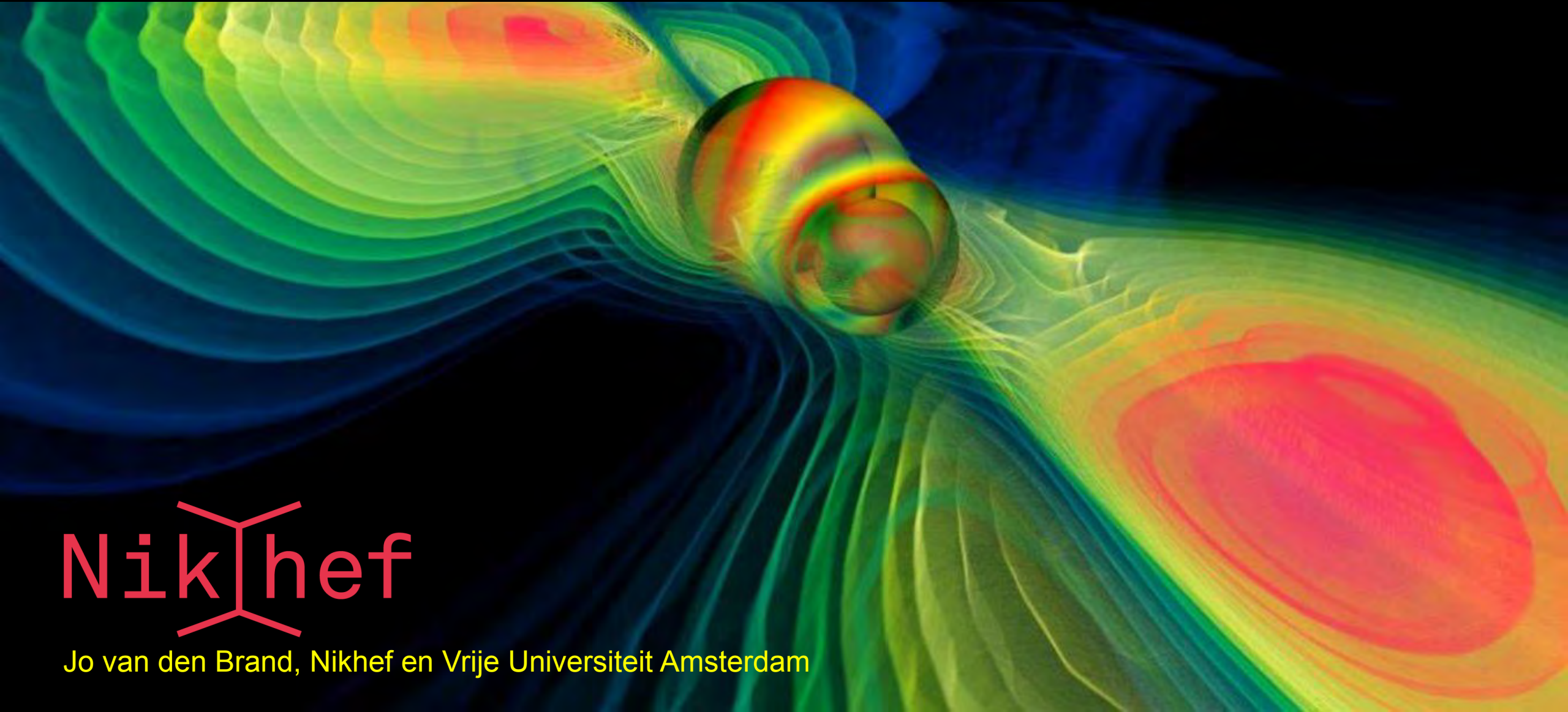


Had Einstein gelijk?

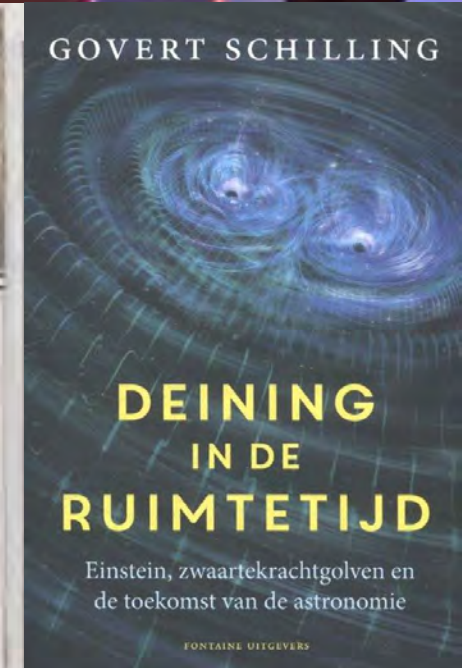
Zwaartekrachtsgolven van botsende zwarte gaten en neutronensterren



Nikhef

Jo van den Brand, Nikhef en Vrije Universiteit Amsterdam

Februari 2016: de ontdekking van zwaartekrachtsgolven



Feest, Einstein heeft gelijk

Nederlandse wetenschappers spelen hoofdrol in de ontdekking van zwaarte-krachtgolven.

door **Hans van Zon**

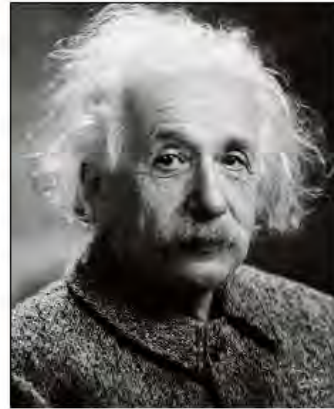
Er hangt een aanstekelijke, statische lading in de congreszaal van het Nationaal instituut voor subatomaire fysica (Nikhef) in Amsterdam. Mensen feliciteren elkaar, kloppen elkaar op de schouders. Het glas wordt geheven. Wat Albert Einstein in 1915 verwoordde in zijn algemene relativiteitstheorie, is nu bevestigd: zwaarte-krachtgolven bestaan.

Vol trots wordt gewezen op de felicitaties van minister Jet Bussemaker en staatssecretaris Sander Dekker van Wetenschap. „Dat na 100 jaar de voorspelling van Einstein waarheid wordt, is postuum een groot compliment aan hem, maar ook zeker aan de wetenschappers van nu”, aldus de bewindslieden. De Nederlandse natuurkundigen van Nikhef en sterrenkundigen van de Radboud Universiteit in Nijmegen krijgen een extra pluim. Zij waren de drijvende kracht bij de verwerking van alle gegevens en de

test die Einsteins theorie moest bevestigen. De Duits-Zwitsers-Amerikaanse geleerde formuleerde de 'ruimtetijd': in zijn theorie beschrijft hij dat de ruimte zich kromt rond voorwerpen van wisselende zwaarte. Het heelal zou daarvoor rekken, krimpen en buigen.

Met de allereerste gemeten zwaarte-krachtgolf, met de naam GW150914, wordt nu aangetoond dat het universum geen stijve, starre constructie is, maar beweegt als gevolg van door massa veroorzaakte minieme trillingen.

„Dit is absoluut spectaculair”, zegt hoogleraar natuurkunde Jo van den Brand, verbonden aan de Vrije Universiteit en leider van het gravitatieprogramma van Nikhef. „Het gaat hier om een knetterhard signaal, het krachtigste moment ooit



Albert Einstein.

door de mensheid gemeten.” GW150914 is afkomstig van een botsing van twee enorme zwarte gaten, zware concentraties massa met een zwaartekracht die zo sterk is, dat er geen licht uit kan ontsnappen. De gaten waren respectievelijk 35 en 30 zonnemassa's zwaar. Daaruit vormde zich 1,5 miljard lichtjaar geleden in 1 miniseconde één nieuw zwart gat met een massa van 62 keer die van onze zon. De resterende drie zonnemassa's werden omgezet in energie en uitgestraald als zwaarte-krachtgolven. De metingen van GW150914 kunnen alleen worden gedaan met precisieapparatuur. Zwaarte-krachtgolven zijn een minieme trilling in

het heelal. Te vergelijken met een rimpel in het IJsselmeer, veroorzaakt door het vallen van een enkele druppel.

Met het Ligo-project, de eerste twee meetpunten in de Amerikaanse staten Washington en Louisiana met elk een 4 kilometer lange pijp en lasers, is het gelukt zo'n rimpeling op te vangen. Als ook het meetstation Virgo bij Pisa in Italië en de door het Nikhef gedroomde eigen Einstein-telescoop in Zuid-Limburg werkelijkheid worden, moet de wetenschappelijke oogst nog gro-

ten bestaan en dat ze kunnen samensmelten tot één. Bovendien dachten we altijd dat zwarte gaten maximaal dertig zonnemassa's zwaar konden zijn. Nu weten we dat ze nog veel zwaarder kunnen zijn.”

In de astronomie wordt al gesproken van een nieuwe vorm van sterrenkunde met onderzoek op basis van zwaarte-krachtgolven in plaats van licht. Studies die mogelijk extra informatie kunnen geven over de oorsprong en de ontwikkeling van

WETENSCHAP Honderd jaar na dato wordt relativiteitstheorie bevestigd

Bewijs voor Einsteins zwaarte-krachtgolven

Einstein dacht dat zwaarte-krachtgolven nooit gemeten konden worden. Dat is nu toch gelukt.

WAT DOEN DEZE GOLVEN?

Bij grote gebeurtenissen, zoals het **samensmelten van twee zwarte gaten**, ontstaan rimpelingen of 'zwaarte-krachtgolven'.

Door zulke golven **vervormen alle objecten in het heelal** (waaronder de aarde) een klein beetje.



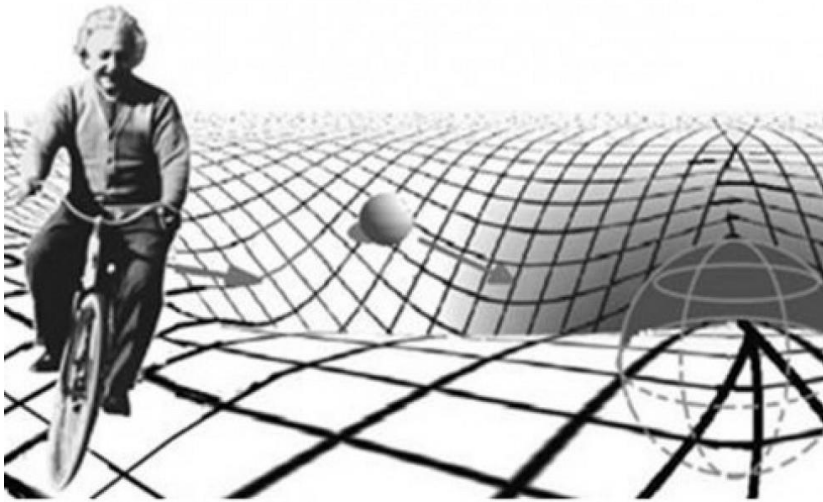
(weergave sterk overdreven)

Einsteins algemene relativiteitstheorie

Einstein ontdekt diepe connecties tussen ruimte, tijd, licht en zwaartekracht

Einsteins zwaartekracht

- Ruimte en tijd zijn natuurkundige objecten
- Zwaartekracht is een meetkundig effect: kromming van ruimtetijd



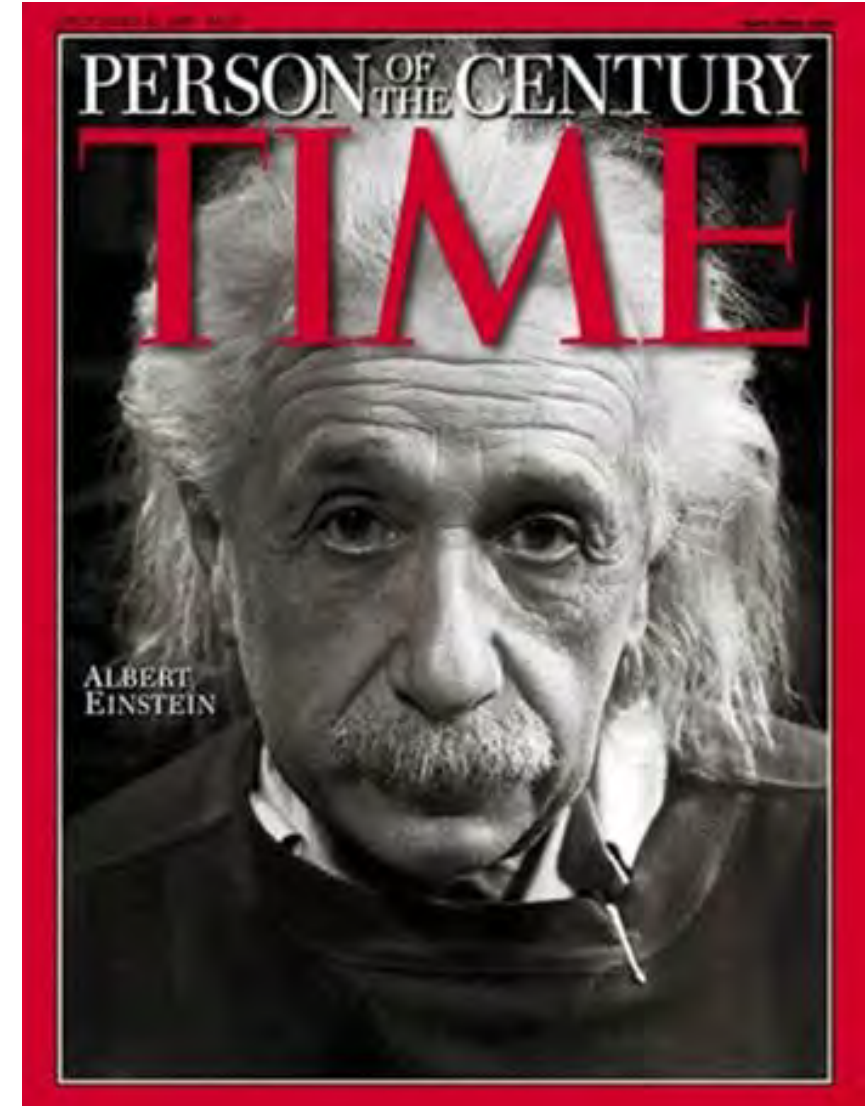
Voorspellingen

- Licht buigt af langs de zon
- Expansie van het Universum
- Zwaartekrachtsgolven

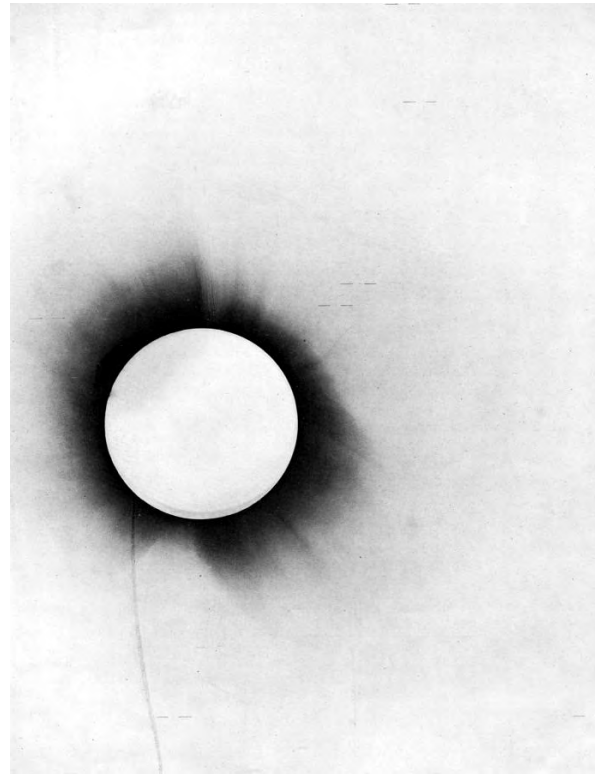
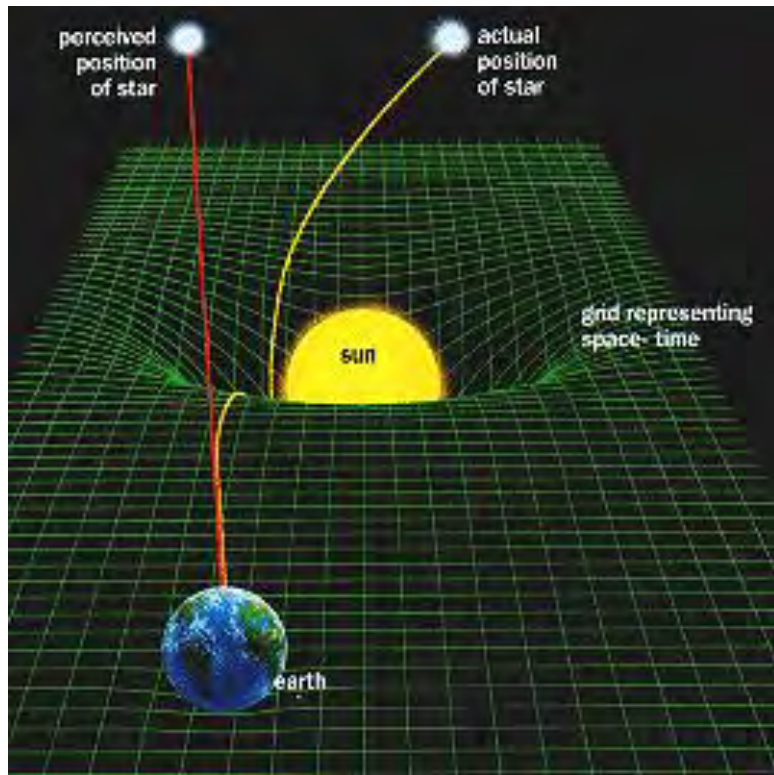
688 Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 22. Juni 1916

Näherungsweise Integration der Feldgleichungen
der Gravitation.

