

**Fundamenteel onderzoek met  
Big Science  
Theatercollege nov 2019**

Nikhef

## Dit gaan we doen

- Wat en waarom van Big Science;
- Iets over Nikhef en CERN;
- Vele voorbeelden van Big Science
- Af en toe een beetje natuurkunde;
- En ook een beetje geschiedenis;
- Een paar filmpjes;
- De toekomst van de *fundamentele fysica*:
  - Symmetrie en Supersymmetrie
  - Einstein Golven (GW)

## **Wat is Big Science?**

Big Science verwijst naar fundamenteel en grensverleggend onderzoek dat in grote internationale verbanden wordt uitgevoerd. Voor dergelijk onderzoek is omvangrijke en vaak kostbare onderzoekinfrastructuur nodig, waarbij vrijwel steeds met de industrie wordt samengewerkt. Het is voor de lange termijn, denk daarbij aan 50- 00 jaar

**Big Science is big money en  
brilliand minds uit de hele wereld.**



# NOBEL OP DE KAART

Martijn van Calmhout  
Jelle Reumer

Op zoek naar  
de Nederlandse  
Nobelprijswinnaars  
van vroeger en nu

## VAN NUL TOT VIJF BIJJOEN KELVIN: OPVALLENDE TEMPERATUREN

5.000.000.000.000

(2012) CERN, Large Hydron Collider, Zwitserland  
Temperatuur ontstaat bij een  
nasmaak-poging op nanoschaal  
van de oerknal.

10.000.000.000

Supernova

150.000.000

Hart van een kernfusiereactor

15.000.000

Kern van de zon

50.000

(2018) Lab in Eindhoven  
Het materiaal in de wolfram rand van een  
reactor werd blootgesteld aan deze hitte.  
Het kunnen beheersen van deze  
temperatuur is belangrijk voor de  
bouw van een kernfusiereactor.\*

5.800

Oppervlakte van de zon

5.700

Aardkern

2.500

Hoogoven

738

Gemiddelde temperatuur op Venus

373,15

Kookpunt water op zeeniveau.

Ook wel: 100 graden Celsius

342

Kookpunt water op top Mount Everest

330

(1913) Death Valley Woestijn, Californië  
Hoogste luchttemperatuur ooit gemeten

293

Kamertemperatuur

273,15

Vriespunt water op zeeniveau. Ook wel: 0 graden Celsius

210

Gemiddelde temperatuur op Mars

184

(1983) Antarctica  
Laagste luchttemperatuur ooit gemeten

44

Gemiddelde temperatuur op Pluto

4,22

(1908) Lab van Heike Kamerlingh Onnes,  
Leiden

3

Deep Space

De leegte tussen sterrenstelsels

0,00000001

Zwart gat

Door Stephen Hawking  
geschatte temperatuur van  
zwart gat.

0,00000000005

(2015) Stanford University,  
Stanford, Californië

Laagste temperatuur ooit  
door mensen bereikt.

Kelvin

## DE NIEUWSTE CIJFERS

Een lab in Eindhoven heeft hittetests uitgevoerd van zo'n vijftigduizend graden, de temperatuur aan de wand van een kernfusiereactor. Welke extreme temperaturen kennen we nog meer?

Graphic **Raymond van der Meij** Research **Mickey Steijaert**



\*Kernfusie: het onder extreem hoge temperaturen fuseren van de kernen van waterstofatomen, waarbij energie vrijkomt

## WAT IS TEMPERAATUUR?

Temperatuur is natuurkundig gezien niets anders dan een maat voor de hoeveelheid trilling van deeltjes in een stof. Hoe hoger de temperatuur van een stof, hoe meer de deeltjes trillen en hoe warmer de stof aanvoelt. Bij 0 Kelvin zijn de atomen en moleculen in de stof stil. Stijgt de temperatuur, dan gaan ze trillen. Bij bepaalde temperaturen gaan de deeltjes zo hard trillen dat ze botsen of zelfs helemaal los van elkaar gaan bewegen: het smeltpunt en kookpunt.

## DE BEKENDSTE TEMPERAATUURSCHALEN

Kelvin (K) Vriespunt 273,15

Afgeleid van de schaal van Celsius, maar met een ander nulpunt. 0 Kelvin is het absolute nulpunt, de laagste temperatuur die theoretisch mogelijk is.

Celsius (°C)

Afgeleid van het vriespunt (0) en kookpunt (100) van water op zeeniveau.

Fahrenheit (°F)

32

Oudere temperatuurschaal dan Celsius, die onder meer nog in de VS wordt gebruikt.

Guinness Book of World Records, NASA, Nature, Science, Hans van Eck (DIFFER)

K  
°C  
°F



## DE NIEUWSTE CIJFERS

VAN NUL TOT  
VIJF BIJJOEN KELVIN:  
OPVALLENDE  
TEMPERATUREN

Een lab in Eindhoven heeft hittetests uitgevoerd van zo'n vijftigduizend graden, de temperatuur aan de wand van een kernfusiereactor. Welke extreme temperaturen kennen we nog meer?

Graphic **Raymond van der Meij** Research **Mickey Steijaert**

5.000.000.000.000

(2012) **CERN, Large Hydron Collider**, Zwitserland  
Temperatuur ontstaan bij een namaak-poging op nanoschaal van de oerknal.

10.000.000.000

Supernova

150.000.000

Hart van een kernfusiereactor

15.000.000

Kern van de zon

50.000

(2018) **Lab in Eindhoven**  
Het materiaal in de wolfram rand van een reactor werd blootgesteld aan deze hitte. Het kunnen beheersen van deze temperatuur is belangrijk voor de bouw van een kernfusiereactor.\*

5.800

Oppervlakte van de zon

5.700

Aardkern

2.500

Hoogoven

738

Gemiddelde temperatuur op Venus

373,15

Kookpunt water op zeeniveau.  
Ook wel: 100 graden Celsius

342

Kookpunt water op top Mount Everest



\*Kernfusie: het onder extreem hoge temperaturen fuseren van de kernen van waterstofatomen, waarbij energie vrijkomt

## WAT IS TEMPERAATUUR?

Temperatuur is natuurkundig gezien niets anders dan een maat voor de hoeveelheid trilling van deeltjes in een



kernen van waterstofatomen,  
waarbij energie vrijkomt

738 Gemiddelde temperatuur op Venus

373,15 Kookpunt water op zeeniveau.  
Ook wel: 100 graden Celsius

342 Kookpunt water op top Mount Everest

330 (1913) Death Valley Woestijn, Californië  
Hoogste luchttemperatuur ooit gemeten



293 Kamertemperatuur

273,15 Vriespunt water op zeeniveau. Ook wel: 0 graden Celsius

210 Gemiddelde temperatuur op Mars

184 (1983) Antarctica  
Laagste luchttemperatuur ooit gemeten

44 Gemiddelde temperatuur op Pluto

4,22 (1908) Lab van Heike Kamerlingh Onnes,  
Leiden

3 Deep Space  
De leegte tussen sterrenstelsels

0,00000001

Zwart gat  
Door Stephen Hawking  
geschatte temperatuur van  
zwart gat.

0,00000000005

Kelvin

(2015) Stanford University,  
Stanford, Californië  
Laagste temperatuur ooit  
door mensen bereikt.



## WAT IS TEMPERAATUUR?

Temperatuur is natuurkundig gezien niets anders dan een maat voor de hoeveelheid trilling van deeltjes in een stof. Hoe hoger de temperatuur van een stof, hoe meer de deeltjes trillen en hoe warmer de stof aanvoelt. Bij 0 Kelvin zijn de atomen en moleculen in de stof stil. Stijgt de temperatuur, dan gaan ze trillen. Bij bepaalde temperaturen gaan de deeltjes zo hard trillen dat ze botsen of zelfs helemaal los van elkaar gaan bewegen: het smeltpunt en kookpunt.

## DE BEKENDSTE TEMPERAATUURSCHALEN

**Kelvin (K)** Vriespunt **273,15**

Afgeleid van de schaal van Celsius, maar met een ander nulpunt. 0 Kelvin is het absolute nulpunt, de laagste temperatuur die theoretisch mogelijk is.

**Celsius (°C)** 0

Afgeleid van het vriespunt (0) en kookpunt (100) van water op zeeniveau.

**Fahrenheit (°F)** 32

Oudere temperatuurschaal dan Celsius, die onder meer nog in de VS wordt gebruikt.

K  
°C  
°F

Guinness Book of World Records, NASA, Nature, Science, Hans van Eck (DIFFER)



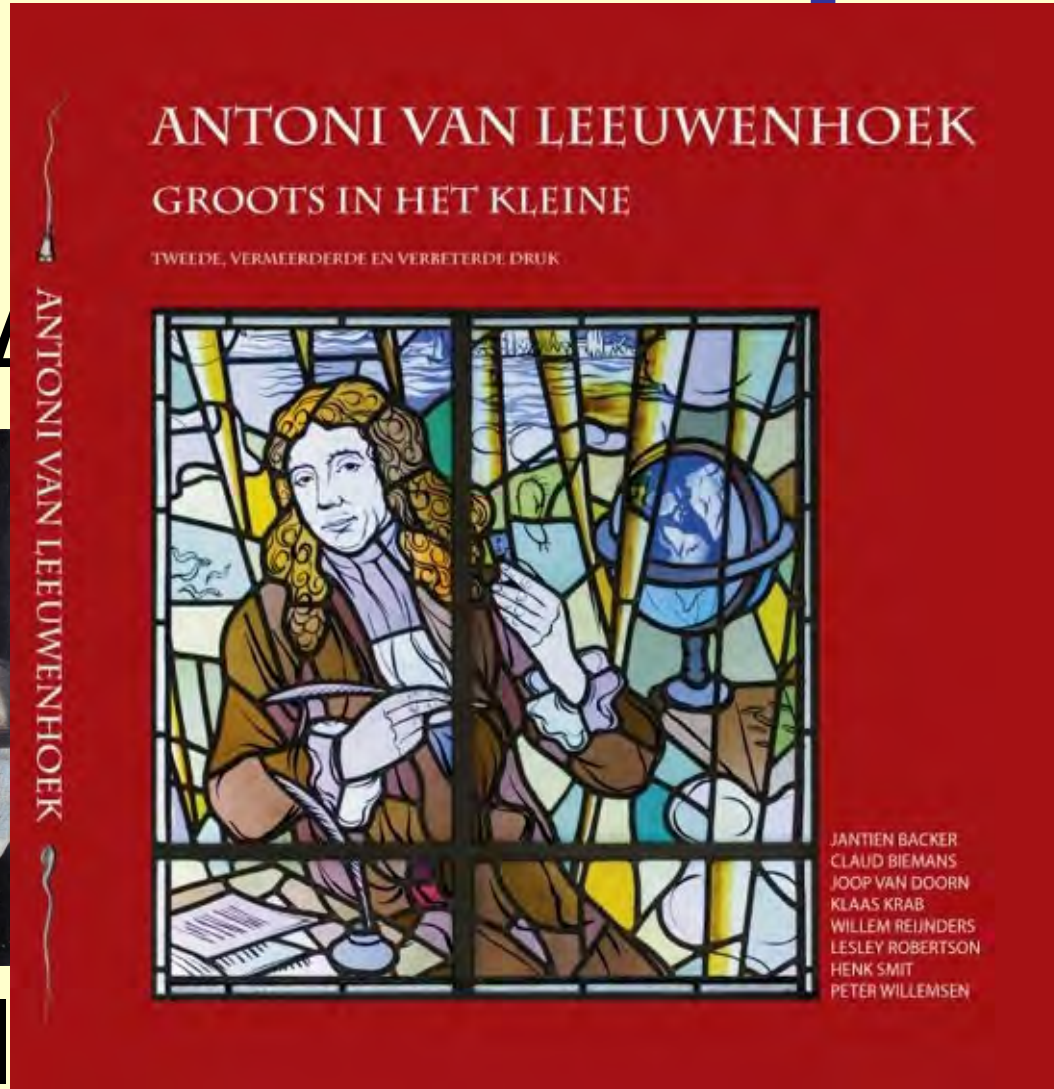


# Microscopie

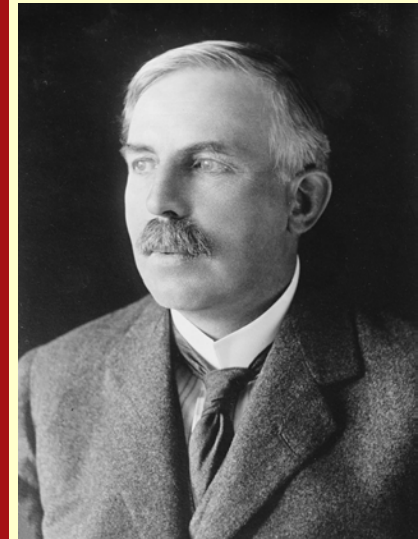
Van A



Al

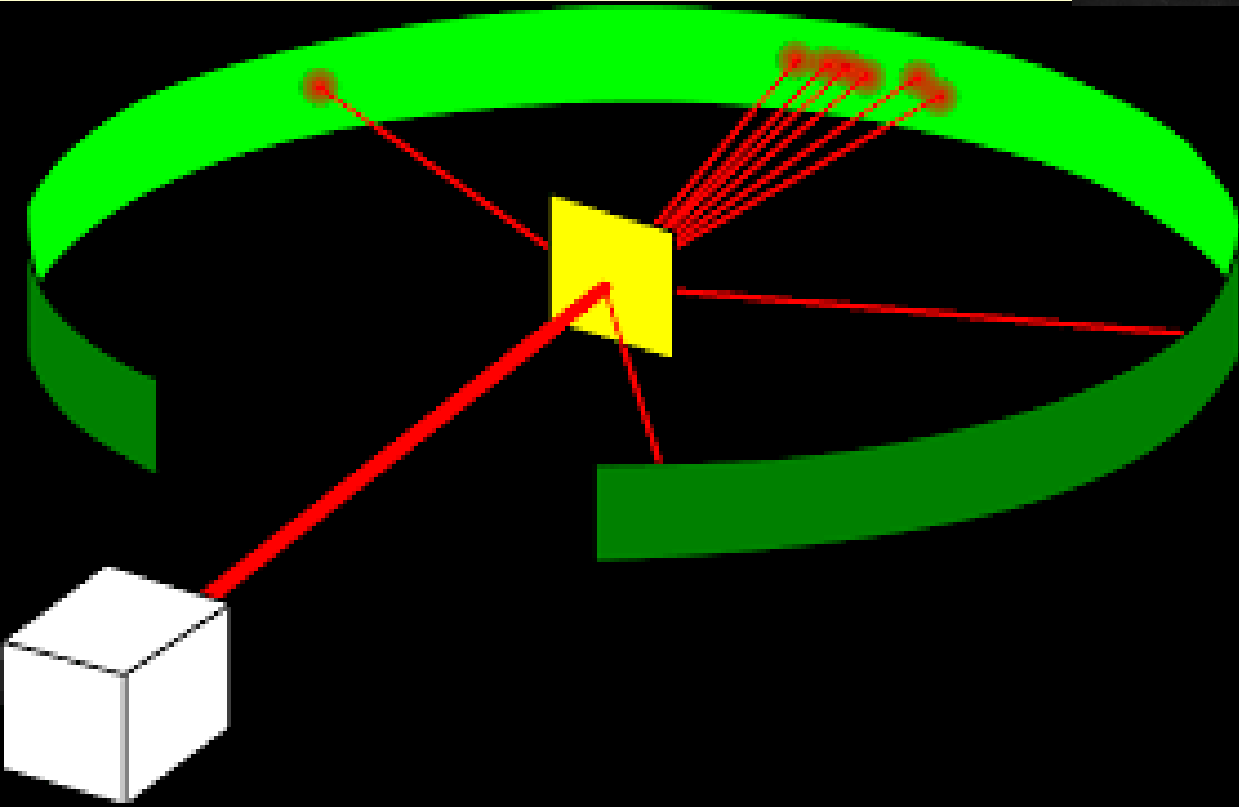
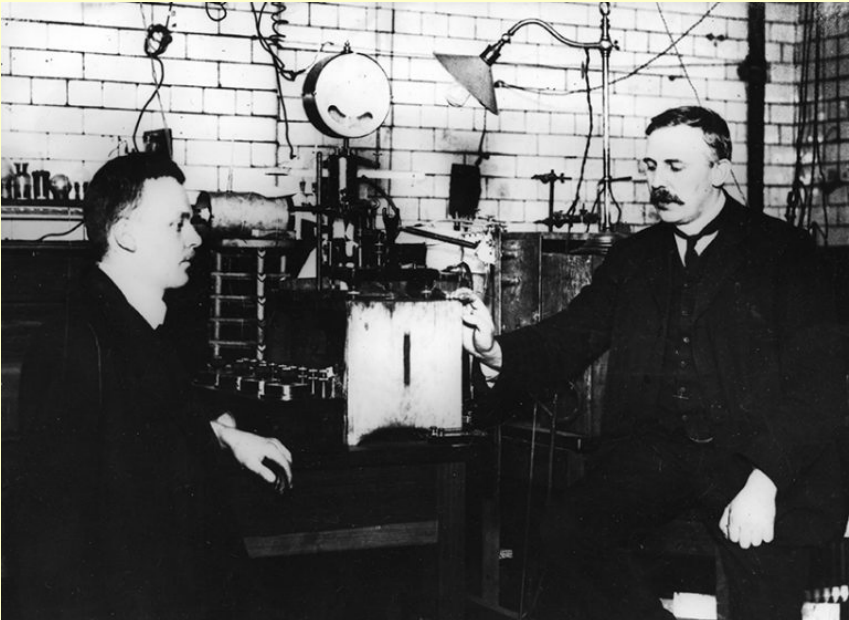


hoek



C<sup>2</sup>

<https://www.youtube.com/watch?v=XBqHkraf8iE>







CERN main site

SPS  
accelerator

Geneva Airport

LHC accelerator



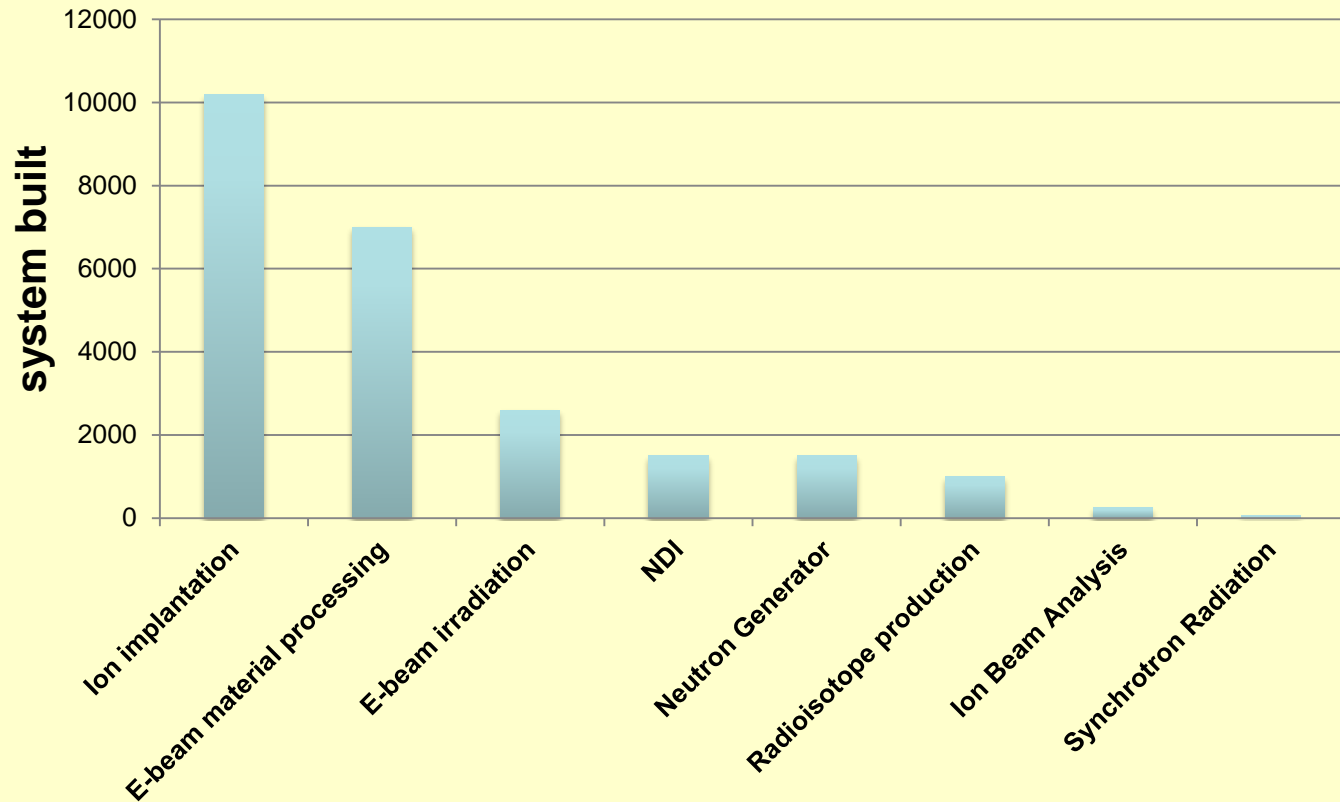
# CERN in Genève

# Het belang van versnellers

- Ruim 100 grote en kleine versnellers op CERN
- Ruim 5.000 versneller labs in de wereld
- Spallation sources zoals ESS zijn versneller gedreven
- Inherent veilige kernenergie (Mirra België)
- Free Electron Lasers (FELs) (duizenden de komende jaren)
- Medische toepassingen, 1/3 van de totale markt
- Compacte versnellers zijn de toekomst
  - CliC
  - Wakefield versnellers



