Het ΛCDM oerknalmodel

Ontstaan, toestand en toekomst van het heelal; het huidige inzicht

Moderne kosmologie

- Kosmologisch principe
  - Heelal is isotroop – in alle richtingen hetzelfde
  - Heelal is homogeen – op iedere plaats hetzelfde
  - Geldt voor vroege heelal en nu op hele grote schaallengtes (≈ 300 miljoen lichtjaar)
- Heelal is niet statisch maar expandeert
  - Andere sterrenstelsels verwijderen zich van ons
- "Hubble-Lemaître" wet: $v_r(t) = H(t)r(t)$
  - $v_r(t)$ = uitdijingssnelheid
  - $H(t)$ = Hubble constante
  - $r(t)$ = afstand
- Huidige Hubble constante H_0
  - Volgens Planck missie: $H_0 = 67{,}7 \pm 0{,}5$ km/s.Mpc
  - Andere methoden: $H_0 = 72 \pm 8$ km/s.Mpc

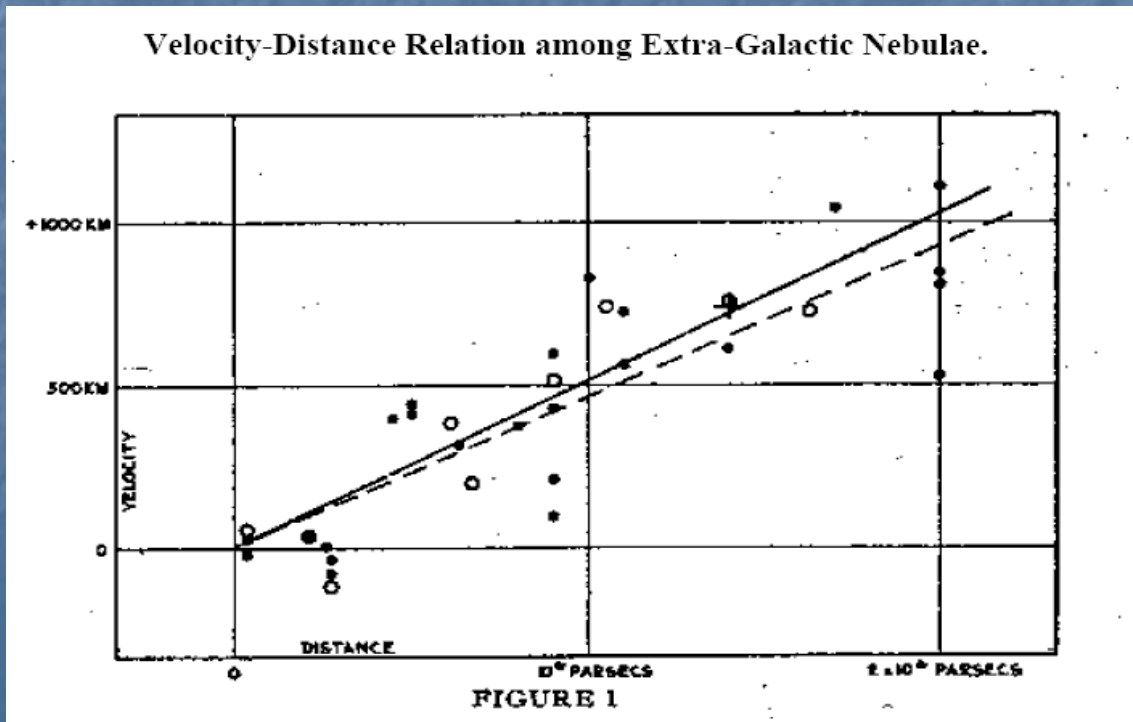
Subscript "0" betreft huidige tijd

Mpc = 3,26 miljoen lichtjaar

Hubble-Lemaître wet

- Lemaître voorspelde in 1927 de uitdijing van het heelal;
- Hubble toonde in 1929 met metingen de uitdijing van heelal aan
- Hij deed waarnemingen aan sterrenstelsels op afstanden tot circa 2 Mpc (≈ 6,5 miljoen lichtjaar)
- Conclusie: het heelal dijt uit met een snelheid van 464 km/s.Mpc
- Inzicht thans: 72 ± 8 km/s Mpc

Leidt tot: "Big Bang" ofwel Oerknaltheorie



Friedmann Vergelijkingen

beschrijven de expansie van het heelal

- Afleiding vraagt toepassing van Algemene Relativiteitstheorie (ART)
- Vereenvoudigde afleiding volgens Newton levert de Friedmann I vergelijking, die de uitdijingssnelheid van het heelal beschrijft:

$$H(t)^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{a^2}$$

waarbij:

$H(t)$ = Hubbleconstante/parameter

a = schaalfactor van het heelal

$\dot{a} = da / dt$ = verandering schaalfactor per tijdseenheid

G = gravitatieconstante

ρ = materiedichtheid (massa per volume-eenheid)

c = lichtsnelheid

k = maat voor de energie-inhoud van het heelal (volgens ART een maat voor de vorm van de ruimte)

Dichtheid als functie van schaalfactor

- Het is gebruikelijk de huidige schaalfactor a_0 de waarde 1 te geven
- Materiedichtheid ρ is omgekeerd evenredig met schaalfactor tot de derde macht:

$$\rho(t) = \frac{\rho_0}{a(t)^3}$$

- Overigens Hubble constante is niet constant, maar varieert in de tijd; huidige Hubble constante: $H_0 = 72 \pm 8$ km/s Mpc
- ρ_0 is de huidige materiedichtheid van heelal: $\rho_0 = 2{,}7.10^{-27}\ \mathrm{kg/m^3}$
- Dit is iets meer dan 1 waterstof atoom per m^3 Het huidige heelal is dus vrijwel leeg!!!

Kritieke dichtheid

- De k - parameter kan 0, positief of negatief zijn
- Indien $k = 0$, dan volgt de zogenaamde kritieke dichtheid, waarvoor geldt:

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

- Later zal blijken dat indien de dichtheid gelijk is aan de kritieke dichtheid het heelal vlak is

Friedmann II

- Er kan ook een vergelijking afgeleid worden voor de versnelling van de heelalexpansie:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3P}{c^2}\right)$$

waarbij: $\ddot{a} =$ versnelling van de schaalfactor

$P =$ druk in het heelal

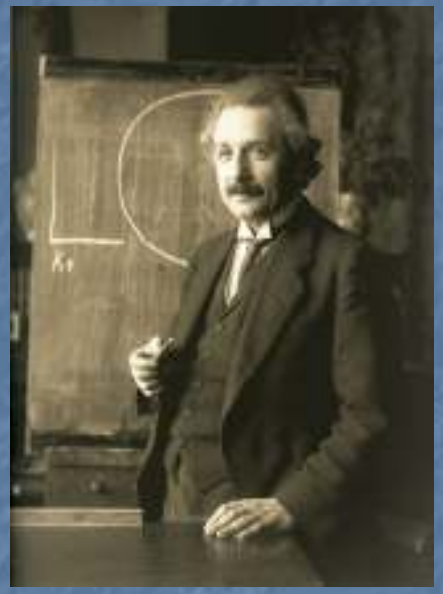
- Let op het – teken: dit betekent dat de versnelling van het heelal negatief is en dus dat de expansiesnelheid afneemt

Friedmann vergelijkingen volgens ART

- In 1915 publiceert Einstein de ART (Algemene relativiteitstheorie)
- Met ART worden de "correcte" Friedmann vergelijkingen afgeleid, die zien er hetzelfde uit als met de Newtoniaanse afleiding:

$$H(t)^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{a^2}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3P}{c^2}\right)$$



- maar de interpretatie is anders:
  - Massa en energie zijn equivalent ($E = mc^2$), daarom speelt naast materie ook stralingsenergie een rol
  - De k - parameter is niet alleen een maat voor de energie-inhoud van het heelal, maar beschrijft ook de vorm van de ruimte

Energievormen

- Volgens de ART hebben we dan ook te maken met drie energievormen:

materie: $\rho_m = \text{materiedichtheid} = \frac{\rho_{m0}}{a^3}$

straling : $\rho_r = \text{stralingsdichtheid} = \frac{\rho_{r0}}{a^4}$

donkere energie: $\rho_\Lambda = \text{donkere energiedichtheid}$

- Stralingsdichtheid is omgekeerd evenredig met schaalfactor tot de vierde macht: 3 machten volgen uit het constante aantal fotonen in een expanderende ruimte en 1 macht als gevolg van het oprekken van de golflengte
- Vacuümenergie (donkere energie) wordt constant verondersteld!

Friedmann I vergelijking met de drie energievormen

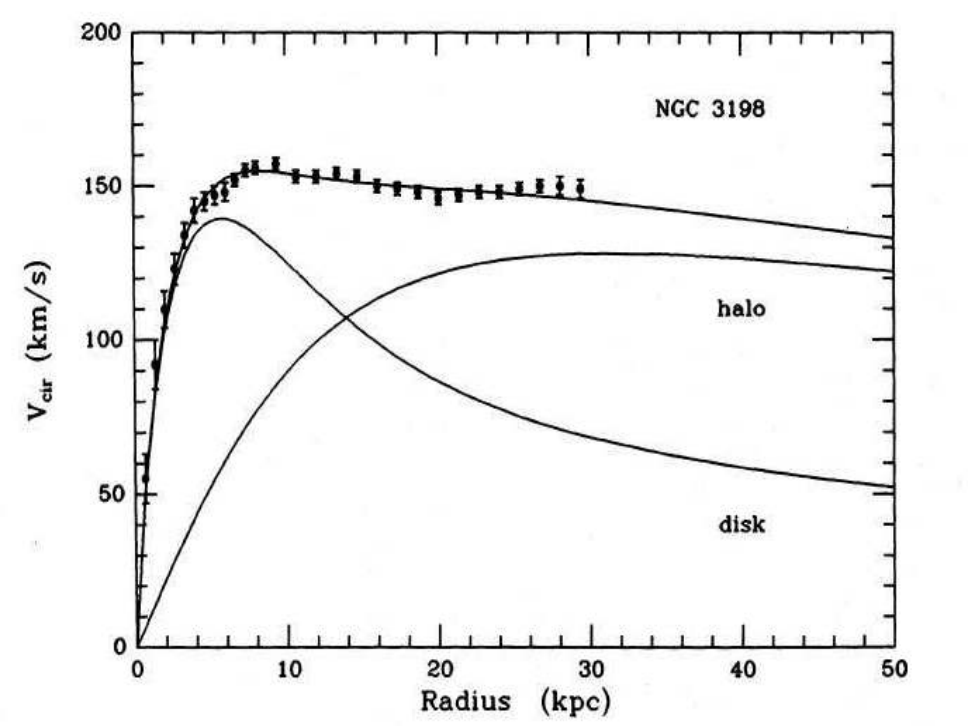
$$H(t)^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\left(\frac{\rho_{r0}}{a^4} + \frac{\rho_{m0}}{a^3} + \rho_\Lambda\right) - \frac{kc^2}{a^2}$$

- Kort na big bang straling verreweg het belangrijkst - straling is dominant voor heelalleeftijden kleiner dan 50.000 jaar
- Daarna: materie dominant tot heelalleeftijd van circa 10 miljard jaar
- Tot slot is vanaf dat moment de donkere energie dominant

Baryonische en donkere materie

- In de Friedmann vergelijkingen komt materiedichtheid ρ_m voor
- Oorspronkelijk: alleen baryonische materie (BM), waaruit sterren, sterrenstelsels en mensen bestaan
- Baryonische materie heeft o.a. interactie met licht (je kan die materie zien!) en met de zwaartekracht
- Bij waarnemingen aan sterrenstelsels blijkt er veel meer materie te moeten zijn dan dat wat wij zien
- Die extra materie noemt men donkere materie (DM)
- DM heeft geen interactie met licht maar wel met zwaartekracht
- Aard van DM is nog een groot ?
- DM blijkt o.a. uit rotatiekrommen en "bullet cluster"

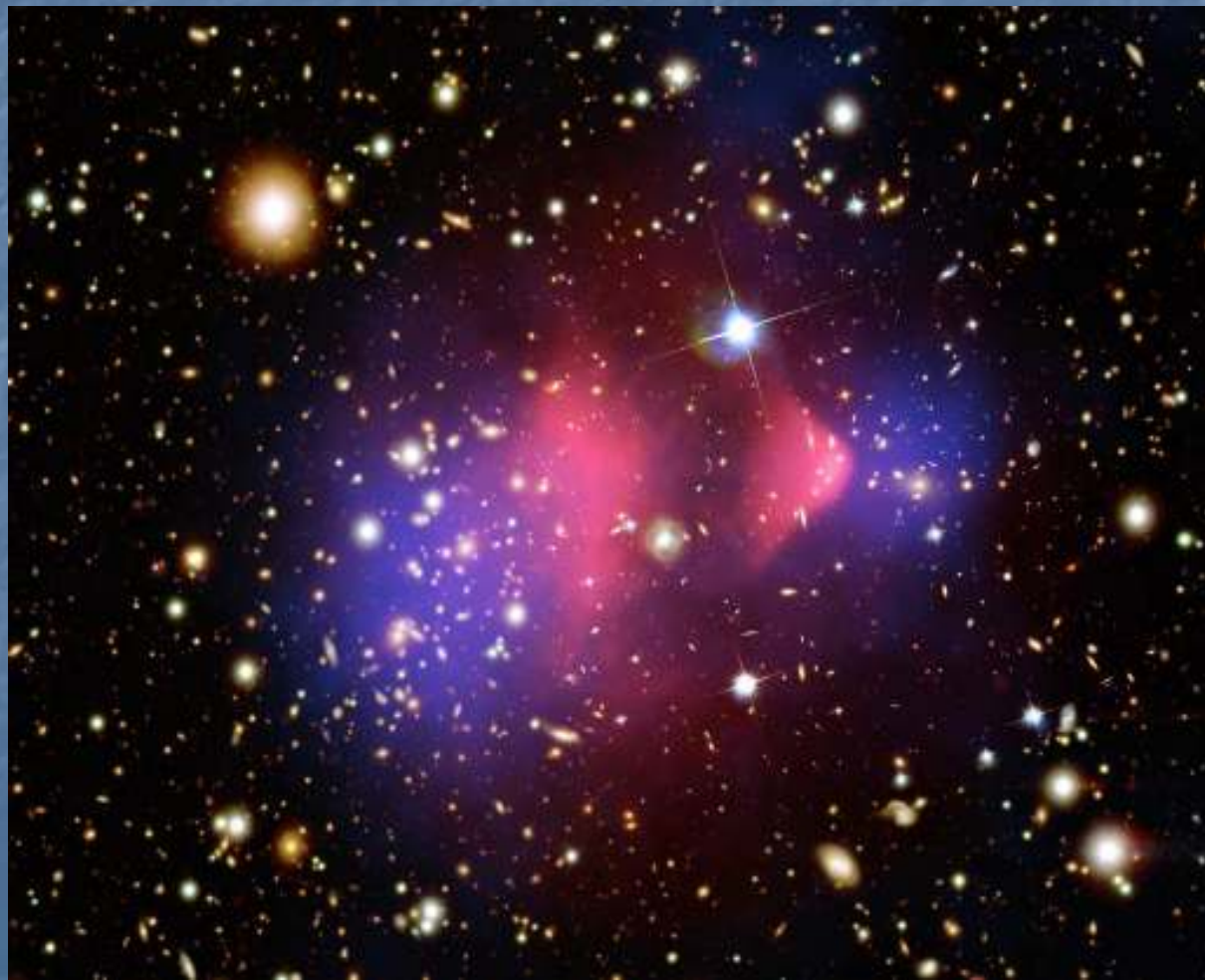
Rotatiekrommen van sterrenstelsels



- Er zijn natuurkundigen (bijv. Erik Verlinde) die twijfelen aan het bestaan van DM
- Zij denken dat de zwaartekrachttheorieën van Einstein en Newton niet (volledig) juist zijn
- De theorie van "Emergent Gravity" van Verlinde kan de waargenomen rotatiekrommen verklaren, zonder DM

