

GIUGNO 2018 N. 179 € 7,50

Le Stelle

MENSILE DI CULTURA ASTRONOMICA

PATRIZIA CARAVEO E LEOPOLDO BENACCHIO

IL CATALOGO DI GAIA ACCENDE LA VIA LATTEA

MASSIMILIANO RAZZANO

L'UNIVERSO NELL'ULTIMO ARTICOLO DI STEPHEN HAWKING

ALBINO CARBOGNANI

CERERE SVELATO DA DAWN

- A CACCIA DI ESOPIANETI CON TESS
- SATELLITI PER RAGGI X VEDONO LA MATERIA OSCURA?
- RETE COSMICA E RETE NEURONALE STRAORDINARIE COINCIDENZE

LE STELLE n. 179 - Mensile - € 7,50



PL 25-05-2018

RETE COSMICA E RETE NEURONALE, STRAORDINARIE COINCIDENZE

Spesso si sente dire che il cervello umano sia l'oggetto più complesso del cosmo. È proprio così? E soprattutto, come definire questa complessità? Non è semplice quantificare in modo oggettivo quanto complessi siano i fenomeni naturali né paragonare tra loro le rispettive complessità... ma in questo articolo ci vogliamo provare



Franco Vazza



Ricercatore presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna.

Alberto Feletti



Dottore di Ricerca in Neuroscienze, è neurochirurgo presso la U.O. di Neurochirurgia dell'Azienda Ospedaliero-Universitaria di Modena dal 2014, con numerose collaborazioni internazionali (soprattutto negli USA ed in Giappone). Ha partecipato ad oltre mille interventi neurochirurgici sia cranici che spinali.

Il 17 aprile del 1955, un signore di 76 anni dalla folta chioma bianca e dallo spiccato accento tedesco venne ricoverato all'ospedale di Princeton per il sanguinamento interno dovuto alla rottura di un aneurisma aortico addominale. Avendo rifiutato qualsiasi trattamento chirurgico, spirò alle prime luci del giorno successivo, senza aver finito la bozza di discorso alla quale stava lavorando e mormorando le sue ultime parole in tedesco, purtroppo non compreso dall'infermiera americana che lo assisteva.

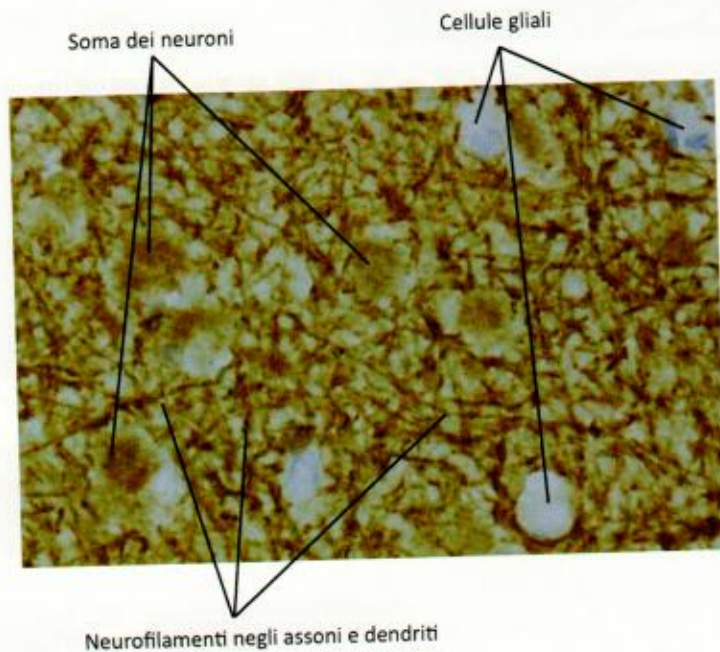
Il padre della Teoria della Relatività, dell'effetto fotoelettrico e di molte altre scoperte fondamentali per la nostra civiltà, Albert Einstein, morì così il 18 aprile del 1955 e nella speranza di comprendere cosa lo avesse reso un tale genio, il suo cervello venne preservato per la ricerca scientifica. Ad oggi sono stati pubblicati tre articoli scientifici che ne hanno esaminato le caratteristiche, mostrando che, anche se il cervello del padre della relatività pesava soltanto 1230 grammi, meno del cervello medio degli adulti maschi (circa 1400 grammi), esso aveva un rapporto di cellule gliali/neuroni più elevato del normale, la densità dei neuroni era maggiore e lo spessore medio della corteccia era inferiore. In altre parole, la rete neuronale del grande scienziato era molto più fitta del normale e in particolare in un articolo pubblicato nel 1999 sul prestigioso *The Lancet* fu dimostrato che il numero di connessioni tra neuroni nella parte del cervello che presiede le abilità matematiche e il

ragionamento spaziale – ovviamente capacità fondamentali per le scoperte di Einstein - era superiore del 15% rispetto alla media.

