

# De BlackGEM Array

op zoek naar bronnen van zwaartekrachtstraling

Radboud Universiteit



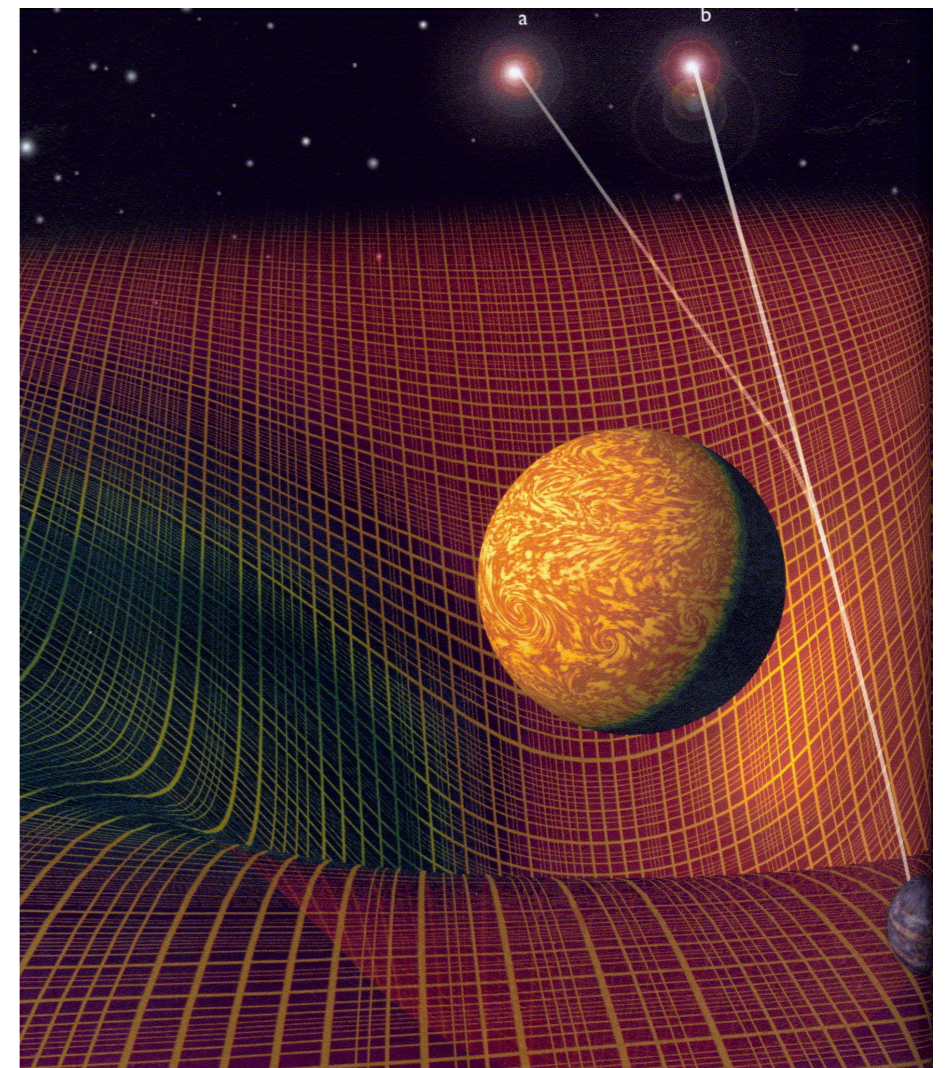
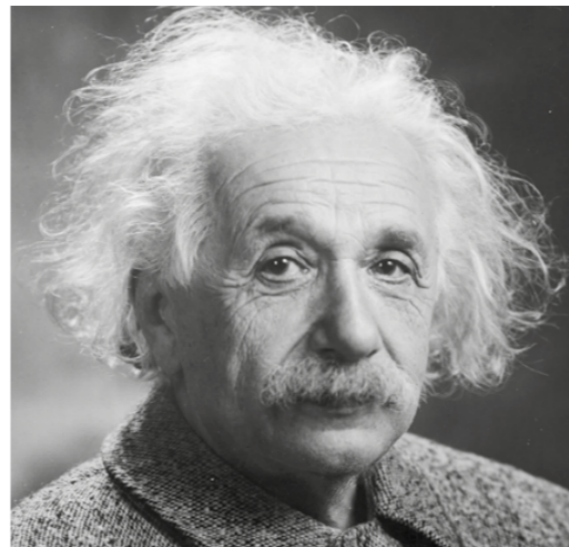
Steven Bloemen  
Gent, 18/03/2017



# Zwaartekracht: Einstein

- Einstein: relativiteitstheorie
- Zwaartekracht = vervorming ruimte(tijd)
- Combinatie ruimte(tijd) en energie/massa = Einstein's veldvergelijkingen

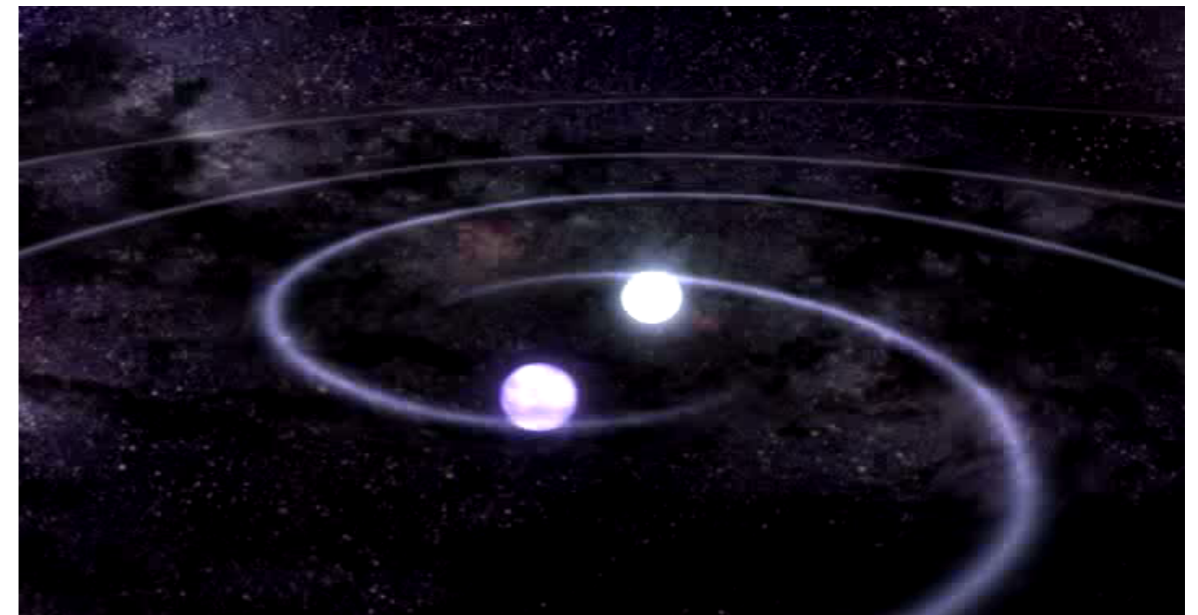
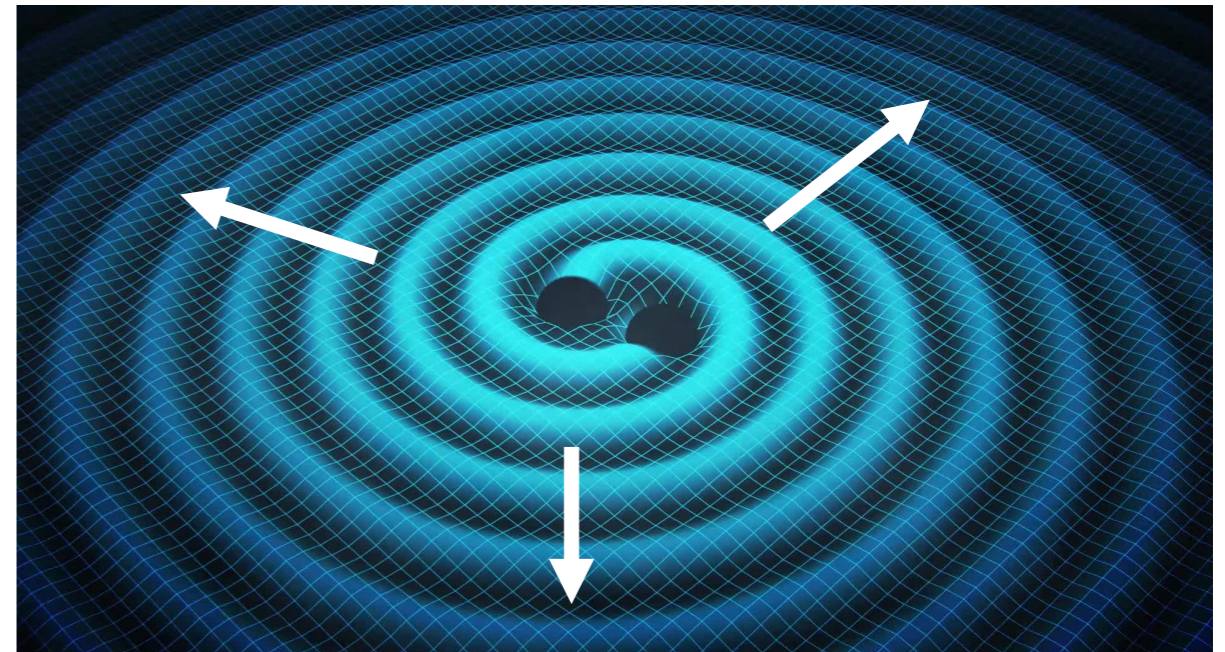
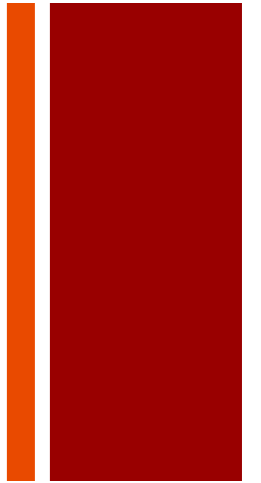
$$G_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$$



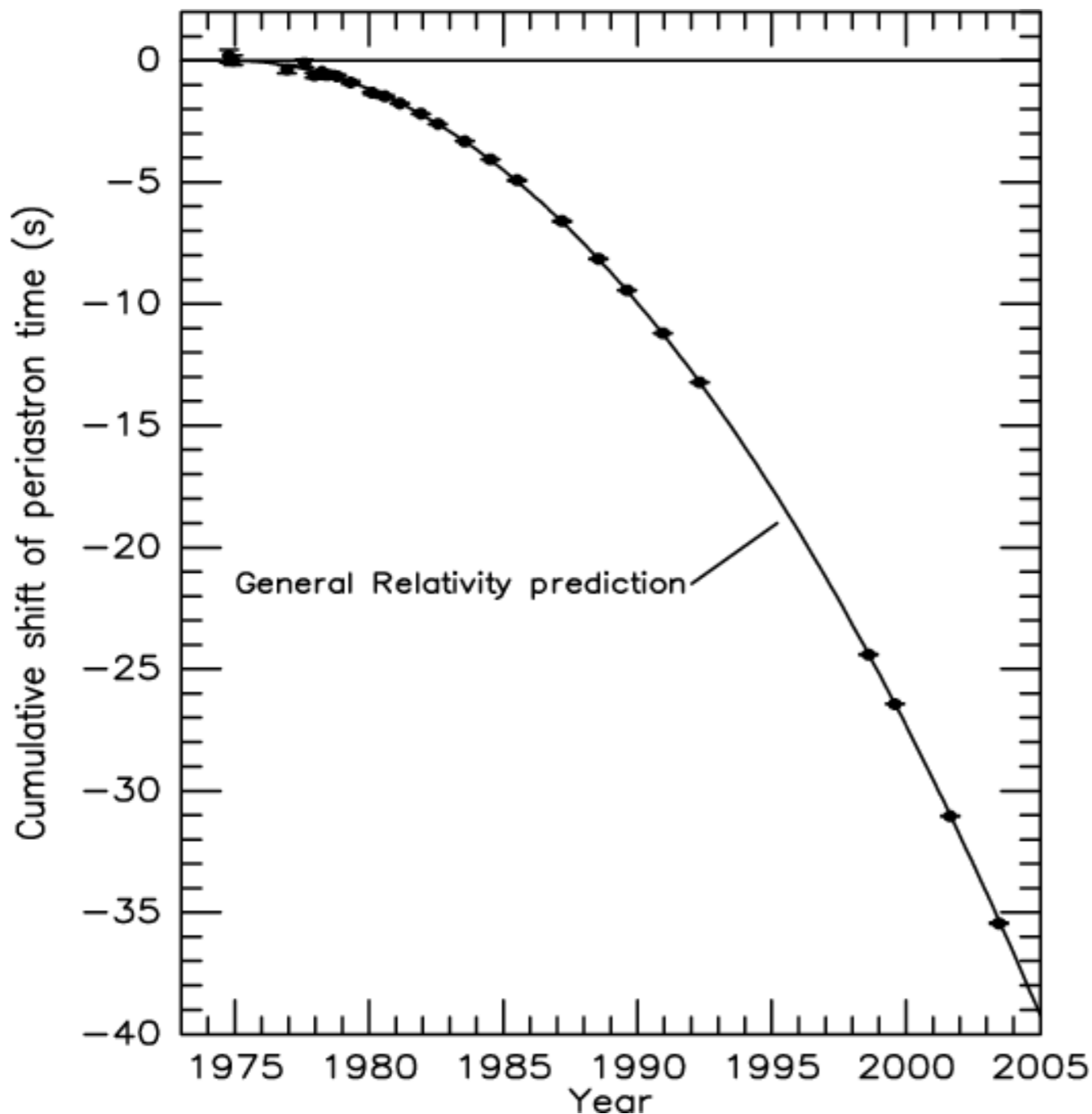


# Gravitationegolven

- Rimpelingen in ruimtetijd
- Veroorzaakt door “versnelde” massa's
- Ruimtetijd enorm “stijf”
- Nodig:
  - Grote zwaartekracht (compacte objecten)
  - Versnelde massa's, hier dubbelsystemen



# + Indirecte indicatie



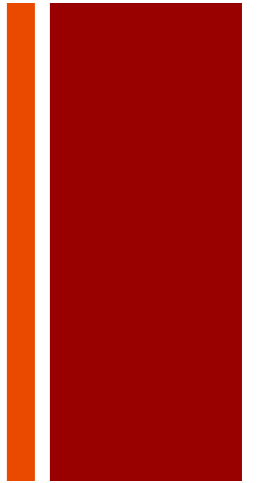
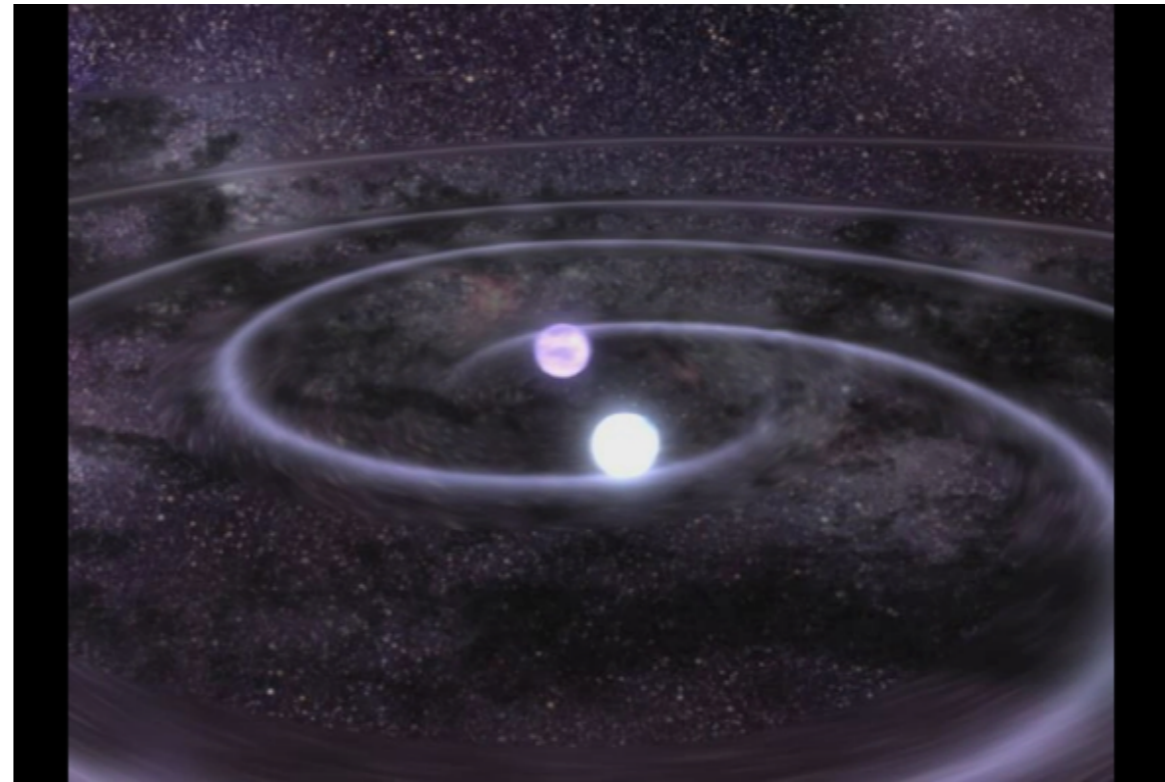
## Hulse-Taylor pulsar (Nobelprijs 1993)

- Energieuitstraling → botsing van componenten van zeer compacte dubbelsterren
- Orbitale periode NS+NS:  $7u45$
- Verkleint met 77 microsec/jaar



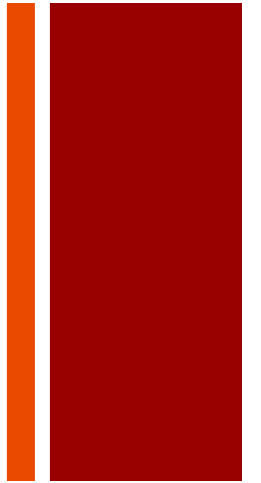
# Waar komen ze vandaan?

- Dubbelsterren
  - Zwarte gaten
  - Neutronensterren
  - Witte dwergen
- Supernova's
- Roterende, vervormde neutronensterren
- Signalen uit het vroege Heelal
- Onbekende bronnen?

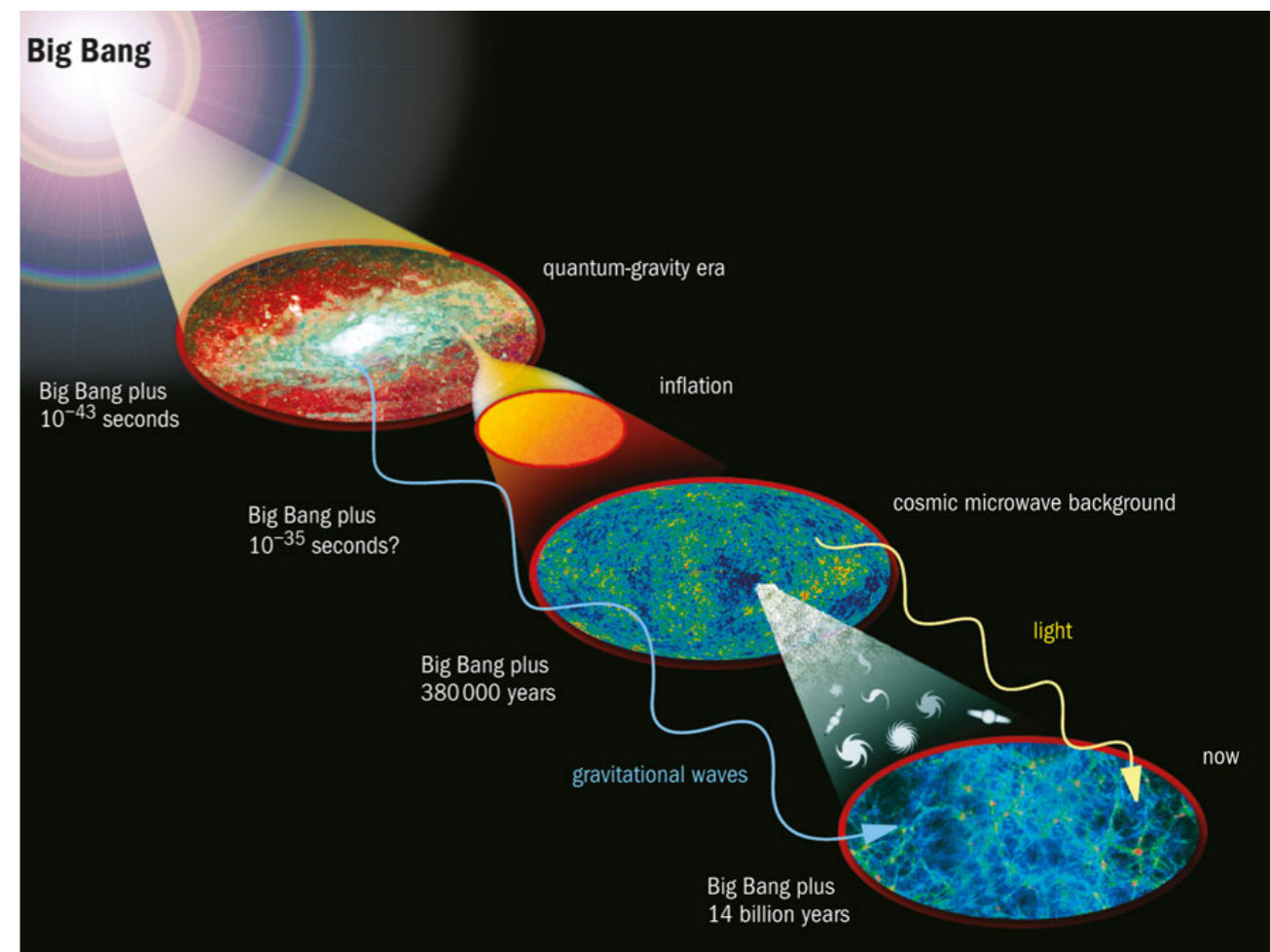


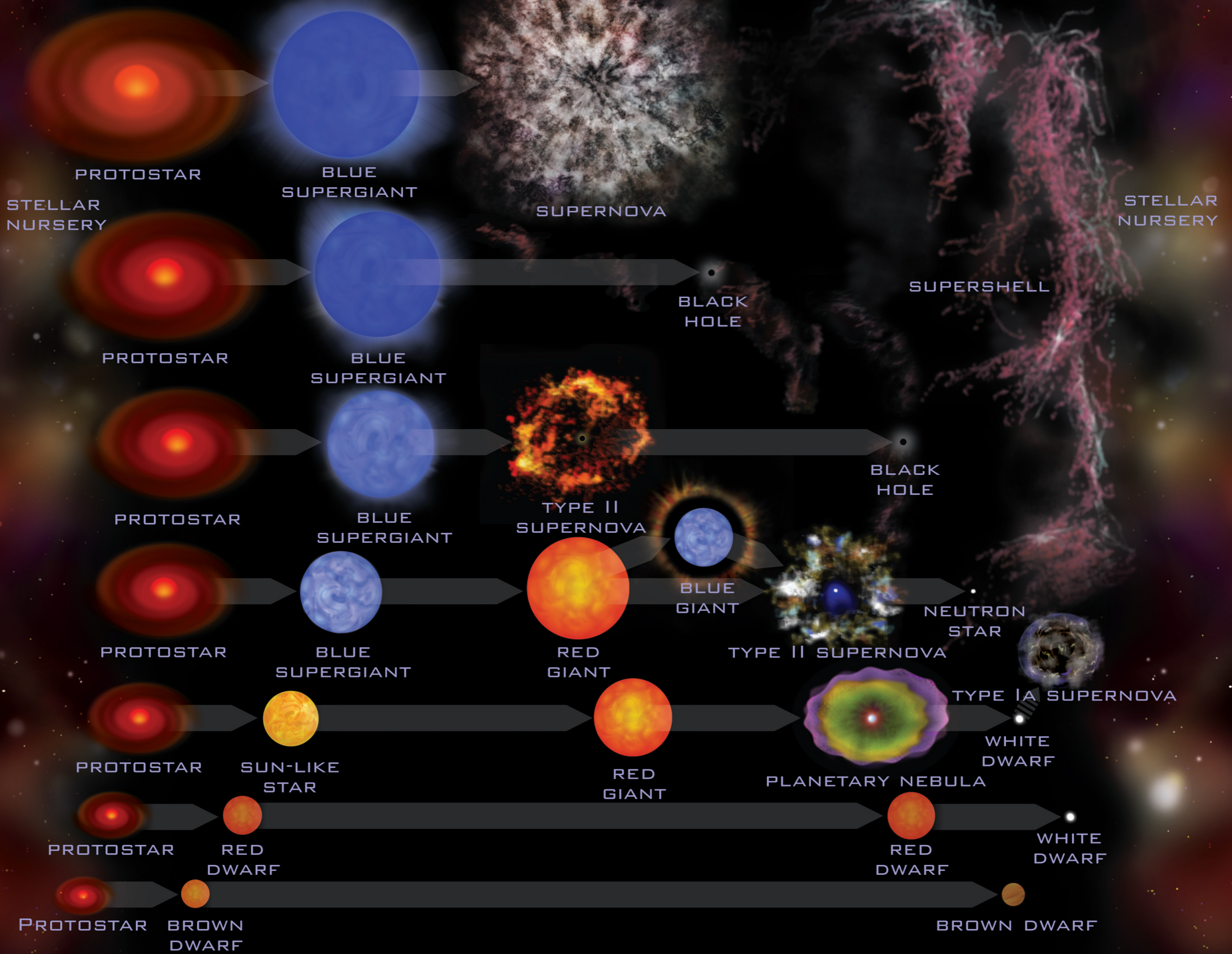


# Waarom willen we ze meten?



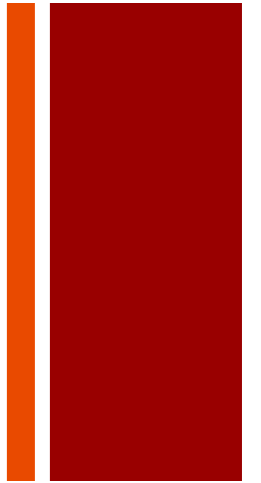
- Tests van Relativiteitstheorie
- Nieuwe manier om het heelal te bestuderen!
- Compacte bronnen → (dubbel)stereolutie
- Niet geabsorbeerd/ verstrooid
- Mogelijk signalen uit het hele vroege heelal (voor de achtergrondstraling)



