

James Webb en de vroegste sterren en superzware zwarte gaten in kernen van sterrenstelsels

E.P.J. van den Heuvel, Universiteit van Amsterdam
Cursus Walrecht, Amersfoort 12 Maart 2025

Eerste helft van lezing: Huidige “standaard model” van evolutie heelal

Tweede helft:

Wat James Webb vertelt over vorming eerste sterren, sterrenstelsels en
superzware zwarte gaten



Leeftijd van het heelal: 13.8 miljard jaar

Leeftijd van het Melkwegstelsel: minstens 13 miljard jaar

Leeftijd van het Zonnestelsel en de Aarde: 4.65 miljard jaar
years

Waterstof (H) en helium (He) werden in de Oerknal gemaakt, alle andere elementen zijn in vroegere generaties zware sterren gemaakt

Wij zijn van Sterrenstof gemaakt

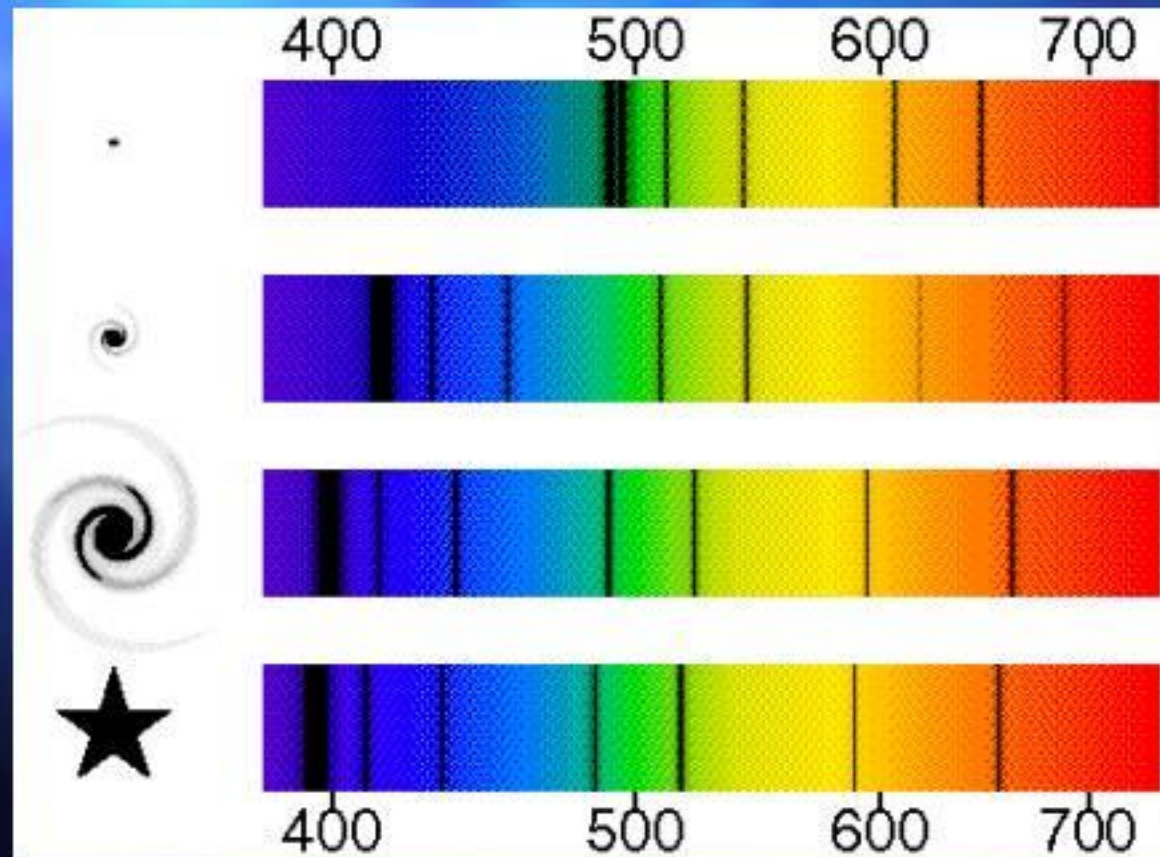
De lichtsnelheid is eindig ($\sim 300\,000$ km/sec)

Daarom:

Ver weg = Lang geleden

Hubble's "Law"

Hoe verder weg een sterrenstelsel, hoe meer zijn spectrum naar het rood is verschoven



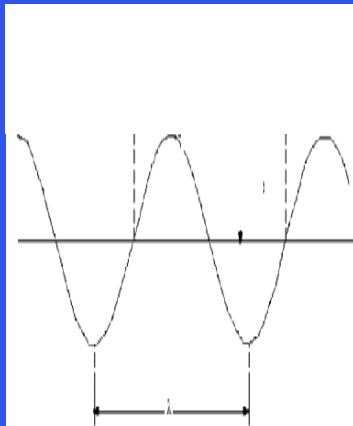
Ver sterrenstelsel:
Grote "roodverschuiving"

Nabije ster: geen
"roodverschuiving"

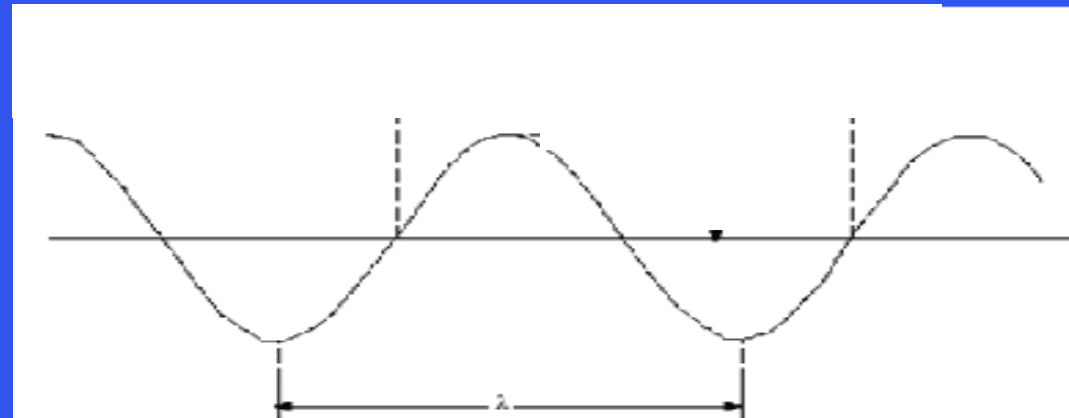
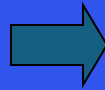
Roodverschuiving is gevolg van
uitdijing van het heelal:
sinds het licht werd uitgezonden
is het heelal uitgezet, waardoor
de uitgezonden lichtgolven zijn
uitgerekt

Ruimte zet uit: lichtgolf opgerekt, dus: **roder**

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



Oorspronkelijke golflengte



$Z=1$

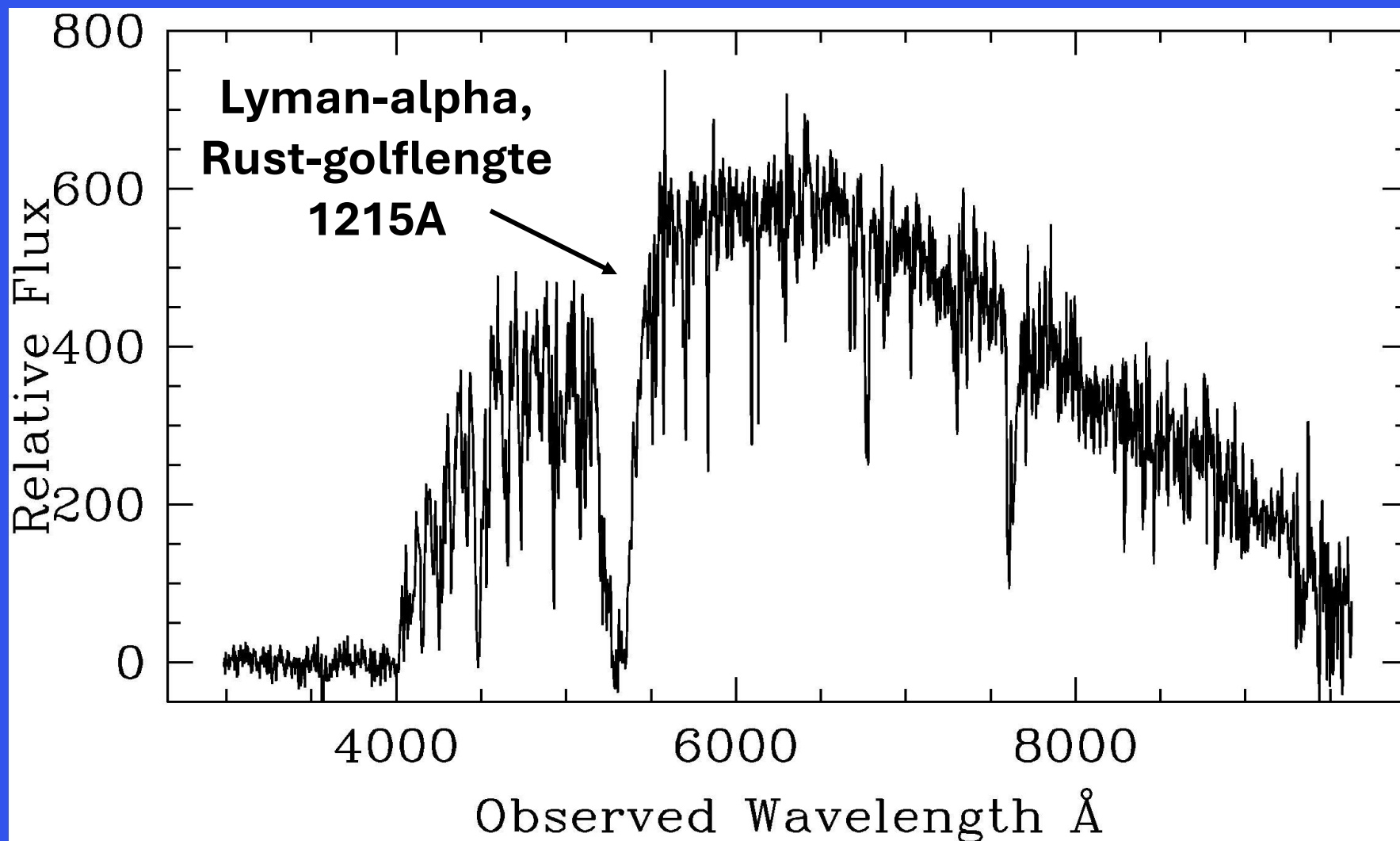
Gemeten golflengte

Bij $z=1$: we zien heelal van 9 miljard jaar geleden (heelal 4.8 miljard jr.oud en in lengtemaat 2 maal zo klein als nu; in volume 8 maal)

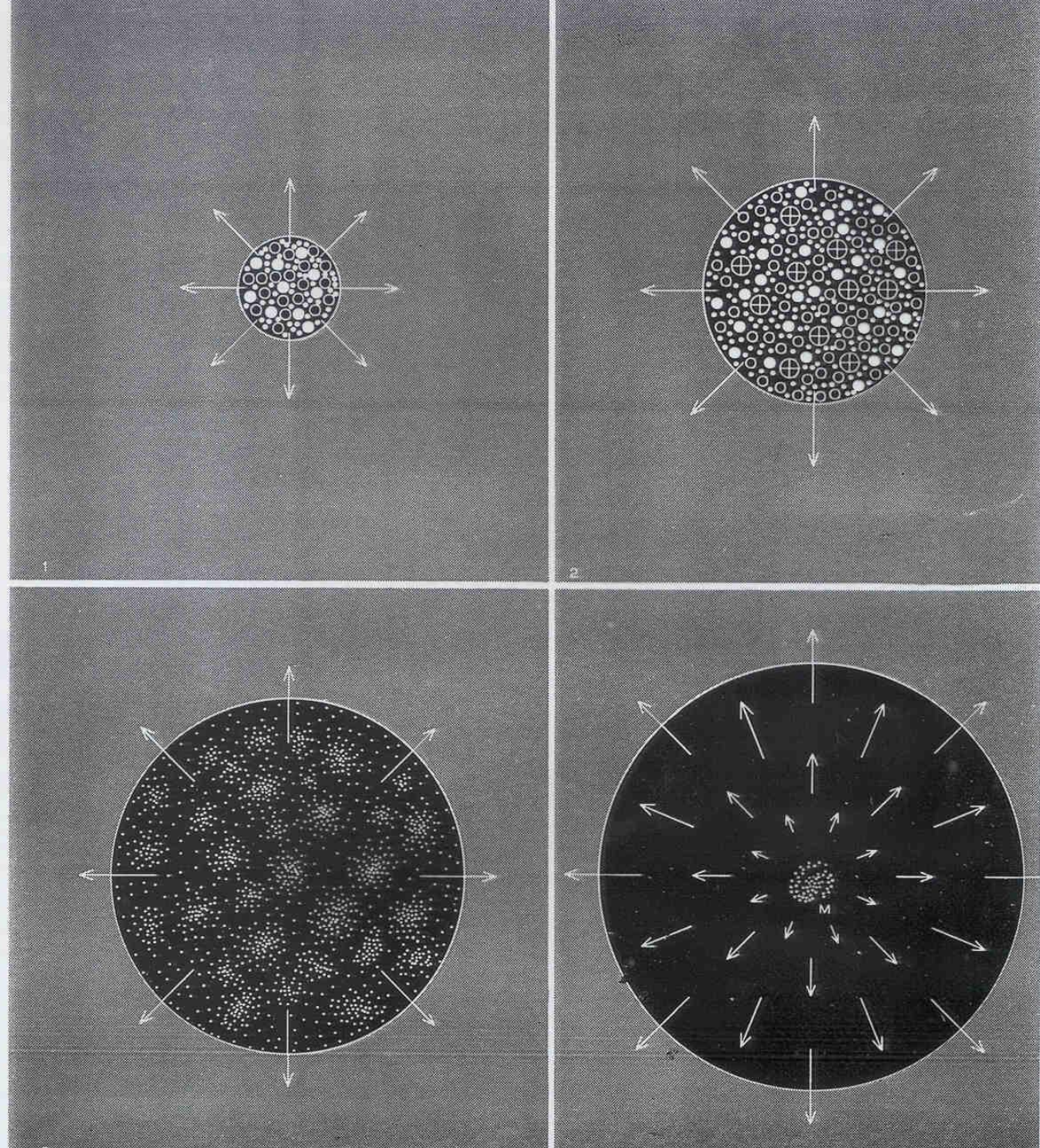
Bij $z= 4.5$: 12.7 miljard jaar geleden (heelal 1.1 miljard jr. oud)

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

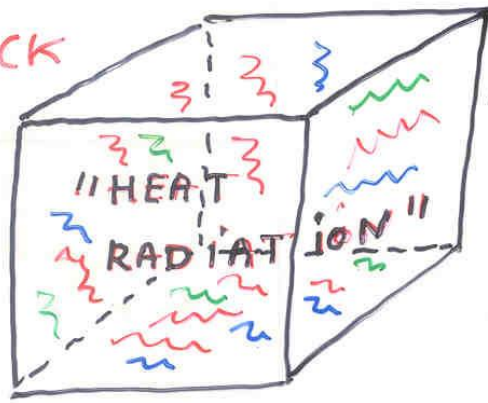
ESO- Very Large Telescope



G. Lemaitre's model (ca 1930) van het ontstaan van het heelal vanuit een heet en dicht "Oeratoom" bestaande uit neutronen.



PLANCK
(1900)

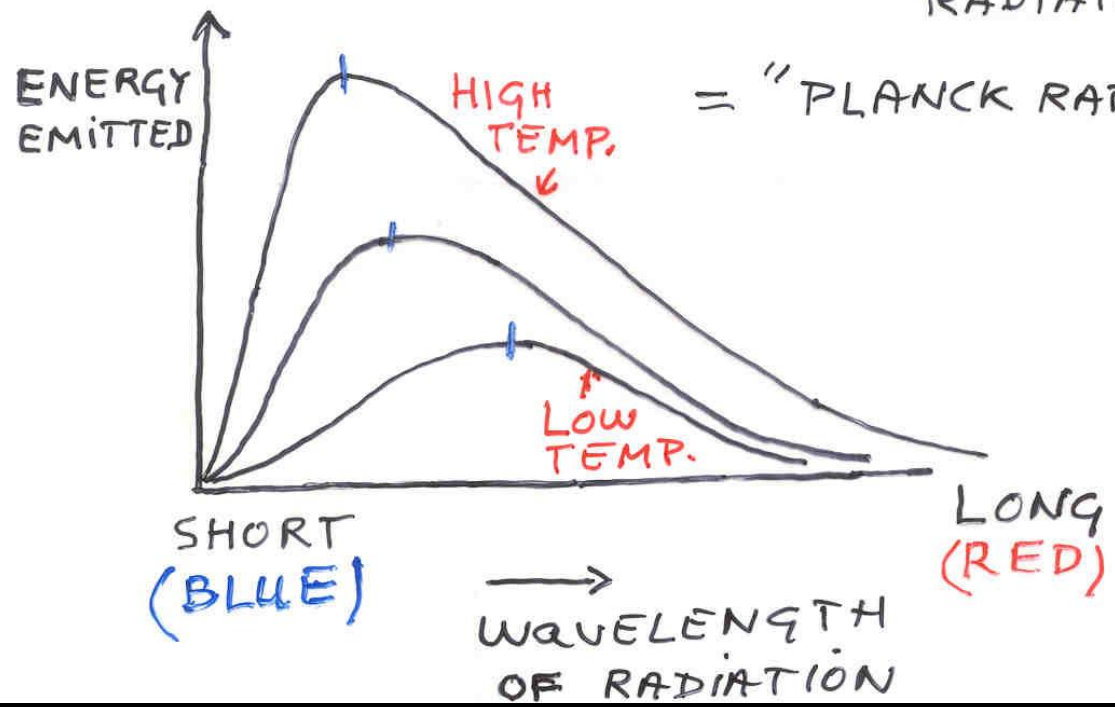


IN CLOSED BOX
OF
TEMPERATURE
 T (°KELVIN)

ALL COLORS

$$[\text{°KELVIN} = \text{°CELSIUS} + 273]$$

"HEAT-RADIATION" = "BLACK-BODY RADIATION" = "PLANCK RADIATION"



Gamow en zijn studenten voorspelden (1949): Heelal is heel heet begonnen: “Hot Big Bang”

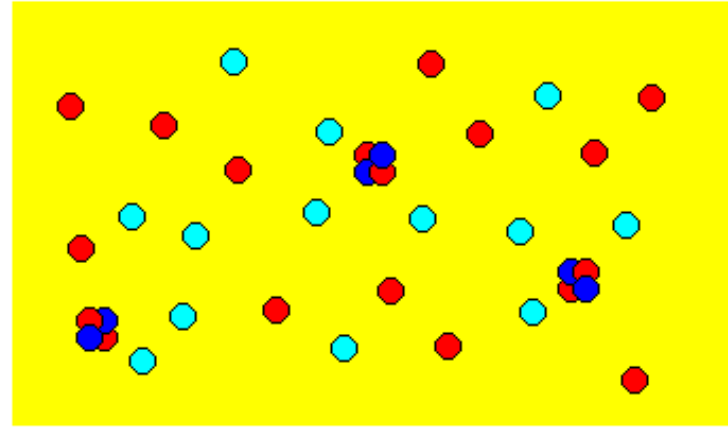
Als de temperatuur in het
uitzettende heelal gedaald is tot
3000 K, gaan waterstof en helium
over van geïoniseerd naar neutraal:
de “recombinatie”.




