conectan lo registrado con el fenómeno estudiado. La Tabla 12 lo muestra para las máquinas examinadas en esta Parte.

Tabla 12. Teorías requeridas para diseñar, operar e interpretar instrumentos y máquinas

Máquina	Diseño	Operación	Interpretación de resultados
Cohete	Mecánica newtoniana, termodinámica, mecánica de fluidos, química, materiales	Teoría del control, estimación bayesiana (Kalman), computación	Mecánica orbital; para la ciencia a bordo, la física del instrumento
Acelerador (LHC)	Electromagnetismo, relatividad especial, mecánica hamiltoniana, superconductividad, criogenia	Control, radiofrecuencia, metrología, computación en tiempo real	Teoría cuántica de campos, física de la interacción radiación-materia, estadística
GPS	Mecánica orbital, física atómica (relojes), electrónica	Relatividad especial y general, procesamiento de señales, modelos atmosféricos	Geodesia, sistemas de referencia
Telescopio óptico (JWST)	Óptica, mecánica, termodinámica (criogenia), física de detectores	Control de frente de onda, calibración fotométrica	Espectroscopia atómica y molecular, cosmología, astrofísica estelar
Event Horizon Telescope	Radioastronomía, relojes atómicos, electrónica	Interferometría, correlación, reconstrucción de imágenes	Relatividad general (métrica de Kerr), magnetohidrodinámica
LIGO	Óptica de láseres, mecánica de suspensiones, vacío, óptica cuántica	Control de cavidades, caracterización del ruido	Relatividad general numérica, astrofísica de objetos compactos, estadística bayesiana
Computadora	Mecánica cuántica de sólidos, electromagnetismo, química de materiales	Lógica booleana, arquitectura, teoría de la información	Teoría de la computación, semántica de los programas

Atelier Velázquez

Nota. Elaboración propia.

La tabla muestra que los instrumentos no son simples ventanas transparentes a la realidad, ni construcciones arbitrarias. Son nudos de teorías heterogéneas, cada una válida en su dominio, cuya articulación produce resultados que ninguna de ellas produciría sola. Un error en cualquiera de las conexiones puede producir un resultado falso, como se verá en el capítulo 44 con el caso de los neutrinos superlumínicos, cuyo origen fue un conector de fibra óptica mal ajustado.

Parte X. Mapa de los límites

Atelier Velázquez

Capítulo 42. Atlas de escalas y teorías efectivas

42.1 Sesenta y un órdenes de magnitud

La física contemporánea describe fenómenos que abarcan unos sesenta y un órdenes de magnitud en longitud, desde la longitud de Planck, 1.6×10^{-35} m, hasta el diámetro del universo observable, unos 8.8×10^{26} m, y unos sesenta y uno en tiempo, desde el tiempo de Planck, 5.4×10^{-44} s, hasta la edad del universo, 4.4×10^{17} s. La Figura 8 sitúa algunos objetos en esa escala logarítmica, y la Tabla 13 asocia a cada nivel las teorías que lo describen.

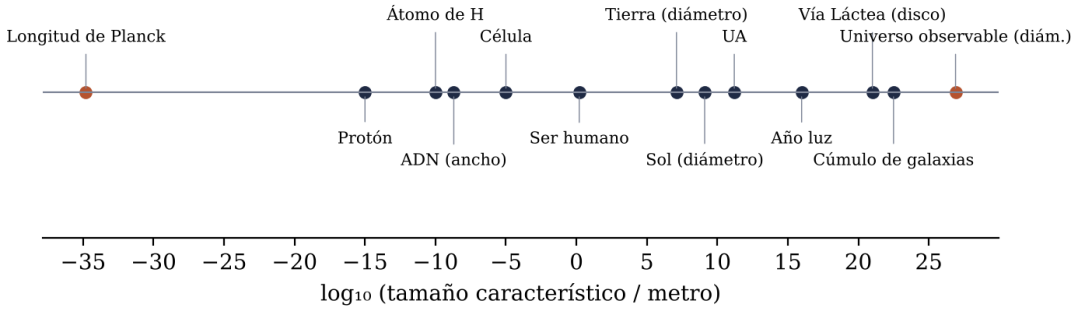


Figura 8. Atlas de escalas: tamaños característicos de objetos físicos en escala logarítmica, desde la longitud de Planck hasta el universo observable.

Fuente. Elaboración propia. Los valores son órdenes de magnitud.

Tabla 13. Escalas, tiempos característicos y teorías efectivas

Nivel	Longitud típica	Tiempo característico	Teorías pertinentes	Estado de la evidencia
Escala de Planck	10^{-35} m	10^{-44} s	Gravedad cuántica (programas en curso)	Sin acceso experimental
Partículas (resolución del LHC)	10^{-19}–10^{-15} m	10^{-27}–10^{-23} s	Teoría cuántica de campos, Modelo Estándar	Confirmado hasta ~10^{13} eV
Núcleos	10^{-15}–10^{-14} m	10^{-22}–10^{-19} s	QCD, teorías efectivas nucleares	Confirmado
Átomos	10^{-10} m	10^{-16}–10^{-8} s	Mecánica cuántica, QED	Confirmado con precisiones de 10^{-12}
Moléculas	10^{-9}–10^{-7} m	10^{-14}–10^{-3} s	Química cuántica, mecánica estadística	Confirmado
Células	10^{-5} m	10^{-3}–10^{5} s	Biofísica, bioquímica, termodinámica fuera del equilibrio	Teorías parciales
Organismos	10^{-3}–10^{2} m	1–10^{9} s	Mecánica clásica, fisiología, biología evolutiva	Teorías parciales

Nivel	Longitud típica	Tiempo característico	Teorías pertinentes	Estado de la evidencia
Planetas	10^{7} m	10^{5}–10^{17} s	Gravitación newtoniana, geofísica, química	Confirmado
Estrellas	10^{9}–10^{12} m	10^{0}–10^{18} s	Hidrostática, física nuclear, transferencia radiativa	Confirmado
Galaxias	10^{20}–10^{21} m	10^{15}–10^{17} s	Dinámica gravitatoria, materia oscura (inferida)	Componente oscura de naturaleza desconocida
Cúmulos y red cósmica	10^{22}–10^{24} m	10^{16}–10^{17} s	Relatividad general, ΛCDM, simulaciones	Tensiones abiertas
Universo observable	10^{26}–10^{27} m	4×10^{17} s	Relatividad general, ΛCDM	Modelo de seis parámetros; componentes oscuras

Nota. Elaboración propia. Los tiempos característicos indican órdenes de magnitud de los procesos típicos de cada nivel.

42.2 Dominios que se solapan

El atlas de escalas se representa a menudo como una escalera de niveles, cada uno fundado en el inferior. La imagen es engañosa en dos sentidos. Primero, las teorías no se distribuyen por tamaños sino por regímenes: la mecánica cuántica describe la superconductividad de un imán de quince metros y el condensado de Bose-Einstein de una nube de átomos de un milímetro; la relatividad general describe la órbita de un satélite y la estructura del universo; la termodinámica se aplica a una célula, a una estrella y a un agujero negro. Segundo, las relaciones entre niveles no son siempre de fundamentación unidireccional. La física nuclear depende de la cromodinámica cuántica, pero la cosmología depende de la física nuclear para la síntesis de los elementos, y la física de partículas depende de la cosmología para restringir las masas de los neutrinos o la naturaleza de la materia oscura. Las conexiones forman una red con circuitos.

El grupo de renormalización explica por qué la red es posible. Como se vio en el capítulo 21, la física de cada escala depende de la de escalas menores solo a través de unos pocos parámetros efectivos. La química no necesita los quarks: le basta la masa y la carga del núcleo. La mecánica de fluidos no necesita la química: le bastan la viscosidad y la ecuación de estado. Esa independencia relativa es una propiedad de los sistemas físicos que la teoría explica: los detalles microscópicos se vuelven irrelevantes al cambiar de escala, salvo en lo que afecta a unas pocas magnitudes. La **universalidad** es la manifestación más clara de este hecho.

La consecuencia gnoseológica es importante. Cada nivel tiene su propio campo de términos y operaciones, y sus propias identidades sintéticas, que no se pierden porque exista una teoría de

Atelier Velázquez

un nivel inferior capaz de derivar, en principio, sus parámetros. La ley de los gases ideales no es menos verdadera porque la mecánica estadística la explique; la explicación la sitúa, delimita su dominio y la conecta con otras leyes. Ni el reduccionismo que declara ilusorios los niveles superiores ni el emergentismo que los declara completamente autónomos describe correctamente esta situación, que es la de una symploké de dominios con dependencias específicas y autonomías relativas.

Atelier Velázquez

Capítulo 43. Ley, teoría, modelo y simulación

43.1 Distinciones

Cuatro términos se usan con frecuencia como sinónimos en la divulgación y deben distinguirse.

Una **ley** física es una relación invariante entre magnitudes, válida en un dominio delimitado: la ley de Hooke para pequeñas deformaciones, la de Ohm para conductores óhmicos, la de gravitación para campos débiles. Las leyes no son universales en un sentido absoluto; su universalidad es relativa a un dominio. Nancy Cartwright argumentó que las leyes fundamentales, tomadas literalmente, son falsas, porque solo valen en condiciones ideales que nunca se dan, y que lo que la física establece son capacidades causales que se manifiestan en dispositivos construidos para aislarlas (Cartwright, 1983).

Una **teoría** es un sistema de principios, leyes, definiciones y reglas de aplicación que cubre un dominio de fenómenos: la mecánica clásica, el electromagnetismo, la relatividad general. Una teoría contiene recursos para construir leyes particulares en situaciones concretas.

Atelier Velázquez

Un **modelo** es una representación de un sistema objetivo concreto, construida con recursos teóricos, empíricos y matemáticos, con idealizaciones deliberadas: el modelo de una estrella como esfera de gas en equilibrio hidrostático, el modelo ΛCDM del universo, el modelo de Ising de un imán. Margaret Morrison y Mary Morgan describieron los modelos como mediadores entre las teorías y el mundo, parcialmente independientes de ambos (Morgan y Morrison, 1999).

Una **simulación** es la exploración computacional de la dinámica de un modelo cuando sus ecuaciones no pueden resolverse analíticamente. Las simulaciones de la formación de estructuras cósmicas, del clima o de las colisiones en el LHC son indispensables, y plantean preguntas propias: ¿es una simulación un experimento? Eric Winsberg ha mostrado que las simulaciones combinan teoría, aproximaciones numéricas, modelos efectivos para los procesos no resueltos y calibraciones empíricas, y que su credibilidad depende de esa combinación (Winsberg, 2010). Una simulación no produce datos sobre el mundo; produce consecuencias de un modelo, que después se comparan con datos.

43.2 Medición, predicción e inferencia

La **medición** es una operación que asigna un valor a una magnitud mediante un instrumento calibrado, con una incertidumbre. La **predicción** deduce el resultado de una medición futura a partir de una teoría o modelo; la **retrodicción** infiere un estado pasado a partir de huellas presentes, y es la forma de razonamiento dominante en cosmología, geología y astrofísica. La **inferencia** es el razonamiento que va de los datos a los parámetros o a la elección entre modelos, y se formaliza estadísticamente.

El **experimento** es una intervención controlada en un sistema para observar su respuesta. La cosmología no puede experimentar con el universo, pero no por ello deja de ser una ciencia empírica: dispone de múltiples sistemas observables (galaxias, cúmulos, supernovas) que funcionan como réplicas naturales, y de experimentos de laboratorio que fijan las leyes que aplica.

43.3 Validación y problemas inversos

En la práctica computacional se distingue la **verificación**, que comprueba que el programa resuelve correctamente las ecuaciones del modelo, de la **validación**, que comprueba que el modelo representa adecuadamente el sistema para el propósito previsto (Oberkampf y Roy, 2010). Una simulación puede estar perfectamente verificada y mal validada.

Atelier Velázquez

Los problemas inversos, ya mencionados en el capítulo 23, plantean dificultades específicas. La **sensibilidad a las condiciones iniciales** del capítulo 9 limita la predicción en sistemas caóticos. Las **limitaciones estadísticas** imponen cotas que ninguna mejora instrumental supera. En cosmología, la más notable es la **varianza cósmica**: solo hay un universo observable, y en las escalas angulares más grandes del fondo cósmico hay pocos modos independientes que medir. La incertidumbre relativa irreducible en la potencia de las fluctuaciones de multipolo ℓ es $\sqrt{2/(2\ell+1)}$; para el cuadrupolo, $\ell = 2$, es del 63 por ciento. Ninguna observación futura podrá decidir si la baja potencia observada en el cuadrupolo es una anomalía o una fluctuación.

Capítulo 44. La filosofía del error científico

44.1 El error como material

La historia de la física no es una acumulación de aciertos. Está hecha también de entidades que no existían, efectos que no se reprodujeron y anomalías que desaparecieron. El error es uno de los materiales de la ciencia: las ciencias se constituyen en buena medida mediante los procedimientos con que detectan y corrigen errores.

44.2 Entidades que no existían

El **éter luminífero** fue durante un siglo un componente central de la física. La teoría ondulatoria de la luz de Fresnel y el electromagnetismo de Maxwell lo requerían como soporte de las ondas; el éter explicaba la aberración de la luz y el arrastre parcial medido por Fizeau en 1851. El experimento de Michelson y Morley no lo refutó de inmediato: Lorentz y FitzGerald lo salvaron con la contracción. El éter desapareció cuando la relatividad lo volvió superfluo. Pero lo que la teoría del éter había establecido —las ecuaciones de las ondas electromagnéticas, las leyes de la reflexión y refracción— sobrevivió intacto. El realismo estructural de Worrall se apoya precisamente en este caso.

Atelier Velázquez

Vulcano es el caso más instructivo de la relación entre hipótesis auxiliares y refutación. En 1846, la anomalía en la órbita de Urano se explicó postulando un planeta desconocido, Neptuno, que fue encontrado. En 1859, Le Verrier aplicó el mismo razonamiento a la anomalía del perihelio de Mercurio y postuló un planeta intramercurial, Vulcano. Ese mismo año, un médico aficionado, Edmond Lescarbault, afirmó haberlo visto cruzar el disco solar, y durante décadas hubo observaciones dudosas. Vulcano no existía; la anomalía era una señal de la relatividad general. El mismo procedimiento —salvar una teoría ante una anomalía añadiendo una entidad— tuvo éxito en un caso y fracasó en el otro. Pierre Duhem había mostrado que ninguna hipótesis se contrasta aisladamente, sino junto con un conjunto de supuestos auxiliares, de modo que una refutación no indica cuál de ellos falla (Duhem, 1906). Imre Lakatos distinguió entre el núcleo de un programa de investigación, protegido por un cinturón de hipótesis auxiliares, y su carácter progresivo o degenerativo: un programa progresa si sus modificaciones predicen hechos nuevos que se confirman, como Neptuno, y degenera si solo se acomodan a las anomalías (Lakatos, 1978).

El **universo estático** de Einstein y su constante cosmológica, el **estado estacionario** de Bondi, Gold y Hoyle, abandonado tras el descubrimiento del fondo cósmico y los recuentos de radiofuentes que mostraban una evolución del universo, son casos de modelos cosmológicos coherentes refutados por observaciones.

44.3 Efectos que no se reprodujeron

En 1903, el físico francés René Blondlot anunció el descubrimiento de los **rayos N**, una nueva radiación emitida por muchas fuentes, que solo podía detectarse por el aumento del brillo de una chispa observado a simple vista. Decenas de investigadores franceses confirmaron el efecto. En 1904, el físico estadounidense Robert Wood visitó el laboratorio de Blondlot y, en la oscuridad, retiró sin que nadie lo notara el prisma de aluminio que debía separar los rayos; los observadores siguieron viendo los mismos efectos (Wood, 1904). La percepción de un efecto débil, con un detector humano y sin controles ciegos, estaba determinada por la expectativa.

En septiembre de 2011, el experimento OPERA, que medía el tiempo de vuelo de neutrinos enviados desde el CERN hasta el laboratorio de Gran Sasso, a 730 km, anunció que llegaban unos 60 nanosegundos antes de lo que tardaría la luz. Los autores pidieron a la comunidad que encontrara el error. En 2012 se identificaron dos problemas instrumentales, un conector de fibra óptica mal ajustado en el sistema de sincronización y un oscilador de referencia; corregidos, la velocidad de los neutrinos coincidía con la de la luz, como confirmaron otros experimentos en el mismo laboratorio (OPERA Collaboration, 2012). El caso es ejemplar por el comportamiento de la colaboración, que no afirmó haber refutado la relatividad, sino haber encontrado una anomalía que no sabía explicar.

En marzo de 2014, la colaboración BICEP2 anunció la detección de ondas gravitacionales primordiales en la polarización del fondo cósmico, con una significación superior a cinco desviaciones típicas. La señal era real; su atribución no lo era: el polvo de la Vía Láctea produce una polarización similar, y los datos de Planck mostraron que podía explicar toda la señal. Entre diciembre de 2015 y agosto de 2016, ATLAS y CMS observaron un exceso de pares de fotones con una masa de unos 750 GeV, con significaciones locales en torno a tres desviaciones típicas, que suscitó cientos de artículos teóricos; con más datos, desapareció. Era una fluctuación estadística.

Atelier Velázquez

44.4 Tipología del error

Los casos permiten distinguir varios tipos de error. Hay **errores conceptuales**, en los que una entidad teórica resulta superflua o inexistente (el éter, el calórico, Vulcano). Hay **errores de modelización**, en los que un cálculo correcto parte de supuestos físicos incompletos (la edad de la Tierra de Kelvin). Hay **errores sistemáticos instrumentales** (OPERA). Hay **errores de atribución**, en los que una señal real se atribuye a una causa equivocada (BICEP2). Hay **fluctuaciones estadísticas** (el exceso de 750 GeV). Y hay **errores inducidos por la expectativa**, cuando el procedimiento de medida no protege contra los sesgos del observador (los rayos N).

A cada tipo de error corresponde un procedimiento de corrección: la reorganización teórica, la revisión de supuestos por contraste con otras ciencias, la búsqueda de sistemáticos y la repetición con instrumentos distintos, el análisis de fondos, la acumulación de datos y la exigencia de umbrales severos, el análisis ciego. Todos comparten un rasgo: exigen la convergencia de cursos operatorios independientes. La **replicación** —la repetición del experimento por otros, con otros instrumentos— es la operación que neutraliza al sujeto particular y convierte un resultado en una identidad estable. Que la física disponga de estos procedimientos no la hace infalible, pero sí corregible, y su historia muestra que la corrección se produce de hecho.

Atelier Velázquez

Capítulo 45. Falacias gnoseológicas

45.1 Cuatro familias de teorías de la ciencia

Gustavo Bueno clasificó las teorías de la ciencia según cómo entienden la relación entre la forma de una ciencia —sus teorías, sus enunciados— y su materia —los fenómenos, los objetos de que trata—, y distinguió cuatro familias (Bueno, 1992). El **descripcionismo** reduce la ciencia a la descripción de la materia: la ciencia registraría los hechos y la teoría sería un resumen. El **teoreticismo** reduce la ciencia a su forma: la ciencia sería un sistema de hipótesis y teorías que se contrasta con los hechos, y su núcleo serían los enunciados. El **adecuacionismo** concibe la verdad como correspondencia entre dos órdenes dados por separado, la teoría y la realidad. El **circularismo**, que Bueno defiende, sostiene que forma y materia se constituyen conjuntamente en las operaciones de los sujetos: las teorías no se superponen a una materia previamente dada, sino que organizan campos materiales a través de operaciones con términos.

Cada una de las tres primeras familias captura algo verdadero y, llevada al extremo, produce falacias características. A ellas se añaden otras que aparecen con frecuencia en la discusión pública de la física. Las examinamos mediante casos.

Atelier Velázquez

45.2 Empirismo ingenuo y descripcionismo

El **empirismo ingenuo** sostiene que la ciencia comienza con la observación libre de teoría. El caso de la imagen del Event Horizon Telescope, examinado en el capítulo 30, muestra su error: lo que se presentó como «la primera fotografía de un agujero negro» es el resultado de una cadena de operaciones que incluye la relatividad general, la teoría de la interferometría, algoritmos de reconstrucción y simulaciones magnetohidrodinámicas. El **descripcionismo**, en su forma más elaborada, entiende las teorías como resúmenes económicos de las sensaciones, al modo de Mach. La historia de la hipótesis atómica, que Mach rechazó por ir más allá de lo observable, muestra la insuficiencia de esa concepción: la teoría atómica no resumía observaciones, sino que predijo relaciones entre fenómenos —el número de Avogadro obtenido por trece métodos— que ninguna descripción contenía.

45.3 Teoreticismo y formalismo

El **teoreticismo** identifica la ciencia con sus teorías y entiende la contrastación como la confrontación de hipótesis con hechos. El falsacionismo de Karl Popper es su forma más influyente: una teoría es científica si prohíbe ciertos resultados, y progresa por conjeturas y refutaciones (Popper, 1959). El criterio captura algo esencial —el riesgo empírico de las teorías—, pero, como mostró el caso de Vulcano, la refutación nunca es lógica e inmediata, y la ciencia no consiste solo en enunciados contrastables, sino en operaciones con instrumentos y materiales. Una variante del teoreticismo es la tendencia a considerar científica una construcción teórica por su riqueza formal, independientemente de su conexión operatoria con el mundo, de lo que la discusión sobre la confirmación no empírica de la teoría de cuerdas, examinada en el capítulo 34, es un ejemplo.

El **formalismo** extremo identifica la realidad física con una estructura matemática. Max Tegmark ha propuesto que el universo no solo se describe mediante matemáticas, sino que es una estructura matemática, y que todas las estructuras matemáticas existen físicamente (Tegmark, 2008). La propuesta confunde la existencia de una objetividad del tercer género —una estructura consistente— con la existencia de un proceso físico del primero. No hay ninguna operación empírica que pueda confirmarla o refutarla.

Atelier Velázquez

45.4 Adecuacionismo

El **adecuacionismo** entiende la verdad como correspondencia entre una teoría y una realidad dada independientemente. Su dificultad es operatoria: para comparar una teoría con la realidad habría que acceder a la realidad sin teoría, lo cual es imposible en la práctica científica. Lo que la física compara son resultados de unas operaciones con resultados de otras. La verdad de la ley de gravitación no consiste en que se «parezca» al mundo, sino en que establece identidades entre la caída de los cuerpos, la órbita de la Luna, las mareas y la precesión, obtenidas por cursos operatorios distintos.

45.5 Psicologismo y sociologismo

El **psicologismo** reduce la ciencia a procesos mentales de los científicos. Su forma más difundida en la física es la interpretación según la cual la conciencia del observador produce el colapso de la función de onda, defendida en algún momento por Eugene Wigner (Wigner, 1961) y abandonada por él mismo. Ninguna predicción de la mecánica cuántica depende de que un observador

consciente mire el resultado; los detectores registran resultados aunque nadie los lea, y la decoherencia explica por qué los registros macroscópicos son estables. Las extensiones de la mecánica cuántica a la conciencia, la espiritualidad o la «creación de la realidad por la mente» no tienen apoyo en la teoría.

El **sociologismo** reduce los resultados científicos a productos de negociaciones sociales. El programa fuerte de la sociología del conocimiento de David Bloor exigió explicar con los mismos tipos de causas sociales las creencias verdaderas y las falsas (Bloor, 1976), y estudios etnográficos de laboratorio mostraron el trabajo de construcción que precede a los hechos (Latour y Woolgar, 1979). Estos estudios aportan información real sobre la dimensión pragmática de la ciencia. Pero no pueden explicar por qué el valor del número de Avogadro coincide en trece métodos independientes, ni por qué los relojes de los satélites GPS adelantan 38.5 microsegundos por día con independencia de las convicciones de los ingenieros. La neutralización del sujeto operatorio en el resultado es precisamente lo que los factores sociales no explican.

Atelier Velázquez

45.6 Monismo e hipóstasis

El **monismo** afirma que todo es una sola cosa: energía, información, campo, conciencia. La afirmación de que «todo es energía» confunde una magnitud —una propiedad conservada de los sistemas físicos— con una sustancia; la energía no existe aislada de los sistemas que la poseen. La afirmación de que «todo es información» sufre de una ambigüedad: la información de Shannon es una medida definida sobre distribuciones de probabilidad de mensajes, y su conexión con la física pasa por mecanismos específicos como el límite de Landauer; generalizarla a una ontología universal es abandonar su definición.

La **hipóstasis** convierte en sustancia lo que es una relación o una abstracción. El lenguaje sobre el tiempo está lleno de hipóstasis: el tiempo «fluye», «pasa», «se detiene». Decir que la entropía «quiere» aumentar o que la función de onda «decide» colapsar son hipóstasis de magnitudes o de procedimientos. La afirmación de que «el espaciotiempo es una ilusión», a partir de resultados en contextos holográficos, es la hipóstasis inversa: se niega la realidad de una estructura bien establecida porque se ha encontrado otra descripción equivalente en ciertos modelos.

45.7 Cientificismo, reduccionismo y fundamentalismo físico

El **cientificismo** sostiene que las ciencias pueden responder todas las preguntas con sentido, y que las demás carecen de él. En 2010, Stephen Hawking y Leonard Mlodinow escribieron que la filosofía había muerto porque no había seguido los avances de la física (Hawking y Mlodinow, 2010). El mismo libro contiene, sin embargo, tesis filosóficas sobre el realismo dependiente del modelo y sobre la creación del universo que no son resultados de la física.

El **reduccionismo ontológico** sostiene que solo existen los constituyentes fundamentales y que todo lo demás es apariencia. Como se vio en el capítulo 21, la física de la materia condensada muestra que las identidades establecidas en niveles superiores —la cuantización de la resistencia Hall, los exponentes críticos— no se obtienen deduciéndolas de los constituyentes, aunque sean compatibles con ellos. El **fundamentalismo físico**, en el sentido en que Bueno criticó un «fundamentalismo científico», atribuye a la física de partículas o a la teoría final una posición desde la que se juzgaría toda realidad. Steven Weinberg sostuvo que las flechas de la explicación apuntan siempre hacia abajo, hacia las leyes más fundamentales (Weinberg, 1992). La tesis es defendible como programa explicativo dentro de la física; como ontología general, confunde el orden de las explicaciones físicas con el orden del ser.

Atelier Velázquez

45.8 Existencia matemática y existencia física

La falacia más característica de la física especulativa contemporánea es inferir la existencia física de una entidad a partir de su existencia matemática. Si las ecuaciones de la inflación eterna admiten infinitos universos burbuja, se afirma que existen; si la teoría de cuerdas admite 10^{500} vacíos, se afirma que están realizados en alguna parte. En 2012, Lawrence Krauss publicó un libro titulado *Un universo de la nada*, que presentaba la física cuántica como explicación de la existencia del universo a partir de la nada (Krauss, 2012). David Albert, filósofo de la física, señaló en una reseña que la «nada» de Krauss era un estado de los campos cuánticos regido por leyes, y que la pregunta de por qué existen esos campos y esas leyes no había sido tocada (Albert, 2012). Una solución de una ecuación es una objetividad matemática; un proceso físico requiere, además, operaciones empíricas que lo alcancen.

