

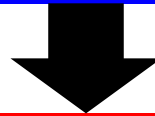






# Selected HOVO lectures in Leiden & Utrecht

Johan Bleeker  
courses 2008 -2020



- Information carriers in astrophysics
- The phase space of discovery
- Expansion and structure evolution of the Universe
- Cosmic acceleration and feedback by compact objects



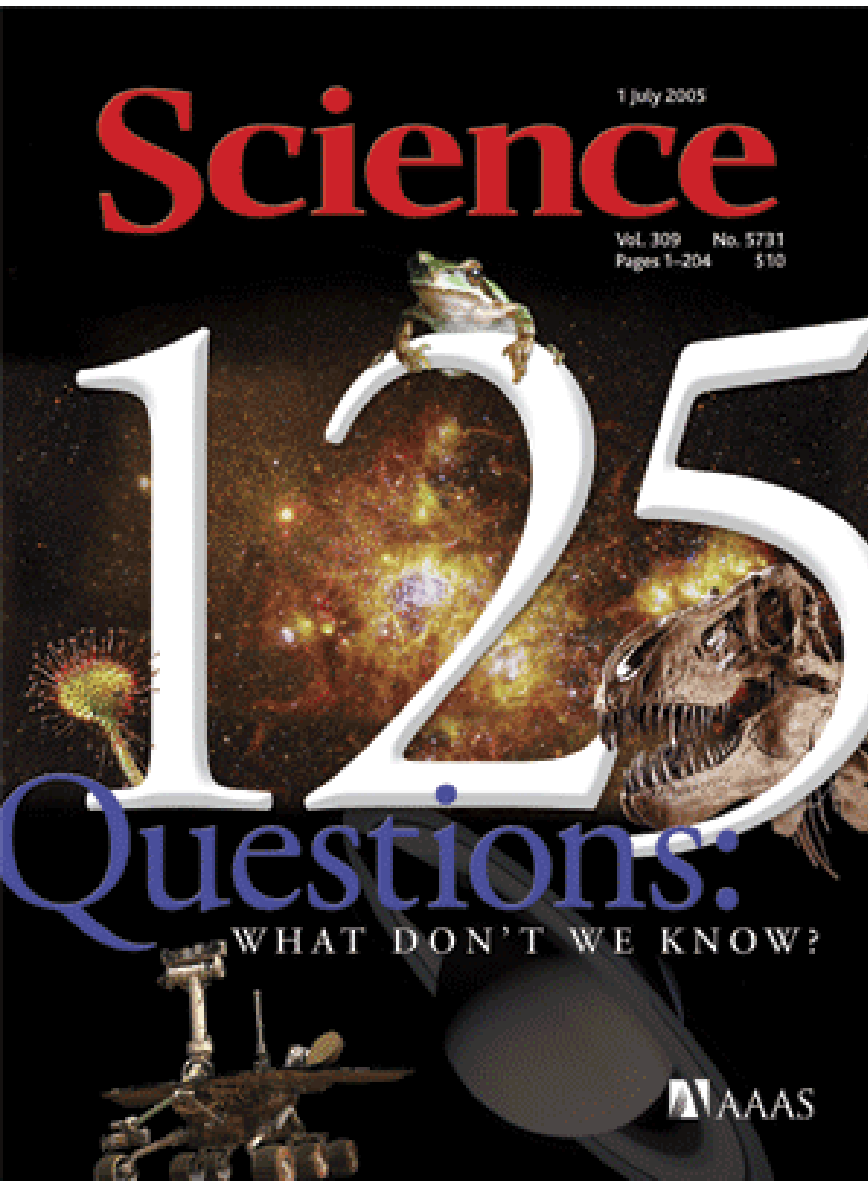
Cosmic messengers



The phase space of discovery



# Grote vragen in de wetenschap

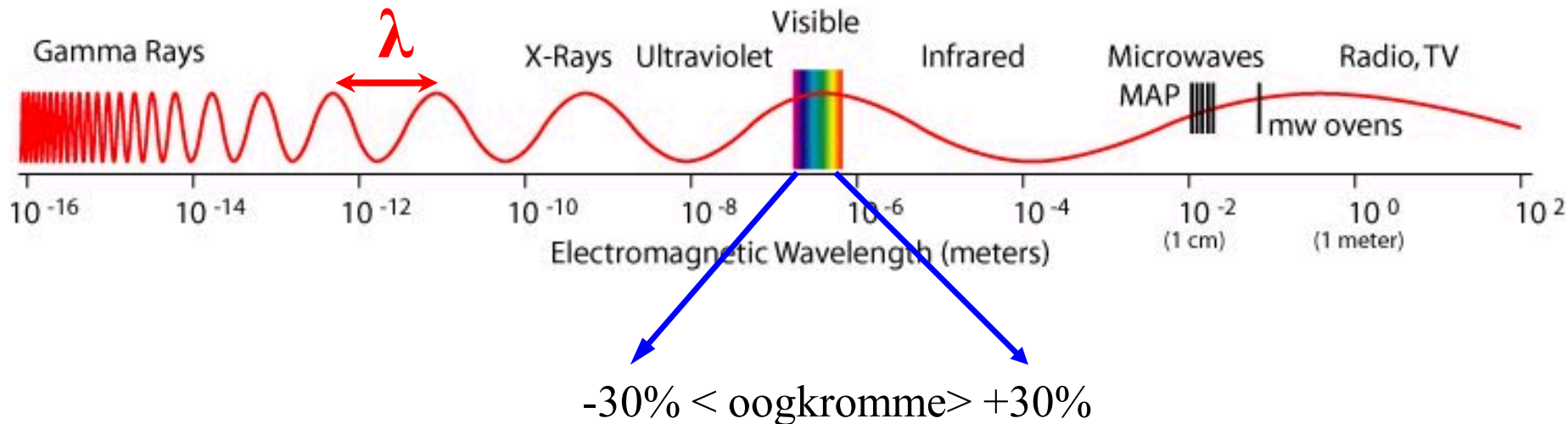


## Top 5

1. What is the Universe made of?
2. What is the biological basis of consciousness?
3. Why do humans have so few genes?
4. To what extent are genetic variation and personal health linked?
5. Can the laws of Physics be unified?

# Traditionele sterrenkunde

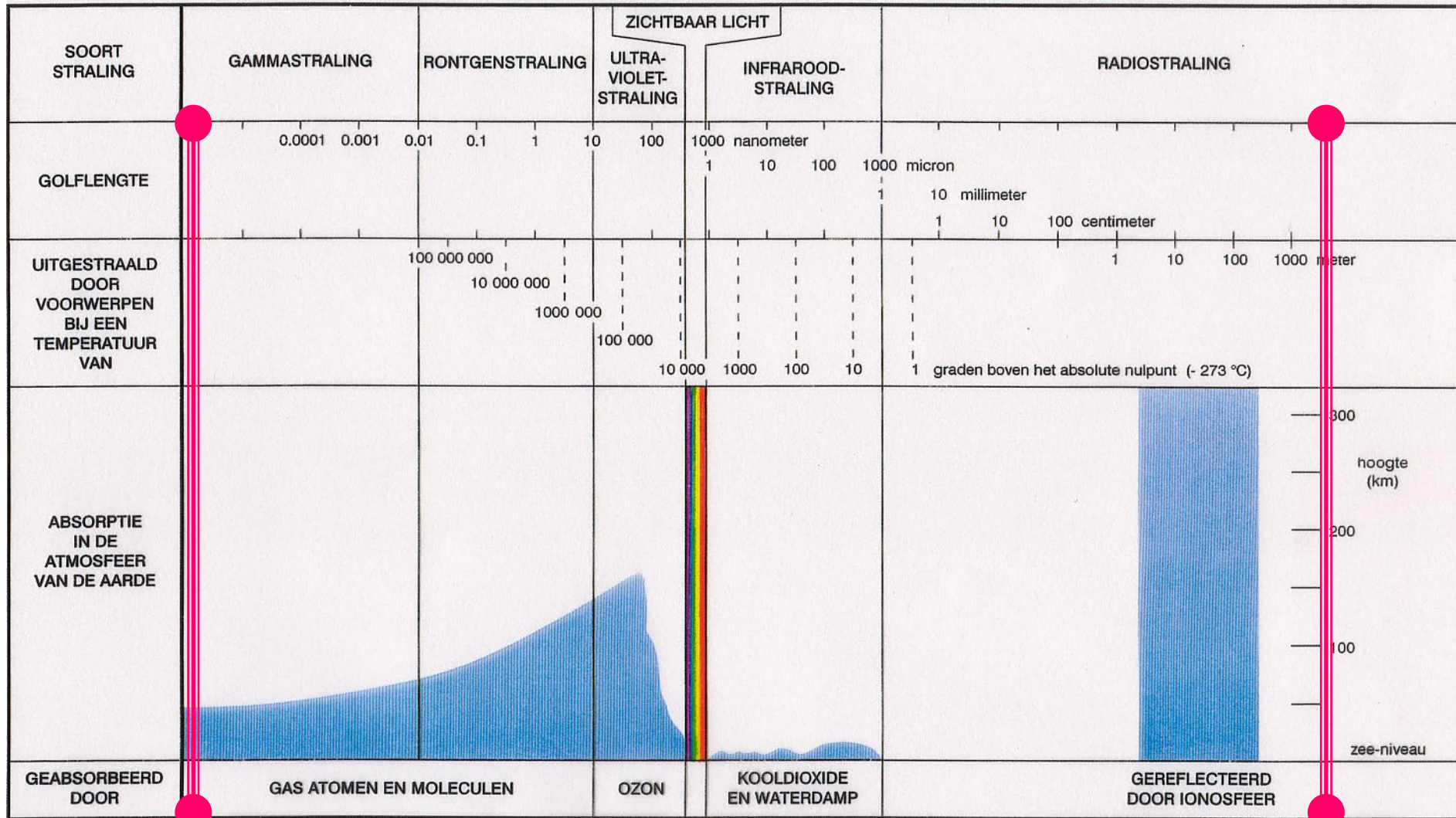
**Waarnemingsvenster:** zichtbaar licht, ook wel “optische straling”



**Analogie met geluid:**

Beluister en interpreteer de “Symfonie van het Heelal” met oren die slechts de centrale C en de twee naastliggende noten kunnen horen

# EM-stralingsabsorptie door dampkring

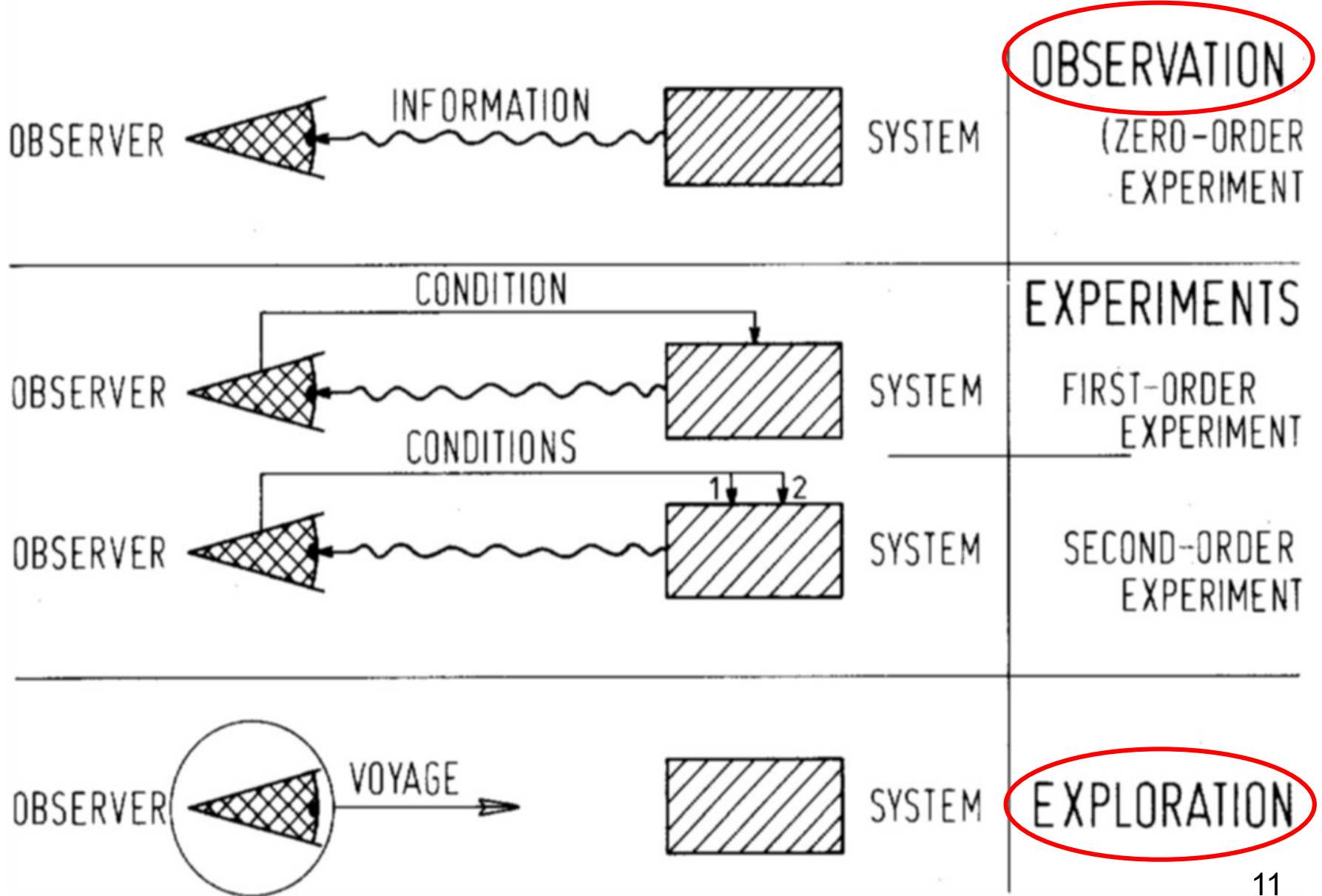


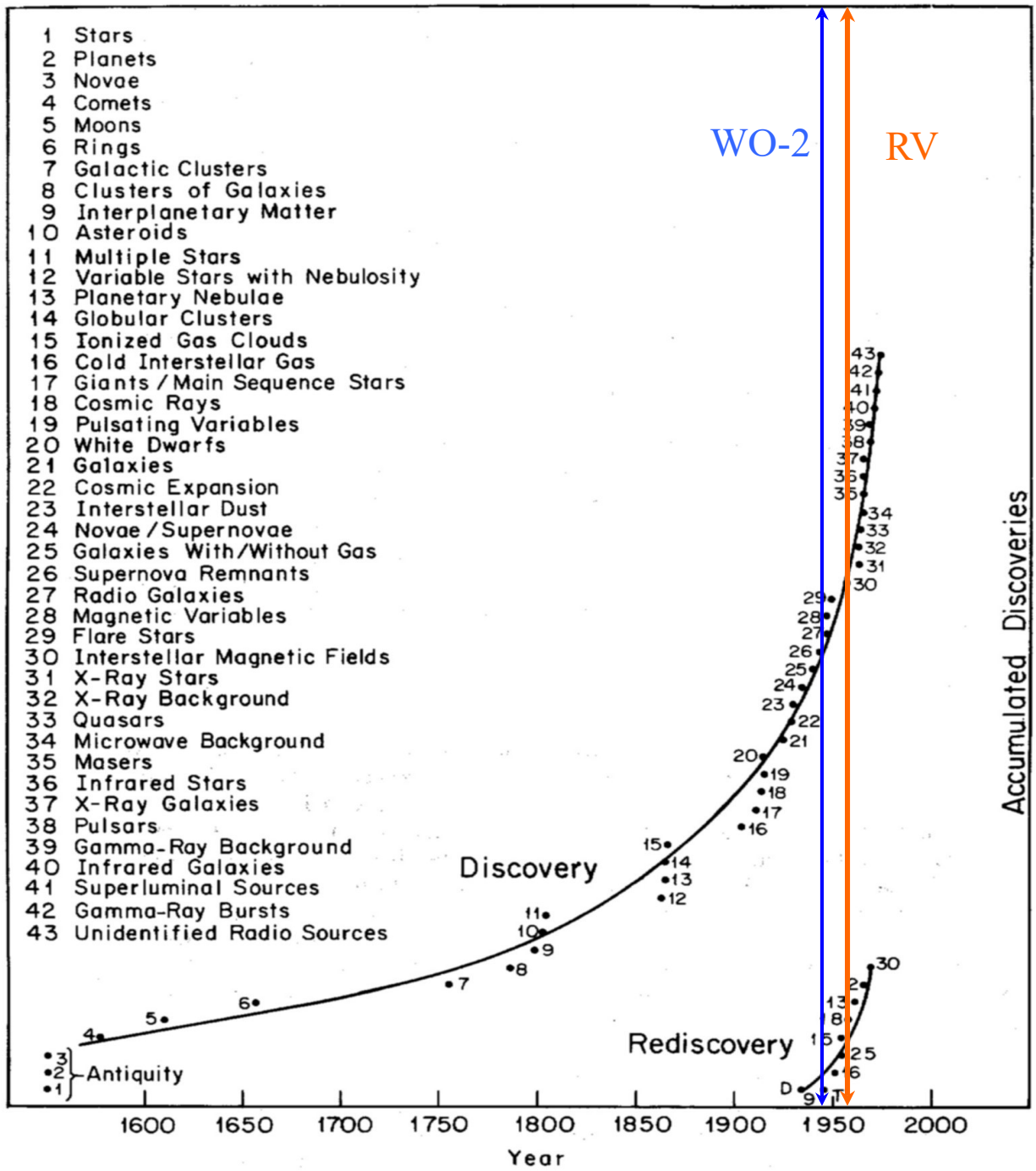
# Buitenaardse ruimte → “nieuwe” sterrenkunde

- **In situ onderzoek** van het zonnestelsel (zon, planeten, manen, asteroïden en kometen)
- **Onbelemmerd zicht** op het hele electromagnetisch spectrum
- **Buigingsbegrenste beeldscherpte** in zichtbaar licht door uitschakeling onrust van dampkring
- **Toegang tot kosmische deeltjesstraling** uit de Melkweg (en daarbuiten)
- **Katalyserend** voor **ontwikkeling nieuwe telescooptechnologie** (materialen, optische sturing) en sensortechnologie (supergeleiders)
- **Katalyserend** voor **ontwikkeling informatietechnologie** (signaalverwerking, rekencapaciteit, datacompressie)



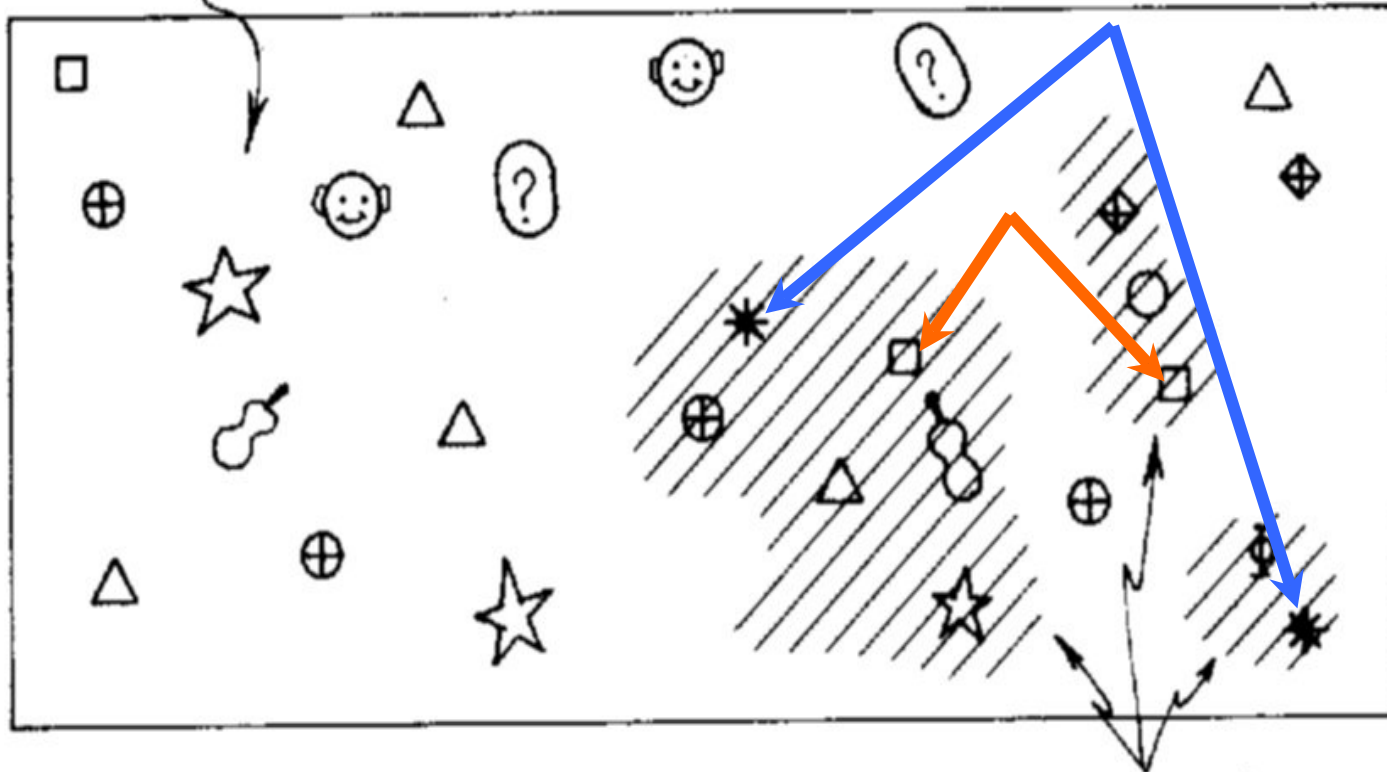
# Opties voor onderzoeksmethodiek







# Diagnostics 'phase space'

Entire volume of phase space



Subvolumes observed to date

Independently observed phenomena  and 

# Hendrik Casimir



- Theoretisch fysicus (quantumtheorie)
- Leerling van Paul Ehrenfest in Leiden, onderzoek bij Niels Bohr en Wolfgang Pauli
- Raad van Bestuur Philips, President van de KNAW
- Biografie (1983): Haphazard Reality, Half a Century of Science
- Concept Wetenschap-Technologie Spiraal: alliantie tussen de Filosoof en de Ingenieur

# Wetenschappelijke vraagstelling: drijfveer voor technologische innovaties

- **Onderzoek naar elementairste bouwstenen van materie**  
bouwstenen kleiner → energie hoger → golflengte korter ( $\lambda = h/p$ )  
licht-microscop → elektronen-microscop → deeltjesversnellers
- **Onderzoek naar elementairste bouwstenen van 't heelal**  
verder (dieper) kijken → terug in de tijd → lichtzwakke objecten  
standaard telescoop → adaptieve telescoop → interferometer ( $\theta = \lambda/D$ )
- **Onderzoek naar vorming/evolutie van planetaire ecosystemen**  
eliminatie invloed aardse dampkring, in-situ diagnostiek  
kunstmanen → ruimtesondes → cognitieve robot-landers

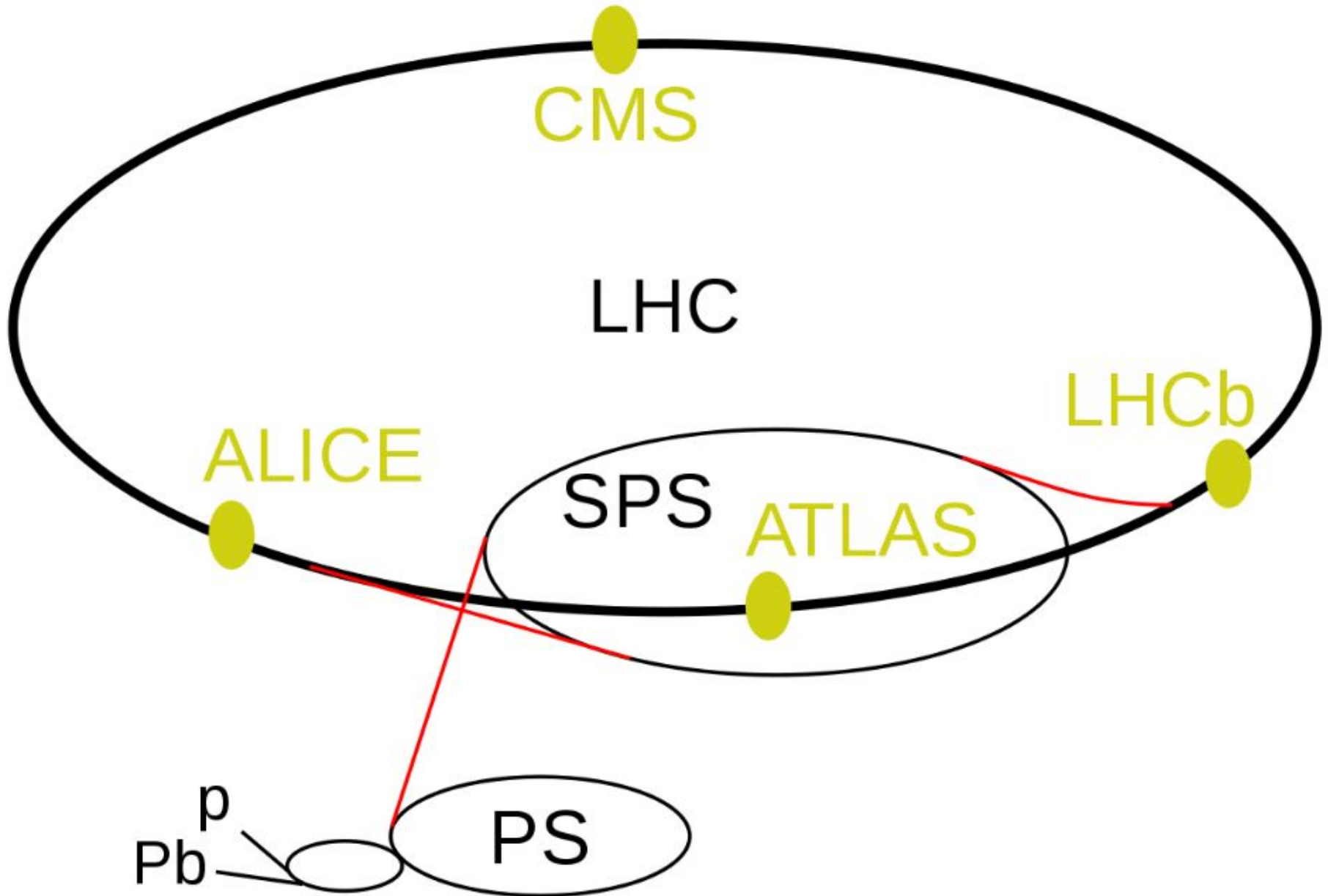






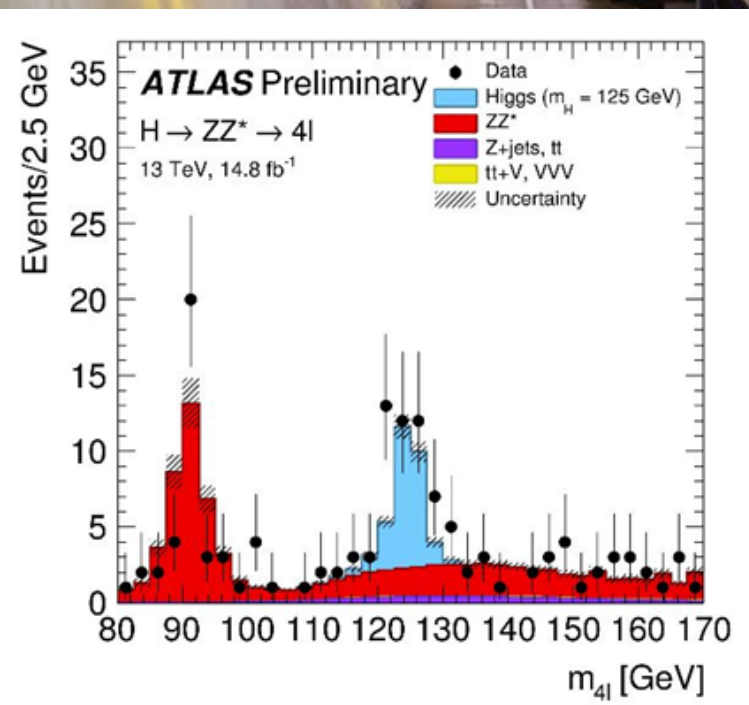
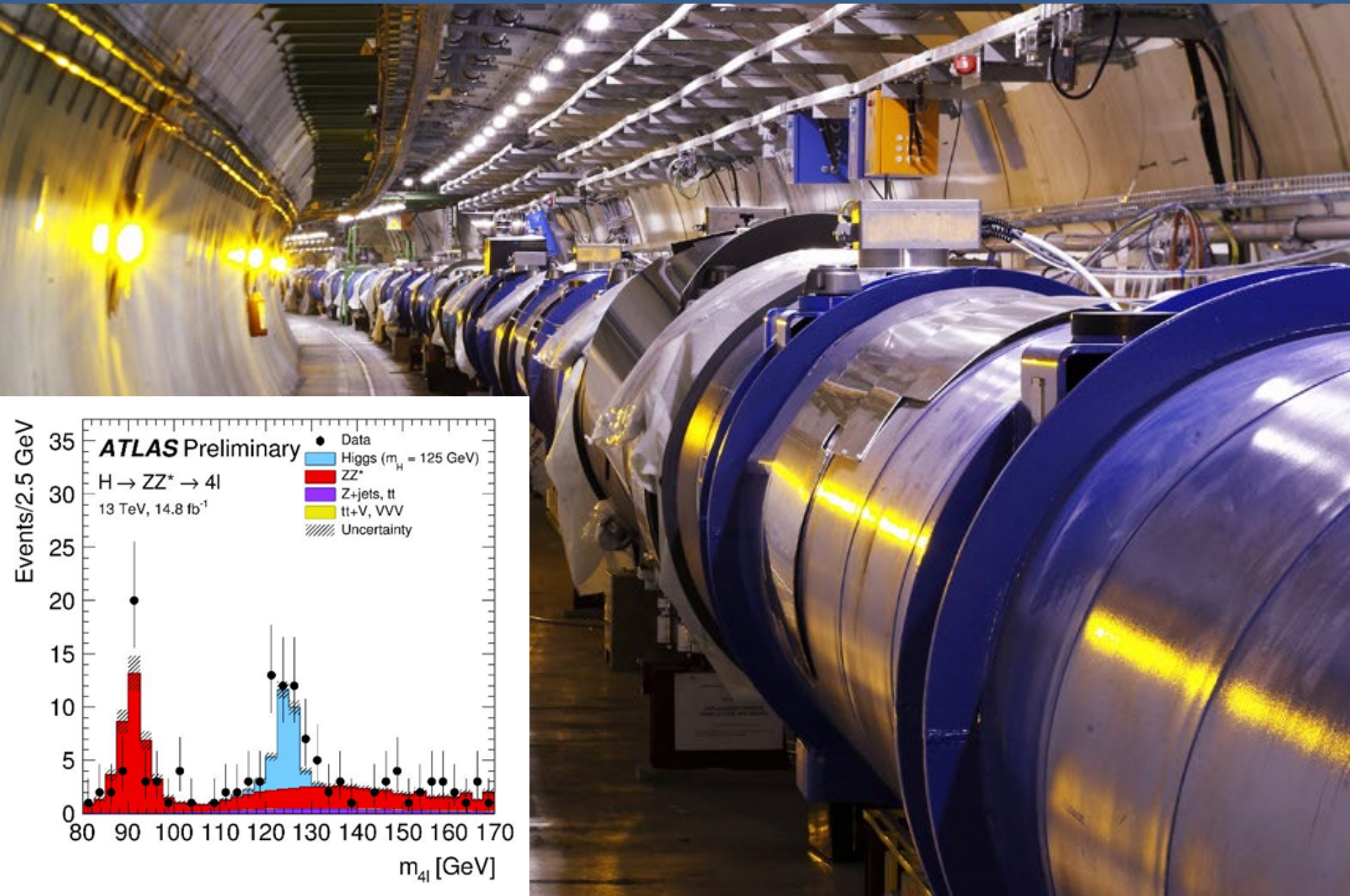
CERN LHC ring met een omtrek van 27 km

# CERN LHC ring: omtrek 27 km



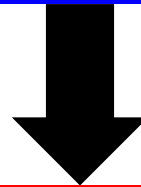


# Large Hadron Collider (LHC) at CERN, $E_{\text{col}} = 13 \text{ TeV}$





# Exploratie naar de rand van het zonnestelsel



Maan, Mars, komeet P67/Churyumov-Gerasimenko,  
Jupiter, Saturnus/Titan, Pluto/Charon, Heliopauze

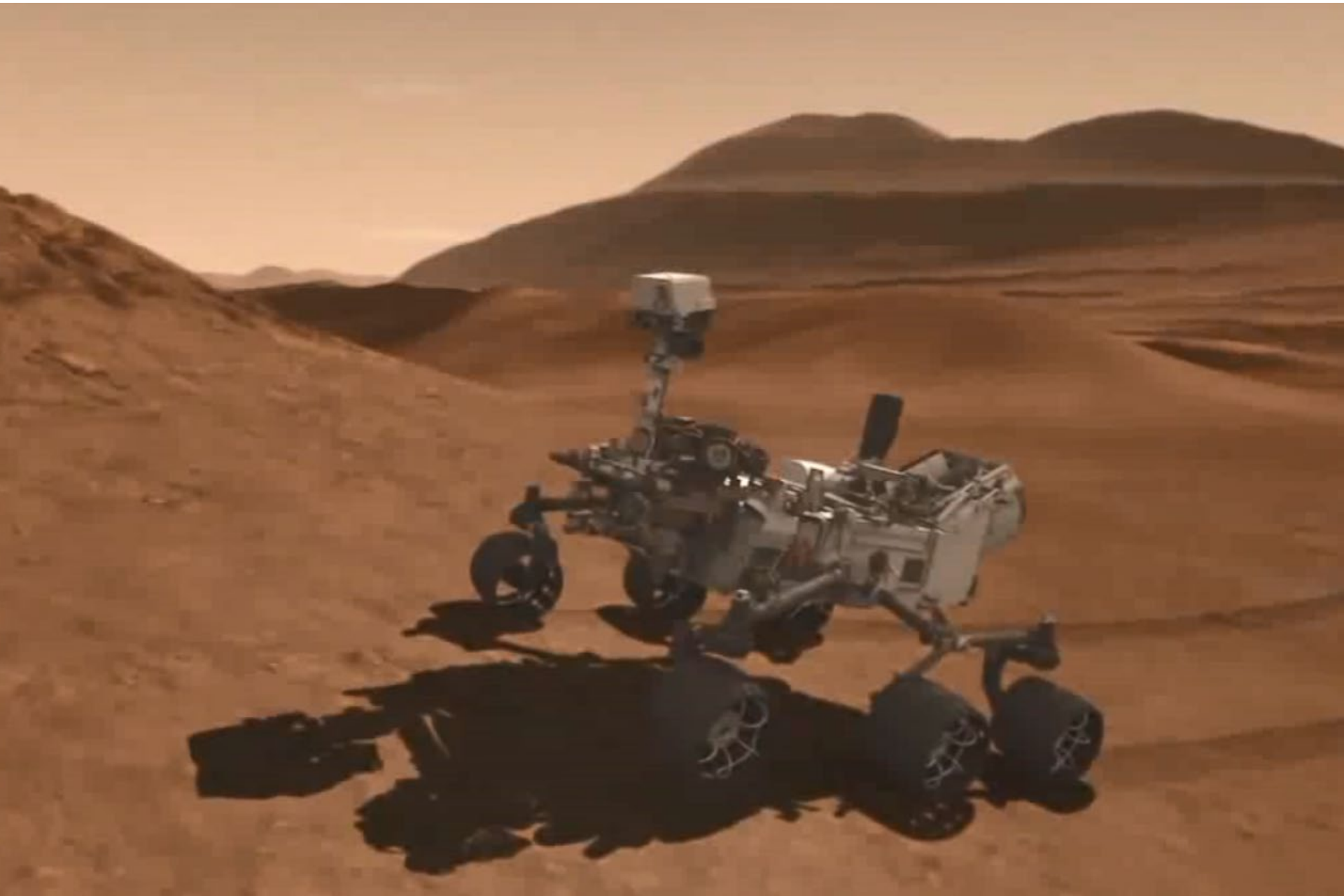


Japanese Lunar Orbiter 'Kaguya' viewing the day-lit earth (JAXA 2016)

# MSL Curiosity Rover: Sky Crane Landing

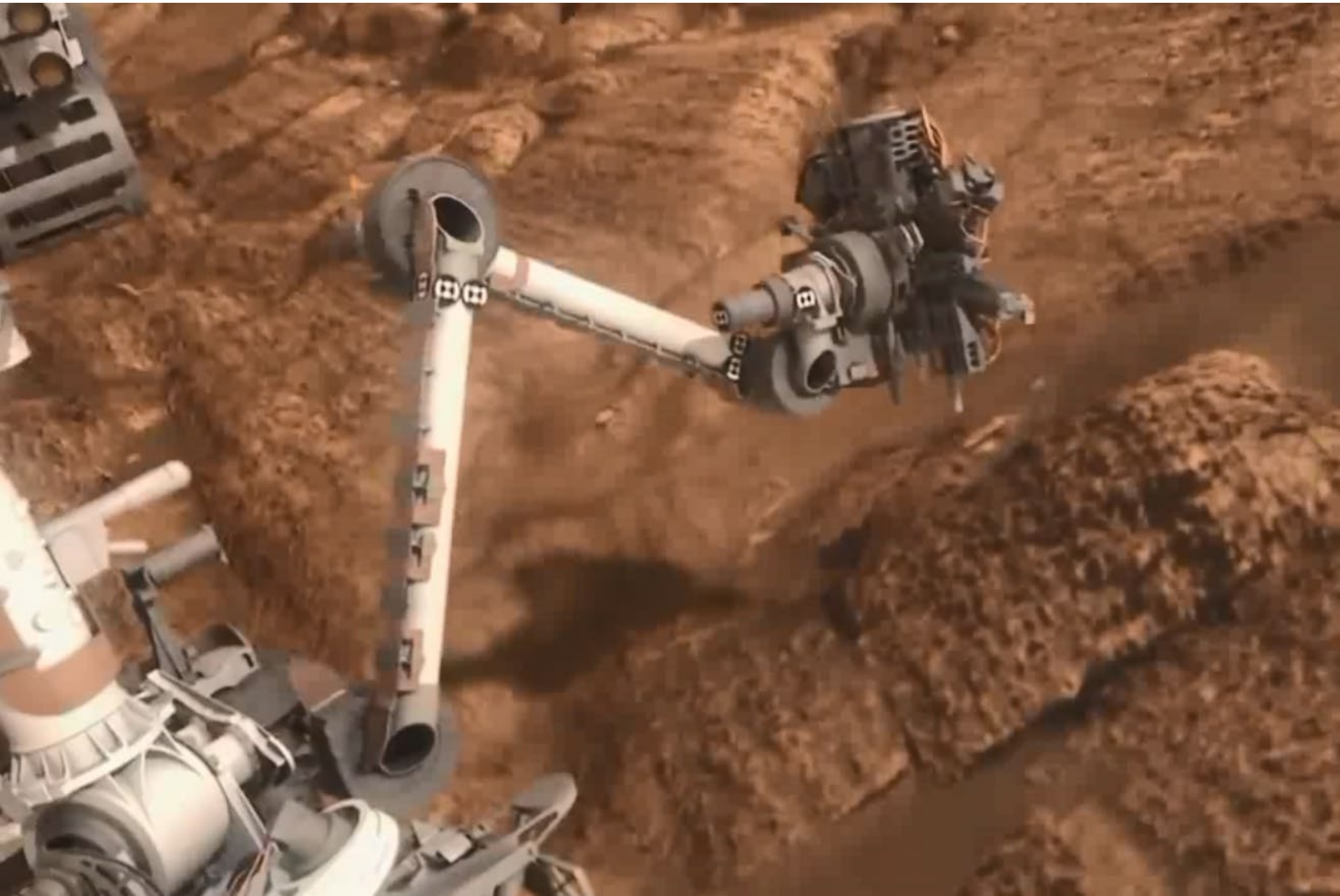


# MSL Curiosity Rover climbing a Martian hill





# MSL Curiosity Rover drilling a Martian rock sample



MSL-Curiosity Rover: panoramic view of Mount Sharp during search for "habitable sites" containing embedded (past) microbial life

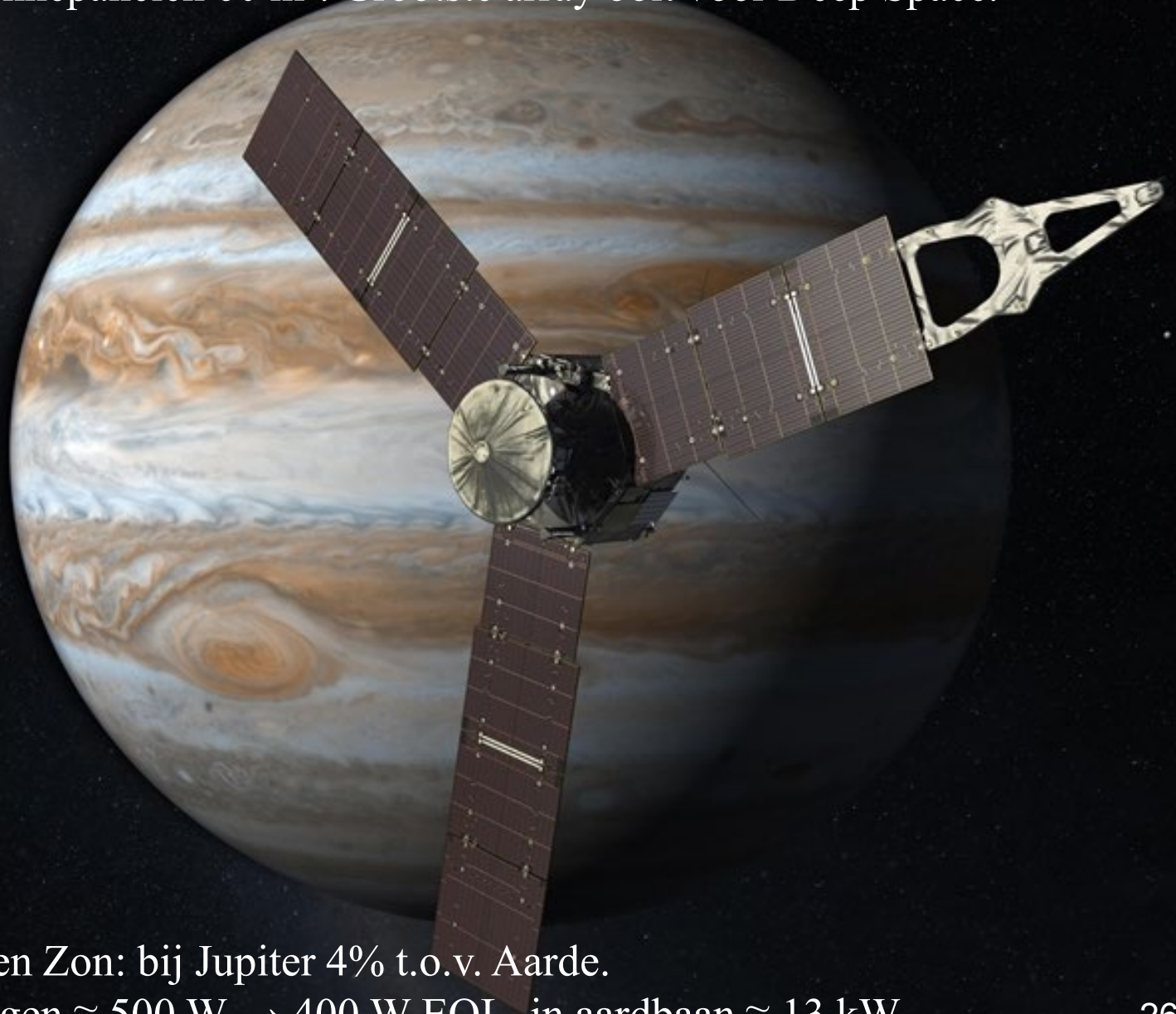




Philae-lander op de komeet  
P67/Churyumov-Gerasimenko



Juno mission naar Jupiter (lancering 5 augustus 2011, aankomst 4 juli 2016).  
Zonnepanelen 60 m<sup>2</sup>. Grootste array ooit voor Deep Space.

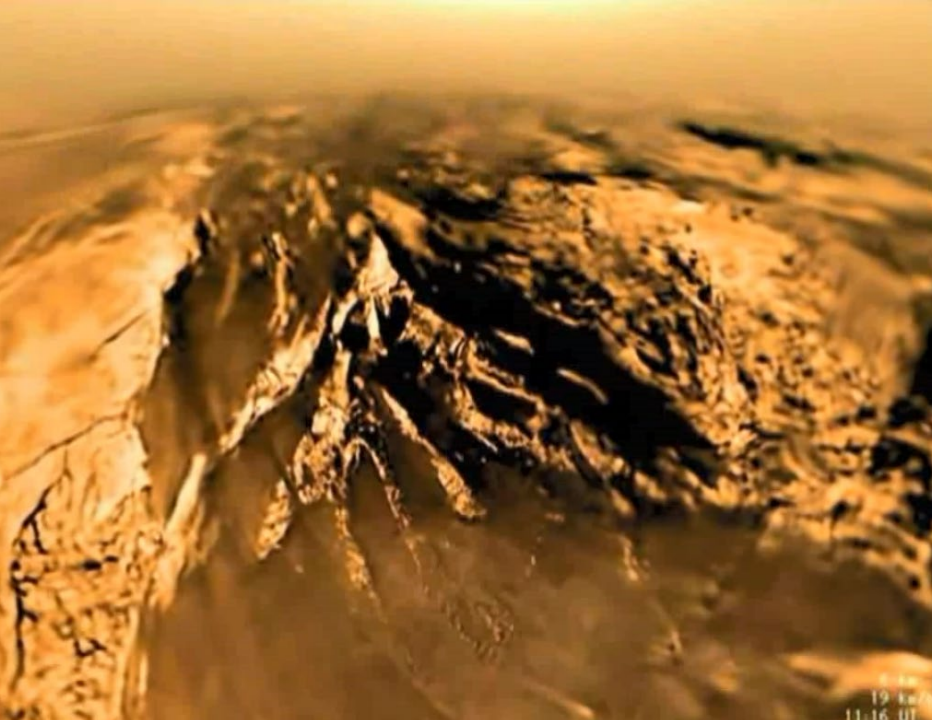


Stralingsvermogen Zon: bij Jupiter 4% t.o.v. Aarde.

Electrisch vermogen  $\approx 500$  W  $\rightarrow$  400 W EOL, in aardbaan  $\approx 13$  kW.

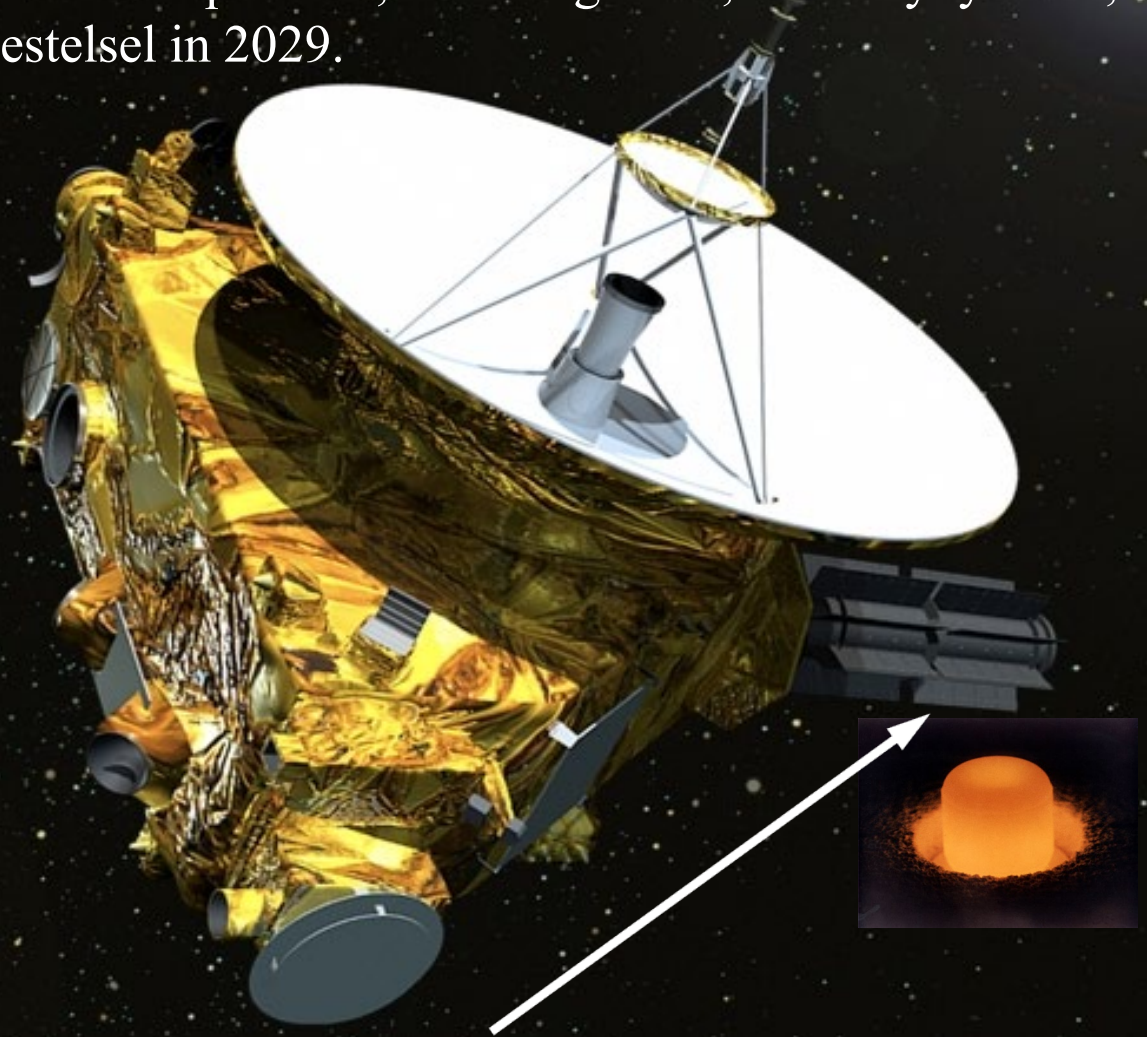


# Cassini/Huygens ruimtesonde: landing van Huygens op de Saturnus maan Titan





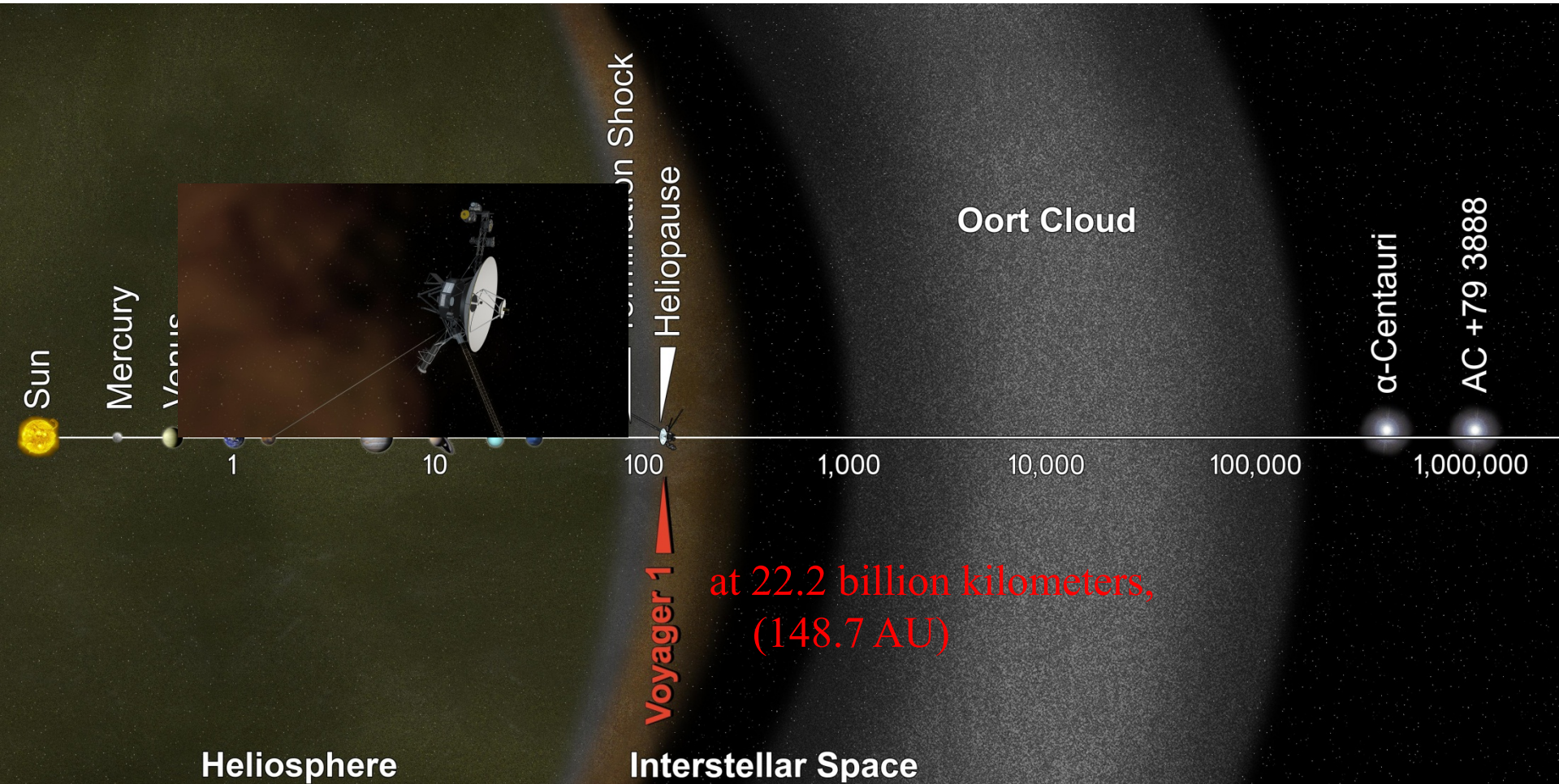
New Horizons naar Pluto/Charon en Kuiper Belt, lancering 2006, Pluto flyby 2015, Kuiper Belt 2019. Verlaat zonnestelsel in 2029.



RTG New Horizons:  
240 W, 30V bij lancering in januari 2006  
verlies 5%/4 jaar → 210 W tijdens flyby  
Pluto systeem,  $\approx 11$  kg  $\text{PuO}_2$ , geen batterijen.



# Voyager 1(2) crossed the termination shock of the heliopause in 2012 (2018)

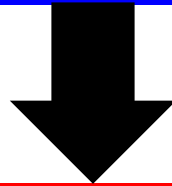


# Informatiedragers uit het heelal:

'boodschappers', 'messengers'

- “Licht”(golven,fotonen) = **elektromagnetische** (EM) straling
- “Kosmische” straling = **kerndeeltjes** met ultra-hoge energie
- “Stof” = **materiedeeltjes**, planet/maan/komeet-monsters
- Neutrino's = **bijna-massaloze deeltjes**, drie soorten:  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$
- Zwaartekrachtgolven = **rimpeling** van ruimtetijd continuum

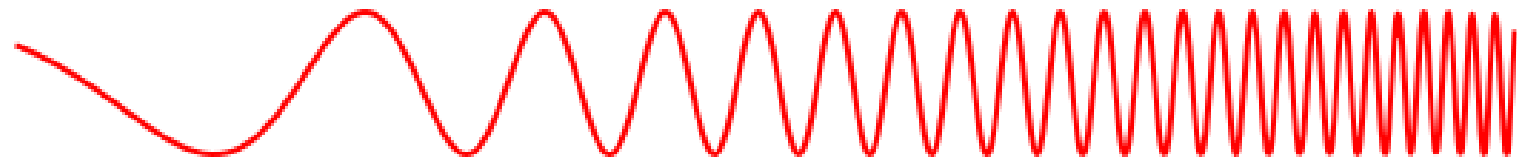
Informatiedragers uit de kosmos



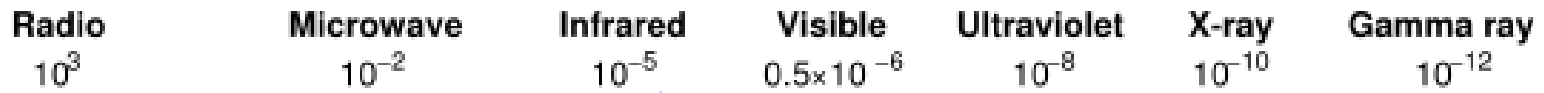
Elektromagnetische straling

Licht is een vorm van **elektromagnetische straling**, met golflengten tussen **0.4 en 0.7 micrometer**; elektromagnetische straling kan echter alle soorten golflengten hebben: van gammastraling tot radiogolven.

Penetrates Earth's Atmosphere?



Radiation Type  
Wavelength (m)

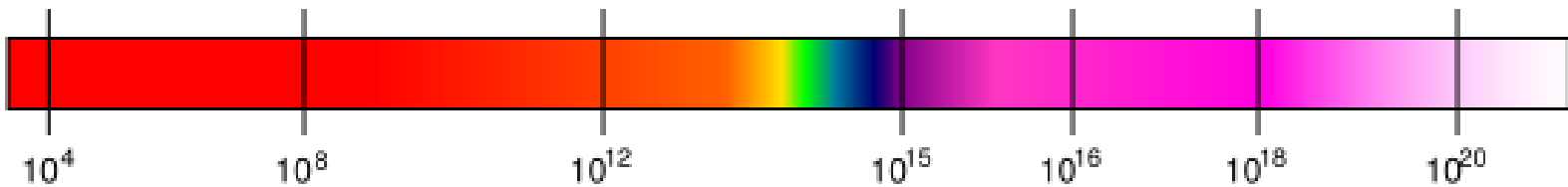


Approximate Scale of Wavelength

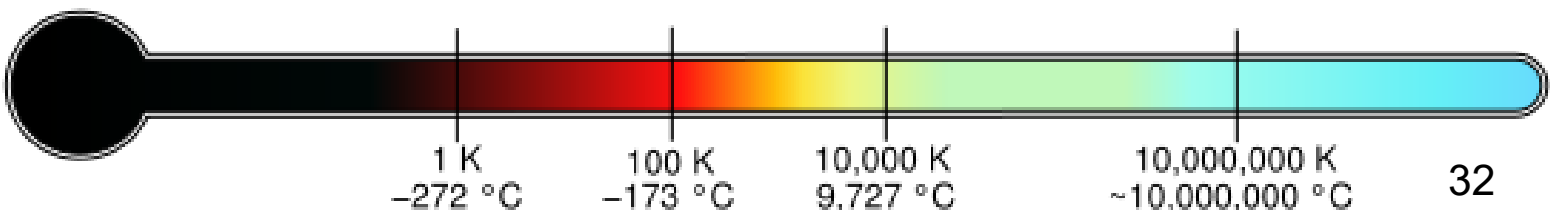


Buildings    Humans    Butterflies    Needle Point    Protozoans    Molecules    Atoms    Atomic Nuclei

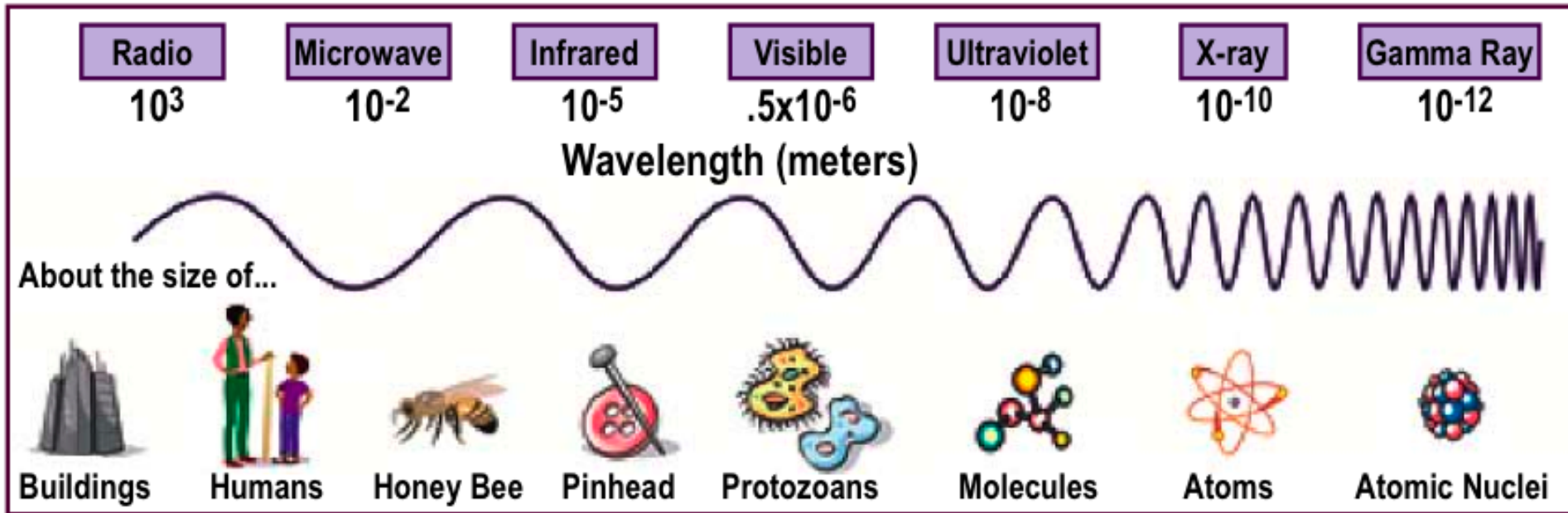
Frequency (Hz)



Temperature of objects at which this radiation is the most intense wavelength emitted



# Het Electromagnetische Spectrum



*Credit: NASA / Ruth Jennings*

Radiogolven hebben de “menselijke maat”

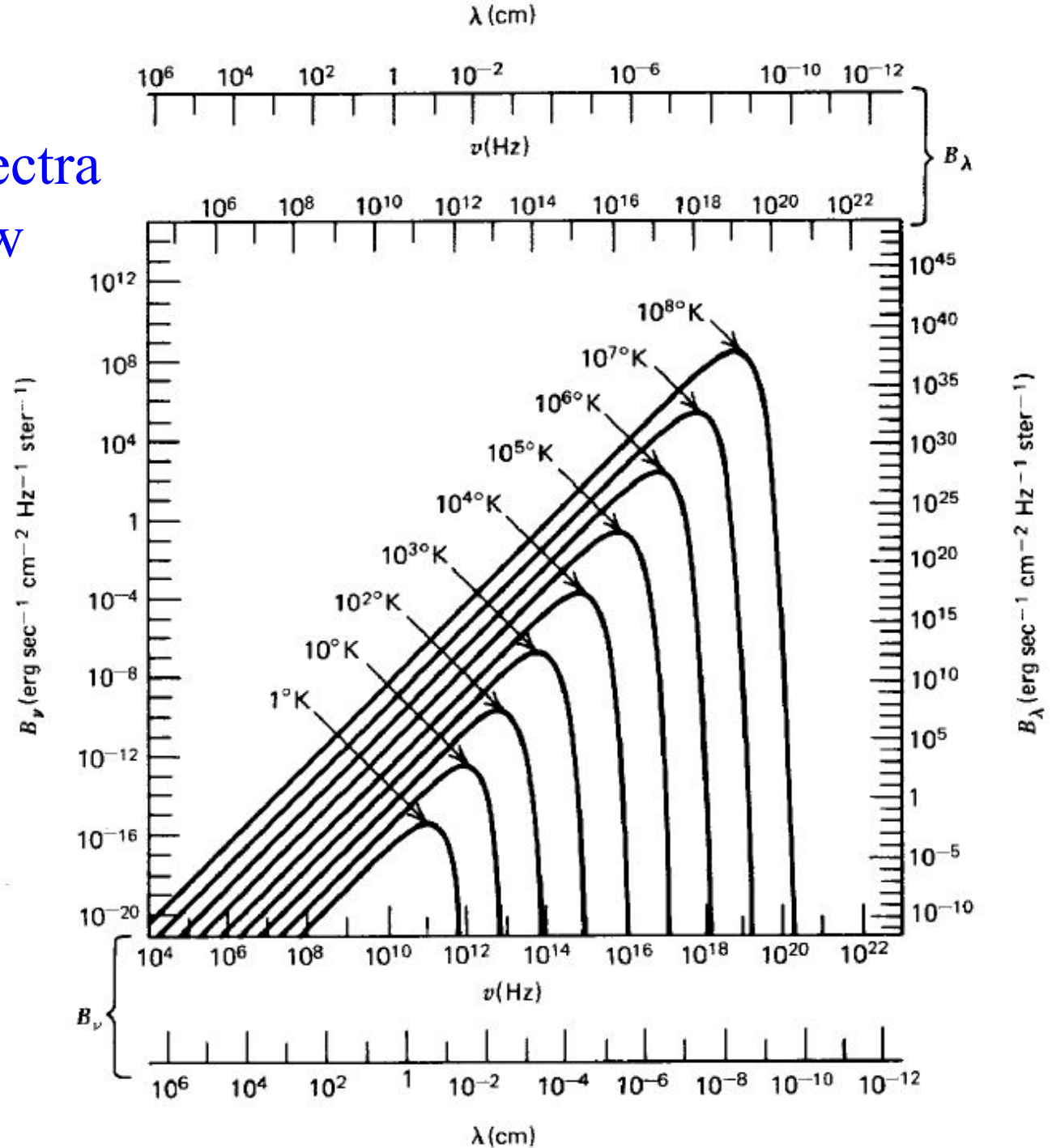
Röntgen- en Gammafotonen de schaalgrootte van atomen en atoomkernen

# Karakteriseren van Licht

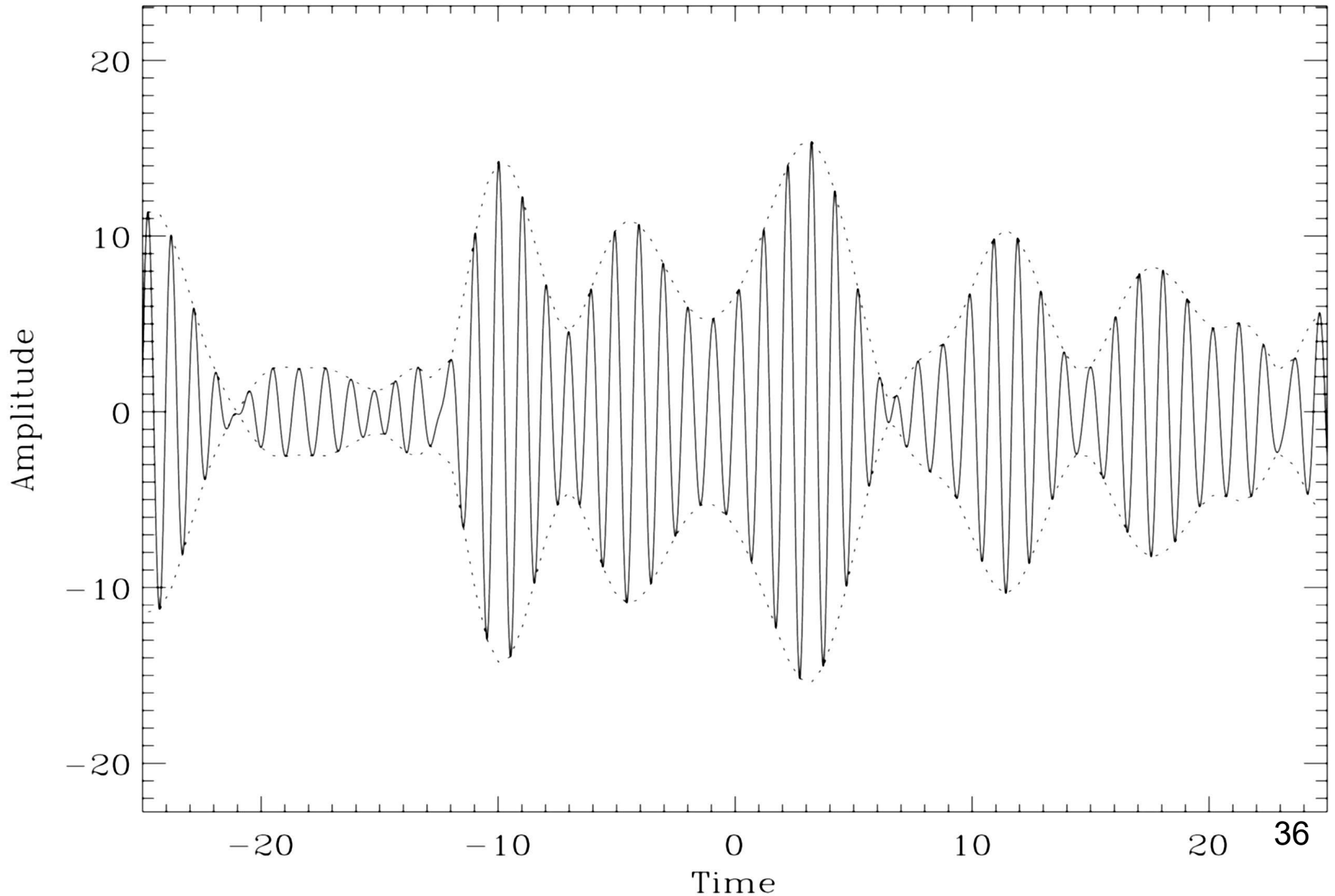
- Als golfverschijnsel:  $E(t) = E_0(t)e^{i[\bar{\omega}t + \varphi(t)]}$ 
  - Amplitude:  $E_0(t)$
  - Fase:  $\bar{\omega}t + \varphi(t)$ , bandbreedte  $\Delta\omega = \omega - \bar{\omega} = \frac{d\varphi(t)}{dt}$
- Als stroom lichtdeeltjes (fotonen):  $Y(t) = \sum_i \delta(t - t_i)$   
Cumulatief:  $X(t) = \sum_i U(t - t_i)$ 
  - quantumenergie:  $E = \hbar\omega$   
( $\omega = 2\pi c/\lambda$ ,  $\hbar$  = gereduceerde constante van Planck)
  - quantumimpuls:  $p = E/c = \hbar\omega / c = 2\pi\hbar/\lambda$  ( $\lambda = h/p$ )



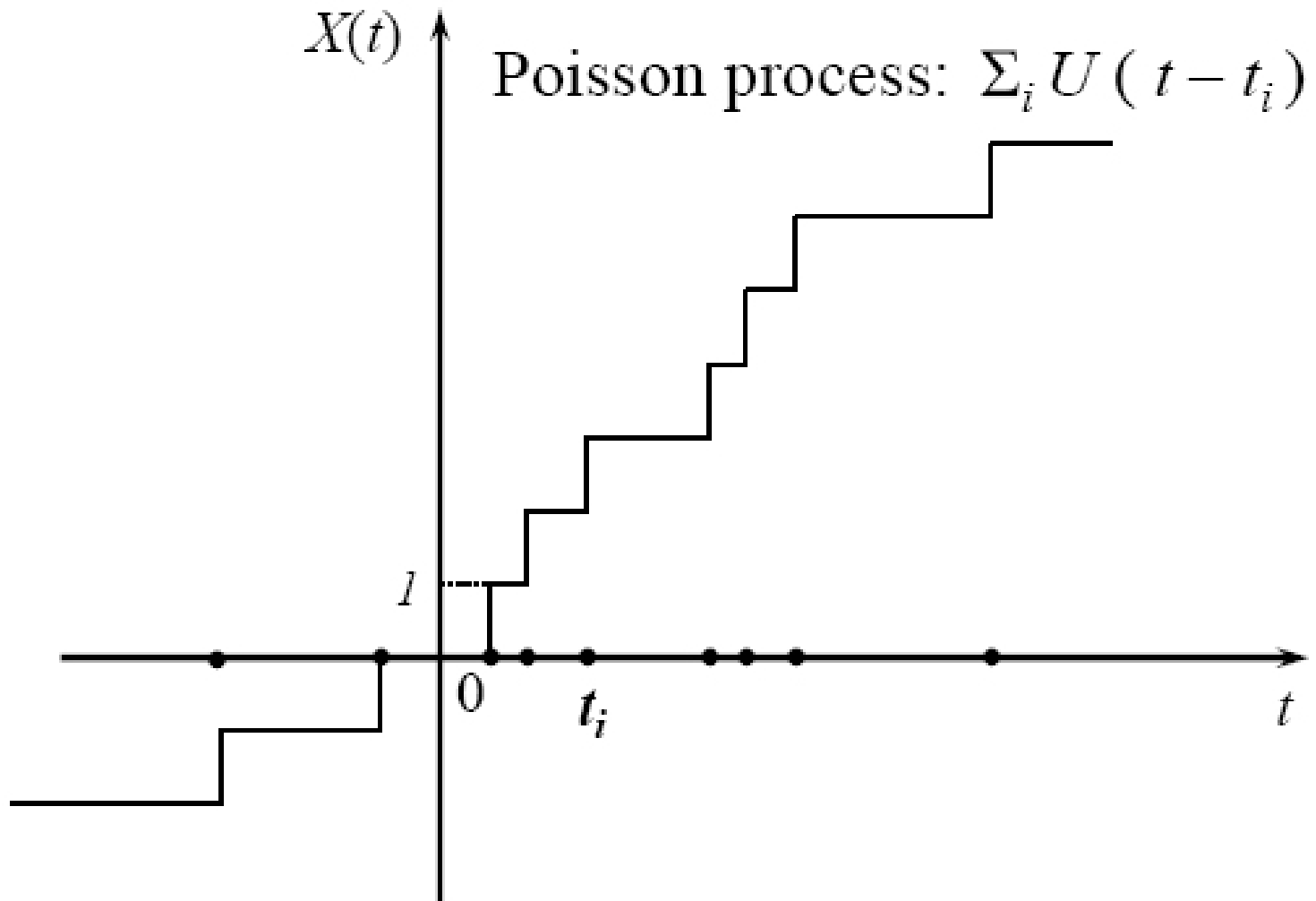
Black body spectra  
:: Planck's law

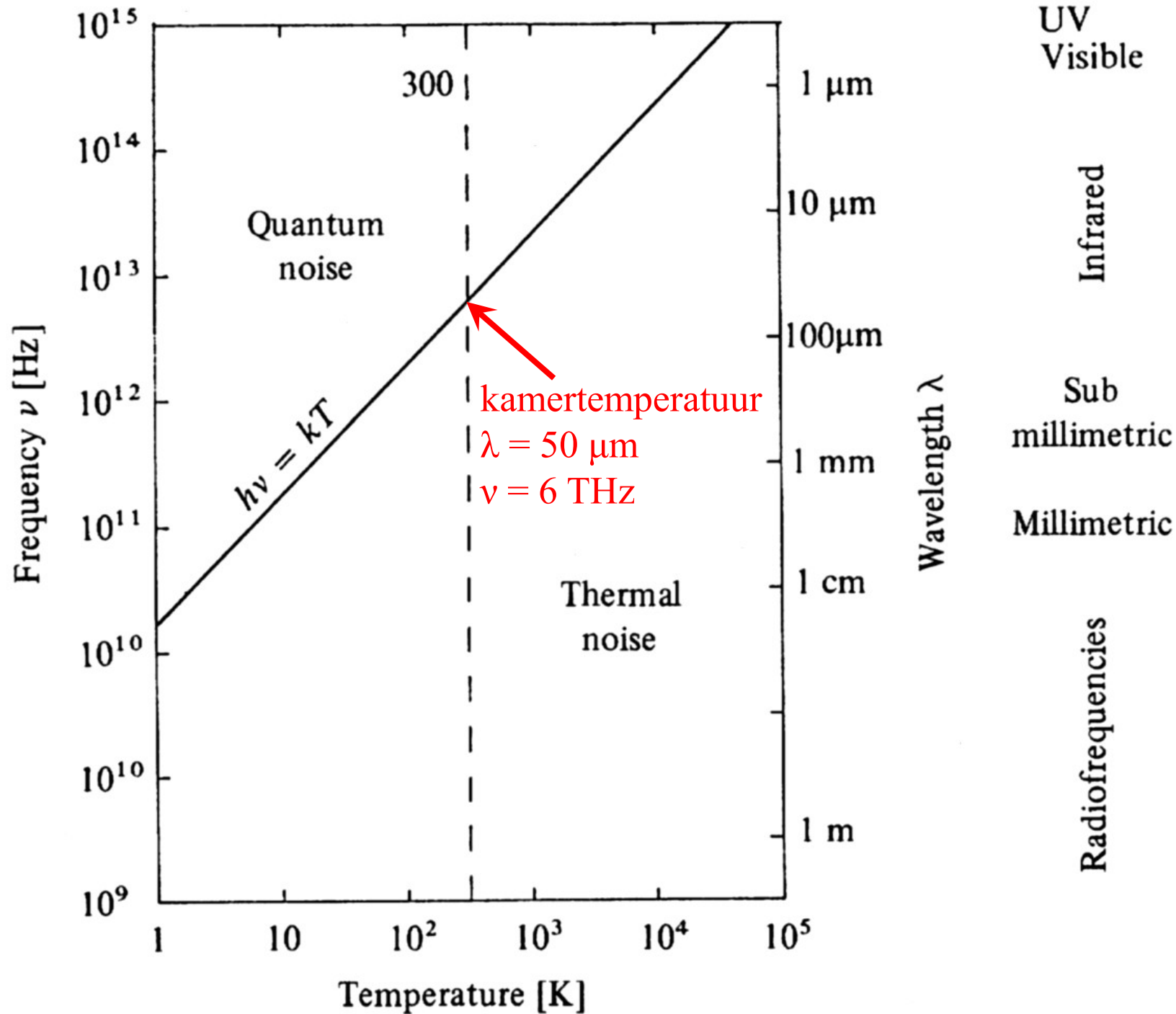


“Gaussisch” licht geproduceerd door een "zwarte" straler: random superpositie van golfpakketten ➡ fluctuerende amplitude en fase.



# foton emissie: stochastisch proces





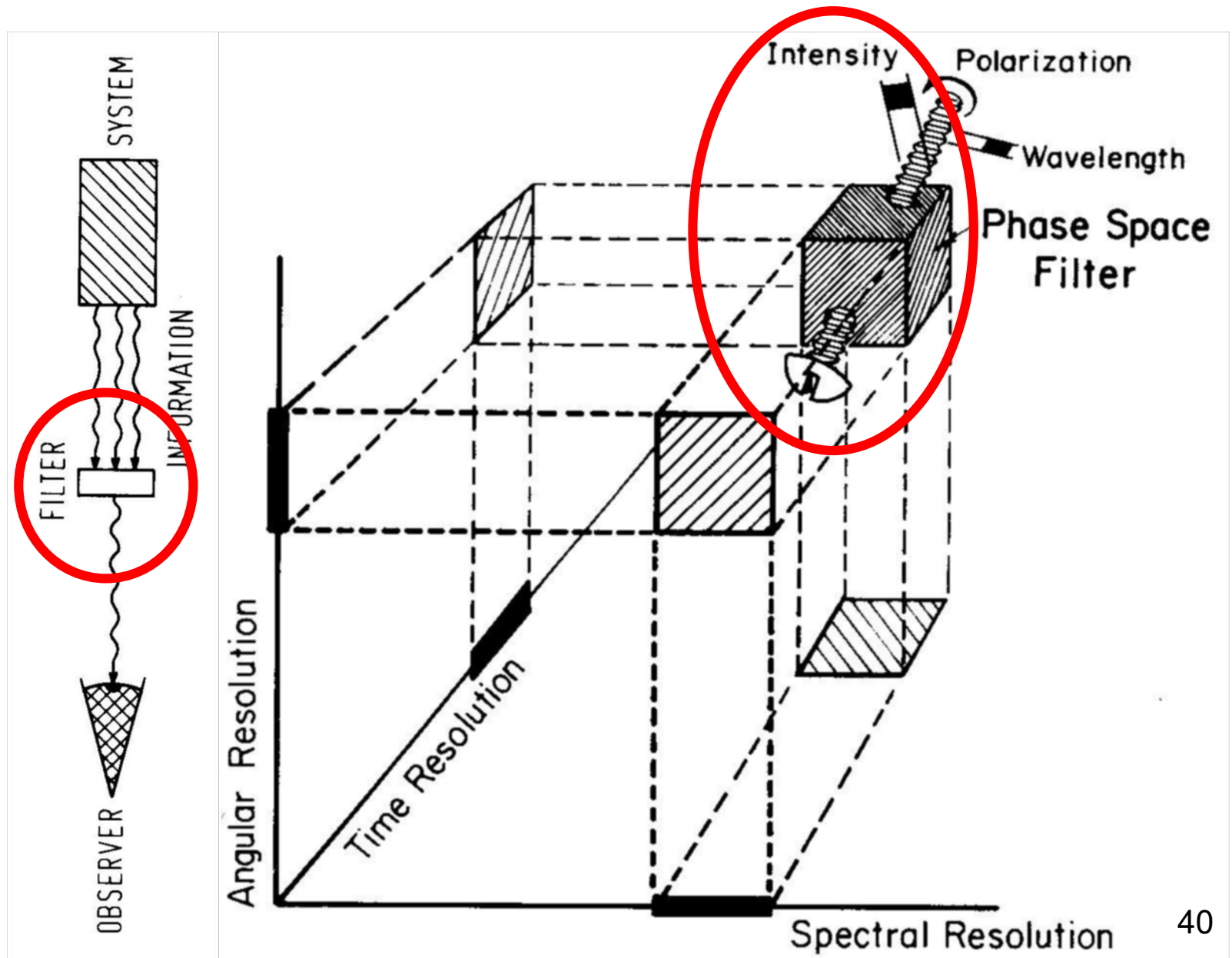
# Waarnemingen: faseruimte voor diagnostiek

## Diagnostische grootheden

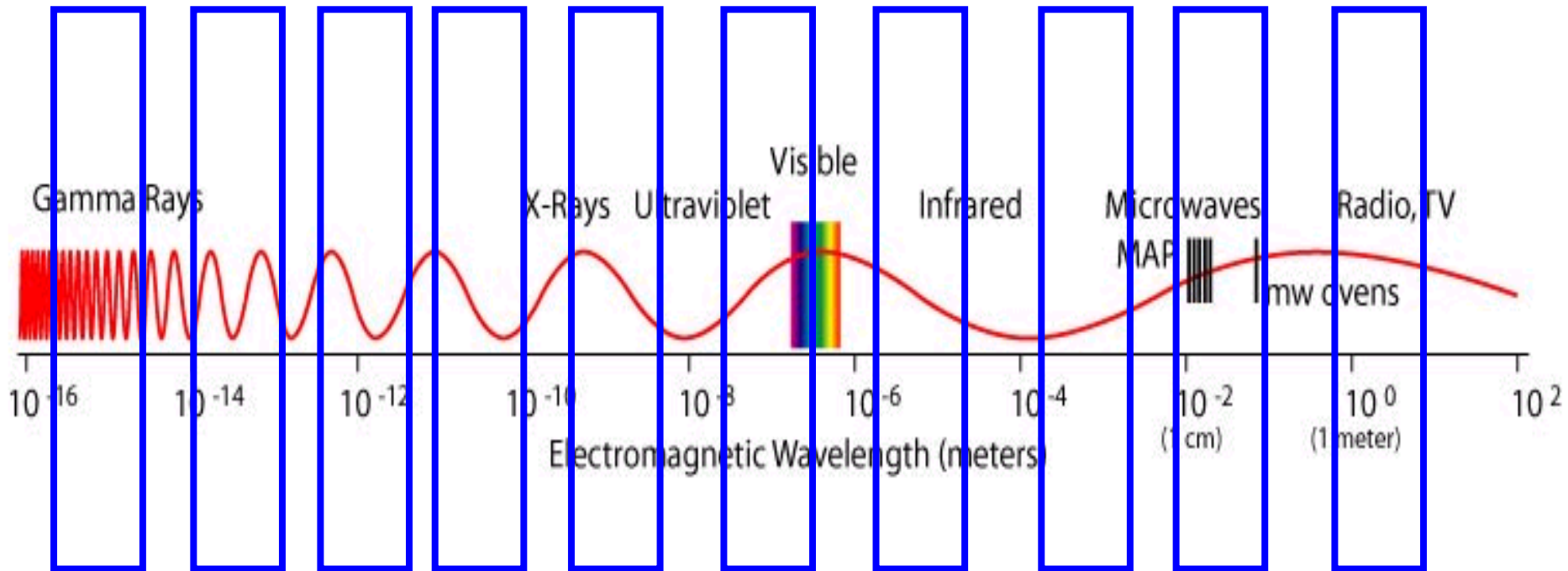
1. Spectraal gebied (in golflengte, frequentie, energie)
2. Ruimtelijk scheidend vermogen (= beeldscherpte)
3. Spectraal scheidend vermogen (= kleurschifting)
4. Minimaal detecteerbare helderheid (= intensiteit)
5. Tijd scheidend vermogen (= hersteltijd)
6. Polarisation scheidend vermogen (voor EM-straling)

➡ **Faseruimte voor diagnostiek:** opgespannen door zes coördinaatassen ➡ 6-D faseruimte

# 3D-beeld van een faseruimte filter



# 1. Spectraal gebied



**Bandbreedte:**  $\lambda_1 \rightarrow \lambda_2$   $\nu_1 \rightarrow \nu_2$   $\epsilon_1 \rightarrow \epsilon_2$



Paardekop Nevel



Zichtbaar licht (Hubble)

Paardekop Nevel



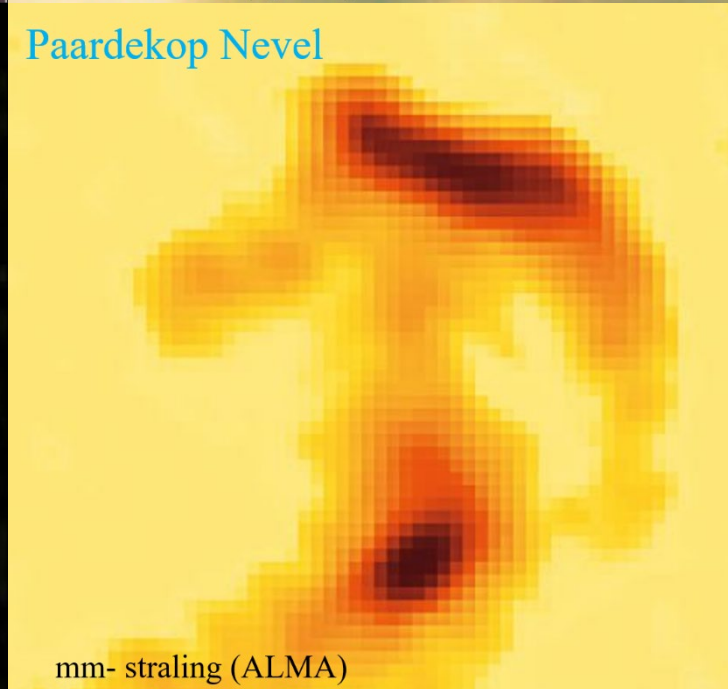
Infrarood licht (Spitzer)

Paardekop Nevel



Submillimeter straling (Herschel)

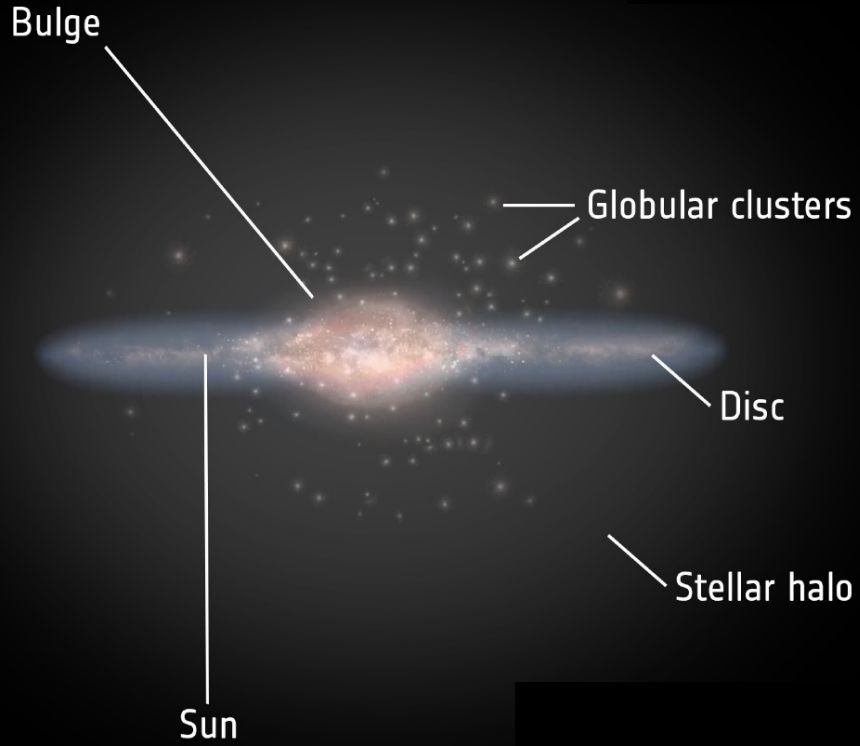
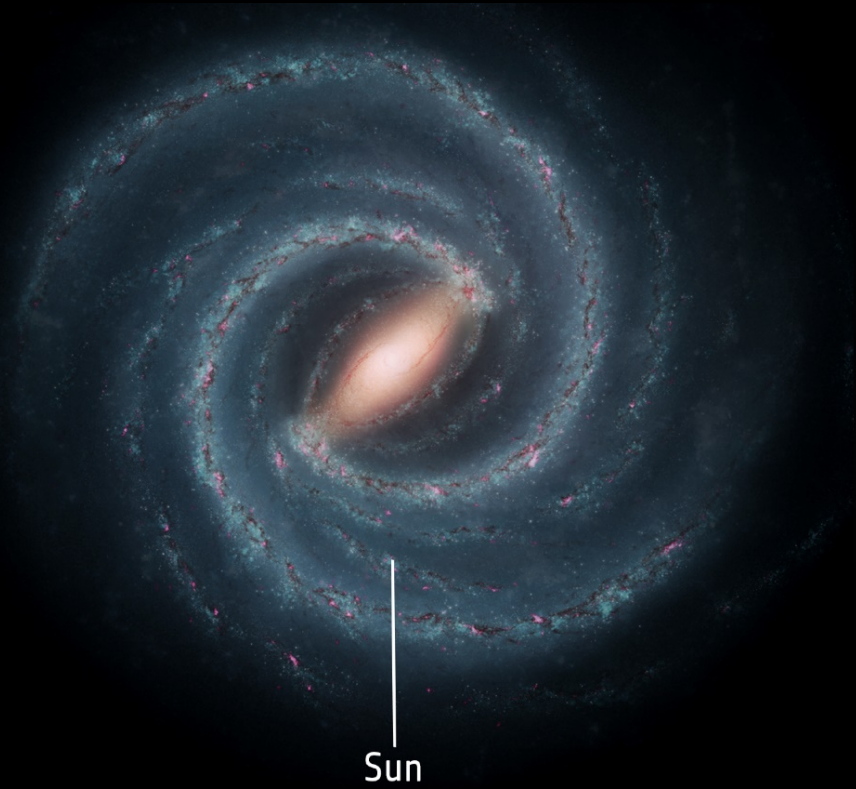
Paardekop Nevel

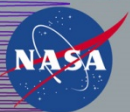
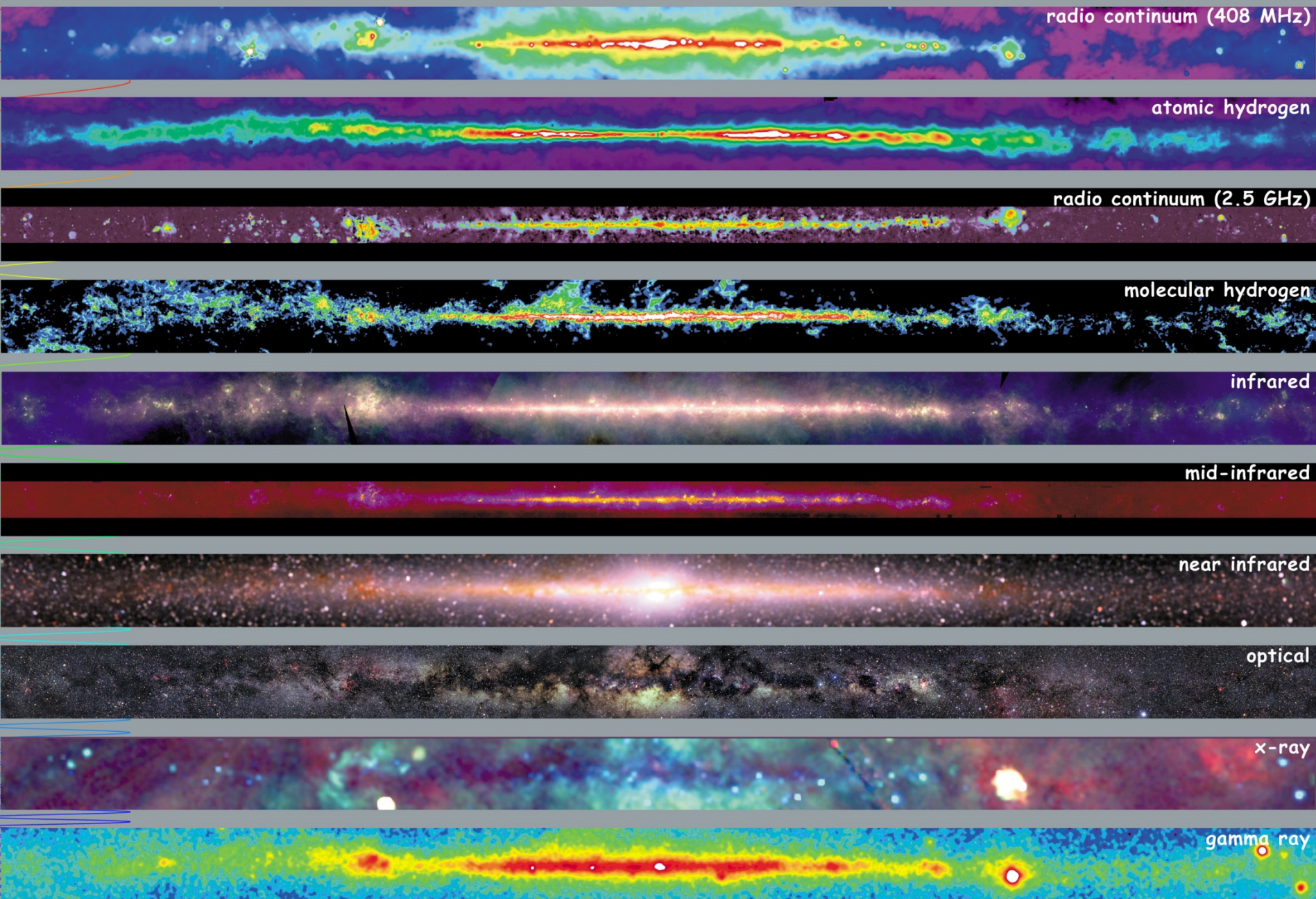


mm- straling (ALMA)



# The anatomy of the Milky Way





# Multiwavelength Milky Way





Nearby Universe  
Today's Galaxies

Time: Present

Developing  
Galaxies

Galaxies grow  
and evolve  
into objects  
with mature  
structure.

Infant Galaxies

**Reionization**

Ultraviolet  
radiation from  
the first stars and  
galaxies "reionizes"  
hydrogen in the  
universe.

First Stars Form

**"Dark Ages"**

No sources of  
light exist to  
illuminate the  
universe.

**Big Bang**

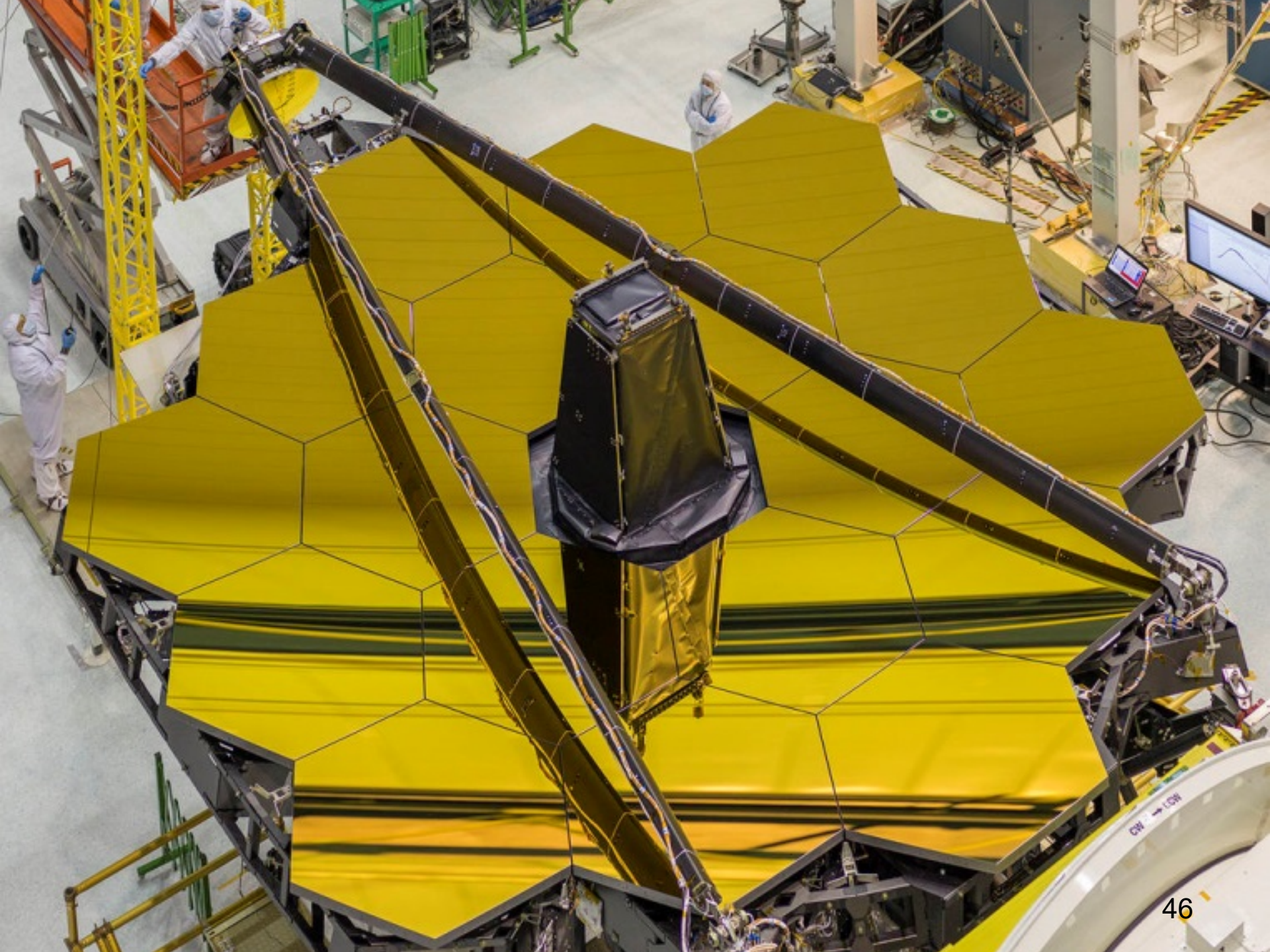
Time: 13,850,000,000  
Years Ago

# James Webb Space Telescope

## Launch: oktober 2021

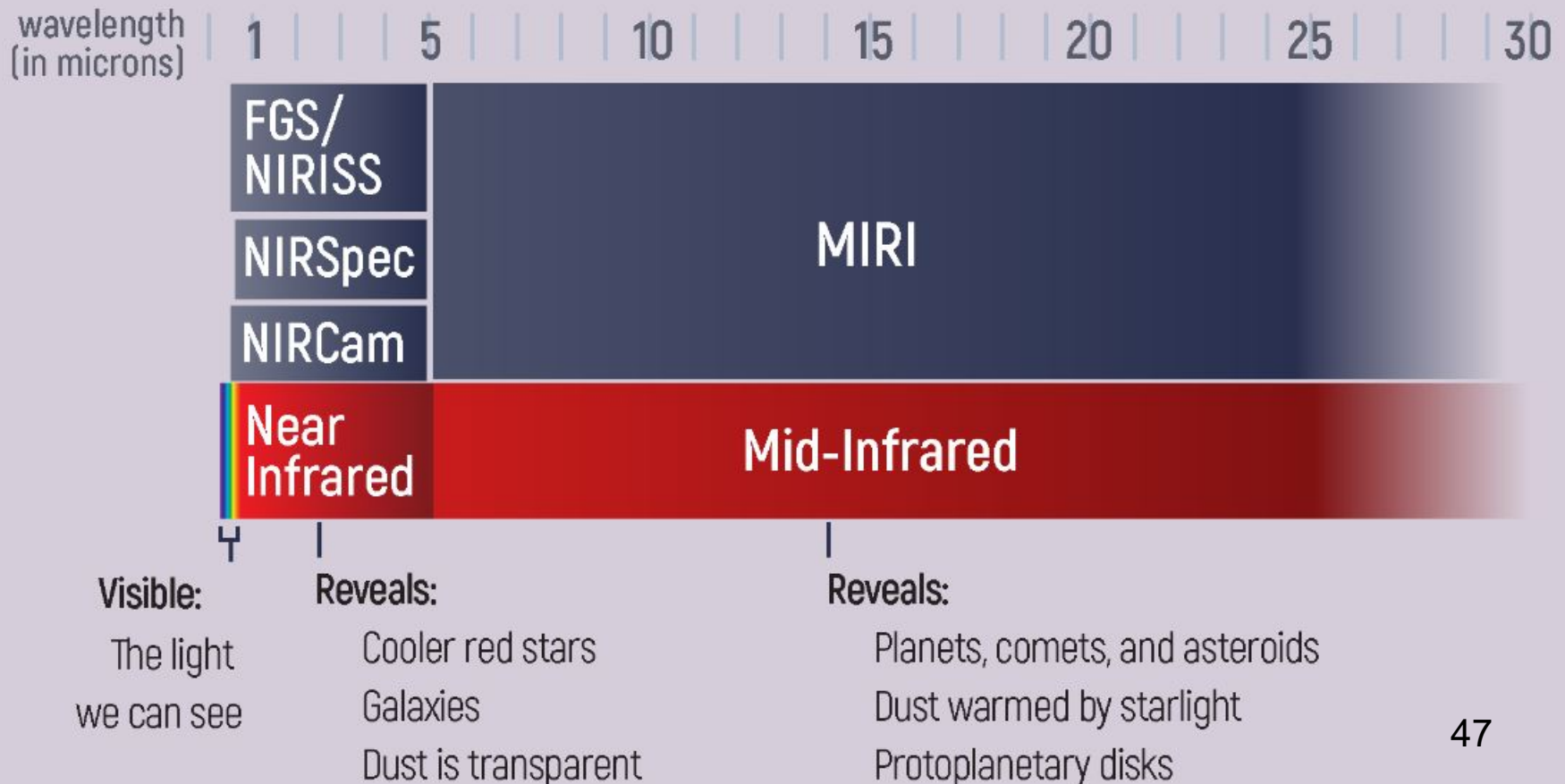






# Webb telescope brandvlak camera's/spectrometers

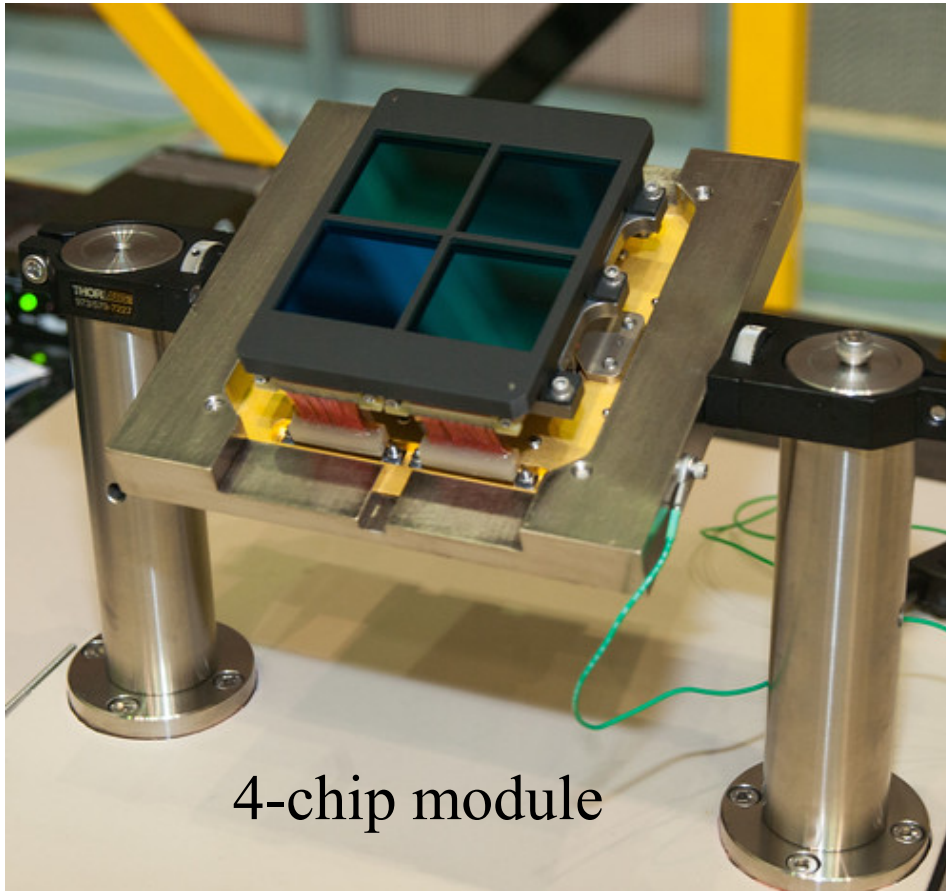
- **Beeldcamera** nabij-infrarood: **0.6 - 5  $\mu\text{m}$**  (NIRCAM)
- **Spectrograaf** nabij-infrarood: **0.6 – 5  $\mu\text{m}$**  (NIRSPEC)
- **Spectrograaf** midden-infrarood: **5 – 28  $\mu\text{m}$**  (MIRI)





# Hubble ➔ James Webb ST: brandvlaksensoren

- **instantaan beeldveld:** JWST = 15x Hubble
- **sensoren:** 2D-array-technologie voor IR-chips (2048x2048 beeldelementen/chip)



## **Materiaal:**

HgCdTe pixel matrix  
(Rockwell, Raytheon)

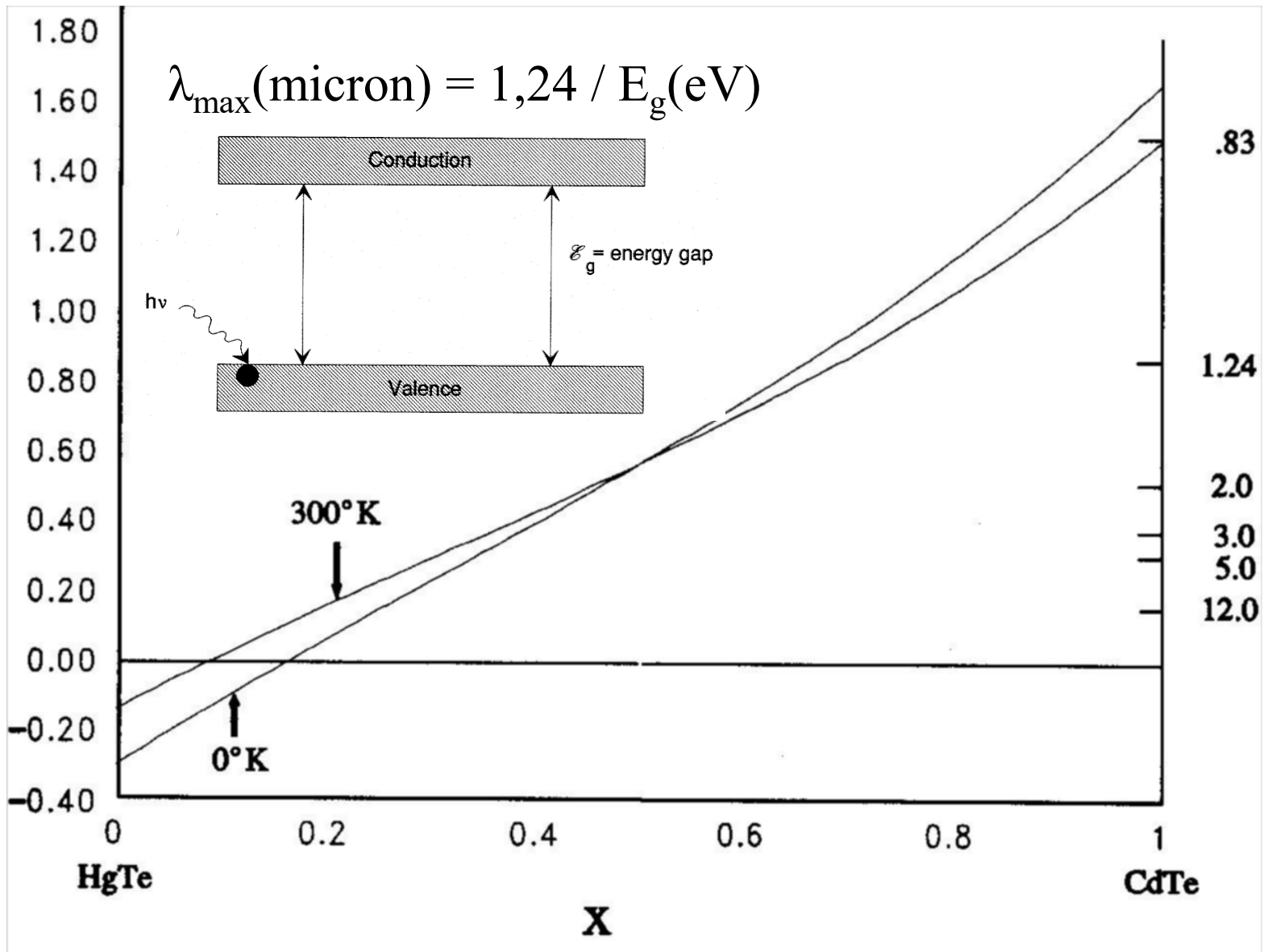
## **Principe:**

Inwendig foto-electrisch effect in halfgeleider met stuurbare 'energy band gap'.

# HgCdTe: sturing golflengte bereik HgTe/CdTe

Band gap in electron Volt

Maximale golflengte in micron





## 2. Beeldscherpte

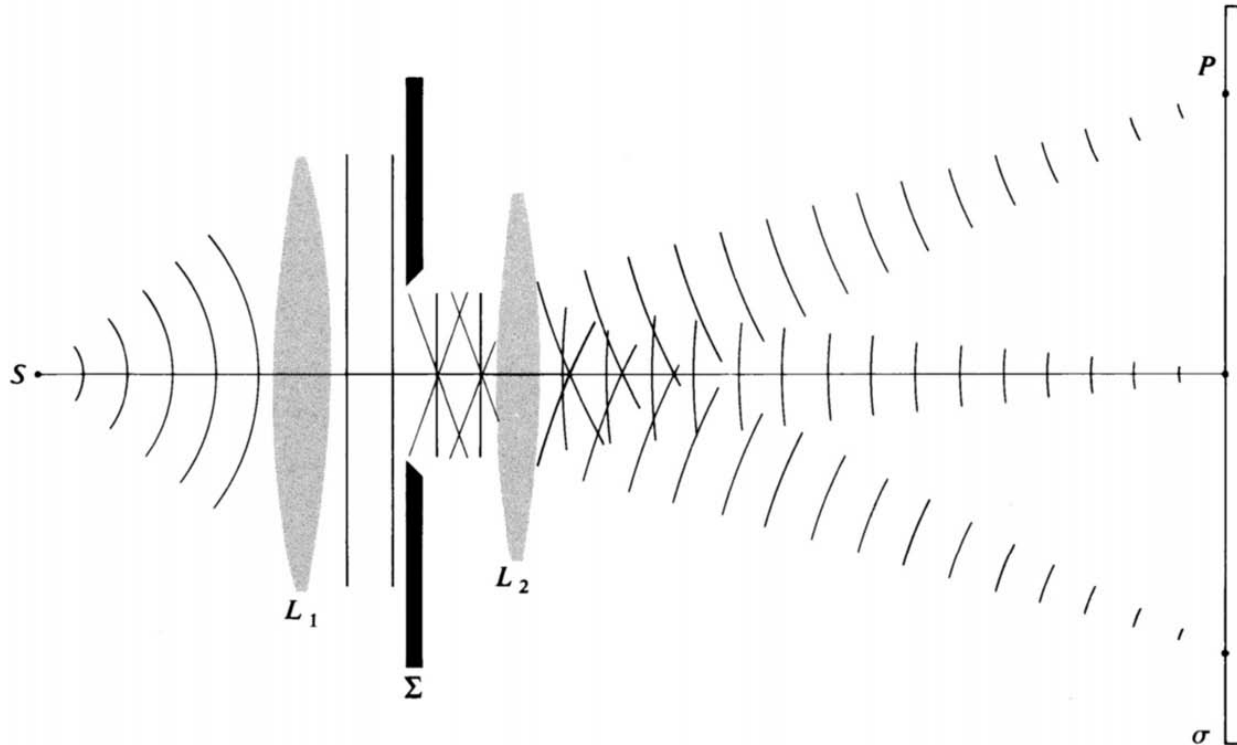
### Begrenzing aan bereikbare beeldscherpte

De fundamenteel fysische begrenzing wordt veroorzaakt door **buiging van het licht** (als golf) aan de **intree-pupil** (apertuur): de buigingsgrens (Engels: diffraction limit)



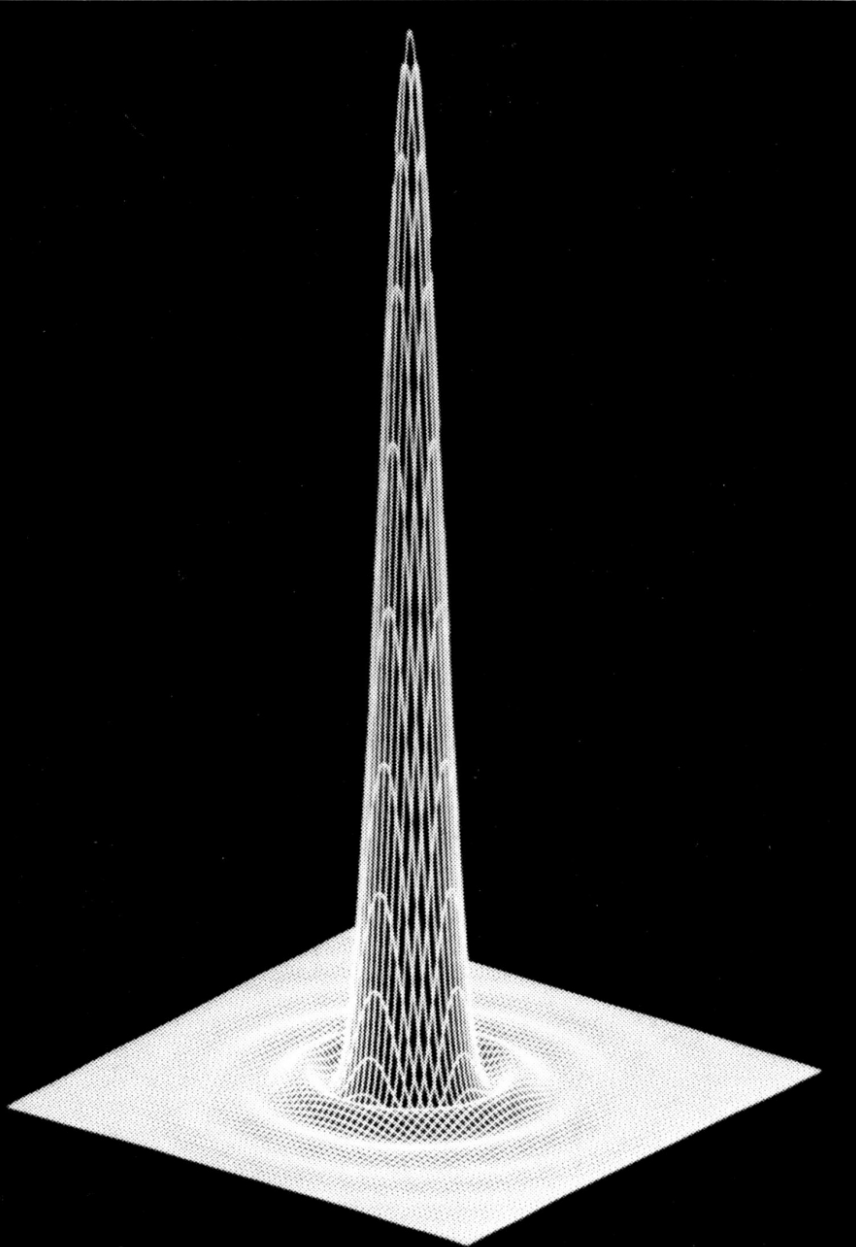
# Huygens-Fresnel principe

**Huygens:** elk onverstoord punt op het doorgelaten golffront is een bron van secundaire golven met dezelfde frequentie als de primaire golf.



**Fresnel:** de amplitude van het stralingsveld op elk punt voorbij de opening is de superpositie van al die secundaire golven met hun relative amplitude en hun relatieve fase in beschouwing genomen.<sup>52</sup>

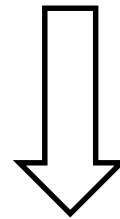
# Buigingsbeeld **verre** puntbron aan een **cirkelvormige** apertuur



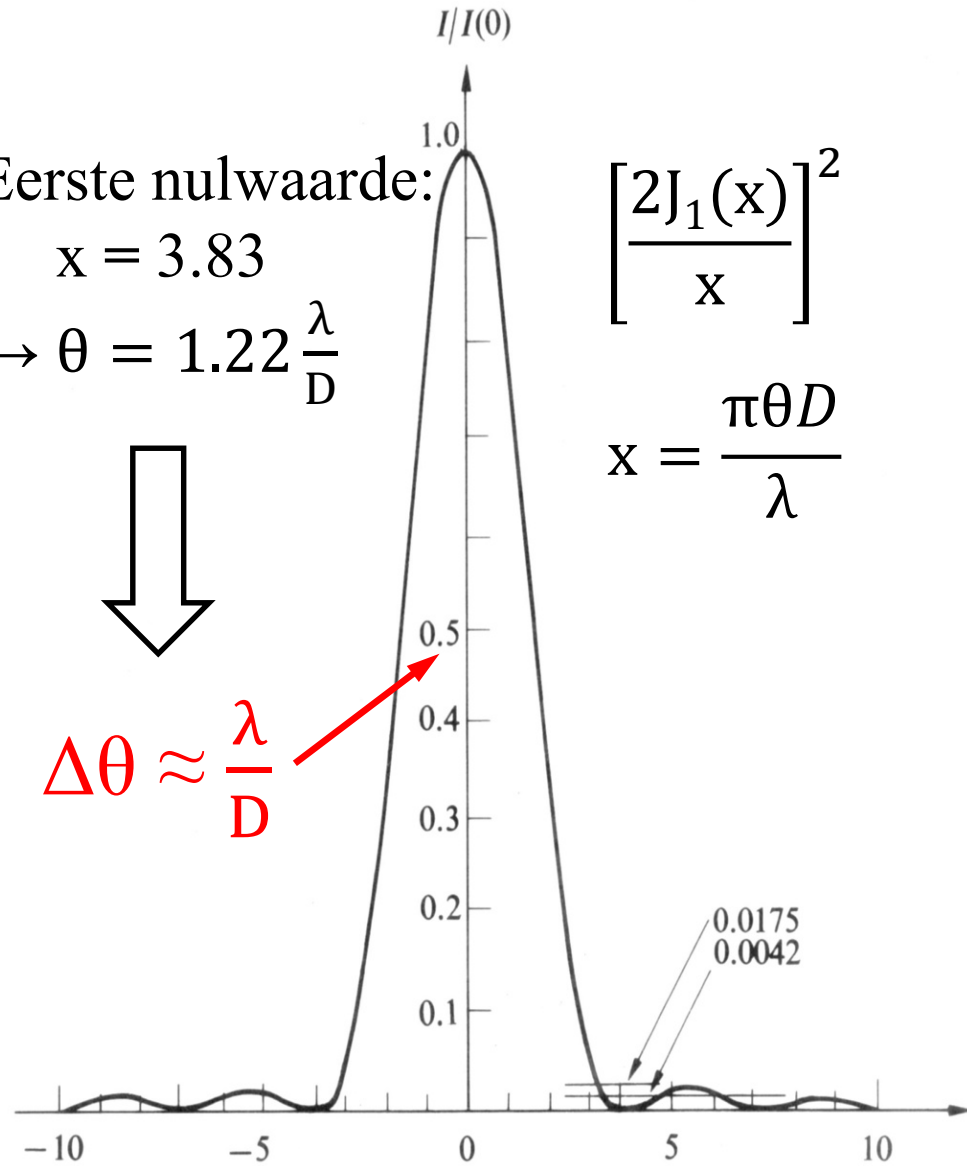
Eerste nulwaarde:

$$x = 3.83$$

$$\rightarrow \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$



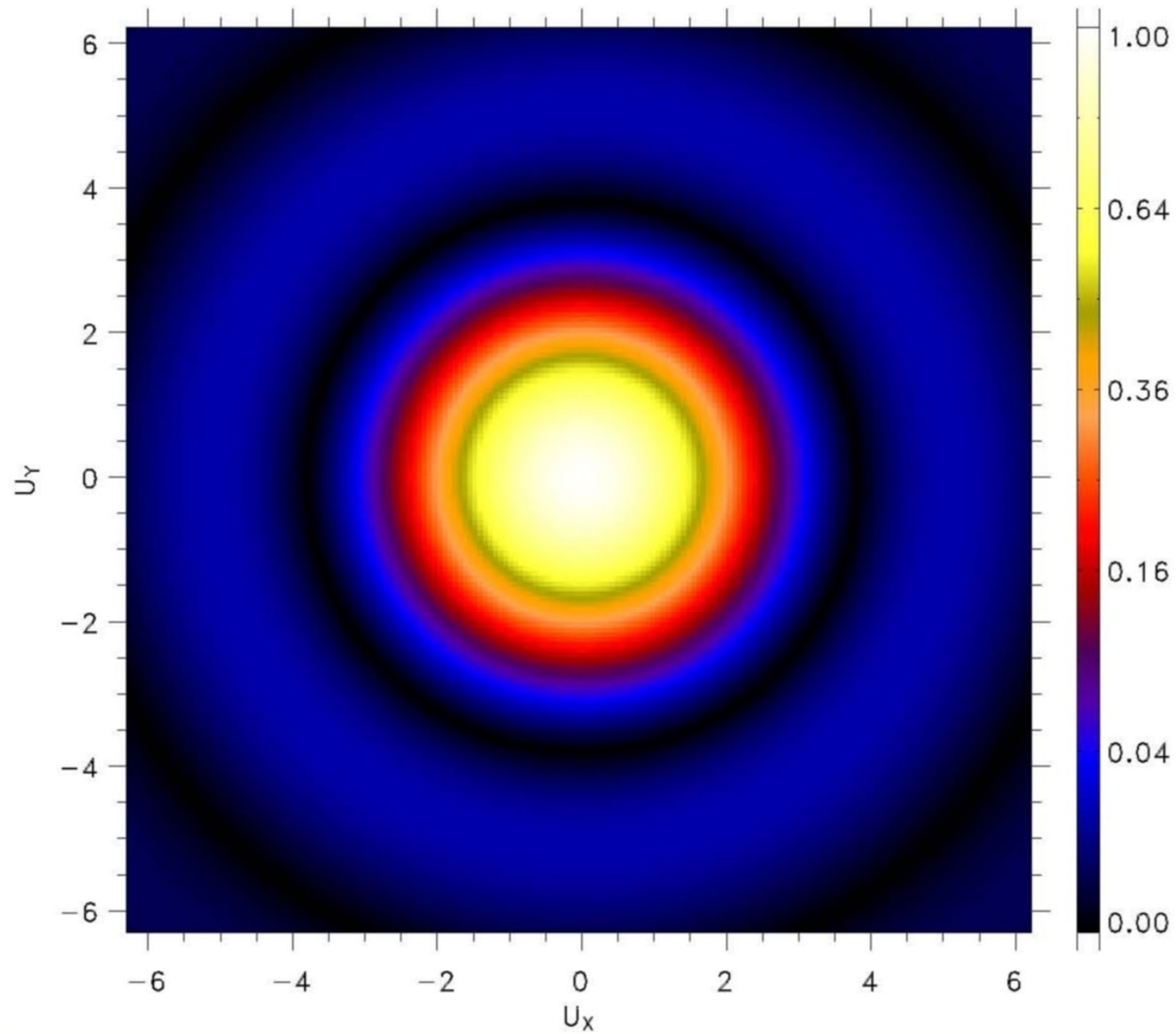
$$\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{D}$$



$$\left[ \frac{2J_1(x)}{x} \right]^2$$

$$x = \frac{\pi\theta D}{\lambda}$$

# Airy schijf



## Berekening van de buigingsgrens

Reguliere benadering:  $\Delta\theta \approx \lambda / D$

Eerste nulwaarde:  $\Delta\theta = 1.22 \lambda / D$

Voorbeeld:  $\lambda = 1 \text{ micron} = 1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ ,  $D = 1 \text{ m}$

$\Delta\theta = 10^{-6} \text{ radialen} = 10^{-6} \times 57 \times 60 \times 60 \text{ bgsec} = 0,2 \text{ bgsec}$



# Quantummechanisch intermezzo

Golffunctie van een deeltje:

met positie-basis:  $\psi(\mathbf{x})$

met impuls-basis:  $\psi(\mathbf{p})$

# Toestandsruimte van een deeltje in de klassieke natuurkunde

In de **klassieke mechanica** wordt de **momentane** toestand van een deeltje beschreven door één punt in een **6-dimensionale toestandsruimte** met coördinaat-assen  $x, y, z, v_x, v_y, v_z$  (plaats- en snelheidscoördinaten). Gegeven een **bewegingswet**, dan kan de toestand van het deeltje worden beschreven door 6 variabelen:  $x(t), y(t), z(t), v_x(t), v_y(t), v_z(t)$ . De geschiedenis van de toestand van het deeltje kan aldus worden voorgesteld door een afgelegd traject in de 6D toestandsruimte.

In plaats van de snelheid  $\vec{v}$  kan ook de impuls  $\vec{p} = m \vec{v}$  worden gebruikt om punten in de toestandsruimte aan te geven. In die beschrijving wordt de **toestandsruimte** aangeduid met **faseruimte**. De faseruimte van een deeltje is een 6D ruimte met coördinaten  $x_i$  en  $p_i$ . Voor elk punt in de faseruimte gelden dan de volgende relaties:

$$\dot{p}_i = F_i(\{r_i\}) \quad \text{en} \quad \dot{r}_i = p_i/m$$

# Toestand van een deeltje volgens de quantummechanica (1)

Een fysisch systeem wordt beschreven door een vectorruimte, waarin (complexe) vectoren de systeemtoestand representeren. Dergelijke 'toestandsvectoren' worden aangeduid met 'ket' en 'bra' vectoren, notatie  $|\psi\rangle$  respectievelijk  $\langle\psi|$ . De 'bra' vector  $\langle\psi|$  (rijvector) is de **complex geconjugeerde** van de 'ket' vector  $|\psi\rangle$  (kolomvector).

De mogelijke uitkomsten voor de x-positie van een deeltje worden gevonden uit de eigenwaardevergelijking voor de **lineaire positie operator**  $\mathbf{X}$  die wordt toegepast op  $|\psi\rangle$ :  $\mathbf{X}|\psi\rangle = x_0|\psi\rangle$ , met  $x_0$  een specifieke eigenwaarde met bijbehorende eigenvector  $|\psi\rangle = |x_0\rangle$

Het **inwendig product** van de toestandsvector  $|\psi\rangle$  met de x-positie eigenvector  $|x_0\rangle$  is gedefinieerd als:

$$\langle x_0|\psi\rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x - x_0)\psi(x)dx = \psi(x_0),$$

met  $\psi(x)$  de golffunctie van het deeltje als functie van de x-coördinaat

## Toestand van een deeltje volgens de quantummechanica (2)

Deze relatie geldt voor elke waarde van  $x_0$ ,  $\rightarrow$

$$\langle x|\psi\rangle = \psi(x)$$

**Betekenis:** de golffunctie  $\psi(x)$  van een deeltje dat in de x-richting beweegt is de projectie van de toestandsvector  $|\psi\rangle$  op de eigenvectoren van positie,  $\psi(x)$  is de golffunctie van het deeltje in de positie-basis.

Behalve door een positie wordt de toestand van een deeltje ook bepaald door zijn impuls. Analooq aan  $\psi(x)$  kan de impulsafhankelijkheid van de golffunctie worden afgeleid uit:

$$\langle p|\psi\rangle = \psi(p)$$

waarin  $p$  een eigenwaarde van de impuls operator  $\mathbf{P}$  uit :  $\mathbf{P}|\psi\rangle = p|\psi\rangle$

**Betekenis:** de golffunctie  $\psi(p)$  van een deeltje met impuls  $p$  ( gericht langs de x-as) is de projectie van de toestandsvector  $|\psi\rangle$  op de eigenvectoren van impuls:  $\psi(p)$  is de golffunctie van het deeltje in de impuls-basis.

# Relatie tussen $\psi(x)$ en $\psi(p)$

$\psi(x)$  en  $\psi(p)$  representeren beide **exact dezelfde** toestandsvector  $|\psi\rangle$  !  
Hieruit volgt dat er een transformatie moet bestaan tussen  $\psi(x)$  en  $\psi(p)$  zodanig dat als  $\psi(x)$  bekend is, transformatie  $\psi(p)$  oplevert en omgekeerd. Er kan eenvoudig worden aangetoond dat de beide representaties Fourier transformaties van elkaar zijn, zij vormen een Fourier paar:

$$\psi(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{ipx}{\hbar}} \psi(x) dx \quad \psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{\frac{ipx}{\hbar}} \psi(p) dp$$

De **waarschijnlijkheidsdichtheid** om een deeltje op positie  $x$  **of** met impuls  $p$  aan te treffen volgt uit:

$$P(x) = \psi^*(x)\psi(x) \text{ en } P(p) = \psi^*(p)\psi(p), \quad * = \text{complex geconjugeerde}$$

Indien de impuls heel precies wordt bepaald,  $\psi(p) = \delta(p - p_0)$ , dan volgt uit de Fourier relaties voor  $P(x) = 1/2\pi$ , de waarschijnlijkheidsdichtheid als functie van de positie is in dat geval een volledig uniforme verdeling. Een toestand met **precies bepaalde impuls is volledig onbepaald in plaats!**



# Onzekerheidsrelaties van Heisenberg

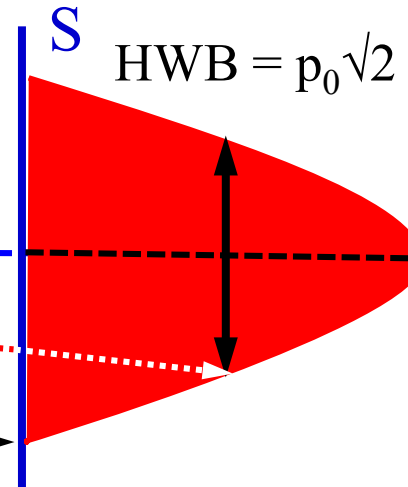
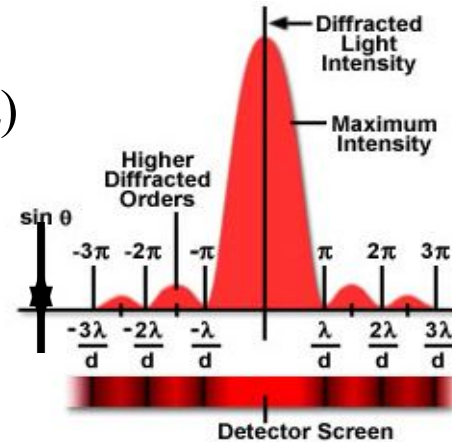
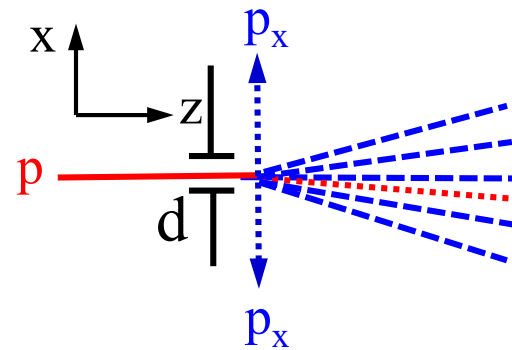
$$\sigma_x \sigma_{p_x} \geq \hbar / 2 \quad (\text{impuls } p_x \text{ gericht langs de x-as})$$

$\sigma_x$  = standaard deviatie in de spreiding van de x-waarde

$\sigma_{p_x}$  = standaard deviatie in de spreiding van de p-waarde in de x-richting

Vb: Transmissie van een stralingsbundel door een spleet:  $I = I_0 \text{sinc}^2(\pi d \sin \theta / \lambda)$

$$\text{sinc } x = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$$



Doorlaat van de spleet  $d$ : kansdichtheid **blokfunctie**  $\frac{1}{d} \Pi(\frac{x}{d})$ , variantie  $\sigma_x^2 = d^2/12$

Centrale vlek op  $S$ : kansdichtheid met **parabolisch profiel**, variantie  $\sigma_{p_x}^2 = p_0^2/5$

$\sigma_x \sigma_{p_x} = p_0 d / \sqrt{60} \rightarrow$  Heisenberg:  $p_0 d / \sqrt{60} \geq \hbar / 4\pi \rightarrow p_0 \geq 0.62 \hbar / d = 0.62 p \lambda / d$

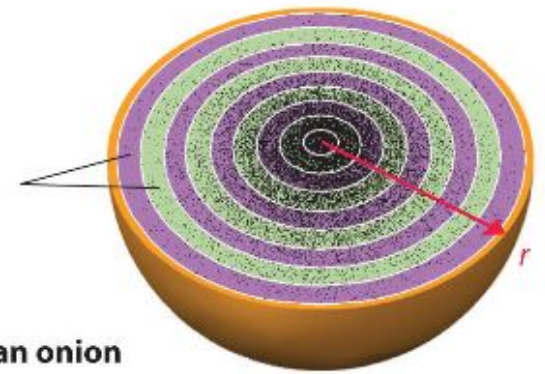
HWB-hoek  $\Delta\theta$ :  $\approx 2 \sin(\Delta\theta/2) = p_0 \sqrt{2} / p = 0.62 \sqrt{2} \lambda / d \rightarrow \Delta\theta \approx \lambda / d =$  **diffractiegrens!**

"Mr Tompkin in Wonderland"  
by George Gamov (1939):  
opsluiting van een biljartbal



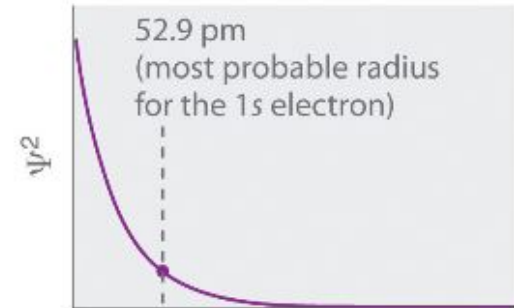
# H-atom

Concentric spherical shells

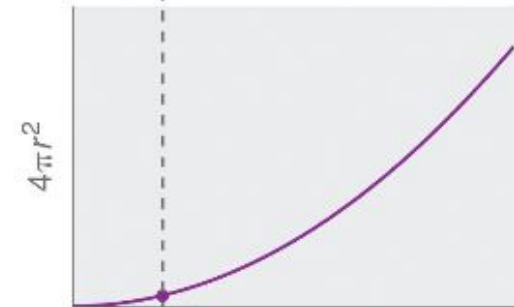


(a) 1s orbital imagined as an onion

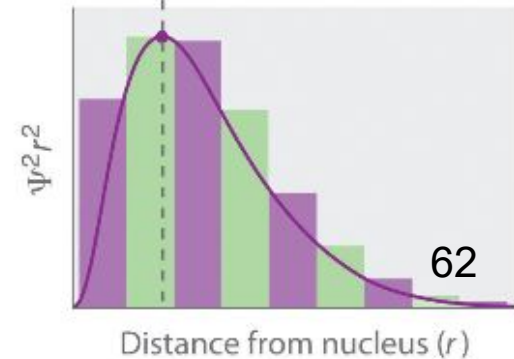
(b) Probability density



(c) Spherical surface area



(d) Radial probability



Getallen voor de **fictieve** macro- en **werkelijke** microwereld

### Gamov's biljart:

$$\hbar=1 \text{ J.s, } m=0.5 \text{ kg, } \sigma_x=0,3 \text{ m} \rightarrow$$

$\sigma_v \approx 3 \text{ m/sec}$ : *fictieve* onrust t.g.v. de nulpuntsenergie

### H-atoom:

$$\hbar=10^{-34} \text{ J.s, } m=10^{-30} \text{ kg, } \sigma_x=10^{-10} \text{ m} \rightarrow$$

$\sigma_v \approx 500 \text{ km/sec}$ : *werkelijke* onrust t.g.v. de nulpuntsenergie

# Buigingsbegrenste beeldscherpte $\Delta\theta$ invloed van atmosferische 'seeing'



Opname vanaf de grond met een karakteristieke atmosferische 'seeing' van 1,1 boogseconden



Hubble (2,4 m  $\emptyset$ ) diepe belichting  
 $\Delta\theta \approx \lambda / D \approx 0,05$  boogseconden



# Beeldscherpte $\Delta\theta$ buiten dampkring

Opname Hubble ruimtetelescoop van spiraalstelsel M100  
aberratie-begrensde beeldscherpte  $\rightarrow$  buigingsbegrenzing



zonder correctie-optiek COSTAR

sferische vertekening  $\rightarrow$   
slijpfout primaire spiegel



met correctie-optiek COSTAR

buigingsbegrensd beeld  $\rightarrow$   
 $\Delta\theta \approx \lambda / D \approx 0,05$  bgseconden<sup>65</sup>



Stervormingsgebied in Carinanevel  
Hubble 20ste verjaardag, april 2010

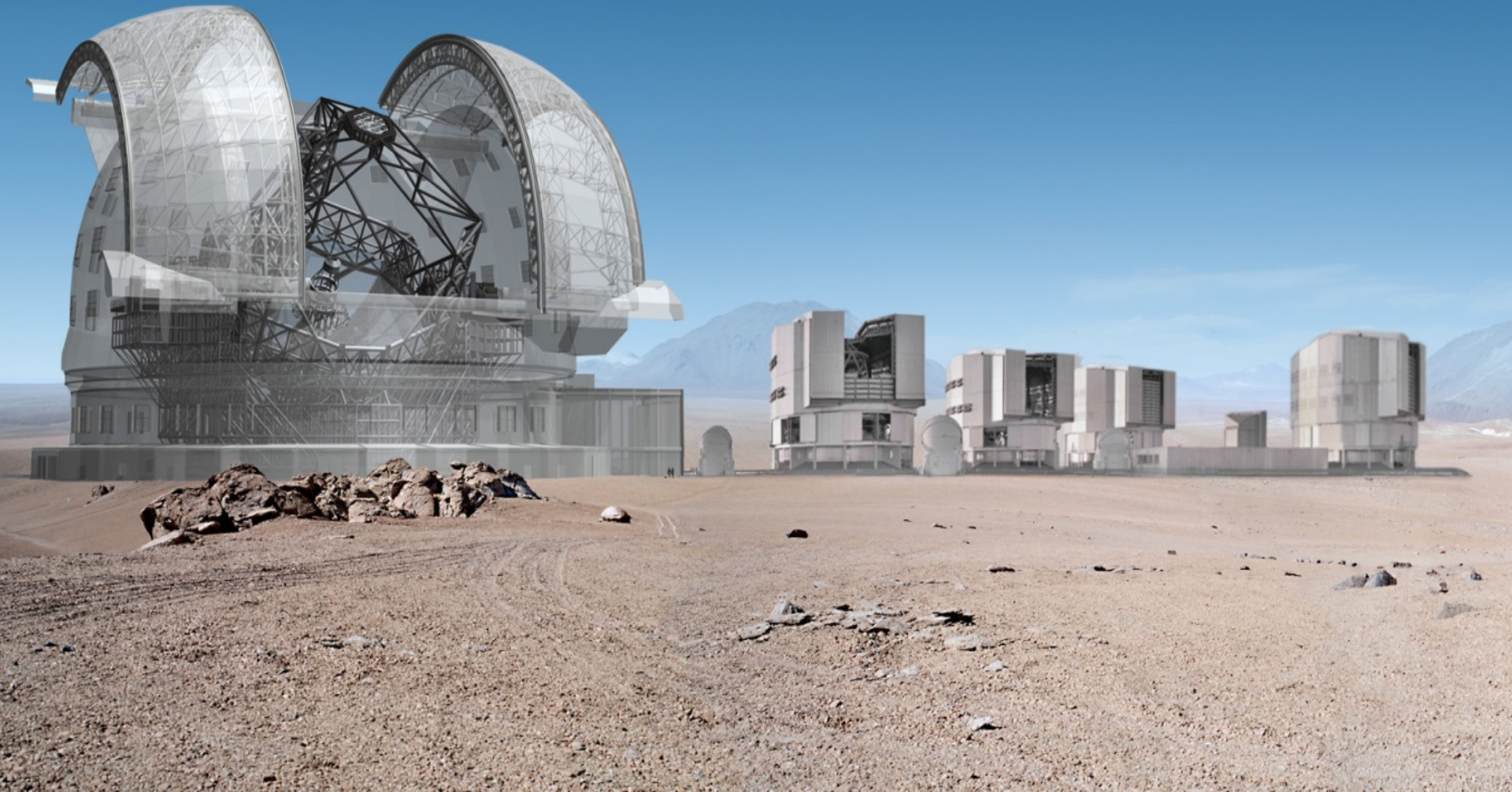


# Diffraction limits for a few selected telescopes

Telescope	Diameter of aperture	Wavelength	Angular resolution $\lambda/D$ (see above note)
MPIfRA Effelsberg, West Germany	100 m	74 cm	25 arcmin
		6 cm	2 arcmin
James Clerk Maxwell Telescope, Mauna Kea	15 m	1 mm	14 arcsec
		0.35 mm	5 arcsec
Infrared Astronomical Satellite (IRAS)	60 cm	100 $\mu\text{m}$	34 arcsec
ESA Infrared Space Observatory (ISO)	60 cm	10 $\mu\text{m}$	4 arcsec
UK Infrared Telescope (UKIRT)	3.9 m	10 $\mu\text{m}$	0.5 arcsec
		2.2 $\mu\text{m}$	0.1 arcsec <sup>a</sup>
Palomar 5 m Telescope	5 m	1 $\mu\text{m}$	0.04 arcsec <sup>a</sup>
		500 $\mu\text{m}$	0.02 arcsec <sup>a</sup>
NASA-ESA Hubble Space Telescope (HST)	2.4m	1 $\mu\text{m}$	0.09 arcsec
		500 nm	0.043 arcsec
		200 nm	0.017 arcsec
		120 nm	0.010 arcsec

ESO European- Extremely  
Large Telescope (E-ELT)  
Chili Atacama woestijn  
Cerro Armazones 3060 meter  
1x 39,3-meter primaire spiegel

ESO Very Large Telescope  
Interferometer (VLTI)  
Chili Atacama woestijn  
Cerro Paranal 2635 meter  
4 x 8,2 -meter primaire spiegel

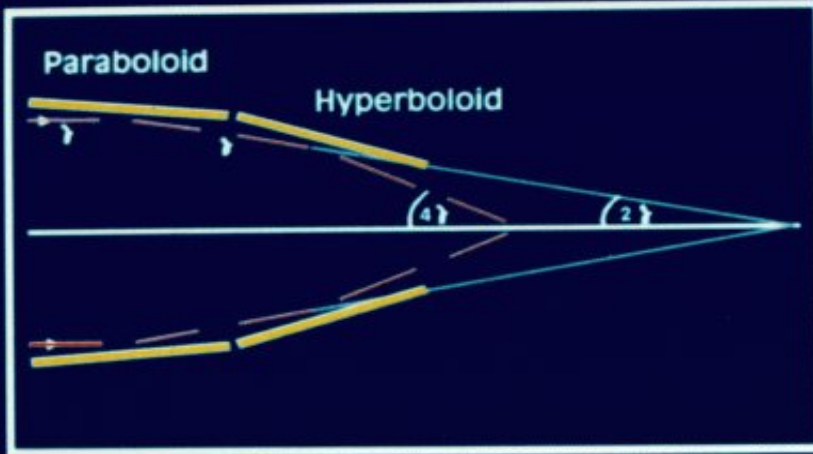


# Principes van Röntgentelescopie

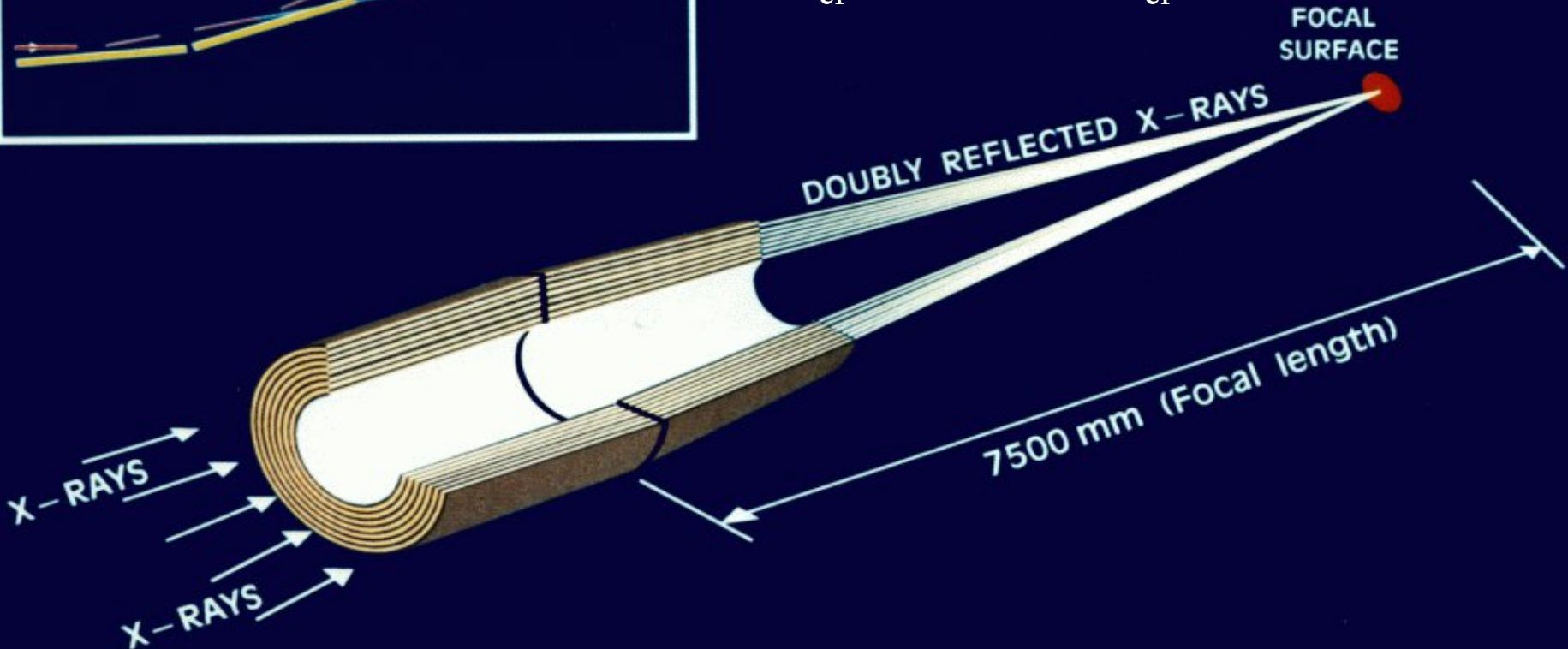
optica met schierend invallende stralingsbundel



# Scherende-inval optiek

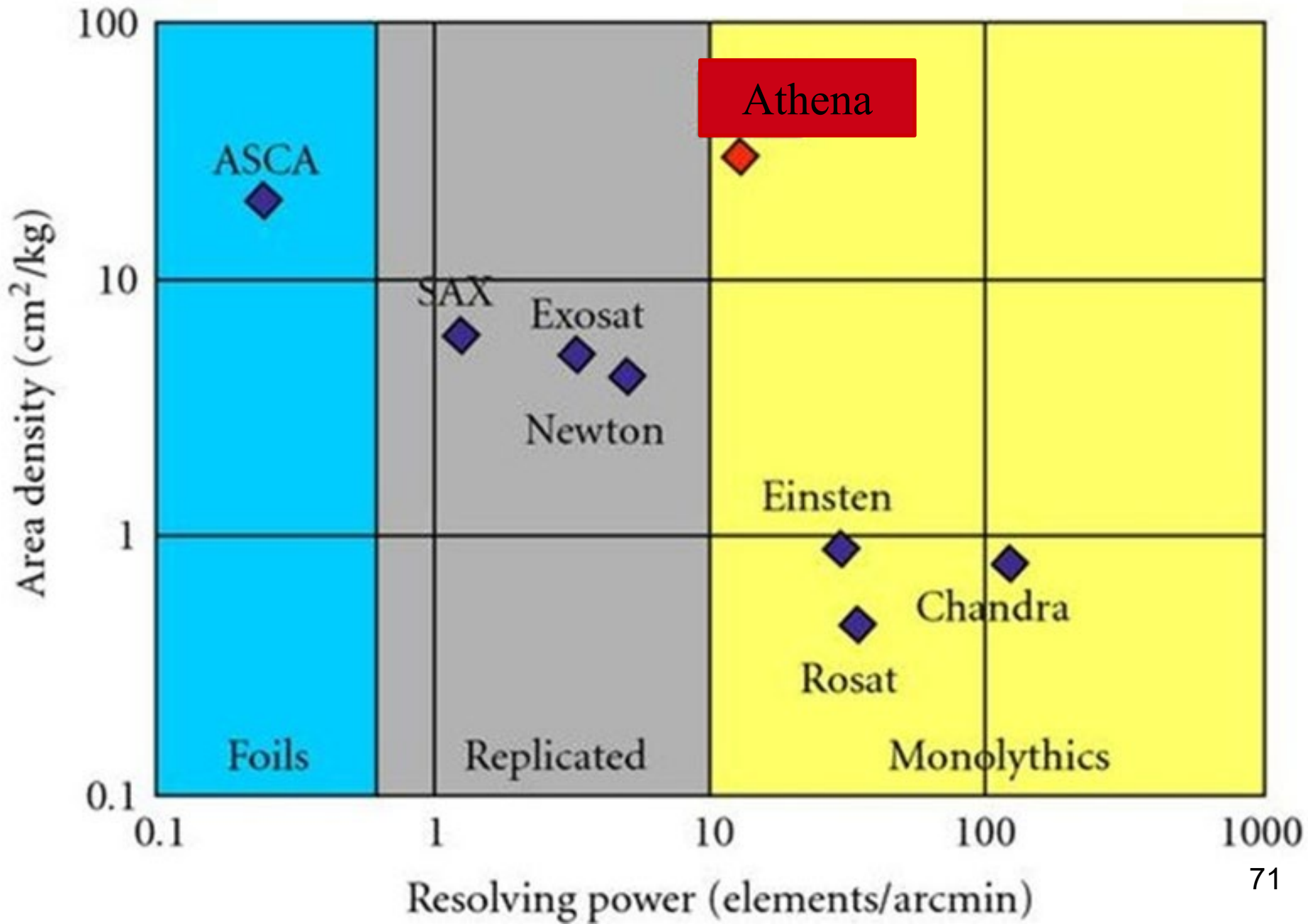


**Total Reflection on metallic surface:**  
Refractive index  $n_{\text{metal}} = 1 - \delta - i\beta$ ,  $\beta \approx 0$   
employing Snell's law, total reflection  
 $\cos \theta_{\text{cr}} = 1 - \delta \rightarrow \theta_{\text{cr}} = \sqrt{2\delta}$ ,  $\delta = \text{small}$





# Area/Resolution Challenge



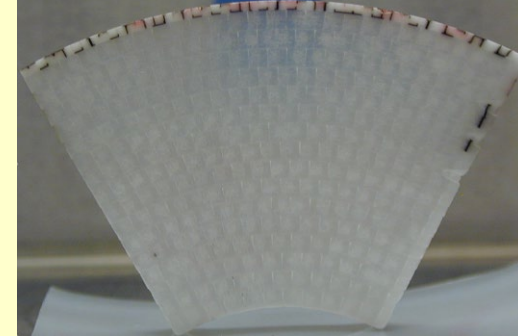
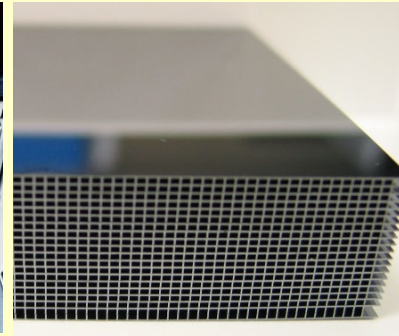
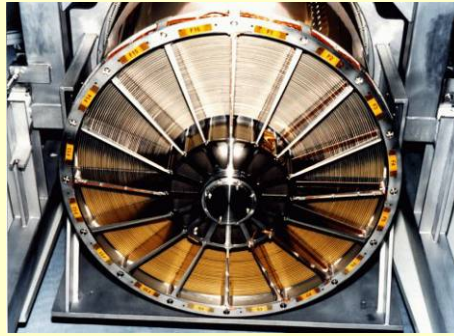
# X-ray optics technology comparison

CHANDRA

XMM Newton

ATHENA

MIXS



*Zerodur*

*Ni*

*Si*

*SiO<sub>2</sub>*

0.5"

14"

< 5"

< 30"

18500 kg/m<sup>2</sup>

2300 kg/m<sup>2</sup>

200 kg/m<sup>2</sup>

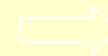
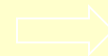
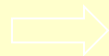
25 kg/m<sup>2</sup>