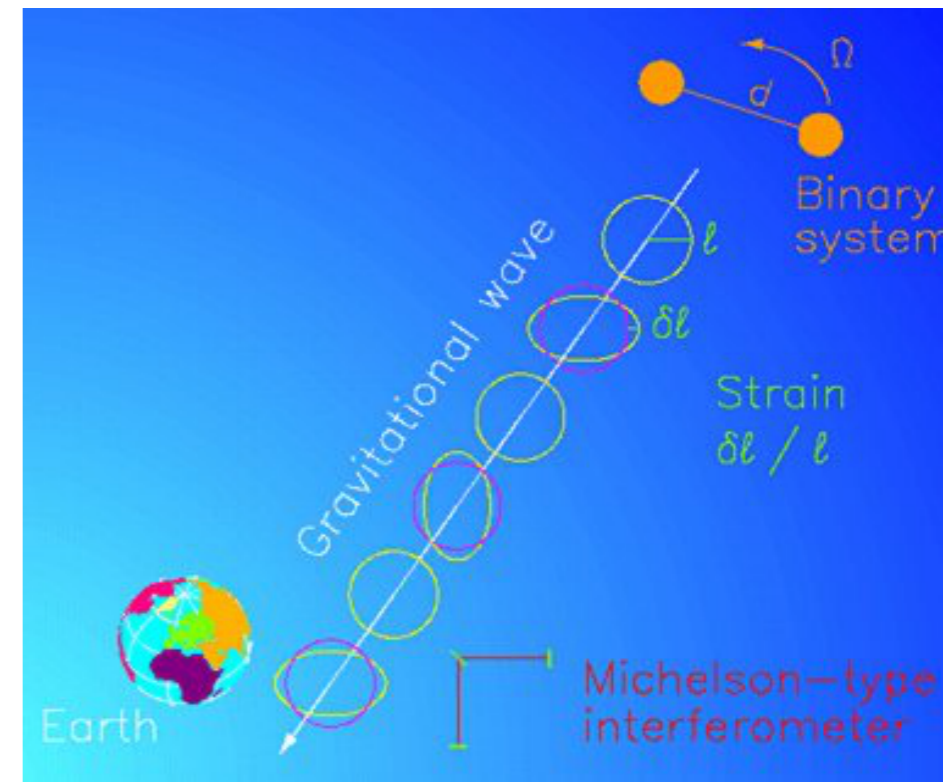




# Hoe kunnen we ze meten?

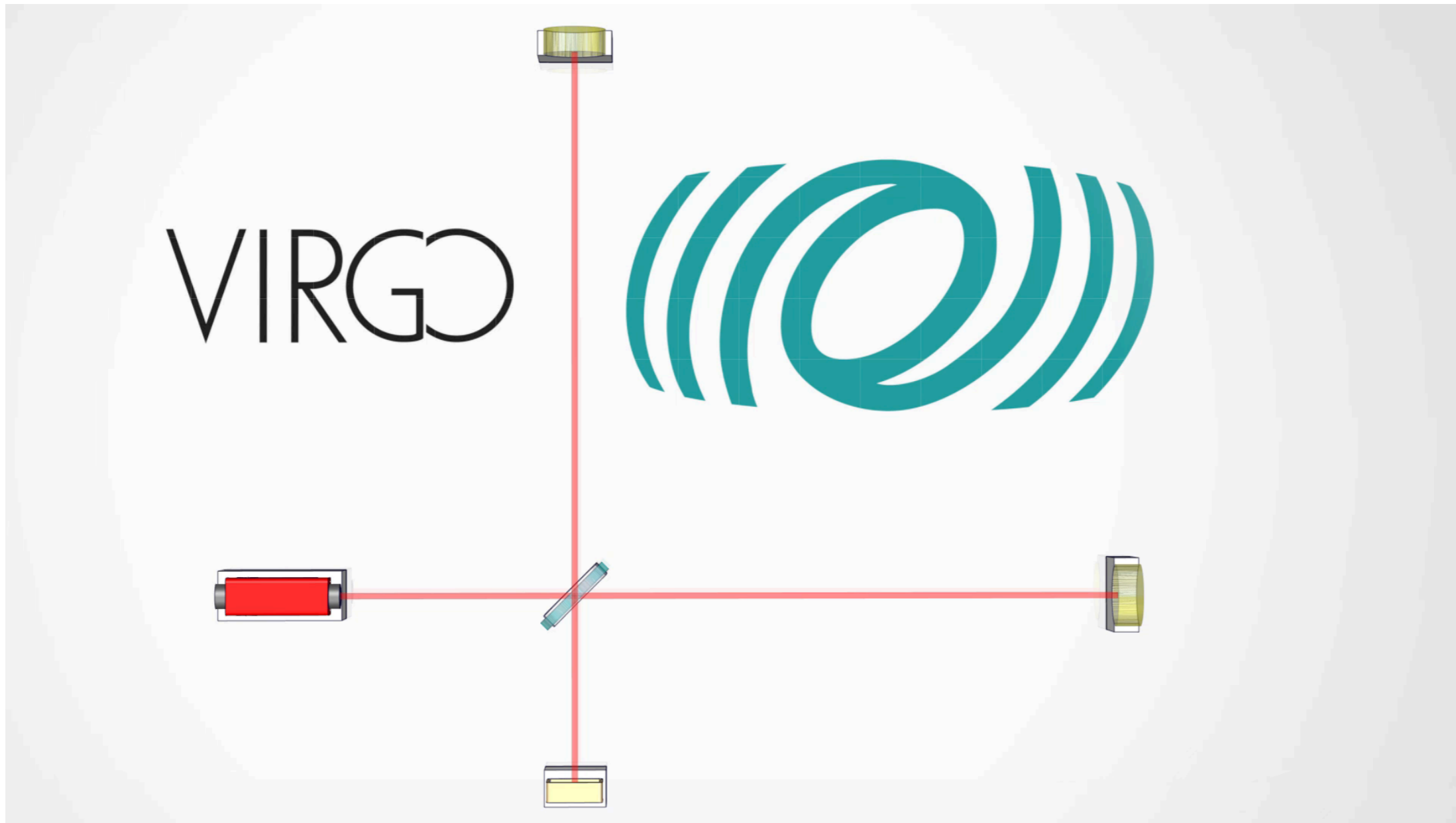
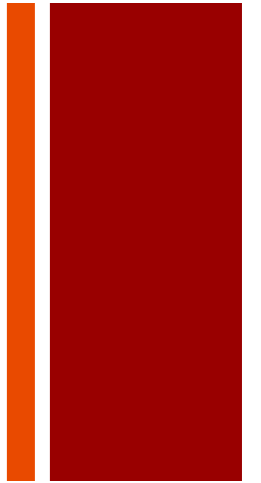
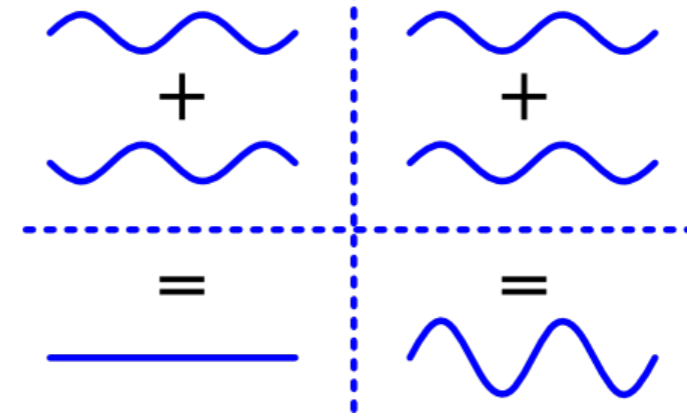


- Effect ver van de bronnen: minuscule vervorming van de “metriek” = verandering afstand/lengte
- Periodieke verandering van de relatieve afstand  $h \sim \Delta L/L$
- Uitdagingen:
  - Meting van  $\Delta L$   
(meetlat ook vervormd!)
  - Ruis!
  - Amplitude van effect  $h \sim 10^{-21}$
- Oplossing: interferometrie

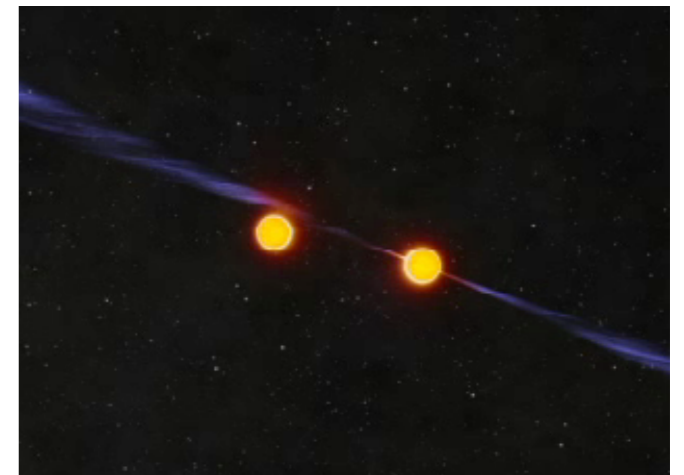
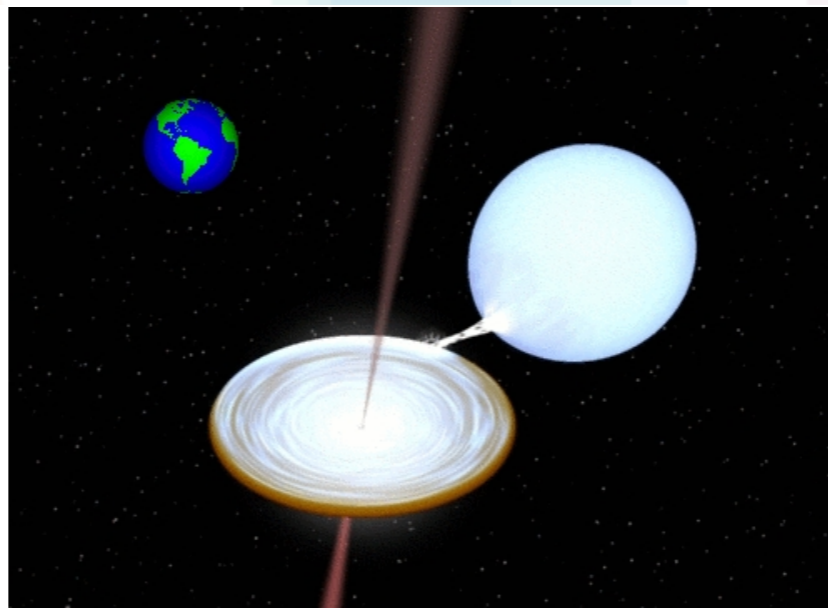
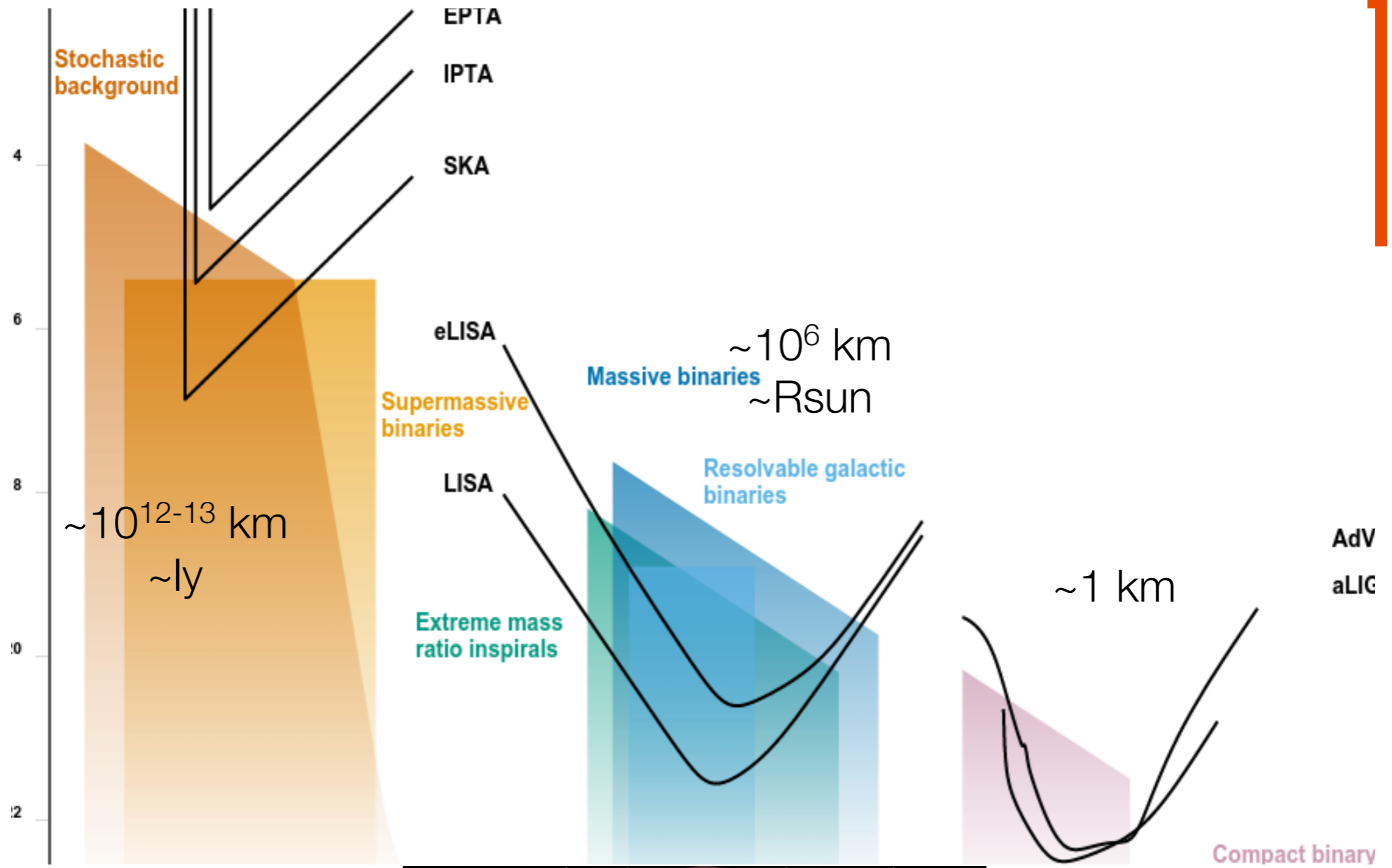




# + Laser interferometrie

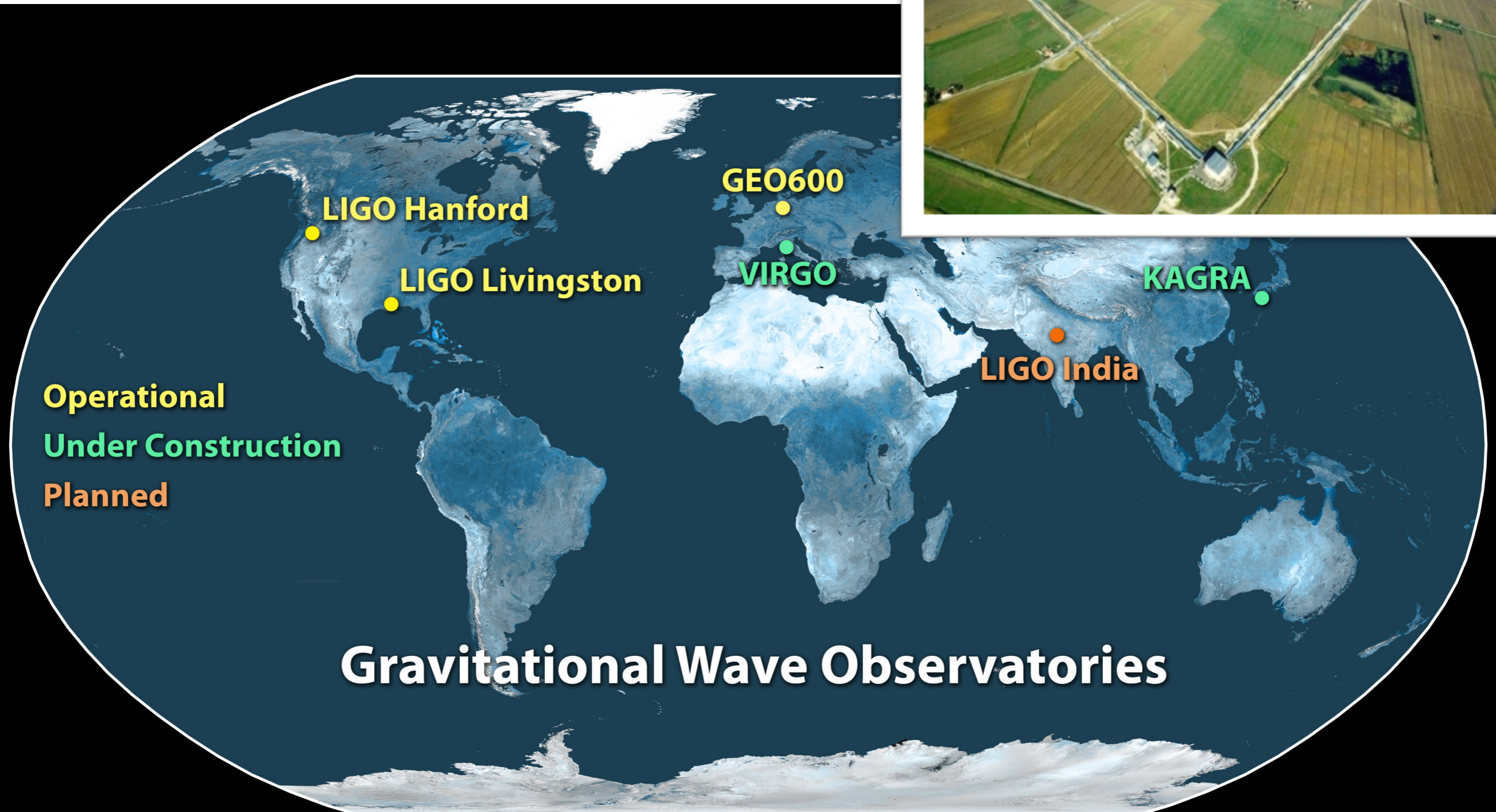


# + GW-spectrum: brongrootte = detectorgrootte

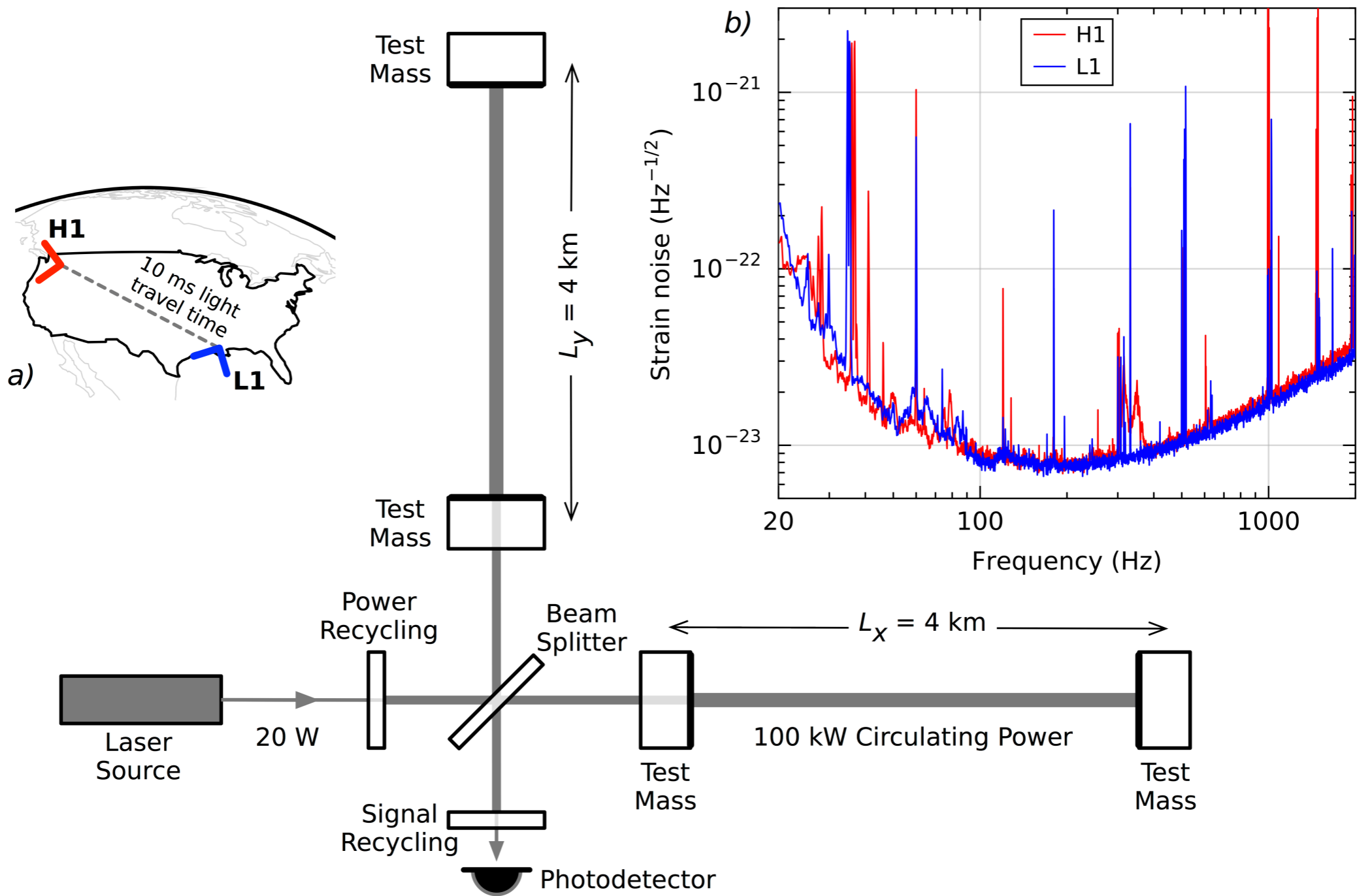




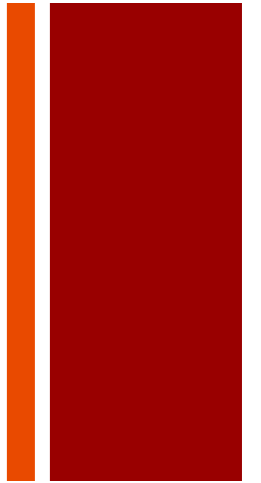
# Detectoren



# + Advanced LIGO: Erste science run sept 2015 – jan 2016



# + Wat kan LIGO/Virgo detecteren?

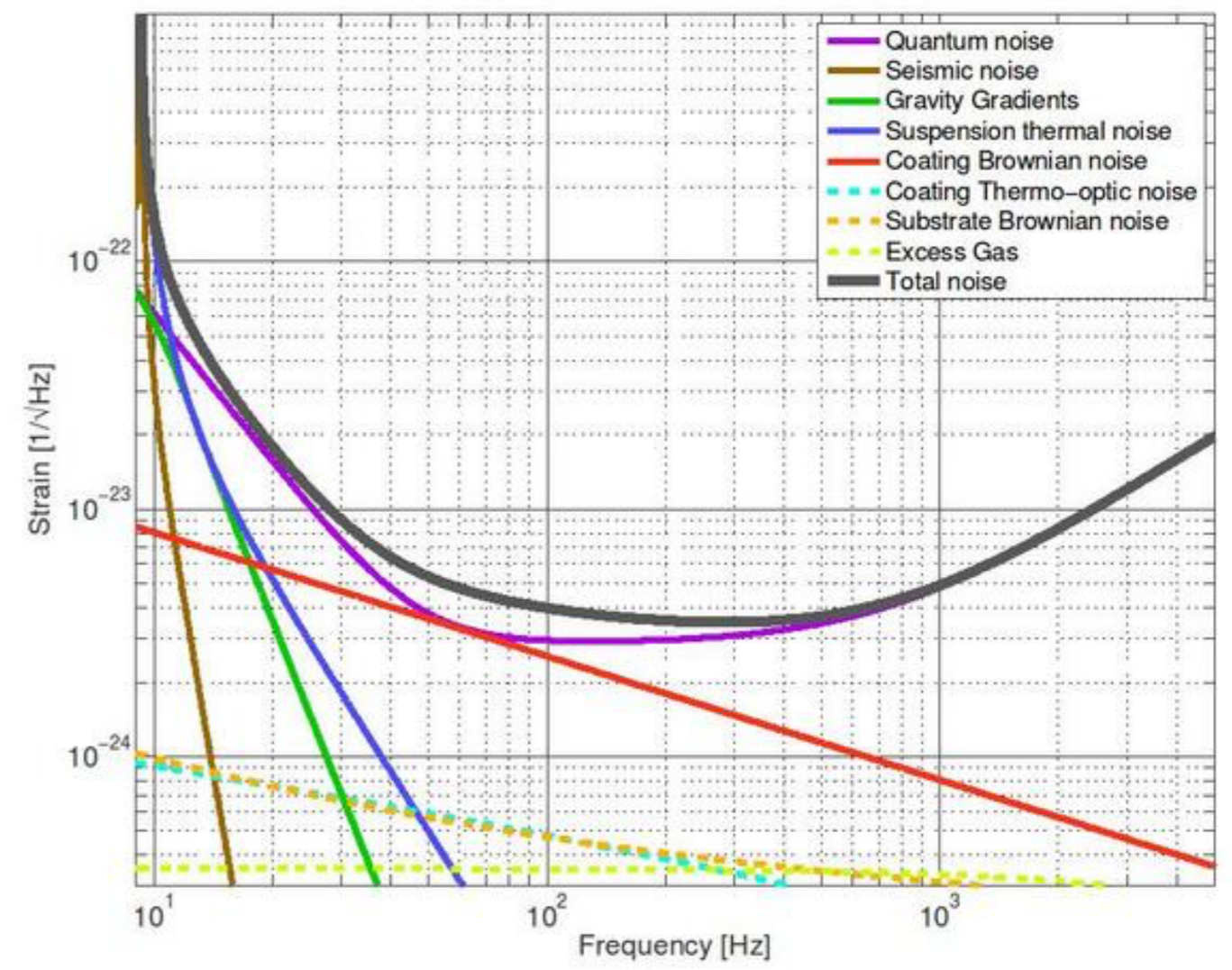
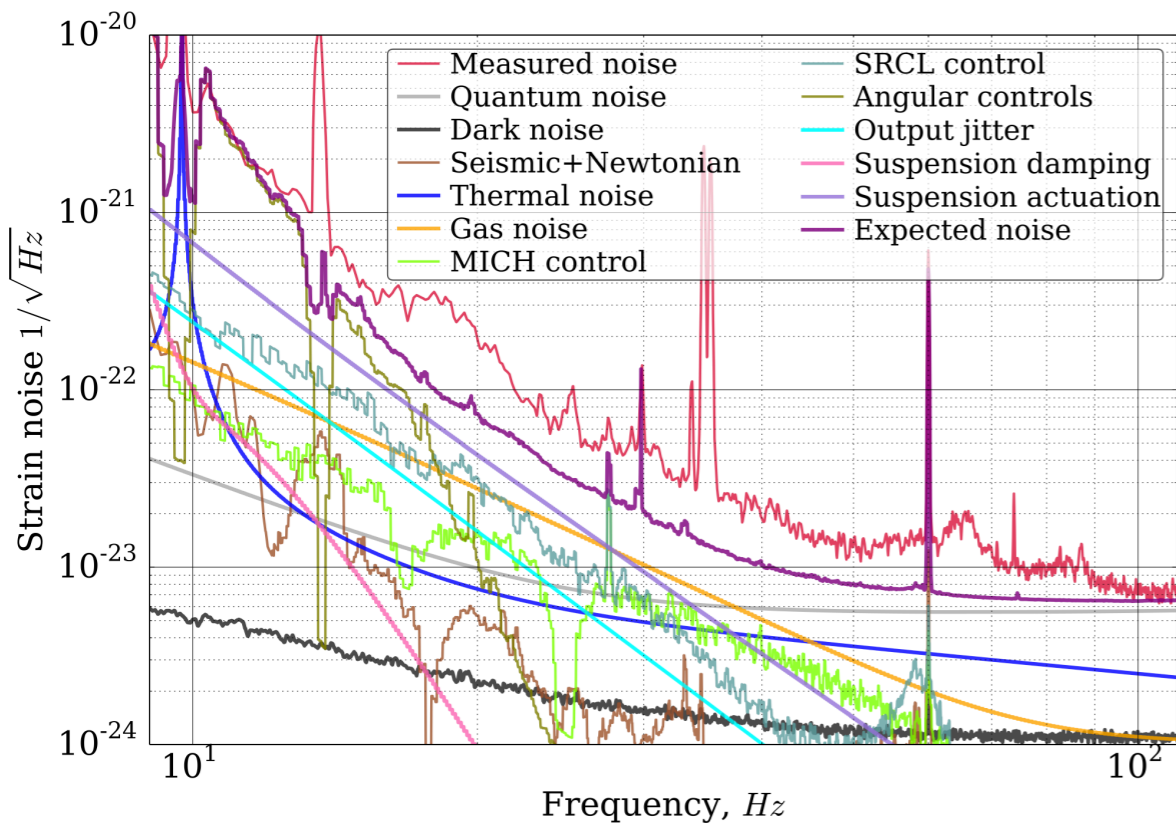
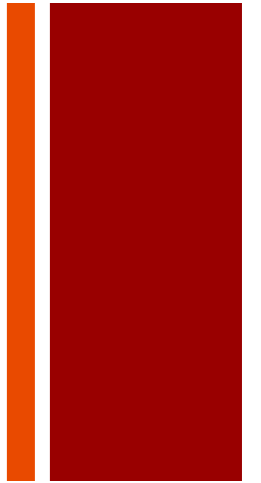


**GW freq.  
tussen  
10 Hz en  
enkele kHz**

## **Mergers** (samenstelling) van

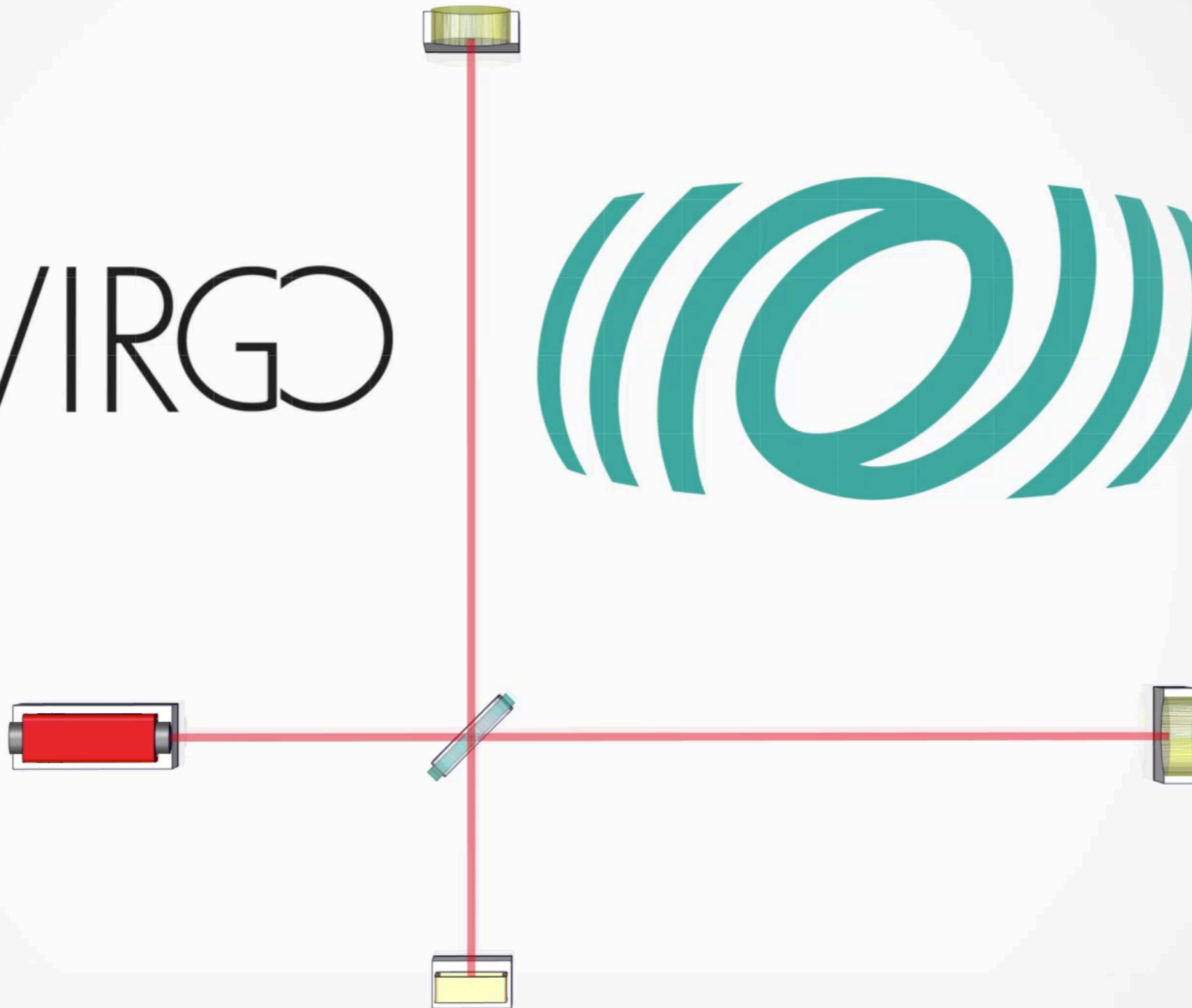
- Neutronenster + neutronenster (13 gekend)
- Neutronenster + zwart gat (0 gekend)
- Zwart gat + zwart gat (0 gekend)