Capítulo 46. Lo que todavía no sabemos

46.1 Grados de conocimiento

Un problema abierto bien delimitado es un resultado científico. Saber exactamente qué se ignora, qué evidencia hay, qué hipótesis compiten y qué observación las decidiría es más valioso que una respuesta prematura. La Tabla 14 recoge los principales problemas abiertos de la física y la cosmología, con su estado a la fecha de corte. La columna de estado utiliza cuatro categorías: **evidencia** cuando hay observaciones directas del fenómeno; **inferencia** cuando el fenómeno se deduce sólidamente de observaciones mediante teorías aceptadas; **hipótesis** cuando se trata de una propuesta sin confirmación; **problema abierto** cuando no se sabe siquiera cuál es la forma correcta de la respuesta.

Tabla 14. Problemas abiertos de la física y la cosmología (octubre de 2026)

Problema	Estado	Evidencia disponible	Hipótesis principales	Investigaciones y criterios de contrastación
Materia oscura	Inferencia sólida; naturaleza desconocida	Curvas de rotación, cúmulos, lentes, fondo cósmico	WIMP, axiones, neutrinos estériles, agujeros negros primordiales; gravedad modificada	LZ, XENONnT, ADMX; lentes de Euclid y Rubin
Energía oscura	Parámetro medido; naturaleza desconocida	Supernovas, BAO, fondo cósmico	Constante cosmológica; campo dinámico; gravedad modificada	DESI (datos completos en 2027), Euclid, Rubin, Roman
Tensión de Hubble	Discrepancia de ~4–5σ	Escalera de distancias frente a otros métodos	Sistemáticos; energía oscura temprana; física nueva	JWST, sirenas estándar, lentes con retardo
Inflación	Hipótesis con predicciones genéricas confirmadas	Planitud, espectro casi invariante, gaussianidad	Modelos de rodadura lenta; alternativas de rebote	Ondas gravitacionales primordiales (Simons, LiteBIRD)
Gravedad cuántica	Problema abierto	Ninguna directa	Cuerdas, bucles, seguridad asintótica, conjuntos causales, CDT	Entrelazamiento gravitatorio en laboratorio; cosmología; ondas gravitacionales
Singularidades	Predicción teórica de la relatividad general	Indirecta (horizontes)	Rebote; resolución cuántica	Teoría de gravedad cuántica
Información en agujeros negros	Problema teórico parcialmente resuelto en modelos	Ninguna directa	Islas, holografía, remanentes	Coherencia teórica; análogos
Masas de los neutrinos	Evidencia (oscilaciones); escala absoluta desconocida	Oscilaciones; KATRIN < 0.45 eV	Mecanismo de balancín; neutrinos de Majorana	JUNO (ordenamiento), DUNE, Hyper-K, doble beta sin neutrinos
Asimetría mate-	Evidencia del hecho;	$\eta \approx 6 \times 10^{-10}$	Leptogénesis, bariogénesis	Violación CP en neutri-

Atelier Velázquez

Problema	Estado	Evidencia disponible	Hipótesis principales	Investigaciones y criterios de contrastación
ria-antimateria	mecanismo desconocido		electrodébil	nos; LHC
Problema de la constante cosmológica	Problema abierto	Discrepancia de 55–120 órdenes de magnitud	Cancelación; antrópica; teorías nuevas del vacío	Coherencia teórica
Condiciones iniciales y baja entropía	Problema abierto	Lisura del universo temprano	Hipótesis del pasado; inflación; propuestas cuánticas	Indirecta
Flecha del tiempo	Explicación estadística sólida; fundamento cosmológico abierto	Termodinámica, registros	Hipótesis del pasado; paso del tiempo primitivo	Conceptual
Espaciotiempo emergente	Hipótesis de investigación	Relaciones en modelos holográficos	Entrelazamiento, redes tensoriales, programas discretos	Derivar un espaciotiempo realista
Física más allá del Modelo Estándar	Evidencia indirecta (neutrinos, materia oscura, asimetría)	Ninguna partícula nueva en el LHC	Supersimetría, axiones, nuevas simetrías	LHC de alta luminosidad; precisión; futuros colisionadores

Nota. Elaboración propia a partir de las fuentes citadas en los capítulos correspondientes.

Atelier Velázquez

46.2 El ajuste fino del universo: constantes, contingencia y límites de la explicación antrópica

Una expresión, tres problemas

El ajuste fino ocupa una posición incómoda entre la física de partículas, la cosmología y la filosofía. La expresión designa, en primer término, la sensibilidad de ciertos resultados a los valores de parámetros incorporados en una teoría. En otro sentido, alude a la necesidad de compensaciones entre contribuciones matemáticas muy grandes para obtener una magnitud física pequeña. Finalmente, se aplica a la aparente estrechez de las condiciones bajo las cuales un universo podría formar estructuras complejas y albergar vida. Estas tres cuestiones pueden relacionarse, pero no son equivalentes. Una cancelación problemática en el cálculo de la masa del Higgs no demuestra que la existencia de organismos sea improbable; una restricción astrofísica sobre la formación de galaxias no demuestra que el universo haya sido diseñado para producirlas.

La dificultad aparece cuando los parámetros que una teoría utiliza como datos de entrada se presentan como si fueran piezas de una maquinaria previa a su propia constitución. En el Modelo Estándar, las masas de los fermiones y diversos acoplamientos se determinan experimentalmente. La teoría permite calcular cómo intervienen en procesos observables, pero no obtiene todos

sus valores a partir de principios más profundos. En cosmología, la amplitud de las fluctuaciones primordiales, las abundancias relativas de materia y radiación y la contribución de la energía oscura intervienen en la reconstrucción de la formación de estructuras. Que todavía ignoremos por qué adoptan esos valores constituye una pregunta física legítima. La frase «podrían haber sido de otra manera» añade, en cambio, una hipótesis contrafáctica cuyo alcance debe explicitarse (Adams, 2019; Barnes, 2012).

Constantes, escalas y condiciones de complejidad

Conviene empezar por las magnitudes adimensionales. La constante de estructura fina, $\alpha = e^2/(4\pi\varepsilon_0\hbar c)$, vale aproximadamente 1/137 y mide la intensidad del acoplamiento electromagnético en el régimen apropiado. Su definición combina constantes que aparecen en las unidades del Sistema Internacional, pero la razón resultante carece de dimensión. También importan las relaciones entre masas, como la del electrón y el protón, y las diferencias entre masas de quarks, que afectan a las propiedades de protones, neutrones y núcleos. La variación aislada de c o de ħ expresadas en determinadas unidades no equivale, por sí sola, a una modificación física inequívoca: es preciso especificar qué relaciones adimensionales o qué predicciones observables cambiarían (Duff et al., 2002).

Atelier Velázquez

Las propiedades nucleares ilustran la complejidad del problema. La estabilidad del hidrógeno, la existencia de núcleos compuestos y la disponibilidad de reacciones estelares dependen de interacciones fuertes, electromagnéticas y débiles, así como de masas y energías de enlace. En las estrellas de nuestro universo, buena parte del carbono se forma mediante la reacción triple alfa: dos núcleos de helio producen transitoriamente berilio-8 y la captura de otro núcleo de helio se ve favorecida por un estado resonante del carbono-12 próximo a 7,65 MeV, conocido como estado de Hoyle. La posición de esta resonancia influye en la producción estelar de carbono y oxígeno. Sin embargo, concluir que cualquier cambio mínimo impediría toda química compleja supone mantener fijos los demás parámetros y desconocer rutas nucleares alternativas. Los modelos de Adams y Grohs (2017) muestran que, bajo otras condiciones de enlace nuclear, un berilio-8 estable abriría vías diferentes de síntesis de carbono. Se trata de modelos contrafácticos, valiosos para determinar dependencias, que no prueban la existencia física de tales universos.

En cosmología ocurre algo semejante. La amplitud de las perturbaciones iniciales de densidad, habitualmente representada por Q, influye en la rapidez con que la gravitación produce ga-

laxias. Perturbaciones demasiado pequeñas dificultarían la formación de estructuras antes de que la expansión diluyera la materia; otras mucho mayores favorecerían un colapso temprano y entornos astrofísicos muy distintos. La conclusión depende de cuánto tiempo se permita evolucionar al sistema, de la composición cósmica y de las condiciones exigidas para considerar una región habitable. Fred Adams (2019) estudia conjuntamente parámetros nucleares, estelares y cosmológicos y muestra que existen regiones alternativas del espacio de parámetros en las cuales son posibles estrellas y procesos productores de energía. La habitabilidad no queda reducida a un punto aislado identificado con nuestro universo.

La constante cosmológica y la naturalidad del Higgs

El caso más célebre de ajuste fino teórico es la constante cosmológica. En el modelo ΛCDM, la aceleración observada de la expansión se representa mediante una componente de densidad aproximadamente constante. La densidad asociada a Λ es extraordinariamente pequeña frente a escalas características de la física de altas energías. Si se estiman contribuciones de punto cero mediante ciertos cortes ultravioletas y se las compara directamente con la densidad cosmológica inferida, aparecen discrepancias que pueden alcanzar alrededor de 120 órdenes de magnitud. Ese número depende del procedimiento y de la escala de corte, como ya se explicó en los capítulos 21 y 28; no es la medida experimental de una «probabilidad de uno entre 10^{120}». Expresa una dificultad en la relación entre descripciones cuánticas efectivas, renormalización y gravitación. Que la energía del vacío gravite exactamente de la manera presupuesta por un cálculo simplificado es parte del problema que debe investigarse (Weinberg, 1989).

Atelier Velázquez

En el sector electrodébil, la masa del bosón de Higgs plantea otra cuestión. Las correcciones cuánticas a un parámetro de masa escalar pueden resultar sensibles a escalas de energía muy superiores a la escala electrodébil. En ciertas formulaciones, obtener el valor observado exige compensaciones entre parámetros «desnudos» y correcciones. La expectativa de que las escalas físicas relativamente alejadas conserven cierta autonomía recibe el nombre de naturalidad técnica. Se han propuesto mecanismos como supersimetría, compositeness o dinámicas de relajación, con consecuencias experimentales diversas; ninguno constituye hasta ahora una solución generalmente confirmada. En este caso el problema se refiere a la estructura de una teoría y a su dependencia de escala, con independencia de cualquier argumento biológico sobre la existencia de observadores.

La palabra «ajuste» resulta así ambigua. Un parámetro libre es una cantidad que la teoría no calcula; una cancelación delicada es una propiedad de cierta parametrización; una restricción para la aparición de estrellas o núcleos es un resultado condicional de modelos físicos. Confundir las tres situaciones produce una falsa unidad del problema. La tarea consiste en reconstruir qué operaciones y relaciones dan contenido a cada una.

El principio antrópico y el argumento de Weinberg

Brandon Carter introdujo en 1974 el lenguaje del principio antrópico al discutir las coincidencias entre magnitudes astronómicas y las condiciones necesarias para la existencia de observadores. Su versión débil recuerda que nuestra localización espacial y temporal no puede tratarse como una muestra escogida sin restricciones: solo podemos encontrarnos en situaciones compatibles con nuestra existencia. Esta observación funciona como una regla de selección, útil para corregir inferencias estadísticas. Las formulaciones fuertes, según las cuales el universo debe admitir observadores, han recibido interpretaciones muy distintas, desde la simple restricción lógica sobre lo observable hasta propuestas metafísicas. Ninguna necesidad de producir vida se sigue por sí sola del hecho de que actualmente exista vida (Carter, 1974).

Atelier Velázquez

Steven Weinberg ofreció en 1987 una aplicación física delimitada. Si se permite que Λ adopte valores diferentes en dominios cosmológicos distintos, una constante cosmológica positiva excesivamente grande frenaría el crecimiento de perturbaciones gravitatorias antes de que surgieran galaxias. La posibilidad de observar una galaxia impone, bajo esa hipótesis, una cota sobre Λ. El argumento identifica una restricción seleccionada por la presencia de observadores en estructuras gravitatorias; no explica de dónde procede la distribución de valores posibles ni establece que tales dominios existan. Tampoco exige una concordancia exacta entre una predicción probabilística y el valor observado: la fuerza de la inferencia depende de los supuestos cosmológicos y estadísticos empleados (Weinberg, 1987).

La teoría de cuerdas ha proporcionado un escenario donde la discusión adquiere una forma particularmente explícita. El paisaje de compactificaciones y flujos podría contener numerosos vacíos efectivos con valores distintos de algunos parámetros, como se examinó en el capítulo 34. La combinación con versiones de inflación eterna permitiría imaginar regiones físicamente realizadas con constantes diferentes. De esa posibilidad matemática no se sigue la existencia de un conjunto de universos contrastado empíricamente, ni queda resuelto el llamado problema de la

medida: para calcular probabilidades es necesario determinar qué se cuenta, con qué peso y bajo qué procedimiento de selección. Una pluralidad inmensa de soluciones de ecuaciones no constituye, sin operaciones adicionales, una población observada.

¿Qué significa afirmar que algo es improbable?

La dificultad decisiva es probabilística. Para afirmar que los parámetros compatibles con la vida son extraordinariamente improbables se necesita un espacio de posibilidades, una medida sobre ese espacio y un criterio para reconocer las configuraciones compatibles con formas de complejidad especificadas. Si los parámetros se tratan como independientes y uniformemente distribuidos dentro de intervalos elegidos de manera arbitraria, el resultado depende de esa elección. Elegir una variable distinta puede transformar una distribución que parecía uniforme en otra que ya no lo es. No conocemos una distribución física generalmente aceptada de constantes fundamentales entre universos posibles; por ello los cálculos de sensibilidad no deben convertirse automáticamente en probabilidades de origen (Adams, 2019).

Atelier Velázquez

Hay además una dificultad de covariación. Variar solo la intensidad electromagnética y conservar todas las masas y fuerzas restantes es una operación matemática legítima dentro de un modelo; no demuestra que tales variaciones sean independientes en una teoría más fundamental. Modificar varios parámetros simultáneamente puede compensar o agravar determinados efectos. Los estudios de universos sin interacción débil ilustran el punto: al modificar también condiciones cosmológicas como la proporción entre bariones y fotones, ciertas simulaciones permiten nucleosíntesis, formación estelar y procesos productores de energía por vías diferentes de las conocidas (Grohs et al., 2018). El resultado amplía el conjunto de alternativas modelables, aunque su validez queda restringida al marco empleado.

Finalmente, la palabra «vida» reúne fenómenos diversos: organismos basados en química del carbono, posibles sistemas químicos diferentes, condiciones de habitabilidad planetaria y mera formación de estructuras capaces de almacenar información. La astronomía puede acotar tiempos de vida estelar, abundancias de elementos y tasas de formación de galaxias; carecemos de una teoría general que determine todas las condiciones suficientes para el surgimiento de vida consciente. Un argumento que comienza con la producción de carbono y termina afirmando la necesidad del ser humano ha cruzado varias fronteras explicativas sin justificar los pasos intermedios.

Explicaciones posibles y estatuto gnoseológico

Las respuestas al ajuste fino pueden ordenarse según el tipo de trabajo que exigen. Una teoría más profunda podría deducir algunos parámetros actualmente libres o mostrar que ciertas combinaciones no pueden variar de manera independiente. Un mecanismo dinámico podría seleccionar valores durante la evolución cosmológica. Un conjunto físicamente realizado de regiones con parámetros diversos, si llegara a justificarse, permitiría formular efectos de selección observacional. Una interpretación teleológica puede proponer que las condiciones del universo responden a una finalidad. Las tres primeras vías contienen proyectos de investigación física con exigencias de formalización y contrastación distintas; la última es una tesis filosófica o teológica cuya aceptación no resulta de medir una constante. Tampoco la física disponible autoriza a descartarla mediante una simple ecuación: su discusión requiere argumentos en un campo diferente.

Desde una perspectiva gnoseológica materialista, la cuestión debe descomponerse en tres niveles. En el primero se encuentran las magnitudes establecidas por procedimientos de medida: espectros, masas, acoplamientos, edades estelares, abundancias nucleares y parámetros cosmológicos estimados con incertidumbre. En el segundo aparecen los modelos que estudian cómo cambiarían esos resultados al alterar parámetros determinados. En el tercero se elaboran hipótesis sobre por qué existen estas leyes y estos valores en lugar de otros. Los pasos entre niveles exigen relaciones demostrables. Confundir el espacio matemático de parámetros con un catálogo de mundos existentes constituye una hipóstasis; tratar las condiciones observadas como si fueran el resultado de una elección consciente constituye una inferencia teleológica adicional, no una consecuencia física.

Atelier Velázquez

La teoría del cierre categorial permite preguntar qué identidades y operaciones sostienen cada resultado. En el cálculo de una resonancia nuclear, la construcción teórica se contrasta con energías medidas y abundancias estelares inferidas; en un modelo alternativo se estudian consecuencias matemáticas bajo condiciones hipotéticas. Ambos trabajos son legítimos, pero su estatuto empírico es diferente. La symploké puede describir filosóficamente sus relaciones parciales con química, astrofísica y biología; no determina por sí misma qué valores de los parámetros admiten organismos. Esa determinación exige investigaciones especializadas y una explicitación de sus incertidumbres.

Una temporalidad condicionada, no un destino

El vínculo con la tesis central de este libro es temporal. Las condiciones que permiten la complejidad incluyen tiempos de vida de estrellas, ritmos de nucleosíntesis, velocidades de expansión, enfriamiento de gas y crecimiento de perturbaciones. Un universo puede admitir núcleos estables y, sin embargo, evolucionar demasiado deprisa para formar estructuras duraderas; otro puede formar estrellas cuyos procesos internos sigan rutas distintas de las solares. El tiempo interviene aquí como parámetro de evolución, duración física de procesos y tiempo cosmológico reconstruido, y ninguna de estas funciones puede sustituir sin más a las demás. El llamado ajuste fino reúne restricciones de escala y de duración que solo adquieren significado al especificarse dentro de teorías y operaciones concretas.

La conclusión más sólida es deliberadamente limitada. Los parámetros conocidos permiten una historia cósmica en la que surgieron galaxias, estrellas, elementos pesados, planetas y organismos; ciertos cambios modelados alterarían esa historia de manera profunda. Todavía no sabemos qué leyes más fundamentales, si existen, fijan esos parámetros, ni disponemos de una distribución generalmente aceptada con la cual calcular la probabilidad de nuestra configuración física. Investigar esas dependencias es una tarea científica legítima. Convertirlas de antemano en prueba de un diseño, de un multiverso realizado o de la inevitabilidad de la vida clausuraría mediante una respuesta filosófica aquello que las ciencias mantienen abierto como problema.

Atelier Velázquez

46.3 Qué se sigue de la ignorancia

La tabla muestra que los problemas abiertos se concentran en tres lugares: en las componentes oscuras que dominan el balance energético del universo, en la frontera entre la gravedad y la teoría cuántica, y en el origen de las condiciones iniciales. Ninguno de ellos autoriza a hablar de un «misterio» que desafíe la comprensión. Todos tienen una forma determinada: se sabe qué medida falta, qué inconsistencia hay que resolver o qué dato es inexplicado. La palabra «misterio» suele usarse para tapar esa forma con una niebla retórica. El desconocimiento delimitado es, en cambio, un resultado positivo de la investigación: un mapa en el que las zonas en blanco tienen bordes.

Parte XI. Observatorio de ciencia contemporánea

Atelier Velázquez

Capítulo 47. El conocimiento científico en movimiento

47.1 Fecha de corte y criterios

Este capítulo registra el estado de los principales programas experimentales y observacionales a fecha de 9 de octubre de 2026. La física es una actividad en curso, y una parte de lo que aquí se afirma quedará superada pronto. Por eso importa distinguir el tipo de cada afirmación: un **resultado publicado** ha pasado la revisión por pares; un **preprint** está disponible públicamente pero no ha sido revisado; un **anuncio** es una comunicación institucional que puede preceder a la publicación; un **indicio** es un resultado con significación estadística insuficiente para considerarlo establecido; un **proyecto en construcción o planificado** todavía no produce datos. Una anomalía estadística no es una revolución científica hasta que la confirman medidas independientes.

47.2 Física de partículas

El LHC funcionó desde 2022 en su tercera campaña, con colisiones de 13.6 TeV, cuyo cierre estaba programado para mediados de 2026, antes de la parada larga que lo convertirá en el LHC de alta luminosidad, cuyas operaciones se prevén para la década de 2030. No ha encontrado partículas fuera del Modelo Estándar. Las medidas de precisión han eliminado dos anomalías que habían suscitado expectativas: el momento magnético del muon, cuyo resultado experimental final de 2025 coincide con la nueva evaluación teórica basada en cálculos en retículo, y la masa del bosón W, cuyo valor discrepante de 2022 no fue confirmado por ATLAS y CMS. LHCb comunicó en 2025 la primera observación de violación CP en bariones. En mayo de 2026, el Consejo del CERN designó el FCC-ee como proyecto preferido para el próximo gran colisionador, con decisión prevista para 2028 (CERN, 2026).

47.3 Cosmología

El instrumento **DESI**, en Arizona, completó en abril de 2026 su programa de cinco años, antes de lo previsto, con más de 47 millones de galaxias y cuásares y 20 millones de estrellas, y continuará observando hasta 2028. Sus análisis de los tres primeros años, publicados en 2025, mostraron una preferencia de entre 2.8 y 4.2 desviaciones típicas por una energía oscura variable, según el catálogo de supernovas utilizado (DESI Collaboration, 2025). Los resultados con el conjunto completo se esperan para 2027. Es un indicio, no un descubrimiento.

Atelier Velázquez

El telescopio espacial **Euclid**, de la Agencia Espacial Europea, lanzado en julio de 2023, publicó en marzo de 2025 un primer conjunto de datos y prepara su primera publicación cosmológica mayor. El **Observatorio Vera C. Rubin**, en Chile, presentó sus primeras imágenes en junio de 2025 e inicia su censo de diez años del cielo austral. El satélite **Gaia** terminó sus observaciones científicas en enero de 2025; su cuarta publicación de datos, prevista para finales de 2026, debe mejorar las paralajes que anclan la escalera de distancias.

En el fondo cósmico de microondas, el **Atacama Cosmology Telescope** publicó en 2025 sus resultados finales, que confirman con precisión independiente las predicciones del modelo ΛCDM y no favorecen las modificaciones propuestas para resolver la tensión de Hubble (Louis et al., 2025; Calabrese et al., 2025). El **Observatorio Simons**, también en Chile, busca la señal de las ondas gravitacionales primordiales. La tensión de Hubble persiste: el análisis de 88 medidas independientes del horizonte sonoro, publicado a comienzos de 2026, la sitúa entre la escalera de distancias y los demás métodos (Pantos y Perivolaropoulos, 2026).

El **telescopio espacial James Webb**, operativo desde julio de 2022, ha identificado galaxias con corrimientos al rojo superiores a 14, menos de 300 millones de años después del comienzo de la expansión (Carniani et al., 2024), ha confirmado la fotometría de las cefeidas de la escalera de distancias y analiza las atmósferas de exoplanetas.

Atelier Velázquez

47.4 Ondas gravitacionales

La cuarta campaña de observación de la red LIGO-Virgo-KAGRA concluyó a finales de 2025 y amplió de manera decisiva el inventario de fusiones de objetos compactos. El catálogo GWTC-4.0, difundido en agosto de 2025 con los datos de la primera etapa de esa campaña (O4a), incorporó 128 nuevas señales de ondas gravitacionales consideradas confiables (LIGO Scientific Collaboration et al., 2025b). El catálogo GWTC-5.0, presentado el 26 de mayo de 2026 con resultados de la siguiente etapa (O4b), añadió 161 eventos y elevó a 390 el número acumulado de eventos confirmados desde la primera detección de 2015 (LIGO Laboratory, 2026). Esta muestra permite realizar análisis estadísticos cada vez más precisos sobre masas, espines, formación y evolución de sistemas compactos. Entre los acontecimientos individuales destaca GW250114, registrado el 14 de enero de 2025 y estudiado como una prueba particularmente precisa de propiedades predichas para la fusión y las oscilaciones finales de agujeros negros. La futura misión

espacial LISA ampliaría estas observaciones hacia frecuencias mucho menores, inaccesibles para los interferómetros terrestres.

47.5 Agujeros negros y astrofísica de altas energías

El **Event Horizon Telescope** ha publicado imágenes de M87* obtenidas en distintos años, que muestran la persistencia del anillo y la variación de su distribución de brillo, y mapas de polarización que revelan la estructura de los campos magnéticos cerca del horizonte de Sagitario A*. Se planifican extensiones de la red con más antenas y observaciones a frecuencias más altas.

En astronomía de neutrinos, el observatorio **IceCube** detectó en 2013 los primeros neutrinos astrofísicos de alta energía (IceCube Collaboration, 2013), identificó en 2018 el primer candidato a fuente, el blázar TXS 0506+056 (IceCube Collaboration et al., 2018), observó en 2022 neutrinos de la galaxia activa NGC 1068 (IceCube Collaboration, 2022) y en 2023 la emisión de neutrinos del plano de la Vía Láctea (IceCube Collaboration, 2023). El 6 de octubre de 2026, la Real Academia Sueca de Ciencias anunció la concesión del premio Nobel de Física a Francis Halzen por sus contribuciones decisivas al observatorio IceCube y al descubrimiento de neutrinos astrofísicos de alta energía (Nobel Prize Outreach, 2026). El telescopio submarino **KM3NeT**, en el Mediterráneo, en construcción, registró en 2023 un neutrino con una energía estimada de unos 220 PeV, el más energético observado, publicado en 2025 (KM3NeT Collaboration, 2025).

Atelier Velázquez

47.6 Neutrinos

El Observatorio Subterráneo de Neutrinos de Jiangmen (JUNO), situado en China, inició la adquisición de datos en agosto de 2025. Sus primeros resultados, comunicados en noviembre de ese año y publicados en Nature en junio de 2026, se basaron en 59,1 días de observación. La colaboración determinó simultáneamente dos parámetros de las oscilaciones de neutrinos: $\sin^2\theta_{12} = 0{,}3092 \pm 0{,}0087$ y $\Delta m^2_{21} = (7{,}50 \pm 0{,}12) \times 10^{-5}$ eV², bajo la hipótesis de ordenamiento normal. La precisión conjunta mejoró aproximadamente por un factor de 1,6 respecto de las mediciones anteriores combinadas. El resultado respalda el diseño del detector, pero no resuelve todavía el ordenamiento de masas de los neutrinos, uno de sus objetivos principales (JUNO Collaboration, 2026). Por otra parte, KATRIN estableció en 2025 una cota superior de 0,45 eV para la masa efectiva del neutrino electrónico; DUNE, en Estados Unidos, y Hyper-Kamiokande, en Japón,

desarrollan programas orientados a estudiar las oscilaciones, el ordenamiento de masas y la posible violación de la simetría CP en el sector leptónico.

47.7 Materia oscura

Los detectores de xenón líquido —**LUX-ZEPLIN** en Estados Unidos, **XENONnT** en Italia, **PandaX-4T** en China— han establecido límites cada vez más estrictos sin detectar ninguna señal (LZ Collaboration, 2025). Se acercan a la región en la que los neutrinos solares y atmosféricos producen un fondo irreducible. Los experimentos de axiones, como ADMX, exploran rangos de masa crecientes sin señal.

