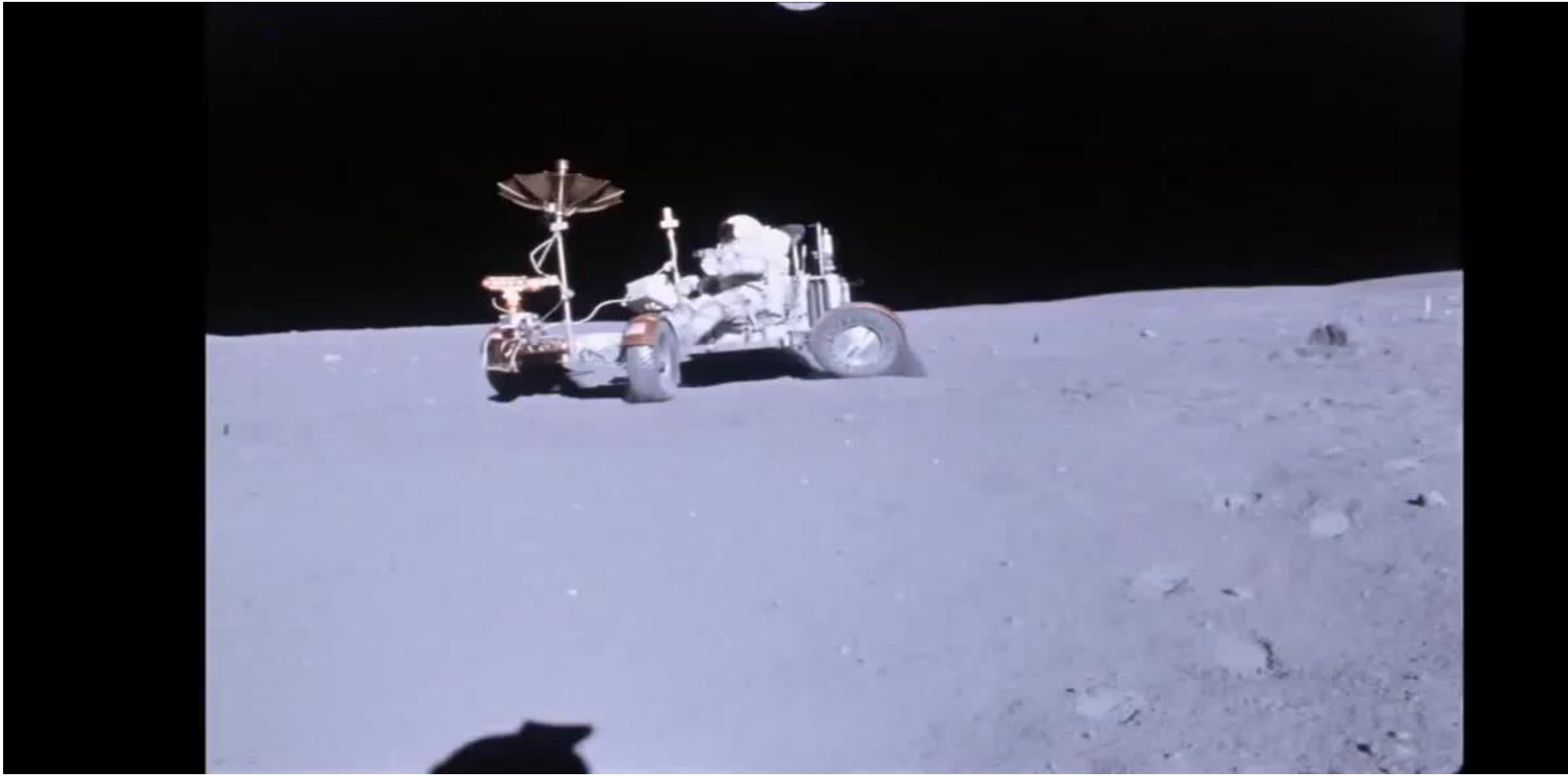
Wat heeft 50 jaar aan sterrenkundige ontdekkingen opgeleverd?

Ed P.J. van den Heuvel
Universiteit van Amsterdam

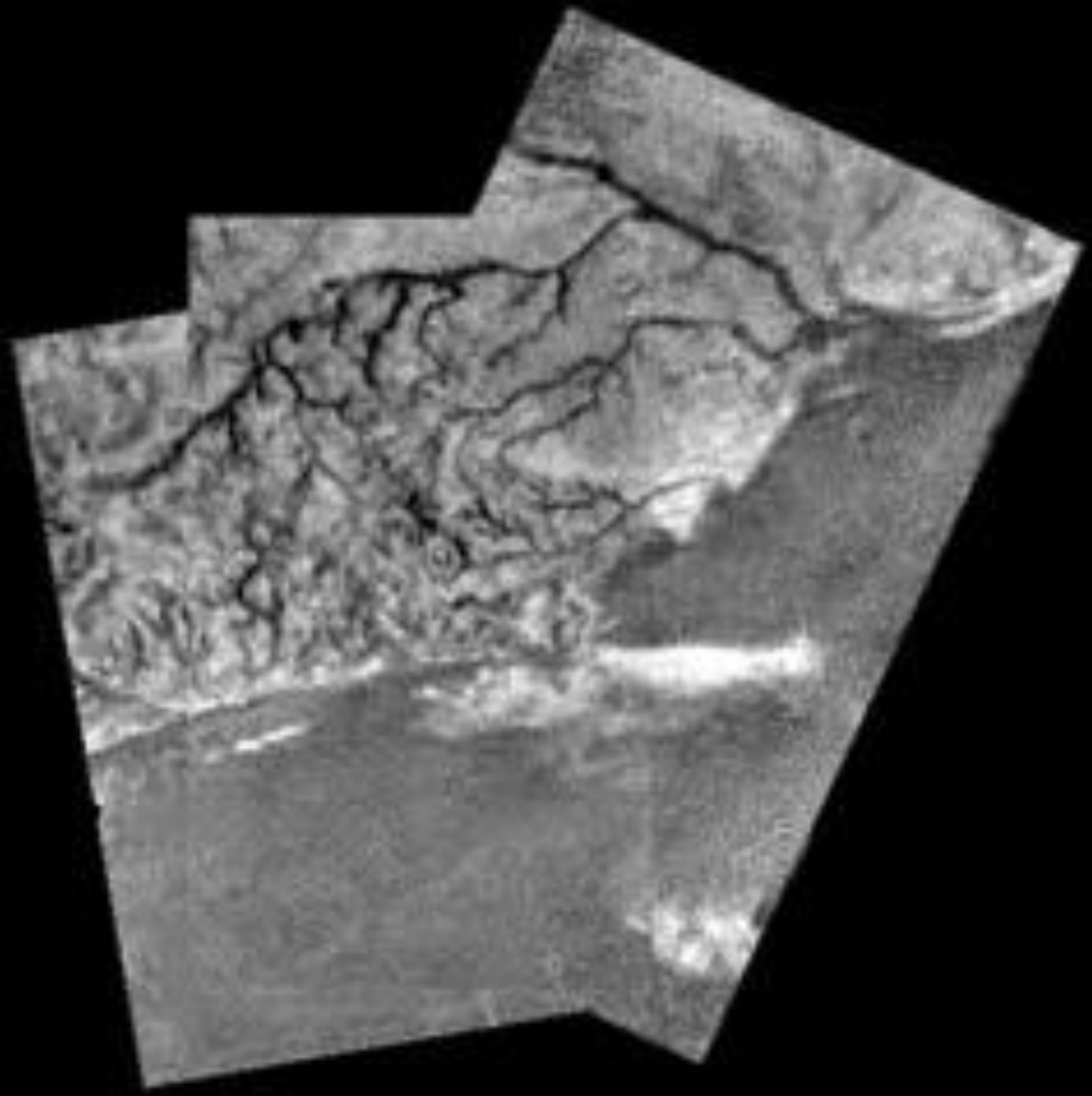
KNVWS Leiden 11 November 2023





Afdaling Cassini-Huygens in Titan’s atmosfeer, 14 januari 2005

Rivier en kustlijn op Titan, opname gemaakt tijdens afdaling, 14 jan.2005



Nobelprijzen Natuurkunde voor Sterrenkundlge ontdekkingen: 26 personen in 11 jaren

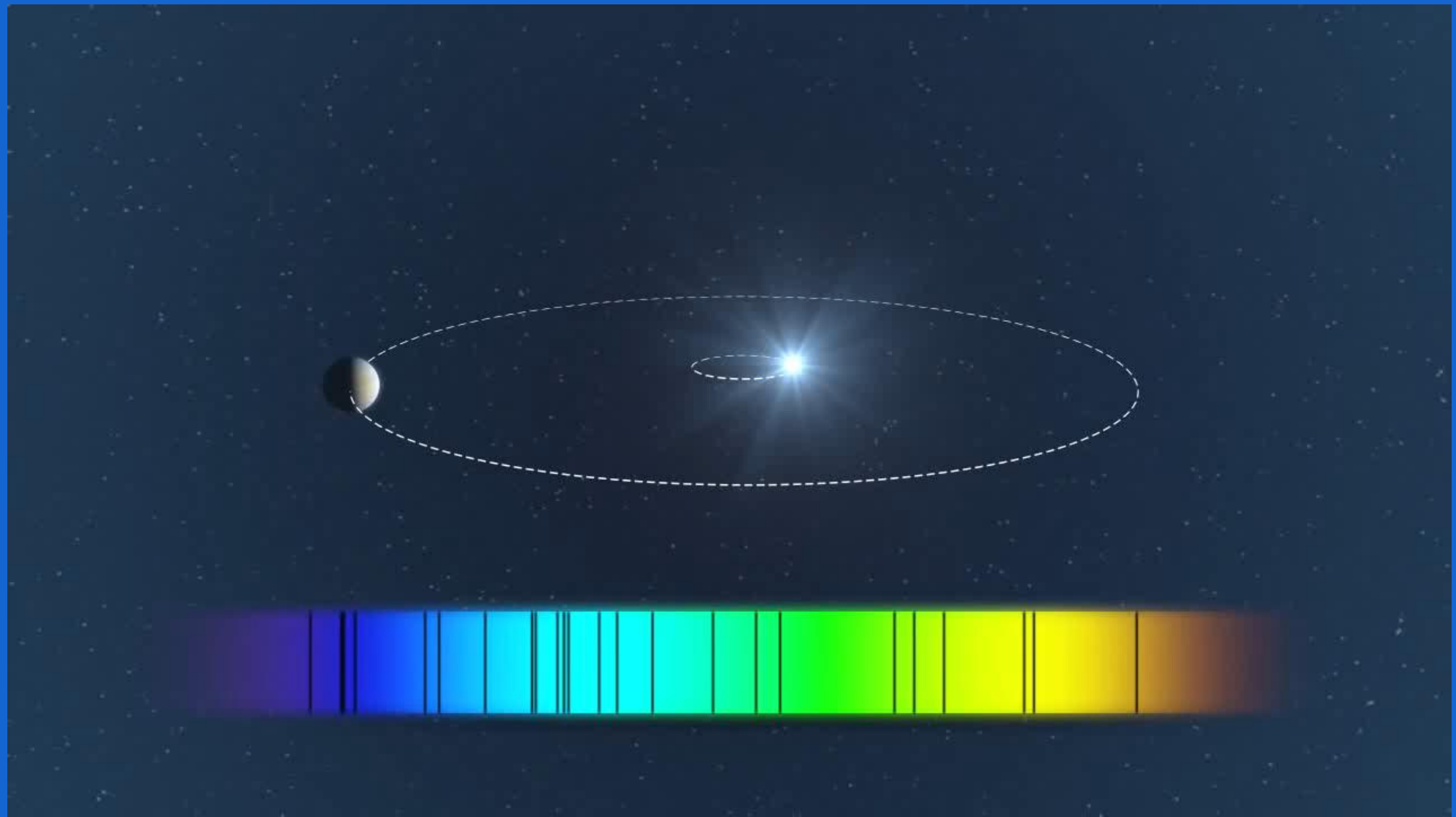
1967: Bethe: energieopwekking in zon en sterren door fusie van waterstof (1938)
1974: Hewish (ontdekking van pulsars=neutronensterren) en Ryle (uitvinding apertuursynthese radiotelescopen.
1978: Penzias en Wilson: ontdekking van kosmische microgolfstraling van de Oerknal
1983: Chandrasekhar (ontdekking limietmassa witte dwergen, 1930) en Fowler: vorming der elementen in sterren (1958).
1993: Taylor en Hulse: ontdekking dubbelster-pulsar (1974) en bevestiging van voorspellingen Algemene Relativiteitstheor.
2002: Giacconi (ontdekking rontgensterren/dubbelsterren), Davies (neutrino's van de Zon), Koshiba (neutrino's van supernova 1987A).
2006: Mather en Smoot: ontdekking rimpels in de kosmische achtergrondstraling van de Oerknal.
2011: Permemutter, Schmidt en Riess: ontdekking Donkere Energie (versnelde uitdijing van heelal, aan supernovae Ia)
2017: Weiss, Thorne en Barish: Ontdekking gravitatiegolven van versmelting dubbele zwarte gaten en dubbele neutronensterren (2015 en 2017)
2019: Mayor en Cheloz: ontdekking van eerste Exoplaneet rond 51 Pegasi; Peebles: theoretische cosmologie.
2020: Genzel, Andrea Ghez en Penrose: voor detectie black hole in Melkwegcentrum, en theorie BHs

Ontdekking Exoplaneten 1995

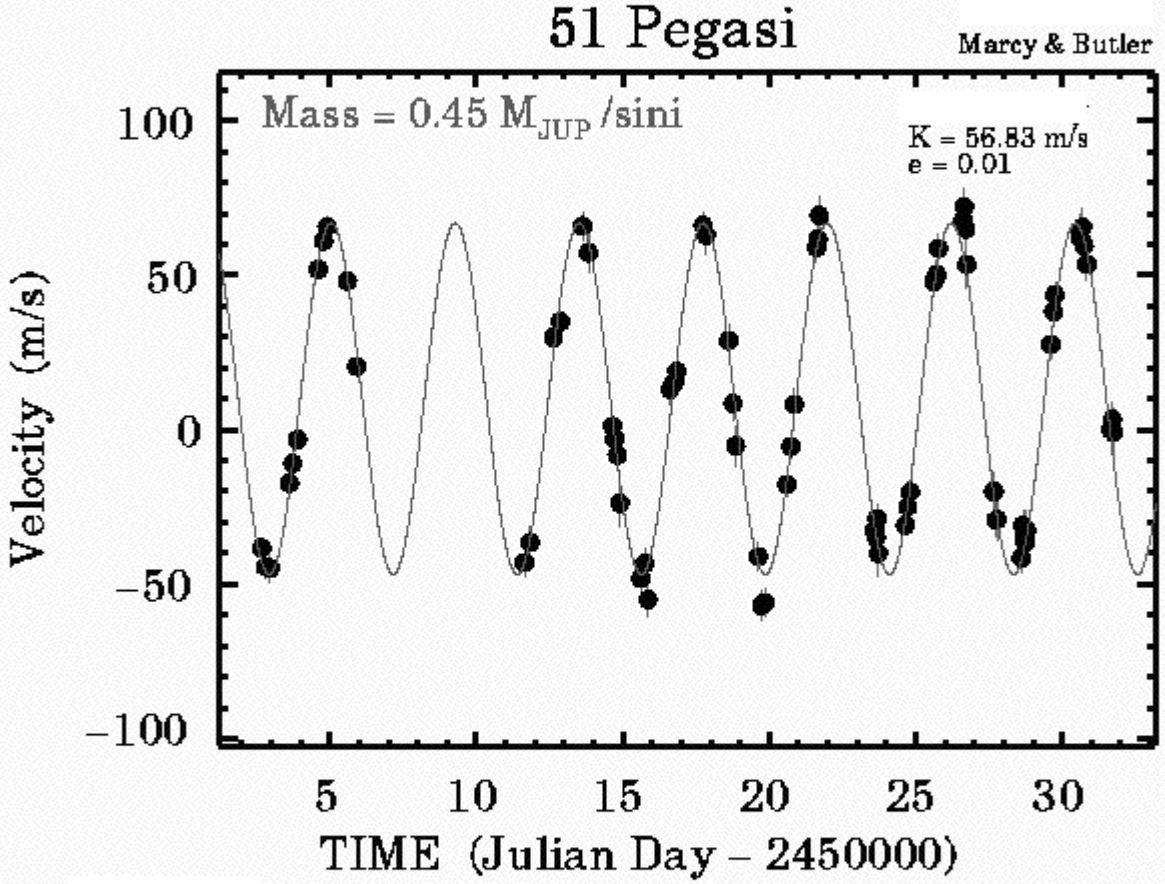
Op 26 October 2023 waren er 5535 bevestigde exoplaneten in 4120 planetenstelsels, met 936 stelsels met meer dan een planeet.

De meeste van deze planeten zijn ontdekt met NASA’s Kepler satelliet

Radiele snelheids methode voor ontdekken Exoplaneten. Pionier Mayor (Geneve), 1995, Nobelprijs 2019

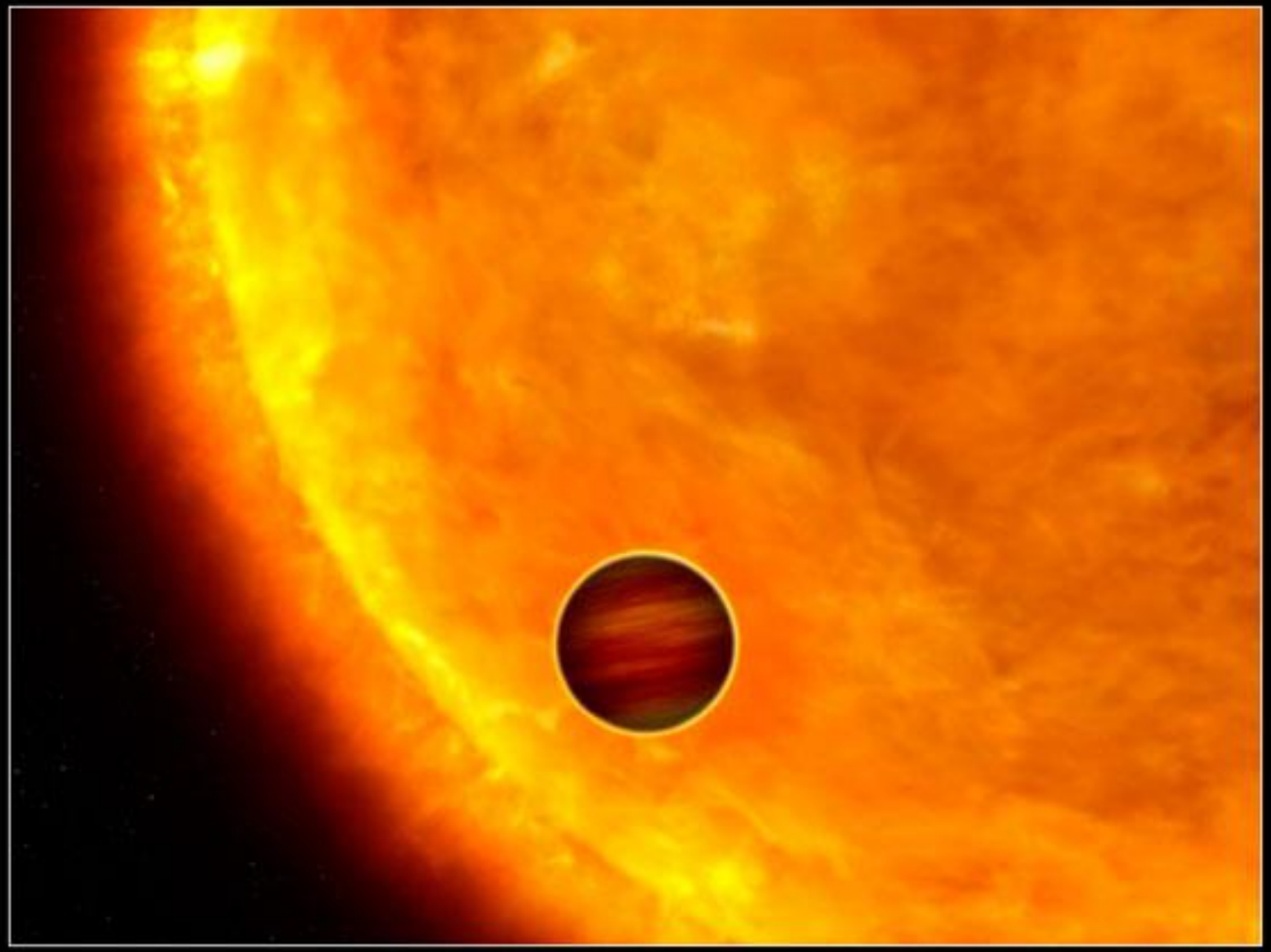


Ontdekt door Michel Mayor en Didi Cheloz (1995)



De eerste exoplaneet rond een “gewone” ster: omlooptijd 4.2 dagen (Mayor en Cheloz 1995, Nobelprijs 2019)

Met deze “radiële snelheidsmethode” zijn meer dan 800 exoplaneten ontdekt.



