

Onderwerpen workshop vroege heelal

Deel 1

Geschiedenis

Kosmologische theorie

Oerknal

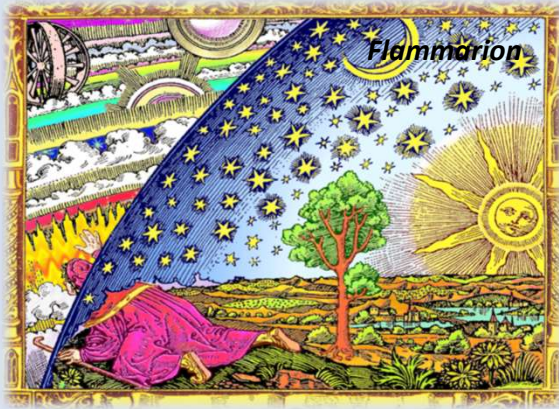
Deel 2

Tijdlijn vroege heelal

Waarnemingen met JWST

Kosmische evolutie

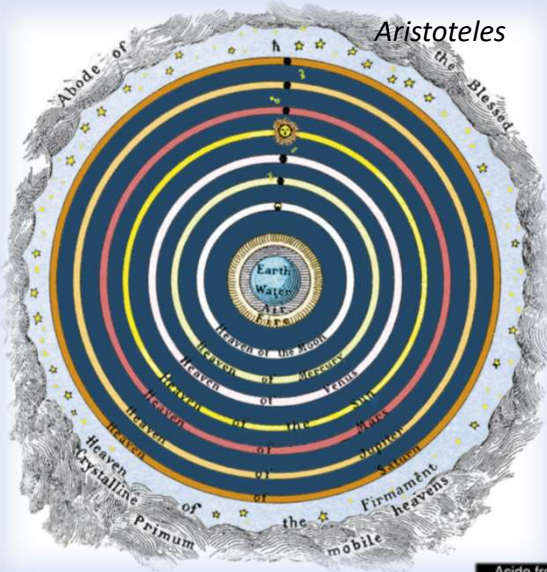
Het vroege heelal



Het eerste begin raakt aan de filosofie (en/of religie), hier de **theorie** en vooral ook de **waarneming**



Geschiedenis



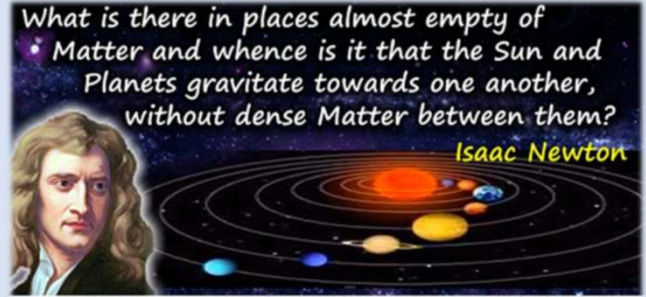
Oudheid en
middeleeuwen

Systeem van Ptolemaeus



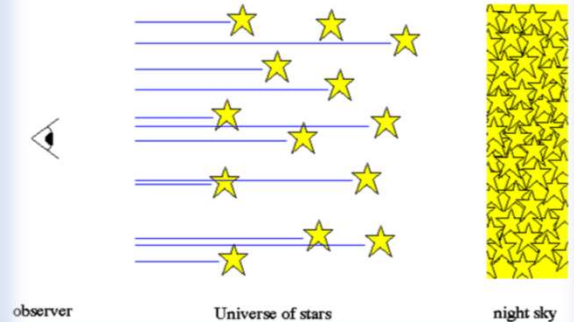
19^e eeuw

Nieuwe tijd: Copernicus, Galilei, Kepler, Newton



More science quotes at Today in Science History todayinsci.com

Olber's paradox 1823



Geboorte huidige heelal idee

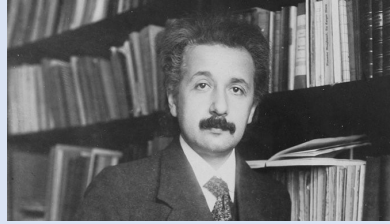
Heelal is groter dan de Melkweg

Henrietta Swan Leavitt



Afstanden meten met Cepheïden (1912), Cosmic distance ladder

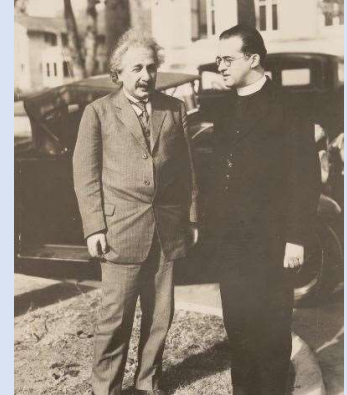
1915 Einstein's
Algemene relativiteitstheorie



1917 Kosmologische constante



1922 Friedman,
wiskundige basis



1927 Lemaitre, expansie



1949 Fred Hoyle's Steady State → big bang

1932 Einstein- De Sittermodel



Uitdijing met
alleen materie,
met $\Lambda=0$ en vlak
heelal



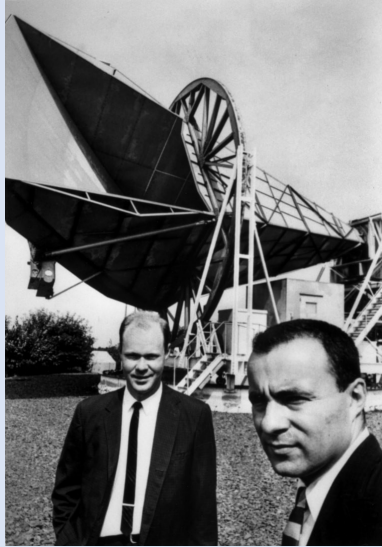
Edwin Hubble

Afstand tot
Andromeda (1924)

