Gravitatiegolven

De dynamica van ruimtetijd



23 oktober 2012
Mark Beker (M.Beker@Nikhef.nl)
LSWK Leiden

Mark Beker



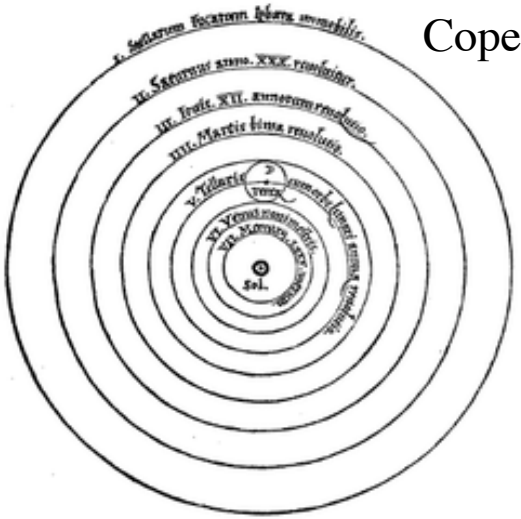
- Opgegroeid in Nieuw Zeeland

- TU Delft (2001 – 2008)
  - *Bachelor and Master of Science*
  - *Applied Physics*

- Nikhef – Nationaal instituut voor subatomaire fysica (2009 – nu)
  - *CERN / Astrodeeltjesfysica*
  - *PhD Gravitatiegolven*
  - *Verbeteren van laag frequentie gevoeligheid van volgende generatie gravitatiegolf detectoren*

vrije Universiteit amsterdam

Licht (zichbaar en onzichtbaar) heeft ons veel geleerd over het Universum en de natuurwetten

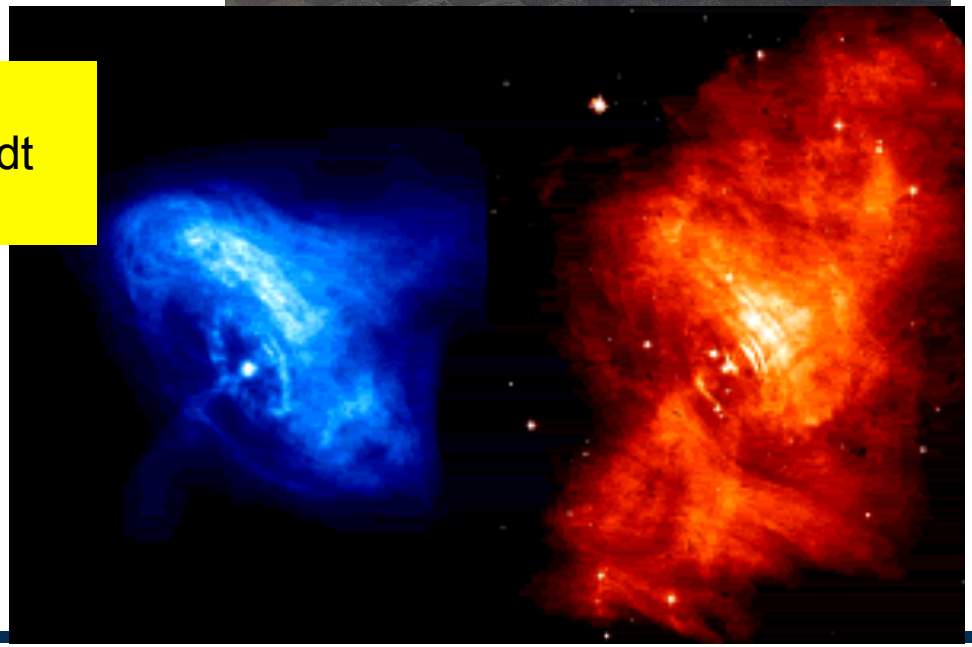


Copernicus 1543



Galileo 1609

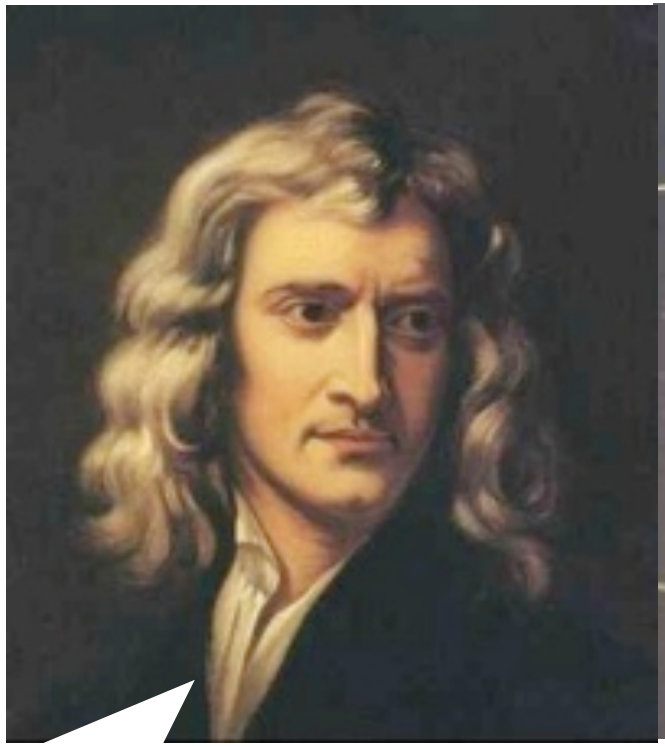
Maar het blijft een stille opname.
De sound track van het Universum wordt gespeeld op ruimte zelf!

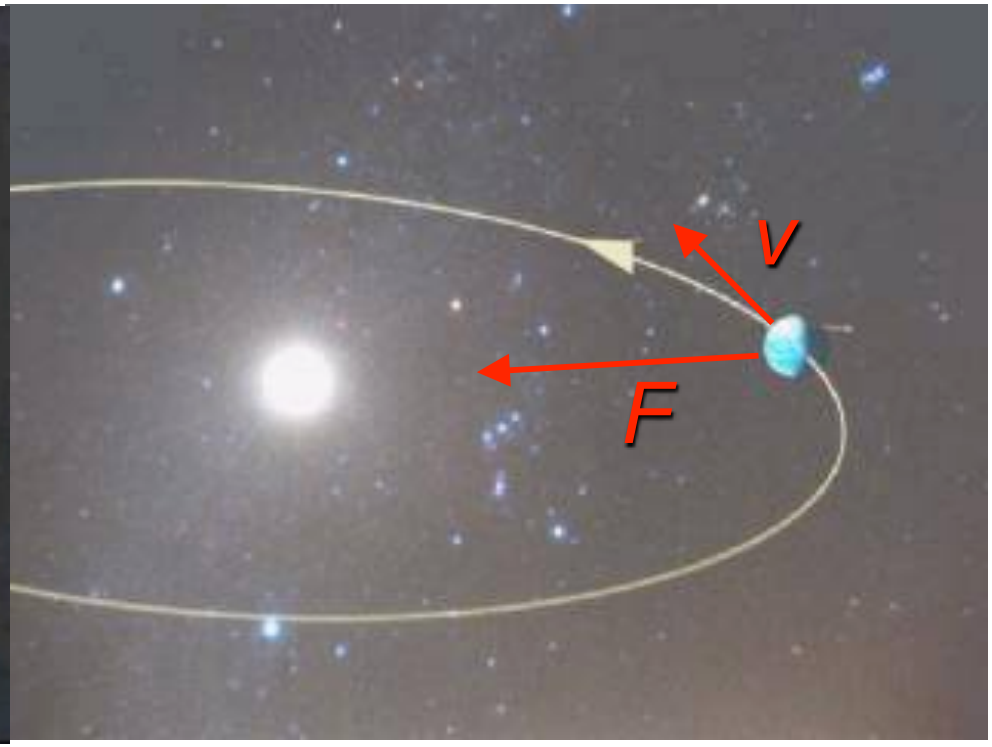


Crab pulsar 6500 ljr
Links Röntgen straling (Chandra)
Rechts Hubble optische opname

Newtons zwaartekrachttheorie (1687): Gravitatie is een kracht die massa's op elkaar uitoefenen

- Deze kracht is instantaan





$$F = -G\frac{mM}{r^2}$$

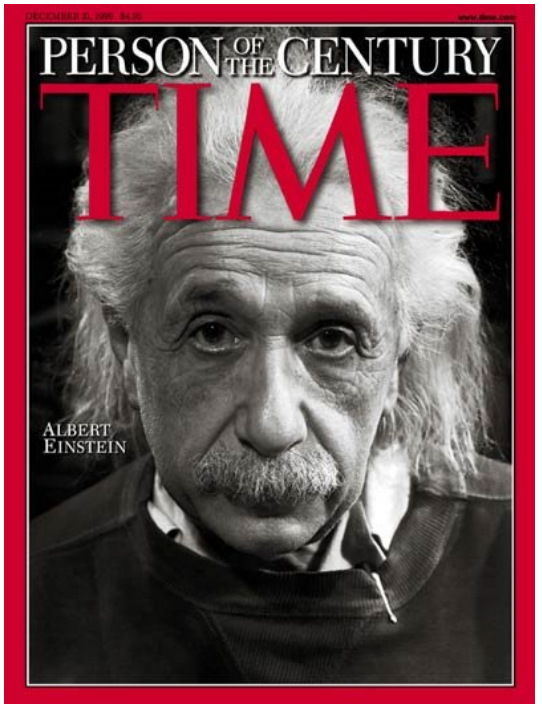
Albert Einstein was het er niet mee eens…

- Speciale relativiteitstheorie (1905)
  - *Natuurwetten zien er hetzelfde uit voor alle inertiële waarnemers*
  - *Licht beweegt met dezelfde snelheid volgens alle waarnemers*

    → Nauwe relatie tussen ruimte en tijd (“ruimte-tijd”)

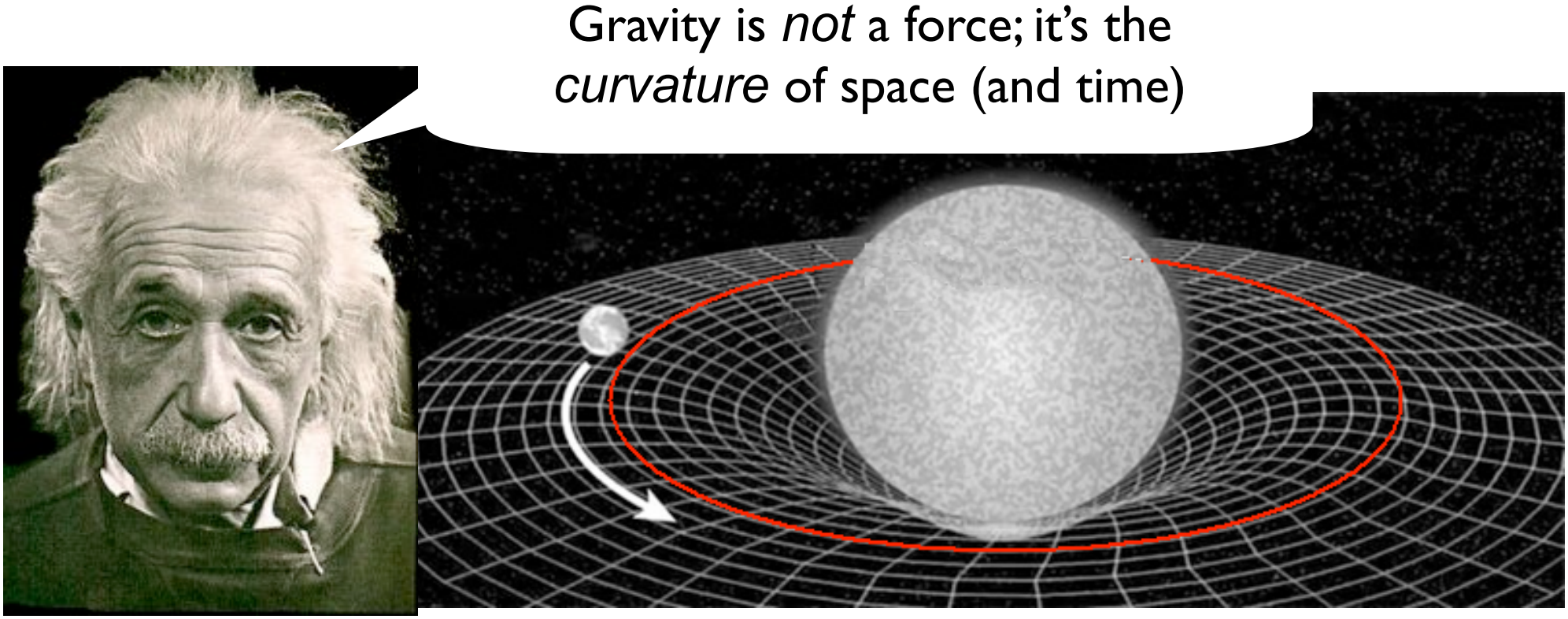
    → Informatie kan hoogstens met lichtsnelheid worden overgedragen

- Hoe past zwaartekracht hierin?



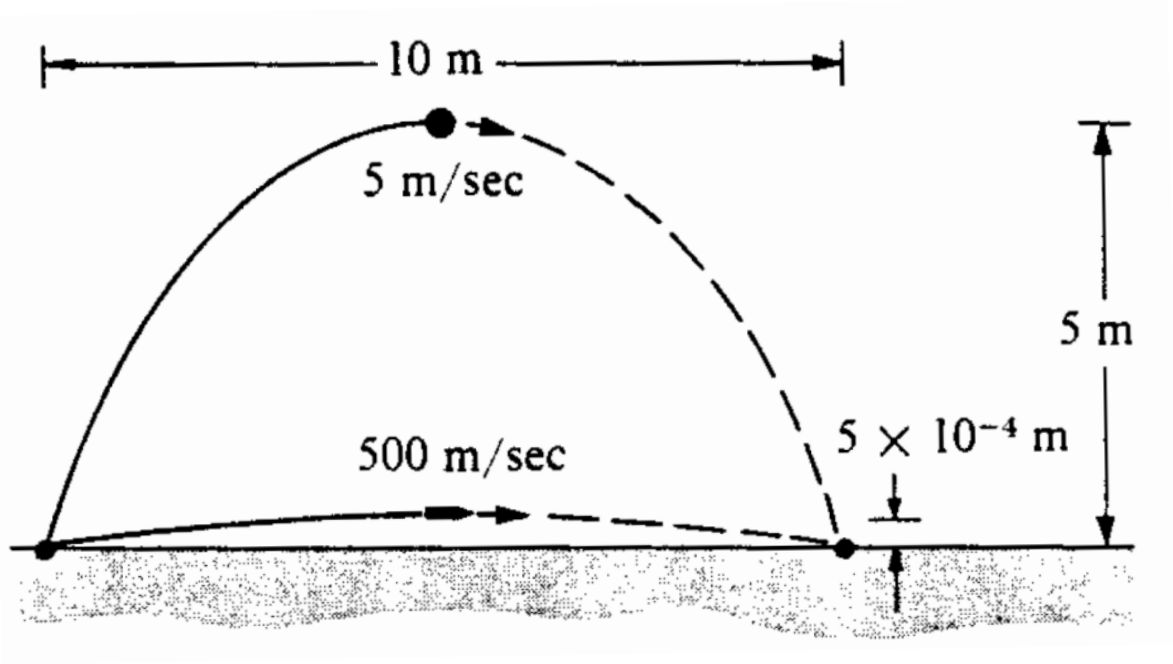
Zwaartekracht is een gevolg van de kromming van ruimte en tijd

- Einsteins algemene relativiteitstheorie (1915)
  - *Inertiële waarnemers in gekromde ruimte-tijd*
  - *Materie veroorzaakt de kromming*
  - *Zwaartekracht is neveneffect van die kromming*



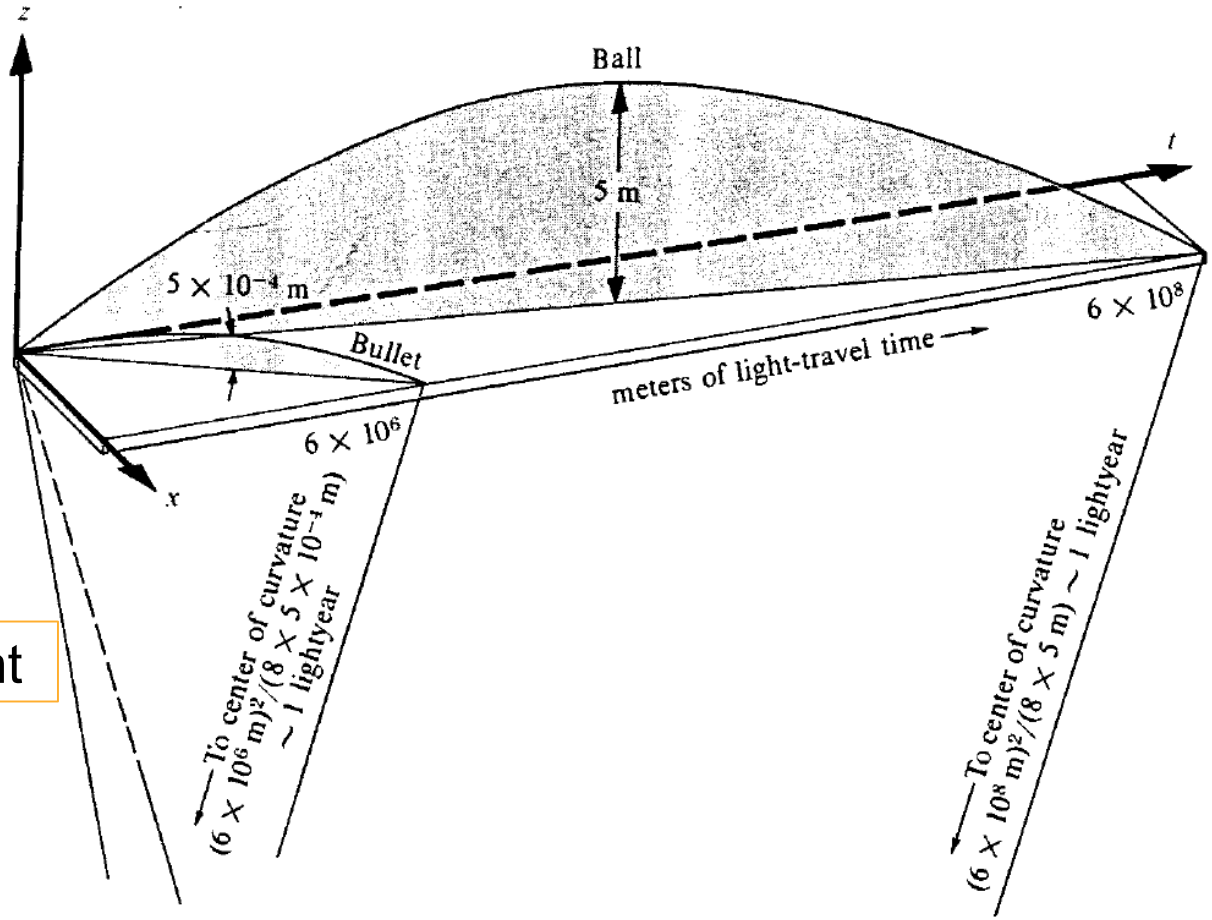
De kromming van ruimtetijd

- Baan van een bal en een kogel
- Alle massa's voelen dezelfde versnelling
- Ruimtelijke kromming is zeer verschillend



De kromming van ruimtetijd

- Nu nemen we tijd erbij…
- De bal en kogel hebben dezelde kromming in ruimtetijd!
- In werkelijkheid volgen vrijvallende objecten een rechte pad, maar in gekromde ruimtetijd!