“Bullet cluster”

- “Bullet cluster” betreft de botsing van twee clusters van sterrenstelsels op een afstand van 3,7 miljard lichtjaar
- Die clusters bestaan uit sterren, gas en stof en donkere materie
- Plaatje toont dit cluster nadat zij door elkaar bewogen zijn:
- rose: gas, centraal zichtbaar, gevolg van drukopbouw
- paars: DM, normaal niet zichtbaar, maar aangetoond door gravitatielenswerking
- Dit gedrag van DM kan (nog) niet verklaard worden met Verlinde’s theorie



Kosmologische constante

- Einstein nam aan: heelal is statisch. Volgens oorspronkelijke Friedmann vergelijking niet mogelijk
- Daarom een kunstgreep: hij voegde kosmologische constante Λ aan ART veldvergelijking toe, waarmee eerder gegeven Friedmann I vergelijking volgt
- Nadat Hubble de uitdijing van het heelal had aangetoond, begreep hij: heelal is niet statisch, maar expandeert. Hij noemde kosmologische constante zijn grootste blunder en liet Λ weer weg

Dichtheidsparameters

- De dichtheden worden vrijwel altijd uit gedrukt in dichtheidsparameters, als een fractie van kritieke dichtheid: $\Omega_m = \frac{\rho_m}{\rho_c}$, $\Omega_r = \frac{\rho_r}{\rho_c}$ en $\Omega_\Lambda = \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c}$
- De huidige dichtheidsparameters zijn dan:

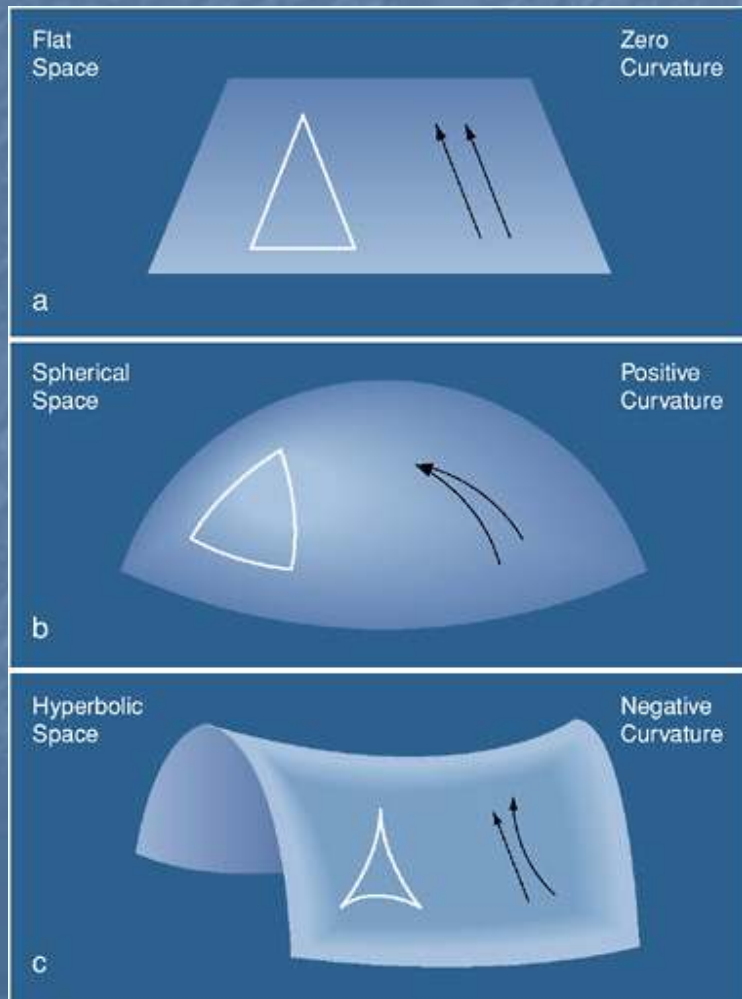
$$\Omega_{m0} = \frac{\rho_{m0}}{\rho_{c0}}, \Omega_{r0} = \frac{\rho_{r0}}{\rho_{c0}} \text{ en } \Omega_{\Lambda 0} = \frac{\rho_\Lambda}{\rho_{c0}}$$

- De huidige waarden zijn bepaald met de Planck missie
- De som van de dichtheidsparameters is totale dichtheidsparameter: $\Omega_0 = \Omega_{m0} + \Omega_{r0} + \Omega_{\Lambda 0}$
- Indien $k = 0$ dan moet gelden: $\Omega_0 = 1$

  verder $k > 0$ ➔ $\Omega_0 > 1$ en $k < 0$ ➔ $\Omega_0 < 1$

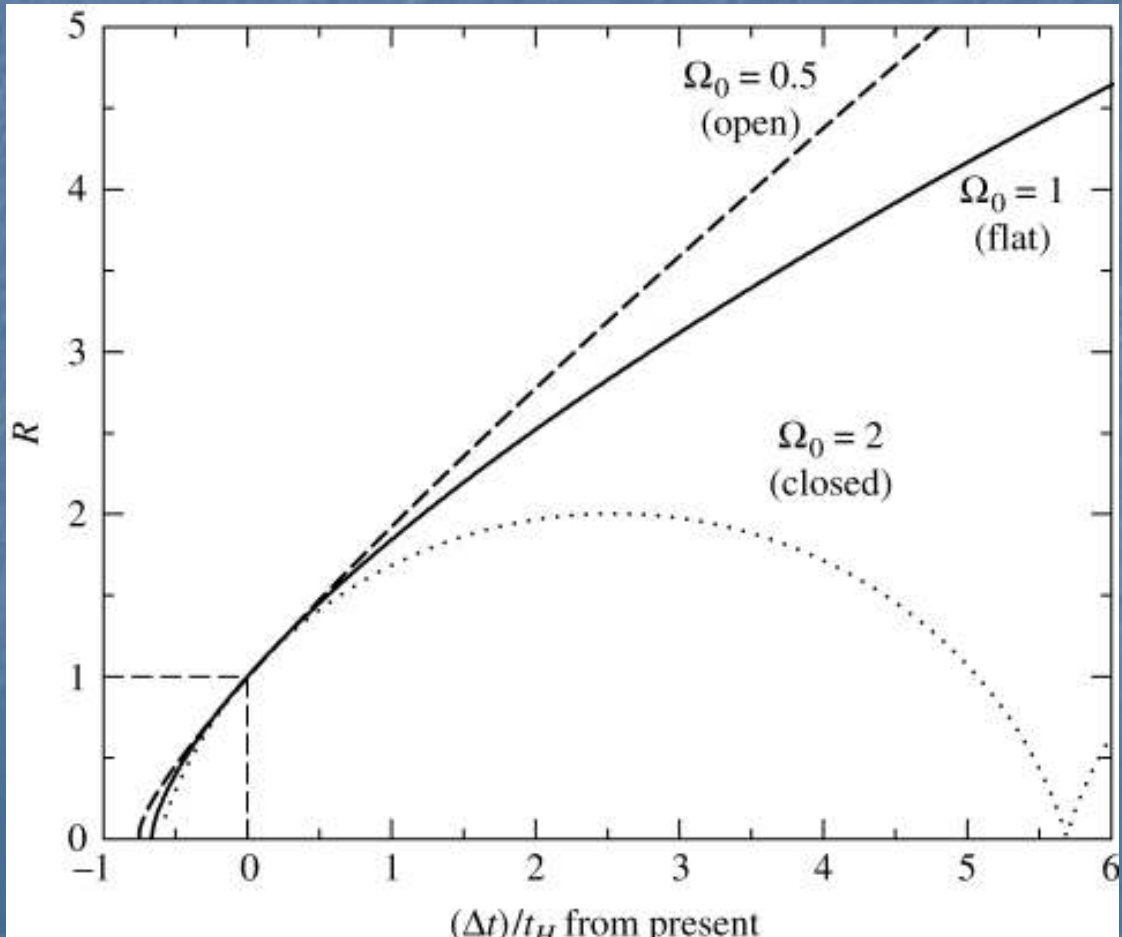
Vlak, gesloten en open heelal

- Heelalruimte hoeft niet vlak te zijn, zoals wij denken te ervaren. Maak vergelijking met plat vlak
- Indien $\Omega_0 = 1$ dan hebben we een vlak heelal met een kromming nul
  - Heelal is dan oneindig groot
- Indien $\Omega_0 > 1$ dan is er een gesloten (elliptisch of sferisch) heelal met positieve kromming
  - Heelal is dan eindig maar onbegrensd
  - Bij rechtlijnige beweging komt men weer in zelfde punt terug
- Indien $\Omega_0 < 1$ dan is er een open (hyperbolisch) heelal, negatief krom
  - Het heelal is ook dan oneindig groot



Uitdijing van het Heelal

- Heelal grootte als functie van tijd
  (plaatje geldig voor heelal zonder donkere energie)
  - Een gesloten heelal zal vanaf "big bang" expanderen en in een latere periode weer krimpen tot de zogenaamde "big crunch"
  - Een open heelal zal altijd met eindige snelheid blijven expanderen
  - Een vlak heelal zal expanderen, maar als de tijd naar oneindig gaat wordt de expansiesnelheid nul



Versnelde uitdijing van heelal

- In 1998 ontdekten twee onderzoeksgroepen:
  - Saul Perlmutter, Adam Riess e.a. (VS) en
  - Brian Schmidt e.a. (Australië)

  dat heelal niet vertraagt maar versnelt.
- Zij ontdekten dat door afstands- en roodverschuivingsmetingen aan supernovae in groot aantal sterrenstelsels
- Daarmee bepaalde men expansiesnelheid van heelal op verschillende kosmologische tijden
- De ontdekking was een grote verrassing die zij zelf lang niet geloofden
- Alle drie kregen daarvoor in 2011 de Nobelprijs voor natuurkunde

Donkere energie

- Om heelalversnelling te verklaren is kosmologische constante Λ weer nodig
- Kosmologische constante blijkt te resulteren in een vorm van energie:

Vacuümenergie of Donkere energie

- Die energie heeft het tegengestelde effect van massa en straling:
  - Massa en straling vertragen uitdijing
  - Positieve donkere energie versnelt uitdijing; Donkere energie leidt tot een virtuele negatieve druk;
  - Met Friedmann II vergelijking volgt dan dat versnelling mogelijk is.

Hoe is heelalversnelling mogelijk?

- Friedmann II vergelijking wordt altijd geschreven als:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3P}{c^2}\right)$$

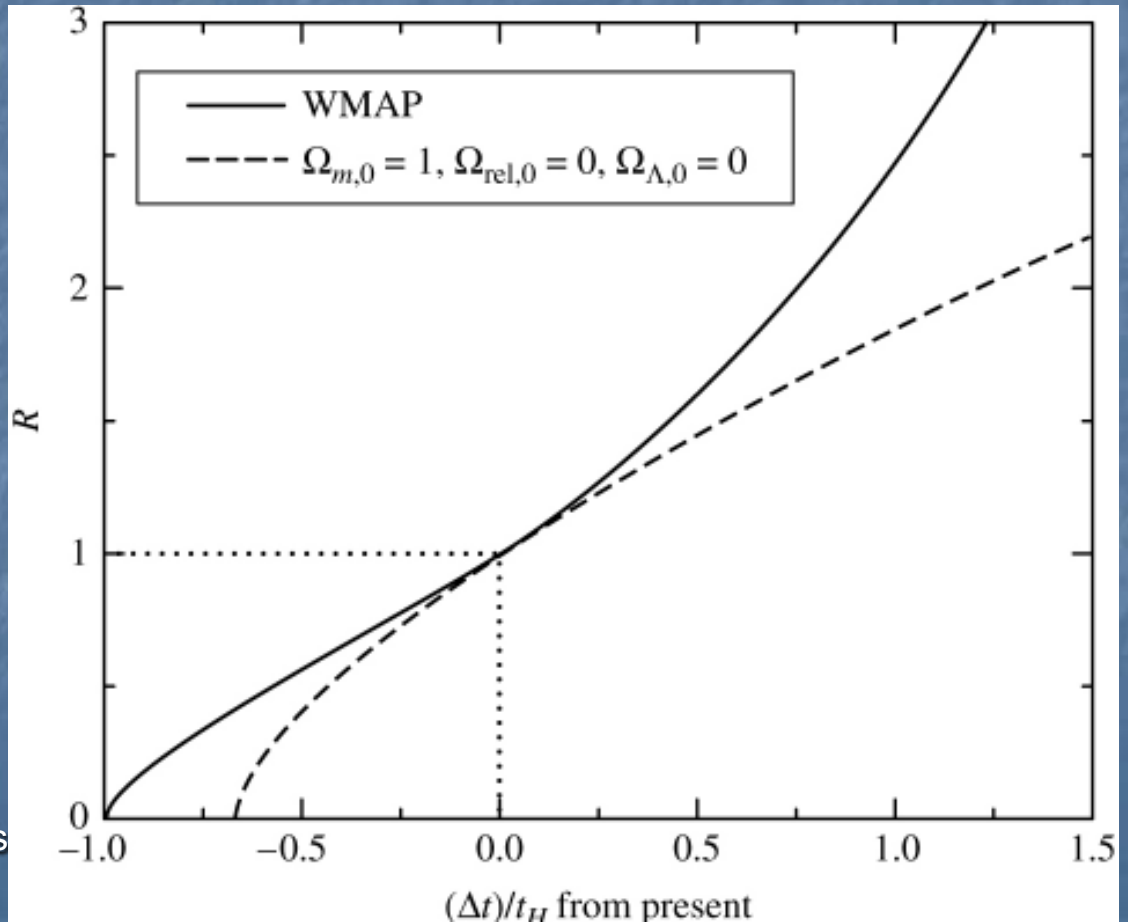
- Dan is het moeilijk te begrijpen dat versnelling mogelijk is
- Maar als men Friedmann I vergelijking differentieert naar de tijd, krijgt men:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\frac{\rho_{m0}}{a^3} + \frac{2\rho_{r0}}{a^4} - 2\rho_\Lambda\right)$$

- De laatste en eerste vergelijking zijn equivalent
- De laatste vgl maakt duidelijk dat versnelling mogelijk is als gevolg van ρ_Λ

Effect van donkere energie

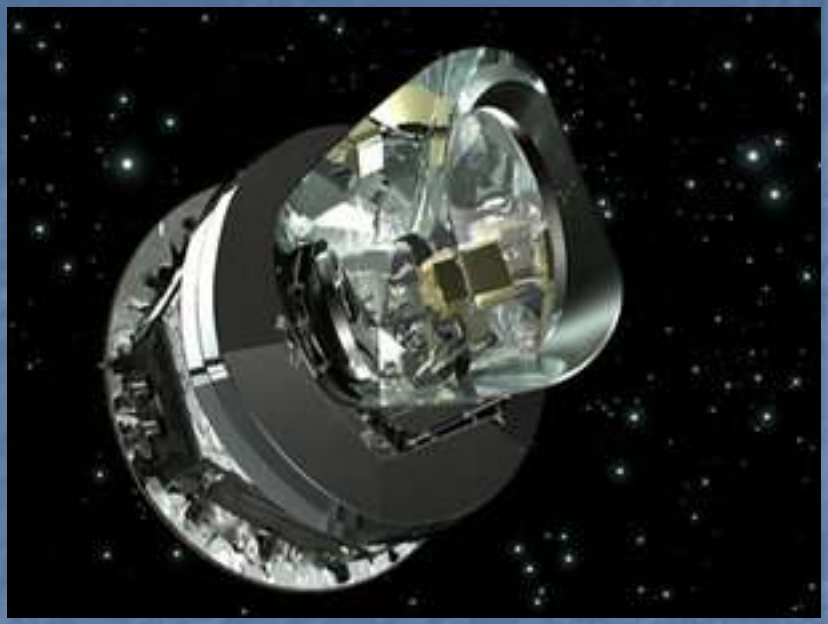
- Stippellijn: heelal met alleen materie; heelalexpansie altijd vertragend
- Volle lijn: heelal met materie, straling en donkere energie; iets voor de huidige tijdstip gaat uitdijing versnellen

