

# Vervolgcurcus Sterrenkunde

Ed P.J. van den Heuvel  
Universiteit van Amsterdam

Gravitatiegolven en Compacte sterren:  
Witte Dwergen, Neutronensterren en  
Zwarte gaten

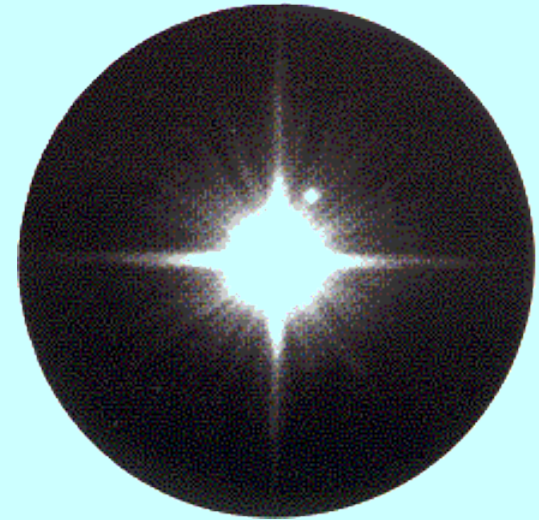
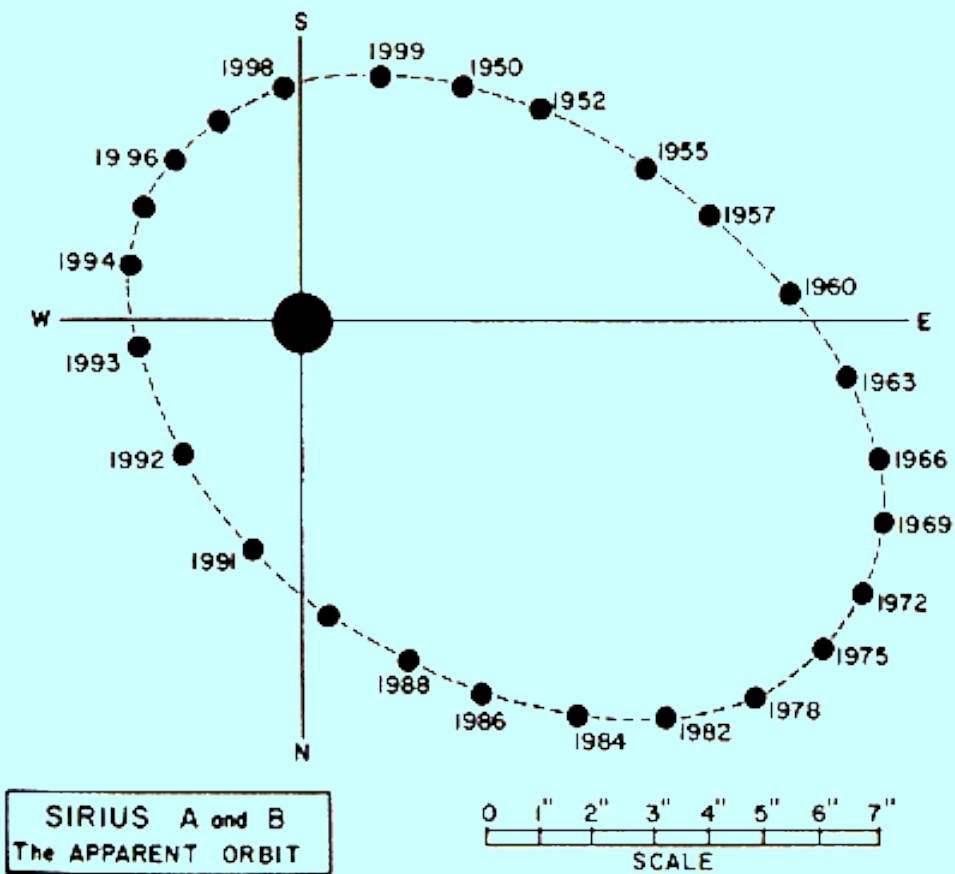
*Amersfoort 20 2022*

# Levensduren van sterren

| MASSA<br>(in zon<br>massa's) | LICHTSTERKTE<br>(in zon-licht-<br>sterktes) | LEVENSDUUR<br>(in jaren)                    |
|------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 1 (Zon)                      | 1                                           | 10 miljard (10 000 miljoen)                 |
| 2 (Sirius)                   | 20                                          | 1 miljard = $(2/20) \times 10$ miljard      |
| 6 (Plejaden)                 | 530                                         | 110 miljoen = $(6/530) \times 10$ miljard   |
| 16                           | 16400                                       | 10 miljoen = $(16/16400) \times 10$ miljard |
| 25 (Rigel)                   | 100 000                                     | 5 miljoen                                   |
| 100 (Eta Car)                | 1000 000                                    | 3 miljoen jaar (1 miljoen jr?)              |
| 0.5 (M-dwerg)                | 0.04                                        | 136 Miljard jaar (69% van alle sterren!)    |

(in zware sterren: in verhouding groter centraal deel waarin kernfusie optreedt. Dit verlengt levensduur tot soms een factor twee)

Wat blijft er over aan het einde van  
het leven van een ster?



Sirius B - in 1862 ontdekt door Alvan Clark - is 10 000 maal zwakker dan Sirius A. De omlooptijd is 50 jaar. De massa van Sirius B is 1 Zonsmassa, die van A is 2 Zonsmassa's

10.000 km  
—

5.5 kg/Litre



EARTH

WHITE DWARF

1700 tons/  
Litre



SIRIUS B

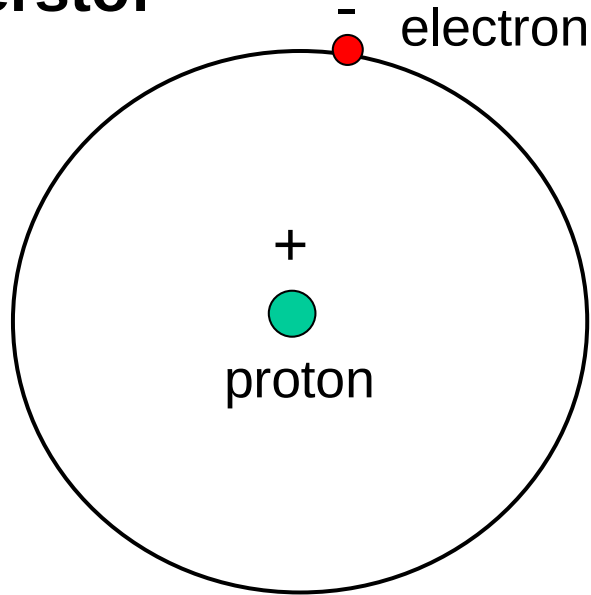


MASS: 332.000 x EARTH

SUN

Meer dan 20 000 witte dwergen bekend (in 1920: 10)  
Nr. 10 tot ca 6700 ontdekt door Willem Luyten (1899-1994)

# Waterstof



## Atoom is leeg !

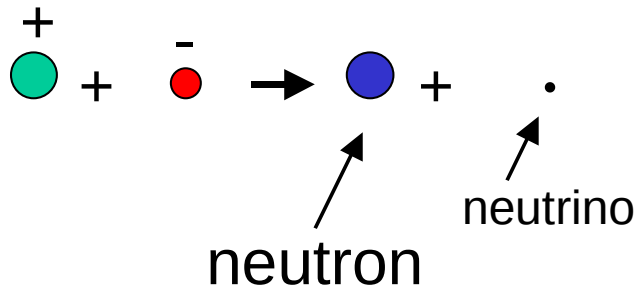
Doorsnee van kleinste electronenbaan: 50 000 maal groter dan doorsnee van atoomkern, dus:

Volume van atoom is  
 $50\,000 \times 50\,000 \times 50\,000 = 10^{14}$   
maal groter dan volume van kern

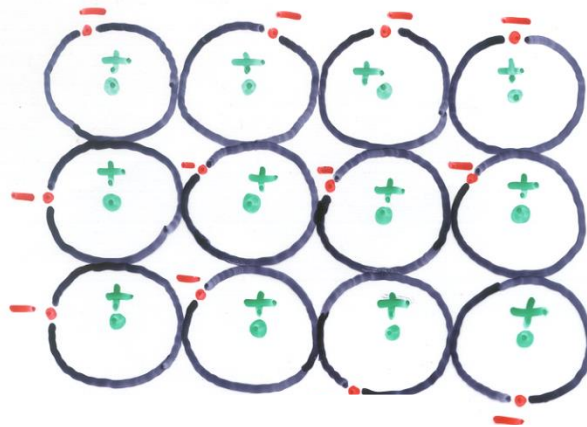
Gewone materie kan dus een factor  $10^{14}$  samengeperst worden, voor alle lege ruimte er uit is.

Dit vereist een druk van  $10^{30}$  bar (atmosfeer)

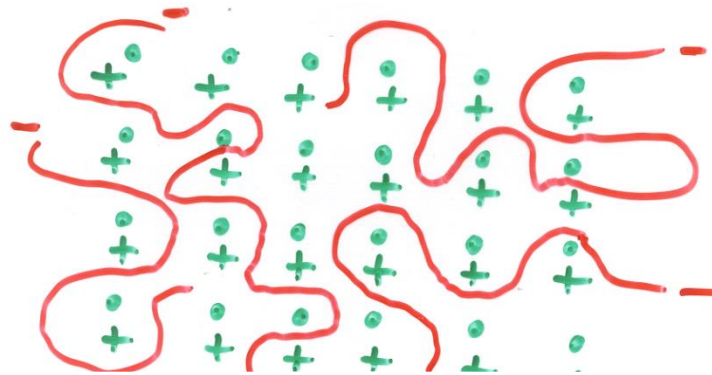
Druk in centrum van witte dwerg is “slechts”  $10^{18}$  bar: nog veel lege ruimte



Proton en neutron zijn  $\sim 1840$  maal zwaarder dan electron



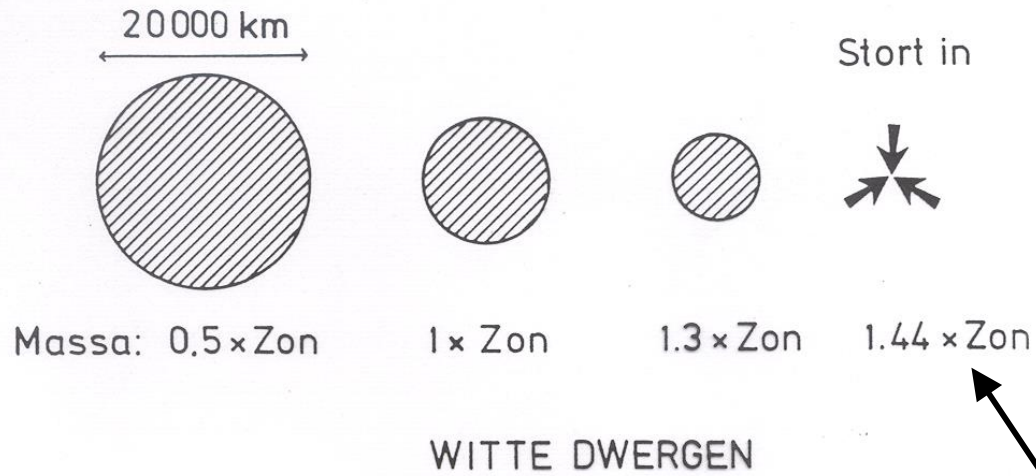
Normale materie: kleinst mogelijke stabiele electronen banen intact