47.8 Metrología y física de precisión

Los **relojes ópticos** han alcanzado incertidumbres de 10^{-18} y se comparan entre laboratorios mediante fibras ópticas y enlaces por satélite. La comunidad metrológica prepara una redefinición del segundo basada en transiciones ópticas, para la cual deben cumplirse criterios de exactitud, de comparación entre relojes de distintos tipos y de contribución regular a la escala de tiempo internacional; la decisión se espera para finales de la década. Los segundos intercalares deberán suprimirse a más tardar en 2035. La precisión de estos relojes los convierte en instrumentos de física fundamental: detectan la curvatura gravitatoria en un milímetro de altura, acotan posibles variaciones de las constantes fundamentales y se han propuesto como detectores de ciertos tipos de materia oscura.

Atelier Velázquez

Tabla 15. Estado de programas experimentales y observacionales seleccionados (9 de octubre de 2026)

Programa	Estado	Resultado reciente o previsto	Tipo de afirmación
LHC / HL-LHC	Fin de la tercera campaña; parada larga	Sin física nueva; HL-LHC en la década de 2030	Publicado / planificado
FCC-ee	Proyecto preferido (mayo de 2026)	Decisión prevista en 2028	Decisión institucional
Muon g-2	Concluido	Acuerdo con la teoría actualizada (2025)	Publicado
DESI	Programa de cinco años completado (abril de 2026)	Indicio de energía oscura variable (2.8–4.2σ)	Publicado / indicio
Euclid	Operativo	Primera publicación de datos (2025)	Publicado
Observatorio Rubin	Inicio del censo	Primeras imágenes (junio de 2025)	Anuncio
Gaia	Observaciones concluidas	Cuarta publicación prevista para	Planificado

Programa	Estado	Resultado reciente o previsto	Tipo de afirmación
		finales de 2026	
JWST	Operativo	Galaxias a z > 14	Publicado
LIGO-Virgo-KAGRA	Cuarta campaña concluida	GW250114; catálogos de 2025–2026	Publicado
Event Horizon Telescope	Operativo	Imágenes multianuales y polarimetría	Publicado
IceCube	Operativo	Neutrinos galácticos (2023); Nobel 2026 a F. Halzen	Publicado / anuncio
KM3NeT	En construcción	Neutrino de ~220 PeV	Publicado
JUNO	Operativo desde 2025	Parámetros solares de oscilación	Preprint / publicado
KATRIN	Operativo	$m_\nu < 0.45$ eV	Publicado
DUNE, Hyper-Kamiokande	En construcción	Violación CP en neutrinos	Planificado
LZ, XENONnT, PandaX-4T	Operativos	Límites sin señal	Publicado
Observatorio Simons, LiteBIRD	Operativo / en preparación	Búsqueda de modos B primordiales	Planificado
Relojes ópticos	Operativos	Redefinición del segundo en preparación	Planificado

Nota. Elaboración propia a partir de comunicados institucionales y publicaciones citadas en el capítulo. El estado puede haber cambiado después de la fecha de corte.

Atelier Velázquez

47.9 Lo que muestra el observatorio

El panorama tiene un rasgo dominante: la mayoría de los grandes programas actuales confirma con precisión creciente las teorías establecidas, y las anomalías que suscitan más interés tienen significaciones moderadas o se han disuelto al mejorar la teoría o los instrumentos. Esto no indica que la física esté terminada. Indica que las teorías actuales son extraordinariamente buenas en sus dominios y que los problemas abiertos de la Tabla 14 se encuentran, en su mayoría, en regiones de parámetros o de escalas difíciles de alcanzar. El camino hacia ellos pasa por la precisión, la combinación de mensajeros y la paciencia.

Parte XII. Escultores del tiempo

Atelier Velázquez

Capítulo 48. Las múltiples formas de entender el tiempo

48.1 De Aristóteles a Kant

La filosofía del tiempo ha acompañado a la física desde sus orígenes, y las principales posiciones pueden ordenarse según la respuesta que dan a dos preguntas: si el tiempo es algo por sí mismo o una relación entre cambios, y si su paso es un rasgo del mundo o de la experiencia.

Para Aristóteles, como se vio en el capítulo 3, el tiempo es el número del movimiento según el antes y el después: no existe sin cambio, y requiere quizá un alma que cuente. Agustín, en el libro XI de las *Confesiones*, desplazó el análisis hacia la experiencia: el pasado ya no es, el futuro aún no es, y el presente no tiene extensión; medimos el tiempo en el alma, como una distensión entre la memoria del pasado, la atención al presente y la espera del futuro. Agustín no niega el tiempo del mundo, creado con él; analiza cómo es posible medirlo.

Newton separó un tiempo absoluto, que fluye uniformemente sin relación con nada externo, de los tiempos relativos que miden los relojes. Leibniz respondió que el tiempo no es más que el orden de los sucesos. Su controversia, por mediación de Clarke, fijó la oposición entre el substantivismo y el relacionismo temporal que todavía organiza el debate.

Atelier Velázquez

Immanuel Kant transformó la cuestión. En la *Crítica de la razón pura* (1781, 1787), el tiempo no es una propiedad de las cosas en sí mismas, sino una forma pura de la intuición, la condición bajo la cual pueden darse a la experiencia los fenómenos del sentido interno y, a través de él, todos los fenómenos (Kant, 1787/1998). Kant formuló además, en la primera antinomia de la razón pura, el problema cosmológico del comienzo del mundo: puede demostrarse con igual fuerza que el mundo tuvo un comienzo en el tiempo y que no lo tuvo. Para Kant la antinomia revela un uso ilegítimo de la razón más allá de la experiencia posible. La cosmología física no ha resuelto la antinomia: ha mostrado que la pregunta por el comienzo depende de qué se entienda por tiempo cuando las teorías que lo definen dejan de ser válidas.

48.2 Bergson y Einstein

Henri Bergson distinguió, desde su *Ensayo sobre los datos inmediatos de la conciencia* (1889), entre el tiempo espacializado de la física, una sucesión de instantes homogéneos representada como una línea, y la duración (*durée*), el tiempo vivido, heterogéneo y continuo, en el que los

momentos se compenetran. El 6 de abril de 1922, en la Sociedad Francesa de Filosofía, Bergson y Einstein discutieron públicamente. Bergson sostenía que la relatividad no afecta a la duración real; Einstein respondió que no existe un tiempo de los filósofos distinto del psicológico y del físico (Canales, 2015). Bergson publicó ese año *Duración y simultaneidad* (Bergson, 1922), donde cometió errores en la interpretación de la paradoja de los gemelos que debilitaron su posición entre los físicos. El debate quedó como emblema de una ruptura entre la física y la filosofía continental del tiempo. Retrospectivamente, puede verse como un desencuentro entre dos objetos distintos: el tiempo propio de las líneas de universo, que la relatividad trata con precisión, y la experiencia temporal de los sujetos, que la física no pretende describir.

48.3 Las series A y B

En 1908, John McTaggart distinguió dos maneras de ordenar los acontecimientos. La **serie A** los ordena como pasados, presentes y futuros, determinaciones que cambian: un acontecimiento es primero futuro, después presente, después pasado. La **serie B** los ordena mediante relaciones permanentes de anterioridad y posterioridad: si un acontecimiento es anterior a otro, lo es siempre. McTaggart argumentó que el tiempo requiere la serie A, porque sin ella no hay cambio, y que la serie A es contradictoria, porque todo acontecimiento tendría las tres determinaciones incompatibles; concluyó que el tiempo es irreal (McTaggart, 1908). El argumento es discutido, pero la distinción entre las dos series organiza el debate contemporáneo.

Atelier Velázquez

48.4 Presentismo, eternalismo y bloque creciente

Las posiciones ontológicas principales son tres. El **presentismo** sostiene que solo existe el presente; el pasado ya no existe y el futuro todavía no. El **eternalismo** sostiene que todos los acontecimientos, pasados, presentes y futuros, existen por igual, y que «presente» es un término indéxico, como «aquí»; el universo sería un **bloque** cuatridimensional en el que nada pasa. La teoría del **bloque creciente**, defendida por C. D. Broad en 1923, sostiene que existen el pasado y el presente, y que el bloque crece a medida que se añaden nuevos presentes (Broad, 1923).

Como se vio en el capítulo 15, el argumento de Rietdijk y Putnam pretende que la relatividad especial obliga al eternalismo, porque la relatividad de la simultaneidad impide definir un presente objetivo extendido por el espacio. La respuesta de Stein mostró que el argumento depende de suponer que la existencia debe definirse mediante la simultaneidad. David Malament

demostró en 1977 que, dada la línea de universo de un observador inercial, la simultaneidad estándar de Einstein es la única relación de simultaneidad definible a partir de la estructura causal del espaciotiempo (Malament, 1977), lo que debilitó la tesis de Reichenbach sobre su carácter convencional, pero no establece que el presente de un observador tenga significado ontológico. El presentismo es incompatible con la relatividad si exige un presente global objetivo; hay versiones que lo restringen a un presente local, a lo largo de cada línea de universo, y que son compatibles con ella. George Ellis ha defendido un «universo de bloque en evolución», en el que el futuro no está determinado debido a la indeterminación cuántica (Ellis, 2006).

48.5 Reichenbach, Price, Maudlin, Rovelli

Hans Reichenbach intentó fundamentar el orden temporal en la causalidad: el tiempo sería la estructura de las cadenas causales. En *La dirección del tiempo*, publicada póstumamente en 1956, propuso fundamentar la dirección temporal en la termodinámica de los sistemas ramificados (Reichenbach, 1956). Huw Price defendió que la dirección temporal es una proyección de nuestra perspectiva de agentes (Price, 1996). Tim Maudlin sostiene, en cambio, que el paso del tiempo es un rasgo intrínseco de la estructura física del mundo, y que las leyes describen cómo se produce un estado a partir de otro en el sentido de ese paso (Maudlin, 2007). Lee Smolin ha ido más lejos y ha propuesto que el tiempo es fundamental y que las leyes mismas evolucionan (Smolin, 2013).

Atelier Velázquez

Carlo Rovelli, a partir de la gravedad cuántica de bucles y de la hipótesis del tiempo térmico, ha descrito el tiempo de la experiencia como el resultado de una superposición de capas que la física moderna ha ido separando: la unicidad del tiempo cayó con la relatividad, que asigna a cada línea de universo su propio tiempo; la dirección, con la mecánica estadística, que la reduce a la baja entropía del pasado; la independencia respecto de la materia, con la relatividad general; el presente objetivo, con la relatividad de la simultaneidad; la continuidad, con la gravedad cuántica. Lo que queda en el nivel fundamental serían relaciones entre variables físicas, sin una variable privilegiada que sea «el tiempo» (Rovelli, 2018).

48.6 Tiempo cuántico

La mecánica cuántica introduce una asimetría peculiar. El tiempo no es un observable, sino un parámetro externo. No hay operador tiempo autoadjunto conjugado a un hamiltoniano acotado

inferiormente. El tiempo de llegada de una partícula a un detector, que es una magnitud medible, plantea dificultades teóricas que no han recibido una solución unánime. En la gravedad cuántica canónica, el parámetro externo desaparece. El mecanismo de Page y Wootters sugiere que el tiempo puede recuperarse como correlación entre un subsistema reloj y el resto, lo cual concuerda con la definición operativa del tiempo como lo que miden los relojes.

48.7 Problemas abiertos

No hay una filosofía del tiempo que reúna el consenso de físicos y filósofos. Lo que sí puede afirmarse es que la palabra «tiempo» designa en las ciencias y en la experiencia varias cosas, que algunas posiciones filosóficas privilegian una y declaran derivadas o ilusorias las demás, y que la física contemporánea ha ido separando funciones que estaban unidas en la noción newtoniana. El capítulo 50 intenta cartografiar esas funciones.

Atelier Velázquez

Capítulo 49. Huellas materiales, historia y representación del tiempo

49.1 Registro, reconstrucción, representación

Tres operaciones se confunden cuando se habla de «ver» el pasado. Un **registro** es un estado físico producido por un acontecimiento pasado y correlacionado con él: un estrato geológico, un fotón del fondo cósmico, una huella digital, la emulsión de una placa fotográfica. Una **reconstrucción** es una inferencia que, a partir de registros y leyes, determina un estado o un proceso pasado: la edad de un circón, la temperatura del universo en la recombinación, la trayectoria de un meteorito. Una **representación** es una construcción, material o simbólica, que hace presente algo para un sujeto: un mapa, un diagrama, una pintura, una película.

49.2 Mirar el cielo es mirar el pasado

La finitud de la velocidad de la luz convierte toda observación astronómica en una observación del pasado. Vemos la Luna como era hace 1.3 segundos, el Sol hace 8.3 minutos, Próxima Centauri hace 4.2 años, Andrómeda hace 2.5 millones de años, el fondo cósmico como era hace 13 800 millones de años. El cielo nocturno es una superposición de épocas, ordenadas por distancia. La astronomía es, en ese sentido, una ciencia histórica que dispone de un recurso que la historia humana no tiene: puede observar directamente estados pasados de objetos de la misma clase que los actuales, a distintas distancias y, por tanto, en distintas épocas.

Atelier Velázquez

49.3 Retrodicción e historia

Como se vio en el capítulo 12, la posibilidad de registros depende de la asimetría termodinámica. Gustavo Bueno distinguió en la historiografía entre **reliquias** —restos materiales del pasado que persisten en el presente— y **relatos** —construcciones que organizan esas reliquias en una secuencia—, y caracterizó la historia como una ciencia que opera con reliquias interpretadas mediante relatos que deben poder contrastarse con ellas (Bueno, 1978). La distinción se aplica, con las debidas diferencias, a la geología y la cosmología: los estratos y los fotones son reliquias; las secuencias de acontecimientos son relatos que deben ajustarse a ellos.

La diferencia está en el tipo de leyes. La reconstrucción cosmológica se apoya en leyes físicas comprobadas en el laboratorio —la desintegración nuclear, las transiciones atómicas, la gra-

vitación— y produce identidades cuantitativas entre registros independientes. La reconstrucción histórica humana se apoya en regularidades de la conducta y las instituciones, en las que el sujeto operatorio forma parte del campo, y sus identidades son de otro tipo. Que ambas sean ciencias del pasado no las vuelve idénticas.

49.4 Cronofotografía

En la segunda mitad del siglo XIX, la fotografía permitió por primera vez registrar mecánicamente fases de un movimiento demasiado rápido para el ojo. En junio de 1878, en Palo Alto, Eadweard Muybridge fotografió con doce cámaras accionadas sucesivamente por hilos a la yegua Sally Gardner al galope y mostró que hay un momento en que las cuatro patas están en el aire, pero recogidas bajo el cuerpo, no extendidas como en la pintura ecuestre tradicional. Su *Locomoción animal* reunió miles de imágenes de personas y animales en movimiento (Muybridge, 1887).

Étienne-Jules Marey, fisiólogo francés, se interesó por el movimiento como objeto de medida. Había desarrollado aparatos que inscribían gráficamente el pulso, la respiración y la marcha, y en *El método gráfico* defendió que las curvas trazadas por los instrumentos son el lenguaje de los fenómenos (Marey, 1878). En 1882 construyó un «fusil fotográfico» que tomaba doce imágenes por segundo, y después desarrolló la cronofotografía sobre placa fija, en la que las fases sucesivas de un movimiento se superponen en una sola imagen, a intervalos regulares, de modo que la posición puede medirse en función del tiempo (Braun, 1992). Las imágenes de Marey son registros y, a la vez, gráficas: convierten el movimiento en un diagrama espaciotemporal, como los de Minkowski, en el que el tiempo se representa por el espacio.

49.5 Perspectiva y representación del movimiento

La representación del espacio en la pintura europea había experimentado una transformación comparable cuatro siglos antes. Hacia 1415–1425, Filippo Brunelleschi realizó en Florencia una demostración de perspectiva lineal con un panel que representaba el baptisterio y un espejo, y en 1435 Leon Battista Alberti codificó en *De pictura* un procedimiento geométrico para construir la representación de un espacio tridimensional en un plano, concebido como una ventana a través de la cual se mira la escena desde un punto (Alberti, 1435/1991). La perspectiva lineal es una aplicación de la geometría de proyecciones y tiene antecedentes en la óptica de Euclides, Pto-

Atelier Velázquez

lomeo e Ibn al-Haytham. Fija un punto de vista y un instante: la escena se representa como la vería un ojo inmóvil.

La representación del movimiento en un soporte fijo es un problema distinto. Los pintores futuristas italianos, como Giacomo Balla, y Marcel Duchamp en su *Desnudo bajando una escalera* (1912), conocían las cronofotografías de Marey y las utilizaron para pintar el movimiento como superposición de fases. El cine, desde el cinematógrafo de los hermanos Lumière en 1895, resolvió el problema de otro modo: no representa el movimiento en una imagen, sino que lo reproduce mediante una sucesión de imágenes fijas proyectadas a un ritmo superior al que el ojo puede separar.

49.6 Tarkovski: esculpir en el tiempo

Andréi Tarkovski tituló su libro de reflexiones sobre el cine *Zapechatlennoe vremia*, literalmente «el tiempo impreso» o «sellado», traducido al español como *Esculpir en el tiempo* (Tarkovski, 1986/1991). Para Tarkovski, el cine es el único arte que fija el tiempo mismo, tal como transcurre, en una forma que puede reproducirse indefinidamente; el cineasta trabaja como un escultor que, a partir de un bloque de tiempo registrado, elimina lo que no pertenece a la obra. Su noción de una «presión del tiempo» dentro del plano —la sensación de que el tiempo fluye en la imagen con una densidad propia, independiente del montaje— es una tesis sobre la experiencia temporal del espectador, no sobre la física.

La expresión que da título a este libro procede de esa imagen, y la comparación con la ciencia es instructiva precisamente por sus límites. El cineasta y el físico trabajan ambos con registros de procesos temporales: el primero con la película, el segundo con las señales de sus detectores. Ambos seleccionan, recortan y transforman esos registros. Pero sus operaciones persiguen fines diferentes.

49.7 Imagen artística e imagen científica

Las imágenes astronómicas contemporáneas muestran la diferencia. Las fotografías del telescopio Hubble y del Webb que circulan públicamente se componen a partir de exposiciones en distintos filtros, muchas veces fuera del espectro visible, a las que se asignan colores convencionales: en la «paleta Hubble», la emisión del azufre ionizado se representa en rojo, la del hidrógeno en verde y la del oxígeno en azul. Las imágenes del Event Horizon Telescope son reconstruccio-

Atelier Velázquez

nes a partir de datos interferométricos incompletos. Las visualizaciones de simulaciones cosmológicas representan magnitudes —densidad, temperatura— mediante colores y brillos elegidos para la legibilidad. En todos estos casos hay decisiones estéticas.

Lorraine Daston y Peter Galison reconstruyeron la historia de las imágenes científicas como una sucesión de ideales epistémicos: la fidelidad a la naturaleza de los atlas del siglo XVIII, que representaban el tipo ideal; la objetividad mecánica del siglo XIX, que pretendía eliminar la intervención del sujeto mediante registros automáticos; y el juicio entrenado del siglo XX, que reconoce la necesidad de la interpretación experta (Daston y Galison, 2007).

La diferencia entre la imagen científica y la artística no está en que una sea un registro puro y la otra una construcción: ambas son construcciones a partir de registros. Está en el papel que desempeñan las operaciones del sujeto. En la imagen científica, las operaciones deben poder ser repetidas por otros sujetos con el mismo resultado, y la imagen funciona como término en una cadena de identidades: el anillo del Event Horizon Telescope tiene un diámetro que se compara con una masa obtenida de otra manera. Las decisiones estéticas son legítimas en la medida en que no alteran esas relaciones. En la imagen artística, las operaciones del sujeto forman parte de la obra: la manera en que Tarkovski sostiene un plano o en que Marey superpone las fases es lo que se ofrece al espectador. En términos de la distinción del capítulo inicial, la imagen científica tiende a neutralizar al sujeto operatorio en el resultado, y la artística lo incorpora. Ambas, sin embargo, son modos de dar forma material a procesos temporales, y ambas enseñan a ver algo que sin ellas no se vería.

Atelier Velázquez

49.8. La duración como materia de composición

La comparación entre arte y ciencia puede extenderse a la música, donde la diferencia entre duración medida, estructura representada y experiencia temporal resulta particularmente visible. Una partitura organiza relaciones de sucesión, simultaneidad, proporción y repetición; su ejecución transforma esas relaciones en acontecimientos acústicos que poseen duraciones medibles. Sin embargo, la duración cronológica de una interpretación no agota su organización musical ni determina por sí sola la experiencia del oyente. Un silencio de cuatro segundos puede desempeñar funciones distintas según su posición dentro de la obra, las relaciones armónicas que lo preceden y las expectativas que produce.

El metrónomo proporciona una referencia periódica, pero no establece por sí mismo el sentido de una frase musical. De manera semejante, el montaje cinematográfico permite comprimir, prolongar o reorganizar acontecimientos representados sin modificar la duración física de los procesos originalmente registrados. La cronofotografía de Marey, por su parte, transforma una sucesión temporal en una distribución espacial de posiciones que puede servir tanto a la investigación del movimiento como a la experimentación artística.

Estas operaciones no autorizan a identificar el tiempo físico con el musical, el cinematográfico o el vivido. Muestran, más bien, que diferentes prácticas pueden operar sobre duraciones, secuencias y registros materiales bajo reglas que no son intercambiables. Allí donde la física exige relaciones cuantitativas contrastables, la composición artística organiza experiencias y representaciones cuya eficacia no se reduce a la reproducción de una medición.

La expresión «escultores del tiempo» adquiere así un sentido filosófico preciso. No designa sujetos capaces de modificar una sustancia temporal, sino operadores que seleccionan, registran, transforman y articulan procesos materiales dotados de duración. El cosmólogo, el metrólogo, el músico y el cineasta no ejecutan la misma clase de operaciones; precisamente por ello, su comparación permite reconocer conexiones reales sin borrar las diferencias entre sus respectivos campos.

Atelier Velázquez

Capítulo 50. Materia investigando materia

50.1 Las dos preguntas

El libro comenzó con dos preguntas. La primera: ¿qué significa que algo ocurra en el tiempo, y cómo ha cambiado esa noción a medida que se transformaron las teorías físicas? La segunda: ¿cómo consiguió un animal situado en un pequeño planeta reconstruir una historia física que abarca desde las escalas subatómicas hasta el universo observable?

La respuesta a la segunda pregunta, que la obra ha intentado dar caso por caso, puede resumirse así. No hubo una facultad especial de conocimiento, sino una acumulación de operaciones materiales: medir ángulos con gnómones y cuadrantes, contar oscilaciones de péndulos y de átomos, separar la luz en espectros, construir telescopios, aceleradores, interferómetros y detectores, escribir ecuaciones y resolverlas, comparar los resultados de unas operaciones con los de otras. Cada instrumento extendió el alcance de los órganos de los sujetos y, a la vez, incorporó teorías en su diseño. El conocimiento cosmológico se construyó cuando cursos operatorios independientes —la nucleosíntesis y el fondo cósmico, la paralaje y las cefeidas, la dinámica estelar y la sombra de un agujero negro— convergieron en las mismas magnitudes. La materia que investiga es parte de la materia investigada: los cuerpos de los sujetos, sus instrumentos y sus registros son procesos físicos, y las estructuras que construyen son relaciones entre esos procesos. No hay un punto de vista exterior al universo desde el que mirarlo; hay operaciones dentro de él cuyos resultados no dependen de quién las ejecuta.

Los límites de esa reconstrucción también son materiales. El horizonte de partículas limita la región observable; la escala de Planck limita, probablemente, la validez de las teorías actuales; la unicidad del universo impone la varianza cósmica; la baja entropía inicial, condición de posibilidad de todos los registros, carece de explicación.

50.2 Las conexiones parciales entre teorías

A lo largo del recorrido, las relaciones entre teorías han aparecido bajo formas diferentes. La mecánica newtoniana es el **límite** de la relativista para velocidades pequeñas y campos débiles, y el límite clásico de la cuántica para acciones grandes frente a $\hbar$. La termodinámica es una **descripción efectiva** de la mecánica estadística, a la que se conecta mediante una medida de proba-

Atelier Velázquez

bilidad y una condición inicial que la mecánica no contiene. La electrodinámica cuántica es una **teoría efectiva** de la teoría electrodébil por debajo de la escala de los bosones W y Z. La óptica es un **caso** del electromagnetismo, identificado por la igualdad entre $1/\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$ y la velocidad de la luz. La materia condensada es **compatible** con la mecánica cuántica sin ser deducible de ella en la práctica, y sus identidades exactas proceden de propiedades colectivas universales. La relatividad general y la teoría cuántica están en **conflicto** donde ambas deberían aplicarse a la vez. Estas relaciones no son todas del mismo tipo. Unas son derivaciones con errores controlados; otras son correspondencias en límites singulares; otras, conexiones mediante supuestos adicionales; otras, conflictos abiertos.

Este es el contenido preciso de la symploké aplicada a la física: unas teorías se conectan con otras, pero no todas con todas ni del mismo modo. La imagen de una pirámide con una teoría fundamental en la cúspide de la que todo se deduciría no describe la física existente. Tampoco la describe la imagen de un archipiélago de teorías inconmensurables. Lo que hay es una red con nudos densos, conexiones de distintos tipos y zonas de fricción.

Atelier Velázquez

50.3 Dialéctica y verdad

Las controversias examinadas —el vacío entre Aristóteles y los atomistas, el geocentrismo y el heliocentrismo, la edad de la Tierra entre Kelvin y los geólogos, el universo estático y el estado estacionario, la materia oscura y la gravedad modificada, la tensión de Hubble— muestran un patrón dialéctico sin necesidad de un esquema de tesis, antítesis y síntesis. Las contradicciones surgieron cuando los resultados de unas operaciones chocaron con los de otras; se resolvieron, cuando se resolvieron, mediante nuevas operaciones y nuevos instrumentos que reorganizaron el campo, no mediante la victoria de un argumento. A veces una de las partes tenía razón en lo esencial (Kelvin no la tenía); a veces ambas tenían razón en parte (Shapley y Curtis); a veces la contradicción reveló un supuesto compartido falso (el éter en Lorentz y en sus críticos).

La teoría del cierre categorial ha servido como instrumento de análisis de la verdad científica, entendida como identidad sintética entre cursos operatorios independientes. Su utilidad se ha mostrado en casos concretos: la prueba de la Luna de Newton, el número de Avogadro de Perrin, la concordancia entre el deuterio primordial y el fondo cósmico, la identidad entre c y $1/\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$, la concordancia entre la masa de M87* obtenida por dinámica estelar y la obtenida por el tamaño

de su sombra. También ha permitido distinguir ese tipo de verdad del éxito predictivo sin cierre (los epiciclos), de la fecundidad matemática sin conexión operatoria con el mundo (partes de la teoría de cuerdas) y de la extrapolación de metáforas (el universo como información). Su límite está en que no sustituye al análisis científico de cada caso: dice qué buscar, no qué se encontrará.