Abbiamo scelto di iniziare questo articolo a cavallo tra la cosmologia e la neurochirurgia proprio dal cervello del grande genio, perché curiosamente questo si trova al crocevia tra due dei più grandi misteri della scienza moderna: come funziona l'Universo e come funziona il cervello?

DUE RETI INTRICATE (E COMPLESSE)

Sappiamo dalla fine degli Anni Settanta che la materia cosmica, sulle scale più grandi che possiamo osservare al telescopio o simulare con un supercomputer, non è distribuita casualmente nello spazio, ma traccia una maestosa rete di galassie, estesa in ogni direzione per centinaia di milioni di anni luce, chiamata il "Cosmic Web". I "mattoni" che lo compongono sono gli aloni di materia oscura, al centro dei quali si formano le galassie. Sebbene queste ultime possano formarsi anche relativamente tardi nel corso dei 13,7 miliardi di anni di vita dell'Universo, la gigantesca trama su grande scala del *Cosmic Web* dovrebbe essere presente a partire da poche centinaia di migliaia di anni dopo il Big Bang: i semi dai quali esso si forma sono le iniziali fluttuazioni di materia ed energia che possiamo osservare nel fondo cosmico di microonde, prodotto circa 300.000 anni dopo il Big Bang. Da quel momento, l'equilibrio tra l'espansione accelerata dello spazio-tempo e l'attrazione della forza di gravità ha impresso a questa rete una peculiare forma a ragnatela, nella quale la materia si condensa lungo sottili filamenti e gruppi o ammassi di centinaia di galassie si formano nelle intersezioni dei filamenti, mentre la maggior parte del volume cosmico rimane praticamente vuoto (la densità delle particelle nell'aria che respiriamo è 10^{21} volte più grande della densità di particelle in un vuoto cosmico!). Si stima che l'intero Universo visibile dovrebbe contenere circa 100 miliardi di galassie, anche se la stima resta incerta per il fatto che le galassie spesso si fondono tra di loro, e anche che la definizione di "galassia" per masse intorno al milione di masse solari non è banale (la nostra Via Lattea ha una massa di circa 500 miliardi di



masse solari). Anche la distribuzione spaziale delle cellule cerebrali è per molti aspetti simile a quella del *Cosmic Web*. Tuttavia, per quanto possa sembrare paradossale (dopo tutto, il cervello è molto più vicino a noi di quanto non siano le galassie!) una stima affidabile del numero di cellule o neuroni nel cervello umano è apparsa in letteratura soltanto poco tempo fa. In un'immagine semplificata (si veda il pannello a sinistra nella figura), alcune aree del cervello sono popolate dal soma dei neuroni e dalle loro proiezioni dendritiche (materia grigia), ed altre aree sono per lo più costituite da assoni che formano fascicoli che collegano diverse aree del sistema nervoso centrale, e quest'ultimo con i suoi muscoli e recettori periferici. Diverse aree grigie corticali non solo hanno una diversa distribuzione dei neuroni, ma hanno anche un'architettura diversa. Ad esempio, la sostanza grigia corticale (che rappresenta oltre l'80% della massa cerebrale) contiene circa 16 miliardi di neuroni (19,0% dei neuroni del cervello) e circa 60 miliardi di cellule non neuronali. La sostanza grigia presenta anche il più elevato numero di connessioni tra i suoi neuroni. Viceversa, il cervelletto ha circa 69 miliardi di neuroni (80,2% dei neuroni del cervello) e circa 16 miliardi di cellule non neuronali. Per iniziare col nostro confronto quantitativo tra i due sistemi, è interessante allora notare come il semplice numero dei loro principali mattoni costitutivi sia molto simile: le circa 100 miliardi di galassie che

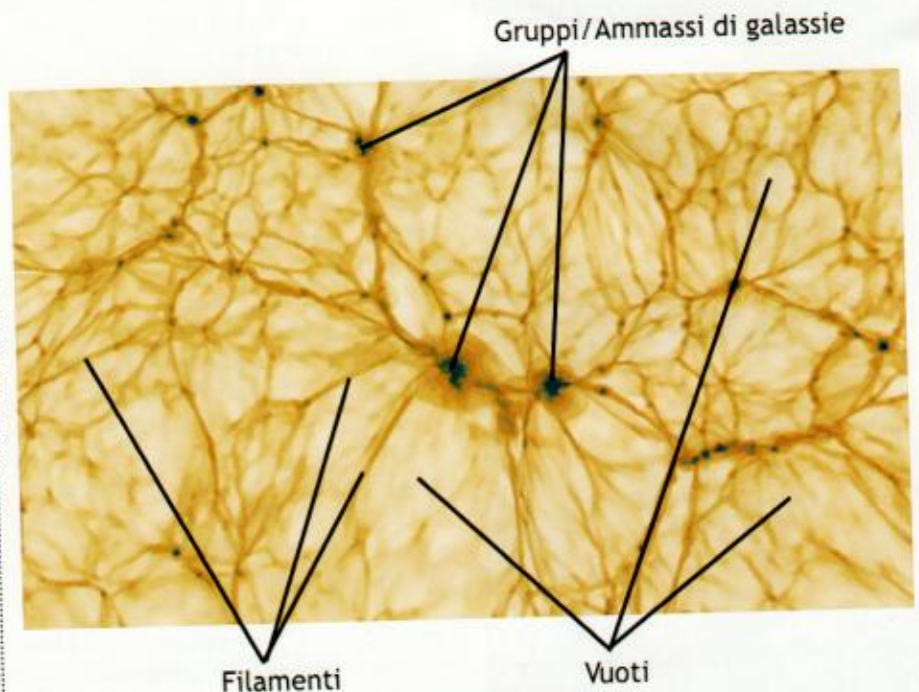
riempiono il web cosmico non sono molto lontane dagli 85 miliardi di neuroni che popolano il cervello, il che è sorprendente parlando di due sistemi tanto diversi. Quel che regola l'evoluzione della rete neuronale su scale di millisecondi è la debolissima corrente che scorre attraverso i neuroni. La diffusione di ioni di sodio, potassio e cloro attraverso le membrane cellulari dei neuroni crea periodiche variazioni del potenziale elettrico alla superficie dei neuroni, che passa da -70milliVolt a +30milliVolt, creando delle correnti di un miliardesimo di Ampère per pochi millisecondi che