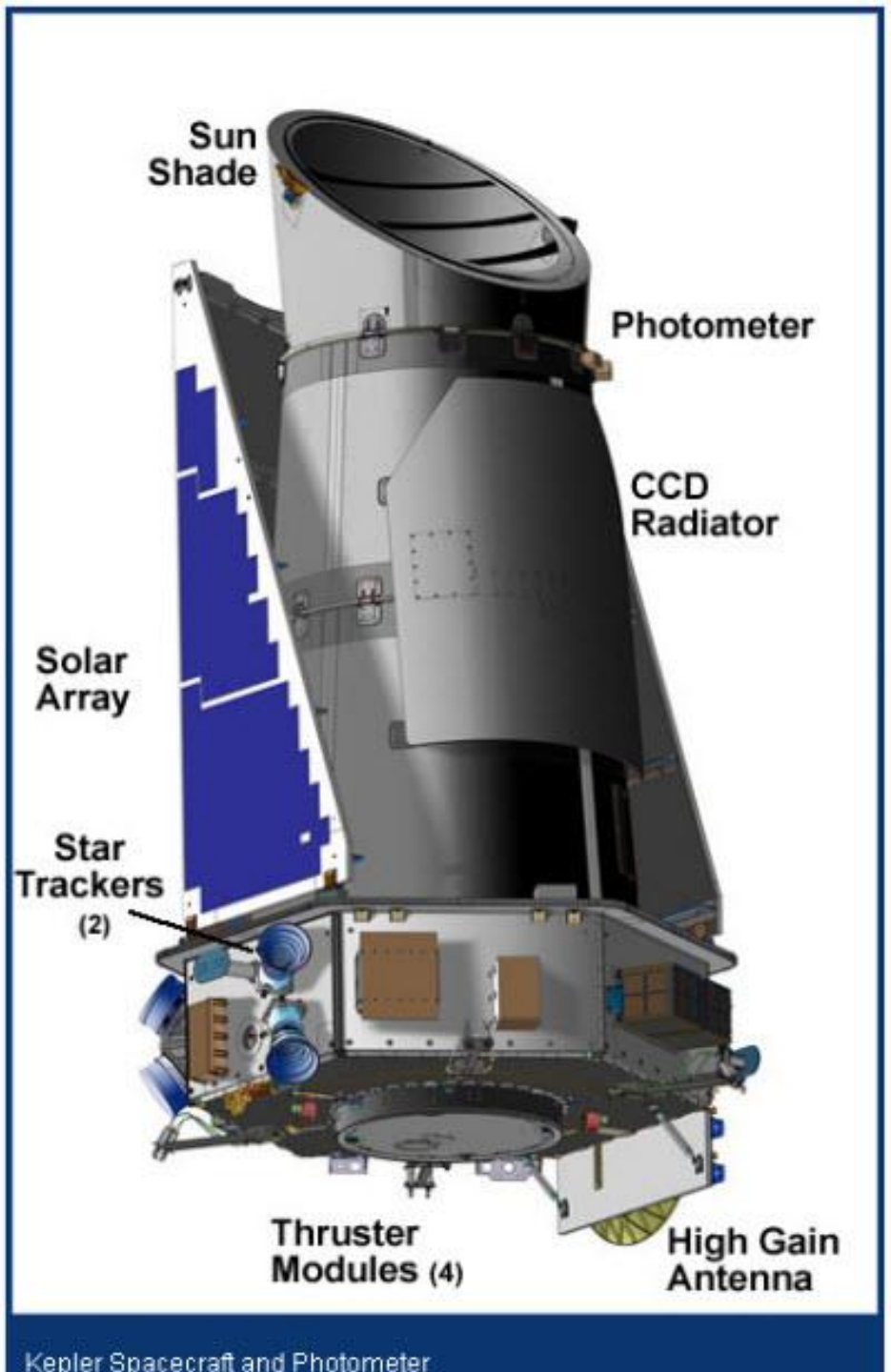
Artist's View of a Transiting Extrasolar Planet

NASA, ESA, and G. Bacon (STScI) ▪ STScI-PRC06-34b

Tweede manier:
de"Transit" methode:
Planeet eclipseert een stukje van de sterschijf.

NASA's Kepler satelliet heeft een 140 cm diameter spiegel-teles-coop (3,5 meter lang) en is speciaal gebouwd om eclipsen van sterren door hun planeten te vinden door nauwkeurig de veranderingen van de lichtsterkten van honderd-duizenden sterren te volgen in de tijd. 42 CCD van 2,2 Megapixels. Kan sterren meten die tot 10 000 maal zwakker zijn dan de zwakste blote-oog sterren. Lancering 2009 (voorbereid sinds 1982!).

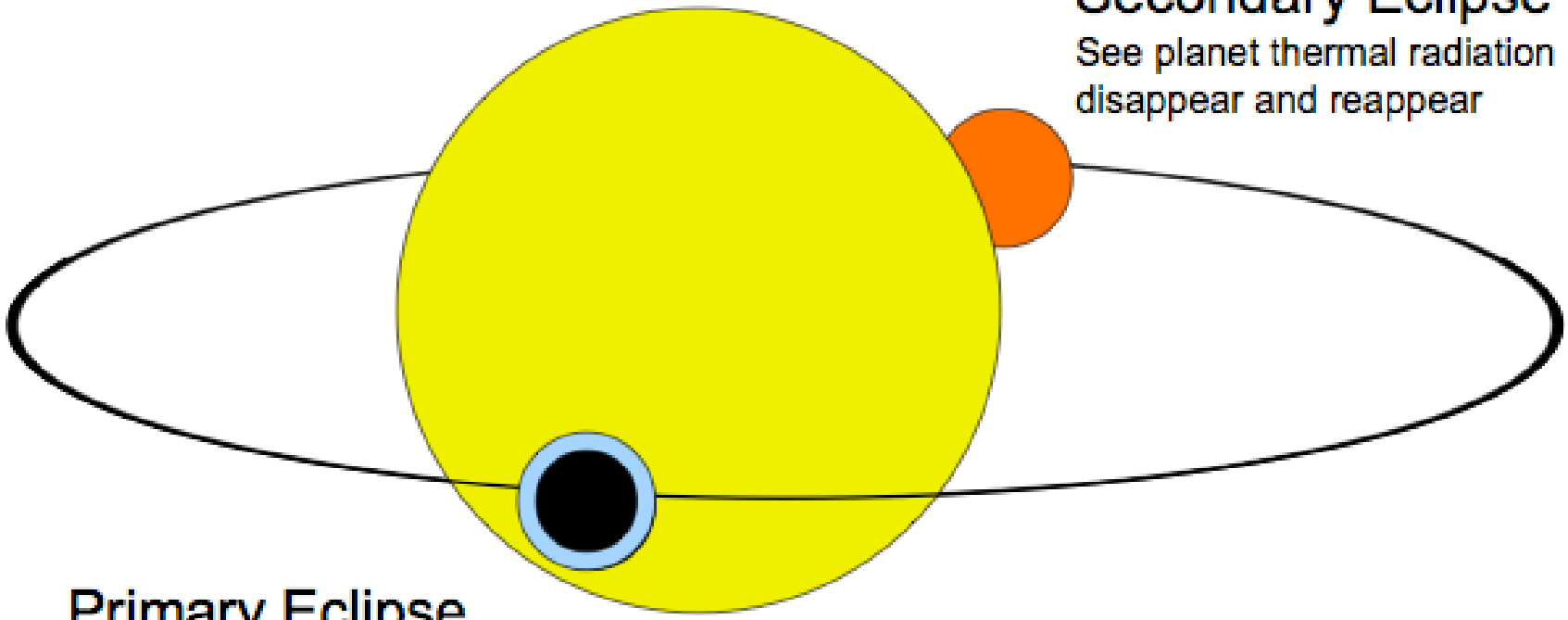
Baan rond de zon volgt de Aarde, achter de Aarde aan, waarbij hij na 4 jaar 150 miljoen Km achterloopt.



Kepler Spacecraft and Photometer

Secondary Eclipse

See planet thermal radiation disappear and reappear

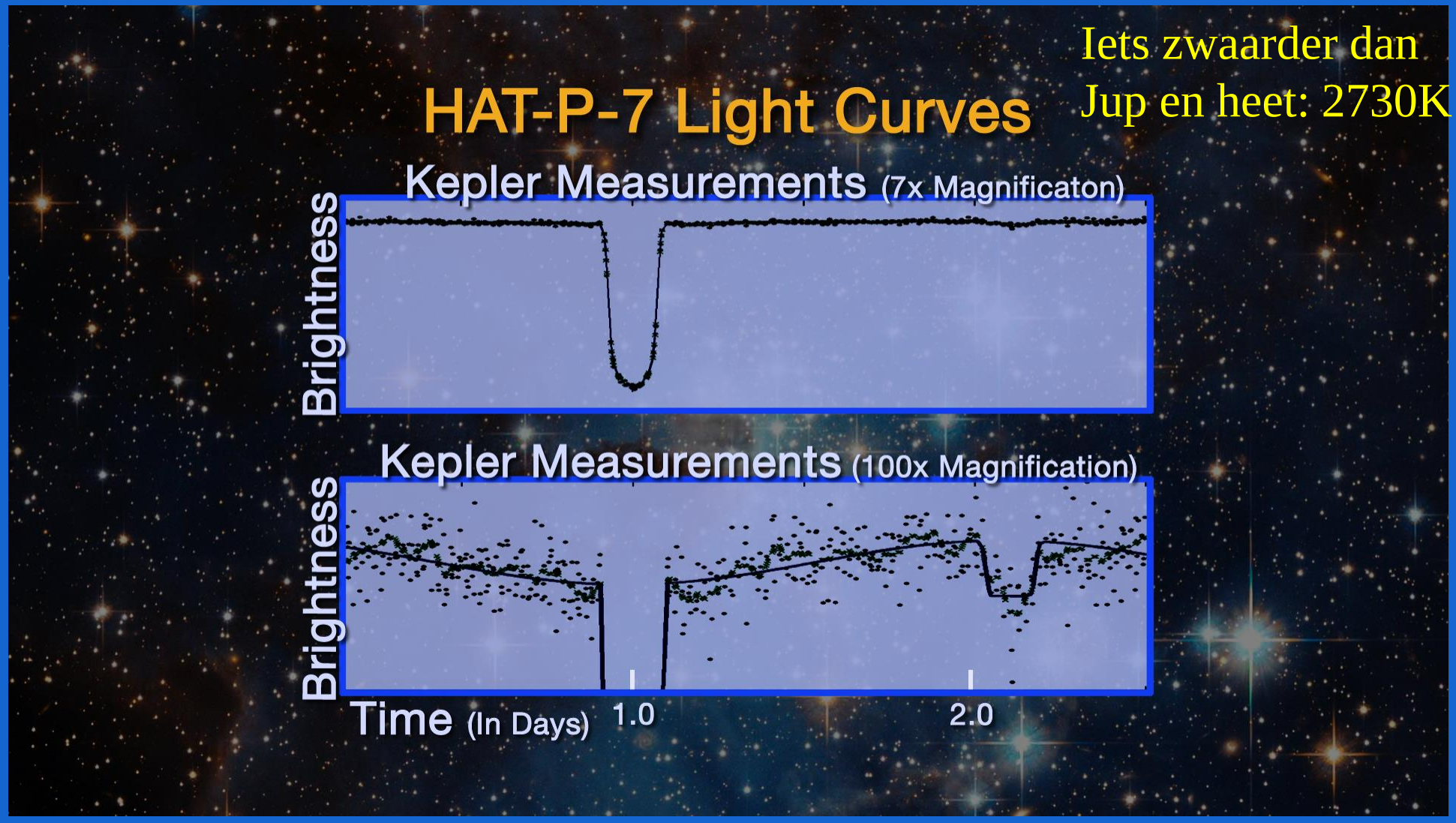


Primary Eclipse

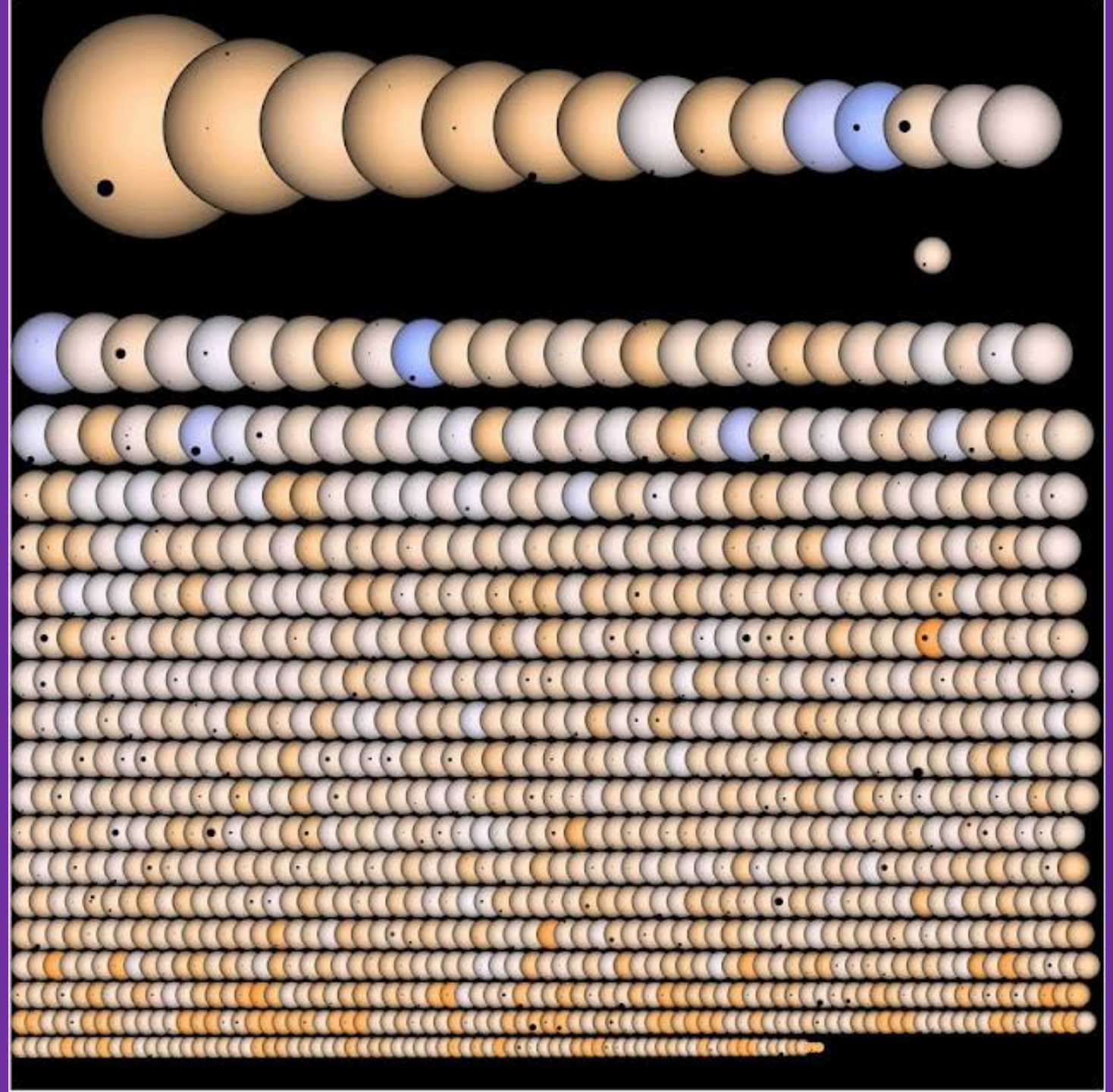
Measure size of planet
See star's radiation transmitted through the planet atmosphere

Learn about atmospheric circulation from thermal phase curves

NASA Kepler satelliet



Iets zwaarder dan Jup en heet: 2730K



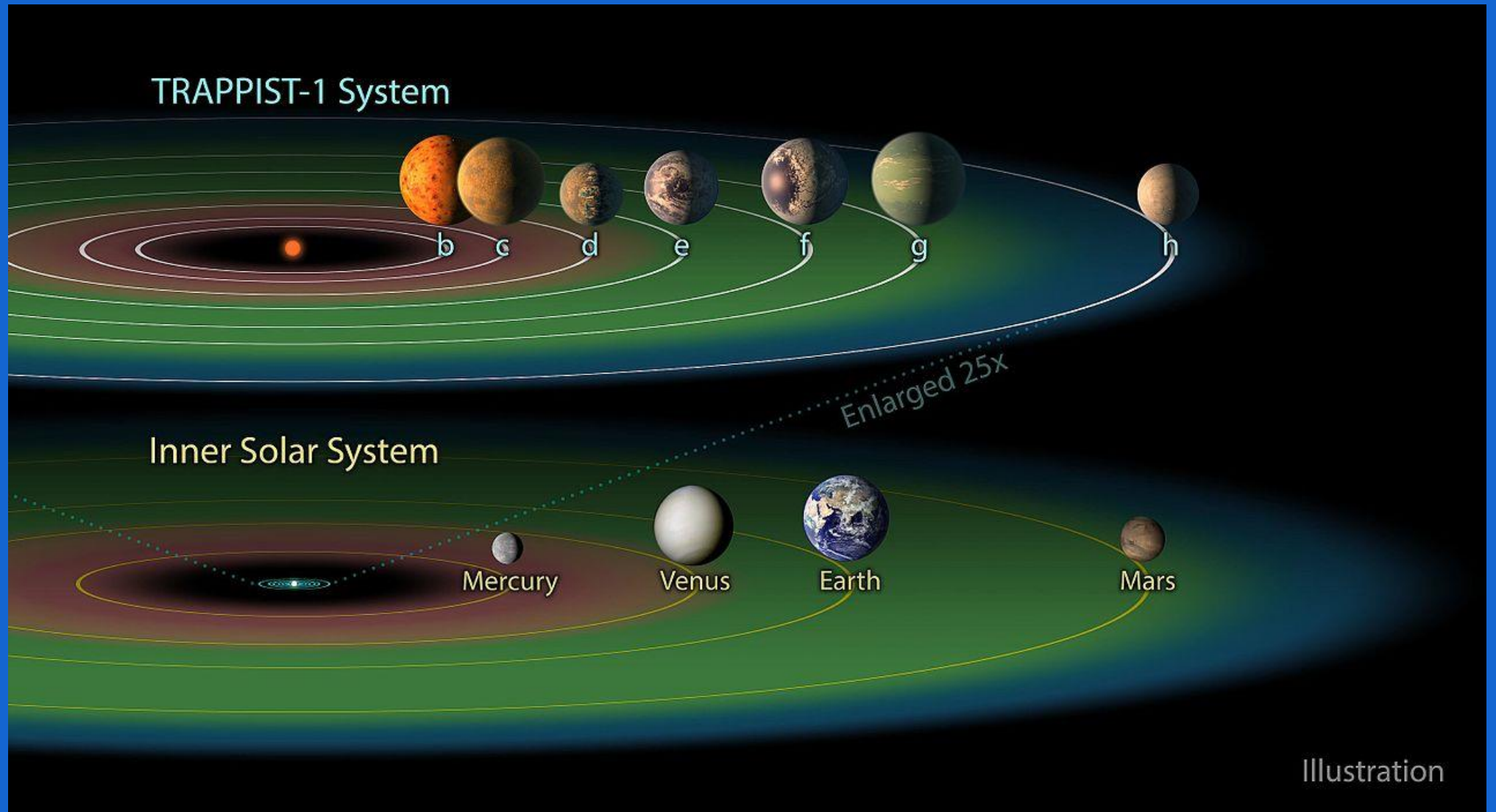
Stand in 2011

Alle 1235 sterren met candidaat- planeten door Kepler gevonden, per 31-3-2011 (NASA “Astronomy Picture of theDay” =APOD).

(De meeste candidaten moesten nog wel bevestigd worden door te zien of de eclipsen periodiek terugkeren en met welke omlooptijd!)