A<sub>eff</sub> @ 1 keV

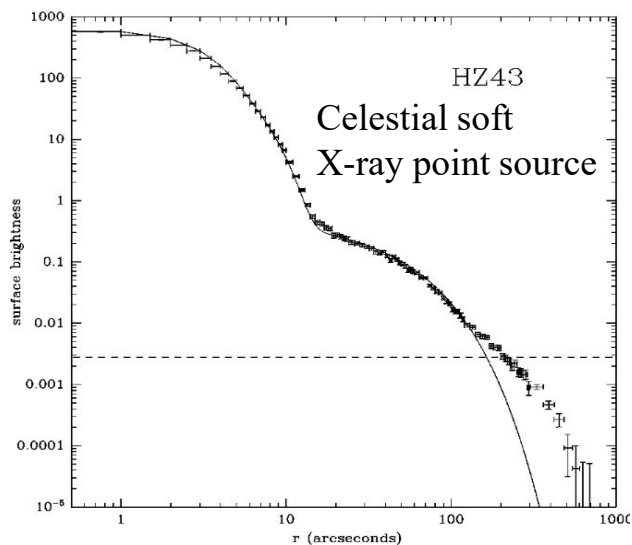
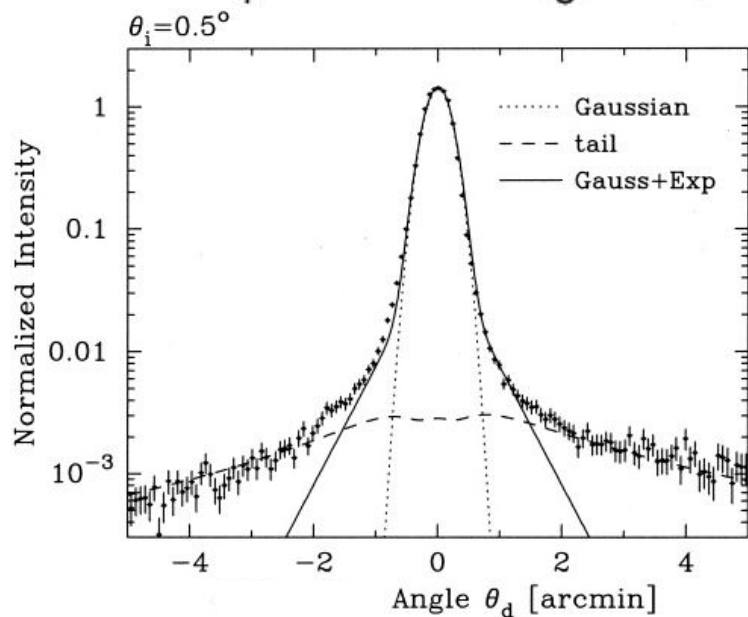
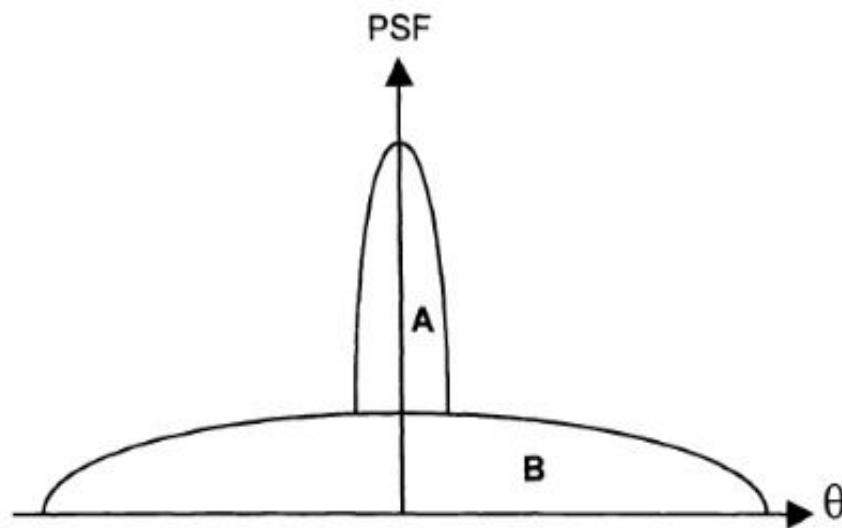
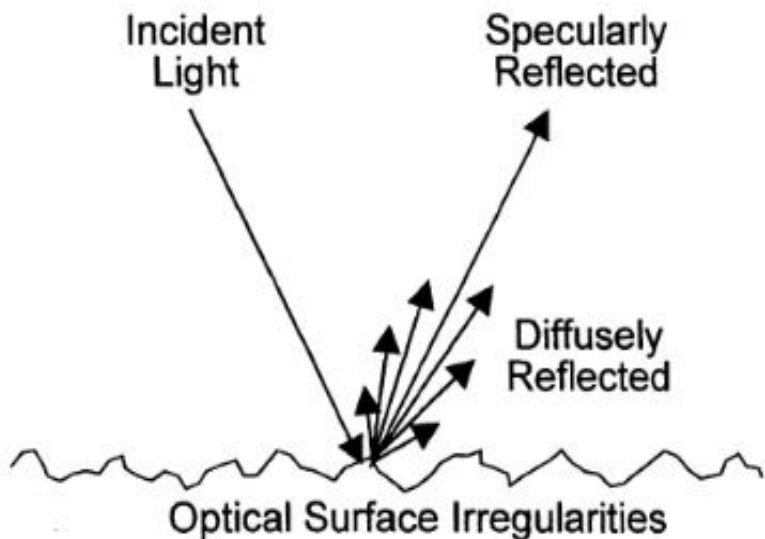
A<sub>eff</sub> @ 1 keV

A<sub>eff</sub> @ 1 keV

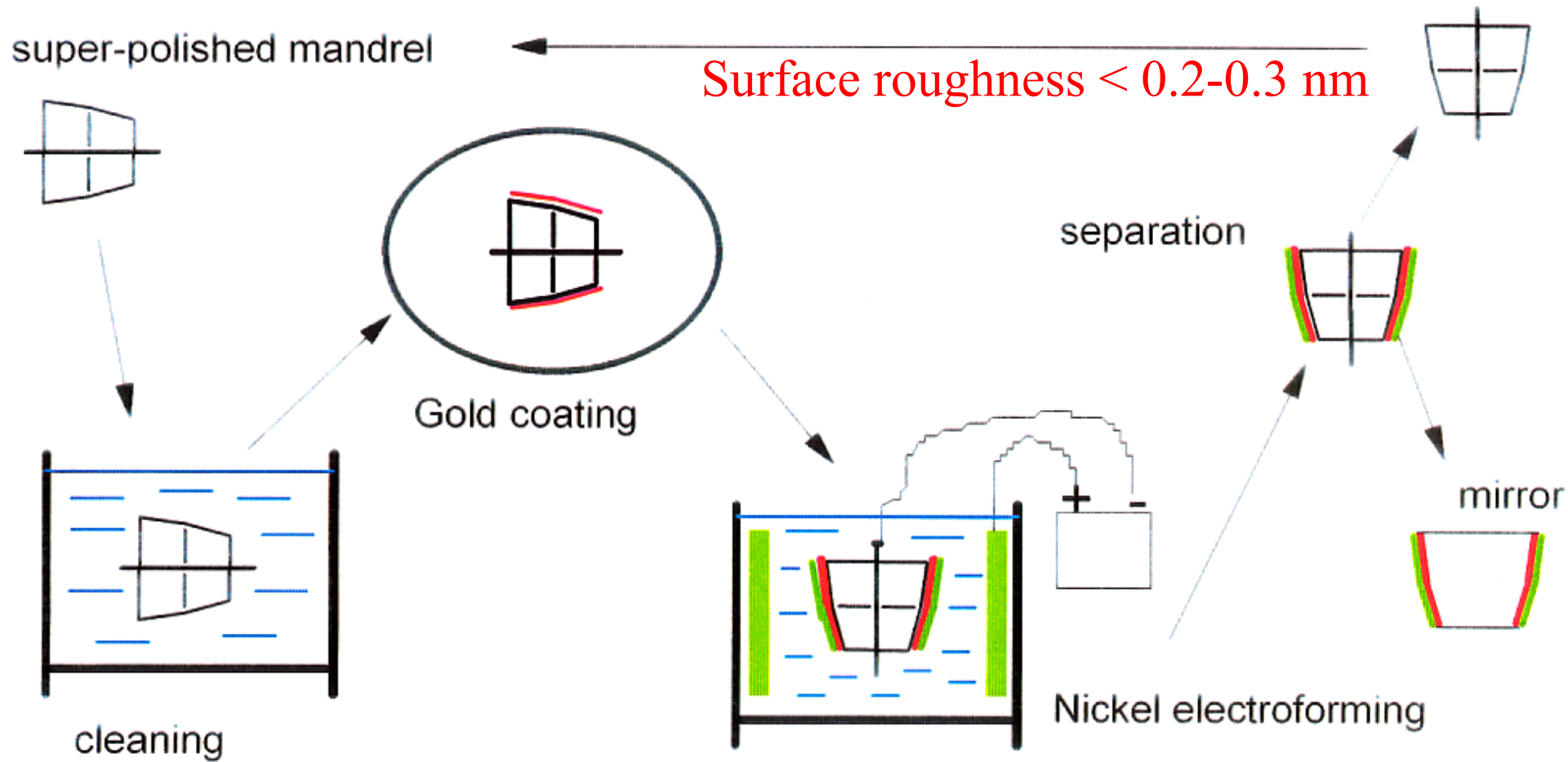
A<sub>eff</sub> @ 1 keV



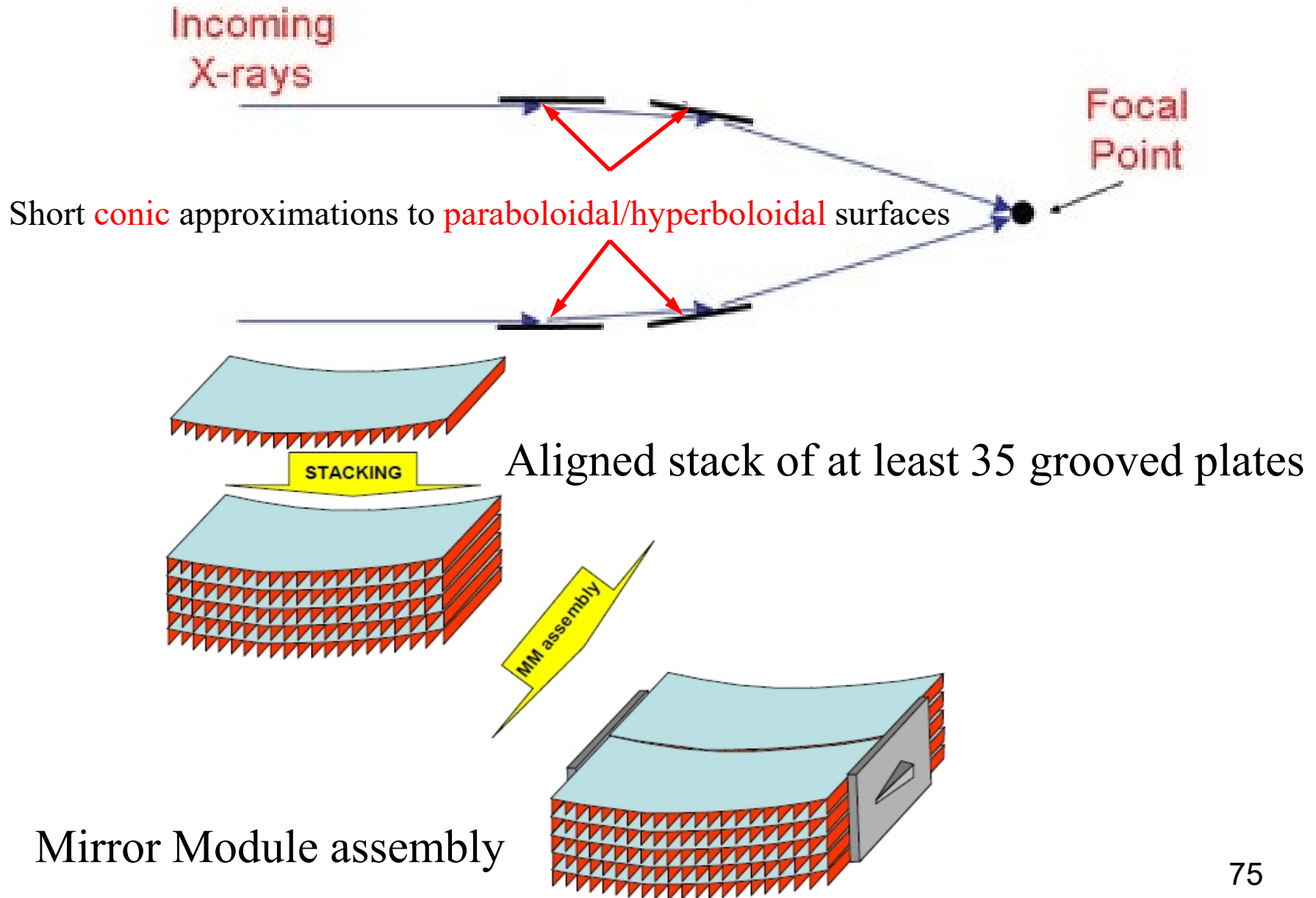
# Verstrooiing van de invallende X-bundel aan micro-onregelmatigheden op het reflecterende oppervlak



# Replicatie proces spiegelschil



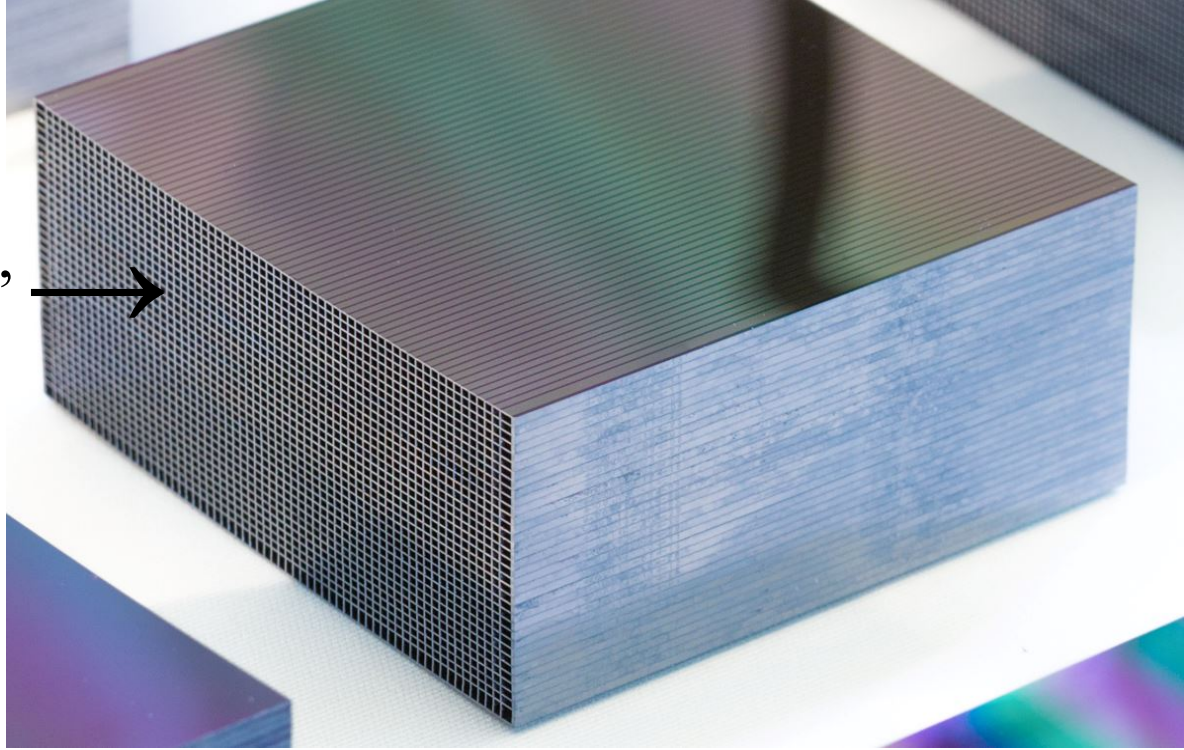
# X-ray-pore optics: aligned stack of grooved Si-wafers



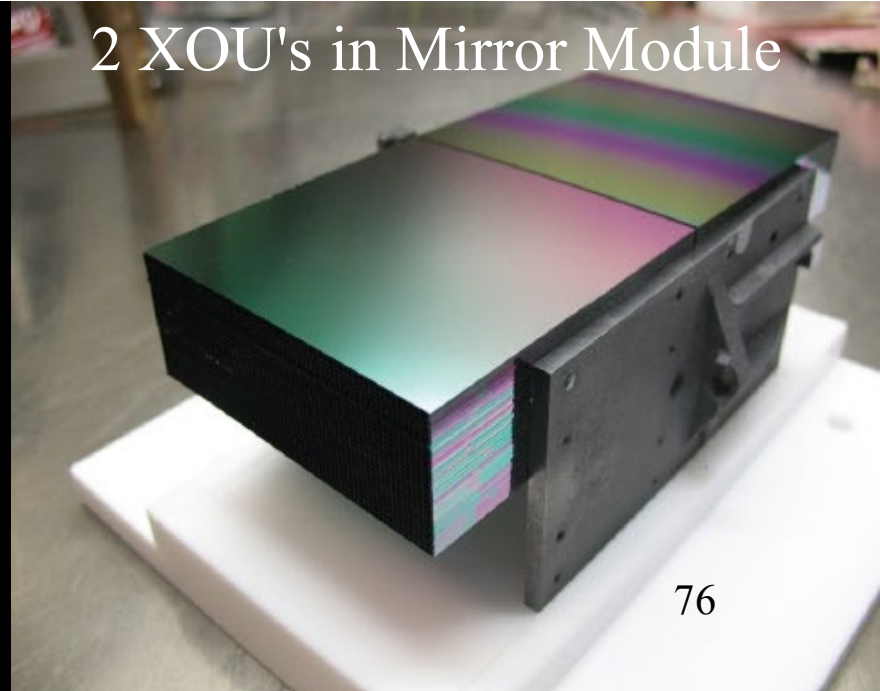


Commercial 12" Si wafers  
→ 100 x 40 mm<sup>2</sup> plates →  
Stack of 35 grooved plates,  
1500 rectangular pores

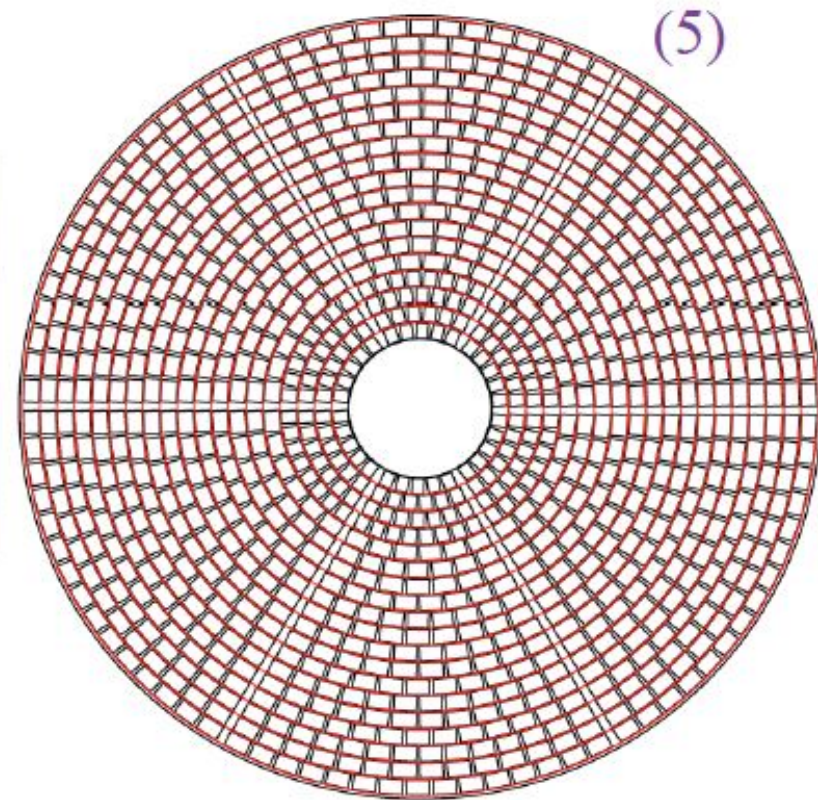
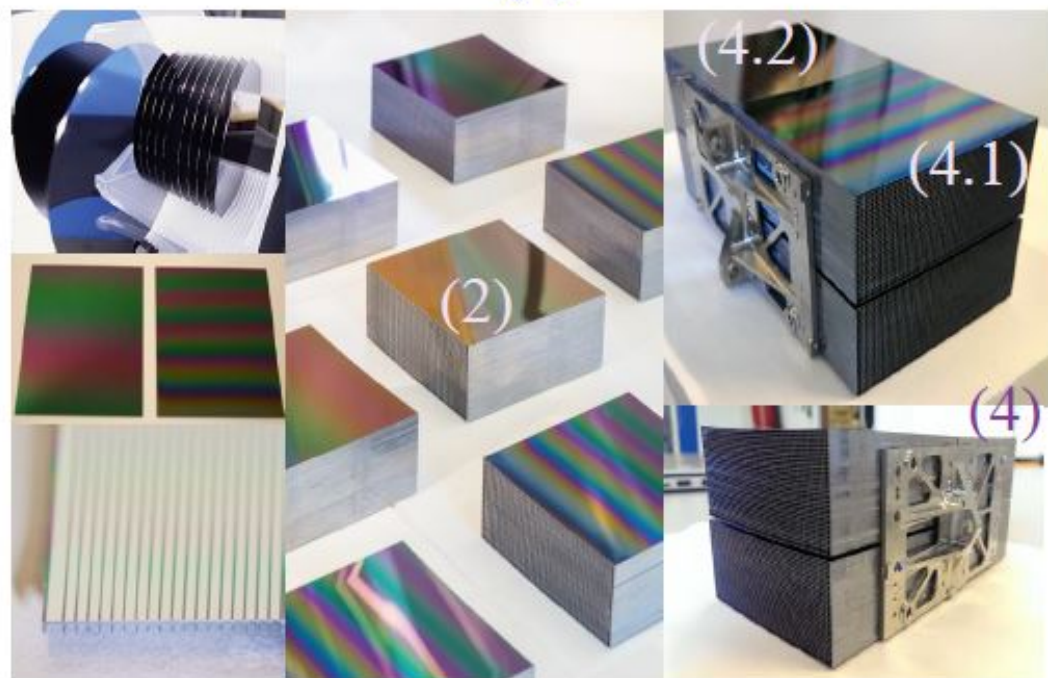
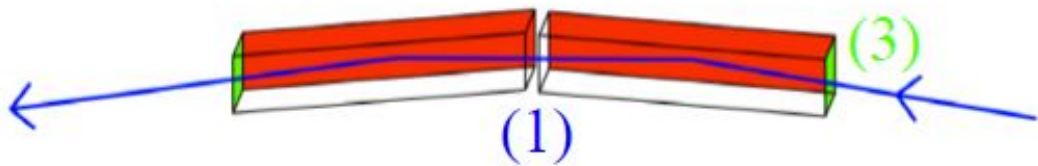
2 aligned stacks → XOU  
(X-ray Optical Unit)



2 XOU's in Mirror Module



# Assembly of Si-pore optics components into total ATHENA optics front-end



## X-ray Mirror characteristics:

Mirror component mass	300 kg
Component mass + structure	650 kg
Total reflecting surface	400 m <sup>2</sup>

## Integrated Optics: 3 meter diameter

- 12 meter focal length
- ≈ 1100 MM's <sup>77</sup>
- 150.000 Si-wafer plates
- 2.600.000 optical pores

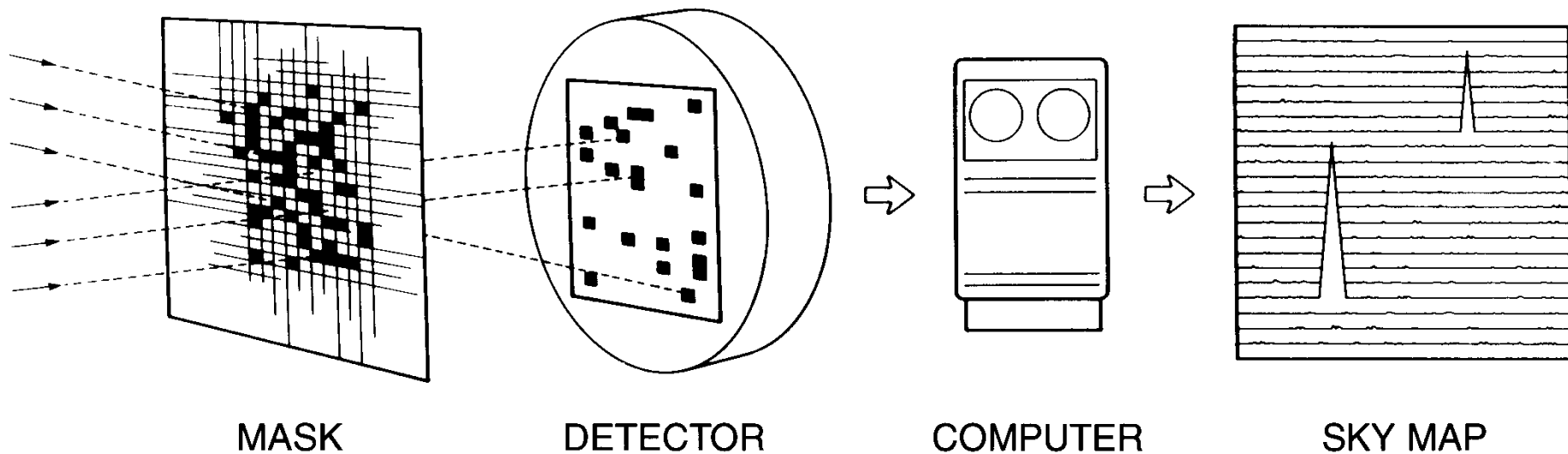


# De hoogste energie in kosmische versnellers waarneming met gammastralingstelescopen

## Technieken

- **Masker telescopen:** 0,01 – 5 MeV → **space based:**  
BeppoSAX (1996-2002)  
INTEGRAL (2002 - heden)
- **Compton telescopen:** 0,1 – 30 MeV → **space based:**  
Compton Observatory (1990 – 2000)
- **Paarconversie telescopen:** 20 MeV – 100 GeV → **space based:**  
GLAST (Lancering: 16 mei 2008)
- **Čerenkov telescopen:** >100 GeV- 100TeV → **ground based:**  
H.E.S.S. (2004 – heden)

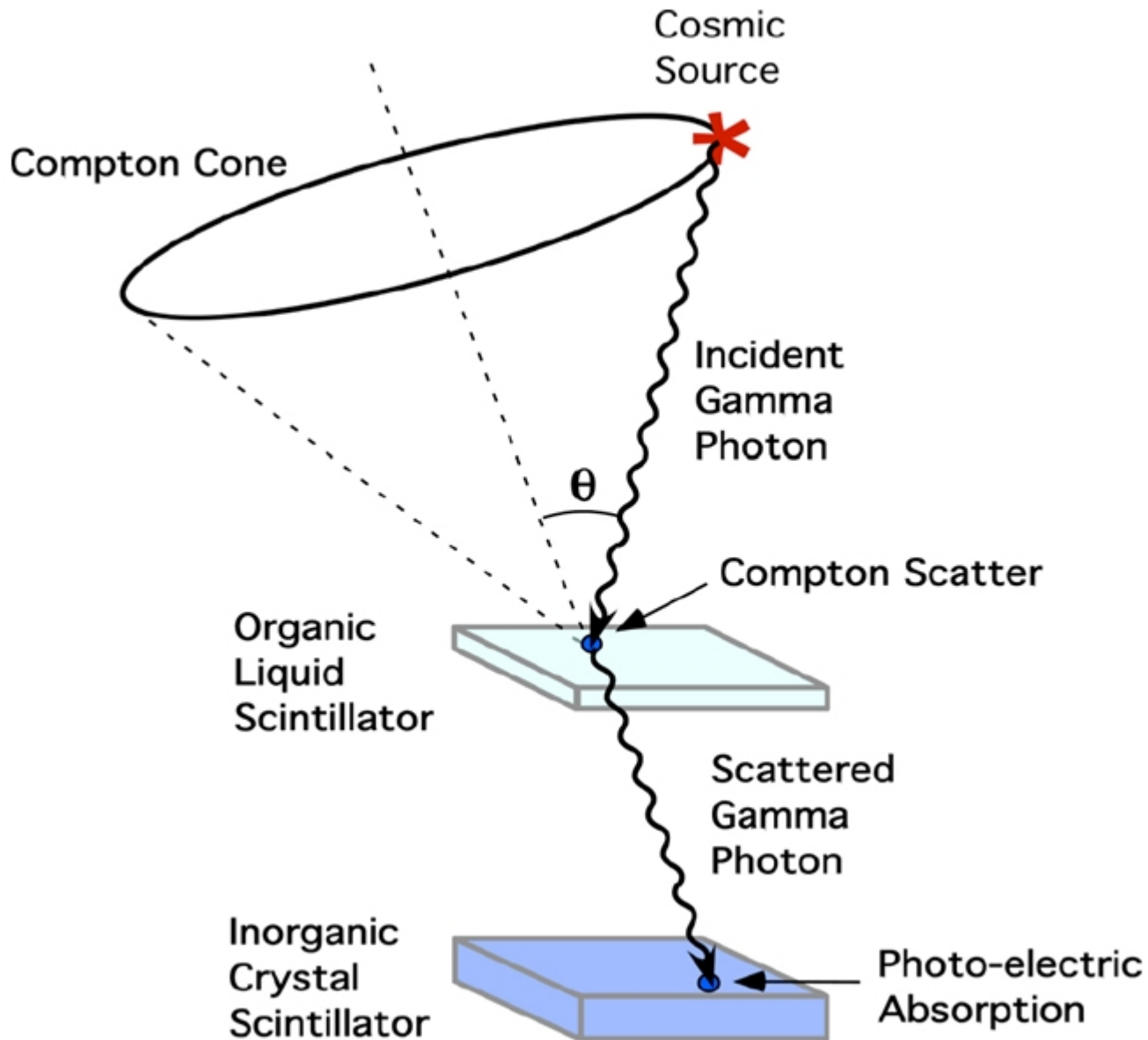
# Wide Field Coded Mask Camera: principle



$$S(x,y) \quad M(x,y) \quad D(x,y) = S(x,y) \otimes M(x,y)$$

- ➔ Reconstruction of  $S(x,y)$  through deconvolution of the recorded image  $D(x,y)$  with the transmission function  $M(x,y)$  of the shadow mask.
- Typical field of view several tens degrees with spatial resolution of a few arcminutes.

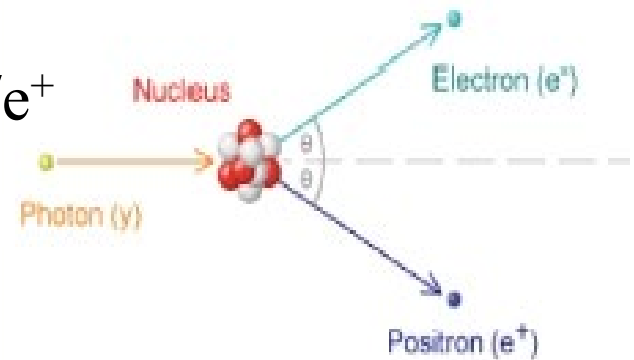
# Compton Telescope: principle



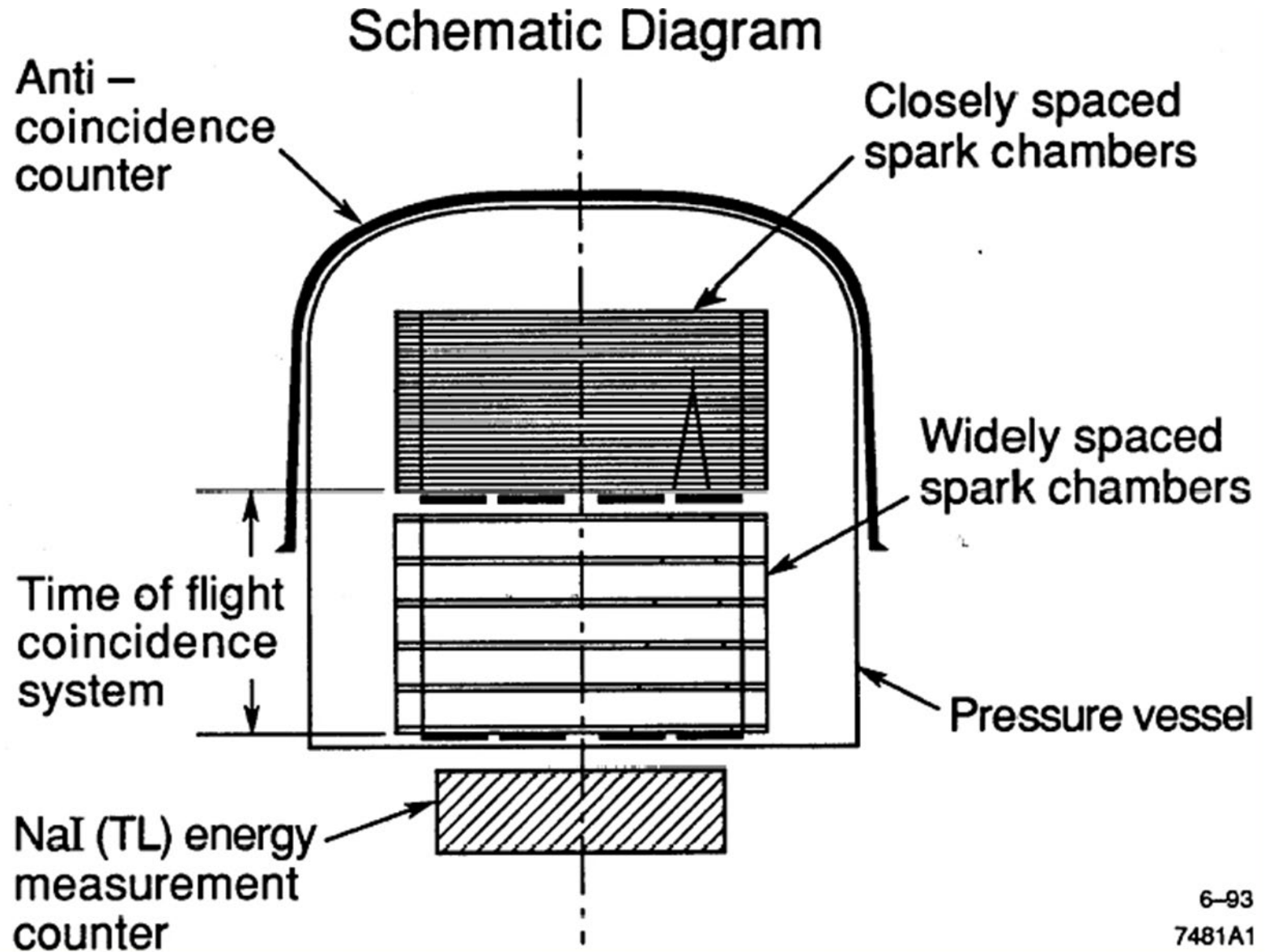


# Paarconversie $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$

- $E_f > 1 \text{ MeV}$  produceert  $e^-/e^+$  paar
- Conversie bij atoomkern voor **impulsbehoud**
- **Grootste doorsnede** voor paarvorming bij  $E_f > 5 \text{ MeV}$
- Bij  $E_f > 100 \text{ GeV}$  directe meting van  $e^-/e^+$  paar **niet haalbaar**
- Indirect via **Čerenkov** straling

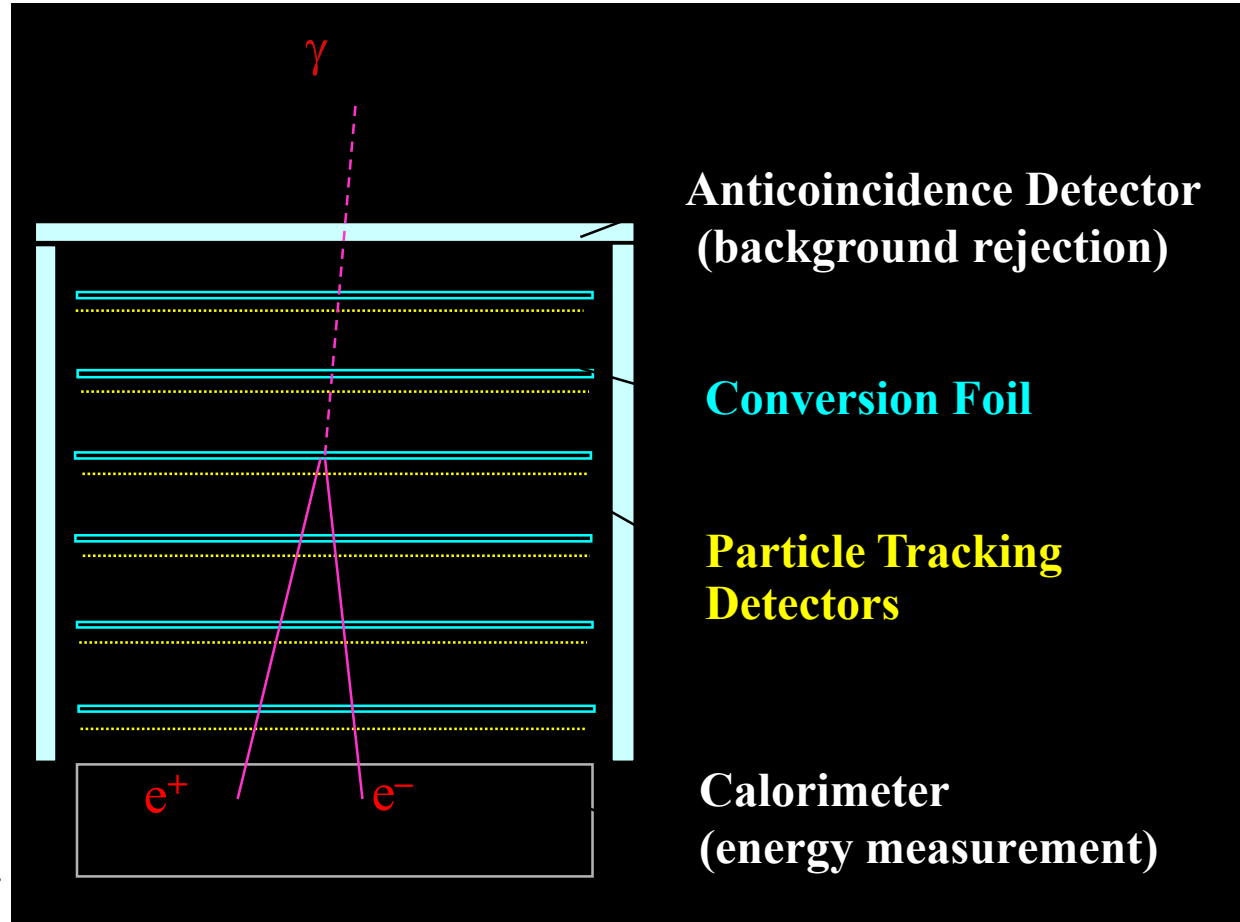


# De paarconversie-telescoop: $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$



# Gamma-ray Pair-Conversion Telescope

- An infalling gamma ray passes through the AntiCoincidence Detector without producing a signal
- The gamma ray interacts in one of the thin tungsten Conversion Foils by pair production, giving an electron and a positron
- The Silicon Strip Particle Tracking Detectors measure the paths of the electron and positron, giving the arrival direction of the original  $\gamma$ -ray.
- The electron and positron collide with the Calorimeter, which measures the energy of the particles and hence the energy of the original  $\gamma$ -ray.



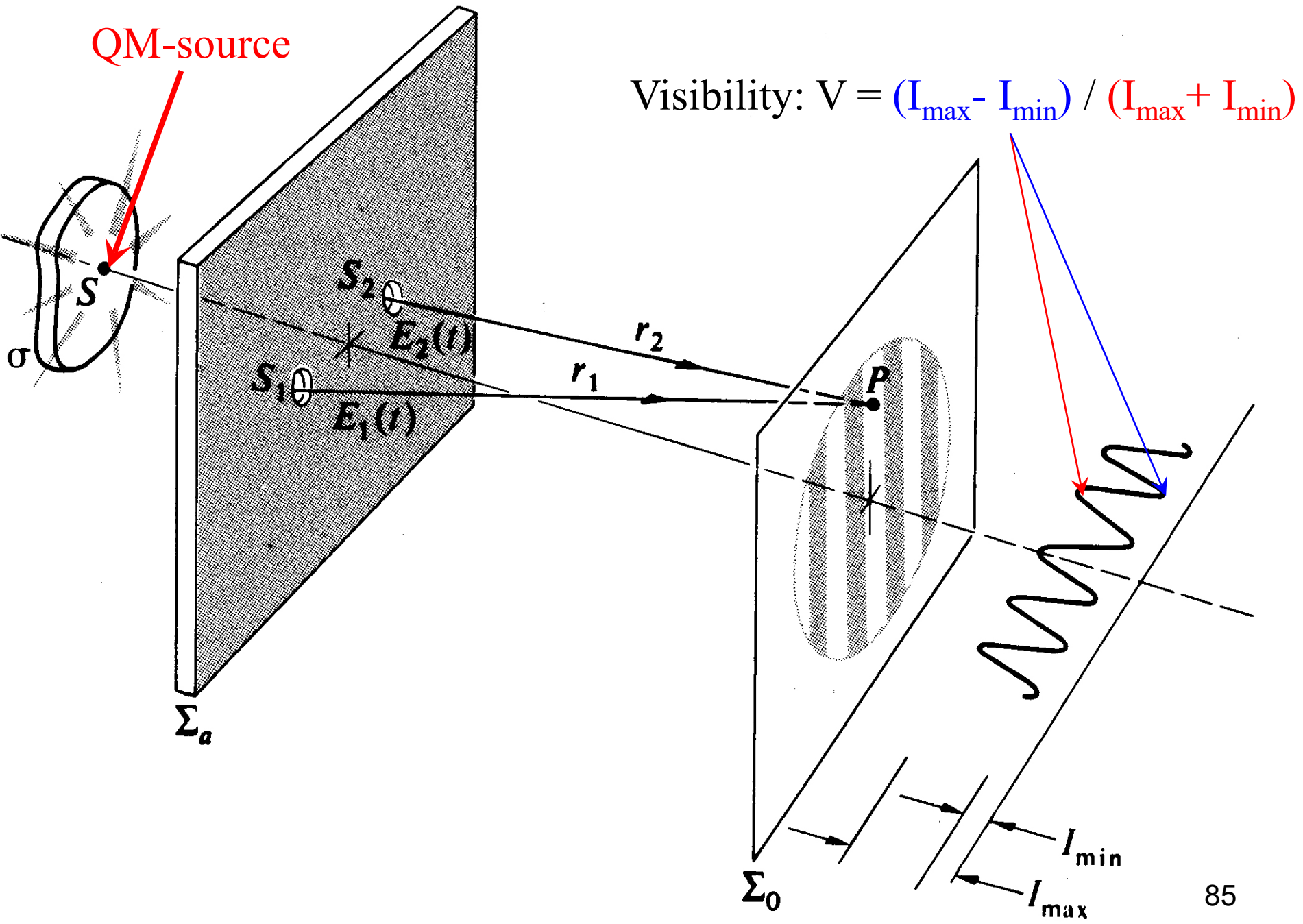
- Unwanted cosmic ray particles are rejected when they produce a signal in the AntiCoincidence Detector.

# Interferometrie

- **Wisselwerking bij golfverschijnselen** (bijvoorbeeld bij licht en geluid) waarbij golven elkaar kunnen versterken of uitdoven, afhankelijk van hun faseverschil.
- **Een interferentieverschijnsel** kan alleen ontstaan bij **coherente golven**. Dit betekent dat bij quasi-monochromatisch (QM) licht, zoals bijvoorbeeld **gaussisch licht** van een zwarte straler, de wisselwerking moet plaatsvinden binnen de **karakteristieke coherentietijd**.

Deze coherentietijd hangt af van de **bandbreedte** van de lopende golf.

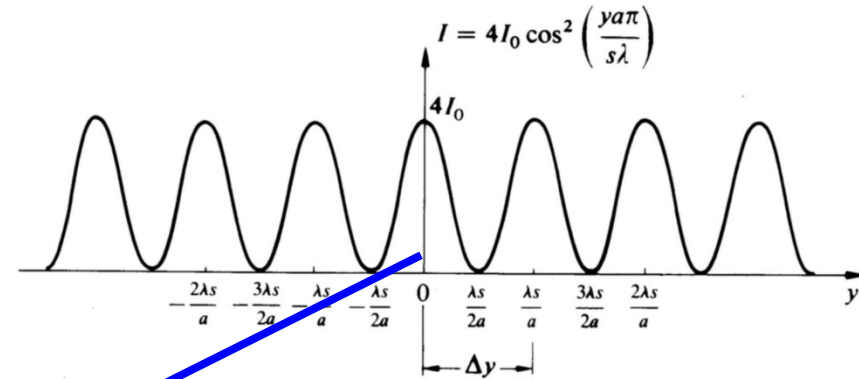




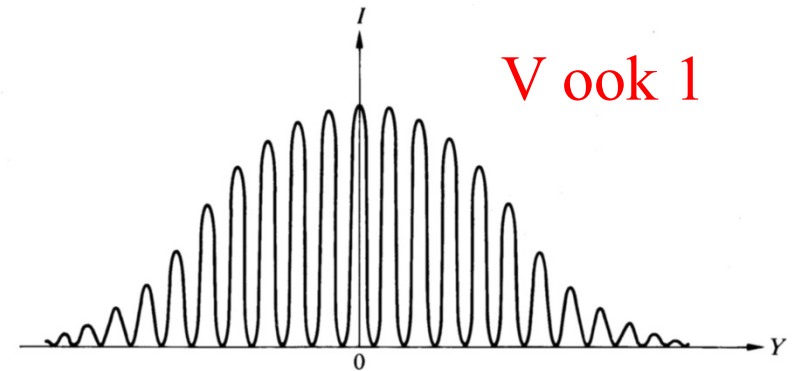
Visibility:  $V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$

monochromatisch licht: coherente golven, ampl/fase = constant

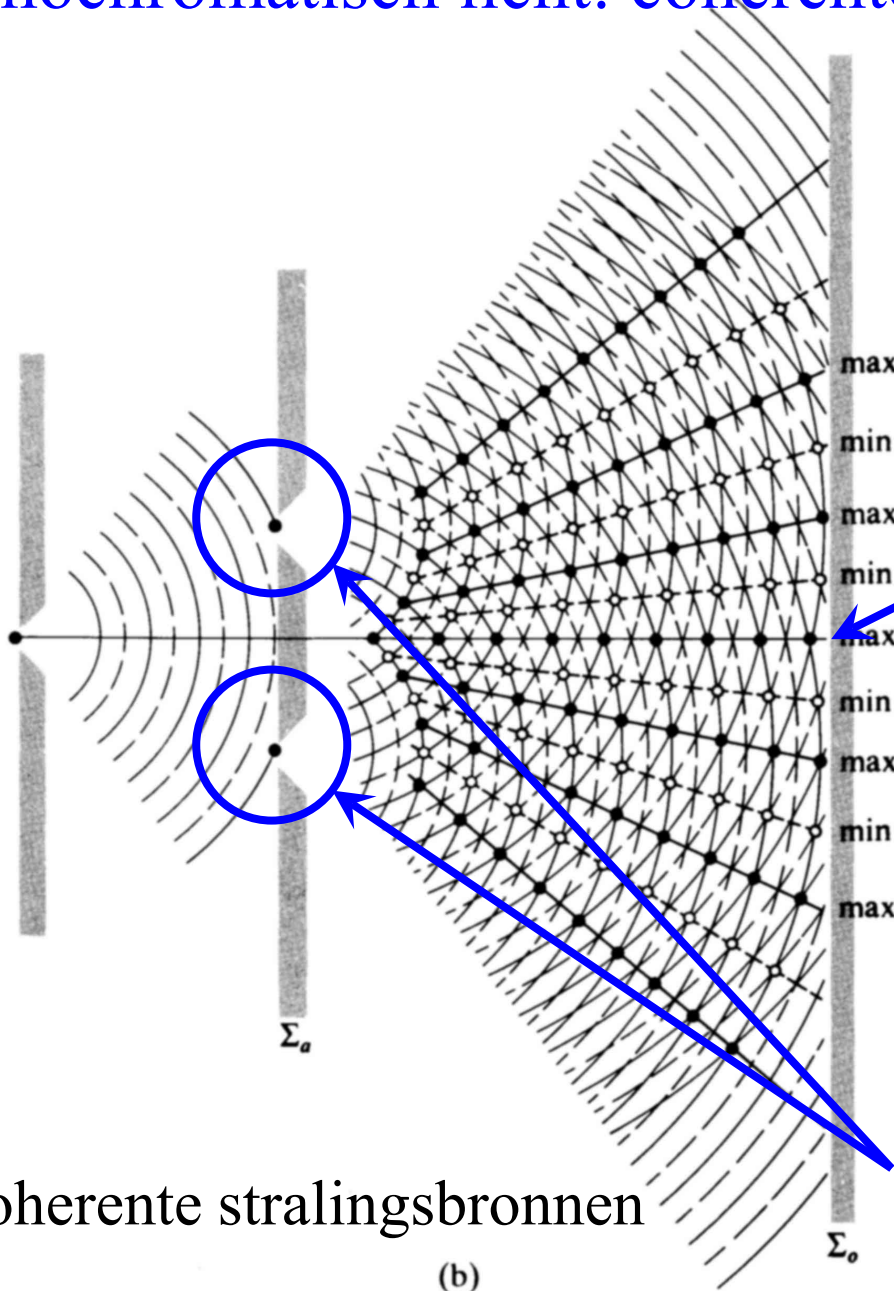
Zichtbaarheid (visibility)  $V = 1$



ideaal contrast patroon:  
infinitiesimale openingen



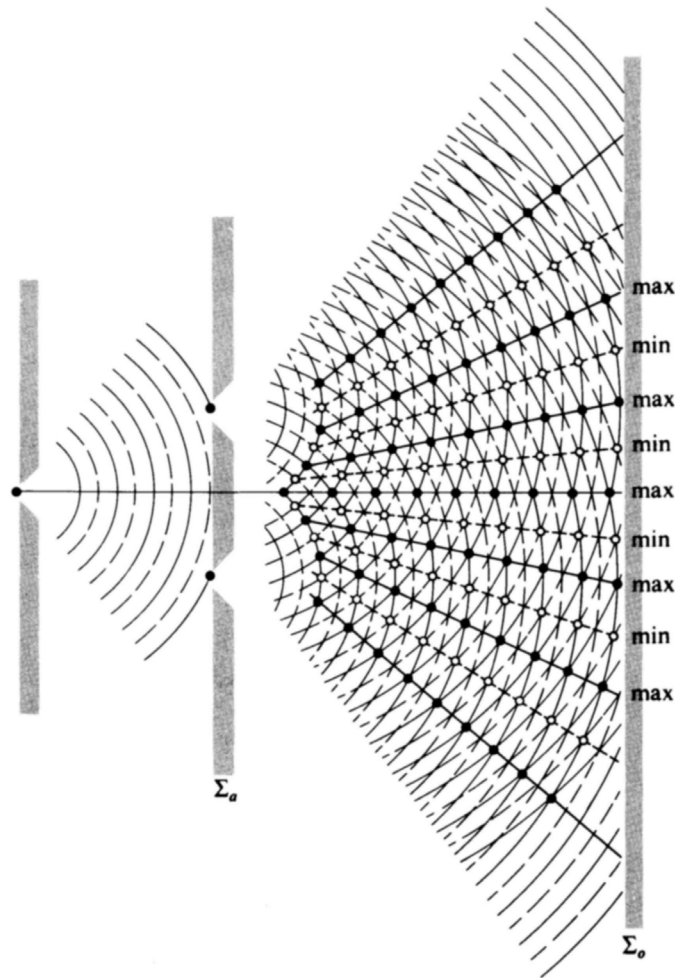
feitelijk contrast patroon t.g.v. buiging door **eindige** openingen



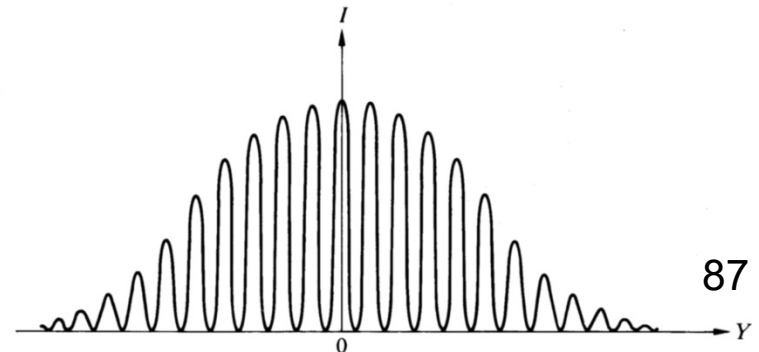
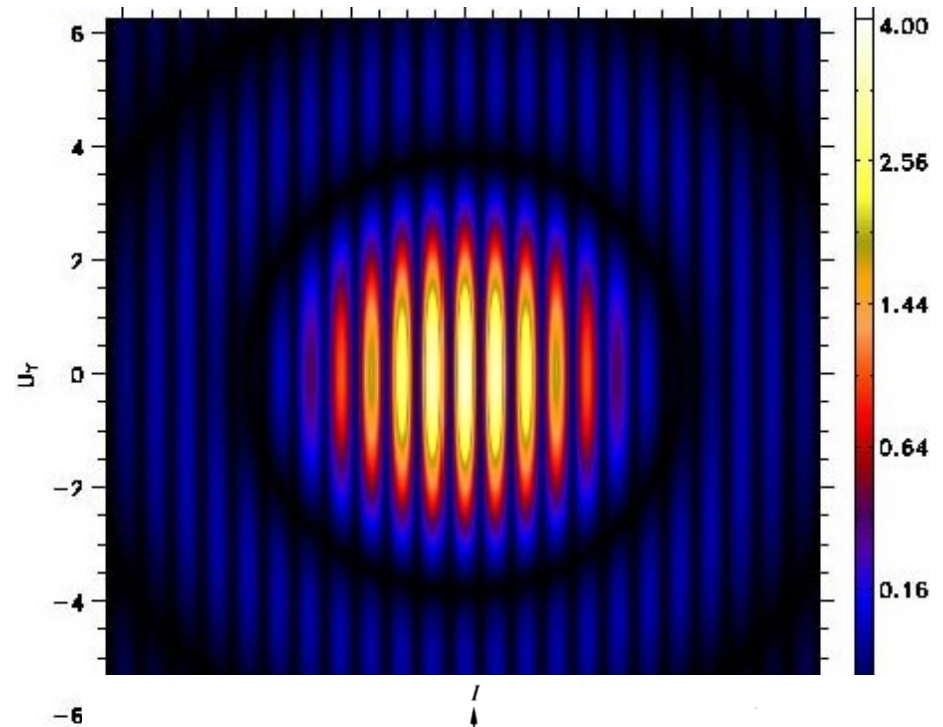
2 coherente stralingsbronnen

(b)

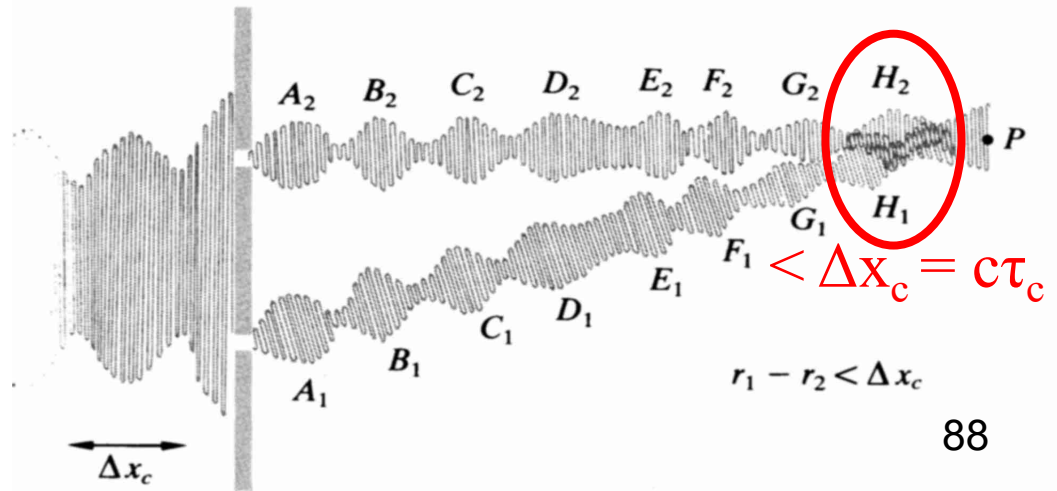
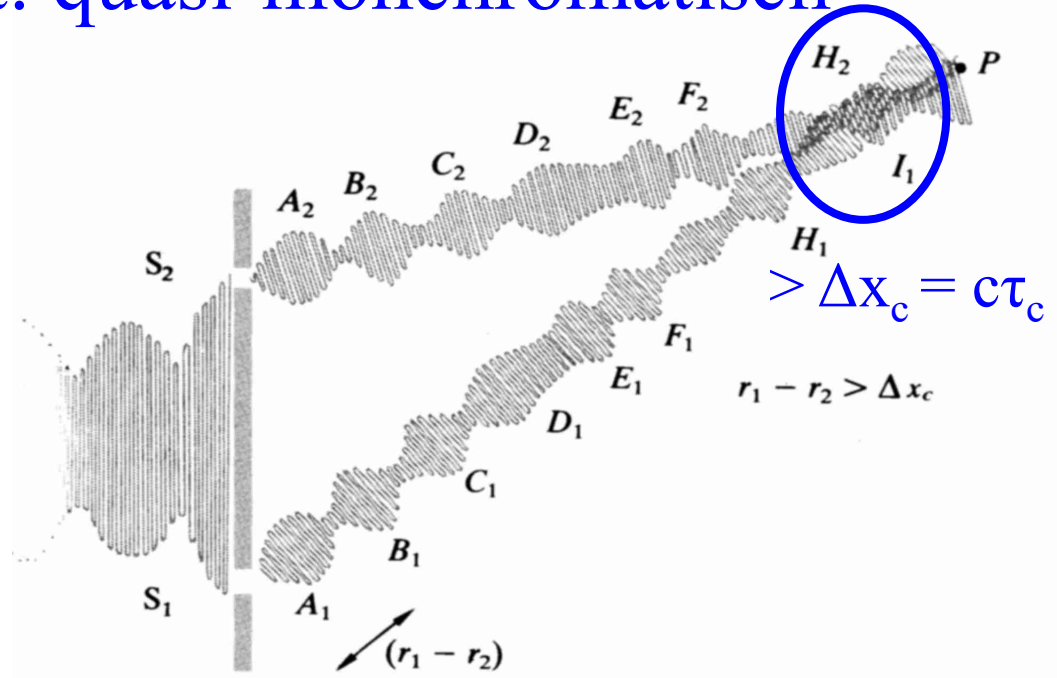
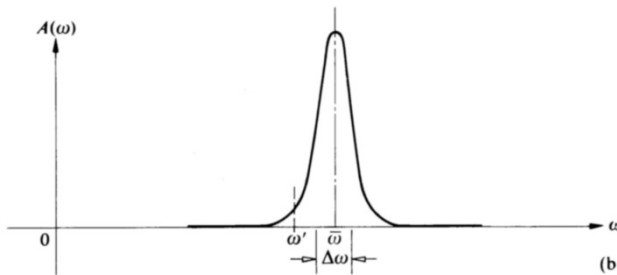
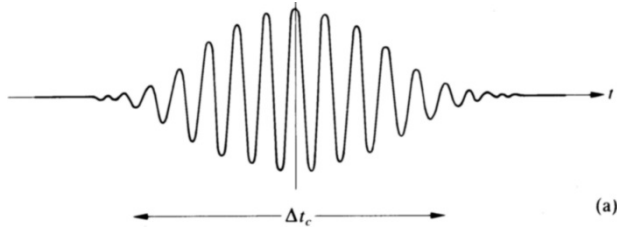
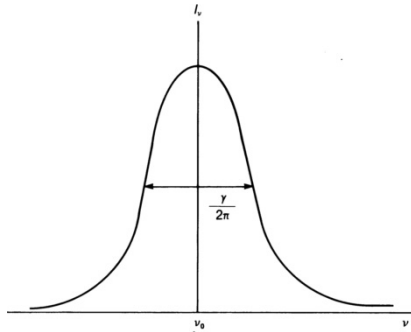
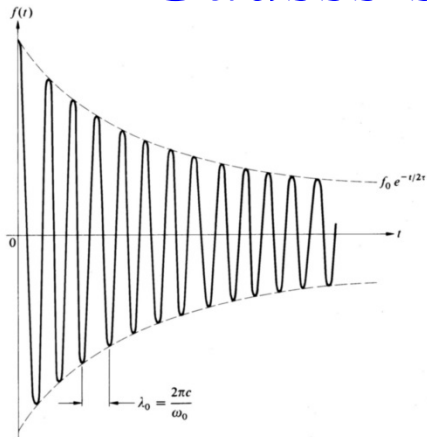
# Responsie van 2-element interferometer op een puntbron



## Modulatie Airy schijf

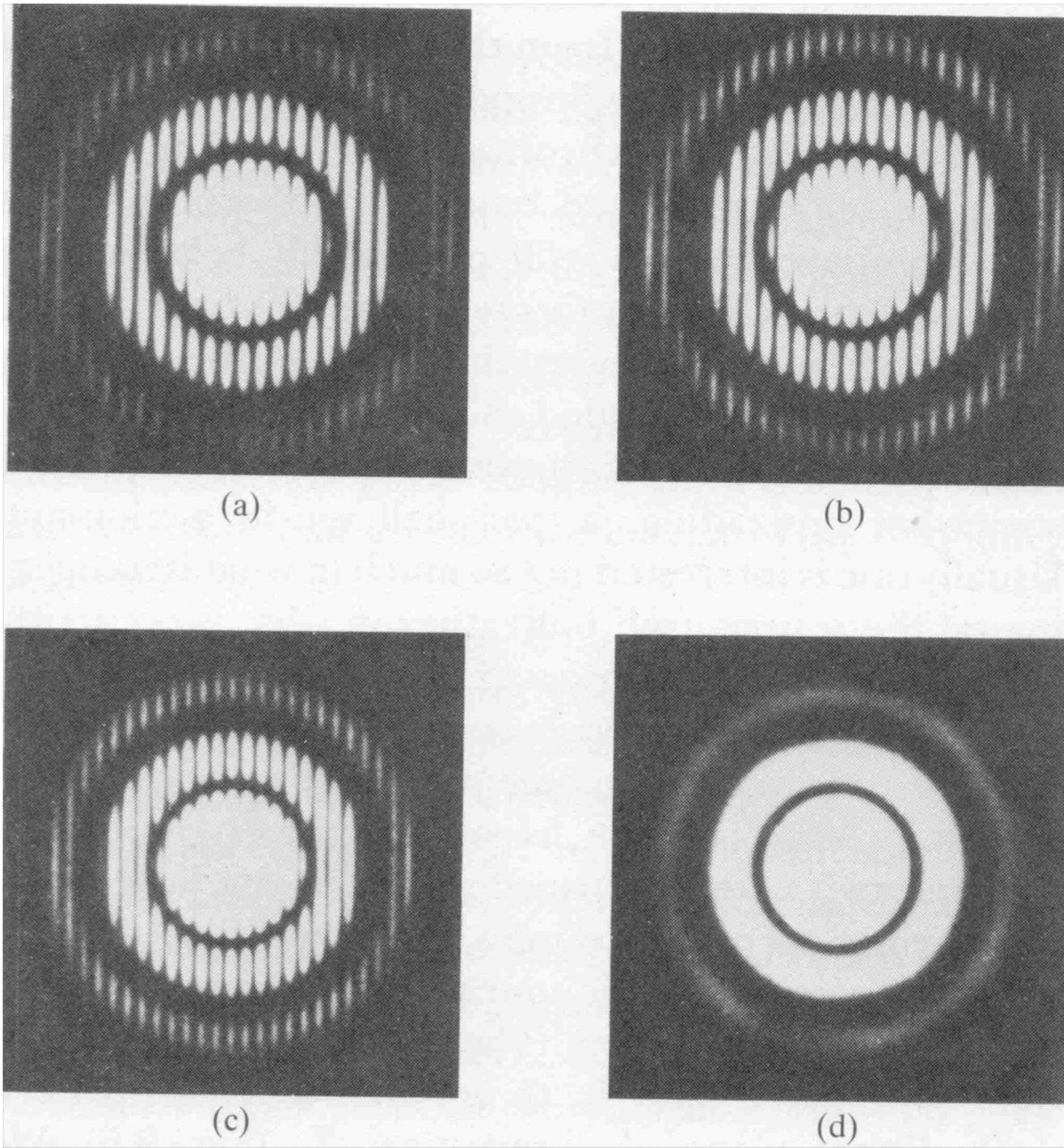


# Gaussisch licht: quasi-monochromatisch



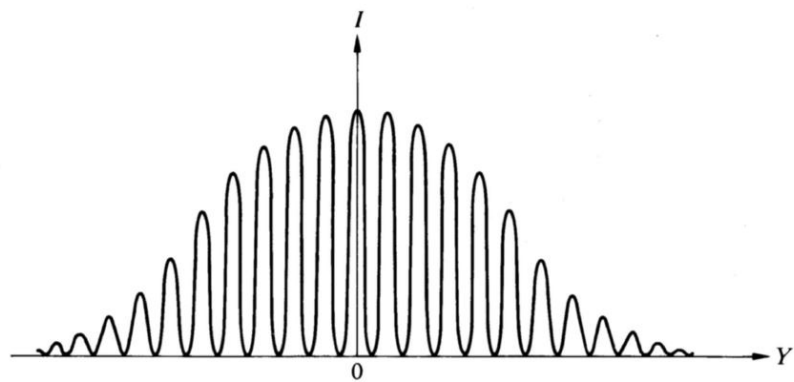
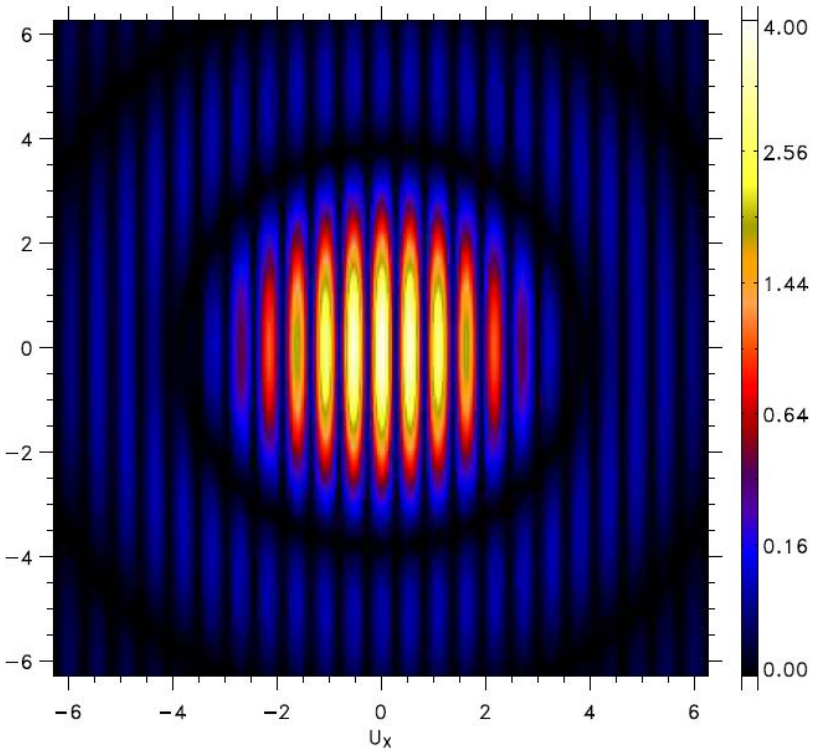


# Verdwijnen coherentie door introductie fasesprong

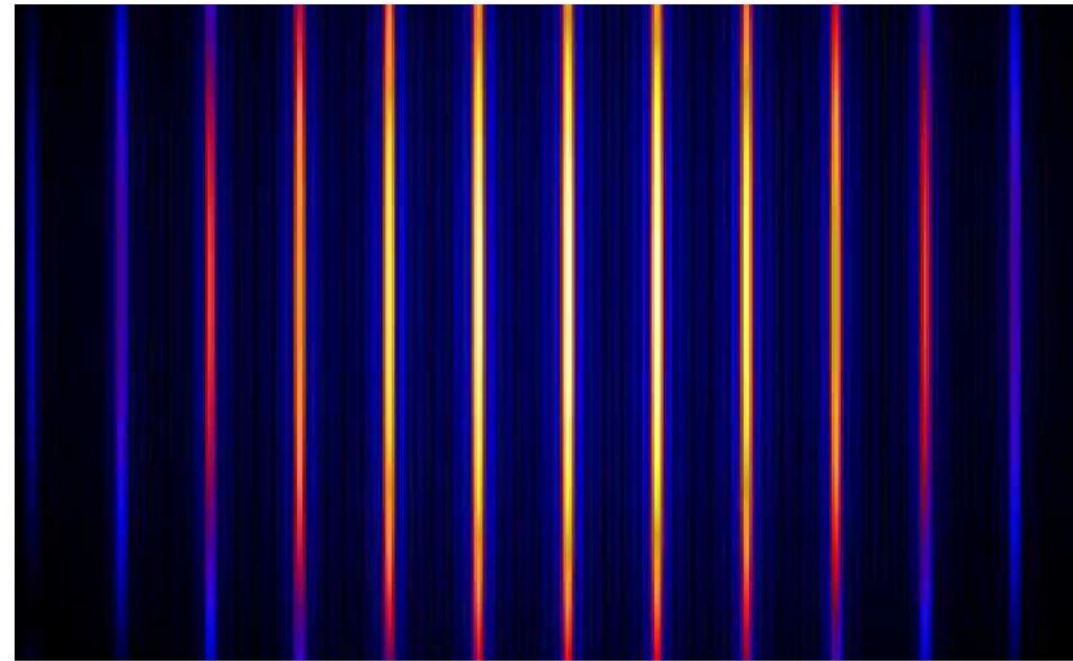




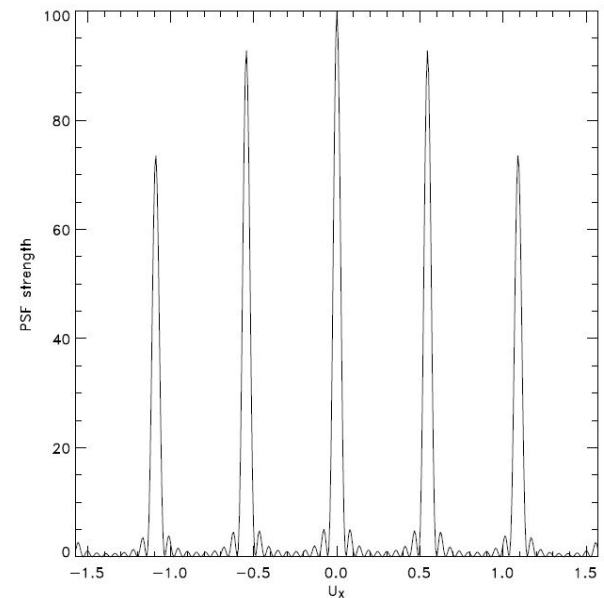
## 2-element interferometer



## 10-element interferometer (centrale deel)

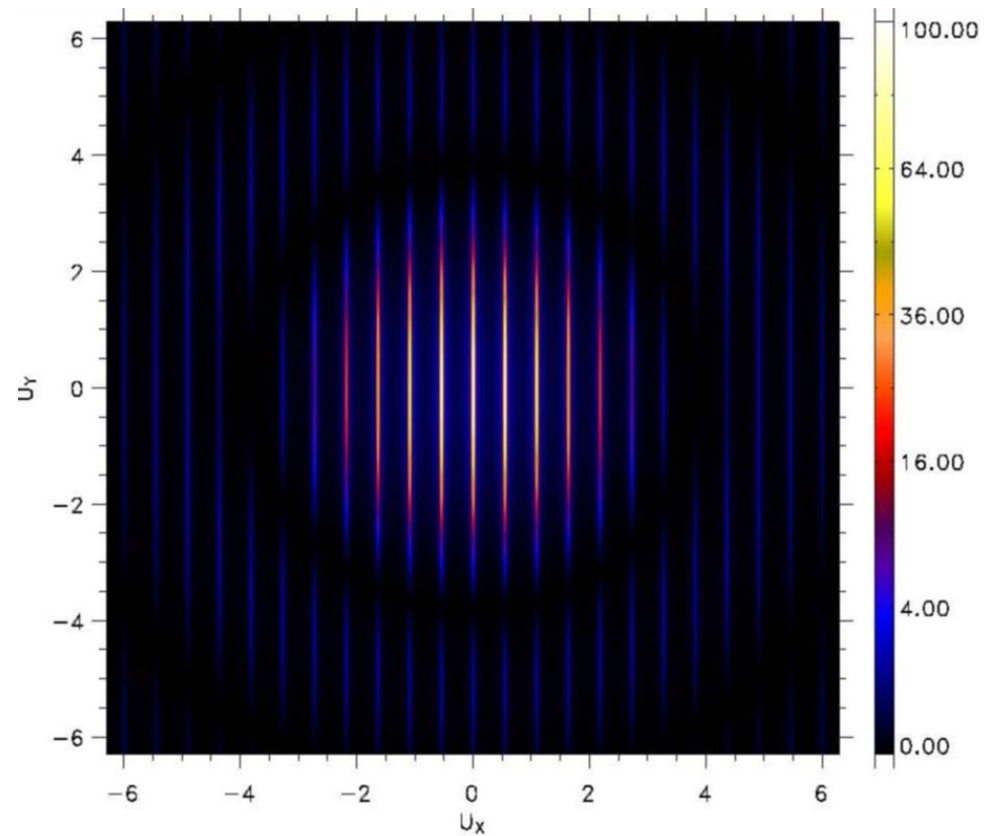
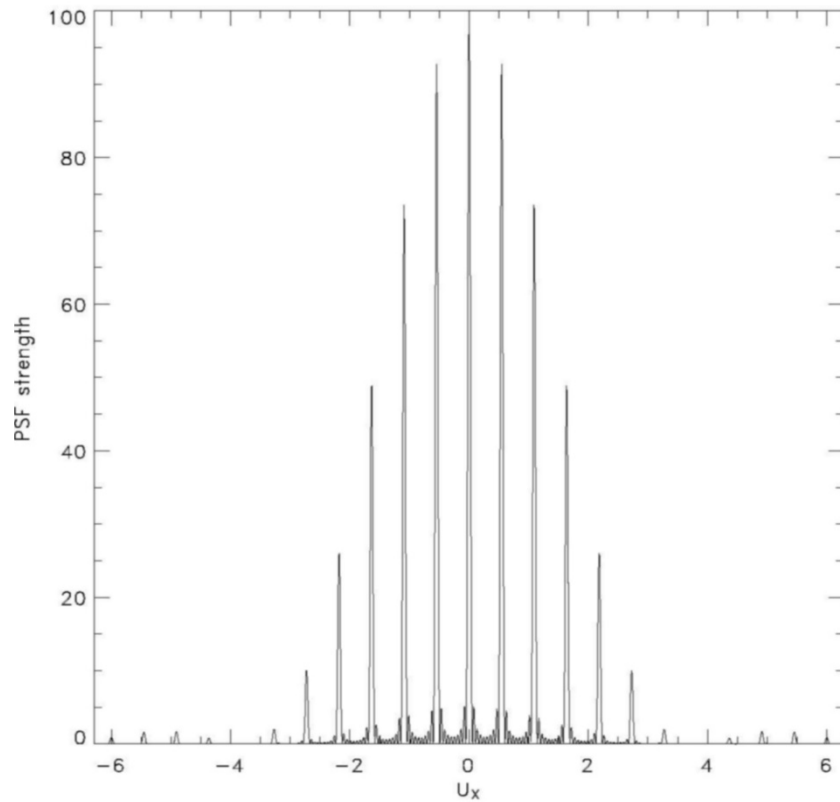


N=10; Slice  $U_y=0$



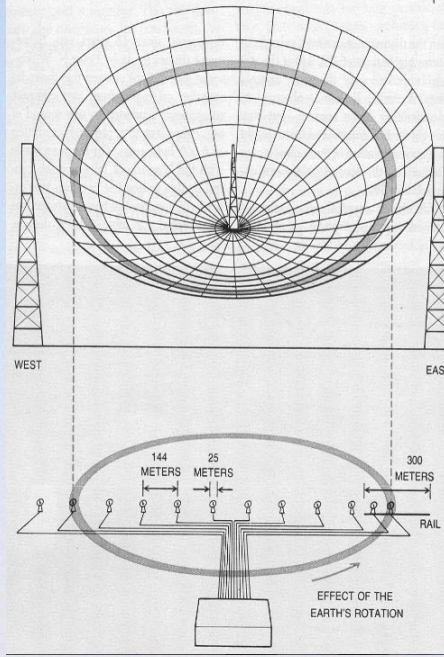
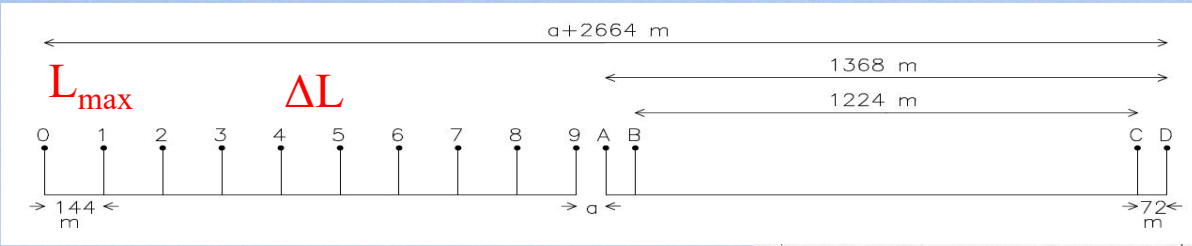
# Responsie van 10-element interferometer op een puntbron

N=10; Slice  $U_y=0$

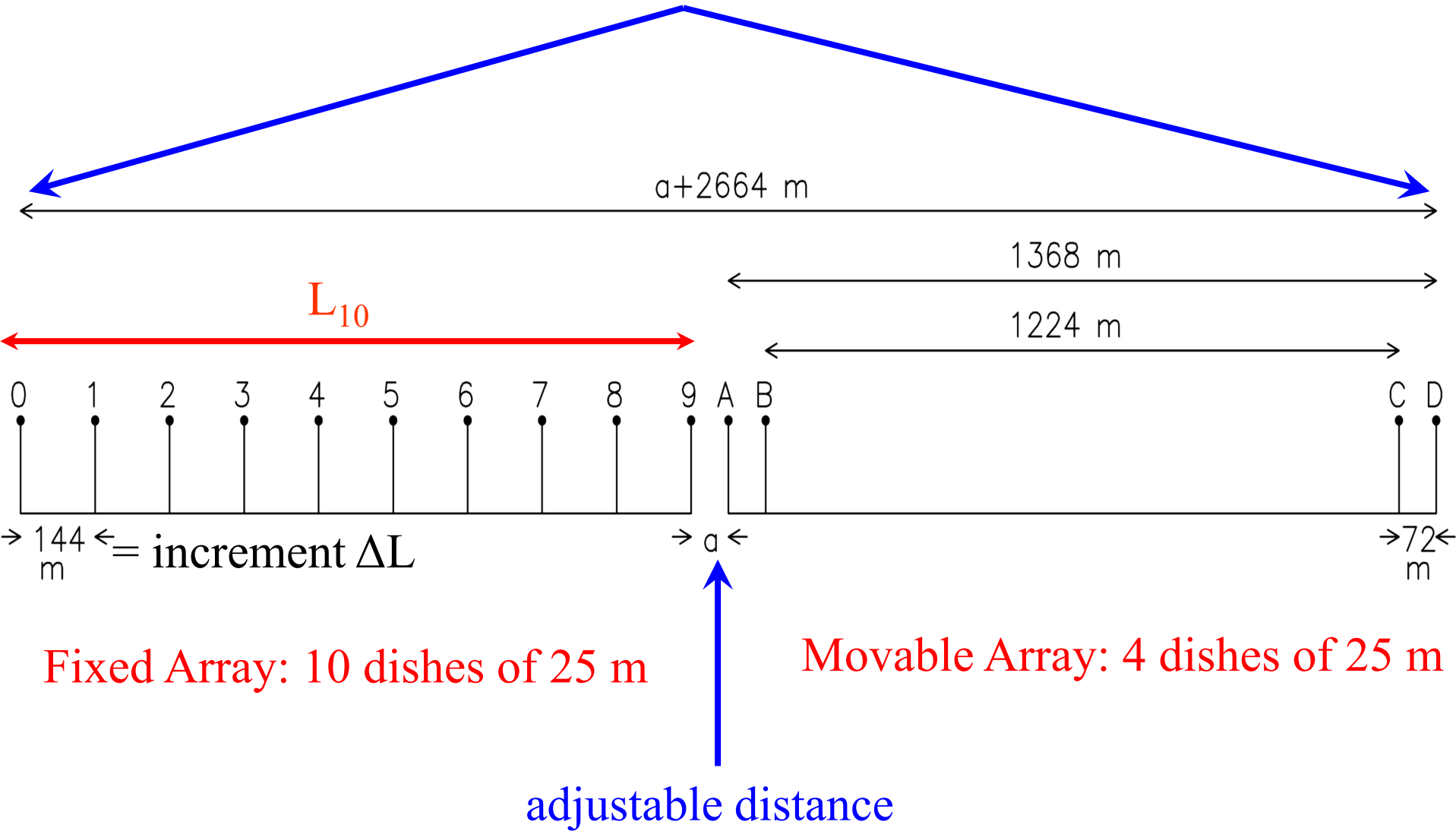




# Westerbork: 10(vast) + 4(mob) schotelantennes (25 m) O → W opgelijnd



Maximum baseline =  $L_{\max}$



Fixed Array: 10 dishes of 25 m

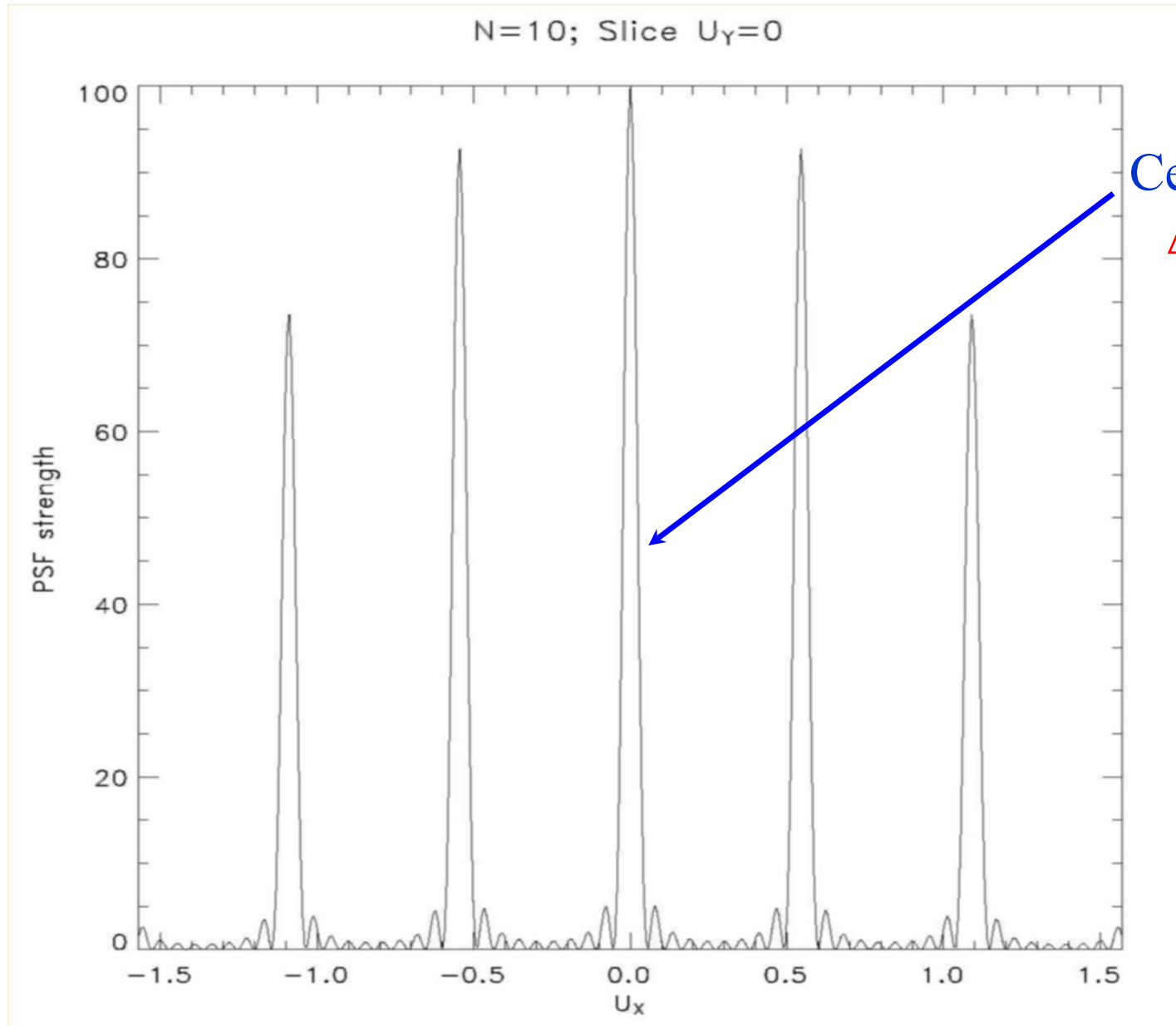
Movable Array: 4 dishes of 25 m

adjustable distance

Lineaire O-W antenne configuratie WSRT

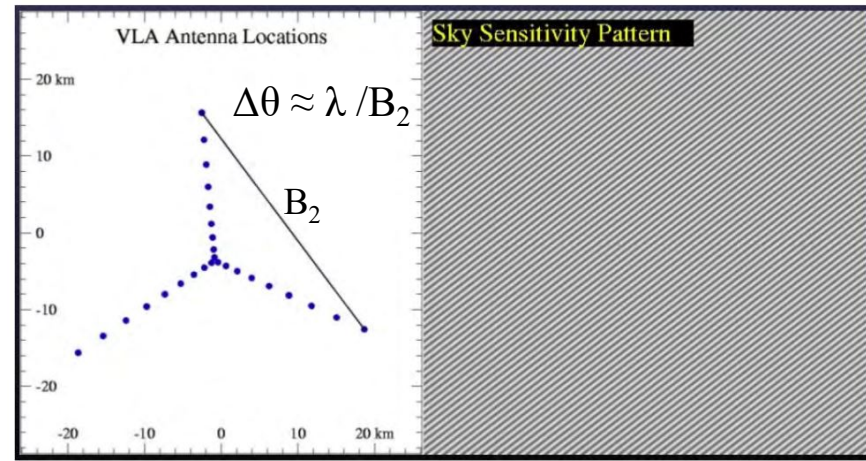
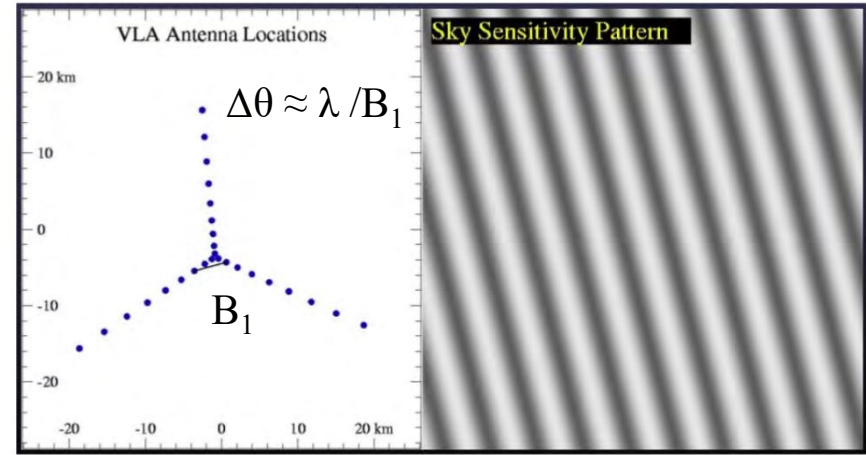
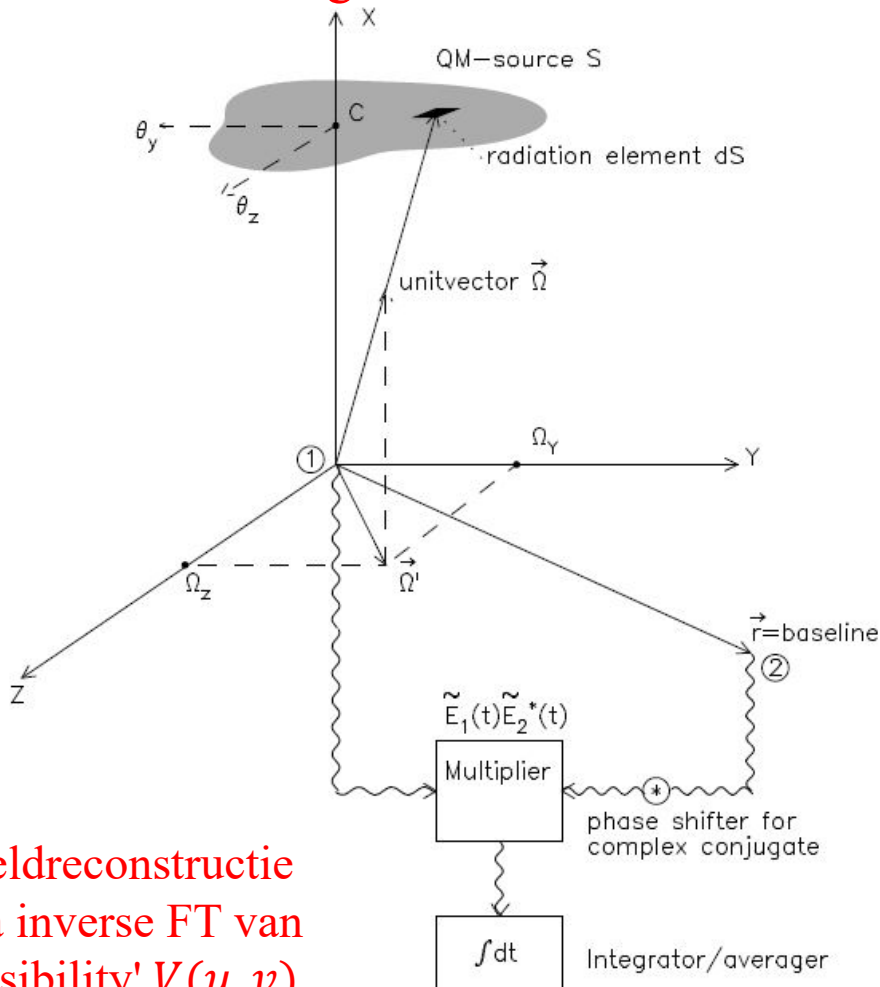


# Radiopuntbron: responsie vaste array



# Radio-interferometer

coherentie meting van het elektrische veld tussen twee antennes (kruiscorrelatie)



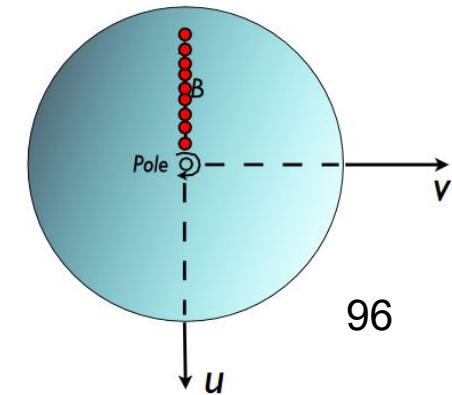
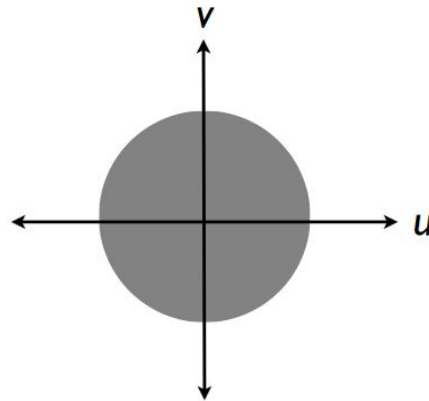
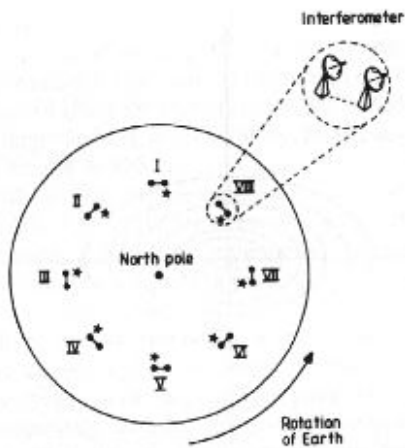
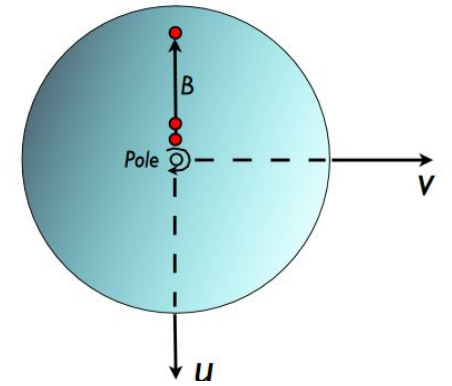
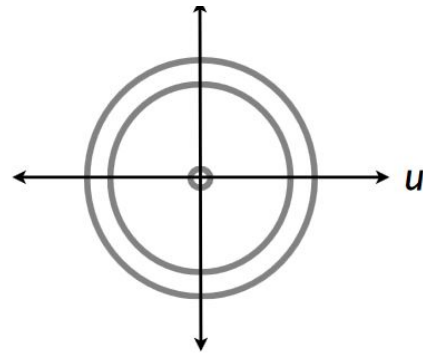
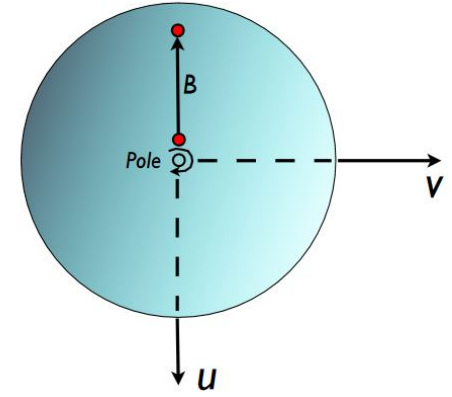
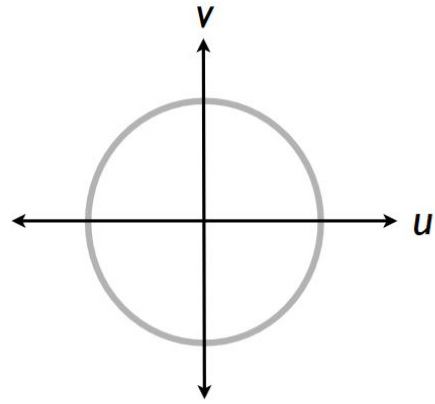
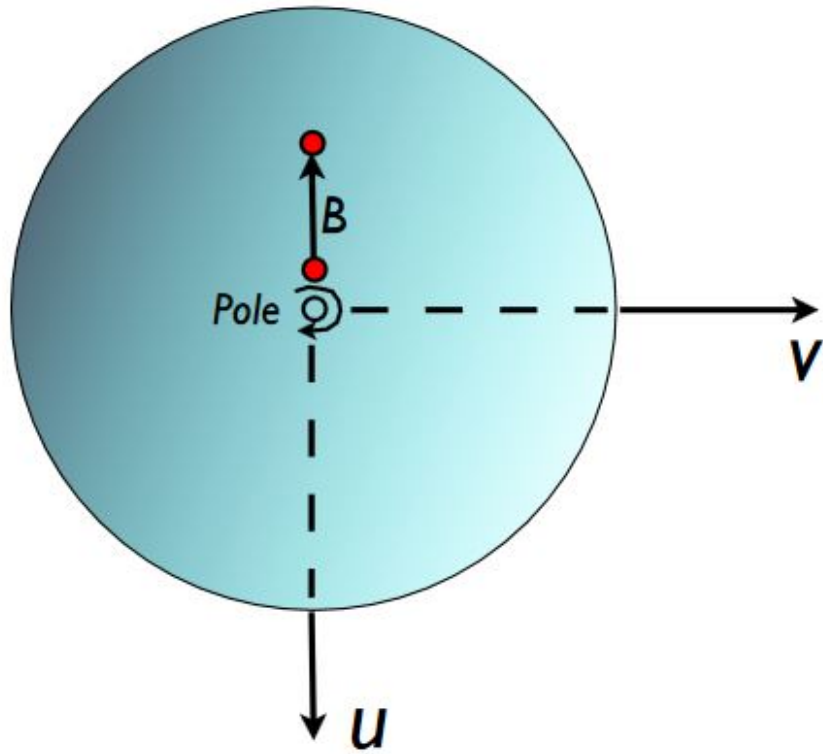
Beeldreconstructie via inverse FT van 'Visibility'  $V(u, v)$

$$I(\vec{\Omega})H(\vec{\Omega}) = \lambda^{-2} \int \int_{\Sigma\text{-plane}} \tilde{\Gamma}'(\vec{r}) e^{-\frac{2\pi i \vec{\Omega} \cdot \vec{r}}{\lambda}} d\vec{r}$$

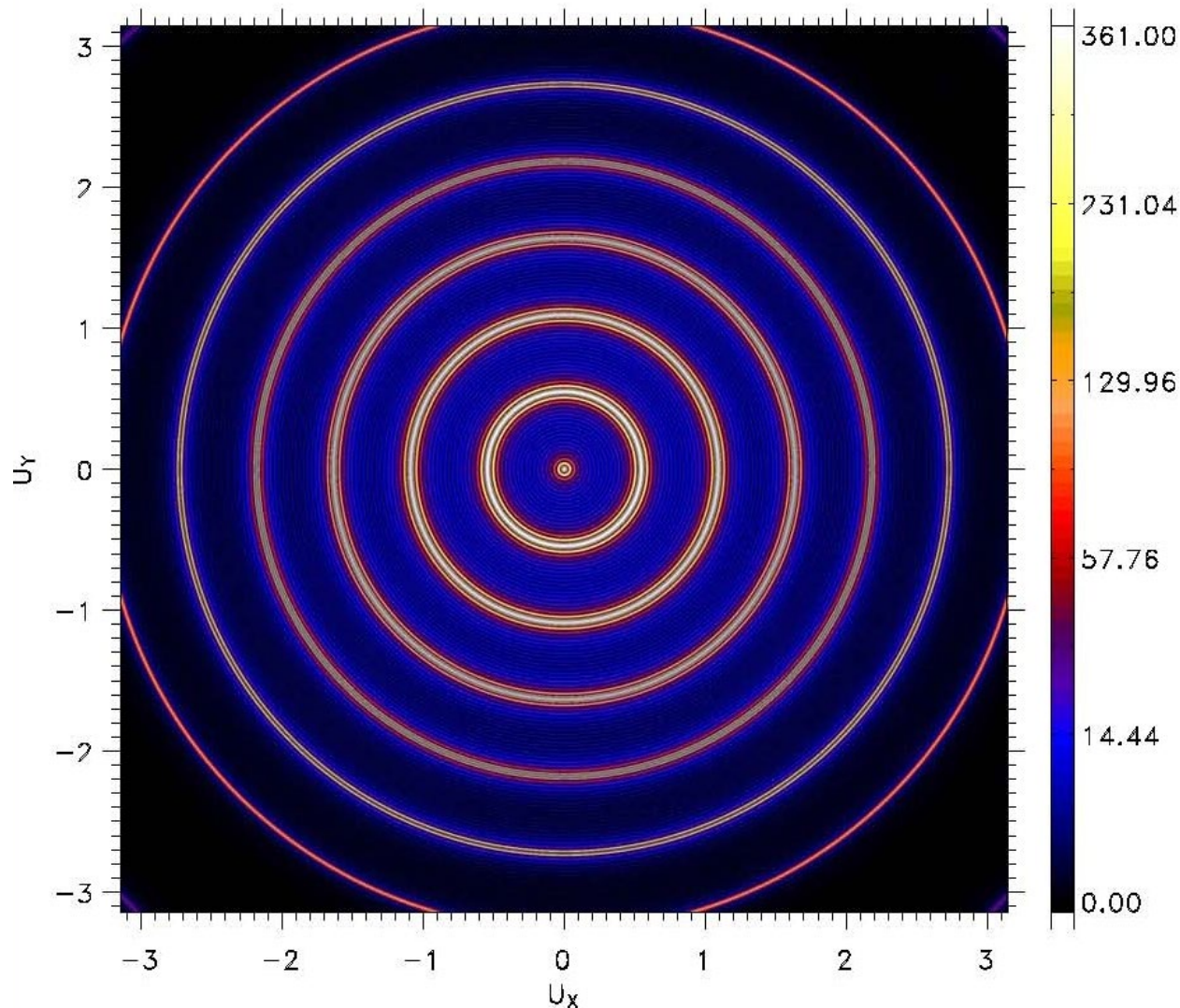
$$\tilde{\Gamma}'(\vec{r}) = \int \int_{\text{source}} I(\vec{\Omega})H(\vec{\Omega}) e^{\frac{2\pi i \vec{\Omega} \cdot \vec{r}}{\lambda}} d\vec{\Omega}$$

$$V(u, v) = \iint_{-\infty}^{+\infty} H(\theta_y, \theta_z) I(\theta_y, \theta_z) e^{\frac{2\pi i(\theta_y u + \theta_z v)}{\lambda}} d\theta_y d\theta_z$$

# Earth Rotation Aperture Synthesis: baseline tracks filling the uv-plane



# Aardrotatie van O-W array: buigingsringen rond centrale piek



Hoekafstand

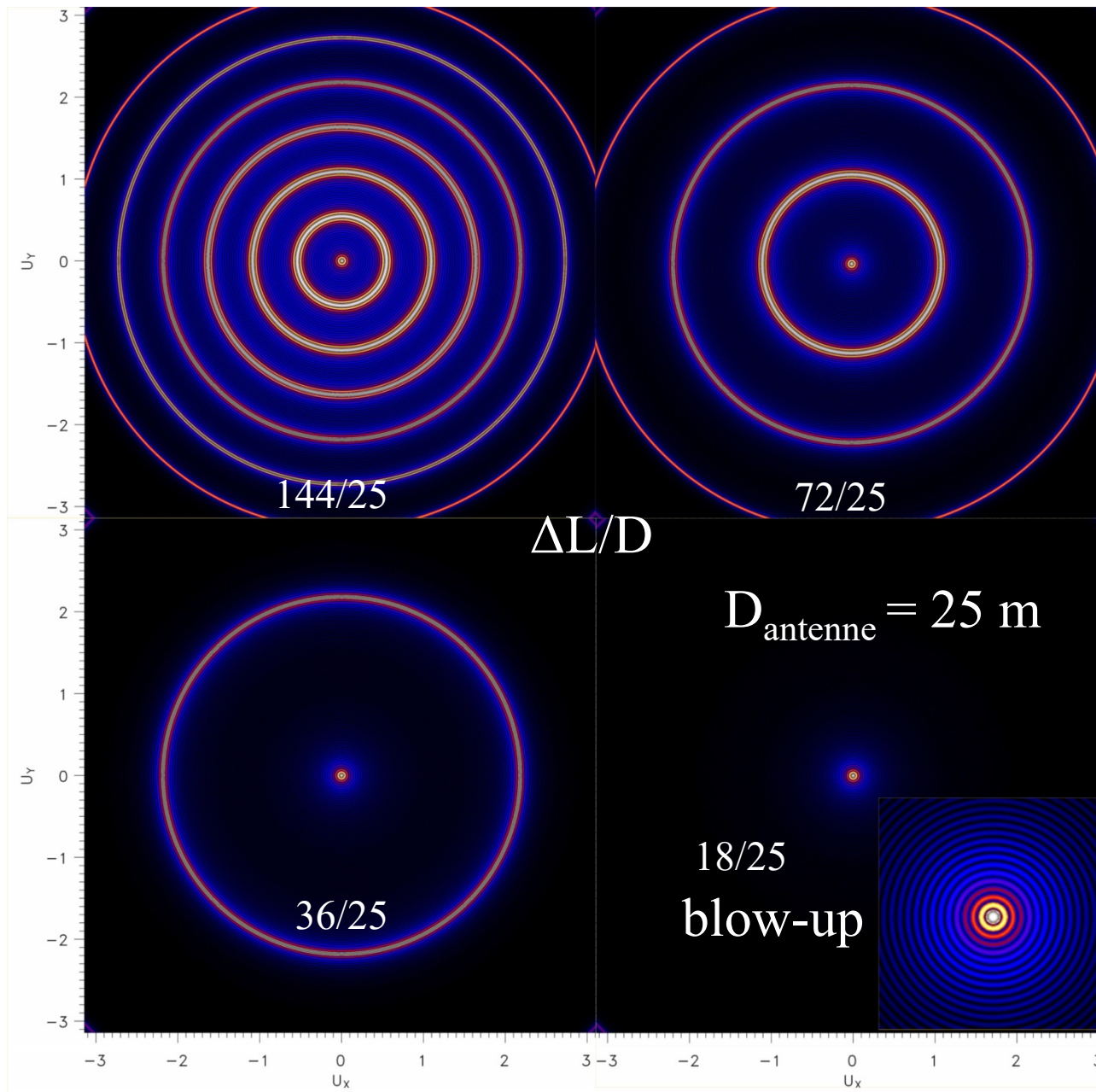
$$\Delta\theta = n(\lambda/\Delta L)$$

$\lambda$  = golflengte

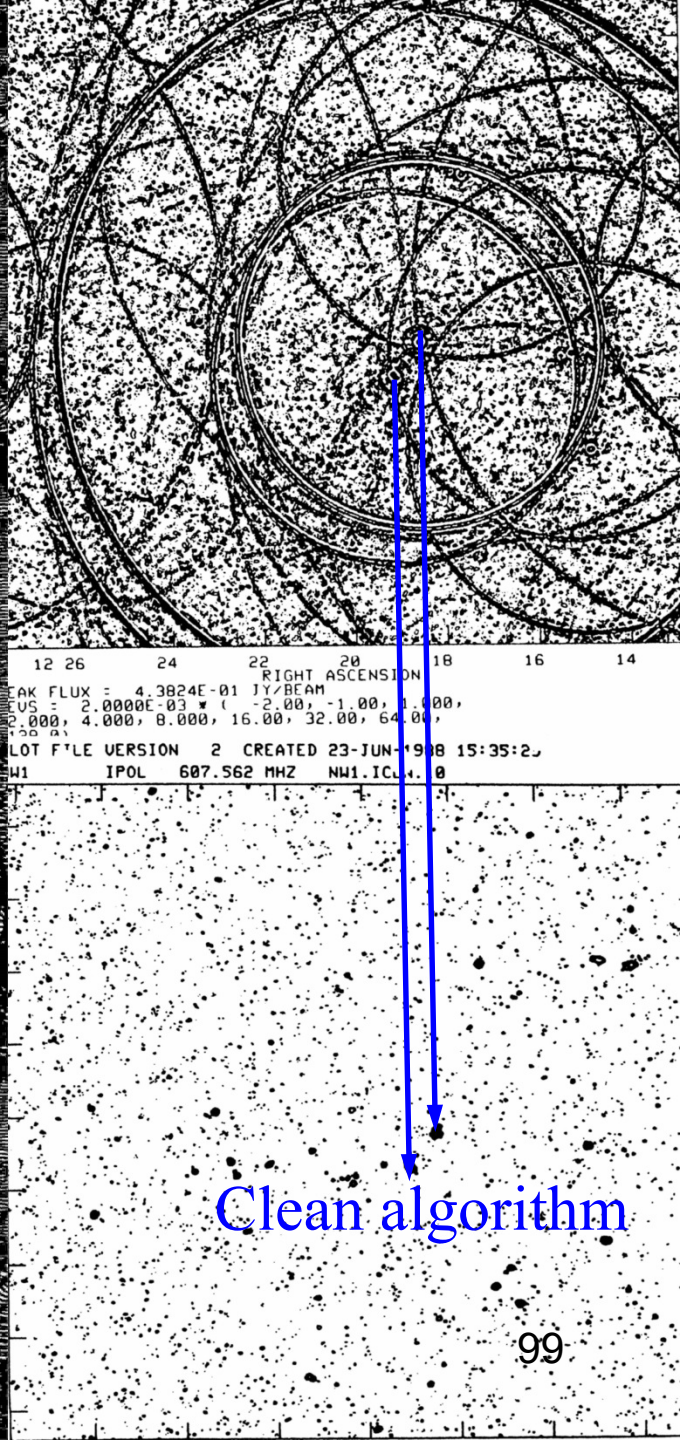
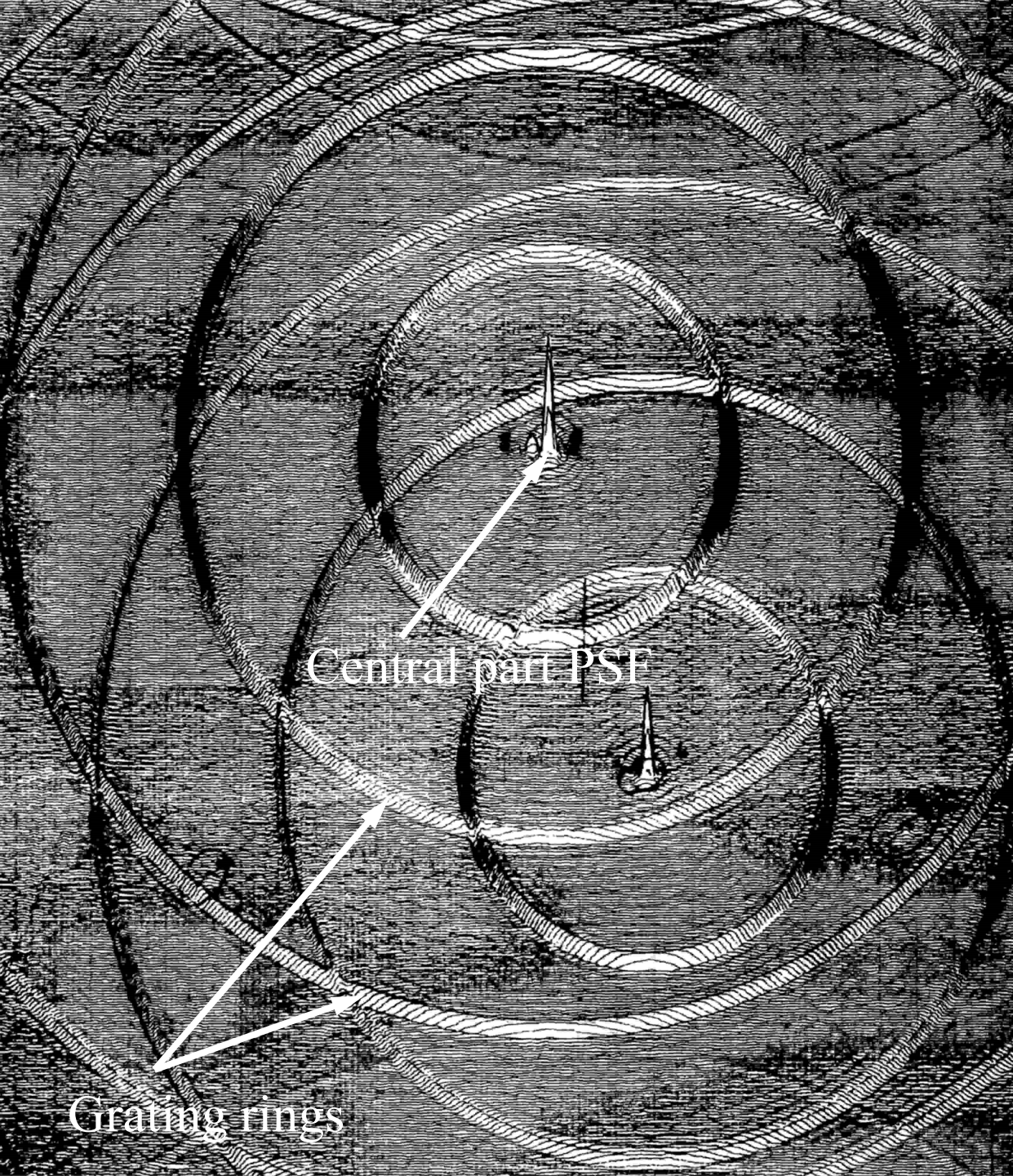
$\Delta L$  = increment



incrementen  $\Delta L = 144, 72, 36, 18$  meter



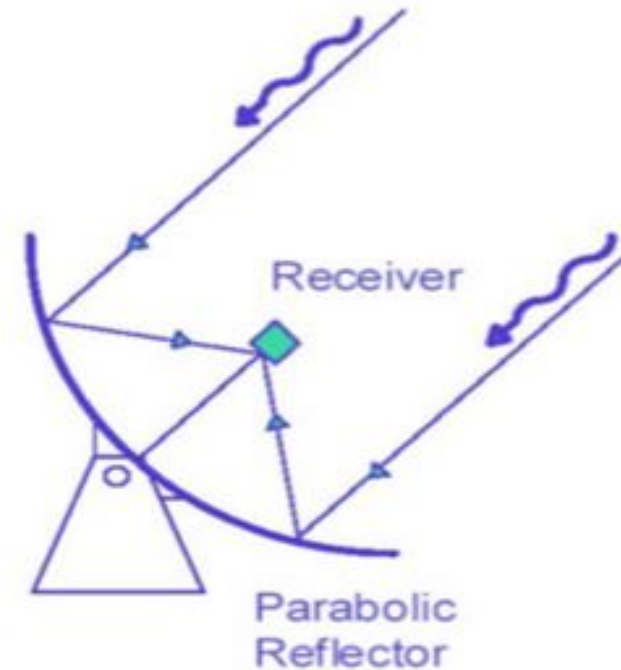
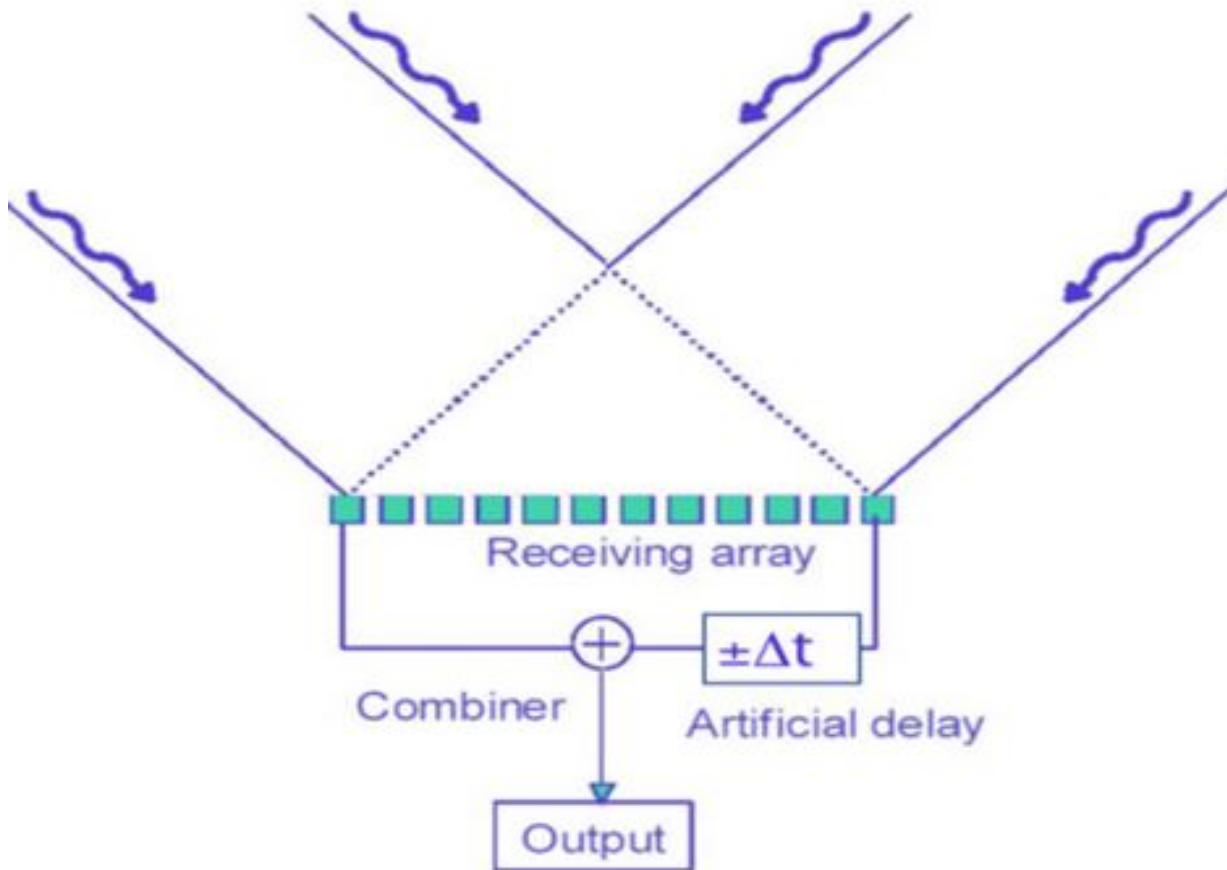




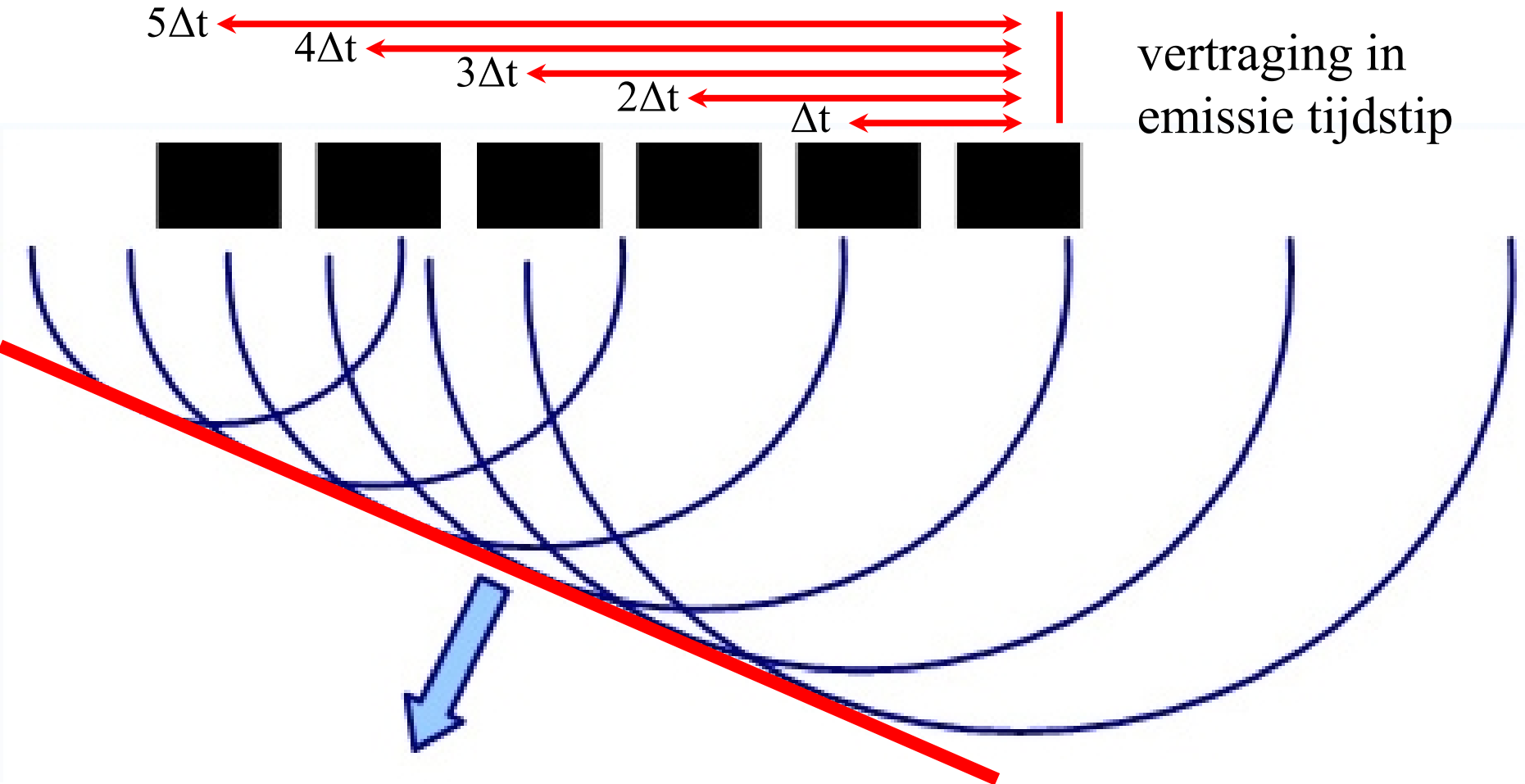
12	26	24	22	20	18	16	14
RAK FLUX = 4.3824E-01 JY/BEAM				RIGHT ASCENSION			
US = 2.0000E-03 ( -2.00, -1.00, 1.00,				0.00, 2.00, 4.000, 8.000, 16.00, 32.00, 64.00,			
LOT FILE VERSION 2 CREATED 23-JUN-1998 15:35:2.							
M1 IPOL 607.562 MHZ NW1.ICLX.0							



# Array-telescoop: elektronische bundelsturing



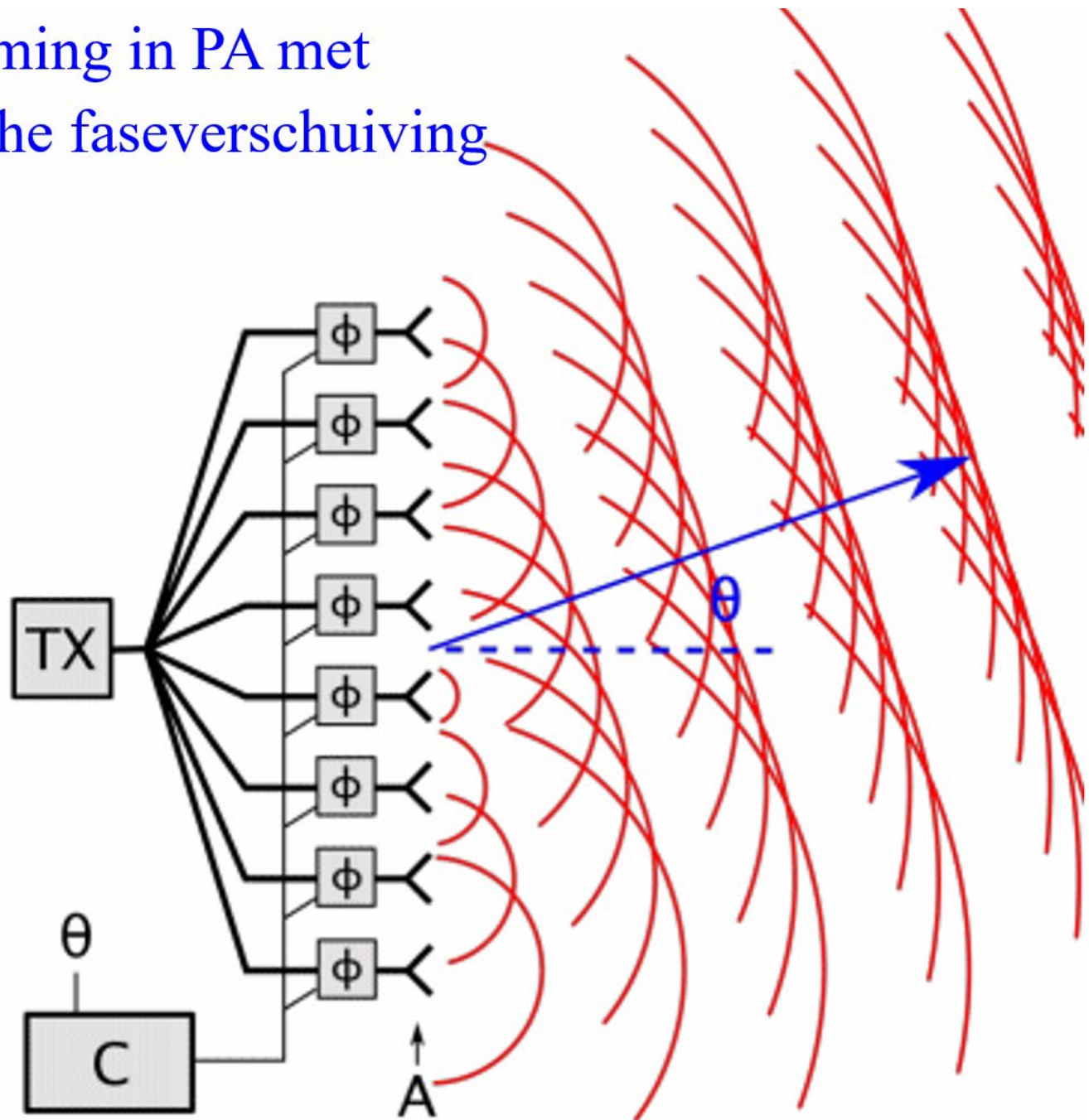
# Principe 'phased array': richten van een golffront



**Richting:** individuele golffronten superponeren in fase ➔ maximale versterking

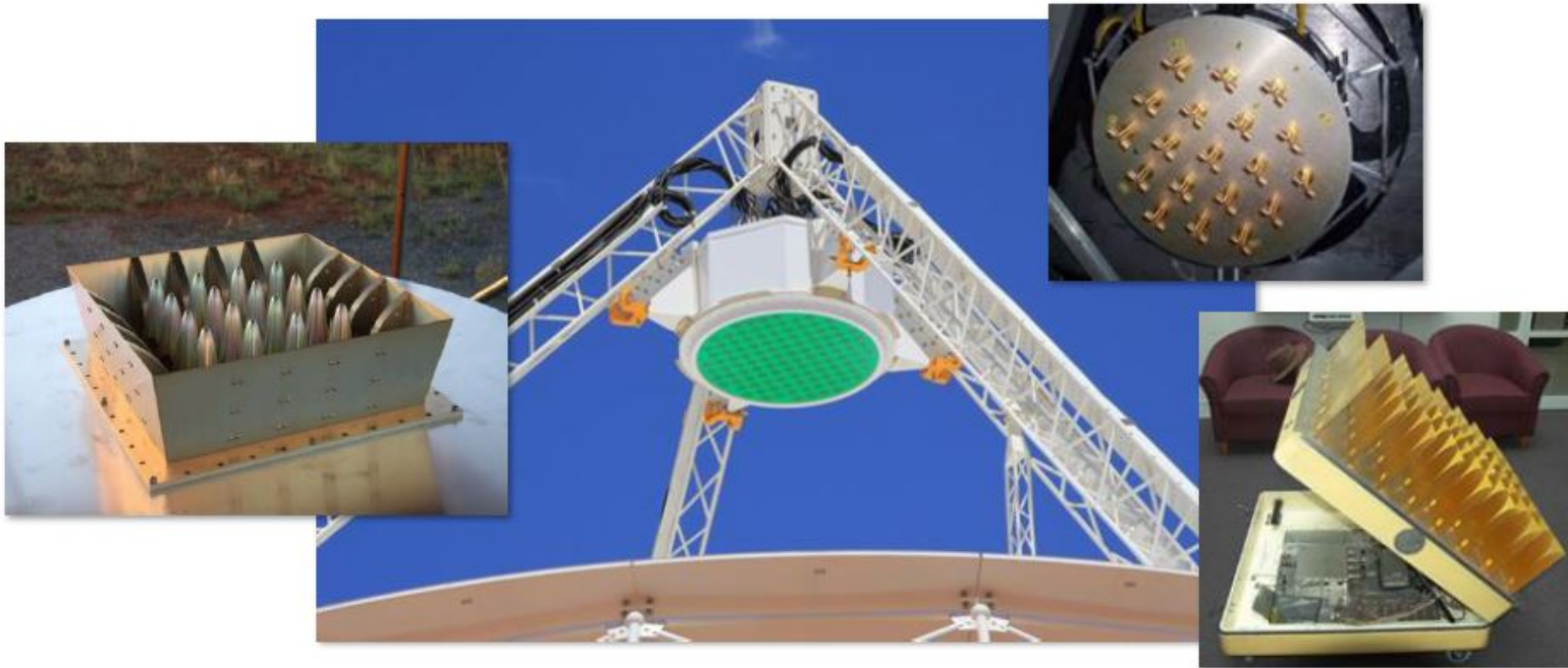


# Bundelvorming in PA met elektronische faseverschuiving



# Phased array feeds in radio astronomy

- Phased arrays can also be used at the focal plane of a parabolic antenna, in place of a traditional feed horn
  - Ideally, we need to Nyquist sample the E-M field in the focal plane



PAF-upgrade van Westerbork Radio Synthese Telescoop:  
APERTIF 13-09-2018

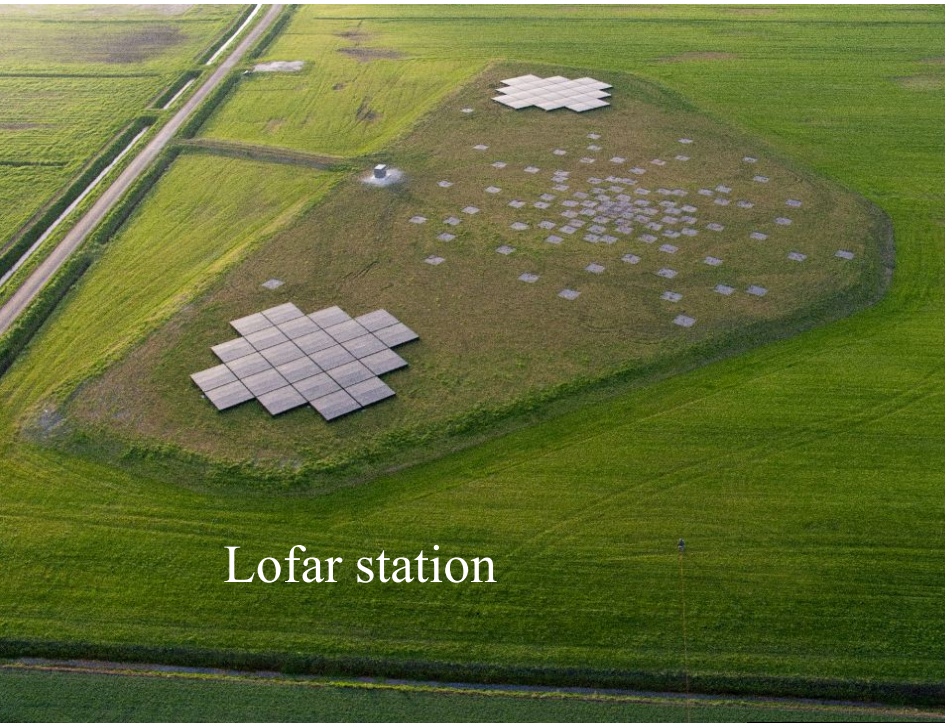
# PAF-upgrade van Westerbork Synthese Radio Telescoop: APERTIF 13-09-2018



APERTIF-PAF met **121 elementen**  
beeldveld vergroot met **factor 25**  
t.o.v. een "single-feed" telescoop



# LOFAR configuratie (fase 1)



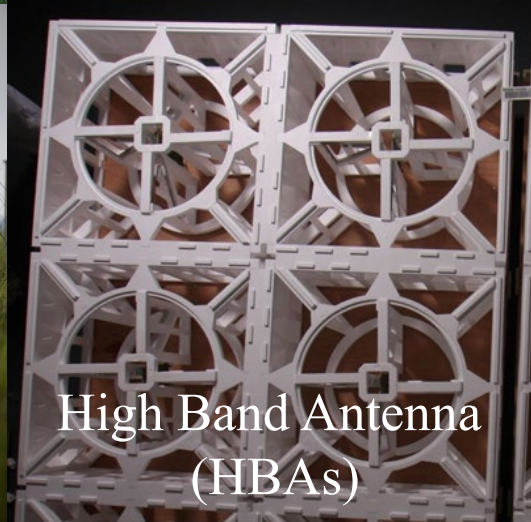
Lofar station



"Superterp" 6 stations binnen 320 m



Low Band Antenna's (LBAs)



High Band Antenna (HBAs)



International Lofar Telescope



# Bundelsynthese LOFAR op 3 niveau's

## Aperture Array

Datastream/bundle = 500 GB/s

Vergelijk: Westerbork = 10 MB/s

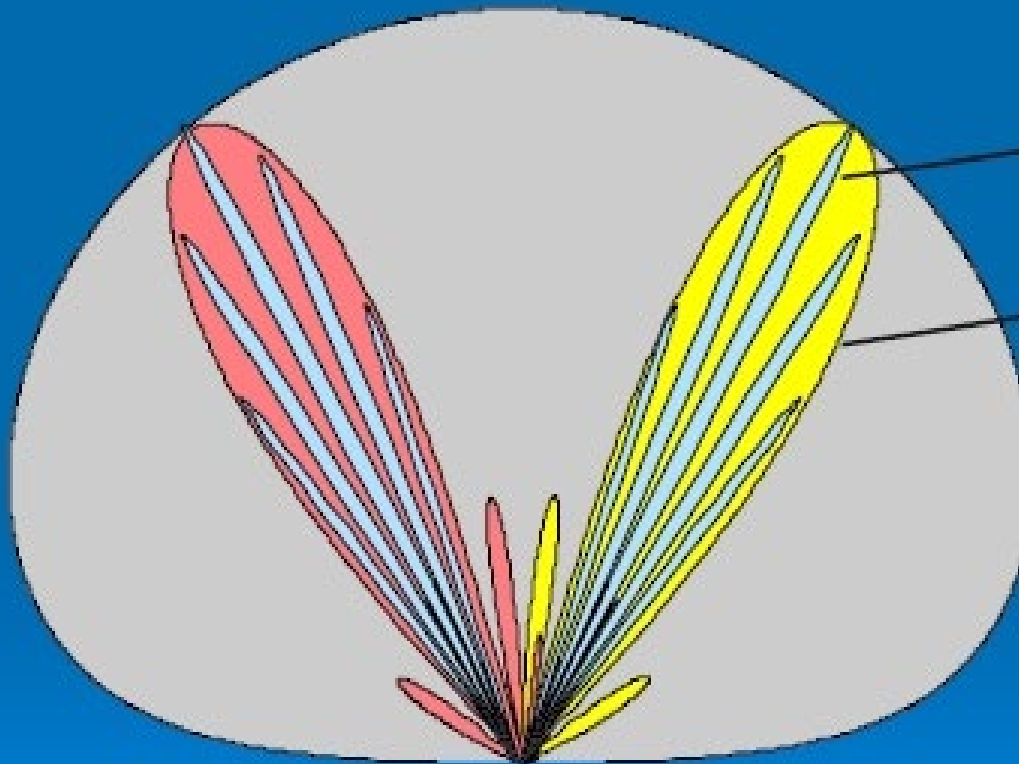
10 bgsec (50 MHz)

3 bgsec (150 MHz)

Synthesized beams

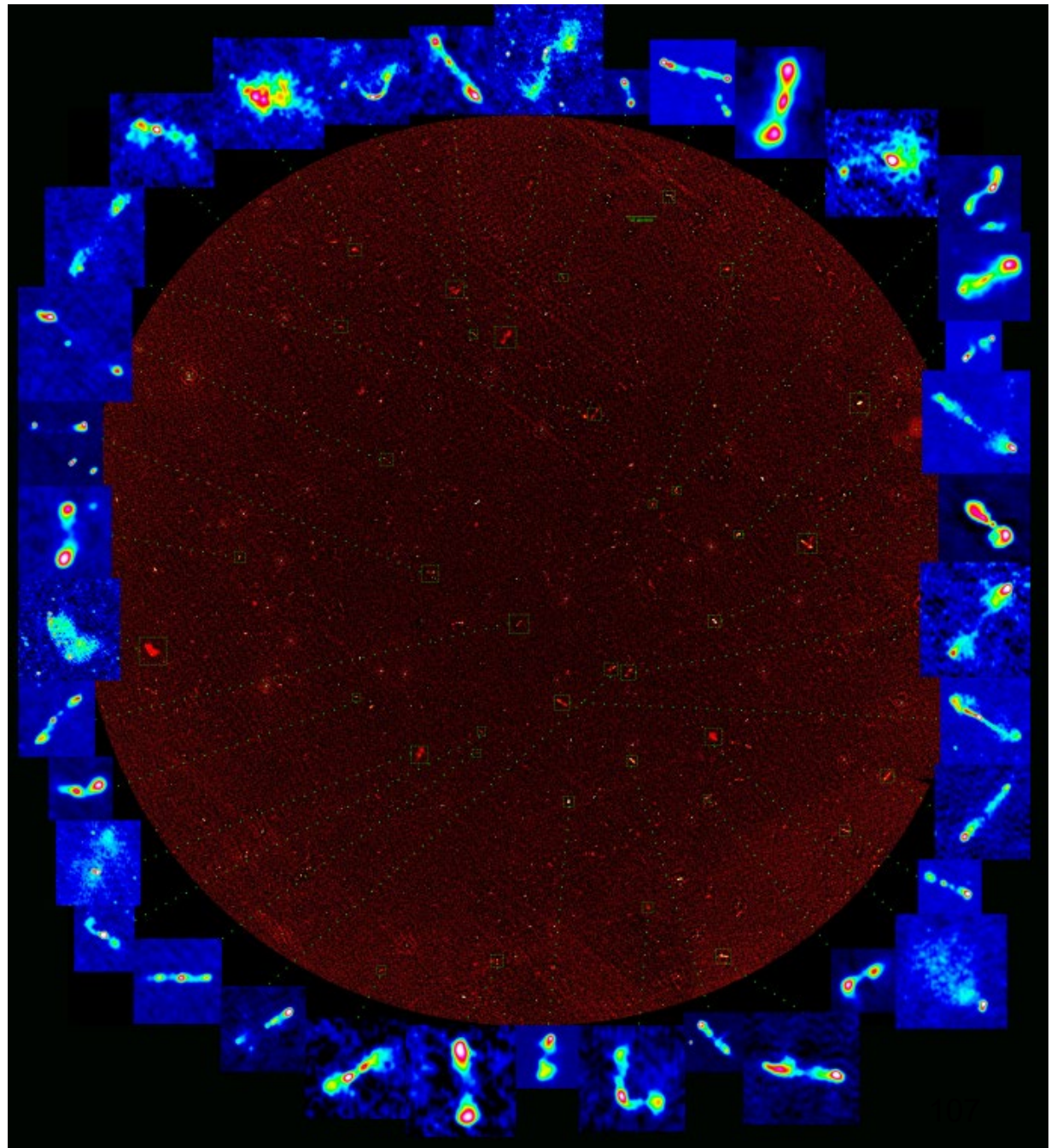
Station antenna patterns

Element antenna pattern



## LOFAR deep field:

- Bootes constellation
- 55 hours exposure
- sky field  $\approx 20 \text{ deg}^2$
- HBA 120 - 168 MHz
- synthesized beam size  $4'' \times 6''$
- $> 10,000$  radio sources
- large morphological variety





# SKA laagfrequent antenne array

120.000 (SKA-1) tot 1.000.000(SKA-2) gekoppelde dipolen  
West-Australië, 2024 – 2030. LOFAR is pilot.