VON A. EINSTEIN.



Arthur Eddington meet de afbuiging van licht in mei 1919



LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

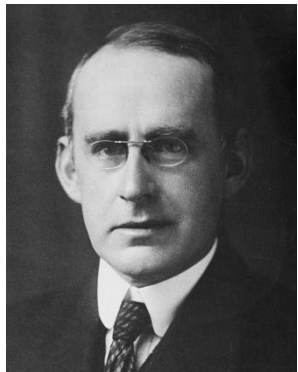
Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed
or Were Calculated to be,
but Nobody Need Worry.

A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could
Comprehend It, Said Einstein When
His Daring Publishers Accepted It.

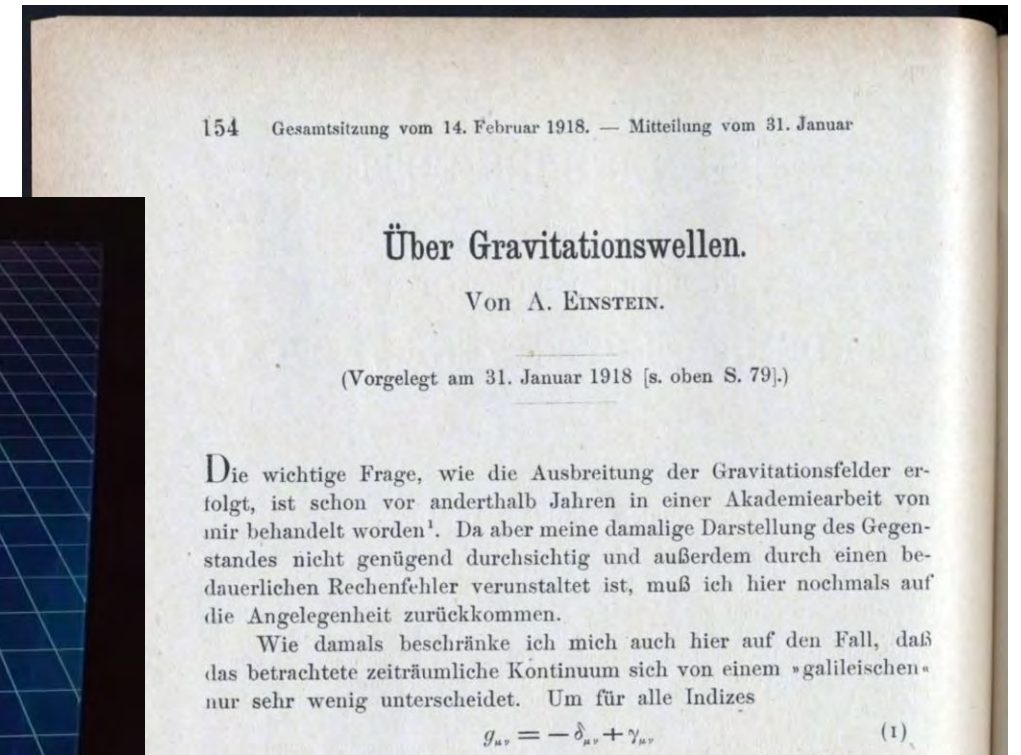
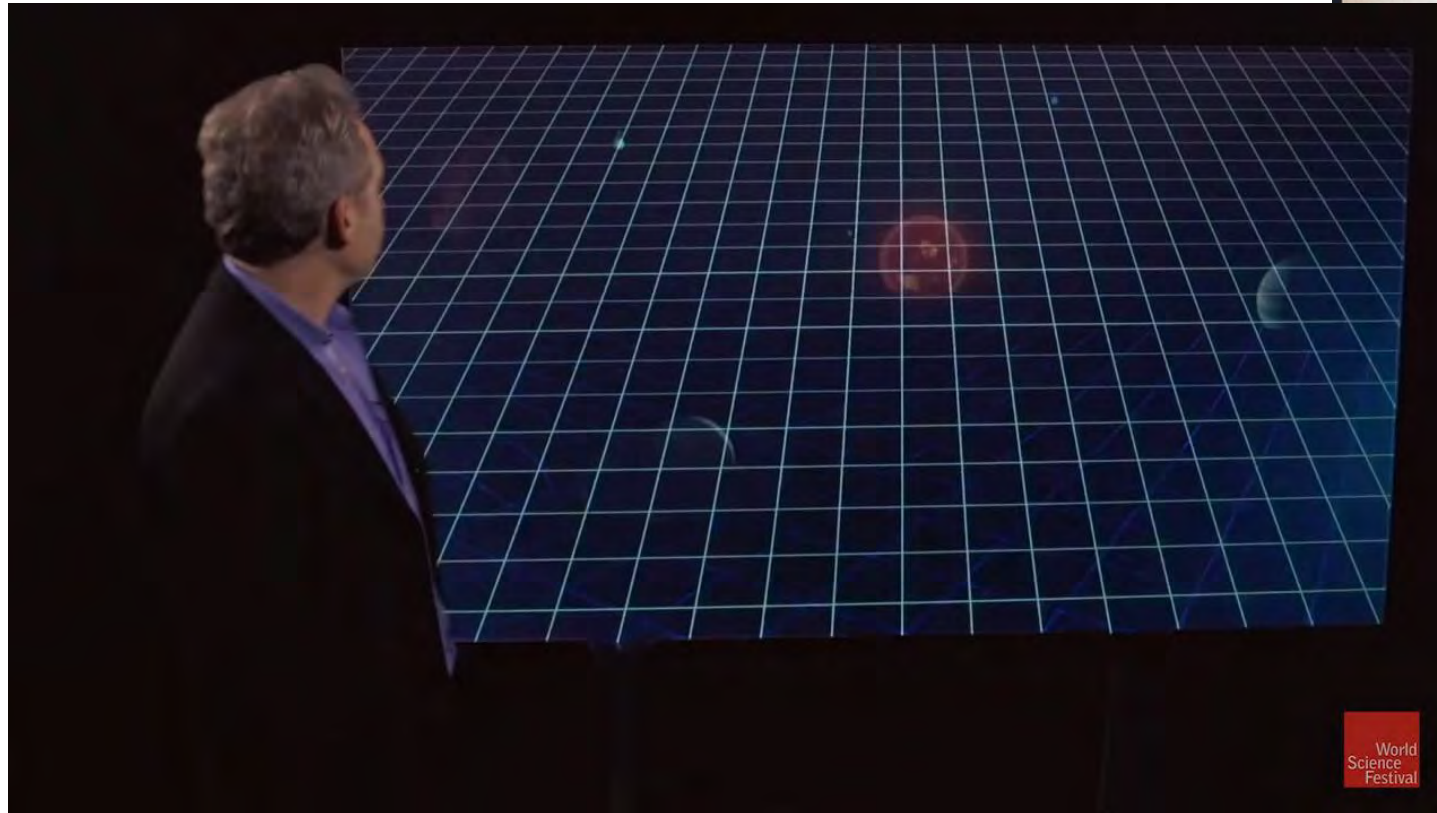


Optical Deflection of Starlight During Eclipses

Date	Location	arc secs
29 May 1919	Sobral	1.98 ± 0.16
	Principe	1.16 ± 0.40
21 Sep 1922	Australia	1.77 ± 0.40
		1.42 to 2.16
		1.72 ± 0.15
		1.82 ± 0.20
9 May 1929	Sumatra	2.24 ± 0.10
19 June 1936	USSR	2.73 ± 0.31
	Japan	1.28 to 2.13
	Brazil	2.01 ± 0.27
25 Feb 1952	Sudan	1.70 ± 0.10
30 Jun 1973	Mauritania	1.66 ± 0.19

Einstein ontdekt zwaartekrachtsgolven

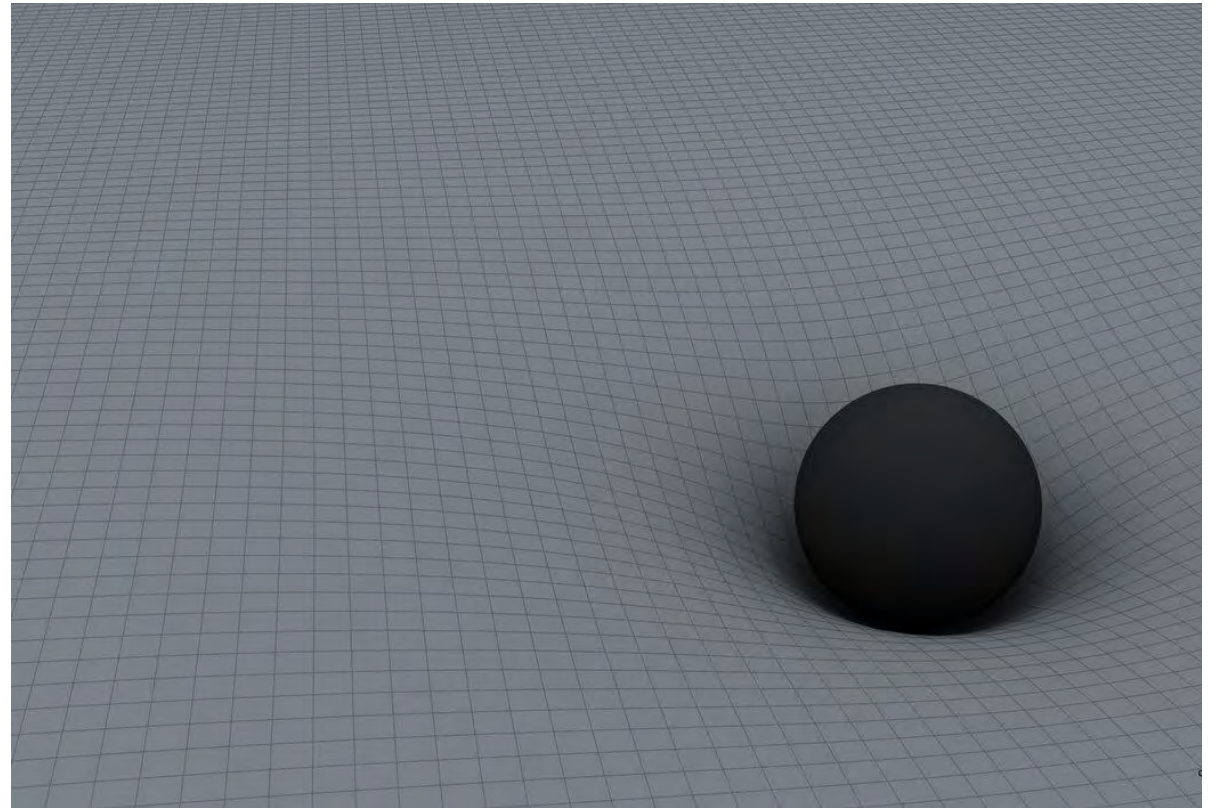
Einstein publiceert zijn ontdekking in Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften op 22 juni 1916 en op 14 februari 1918



Robert Oppenheimer voorspelt bestaan van zwarte gaten

Samen met Snyder voorspelt hij in 1939 de vorming van zwarte gaten als zware sterren aan hun einde komen

Zwarte gaten zijn gemaakt van ruimtetijd. Alle materie is volgens de theorie verdwenen in een singulariteit

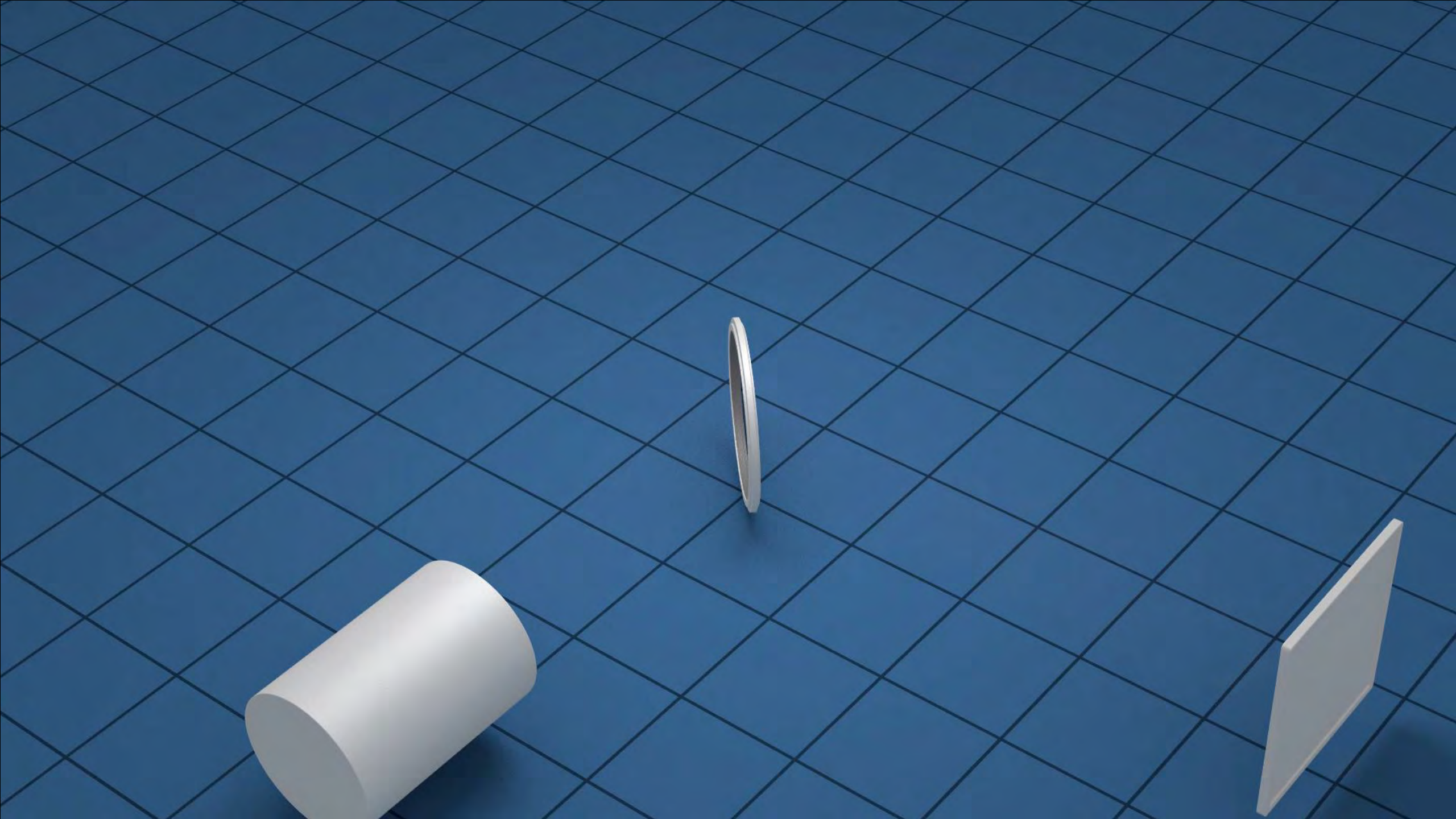


Zwaartekracht en kunst

De theorie van ruimtetijd







Het samensmelten van twee zwarte gaten

LIGO Virgo Collaboration



Zwaartekrachtsgolven gemeten door natuurkundigen

Zwaartekrachtsgolven bestaan!