Trappist-1 is een rode dwerg ster, afst. 39 ljr. Massa =0.08xZon, Lichtsterkte =0.0004xZon
Omlooptijd planeet g = 12,3 dagen, b: 1,5 dag. Planeten e, f en g zijn in de bewoonbare zone.

Alle planeten hebben massa's tussen 0.5 en 2 maal die van Aarde. Leeftijd: 8 miljard jaar

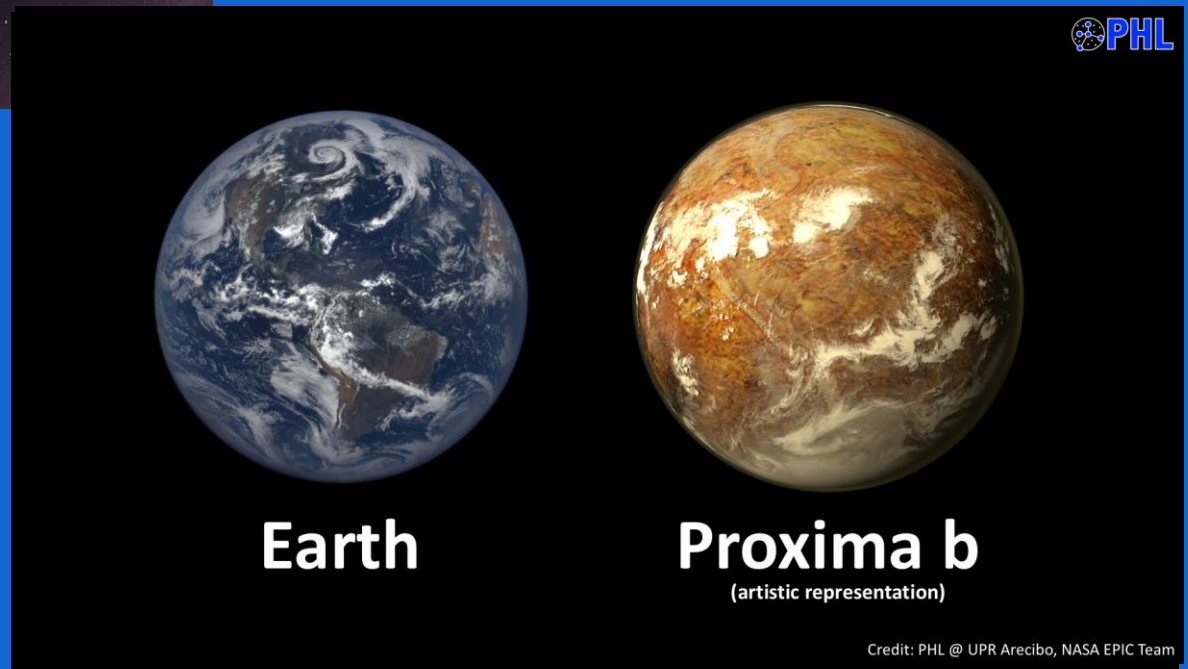


Onze meest nabije ster, Proxima Centauri (4.2 lichtjaar) heeft een planeet 1,3 maal zo zwaar als de Aarde, in de “bewoonbare zone’ (omlooptijd 11.2 dagen), en ook een schijf van ijsblokken en rotsen op 4 keer de afstand Aarde-Zon

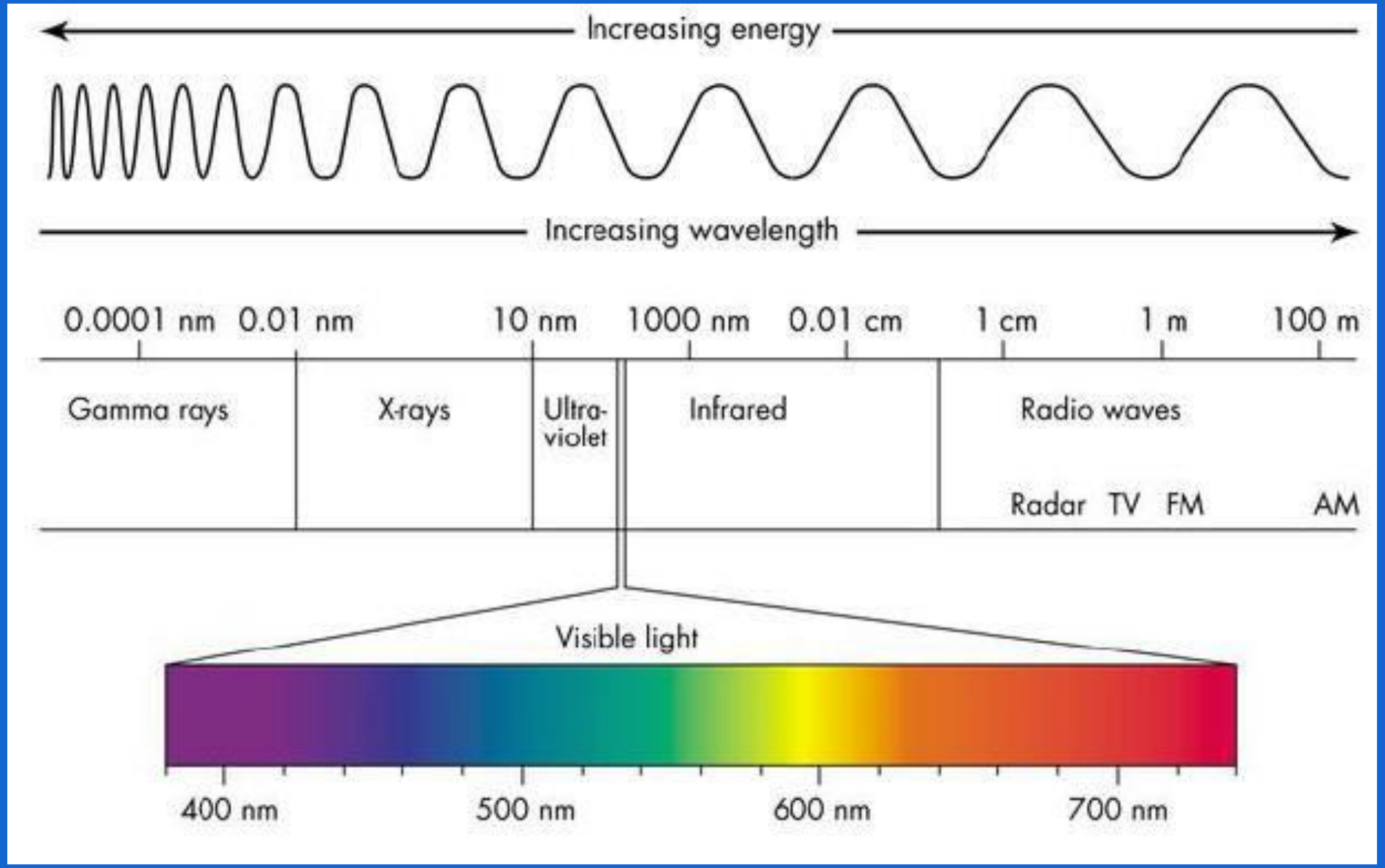


Proxima Cen straalt 500 maal minder energie uit dan de Zon

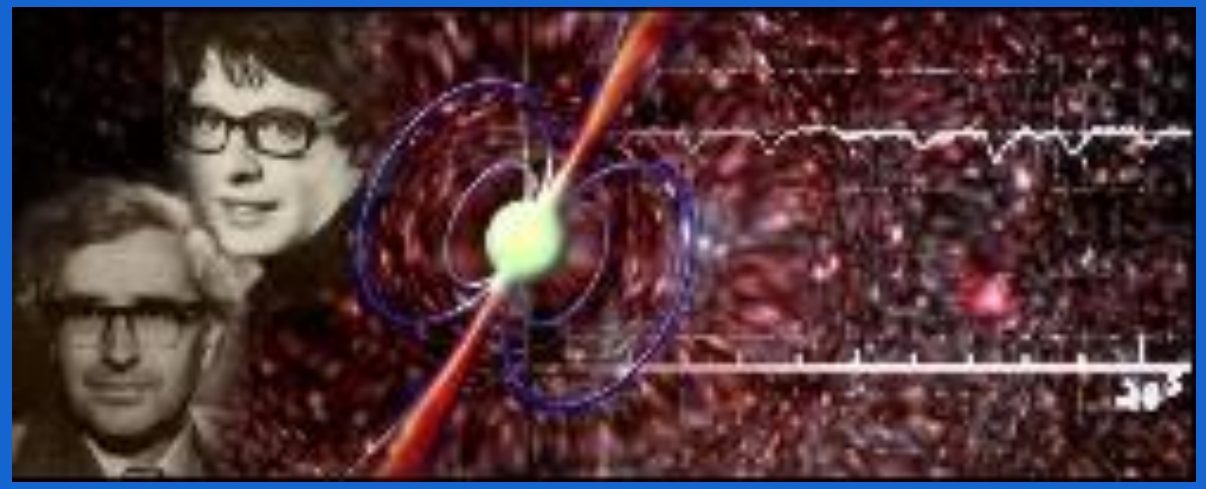
Massa: 0.12 x Zon



Hoe korter de golflengte, hoe groter de energie van de *fotonen*
(fotonen = licht-quanten = golf-pakketjes)



De ontdekking van radio pulsars: Neutronensterren





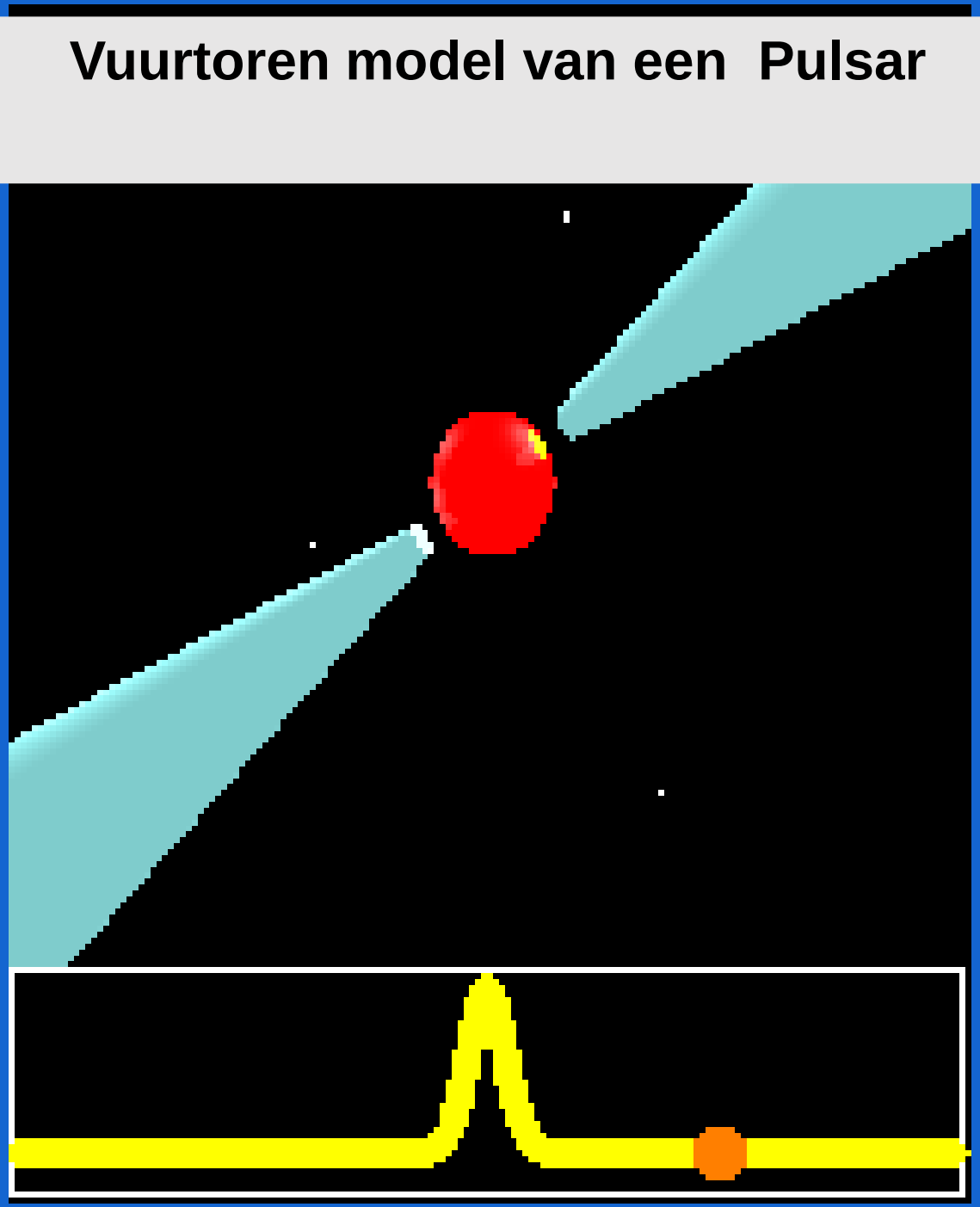
1967: Studente Jocelyn Bell ontdekt eerste radiopulsar CP1919, regelmatig pulsend elke 1.33 seconde. 1974: NOBELPRIJS voor haar baas: Prof. Anthony Hewish.

Neutronenster heeft een trillingstijd en kortste rotatieperiode van 0.001 (een-duizendste) seconde, een witte dwerg: van 1 seconde

November 1968: Ontdekking van pulsar in de Krabnevel met periode van 0.033 (= een-dertigste) seconde: dit kan alleen een roterende neutronenster zijn.

Thans zijn meer dan 3000 radiopulsars ontdekt (w.o. 20 dubbele)

Vuurtoren model van een Pulsar



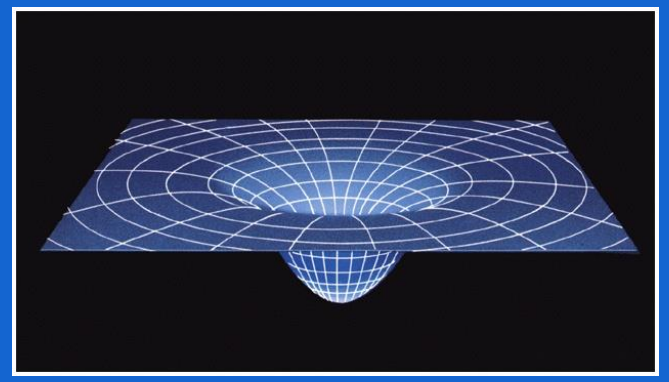


Baade and Zwicky (1934); Oppenheimer en Volkoff (1939); Oppenheimer en Snyder (1939, Zwart gat)

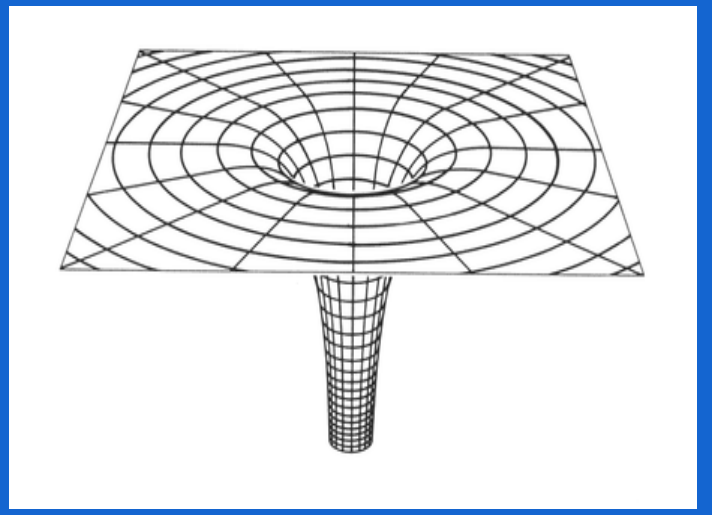
Neutronenster: 400 000 maal massa van aarde in bol van 20 km diameter

zwaartekrachtsversnelling = 100 miljard maal die op Aarde

Ontsnapsnelheid van oppervlak = 150 000 km/sec (vergelijk Aarde: 11.2 km/sec)



Neutronenster: kuil met bodem; licht er kan nog uit



Zwart gat: geen bodem

EINDSTADIA VAN STERREN

MINDER DAN 8 ZONSMASSA'S



10000 KM



300 000 AARD-MASSA'S

TUSSEN 8 EN ~ 20-25 ZONSMASSA'S

LEVEN KORTER DAN 20 MILJOEN JAAR

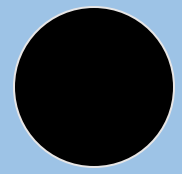


430 000 AARD-MASSA'S

20 km

ZWAARDER DAN ~ 25 ZONSMASSA'S

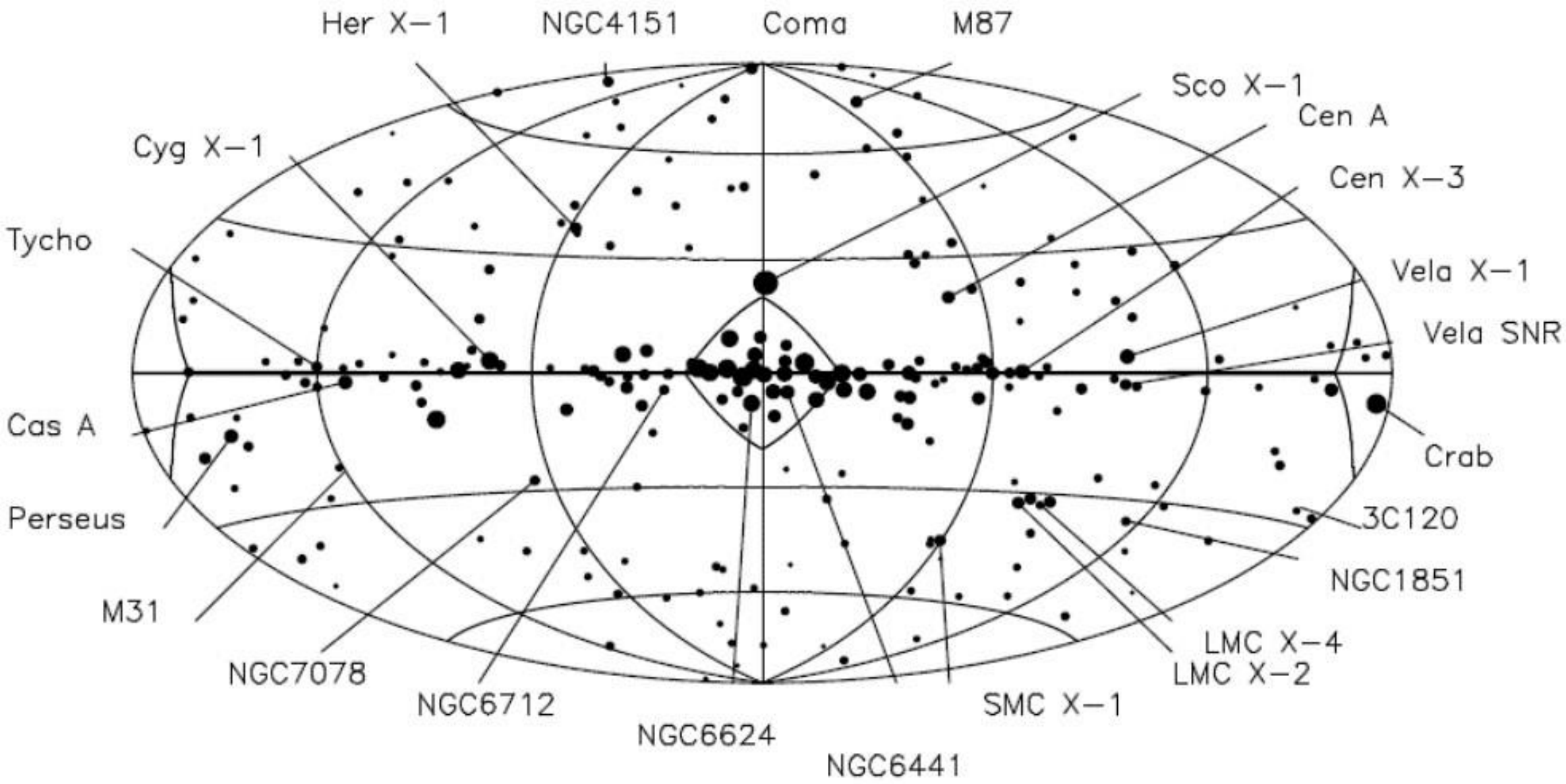
LEVEN KORTER DAN 6 MILJOEN JAAR



1 MILJOEN AARD-MASSA'S ZWART GAT

Röntgendubbelsterren (Nobelprijs 2002, Giacconi), dubbele neutronensterren (Nobelprijs 1993 Taylor en Hulse) en dubbele zwarte gaten (Nobelprijs 2017, Weiss, Thorne en Barish)