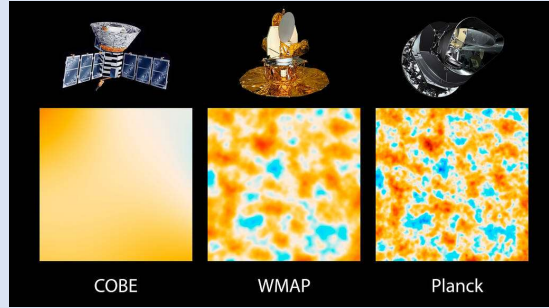
Roodverschuiving en
afstand (1929)

Recente ontwikkelingen

3K microwave background



1964, Bob Wilson and Arno Penzias met een hoorn antenne



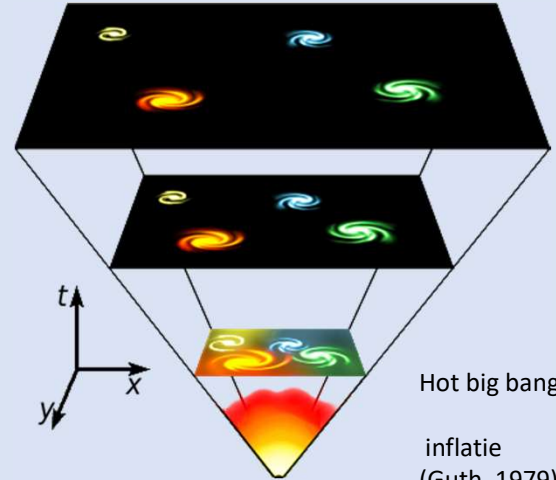
1989 – 2001 - 2009

Λ CDM model
Cold dark matter
Dark energy

1963 Quasars



1998 versnelde uitdijing
(SN type 1a)



Hot big bang,
inflatie
(Guth, 1979)

Kosmologische theorie



waarbij we altijd op zoek moeten zijn naar de waarnemingen

Vraag

Wat zijn een aantal voorbeelden van :

theorieën zonder (directe) waarnemingen:

- String theorie
- Grand unified theories (GUTs)
- Super symmetrie

conclusies uit waarnemingen m.b.v. veel theorie:

- Donkere energie
- Donkere materie

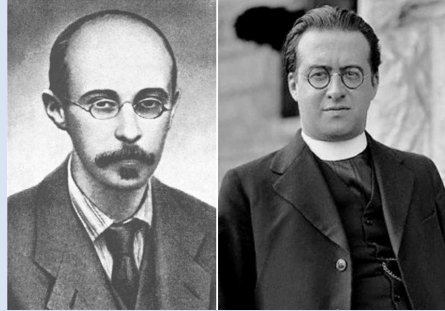
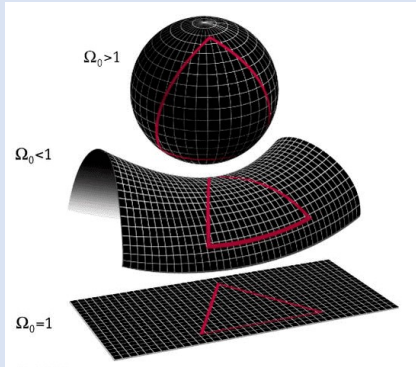
De basis voor de kosmologische theorie: FLRW model

Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker model

Heelal met een

isotrope homogene (bewegende) ideale vloeistof

The FLRW model is ontwikkeld
onafhankelijk van elkaar in jaren 20-30



Aleksandr Friedmann

Georges Lemaître

Friedmann Equations
& expansie



Oeratoom in Leuven



Arthur Geoffrey Walker (UK)

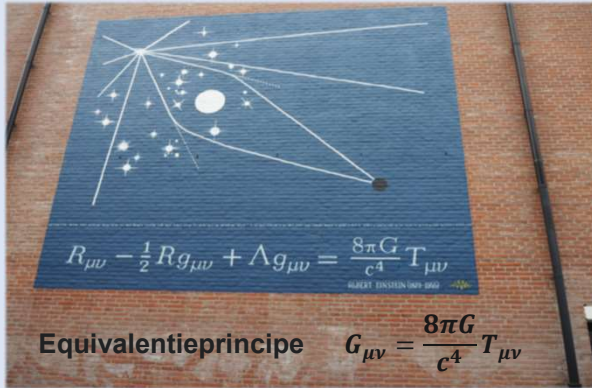
Robertson-Walker (RW) model, of
Friedmann-Robertson-Walker (FRW) model

wiskundige basis voor een
homogene en isotrope *metriek*



Howard P. Robertson (USA)

Algemene Relativiteitstheorie (Cursus ART Nico Roos)



geometrie - ruimte-tijd \longleftrightarrow dichtheid - energie-impuls

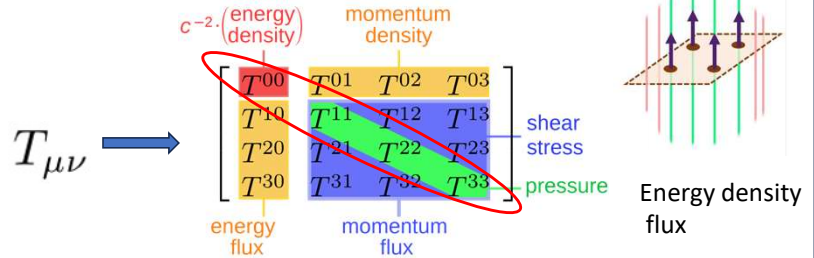
Geometrie - Einstein tensor Ricci curvaturescalar

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu}$$

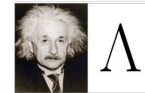
Ricci curvatures tensor

Metrische tensor

Energie-impuls tensor (stress energy tensor)



Kosmologische constante



$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} (T_{\mu\nu} - \Lambda_{\mu\nu})$$

Beschrijving (geometrische) evolutie van het heelal (theorie)