# Impact: accelerators in Science, Industry and Society



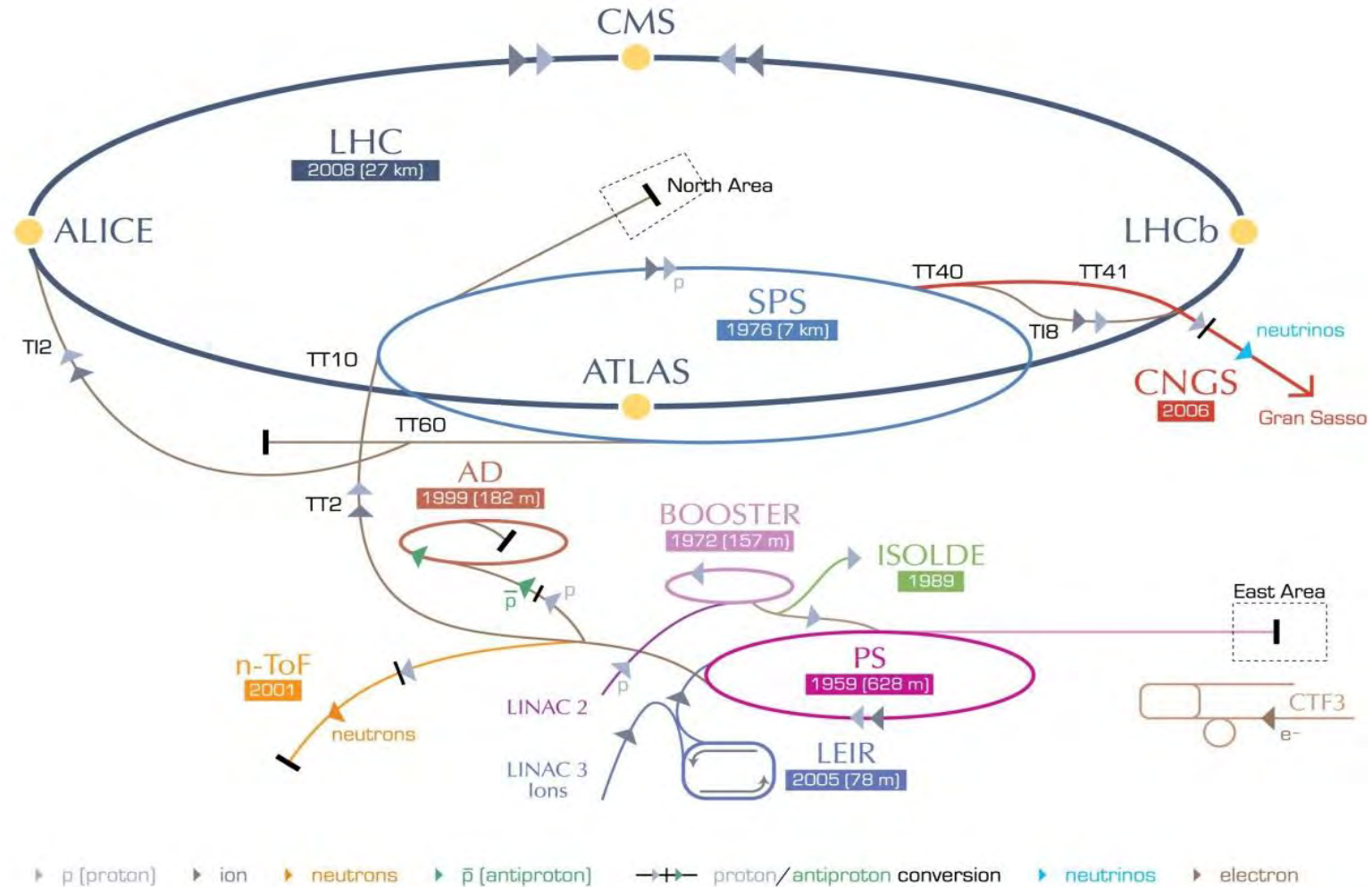
24.000 accelerators in the world, (more than 30.000 if medical are included)  
1100 new systems deployed every year for about US\$ 2.2B.  
(if medical therapy is included, the bottom line figure will increase by 1 \$B more)



Een met hedendaagse onderdelen nagebouwde Gould Laser



# Het CERN Versneller complex

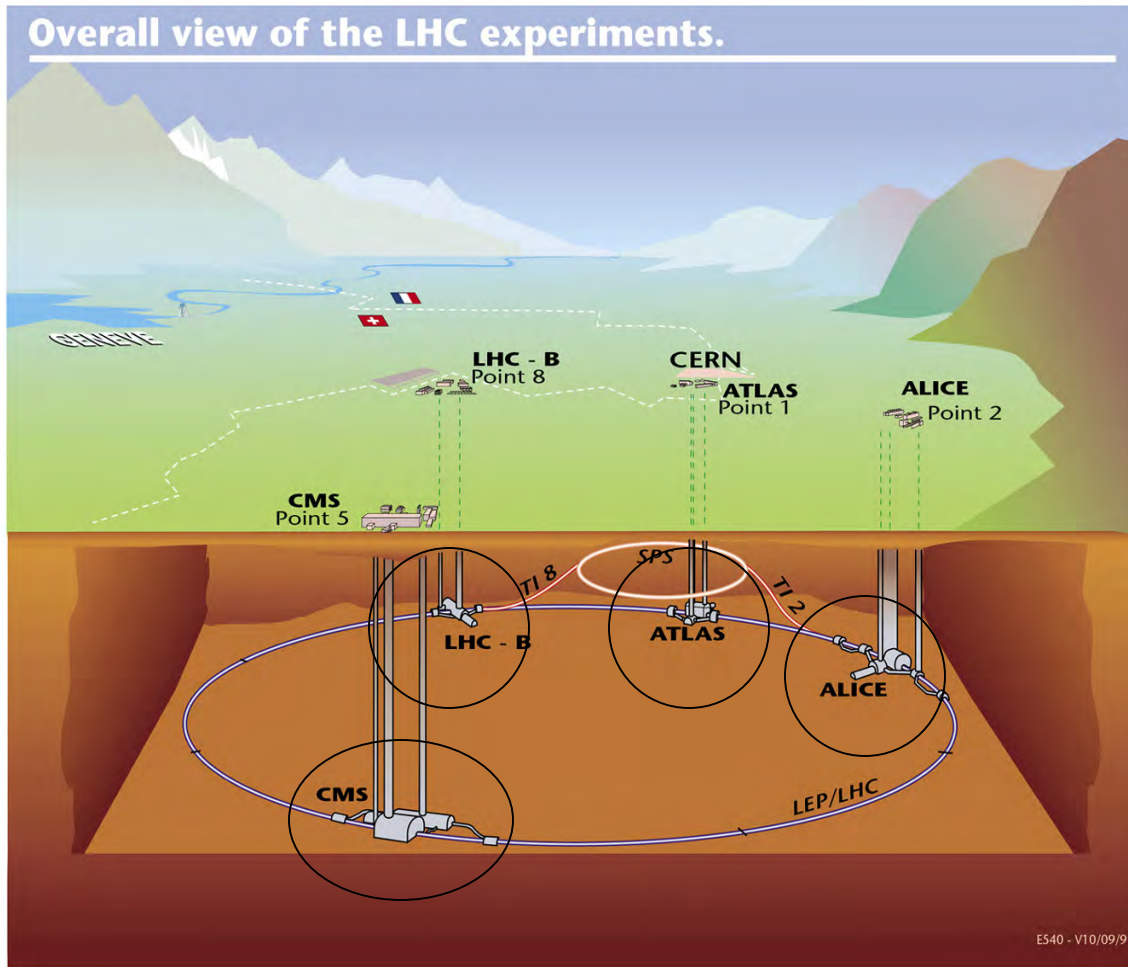


LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine Device  
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight

# LHC

De Large Hadron Collider is het krachtigste instrument dat we hebben om deeltjes eigenschappen te onderzoeken.



- Vier **gigantische ondergrondse hallen** om enorme detectoren te plaatsen.
- De versneller met de **hoogste energie** ter wereld.
- Botsende deeltjes met de **hoogste bundel intensiteit**.
- Bedrijft bij een temperatuur **kouder dan het heelal**.



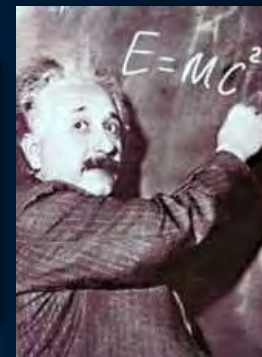
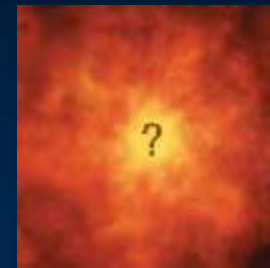




# The Mission of CERN

- ❑ **Push forward** the frontiers of knowledge

E.g. the secrets of the Big Bang, what is the matter like within the first moments of the universe's existence?



- ❑ **Develop** new technologies, accelerators and detectors

Information technology  
Medicine - diagnosis and therapy



- ❑ **Train** scientists and engineers of tomorrow



- ❑ **Unite** people from different countries and cultures





# CERN was founded 1954:

“Science for Peace”

12 European States

## Today: 21 Member States

~ 2300 staff

~ 1300 other paid personnel

> 11500 users

Budget (2015) ~1000 MCHF

NL contribution ~4.5% (43 M€)

**Member States:** Austria, Belgium, Bulgaria, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Israel, Italy, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Slovak Republic, Spain, Sweden, Switzerland and United Kingdom

**States in accession to Membership:** Romania, Serbia

**Applications for Membership or Associate Membership:**

Brazil, Croatia, Cyprus, Pakistan, Russia, Slovenia, Turkey, Ukraine

**Observers to Council:** India, Japan, Russia, Turkey, United States of America; European Union, JINR and UNESCO

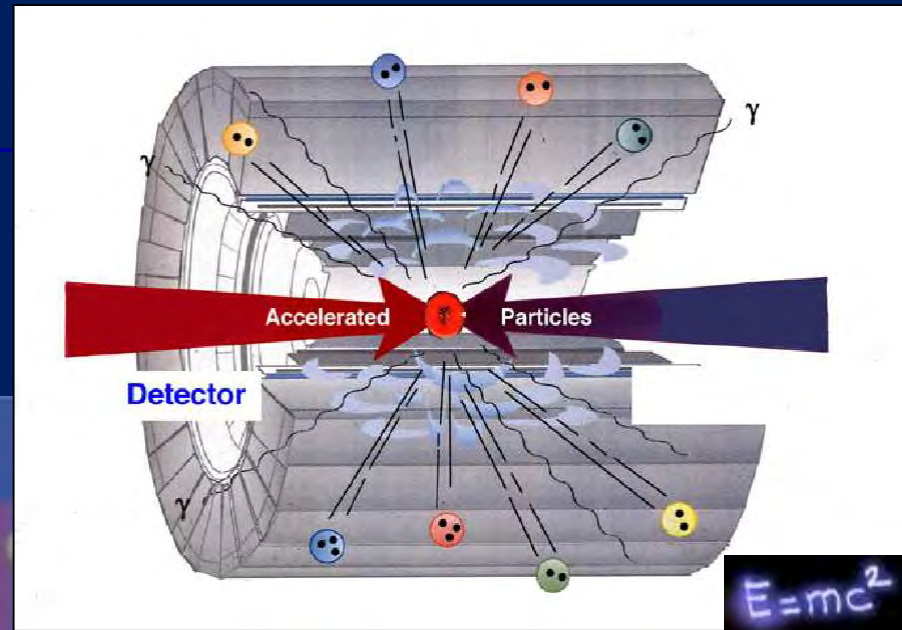




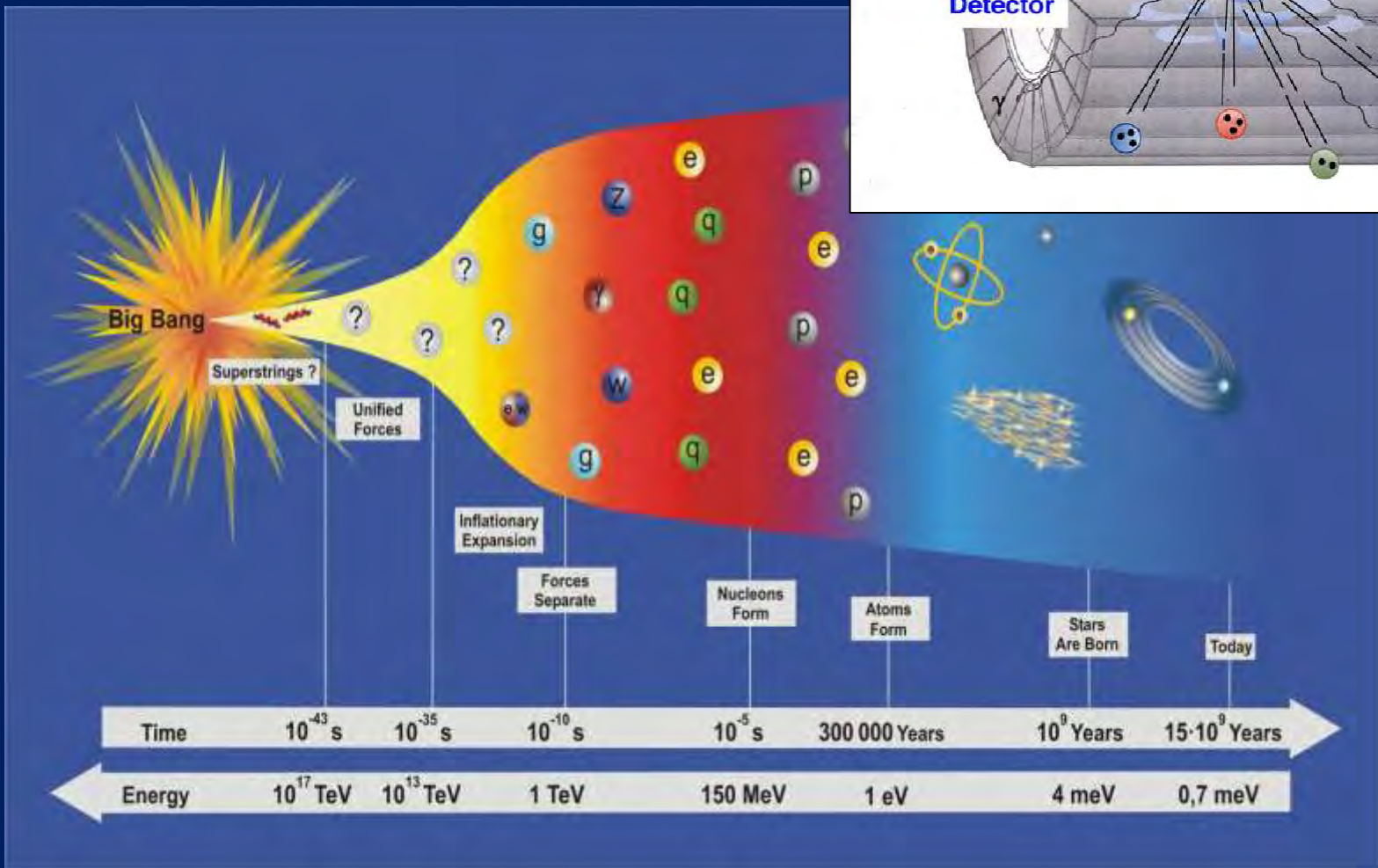
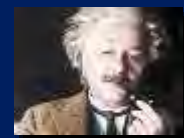


$$E = mc^2$$

# Generation of heavy particles with short life time



$$E = mc^2$$





# ATLAS on surface and underground

- Underground cavern at - 90 m
- 2 shafts give access to a 50,000 m<sup>3</sup> cavern for the detector



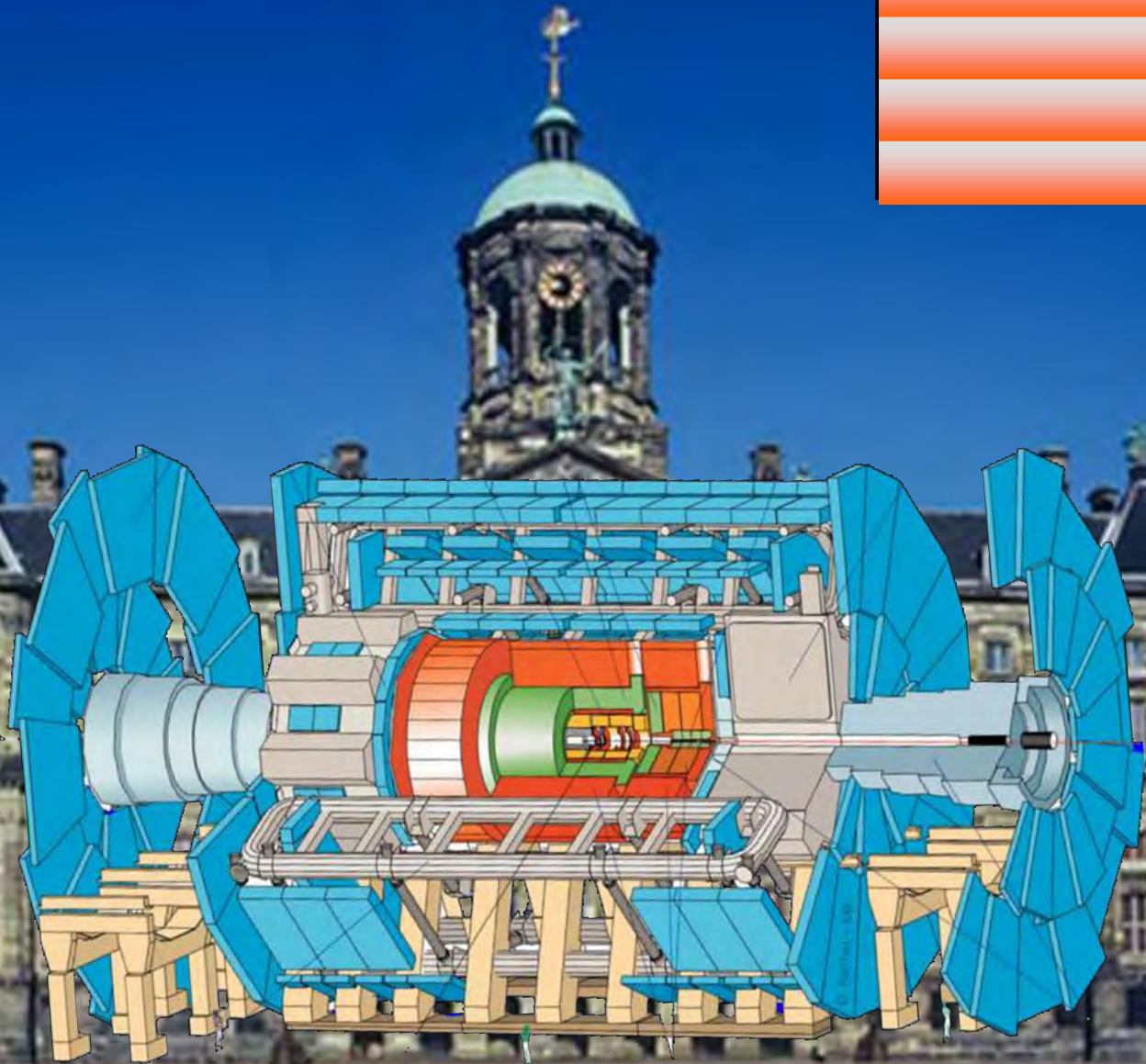
Cavern length = 55 m  
width = 32 m  
height = 35 m





