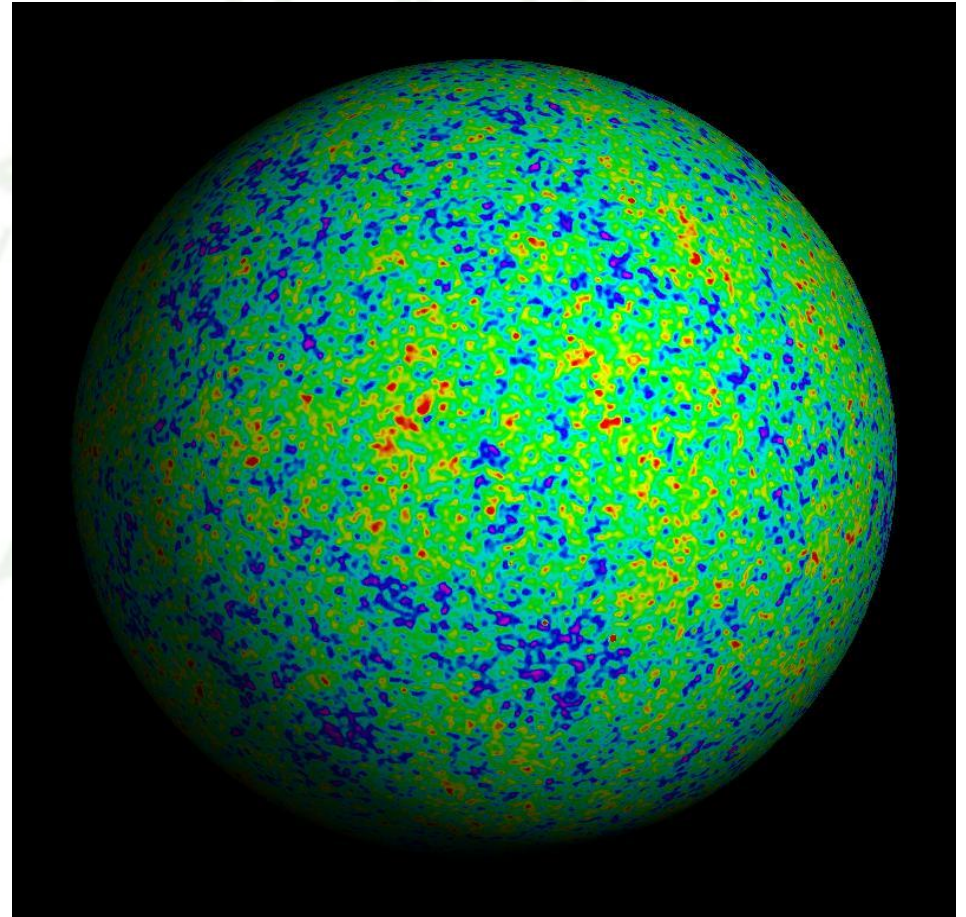


HOVO cursus Kosmologie

Voorjaar 2011

prof.dr. Paul Groot
dr. Gijs Nelemans

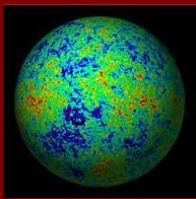


Afdeling Sterrenkunde,
Radboud Universiteit Nijmegen

HOVO cursus Kosmologie

Overzicht van de cursus:

- 17/1 Groot Historische inleiding + afstandsladder
- 24/1 Nelemans Observationale kosmologie, CMB
- 31/1 *Nelemans* *Friedmann vgl., Nucleosynthese*
- 7/2 Nelemans Donkere materie en Structuurvorming
- 14/2 Nelemans Supernovae, donkere energie, Inflatie
- 21/2 Groot Weak lensing, EUCLID, toekomst



