

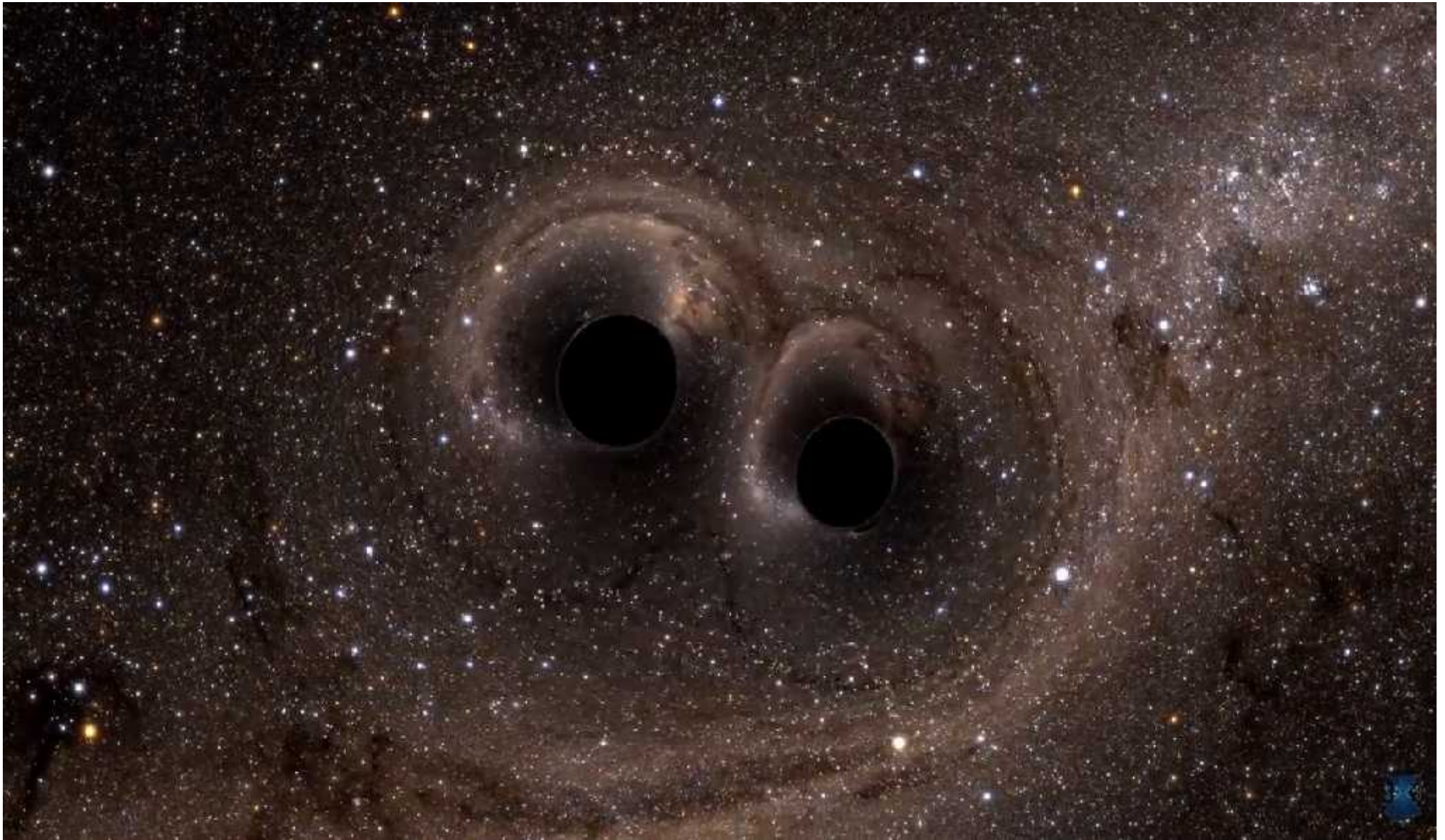
100 jaar Algemene Relativiteitstheorie

een inkompleet stukje geschiedenis met een goede portie
natuurkunde

23 januari 2017
Laura van der Schaaf

... een verhaal dat nog veel eerder begonnen is ...

$1.3^{+0.5}_{-0.6} \cdot 10^9$ jaren geleden



Toen de eerste eucaryonten op aarde ontstonden

Galileo (1564-1642)

- 80 jarige oorlog
- Beweging in gravitatie veld hangt niet af van de massa
- Introduceerd notie van relativiteit en referentie stelsels



1971, David Scott, Apollo 15 mission



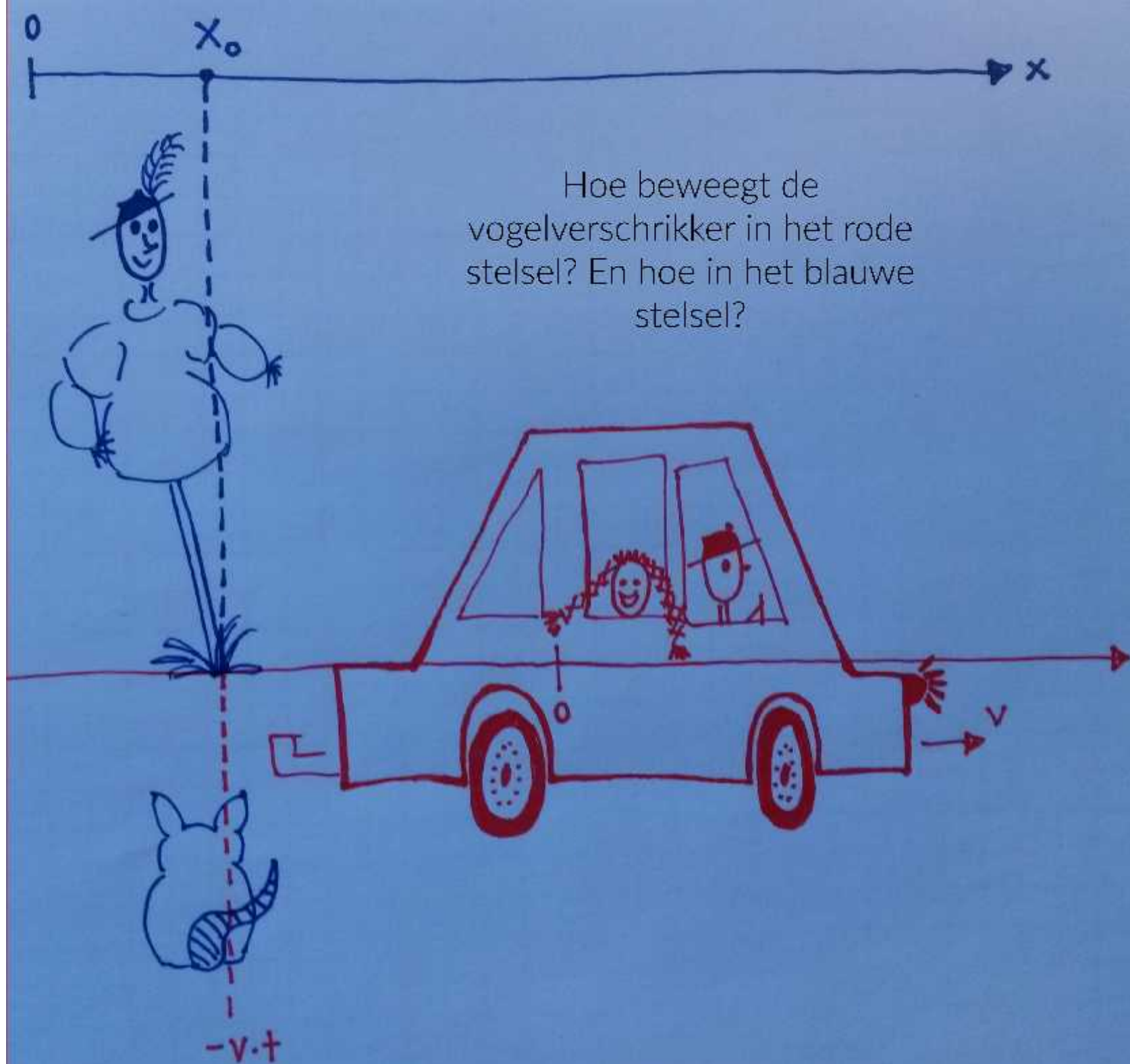
Galileo (1564-1642)

- 80 jarige oorlog
- Beweging in gravitatie veld hangt niet af van de massa
- Introduceerd notie van relativiteit en referentie stelsels



1971, David Scott, Apollo 15 mission



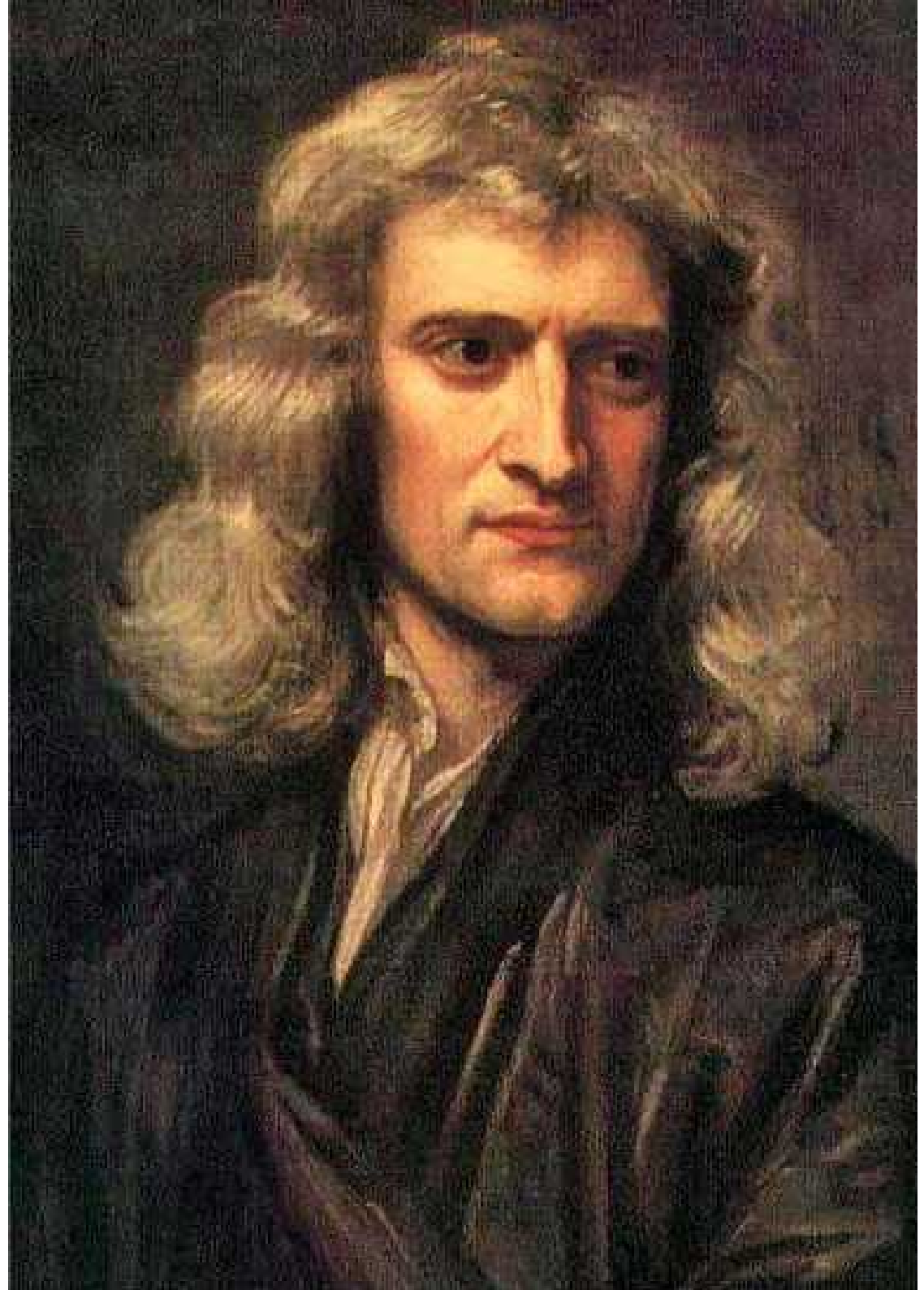


Newton

(1643-1727)

- Tijd van Engels-Nederlandse oorlogen en de 30 jarige oorlog
- Klassieke mechanika