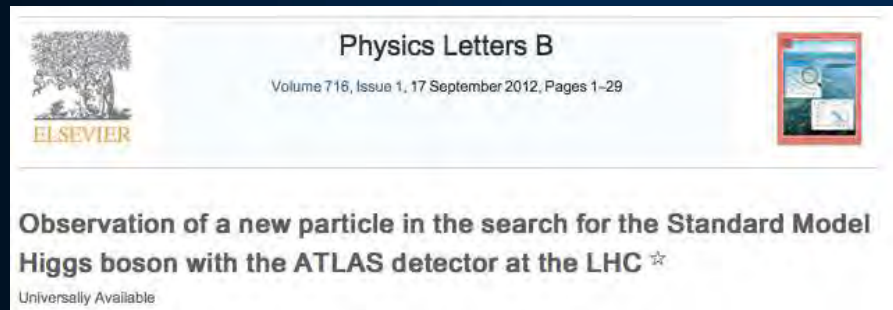
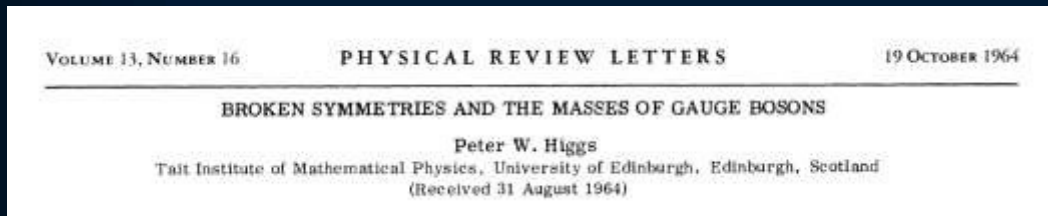


# ATLAS in Amsterdam





# It takes time....Mr Higgs - prelude



*"I certainly had no idea it would happen in my lifetime at the beginning, more than 40 years ago.*

*I think it shows amazing **dedication by the young people** involved with these colossal collaborations to persist in this way, on what is a really a very difficult task.*

*I congratulate them."*

Peter Higgs, July 4<sup>th</sup>, 2012





# The Netherlands and CERN



The Netherlands is a **founding member** of CERN

Cornelis Jan Bakker: 2<sup>nd</sup> Director General of CERN (1955-1960)

Dutch scientists have made very important contributions to the advance of Particle Physics in general and have maintained a strong involvement in CERN

## Nobel Prizes in Physics:

related to advance of Particle Physics:

1913: H. Kamerlingh Onnes: Superconductivity

1984: S. van der Meer: Accelerator physics (at CERN)

1999: M. Veltman and G. 't Hooft: theory of electroweak interactions



F. Linde  
Director  
NIKHEF

J. Engelen  
CSO, CERN  
2004 - 2008

H. ten Kate  
ATLAS

2005: CERN Visit of  
Maria van der Hoeven  
(Minister for Education,  
Culture and Science)



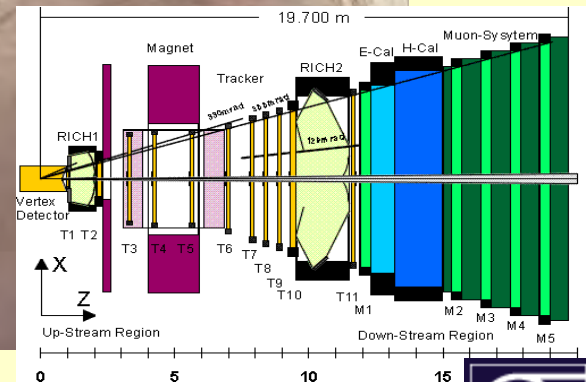
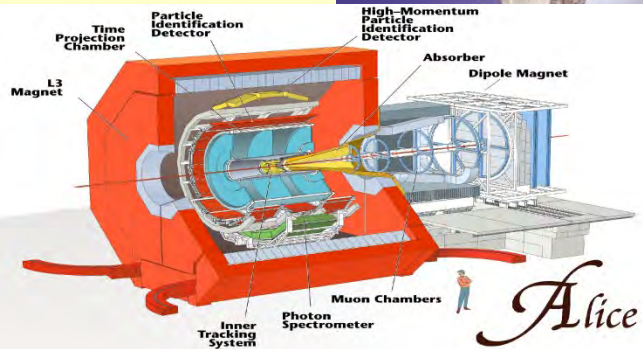
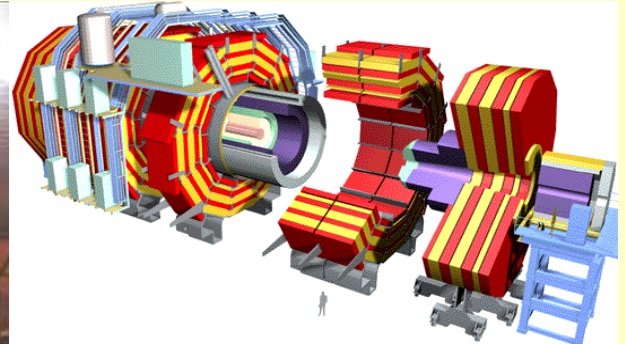
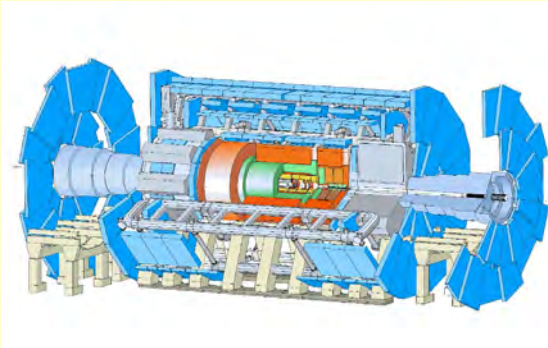
Media coverage in NL  
from NIKHEF home page





# Detectoren bij LHC

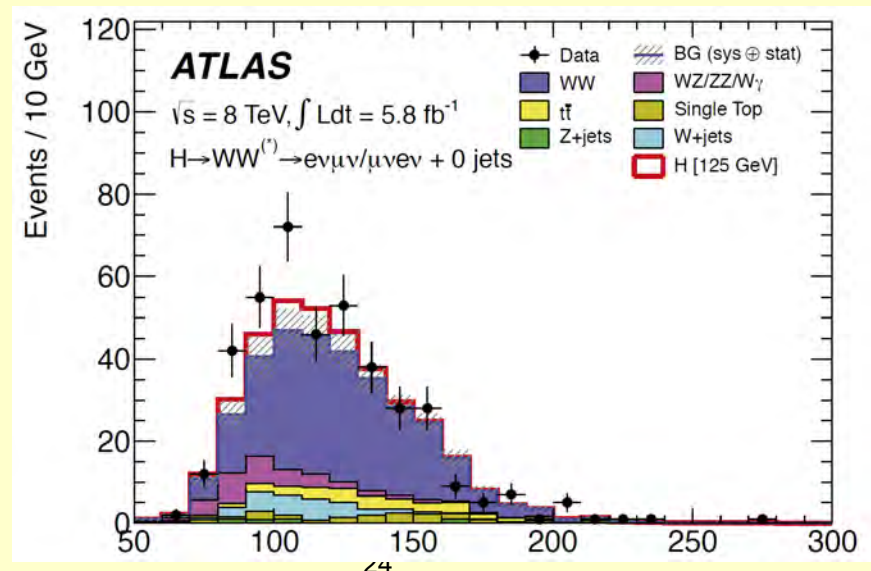
LHC in bedrijf in 2009 heeft onze kijk op het heelal veranderd en er ligt nog meer in het verschiet.





# Het Higgs deeltje

- In 1964 *Brout-Englert-Higgs mechanism* verklaart massa in het Standaardmodel
- 4 juli 2012 Higgs-boson aangetoond door ATLAS en CMS
- 2013 Higgs en Englert krijgen de Nobelprijs



**En aan de opvolger wordt de  
komende vijftien jaar gewerkt:**

**HL-LHC project**



**... and let light shining over LHC  
many years more...**





Future ? A new 100 km tunnel, “best” option

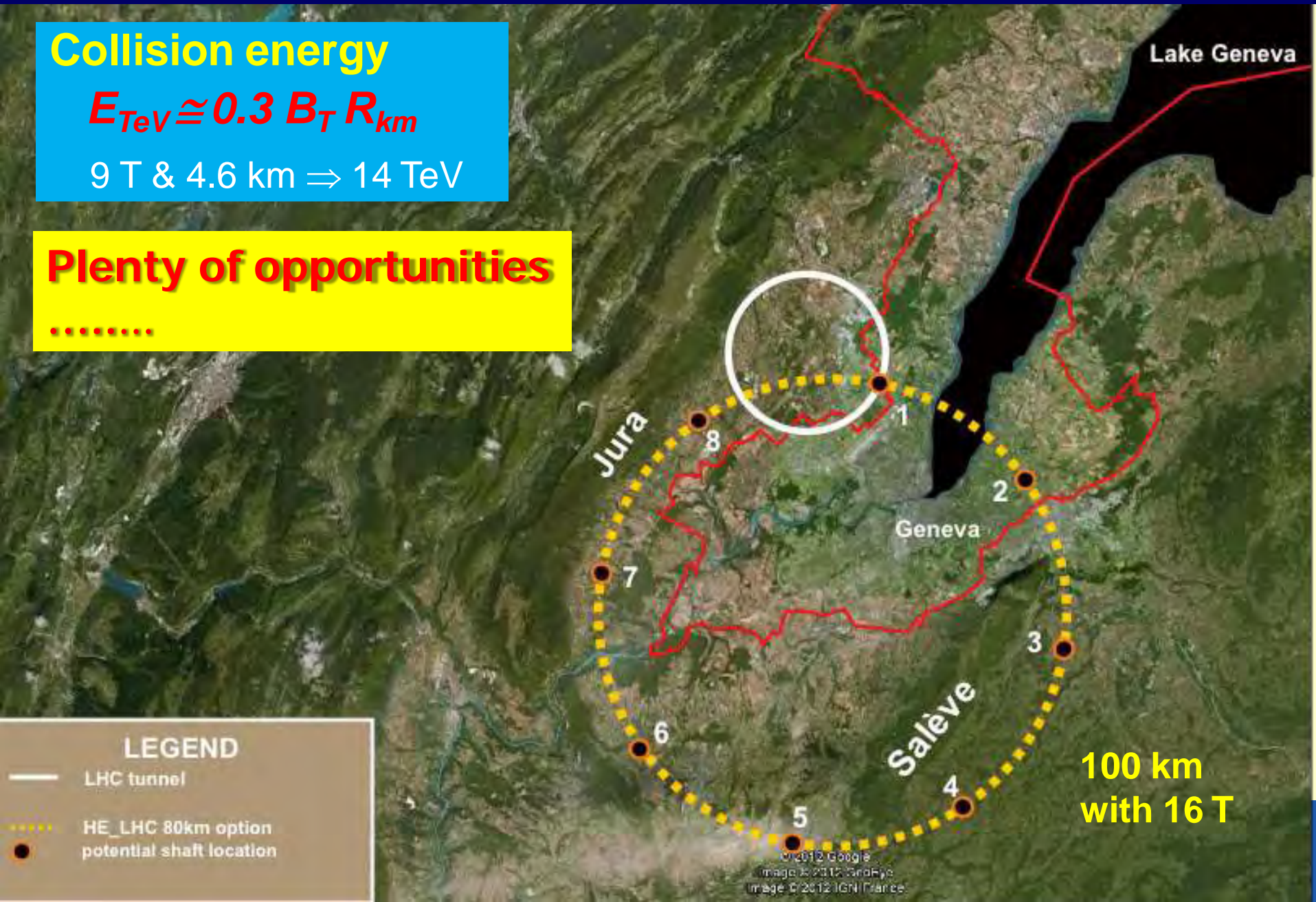
## Collision energy

$$E_{TeV} \approx 0.3 B_T R_{km}$$

9 T & 4.6 km  $\Rightarrow$  14 TeV

## Plenty of opportunities

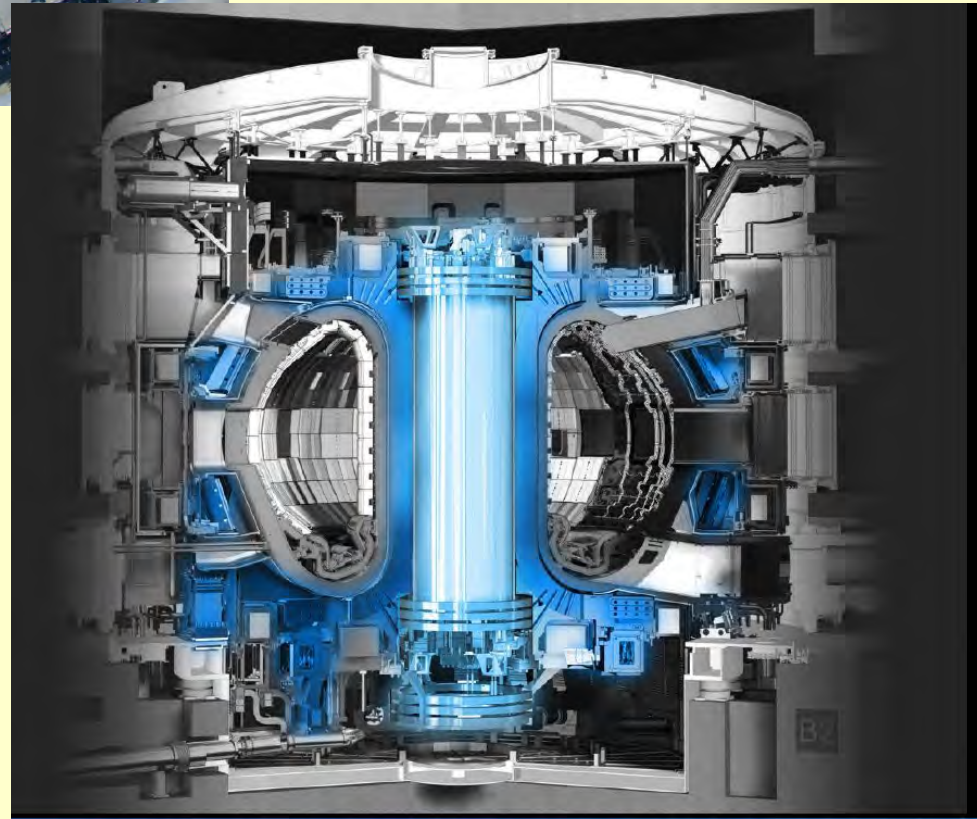
.....