# SKA Radio interferometer configuratie (3000 km)

## Spiraalkern + random distributie buitengebied







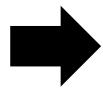
SKA middenfrequent-antennes  
met off-set Gregorian spiegelconfiguratie  
Tot 2500 schotel-antennes (13-18 meter)  
Zuid- Afrika, Noord-Kaap provincie 2024→2030



# Grondresolutie( $\Delta x$ ) $\leftrightarrow$ primaire spiegel (D)

Satelliethoogte:  $h \rightarrow \Delta\theta = \Delta x / h$

Buiginggrens :  $\Delta\theta = \lambda / D$



$$D = \lambda h / \Delta x$$

Vb: grondresolutie: 0,5 meter

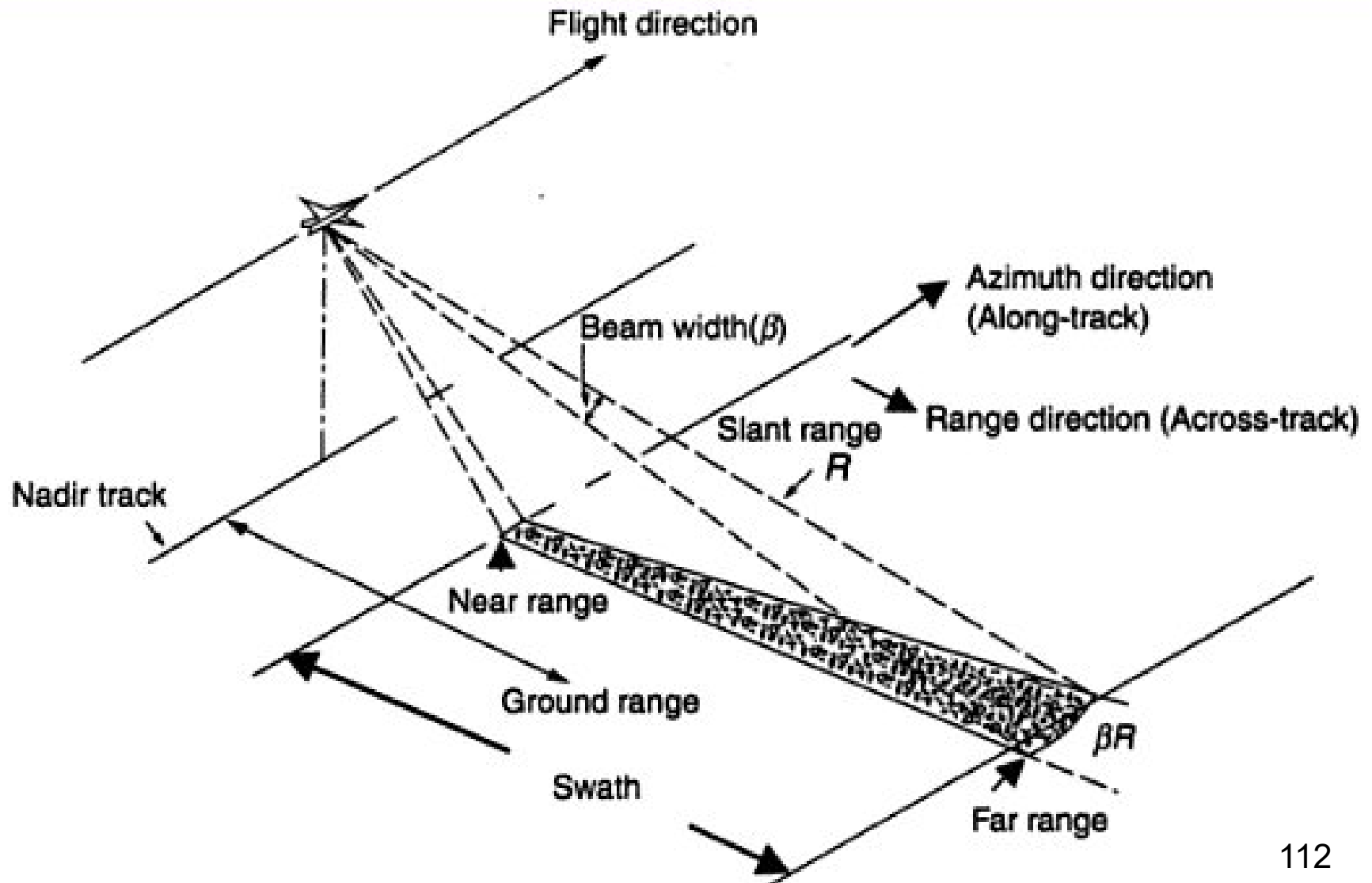
satelliethoogte: 500 kilometer

zichtbaar licht: 0,5 micrometer

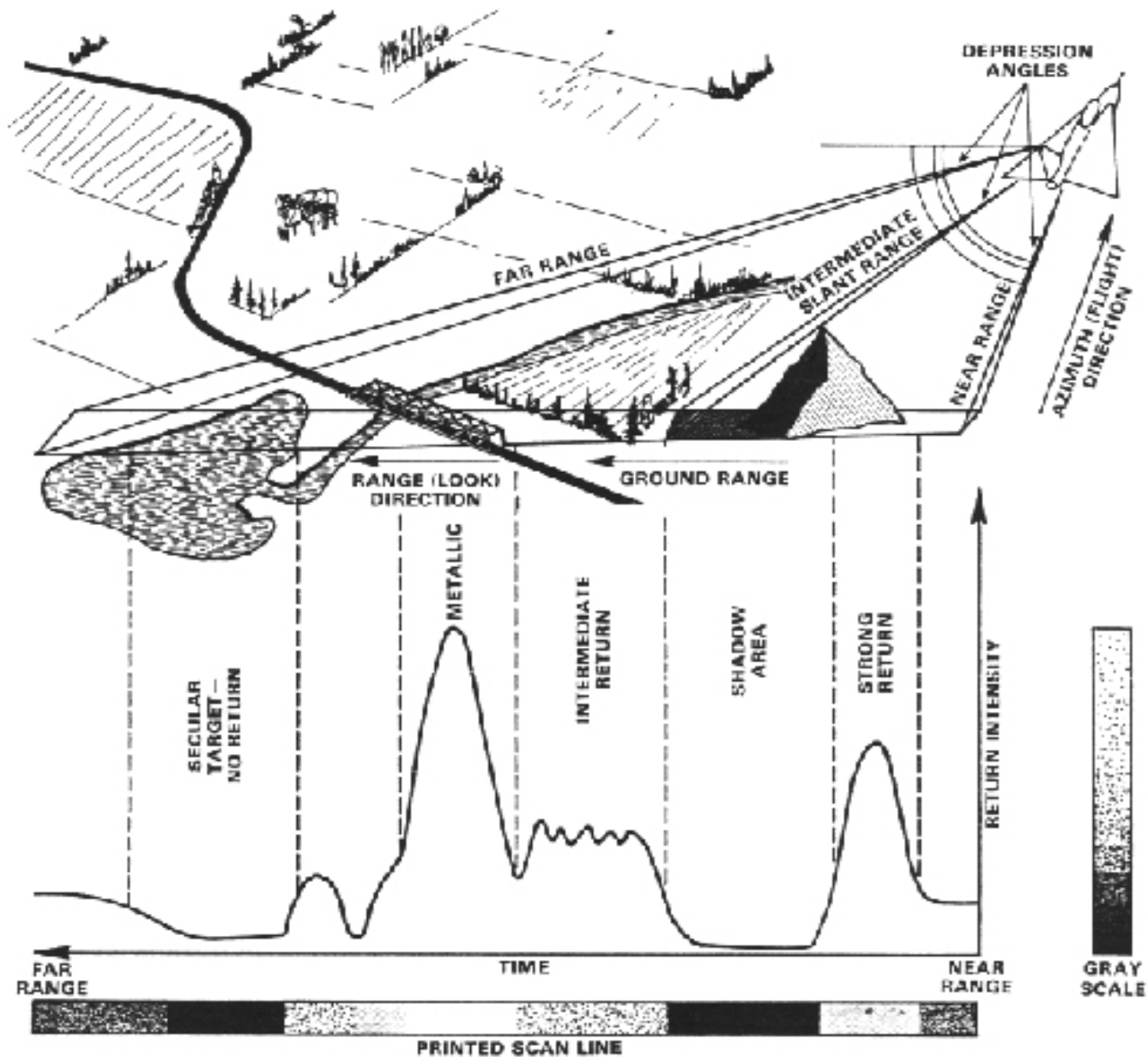
$$\rightarrow D = 5 \cdot 10^5 \times 5 \cdot 10^{-7} / 5 \cdot 10^{-1} = 50 \text{ cm}$$

Let op: ideale geval

# Beeldscherpte aardoppervlak vanuit de ruimte: zijwaarts kijkende radar (SLR, SLAR)

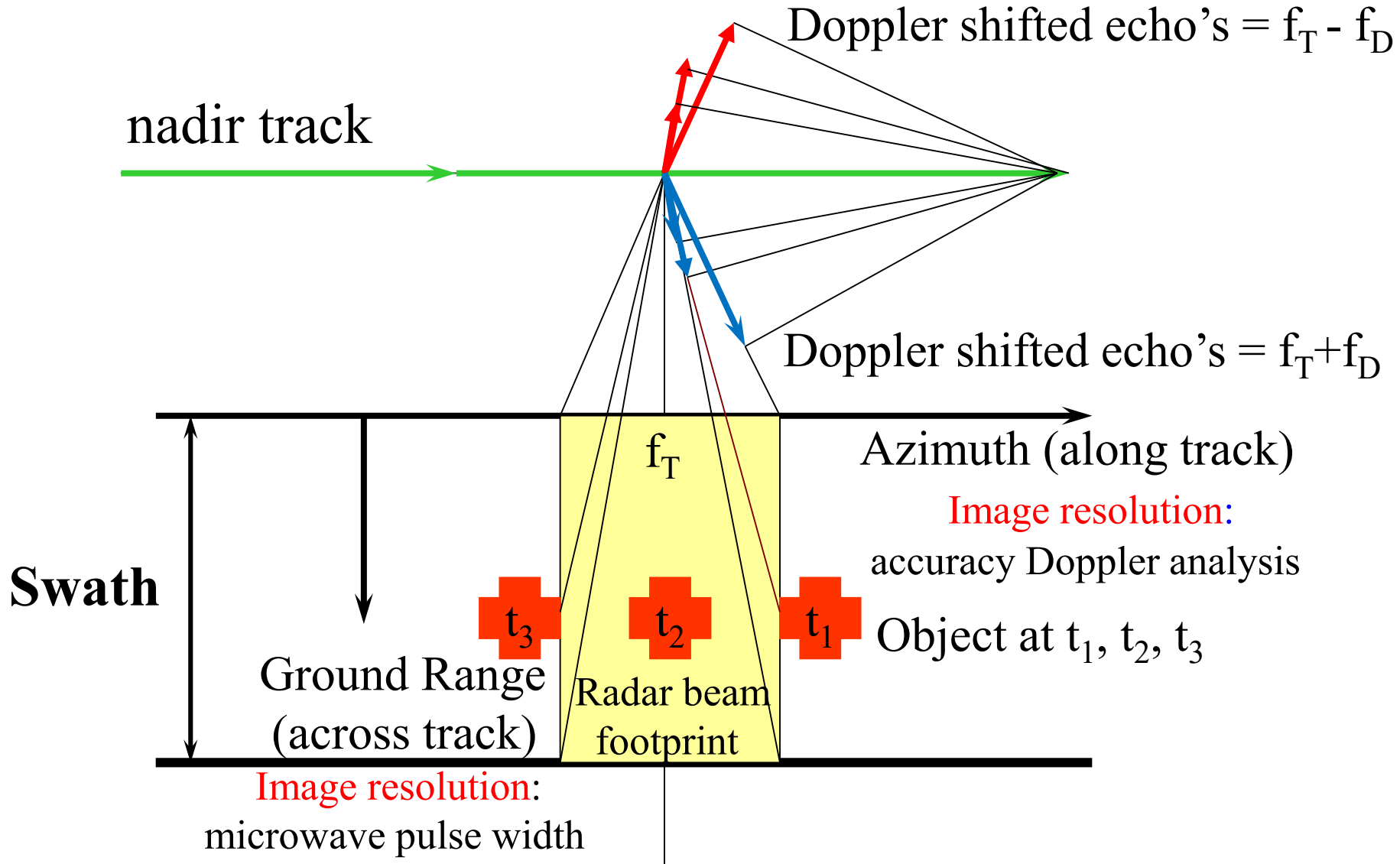


# SLR, SAR: strength of echo returns

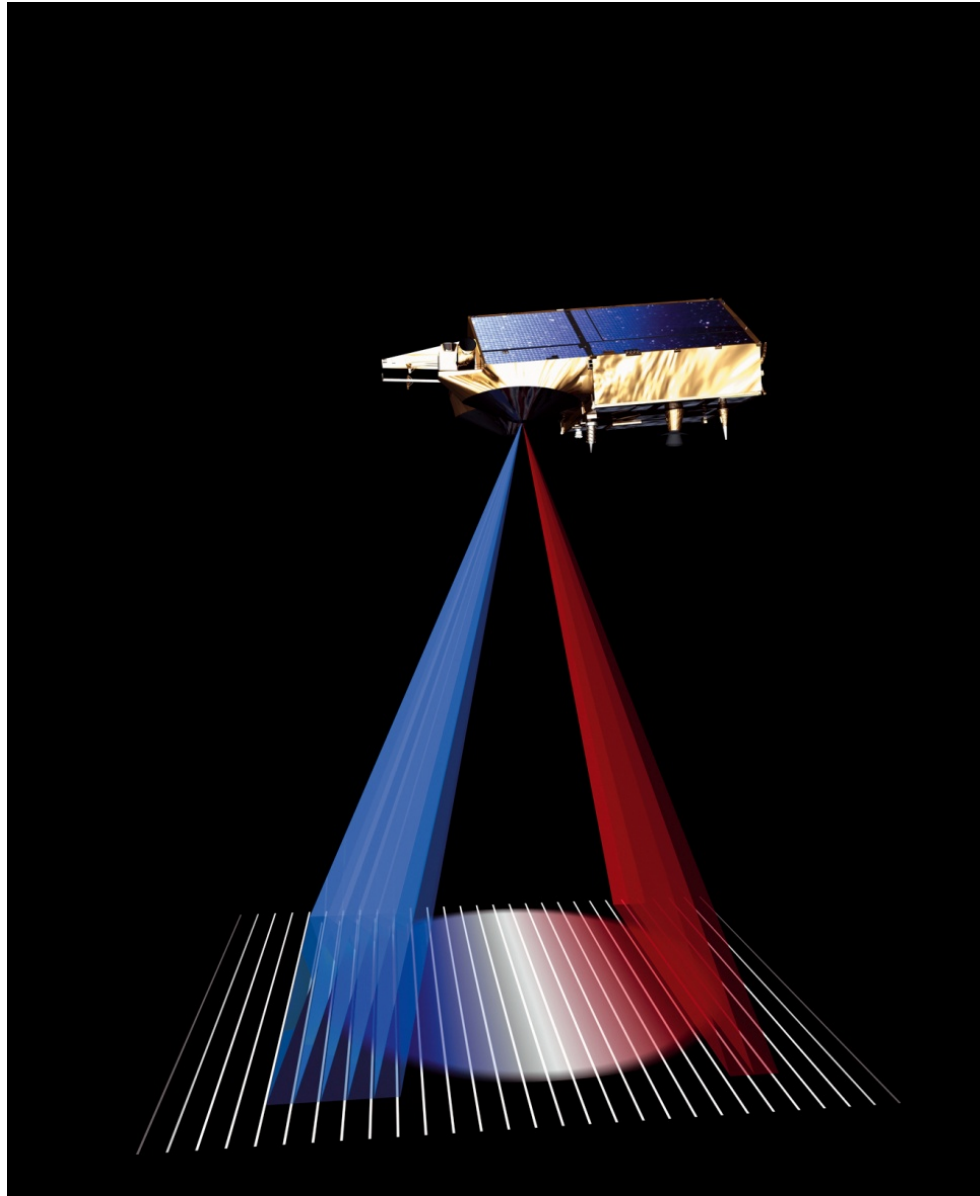




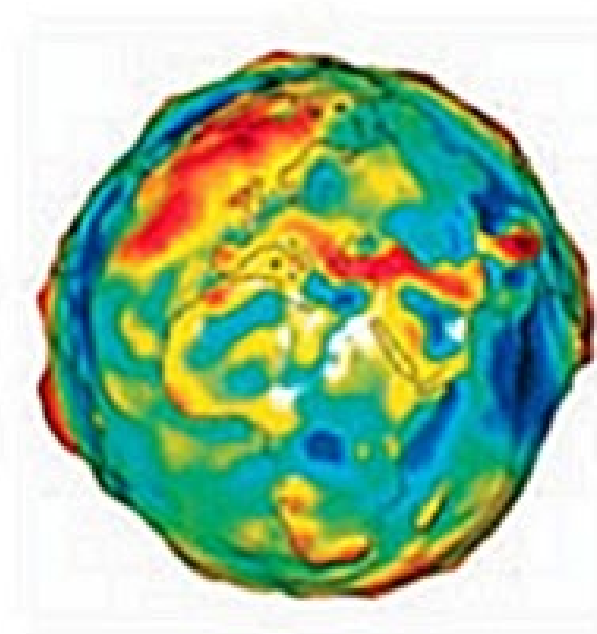
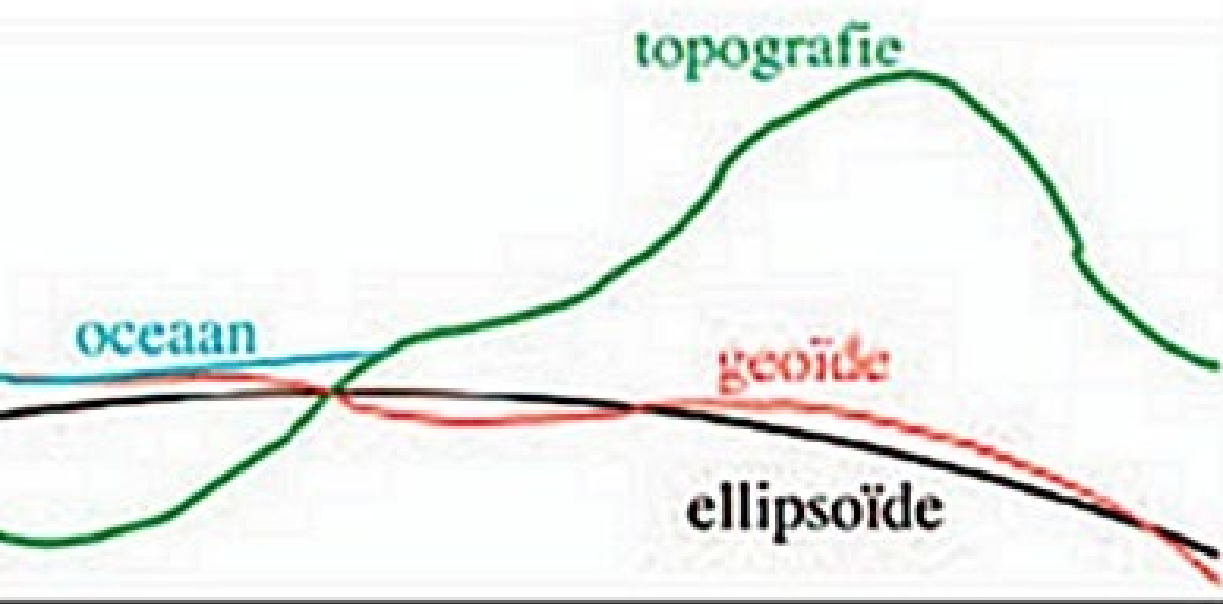
# SAR: time multiplexing physical antenna



# Principle of Doppler resolution CryoSAT-2 altimeter (2010)

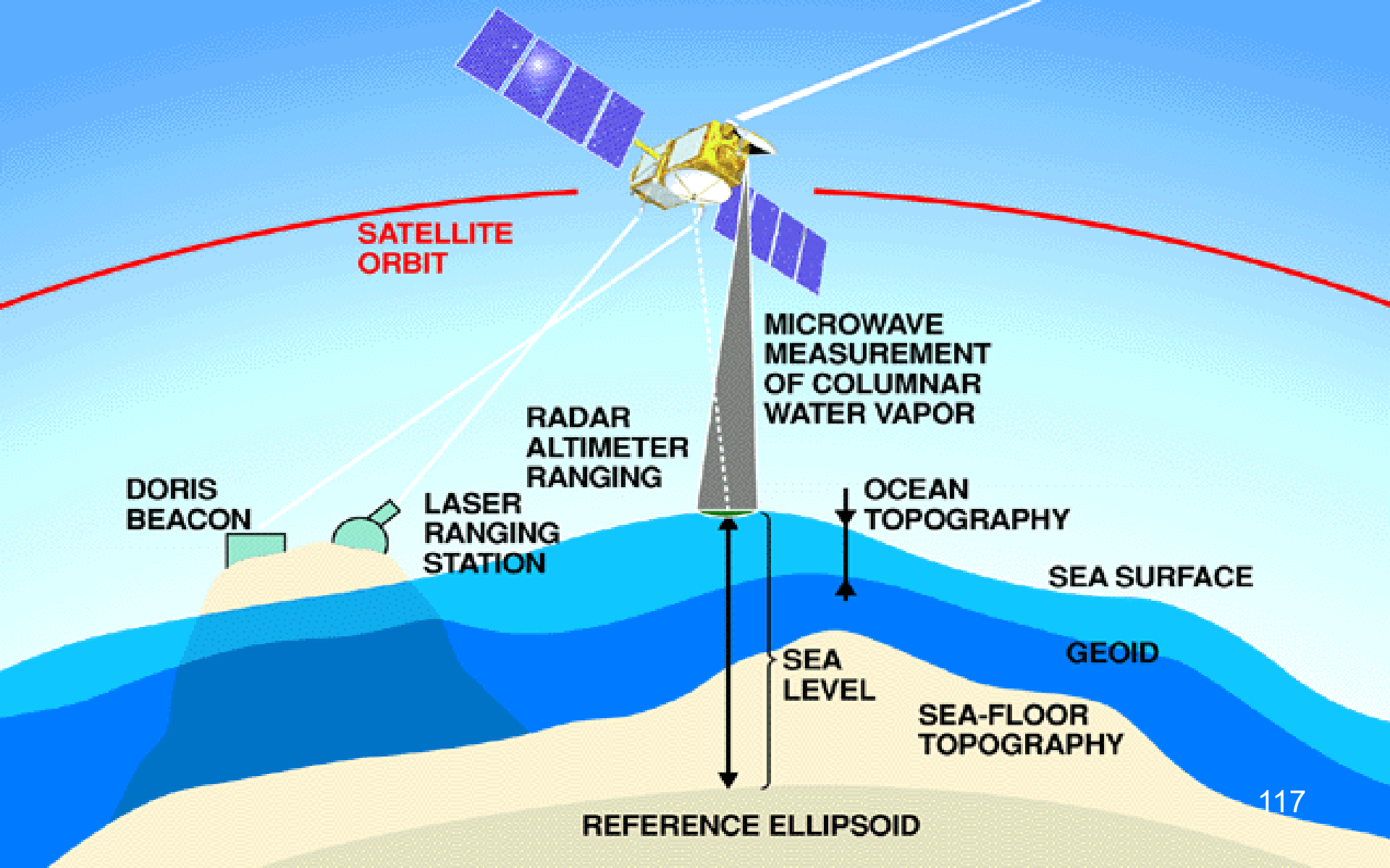
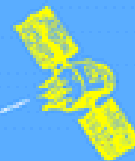


# Geoïde: equipotentiaalvlak aards zwaartekrachtveld



# JASON-1 MEASUREMENT SYSTEM

GPS SATELLITE



SATELLITE ORBIT

MICROWAVE MEASUREMENT OF COLUMNAR WATER VAPOR

RADAR ALTIMETER RANGING

DORIS BEACON

LASER RANGING STATION

OCEAN TOPOGRAPHY

SEA SURFACE

GEOID

SEA LEVEL

SEA-FLOOR TOPOGRAPHY

REFERENCE ELLIPSOID



# Beeldscherpte diagram

$$\log D = \log (\lambda \theta^{-1}) = - \log \theta + \log \lambda$$

$$y = -x + c_\lambda$$

- 45° lijn: constante golflengte

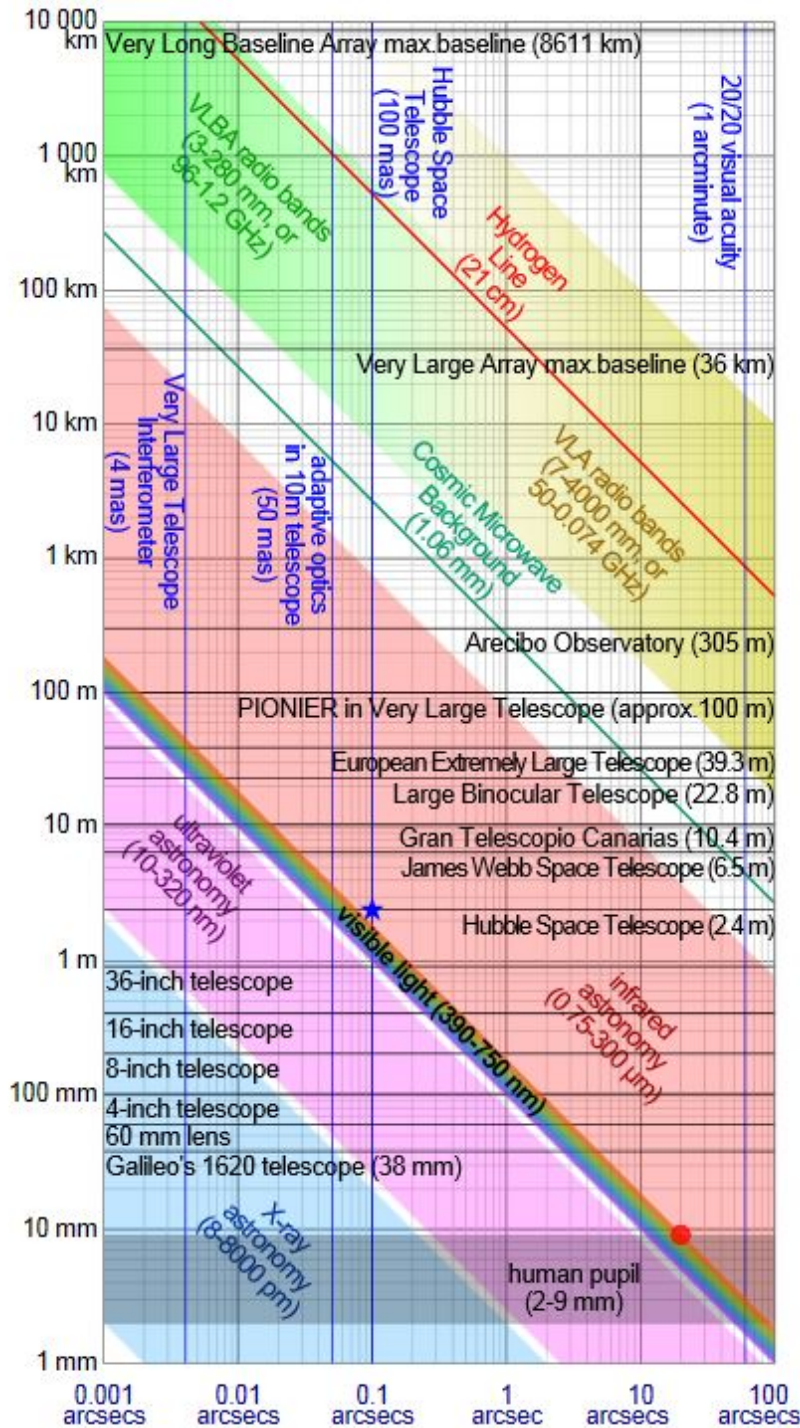
## Event Horizon Telescope (EHT):

Zwart Gat in M87: 6.5 miljard  $M_\odot \rightarrow$   
 Waarnemingshorizon  $\approx 100$  miljard km

Afstand M87: 55 Mljr  $\rightarrow \Delta\theta \approx 50 \mu\text{bgsec}$

Waarneming bij  $\lambda = 1.3 \text{ mm} \rightarrow$

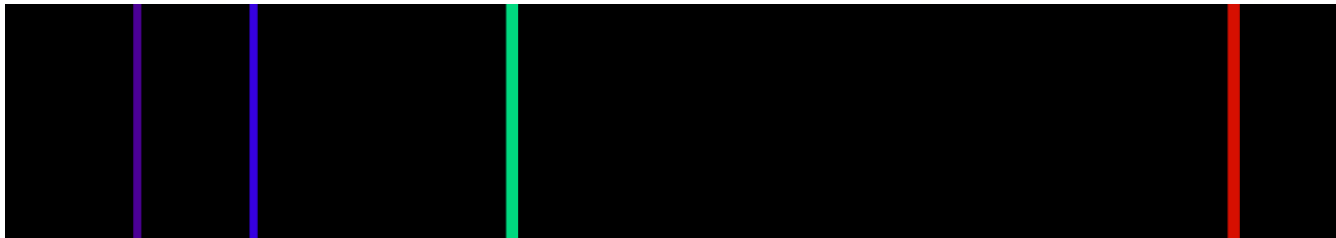
Minimale diameter EHT:  $D = 5000 \text{ km}$



### 3. Spectraal scheidend vermogen: $R_\lambda = \lambda / \Delta\lambda$



**Continuous**

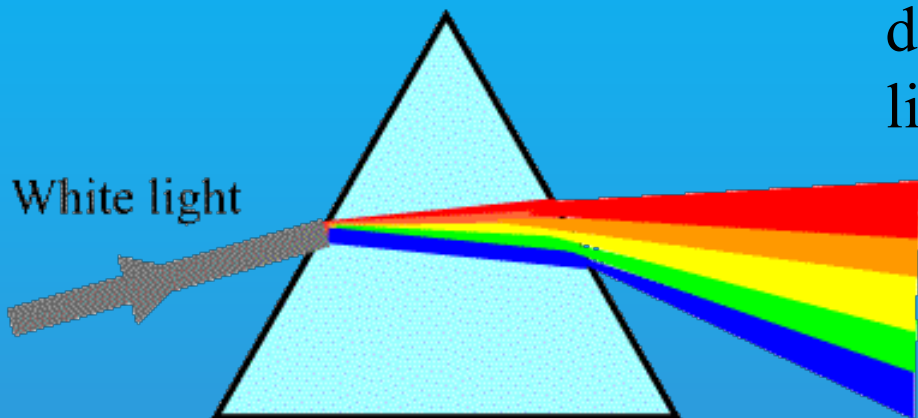


**Emission  
or  
Bright Line**

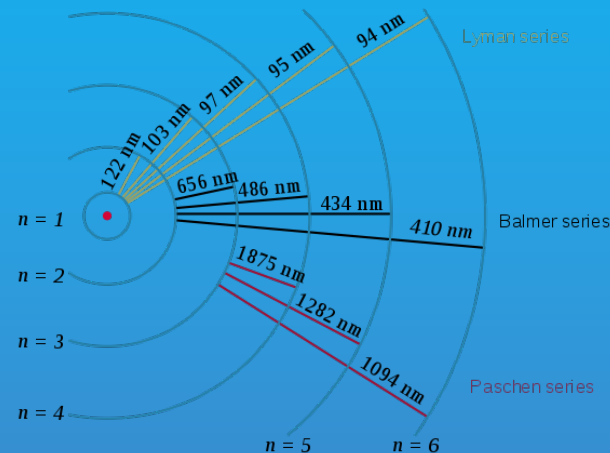


**Absorption  
or  
Dark Line**

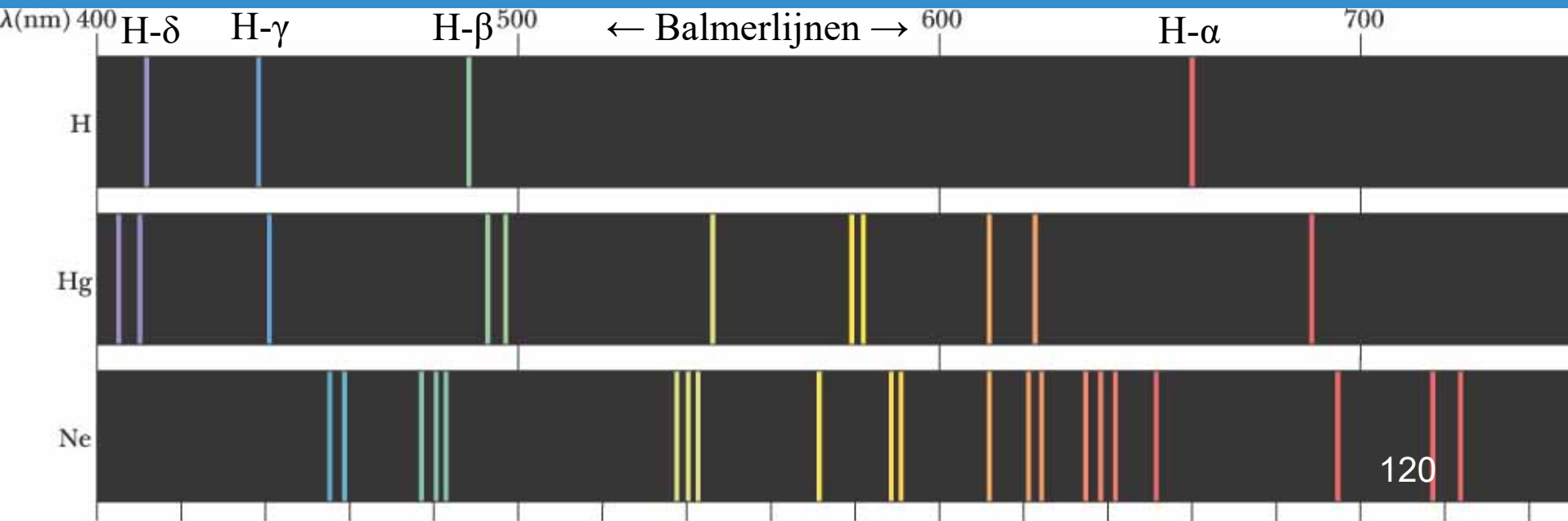
# Refraction through a prism



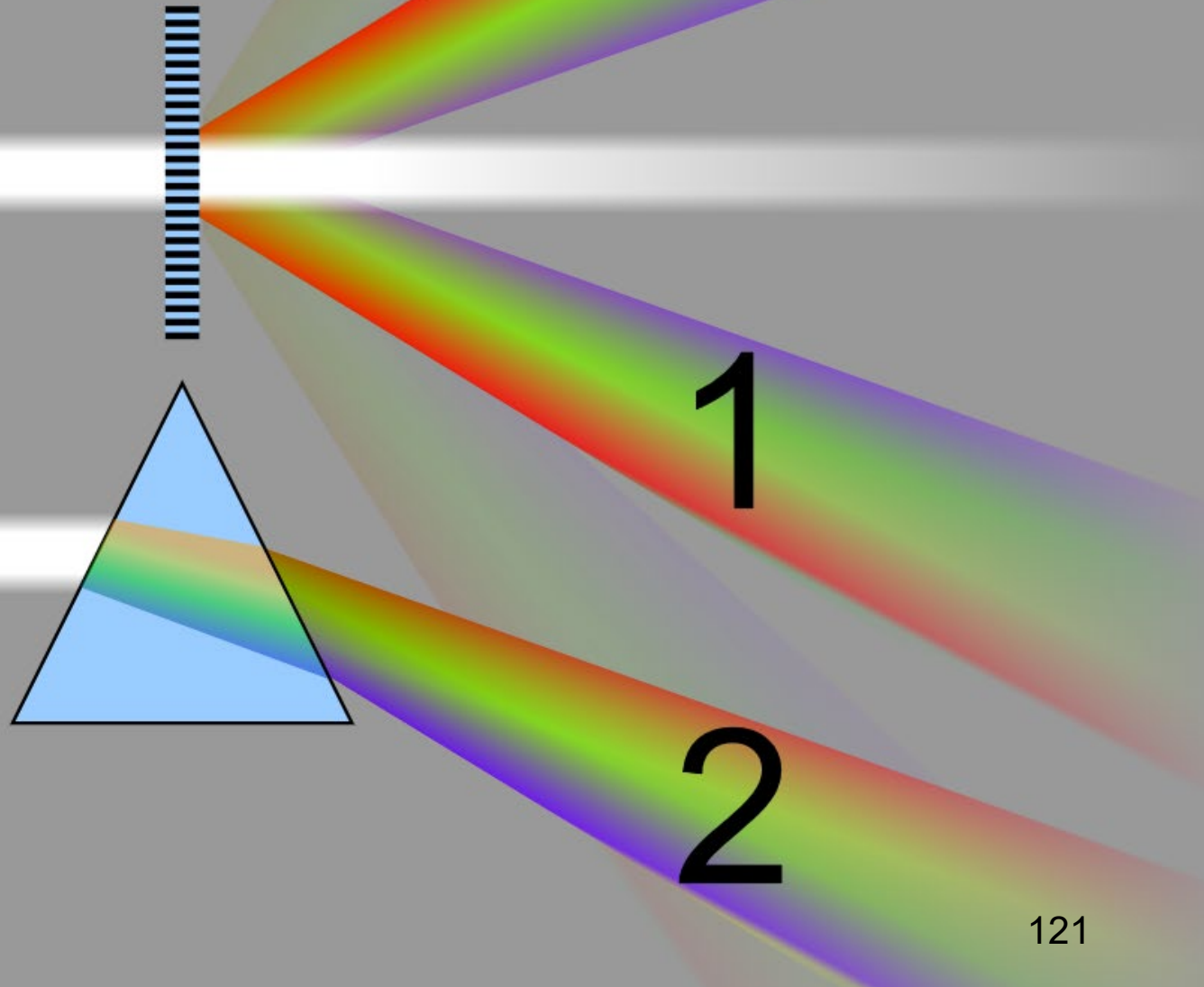
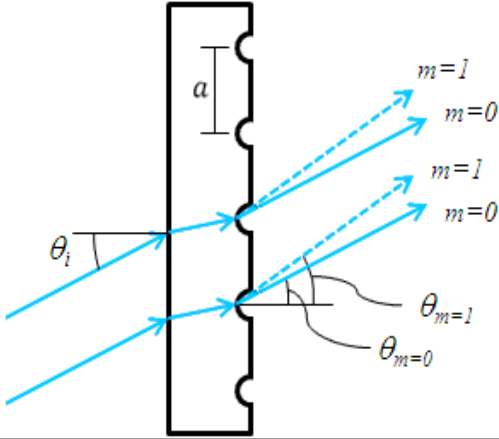
In de kleurenband van het spectrum zitten bij **vaste golflengten lijnen** van de verschillende elementen die in de lichtbron voorkomen:



Golflengte (in nanometers)



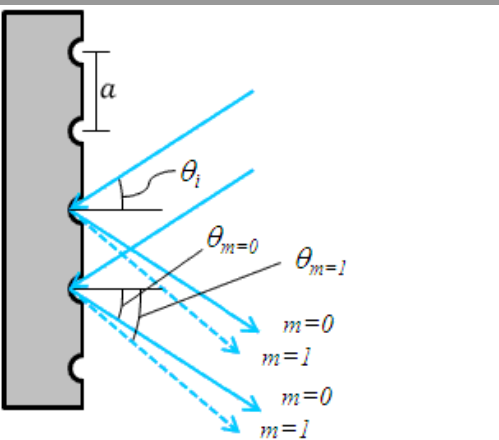
# DiffRACTIE met transmissie- of reflectietralie



Tralie vergelijking:

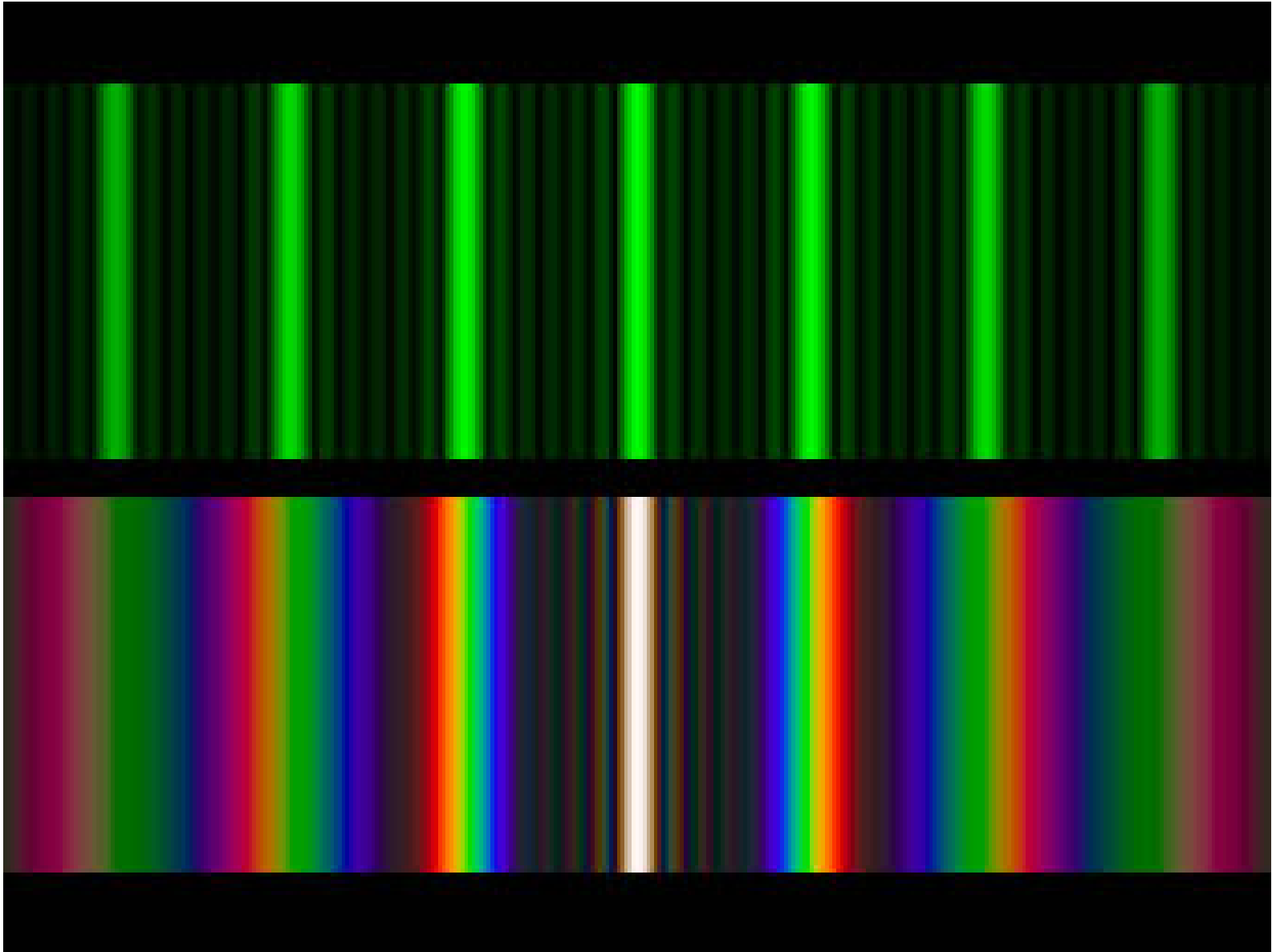
$$\sin \theta_m \pm \sin \theta_i = m \frac{\lambda}{a}$$

$$\perp \rightarrow \sin \theta_m = m \frac{\lambda}{a}$$





# Traliespectra van een monochromatische (groene) laser en een polychromatische (witte) lichtbundel



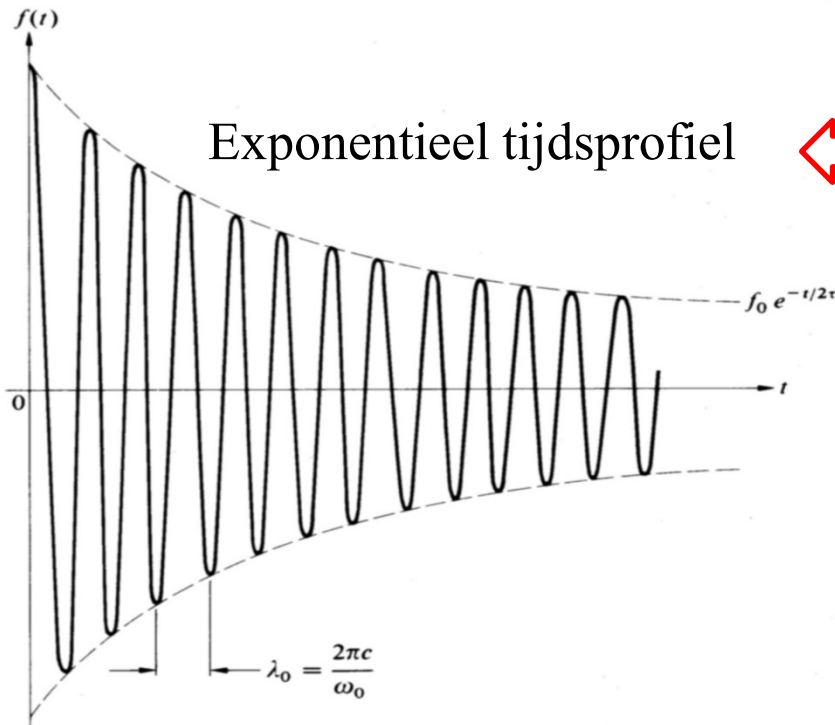
# Natuurlijke lijnbreedte: onzekerheidsrelaties van Heisenberg

Fluctuaties in energie en tijd:  $\sigma_E \sigma_t \geq \hbar/2$

Met  $E = h\nu \rightarrow \sigma_E = h\sigma_\nu = \hbar\sigma_\omega \rightarrow \sigma_\omega \sigma_t = 1/2$

$$\sigma_\omega = 1/(2\sigma_t) = 1/\tau_{\text{coh}}$$

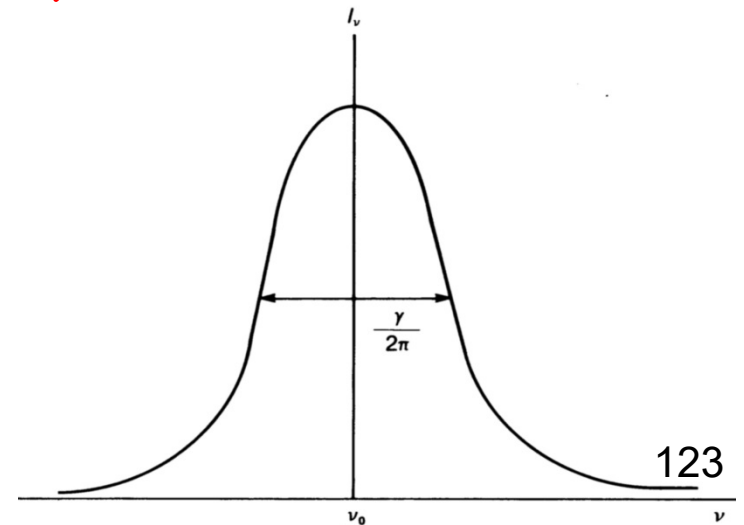
Stralingsemissie bij terugval uit geëxciteerde atomaire toestanden met levensduur  $\tau_{\text{coh}}$



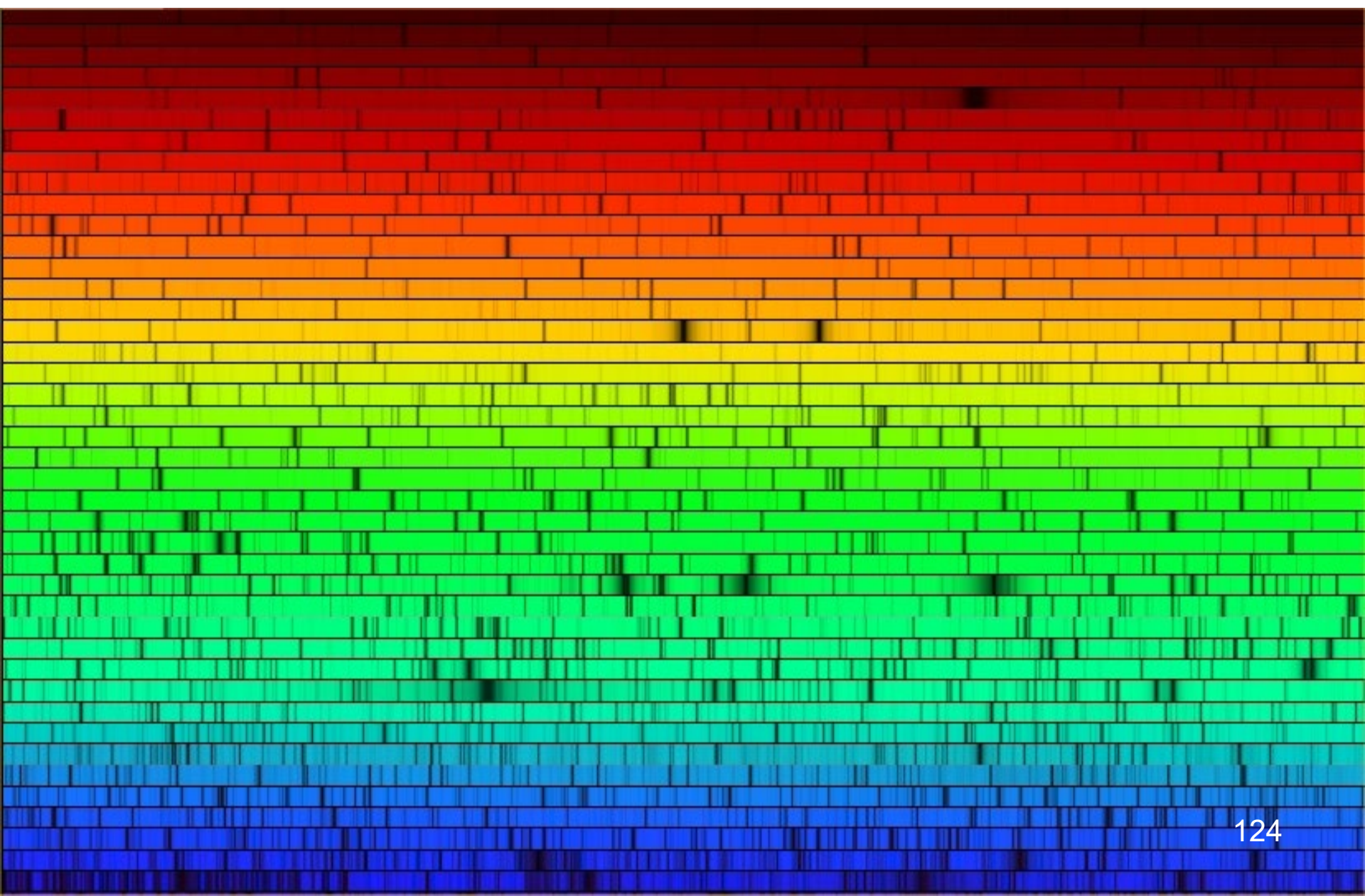
FT



Lorentz frequentieprofiel



# Voorbeeld: zonnenspectrum

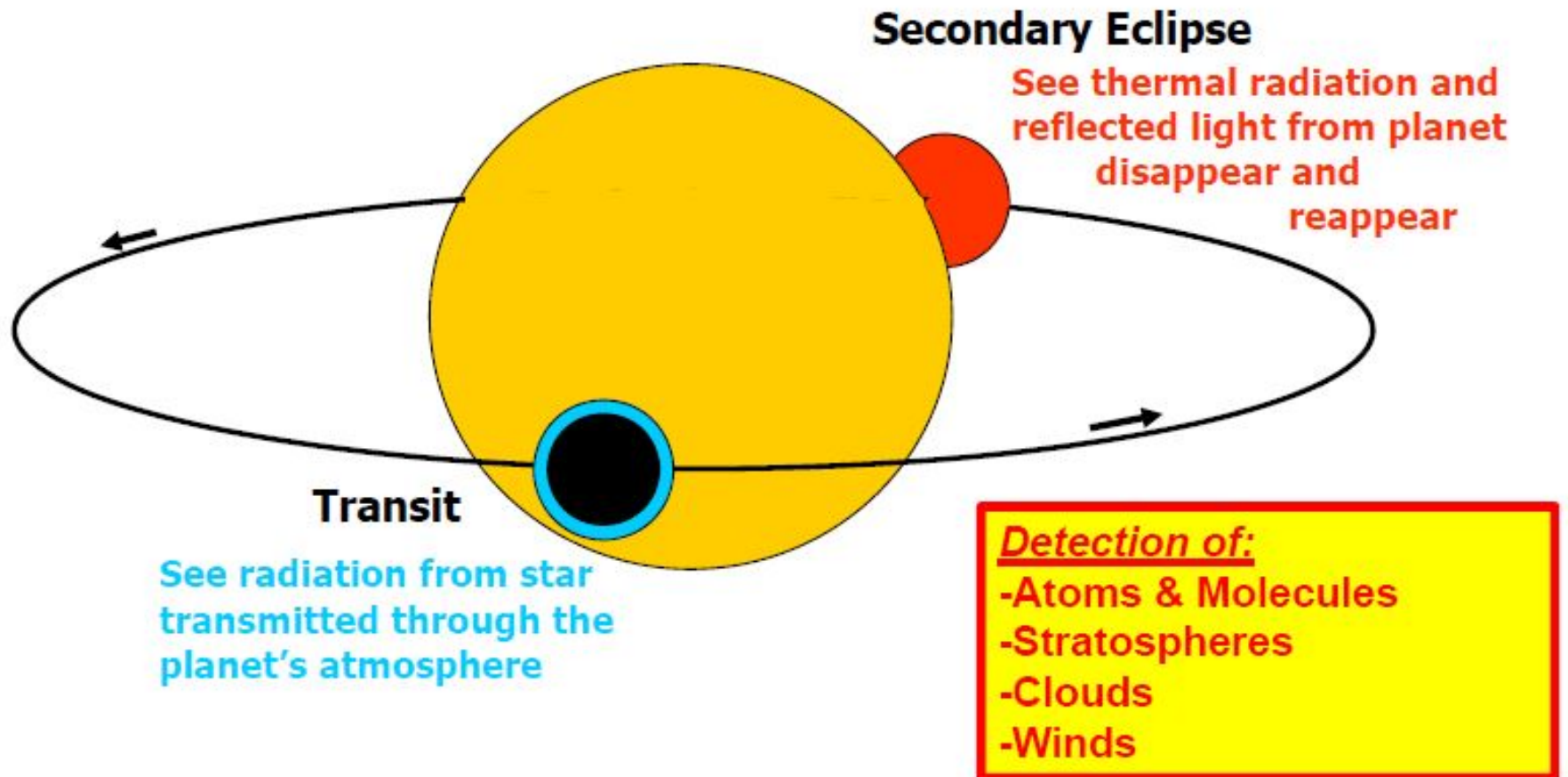


# Dynamica planeetbeweging: radiële snelheidsprofiel

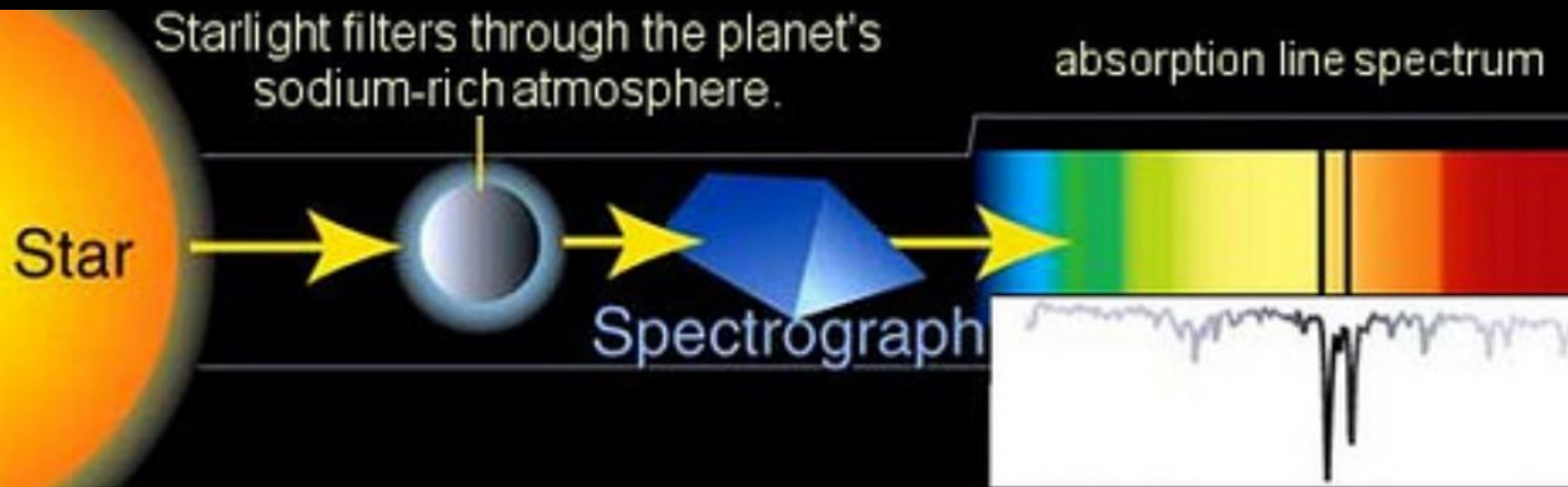


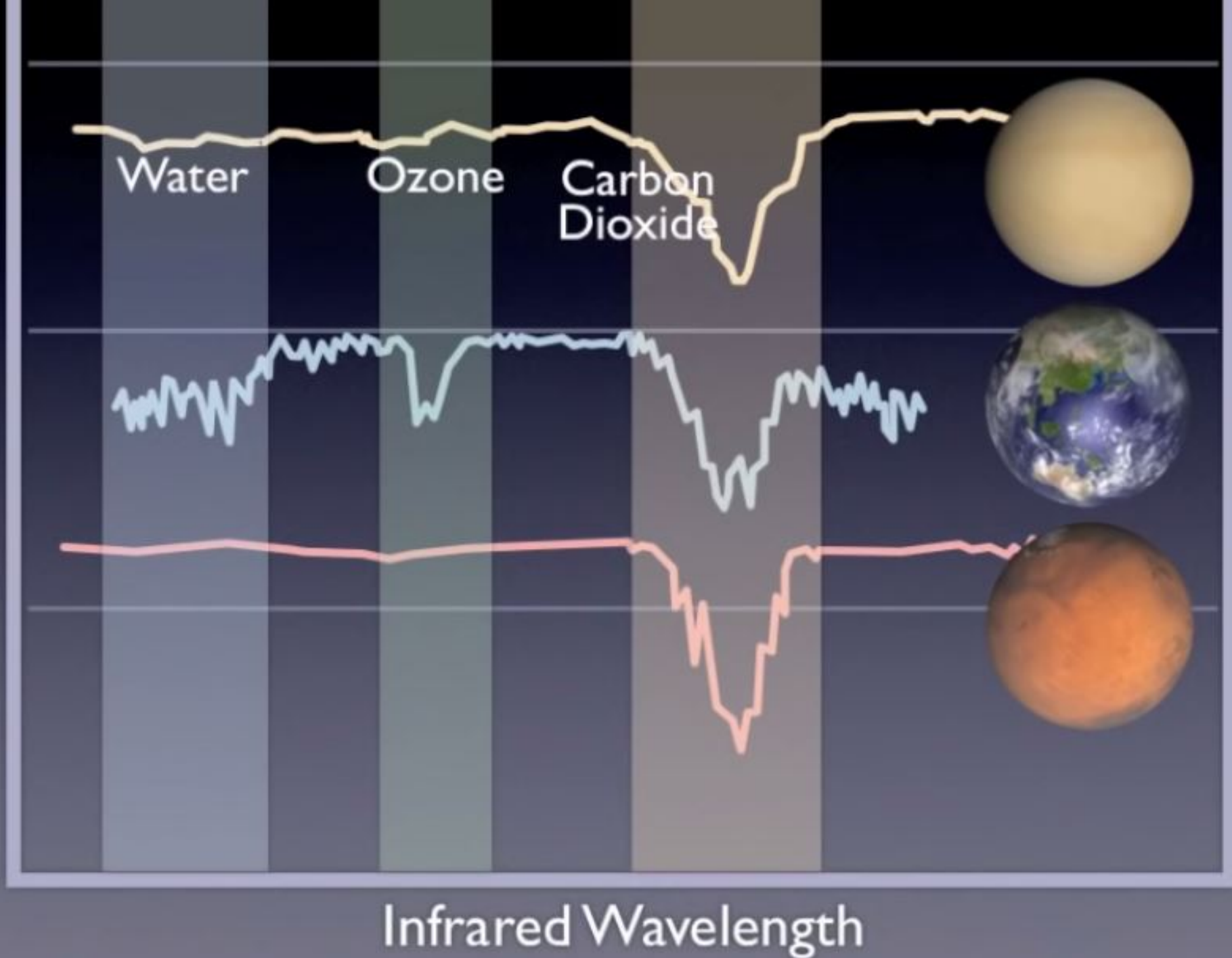


# Transits Allows Studies of the Atmospheres That Are Not Possible for Non-Transiting Planets



# Planetary transit spectroscopy

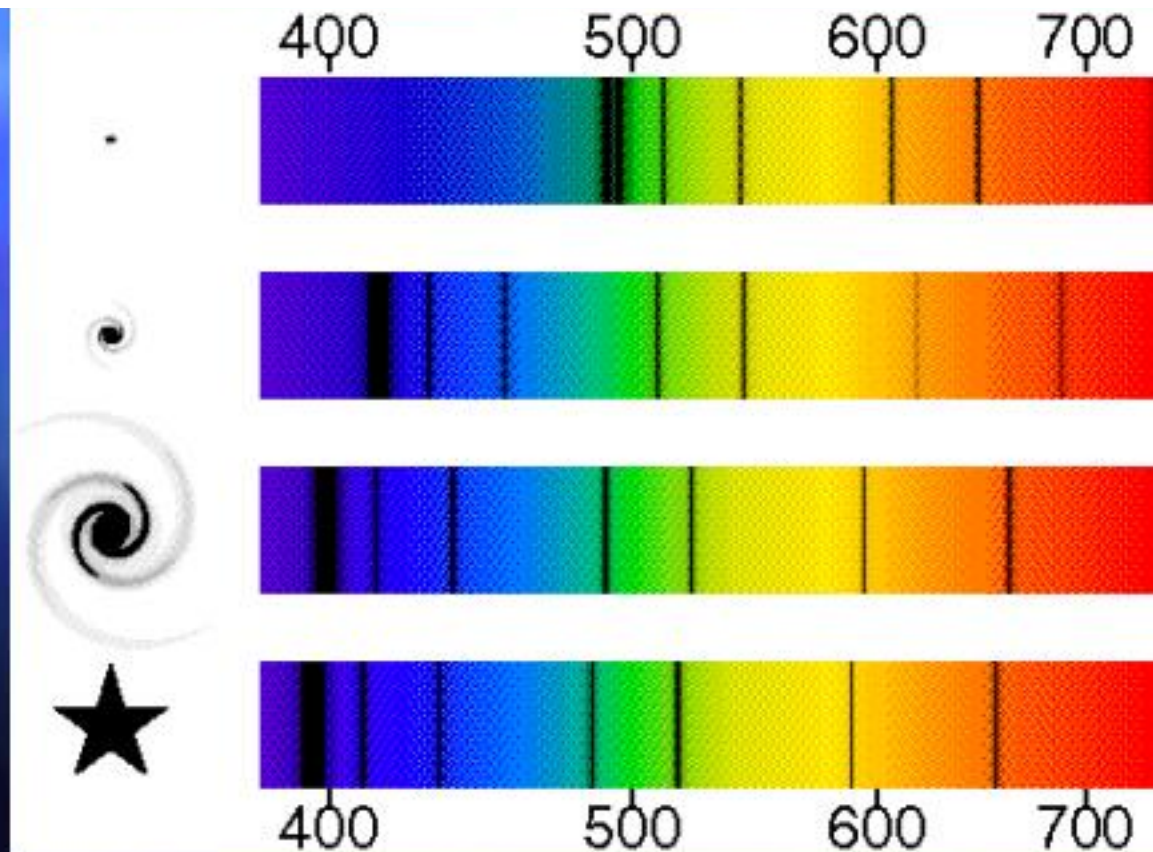




# Kosmologisch roodverschuiving: wet van Hubble

Hoe verder het sterrenstelsel, hoe meer is het spectrum rood verschoven volgens:

$$v = H_0 \cdot d$$



Ver sterrenstelsel:  
Grote roodverschuiving

Nabije ster: geen  
roodverschuiving



# De wet van Hubble : $v = H_0 \cdot d$

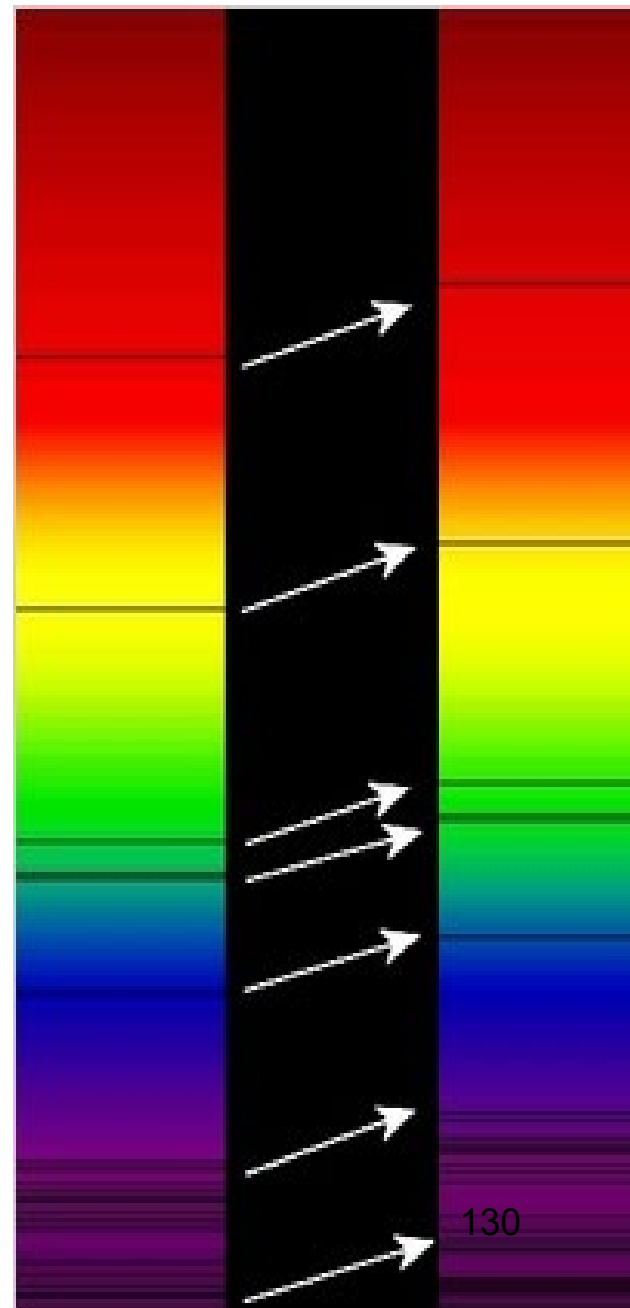
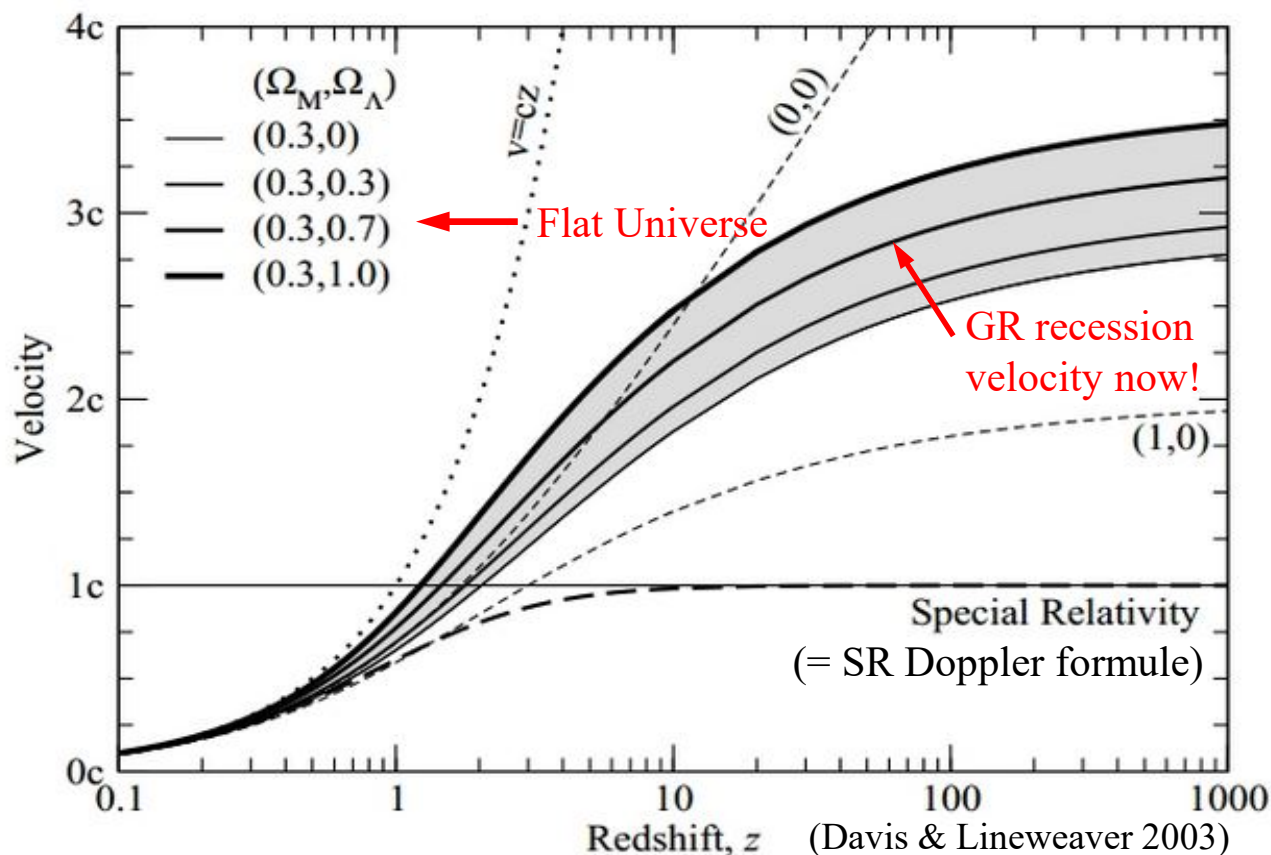
## Kosmologische roodverschuiving (z)

$$z = (\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{emit}}) / \lambda_{\text{emit}}$$

$$1+z = \lambda_{\text{obs}} / \lambda_{\text{emit}} = a(t_{\text{obs}}) / a(t_{\text{emit}})$$

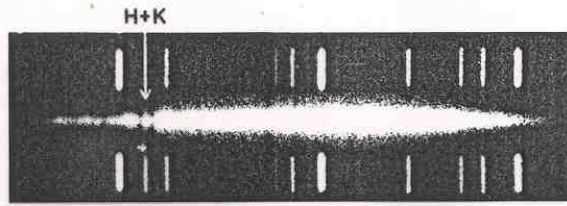
$v = f(z)$  is **niet de relativistische Doppler formule**.

Alleen voor  $v \ll c \rightarrow z = v/c$





VIRGO



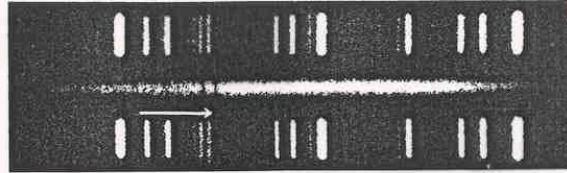
1,200 KM/SEC

78 Mly

Roodverschuiving van de H+K lijnen van Ca



URSA MAJOR



15,000 KM/SEC

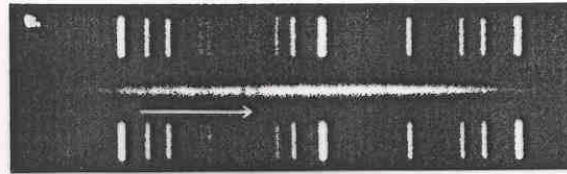
750 Mly

Kosmologische roodverschuiving (z)

$$z = (\lambda_{ob} - \lambda_{em}) / \lambda_{em}$$
$$1+z = \lambda_{ob} / \lambda_{em} = a(t_{ob}) / a(t_{em})$$



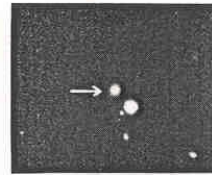
CORONA BOREALIS



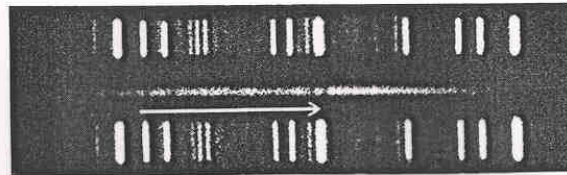
22,000 KM/SEC

1100 Mly

Relatie  $v = f(z)$  is niet Doppler formule, alleen voor  $v \ll c \rightarrow z = v/c$



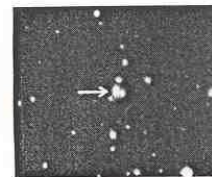
BOOTES



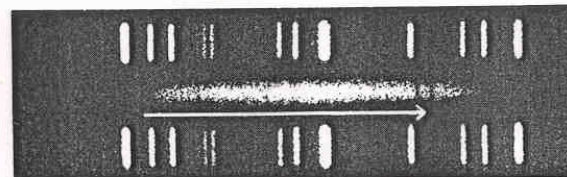
39,000 KM/SEC

2000 Mly

Snelheid neemt toe met ongeveer 20 km/sec per miljoen lichtjaren!



HYDRA

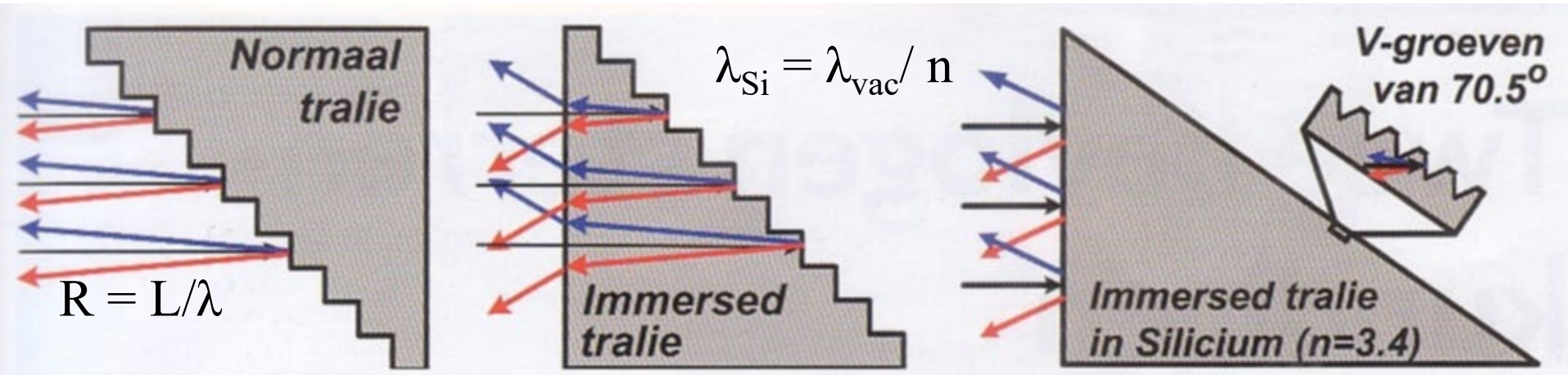


61,000 KM/SEC

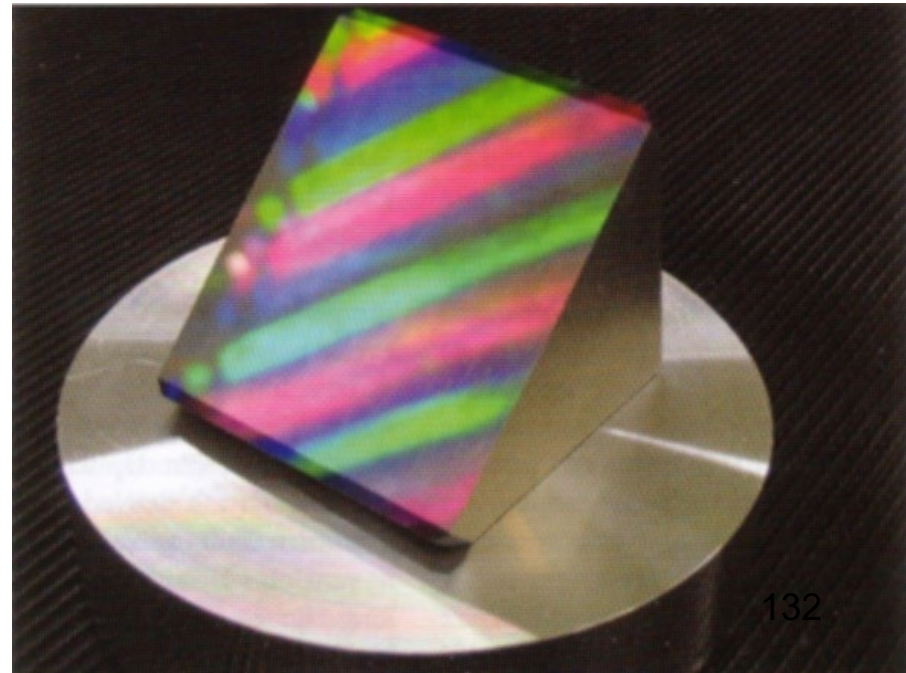
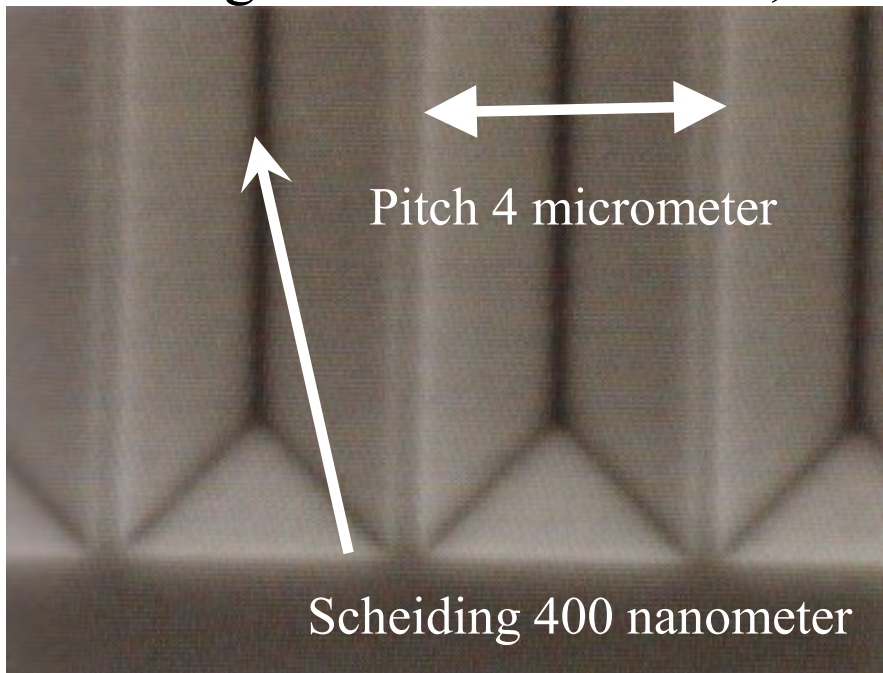
3000 Mly

(= 'Hubble - constante')

# Innovatie: toepassing monolithisch 'immersed' tralie'

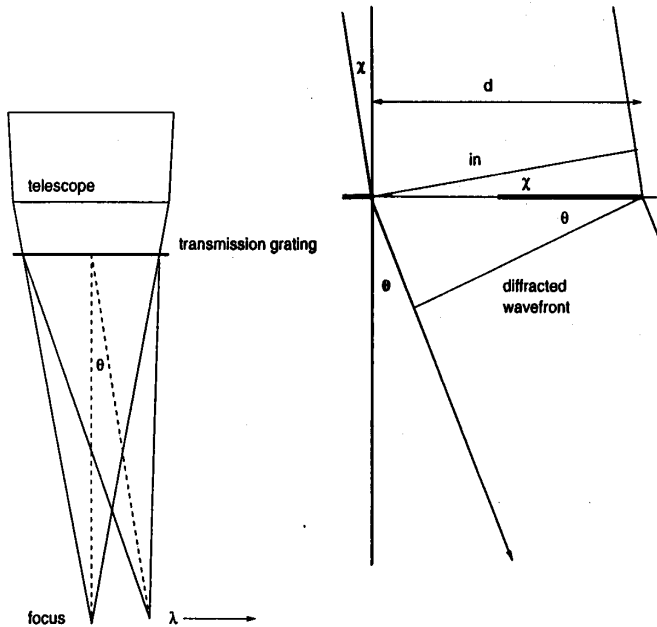


Fotolithografisch etsen met  $70,52^\circ$





## Transmission grating



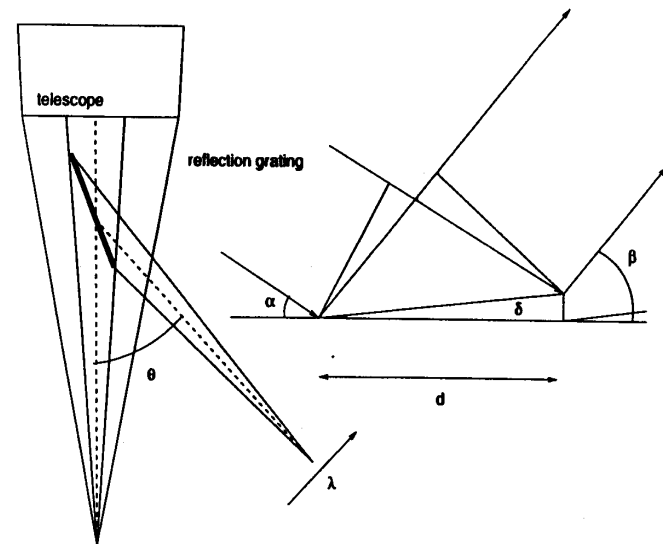
“Normal” incidence

$$\text{DE: } m\lambda = d(\sin\theta - \sin\chi)$$

$$\text{BW: } \Delta\chi \rightarrow \Delta\theta \rightarrow \Delta\lambda = \frac{d}{m} \cos\theta \Delta\theta$$

$$\text{RP: } \lambda/\Delta\lambda = \theta/\Delta\theta$$

## Reflection grating



## XMM-Newton RGS

“Grazing” incidence

$$\text{DE: } m\lambda = d(\cos\beta - \cos\alpha)$$

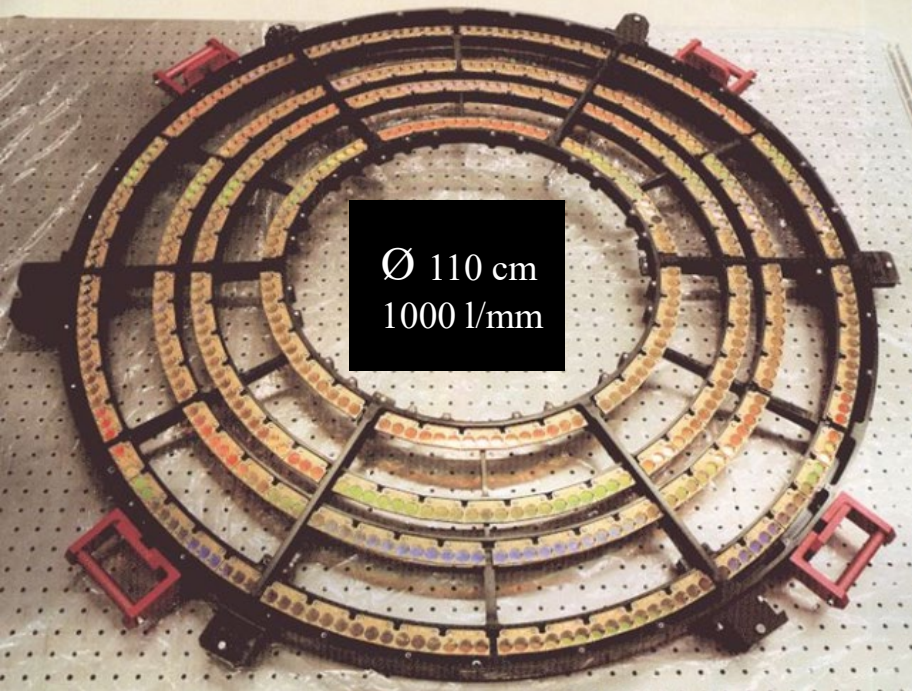
$$\text{BW: } \Delta\alpha \rightarrow \Delta\lambda = \frac{d}{m} \sin\alpha \Delta\alpha$$

$$\text{RP: } \lambda/\Delta\lambda = \frac{\cos\alpha - \cos\beta}{\sin\alpha \Delta\alpha}$$

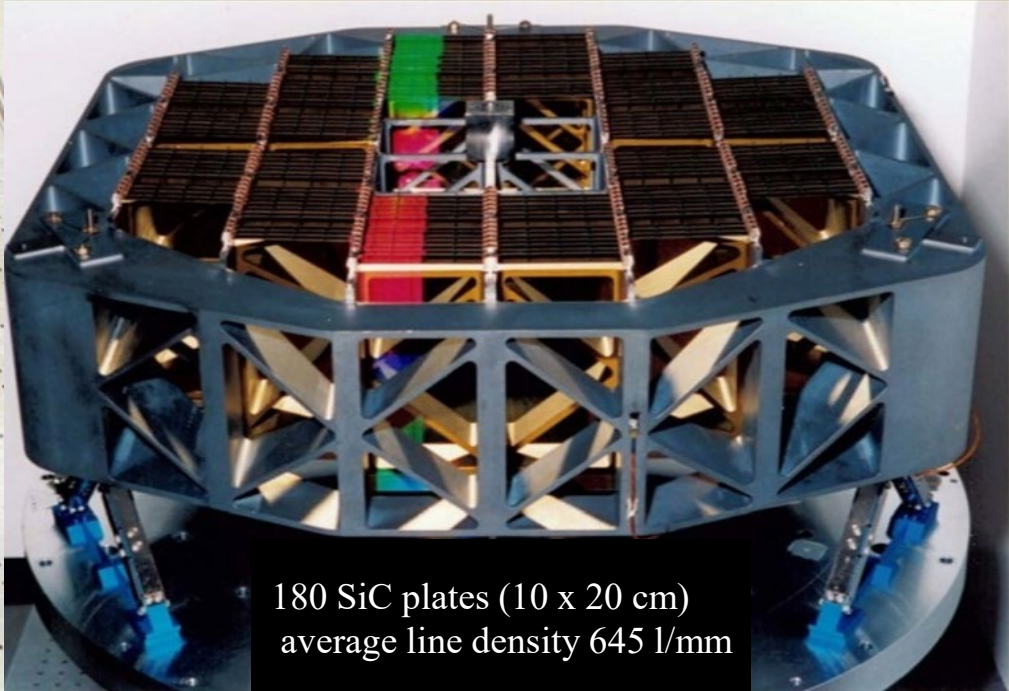
→ effective grating period:  $d \sin\alpha$

→ effective line density:  $\rho = \frac{\rho_r}{\sin\alpha}$  ( $\rho_r$  = ruling density)

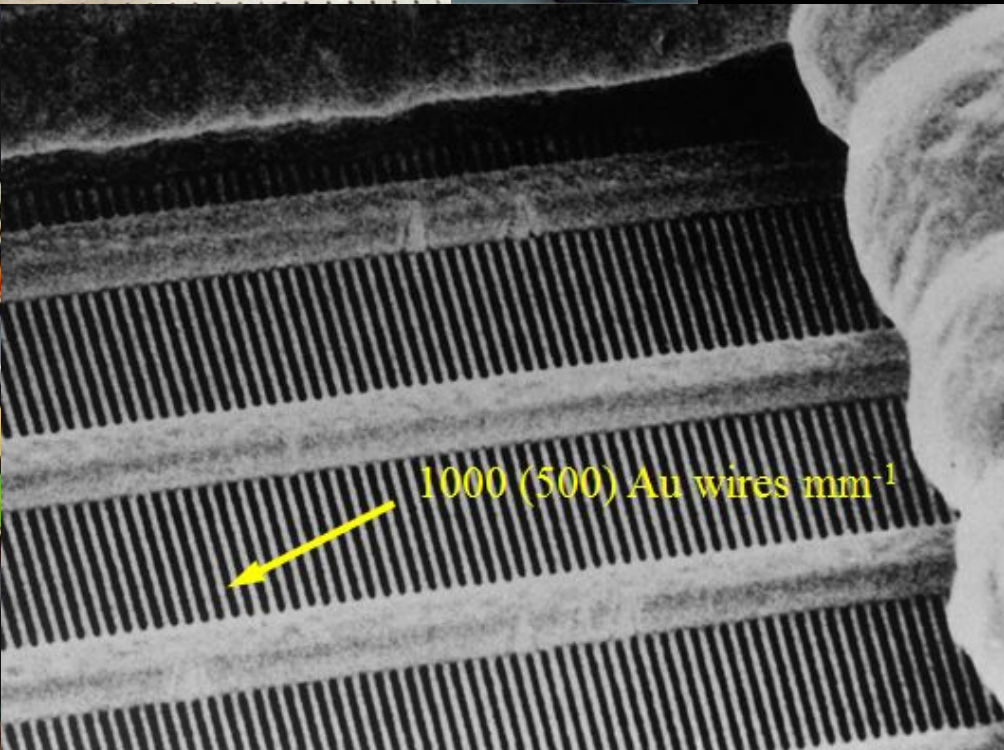




$\text{Ø } 110 \text{ cm}$   
 $1000 \text{ l/mm}$



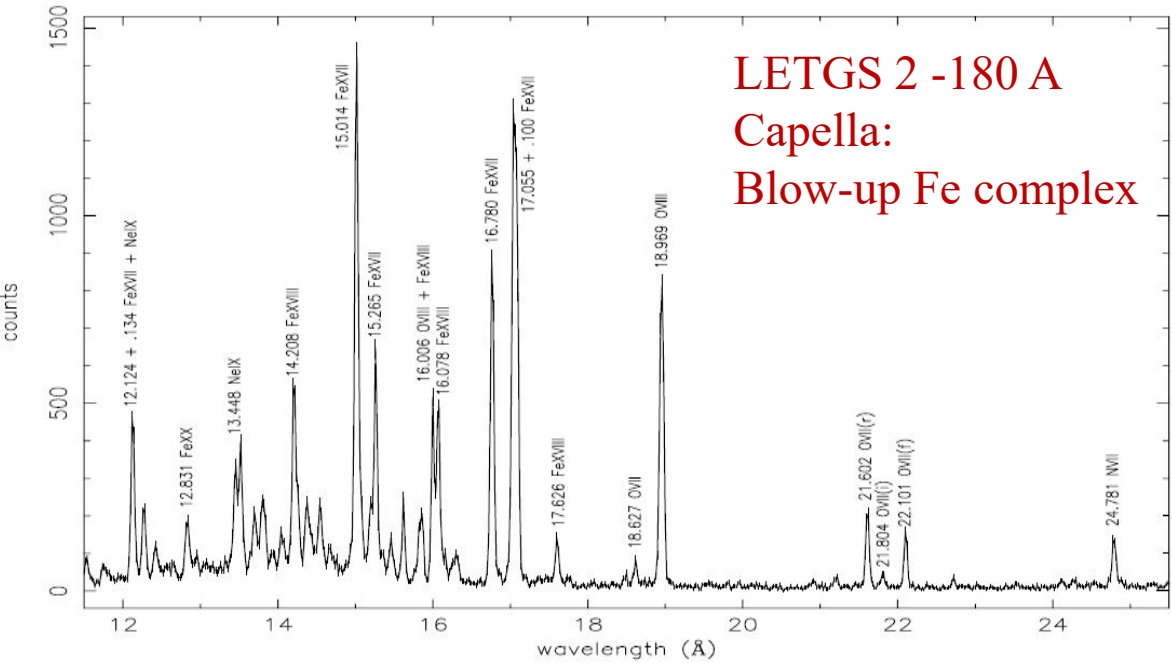
180 SiC plates (10 x 20 cm)  
average line density 645 l/mm



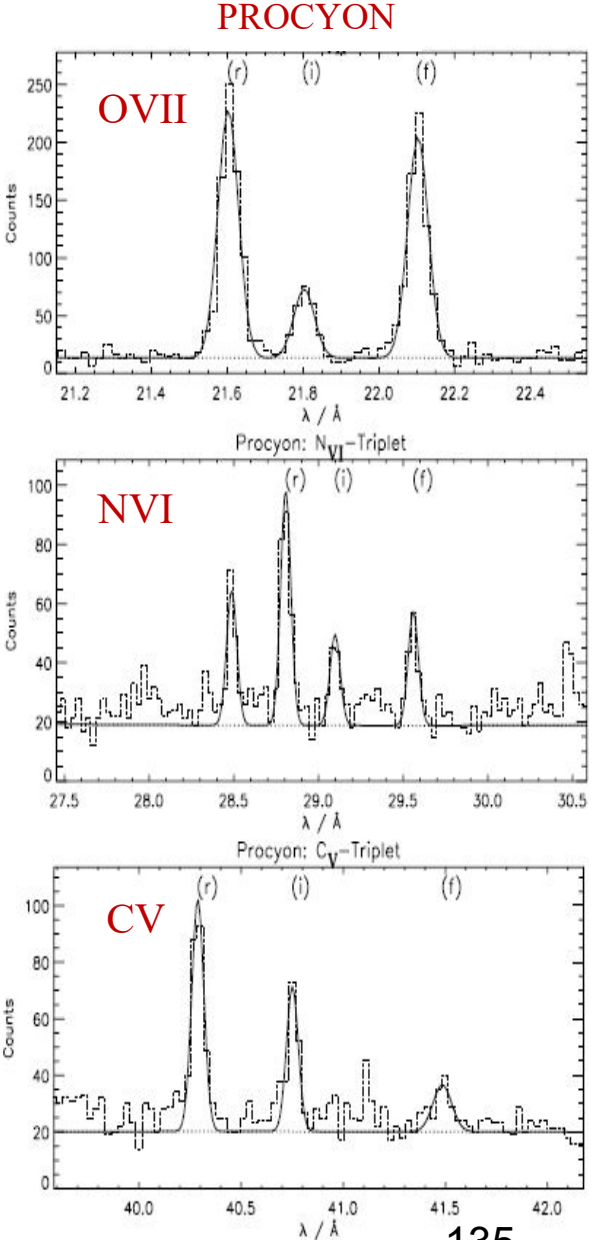
1000 (500) Au wires mm<sup>-1</sup>



# HR spectroscopy with Chandra LETGS, plasma density diagnostics with He-like triplets



LETGS 2 -180 Å  
 Capella:  
 Blow-up Fe complex



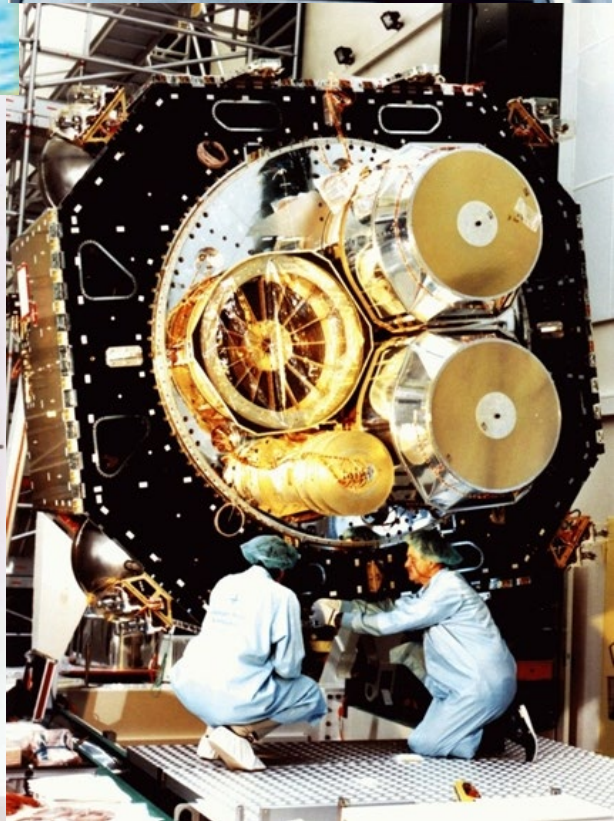
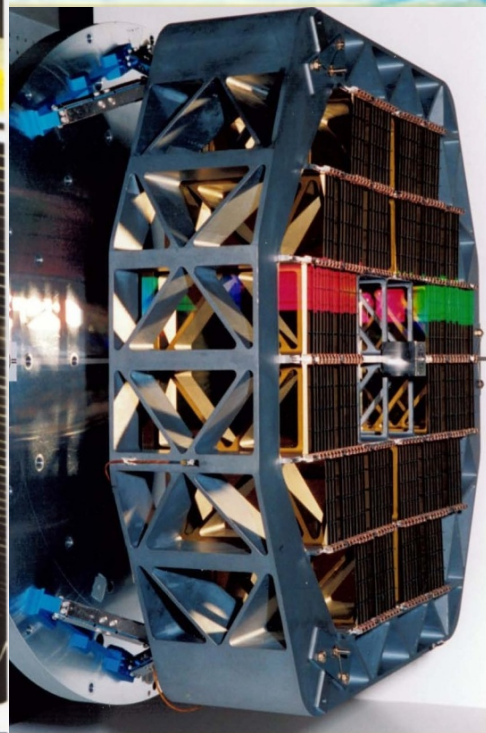
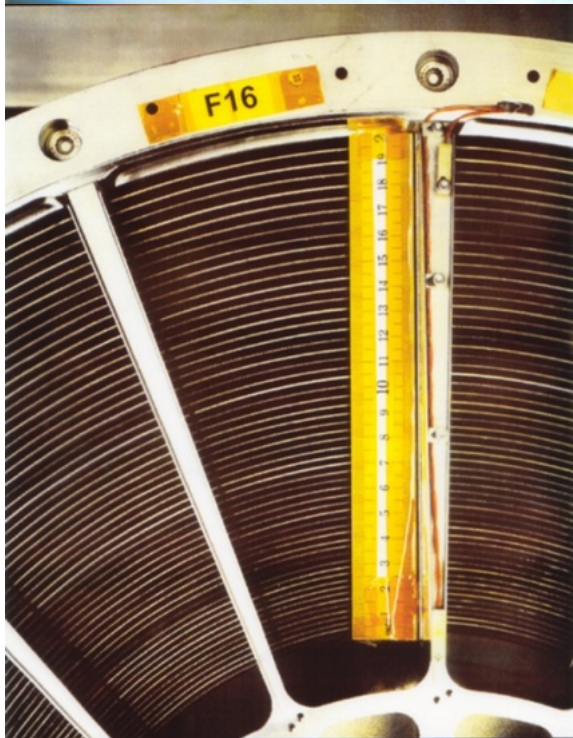
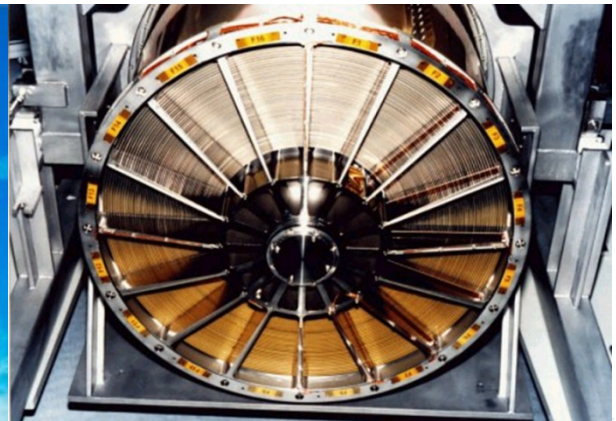
Plasma electron density  $n_e$  from the triplet  $f/i$  ratio of the He-like ion

Capella OVII:  $n_e = 3.10^9$ , NVI:  $7.10^9$ , CV =  $3.10^9$   
 Procyon OVII:  $n_e = 2.10^9$ , NVI:  $9.10^9$ , CV  $< 10^9$

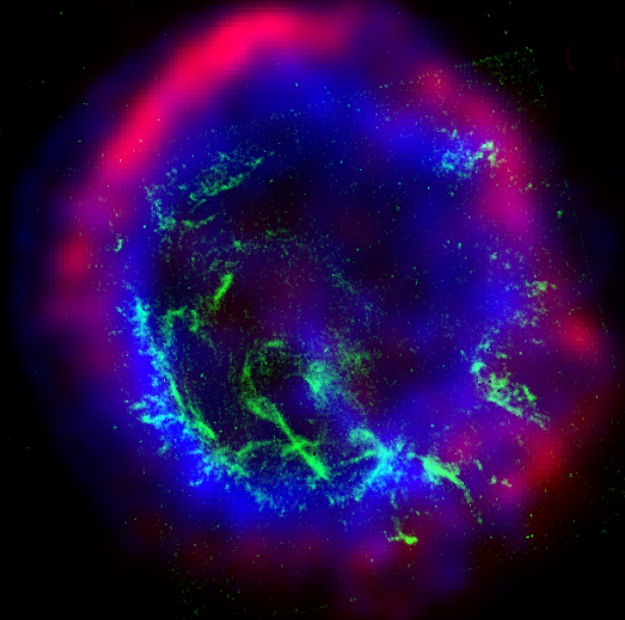
- Electron density values typical for solar active regions
- No densities as high as in solar flares
- Flux generated in Magnetic Loops: filling factor exceeds solar  $> 10$



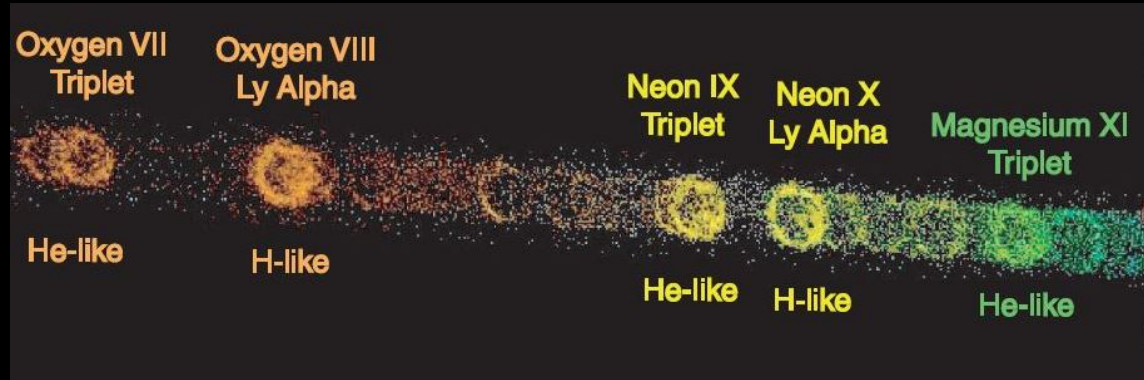
# High-dispersion X-ray spectroscopy on XMM-Newton



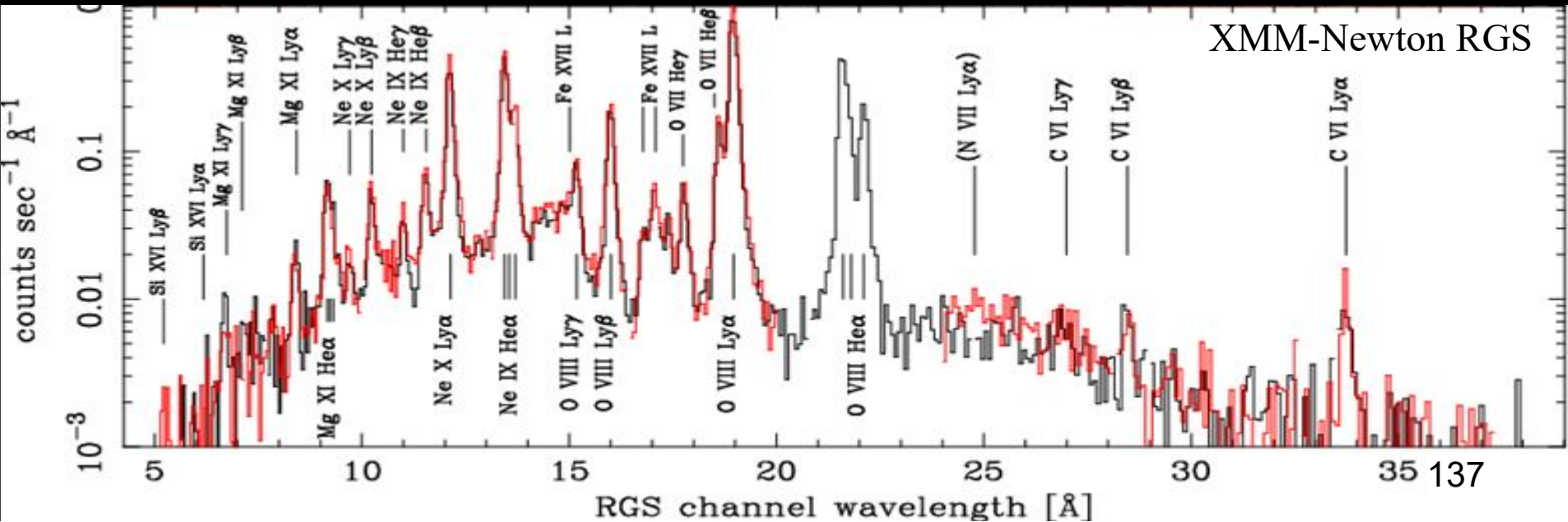




Gaetz et al (2000)



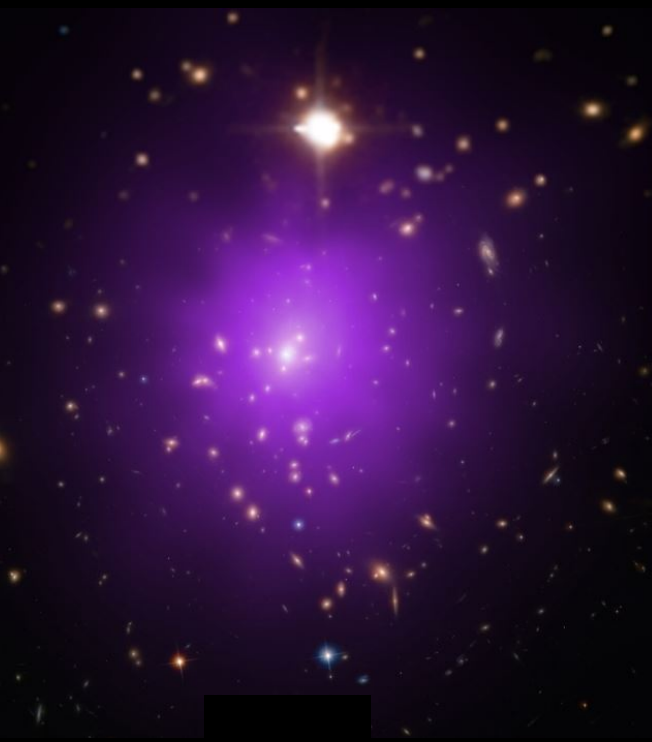
SNR: schokverhitting in 1E0102-73  
 Kleine Magelhaense Wolk op 199.000 lichtjtr



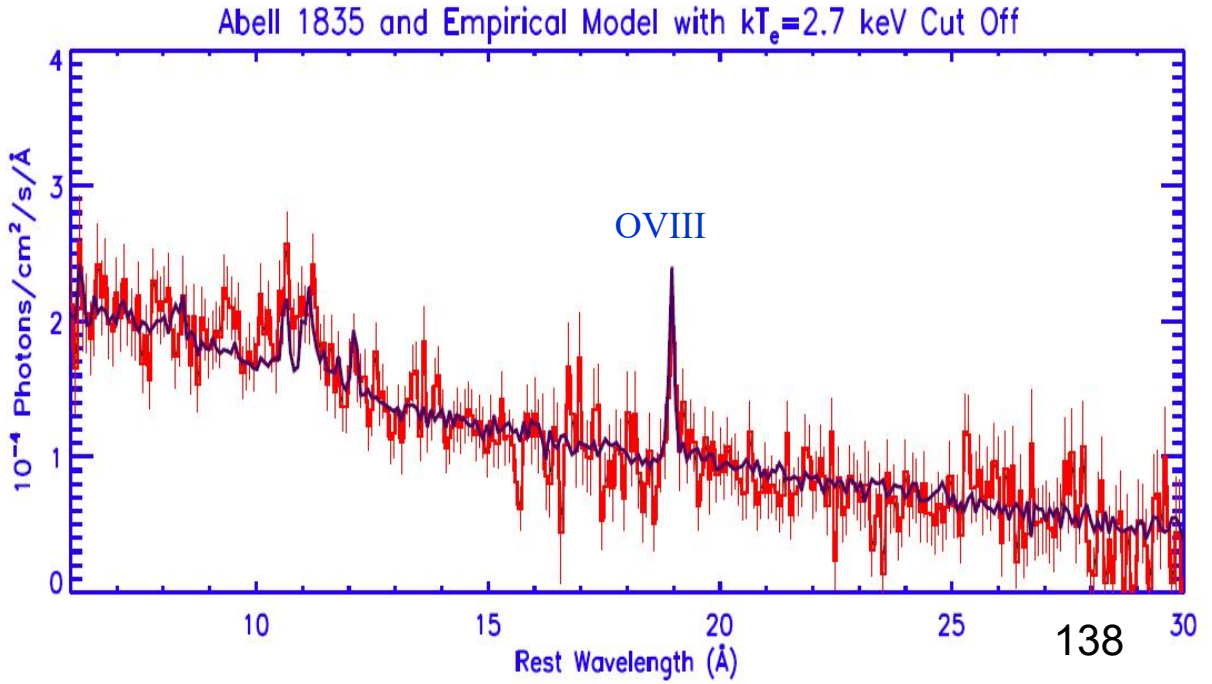
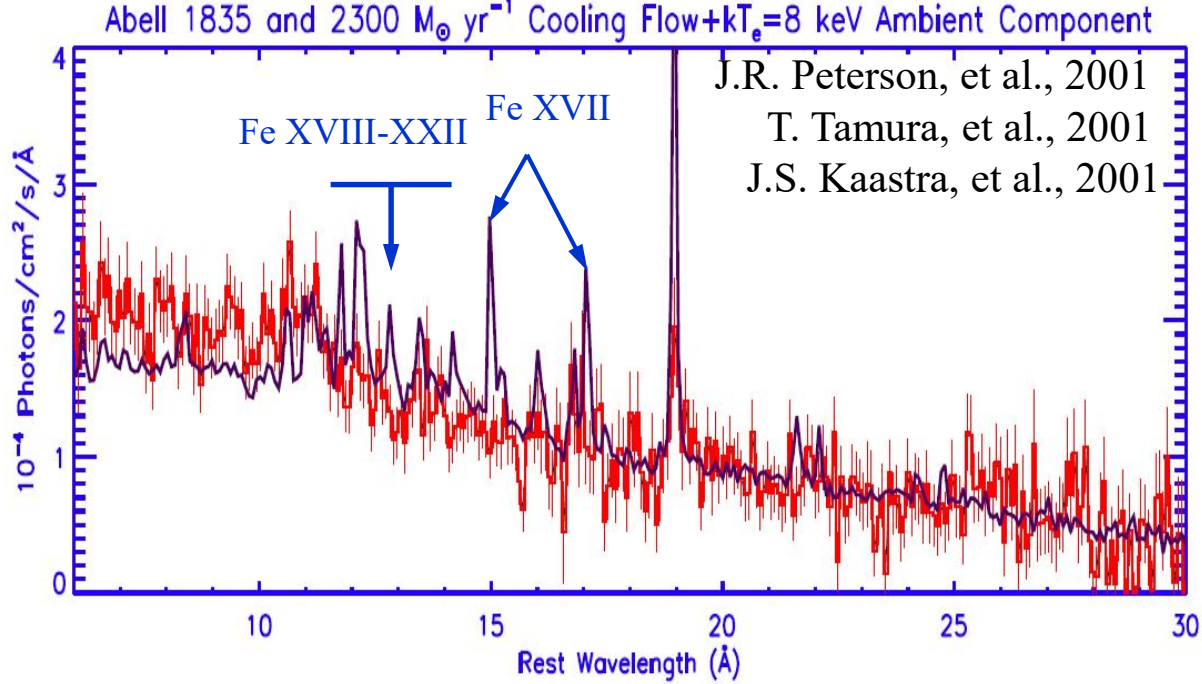


# From Cooling Flows to Cool Cores in galaxy clusters.

Characteristically:  
temperatures  $< T_{\text{max}}/3$  missing  
(Peterson & Fabian, 2006)



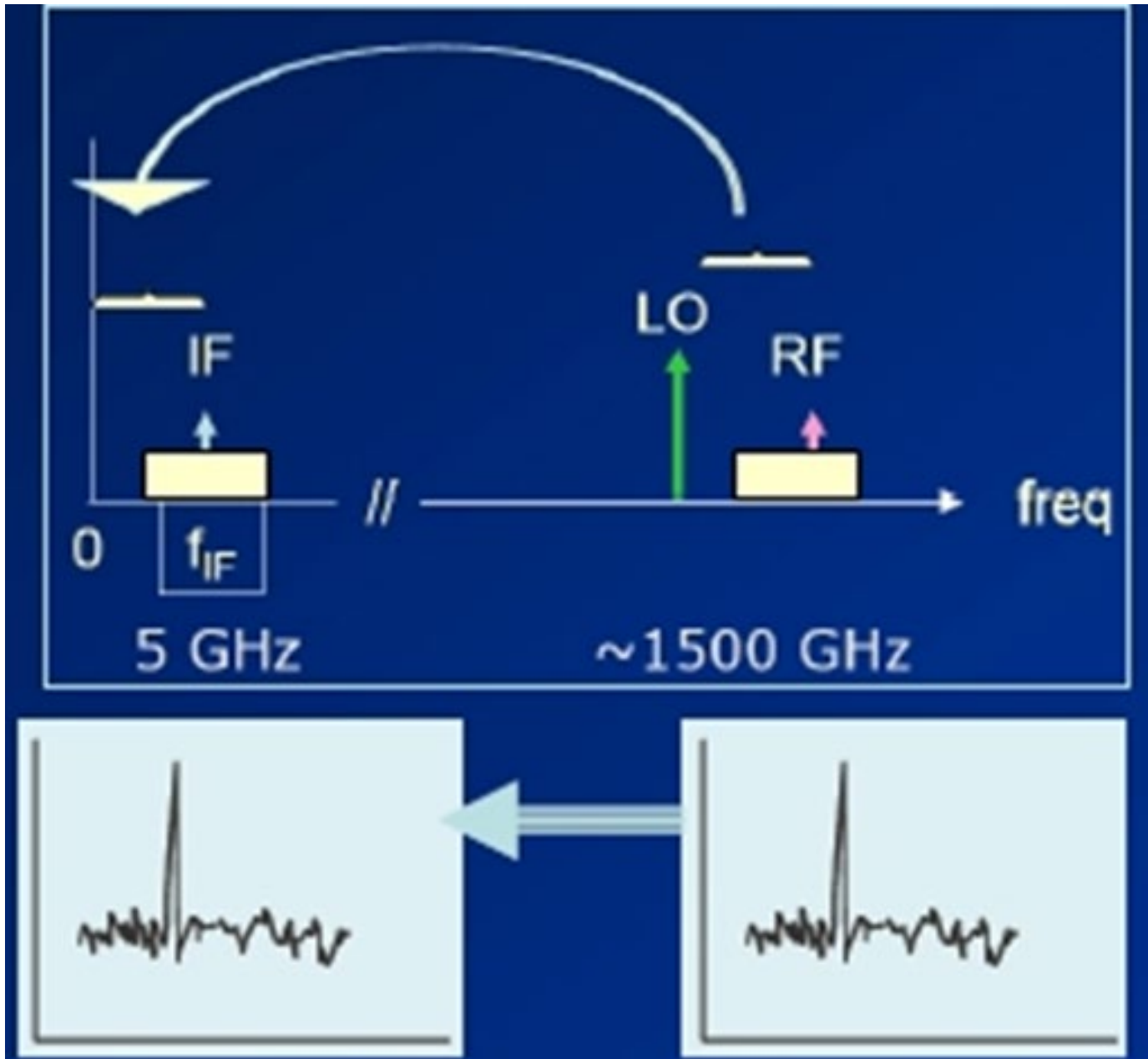
Abell 1835 (Chandra)



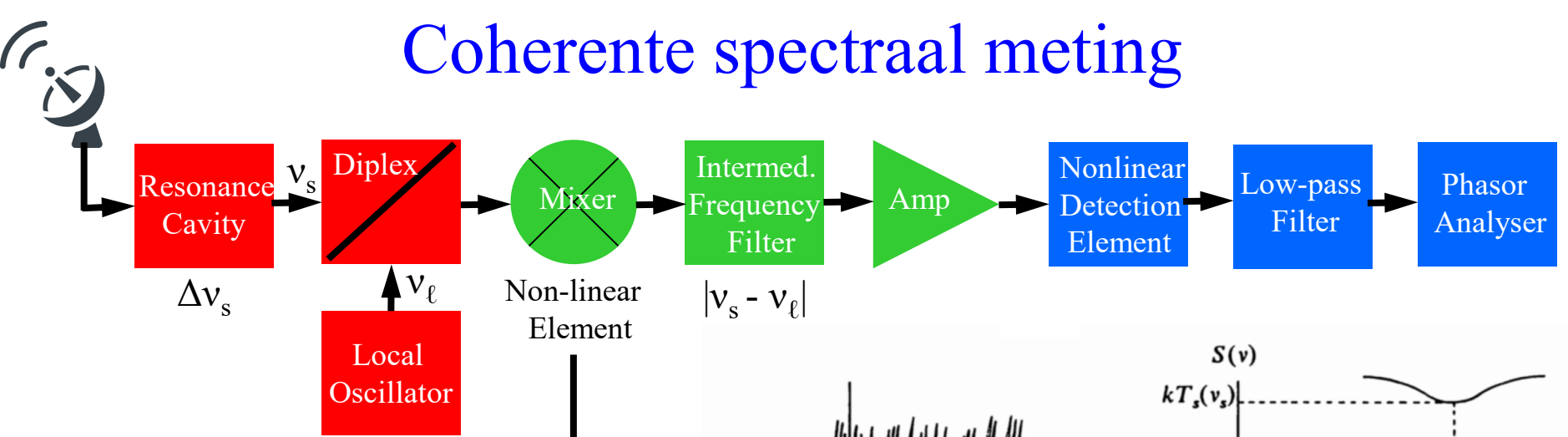
# spectrale scheiding door heterodyne detectie

- Heterodyne detectie is een methode van stralingsdetectie waarbij het **meetsignaal niet-lineair wordt gemengd met een referentiesignaal** op een nabij gelegen, stabiele, frequentie.
- Het referentiesignaal wordt geproduceerd door een Locale Oscillator, het meetsignaal en het signaal van de **locale oscillator** worden gesuperponeerd in een **diplexer** en vandaar naar een **mixer** gestuurd.
- De mixer heeft een **niet-lineaire responsie** op de amplitude van het gesuperponeerde signaal, een deel van de mixer signaal output is evenredig met het kwadraat van de mixer signal input.
- De amplitude- en faseinformatie van het meetsignaal wordt, voor een deel, lineair overgebracht naar de laagfrequente verschilfrequentie met de Locale Oscillator: **het IF-signaal**.
- Op het IF-signaal wordt **spectraal(kleur) analyse** uitgevoerd.

# heterodyne principle



# Coherente spectraal meting

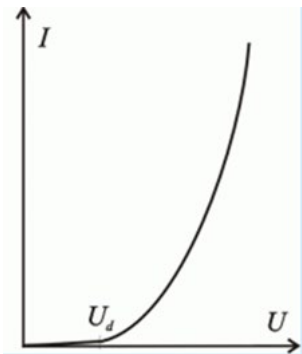


## Principe:

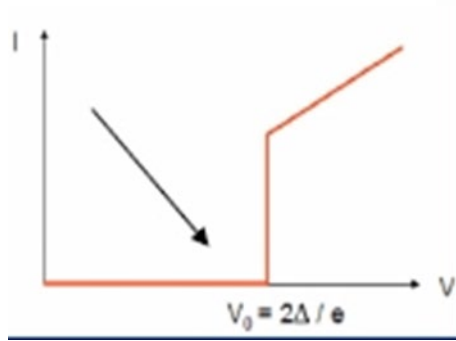
Heterodyne detectie

$\nu \approx 100 - 1000 \text{ GHz}$

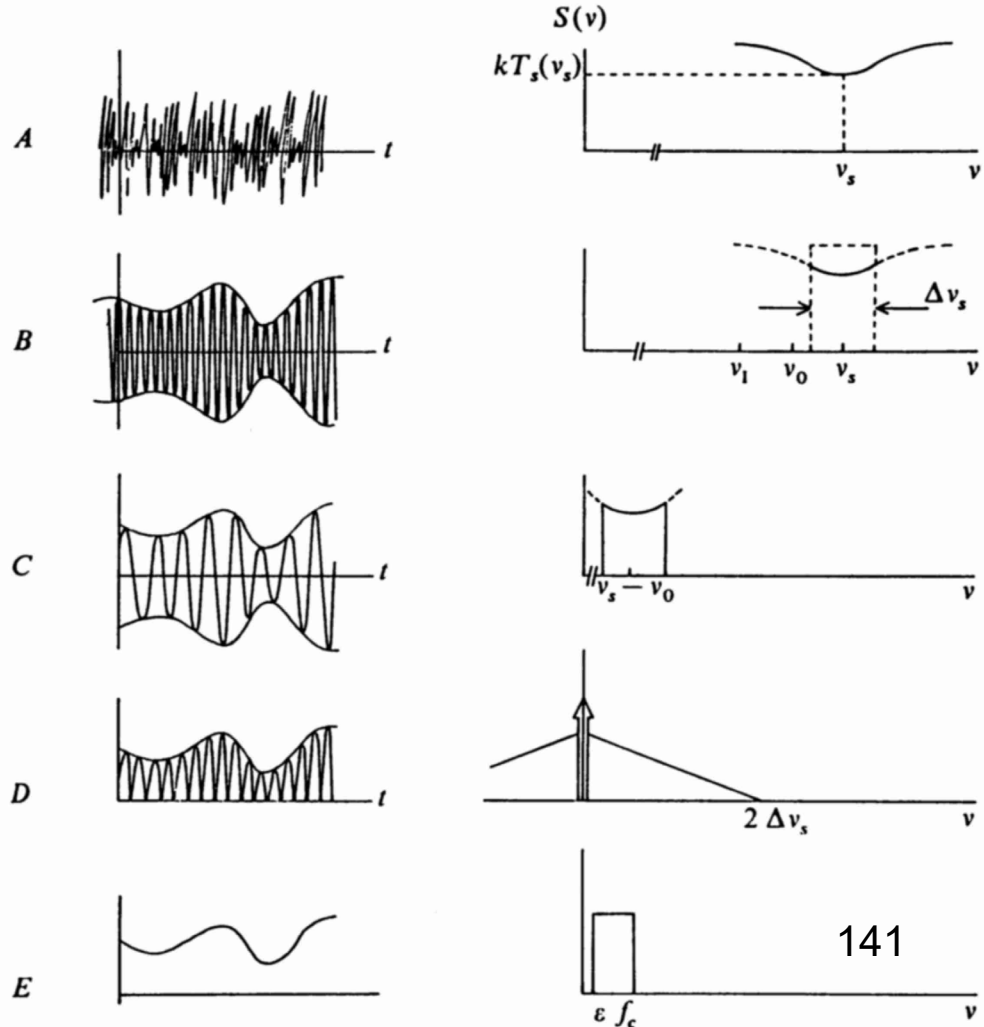
$\lambda \approx 1 \text{ mm} - 100 \mu\text{m}$



diode I - V

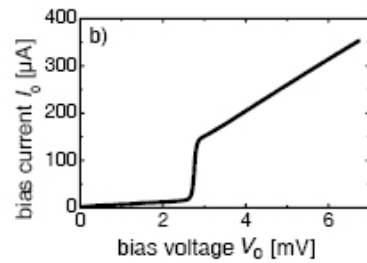
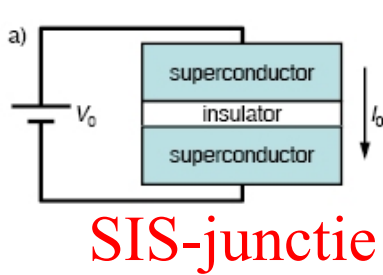


SIS I - V

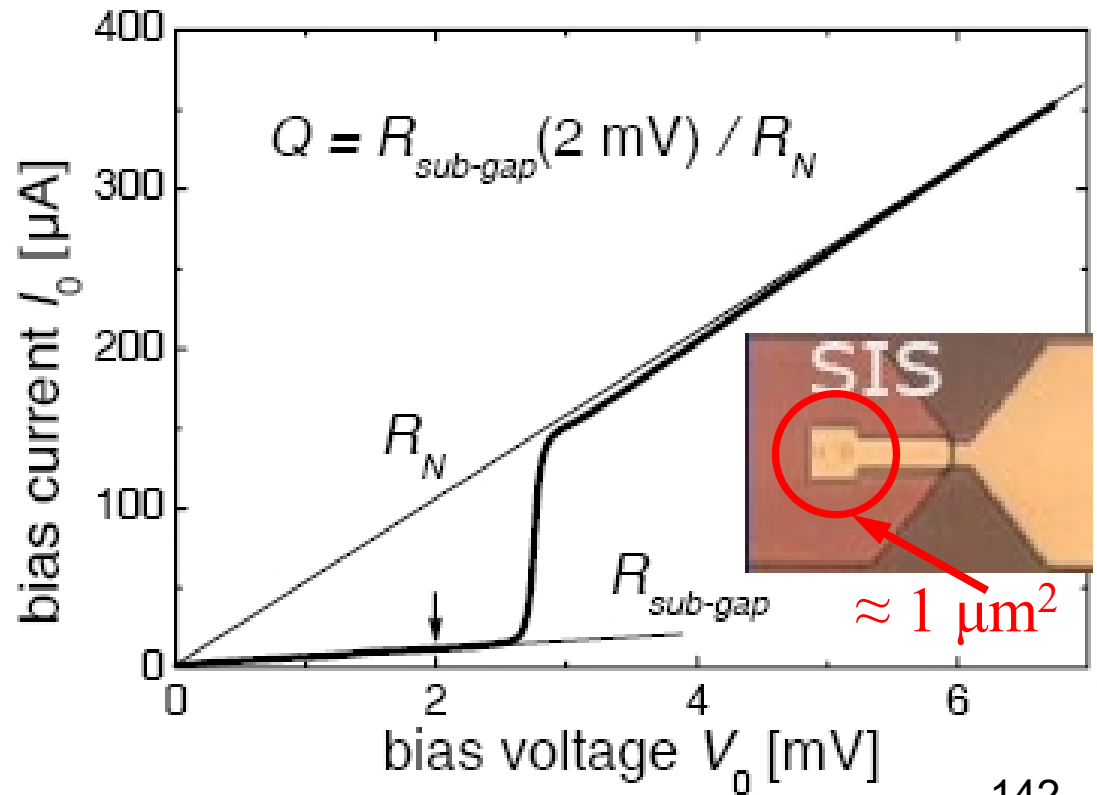
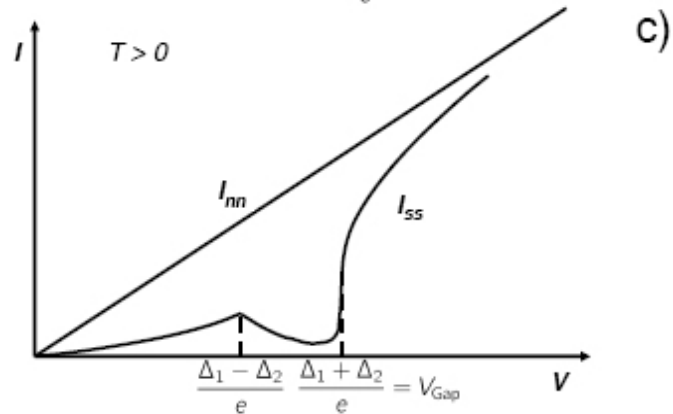
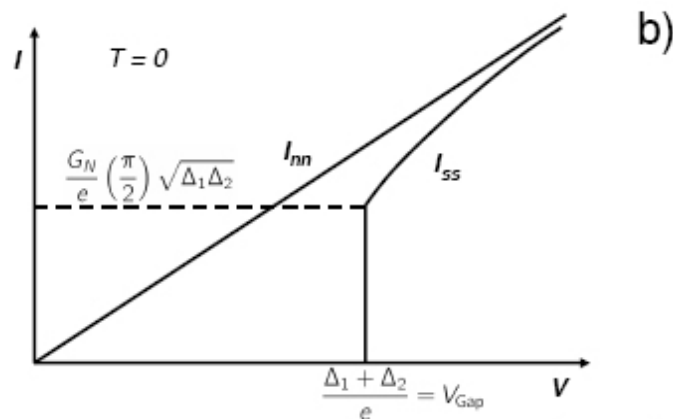




# submm mixer element: supergeleidende junctie



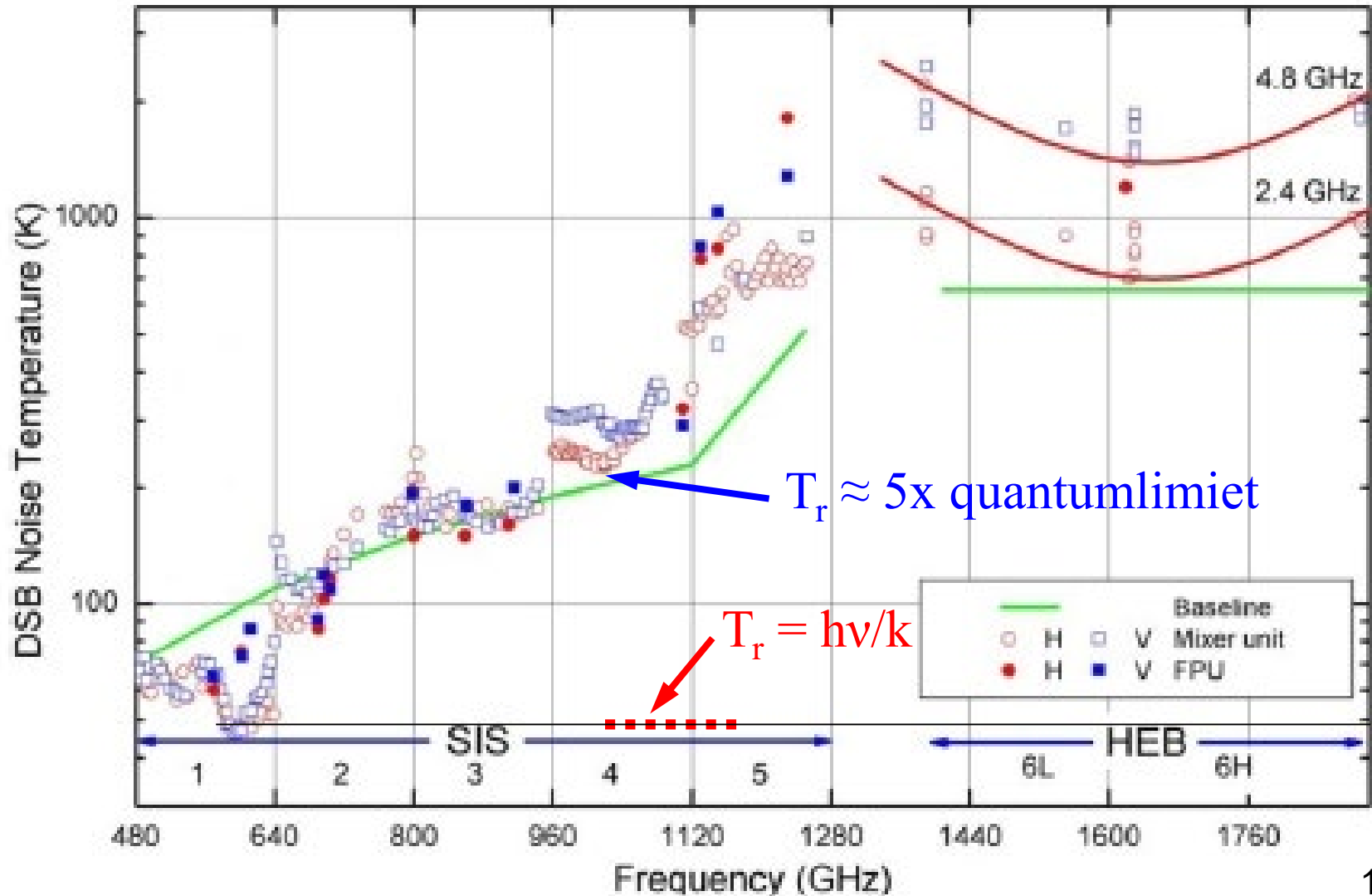
Junction material	$V_{Gap}$ [mV]	$\nu_{max}$ [GHz]
<b>Nb/Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nb</b>	<b>2.9</b>	<b>1400</b>
Nb/Al-AIN/NbTiN	3.5	1700
NbTiN/MgO/NbTiN	5.2	2500
NbN/AIN/NbN	5.4	2600



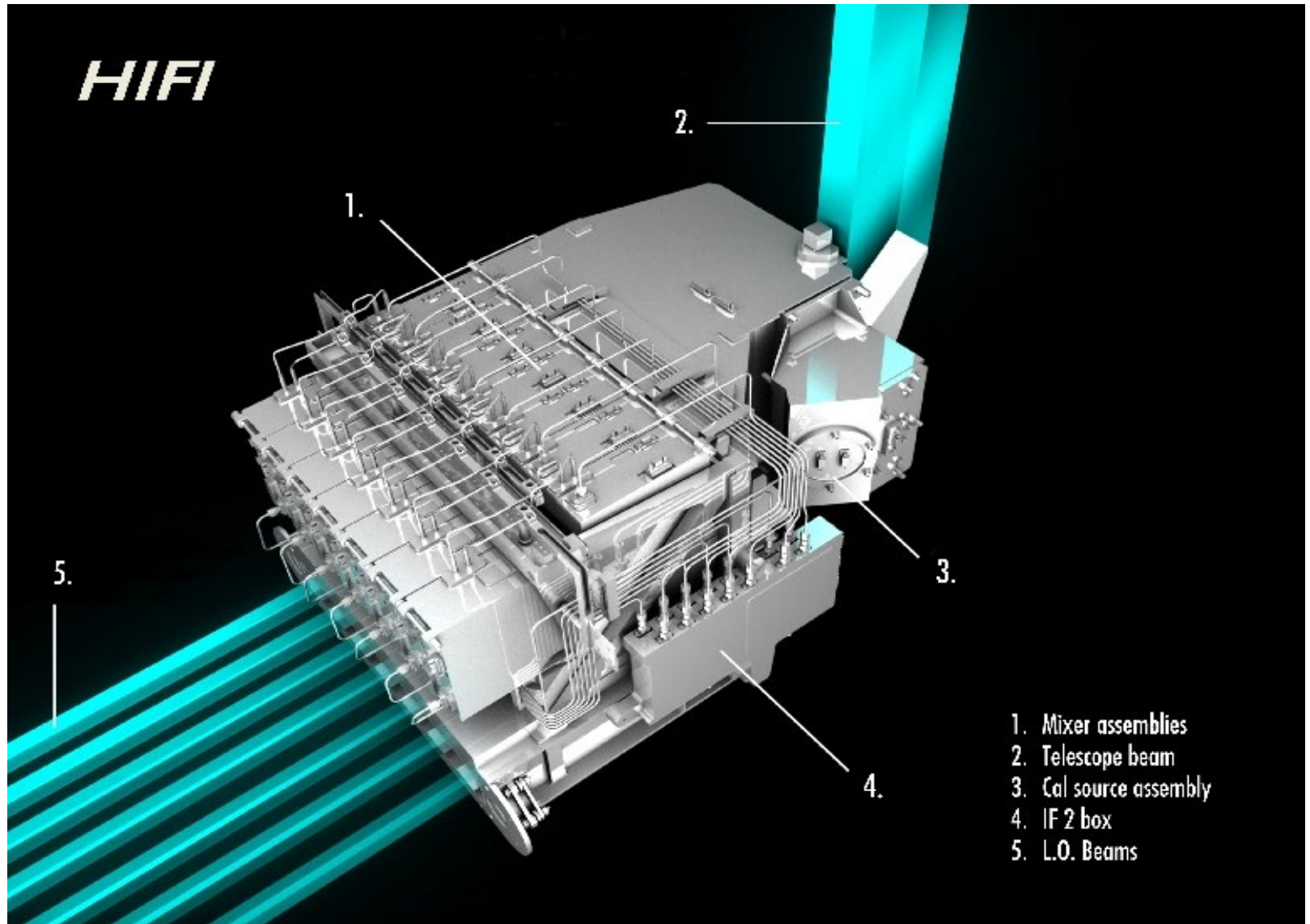
# De quantumlimiet voor ruis bij submm ontvangers

- Het **fluctuatiegedrag** van een zwarte straler (stralingswet Planck) wordt theoretisch beschreven door de **Bose-Einstein statistiek**.
- Hierbij is de  **$kT/h\nu$**  (= de verhouding tussen thermische energie,  $kT$ , en foton energie,  $h\nu$ ) de bepalende factor.
- Voor  **$kT \gg h\nu$**  is er sprake van de **thermische limiet**, de ruis van het meetsysteem wordt uitgedrukt in een ruistemperatuur  $T_r$ . Dit is het geval in de **radio en millimeter sterrenkunde**.
- Voor  **$kT \ll h\nu$**  is er sprake van de quantumlimiet, de ruis van het meetsysteem wordt uitgedrukt in een statistische maat zoals de variantie van een statistische verdeling (cq. normale verdeling). Dit is altijd het geval in de **UV-, X-, en gammasterrenkunde**.
- In het submillimetergebied wordt de kwaliteit van een ontvanger weliswaar nog uitgedrukt in een ruistemperatuur, maar er wordt naar gestreefd de **limiet van quantumfluctuaties zo dicht mogelijk te benaderen**.

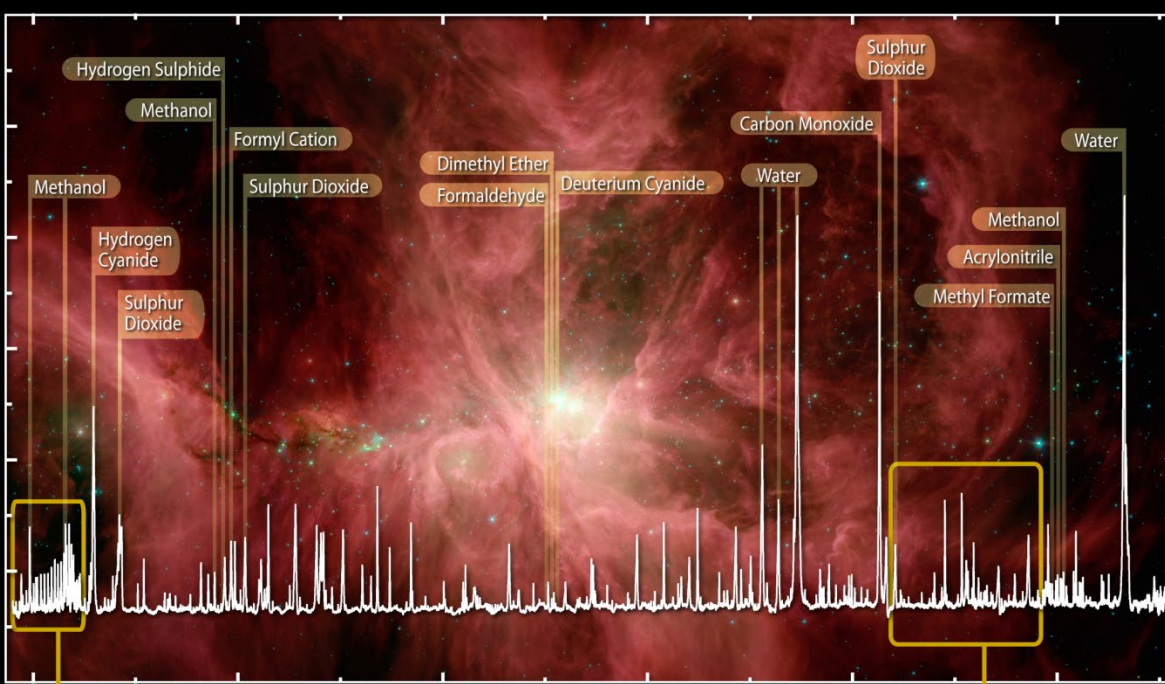
# Ruistemperaturen ( $T_r$ ) voor Herschel-HIFI over het gehele frequentiebereik t.o.v. individuele mixers



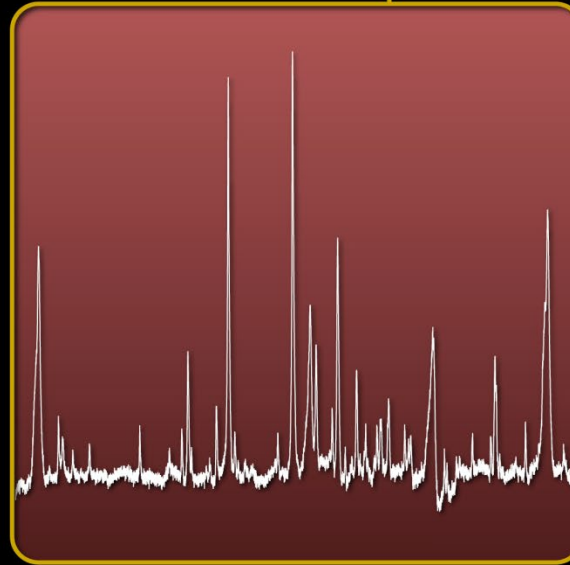
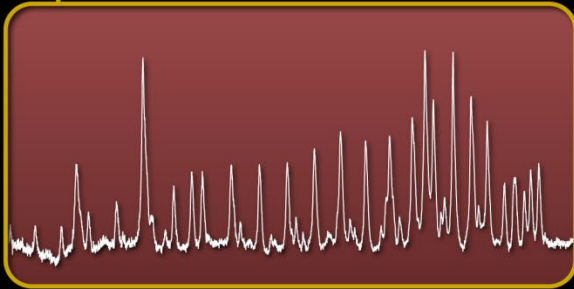
# HIFI: aanstralende bundels







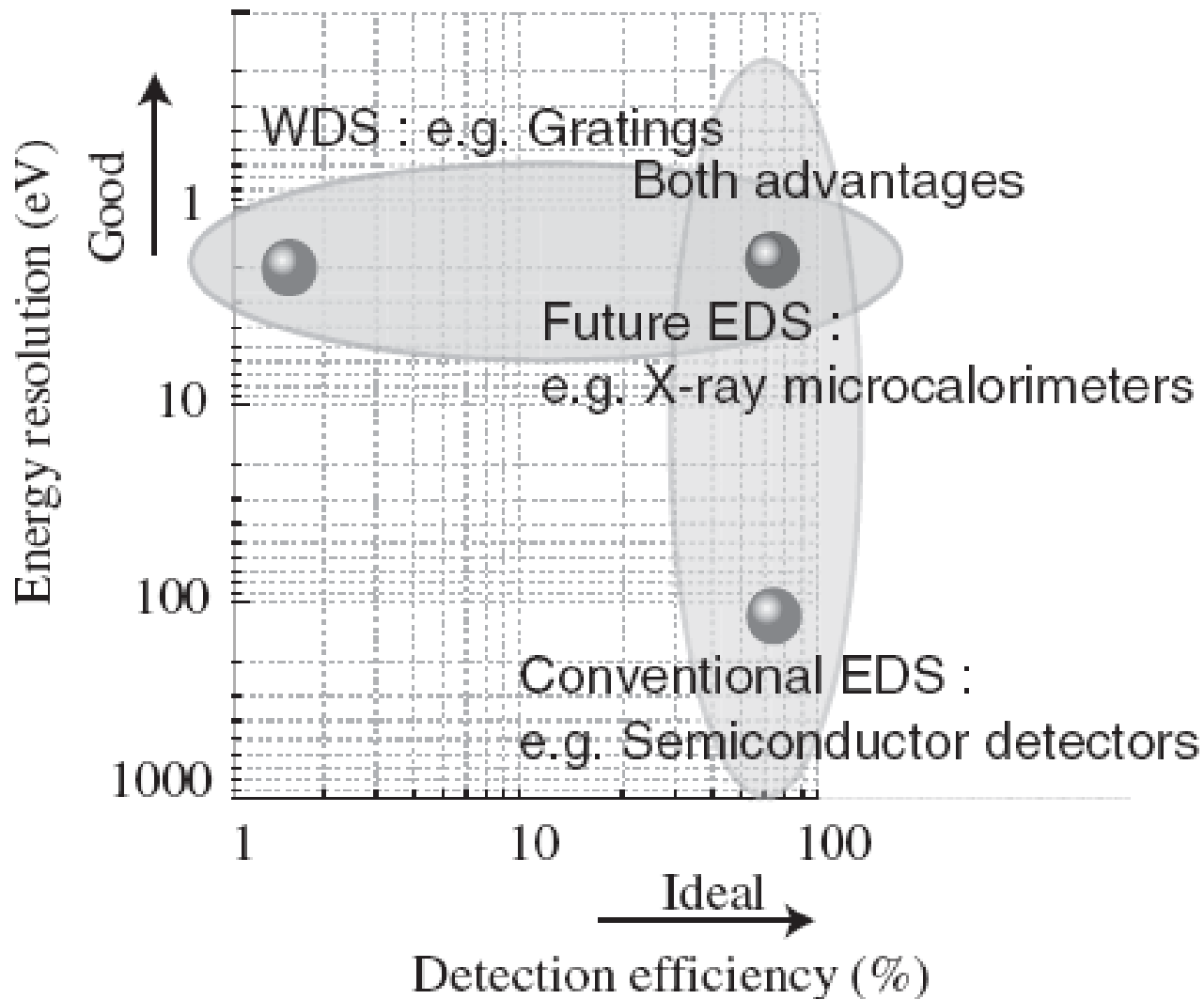
high resolution spectra  
of a large number of  
molecular species in  
the Orion Nebula  
obtained with the HIFI  
instrument on Herschel



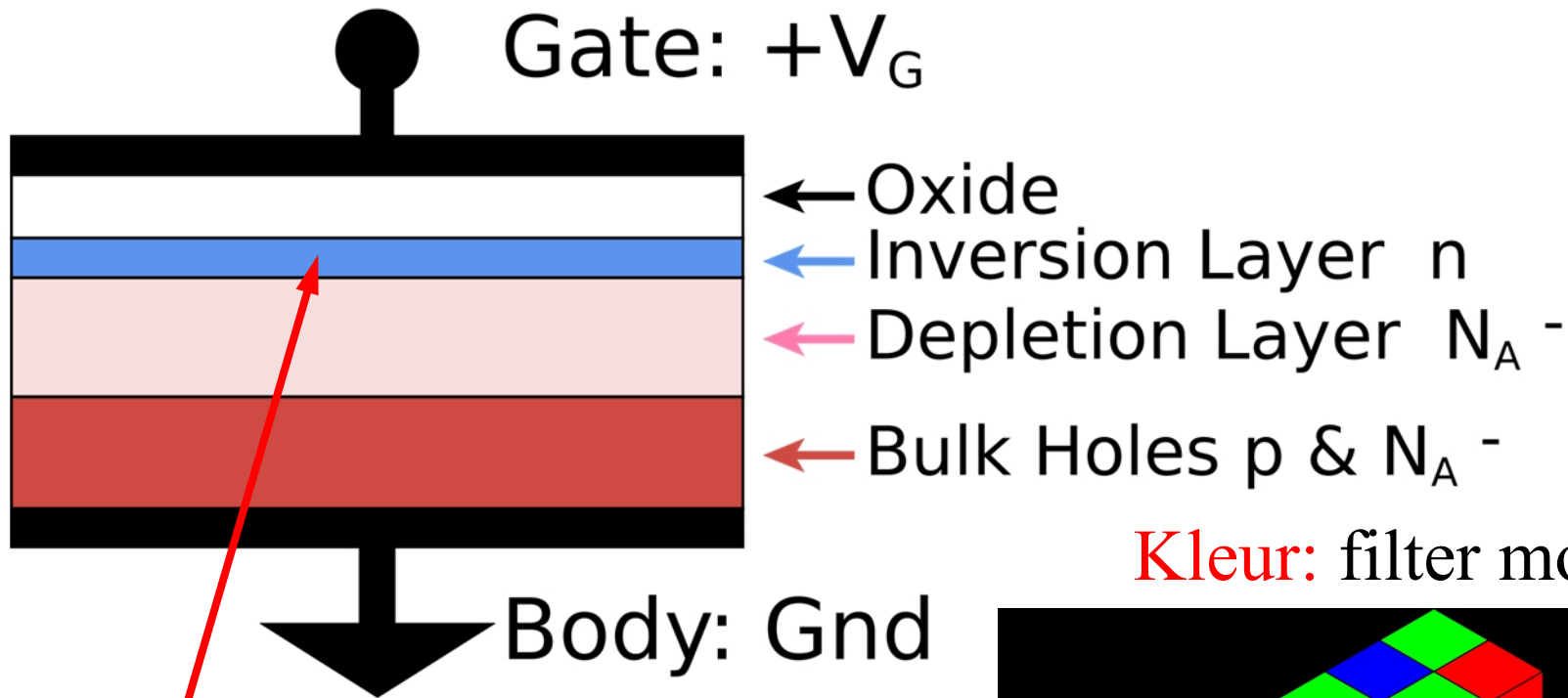
HIFI Spectrum of Water and  
Organics in the Orion Nebula

# Röntgenbeeldsensoren met intrinsieke kleurmeting

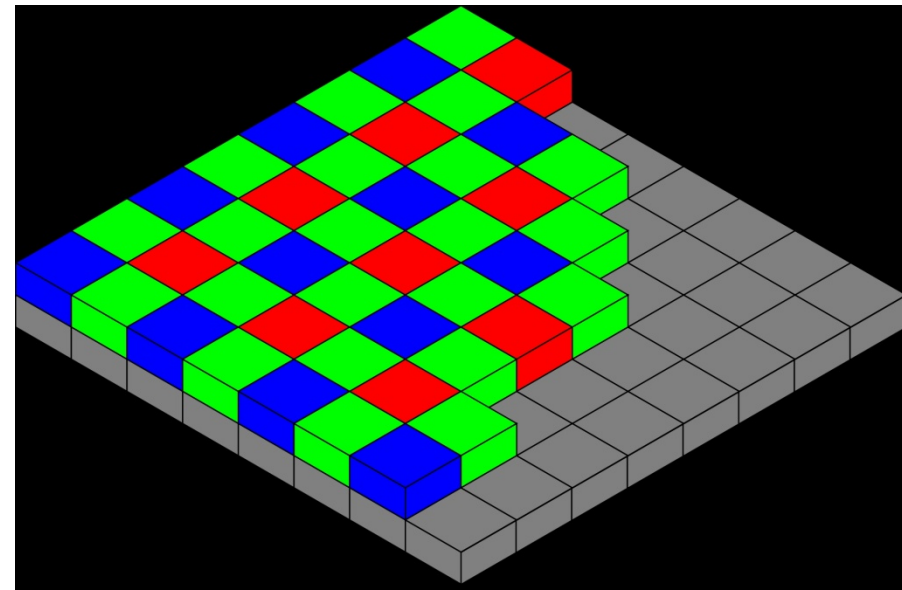
(hoog rendement → 100%, groter **kleurscheidend vermogen**)



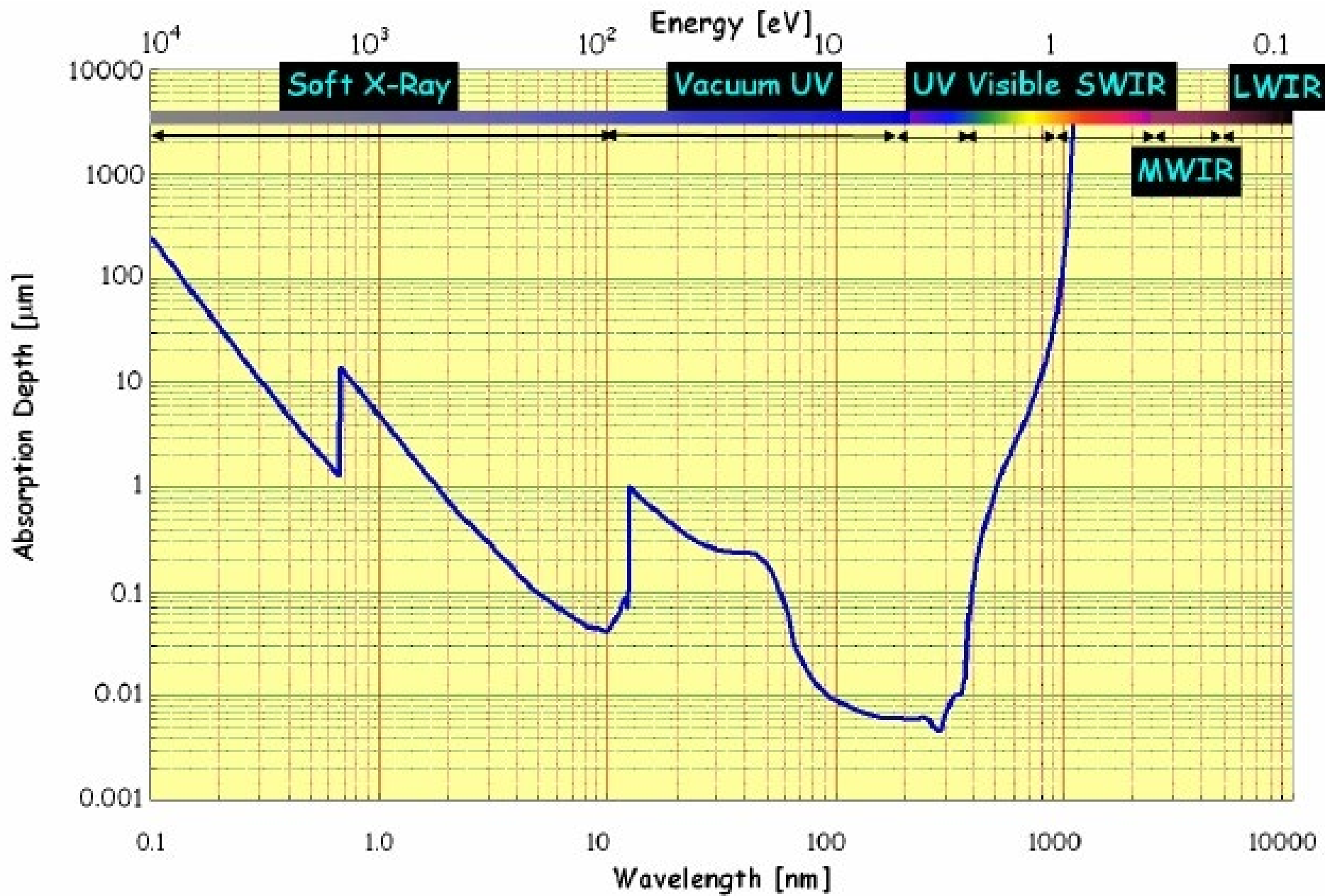
# CCD spectrometer: MOS condensator matrix



**Kleur:** filter mozaïk

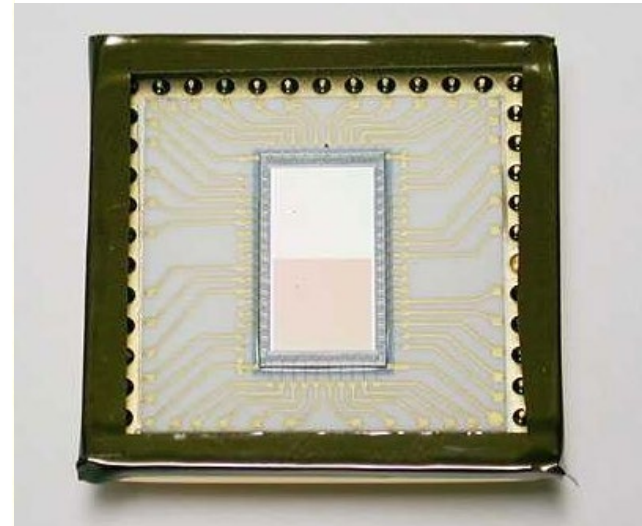
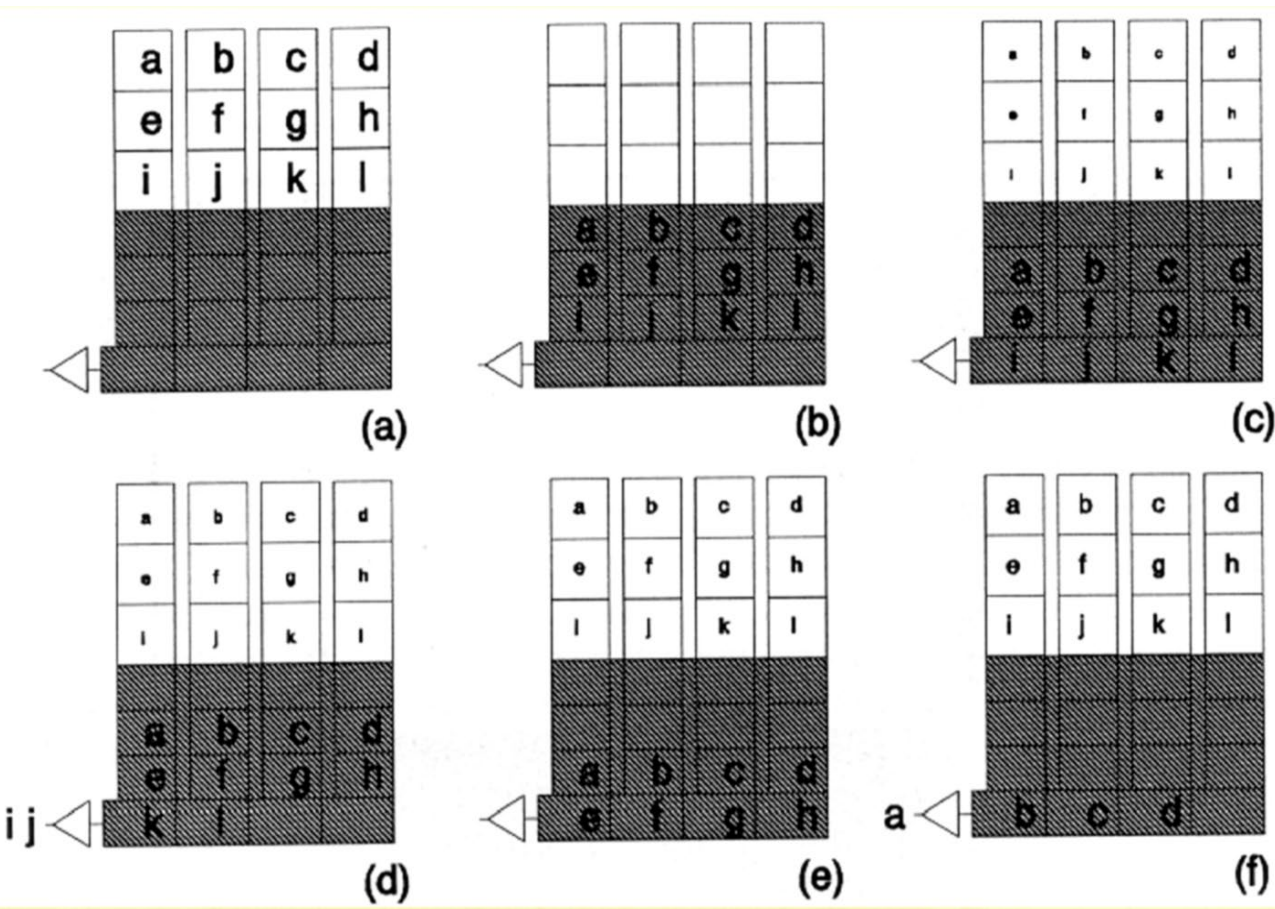


Vrijgemaakt door lichtinval

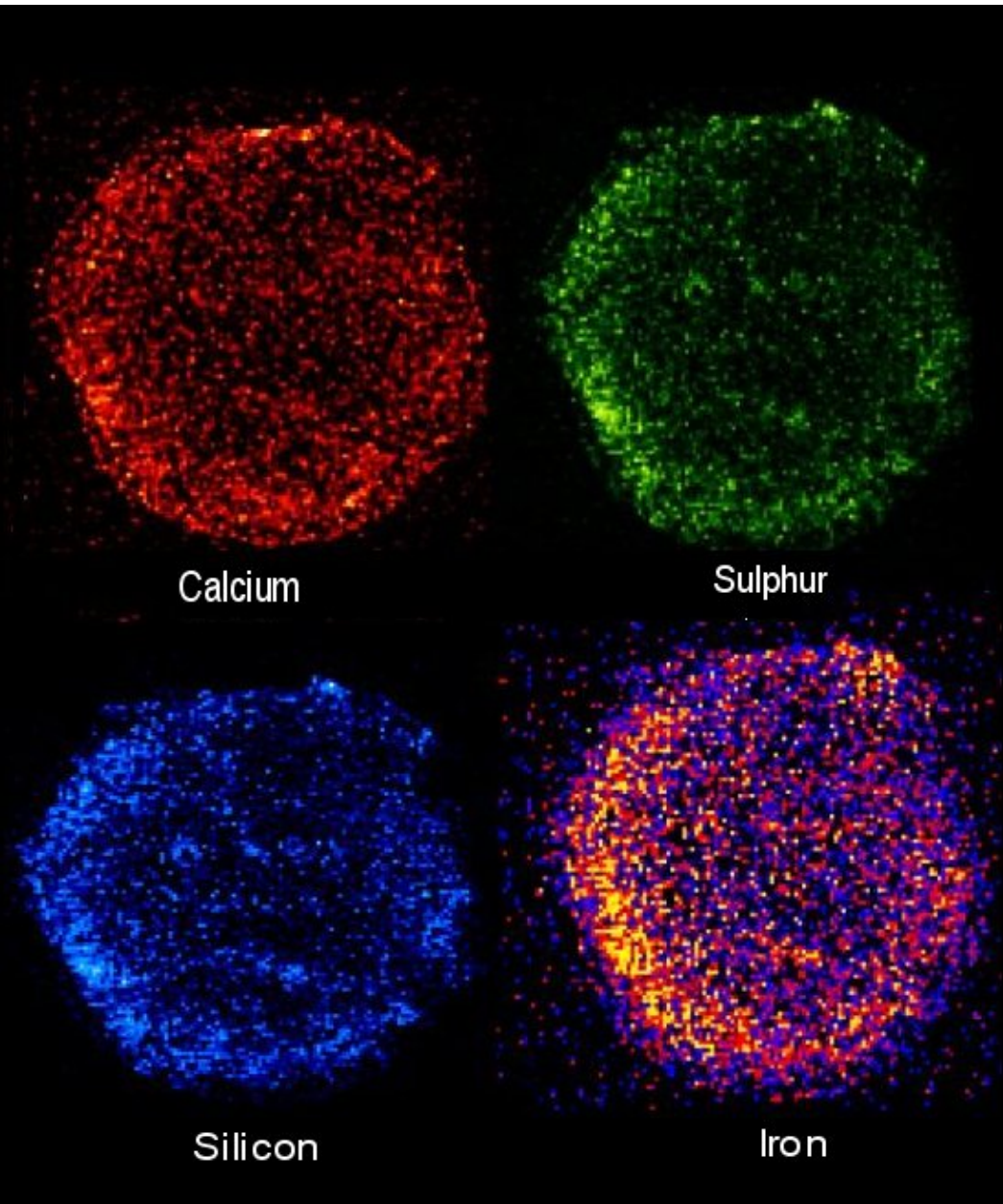




# Toepassing van Frame Transfer CCD



# Schokverhitting in de Tycho SNR (SN1572)



$$T_S \approx 10^7 \left[ \frac{v_s}{1000 \text{ km/s}} \right]^2 \text{ K}$$

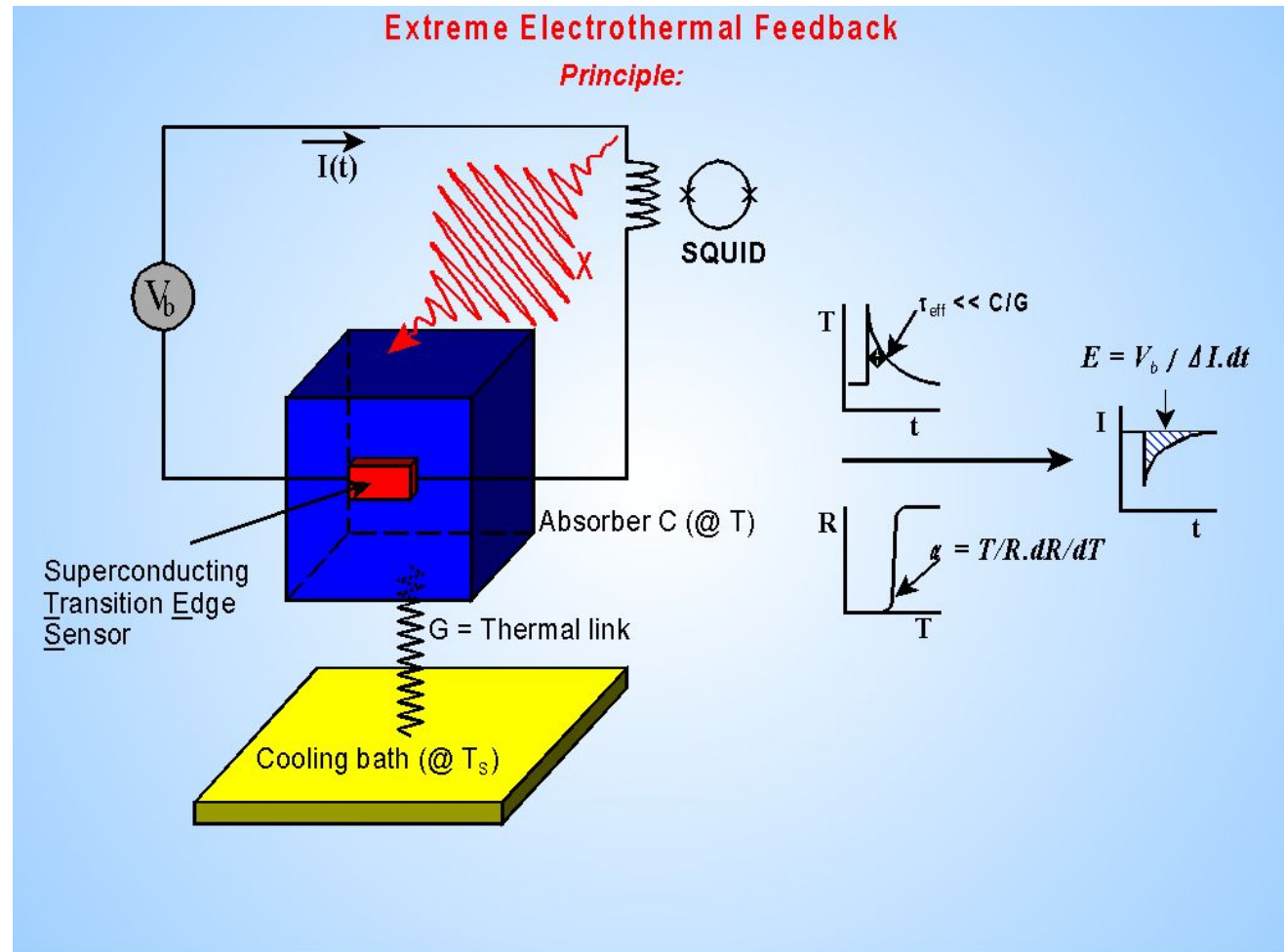
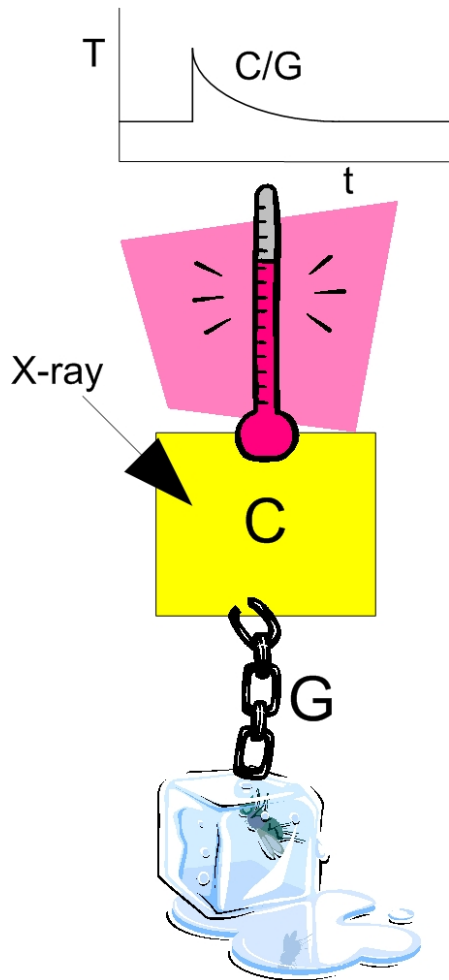
Beelden in enkele Röntgen-emissielijnen van de **hooggeïoniseerde** elementen

Ca, S, Si, Fe

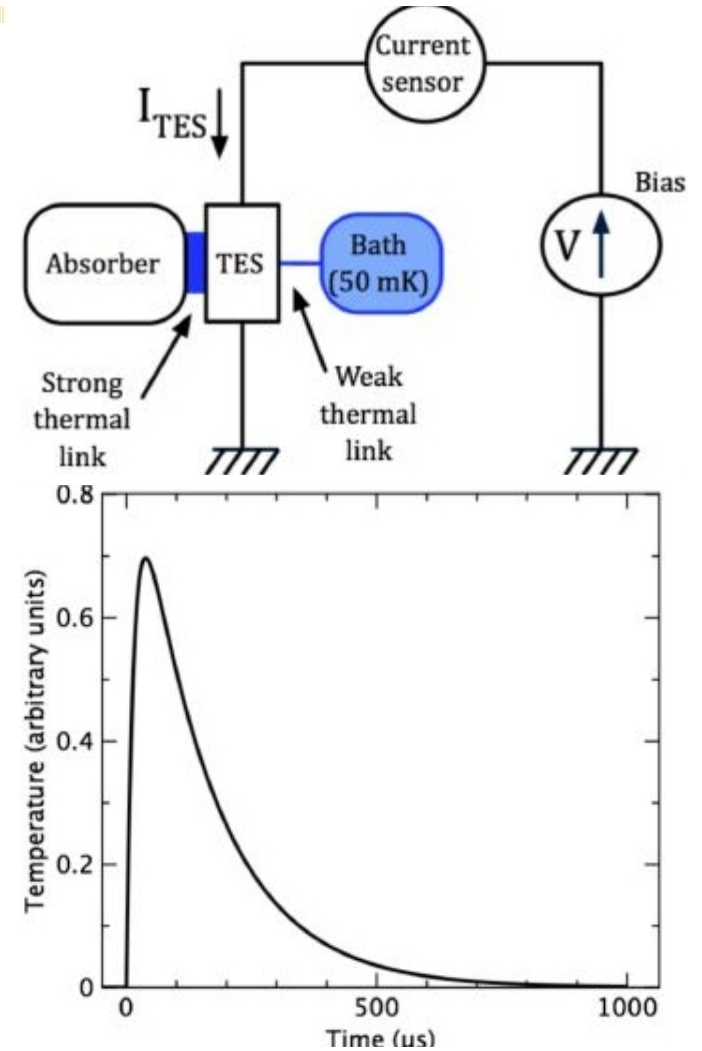
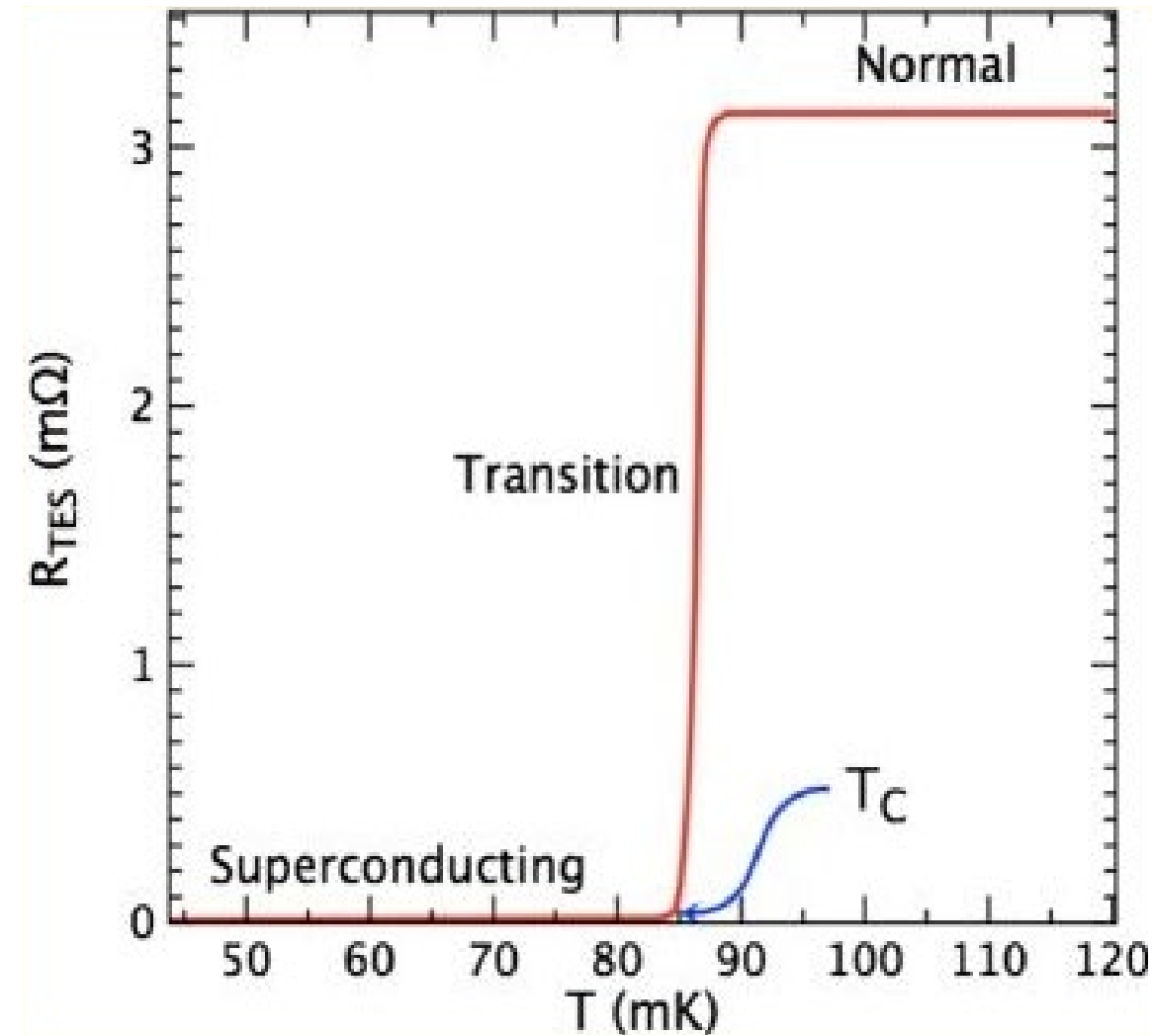
Opnames met XMM-Newton  
X-ray **CCD brandvlakcameras**

# Kleurmeting van individuele X-ray fotonen

## principe

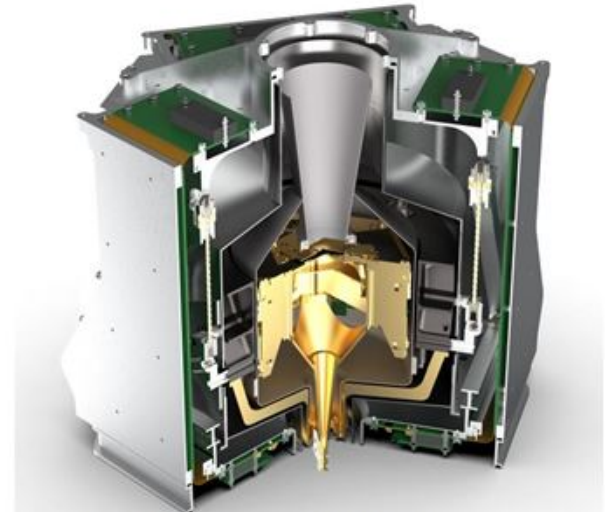
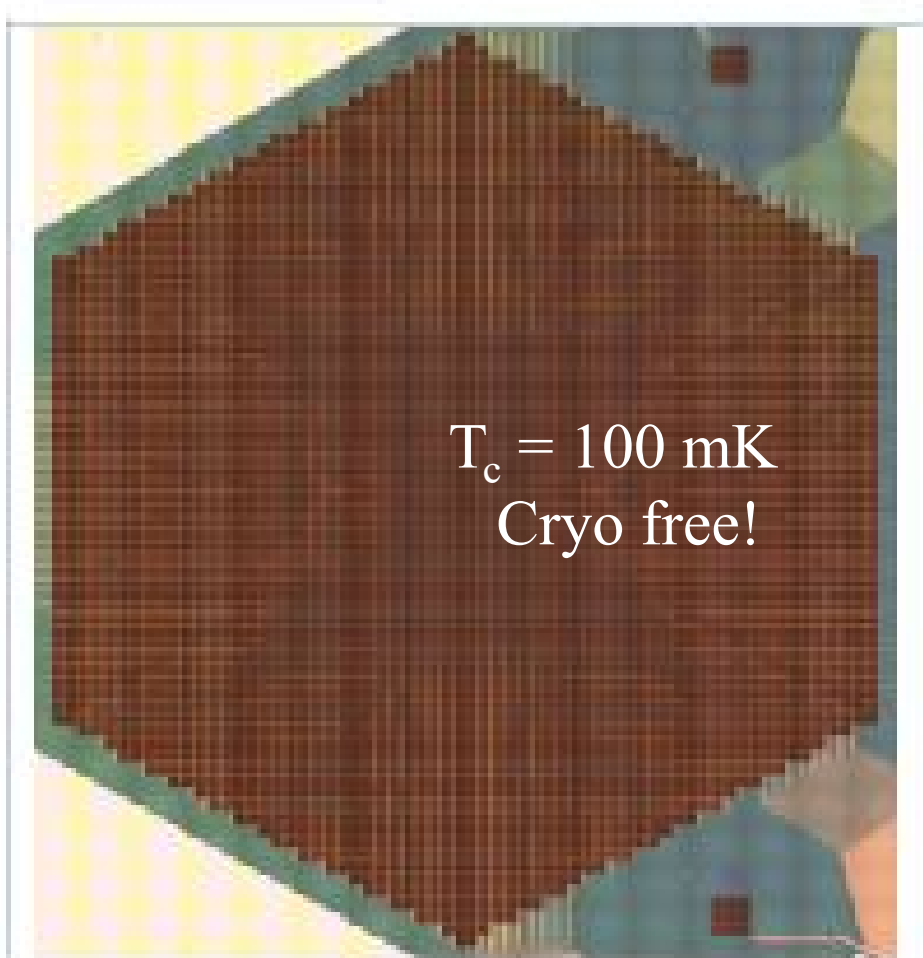


# Transition edge sensor: de fase overgang

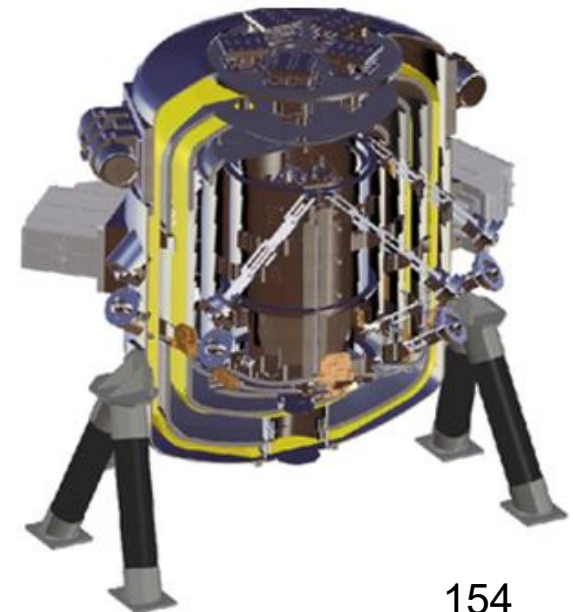




# TES-Röntgencalorimeter (prototype 2018)

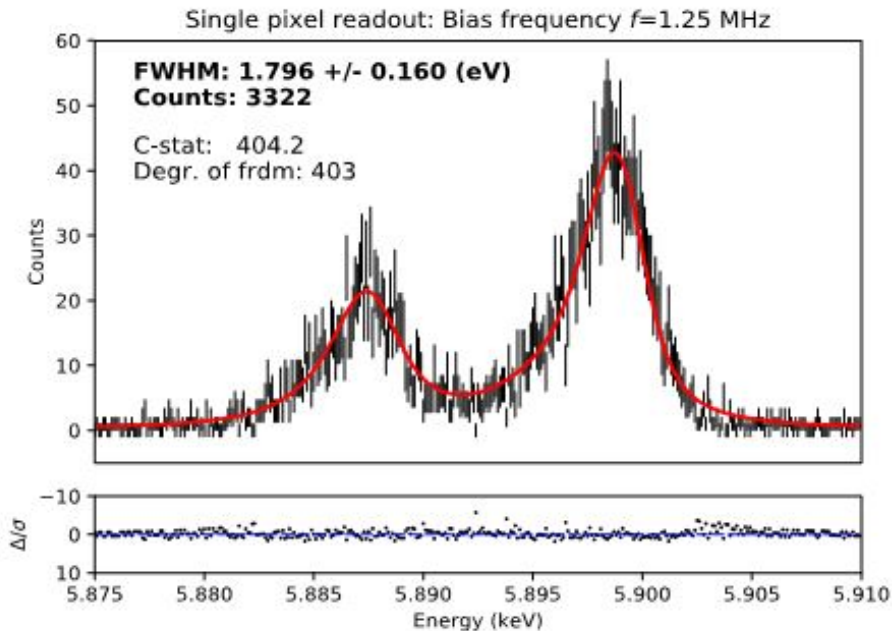


TES: 3168 Mo/Au pixels, pitch  $275 \mu\text{m}$   
X-ray absorber:  $4.2 \mu\text{m}$  Bi,  $1.7 \mu\text{m}$  Au

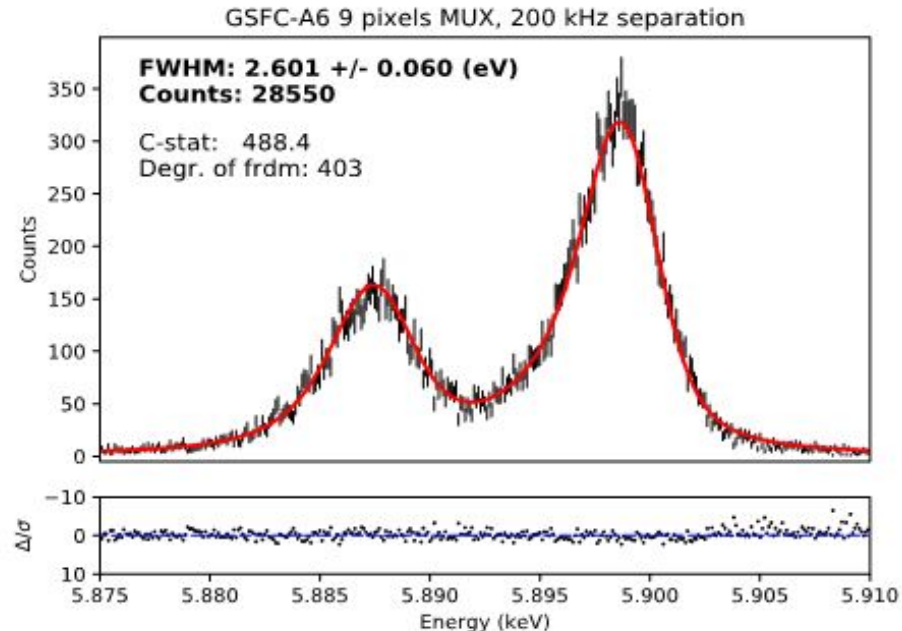


# Transition Edge Sensor (2018)

## kleurscheiding voor Röntgenfotonen



Single pixel (SRON, NASA, VTT)



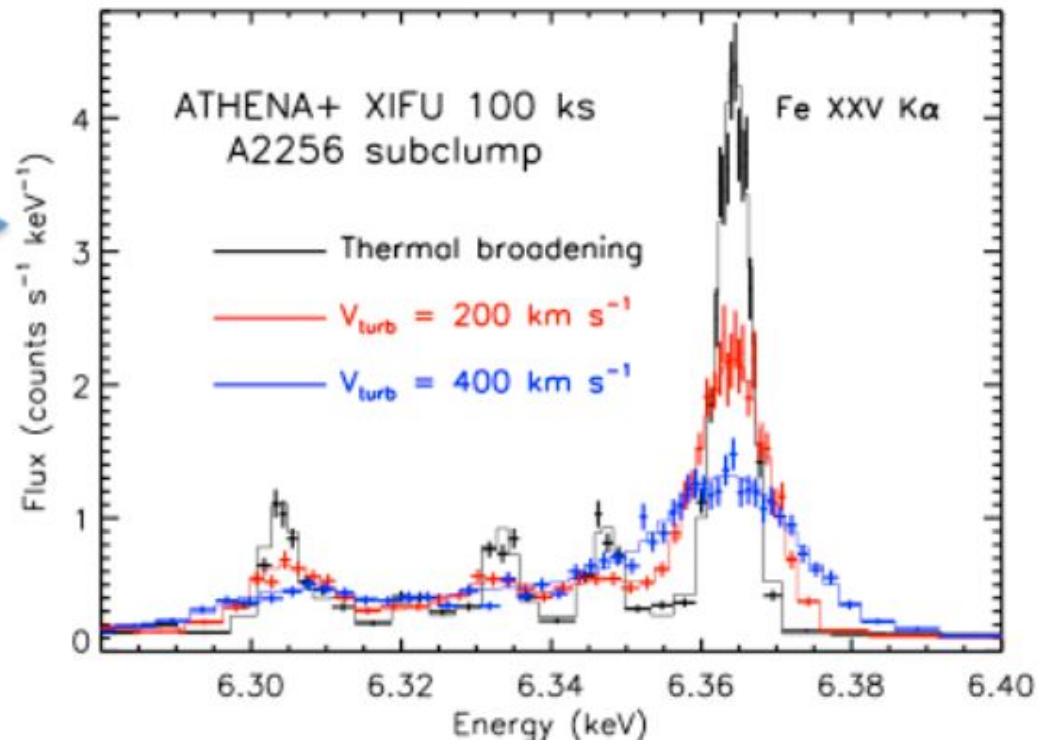
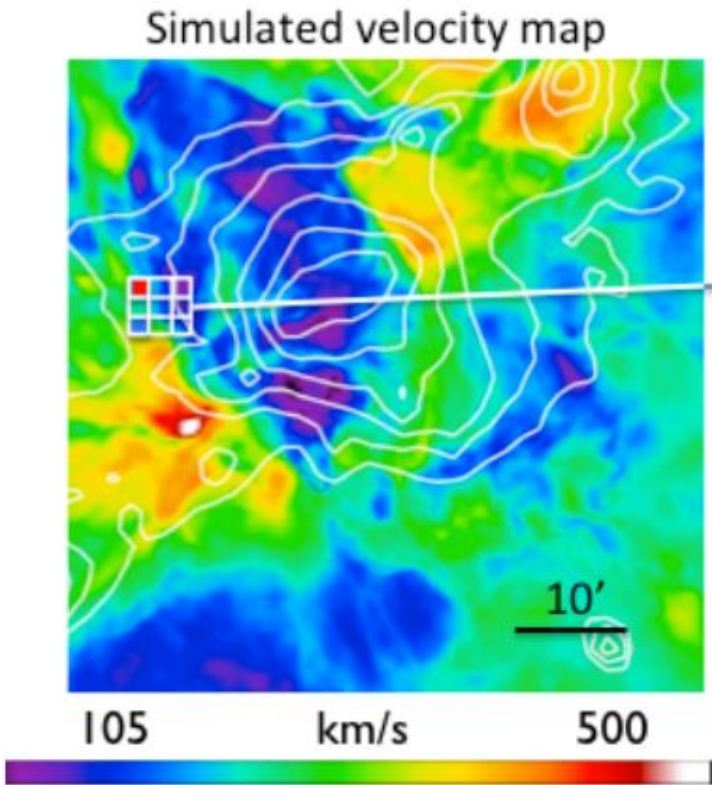
Multiplexed pixel (SRON, NASA, VTT)

$\lambda / \Delta\lambda \approx 3300$  detectie-rendement  $\approx 100\%$   $\lambda / \Delta\lambda \approx 2300$

# Dissipatie zwaartekrachtsenergie in intra-cluster gas

Potentiële verbreding van emissielijnen door turbulentie in het hete intra-cluster gas, geïnduceerd door invallende massaconcentraties naar de kern van de A2256 cluster.