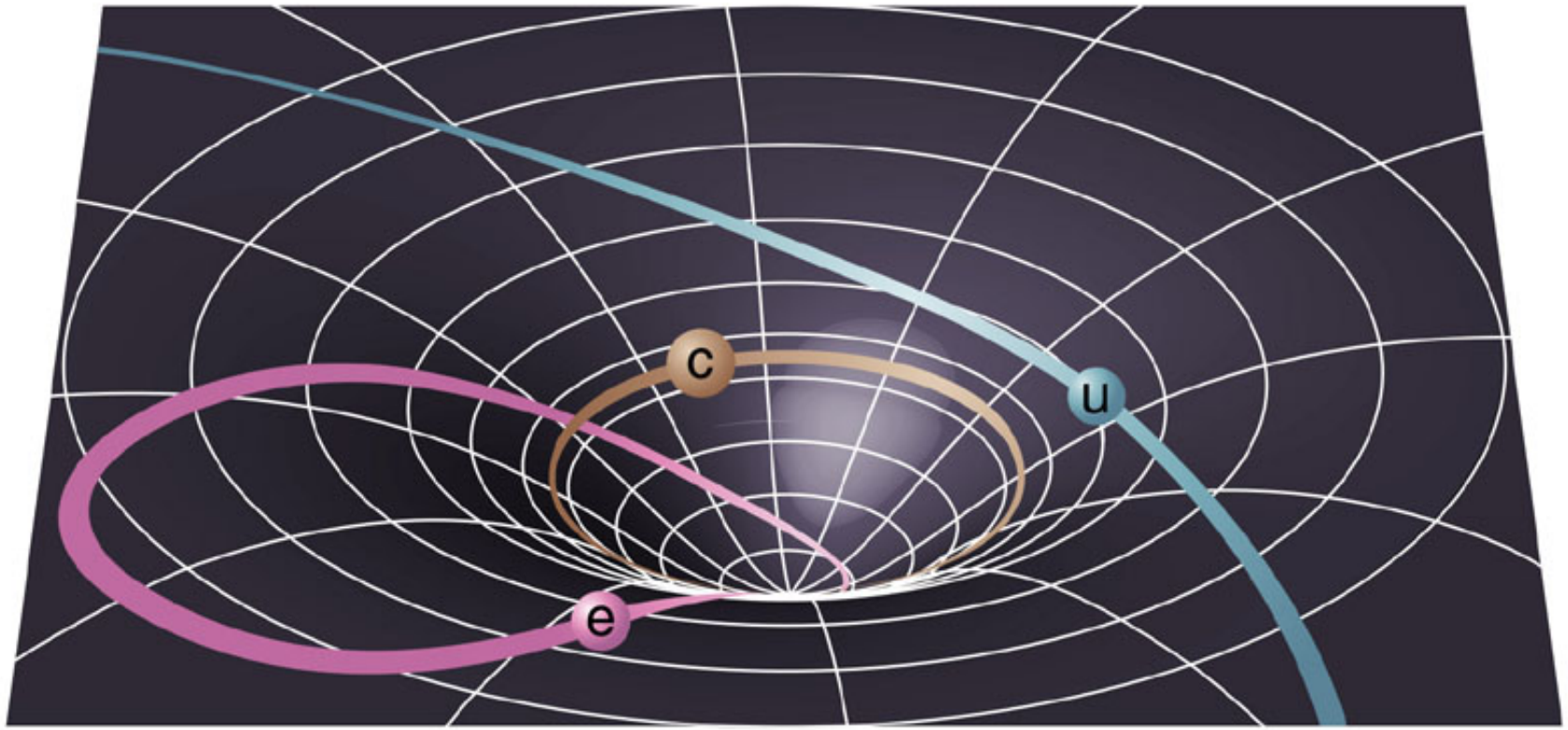
Kromming ⇔ zwartekracht

Planeetbanen in gekromde ruimte-tijd

c Cirkelbaan

e Elliptische baan

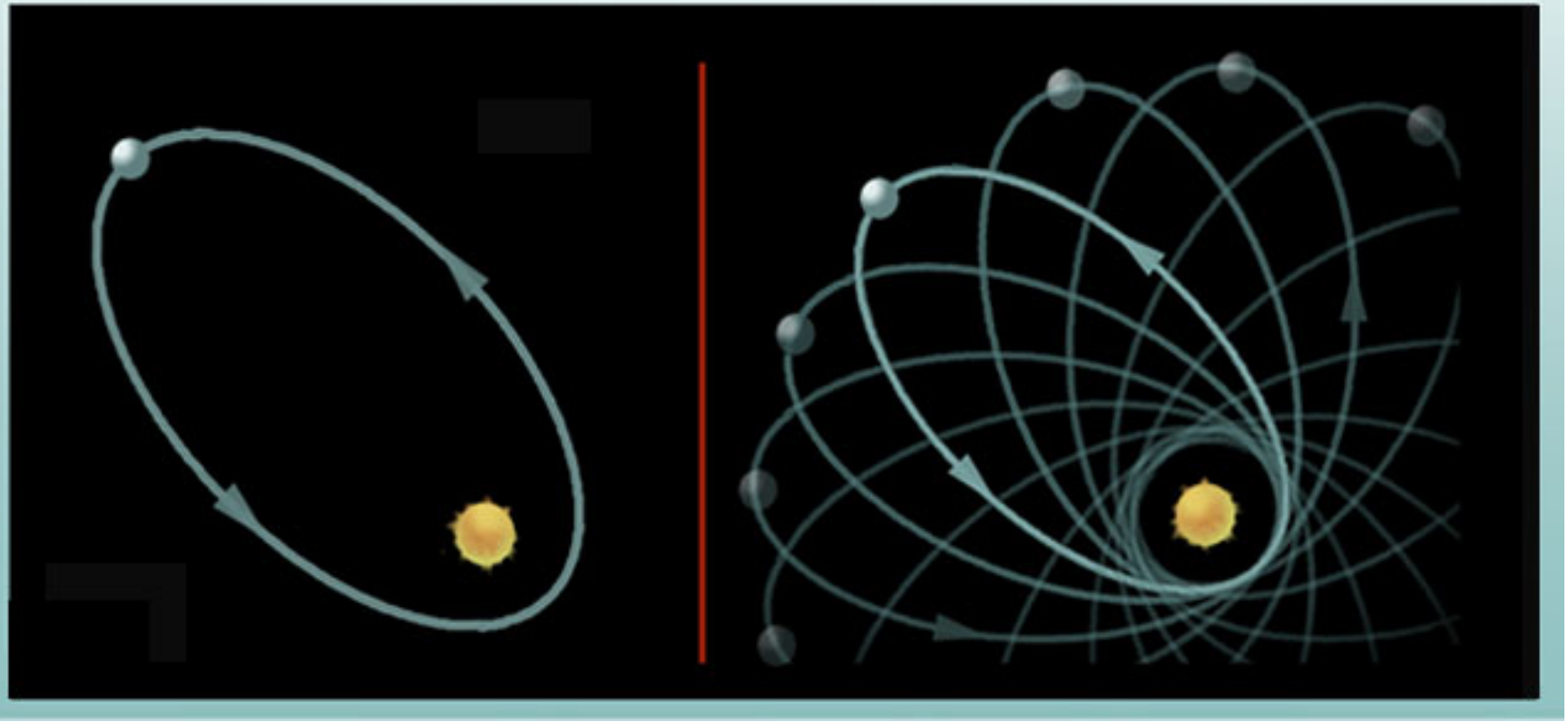
u Ongebonden baan (parabool)



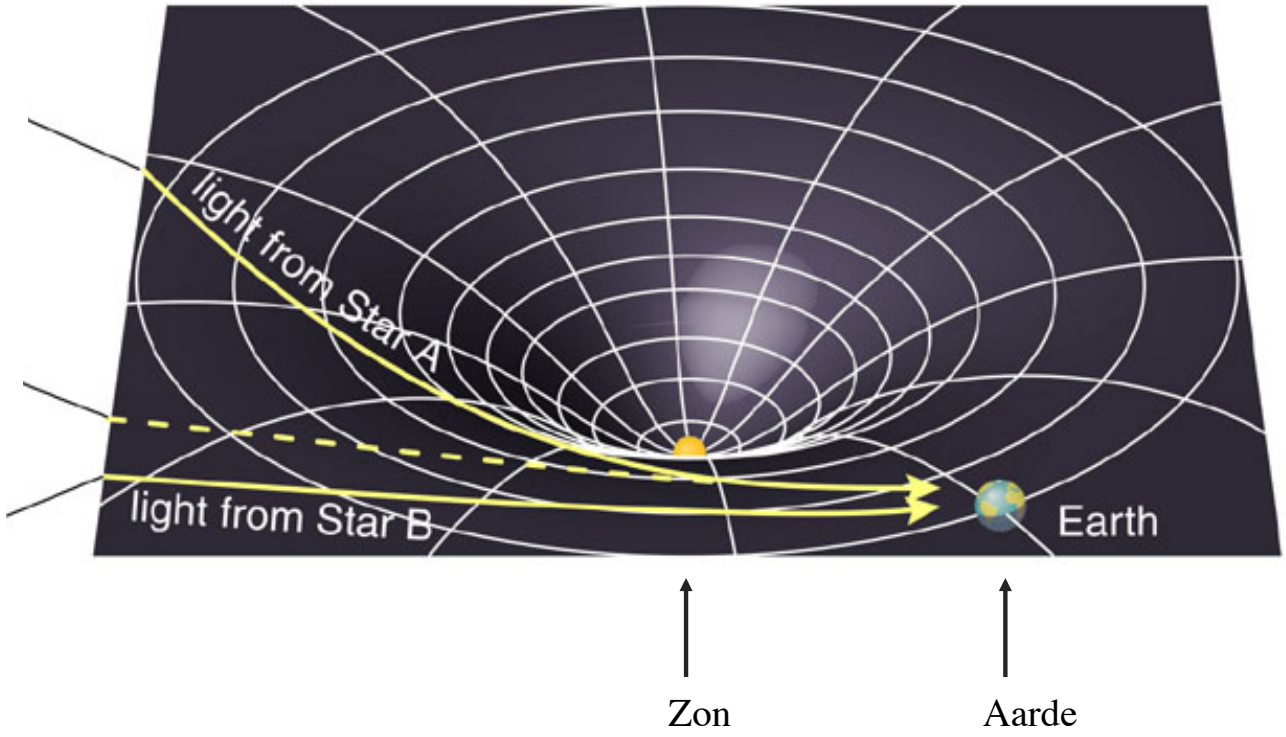
Precessie van de Mercuriusbaan was voor Einstein het grote bewijsstuk voor zijn theorie

574 boogseconden per eeuw
532 - zwaartekracht andere planeten
42 -Algemene Relativiteitstheorie

$$\delta\phi_{peri} = \frac{6\pi GM}{c^2 r}$$



Licht wordt afgebogen door de zwaartekracht van de zon



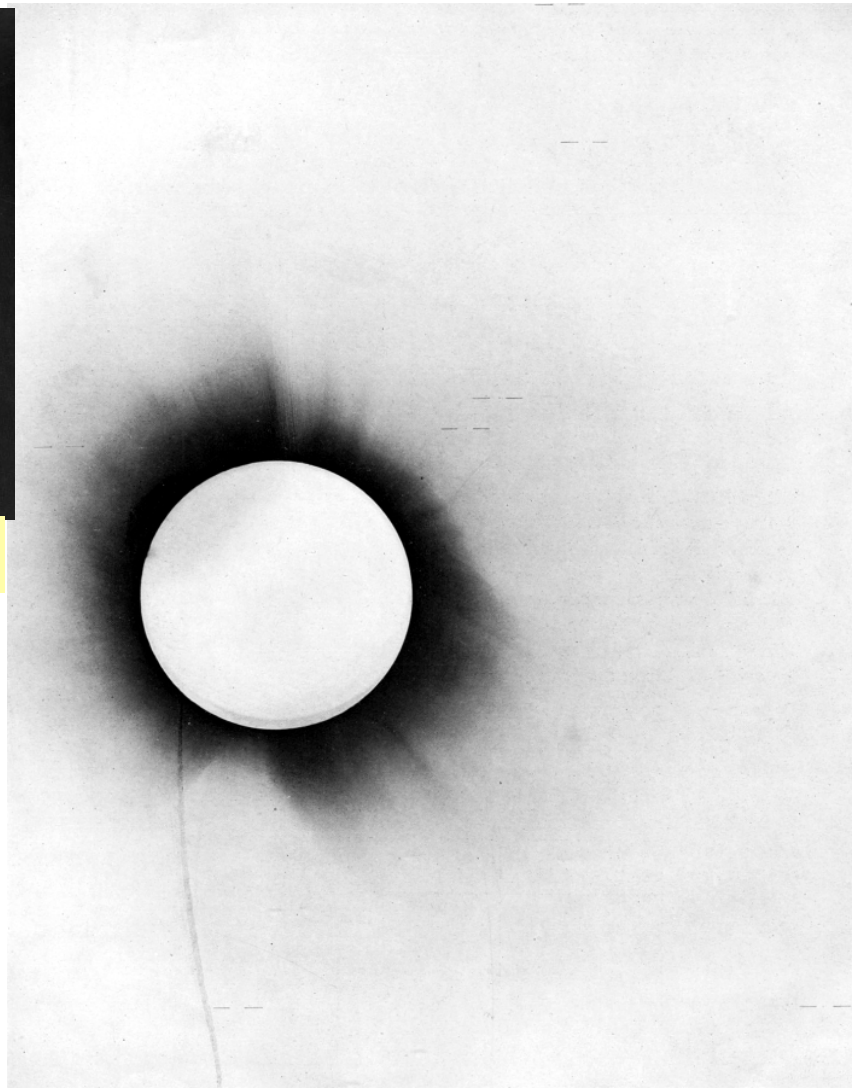
Relativiteitstheorie: $\alpha = \frac{2GM}{c^2 r}$

Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

Licht wordt afgebogen door de zwaartekracht van de zon



A. Eddington



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.

New York Times, November 10, 1919

Einstein voorspelde ook gravitatie golven
Laatste voorspelling die nog niet (direct) is waargenomen

Een gravitatiegolf is het dynamische gedrag van ruimte-tijd zelf

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

De kromming van ruimte-tijd vertelt massa hoe te bewegen,
massa vertelt ruimte-tijd hoe te buigen

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

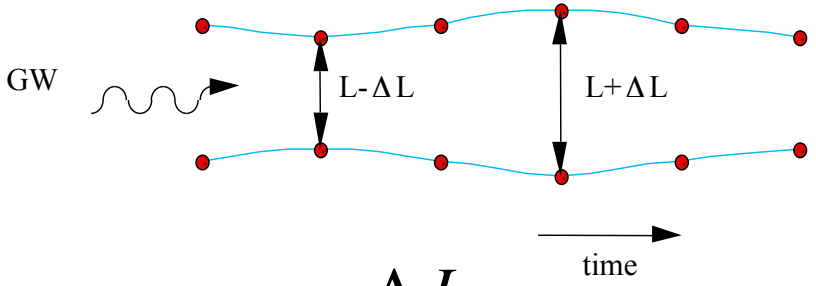
Een verstoring op de metriek leidt tot een golf vergelijking

$$(-\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \nabla^2) h_{\mu\nu} = 0$$

Een kromming h oscilleert door de ruimte (met snelheid c)

De dynamica van gravitatiegolven

- Volgen uit de (algemene)relativiteitstheorie
- Gravitatiegolf = ruimtetijd metrische golf
  - *Afstandsvariatie*
  - *Amplitude h*



$$h = 2\frac{\Delta L}{L}$$

- GG geproduceerd door versnelling
  - *D = afstand tot bron*
  - *Q = quadrupolemoment*

$$h \approx \frac{2G}{c^4}\frac{d^2Q}{dt^2}\frac{1}{d}$$

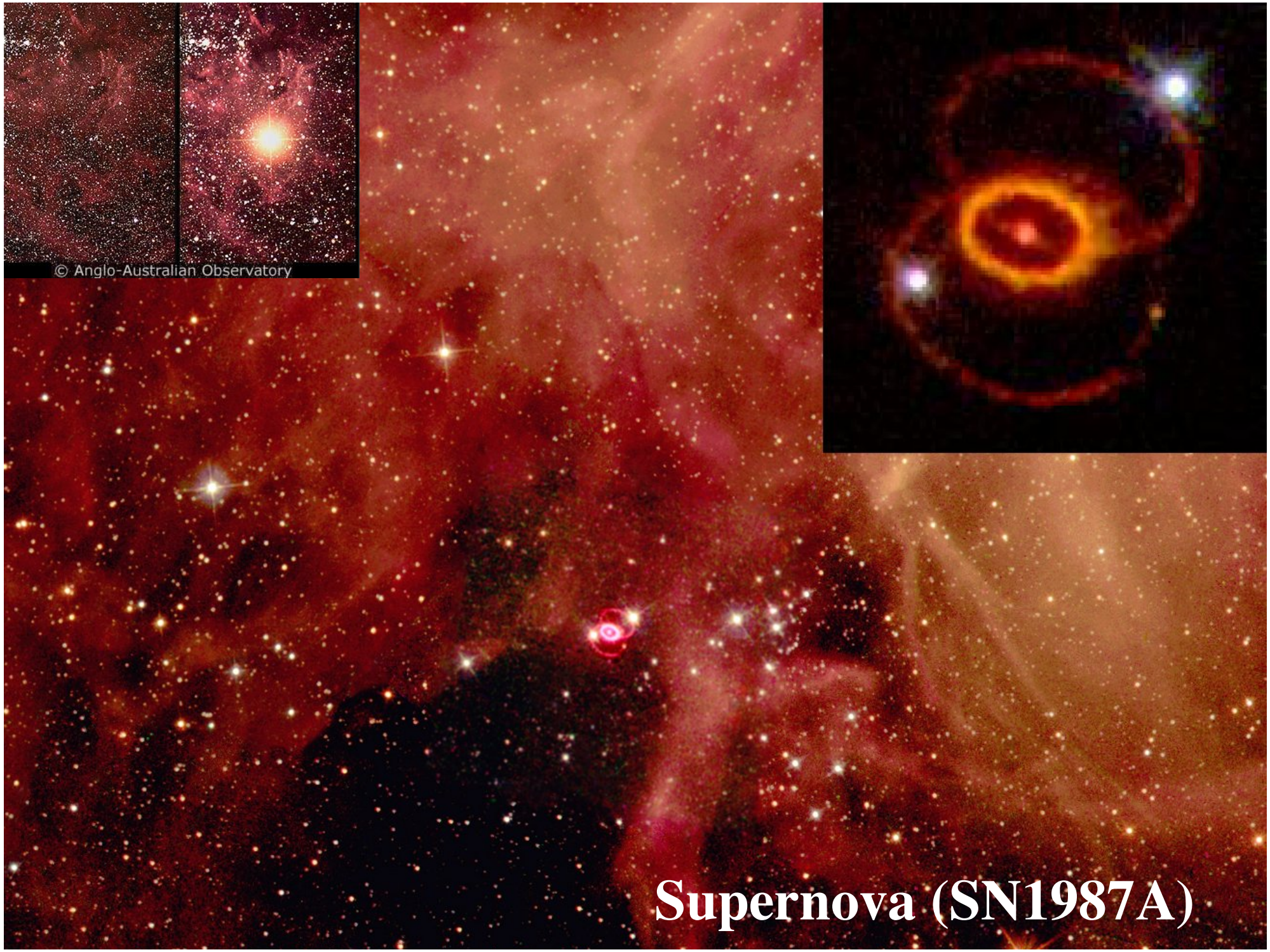
- Zeer zwakke koppeling
  - *Aarde – zon: 313 W*
  - *-> Gebruik astrofysische objecten*

$$10^{-44}\, s^2 kg^{-1} m^{-1}$$

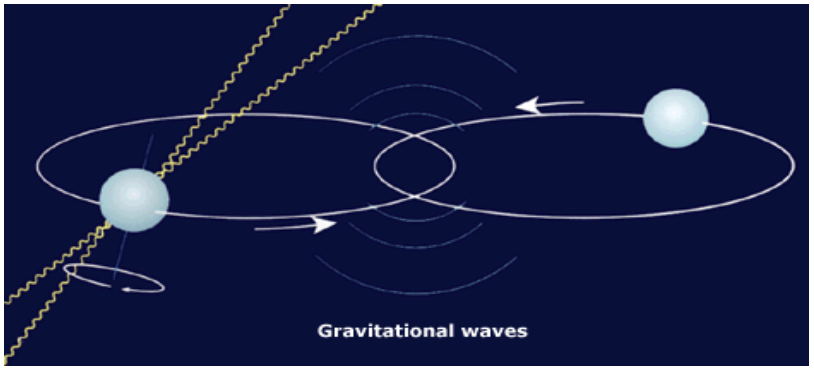


Hubble space telecope


Virgo sterrenstelsel cluster, 53.8 miljoen licht-jaar

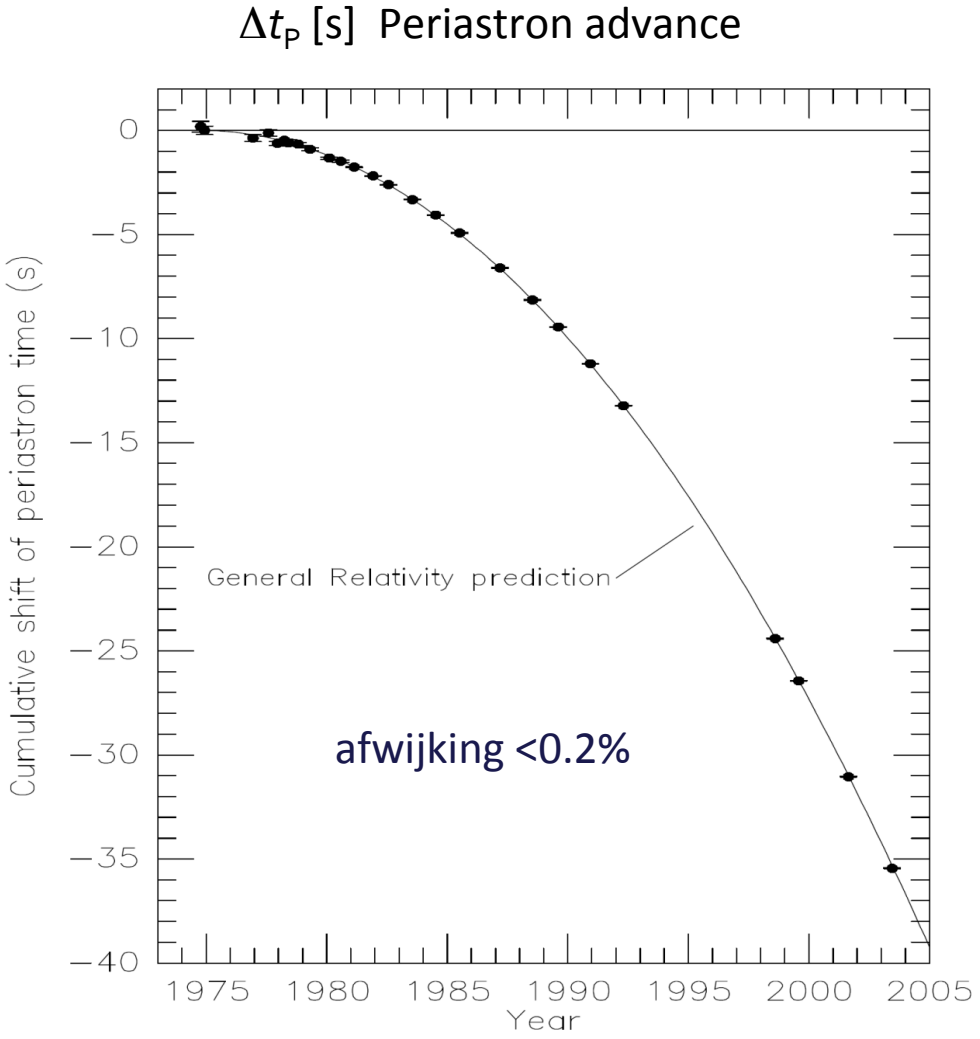

© Anglo-Australian Observatory
Supernova (SN1987A)

Indirecte detectie van gravitatie golven met binary pulsar



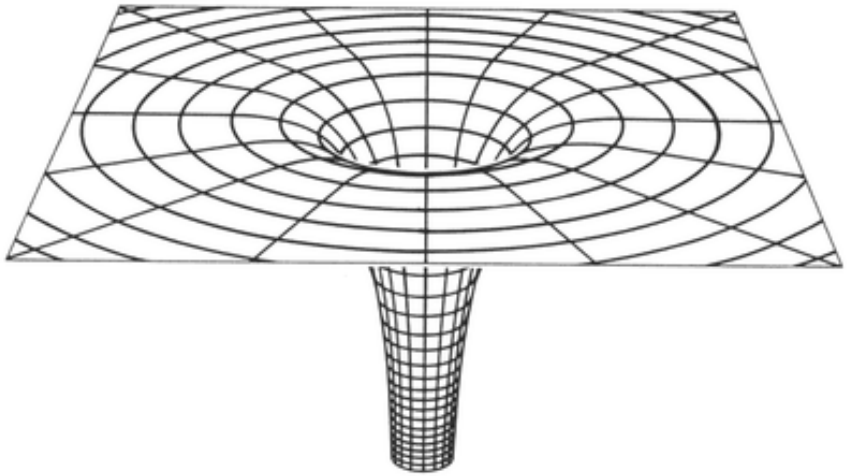
- Russell A. Hulse en Joseph H. Taylor, Jr.
- In 1974 werd de eerste pulsar in een binair systeem ontdekt
- Periode ~ 8h
- GW emissie verkort de periode
- Nobelprijs 1991