◀ Immagine semplificata delle aree del cervello

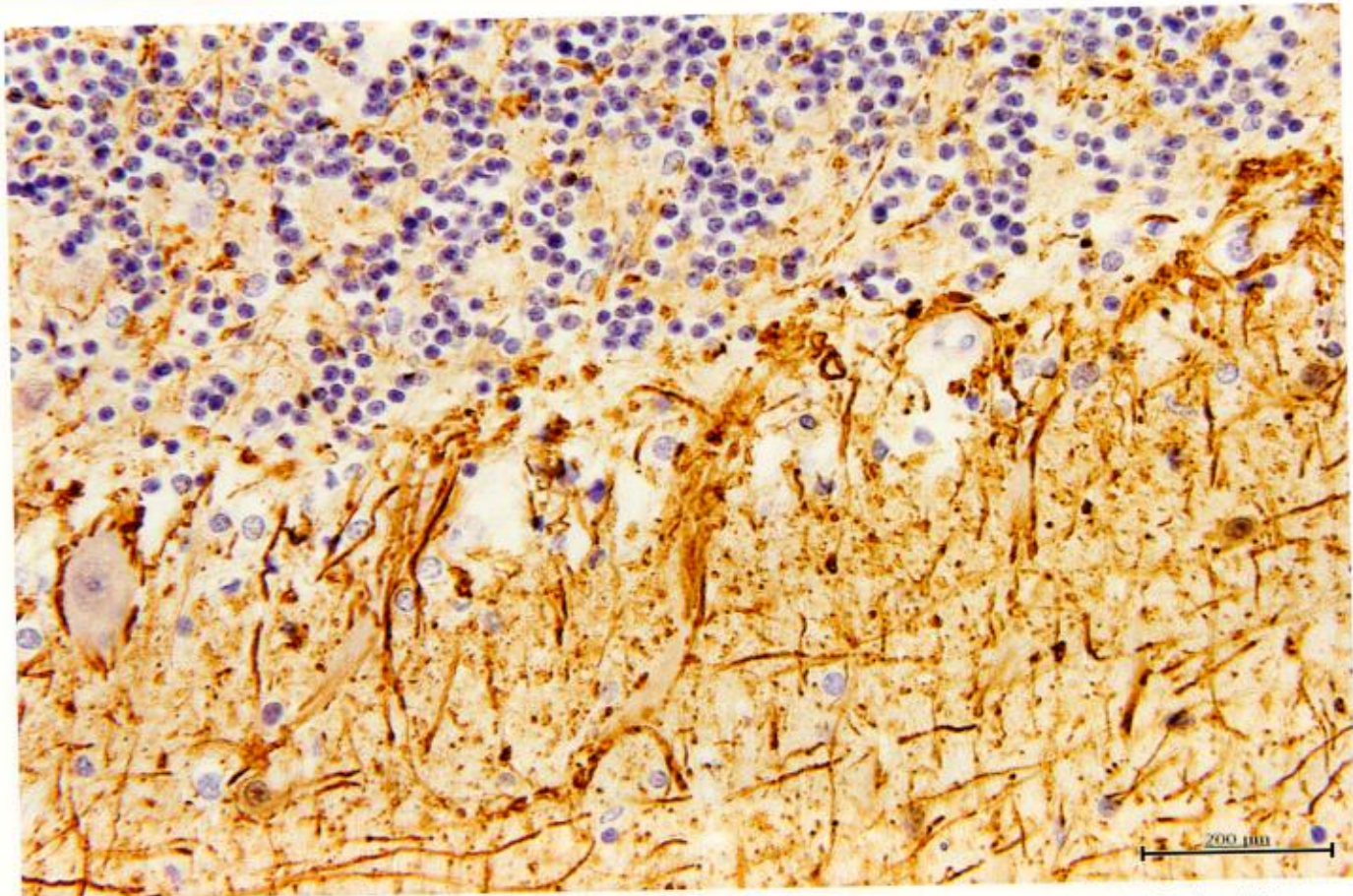
si propagano attraverso gli assoni fino al prossimo neurone, e così via. Per mezzo delle modulazioni di migliaia di segnali elettrici (mediati anche da interazioni chimiche) prodotti dai neuroni in ogni secondo, la rete neuronale si organizza e tutte le informazioni fondamentali per il funzionamento di ogni essere umano (o animale) si propagano attraverso la rete, e da questa fino ai nervi più periferici degli arti.