(Opwekking van schokgolven door dichtheidscompressie)





# 4. Minimaal meetbare helderheid: $I_{\text{grens}}$

11.9  $\square$   $\square$  8.8

8.6  $\square$

8.8  $\square$

$\square$  9.5

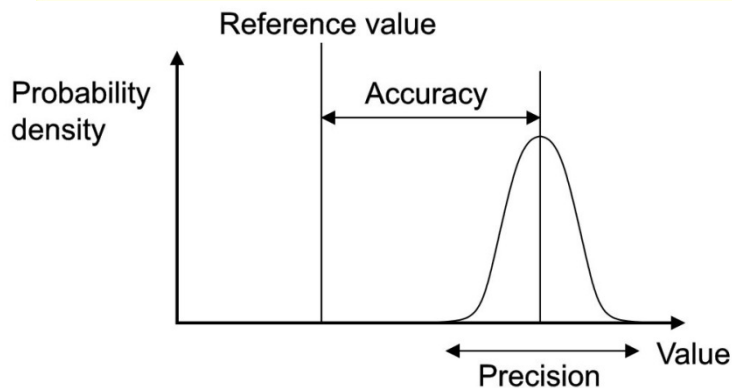
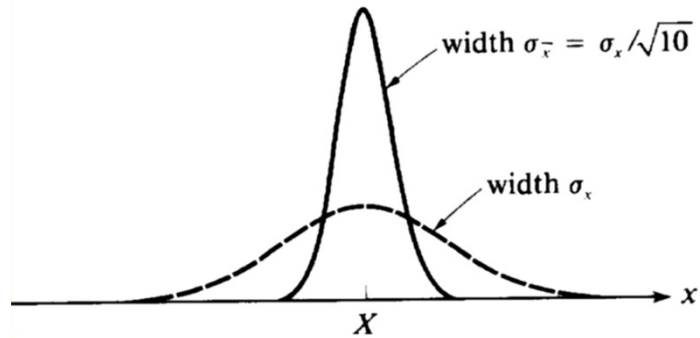
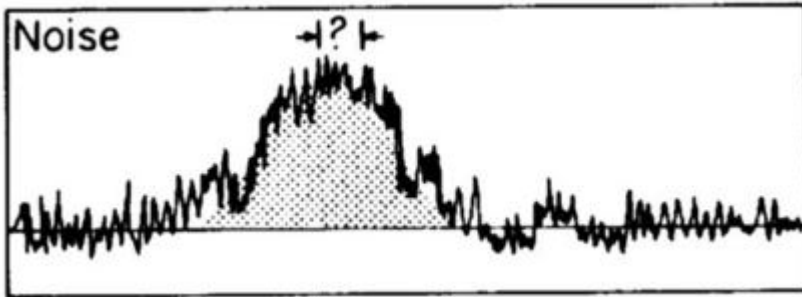
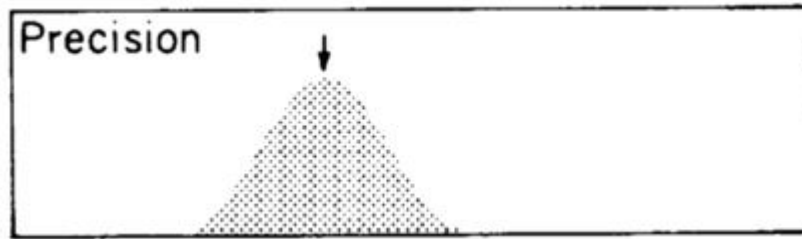
9.5  $\square$

8.6  $\square$

Hubble-ExDF: “diepste” beeld in V/IR licht van het heelal

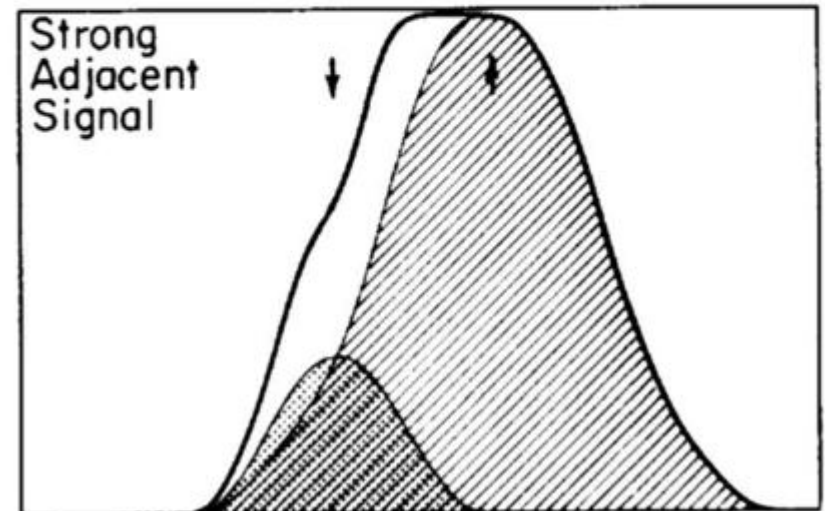
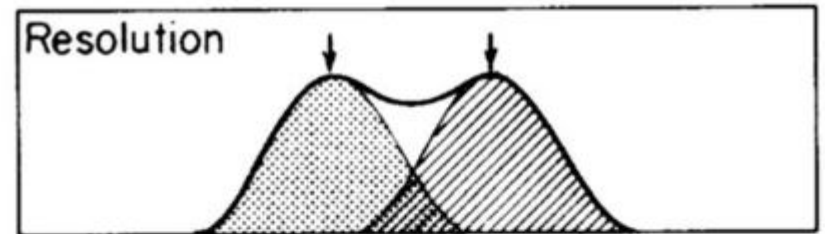


# Beelden: analyse parameters



Nauwkeurigheid  
 Precisie  
 Scheidend vermogen

Accuracy  
 Precision  
 Resolution



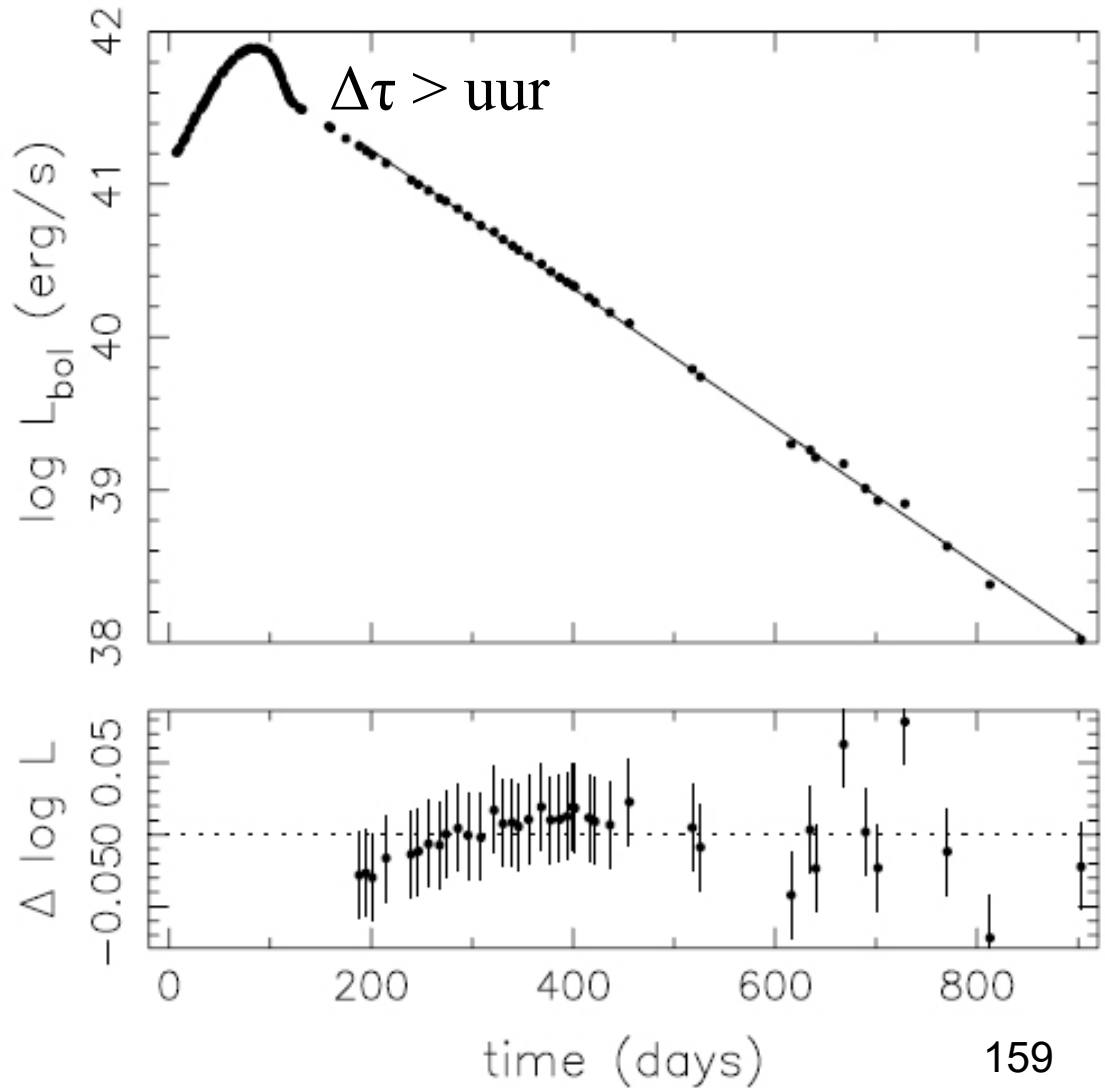
# 5. Time Domain Astrophysics: time series resolution $\Delta\tau$

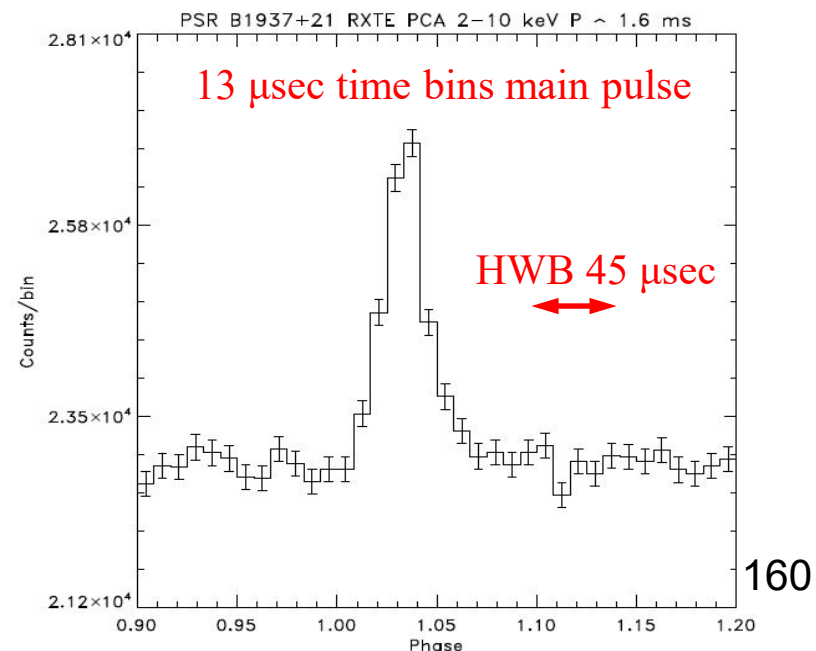
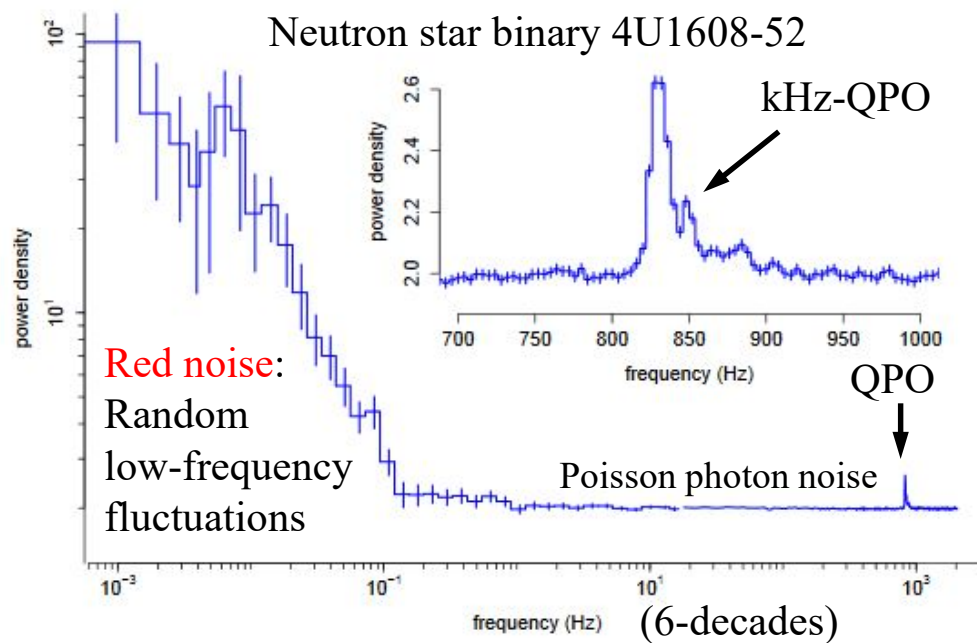
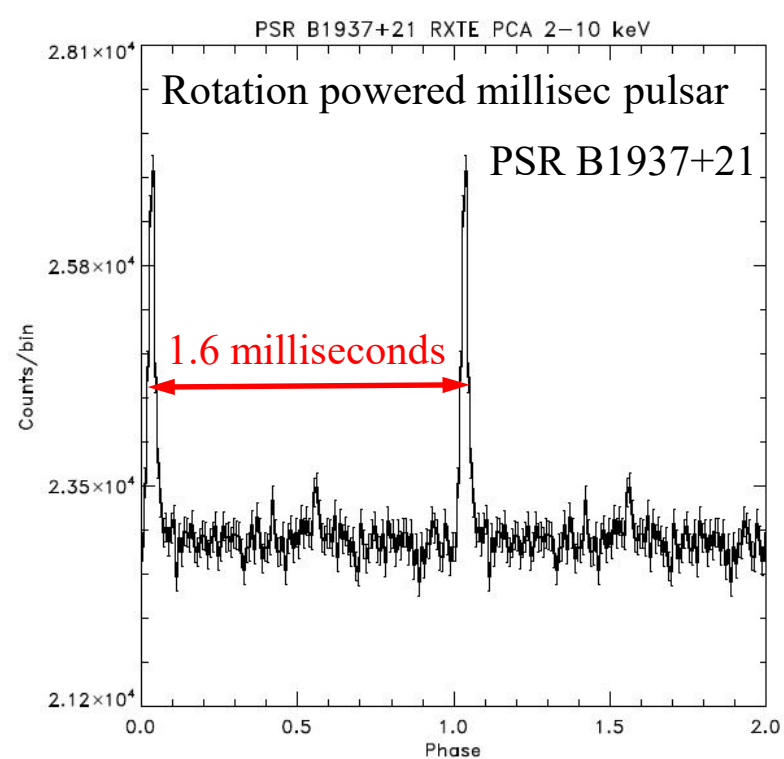
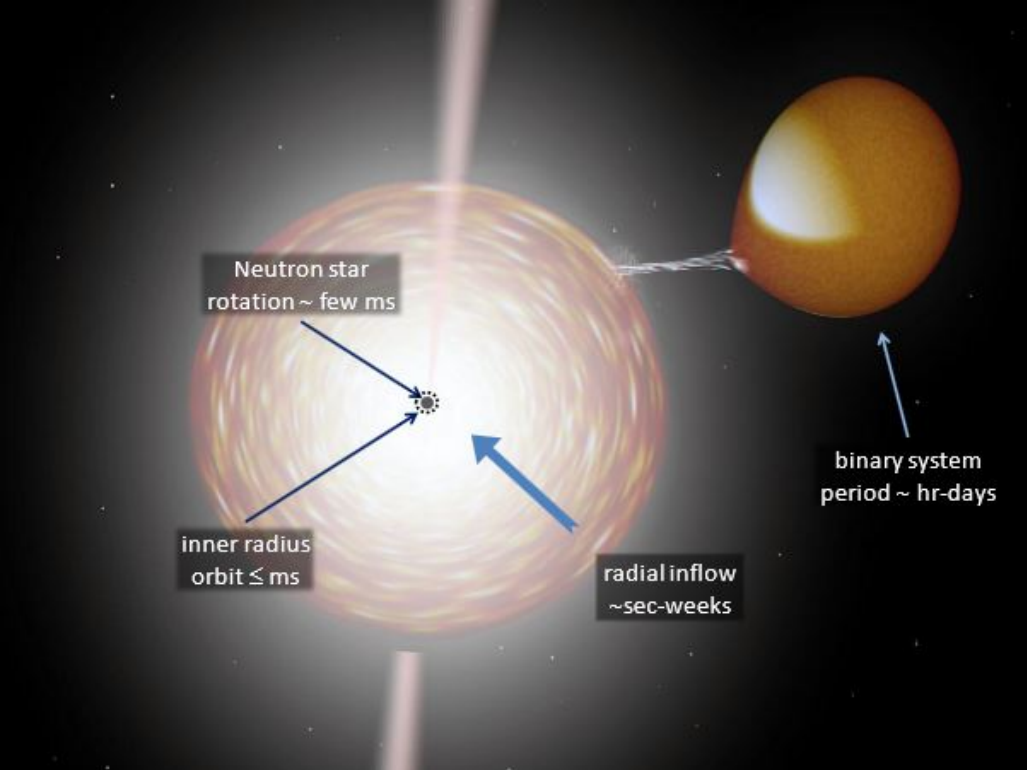
SN1987A: voor

SN1987A: na

© Anglo-Australian Observatory

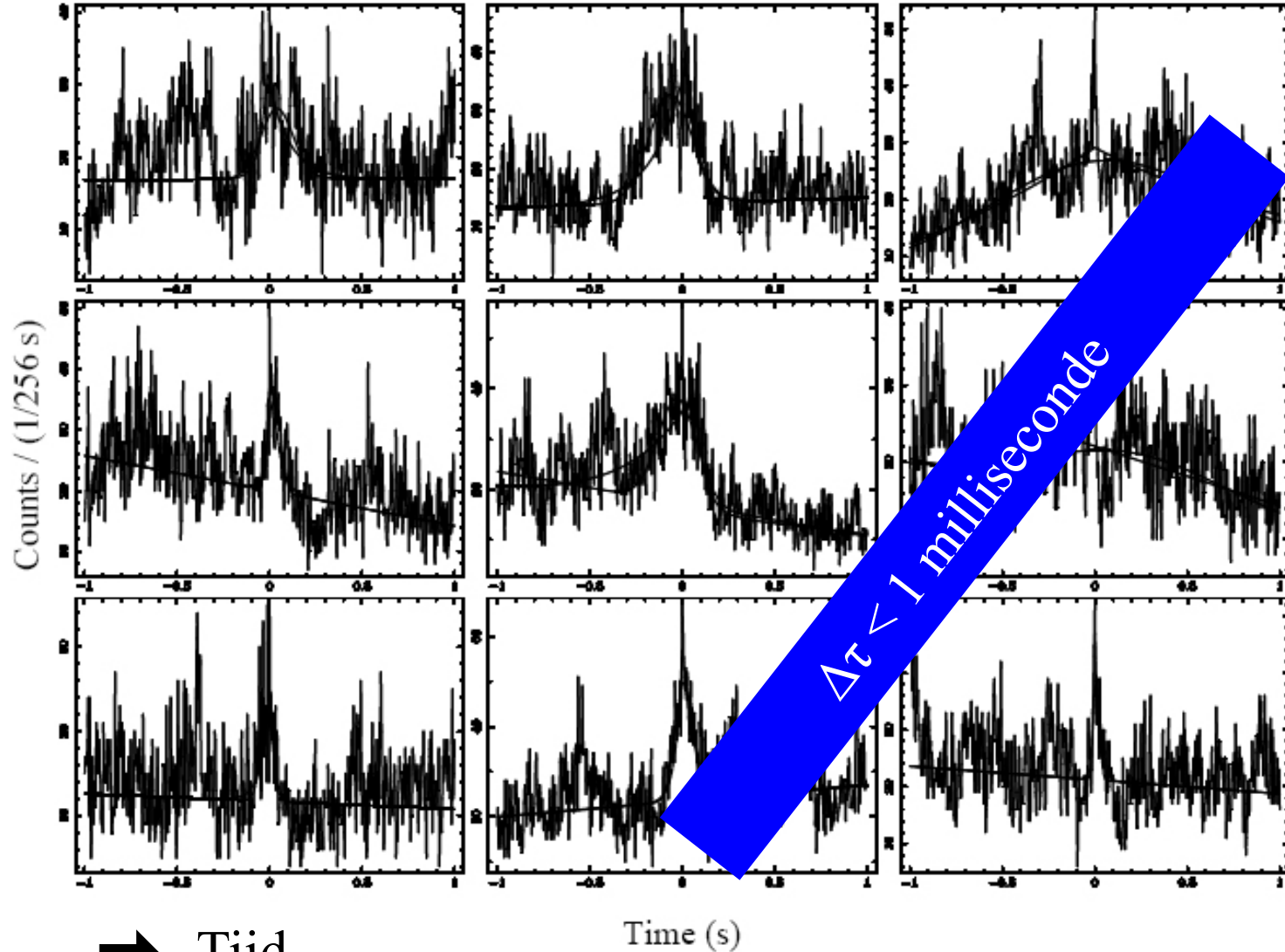
SN 1987A bolometric lightcurve





# Tijdfluctuatie in Röntgenhelderheid van een hete materiestroom naar een zwart gat

Aantal fotonen per 4 millisecon interval

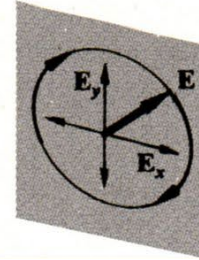
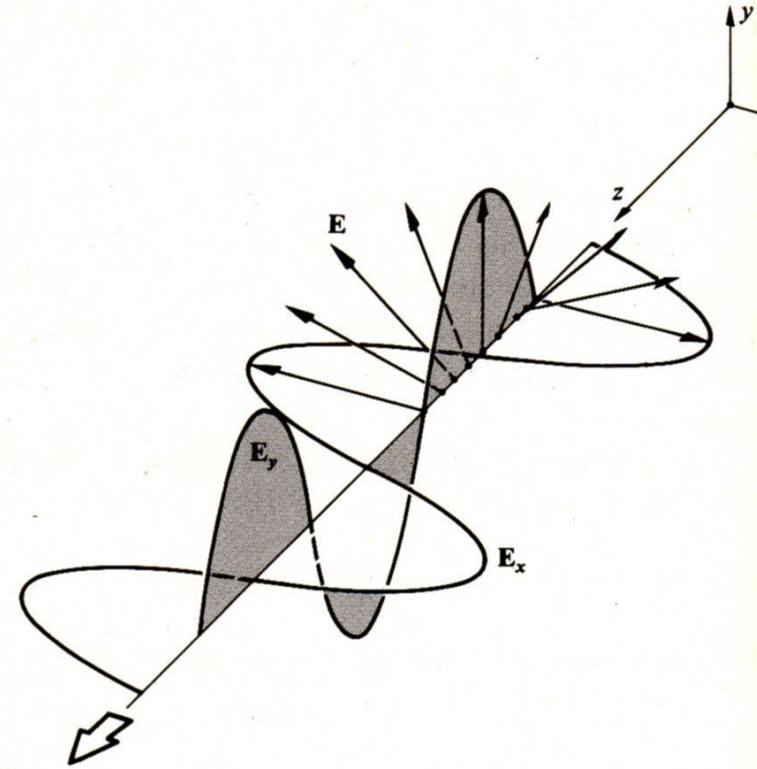
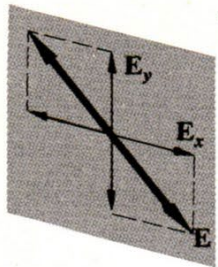
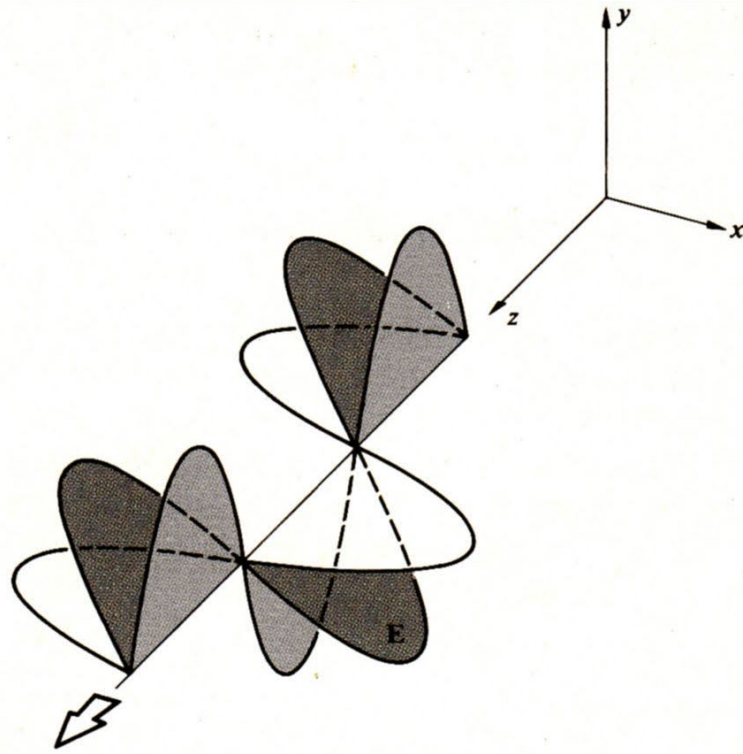


Tijd





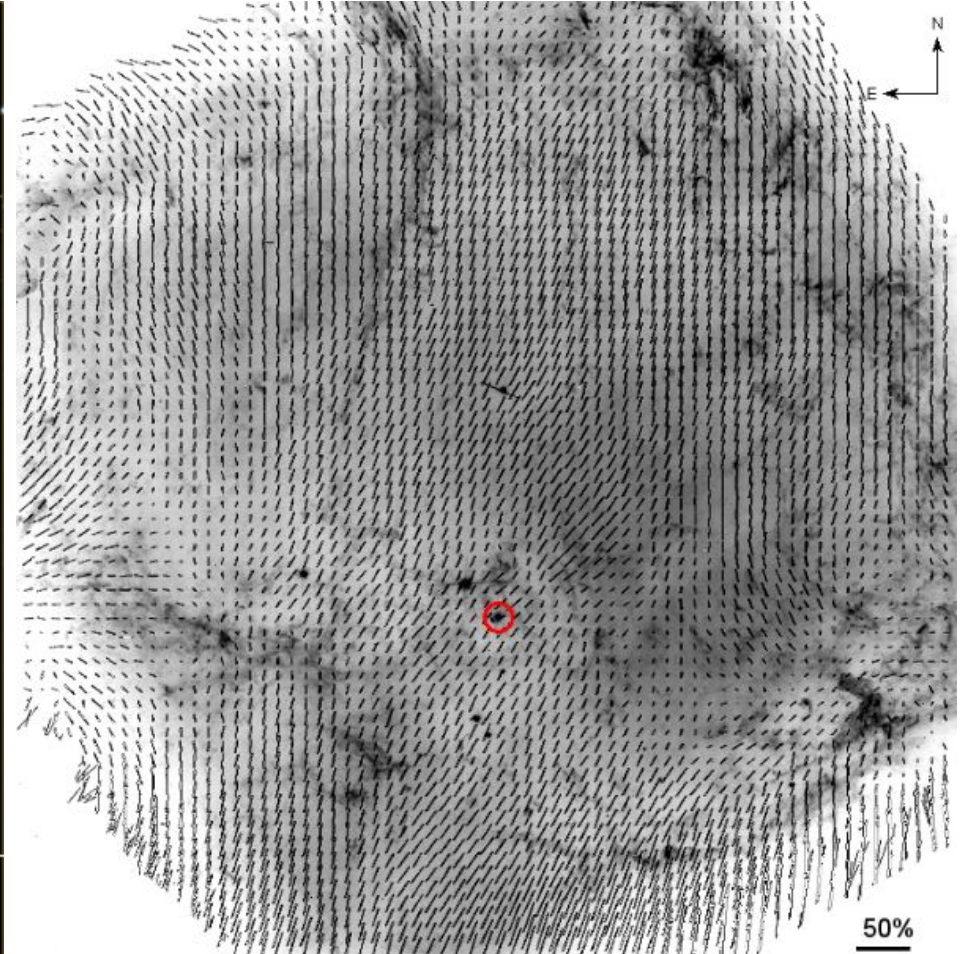
# Gepolariseerde lichtgolf



Lineair gepolariseerde golf

Circulair gepolariseerde golf

## 6. Polarisatie scheiding



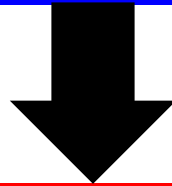
# Hoeveel onafhankelijke filters in de faseruimte?

- **Spectraal gebied** :  $10^{-20} < \lambda < 10^{+4}$  meter ➡ bereik  $10^{+24}$   
**Begrenzer**:  $e^+/e^-$  productie via  $\mu$ golfachtergrond en niet-thermische radiostraling  $>1$  meter, absorptie door interstellair plasma.
- **Gezichtsscherpte** :  $10^{-18} < \Delta\theta < 2\pi$  radialen ➡ bereik  $10^{+19}$   
**Begrenzer**: Schwarzschildstraal ( $R_s = 2GM/c^2$ ) van één  $M_\odot$  ( $\odot_s \sim 1$  km) over afstand ter grootte van de Melkweg
- **Kleurschifting** :  $1 < R_\lambda < 10^{+8}$  ➡ bereik  $10^{+8}$   
**Begrenzer**: Heisenberg relatie bepaalt natuurlijke lijnbreedte, Doppler verbreding t.g.v. thermische onrust en turbulente beweging.
- **Hersteltijd** :  $3 \times 10^{-6} < \Delta\tau < 3 \times 10^{+17}$  sec ➡ bereik  $10^{+23}$   
**Begrenzer**: lichtsnelheid over Schwarzschildstraal ( $\odot_s \sim 1$  km)

Totaal aantal **onafhankelijke filters**, aannemend sprongen van 1000:

$$8 \times 7 \times 3 \times 8 \approx 1350$$

Informatiedragers uit de kosmos



Kosmische straling

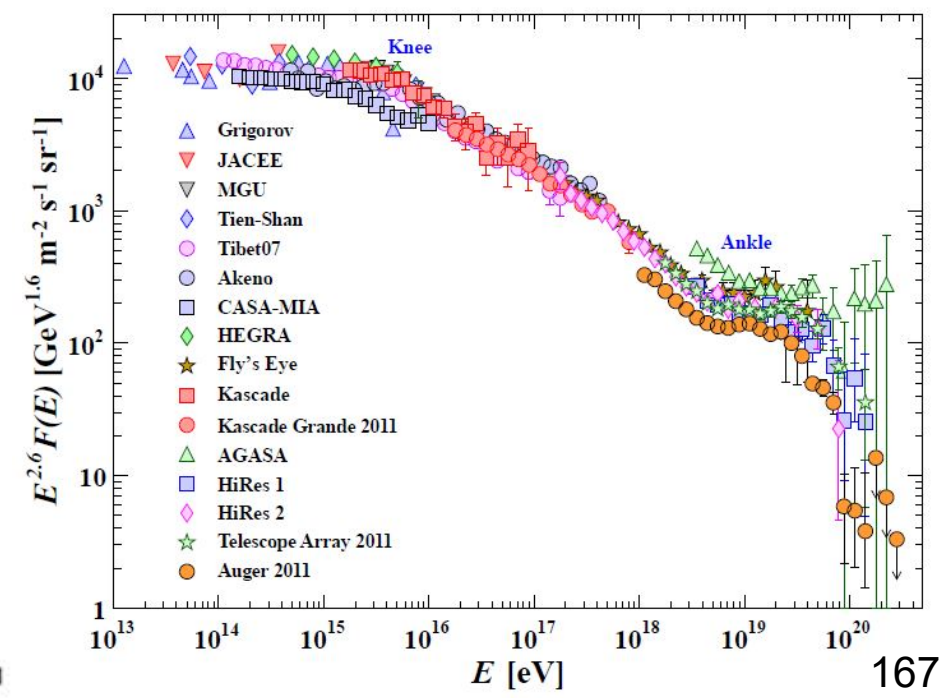
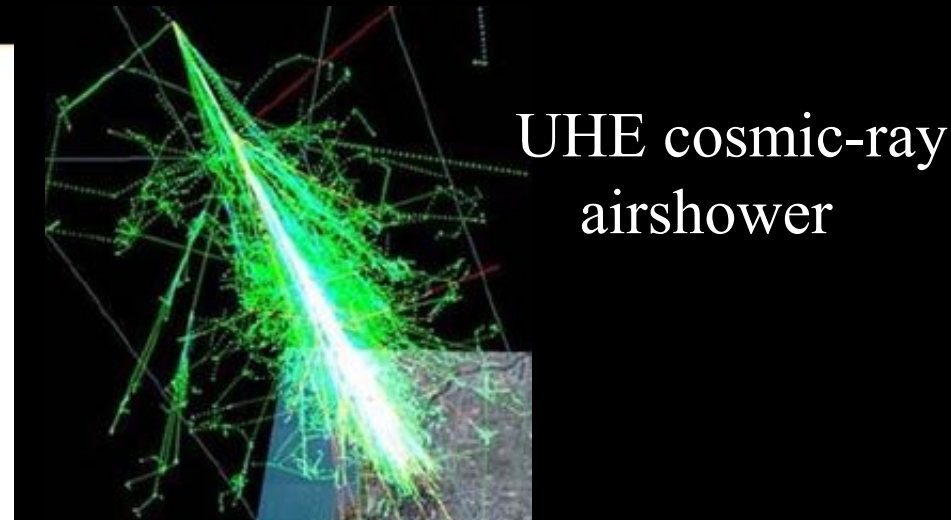
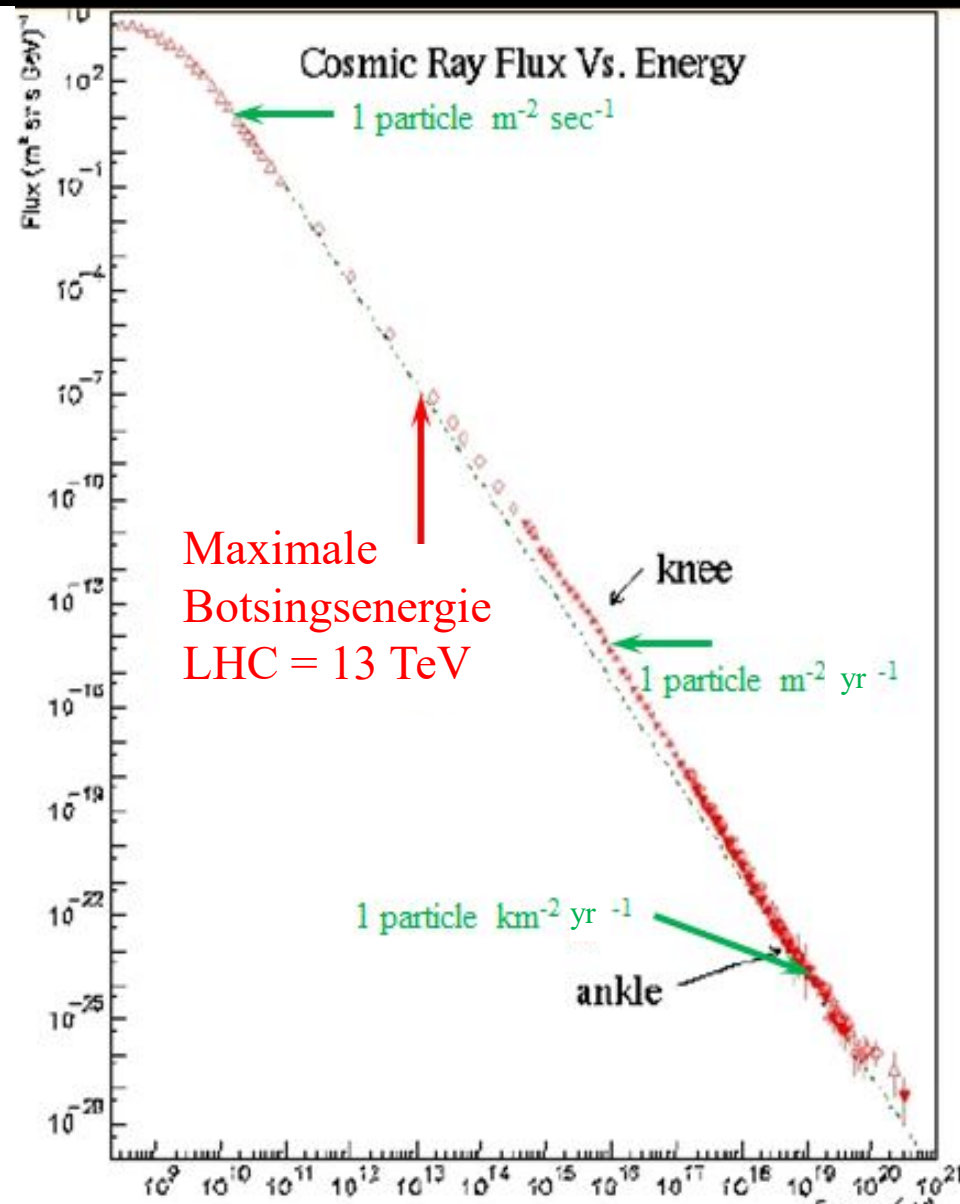




Auger Observatory (2006/7)

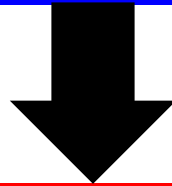
Western Mendoza ,Argentina: 3000 km<sup>2</sup> Ultra-High-Energy  
Cosmic-Ray (UHECR) detection area

# Spectrum primaire kosmische straling





Informatiedragers uit de kosmos

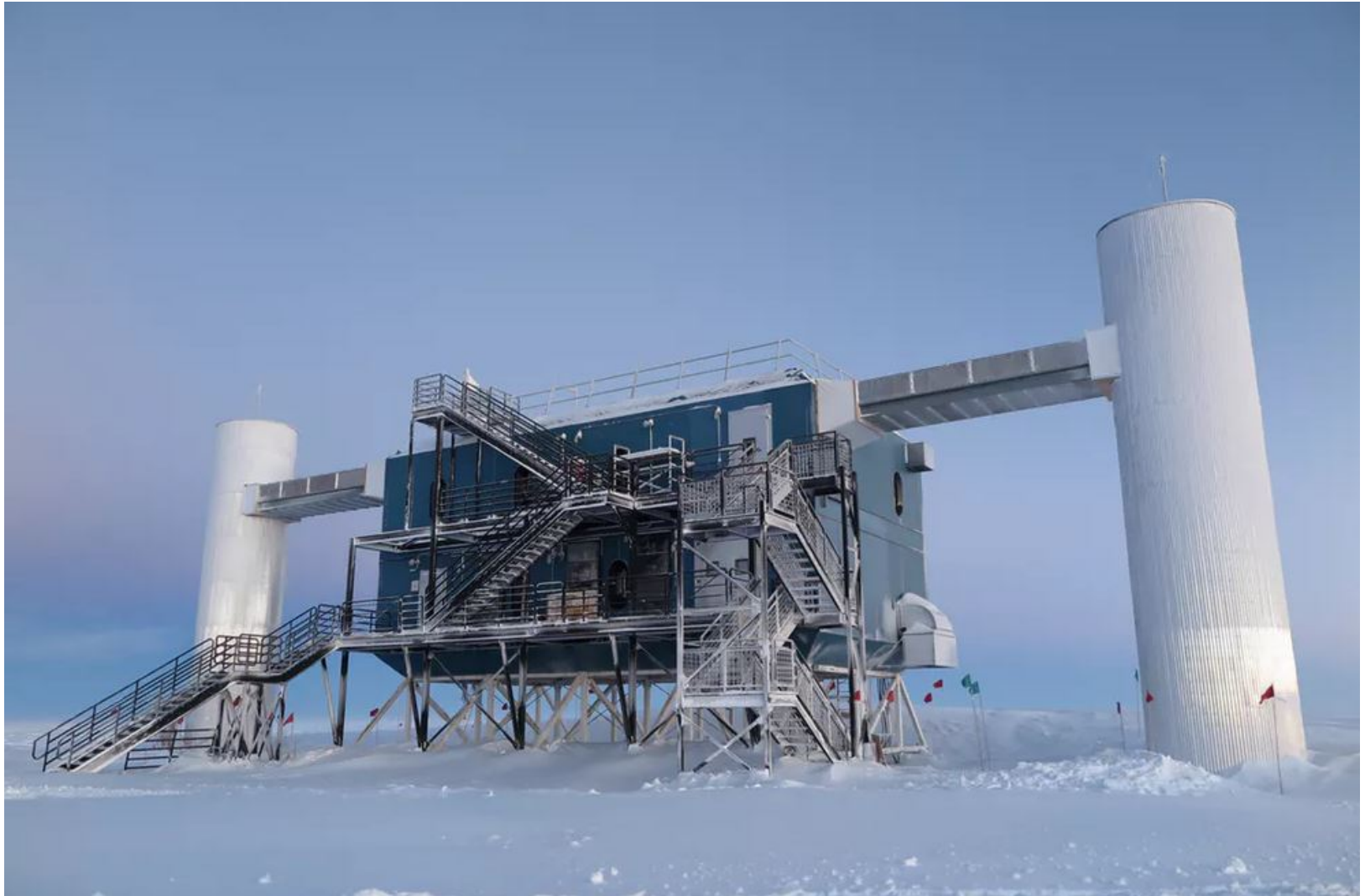


Neutrino's



# IceCube Neutrino Observatory

## Amundsen-Scott South Pole Station, Antarctica





# ICECUBE

SOUTH POLE NEUTRINO OBSERVATORY



**IceCube Laboratory**  
Data is collected here and sent by satellite to the data warehouse at UW-Madison



**Digital Optical Module (DOM)**  
5,160 DOMs deployed in the ice

**1 Gton instrumented volume**

50 m

Ice Top

86 strings of DOMs, set 125 meters apart

1450 m

IceCube detector

DeepCore

2450 m

Antarctic bedrock

**Amundsen-Scott South Pole Station, Antarctica**  
A National Science Foundation-managed research facility

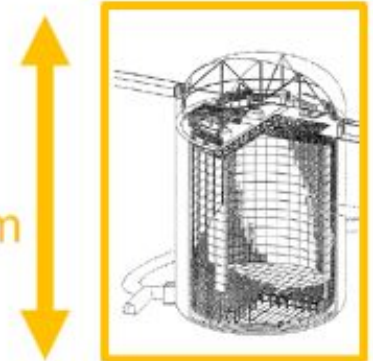


60 DOMs on each string

DOMs are 17 meters apart

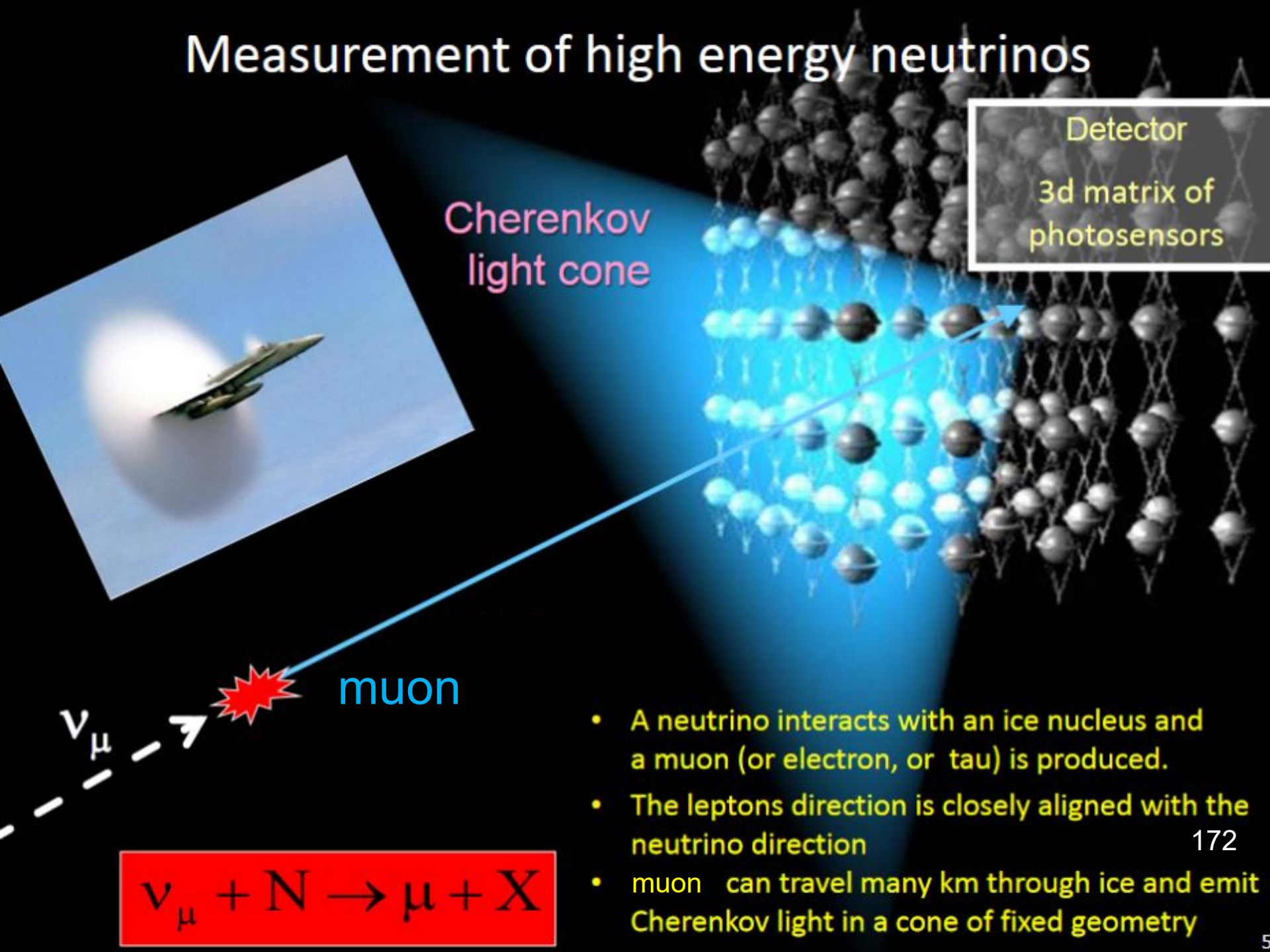
50m

**Super-Kamiokande**



50kton

# Measurement of high energy neutrinos



Cherenkov  
light cone

Detector  
3d matrix of  
photosensors

muon

- A neutrino interacts with an ice nucleus and a muon (or electron, or tau) is produced.
- The leptons direction is closely aligned with the neutrino direction
- muon can travel many km through ice and emit Cherenkov light in a cone of fixed geometry

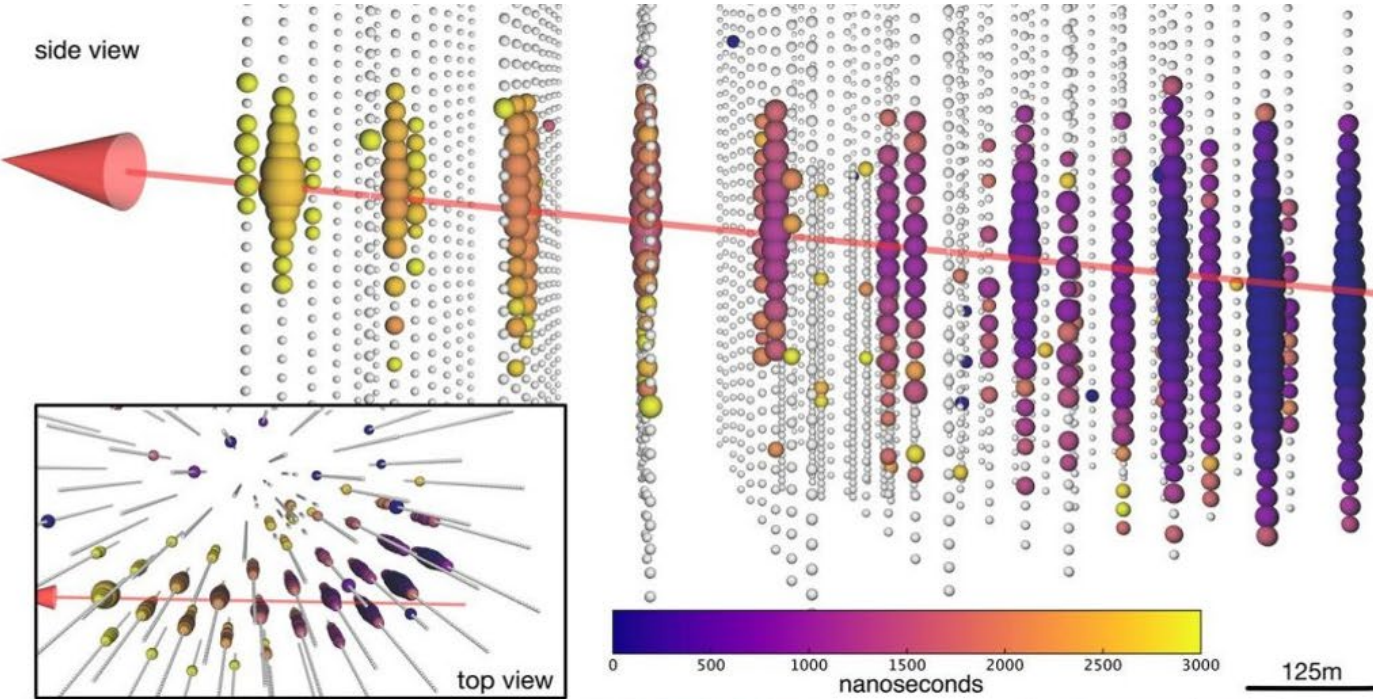




In 2017 door  $\nu_\mu$  geproduceerd **muon spoor**,  $E(\nu_\mu) \approx 3 \times 10^{14}$  eV

Bron:  $\gamma$ -ray flare van **blazar** TXS 0506+056 op  $4 \times 10^9$  lichtjaar

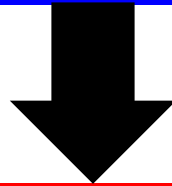
Data archives IceCube: eerste detectie ( $3.5\sigma$ ): sept 2014 – maart 2015





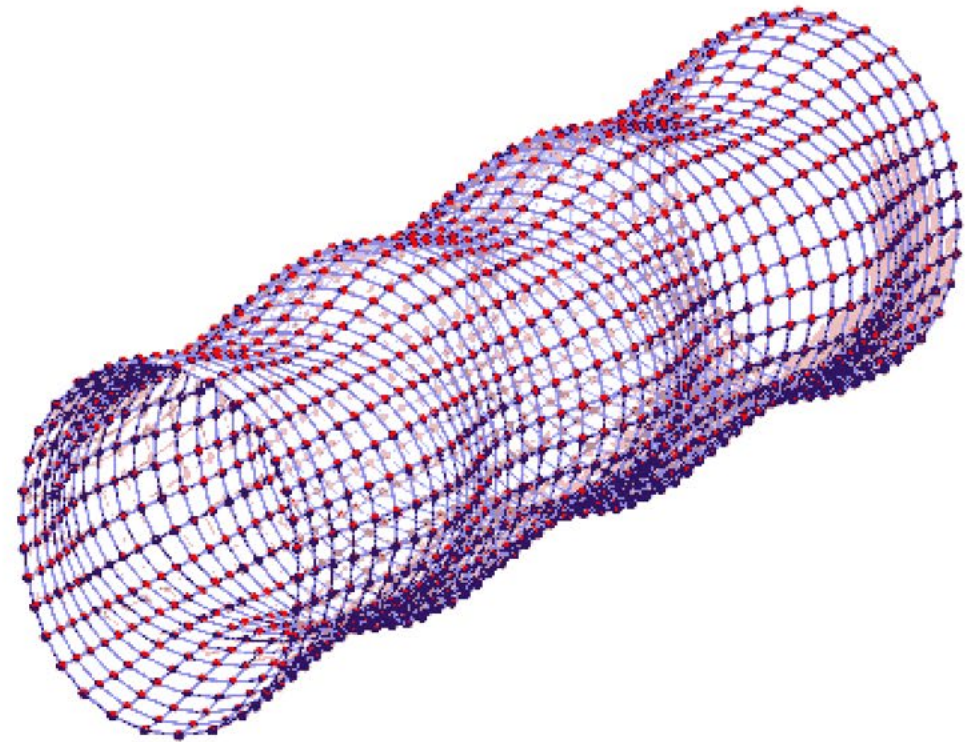
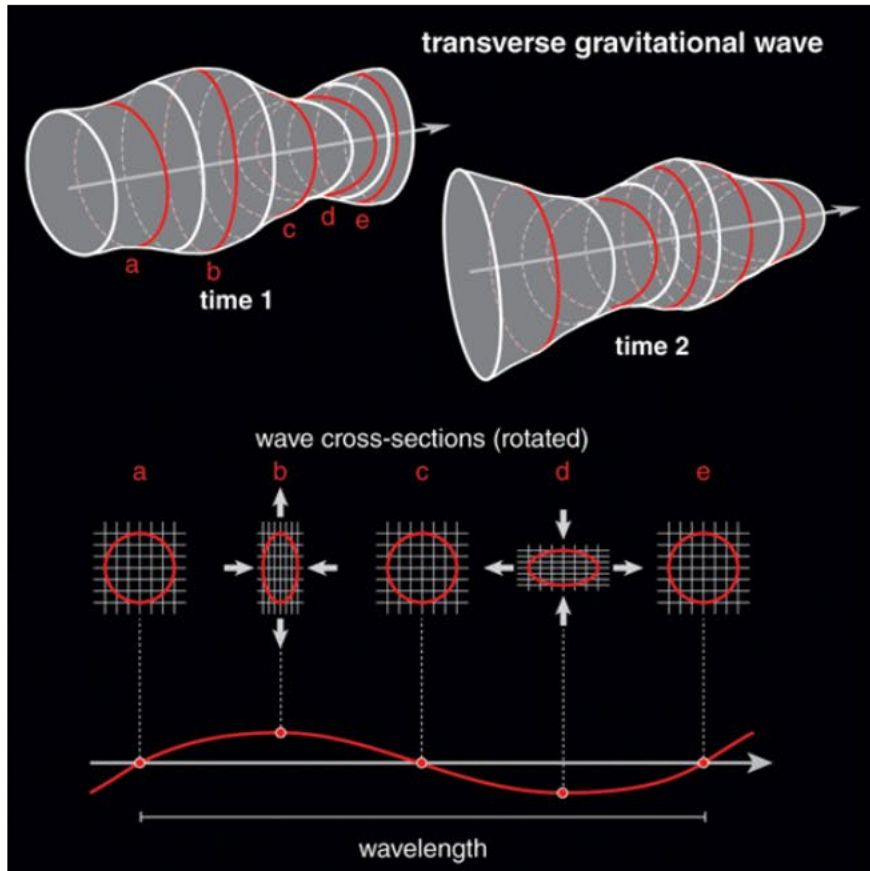
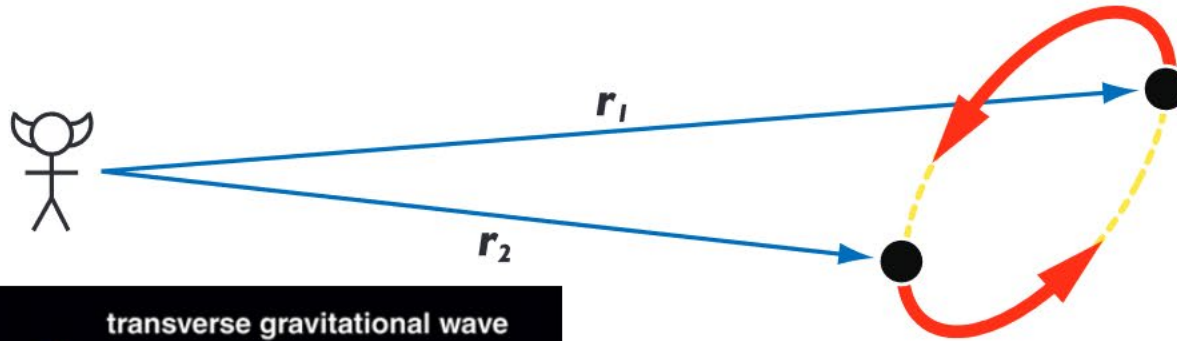


Informatiedragers uit de kosmos



Zwaartekrachtgolven

# Zwaartekrachtgolven = quadropool straling



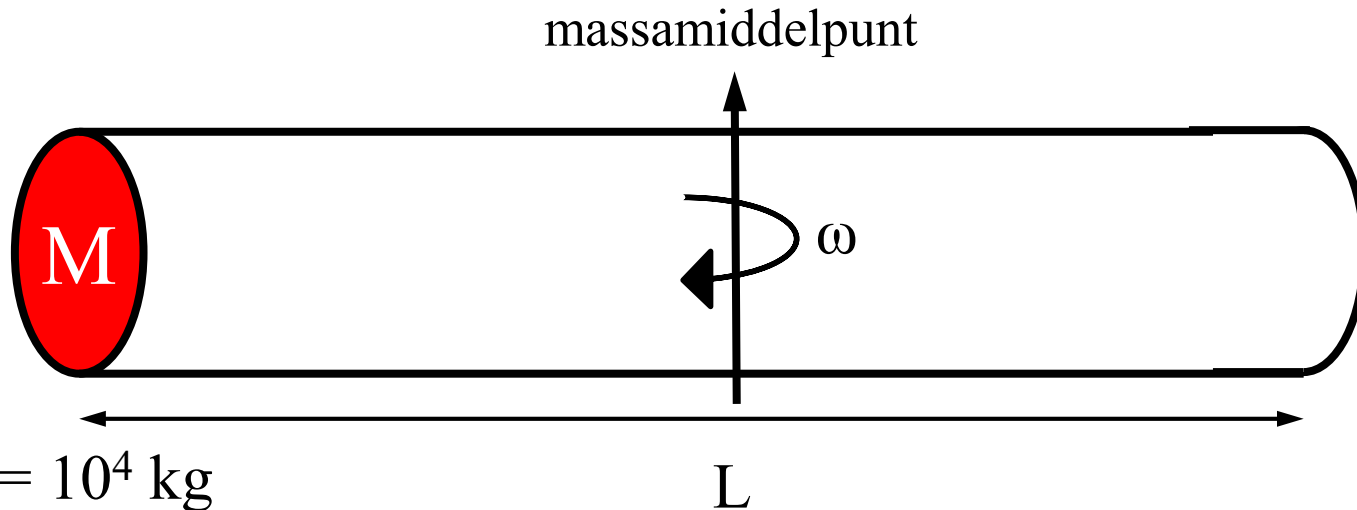
# Gravitatiestraling: stralingsvermogen

- Einstein vergelijkingen
- Gelineariseerde versie (vlakke ruimte met kleine verstoring)
- Energieverlies in **quadrupool straling** van een roterende cilindrische staaf ('end over end' met radiaal frequentie  $\omega$ ), massa  $M$  en lengte  $L$ :

$$\dot{E}_{\text{GW}} = \frac{2G}{45c^5} M^2 L^4 \omega^6 = 1.2 \times 10^{-54} M^2 L^4 \omega^6 \text{ Watt}$$



# Roterende cilindrische staaf van 10 ton



$$M = 10^4 \text{ kg}$$

$$L = 10 \text{ m}$$

$$\omega = 2\pi \times 5 \text{ rad.sec}^{-1}$$

$$\dot{E}_{\text{GW}} = 1.2 \times 10^{-54} M^2 L^4 \omega^6 = 1.2 \times 10^{-54} \times 10^8 \times 10^4 \times 10^9 \approx 10^{-33} \text{ W}$$

$$\text{Graviton energy } \hbar\omega = 6.6 \times 10^{-34} \times 10 \approx 10^{-32} \text{ Watt}$$

Gemiddelde emissie: één graviton per 10 seconden

Opwekking en detectie van zwaartekrachtgolven in een laboratorium is een vruchteloze onderneming

# Gravitiestraling dubbelster met massa's $m_1^*$ en $m_2^*$

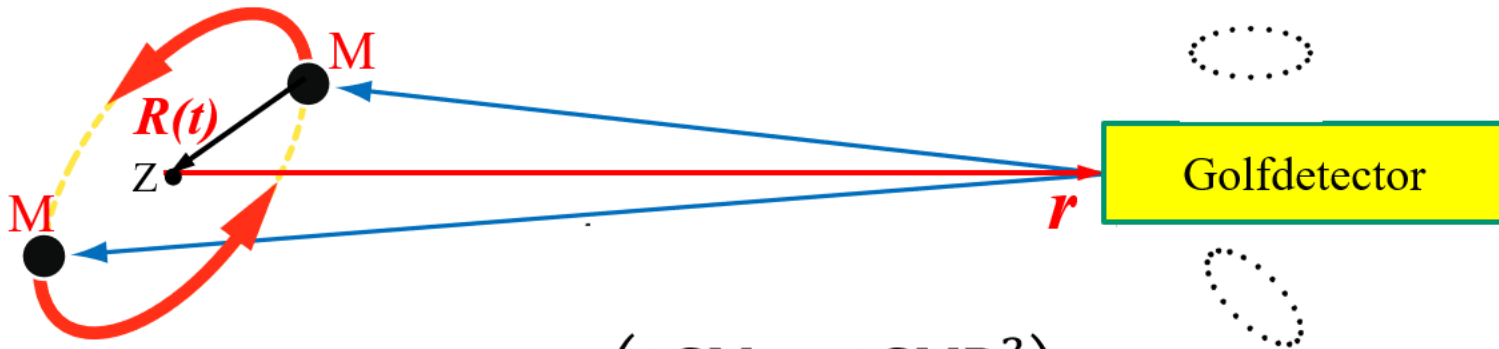
**Maximaal vermogen** in gravitiestraling (orde schatting):

➤  $\omega^2 = GM/a^3$ ,  $a$  = halve lange as van de omloopbaan.  
3<sup>e</sup> wet van Kepler:  $\omega^2 a^3 = G(m_1^* + m_2^*) = GM$

➤ Voor 2 gelijke sterrenmassa's  $m_1^* = m_2^* = M/2$   
en een baan met eccentriciteit  $\varepsilon = 0$  (cirkelbaan) geldt:

$$\dot{E}_{\text{GW}} = \frac{2}{5} \frac{c^5}{G} \left( \frac{GM}{c^2 a} \right)^5 = \frac{2}{5} \frac{c^5}{G} \left( \frac{R_s^*}{a} \right)^5 < \frac{c^5}{G} \approx 4 \times 10^{52} \text{ Watt}$$

# De 'strain' van een gravitatiegolf



Versnelling bij  $r$ :  $\vec{a}_r = -\vec{e}_r \left( \frac{2GM}{r^2} + \frac{3GMR^2}{r^4} \right)$ , 2<sup>e</sup> moment  $MR^2 = Q$

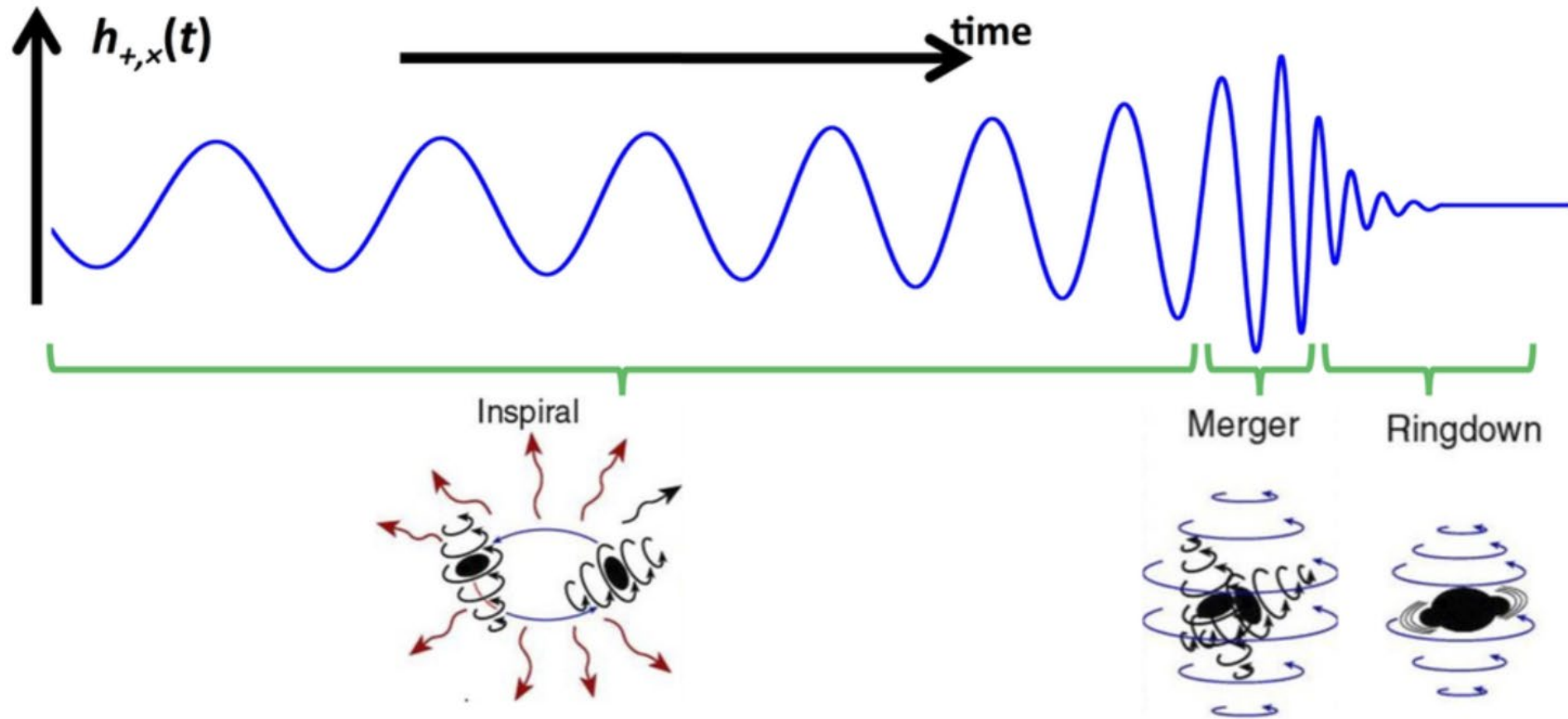
Quadrupool moment  $Q(t) = MR^2(t)$  bij oscillerende asferische massa

Newtoniaanse benadering + speciale relativiteitstheorie (gravitatie golfsnelheid is  $c$ ): de relatieve getijdewerking  $h(t) = \Delta L/L$  (dimensieloos) op een golfdetector met lengte  $L$  door een passerende gravitatiegolf:

$$h(t) \approx \frac{G\ddot{Q}(t)}{c^4 r} = \frac{2GM}{c^2} \cdot \frac{1}{r} \cdot \left( \frac{v(t)}{c} \right)^2 \approx \frac{R_s}{r} \cdot \left( \frac{v_{\text{rms}}}{c} \right)^2 = \text{'strain'}$$

Strain bij  $M = 1M_{\odot}$ ,  $r = 300$  miljoen lichtjaar,  $v \leq c \rightarrow h \leq 10^{-21}$

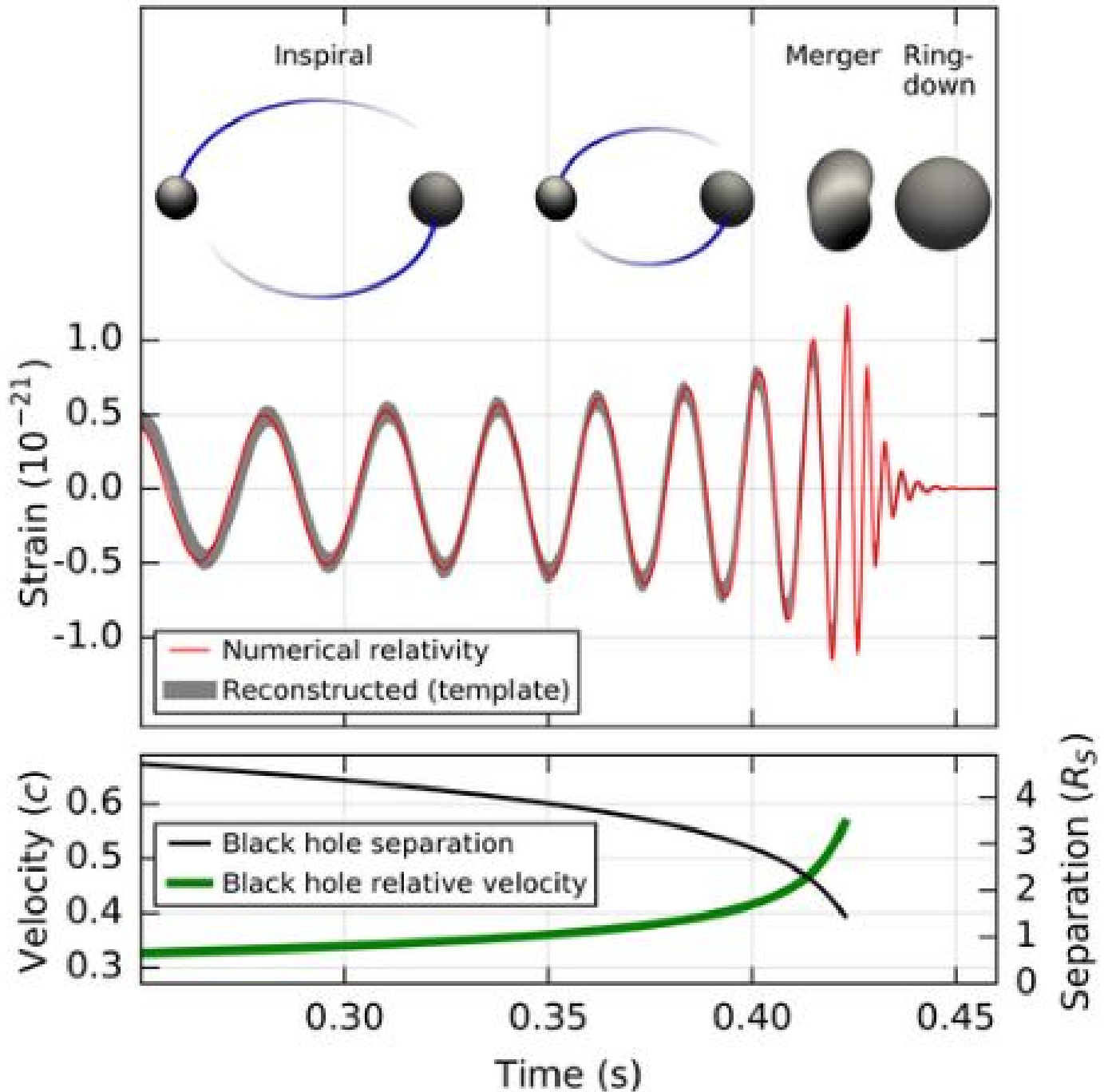
# The basics of binary coalescence



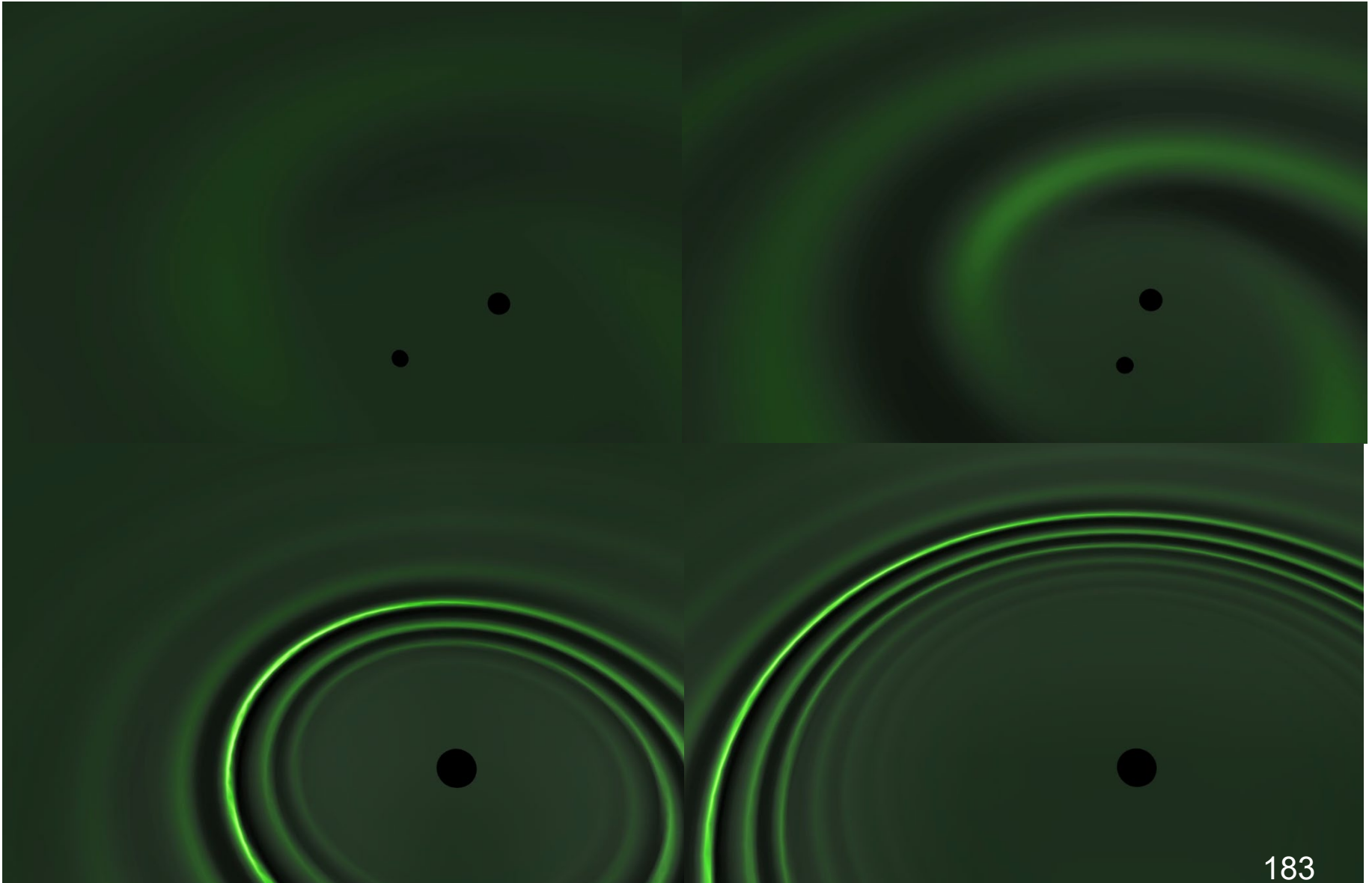
‘Strain’ & Frequency development during Inspiral, Merger and Ringdown.  
For a circular binary orbit holds that the period of the gravitational wave equals one half of the orbital period:

$$P_{\text{GW}} = \frac{1}{2} P_{\text{binary}}$$

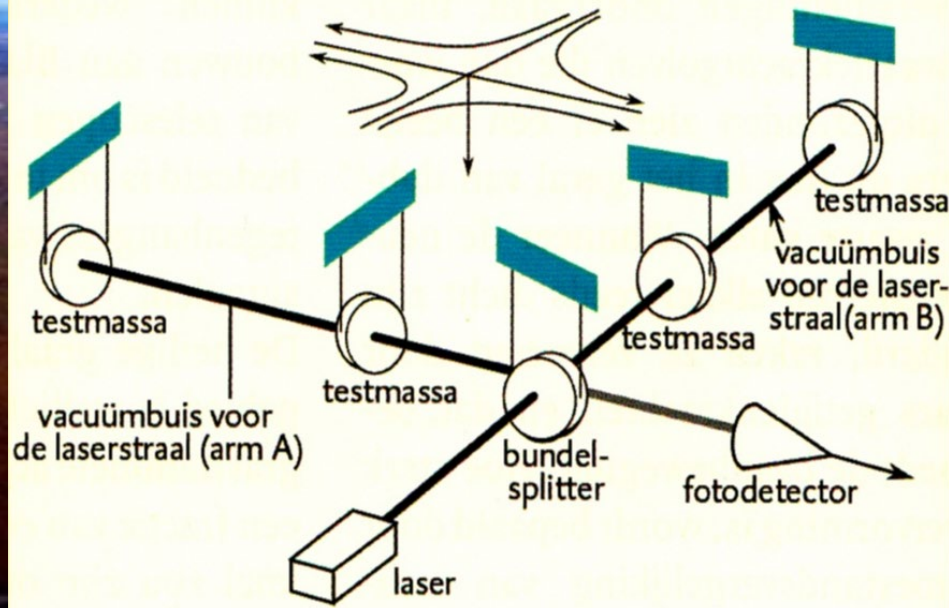




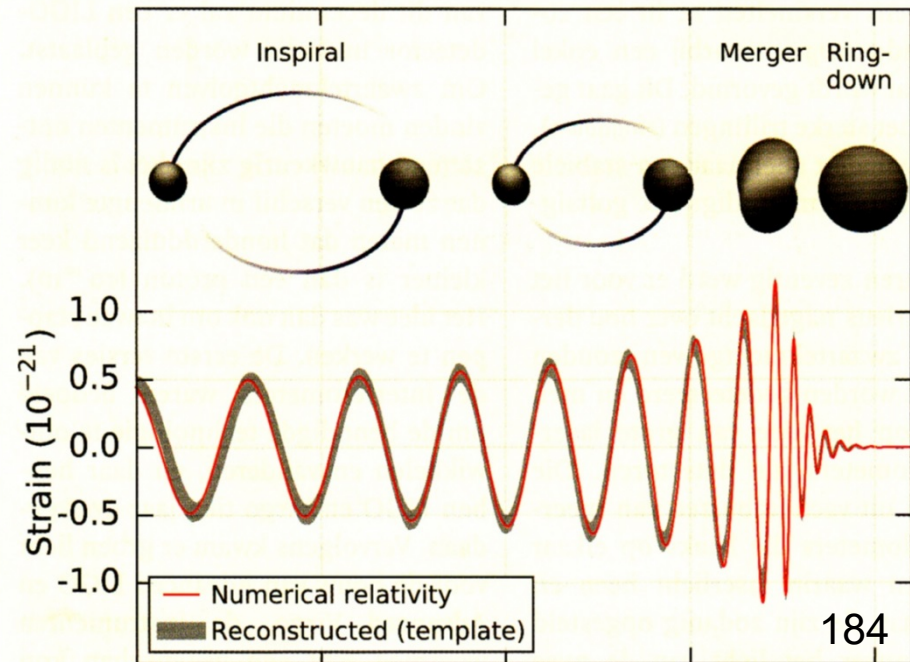
# Inspiral and coalescence of a double black hole binary



Advanced LIGO Hanford (2015)  
(Washington State)

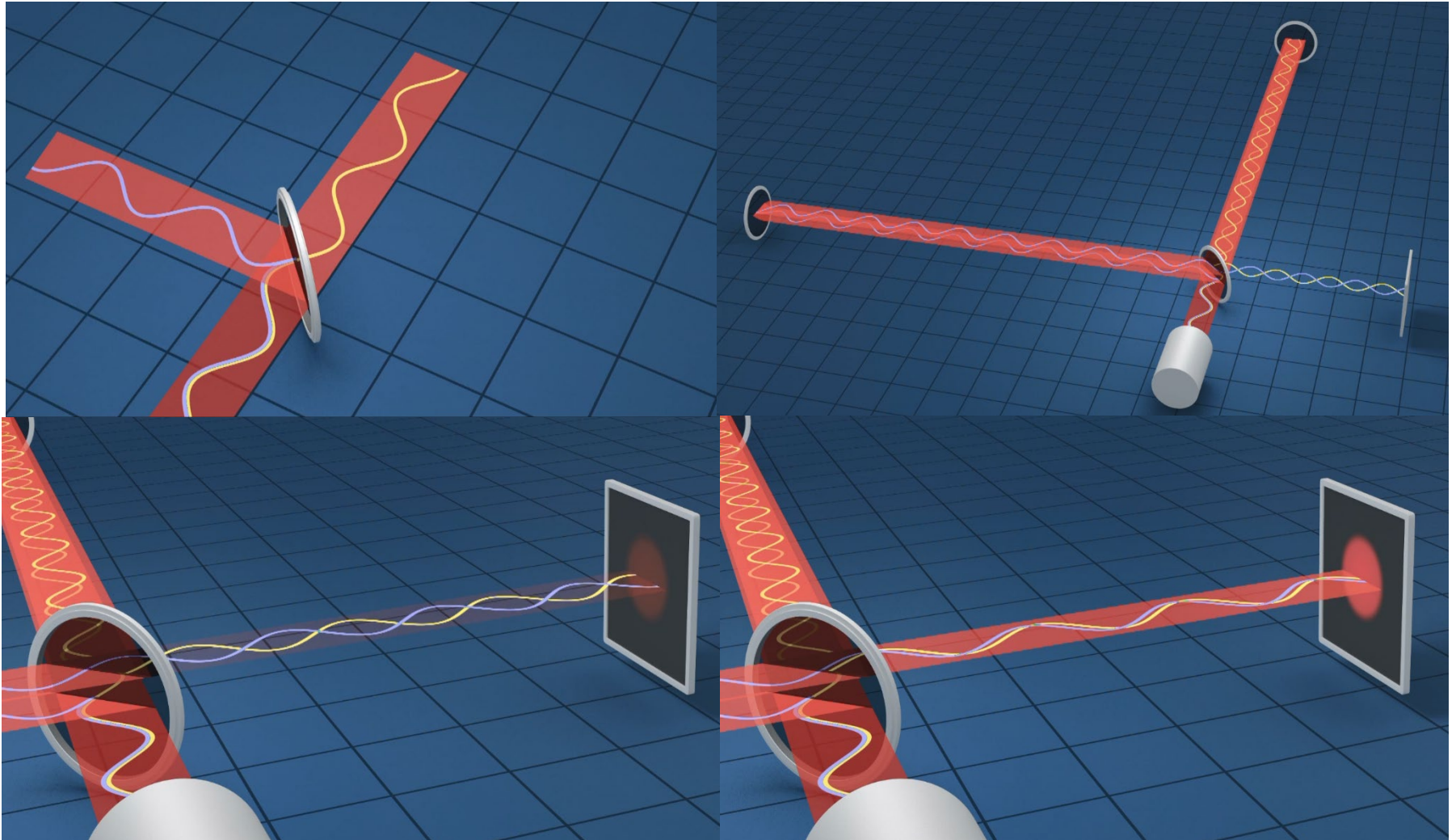


Advanced LIGO  
Livingston (2015)  
(Louisiana)





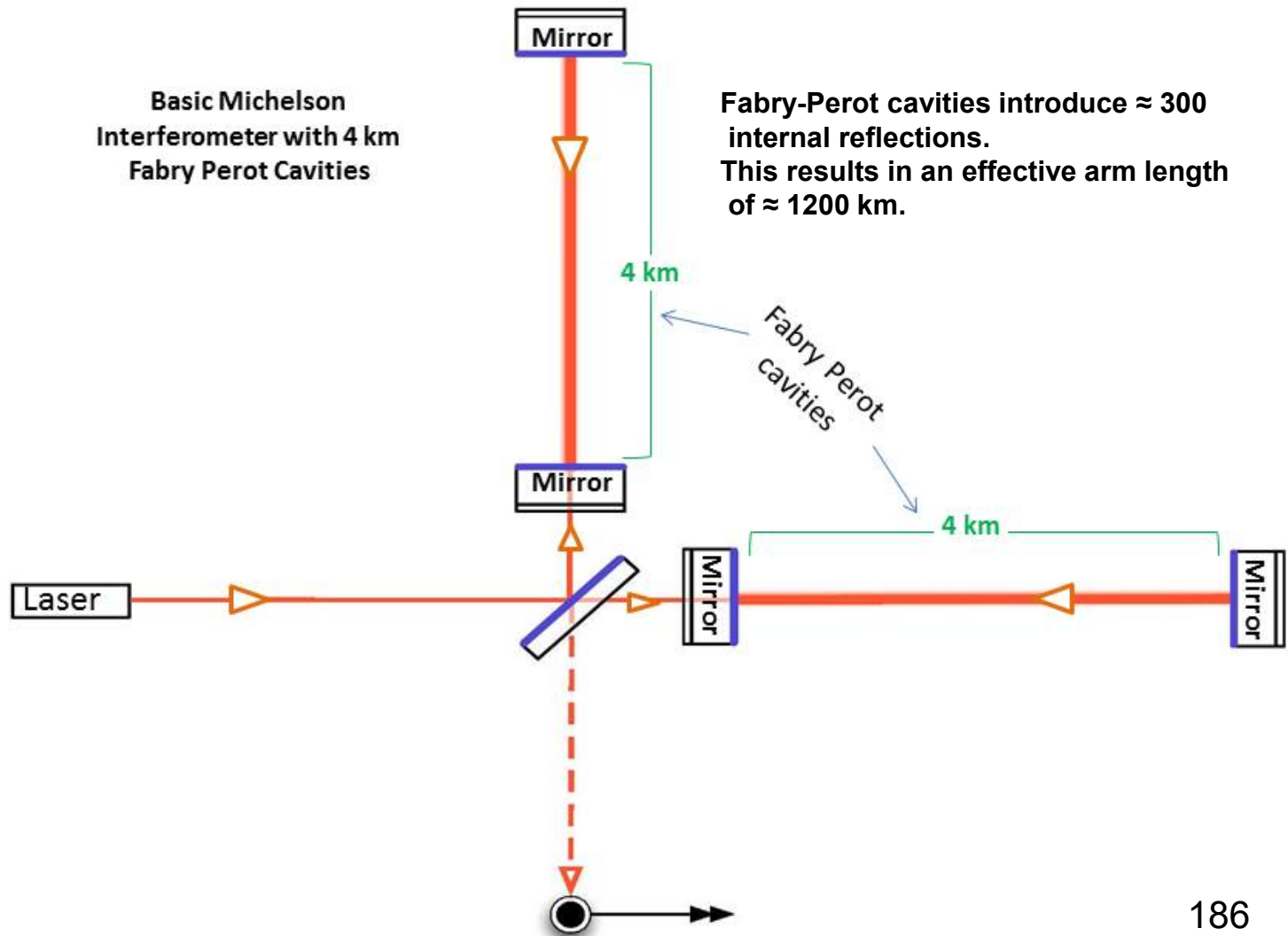
# GW-interferometer: detectieprincipe





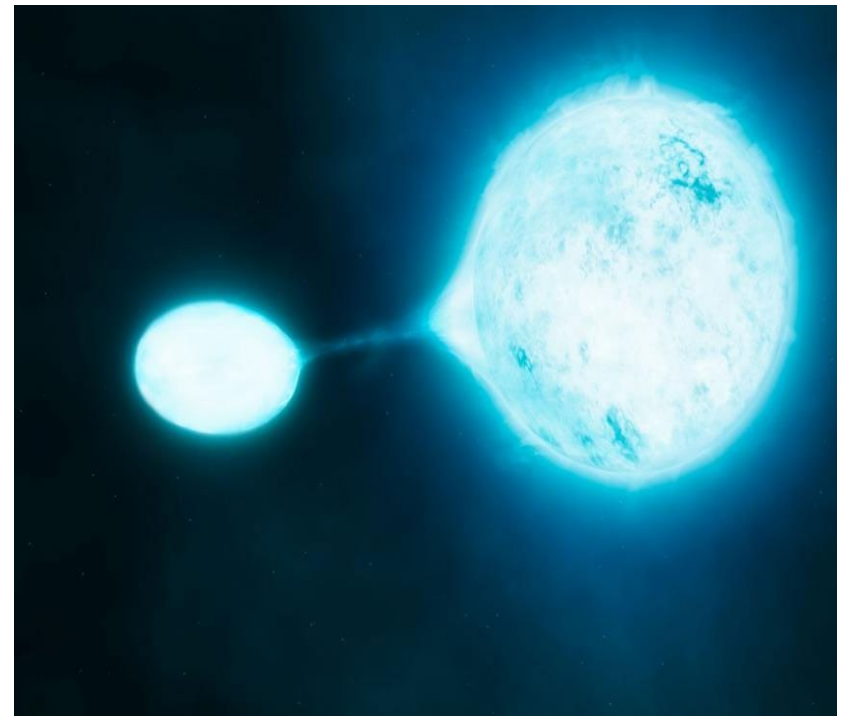
# LIGO gravitational wave detector with 4 km arms

## Michelson Interferometer with FP-cavities

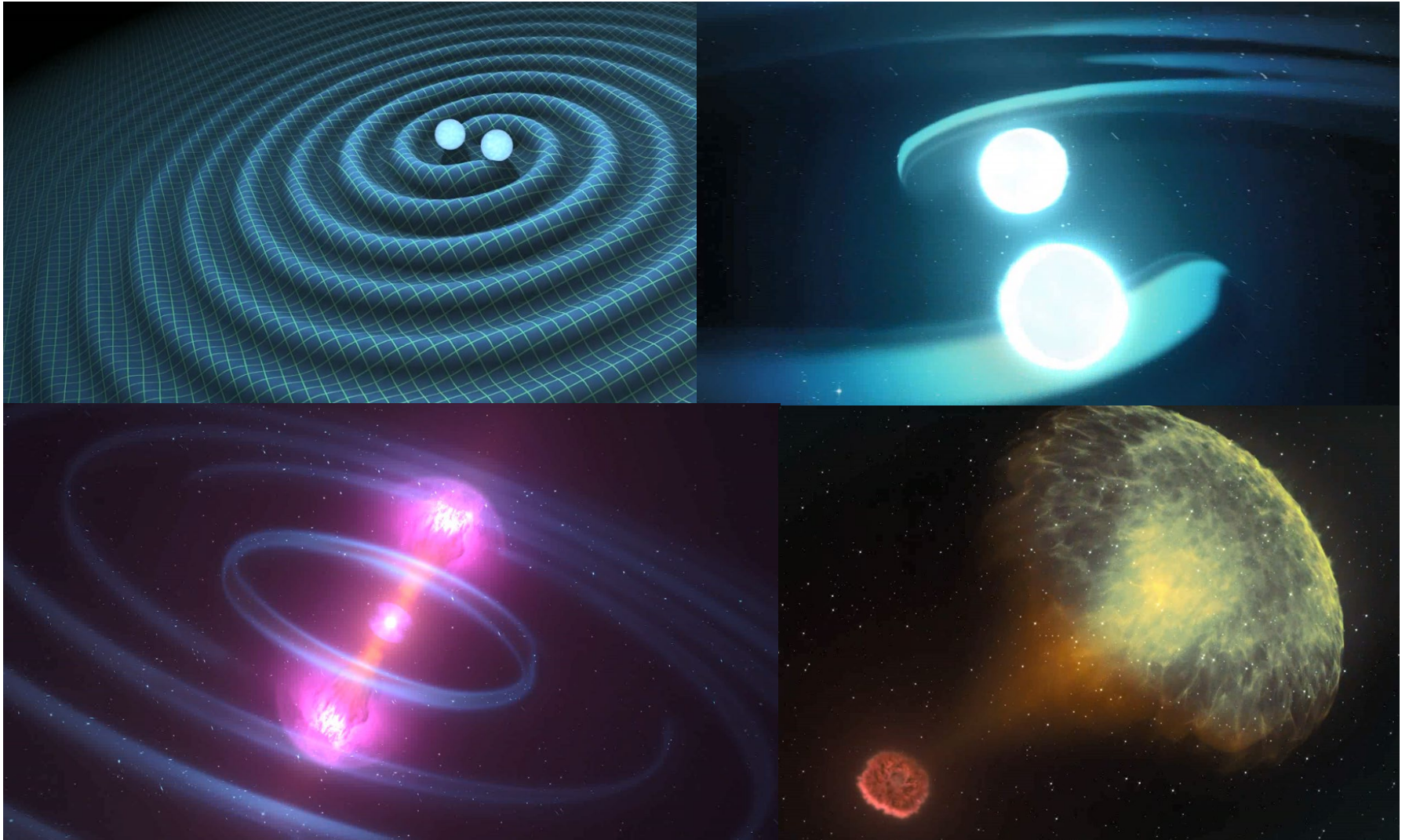


# Eerste LIGO detectie: GW150914, drie ontdekkingen in één

- Dubbele zwarte gaten bestaan
- Ze smelten samen tot een nieuw zwart gat
- Deze zwarte gaten zijn zwaarder dan die we kennen
- Vorming nog onduidelijk: in cluster of dubbelster

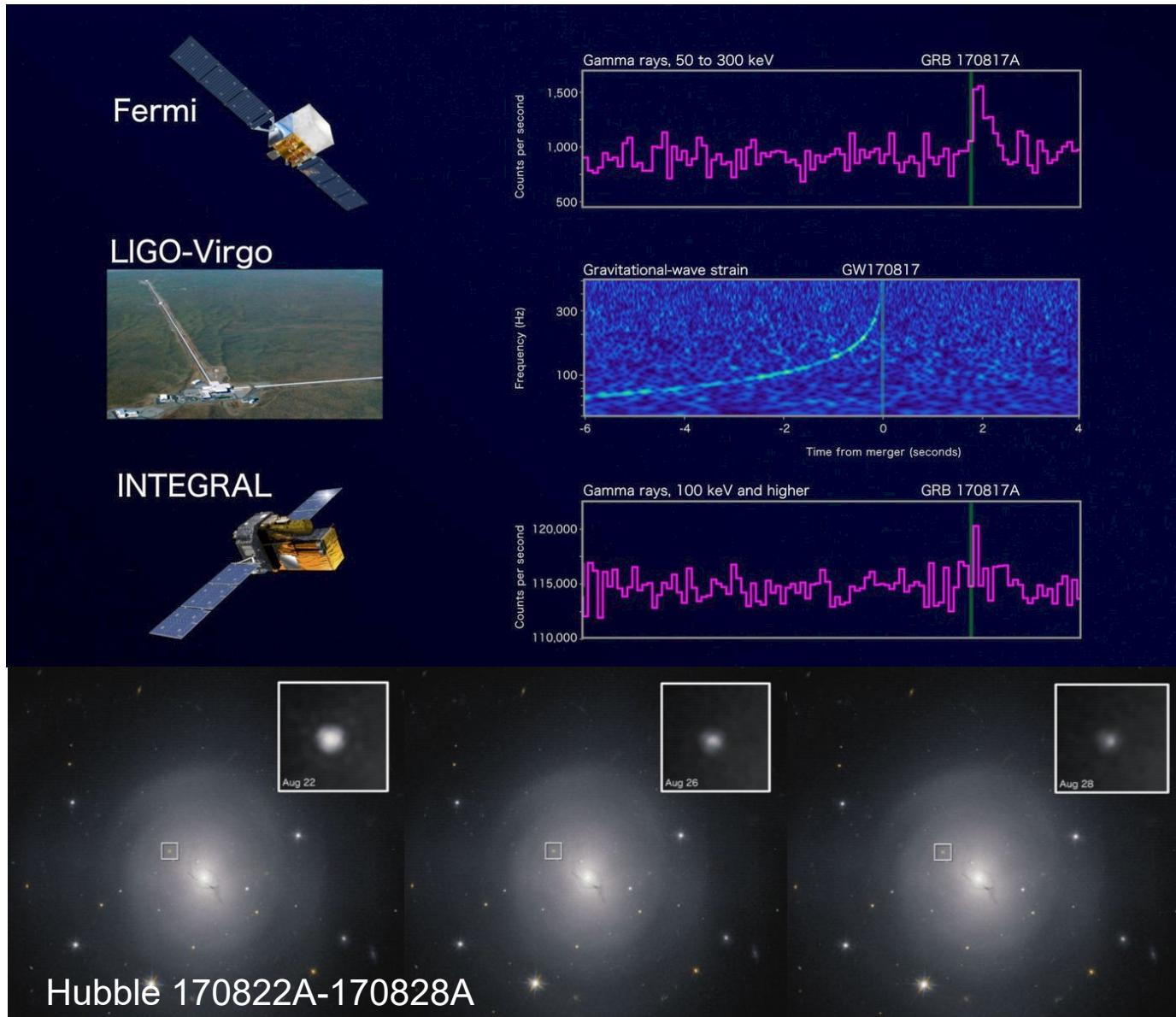


# Neutron star binary collapse animation



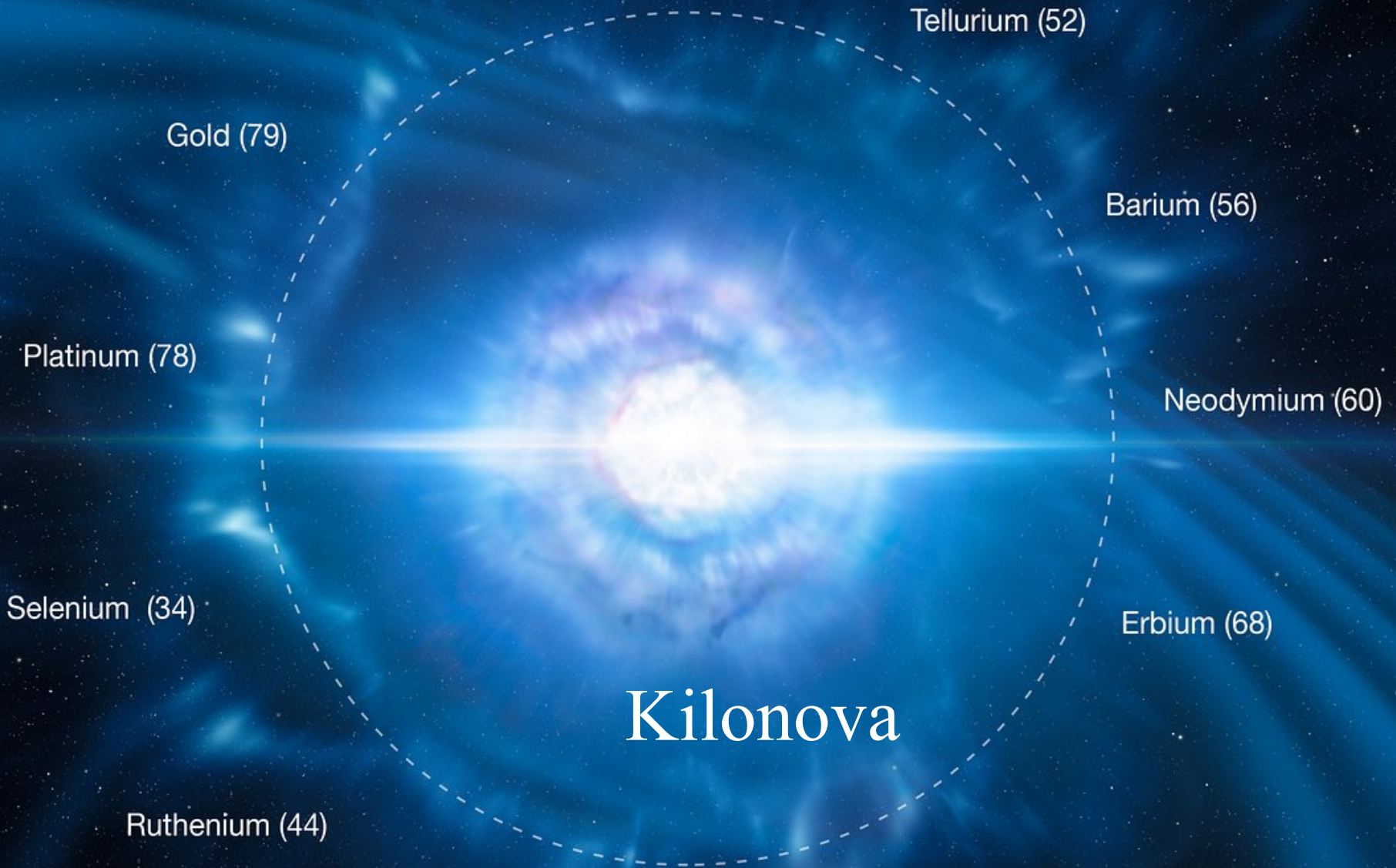


# Multi-messenger data of a neutronstar binary collaps



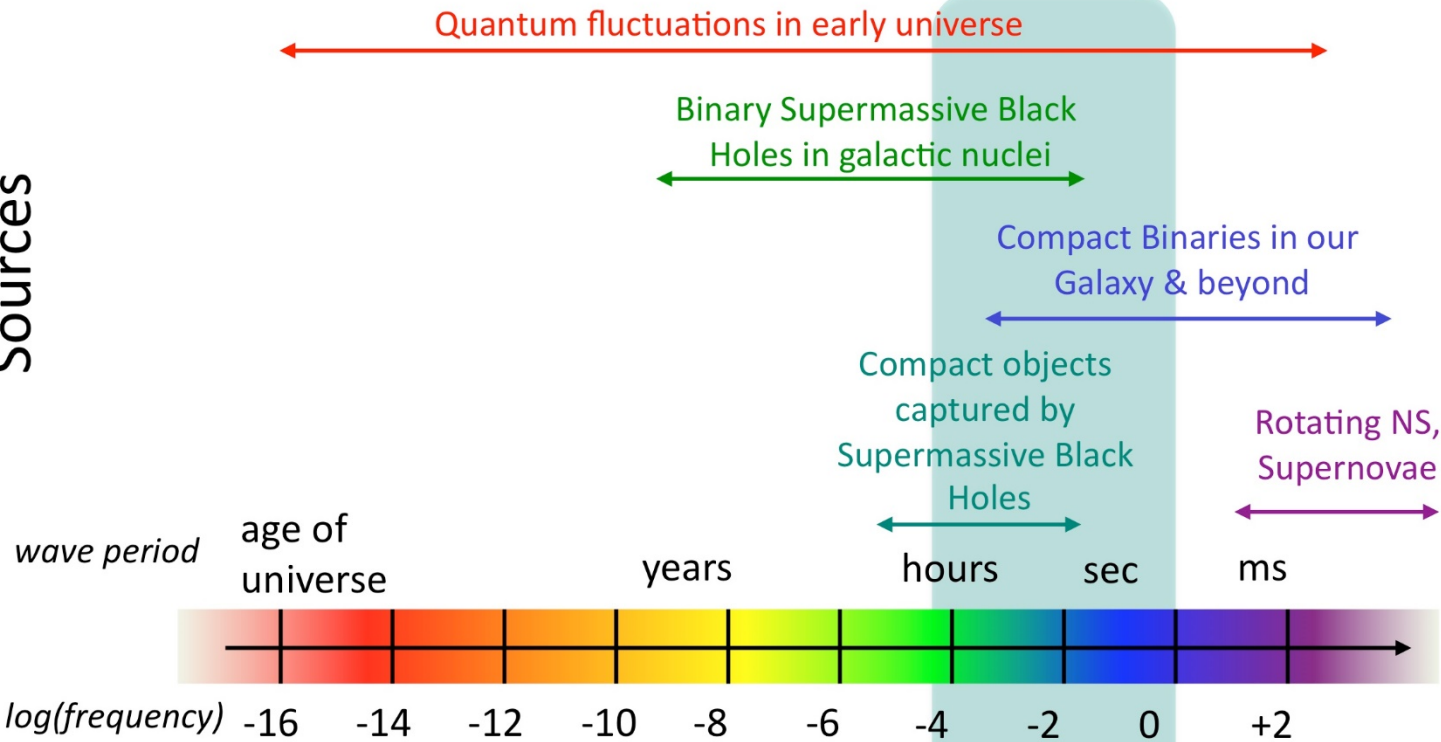


# Productie van zware elementen bij collaps van een neutronendubbelster

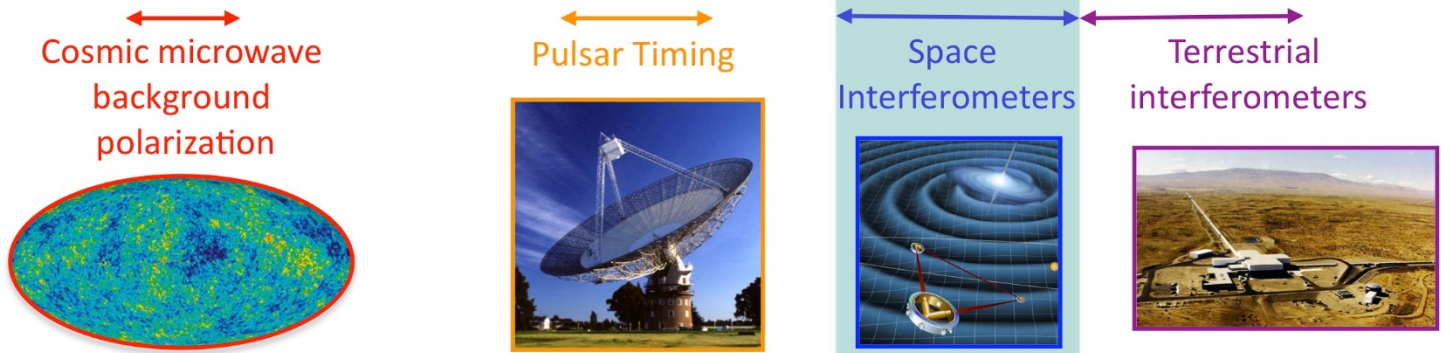


# The Gravitational Wave Spectrum

Sources

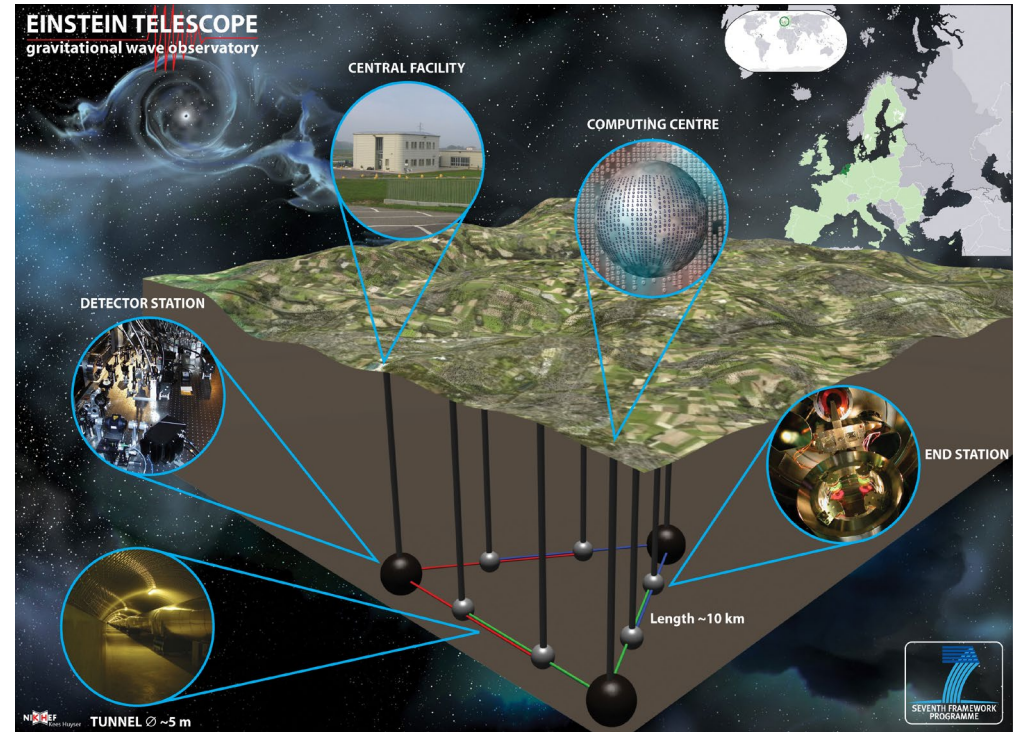
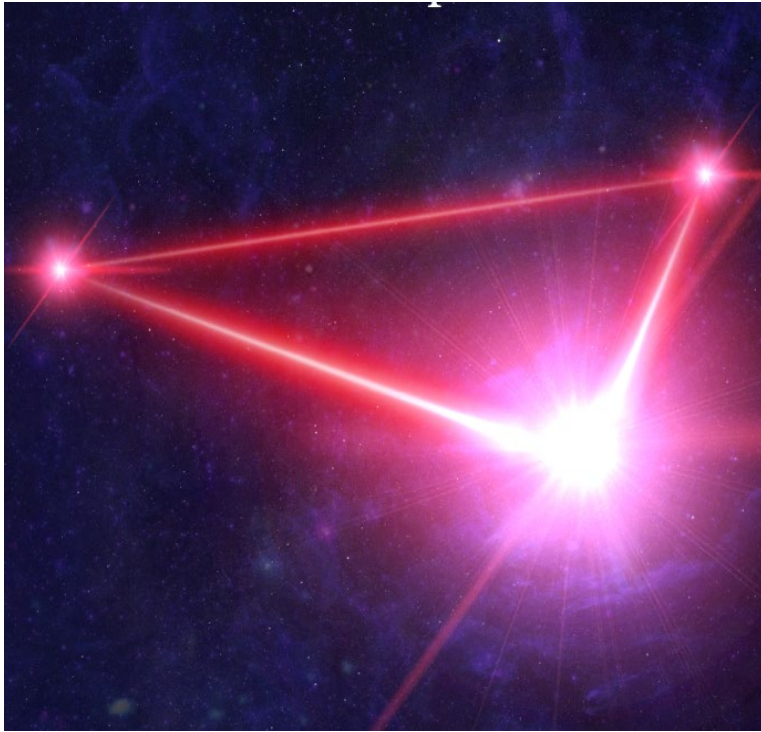


Detectors





# Volgende generatie gravitatiegolftelescopen



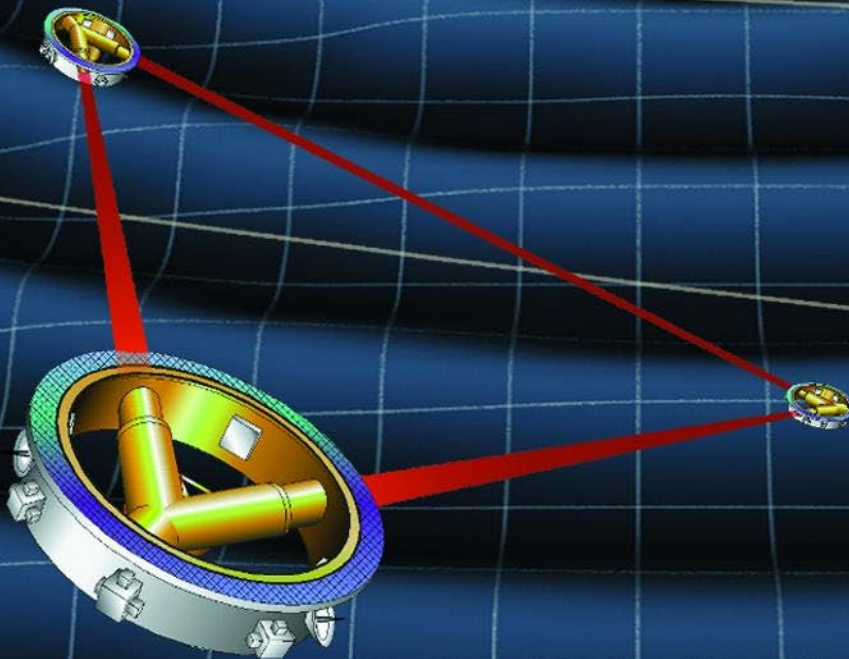
- LISA: laserinterferometer in **heliocentrische baan** (2034).
- Frequenties: **0.1-100 mHz**

- Einstein Telescope (ET) volgend generatie **aardse** detectoren: 2025+ in NL?
- Frequenties: **10-100 Hz**



# Laser Interferometer Space Antenna (LISA)

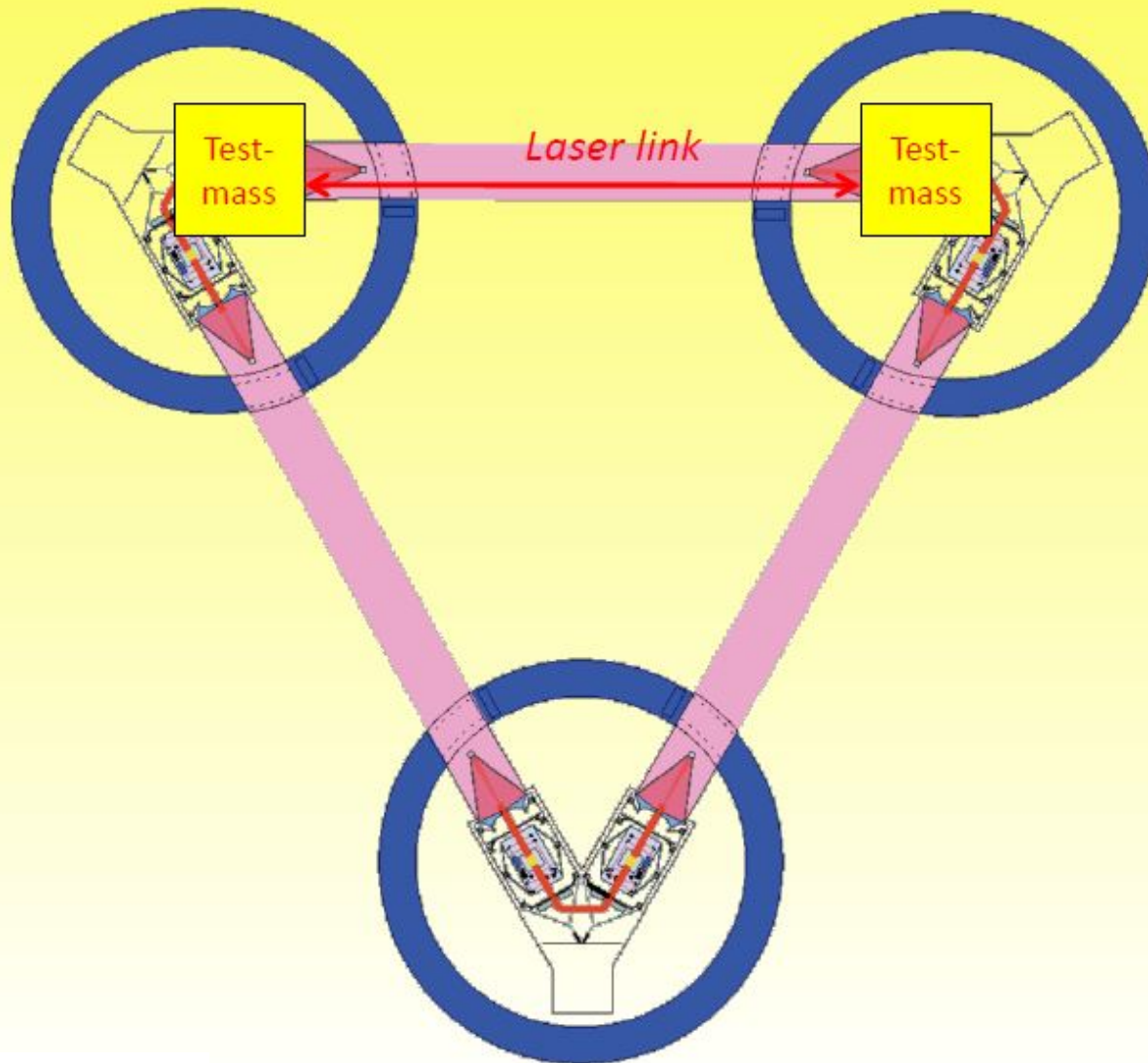
3 satellites  
2.5 million km arms  
50 million km behind Earth



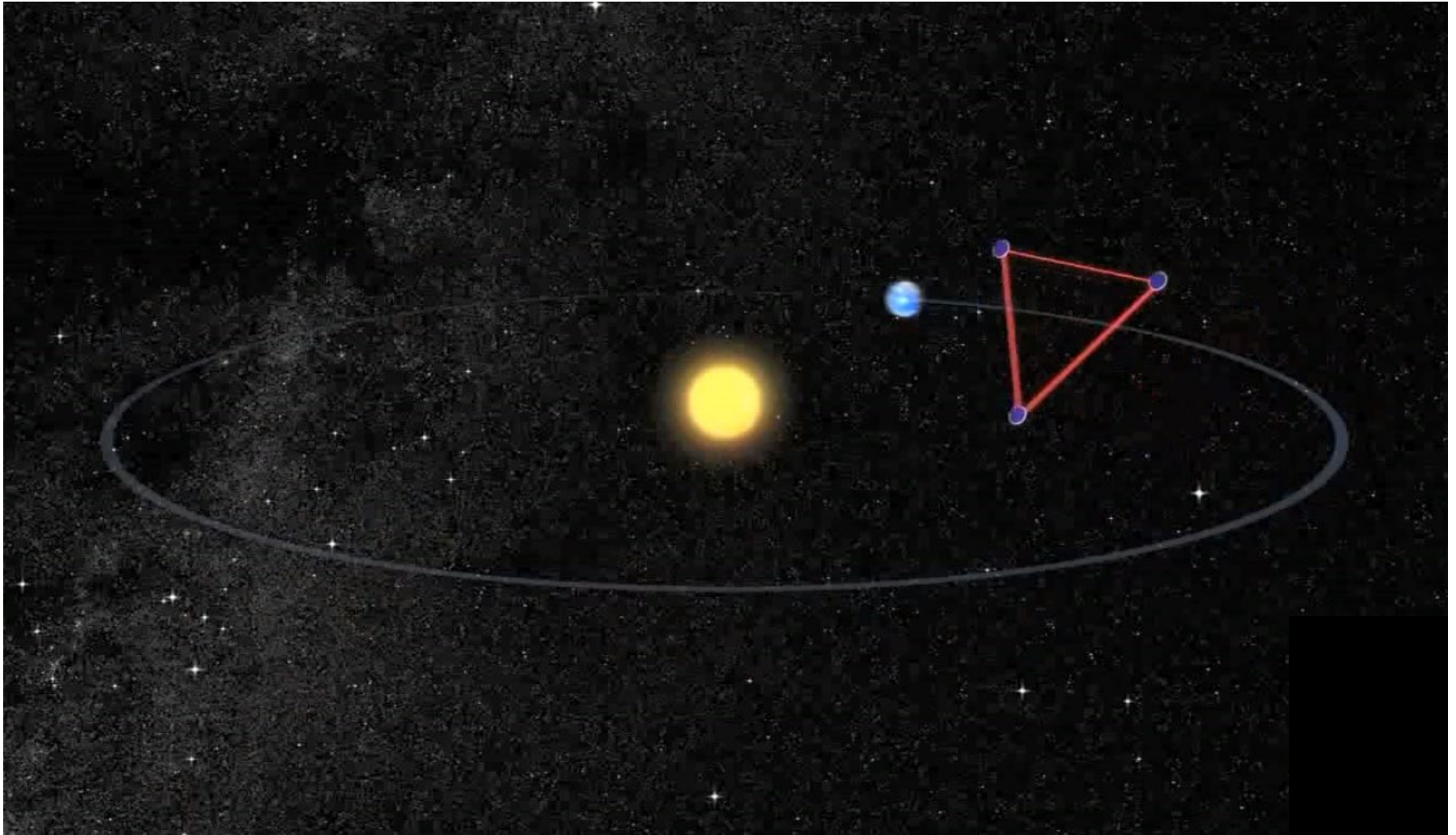


# LISA single arm

2.5 million km arms - two test masses

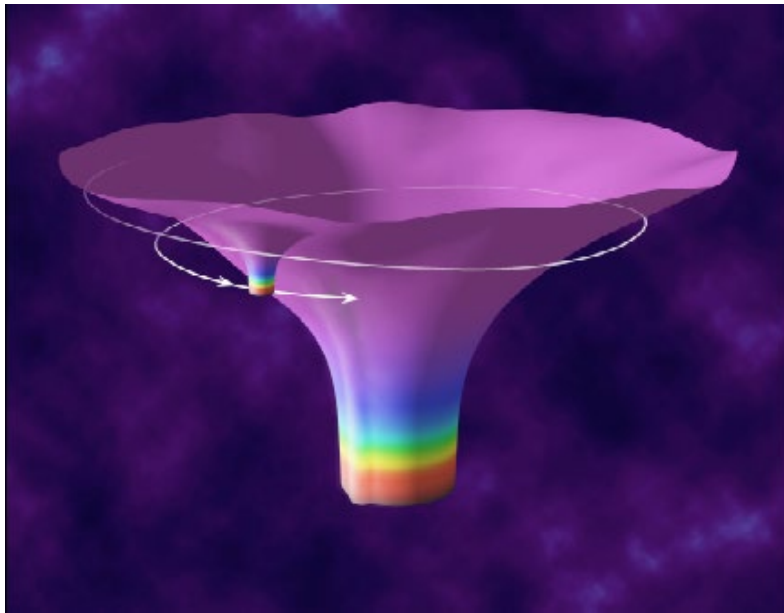
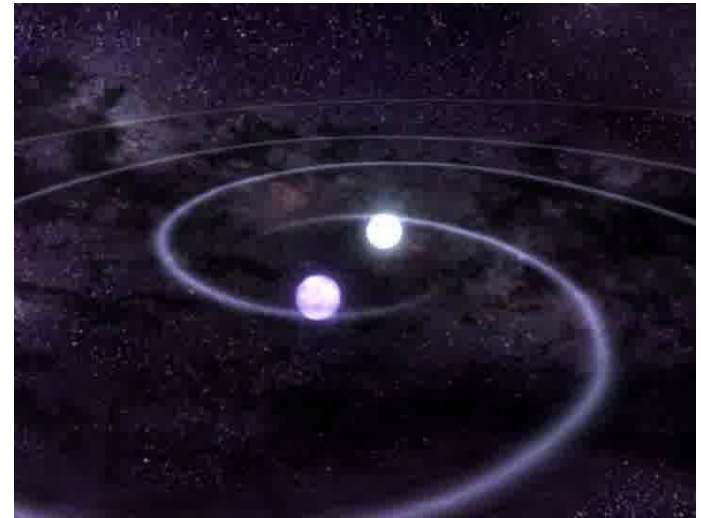


# LISA trailing the earth in heliocentric orbit

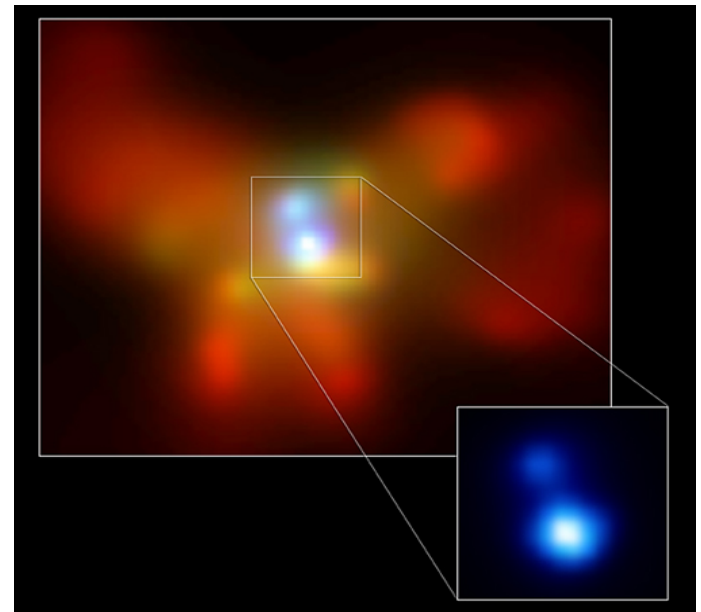


# Bronnen in frequentieband ruimteinterferometers

- Compacte dubbelsterren
- Compacte objecten rond zwarte gaten: **Extreme Mass Ratio Inspirals (EMRI's)**



- Samensmeltende superzwarte zwarte gaten in **galaxy mergers**



# LISA measurement technique and challenges

- The goal of the mission is to detect and observe Gravitational Waves (GW)
- Laser Interferometry used to detect minute distance variations between free flying Test Masses (TM)
- Spacecraft required to “shield” the TM from external perturbations (SRP, drag free control), internal perturbations to be minimised (EMC, mass balance, thermal,...)
- Three arms required to determine origin and polarization (redundancy)
- Measurement broken into three legs:



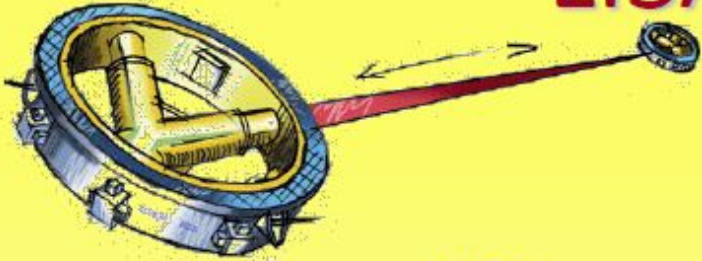
- Expected variations are a few picometers,  $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$ , sub atomic!

$\Delta L/L = h/2 \rightarrow h = \text{karakteristieke 'strain' amplitude van de zwaartekrachtgolf.}$

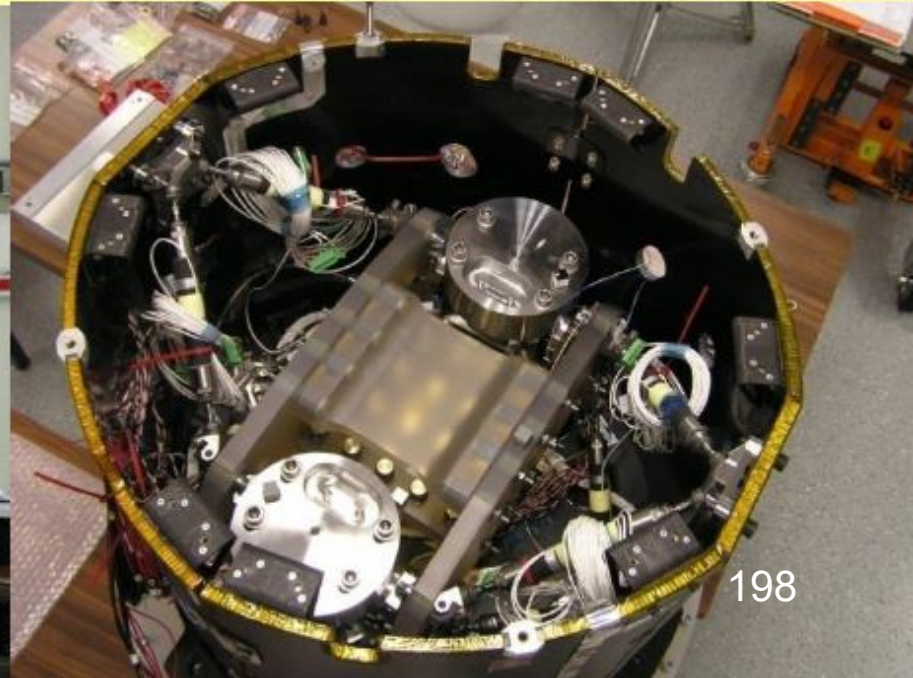
Met  $h = 10^{-21}$  en  $L = 2.5 \times 10^9 \text{ m} \rightarrow \Delta L \approx 1 \text{ picometer!}$



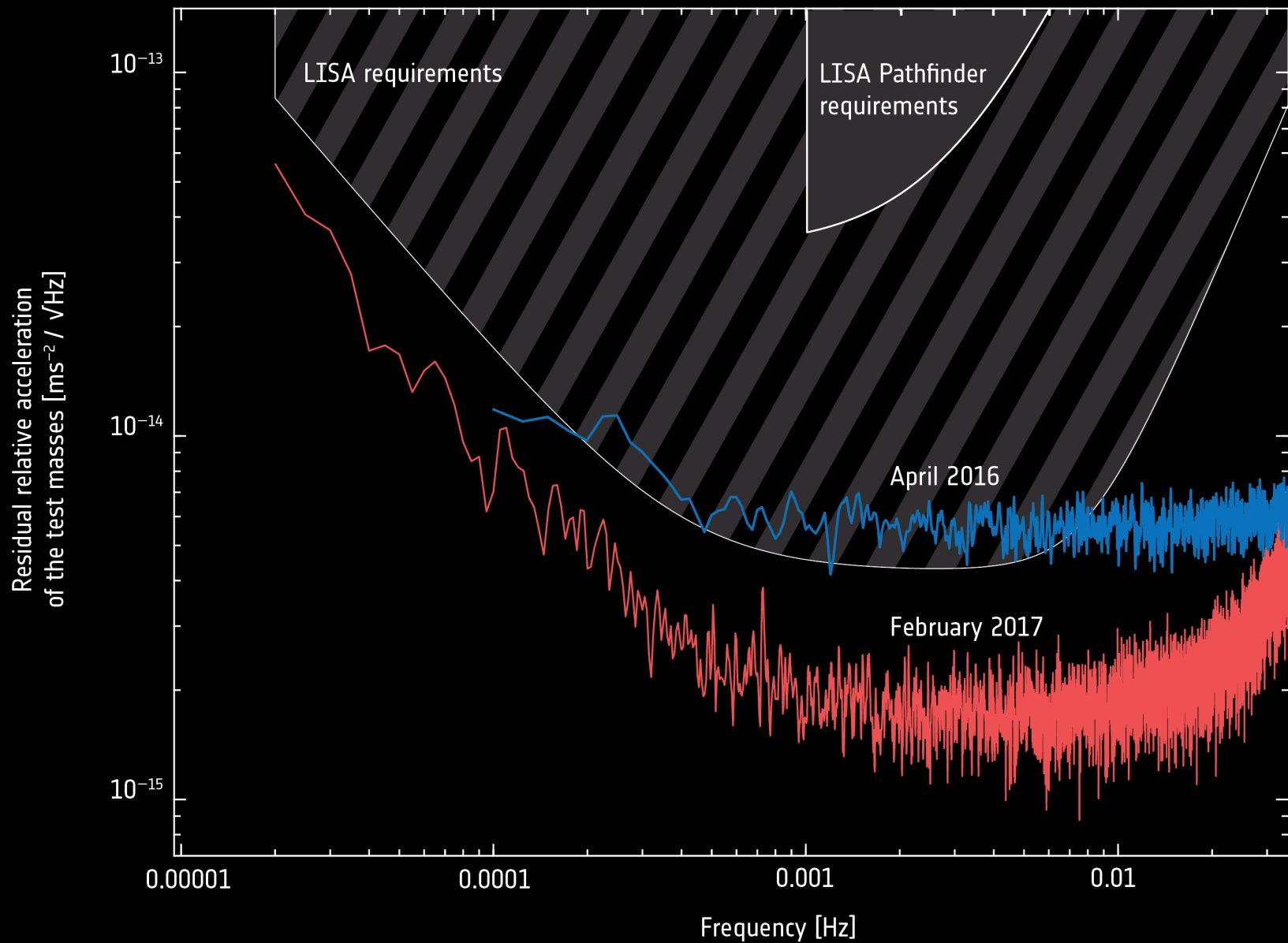
# LISA Pathfinder



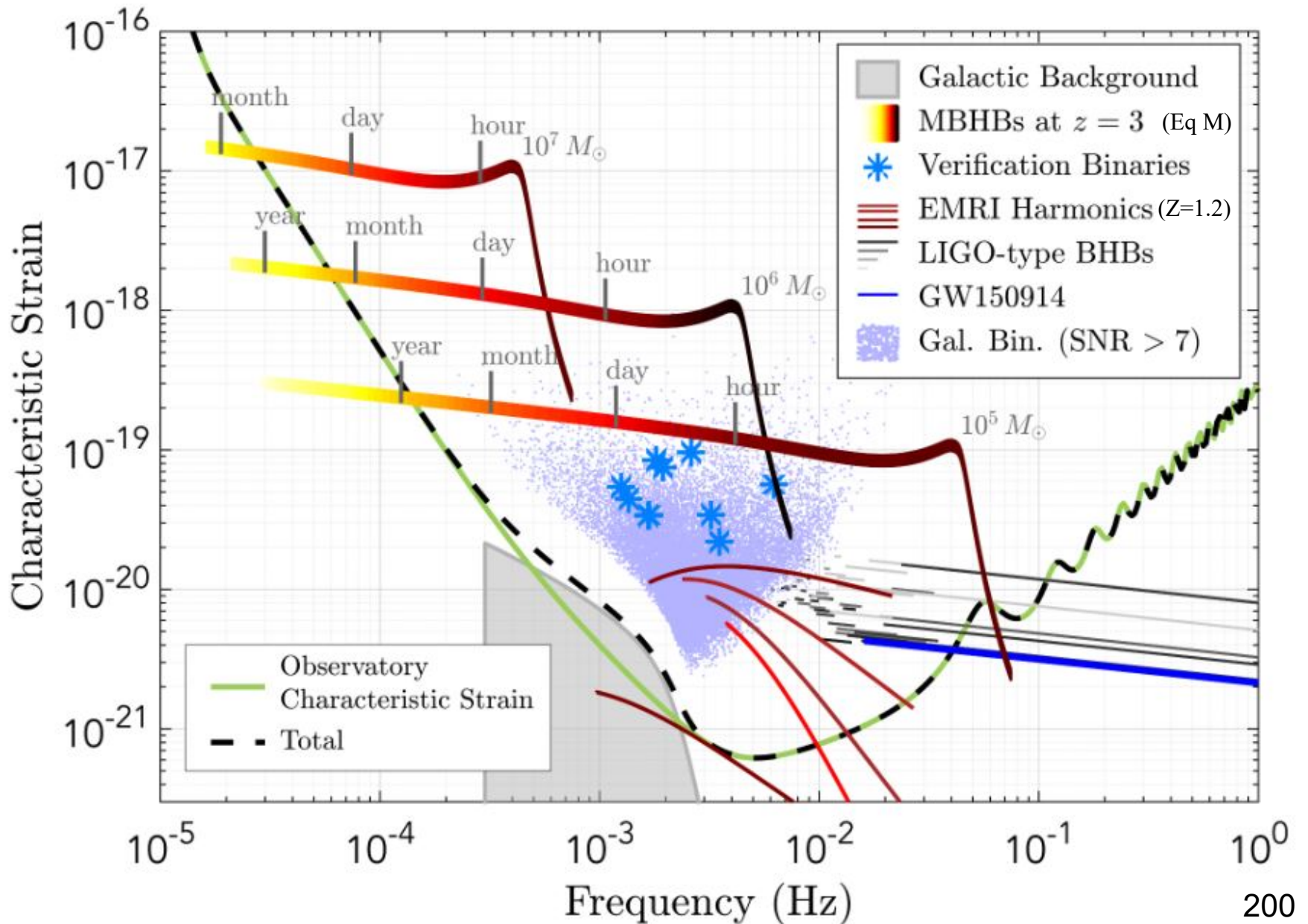
- Take one LISA arm
- Squeeze it into ONE satellite



# Acceleration noise measured in LISA Pathfinder

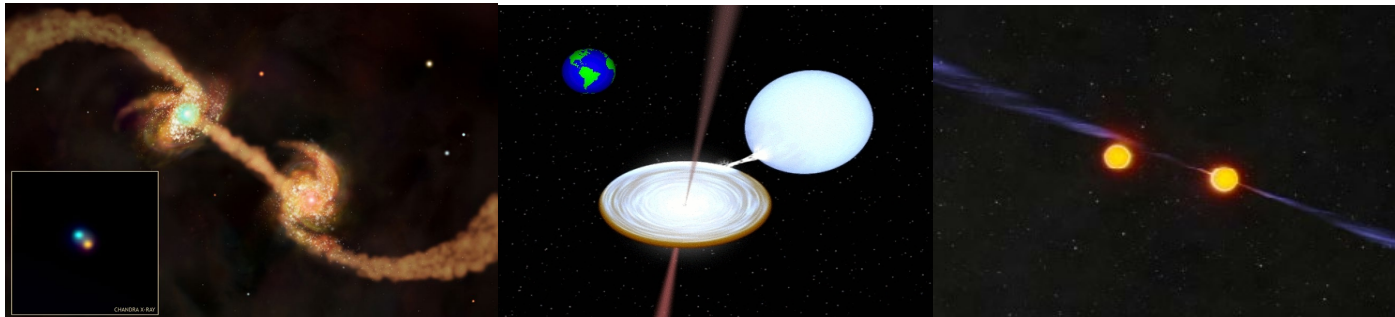
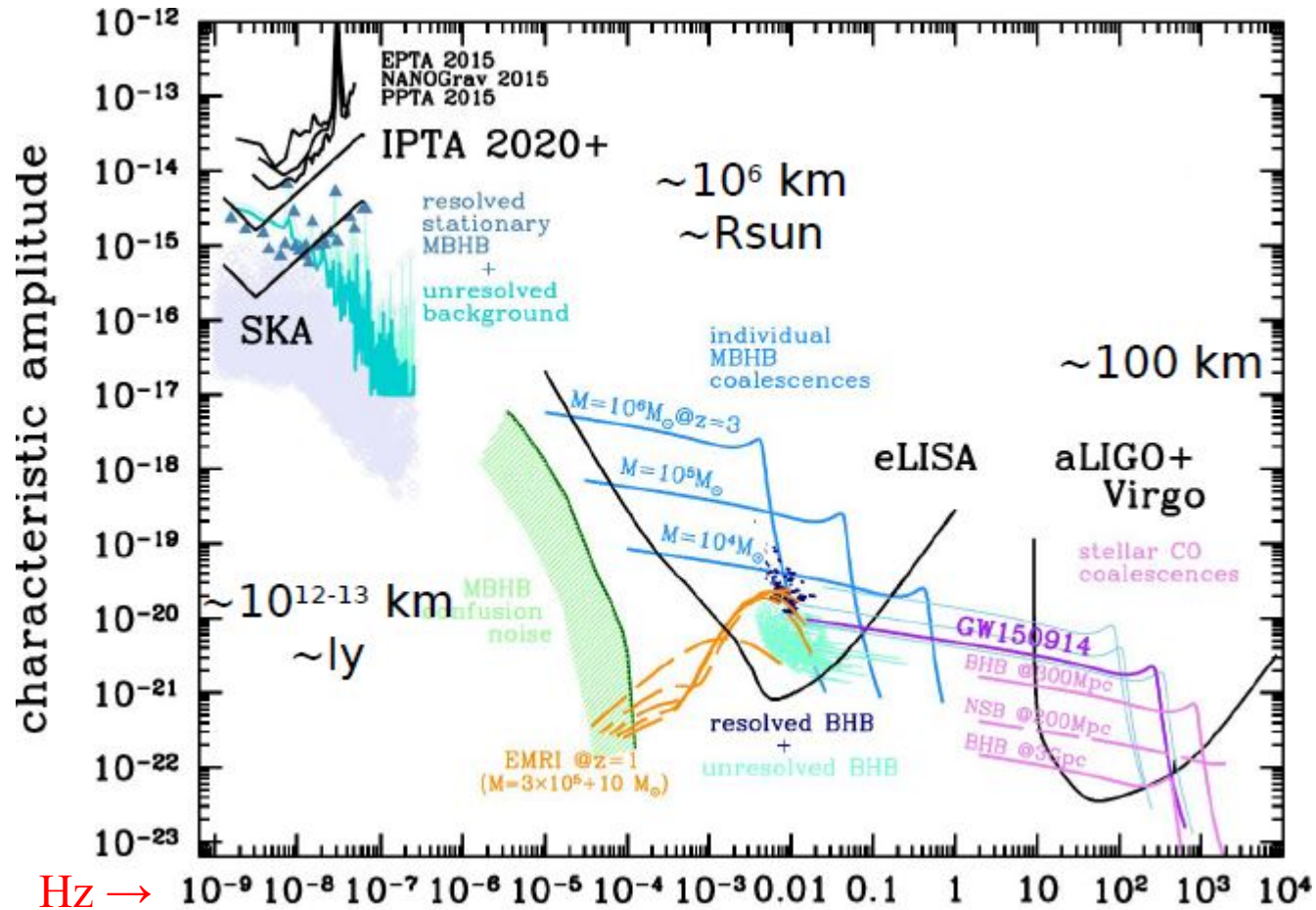


# LISA targeted source populations and sensitivity limits





# Gravitational wave frequency spectrum and source size







The Universe



Expansion and structure evolution



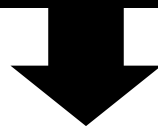




Hete Oerknal



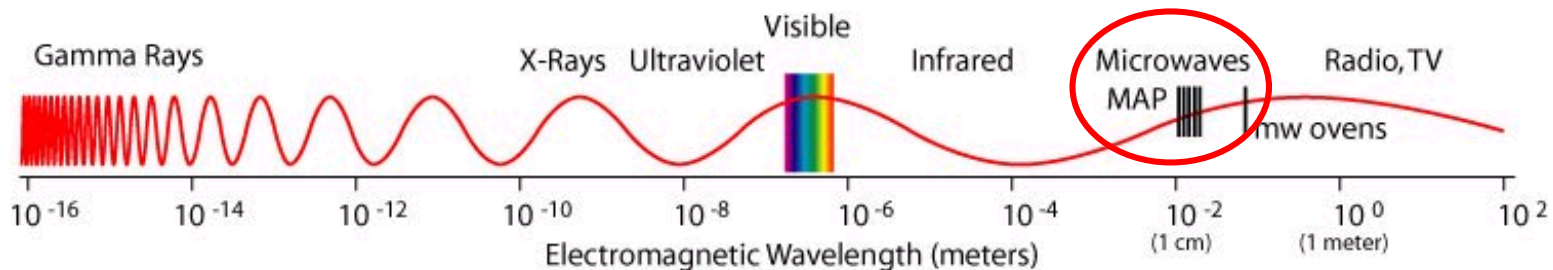
Expansie



Materie koelt



Warmtestraling: nu 2.725 K



## Centrum van de Oerknal?

Het heelal is een 3-dimensionale ruimte die gekromd is in de 4-dimensionale **ruimtetijd**. Dit is juist zoals het aardoppervlak een gekromde 2-dimensionale ruimte is in onze 3-dimensionale ruimte.