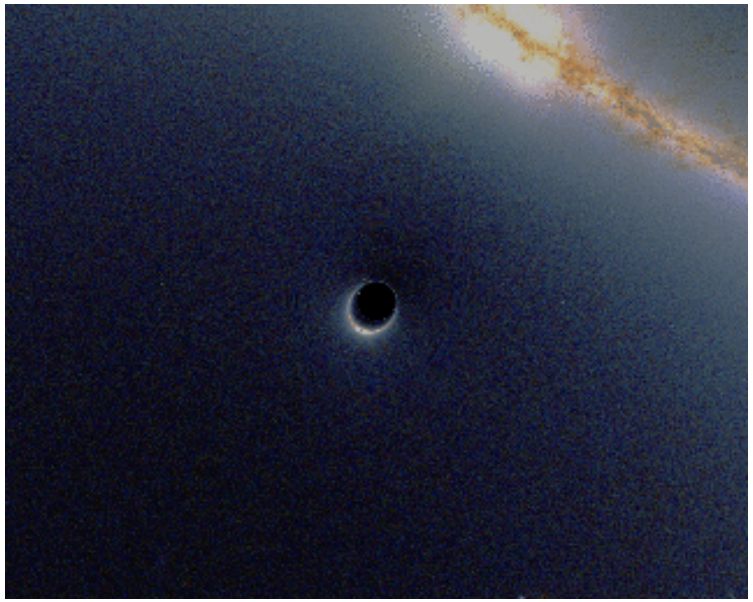


Grote astrofysische objecten: zwarte gaten

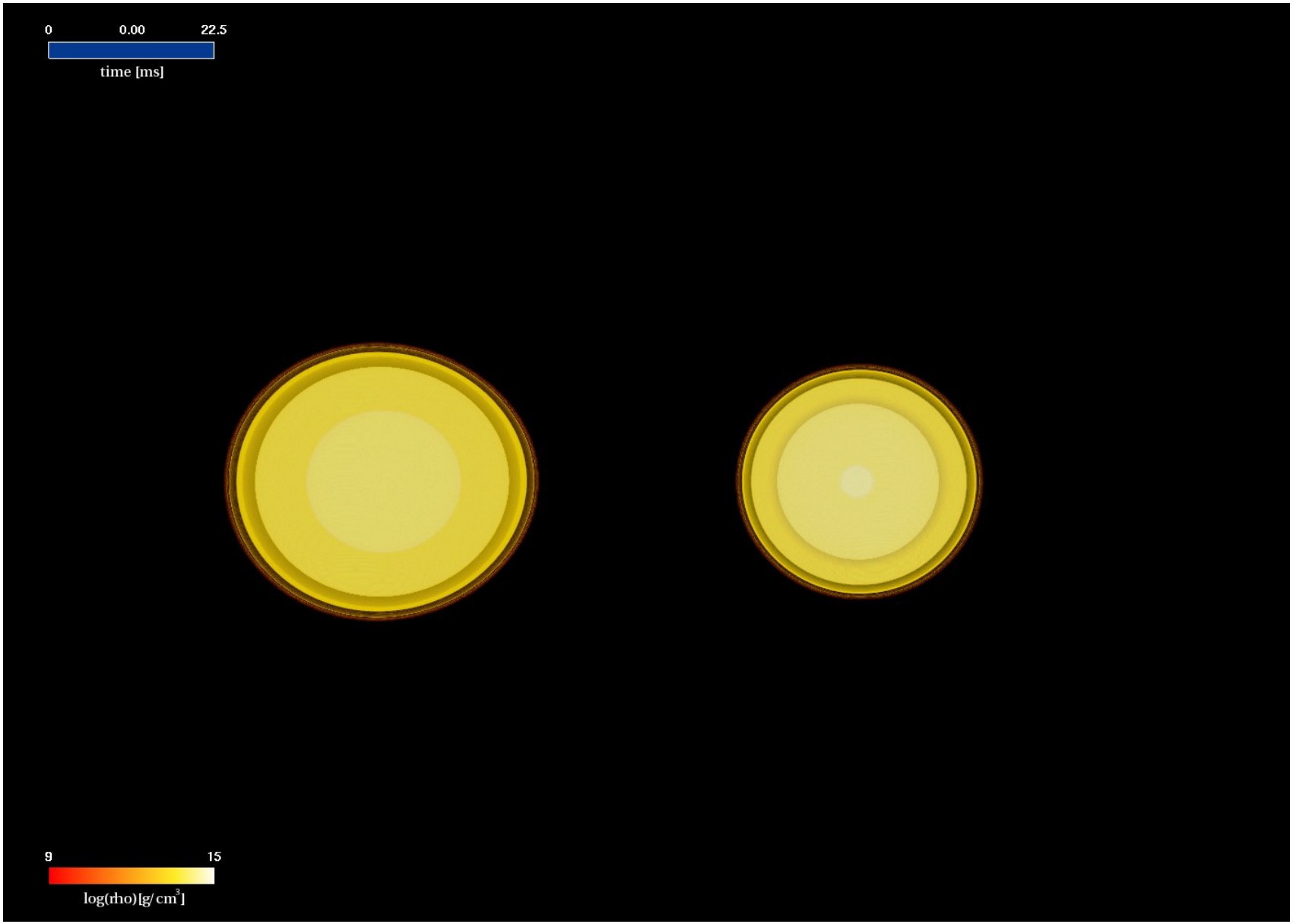
- Een object zo compact dat zelfs licht niet kan ontsnappen van zijn zwaartekrachtsveld
- De massa van de aarde gecomprimeerd tot een straal van 6 kilometer
- Licht buigt heel sterk erom heen
- Volgt wiskundig uit algemene relativiteitstheorie
- Gevormd door instorten van opgebrande sterren of combinatie van twee zware sterren



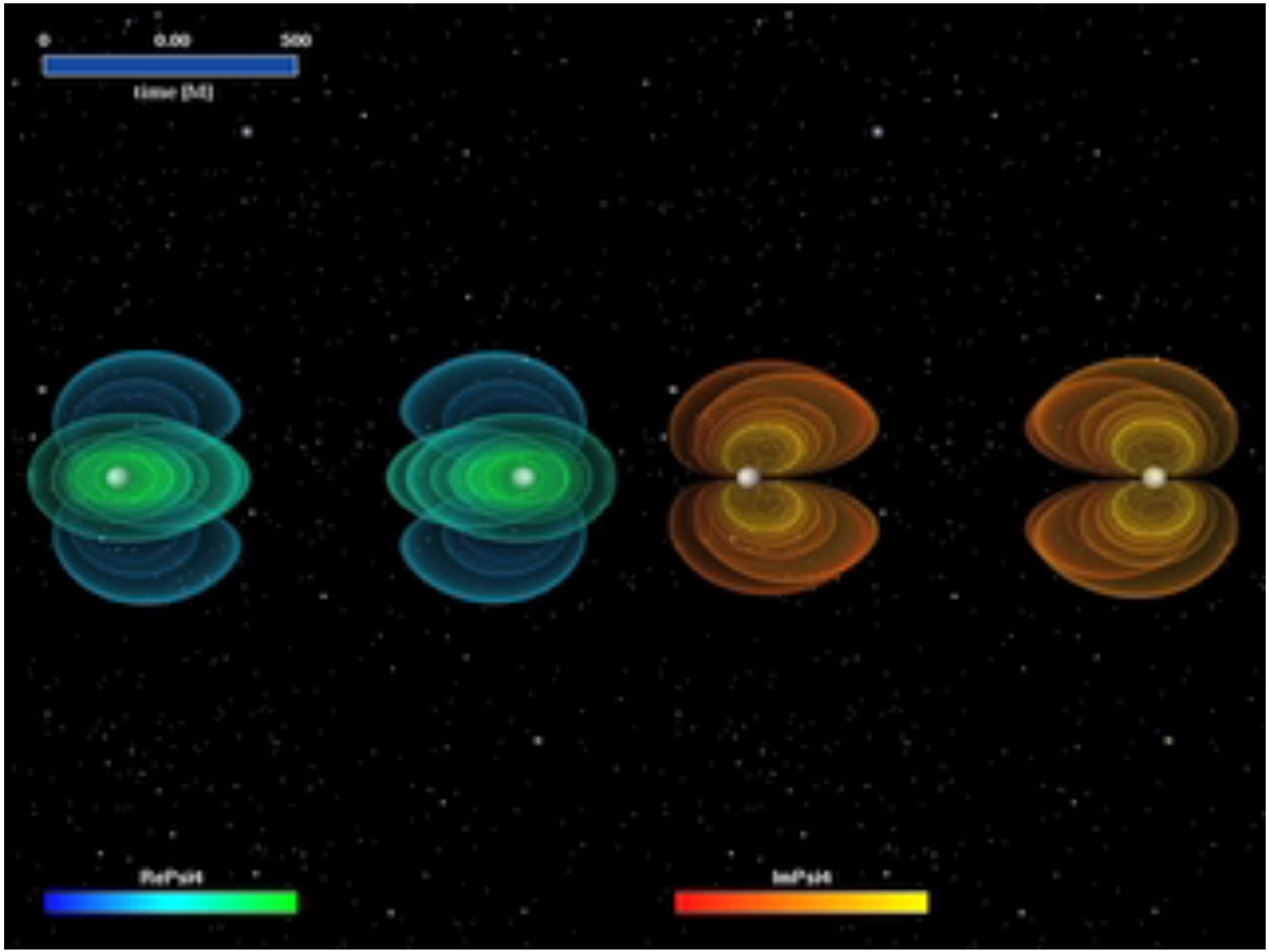




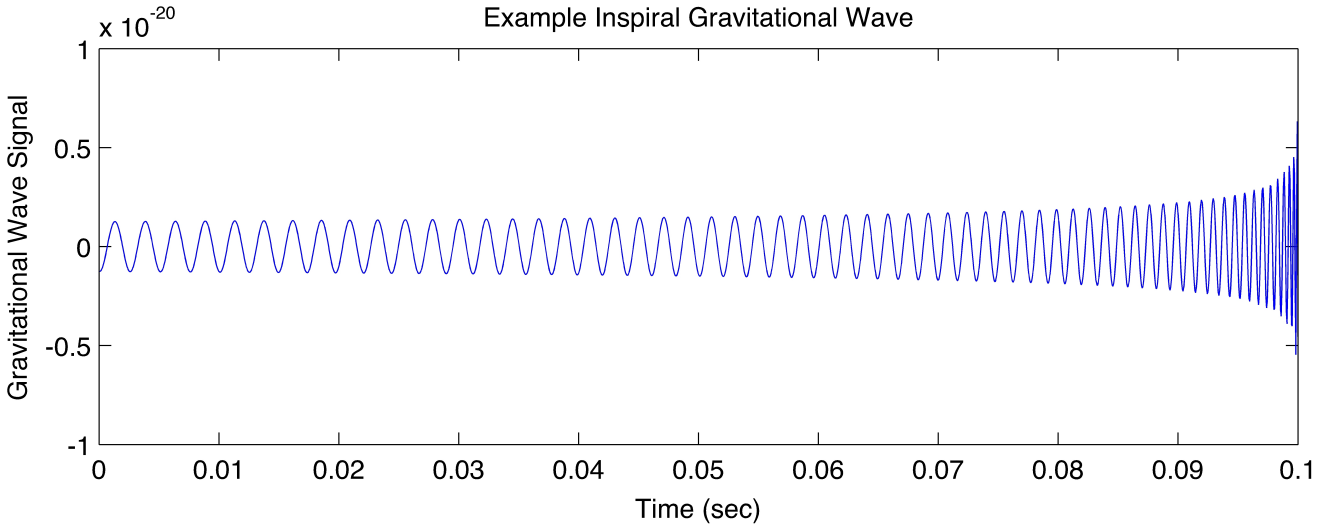
Zwarte gat formatie van twee zware(neutronen) sterren

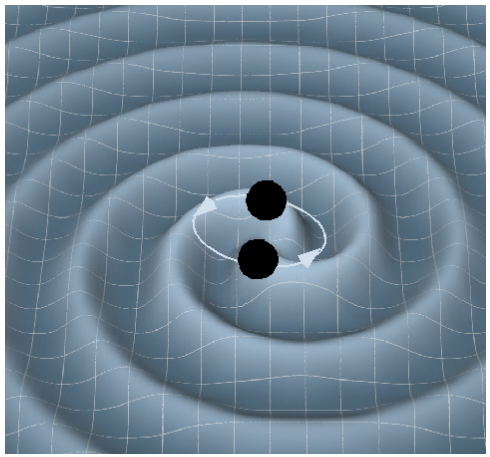


Gravitatiegolven tijdens de formatie van een zwart gat



“Het geluid” van twee dansende sterren



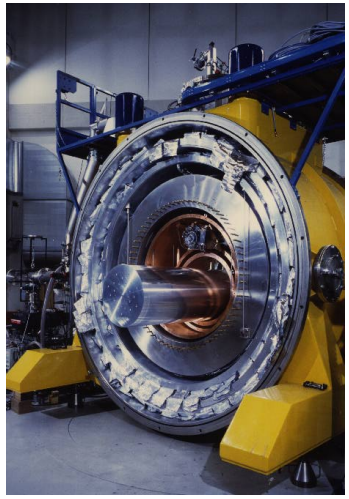




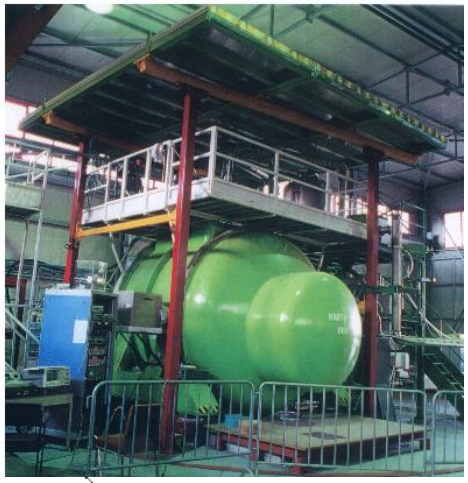
Hoe kan je gravitatie straling meten?

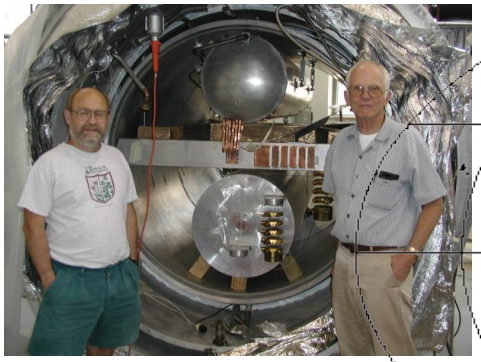


Staaf detectoren: IGEC collaboration



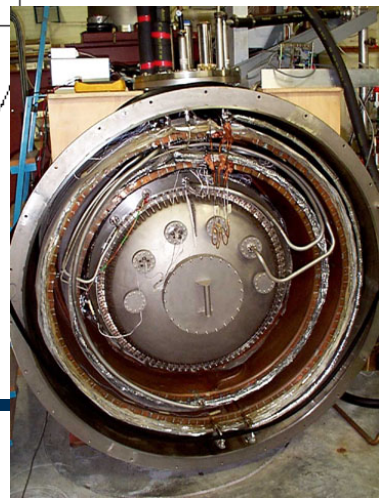








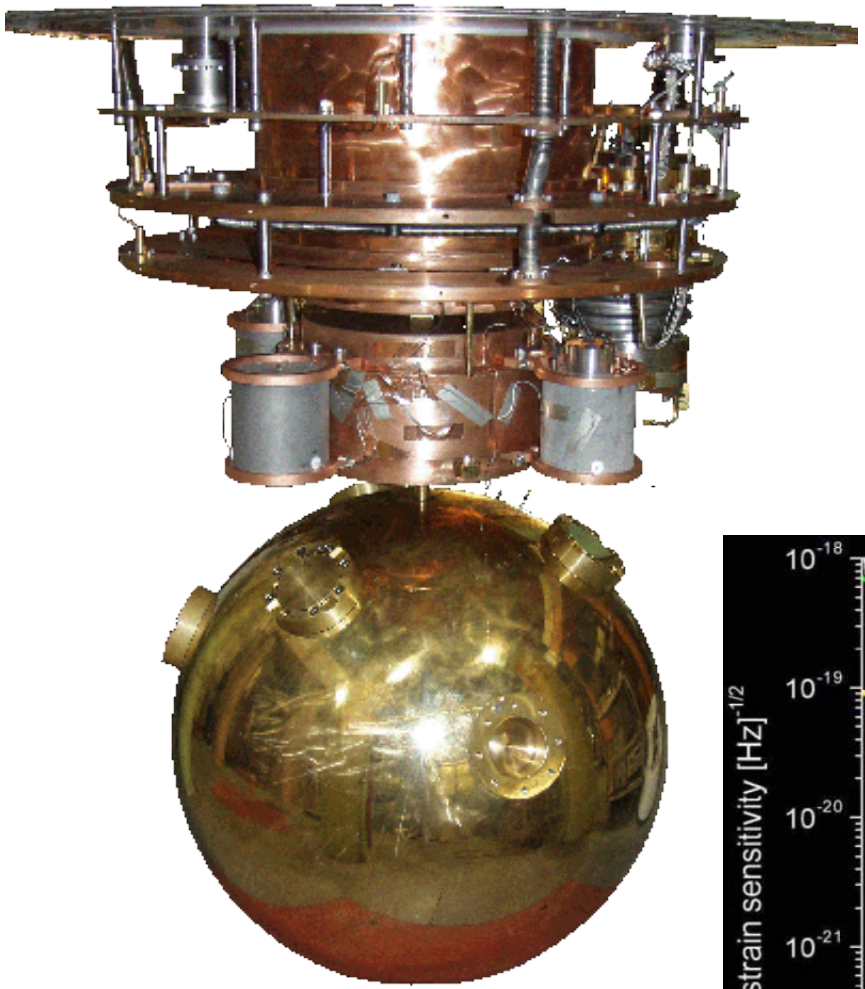
Meten van gravitatiegolven van compacte objecten



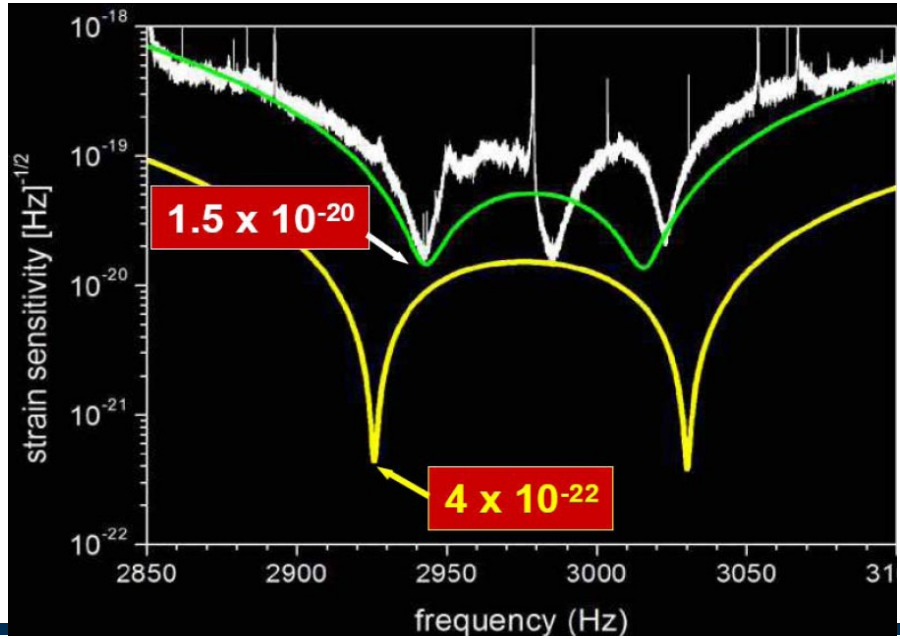
IGEC

Ladbrokes.com

Mini-GRAIL: een bolvormige `staaf' in Leiden

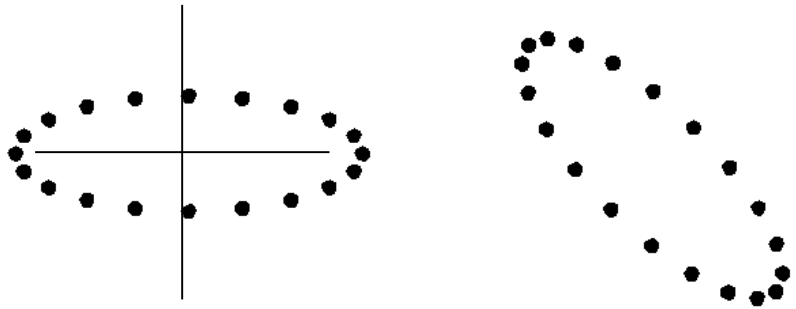


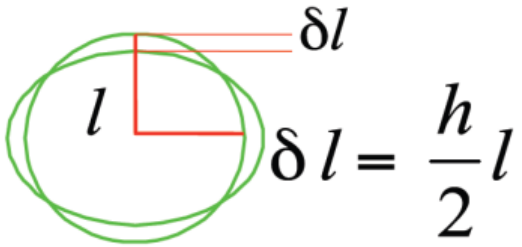
- 68 cm diameter, 1400 kg CuAl
- 20 mK
- 2001 – ?