Op dat moment werd het gehele
heelal doorzichtig.

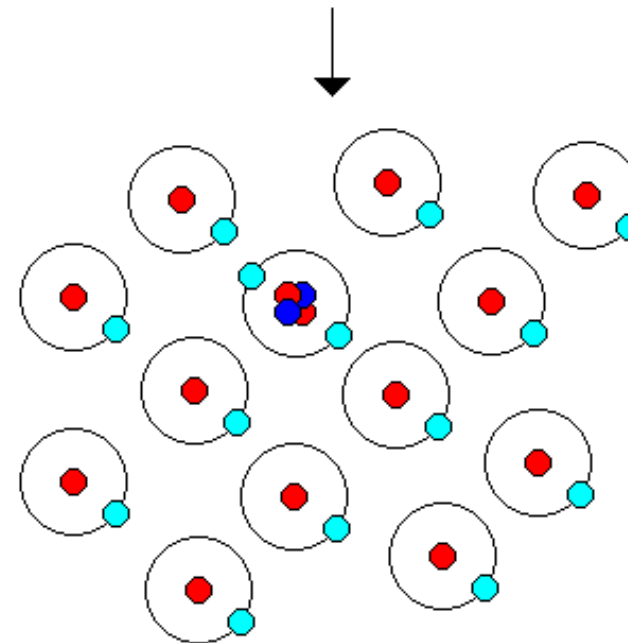
Voorspelden: Sindsdien heelal factor
600 uitgedijd: temperatuur van de
straling nu 5 à 6 Kelvin:
Microgolf straling.



Recombination

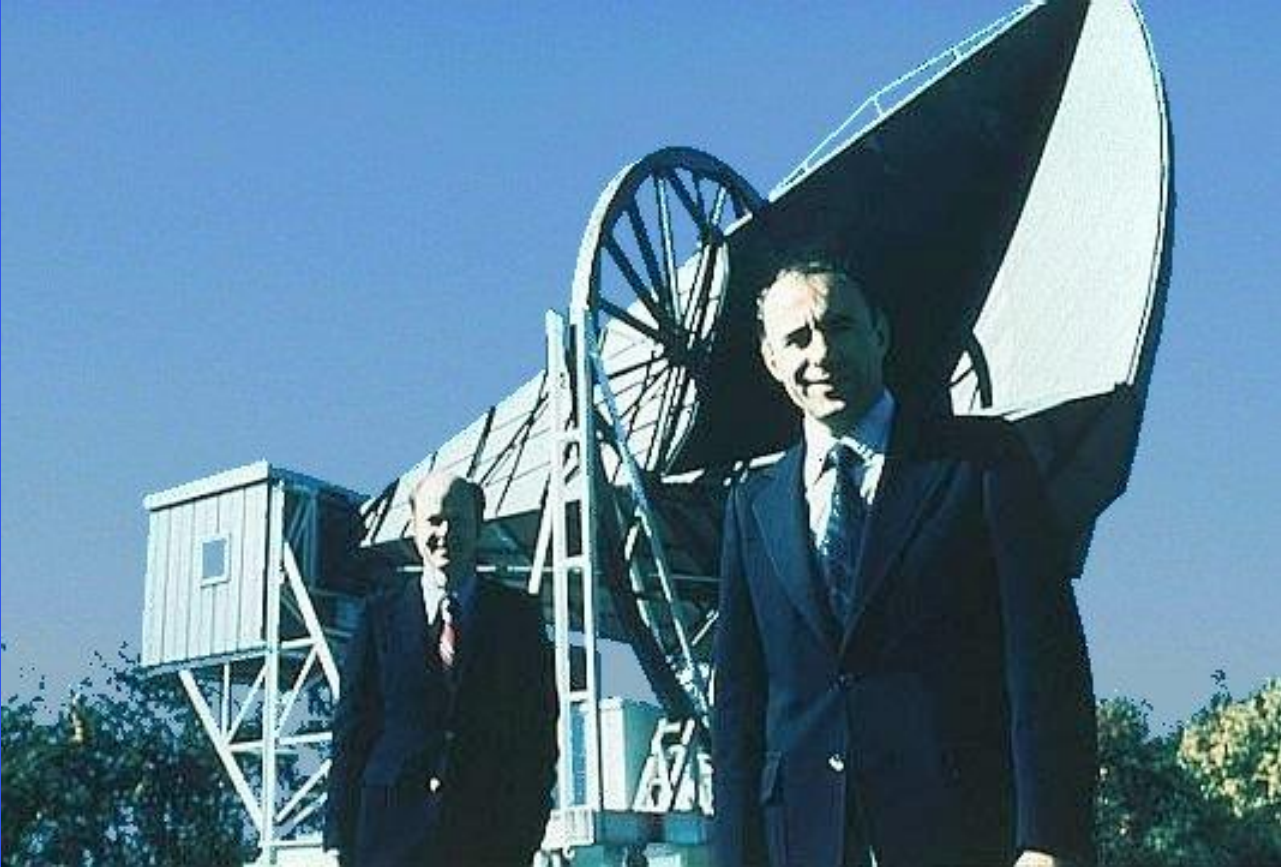
As the Universe expands and cools, protons and electrons combine to form hydrogen (the most abundant element). And helium nuclei combine with electrons to form helium atoms. This process is called recombination.



-  electron
-  proton
-  helium nuclei



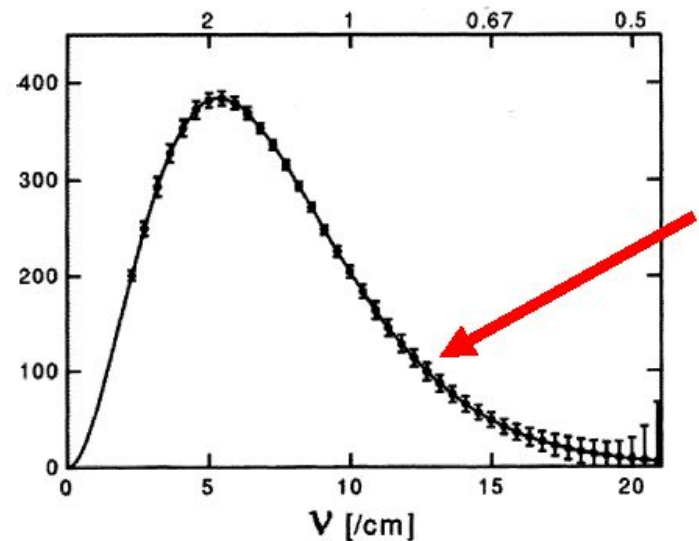
-  hydrogen atom
-  helium atom

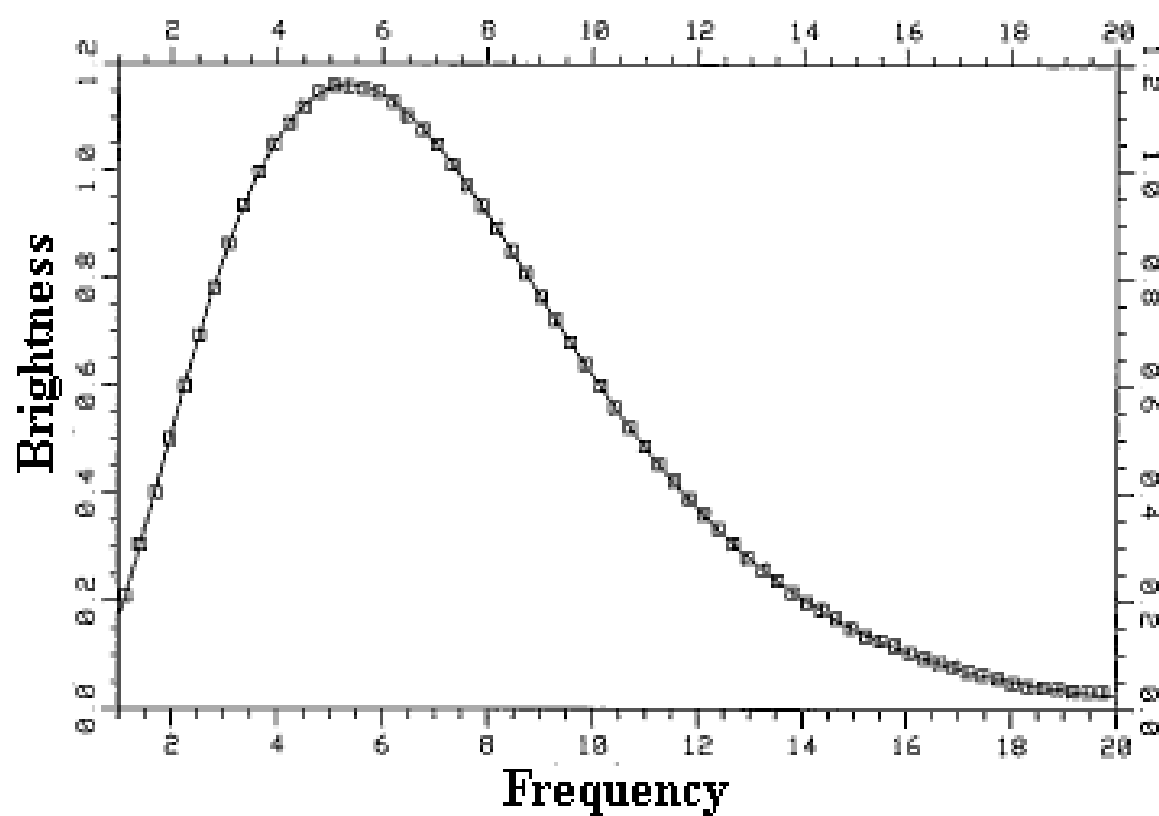


**Holmdel Radiotelescoop
(New Jersey, USA)**

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

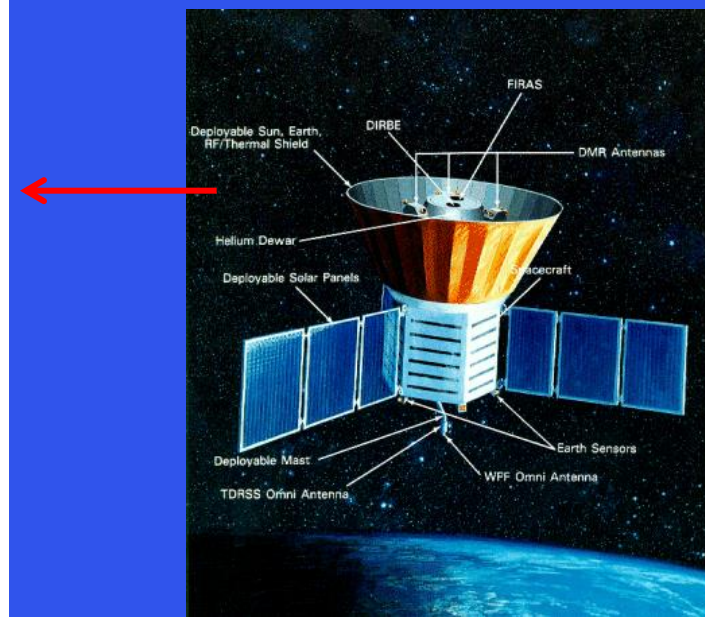
Er zijn 1 miljard fotonen van deze straling per materiedeeltje (proton of neutron) in het heelal.





Cosmic Background Explorer (COBE, gelanceerd 1989)
 mat deze Planckkromme: Temperatuur 2,735 (± 0.006)
 Kelvin

10^9 fotonen per materiedeeltje (baryon= proton/neutron)
 in het heelal

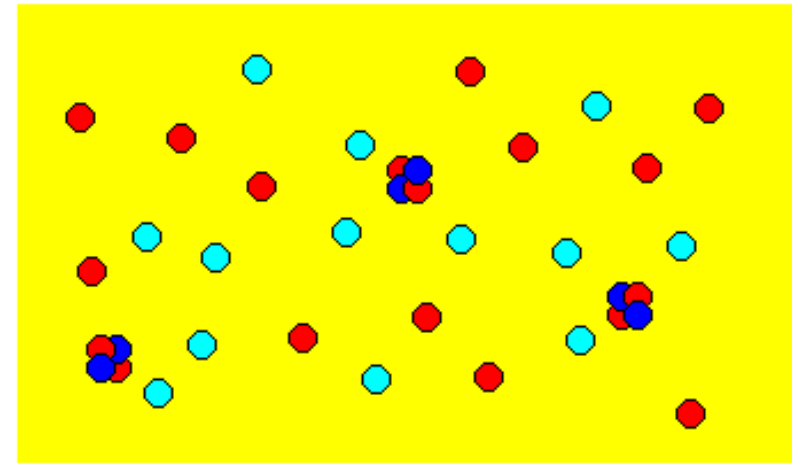


COBE

Gemeten temperatuur van de
 microgolf achtergrondstraling:
 2.735K toont:
 Heelal is sinds recombinitie (380 000
 jr na Oerknal) factor 1100
 (=3000/2.735) uitgezet.

Bewijzen voor hete Oerknal als begin van heelal

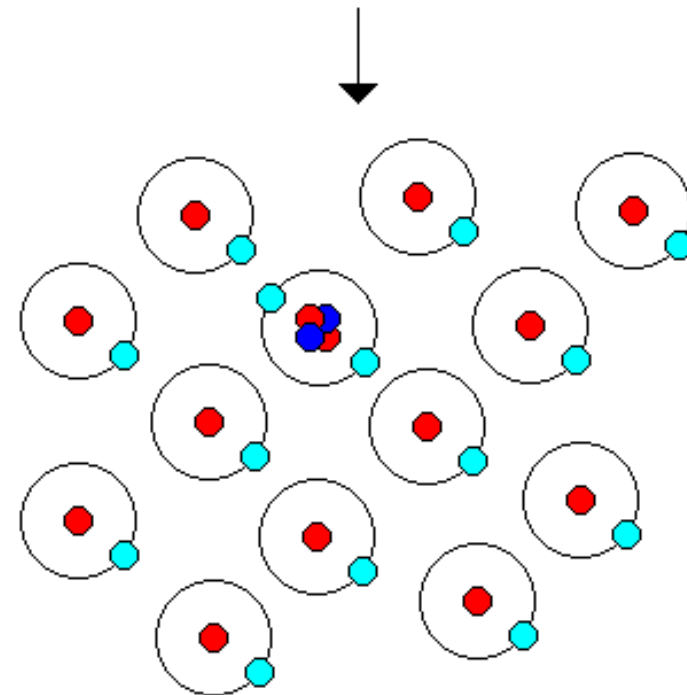
1. Uitdijng van het heelal
2. Microgolf achtergrondstraling van Oerknal, ontdekt in 1964: dateert van 380 000 jaar na begin, toen werd heelal doorzichtig: temperatuur 3000 Kelvin
3. Heelal is met 72% H + 28% Helium begonnen (na de eerste 3 minuten); (thans ~ 70% H, 28% He en 2% zwaardere elementen).



electron

proton

helium nuc



hydrogen

helium at

Bijzondere ontdekkingen van de laatste decennia:

- Donkere Materie en Donkere Energie: Heelal is Vlak
($\Omega = 1.0000\dots$ = verhouding tussen de dichtheid en “critische dichtheid”).