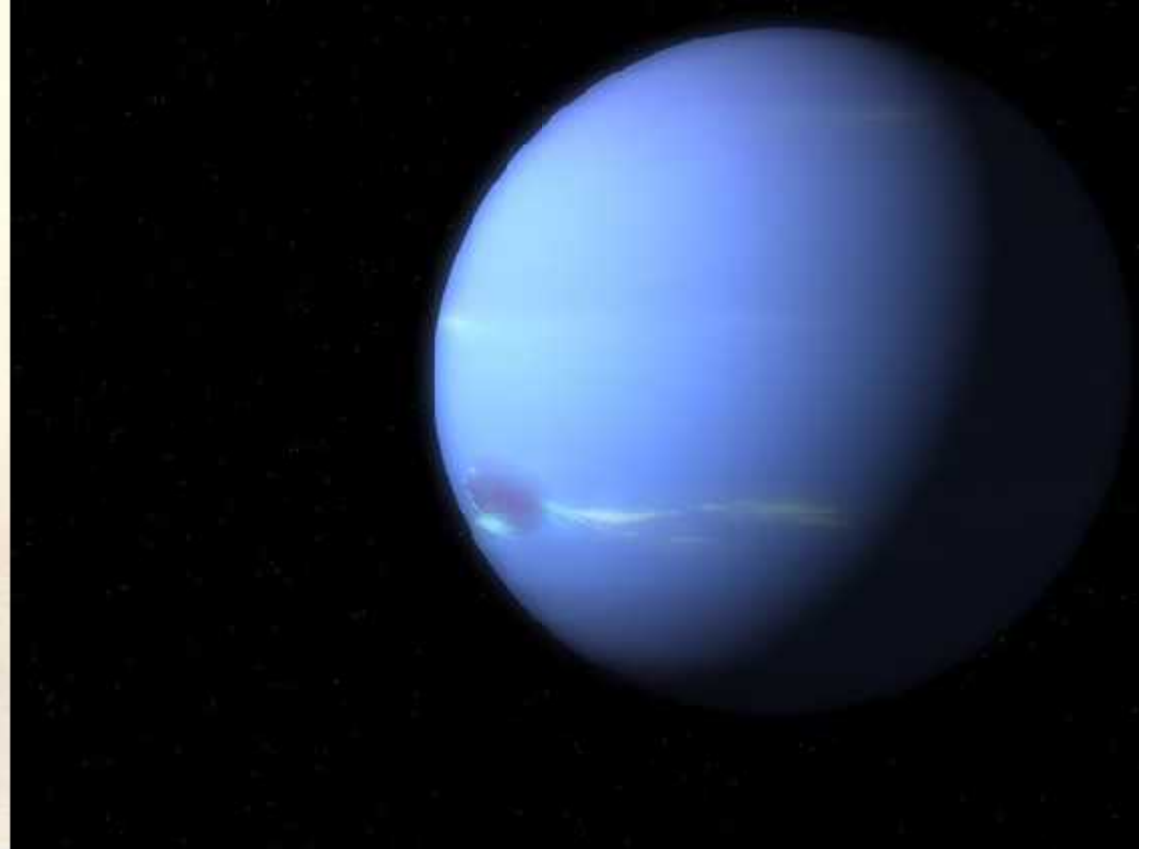
Gravitatie wet van Newton:



Meetingen van Alexis Bouvard en de voorspelling van Neptunus

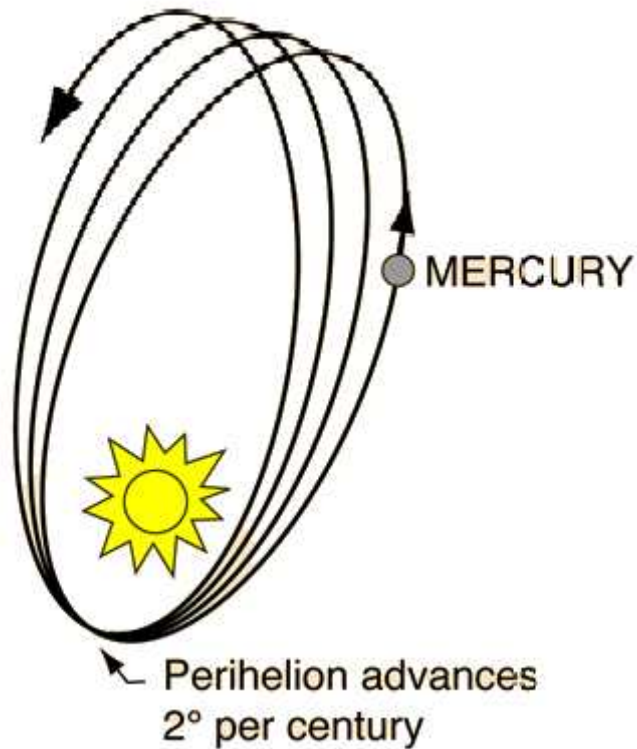


(1767-1843)



Voorspelling door Adams en Verrier in 1843
Ontdeking door Galle en d'Arrest in 1846

Meetingen van Verrier en de perihelion precessie van Mercurius

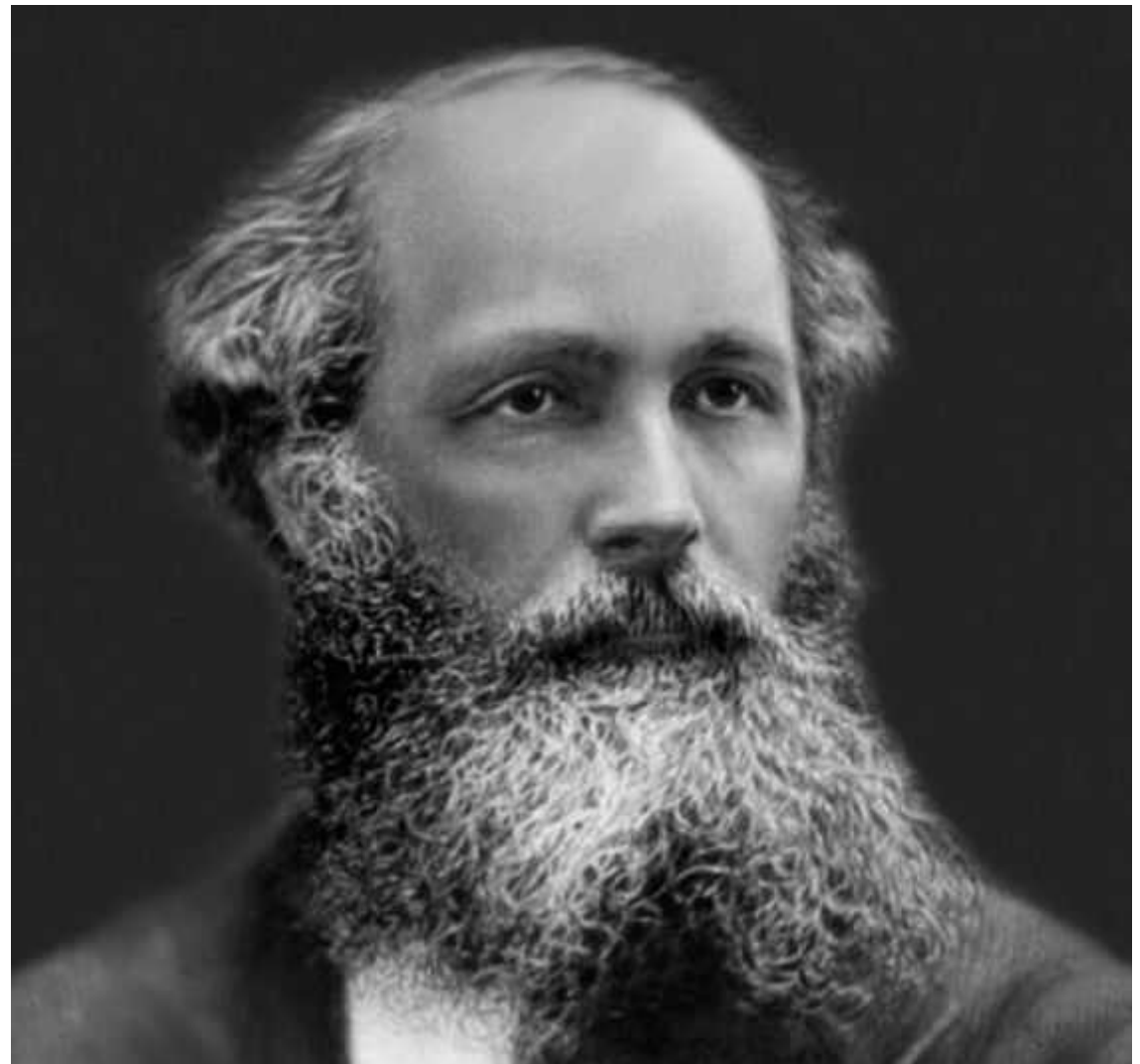
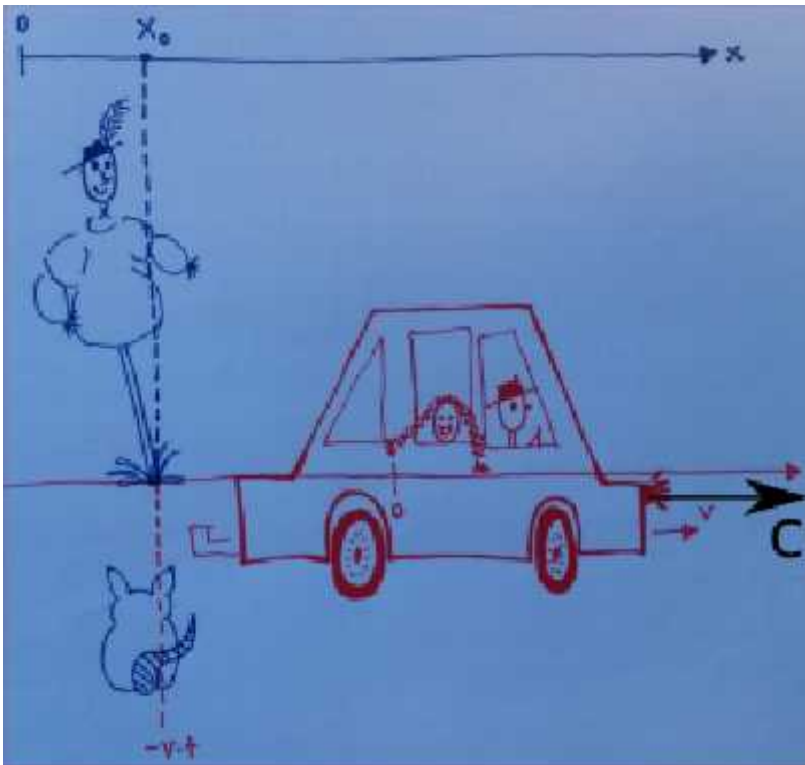


Kan niet verklaard worden door de bekende planeten → Vulcanus postuleerd maar nooit gevonden

Elektrische kracht en magnetische
kracht vereent in een set formulas

Lichtsnelheid een konstante
(onafhankelijk van referentie stelsel)