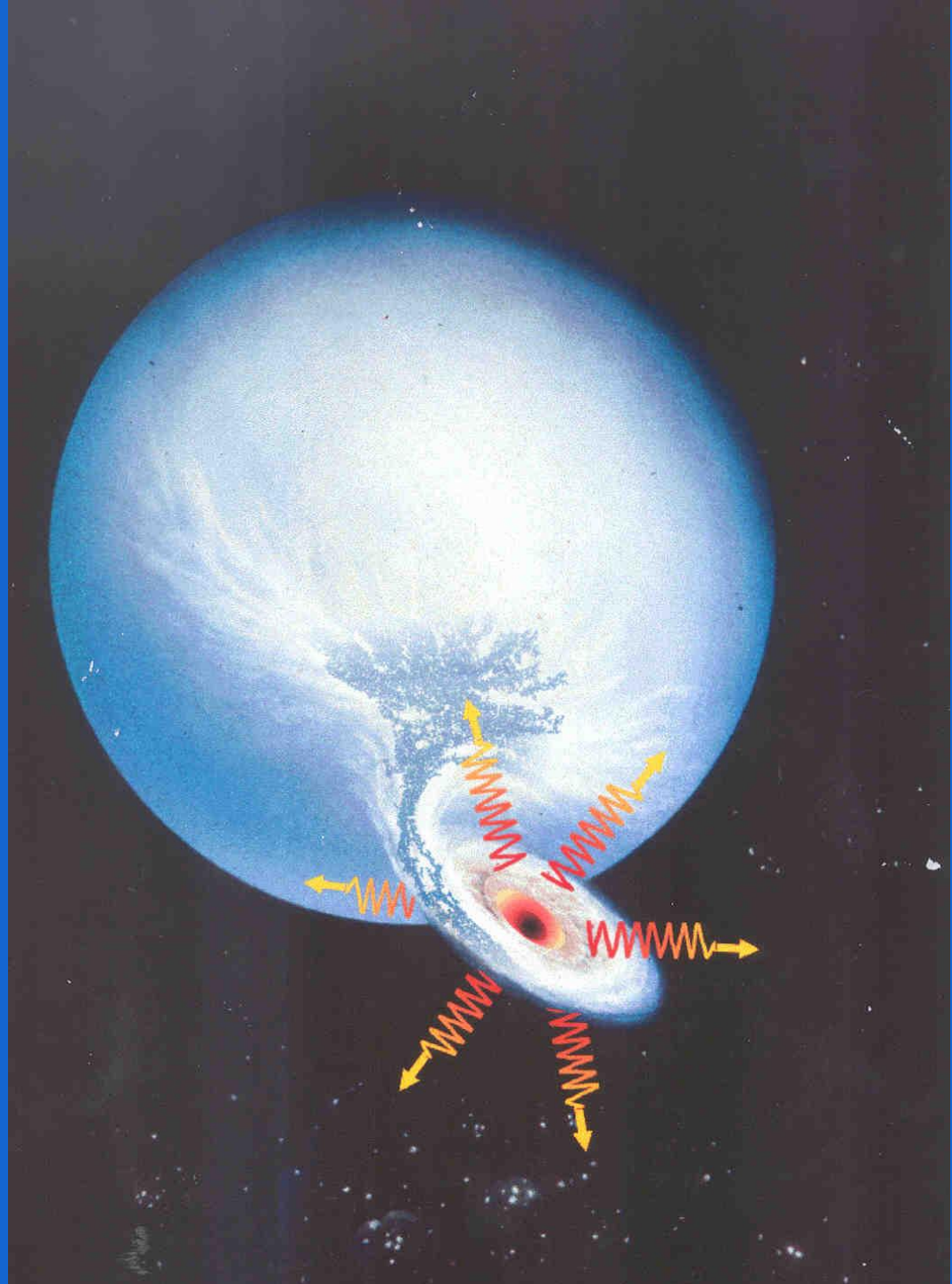
Röntgenhemel Ariel V satelliet (1975, in Melkwegcoordinaten)



Zware röntgen-dubbelsterren (ontdekt in 1972)

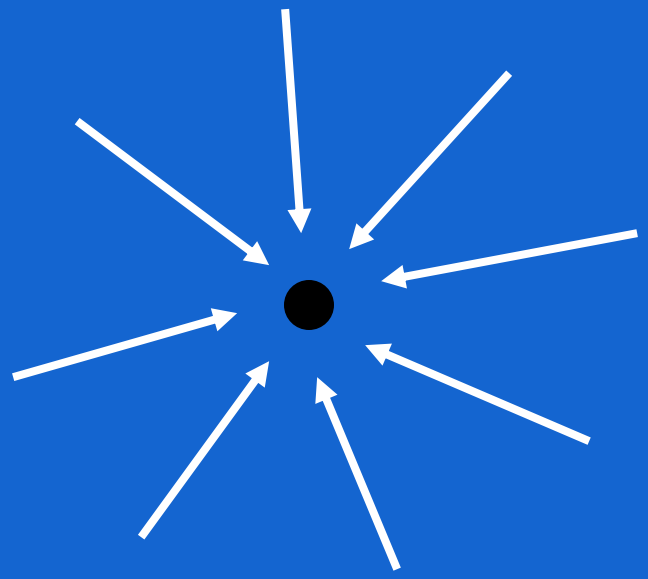
Blauwe superreus van 14 tot 40 zonsmassa's met een massa-invangende neutronenster of zwart gat als begeleider.

Baan-omlooptijd tussen 2 en 165 dagen.
Voorbeelden: Cen X-3 en Cyg X-1.



Opwekking van rontgenstraling door gas dat op neutronenster valt, met snelheid 150 000 km/sec

Invalsnelheid
150 000 km/sec

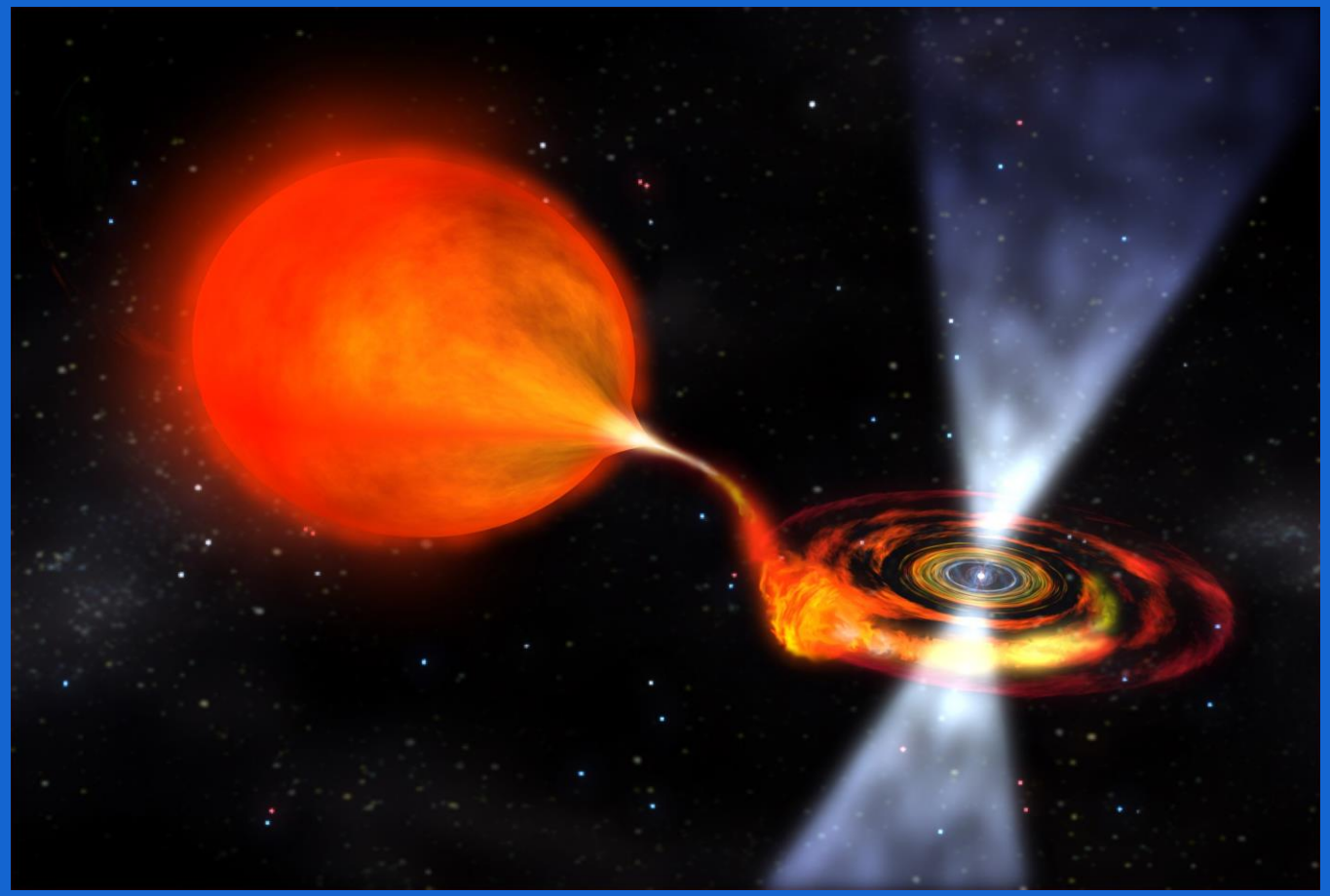


Energie-vrijmaking: $0.15mc^2$ (20 maal meer dan waterstof-fusie)

Bij invallen naar Zwart gat kan $0.40mc^2$ vrijkomen als rontgen-straling!

“Lichte” Röntgendubbelsterren (massa van begeleider ongeveer die van Zon of lichter); omlooptijd meestal minder dan een dag.
(~ Helft van alle röntgendubbelsterren)

Voorbeeld:
Scorpius X-1

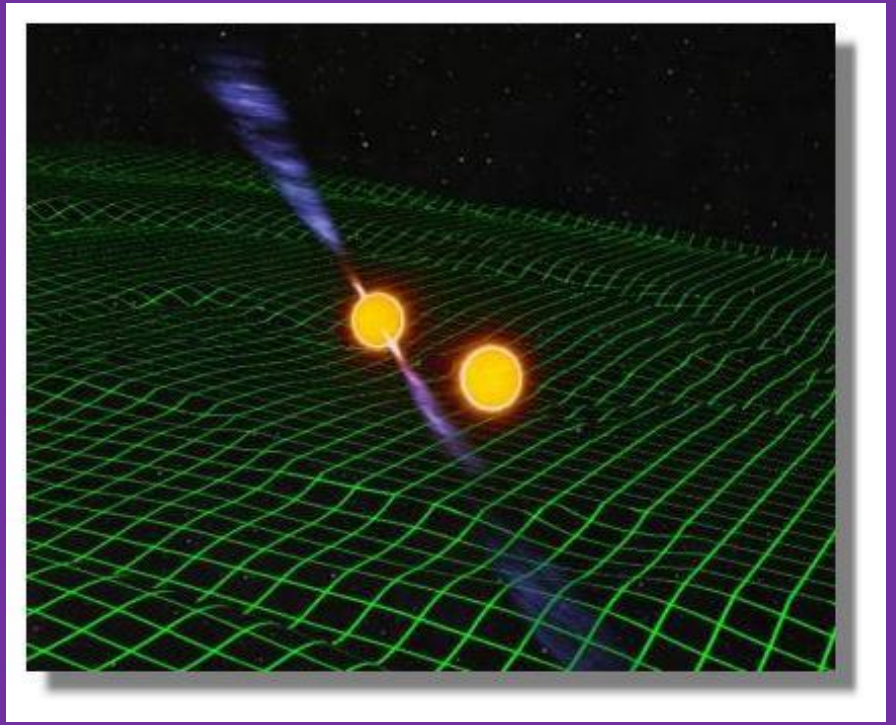


1974: Joseph Taylor en Russel Hulse ontdekken de pulsar 1913+16 (Nobelprijs natuurkunde 1993).

Beschrijft in 7.45 uur zeer elliptische baan rond onzichtbare begeleider: Precies wat je verwacht als tweede ster in een zware röntgendubbelster na inspiraleren explodeert en neutronenster achterlaat: dubbele neutronenster (of een neutronenster plus een zwart gat).

Thans 20 dubbele neutronensterren bekend.

Kortste omloopstijd is 2.4 uur: Pulsar 0737-3039: Baan krimpt 7 mm per dag (gemeten) door energieverlies door zwaartekrachts-golven.

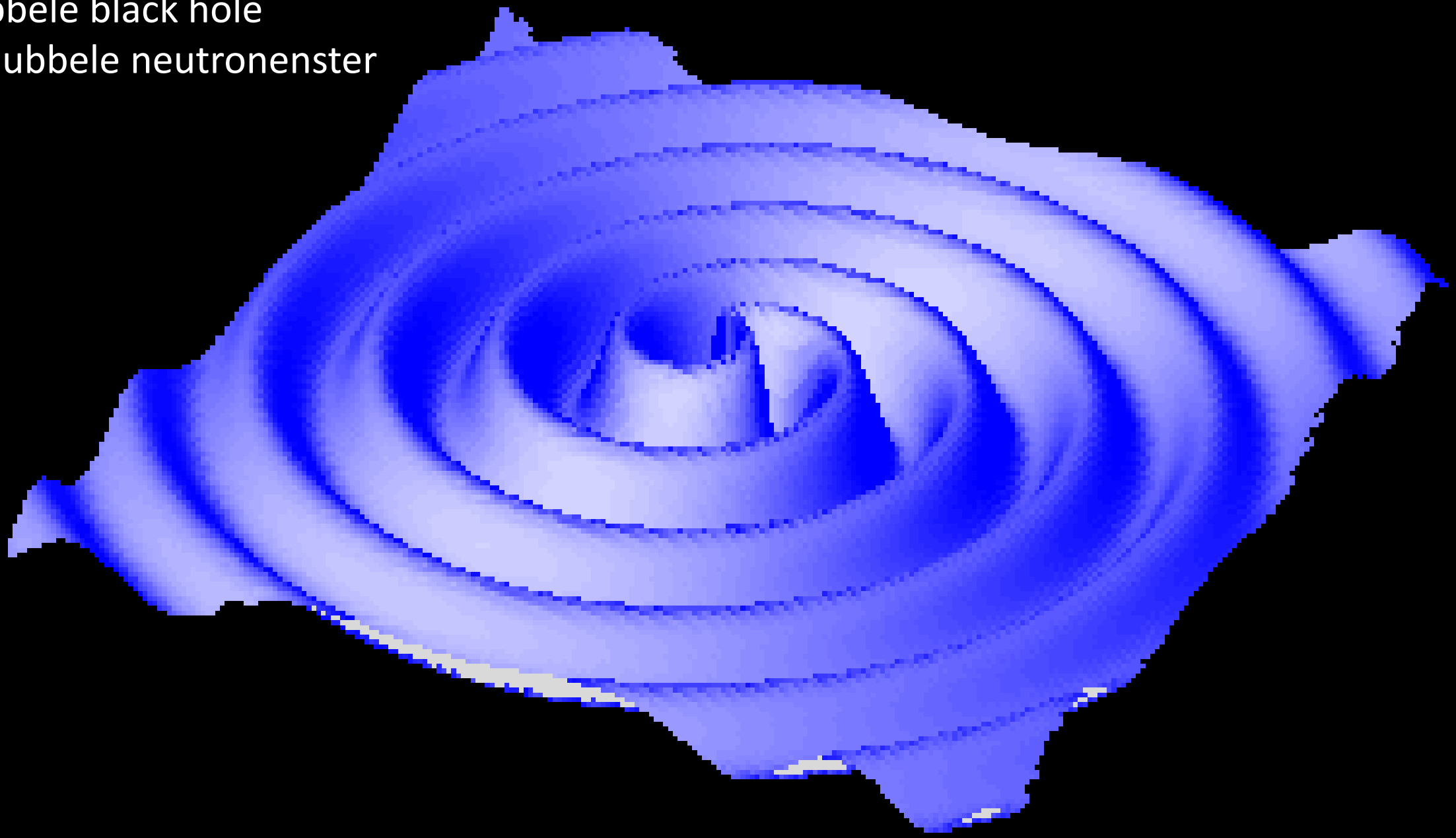


Dubbele neutronenster PSR J 0737: omlooptijd 2.4 uur; baan-excentriciteit 0.08
Systeem verliest energie door uitzenden van Gravitatiegolven en over 86 miljoen jaar zullen de sterren met elkaar versmelten. Draaien dan 1000 x per seconde om elkaar.

WE KENNEN NU 20 VAN ZULKE DUBBELSTERREN IN ONS MELKWEGSTELSEL



Gravitatiegolven uitgezonden door
Dubbele black hole
of dubbele neutronenster





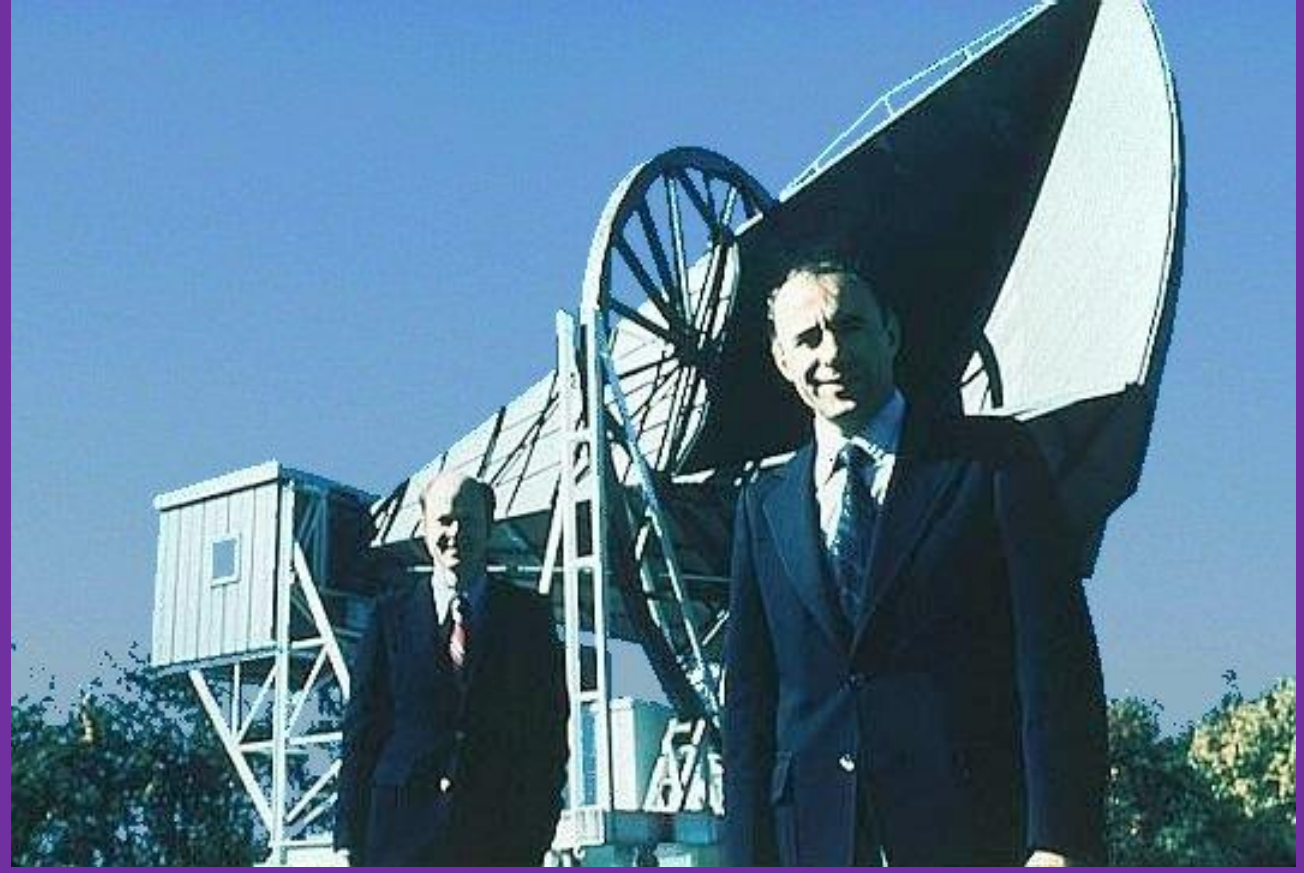
LIGO = Laser Interferometer Gravitational wave Observatory(2 armen van 4 km, in staten Washington en Lousiana; 400 M$ investering).