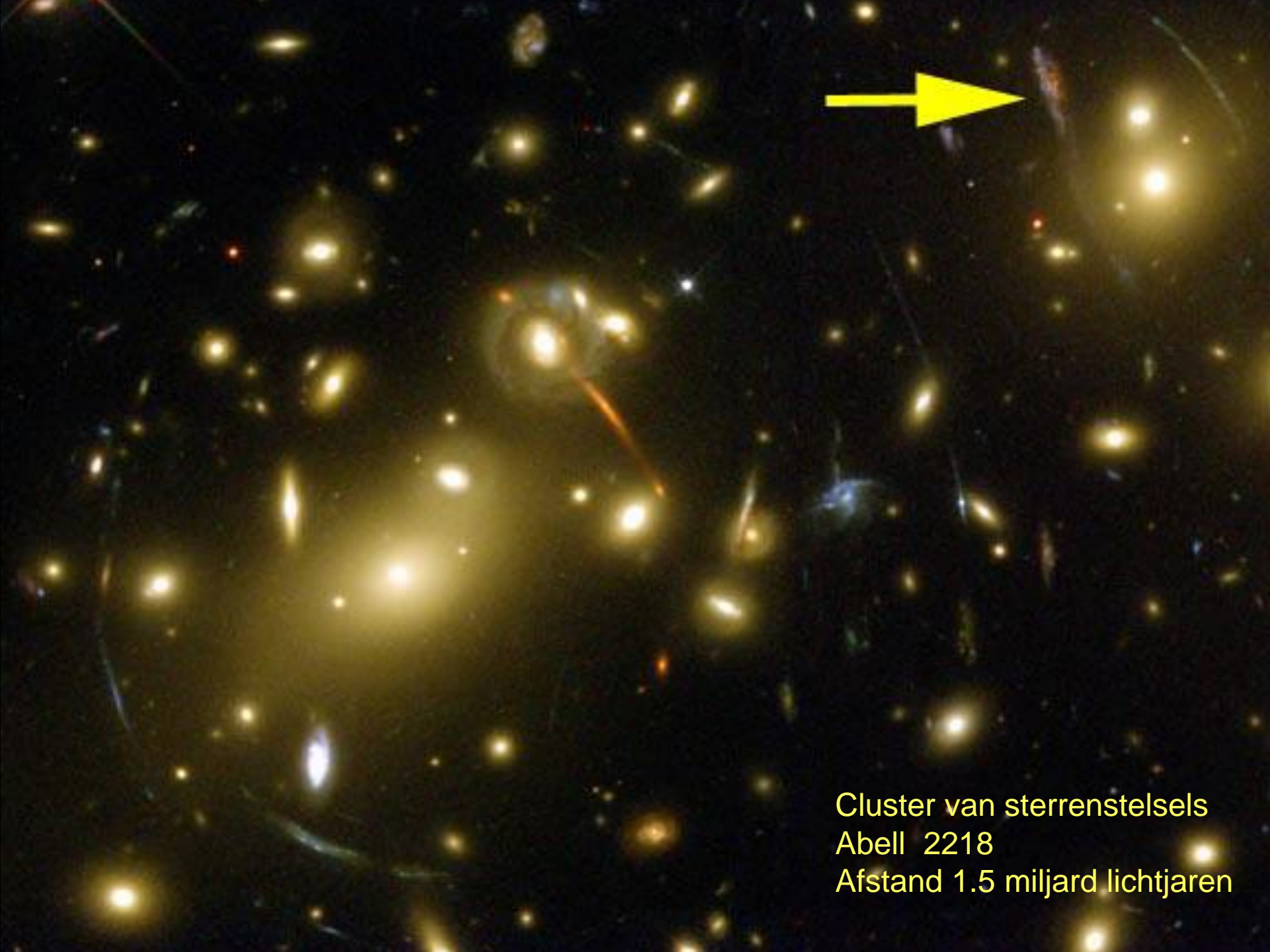
$\Omega = 1$ betekent: totale energie van heelal is NUL.

[“critische dichtheid” zit op de grens tussen een “instortend” (totale energie kleiner dan nul) en een “eeuwig uitdijend” heelal (energie groter dan nul)]

Bestaan van veel extra materie met zwaartekracht blijkt onder meer uit zwaartekrachts-lenswerking in sterrenstelsels en clusters van sterrenstelsels:

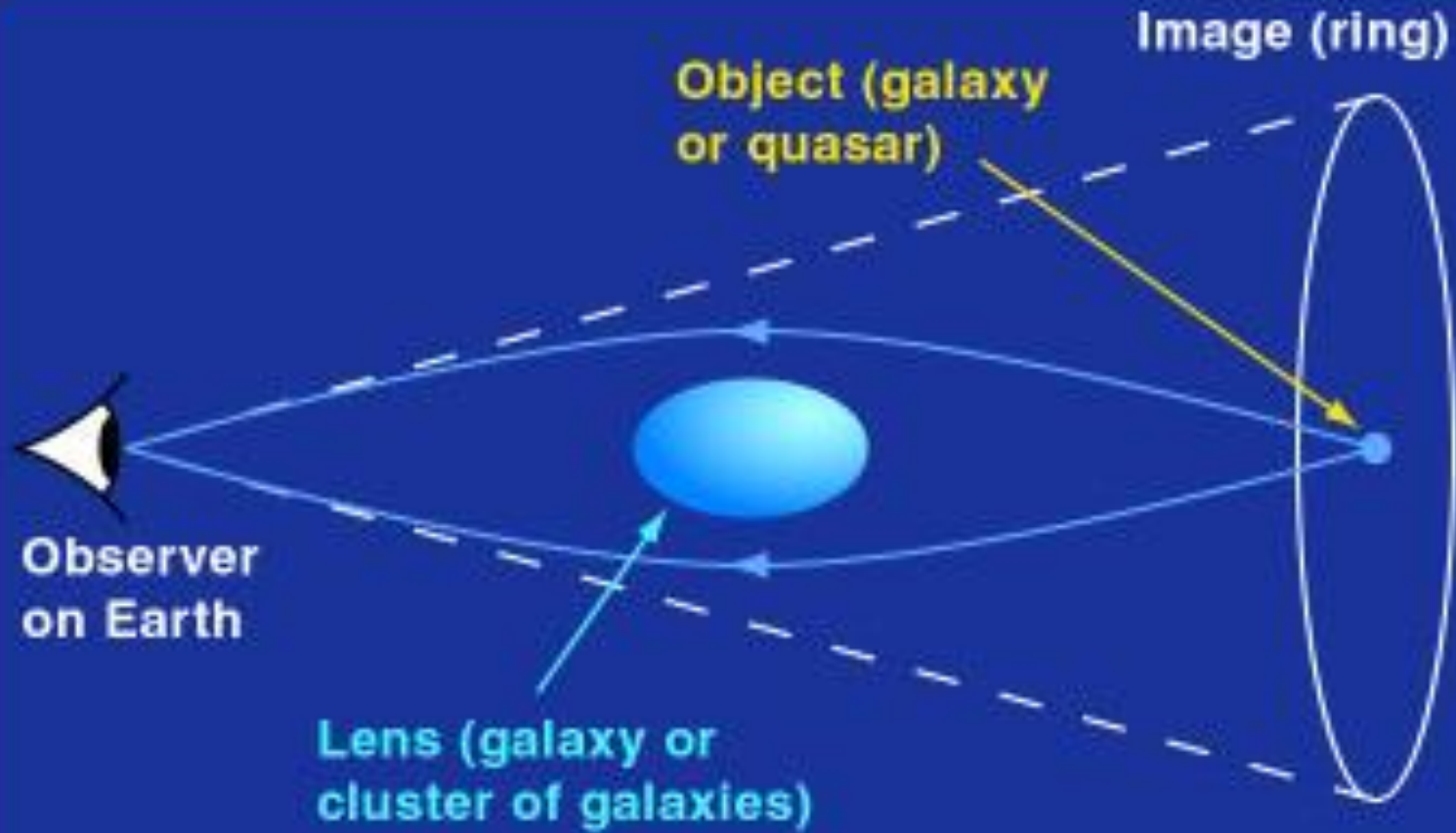
DONKERE MATERIE

(6 maal zoveel als “gewone” materie die uit atomen en moleculen bestaat)



Cluster van sterrenstelsels
Abell 2218
Afstand 1.5 miljard lichtjaren

Het tot stand komen van een “Einstein Ring”



Cluster Abell 1689, Gravitational Lense (HST).

“Einstein-ringen tonen dat er in de clusters ca 6 maal meer “donkere materie”, met zwaartekracht is, dan “gewone” materie van sterren en gas die uit atomen bestaan.



Donkere Energie

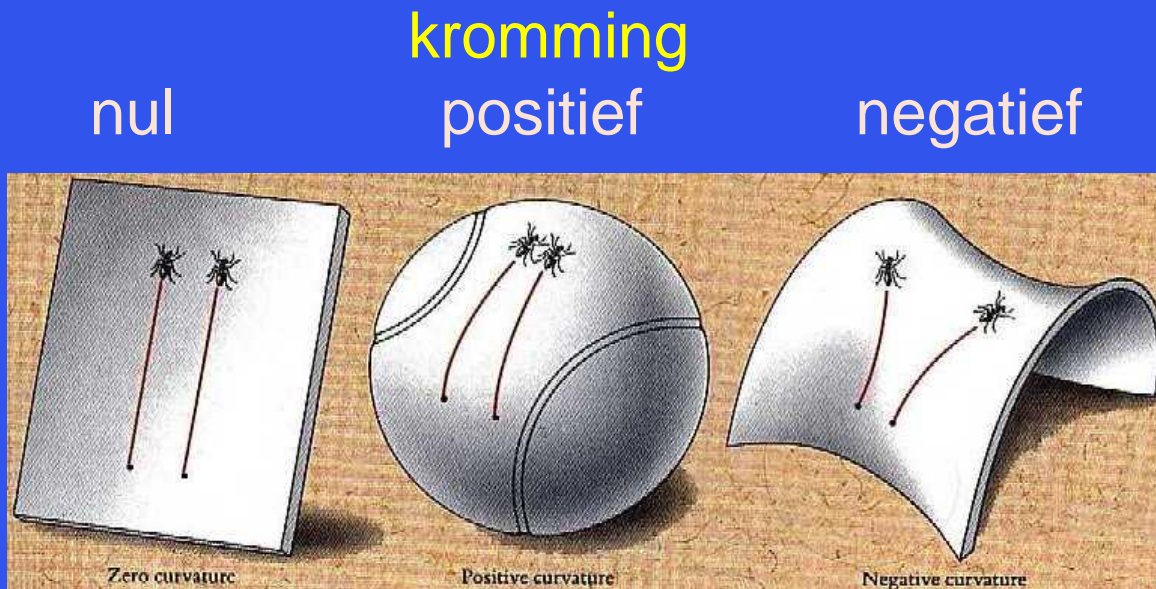
**bestaan hiervan blijkt uit helderheid van
verre Supernovae van Type Ia**

Dit toont: uitdijing van heelal versnelt.

**Hierin zit ongeveer 70% van alle energie
van het heelal**

Zichtbare en onzichtbare ingrediënten van ons vreemde heelal

96 % onbekend!



Λ groter dan 0



Heelal is Vlak (kromming nul) : $\Omega = 1.000$
dus totale energie NUL: “*The best free lunch*”

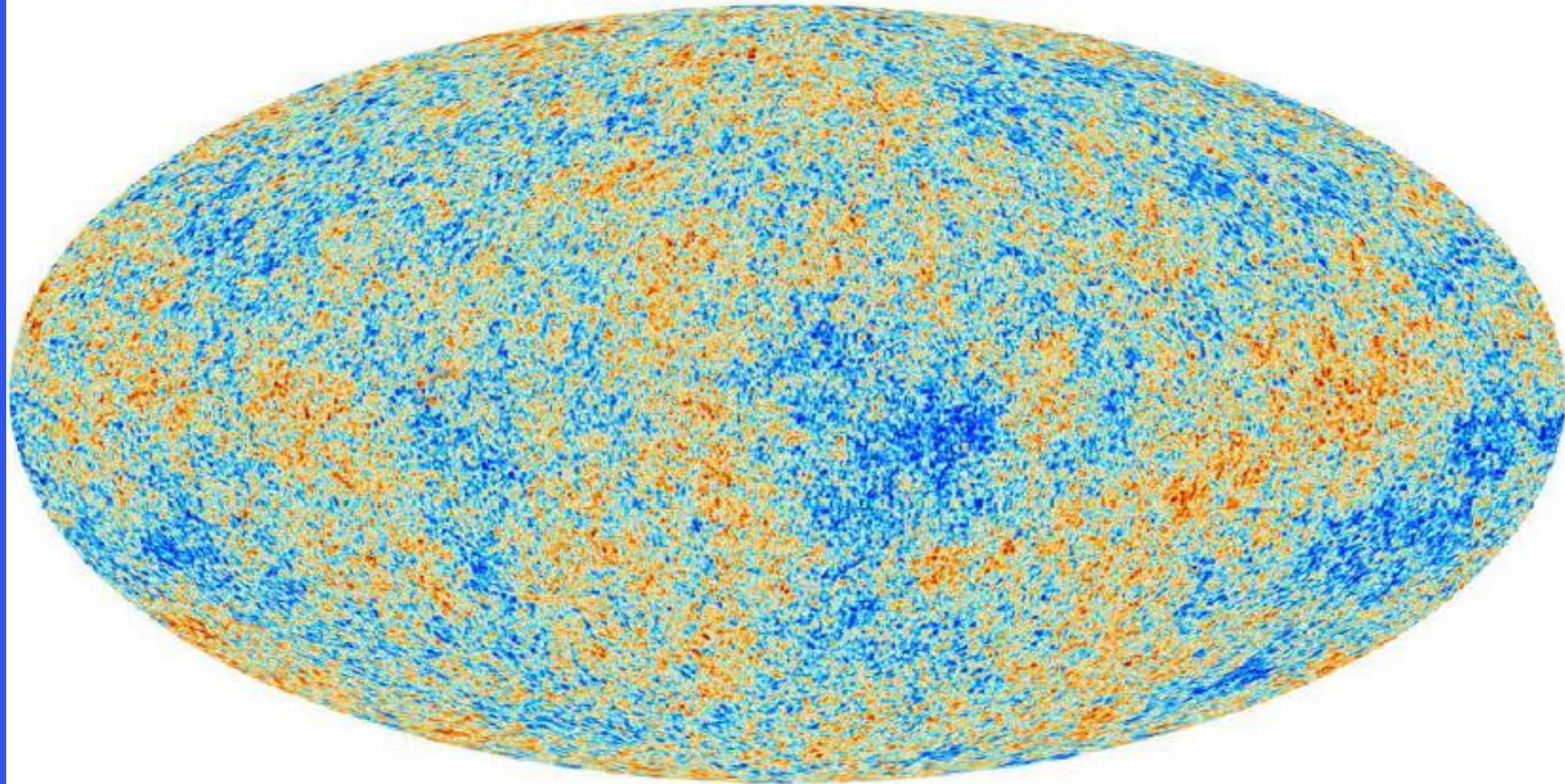
Het Lambda Cold Dark Matter model: aangeduid als Λ CDM, blijkt ook te kloppen met de verdeling van de afmetingen van de (zeer Kleine) rimpeltjes in de Kosmische Microgolf achtergrondstraling van de Oerknal.

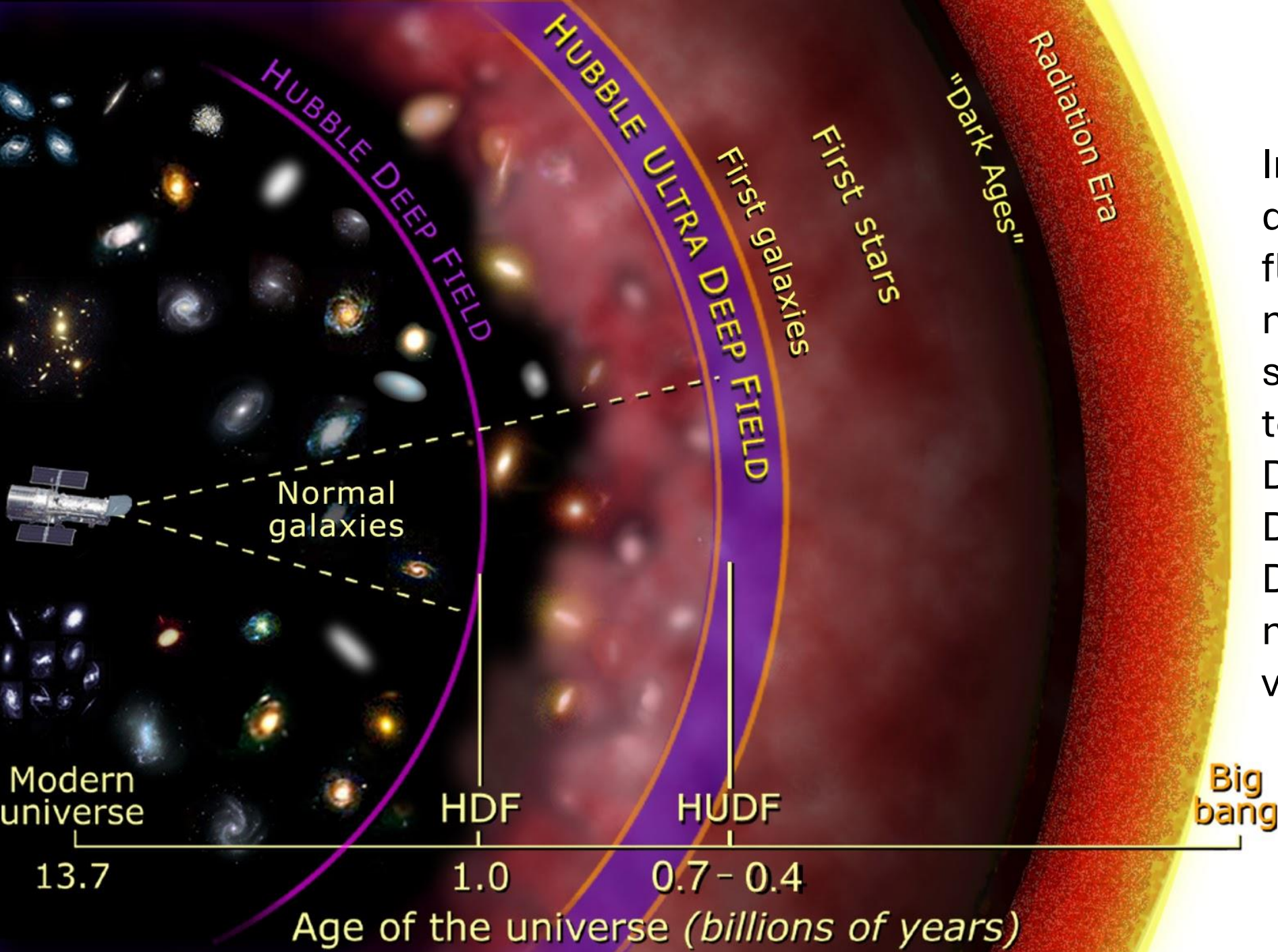
Planck hemelkaart 2013 (ESA 2009-13)

Temperatuurs- /dichtheidsfluctuaties in de kosmische microgolf-achtergrondstraling

Temperatuurs-
variaties over
Hemel:
minder dan
0.0001 Kelvin

Gevolg van
dichtheids-
variaties in
tijd lang voor
Recombinatie
(doorzichtig
worden)





In de Dark Ages groeiden de Kleine dichtheidsfluctuaties die in de microgolf achtergrondstraling te zien zijn, uit tot grote dichtheden. Dit gebeurde voor de Donkere Materie. De "gewone" atomaire materie viel in die "kuilen van Donkere Materie.