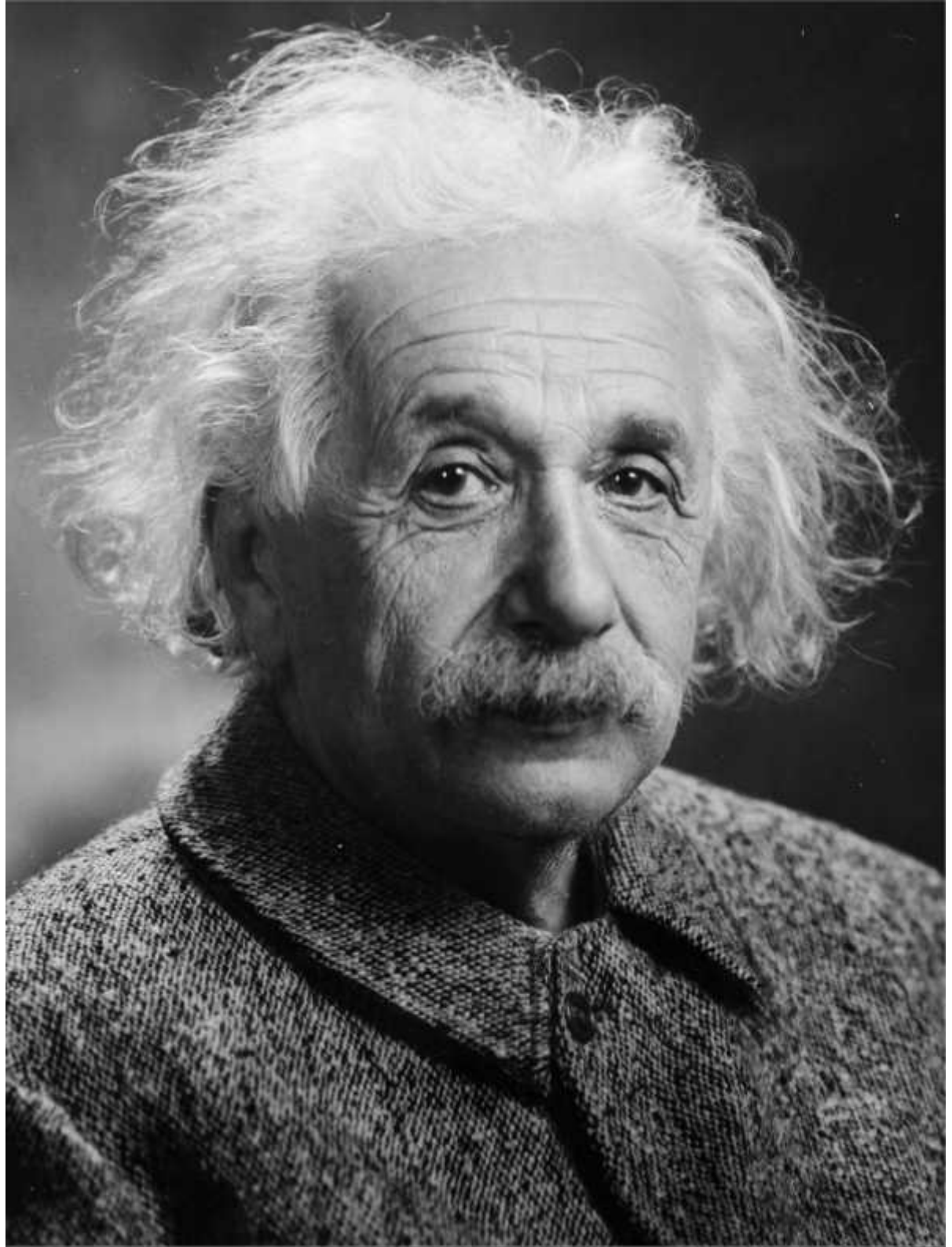
→ Probleem met de referentie
stelsels van Galileo



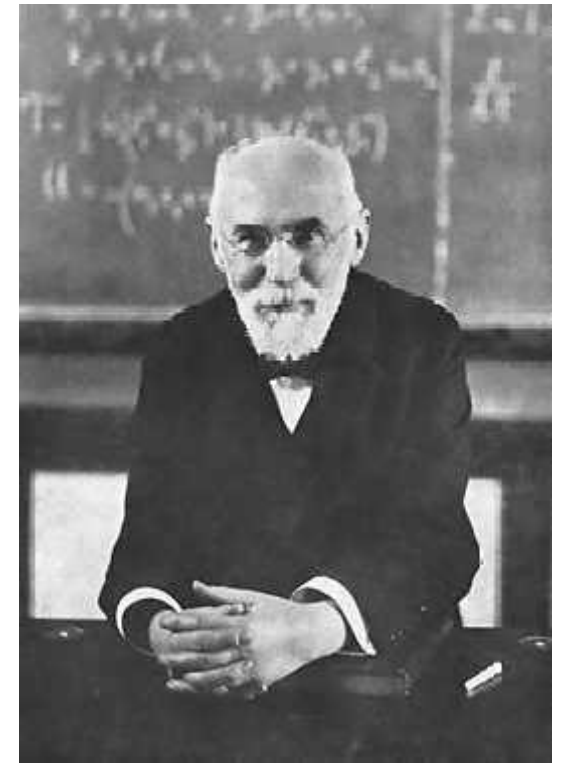
Maxwell (1831-1879)

Einstein (1879-1955)

- Geboren in Ulm, Duitsland
- 1848 krijgt een kompas cadeau
- 1894 verhuisd naar Italië
- 1895 gaat naar school in Aarau, CH
- 1896 begint studie aan de ETH en geeft Duitse staatsburgerschap op
- 1900 rond studie af
- 1901 word Zwitserse burger
- 1902 werkt als patent klerk
- 1905 annus mirabilis:
 - Fotoelektrisch effect
 - Speciale relativiteits theorie
- 1911 verhuisd naar Prague voor professor
- 1912 Zürich voor professor
- 1914 Berlijn professor
- 1915 algemene relativiteits theorie
- 1919 word weer Duitse burger, Eddington experiment
- 1921 Nobel prijs
- 1933 verhuisd naar de USA
- 1939 brief naar Roosevelt voor een programma voor de atoom bom
- 1940 word US burger, blijft Zwitserse burger



De speciale relativiteits theorie of hoe snel gaat het licht?



Lorentz (1853-1928)

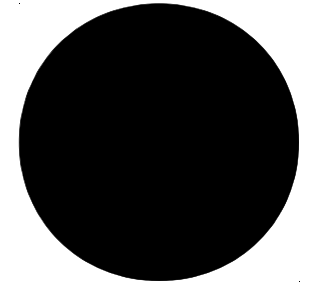
De algemene relativiteits theorie of waar is deze hond?



De algemene relativiteits theorie of waar is deze hond?



De algemene relativiteits theorie of waar is deze hond?



Twée vergelijkingen

(sorry ... ze zijn wel erg mooi!)

Wat is de metriek voor een een energie verdeling?

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

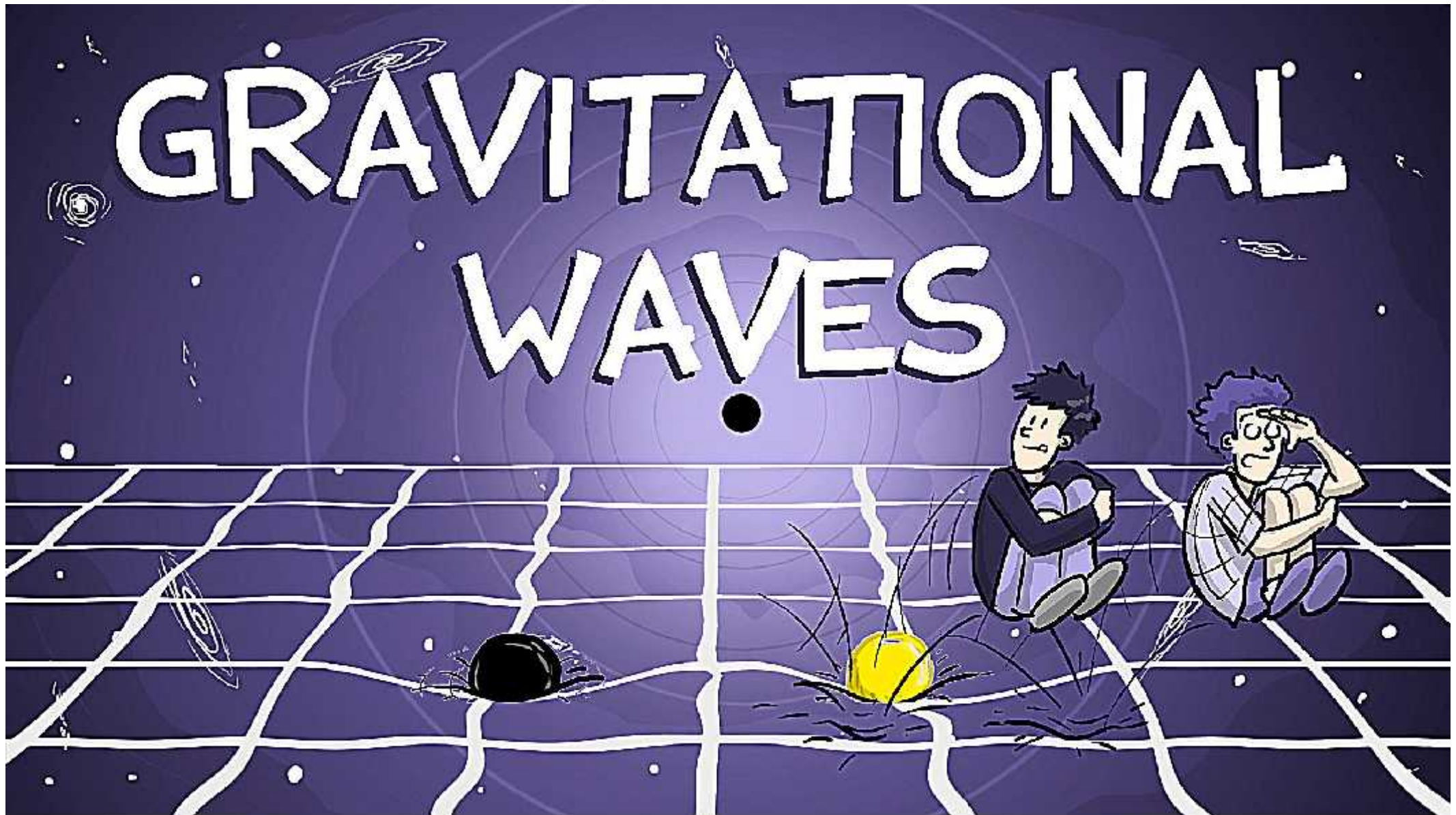
(Einstein vergelijking)

Hoe beweegt een box wanneer ik de metriek ken?

$$\frac{d^2 x^\mu}{d\lambda^2} + \Gamma_{\rho\sigma}^\mu \frac{d^2 x^\rho}{d\lambda} \frac{d^2 x^\sigma}{d\lambda} = 0$$

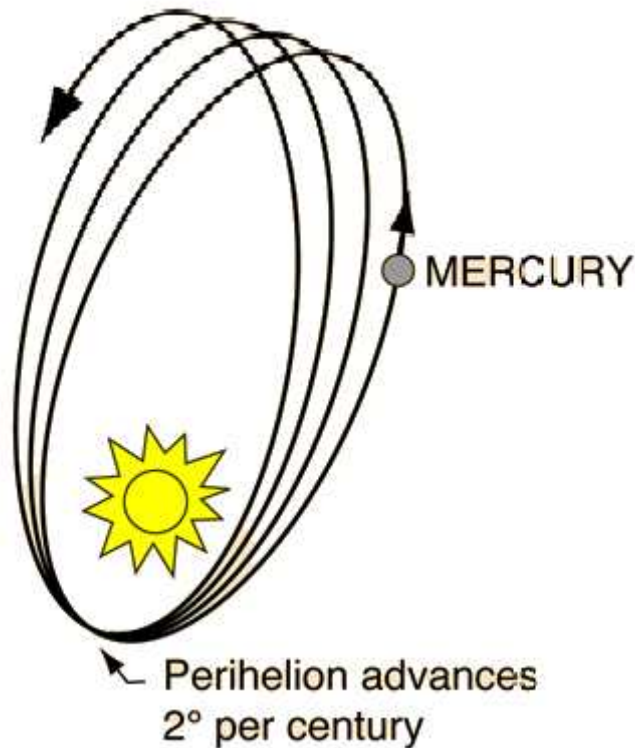
(geodesic equation)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$



Maar zo ver zijn we nog niet ...