# + Ruis

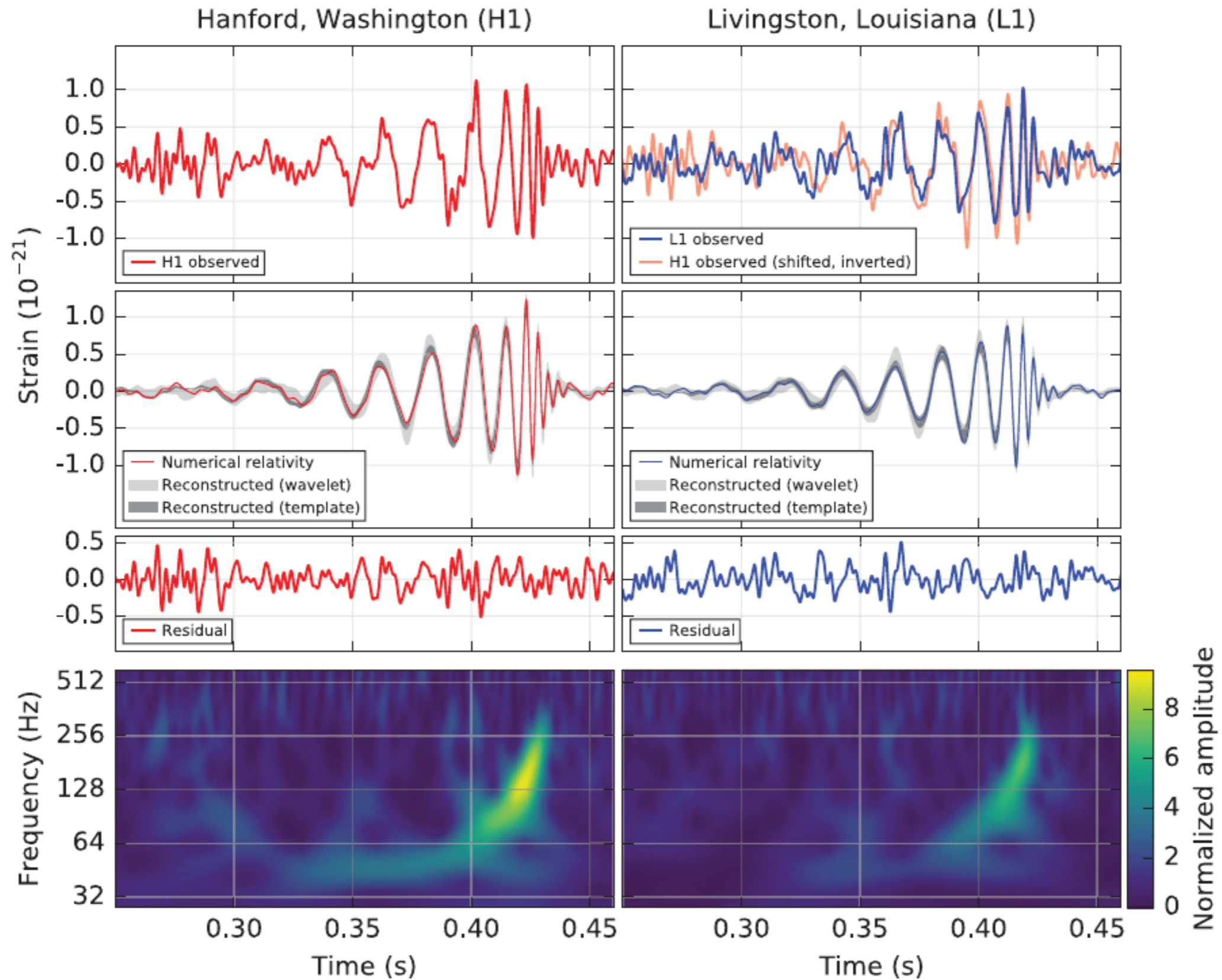


# + Geen eenvoudige interferometer...

VIRGO

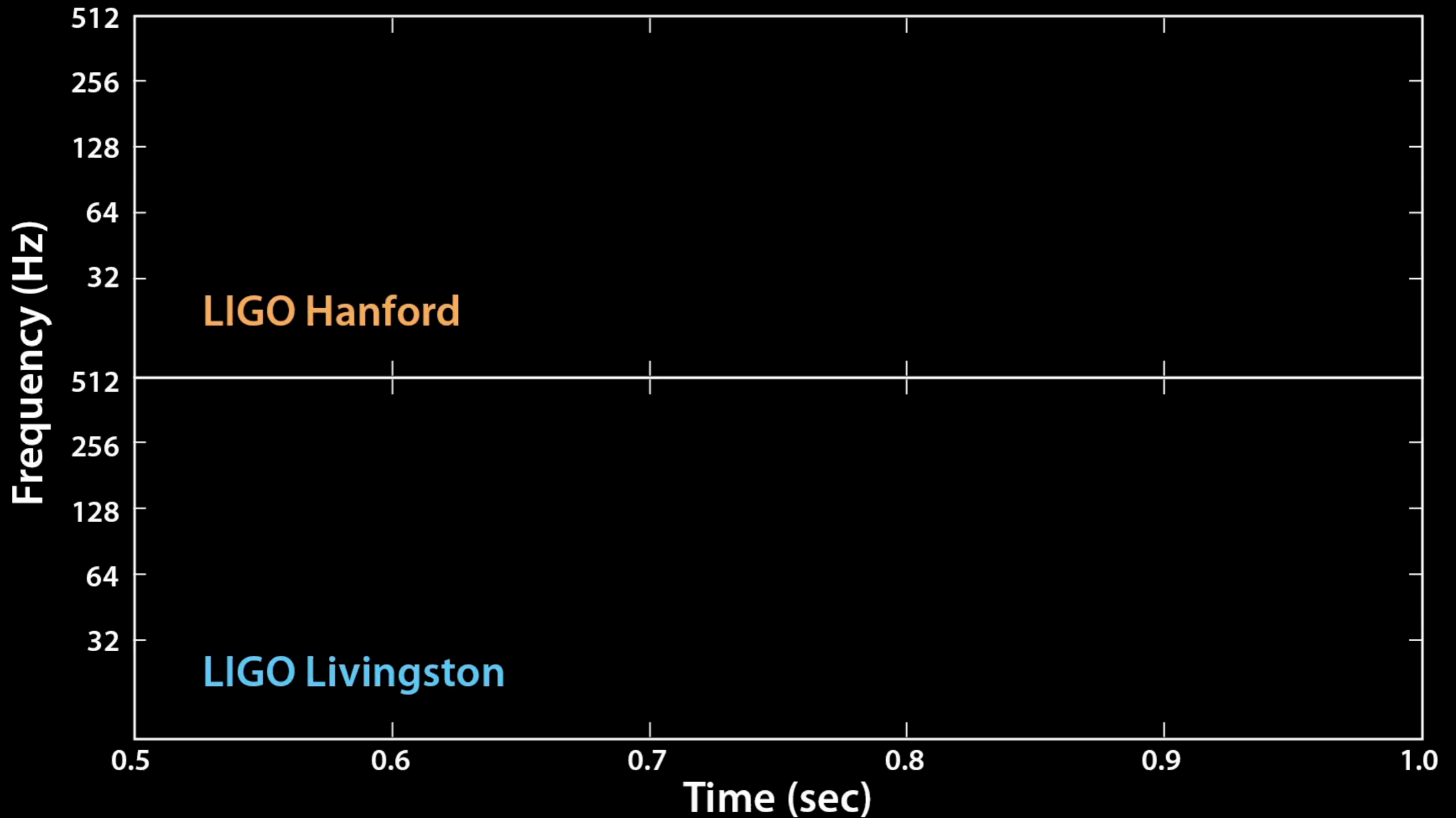
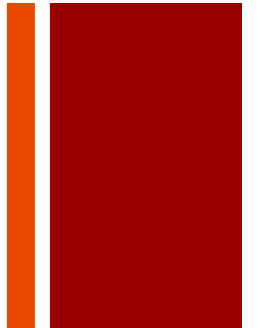


# + GW150914

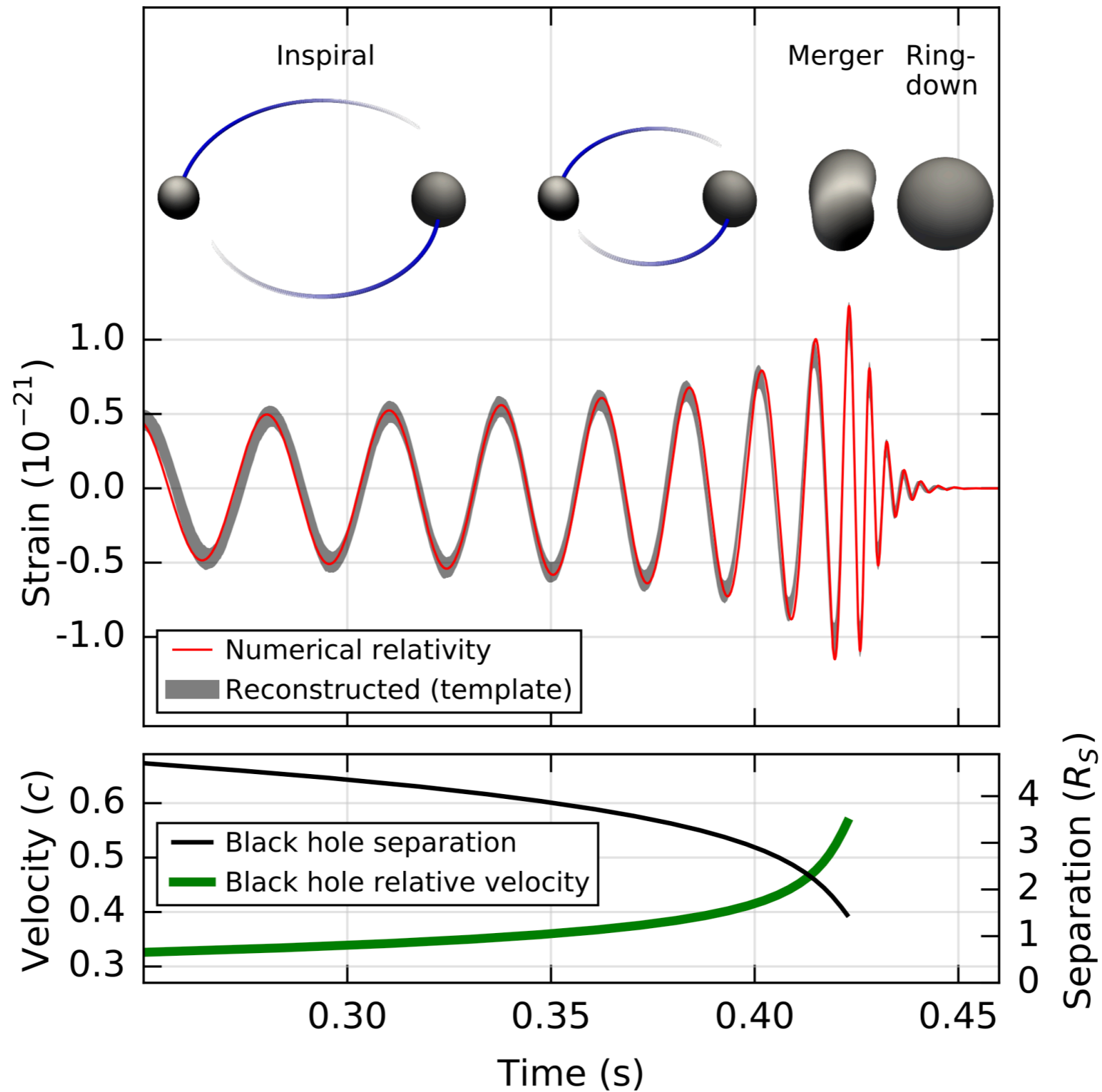
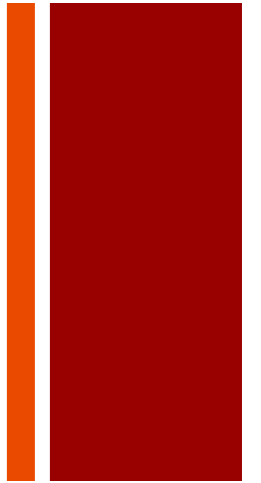




# + GW150914 hoorbaar gemaakt

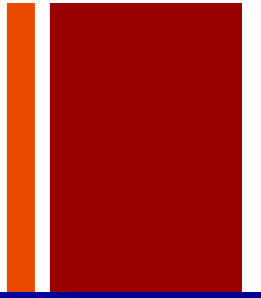


# + GW150914

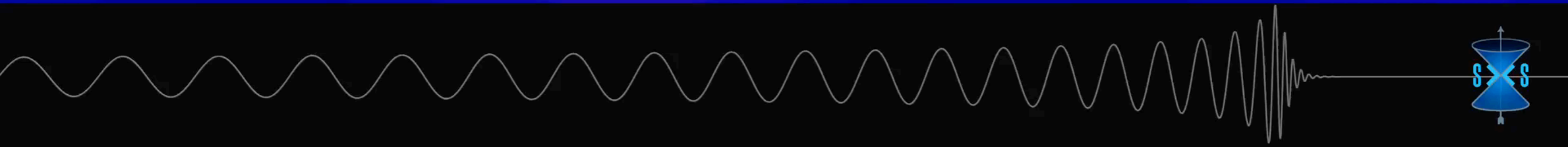
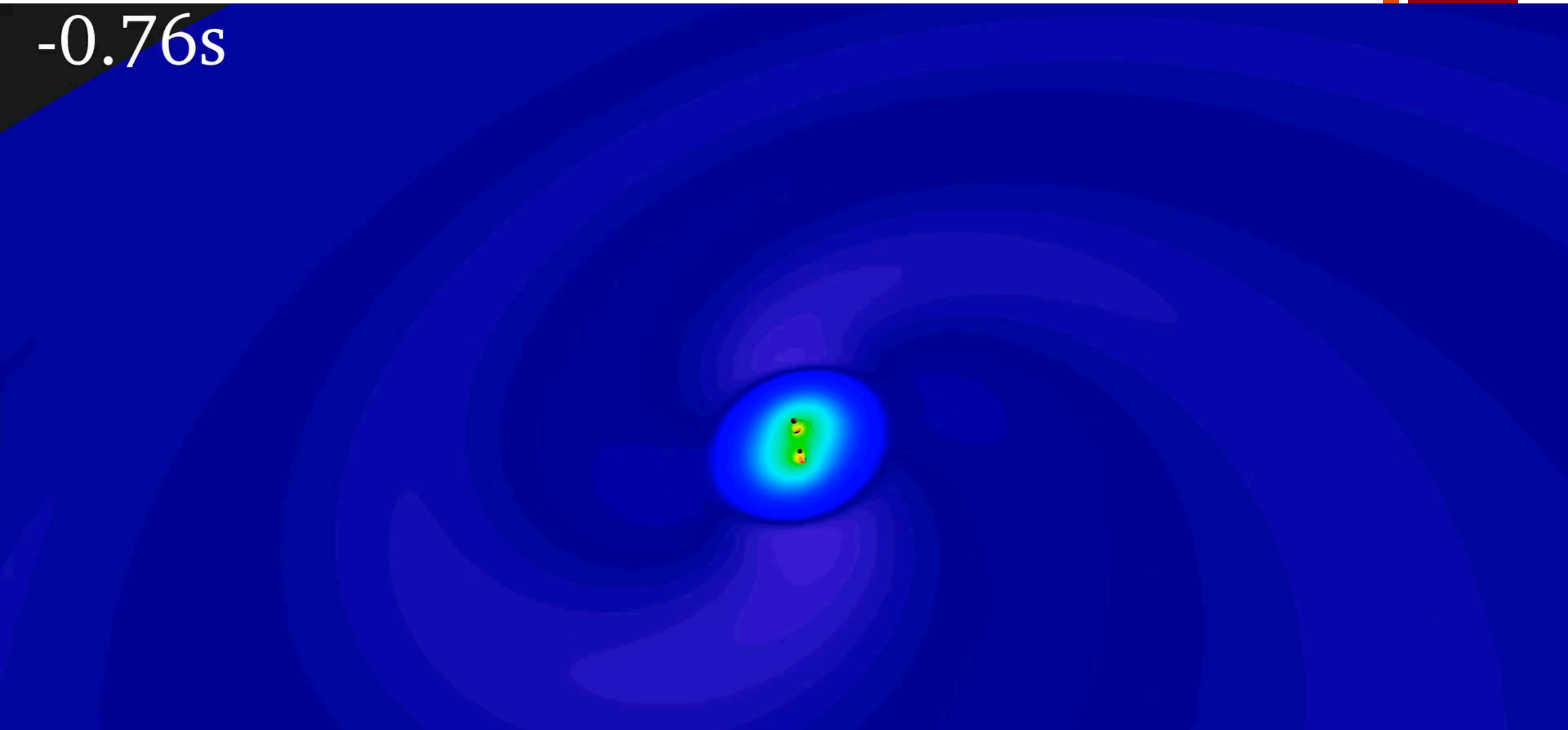


+

# Samensmelten twee zwarte gaten

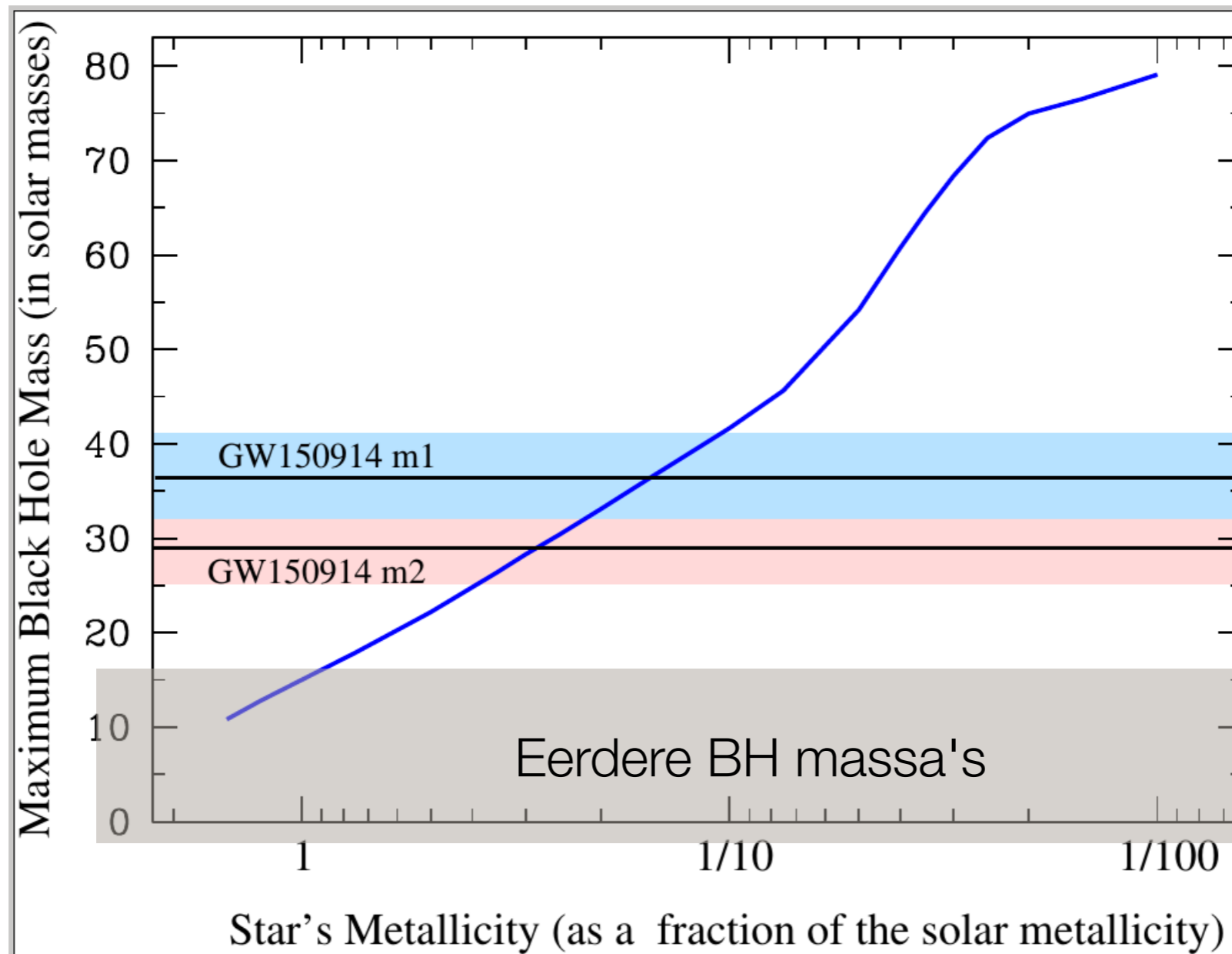


-0.76s

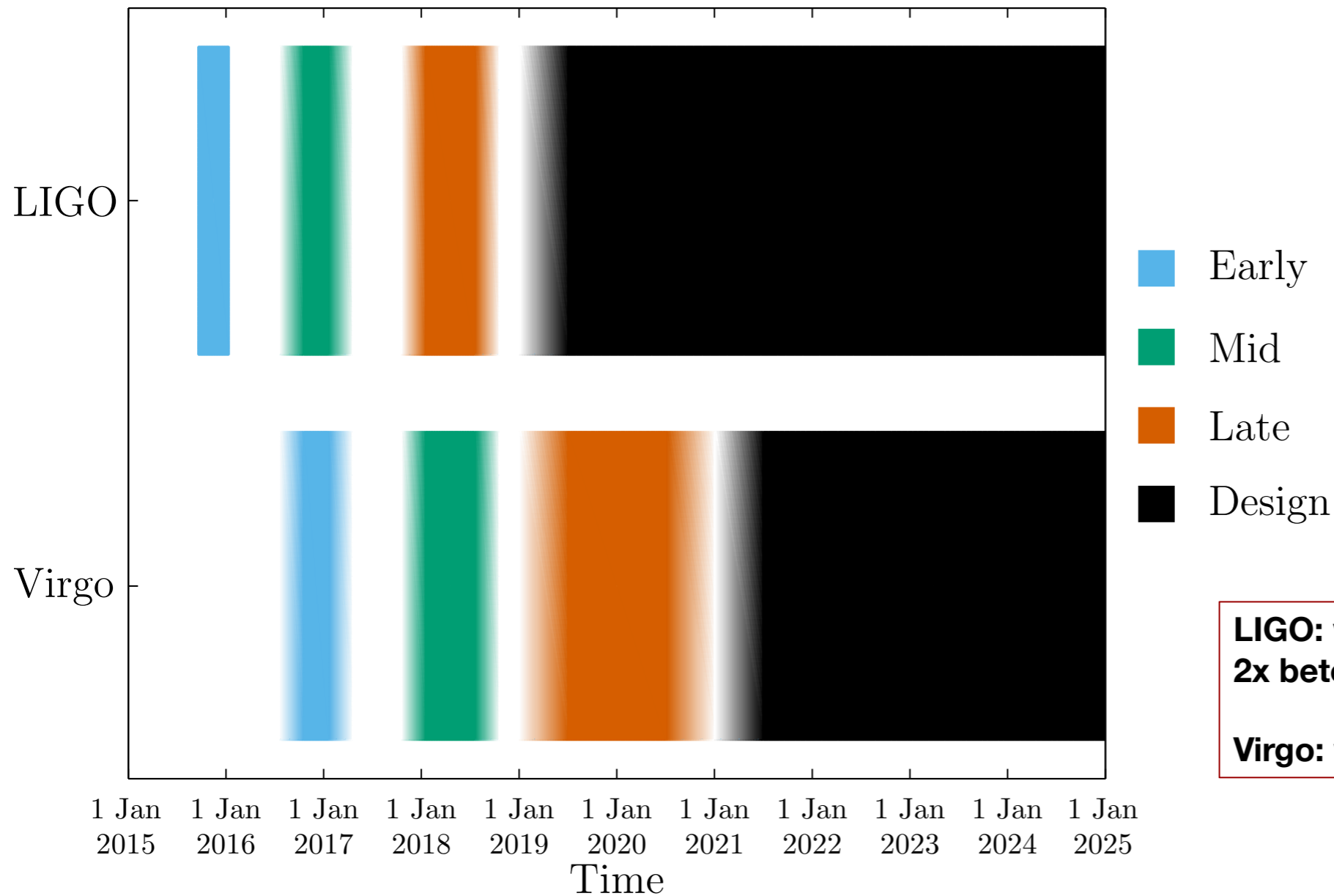
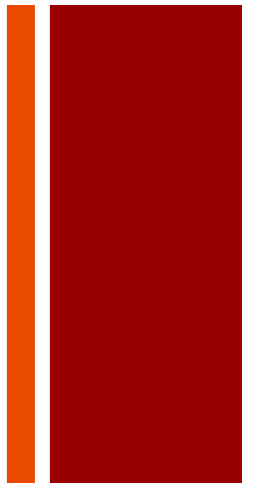


# +GW150914: drie ontdekkingen in één

- › Dubbele zwarte gaten bestaan
- › Ze smelten samen tot een nieuw zwart gat
- › Deze zwarte gaten zijn zwaarder dan die we kennen



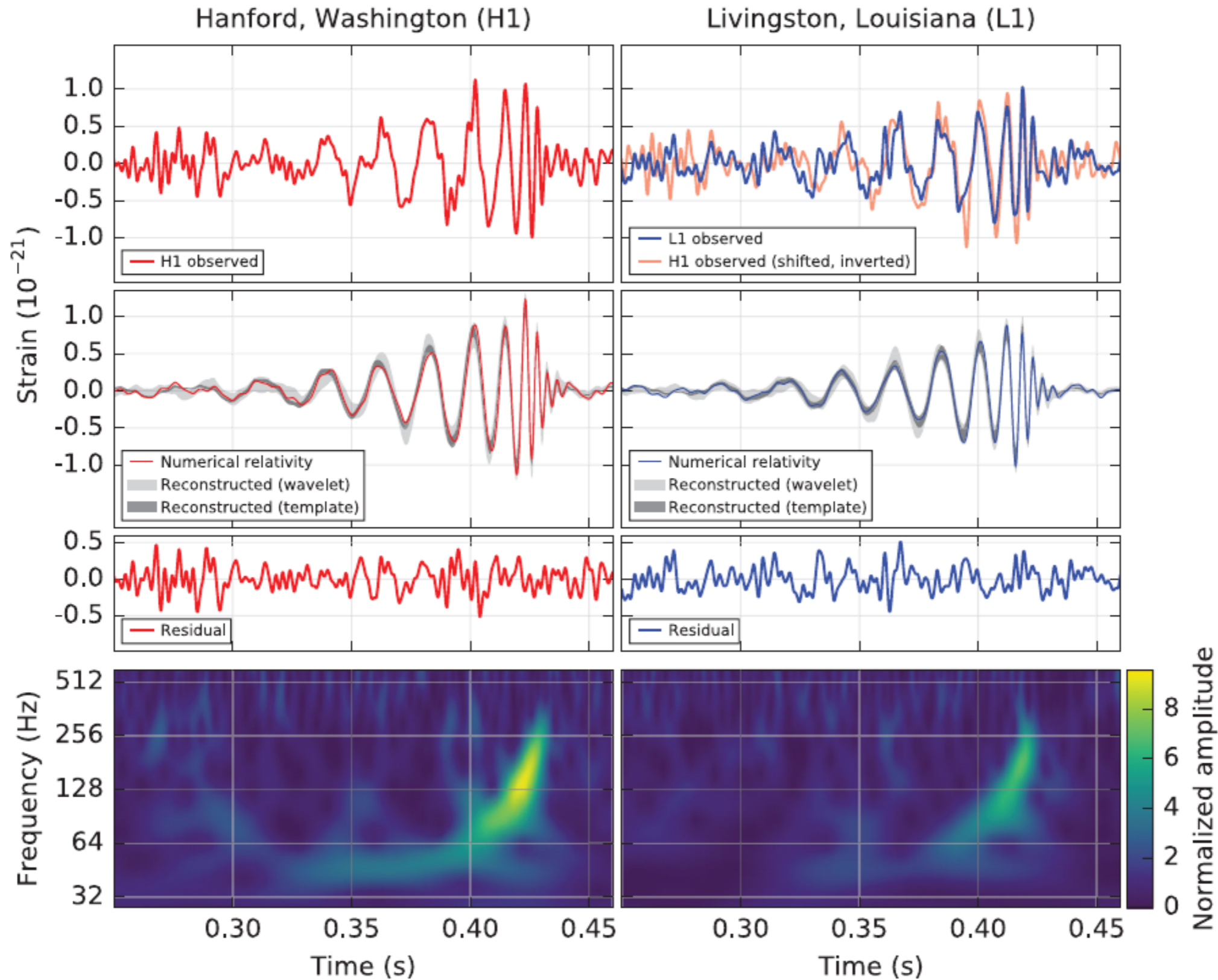
# + Nieuwe LIGO-Virgo waarnemingen



**LIGO: vanaf november  
2x beter dan vorig jaar**

**Virgo: vanaf maart 2017**

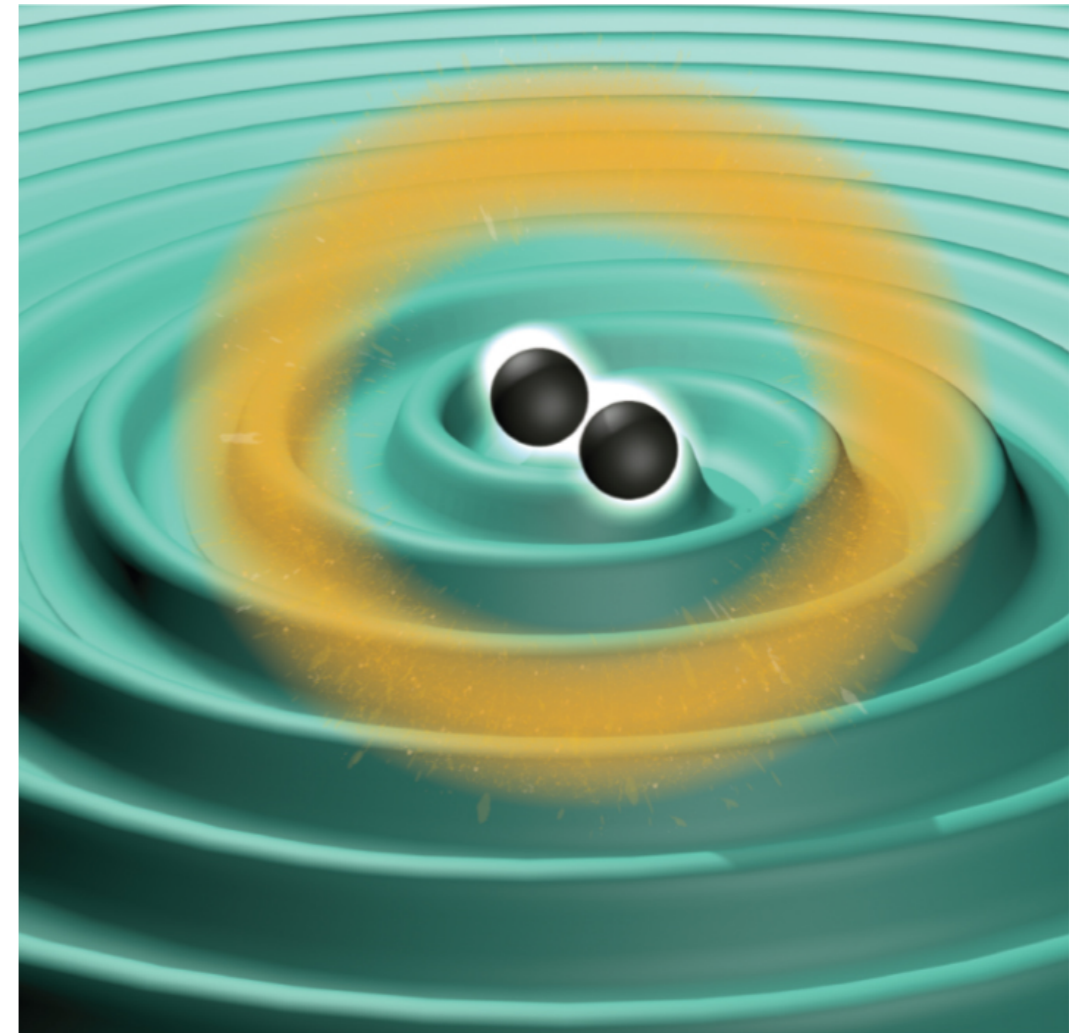
# + Een nieuwe blik op het universum!