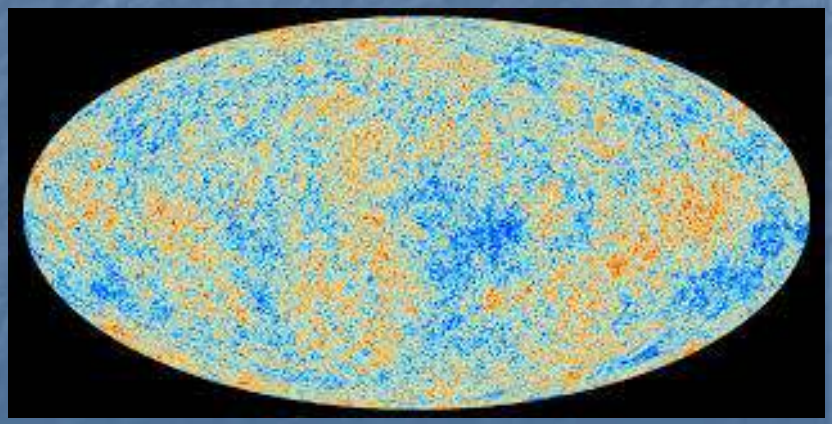


Planck missie

- ESA Satelliet, gelanceerd in 2009
- Kosmische achtergrondstraling (CMB: Cosmic Microwave Background radiation) door Planck zeer nauwkeurig gemeten (ca 2.10^{-6} K)
- Eerder gedaan door COBE (1992) en WMAP (2003) satellieten
- Doel: heelaleigenschappen bepalen
- Resultaten gepubliceerd in 2015
- Temperatuur van CMB volgens Planck:

  T_0 = 2,73 K met variaties van circa 10^{-5} T_0





AWSV Metius

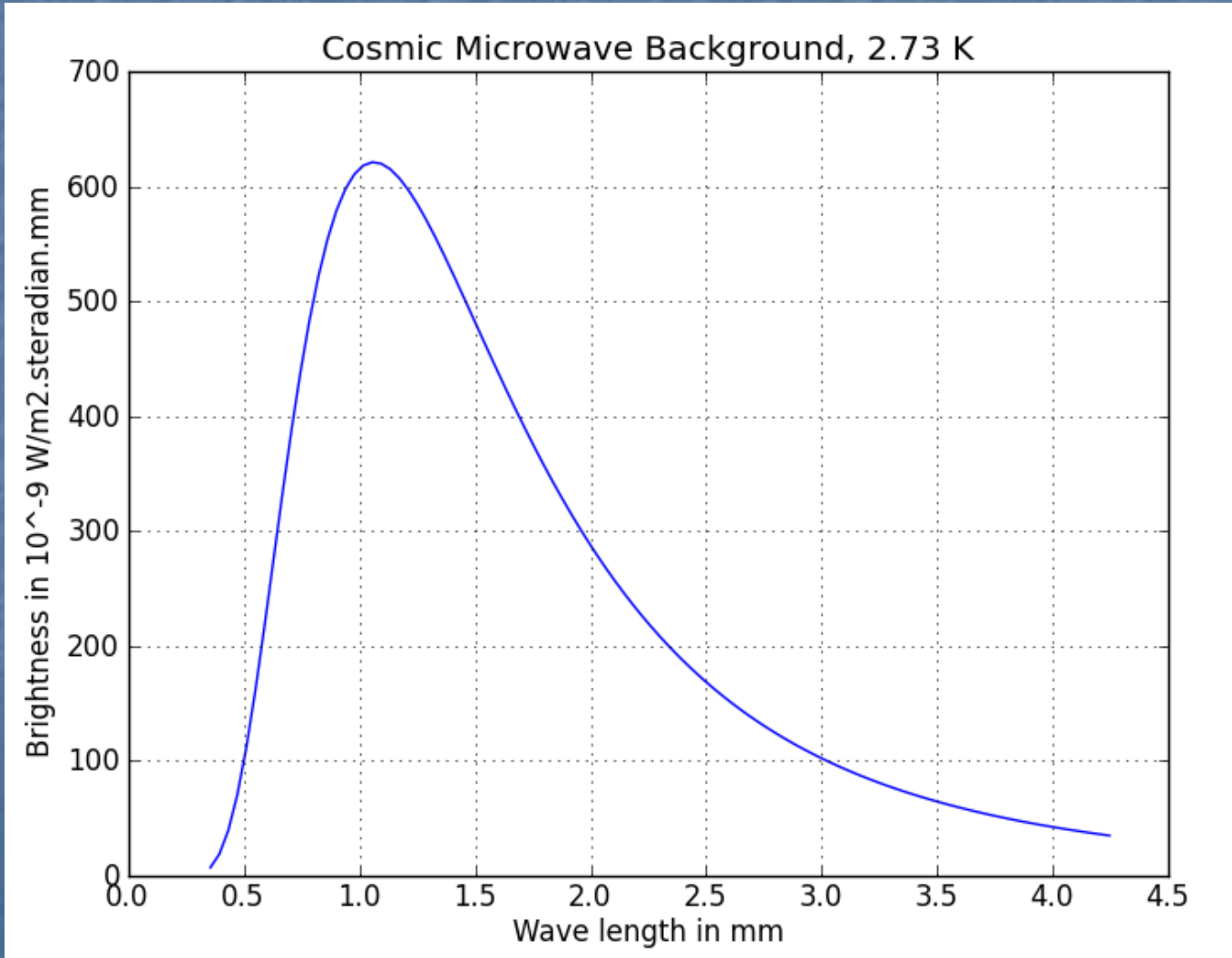
CMB: Kosmische achtergrond straling

- Planck missie: 370.000 jaar na oerknal wordt heelal transparant ⇒ CMB
- Fotonen botsen niet meer met elektronen ⇒ infrarode straling met golflengte $\lambda \approx 970$ nm
- Heelaltemperatuur toen $T \approx 2980$ K en roodverschuiving $z \approx 1091$
- Daarmee kan huidige temperatuur en golflengte van CMB-straling berekend worden: $T_{CMB} \approx 2980/(1091+1) \approx 2{,}73$ K en $\lambda_{CMB} \approx (1091+1).970$ nm $\approx 1{,}1$ mm
- In 1948 voorspelden Nader en Herman, op basis van Friedmann en quantummechanica, CMB met $T \approx 5$ K
- In 1964 ontdekten Arno Penzias en Robert Wilson bij toeval CMB en krijgen daarvoor Nobel prijs