Meetingen van Verrier en de perihelion precessie van Mercurius



Kan niet verklaard worden door de bekende planeten → Vulcanus postuleerd maar nooit gevonden

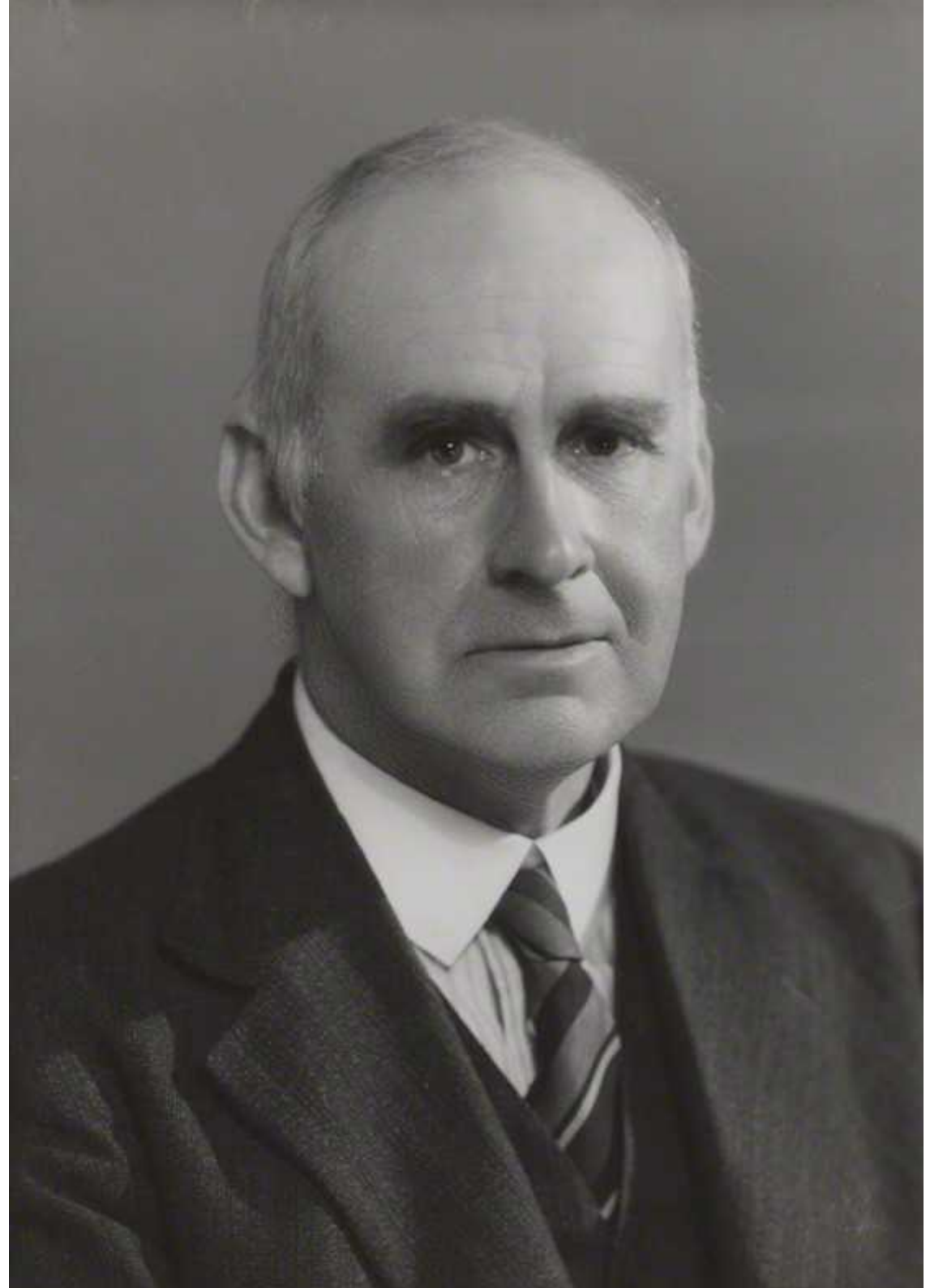
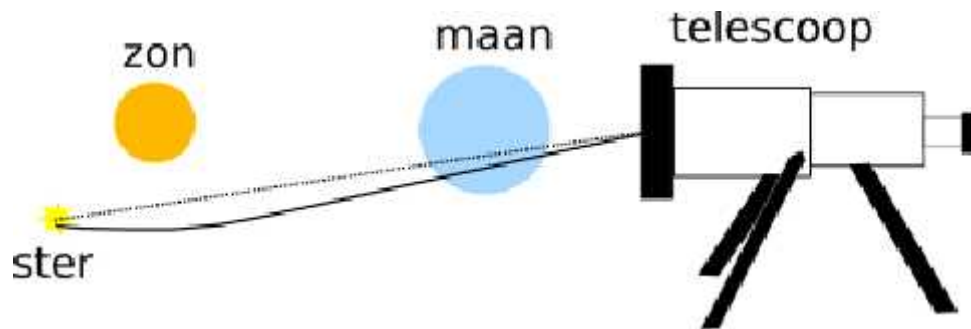


Precessie verklaard in de algemene relativiteitstheorie

Eddington

(1882-1944)

Op pad om Einstein gelijk te
geven kort na de eerste
wereld oorlog



Afbuiging van licht

New York Times,
Nov. 10, 1919

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
		$1.42 \text{ to } 2.16$
		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	$1.28 \text{ to } 2.13$
20 May 1947	Brazil	2.01 ± 0.27
25 Feb 1952	Sudan	1.70 ± 0.10
30 Jun 1973	Mauritania	1.66 ± 0.19

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.

CONFIRMED

Een hint voor gravitatie golven: PSR B1913+16



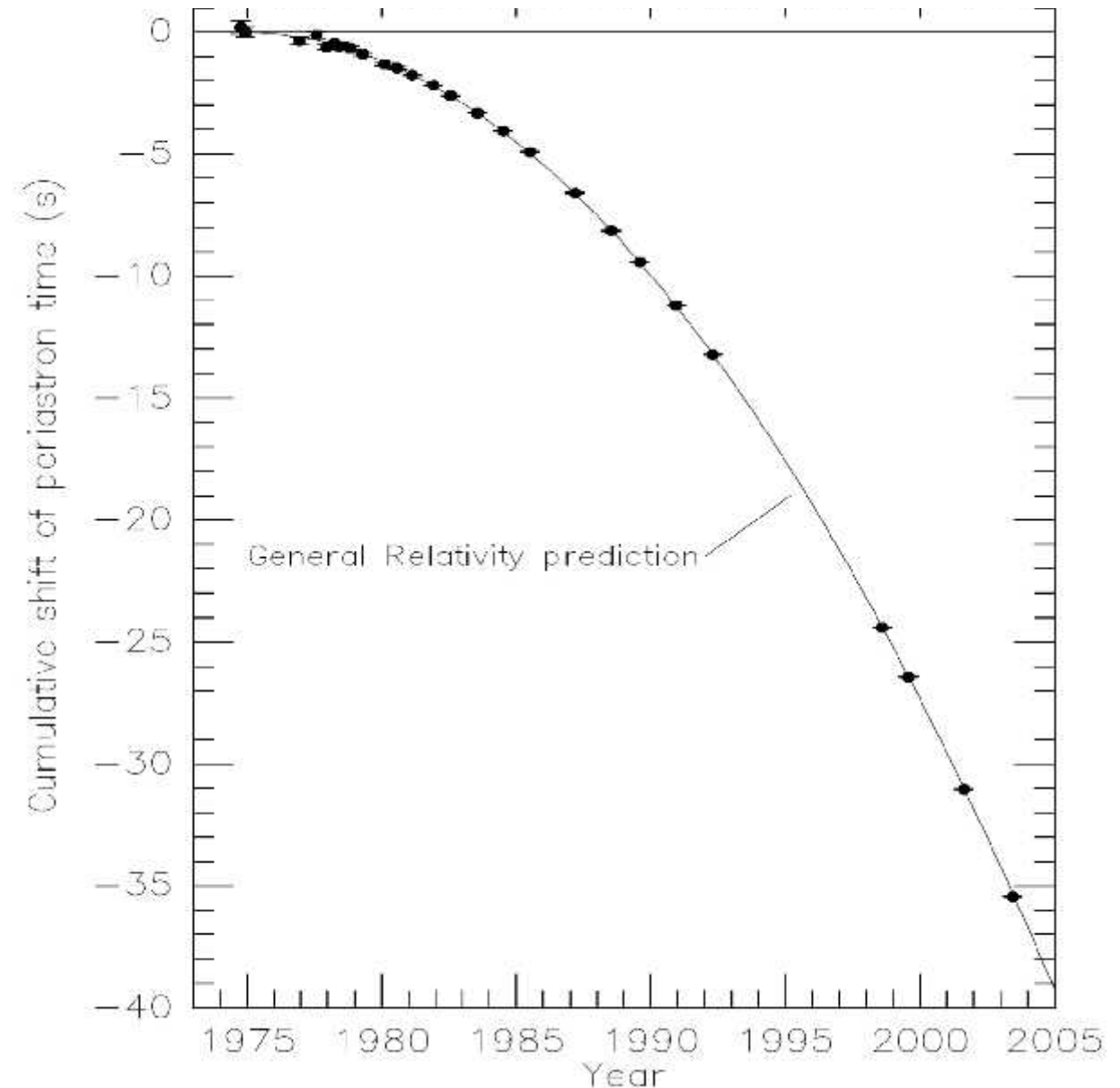
Russell A. Hulse
Joseph H. Taylor, Jr.
1974: eerste detektie van
een dubbelpulsar

Periode ~ 8 h

Periode neemt af met de tijd

1993: Nobel prise voor de
detektie van een
dubbelpulsar

Data volgt de voorspelling



Hafele-Keating experiment in 1971



- Tijd gaat langzamer wanneer een klok beweegt ten opzichte van de observer
- Tijd gaat langzamer wanneer de klok dichterbij de aarde is

Hafele–Keating experiment in 1971

Results [\[edit \]](#)

The results were published in *Science* in 1972:^{[\[1\]](#)[\[2\]](#)}

	nanoseconds gained			
	predicted			measured
	gravitational (general relativity)	kinematic (special relativity)	total	
eastward	+144 ±14	−184 ±18	−40 ±23	−59 ±10
westward	+179 ±18	+96 ±10	+275 ±21	+273 ±7

- Tijd gaat langzamer wanneer een klok beweegt ten opzichte van de observer
- Tijd gaat langzamer wanneer de klok dichterbij de aarde is