# + Zwaartekrachtstraling

## – een nieuw venster op de kosmos

- Test Einstein's relativiteitstheorie
- Productie 'r-process elementen' waaronder goud
- Populatie van neutronensterren, zwarte gaten
- ...



# + Complementaire waarnemingen: aanvullende informatie

## **Zwaartekrachtstraling**

- Tijdstip van botsing
- Massa's
- Spin
- Inclinatiehoek baan
- Afstand
- Interne structuur NS
- Statistiek: aantal
- ...

## **Electromagnetische straling**

- Precieze locatie
- Omgeving (sterrenstelsel, populatie)
- 'Remnant'
- Vorming chemische elementen
- Botsing (ejecta, snelheden)
- ...



# The Origin of the Solar System Elements

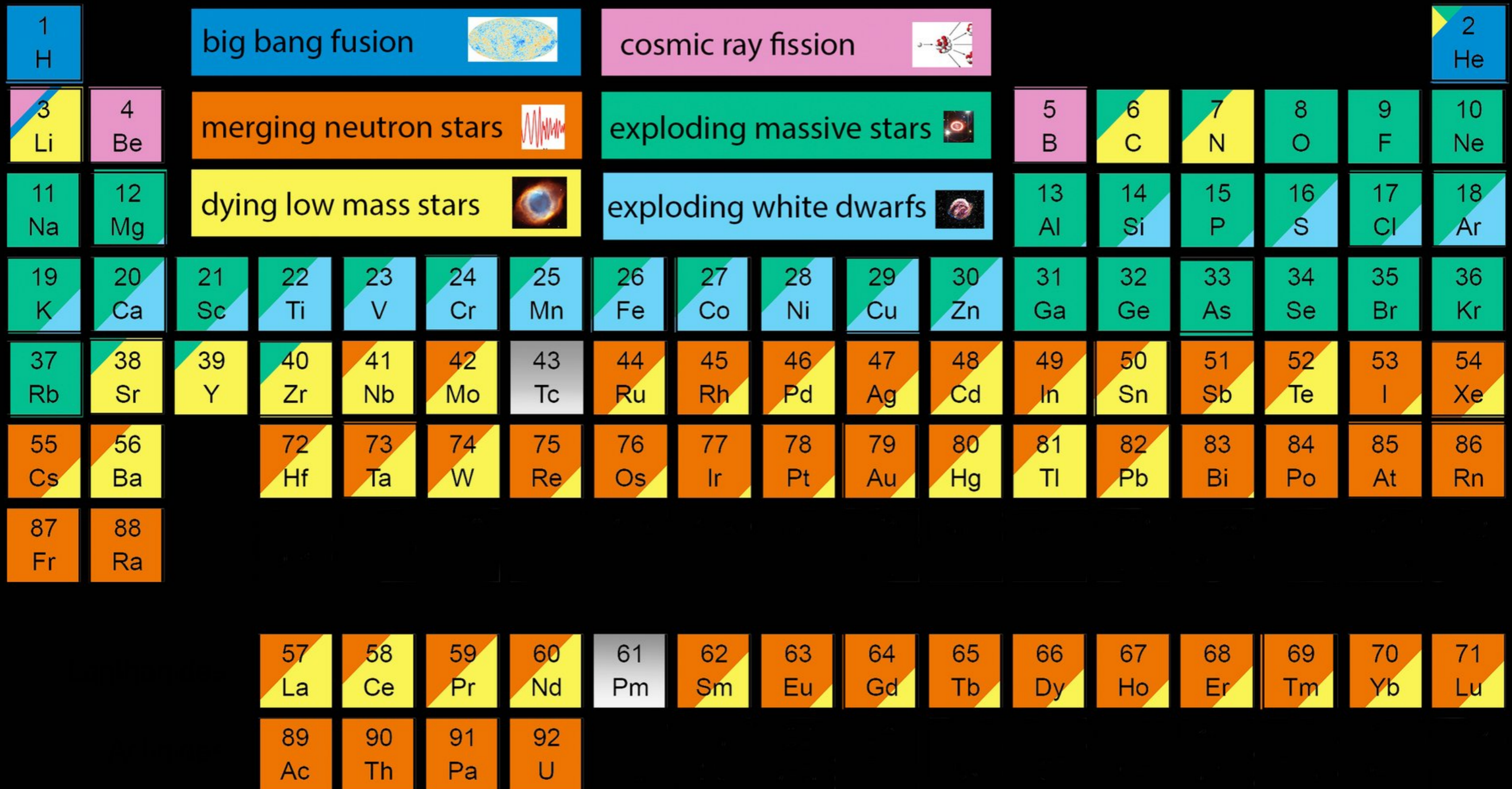
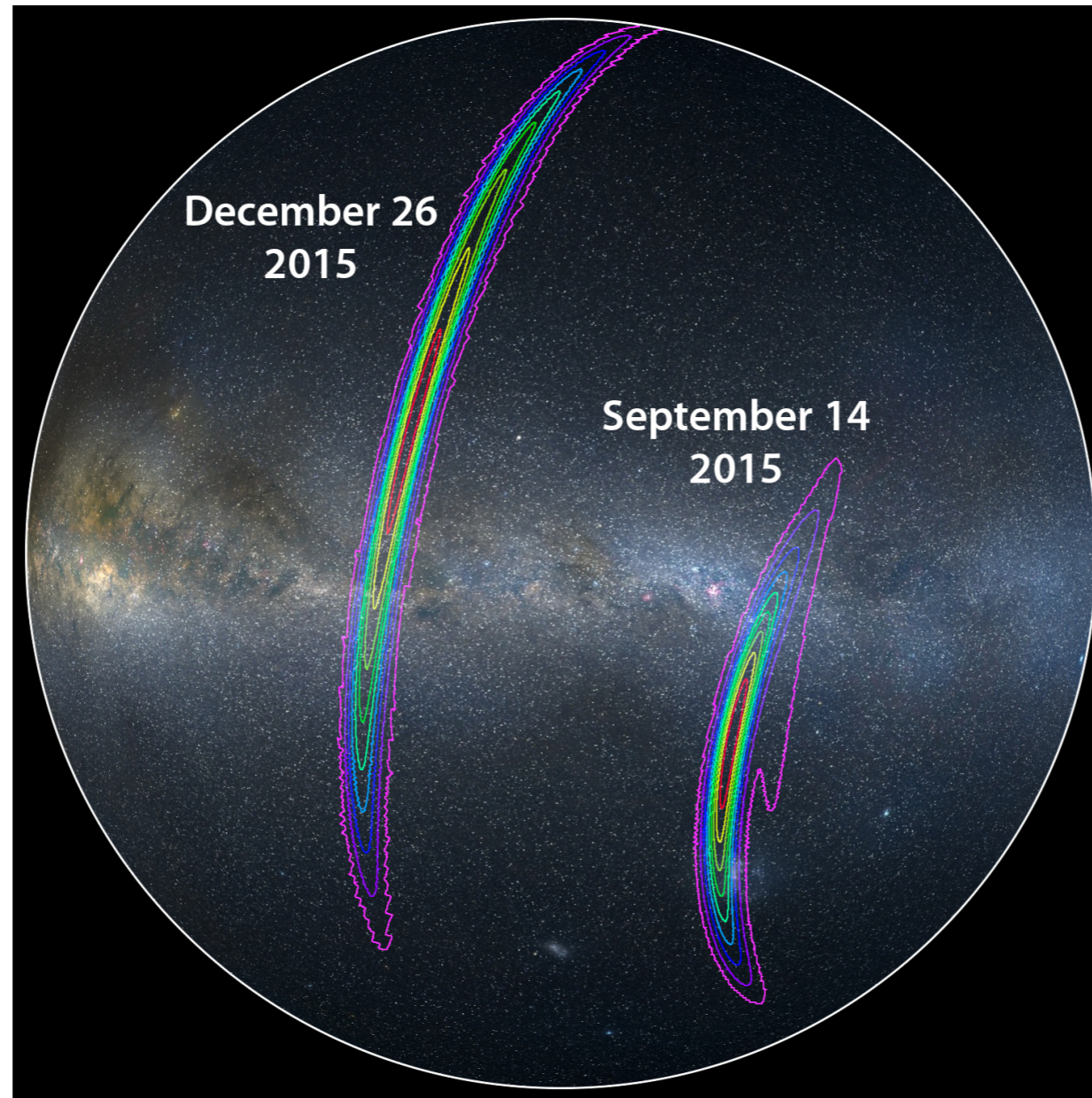
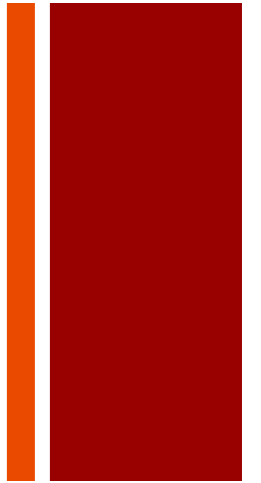
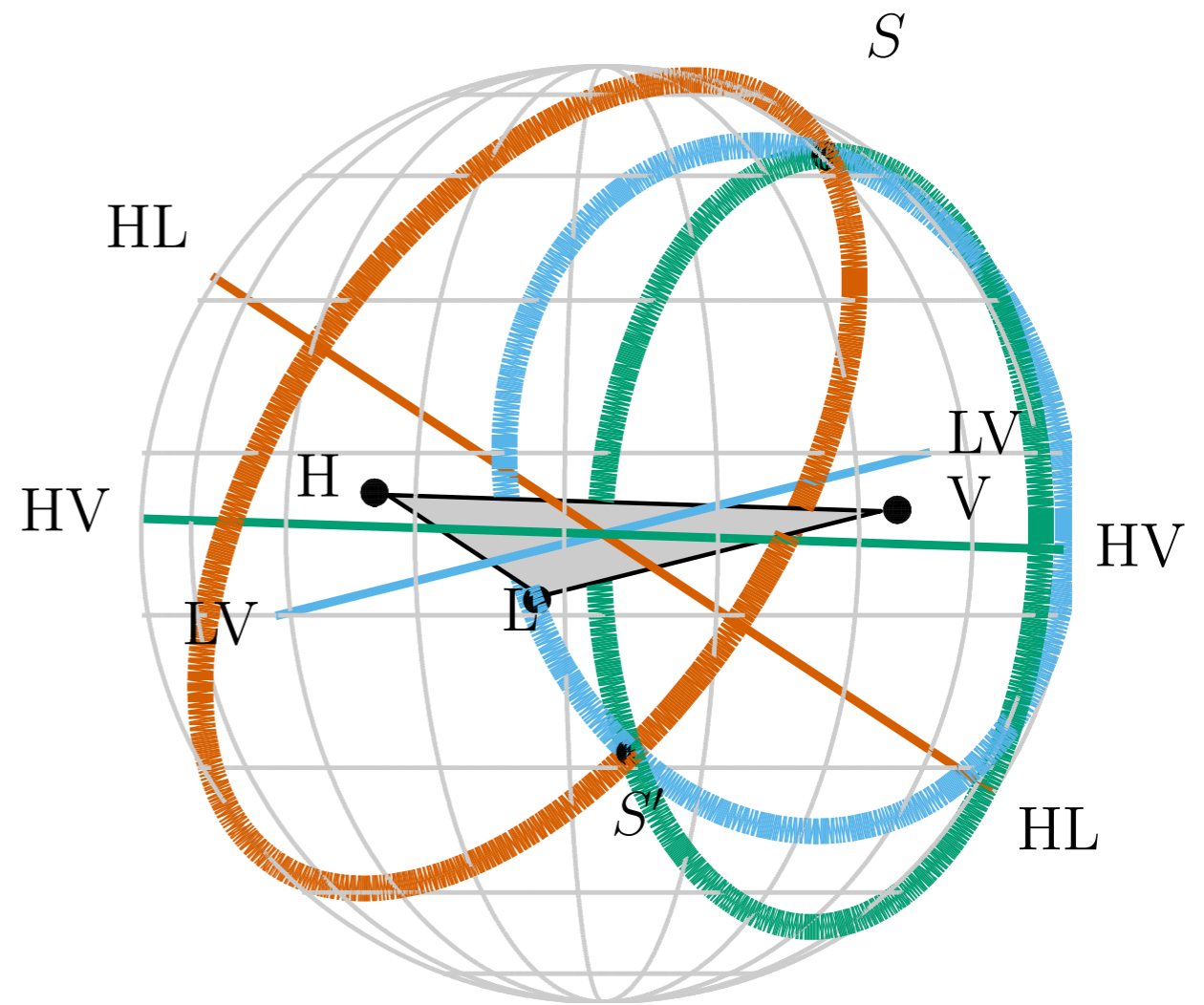
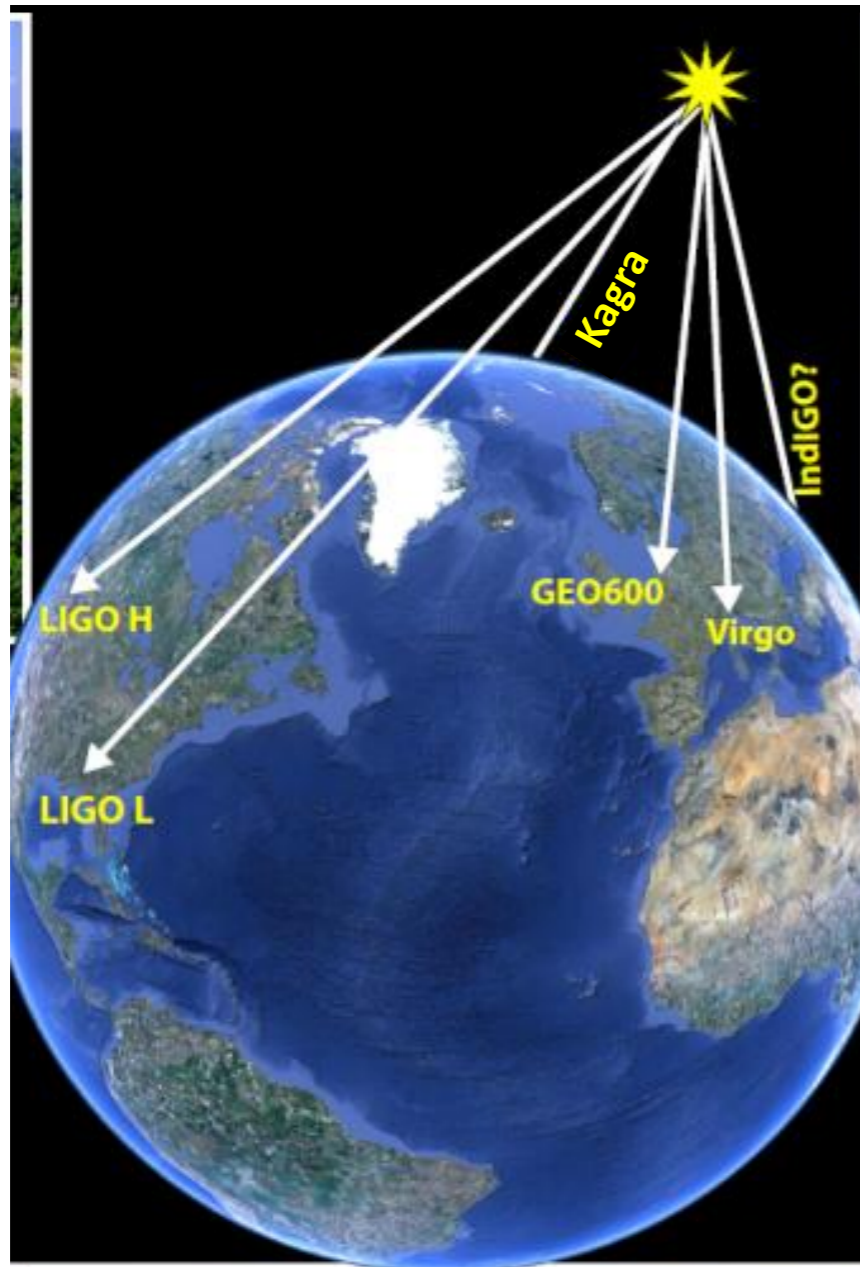
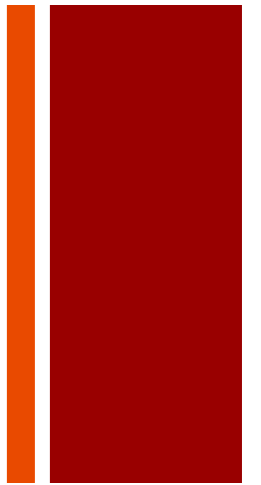


Figure: Jennifer Johnson

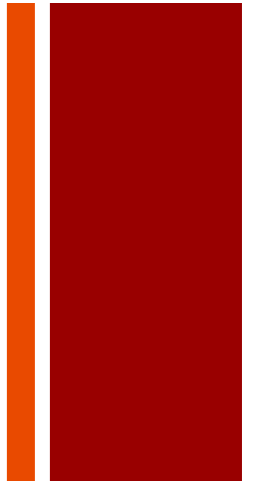
# + Geen nauwkeurige positiebepaling



# + Geen nauwkeurige positiebepaling



# + Optische flitsen die horen bij bronnen van gravitatiestraling

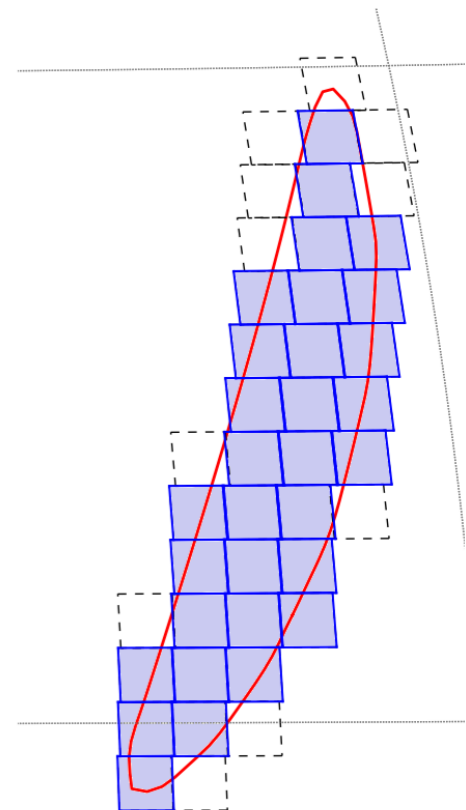
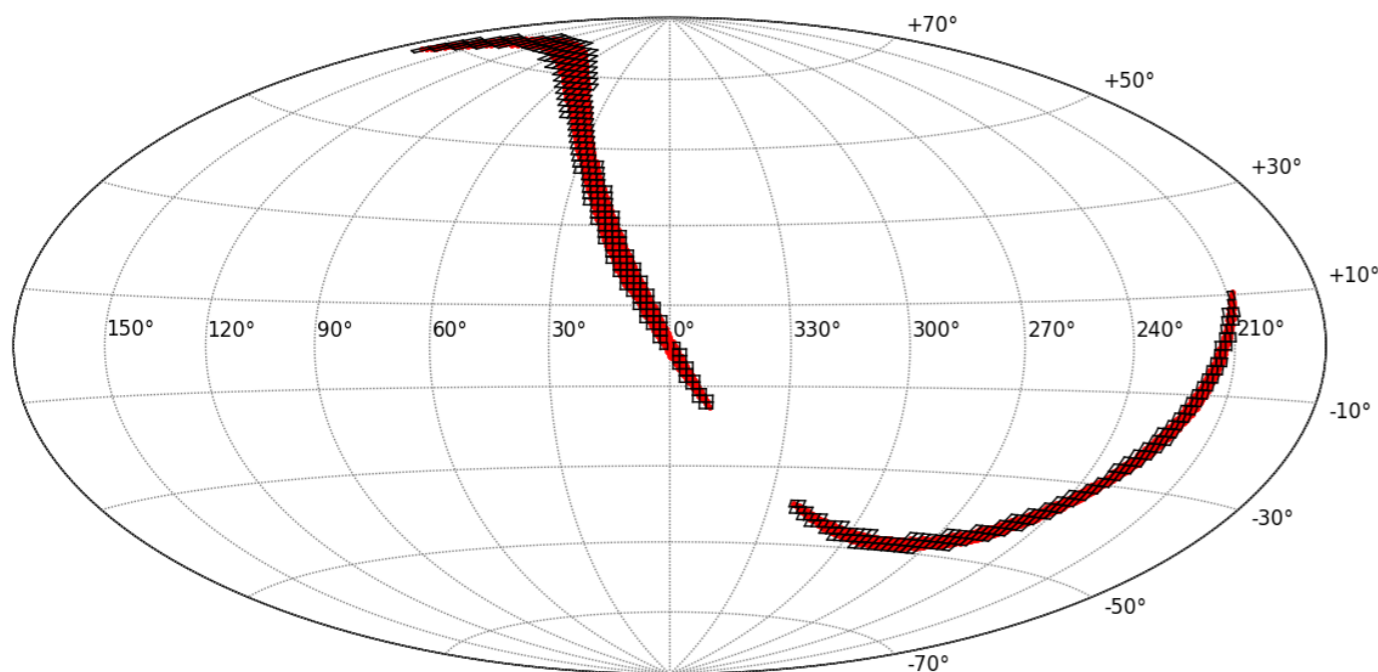


## ■ Uitdagingen:

- Onnauwkeurige positiebepaling aan hemel ( $\sim 100 \text{ deg}^2$ )
- Zwak (21-22 mag op 200 Mpc)
- Herkennen (naald in hooiberg)
- Slechts uren zichtbaar

## ■ Wat we nodig hebben:

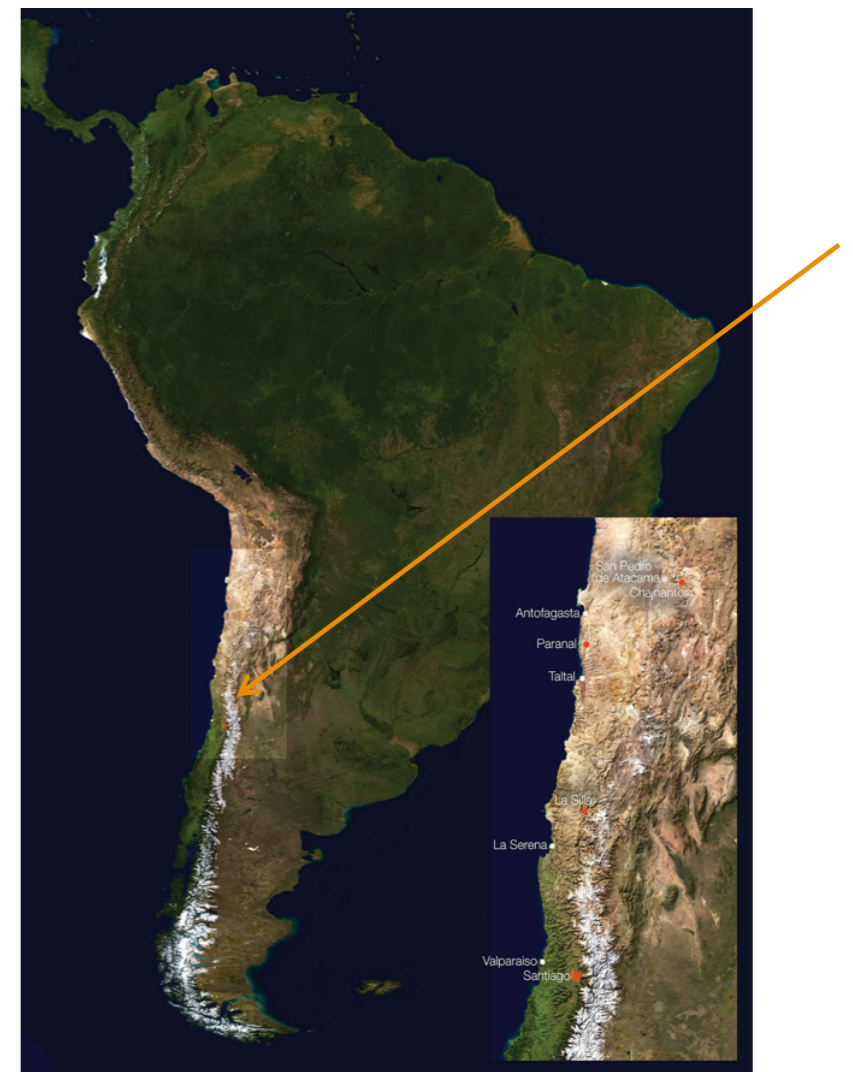
- Groot beeldveld
- Gevoelige detector / grote spiegel / goede site
- Kleurinformatie
- Faciliteit gereserveerd voor dit onderzoek



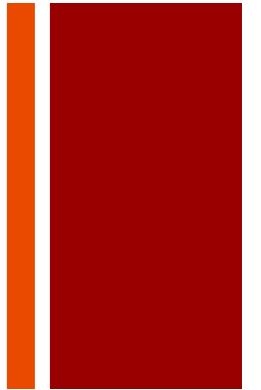
# + BlackGEM

~2018

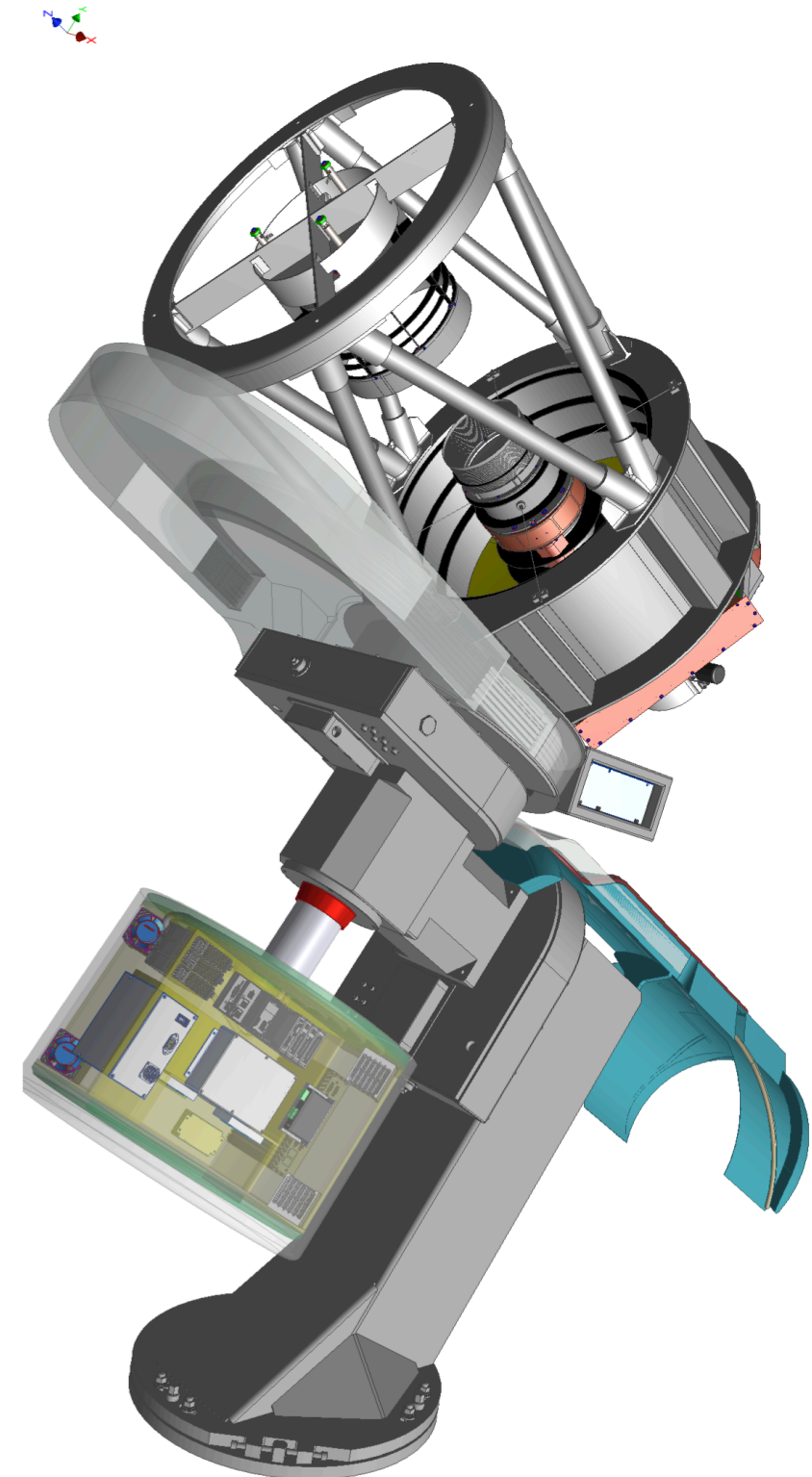
- Nederlands project (NOVA, Radboud Universiteit)
- Tegen 2018: 3 telescopen (65cm) op La Silla, Chili