We hebben een maat nodig : afstandsmaat ofwel een metriek (ds) en verloop in de tijd (dynamiek)

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

3 dimensionale ruimte (euclidisch) Newton

tijd is hier nog apart

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$$

ruimte-tijd (geen kromming) Minkowski

tijd en ruimte samen

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

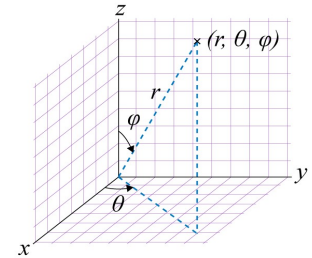
ruimte-tijd (algemeen) Einstein

licht,

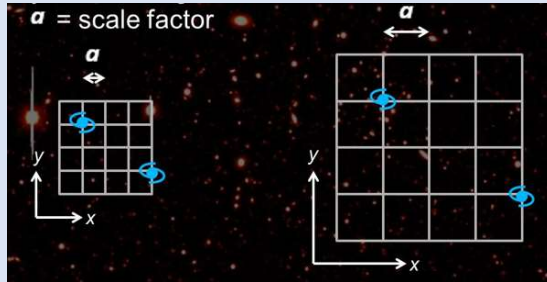
$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dy^\nu = 0$$

↑ *kruistermen*

$$ds^2 = dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$$



Wat beïnvloedt nu de metriek van de ruimte-tijd?



Massa/energie dichtheid : isotroop/homogeen (FLRW)

sferische coördinaten

Schaal factor als functie v.d. tijd

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \right)$$

krommingsparameter

→ geen kruistermen bij sferische coördinaten in de metrische tensor

Energie/massa dichtheden

Eerste Friedmann vergelijking

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

Critical mass (referentie) als
curvature $k = 0$ en geen Λ
(DE) en geeft op present day

$$H_0^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho_c \Rightarrow \rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

Dimensieloze parameter
Relatieve energie dichtheid:

$$\Omega_i = \frac{\rho_i(t)}{\rho_c} = \frac{8\pi G\rho_i(t)}{3H_0^2}$$

$$\Omega_k = -\frac{kc^2}{H(t)^2 a(t)^2}$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2}$$

$$\Rightarrow \Omega_k + \sum_i \Omega_i = 1$$

De eerste Friedmann vergelijking kan nu herschreven worden als

$$H(t) = H_0 \sqrt{\Omega_{k,0} \left(\frac{a_0}{a(t)}\right)^2 + \sum_i \Omega_{i,0} \left(\frac{a_0}{a(t)}\right)^{3(w_i+1)}} \quad \Omega_{k,0} + \sum_i \Omega_{i,0} = 1$$

Hubble parameter

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$$

$$H_0 = \frac{v}{d}$$

Hubble constante lokaal
gemeten, waarbij de afstand
 d onafhankelijk is bepaald

Toestandsvergelijking

$$p(t) = w c^2 \rho(t)$$

$$\rho_i(t) = \rho_{i,0} \left(\frac{a(t)}{a_0}\right)^{-3(1+w_i)}$$

Beschrijving evolutie van het heelal (bouwstenen)

- Niet relativistische materie (koude donkere materie, gewone materie)
- Relativistische energie (straling, neutrino's, relativistische (donkere) materie)
- Vacuüm energie (donkere energie)

$$E^2 = (pc)^2 + (m_0c^2)^2$$

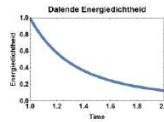
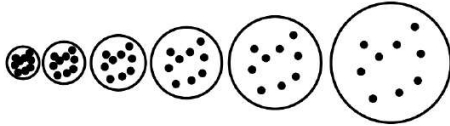
niet relativistisch: $pc < m_0c^2$

relativistisch: $pc > m_0c^2$



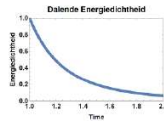
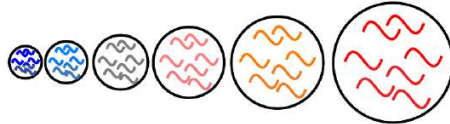
Bouwdoos voor het universum

niet
relativistisch



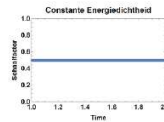
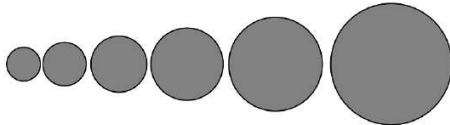
$w=0$

relativistisch



$w=1/3$

vacuüm



$w=-1$

$$p(t) = wc^2\rho(t)$$

$$\rho_i(t) = \rho_{i,0} \left(\frac{a(t)}{a_0} \right)^{-3(1+w_i)}$$

niet relativistisch $\rho(t)a(t)^3 = \rho_0 a_0^3$

relativistisch $\rho(t)a(t)^4 = \rho_0 a_0^4$

vacuüm $\rho(t) = \text{constant}$

Nu de waarneming, roodverschuiving

$$H(t) = H_0 \sqrt{\Omega_{k,0} \left(\frac{a_0}{a(t)}\right)^2 + \Omega_{rel,0} \left(\frac{a_0}{a(t)}\right)^4 + \Omega_{m,0} \left(\frac{a_0}{a(t)}\right)^3 + \Omega_{\Lambda,0}}$$

$$\frac{a_0}{a(t)} = \frac{\lambda_0}{\lambda(t)} = 1 + z \quad H(z) = H_0 E(z)$$

$$E(z) = \sqrt{\Omega_{k,0}(1+z)^2 + \Omega_{rel,0}(1+z)^4 + \Omega_{m,0}(1+z)^3 + \Omega_{\Lambda,0}}$$