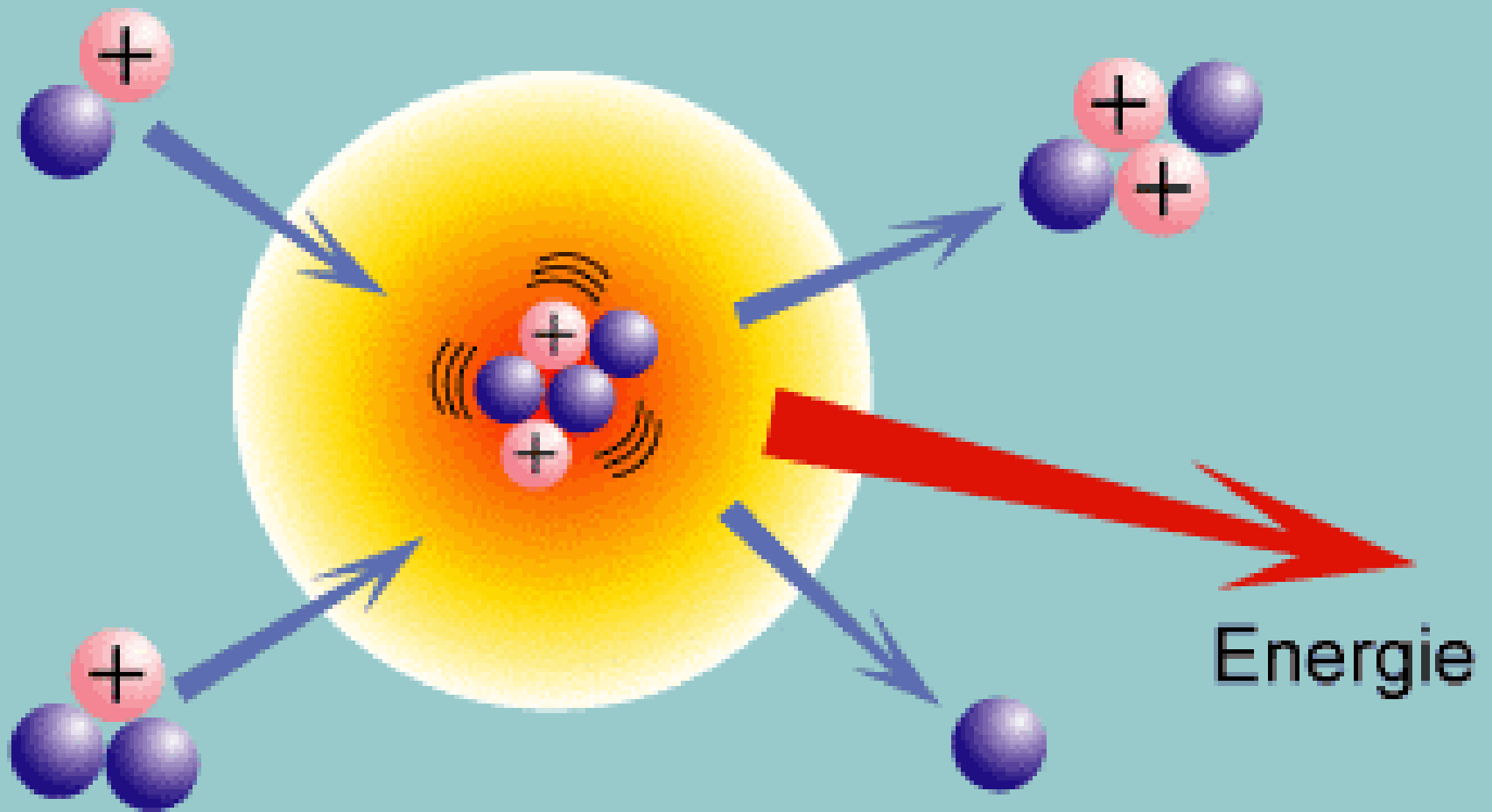


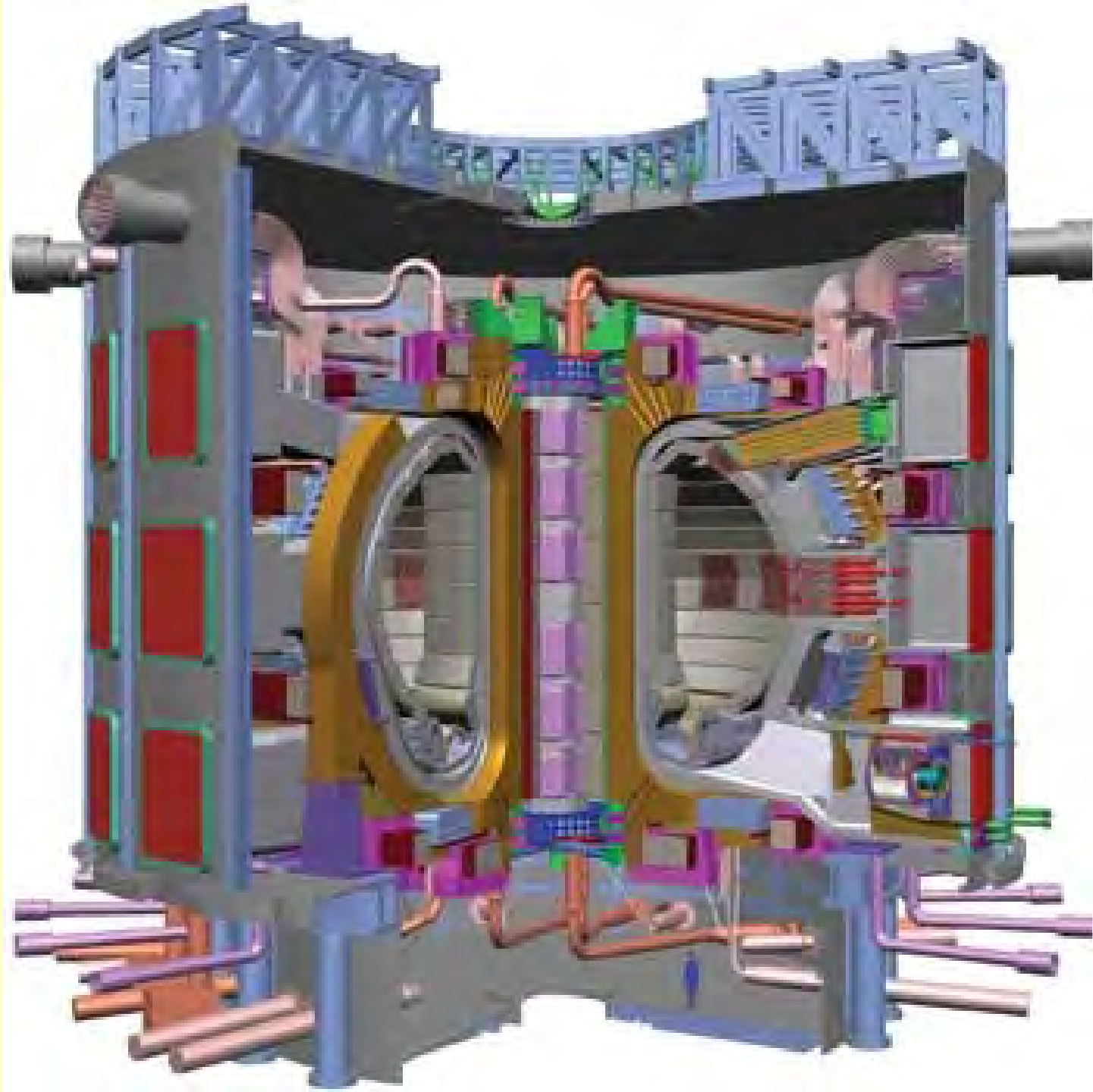


# ITER











# European Southern Observatory in Chili (Andes)



# ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)

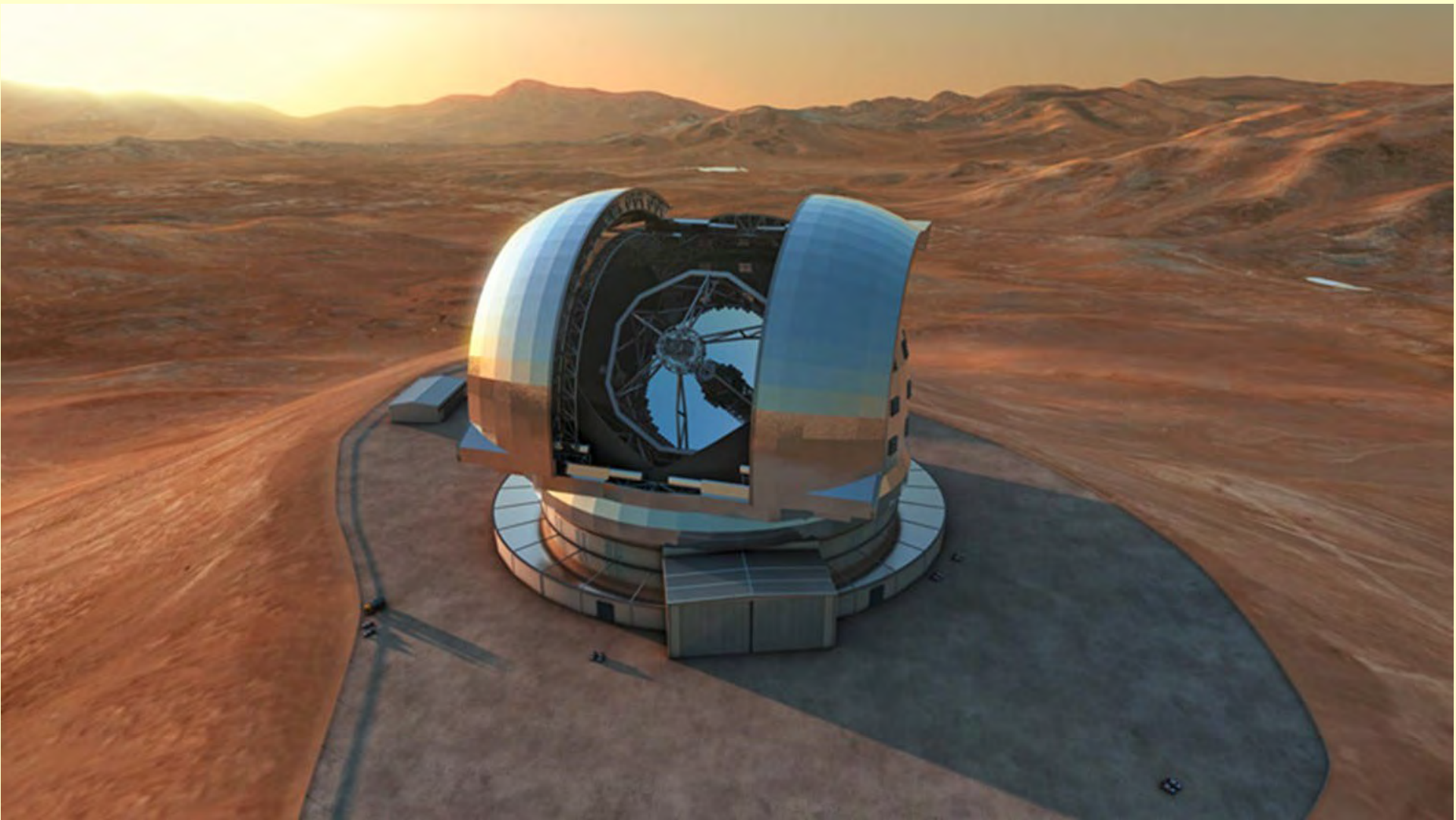




# LOFAR en SKA

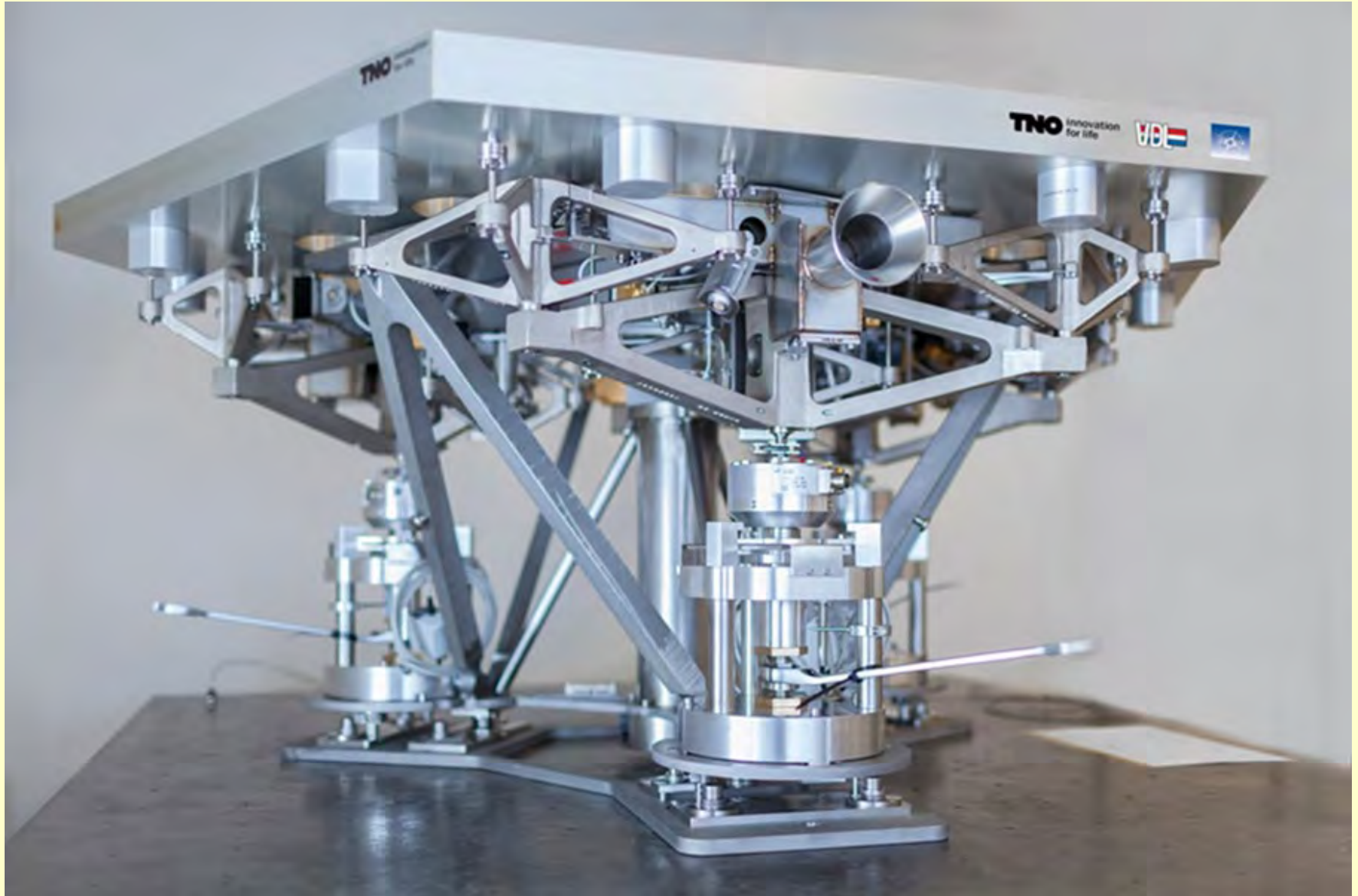


# E-ELT





# Nederlandse bijdrage aan de hoofdspiegel van E-ELT: VDL en TNO





# European Spallation Source





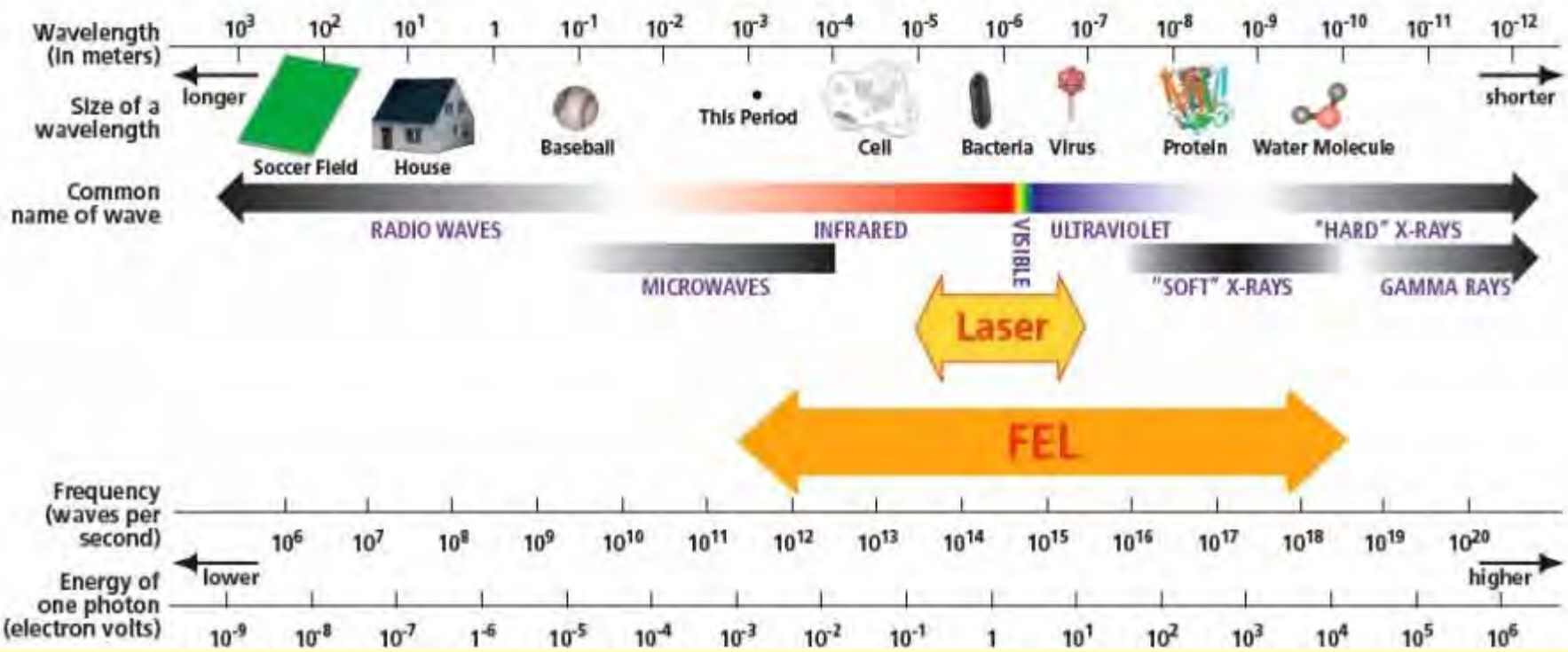
# The European XFEL





# PSI / Swiss-FEL

## THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

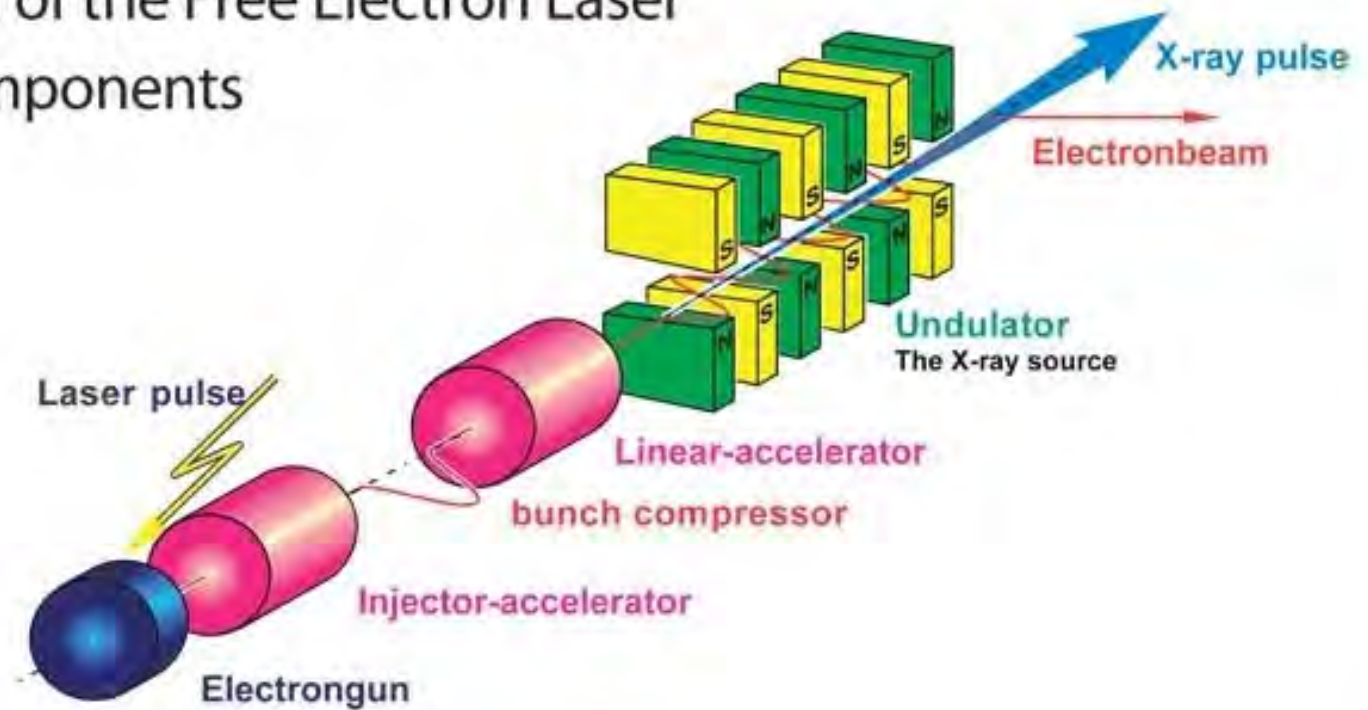




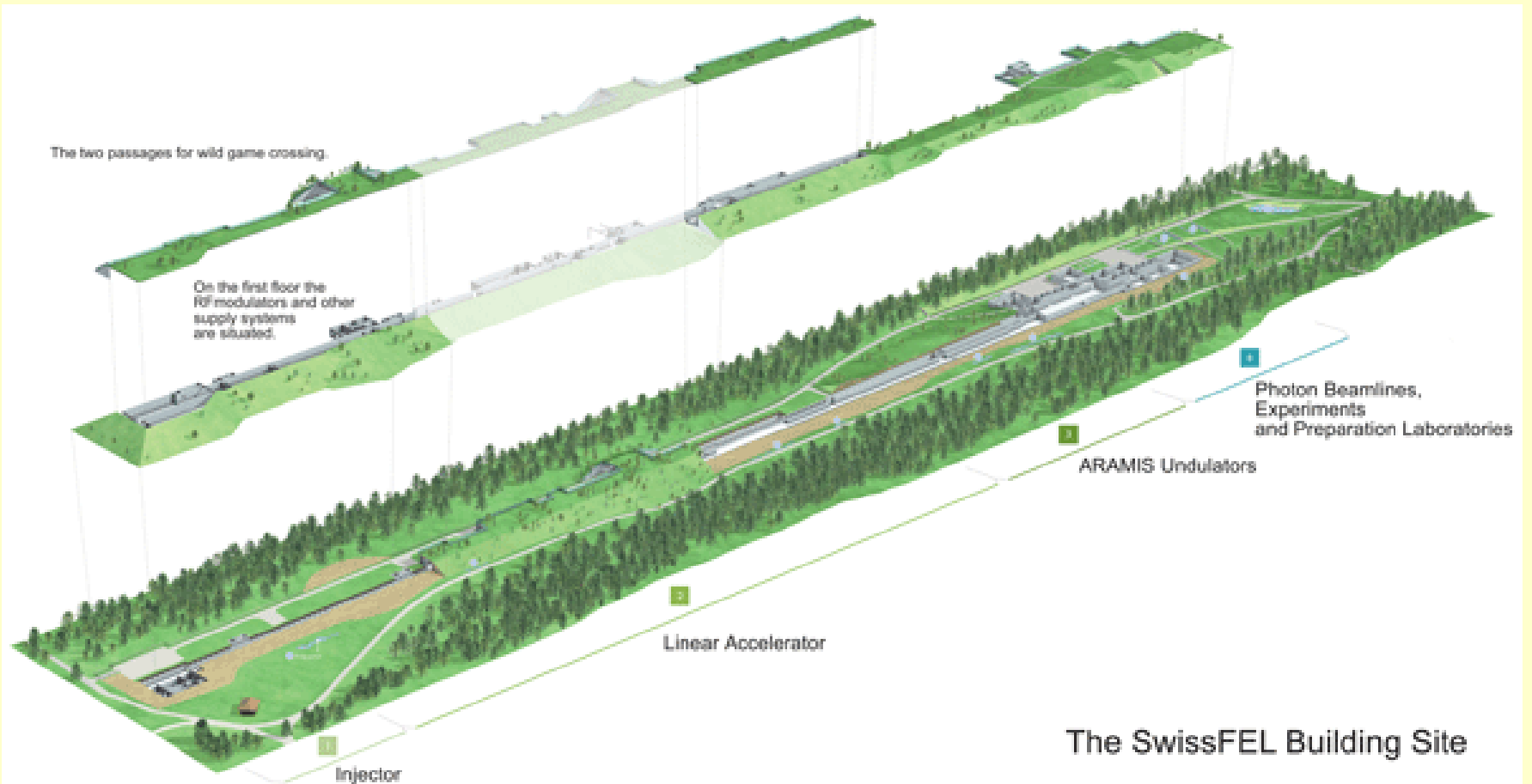
# PSI / Swiss-FEL

Schematic design of the Free Electron Laser with different components

- 1) Electron gun
- 2) Injector
- 3) Accelerator
- 4) Undulator



# PSI / Swiss-FEL (vervolg)





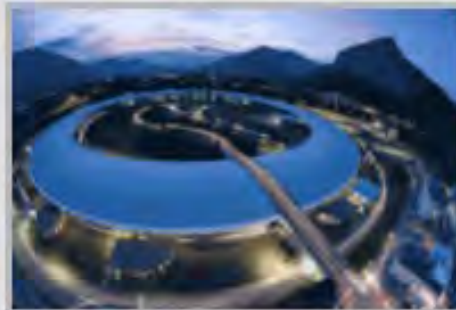
# PSI / Swiss-FEL

## From Waste Radiation to Light Sources

Over more than 60 years synchrotron radiation facilities have evolved from parasitic operation at particle accelerators to dedicated research tools. Since the first observation of synchrotron radiation 3 generations of facilities have come about.



First observation of synchrotron light at GE's synchrotron



3rd generation: The European Synchrotron Radiation Facility at Grenoble, France



3rd generation: The Swiss Light Source at PSI, Switzerland

# European Synchrotron Light Source in Grenoble







# European Synchrotron Radiation Facility



ESRF

Schneider

ISN

CNRS

INPG

CEA

ST

EMBL

ILL

IBS





Medisch

Chemie

Milieu

# Toepassingen van synchrotron licht:

Paleontologie

Materiaalkunde

Geofysica

Industriële research





# Dit lab, maar dan op een keukentafel

Grote röntgenresearchlabs zijn van het formaat voetbalstadion en hebben eindeloze wachttijden. Een Nederlands-Vlaams tafelmiddel moet dat veranderen.



Het grote ESRF-synchrotron in Grenoble, waar Europese onderzoekers nu nog op aangewezen zijn voor geavanceerd onderzoek met röntgenbundels.

Foto ESRF

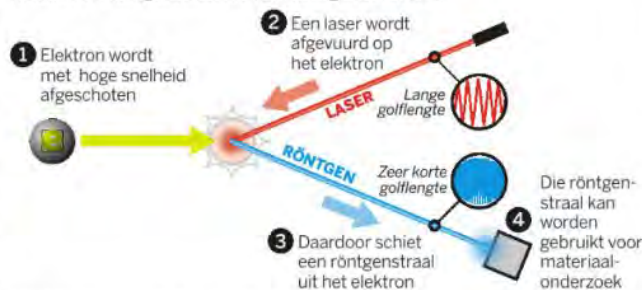
**Martijn van Calmthout**  
Eindhoven

In de bunker op het terrein van de TU Eindhoven waar natuurkundehoogleraar Jom Luiten en zijn team de komende jaren hun opstellingen gaan bouwen, trekken technici oude experimenten uit elkaar. Pas als die opgeruimd zijn, kan het project beginnen dat over drie jaar moet uitmonden in een revolutionair röntgenkanon, made in Holland. Het apparaat zal passen op een tafel van twee meter, maar kunnen wedijveren met de grootste röntgenlaboratoria – enorme cirkelvormige synchrotrons. 'Ik weet niet of je weleens bij ERSF in Grenoble bent geweest, maar dat voelt echt als een sportstadion', zegt Luiten.

SmartLight heet het project dat dinsdag officieel van start gaat – een samenwerking met Europees geld van Nederlandse en Vlaamse universiteiten, bedrijven, musea en ziekenhuizen. De naam knipoogt naar het Art8Light project van Luiten samen met de Delftse hoogleraar materiële kunstgeschiedenis Joris Dik. Met röntgen werd daarin gekeken naar schilderijen, bijvoorbeeld een Van Gogh. Die moest naar Grenoble, wat alleen kon omdat het particulier bezit was. 'Er is geen museum dat dat zou toestaan', zegt Dik.

## INVERSE COMPTON SCATTERING

Nieuw soort röntgenstraling in ontwikkeling in Eindhoven



220118 © de Volkskrant - tb. Bron: Smart\*Light

Als het aan Luiten ligt, hoeft Dik binnen enkele jaren niet meer de deur uit voor röntgenonderzoek. Tot op atoomniveau kan met SmartLight in materialen worden gekeken, naar opbouw, samenstelling, schades. Een lab, museum of ziekenhuis zou zich een eigen bundelmachine kunnen veroorloven, maar een mobiele installatie in een container is ook denkbaar. Zo heeft iedereen 'een bundel harde röntgenstraling, waarvoor je tot nu toe naar de grote labs moet.'

Daartoe wordt een wonderlijke combinatie van natuurkundige verschijnselen