50.4 Una cartografía de las temporalidades científicas

La utilidad de una cartografía gnoseológica del tiempo depende de su capacidad para explicar relaciones verificables entre funciones distintas. Una clasificación que se limitara a enumerarlas repetiría, con otros nombres, distinciones ya contenidas en la física. El problema filosófico comienza cuando se investiga qué operaciones hacen posible pasar de una descripción temporal a otra, qué magnitudes permanecen invariantes y qué pierde significado durante el tránsito.

Criterio de articulación gnoseológica

La cartografía exige una distinción preliminar. Las funciones temporales consideradas no pertenecen todas al mismo nivel de análisis. Algunas son parámetros de formulación matemática; otras, magnitudes físicas mensurables; otras, relaciones causales, procedimientos de reconstrucción, estructuras históricas o modalidades de experiencia y representación. Su agrupación no supone que constituyan especies de una única entidad física denominada «tiempo». Responde al problema filosófico de establecer las relaciones que permiten, o impiden, pasar justificadamente de unas a otras.

Atelier Velázquez

Se propone examinar cada articulación mediante cinco condiciones:

Primera, determinación del dominio. Debe establecerse dentro de qué teoría, escala, sistema material o práctica operatoria adquiere significado cada función temporal. Una magnitud definida dentro de una teoría no puede trasladarse sin condiciones a otra.

Segunda, identificación del procedimiento. Deben especificarse las operaciones mediante las cuales se obtiene la magnitud, relación o representación correspondiente: conteo de oscilaciones, comparación de relojes, integración de ecuaciones, análisis de registros, inferencia histórica o construcción simbólica.

Tercera, explicitación del vínculo. La relación entre dos funciones debe apoyarse en una transformación matemática, una correspondencia empírica, una dependencia causal o una com-

paración operatoria identificable. La semejanza terminológica no constituye, por sí misma, una conexión demostrada.

Cuarta, determinación de invariantes y límites. Cuando corresponda, debe establecerse qué magnitudes permanecen invariantes, qué relaciones se conservan bajo las transformaciones utilizadas y qué supuestos restringen su validez. No toda articulación dispone de invariantes en sentido físico estricto: algunas solo admiten concordancias empíricas, relaciones inferenciales o comparaciones filosóficas.

Quinta, control de identificación ilegítima. Debe distinguirse entre relacionar dos funciones y declararlas idénticas. La primera operación puede estar justificada mediante resultados científicos; la segunda exige demostrar que las diferencias relevantes desaparecen bajo condiciones expresamente establecidas.

Estas condiciones permiten distinguir tres resultados: articulaciones fuertes, sostenidas por relaciones matemáticas y contrastaciones independientes dentro de un dominio definido; articulaciones condicionadas, que requieren hipótesis adicionales o procedimientos de reconstrucción; y analogías filosóficas o representacionales, útiles para comparar campos, pero insuficientes para establecer una identidad física.

Atelier Velázquez

El criterio no mide la verdad de las teorías ni sustituye sus procedimientos de demostración. Su función es reconstruir la legitimidad de sus conexiones y reconocer el punto en que una relación operatoria se transforma injustificadamente en una identificación ontológica.

Una primera conexión articula el tiempo metrológico, el tiempo propio y los sistemas de coordenadas. Un reloj atómico realiza una frecuencia de referencia y acumula duración a lo largo de su trayectoria; comparar relojes espacialmente separados requiere, además, procedimientos de transferencia de señales y una descripción relativista de sus movimientos y de los campos gravitatorios. Los sistemas de navegación por satélite combinan estas operaciones: necesitan escalas temporales coordinadas, predicciones orbitales y correcciones relativistas para relacionar las señales emitidas desde trayectorias diferentes. El acuerdo entre predicciones y mediciones confirma la consistencia de esa articulación. Sin embargo, la escala temporal de coordinación y el

tiempo propio de un reloj particular desempeñan funciones distintas; su relación matemática no los convierte en una sola magnitud sin condiciones.

Una segunda conexión une el tiempo medido directamente con el tiempo reconstruido. La datación radiométrica utiliza tasas de desintegración calibradas, concentraciones isotópicas observadas y modelos de la historia material de las muestras. La edad atribuida a una roca depende de los supuestos sobre el sistema isotópico, sus condiciones de cierre y posibles intercambios posteriores de materia. Un reloj de laboratorio y una roca antigua no realizan la misma operación: el primero compara procesos presentes; la segunda conserva relaciones materiales que permiten inferir una duración pasada. La concordancia entre métodos isotópicos distintos puede fortalecer esa inferencia, pero cada supuesto y cada fuente de error deben examinarse de manera independiente.

Una tercera conexión relaciona el tiempo cosmológico, la evolución térmica y el tiempo inferido desde la radiación observada. En modelos homogéneos e isótropos, el corrimiento al rojo cosmológico satisface $1 + z = a(t_0)/a(t_e)$, donde a representa el factor de escala, t_0 la época de observación y t_e la de emisión. Para la radiación de fondo, bajo las condiciones habituales de expansión adiabática, la temperatura evoluciona aproximadamente según $T(z) = T_0(1 + z)$. El espectro y las anisotropías medidos actualmente, junto con un modelo dinámico de expansión, permiten reconstruir condiciones del universo temprano. Asignar una edad a esas condiciones exige especificar los parámetros cosmológicos y las hipótesis del modelo. La propagación de la radiación, la evolución térmica y la coordenada cosmológica intervienen conjuntamente sin reducirse a una misma función temporal.

Atelier Velázquez

El criterio también sirve para descartar identificaciones injustificadas. El parámetro de una ecuación de evolución no contiene, por sí mismo, un flujo temporal; la flecha termodinámica designa una asimetría de determinados procesos, no una sustancia temporal; la existencia de un tiempo cosmológico en ciertos modelos no restablece un presente universal newtoniano; y la ausencia de un tiempo externo ordinario en algunas ecuaciones de gravedad cuántica tampoco demuestra que todos los fenómenos temporales sean ilusorios. Las conexiones y los límites se determinan caso por caso, mediante matemáticas, mediciones y supuestos reconocibles.

La cartografía tiene, por tanto, una función crítica y constructiva. Permite comparar operaciones de sincronización, reconstrucción de acontecimientos pasados e inferencias cosmológicas, y

muestra por qué una teoría puede relacionar funciones temporales sin autorizarnos a identificarlas. Su originalidad posible reside en ese criterio de articulación, cuyo alcance debe valorarse por los problemas que esclarece y las objeciones que admite, más que por la pretensión de haber descubierto una nueva propiedad física del tiempo.

Tabla 16. Cartografía gnoseológica de las temporalidades científicas

Función temporal	Dominio	Operaciones que dan acceso	Invariantes o contrastes relevantes	Conexiones con otras funciones	Identificación ilegítima frecuente
1. Parámetro dinámico	Mecánica, teoría de campos, mecánica cuántica	Integración de ecuaciones de evolución	La forma de las leyes cuando existe simetría de traslación temporal	Con la energía (Noether); con el tiempo coordenado	Confundir el parámetro con un flujo
2. Tiempo metrológico	Metrología	Conteo de oscilaciones atómicas; comparación de relojes	La frecuencia de una transición atómica (definición del segundo)	Realiza el tiempo propio de cada reloj	Suponer que mide un tiempo absoluto
3. Tiempo propio	Relatividad especial y general	Lectura de un reloj a lo largo de su trayectoria	La longitud temporal de una línea de universo	Lo realiza el tiempo metrológico; el cósmico es el propio de los observadores comóviles	Suponer que es igual para todos los relojes
4. Tiempo coordenado	Relatividad	Elección de coordenadas y de convención de sincronía	Nada: depende de la elección	Se fija mediante señales y la estructura causal	Atribuirle significado físico directo
5. Orden causal	Relatividad; conjuntos causales	Envío de señales; estructura de conos de luz	El orden parcial de acontecimientos con separación temporal	Restringe las sincronizaciones posibles; fundamenta la prohibición de señales superlumínicas	Identificarlo con un orden temporal total
6. Tiempo termodinámico	Termodinámica, mecánica estadística	Medida de calores y temperaturas; conteo de microestados	Tendencia estadística al aumento de la entropía macroscópica, bajo las condiciones aplicables	Hace posibles los registros; se apoya en la condición cosmológica inicial	Identificar la flecha con el tiempo mismo o con su paso
7. Tiempo cosmológico	Cosmología relativista	Integración de las ecuaciones de Friedmann con parámetros medidos	El tiempo propio de los observadores comóviles en soluciones homogéneas	Combina 3, 6 y 8	Tomarlo por un presente universal de la teoría general
8. Tiempo reconstruido	Geología, astrofísica, cosmología	Retrodicción a partir de registros y leyes	Las edades obtenidas por métodos independientes	Requiere 6 (registros) y 1 (leyes) calibrados con 2	Confundir reconstrucción con observación directa
9. Tiempo histórico	Historiografía, ciencias humanas	Interpretación de reliquias mediante relatos	Secuencias contrastadas con reliquias	Comparte con 8 la forma; difiere en el tipo de leyes	Reducirlo a tiempo físico o separarlo por

Atelier Velázquez

Función temporal	Dominio	Operaciones que dan acceso	Invariantes o contrastes relevantes	Conexiones con otras funciones	Identificación ilegítima frecuente
					completo
10. Tiempo vivido	Psicología, fenomenología	Experiencia, memoria, expectativa	Ninguno en sentido físico	Se apoya en procesos físicos (6) del organismo	Proyectarlo sobre la física o declararlo ilusorio
11. Tiempo representado	Artes, visualización científica	Registro, montaje, composición	Las relaciones que se conservan en la representación científica	Usa registros (8) y sujetos (10)	Tomar la imagen por el proceso
12. Tiempo en gravedad cuántica	Programas de investigación	Correlaciones entre subsistemas; flujos de estados	Problema abierto	Debe recuperar 3, 5 y 6 en el límite clásico	Concluir que «el tiempo no existe»

Nota. Elaboración propia. La tabla organiza funciones temporales según sus dominios, operaciones, relaciones relevantes, conexiones y posibles extrapolaciones. Se distingue entre invariantes físicos estrictos, concordancias empíricas, relaciones inferenciales y propiedades de las representaciones. Las doce entradas no corresponden a clases ontológicamente equivalentes ni pretenden identificar «tipos de sustancia temporal». Su finalidad es precisar las condiciones y los límites de articulación entre funciones heterogéneas.

Atelier Velázquez

La propuesta tiene antecedentes que deben reconocerse. Isham clasificó en 1993 las estrategias para recuperar el tiempo en gravedad cuántica. Callender ha distinguido entre el tiempo manifiesto de la experiencia y el tiempo de la física. Rovelli ha descrito la disolución por capas de las propiedades del tiempo newtoniano. Reichenbach intentó derivar el orden temporal de la causalidad y la dirección de la termodinámica. La contribución que aquí se propone consiste en organizar esas distinciones según un criterio gnoseológico: para cada función se indica qué operaciones permiten acceder a ella, qué permanece invariante bajo esas operaciones y mediante qué identidades se conecta con las demás.

Alcance crítico y objeciones a la cartografía

La propuesta admite al menos tres objeciones que conviene formular antes de extraer sus consecuencias.

La primera procede del reduccionismo físico. Podría sostenerse que las diversas funciones temporales identificadas no son más que manifestaciones derivadas de una estructura fundamental todavía desconocida. La existencia de múltiples procedimientos para medir o representar el tiempo no demostraría, desde esta perspectiva, una pluralidad irreductible de temporalidades. La objeción es legítima: la diversidad operatoria presente no constituye una prueba de imposibilidad

de unificación futura. Sin embargo, aun si una teoría más fundamental permitiera derivar determinadas relaciones temporales, seguiría siendo necesario establecer bajo qué condiciones aparecen las magnitudes efectivas, qué aproximaciones permiten recuperarlas y qué operaciones las convierten en resultados contrastables. Una derivación formal no elimina por sí sola las diferencias entre los procedimientos científicos mediante los cuales se accede a sus resultados.

La segunda objeción afecta al carácter heterogéneo de la clasificación. El tiempo propio relativista es una magnitud física definida matemáticamente, mientras que el tiempo histórico y el tiempo vivido remiten a prácticas y fenómenos de naturaleza diferente. Agruparlos podría producir una falsa equivalencia categorial. La respuesta consiste en reconocer expresamente esa heterogeneidad: la cartografía no afirma que todas sus entradas pertenezcan a una única categoría científica. Su objeto es la articulación filosófica entre categorías y prácticas, no la reducción de todas ellas a una misma definición física.

La tercera objeción se refiere a la novedad del planteamiento. La filosofía contemporánea ya ha distinguido entre tiempo físico y manifiesto, temporalidades relacionales, estructuras causales y problemas de fundamentación. La propuesta presente no reclama prioridad sobre esas distinciones. Su contribución específica consiste en someterlas a un criterio comparativo centrado en dominios, operaciones, invariantes, dependencias y límites de identificación. Su valor dependerá de la capacidad para esclarecer casos concretos que otras clasificaciones dejan insuficientemente diferenciados.

Atelier Velázquez

De estas objeciones se desprende una restricción fundamental: la cartografía no constituye una demostración de irreductibilidad ontológica definitiva. Tampoco permite resolver por sí misma el problema del paso temporal o de la flecha termodinámica. Su utilidad consiste en mostrar qué conexiones están científicamente establecidas, cuáles dependen de supuestos adicionales y cuáles siguen siendo problemas filosóficos abiertos.

50.5 Tesis defendidas, tesis abiertas

Puede establecerse ahora qué ha quedado defendido y qué no.

Ha quedado suficientemente defendida la primera tesis: el conocimiento físico del cosmos se constituye mediante articulaciones específicas entre fenómenos, instrumentos, operaciones, cons-

trucciones matemáticas, experimentos e inferencias. Cada capítulo ha mostrado alguna de esas articulaciones, y ninguno ha encontrado un resultado cosmológico que no dependa de ellas.

Ha quedado suficientemente defendida la segunda: las teorías físicas tienen dominios de validez y se relacionan mediante límites, aproximaciones, correspondencias y teorías efectivas, con zonas de conflicto. La relación entre la relatividad general y la teoría cuántica sigue siendo un conflicto abierto.

Ha quedado defendida, con la precisión que permite la cartografía de la Tabla 16, la tercera: el tiempo aparece en la física bajo funciones heterogéneas, conectadas parcialmente mediante identidades operatorias, y su identificación sin análisis produce extrapolaciones.

Quedan abiertas cuestiones que este libro no resuelve. Queda abierto si una teoría de gravedad cuántica permitirá derivar todas las funciones temporales de una estructura más básica, o si alguna de ellas, como la flecha o el paso, tiene un carácter primitivo. Queda abierto el origen de la baja entropía inicial. Queda abierto si el paso del tiempo es un rasgo del mundo físico o de la relación entre los sujetos y el mundo. La cartografía no decide estas cuestiones; las formula de manera que pueda saberse qué tipo de operación las decidiría.

Atelier Velázquez

50.6 Nuevas preguntas

La investigación abre al menos tres preguntas. La primera es si los relojes ópticos, que hoy detectan la curvatura en un milímetro, permitirán acceder experimentalmente a la relación entre el tiempo propio y la teoría cuántica, por ejemplo mediante relojes en superposición de alturas, como se ha propuesto. La segunda es si la cosmología podrá someter a prueba la hipótesis del pasado, o si esta permanecerá como condición de posibilidad no explicada de toda reconstrucción. La tercera es filosófica y concierne a la relación entre el tiempo vivido y los demás: si la experiencia temporal de los sujetos, que es ella misma un proceso físico en un organismo, puede situarse en la cartografía sin reducirla a un epifenómeno ni elevarla a fundamento.

El título de este libro pedía una filosofía para cosmólogos y escultores del tiempo. Los cosmólogos trabajan con el tiempo reconstruido y el tiempo cosmológico, y necesitan saber cuándo están ante una identidad y cuándo ante una extrapolación. Los escultores del tiempo —cineastas, fotógrafos, músicos, pero también relojeros y metrólogos— trabajan con el tiempo registrado y representado, y su obra enseña que todo registro es una operación. Lo que tienen en común es

que ninguno trabaja con «el tiempo» en singular, sino con funciones temporales materialmente determinadas, y que su trabajo consiste en articularlas.

Atelier Velázquez

Conclusión

Este ensayo ha recorrido veinticinco siglos de intentos de ordenar el cosmos y de medir el cambio, desde los calendarios babilonios hasta los relojes ópticos, desde las esferas de Eudoxo hasta las fusiones de agujeros negros. No ha pretendido ofrecer una historia completa de la física ni una exposición técnica de cada teoría, sino reconstruir, mediante casos concretos, cómo se construye el conocimiento del universo y qué se puede afirmar con legitimidad sobre el tiempo a partir de él.

Tres resultados merecen subrayarse.

El primer resultado es gnoseológico. El conocimiento físico del cosmos se constituye mediante articulaciones históricamente determinadas entre fenómenos, instrumentos, operaciones, modelos matemáticos y procedimientos de inferencia. Numerosos resultados científicos especialmente sólidos se apoyan en la convergencia de vías de contrastación relativamente independientes: la identificación de la gravitación terrestre y celeste, la determinación del número de Avogadro mediante técnicas diferentes o las restricciones cosmológicas obtenidas del fondo de microondas y de la abundancia de elementos ligeros. Esa independencia, sin embargo, no puede darse por supuesta: los procedimientos pueden compartir calibraciones, hipótesis teóricas o errores sistemáticos. En la teoría del cierre categorial, determinadas confluencias pueden analizarse como identidades sintéticas. Se trata de una interpretación filosófica que esclarece casos importantes de objetividad científica, pero no agota todas las modalidades de prueba o justificación presentes en las ciencias. Las teorías se reformulan, las interpretaciones ontológicas cambian y ciertos resultados permanecen válidos dentro de límites de precisión y aplicación cuidadosamente delimitados.

El segundo resultado concierne a la articulación de las teorías físicas. Sus relaciones forman una estructura plural de límites, aproximaciones, correspondencias, reducciones, teorías efectivas y problemas de compatibilidad. El grupo de renormalización permite explicar algunas de esas relaciones, especialmente la dependencia de las descripciones respecto de la escala y la aparición de

Atelier Velázquez

comportamientos universales en sistemas diferentes. Su fecundidad no convierte todos los vínculos entre disciplinas en casos de renormalización. La symploké ofrece una interpretación filosófica de la coexistencia de conexiones específicas y autonomías relativas, mientras la determinación de cada vínculo exige argumentos físicos concretos. Una futura teoría de gravedad cuántica podría transformar profundamente la descripción del espaciotiempo sin eliminar por ello la utilidad de la termodinámica, la química o la mecánica en sus respectivos dominios.

El tercer resultado concierne al tiempo. La noción newtoniana de un tiempo absoluto, único, uniforme y universal se ha descompuesto en funciones que las teorías modernas tratan por separado: el parámetro de las leyes dinámicas, la magnitud que miden los relojes atómicos, el tiempo propio de cada trayectoria, el orden causal de los conos de luz, la dirección termodinámica, el tiempo cósmico de los modelos homogéneos, el tiempo reconstruido a partir de registros, el tiempo vivido y representado, y el problema abierto del tiempo en la gravedad cuántica. Estas funciones están conectadas por identidades operatorias bien establecidas, pero no se dejan reducir a una. La cartografía propuesta en el capítulo 50 no es una teoría física nueva: es un instrumento para distinguir lo que la física afirma de lo que se le atribuye. Permite decir con precisión por qué la relatividad no demuestra por sí sola que el paso del tiempo sea una ilusión, por qué la segunda ley de la termodinámica no es la definición del tiempo, por qué el tiempo cósmico no es un presente universal y por qué la ecuación de Wheeler-DeWitt no prueba que el tiempo no exista.

La contribución filosófica de la investigación puede formularse, por tanto, de manera delimitada: no se ha descubierto una nueva propiedad física del tiempo, sino que se ha propuesto un criterio de articulación gnoseológica para examinar las relaciones entre sus distintas funciones científicas y representacionales. La distinción entre dominios, operaciones, invariantes, correspondencias y extrapolaciones permite conservar la pluralidad de los procedimientos sin convertirla en incomunicación entre disciplinas. También permite reconocer conexiones efectivas sin elevarlas a una identidad universal injustificada. Esta propuesta es revisable y deberá juzgarse por los problemas que esclarece, las distinciones que introduce y las objeciones que puede soportar. Su mérito, si lo tiene, no reside en clausurar definitivamente la cuestión del tiempo, sino en proporcionar una forma más rigurosa de plantear sus relaciones.

Atelier Velázquez

El límite de este trabajo es claro. Es un ensayo filosófico apoyado en resultados científicos, no una investigación científica original. Las Ideas del materialismo filosófico que ha utilizado —symploké, dialéctica, géneros de materialidad, cierre categorial— se han mostrado útiles para ordenar materiales y detectar extrapolaciones, pero no han sido demostradas por esos materiales, ni podrían serlo del modo en que se demuestra una ley física. Otras teorías de la ciencia ordenarían los mismos casos de otra manera, y algunas de sus intuiciones —el realismo de entidades de Hacking, el realismo estructural de Worrall, el análisis de Cartwright sobre las leyes— han sido incorporadas cuando aclaraban un problema. Los resultados de frontera recogidos en el capítulo 47 envejecerán pronto. Algunas de las cuestiones filosóficas, como la naturaleza del paso del tiempo, quedan formuladas con más precisión, pero no resueltas.

Queda, al final, la imagen que dio título a la última parte. Un animal que habita la superficie de un planeta ha aprendido a esculpir intervalos de tiempo en átomos de cesio y de estroncio, a leer en la luz de microondas la temperatura de un universo de 380 000 años, a reconstruir en circones la edad de la Tierra y en ondas gravitacionales la fusión de dos horizontes. Lo ha hecho sin salir de la materia de la que forma parte, mediante operaciones que cualquier otro sujeto competente puede repetir. Esa es la única garantía que tiene su conocimiento, y no es pequeña.

Atelier Velázquez

Glosario conceptual y etimológico

Adecuacionismo

Concepción de la verdad científica como correspondencia entre una teoría y una realidad dada independientemente. En la clasificación de Bueno, una de las cuatro familias de teorías de la ciencia (cap. 45).

Aiőn (αἰών)

«Fuerza vital», «duración de una vida», «edad»; en Platón, eternidad, de la que el tiempo es imagen móvil (cap. 2).

Anánkē (ἀνάγκη)

«Necesidad»; personificada en Parménides y en el mito de Er (cap. 2).

Archḗ (ἀρχή)

«Comienzo», «mando»; en la filosofía griega, principio de todas las cosas. La atribución de su uso técnico a Anaximandro procede de la tradición doxográfica (cap. 3).

Átomo (ἄτομος)

«Que no se puede cortar». Término de Leucipo y Demócrito para los constituyentes indivisibles de la materia; hoy designa un sistema de núcleo y electrones que sí es divisible (caps. 3, 11).

Causalidad

Del latín *causa*, término primero jurídico. Relación por la cual un suceso o una variable produce o determina otro; en la física moderna, inscrita en la estructura de conos de luz y analizada en términos de intervención (caps. 3, 9, 15).

Chrónos (χρόνος)

«Tiempo» como sucesión medible. Distinto etimológicamente de Krónos, el titán; su identificación es una alegoría tardía (cap. 2).

Atelier Velázquez

Cierre categorial

Teoría de la ciencia de Gustavo Bueno según la cual una ciencia se constituye cuando las operaciones sobre un campo de términos producen identidades sintéticas estables con independencia del sujeto que las ejecuta (caps. 0, 5, 7, 20, 32, 50).

Circularismo

Teoría de la ciencia que concibe la forma y la materia de las ciencias como constituidas conjuntamente en las operaciones; posición defendida por Bueno (cap. 45).

Cosmología y cosmogonía

De *kósmos* y *lógos* o *gígnomai*. La cosmología describe la estructura y evolución del universo; la cosmogonía narra su origen (cap. 1).

Descripcionismo

Teoría de la ciencia que la concibe como descripción o resumen de hechos (cap. 45).

Dialéctica (διαλεκτική)

De *dialégesthai*, «conversar». En Platón, método de ascenso a los principios; en Aristóteles, razonamiento a partir de opiniones aceptadas; en Hegel, movimiento de la realidad y el pensamiento; en Bueno, tratamiento de contradicciones entre resultados de operaciones en procesos materiales (caps. 3, 50).

Atelier Velázquez

Dýnamis (δύναμις)

«Capacidad», «potencia»; en Aristóteles, potencia frente a acto (cap. 3).

Emergencia

Aparición en un sistema de propiedades que no poseen sus componentes; débil si son deducibles en principio, fuerte si no lo son (cap. 21).

Enérgeia (ἐνέργεια)

Término aristotélico: actividad, acto. No equivale al concepto físico moderno de energía, constituido en el siglo XIX como magnitud conservada (caps. 3, 10).

Entropía

Término acuñado por Clausius en 1865 a partir de *tropḗ*, «transformación». Función de estado cuyo aumento caracteriza los procesos irreversibles; en la formulación de Boltzmann, proporcional al logaritmo del número de microestados (caps. 10–12).

Epistemología y gnoseología

De *epistḗmē*, «saber», y *gnôsis*, «conocimiento». En el uso de Bueno, la epistemología estudia la relación sujeto-objeto en el conocimiento; la gnoseología, la constitución de las ciencias como sistemas de operaciones (cap. 0).

Física (φυσική)

De *phýsis*. Originalmente, el saber sobre la naturaleza; hoy, ciencia experimental y matematizada de los sistemas materiales en cuanto descritos mediante magnitudes medibles y leyes generales (cap. 0).

Identidad sintética

En la teoría del cierre categorial, igualdad entre términos obtenidos por cursos operatorios distintos, que no se sigue de definiciones (caps. 0, 7, 11, 27).

Invariancia

Propiedad de una magnitud o una ley de no cambiar bajo una transformación. El término matemático *invariante* fue difundido por Sylvester (cap. 16).

Atelier Velázquez

Kairós (καιρός)

«Medida justa», «momento oportuno» (cap. 2).

Kínēsis (κίνησις)

«Movimiento», «cambio»; en Aristóteles, actualización de lo que está en potencia en cuanto tal (cap. 3).

Kósmos (κόσμος)

«Orden», «disposición», «adorno»; aplicado al mundo como totalidad ordenada desde la filosofía jonia (cap. 1).

Lógos (λόγος)

De *légō*, «recoger, contar, decir»: palabra, discurso, cuenta, razón, proporción. En Euclides, razón entre magnitudes (cap. 3).

Materia

Del latín *materia*, «madera de construcción», que tradujo el griego *hýlē*. Materia física: lo que estudia la física. Materia filosófica en Bueno: idea que comprende tres géneros de materialidad (cap. 0).

M_1, M_2, M_3

Géneros de materialidad en la ontología de Bueno: físico-exteriores, subjetivos o vivenciales y objetividades abstractas (caps. 0, 3, 32).

Métron (μέτρον)

«Medida». Raíz de *symmetría* y de numerosos términos metrológicos (cap. 16).