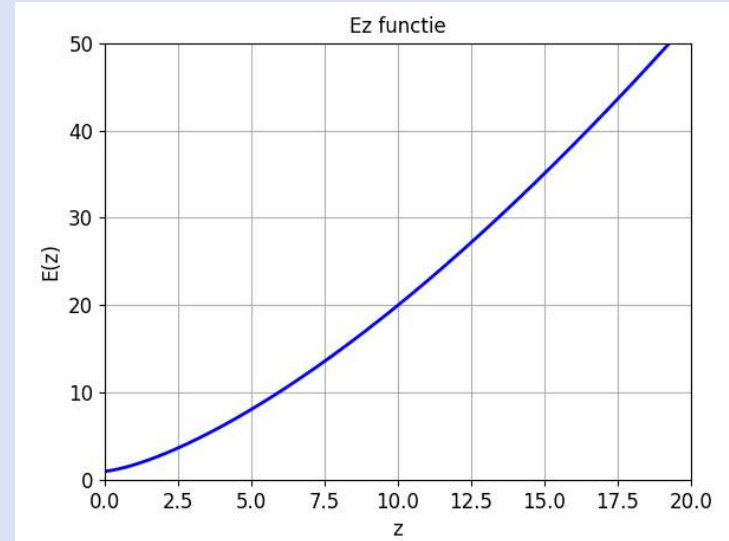
De Hubble parameter $E(z)$ komt steeds terug
en daar zitten alle energie dichtheden in
→ belangrijke functie

Waarneembereik roodverschuiving:

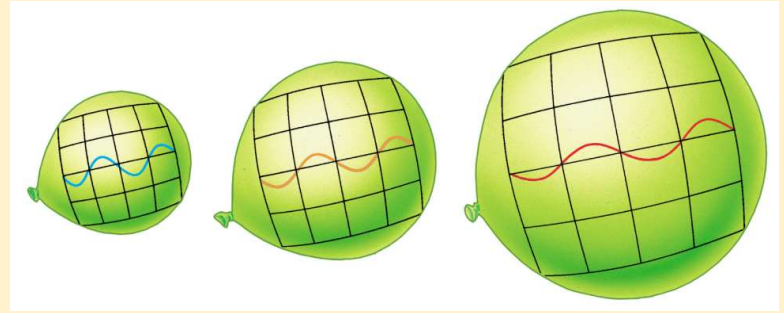
JWST, $z \leq 20$

EUCLID, $z \leq 2$

LIGO/VIRGO BH mergers, $z \leq 1$



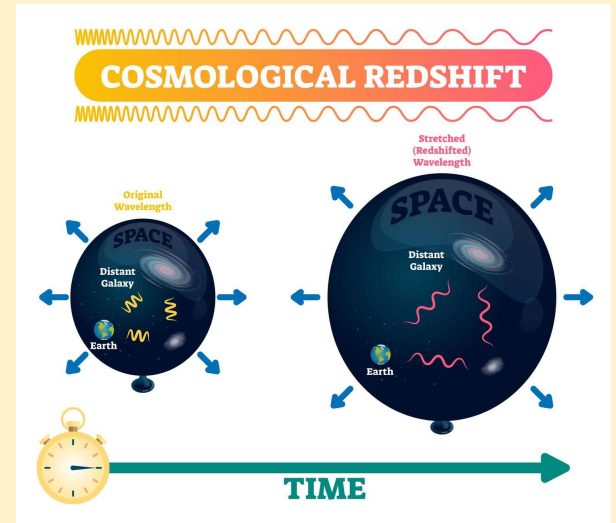
Vraag:



Komt de roodverschuiving door

1) uitdijing van de ruimte

2) van elkaar af bewegen van de zender en de ontvanger





pauze

Hubble tension

$$H(z) = H_0 E(z)$$



Hubble constante lokaal gemeten (Cepheiden)

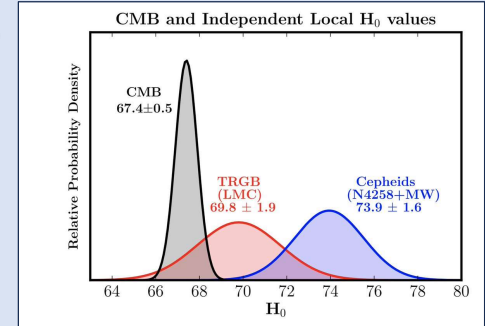
$$H_0 = \frac{v}{d} = \frac{zc}{d}$$

Webb Confirms Accuracy of Universe's Expansion Rate Measured by Hubble, Deepens Mystery of Hubble Constant Tension (Cepheiden)

$$\Lambda\text{CDM}: z = 1089, \Omega_{m,0}/\Omega_{\Lambda,0} = 30/70\%$$

$$E(z=1089) = 2.3 \cdot 10^4$$

$$H_0 = 70 \rightarrow H(z=1089) = 1.6 \cdot 10^6$$

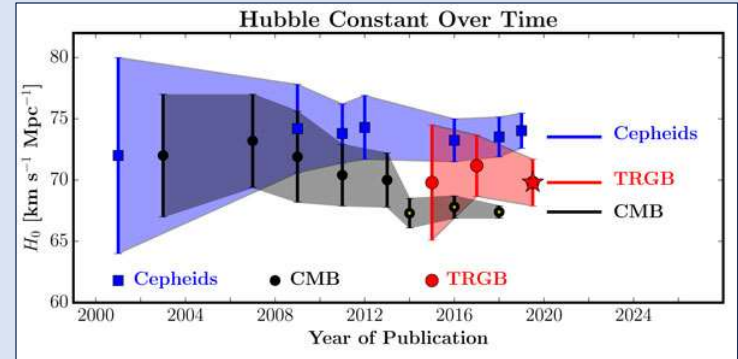


Meting methoden zijn niet vergelijkbaar?

Λ niet constant in de evolutie?

Lokaal gemeten niet representatief?

Warm DM?