ingezet. Het gewenste röntgenlicht ontstaat op het moment dat met een intense laser recht tegen een bundel elektronen in wordt geschoten. Het laserlicht brengt de aanvliegende elektronen aan het trillen, die daarvoor licht uitzenden. Door de snelheid treedt tegelijk het dopplereffect op, bekend van de hoge toon van een aanstormende politiebuis. Als de elektronen met bijna de lichtsnelheid vliegen, wordt het vrijkomende licht zomaar een factor tienduizend opgevoerd, tot het röntgenstraling is.

De laserstraal en de elektronenbun-

del zijn maar tienden van een haar dik, maar als de zaken allemaal goed zijn uitgemikt en ingeregeld, kan hun frontale botsing een smalle röntgenbundel opleveren waarmee goed onderzoek te doen is. Minder intens dan in Grenoble, maar vaak is dat ook niet echt nodig. 'In de praktijk worden de bundels daar gedimd om geen schade aan hun monsters te maken.'

SmartLight, zegt Luiten, is nadrukkelijk een demonstratieproject waarin bestaande technologie wordt samengebracht. De gepulste laser is het meest conventionele onderdeel. Bijzonder is wel de pulserende elektronenbron die zal worden gebruikt – deels in Eindhoven ontwikkeld in Luitens groep.

Maar in het hart van het röntgenkanon zit het opmerkelijkste onderdeel, dat maakt dat het hele proces zich binnen een paar meter kan afspelen. Daar zit een versnellereenheid die de elektronen in een flits opjaagt naar vrijwel de lichtsnelheid, dankzij technieken die op deeltjeslab Cern zijn ontwikkeld.

De negatief geladen elektronen surfen daarin mee op microgolven in een zogeheten X-band, een techniek die ook een rol zou kunnen spelen bij nieuwe supersnellers op Cern. Door met de snelheid te spelen, kan ook de

golflengte van de straling worden ingesteld. De hardste röntgens uit de SmartLight zijn intenser dan wat Grenoble haalt. En precies wat in technisch materiaalonderzoek veelgevraagd is.

Eigenlijk, vertelt Luiten, is het hele röntgenproject met die ingenieuze hyperversnellers begonnen. Hightechbedrijf VDL – bij het publiek vooral bekend van bussen en trucks – ontwikkelde voor Cern jarenlang mee aan de X-band in het kader van het Clic-project, een lange rechte versneller aan het meer van Genève. Die gaat niet door en dus vroeg VDL aan bevriende partijen wat er nog meer met de ontwikkelde elektronversnellers zou kunnen worden verzonnen.

Het moeizame gedoe van kunsthistoricus Dik met zijn Van Gogh bracht Luiten op het idee van superkleine röntgenbundels voor eigen gebruik.

Als het loopt zoals ze bedacht hebben, zegt Luiten, wordt het nieuwe röntgenkanon uiteindelijk een commercieel product. Reden waarom de Europese grensregio miljoenen steekt in de samenwerking van bedrijven en universiteiten. Het enige wat Luiten echt nog dwarszit is de naam. 'Die klinkt me veel te veel als dimbare sfeerverlichting. Daar moeten we echt nog iets op verzinnen.'



Auger  
Kosmische stralen

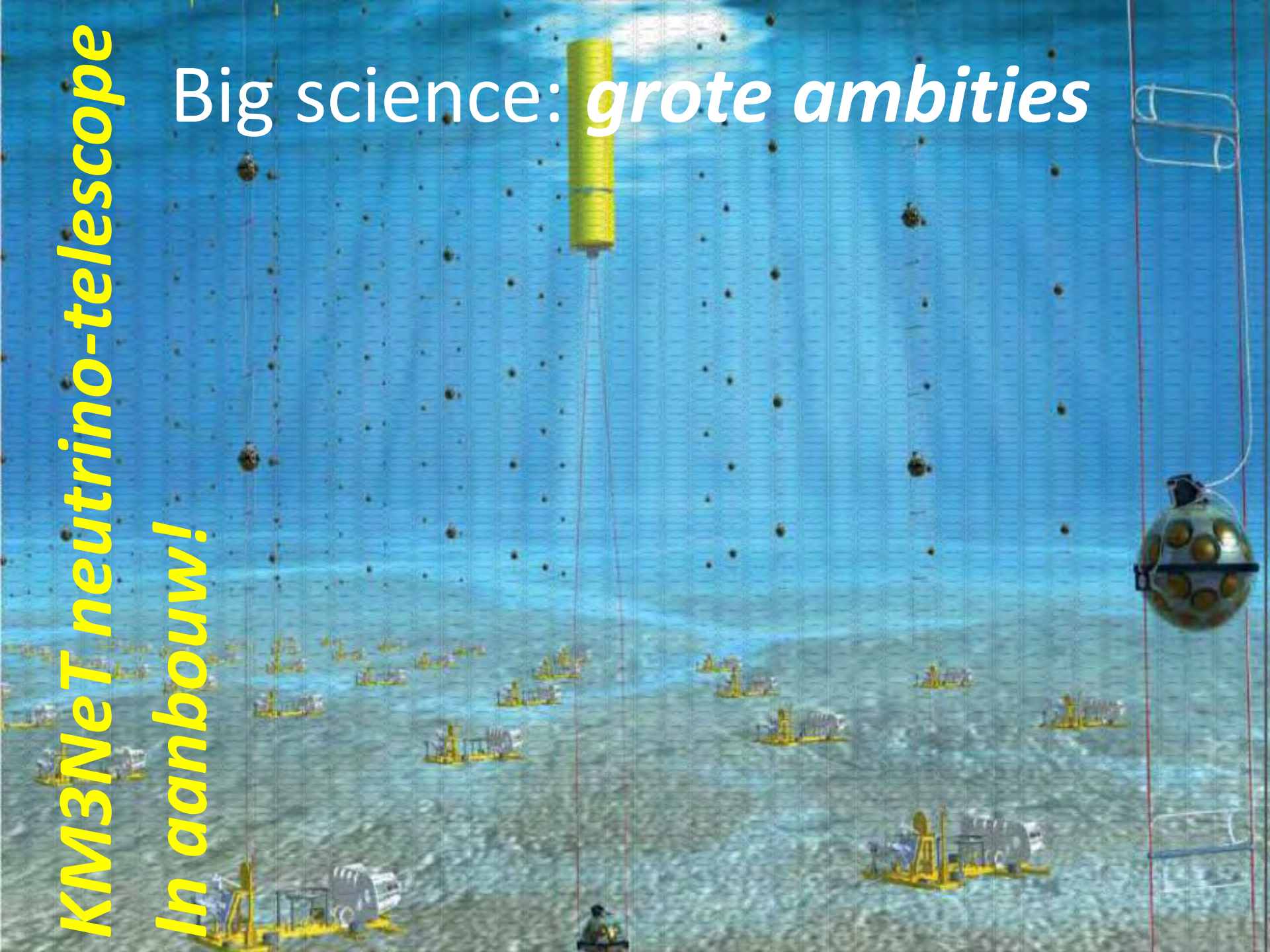




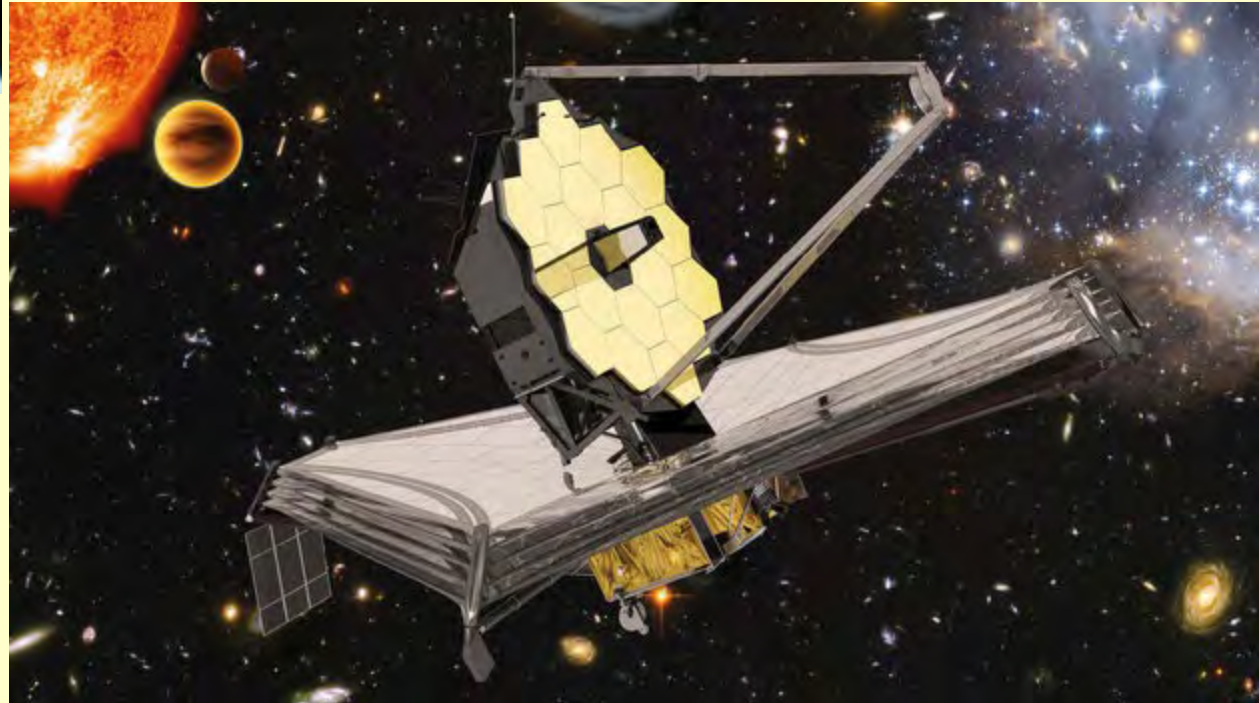
**KM3NeT neutrino-telescope**

**In aanbouw!**

Big science: *grote ambities*



# Ruimtevaart





# Technologie = Progressie!

“Dark ages”  
blote oog

“Renaissance”  
*telescopen*

“Heden”  
*satellieten*  
*observatoria*

*instrumentatie*



**Hoe kleiner het deeltje des te  
groter de microscoop  
of de telescoop  
  
(en hoe duurder...)**



## Om even bij stil te staan

- aan alle grote wetenschappelijke doorbraken liggen uitvindingen ten grondslag. (Het omgekeerde is ook waar)
- afschaffing slavernij was de doorbraak van de stoommachine die al 2000 jaar eerder was uitgevonden.
- Een cultuur van vrije pers, vrije kunsten en vrije wetenschap heeft alle innovaties die we kennen voortgebracht

## Lange en korte termijn valorisatie (maatschappelijk nut)

- De industrie van lidstaten profiteert rechtevreeks van de bouw en exploitatie van grote onderzoeksfaciliteiten
- Op termijn van 50 jaar en langer:
  - Free Electron Lasers
  - Synchrotrons inmiddels vele tientallen in de wereld
  - Kernfusie, schone energie in onbeperkte mate
  - Doorbraken in medische diagnostiek en- therapie



## Big Science voor vrede in Europa

Conclusie:

Big Science is super belangrijk

Zie ook [www.bigscience.nl](http://www.bigscience.nl)

**Nieuwsgierigheid -> verwondering -> fascinatie->  
inspiratie -> motivatie**

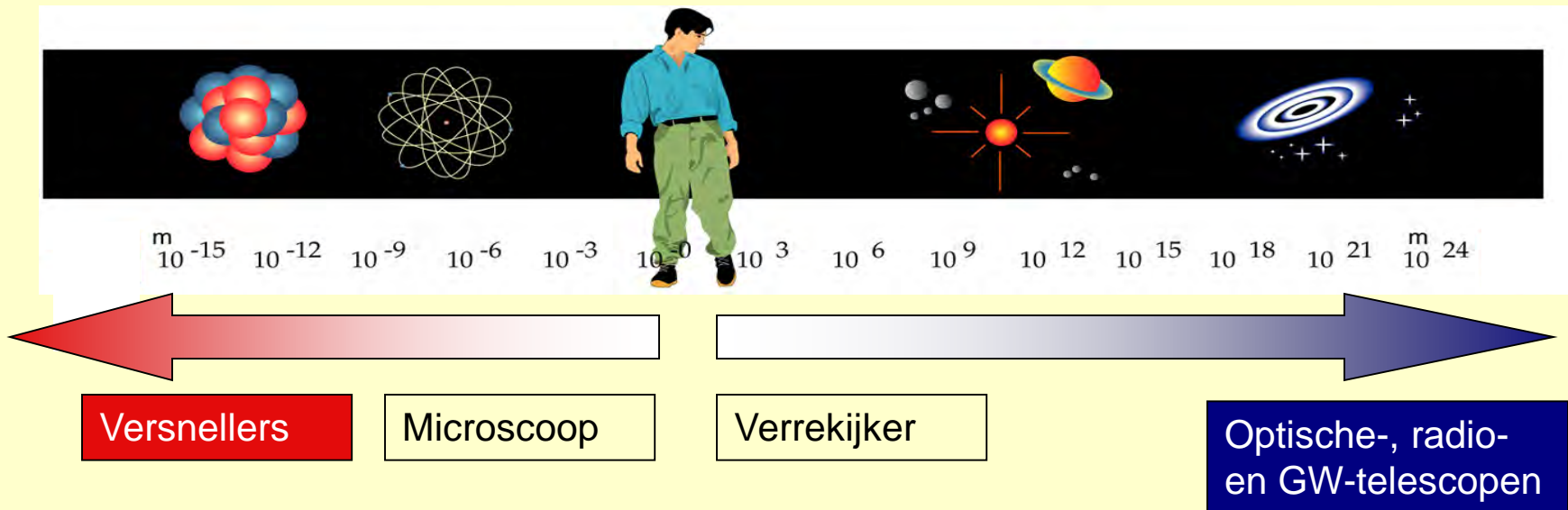
**Een natuurkundige vraagt nooit  
*waarom?***