Nel *Cosmic Web*, invece, non c'è alcun segnale elettrico a spostare le galassie e gli unici meccanismi fondamentali che lo fanno evolvere sono la forza di gravità e l'espansione accelerata dello spazio-tempo. Ogni galassia risente infatti del cambio di posizione delle galassie attorno a sé dopo un certo tempo, necessario alla luce e al potenziale gravitazionale per percorrere tutte le separazioni tra galassia e galassia; in questo modo, le galassie scambiano tra di loro a tutti gli effetti "delle informazioni" (quantificabili in *bit*), e il progressivo flusso di informazioni gravitazionali attraverso la rete determina come la materia si organizza nel *Cosmic Web*.

In base alle più recenti misure del fondo cosmico di microonde ottenute col satellite Planck, la densità di energia (o in massa equivalente, tramite $E=mc^2$) del volume cosmico è per il 70% costituita dall'elusiva



▲ Il *Cosmic Web* ovvero la struttura a grande scala dell'Universo



▲ Sezione di spessore di 4 µm del cervelletto umano. Neurofilamenti marcati con anticorpo monoclonale clone 2F11. Ventana in immunostainer Benchmark XT. (cortesía di Elena Zunarelli (Dipartimento di Anatomia Patologica, Policlinico Ospedaliero-Universitario di Modena)).

energia oscura (non direttamente associata con la formazione del *Cosmic Web*) e per il 30% dalla materia. Di quest'ultima la maggior parte è costituita dalla materia oscura, solo il 4,5% è materia ordinaria e meno dello 0,1% è sotto forma di radiazione (fotoni).

Nel cervello la maggior parte del volume è occupato da neuroni e cellule gliali (70-80%), mentre il 15-20% è occupato dallo spazio interstiziale, cioè lo spazio extracellulare tra le cellule gliali e neuronali, e tra queste e i capillari sanguigni. I vasi sanguigni occupano dal 3% al 5% del volume cerebrale. È interessante notare che la massa del cervello è costituita da acqua per il 78%, mentre per il resto la composizione consta di lipidi (10-12%), proteine (8%), carboidrati (1%), sostanze organiche solubili (2%) e sale (1%). Con una certa approssimazione, si può dire che il flusso di informazione nel cervello è sostenuto principalmente dalla doppia membrana lipidica dei neuroni e dalle proteine di membrana. In questo senso, curiosamente in entrambi i sistemi la rete essenziale occupa il 20-30% della massa totale.

LE SCALE SPAZIALI PIÙ IMPORTANTI

Le somiglianze qualitative e globali tra i due sistemi non possono ovviamente cancellare il fatto che la differenza di estensione tra i medesimi è imbarazzante, di oltre 27 ordini di grandezza. Come possiamo procedere ad un qualsiasi tipo di confronto quantitativo?

Il concetto di *fenomeno emergente* ci viene fortunatamente in soccorso: molti fenomeni naturali sono riconoscibili come tali soltanto se guardati a determinate scale spaziali, mentre diventano invisibili in tutte le altre scale. Per esempio, la maggior parte dei fenomeni della meccanica quantistica emergono solo se guardiamo il cosmo su scale minuscole, mentre la turbolenza di un liquido emerge soltanto se osserviamo il fluido su scale molto più grandi di quelle delle singole molecole.

Allo stesso modo, l'organizzazione su vasta scala della materia cosmica emerge soltanto su scale dai milioni di anni luce in su. La *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) o la *2-Degree Field Galaxy Redshift Survey* (2dFGRS) sono forse le più famose scansioni a largo campo ottenute con telescopi

terrestri ed è soltanto grazie ai vastissimi volumi di cielo che hanno osservato che l'organizzazione a ragmatela dell'Universo è diventata evidente. Su scale spaziali più piccole di qualche centinaio di migliaia di anni luce la materia cosmica è distribuita in tutt'altro modo: per esempio in forma di bracci a spirale all'interno delle galassie, o di dense nubi dove nascono nuove stelle all'interno delle galassie stesse, o in sistemi a disco sulla scala "piccola" dei sistemi planetari. Ognuno di questi "sottosistemi" interagisce relativamente poco con le scale più grandi o più piccole, il che ci permette (fortunatamente) di studiare molti fenomeni in modo separato gli uni dagli altri. In breve, la rete cosmica non sembra un *frattale*: le sue proprietà dipendono dalla scala alla quale lo osserviamo e, sotto una certa soglia, l'informazione cosmica si organizza diversamente. Volendo affrontare quindi la faticosa domanda "cosa è più complesso" siamo allora a concentrarci su una ristretta varietà di scale, sia in quello del *Cosmic Web* (da qualche milione a qualche miliardo di anni luce) sia nel caso del cervello (da pochi centimetri a qualche micron, ovve-