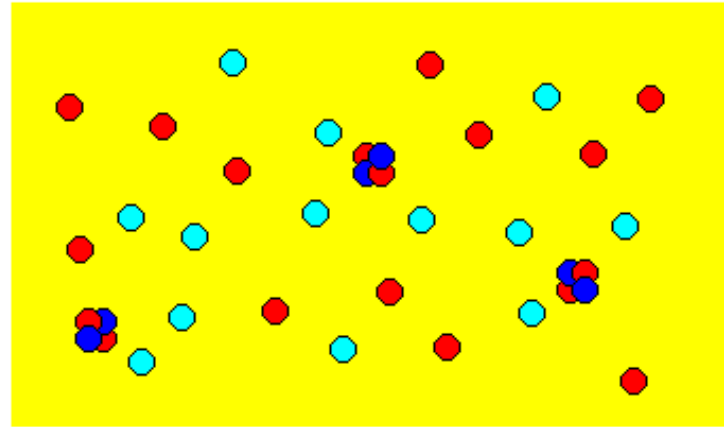
In de 3-dimensionale ruimte van het heelal is er net als op het oppervlak van een bol **geen centrum aan te wijzen!**

Het “centrum” ligt buiten de 3-dimensionale ruimte, in de 4e dimensie: Het “centrum” is het **moment van de Oerknal**.

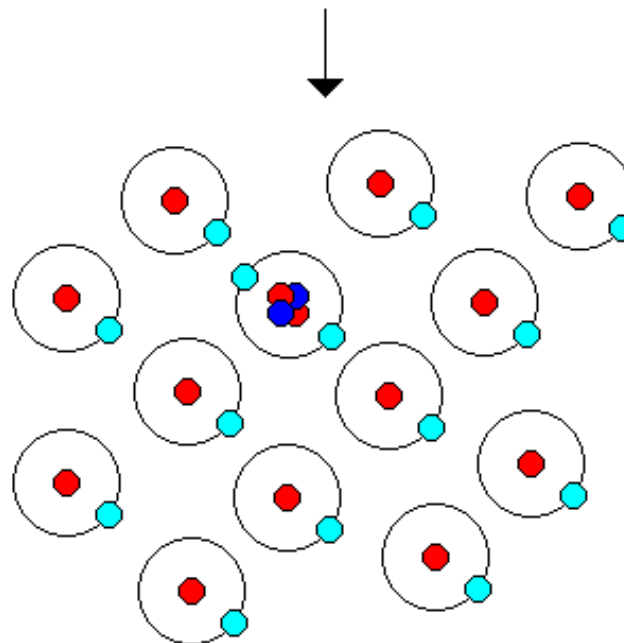
## Recombination

As the Universe expands and cools, protons and electrons combine to form hydrogen (the most abundant element). And helium nuclei combine with electrons to form helium atoms. This process is called recombination.

Als de temperatuur in het uitdijende heelal gedaald is tot 3000 K, gaan waterstof en helium over van geïoniseerde naar neutrale atomen: de 'recombinatie'. Op dat moment werd het gehele heelal **doorzichtig** voor EM-straling.



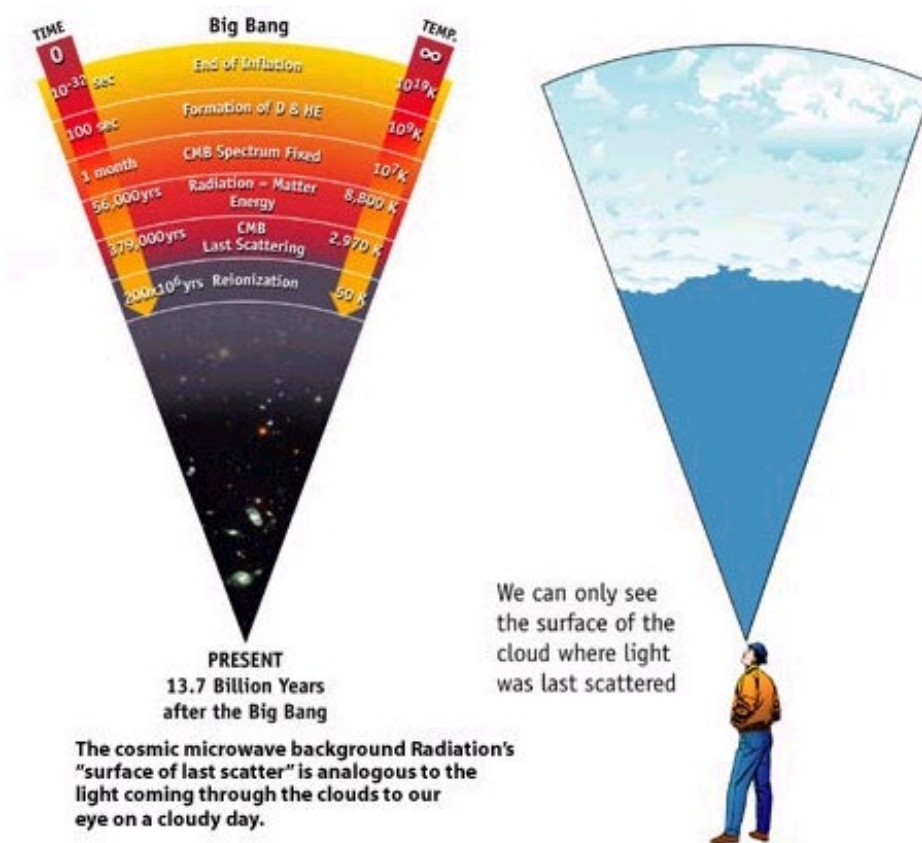
- electron
- proton
- helium nuclei



- hydrogen atom
- helium atom

# “Oppervlak laatste verstrooiing”

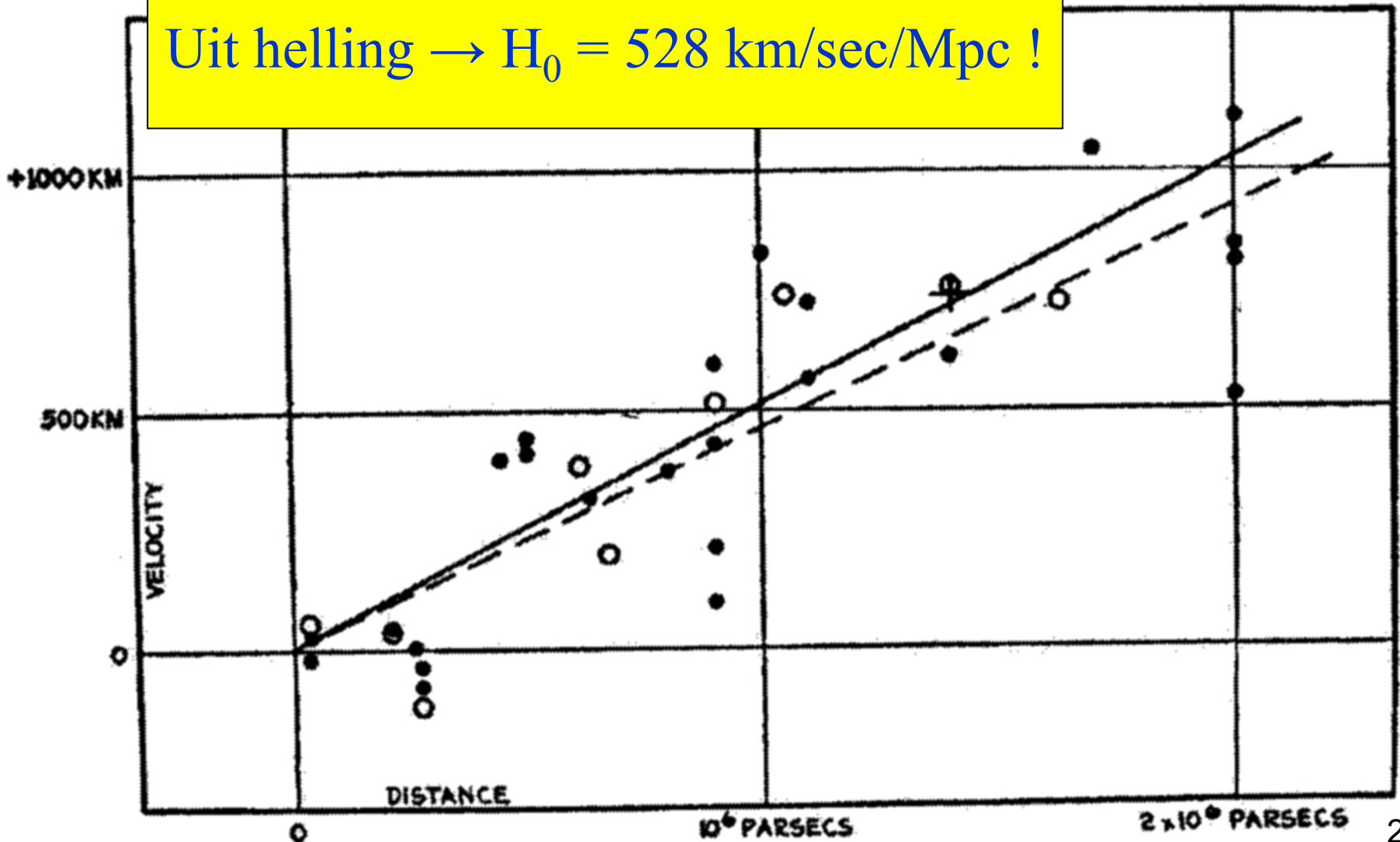
- Ca 370.000 jaar na de OERKNAL recombinitie naar atomen → geen verstrooiing meer → **heelal doorzichtig voor microgolfstraling**
- Meten van de temperatuursverdeling over de hemel van de microgolfstraling is de **kartering van het “oppervlak” waarin de laatste verstrooiing plaatsvond!**





Wet van Hubble (1929, waarneming):  $v_0 = H_0 \cdot d_0$

Uit helling  $\rightarrow H_0 = 528 \text{ km/sec/Mpc} !$



Wet van Hubble :  $v(t) = H(t).d(t) \rightarrow$  nu:  $v_0 = H_0.d_0$

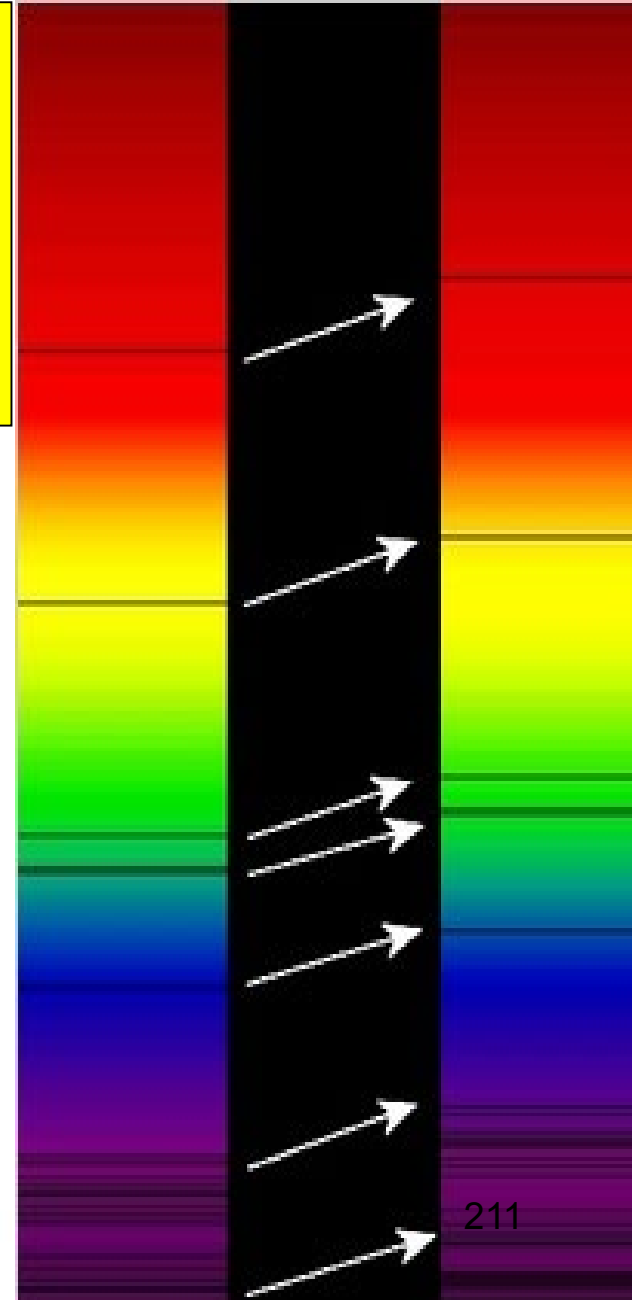
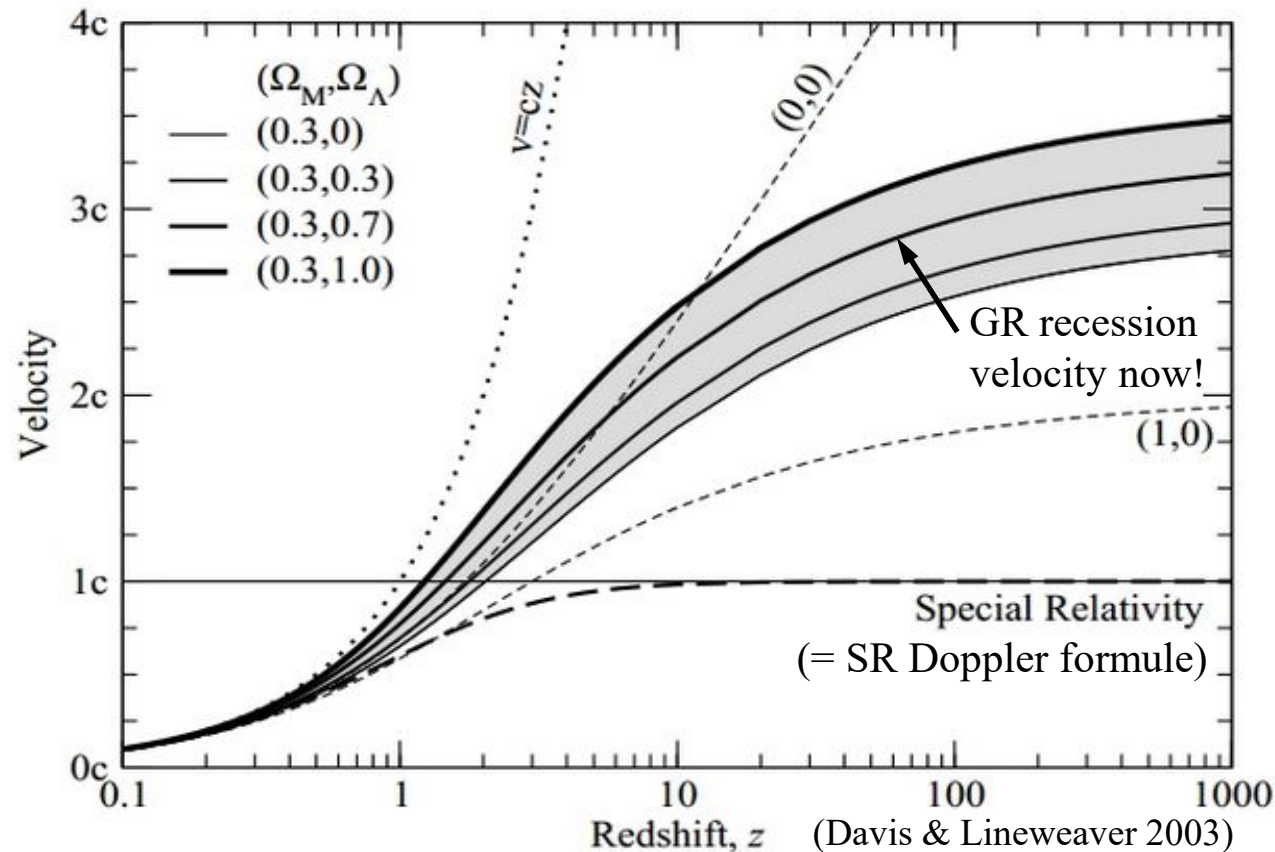
## Kosmologische roodverschuiving (z)

$$z = (\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{emit}}) / \lambda_{\text{emit}}$$

$$1+z = \lambda_{\text{obs}} / \lambda_{\text{emit}} = a(t_{\text{obs}}) / a(t_{\text{emit}})$$

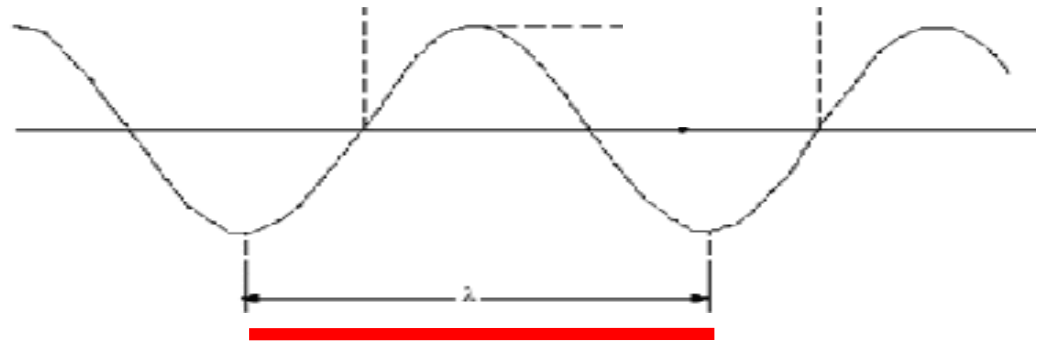
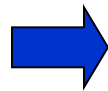
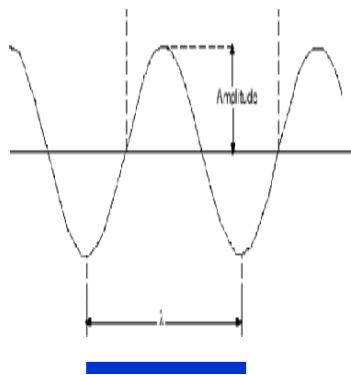
$v = f(z)$  is **niet** de speciaal-relativistische Doppler formule!

Alleen voor  $v \ll c \rightarrow z = v/c$



# Ruimte zet uit: lichtgolf opgerekt, dus: roder

Roodverschuiving  $z$ : gemeten golflengte  $(1+z)$  maal zo groot als de uitgezonden golflengte:



Oorspronkelijke golflengte

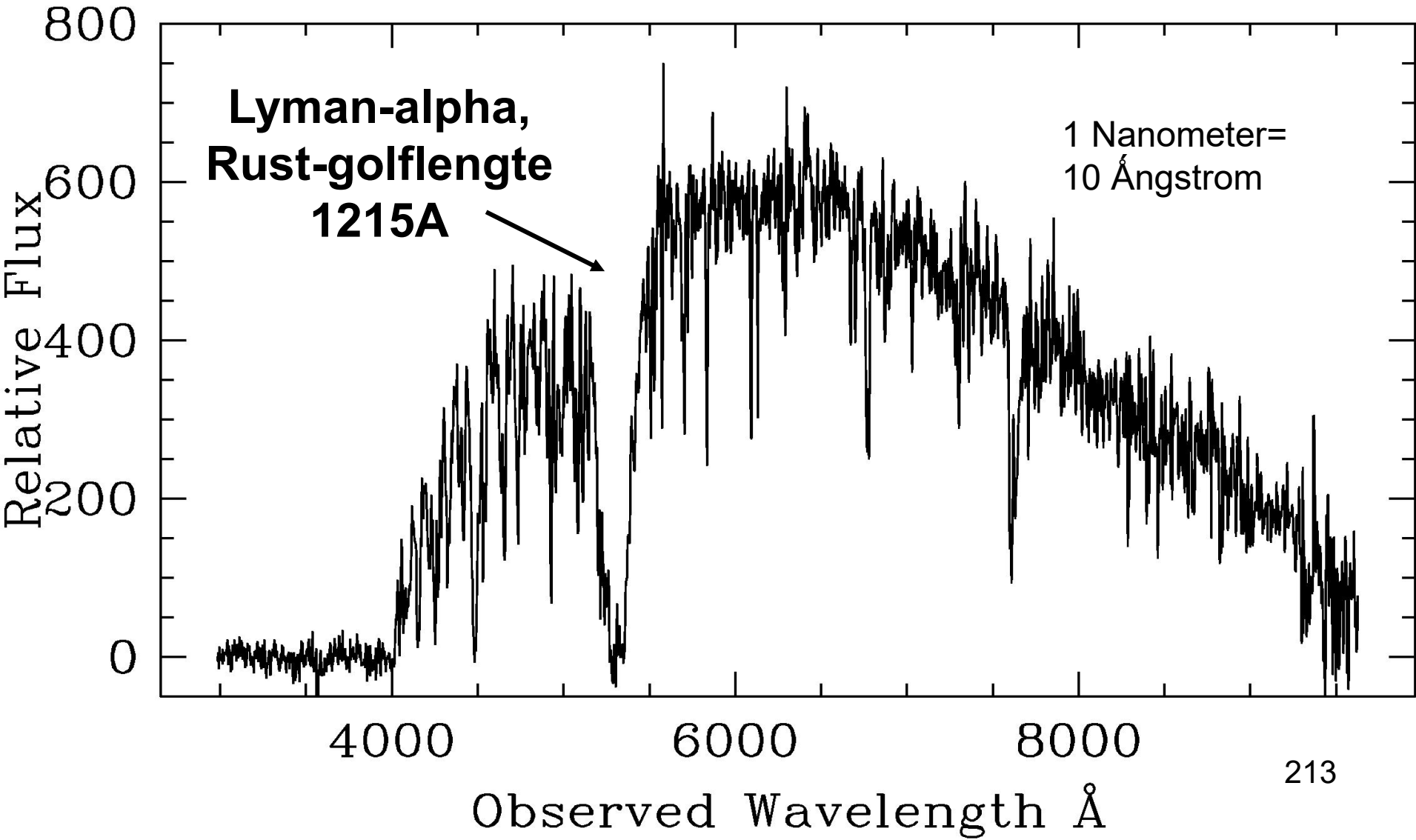
Gemeten golflengte

Bij  $z=1$ : we zien het heelal van ca 8 miljard jaar geleden. (heelal 5.8 miljard jaar oud en in lengtemaat 2 maal zo klein als nu; in volume 8 maal kleiner).

Bij  $z=4.5$  : ca 12.5 miljard jaar geleden (heelal 1.3 miljard jaar oud).

Verre Sterrenstelsels: Gammaflits van 23 Maart 2003:  
roodverschuiving 3.28: 11.7 miljard jaar geleden

*ESO- Very Large Telescope*





# Grootste waargenomen roodverschuivingen:

$z = 8$  en  $9$  voor twee Gammaflitsen

Deze flitsen worden optisch soms korte tijd een miljoen keer helderder dan een supernova!

Zij werden uitgezonden toen het heelal jonger was dan 0,6 miljard jaar !

Het heelal was toen 9 (10) keer kleiner dan nu in lineaire maat, en 729 (1000) maal kleiner in volume!

# Gedrag van gebonden systemen in de "Hubble flow"

Gebonden systemen zijn een maat voor absolute afmeting en behouden dezelfde 'lengte' zolang de Hubble expansiesnelheid veel kleiner is dan de ontsnappingsnelheid van het gebonden systeem over vergelijkbare afmetingen !!

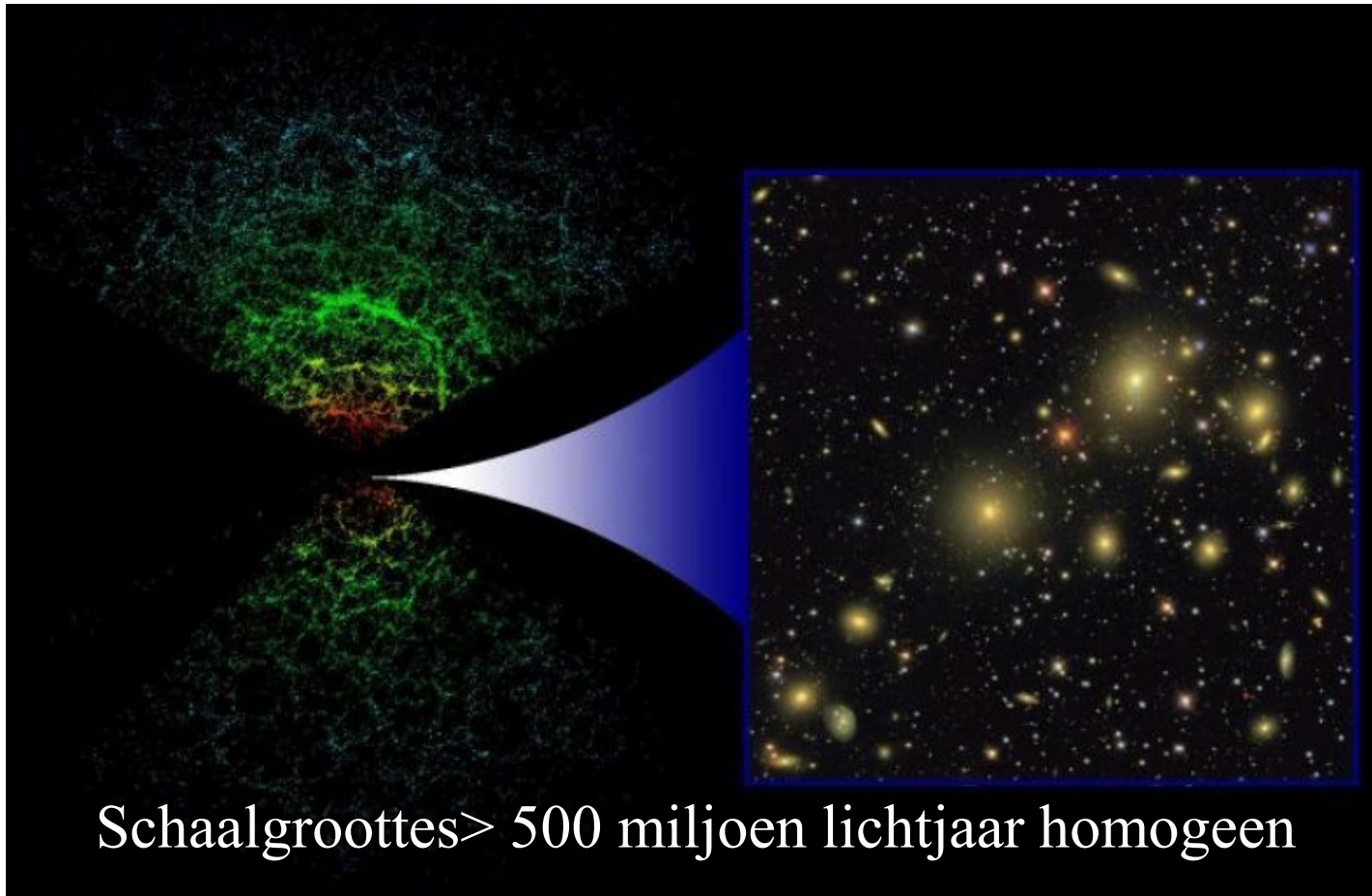
- **Mens:** van der Waals **moleculaire krachten** veel groter dan de Hubble expansie over de menselijke maat
- **Meetlat:** ditto bij beschouwing van de **atomaire kristalstructuur**

Op kosmische schaal met de **zwaartekracht als bindende factor** ( $H_0 = 70,8 \text{ km/sec/Mpc}$ )

	<b>R</b>	<b><math>v_{\text{esc}} = (2GM/R)^{1/2}</math></b>	<b><math>v_{\text{exp}} = H_0 R</math></b>
• Aarde	6370 km	11,2 km/sec	$1,4 \times 10^{-14} \text{ km/sec}$
• Zonnestelsel	$6 \times 10^9 \text{ km}$	6,7 km/sec	$1,3 \times 10^{-8} \text{ km/sec}$
• Melkweg	$5 \times 10^4 \text{ lichtjaar}$	340 km/sec	1,0 km/sec
• Supercluster	$5 \times 10^7 \text{ lichtjaar}$	760 km/sec	1020 km/sec

# Het kosmologisch principe

Het kosmologisch principe is de aanname in de kosmologie dat het **heelal op grote schaal** er in alle richtingen hetzelfde uitziet (**isotroop**) en dat het op iedere plaats (tijd) dezelfde eigenschappen bezit (**homogeen**).



# Massa-Energie equivalentie

- **Concept:** elke massa heeft een geassocieerde energie en vice versa

- **Speciale relativiteitstheorie** geeft de equivalentie formule:

$$E = mc^2$$

$m = m_0$  = rustmassa  $\rightarrow E = E_0$  = rustenergie

$m$  = relativistische massa  $\rightarrow E$  = totale energie

$m = m_0(1-v^2/c^2)^{-1/2} = \gamma m_0$      $\gamma$  = Lorentz factor

- **massa 1 gram:** 25GW.uur, 22 kiloton TNT, 21 Teracalorieën
- **Einstein-SEP:** alle vormen van massa en energie produceren op dezelfde wijze zwaartekracht



# ART: de spannings-energie tensor

- De veldvergelijking van Einstein:

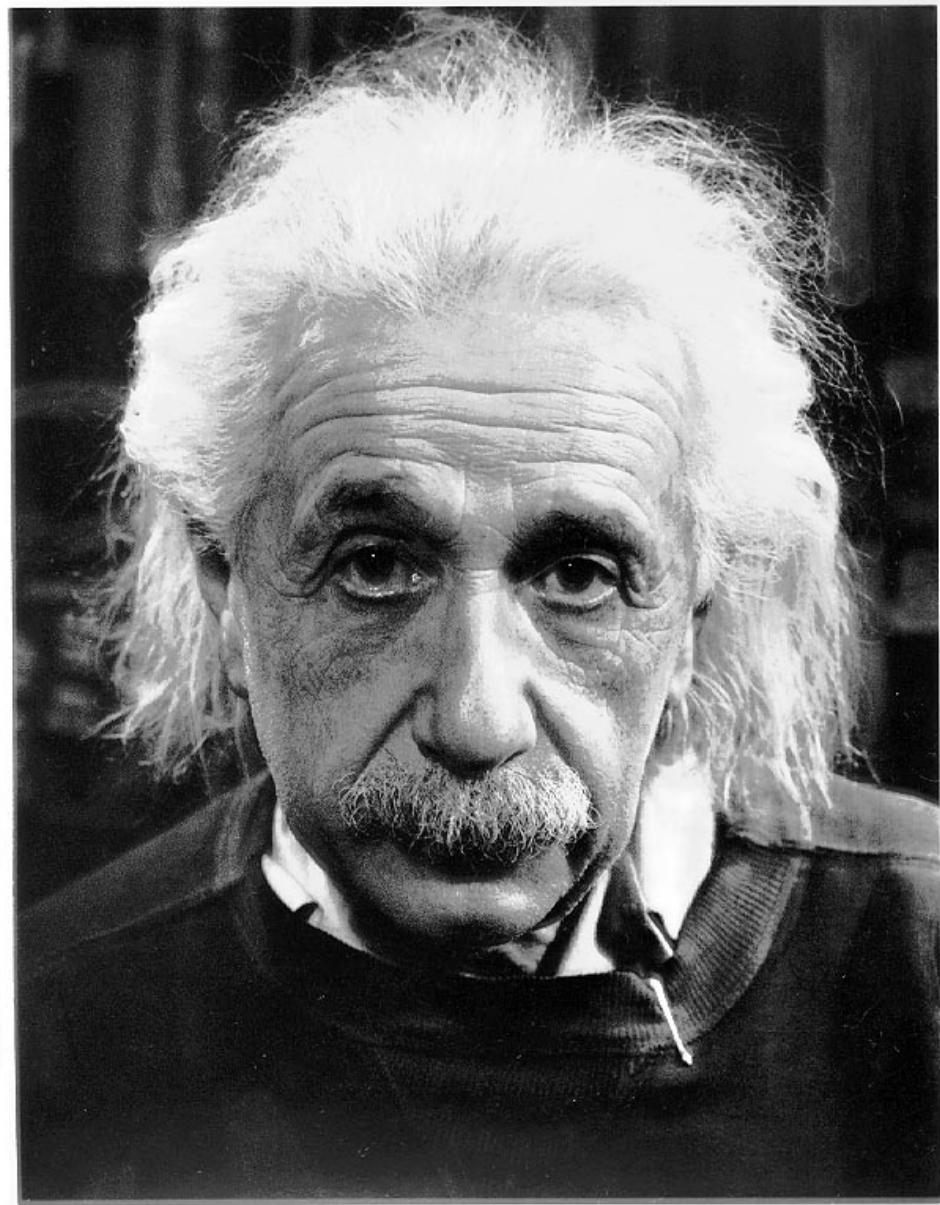
$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = (8\pi G/c^4) T_{\mu\nu}, \quad (\mu, \nu = 0 \rightarrow 3)$$

- De uitdijng van het heelal wordt in de ART bepaald door de **spannings-energie tensor**  $T_{\mu\nu}$  die de energiedichtheid en de impuls-flux (= druk) beschrijft in de ruimtetijd. Inertiaal systeem in **ART kent geen "energie" maar alleen "energie-impuls"**, druk is impulstransport.
- De geometrie van het ruimtetijd continuum wordt bepaald door de totale massa-energieinhoud van dat continuum.
- De spannings-energie tensor is de **bron van het zwaartekrachtsveld** in de veldvergelijking van de ART net als massa de bron van de zwaartekracht is volgens Newton.

‘Einstein’s  
biggest blunder’  
was **a golden idea**:

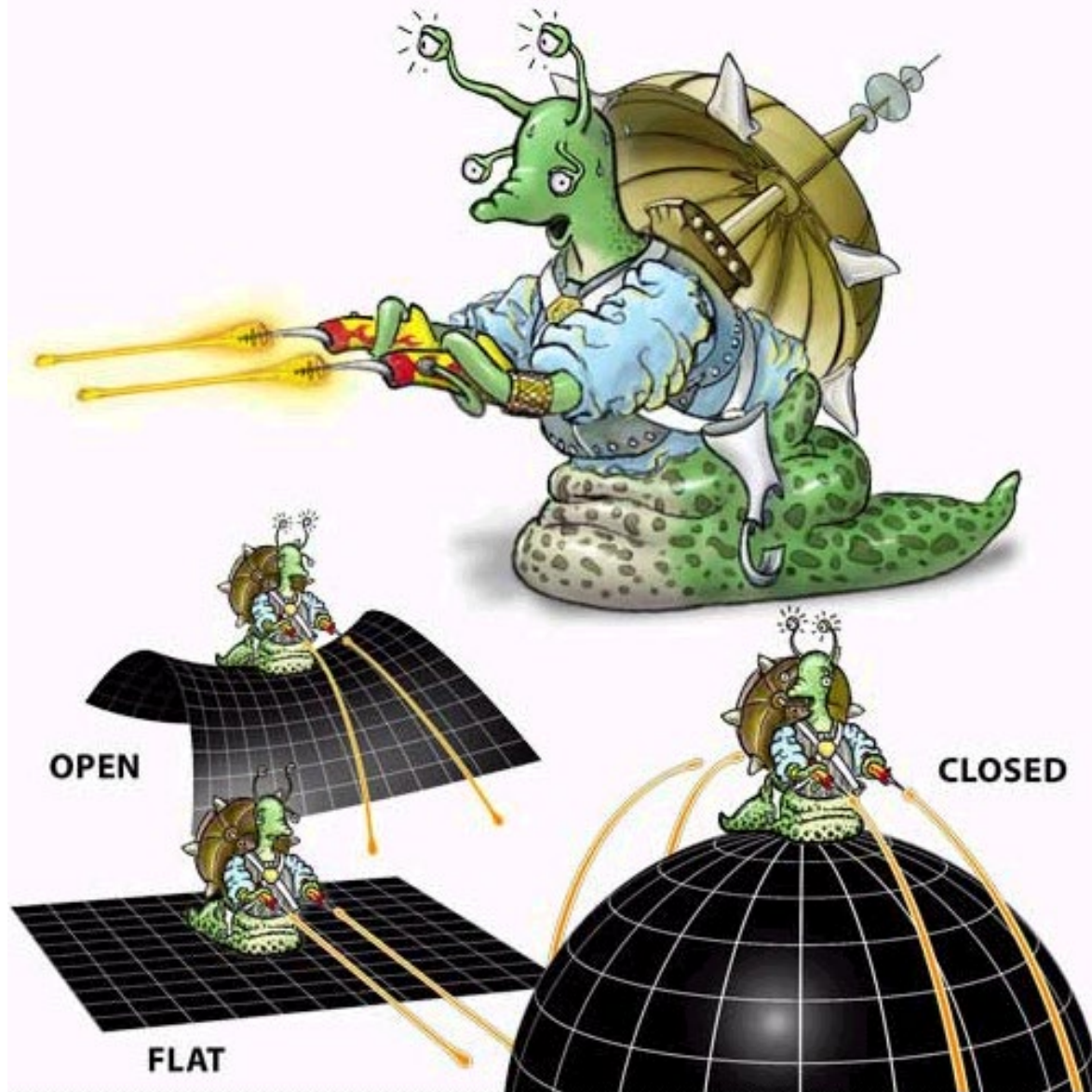
The part of the  
mass/energy of the  
Universe due to  
**lambda is ca 70 %**

The nature of this  
energy is still a  
**complete mystery**  
**(“vacuum energy”)**



"Things should be made as simple as possible,  
but not any simpler."  
- Albert Einstein

# Geometrie van het heelal



# Het Friedmann model voor de schaling van een uitdijend isotroop en homogeen heelal

$$(\dot{a}/a)^2 = (8\pi G\rho)/3 + (\Lambda c^2)/3 - (kc^2)/a^2$$

**a** = a(t): schaalfactor volgens  $d(t) = a(t).d_0$  ,  $a(t_0) = 1$  ( $t_0 = nu$ )

**G** = gravitaieconstante

**$\rho$**  = materiedichtheid

**$\Lambda$**  = kosmologische constante uit de ART veldvergelijking

**k** = krommingsparameter,  $< 0$  (hyp),  $0$  (vlak),  $> 0$  (bol)

**c** = lichtsnelheid, indien nodig voor dimensionering naar  $sec^{-2}$

**Wet van Hubble:**  $\dot{a}(t)d_0 = H(t).a(t)d_0 \rightarrow H(t) = \dot{a}(t)/a(t)$

**H(t) is constant op een vast tijdstip in de ruimte, niet constant in de tijd!**



# De gemiddelde massa- en energiedichtheid

Wordt gegeven door de “dichtheidsparameter”:

$$\Omega = \Omega_m + \Omega_\Lambda = (\rho_m/\rho_{\text{crit}}) + (\rho_\Lambda/\rho_{\text{crit}})$$

$\rho_m$  = gemiddelde massadichtheid ( ook alle donkere materie)

$\rho_\Lambda$  = maat ( in  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) voor dichtheid donkere energie  
(kosmologische constante?)

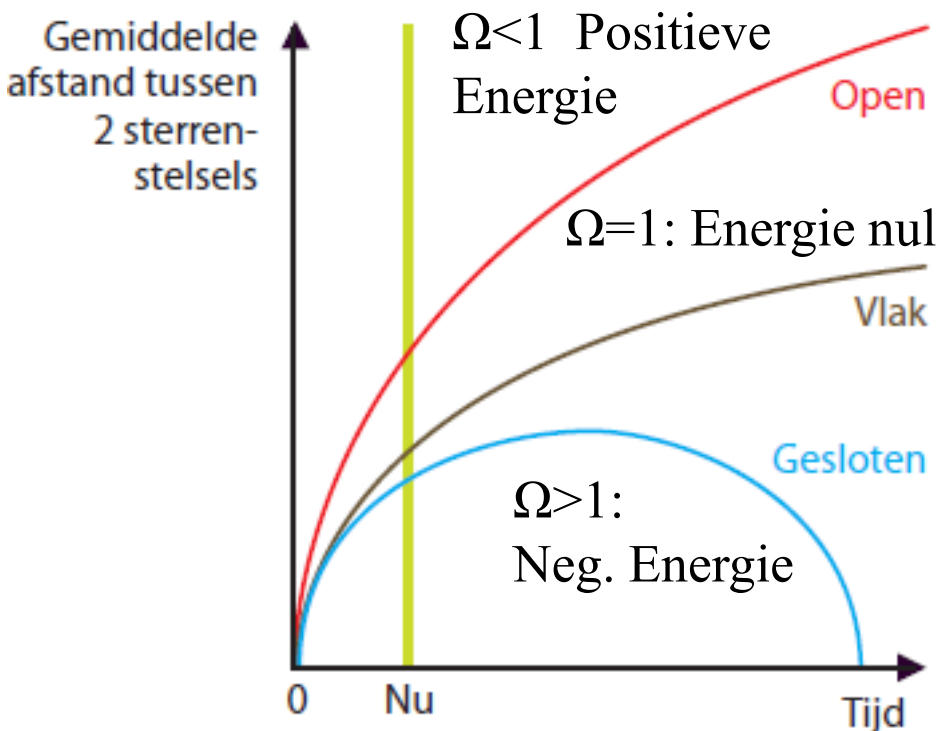
$\rho_{\text{crit}}$  = kritische dichtheid [ $3H_0^2/(8\pi G)$ ]  $\rightarrow$  Euclidisch heelal  
( $5^+$  H-atomen/ $\text{m}^3$ , beste lab-vacuum  $10^{15}$  atomen/ $\text{m}^3$ )

Indien  $\Omega = 1 \rightarrow$  vlakke (euclidische) ruimte

Hubble (1929) dacht dat de waargenomen uitdijing van het heelal het model van de Sitter (1917) met Einstein's lambda bevestigde.

Echter, in 1922/23 vond Friedmann de algemene oplossingen voor de mogelijke evolutie van het heelal, zonder lambda. Afhankelijk van de "dichtheid" van de materie en energie kan het heelal zijn: "open" (lage dichtheid), gesloten (hoge dichtheid) en "vlak".

De werkelijke toestand van het heelal moet uit metingen bepaald worden!!



Alexander Friedmann  
(1888-1925)

# Oplossing Friedmann vergelijking zonder $\Lambda$ -term

$k = 0$ : vlak heelal, totale energie  $E = T + V = 0$ .

Friedmann vergelijking (alleen materie, geen straling):

$$(\dot{a}/a)^2 = H^2 = 8\pi G\rho_0/(3a^3) \rightarrow \dot{a}a^{1/2} = \text{constant} \rightarrow a(t) = (t/t_0)^{2/3}$$

$$H(t) = 2/(3t), \text{ als } t \rightarrow \infty:$$

Uitdijng gaat altijd door maar nadert tot oneindig langzaam.

$k \neq 0$ : sferisch ( $k > 0$ ,  $E < 0$ ) of hyperbolisch ( $k < 0$ ,  $E > 0$ ) heelal.

Friedmann vergelijking (alleen materie, geen straling):

$$(\dot{a}/a)^2 = H^2 = 8\pi G\rho_0/(3a^3) - k/a^2$$

$k < 0$ :  $H^2$  altijd positief, eeuwig uitdijend heelal met  $\rho \rightarrow 0$ .

$$\text{Limiet } (\dot{a}/a)^2 = -k/a^2 \rightarrow \dot{a} = (-k)^{1/2} \rightarrow a(t) = (-k)^{1/2}t + \text{const.}$$

Uitdijngssnelheid wordt constant, 'open' heelal.

$k > 0$ : Op zeker tijdstip  $t_{\max}$  geldt  $8\pi G\rho_0/(3a^3) = k/a^2 \rightarrow \dot{a} = 0$

Uitdijng stopt op  $t_{\max}$  en keert om, 'gesloten' heelal.

**Closed Universe**



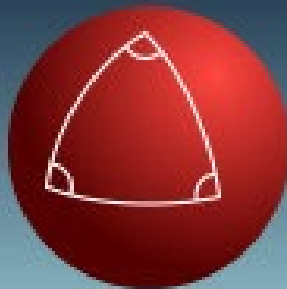
$\Omega > 1$  without  $\Lambda$ -term

**Open Universe**



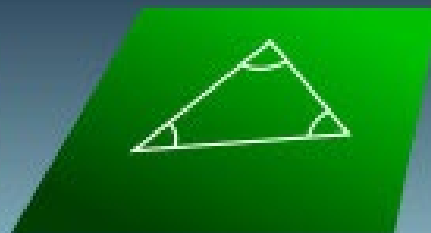
$\Omega < 1$  without  $\Lambda$ -term

**Closed**



sum of angles  
 $> 180^\circ$

**Flat**



sum of angles  
 $= 180^\circ$

**Open**



sum of angles  
 $< 180^\circ$



# Friedmann vergelijkingen voor homogeen en isotroop vlak heelal ( $k = 0$ ), energiedichtheid $\rho(t)$ en druk $p(t)$

Evolutie van de expansiefactor  $a(t)$  die beschrijft hoe de afstand tussen objecten  $\vec{r} = a(t)\vec{x}$  toeneemt met de tijd als gevolg van de kosmische expansie. Normalisatie: nu ( $t_0$ ) geldt  $a(t_0) = 1$ , afname tot  $a = 0$  op het moment van de oerknal.

Vergelijking voor energie:

$$(\dot{a}/a)^2 = (8\pi G/3)\rho + \Lambda/3$$

Vergelijking voor gravitatieversnelling/vertraging:

$$\ddot{a}/a = (-4\pi G/3)(\rho + 3p) + \Lambda/3$$

Hierin is  $\rho(t) = \rho_m(t) + \rho_r(t)$  de tijdsafhankelijke energiedichtheid uitgedrukt als som van de massadichtheid  $\rho_m(t)$  en het massa equivalent  $\rho_r(t)$  van de stralingsenergiedichtheid  $u_r(t)$ ,  $\rho_r(t) = u_r(t)/c^2$ .  $\Lambda$  is de kosmologische constante,  $G$  de gravitatieconstante.

# Thermodynamica van het heelal: de energiedichtheid

Pas de eerste hoofdwet uit de thermodynamica toe (energiebehoud):

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A = \Delta U + p\Delta V$$

In woorden: toegevoerde energie (zeg warmte  $\Delta Q$ ) wordt omgezet in verhoging inwendige energie ( $\Delta U$ ) + arbeid ( $\Delta A$ ).

Voor adiabatische uitdijng van het heelal geldt  $\Delta Q = 0 \rightarrow$

$$\Delta U = -p\Delta V$$

De energiedichtheid  $\rho$  en de verandering van energiedichtheid  $\Delta\rho$

in het uitdijng heelal volgen dan uit:  $\rho \equiv U/V$ ,  $V \sim a^3$ ,

differentiatie levert een hydrodynamische vergelijking in  $\dot{\rho}$ :

$$\Delta\rho = \Delta(U/V) = - (p + \rho)(\Delta V/V) = - 3(p + \rho)(\Delta a/a)$$

$a = a(t)$  de schaalfactor van het heelal. Delen door  $\Delta t$ :

$$\dot{\rho} + 3(p + \rho) \dot{a}/a = 0$$

Relatie volgt ook uit de Friedman vergelijkingen in  $\dot{a}$  en  $\ddot{a}$  voor

een **vlak homogeen en isotroop** heelal  $\rightarrow$  uitdijng is adiabatisch!

# Thermodynamica v/h heelal: de toestandsgrootte $w$

De zójuist afgeleide toestandsvergelijking voor een **vlak** heelal, beschouwd als homogeen en isotroop hydrodynamisch ensemble, wordt gekarakteriseerd door een dimensieloze grootte  $w = p/\rho$ :

$$(\Delta\rho/\rho) = -3(1 + w)(\Delta a/a) \rightarrow \rho \sim a^{-3(1 + w)}$$

- Voor niet-relativistische materie  $p \ll \rho$  ( gas, stof)  $\rightarrow p/\rho = w \approx 0$ :

$\rho \sim a^{-3}$ ,  $\sim V^{-1}$ : Een afname evenredig met toename van volume!

- Voor ultra-relativistische materie en EM-straling  $\rightarrow p/\rho = w = 1/3$ :

$\rho \sim a^{-4}$ : Een "sneller dan evenredig" afname met volumetoename!

Oorzaak: de "de Broglie" golflengte ( $\lambda = h/p$ ) wordt roodverschoven! Gevolg van de arbeid die wordt verricht door de stralingsdruk (impuls) tijdens de expansie? 228

# De donkere energie $\Lambda$ : een kosmologische constante ?

Eenvoudigste verklaring voor donkere energie is:

**'the cost of having space'**

Dit betekent dat een volume ruimte (vacuum) intrinsiek een zekere hoeveelheid fundamentele energie bezit, die wordt aangeduid als "kosmologische constante" ( $\Lambda$ ) of vacuum-energie met een dichtheid  $\rho_\Lambda$ . Toepassing eerste hoofdwet thermodynamica bij adiabatisch proces:

**$\Delta U = -p\Delta V$ : toename  $\Delta V$  vereist arbeid  $\rightarrow$  energieafname  $\Delta U$**

Echter, de hoeveelheid energie bij een volumetoename van het vacuum neemt toe ( $\sim \rho V$ ), bij een volumetoename  $\Delta V$  met:

**$\Delta U = \rho_\Lambda \Delta V = -p\Delta V$ ,  $\rho_\Lambda$  en  $\Delta V$  beide positief  $\rightarrow p = \text{negatief}$  !**

**$p = -\rho_\Lambda \rightarrow w = -1 \rightarrow \rho \sim a^0 = \text{constant}$**

onafhankelijk van schaalfactor/tijd conform "kosmologische constante".

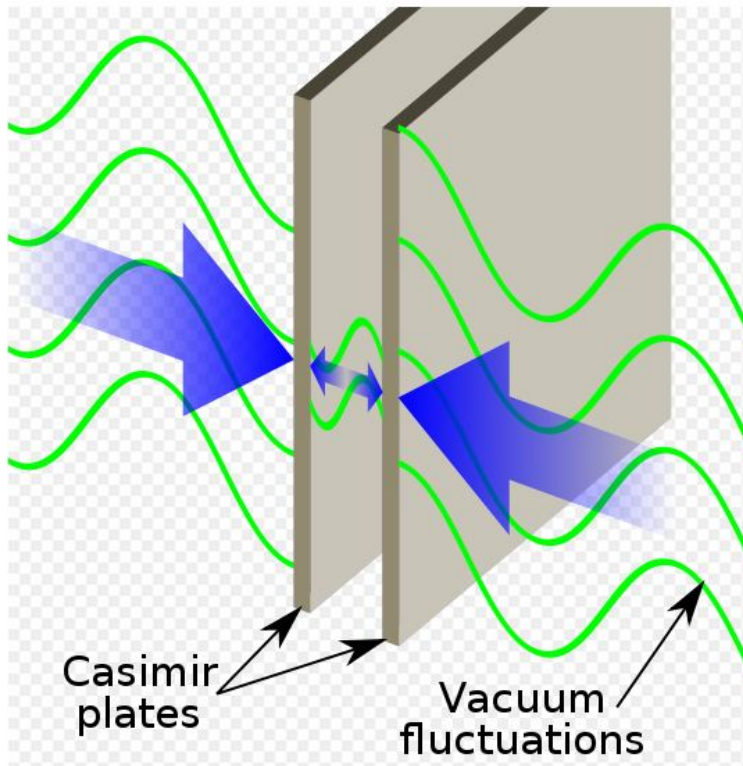
Algemene relativiteitstheorie: **druk vertegenwoordigt massa**  $\rightarrow$

positieve druk  $\rightarrow$  'aantrekkende' zwaartekracht

negatieve druk  $\rightarrow$  'afstotende' zwaartekracht



# Bewijs voor het bestaan van vacuümenergie: het Casimir effect



Theoretisch **voorspeld in 1948** door de Nederlandse fysicus Hendrik Casimir. Eerste experimentele aanwijzing in 1958 door Marcus Sparnaay (Philips). Eerste **overtuigende meting in 1997** door Steve Lamoreaux (Los Alamos). Kracht wordt veroorzaakt doordat alleen virtuele deeltjes (vacuümfluctuaties) met een bepaalde golflengte tussen de platen passen. Andere golflengten worden uitgedempt → platen naar elkaar geduwd

Casimir kracht tussen twee parallele platen:  $F = -(\pi h/480)A/a^4$ ,  
 $A$  = plaatoppervlak,  $a$  = onderlinge afstand

# Versnelde uitdijing: de acceleratievergelijking

Differentiatie van de Friedmann-vergelijking voor  $\dot{a}/a$  gecombineerd met de hydrodynamische vergelijking voor  $\dot{\rho}$  geeft een uitdrukking voor de versnelling van de schaalfactor  $a(t)$ , de acceleratievergelijking (met  $c=1$ ):

$$\ddot{a}/a = (-4\pi G/3)(\rho + 3p) + \Lambda/3$$

- Zonder  $\Lambda/3$

Versnelde uitdijing betekent dat  $\ddot{a} > 0 \rightarrow \rho + 3p < 0 \rightarrow$  toestands-grootheid  $w < -1/3$ , straling en materie ( $w = 1/3$ ,  $w = 0$ ) kunnen nooit tot versnelling van  $a(t)$  leiden.

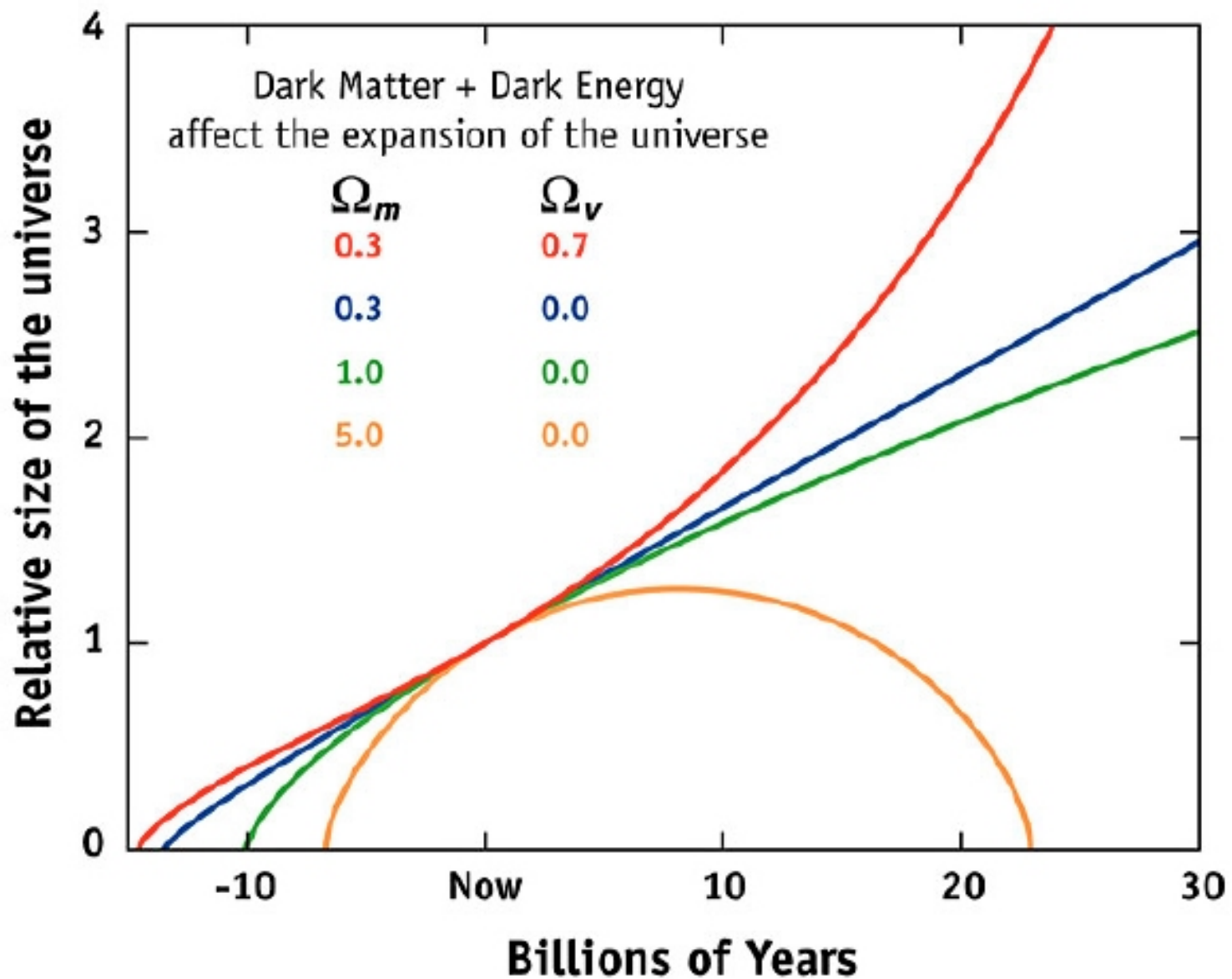
- Met  $\Lambda/3$

Voeg een component met negatieve druk toe m.b.v.  $\rho_\Lambda$  en  $p_\Lambda$ :

$$(-4\pi G/3)(\rho + \rho_\Lambda + 3(p + p_\Lambda)) = (-4\pi G/3)(\rho + 3p) + \Lambda/3 \rightarrow$$
$$\rho_\Lambda + 3p_\Lambda = -(\Lambda/4\pi G), \text{ met } p_\Lambda = -\rho_\Lambda \rightarrow \rho_\Lambda = (\Lambda/8\pi G)$$

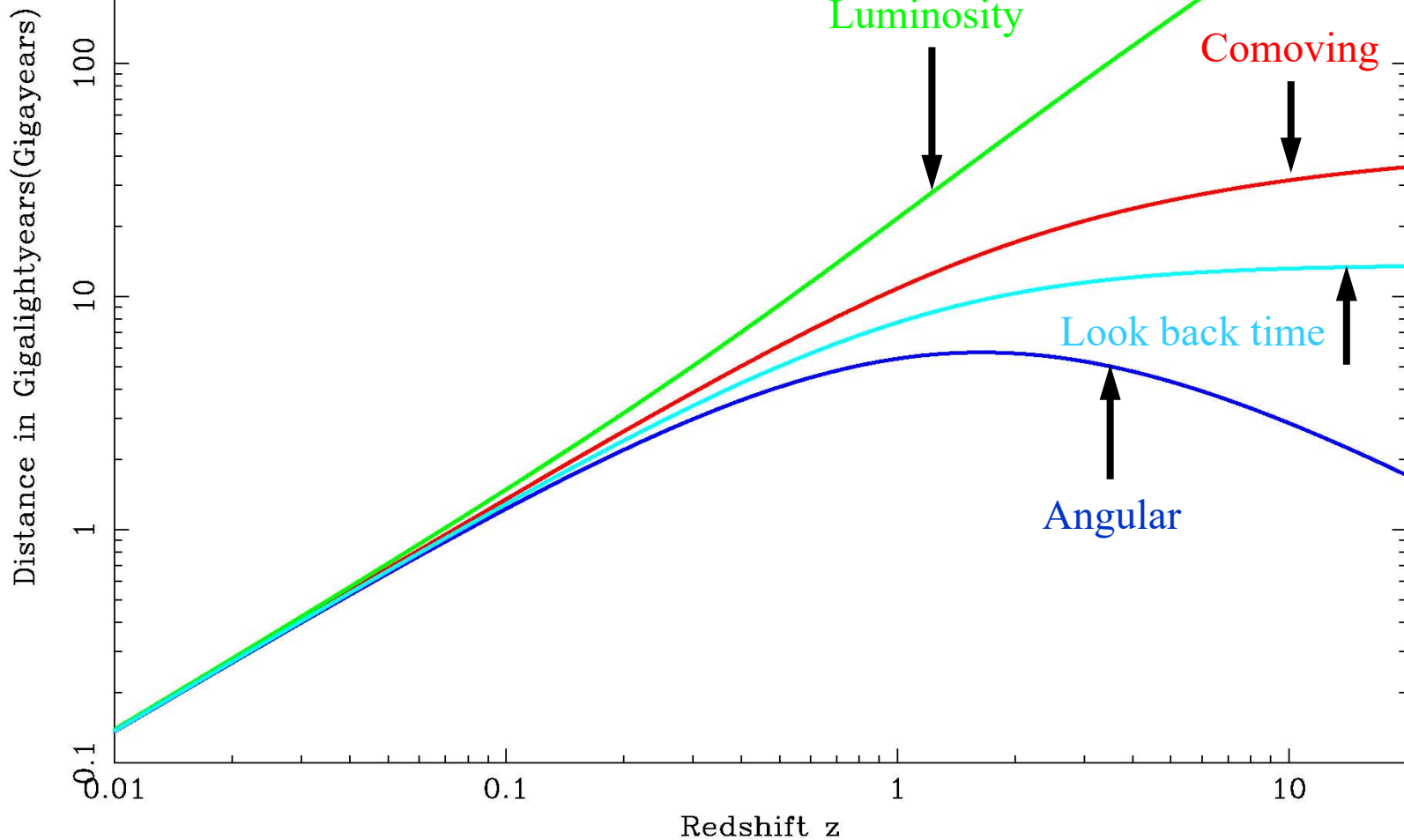
Gemeten  $\Lambda \approx 10^{-35} \text{ sec}^{-2}$ ,  $\rho_\Lambda \approx 7 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3 \approx 4 \text{ H/m}^3$  ( $6 \times 10^{-10} \text{ Joule/m}^3$ )

# Uitdijend heelal: voorbeelden van rol $\Omega_m$ en $\Omega_v$



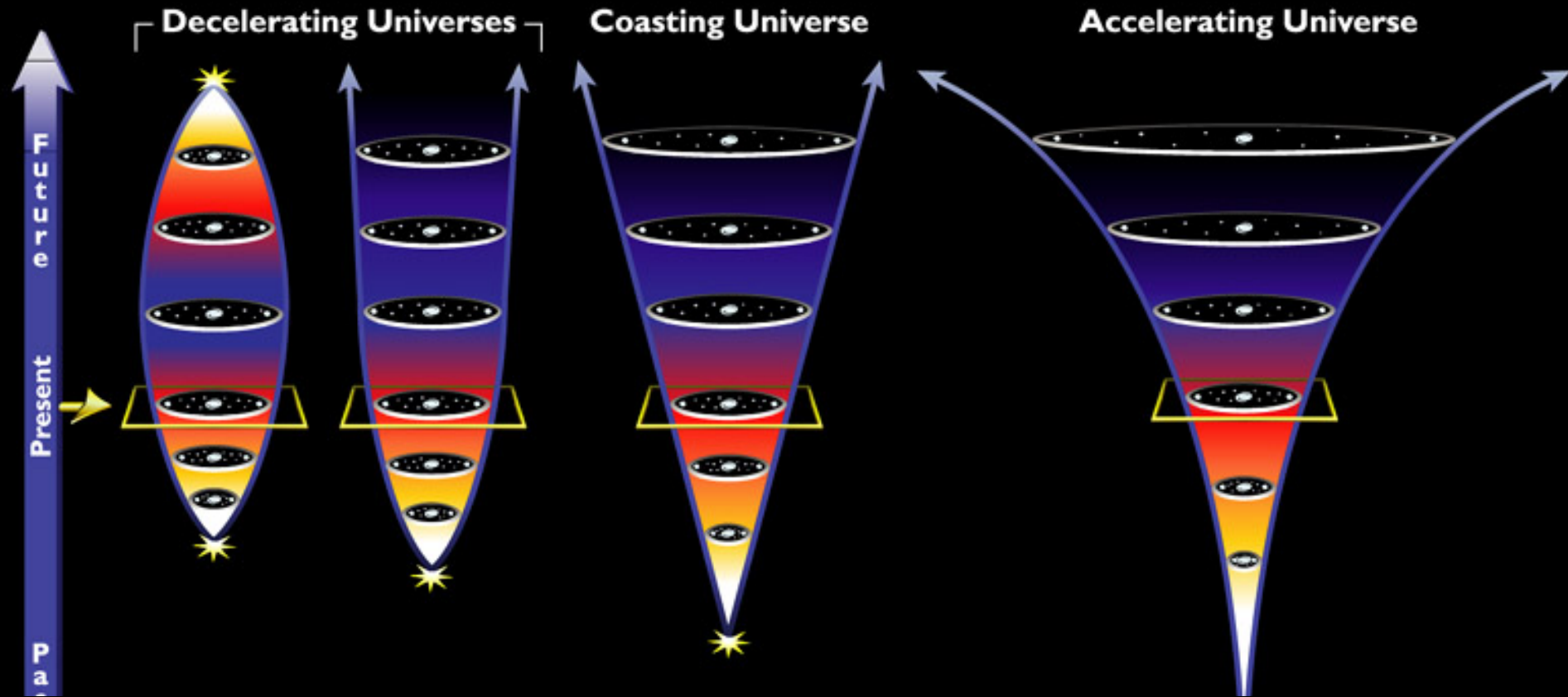
Flat Universe:  $\Omega_m=0.27$ ,  $\Omega_r=0$ ,  $\Omega_\Lambda=0.73$ ,  $\Omega_c=0$

Distances in cosmology,  $H = 71 \text{ km}/(\text{sec.Mpc})$



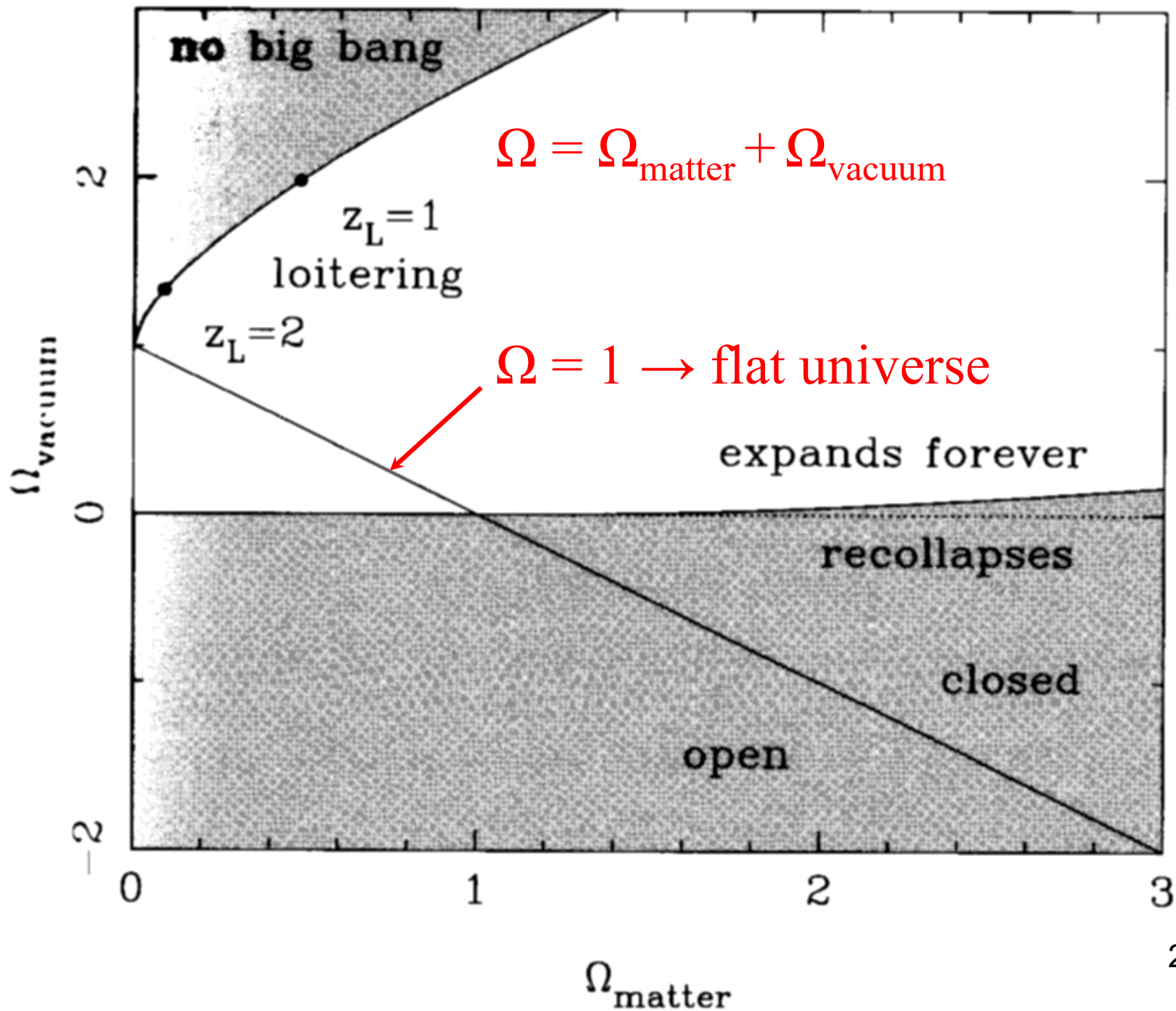


# Possible Models of the Expanding Universe

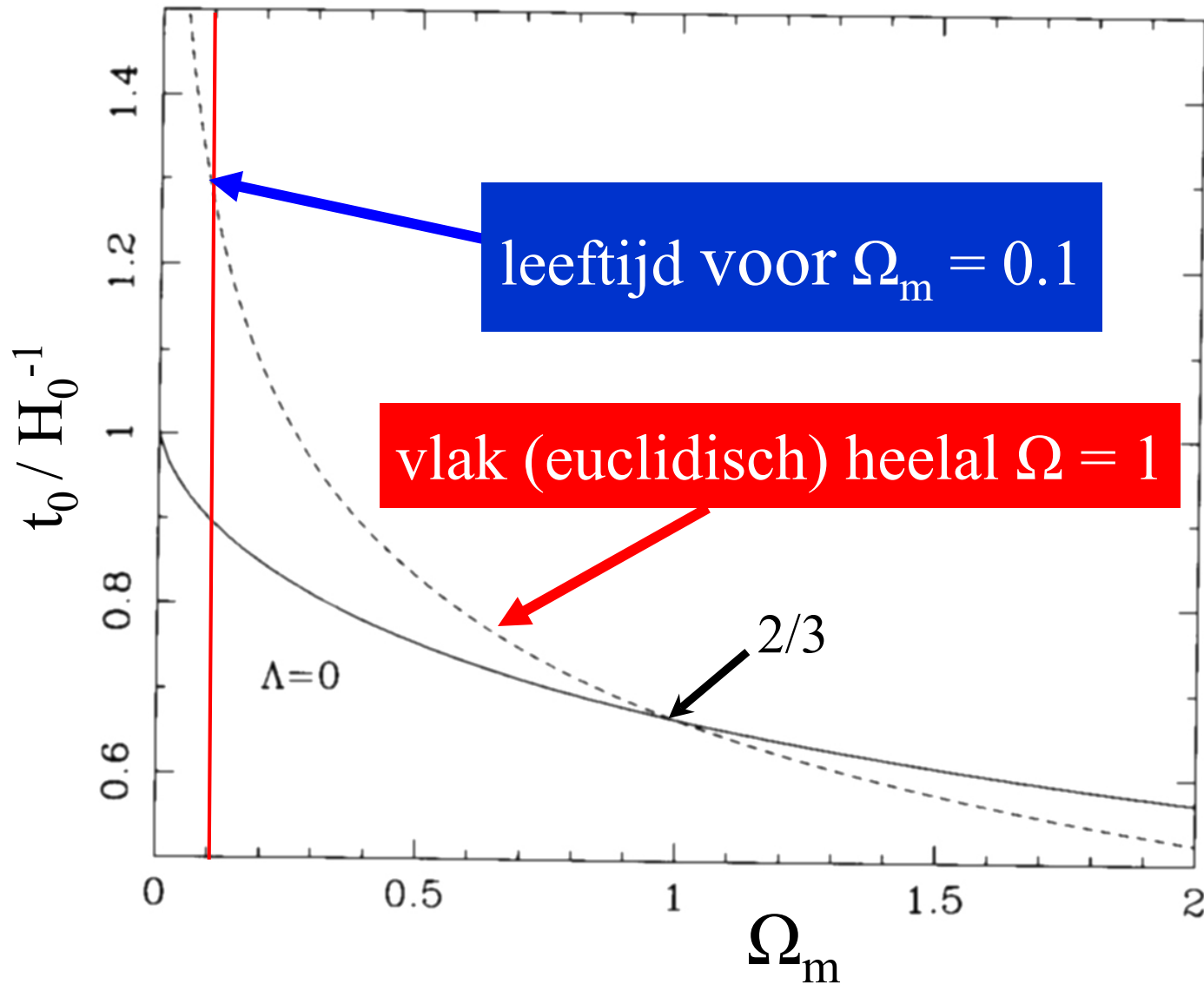


4 modellen:

- $\Omega_{\text{materie}} > 1$  ► uitdijing vertraagt, uiteindelijk volgt collaps
- $\Omega_{\text{materie}} = 1$  ► uitdijing vertraagt asymptotisch, geen collaps
- $\Omega_{\text{materie}} = 0$  ► uitdijing met constante snelheid (“coasting”)
- $\Omega_{\text{donkere energie}} > 0$  ► uitdijing versnelt



Huidige leeftijd  $t_0$  vlak heelal ( $\Omega = 1$ ) hangt af van  $\Omega_m$  !



# Schaling met roodverschuiving $z$

- golflengte:  $\lambda(z) = \lambda(0)/(1+z)$
- ruimtelijk volume:  $V(z) = V(0)/(1+z)^3$
- materiedichtheid:  $\rho_m(z) = \rho_m(0)(1+z)^3$
- donkere energiedichtheid:  $\rho_\Lambda(z) = \rho_\Lambda(0) = \text{constant}$

Schaling verhouding  $\Omega_m/\Omega_\Lambda$  :

$\rho_m(z)/\rho_\Lambda(z) \sim (1+z)^3 \rightarrow$  afhankelijk van  $z$

$$\Omega_m(z)/\Omega_\Lambda(z) = (\Omega_m(0)/\Omega_\Lambda(0))(1+z)^3$$



## Bij welke $z$ ( $t_{\text{heelal}}$ ) domineert $\Omega_m$ ?

- Huidige waarde  $\Omega_m/\Omega_\Lambda(t_0) \approx 3/7$ : donkere energie domineert
- Voor roodverschuiving  $z$  waarbij materiedichtheid de expansie zeker domineert geldt:

$$\Omega_m(z)/\Omega_\Lambda(z) \geq 10$$

- De waarde van  $z$  kan dan worden bepaald uit:

$$(1+z)^3 = 70/3 \rightarrow z \approx 1,8 \rightarrow$$

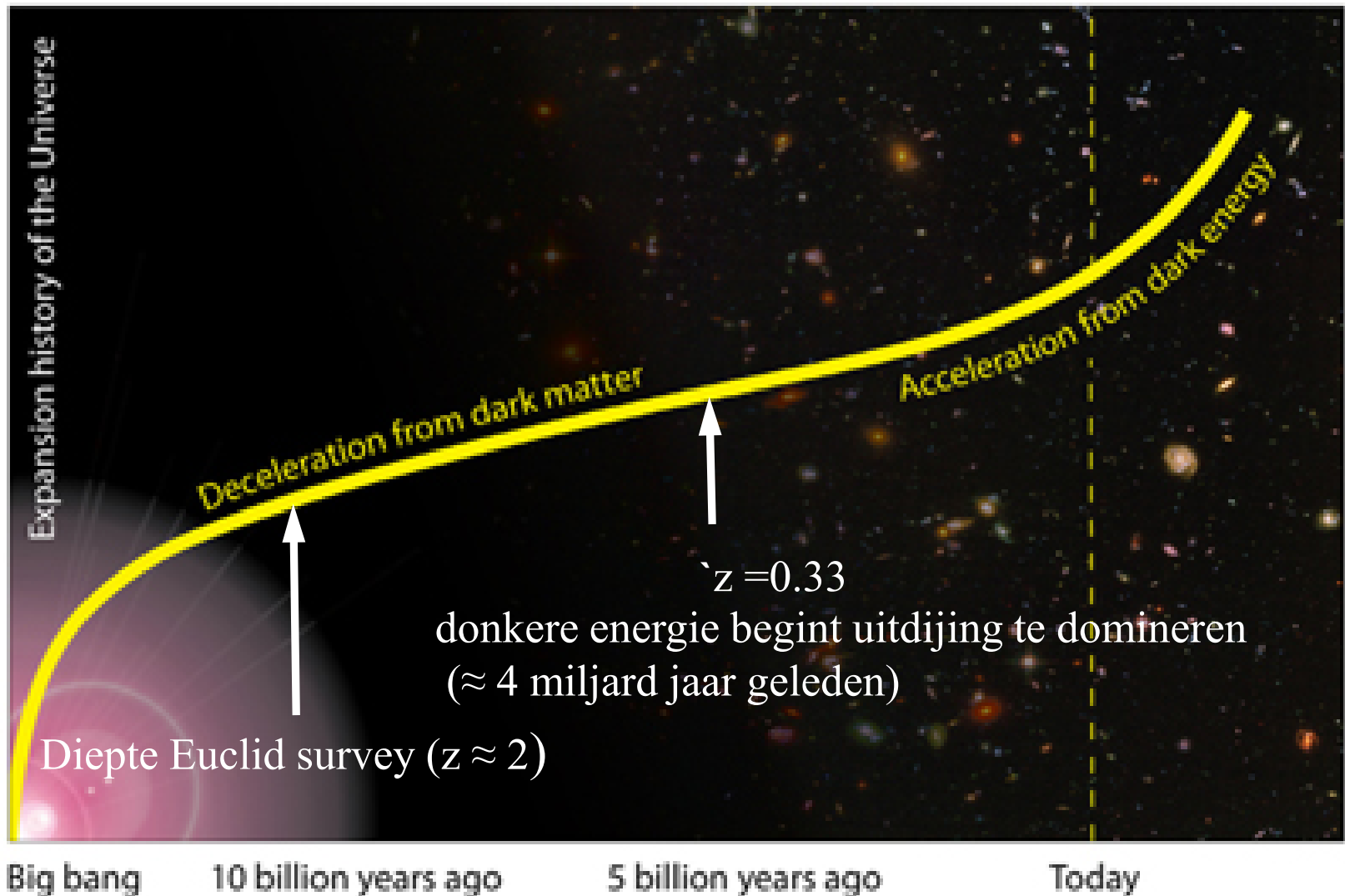
$$t_{\text{heelal}} \approx 4 \text{ miljard jaar}$$

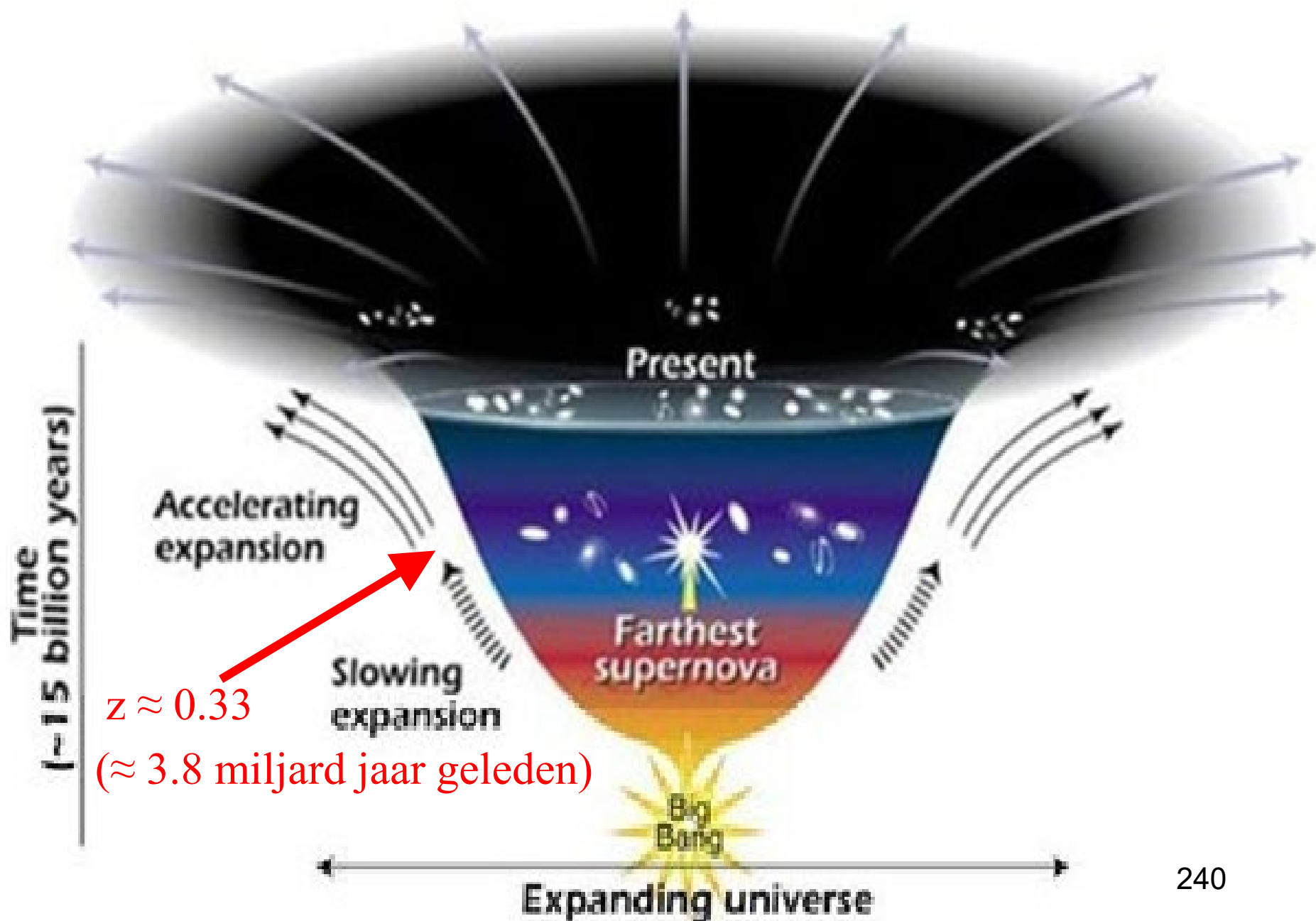
- "Cross-over" punt  $\Omega_m$  en  $\Omega_\Lambda$ ?

$$\Omega_m(z)/\Omega_\Lambda(z) = 1 \rightarrow (1+z)^3 \approx 7/3 \rightarrow z \approx 0,33$$

$$t_{\text{heelal}} \approx 10 \text{ miljard jaar}$$

# Uitdijingsgeschiedenis van het Heelal

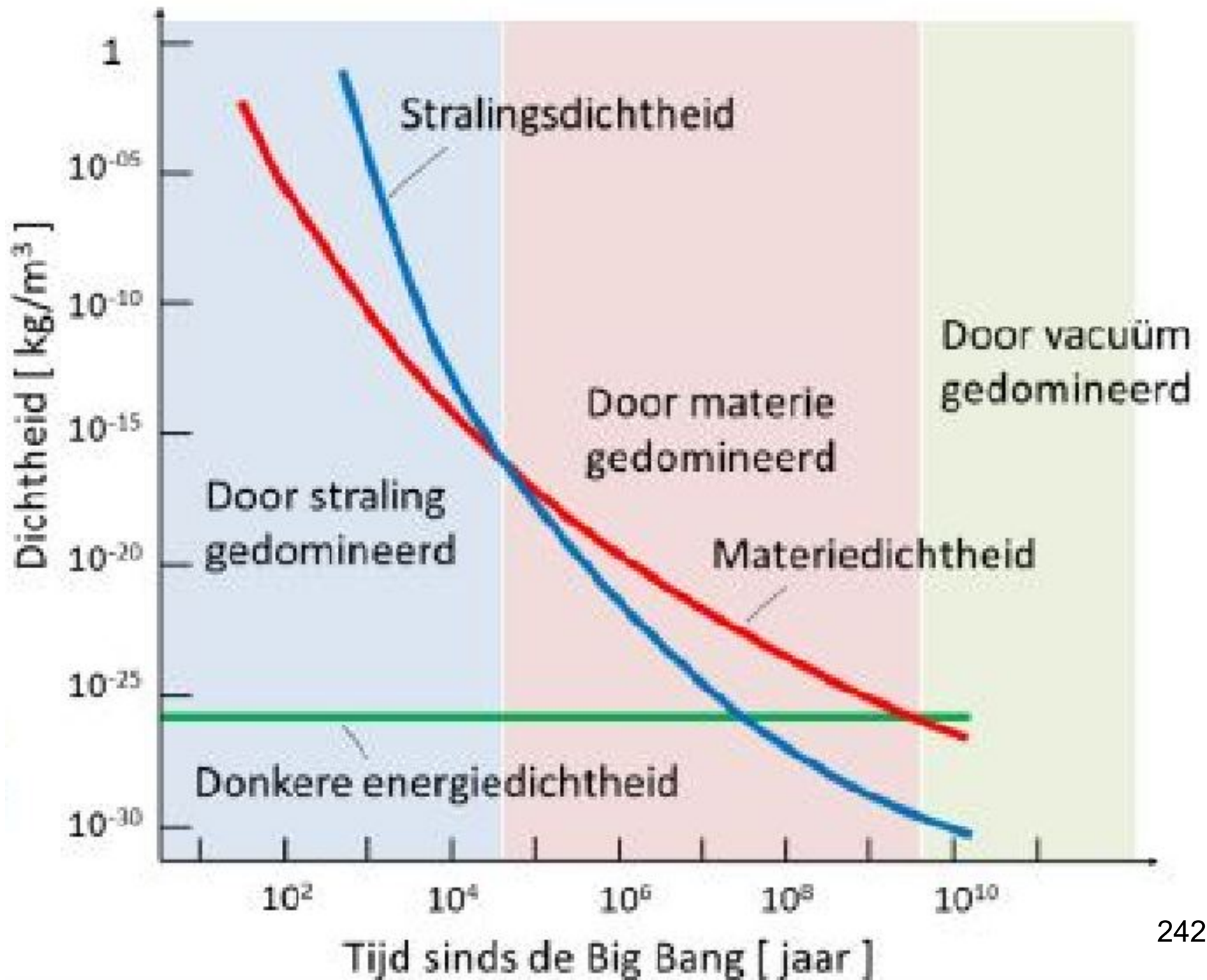




# Relatieve rol van straling, materie en donkere energie bij de evolutie van het heelal

- Tijdens **vroegste fase** van het heelal: **dominantie van stralingsenergie  $\rho_s$**  tengevolge van de hoge dichtheid van ultra-relativistische deeltjes, met name fotonen en neutrino's.
- Door de snelle afname van deze dichtheid met de expansie ( $\rho_s \sim a^{-4}$ ) wordt de **materiedichtheid ( $\rho_m \sim a^{-3}$ ) dominant na ca 60.000 jaar** op een kosmologische roodverschuiving  **$z$  van  $\sim 3600$** , dit is dus veel eerder dan de **ontkoppeling van materie en straling na ca 370.000 jaar** op een kosmologische roodverschuiving  **$z$  van  $\sim 1100$** , waarvan wij nu het oudste licht (de microgolf-achtergrondstraling) zien.
- De **dominatie van donkere energie ( $\rho_\Lambda$  constant)** boven die van materie, toen dus de uitdijing van het heelal ging versnellen, begon  **$\approx 4$  miljard jaar geleden** bij een roodverschuiving  **$z \approx 0.33$**





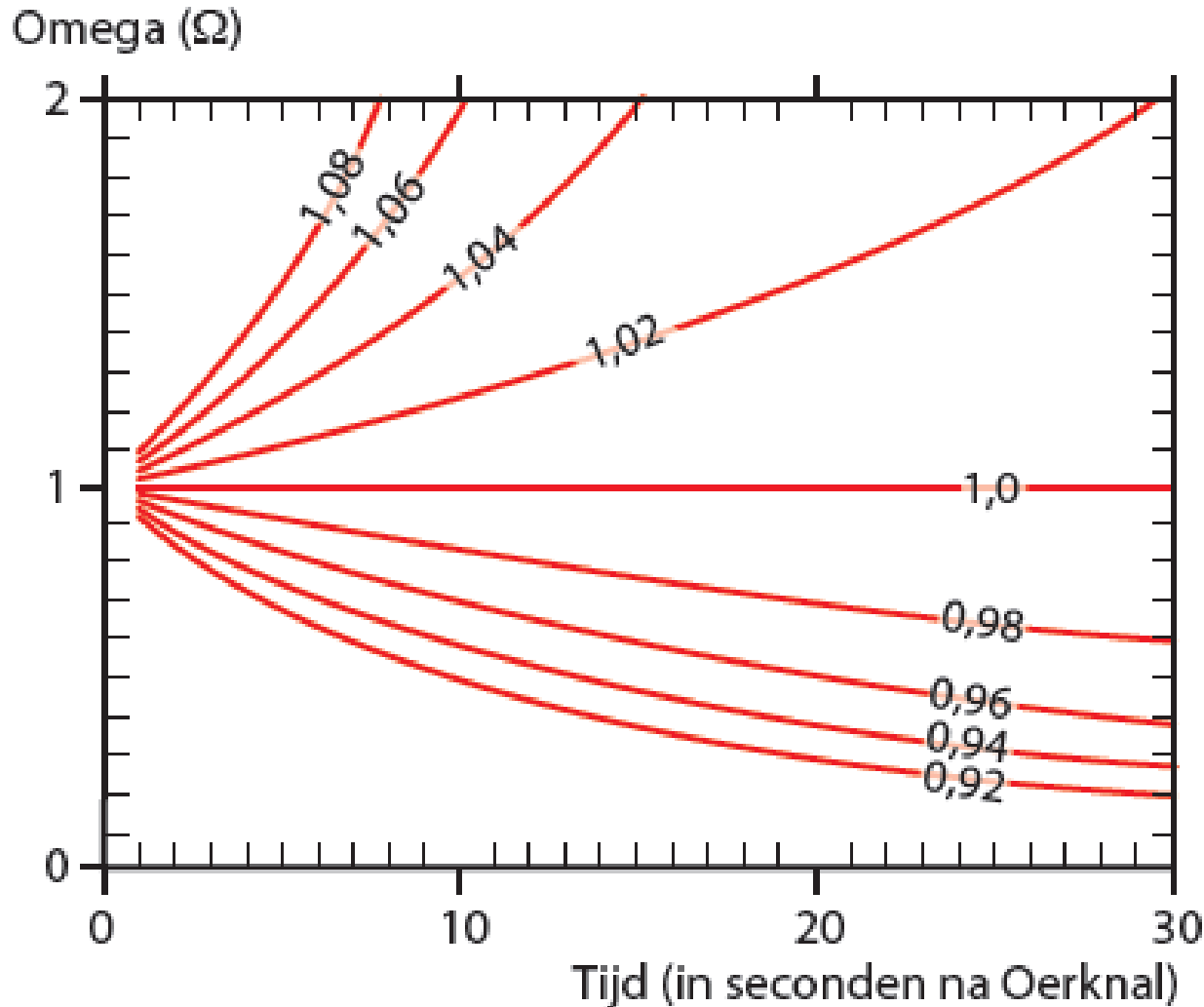
# Zijn er theorieën die een waarde voor $\Lambda$ voorspellen?

- Over de grootte van  $\Lambda$  kunnen voorspellingen worden gedaan vanuit de Quantum ElectroDynamica (**QED**) en de Stochastische ElectroDynamica (**SED**).
- Evenwel: **consistentie met het principe van Lorenz-covariantie en met de grootte van  $h$ , de constante van Planck**, vereist een veel grotere waarde van  $\rho_\Lambda$  dan de gemeten kosmologische waarde van  $(\rho_\Lambda)_{\text{kos}} \approx 7 \times 10^{-10} \text{ Joule/m}^3$ :  
$$(\rho_\Lambda)_{\text{QED,SED}} \approx 10^{113} \text{ Joule/m}^3$$
- Het vacuüm is dus niet leeg maar heeft ‘gewicht’, de voorspelde waarde is echter  $\approx 10^{122}$  **groter dan wordt waargenomen**.
- Met de theoretisch waarde zou het heelal zo snel uitdijen dat zich nooit leven had kunnen ontwikkelen.

## Het vlakheidsprobleem : waarom is waarde van $\Omega$ zo dichtbij 1?

Als  $\Omega$  in het begin iets afweek van 1,0000000000....., dan zal de waarde bij uitdijing snel steeds meer gaan afwijken.

(Dicke, omstreeks 1970)



# Vlakheidsprobleem bij $\Omega = 1$ : kosmische inflatie

Substitueer  $\rho_k = 3H_0^2/(8\pi G)$  in de vergelijking van Friedmann:

$$a^2(\rho_k - \rho) = -3k/(8\pi G) = \text{constant} \rightarrow (\Omega^{-1} - 1)pa^2 = \text{constant}$$

Nu  $|\Omega^{-1} - 1| \approx 0.01$ ,  $pa^2$  is sinds de Plancktijd ( $t_p = 5.4 \times 10^{-44}$  s) met  $\approx 10^{60}$  afgenomen,  $|\Omega^{-1} - 1|$  moet dus sinds  $t_p$  met  $10^{60}$  zijn toegenomen  $\rightarrow |\Omega^{-1} - 1| = 10^{-62}$  op  $t_p$ , ongekende afstemming ("fine tuning").

Oplossing: Gedurende korte tijd heeft het vroege heelal een exponentiële expansie ondergaan onder invloed van een alles dominerende energie-dichtheid uit het vacuum  $\rho_V (\Lambda_V)$ .

De Friedmann vergelijking wordt dan:

$$(\dot{a}/a)^2 = H^2 = \Lambda_V/3 \rightarrow a = e^{Ht} = \exp[(\Lambda_V/3)^{1/2}t]$$

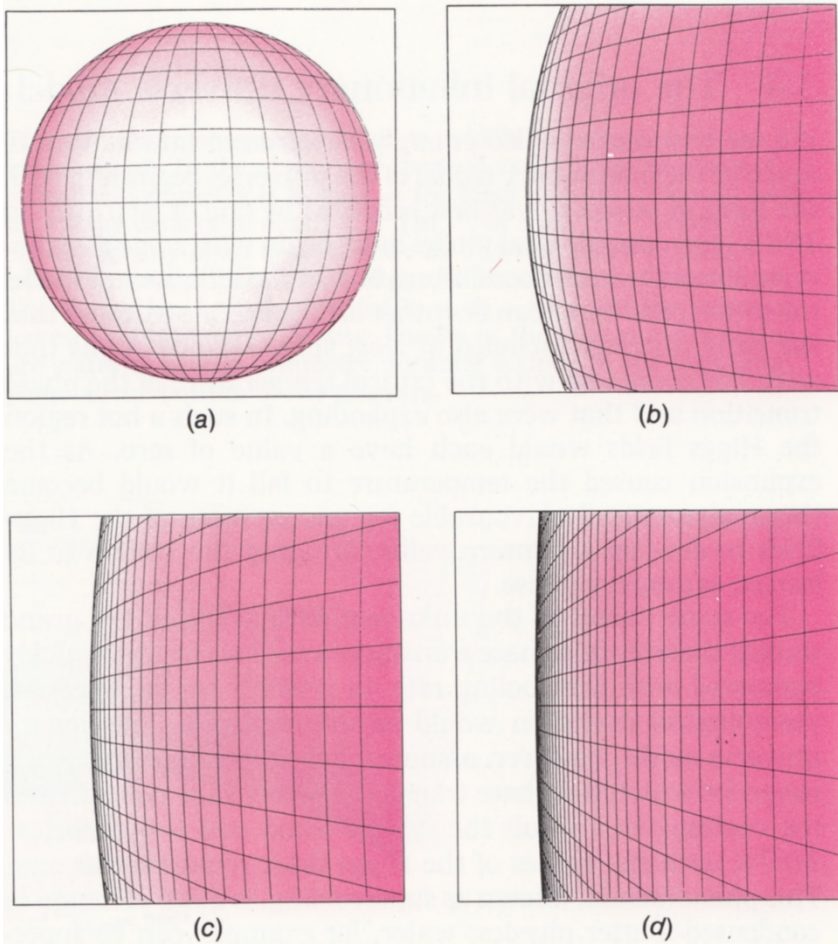
$$\rho a^2 = \rho_V e^{2Ht} = \text{const. } e^{2Ht} \rightarrow \text{met } H = 10^{36} \text{ s}^{-1}$$

**Inflatie** van  $t_i = 10^{-36}$   $\rightarrow$   $t_f = 10^{-34}$  s:  $a(t_f) / a(t_i) = e^{200}$

Tijdens deze inflatie reduceert  $|\Omega^{-1} - 1|$  met een factor  $10^{-87}$  !



# Inflatie: ruimte zelf mag veel sneller uitdijen dan met de lichtsnelheid



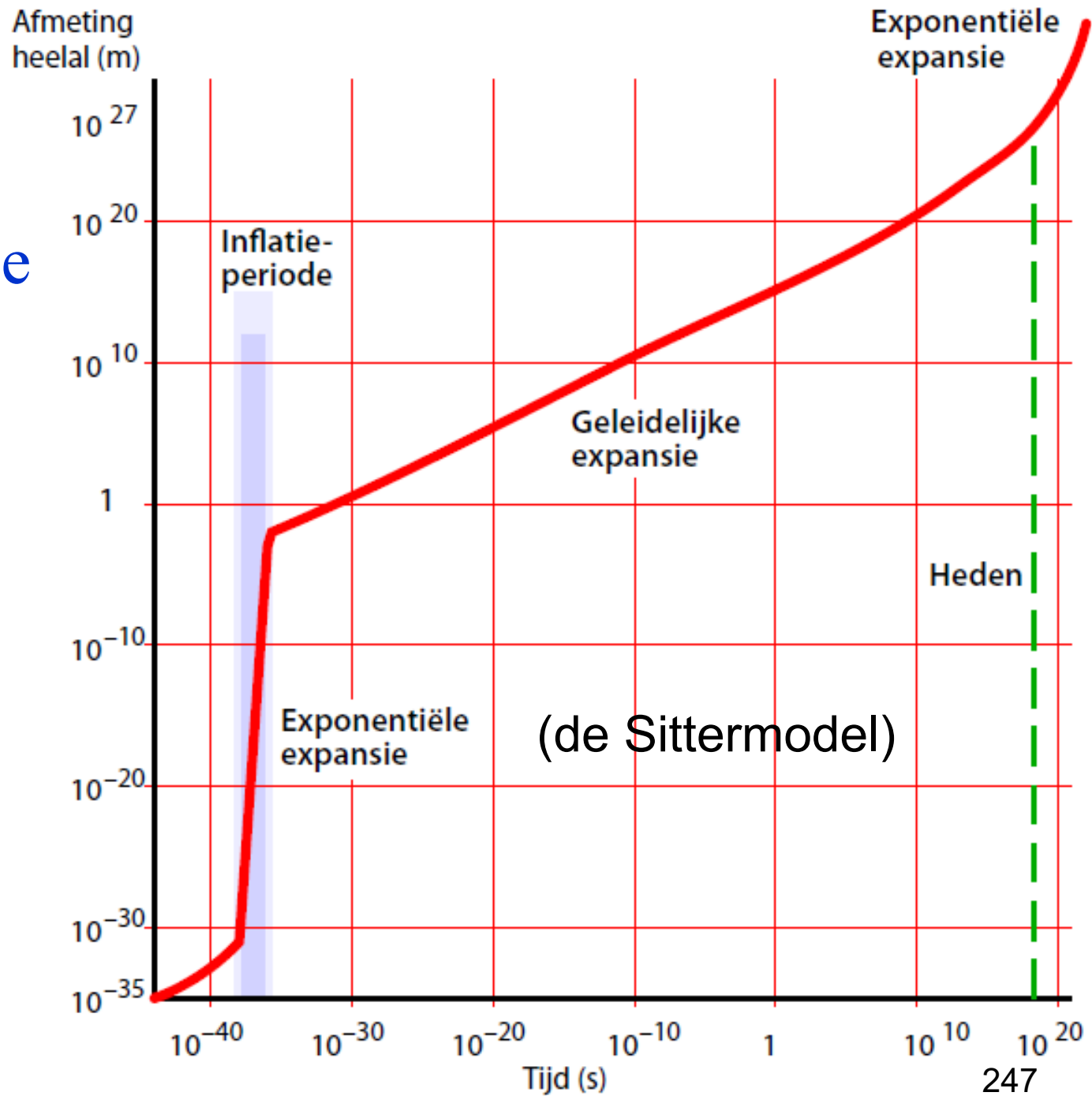
Als het heelal door de inflatie gigantisch is opgeblazen, en dientengevolge een enorm grote kromtestraal heeft, dan zullen wij die er slechts een klein stukje van kunnen overzien, de indruk hebben dat het heelal **vlak** is.

Net zoals het de mens op Aarde toeschijnt dat hij op een **vlakke Aarde** leeft.

$\Omega=1$  betekent daarom: heelal is gigantisch veel groter dan het stukje dat wij kunnen overzien (tot  $13.8 \times 10^9$  jaar terugkijktijd).

# Inflatie-idee

Allan Guth  
Andrei Linde  
(ca 1980)



# Adiabatisch expansie van de kosmische $\mu$ golf straling

- Fotongas met temperatuur  $T$ , nu waargenomen met temperatuur  $T_0$

Voor adiabatische expansie geldt :

$$TV^{(\gamma-1)} = \text{constant},$$

$\gamma =$  adiabatische index  $=4/3$  voor een fotongas  $\rightarrow TV^{1/3} = \text{constant}$

$\rightarrow a(t)T = \text{constant}$ , bij  $t_0$  geldt  $T = T_0$  en  $a(t) = a(t_0)$

$\rightarrow T/T_0 = a(t_0)/a(t) \rightarrow T = T_0(1+z)$

$\rightarrow$  zwarte straler  $\lambda_{\text{max}}T = \text{constant} \rightarrow \lambda = \lambda_0/(1+z)$

- $T_0 = 2,726 \text{ K}$ , ontkoppeling van de straling en materie  
378.000 jaar na de oerknal  $\rightarrow z = 1089 \rightarrow T_{\text{CMB}} \approx 3000 \text{ K}$

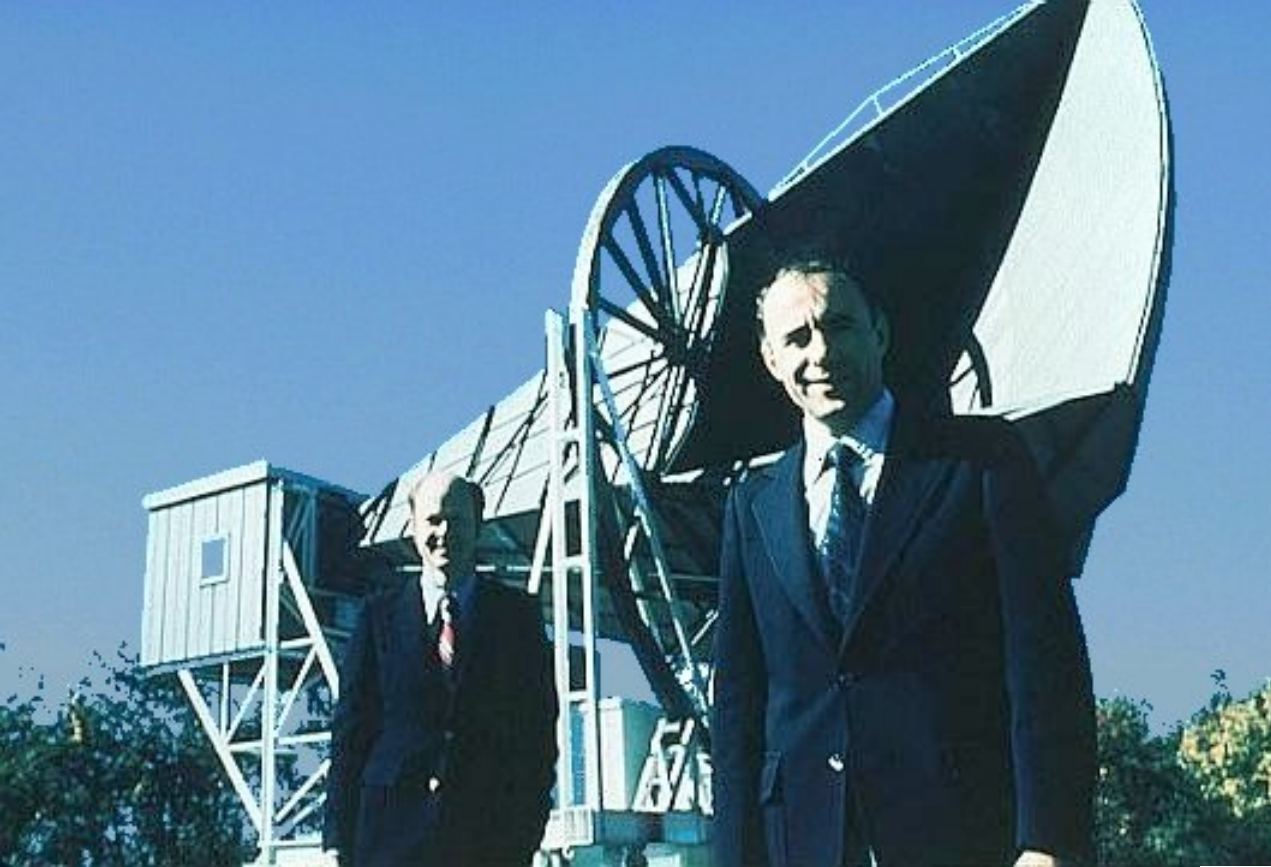
# Diagnostiek aan donkere materie /energie

- Temperatuursfluctuaties in de **mikrogolfachtergrondstraling** (het oudste licht) op boogminuten-schaal met  $\Delta T/T = 10^{-6}$
- **Afname/toename van de schijnbare SN-Ia helderheid** (als gestandaardiseerde bron van absolute lichtkracht) naar grotere roodverschuiving.
- Vervorming door **zwaartekrachtlenzen** (zwak) van de vorm van melkwegstelsels.
- Evolutie **röntgenmorfologie** (met  $z$ ) van intraclustergas in groepen en clusters van melkwegstelsels.
- **Dynamica** van sterren in melkwegstelsels en van melkwegstelsels in clusters.
- **Detectie van deeltjes** met een massa  $> 0.1$  TeV, gammastraling boven 50 GeV.



# Diagnostiek van het “oudste licht”

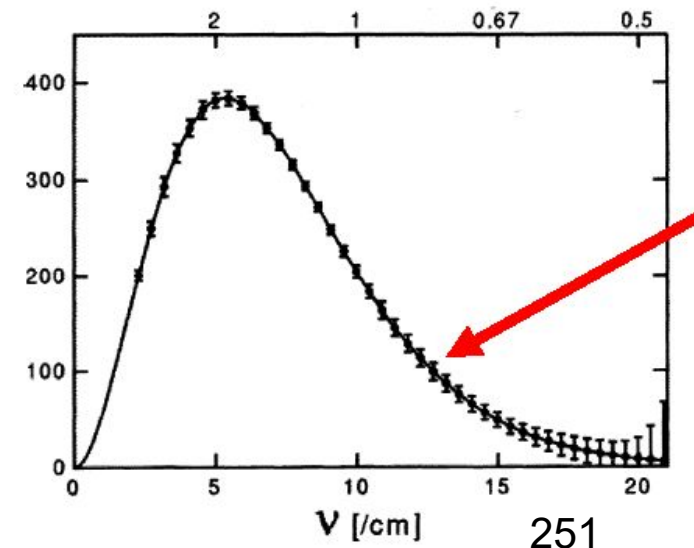
- Golflengteband: millimeter en submillimeter straling (microgolfgebied)
- Techniek: telescopen op ruimteplatformen
- Projecten (1989, 2001, 2009):
  - **CO**smic **B**ackground **E**xplorer (**COBE**) (referentie)
  - **W**ilkinson **M**icrowave **A**nisotropy **P**robe (**WMAP**)
  - **Planck**



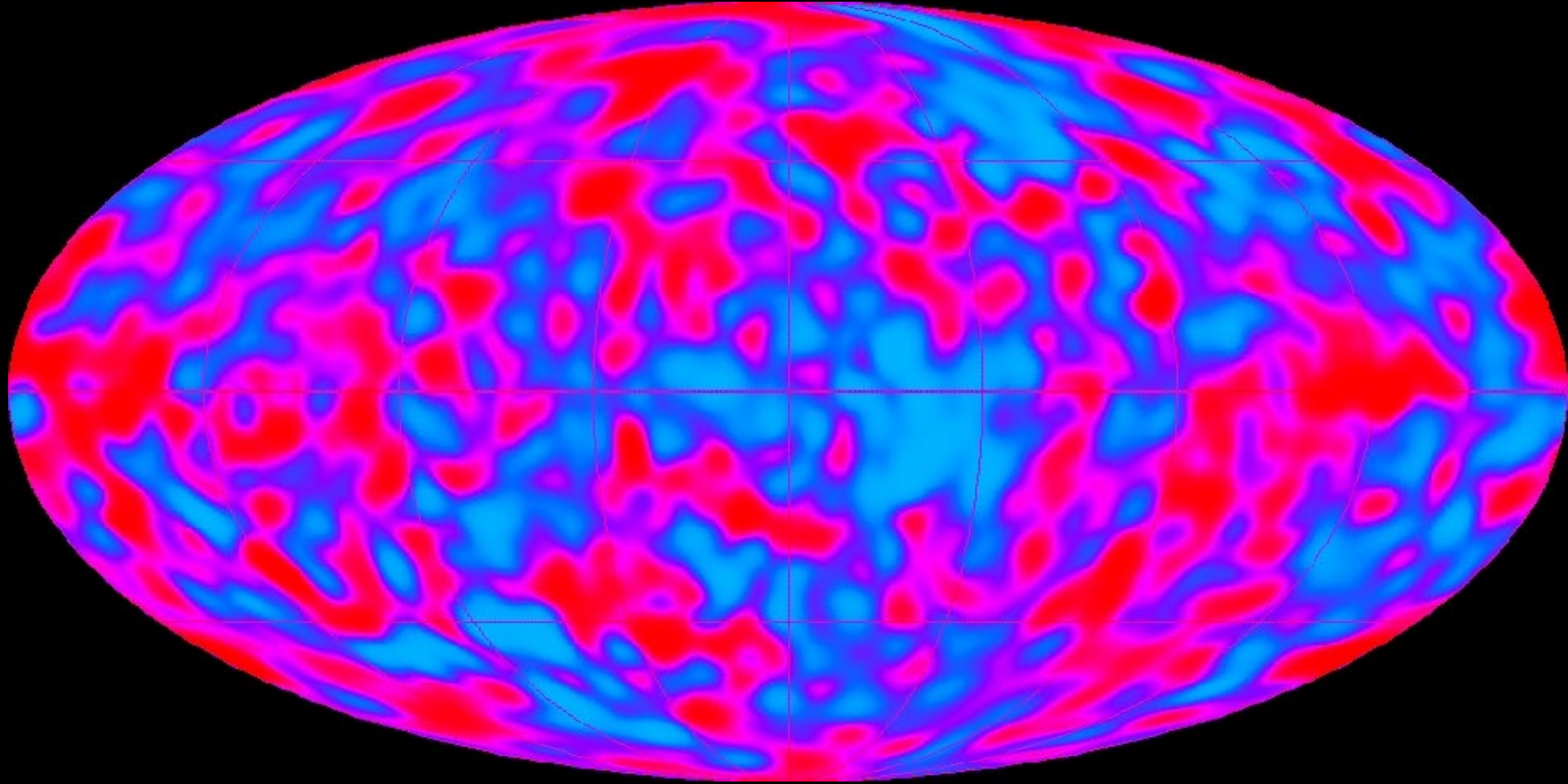
# Holmdel Radiotelescoop New Jersey, USA

A. Penzias and R. Wilson ontdekten in 1964 een microgolf ruis van de gehele hemel: past bij een temperatuur van ongeveer 3 Kelvin: dit is de warmtestraling van 370 000 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.



temperatuur inhomogeniteiten  $\sim 7^0$

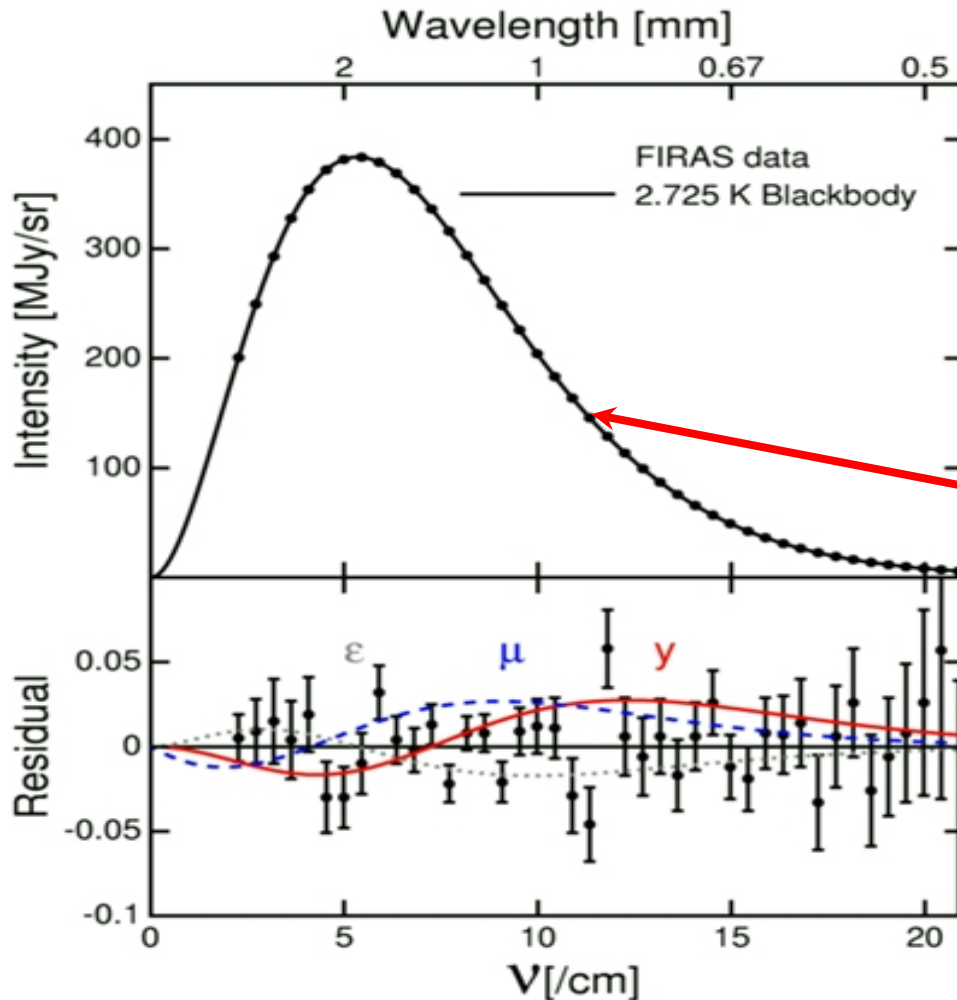


COsmic Background Explorer (COBE), 1992

# Het oudste licht

- Vroege heelal zeer heet → geen atomen, alleen electronen + kernen
- Veelvuldige verstrooiing van licht aan electronen →

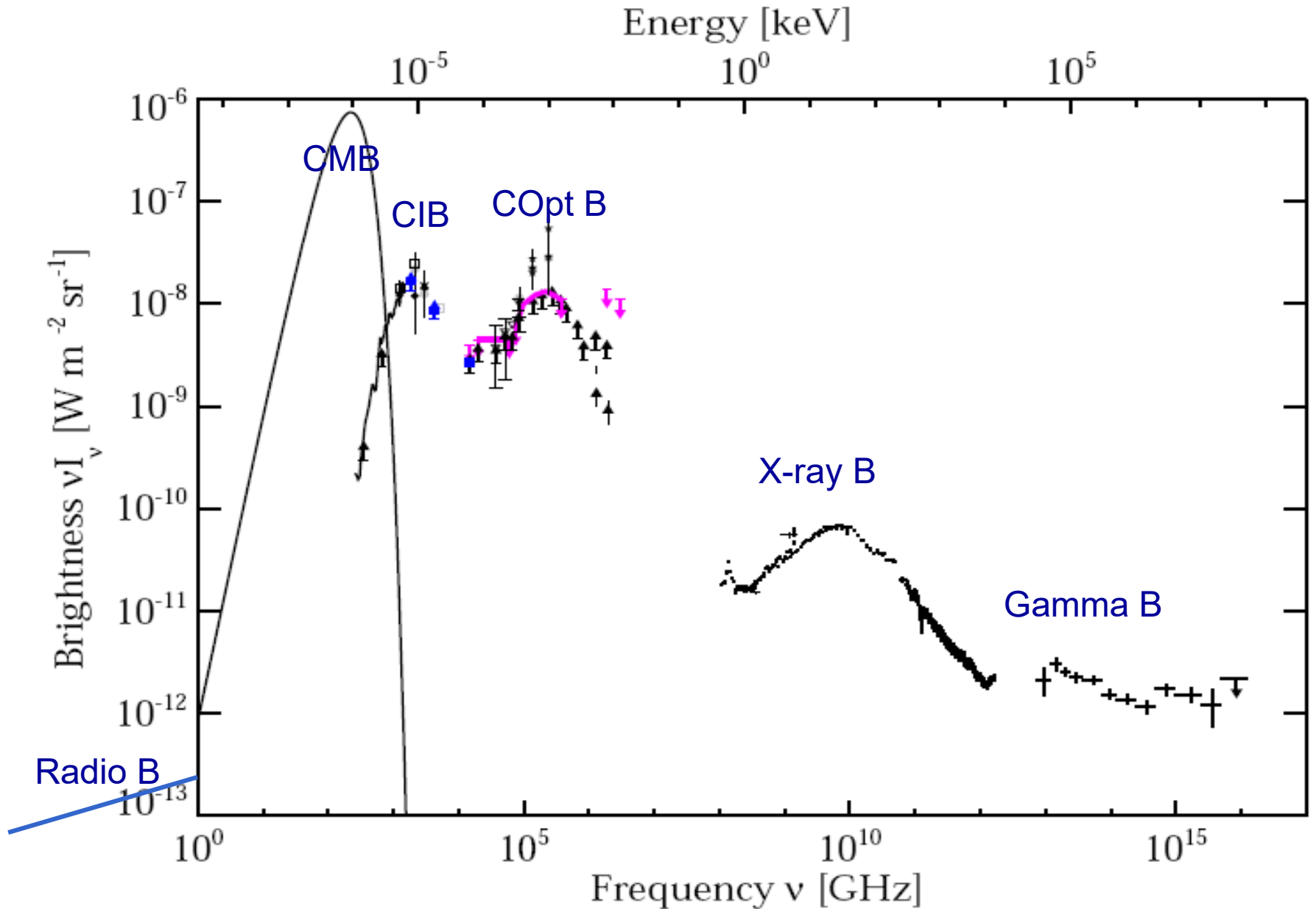
spectrum: stralingsverdeling van Planck



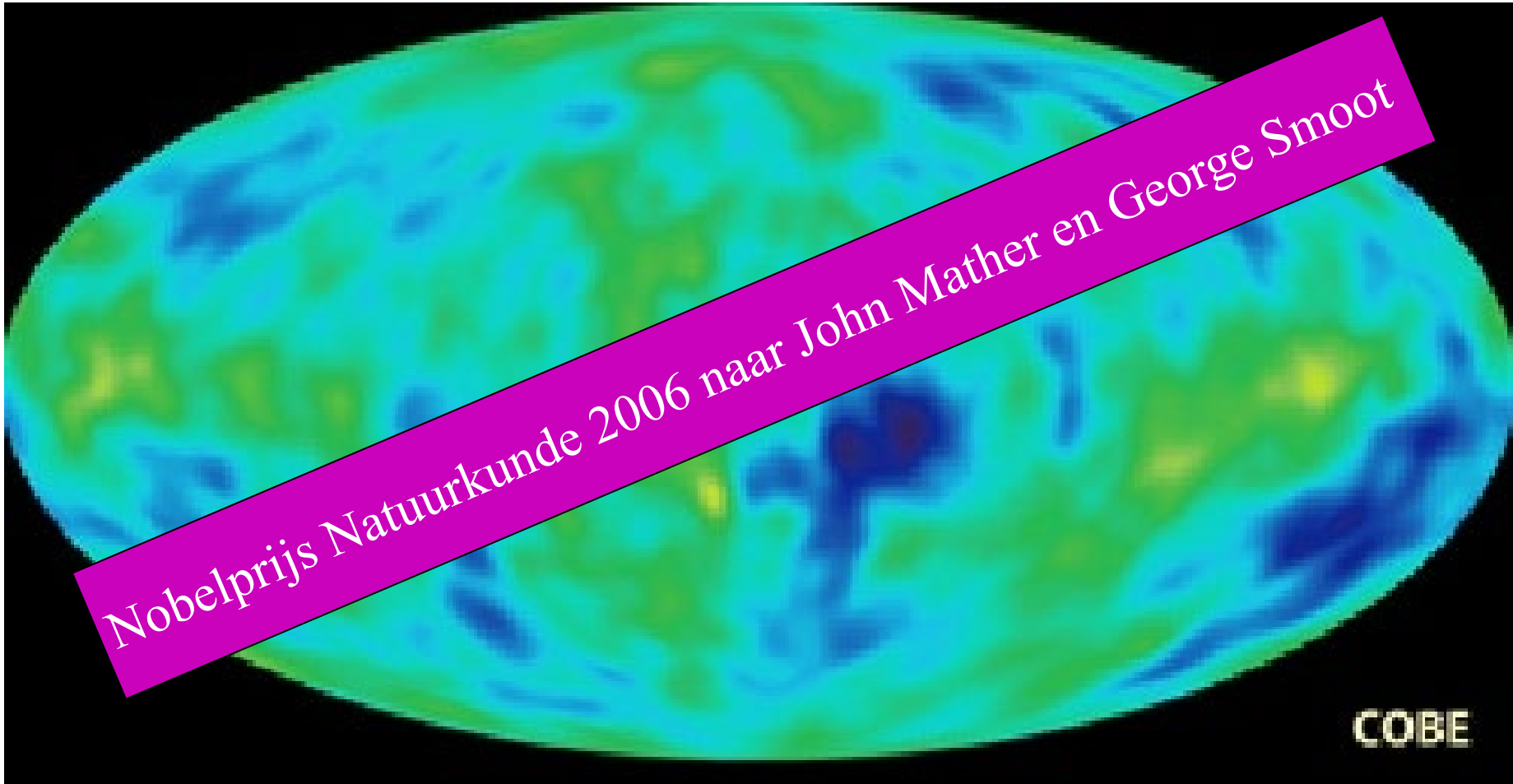
Oppervlak van een zwart  
lichaam met een oppervlakte  
temperatuur van 2,726 K



# electromagnetic content of the universe today



# Eindresultaat COBE: CMB anisotropie

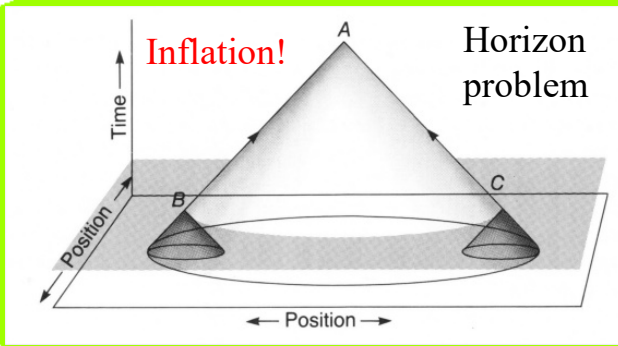


# WMAP resultaten

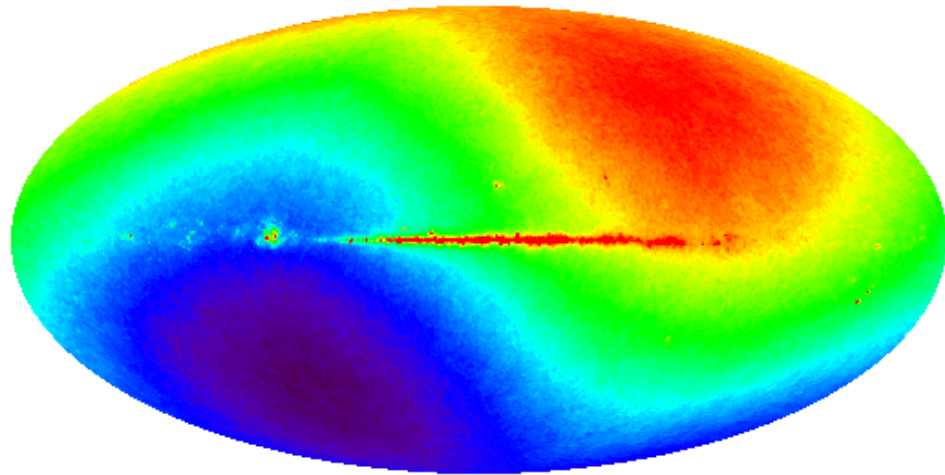
**ROOD**-**BLAUW** = 4-0 K

monochroom groen!

extreem uniforme temperatuur 2,72 K

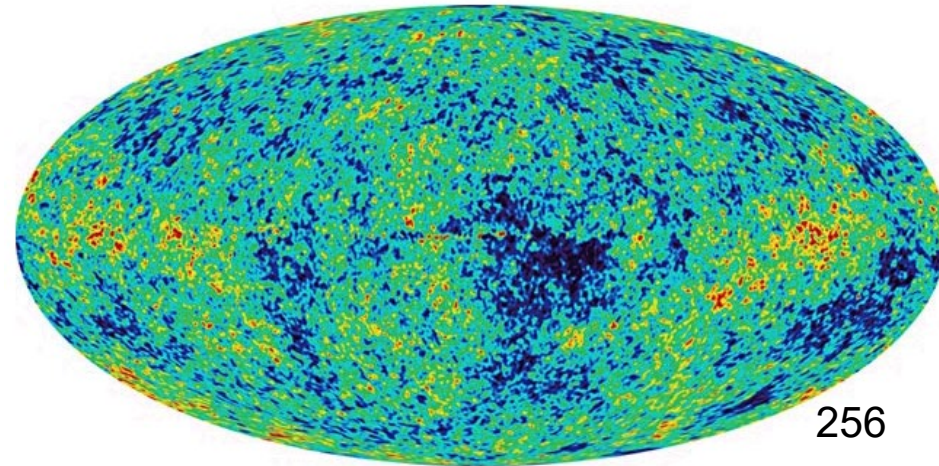
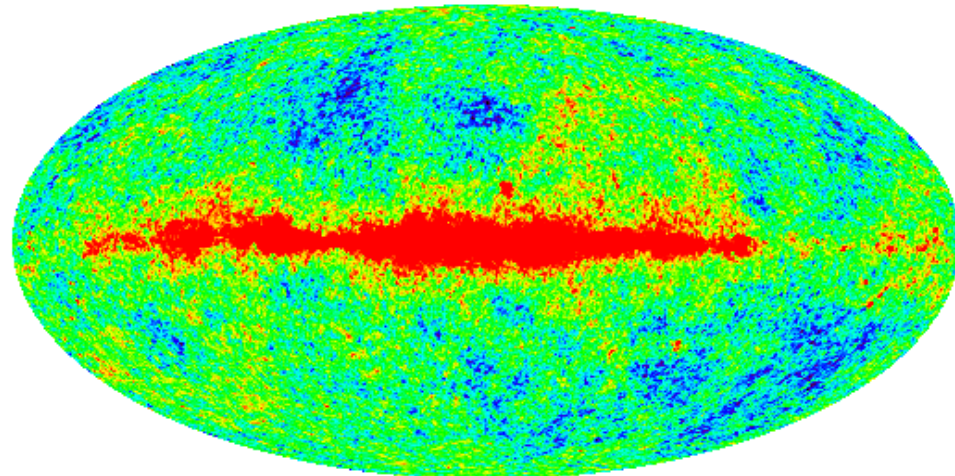


**ROOD** - **BLAUW** = 2,729 - 2,721 K

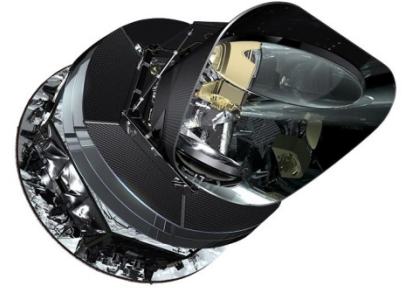


**ROOD** - **BLAUW** = 0.0004 K verschil

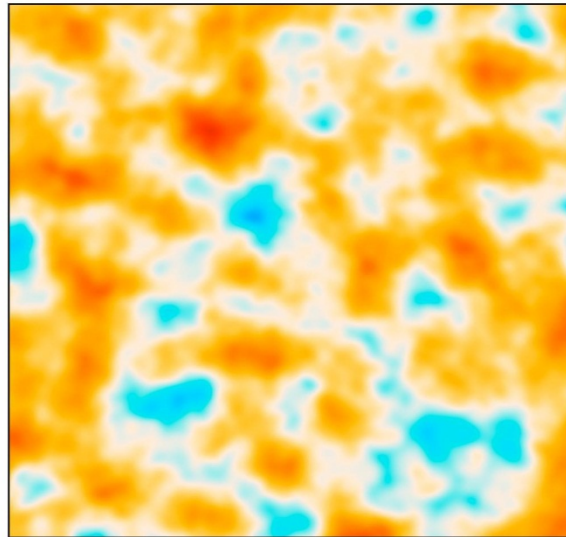
CMB temperature distribution final result



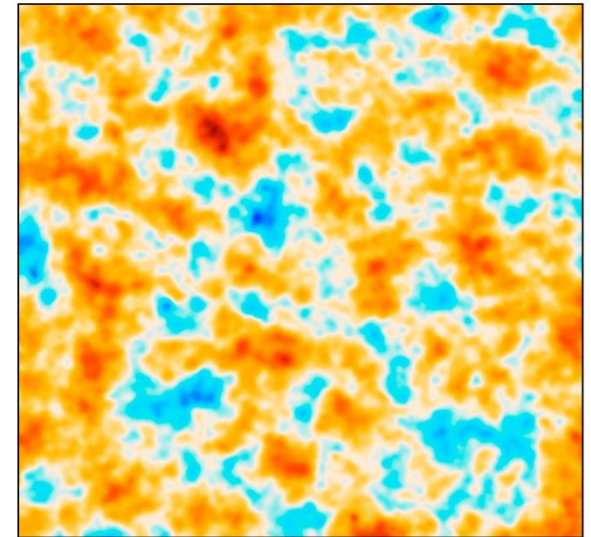
# Improvement in spatial resolution of the CMB probes



COBE



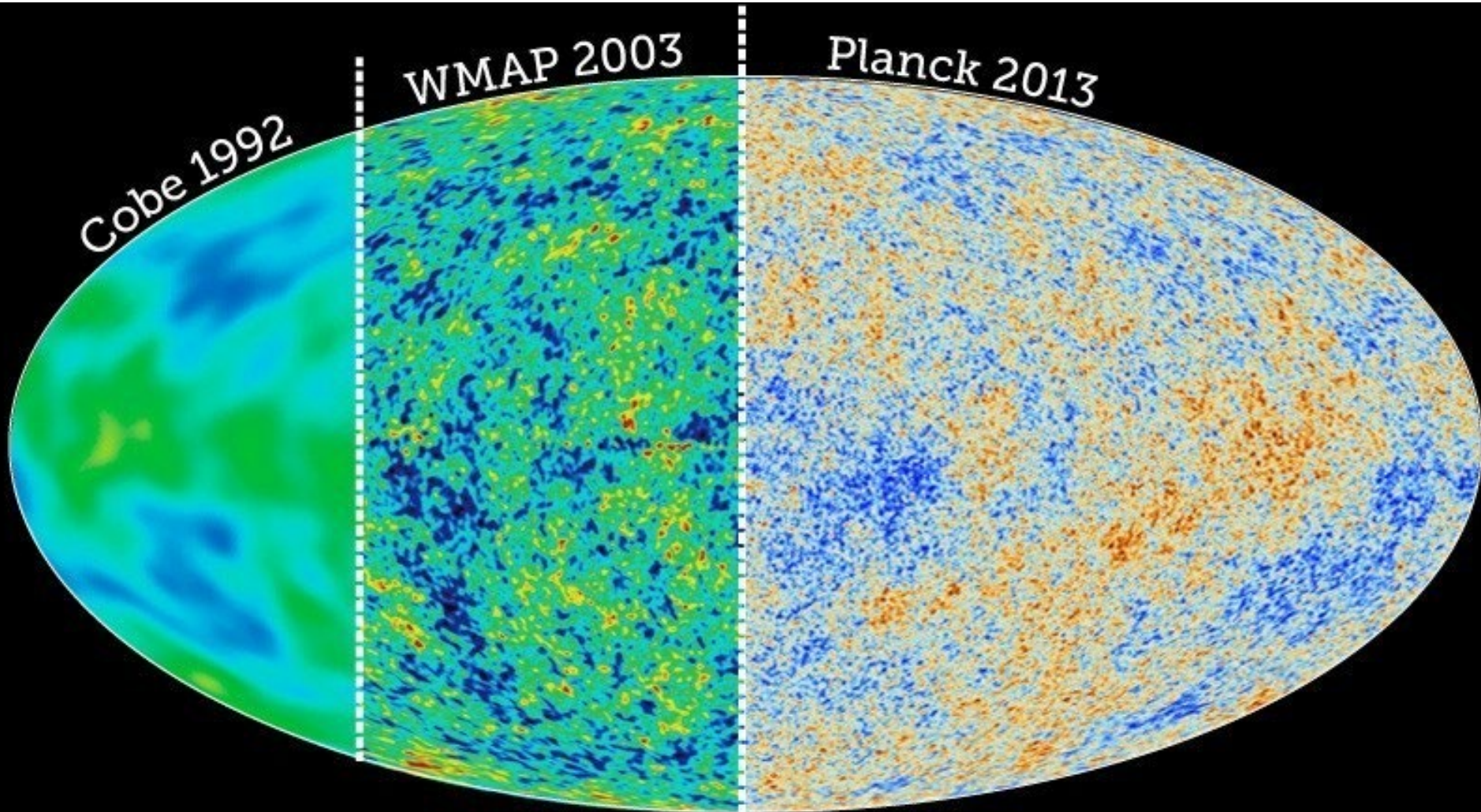
WMAP



Planck



# Verbetering beeldscherpte $\mu$ -golfachtergrondstraling (CMB) met 3 generaties satellieten



# Diagnostiek aan Grote-Schaal structuur

**Planck(ESA):** fluctuaties in de  $\mu$ -golfachtergrond

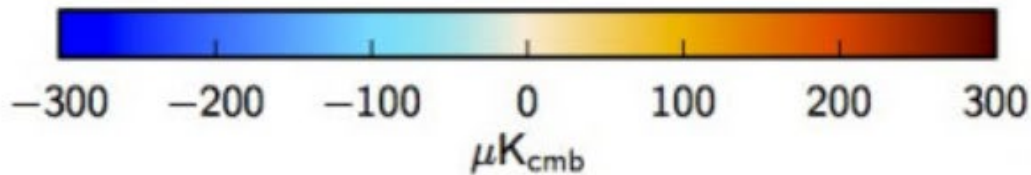
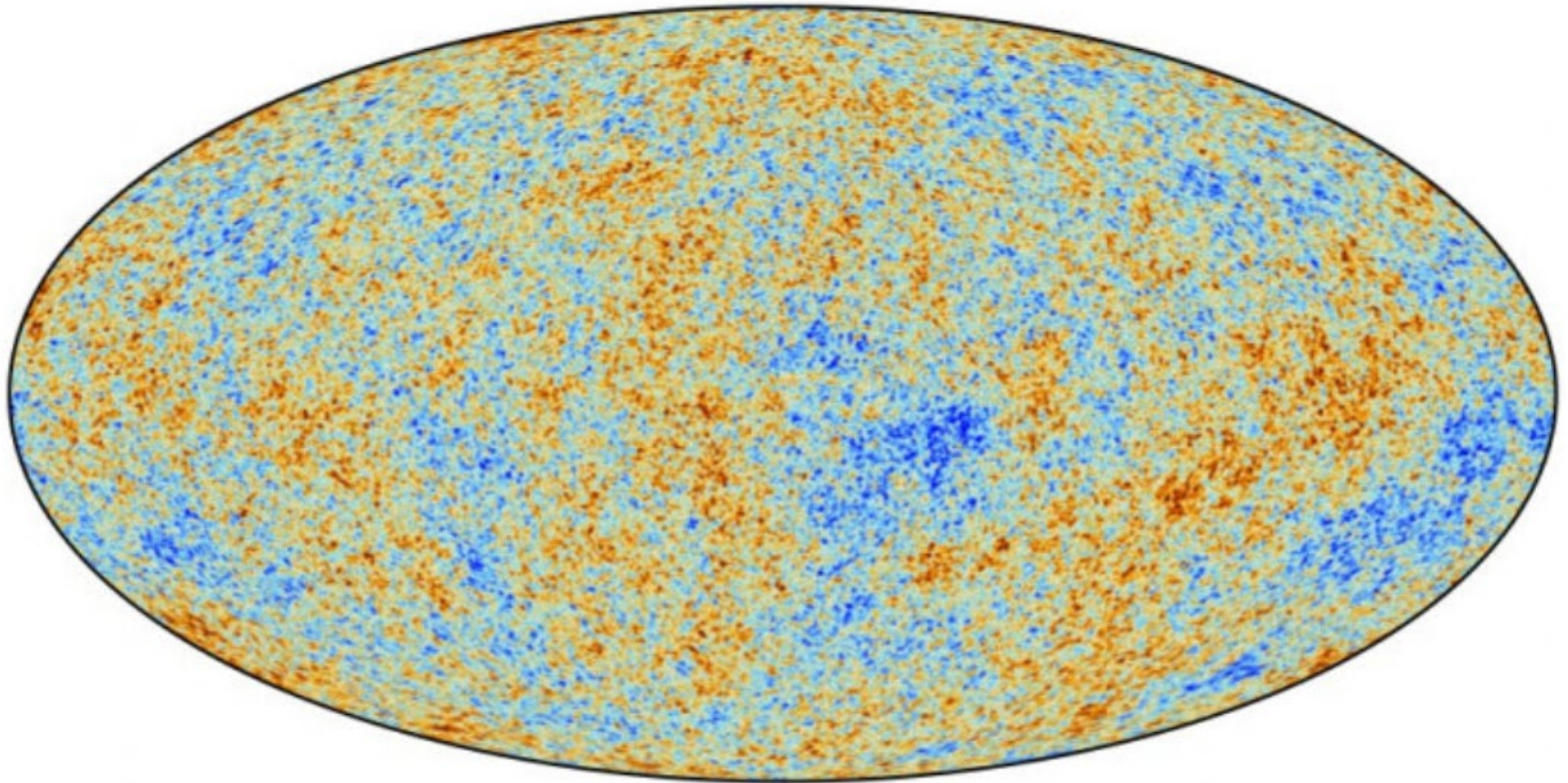
Operatie: 14 mei 2009 lancering met Ariane-V raket,  
augustus 2013 uit baan, oktober 2013 'switch off'

Locatie in **faseruimte voor diagnostiek t.o.v. WMAP:**

- Frequentieband tot 1 THz ( $\sim 10$  x hoger)
- Ruimtelijk: 5-boogminuten-schaal ( $\sim 3$ x beter)
- Temperatuursfluctuaties  $\Delta T/T = 10^{-6}$  ( $\sim 5$  x beter)
- Polarisatiegraad ( $\sim 3$ x beter)

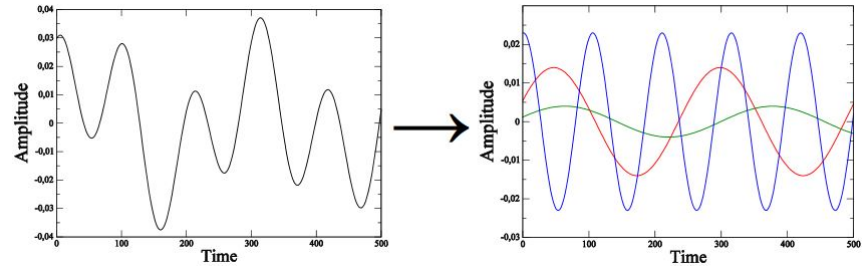


# Planck final (2018): Temperature/density fluctuations CMB, average CMB temperature 2.726 K



# Temperatuur-/dichtheidsfluctuaties: ontbinding in sferische harmonischen

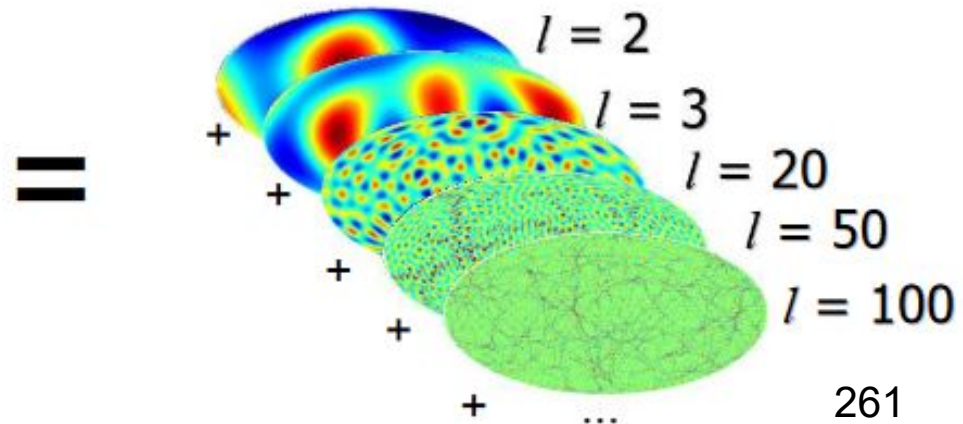
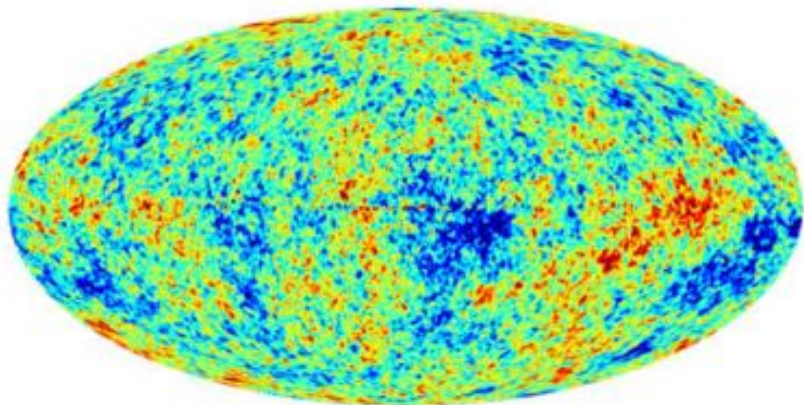
$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n \cos(2\pi nx/D + \phi_n)$$



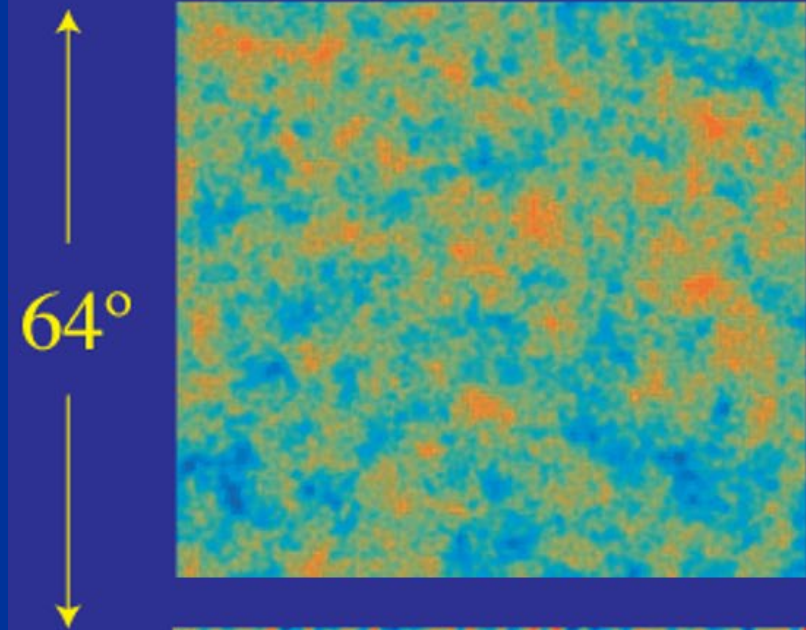
$$T(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

$$Y_{lm} = e^{im\phi} P_l^m(\cos \theta)$$

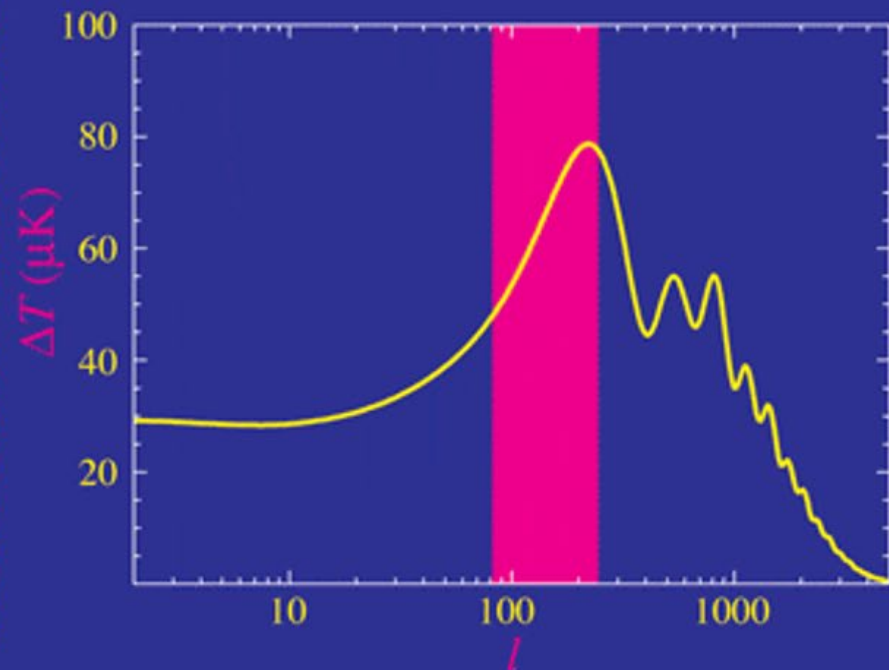
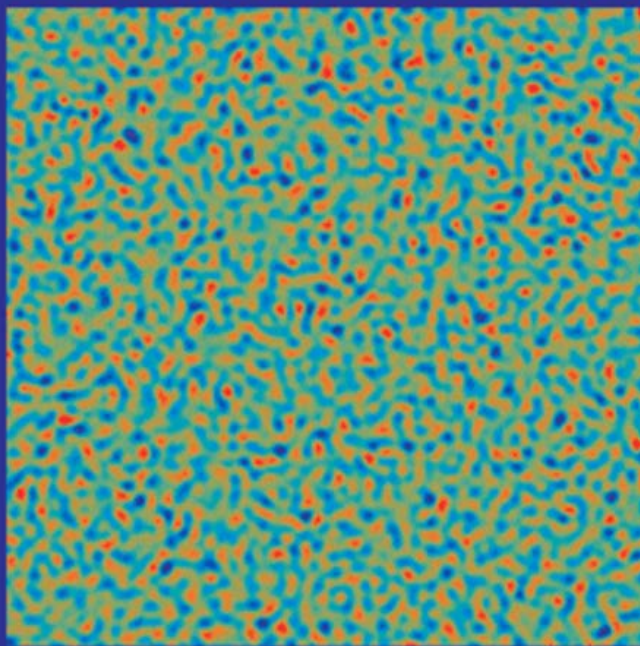
$$C_l \equiv \langle |a_{lm}|^2 \rangle \equiv \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^l |a_{lm}|^2$$





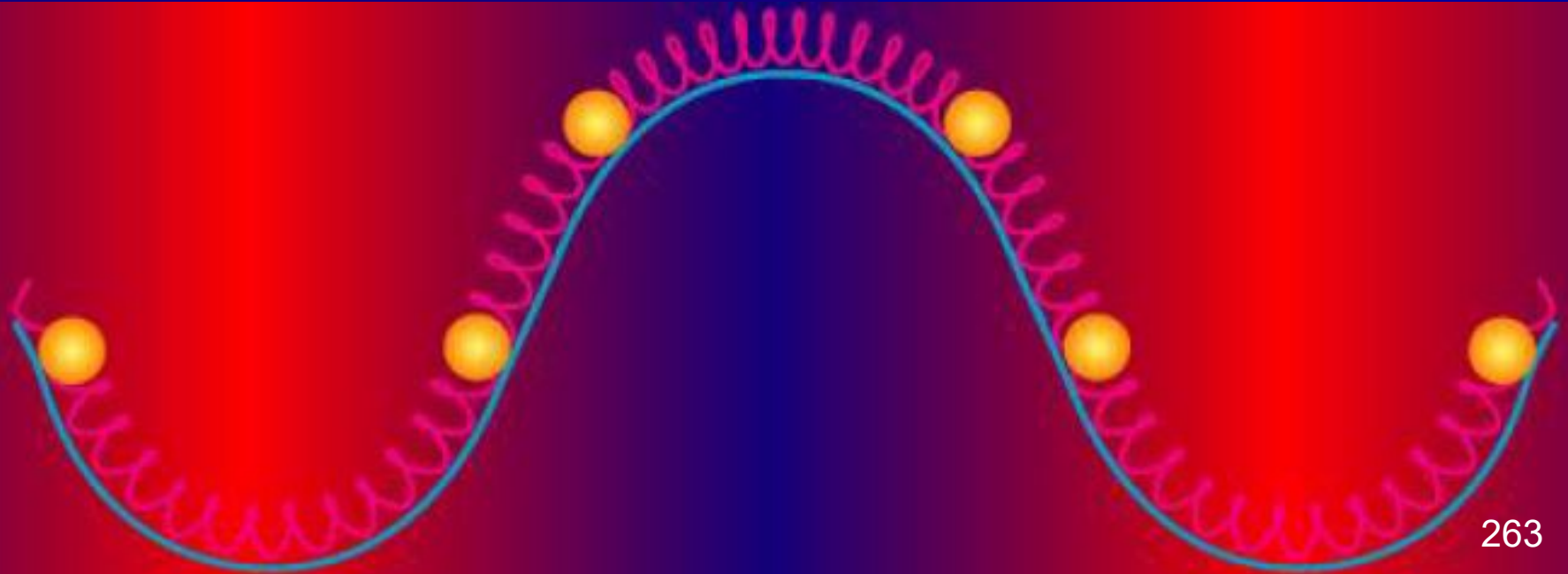


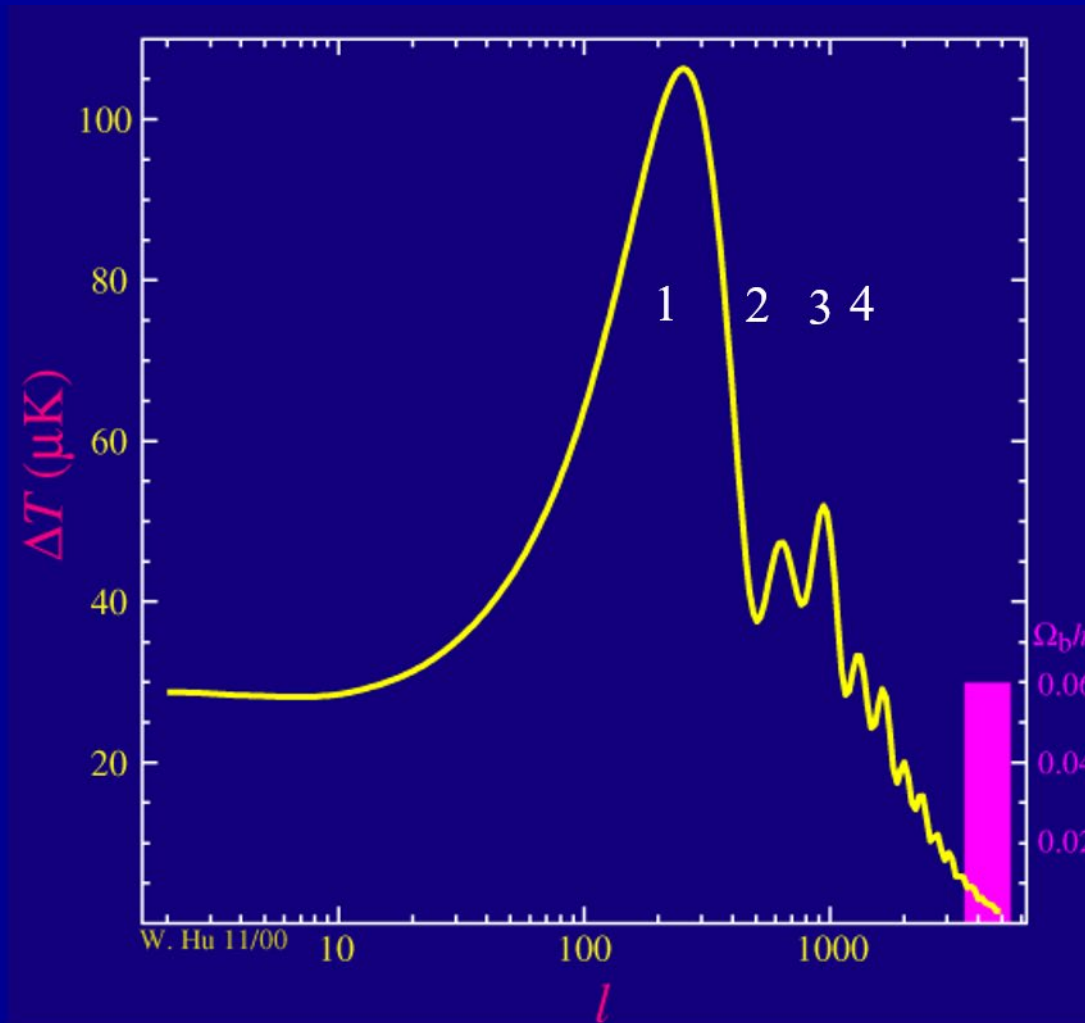
Het temperatuur 'power spectrum' sorteert de intensiteit (amplitude) van de temperatuursverschillen  $\Delta T$  in de hemelverdeling van  $T$  over de verschillende hoekschalen.