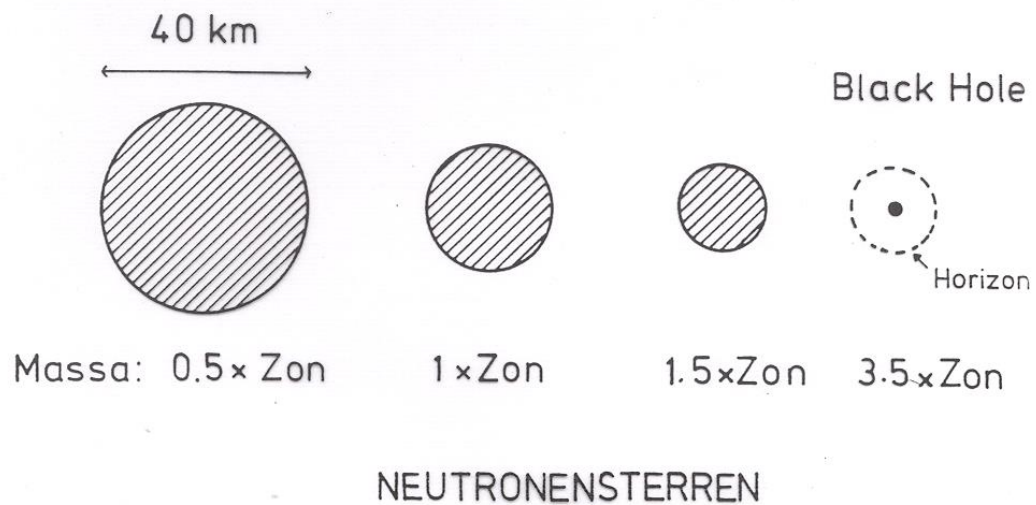
*Electronen "ontaarding"*: atoomkernen dichter bij elkaar dan de diameter van de kleinst mogelijke stabiele electronen banen: electronen oefenen zeer grote, zgn. "Fermi-druk" uit

Witte Dwerg is  
"uitgebrande",  
dode ster:  
Kernen van  
Helium, koolstof  
en zuurstof

Bij niet te  
hoge tempe-  
ratuur



(1911- 1995)  
**Chandrasekhar-limiet**  
 (1930)



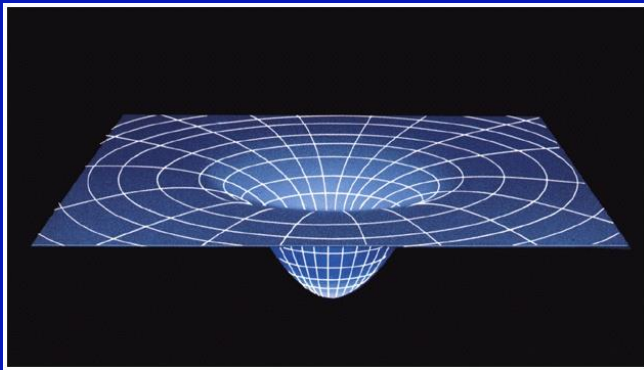
Stralen van witte  
 dwergen en  
 neutronensterren  
 Met toenemende  
 massa's



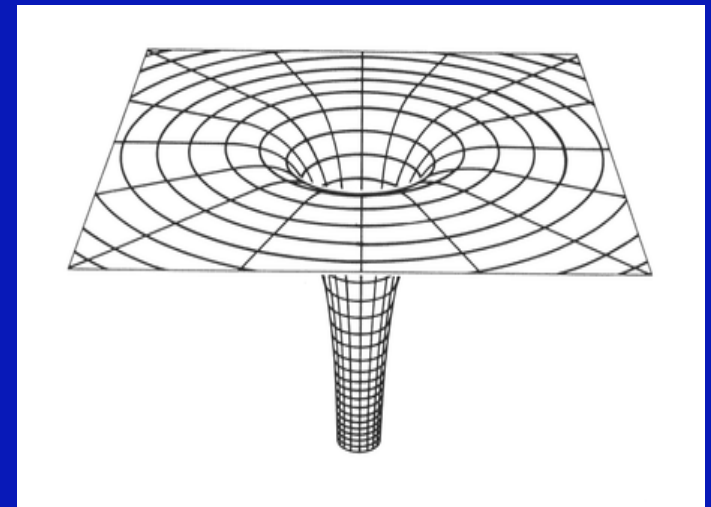
Neutronenster: 420 000 maal massa van  
aarde in bol van 20 km diameter

Zwaartekrachts versnelling = 100 miljard  
maal die op Aarde

Ontsnapsnelheid van oppervlak =  $0.5c$   
(vergelijk Aarde: 11.2 km/sec)



Neutronenster: nog bodem;  
licht kan er nog uit  
(*Oppenheimer en Volkoff 1938*)



Zwart gat: geen bodem  
(*Oppenheimer en Snyder 1939*)

# EINDSTADIA VAN STERREN

**STERREN TOT 8 ZONMASSA'S**



10000 KM



300 000 AARDMASSA'S

**STERREN VAN 8 TOT ~ 25 ZONMASSA'S**  
*LEVEN KORTER DAN 20 MILJOEN JAAR*

450 000 AARDMASSA'S



20 km

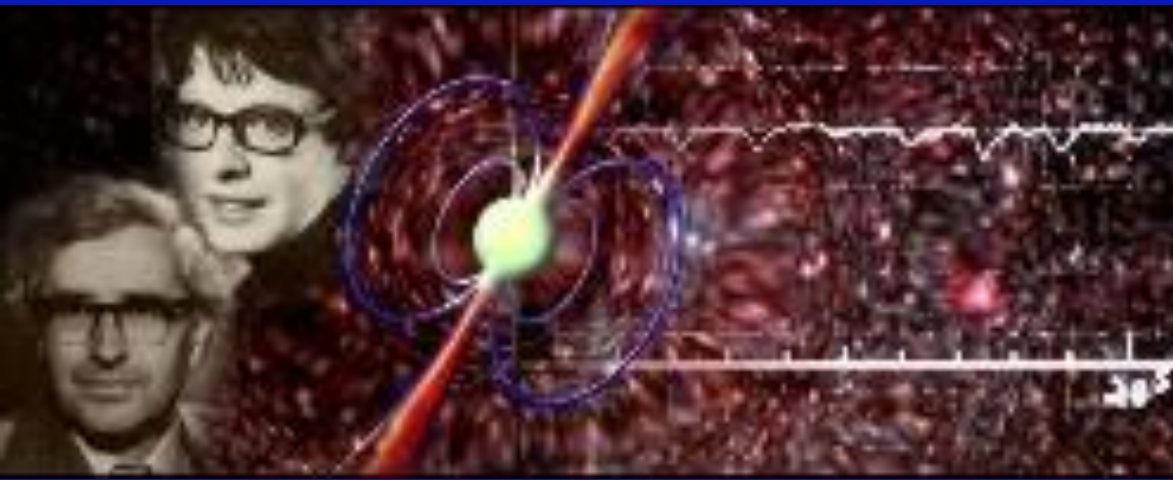


**STERREN ZWAARDER DAN 25 ZONMASSA'S**  
*LEVEN KORTER DAN 5 MILJOEN JAAR*

1 MILJOEN AARDMASSA'S



ZWART GAT



1967: Studente Jocelyn Bell ontdekt de eerste pulsar CP 1919, regelmatig pulsende radiobron met  $P=1.33$  sec

Deze periode kan nog net voor een trillende of snelroterende Witte Dwerf, maar sneller kan niet voor zo'n ster

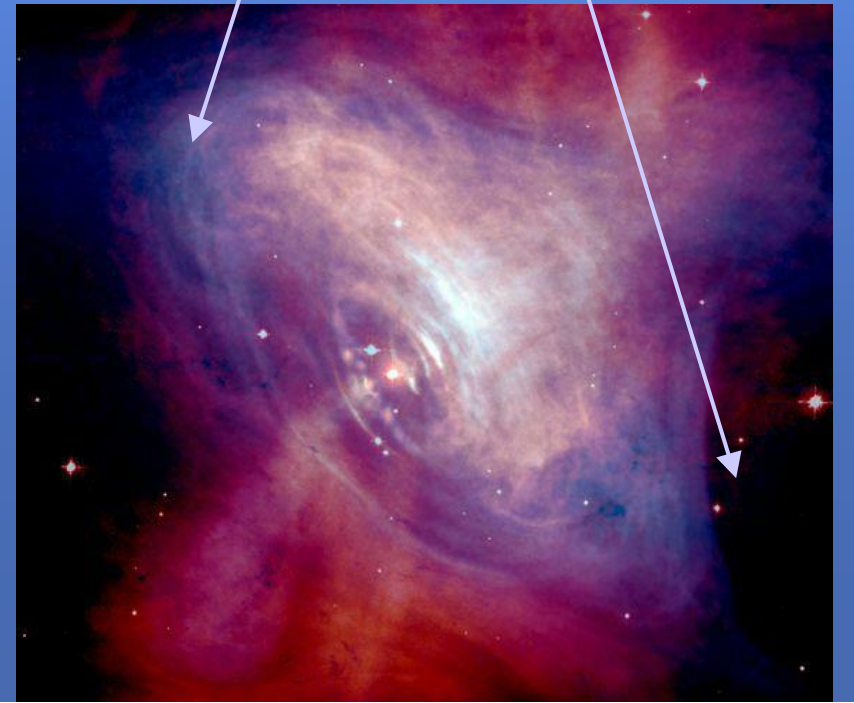
Een Neutronenster heeft een eigen trillingstijd en kortste rotatieperiode van ongeveer één duizendste seconde!

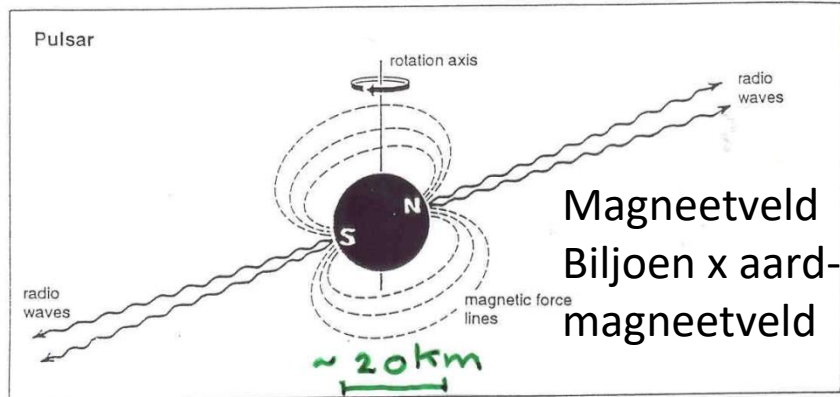
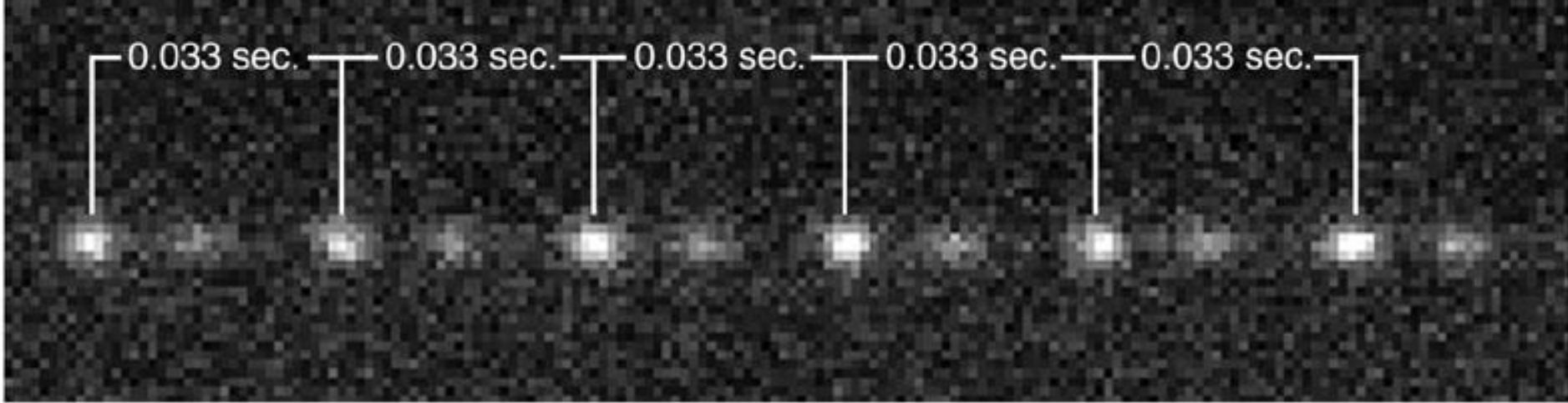