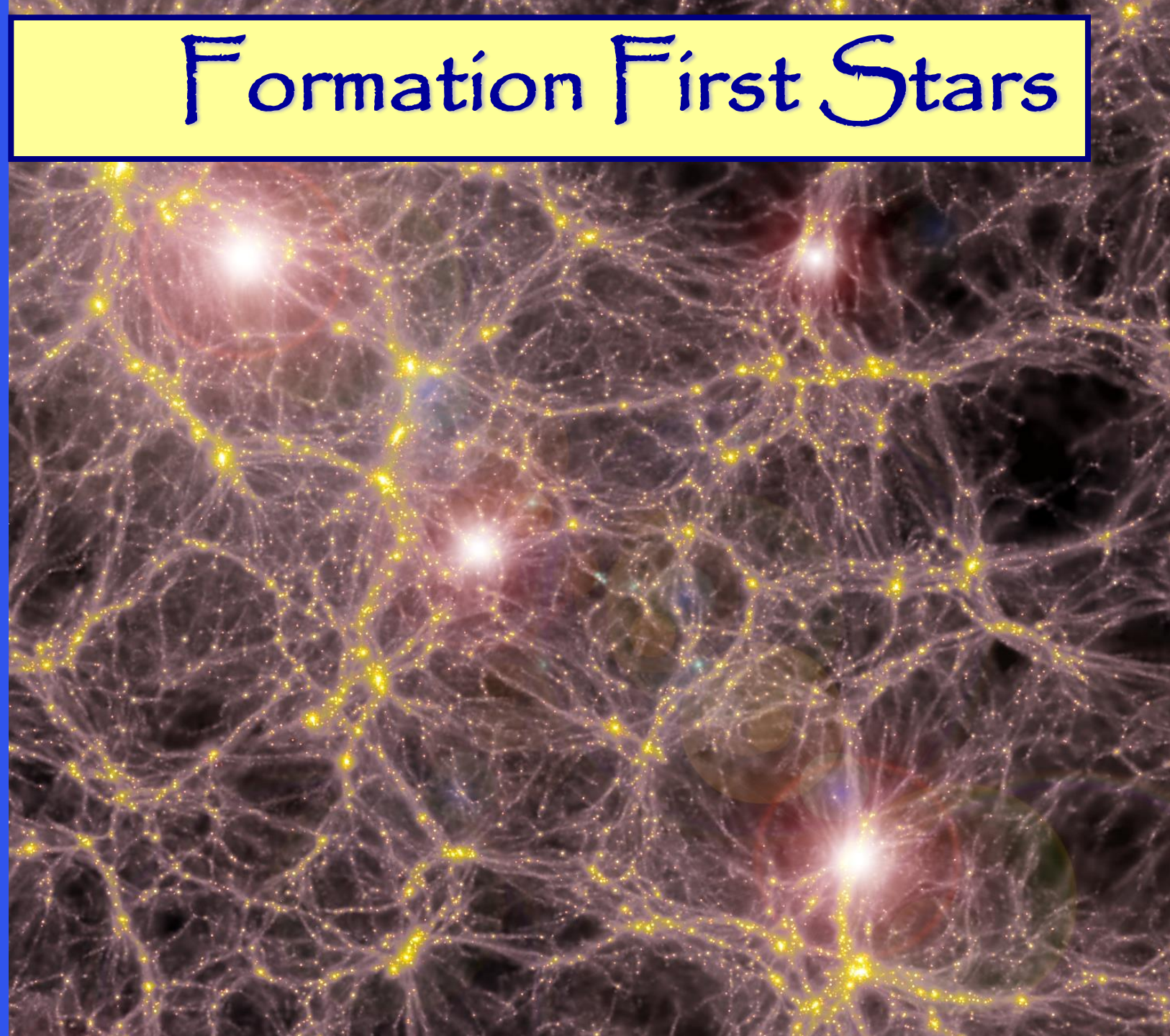
Formation First Stars

In computer simulaties van de zwaartekrachts werking op de Donkere Materie in het vroege uitdijende heelal:

Donkere materie trekt samen in een “web-achtige” structuur: de materie concentreert zich op de oppervlakken van een zeepbel-achtige structuur: “Het Cosmic Web”

De “gewone” baryonische materie (atomen) valt in die “valleien” van Donkere Materie

Simulation: V. Bromm et al.

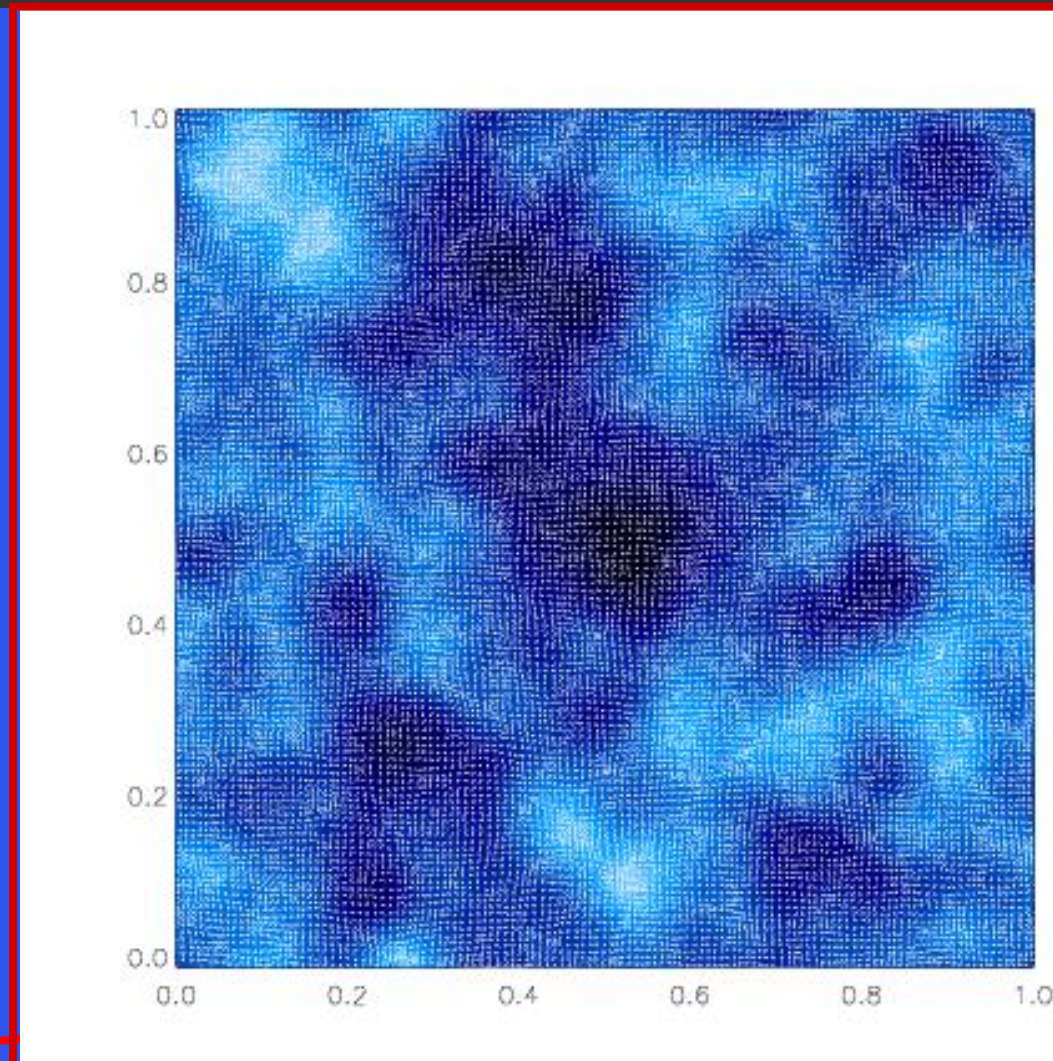


Void Formation (computer simulatie, incl. Dark Matt. + Dark E_n.)

De simulaties gaan uit van het Λ CDM-model: een uitdijend vroeg heelal met Λ (donkere energie) en Cold Dark Matter (CDM).

Cold betekent: deeltjes DM die slechts langzaam bewegen, in vergelijking met de uitdijing van heelal.

Dit patroon krijg je nooit zonder Dark Matter



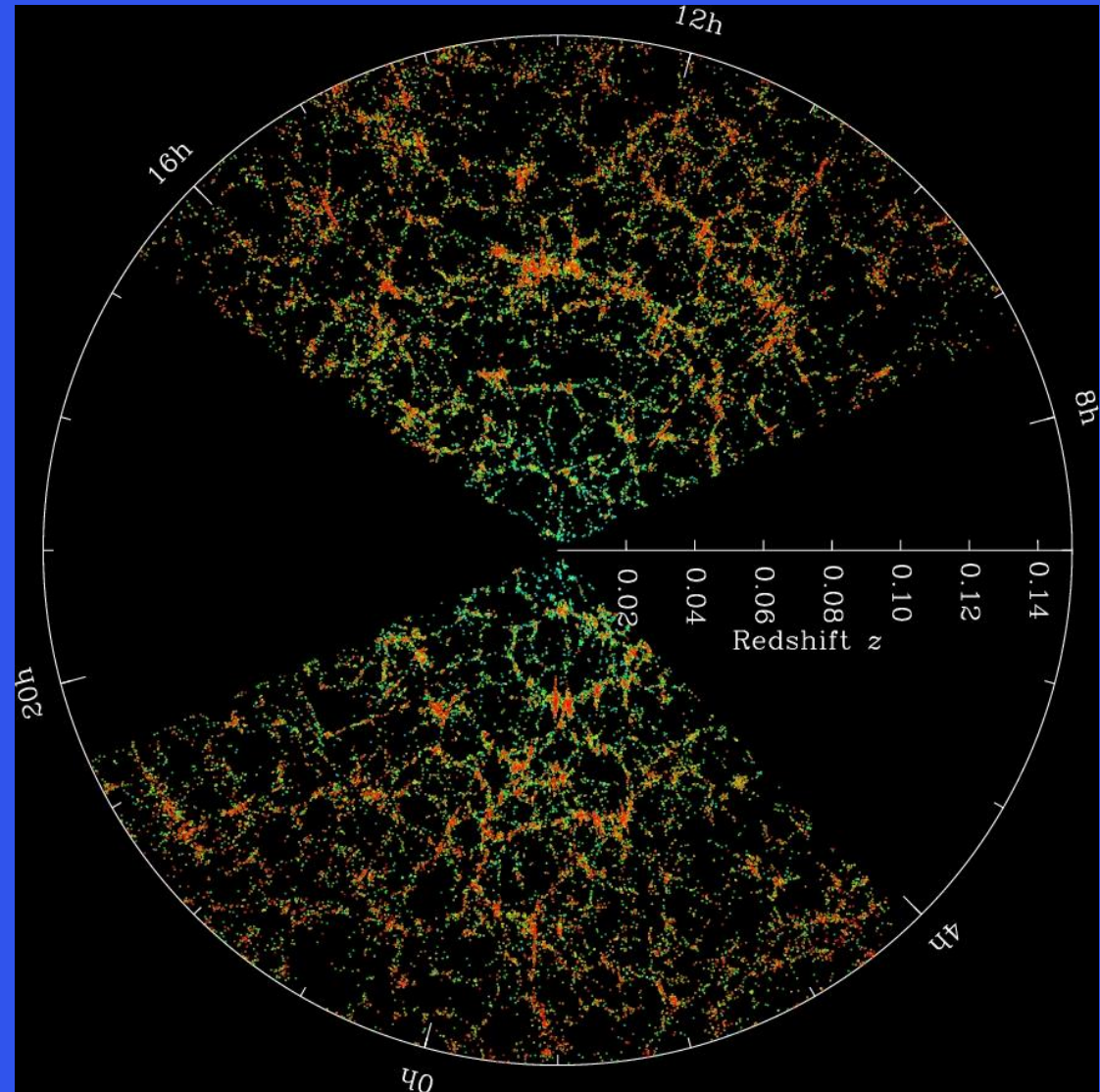
$z = 20.0$



50 Mpc/h

Onafhankelijke bevestiging van het bestaan van Donkere Materie en Donkere Energie:

Sloane Digital Sky survey
van 930 000 sterrenselsels
in de ruimte: heeft een
“schuim” structuur:
De stelsels bevinden zich
op zeepbel-achtige opper-
vlakken rond “leegten”
(VOIDs)



Nieuws van James Webb

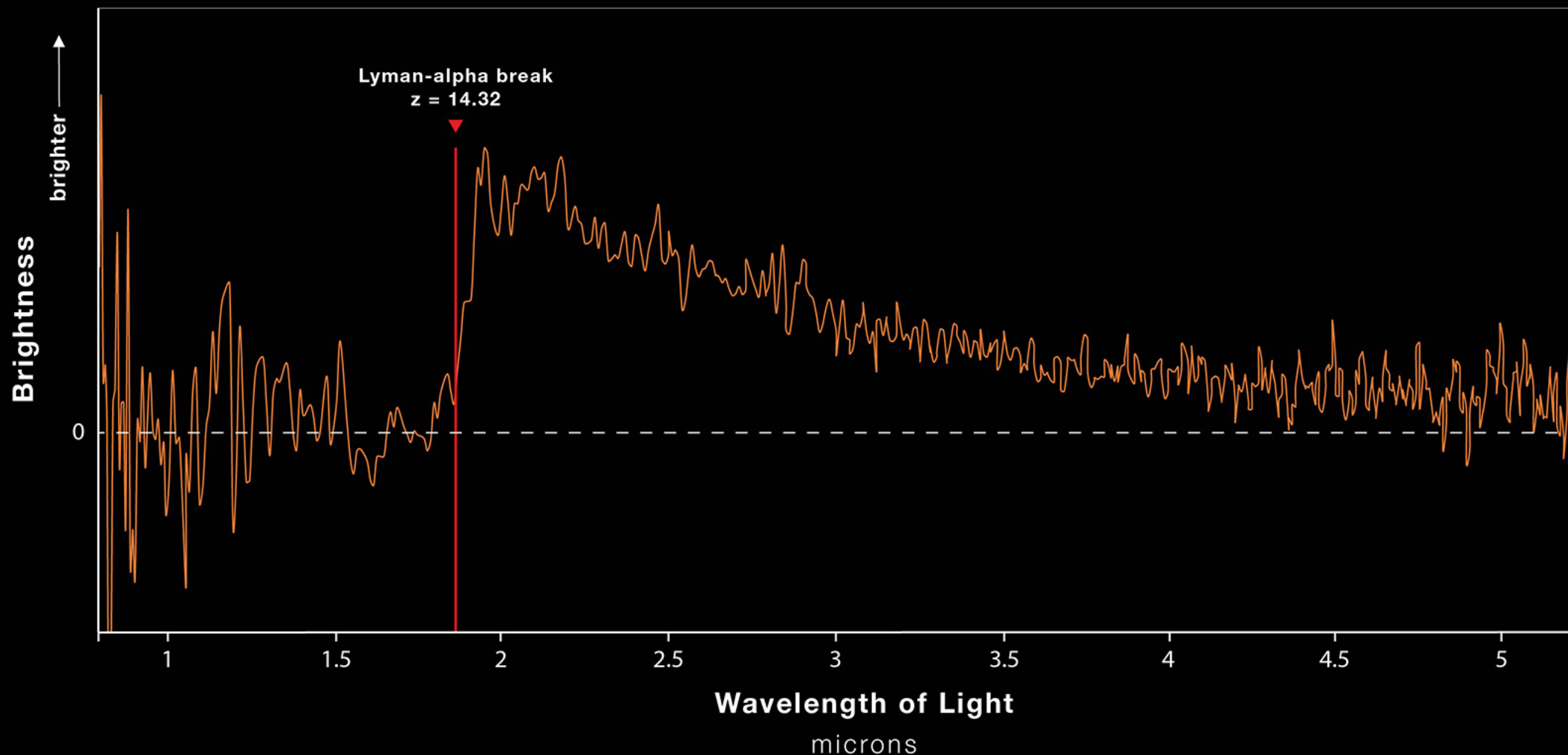
James Webb vond een zeer
vroeg Sterrenstelsel:
Roodverschuiving 14.32



GALAXY JADES-GS-Z14-0

GALAXY EXISTED 300 MILLION YEARS AFTER BIG BANG

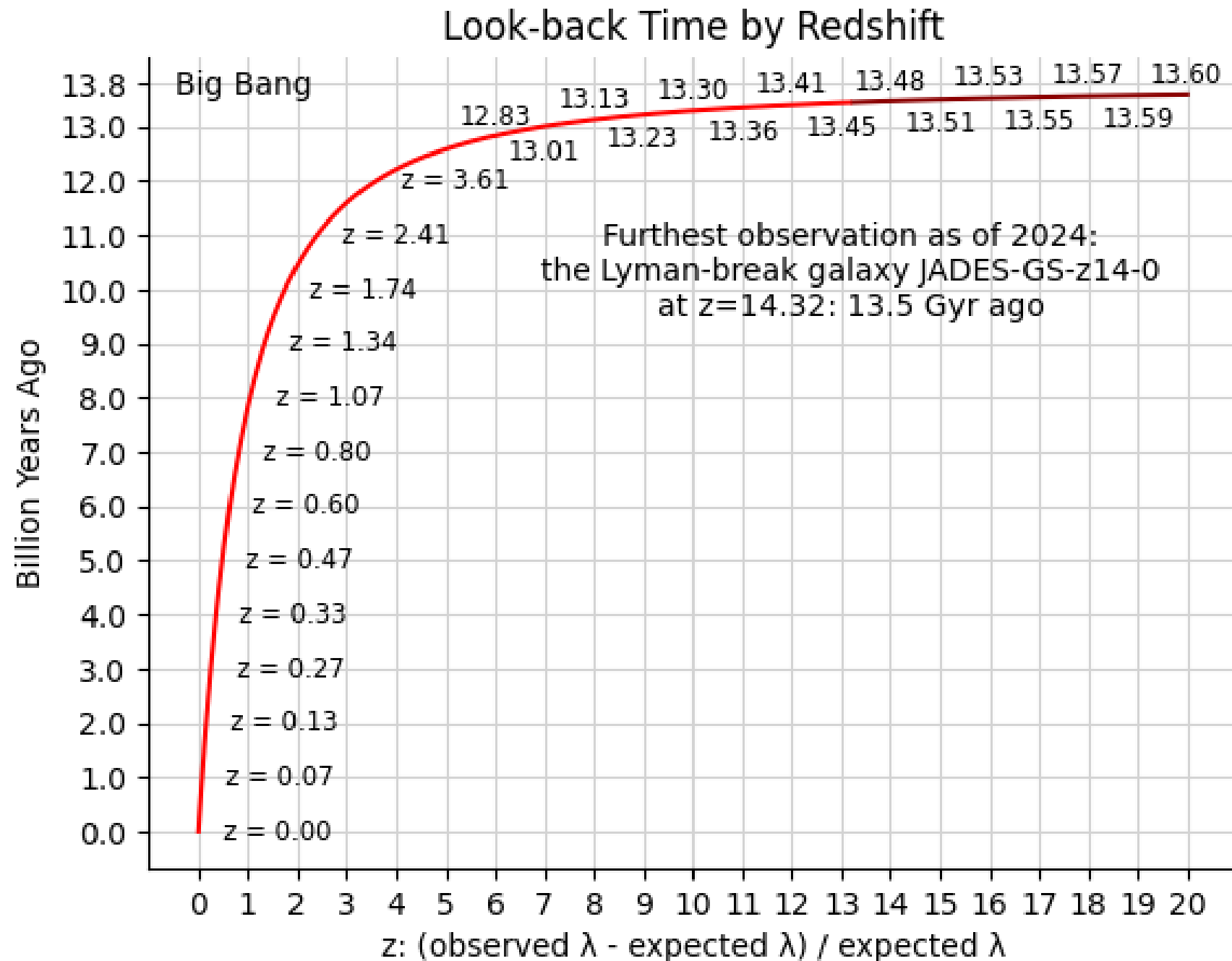
NIRSpec Microshutter Array Spectroscopy



Roodverschuiving z versus leeftijd (= Terugkijktijd) voor Λ CDM Model.