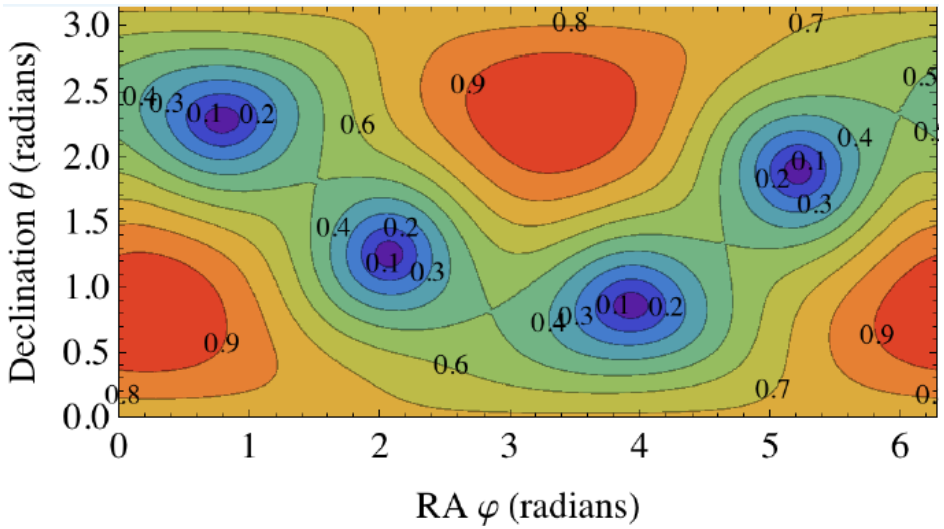


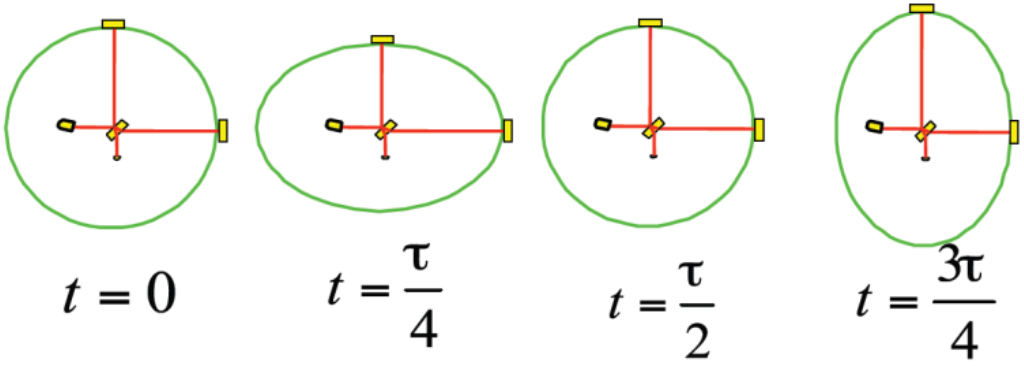
Het meten van de kromming in ruimte tijd

- Een systeem van vrij vallende testmassa's wordt verplaatst door een gravitatiegolf
- Plus een kruispolarisatie
- Maak spiegels van de test massa's en meet de verplaatsing met een interferometer
- "Antenae" gevoeligheid afhankelijk van richting

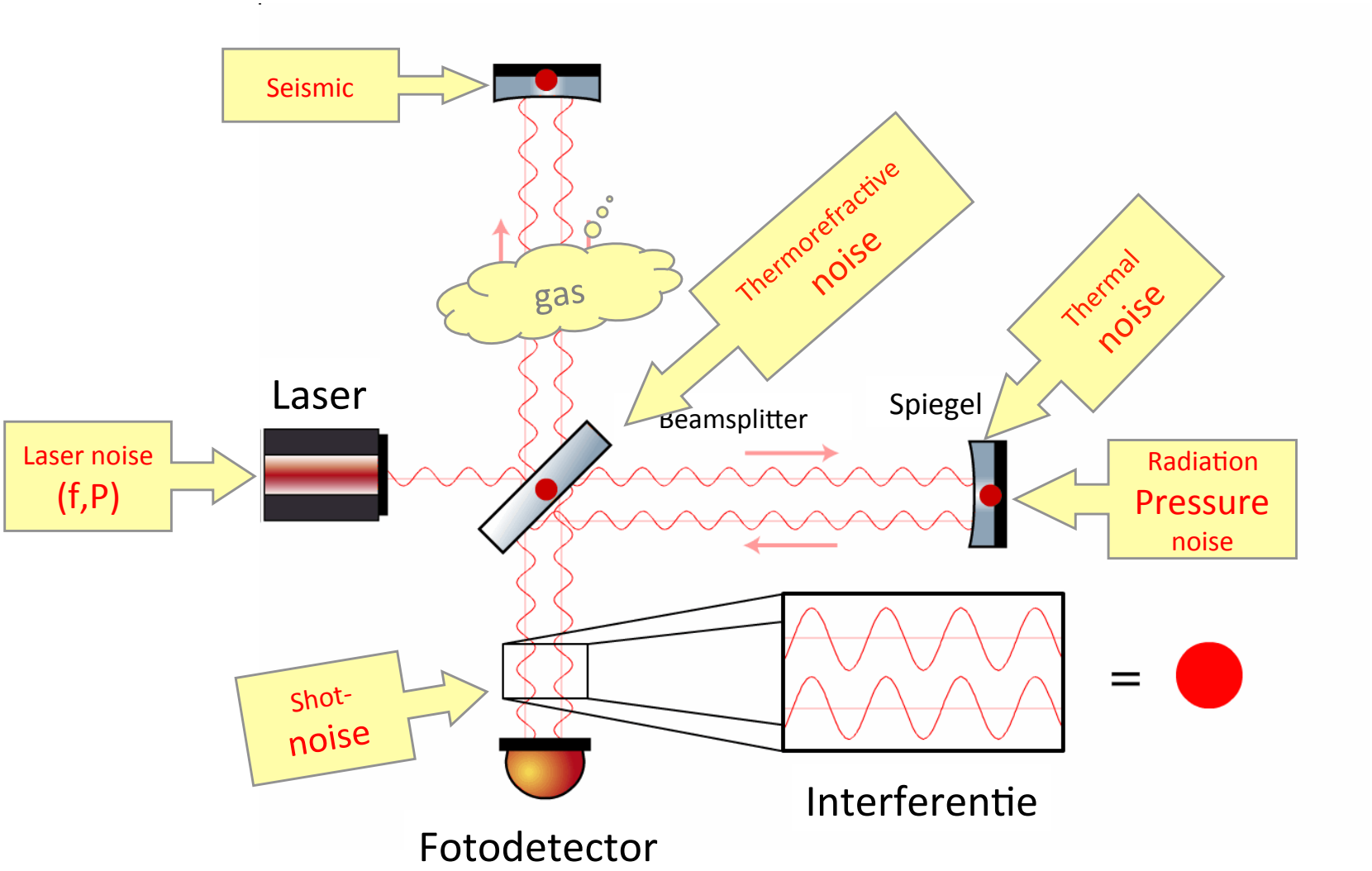


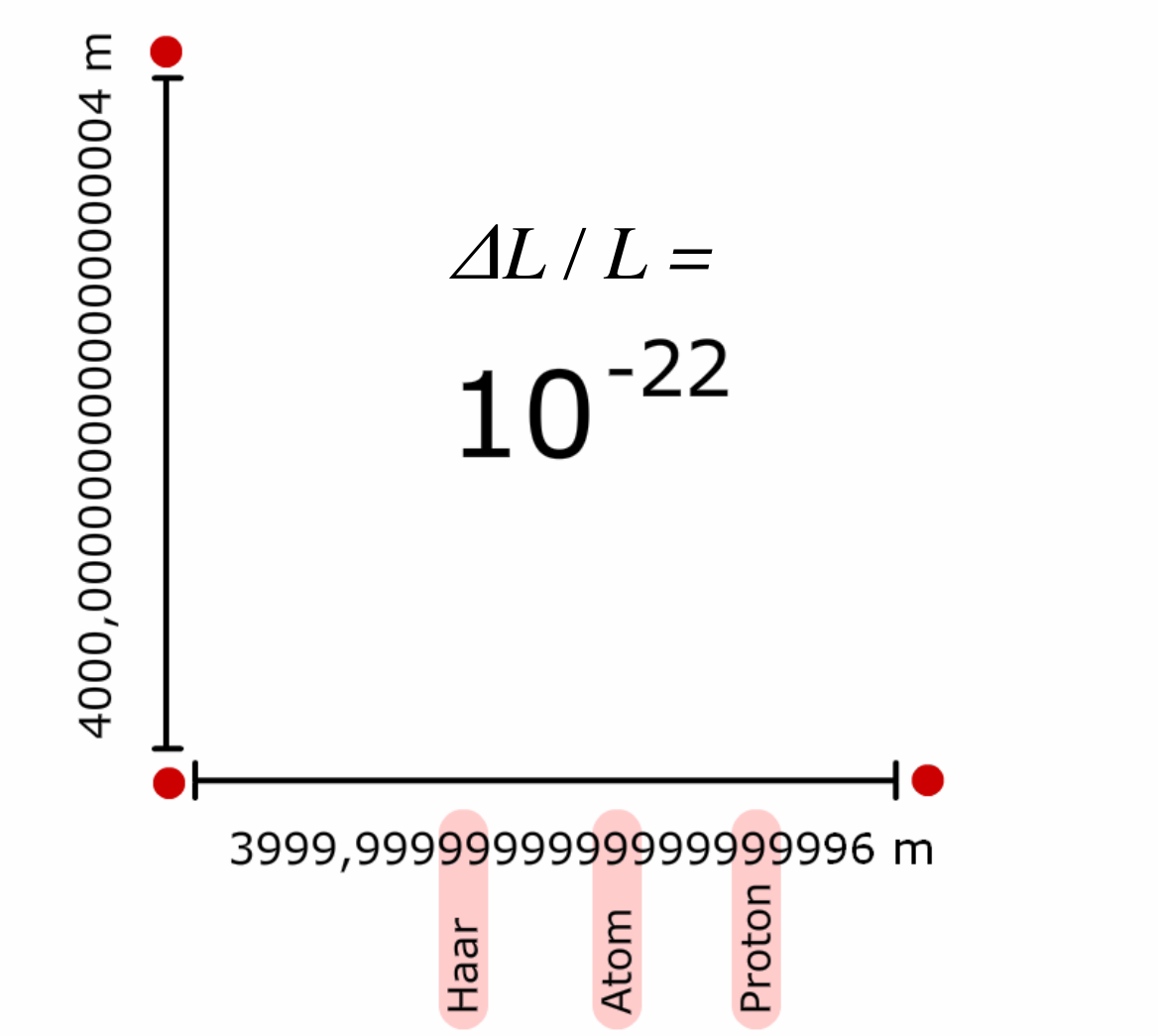






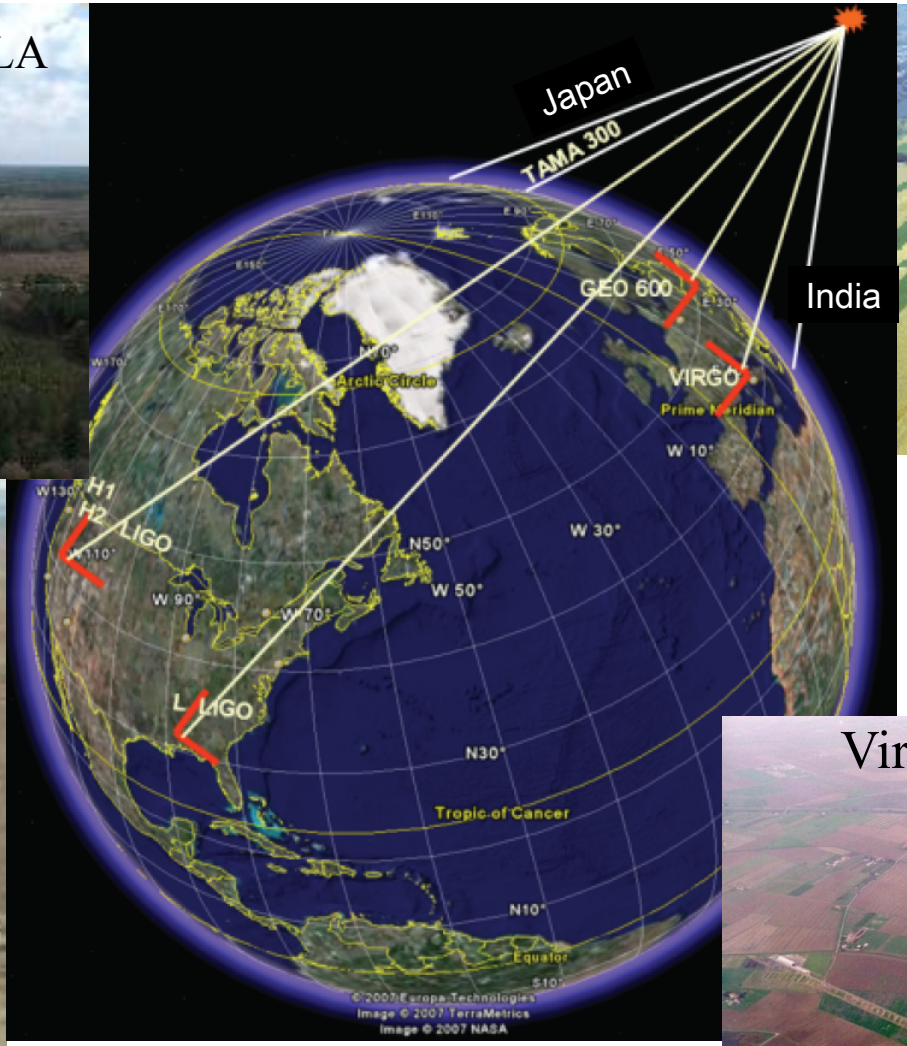
Het meten van de kromming in ruimte tijd




4000,000000000000000004 m
$\Delta L / L =$
10^{-22}
3999,999999999999999996 m
Haar
Atom
Proton

Een wereld wijde netwerk van gravitatie golf detectors





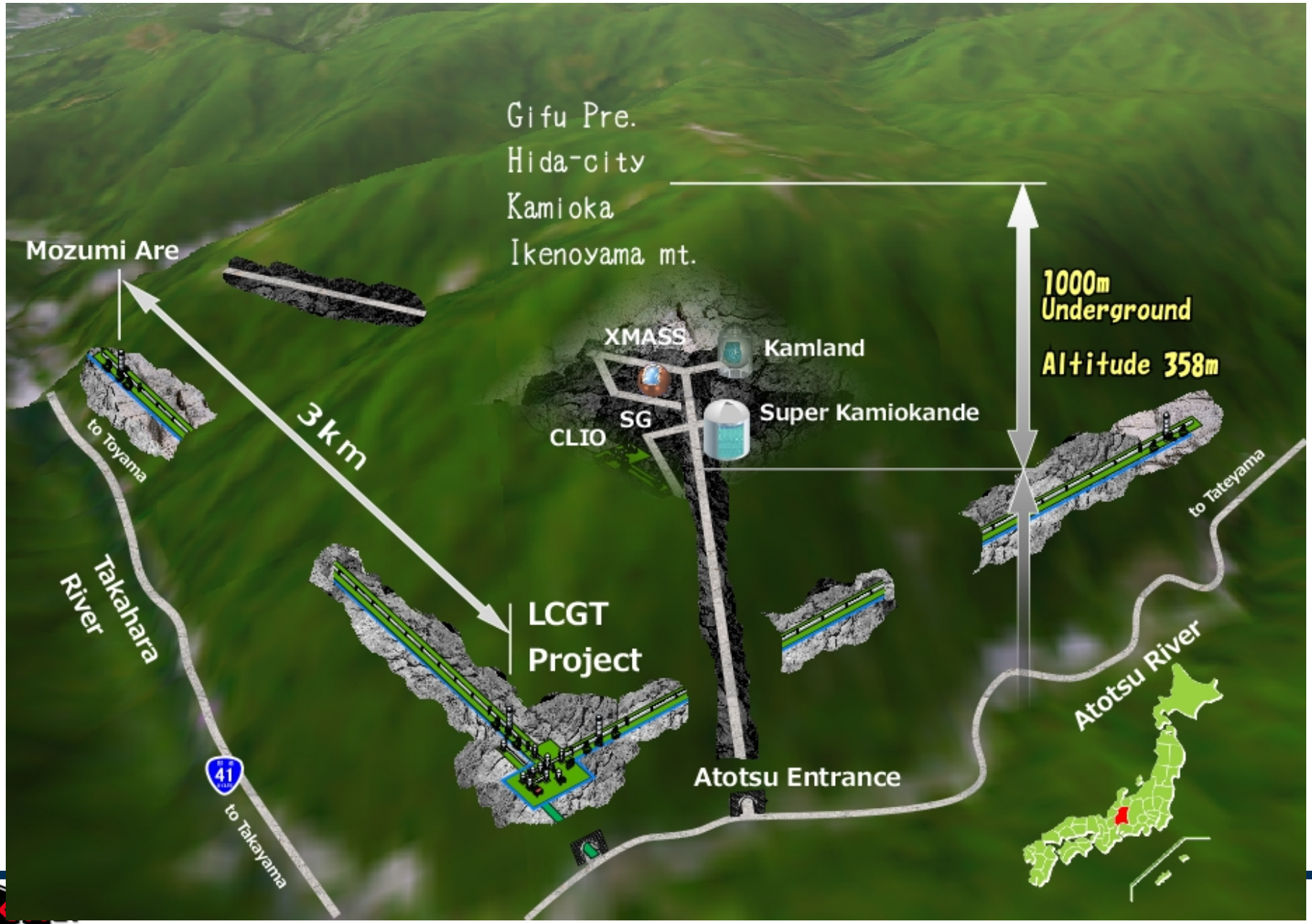




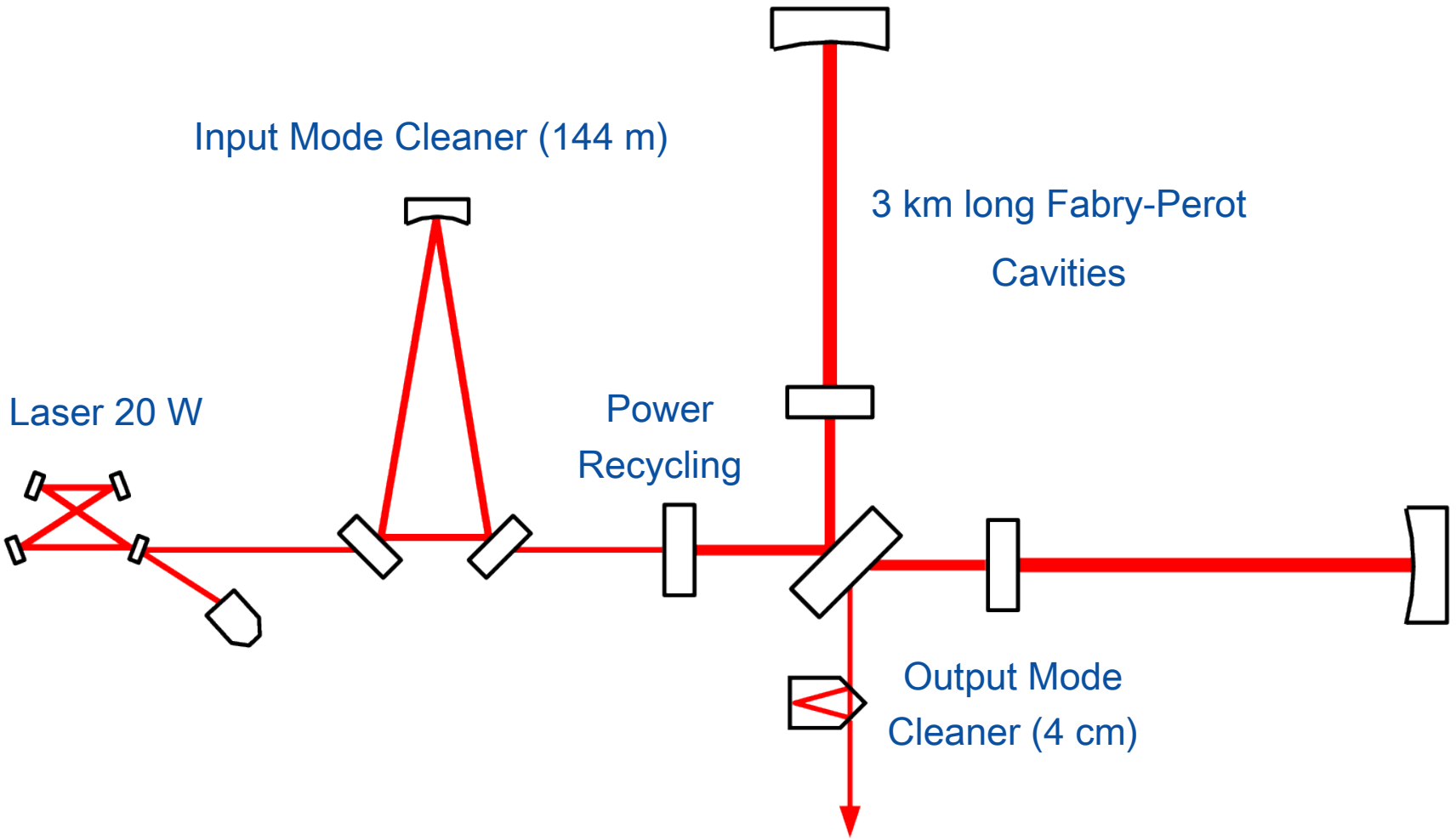
LIGO India ~2018



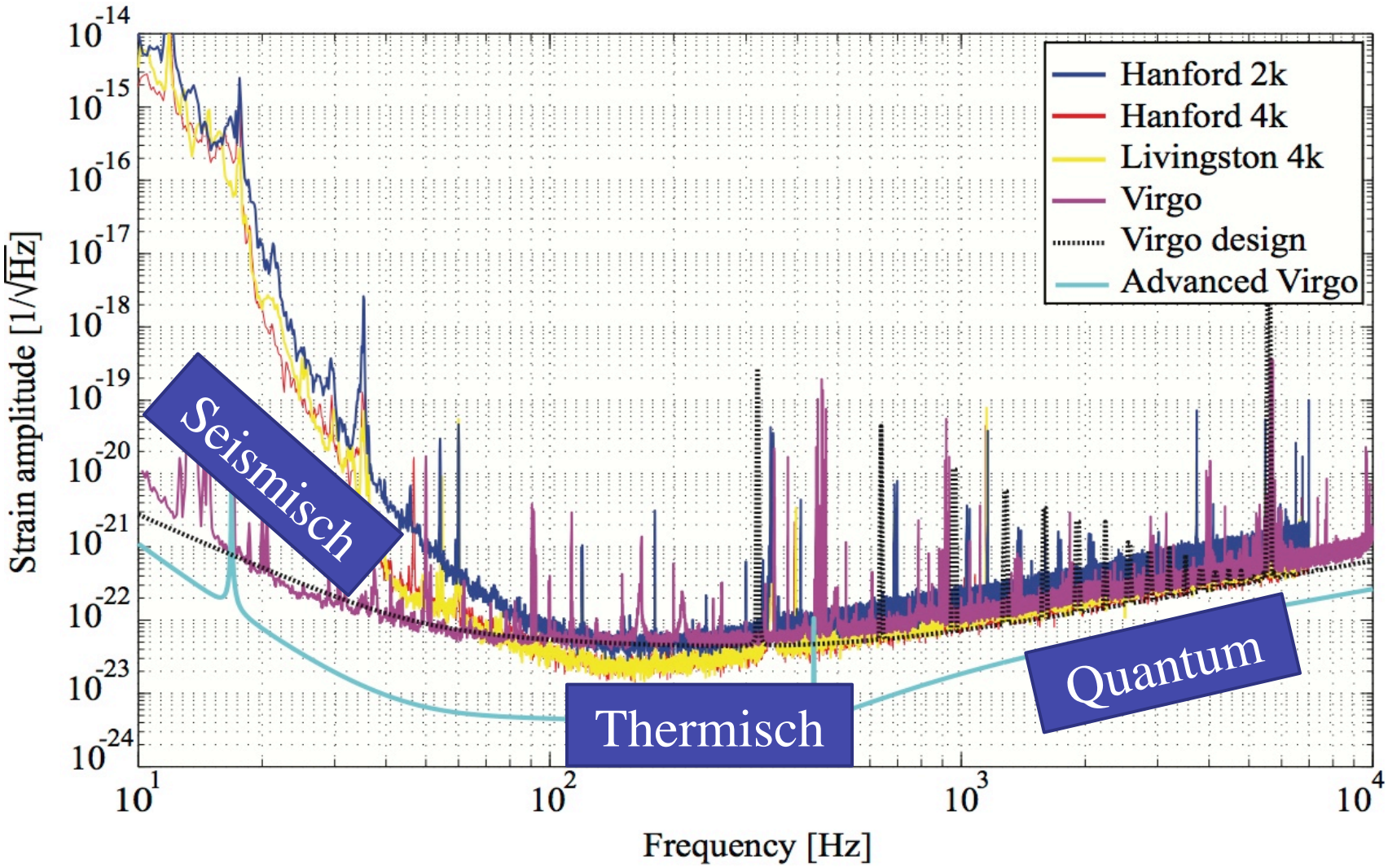
KAGRA, Ondergrondse detector in Kamioka, Japan