**Crab Nebula, ESO-VLT**  
**Remnant of Supernova 1054 AD**

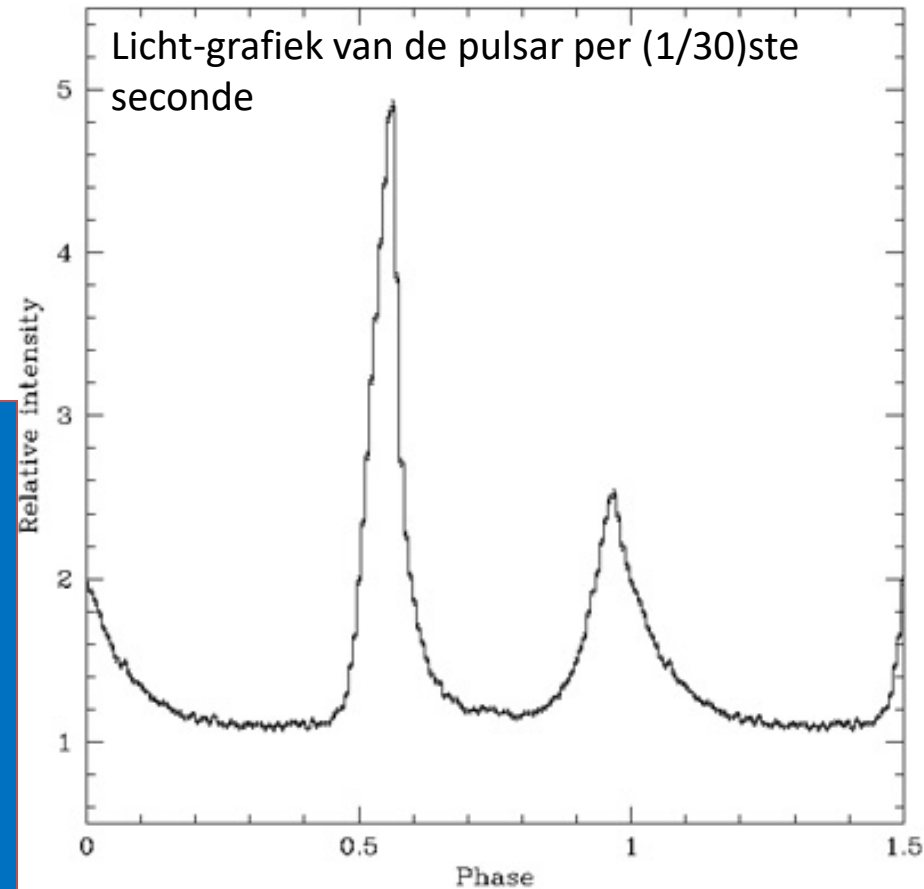
Distance 5000 lightyrs  
Expansion velocity  $\sim 1500 \text{ km/s}$