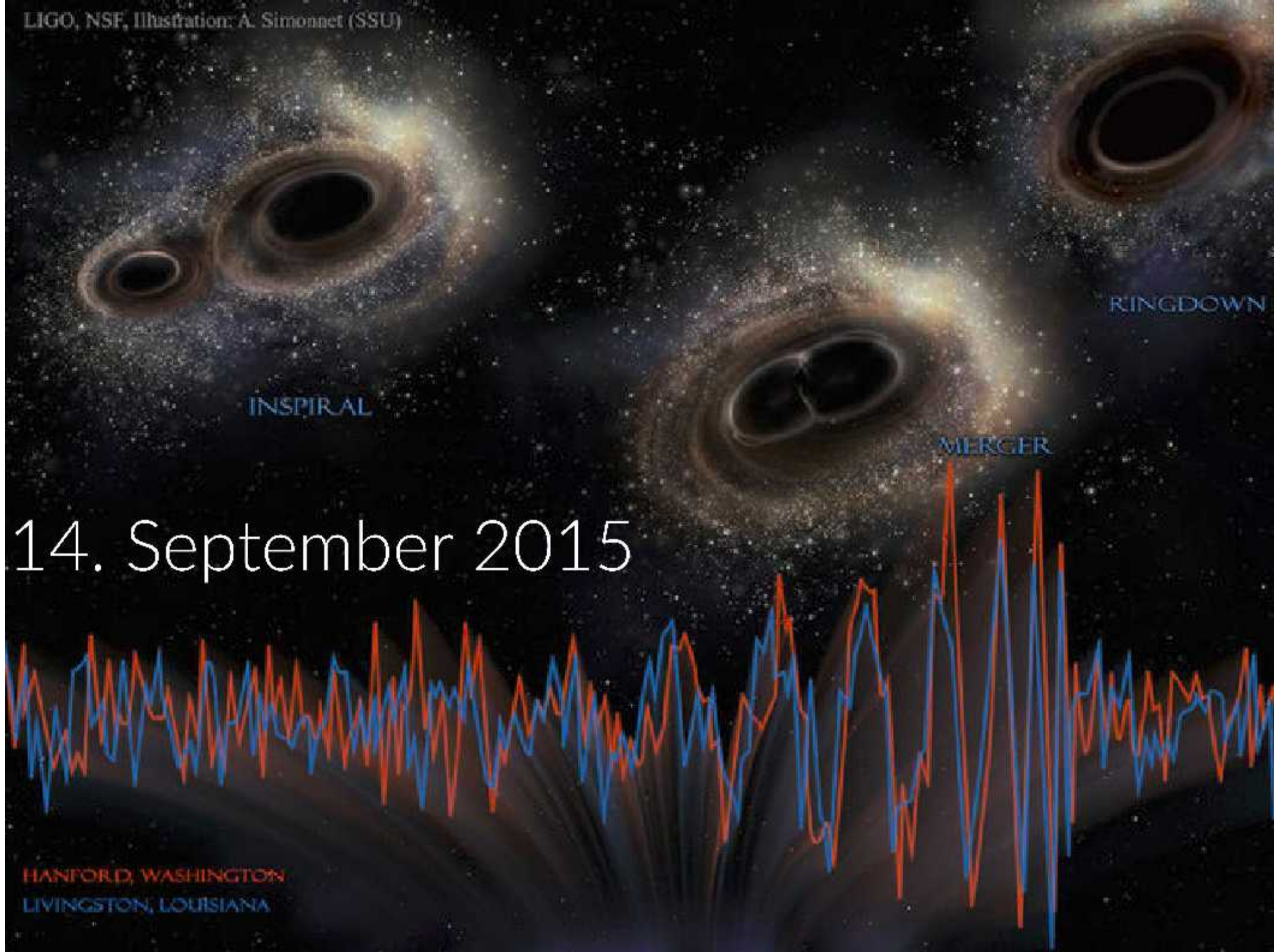
INSPIRAL

MERGER

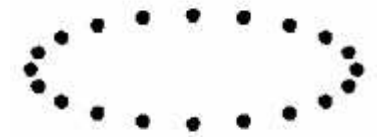
RINGDOWN

14. September 2015

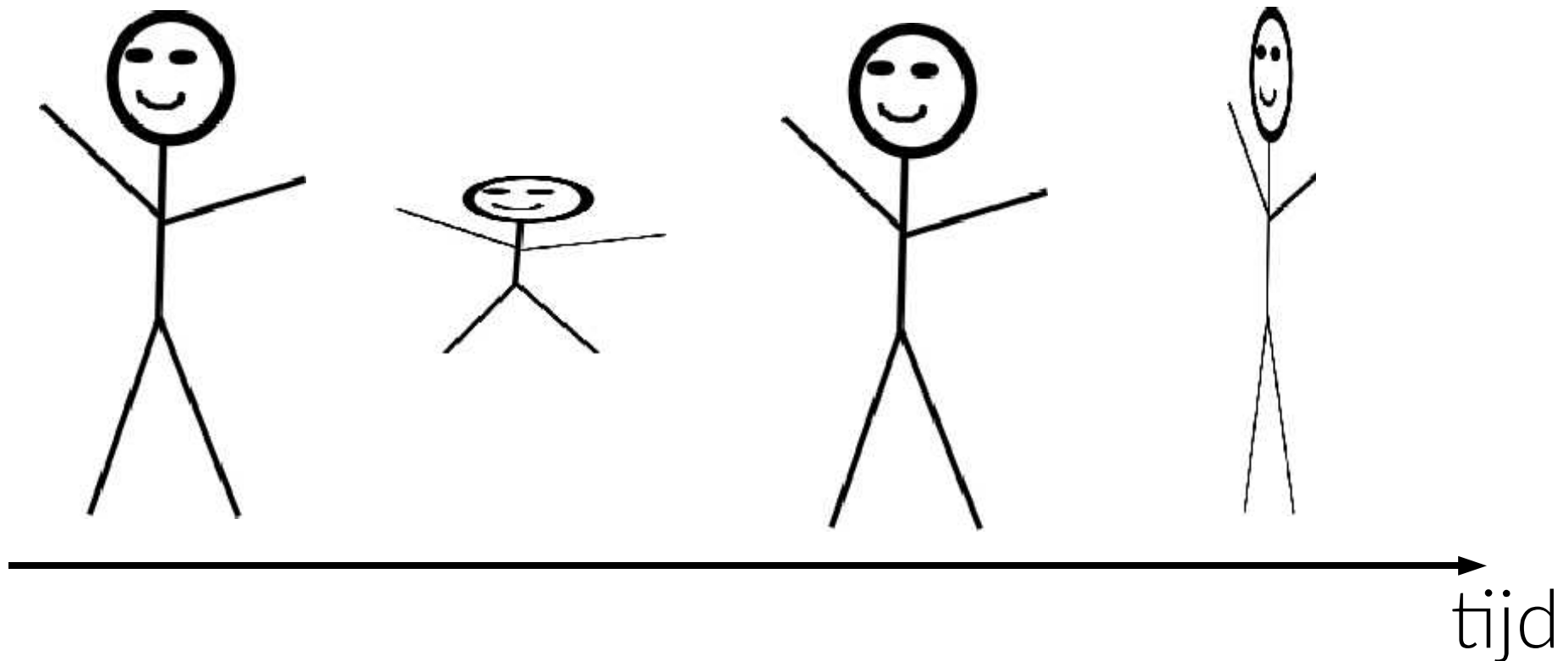
HANFORD, WASHINGTON
LIVINGSTON, LOUISIANA



Wat gebeurt wanneer een gravitatie golf voorbei komt?

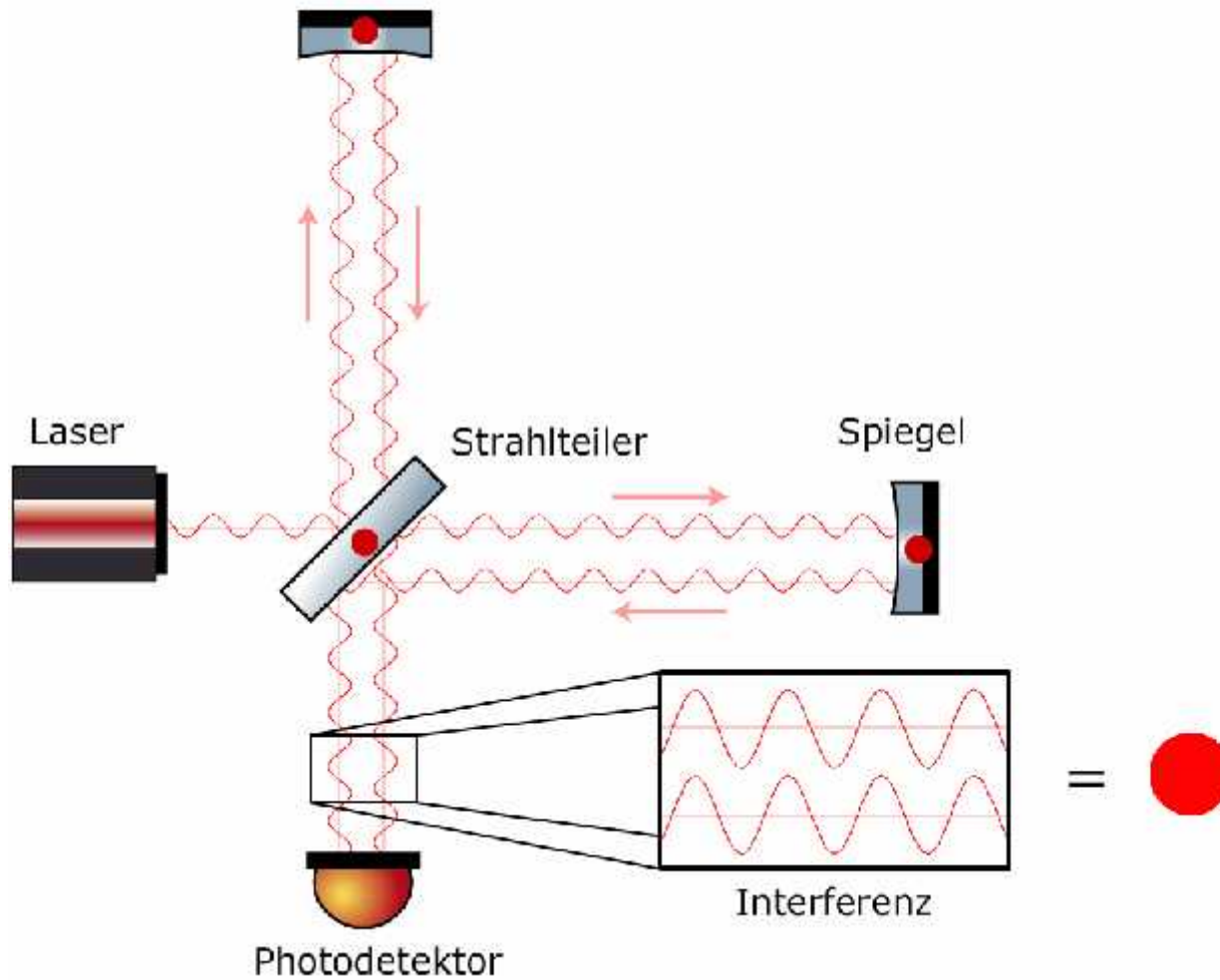


Vrij vliegend mens in het heelal:

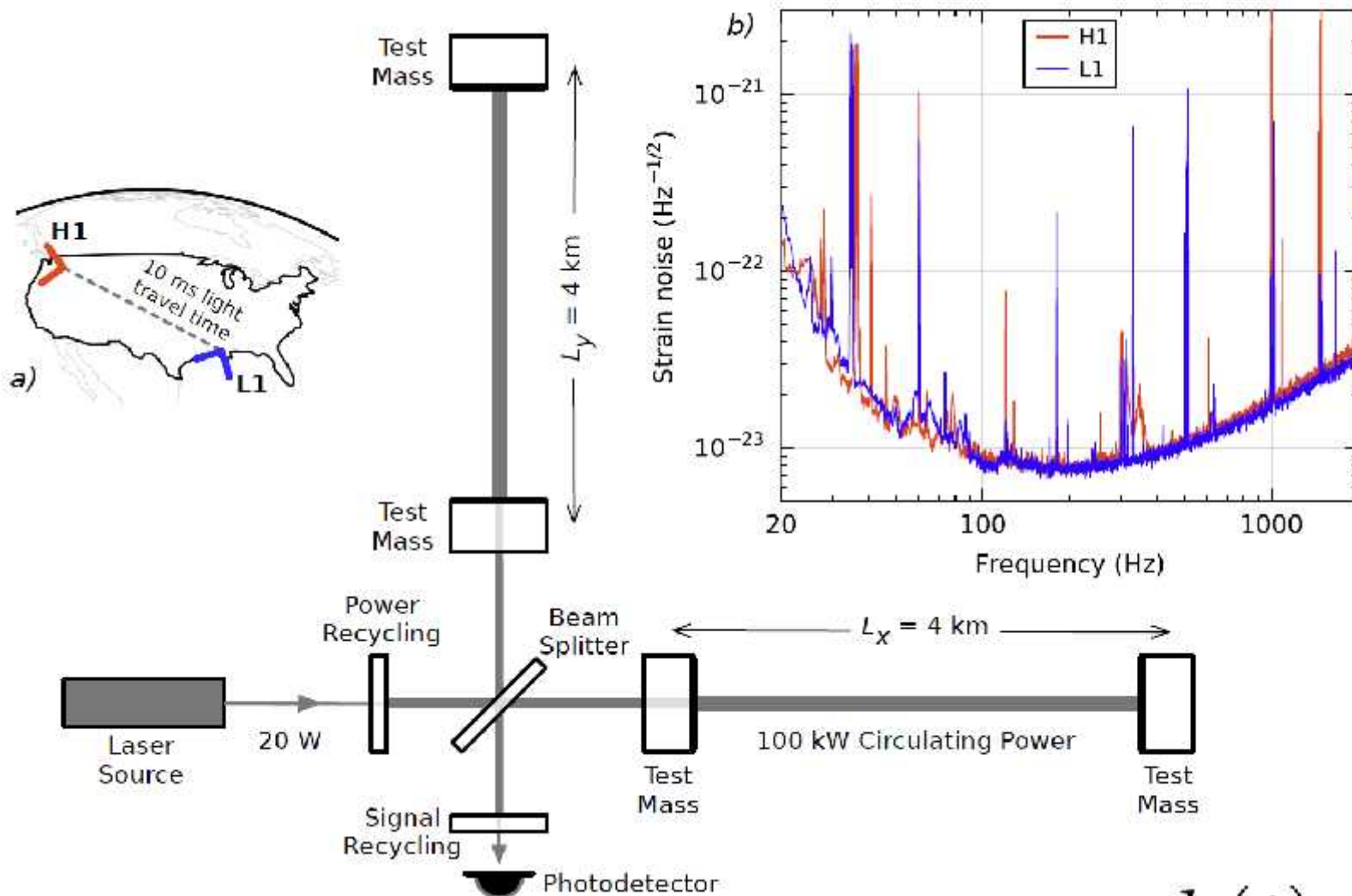


Zouw dit nouw echt gebeuren?