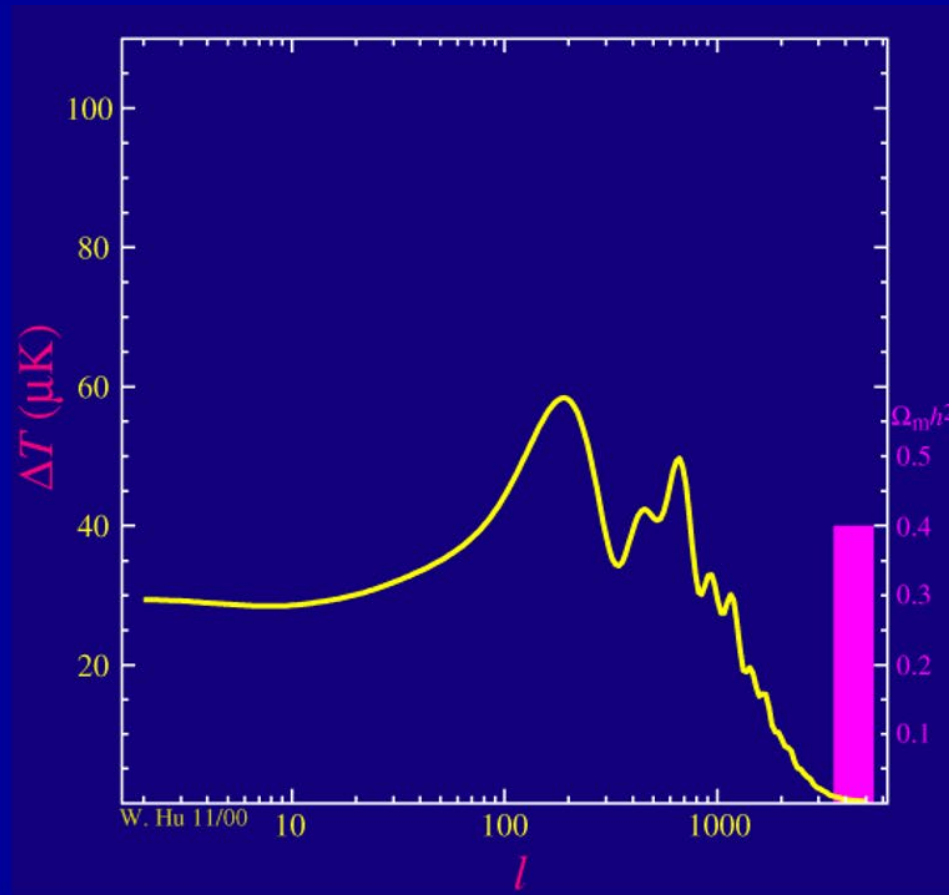
Vroege heelal (pre-recombinatie) gevuld met **baryon-foton plasma** in een gravitatie-potentiaal met pieken en dalen: het gevolg van Donkere Materie (**DM**).  
Wisselwerking van stralingsdruk en zwaartekracht → drukgolven, gebieden met afwisselend hoge en lage dichtheid → **akoestiek**





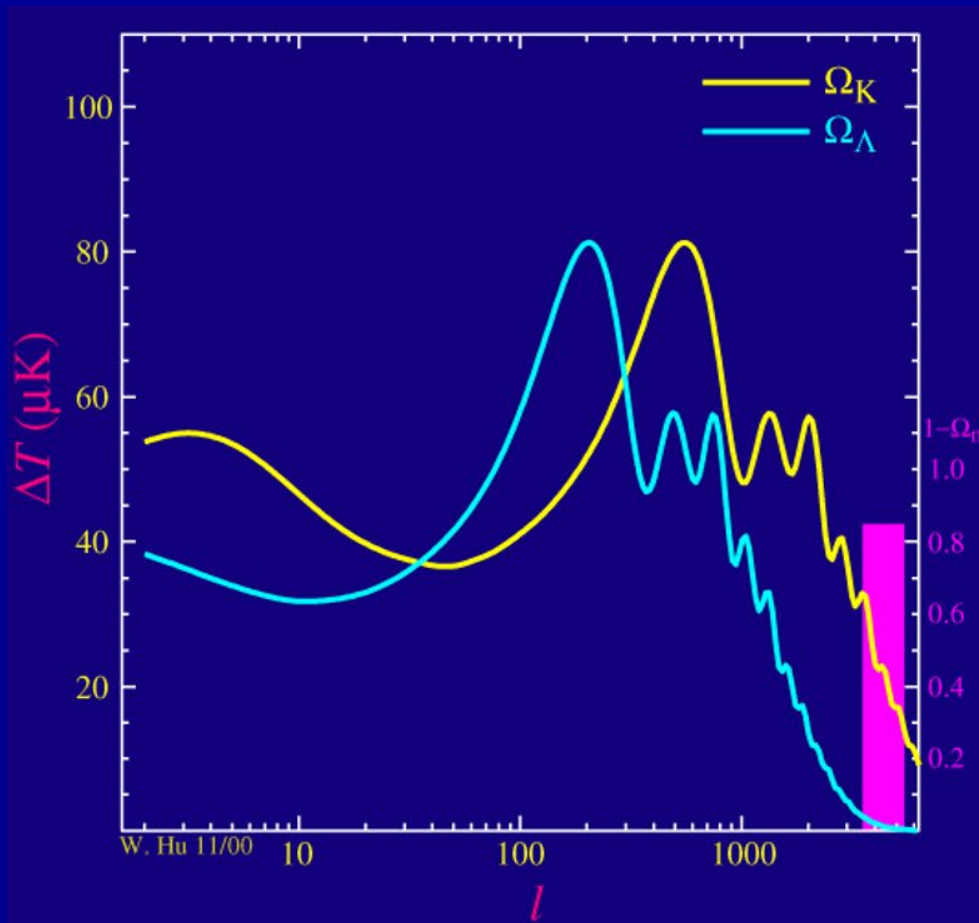
Verhoging van de baryonendichtheid (normale materie) moduleert de hoogte van de akoestische pieken. De oneven genummerde pieken worden versterkt t.o.v. de even genummerde pieken.



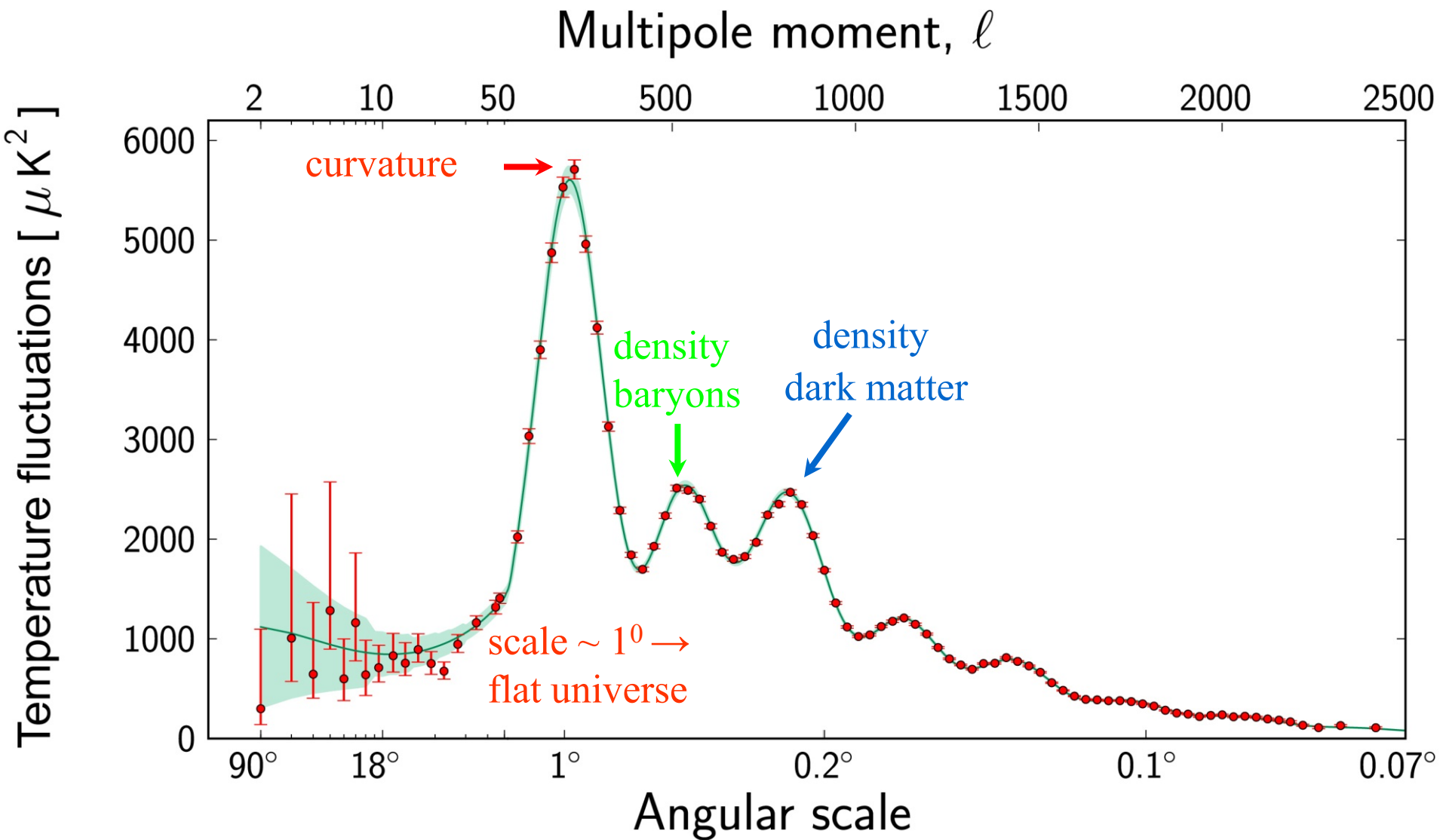


Donkere-materie verhoogt de totale materiedichtheid bij onveranderde baryonen-dichtheid. Bij toename van de donkere-materiedichtheid neemt de sterkte van de akoestische pieken af omdat de invloed van de druk t.g.v. straling (fotonen) verminderd. De sterkte van de even-oneven modulatie, tengevolge van de baryonen, neemt toe.





Kromming van de ruimte en Donkere Energie veranderen beiden de **hoekdiameter-afstand** naar het oppervlak van de laatste verstooing (waar de recombinitie van het hete baryon-plasma optrad). Dit resulteert in een verschuiving van de piekposities langs de as van de multipool  $l$ .



Acoustic peaks related to density waves in the very early Universe

## Anomalie 1:

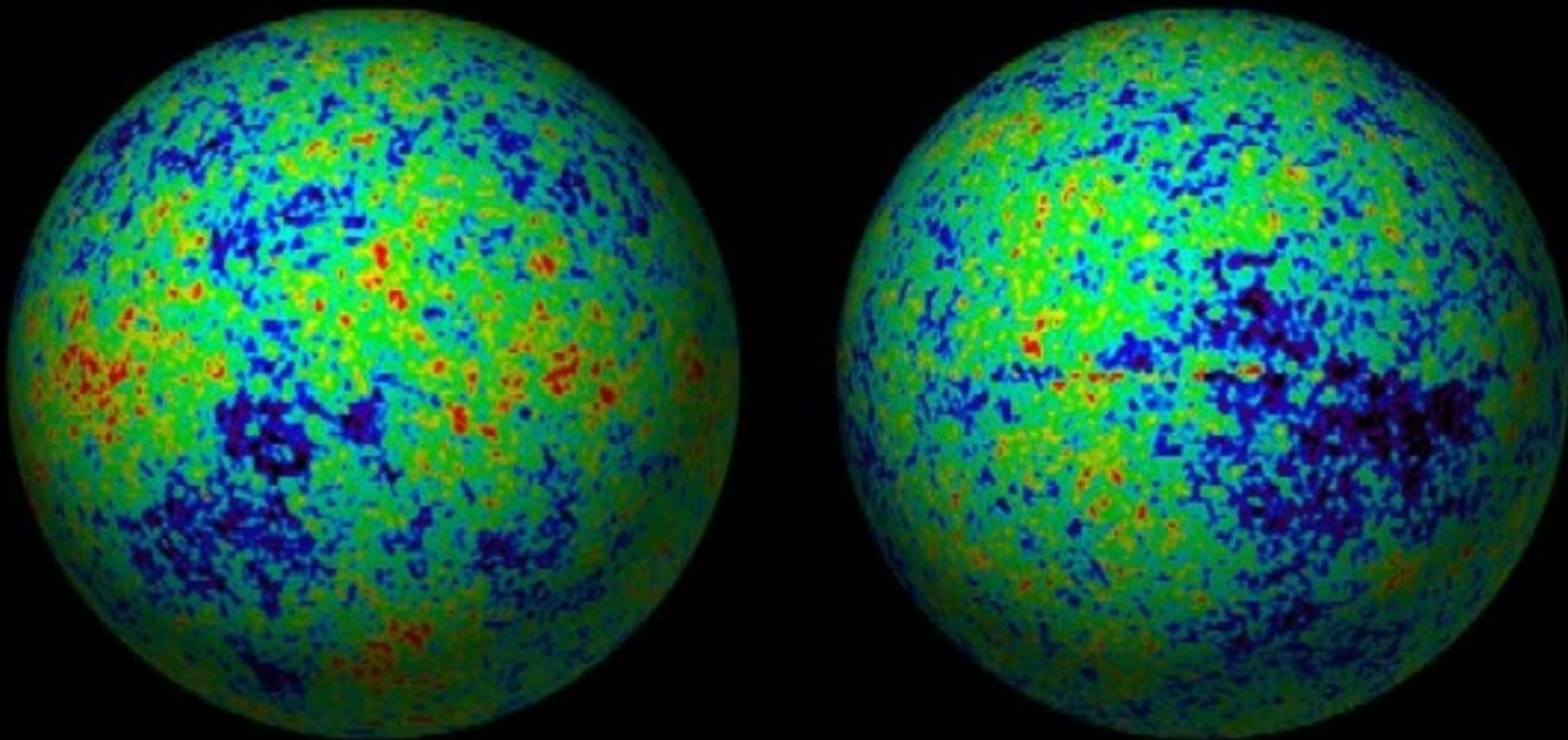
Lager vermogen ( $\sim 10\%$ ) in de temperatuursfluctuaties bij grote hoekschalen ( $6^\circ - 90^\circ$ ) dan verwacht op grond van het best passende kosmologisch model:

Volstreekte isotropie van het heelal, met name op de grootste ruimtelijke hoekschalen staat mogelijk ter discussie.

## Anomalie 2: geen volstrekte isotropie

noordelijk en zuidelijk ecliptisch halfrond zijn niet hetzelfde

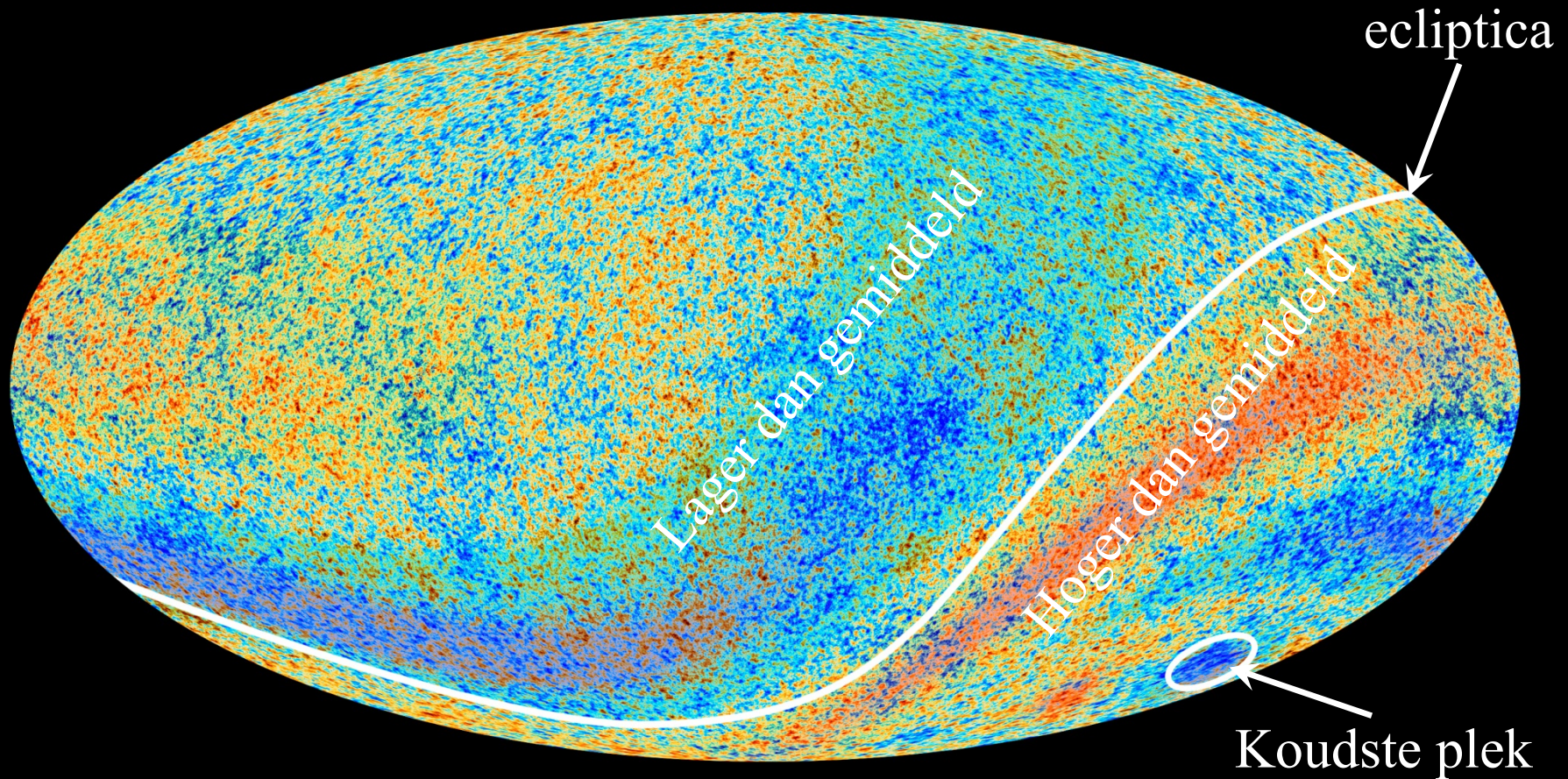
**Kosmische variantie?**



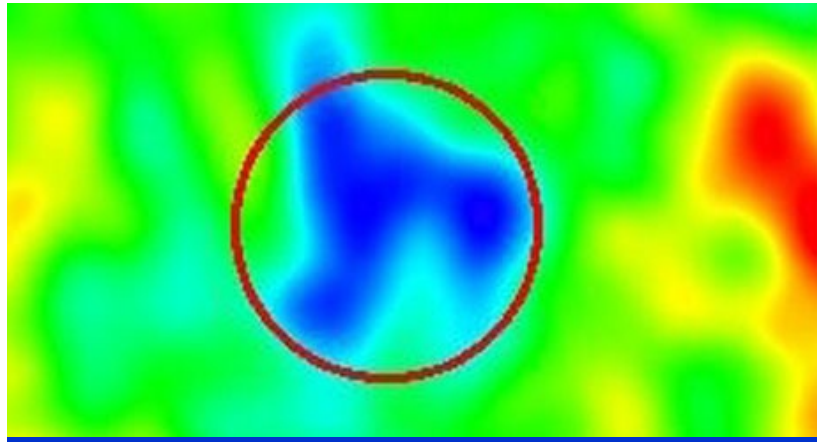


# Anomalie 3: asymmetrie gemiddelde temperatuur

N-ecliptisch halfrond wat **kouder**, Z-ecliptisch halfrond  
wat **warmer**, (te) grote **koude plek**



# Anomalie-4: (te) grote extreem koude plek in Eridanus



Diameter  $\approx 5^\circ$ ,  $\Delta T \approx 70 \mu\text{K}$

Onwaarschijnlijke combinatie van hoekafmeting ( $5^\circ$ ) en temperatuurverschil ( $70 \mu\text{K}$ ).

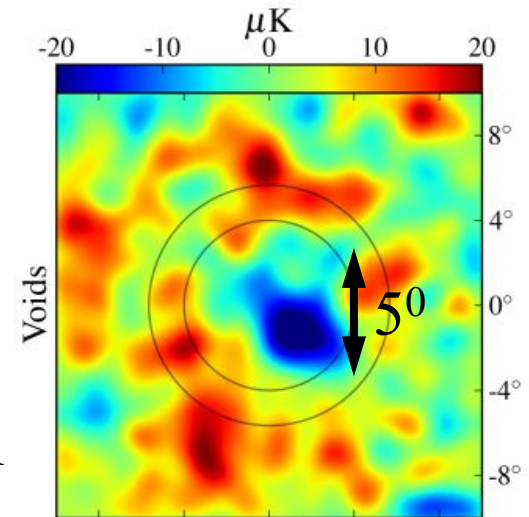
De gemiddelde  $\Delta T$  (rms) over de CMB-hemel (t.o.v.  $\sim 2.7\text{K}$ ) is  $18 \mu\text{K}$ , en de grootste temperatuursfluctuaties treden op bij een schaalgrootte van  $1^\circ$

Imprint supervoid on CMB

**Verklaring** gezocht met de in Eridanus gevonden ‘**supervoid**’ (superholte) met een afmeting van  $> 0.5$  miljard lichtjaar op een afstand 6 miljard lichtjaar ( $z=1$ ).

Recent onderzoek laat zien dat het statistisch gewicht van deze correlatie laag is!

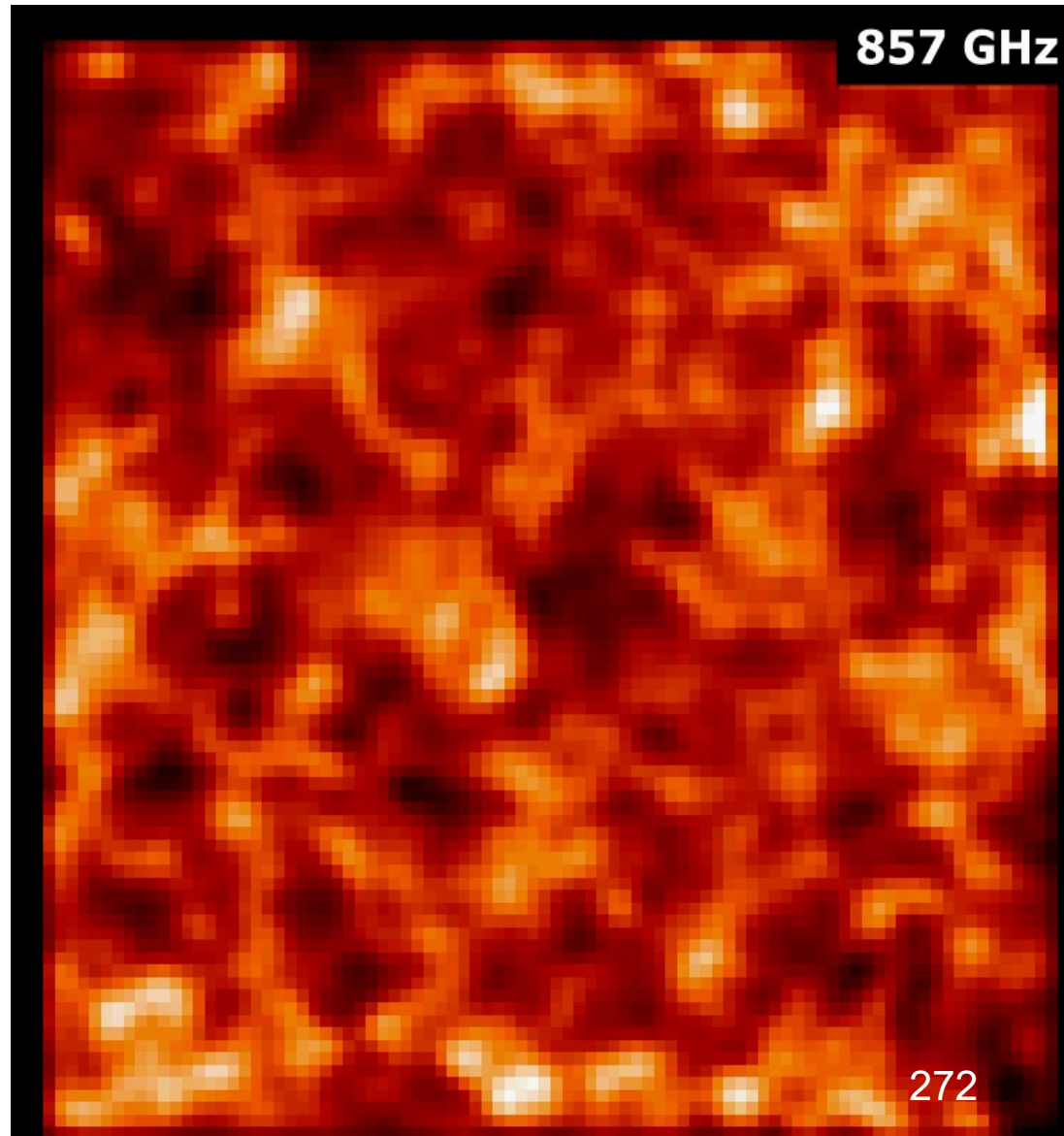
Bovendien kan een holte van dergelijke afmetingen volgens de huidige theorie niet worden gevormd!





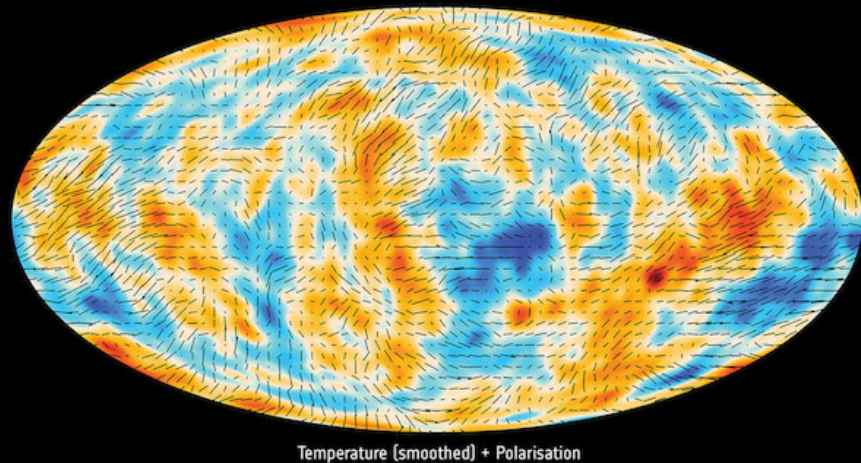
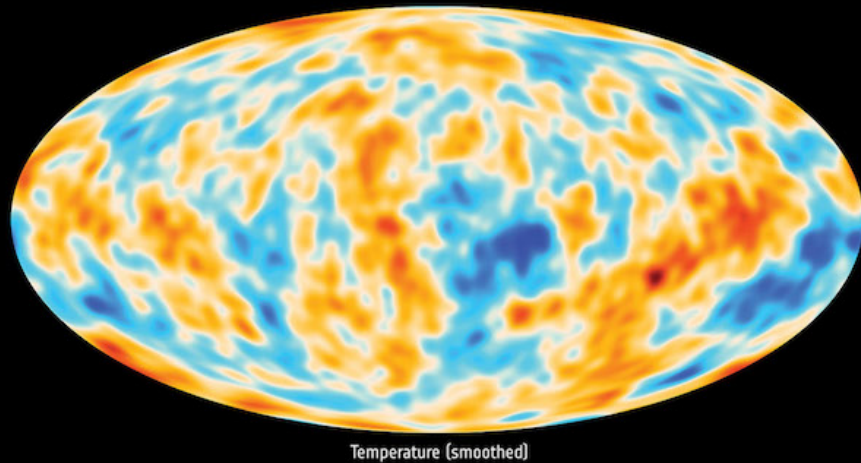
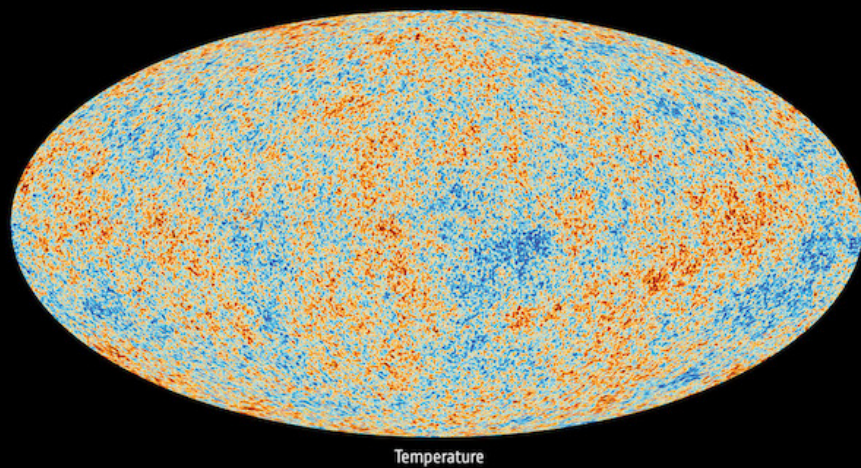
# The Planck mapped CIB changing with frequency

1. The image shows large structures containing Ultra-Luminous Infrared galaxies.
2. These galaxies form stars at a very high rate (thousand times faster than the Milky Way).
3. It is expected that the lowest Planck frequency CIB maps (217 GHz) show the most distant structures formed less than 2 billion years after the Big Bang.
4. The change in the structures observed demonstrate we are seeing younger layers of galaxies in the Universe.



# Planck 2018 eindresultaat

Temperatuurs- /dichtheidsfluctuaties  
in de kosmische  $\mu$ golf-achtergrond-  
straling



Correlatie temperatuurs-/dichtheids-  
fluctuaties met polarisatierichting  
CMB-straling



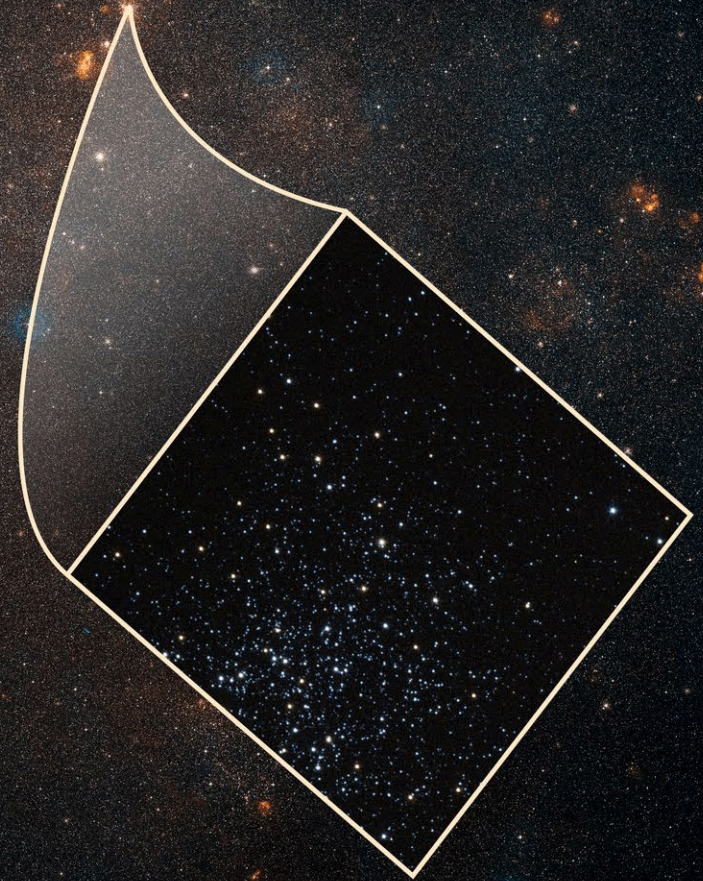
# kosmologisch parameters volgens Planck 2018

- Leeftijd van het heelal:  $t_0 = 13,798 \pm 0.037$  miljard jaar
- Hubble constante:  $H_0 = 67,4 \pm 0,5 \text{ km sec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} *$
- Zwaartekracht producerende materie:  $\Omega_m = 31,5 \%$
- Gewone materie (baryonen):  $\Omega_b = 5.0 \%$
- Donkere materie:  $\Omega_d = 26,5 \%$
- Donkere energie:  $\Omega_\Lambda = 68,5 \%$
- Dichtheid van het heelal **binnen 1% van de kritische dichtheid  $\rho_c$**  voor een vlak heelal.

\* De waarde van deze Hubble constante uit de data voor het ‘verre’ (= vroege) heelal verschilt significant van de recentste waarde afgeleid uit een Cepheiden sample uit het lokale heelal.



# Hubble opname stercluster in Grote Magelhaense Wolk Calibratie (2019): ‘Cosmic Distance Ladder’ met 70 Cepheiden



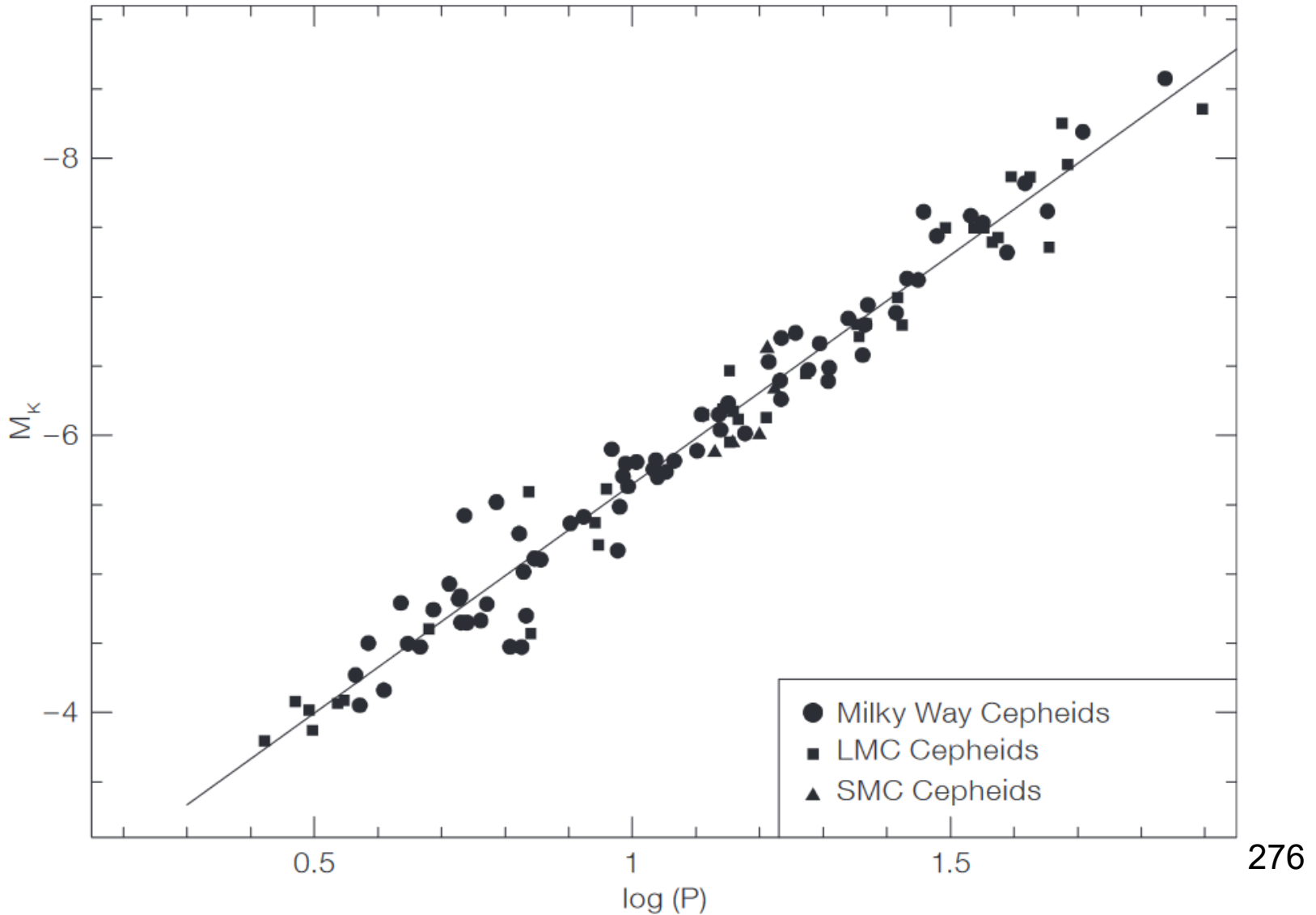
275

Hubble constante ‘Late Universe’  $H_0 = 74.03 \pm 1.42 \text{ km/s/Mpc}$



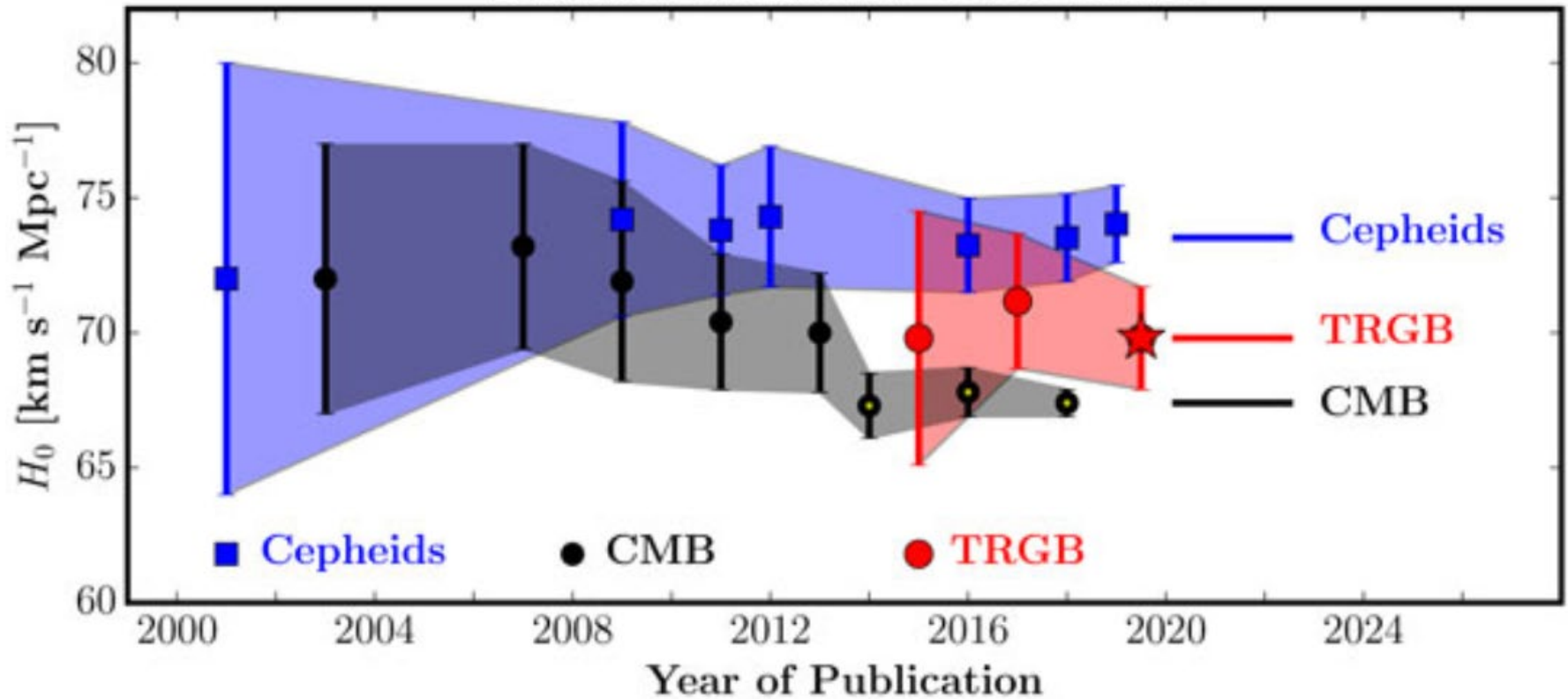
# Cepheids: period – luminosity relation

## Milky Way, LMC and SMC



# Emerging discrepancy $H_0$ measurements for distant (early) and local (late) Universe

Hubble Constant Over Time

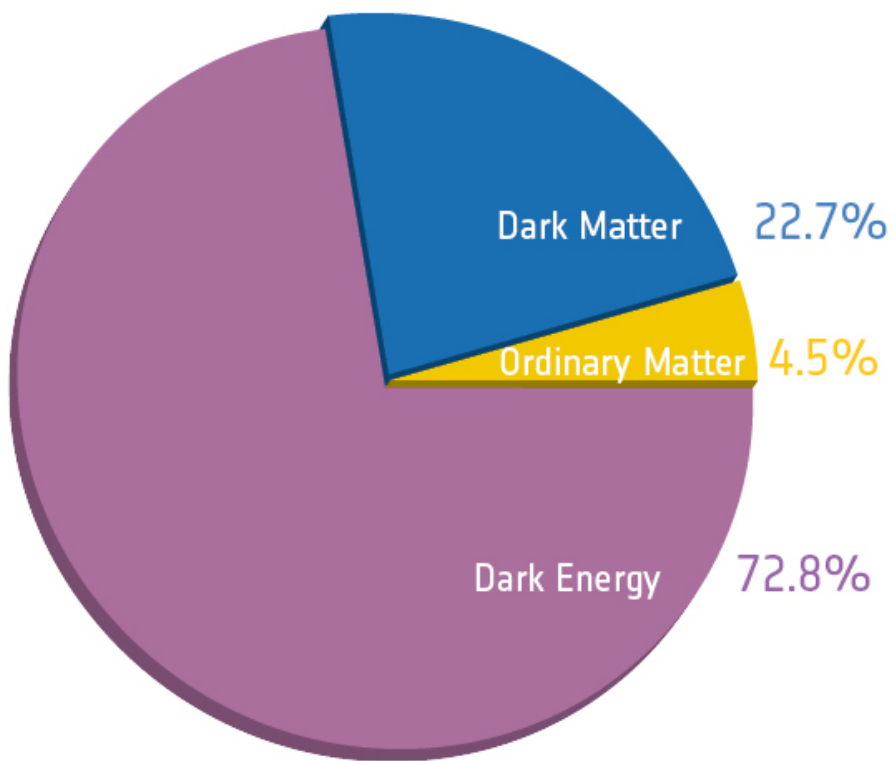


Discrepancy Cepheids – Planck =  $6.6 \pm 1.5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

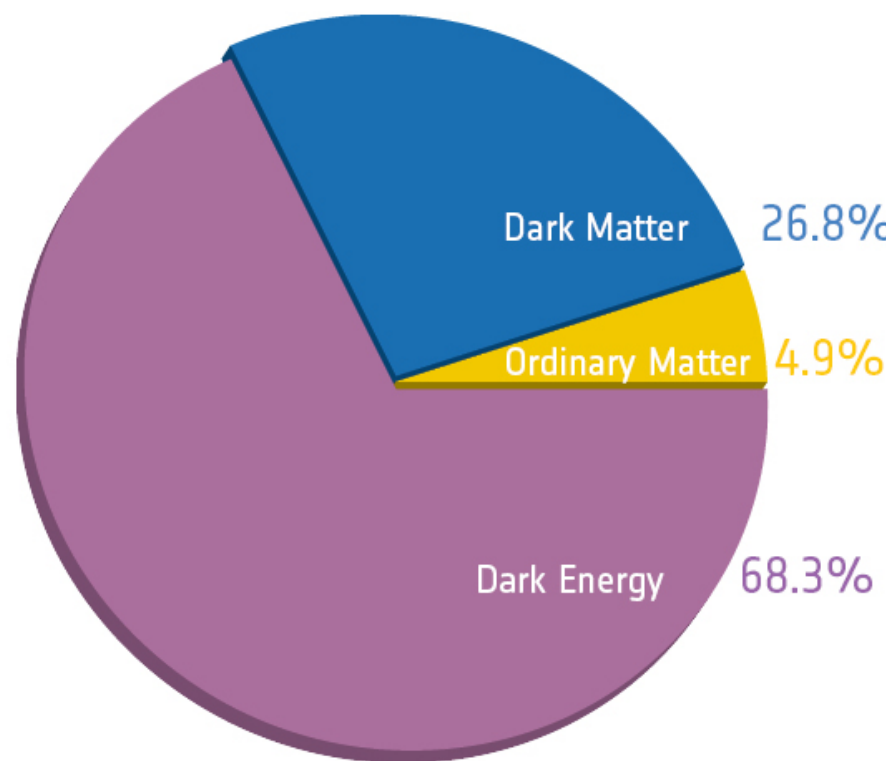
4.4 standard deviations (probability  $< 10^{-5}$ ) 277

Implies new physics in the current  $\Lambda$ CDM cosmology model?

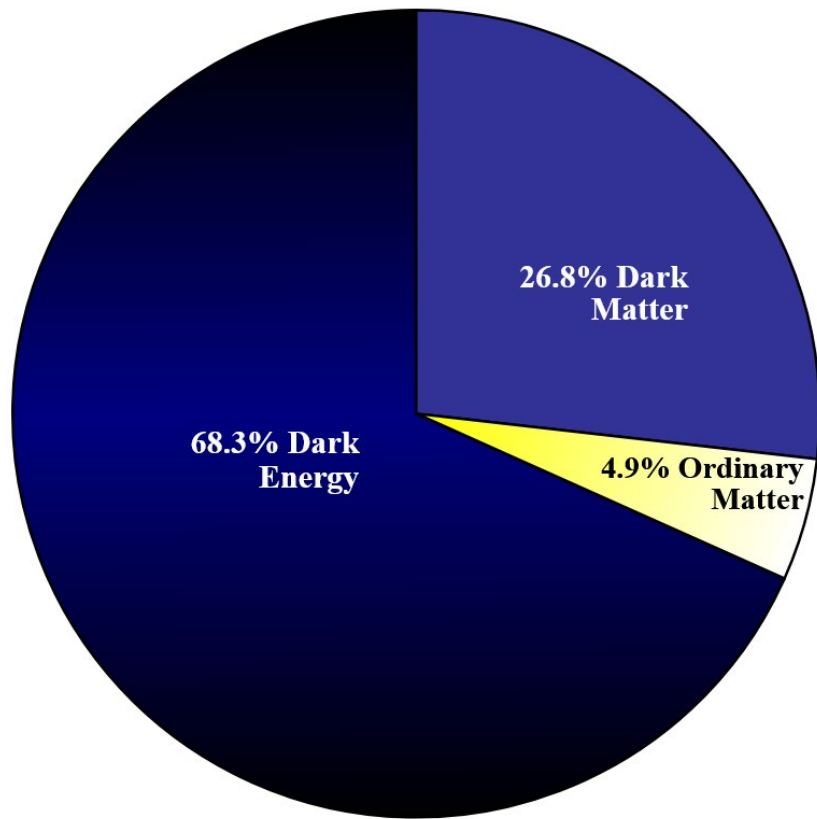




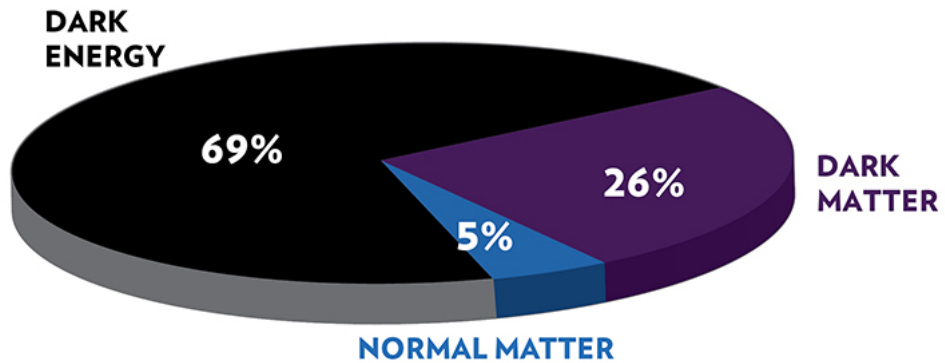
Before Planck



After Planck



### ENERGY DISTRIBUTION OF THE UNIVERSE



# Conclusies "Planck $\mu$ -golfachtergrond survey 2018:

we weten nu nog preciezer wat we niet weten!

- $\Lambda$ CDM ('concordantie') model is nog overtuigender bevestigd als het model dat de waarnemingen het beste beschrijft.  
Er zijn niettemin andere kosmologische modellen die nog zodanig redelijk bij de waarnemingen passen dat ze vooralsnog niet kunnen worden uitgesloten.
- **Inflatie na explosie** d.m.v. een onbekend inflatieveld  
De gemeten anomalieën, indien reëel, zetten dit model **onder druk**
- **Structuurvorming** door onbekende aantrekking: **donkere materie**
- **Versnelde uitdijng** door onbekende afstoting: **donkere energie**

## Diagnostiek donkere energie

Afname/toename van de schijnbare SN-Ia helderheid  
(als gestandaardiseerde bron voor bekende intrinsieke  
lichtkracht) naar grotere roodverschuiving  $z$ .



# SN 1987A, Grote Maghellaense Wolk



# Hoge-z SN-Ia surveys voor kosmologie

Twee teams, start in 1994

- Supernova Cosmology Project (SCP)
- High-z SN search

Eerste aanwijzing voor versnelde uitdijing gepubliceerd in 1998.

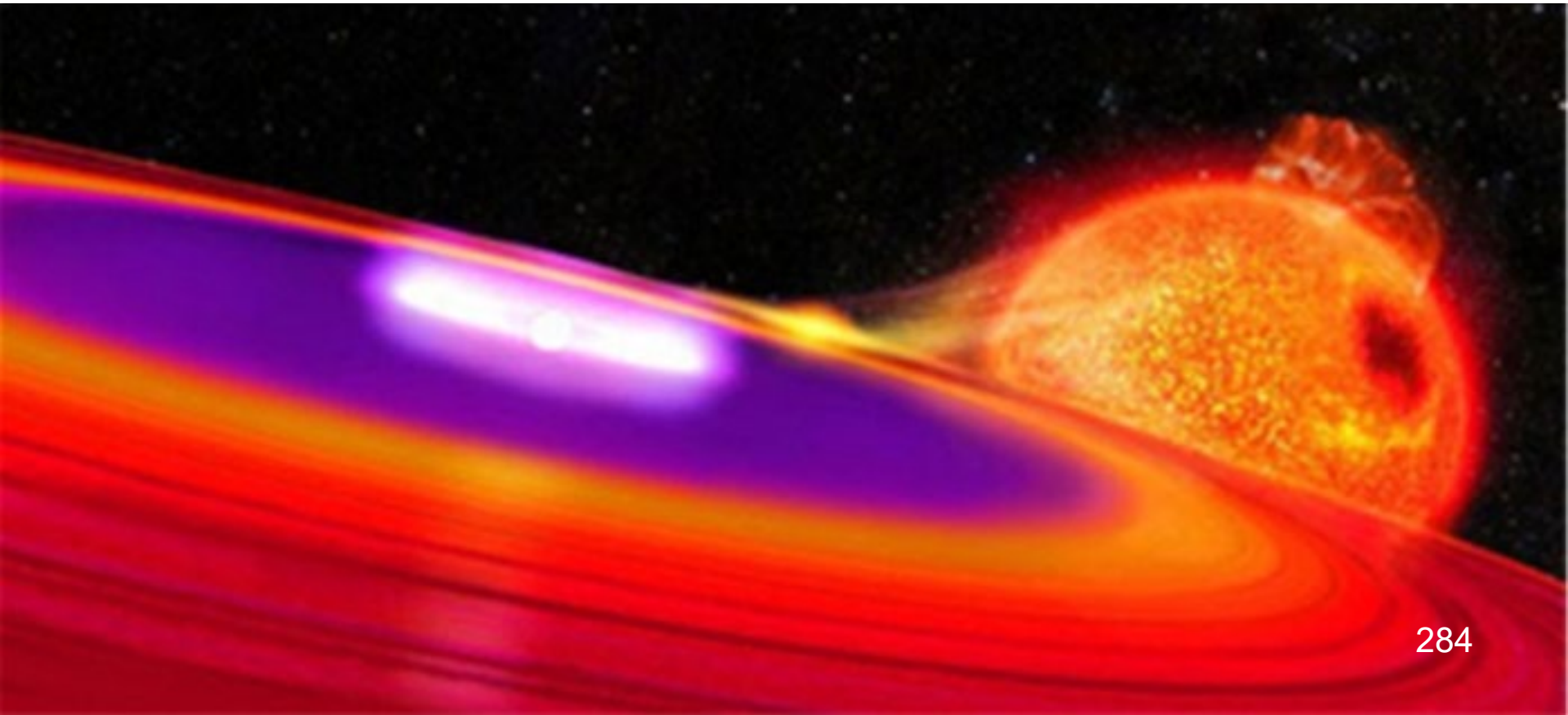
## Methodiek:

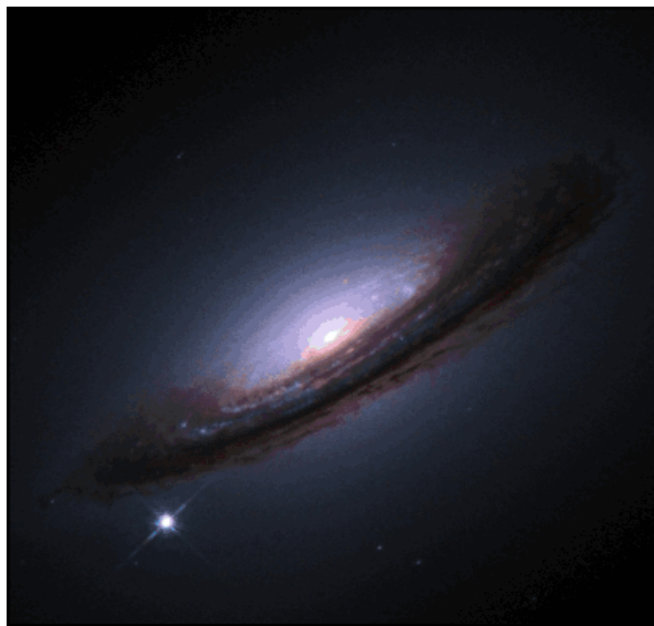
In een heelal **gedomineerd door materie** treedt door vertraging van de uitdijing (zwaartekracht wisselwerking) een **toename van de schijnbare SN-helderheid op naar grotere roodverschuiving**.

In een heelal **gedomineerd door donkere energie** treedt door versnelling van de uitdijing (negatieve druk) een **afname van de schijnbare SN-helderheid op naar grotere roodverschuiving**.

# Scenario voor “standard candle” supernova type 1A:

Nauwe dubbelster met compacte component (Witte Dwerf) →  
massaoverdracht van begeleider naar Witte Dwerf (WD) ster →  
totale massaopbouw aan het oppervlak WD tot aan **limiet van 1.44  
zonsmassa's** → verbrandt/ontploft de WD volledig (SN-1A explosie).  
Daarbij komt  $\sim 1M_{\odot}$  radioactief  $^{56}\text{Ni}$  vrij, dat **vervalt tot  $^{56}\text{Fe}$** .



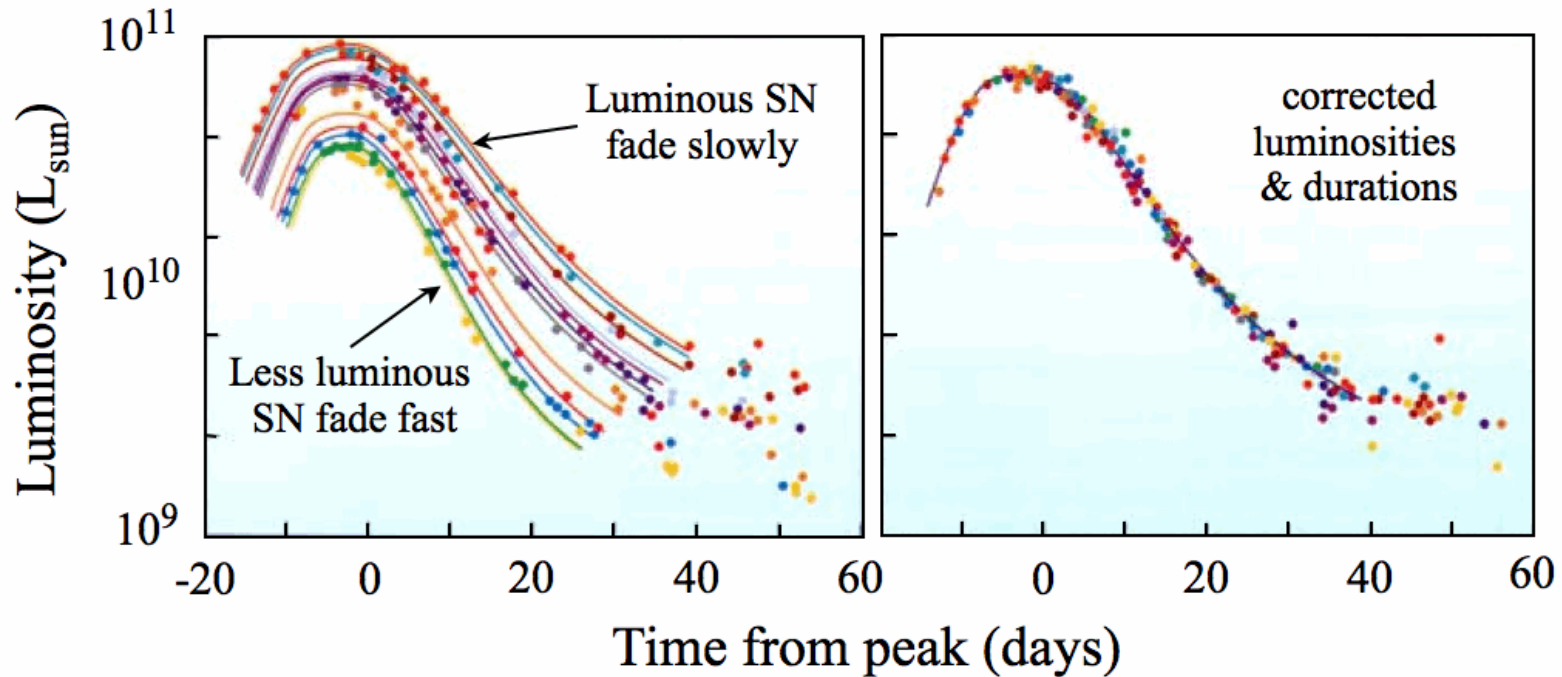


SN 1994d in NGC 4526



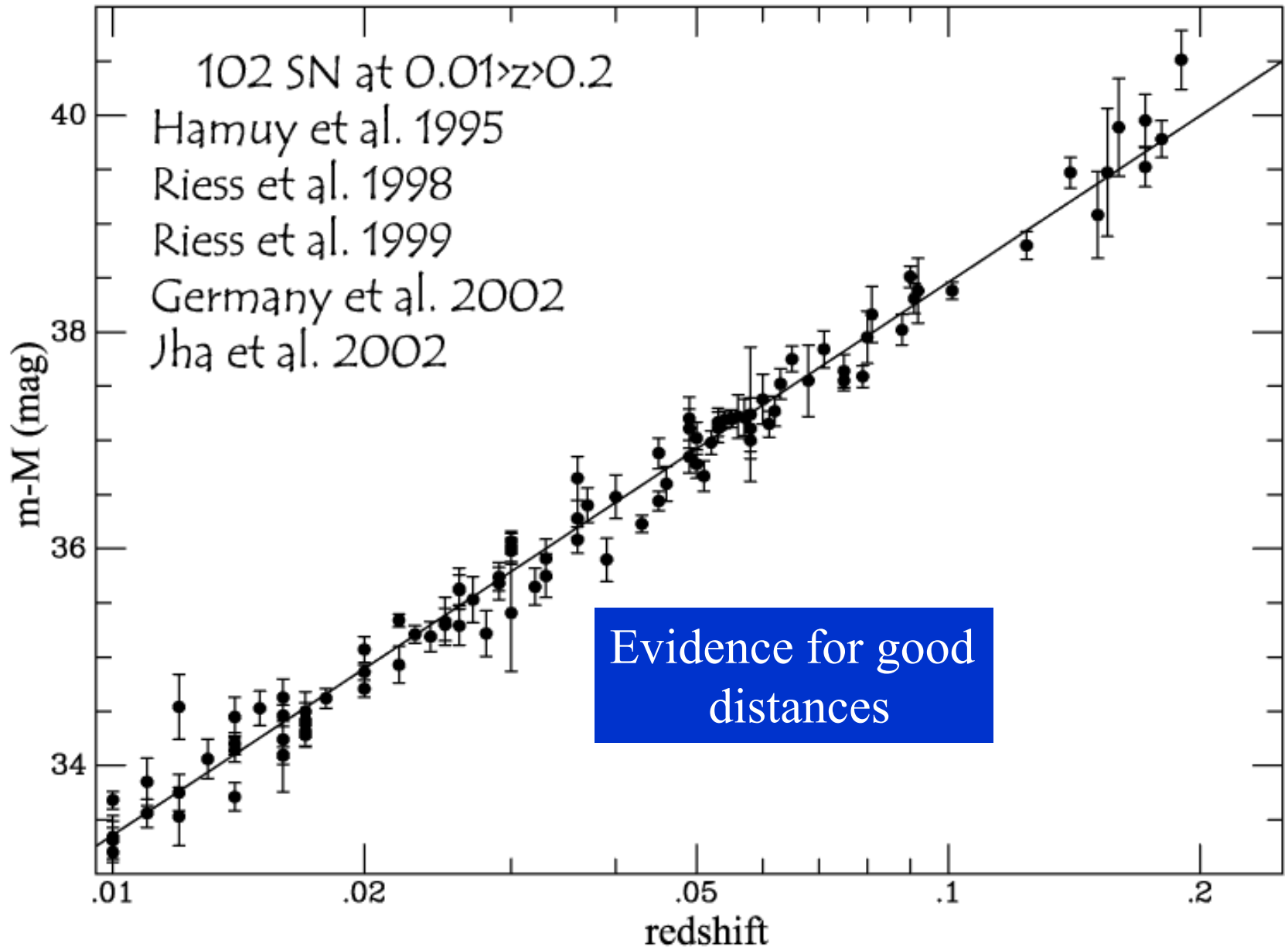
WDS tot limiet van 1.44 zonsmassa's  
→ SN-explosie

White dwarf with companion



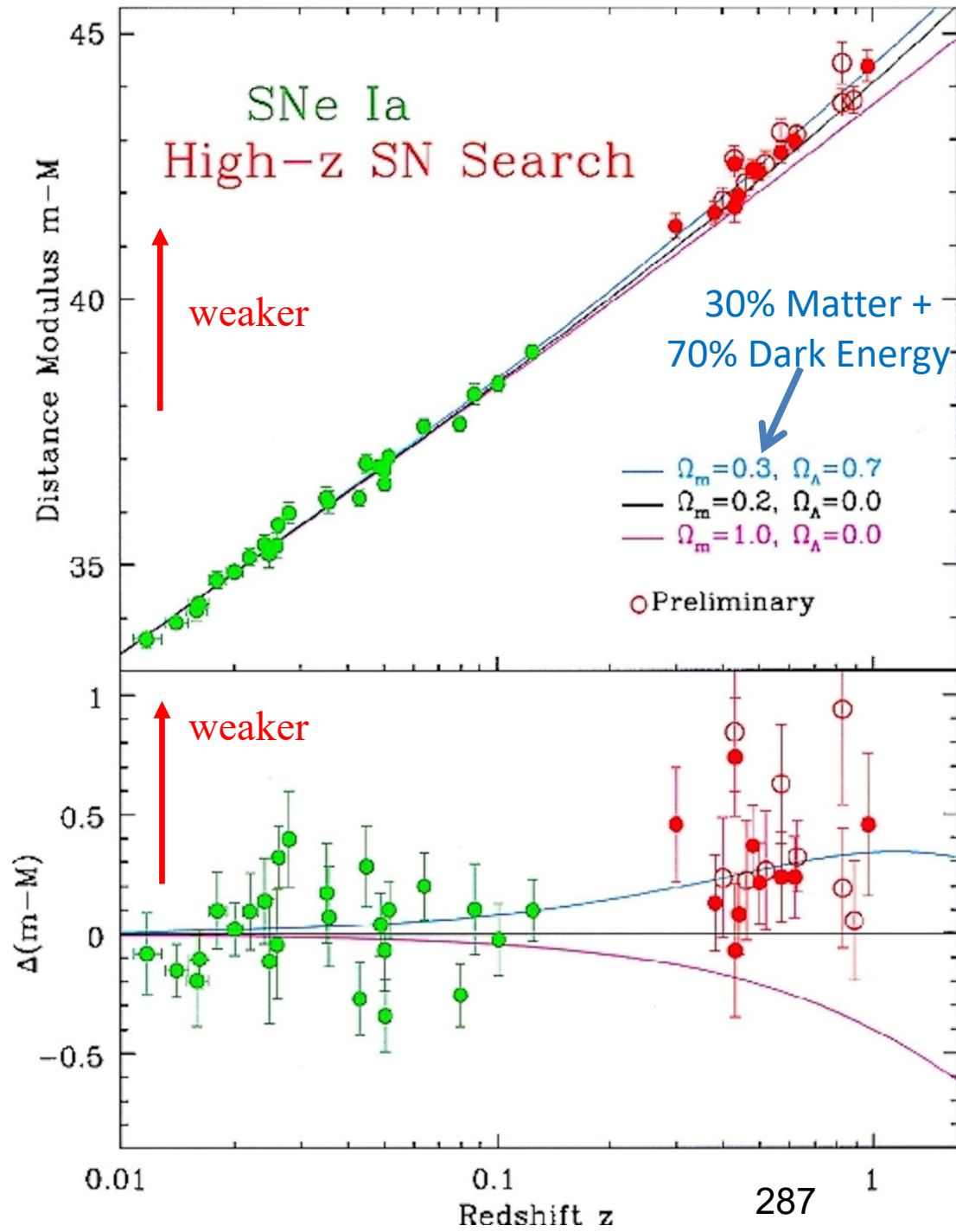


# The nearby SN Ia sample

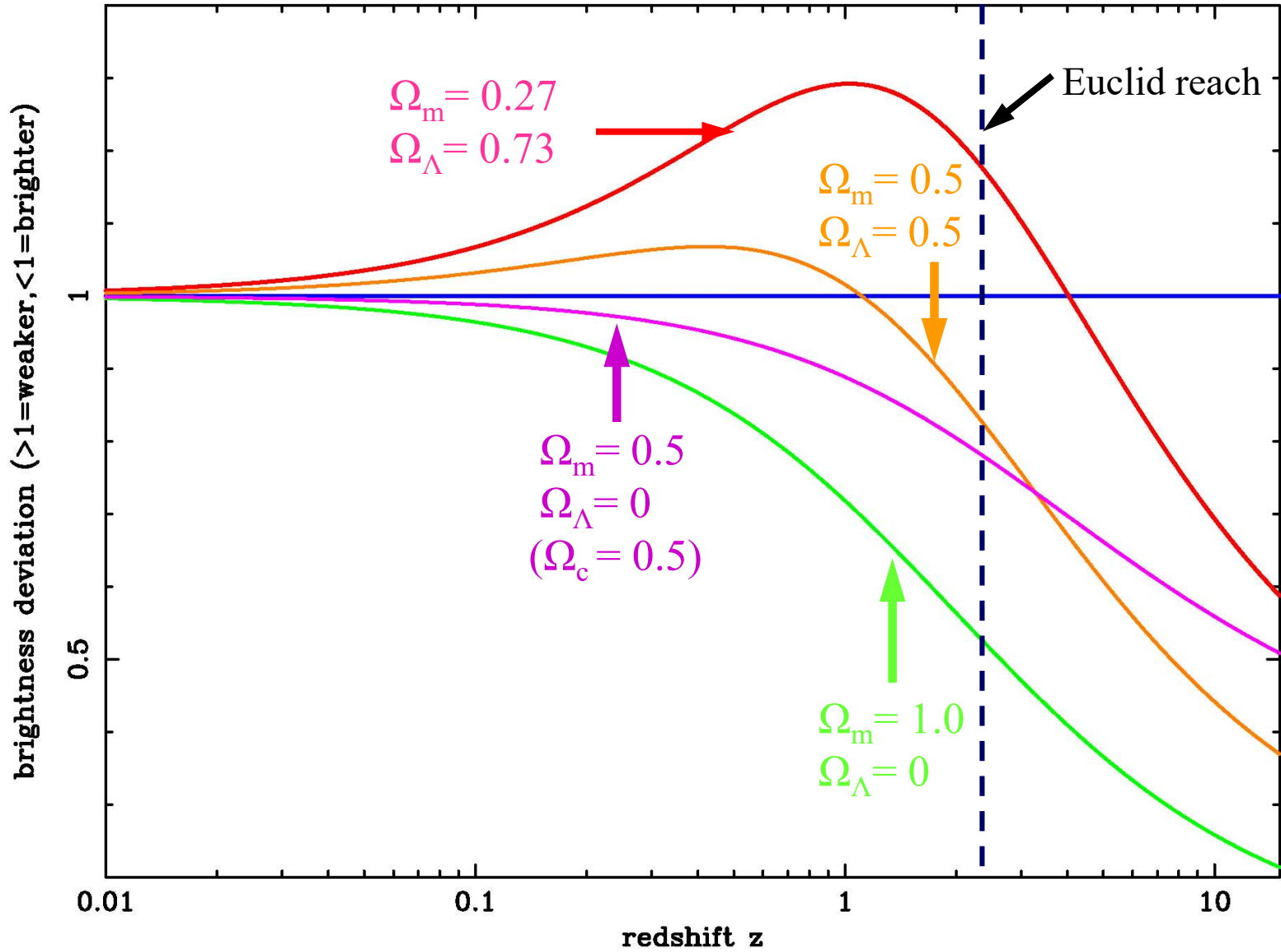


Distance Modulus  $m-M$   
 corresponds to the 'light distance'  
 assuming brightness to decrease  
 proportional to  $1/(\text{distance})^2$

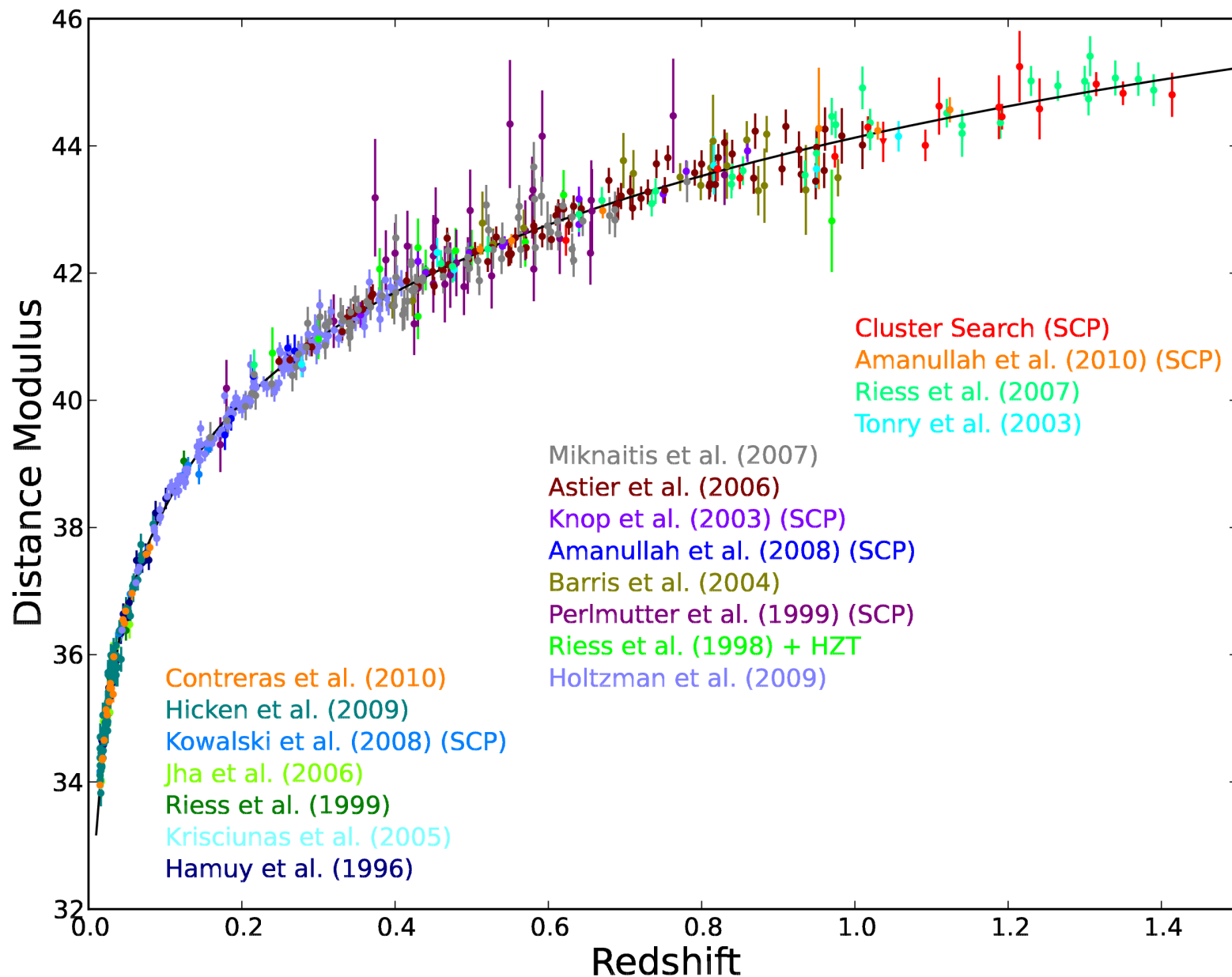
Nobel Prize Physics 2011  
 for  
 Saul Perlmutter  
 Adam G. Riess  
 Brian P. Schmidt



Reference(blue):  $\Omega_m=0.27$ ,  $\Omega_\Lambda=0$ ,  $\Omega_c=0.73$   
cbr\_combifile.txt

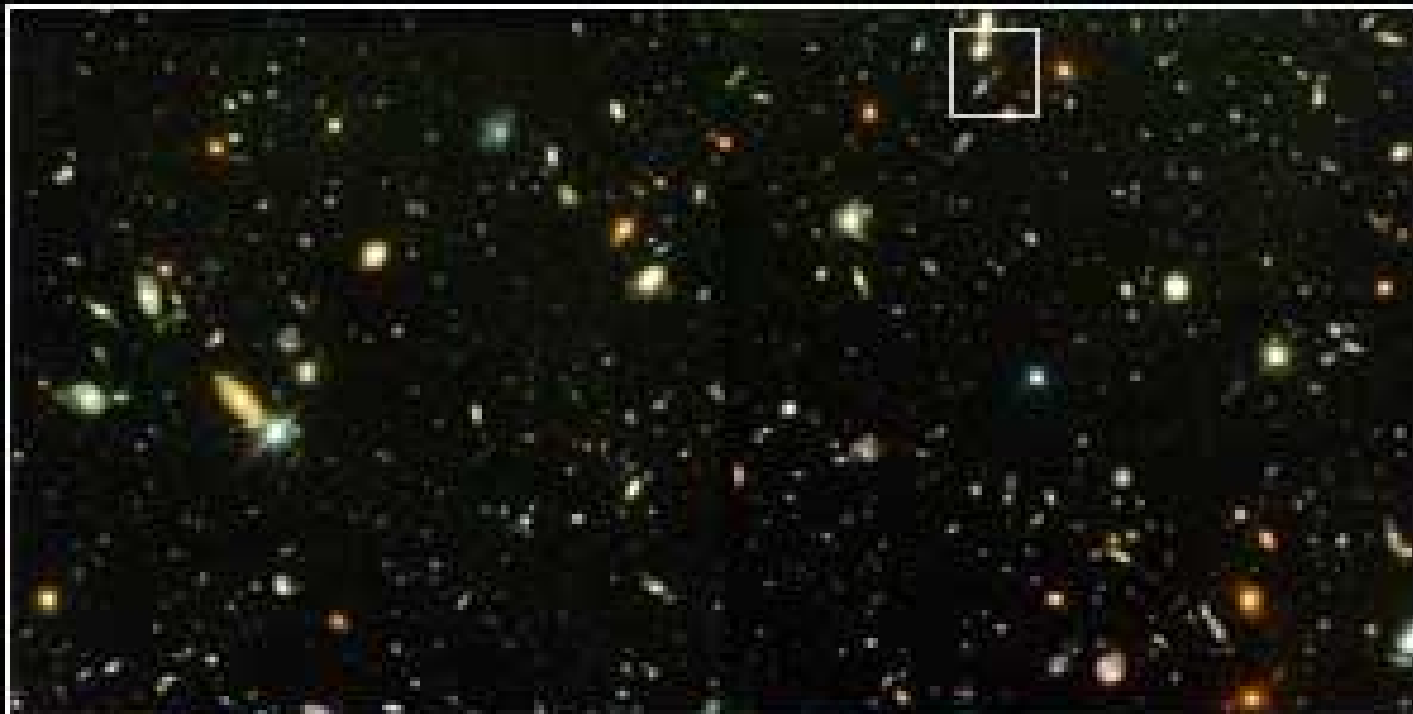


# SN-1a statistiek inclusief Hubble hoge-z detecties

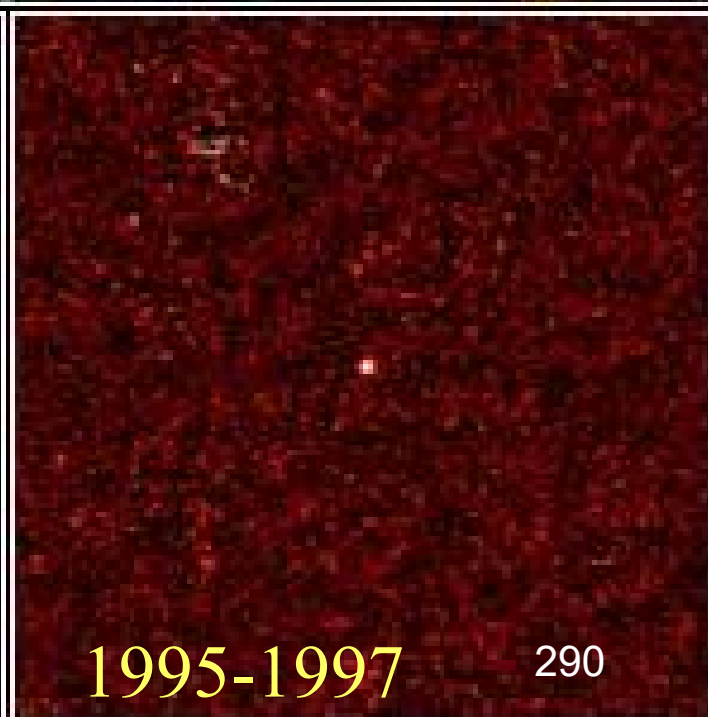
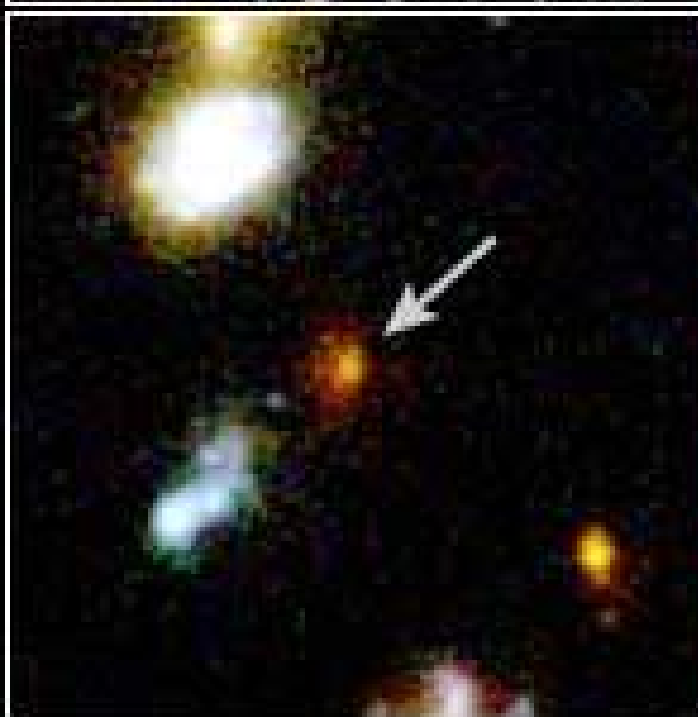




De verste  
supernova  
in het Hubble  
Deep Field:

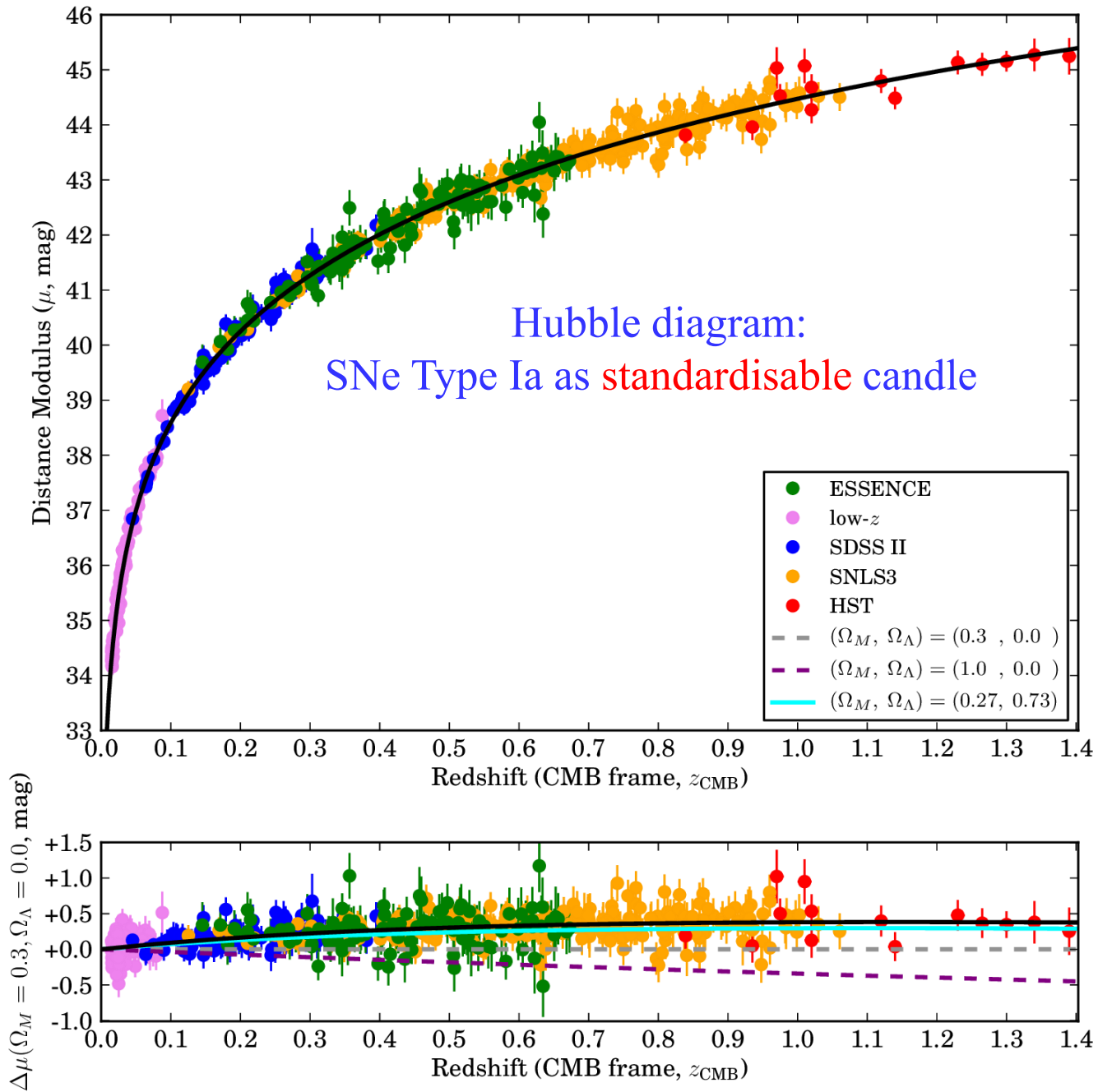


Rechtsonder:  
aftrekken van  
1997 beeld  
van 1995 beeld  
toont de  
supernova



1995-1997

290



# SNe Type Ia: eenduidige standaardiseerbare lichtbron?

## Triggers

- Massa overdracht van begeleider naar een Witte Dwerg in een compacte dubbelster. Als  $M_{\text{WD}} > 1.44 M_{\odot}$  wordt, verbrandt/ontploft de WD volledig. Daarbij komt  $\sim 1 M_{\odot}$  radioactief  $^{56}\text{Ni}$  vrij, dat vervalt tot  $^{56}\text{Fe}$ .
- 'Spiral-in' en 'merging' van 2 WDs in een WD-dubbelster. Kan worden gevormd in sterclusters: 'merger' van compacte dubbelsterren met 1 WD.

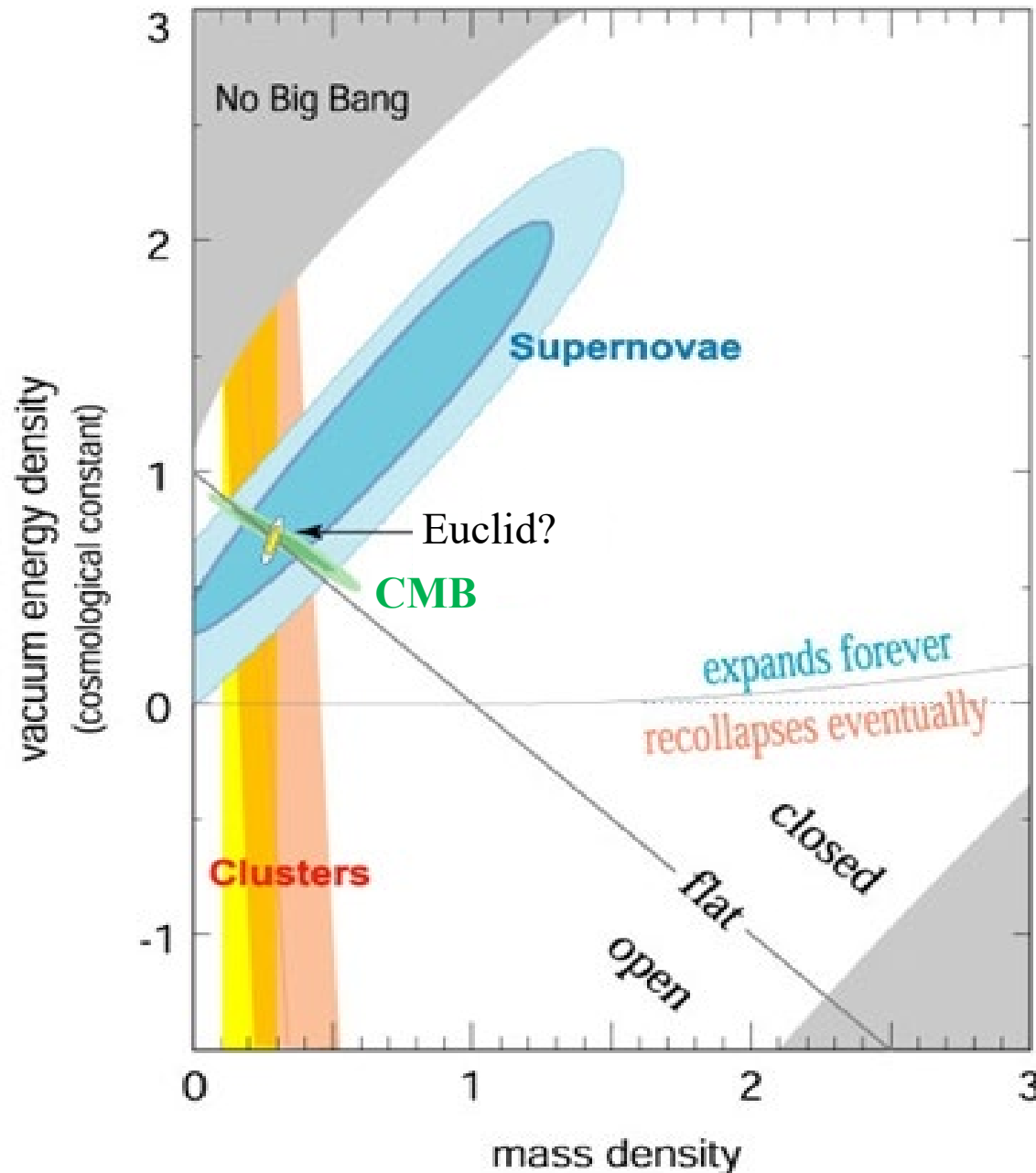
## Omringend sterrenstelsel

- SNe Ia zien we in alle typen sterrenstelsels. In elliptische stelsels is de intrinsieke lichtkracht meestal aanzienlijk zwakker dan in spiraalstelsels
- Variabele stofcondities langs de gezichtslijn
- Concentratie zware elementen(metalen) beïnvloedt de piekluchtcracht  
→ lichtkrachtevolutie van SNe Type Ia met roodverschuiving?

## Low-z (<0.15) SNe survey by GAIA astrometrische satelliet

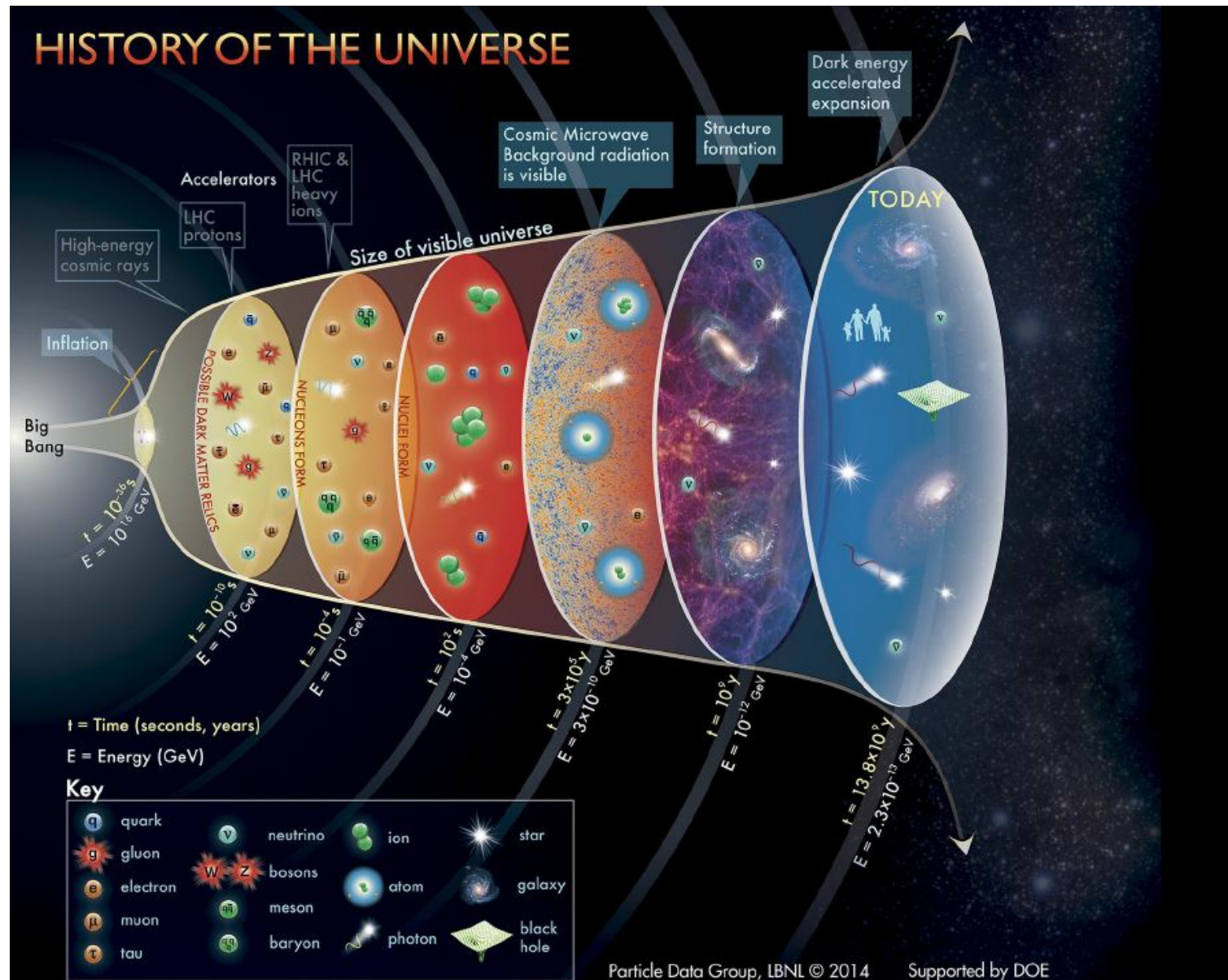
- $\sim 6300$  SNe ( $\sim 3-4/\text{dag}$ ) in 5 jaar, waaronder  $\sim 4400$  SNe Type Ia
- blauwe en rode fotometrie voor SNe sterker dan  $19^{\text{th}}$  magnitude (vis)

# Observational constraints $\Omega = \Omega_{\text{matter}} + \Omega_{\text{vacuum}}$

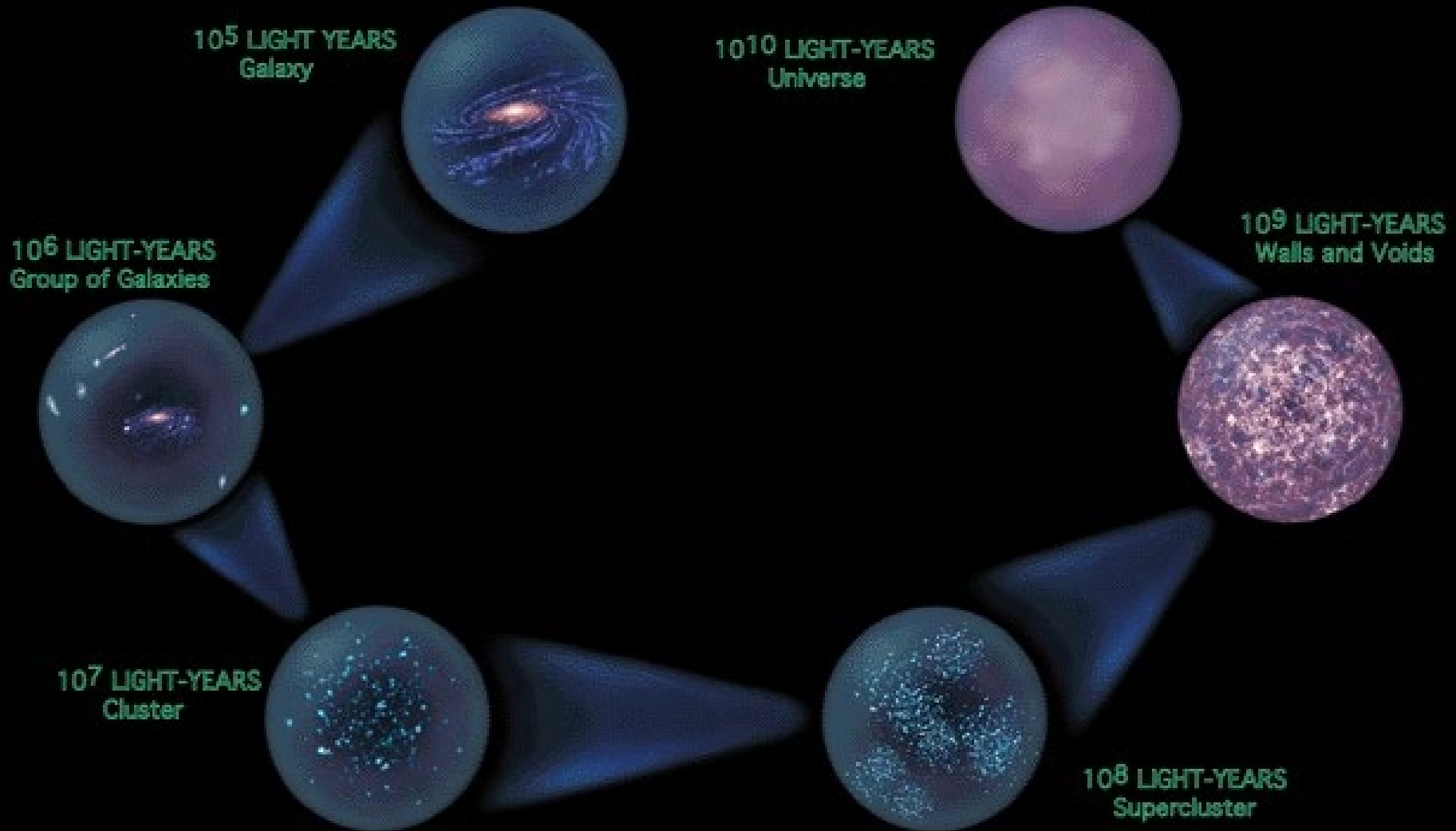




# Oorsprong en Ontwikkeling van de grote-schaal-structuur van het heelal

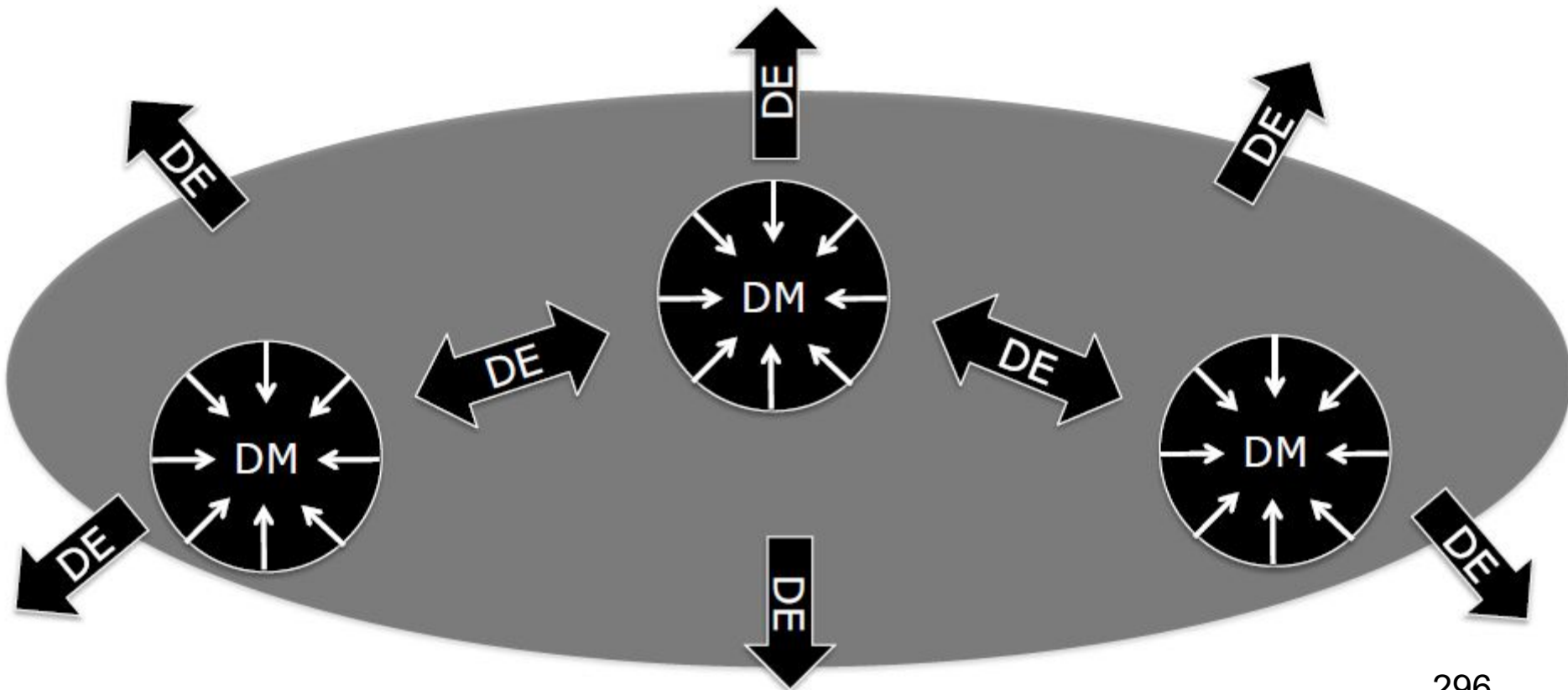


# Structuur schalen in het heelal



# Groei van kosmische structuren (1)

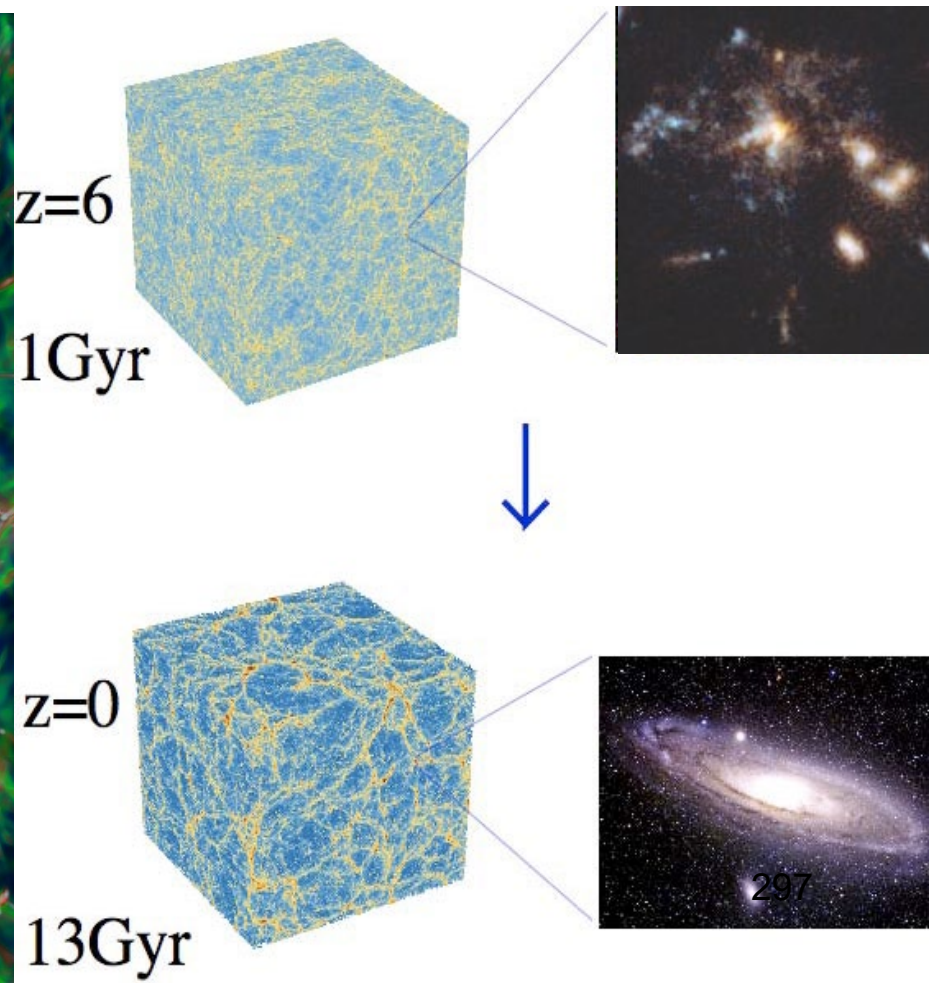
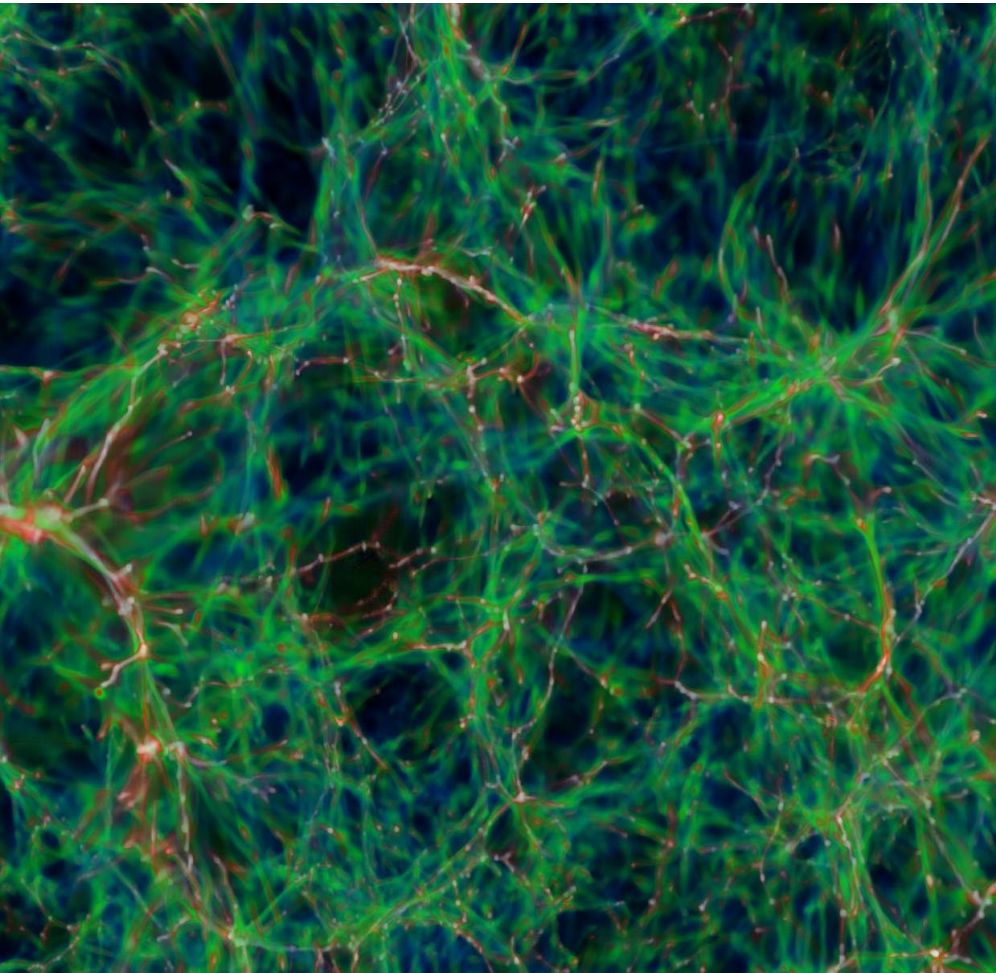
Donkere materie en donkere energie beïnvloeden de eigenschappen, zoals massa en ruimtelijke verdeling van massieve structuren.





## Groei van kosmische structuren (2)

klontering en verhitting van baryonische materie treedt op onder invloed van zwaartekracht (donkere materie + baryonen) en donkere energie

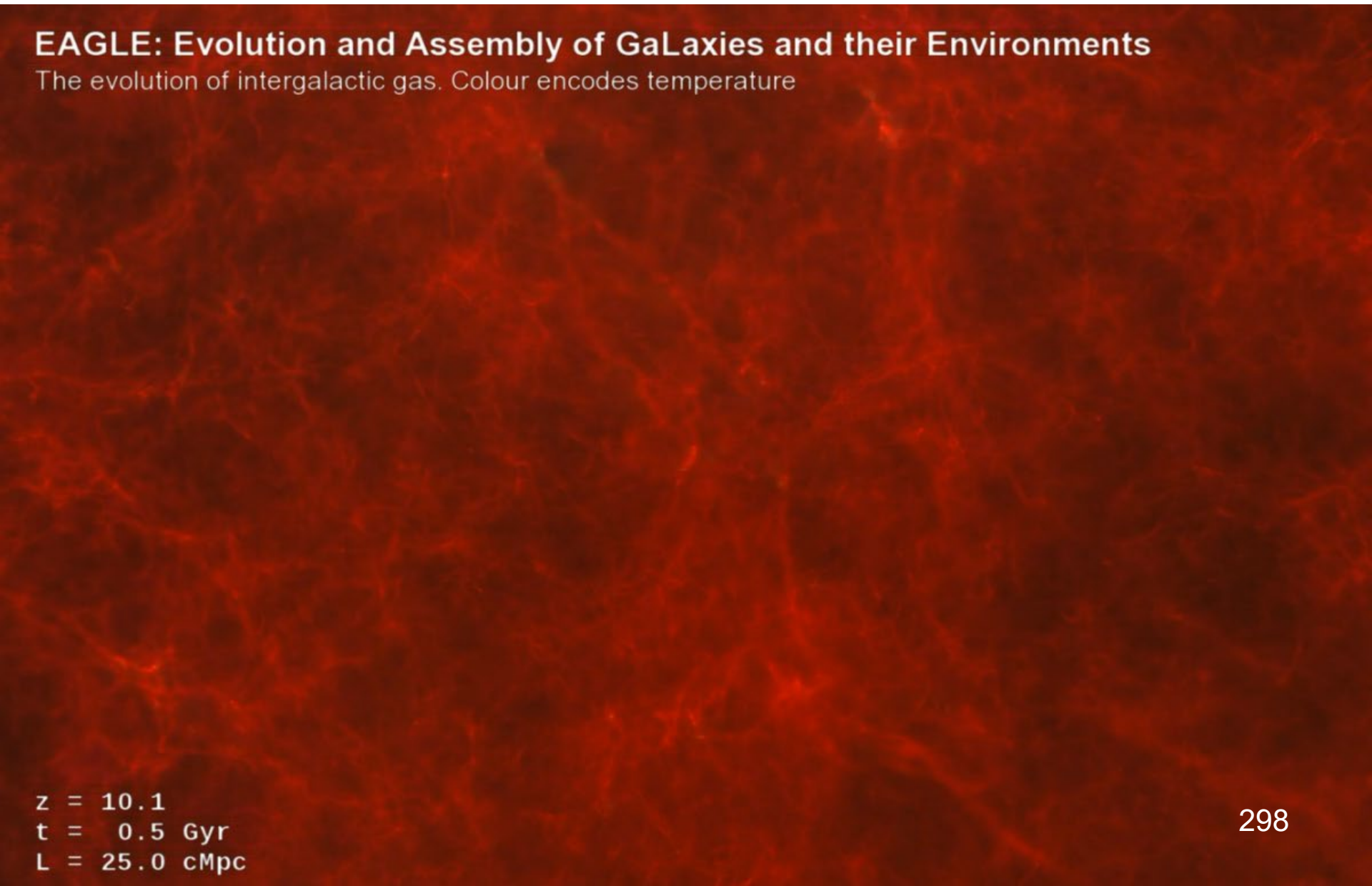




# Computer simulatie voor kosmisch web op $z = 10$ , leeftijd heelal 500 miljoen jaar

**EAGLE: Evolution and Assembly of GaLaxies and their Environments**

The evolution of intergalactic gas. Colour encodes temperature

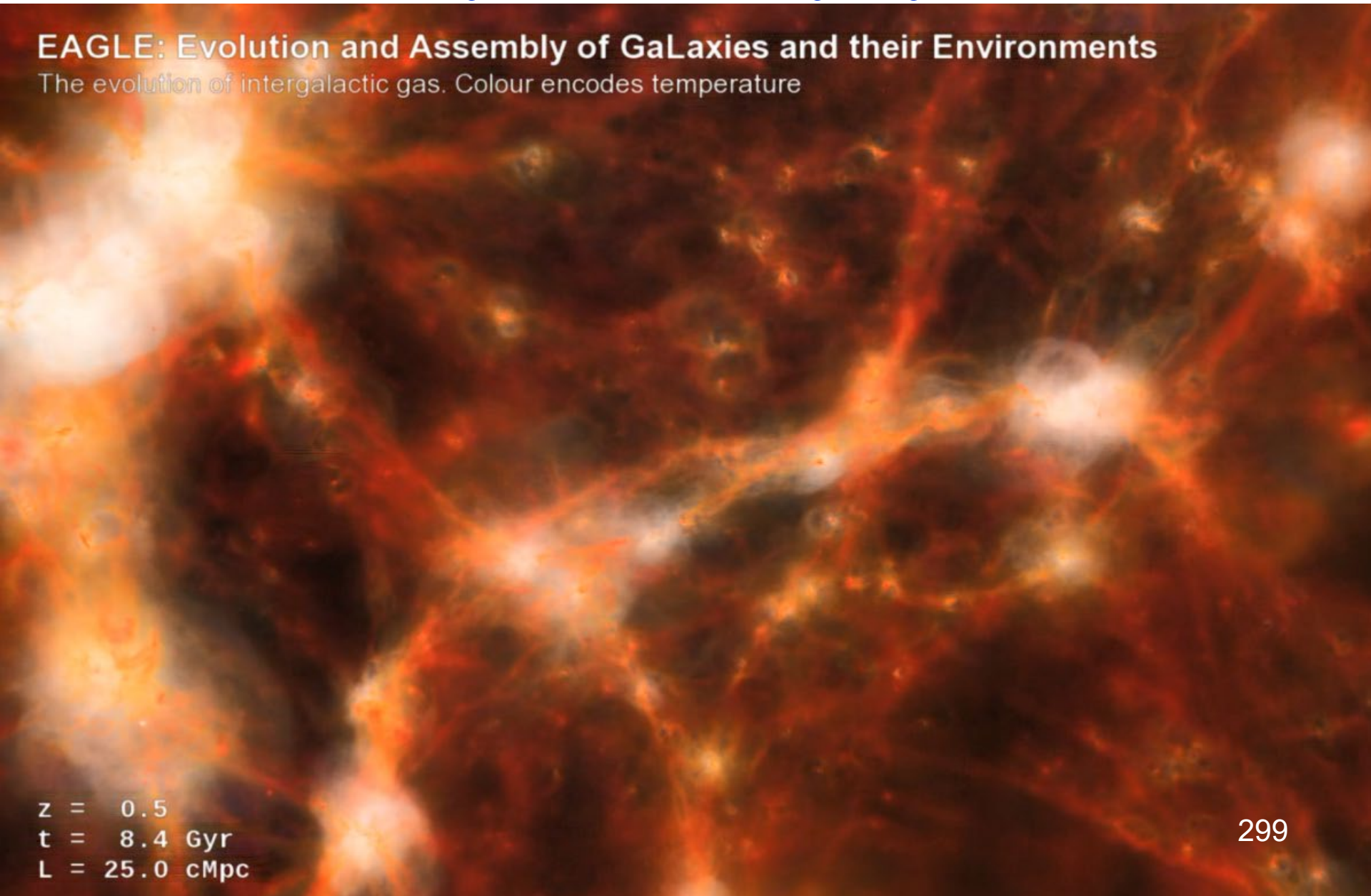


$z = 10.1$   
 $t = 0.5 \text{ Gyr}$   
 $L = 25.0 \text{ cMpc}$

# Computer simulatie voor kosmisch web op $z = 0,5$ leeftijd heelal 8,4 miljard jaar

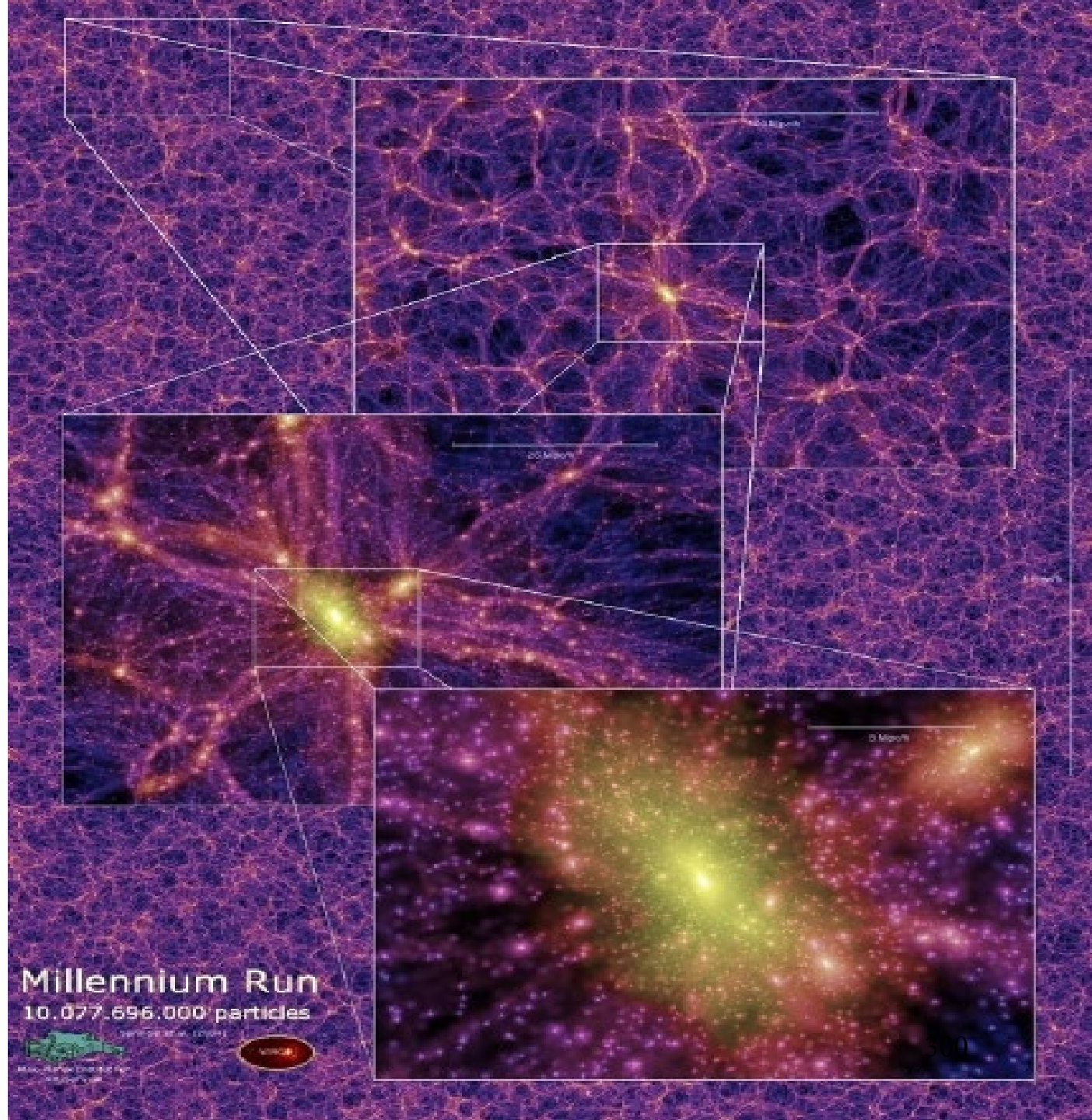
**EAGLE: Evolution and Assembly of GaLaxies and their Environments**

The evolution of intergalactic gas. Colour encodes temperature



$z = 0.5$   
 $t = 8.4 \text{ Gyr}$   
 $L = 25.0 \text{ cMpc}$

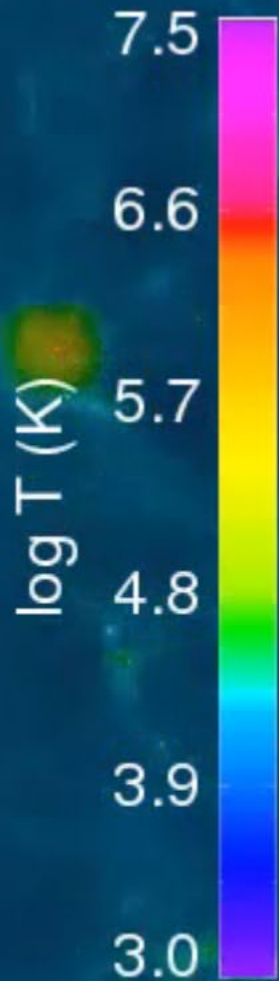
Millennium Run:  
Computer simulatie  
van het kosmisch  
web, zoom in to  
galaxy cluster scale





$z=5.0$

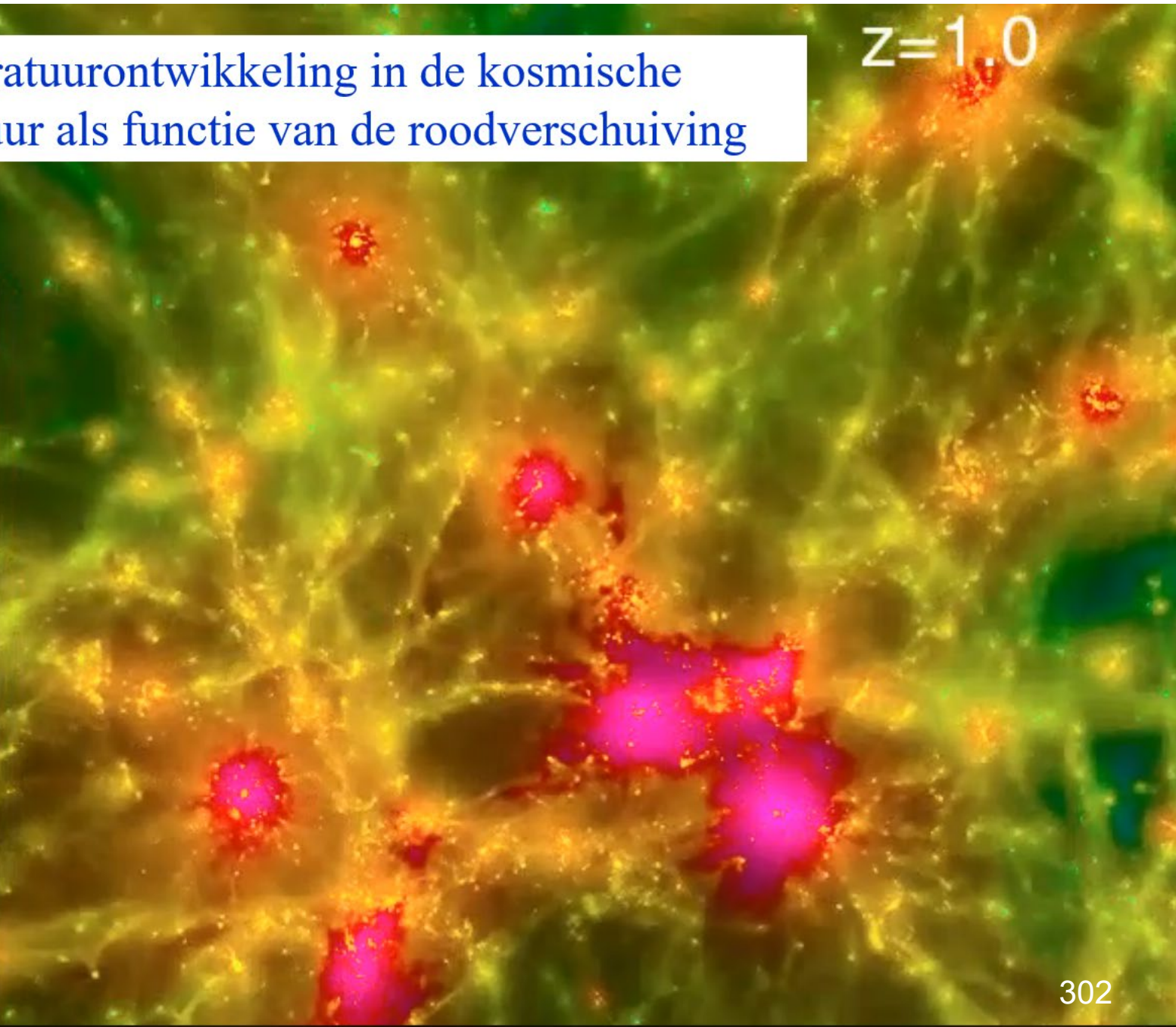
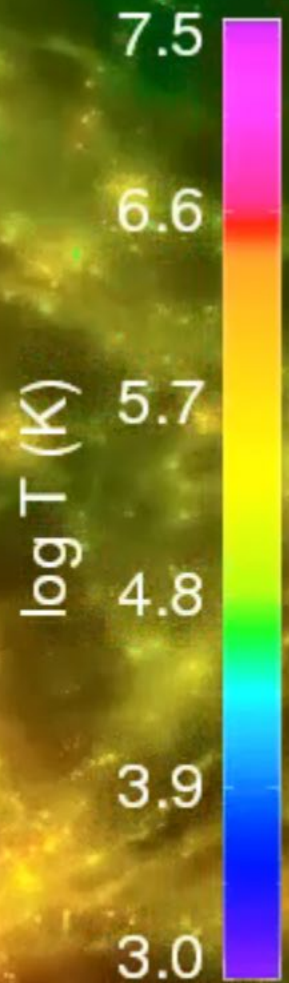
Temperatuurontwikkeling in de kosmische webstructuur als functie van de roodverschuiving



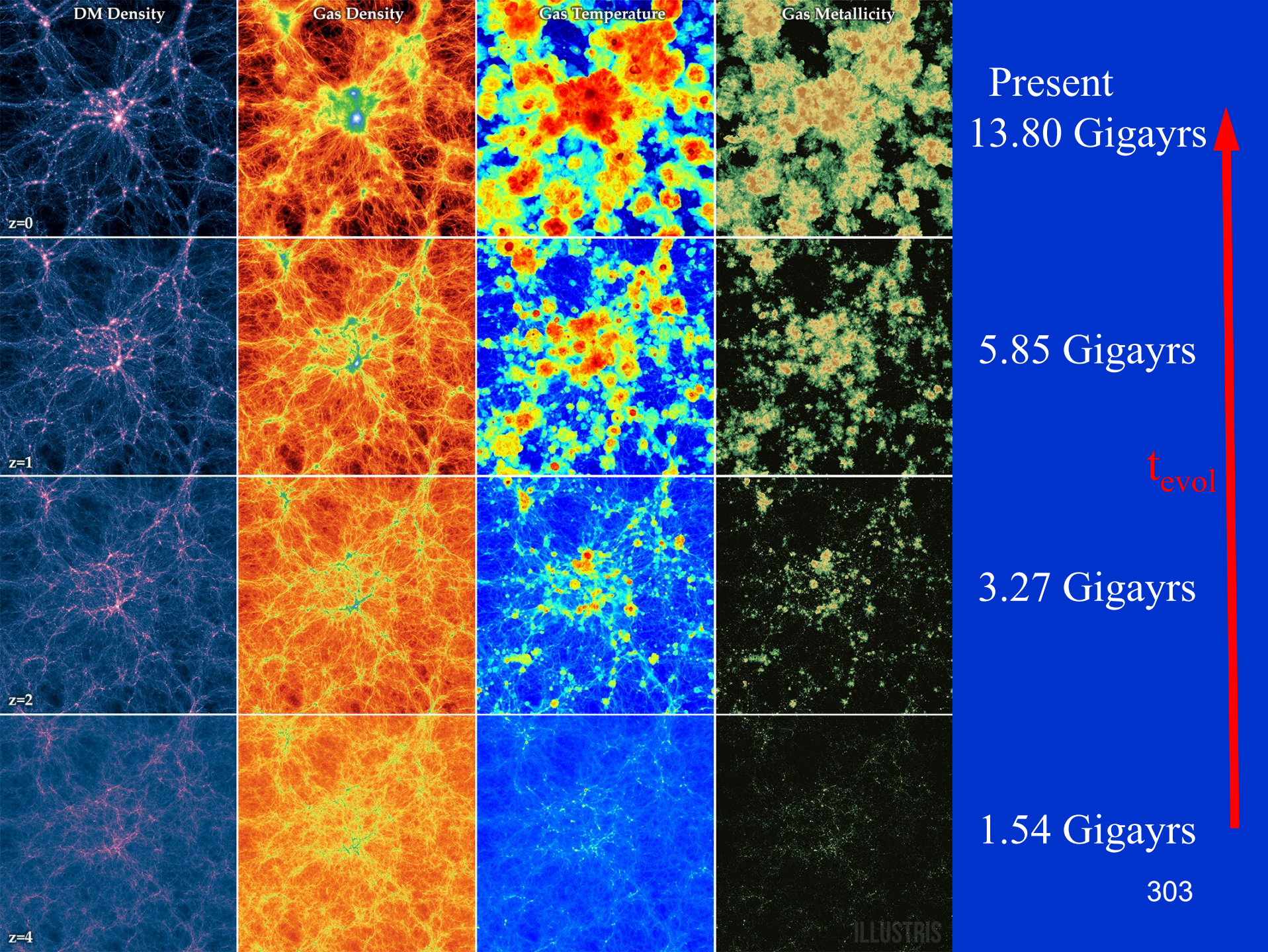


Temperatuurontwikkeling in de kosmische webstructuur als functie van de roodverschuiving

$z=1.0$









Structuurontwikkeling in het heelal vanaf de  
ontkoppeling van de  $\mu$ -golfachtergrondstraling  
370.000 jaar na de oerknal

fluctuaties schuim/voids melkwegen

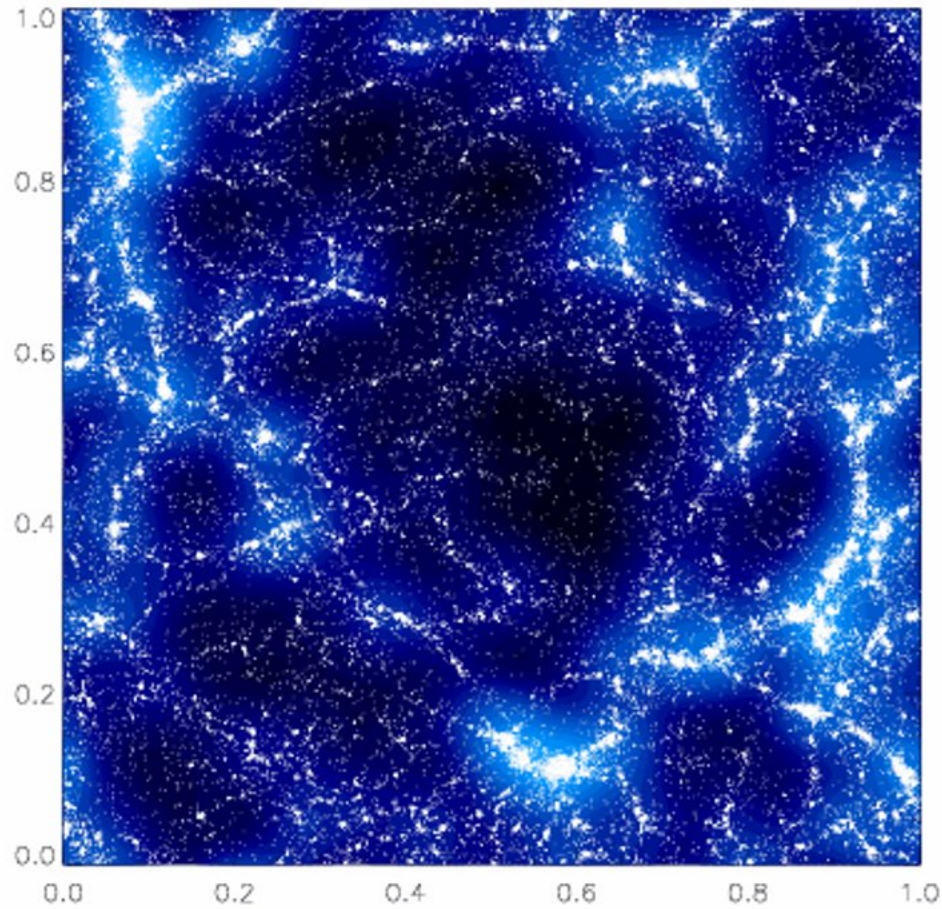
groepen

clusters



# Void Formation

(Simulation, including Dark Matter + Dark Energy)

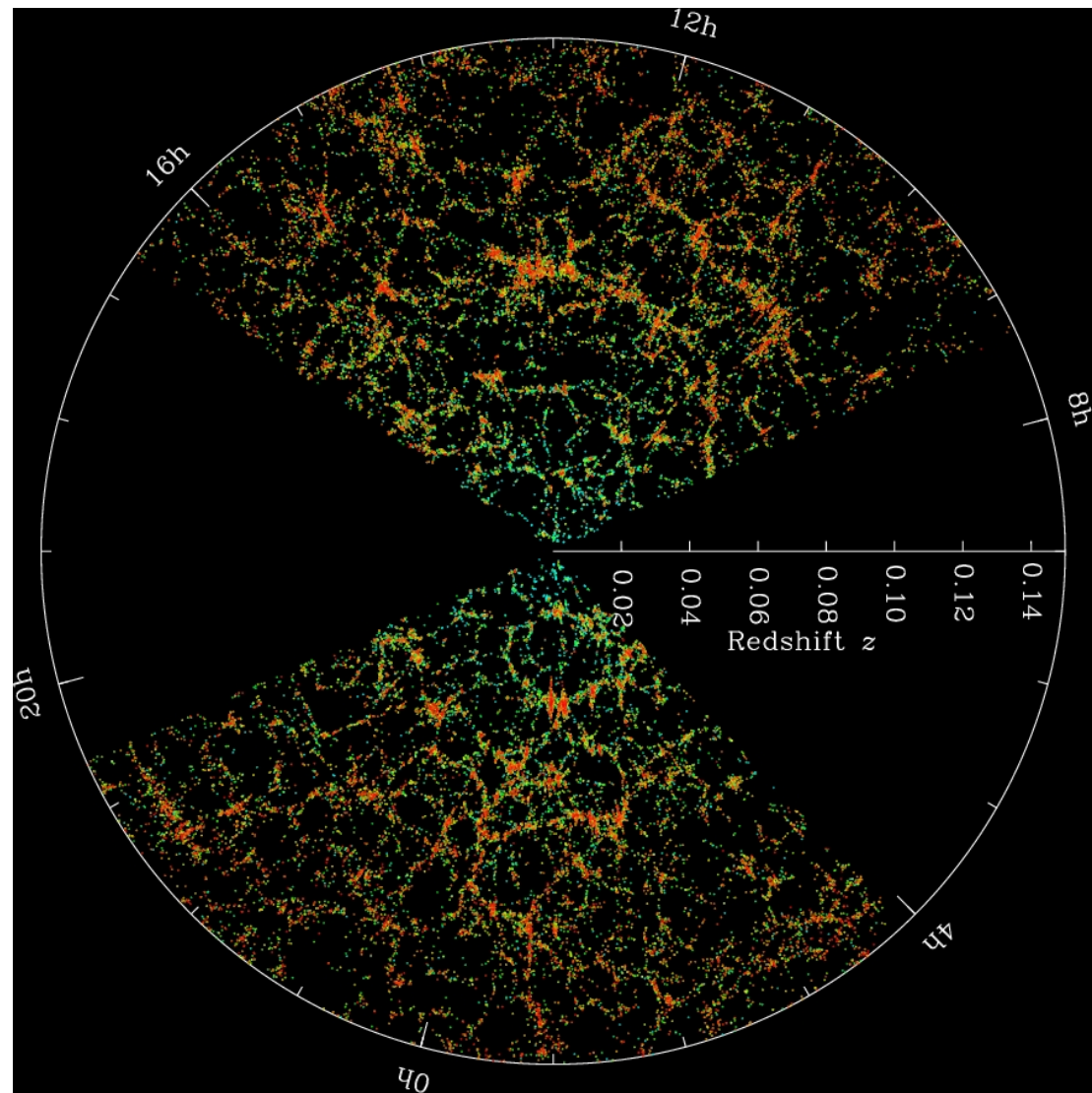


50 Mpc/h

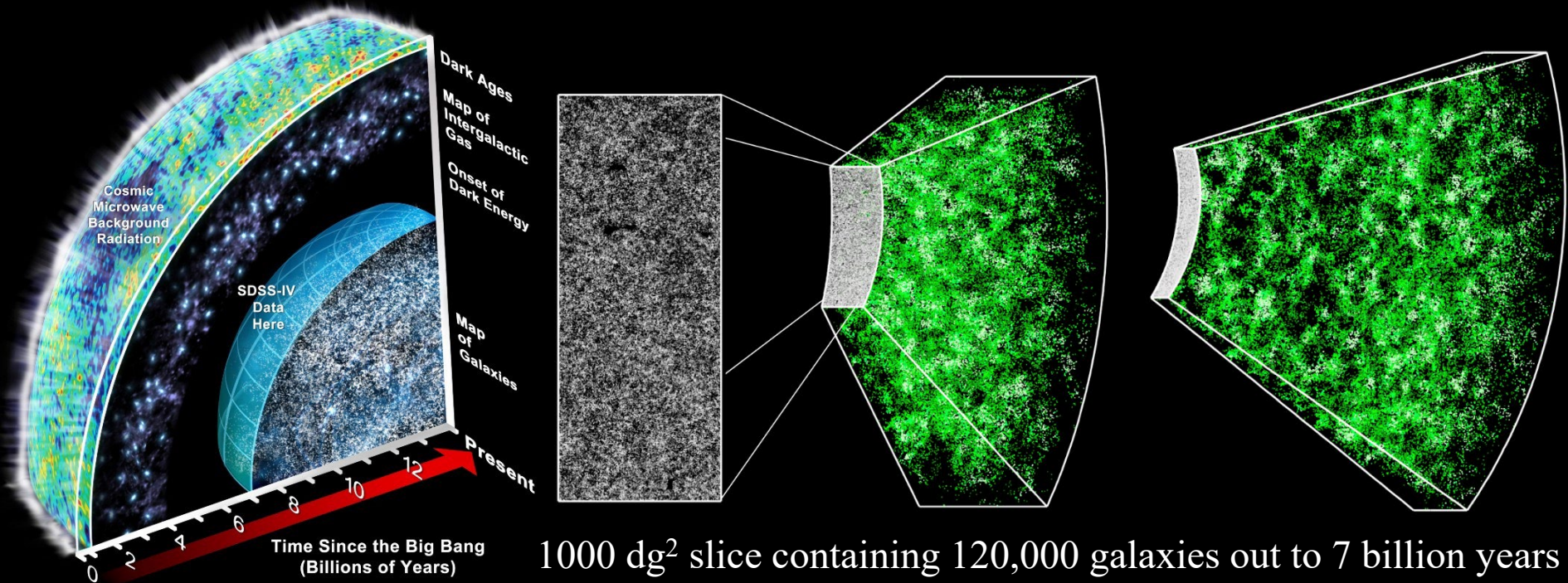


# Observational evidence for the existence of Void formation (1)

Sloane Digital Sky Survey:  
distribution of 930 000  
galaxies in space: shows  
a **foam-like structure**:  
galaxies are distributed  
around **bubble-shaped voids**.



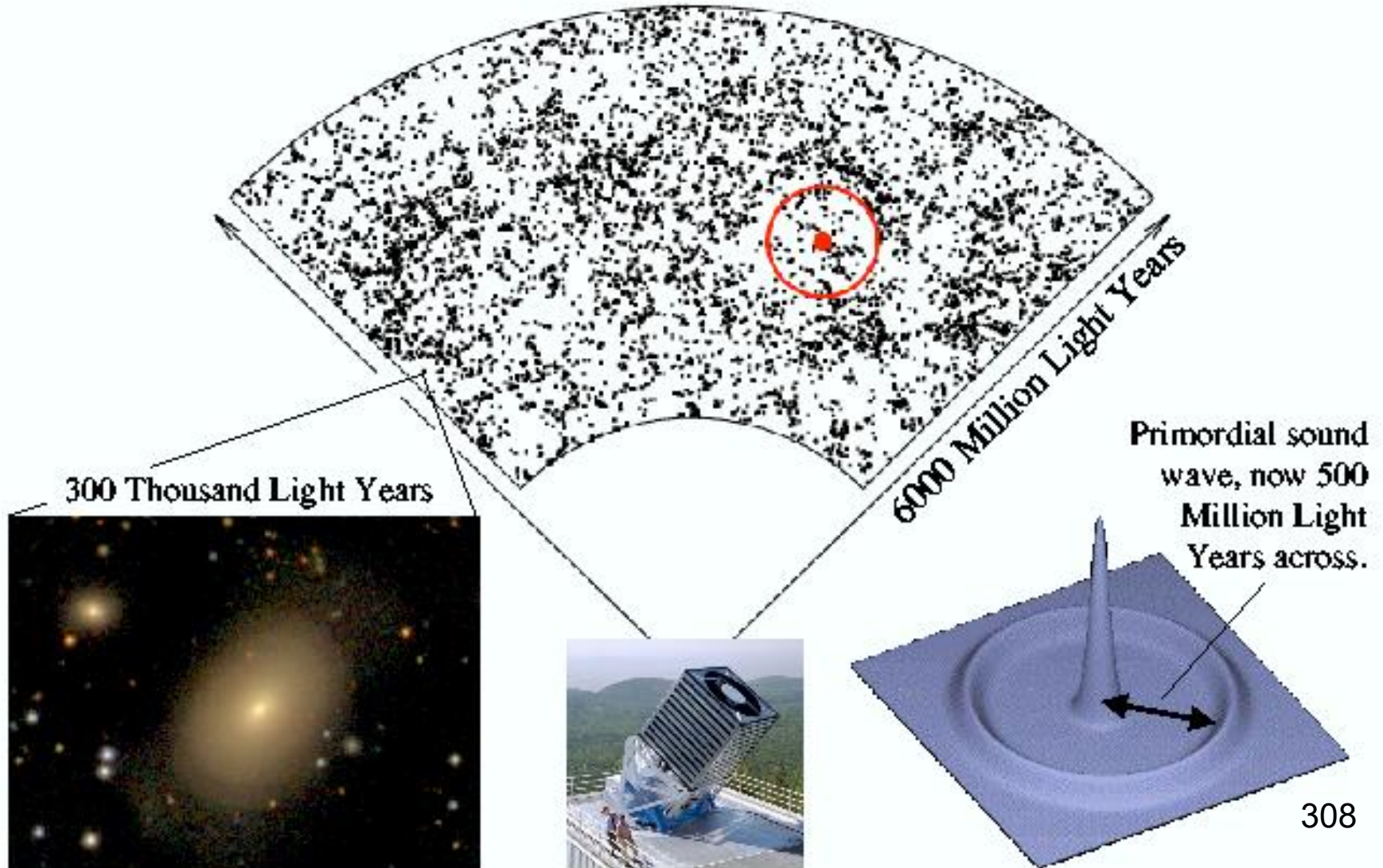
# Observational evidence for the existence of Void formation (2)



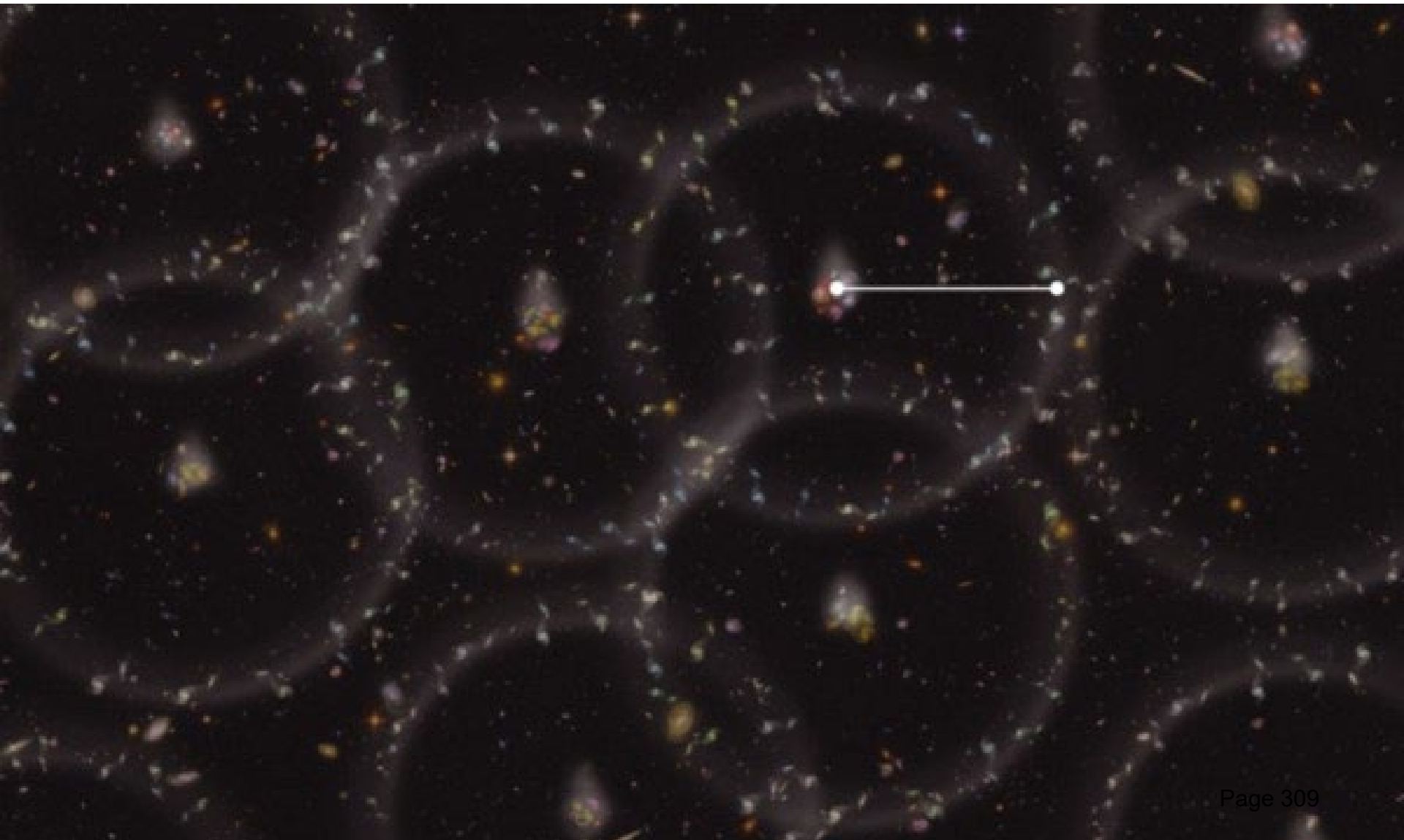
Sloane Digital Sky Survey III covering a volume of 650 (Gyr)<sup>3</sup>:  
Distribution of **1.2 million galaxies in space**: shows a foam-like structure: galaxies are distributed around **bubble-shaped voids** (2016)



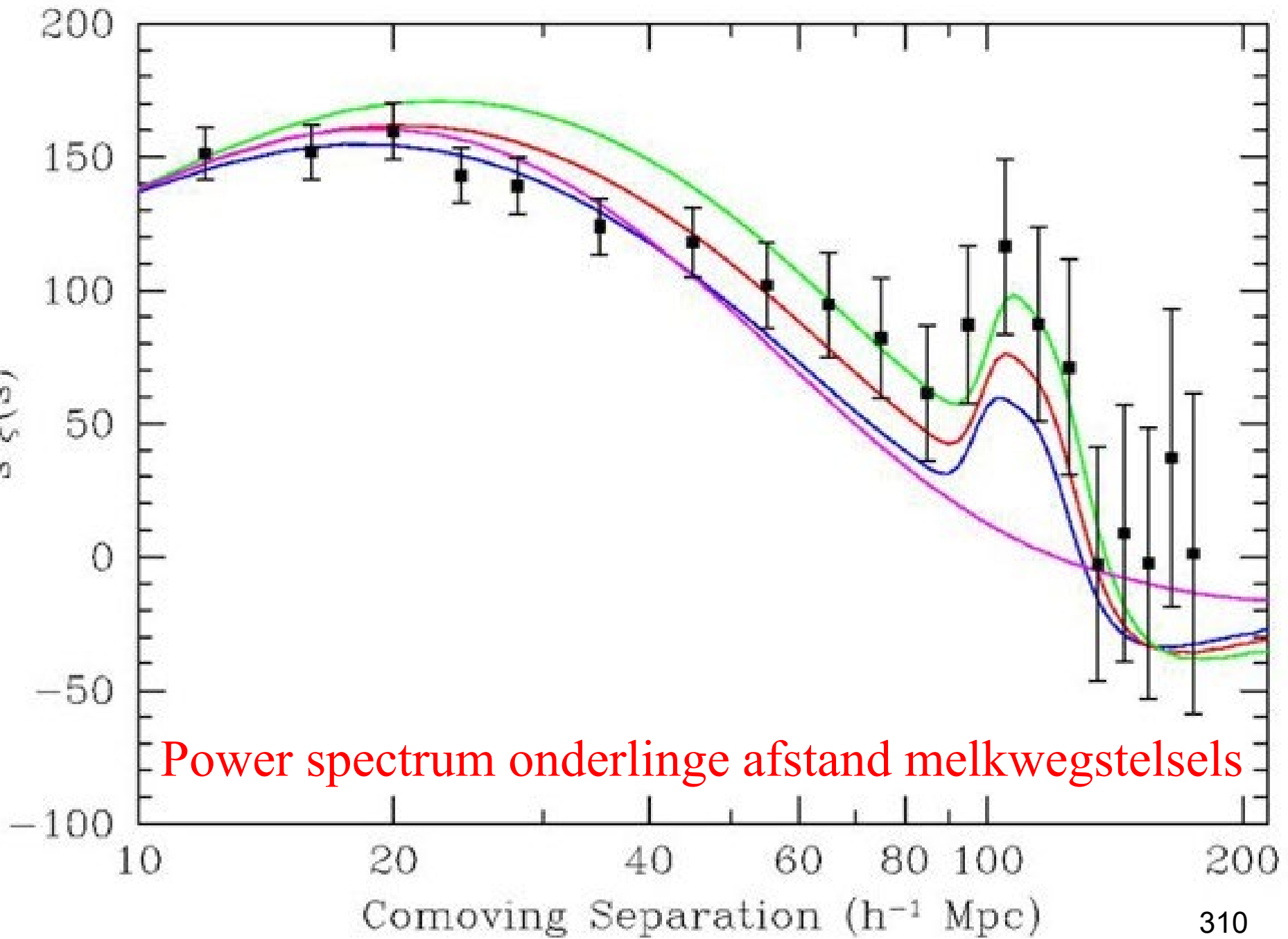
Baryon Akoestische Oscillaties worden terug gezien in het huidige heelal als voorkeursafstand tussen sterrenstelsels (500 miljoen lichtjaar) (1)



Baryon Akoestische Oscillaties worden terug gezien in het huidige heelal als voorkeursafstand tussen sterrenstelsels (nu op 500 miljoen lichtjaar) (2)







# Conclusies donkere energie in het heelal

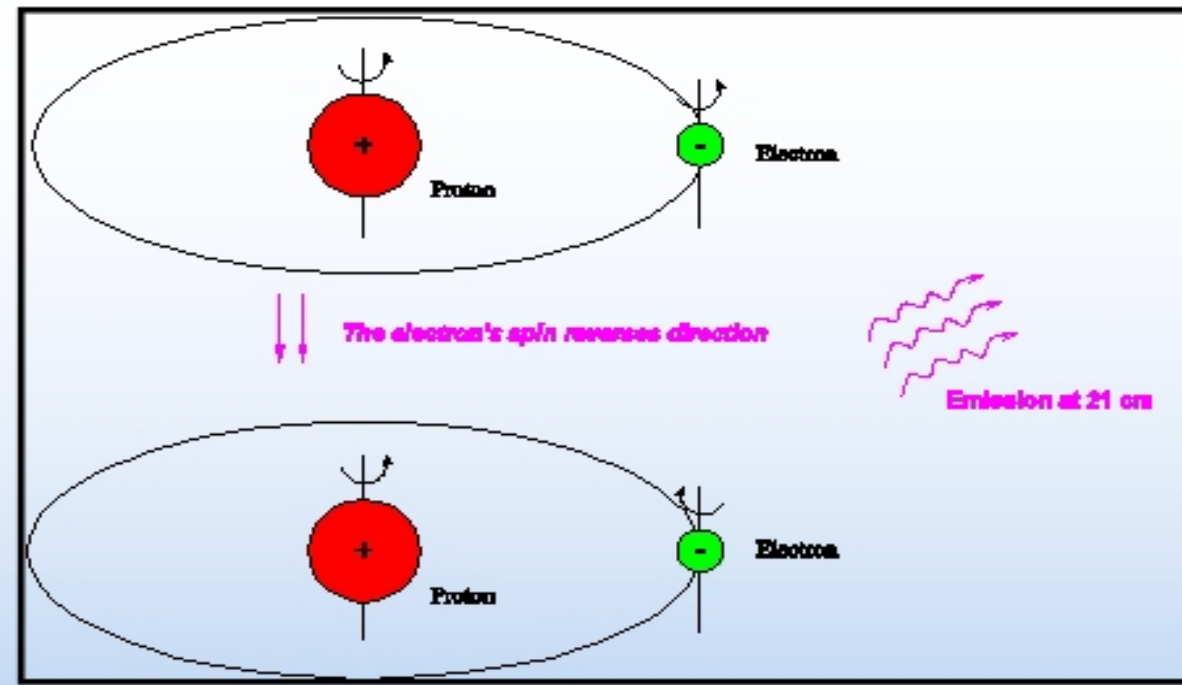
Aanwijzingen zijn indirect maar redelijk overtuigend!

1. Afstandsmetingen m.b.v. SN-Ia als standaard lichtbron en hun afhankelijkheid van de roodverschuiving  $z$  : suggereert een versnelling van de expansie van het heelal gedurende de 2<sup>de</sup> helft van haar levensloop (Nobelprijs 2011).
2. Theoretische noodzaak voor "extra energie" die niet uit normale of donkere materie bestaat om de waarneming van een vlak heelal te verklaren: er zijn geen observationele aanwijzingen die duiden op een "globale" kromming van het universum.
3. De waargenomen grote-schaal golfpatronen van de massadichtheid in het heelal. De Sloan Digital Sky Survey en de WiggleZ survey (2011) met 200.000 melkwegstelsels van het Australian Astronomical Observatory toont lege bellen (voids) met een typische grootte van 150 Mpc omgeven door sterrenstelsels . De hiermee nauwkeuriger afgeleide snelheden van de stelsels bevestigt versnelde uitdijing vanaf een leeftijd van  $\approx 9$  miljard jaar.

# diagnostiek evolutionaire overgang $15 < z < 10$ 'dark age' → 'epoch of reionization'

- **Golflengteband:** nabij-IR (1-20  $\mu\text{m}$ ) en langgolvlige radiostraling (< 200 MHz)
- **Techniek:**  
grote, buigingsbegrensde, infrarood -telescoop in de ruimte, multi-bundel radiosynthese telescopen op de grond
- **Projecten:**
  - James Webb Space Telescope ( JWST, 2021+)
  - LOw Frequency ARray (LOFAR, 2010+)

# Neutraal waterstof: hyperfijnovergang



## Hydrogen 21 cm line

- Spin flips probability: **Once every ten million years** – should be hard to detect
- But:
  - Huge amounts of atomic hydrogen in the Galaxy
  - Makes the 21 cm line easy to detect



Nearby Universe  
Today's Galaxies

Time: Present

# Tijdperk van de herionisatie

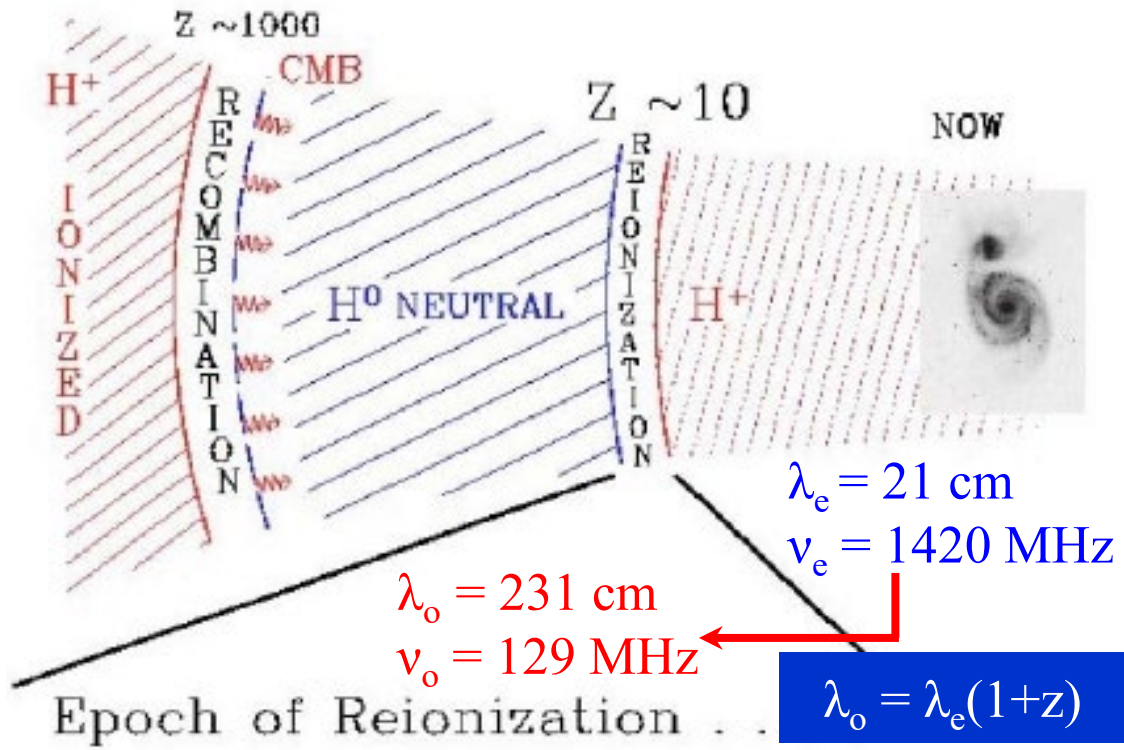


Galaxies grow and evolve into objects with mature structure.