**Chandra: X-ray picture**

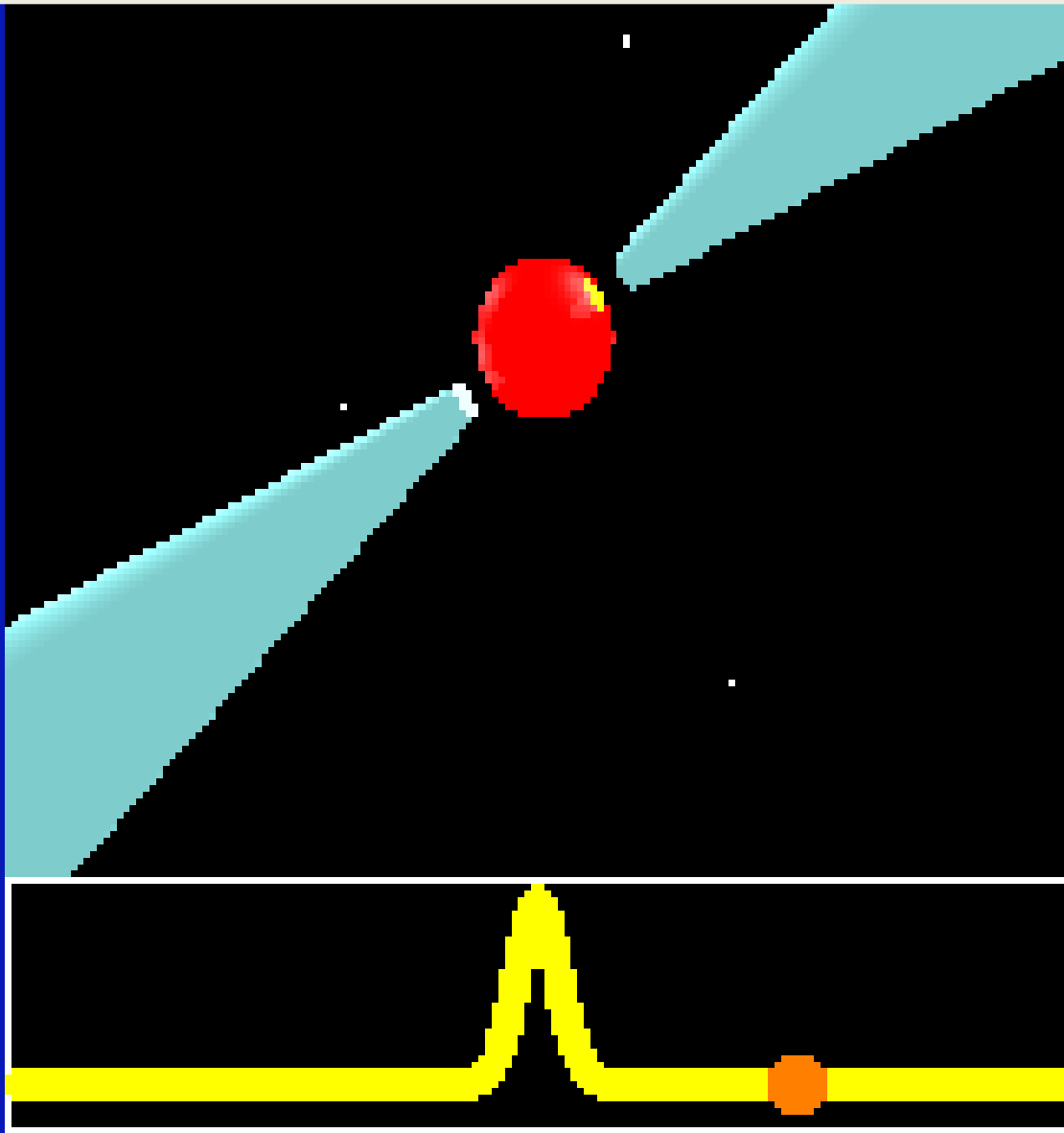


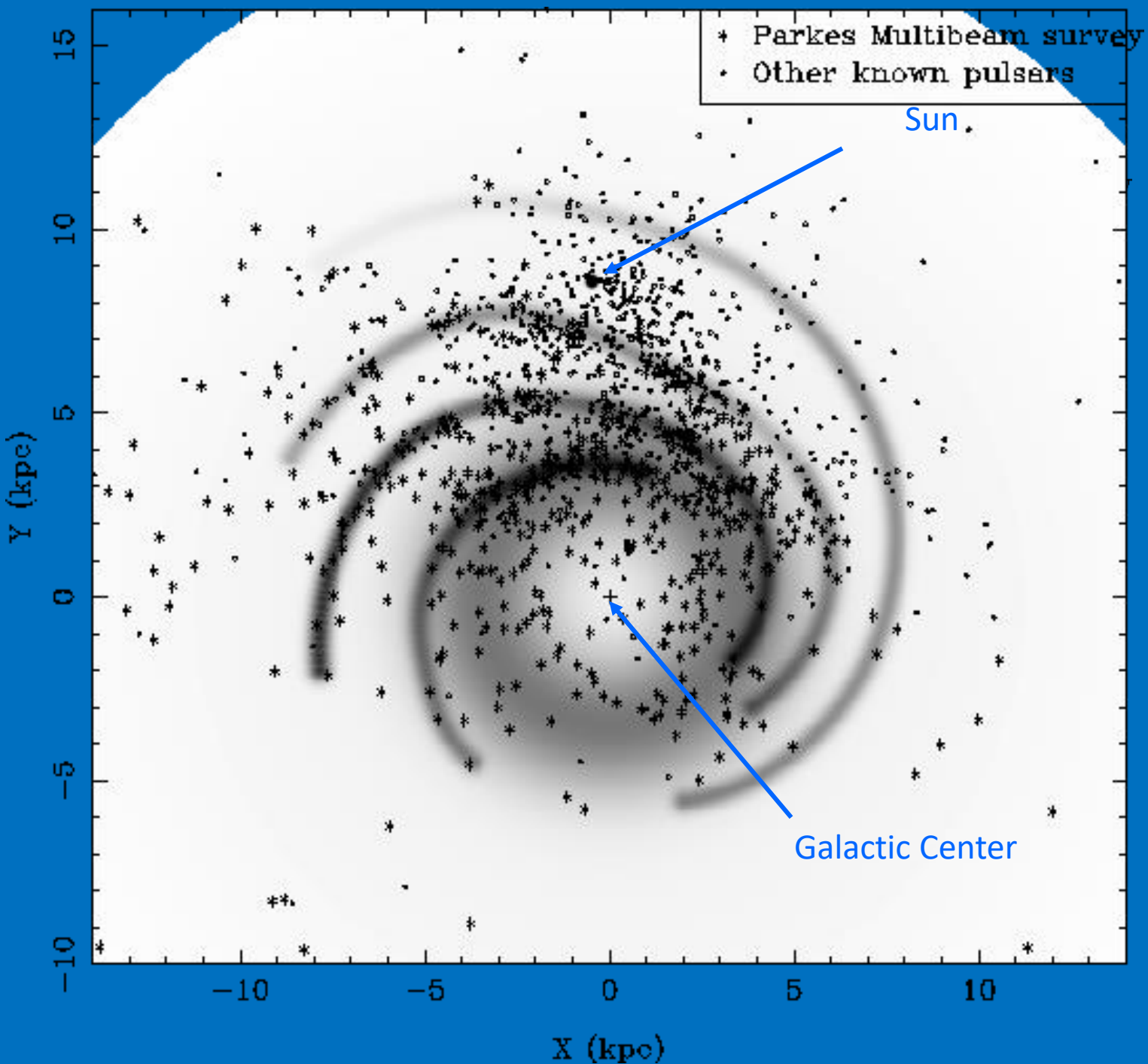


Krab Pulsar,  
Periode 0,033 seconden



# Lighthouse model of a Pulsar





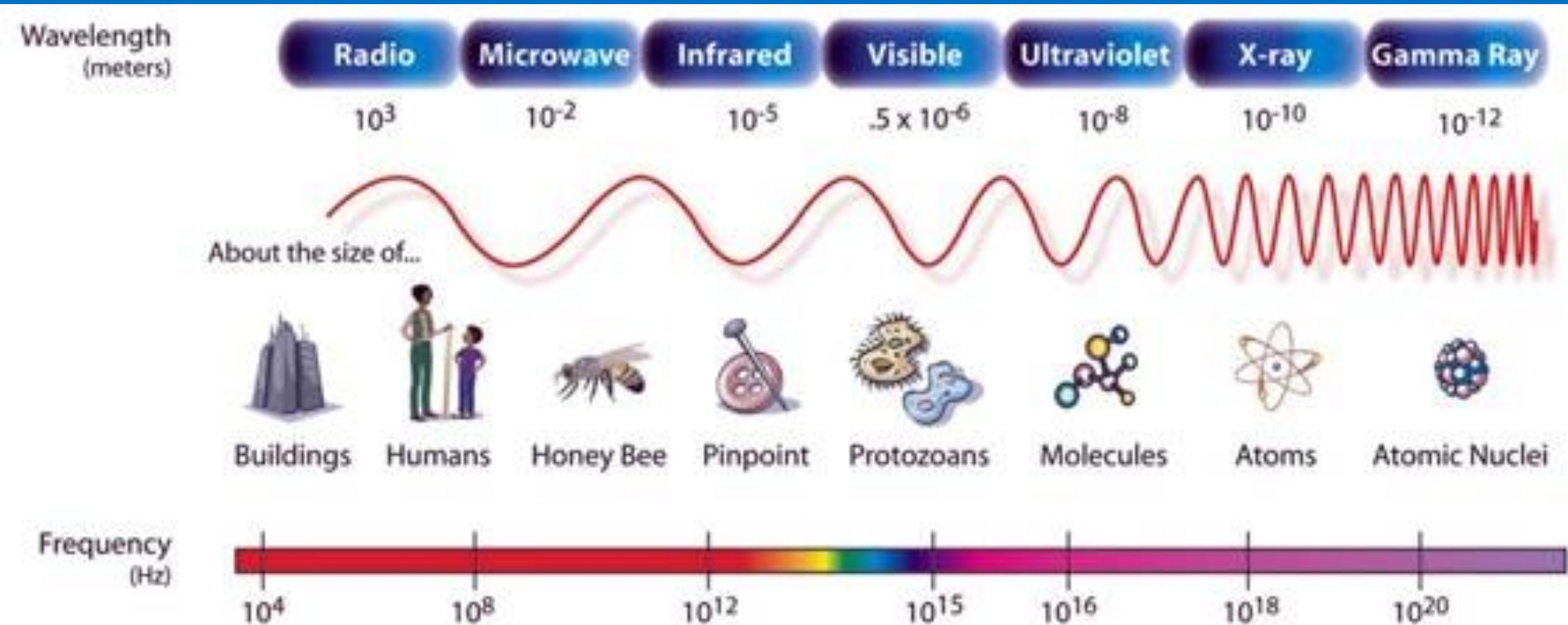
Plaatsen  
van  
ongeveer  
1800  
bekende  
radio  
pulsars  
in het vlak  
van de  
Melkweg  
(thans ongeveer  
2900 pulsars  
bekend)

Dubbele neutronenster PSR J 0737: omlooptijd 2.4 uur; baan-excentriciteit 0.08  
Systeem verliest energie door uitzenden van Gravitatiegolven en over 86 miljoen jaar  
zullen de sterren met elkaar versmelten. Draaien dan 1000 x per seconde om elkaar.

WE KENNEN NU 20 VAN ZULKE DUBBELSTERREN IN ONS MELKWEESTELSEL

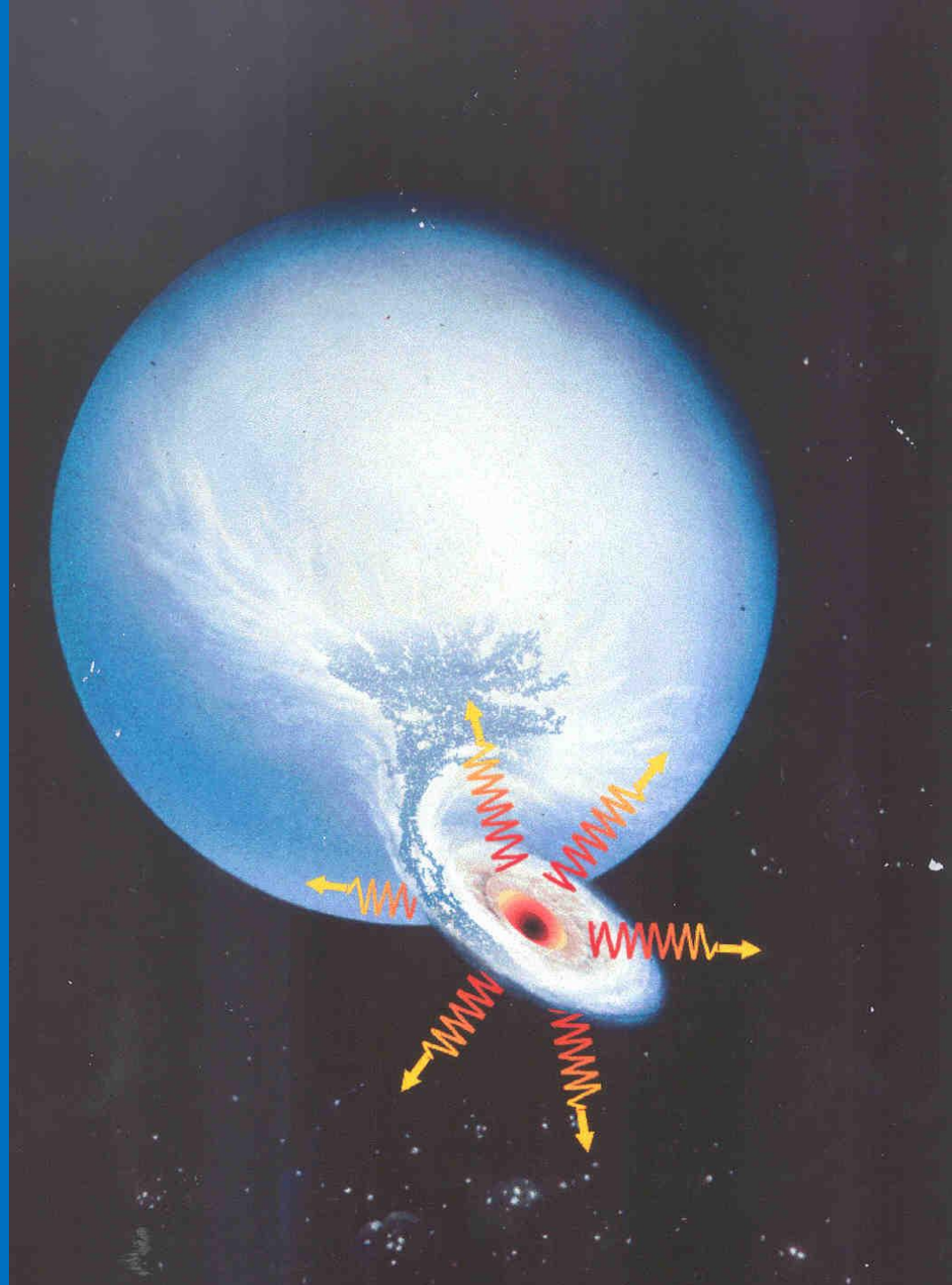


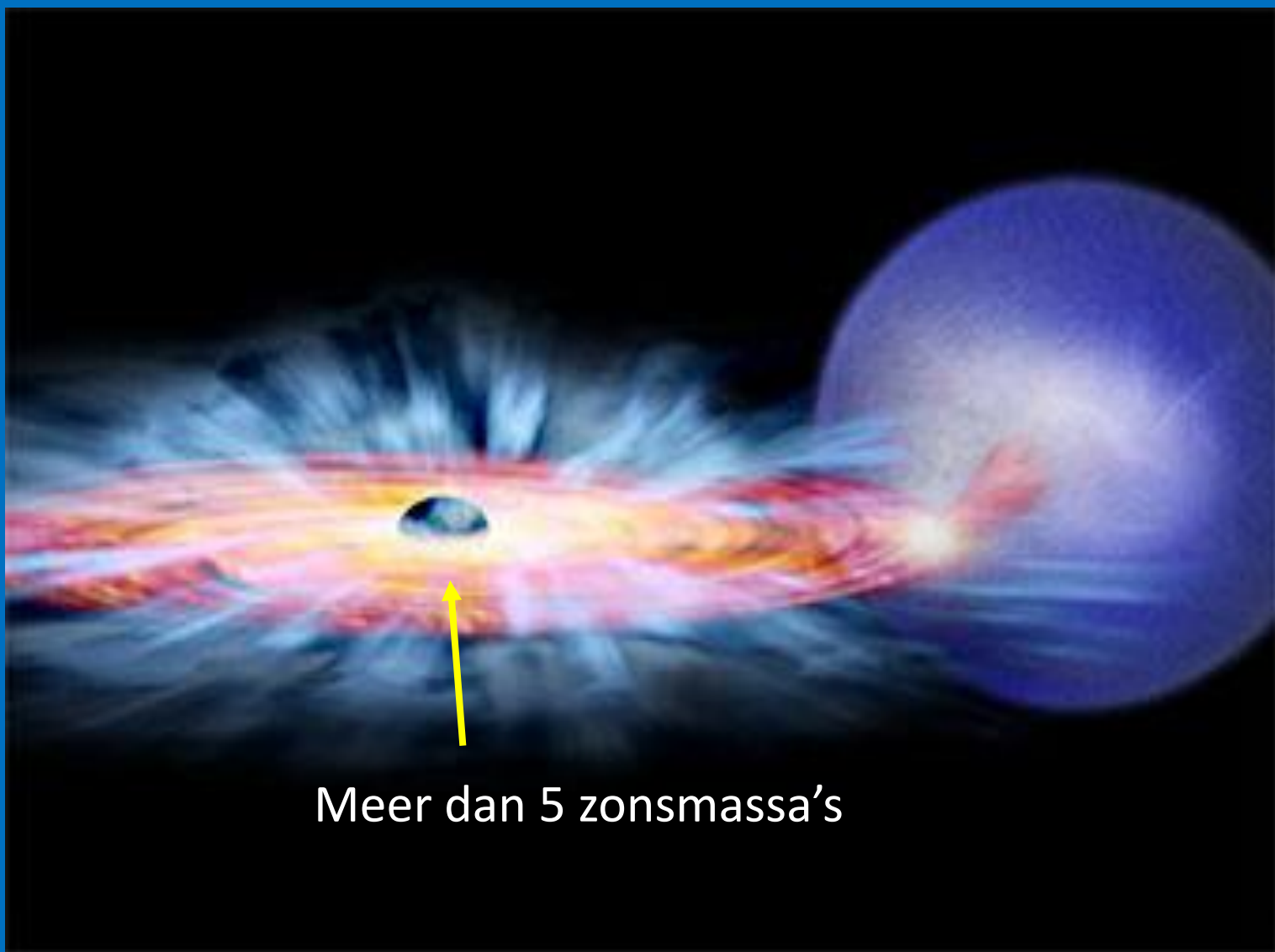
# De verschillende soorten electromagnetische stralingen, alle planten zich voort met de lichtsnelheid



# Pulserende zware röntgen-dubbelster

Blauwe superreus  
met een massa-  
invangende  
neutronenster als  
begeleider. Baan-  
omlooptijd tussen  
2 en 165 dagen