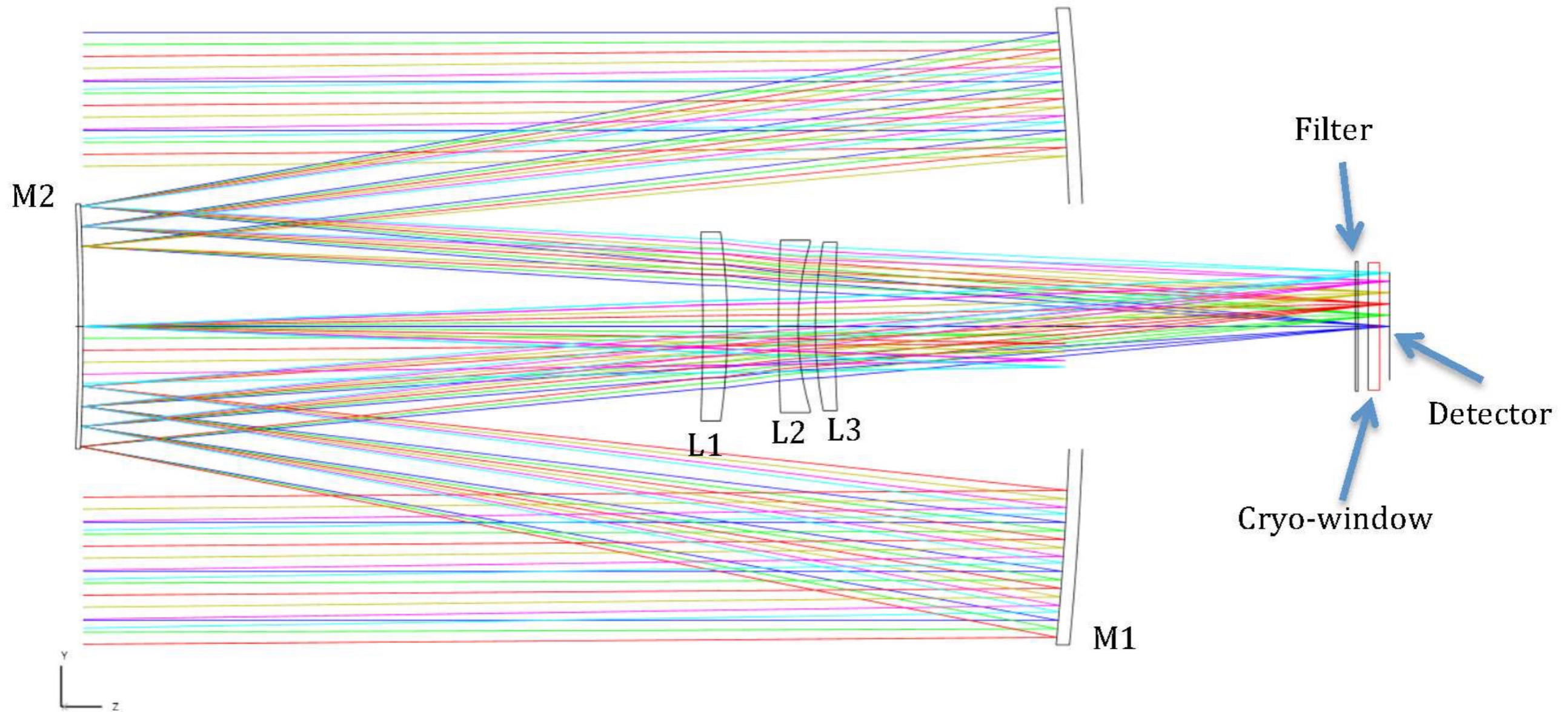
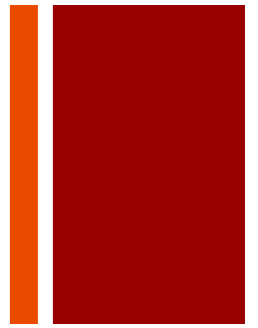
# + BlackGEM



- Koolstofvezel-telescoopstructuur
- Speciaal mechanisch en optisch ontwerp
- $2.7 \text{ deg}^2$  per telescoop (10x volle maan)
- 110 megapixel CCD per telescoop
- 500 gigabyte per nacht
- Volgt triggers van LIGO/Virgo vanaf 2018
- **23 mag in 5 minuten integratie**  
→ vereist goede seeing ( $\sim 1$  boogseconde)



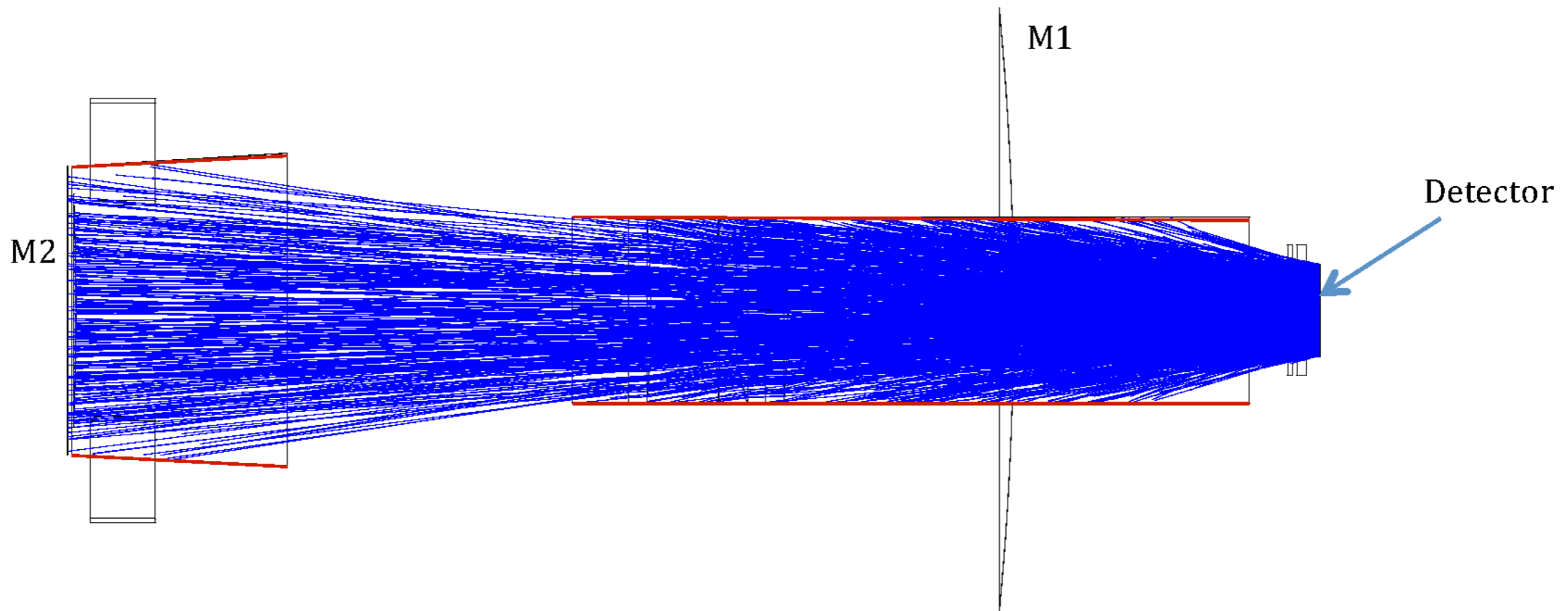
# + Modified Dall Kirkham Cassegrain



600mm apertuur  
F/5.5, focal length 3300mm  
Pupil op tweede spiegel  
M1: parabolisch  
M2: sferisch

Optisch ontwerp: Harrie Rutten & Rik ter Horst

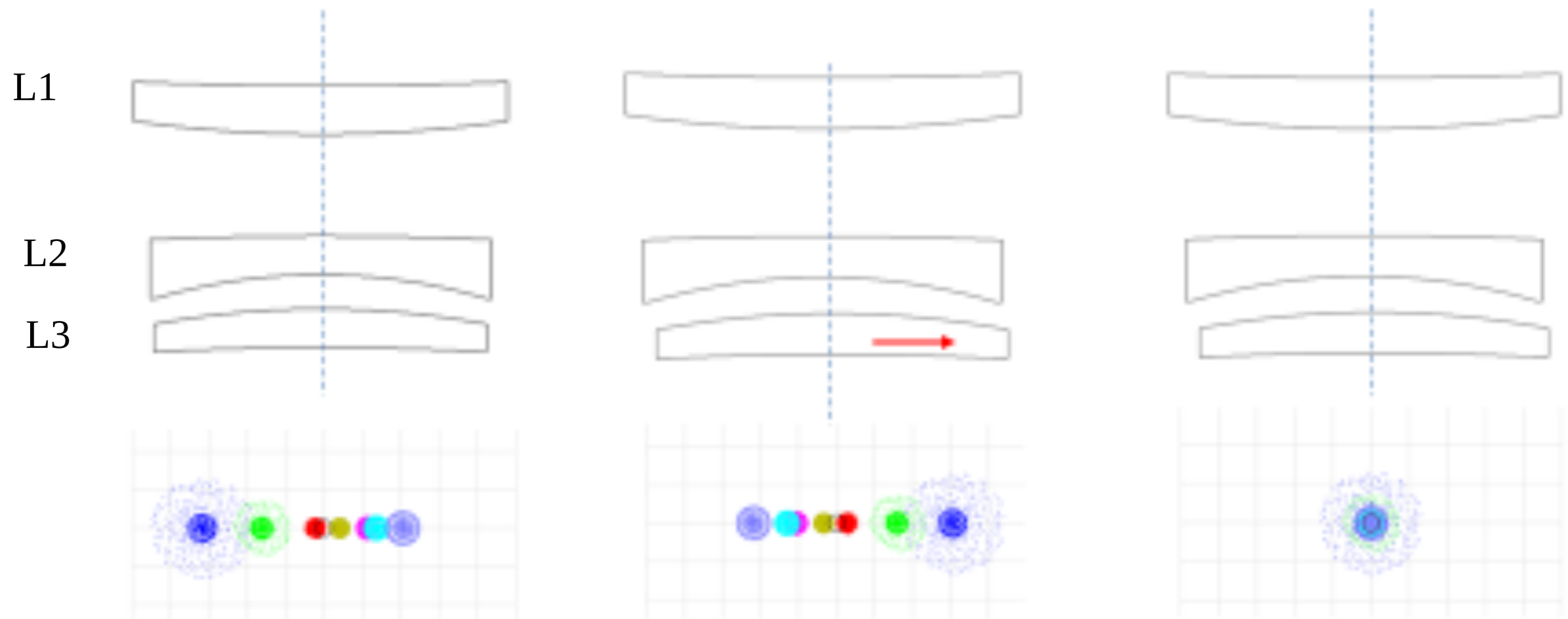
# + Strooilicht afvangen is uiterst belangrijk!



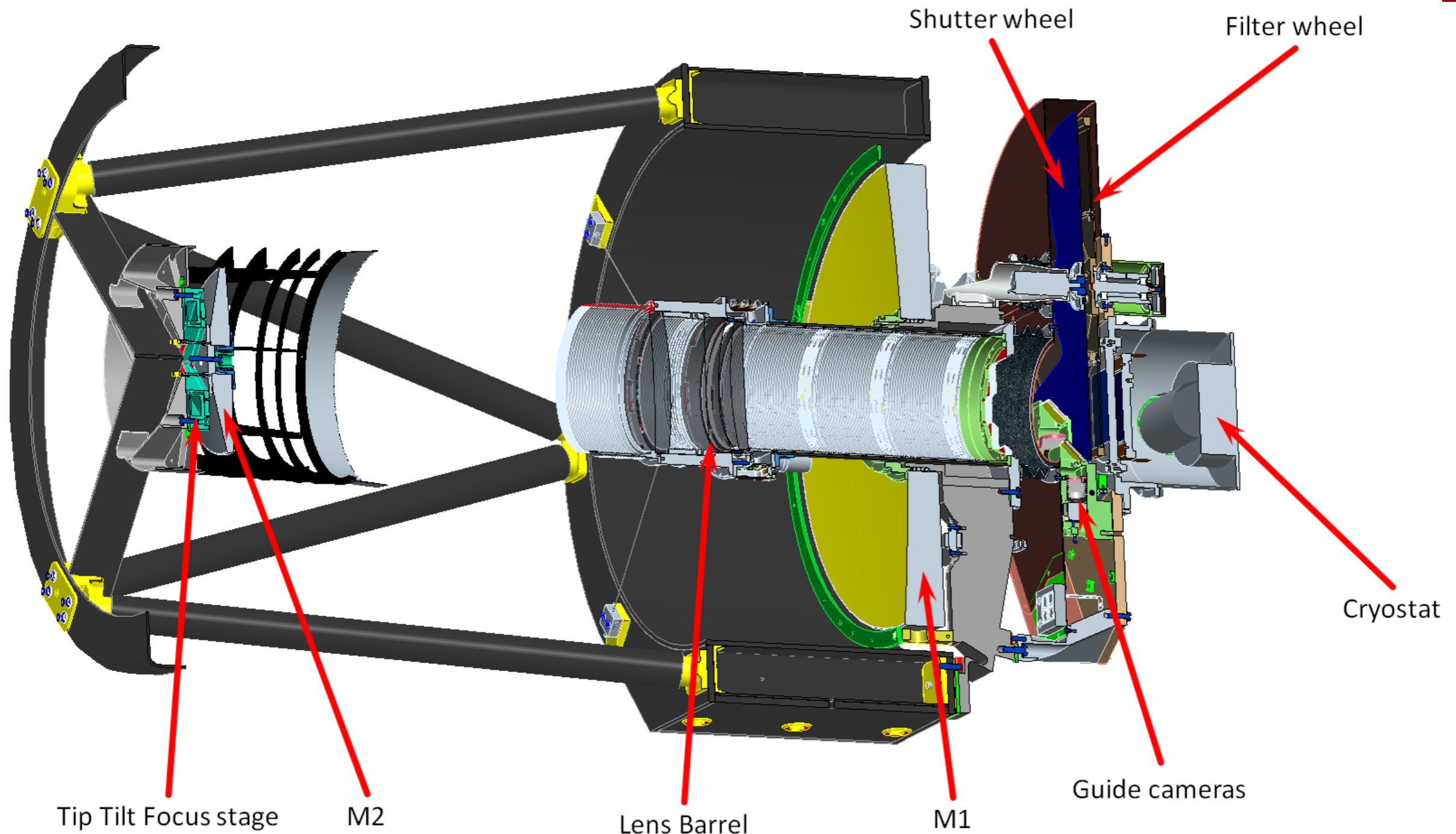
**FIGURE 2.4:** BlackGem baffles; At right the detector 'light source'. No light exits the baffle system, so the other way around no straylight can reach the focal plane.

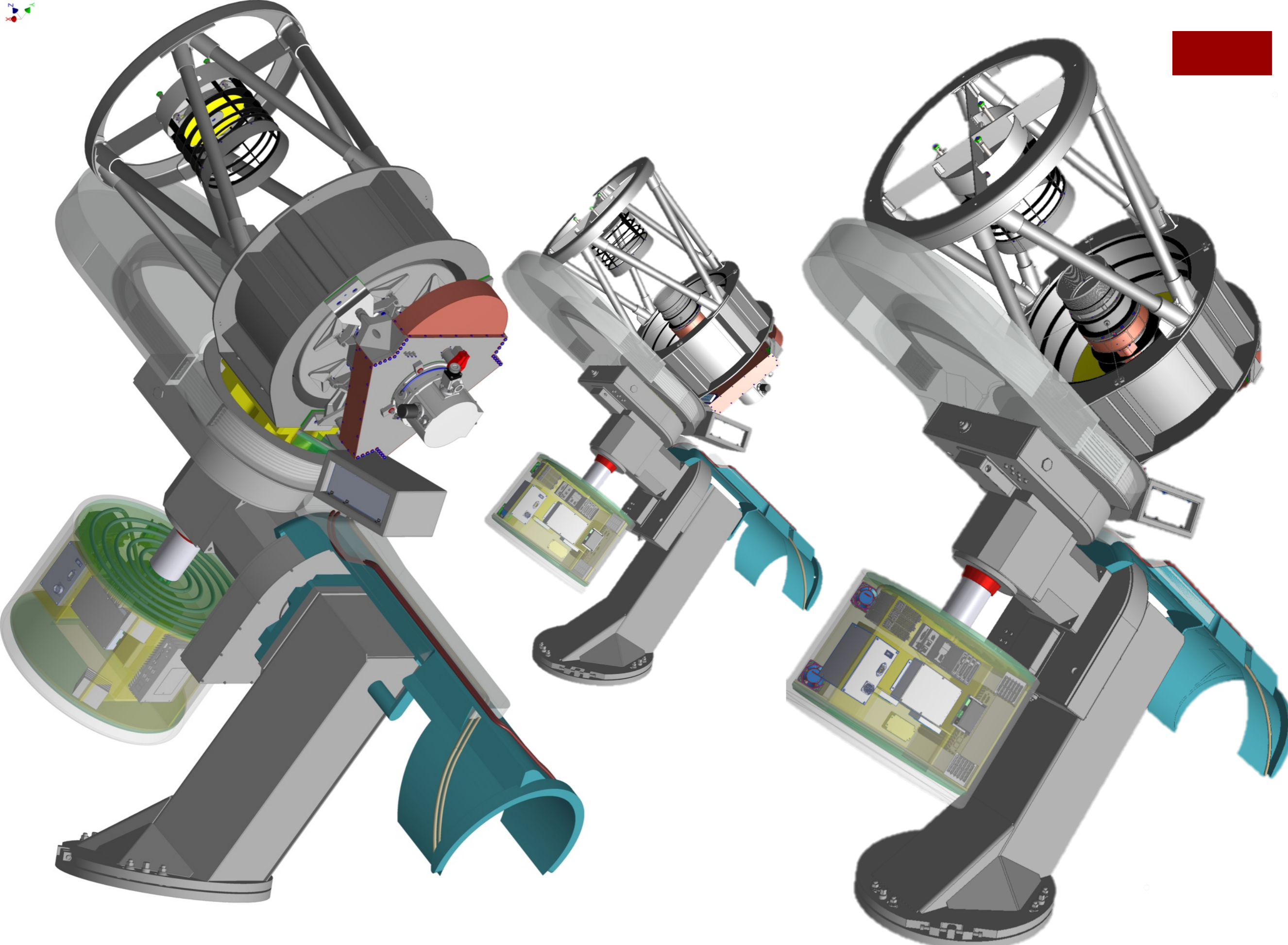


# + ADC door verschuiving derde lens



# + Opto-mechanisch design

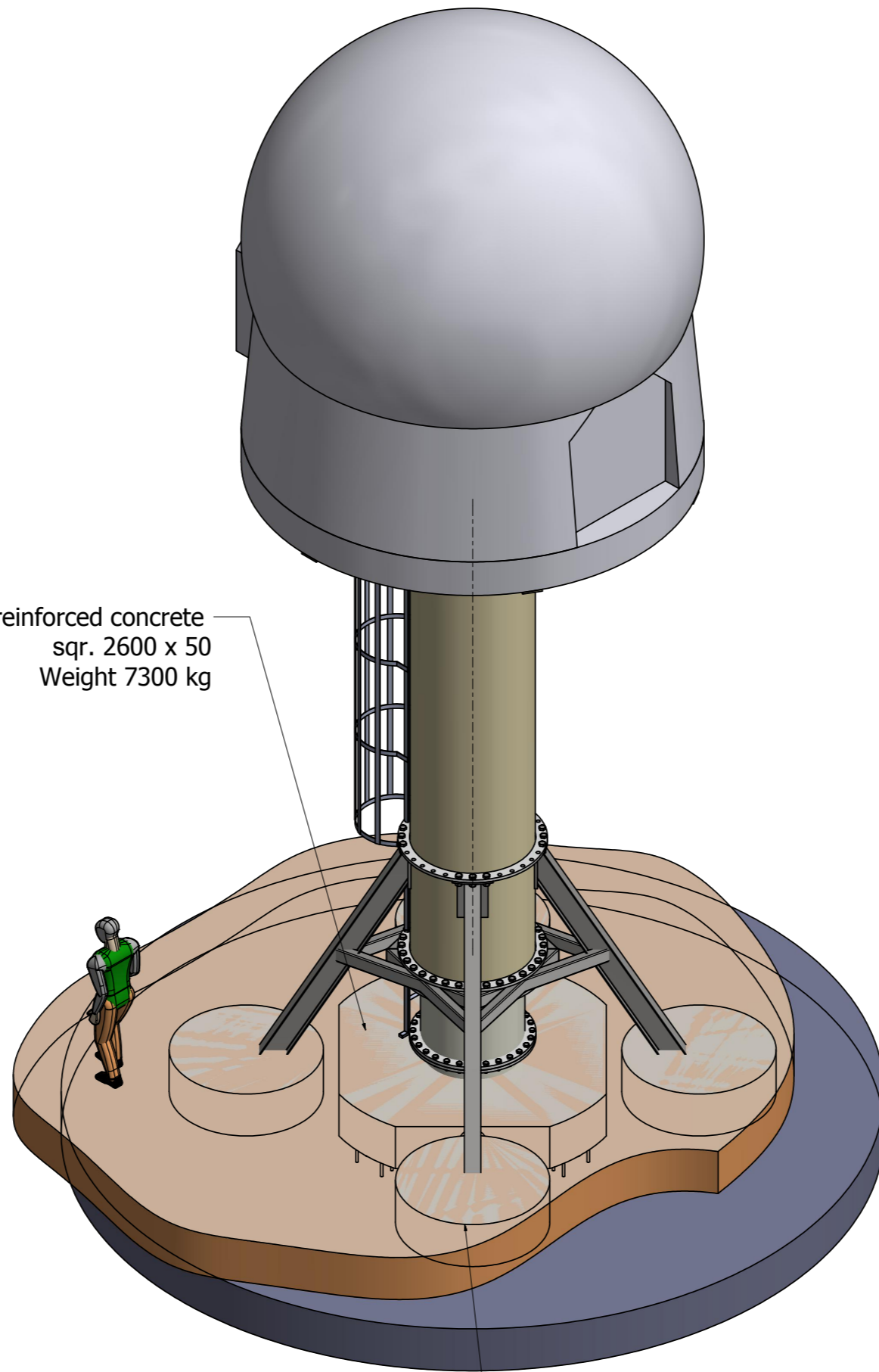






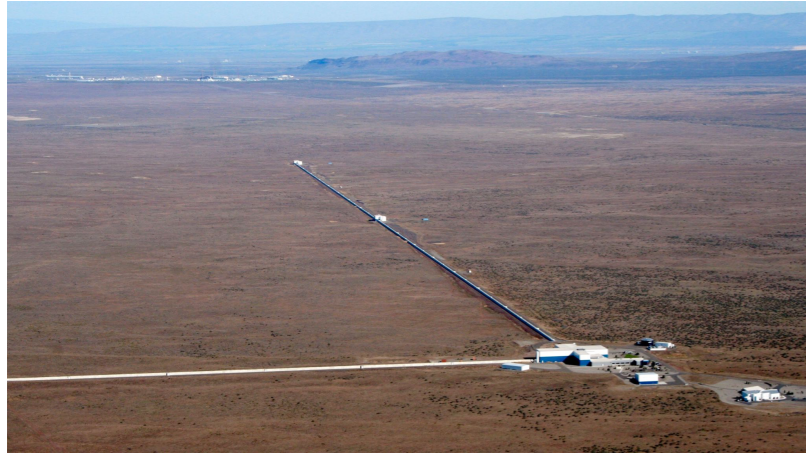
**Op 7m hoge torens om  
seeing door turbulente  
lucht vlak boven  
aardoppervlak te  
verminderen**

reinforced concrete  
sqr. 2600 x 50  
Weight 7300 kg



reinforced concrete Ø1500 x 50  
Weight 2200 kg (4x)

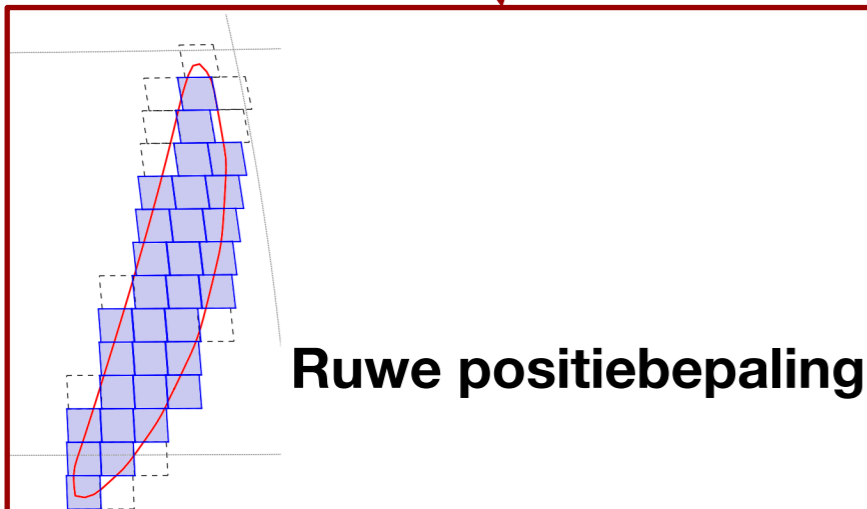
# + Detecteren van een optische flits



**Detectie LIGO/Virgo**



**Nauwkeurige  
positiebepaling  
+ kleur, helderheid  
met BlackGEM**

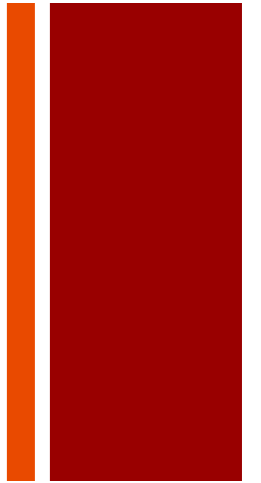


**Ruwe positiebepaling**



**Opvolging met grootste telescopen**

# + Software, volledig robotisch



The screenshot shows the 'abot dome' control software interface. At the top, it displays 'abot' on the left and 'DOME | SETTINGS | ABOUT' on the right, along with a 'SYBILLA' logo. Below this is a navigation bar with 'dome', 'MANAGEMENT', 'STATUS', and 'CAPABILITIES'. The main control area features a grid of buttons: 'Disconnect', 'Switch Off', 'Reset', 'Park', 'Stop', 'Reset', 'Remote', 'Open', 'Close', 'Stop', 'Switch Off', 'Rotate...', 'Stop', 'Track...', 'Stop', 'On', and 'Reset'. The 'Open' button is highlighted with a blue border. Below the buttons, there is a 3D model of a dome structure on the left and a status display on the right. The status display shows 'Shutters' with a progress bar labeled 'Opening', and 'Rotation & Tracking' with a vertical line and 'Current: 00°00'00\".