TRGB: Tip of the Red Giant Branch

Kosmische parameters (tijden)

$$t_L = \frac{1}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{(1+z')E(z')} \quad \text{Lookback time}$$

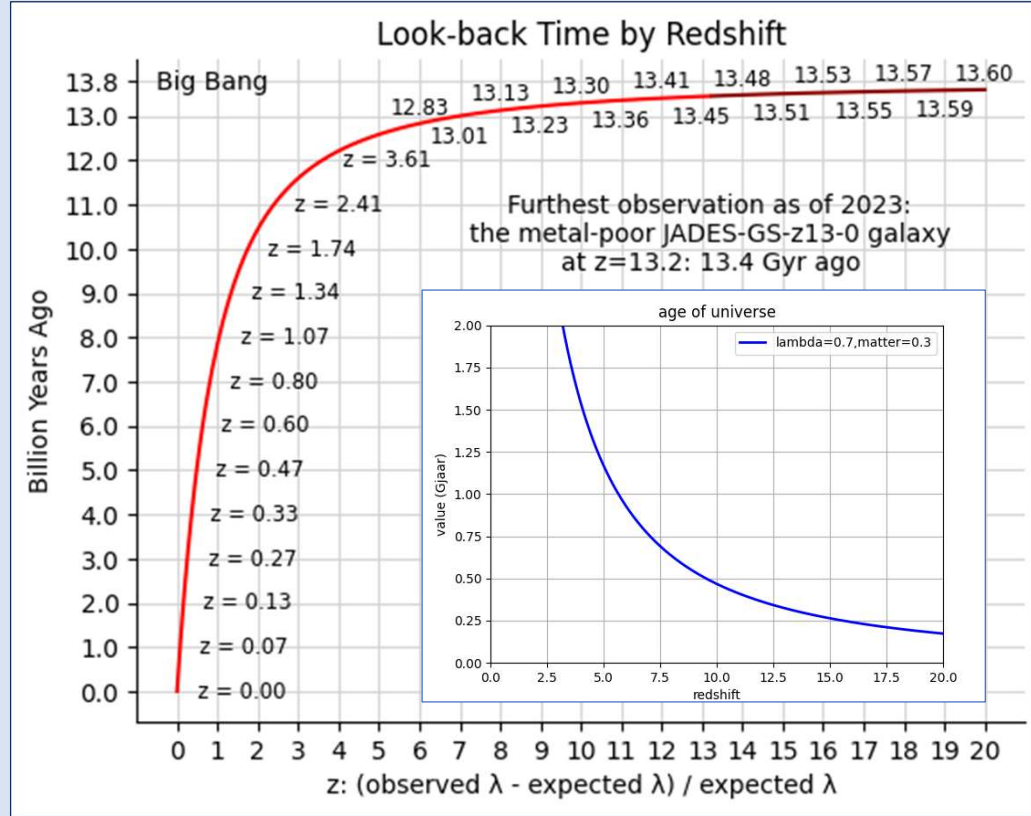
Hubble tijd $t_H = \frac{1}{H_0} \quad 14.4 \text{ Gjaar}$

$H_0 = 67.5$

Leeftijd heelal: $t_0 = \frac{1}{H_0} \int_0^\infty \frac{dz'}{(1+z')E(z')}$ ↗ Integraal 0.956

Leeftijd heelal: 13.8 Gjaar

[Age of the universe - Wikipedia](#)



Kosmische parameters (afstanden)

**Proper distance
(local)**

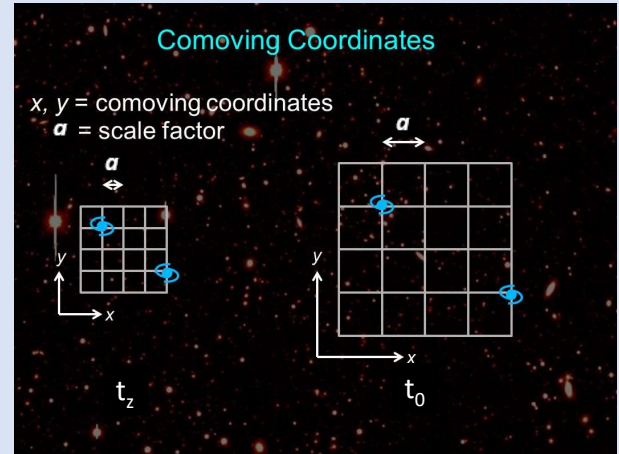
$$d(z)_p = \frac{d(0)_p}{(z + 1)}$$

Hubble distance

$$d_H = \frac{c}{H_0}$$

Comoving distance:
(langs de line of sight)

$$d_c(z) = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{E(z')}$$



Fysieke dimensie schaalt niet mee met de uitdijing van de ruimte-tijd, dus sterrenstelsels worden niet kleiner en waren vroeger relatief groter t.o.v de comoving coördinaten

Comoving en proper afstanden zijn niet direct waar te nemen, maar de volgende afstanden zijn wel direct te relateren aan de **waarneming**

[Scale factor \(cosmology\) - Wikipedia](#)

[Comoving and proper distances - Wikipedia](#)

Waarneming en afstanden

z (roodverschuiving), S (flux), $\Delta\theta$ (schijfbare diameter) kunnen we meten.

L (lichtkracht) en R (fysische diameter) willen weten.