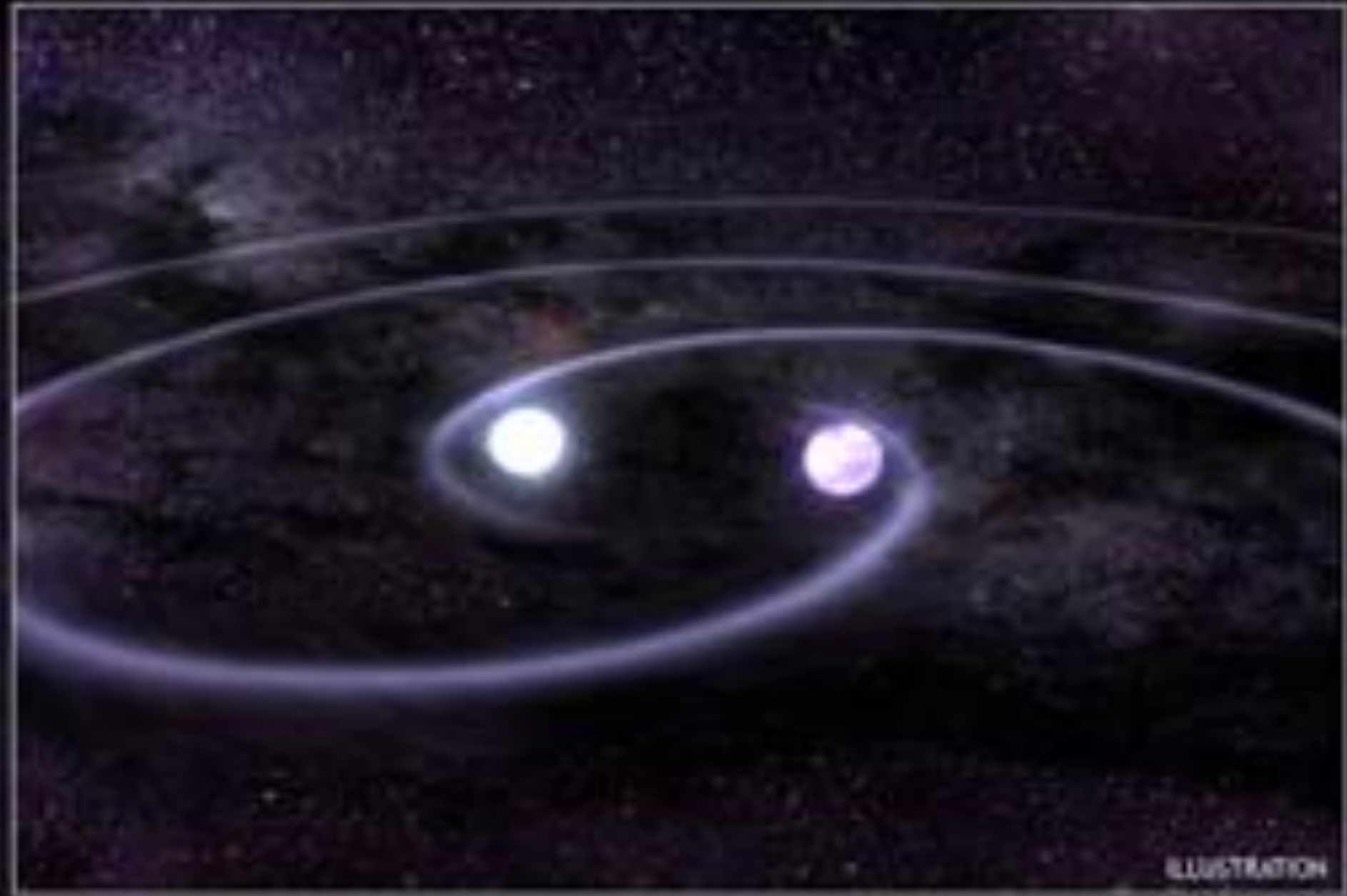


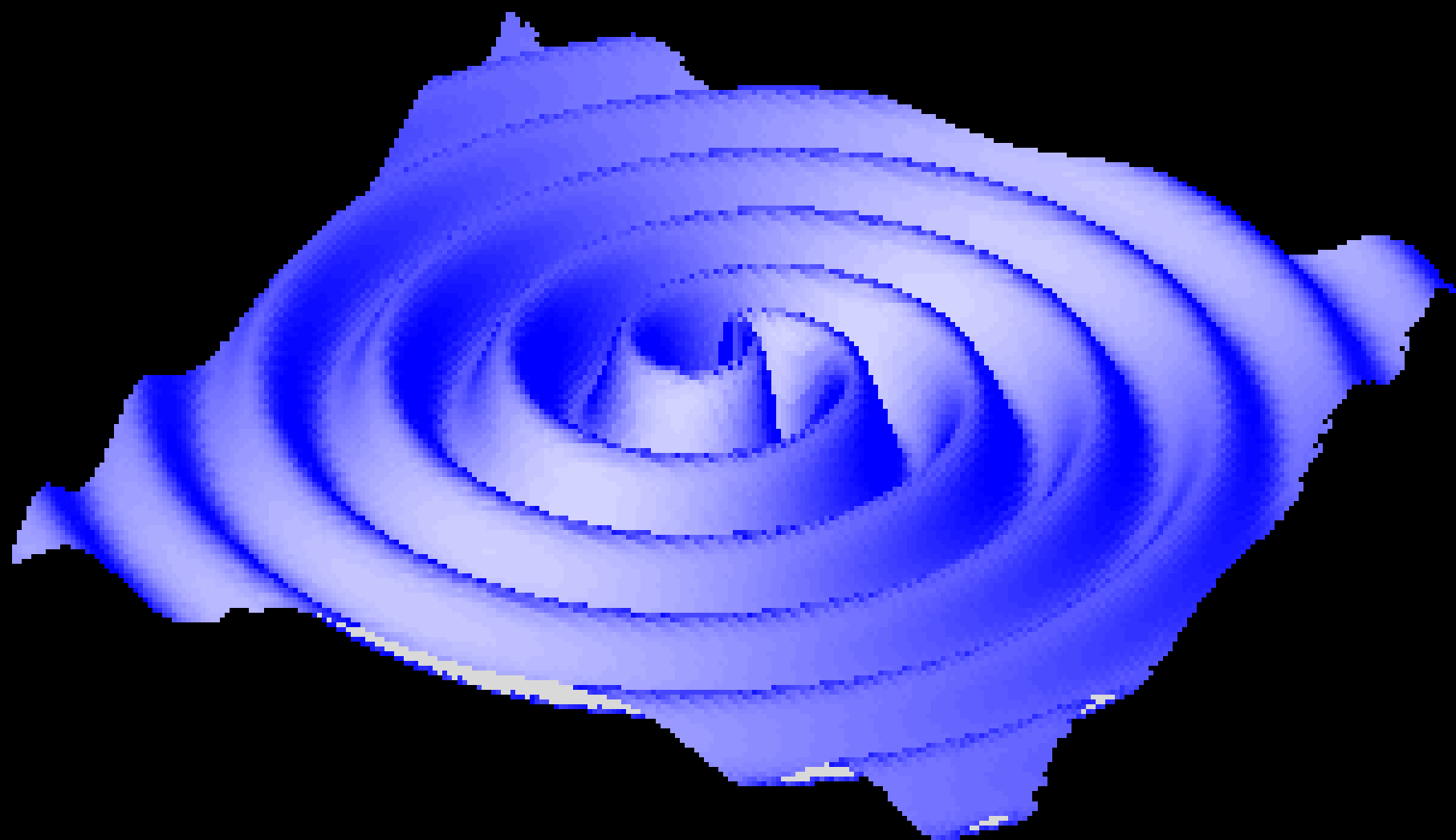


Meer dan 5 zonsmassa's

Zwart gat röntgen-dubbelster; meer dan 30 bekend in Melkwegstelsel en nabije sterrenstelsels (o.a. in de Grote Magelhaense Wolk en M33); massa's 5 tot 20 x Zon

Gravitatiegolven zijn ECHTE rimpelingen van de ruimte, planten zich met lichtsnelheid voort





# Ontdekkingen van laatste zes jaar: Gravitatiegolven van versmeltende dubbele zwarte gaten en neutronensterren



LIGO= Laser Interferometer Gravitationalwave Observatory.

LIGO meet verplaatsingen van 1 op  $10^{21}$ . Dit betekent dat hij op 4 kilometer lengte een verplaatsing kan meten van minder dan één duizendste van de middellijn van een proton (atoomkern van waterstof).

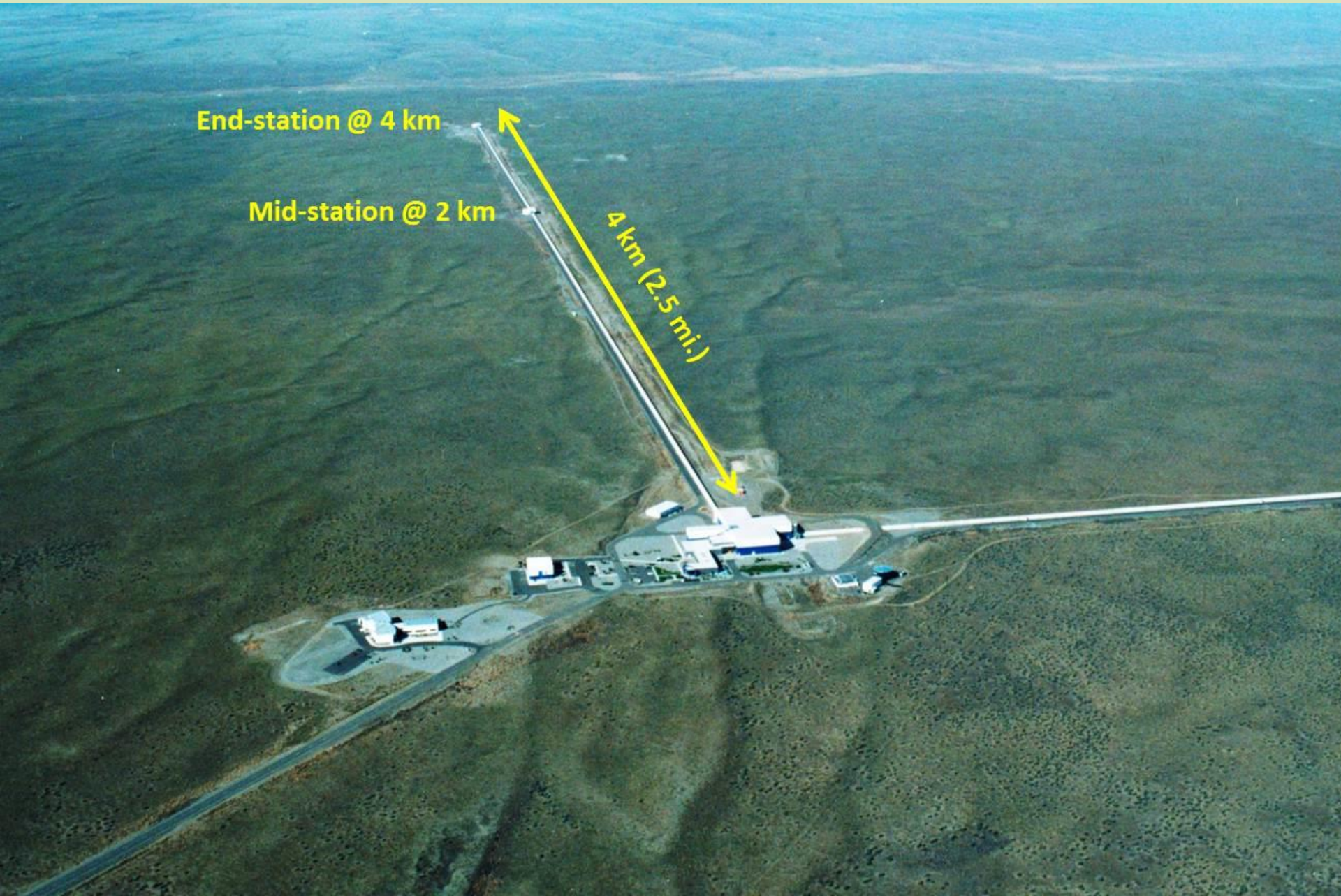
Nodig om Gravitatiegolven te meten van twee versmeltende neutronsensterren op 100 miljoen lichtjaren. Tot 2015 was dit sterkst denkbare bron v. gravitatiegolven.