# + MeerLICHT: prototype van BlackGEM, gekoppeld aan MeerKAT radiotelescoop



Eerste telescoop van het BlackGEM type

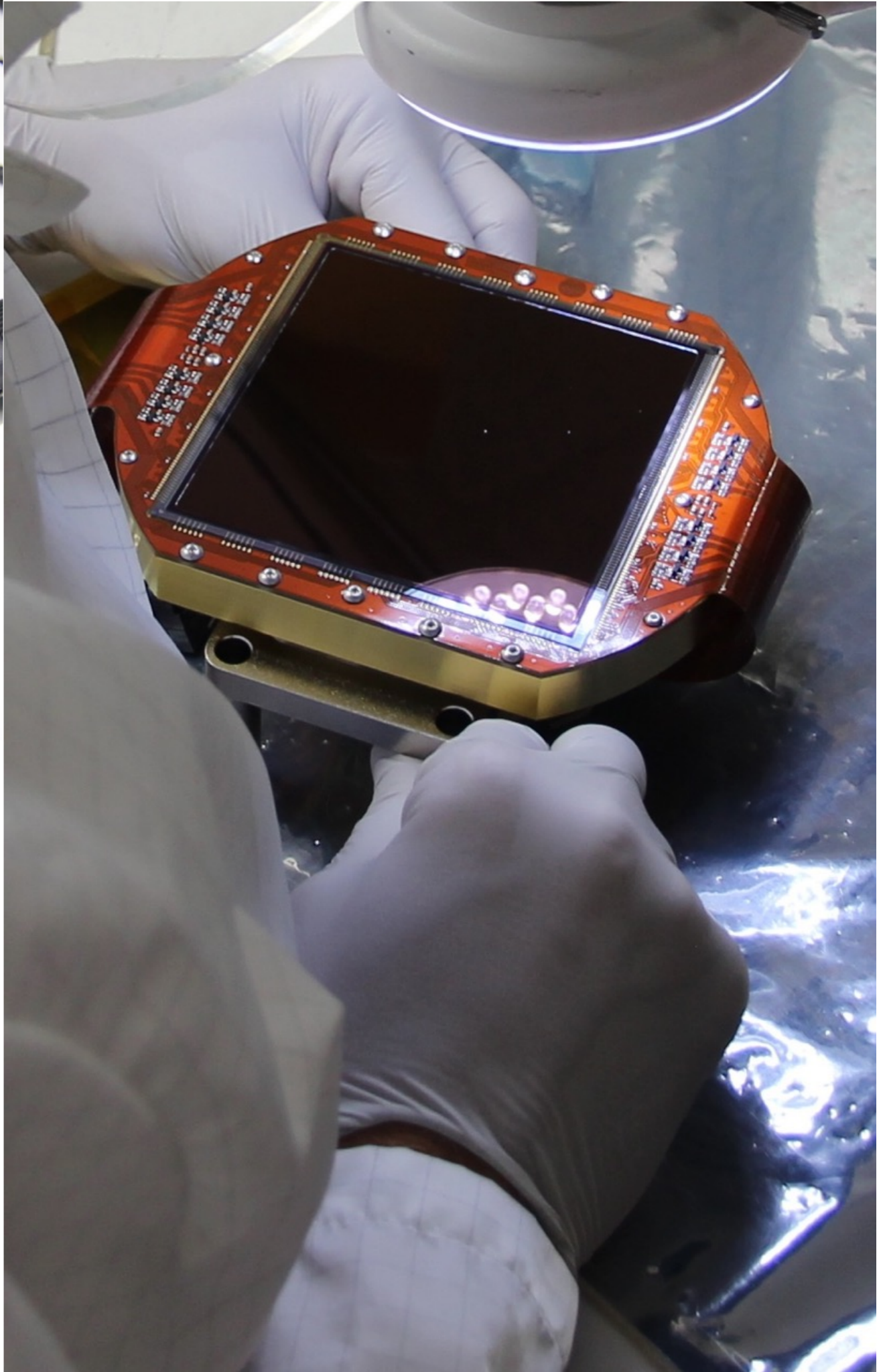
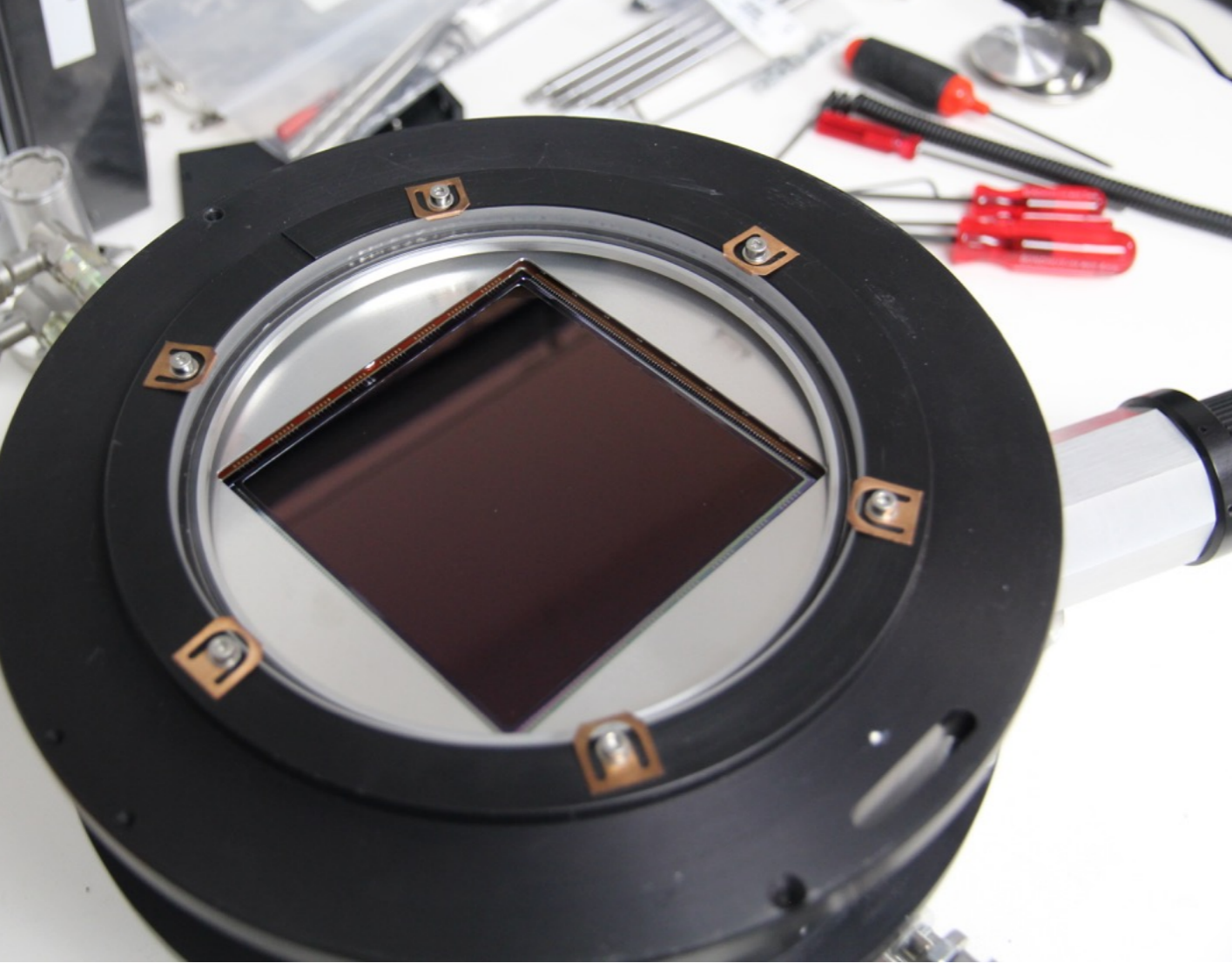
Sutherland – **South Africa**

Kijkt altijd mee met **MeerKAT** radio telescoop

In Zuid Afrika: brug tussen 10m SALT en SKA/MeerKAT

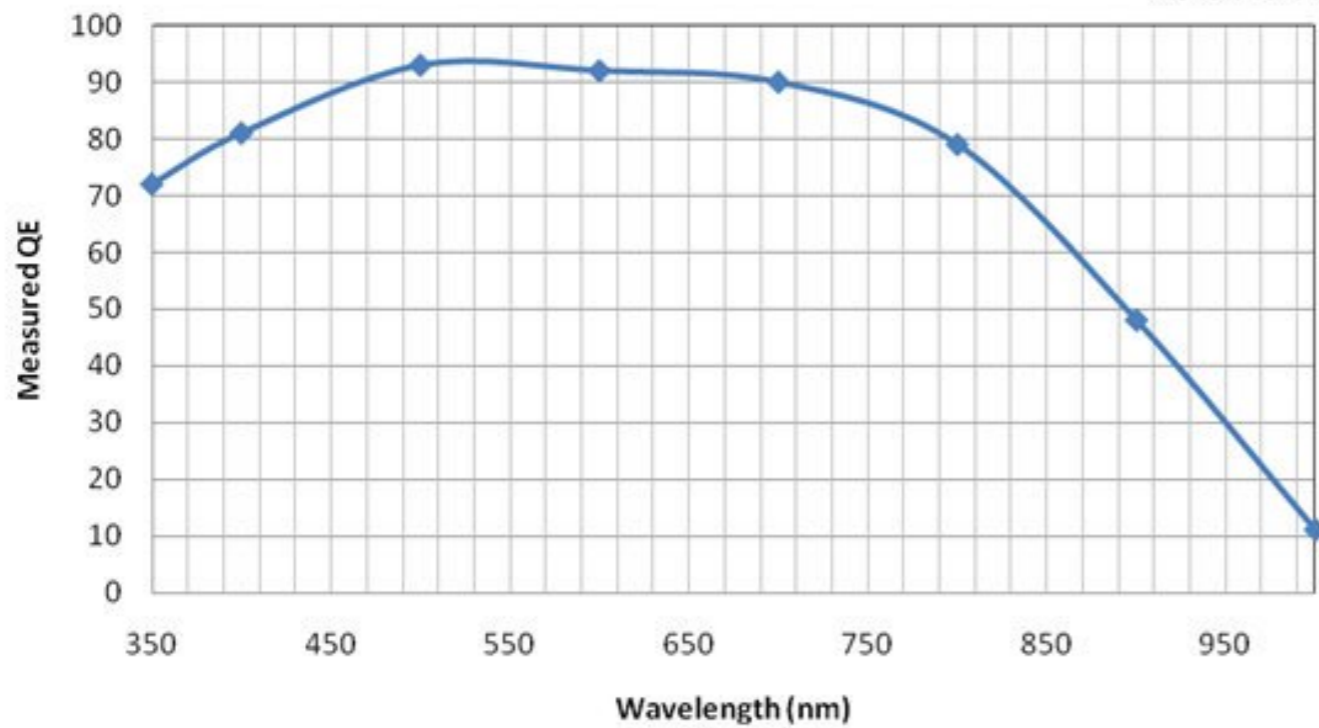
Transients zoeken in optisch en radio tegelijk

RU, NWO, UvA (NL); UCT, SAAO (SA); Oxford, Manchester (UK)