Hiermee werd in September 2015 de puls gravitatiegolven van twee versmeltende zwarte gaten van ongeveer 30 zonsmassa’s gemeten. Daarna nog honderden van deze versmeltende dubbele zwarte gaten waargenomen.
Op 17 augustus 2017: versmelten van twee neutronensterren.

Nobelprijs natuurkunde 2017 voor Weiss, Thorne en Barish.

GW 170817: Ontstaan van korte Gamma Flits en “Red Nova”: versmelten van 2 neutronensterren door verlies Gravitatiestraling

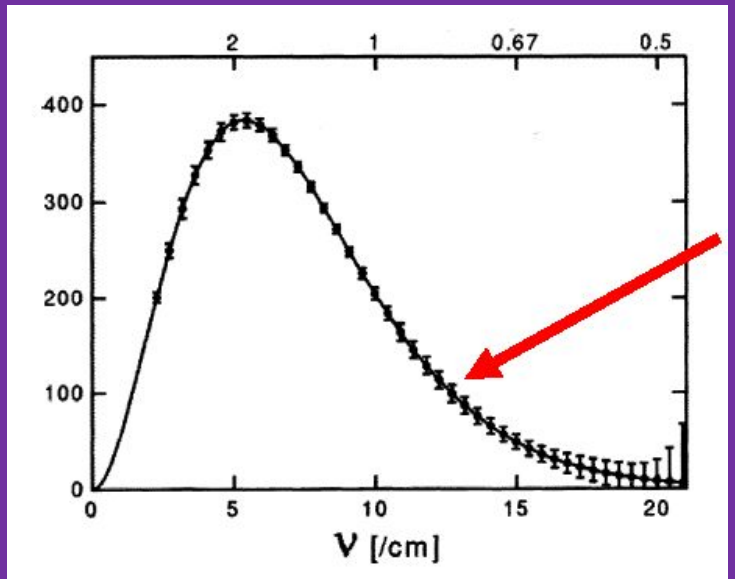
Ontdekking van de kosmische microgolf achtergrond straling van de Oerknal (Penzias en Wilson 1964, Nobelprijs 1978), en van de “rimpels” in deze straling (Mather en Smoot, Nobelprijs 2006); structuurvorming in het heelal

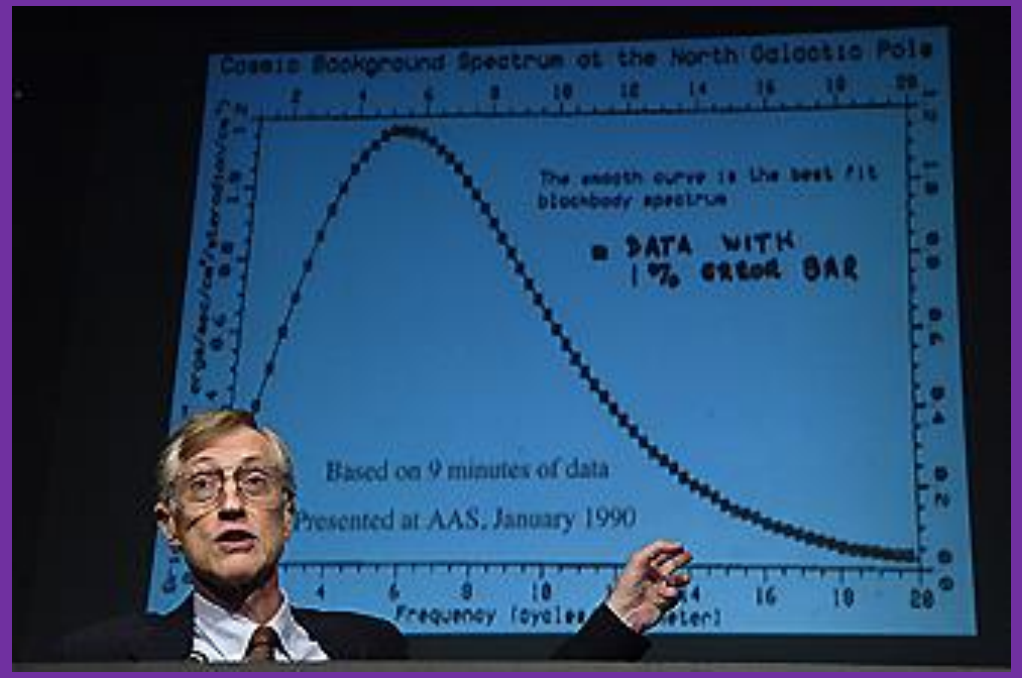


Holmdel Radiotelescoop (New Jersey, USA)

A.Penzias and R.Wilson ontdekten in 1964 een micro-golf ruis van de gehele hemel: past bij een temperatuur van ongeveer 3 Kelvin: dit is de warmtestraling van 380 000 jaar na de Oerknal: het “oudste licht” in heelal (Nobelprijs 1978).

Er zijn 1 miljard fotonen van deze straling per materiedeeltje (proton of neutron) in het heelal.





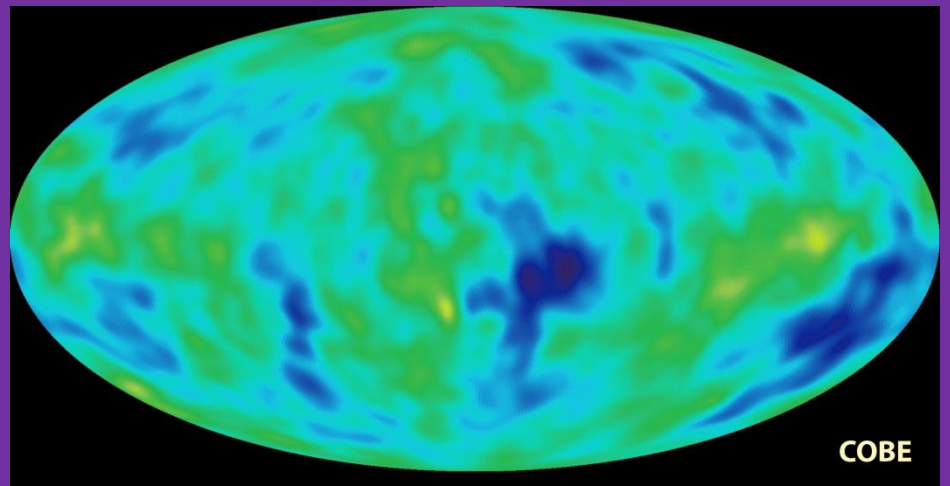
Nobelprijs Natuurkunde 2006 voor COsmic Background Explorer (COBE) team leader John.C.Mather (NASA)

en

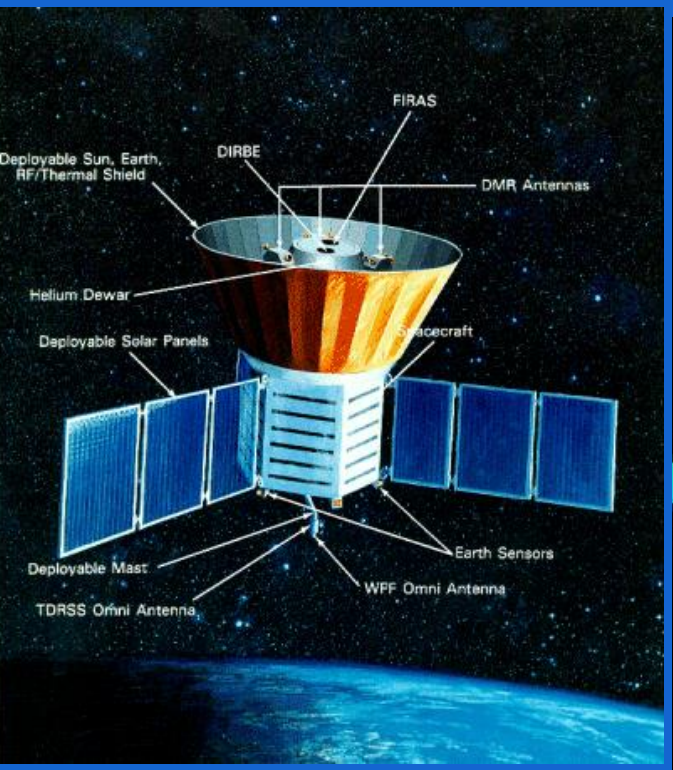
COBE widefield microwave telescope leader George Smoot (UC Berkeley):

"It is like seeing the Face of God"

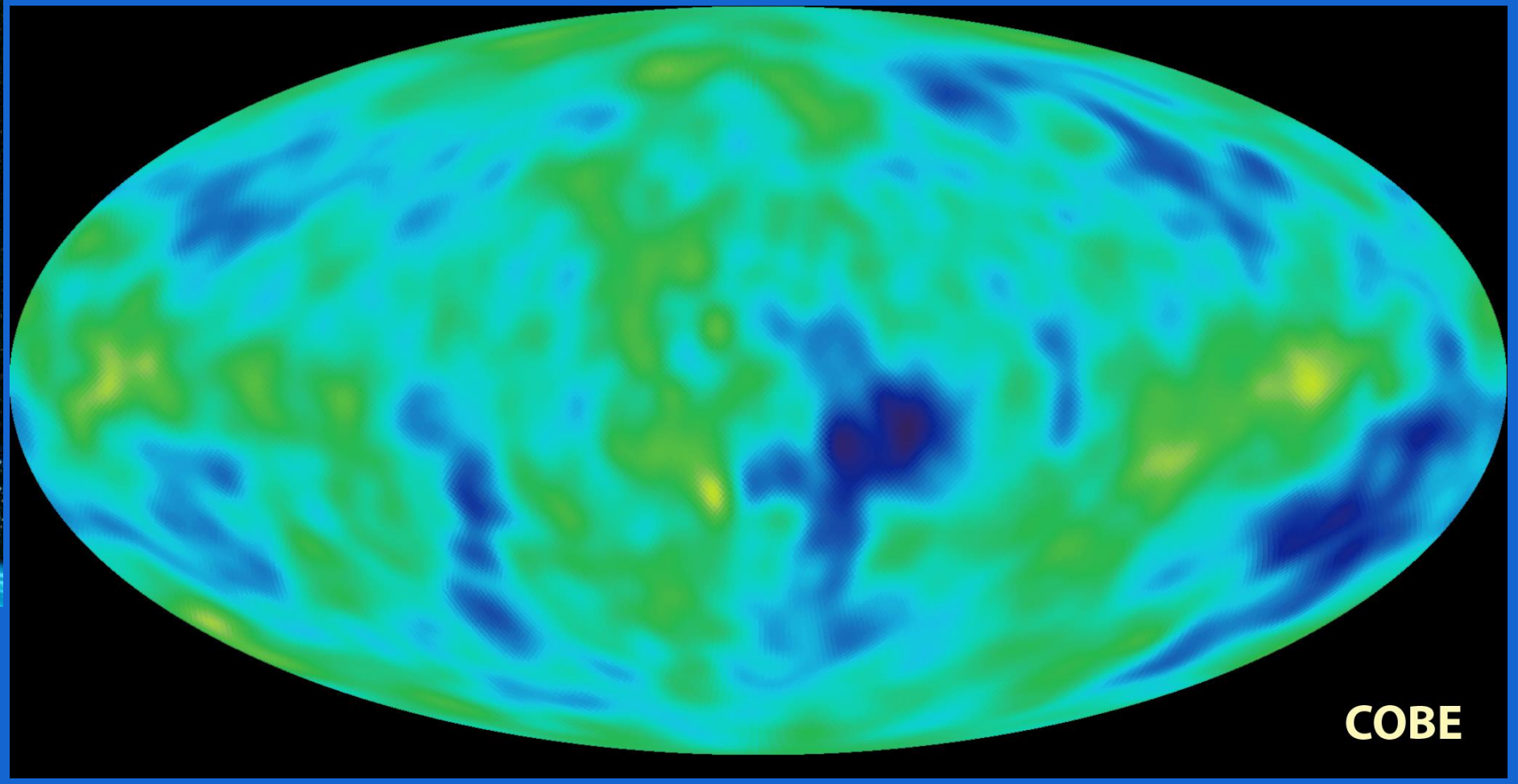




Cosmic Microwave Background (COBE)



Cosmic Background Explorer (COBE,1990)

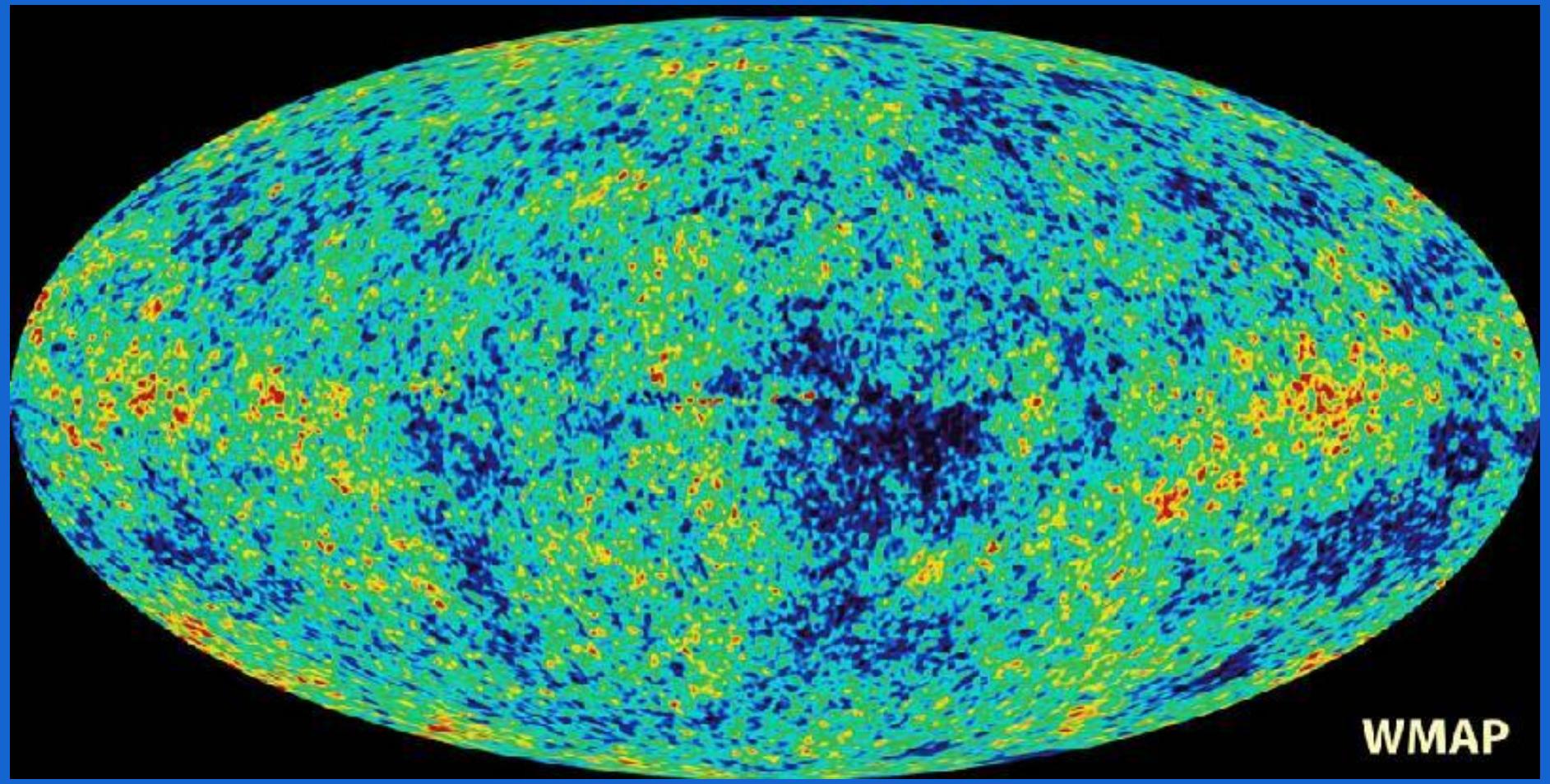


Map of the Universe at Recombination Epoch (1990) :

- 379,000 years after Big Bang
- Large-scale horizon perturbations in gravitational potential (density fluctuations)
- $\Delta T/T < 10^{-5}$ = Relatieve T-veschillen over de hemel