Ruimte en tijd zijn dynamische grootheden

We zien het botsen van twee zwarte gaten

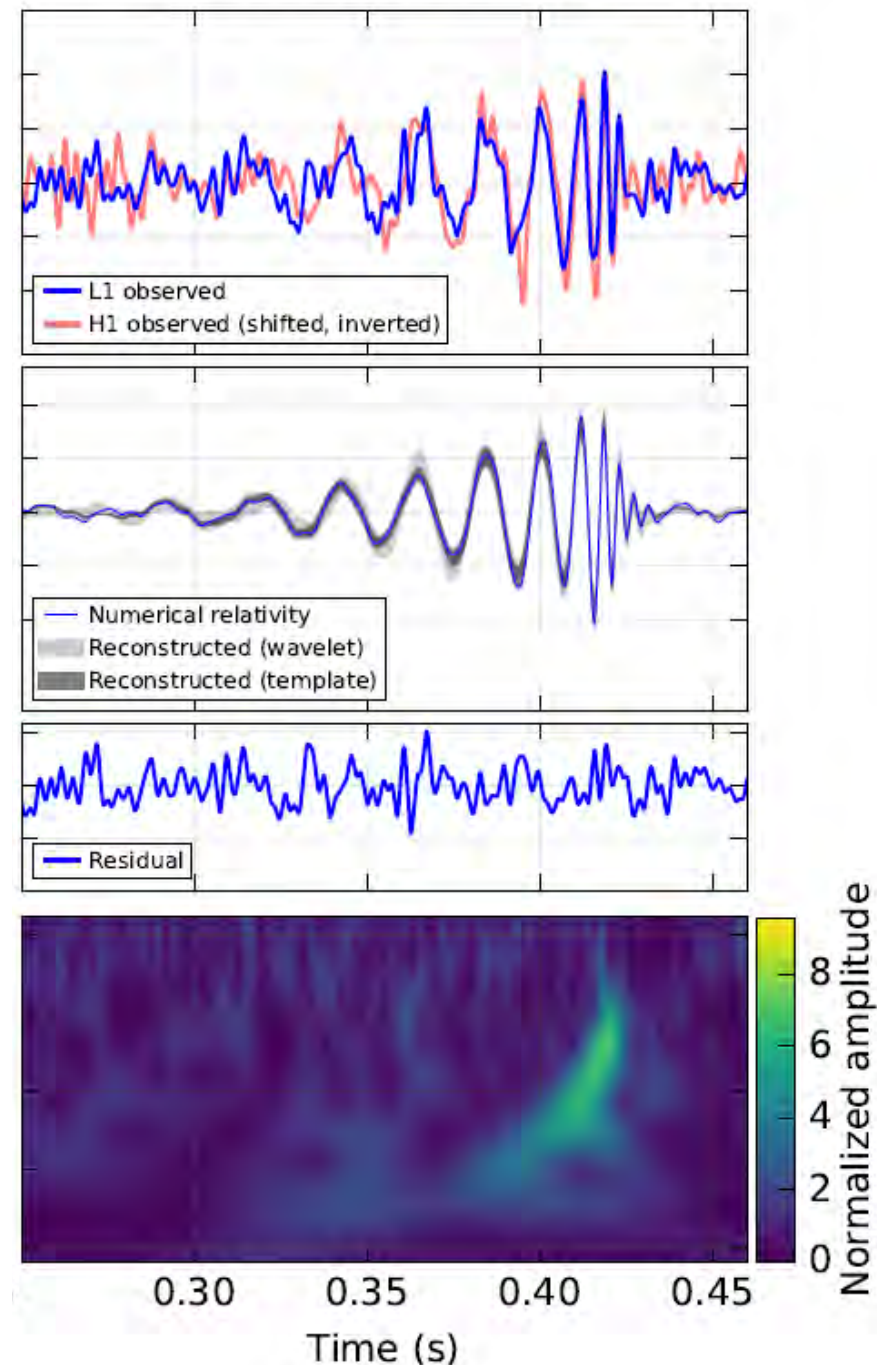
We zien de vorming een zwart gat

We detecteren de krachtigste botsing ooit

We hebben een nieuwe manier om naar het Universum te kijken

Einsteins theorie ondergaat een ultieme test onder de meest extreme omstandigheden van gravitatie

We kunnen deze bronnen gebruiken om de historie en evolutie van het Universum te bestuderen



Nobelprijs voor de natuurkunde 2017



Press Release: The Nobel Prize in Physics 2017

3 October 2017

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics 2017 with one half to

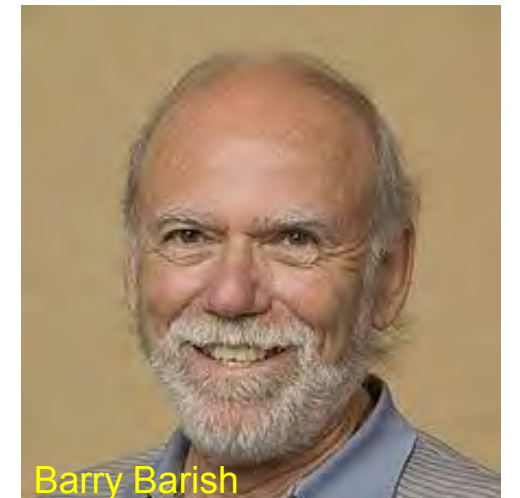
Rainer Weiss
LIGO/VIRGO Collaboration

and the other half jointly to

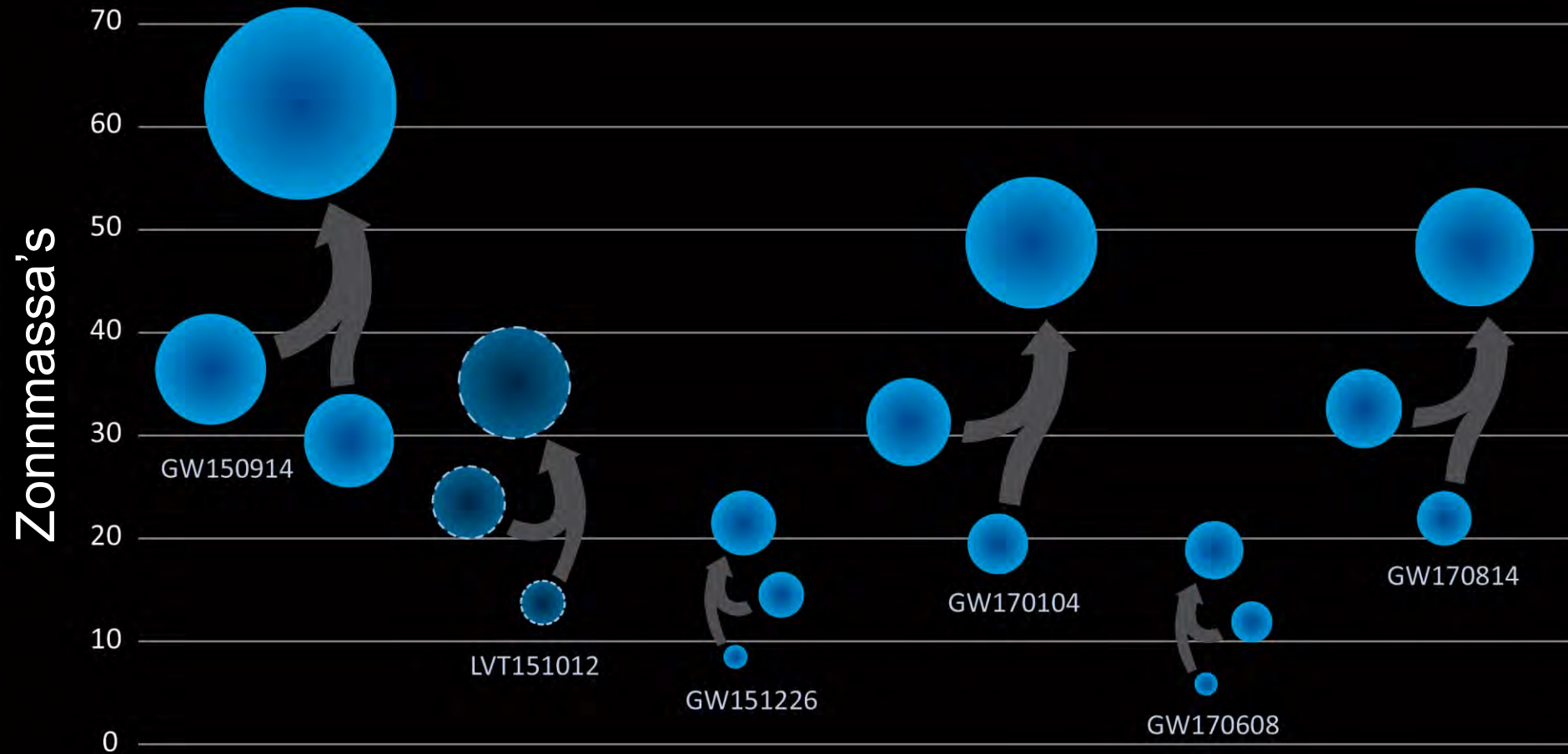
Barry C. Barish
LIGO/VIRGO Collaboration

and

Kip S. Thorne
LIGO/VIRGO Collaboration

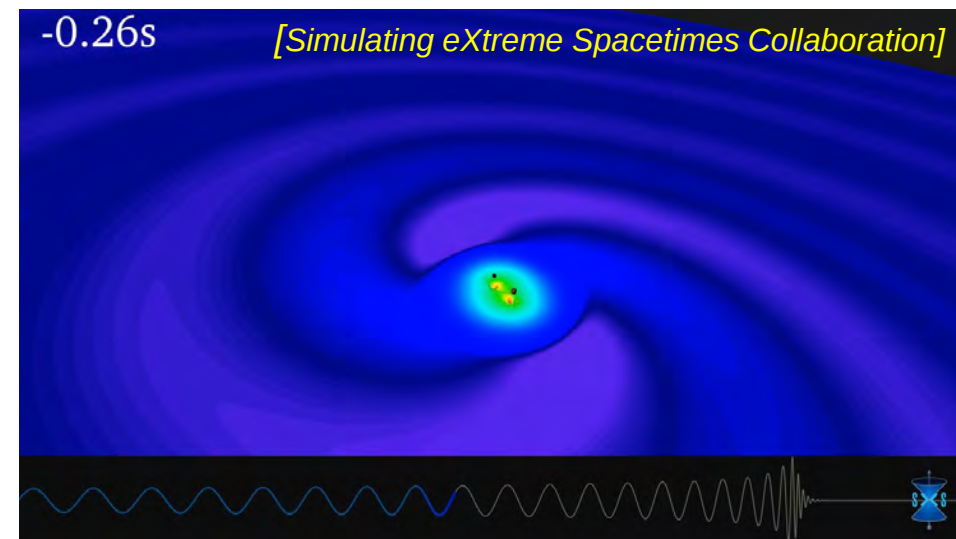
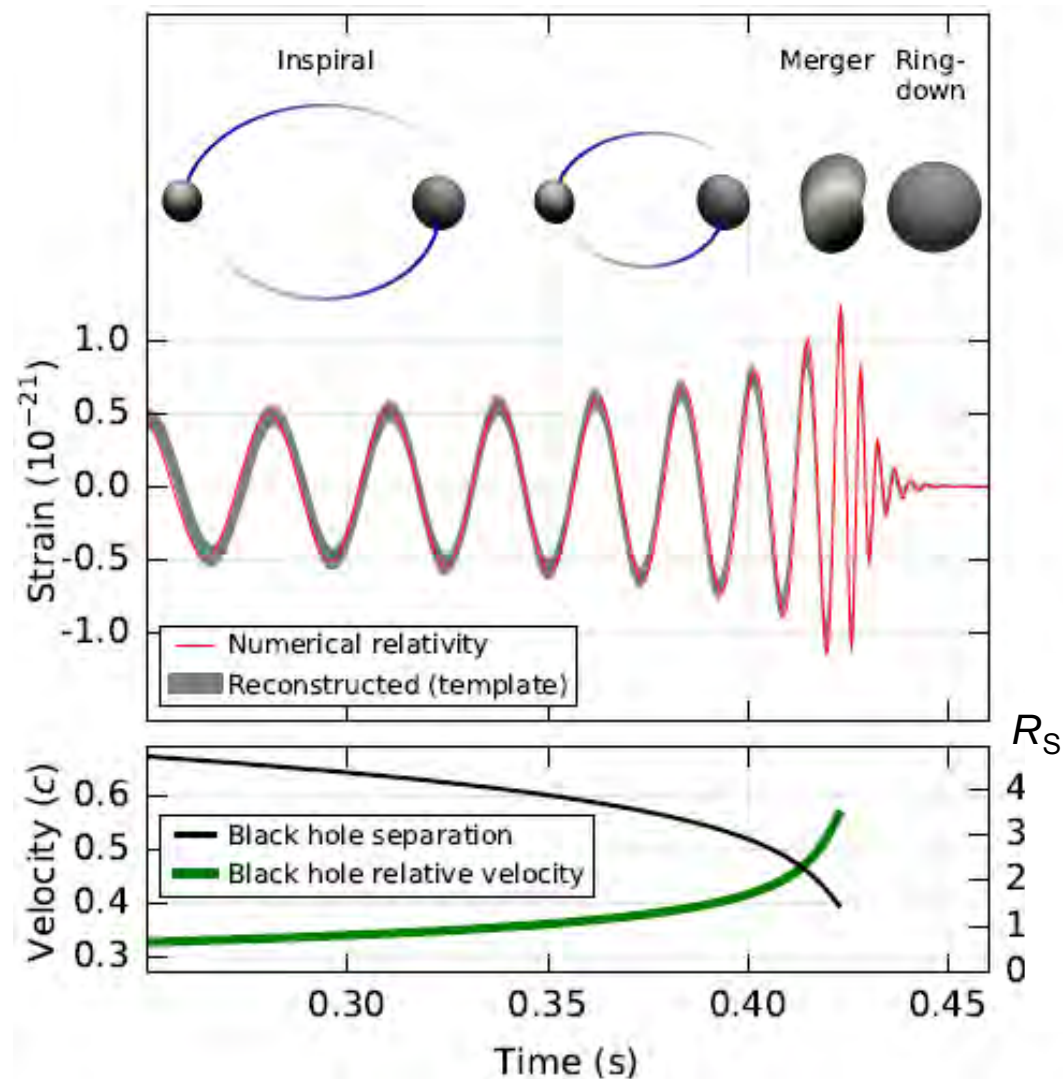


Zwarte gaten waarvan de massa bekend is



Event GW150914: botsing van twee zwarte gaten

Het systeem zal energie verliezen door uitzenden van zwaartekrachtsgolven. De zwarte gaten komen dicht bij elkaar en hun snelheid neemt toe. Massa's en impulsmoment kunnen bepaald worden voor “inspiral” en “ringdown” fase



Chirp massa volgt uit het frequentiegedrag

Maximum frequentie hangt af van totale massa

Baanfase kan met post-Newtoniaanse expansie berekend worden (tot zevende orde!)

De bron is zelf-calibrerend: we kunnen het als een soort “standaardkaars” gebruiken

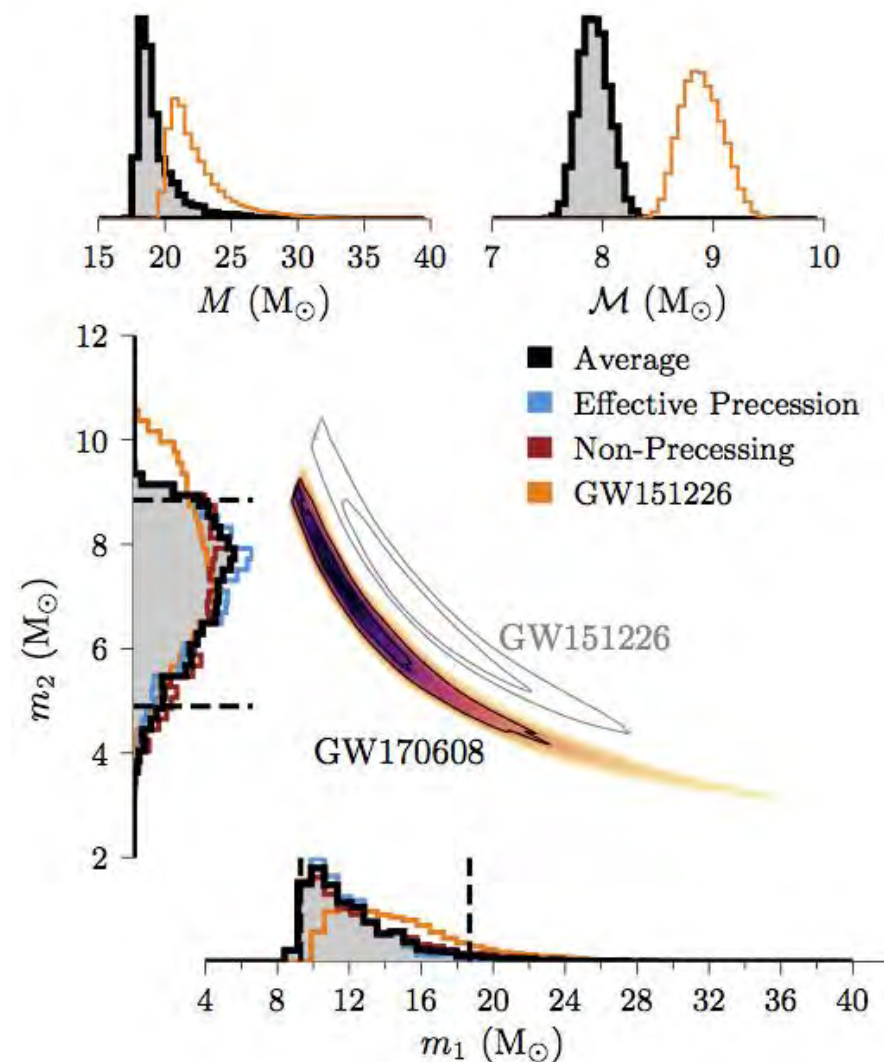
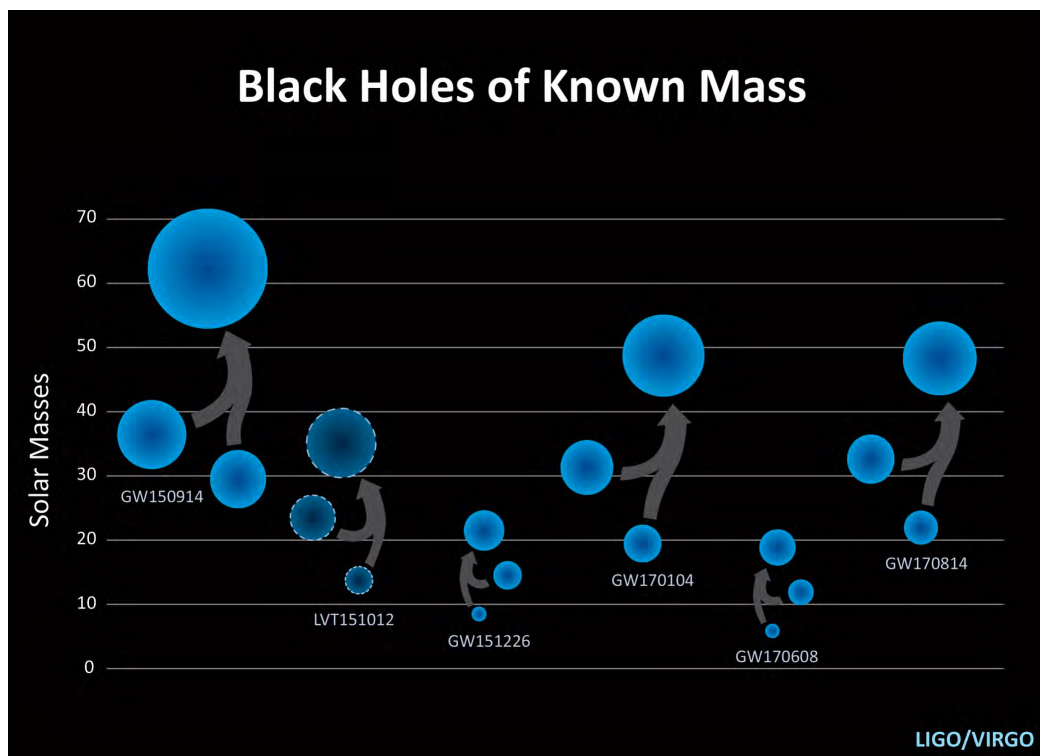
Wetenschappelijk: eigenschappen van zwarte gaten