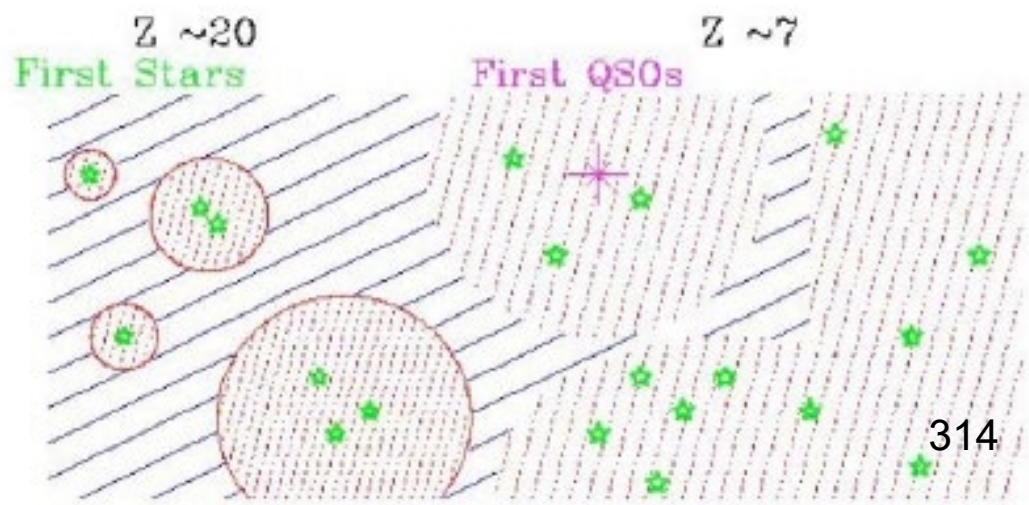
**Reionization**  
Ultraviolet radiation from the first stars and galaxies "reionizes" hydrogen in the universe.

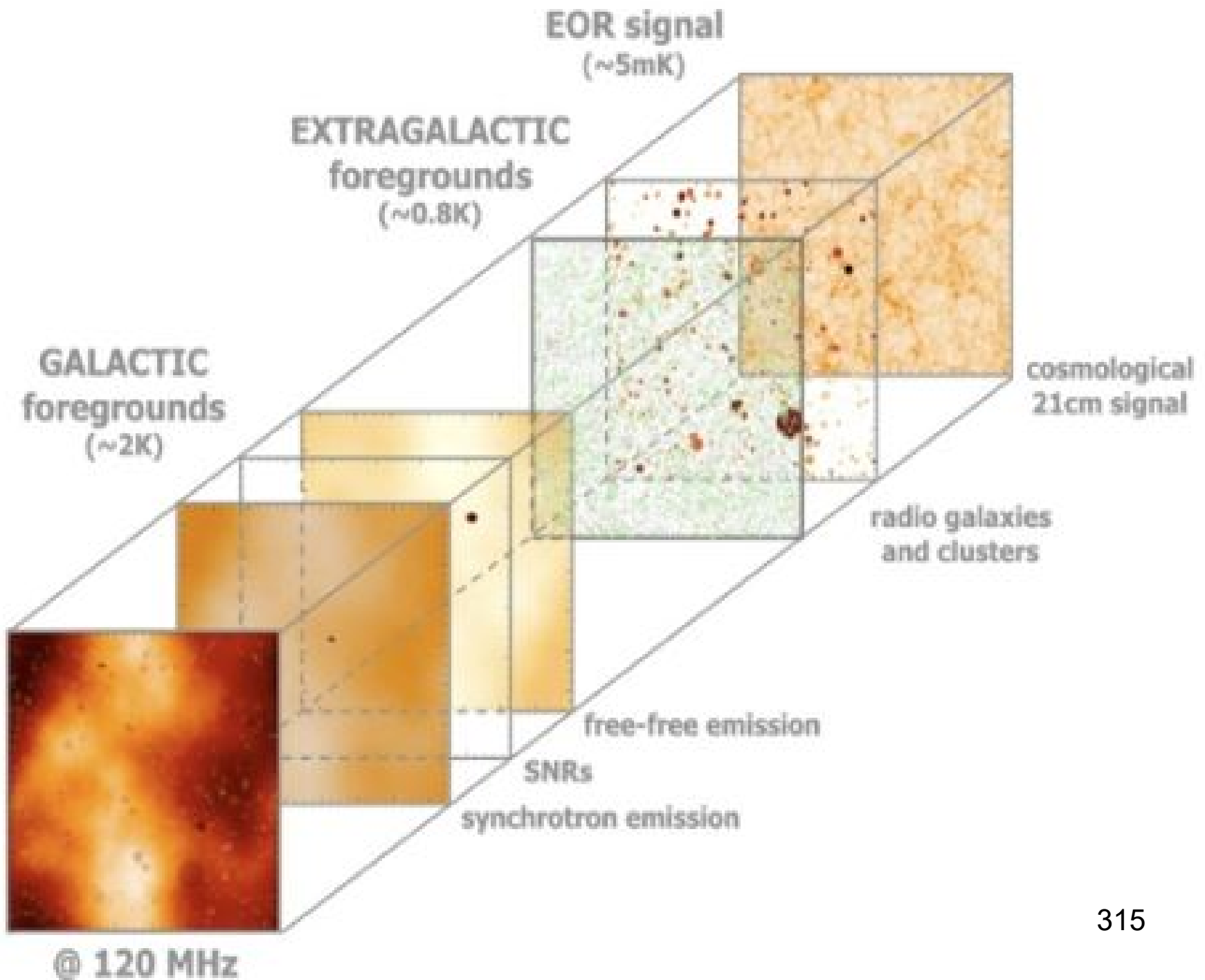
**"Dark Ages"**  
No sources of light exist to illuminate the universe.

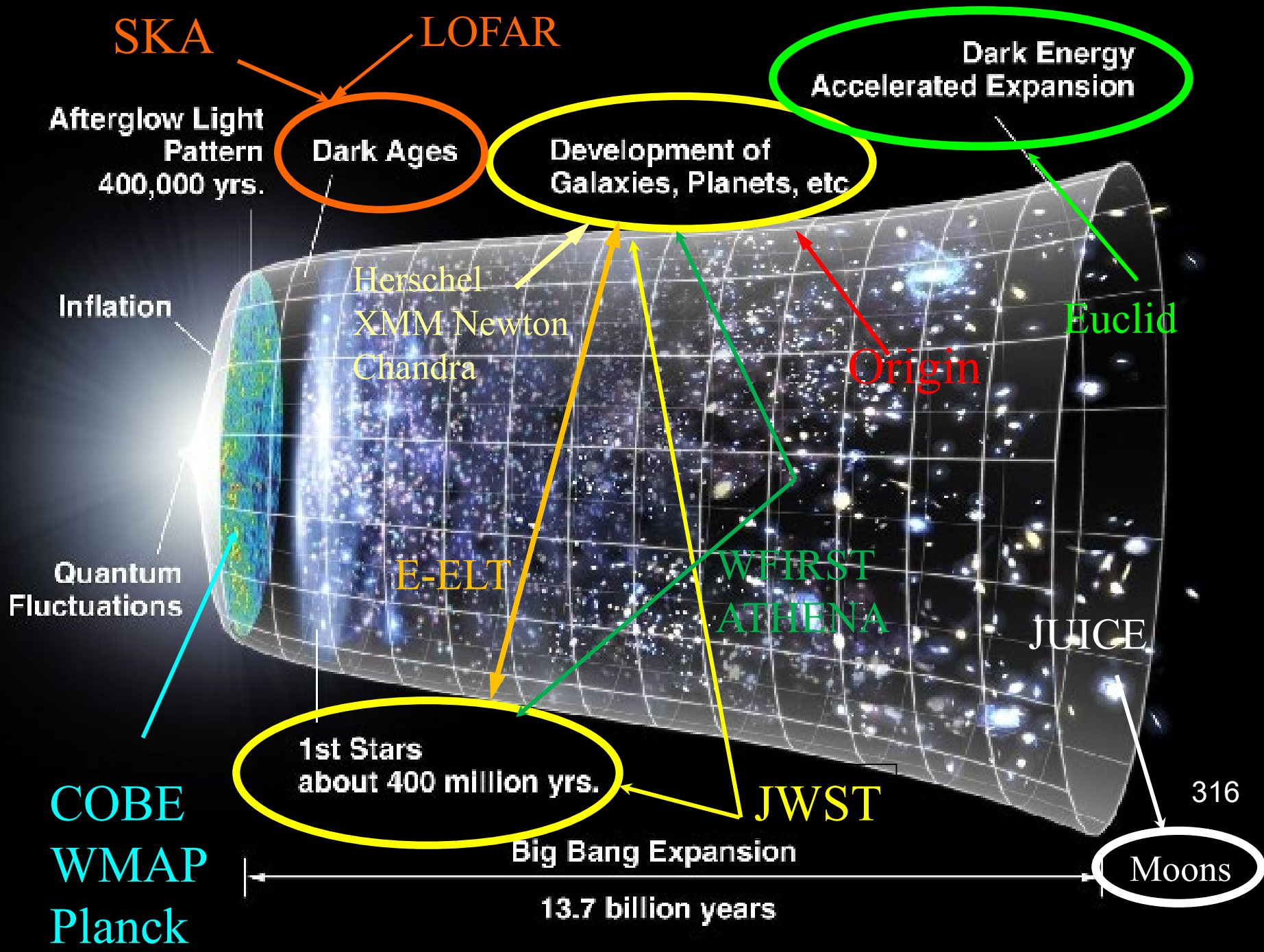
**Big Bang**  
Time: 13,850,000,000 Years Ago



Epoch of Reionization ...







SKA

LOFAR

Dark Energy Accelerated Expansion

Dark Ages

Development of Galaxies, Planets, etc

Euclid

Origin

JUICE

316

Moons

Big Bang Expansion

1st Stars about 400 million yrs.

JWST

WFIRST  
ATHENA

E-ELT

Herschel  
XMM  
Newton  
Chandra

Inflation

Quantum Fluctuations

Afterglow Light Pattern  
400,000 yrs.

COBE  
WMAP  
Planck

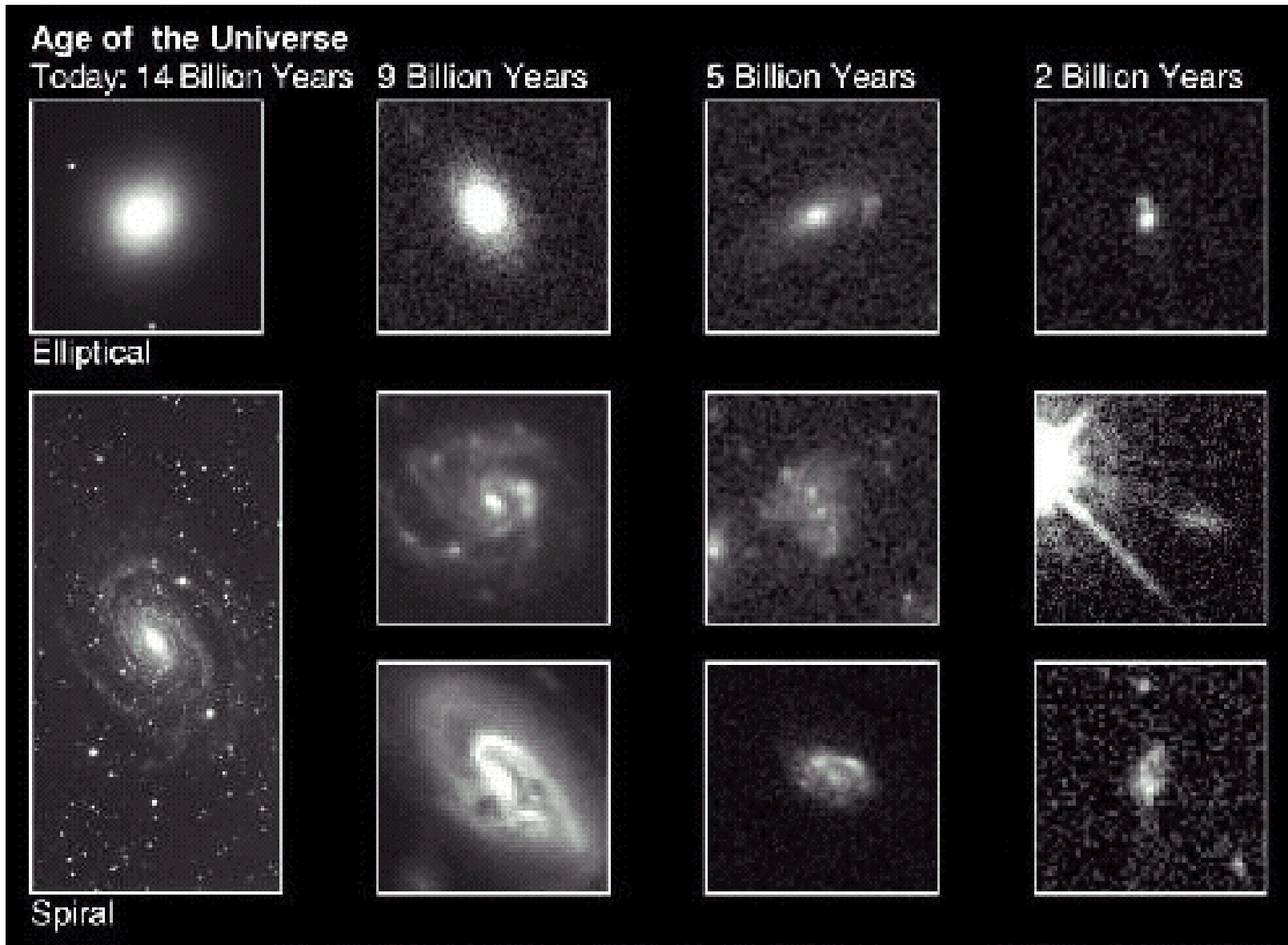
13.7 billion years

# Evolution of large scale structure: Galaxy formation

- Hubble Ultra Deep Field
- Alma/Subaru deep exposure



# Hubble: vorming van Melkwegstelsels



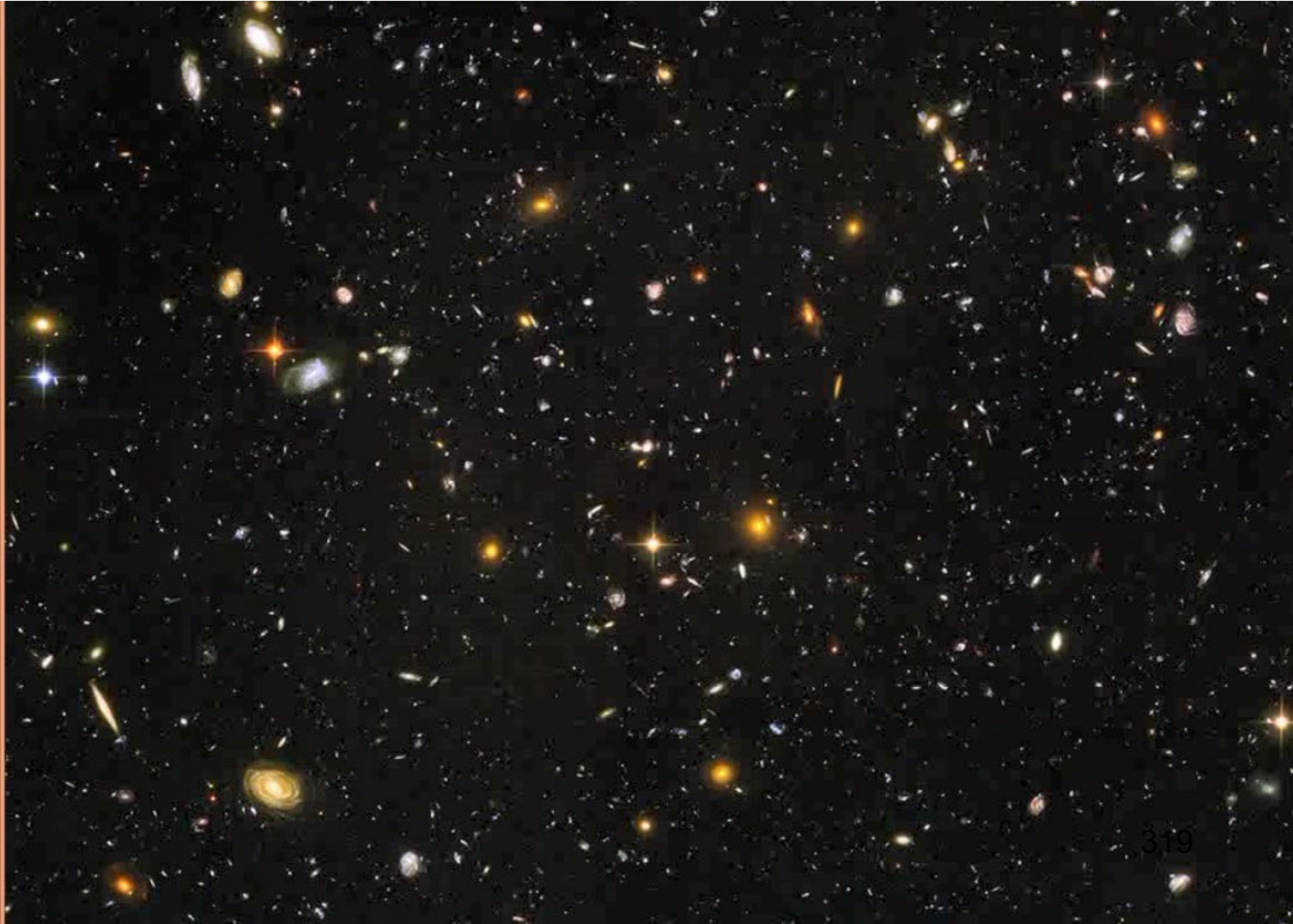
# Hubble Ultra Deep Field (HUDF) in the constellation Fornax total number of galaxies $> 10.000$

## FAST FACTS

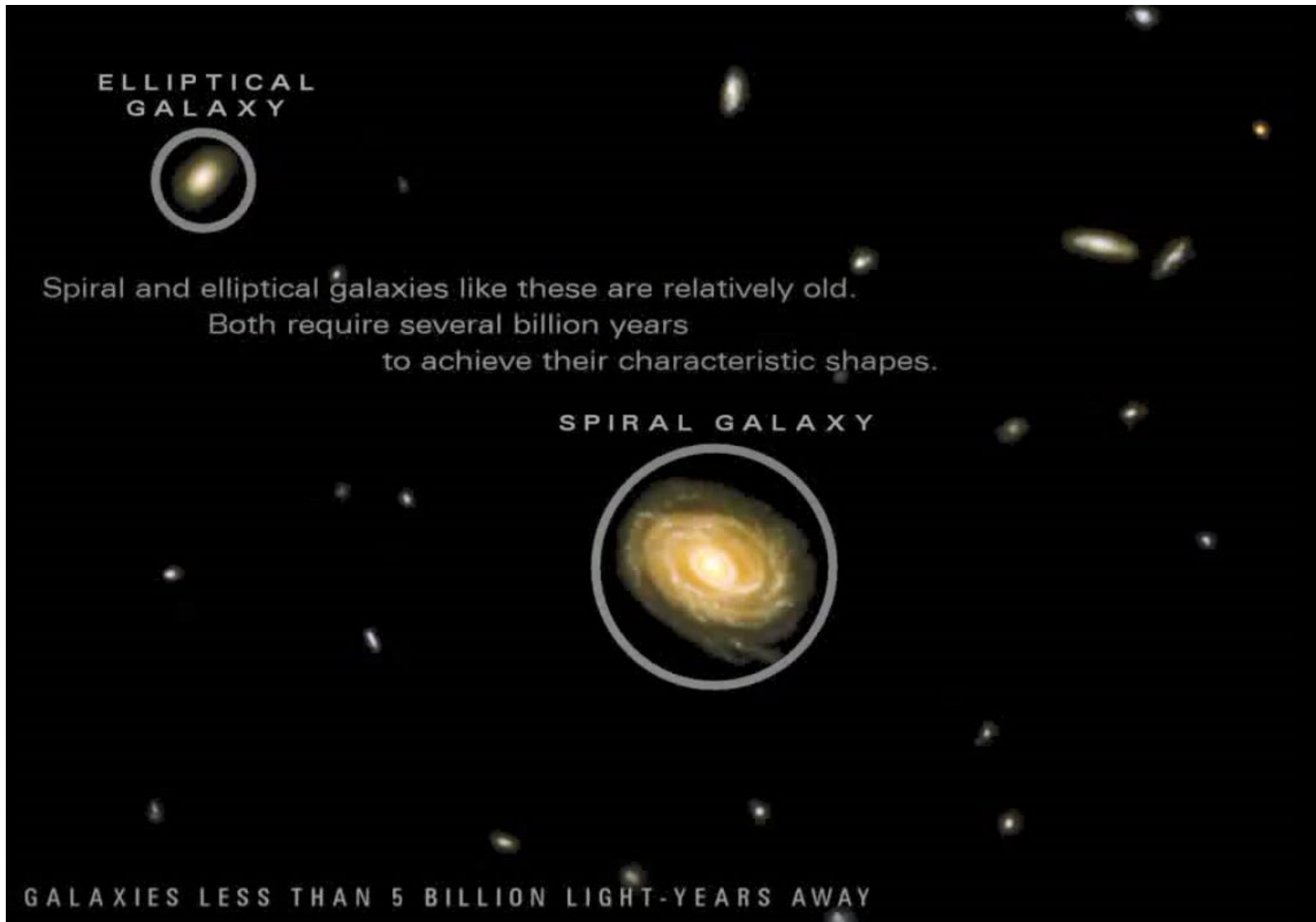
- ➔ Location:  
Constellation Fornax
- ➔ Distance from Earth:  
Up to 13 billion  
light-years away
- ➔ Size:  
This patch of sky is  
about one-tenth the  
diameter of the full Moon.

Hubble Ultra  
Deep Field

a hubble image tour



# Galaxies in the HUDF < 5 billion light years away

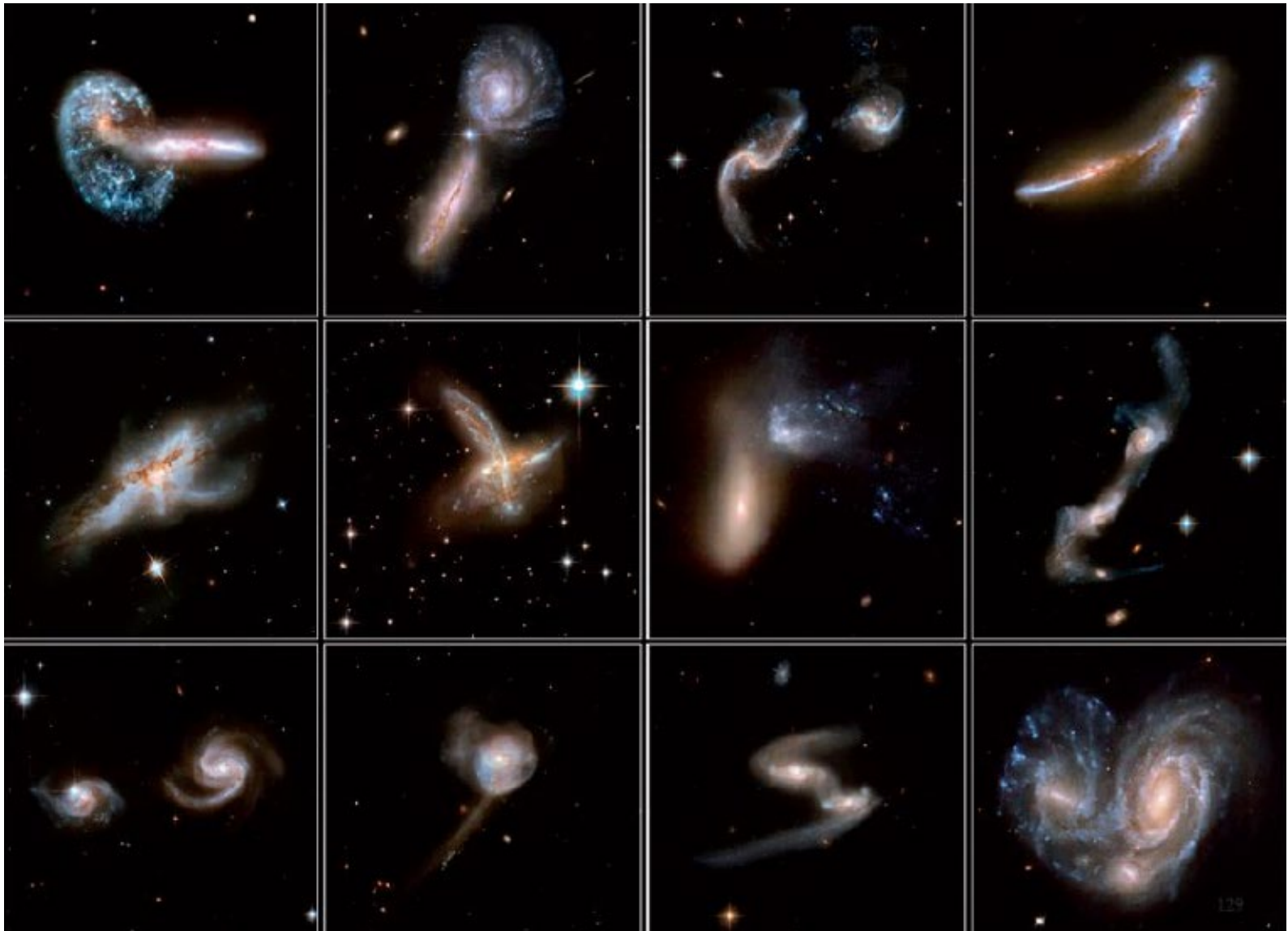


# Galaxies in the HUDF 5 -10 billion light years away





# Mergers: colliding galaxies



# Galaxies in the HUDF > 10 billion light years away





# Himiko triple galaxy merger



Universe 800 million yrs ( $z = 6.6$ )  
Very high star forming rate: several 100's/yr  
No hint of Carbon or heavy elements  
Precursor to large galaxy formation from  
primordeal material?

Hubble

ALMA/SUBARU

# Diagnostiek aan de ‘dark matter’ structuur

Euclid (ESA-L2022), Nancy Roman Space Telescope (NASA-L2025+)

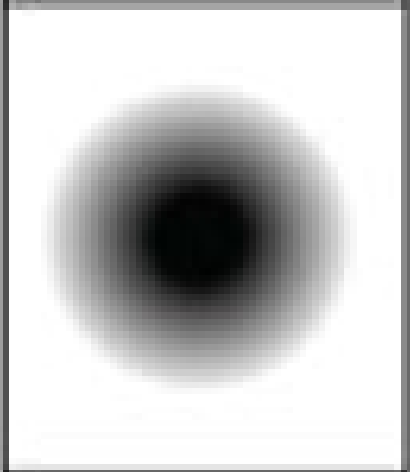
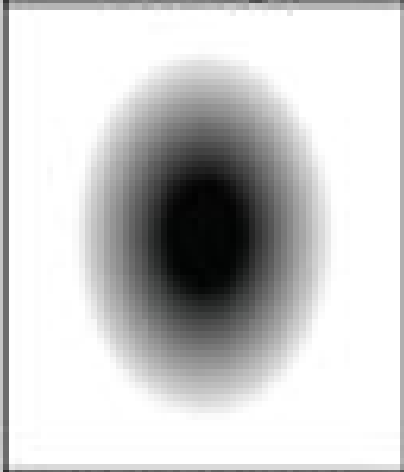
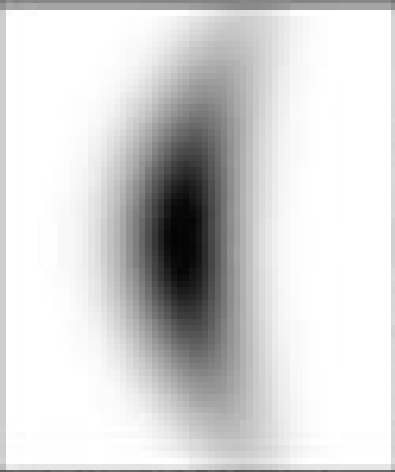
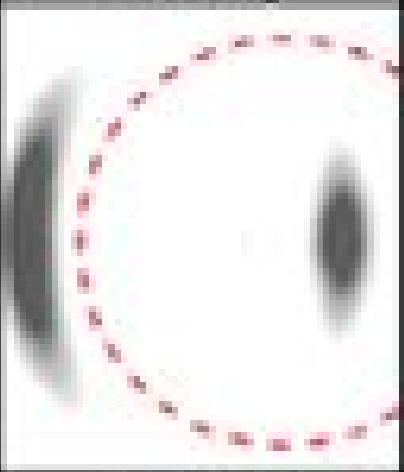
- **Vervorming door zwaartekrachtlenzen** (‘weak lensing’) van de vorm van melkwegstelsels.  
‘Wide Survey’:  $15000 \text{ gr}^2 \approx \frac{1}{3} \text{ hemel tot } z=2$  ( $10^{10}$  jaar terug)
- **Clustering van melkwegstelsels op bepaalde hoekschalen** in de grote-schaal structuur van het heelal (‘Baryon Acoustic Oscillations (BAO)’)
- **Grote steekproef ( $>1000$ ) met Supernovae 1A** tot op grote roodverschuiving ( $z \sim 2$ , ‘deep survey’  $2 \times 20 \text{ gr}^2$ )



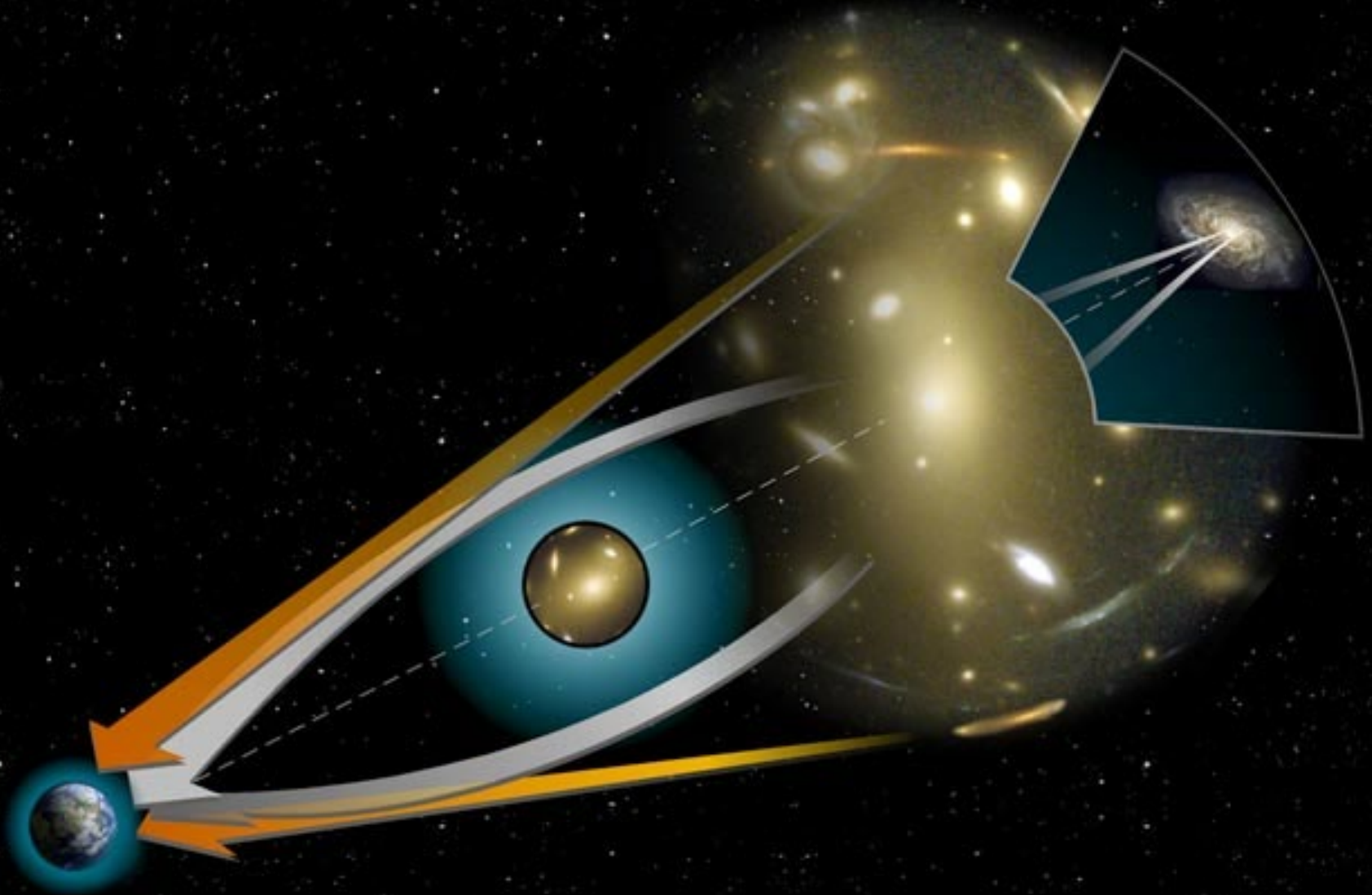
# Distorsie stralingsmorfologie door zwaartekracht lens



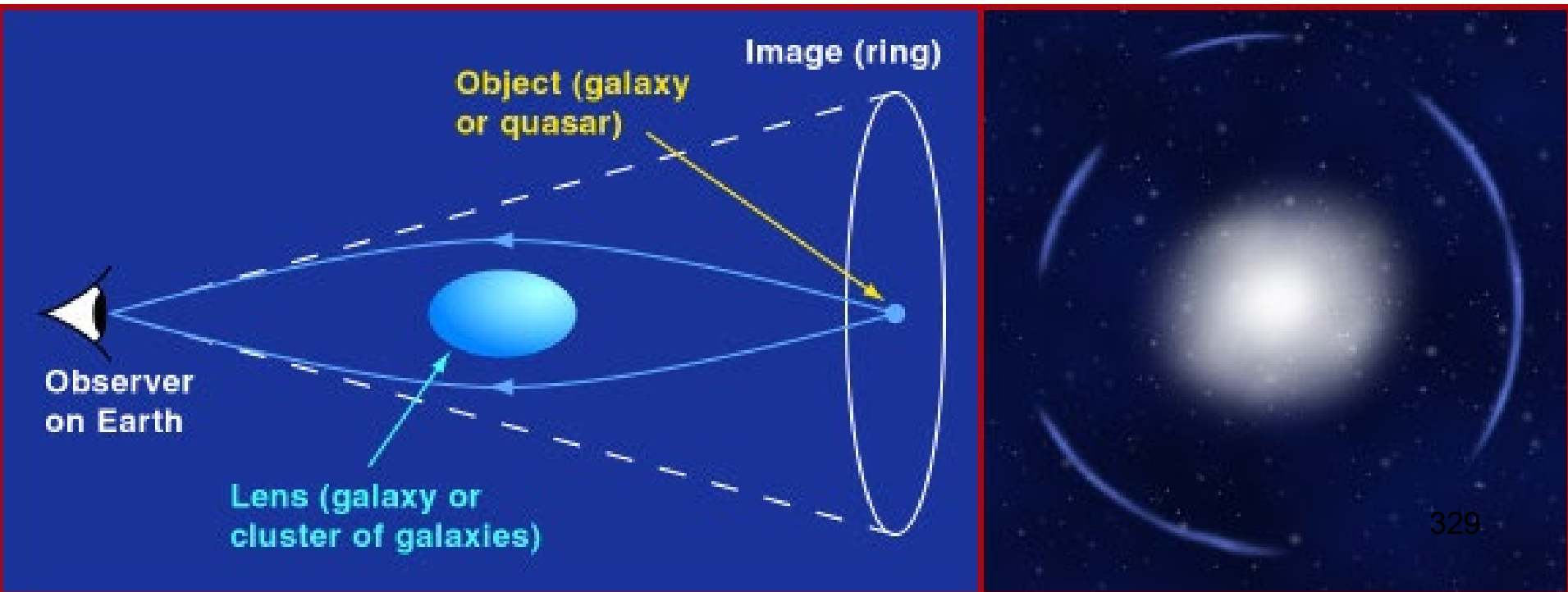
# Gravitational lensing: Weak $\rightarrow$ Strong

No lensing	Weak lensing	Flexion	Strong lensing
			
	Large-scale structure	Substructure, outskirts of halos	Cluster and galaxy cores

# Principe van een kosmische zwaartekracht lens (1)

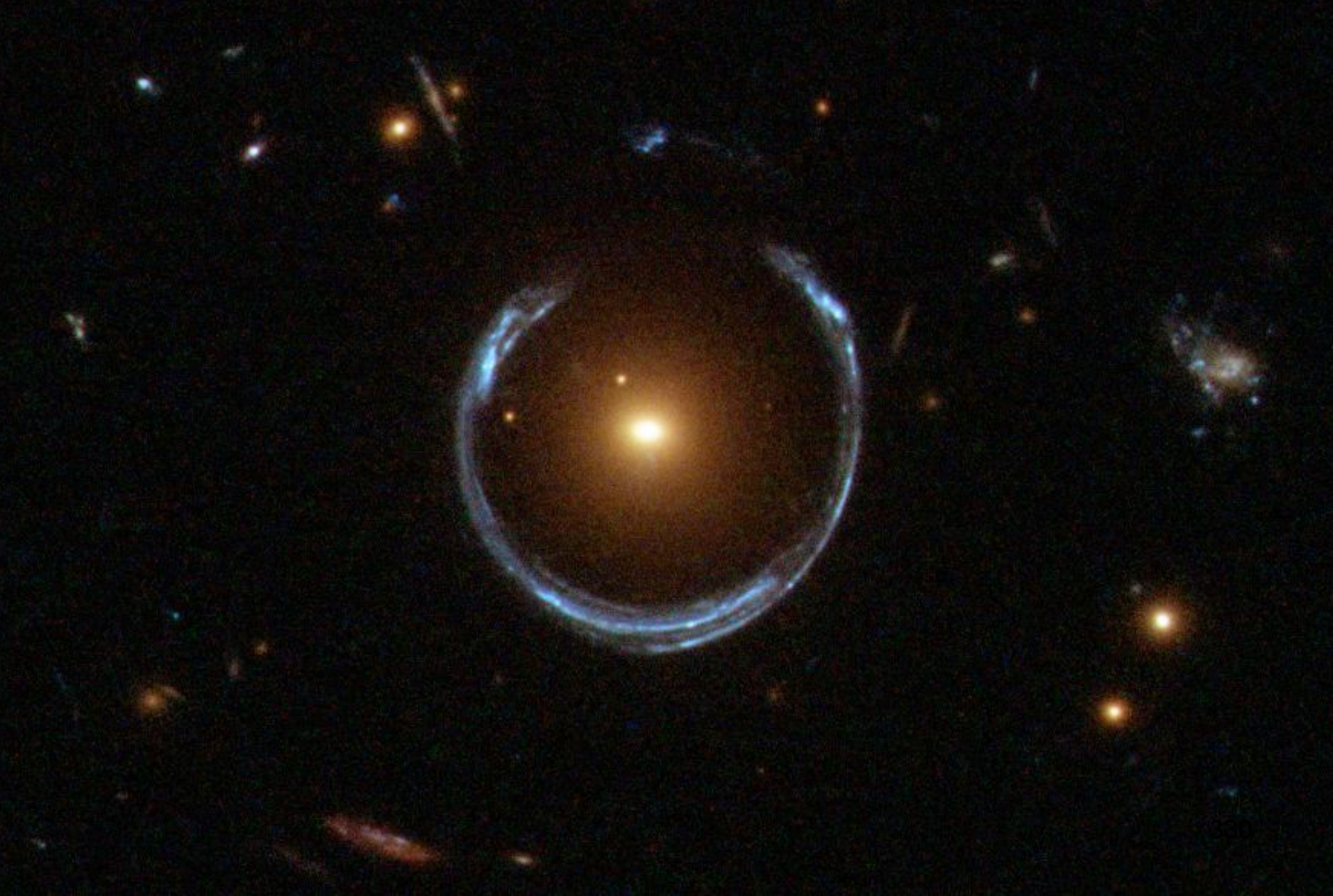


# Principe van een kosmische zwaartekracht lens: vorming van een “Einstein Ring” (2)

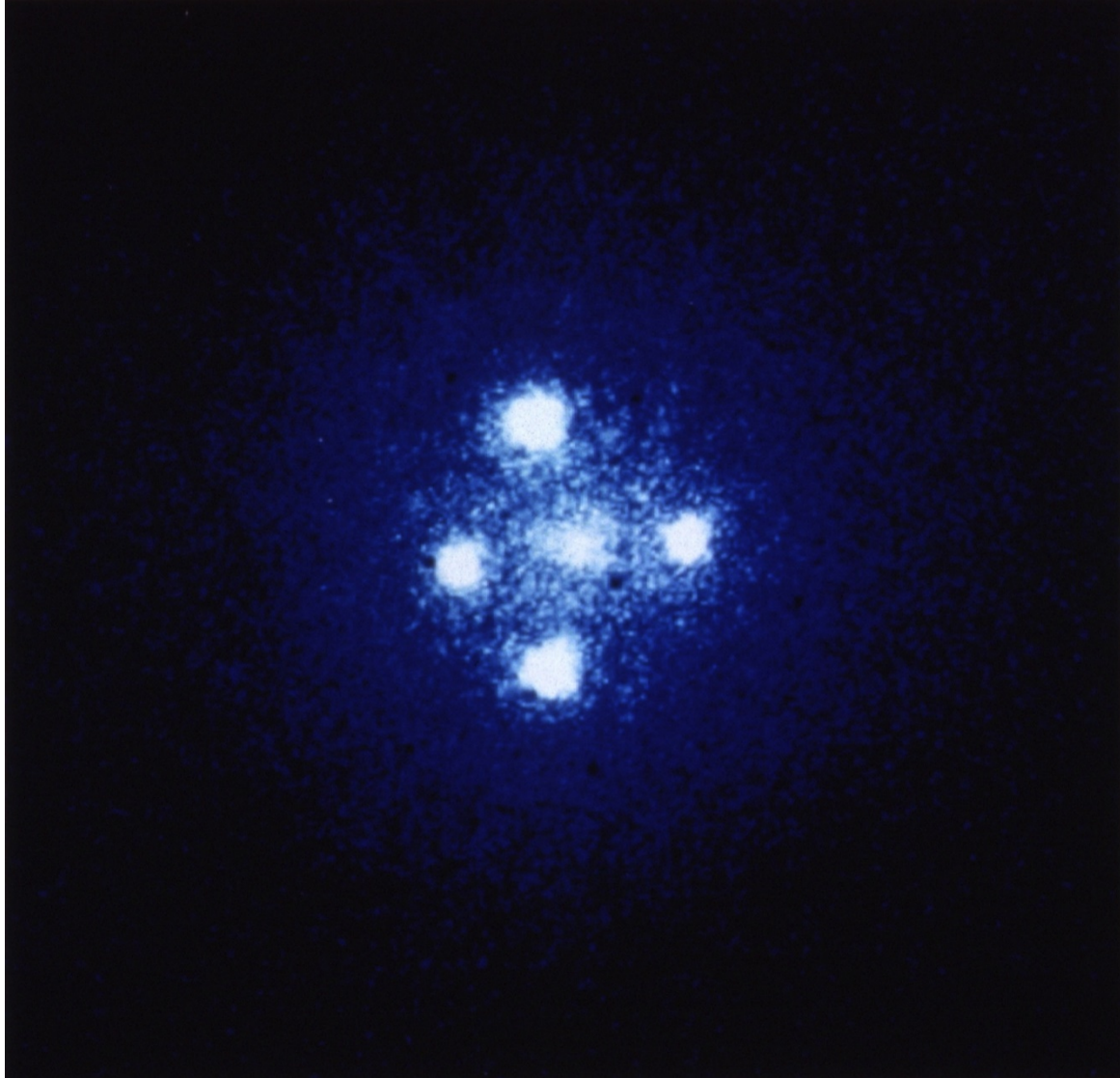




# Hubble (2008): Hoefijzervormige Einstein ring



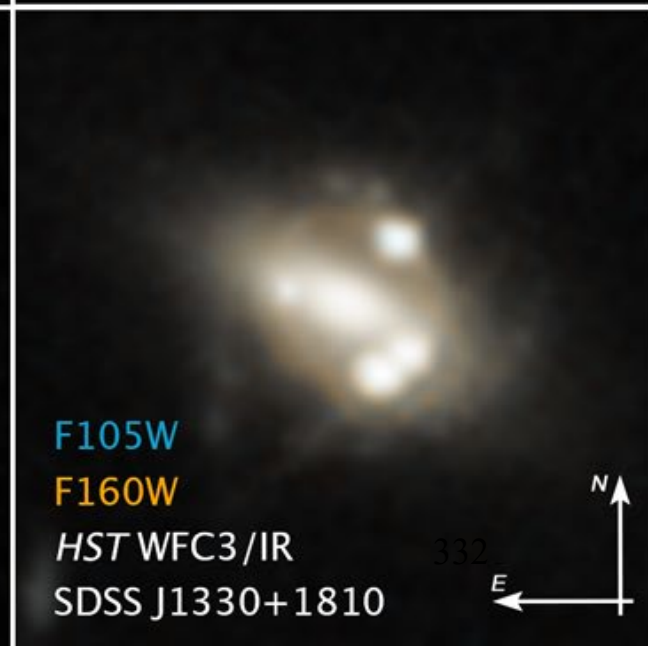
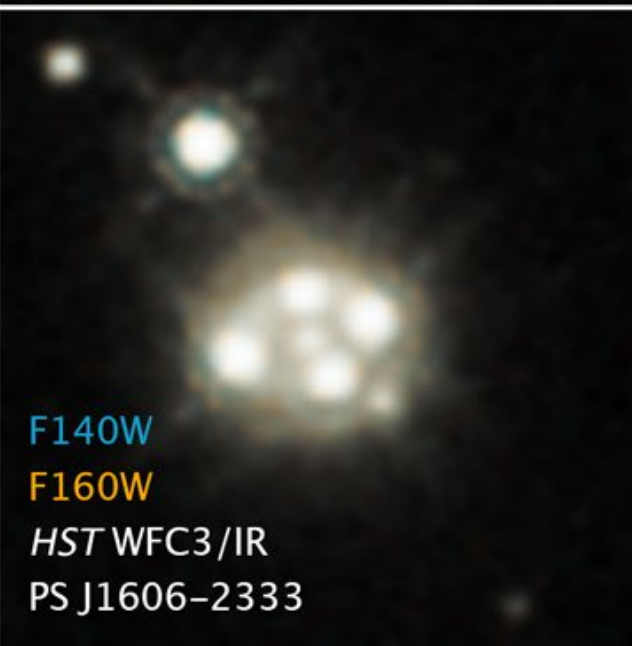
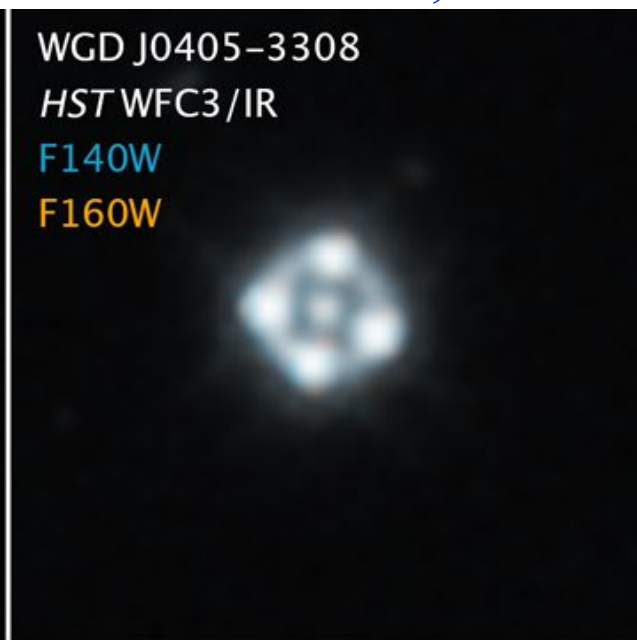
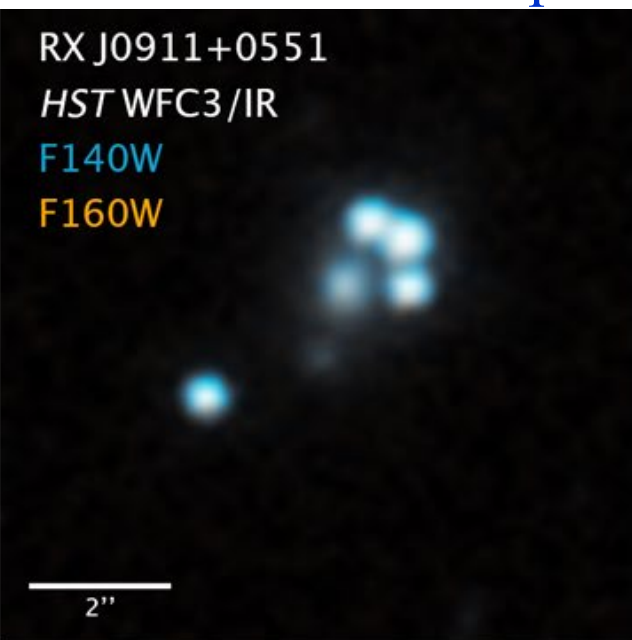
“Einstein cross”: veelvoudig beeld van Quasar door zwaartekracht lens van dichtbijstaand melkwegstelsel





# Hubble sterke lenswerking op 6 quasars, DM klonten $10^{-4}$ - $10^{-5} M_{\text{halo}}$ (Gal)

Opnames 2015 – 2018, AAS 2020



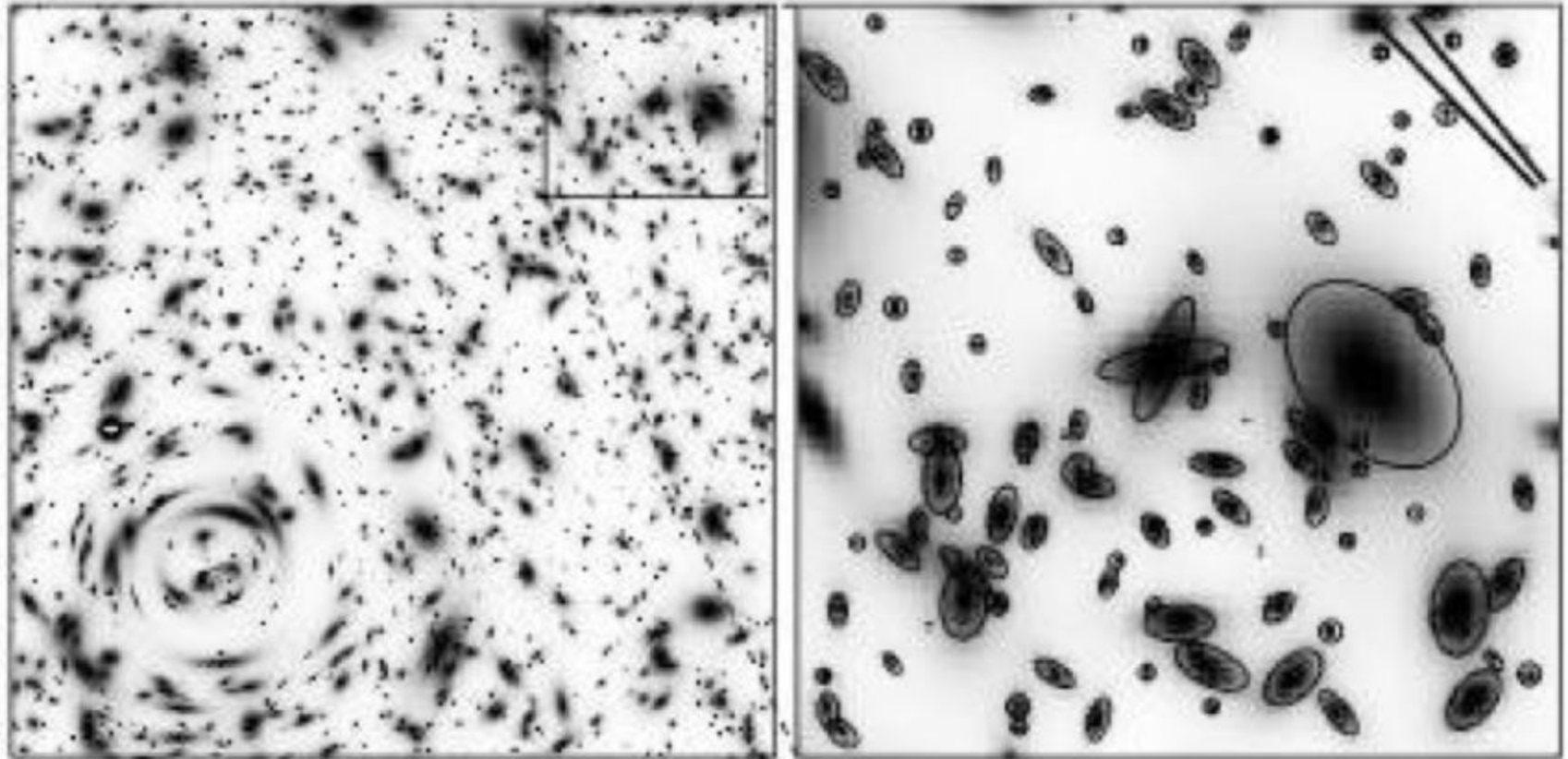
# Hubble: vervorming melkwegstelsel door zwaartekracht lens





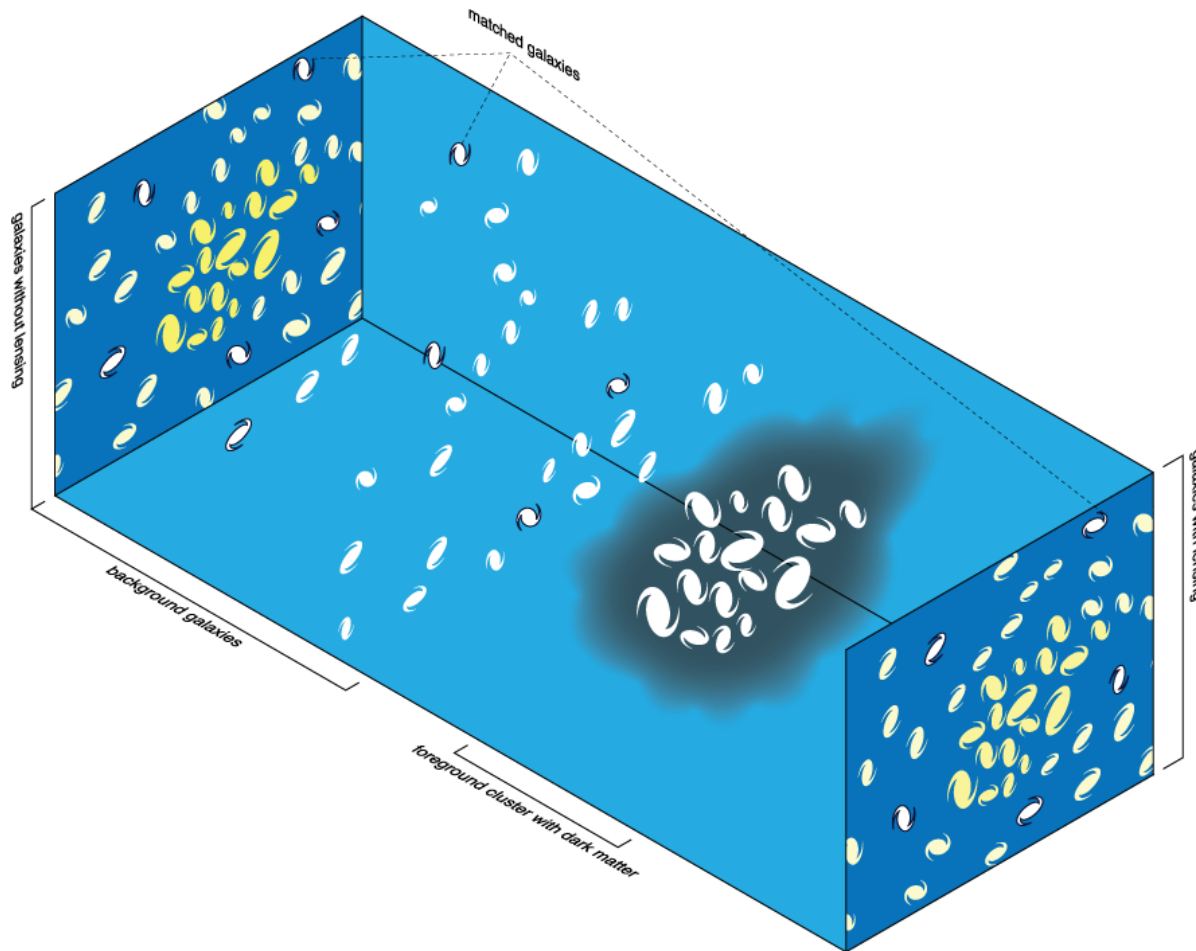
# Zwakke lenswerking

(Credit Henk Hoekstra UL)



De vervorming door zwakke lenswerking kan heel precies worden bepaald door de ellipticiteiten van verre melkwegstelsels te meten en daaruit de massaverdeling in de lens te reconstrueren.

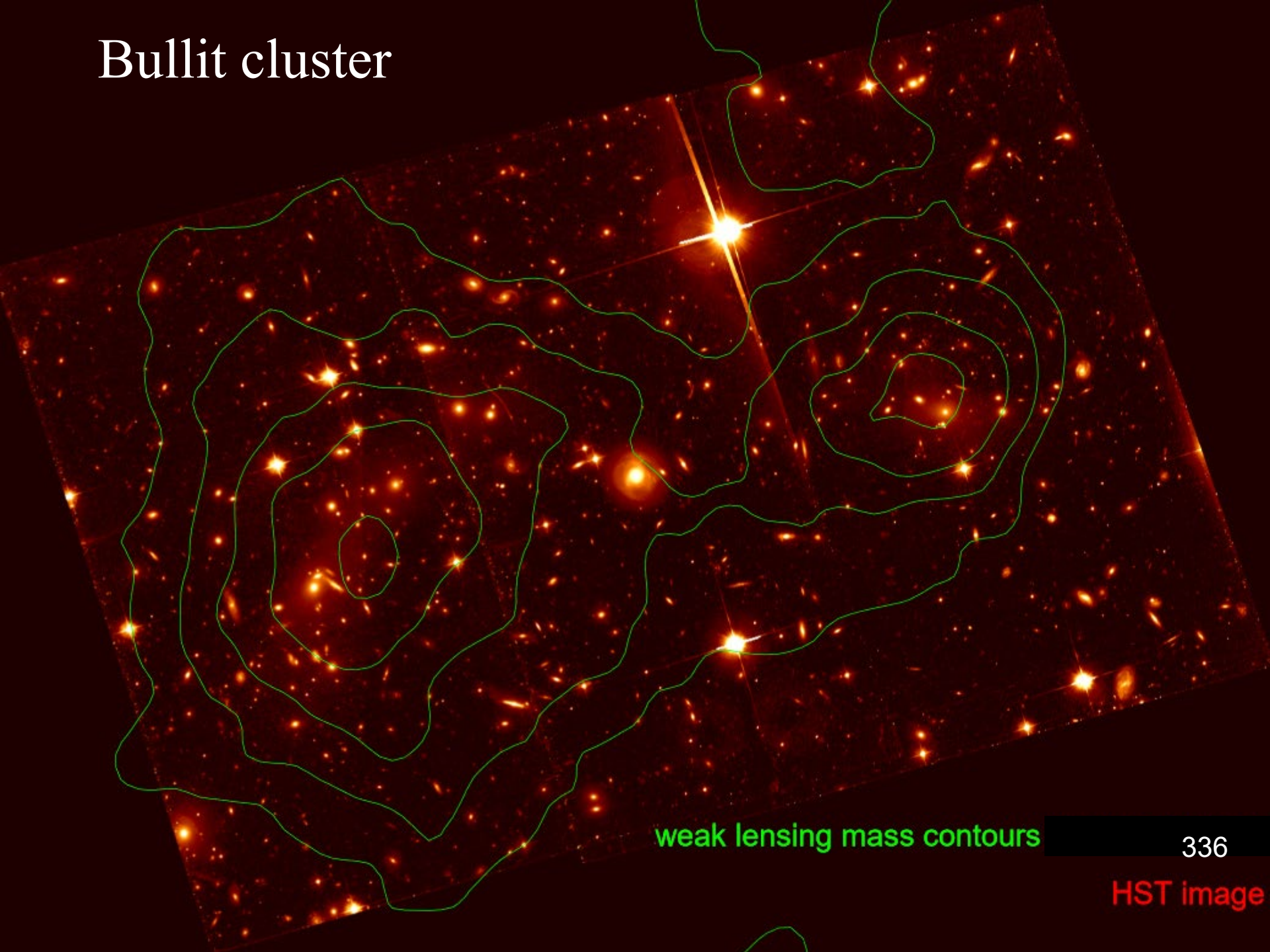
# Zwakke lenswerking door de (donkere) massa in een cluster van melkwegstelsels:



335

De door zwaartekracht geproduceerde 'shear' leidt tot een **coherente alignering van de ellipticiteiten** van de achtergrond-melkwegstelsels

# Bullit cluster



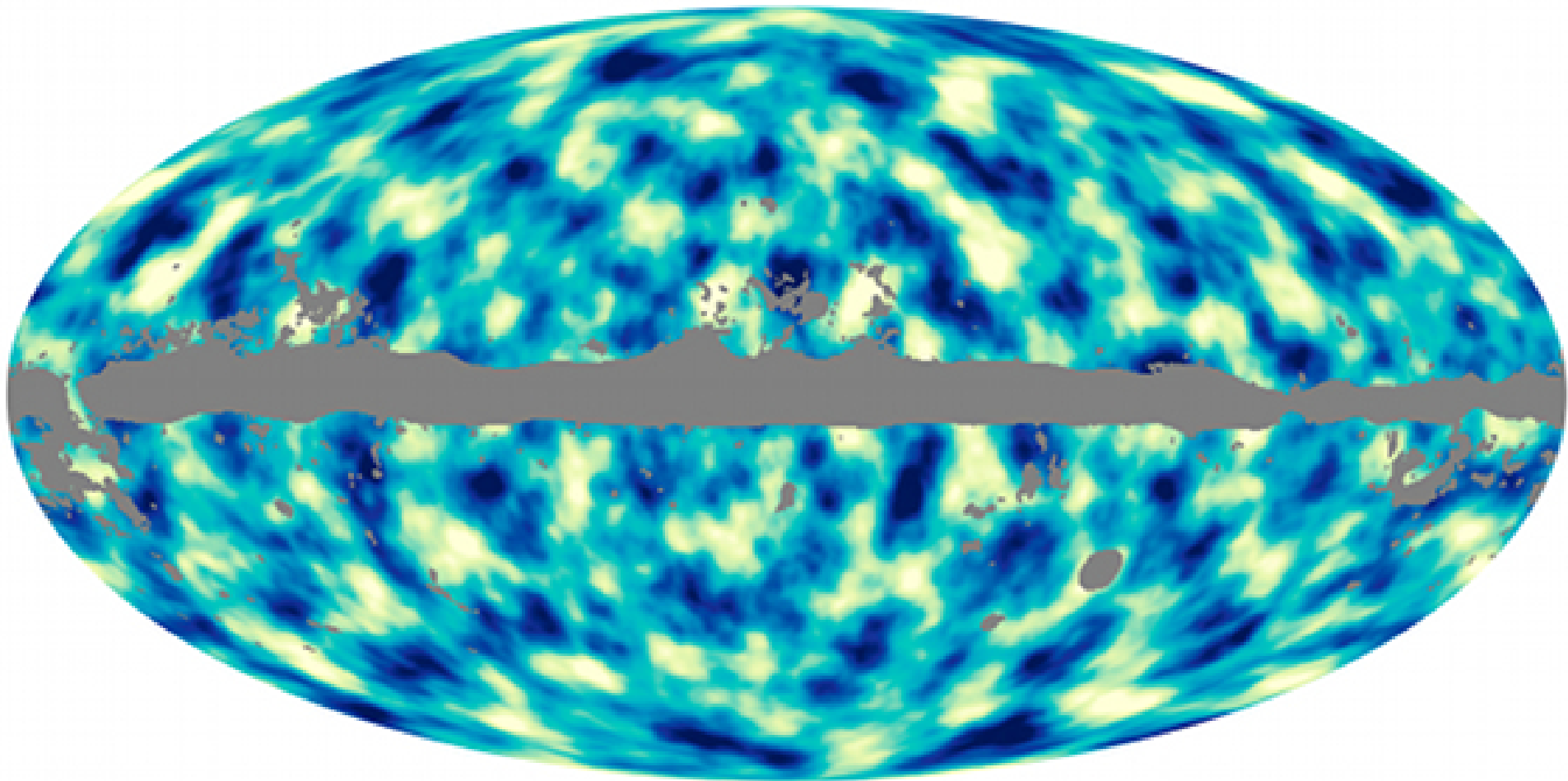
weak lensing mass contours

336

HST image

# Globale verdeling van donkere materie

Afgeleid uit de **zwakke lenswerking op de  $\mu$ -golfachtergrond-straling**  
gebaseerd op de Planck hemelkaart (2018)





# Specifieke eisen aan waarneeminstrument

## **Zwakke lenswerking van kosmische structuren:**

- scherpe afbeeldingen van veel melkwegstelsels
- fotometrie in meerdere banden, inclusief nabij infrarood

## **Samenklontering van melkwegstelsels:**

- 3d verdeling van veel melkwegstelsels op hoge roodverschuiving
- goede spectra in nabij infrarood

*Voor beide moet een groot oppervlak van de hemel worden waargenomen vanuit de ruimte.*

# Annihilatie van donkere materie $\rightarrow$ high energy $\gamma$ -rays?



$$E_{\gamma} > 100 \text{ GeV}$$

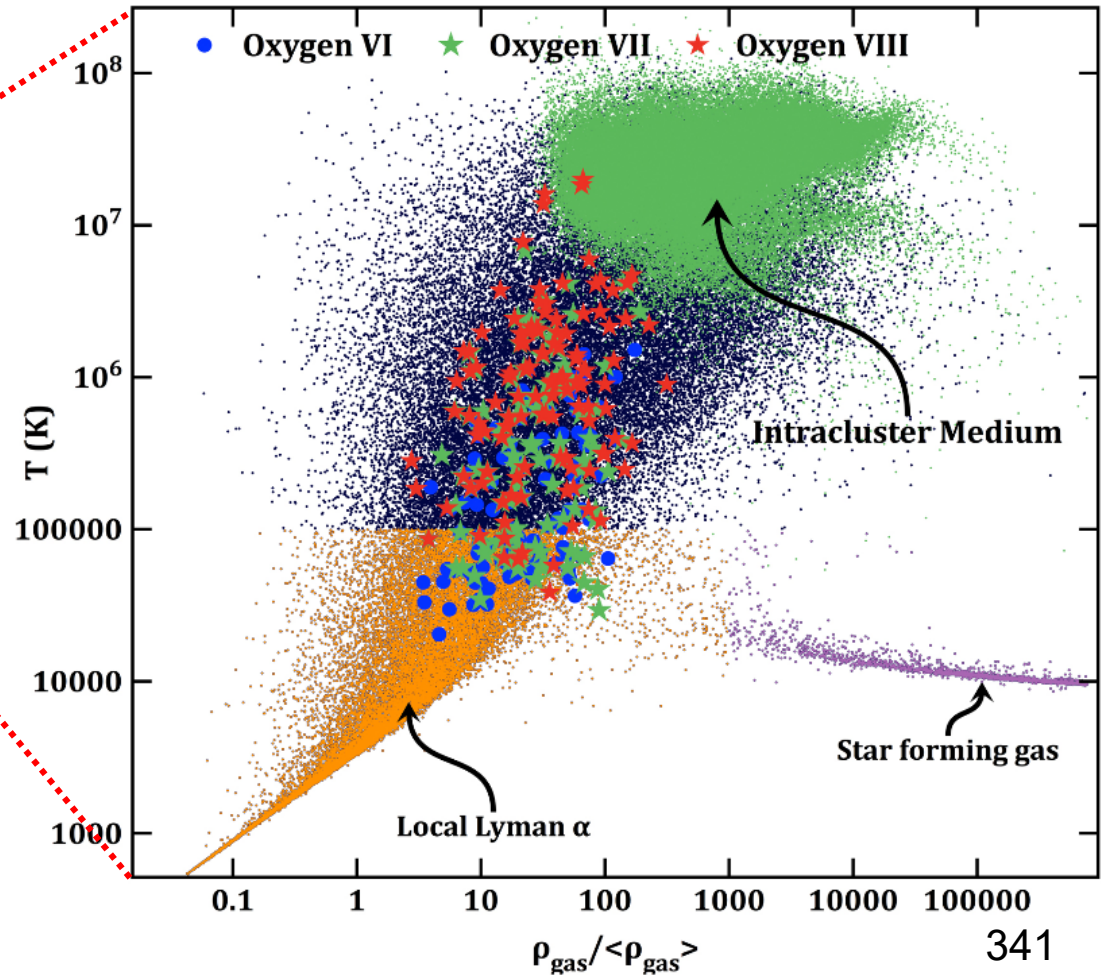
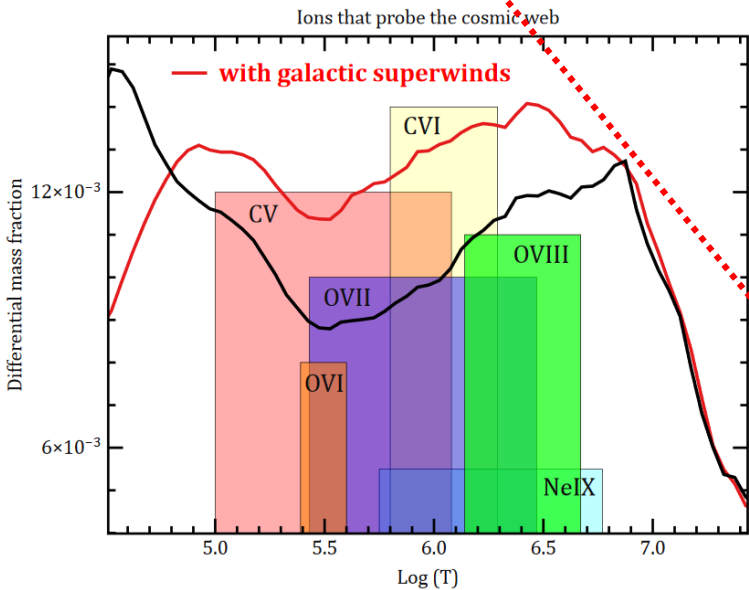
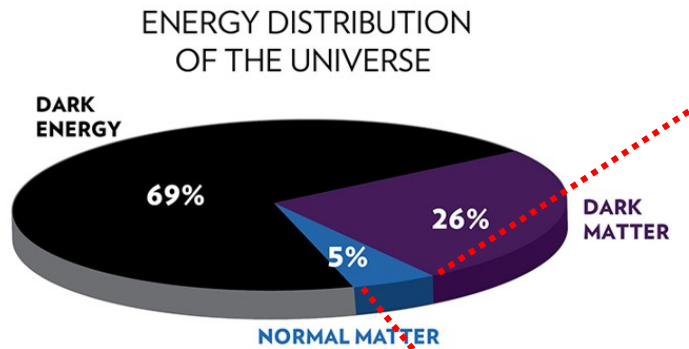
# Baryonen als “tracer” van donkere materie

- De grote schaal structuur van het huidige heelal wordt bepaald door de groei van de fluctuaties in de dichtheid van de donkere materie en door de dynamische wisselwerking van donkere materie met de donkere energie
- De wijze waarop deze grote schaal structuur zich aan ons manifesteert wordt bepaald door de zichtbare, baryonische, materie die is ingebed in de distributie van de donkere materie



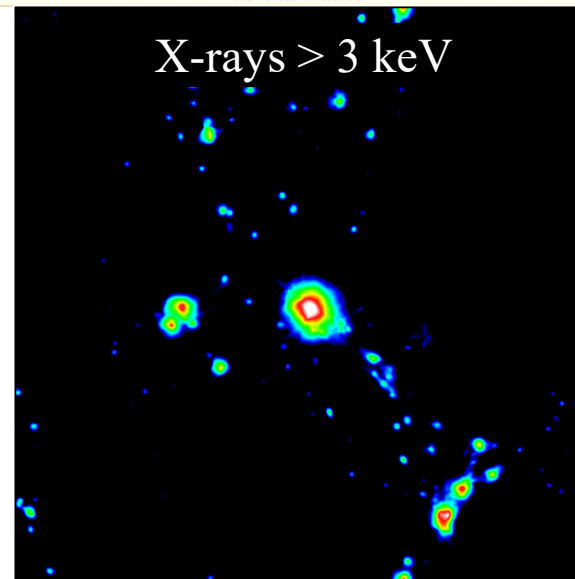
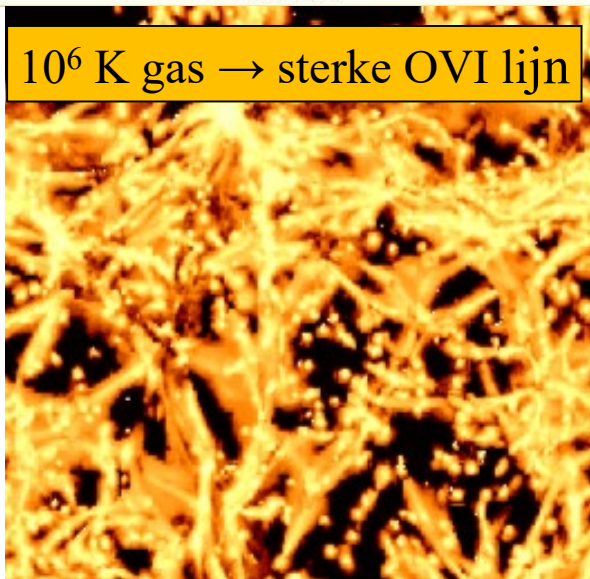
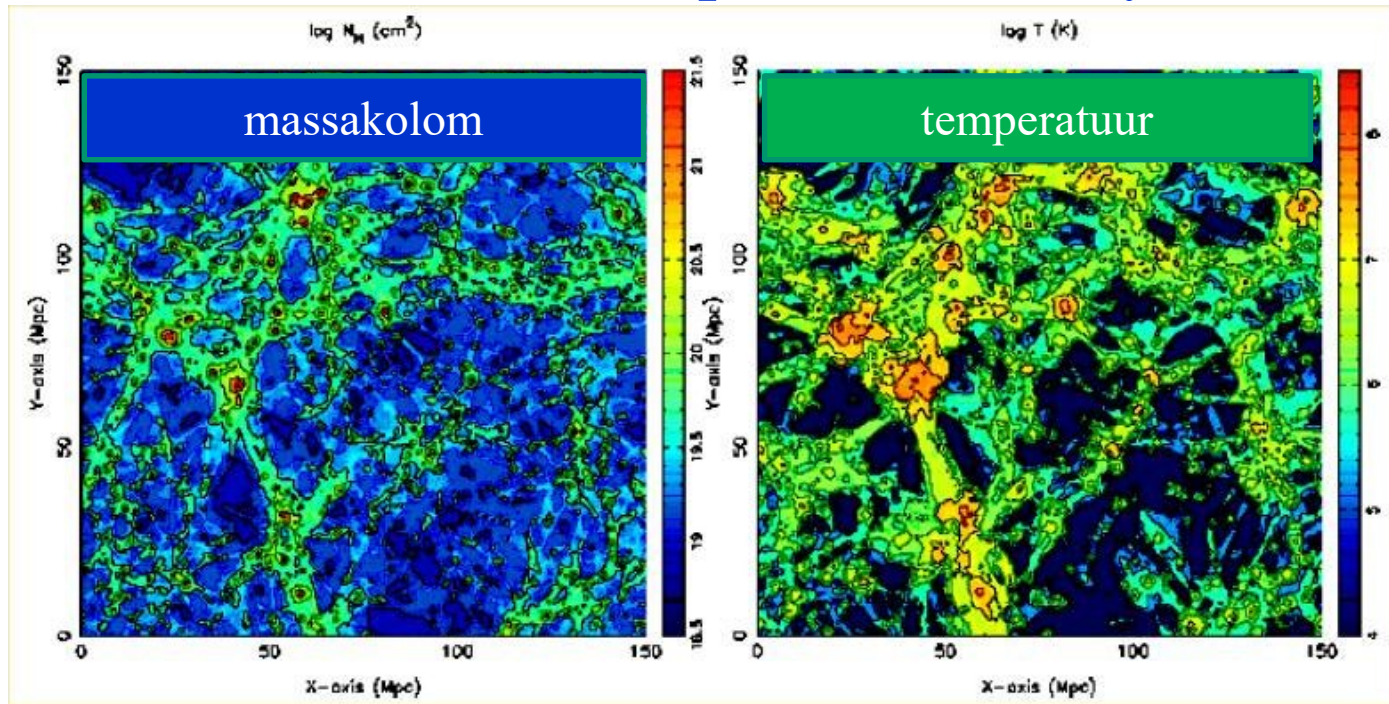
# Baryon populations in the Universe:

- Temperature vs Density
- Ion species as thermometers for the cosmic web

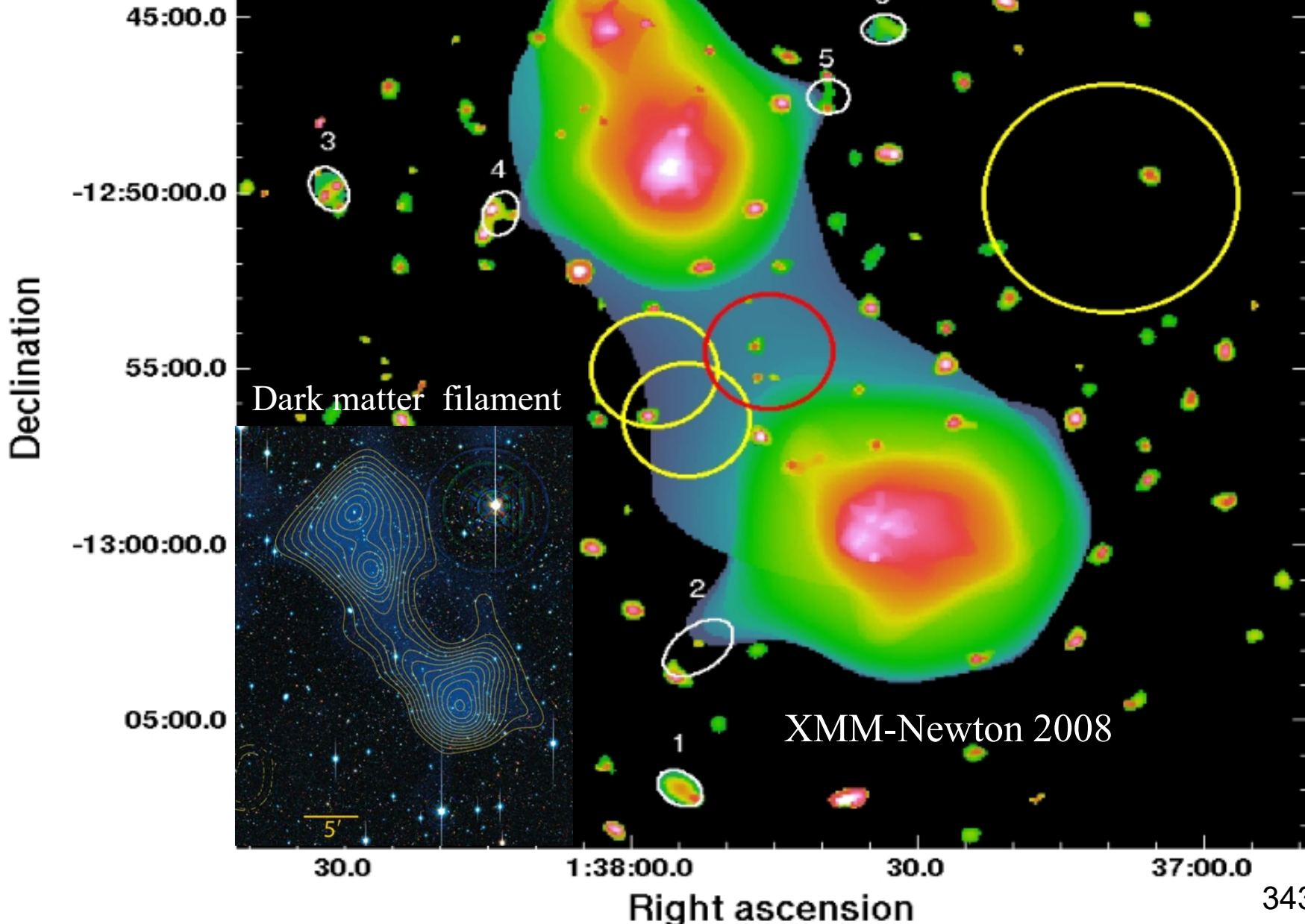




# Kosmisch Web: Massa, Temperatuur, X-rays, OVII-kolom



Hot ( $5 \times 10^6$  K) web gas filament connecting clusters  
A222 and A223





# HST: Cluster Abell 1689, Gravitational Lense .

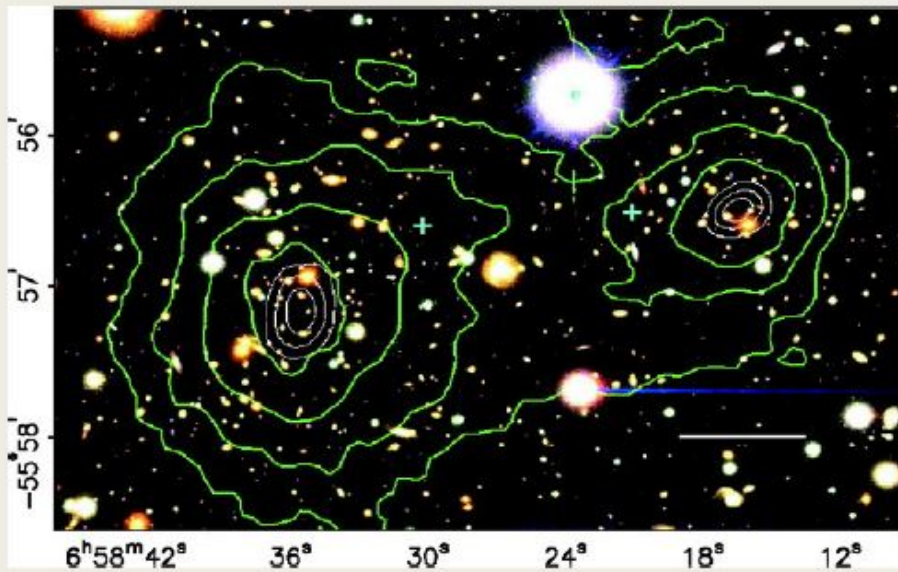
Einstein-ringen  
tonen in de cluster:  
ca. 6 maal meer  
'donkere' materie  
met zwaartekracht  
dan 'gewone'  
materie die uit  
atomen bestaat.



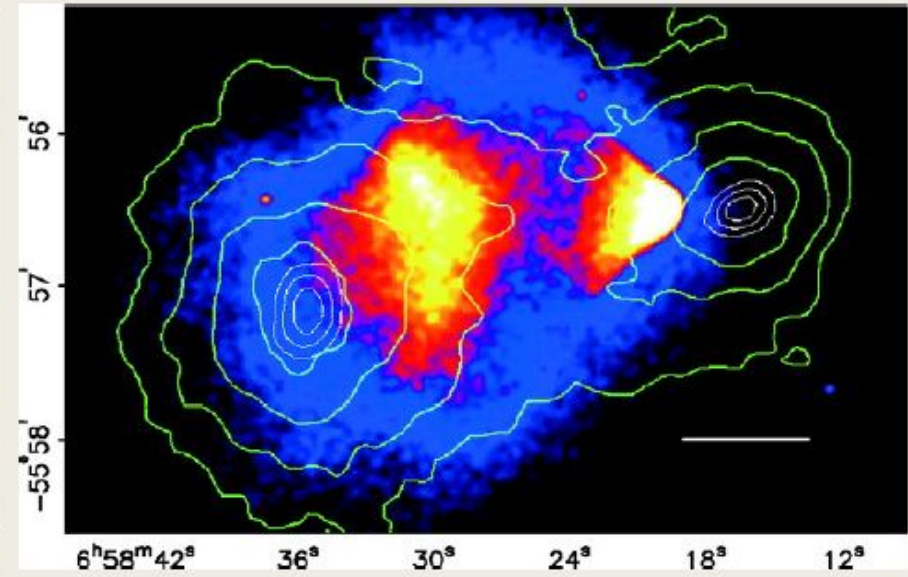


Bullet cluster: interacting cluster pair (cluster merger) shows different behavior between the **non-interacting dark matter** component and the **interacting baryonic matter** component.

➔ empirical proof for the existence of dark matter



- D. Clowe et al., 2006, ApJ 648, L109
- Weak-lensing observations of cluster merger 1E 0657-558 ( $z = 0.296$ )



- Chandra X-ray observations
- ➔ Detection of dark matter, independent of assumptions regarding the nature of the gravitational force law.



# Clusters van Melkwegstelsels



**Galaxy Cluster Abell 2218**

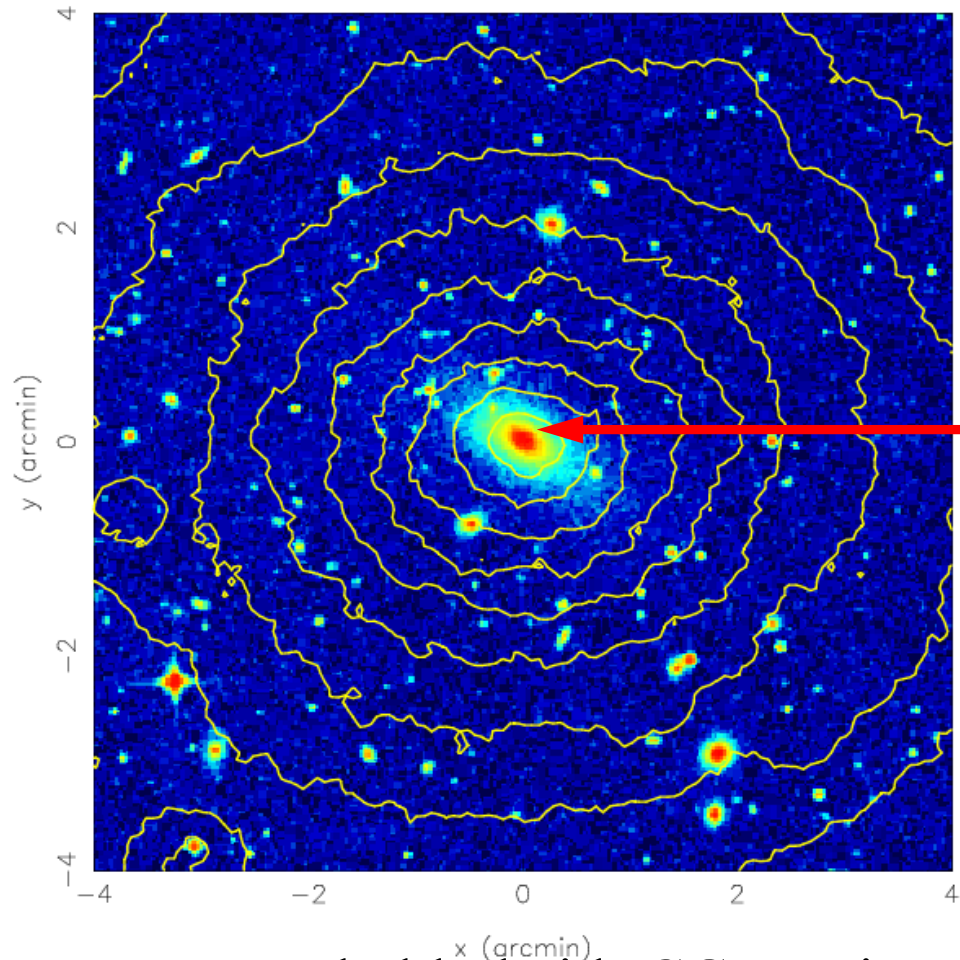
**HST • WFPC2**

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, STECF) • STScI-PRC00-08

Melkwegstelsels vormen slechts een **kleine massafractie**  
t.o.v. de donkere materie en het hete intracluster-gas

# Clusters van Melkwegstelsels: het hete IntraCluster Gas (ICG) met $T \sim 10^7 - 10^8$ K

Sérsic 159-03



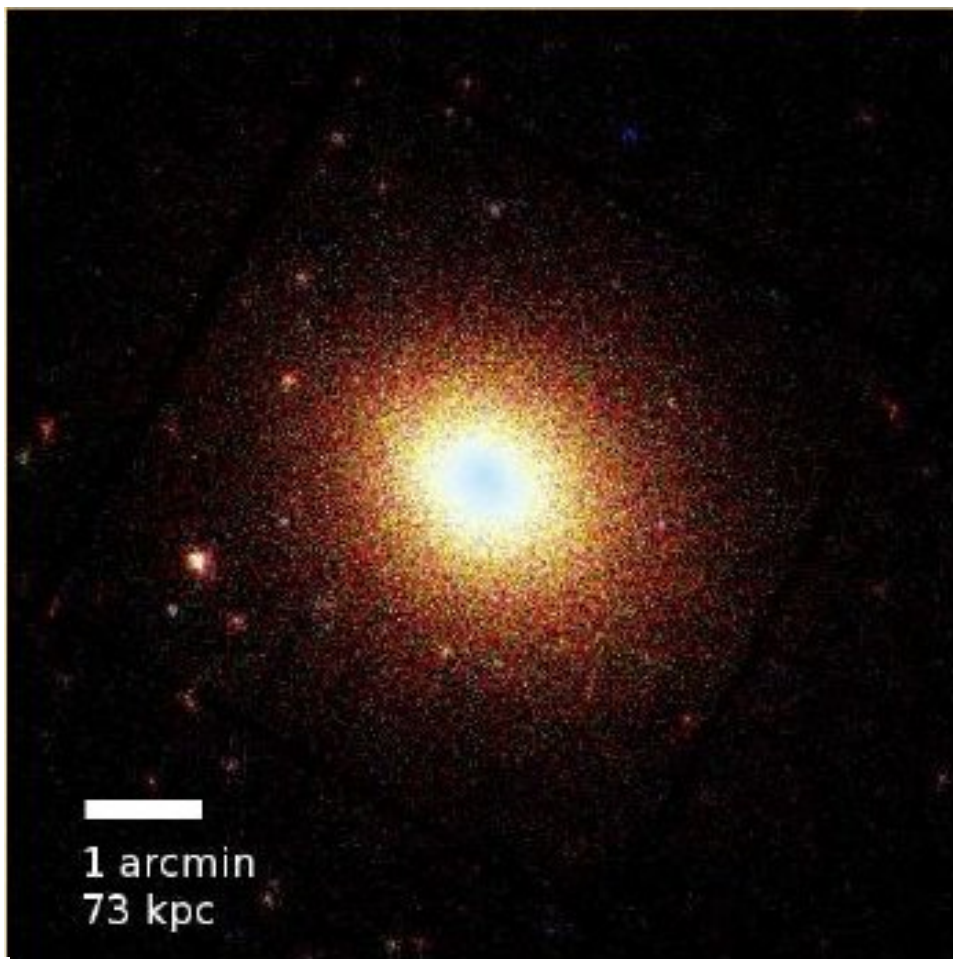
Centraal “zwaar”  
melkwegstelsel  
in de cluster

$$\text{Massa}_{\text{ICG}} \approx 6 \times \text{Massa}_{\text{gal}}$$

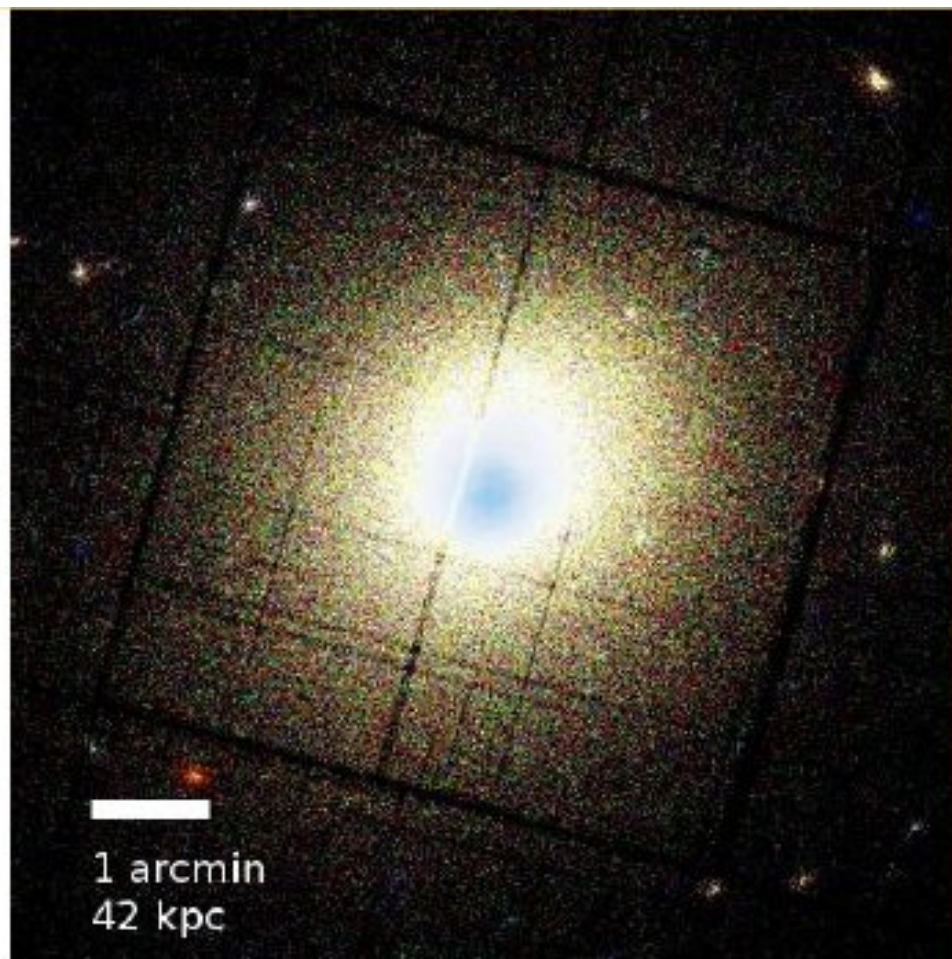
Röntgenhelderheid ICG maximaal op de **positie van een centraal (optisch) helder stelsel**. Door grotere dichtheid daar koelt het ICG



# X-ray emission of Intracluster media in 2 clusters (XMM-Newton)

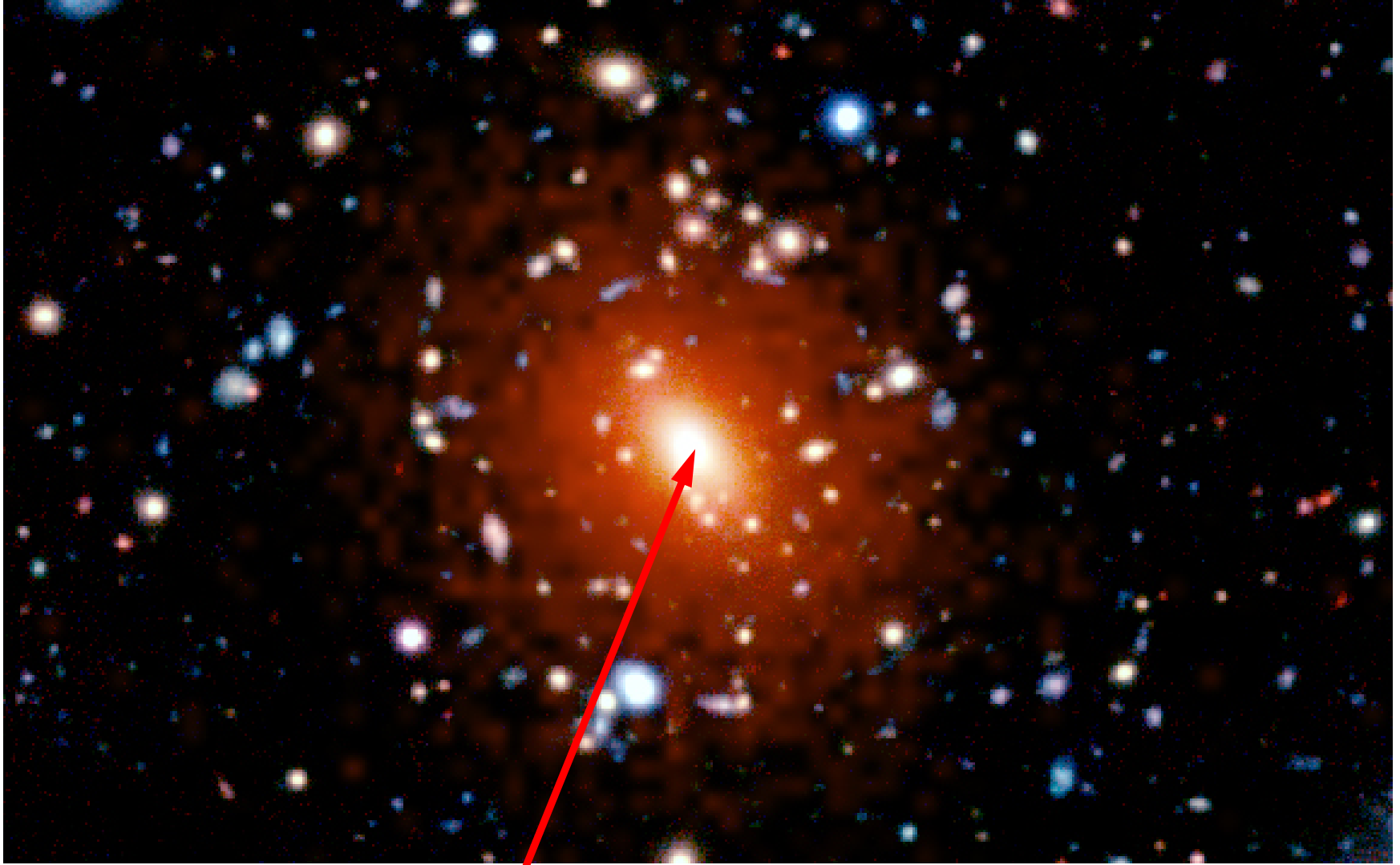


**Sérsic 159-03** ( $\sim 130$  ks)  
Redshift: 0.0564



**2A 0335+096** ( $\sim 130$  ks)  
Redshift: 0.0349

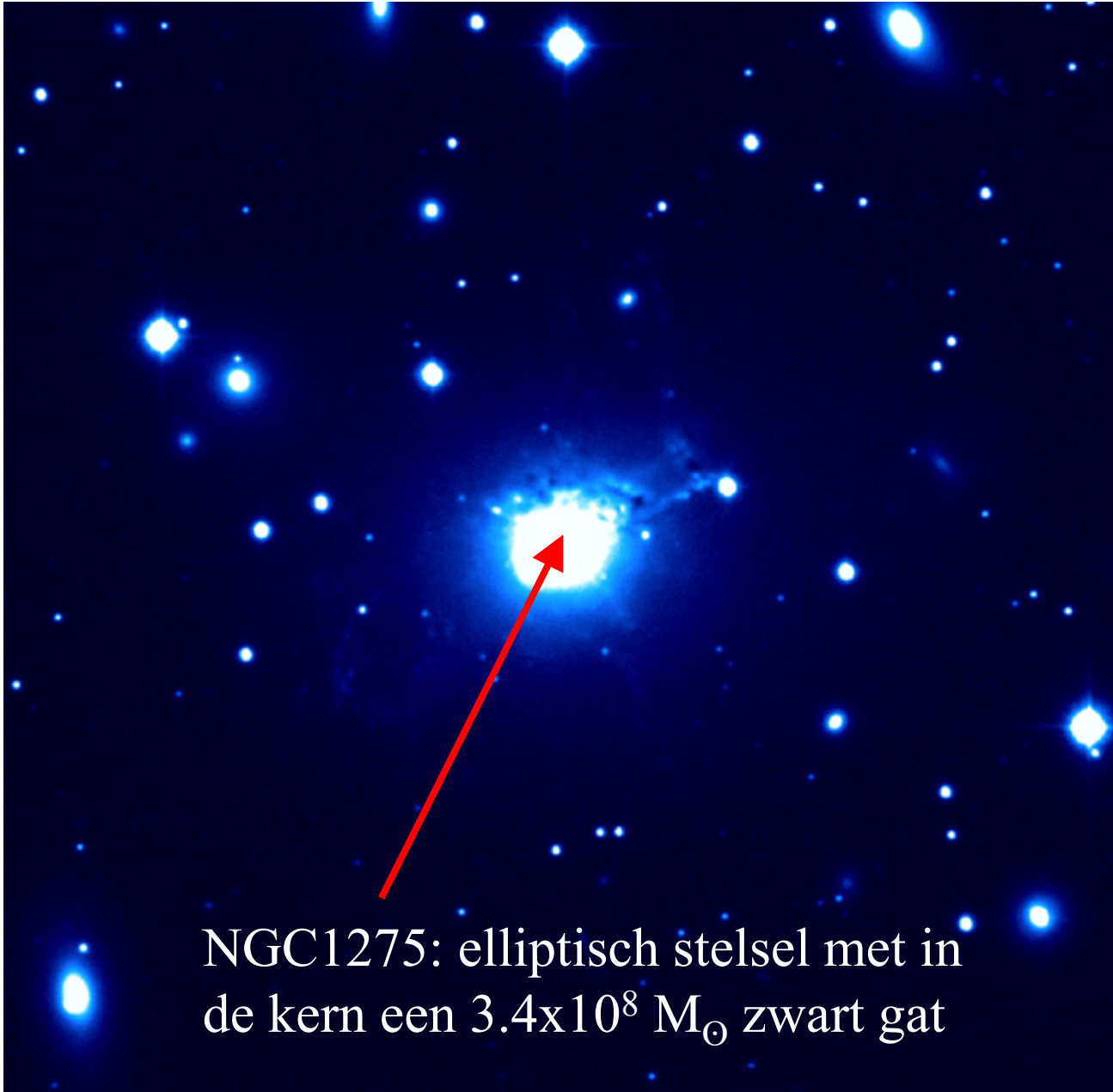
# Intracluster Gas ( $T \sim 10^7$ - $10^8$ K) rond centraal stelsel



Centraal “zwaar” Melkwegstelsel in de cluster  
Massa van **heet gas**  $\approx 6 \times$  **Massa optisch stelsels**

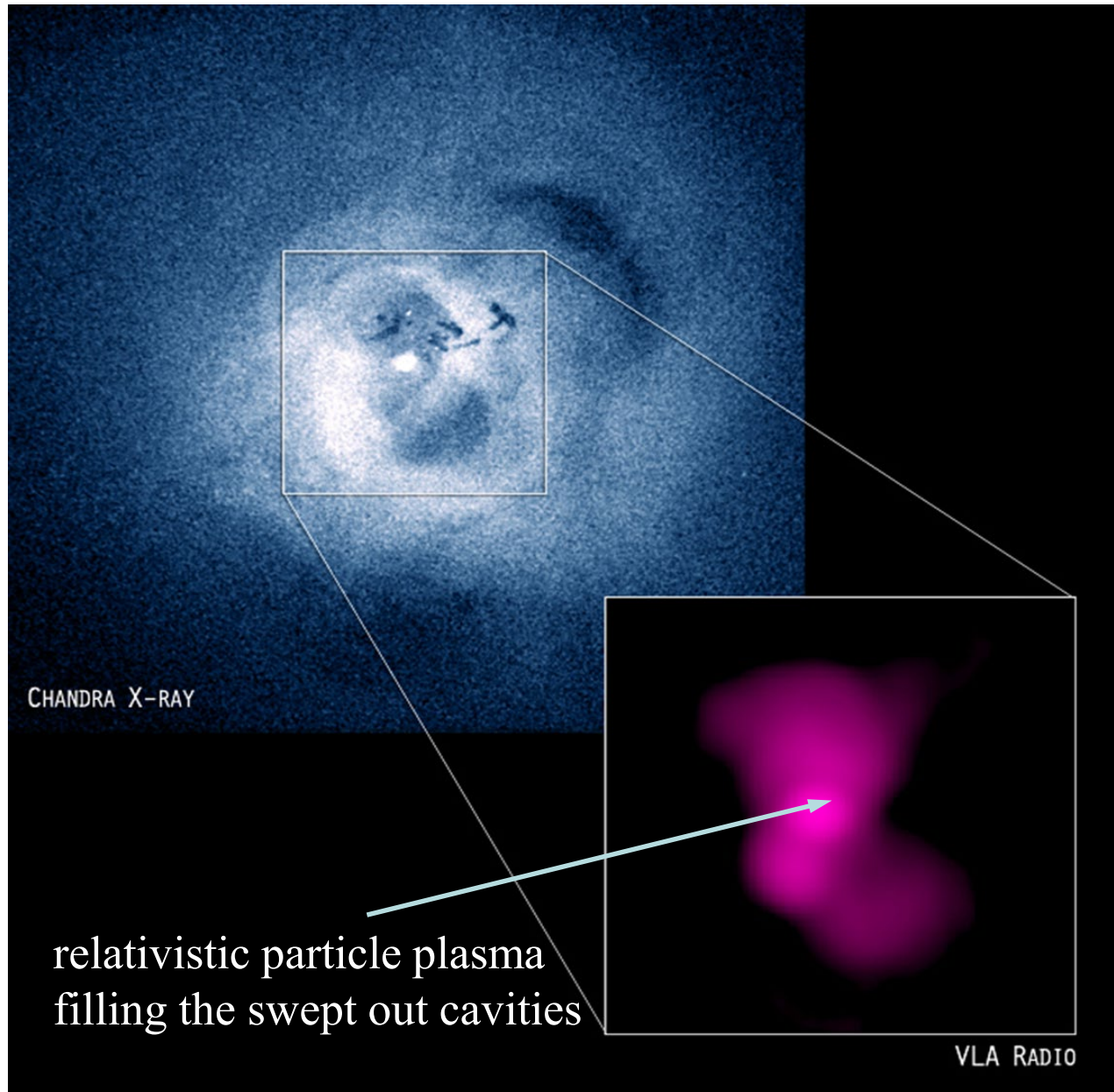


# Centraal deel Perseus cluster ( $\approx 500$ stelsels)



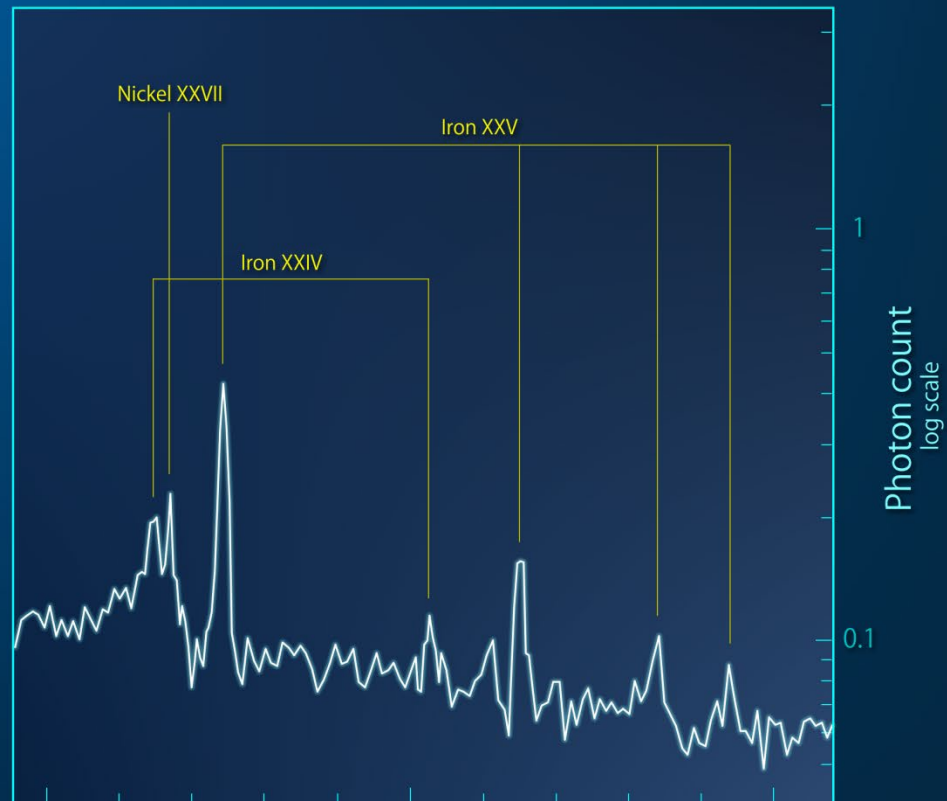
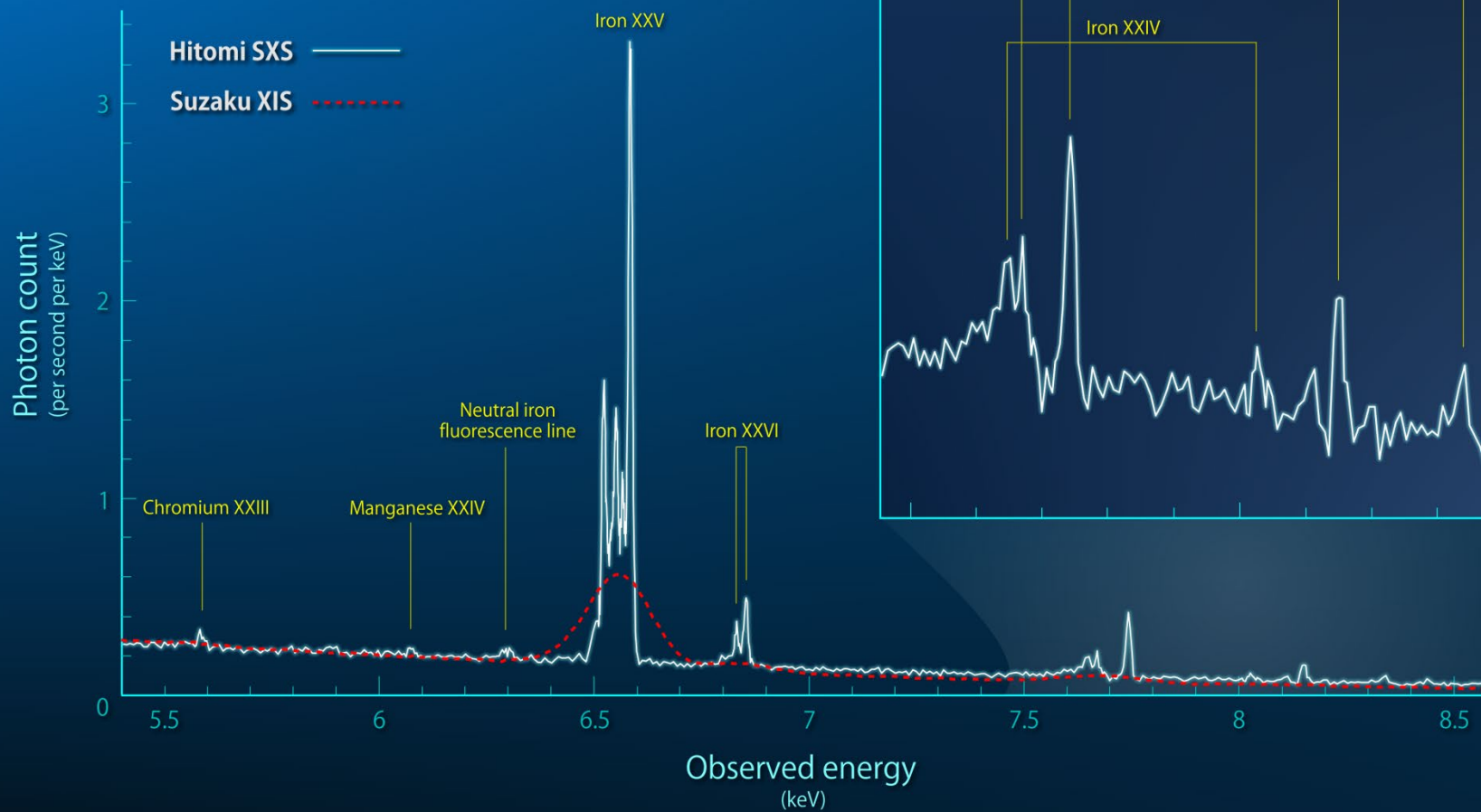
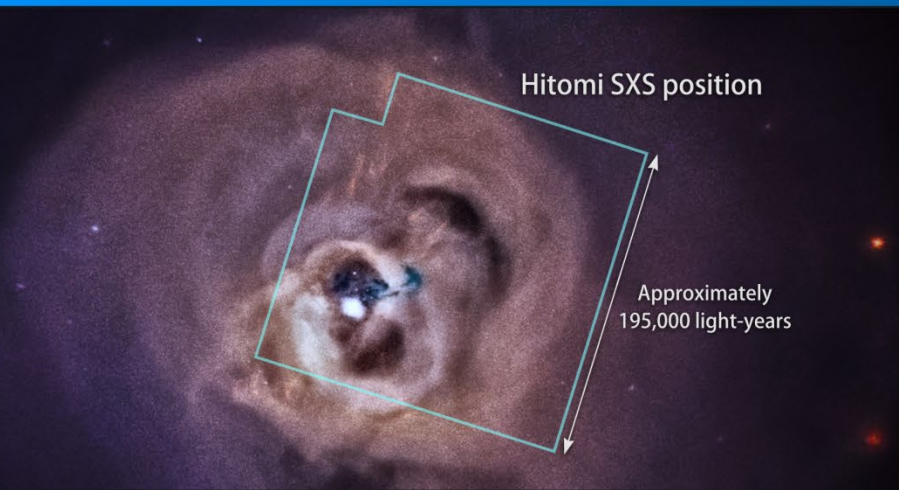
NGC1275: elliptisch stelsel met in de kern een  $3.4 \times 10^8 M_{\odot}$  zwart gat

# IGM cavities: jet outflow by the central black hole in NGC 1275

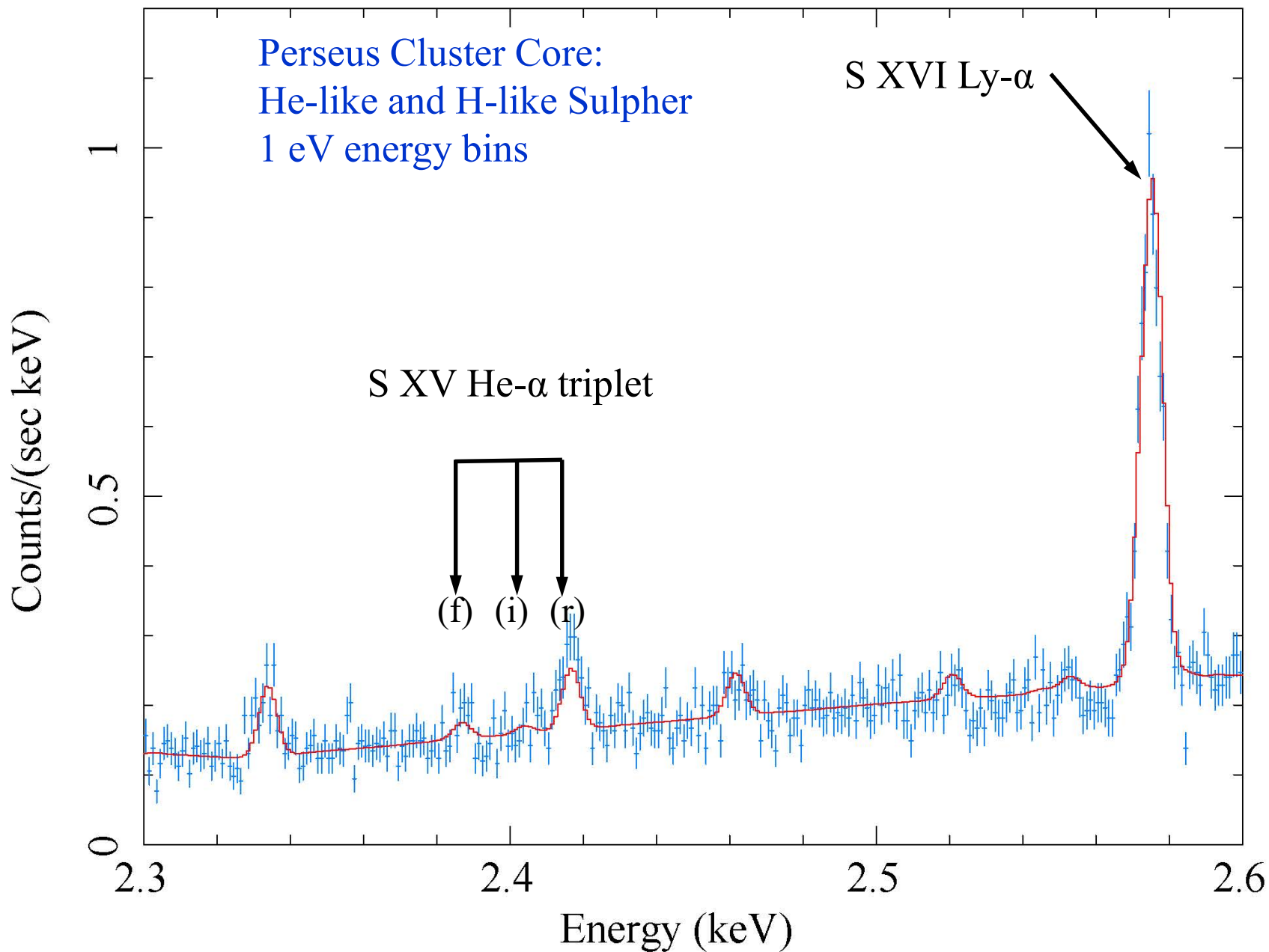


# Perseus Galaxy Cluster X-ray Spectra

## Hitomi X-ray calorimeter 2016

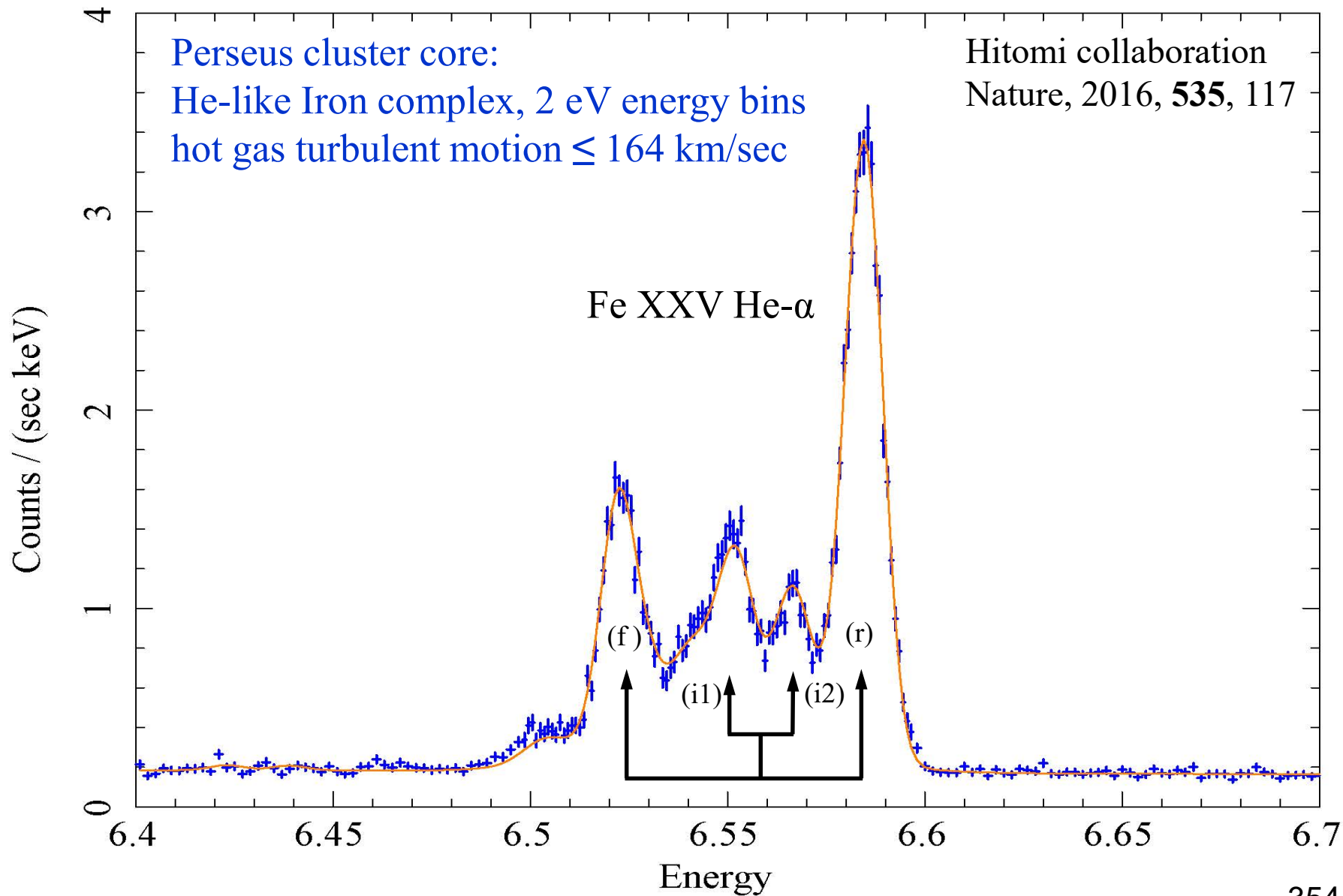


# Perseus Core S-XV and S-XVI

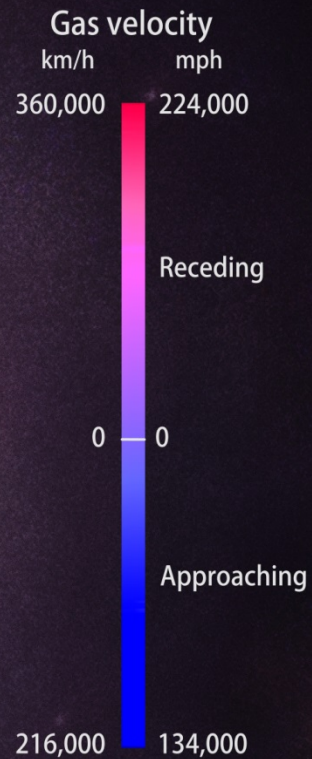
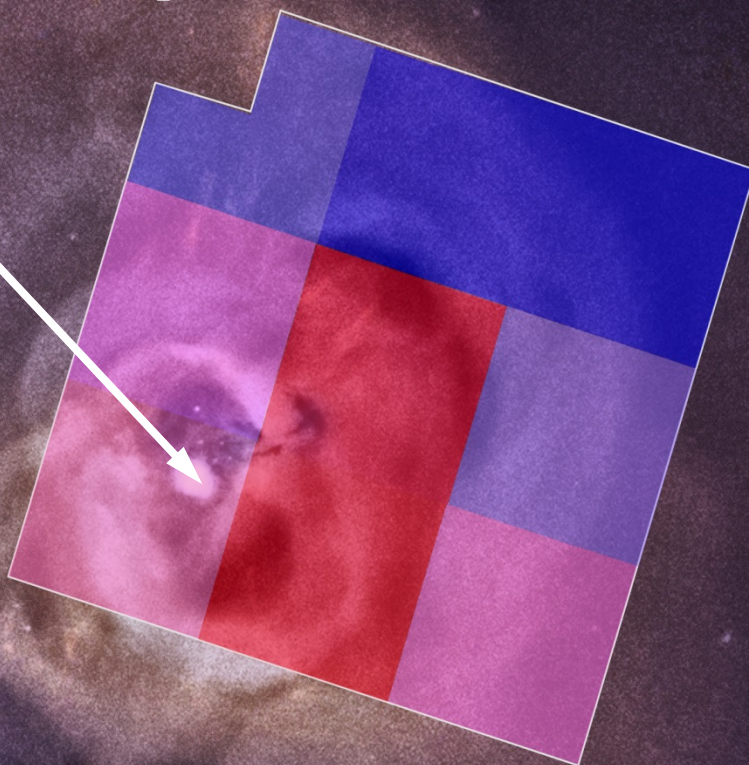
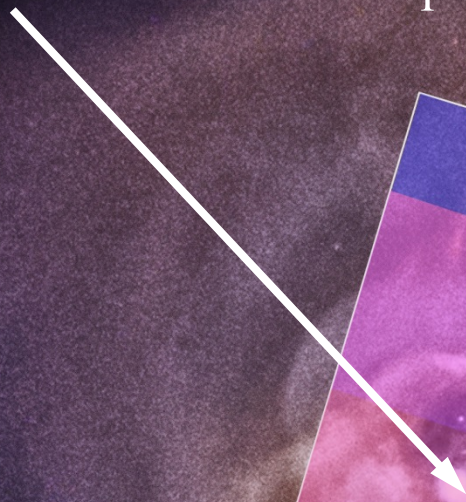




# Perseus Core Fe-XXV complex



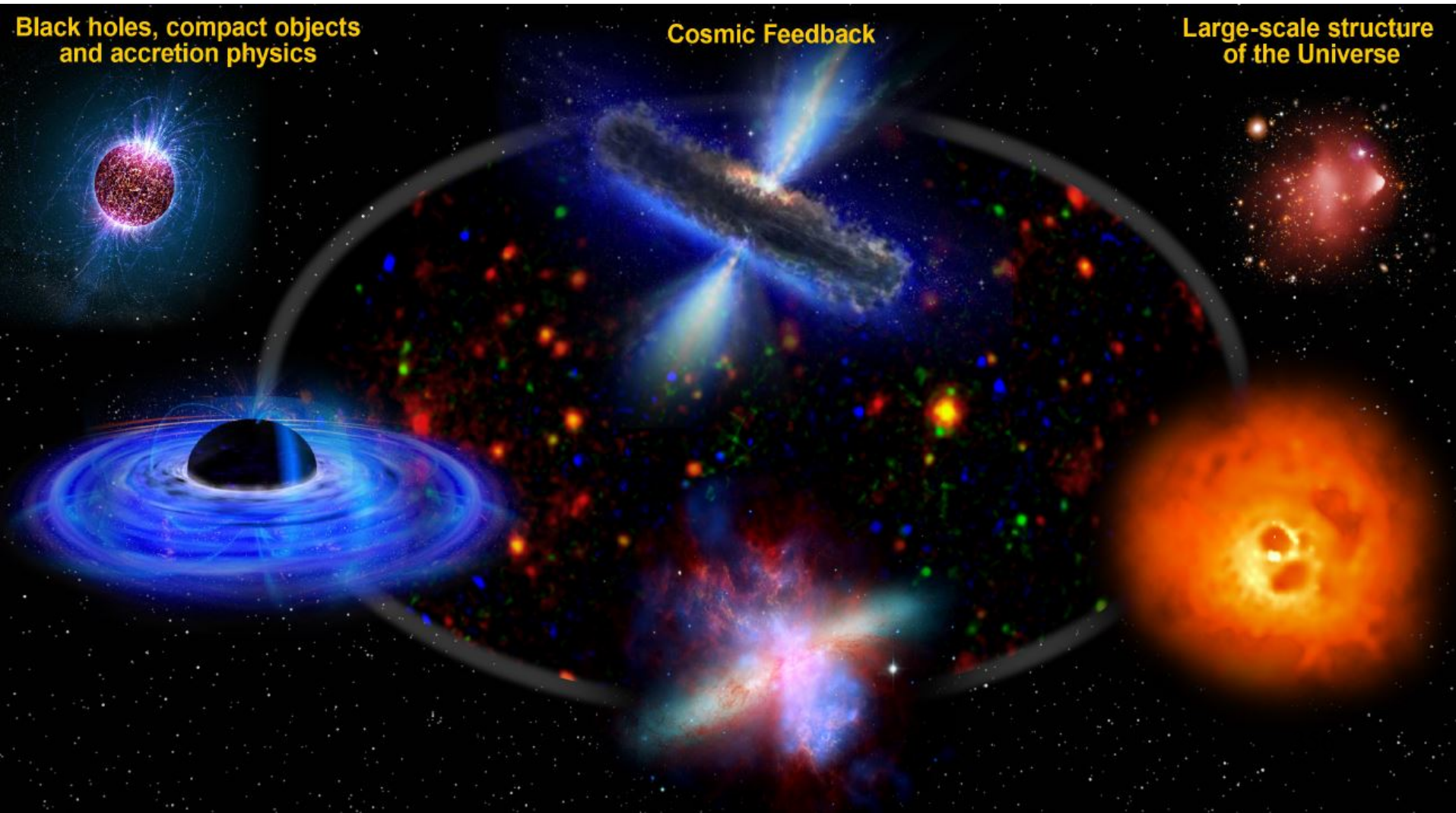
NGC 1275 : Active Galactic Nucleus with jet outflow, creating cavities filled with relativistic plasma: ‘cosmic feedback’



100,000 light-years



Cyclus van kosmische terugkoppeling ('cosmic feedback')  
die van invloed is op de **evolutie van de grote schaal structuur**



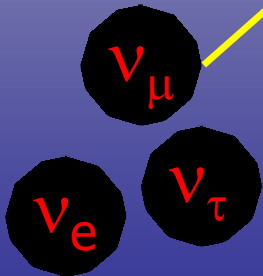
# Het globale beeld

gas 4.2%

sterren 0.5%



neutrino's 0.3%

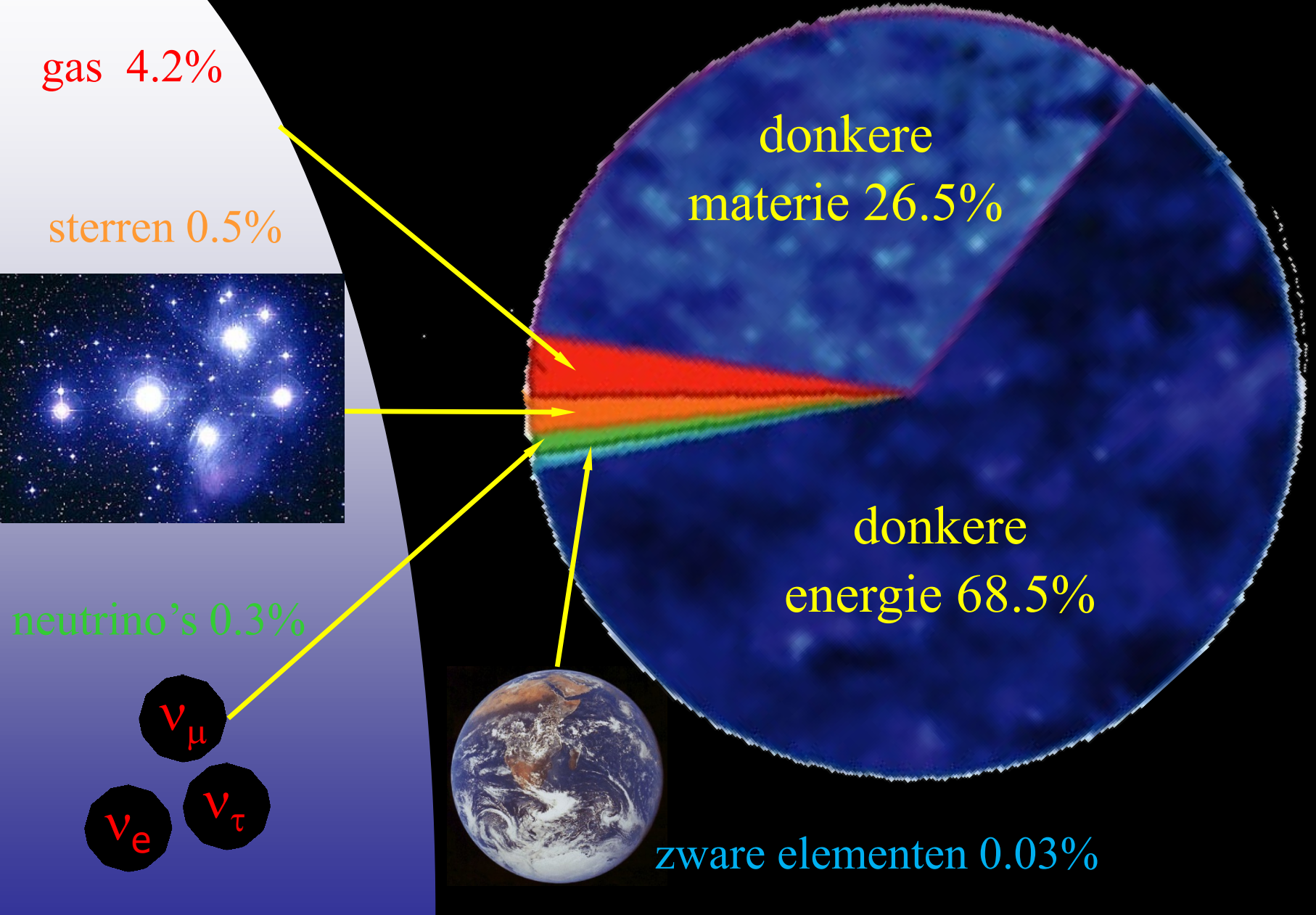


donkere  
materie 26.5%

donkere  
energie 68.5%



zwarte elementen 0.03%







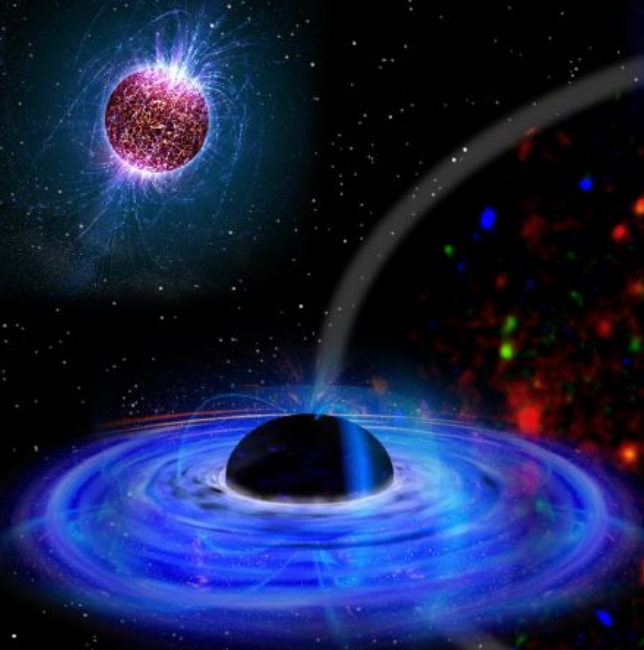
cosmic acceleration and feedback



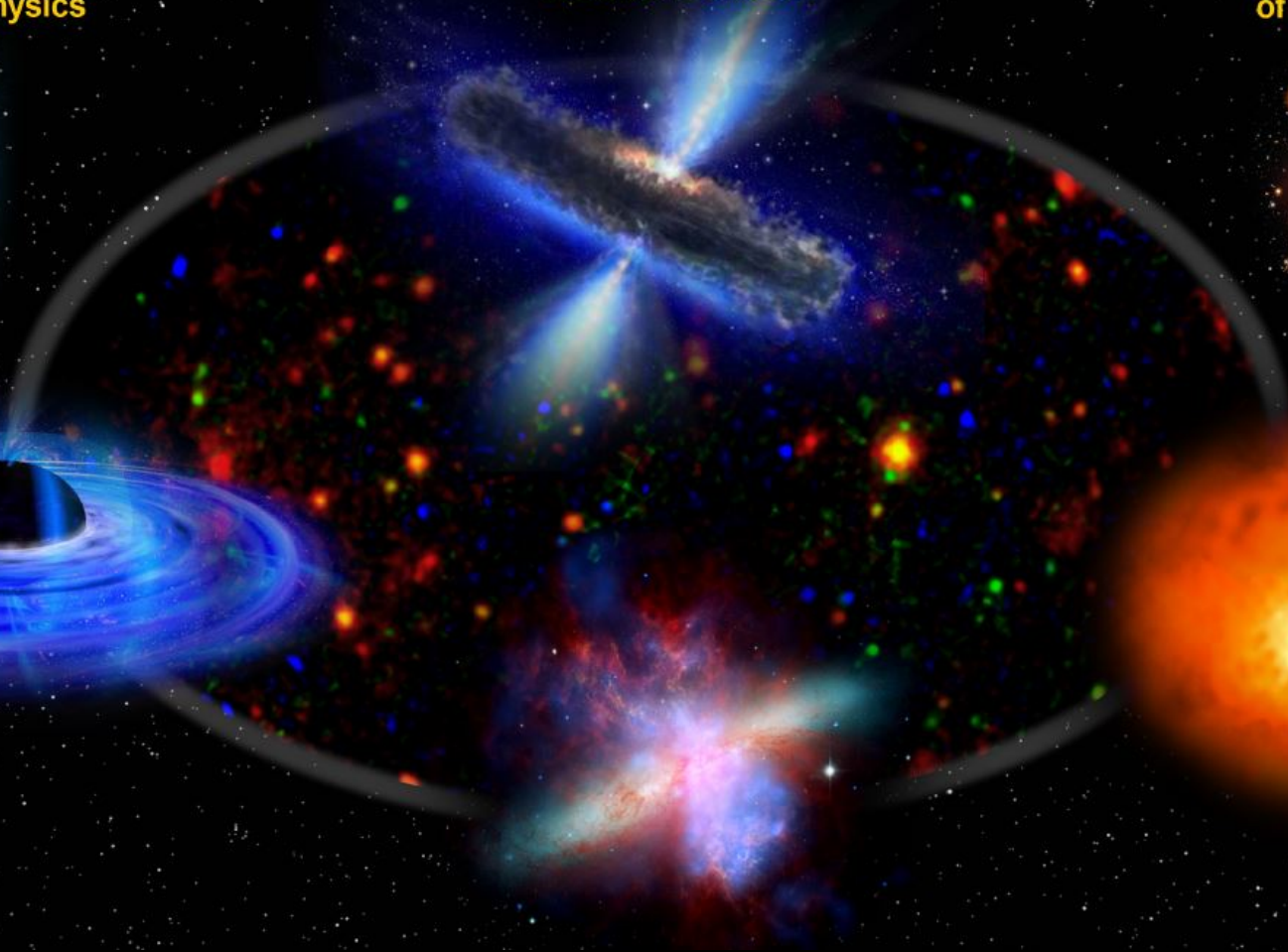
the role of compact objects in the Universe:  
binaries, pulsars, neutron stars and black holes



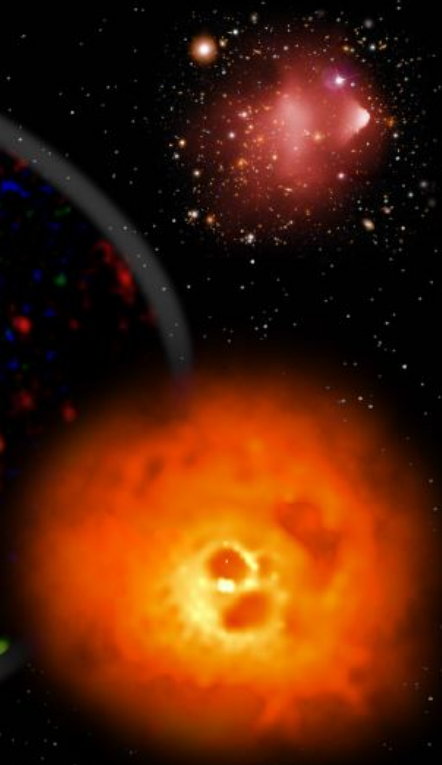
**Black holes, compact objects  
and accretion physics**



**Cosmic Feedback**



**Large-scale structure  
of the Universe**





# Kosmische versnellers: een selectie

- Versnelling in **supernova's** door schokgolven.
- Versnelling in **pulsars (neutronensterren)** aangedreven door dissipatie van rotatie-energie of door materie overdracht (accretie) in een compact dubbelstersysteem.
- Versnelling bij **stellaire zwarte gaten** aangedreven door accretie in een compact dubbelstersysteem.
- Versnelling bij **superzware zwarte gaten** aangedreven door accretie t.g.v. ‘star bursts’.

# Eindstadia van stervolutie:

Dood van sterren → geboorte van (ultra) compacte objecten

- **Geen kosmisch vuurwerk:**
  - de witte dwerg: dichtheid  $\approx 1 M_{\odot}$  binnen  $R_{\text{aarde}}$
- **Wel kosmisch vuurwerk** (= supernova):
  - de neutronenster: dichtheid  $\approx 1 M_{\odot}$  binnen straal 10 km
  - de quarkster ??: dichtheid  $\approx 1 M_{\odot}$  binnen straal 5 km
  - het stellaire zwarte gat: singulariteit  $\approx 1 M_{\odot}$  binnen straal 3 km (= Schwarzschildstraal)
- **Superzware zwarte gaten** (in kernen van sterrenstelsels)

# Eindstadia van stervevolutie



# Neutronensterren als pulsars

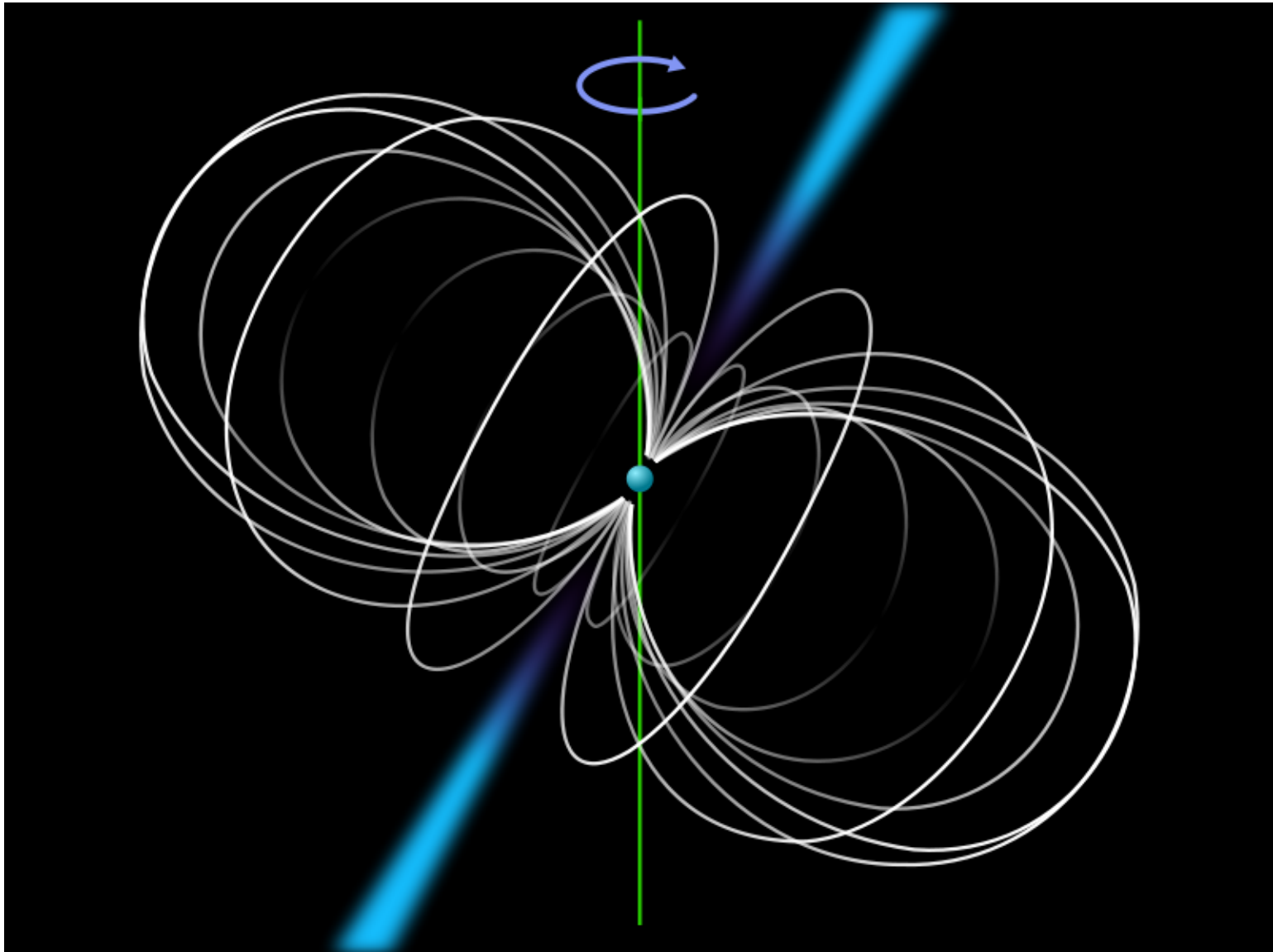


# Hete oppervlakken $10^6 - 10^7$ K : Röntgentelescopie

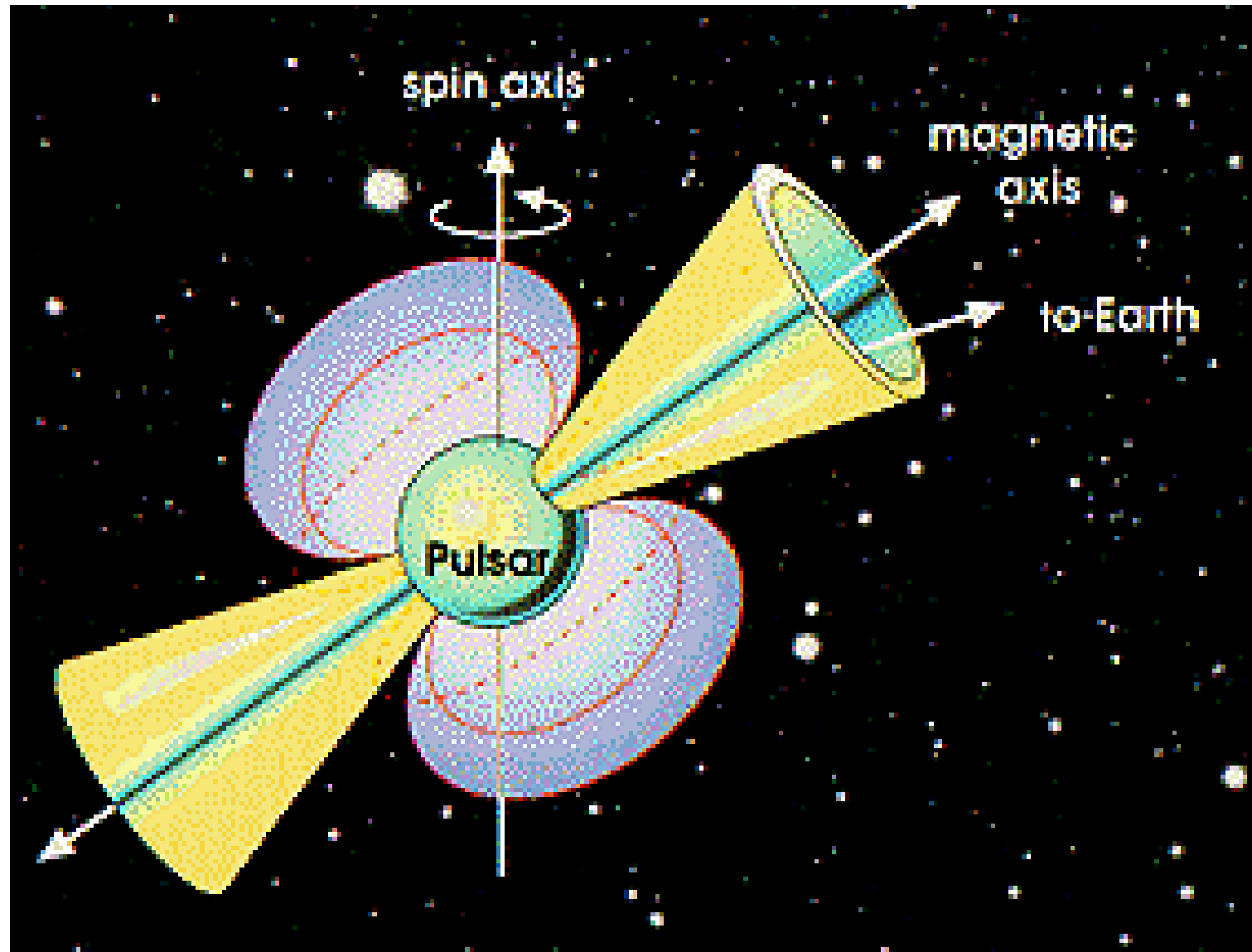


# Pulsar: roterende neutronen ster

Rotatie-as en magnetische dipoolas staan onder een hoek



# Gezichtshoek naar de aardse waarnemer



# Soorten pulsars naar energielevering

- **Afname rotatie-energie** van de neutronenster  
(Rotation powered pulsars)
- **Massastroom uit accretieschijf** in compacte dubbelster  
(Accretion powered pulsar)
- **Afname** van een ultrasterk ( $10^{15}$ ) **magneetveld**  
(Magnetar)



# Crab pulsar: wisps and rings moving

Krabnevel: stralende pulsarwind door versnelde ultra-relativistische deeltjes (electronen/positronen)



X-rays (Chandra SO)



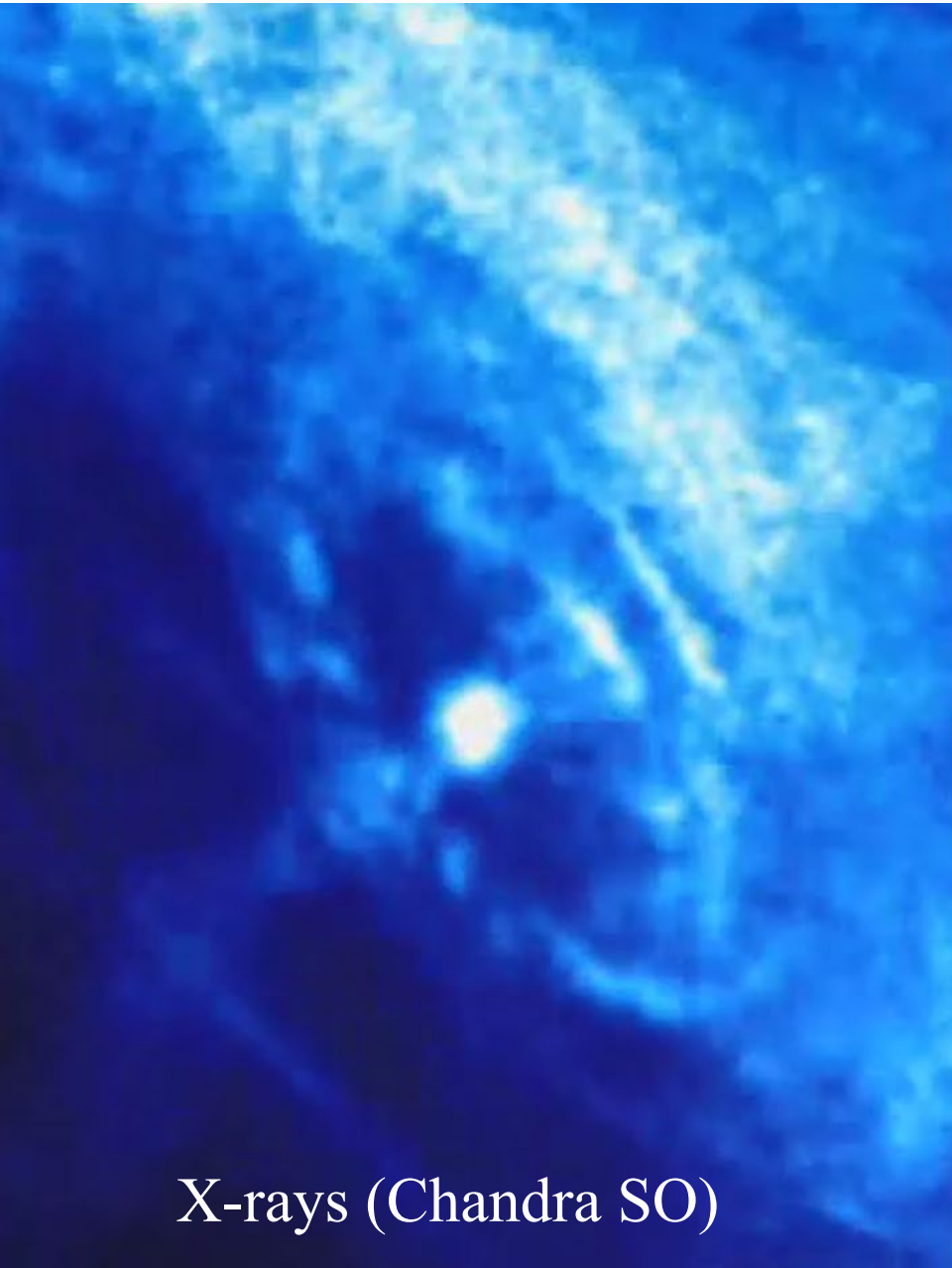
Optical light (Hubble ST)

# Krabpulsar: ringvormige emissie door geschokte 'pulsar wind'

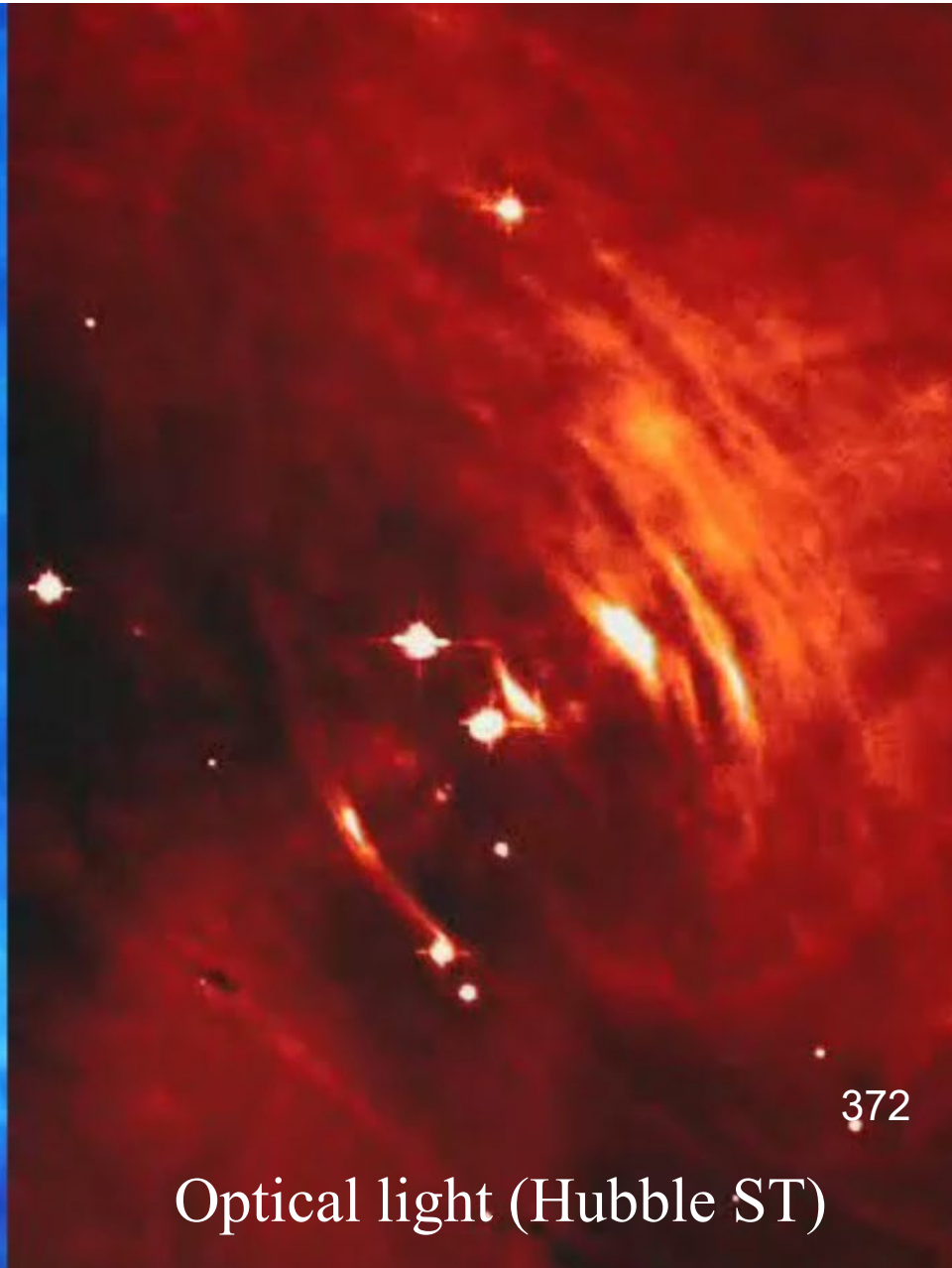
## Ontstaan 'pulsar wind':

- Het roterende magnetisch veld van de pulsar wekt een **electrisch veld** op aan het oppervlak van de neutronenster (Lorentz-kracht).
- Dit quadrupoolveld is veel sterker ( $\approx 2 \times 10^{14}$  Volt/m) dan de zwaartekracht van de neutronenster en **trekt lading (deeltjes) uit de sterkorst** die verder langs de open magnetische veldlijnen wordt versneld → er ontstaat een "pulsar wind".