De wet van Hubble

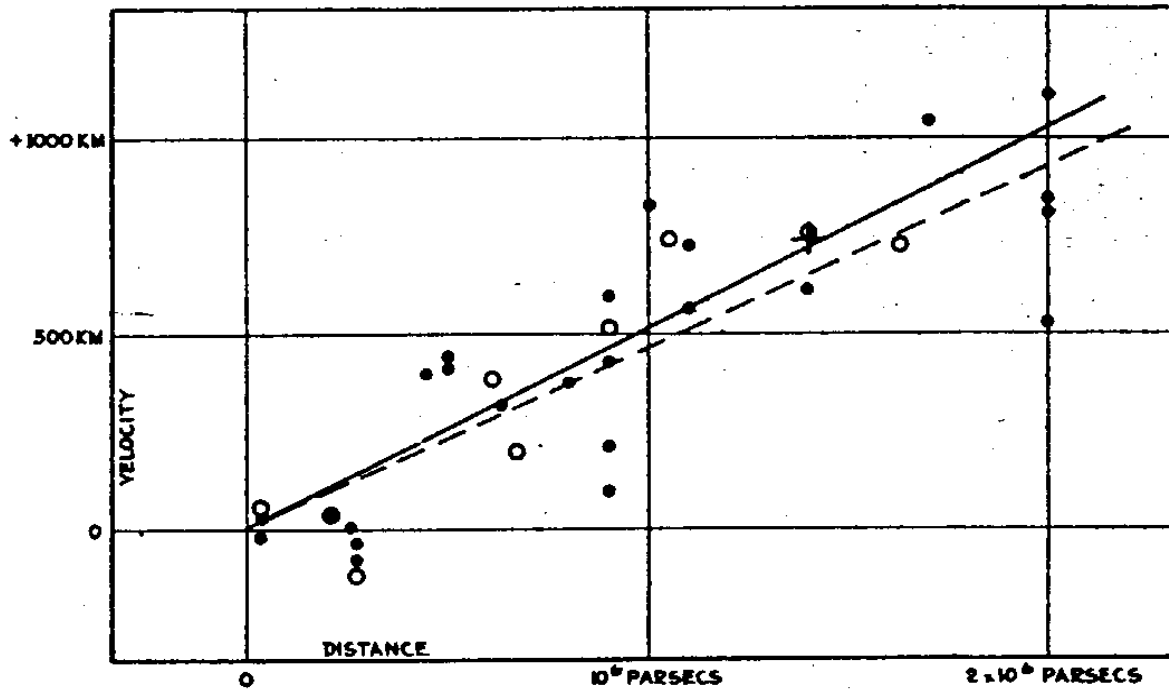
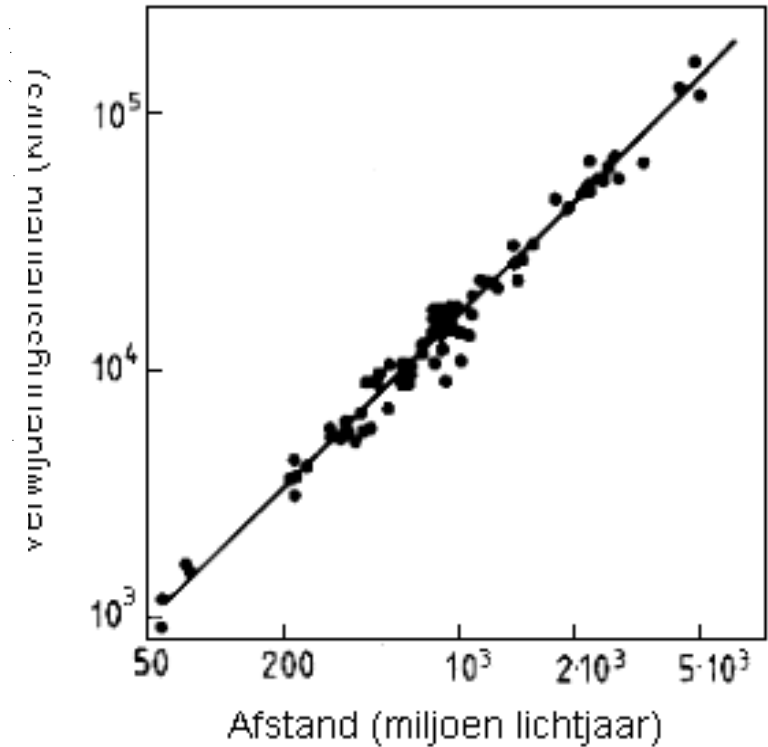