QUALCHE ULTERIORE CURIOSITÀ SUL CERVELLO

Il cervello umano usa 46 cm³ di ossigeno al minuto; il 94% è utilizzato dalla materia grigia. Durante la gravidanza, vengono sviluppati 250.000 neuroni al minuto. Il cervello costituisce il 2% del peso di una persona. Nonostante questo, anche a riposo, il cervello consuma il 20% dell'energia del corpo. Il cervello consuma energia a 10 volte la velocità del resto del corpo per grammo di tessuto. Il consumo medio di un adulto tipico è di 100 Watt e il cervello consuma il 20% di questo rendendo la potenza del cervello di 20 W (rapportato ad una dieta di 2400 calorie medie). Il glucosio è la principale fonte di energia per il cervello. Con l'aumentare delle dimensioni e della complessità del cervello, aumenta il fabbisogno energetico. Il cervello umano è uno degli organi più affamati di energia nel corpo aumentando così la sua vulnerabilità. Se l'alimentazione di energia viene interrotta per 10 minuti, si verifica un danno cerebrale permanente. Non c'è nessun altro organo così sensibile ai cambiamenti nel suo approvvigionamento energetico.



ro milionesimo di metro): questo ci permette di analizzare i due sistemi in modo indipendente dalle loro dimensioni assolute.

NUOVE ANALISI QUANTITATIVE

Confrontare questi due sistemi è reso problematico dal fatto che otteniamo per ciascuno di essi dei dati in modi drasticamente diversi: lunghe indagini con giganteschi telescopi e costose simulazioni numeriche su centinaia di migliaia di CPU vengono utilizzate per comprendere l'Universo, mentre gli strumenti di indagine per il cervello umano sono la microscopia elettronica, l'immunoistochimica, la risonanza magnetica funzionale, la metabolomica e la teoria dell'informazione.

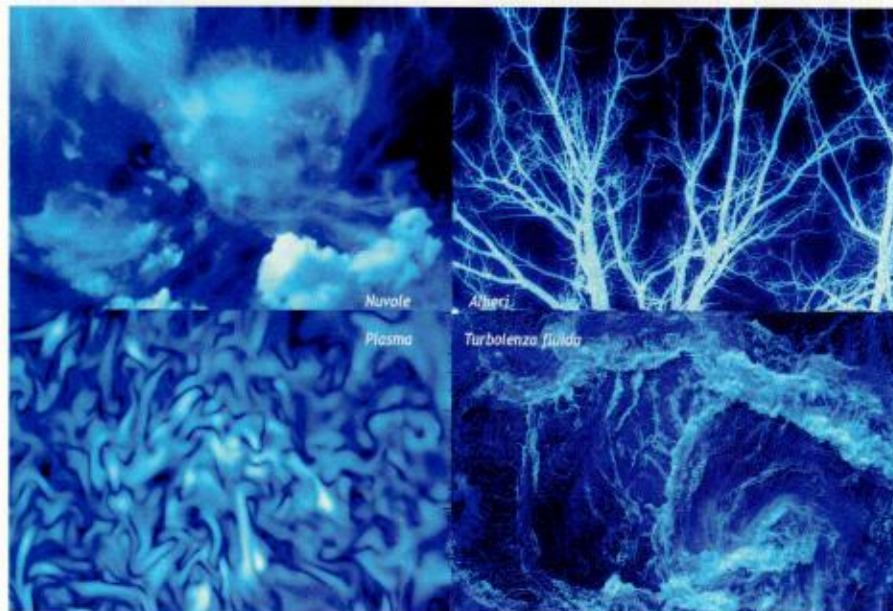
In questo contributo proviamo una via semplice, che consiste nell'analisi geometrica di due mappe su grande scala del *Cosmic Web* (alcune sezioni di 1 miliardo di anni luce di lato prese da una simulazione cosmologica recente) e del cervelletto (alcune fette di 4 micron di spessore estratte dalla rete del cervelletto come mostrato nella figura della pagina precedente).