SN19616 Quantum Efficiency

Temp: -100C



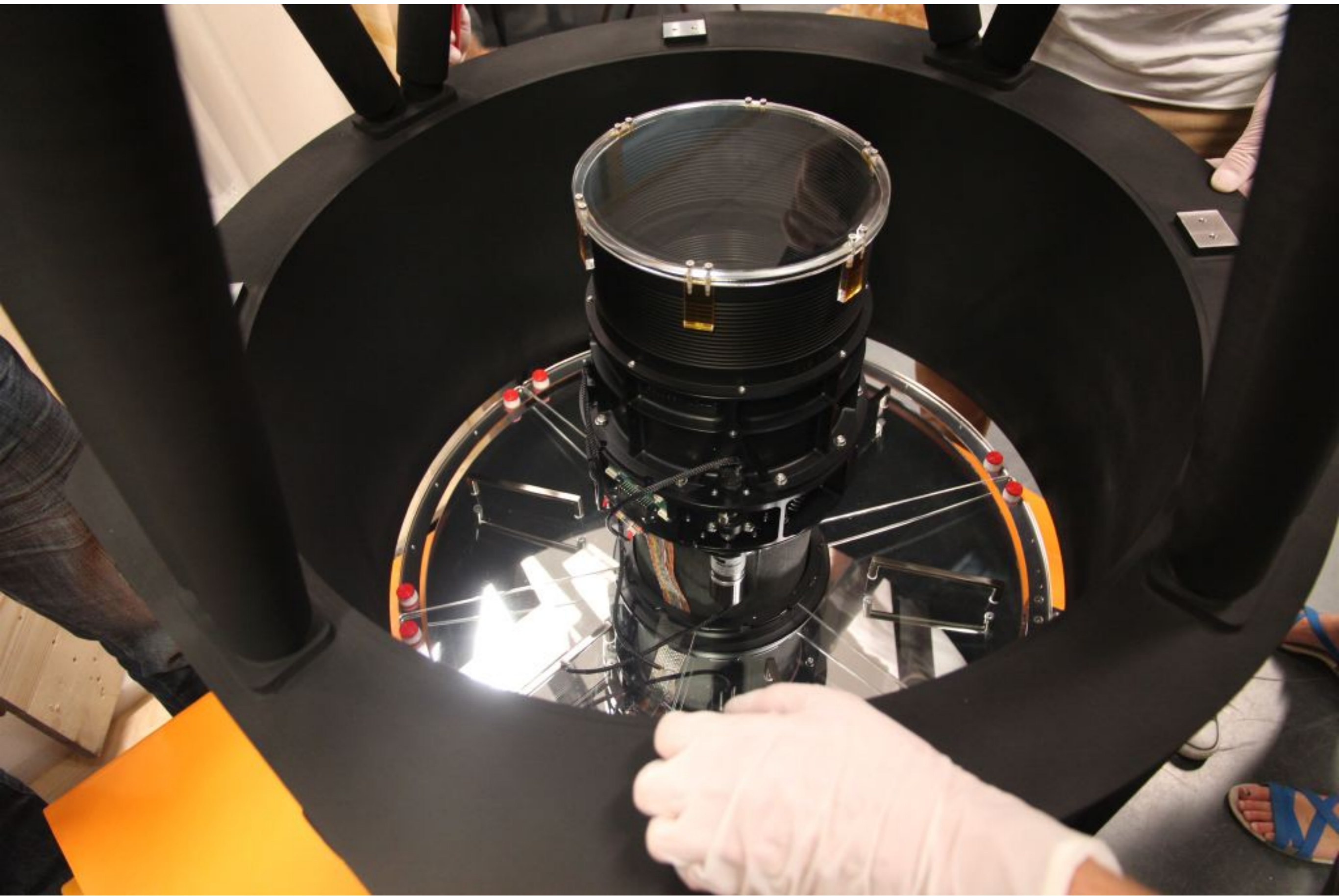


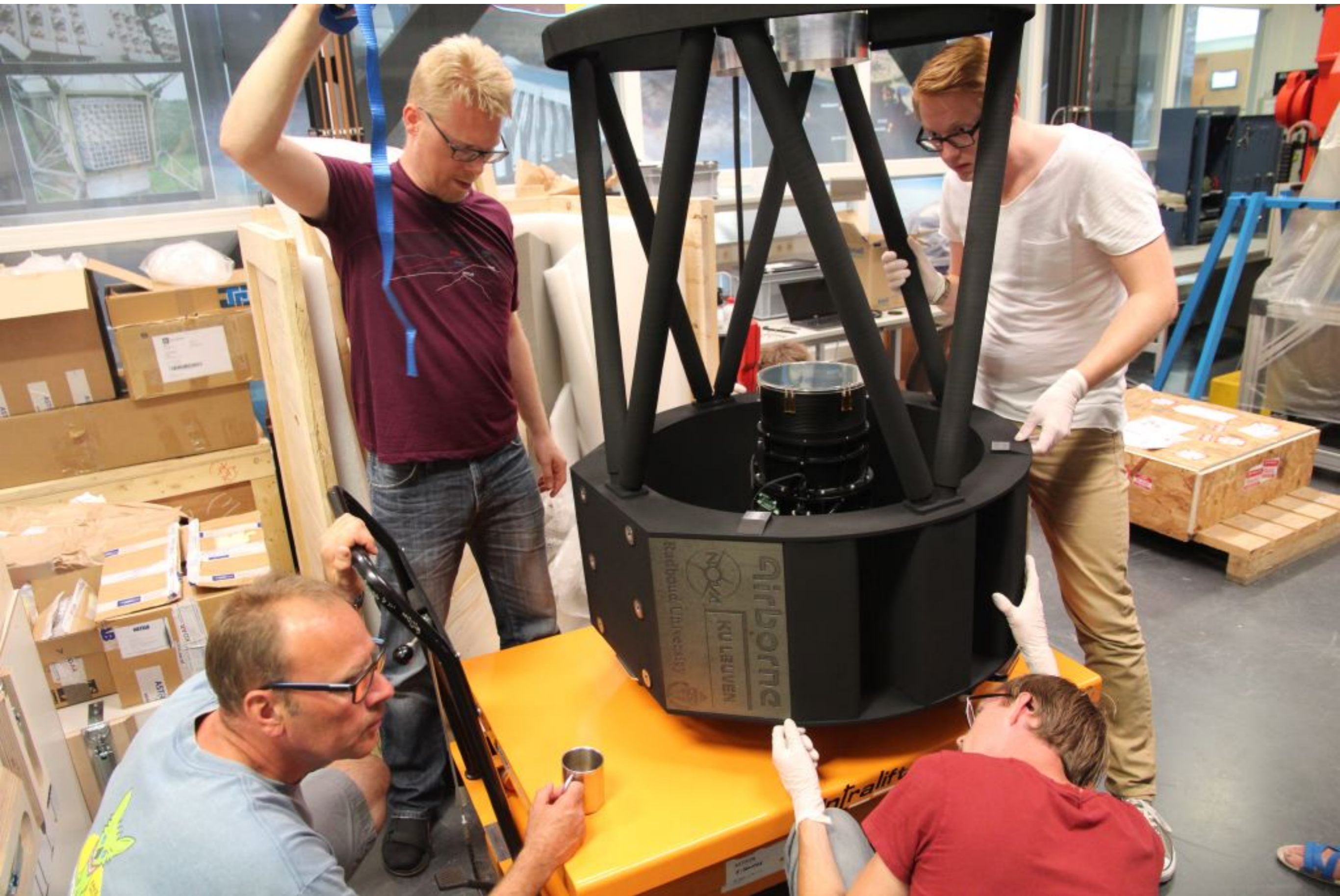




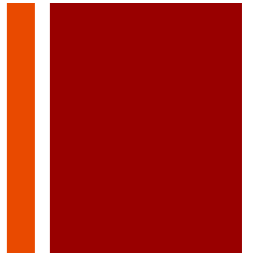




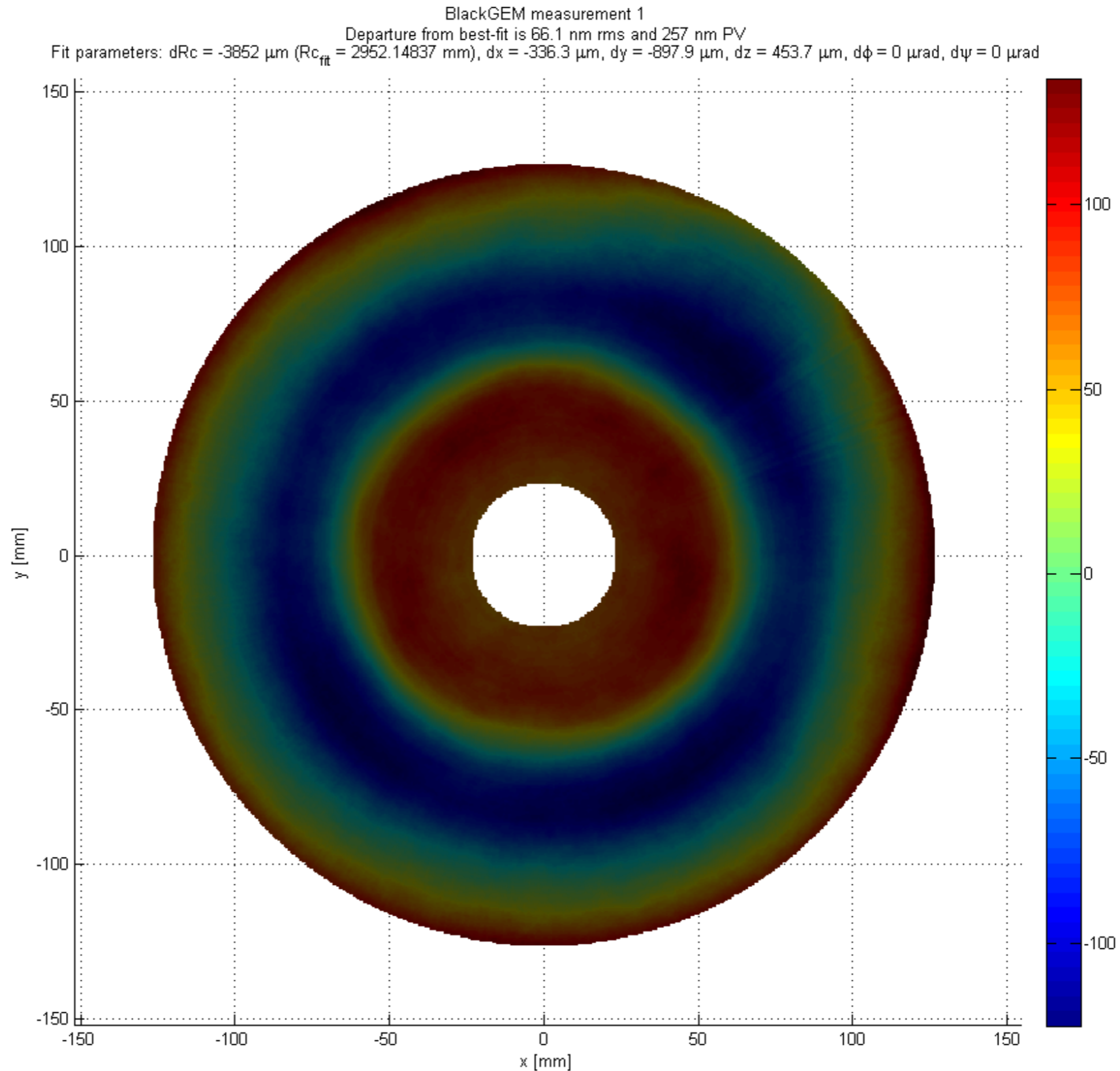


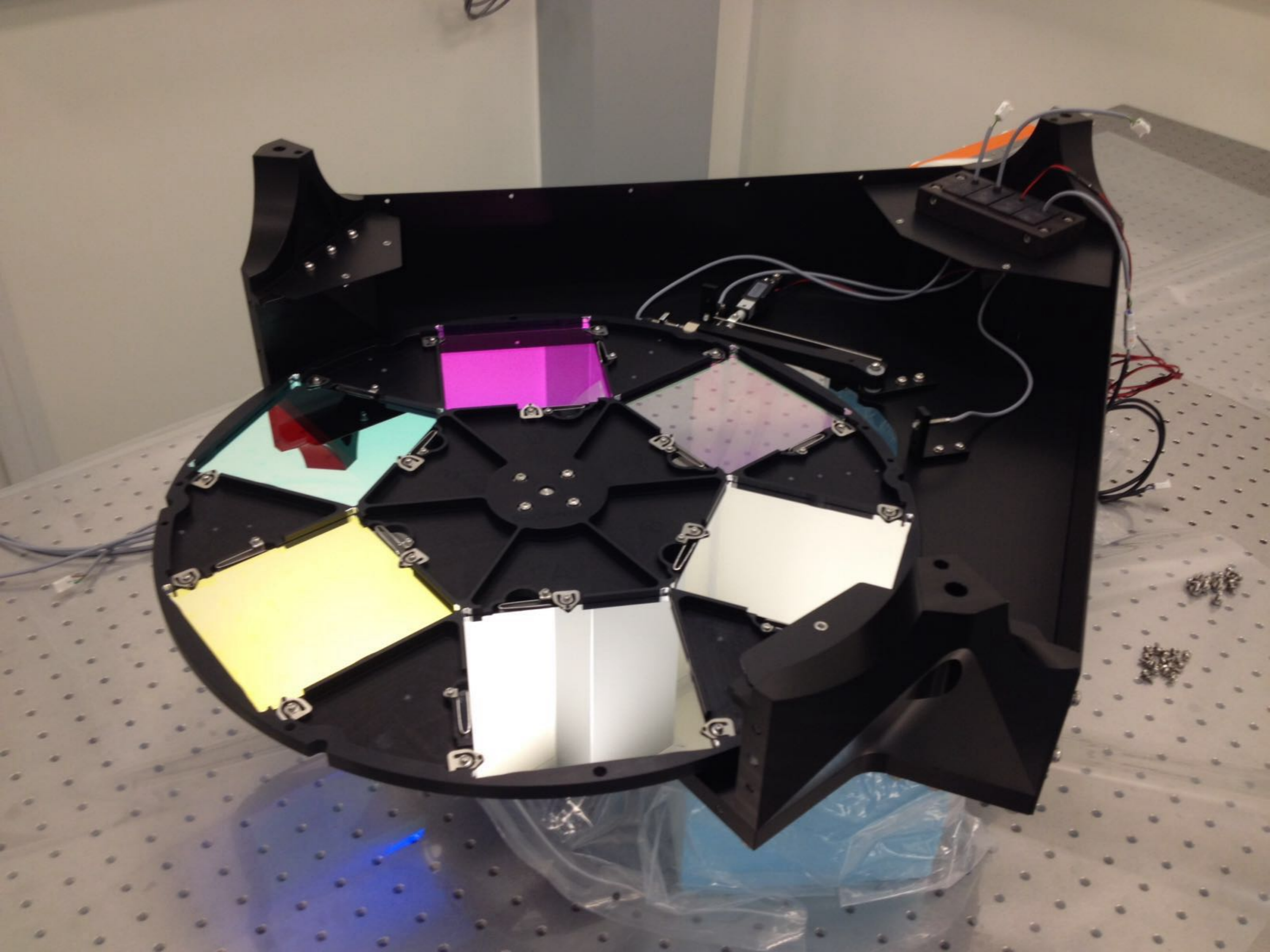


# + M2 productie was moeilijk...

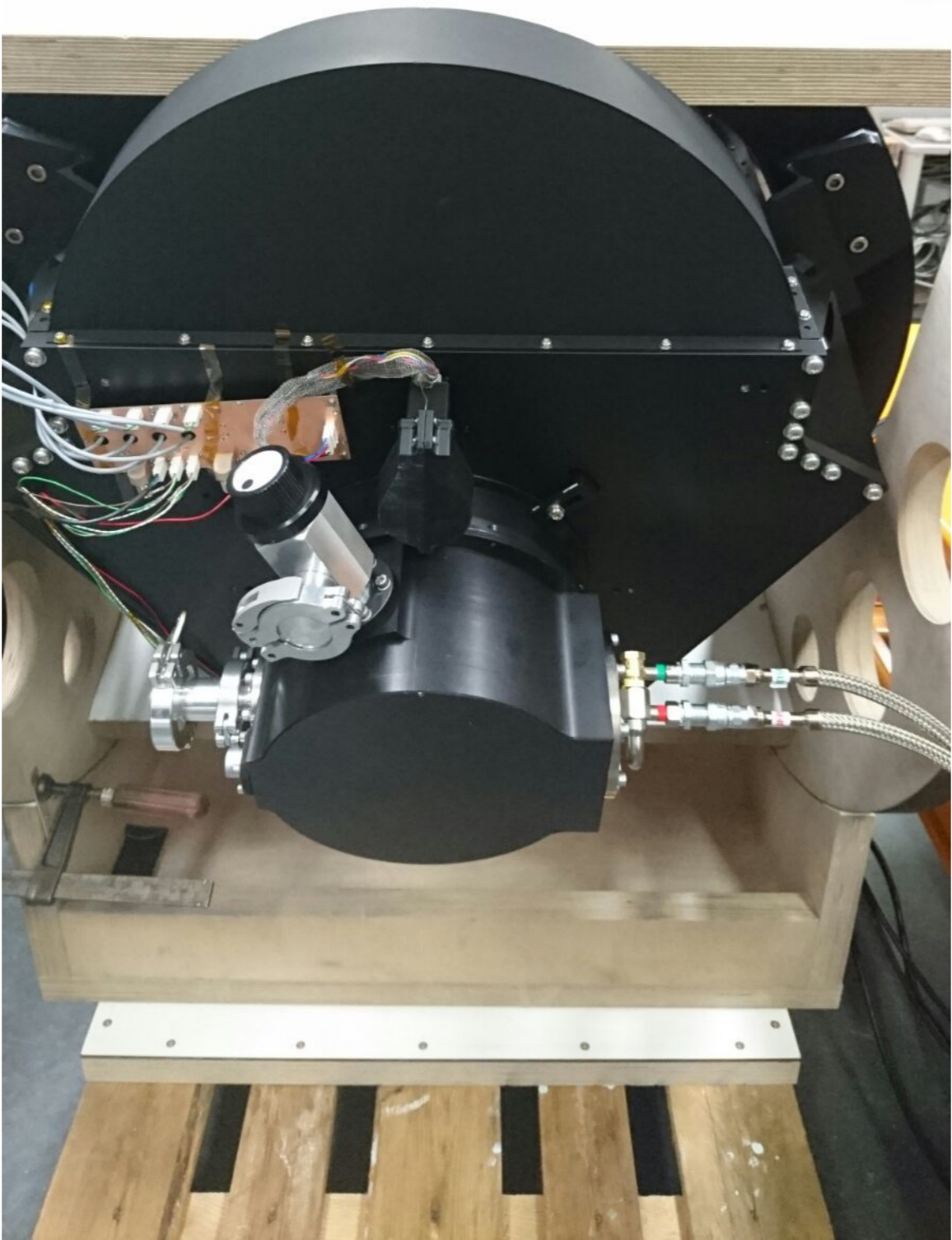


Diameter: 26cm  
Radius: -296 cm

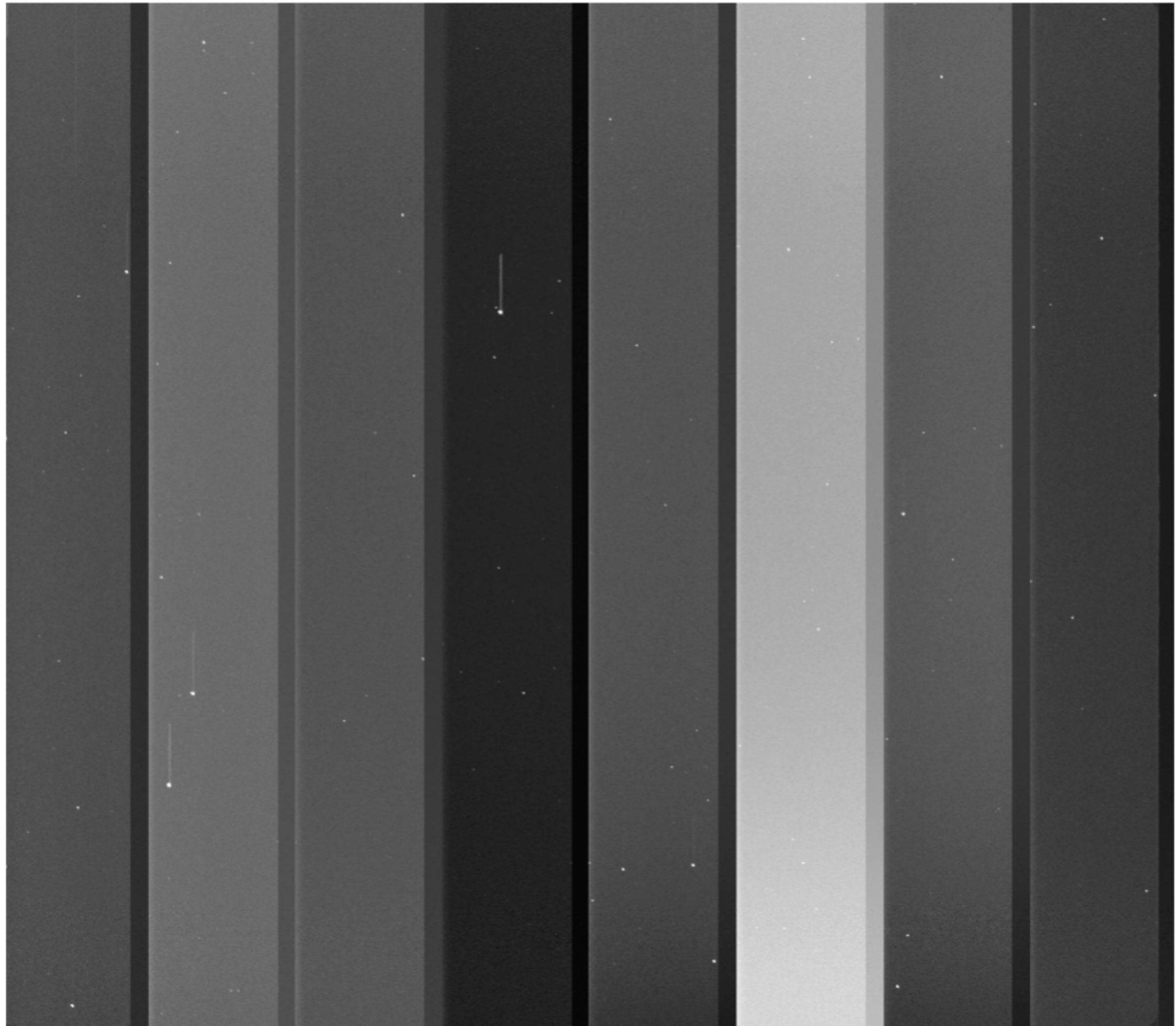














File Edit View Frame Bin Zoom Scale Color Region WCS Analysis Help

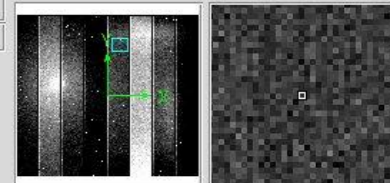
File ML\_12000x10600\_73.fits

Object

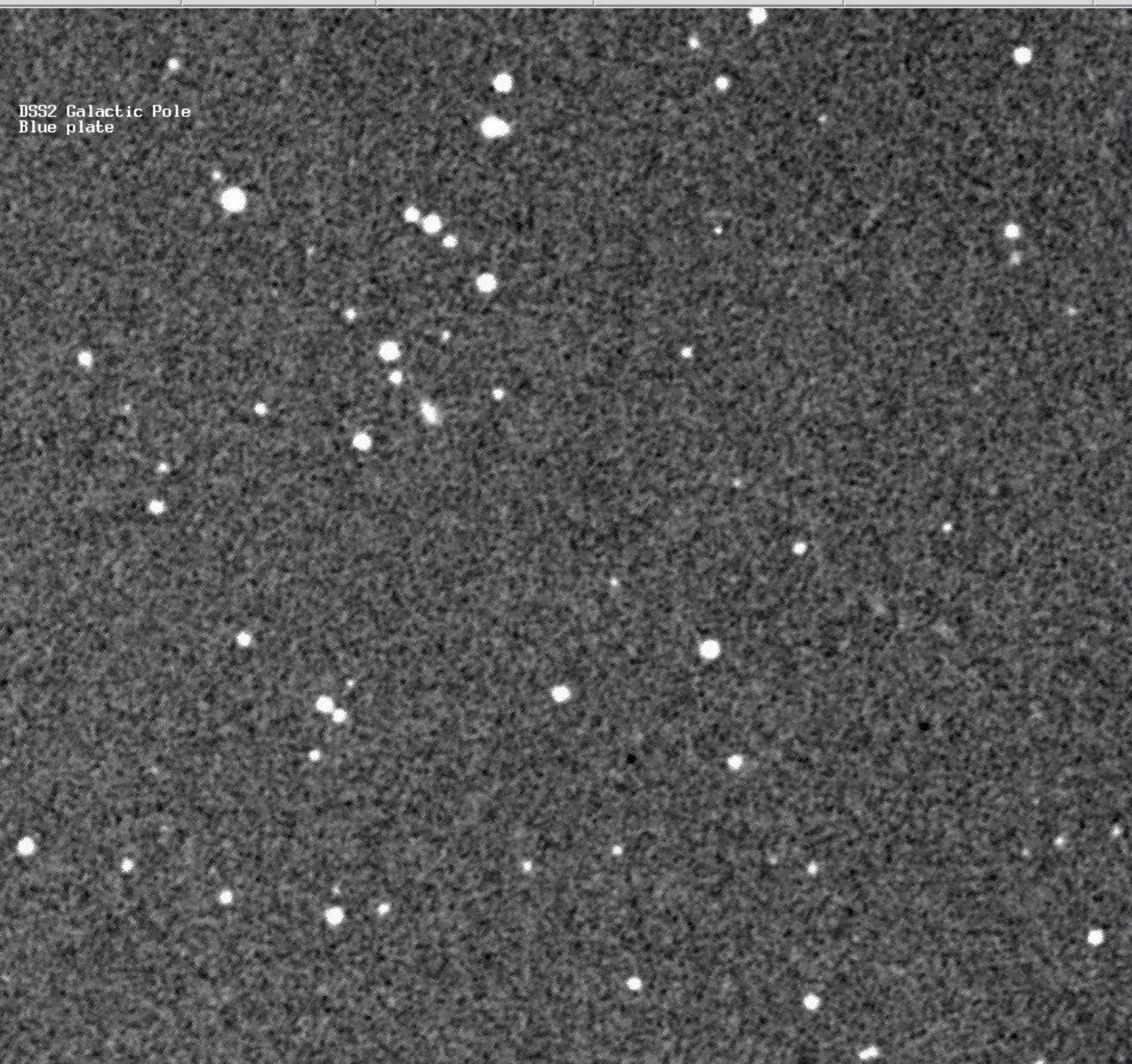
Value 4765

WCS

Physical	X	6406.000	Y	8598.000
Image	X	6406.000	Y	8598.000
Frame 12	x	1.000		0.000 °



file	edit	view	frame	bin	zoom	scale	color	region	wcs	help
-	+	to fit	zoom 1/8	zoom 1/4	zoom 1/2	zoom 1	zoom 2	zoom 4	zoom 8	





TLC120 2016/12/03 22:51:56

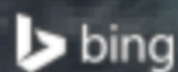
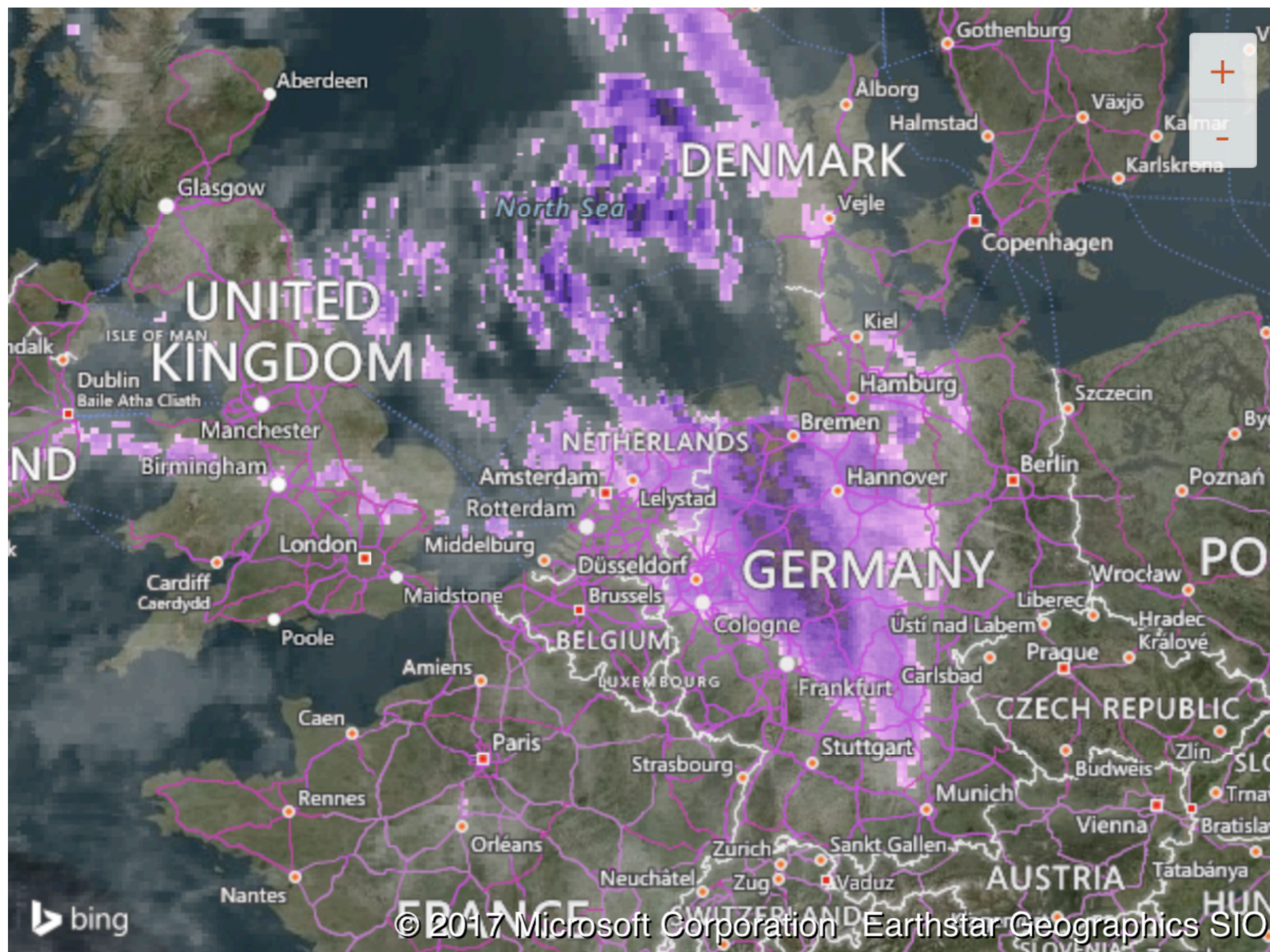
# + Test in Huygens observatorium (Radboud Universiteit)



# Netherlands Satellite

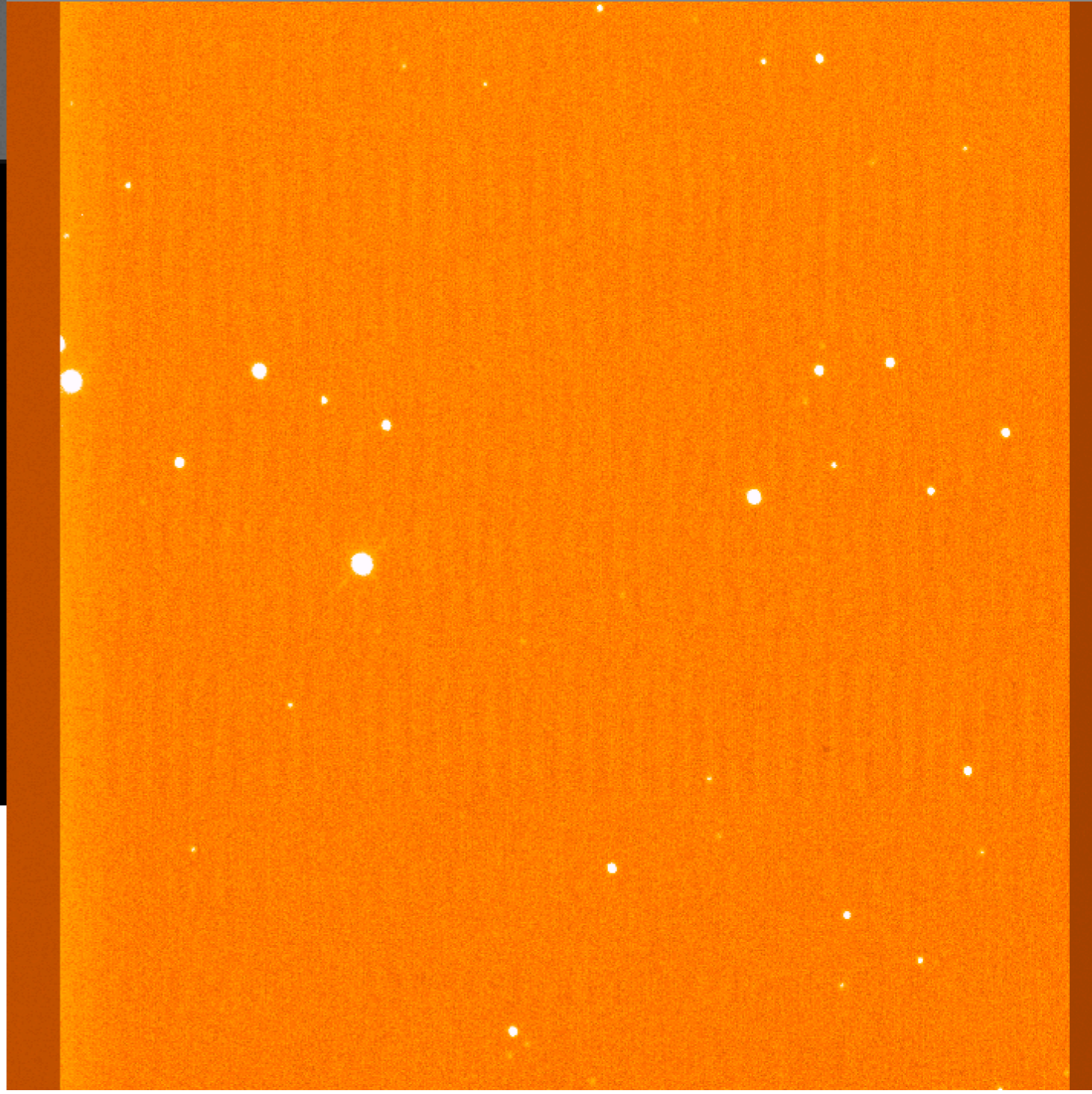
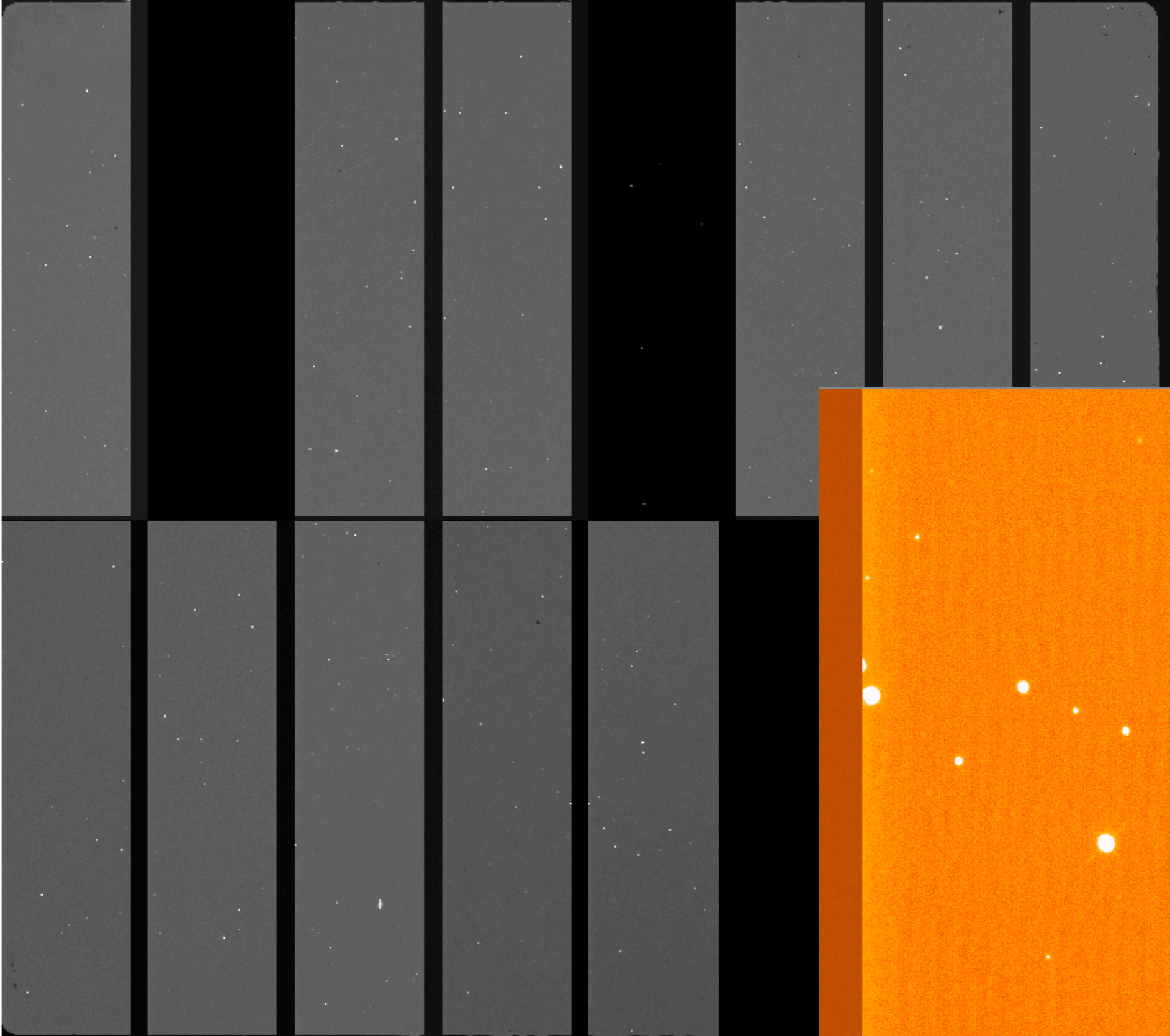


**PLAY** ▶ 5:55 6:55 7:55 8:55 9:55 **10:55**



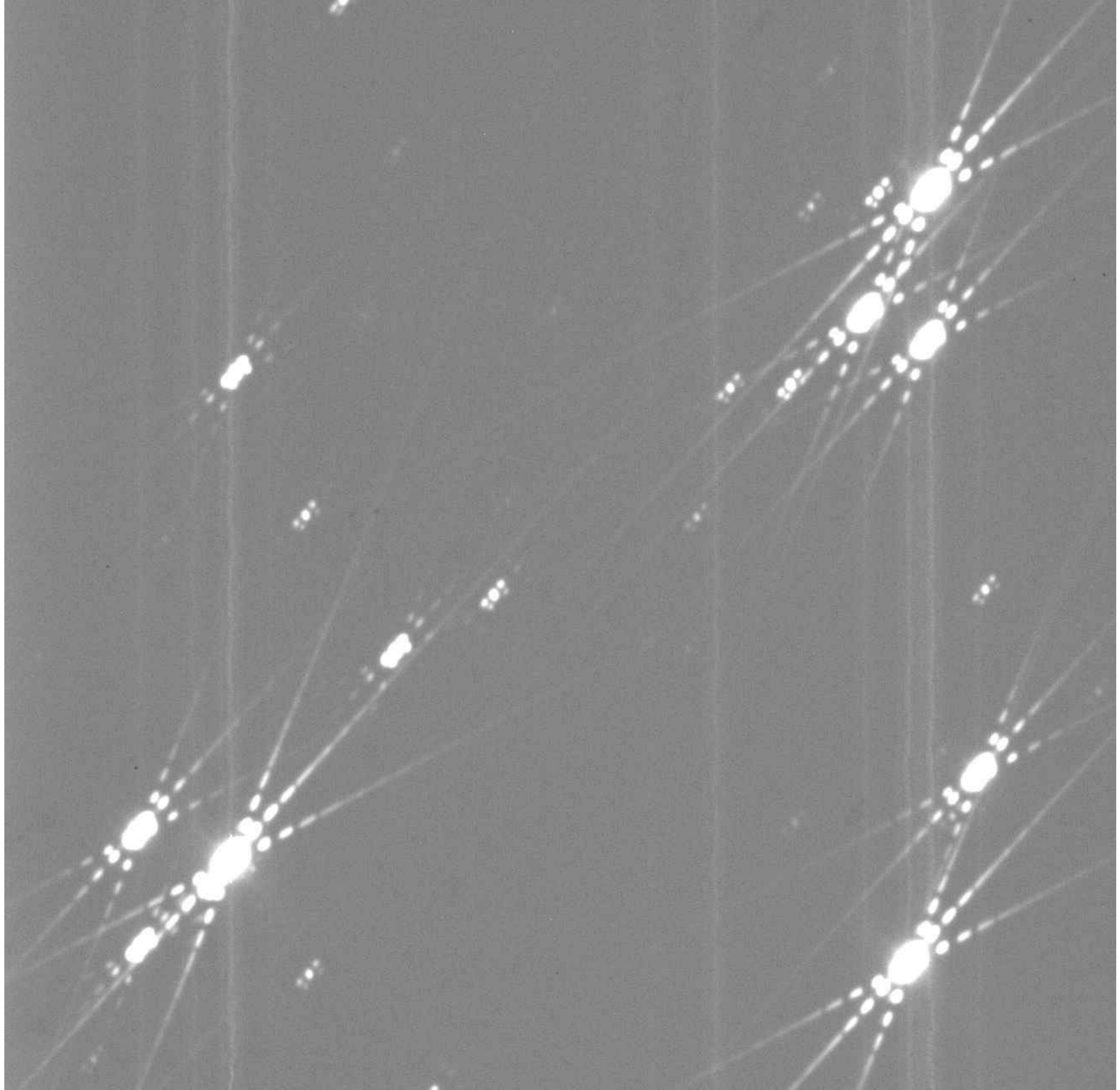
© 2017 Microsoft Corporation Earthstar Geographics SIO





**1 minuut in V+R band**

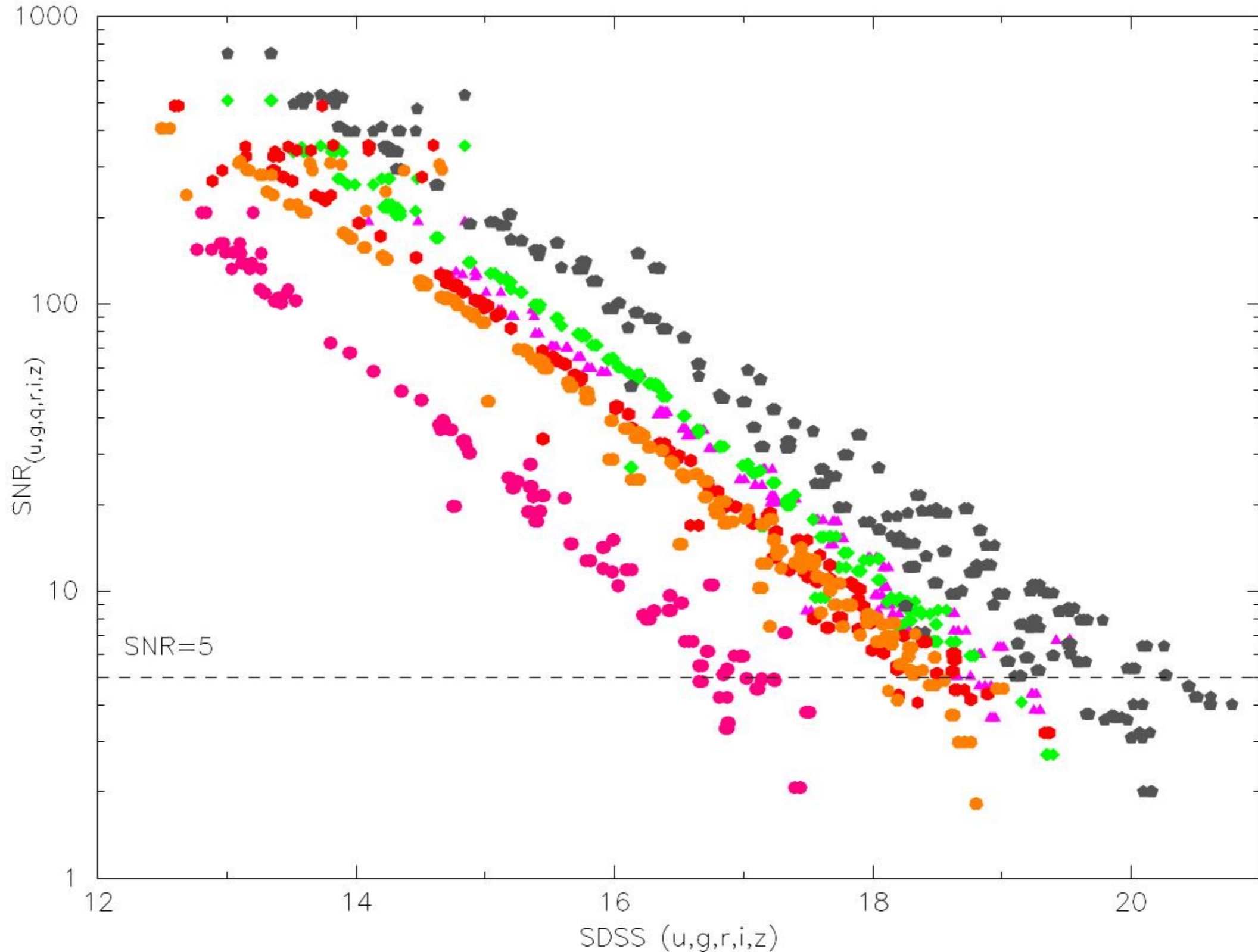
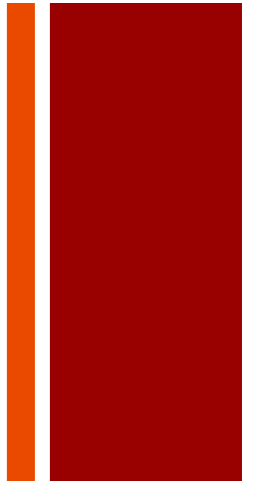




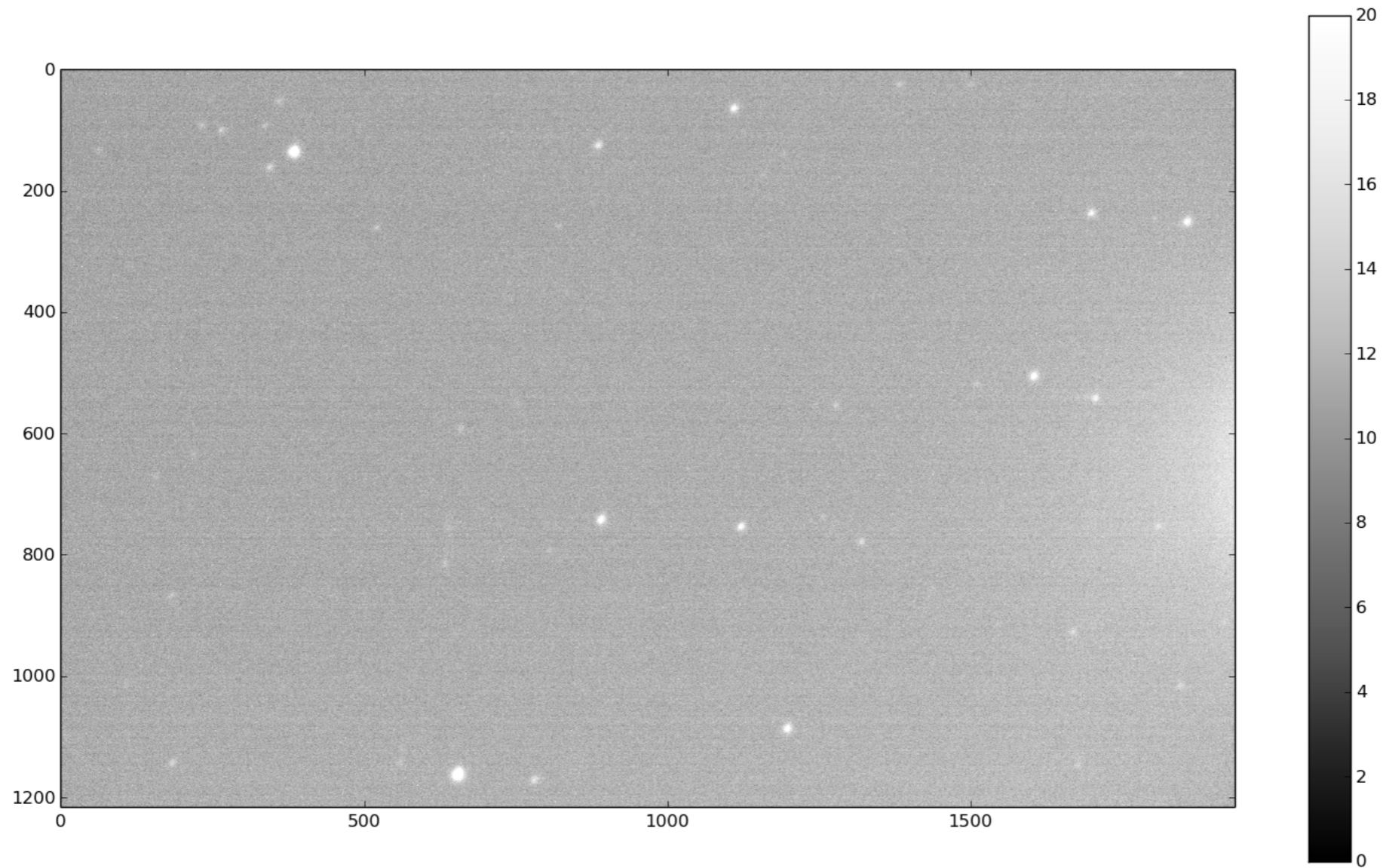
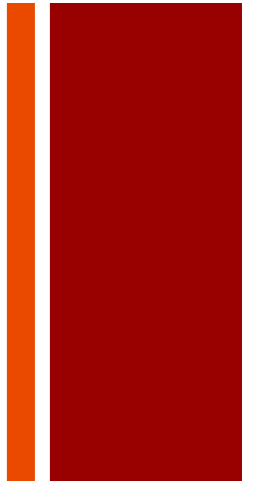