CMB is sterke aanwijzing dat oerknaltheorie juist kan zijn

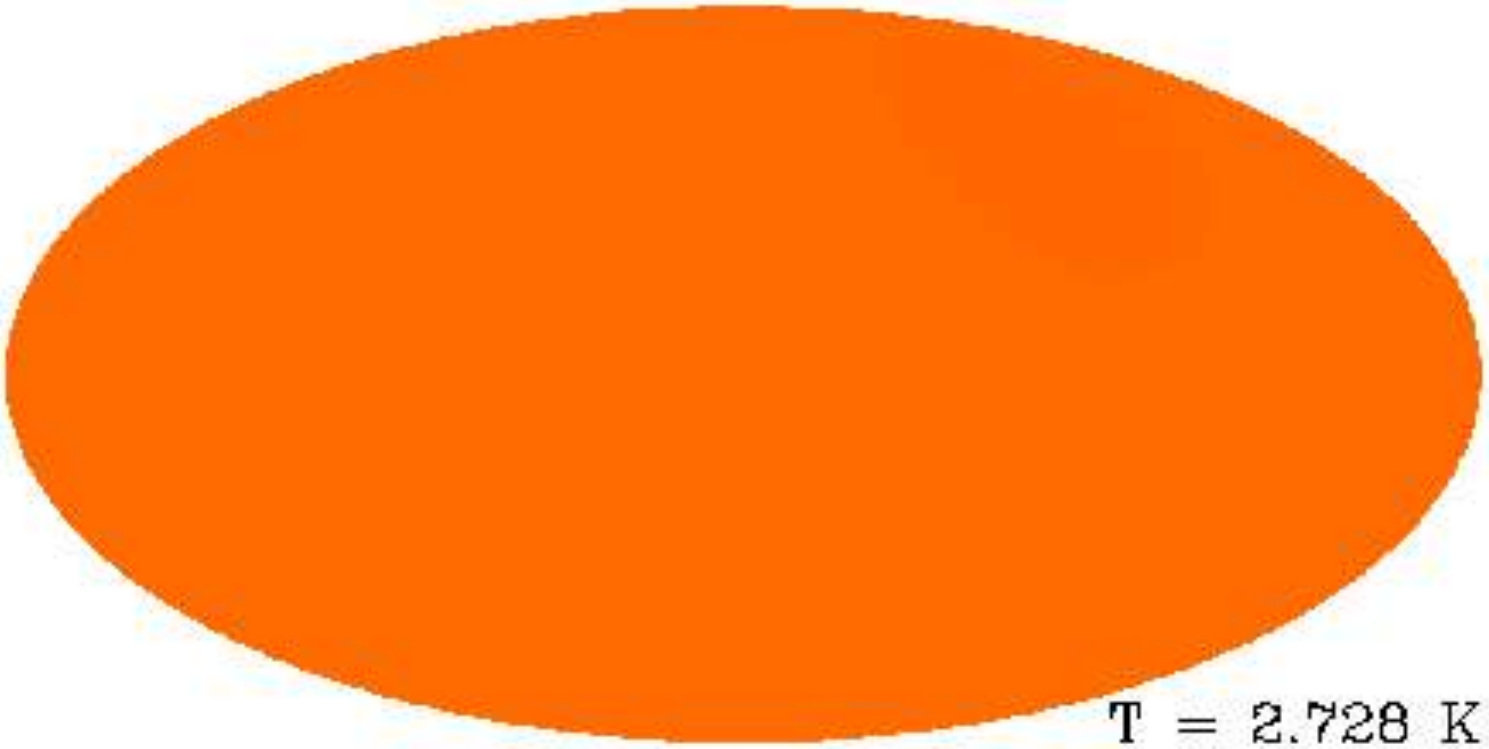
CMB: Stralingsintensiteit

- Blijkt vrijwel exact zwarte straling te zijn volgens de Planck functie



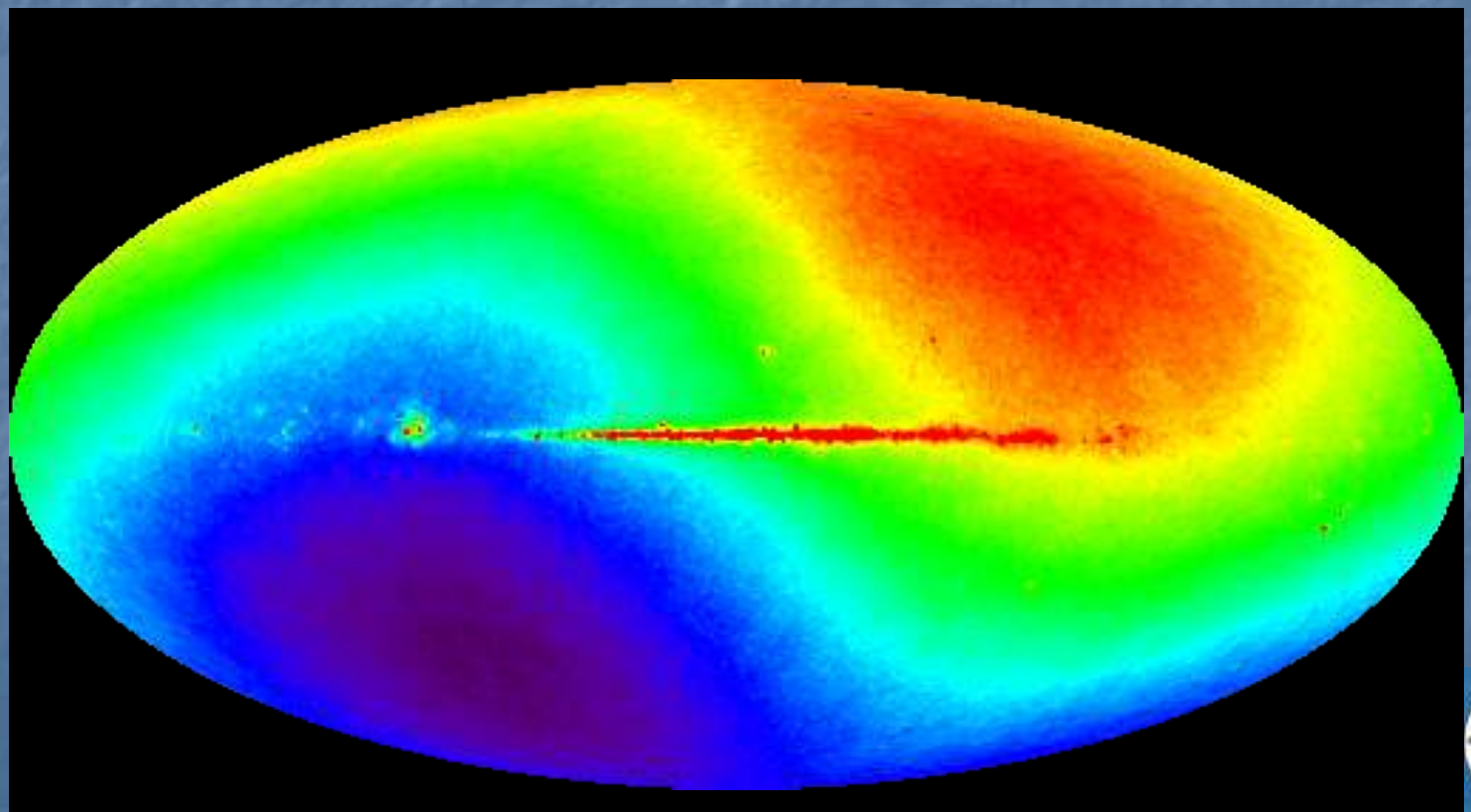
CMB - correcties

- CMB heeft uitermate gelijkmatige temperatuur: 2,728 K



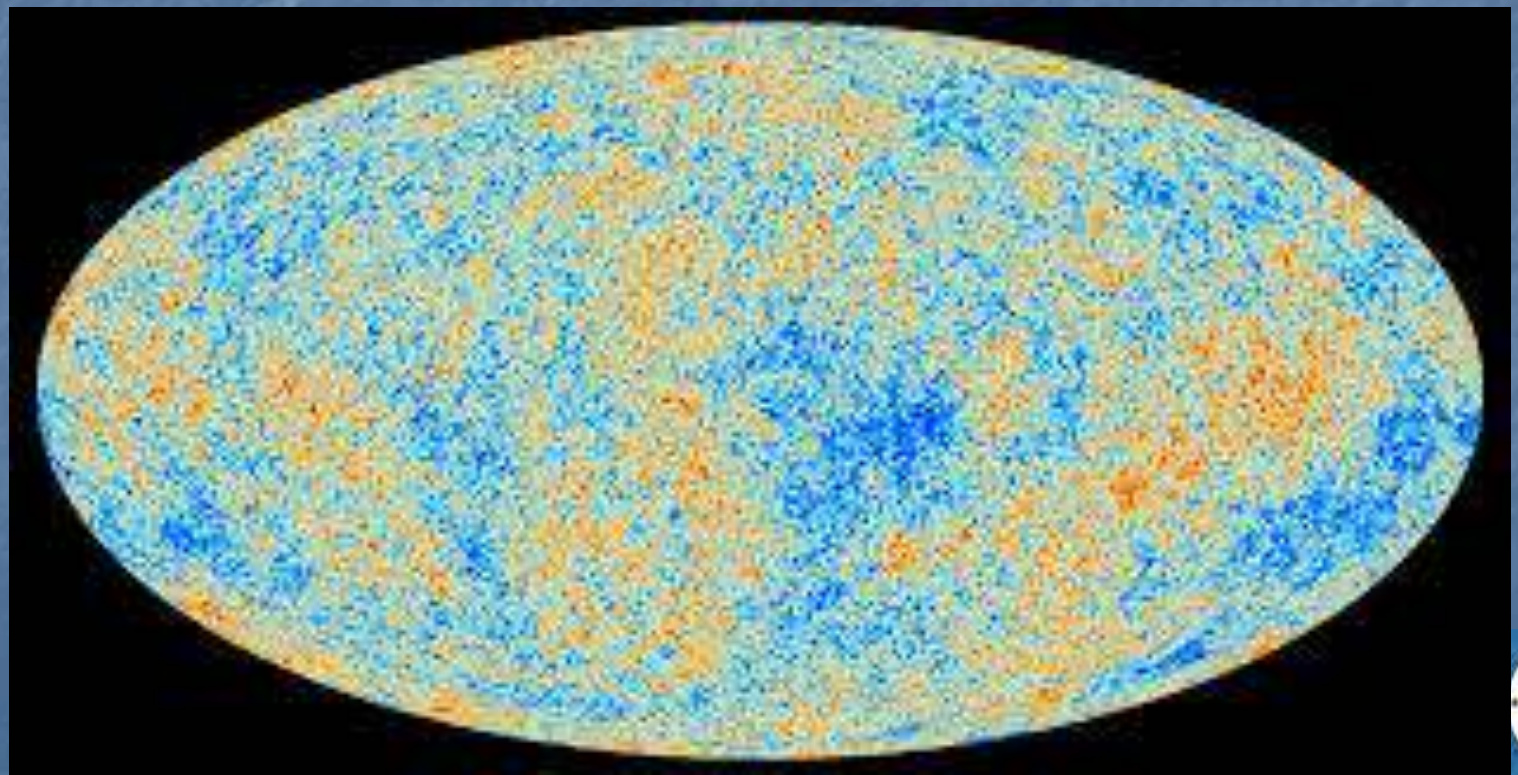
CMB - correcties

- CMB heeft uitermate gelijkmatige temperatuur: 2,728 K
- Als dat gemiddelde wordt afgetrokken, dan volgt:
  - Dipool temperatuurverschillen $\Delta T \approx$ 3,353 mK a.g.v. beweging van 365 km/s tov CMB achtergrond
  - Temperatuurverschillen agv stofstraling Melkweg



CMB - correcties

- CMB heeft uitermate gelijkmatige temperatuur: 2,728 K
- Als dat gemiddelde wordt afgetrokken, dan volgt:
  - Dipool temperatuurverschillen $\Delta T \approx$ 3,353 mK a.g.v. beweging van 365 km/s tov CMB achtergrond
  - Temperatuurverschillen agv stofstraling Melkweg
- Na correctie hiervoor: $\Delta T \approx$ 20 - 200 µK



Huidige Kosmologische Waarden

- Volgens de Planck missie (2015) zijn huidige kosmologische waarden:
  - Dichtheidsparameters:

Materie: $\Omega_{m0} = 0,308 \pm 0,012$, waarvan:

donkere materie: $\Omega_{dm0} = 0,2594$

baryonische materie: $\Omega_{b0} = 0,0486$

Straling: $\Omega_{r0} = 9,15.10^{-5}$; straling thans onbelangrijk

Donkere energie: $\Omega_{\Lambda 0} = 0,692 \pm 0,012$

Kromming: heelal is vlak of vrijwel vlak

- Hubble constante: $H_0 = 67,8 \pm 0,9$ km/s.Mpc*
- Kritische dichtheid: $\rho_{c0} = 8,63.10^{-27}$ kg/m^3
- Dichtheid heelal:

$\approx 0,25$ waterstof atoom/m^3 plus $2,25.10^{-27}$ kg/m^3 donkere materie

* Hubble metingen in 2016: H_0 = 71,9 + 2,4 – 3,0

Soort Donkere materie

- Kosmologisch model gaat uit van donkere materie (DM).
- Volgens Planck missie: circa 5 maal zo veel DM dan BM
- Wat zou de donkere materie kunnen zijn?
  - Donkere massa is toch baryonisch: MACHO's (Massive Compact Halo Objects) zoals bruine dwergen, zwarte gaten van stellaire omvang. Analyses: kan maximaal 19 % van de DM van Melkweg verklaren
  - HDM (Hot Dark Matter): deeltjes met relativistische snelheden; zware neutrino's. Maar: HDM zal onvoldoende verdichten door zwaartekracht. Dan: vorming van sterrenstelsels onverklaarbaar
  - CDM (Cold Dark Matter): hypothetische deeltjes, zoals WIMPS (Weakly Interacting Massive Particles, alleen interactie met gravitatie niet elektromagnetisch of sterk/zwak) of Axions
- Conclusie: We hebben waarschijnlijk te maken met CDM

Natuurkrachten

- Sterke kernkracht
  - Maakt atoomkernen stabiel en is verantwoordelijk voor kernfusie
  - Sterkste kracht: grootte 1
- Elektromagnetische kracht
  - Verantwoordelijk voor elektromagnetische straling (fotonen, licht etc.)
  - Maakt moleculen, bestaande uit atomen, mogelijk
  - Op een na sterkste kracht: grootte 1/137
- Zwakke kernkracht
  - Verantwoordelijk voor radioactief verval
  - grootte: 10^{-4}
- Zwaartekracht
  - Verantwoordelijk voor het ontstaan van sterren, sterrenstelsels, etc.
  - Heel erg klein: grootte 10^{-38}

Hiervan is zwaartekracht het slechtst begrepen. Quantummechanica en Einstein's zwaartekrachttheorie kloppen onderling niet. Een nieuwe theorie: "Quantum Gravity" probeert dit op te lossen

Donkere energie

- "Quantum Gravity" probeert de ART en QM (quantum-mechanica) met elkaar in overeenstemming te brengen
- "Quantum Gravity" theorie doet voorspelling van energiedichtheid van donkere energie
- "Quantum gravity" voorspelt: $u_{vac} \approx 10^{111}\ \mathrm{J/m^3}$
- Uit Planck metingen volgt donkere energiedichtheid:

$$u_{vac} = \rho_\Lambda c^2 = 5{,}4 \cdot 10^{-10}\ \mathrm{J/m^3}$$

- "Quantum Gravity" is dus (nog) een factor 10^{120} fout
- Als "Quantum Gravity" juist zou zijn, dan is heelalexpansie dermate snel, dat nooit sterren en sterrenstelsels konden ontstaan

Huidige kosmologische model

- De grote meerderheid van astronomen en kosmologen gaan uit van het bestaan van:
  - "Big Bang" ofwel Oerknal
  - Koude Donkere Materie, CDM, om o.a. dynamica en ontstaan van sterrenstelsels te kunnen verklaren
  - Donkere energie, gekenmerkt door kosmologische constante Λ , om versnelde uitdijing van heelal te verklaren
- Men spreekt van: ΛCDM oerknalmodel
- Dit is het: Standaard Kosmologiemodel

Schatting Heelalleeftijd

- Eenvoudigste aanname: expansiesnelheid is constant

$$a = Ct$$

- Blijkt een leeg heelal te betreffen (geen straling, geen materie en geen donkere energie)
- Dan volgt voor heelalleeftijd:

$$t_0 = \frac{1}{H_0} = \frac{1}{67,7}\ \text{s.Mpc/km} = 14,4\ \text{Gj}$$

- Verbluffend dicht bij de thans bekende waarde: 13,80 Gj

- Deze tijd noemt men ook de Hubble tijd:

$$t_H = \frac{1}{H_0} = 14,4\ \text{Gj}$$

Heelalleeftijd volgens Planck

- Met de Planck data is een goede schatting te maken van de heelalleeftijd:

$$t_0 = 13{,}799 \pm 0{,}038 \text{ Gj}$$

- Heelalleeftijd is overigens sterk afhankelijk van de samenstelling van het heelal
  - Indien heelal alleen straling zou bevatten (zoals men zou verwachten a.g.v. annihilatie van materie met antimaterie)

$$t_0 = 7{,}21 \text{ Gj}$$

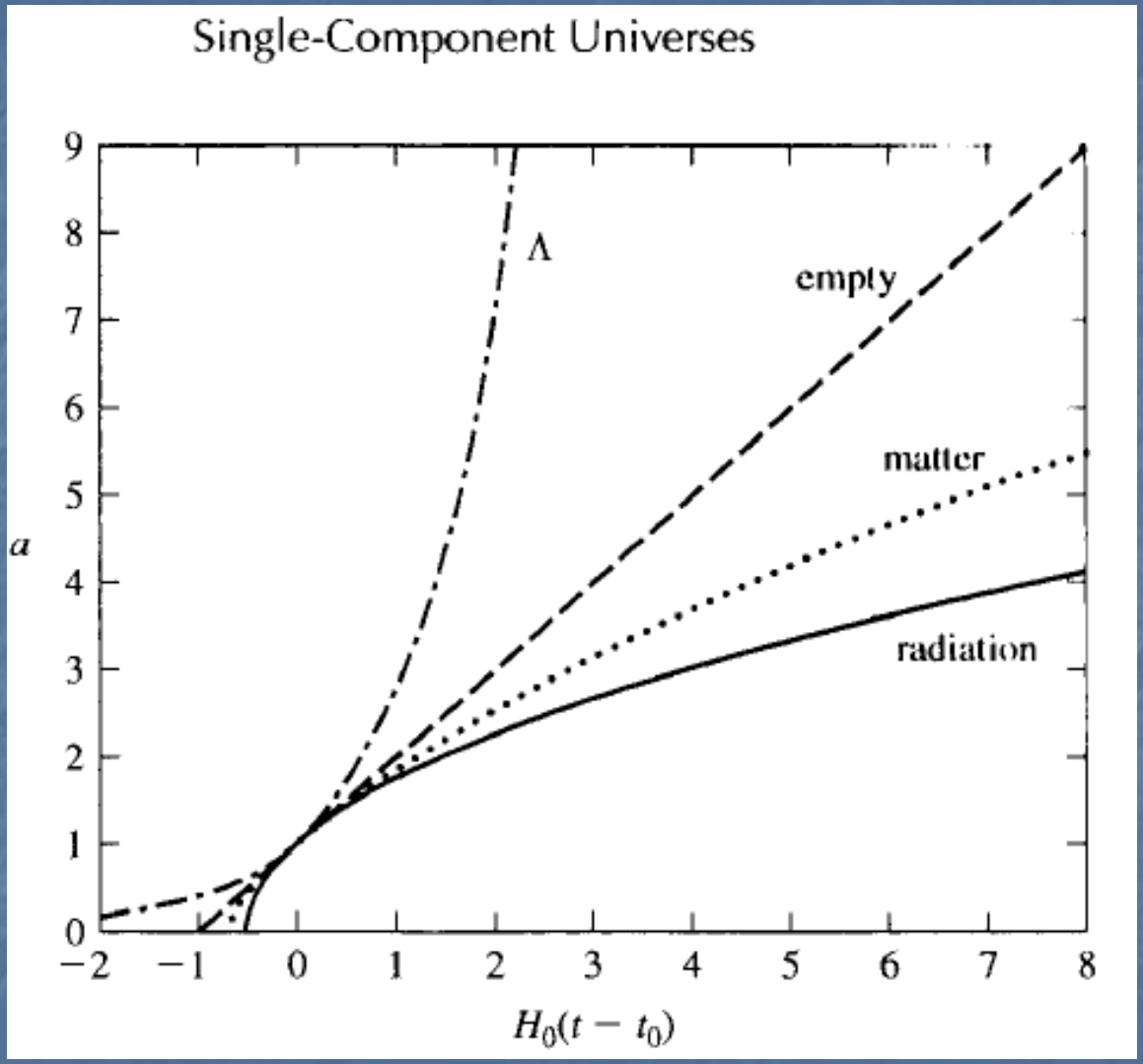
  - Indien heelal alleen gevuld zou zijn met materie (zoals het lijkt te zijn met de Newtoniaanse afleiding van Friedmann) dan is heelalleeftijd:

$$t_0 = 9{,}61 \text{ Gj}$$

  - Heelal met alleen donkere energie ("de Sitter" heelal):

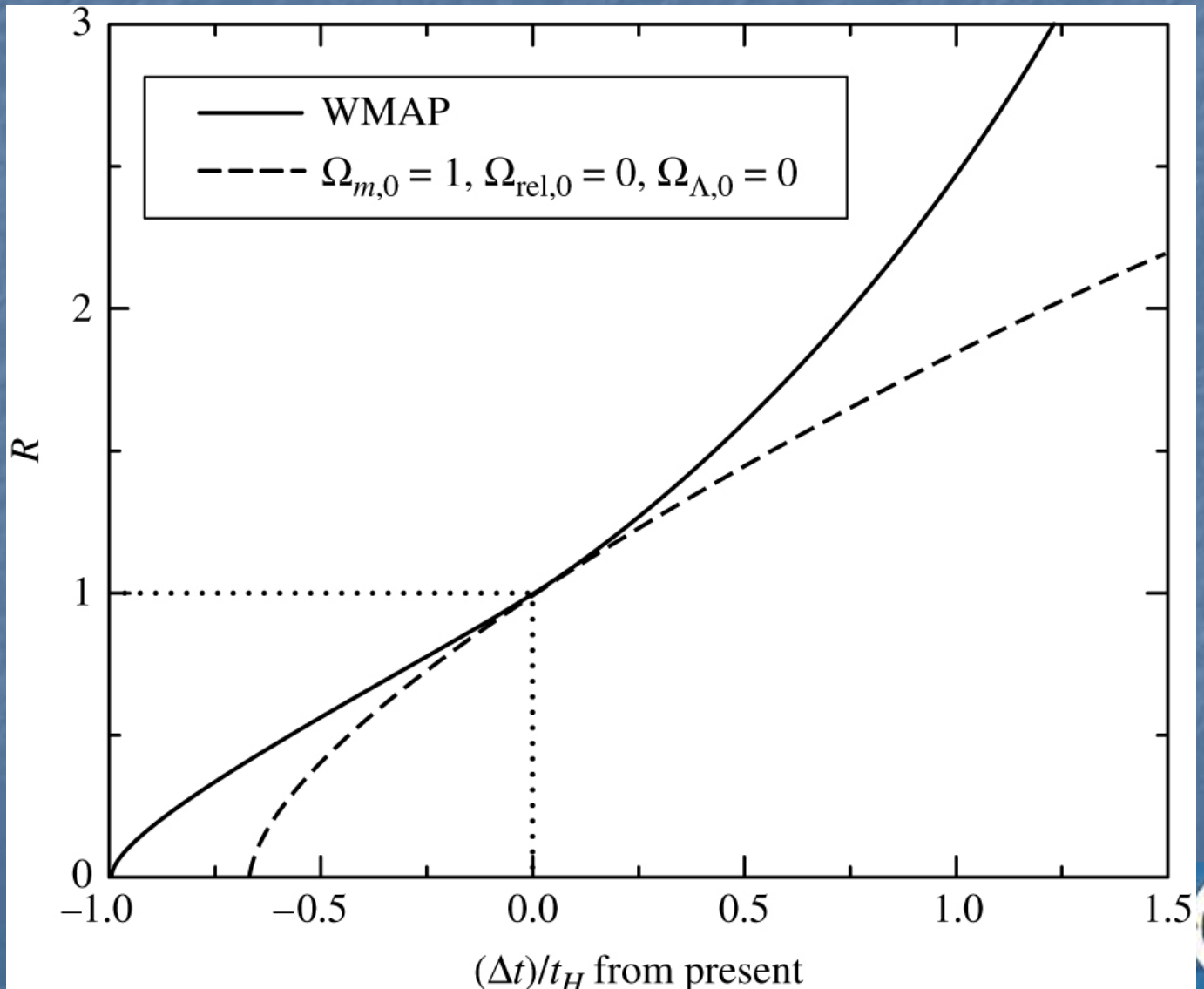
Geen "big bang": heelalleeftijd oneindig groot