Bijvoorbeeld: bij $z=20$ was heelal 200 miljoen jaar oud. Bij $z=15$: 290 miljoen jr. bij $z=12$, 390 miljoen jaar, bij $z=10$: 500 miljoen jr., etc.

Bij 300 miljoen jaar was er al het Lyman-break galaxy JADES-5G- $z=14-0$



Vorming van de eerste sterren

Populatie III

De Allereerste Sterren:

Populatie III:

bestaan alleen uit H en He

In de Melkweg en andere sterrenstelsels:

Populatie I:

Sterren in de Melkwegschijf:

jonger dan 10 miljard jaar.

Bevatten relatief veel zwaardere elementen (ca 2 % van de massa)

Bijv. Zon en de jonge zware O en B sterren

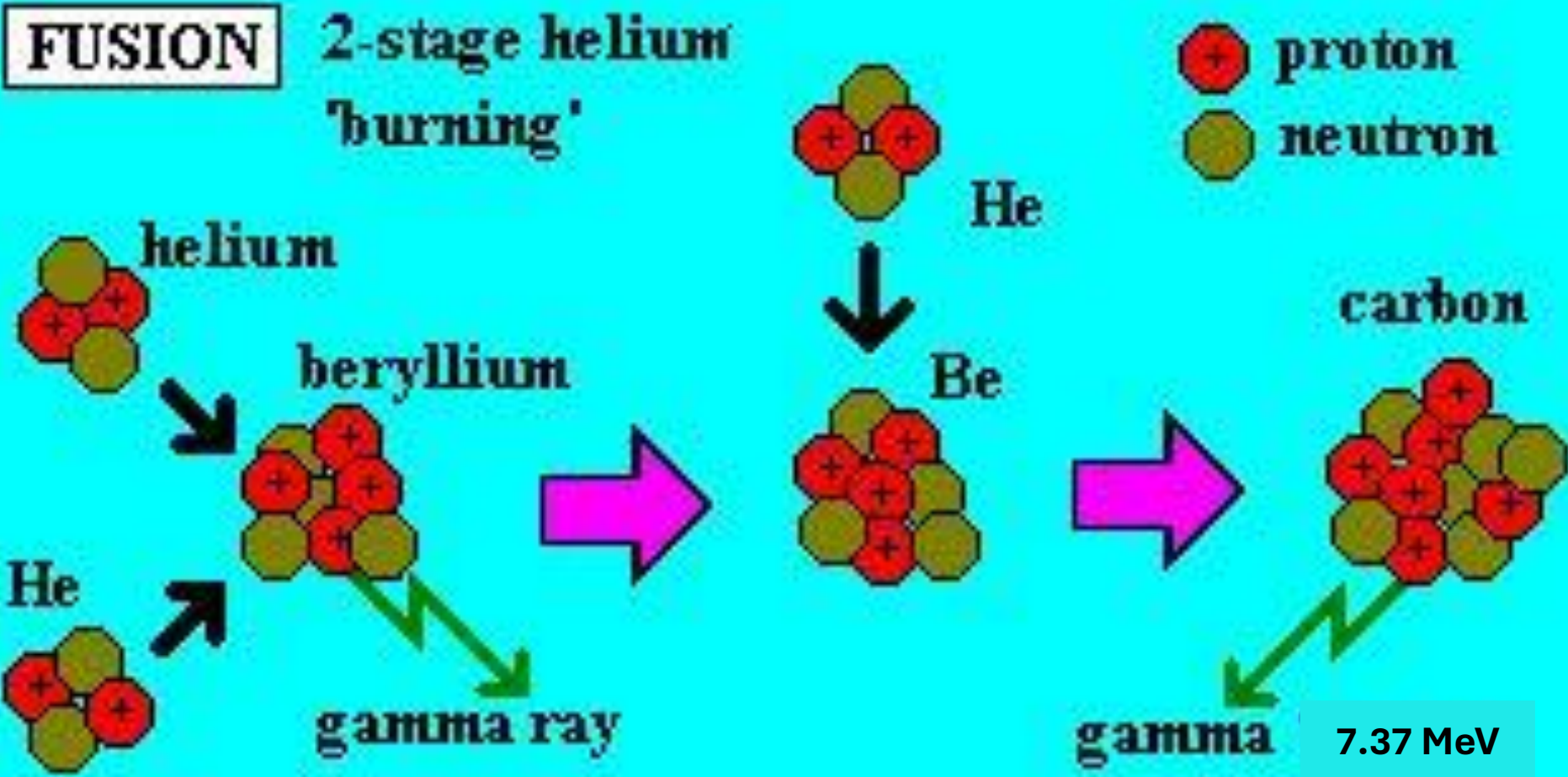
Populatie II:

Sterren in de bolvormige halo rond de Melkwegschijf. Voorbeeld: bolvormige sterrenhopen, Z (zware elementen) tussen 0.001% en 0.5 %. Ouder dan 10 miljard jr.



Then came a spark. Tiny fluctuations in matter caused the first clouds of gas to collapse under gravity, igniting nuclear fusion. These were the first stars, known as **Population III stars**—cosmic giants born in a universe untouched by heavier elements.

Waar komen de elementen
zwaarder dan helium vandaan:
kernfusie binnen sterren



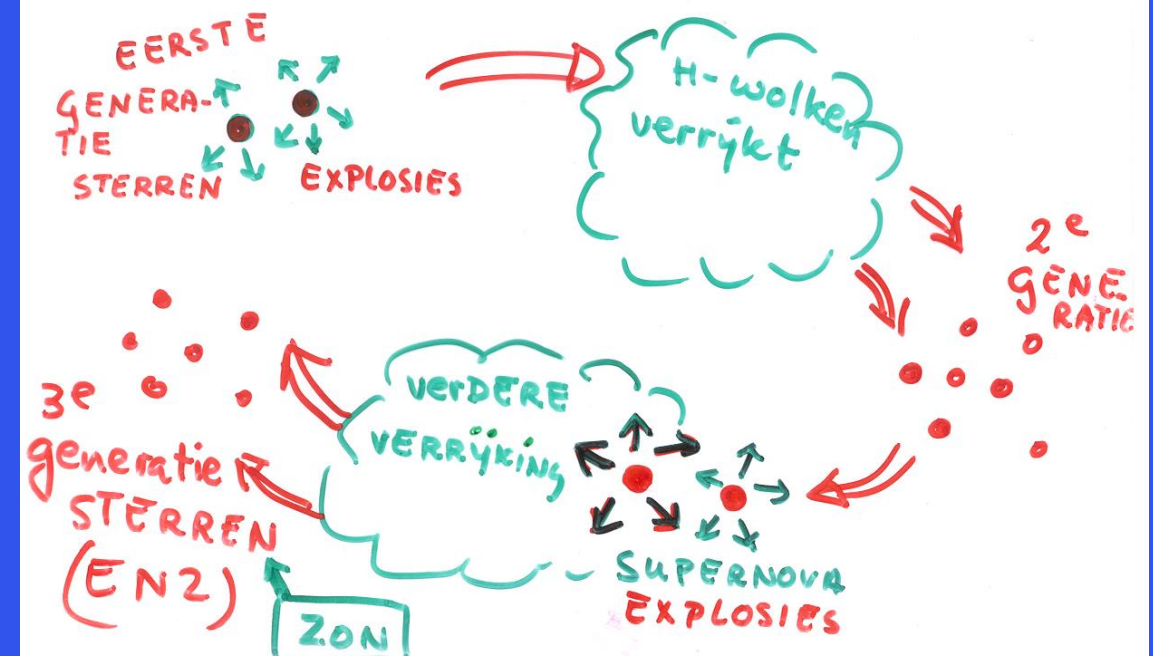
In Helium-kern van Rode Reuzensterren:

Helium fusie gebeurt by $T \sim 100$ miljoen K en produceert C. Bij iets hogere T fuseert C verder met He tot O

- H (WATERSTOF) en He (Helium) GEVORMD IN BIG BANG
- ELEMENTEN ZWAARDER, DAN He GEVORMD DOOR KERNFUSIE IN STERREN



- ELEMENTEN VOORBY YZER ONTSTAAN IN SUPERNOVA EXPLOSIES (neutron-vangst)

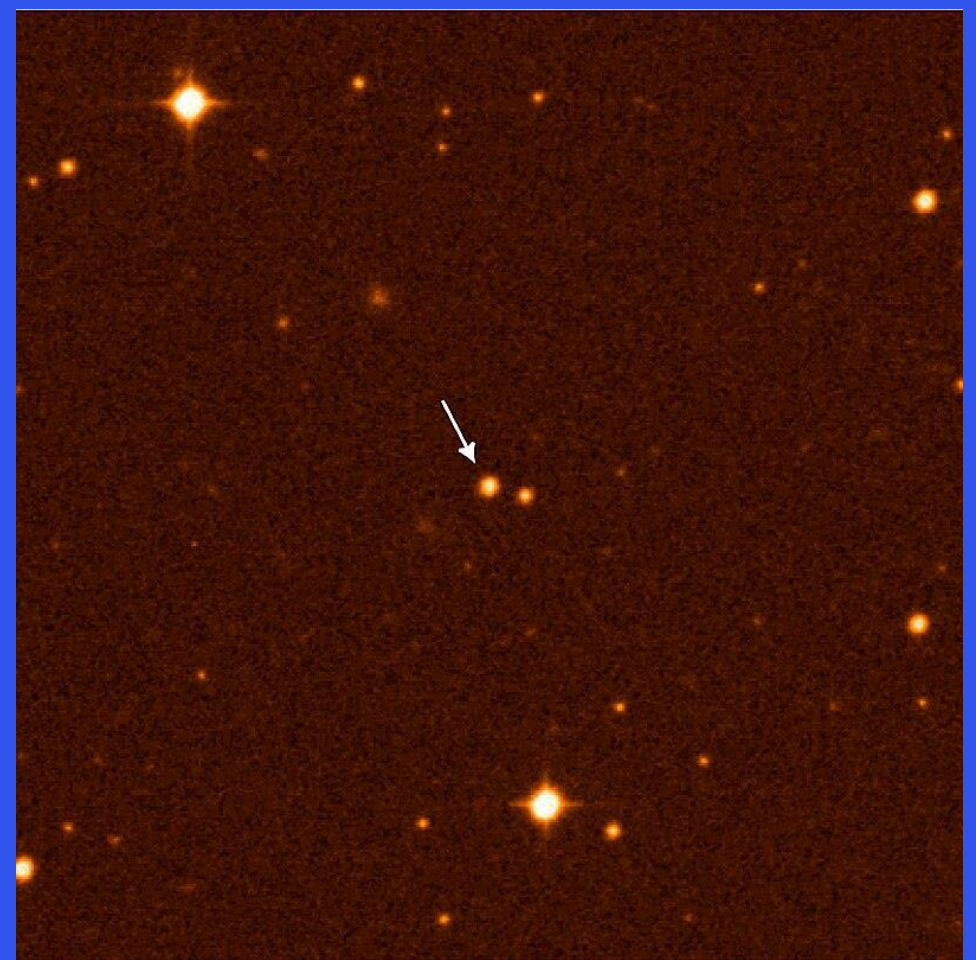


Populatie III heeft alleen zware sterren gevormd

Bewijs: Het tegenwoordig ontbreken van lichte sterren die helemaal geen elementen zwaarder dan helium bevatten:

Sterren met massa's kleiner dan 0.9 zonsmassa's leven langer dan leeftijd van heelal (13.8 miljard jaar). Als in Populatie III zich ook sterren van lage massa (0.1 – 0.9 maal de zon) gevormd hadden, zou men tegenwoordig nog zulke compleet “metaalarme” sterren moeten aantreffen. Deze zijn nooit gevonden.

Kennelijk zijn er in Pop III nooit lichte sterren gevormd!



De ultra-metaal-arme ster HE0107-5240, $Z = (1/160\,000) \times Z(\text{zon})$ op afstand 36 000 lj; er zijn twee nog iets Z-armere sterren gevonden in de halo van het Melkwegstelsel

Problemen met betrekking tot de vorming van de eerste sterren:

Na de recombinitie (380 000 jaar na Big Bang) bestaat de materie in heelal uit atomen Neutrale Waterstof en Helium.

Voor stervorming in waterstofwolken is echter nodig dat een deel van de atomen is omgezet in waterstof-moleculen: H_2

Nodig omdat bij samentrekken van gaswolk door zwaartekracht, wolk heter wordt door vrijkomen van zwaartekrachts energie. Door de warmte loopt gasdruk op: werkt samentrekking tegen. Om samentrekking niet te stoppen, moet gas kunnen afkoelen.

Kan alleen als het de geproduceerde warmte kan uitstralen. Bij atomaire Waterstof lukt dat als $T > 10\,000\text{ K}$ (aanslag eerste energieniveau boven grondniveau: UV Lyman-alpha lijn). Voordat $10\,000\text{ K}$ bereikt is, is echter samentrekking al gestopt. Om samentrekking niet te stoppen bij lagere T (tot ca 1000 K) is H_2 nodig, die via aanslag van moleculaire energieniveaux straalt in het infrarood.

In waterstofwolken in het Melkwegstelsel is ca 10% van de waterstof H₂; de Moleculen vormen zich op het oppervlak van interstellaire stofdeeltjes.

Voordat de eerste sterren zich vormden, waren er geen elementen zwaarder dan Helium en kon zich geen stof vormen.

Een manier om dan H₂ te vormen : $H + e \rightarrow H^-$, $H^- + H \rightarrow H_2^-$, $H_2^- \rightarrow H_2 + e$.

Het kan ook via een vrij proton + H

Beide manieren vereisen enige ionisatie van de neutrale waterstof.

Dat gebeurt als gevolg van zeldzame energierijke botsingen tussen waterstofatomen. Zo ontstaat bij roodverschuiving $z=20$ a 30 één electron op de 100 000 neutrale H-atomen, wat voldoende is voor (moeizame, langzame) koeling door H₂.

Star Formation Now

Modern galaxies are built from a panoply of ingredients such as carbon, oxygen and dust. These materials help gases to cool. Cool clouds have lower pressures. Lower pressure means a collapsing cloud of dust can contract until its core is extremely dense—dense enough to get the hydrogen in its center to undergo thermonuclear fusion. After fusion begins, the sudden burst of energy blows away the outermost layers of the collapsing cloud, leaving a relatively small star behind.