[verplaatsing gelijk aan 1/25-ste millimeter op 4.2 lichtjaren lengte]

End-station @ 4 km

Mid-station @ 2 km

4 km (2.5 mi.)

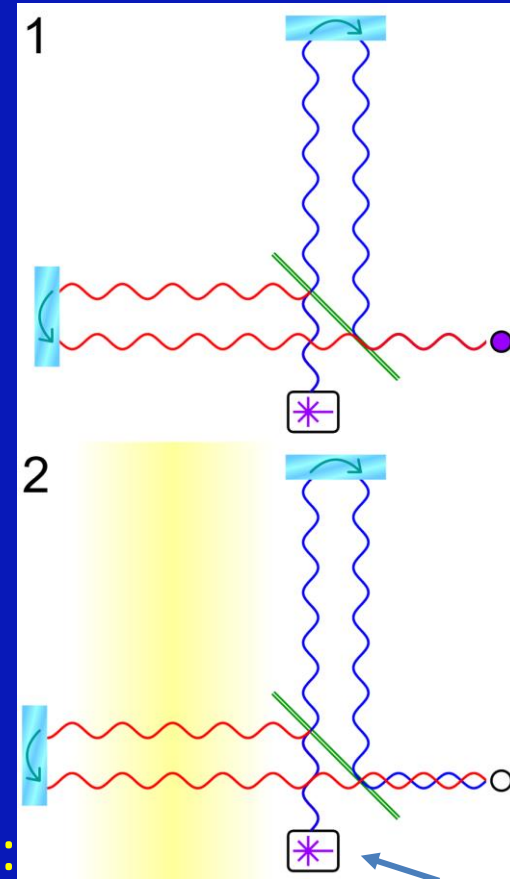


# Principe van LIGO en VIRGO

(heen- en terug-  
gaande lichtbundels  
gescheiden weer-  
gegeven)

1. Geen wegverschil  
tussen de gereflec-  
teerde bundels:  
versterking (in fase)

2. Gravitatiegolf (geel)  
verkort de horizontale  
arm: Wegverschil  $0.5\lambda$ :  
uitdoving (tegenfase)



detector

Laser-lichtbron  
1064 nm Nd:YAG

14 September 2015:

Eerste LIGO ontdekking:

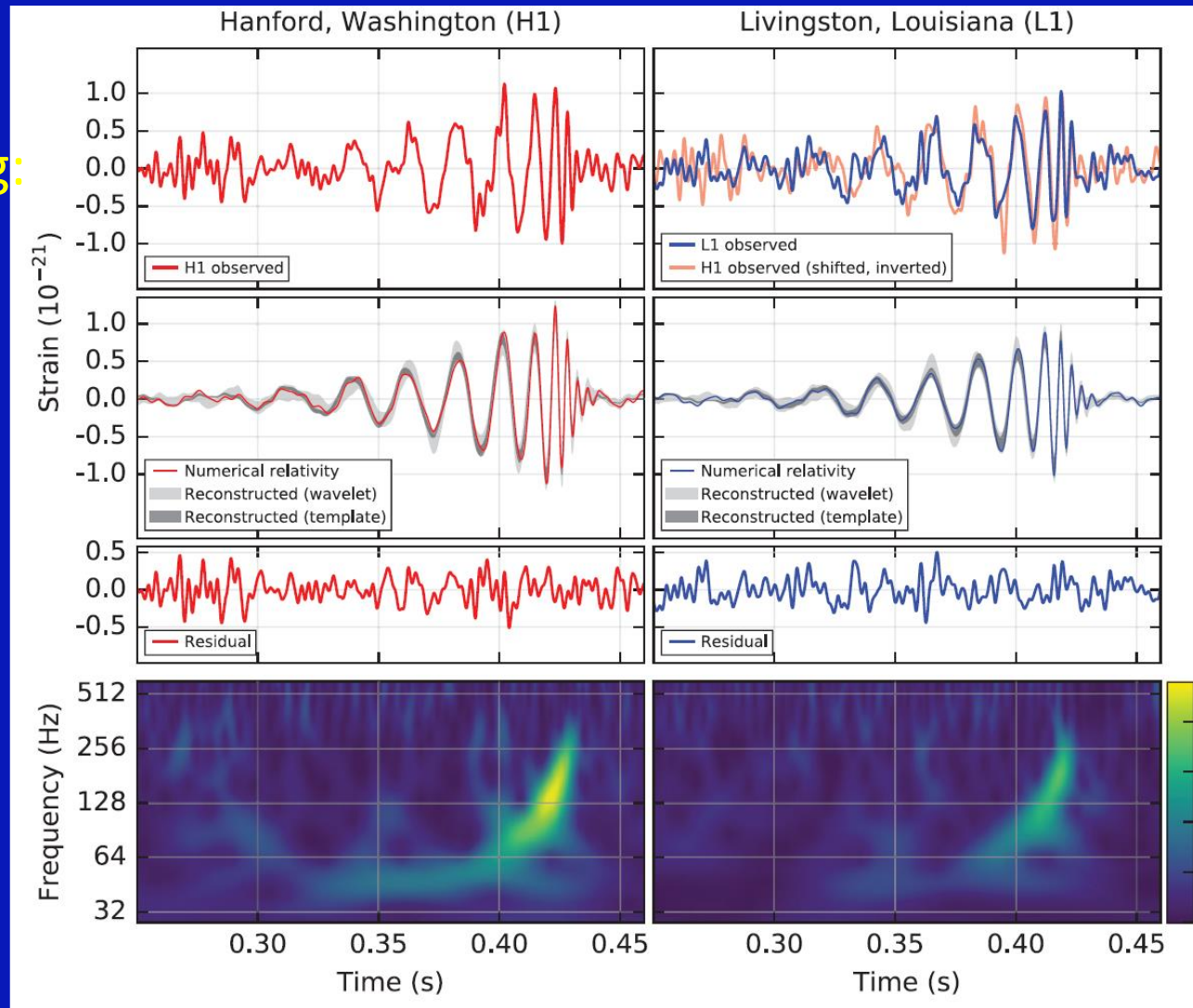
Versmelten twee zeer  
zware zwarte gaten:

36 en 29 Zonsmassa's;

3 zonsmassa's  
volledig in energie  
uitgestraald.

Afst.: 1350 miljoen  
lichtjaar)

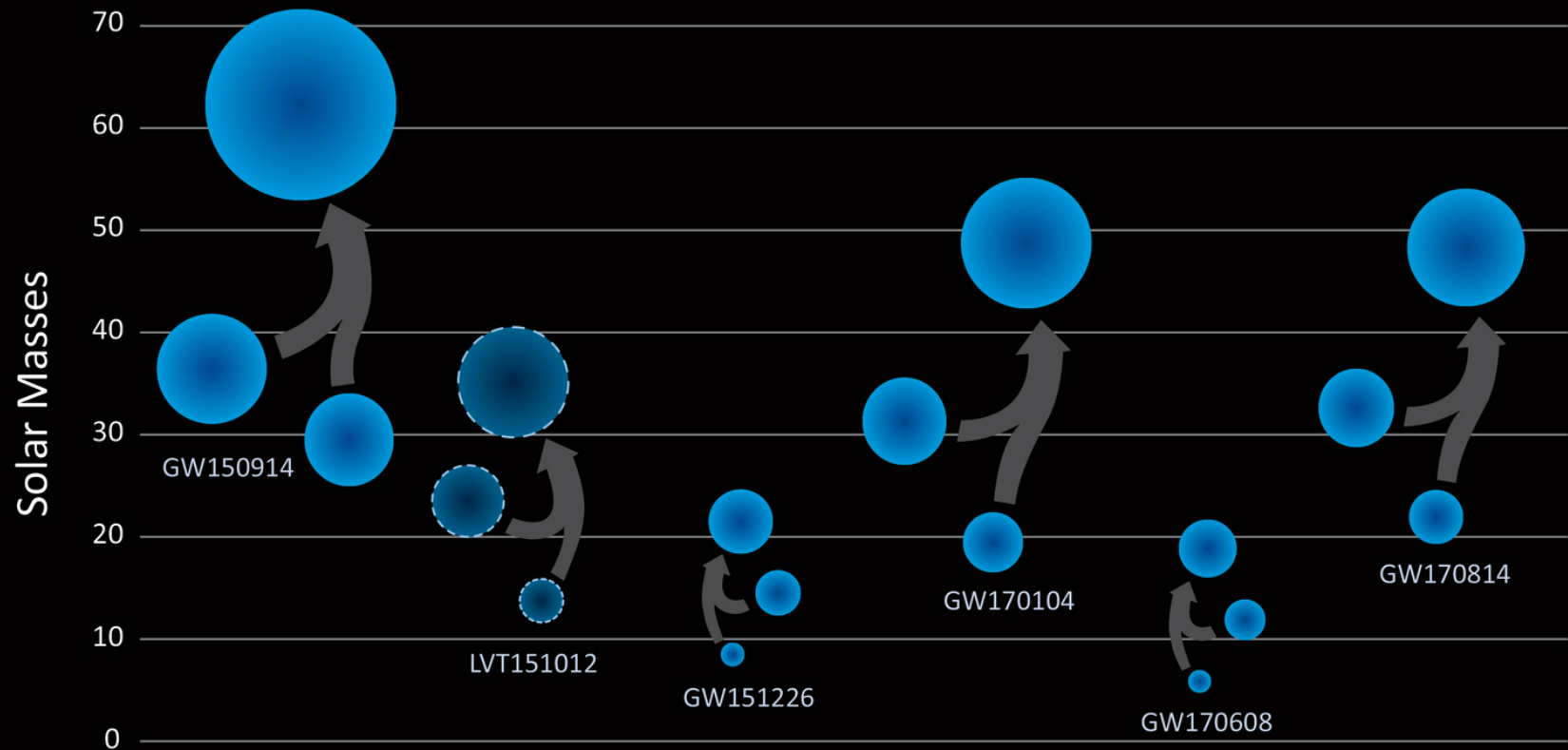
NU WETEN WE: DUBBELE  
BLACK HOLES BESTAAN



Hierna in 2015-17 nog 5 dubbele BH versmeltingen  
gezien, en in de Jaren hierna nog vele meer