Heelalgrootte als functie van tijd



Heelal expansie

- Volle lijn geeft expansie van huidige (vlakke) heelal



Roodverschuiving

- Roodverschuiving z is het verschijnsel dat de golflengte van straling groter wordt nadat de straling is uitgezonden:

$$z = \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_e}$$

z = roodverschuiving

λ_e = golflengte bij emissie van de straling

λ_o = golflengte zoals waargenomen

$\Delta\lambda$ = toename van de golflengte

- Er zijn 3 soorten roodverschuiving
  - Snelheidsroodverschuiving (Doppler effect): verwijderende stralingsbronnen vertonen roodverschuiving
  - Gravitationele roodverschuiving: straling die zich van een massa verwijdert vertoont ook roodverschuiving
  - Kosmologische roodverschuiving: Door de uitdijing van het heelal neemt de golflengte in dezelfde mate toe als de uitdijing
- Hier alleen kosmologische roodverschuiving van belang

Roodverschuiving en schaalfactor

- Uit de definitie van roodverschuiving en het feit dat de golflengte toeneemt met de uitdijing van het heelal volgt een eenvoudig verband tussen schaalfactor en roodverschuiving:

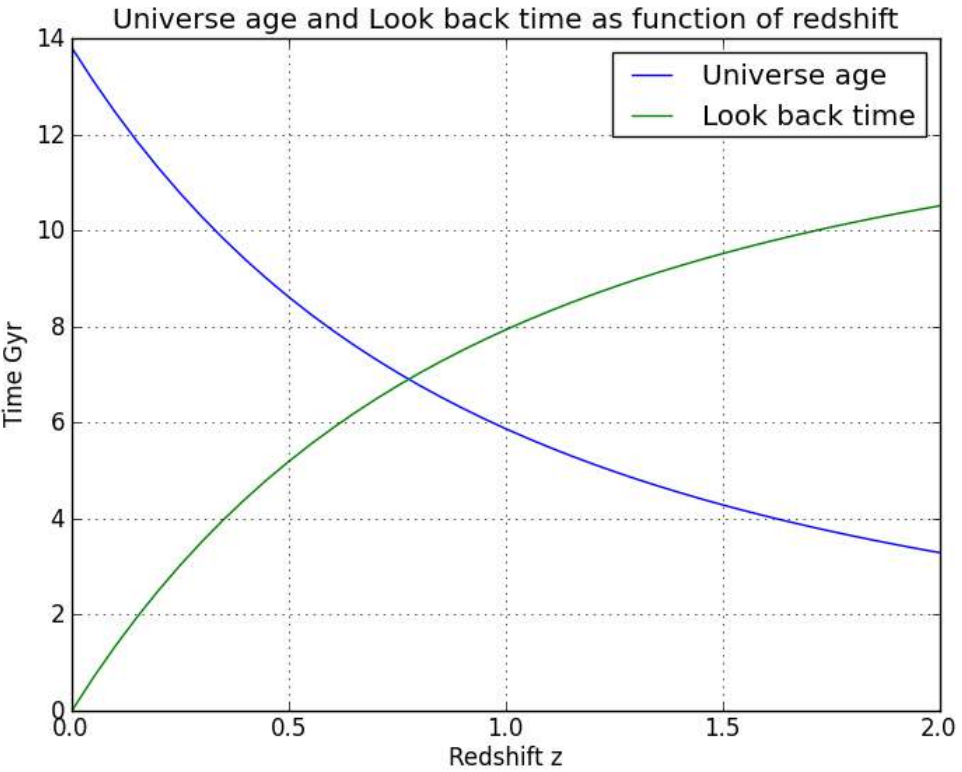
$$a = \frac{1}{z+1}$$

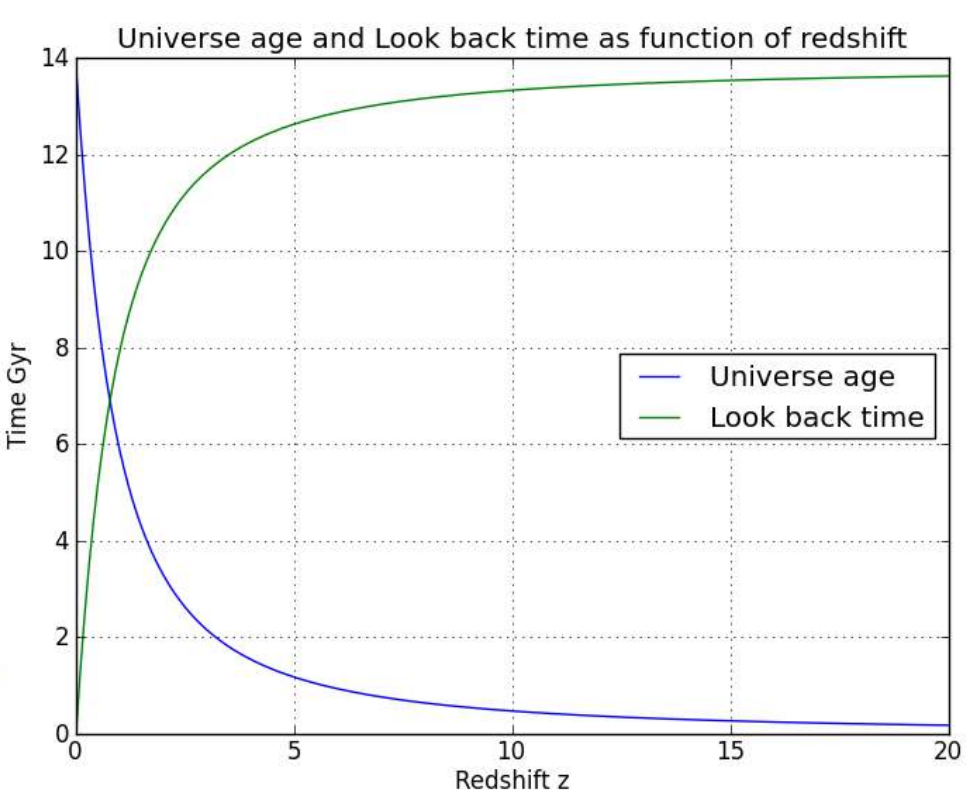
- Door meting van roodverschuiving van licht uit het verre heelal, uitgezonden in het verleden, is het dus mogelijk om de schaalfactor op dat moment te bepalen!

Roodverschuiving, tijden en afstanden

- Kosmologen spreken vrijwel altijd over (kosmologische) roodverschuiving z
- Voor anderen vaak onduidelijk: als voorbeeld een sterrenstelsel waargenomen op roodverschuiving $z = 1$
  - We kijken in het verleden. Relatieve heelalgrootte bij lichtemissie: schaalfactor a volgt uit roodverschuiving $z = 1$ ➔ $a = 1/(z+1) = 0{,}5$
  - Leeftijd van toenmalige heelal kan met Friedmann vgl berekend worden: $z = 1$ ➔ $t_{z=1} = 5{,}87$ Gj
  - Terugkijktijd is huidige heelalleeftijd minus leeftijd bij waargenomen roodverschuiving: $t_{terugkijk} = t_0 - t_{z=1} = 13{,}80 - 5{,}87 = 7{,}93$ Gj
  - Huidige afstand ("proper distance") tot sterrenstelsel is groter dan lichtreistijd suggereert (7,93 Glj), omdat heelal verder expandeerde. Met Friedmann volgt: afstand $d_{thans} = 11{,}07$ Glj
  - Maar afstand op moment van lichtemissie was veel kleiner, weer met schaalfactor: $d_{emissie} = d_{thans}/(1+z) = 5{,}54$ Glj
  - We kijken dus 7,93 Gj in het verleden naar stelsel op 11,07 Glj afstand

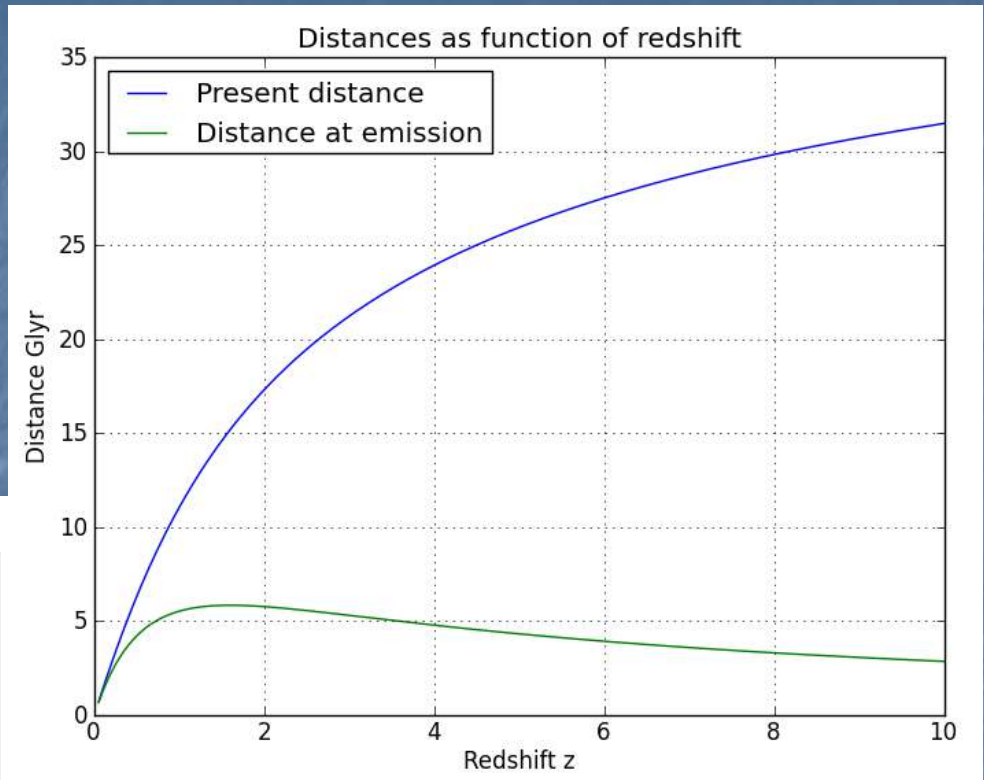
Heelalleeftijd en terugkijktijd als fct *z*

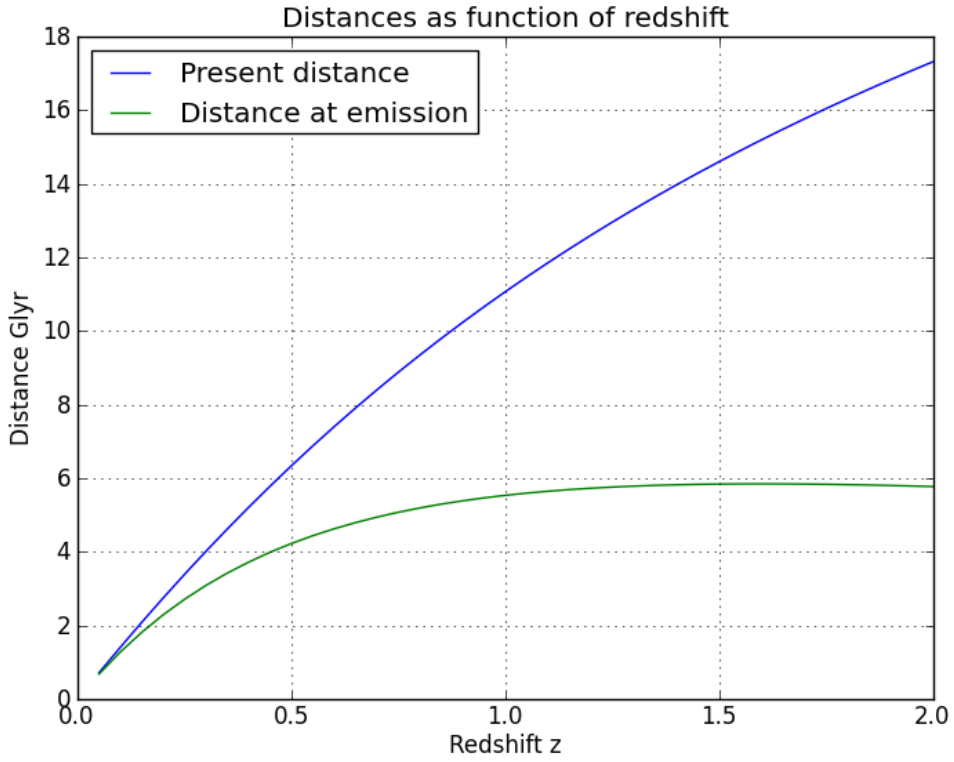




AWSV Metius

Huidige en afstand bij emissie als fct *z*





AWSV Metius

Horizon

- Objecten waarvan het licht ons gedurende heelalleeftijd heeft kunnen bereiken zijn waarneembaar
- Dat is horizonafstand of "proper distance" (werkelijke afstand) tot de grens van het nu waarneembare heelal
- Voor het huidige heelal: d_h = 46,3 Glj
- Horizon afstand 46,3 Glj is dus de afstand die licht afgelegd zou hebben in 13,8 Gj rekening houdend met heelalexpansie
- Naarmate het heelal ouder wordt neemt de horizon afstand toe
- Op dit moment is het verste waargenomen sterrenstelsel: GN-z11: z = 11,1, $t_{terugkijk}$ = 13,4 Gj en afstand 32,2 Glj
- Hieruit blijkt 400 Mj na big bang waren er al sterren en sterrenstelsels