Phýsis (φύσις)

De *phýō*, «hacer crecer»: crecimiento, constitución, naturaleza. Aristóteles distingue siete acepciones (cap. 0).

Quantum

Neutro del latín *quantus*, «cuánto». Cantidad mínima de energía intercambiada o transportada, introducida por Planck y Einstein (cap. 18).

Reducción

Derivación de las leyes de una teoría a partir de las de otra más fundamental, mediante definiciones puente (cap. 21).

Atelier Velázquez

Simetría (συμμετρία)

«Conmensurabilidad», «proporción debida»; en la física moderna, transformación que deja invariantes las leyes (cap. 16).

Symploké (συμπλοκή)

«Entrelazamiento». En Platón, combinación de las Formas que hace posible el discurso; en Bueno, principio según el cual unas cosas están conectadas con otras pero no todas con todas (caps. 0, 21, 31, 39, 50).

Teoreticismo

Teoría de la ciencia que la identifica con sistemas de teorías contrastadas con los hechos; el falsacionismo es su forma más conocida (cap. 45).

Teoría efectiva

Teoría válida en un dominio de escalas, que incorpora la física de otras escalas a través de pocos parámetros (cap. 21).

Tiempo propio

Tiempo que marca un reloj a lo largo de su línea de universo; invariante relativista (caps. 8, 15, 17, 50).

Universalidad

Independencia del comportamiento de gran escala respecto de los detalles microscópicos, explicada por el grupo de renormalización (caps. 21, 42).

Atelier Velázquez

Anexos

Atelier Velázquez

Anexo A. Atlas biográfico e índice de exponentes

Tabla 17. Exponentes principales: periodo, contribución y capítulos donde se tratan

Exponente	Periodo	Campo	Contribución principal	Capítulos
Tales de Mileto	s. VI a. n. e.	Filosofía natural	Principio material (agua)	3
Anaximandro	c. 610–546 a. n. e.	Filosofía natural	Ápeiron; Tierra sin apoyo; orden del tiempo	3
Parménides	s. V a. n. e.	Filosofía	El ser inmutable; desafío al cambio	3
Demócrito	c. 460–370 a. n. e.	Filosofía natural	Átomos y vacío	3, 11
Platón	427–347 a. n. e.	Filosofía	*Timeo*; symploké en el *Sofista*	0, 2, 3
Aristóteles	384–322 a. n. e.	Filosofía, física	Causas; movimiento; tiempo como número del movimiento	3, 48
Eudoxo	c. 390–337 a. n. e.	Astronomía, matemáticas	Esferas homocéntricas; teoría de proporciones	4, 5
Euclides	c. 300 a. n. e.	Matemáticas	*Elementos*	4
Aristarco	c. 310–230 a. n. e.	Astronomía	Distancias Sol–Luna; heliocentrismo	4
Eratóstenes	c. 276–194 a. n. e.	Geografía	Circunferencia terrestre	4
Hiparco	c. 190–120 a. n. e.	Astronomía	Precesión; tabla de cuerdas	5
Ptolomeo	c. 100–170	Astronomía	*Almagesto*; ecuante	5
Agustín de Hipona	354–430	Filosofía, teología	Tiempo como *distentio animi*	2, 48
Āryabhaṭa	476–c. 550	Astronomía	Rotación terrestre; senos	6
Brahmagupta	598–c. 668	Matemáticas	Reglas del cero	6
Al-Battānī	c. 858–929	Astronomía	Parámetros solares	6
Ibn al-Haytham	c. 965–1040	Óptica	Teoría de la visión; crítica del ecuante	6
Al-Bīrūnī	973–c. 1050	Astronomía, geodesia	Radio terrestre	6
Naṣīr al-Dīn al-Ṭūsī	1201–1274	Astronomía	Par de Ṭūsī; Maragha	6
Guo Shoujing	1231–1316	Astronomía	*Shoushi li*; año de 365.2425 días	6
Jean Buridan	c. 1301–1360	Filosofía natural	Ímpetu	6
Nicole Oresme	c. 1320–1382	Filosofía natural	Representación gráfica; velocidad media	6
Ibn al-Shāṭir	1304–1375	Astronomía	Modelos sin ecuante	6
Ulugh Beg y al-Kāshī	s. XV	Astronomía, matemáticas	Samarcanda; 2π con 16 decimales	6
Copérnico	1473–1543	Astronomía	Heliocentrismo; distancias relativas	6

Atelier Velázquez

Exponente	Periodo	Campo	Contribución principal	Capítulos
Tycho Brahe	1546–1601	Astronomía	Observación de precisión	6
Kepler	1571–1630	Astronomía	Leyes del movimiento planetario	6
Galileo	1564–1642	Física, astronomía	Telescopio; caída de los cuerpos	6, 8
Huygens	1629–1695	Física	Reloj de péndulo; fuerza centrífuga	8
Newton	1642–1727	Física, matemáticas	Leyes del movimiento; gravitación; cálculo	7
Leibniz	1646–1716	Filosofía, matemáticas	Cálculo; tiempo relacional	7, 48
Euler y Lagrange	s. XVIII	Matemáticas, mecánica	Cálculo de variaciones; mecánica analítica	9
Laplace	1749–1827	Física matemática	Determinismo; mecánica celeste	9
Hamilton	1805–1865	Física matemática	Hamiltoniano; espacio de fases	9
Carnot	1796–1832	Termodinámica	Eficiencia máxima de máquinas térmicas	10
Joule	1818–1889	Física	Equivalente mecánico del calor	10
Clausius	1822–1888	Termodinámica	Segunda ley; entropía	10
Kelvin	1824–1907	Física	Temperatura absoluta; edad de la Tierra	10, 24
Faraday	1791–1867	Física	Inducción; líneas de fuerza	13
Maxwell	1831–1879	Física	Ecuaciones del campo; distribución de velocidades	11, 13
Boltzmann	1844–1906	Física	Entropía estadística; teorema H	11
Gibbs	1839–1903	Física	Mecánica estadística de conjuntos	11
Poincaré	1854–1912	Matemáticas, física	Tres cuerpos; relatividad; convención	9, 14
Lorentz	1853–1928	Física	Transformaciones; teoría del electrón	14
Einstein	1879–1955	Física	Relatividades; cuantos de luz; movimiento browniano	11, 14, 17, 18
Minkowski	1864–1909	Matemáticas	Espaciotiempo	15
Emmy Noether	1882–1935	Matemáticas	Simetrías y leyes de conservación	16
Schwarzschild	1873–1916	Astronomía	Primera solución exacta	17, 30
Planck	1858–1947	Física	Cuanto de acción; cuerpo negro	18
Bohr	1885–1962	Física	Modelo atómico; complementariedad	18, 20
De Broglie	1892–1987	Física	Ondas de materia	18
Heisenberg	1901–1976	Física	Mecánica matricial; incertidumbre	18
Schrödinger	1887–1961	Física	Ecuación de ondas; entrelazamiento	18, 19
Born	1882–1970	Física	Interpretación probabilista	18
Pauli	1900–1958	Física	Exclusión; neutrino	18, 22
Dirac	1902–1984	Física	Ecuación relativista; antimateria	18, 21
Bose	1894–1974	Física	Estadística de partículas indistingui-	18

Atelier Velázquez

Exponente	Periodo	Campo	Contribución principal	Capítulos
			bles	
Fermi	1901–1954	Física	Teoría de la desintegración beta	22
Feynman, Schwinger, Tomonaga, Dyson	s. XX	Física	Electrodinámica cuántica renormalizada	21
Bell	1928–1990	Física	Desigualdades	19
Clauser, Aspect, Zeilinger	s. XX–XXI	Física	Pruebas experimentales del teorema de Bell	19
Bohm, Everett	s. XX	Física	Interpretaciones alternativas	20
Wilson	1936–2013	Física	Grupo de renormalización	21
P. W. Anderson	1923–2020	Física	Rotura de simetría; «más es diferente»	21
Yang y Mills	s. XX	Física	Teorías gauge no abelianas	21, 22
Gell-Mann	1929–2019	Física	Quarks	22
Glashow, Weinberg, Salam	s. XX	Física	Teoría electrodébil	22
Englert, Brout, Higgs	s. XX	Física	Mecanismo de Higgs	22
’t Hooft y Veltman	s. XX	Física	Renormalizabilidad de teorías gauge	22
Pontecorvo	1913–1993	Física	Oscilaciones de neutrinos	22
Kajita y McDonald	s. XX–XXI	Física	Descubrimiento de las oscilaciones	22
Henrietta Leavitt	1868–1921	Astronomía	Relación periodo-luminosidad	23
Cecilia Payne-Gaposchkin	1900–1979	Astronomía	Composición estelar	24
Chandrasekhar	1910–1995	Astrofisica	Límite de las enanas blancas	24, 30
Jocelyn Bell Burnell	1943–	Radioastronomía	Púlsares	24
Slipher	1875–1969	Astronomía	Velocidades de nebulosas	26
Friedmann	1888–1925	Física matemática	Universos en expansión	26
Lemaître	1894–1966	Cosmología	Expansión; átomo primitivo	26
Hubble	1889–1953	Astronomía	Distancias galácticas; ley de recesión	25, 26
Zwicky	1898–1974	Astronomía	Materia oscura en cúmulos	25
Vera Rubin	1928–2016	Astronomía	Curvas de rotación planas	25
Gamow, Alpher, Herman	s. XX	Cosmología	Nucleosíntesis; predicción del fondo	27
Penzias y Wilson	s. XX	Radioastronomía	Fondo cósmico de microondas	27
Peebles	1935–	Cosmología	Cosmología física	25, 27
Perlmutter, Schmidt, Riess	s. XX–XXI	Cosmología	Aceleración de la expansión	28
Guth, Starobinsky, Linde	s. XX–XXI	Cosmología	Inflación	29
Penrose	1931–	Física matemática	Teoremas de singularidad	30
Kerr	1934–	Física matemática	Agujeros negros en rotación	30
Bekenstein	1947–2015	Física	Entropía de los agujeros negros	31
Hawking	1942–2018	Física	Radiación de los agujeros negros	31
Wheeler y DeWitt	s. XX	Física	Cuantización canónica de la gravedad	33, 36

Atelier Velázquez

Exponente	Periodo	Campo	Contribución principal	Capítulos
Veneziano, Nambu, Susskind	s. XX	Física	Origen de la teoría de cuerdas	34
Scherk, Schwarz, Green	s. XX	Física	Supercuerdas como teoría de la gravedad	34
Witten	1951–	Física, matemáticas	Teoría M	34, 35
Polchinski	1954–2018	Física	D-branas	34
Strominger y Vafa	s. XX–XXI	Física	Microestados de agujeros negros	31, 35
Maldacena	1968–	Física	Correspondencia AdS/CFT	35
Ashtekar, Rovelli, Smolin	s. XX–XXI	Física	Gravedad cuántica de bucles	36, 48
Reuter	1959–	Física	Seguridad asintótica	36
Sorkin	1945–	Física	Conjuntos causales	36
Ambjørn, Jurkiewicz, Loll	s. XX–XXI	Física	Triangulaciones dinámicas causales	36
Hartle y Vilenkin	s. XX–XXI	Cosmología	Cosmología cuántica	36
Halzen	1944–	Astrofísica de partículas	IceCube; neutrinos astrofísicos	47
Kant	1724–1804	Filosofía	Tiempo como forma de la intuición	48
Bergson	1859–1941	Filosofía	Duración	48
Reichenbach	1891–1953	Filosofía de la ciencia	Dirección del tiempo	12, 48
Duhem, Popper, Kuhn, Lakatos	s. XX	Filosofía de la ciencia	Contrastación y cambio teórico	5, 44, 45
Gustavo Bueno	1924–2016	Filosofía	Materialismo filosófico; cierre categorial	0, 3, 45, 50
van Fraassen, Hacking, Cartwright	s. XX–XXI	Filosofía de la ciencia	Empirismo constructivo; realismo de entidades; leyes	32, 43
Price, Albert, Maudlin, Callender	s. XX–XXI	Filosofía del tiempo	Flecha y paso del tiempo	12, 48

Nota. Elaboración propia. La tabla funciona como índice onomástico de los exponentes principales; las contribuciones se desarrollan en los capítulos indicados.

Atelier Velázquez

Anexo B. Atlas de ecuaciones

Tabla 18. Ecuaciones principales explicadas en el texto

Nombre	Expresión	Capítulo
Paralaje	$d\,[\mathrm{pc}] = 1/p\,[''] $	4
Tercera ley de Kepler	$T^2 = 4\pi^2 a^3 / G(M+m)$	6, 7
Segunda ley de Newton	$\vec{F} = d\vec{p}/dt$	7
Gravitación universal	$F = G m_1 m_2 / r^2$	7
Oscilador armónico	$x(t) = A\cos(\omega t + \varphi)$	8
Euler-Lagrange	$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = 0$	9
Ecuaciones de Hamilton	$\dot{q} = \partial H/\partial p,\ \dot{p} = -\partial H/\partial q$	9
Sistema de Lorenz	$\dot{x} = \sigma(y-x)$, etc.	9
Primera ley	$\Delta U = Q - W$	10
Eficiencia de Carnot	$\eta = 1 - T_f/T_c$	10
Entropía de Clausius	$dS = \delta Q_{\mathrm{rev}}/T$	10
Entropía de Boltzmann	$S = k_B \ln W$	11
Factor de Boltzmann	$p_i \propto e^{-E_i/k_B T}$	11
Límite de Landauer	$E_{\min} = k_B T \ln 2$	11
Ecuaciones de Maxwell	$\nabla \cdot \vec{E} = \rho/\varepsilon_0$, etc.	13
Fuerza de Lorentz	$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$	13
Transformaciones de Lorentz	$t' = \gamma(t - vx/c^2)$	14
Dilatación temporal	$\Delta t = \gamma \Delta \tau$	14
Masa-energía	$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$	14
Intervalo de Minkowski	$ds^2 = -c^2dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$	15
Teorema de Noether (energía)	$E = \sum \dot{q}\ \partial L/\partial \dot{q} - L$	16
Ecuaciones de Einstein	$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}/c^4$	17
Radio de Schwarzschild	$r_s = 2GM/c^2$	17, 30
Ley de Planck	$B_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1}$	18
Efecto fotoeléctrico	$E_k = h\nu - W$	18
Niveles de Bohr	$E_n = -13.6\ \mathrm{eV}/n^2$	18
Ecuación de Schrödinger	$i\hbar\ \partial_t \psi = \hat{H}\psi$	18
Incertidumbre	$\Delta x\, \Delta p \geq \hbar/2$	18
Ecuación de Dirac	$(i\hbar\gamma^\mu \partial_\mu - mc)\psi = 0$	18
Desigualdad CHSH	$\lvert S \rvert \leq 2$ (local); $2\sqrt{2}$ (cuántico)	19

Atelier Velázquez

Nombre	Expresión	Capítulo
Integral de camino	$\int \mathcal{D}[x]\, e^{iS/\hbar}$	21
Oscilación de neutrinos	$P = \sin^{22}\theta \sin^2(1.27\Delta m^2 L/E)$	22
Módulo de distancia	$m - M = 5\log_{10}(d/10\ \text{pc})$	23
Teorema de Bayes	$P(\theta\|D) \propto P(D\|\theta)P(\theta)$	23
Desintegración radiactiva	$t = \lambda^{-1}\ln(1 + D/P)$	24
Ley de Hubble-Lemaître	$v = H_0 d$	26
Corrimiento al rojo	$1 + z = 1/a(t_e)$	26
Ecuación de Friedmann	$H^2 = 8\pi G\rho/3 - kc^2/a^2 + \Lambda c^2/3$	26
Temperatura de Hawking	$T_H = \hbar c^3/8\pi G M k_B$	31
Entropía de Bekenstein-Hawking	$S = k_B A/4\ell_P^2$	31
Wheeler-DeWitt	$\hat{H}\Psi = 0$	33
Espectro de área (bucles)	$A = 8\pi\gamma\ell_P^2 \sum\sqrt{j(j+1)}$	36
Ecuación de Tsiolkovski	$\Delta v = v_e \ln(m_0/m_f)$	38
Correcciones GPS	$-v^2/2c^2;\ GM(1/R - 1/r)/c^2$	40

Nota. Elaboración propia. Los símbolos, unidades, supuestos y dominios de validez se explican en los capítulos indicados.

Atelier Velázquez

Anexo C. Atlas de instrumentos

Tabla 19. Instrumentos principales: qué detectan, cómo funcionan y qué inferencias permiten

Instrumento	Qué detecta	Principio de funcionamiento	Magnitud medida	Errores característicos	Inferencias que permite
Gnomon y cuadrante	Sombra y altura de astros	Geometría de la proyección	Ángulos	Refracción atmosférica, lectura	Latitud, estaciones, tamaño terrestre
Telescopio óptico con CCD	Fotones visibles e infrarrojos	Óptica; efecto fotoeléctrico en silicio	Flujo, posición	Difracción, atmósfera, calibración	Distancias, temperaturas, composición
Espectrógrafo	Distribución de la luz por longitud de onda	Dispersión por red o prisma	Longitud de onda, intensidad	Calibración de longitud de onda, resolución	Composición, velocidad, temperatura
Radiotelescopio e interferómetro	Ondas de radio	Antenas; correlación de señales	Intensidad, fase	Cobertura incompleta, ruido	Imágenes de alta resolución; fondo cósmico
Reloj atómico	Frecuencia de transiciones atómicas	Resonancia; conteo de oscilaciones	Intervalos de tiempo	Efectos de entorno, desplazamientos sistemáticos	Tiempo propio; relatividad; posición (GPS)
Acelerador y detector	Productos de colisiones	Campos electromagnéticos; interacción partícula-materia	Energía, momento, trayectorias	Fondo, simulación, sistemáticos de calibración	Partículas, secciones eficaces, constantes
Detector de neutrinos	Luz Cherenkov o centelleo	Interacción débil en grandes volúmenes	Energía y dirección	Fondo de rayos cósmicos, eficiencia	Oscilaciones, fuentes astrofísicas
Interferómetro gravitacional	Variaciones de longitud de 10^{-21}	Interferometría láser	Deformación en función del tiempo	Ruido sísmico, térmico y cuántico	Fusiones de objetos compactos; pruebas de la relatividad
Espectrómetro de masas	Razones isotópicas	Separación por razón masa/carga	Abundancias relativas	Fraccionamiento, contaminación	Edades radiométricas
Detector de xenón líquido	Retrocesos nucleares	Centelleo y carga en xenón	Energía depositada	Radiactividad de fondo, neutrinos	Límites a la materia oscura

Nota. Elaboración propia.

Atelier Velázquez

Capítulo 51. Instrumentos complementarios

El siguiente cuadro completa el atlas sin repetir los instrumentos ya tratados en la Tabla 19. Se presentan quince tecnologías adicionales, seleccionadas por su importancia histórica o experimental.

Instrumento	Principio y alcance
Astrolabio planisférico	Proyección geométrica de la esfera celeste; determina alturas, posiciones y problemas horarios. Precisión limitada por escalas, latitud y observación.
Sextante de navegación	Mide ángulos ópticos mediante reflexión; junto con efemérides y cronómetros contribuye a determinar posiciones. Requiere correcciones de refracción y horizonte.
Cronómetro marino	Transporta una referencia de tiempo para calcular longitud geográfica mediante comparación de horas. Sus limitaciones incluyen deriva y sensibilidad ambiental.
Radar planetario	Transmite pulsos de radio y mide retardos y desplazamientos Doppler para inferir distancias, velocidades y propiedades de superficies.
Telescopio espacial infrarrojo	Registra radiación infrarroja de fuentes frías, regiones con polvo o emisores con corrimiento al rojo; exige control térmico y calibración espectral.
Satélite astrométrico	Mide posiciones, paralajes y movimientos estelares mediante óptica de precisión y calibración global; permite reconstruir distancias y cinemática.
Bolómetro cosmológico	Absorbe radiación y mide la variación de una propiedad sensible, habitualmente térmica; detecta señales cósmicas débiles con ruido controlado.
Cámara de niebla	Hace visibles trayectorias de partículas cargadas mediante gotas condensadas sobre iones; proporciona registros indirectos de ionización.
Cámara de burbujas	Forma burbujas sobre trayectorias de partículas cargadas en líquidos sobrecalentados; permite estimar momento y carga en campos magnéticos.
Detector de silicio	Registra cargas producidas por partículas en semiconductores; reconstruye trayectorias y vértices, con límites de resolución y alineación.
Calorímetro de partículas	Estima la energía depositada por partículas y cascadas secundarias en materiales detectores; necesita calibración de respuesta y corrección de pérdidas.
Fotomultiplicador	Transforma fotones incidentes en señales eléctricas amplificadas; se emplea en sistemas de centelleo y Cherenkov, con límites de ruido y ganancia.
Telescopio de rayos X	Registra fotones energéticos mediante óptica de incidencia rasante o técnicas especiales; estudia plasmas calientes y acreción.
Reloj atómico óptico	Utiliza frecuencias de transición óptica para realizar y comparar referencias temporales de precisión extrema; permite medir efectos relativistas.
Red VLBI	Combina señales de radiotelescopios distantes mediante sincronización precisa; consigue alta resolución angular, limitada por cobertura y calibración.

La comparación entre estos dispositivos muestra que observar consiste en articular fenómenos, materiales, modelos y operaciones instrumentales. Cada instrumento amplía determinadas capacidades y, al mismo tiempo, introduce límites de resolución, calibración e interpretación.

Atelier Valdivieso

Anexo D. Cronología

Tabla 20. Cronología selectiva de teorías, instrumentos y descubrimientos

Fecha	Acontecimiento	Capítulo
c. 3200 a. n. e.	Newgrange, orientación solsticial	1
s. VII a. n. e.	Copias del *Enūma eliš* y de *MUL.APIN*; diarios astronómicos babilonios	2
c. 585 a. n. e.	Tales y la tradición jonia	3
c. 300 a. n. e.	*Elementos* de Euclides	4
c. 240 a. n. e.	Medición de Eratóstenes	4
c. 150	*Almagesto* de Ptolomeo	5
499	*Āryabhaṭīya*	6
1261	*Tadhkira* de al-Ṭūsī; observatorio de Maragha (1259)	6
1281	Calendario *Shoushi* de Guo Shoujing	6
1543	*De revolutionibus* de Copérnico	6
1609–1619	Leyes de Kepler; telescopio de Galileo (1609–1610)	6
1656	Reloj de péndulo de Huygens	8
1687	*Principia* de Newton	7
1788	*Mécanique analytique* de Lagrange	9
1824	*Reflexiones* de Carnot	10
1831	Inducción electromagnética (Faraday)	13
1838	Primera paralaje estelar (Bessel)	4
1846	Descubrimiento de Neptuno	7
1865	Ecuaciones de Maxwell; entropía de Clausius	10, 13
1877	Entropía estadística de Boltzmann	11
1887	Experimento de Michelson y Morley	14
1900	Cuanto de Planck	18
1905	Relatividad especial; cuantos de luz; movimiento browniano	11, 14, 18
1908	Espaciotiempo de Minkowski	15
1912	Relación periodo-luminosidad (Leavitt)	23
1913	Átomo de Bohr	18
1915	Ecuaciones de Einstein	17
1918	Teoremas de Noether	16
1919	Eclipse y desviación de la luz	17
1922–1927	Friedmann y Lemaître: universo en expansión	26
1925–1927	Mecánica cuántica: Heisenberg, Schrödinger, Born, incertidumbre	18
1928	Ecuación de Dirac	18

Atelier Velázquez

Fecha	Acontecimiento	Capítulo
1929	Ley de Hubble-Lemaître	26
1933	Materia oscura en el cúmulo de Coma (Zwicky)	25
1935	EPR; gato de Schrödinger	19
1948	Nucleosíntesis primordial; electrodinámica cuántica renormalizada	21, 27
1955	Reloj atómico de cesio	8
1956	Detección del neutrino	22
1964	Teorema de Bell; mecanismo de Higgs; quarks	19, 22
1965	Fondo cósmico de microondas; teorema de singularidad de Penrose	27, 30
1967	Primer púlsar; teoría electrodébil; segundo atómico del SI	8, 22, 24
1970–1980	Curvas de rotación planas (Rubin)	25
1971–1973	Renormalizabilidad; libertad asintótica; grupo de renormalización	21, 22
1974–1975	Radiación de Hawking; púlsar binario	17, 31
1980–1982	Inflación; experimentos de Aspect	19, 29
1984	Primera revolución de supercuerdas	34
1986–1995	Gravedad cuántica de bucles	36
1992	Anisotropías del fondo cósmico (COBE)	27
1995	Teoría M; quark top; primer exoplaneta en estrella solar	22, 24, 35
1997	Correspondencia AdS/CFT	35
1998	Aceleración de la expansión; oscilaciones de neutrinos	22, 28
2012	Bosón de Higgs	22
2015	Primera detección de ondas gravitacionales; pruebas de Bell sin lagunas	17, 19
2019	Imagen de M87*; redefinición del SI	8, 30
2022	Imagen de Sagitario A*; primeras imágenes del JWST	30, 47
2025	GW250114; DESI DR2; JUNO; resultado final de Muon g-2	22, 28, 30, 47
2026	DESI completa su programa; Estrategia Europea (FCC-ee); Nobel a F. Halzen	47

Nota. Elaboración propia a partir de las fuentes citadas en los capítulos.

Atelier Velázquez

Anexo E. Constantes, magnitudes, símbolos y unidades

Capítulo 52. E.1. Consideraciones generales

La formulación matemática de las teorías físicas requiere distinguir magnitudes, unidades, constantes y parámetros. Una magnitud representa una propiedad susceptible de cuantificación dentro de un procedimiento determinado; la unidad establece una referencia convencional de medida; una constante física aparece como cantidad invariante dentro de las condiciones de una teoría; un parámetro depende del modelo o sistema considerado.

Esta distinción resulta particularmente importante en cosmología. La velocidad de la luz en el vacío posee un valor exacto por definición del Sistema Internacional, mientras que la constante de gravitación universal conserva incertidumbre experimental. Por otra parte, la constante de Hubble no es una constante fundamental universal: es un parámetro cosmológico estimado mediante observaciones y modelos.

Capítulo 53. E.2. Constantes fundamentales

Símbolo	Magnitud	Valor	Unidad
c	Velocidad de la luz en el vacío	299 792 458, exacto	m/s
h	Constante de Planck	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$, exacto	J·s
ħ	Constante reducida de Planck, h/2π	$\approx 1.054\,571\,817 \times 10^{-34}$	J·s
G	Constante de gravitación universal	$6.674\,30(15) \times 10^{-11}$	$m^3/(kg \cdot s^2)$
k_B	Constante de Boltzmann	$1.380\,649 \times 10^{-23}$, exacto	J/K
e	Carga elemental, magnitud positiva	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$, exacto	C
N_A	Constante de Avogadro	$6.022\,140\,76 \times 10^{23}$, exacto	mol^{-1}
Δν_Cs	Frecuencia de transición hiperfina del cesio-133 que define el segundo	9 192 631 770, exacto	Hz
α	Constante de estructura fina	≈ 1/137.036	Adimensional
ε_0	Permitividad eléctrica del vacío	$\approx 8.854\,187\,8188 \times 10^{-12}$	F/m
μ_0	Permeabilidad magnética del vacío	$\approx 1.256\,637\,06127 \times 10^{-6}$	N/A^2

Nota. Los valores exactos corresponden a las definiciones vigentes del Sistema Internacional; los restantes valores son aproximados o poseen incertidumbre experimental. Desde la redefinición del SI en 2019, ε_0 y μ_0 no poseen valores numéricos exactos por definición.