VIRGO optische schema



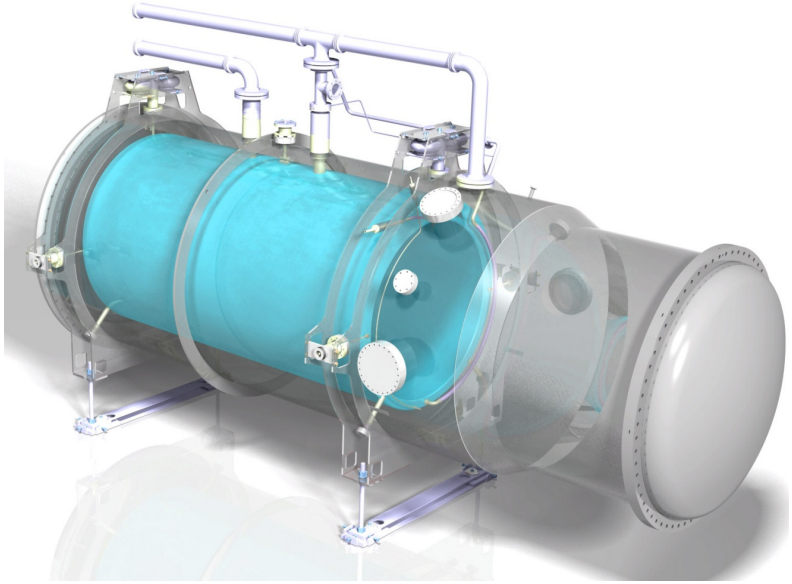
Detector gevoeligheid uitgedrukt in “strain”, $h=\Delta L/L$



Virgo is het grootste vacuum system in Europe

- (LIGO is ‘s werelds grootste)
- 3km long arm cavity tubes ~1 m diameter
- Ultra hoge vacuüm
- Cryogenic molecule traps



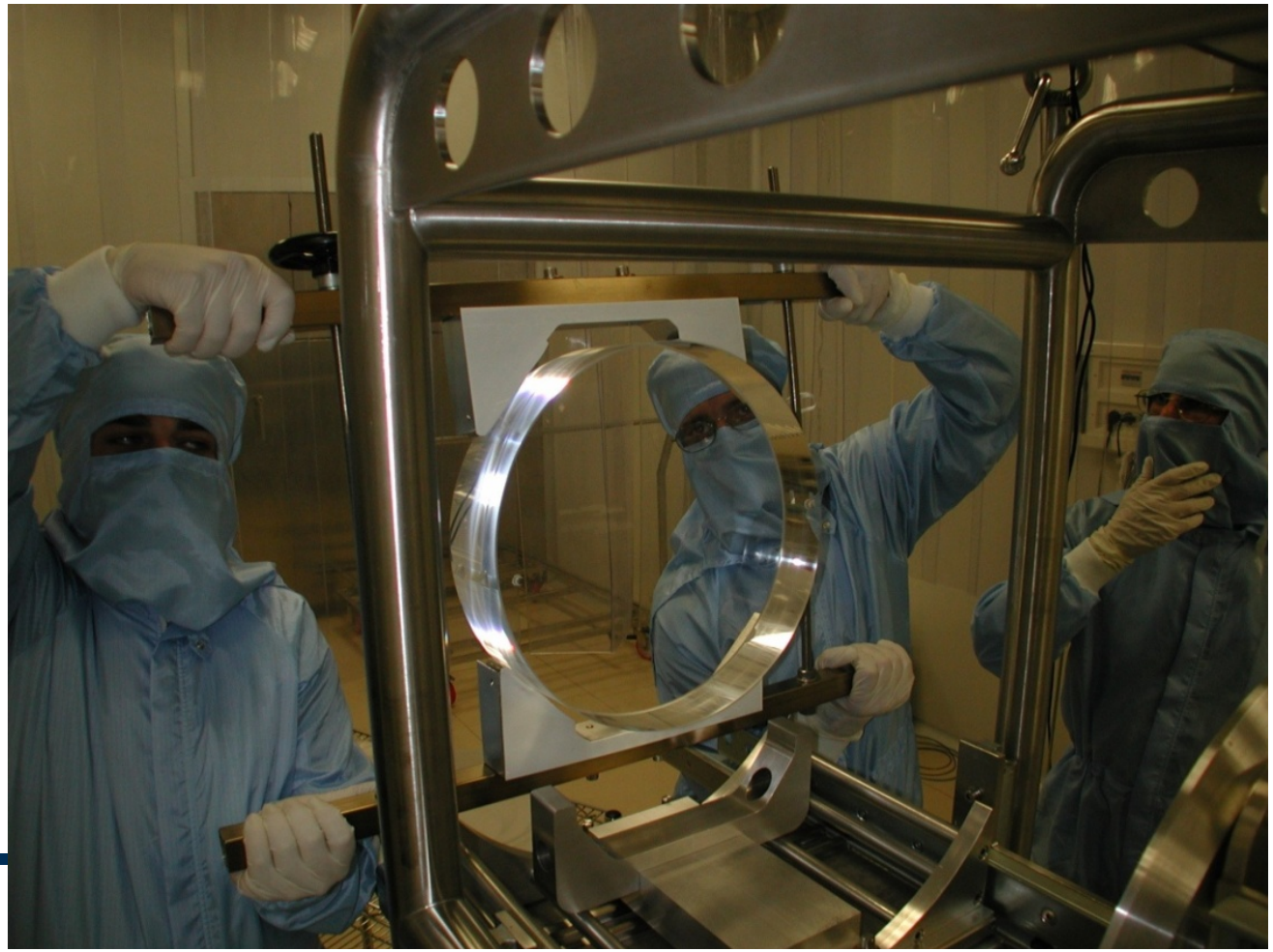




Spiegels gemaakt van ultra puur Silica

High quality fused silica mirrors

- 35 cm diameter, 10 cm thickness, 21 kg mass
- Surface deformation ~l/100
- Substrate losses ~1 ppm
- Coating losses <5 ppm

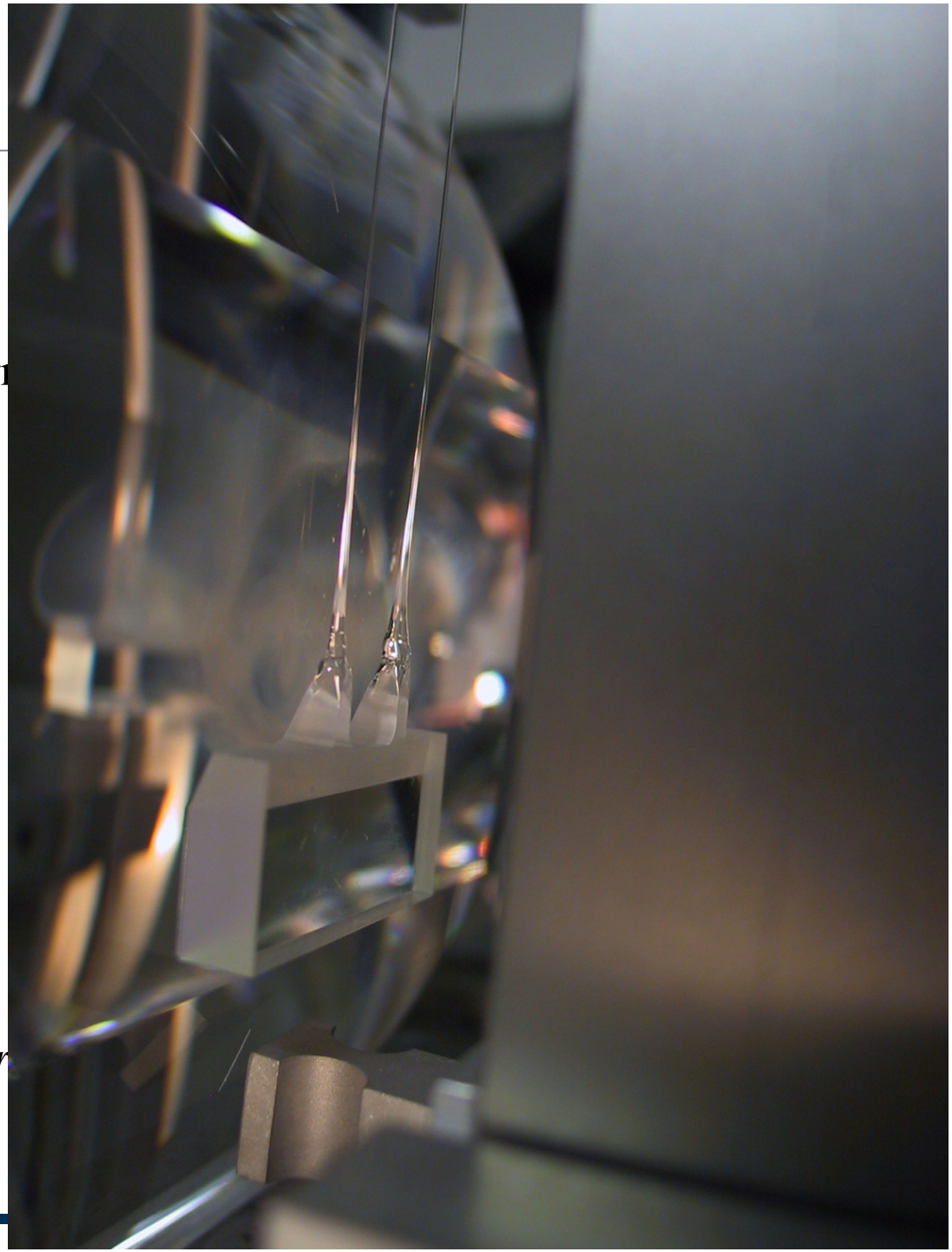


Thermische ruis

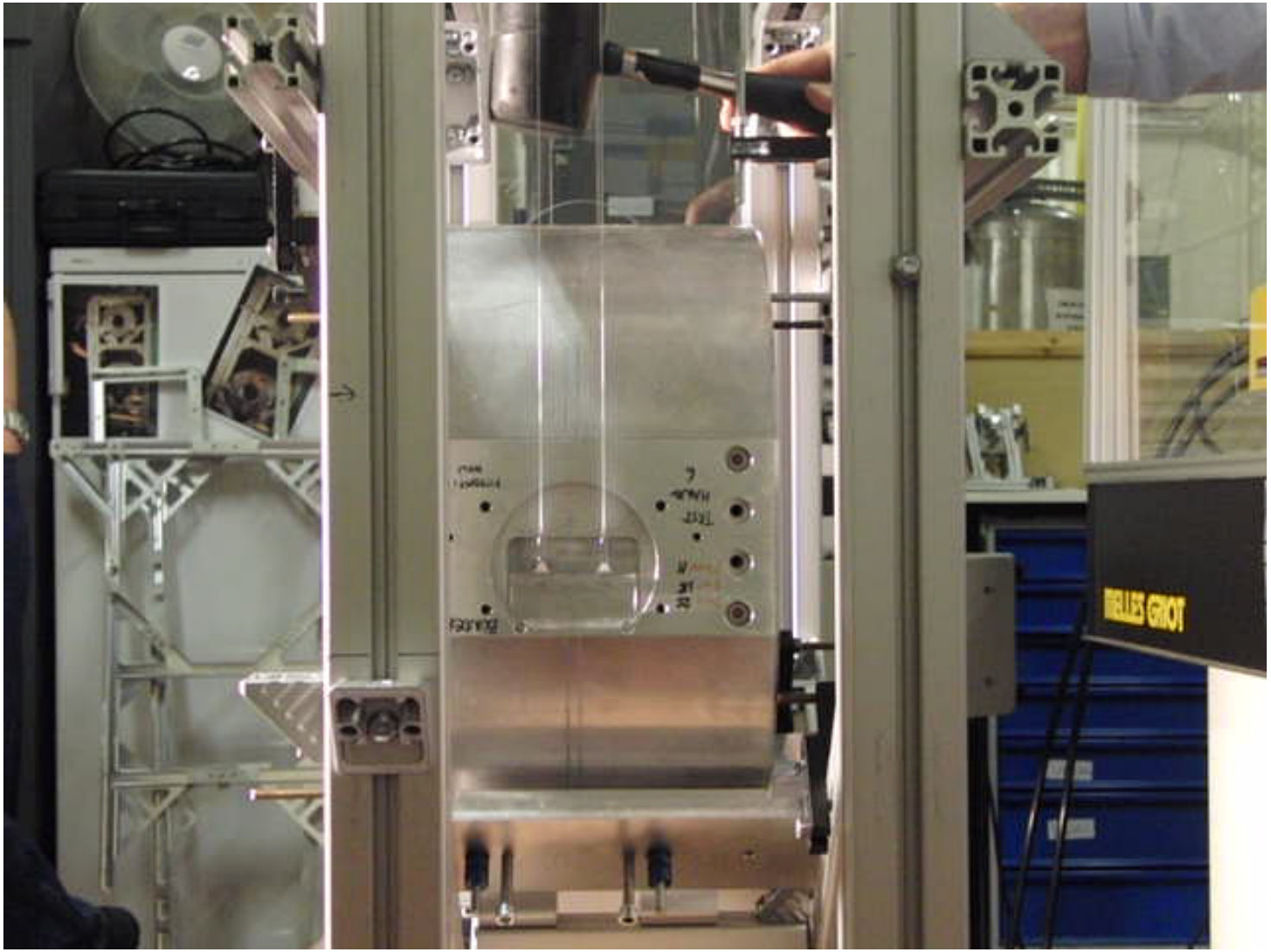
- Mechanische modes zijn in therr
  - *Modes:*
    - *Pendulum mode*
    - *Draad vibratie*
    - *Spiegel interne modes*
    - *Coating oppervlak*
  - *Energie:* $k_B T$
- Thermisch spectrum:

- Strategie:
  - *Gebruik speciale materialen:*

    → *concentreer de beweging op de r*

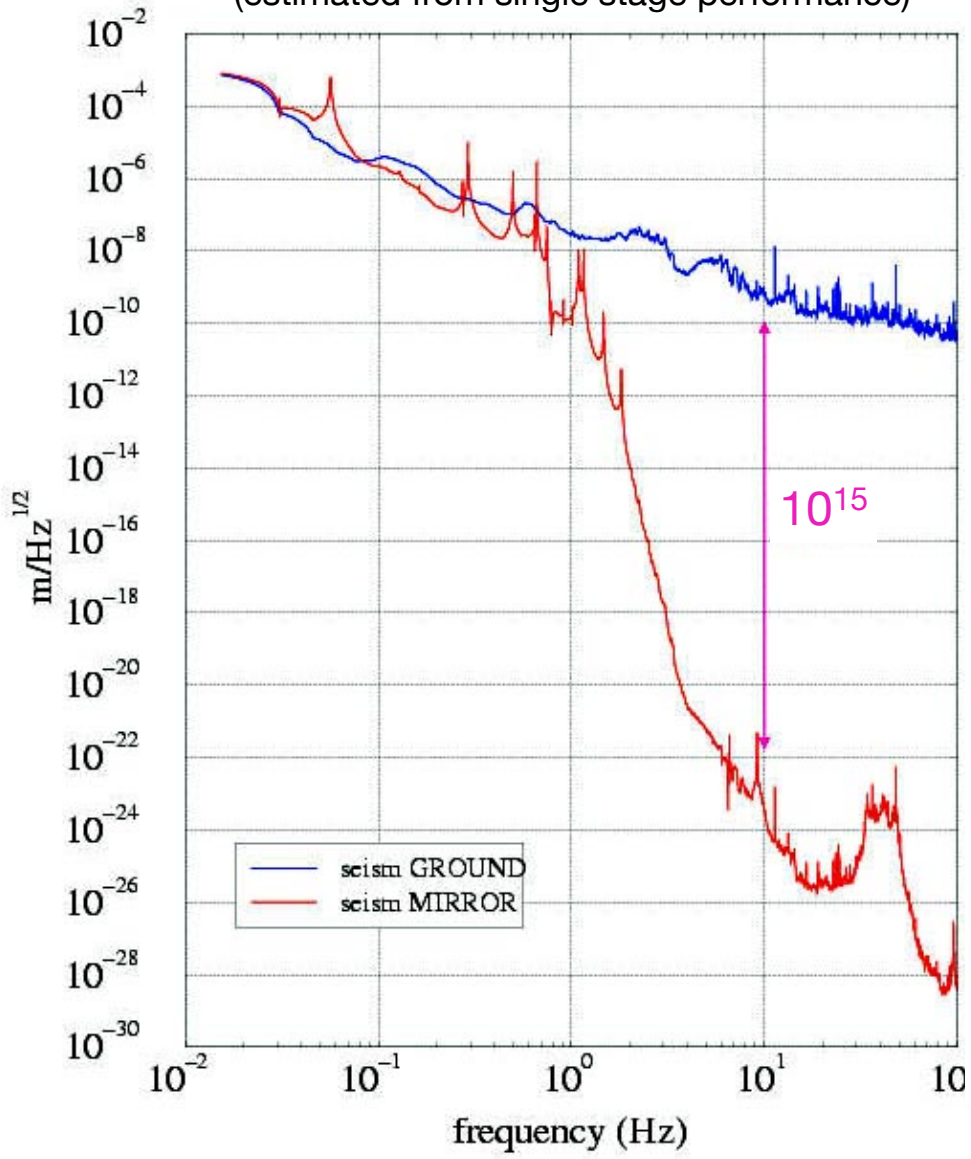


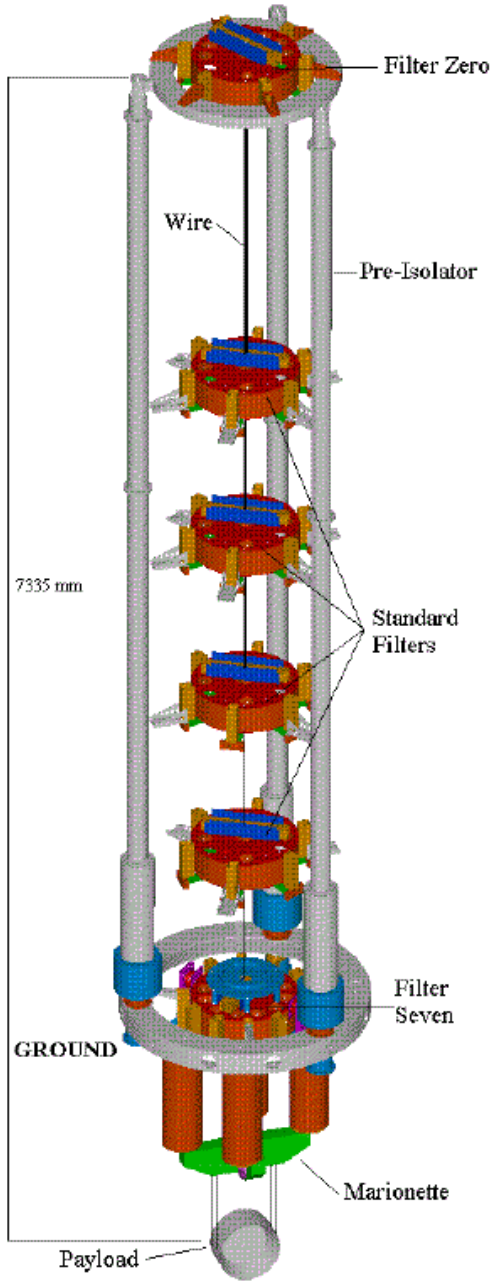
Monolithische fused silica ophanging voor spiegels



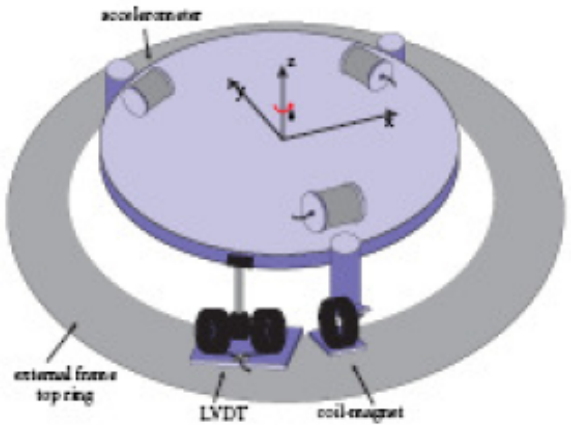
“Super attenuators” ontwikkeld als schokdempers

(estimated from single stage performance)