We kunnen informatie extraheren van massa's, impulsmoment, uitgestraalde energie, positie, afstand, inclinatie, polarisatie. Populatiestudies kunnen licht werpen op formatiemechanismen

LVC heeft 6 BBH botsingen gepubliceerd

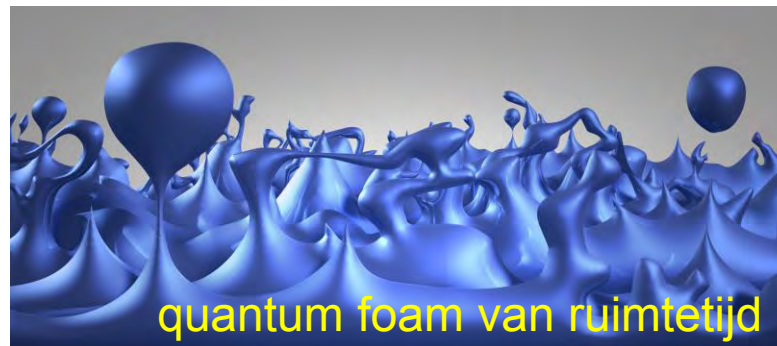
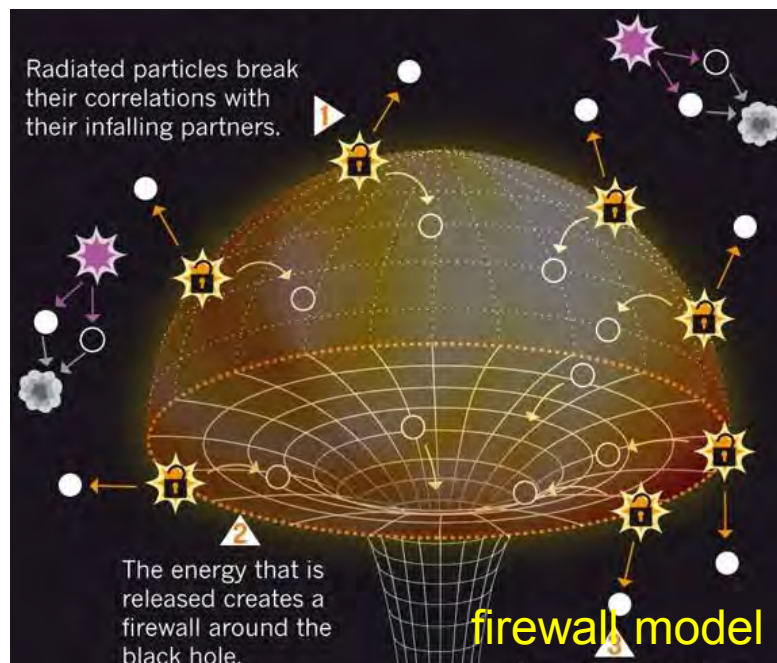
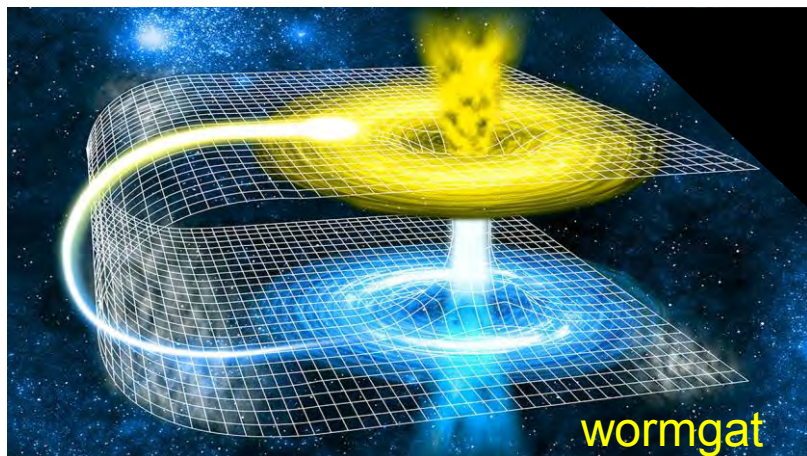
Fundamentele fysica, astrofysica, astronomie, en kosmologie

Testen van algemene relativiteitstheorie (ART)



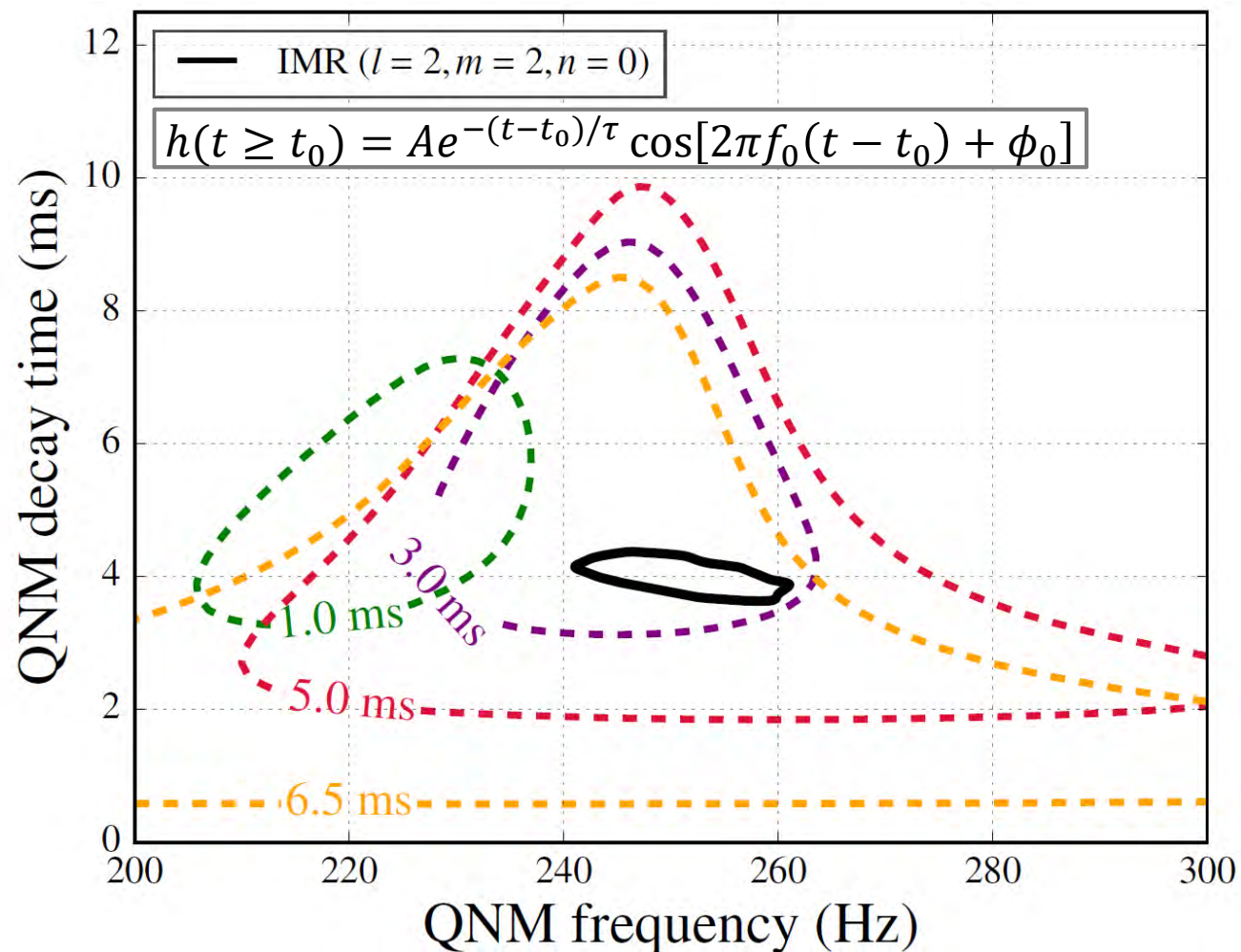
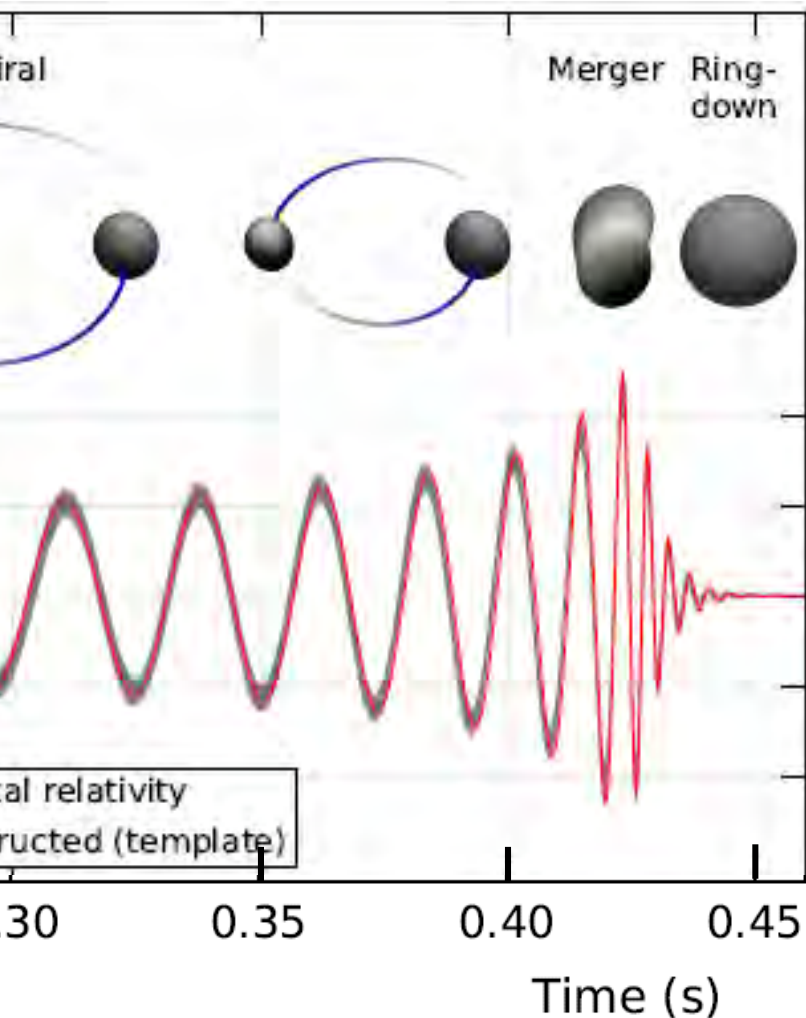
Fundamentele fysica: hebben we zwarte gaten gezien?

Onze theorieën “voorspellen” het bestaan van andere objecten, zoals quantummodificaties van ART zwarte gaten, bosonsterren, gravastars, firewalls, etc. Waarom denken we dat we zwarte gaten gezien hebben?



Werd er een zwart gat gecreëerd?

Op basis van de “inspiral” kunnen we een “ringdown”-frequentie voorspellen van ongeveer 250 Hz en een vervaltijd van 4 ms. Dit is wat we meten (<http://arxiv.org/abs/1602.03841>). We zullen dit verder onderzoeken



Limiet op de massa van het graviton

We kunnen een limiet op de Compton-golflengte $\lambda_g = h/m_g c$ van het graviton zetten en die vergelijken met metingen aan het Zonnestelsel of aan binaire pulsars. Onze limiet is nu al 10,000 keer meer stringent dan die op het foton



$$\delta\Phi(f) = -\frac{\pi Dc}{\lambda_g^2(1+z)} f^{-1}$$

Will, Phys. Rev. D **57**, 2061 (1998)

Massive-graviton theorie dispersie
relatie $E^2 = p^2 c^2 + m_g^2 c^4$

We hebben $\lambda_g = h/(m_g c)$

Dus frequentie-afhankelijke snelheid

$$\frac{v_g^2}{c^2} \equiv \frac{c^2 p^2}{E^2} \cong 1 - h^2 c^2 / (\lambda_g^2 E^2)$$

$$\lambda_g > 10^{13} \text{ km}$$

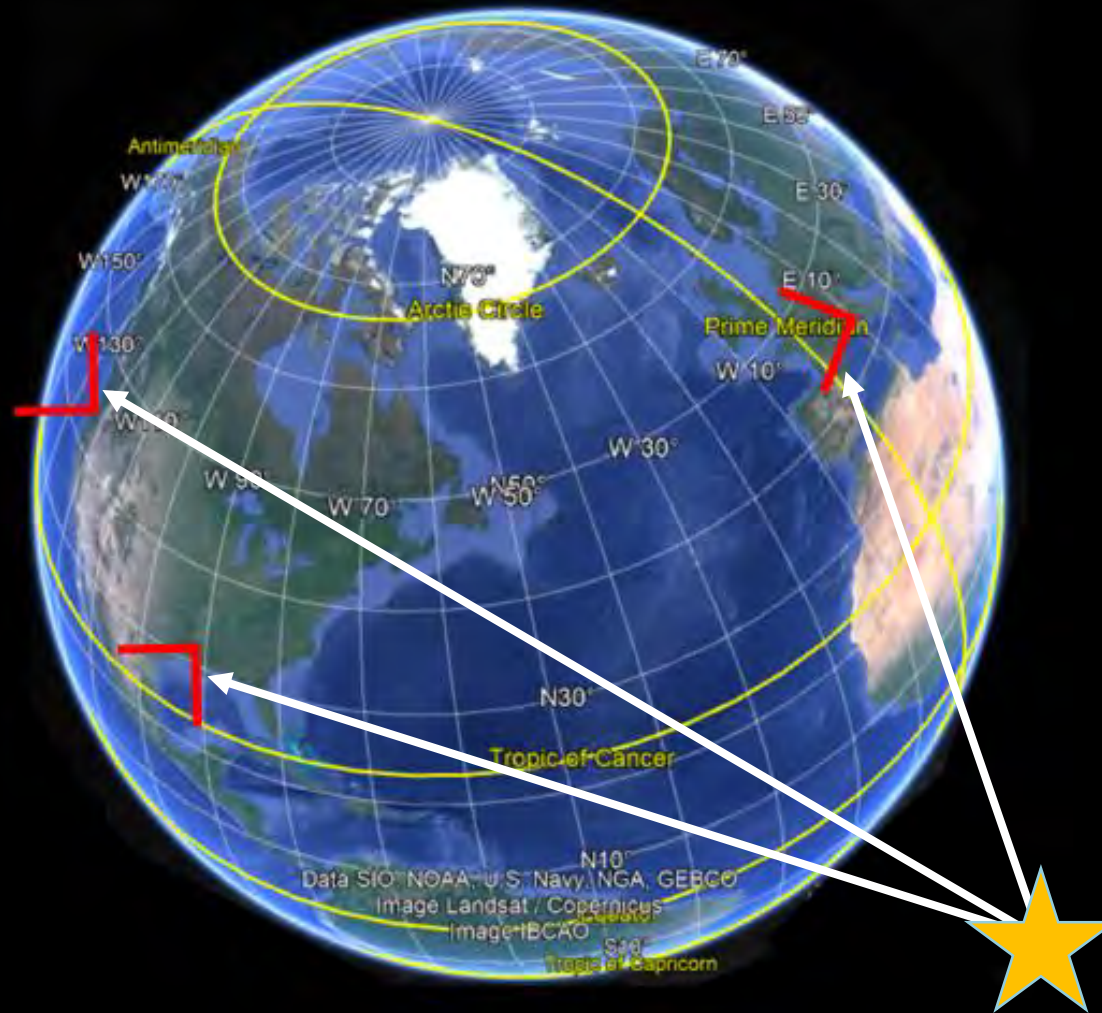
$$m_g \leq 10^{-22} \text{ eV}/c^2$$

Michalis Agathos (Nikhef 2016)

Zie “Tests of general relativity with GW150914” <http://arxiv.org/abs/1602.03841>

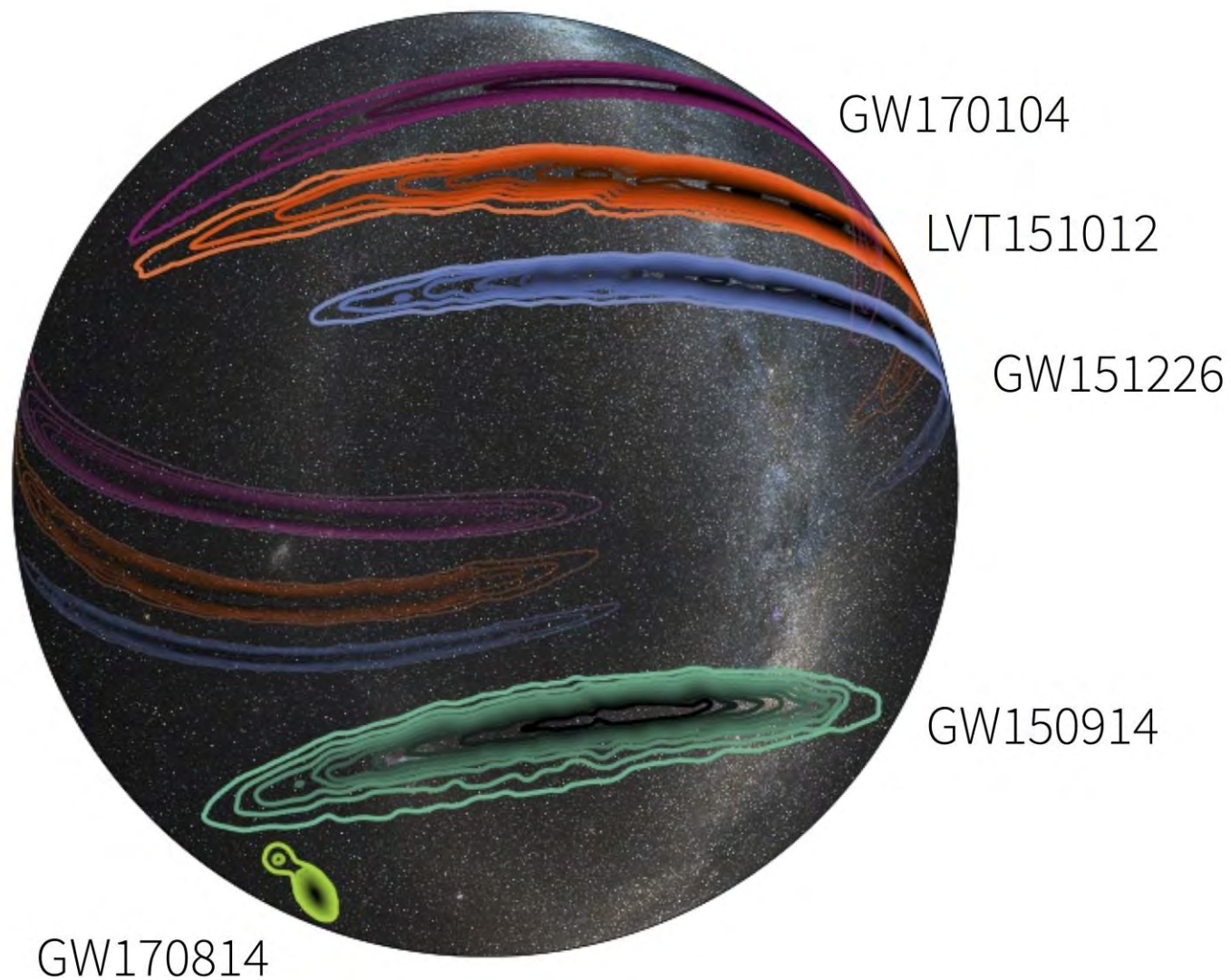
Eerste LIGO Virgo detectie: triangulatie!