Capítulo 54. E.3. Unidades y referencias astronómicas

Magnitud	Símbolo	Equivalencia aproximada o exacta

Magnitud	Símbolo	Equivalencia aproximada o exacta
Unidad astronómica	ua	149 597 870 700 m, exactos
Año luz	a.l.	$9.460\,730\,472\,5808 \times 10^{15}$ m, para el año juliano
Pársec	pc	$\approx 3.085\,677\,581 \times 10^{16}$ m
Kilopársec	kpc	10^3 pc
Megapársec	Mpc	10^6 pc
Gigapársec	Gpc	10^9 pc
Año juliano	a	365.25 días = 31 557 600 s
Masa solar	$M_\odot$	$\approx 1.988 \times 10^{30}$ kg
Masa terrestre	$M_\oplus$	$\approx 5.972 \times 10^{24}$ kg
Radio terrestre medio	$R_\oplus$	$\approx 6.371 \times 10^6$ m
Electronvoltio	eV	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ J, exactos
Gigaelectronvoltio	GeV	10^9 eV
Teraelectronvoltio	TeV	10^{12} eV

Las unidades astronómicas permiten expresar distancias y escalas que serían difíciles de manejar mediante metros ordinarios. Debe recordarse que el año luz es una unidad de distancia y que el electronvoltio es una unidad de energía.

Atelier Velázquez

Capítulo 55. E.4. Parámetros cosmológicos

H_0 — Constante de Hubble actual. Valor del parámetro de expansión H(t) en la época presente. Su estimación depende de observaciones, calibraciones y modelos cosmológicos, y es objeto de una controversia importante.

a(t) — Factor de escala. Función que describe la evolución relativa de distancias comóviles en modelos cosmológicos homogéneos e isótropos. Suele normalizarse a uno en la época presente.

z — Corrimiento al rojo. Parámetro adimensional definido mediante la comparación entre longitudes de onda observadas y emitidas bajo las condiciones correspondientes.

Λ — Constante cosmológica. Parámetro que aparece en las ecuaciones de Einstein y que dentro de ΛCDM se relaciona con la componente de energía oscura de tipo constante cosmológica.

Ω_m — Parámetro de densidad de materia. Razón entre la densidad total de materia y la densidad crítica en la época considerada.

Ω_b — Parámetro de densidad bariónica. Razón entre la densidad de materia bariónica y la densidad crítica.

Ω_Λ — Parámetro asociado a la constante cosmológica. Expresa su contribución relativa al balance cosmológico dentro del modelo utilizado.

T_CMB — Temperatura del fondo cósmico de microondas. Magnitud observacional de aproximadamente 2.7255 K en la época presente.

t_0 — Edad cosmológica estimada. Tiempo transcurrido desde el régimen inicial caliente y denso descrito mediante el modelo cosmológico, de aproximadamente 13.8 mil millones de años en ΛCDM. No debe confundirse con una demostración de la edad de una totalidad metafísica.

Los parámetros cosmológicos deben citarse junto al conjunto de datos, modelo y fecha de estimación cuando se utilicen valores numéricos precisos.

Capítulo 56. E.5. Símbolos frecuentes en las ecuaciones

Símbolo	Significado habitual
t	Coordenada o parámetro temporal
τ	Tiempo propio u otro parámetro, según contexto
x	Posición o coordenada
v	Velocidad
a	Aceleración; también factor de escala cosmológico cuando se escribe a(t)
m	Masa
F	Fuerza
p	Momento lineal
E	Energía
K o T	Energía cinética, según convención
V o U	Energía potencial, según convención
L	Lagrangiano; también luminosidad o momento angular en otros contextos
H	Hamiltoniano; también parámetro de Hubble, según contexto
S	Acción o entropía, según contexto
P	Presión; también periodo o probabilidad, según convención
ρ	Densidad
T	Temperatura absoluta o periodo, según contexto
ν	Frecuencia
λ	Longitud de onda; también otros parámetros en campos específicos
ω	Frecuencia angular
ψ	Función de onda o campo, según contexto
Δ	Diferencia o variación de una magnitud
∂	Derivada parcial
∇	Operador diferencial nabla
g_μν	Componentes de la métrica espaciotemporal
R_μν	Tensor de Ricci

Atelier Velázquez

Símbolo	Significado habitual
$G_{\mu\nu}$	Tensor de Einstein
$T_{\mu\nu}$	Tensor de energía-momento
γ	Factor de Lorentz u otra magnitud, según contexto
σ	Desviación estándar u otra magnitud específica
$\hbar$	Constante reducida de Planck
Ω	Parámetro de densidad cosmológica u otra cantidad según contexto

Capítulo 57. E.6. Criterio de interpretación

Un mismo símbolo puede tener significados distintos entre teorías. La letra S representa habitualmente entropía en termodinámica y acción en mecánica analítica; H puede representar un hamiltoniano o la tasa de expansión cosmológica; a puede indicar aceleración o factor de escala.

La notación científica adquiere significado físico cuando sus términos, unidades y operaciones quedan establecidos dentro de una teoría determinada.

El lector deberá interpretar siempre las expresiones matemáticas en relación con su definición local, su dominio de aplicación y el procedimiento físico que les confiere contenido.

Atelier Velázquez

Atelier Velázquez

Anexo F. Siglas y abreviaturas científicas

Las abreviaturas se presentan en orden alfabético aproximado para facilitar la consulta. La inclusión de una sigla no supone que el programa o la hipótesis correspondiente estén confirmados experimentalmente.

AdS. Espacio anti-de Sitter, familia de geometrías relevante para holografía y gravedad cuántica.

AdS/CFT. Correspondencia propuesta entre determinadas teorías gravitatorias en espacios anti-de Sitter y teorías conformes de campos.

ALMA. Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, observatorio interferométrico en Chile.

APA. American Psychological Association, sistema de normas para citas y referencias.

BAO. Baryon Acoustic Oscillations, oscilaciones acústicas bariónicas.

Atelier Velázquez

BIPM. Bureau International des Poids et Mesures, Oficina Internacional de Pesas y Medidas.

CCD. Charge-Coupled Device, dispositivo de carga acoplada empleado en detectores ópticos.

CERN. Organización Europea para la Investigación Nuclear; sus siglas proceden de un nombre histórico francés.

CMB. Cosmic Microwave Background, fondo cósmico de microondas.

CODATA. Committee on Data of the International Science Council; su grupo de constantes recomienda valores ajustados de constantes físicas.

DESI. Dark Energy Spectroscopic Instrument, instrumento para estudiar mediante espectroscopia la estructura cósmica.

EHT. Event Horizon Telescope, red interferométrica de radiotelescopios.

EPR. Einstein–Podolsky–Rosen, argumento de 1935 sobre fundamentos de la mecánica cuántica.

ESA. European Space Agency, Agencia Espacial Europea.

FCC-ee. Future Circular Collider — electron-positron; propuesta de colisionador circular de electrones y positrones.

FLRW. Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker, familia de métricas cosmológicas homogéneas e isótropas.

GPS. Global Positioning System, sistema global de posicionamiento por satélite.

GW. Gravitational Wave, onda gravitacional.

GWTC. Gravitational-Wave Transient Catalog, catálogo de eventos transitorios de ondas gravitacionales.

HL-LHC. High-Luminosity Large Hadron Collider, ampliación de luminosidad del LHC.

IAU. International Astronomical Union, Unión Astronómica Internacional.

JUNO. Jiangmen Underground Neutrino Observatory, observatorio subterráneo de neutrinos de Jiangmen.

JWST. James Webb Space Telescope, telescopio espacial James Webb.

Atelier Velázquez

LHC. Large Hadron Collider, Gran Colisionador de Hadrones.

LIGO. Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, observatorio de ondas gravitacionales por interferometría láser.

LISA. Laser Interferometer Space Antenna, misión espacial de ondas gravitacionales en preparación.

NASA. National Aeronautics and Space Administration, agencia espacial estadounidense.

QCD. Quantum Chromodynamics, cromodinámica cuántica.

QED. Quantum Electrodynamics, electrodinámica cuántica.

QFT. Quantum Field Theory, teoría cuántica de campos.

SI. Sistema Internacional de Unidades.

SUSY. Supersymmetry, supersimetría.

TAI. Temps Atomique International, Tiempo Atómico Internacional.

UTC. Coordinated Universal Time, Tiempo Universal Coordinado.

VLBI. Very Long Baseline Interferometry, interferometría de muy larga base.

WIMP. Weakly Interacting Massive Particle, partícula masiva de interacción débil hipotética.

ΛCDM. Lambda Cold Dark Matter, modelo cosmológico de constante cosmológica y materia oscura fría.

Anexo G. Índice analítico temático

Las referencias por capítulo se mantienen estables durante la edición. Un índice definitivo por páginas puede elaborarse después de fijar la maquetación.

Capítulo 58. A

Acción estacionaria: cap. 9.
Agujeros negros: caps. 30–32.
Antimateria: caps. 18 y 22.
Astronomía islámica e india: cap. 6.

Capítulo 59. B

Big Bang: caps. 26–28.
Boltzmann y entropía estadística: caps. 11 y 12.

Atelier Velázquez

Capítulo 60. C

Causalidad: caps. 9, 15 y 48.
Cierre categorial: caps. 0, 7, 45 y 50.
Cosmologías antiguas: caps. 1–3.
Cronología científica: anexo D.

Capítulo 61. D

Datación radiométrica: cap. 24.
Decoherencia: caps. 19 y 20.
Determinismo: cap. 9.
Dialéctica: caps. 3, 9 y 45.
Distancias cósmicas: cap. 23.

Capítulo 62. E

Ecuaciones de Einstein: cap. 17.

Entrelazamiento: cap. 19.
Entropía: caps. 10–12 y 31.
Escala de Planck: caps. 33 y 42.
Espaciotiempo: caps. 15, 17 y 33.

Capítulo 63. F

Falacias gnoseológicas: cap. 45.
Filosofía del tiempo: caps. 12, 48 y 50.
Fondo cósmico: cap. 27.

Capítulo 64. G

Galaxias: cap. 25.
GPS y relatividad: cap. 40.
Gravedad cuántica: caps. 33–37.

Capítulo 65. H

Horizonte cosmológico: cap. 26.
Horizonte de sucesos: caps. 30 y 31.

Atelier Velázquez

Capítulo 66. I

Identidad sintética: caps. 0, 7, 11 y 45.
Inflación: cap. 29.
Instrumentos astronómicos: caps. 23 y 41.
Interpretaciones cuánticas: cap. 20.
Irreversibilidad: caps. 10–12.

Capítulo 67. L

Ley de Hubble–Lemaître: cap. 26.
Ley de Kepler: caps. 6 y 7.
Límites del conocimiento: caps. 42–46.

Capítulo 68. M

Materia oscura: caps. 25 y 28.
Materialismo filosófico: caps. 0, 32, 45 y 50.
Mecánica analítica: cap. 9.

Mecánica cuántica: caps. 18–22.
Modelo ΛCDM: cap. 28.

Capítulo 69. N

Neutrinos: caps. 22 y 47.
Nucleosíntesis: caps. 24 y 27.

Capítulo 70. O

Observación científica: caps. 23 y 43.
Ontología física: caps. 32 y 50.
Ondas gravitacionales: caps. 17 y 41.

Capítulo 71. P

Paralaje: caps. 4 y 23.
Principio de equivalencia: cap. 17.
Problema de medición cuántica: caps. 19 y 20.
Problema del tiempo: caps. 33 y 48.

Atelier Velázquez

Capítulo 72. R

Radiación de Hawking: cap. 31.
Realismo científico: caps. 32 y 43.
Reducción y emergencia: caps. 21 y 42.
Relatividad especial: caps. 14 y 15.
Relatividad general: cap. 17.
Retrodicción: caps. 24, 27 y 49.

Capítulo 73. S

Segundo del SI: cap. 8.
Simetría y Noether: cap. 16.
Singularidades: caps. 30 y 33.
Symploké: caps. 0, 21, 39 y 50.

Capítulo 74. T

Teoría cuántica de campos: cap. 21.
Teoría de cuerdas: caps. 34 y 35.

Teoría M e holografía: cap. 35.
Termodinámica: caps. 10–12.
Tiempo propio: caps. 8, 15 y 17.
Tiempo reconstruido: caps. 24, 27 y 49.

Capítulo 75. U

Universalidad: caps. 21 y 42.
Universo observable: caps. 26 y 42.

Capítulo 76. V

Vacío cuántico: caps. 21 y 32.
Violación CP: cap. 22

Atelier Velázquez

Bibliografía

't Hooft, G. (1971). Renormalizable Lagrangians for massive Yang-Mills fields. *Nuclear Physics B, 35*(1), 167–188.

't Hooft, G. (1993). *Dimensional reduction in quantum gravity* [Preprint]. arXiv:gr-qc/9310026.

't Hooft, G., & Veltman, M. (1974). One-loop divergencies in the theory of gravitation. *Annales de l'Institut Henri Poincaré A, 20*(1), 69–94.

Abbott, B. P., et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). (2016). Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Physical Review Letters, 116*(6), 061102.

Abbott, B. P., et al. (LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, Fermi Gamma-ray Burst Monitor, & INTEGRAL). (2017). Gravitational waves and gamma-rays from a binary neutron star merger: GW170817 and GRB 170817A. *The Astrophysical Journal Letters, 848*(2), L13.

Abdo, A. A., et al. (2009). A limit on the variation of the speed of light arising from quantum gravity effects. *Nature, 462*, 331–334.

Adams, F. C. (2019). The degree of fine-tuning in our universe—and others. *Physics Reports, 807*, 1–111. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2019.02.001

Adams, F. C., & Grohs, E. (2017). Stellar helium burning in other universes: A solution to the triple alpha fine-tuning problem. *Astroparticle Physics, 87*, 40–54. https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2016.12.002

Agazie, G., et al. (NANOGrav Collaboration). (2023). The NANOGrav 15 yr data set: Evidence for a gravitational-wave background. *The Astrophysical Journal Letters, 951*(1), L8.

Agustín de Hipona. (1968). *The city of God against the pagans: Vol. 3. Books VIII–XI* (D. S. Wiesen, Trad.). Harvard University Press.

Atelier Velázquez

Agustín de Hipona. (2005). *Confesiones* (P. Rodríguez de Santidrián, Trad.). Alianza. (Obra original escrita c. 397–400)

Aharonov, Y., & Bohm, D. (1959). Significance of electromagnetic potentials in the quantum theory. *Physical Review, 115*(3), 485–491.

Ahmad, Q. R., et al. (SNO Collaboration). (2002). Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral-current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory. *Physical Review Letters, 89*(1), 011301.

Ahmed, M., Dodelson, S., Greene, P. B., & Sorkin, R. (2004). Everpresent Λ. *Physical Review D, 69*(10), 103523.

Albert, D. Z. (2000). *Time and chance*. Harvard University Press.

Albert, D. Z. (2012, 23 de marzo). On the origin of everything [Reseña del libro *A universe from nothing*, de L. M. Krauss]. *The New York Times Sunday Book Review*.

Alberti, L. B. (1991). *On painting* (C. Grayson, Trad.). Penguin. (Obra original escrita en 1435)

Albrecht, A., & Sorbo, L. (2004). Can the universe afford inflation? *Physical Review D, 70*(6), 063528.

Albrecht, A., & Steinhardt, P. J. (1982). Cosmology for grand unified theories with radiatively induced symmetry breaking. *Physical Review Letters, 48*(17), 1220–1223.

ALEPH Collaboration, DELPHI Collaboration, L3 Collaboration, OPAL Collaboration, SLD Collaboration, LEP Electroweak Working Group, & SLD Electroweak and Heavy Flavour Groups. (2006). Precision electroweak measurements on the Z resonance. *Physics Reports, 427*(5–6), 257–454.

Aliberti, R., et al. (2025). *The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model: An update* [Preprint]. arXiv:2505.21476.

Allen, J. P. (1988). *Genesis in Egypt: The philosophy of ancient Egyptian creation accounts*. Yale University Press.

ALMA Partnership. (2015). The 2014 ALMA long baseline campaign: First results from high angular resolution observations toward the HL Tau region. *The Astrophysical Journal Letters, 808*(1), L3.

Atelier Velázquez

Almheiri, A., Dong, X., & Harlow, D. (2015). Bulk locality and quantum error correction in AdS/CFT. *Journal of High Energy Physics, 2015*(4), 163.

Almheiri, A., Engelhardt, N., Marolf, D., & Maxfield, H. (2019). The entropy of bulk quantum fields and the entanglement wedge of an evaporating black hole. *Journal of High Energy Physics, 2019*(12), 63.

Almheiri, A., Marolf, D., Polchinski, J., & Sully, J. (2013). Black holes: Complementarity or firewalls? *Journal of High Energy Physics, 2013*(2), 62.

Alpher, R. A., & Herman, R. (1948). Evolution of the universe. *Nature, 162*, 774–775.

Alpher, R. A., Bethe, H., & Gamow, G. (1948). The origin of chemical elements. *Physical Review, 73*(7), 803–804.

Ambjørn, J., & Loll, R. (1998). Non-perturbative Lorentzian quantum gravity, causality and topology change. *Nuclear Physics B, 536*(1–2), 407–434.

Ambjørn, J., Jurkiewicz, J., & Loll, R. (2004). Emergence of a 4D world from causal quantum gravity. *Physical Review Letters, 93*(13), 131301.

Ambjørn, J., Jurkiewicz, J., & Loll, R. (2005). Spectral dimension of the universe is scale dependent. *Physical Review Letters, 95*(17), 171301.

Anderson, C. D. (1933). The positive electron. *Physical Review, 43*(6), 491–494.

Anderson, M. H., Ensher, J. R., Matthews, M. R., Wieman, C. E., & Cornell, E. A. (1995). Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapor. *Science, 269*(5221), 198–201.

Anderson, P. W. (1972). More is different. *Science, 177*(4047), 393–396.

Andrewes, W. J. H. (Ed.). (1996). *The quest for longitude*. Collection of Historical Scientific Instruments, Harvard University.

Aristóteles. (1994). *Metafísica* (T. Calvo Martínez, Trad.). Gredos.

Aristóteles. (1995). *Física* (G. R. de Echandía, Trad.). Gredos.

Aristóteles. (1996). *Acerca del cielo. Meteorológicos* (M. Candel, Trad.). Gredos.

Atelier Velázquez

Arndt, M., Nairz, O., Vos-Andreae, J., Keller, C., van der Zouw, G., & Zeilinger, A. (1999). Wave–particle duality of C60 molecules. *Nature, 401*, 680–682.

Arnison, G., et al. (UA1 Collaboration). (1983). Experimental observation of isolated large transverse energy electrons with associated missing energy at √s = 540 GeV. *Physics Letters B, 122*(1), 103–116.

Ashby, N. (2003). Relativity in the Global Positioning System. *Living Reviews in Relativity, 6*, 1.

Ashtekar, A. (1986). New variables for classical and quantum gravity. *Physical Review Letters, 57*(18), 2244–2247.

Ashtekar, A., Pawlowski, T., & Singh, P. (2006). Quantum nature of the Big Bang. *Physical Review Letters, 96*(14), 141301.

Aspect, A., Dalibard, J., & Roger, G. (1982). Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers. *Physical Review Letters, 49*(25), 1804–1807.

Assmann, J. (2001). *The search for God in ancient Egypt* (D. Lorton, Trad.). Cornell University Press.

ATLAS Collaboration. (2012). Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Physics Letters B, 716*(1), 1–29.

Aveni, A. F. (2001). *Skywatchers* (ed. rev.). University of Texas Press.

Bailey, J., et al. (1977). Measurements of relativistic time dilatation for positive and negative muons in a circular orbit. *Nature, 268*, 301–305.

Barbour, J. (1999). *The end of time: The next revolution in our understanding of the universe*. Weidenfeld & Nicolson.

Bardeen, J. M., Carter, B., & Hawking, S. W. (1973). The four laws of black hole mechanics. *Communications in Mathematical Physics, 31*(2), 161–170.

Bardeen, J., Cooper, L. N., & Schrieffer, J. R. (1957). Theory of superconductivity. *Physical Review, 108*(5), 1175–1204.

Atelier Velázquez

Barnes, L. A. (2012). The fine-tuning of the universe for intelligent life. *Publications of the Astronomical Society of Australia, 29*(4), 529–564. https://doi.org/10.1071/AS12015

Barnes, V. E., et al. (1964). Observation of a hyperon with strangeness minus three. *Physical Review Letters, 12*(8), 204–206.

Barrow-Green, J. (1997). *Poincaré and the three body problem*. American Mathematical Society.

Batterman, R. W. (2002). *The devil in the details: Asymptotic reasoning in explanation, reduction, and emergence*. Oxford University Press.

Beekes, R. (2010). *Etymological dictionary of Greek*. Brill.

Bekenstein, J. D. (1973). Black holes and entropy. *Physical Review D, 7*(8), 2333–2346.

Bell, J. S. (1964). On the Einstein Podolsky Rosen paradox. *Physics Physique Fizika, 1*(3), 195–200.

Bergson, H. (1922). *Durée et simultanéité: À propos de la théorie d'Einstein*. Félix Alcan.

Bertotti, B., Iess, L., & Tortora, P. (2003). A test of general relativity using radio links with the Cassini spacecraft. *Nature, 425*, 374–376.

Bérut, A., Arakelyan, A., Petrosyan, A., Ciliberto, S., Dillenschneider, R., & Lutz, E. (2012). Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics. *Nature, 483*, 187–189.

Bessel, F. W. (1838). Bestimmung der Entfernung des 61sten Sterns des Schwans. *Astronomische Nachrichten, 16*, 65–96.

Bethe, H. A. (1939). Energy production in stars. *Physical Review, 55*(5), 434–456.

BICEP/Keck Collaboration. (2021). Improved constraints on primordial gravitational waves using Planck, WMAP, and BICEP/Keck observations through the 2018 observing season. *Physical Review Letters, 127*(15), 151301.

BICEP2/Keck Array and Planck Collaborations. (2015). Joint analysis of BICEP2/Keck Array and Planck data. *Physical Review Letters, 114*(10), 101301.

BIPM. (2019). *The International System of Units (SI)* (9.ª ed.). Bureau International des Poids et Mesures.

Atelier Velázquez

Bloom, E. D., et al. (1969). High-energy inelastic e–p scattering at 6° and 10°. *Physical Review Letters, 23*(16), 930–934.

Bloor, D. (1976). *Knowledge and social imagery*. Routledge & Kegan Paul.

Blumenthal, G. R., Faber, S. M., Primack, J. R., & Rees, M. J. (1984). Formation of galaxies and large-scale structure with cold dark matter. *Nature, 311*, 517–525.

Bohm, D. (1952). A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables. I. *Physical Review, 85*(2), 166–179.

Bohr, N. (1913). On the constitution of atoms and molecules. *Philosophical Magazine, 26*(151), 1–25.

Bohr, N. (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review, 48*(8), 696–702.

Boltwood, B. B. (1907). On the ultimate disintegration products of the radio-active elements. Part II. The disintegration products of uranium. *American Journal of Science, 23*(134), 77–88.

Boltzmann, L. (1877). Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über das Wärmegleichgewicht. *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Classe, 76*, 373–435.

Bombelli, L., Lee, J., Meyer, D., & Sorkin, R. D. (1987). Space-time as a causal set. *Physical Review Letters, 59*(5), 521–524.

Bond, J. R., Kofman, L., & Pogosyan, D. (1996). How filaments of galaxies are woven into the cosmic web. *Nature, 380*, 603–606.

Bondi, H., & Gold, T. (1948). The steady-state theory of the expanding universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 108*(3), 252–270.

Boole, G. (1854). *An investigation of the laws of thought*. Walton and Maberly.

Born, M. (1926). Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge. *Zeitschrift für Physik, 37*(12), 863–867.

Atelier Velázquez

Bose, S. (1924). Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese. *Zeitschrift für Physik, 26*, 178–181.

Bose, S., Mazumdar, A., Morley, G. W., Ulbricht, H., Toroš, M., Paternostro, M., Geraci, A. A., Barker, P. F., Kim, M. S., & Milburn, G. (2017). Spin entanglement witness for quantum gravity. *Physical Review Letters, 119*(24), 240401.

Bothwell, T., et al. (2019). JILA SrI optical lattice clock with uncertainty of 2.0×10^{-18}. *Metrologia, 56*(6), 065004.

Bothwell, T., Kennedy, C. J., Aeppli, A., Kedar, D., Robinson, J. M., Oelker, E., Staron, A., & Ye, J. (2022). Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample. *Nature, 602*, 420–424.

Bousso, R., & Polchinski, J. (2000). Quantization of four-form fluxes and dynamical neutralization of the cosmological constant. *Journal of High Energy Physics, 2000*(6), 006.

Brading, K., & Brown, H. R. (2003). Symmetries and Noether's theorems. En K. Brading & E. Castellani (Eds.), *Symmetries in physics: Philosophical reflections* (pp. 89–109). Cambridge University Press.

Braun, M. (1992). *Picturing time: The work of Etienne-Jules Marey (1830–1904)*. University of Chicago Press.

Brewer, S. M., Chen, J.-S., Hankin, A. M., Clements, E. R., Chou, C. W., Wineland, D. J., Hume, D. B., & Leibrandt, D. R. (2019). $^{27}Al^{+}$ quantum-logic clock with a systematic uncertainty below 10^{-18}. *Physical Review Letters, 123*(3), 033201.

Bricker, H. M., & Bricker, V. R. (2011). *Astronomy in the Maya codices*. American Philosophical Society.

Bridgman, P. W. (1927). *The logic of modern physics*. Macmillan.

Broad, C. D. (1923). *Scientific thought*. Kegan Paul, Trench, Trubner.

Brown, H. R. (2005). *Physical relativity: Space-time structure from a dynamical perspective*. Oxford University Press.

Brune, M., Hagley, E., Dreyer, J., Maître, X., Maali, A., Wunderlich, C., Raimond, J. M., & Haroche, S. (1996). Observing the progressive decoherence of the "meter" in a quantum measurement. *Physical Review Letters, 77*(24), 4887–4890.

Atelier Velázquez

Bueno, G. (1972). *Ensayos materialistas*. Taurus.

Bueno, G. (1978). Reliquias y relatos: Construcción del concepto de «historia fenoménica». *El Basilisco, 1*, 5–16.

Bueno, G. (1990). *Materia*. Pentalfa.

Bueno, G. (1992). *Teoría del cierre categorial: Vol. 1. Introducción general. Siete enfoques en el estudio de la ciencia*. Pentalfa.

Burbidge, E. M., Burbidge, G. R., Fowler, W. A., & Hoyle, F. (1957). Synthesis of the elements in stars. *Reviews of Modern Physics, 29*(4), 547–650.