# *Paauze*

# Onderzoeksgebied NIKHEF

Deeltjesfysica kijkt naar materie in de kleinste details



Om te zien heb je stralingsbundels nodig (bv 's-nachts)



# Archétypische vragen:

- Waar komen we vandaan?
- Waarom zijn we hier
- Waar eindigt dit

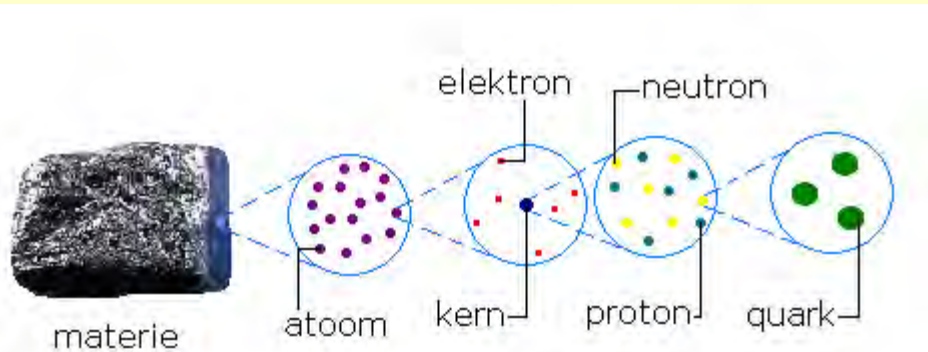
# Elementen

- Oude Grieken B.C.
- Alfabet
- Muziekschrift
- Mendeljev omstreeks 1850 (H-U 92)
- Watson en Crick 1953 DNA (A-C-T-G)





























# Atoommodellen



- Democritos 500 BC
- Thomson, halverwege de 19<sup>e</sup> eeuw
- Rutherford eind 19<sup>e</sup> eeuw
- Bohr begin 20<sup>e</sup> eeuw
- Het standaardmodel ongeveer 1965

# Het standaardmodel

family	I			II			III		
charge	<b>quarks</b>								
$+\frac{2}{3}$	 <b>u</b>	 <b>u</b>	 <b>u</b> up	 <b>c</b>	 <b>c</b>	 <b>c</b> charm	 <b>t</b>	 <b>t</b>	 <b>t</b> top
$-\frac{1}{3}$	 <b>d</b>	 <b>d</b>	 <b>d</b> down	 <b>s</b>	 <b>s</b>	 <b>s</b> strange	 <b>b</b>	 <b>b</b>	 <b>b</b> bottom
0	 <b><math>\nu_e</math></b> electron-neutrino			 <b><math>\nu_\mu</math></b> muon-neutrino			 <b><math>\nu_\tau</math></b> tau-neutrino		
-1	 <b>e</b> electron			 <b><math>\mu</math></b> muon			 <b><math>\tau</math></b> tau		
	<b>leptons</b>								
mass in MeV	up	1.5–3.3	down	3.6–6.0	e-neutrino	$\neq 0$	electron	0.511	
	charm	1270	strange	70–130	$\mu$ -neutrino	$\neq 0$	muon	105.66	
	top	171300	bottom	4200	$\tau$ -neutrino	$\neq 0$	tau	1776.84	

# De archétypische antwoorden:

- Van Goden tot wetenschap
- “The universe is friendly”
- Dust to dust

Maar vooral omdat het heel veel (geld) oplevert



## Kosten van fundamenteel onderzoek

- GW-detectoren G3: 1000 miljoen per stuk
- ITER: 12 miljard
- Nikhef: 25 miljoen euro per jaar
- CERN: 800 miljoen euro per jaar
  - Bouw *LHC-versneller*: 4 miljard euro
  - Bouw vier experimenten: ruim 3 miljard
  - Upgrade tot 2030: 200 miljoen euro/jaar
- Na 2032 de nieuwe versneller: 50 miljard!

*Waarom toch?*

Toepassingen te over, maar waarom willen we het inwendige van een krokodilmummie kennen?

En waarom restaureren we oude meesters en subsidiëren we musea



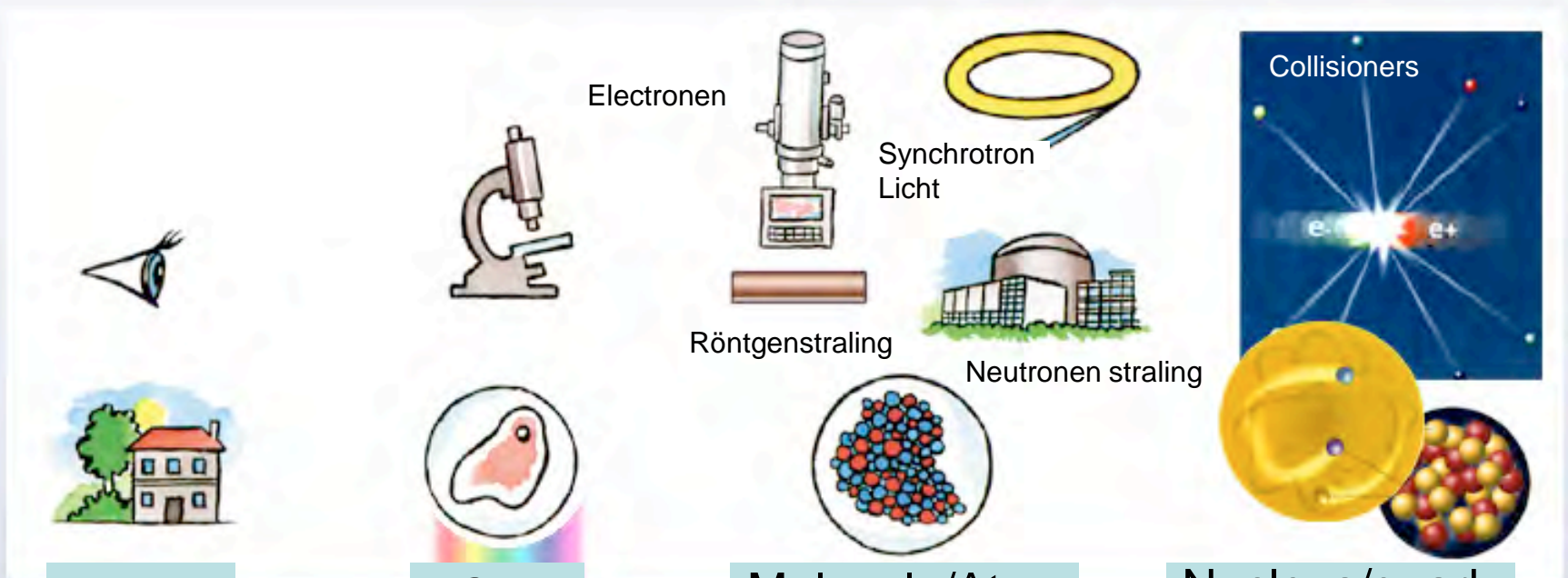
*there is no applied science without science to apply*



# Maak het onzichtbare zichtbaar

*Vrij naar Blaise Pascal*

**zien = begrijpen**



De wereld om ons heen

Cel

Molecule/Atoom

Nucleus/quark

Electromagnetic waves



Radio waves

IR

Visible light

UV

EUV

Soft X-rays

Hard X-rays

Gamma rays

Particles



## Een beetje natuurkunde

Dualiteit van golven en deeltjes  
Newton en Huygens hadden  
beiden gelijk.

interferometrie en de lichtsnelheid:  
**Michelson-Morley-experiment**

## Symmetrie en *super* symmetrie

- Antimaterie, de PET scanner en het Majoranadeeltje
- Donkere Materie (SuSy) 80% van de Heelal massa is onzichtbaar (lees: heeft geen interactie met EM-straling)
- Oerkrachten
- Unificatie van Einstein en Bohr

**14 september 2015**  
**Zwaartekrachtsgolven zijn ontdekt**

Nobelprijs in 2017



# Bekendmaking op 11 februari 2016



# Twee belangrijke waarnemingen

- Twee samensmeltende zwarte gaten:  
[https://www.nikhef.nl/pub/pr/gw170817/BNS merger 3D disk black hole GW STRAIN.mp4](https://www.nikhef.nl/pub/pr/gw170817/BNS_merger_3D_disk_black_hole_GW_STRAIN.mp4)
- Twee samensmeltende neutronsterren:  
<https://www.nikhef.nl/pub/pr/gw170817/NASA-MergeranimationGW170817.mp4>

## **Speciale NL-website voor de Einstein telescoop:**

- <https://www.nikhef.nl/news/eigen-website-voor-het-einstein-telescope-project/>

Levenscyclus van sterren;

Wat zijn zwarte gaten, hoe ontstaan ze?

En neutronsterren?



## Een beetje relativiteitstheorie

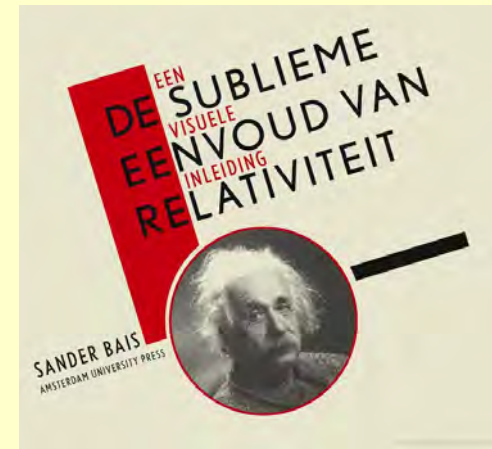
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$\Rightarrow L' = L_0 \cdot \frac{1}{\gamma}$$
$$\Rightarrow t' = t \cdot \gamma$$

### Speciale relativiteit (*de trein*):

- De paradox van de snelheid
- Lorentz-contractie/-dilatatatie van ruimte en tijd

### Algemene relativiteit (*de lift*):

- De vier dimensionale tijdruimte
- Rond zware massa's loopt de tijd langzamer (*Interstellar*)



Einstein: de tijdruimte is 4-dimensionaal en gekromd in de buurt van grote massa's

<https://www.youtube.com/watch?v=1EGEcTlauB4>

Hoe zien zwaartekrachtsgolven er dan uit?

<https://www.youtube.com/watch?v=1EGEcTlauB4>

<https://www.youtube.com/watch?v=dw7U3BYMs4U&t=2s>

GOVERT SCHILLING

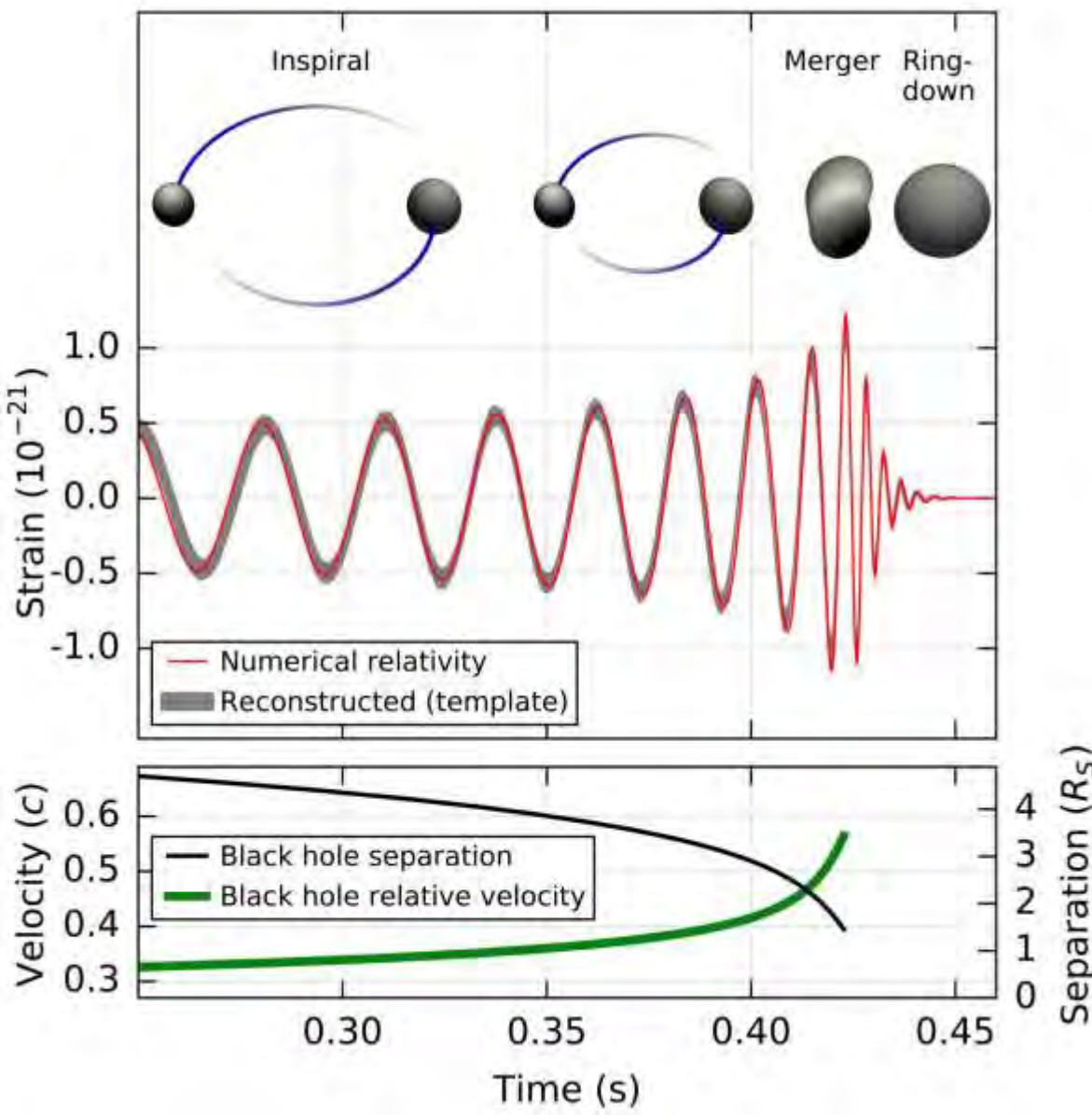
# DEINING IN DE RUIMTETIJD

Einstein, zwaartekrachtgolven en  
de toekomst van de astronomie

FONTAINE UITGEVERS



# 1<sup>e</sup> BBH merger: 14 september 2015



## de details

1,3 miljard jaar  
geleden gebeurd!