Interferometers – handig voor de detektie van gravitatie golven



Interferometers voor de zoektocht naar gravitatie golven

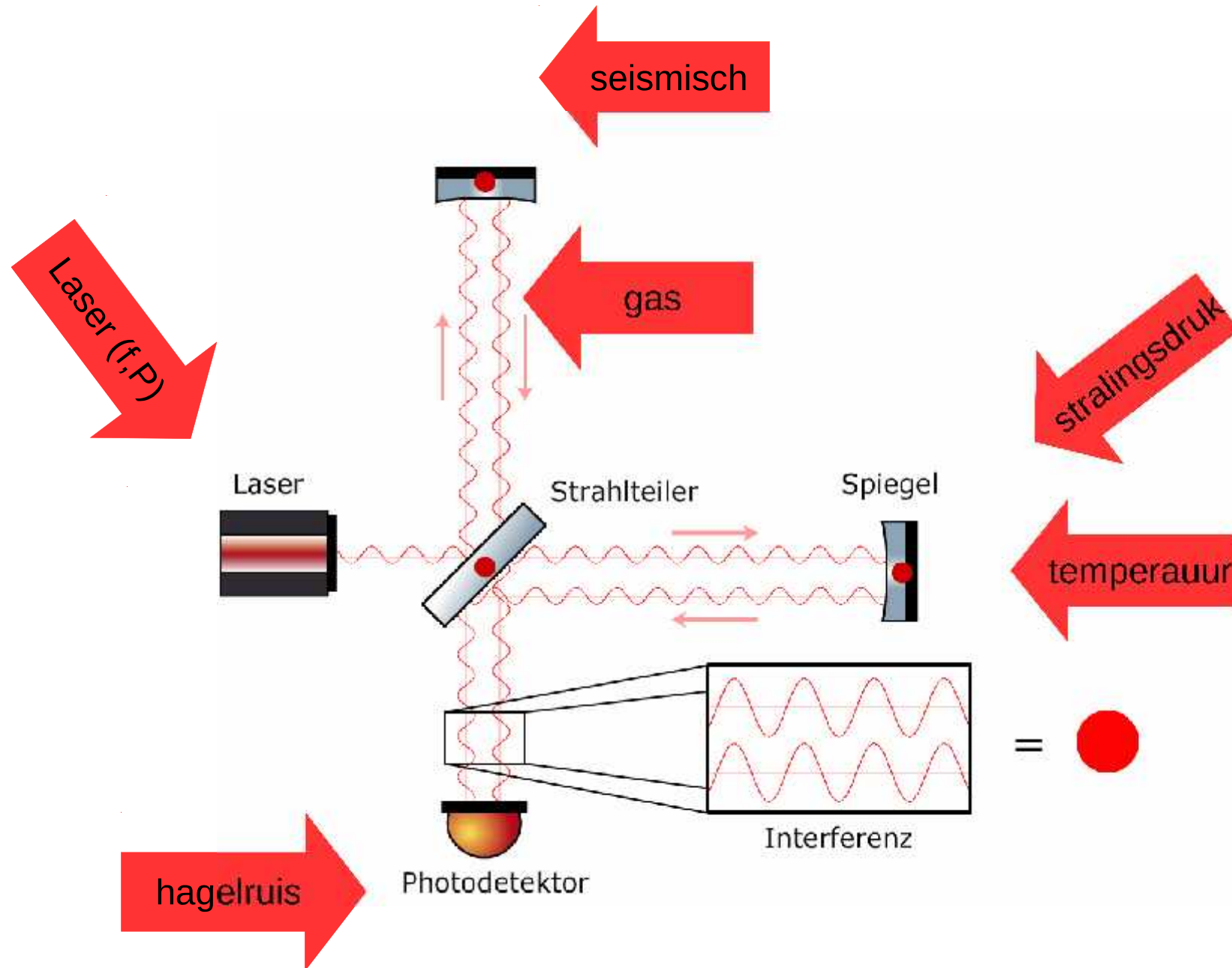


$$h(t) = 2 \cdot \frac{\Delta L(t)}{L}$$

Waterstof atom en de afstand naar de zon



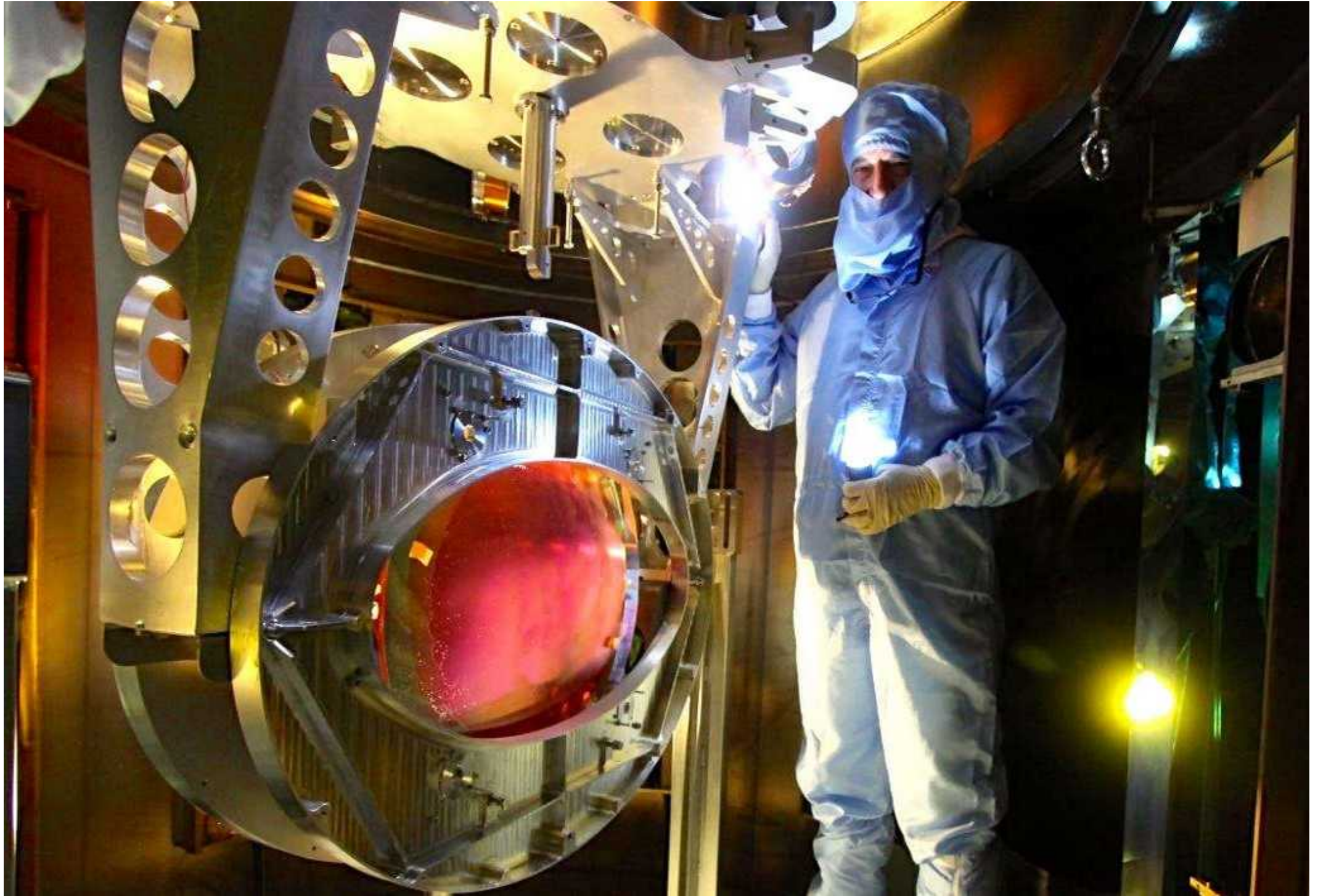
Wat is de achtergrond?



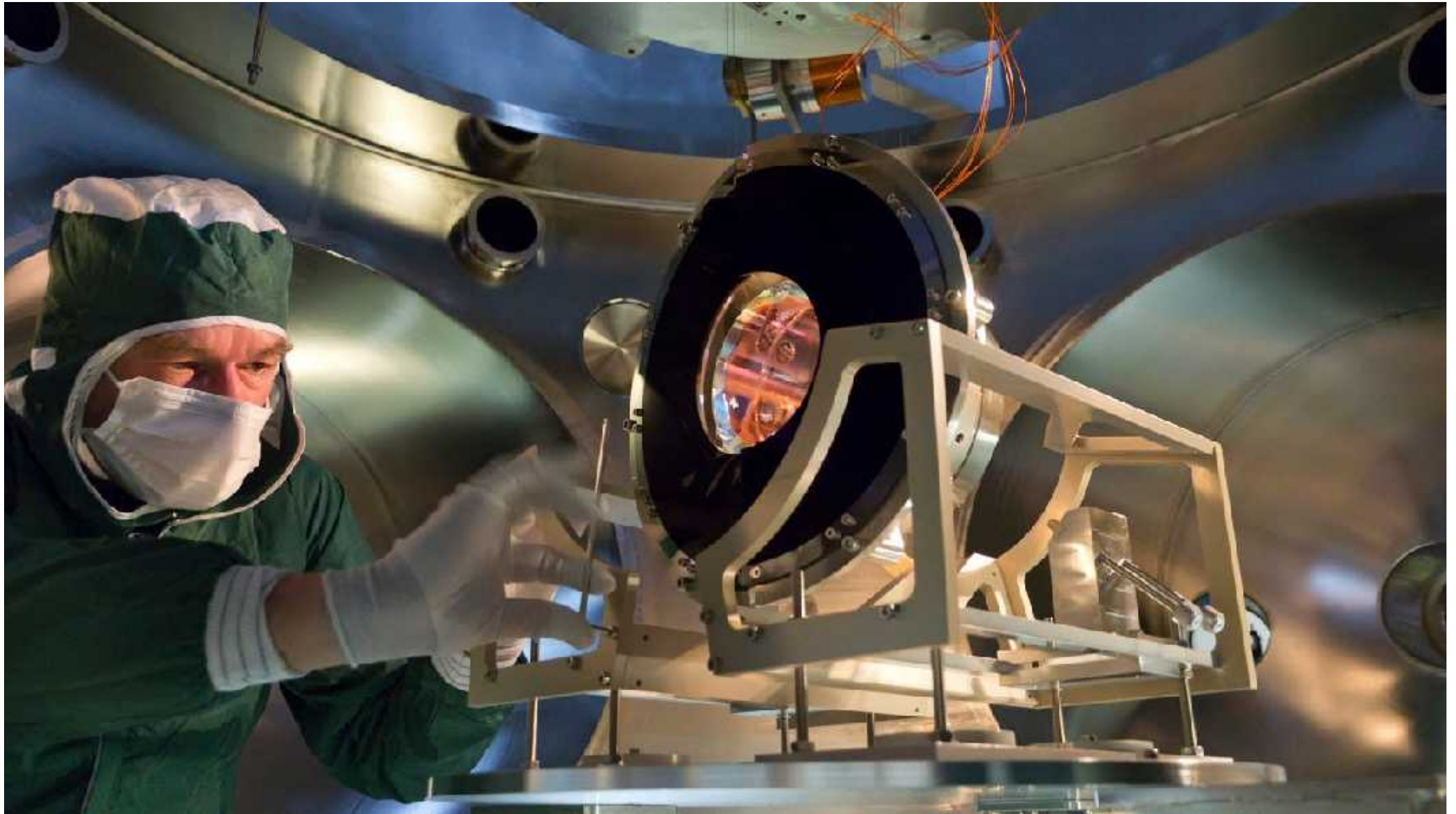
Een verzameling van plaatjes voor de
advanced Virgo detector