Burkert, W. (1972). *Lore and science in ancient Pythagoreanism* (E. L. Minar, Trad.). Harvard University Press.

Calabrese, E., et al. (2025). *The Atacama Cosmology Telescope: DR6 constraints on extended cosmological models* [Preprint]. arXiv:2503.14454.

Callender, C. (2017). *What makes time special?* Oxford University Press.

Canales, J. (2015). *The physicist and the philosopher: Einstein, Bergson, and the debate that changed our understanding of time*. Princeton University Press.

Candelas, P., Horowitz, G. T., Strominger, A., & Witten, E. (1985). Vacuum configurations for superstrings. *Nuclear Physics B, 258*, 46–74.

Carniani, S., et al. (2024). A shining cosmic dawn: Spectroscopic confirmation of two luminous galaxies at z ∼ 14. *Nature, 633*, 318–322.

Carnot, S. (1987). *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego* (J. Ordóñez, Trad.). Alianza. (Obra original publicada en 1824)

Carter, B. (1974). Large number coincidences and the anthropic principle in cosmology. En M. S. Longair (Ed.), *Confrontation of cosmological theories with observational data* (IAU Symposium 63, pp. 291–298). D. Reidel. https://doi.org/10.1017/S0074180900235638

Cartwright, N. (1983). *How the laws of physics lie*. Oxford University Press.

Casimir, H. B. G. (1948). On the attraction between two perfectly conducting plates. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, 51*, 793–795.

Atelier Velázquez

Cavendish, H. (1798). Experiments to determine the density of the Earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 88*, 469–526.

Cayrel, R., et al. (2001). Measurement of stellar age from uranium decay. *Nature, 409*, 691–692.

CERN. (2026, 22 de mayo). *The CERN Council decided to update the European Strategy for Particle Physics* [Comunicado]. https://home.cern/the-cern-council-decided-to-update-the-european-strategy-for-particle-physics/

Chandrasekhar, S. (1931). The maximum mass of ideal white dwarfs. *The Astrophysical Journal, 74*, 81–82.

Chantraine, P. (1968–1980). *Dictionnaire étymologique de la langue grecque: Histoire des mots*. Klincksieck.

Chou, C. W., Hume, D. B., Rosenband, T., & Wineland, D. J. (2010). Optical clocks and relativity. *Science, 329*(5999), 1630–1633.

Christenson, J. H., Cronin, J. W., Fitch, V. L., & Turlay, R. (1964). Evidence for the 2π decay of the K_2^0 meson. *Physical Review Letters, 13*(4), 138–140.

Cicerón. (1999). *Sobre la naturaleza de los dioses* (A. Escobar, Trad.). Gredos.

Clagett, M. (1959). *The science of mechanics in the Middle Ages*. University of Wisconsin Press.

Clagett, M. (1995). *Ancient Egyptian science: Vol. 2. Calendars, clocks, and astronomy*. American Philosophical Society.

Clauser, J. F., Horne, M. A., Shimony, A., & Holt, R. A. (1969). Proposed experiment to test local hidden-variable theories. *Physical Review Letters, 23*(15), 880–884.

Clausius, R. (1850). Über die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen. *Annalen der Physik, 155*(3), 368–397; (4), 500–524.

Clausius, R. (1865). Über verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie. *Annalen der Physik, 201*(7), 353–400.

Cleomedes. (2004). *Cleomedes' lectures on astronomy: A translation of The Heavens* (A. C. Bowen & R. B. Todd, Trads.). University of California Press.

Atelier Velázquez

Clowe, D., Bradač, M., Gonzalez, A. H., Markevitch, M., Randall, S. W., Jones, C., & Zaritsky, D. (2006). A direct empirical proof of the existence of dark matter. *The Astrophysical Journal Letters, 648*(2), L109–L113.

CMS Collaboration. (2012). Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Physics Letters B, 716*(1), 30–61.

Cockcroft, J. D., & Walton, E. T. S. (1932). Experiments with high velocity positive ions. II. The disintegration of elements by high velocity protons. *Proceedings of the Royal Society of London A, 137*(831), 229–242.

Connelly, J. N., Bizzarro, M., Krot, A. N., Nordlund, Å., Wielandt, D., & Ivanova, M. A. (2012). The absolute chronology and thermal processing of solids in the solar protoplanetary disk. *Science, 338*(6107), 651–655.

Connes, A., & Rovelli, C. (1994). Von Neumann algebra automorphisms and time-thermodynamics relation in generally covariant quantum theories. *Classical and Quantum Gravity, 11*(12), 2899–2917.

Cooke, R. J., Pettini, M., & Steidel, C. C. (2018). One percent determination of the primordial deuterium abundance. *The Astrophysical Journal, 855*(2), 102.

Corry, L., Renn, J., & Stachel, J. (1997). Belated decision in the Hilbert-Einstein priority dispute. *Science, 278*(5341), 1270–1273.

Courant, E. D., Livingston, M. S., & Snyder, H. S. (1952). The strong-focusing synchrotron—A new high energy accelerator. *Physical Review, 88*(5), 1190–1196.

Cowan, C. L., Jr., Reines, F., Harrison, F. B., Kruse, H. W., & McGuire, A. D. (1956). Detection of the free neutrino: A confirmation. *Science, 124*(3212), 103–104.

Cullen, C. (1996). *Astronomy and mathematics in ancient China: The Zhou bi suan jing*. Cambridge University Press.

Darrigol, O. (2004). The mystery of the Einstein–Poincaré connection. *Isis, 95*(4), 614–626.

Daston, L., & Galison, P. (2007). *Objectivity*. Zone Books.

Atelier Velázquez

Davis, K. B., Mewes, M.-O., Andrews, M. R., van Druten, N. J., Durfee, D. S., Kurn, D. M., & Ketterle, W. (1995). Bose-Einstein condensation in a gas of sodium atoms. *Physical Review Letters, 75*(22), 3969–3973.

Davis, R., Jr., Harmer, D. S., & Hoffman, K. C. (1968). Search for neutrinos from the Sun. *Physical Review Letters, 20*(21), 1205–1209.

Davis, T. M., & Lineweaver, C. H. (2004). Expanding confusion: Common misconceptions of cosmological horizons and the superluminal expansion of the universe. *Publications of the Astronomical Society of Australia, 21*(1), 97–109.

Davisson, C., & Germer, L. H. (1927). Diffraction of electrons by a crystal of nickel. *Physical Review, 30*(6), 705–740.

Dawid, R. (2013). *String theory and the scientific method*. Cambridge University Press.

de Vaan, M. (2008). *Etymological dictionary of Latin and the other Italic languages*. Brill.

Delva, P., et al. (2018). Gravitational redshift test using eccentric Galileo satellites. *Physical Review Letters, 121*(23), 231101.

DESI Collaboration. (2025). *DESI DR2 results II: Measurements of baryon acoustic oscillations and cosmological constraints* [Preprint]. arXiv:2503.14738.

DeWitt, B. S. (1967). Quantum theory of gravity. I. The canonical theory. *Physical Review, 160*(5), 1113–1148.

Dicke, R. H., Peebles, P. J. E., Roll, P. G., & Wilkinson, D. T. (1965). Cosmic black-body radiation. *The Astrophysical Journal, 142*, 414–419.

Diels, H., & Kranz, W. (Eds.). (1951–1952). *Die Fragmente der Vorsokratiker* (6.ª ed.). Weidmann.

Dirac, P. A. M. (1928). The quantum theory of the electron. *Proceedings of the Royal Society of London A, 117*(778), 610–624.

Donadi, S., Piscicchia, K., Curceanu, C., Diósi, L., Laubenstein, M., & Bassi, A. (2021). Underground test of gravity-related wave function collapse. *Nature Physics, 17*, 74–78.

Atelier Velázquez

Donoghue, J. F. (1994). General relativity as an effective field theory: The leading quantum corrections. *Physical Review D, 50*(6), 3874–3888.

Douglas, M. R. (2003). The statistics of string/M theory vacua. *Journal of High Energy Physics, 2003*(5), 046.

Drake, S. (1973). Galileo's experimental confirmation of horizontal inertia: Unpublished manuscripts. *Isis, 64*(3), 291–305.

Duff, M. J., Okun, L. B., & Veneziano, G. (2002). Trialogue on the number of fundamental constants. *Journal of High Energy Physics, 2002*(03), 023. https://doi.org/10.1088/1126-6708/2002/03/023

Duhem, P. (1906). *La théorie physique: Son objet, sa structure*. Chevalier & Rivière.

Duhem, P. (1908). *ΣΩΖΕΙΝ ΤΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ: Essai sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée*. Hermann.

Dürr, S., et al. (2008). Ab initio determination of light hadron masses. *Science, 322*(5905), 1224–1227.

Dyson, F. J. (1949). The radiation theories of Tomonaga, Schwinger, and Feynman. *Physical Review, 75*(3), 486–502.

Dyson, F. W., Eddington, A. S., & Davidson, C. (1920). A determination of the deflection of light by the Sun's gravitational field, from observations made at the total eclipse of May 29, 1919. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A, 220*, 291–333.

Earman, J. (1986). *A primer on determinism*. Reidel.

Earman, J., & Glymour, C. (1980). Relativity and eclipses: The British eclipse expeditions of 1919 and their predecessors. *Historical Studies in the Physical Sciences, 11*(1), 49–85.

Earman, J., & Norton, J. (1987). What price spacetime substantivalism? The hole story. *The British Journal for the Philosophy of Science, 38*(4), 515–525.

Eddington, A. S. (1928). *The nature of the physical world*. Cambridge University Press.

Einstein, A. (1905a). Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Annalen der Physik, 323*(13), 639–641.

Atelier Velázquez

Einstein, A. (1905b). Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik, 322*(8), 549–560.

Einstein, A. (1905c). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik, 322*(6), 132–148.

Einstein, A. (1905d). Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik, 322*(10), 891–921.

Einstein, A. (1907). Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen. *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik, 4*, 411–462.

Einstein, A. (1915). Die Feldgleichungen der Gravitation. *Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften*, 844–847.

Einstein, A. (1917). Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. *Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften*, 142–152.

Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review, 47*(10), 777–780.

Eisenstein, D. J., et al. (2005). Detection of the baryon acoustic peak in the large-scale correlation function of SDSS luminous red galaxies. *The Astrophysical Journal, 633*(2), 560–574.

Ellis, G. F. R. (2006). Physics in the real universe: Time and spacetime. *General Relativity and Gravitation, 38*(12), 1797–1824.

Ellis, G., & Silk, J. (2014). Scientific method: Defend the integrity of physics. *Nature, 516*, 321–323.

England, P. C., Molnar, P., & Richter, F. M. (2007). John Perry's neglected critique of Kelvin's age for the Earth: A missed opportunity in geodynamics. *GSA Today, 17*(1), 4–9.

Englert, F., & Brout, R. (1964). Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons. *Physical Review Letters, 13*(9), 321–323.

Essen, L., & Parry, J. V. L. (1955). An atomic standard of frequency and time interval: A caesium resonator. *Nature, 176*, 280–282.

Atelier Velázquez

Euclides. (1994). *Elementos: Libros V–IX* (M. L. Puertas Castaños, Trad.). Gredos.

Event Horizon Telescope Collaboration. (2019). First M87 Event Horizon Telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole. *The Astrophysical Journal Letters, 875*(1), L1.

Event Horizon Telescope Collaboration. (2022). First Sagittarius A* Event Horizon Telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole in the center of the Milky Way. *The Astrophysical Journal Letters, 930*(2), L12.

Everett, H., III. (1957). "Relative state" formulation of quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics, 29*(3), 454–462.

Everitt, C. W. F., et al. (2011). Gravity Probe B: Final results of a space experiment to test general relativity. *Physical Review Letters, 106*(22), 221101.

Fan, X., Myers, T. G., Sukra, B. A. D., & Gabrielse, G. (2023). Measurement of the electron magnetic moment. *Physical Review Letters, 130*(7), 071801.

Faraday, M. (1832). Experimental researches in electricity. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 122*, 125–162.

Faulkes, A. (Trad.). (1987). *Snorri Sturluson: Edda*. Everyman.

Feldbrugge, J., Lehners, J.-L., & Turok, N. (2017). No smooth beginning for spacetime. *Physical Review Letters, 119*(17), 171301.

Fermi, E. (1934). Versuch einer Theorie der β-Strahlen. I. *Zeitschrift für Physik, 88*, 161–177.

Feynman, R. P. (1948). Space-time approach to non-relativistic quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics, 20*(2), 367–387.

Fixsen, D. J. (2009). The temperature of the cosmic microwave background. *The Astrophysical Journal, 707*(2), 916–920.

Freedman, S. J., & Clauser, J. F. (1972). Experimental test of local hidden-variable theories. *Physical Review Letters, 28*(14), 938–941.

Atelier Velázquez

Freedman, W. L., et al. (2025). Status report on the Chicago-Carnegie Hubble Program (CCHP): Measurement of the Hubble constant using the Hubble and James Webb Space Telescopes. *The Astrophysical Journal, 985*(2), 203.

Friedmann, A. (1922). Über die Krümmung des Raumes. *Zeitschrift für Physik, 10*, 377–386.

Frisch, D. H., & Smith, J. H. (1963). Measurement of the relativistic time dilation using μ-mesons. *American Journal of Physics, 31*(5), 342–355.

Fuchs, C. A., Mermin, N. D., & Schack, R. (2014). An introduction to QBism with an application to the locality of quantum mechanics. *American Journal of Physics, 82*(8), 749–754.

Fukuda, Y., et al. (Super-Kamiokande Collaboration). (1998). Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos. *Physical Review Letters, 81*(8), 1562–1567.

Gaia Collaboration. (2023). Gaia Data Release 3: Summary of the content and survey properties. *Astronomy & Astrophysics, 674*, A1.

Galilei, G. (1976). *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias* (C. Solís & J. Sádaba, Eds.). Editora Nacional. (Obra original publicada en 1638)

Galilei, G. (2007). *La gaceta sideral* (C. Solís, Ed. y Trad.). Alianza. (Obra original publicada en 1610)

Geller, M. J., & Huchra, J. P. (1989). Mapping the universe. *Science, 246*(4932), 897–903.

Gell-Mann, M. (1964). A schematic model of baryons and mesons. *Physics Letters, 8*(3), 214–215.

Ghezzi, I., & Ruggles, C. (2007). Chankillo: A 2300-year-old solar observatory in coastal Peru. *Science, 315*(5816), 1239–1243.

Ghirardi, G. C., Rimini, A., & Weber, T. (1986). Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems. *Physical Review D, 34*(2), 470–491.

Gibbs, J. W. (1902). *Elementary principles in statistical mechanics*. Charles Scribner's Sons.

Giustina, M., et al. (2015). Significant-loophole-free test of Bell's theorem with entangled photons. *Physical Review Letters, 115*(25), 250401.

Atelier Velázquez

Glashow, S. L. (1961). Partial-symmetries of weak interactions. *Nuclear Physics, 22*(4), 579–588.

González-Reimann, L. (2002). *The Mahābhārata and the yugas: India's great epic poem and the Hindu system of world ages*. Peter Lang.

Goroff, M. H., & Sagnotti, A. (1986). The ultraviolet behavior of Einstein gravity. *Nuclear Physics B, 266*(3–4), 709–736.

GRAVITY Collaboration. (2020). Detection of the Schwarzschild precession in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole. *Astronomy & Astrophysics, 636*, L5.

Green, M. B., & Schwarz, J. H. (1984). Anomaly cancellations in supersymmetric D = 10 gauge theory and superstring theory. *Physics Letters B, 149*(1–3), 117–122.

Griffiths, R. B. (1984). Consistent histories and the interpretation of quantum mechanics. *Journal of Statistical Physics, 36*(1–2), 219–272.

Grohs, E., Howe, A. R., & Adams, F. C. (2018). Universes without the weak force: Astrophysical processes with stable neutrons. *Physical Review D, 97*(4), 043003. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.043003

Gross, D. J., & Wilczek, F. (1973). Ultraviolet behavior of non-Abelian gauge theories. *Physical Review Letters, 30*(26), 1343–1346.

Gubser, S. S., Klebanov, I. R., & Polyakov, A. M. (1998). Gauge theory correlators from non-critical string theory. *Physics Letters B, 428*(1–2), 105–114.

Guralnik, G. S., Hagen, C. R., & Kibble, T. W. B. (1964). Global conservation laws and massless particles. *Physical Review Letters, 13*(20), 585–587.

Guth, A. H. (1981). Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems. *Physical Review D, 23*(2), 347–356.

Hacking, I. (1983). *Representing and intervening: Introductory topics in the philosophy of natural science*. Cambridge University Press.

Hadot, P. (2004). *Le voile d'Isis: Essai sur l'histoire de l'idée de nature*. Gallimard.

Atelier Velázquez

Hafele, J. C., & Keating, R. E. (1972). Around-the-world atomic clocks: Observed relativistic time gains. *Science, 177*(4044), 168–170.

Hall, A. R. (1980). *Philosophers at war: The quarrel between Newton and Leibniz*. Cambridge University Press.

Handsteiner, J., et al. (2017). Cosmic Bell test: Measurement settings from Milky Way stars. *Physical Review Letters, 118*(6), 060401.

Hanson, N. R. (1960). The mathematical power of epicyclical astronomy. *Isis, 51*(2), 150–158.

Hartle, J. B., & Hawking, S. W. (1983). Wave function of the universe. *Physical Review D, 28*(12), 2960–2975.

Hasert, F. J., et al. (1973). Observation of neutrino-like interactions without muon or electron in the Gargamelle neutrino experiment. *Physics Letters B, 46*(1), 138–140.

Hawking, S. W. (1971). Gravitational radiation from colliding black holes. *Physical Review Letters, 26*(21), 1344–1346.

Hawking, S. W. (1974). Black hole explosions? *Nature, 248*, 30–31.

Hawking, S. W. (1975). Particle creation by black holes. *Communications in Mathematical Physics, 43*(3), 199–220.

Hawking, S. W. (1976). Breakdown of predictability in gravitational collapse. *Physical Review D, 14*(10), 2460–2473.

Hawking, S. W., & Penrose, R. (1970). The singularities of gravitational collapse and cosmology. *Proceedings of the Royal Society of London A, 314*(1519), 529–548.

Hawking, S., & Mlodinow, L. (2010). *The grand design*. Bantam.

Heath, T. L. (1913). *Aristarchus of Samos, the ancient Copernicus*. Clarendon Press.

Heisenberg, W. (1925). Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. *Zeitschrift für Physik, 33*, 879–893.

Heisenberg, W. (1927). Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik, 43*(3–4), 172–198.

Atelier Velázquez

Hensen, B., et al. (2015). Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres. *Nature, 526*, 682–686.

Heródoto. (1977). *Historia: Libros I–II* (C. Schrader, Trad.). Gredos.

Hertz, H. (1893). *Electric waves* (D. E. Jones, Trad.). Macmillan.

Hesíodo. (1978). *Obras y fragmentos* (A. Pérez Jiménez & A. Martínez Díez, Trads.). Gredos.

Hewish, A., Bell, S. J., Pilkington, J. D. H., Scott, P. F., & Collins, R. A. (1968). Observation of a rapidly pulsating radio source. *Nature, 217*, 709–713.

Higgs, P. W. (1964). Broken symmetries and the masses of gauge bosons. *Physical Review Letters, 13*(16), 508–509.

Hirata, K., et al. (1987). Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A. *Physical Review Letters, 58*(14), 1490–1493.

Homero. (2000). *Odisea* (J. M. Pabón, Trad.). Gredos.

Howard, D. (2004). Who invented the "Copenhagen interpretation"? A study in mythology. *Philosophy of Science, 71*(5), 669–682.

Hoyle, F. (1948). A new model for the expanding universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 108*(5), 372–382.

Hubble, E. (1929a). A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 15*(3), 168–173.

Hubble, E. (1929b). A spiral nebula as a stellar system, Messier 31. *The Astrophysical Journal, 69*, 103–158.

Huggett, N., & Wüthrich, C. (2013). Emergent spacetime and empirical (in)coherence. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics, 44*(3), 276–285.

Hulse, R. A., & Taylor, J. H. (1975). Discovery of a pulsar in a binary system. *The Astrophysical Journal, 195*, L51–L53.

Hunger, H., & Pingree, D. (1989). *MUL.APIN: An astronomical compendium in cuneiform*. Berger & Söhne.

Hunger, H., & Pingree, D. (1999). *Astral sciences in Mesopotamia*. Brill.

Atelier Velázquez

Hutton, J. (1788). Theory of the Earth; or an investigation of the laws observable in the composition, dissolution, and restoration of land upon the globe. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 1*(2), 209–304.

IceCube Collaboration, et al. (2018). Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A. *Science, 361*(6398), eaat1378.

IceCube Collaboration. (2013). Evidence for high-energy extraterrestrial neutrinos at the IceCube detector. *Science, 342*(6161), 1242856.

IceCube Collaboration. (2022). Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy NGC 1068. *Science, 378*(6619), 538–543.

IceCube Collaboration. (2023). Observation of high-energy neutrinos from the Galactic plane. *Science, 380*(6652), 1338–1343.

Ijjas, A., Steinhardt, P. J., & Loeb, A. (2013). Inflationary paradigm in trouble after Planck2013. *Physics Letters B, 723*(4–5), 261–266.

Isham, C. J. (1993). Canonical quantum gravity and the problem of time. En L. A. Ibort & M. A. Rodríguez (Eds.), *Integrable systems, quantum groups, and quantum field theories* (pp. 157–287). Kluwer.

Jacobson, T. (1995). Thermodynamics of spacetime: The Einstein equation of state. *Physical Review Letters, 75*(7), 1260–1263.

Jaffe, R. L. (2005). Casimir effect and the quantum vacuum. *Physical Review D, 72*(2), 021301.

Jafferis, D., et al. (2022). Traversable wormhole dynamics on a quantum processor. *Nature, 612*, 51–55.

Jamison, S. W., & Brereton, J. P. (Trads.). (2014). *The Rigveda: The earliest religious poetry of India*. Oxford University Press.

Joule, J. P. (1850). On the mechanical equivalent of heat. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 140*, 61–82.

JUNO Collaboration. (2026). Measurement of reactor neutrino oscillation with the first JUNO data. Nature, 654, 343–348. https://doi.org/10.1038/s41586-026-10538-z

Atelier Velázquez

JWST Transiting Exoplanet Community Early Release Science Team. (2023). Identification of carbon dioxide in an exoplanet atmosphere. *Nature, 614*, 649–652.

Kachru, S., Kallosh, R., Linde, A., & Trivedi, S. P. (2003). De Sitter vacua in string theory. *Physical Review D, 68*(4), 046005.

Kant, I. (1998). *Critique of pure reason* (P. Guyer & A. W. Wood, Trads.). Cambridge University Press. (Obra original publicada en 1781 y 1787)

Kasen, D., Metzger, B., Barnes, J., Quataert, E., & Ramirez-Ruiz, E. (2017). Origin of the heavy elements in binary neutron-star mergers from a gravitational-wave event. *Nature, 551*, 80–84.

KATRIN Collaboration. (2025). Direct neutrino-mass measurement based on 259 days of KATRIN data. *Science, 388*(6743), 180–185.

Katz, V. J. (2009). *A history of mathematics: An introduction* (3.ª ed.). Addison-Wesley.

Kennedy, E. S., & Roberts, V. (1959). The planetary theory of Ibn al-Shāṭir. *Isis, 50*(3), 227–235.

Kennefick, D. (2009). Testing relativity from the 1919 eclipse—A question of bias. *Physics Today, 62*(3), 37–42.

Kepler, J. (1992). *New astronomy* (W. H. Donahue, Trad.). Cambridge University Press. (Obra original publicada en 1609)

Kerr, R. P. (1963). Gravitational field of a spinning mass as an example of algebraically special metrics. *Physical Review Letters, 11*(5), 237–238.

Khoury, J., Ovrut, B. A., Steinhardt, P. J., & Turok, N. (2001). Ekpyrotic universe: Colliding branes and the origin of the hot big bang. *Physical Review D, 64*(12), 123522.

Kirchhoff, G., & Bunsen, R. (1860). Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen. *Annalen der Physik, 186*(6), 161–189.

Kirk, G. S., Raven, J. E., & Schofield, M. (1983). *The presocratic philosophers* (2.ª ed.). Cambridge University Press.

Atelier Velázquez

KM3NeT Collaboration. (2025). Observation of an ultra-high-energy cosmic neutrino with KM3NeT. *Nature, 638*, 376–382.

Kobayashi, M., & Maskawa, T. (1973). CP-violation in the renormalizable theory of weak interaction. *Progress of Theoretical Physics, 49*(2), 652–657.

Kobrin, B., Schuster, T., & Yao, N. Y. (2023). *Comment on «Traversable wormhole dynamics on a quantum processor»* [Preprint]. arXiv:2302.07897.

Kosmann-Schwarzbach, Y. (2011). *The Noether theorems: Invariance and conservation laws in the twentieth century* (B. E. Schwarzbach, Trad.). Springer.

Kovtun, P. K., Son, D. T., & Starinets, A. O. (2005). Viscosity in strongly interacting quantum field theories from black hole physics. *Physical Review Letters, 94*(11), 111601.

Kragh, H. (2010). When is a prediction anthropic? Fred Hoyle and the 7.65 MeV carbon resonance. *Archive for History of Exact Sciences, 64*(6), 721–751.

Krauss, L. M. (2012). *A universe from nothing: Why there is something rather than nothing*. Free Press.

Kuhn, T. S. (1957). *The Copernican revolution: Planetary astronomy in the development of Western thought*. Harvard University Press.

Lakatos, I. (1978). *The methodology of scientific research programmes* (J. Worrall & G. Currie, Eds.). Cambridge University Press.

Lamb, W. E., Jr., & Retherford, R. C. (1947). Fine structure of the hydrogen atom by a microwave method. *Physical Review, 72*(3), 241–243.

Lambert, W. G. (2013). *Babylonian creation myths*. Eisenbrauns.

Lamoreaux, S. K. (1997). Demonstration of the Casimir force in the 0.6 to 6 μm range. *Physical Review Letters, 78*(1), 5–8.

Landauer, R. (1961). Irreversibility and heat generation in the computing process. *IBM Journal of Research and Development, 5*(3), 183–191.

Laplace, P.-S. (1995). *Philosophical essay on probabilities* (A. I. Dale, Trad.). Springer. (Obra original publicada en 1814)

Atelier Velázquez

Laskar, J. (1989). A numerical experiment on the chaotic behaviour of the Solar System. *Nature, 338*, 237–238.

Laskar, J., & Gastineau, M. (2009). Existence of collisional trajectories of Mercury, Mars and Venus with the Earth. *Nature, 459*, 817–819.

Latour, B., & Woolgar, S. (1979). *Laboratory life: The social construction of scientific facts*. Sage.

Laudan, L. (1981). A confutation of convergent realism. *Philosophy of Science, 48*(1), 19–49.

Leavitt, H. S. (1908). 1777 variables in the Magellanic Clouds. *Annals of Harvard College Observatory, 60*, 87–108.