=

$1,2 \times 10^{22}$  km

voor: 29 & 36  $M_{\text{zon}}$

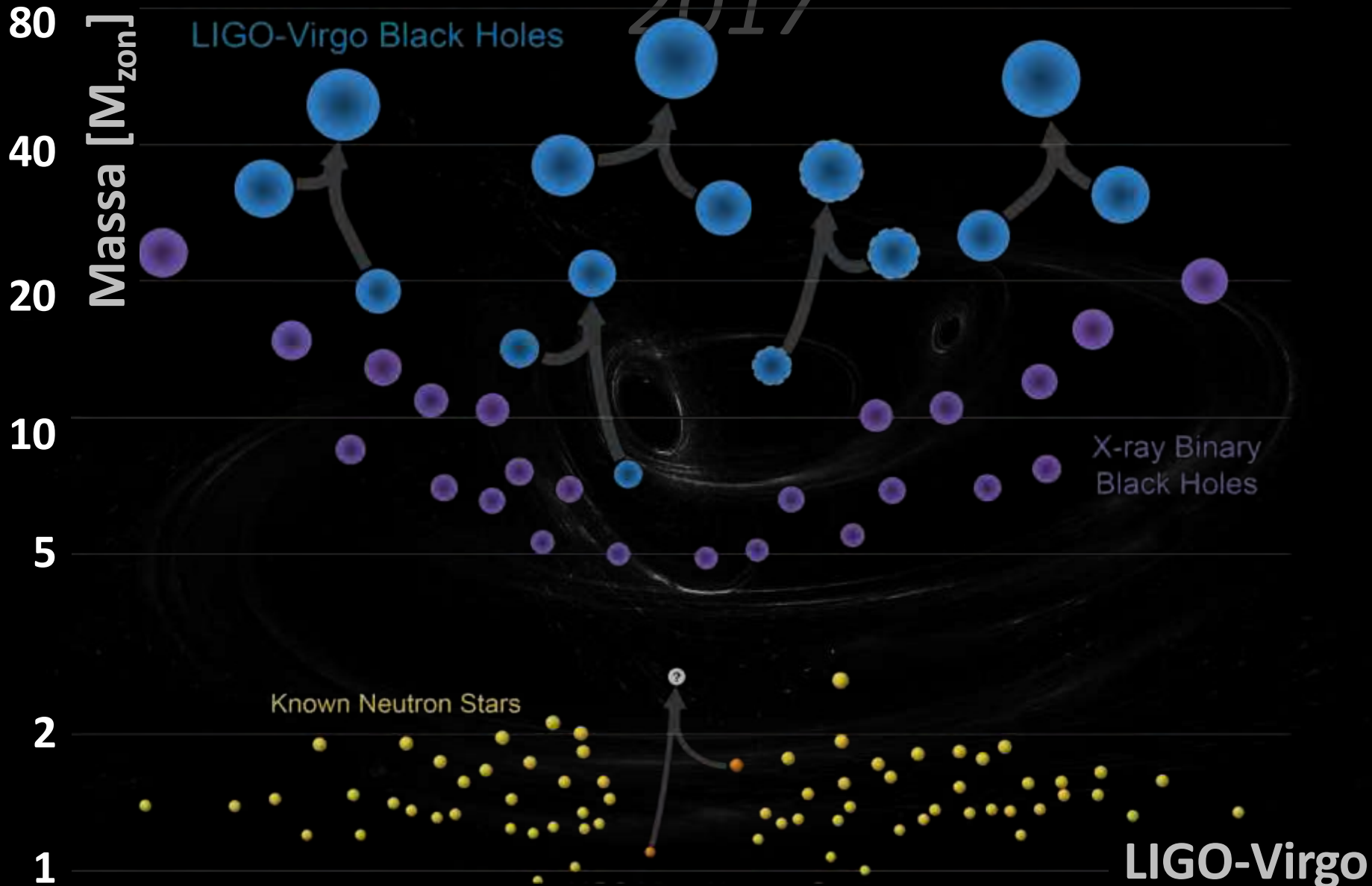
na: 62  $M_{\text{zon}}$

3  $M_{\text{zon}}$  'opgebrand'  
in minder dan 1 s

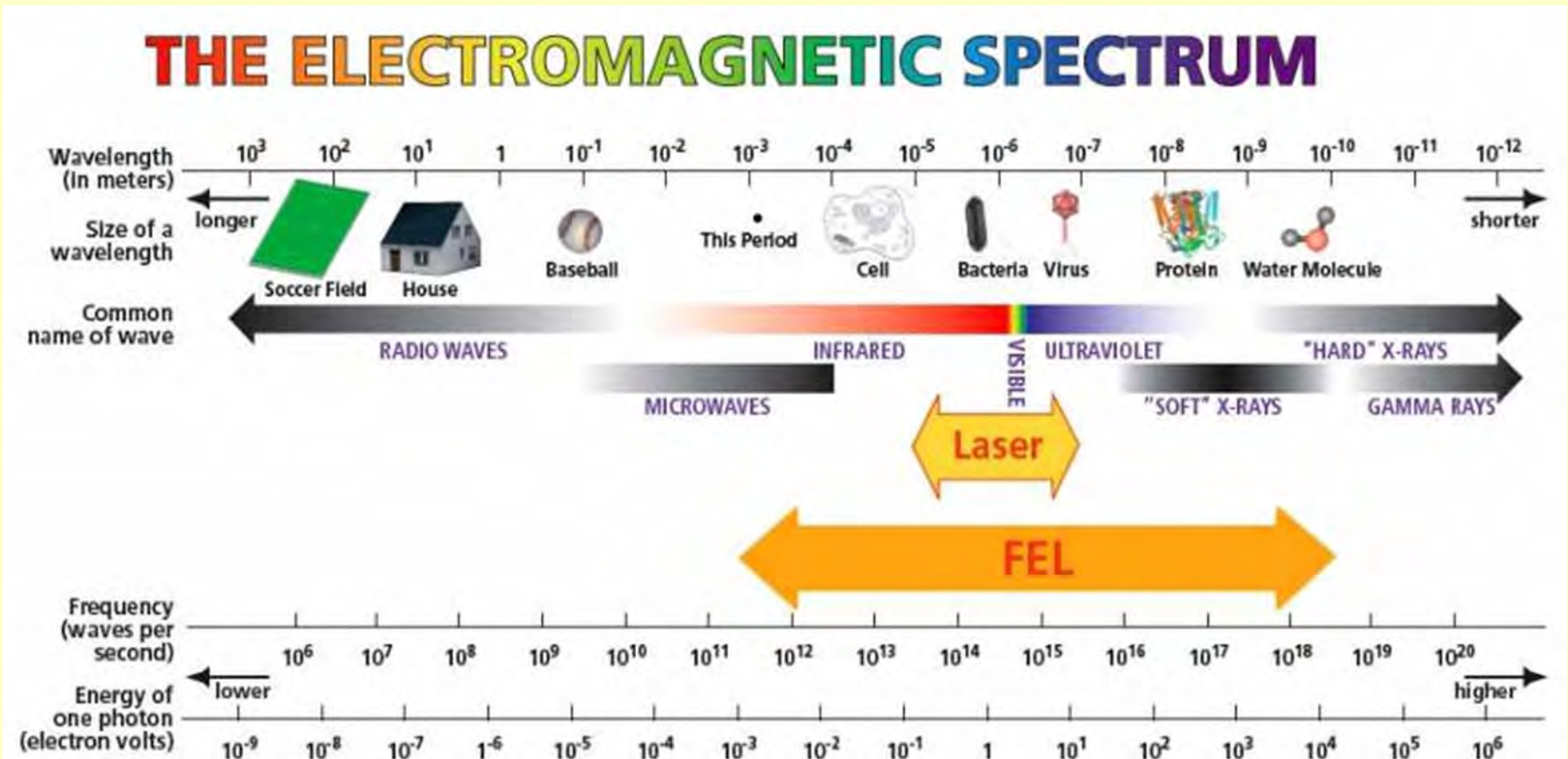
# 1<sup>e</sup> BNS merger: 17 augustus

2017

LIGO-Virgo Black Holes



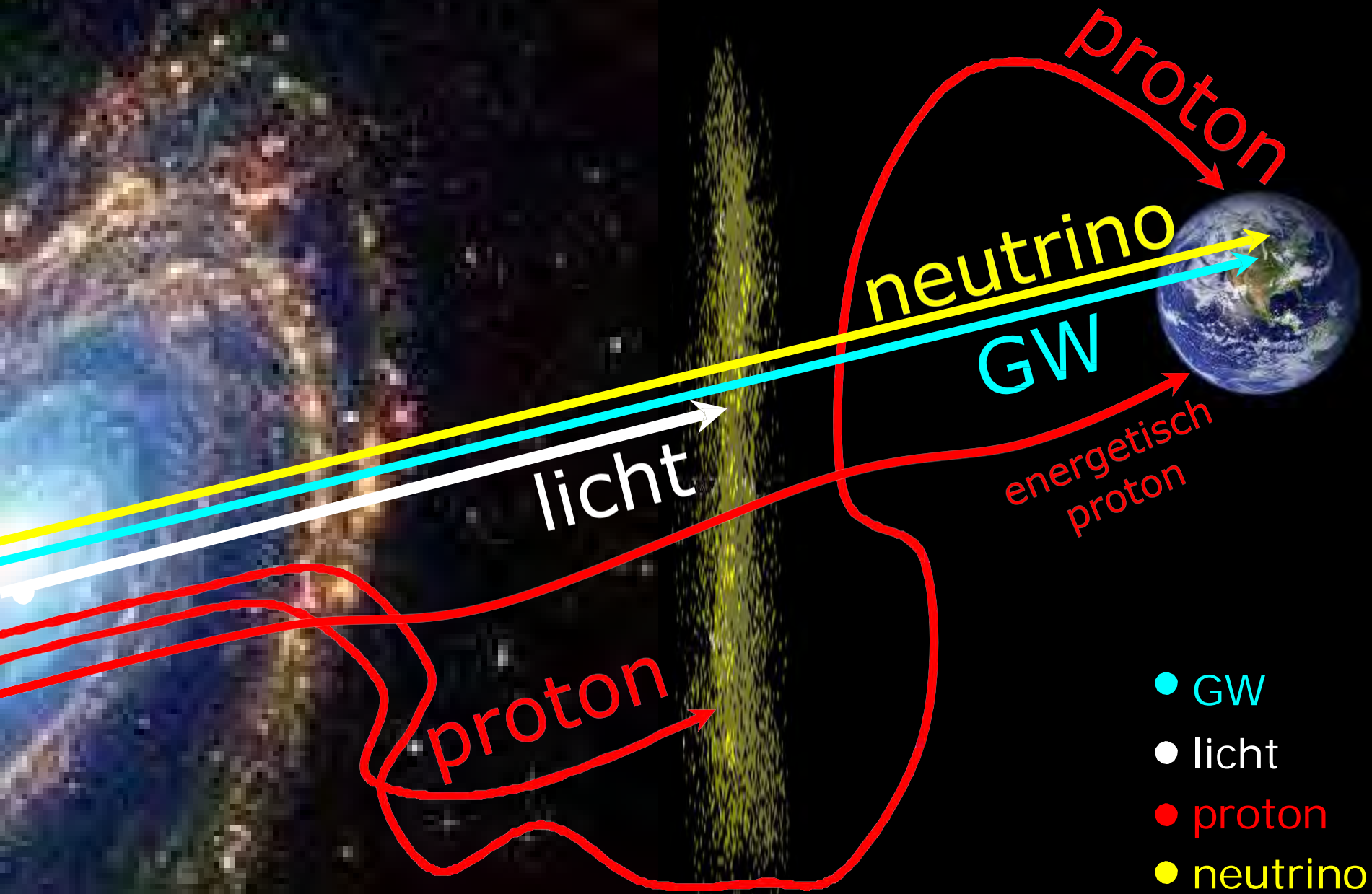
## Een nieuwe manier van kijken



Eindelijk het zesde zintuig voor de mensheid



# “Multimessenger” astronomie



# “Multimessenger” astronomie

Kosmische straling  
AUGER-Argentina

**Toekomst**

“licht”

ETAS/MIA/Spain Namibia/Spain

**ieder:  
100-1000 M€**

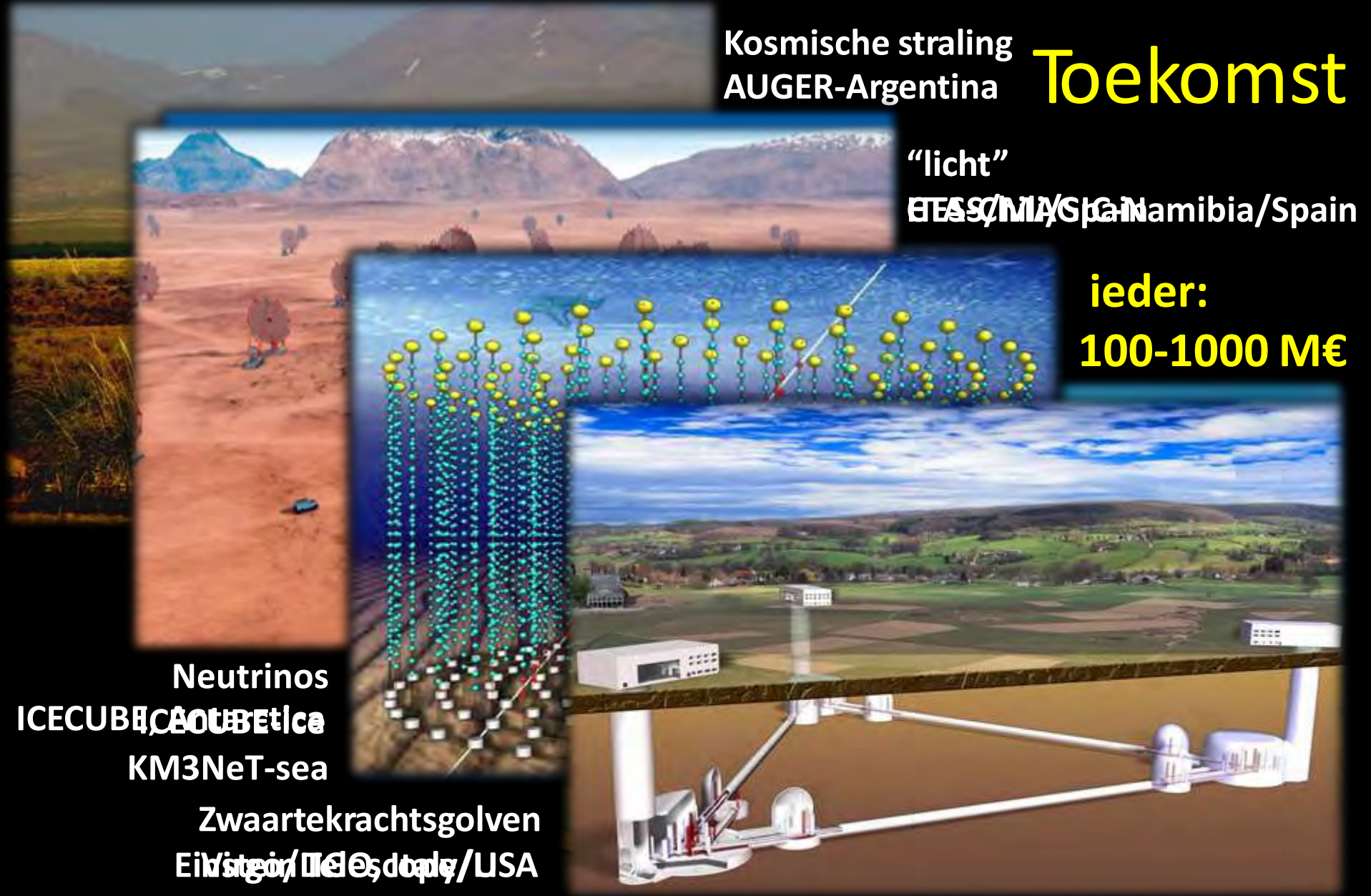
Neutrinos

ICECUBE/CASCADE

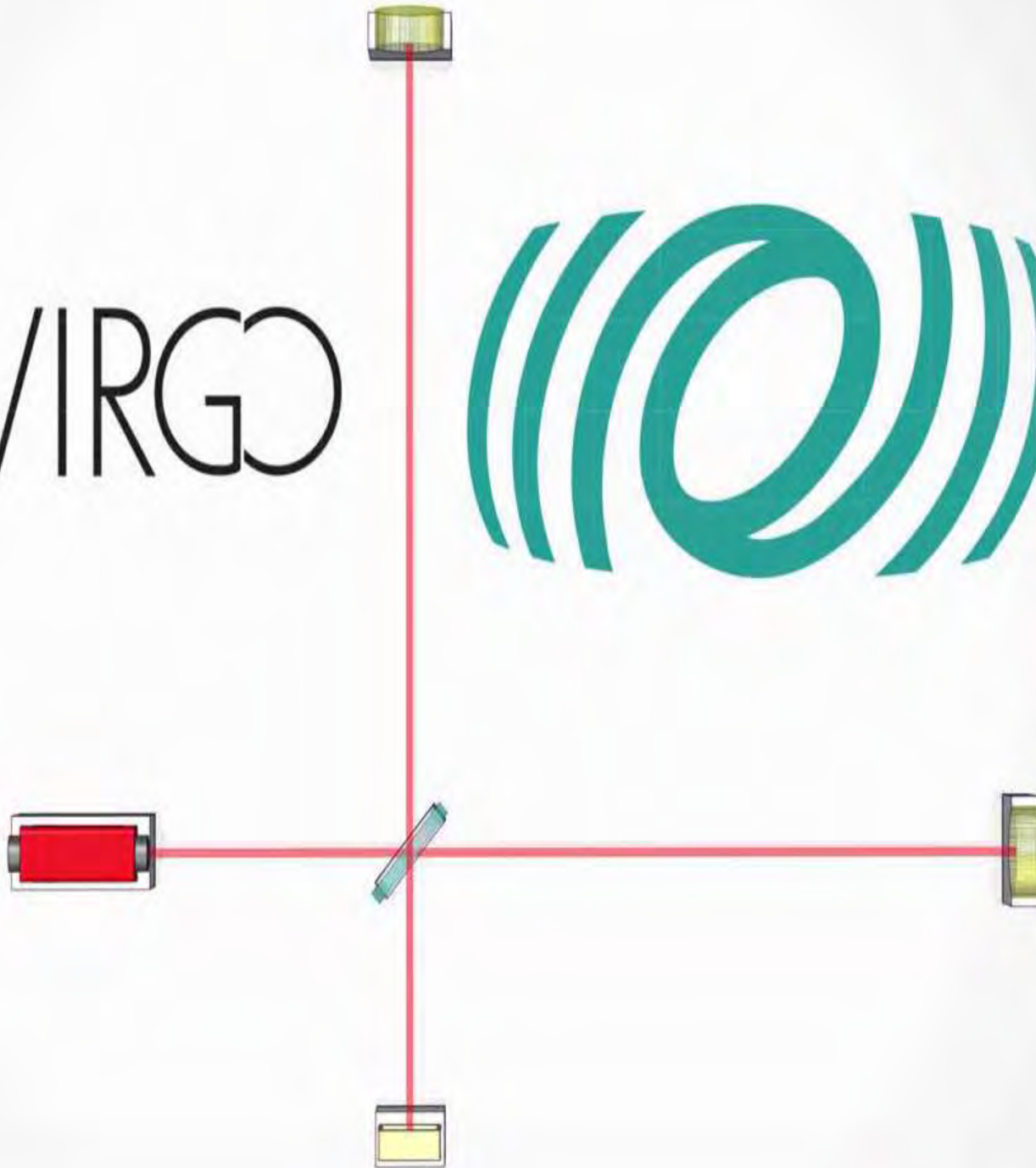
KM3NeT-sea

Zwaartekrachtsgolven

Einstein Telescope/USA



# VIRGO





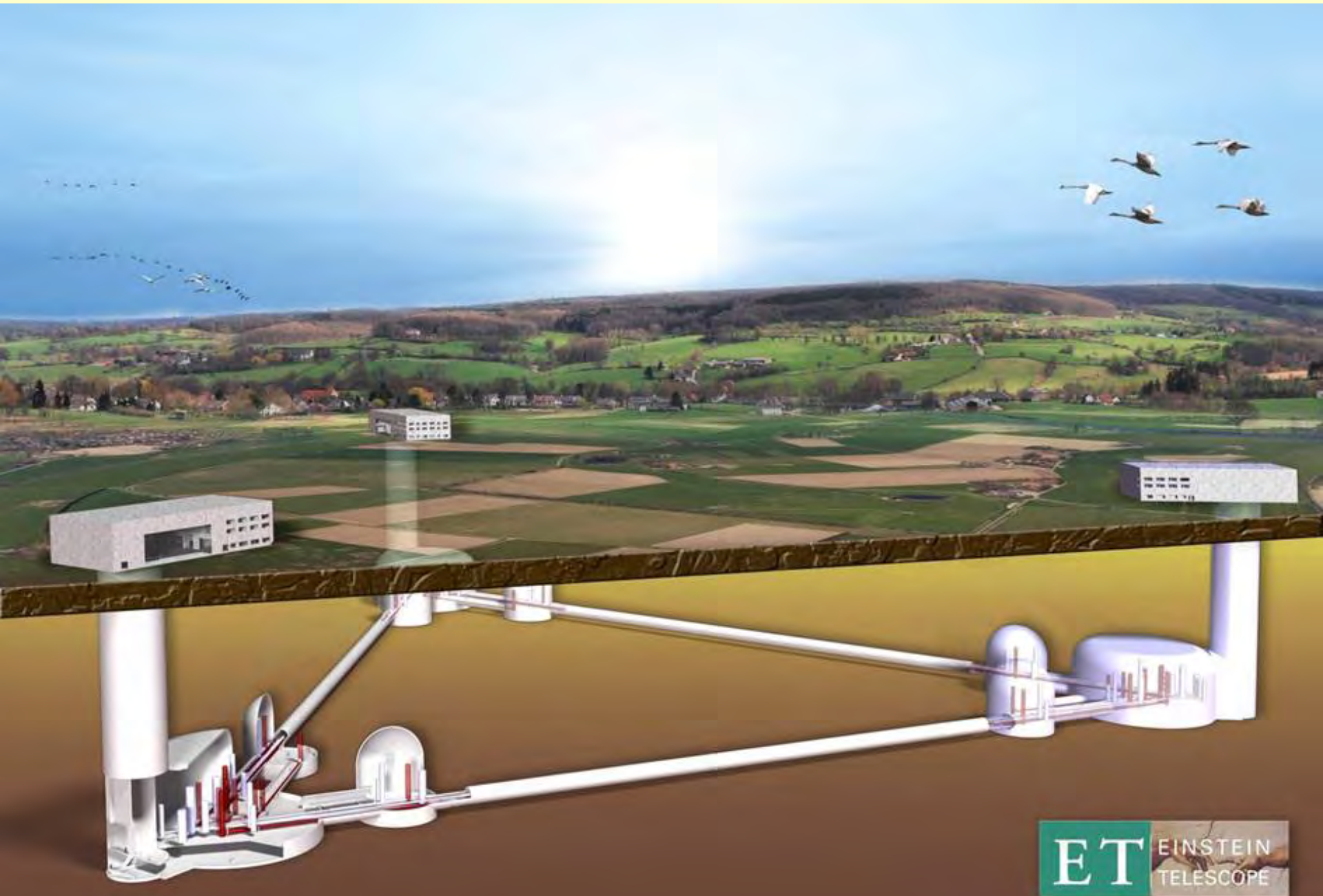
# Hoe werkt een GW-detector?