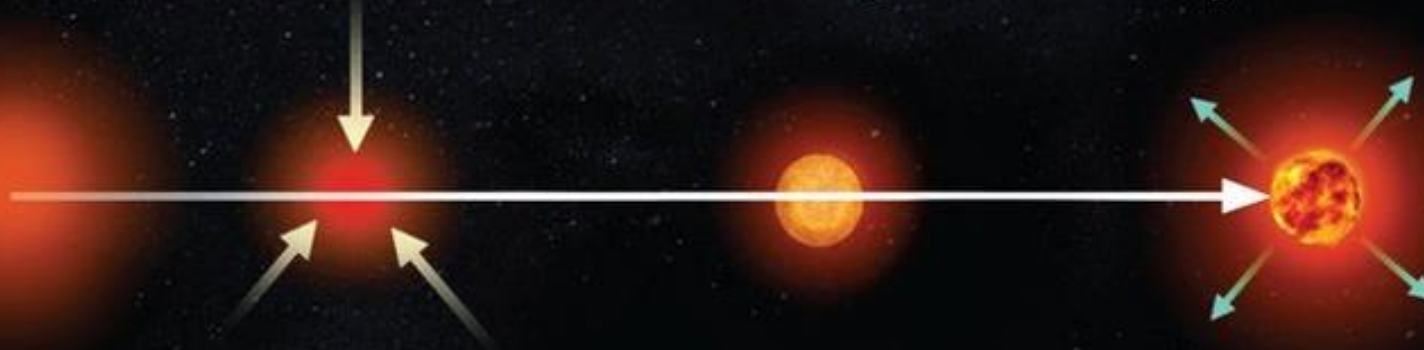
In gas in huidige Melkweg: Snelle contractie

Material accumulates

Gas contracts

Fusion begins

Outer layers are blown away



In vroege heelal:

Gas kan niet efficiënt koelen, dus inwendige druk blijft groot en vertraagt de samentrekking. Hierdoor kan de ster heel lang gas uit de omgeving aantrekken en vormen zich zware sterren

Material accumulates

Gas contracts

Material continues to accumulate

Fusion begins

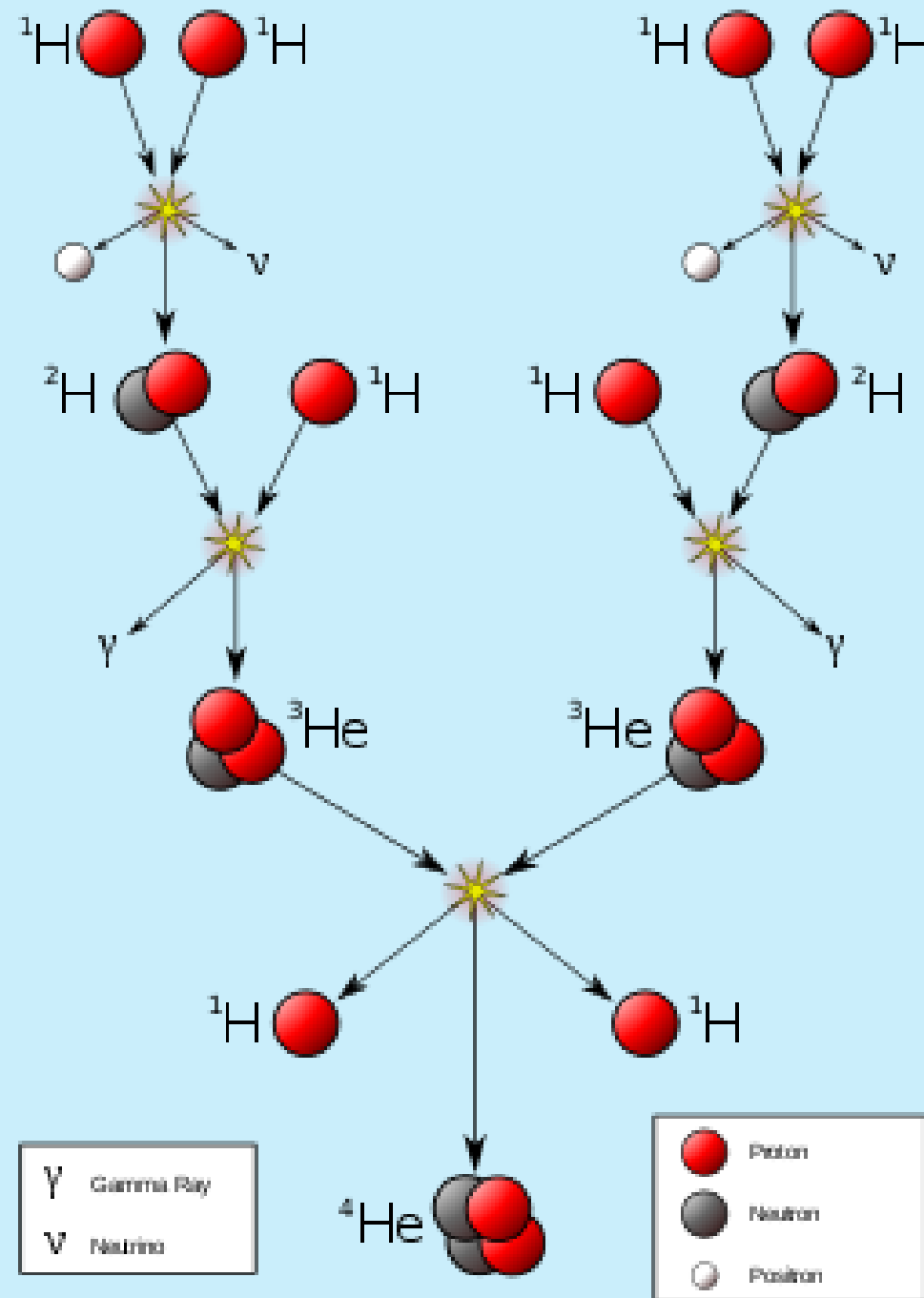


Waterstof fusie

Protonreeks

(George Gamow,
Edward Teller, C.F.
Von Weizsacker;
1939).

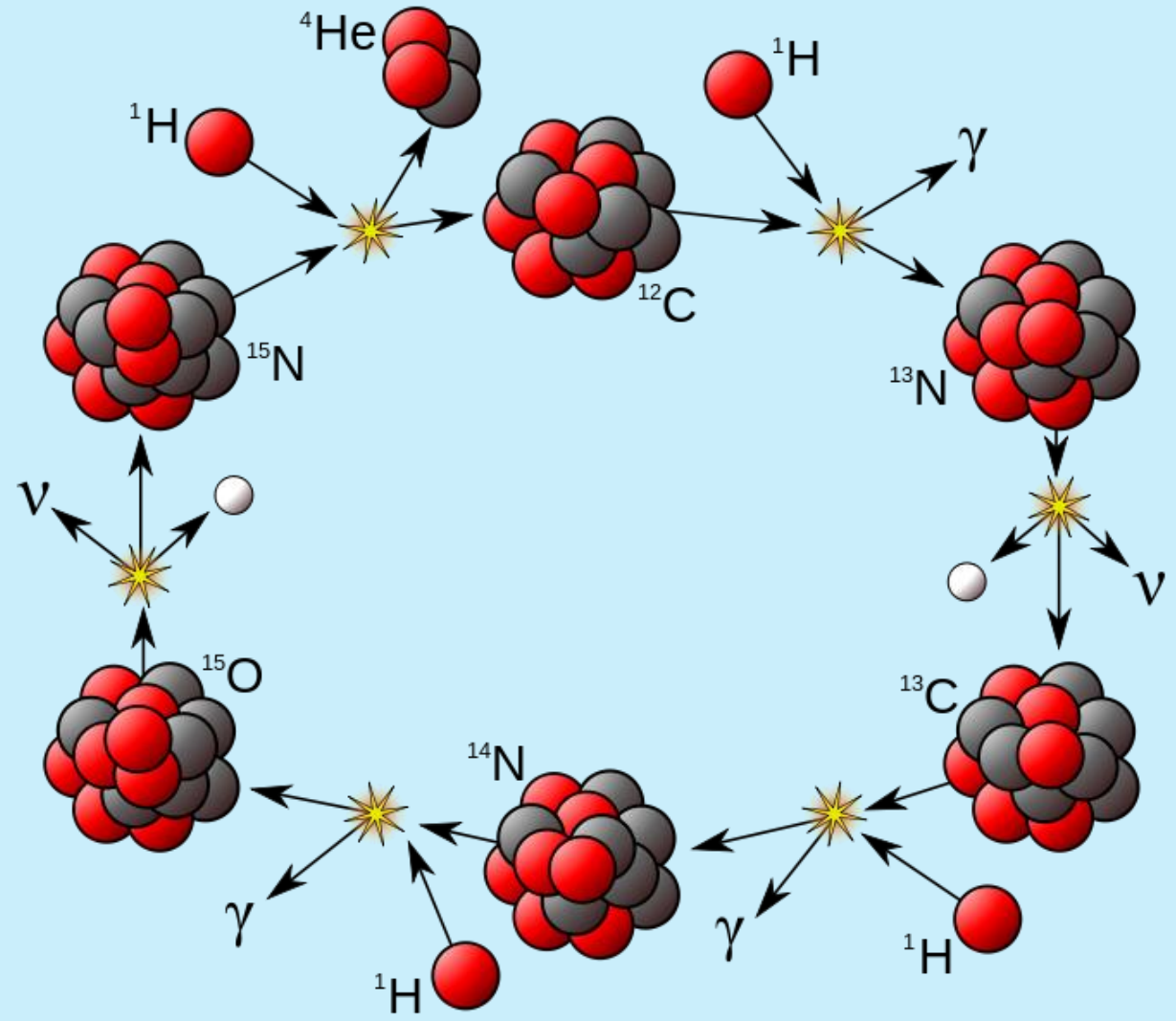
Bij centrale temperatuur
 $T_c = 10\text{-}20$ miljoen K.






Waterstof fusie

CNO cyclus
(Hans Bethe
1938, 1939;
Nobelprijs
1967)

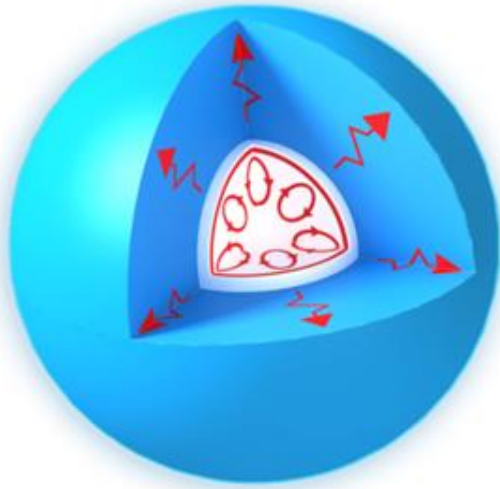
$T_c \sim 20 - 40$ miljoen K



	Proton	γ	Gamma Ray
	Neutron	ν	Neutrino
	Positron		

Heat Transfer of Stars

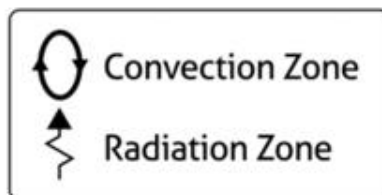
> 1.5 solar masses



0.5 - 1.5 solar masses



< 0.5 solar masses



Sterren > 1.5 zonsmassa fuseren H via CNO cyclus. Daar deze zeer T-afhankelijk is, is de fusiekern convectief. De ster-mantel is darentegen in rust (radiatief). Dit is precies andersom dan in de Zon.

In POP III sterren is er geen C, N, en O

Daarom kunnen deze zware sterren hun energie alleen opwekken door waterstoffusie via de Protonreeks.


Dit zijn dus heel vreemde zware sterren, zonder een convectieve kern met CNO-cyclus fusie, zoals de tegenwoordige zware sterren

Deze zware sterren van de eerste generatie, van tussen ~ 100 en misschien 1000 zonsmassa's, leefden heel kort:: enkele miljoenen jaren. Ze maakten C en O via helium fusie, en zwaardere elementen tot Fe via latere fusiereacties.

Daarna explodeerden ze als supernovae, waarbij ook de elementen voorbij ijzer gemaakt werden en mede geïnjecteerd in de interstellaire waterstofwolken.

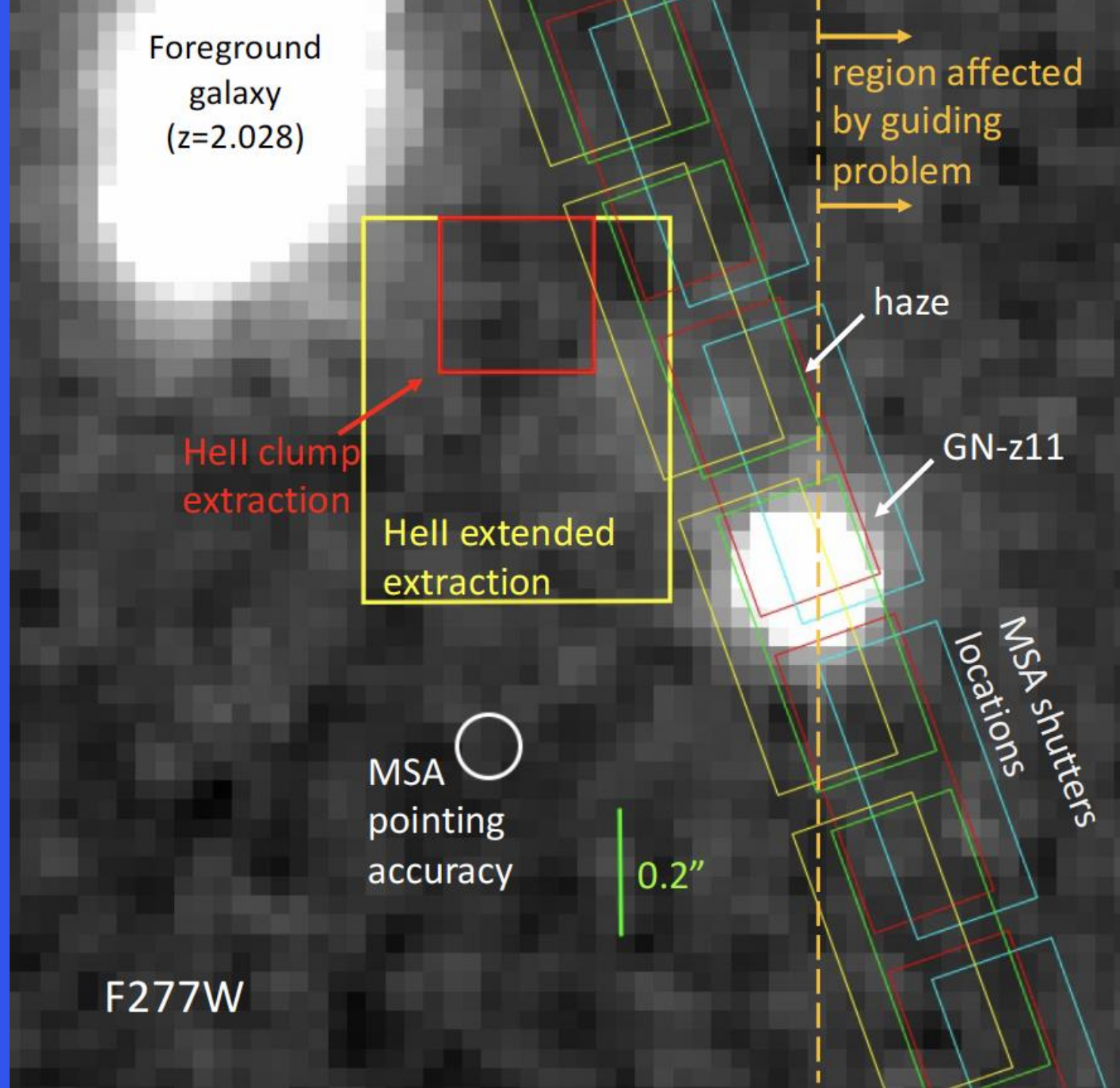
Deze explosies lieten zwarte gaten na, met massa's tussen 10 en en ca 100 zonsmassa's.

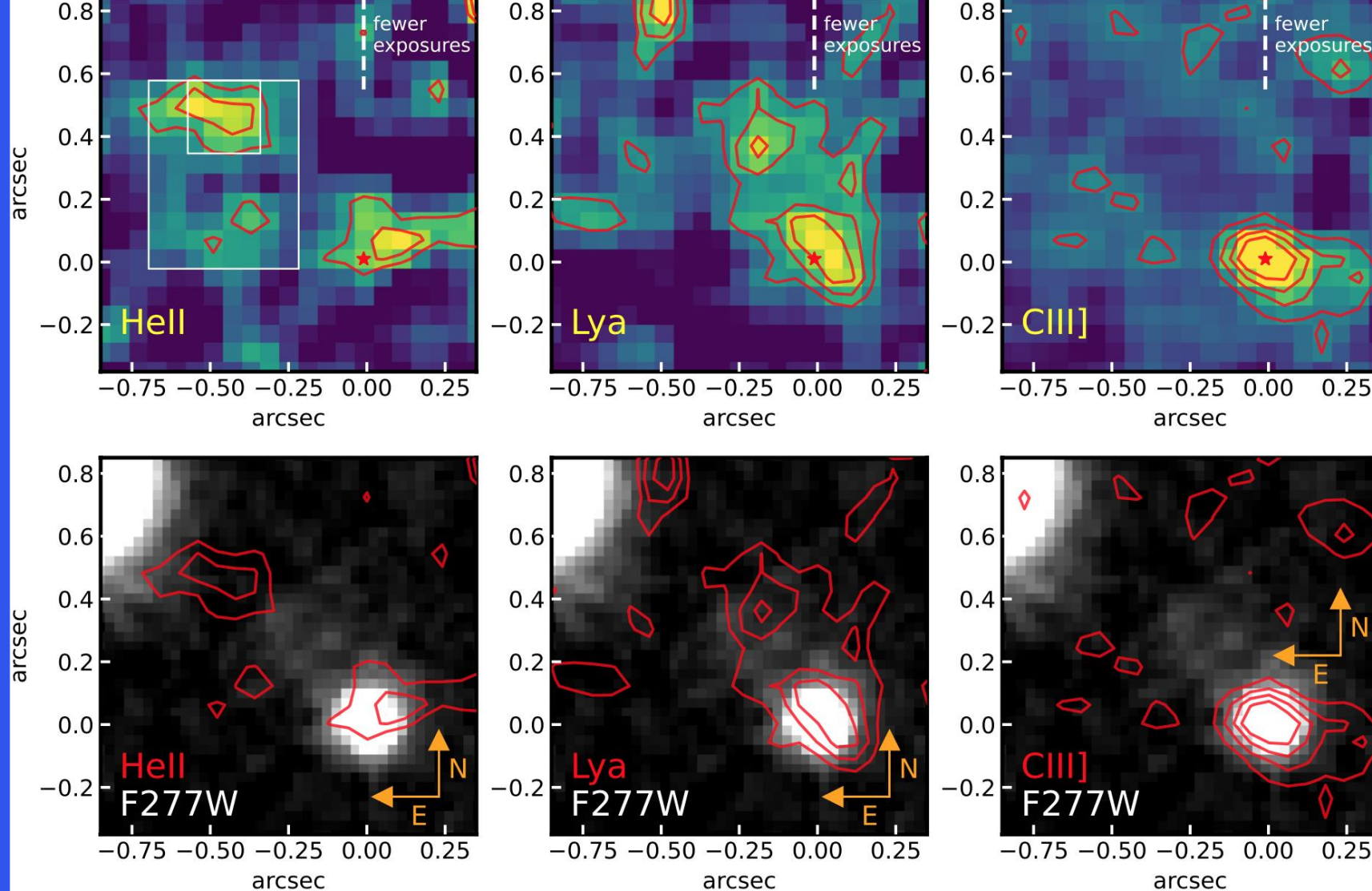
Aanwijzingen gevonden door JWST voor bestaan Pop III sterren



GN-z11

NIRCam opname James Webb van 1.7" gebied rond sterrenstrelsel GN-z11 met de zuivere He II clump (zonder zwaardere elementen) aangeduid. Die clump wordt naar alle waarschijnlijkheid geïoniseerd door de UV straling van ca 600 000 zonsmassa's aan PopIII sterren (Maiolino et al. 2024).