Leavitt, H. S., & Pickering, E. C. (1912). Periods of 25 variable stars in the Small Magellanic Cloud. *Harvard College Observatory Circular, 173*, 1–3.

Lee, J. G., Adelberger, E. G., Cook, T. S., Fleischer, S. M., & Heckel, B. R. (2020). New test of the gravitational $1/r^2$ law at separations down to 52 μm. *Physical Review Letters, 124*(10), 101101.

Lees, J. P., et al. (BaBar Collaboration). (2012). Observation of time-reversal violation in the B^0 meson system. *Physical Review Letters, 109*(21), 211801.

Leibniz, G. W., & Clarke, S. (2000). *Correspondence* (R. Ariew, Ed.). Hackett. (Obra original publicada en 1717)

Lemaître, G. (1927). Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques. *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles, 47*, 49–59.

Lemaître, G. (1931). The beginning of the world from the point of view of quantum theory. *Nature, 127*, 706.

León-Portilla, M. (1956). *La filosofía náhuatl estudiada en sus fuentes*. Universidad Nacional Autónoma de México.

LHCb Collaboration. (2025). Observation of charge–parity symmetry breaking in baryon decays. *Nature, 643*, 1223–1228.

Atelier Velázquez

Liddell, H. G., Scott, R., & Jones, H. S. (1940). *A Greek-English lexicon* (9.ª ed.). Clarendon Press.

LIGO Laboratory. (2026, May 26). GWTC-5.0: Updated LIGO–Virgo–KAGRA catalog sets new records in precision gravitational wave astronomy. https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20260526

LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, & KAGRA Collaboration. (2025a). GW250114: Testing Hawking's area law and the Kerr nature of black holes. *Physical Review Letters, 135*(11), 111403.

LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, & KAGRA Collaboration. (2025b). *GWTC-4.0: An introduction to version 4.0 of the Gravitational-Wave Transient Catalog* [Preprint]. arXiv:2508.18080.

Lindberg, D. C. (2007). *The beginnings of Western science* (2.ª ed.). University of Chicago Press.

Linde, A. D. (1982). A new inflationary universe scenario: A possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems. *Physics Letters B, 108*(6), 389–393.

Livio, M. (2011). Lost in translation: Mystery of the missing text solved. *Nature, 479*, 171–173.

Lloyd, G. E. R. (1970). *Early Greek science: Thales to Aristotle*. Chatto & Windus.

Lorentz, H. A. (1904). Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, 6*, 809–831.

Lorenz, E. N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences, 20*(2), 130–141.

Loschmidt, J. (1876). Über den Zustand des Wärmegleichgewichtes eines Systems von Körpern mit Rücksicht auf die Schwerkraft. *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien, 73*, 128–142.

Louis, T., et al. (2025). *The Atacama Cosmology Telescope: DR6 power spectra, likelihoods and ΛCDM parameters* [Preprint]. arXiv:2503.14452.

Atelier Velázquez

LZ Collaboration. (2025). Dark matter search results from 4.2 tonne-years of exposure of the LUX-ZEPLIN (LZ) experiment. *Physical Review Letters, 135*(1), 011802.

Mach, E. (1919). *The science of mechanics* (T. J. McCormack, Trad.; 4.ª ed.). Open Court. (Obra original publicada en 1883)

Major, J. S., Queen, S. A., Meyer, A. S., & Roth, H. D. (Trads.). (2010). *The Huainanzi*. Columbia University Press.

Malament, D. (1977). Causal theories of time and the conventionality of simultaneity. *Noûs, 11*(3), 293–300.

Maldacena, J. (1998). The large N limit of superconformal field theories and supergravity. *Advances in Theoretical and Mathematical Physics, 2*(2), 231–252.

Maldacena, J., & Susskind, L. (2013). Cool horizons for entangled black holes. *Fortschritte der Physik, 61*(9), 781–811.

Marey, É.-J. (1878). *La méthode graphique dans les sciences expérimentales*. G. Masson.

Marletto, C., & Vedral, V. (2017). Gravitationally induced entanglement between two massive particles is sufficient evidence of quantum effects in gravity. *Physical Review Letters, 119*(24), 240402.

Martin, J., Ringeval, C., & Vennin, V. (2014). Encyclopædia inflationaris. *Physics of the Dark Universe, 5–6*, 75–235.

Maudlin, T. (2007). *The metaphysics within physics*. Oxford University Press.

Maxwell, J. C. (1860). Illustrations of the dynamical theory of gases. *Philosophical Magazine, 19*(124), 19–32.

Maxwell, J. C. (1865). A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 155*, 459–512.

May, G. (1994). *Creatio ex nihilo: The doctrine of «creation out of nothing» in early Christian thought* (A. S. Worrall, Trad.). T&T Clark.

Mayor, M., & Queloz, D. (1995). A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature, 378*, 355–359.

Atelier Velázquez

McTaggart, J. E. (1908). The unreality of time. *Mind, 17*(68), 457–474.

Michell, J. (1784). On the means of discovering the distance, magnitude, &c. of the fixed stars. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 74*, 35–57.

Michelson, A. A., & Morley, E. W. (1887). On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether. *American Journal of Science, 34*(203), 333–345.

Milgrom, M. (1983). A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis. *The Astrophysical Journal, 270*, 365–370.

Millikan, R. A. (1916). A direct photoelectric determination of Planck's «h». *Physical Review, 7*(3), 355–388.

Minkowski, H. (1909). Raum und Zeit. *Physikalische Zeitschrift, 10*, 104–111.

Misner, C. W., Thorne, K. S., & Wheeler, J. A. (1973). *Gravitation*. W. H. Freeman.

Mohr, P. J., Newell, D. B., Taylor, B. N., & Tiesinga, E. (2025). CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2022. Reviews of Modern Physics, 97(2), 025002. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.97.025002

Moreva, E., Brida, G., Gramegna, M., Giovannetti, V., Maccone, L., & Genovese, M. (2014). Time from quantum entanglement: An experimental illustration. *Physical Review A, 89*(5), 052122.

Morgan, M. S., & Morrison, M. (Eds.). (1999). *Models as mediators: Perspectives on natural and social science*. Cambridge University Press.

Mukhanov, V. F., & Chibisov, G. V. (1981). Quantum fluctuations and a nonsingular universe. *JETP Letters, 33*(10), 532–535.

Muñoz de Nova, J. R., Golubkov, K., Kolobov, V. I., & Steinhauer, J. (2019). Observation of thermal Hawking radiation and its temperature in an analogue black hole. *Nature, 569*, 688–691.

Muon g-2 Collaboration. (2025). *Measurement of the positive muon anomalous magnetic moment to 127 ppb* [Preprint]. arXiv:2506.03069.

Atelier Velázquez

Muybridge, E. (1887). *Animal locomotion: An electro-photographic investigation of consecutive phases of animal movements*. University of Pennsylvania.

Nagel, E. (1961). *The structure of science: Problems in the logic of scientific explanation*. Harcourt, Brace & World.

Navas, S., et al. (Particle Data Group). (2024). Review of particle physics. *Physical Review D, 110*(3), 030001.

Needham, J., Wang, L., & Price, D. J. de S. (1960). *Heavenly clockwork: The great astronomical clocks of medieval China*. Cambridge University Press.

Neugebauer, O. (1975). *A history of ancient mathematical astronomy*. Springer.

Newton, I. (1961). *The correspondence of Isaac Newton: Vol. 3. 1688–1694* (H. W. Turnbull, Ed.). Cambridge University Press. (Carta a R. Bentley escrita en 1693)

Newton, I. (1999). *The Principia: Mathematical principles of natural philosophy* (I. B. Cohen & A. Whitman, Trads.). University of California Press. (Obra original publicada en 1687)

Nobel Prize Outreach. (2026). *The Nobel Prize in Physics 2026*. NobelPrize.org. https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2026/summary/

Noether, E. (1918). Invariante Variationsprobleme. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 235–257.

Norton, J. D. (2008). The dome: An unexpectedly simple failure of determinism. *Philosophy of Science, 75*(5), 786–798.

O'Kelly, M. J. (1982). *Newgrange: Archaeology, art and legend*. Thames and Hudson.

Oberkampf, W. L., & Roy, C. J. (2010). *Verification and validation in scientific computing*. Cambridge University Press.

Obied, G., Ooguri, H., Spodyneiko, L., & Vafa, C. (2018). *De Sitter space and the swampland* [Preprint]. arXiv:1806.08362.

OPERA Collaboration. (2012). Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam. *Journal of High Energy Physics, 2012*(10), 093.

Atelier Velázquez

Oppenheimer, J. R., & Snyder, H. (1939). On continued gravitational contraction. *Physical Review, 56*(5), 455–459.

Ostriker, J. P., & Peebles, P. J. E. (1973). A numerical study of the stability of flattened galaxies: Or, can cold galaxies survive? *The Astrophysical Journal, 186*, 467–480.

Page, D. N. (1993). Information in black hole radiation. *Physical Review Letters, 71*(23), 3743–3746.

Page, D. N., & Geilker, C. D. (1981). Indirect evidence for quantum gravity. *Physical Review Letters, 47*(14), 979–982.

Page, D. N., & Wootters, W. K. (1983). Evolution without evolution: Dynamics described by stationary observables. *Physical Review D, 27*(12), 2885–2892.

Pais, A. (1982). *«Subtle is the Lord…»: The science and the life of Albert Einstein*. Oxford University Press.

Panofsky, E. (1939). *Studies in iconology: Humanistic themes in the art of the Renaissance*. Oxford University Press.

Pantos, I., & Perivolaropoulos, L. (2026). *Dissecting the Hubble tension: Insights from a diverse set of sound-horizon-free H_0 measurements* [Preprint]. arXiv:2601.00650.

Patterson, C. (1956). Age of meteorites and the Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta, 10*(4), 230–237.

Pauli, W. (1980). *General principles of quantum mechanics* (P. Achuthan & K. Venkatesan, Trads.). Springer. (Obra original publicada en 1933)

Payne, C. H. (1925). *Stellar atmospheres: A contribution to the observational study of high temperature in the reversing layers of stars*. Harvard Observatory.

Pearl, J. (2009). *Causality: Models, reasoning, and inference* (2.ª ed.). Cambridge University Press.

Peebles, P. J. E. (1966). Primordial helium abundance and the primordial fireball. II. *The Astrophysical Journal, 146*, 542–552.

Atelier Velázquez

Penington, G. (2020). Entanglement wedge reconstruction and the information paradox. *Journal of High Energy Physics, 2020*(9), 2.

Penrose, R. (1965). Gravitational collapse and space-time singularities. *Physical Review Letters, 14*(3), 57–59.

Penrose, R. (1979). Singularities and time-asymmetry. En S. W. Hawking & W. Israel (Eds.), *General relativity: An Einstein centenary survey* (pp. 581–638). Cambridge University Press.

Penrose, R. (1989). *The emperor's new mind*. Oxford University Press.

Penrose, R. (2010). *Cycles of time: An extraordinary new view of the universe*. The Bodley Head.

Penzias, A. A., & Wilson, R. W. (1965). A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s. *The Astrophysical Journal, 142*, 419–421.

Perlmutter, S., et al. (1999). Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae. *The Astrophysical Journal, 517*(2), 565–586.

Perrin, J. (1909). Mouvement brownien et réalité moléculaire. *Annales de Chimie et de Physique, 18*, 5–114.

Perrin, J. (1913). *Les atomes*. Félix Alcan.

Phillips, M. M. (1993). The absolute magnitudes of Type Ia supernovae. *The Astrophysical Journal Letters, 413*, L105–L108.

Pingree, D. (1981). *Jyotiḥśāstra: Astral and mathematical literature*. Otto Harrassowitz.

Planck Collaboration. (2020). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics, 641*, A6.

Planck, M. (1901). Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum. *Annalen der Physik, 309*(3), 553–563.

Platón. (1988). *Diálogos V: Parménides, Teeteto, Sofista, Político* (M. I. Santa Cruz, Á. Vallejo Campos & N. L. Cordero, Trads.). Gredos.

Platón. (1992). *Diálogos VI: Filebo, Timeo, Critias* (M. Á. Durán & F. Lisi, Trads.). Gredos.

Atelier Velázquez

Plinio el Viejo. (1950). *Natural history: Vol. 5. Libri XVII–XIX* (H. Rackham, Trad.). Harvard University Press.

Plofker, K. (2009). *Mathematics in India*. Princeton University Press.

Plutarco. (1995). *Obras morales y de costumbres VI: Isis y Osiris. Diálogos píticos* (F. Pordomingo Pardo & J. A. Fernández Delgado, Trads.). Gredos.

Poincaré, H. (1898). La mesure du temps. *Revue de Métaphysique et de Morale, 6*(1), 1–13.

Poincaré, H. (1906). Sur la dynamique de l'électron. *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo, 21*, 129–176.

Polchinski, J. (1995). Dirichlet branes and Ramond-Ramond charges. *Physical Review Letters, 75*(26), 4724–4727.

Politzer, H. D. (1973). Reliable perturbative results for strong interactions? *Physical Review Letters, 30*(26), 1346–1349.

Pontecorvo, B. (1968). Neutrino experiments and the problem of conservation of leptonic charge. *Soviet Physics JETP, 26*(5), 984–988.

Popper, K. R. (1959). *The logic of scientific discovery*. Hutchinson.

Pound, R. V., & Rebka, G. A., Jr. (1960). Apparent weight of photons. *Physical Review Letters, 4*(7), 337–341.

Price, H. (1996). *Time's arrow and Archimedes' point: New directions for the physics of time*. Oxford University Press.

Prigogine, I. (1980). *From being to becoming: Time and complexity in the physical sciences*. W. H. Freeman.

Putnam, H. (1967). Time and physical geometry. *The Journal of Philosophy, 64*(8), 240–247.

Putnam, H. (1975). *Mathematics, matter and method: Philosophical papers* (Vol. 1). Cambridge University Press.

Ragep, F. J. (1993). *Naṣīr al-Dīn al-Ṭūsī's memoir on astronomy (al-Tadhkira fī ʿilm al-hayʾa)*. Springer.

Atelier Velázquez

Ragep, F. J. (2007). Copernicus and his Islamic predecessors: Some historical remarks. *History of Science, 45*(1), 65–81.

Rainville, S., et al. (2005). A direct test of E = mc². *Nature, 438*, 1096–1097.

Reichenbach, H. (1956). *The direction of time*. University of California Press.

Reuter, M. (1998). Nonperturbative evolution equation for quantum gravity. *Physical Review D, 57*(2), 971–985.

Riemann, B. (1868). Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen. *Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, 13*, 133–152.

Riess, A. G., et al. (1998). Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. *The Astronomical Journal, 116*(3), 1009–1038.

Riess, A. G., et al. (2022). A comprehensive measurement of the local value of the Hubble constant with 1 km s^{-1} Mpc^{-1} uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SH0ES team. *The Astrophysical Journal Letters, 934*(1), L7.

Riess, A. G., et al. (2024). JWST observations reject unrecognized crowding of Cepheid photometry as an explanation for the Hubble tension at 8σ confidence. *The Astrophysical Journal Letters, 962*(1), L17.

Roberts, V. (1957). The solar and lunar theory of Ibn ash-Shāṭir: A pre-Copernican Copernican model. *Isis, 48*(4), 428–432.

Rossi, B., & Hall, D. B. (1941). Variation of the rate of decay of mesotrons with momentum. *Physical Review, 59*(3), 223–228.

Rothman, T., & Boughn, S. (2006). Can gravitons be detected? *Foundations of Physics, 36*(12), 1801–1825.

Rovelli, C. (1996). Relational quantum mechanics. *International Journal of Theoretical Physics, 35*(8), 1637–1678.

Rovelli, C. (2011). *The first scientist: Anaximander and his legacy* (M. L. Rosenberg, Trad.). Westholme.

Rovelli, C. (2018). *El orden del tiempo* (F. J. Ramos Mena, Trad.). Anagrama.

Atelier Velázquez

Rovelli, C., & Smolin, L. (1990). Loop space representation of quantum general relativity. *Nuclear Physics B, 331*(1), 80–152.

Rovelli, C., & Smolin, L. (1995a). Discreteness of area and volume in quantum gravity. *Nuclear Physics B, 442*(3), 593–619.

Rovelli, C., & Smolin, L. (1995b). Spin networks and quantum gravity. *Physical Review D, 52*(10), 5743–5759.

Rubin, V. C., & Ford, W. K., Jr. (1970). Rotation of the Andromeda Nebula from a spectroscopic survey of emission regions. *The Astrophysical Journal, 159*, 379–403.

Rubin, V. C., Ford, W. K., Jr., & Thonnard, N. (1980). Rotational properties of 21 Sc galaxies with a large range of luminosities and radii, from NGC 4605 (R = 4 kpc) to UGC 2885 (R = 122 kpc). *The Astrophysical Journal, 238*, 471–487.

Ruggles, C. (1999). *Astronomy in prehistoric Britain and Ireland*. Yale University Press.

Russell, B. (1913). On the notion of cause. *Proceedings of the Aristotelian Society, 13*, 1–26.

Ryu, S., & Takayanagi, T. (2006). Holographic derivation of entanglement entropy from the anti–de Sitter space/conformal field theory correspondence. *Physical Review Letters, 96*(18), 181602.

Sachs, A. J., & Hunger, H. (1988). *Astronomical diaries and related texts from Babylonia: Vol. 1*. Österreichische Akademie der Wissenschaften.

Sadakata, A. (1997). *Buddhist cosmology: Philosophy and origins* (G. Sekimori, Trad.). Kōsei.

Sakharov, A. D. (1967). Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe. *JETP Letters, 5*, 24–27.

Saliba, G. (2007). *Islamic science and the making of the European Renaissance*. MIT Press.

Scherk, J., & Schwarz, J. H. (1974). Dual models for non-hadrons. *Nuclear Physics B, 81*(1), 118–144.

Schrödinger, E. (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem (Erste Mitteilung). *Annalen der Physik, 384*(4), 361–376.

Atelier Velázquez

Schrödinger, E. (1935). Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. *Die Naturwissenschaften, 23*, 807–812.

Schwarzschild, K. (1916). Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie. *Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften*, 189–196.

Scrimgeour, M. I., et al. (2012). The WiggleZ Dark Energy Survey: The transition to large-scale cosmic homogeneity. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 425*(1), 116–134.

Shalm, L. K., et al. (2015). Strong loophole-free test of local realism. *Physical Review Letters, 115*(25), 250402.

Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal, 27*(3), 379–423; (4), 623–656.

Shaposhnikov, M., & Wetterich, C. (2010). Asymptotic safety of gravity and the Higgs boson mass. *Physics Letters B, 683*(2–3), 196–200.

Sivin, N. (2009). *Granting the seasons: The Chinese astronomical reform of 1280*. Springer.

Slipher, V. M. (1917). Nebulae. *Proceedings of the American Philosophical Society, 56*, 403–409.

Smith, A. M. (2001). *Alhacen's theory of visual perception*. American Philosophical Society.

Smolin, L. (2006). *The trouble with physics*. Houghton Mifflin.

Smolin, L. (2013). *Time reborn: From the crisis in physics to the future of the universe*. Houghton Mifflin Harcourt.

Smoot, G. F., et al. (1992). Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps. *The Astrophysical Journal Letters, 396*, L1–L5.

Springel, V., et al. (2005). Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars. *Nature, 435*, 629–636.

Starobinsky, A. A. (1980). A new type of isotropic cosmological models without singularity. *Physics Letters B, 91*(1), 99–102.

Atelier Velázquez

Stein, H. (1968). On Einstein–Minkowski space–time. *The Journal of Philosophy, 65*(1), 5–23.

Strominger, A., & Vafa, C. (1996). Microscopic origin of the Bekenstein-Hawking entropy. *Physics Letters B, 379*(1–4), 99–104.

Susskind, L. (1995). The world as a hologram. *Journal of Mathematical Physics, 36*(11), 6377–6396.

Swerdlow, N. M., & Neugebauer, O. (1984). *Mathematical astronomy in Copernicus's De revolutionibus*. Springer.

Swingle, B. (2012). Entanglement renormalization and holography. *Physical Review D, 86*(6), 065007.

Tarkovski, A. (1991). *Esculpir en el tiempo* (E. Banús, Trad.). Rialp. (Obra original publicada en 1986)

Tedlock, D. (Trad.). (1996). *Popol Vuh: The definitive edition of the Mayan book of the dawn of life and the glories of gods and kings* (ed. rev.). Simon & Schuster.

Tegmark, M. (2008). The mathematical universe. *Foundations of Physics, 38*(2), 101–150.

Thomson, W. (1852). On a universal tendency in nature to the dissipation of mechanical energy. *Philosophical Magazine, 4*(25), 304–306.

Thomson, W. (1862). On the secular cooling of the Earth. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 23*, 157–169.

Thoren, V. E. (1990). *The lord of Uraniborg: A biography of Tycho Brahe*. Cambridge University Press.

Tonomura, A., Endo, J., Matsuda, T., Kawasaki, T., & Ezawa, H. (1989). Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern. *American Journal of Physics, 57*(2), 117–120.

Toomer, G. J. (Trad.). (1984). *Ptolemy's Almagest*. Duckworth; Springer.

Touboul, P., et al. (MICROSCOPE Collaboration). (2022). MICROSCOPE mission: Final results of the test of the equivalence principle. *Physical Review Letters, 129*(12), 121102.

Atelier Velázquez

Tsiolkovski, K. E. (1903). Исследование мировых пространств реактивными приборами [Exploración del espacio cósmico mediante aparatos de reacción]. *Научное обозрение, 5*.

Turing, A. M. (1936). On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society, s2-42*(1), 230–265.

Uggerhøj, U. I., Mikkelsen, R. E., & Faye, J. (2016). The young centre of the Earth. *European Journal of Physics, 37*(3), 035602.

Unruh, W. G. (1976). Notes on black-hole evaporation. *Physical Review D, 14*(4), 870–892.

van Fraassen, B. C. (1980). *The scientific image*. Oxford University Press.

Van Raamsdonk, M. (2010). Building up spacetime with quantum entanglement. *General Relativity and Gravitation, 42*(10), 2323–2329.

Veneziano, G. (1968). Construction of a crossing-symmetric, Regge-behaved amplitude for linearly rising trajectories. *Il Nuovo Cimento A, 57*(1), 190–197.

Verlinde, E. (2011). On the origin of gravity and the laws of Newton. *Journal of High Energy Physics, 2011*(4), 29.

Verlinde, E. (2017). Emergent gravity and the dark universe. *SciPost Physics, 2*(3), 016.

Vessot, R. F. C., et al. (1980). Test of relativistic gravitation with a space-borne hydrogen maser. *Physical Review Letters, 45*(26), 2081–2084.

Vilenkin, A. (1982). Creation of universes from nothing. *Physics Letters B, 117*(1–2), 25–28.

von Klitzing, K., Dorda, G., & Pepper, M. (1980). New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance. *Physical Review Letters, 45*(6), 494–497.

von Neumann, J. (1932). *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Springer.

Wallace, D. (2012). *The emergent multiverse: Quantum theory according to the Everett interpretation*. Oxford University Press.

Walsh, D., Carswell, R. F., & Weymann, R. J. (1979). 0957 + 561 A, B: Twin quasistellar objects or gravitational lens? *Nature, 279*, 381–384.

Atelier Velázquez

Webster, B. L., & Murdin, P. (1972). Cygnus X-1—A spectroscopic binary with a heavy companion? *Nature, 235*, 37–38.

Weihs, G., Jennewein, T., Simon, C., Weinfurter, H., & Zeilinger, A. (1998). Violation of Bell's inequality under strict Einstein locality conditions. *Physical Review Letters, 81*(23), 5039–5043.

Weinberg, S. (1967). A model of leptons. *Physical Review Letters, 19*(21), 1264–1266.

Weinberg, S. (1979a). Phenomenological Lagrangians. *Physica A, 96*(1–2), 327–340.

Weinberg, S. (1979b). Ultraviolet divergences in quantum theories of gravitation. En S. W. Hawking & W. Israel (Eds.), *General relativity: An Einstein centenary survey* (pp. 790–831). Cambridge University Press.

Weinberg, S. (1987). Anthropic bound on the cosmological constant. *Physical Review Letters, 59*(22), 2607–2610.

Weinberg, S. (1989). The cosmological constant problem. *Reviews of Modern Physics, 61*(1), 1–23.

Atelier Velázquez

Weinberg, S. (1992). *Dreams of a final theory*. Pantheon.

Weisberg, J. M., & Huang, Y. (2016). Relativistic measurements from timing the binary pulsar PSR B1913+16. *The Astrophysical Journal, 829*(1), 55.

Whewell, W. (1840). *The philosophy of the inductive sciences, founded upon their history*. John W. Parker.

Wigner, E. P. (1961). Remarks on the mind-body question. En I. J. Good (Ed.), *The scientist speculates* (pp. 284–302). Heinemann.

Wilde, S. A., Valley, J. W., Peck, W. H., & Graham, C. M. (2001). Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature, 409*, 175–178.

Will, C. M. (2014). The confrontation between general relativity and experiment. *Living Reviews in Relativity, 17*, 4.

Wilson, K. G. (1971). Renormalization group and critical phenomena. I. *Physical Review B, 4*(9), 3174–3183.

Winsberg, E. (2010). *Science in the age of computer simulation*. University of Chicago Press.

Witten, E. (1995). String theory dynamics in various dimensions. *Nuclear Physics B, 443*(1–2), 85–126.

Witten, E. (1998). Anti de Sitter space and holography. *Advances in Theoretical and Mathematical Physics, 2*(2), 253–291.

Woit, P. (2006). *Not even wrong: The failure of string theory and the search for unity in physical law*. Jonathan Cape.

Wolszczan, A., & Frail, D. A. (1992). A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12. *Nature, 355*, 145–147.

Wood, R. W. (1904). The n-rays. *Nature, 70*, 530–531.

Woodward, J. (2003). *Making things happen: A theory of causal explanation*. Oxford University Press.

Worrall, J. (1989). Structural realism: The best of both worlds? *Dialectica, 43*(1–2), 99–124.

Wu, C. S., Ambler, E., Hayward, R. W., Hoppes, D. D., & Hudson, R. P. (1957). Experimental test of parity conservation in beta decay. *Physical Review, 105*(4), 1413–1415.

Yan, H.-S., & Lin, T.-Y. (2002). A study on ancient Chinese time laws and the time-telling system of Su Song's clock tower. Mechanism and Machine Theory, 37(1), 15–33. https://doi.org/10.1016/S0094-114X(01)00059-3

Yang, C. N., & Mills, R. L. (1954). Conservation of isotopic spin and isotopic gauge invariance. *Physical Review, 96*(1), 191–195.

Yin, J., et al. (2017). Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers. *Science, 356*(6343), 1140–1144.

Zeh, H. D. (1970). On the interpretation of measurement in quantum theory. *Foundations of Physics, 1*(1), 69–76.

Atelier Velázquez

Zurek, W. H. (2003). Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical. *Reviews of Modern Physics, 75*(3), 715–775.

Zwicky, F. (1933). Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln. *Helvetica Physica Acta, 6*, 110–127.

Atelier Velázquez