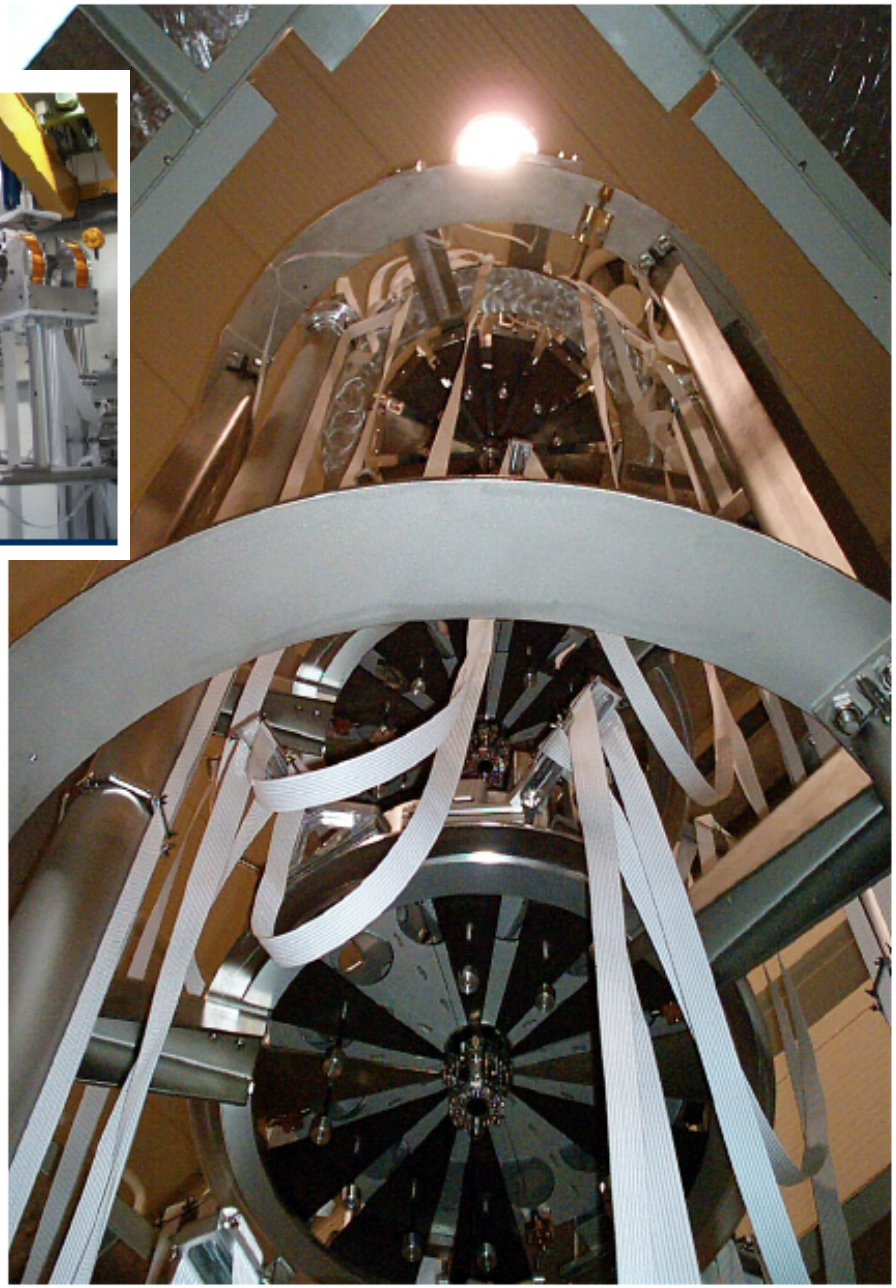


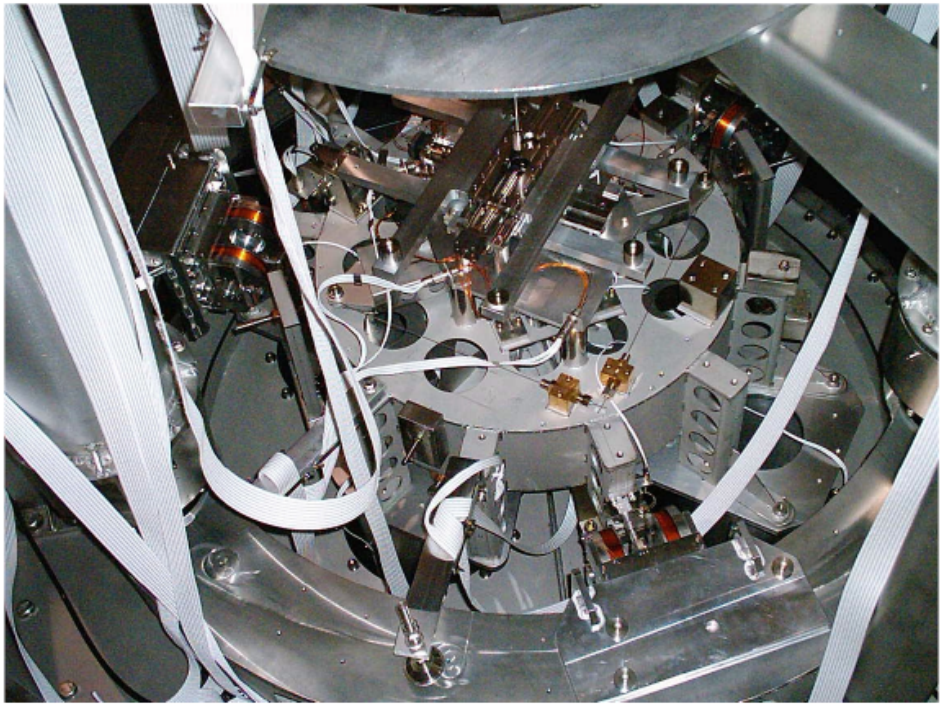


Seismische isolatie



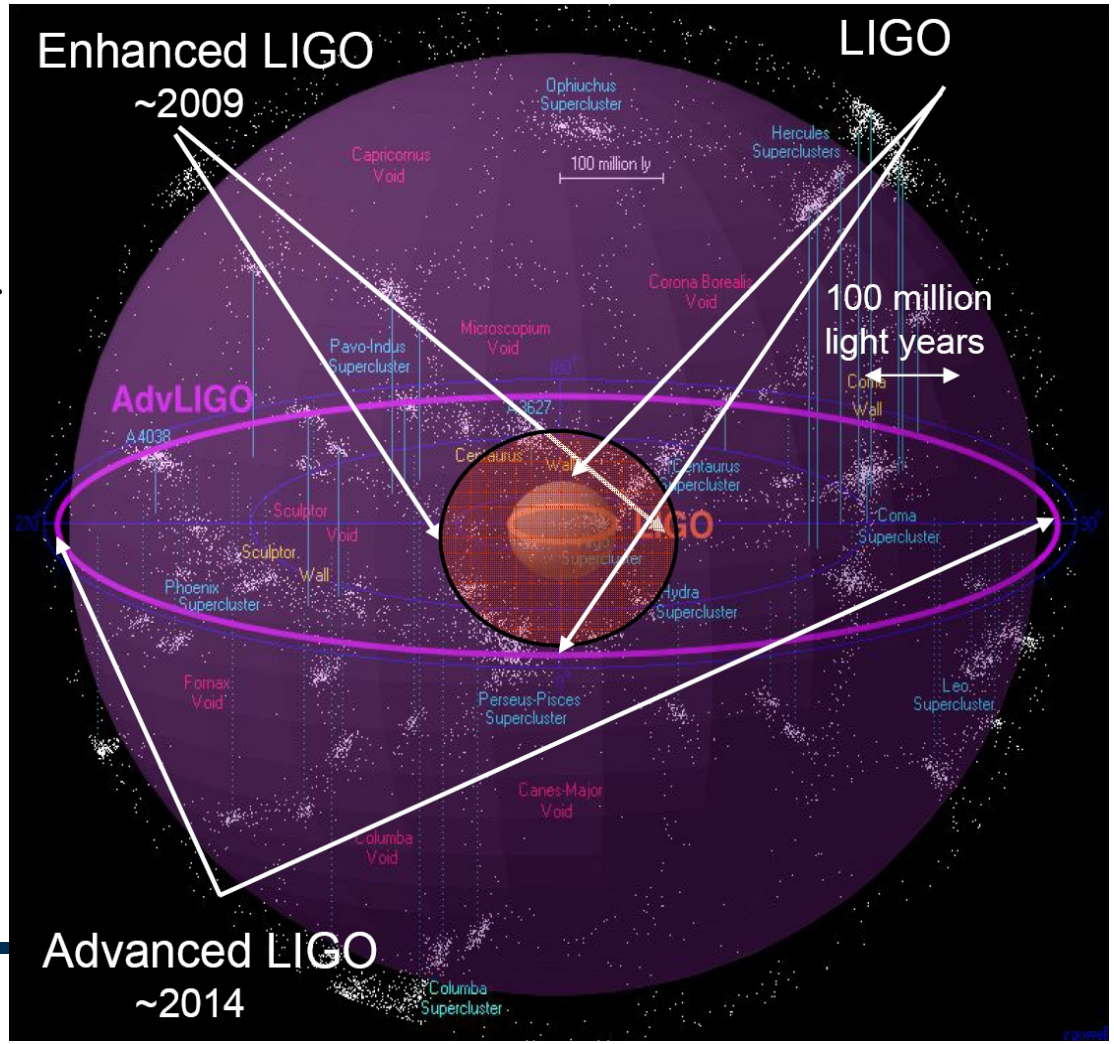






LIGO en VIRGO: evolutie

- Op dit moment honderden sterrenstelsels binnen bereik
- Virgo+ net afgesloten
- Advanced detectoren
  - *Ongeveer 1000 keer meer sterrenstelsels binnen bereik*
  - *In 2016 verwachten we 1 signaal per dag of week*
  - *Begin van gravitatie astrofysica*



Evolution of ground-based GW detectors

- 1st generation interferometric detectors
  - *Initial LIGO, Virgo, GEO600*

Unlikely detection

Science data taking
Set up network observation

- *Enhanced LIGO, Virgo+*

Plausible detection

Lay ground for multi-messenger astronomy

We are here

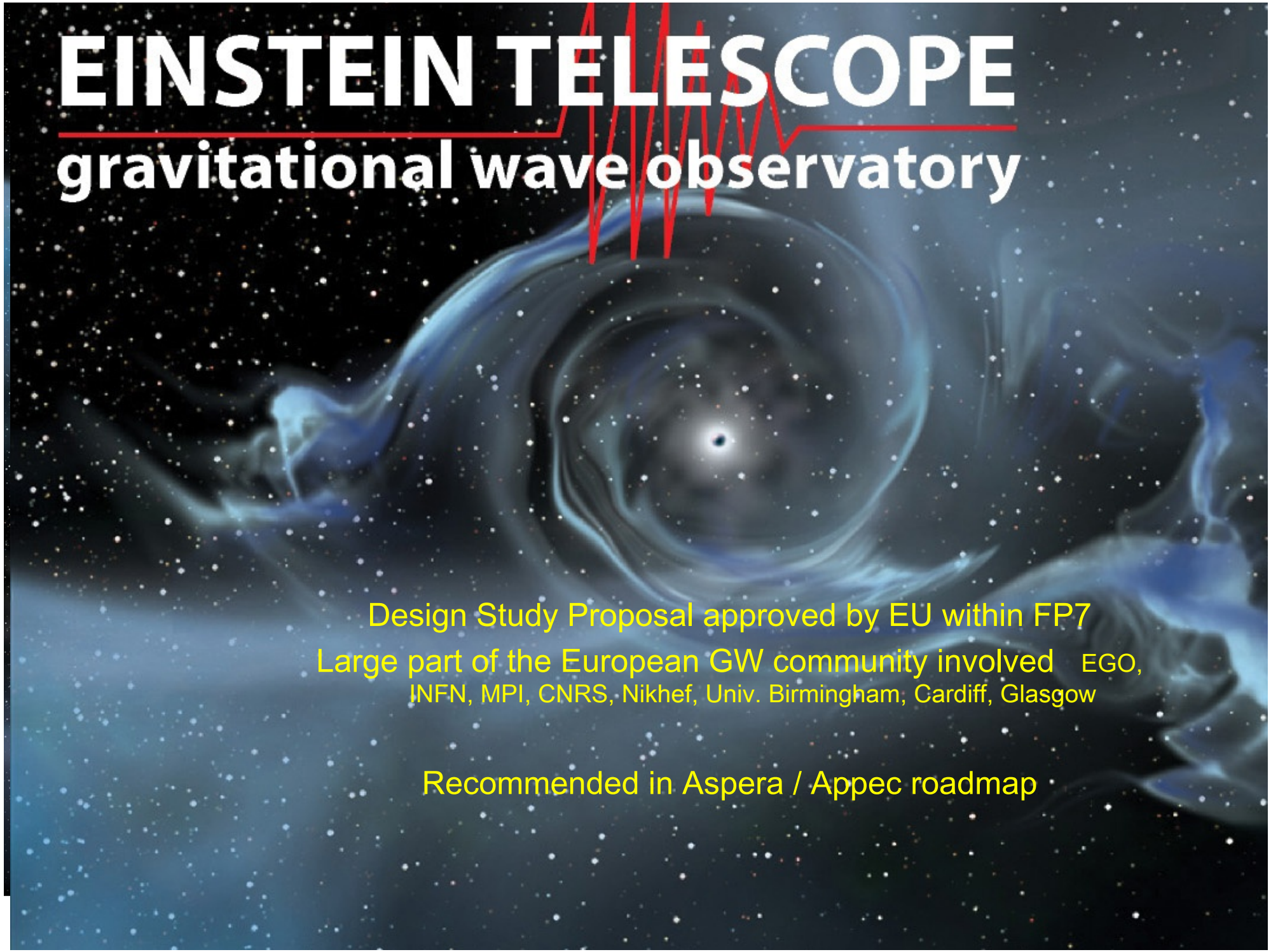
- 2nd generation detectors
  - *Advanced LIGO, Advanced Virgo, GEO-HF*

Likely detection

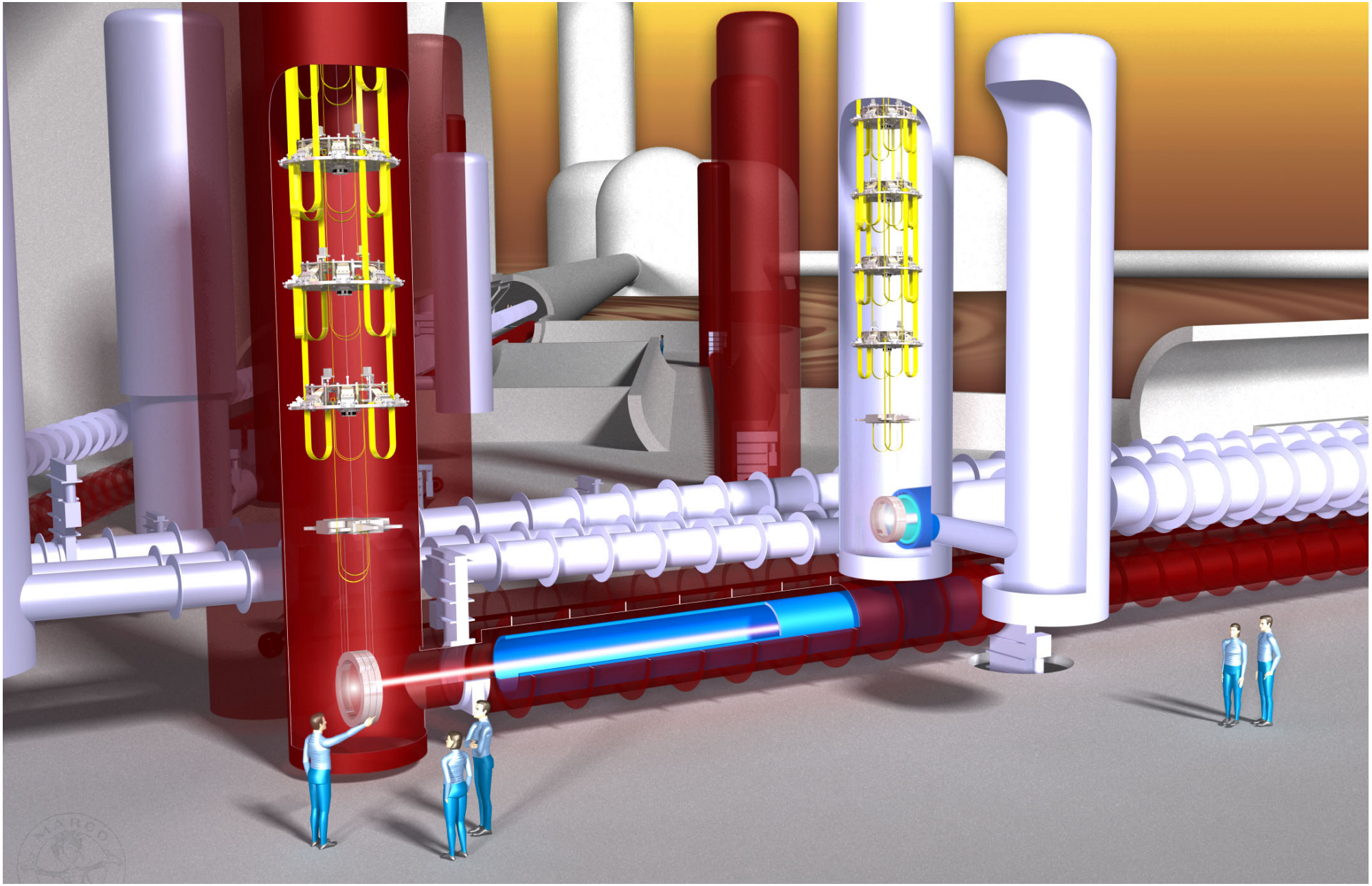
Routine observation
Towards GW astronomy

- 3rd generation detectors
  - *Einstein Telescope, US counterpart to ET*

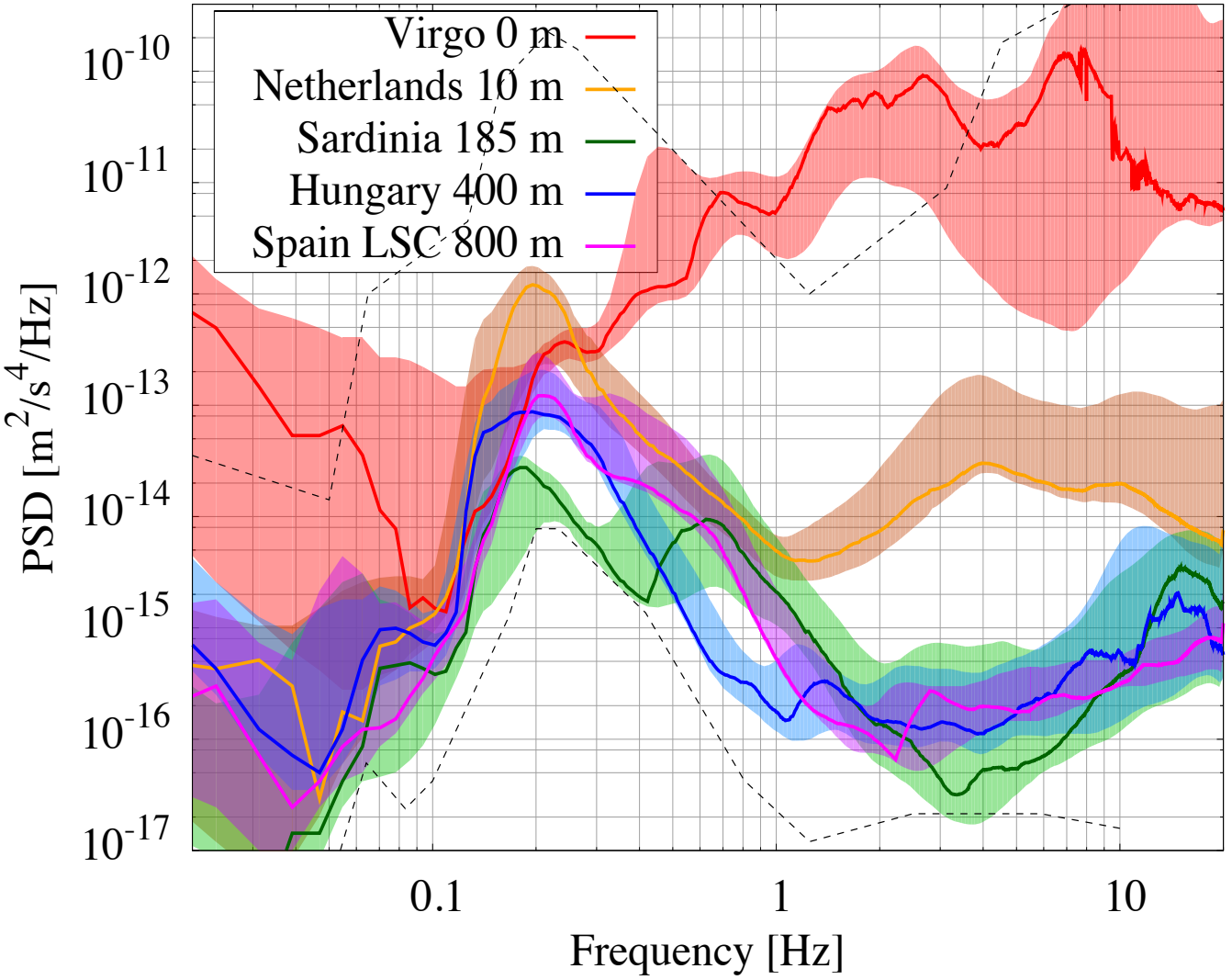
Thorough observation
of Universe with GW

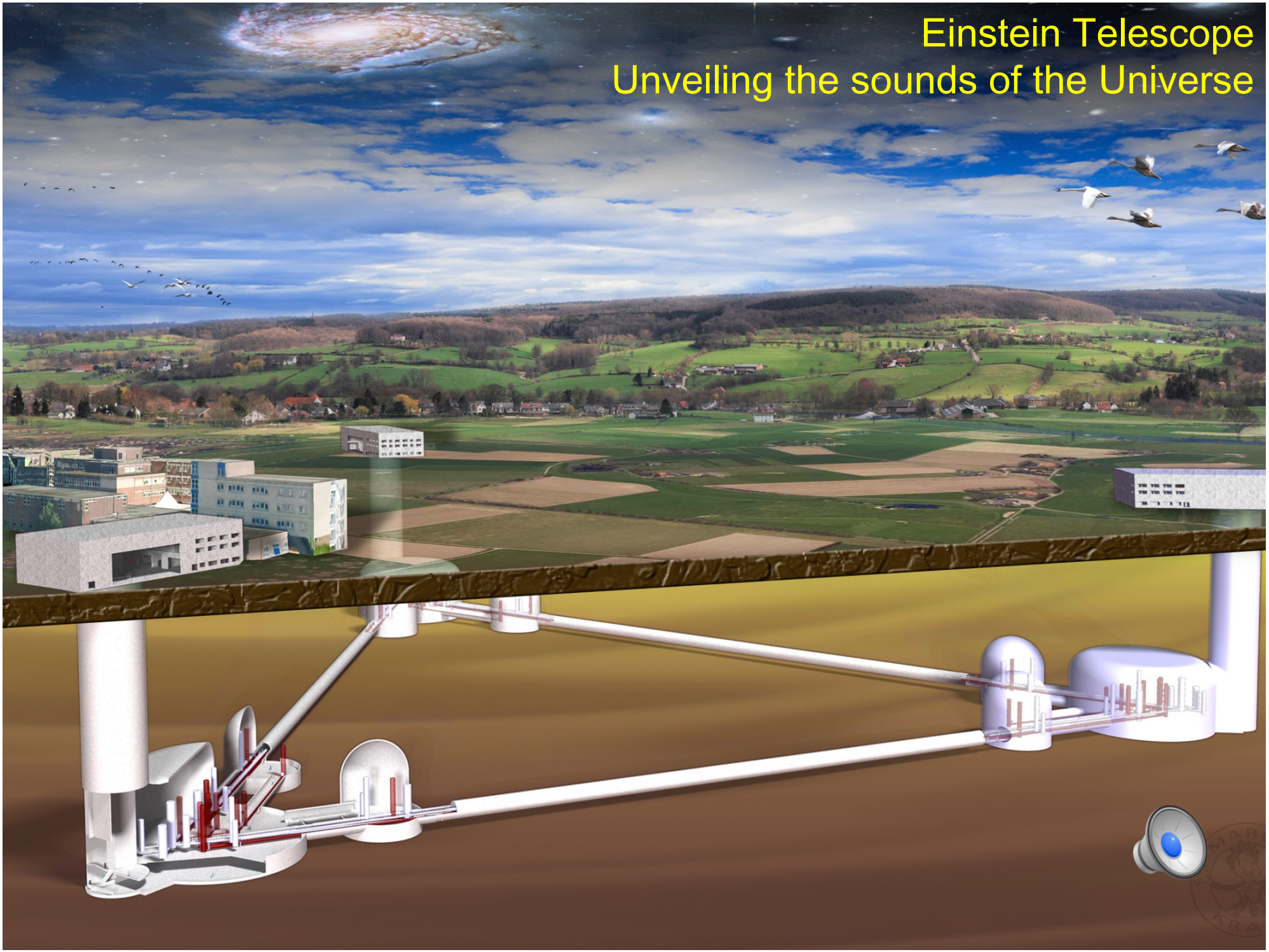

EINSTEIN TELESCOPE
gravitational wave observatory
Design Study Proposal approved by EU within FP7
Large part of the European GW community involved EGO,
INFN, MPI, CNRS, Nikhef, Univ. Birmingham, Cardiff, Glasgow
Recommended in Aspera / Appec roadmap