1. angular-diameter distance

$$\Delta\theta = R/d_A$$

$$d_A(z) = \frac{d_H}{(1+z)} \int_0^z \frac{dz}{E(z)} \quad \text{extra factor } 1/(1+z) \text{ tov } d_c$$

$$\Delta\theta = \frac{a_0}{a(t)} \frac{R}{d_c} = (1+z) \frac{R}{d_c} \quad (\text{de diameter } R \text{ schaalt niet mee})$$

2. luminosity distance

$$S = \frac{L}{4\pi d_L^2}$$

$$\longrightarrow -2.5 \log(S) = -2.5 \log(L) + 5 \log(d_L) + \text{const}$$

$$d_L(z) = (1+z)^2 d_A(z)$$

[Etherington's reciprocity theorem - Wikipedia](#)

$$d_L(z) = (1+z) d_H \int_0^z \frac{dz}{E(z)}$$

$$\text{Afstandsmodulus: } \mu_0 = m - M = 5 \log\left(\frac{d_L}{\text{Mpc}}\right) + 25$$

d_L wordt gebruikt bij standard candles zoals supernovae type Ia

Python programma 'cosmic parameters'

```
# E(z) en andere kosmische parameters berekenen
#
# een paar bilbiotheken klaarzetten
#
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import math
#
#
const=977.8 # (1 hubble is bijna 1000 miljard jaar)
hubble=67.3 # LCDM
#
age_const=const/hubble # (1/hubble) = Hubble time
#
dist_const=3e5/hubble # in Mpc
dist_const2=dist_const*1000 # in kpc
#
dz = 0.001 # stap redshift
z_start = 0 # begin van de redshift
z_end = 20 # eind van de redshift
n_steps = int ( round (( z_end - z_start )/dz)) # number of timesteps
print(n_steps)
#
z_arr = np. zeros ( n_steps ) # array of zeros
#
Ez_arr = np. zeros ( n_steps) # array of zeros
Comoving_arr = np. zeros ( n_steps ) # array of zeros
App_diam_arr = np. zeros ( n_steps ) # array of zeros
diam_arr = np. zeros ( n_steps ) # array of zeros
Lum_dist_arr = np. zeros ( n_steps ) # array of zeros
Dist_mod_arr = np. zeros ( n_steps ) # array of zeros
Lookback_arr = np. zeros ( n_steps ) # array of zeros
```

initialisatie

```
# eerste berekening
Omega_m=0.3
Omega_l=0.7
Omega_r=0.0 # is eigenlijk 0.0001

str_m1=str(Omega_m)
str_l1=str(Omega_l)
label1='lambda='+str_l1+',matter='+str_m1

Omega_k=1-Omega_m-Omega_l-Omega_r
print(Omega_k,Omega_m,dist_const)

#
# calculating Ez
for i in range (0, n_steps):
    z = z_start + i * dz
    z_arr [i] = z
    Ez = Omega_r * ((z+1)**4) + Omega_m * ((z+1)**3) + (Omega_k * (z+1)**2) + Omega_l
    Ez_arr [i] = np.sqrt(Ez)

#
integral=0
integral2=0
for i in range (0, n_steps):
    z = z_arr [i]
    integral = integral + dz/(Ez_arr [i])
    Comoving = integral * dist_const2 #in kpc
    App_diam_arr [i] = Comoving/(z+1)
    Comoving_arr [i] = integral * dist_const #in Mpc
    Lum_dist_arr [i] = Comoving_arr [i]*(z+1)
    Dist_mod_arr [i] = 5 * math.log(Lum_dist_arr [i], 10) + 25
    diam_arr [i] = 1/App_diam_arr [i] # in radialen
    diam_arr [i] = diam_arr [i]*57.3*3600 # in arcsec/kpc
    integral2 = integral2 + dz/((z+1) * Ez_arr [i])
    Lookback_arr [i] = integral2 * age_const

#
fig = plt. figure (6)
plt . plot (z_arr , Lookback_arr , linewidth = 2, color = 'blue', label = label1)
plt . plot (z_arr , Lookback_arr2 , linewidth = 2, color = 'red', label = label2)
plt.title ("Lookback time", fontsize = 12)
plt.grid ( True )
plt.xlabel ('redshift')
plt.ylabel ('value (Gjaar)')
plt.legend ()

#
plt . show ()

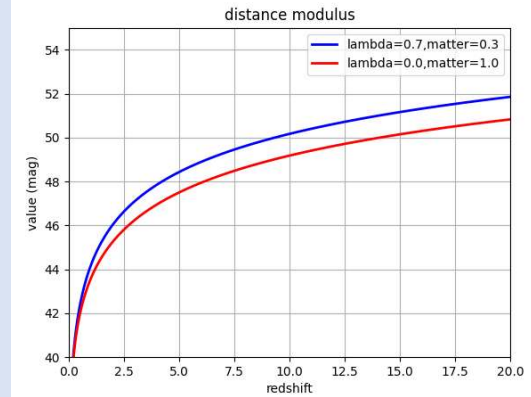
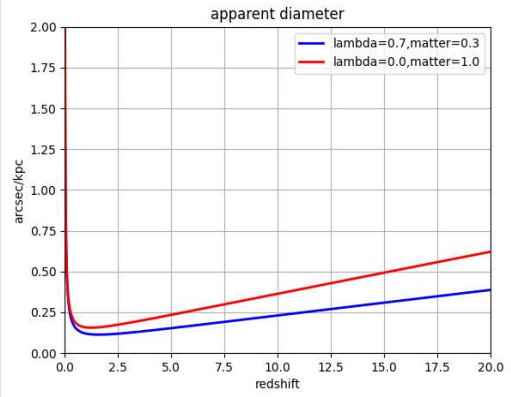
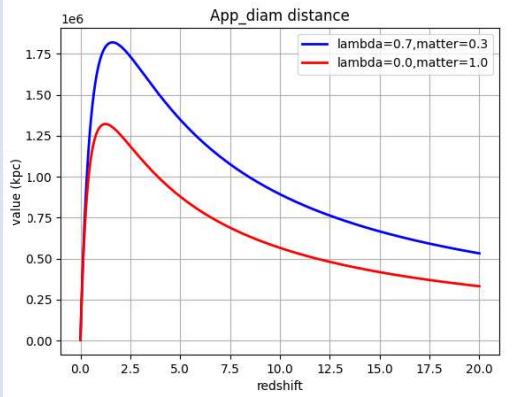
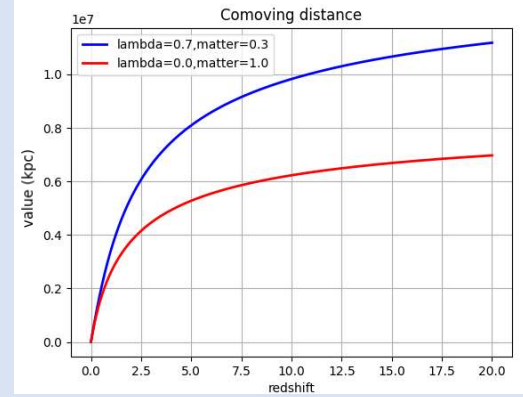
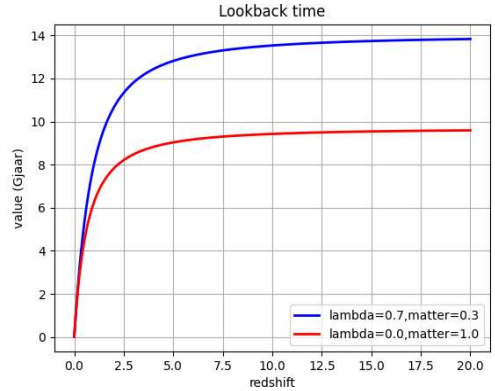
# end
```