# Crab pulsar: wisps and rings moving: zoomed in



X-rays (Chandra SO)



Optical light (Hubble ST)

# Continue deeltjesinjectie door pulsar

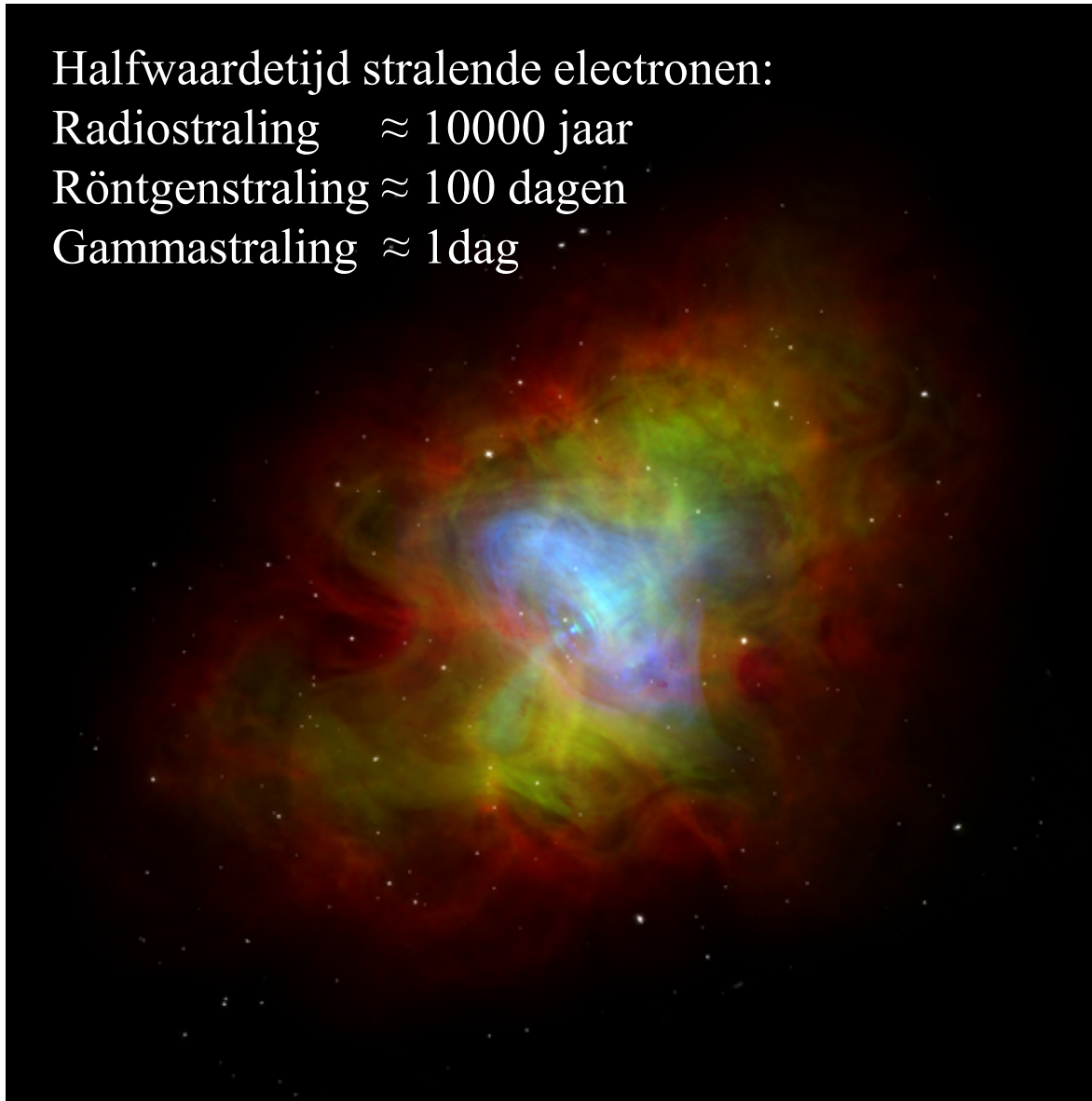
Afname rotatie-energie pulsar = stralings- en expansieverliezen

Halfwaardetijd stralende electronen:

Radiostraling  $\approx 10000$  jaar

Röntgenstraling  $\approx 100$  dagen

Gammastraling  $\approx 1$  dag





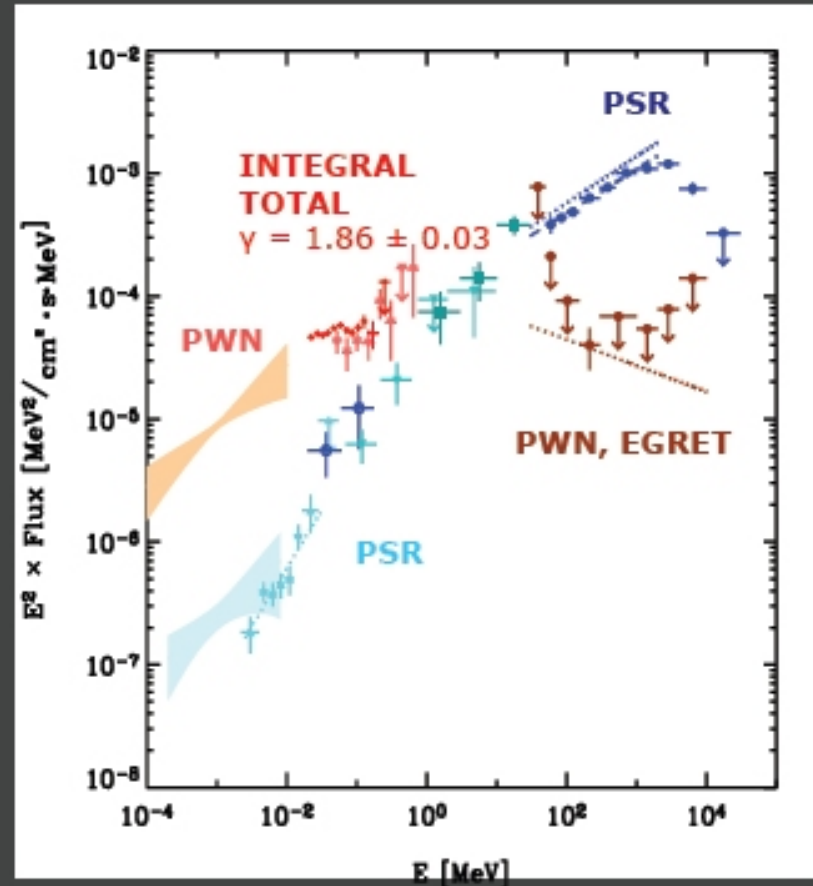
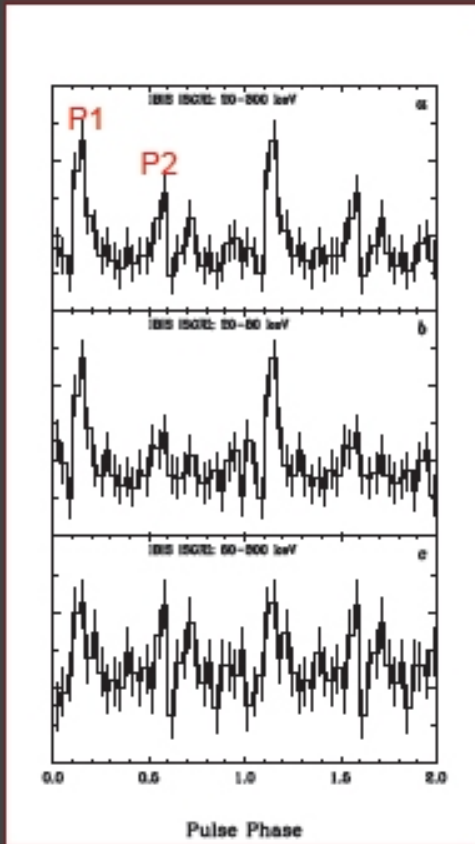
# Vela pulsar in gamma rays

**Vela Pulsar** (periode 89 milliseconde)

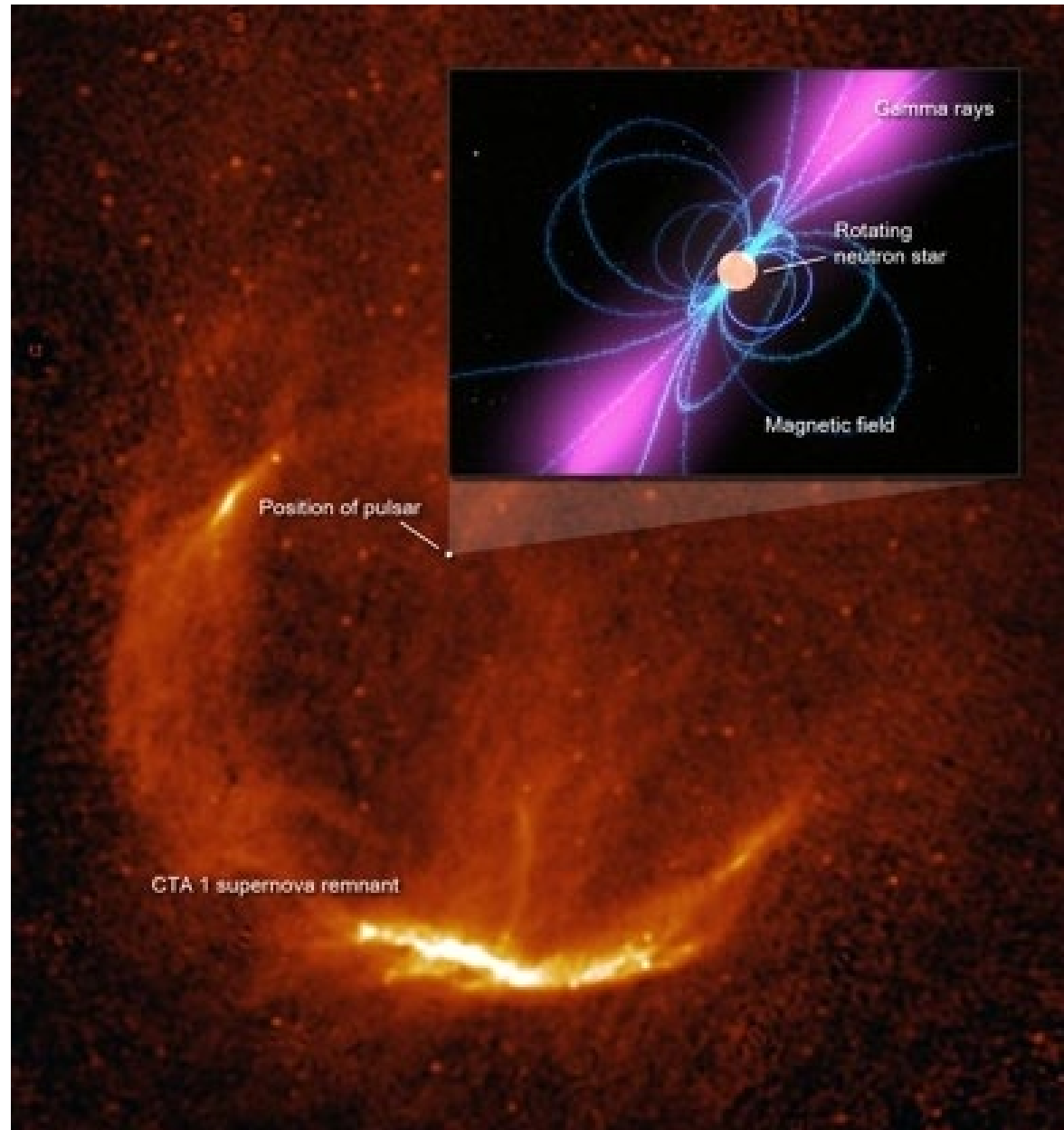
INTEGRAL 2.1 Msec  
IBIS / ISGRI

6.2  $\sigma$

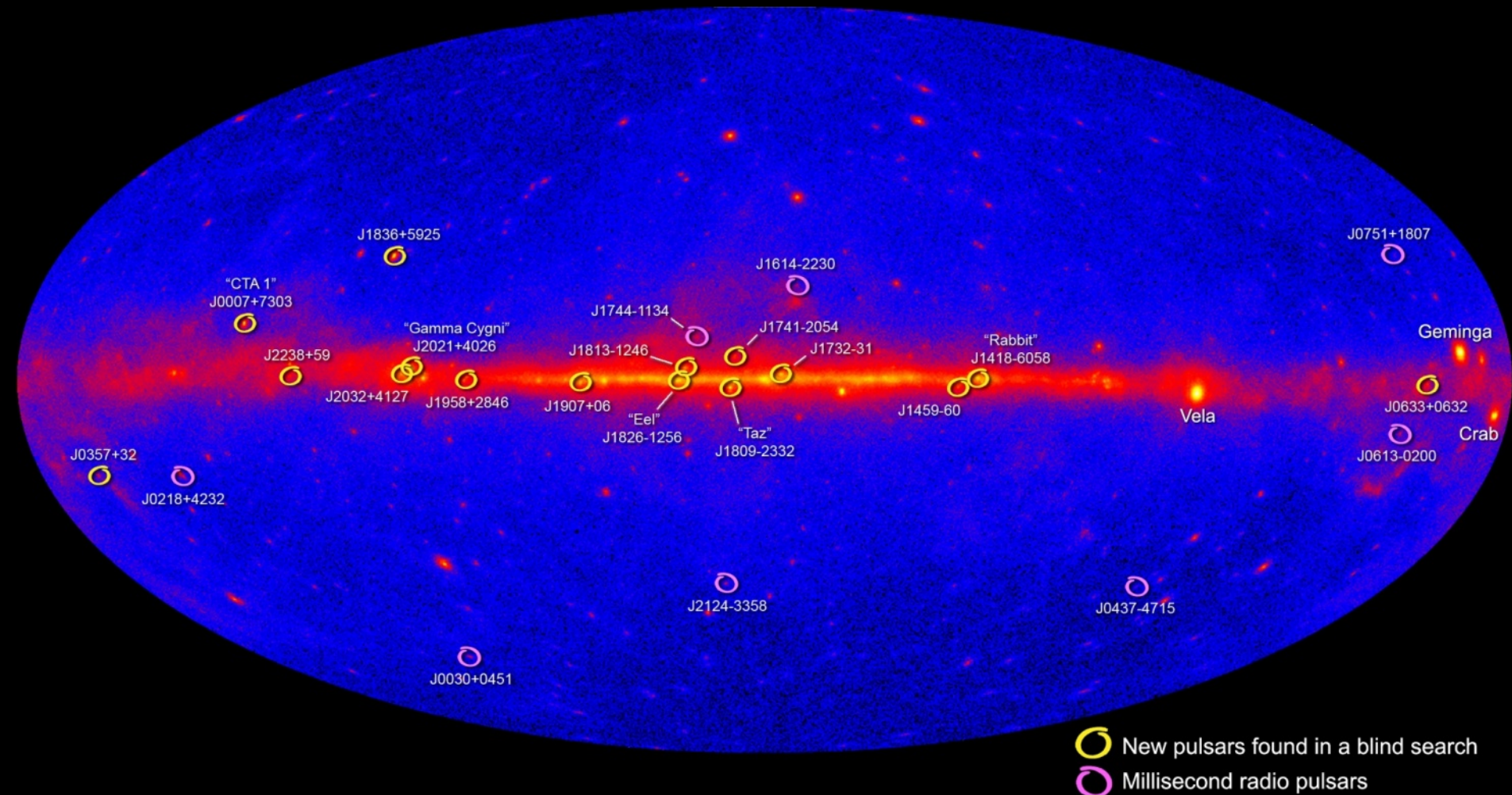
( $Z_N^2$ )



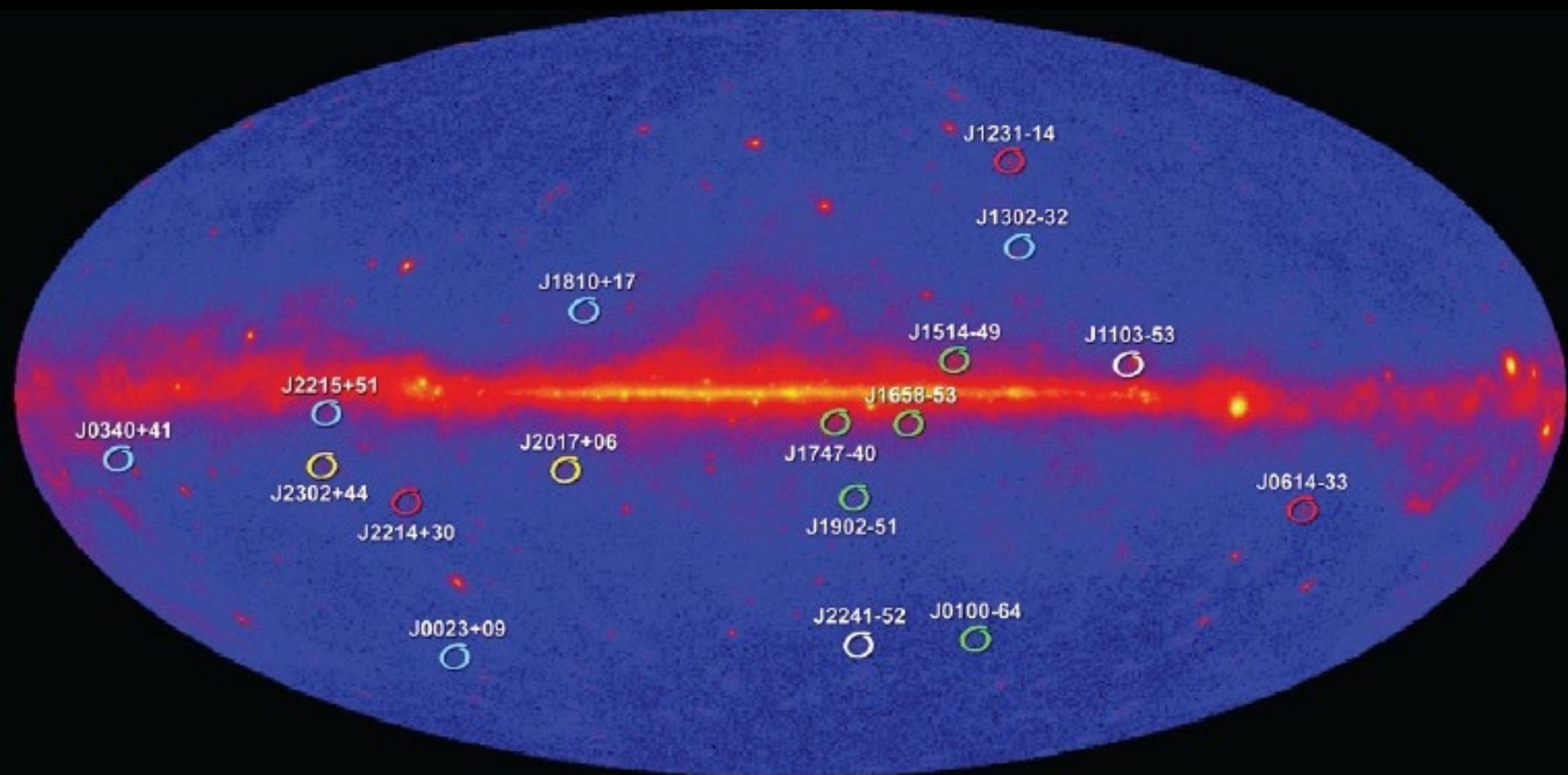
# Hard $\gamma$ -ray pulsar, no pulsations at other wavelengths



# Fermi: new gamma ray pulsars



# msec-radiopulsars coincident with non-identified $\gamma$ -ray sources







# stellaire en superzware zwarte gaten



## zwarte gaten: wat is hun betekenis?

- Een ultieme test van de **Algemene Relativiteits Theorie in de sterke veld limiet**, niet na te bootsen op aarde!  
Is de ART de juiste zwaartekracht theorie met al zijn opmerkelijke eigenschappen, zoals frame dragging etc?
- Welke rol hebben zwarte gaten gespeeld bij de **structuur vorming van het heelal**?
- Hoe zetten zwarte gaten accretie-energie om in **bundels met extreem relativistische deeltjes**?



## zwarte gaten: enig historisch perspectief

- **1916:** Schwarzschild uit de Algemene Relativiteits Theorie (ART):  
**Schwarzschild straal** =  $R_s = 2GM/c^2 = 3 (M/M_\odot) \text{ km}$
- **1938/1939:** Oppenheimer + Volkoff + Snyder → voldoende concentratie van materie levert een volledige, catastrofale, ineenstorting op die door niets kan worden gestopt.  
Dit eindigt in een **materiesingulariteit**.
- **1960:** Wheeler → voert de naam zwart gat in voor dit ‘theoretische’ object: een **object moet een zwart gat** zijn als zijn massa is geconcentreerd binnen de **bij het object behorende Schwarzschildstraal** =  $R_s = 3 \times 10^8 (M / 10^8 M_\odot) \text{ km}$ . Voor een superzwaar zwart gat met  $M = 10^8 M_\odot$  is dit  $\approx 2 \text{ AU}$ .

# roodverschuiving van EM-straling in een zwaartekrachtsveld

- rustmassa foton  $m_0 = 0$
- relativistische massa foton  $m = E/c^2 = hv/c^2$
- van steroppervlak (straal  $R$ ) naar waarnemer



- arbeid  $W = m\Delta U$ ,  $\Delta U =$  doorlopen zwaartekrachtpotential
- roodverschuiving  $z$  volgt uit energieverlies  $E - W$ :

$$\Delta v/v = \Delta U/c^2, \Delta U = U(R) = GM/R \rightarrow$$

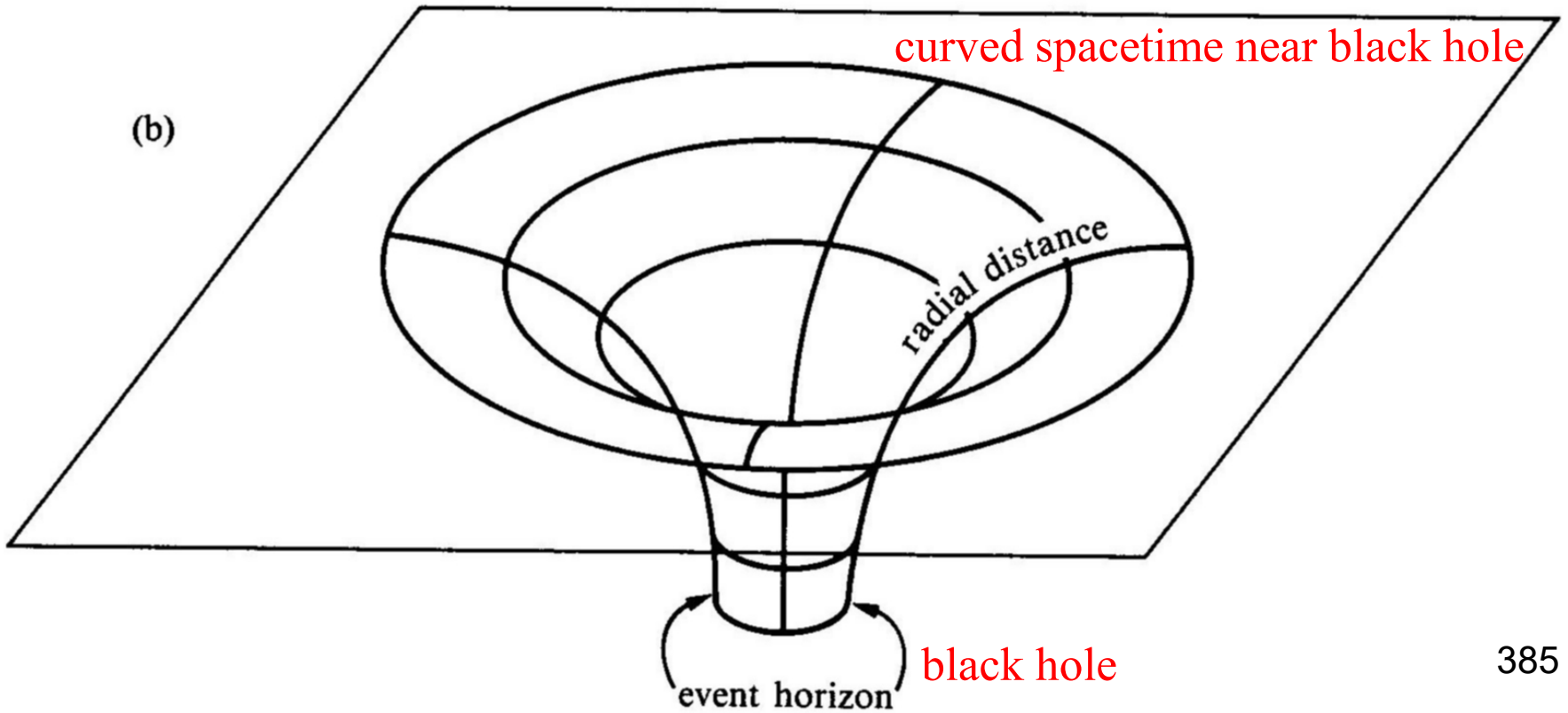
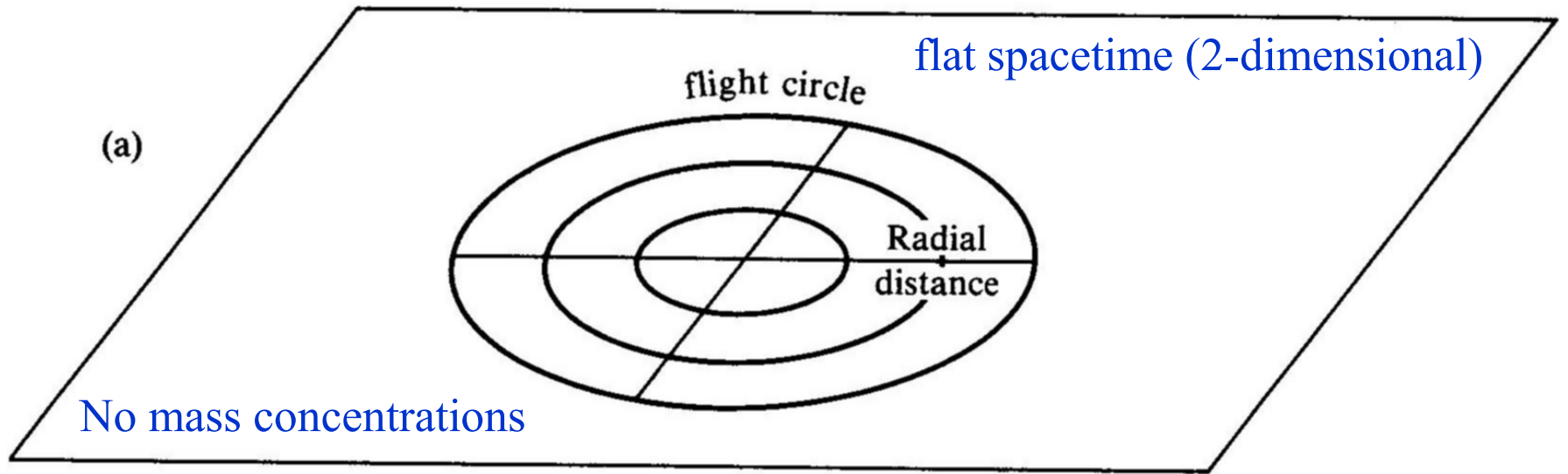
$$z \approx \Delta v/v = GM/Rc^2 = R_s / 2R, \text{ geldig bij } \Delta v/v \ll 1 \text{ (} R \gg R_s \text{)}$$

$$\text{ART: } 1 + z = (1 - R_s/R)^{-1/2}$$

# Schwarzschildstraal/fysieke straal: $R_s/R_f$

**Normale materie**  $M = (4/3)\pi R^3 \rho_m \rightarrow R \sim M^{1/3}$ , let op  $R_s \sim M$ .  
De kritische **dichtheid  $\rho_s$  voor catastrofale collaps  $\sim M^{-2}$** , bij  
superzware ( $\approx 10^9 M_\odot$ ) zwarte gaten is  $\rho_s \approx 10$  x dichtheid lucht.

• Atoomkern	$3 \times 10^{-39}$
• Atoom	$3 \times 10^{-43}$
• Mens	$10^{-25}$
• Aarde	$10^{-9}$
• Melkwegstelsel	$6 \times 10^{-7}$
• Zon	$4 \times 10^{-6}$
• Witte Dwerg Ster	$3 \times 10^{-4}$
• Neutronenster	0,3

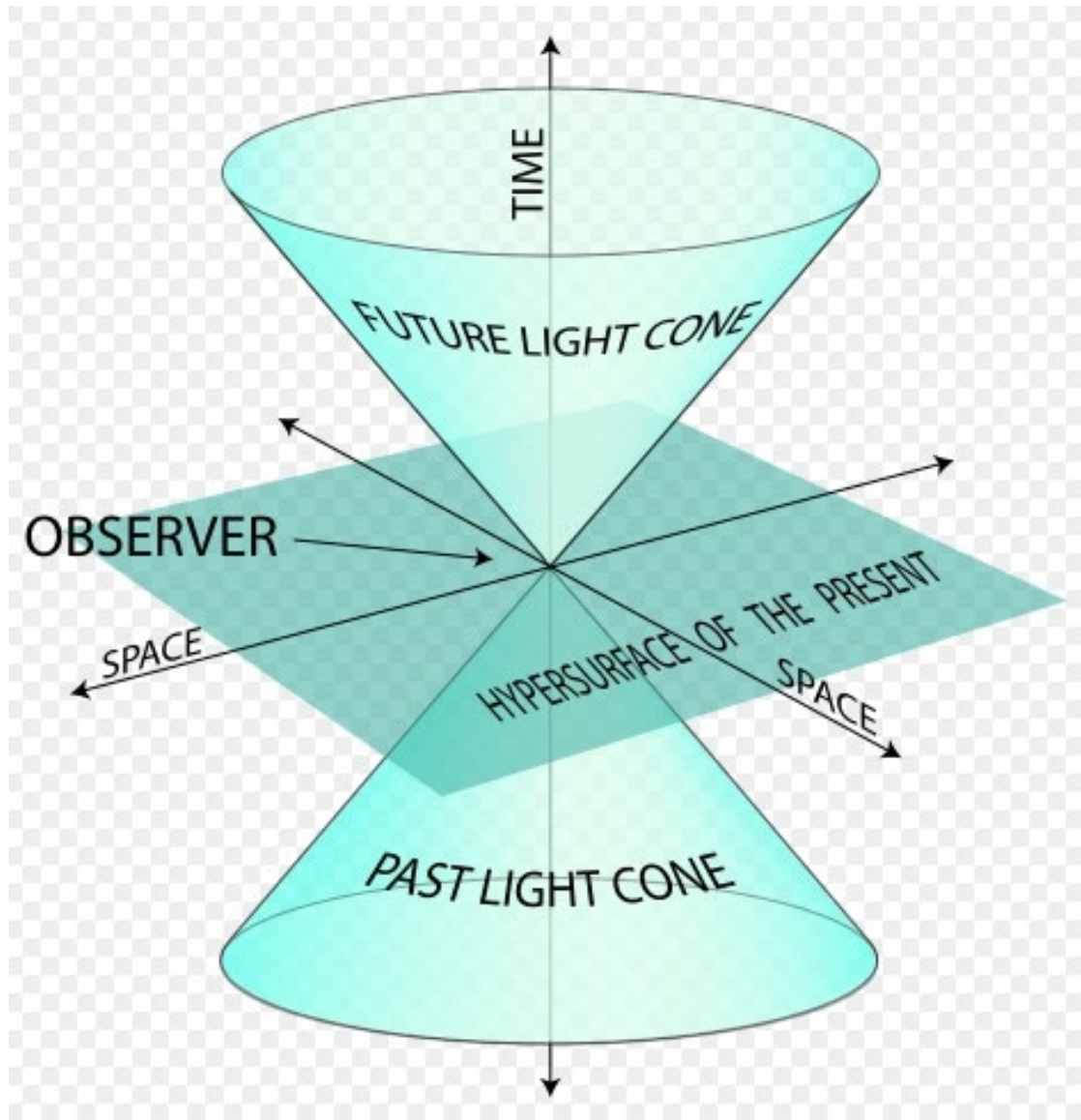




# karakterisatie van een zwart gat

- Zwarte gaten worden volledig gekarakteriseerd door hun **massa  $M$** , hun **draai-impulsmoment  $J$**  en hun **lading  $Q$**  ( $\approx 0$ , het lokaal aanwezige plasma verhindert de opbouw van een stationaire statische lading).
- Voor  **$Q = 0$  en  $J = 0$**  geldt de **Schwarzschildoplossing** van een stationair sferisch symmetrisch zwart gat met als **waarnemingshorizon** de Schwarzschildstraal  $R_s$ . De **massa  $M$**  bepaalt de schaal (afmeting) van de **kromming van de ruimtetijd**.
- Naast de Schwarzschildstraal is er nog een tweede belangrijke parameter  $R_{\text{isco}} = 6GM/c^2$ , dit is de straal van de **laatste circulaire stabiele baan** om het zwarte gat. **Buiten  $R_{\text{isco}}$**  kunnen testdeeltjes permanent in stabiele cirkelbanen om het zwarte gat bewegen. **Binnen  $R_{\text{isco}}$**  zijn de banen instabiel, testdeeltjes spiraliseren snel naar de waarnemingshorizon  $R_s$  en vallen in het zwarte gat.  
Baanperiode voor  $M = 10 M_\odot \approx 5$  millisecon, voor  $10^8 M_\odot \approx 12$  uur.

# Light cone in 3D-spacetime (2D hypersurface + time)





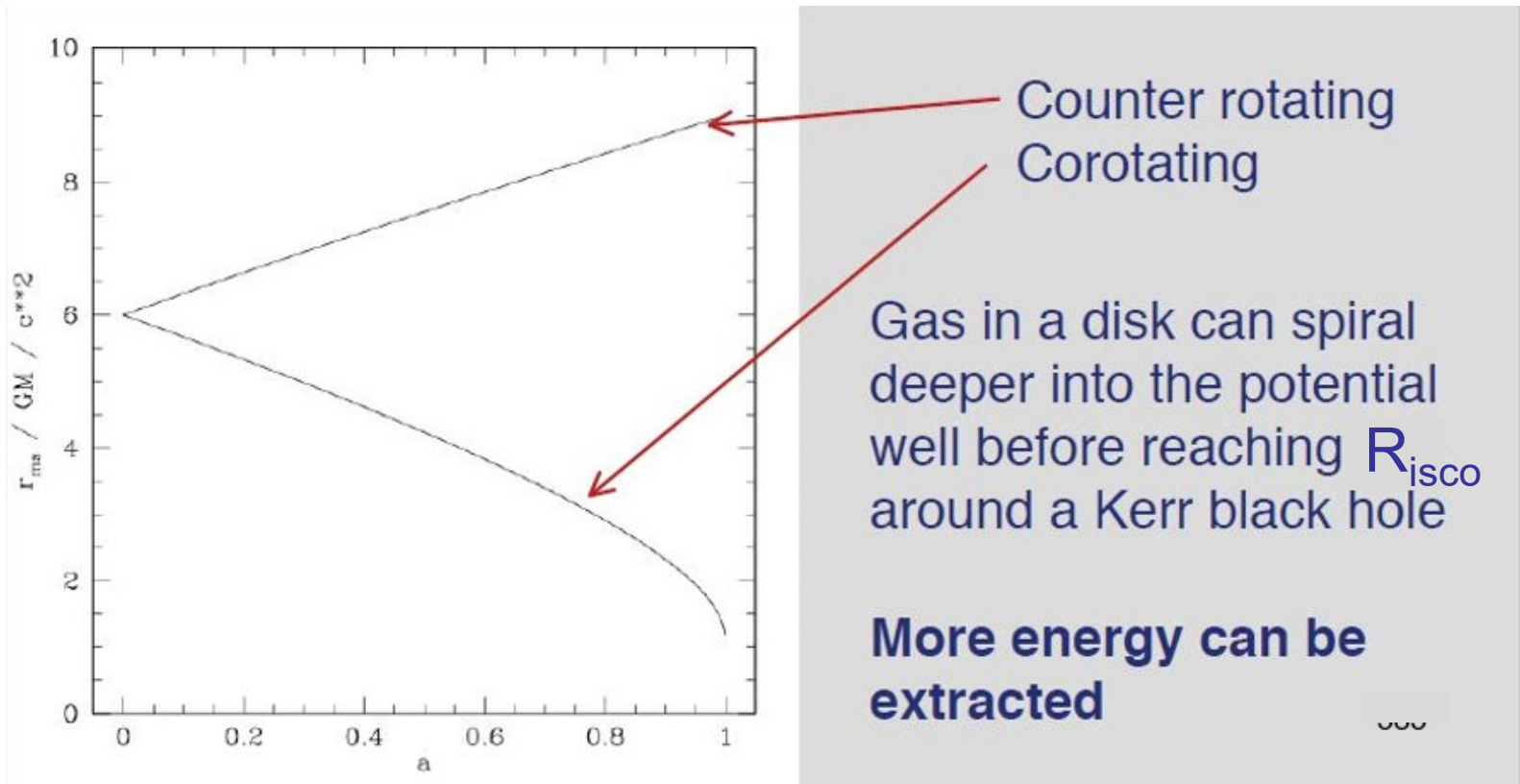
# Een Kerr zwart gat

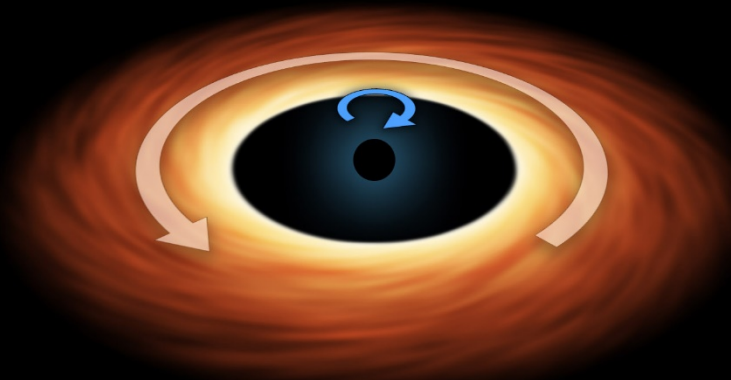
- Indien  $Q = 0$  met  $J$  en  $M$  willekeurige waarden, dan is er sprake van een **Kerr zwart gat**. Dit is ook een axiaalsymmetrische oplossing waarbij het zwarte gat een rotatie-as met een bepaalde voorkeursrichting bezit.
- Het draai-impulsmoment  $J$  wordt gekarakteriseerd door een **dimensieloze spinparameter**  $a = cJ/ GM^2$ , met  $0 < a < 1$  en met rotatie-energie  $E_{\text{rot}} < 0.29M$ . Het maximale draai-impulsmoment van een Kerr zwart gat komt overeen met een spinparameterwaarde  $a = 1$ . Dit is de bovengrens voor de spin-up van een Kerr zwart gat. De **rotatie bepaalt de geometrie van de ruimtetijd** en veroorzaakt het meedraaien van objecten vlak buiten de waarnemingshorizon (**'frame dragging'**, Lense Thirring effect).



# de waarnemingshorizon van een Kerr zwart gat

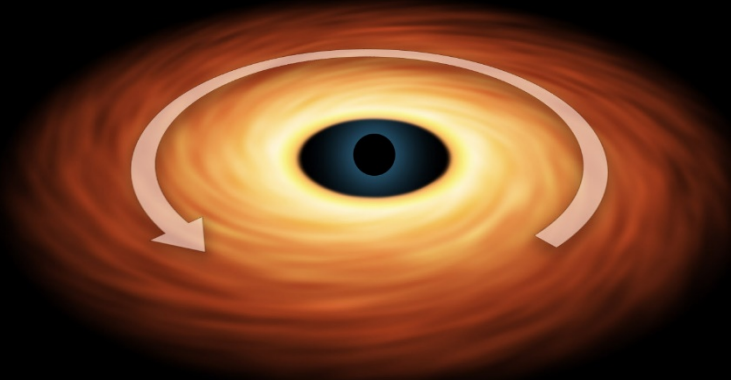
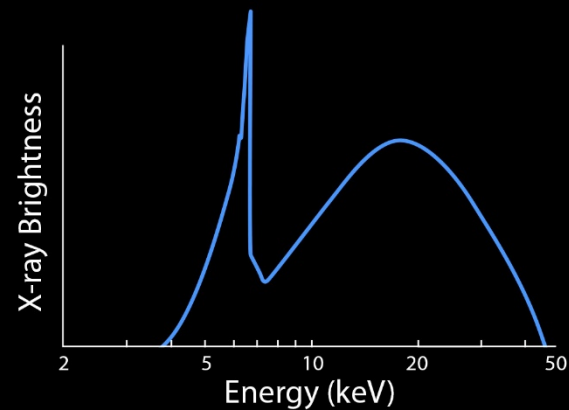
- Kerr zwarte gaten bezitten ook een waarnemingshorizon en een binnenste (laatste) stabiele cirkelbaan. Voor testdeeltjes die zich in het equatoriale vlak van het roterende zwarte gat bevinden is  $R_{\text{isco}}$  kleiner dan de Schwarzschildstraal voor het geval dat het testdeeltje coroteert in zijn baan met het zwarte gat en groter dan de Schwarzschildstraal bij retrograde rotatie.





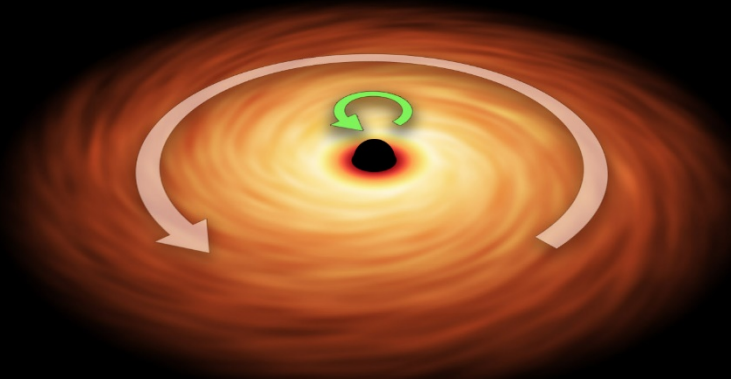
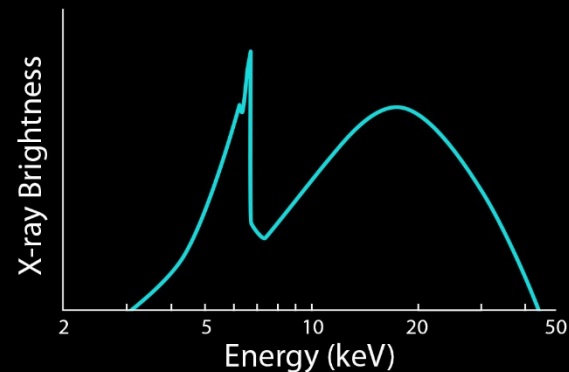
Retrograde  
Rotation

$$\text{ISCO} = 9GM/c^2$$



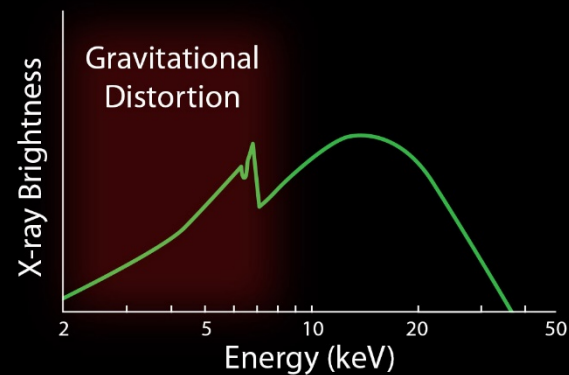
No Black Hole  
Rotation

$$\text{ISCO} = 6GM/c^2$$



Prograde  
Rotation

$$\text{ISCO} = GM/c^2$$



massa **M** en schaal, impulsmoment **J** en lading **Q**

Class	Mass	Size
Supermassive black hole	$\sim 10^5 - 10^9 M_{\text{Sun}}$	$\sim 0.001 - 10 \text{ AU}$
Intermediate-mass black hole	$\sim 10^3 M_{\text{Sun}}$	$\sim 10^3 \text{ km} = R_{\text{Earth}}$
Stellar black hole	$\sim 10 M_{\text{Sun}}$	$\sim 30 \text{ km}$
Micro black hole	up to $\sim M_{\text{Moon}}$	up to $\sim 0.1 \text{ mm}$
	Stationary ( $J = 0$ )	Rotating ( $J > 0$ )
Uncharged ( $Q = 0$ )	Schwarzschild	Kerr
Charged ( $Q \neq 0$ )	Reissner-Nordström	Kerr-Newman

# detectie van zwarte gaten door accretie

- Het bestaan van **zwarte gaten** volgt direct uit de **ART (1915)**
- Meer dan 50 jaar blijft dit louter theorie, maar in **1967** wordt de **eerste neutronenster** ontdekt (Bell & Hewish)
- Bestaan er dan ook zwarte gaten?  
In **1970** worden de eerste stellaire zwarte gaten **in nauwe (= compacte) dubbelsterren** gevonden
- Dit versterkt het vermoeden voor het bestaan van **superzware gaten** in de kernen van **actieve sterrenstelsels** zoals 'quasars'

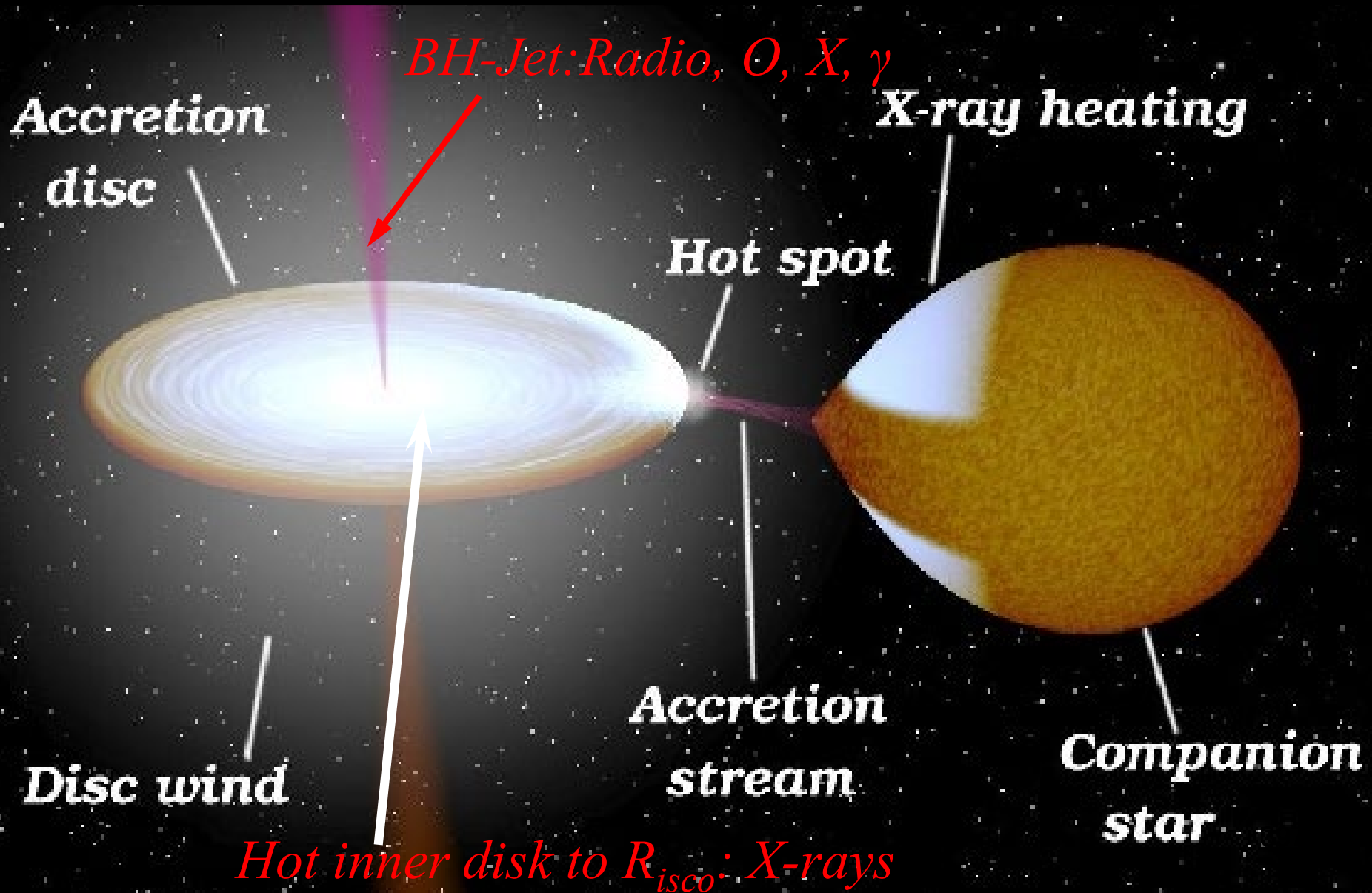




Stellaire zwarte gaten in compacte dubbelsterren  
massafuncties

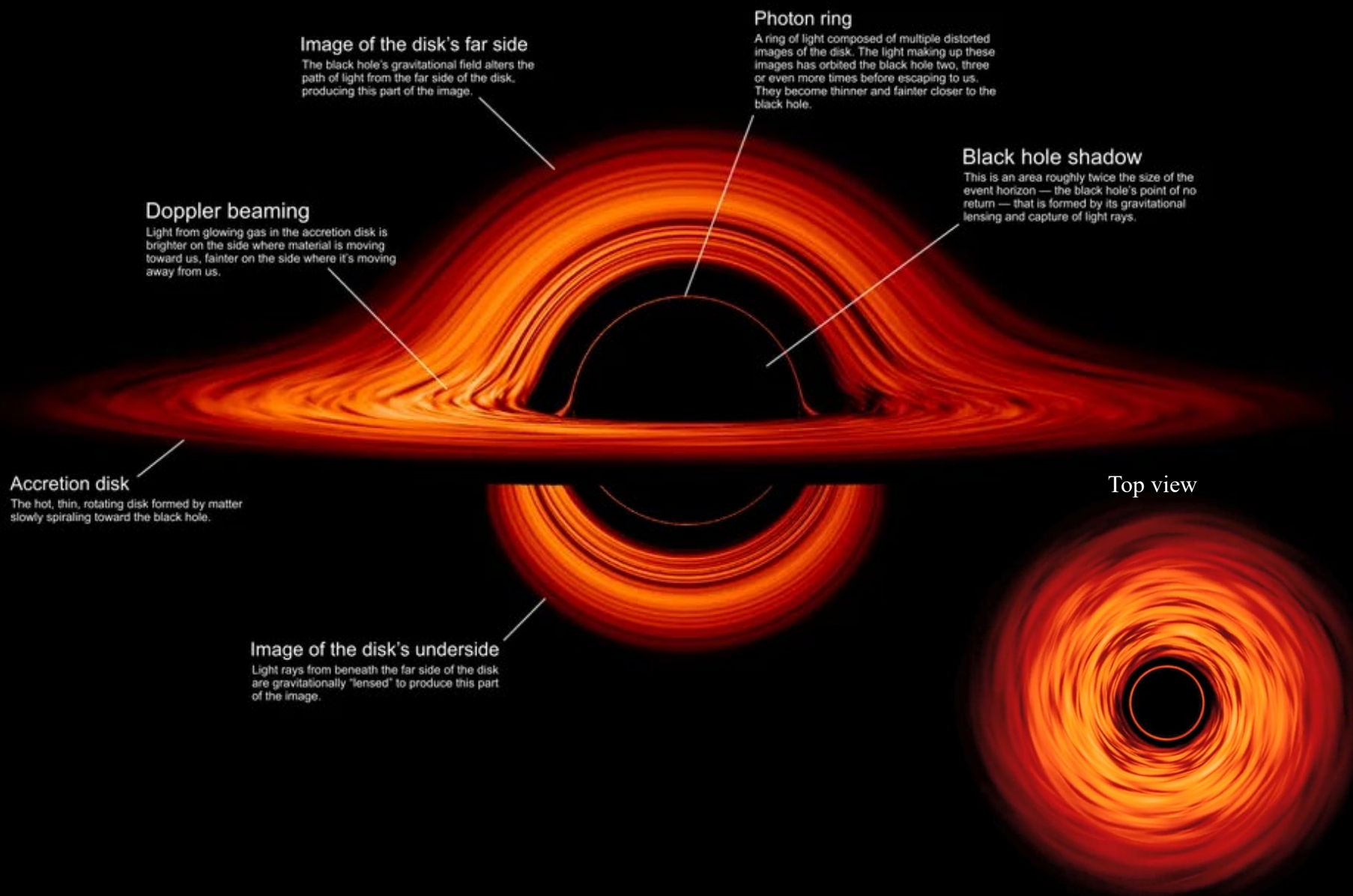


# Zwaartekracht verhitting: materie spiralisert naar een stellair zwart gat in een nauwe dubbelster

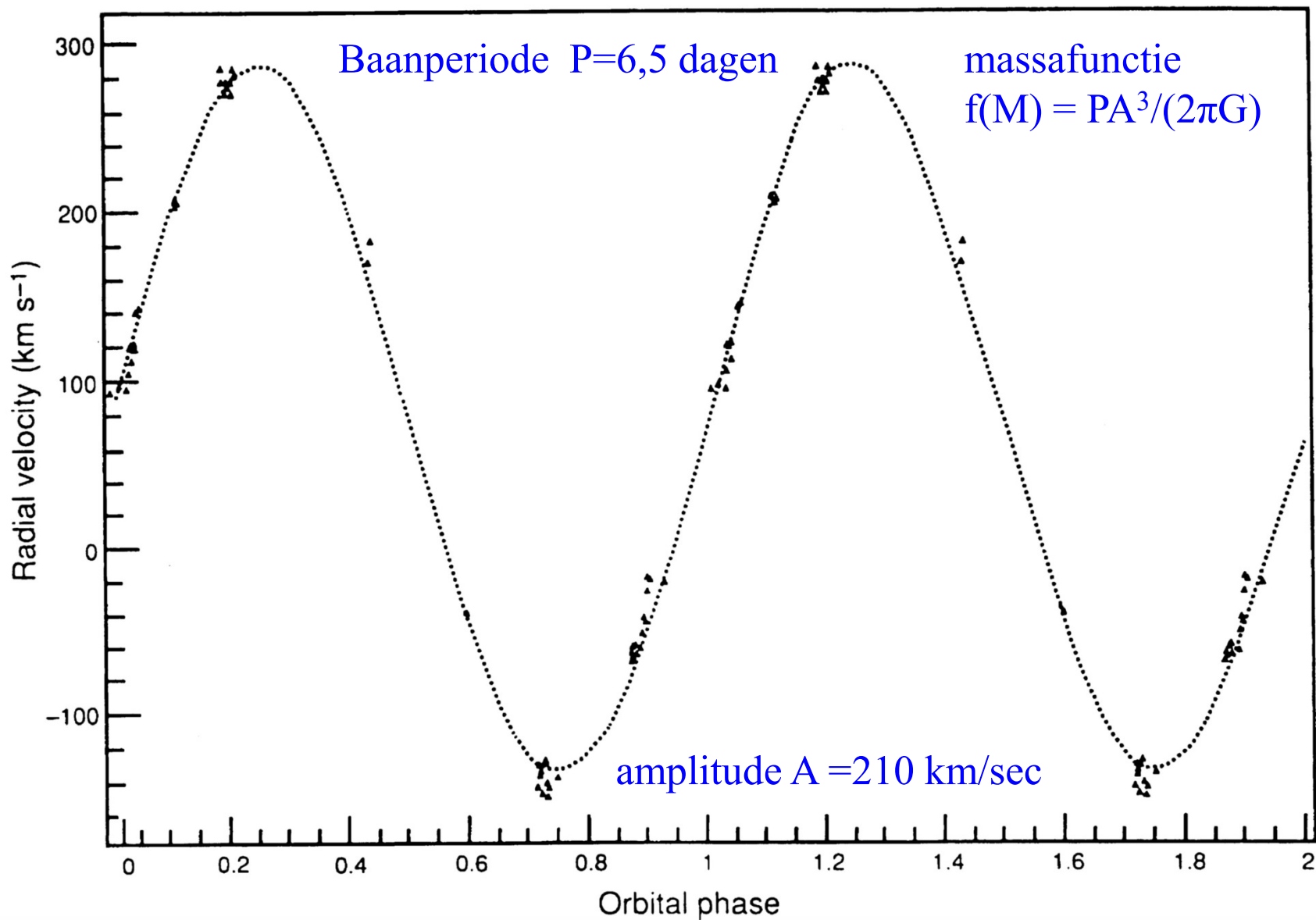




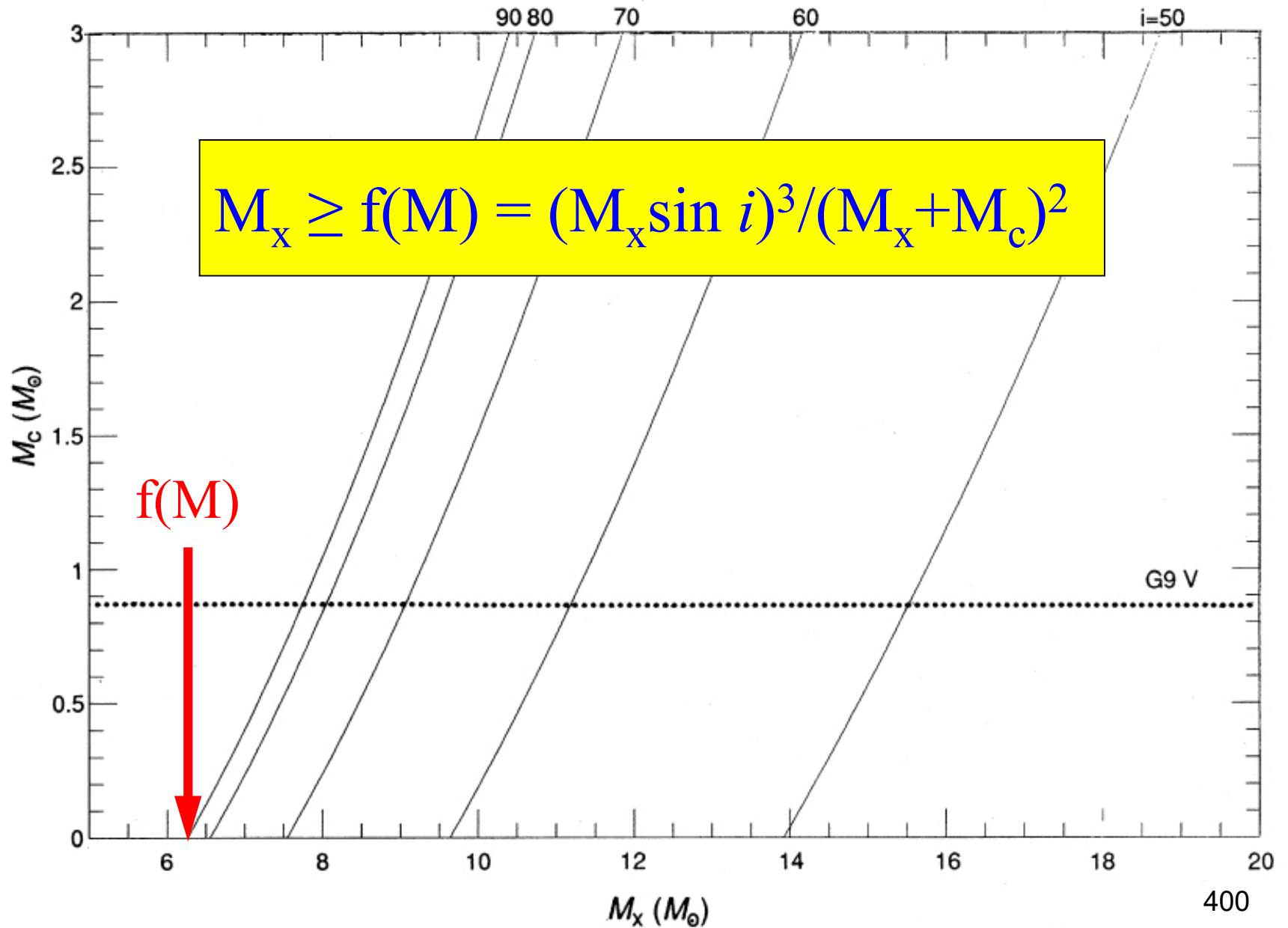
# GR effects shaping the image of an accretion disk around a BH



# Radiële snelheidskromme van de dubbelster V404 Cyg



minimale  $M_x$  compacte ster  $> 6 M_\odot$  voor  $M_c = 0$  en  $i = 90^\circ$

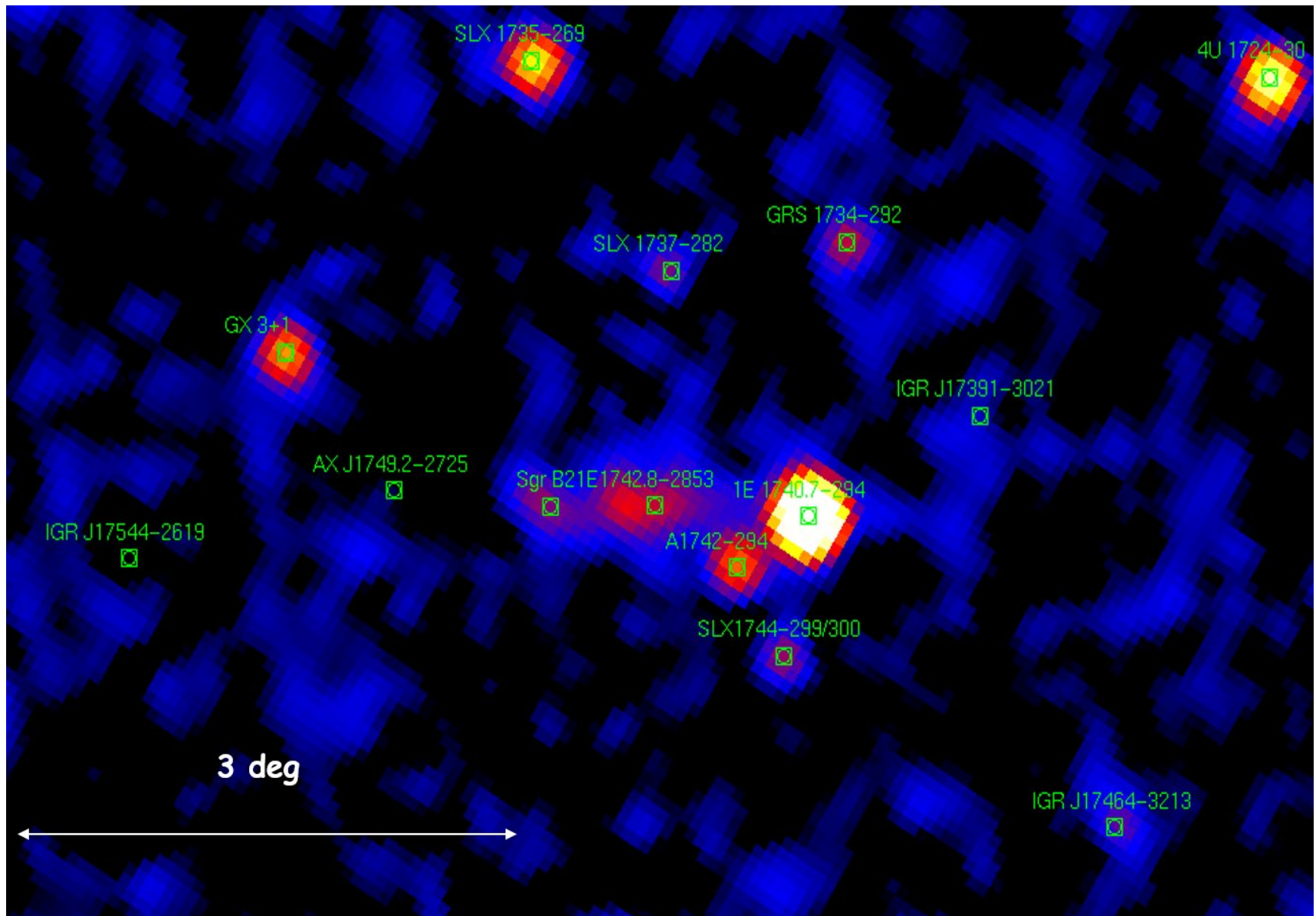


# BH-masses in binaries from the observed mass functions

Binary	Likely $M_x(M_\odot)$	$f(M)=M_{x,\min}(M_\odot)$
4U1543-47	$5 \pm 2.5$	$0.22 \pm 0.02$
GRO J0422+32	$10 \pm 5$	$1.21 \pm 0.06$
GRO J1655-40	$7 \pm 1$	$2.73 \pm 0.09$
SAX J1819.3-2525	$10.2 \pm 1.5$	$2.74 \pm 0.12$
A0620-00	$10 \pm 5$	$2.91 \pm 0.08$
GRS 1124-683	$7 \pm 3$	$3.01 \pm 0.15$
GRS 1009-45	$4.2 \pm 0.6$	$3.17 \pm 0.12$
H1705-250	$4.9 \pm 1.3$	$4.86 \pm 0.13$
GS 2000+250	$10 \pm 4$	$4.97 \pm 0.10$
XTE J1118+480	$7 \pm 1$	$6.0 \pm 0.3$
GS 2023+338	$12 \pm 2$	$6.08 \pm 0.06$
XTE J1550-564	$10.5 \pm 1$	$6.86 \pm 0.71$
XTE J1859+226	$10 \pm 3$	$7.4 \pm 1.1$
GRS 1915+105	$14 \pm 4$	$9.5 \pm 3.0$



# Galactic Centre region with 18 hard-X-ray binaries containing either a neutron star or a stellar mass black hole



# '2010 statistiek' van stellaire zwarte gaten in dubbelsterren

**BH Binary:** Mass  $> 3 M_{\odot}$  from binary analyses ; no NS properties

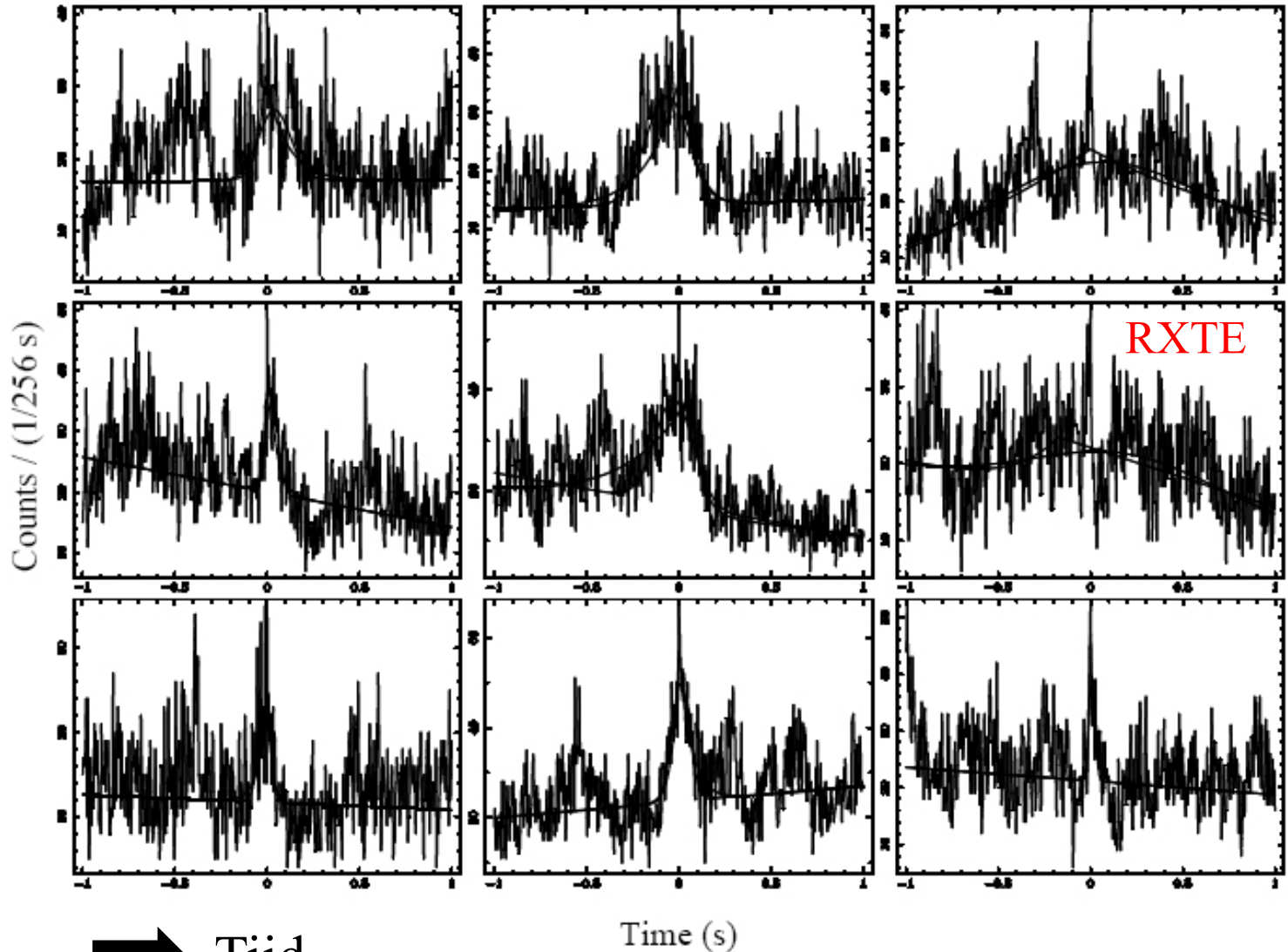
**BH Candidate:** BHB X-ray properties + no pulsations + no X-ray bursts

	<u>Dynamical BHBs</u>	<u>BH Candidates</u>
Milky Way	18	32
LMC	2	0
nearby galaxies	3 (e.g., M33-X7)	(? many ULXs)
-----		
<b>total</b>	<b>23</b>	<b>32 + ?</b>
<b>Transients</b>	<b>17</b>	<b>25 + ?</b>



Random fluctuaties in röntgenhelderheid tgv onregelmatige hete accretiestroom naar stellair zwart gat, **nooit pulsaties**

↑ Aantal fotonen per 4 millisecc interval



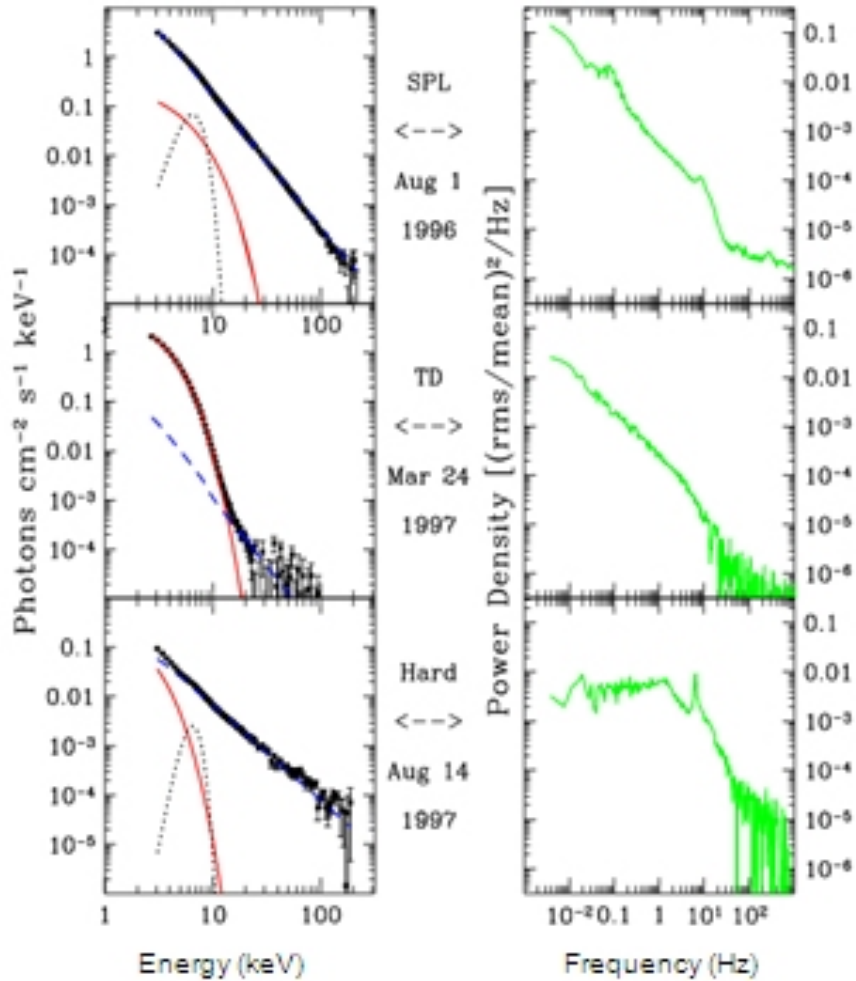
→ Tijd

# Stadia van actieve accretie bij een zwart gat

Energy spectra

Power density spectra

GRO J1655-40

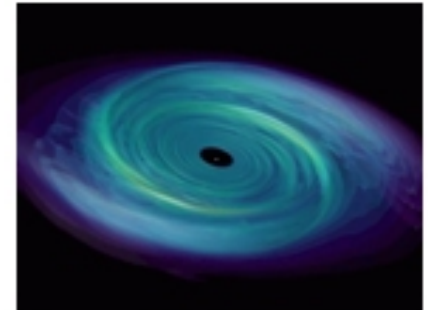


State

physical picture

→ steep power law

Disk + ??



→ thermal

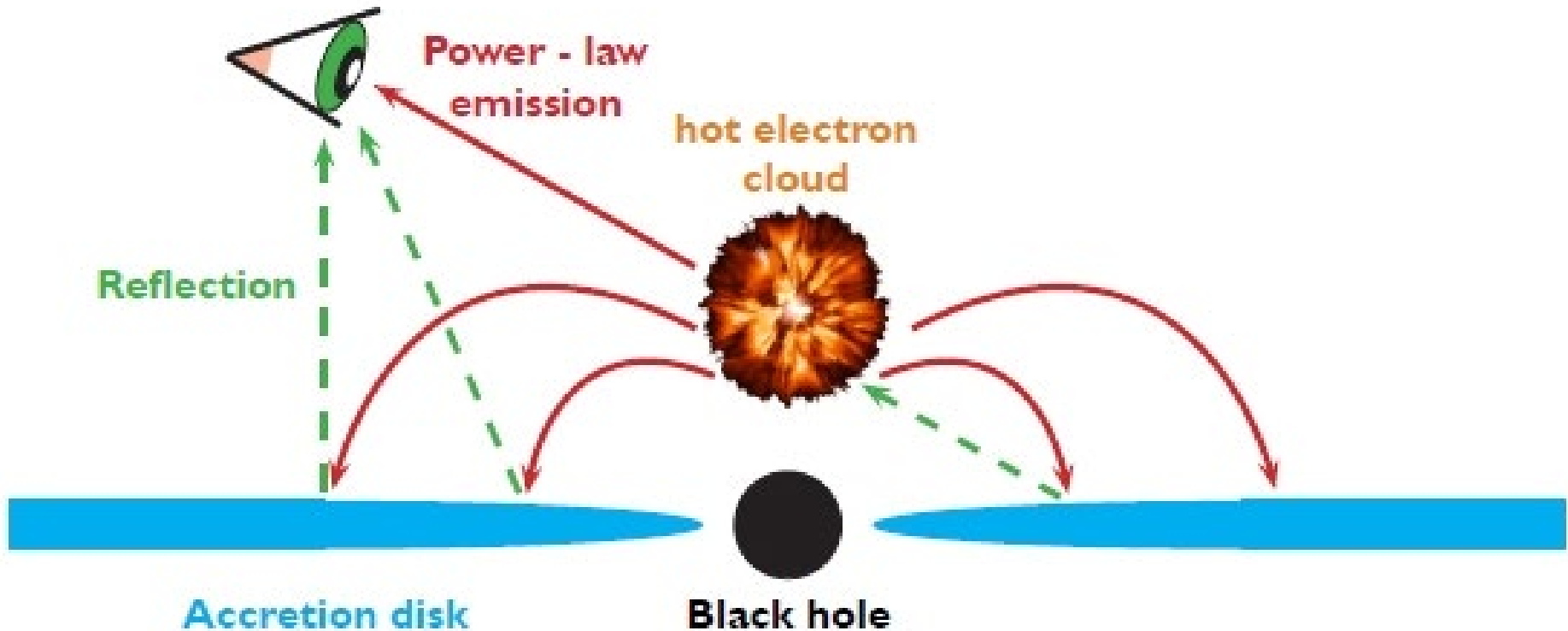
→ hard state

Jets van relativistische deeltjes

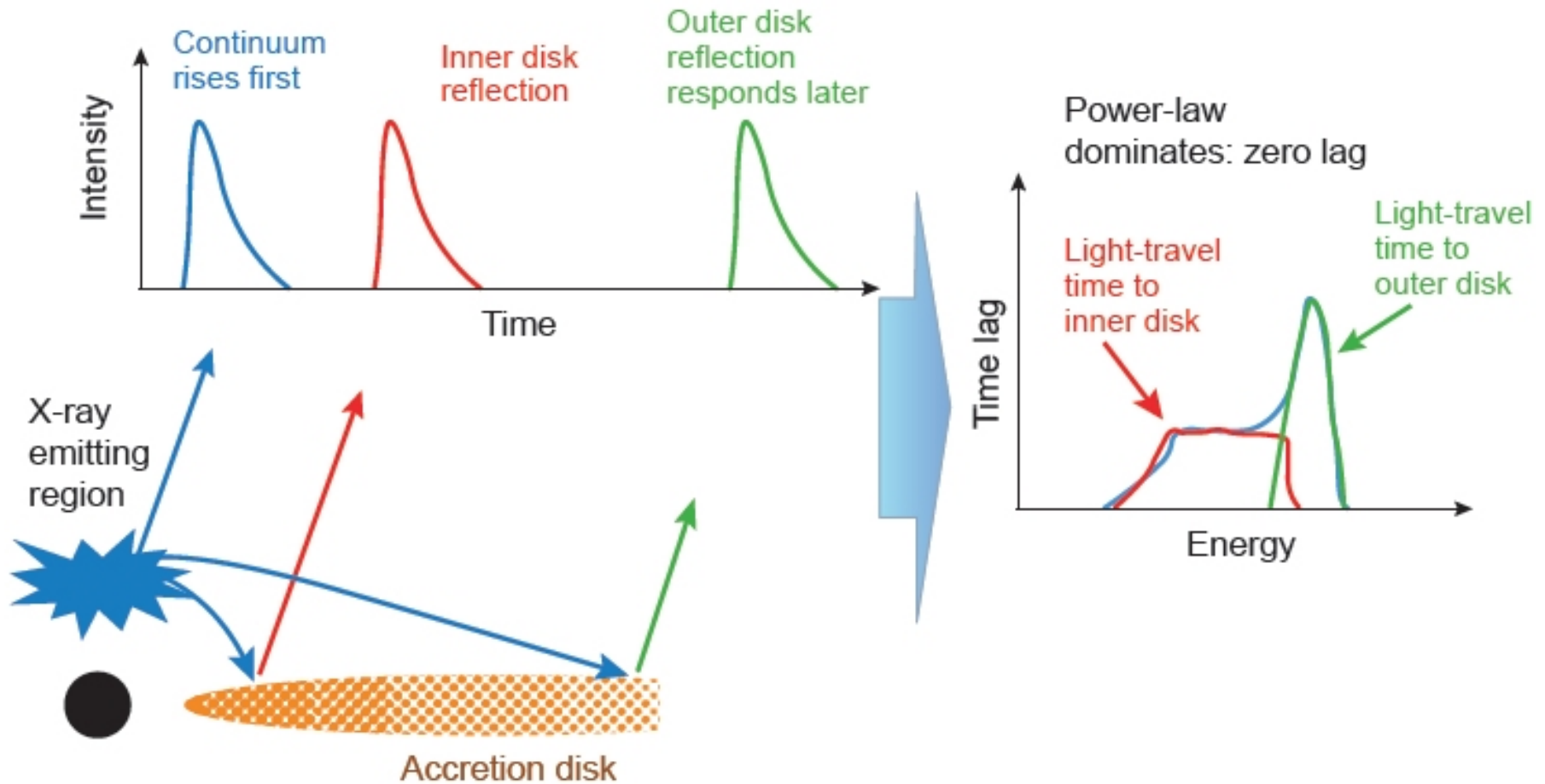




# Stralingscomponenten rondom een zwart gat

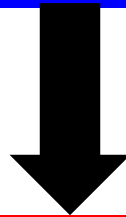


# tijdsvertraging in de accretieschijfecho emissie





Entropie en informatiedichtheid van zwarte gaten



Hawkingstraling



# Entropie van zwarte gaten (1)

- **Materie**, bv. een hoeveelheid heet gas, **bezit entropie**. Entropie is een maat voor het aantal verschillende mogelijkheden die voldoen aan een bepaald criterium. Voorbeeld: een boodschap bestaat uit **65 bits**, aantal verschillende mogelijkheden  $2^{65}$ , **entropie** =  $\ln 2^{65} \approx 45$ .
- Entropie is geassocieerd met **waarschijnlijkheidsverdelingen** en is ook een maat voor een verborgen microscopische substructuur van informatie.
- De entropiewaarde hangt af van de waarschijnlijkheidsverdeling over de mogelijke toestanden in de toestandruimte ('**space of states**') van het beschouwde systeem en van de kennis van de toestand van het systeem.  
In formule:  **$S = -\sum p_i \ln p_i$**  → - **verwachtingswaarde van  $\ln p$**
- Tweede hoofdwet van de thermodynamica stelt dat de **totale entropie van het heelal altijd toeneemt**.

## Entropie van zwarte gaten (2)

- Als er materie over de waarnemingshorizon in het zwarte gat verdwijnt, **dan zou de entropie van het heelal afnemen**: dit is **strijdig met de tweede hoofdwet**.
- Jacob Bekenstein postuleerde in 1972 dat zwarte gaten entropie moeten bezitten en dat des te groter het zwarte gat, des te groter de entropie.
- De aanduiding "black holes have no hair" (Wheeler) in de betekenis van een **kale en uniforme waarnemingshorizon** (entropie = 0) is dus **te simplistisch**: er moet sprake zijn van een verborgen microscopische substructuur die op vele manieren kan worden herschikt zonder het aanzicht in macroscopische zin te wijzigen.

# Hoe groot is de (informatie) entropie van een zwart gat

**Vraag (J. Bekenstein):** hoeveel verandert de grootte van een zwart gat indien één bit informatie wordt toegevoegd?

Heisenberg **onzekerheidsrelatie** bepaalt de **golflengte van een 'één-bit foton'** door de buigenslimiet te kiezen op de schaal van het zwarte gat.

Enkel de uitspraak of het foton wordt ingevangen (1 of 0) impliceert  $\lambda = 2R_s$ , fotonenergie  $\Delta E = hc/(2R_s) \rightarrow$  massa-equivalent  $\Delta m = h/(2R_s c)$

Toename Schwarzschildstraal door verhoging  $\Delta m \rightarrow \Delta R_s = hG/(R_s c^3)$

Dit levert een **oppervlaktoename** van de waarnemingshorizon met:

$$4\pi(R_s + \Delta R_s)^2 - 4\pi R_s^2 \approx 8\pi R_s \Delta R_s = 16\pi^2 \hbar G / c^3 = (4\pi \ell_p)^2 = \text{const} \cdot A_p$$

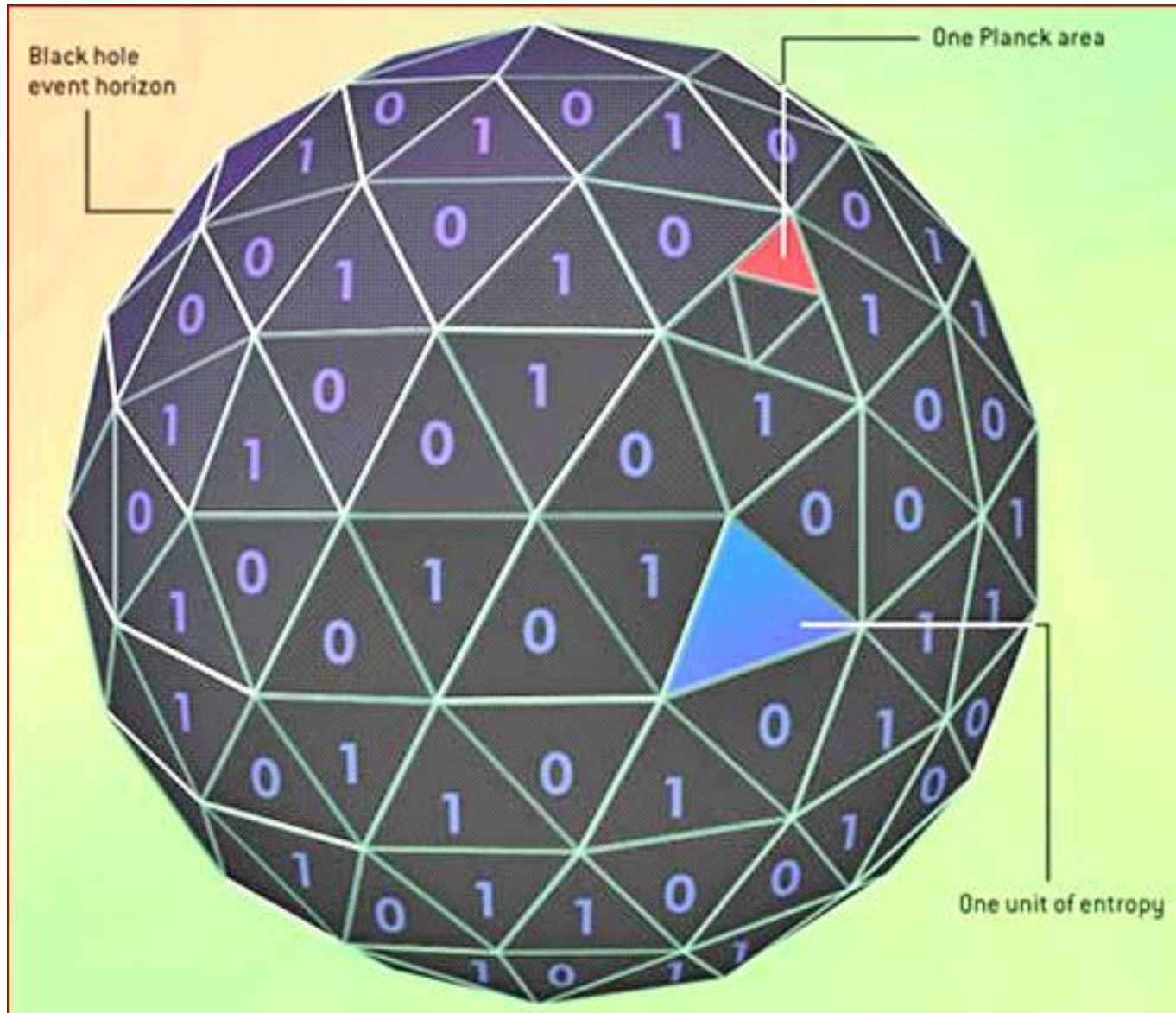
Hierin is  $\ell_p$  de Plancklengte  $= (\hbar G / c^3)^{1/2} \approx 10^{-35} \text{m}$ ,  $A_p =$  Planckoppervlak.

De **entropie van een zwart gat**, gemeten in bits, is evenredig met het **oppervlak van de waarnemingshorizon** uitgedrukt in Planck eenheden en dus niet, zoals intuïtief verwacht, met het volume binnen de horizon.

Conclusie: entropie schaalt met oppervlak van de horizon  $A_h$ .

**Exacte berekening van Hawking** entropie  $S = \frac{1}{4} (A_h / A_p)$ , met  $k=1$ .

# Informatiedichtheid op de horizon van een zwart gat





# Hawking straling van een zwart gat

Stephen Hawking toonde in 1974/75 aan dat een zwart gat niet alleen entropie bezit maar ook een temperatuur  $T$  heeft waardoor het zich als een zwarte straler gedraagt:

$$T = \hbar c^3 / (8\pi kGM), \rightarrow T \sim 1/M !$$

met  $k$  = Boltzmann constante,  $G$  = gravitatie constante,  $\hbar$  = Dirac constante =  $h/2\pi$

Het **energieverlies** door Hawking straling leidt uiteindelijk tot **verdamping van het gat** met een verdampingstijd  $t_{\text{evap}}$ :

$$t_{\text{evap}} = 5120\pi G^2 M^3 / (\hbar c^4), \rightarrow t_{\text{evap}} \sim M^3$$

Enkele getallen:

zwart gat van **5 zonsmassa's**:  $T \approx 10^{-8}$  K, verdampingstijd:  $\approx 3 \times 10^{69}$  jaar

zwart gat in de kern van een actief melkwegstelsel van  $5 \times 10^9$  zonsmassa's:  $T \approx 10^{-17}$  K

zwart gat met de massa van de maan (straal 0.1 mm):  $T \approx 1$  K

zwart gat met een massa van  $10^{11}$  kg:  $T \approx 10^{12}$  K, verdampingstijd:  $\approx 3 \times 10^9$  jaar

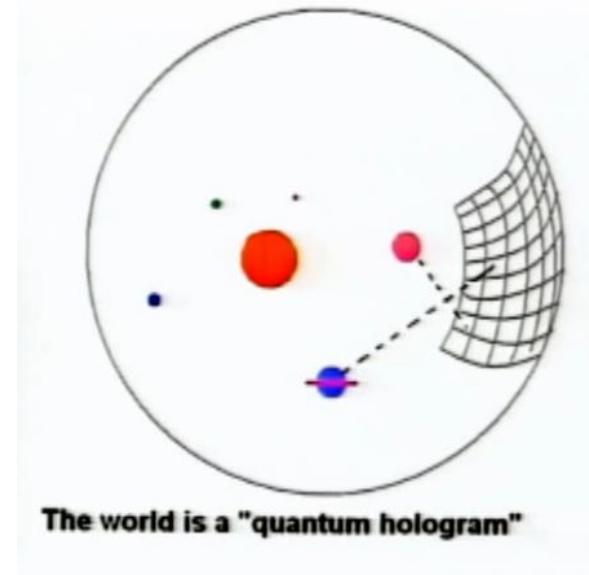
zwart gat met een **massa van  $10^{-8}$  kg (= de Planckmassa)**:  $T = 10^{31}$  K

Volgens Hawking ging met de verdamping van een zwart gat de daarin aanwezige **informatie verloren**. Dit is in strijd met de quantummechanica die stelt dat **informatie** hoe ook vervormd, gefragmenteerd of getransformeerd, **nooit verloren kan gaan**.

Dit leidde in de jaren 80/90 tot de **'informatie paradox'** en de **'black hole war'** tussen Leonard Susskind (grondlegger van de snaartheorie) en Stephen Hawking.

# Susskind model: complementariteit en holografisch principe

Uit entropie berekening: het **maximale aantal bits** nodig om een begrensde gebied in de ruimte te beschrijven is **evenredig met het begrenzingsoppervlak**. Susskind: 'the world is described by pixels, not voxels'. Het **horizon oppervlak** van een zwart gat kan dan wiskundig beschreven worden als **een hologram**, waarin alle informatie die aanwezig is in het zwarte gat ligt opgeslagen, een idee afkomstig van Gerard 't Hooft. Informatie capaciteit **1 bit per  $4A_p$** .

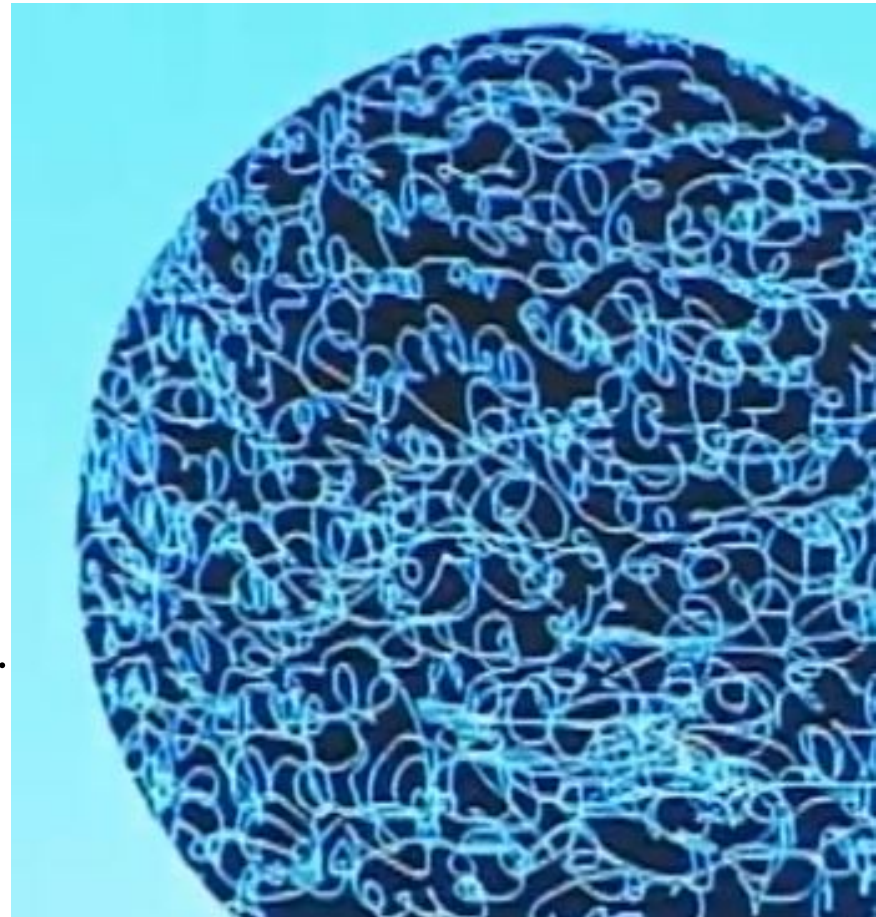


Wat gebeurt er bij passage van een object door de waarnemingshorizon? Volgens Susskind hangt dat af van de waarnemingspositie: **een verre waarnemer** ziet het object nooit de horizon passeren en ten ondergaan in een hete grenslaag ("stretched horizon"), waarbij **Hawkingstraling vrijkomt**. De Hawkingstraling bevat dan de informatie, die dus **niet verloren gaat in het zwarte gat**. Een met het object meebewegende waarnemer merkt niets bij passage van de horizon. Deze interpretatie noemt hij de **complementariteit van het zwarte gat**: het is het één of het ander, maar nooit beiden tegelijk. Er is geen paradox omdat de verre en de meebewegende waarnemer **nooit contact kunnen maken**: één buiten, één binnen de waarnemingshorizon. **Complementariteit is een eigenschap van de quantummechanica.**

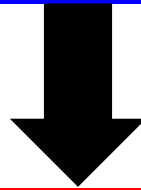
# Microscopische morfologie van de waarnemingshorizon?

De meest vooraanstaande snaartheoretici, Juan Maldacena en Edward Witten, hebben een **wiskundig sluitend model** opgesteld van de **microscopische horizonstructuur** van een zwart gat. De inhoud van de binnenruimte, en dus de informatie, kan worden beschreven als een hologram aan de rand van de ruime. Het bestaat uit een zogenaamd **'D-brane'**, een oppervlakte in de ruimte waar **snaren** aan vast kunnen zitten en waarmee gluonen/hadronen kunnen worden beschreven. De **'open' snaren** trillen en treden met elkaar in wisselwerking waardoor **'gesloten snaren'** worden gevormd, die het zwarte gat verlaten in de **vorm van Hawking straling**.

Recent zijn er aanwijzingen dat **quantumcomplementariteit**, in combinatie met **quantumverstrengeling**, het mogelijke bestaan van een **'firewall'** bij de waarnemingshorizon impliceert. Deze "firewall" zou de **toegang versperren** van de meebewegende waarnemer, de waarnemingshorizon is dan niet alleen een 'point of no return' maar een **blokkade**, de ART komt dan fundamenteel ter discussie te staan.



Superzware zwarte gaten

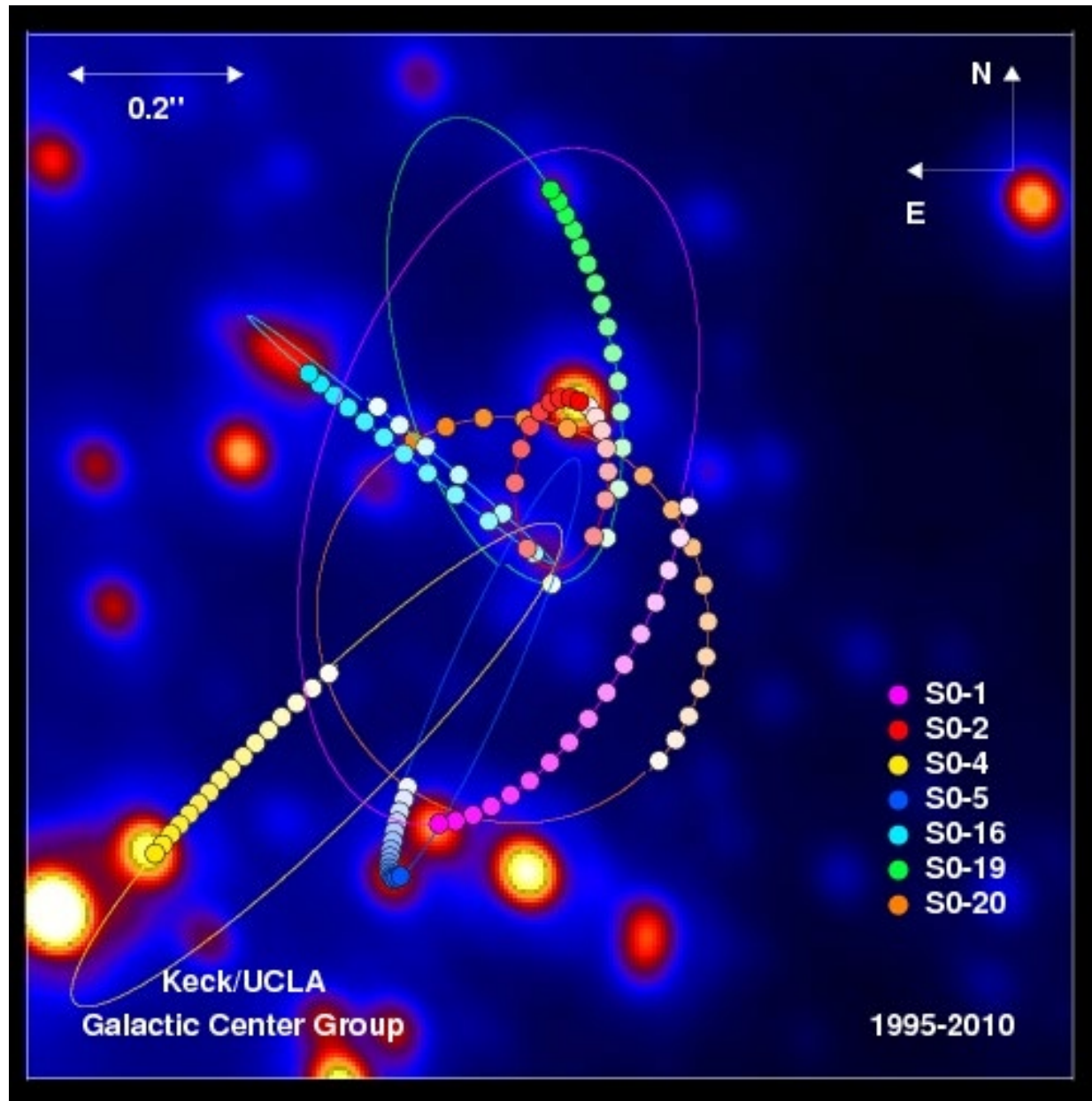


‘Feedback’ naar structuurvorming in het heelal

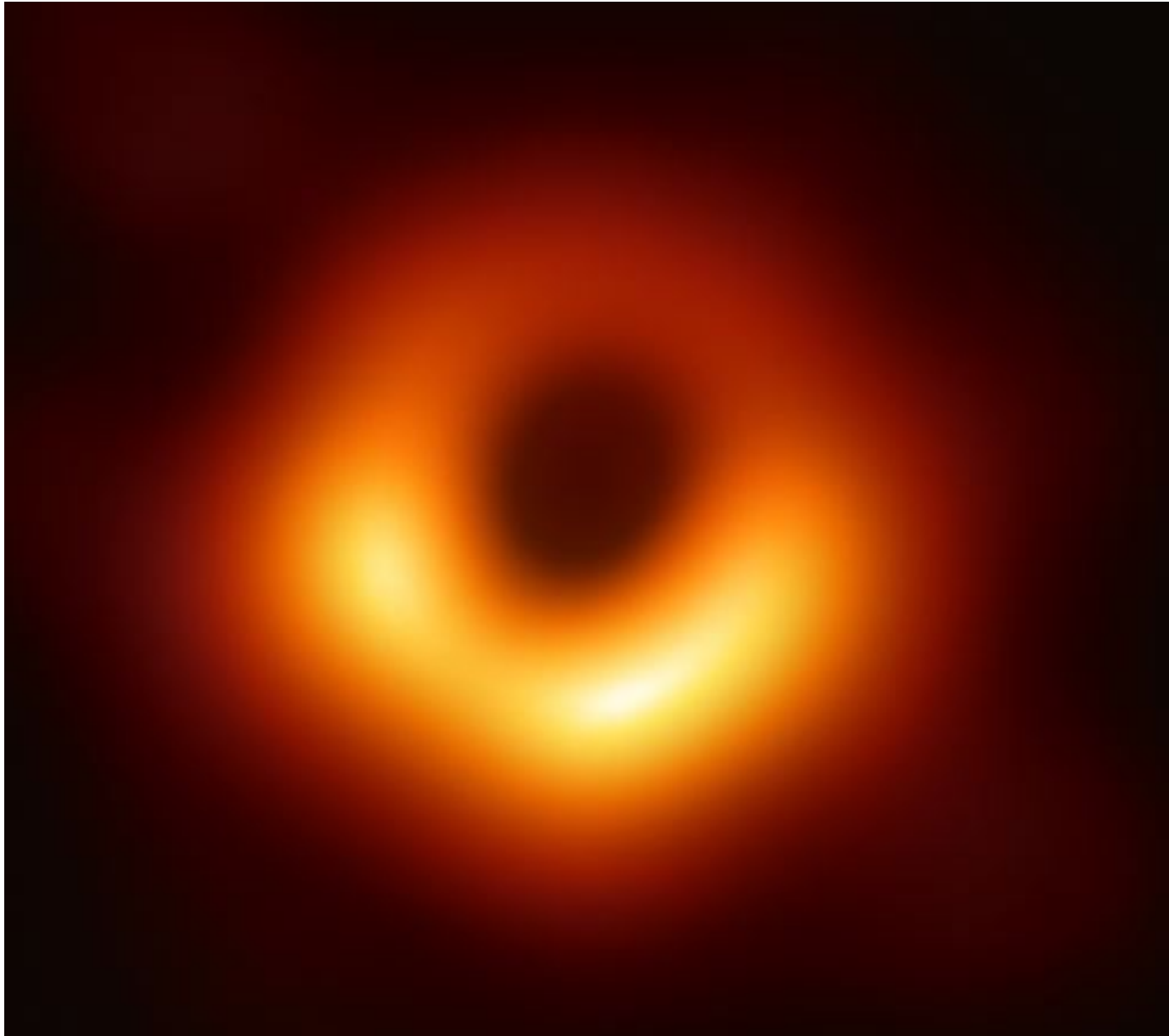




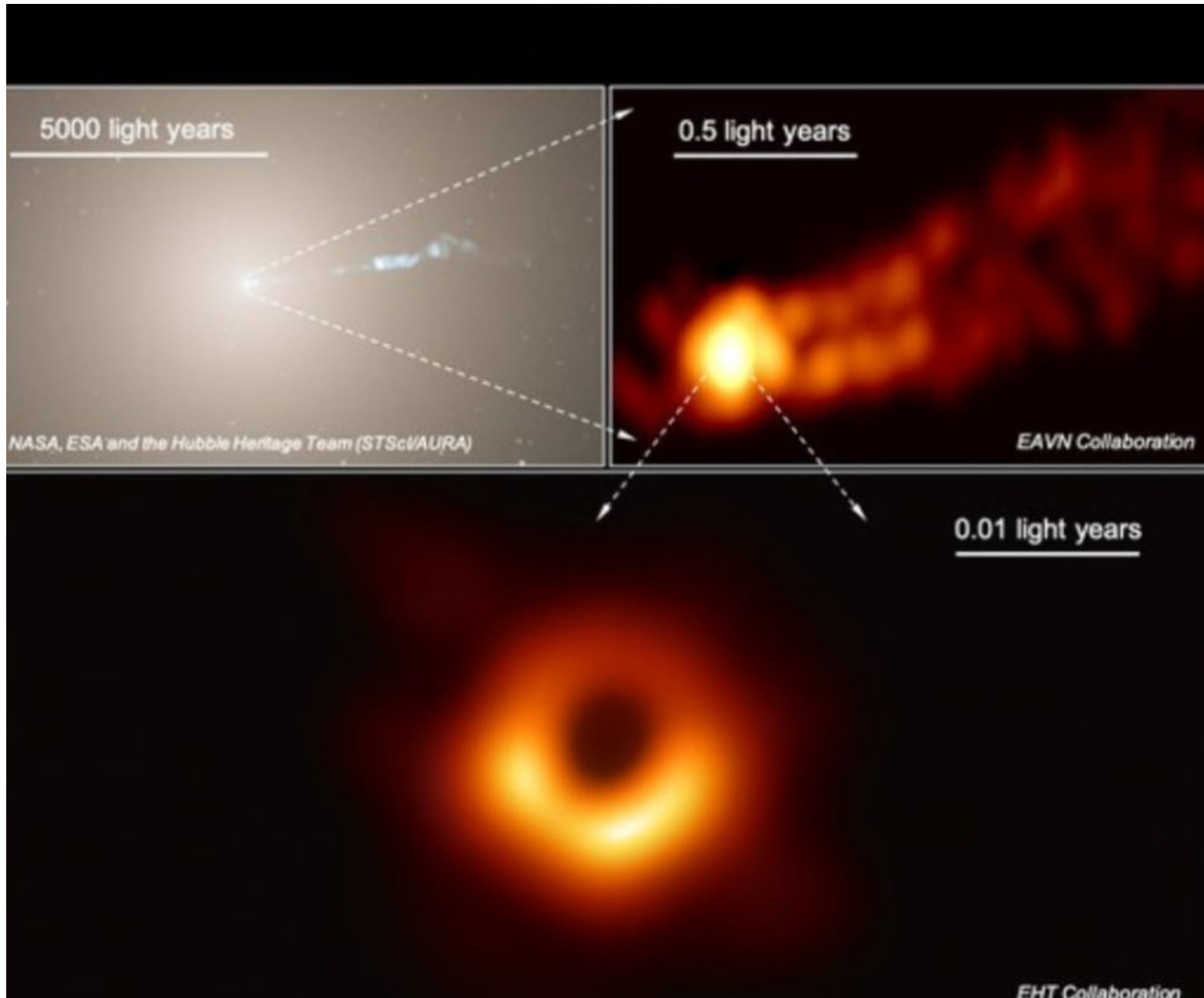
# Superzwaar zwart gat in ons Melkwegcentrum: $4 \times 10^6 M_{\odot}$



Event Horizon telescope: M87 central BH of 6.5 billion  $M_{\odot}$



# Zoom on the central black hole in the M87 galaxy in Virgo





# Kosmische 'jets' (straalstromen): "footprint" van de krachtigste deeltjesversnellers

Radio-continuüm kaart Cyg A: radiostelsel met actieve kern

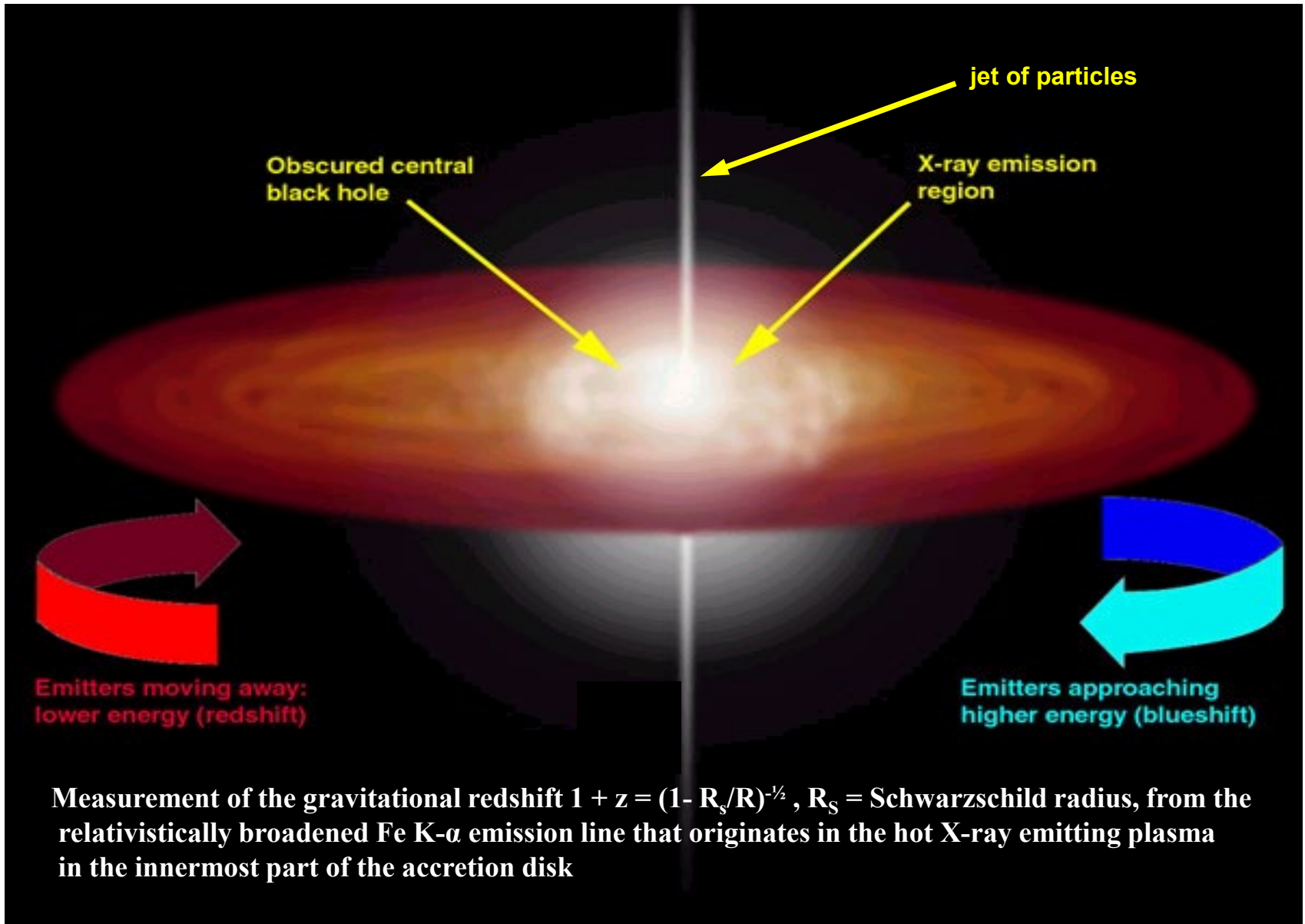


superzwaar zwart gat

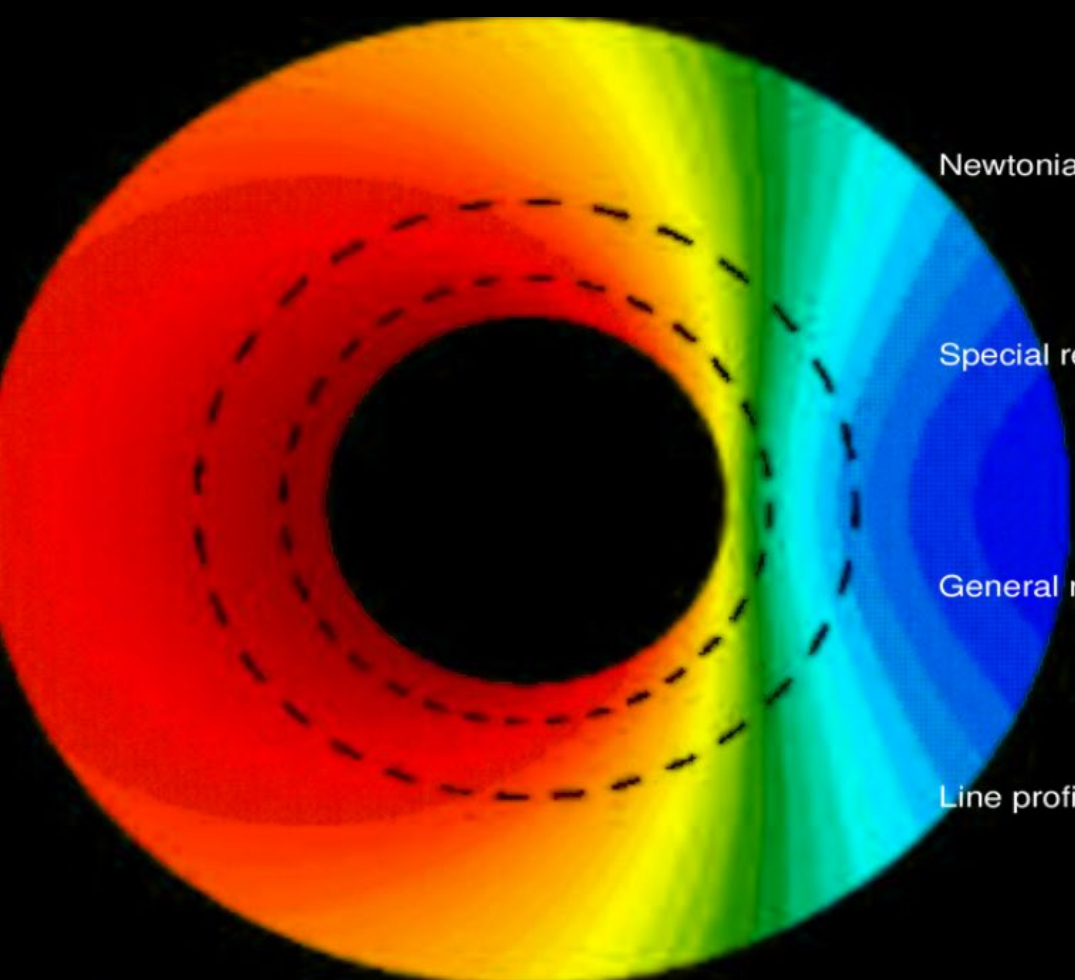
# Meting van de spin van zwarte gaten

- Meting van de **polarisatiegraad en -richting** als functie van de foton energie voor de **thermische schijfemissie** (**draaiing van het polarisatievlak is spin afhankelijk**)
- Meting van de **zwaartekracht-roodverschuiving** in het binnenste deel van de accretieschijf uit het relativistisch **verbrede lijnprofiel van de Fe K- $\alpha$  lijn**
- Meting van **hoogfrequente QPO's**. De ISCO's voor een Schwarzschild metriek van zwarte gaten van **5-15  $M_{\odot}$**  komen overeen met QPO frequenties van **450-150 Hz**.

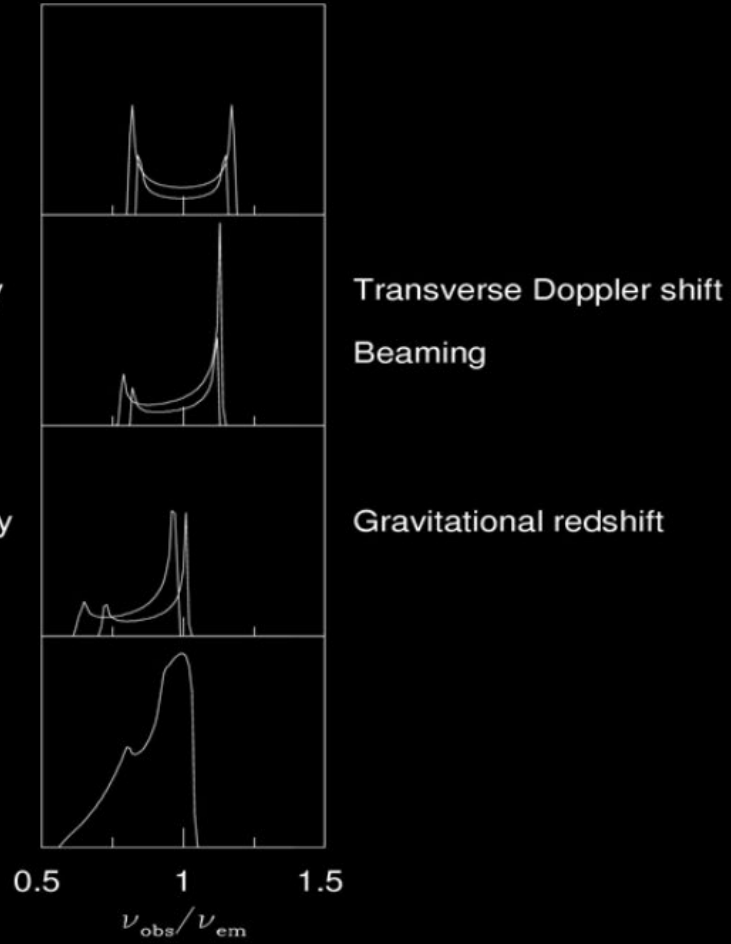
# bepaling van de spin van (superzware) zwarte gaten



# Relativistic line profile of the inner accretion disk of a SMBH



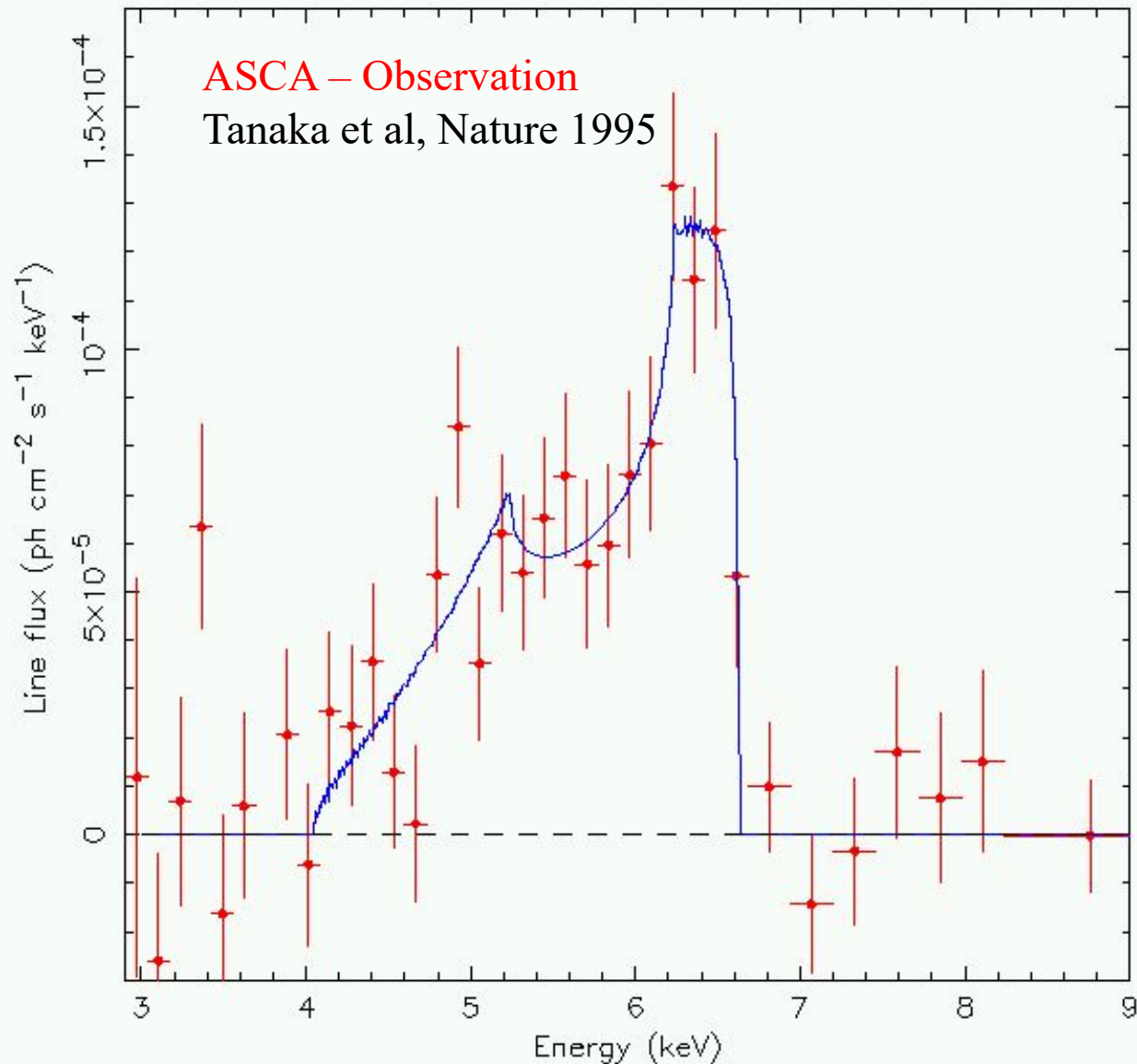
↑↑  
Top view of the accretion disk surrounding the supermassive black hole



↑↑  
emission line profile at the innerside of the disk

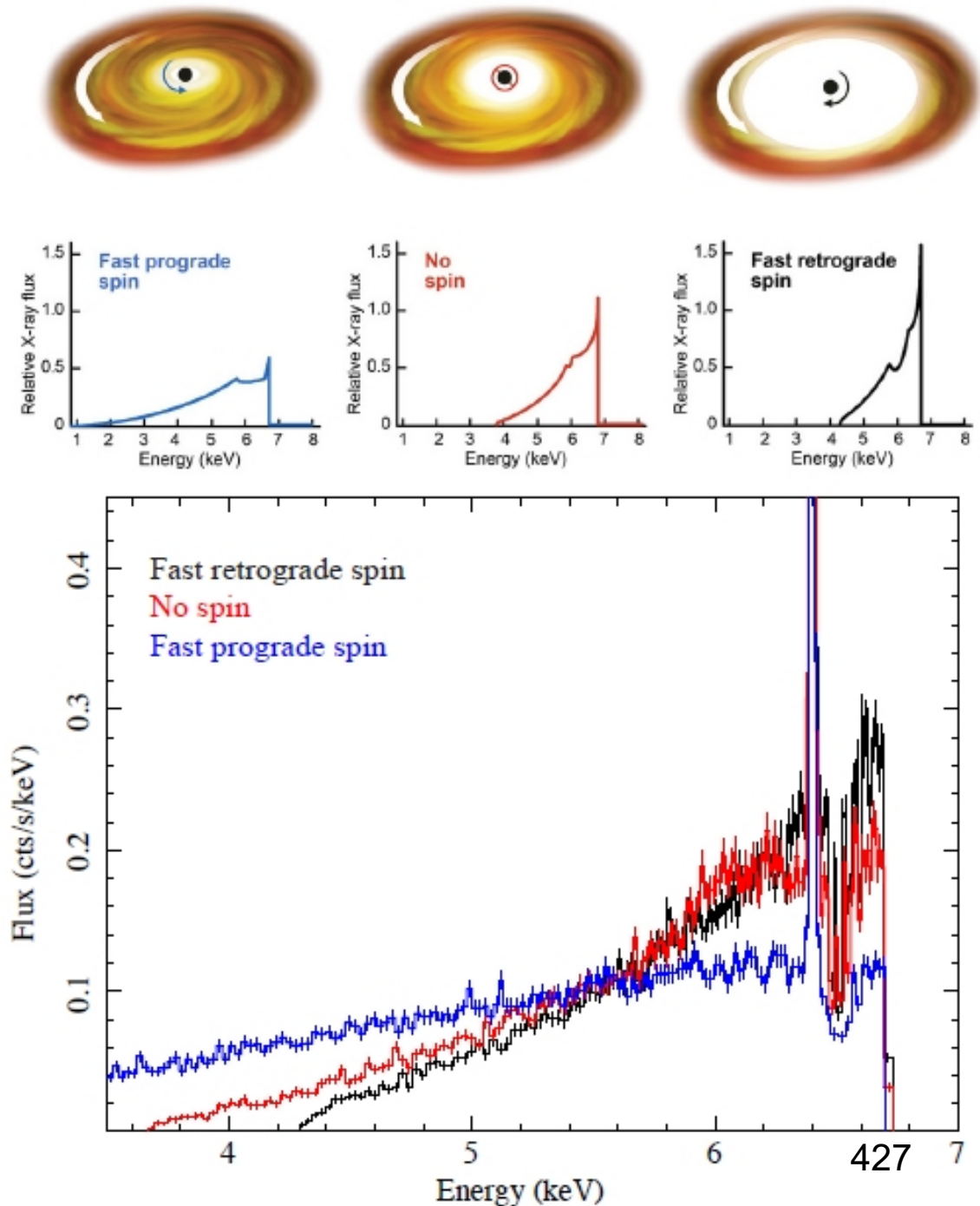


# Eerste meting relativistisch verbrede Fe-fluorescentielijn. bij 6.4 keV, in de actieve melkwegkern MCG-6-30-15



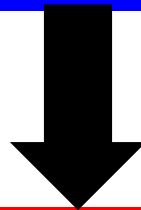
Verandering van het ijzer emissielijnprofiel met de rotatie van het zwarte gat

Simulatie van de verwachte lijnprofielen zoals waar te nemen met de ATHENA Röntgentelescoop in 2030+





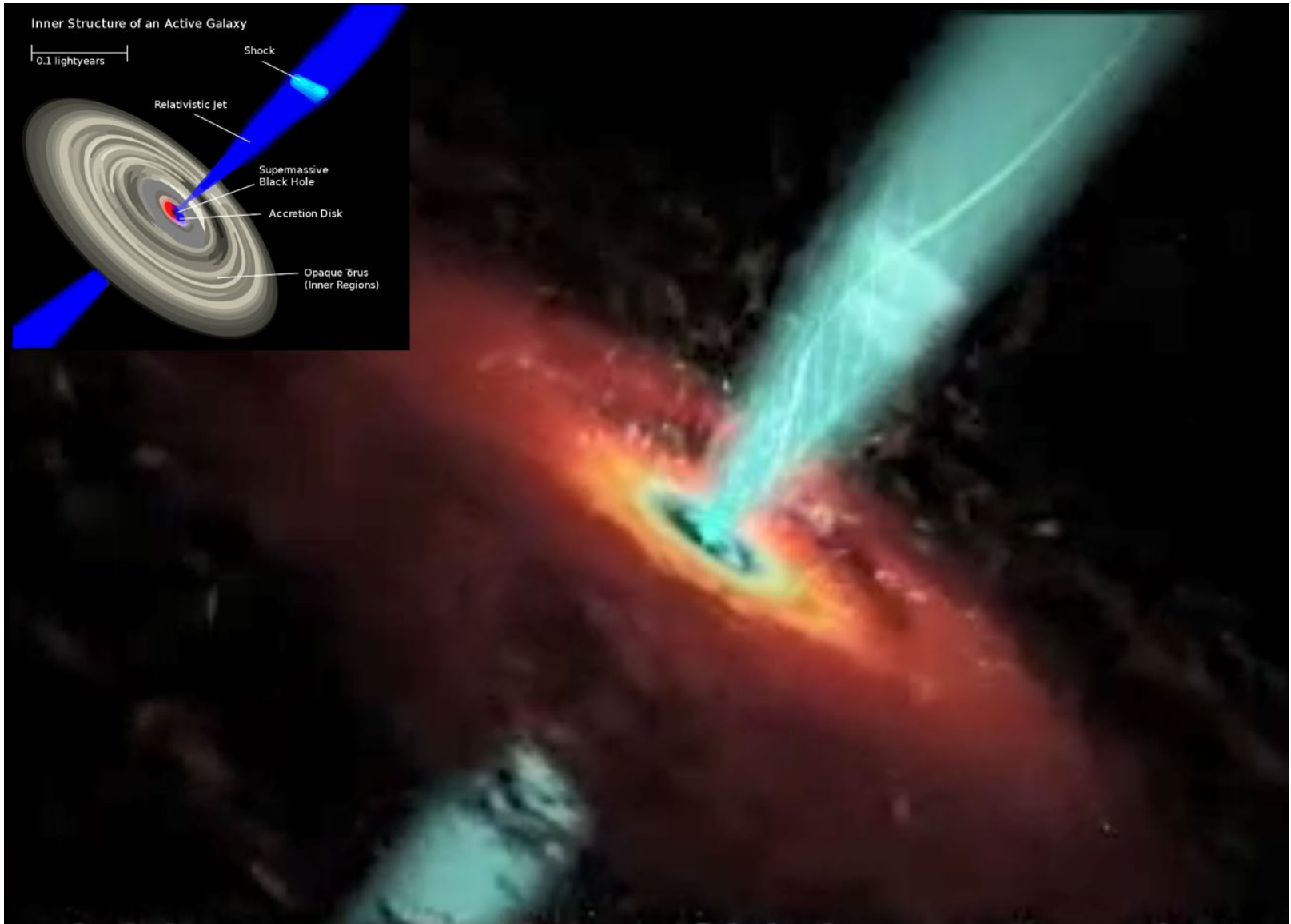
Jets, outflows and feedback

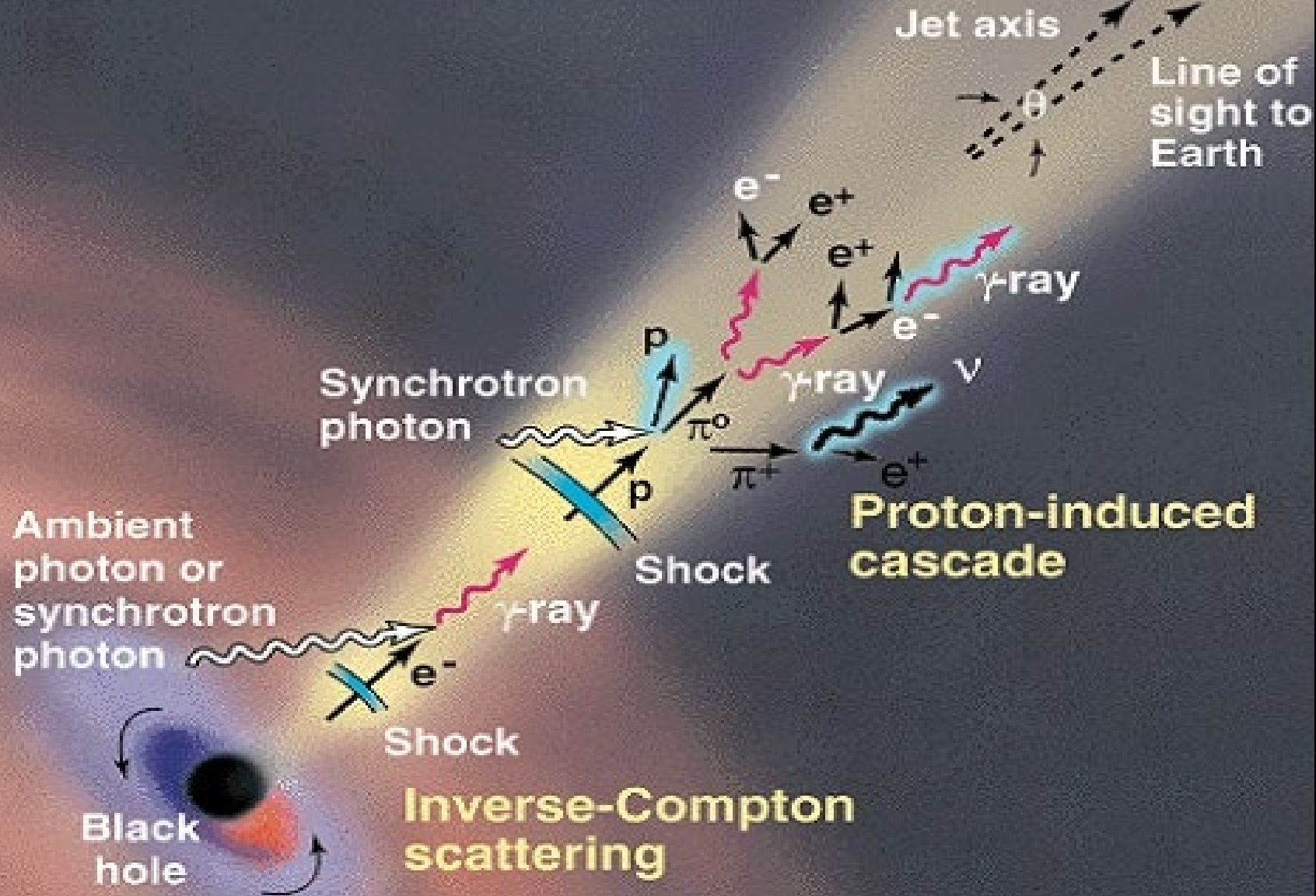


Science with ATHENA



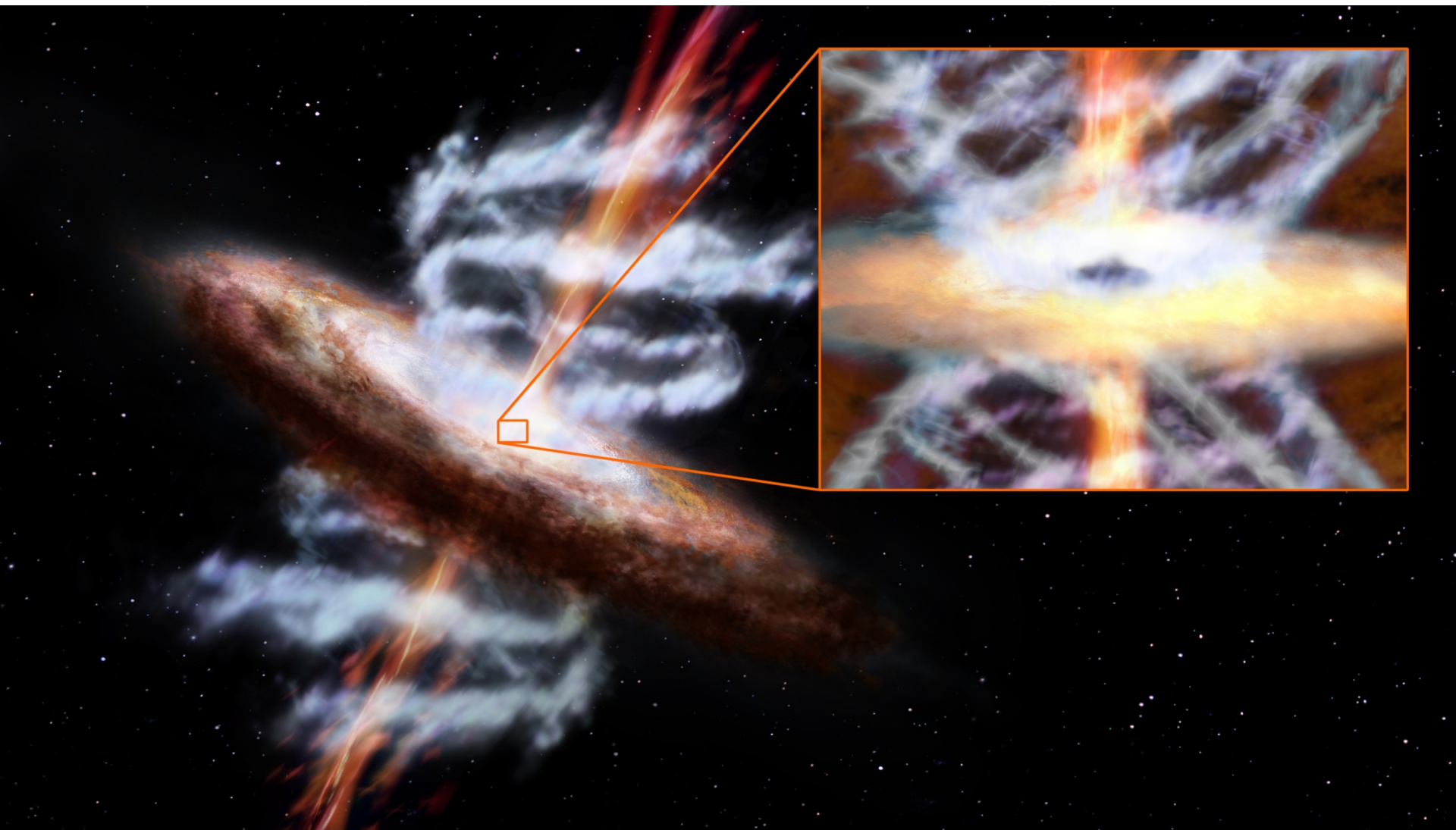
# Inner structure of a blazar nucleus producing a jet outflow



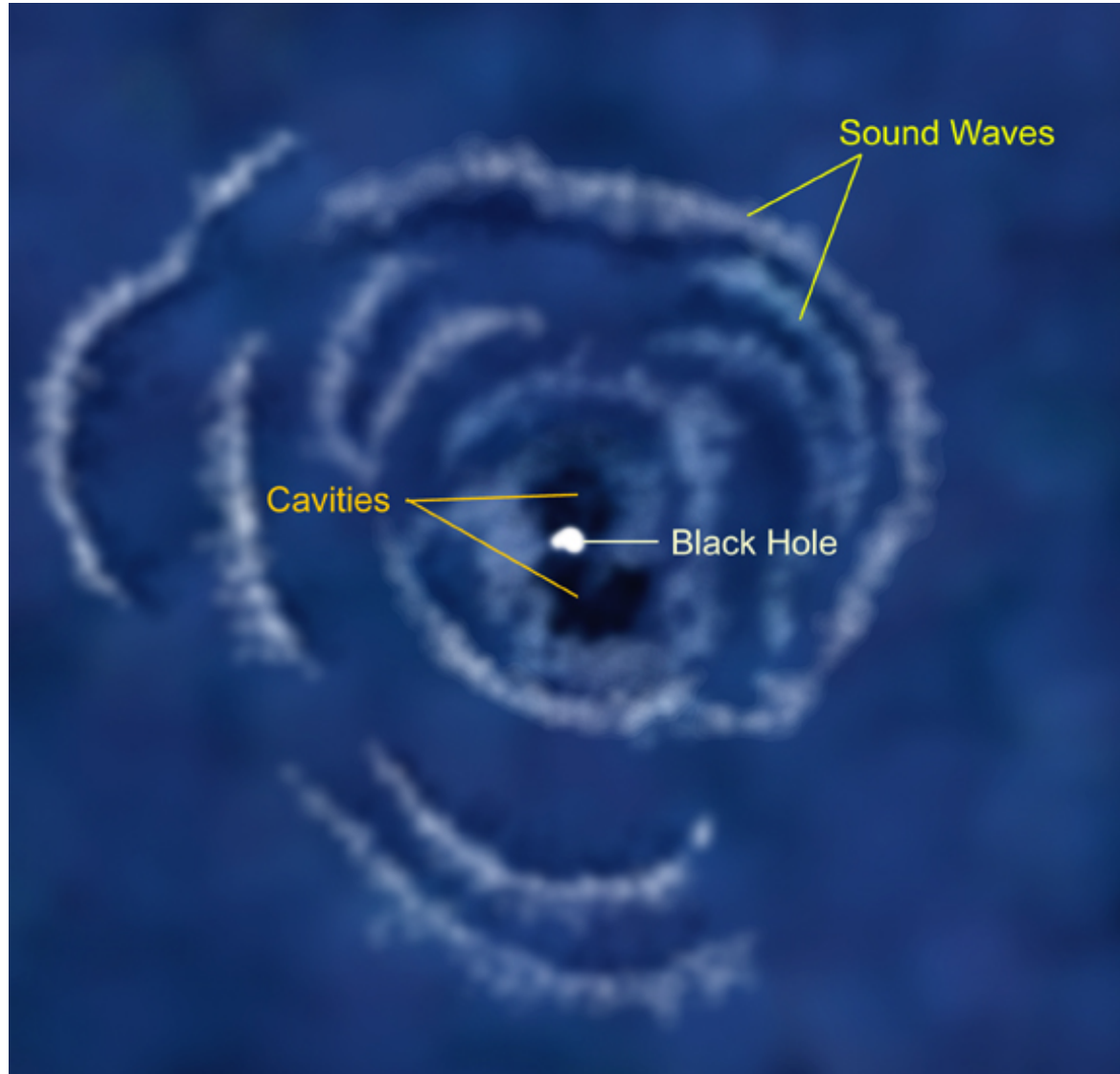


Radiation processes in collimated jet emission

# Active Galactic Nucleus: **ultra fast outflows** of gas clouds



# Verhitting van intracluster gas door akoestische golven uit 'terugkoppeling' door het centrale zwarte gat





# Athena X-ray observatory (2030+)

## belangrijkste wetenschappelijke thema's

- Hoe verzamelt **gewone materie zich tot de grote-schaal structuren** die we nu in het heelal waarnemen?
- Hoe **groeien zware zwarte gaten** en hoe beïnvloeden die de **evolutie van het heelal**?

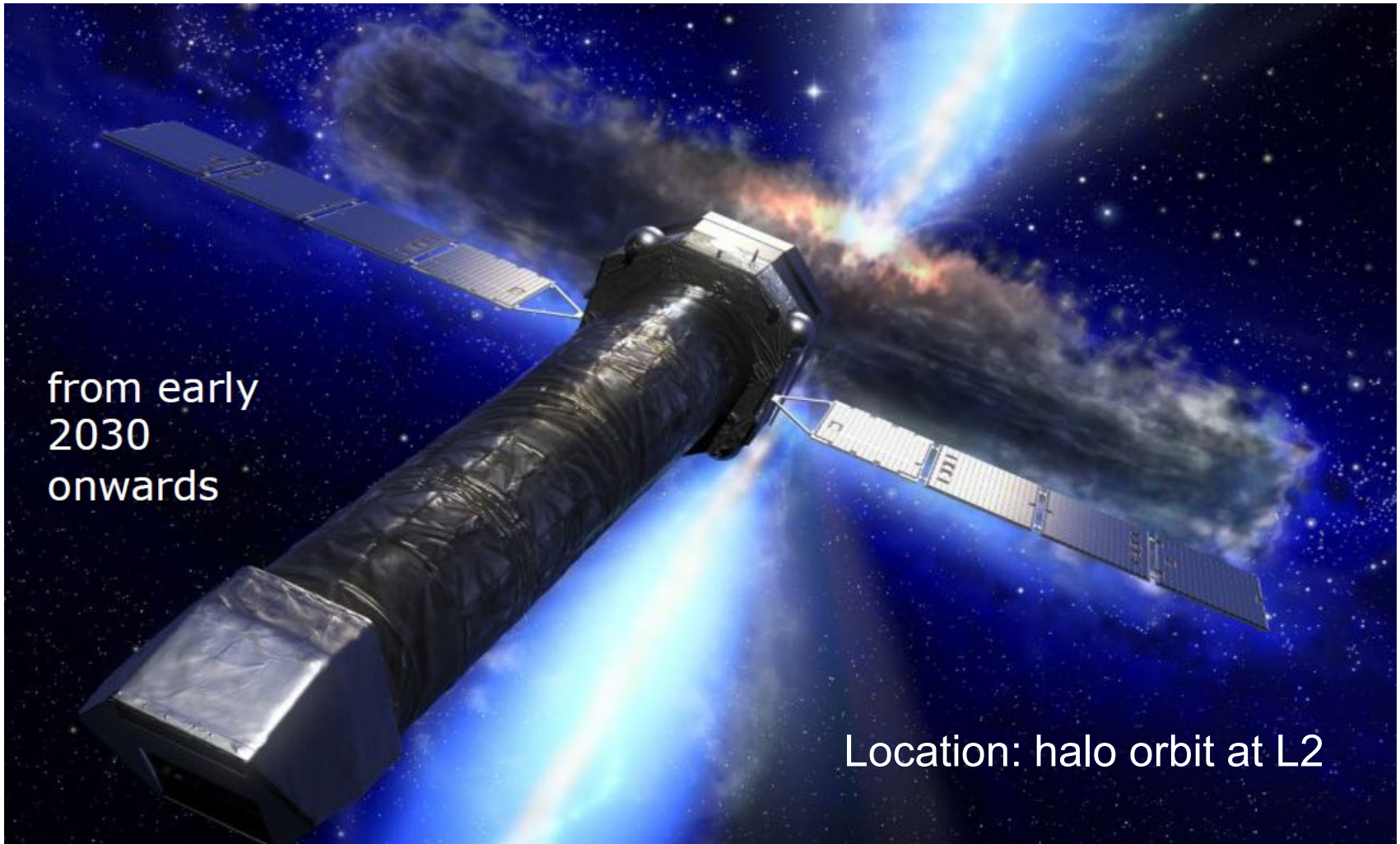
# Athena X-ray observatory (2030+): diagnostiek

- Evolutie hete-gasmorfologie met roodverschuiving  $z$  van intraclustergas in groepen en clusters van melkwegstelsels door afbeeldingen in röntgenlicht met hoog spectraalscheidend vermogen
- Evolutie van groei en spin van superzware zwarte gaten door röntgenspectroscopie en -polarisatiemeting van accretieschijven met hoog tijdscheidend vermogen aan de rand van de waarnemingshorizon

## Locatie in faseruimte voor diagnostiek:

- Majeure sprong in spectrale grensgevoeligheid (200x) t.o.v. XMM-Newton (en Chandra)
- Nieuwe waarnemingsas: polarisatie
- Unieke combinatie van tijd- en spectraalscheidend vermogen (spectroscopie in de fotonbegrensde limiet)

# Athena Mission (ESA 2030+), artist impression

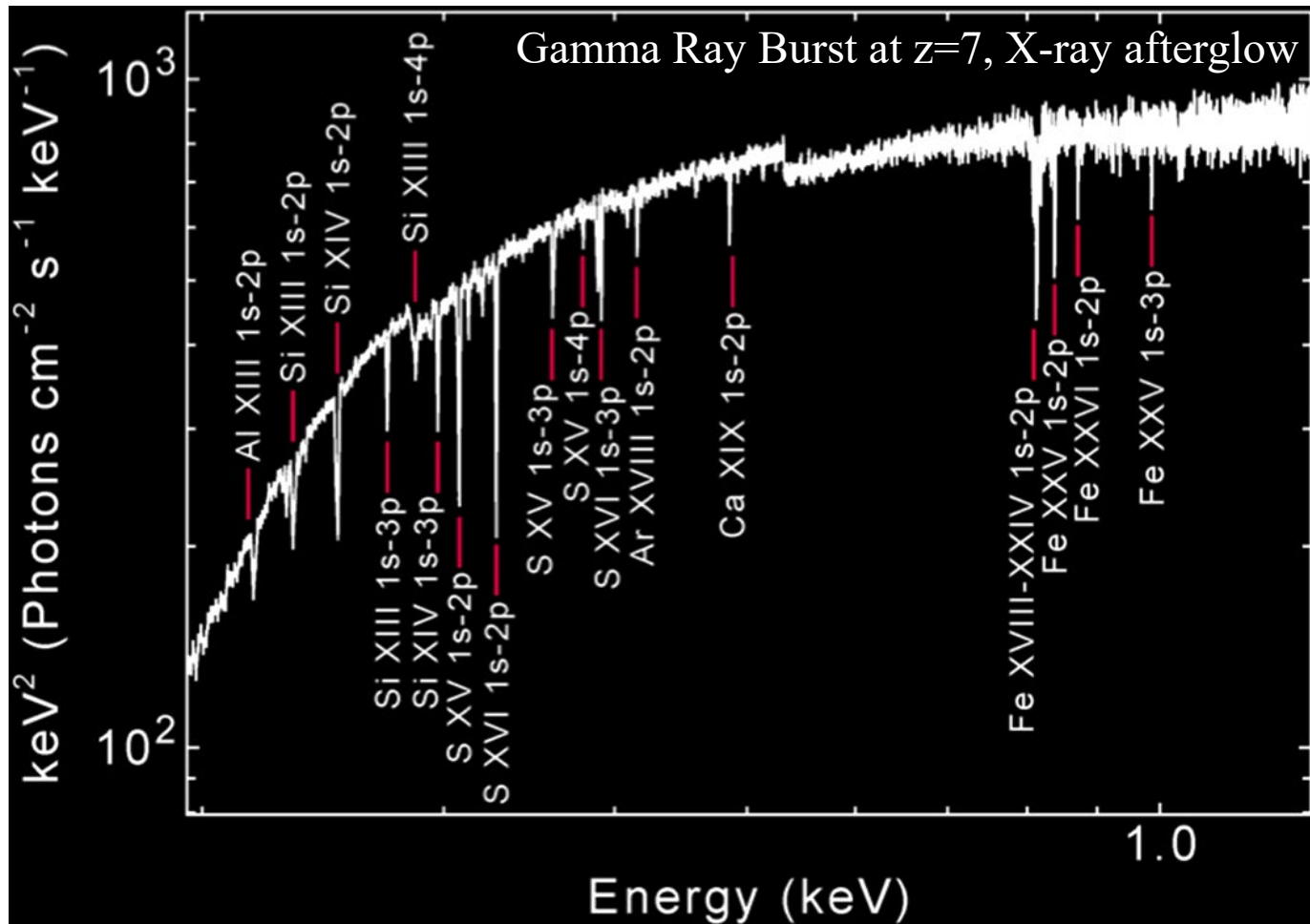


from early  
2030  
onwards

Location: halo orbit at L2

# Athena: eerste sterren en zwarte gaten

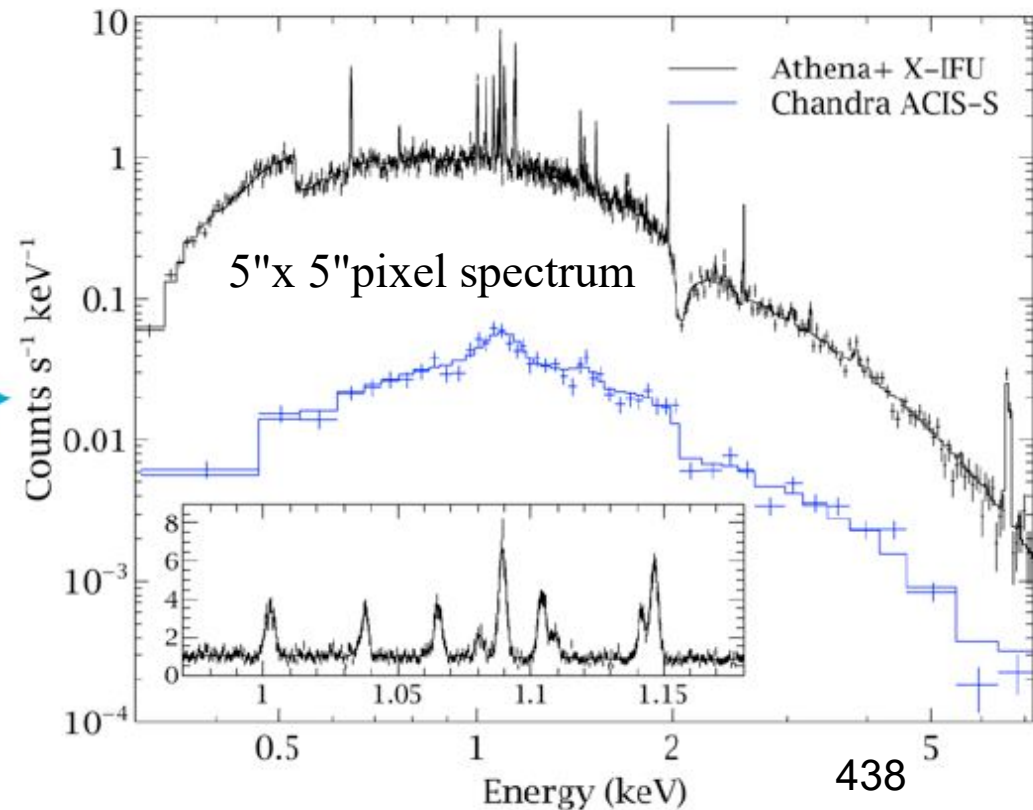
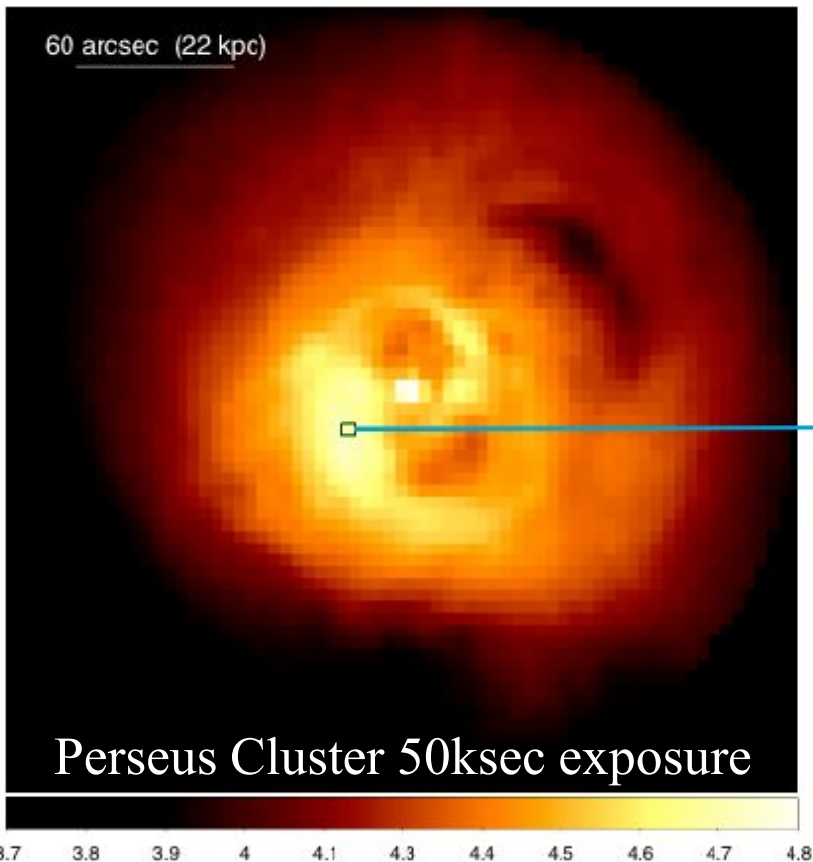
**Vraag:** Wanneer explodeerden de eerste generatie zware sterren die de **eerste 'kern' zwarte gaten** produceerden en de eerste metalen in het heelal verspreidden?





# Athena: kosmische terugkoppeling

Hoe **dissiperen de jets van actieve melkwegkernen hun mechanisch energie** in het hete intraclustergas en hoe beïnvloedt dit de voeding van het zwarte gat? Welke invloed heeft dit op de **dynamische cluster-evolutie**?



# Athena: de groei van zwarte gaten in 't vroege heelal

- Wat was de **groei van zwarte gaten** tijdens het tijdperk van **herionisatie**?