ET infrastructure

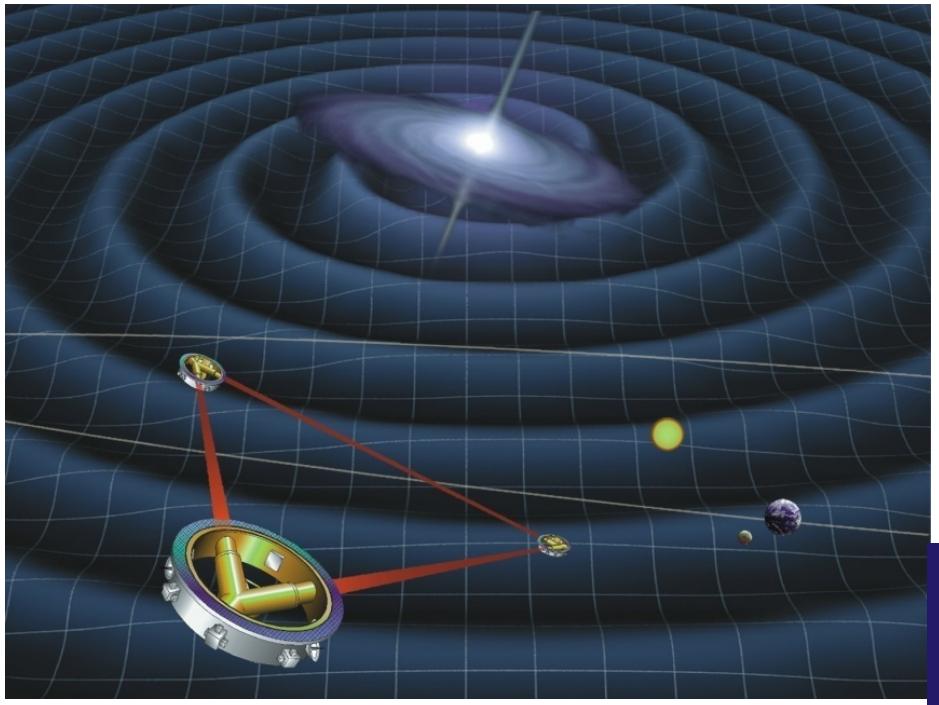


Seismische studies wijzen op geschikte locaties voor een volgende generatie detector



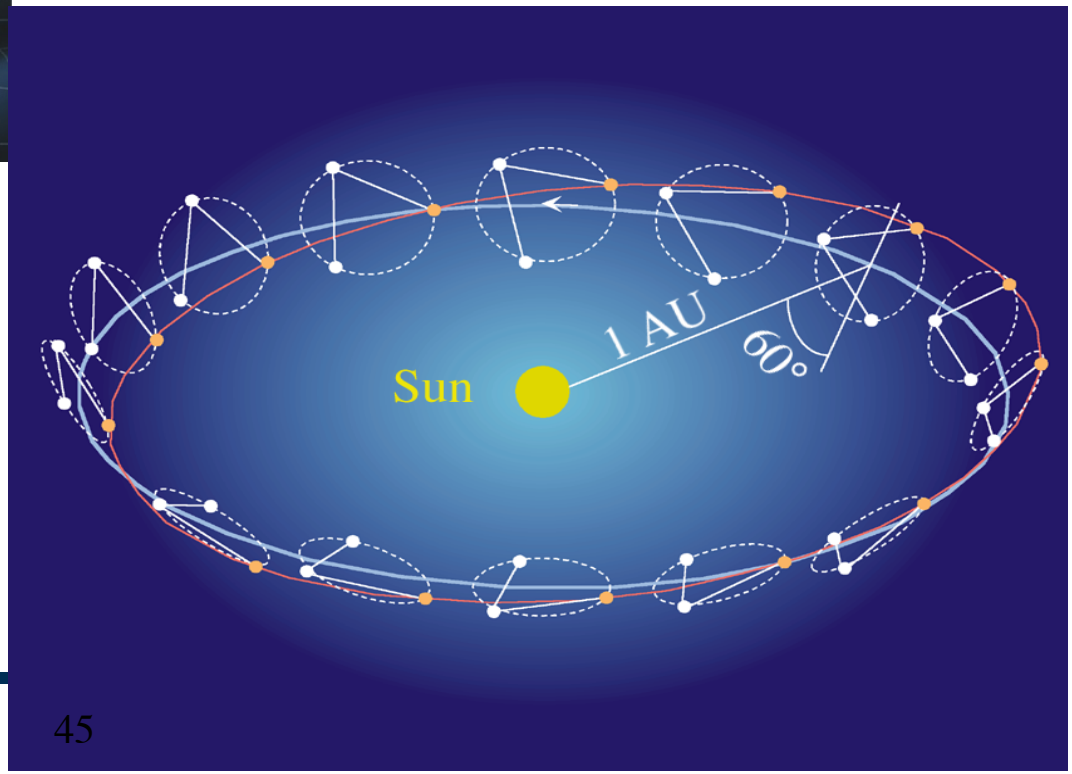

Einstein Telescope
Unveiling the sounds of the Universe

Gravitatie golf detector in de ruimte - LISA

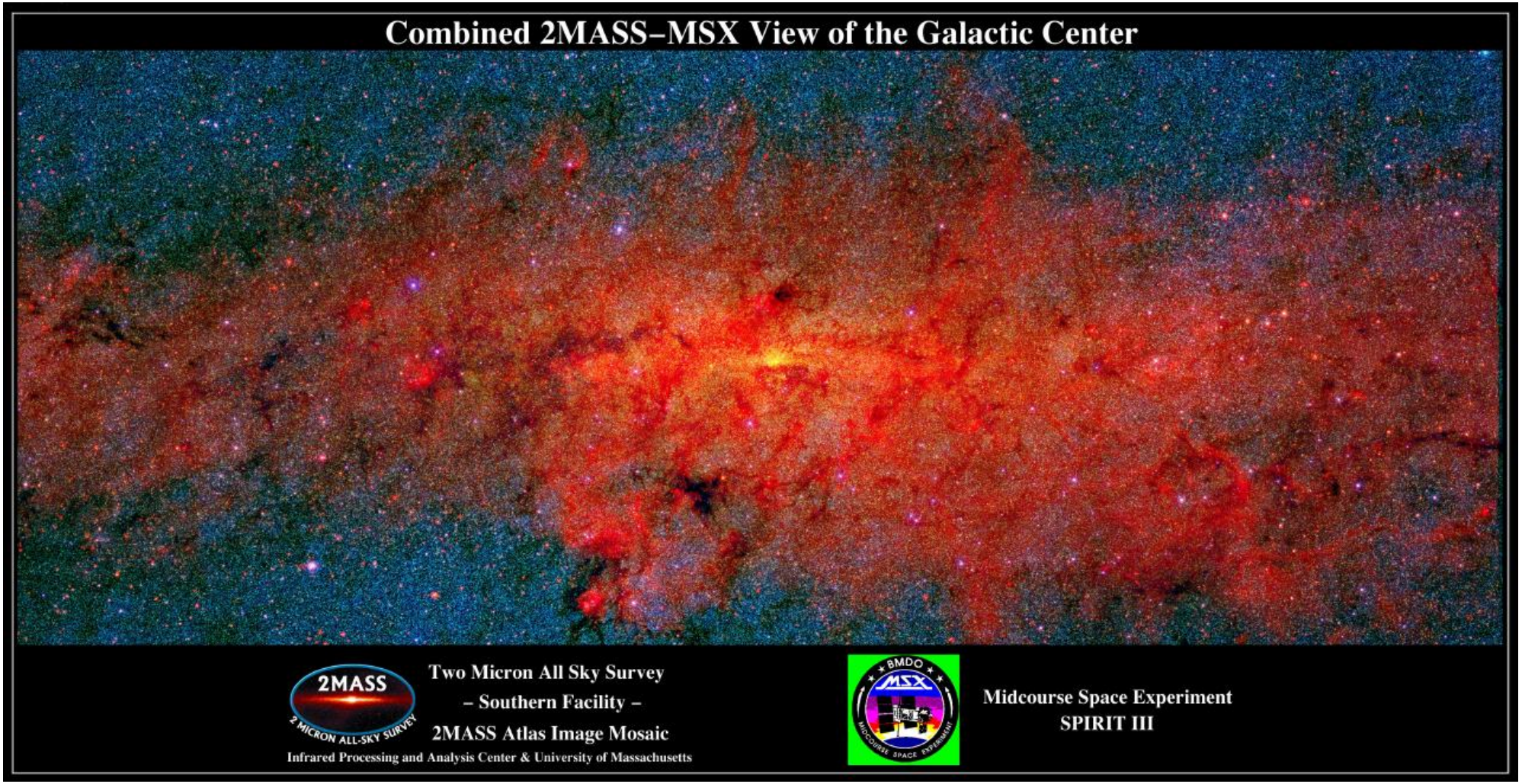


- *3 satelieten in een baan rond de zon, (achter Aarde) 5 x10^6 km uit elkaar*
- *Meet afstandsverschillen tussen vrijvallende massa's met lasers*
- *Sammenwerking tussen ~~NASA~~ en ESA*
- *Launch date > 2025*

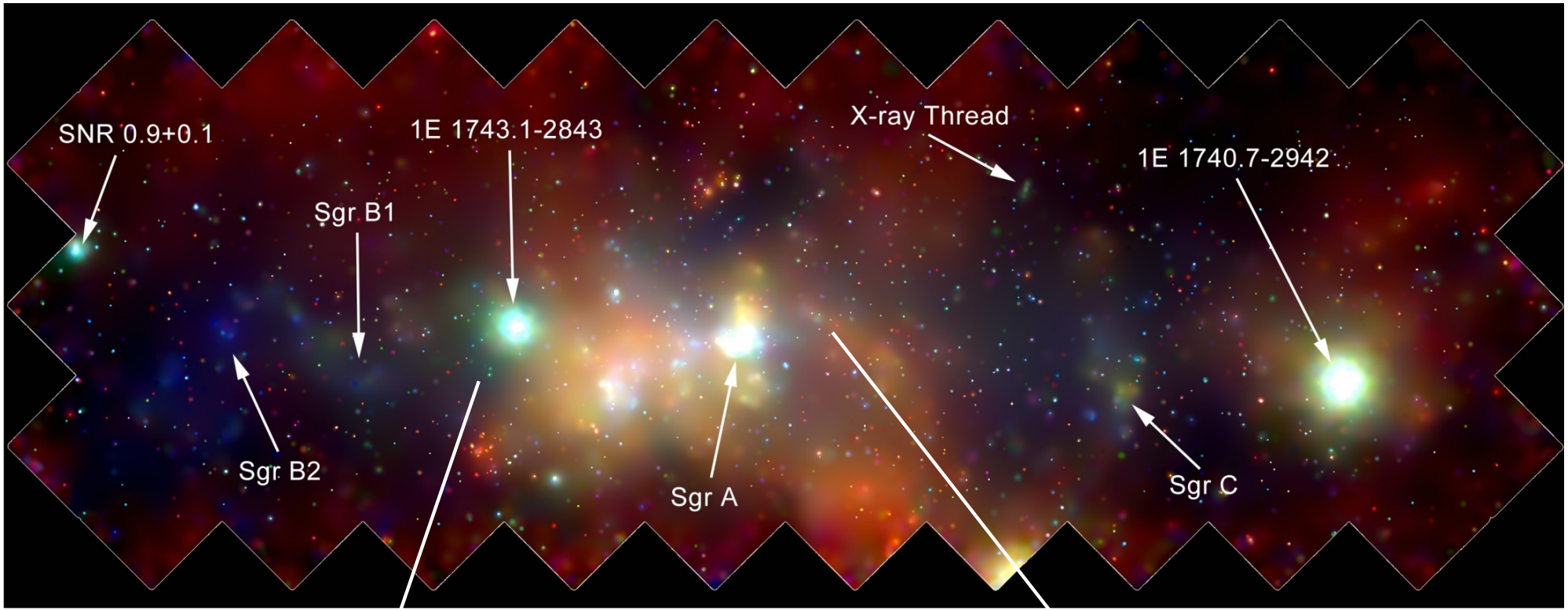
LISA jaagt op super-massive zwartegaten



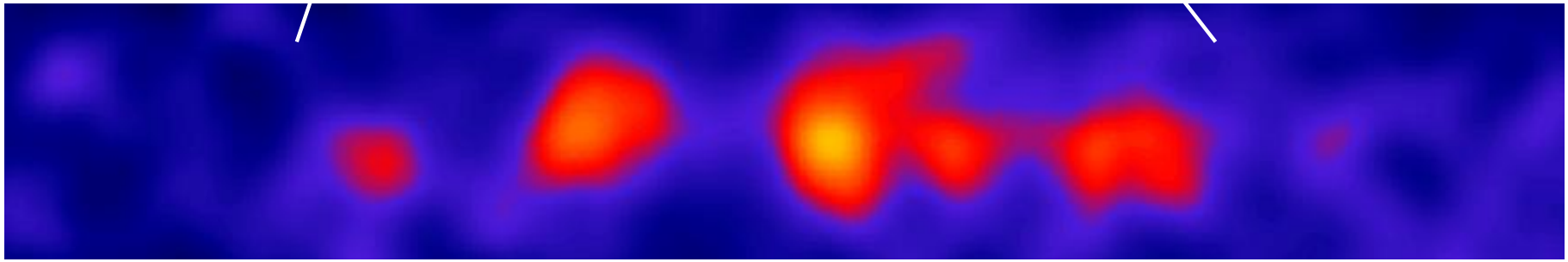

Op zoek naar de allerzwaarste objecten in het Universum
Het centrum van de Melkweg-stelsel



Infrared telescopen kijken door de stof heen..

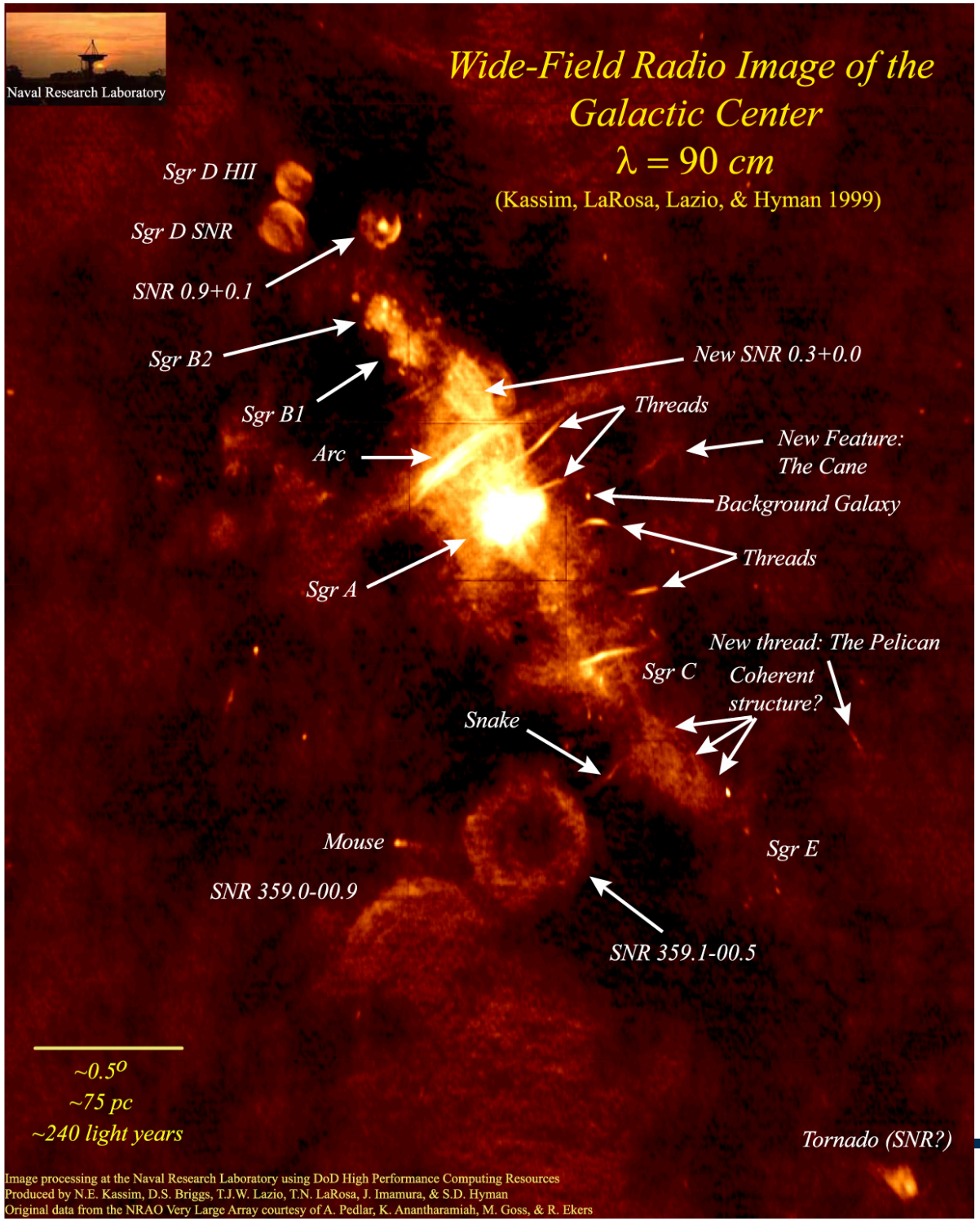


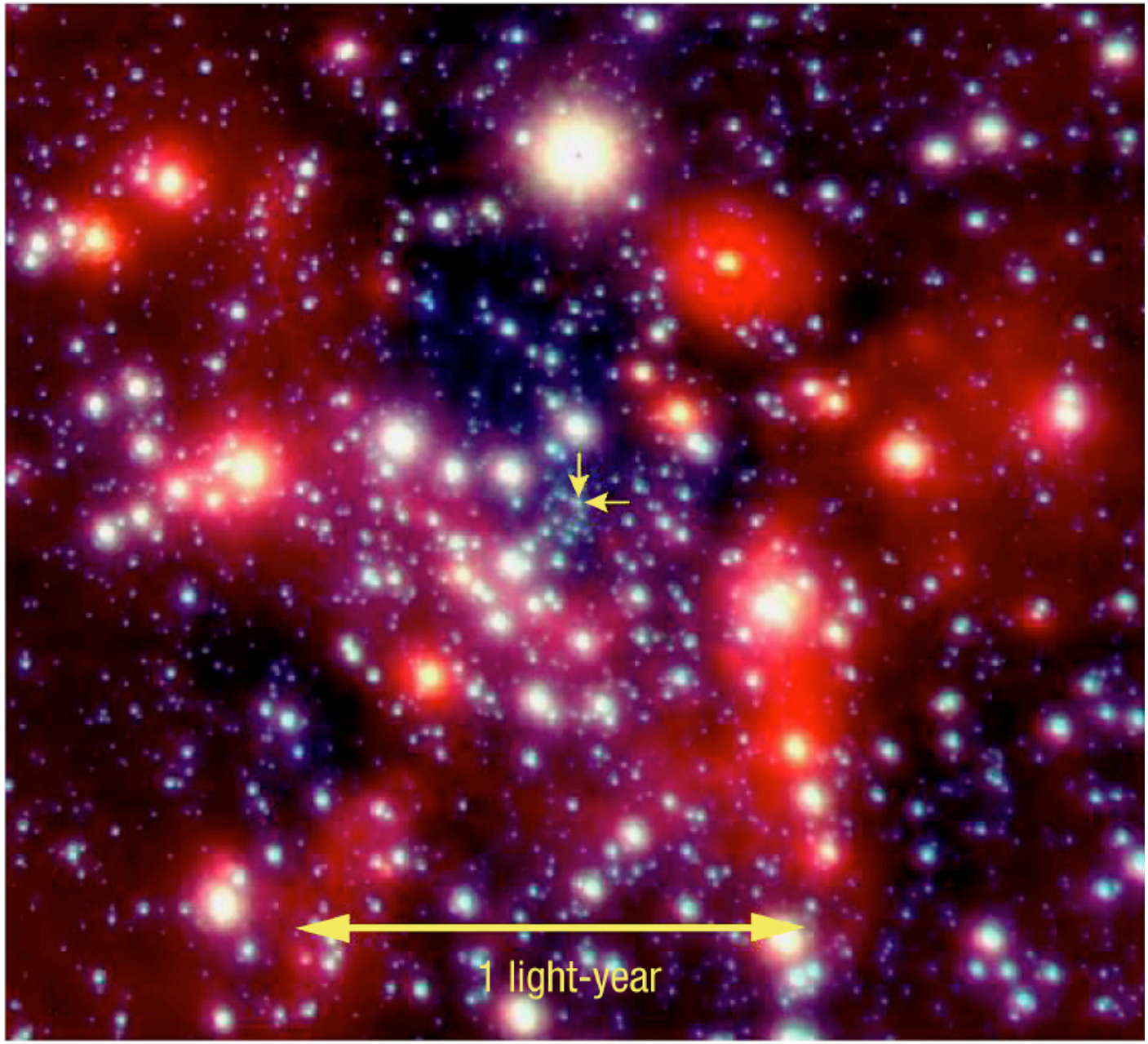
Röntgenstraling



Gammastraling

Radiobeelden

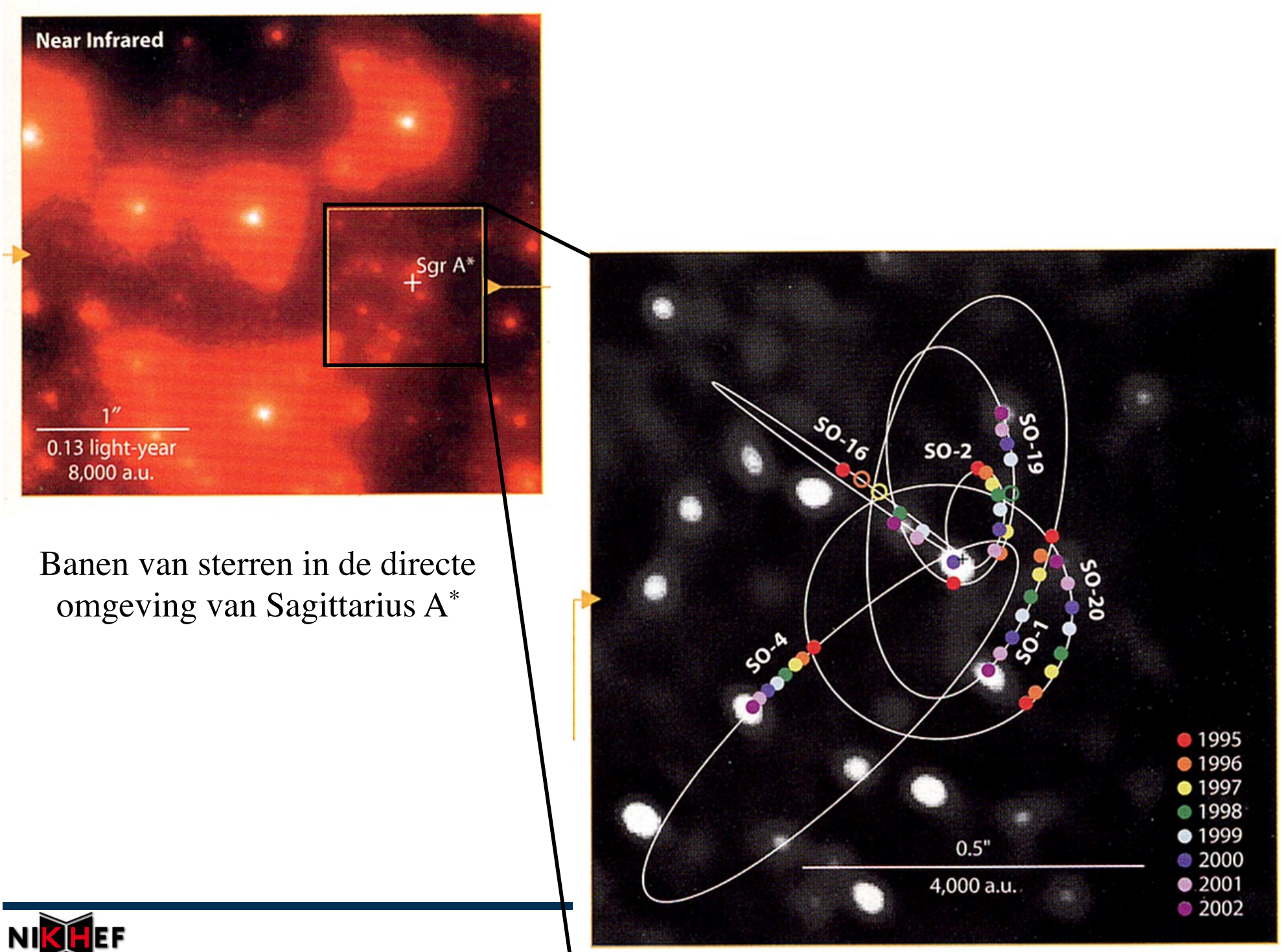




The Centre of the Milky Way
(VLT YEPUN + NACO)