# Signaal-ruisverhouding

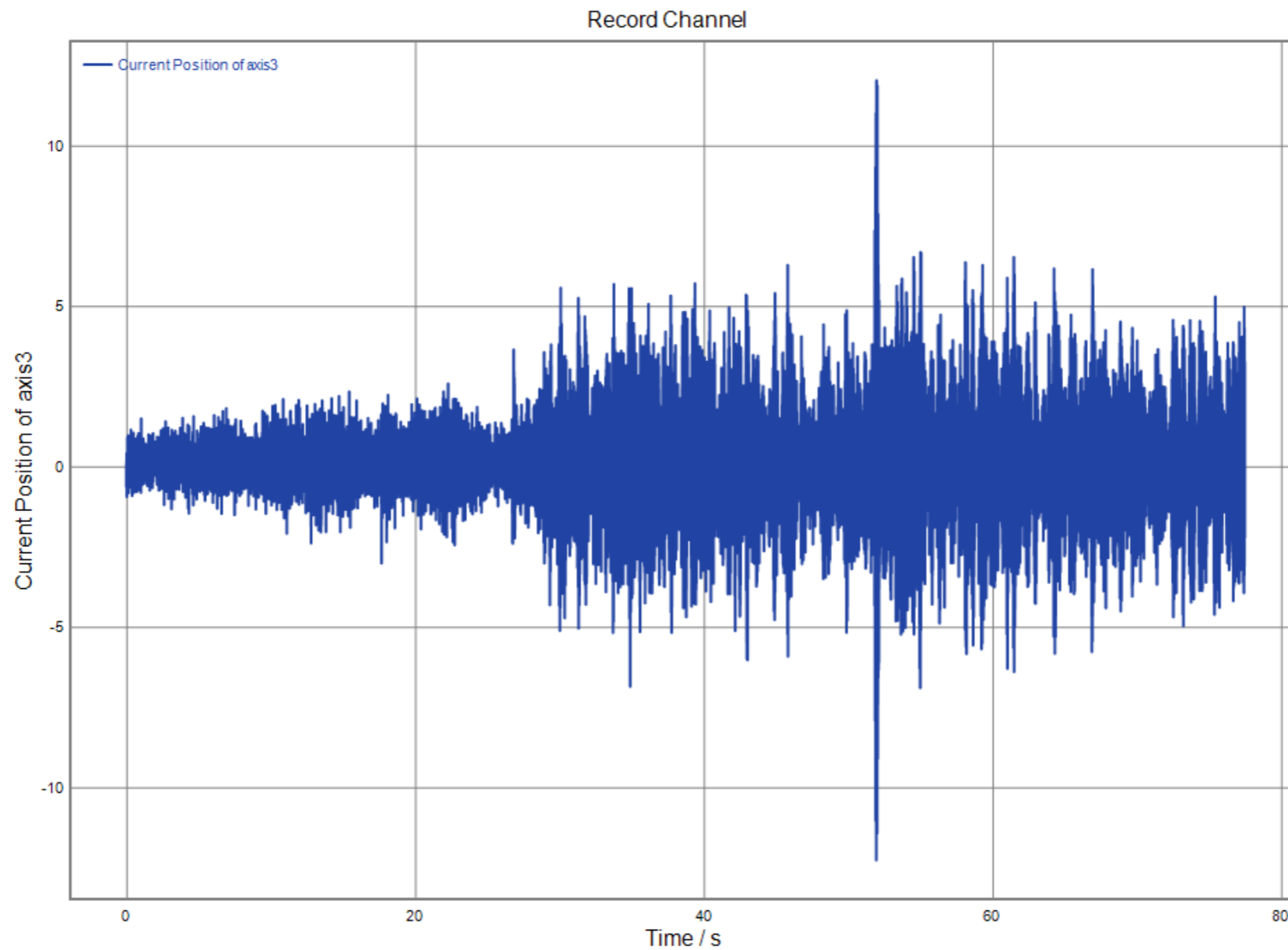
(1 min, 3.5 boogseconden seeing, volle maan)



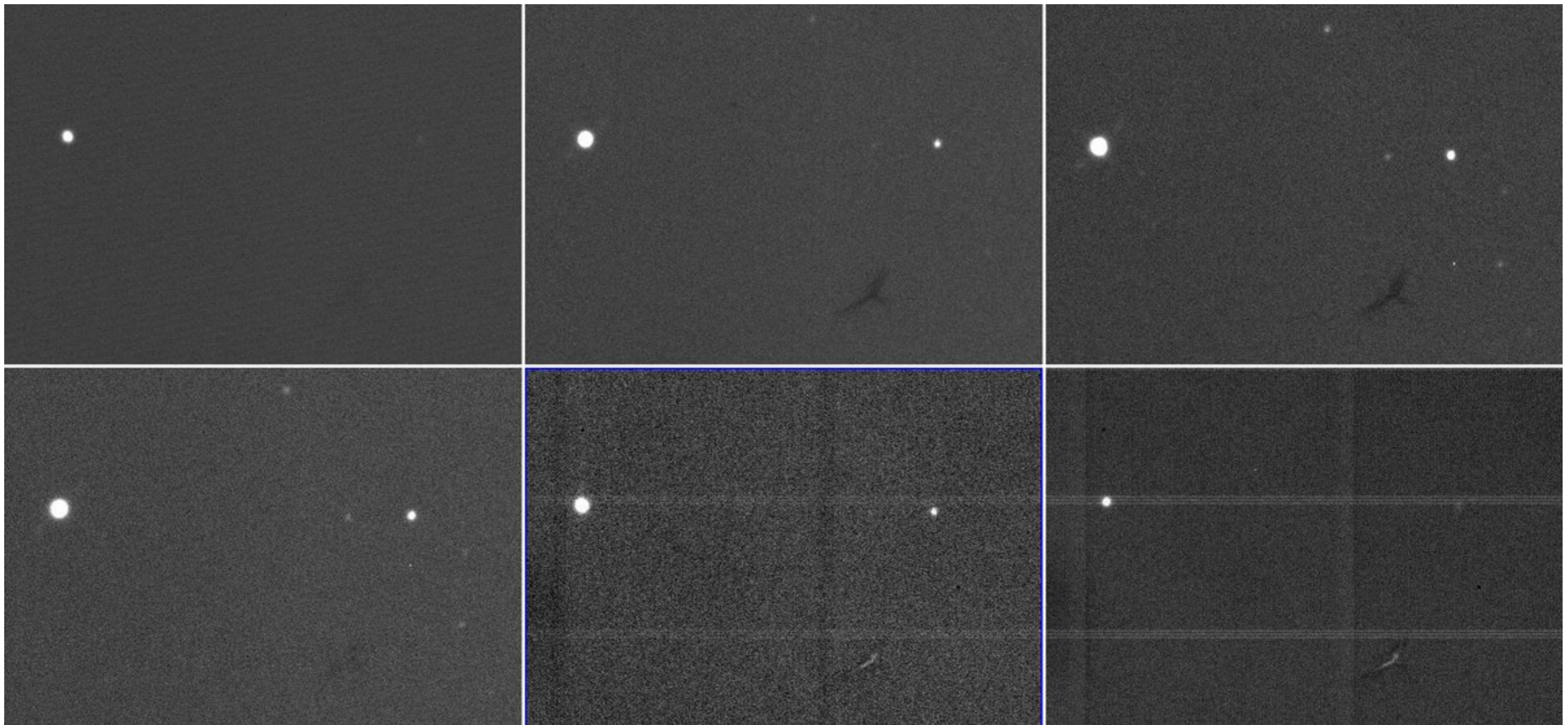
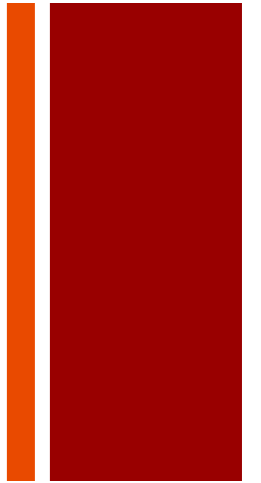
# + Eén van de guiding cameras



# + Cryostaatkoeling zorgt voor vibraties van M2...



+ 6 filters



# De grootste telescoop staat in Nijmegen

**Het is een reusachtig object** op de Sterrenwacht van de Radboud Universiteit: de orlings gedraaide MeerLICHT-telecoop. Het is de grootste en de meest kostbare en geavanceerde telescoop van het land.

**Michael Suijkerbuijk**  
Rijmegen

**W**ie de foto van het sterrenwachtgebouw van de Radboud Universiteit ziet, zal denken aan een groot wit blok met een klein raam. Het is de MeerLICHT-telecoop, een reusachtig object van bijna 10 meter hoog. Het is de grootste en de meest kostbare en geavanceerde telescoop van het land. Het is een reusachtig object van bijna 10 meter hoog. Het is de grootste en de meest kostbare en geavanceerde telescoop van het land.

De MeerLICHT is op de voorgrond van een tweedelijks project. Het is de grootste en de meest kostbare en geavanceerde telescoop van het land. Het is een reusachtig object van bijna 10 meter hoog. Het is de grootste en de meest kostbare en geavanceerde telescoop van het land.

De MeerLICHT is op de voorgrond van een tweedelijks project. Het is de grootste en de meest kostbare en geavanceerde telescoop van het land. Het is een reusachtig object van bijna 10 meter hoog. Het is de grootste en de meest kostbare en geavanceerde telescoop van het land.

De MeerLICHT is op de voorgrond van een tweedelijks project. Het is de grootste en de meest kostbare en geavanceerde telescoop van het land. Het is een reusachtig object van bijna 10 meter hoog. Het is de grootste en de meest kostbare en geavanceerde telescoop van het land.

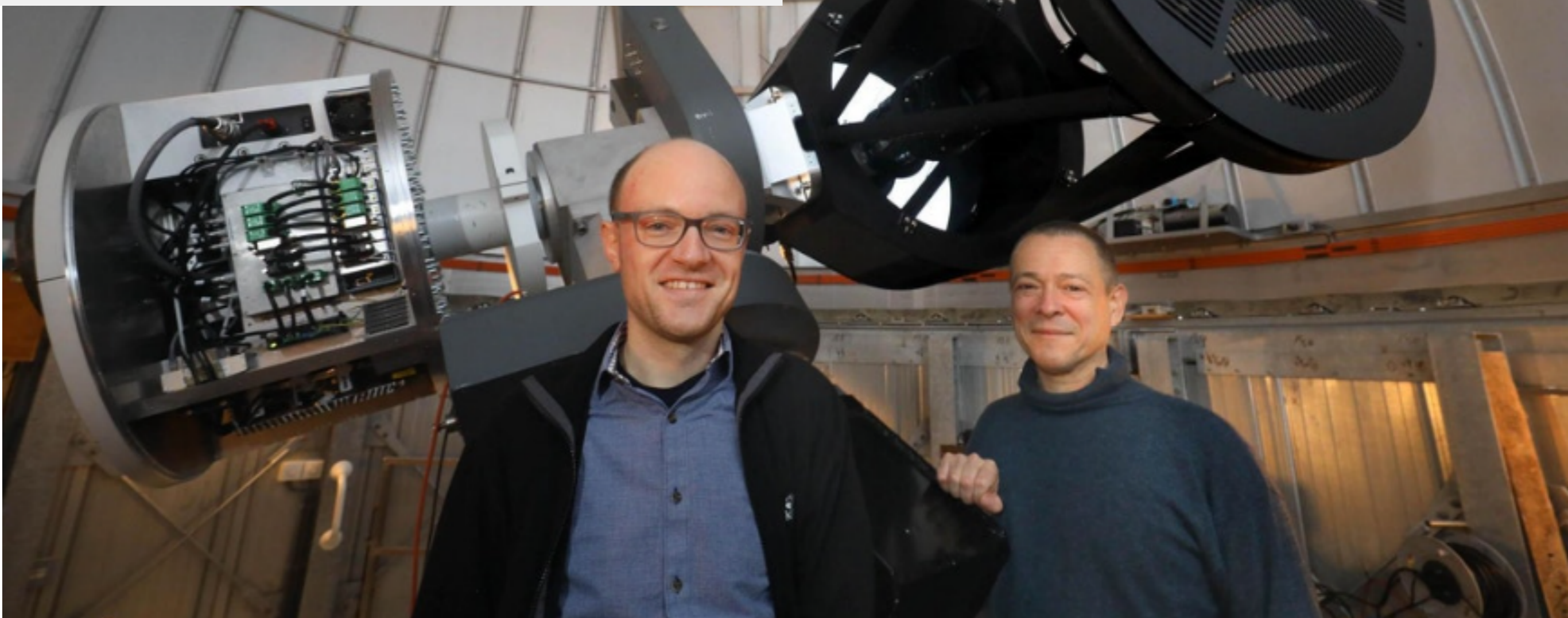
Kijk mee naar de sterren in het heelal

De MeerLICHT is op de voorgrond van een tweedelijks project. Het is de grootste en de meest kostbare en geavanceerde telescoop van het land. Het is een reusachtig object van bijna 10 meter hoog. Het is de grootste en de meest kostbare en geavanceerde telescoop van het land.

De MeerLICHT is op de voorgrond van een tweedelijks project. Het is de grootste en de meest kostbare en geavanceerde telescoop van het land. Het is een reusachtig object van bijna 10 meter hoog. Het is de grootste en de meest kostbare en geavanceerde telescoop van het land.

**Door deze telescoop kunnen we sneller op zoek naar objecten in het heelal**

— Sterrenwacht van de Radboud Universiteit

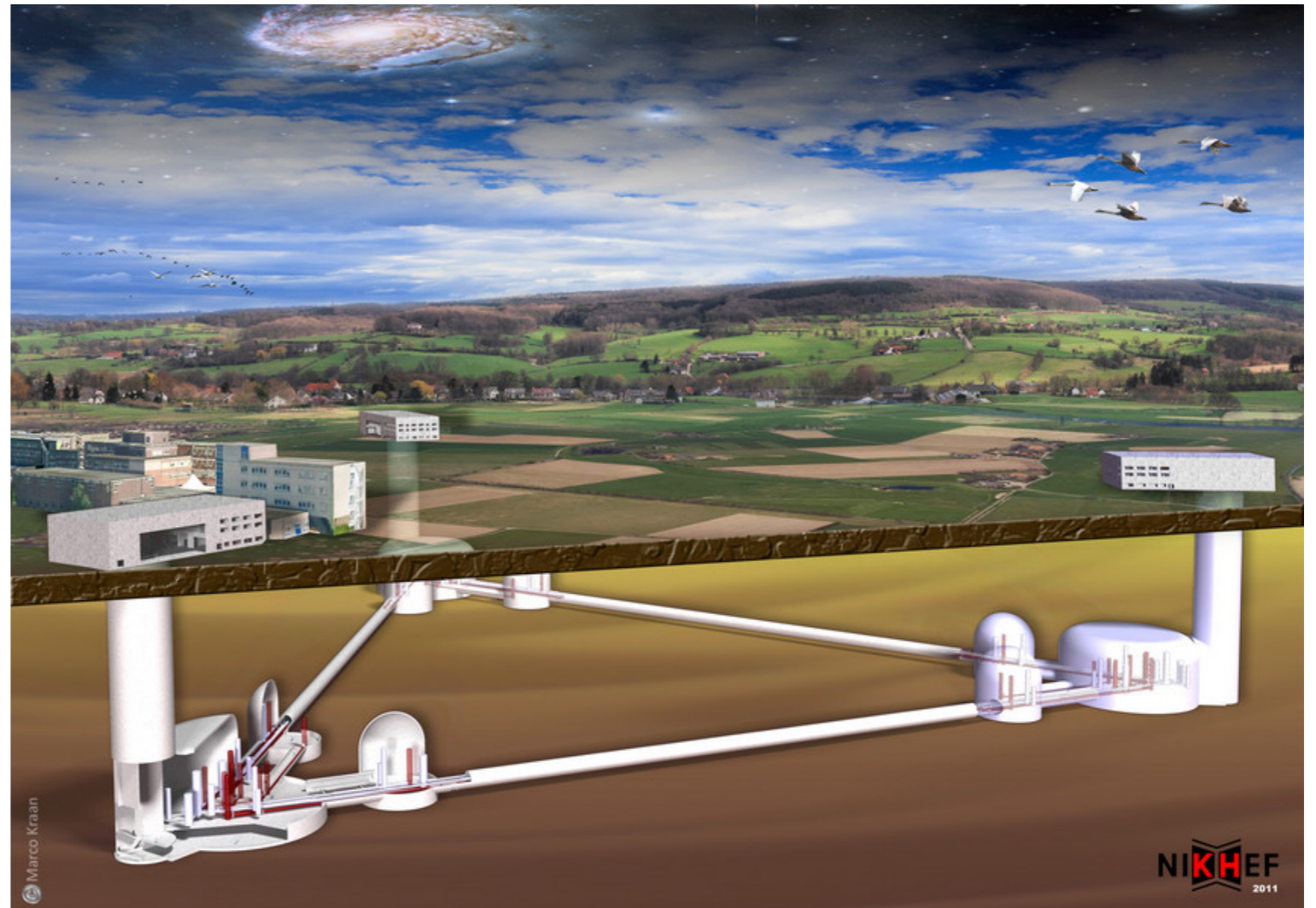


# + Einstein Telescope

~2028

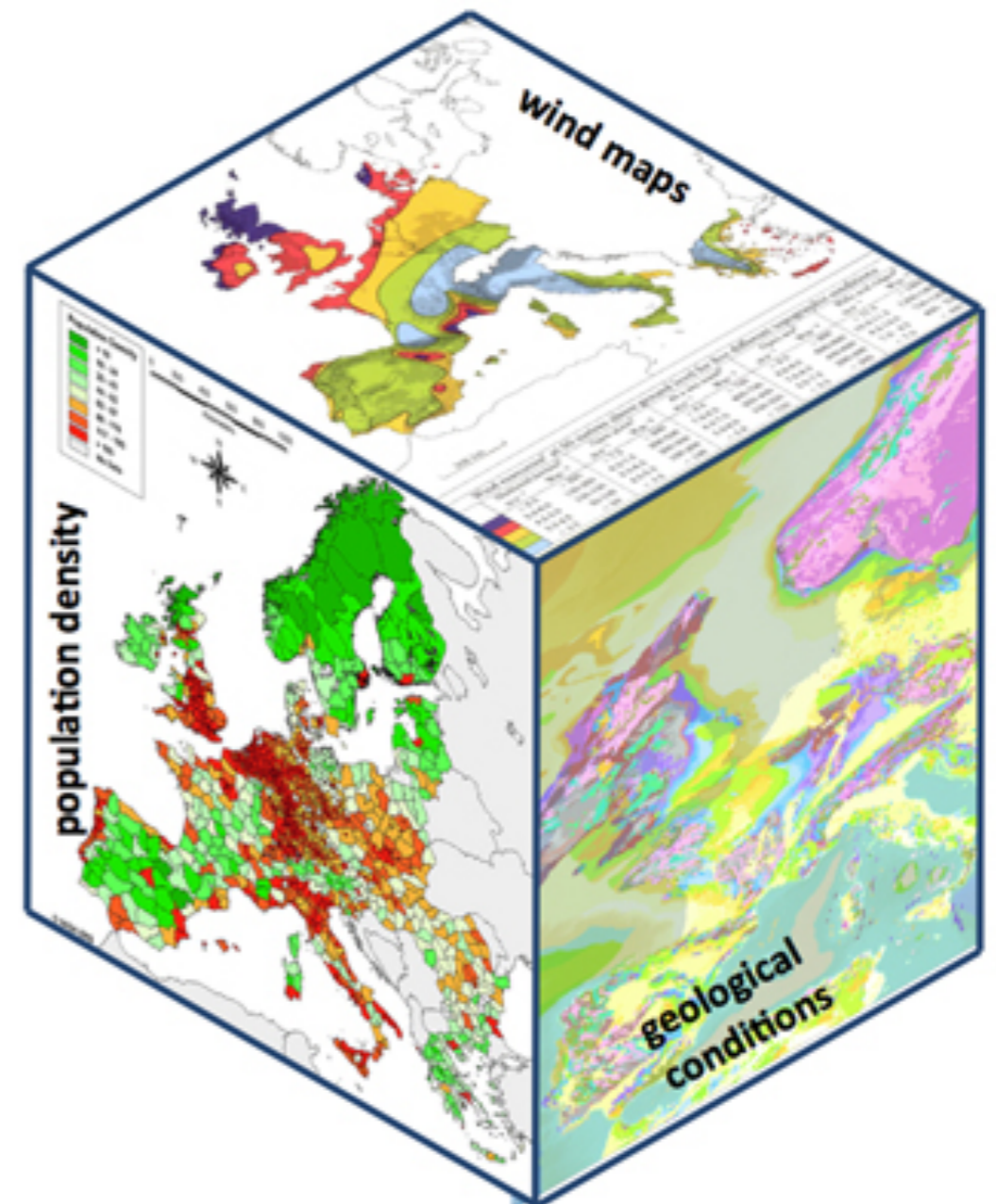
Interferometer van  
3<sup>de</sup> generatie

- Ondergronds (trillingen)
- Cryogeen (thermische ruis)
- Langere armen (10 km vs 3-4 km)
- Krachtigere lasers (statistische ruis)



# + ET: op zoek naar geschikte locatie

- Momenteel in design studie
- Zoeken naar geschikte locatie (seismische ruis, bevolking, wind, golven op zee, ...)
- Zuid-Limburg is geschikt!





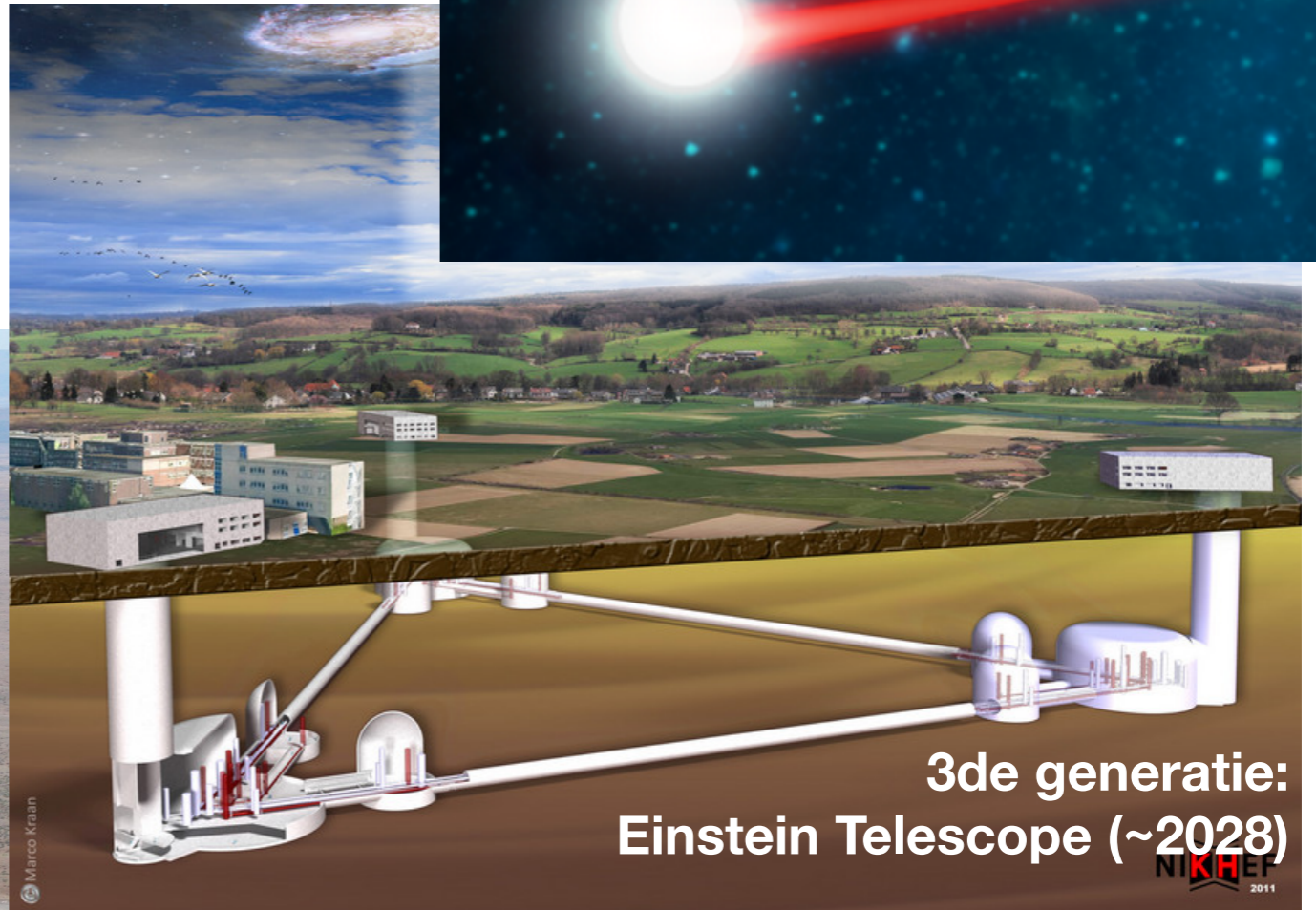
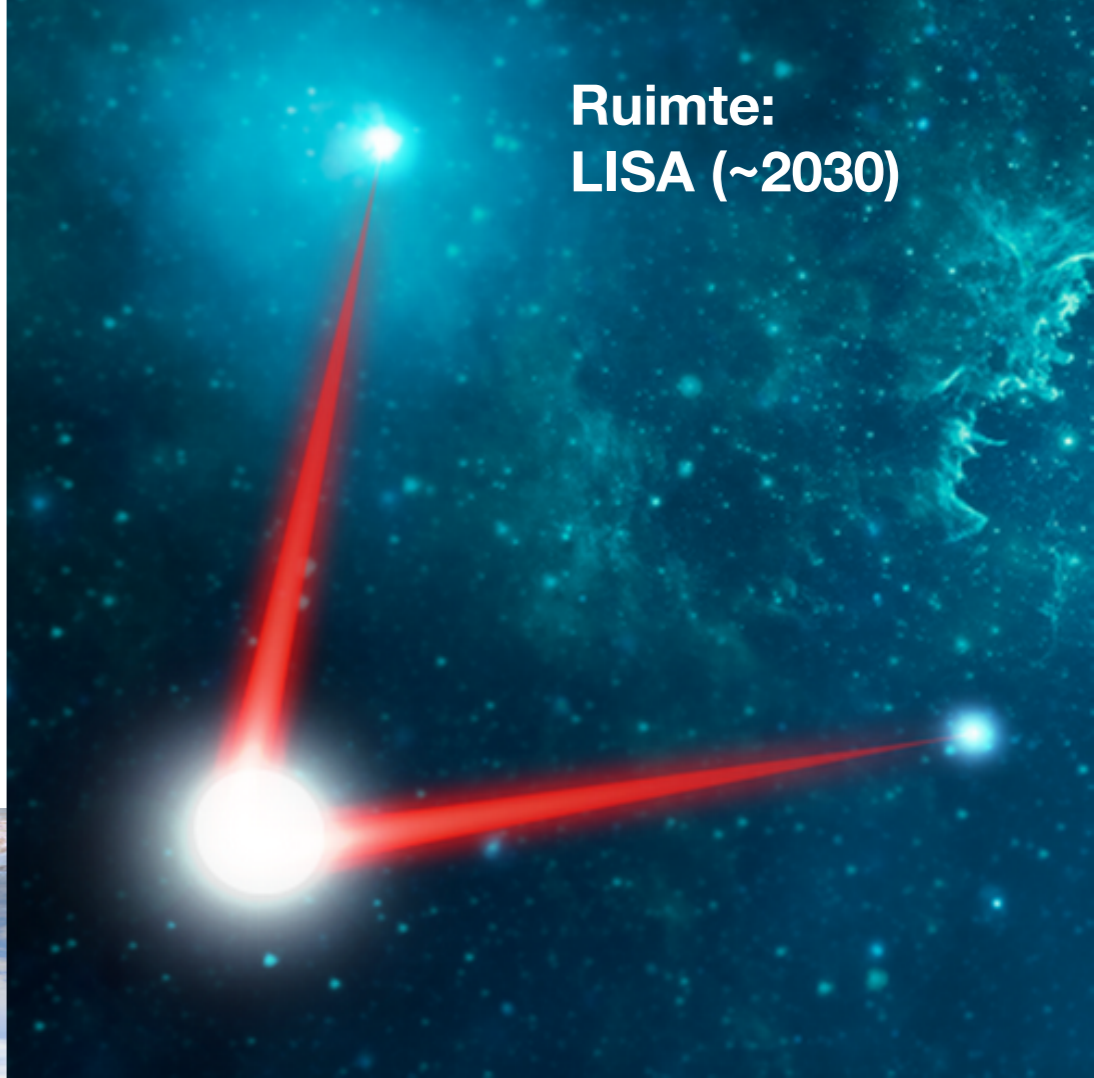
**BlackGEM (2018)**



**2de generatie:**  
LIGO/Virgo (2015)  
Japan (2018)  
India (2023)



**Ruimte:  
LISA (~2030)**



**3de generatie:**  
Einstein Telescope (~2028)



© Marco Kraan