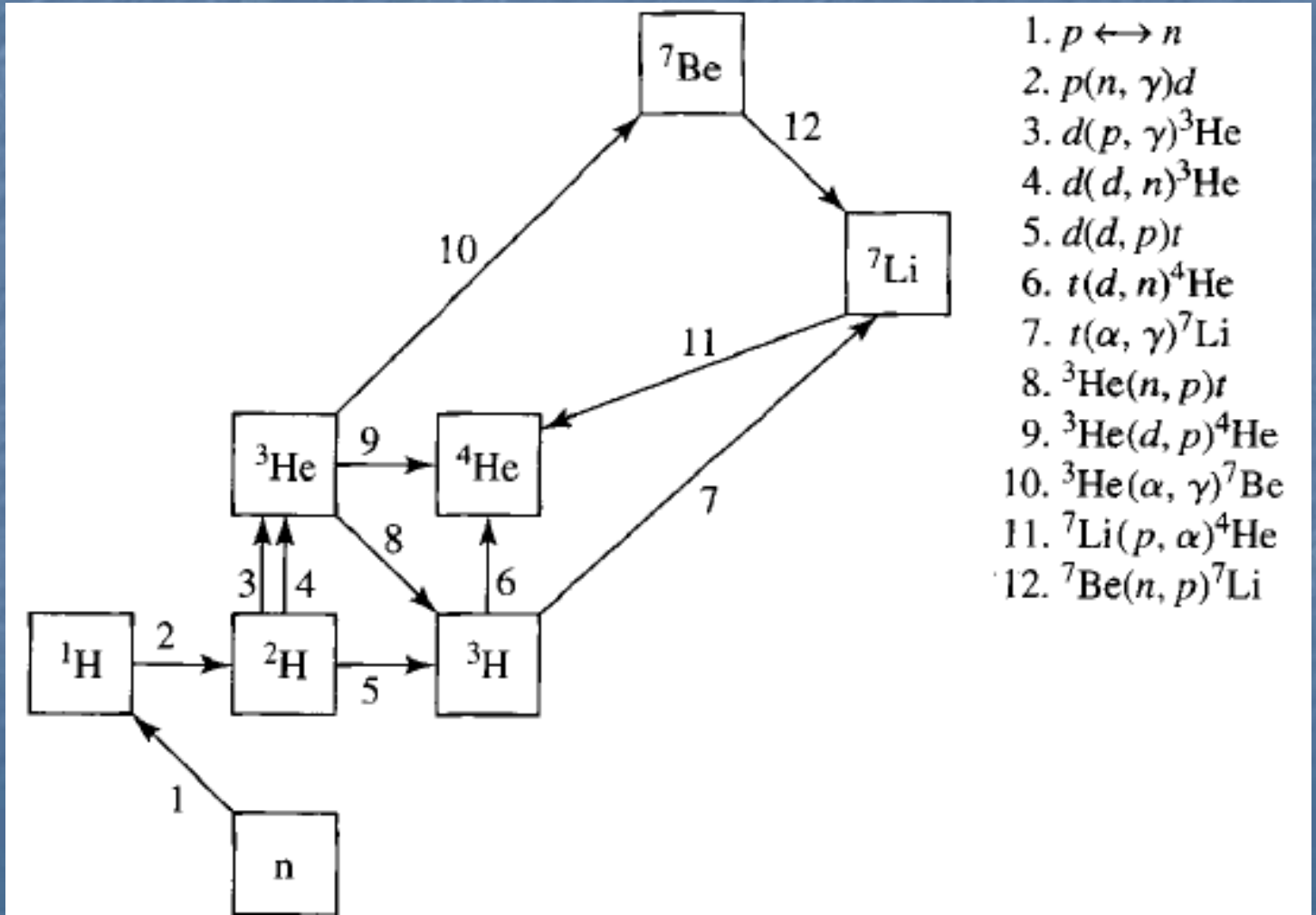
“Big Bang” Nucleosynthese (BBN)

- Hiermee bedoelt men de vorming van materie
- De eerste 3 minuten na “big bang” waren bepalend voor de materie in het heelal
- In die periode was er sprake van een door straling gedomineerd heelal
- Huidige waarnemingen geven voor het oerheelal:

  ≈76 % H en ≈24 % He, plus een beetje Li

Vorming van waterstof en helium

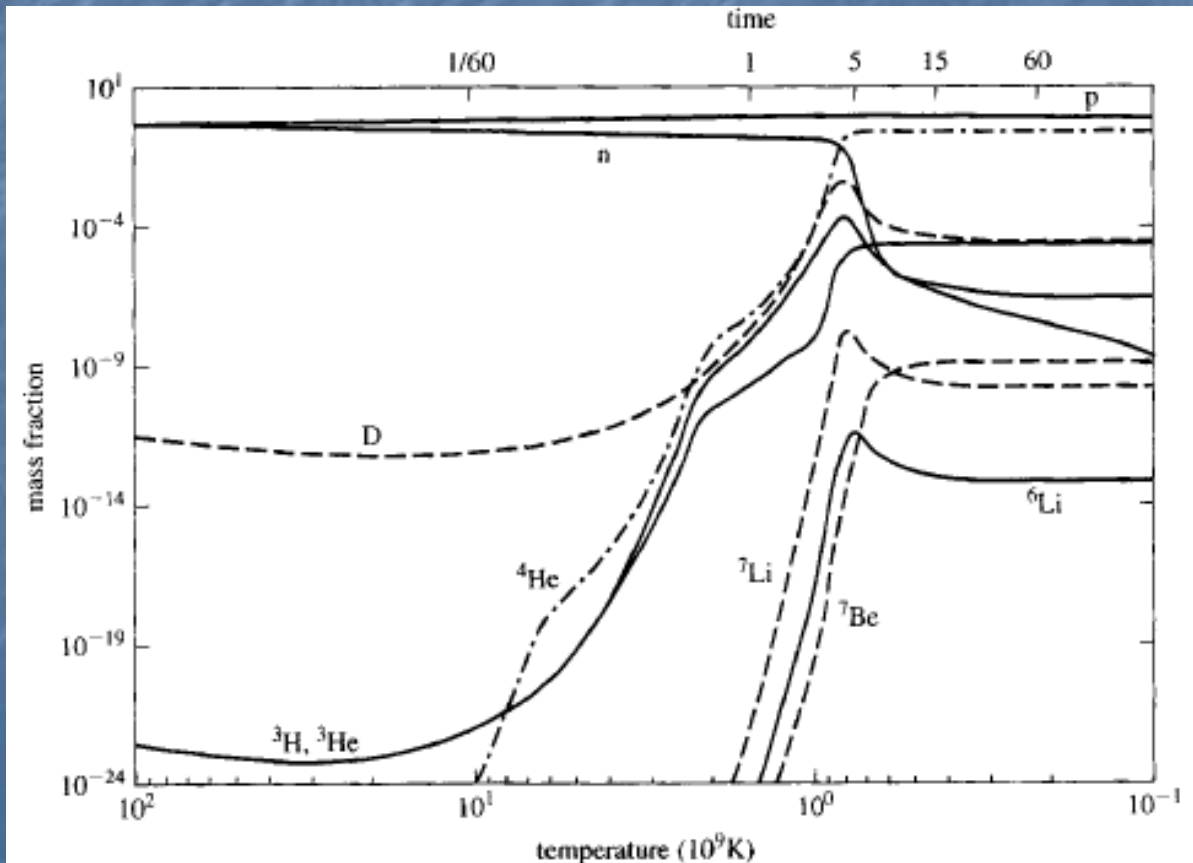
- Deeltjesfysici zijn in staat om dit proces gedetailleerd te simuleren, rekening houdend met mogelijke reacties, reactiesnelheden en temperatuur als functie van de tijd:



BBN simulatie-resultaat

- De massafractie van gevormde deeltjes als functie van temperatuur en tijd
- Hieruit blijkt dat na $t \approx 15$ minuten en $z \approx 140$ miljoen BBN eindigt en het heelal ≈ 76% waterstof en ≈ 24 % helium bevat
- Dit komt goed overeen met waarnemingen

Huidige kosmologische ΛCDM model blijkbaar dicht bij waarheid



Na BBN: Recombinatie en ontkoppeling

- Na BBN zijn belangrijke gebeurtenissen:
  - Recombinatie (verkeerde term: in feite voor de eerste keer combinatie):

"Atoomkernen binden met elektronen en vormen atomen"

Heelal met geïoniseerd plasma wordt heelal met gas van neutrale atomen

  - Ontkoppeling:

"Fotonen botsen niet meer met materie (elektronen)"

Fotonen kunnen ongehinderd bewegen: het heelal wordt transparant

Deze fotonen vormen dus kosmologische achtergrond straling (CMB)

Recombinatie en Ontkoppeling

- Recombinatie gebeurt tussen: $z \approx 1600 - 1000$ en heelalleeftijd $t \approx 195.000 - 400.000$ jaar
- Formele recombinatie: helft atoomkernen nog niet gebonden aan elektronen bij: $z \approx 1370$, $t \approx 252.000$ jaar en $T \approx 3740$ K

- Ontkoppeling: moment dat er zo weinig vrije elektronen zijn dat fotonen niet meer met elektronen botsen
- Dan ontstaat CMB, kosmische achtergrondstraling
- Gebeurt bij: $z \approx 1090$, $t \approx 372.000$ jaar en $T \approx 2976$ K

Structuurvorming

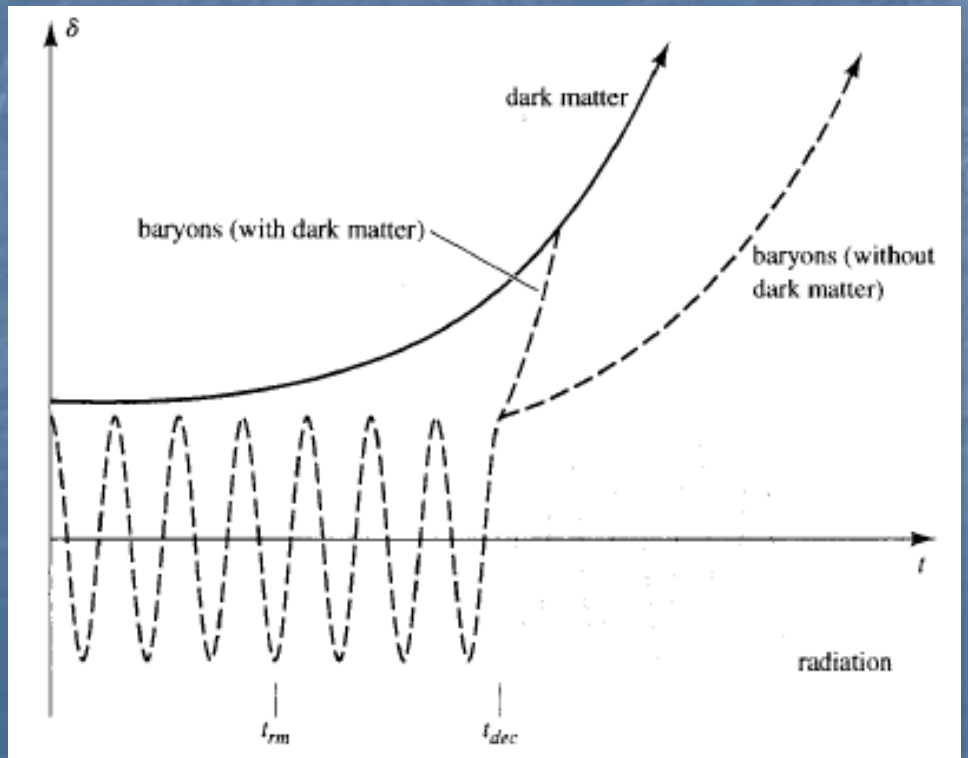
- CMB vertoont kleine temperatuurvariaties: $\frac{\delta T}{T} \approx 1 - 7{,}5 \cdot 10^{-5}$
- Daaruit volgt dat dichtheidsvariaties op dat moment (t = 372.000 jaar):

$$\frac{\delta \rho}{\rho} = 3\frac{\delta T}{T} \approx 0{,}3 - 2{,}3 \cdot 10^{-4}$$

- Die variaties hebben geleid tot vorming van sterren en sterrenstelsels als gevolg van zwaartekracht
- Baryonische materie en donkere materie gedragen zich daarbij verschillend:
  - Voor ontkoppeling zal alleen DM verdichten
  - BM verdicht zich niet vóór ontkoppeling en alleen dichtheids-variaties met een massa groter dan ≈ 10^{13} $M_\odot$ blijven bestaan
  - Dat betreft massa's groot genoeg voor vorming van clusters en superclusters van sterrenstelsels

Vorming eerste sterrenstelsels

- Recent waargenomen sterrenstelsel GN-z11: 13,4 Gj geleden gevormd, dus bij: t_{heelal} = 400 Mj
- Met alléén BM kan dit stelsel nooit gevormd kan zijn in beschikbare tijd: verdichtingssnelheid van BM is daarvoor te laag
- Blijkbaar speelde DM een essentiële rol:
- Conclusie: sterrenstelsels konden alleen ontstaan als gevolg van de invloed van DM