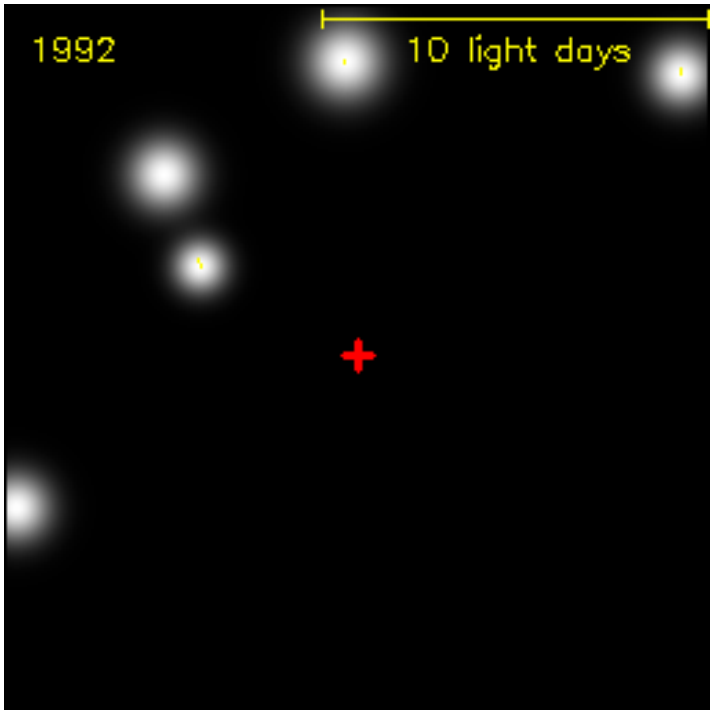
ESO PR Photo 23a/02 (9 October 2002)

© European Southern Observatory

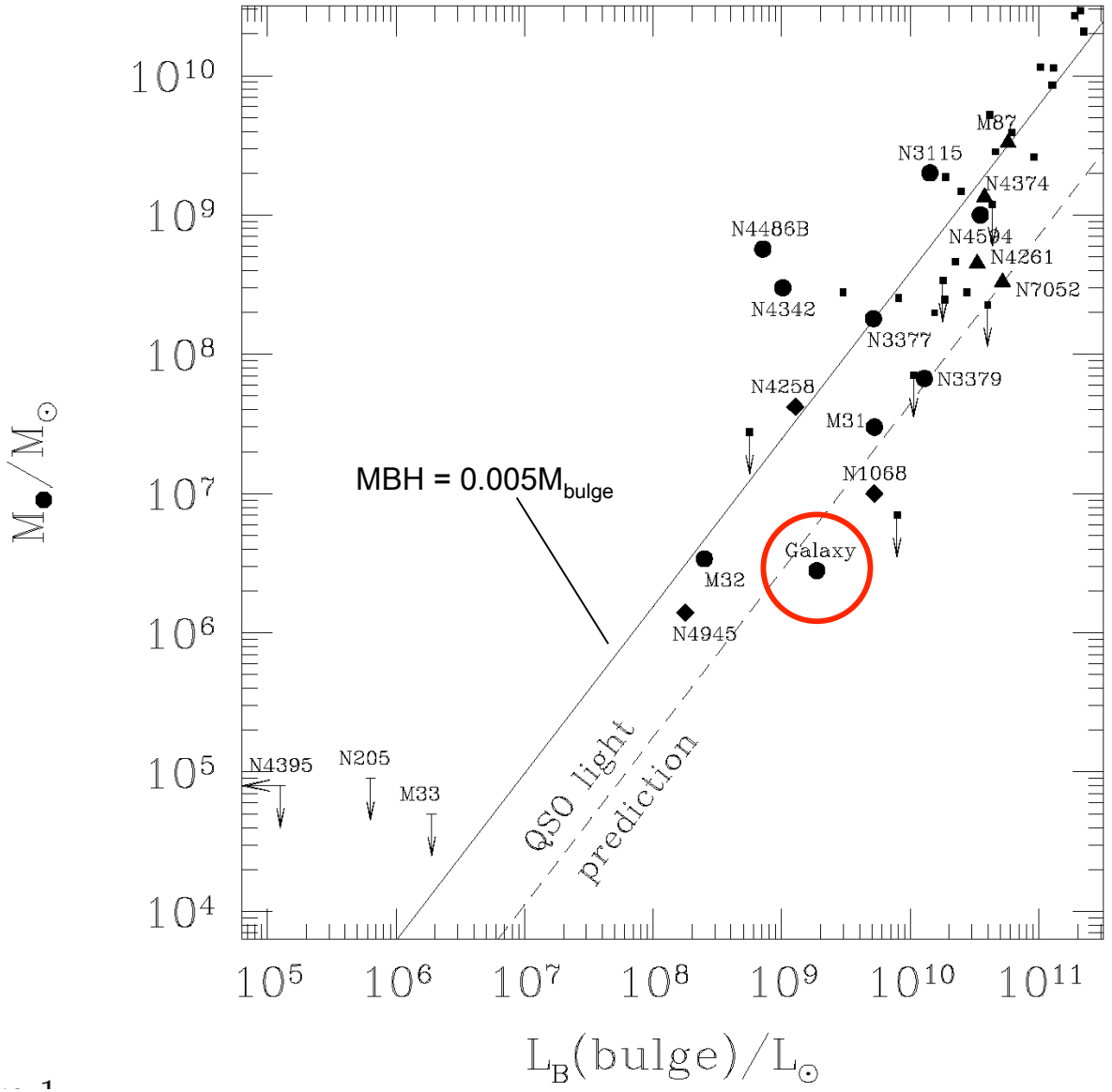


Banen van sterren in de directe omgeving van Sagittarius A*

Banen van sterren rond het centrum van de Melkweg wijzen op superzwaar zwart gat



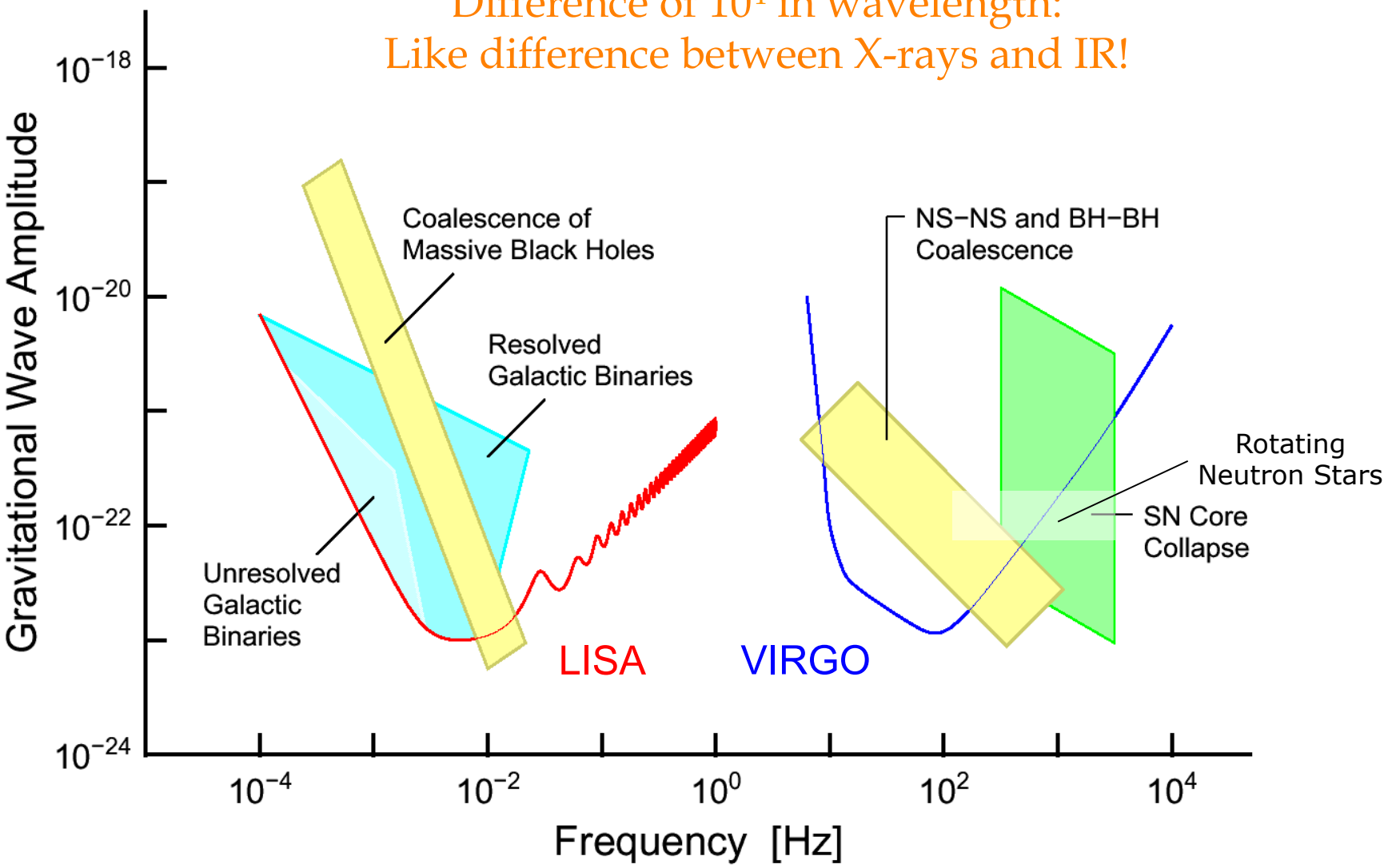
4 miljoen keer de massa van onze eigen zon



D. Richstone et al., Nature 395, A14, 1998

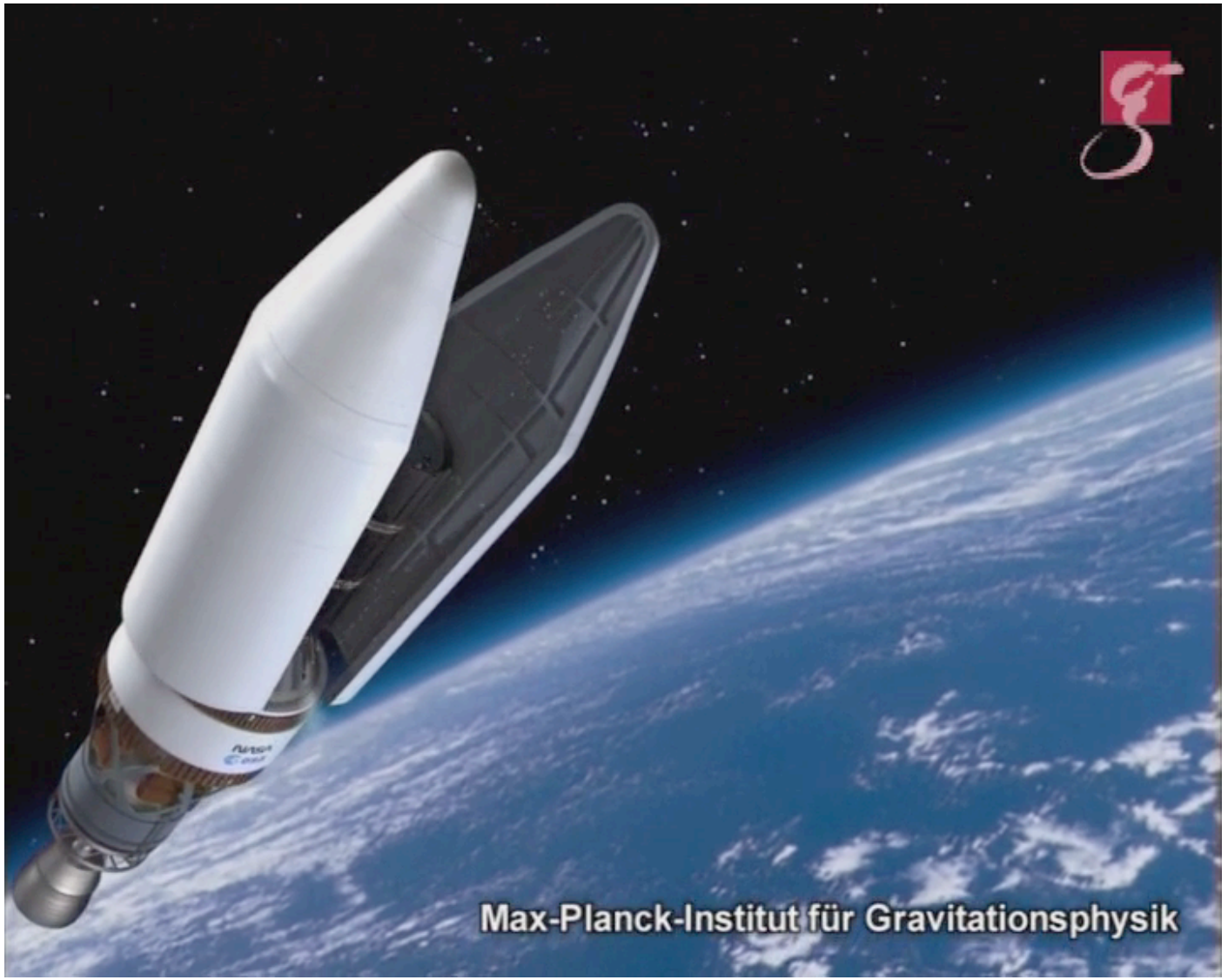
LISA compliments ground based detectors

Difference of 10^4 in wavelength:
Like difference between X-rays and IR!

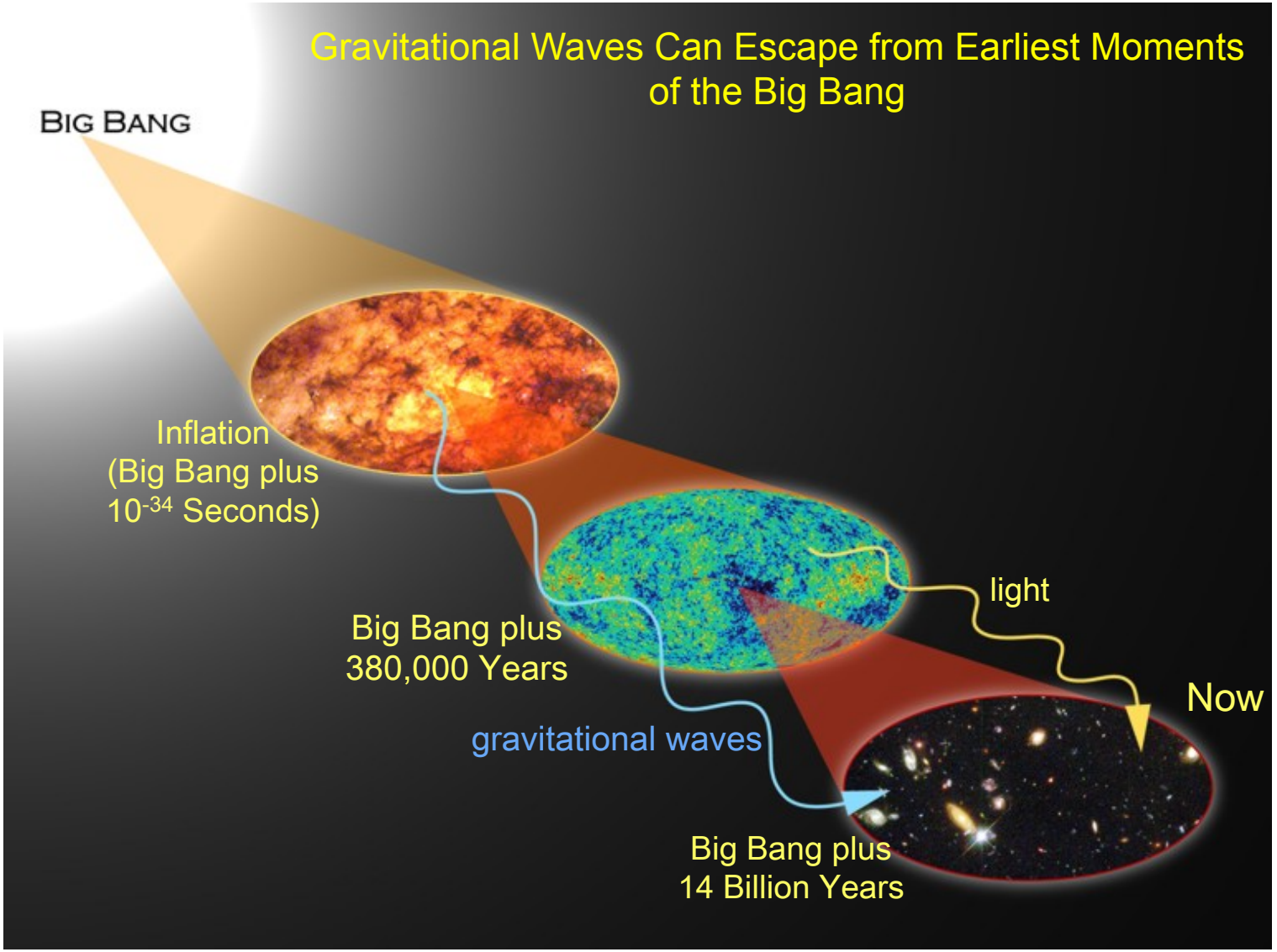


LISA will see all the compact white-dwarf and neutron-star binaries in the Galaxy (Schutz)

Filmpje LISA

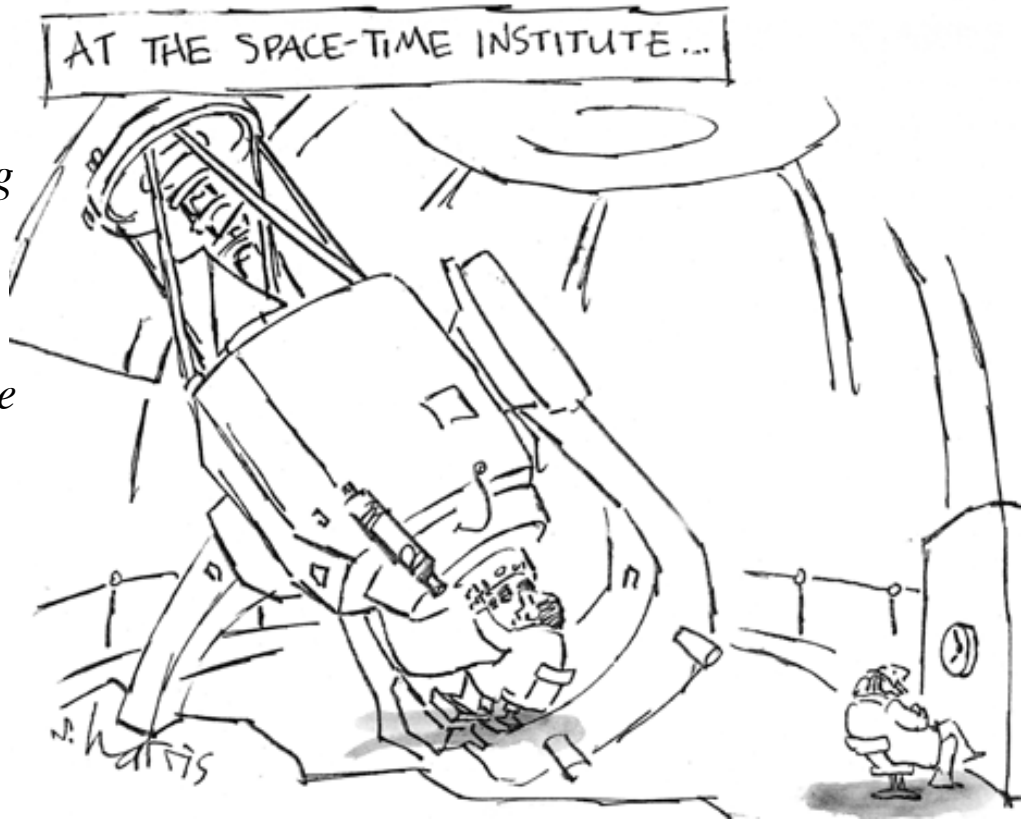


Met gravitatie golven kunnen we luisteren naar de alle vroegste momenten van het Universum



Samenvatting

- Volgens algemene relativiteitstheorie:
  - *Zwaartekracht een consequentie van de kromming in ruimte-tijd*
  - *Gravitatie golven zijn het dynamische gedrag van ruimte-tijd*
- Maar had Einstein wel gelijk?
  - *Houdt zijn theorie stand in de meeste extreme gevallen van gravitatie*
- Wat kunnen we leren over de structuur van sterren en het ontstaan van het Universum
- Detectoren staan op de punt om grote ontdekkingen te doen en zullen een nieuwe venster op het Universum openen



- De drijfkracht achter de transformatie van het Universum is zwaartekracht...
- Alles wat er weten over het universum hebben er geleerd van beelden, eerst.. en zoals deze van Hubble telescope en later ook onzichtbare licht...

- Maar het blijft een stile opname, zonder geluid
- Zou het niet mooi zijn om ook de bijbehorende muziek van het universum te horen? De muziek wordt gespeeld op de ruimte zelf

So have we seen anything yet?

Predictions for the rates of compact binary coalescences observable by ground-based gravitational-wave detectors

Classical and Quantum Gravity 27 (2010) 173001

	NS-NS	NS-BH	BH-BH
Rate ($\mathrm{MWEG}^{-1}\ \mathrm{yr}^{-1}$)	$100\,^{1000}_{1}$	$3\,^{100}_{0.05}$	$0.4\,^{30}_{0.01}$
iLIGO (yr^{-1})	$0.02\,^{0.2}_{2\times10^{-4}}$	$0.004\,^{0.1}_{7\times10^{-5}}$	$0.007\,^{0.5}_{2\times10^{-4}}$
aLIGO (yr^{-1})	$40\,^{400}_{0.4}$	$10\,^{300}_{0.2}$	$20\,^{1000}_{0.4}$