Beam splitter



Input-mode cleaner end mirror



Seismische isolatie op de Virgo site



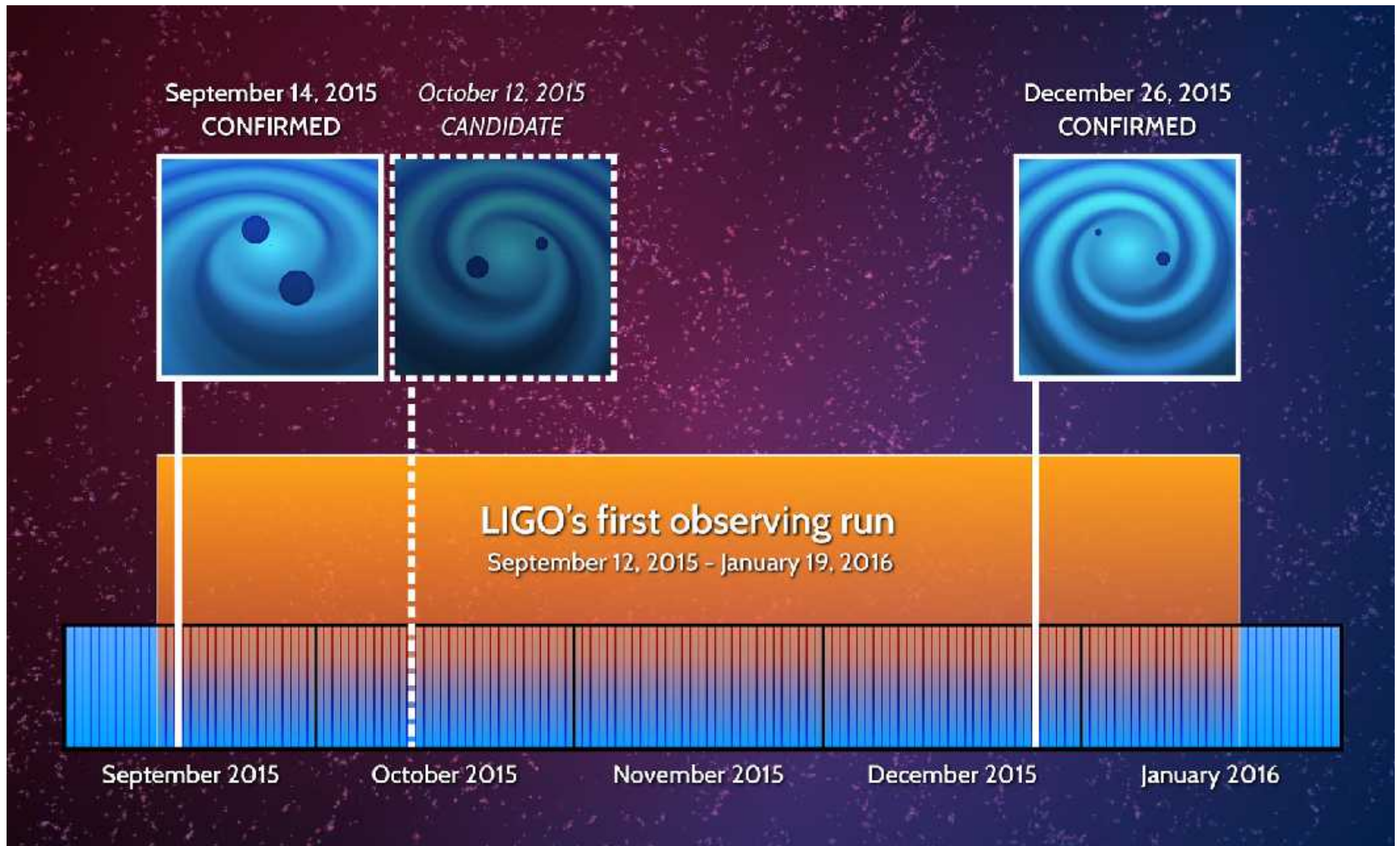
Seismische isolatie – op het Nikhef



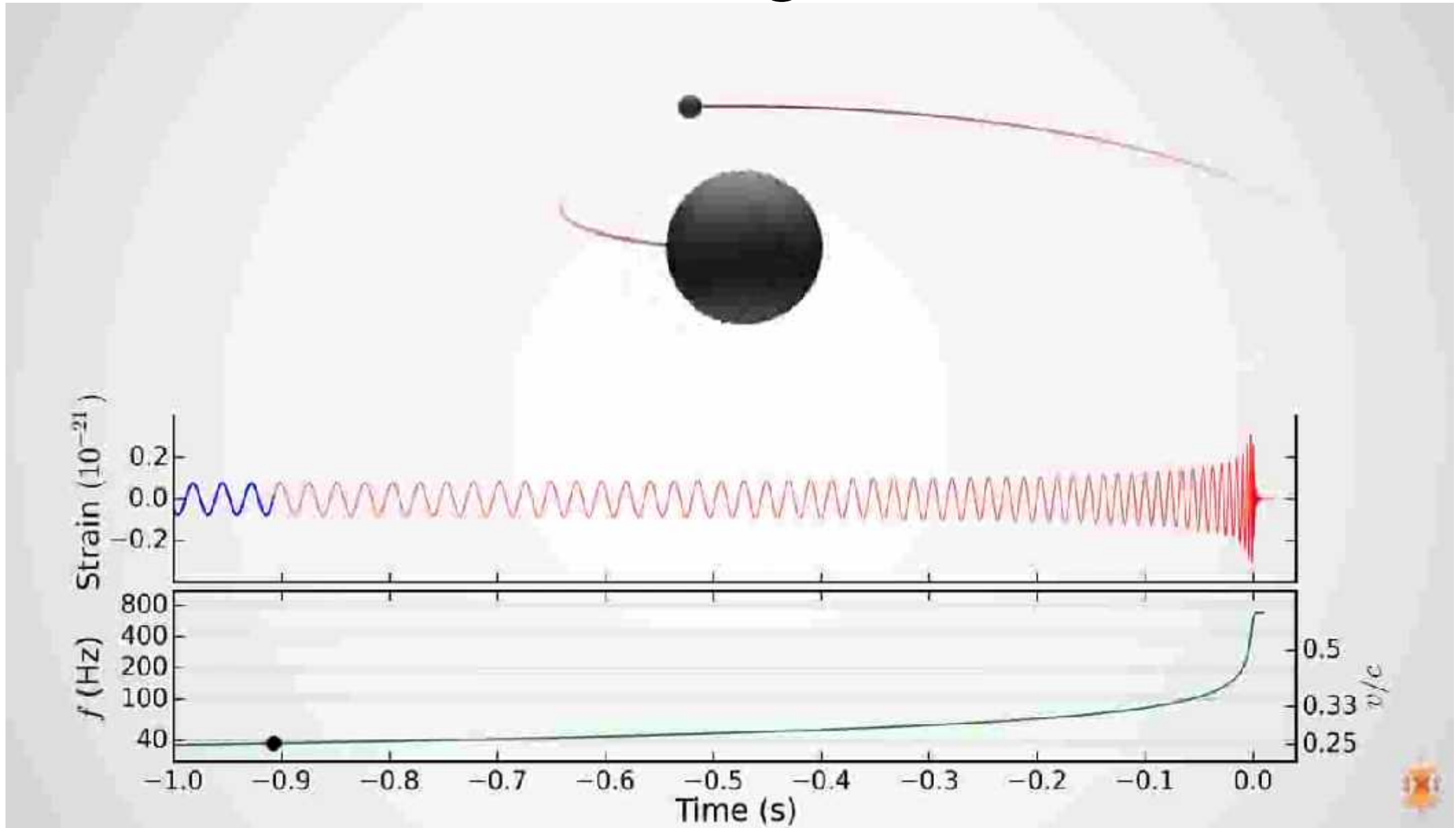
Aan het werk in het optisch lab



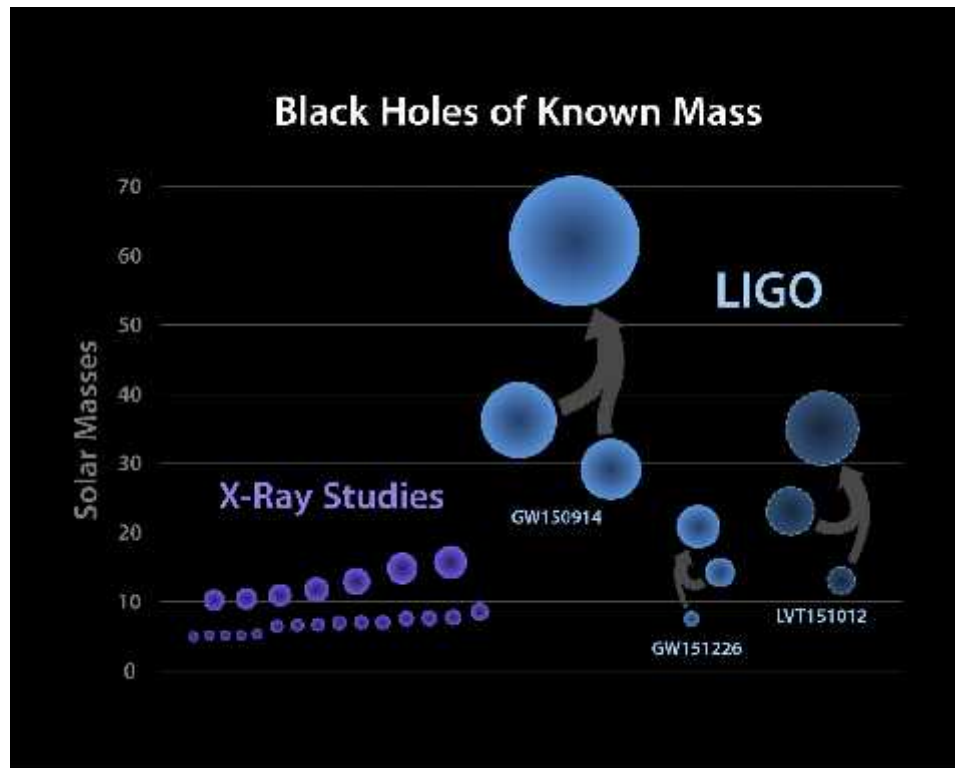
Lucky! =D



Signaal van het versmelten van zwarte gaten



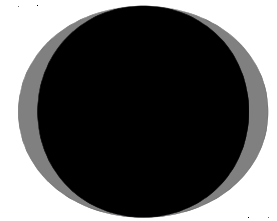
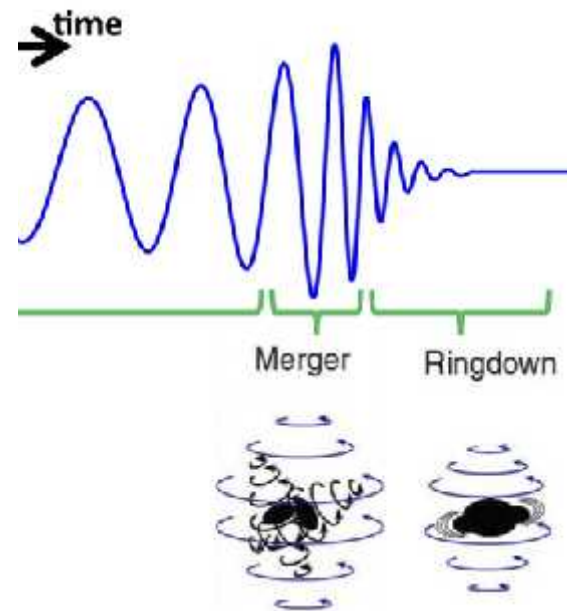
Onvoorstelbare objecten – zwarte gaten



Vergelijkbaar met een gong ...



Het laatste stukje van het signaal

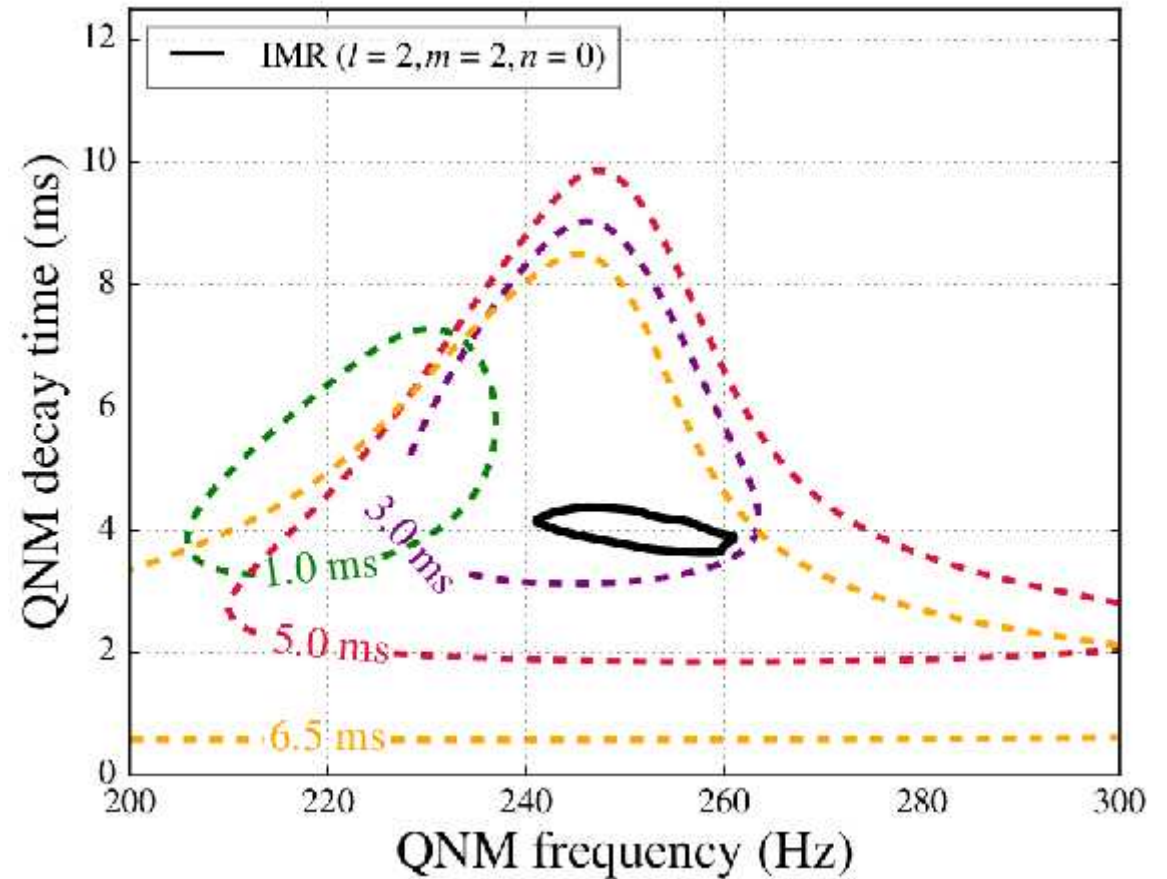


Charakteristieke toon (gedempde sinusoid – net als voor een gong)
enkel voor het laatste stukje – want een gong kapot slaan klinkt wat anders!