Galaxy GN-z11 He II 1640 line in clump of gas outside galaxy and C III 1902 on the galaxy He II is pristine, but the galaxy already has carbon. The He II ionization is suggested to be due to 600 000 M_{sun} in Pop III stars with total luminosity $7 \times 10^9 L_{\text{sun}}$. (Maiolino et al 2024) The galaxy also has a 2 million M_{sun} BH



IONIZATION: EFFECTS OF UV RADIATION FROM THE FIRST STARS

Eerste generatie sterren veroorzaken begin van de her-ionisatie van de neutrale waterstof
(In huidige heelal is waterstof in de intergalactische ruimte geheel geïoniseerd)



Plaatje van voor de komst van James Webb

Recombination
(380,000 years
after the big bang)

Early stars
(about 100 million years)

black holes at the centers of quasars?

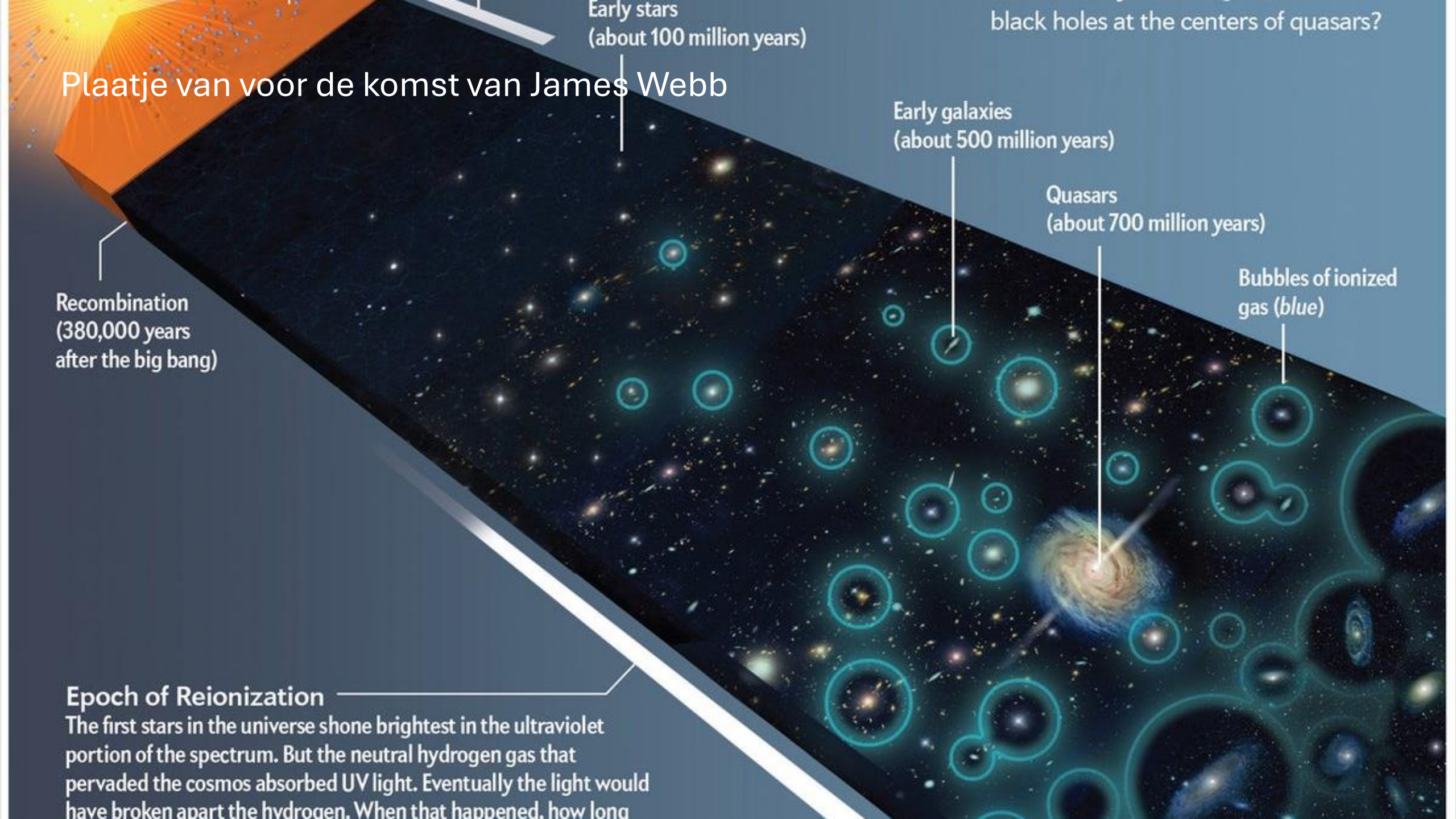
Early galaxies
(about 500 million years)

Quasars
(about 700 million years)

Bubbles of ionized
gas (blue)

Epoch of Reionization

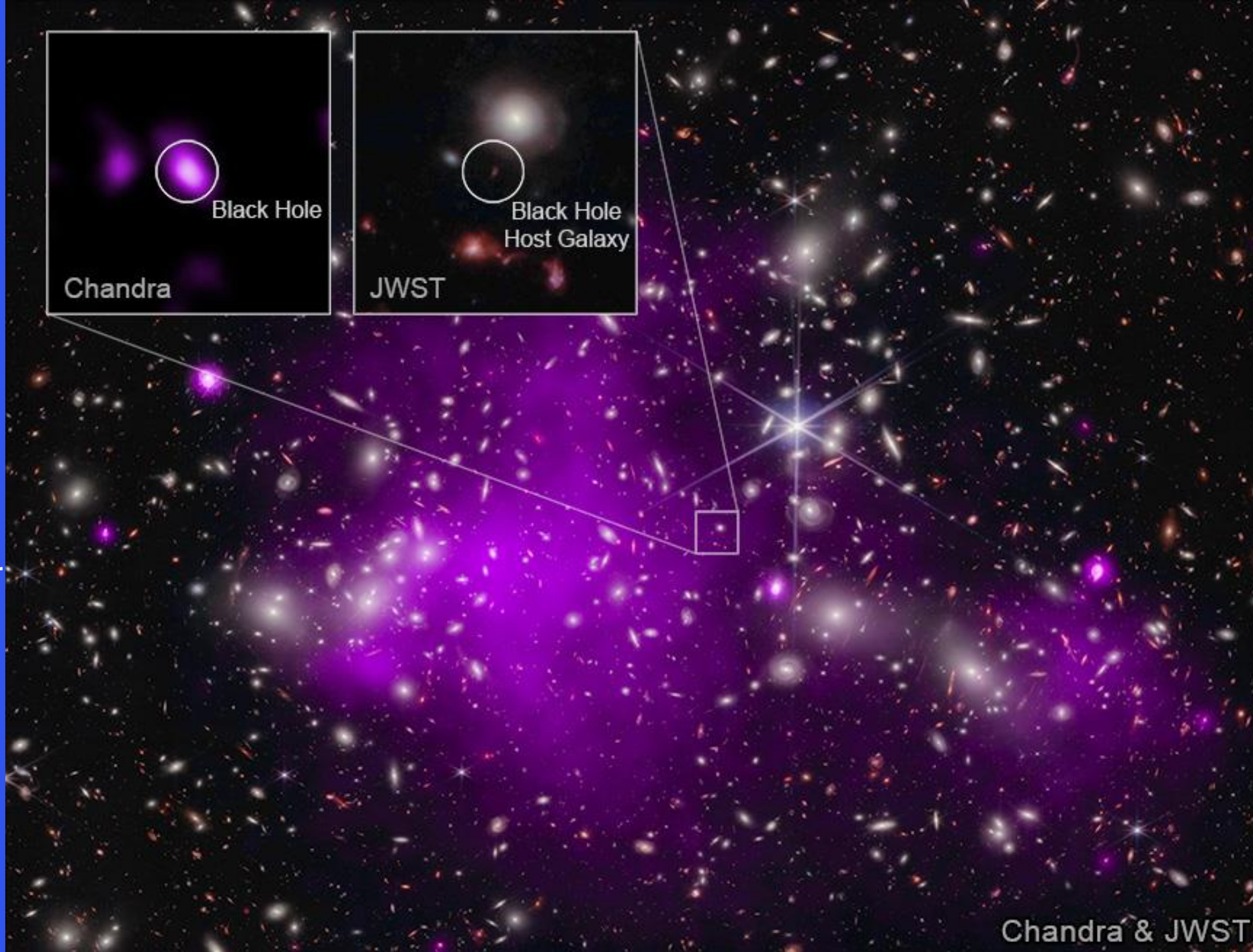
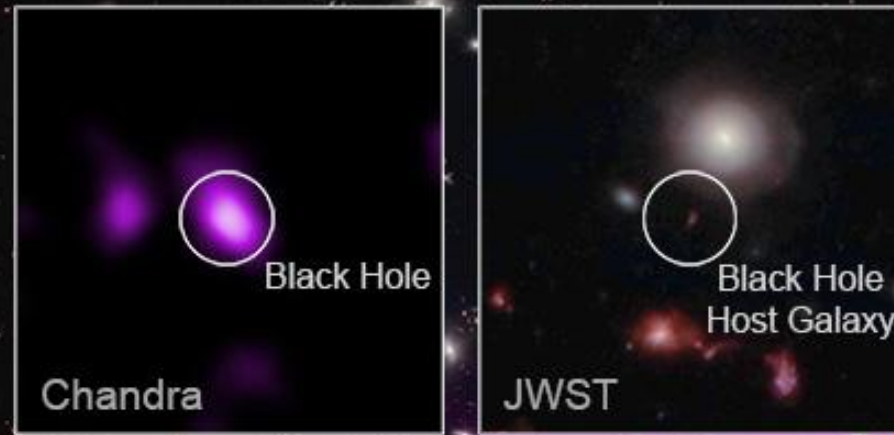
The first stars in the universe shone brightest in the ultraviolet portion of the spectrum. But the neutral hydrogen gas that pervaded the cosmos absorbed UV light. Eventually the light would have broken apart the hydrogen. When that happened, how long



De eerste superzware zwarte gaten in kernen van sterrenstelsels: Super Massive Black Holes (SMBHs)

- Er is een waargenomen verband tussen massa van het SMBH en de massa van de centrale lens (“Bulge”) van sterren van het sterrenstelsel.
- Maar: wat is het oorzaak en gevolg verband: was het SMBH eerst of de lens eerst?
- Het lijkt waarschijnlijk dat het SMBH gegroeid is door samenklontering van sterren en stellaire BHs in de centrale delen van een stelsel.
- Een alternatief model is: directe vroege vorming van het SMBH uit een grote heel dichte gaswolk, waarna de rest van de wolk de centrale “bulge” van sterren vormde.

Supermassive BH
UHZ-1, $z=10$
in een galaxy 500
miljoen jaar na
de Big Bang,
ontdekt door Chandra
+ James Webb in het
veld van galaxy cluster
Abell 2744



Little Red
Dots (LRDs),
een
nieuw
type van
Super
Massive
BHs,
ontdekt
door JWST

CEERS 14448
 $z=4.75$



NGDEEP 4321
 $z=8.92$



PRIMER-COS 10539
 $z=7.48$



CEERS 20320
 $z=5.27$

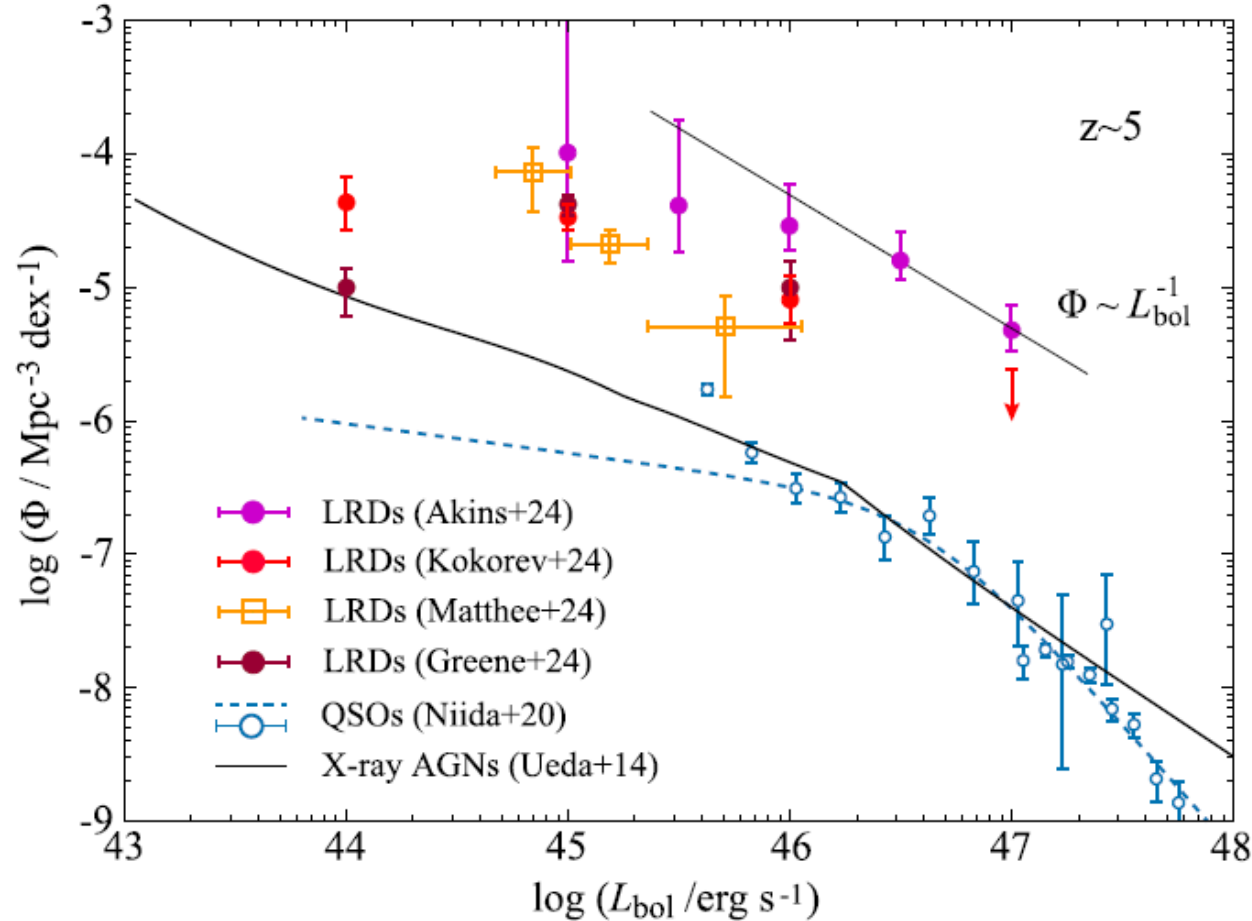


JADES 9186
 $z=4.99$

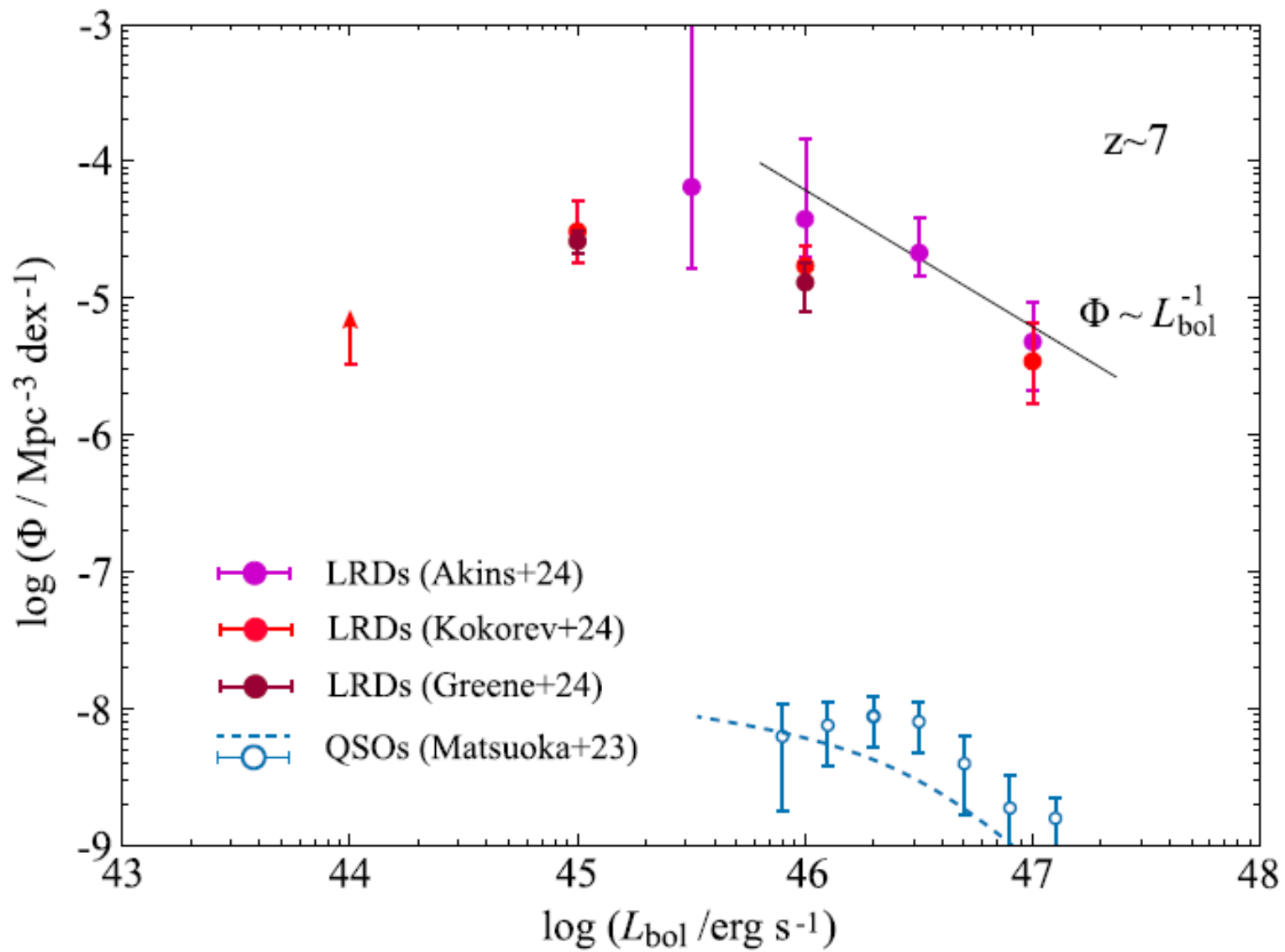


PRIMER-UDS 17818
 $z=6.40$





LRDs (Little Red Dots) zijn Active Galaxy Nuclei (AGNs, met brede lijnprofielen) met grote roodverschuiving, ontdekt met James Webb. Het zijn Super Massive BHs die gevoed worden door accretie (invangen) van veel gas via een accretieschijf. Hun aantallen zijn ~ 100 keer groter dan van al bekende AGNs, ontdekt uit X-emissie. **Hier voor $4.5 < z < 6.5$** . Log $L(\text{bol}) = 47$ betekent: BH massa 1 miljard zonsmassa's, dat ongeveer ~ 10 zonsmassa's per jaar aan gas opslokt. Bij 46: slokt 1 zonsmassa per jr op.