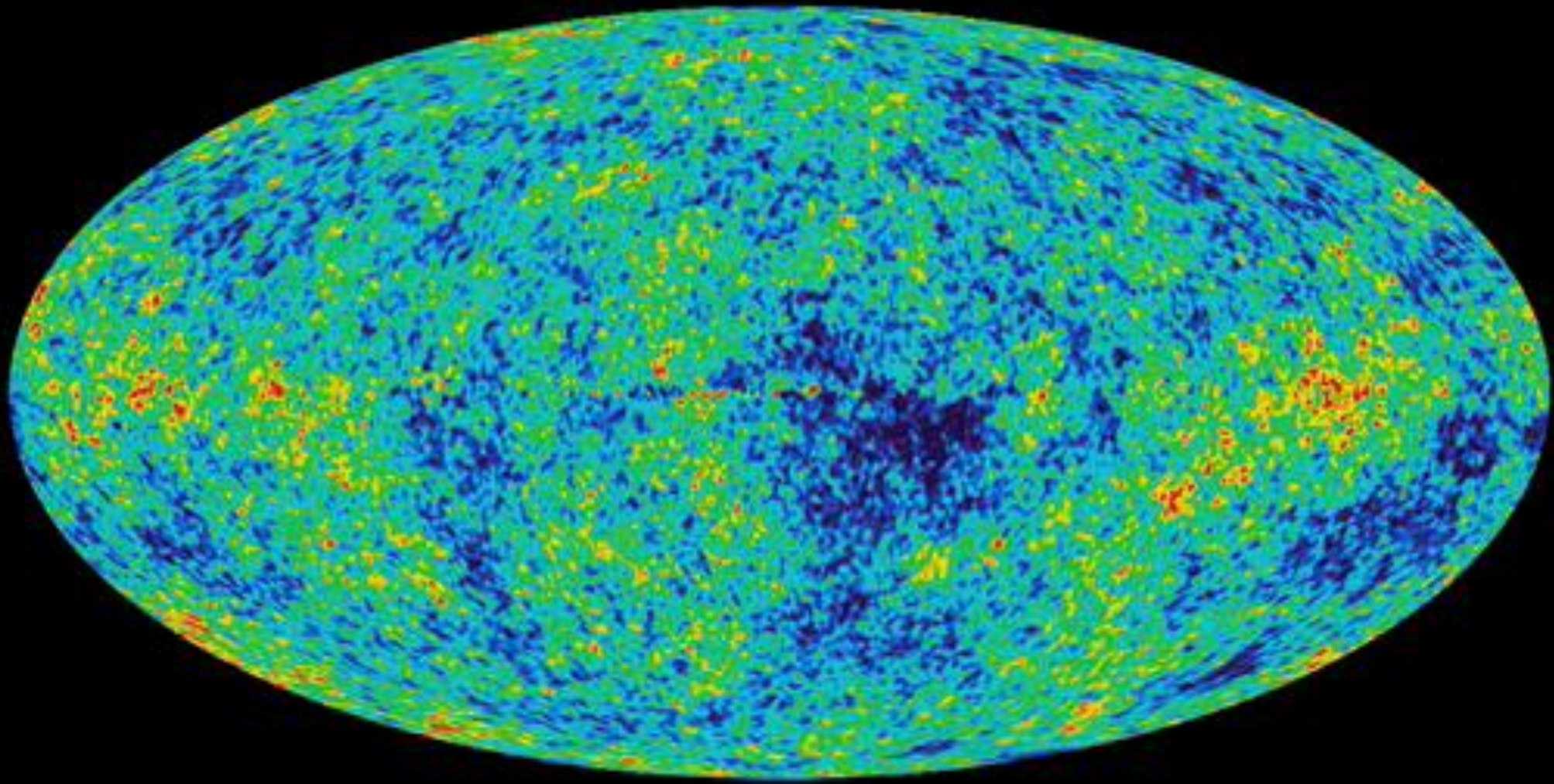
Cosmic Microwave Background

WMAP, 2003

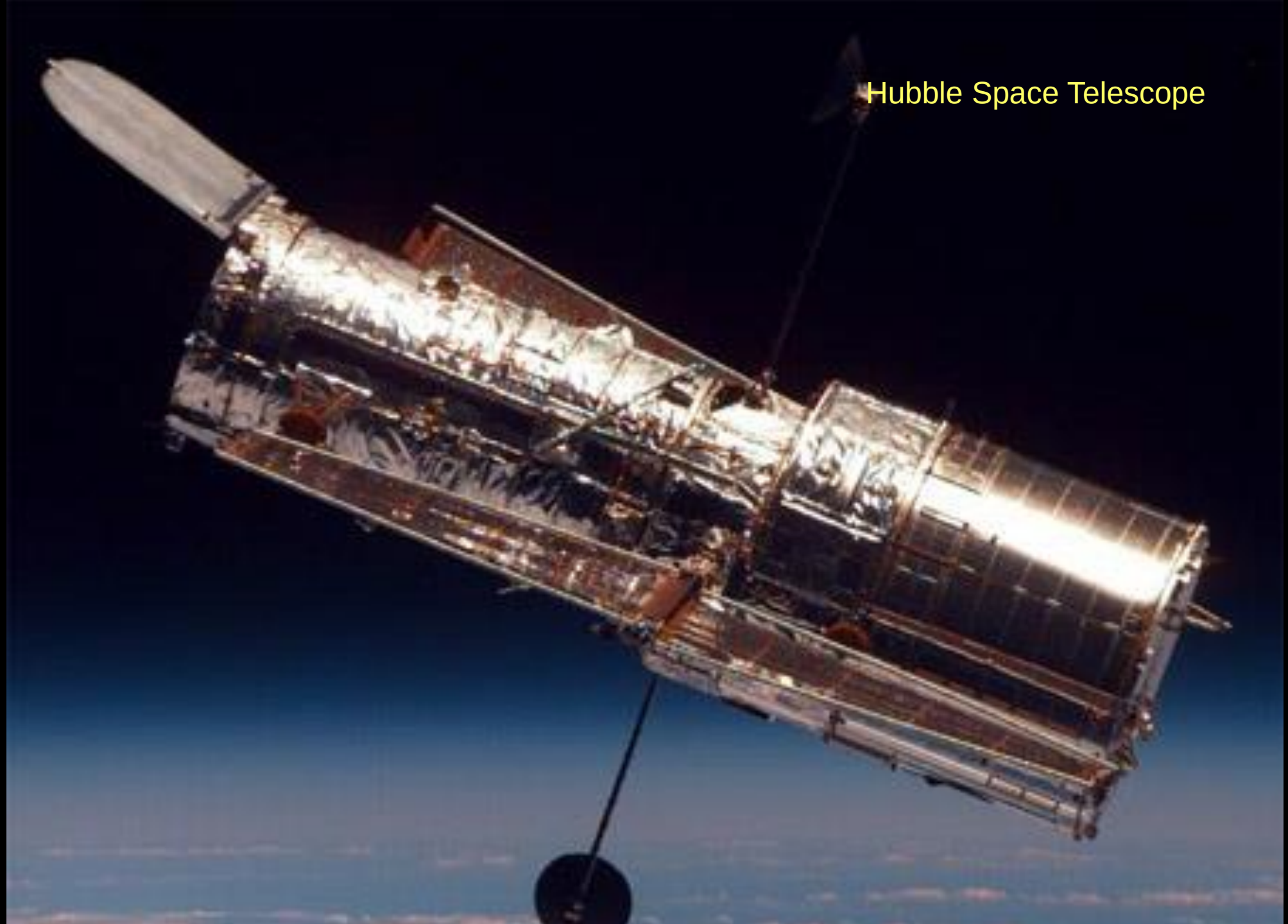


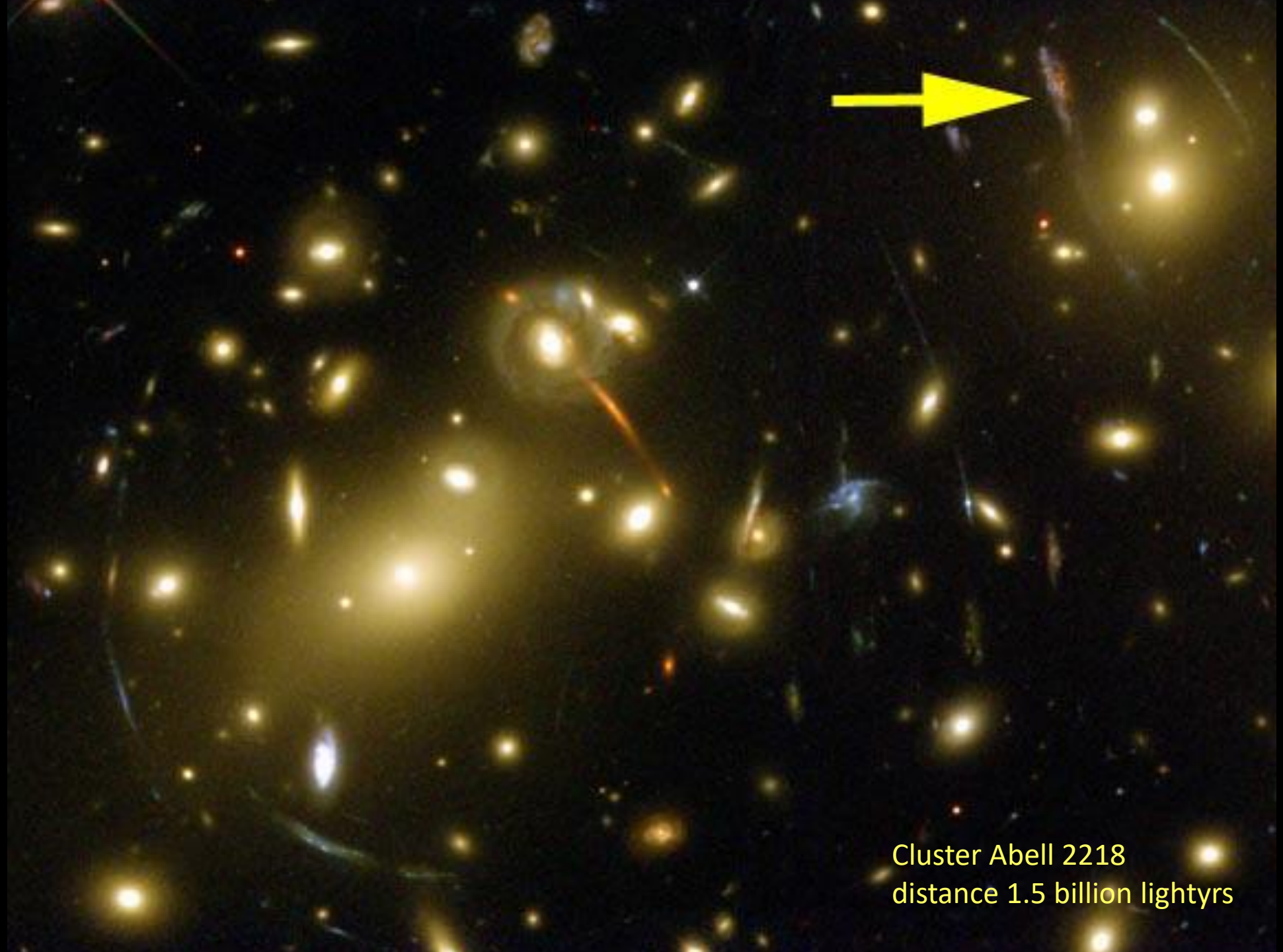
Map of the Universe at Recombination Epoch (2003-2005):

- 379,000 years after Big Bang
- Subhorizon perturbations: primordial sound waves (gas-density fluctuations)
- **Relatieve T-verschillen over de hemel:** $\Delta T/T < 10^{-5}$

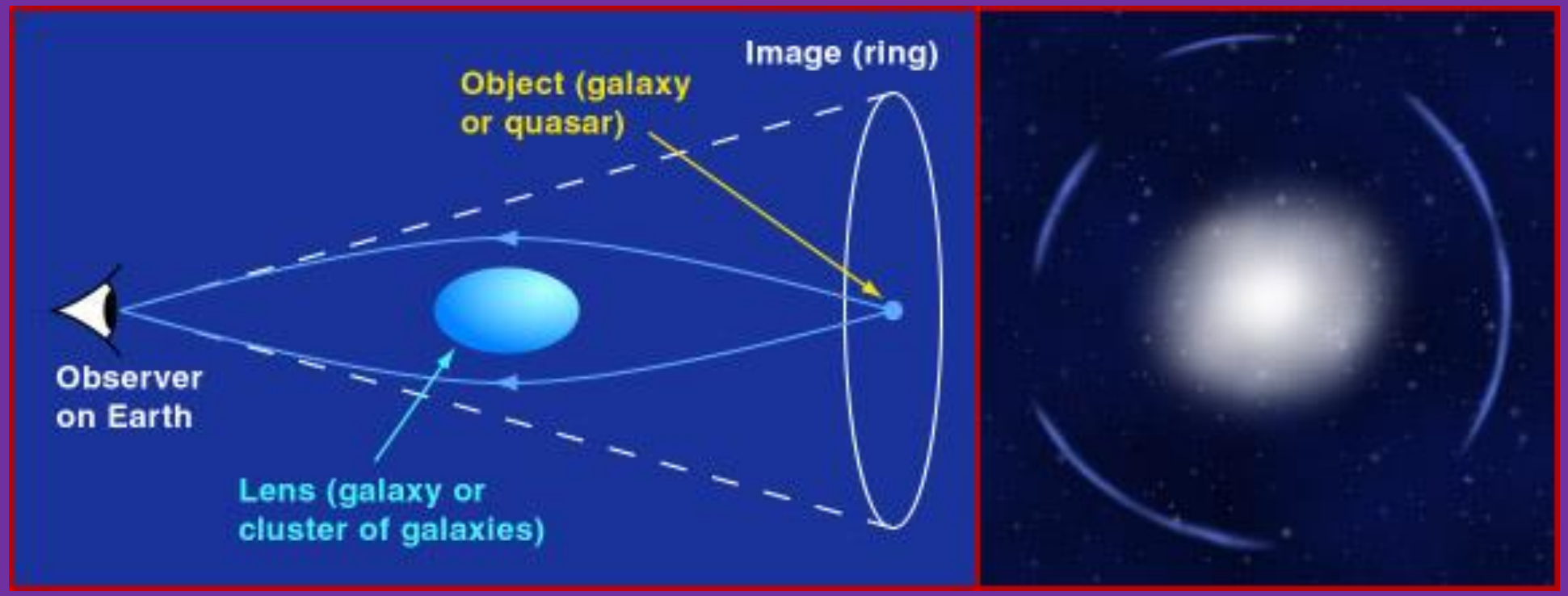


Donkere Materie en Donkere Energie


Hubble Space Telescope


Cluster Abell 2218
distance 1.5 billion lightyrs

Het tot stand komen van een “Einstein Ring”



In clusters van sterrenstelsels: 5 tot 10 maal meer materie met zwaartekracht dan gewone die uit atomen bestaat: “Donkere Materie”.

Ontdekking van de Donkere Energie

Distance Modulus corresponds to the “light distance”, assuming brightness to decease proportional to 1/(distance)²



Saul Perlemutter, born 1959

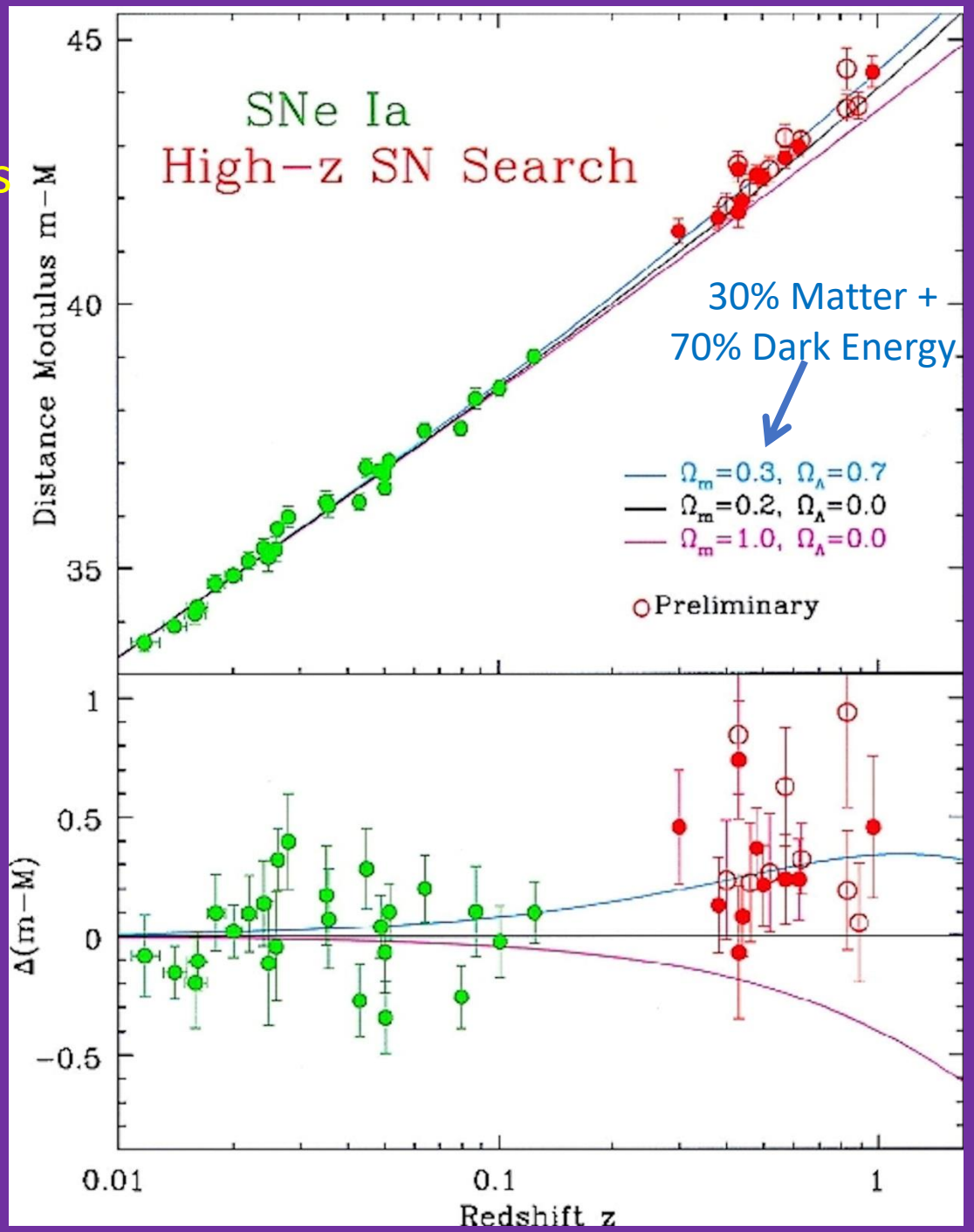


Adam Riess, born 1969

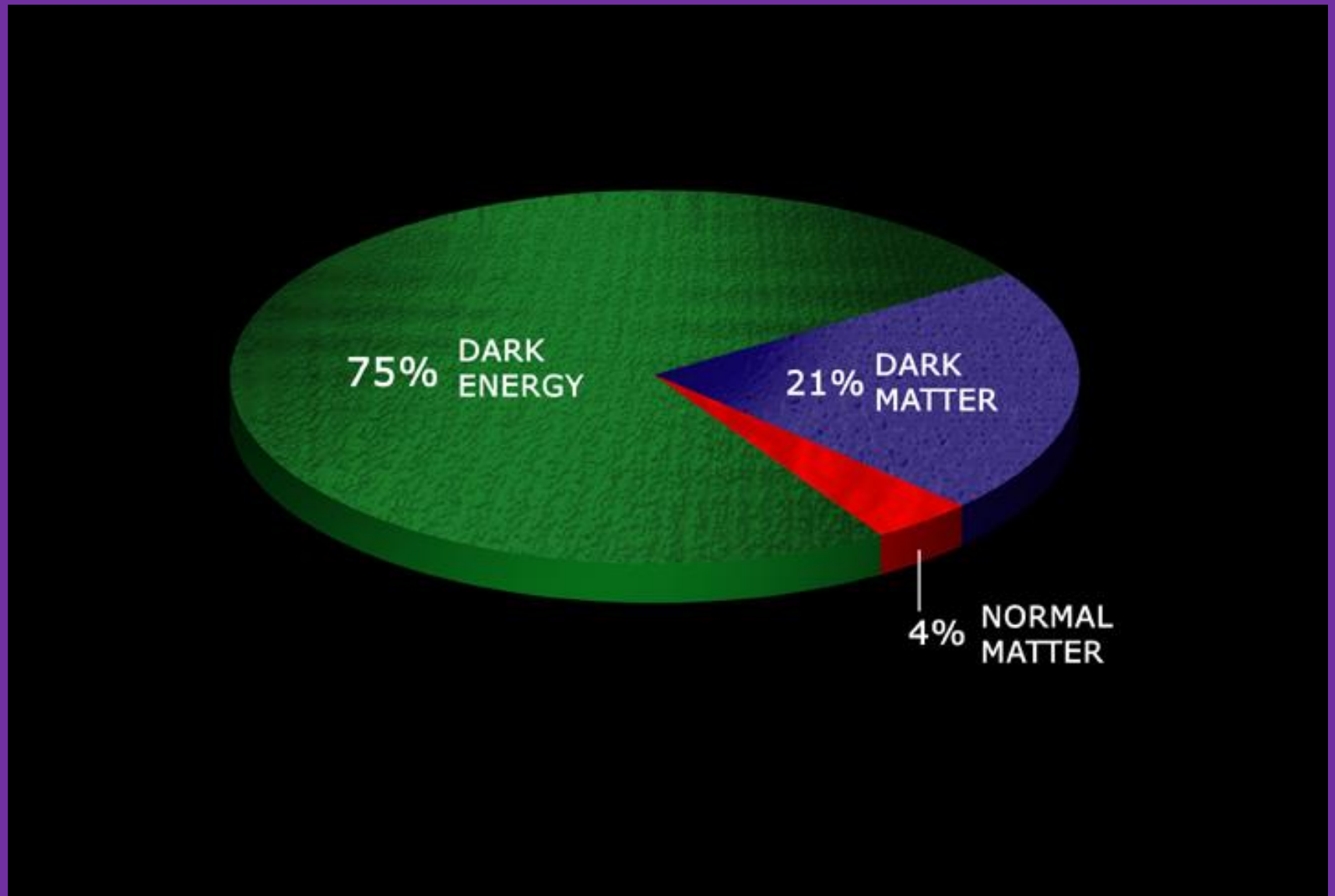


Brian Schmidt, born 1967

Nobel Prize Physics 2011



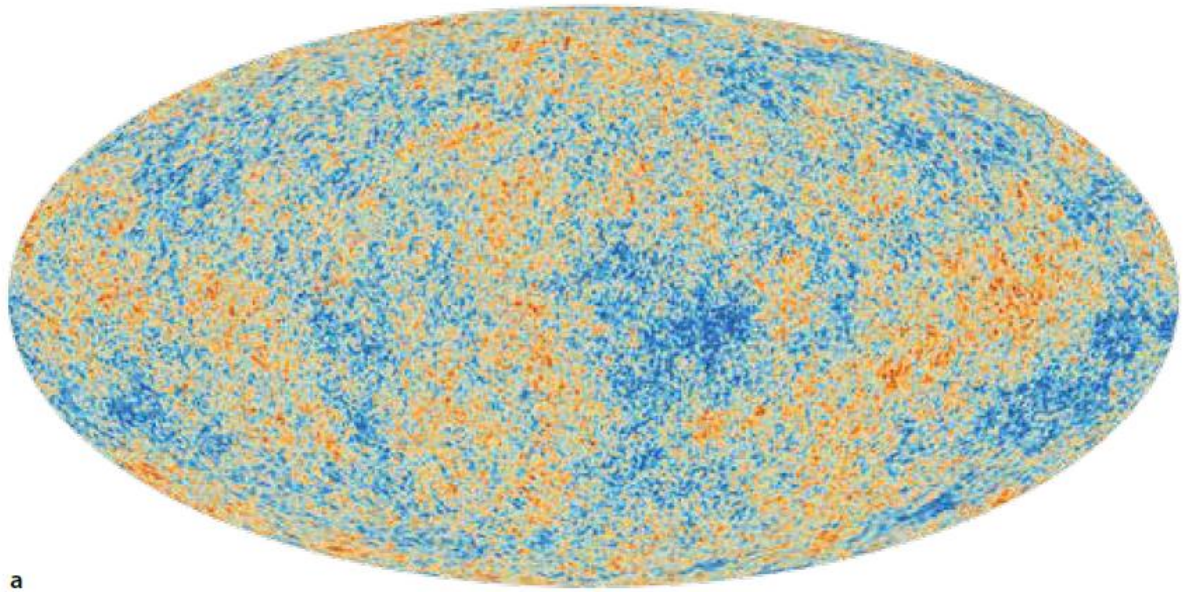
Zichtbare en onzichtbare ingredienten van het heelal