berekening

plotten

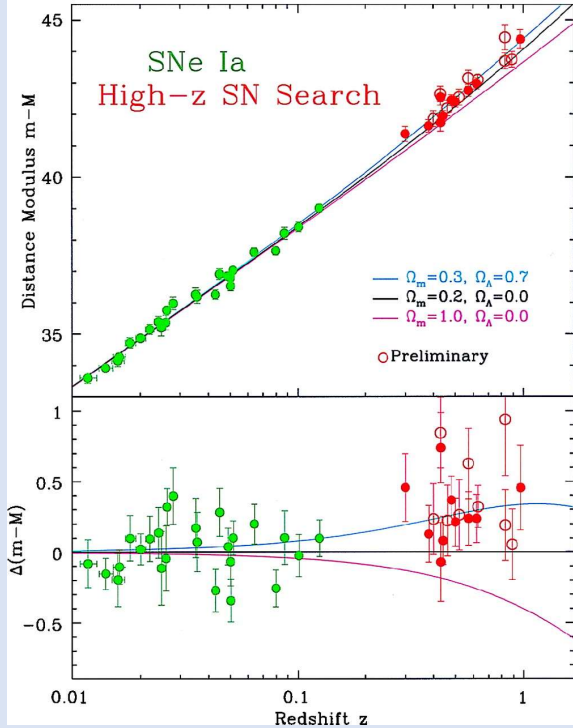
Zelf spelen met parameters

Python programma
'cosmic parameters'

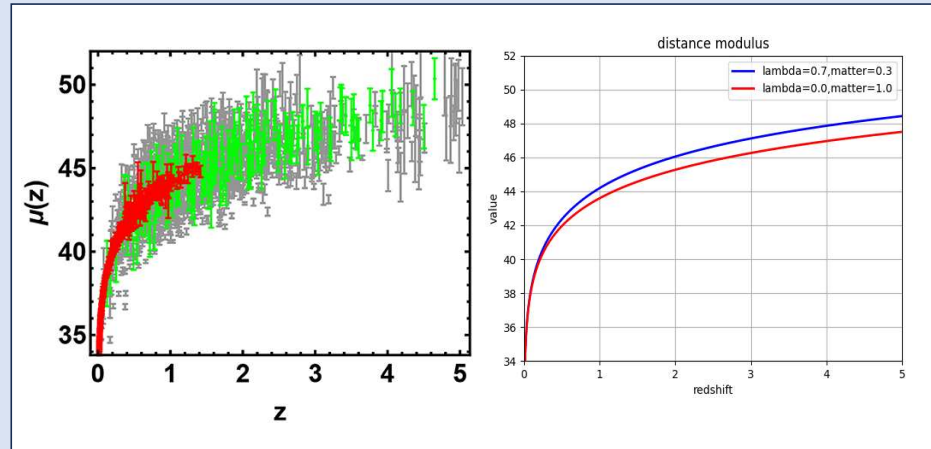


Waarneming Λ die we nu donkere energie noemen

Toepassing luminosity distance



The Hubble diagram for SN Ia.



High redshift Hubble diagram of SNIa (red points), quasars (gray points), and GRBs (green points)

x-as logaritisch!!!

Ruimte en tijd zijn verweven in het heelal.

waarom kunnen we toch over de leeftijd van het heelal en dus van een nu spreken?

Aanname is heelal is isotroop en homogeen (FLRW model),

dus elke waarnemer ziet het heelal op dezelfde manier

FLRW metriek – Λ CDM model



Het begin

Schalen/perspectief



Onze (ervarings-) wereld

Macroscopisch & statistisch
Veel deeltjes (getal van Avogadro)
Emergentie (zoals temperatuur)
Ruimte en tijd gescheiden
Richting van de tijd
zwaartekracht
 $v \ll c$ (wij staan stil!)

Grootschalige kosmische eigenschappen
Ruimte en tijd verweven (ART)
Homogeen en isotroop
Uitdijing en versnelling

Boltzmann constant k_B
 $E = k_B T$

Lichtsnelheid c

$$E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2}$$

Plank constante h
 $E = hf$

Microscopisch
Quantumvelden & onzekerheid
Interacties
Elementaire deeltjes en eigenschappen
Tijd en ruimte weinig of geen betekenis

Bij oerknal (en zwarte gaten)
komen deze perspectieven
bij elkaar

Hot big bang

Heet dicht begin (niet in evenwicht)

Proces van afkoeling (streven naar evenwicht) via diverse overgangen.