Zelfde voor $6.5 < z < 8.5$

BH Accretion rate Density (BHAD) karakteriseert hoe snel de massa's van de black holes in kernen van stelsels groeiden door accretie van gas.

De BHs van 100 miljoen zonsmassa's ($\log L(\text{bol}) = 46$) groeiden 1 zonsmassa per jaar, die van 1 miljard zonsmassa's ($\log L = 47$) groeiden 10 zonsmassa's per jaar.

Zo konden in een miljard jaar SMBHs van vele miljarden zonsmassa's ontstaan.

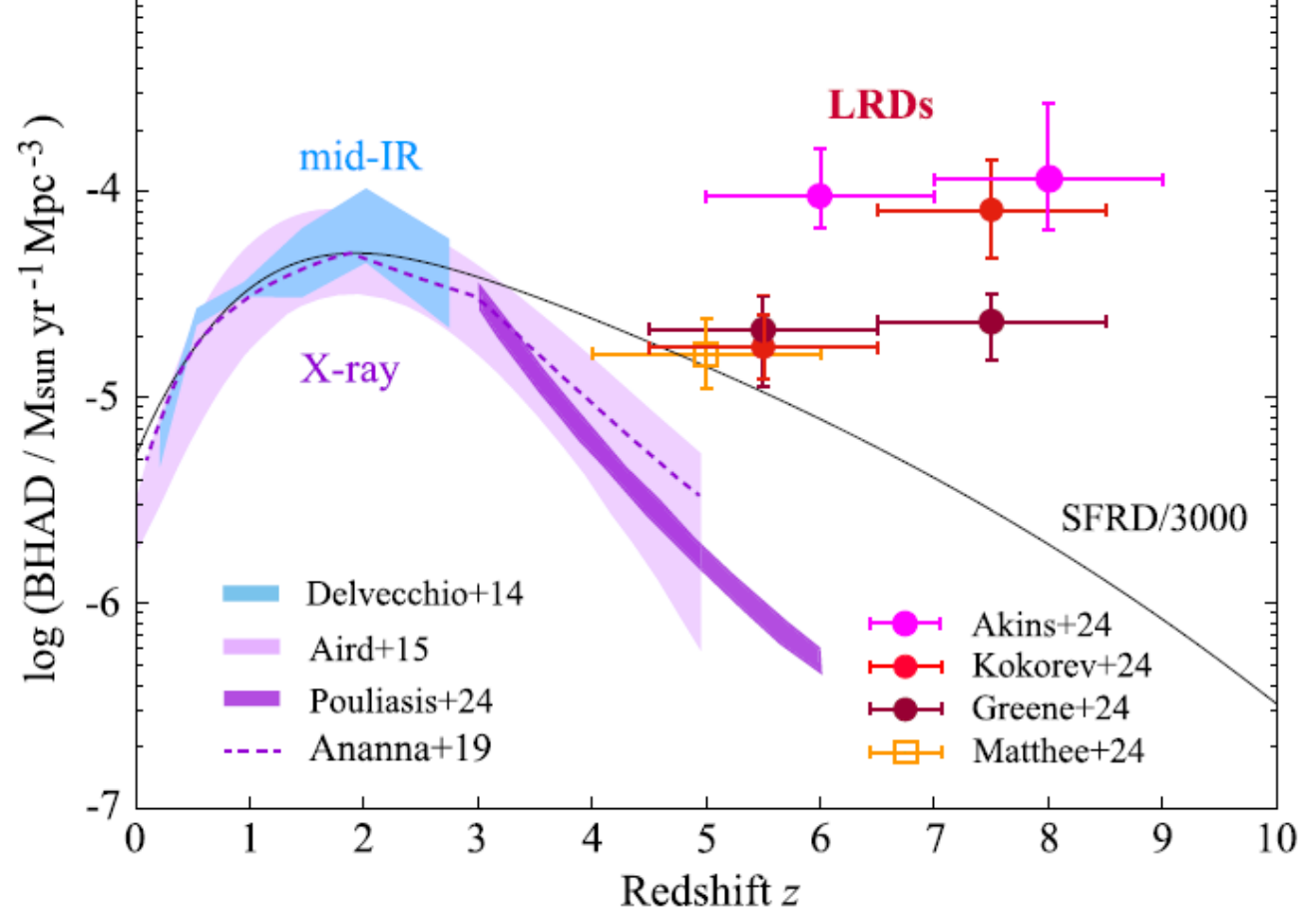
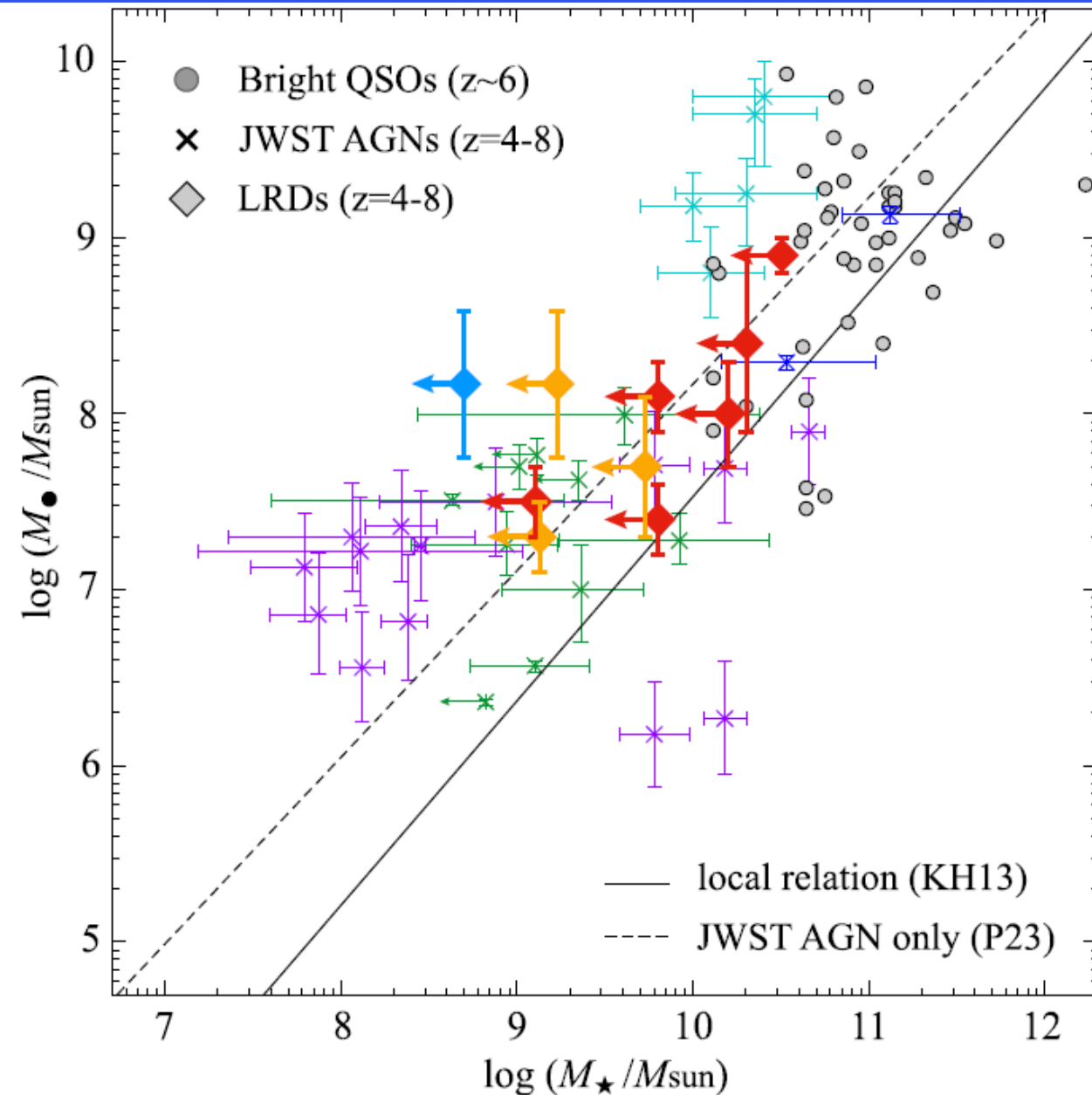


Figure 2. The cosmic BHAD as a function of redshift. Each data point and curve represents BHADs estimated under the assumption of a 10% radiative efficiency ($\epsilon_{\text{rad}} = 0.1$) for the three different populations, including LRDs (H. B. Akins et al. 2024; J. E. Greene et al. 2024; J. Matthee et al. 2024; V. Kokorev et al. 2024), X-ray-selected AGNs including Compton-thick populations (J. Aird et al. 2015; T. T. Ananna et al. 2019; E. Pouliasis et al. 2024), and mid-infrared-selected AGNs (I. Delvecchio et al. 2014). For comparison, the cosmic SFRD scaled by a factor of 3000 is overlaid (Y. Harikane et al. 2022). The BHAD attributed to LRDs remains significantly dominant at $z > 6$.

Verband tussen black hole massa en “bulge” (“lens”) massa van het sterrenstelsel (Inayoshi en Ichikawa, ApJ Lett ‘24)

SM Black Hole massa is ongeveer 1% van massa van “bulge” van het sterrenstelsel (JWST).

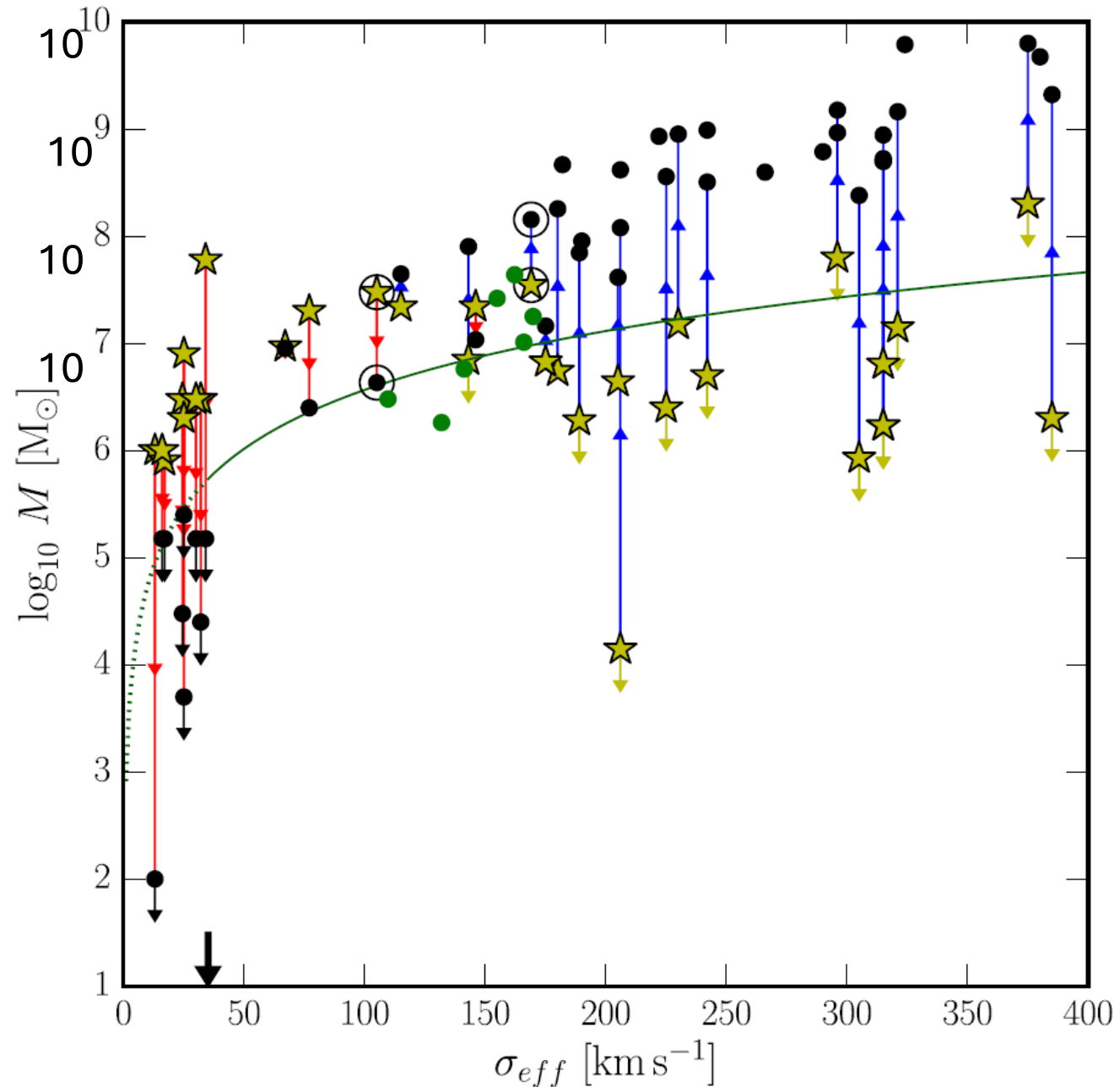
In de Active Galaxy Nuclei (AGNs) zien we de SMBHs groeien door Accretie van gas. De JWST resultaten voor LRDs tonen hoge accretie-efficiency: uitgestraalde energie is 20 % van mc^2 van het ingevangen gas. Dat kan alleen als de BHs snel draaien (> 96% van max rotatie) en gas in dunne Accretieschijf.



Massa's van centrale sterrenhopen (**sterren**) en centrale black holes (**stippen**) van sterrenstelsels bij ons in de buurt, uitgezet tegen de gemiddelde snelheden van de sterren in de centrale sterrenhopen (NSCs).

De massa's van de centrale sterrenhopen zijn evenredig met de massa van de centrale "bulge" ("lens" van sterren) van hun sterrenstelsel.

Berekeningen (Stone et al. 2017) tonen dat "BH-zaadjes" van 100 tot 1000 zonsmassa's kunnen ontstaan door de botsingen van sterren in de dichte centrale delen van de sterrenhopen. Die "zaadjes" groeien dan verder door vangst van sterren en later ook gas.



Zwart gat volgens Algemene RelativiteitsTheorie

Hierbuiten
kan men
nog weg

In eindige
tijd bereik je
singulariteit

Event
horizon

$R_{\text{Schwarzschild}}$

Singularity



Gravitatieconstante

Horizonstraal R van zwart gat: GM/c^2

Lichtsnelheid

Horizonstraal is evenredig met de massa van gat

$$R(\text{horizon}) = 3 \text{ km} \times \text{Massa (in zonsmassa's)}$$

Voorbeeld: bij 5 Zonsmassa's: $R(\text{horizon}) = 15 \text{ km}$

20 Zonsmassa's: $R(\text{horizon}) = 60 \text{ km}$

“Gemiddelde Dichtheid” van een black hole is $M/(4\pi/3)R^3 \sim M/M^3 \sim 1/M^2$

Dit betekent: als men een black hole van heel grote massa wil maken, kan dit met materie van lage dichtheid: bijvoorbeeld: **een bal water van 100 miljoen zonsmassa's zit al binnen zijn eigen horizon**, en collapst tot een black hole.

Dus ook: een gaswolk van miljarden zonsmassa's in het vroege heelal kan, als hij niet roteert en bij samentrekken niet fragmenteert, collapsen tot een black hole, In dit geval een Super Massive Black hole.

Om niet te fragmenteren is nodig dat er geen H₂ in de wolk is, zodat hij niet kan koelen. De H₂ kan afgebroken zijn door de UV straling van eerder gevormde Pop III sterren in de omgeving van de wolk.

Bromm en Loeb (2003, Astrophysical Journal) berekenden dat zo'n wolk tot een SMBH kan instorten. Dus: al bij $z=20$ zouden zich SMBHs kunnen vormen.

Samenvatting: De JWST heeft ons getoond dat:

- Er 290 miljoen jaar na de Oerknal al sterrenstelsels zijn, roodverschuiving 14.5: Heelal was toen in volume $15.5^3 = 3720$ maal kleiner dan thans.
- Dat er bij roodverschuiving 11 (440 miljoen jr. na Big Bang) waarschijnlijk nog Populatie III sterren zijn (Hell wolk bij GN-z11)
- De Little Red Dots zijn Active Galaxy Nuclei (SMBHs) en hun aantallen zijn bij roodverschuiving 4 tot 9 tussen de 100 en 1000 maal groter dan die van de quasars. Dit zijn SMBHs met massa's van tussen 0.1 en 10 miljard zonsmassa's en groeien met 0.1 a 10 zonsmassa's per jaar door invangst van gas

VOORTS:

- Het meest waarschijnlijk ontstaan SMBHs uit de Nucleaire sterrenhopen van hun sterrenstelsels, door invangst van sterren en stellaire black holes door de eerst gevormde stellaire black holes van ca 100 zonsmassa's.