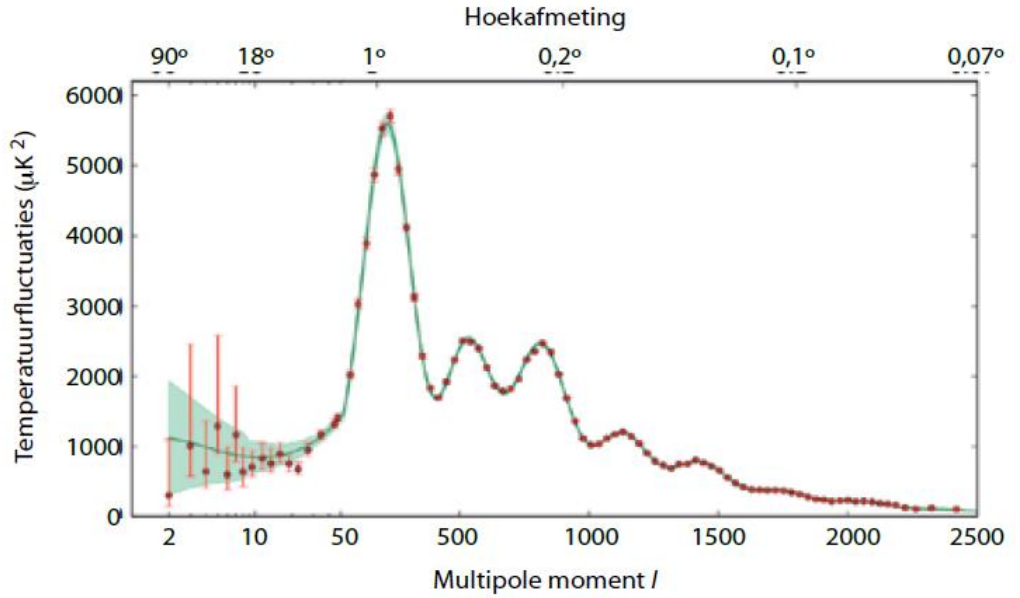
Planck-satelliet(2009-2013, ESA) kaart van fluctuaties van de kosmische Microgolf achtergrond-straling over de hemel: (2.5 x scherper dan WMAP)

Spectrum van de afmetingen van de fluctuaties past bij
70 % DE en 26% DM

Gewone materie: 4%



a

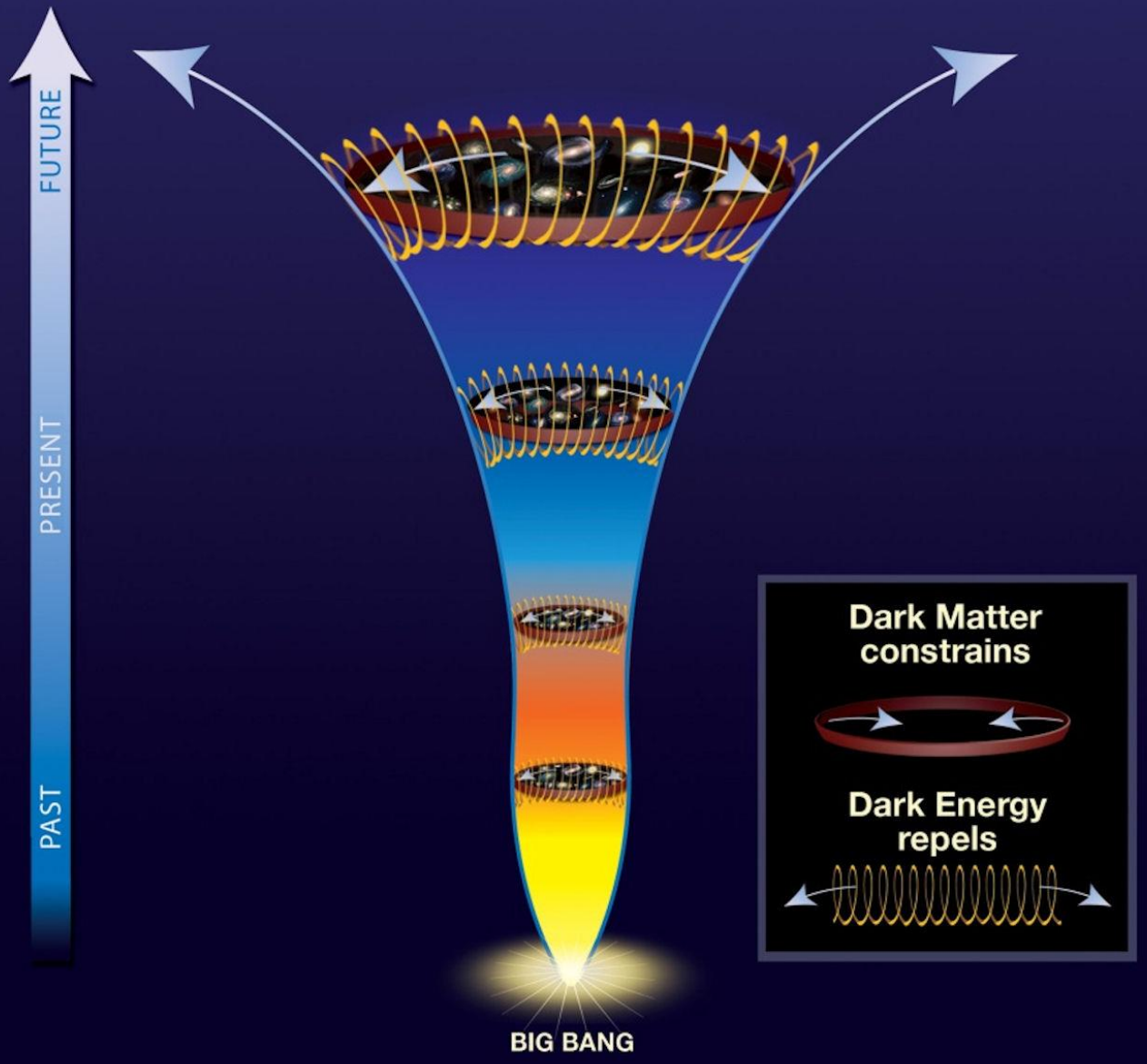


b

Totaal: Ω= 1,00. Totale Energie NUL: “The best free lunch”

Cosmic tug of war

The force of dark energy surpasses that of dark matter as time progresses.

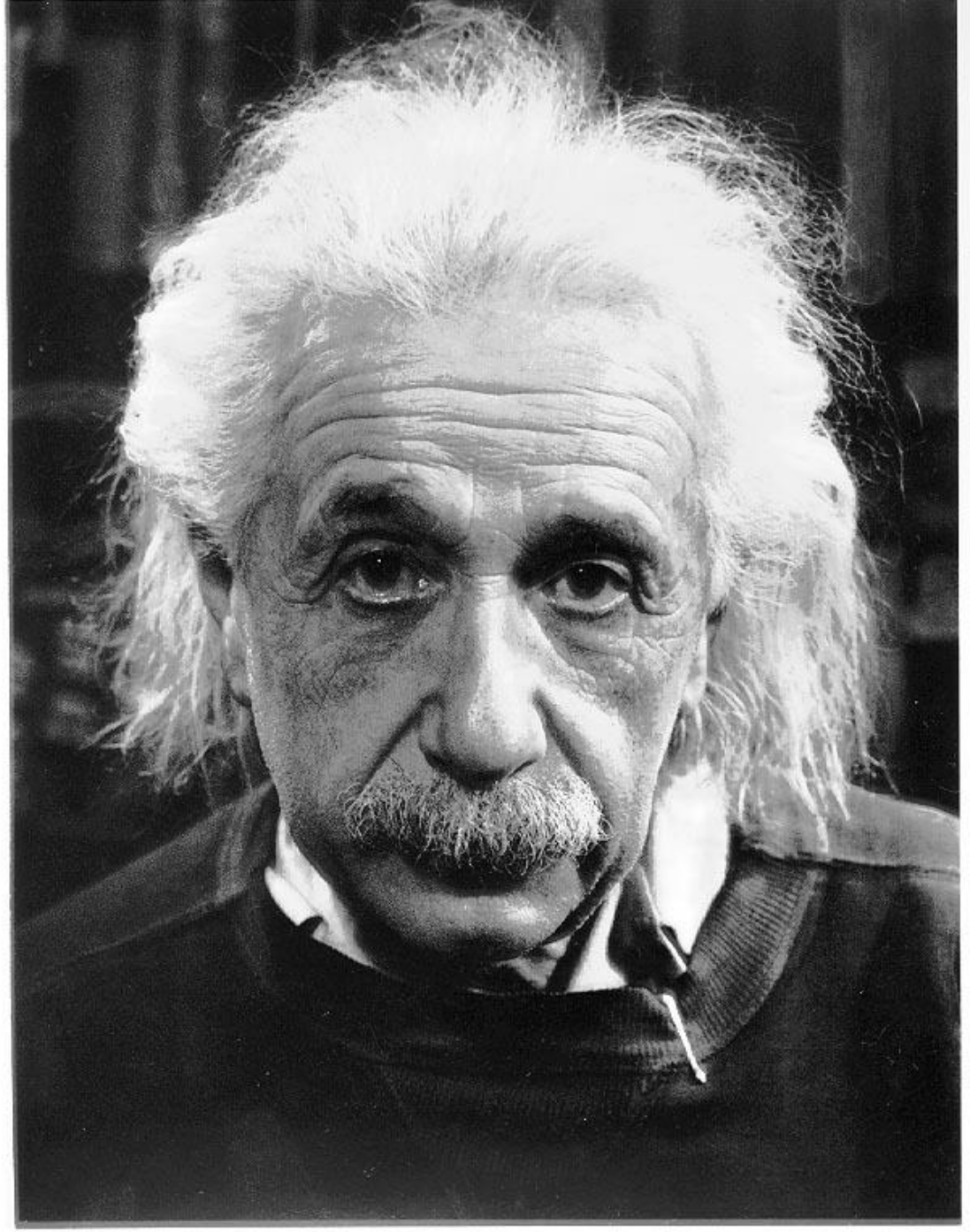


Einstein's "grootste blunder"(1917: voorstel van kosmische afstoting Λ = Lmabda), was een Gouden greep:

Het deel van Omega te wijten aan Lambda is:

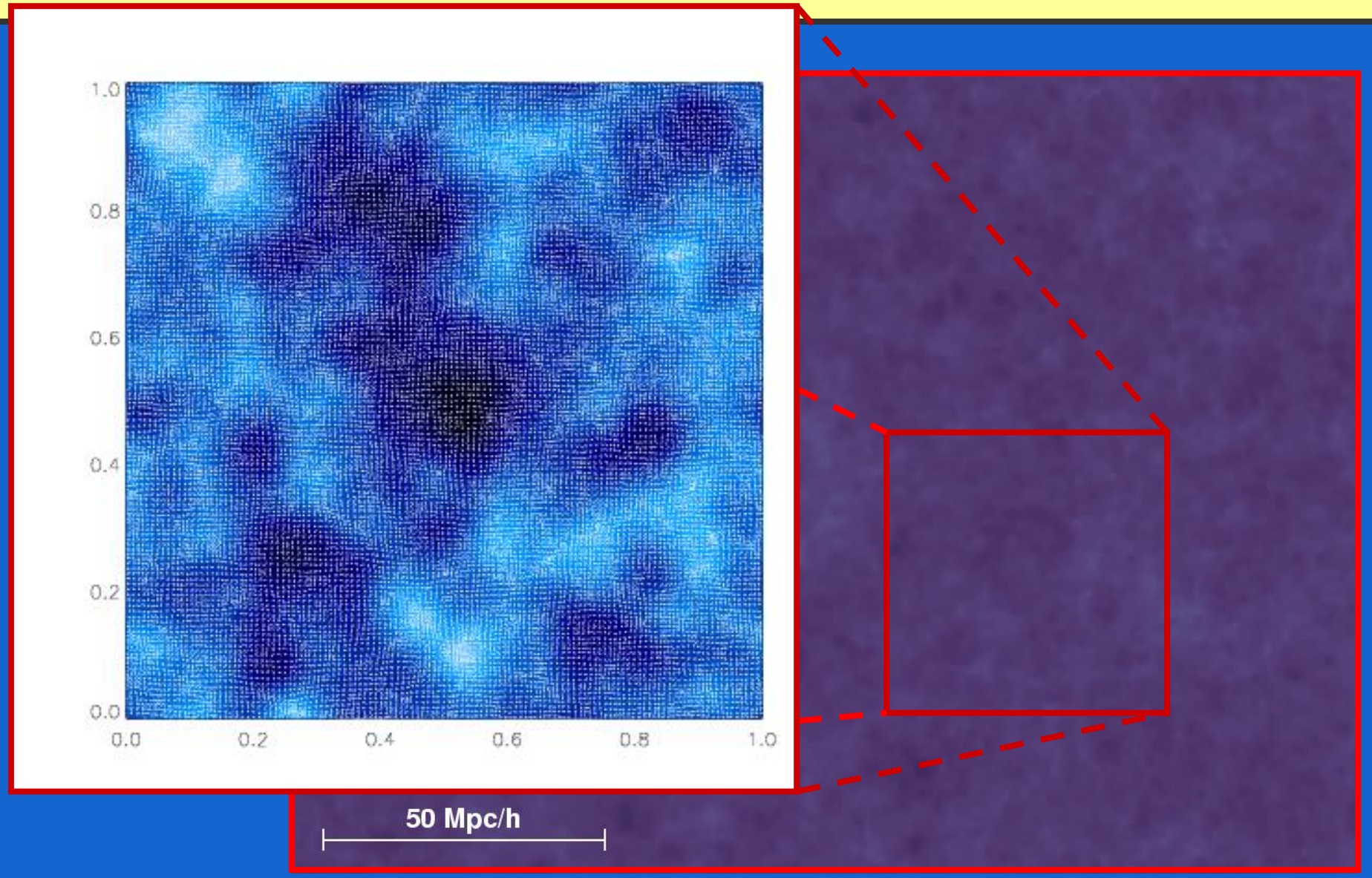
ongeveer 0.7

De oorzaak van Lambda is nog **een** compleet raadsel ("vacuum energie")




Formation First Stars:
326 Million lightyrs
Computer simulatie van klontering van Dark Matter
Simulation: V. Bromm et al.

Void Formation (computer simulatie, incl. Dark Matt. + Dark En.)



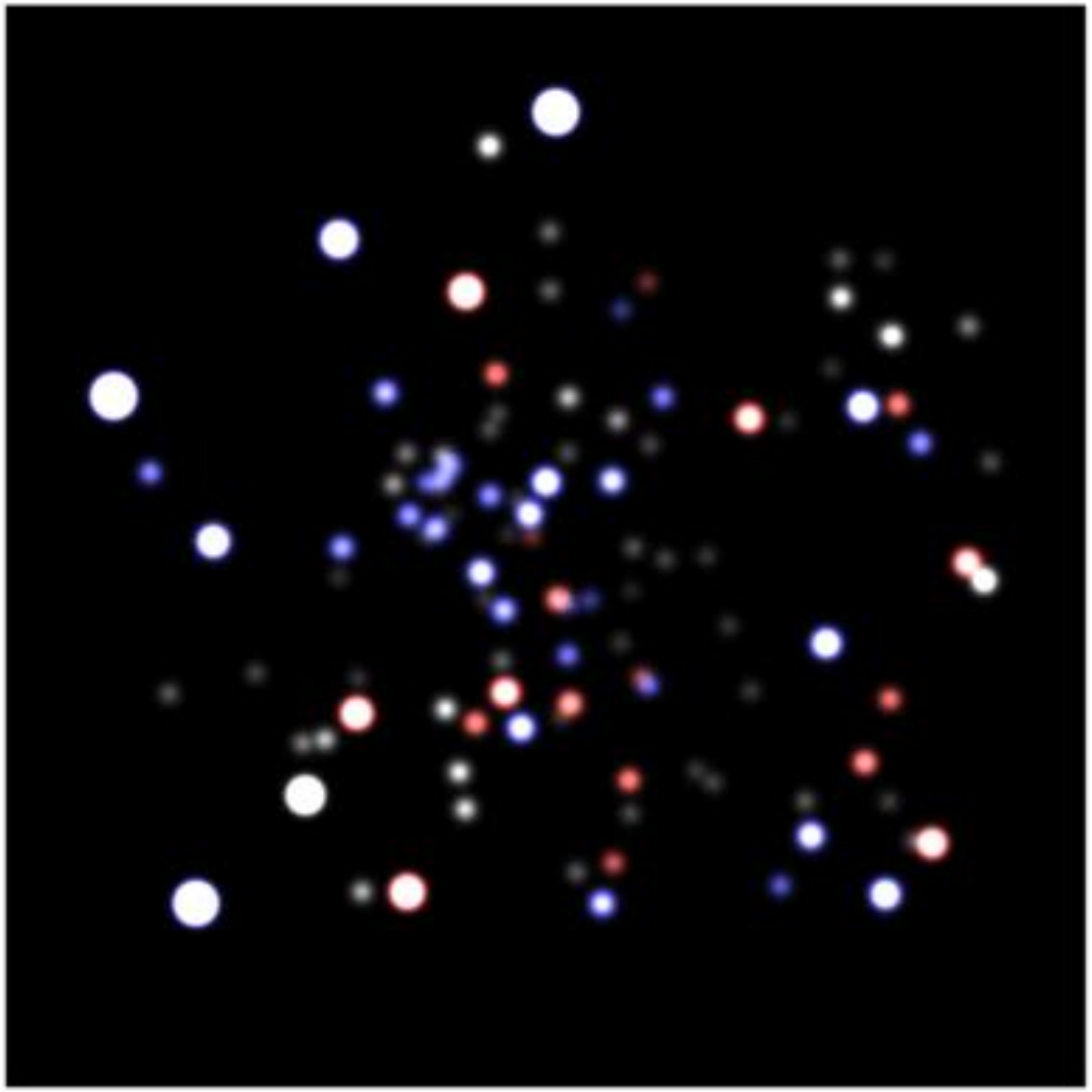
nimation of the Stellar Orbits around the Galactic Center (2019)