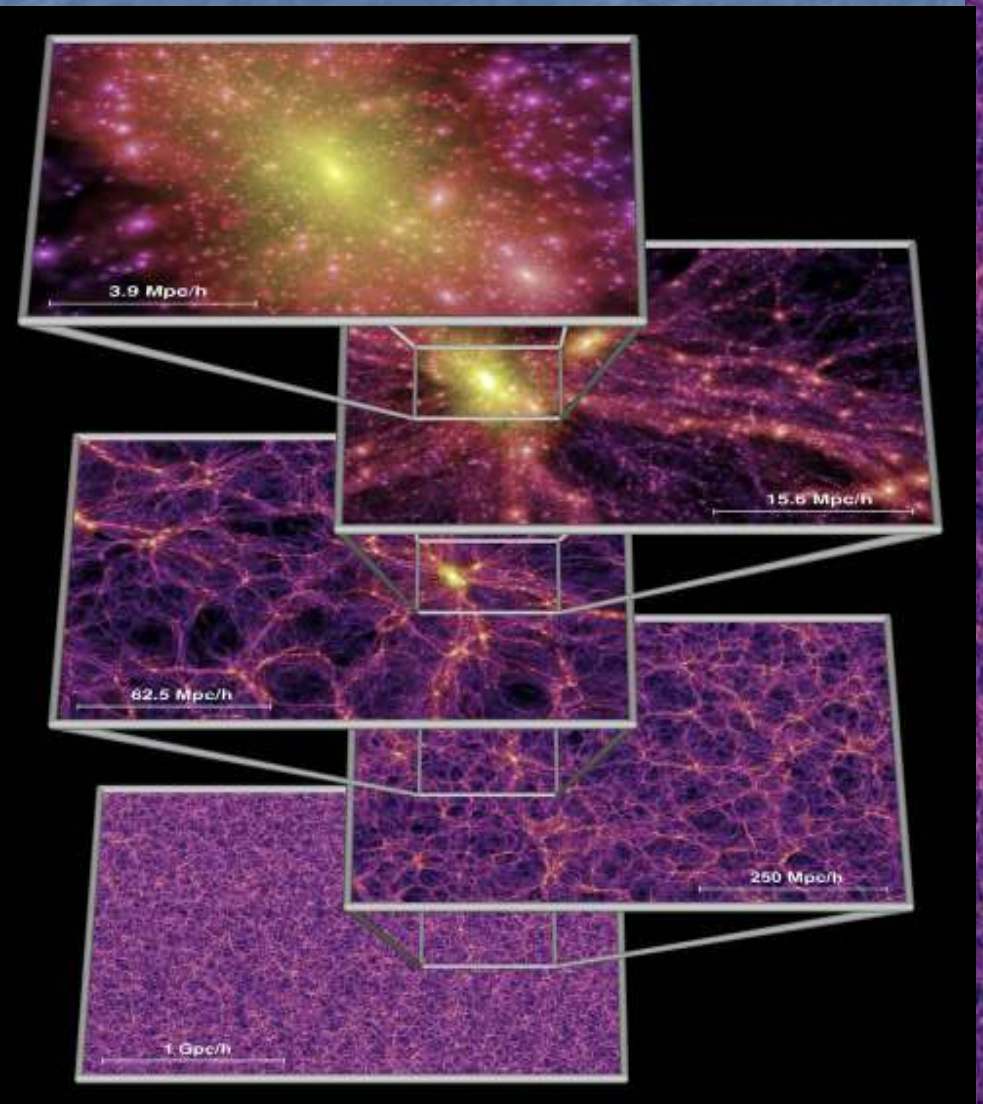
Top down of bottom up

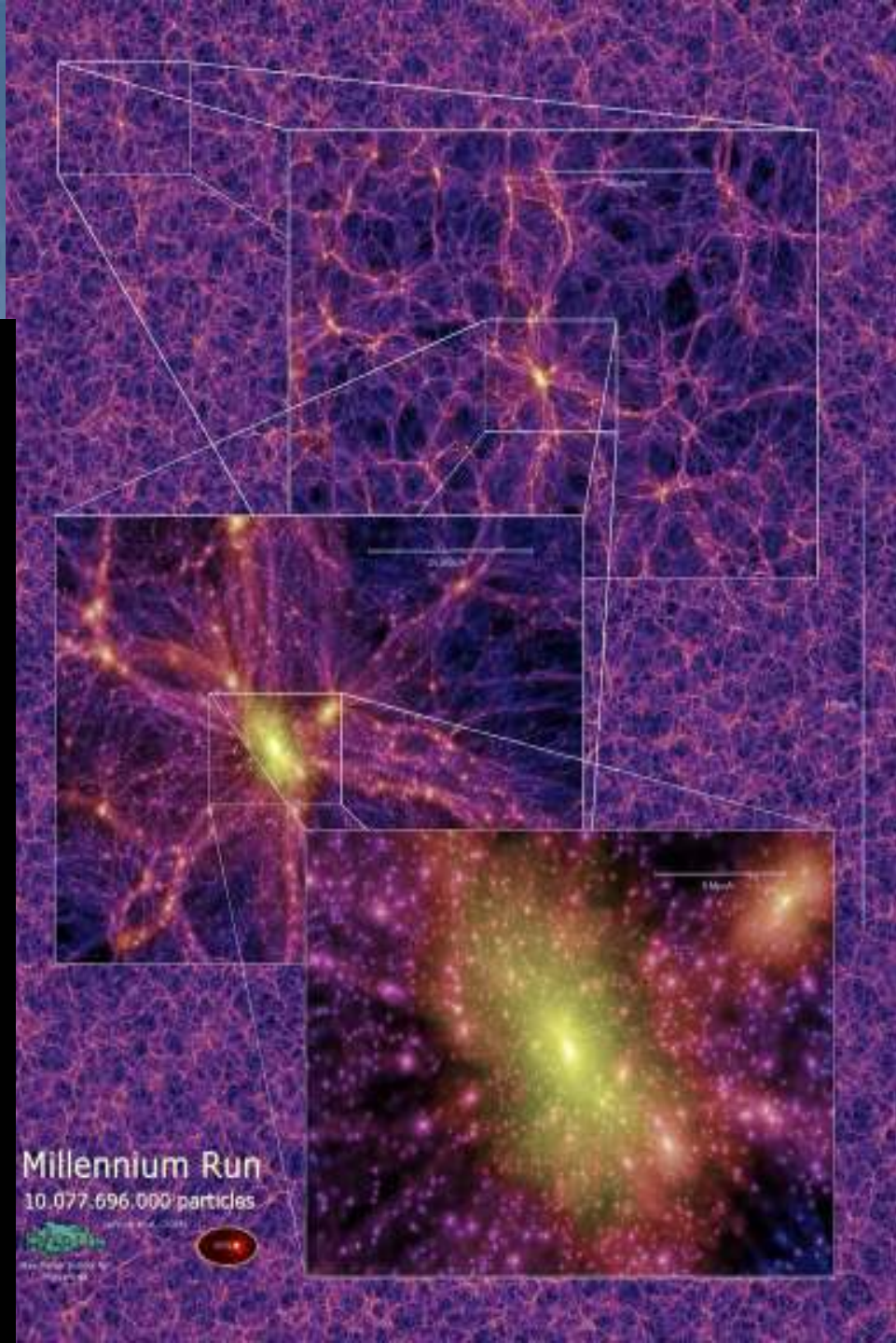
- Rond 1970: twee visies hoe vorming van superclusters, clusters, sterrenstelsels en sterren is verlopen
- Top down: eerst verdichting tot filament super-structuren, waaruit later door fragmentatie clusters en sterrenstelsels met sterren ontstaan
  - Na ontkoppeling: BM fluctuaties 10^{13} - 10^{15} zonsmassa's als startpunt aanwezig: ondersteunt top down visie
  - Maar fragmentatie vereist koeling; dat kan niet zo snel gegaan zijn; maakt top down onwaarschijnlijk
- Bottom up: als eerste ontstaan sterren en sterrenstelsels, later door samenklontering vorming clusters en superclusters
  - Waarnemingen en simulaties ondersteunen deze visie, maar DM was essentieel

Millennium simulatie

- Millenium simulatie (Virgo consortium: UK, Duitsland, US, Japan, Canada)
  - 10 miljard deeltjes (1 deeltje: CDM van 1 miljoen $M_\odot$)
  - In kubus van 2^3 miljard lichtjaar
  - Begin simulatie: Ontkoppeling
  - Fluctuaties in overeenstemming met CMB
  - Einde simulatie: Huidige tijd, $z = 0$
  - Resultaat ca. 20 miljoen sterrenstelsels
  - Rekentijd meer dan maand op supercomputer Max Planck instituut

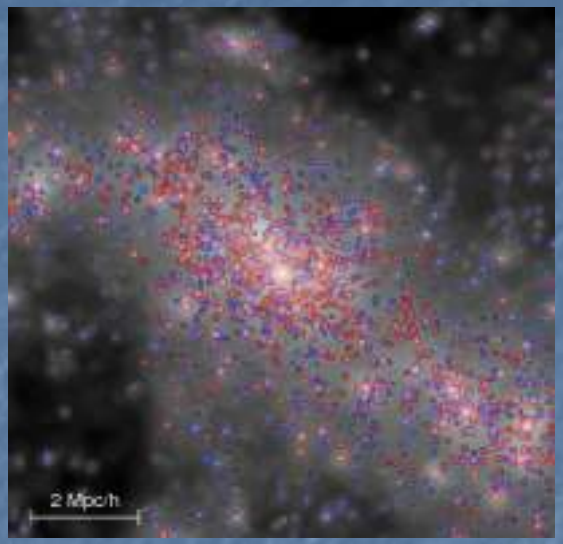
Millenium simulatie

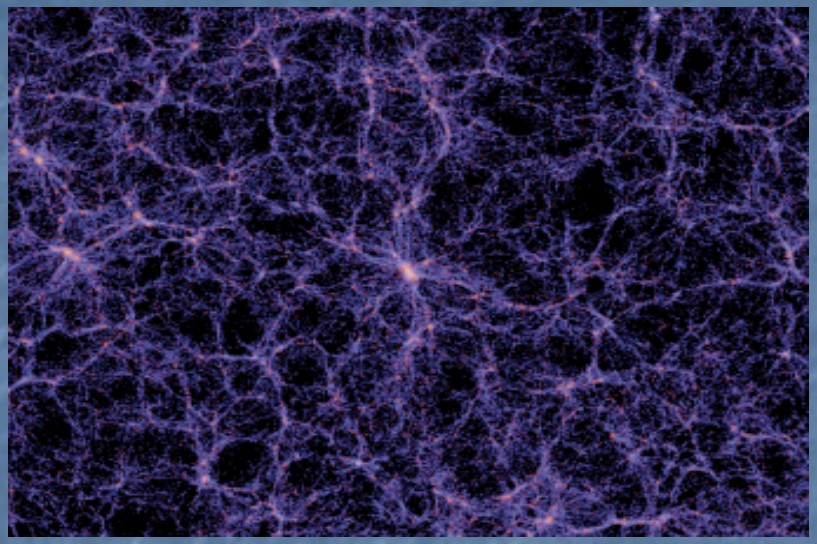




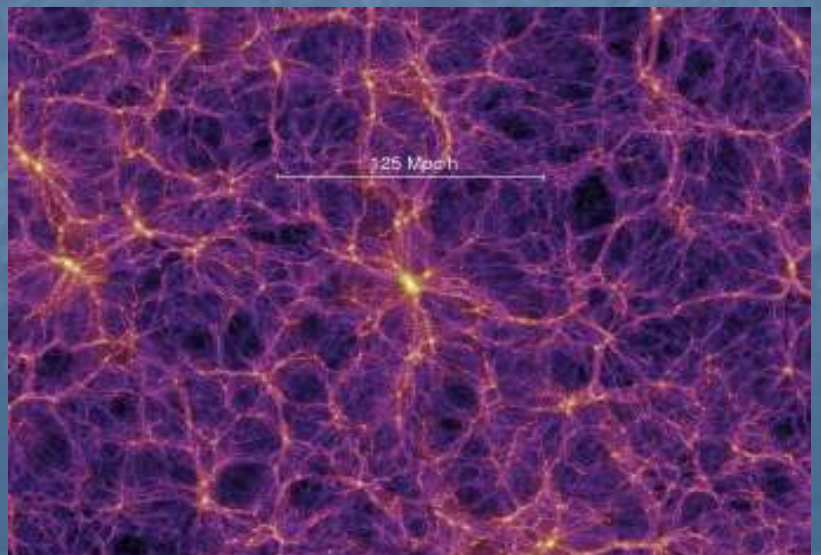
Millennium Simulatie

Verdeling van sterrenstelsels (BM):



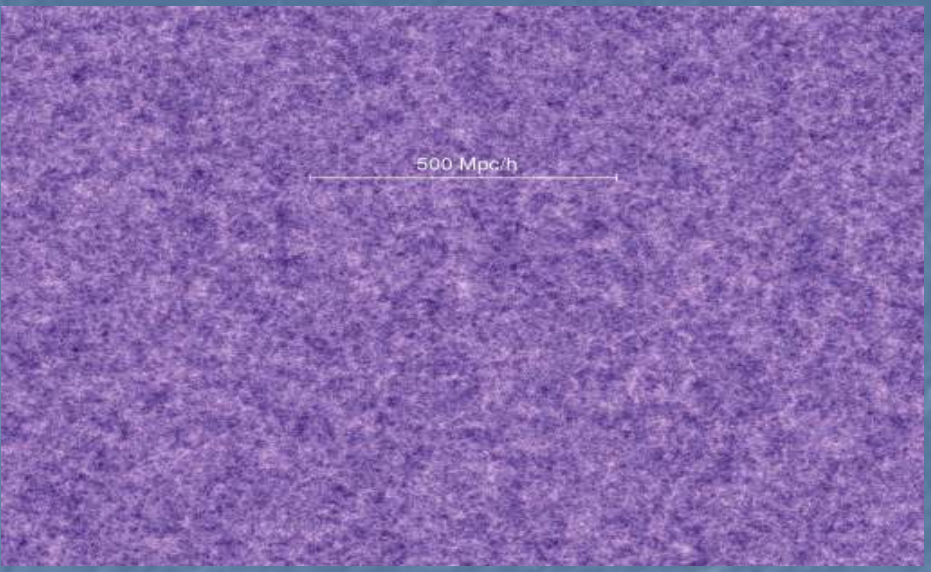


Verdeling van donkere materie (DM):