Was dat wel een zwart gat?

Of zo als Jo altijd zegt:

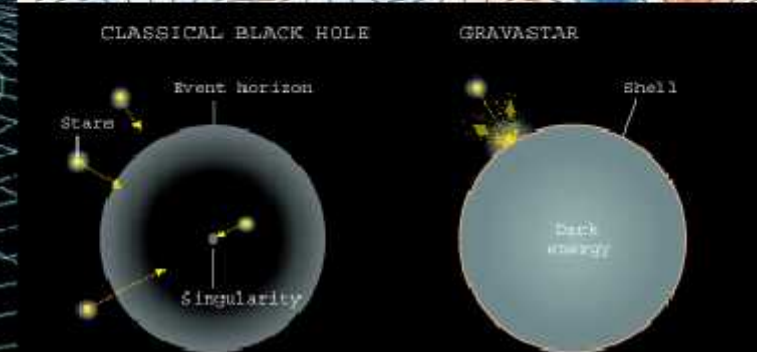
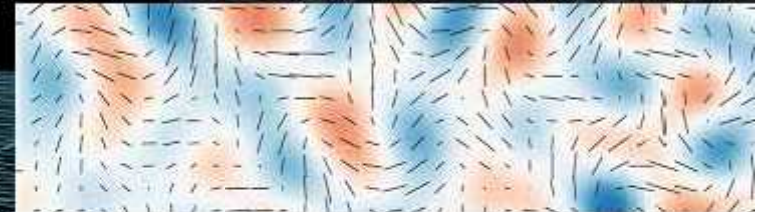
Je moet het gat gewoon een zettje met de hamer geven.



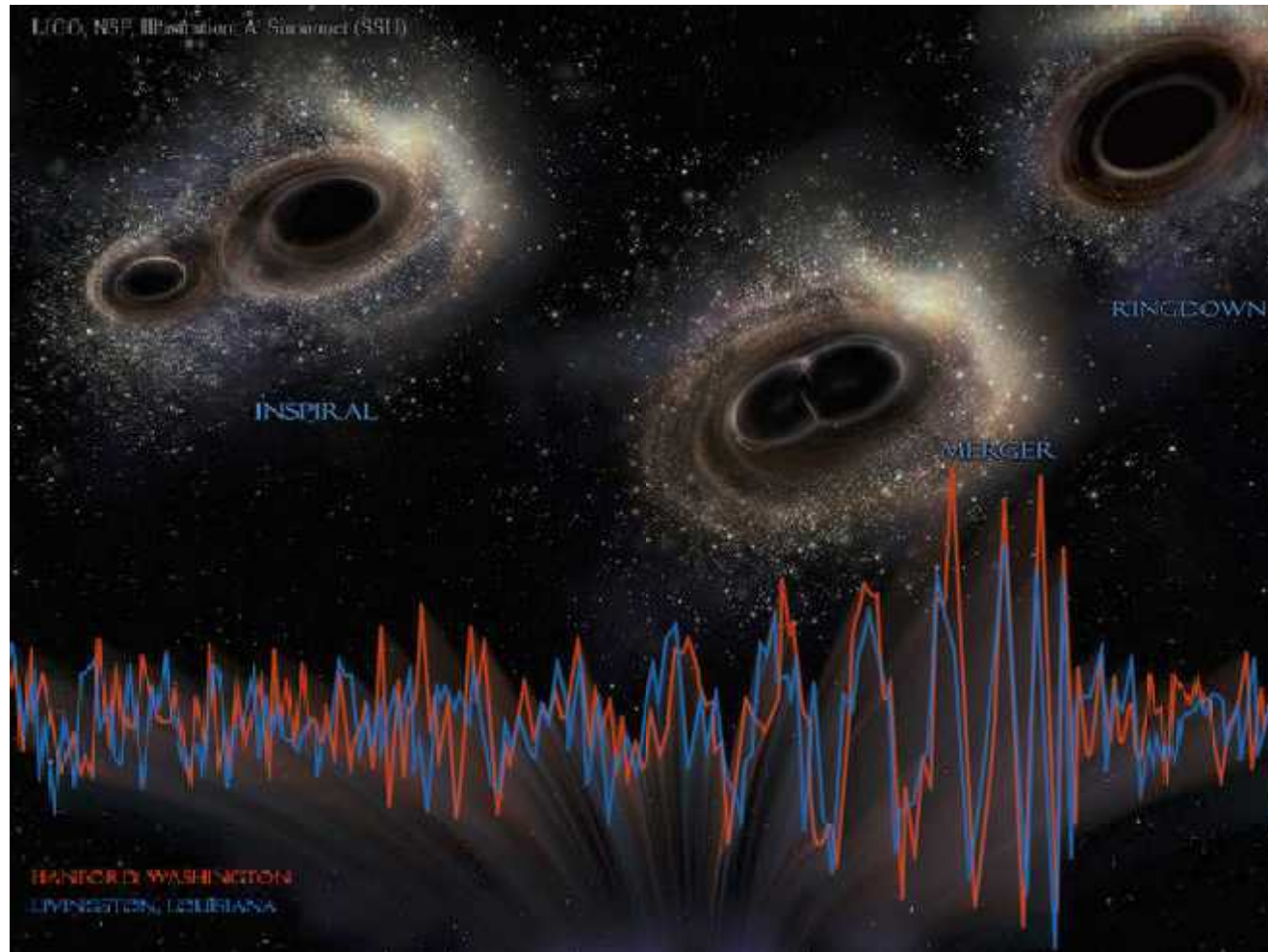
$$h(t > t_0) = e^{-(t-t_0)/\tau} \cdot \cos[2\pi f_0(t - t_0) + \phi_0]$$

Signal consistent met een zwart gat – maar er zijn nog steeds andere opties ...

Nogsteeds genoeg problemen
optelossen

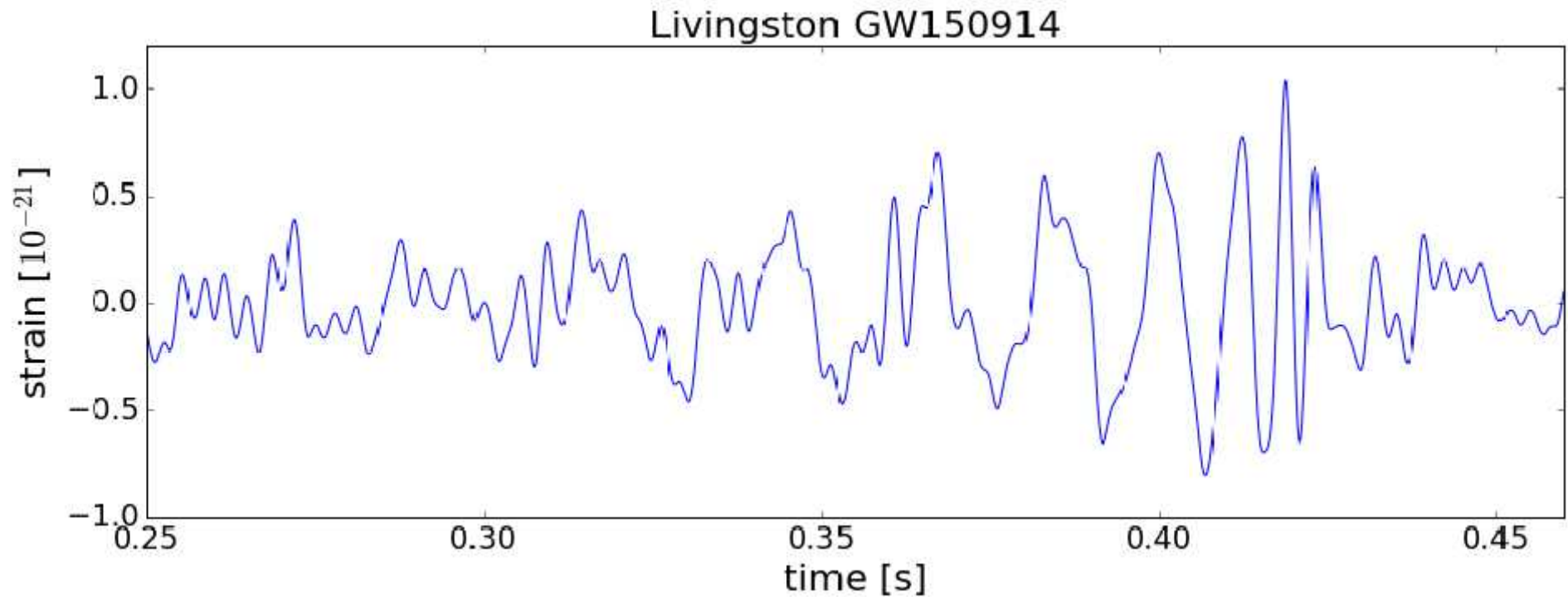
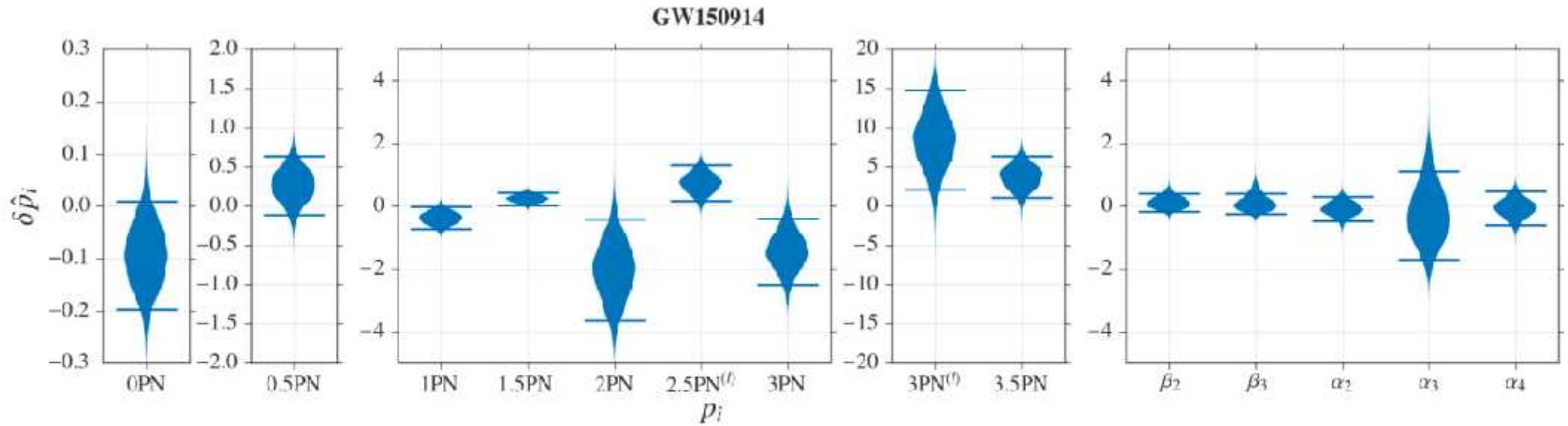


De geparameterizeerde test



$$p_i \rightarrow (1 + \delta p_i) \cdot p_i$$

Geparametriseerde test



Nog een beetje afwachten ...





*B*ij deze hopen we op nog vele verassingen nu we ons nieuwe zintuig leren te gebruiken.