15 augustus 2017



Eerste triple detectie door Virgo en LIGO

Zwaartekrachtsgolven reizen ongeveer 2 miljard jaar door het Universum en raken de Aarde eerst op lat. 44.95 degr S, long 72,97 degr W, Puerto Aysen, Chili. De bron was in de constellatie Eridanus

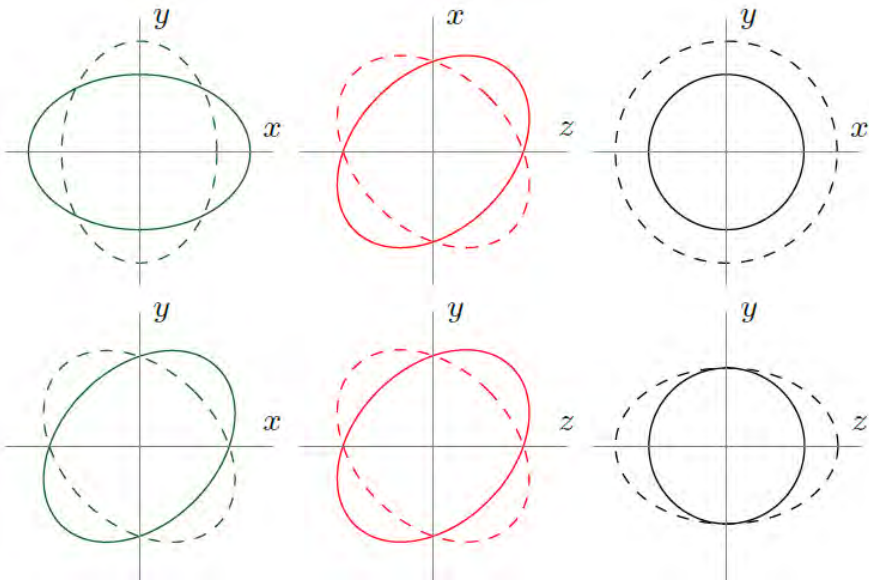


Polarisaties van zwaartekrachtsgolven

Polarisatie is een fundamentele eigenschap van ruimtetijd. Het bepaalt hoe ruimtetijd vervormd kan worden. Algemene metrische theorieën laten zes polarisaties toe. De algemene relativiteitstheorie kent slechts twee (tensor) polarisaties

ART laat enkel (T) polarisaties toe

Algemene metrische theorieën kennen ook vector (V) en scalaire (S) polarisaties



Theory	+	x	x	y	b	l
General Relativity						
GR in noncompactified 4/6D Minkowski						
Einstein-Æther						
5D Kaluza-Klein						
Randall-Sundrum braneworld						
Dvali-Gabadadze-Porrati braneworld						
Brans-Dicke						
$f(R)$ gravity						
Bimetric theory						
Four-Vector Gravity						

Nishizawa et al., Phys. Rev. D 79, 082002 (2009) [except G4v & Einstein-Æther].

allowed / depends / forbidden

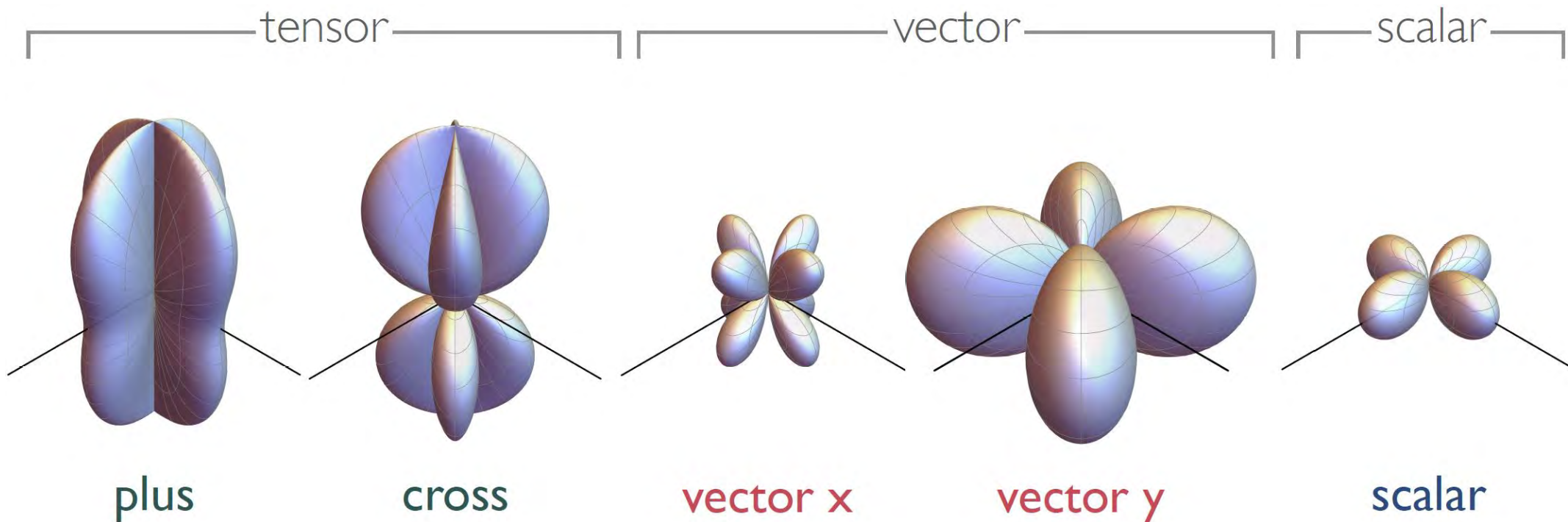
Eerste test van polarisaties van zwaartekrachtsgolven

Volgens Einsteins algemene relativiteitstheorie bestaan er slechts twee polarisaties. Algemene metrische theorieën van gravitatie staan zes polarisaties toe. GW170814 bevestigt Einsteins voorspelling

Hoekafhankelijkheid (antenne-patronen) verschilt voor T, V, S

LIGO en Virgo hebben verschillende antenne-patronen

Dit maakt een fundamentele test mogelijk van de polarisaties van ruimtetijd



Eerste test van polarisaties van zwaartekrachtsgolven

Volgens Einsteins algemene relativiteitstheorie bestaan er slechts twee polarisaties. Algemene metrische theorieën van gravitatie staan zes polarisaties toe. GW170814 bevestigt Einsteins voorspelling

Hoekafhankelijkheid (antenne-patronen) verschilt voor T, V, S

LIGO en Virgo hebben verschillende antenne-patronen

Dit maakt een fundamentele test mogelijk van de polarisaties van ruimtetijd



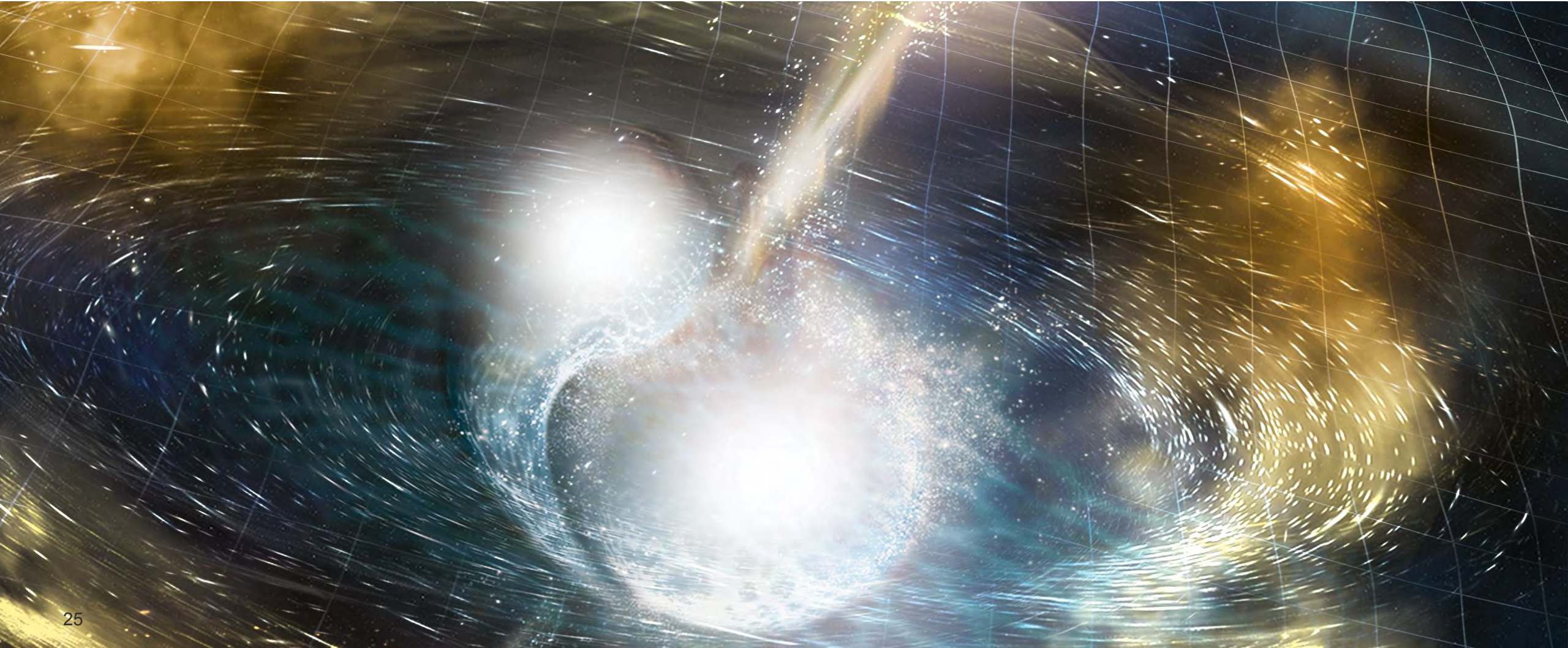
Our analysis favors tensor polarizations in support of General Relativity

**Our data favor tensor structure over vector by about a (Bayes) factor 200
And tensor over scalar by about a factor 1000**

This is a first test, and for BBH we do not know the source position very well

GW170817: de start van multi-messenger astronomie

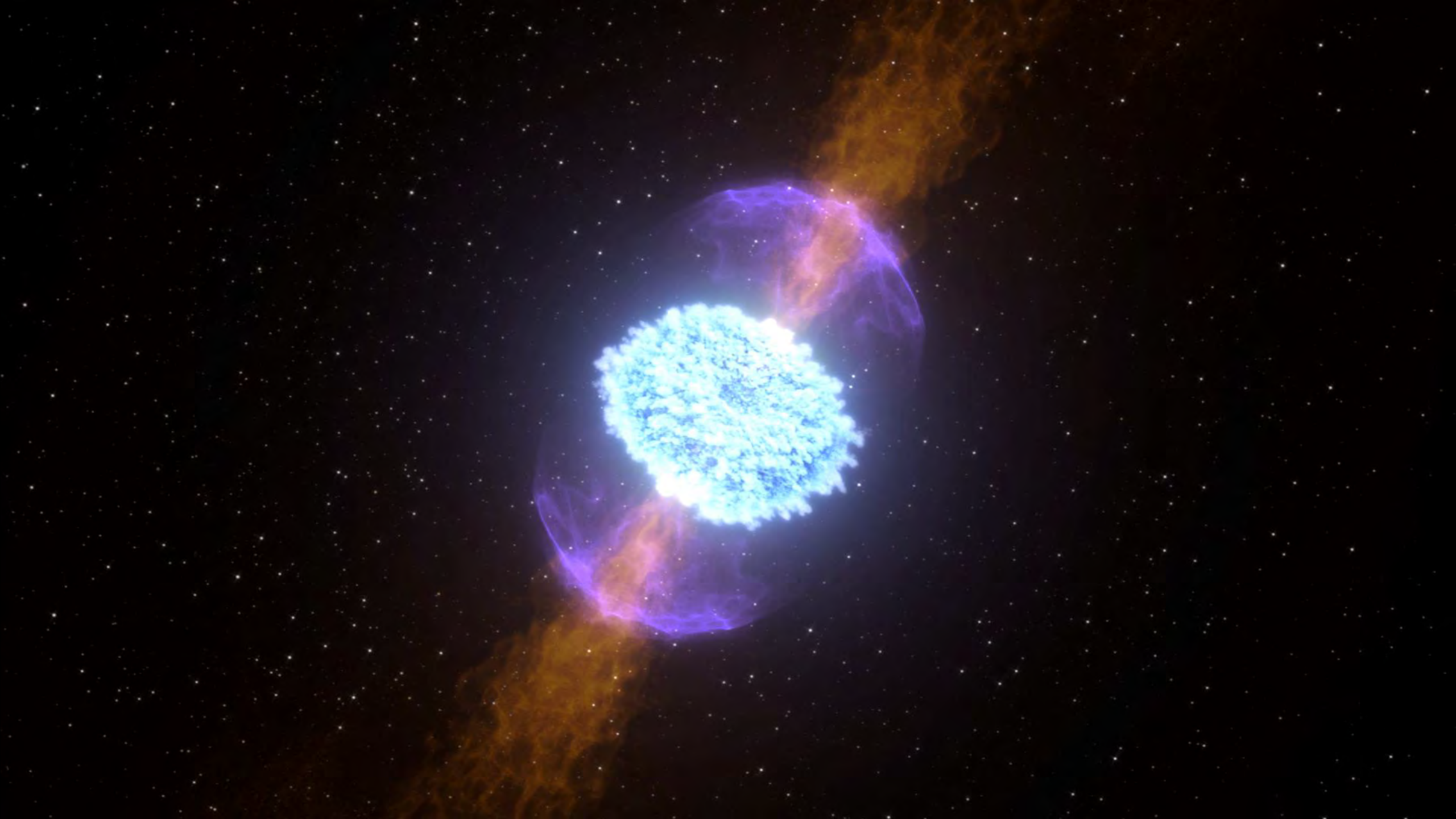
Veel compacte bronnen zenden, behalve zwaartekrachtsgolven, ook licht, gamma- en X-stralen, en UV, optisch, IR, en radiogolven, als ook neutrino's en andere subatomaire deeltjes uit. Ons drie-detector globaal netwerk staat toe om deze boodschappers te identificeren