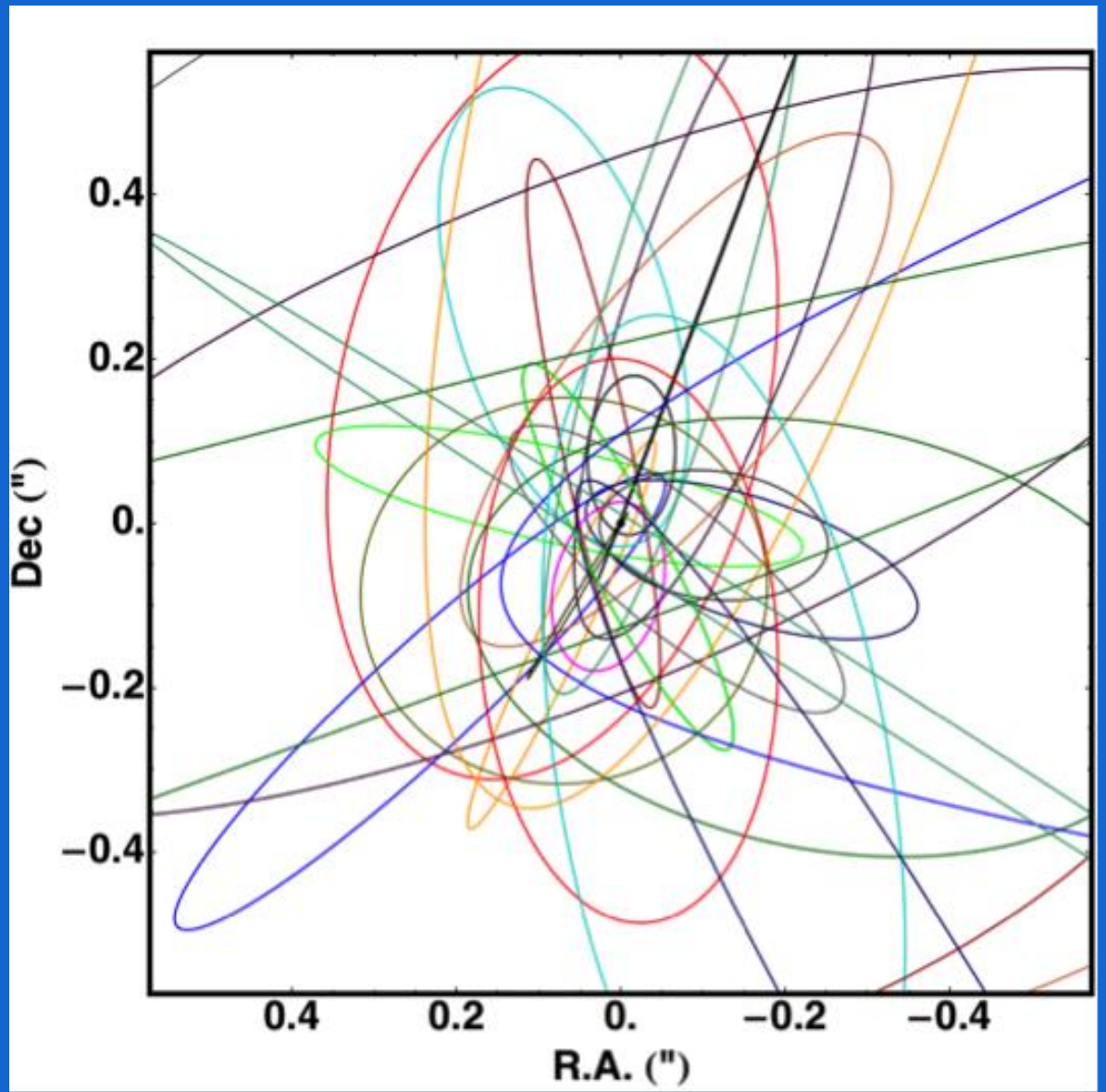
Meting van massa van het black hole (4 miljoen zonsmassa’s) in Melkwegcentrum, uit metingen van banen van sterren rond dit centrum: Andrea Ghez en Reinhard Genzel, Nobelprijs 2020



Very Large Telescope van ESO in Chili

Bewegingen van de sterren om het Melkwegcentrum in elliptische banen, zoals gemeten door de groep van Genzel, met de ESO VLT Interferometer in Infrarood, sinds 1992. Rechts: de banen van een dertigtal sterren(MPI Extraterrestrische Physik)

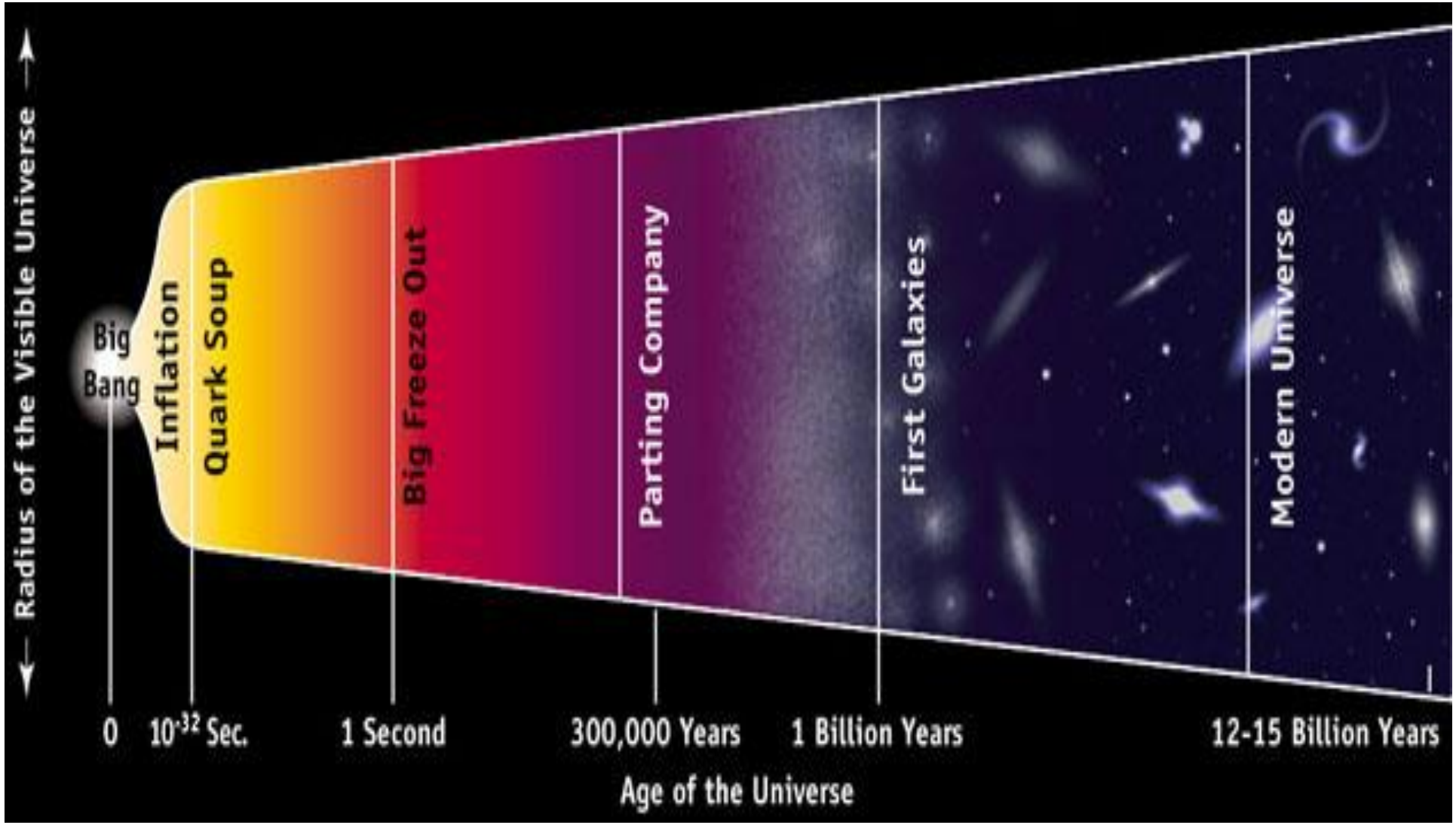




Ontdekking van Inflatie
Guth en Linde

(geen Nobelprijs, die ging naar Peebles, 2019; terecht?)

THE COSMIC TIMELINE

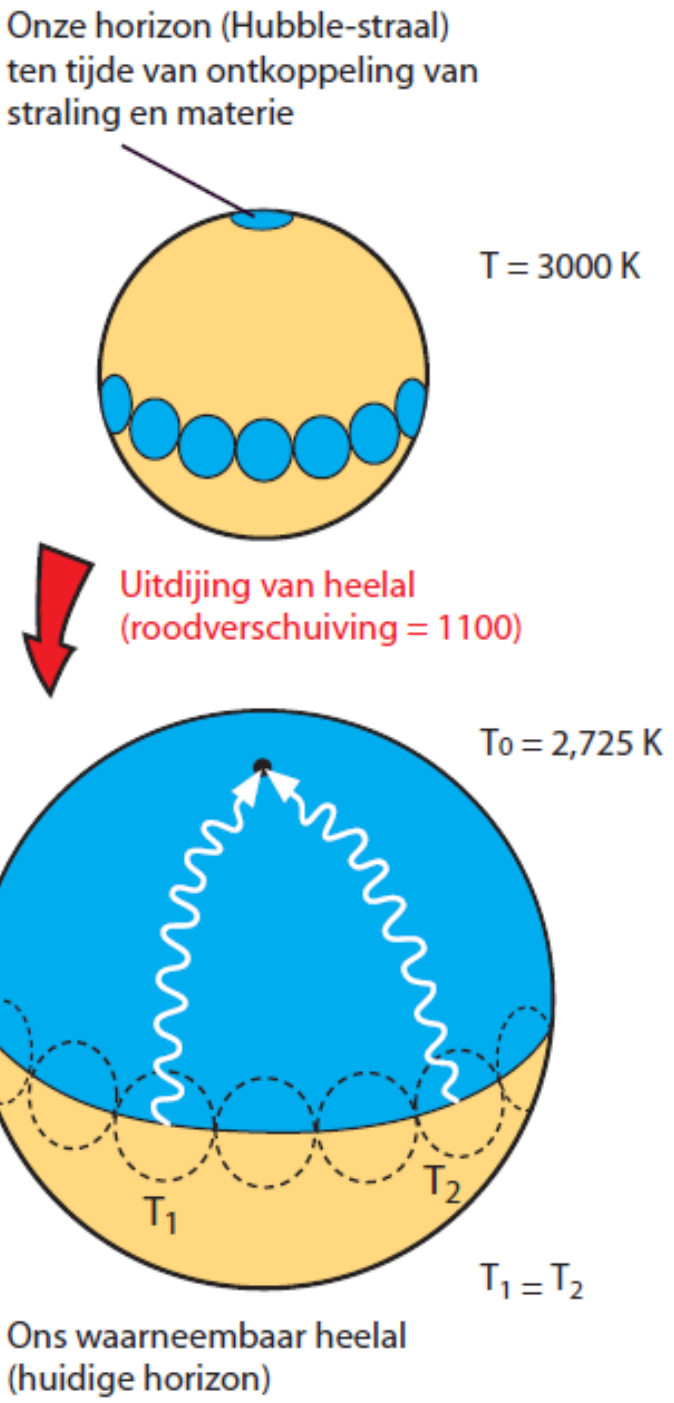


Waarom Inflatie?

1. Het horizon-probleem:

Hoe kan de 3 K achtergrond-straling uit alle richtingen zo exact dezelfde temperatuur hebben terwijl de delen van het heelal in de verschillenderichtingen 380 000 jaar na de Oerknal helemaal niet met elkaarin contact waren?
[Hetzelfde geldt ook voor de natuurwetten, deze zijn overalhetzelfde].

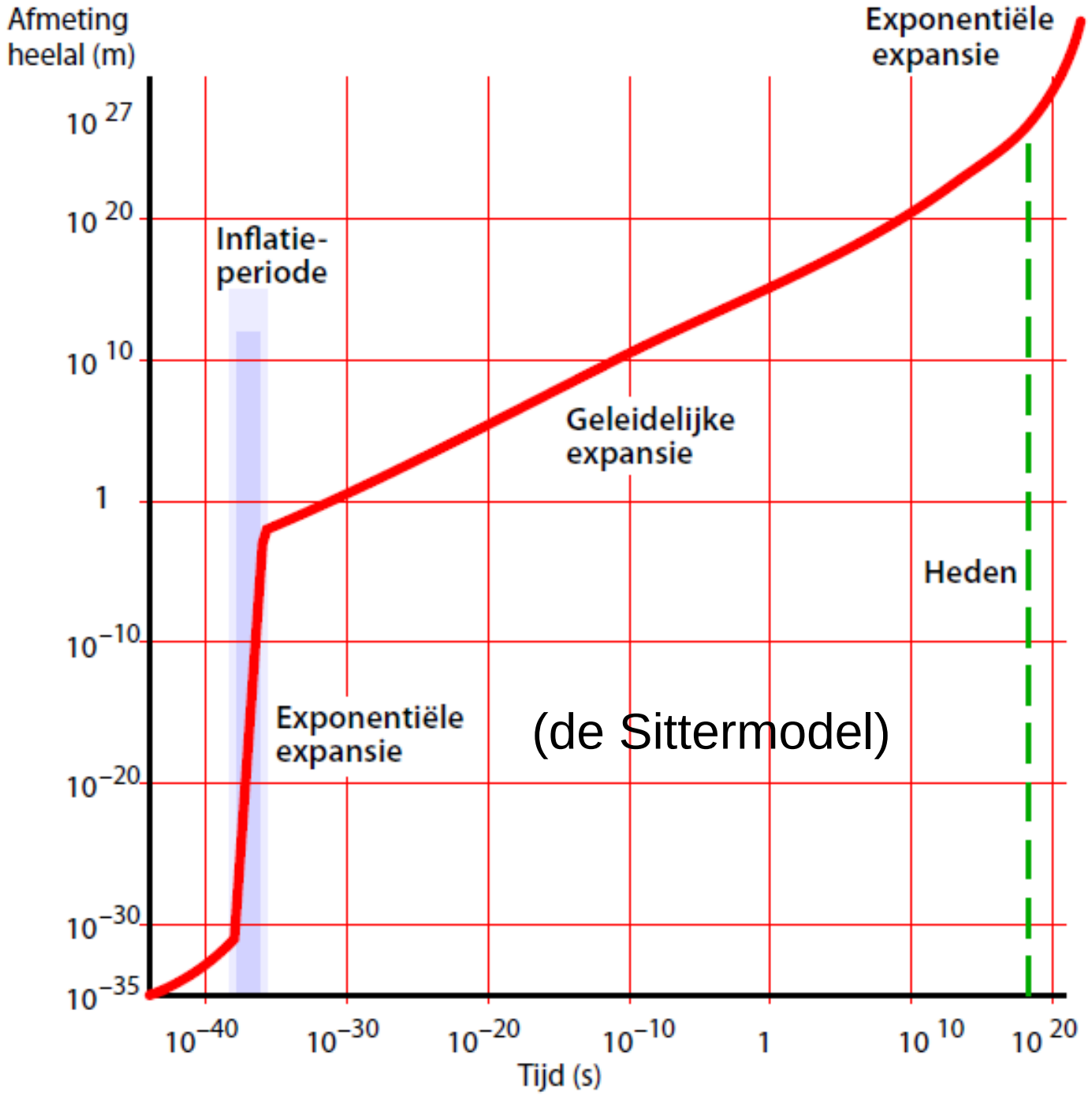
Als er een vroegere fase van enorm snelle uit-zetting geweest is, kan er voorafgaand aan die fase wel contact tussen alle delen van heelal zijn geweest



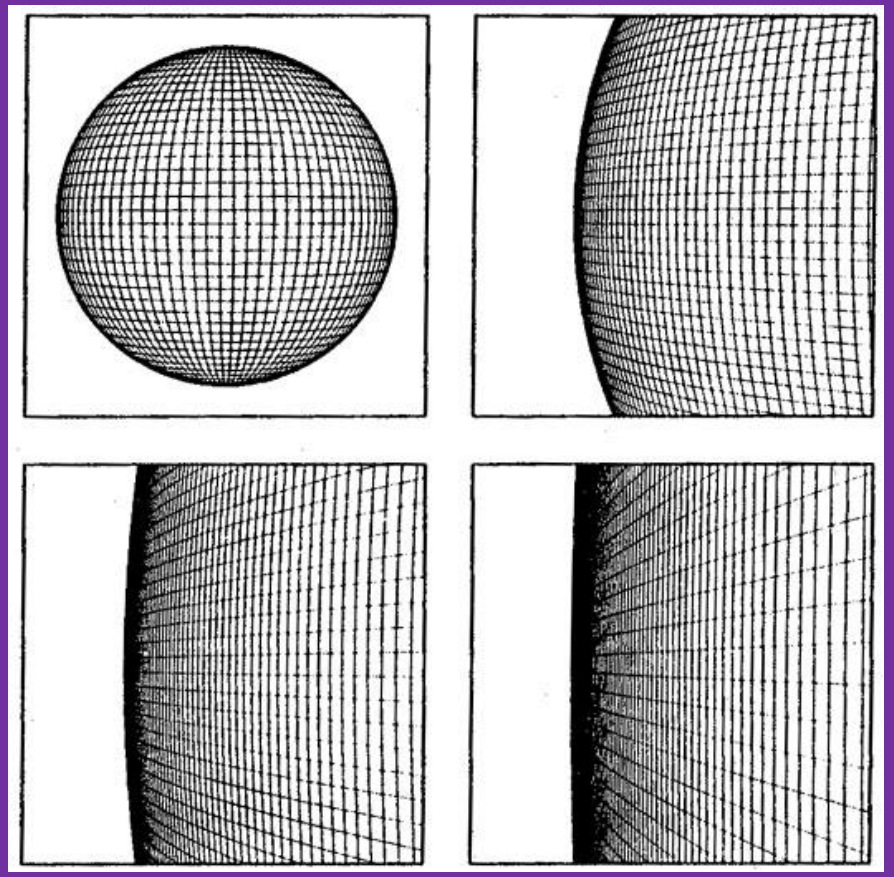
Inflatie-idee

(Allan Guth
Andrei Linde
ca 1980)

Ter verklaring
van ontbreken
Magnetische
mono-polen



Inflatie: *Ruimte zelf* mag veel sneller uitdijen dan met de lichtsnelheid



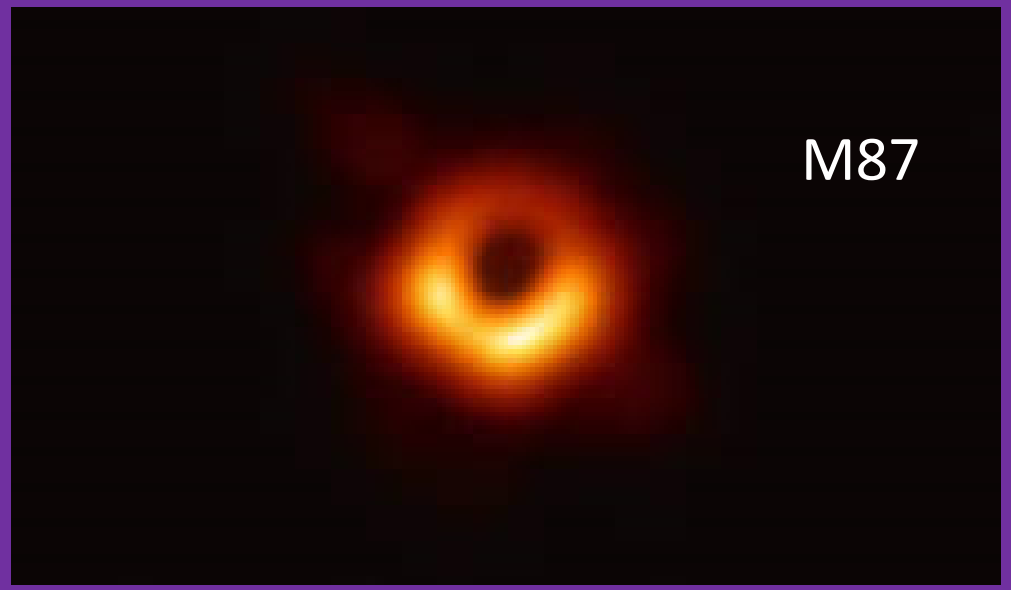
Als het heelal door de inflatie gigantisch is opgeblazen, en een gigantische Kromtestraal heeft, zullen wij, die er slechts een klein stukje van kunnen overzien, de indruk hebben dat het VLAK is, net als het de mens op Aarde toeschijnt dat hij op een vlakke Aarde leeft.

Ω= 1 betekent daarom: Heelal is gigantisch veel groter dan het stukje dat wij kunnen overzien (tot 13.8 miljard jr. terugkijktijd).

Andere grote ontdekkingen:

- Ontdekking van oorsprong Gamma-Ray Bursts, dankzij detectie optisch nagloeien (J. van Paradijs, P. Groot, en Nederlandse instrumenten in BeppoSAX satelliet, 1997)

- Maken afbeelding centrale supermassive black hole in Centrum van M87 en van ons Melkwegstelsel (Heino Falcke, 2019, 2022; Balzanprijs 2023)



Conclusies:

De grote doorbraken zijn vooral te danken aan:

- Gebruik van nieuwe golflengte gebieden: radio, microgolven, sub-millimeter, Infrarood, Röntgen, gamma.
- Nieuwe technieken: interferometrie (Gravitatiegolven, sterren rond Melkwegcentrum, Event Horizon Telescope)
- grote collaboraties: LIGO, COBE, WMAP, Planck, Event Horizon Telescope, ESO, ALMA, Herschell, GRO-BATSE, BeppoSAX
- Slimme ideëen van individuen (Exoplaneten, Dark Energy-SN Ia; binary pulsar (tests Algemene Relativiteits theorie); inflatie)