Anche se l'occhio può effettivamente cogliere molte somiglianze tra le strutture nei due campioni, è soltanto l'analisi statistica e quantitativa che ci permette di andare oltre l'*apofenia*, ovvero la tendenza umana

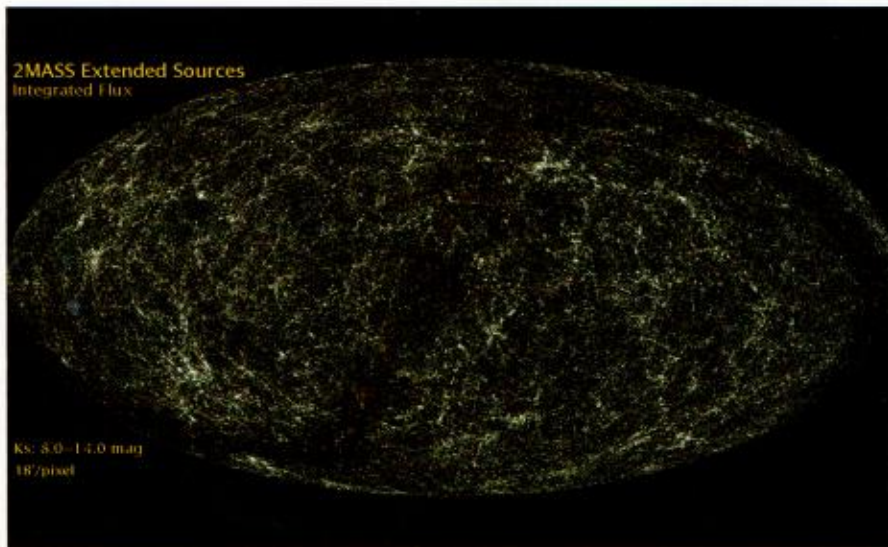
nel percepire somiglianze in forme complesse o anche interamente casuali (come, ad esempio, le molte figure che possiamo percepire nelle nuvole). Nel caso specifico, abbiamo estratto lo *spettro di potenza* della distribuzione di massa in 2 dimensioni dei due sistemi, una tecnica standard usata in cosmologia per lo studio sia delle strutture cosmiche simulate sia della distribuzione spaziale osservata delle galassie.

Lo spettro di potenza permette di visualizzare su quali scale è prevalentemente organizzato un fenomeno.

Se la trama del *Cosmic Web* o della rete neuronale fosse una melodia, lo spettro di potenza equivarrebbe a contare quante note acute e quante gravi vengono suonate in entrambi i casi. Una "melodia spaziale" organizzata soprattutto con fluttuazioni di materia su grandi scale (ovvero basse frequenze spaziali, visto che la frequenza spaziale è l'inverso di una lunghezza, come una frequenza temporale è l'inverso di un tempo) sarà caratterizzata da uno spettro con più potenza alle basse frequenze e, viceversa, una "melodia spaziale" carat-



▲ Altri esempi di reti in fenomeni naturali.



▲ La distribuzione di galassie dell'Universo Locale osservata dalla survey 2MASS (Maddox et al. 2009).

terizzata soprattutto da fluttuazioni su scale piccole mostrerà uno spettro con potenza alle alte frequenze spaziali.

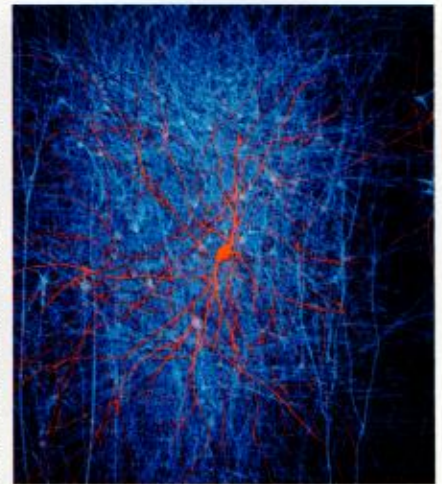
Gli spettri nella figura della pagina successiva mostrano una straordinaria somiglianza tra gli spettri di potenza del cosmo simulato e delle fette di cervelletto analizzate: se normalizziamo le frequenze spaziali in base alle dimensioni dei due sistemi (ovvero dividiamo le lunghezze nei due sistemi per la loro dimensione massima), gli spettri di potenza delle due reti si sovrappongono quasi perfettamente, ad indicare che la ripartizione della potenza delle fluttuazioni tra scale grandi e piccole è estremamente simile. La distribuzione delle fluttuazioni nella rete neuronale nel cervelletto, su scale da 0,1 mm a 1 μm , ha il medesimo andamento della distribuzione di materia nel *Cosmic Web*, da scale di 500 milioni di anni luce fino a 5 milioni anni luce. Per quantificare quanto significativa sia questa somiglianza abbiamo ripetuto la stessa analisi con altre immagini di sistemi naturali (come le ramificazioni di un albero, la morfologia delle nuvole, la turbolenza in un corso d'acqua, eccetera) riscalate nel medesimo modo, trovando che le somiglianze sono molto meno marcate: per esempio nella figura finale dell'articolo mostriamo anche gli spettri di potenza delle distribuzioni di massa bi-dimensionali di alcune altre reti che comunemente si trovano in natura: nuvole e rami d'albero. In entrambi i casi, le distribuzioni mostrano un andamento più ripido dello spettro di potenza, compatibile

con una distribuzione *frattale* delle fluttuazioni, ovvero caratterizzata da una distribuzione uguale ad ogni scala delle fluttuazioni. Nei casi del *Cosmic Web* e della rete neuronale, invece, il nostro spettro mostra una prevalenza di fluttuazioni alle scale più grandi accessibili all'osservazione. Stabilita questa ulteriore somiglianza strutturale, possiamo usare questo come punto di partenza per decidere infine quale delle due reti sia in grado di processare più informazione?