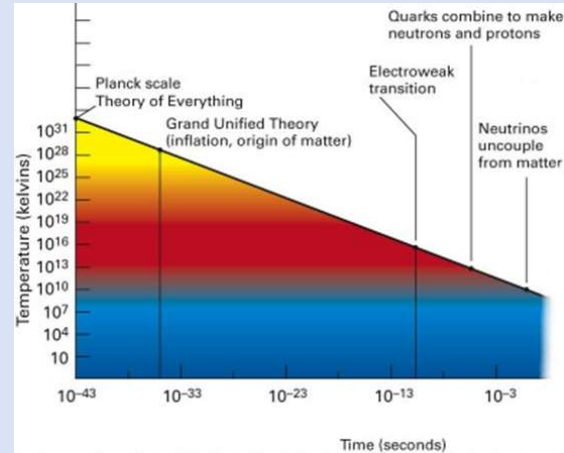
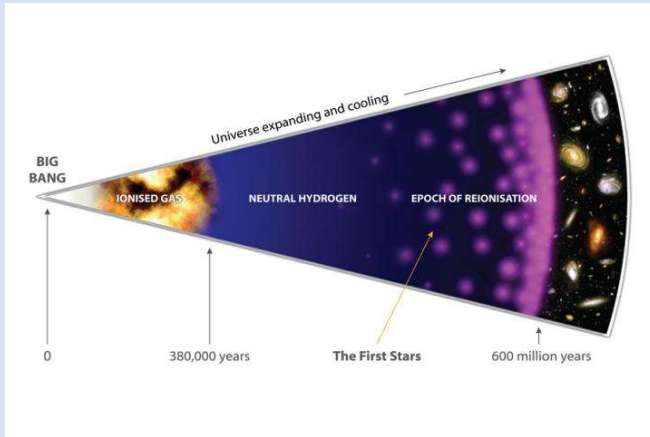
Afkoeling gaat gepaard met uitdijing

Aanname: begin bij de Planck schaal:

$$\text{Planck lengte: } l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}, 1.6 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

$$\text{Planck tijd: tijd voor licht om een Planck lengte af te leggen: } t_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}, 5.4 \cdot 10^{-44} \text{ s}$$

$$\text{Planck temperatuur: golflengte licht is een Planck lengte: } T_p = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G k_B}}, 1.4 \cdot 10^{32} \text{ K}$$



Evolutie van het heelal

[Chronology of the universe – Wikipedia](#)

Planck energy: 1.22×10^{19} GeV

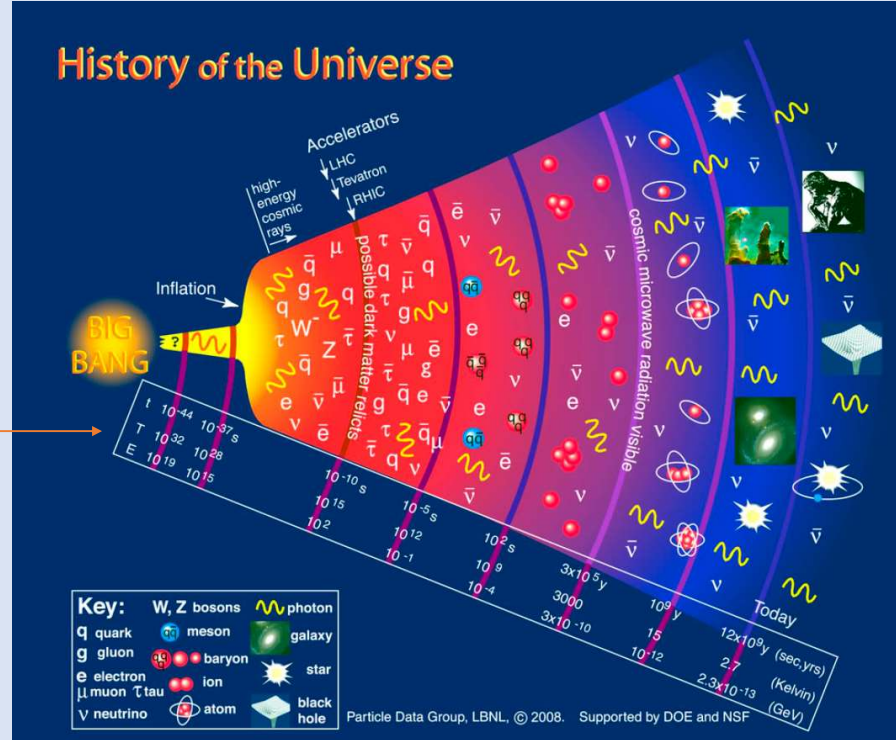
In het begin domineert deeltjesfysica de zwaartekracht

Relativistisch: $\rho \propto \frac{1}{a^4}$, $T \propto \frac{1}{a}$, $T \propto t^{-\frac{1}{2}}$

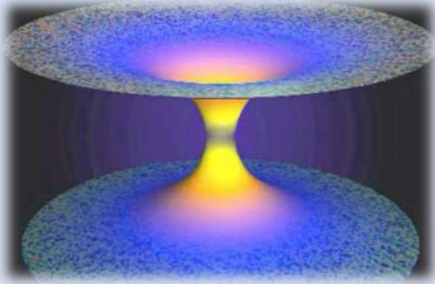
Niet-relativistisch: $\rho \propto \frac{1}{a^3}$, $T \propto \frac{1}{a^2}$, $T \propto t^{-\frac{4}{3}}$

Tijd
Temperatuur
Energie

$E = k_B T$
 $1 \text{ eV} = 11604 \text{ K}$
 $100 \text{ GeV} = 10^{15} \text{ K}$



Allereerste begin: wilde nieuwe ideeën



Big bounce



Hartle – Hawking:
no boundary idea



Cyclisch universum

Thomas hertog,
Ontstaan van de tijd,
holografie

Thomas Hertog:

Uitdijing van de ruime en de tijd zelf zijn
emergente verschijnselen geborduurd uit
ontelbare kwantumdraden die een tijdloze wereld
in een lager dimensionaal oppervlak vormen