# De eerste zes LIGO dubbele black holes

## Black Holes of Known Mass



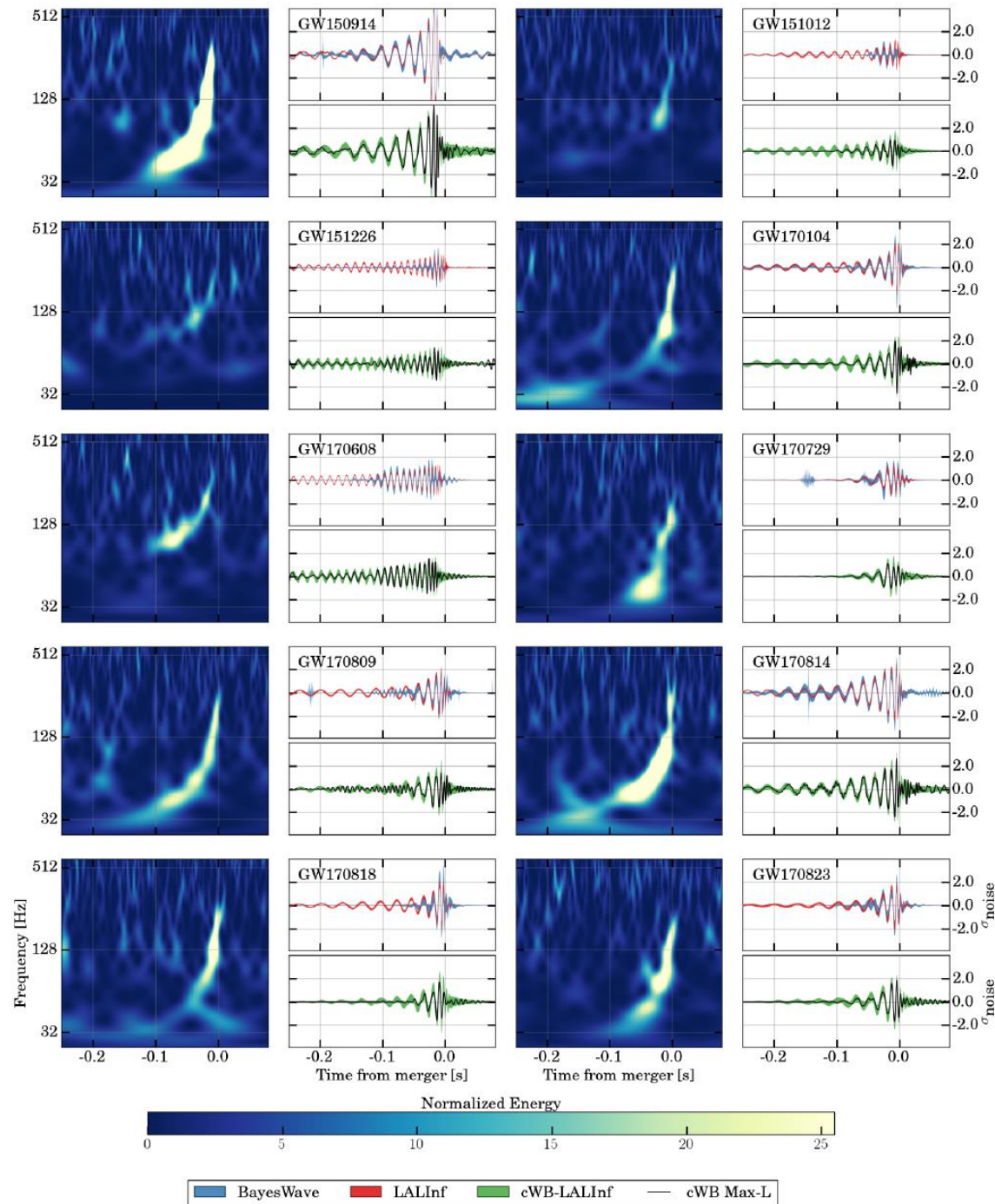
2018: nog 4 versmelten-  
de dubbele BHs in LIGO  
database gevonden  
(30 nov.2018 bekend  
gemaakt).

Eerste 10 LIGO Gravitatie-  
signalen van versmeltende  
dubbele zwarte gaten

Zwaarste: GW170729:

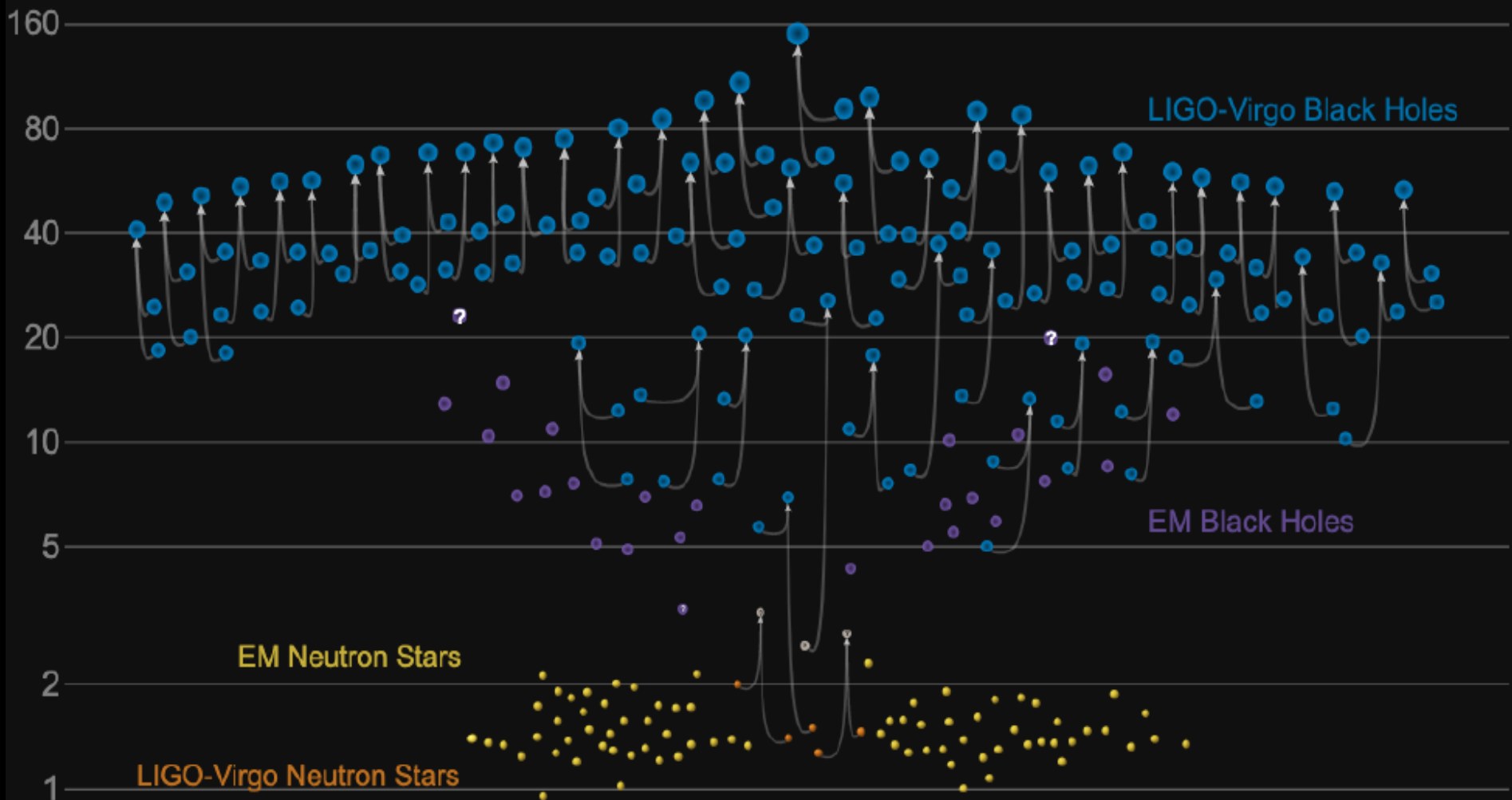
50.6 + 34.3 zonsmassa's

Van 8-4-tot 4-12 in 2019:  
23 zekere events, waarvan  
22 BH+BH, en 1 NS+NS  
(26 April 2019)



# Masses in the Stellar Graveyard

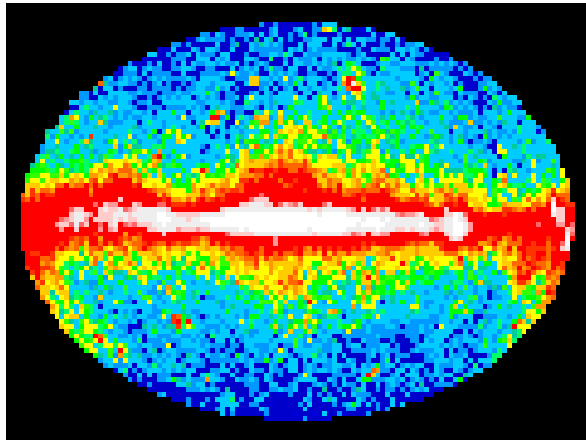
*in Solar Masses*



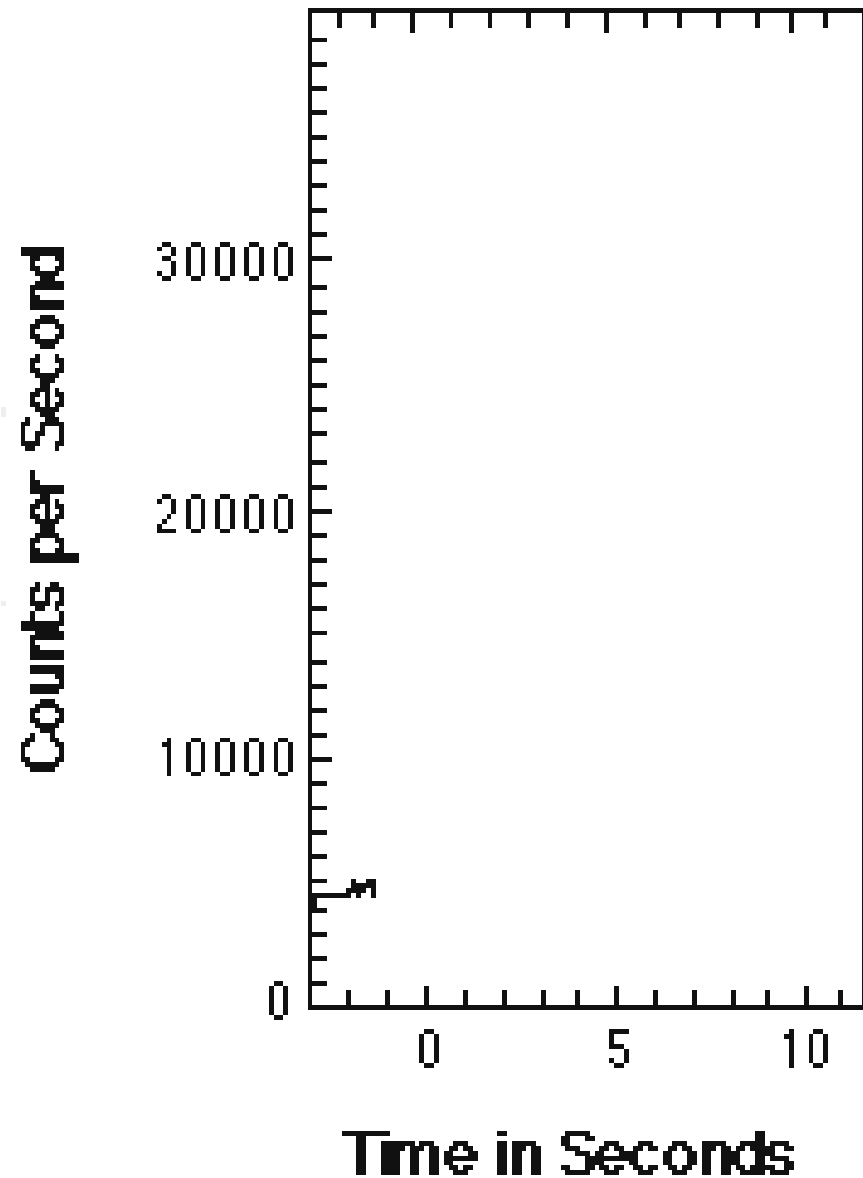
GWTC-2 plot v1.0

LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

Gamma Flitsen: gemiddeld één per dag op willekeurige plek aan hemel



GRB 910421



Ontstaan van korte Gamma Flits en “Red Nova”:  
versmelten van 2 neutronensterren door verlies Gravitatiestraling

# Voorspelde effecten bij versmelten van dubbele Neutronen Sterren:

- Sterke burst van gravitatiegolven: de enige zekere bron die LIGO verwachtte sinds 1977.
- Vorming neutron-rijke atoomkernen (goud, platina, uranium): 0.1 zonsmassa neutron-materie uitgestoten: zeer radio-actief: Hitte: “Rode nova” (“Kilo Nova”)
- Gamma-Flits (GRB) (*Paczynski 1986; Eichler et al. 1989*)