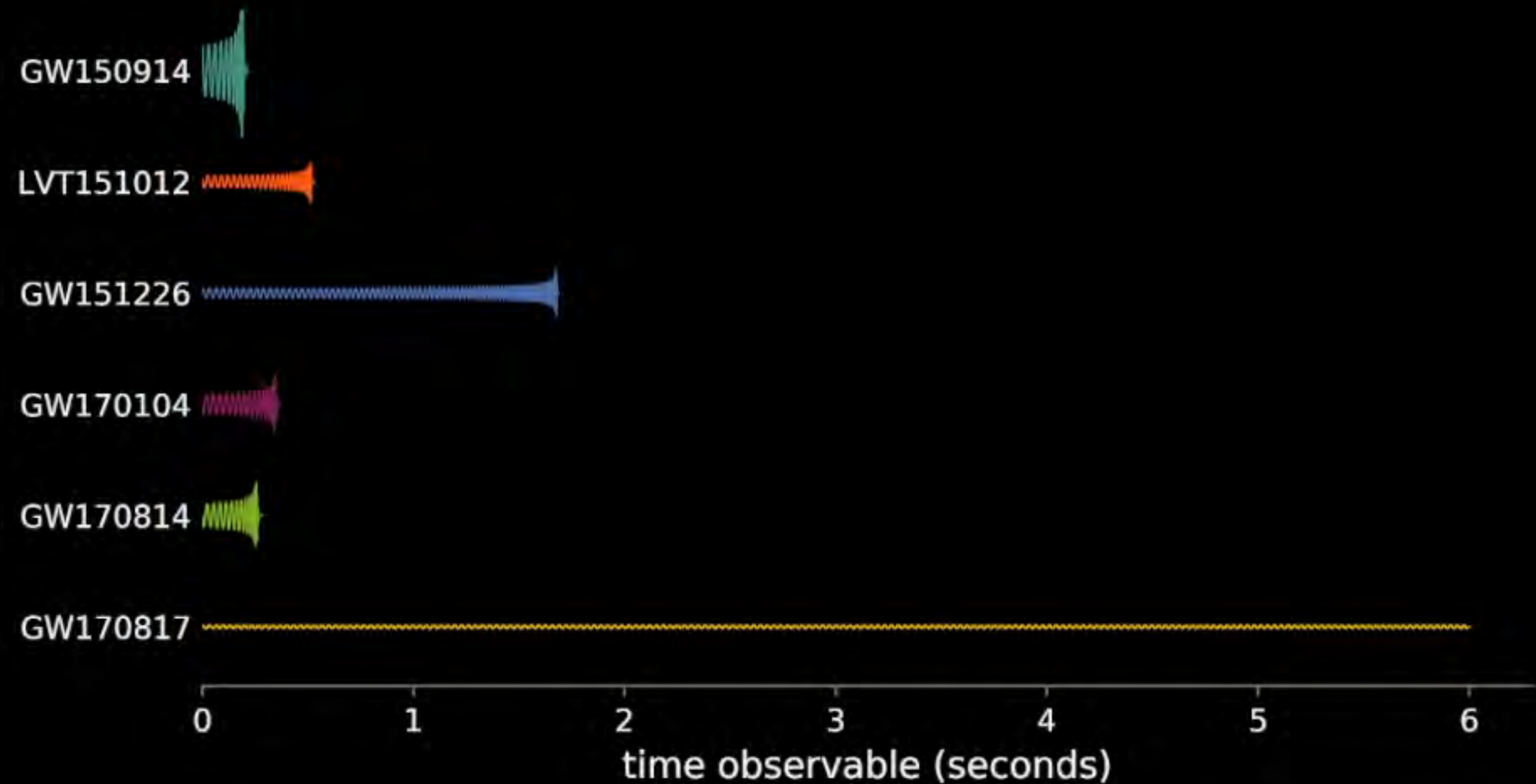




De Aarde op schaal







Gamma-straling bereikt de Aarde 1.7 seconde na de botsing

INTEGRAL

Fermi Space Telescope



Implicaties voor fundamentele fysica

Gamma-stralen bereiken de Aarde 1.7 s na het eind van het zwaartekrachtsgolf inspiral-signaal. De meetgegevens zijn consistent met standaard EM theorie minimaal gekoppeld aan General Relativity

Snelheden van zwaartekrachtsgolven en licht

Identieke snelheden tot een nauwkeurigheid van

$$-3 \times 10^{-15} < \frac{\Delta v}{v_{EM}} < +7 \times 10^{-16}$$

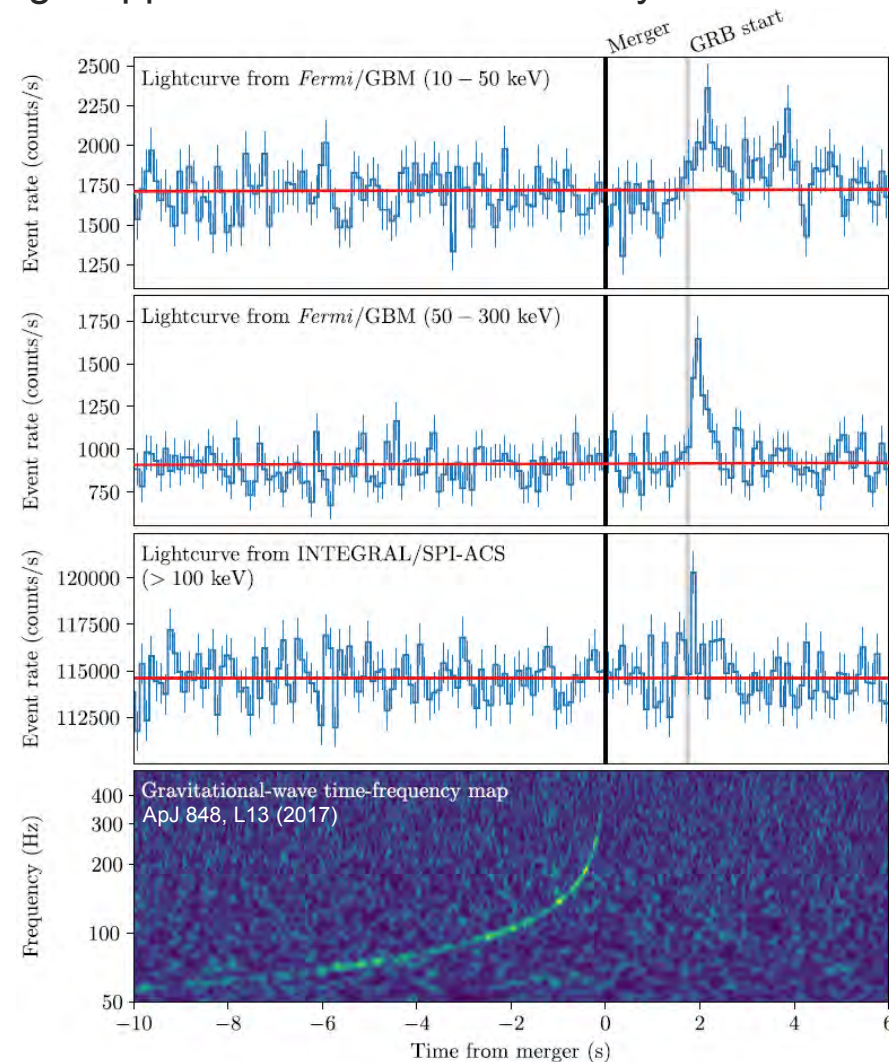
Test van het Equivalentieprincipe

Volgens ART, worden GW en EM golven op dezelfde manier afgebogen en vertraagd door de kromming van ruimtetijd door massaverdelingen (i.e. achtergrond gravitatie-potentiaal). Shapiro-vertraging beïnvloedt beide golven op dezelfde wijze

$$\Delta t_{\text{gravity}} = -\frac{\Delta \gamma}{c^3} \int_{r_0}^{r_e} U(r(t); t) dr$$

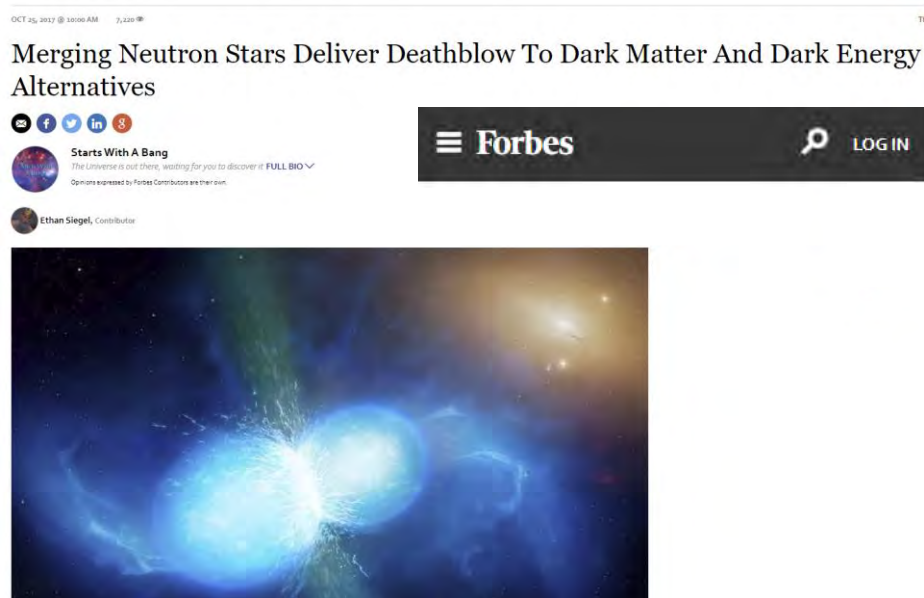
De potentiaal van onze Melkweg geeft hetzelfde effect tot op $-2.6 \times 10^{-7} \leq \gamma_{\text{GW}} - \gamma_{\text{EM}} \leq 1.2 \times 10^{-6}$

Als we data van “peculiar” snelheden meenemen tot een afstand van 50 Mpc, vinden we $\Delta \gamma \leq 4 \times 10^{-9}$



Donkere Energie en Donkere Materie na GW170817

GW170817 heeft consequenties voor ons begrip van Donkere Energie en Donkere Materie



GW170817 falsificeert Donkere Materie Emulatoren

No-dark-matter modified gravity theorieën zoals TeVeS of MoG/Scalar-Tensor-Vector modellen zouden een verschil in aankomsttijden geven tussen fotonen en zwaartekrachtsgolven van ongeveer 800 dagen, in plaats van de gemeten 1.7 seconde (arXiv:1710.06168v1)

Donkere Energie na GW170817

Toevoegen van een scalair veld aan een tensortheorie van zwaartekracht, levert twee generieke effecten:

1. In het algemeen wordt de voortplantingssnelheid van zwaartekrachtsgolven beïnvloedt (een toename)
2. De schaal van de effectieve Planck-massa verandert over kosmische tijden, hetgeen de demping van de zwaartekrachtsgolven beïnvloedt tijdens de expansie van het Universum

Simultane detectie van GW en EM signalen sluit modified gravity theories uit (arXiv:1710.05901v2)

Een grote klasse scalar-tensor theorieën en DE modellen worden afgekeurd, e.g. covariant Galileon, maar ook andere gravity theorieën die een andere c_g voorspellen zoals Einstein-Aether, Horava gravity, Generalized Proca, TeVeS en andere MOND-achtige modellen

	$c_g = c$	$c_g \neq c$
Horndeski	General Relativity quintessence/k-essence [46] Brans-Dicke/$f(R)$ [47, 48] Kinetic Gravity Braiding [50]	quartic/quintic Galileons [13, 14] Fab Four [15] de Sitter Horndeski [49] $G_{\mu\nu}\phi^\mu\phi^\nu$ [51], $f(\phi)\cdot$Gauss-Bonnet [52]
beyond H.	Derivative Conformal (19) [17] Disformal Tuning (21) quadratic DHOST with $A_1 = 0$	quartic/quintic GLPV [18] quadratic DHOST [20] with $A_1 \neq 0$ cubic DHOST [23]
	Viable after GW170817	Non-viable after GW170817

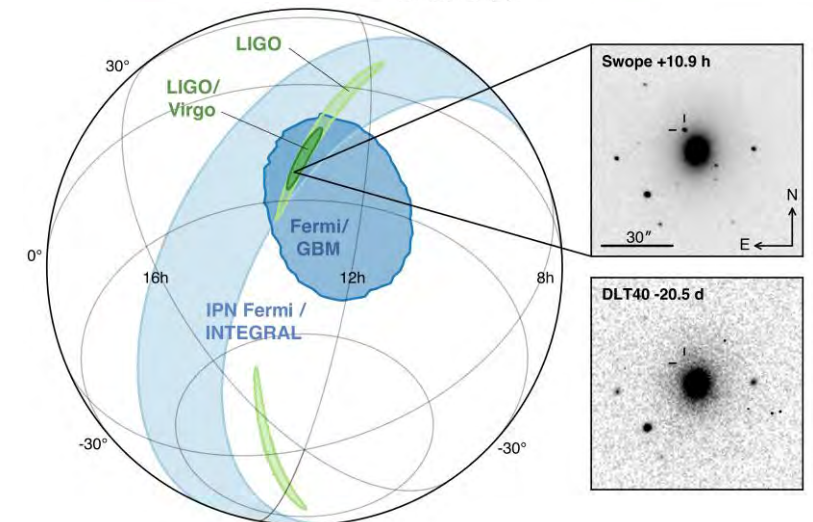
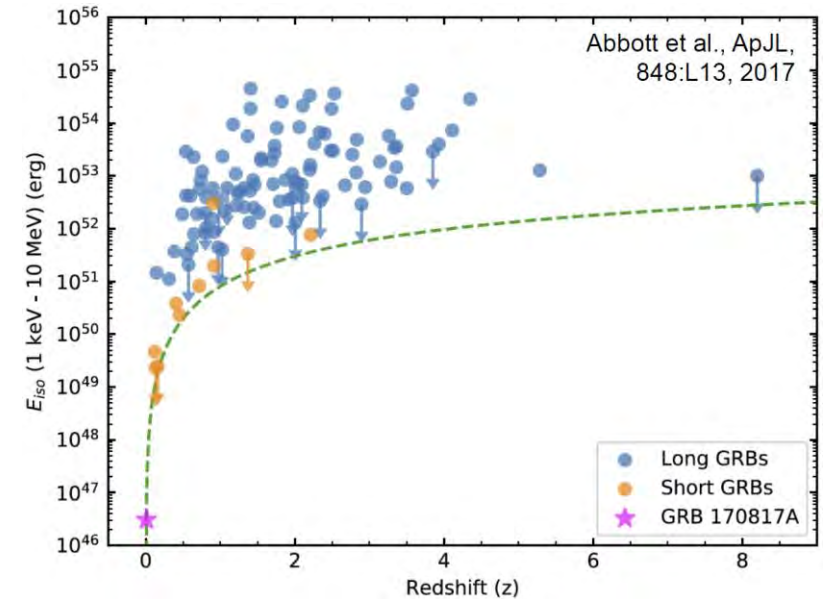
In het hart kijken van een zwakke, maar dichtbij staande sGRB

Zwaartekrachtsgolven hebben de progenitor van de sGRB bepaald en zorgen voor zowel ruimtelijke localisatie en afstand tot de bron. Hierdoor konden astronomen hun EM follow-up van een kilonova starten

Meest dichtbij, maar zwakste sGRB; GW event met hoogste SNR

LIGO/Virgo network liet bron-localisatie toe van 28 (deg)^2 en afstandsmeting van Mpc

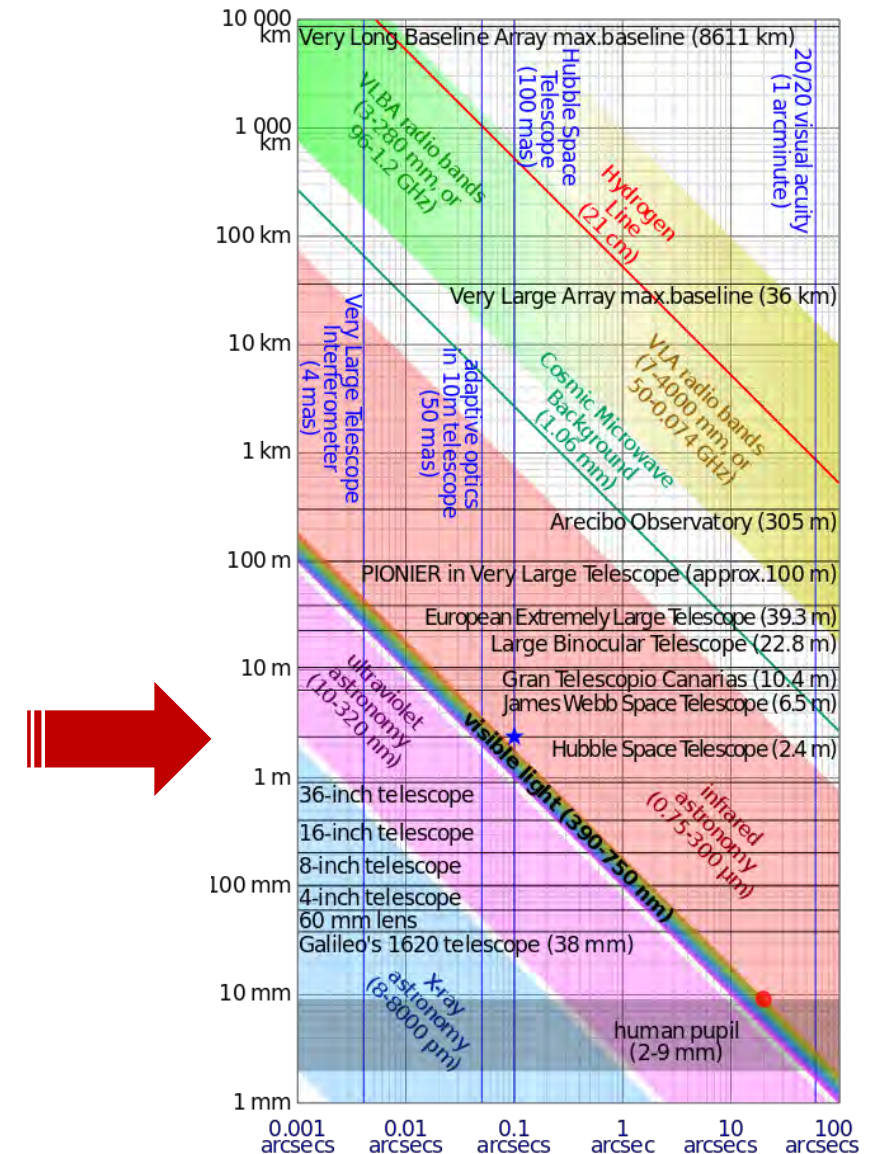
Hierdoor konden astronomen voor het eerst een kilonova bestuderen, de r-proces productie van elementen, voor een snel afzwakkende bron