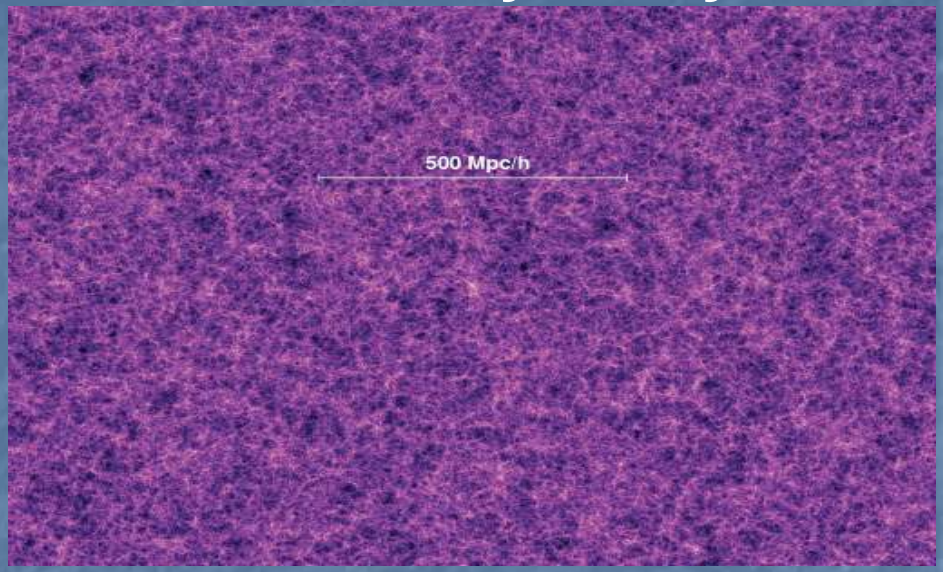


Millennium simulatie

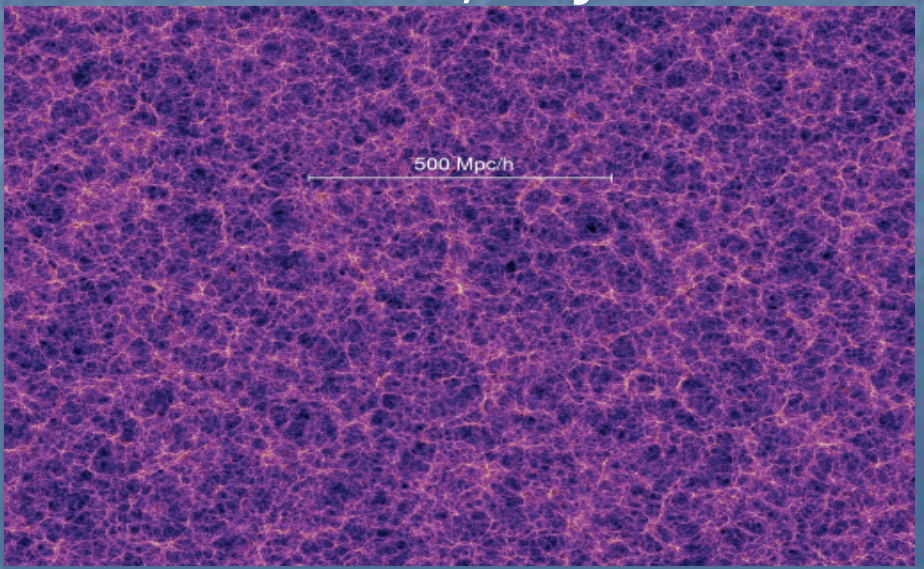
t = 210 Mj



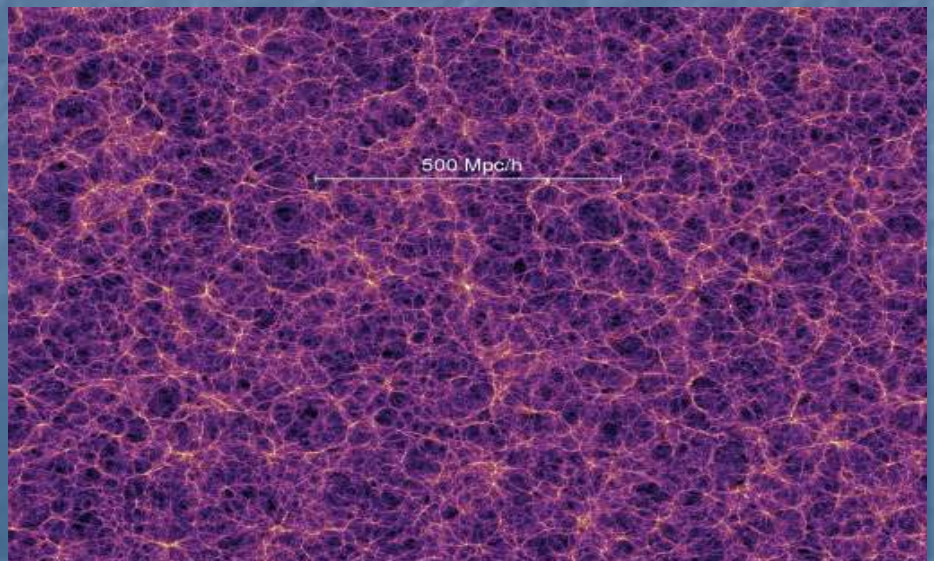
t = 1000 Mj = 1 Gj



t = 4,7 Gj

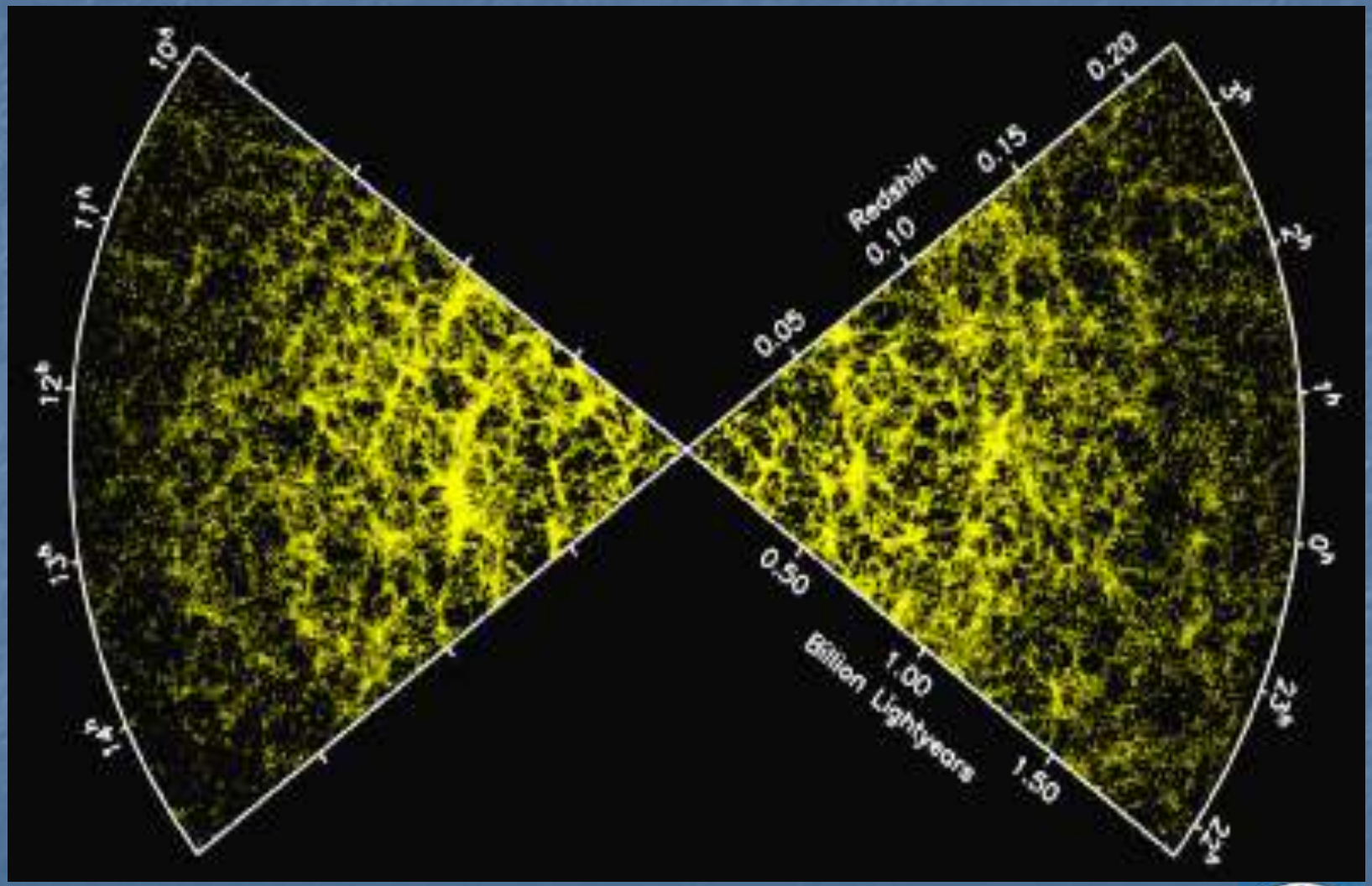


t = 13,6 Gj



Waarnemingen

- 2dF Redshift Survey



Millenium simulatie

- Resultaten komen redelijk goed overeen met waarnemingen
- Conclusies:
  - CDM is verantwoordelijk voor vorming van sterrenstelsels
  - Vooral “Bottom up” vorming is waarschijnlijk

Wanneer eerste sterrenstelsels

Dichtheidsvariaties CMB	$z_{ontk} = 1091$	
Bolvormige sterrenstelsels	$z \approx 20$	$t_L \approx 13{,}6$ Gj
GN-z11 (recente waarneming)	$z = 11{,}1$	$t_L \approx 13{,}4$ Gj
Eerste 10 % zware elementen	$z \geq 3$	$t_L \geq 11{,}6$ Gj
Clusters van sterrenstelsels	$z \approx 2$	$t_L \approx 10{,}5$ Gj
Dunne schijven spiraalstelsels	$z \approx 1$	$t_L \approx 7{,}9$ Gj
Superclusters	$z \approx 1$	$t_L \approx 7{,}9$ Gj

Grote structuren (clusters en super-clusters) zijn later ontstaan dan sterrenstelsels

Problemen met ΛCDM model

- Waarom is het heelal zo ontzettend vlak? Kan toch geen toeval zijn?
- Waarom is de CMB in alle richtingen gelijk, terwijl grote delen van die achtergrond nooit in contact zijn geweest?
- Waarom zijn er geen magnetische monopolen, die er volgens sommige GUT* theorieën zouden moeten zijn?

*GUT = "Grand Unified Theory", die probeert de elektrozwakke kracht te unificeren met de sterke kernkracht (GUT is nog niet aangetoond en natuurkundigen zijn het niet eens over deze theorie)

Inflatie

- In 1980/1983 vinden Alan Guth (VS – Stanford University) en Andrei Linde (Lebedev physical institute Moskou, thans Stanford University) oplossing voor genoemde problemen: Inflatie
  - Direct na "big bang" is heelal uiterst compact
  - Ieder punt in dat zeer compacte heelal was nog in causaal contact met elkaar
  - Gedurende een fractie van een seconde is er exponentiële expansie: inflatie
  - Daarna volgt de expansie zoals volgens standaard ΛCDM model, zoals eerder besproken
- Inflatietheorie nog niet experimenteel bevestigd
- Model om de inflatie te verklaren gaat uit van een scalair veld: inflatieveld (nogal speculatief, maar Higgs voorspelde rond 1965 ook het Higgs deeltje met een Higgs veld; aangetoond in 2012 in LHC)

Inflatie lost de drie problemen op

- Gelijkmatigheid van CMB volgt direct uit de inflatiefactor:
  - Huidige heelal is slechts 10^{-16} deel van het heelal dat in contact geweest is
- Vlakheid is ook een direct gevolg van inflatie:
  - Indien het heelal niet vlak was voor begin van inflatie dan is het heelal vrijwel vlak na een inflatiefactor van $2{,}7.10^{43}$
  - (Een klein deel van een bol is vrijwel een plat vlak)
- Monopolen
  - Volgens verschillende GUT theorieën is het goed mogelijk dat er nooit monopolen gevormd zijn, maar:
  - Monopool dichtheid volgens inflatietheorie: 10^{-79} monopool in zichtbare heelal!

Toekomst van het heelal

- Heelal gaat steeds sneller uitdijen – De Hubble constante wordt steeds groter
- Ondanks dat de horizonafstand groter wordt zullen we steeds minder kunnen zien:
  - Sterrenstelsels met $z = 10$ zien we bij $t_{heelal} \approx 0{,}5$ Gj. Het stelsel is zichtbaar tot $t_{heelal} \approx 3{,}3$ Gj en is dus over $\approx 2{,}8$ Gj niet meer zichtbaar
  - Sterrenstelsels met $z = 2$ zien we bij $t_{heelal} \approx 3{,}3$ Gj. Het stelsel is niet meer zichtbaar over ≈ 8 Gj
  - Over nog langere tijd zien we alleen nog maar de door zwaartekracht gebonden sterrenstelsels (lokale groep)
- Sterren komen aan levenseinde, er worden geen sterren meer gevormd en heelal wordt donker en koud
- Hawking straling maakt dat de door sterren gevormde zwarte gaten weer verdwijnen na $\approx 10^{66}$ jaar

Samenvatting

- Huidige kosmologische parameters (volgens Planck missie):
  - Hubble constante: 67,8 km/s.Mpc
  - Heelalleeftijd: 13,8 miljard jaar
  - Inhoud heelal:
    - 30,8 % materie, waarvan 4,9 % baryonisch en 25,9 % donkere materie
    - 69,2 % donkere energie
    - 0,009 % straling
  - Heelal is vrijwel vlak en vele malen groter dan de horizonafstand
  - Temperatuur kosmische achtergrondstraling: 2,73 K
  - Heelal versnelt en wordt erg koud en leeg

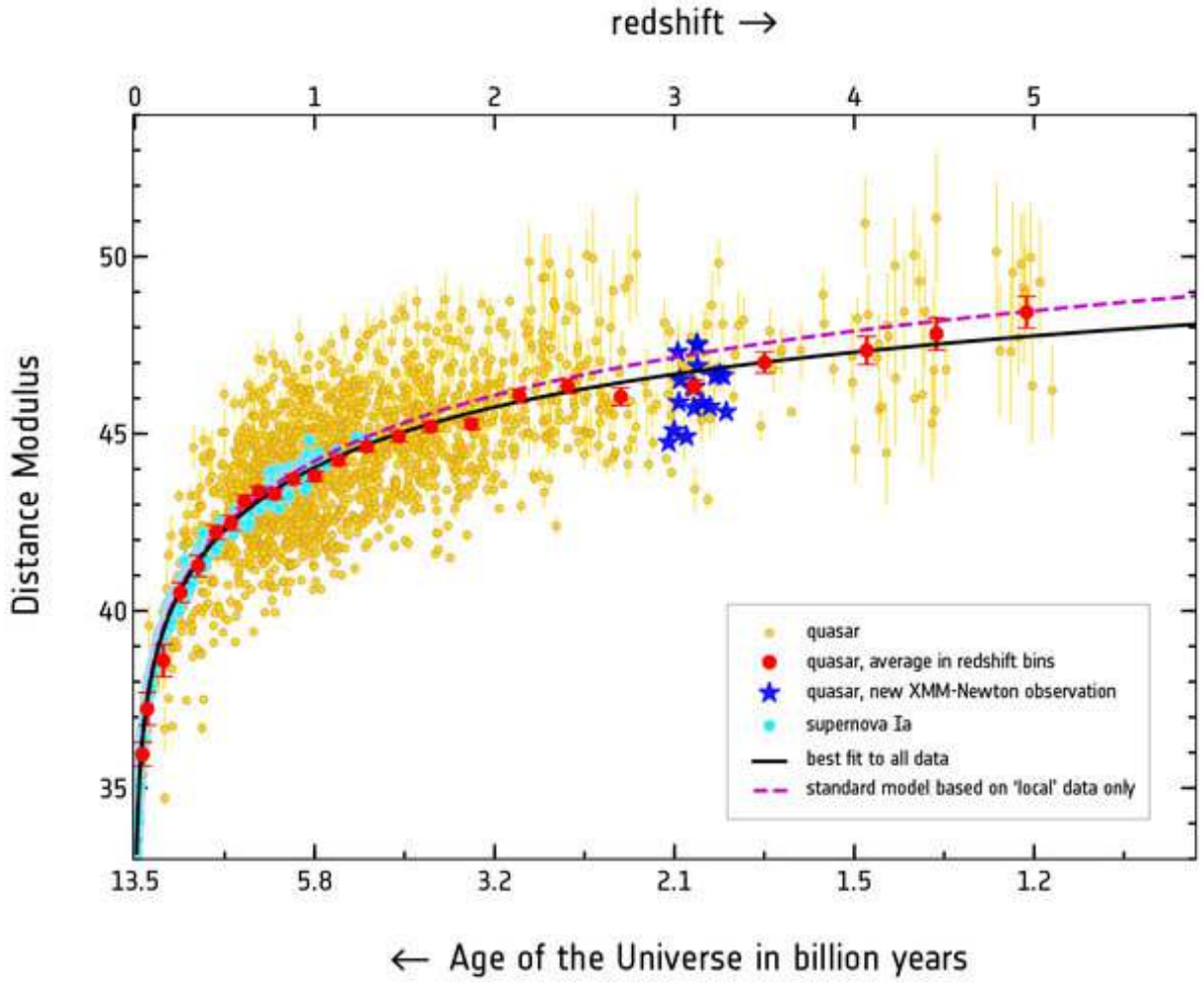
Is het ΛCDM oerknalmodel juist?

- ΛCDM oerknalmodel is dicht bij de waarheid:
  - Waargenomen heelalexpansie
  - Kosmische achtergrondstraling; met bekende fysica goed te verklaren
  - "Big Bang Nucleosynthese"; waargenomen baryonische materie (76 % H en 24 % He) komt goed overeen met simulatieresultaten
  - Geen waarnemingen die het model weerspreken
- Maar:
  - Bij oerknal: oneindige druk en temperatuur??; we begrijpen nog niets van de natuurkunde onder extreme condities
  - Inflatie nog niet experimenteel bevestigd
  - Aard van donkere materie nog duister; bestaat donkere materie wel?
  - Donkere energie; herkomst is nog volstrekt duister
- ΛCDM model juist!!!???

ΛCDM oerknalmodel toch niet correct?

- Januari 2019 paper van Italiaanse en Engelse onderzoekers
- Versnellende uitdijing van heelal is eerder aangetoond door waarnemingen aan supernovae op roodverschuivingen $z <\approx 1$ (terugkijktijd ≈ 8 miljard jaar)
- Nu: waarnemingen aan quasars (sterrenstelsels met actieve kern, die erg veel energie uitstralen) op $z <\approx 5$ (terugkijktijd ≈ 12 miljard jaar)
- Hiermee afstandsmetingen op grotere afstanden mogelijk

Afstand - roodverschuiving relatie



ΛCDM oerknalmodel toch niet correct?

- Consequenties en eerste indruk:
  - Hubble constante zoals bepaald met supernovae te hoog
  - Wellicht de verklaring voor het verschil gevonden door Planck missie (67,8 km/s.Mpc) en supernovae data (≈ 72 km/s.Mpc)
  - Donkere energiedichtheid is wellicht niet constant, maar afhankelijk van schaalfactor en zou in de tijd toenemen

Gebruikte literatuur

- Collegedictaat: “Origin and Evolution of the Universe”, 2015, prof. dr. Henk Hoekstra, Sterrewacht Leiden, Universiteit Leiden
- “An Introduction to Modern Astrophysics”, 2007, Bradley W. Carroll en Dale A. Ostlie, ISBN 0-8053-0402-9, Chapters 29 en 30
- “De kortste introductie: Kosmologie”, 2003, Peter Coles, ISBN 90274 7932 1
- “Cosmological constraints from the Hubble diagram quasars at high redshifts”, 2019, G. Risaldi en E. Lusso, Nature Astronomy

ΛCDM oerknalmodel toch niet correct?

- Zie website:

http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Active_galaxies_point_to_new_physics_of_cosmic_expansion