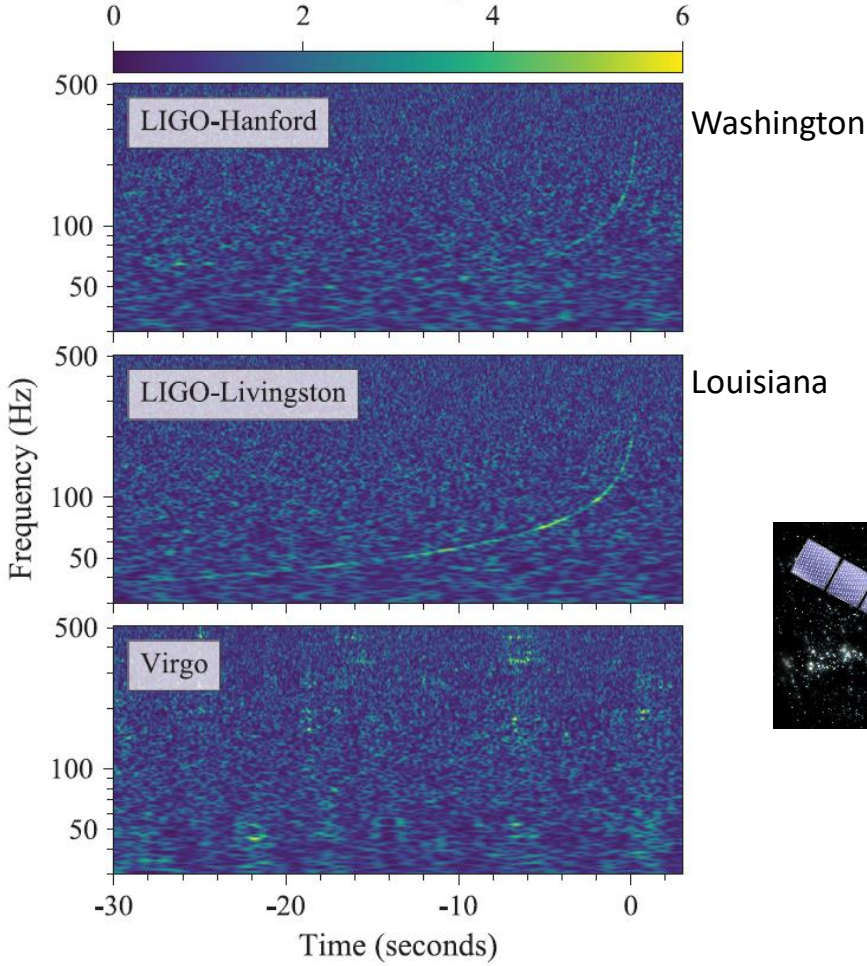
# 17 Aug. 2017: LIGO: versmelten van 2 neutronensterren + Gamma Flits

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 848:L13 (27pp), 2017 October 20

Abbott et al.

GW170817

Normalized amplitude



Integral  
(ESA)

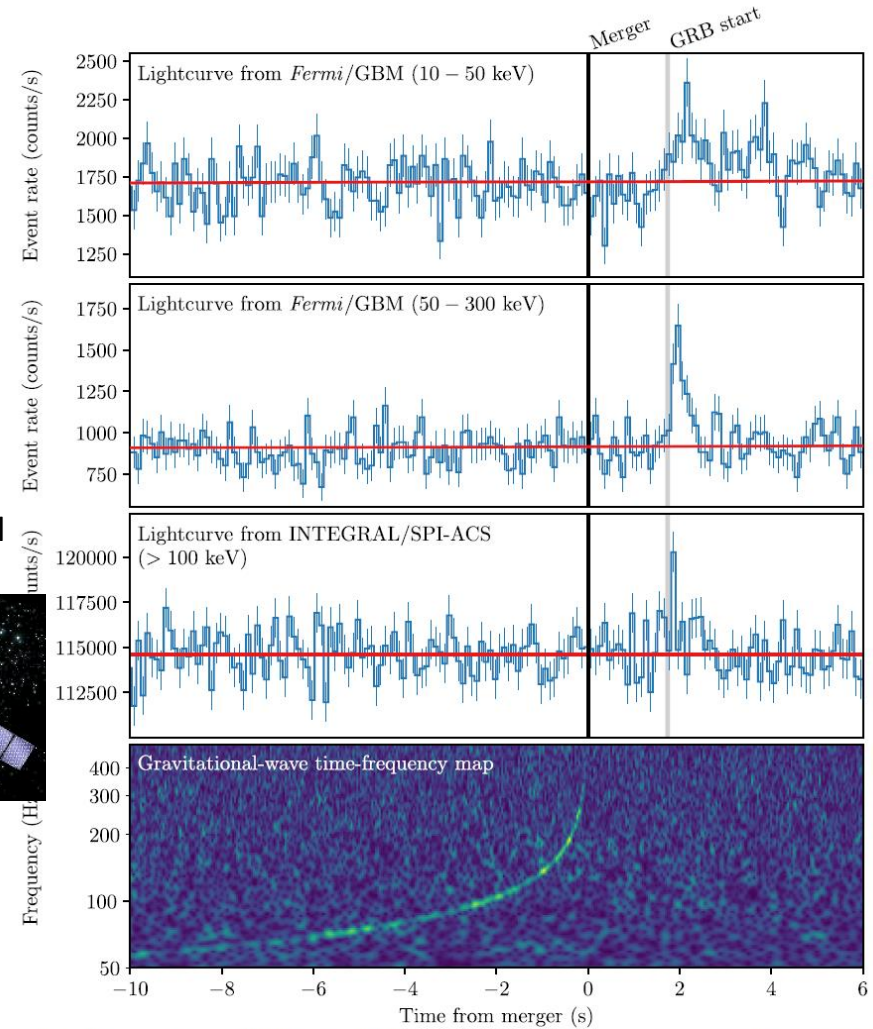


Figure 2. Joint, multi-messenger detection of GW170817 and GRB 170817A. Top: the summed GBM lightcurve for sodium iodide (NaI) detectors 1, 2, and 5 for GRB 170817A between 10 and 50 keV, matching the 100 ms time bins of the SPI-ACS data. The background estimate from Goldstein et al. (2016) is overlaid in red. Second: the same as the top panel but in the 50–300 keV energy range. Third: the SPI-ACS lightcurve with the energy range starting approximately at 100 keV and with a high energy limit of at least 80 MeV. Bottom: the time-frequency map of GW170817 was obtained by coherently combining LIGO-Hanford and LIGO-Livingston data. All times here are referenced to the GW170817 trigger time  $T_{0}^{\text{GW}}$ .

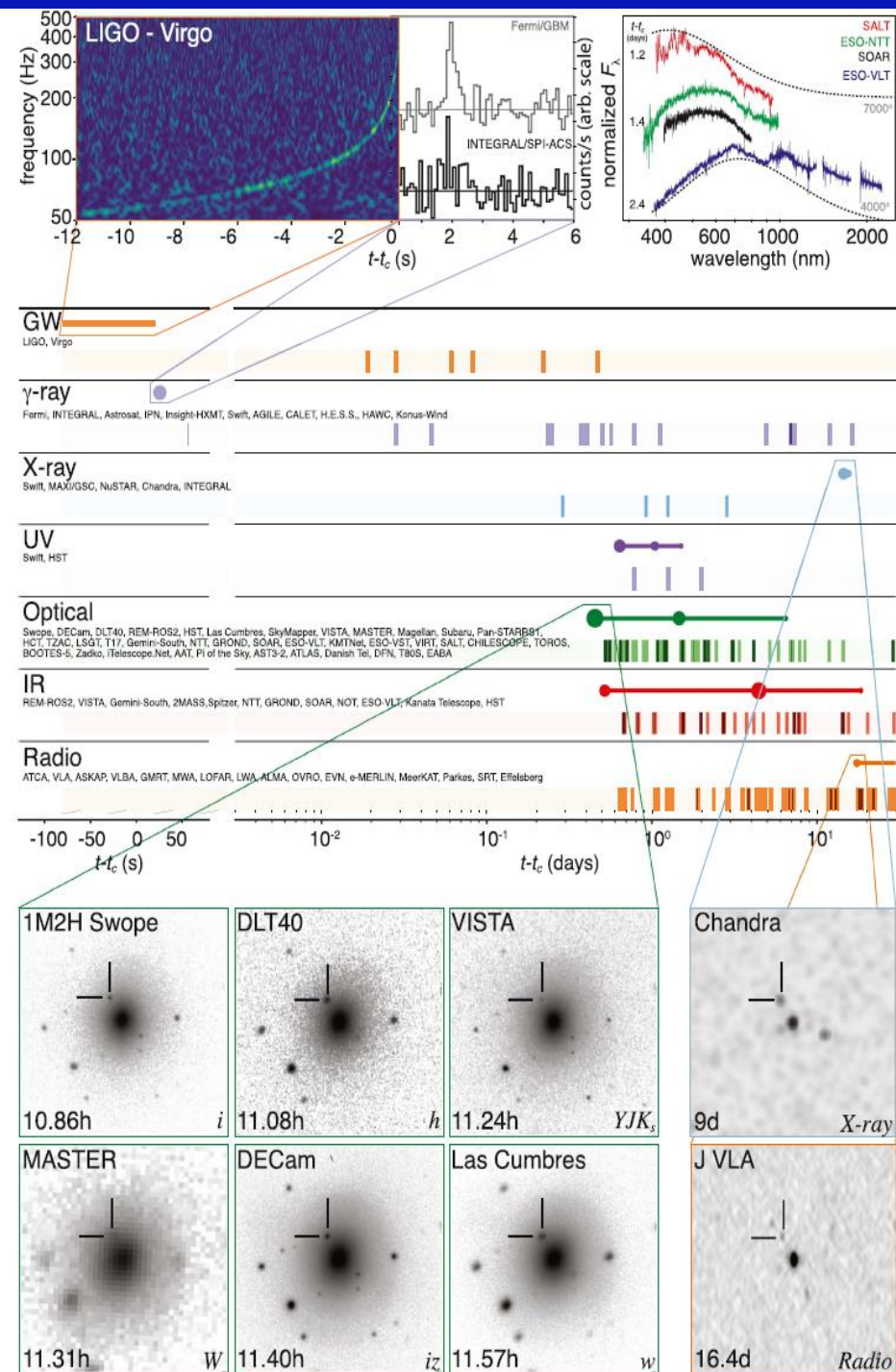
Waarnemingen bij alle golflengten, van gamma tot optisch, Infrarood, radio

Abbot + >3000 co-authors  
ApJ Letters 848, L12 (49pp)

> 70 publicaties op 16 October  
2017

NGC 4993: S0 stelsel met helft  
massa van ons Melkwegstelsel  
Laatste 5 miljard jaar geen  
stervorming: dubbele  
NS ouder zijn dan 5 miljard  
Jaar.

Afst.  $d = 42,5 \text{ Mpc} = 138 \text{ Miljoen}$   
lichtjaar



## Radio Detection of the Kilonova of GW170817



*"For the greatest benefit to mankind"*  
*Alfred Nobel*



*The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the*

# 2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS



**Rainer Weiss  
Barry C. Barish  
Kip S. Thorne**

*"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"*

# Het belang van Supernovae en dubbele neutronensterren

- A. Supernova zelf maakt alle elementen zwaarder dan IJzer, via neutronenbestraling van IJzer-atoomkernen
- B. Bepaalde elementen kunnen zo niet gemaakt worden, wel na versmelten van dubbele neutronenster: goud, uraan, platina
- C. Deze, tezamen met elementen zwaarder dan Helium, in binnenste van zware sterren gemaakt, worden geïnjecteerd in wolken Waterstof en Helium in sterrenstelsels: geleidelijk aan verrijkt met zwaardere elementen.
- D. Uit verrijkte wolken vormen zich nieuwe sterren, met planeten.