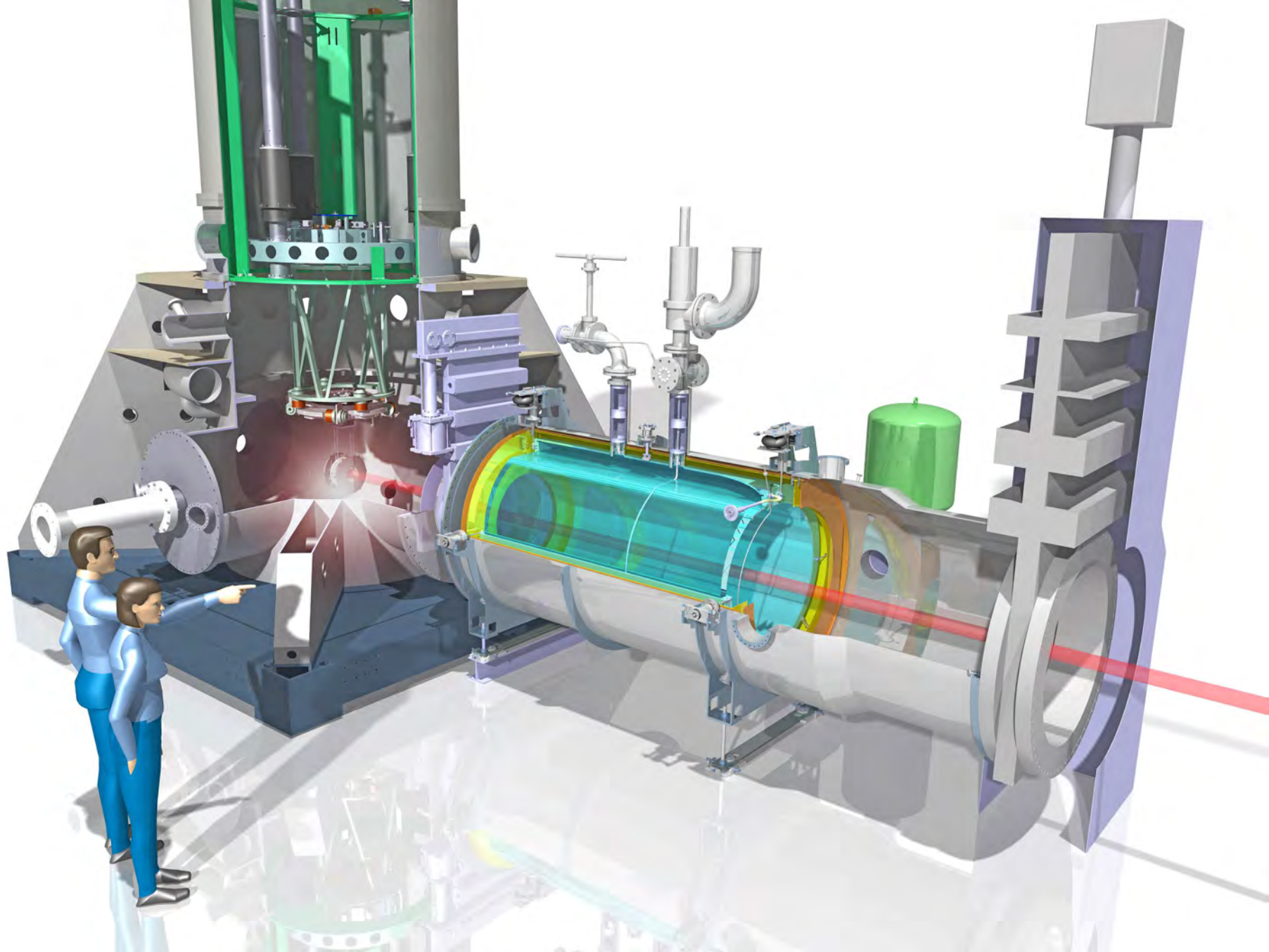
<https://www.youtube.com/watch?v=IOHnkCJ45bQ&feature=youtu.be>

Meer beeldmateriaal op deze Nikhef pagina:

<https://www.nikhef.nl/zwaartekrachtgolven-2016-2017/>

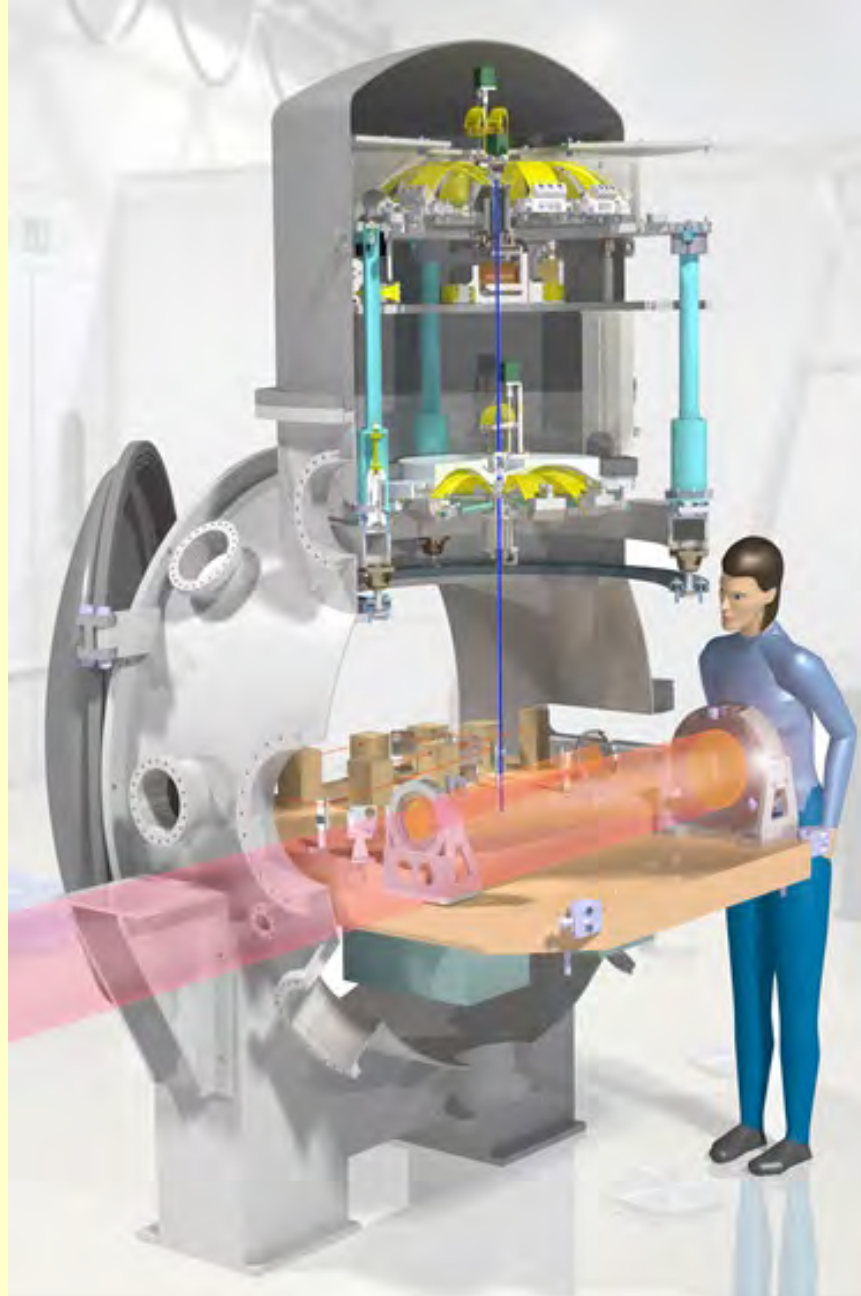
# Een Big Science Instituut in Nederland





Artist's impression of a cryolink that is installed in between the main beampipe and the towers containing the end mirrors in the 3-km long interferometer arms; the cryolinks are an essential ingredient in reaching the ultrahigh vacuum requirements of Virgo. Credit: Marco Kraan, Nikhe82



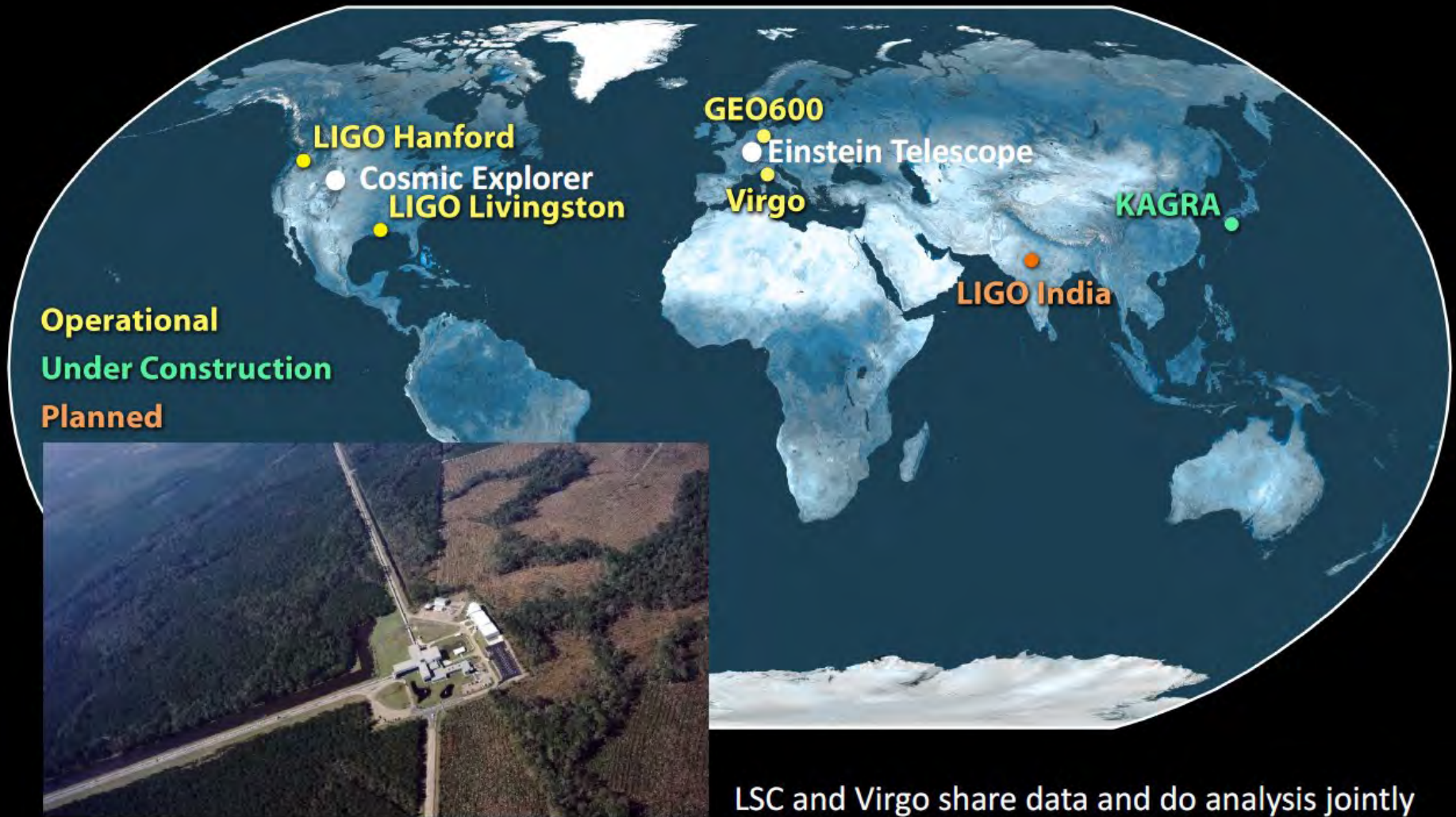


Artist impression of the in-vacuum seismic attenuation system that suspends the injection and detection benches. Credit: Marco Kraan, Nikhef

# Een Big Science Project in Zuid –Limburg?

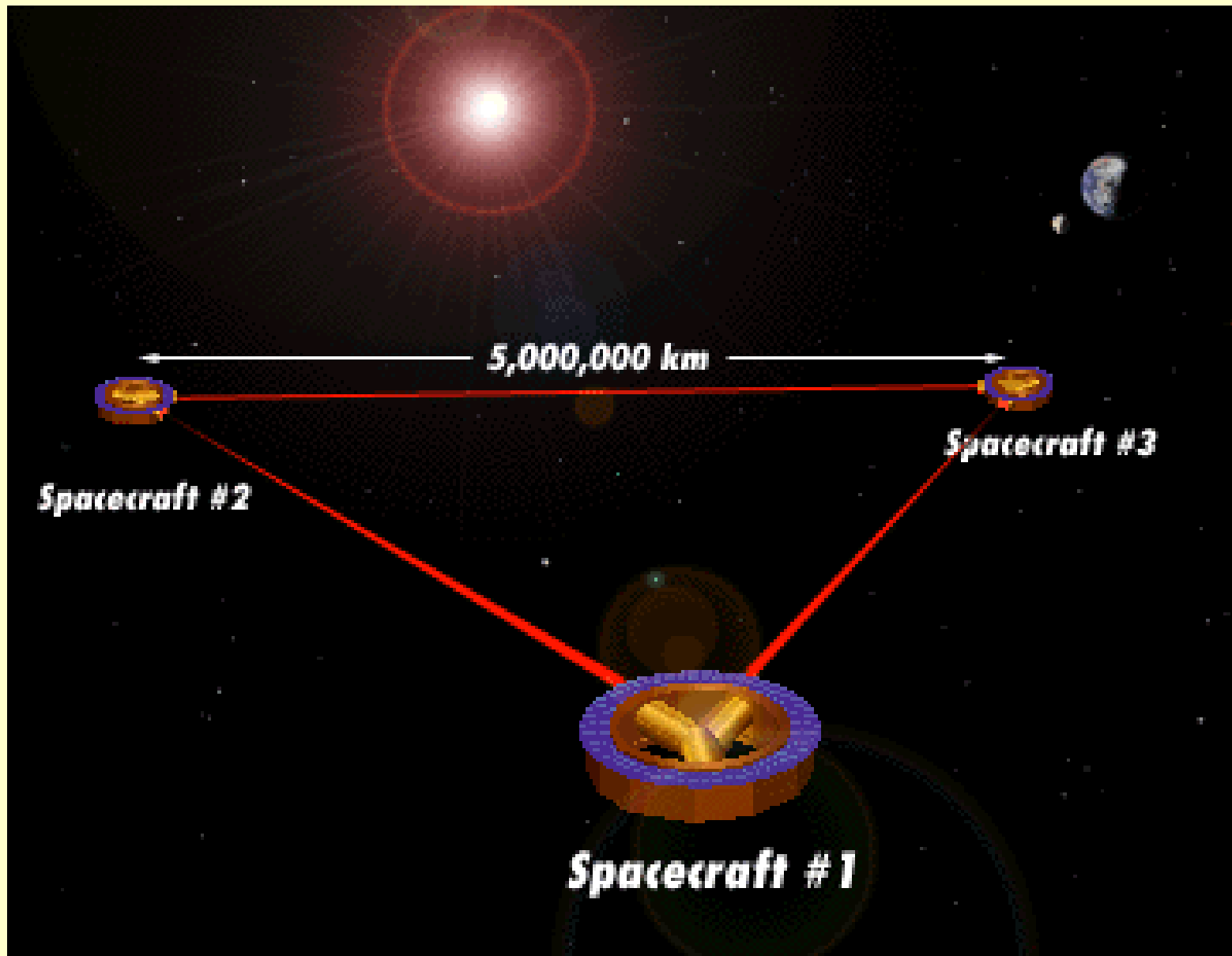
- Positieve Impactstudie Prov. Limburg opdrachtgever EZ en OCW
- Buitenland:
  - ESFRI 2020 NL, DL, BE, IT HG, FR, PL
  - Europees consortium van Lidstaten als bij ESS
- Boring bij Terziet vorig jaar geluidsmetingen op 280m diepte
- Beslissing voor locatie voorzien in 2021
- Grote Geld volgende kabinet
- Voor nu:
  - Bezoekerscentrum, R&D-centrum: ET-Pathfinder
  - Een ARC-GW in Limburg Met de Belgen, de Duitsers en de Industrie. Prototype 15M€ (over 4 jaar).
- Concurrentie:
  - Sardinië
  - Hongarije onbekend

# Towards a global GW research infrastructure





# LISA een GW-telescoop in de ruimte



# Instrumentatie voor GW detectie

- Trillingsisolatie
- Meest geavanceerde optica
- Snelle nanometer Mechatronica
- Vacuüm
- Cryo

# De Einstein Pathfinder



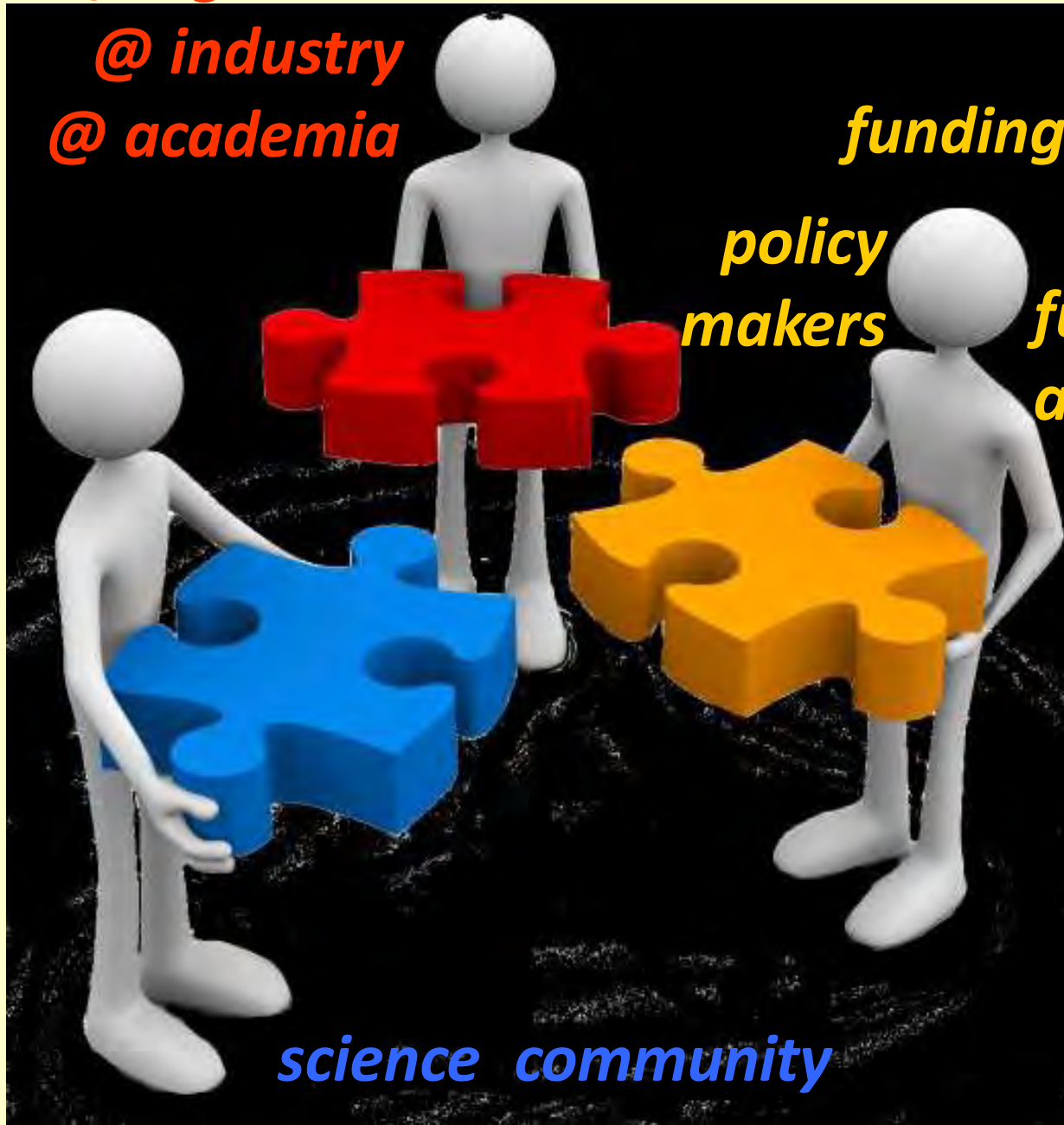


*technicians/engineers*

*@ industry*  
*@ academia*

*funding*

*policy makers* *funding authorities*



*science community*

# Big Science voor wereldvrede

- 5 derde generatie GW-detectors:
  - 2xVS,EU,Japan,India
- Multi messenger science:
  - Licht, GW, Neutrino's, kosmische stralen (Auger)
- Nieuwe GW-detectors:
  - Derde generatie: ET, Super Ligo, A-Ligo
  - Ruimte missies: LISA (EU&VS), China