IL CERVELLO O L'UNIVERSO: CHI È PIÙ COMPLESSO?

La moderna "teoria dell'informazione" asserisce che un fenomeno è tanto più complesso quanto la sua evoluzione futura è più difficile da prevedere.

Un sasso lanciato in aria evolve in modo poco complesso, visto che nota la sua velocità iniziale e tenendo conto della resistenza dell'aria, è possibile calcolarne la futura traiettoria con una discreta precisione, così come il tempo di caduta al suolo. L'evoluzione dei prossimi cento lanci di un dado è invece quasi impossibile da prevedere: la probabilità che una qualsiasi sequenza di numeri prevista si verifichi davvero è di 6 alla 10⁻⁷⁷: un 6 preceduto da *settantasette* zeri. Possiamo quindi concludere che un semplice dado sia uno dei sistemi più complessi dell'Universo? Tuttavia dal punto di vista statistico, il problema del dado diventa semplicissimo e può essere risolto con la matematica di base: ogni numero uscirà *in media* in un sesto dei casi.

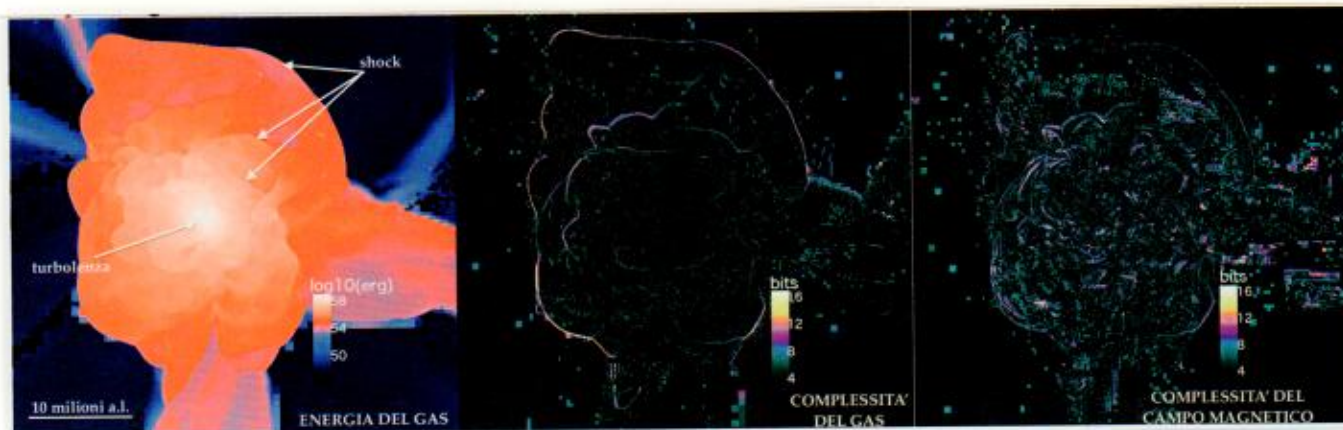


▲ La rete neuronale del cervello umano, nella più grande simulazione numerica mai realizzata, dal progetto Blue Brain (<https://bluebrain.epfl.ch>).

Insomma, *statisticamente parlando*, il dado è un problema semplice, perché possiamo facilmente sapere cosa farà *in media*, mentre molti altri problemi fisici, restano *statisticamente complessi*: per esempio l'atmosfera terrestre è un sistema a buon diritto definito come complesso, in quanto anche prevedere la sua evoluzione *media* è un problema molto più complicato, per modellare il quale sono necessari i più potenti centri di calcolo del pianeta.

Grazie all'apparato matematico sviluppato per quantificare la complessità statistica dei vari sistemi, possiamo finalmente approssicare l'antico dilemma, se sia più complicato il cervello o l'Universo che ci contiene. Un modo pratico per stimare la "complessità" di una rete è calcolare quanto lungo deve essere un programma che possa produrre statisticamente la rete stessa.

In un recente studio (<https://arxiv.org/abs/1611.09348>) uno degli autori ha presentato l'applicazione della teoria dell'informazione per mappare la distribuzione spaziale della complessità nell'Universo simulato, mostrando per esempio che un luogo estremamente complesso nell'Universo è proprio l'intersezione tra la materia dei filamenti e i nodi della rete cosmica, ovvero gli ammassi di galassie. In questi punti, i rapidi processi di accrescimento di materia (sotto la spinta della forza di gravità) impongono alla materia ordinaria delle variazioni di energia molto rapide e difficili da prevedere nel dettaglio e questa informazione può venire utilizzata per caratterizzare



▲ Distribuzione dell'energia del gas in un ammasso di galassie simulato (a sinistra), confrontata con la distribuzione della complessità del gas stesso (al centro) e del campo magnetico (a destra). Tratto e rielaborato dall'autore (MNRAS 2017).

il livello di complessità nel *Cosmic Web*.