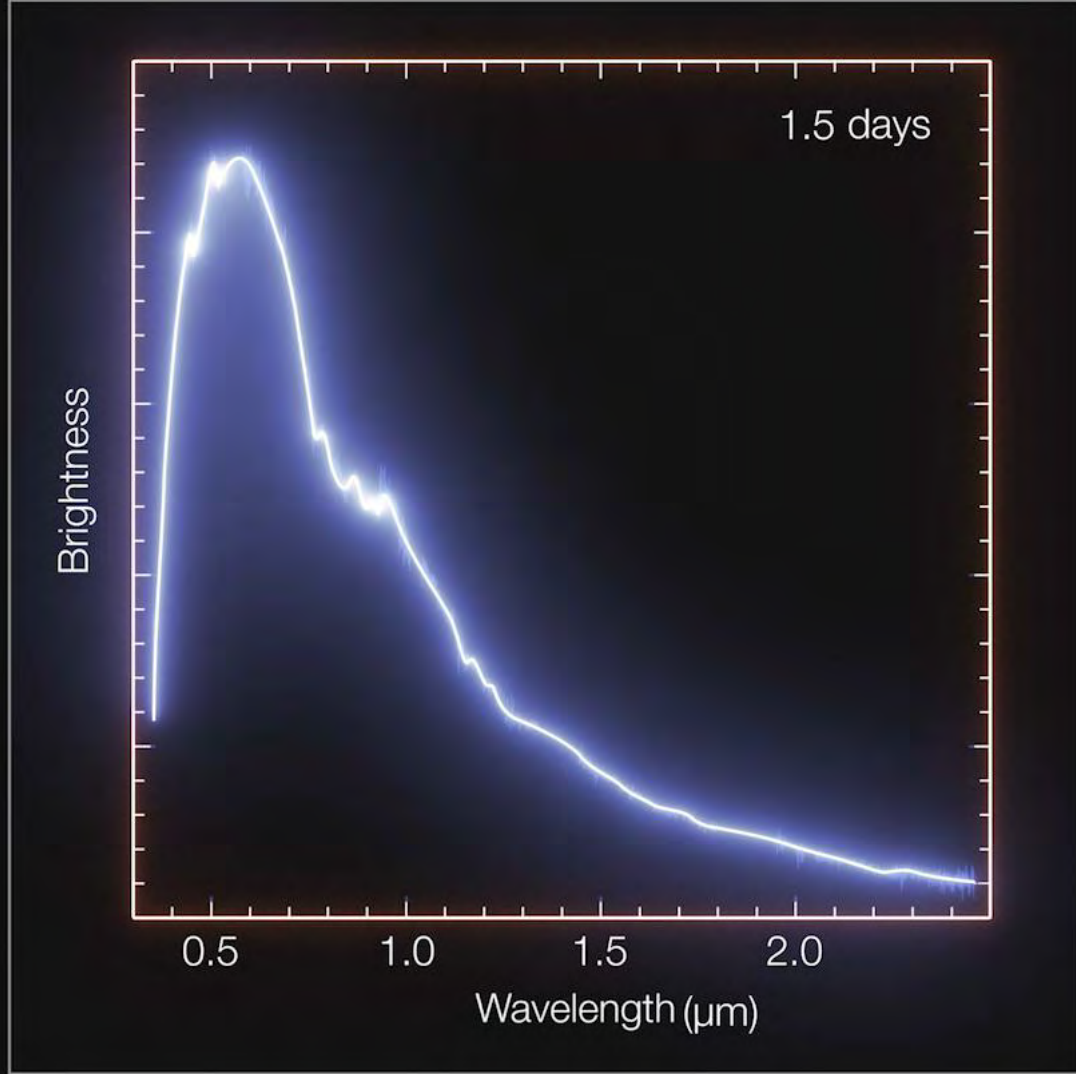
In het hart kijken van een zwakke, maar dichtbij staande sGRB

Zwaartekrachtsgolven laten het toe om ongeveer 1500 omwentelingen van twee sterren (ter grootte van een stad) te zien. We kunnen hieruit baan, chirpmassa, componenten masses, etc. bepalen voor een object op 130 miljoen lichtjaar afstand

Hubble Space Telescope



European Southern Observatory



Waar komen onze elementen vandaan?

Waar komen onze elementen vandaan?

1 H																	2 He		
3 Li	4 Be													5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg													13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr		
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe		
55 Cs	56 Ba			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
87 Fr	88 Ra																		
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U														

Merging Neutron Stars
Dying Low Mass Stars

Exploding Massive Stars
Exploding White Dwarfs

Big Bang
Cosmic Ray Fission

Bestuderen van de structuur van neutronensterren

Getijden laten een afdruk na op de zwaartekrachtsgolven van binaire neutronensterren. Dit levert informatie over hun vervormbaarheid. Om dit beter te kunnen meten, moeten onze instrumenten gevoeliger worden bij hoge frequenties

Zwaartekrachtsgolven van binaire neutronensterren

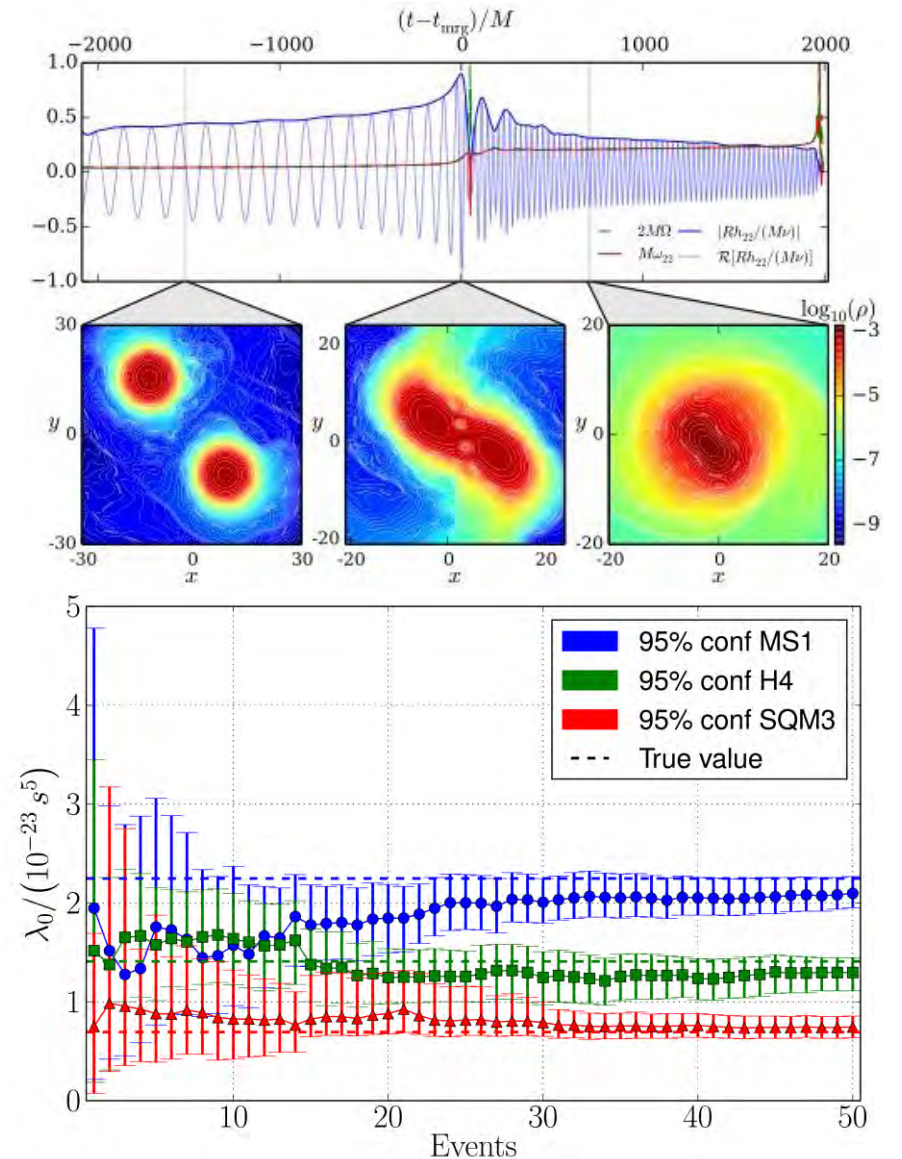
- Als ze dichtbij elkaar zijn, oefenen de sterren getijdenkrachten op elkaar uit, waardoor ze vervormen
- Dit heeft invloed op de baanbeweging
- Effecten van de getijdenkrachten worden weerspiegeld in het patroon van de zwaartekrachtsgolven
- Hieruit kunnen we de toestandsvergelijking van de neutronenster afleiden

Meting van de getijden-deformaties van GW170817

- Meetgegevens komen beter overeen met verwachte signalen van meer compacte neutronensterren
- Een zogenaamde “Soft equation of state”

LIGO + Virgo, PRL 119, 161101 (2017)

Bernuzzi, Nagar, Font, ...



Een nieuwe kosmische meetlat

Met enkele tientallen detecties van binaire neutron-ster botsingen kunnen we de Hubble parameter bepalen met een precisie van ongeveer 1%

Meting van de locale expansie van het Universum

De Hubble constante

- Afstand tot de bron van zwaartekrachtsgolven
- Roodverschuiving uit EM “counterpart” (galaxy NGC 4993)

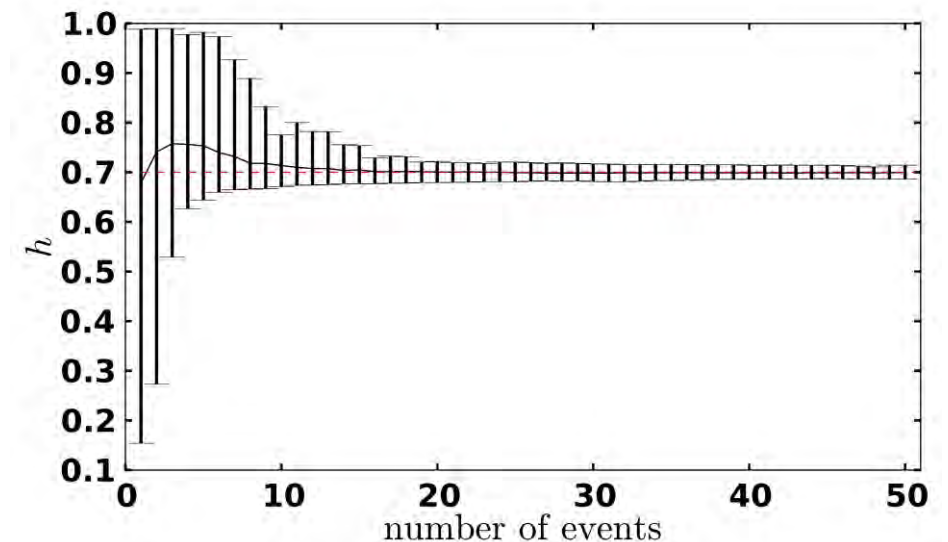
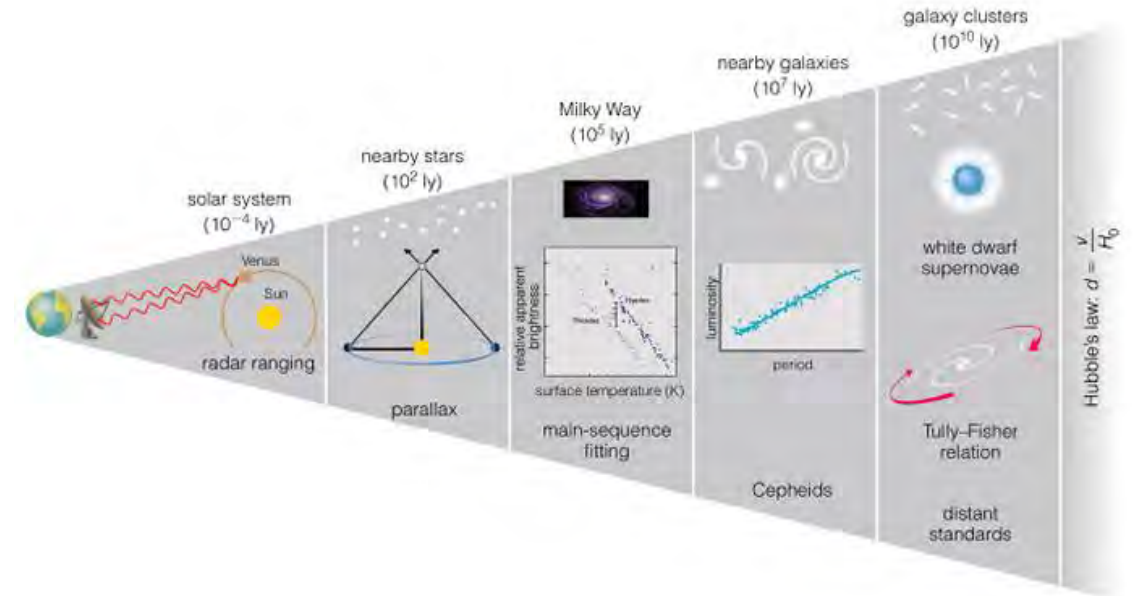
LIGO+Virgo *et al.*, Nature 551, 85 (2017)

GW170817

- Een enkele detectie heeft beperkte nauwkeurigheid
- Met enkele tientallen detecties door LIGO/Virgo kunnen we een O(1%) nauwkeurigheid bereiken

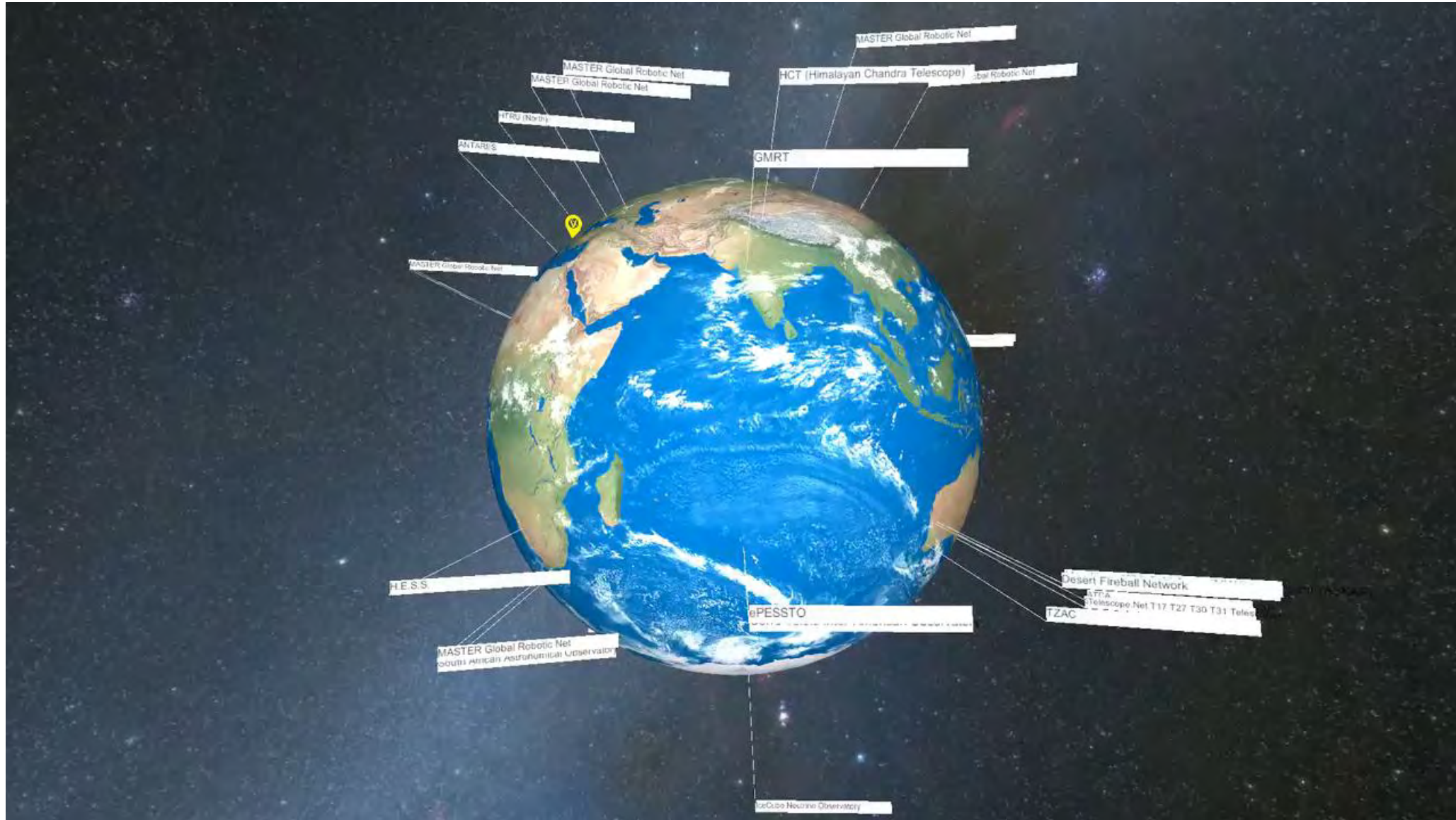
Del Pozzo, PRD 86, 043011 (2012)

Derde generatie observatoria maken studies mogelijk van de toestandsvergelijking van Donkere Energie



Wereldwijde inspanning om GW170817 te observeren

GW170817 bestudeerd door ongeveer 70 observatoria wereldwijd (inclusief Antarctica) en in de ruimte



Wetenschappelijke impact van zwaartekrachtsgolven

Multi-messenger astronomie: een brede gemeenschap is nu afhankelijk van detectie van zwaartekrachtsgolven

Fundamentele fysica

Toegang tot het dynamische sterke-veld regime, nieuwe testen van de algemene relativiteitstheorie

Studies van zwarte gaten: inspiral, merger, ringdown, quasi-normal modes, echo's

Lorentz-invariantie, equivalentieprincipe, polarisatie, pariteitsschending, axionen

Astrofysica

Eerste observatie van de samensmelting van een dubbele neutronenster, relatie tot sGRB

Bewijs voor een kilonova, verklaring voor het ontstaan van elementen zwaarder dan ijzer

Astronomie

Start van zwaartekrachtsgolven-astronomie, populatiestudies, formatie van progenitors, remnant studies

Kosmologie

Binaire neutronensterren kunnen dienst doen als standaard “sirenen”

Donkere Materie en Donkere Energie

Kernfysica

Getijde-interacties tussen neutronensterren worden “afgedrukt” op zwaartekrachtsgolven

Toegang tot de toestandsvergelijking

LVC komen eind dit jaar terug met verbeterde instrumenten voor de volgende meetperiode (O3)

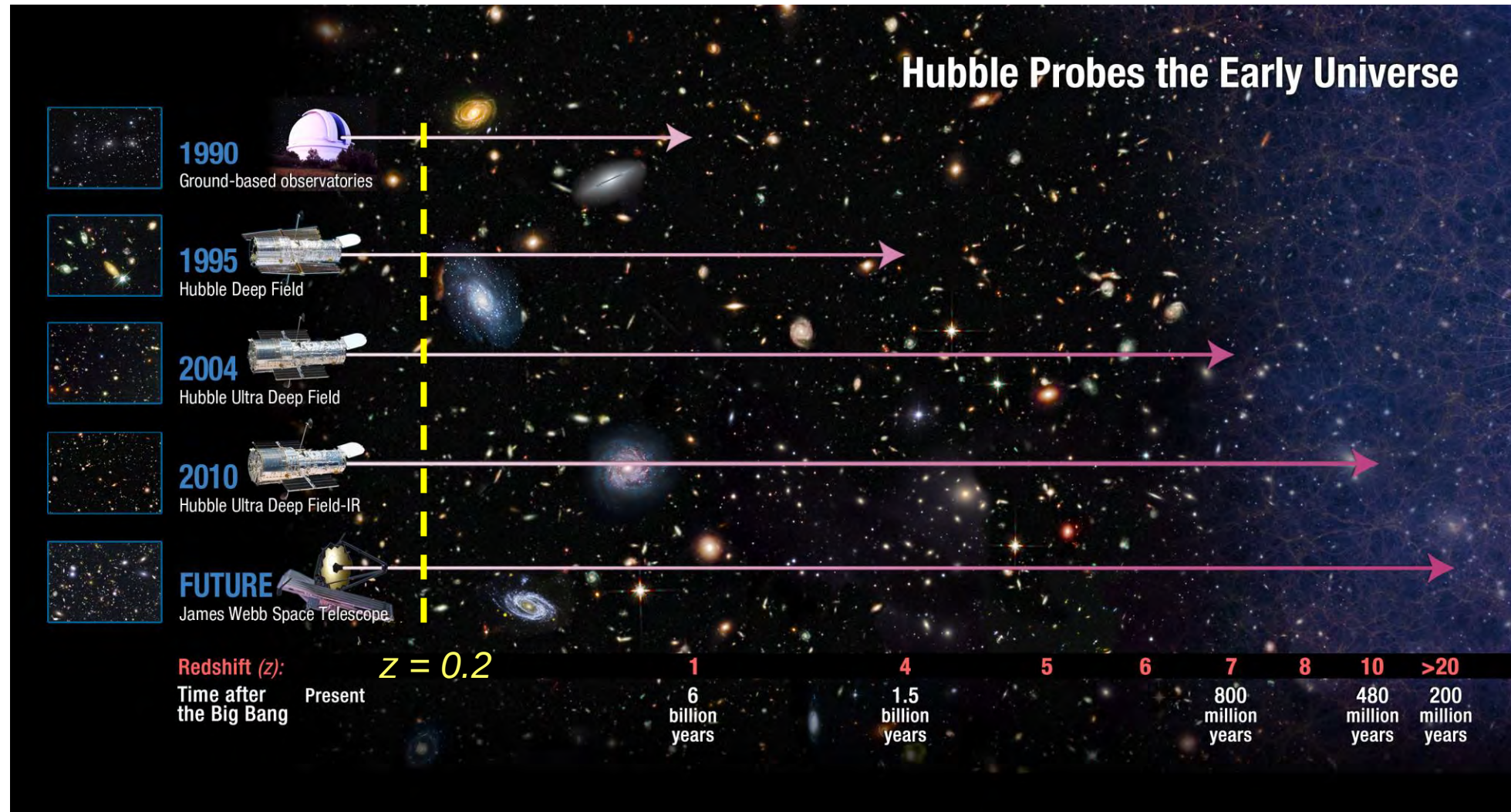


Einstein Telescope: ziet alle BBH-botsingen in het Universum

Dit is niet mogelijk met bestaande faciliteiten en vereist een nieuwe generatie observatoria voor zwaartekrachtsgolven

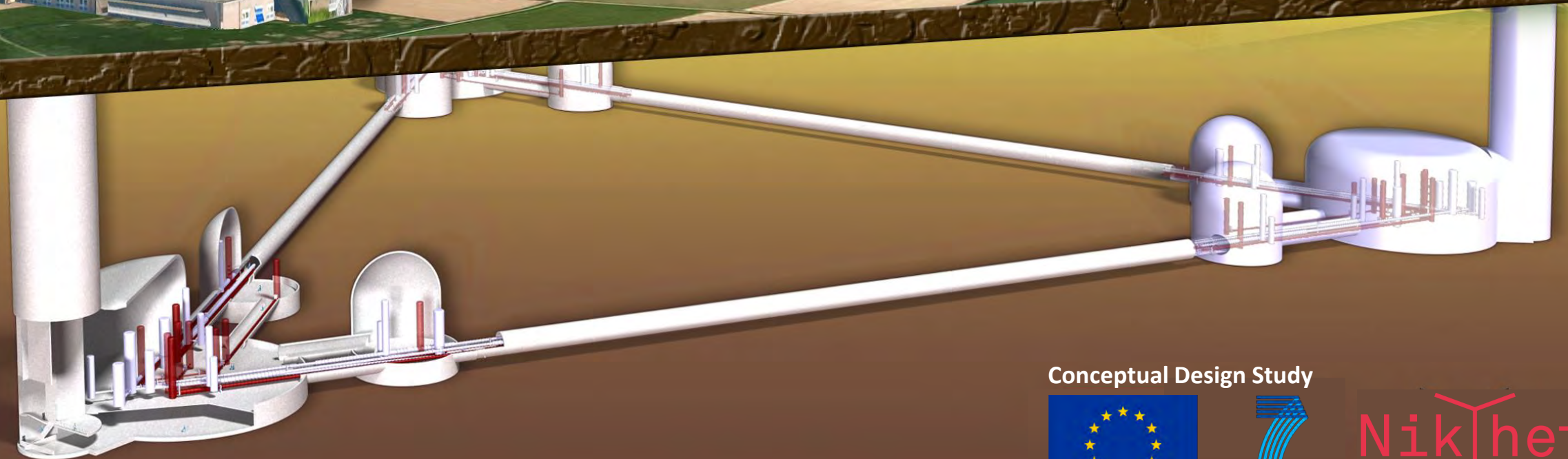
We willen miljoenen BBH gebeurtenissen meten, met hoge SNR, verdeeld over een groot bereik in z ($z < 20$)

Dit laat statistische analyses van data versus roodverschuiving mogelijk, massaverdelingen, etc.



Einstein Telescope

*Het nieuwe observatorium voor zwaartekrachtsgolven
Een gecoördineerde inspanning samen met de VS voor
een globaal 3G netwerk ...*



Conceptual Design Study



Nikhef

Keuze van locatie

We hebben 16 merendeels ondergrondse locaties bestudeerd, waarvan 14 in Europa. Naast de site in B-D-N zijn ook mogelijke locaties in Sardinië, Spanje en in Hongarije van goede kwaliteit

Seismische studies

In totaal 16 metingen in 11 landen

- Europa
- KAGRA, Japan
- Homestake, USA

KNMI seismisch meetstation in Nederland

Permanente ondergrondse meetstations zijn opgezet voor Einstein Telescope in Sardinië en in Hongarije

De Nederlandse site:

- Geologie van de Limburgse ondergrond
- Geen naburige verstorende activiteiten
- Vervolgstudies zijn geplanned
- Excellente verbindingen
- Internationale samenwerking met excellente kennisinstellingen
- Expertise van onze industrie



Data collected from these sites

3rd party data obtained and analyzed from these sites

Mark Beker,
David Rabeling
Nikhef
KAGRA,
Homestake,
INFN, Hungary



Samenwerking met instituten in België en Duitsland

De beste instituten van Nederland, België en Duitsland zullen samenwerken met top-instituten wereldwijd. Einstein Telescope zal als een magneet werken voor het aantrekken van internationaal toptalent

Uitstekende locale contacten met AEI Max Planck, Fraunhofer, RWTH Aachen in Duitsland, KU Leuven en University of Liège in België, vijf universiteiten in Nikhef en Maastricht University

LIGO Virgo Collaboration heeft ongeveer 1500 actieve wetenschappers in 140 institutes, terwijl MOUs met 95 samenwerkingsverbanden in de astronomie bestaan. De beste instituten en wetenschappers zijn betrokken



Nationale belang inmiddels in nationale nota's vastgelegd

Einstein Telescope krijgt veel support uit de wetenschap: de KNAW agenda grootschalige onderzoeksfaciliteiten, de PCGWI (door NWO benoemd). ET is gamechanger in NWA route 2



KONINKLIJKE NEDERLANDSE
AKADEMIE VAN WETENSCHAPPEN

KNAW-AGENDA GROOTSCHALIGE ONDERZOEKSFACILITEITEN



1 Miljard extra voor onderzoek en innovatie

15 september 2016



39 | Domain – Science/Technology

ET

'Listening' to the universe

Einstein Telescope (ET) is the European Initiative for a third-generation, underground gravitational wave observatory, designed to detect gravitational waves from space. South Limburg is a potential candidate for establishing this European facility.

Gravitational waves are small ripples in spacetime. Albert Einstein already predicted their existence in 1916. A hundred years later they were actually detected by the LIGO detector in the US. This discovery gave rise to an entirely new field of research in which astrophysics, cosmology and fundamental physics converge.

For centuries, human beings have studied the universe by examining electromagnetic radiation such as light. But not every cosmic object emits radiation, and not all radiation reaches our detectors, because it could be blocked by cosmic dust, for example. Gravitational waves, however, fly through the universe unimpeded. The ET will therefore be able to detect signals from the farthest reaches of outer space.

Gravitational waves betray their presence by the minute distortion of the two kilometre-long arms of a gravitational wave detector, which consequently take on different lengths. In order to measure these differences in length (10^{-18} m, smaller than the diameter of the nucleus



National Roadmap Large-Scale Scientific Infrastructure

of an atom), researchers use rebounding beams of laser light. The ET will have six of these interferometers, each 10 kilometres long. The ET will therefore be far more sensitive than the current generation of detectors, capable of increasing the number of observations by a factor of approximately 1,000. In order to prevent interference from disruptive external vibrations as much as possible, the telescope is going to be built about 200 metres underground.

The ET's great measuring accuracy and vibration frequency range will make it possible to study the most powerful phenomena in outer space. The ET will also provide observational data in the area of quantum gravity, which is where Einstein's general theory of relativity meets quantum physics. The ET will therefore steer us towards the correct theory of gravity.

The preliminary design of the ET has already been completed; the 'programme of requirements' is under preparation. In phase 1 research will be conducted on the optimal location (definitive choice is expected around 2020), the schedule and the funding, after which the telescope will be built in phase 2.

The ET is an initiative of ten European institutes, with NIKHEF as the Netherlands' participating party. The research team currently consists of more than 220 researchers from 57 research institutes.



Wereldwijde steun voor onderzoek zwaartekrachtsgolven

LIGO en Virgo nu operationeel. LIGO-India en KAGRA in Japan onder constructie. ESA lanceert LISA in 2034. Einstein Telescope ontwerpstudie door EU gefinancierd, steun van APPEC EU, support by APPEC

Onderzoek naar zwaartekrachtsgolven

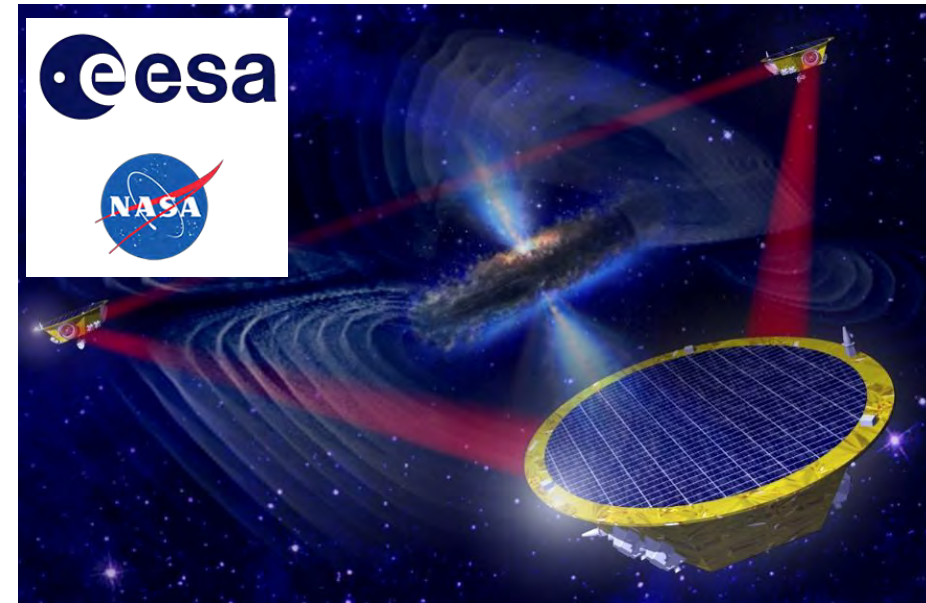
- LIGO en Virgo operationeel
- LIGO-India en KAGRA onder constructie
- ESA en NASA kiezen voor LISA
- Pulsar Timing Arrays, zoals EPTA en SKA
- Kosmische Microgolf Achtergrondstraling

Einstein Telescope

- Ontwerp door EU FP7 gefinancierd
- APPEC plaatst ET prominent op Roadmap

Volgende stappen

- Verdere samenwerking België, Nederland en Duitsland
- ESFRI Roadmap



Einstein Telescope en CERN

CERN zou een grote rol kunnen spelen in onze “quest” voor Einstein Telescope. Er is sterke wetenschappelijke overlap, en we zouden ons voordeel kunnen doen met de bestaande expertise en middelen

Wetenschap

Gravitatie is een fundamentele interactie met belangrijke open wetenschappelijke vragen

GWs vormen het dynamische deel van gravitatie

Er is grote wetenschappelijke interesse vanuit de HEP gemeenschap

Betrek GW wetenschappers in de naderende discussie rond de EU HEP Strategy

Governance

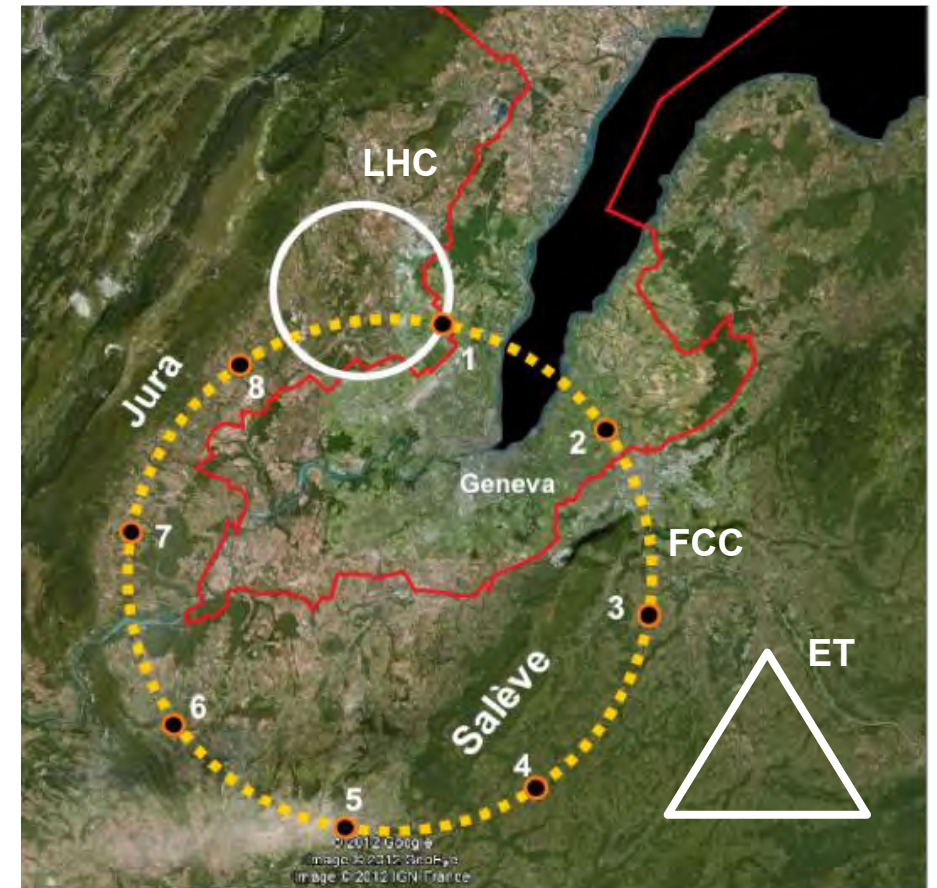
Financieel en project management

Excellente, robuuste en bewezen organisatie

Technisch

Vacuum infrastructure, ondergrondse constructie

Cryogenics, controls



Bedankt voor uw aandacht!