Da queste prime stime, possiamo estrapolare che il *Cosmic Web* nell'intero Universo osservabile (il tracciato delle sue 100 miliardi di galassie) sia tra 1 e 10 petabyte (da 1 a 10 milioni di gigabyte). Stimare la complessità del cervello umano è molto più difficile, perché le sue simulazioni globali sono ancora una sfida troppo difficile per la scienza. Sulla base dell'ultima analisi della connettività della rete cerebrale, studi indipendenti hanno concluso che la capacità di memoria totale del cervello umano adulto dovrebbe essere di circa 2,5 petabyte, proprio entro il range di 1-10 petabyte stimato per il web cosmico! Questa stima ci suggerisce due prospettive egualmente affascinanti. La prima è che possiamo pensare che l'intero corpo di informazioni immagazzinato in un cervello umano (vale a dire l'intera esperienza di vita di una persona) potrebbe essere codificato usando la distribuzione delle galassie nell'intero Universo! La seconda che, viceversa, un dispositivo di calcolo con la capacità di memoria del cervello umano potrebbe essere sufficiente a riprodurre la complessità visualizzata dall'Universo alle sue scale più grandi!

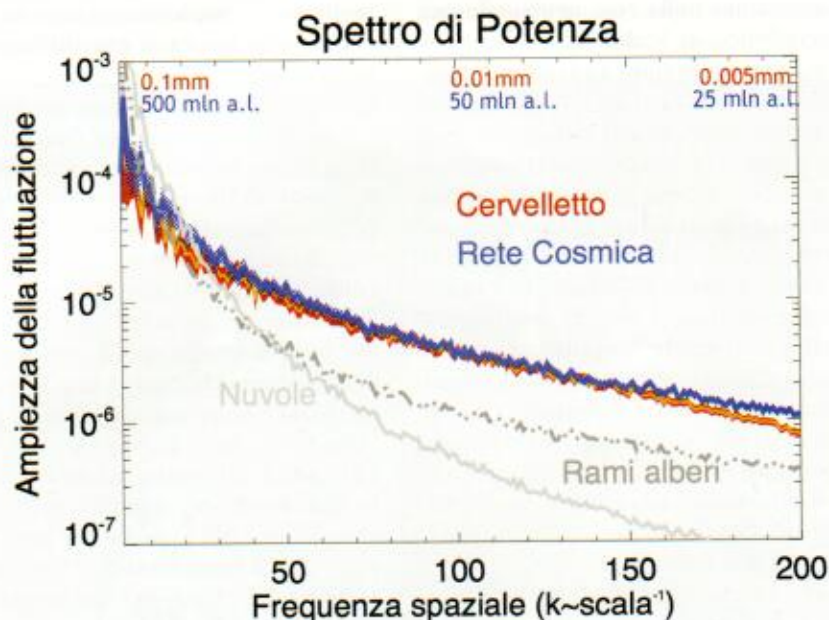
CONCLUSIONE

A scanso di equivoci, osserviamo che la nostra analisi non vuole contenere nessun tipo di messaggio teologico o metafisico, nemmeno nascosto: il fascino di questi numeri è che, alla luce di analisi statistiche e morfologiche, la somiglianza tra

reti complesse così diverse ed importanti per la nostra comprensione della Natura emerge in modo chiaro, grazie ad analisi quantitative. Nonostante le differenze nel substrato, i meccanismi fisici rilevanti e le dimensioni assolute, la rete neuronale umana e la rete cosmica delle galassie mostrano somiglianze inaspettate se osservate attraverso la lente obiettiva della teoria dell'informazione. Questo è davvero notevole, considerando che c'è più somiglianza condivisa tra queste reti complesse piuttosto che tra la rete cosmica e l'interno di una galassia, o tra la rete neuronale e l'interno di un corpo neuronale. Ovviamente questi risultati vanno presi con prudenza poiché la nostra

analisi è limitata a piccoli campioni, ed inoltre ci siamo giocoforza basati su tecniche di misurazione molto diverse. Speriamo che il futuro possa fornirci risposte più soddisfacenti, come la sfida di simulare l'intero ricavato della rete neuronale, grazie a programmi di grandi dimensioni come lo *Human Brain Project*. Inoltre, nel prossimo decennio otterremo anche il sondaggio più completo della rete cosmica, come risultato di una grande impresa internazionale per costruire il più grande telescopio radio mai costruito: lo *Square Kilometer Array*.

Gli autori ringraziano la Dott.ssa Elena Zunarelli (Dipartimento di Anatomia Patologica, Policlinico Ospedaliero-Universitario di Modena) per aver prodotto le immagini microscopiche mostrate in questo articolo. ●



▲ Gli spettri di potenza del cosmo simulato e delle fette di cervelletto si sovrappongono quasi perfettamente, ad indicare che la ripartizione della potenza delle fluttuazioni tra scale grandi e piccole è estremamente simile.