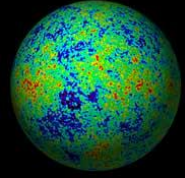
FIGURE 1



De wet van Hubble $v = H_0 d$

Doppler effect: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$





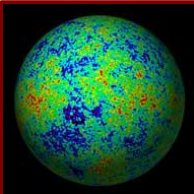
Het expanderende Heelal

Conclusie: Het Heelal expandeert!

Consequenties:

- Afstanden worden groter!
- Vroeger was de schaal kleiner!
- Het heelal koelt af!
- Vroeger was het kleiner!

Het heelal is begonnen in een hete Oerknal!

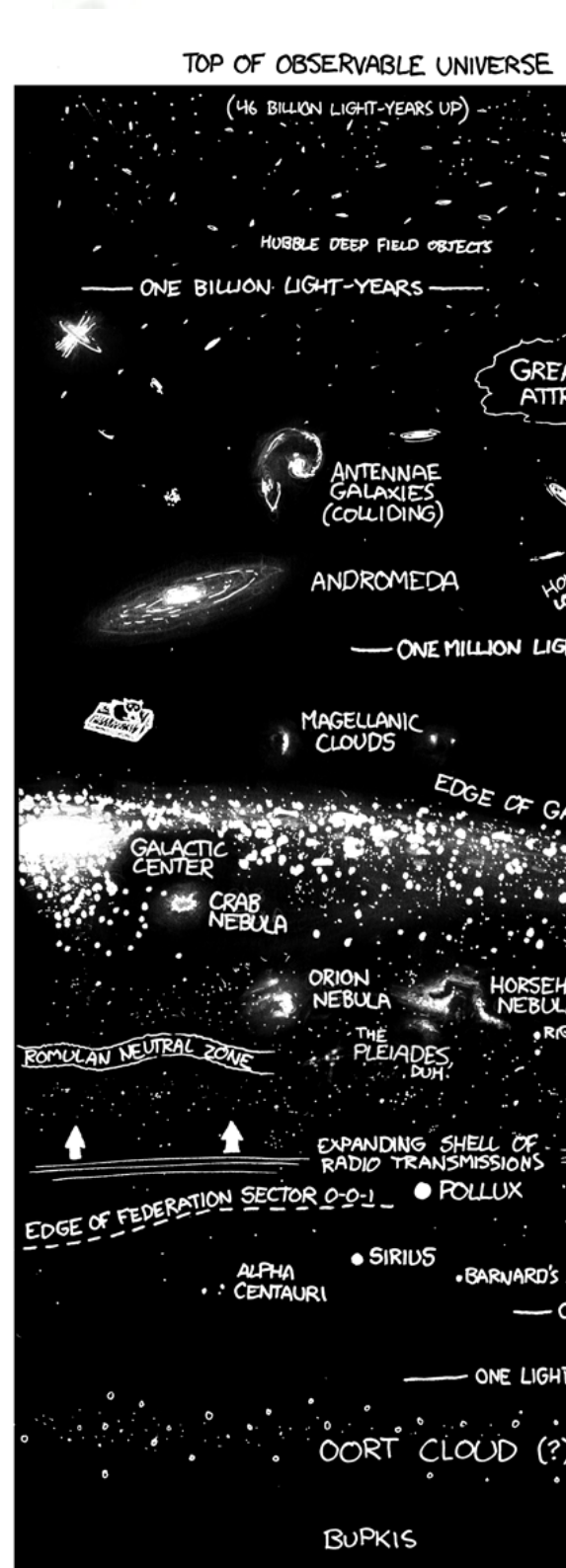
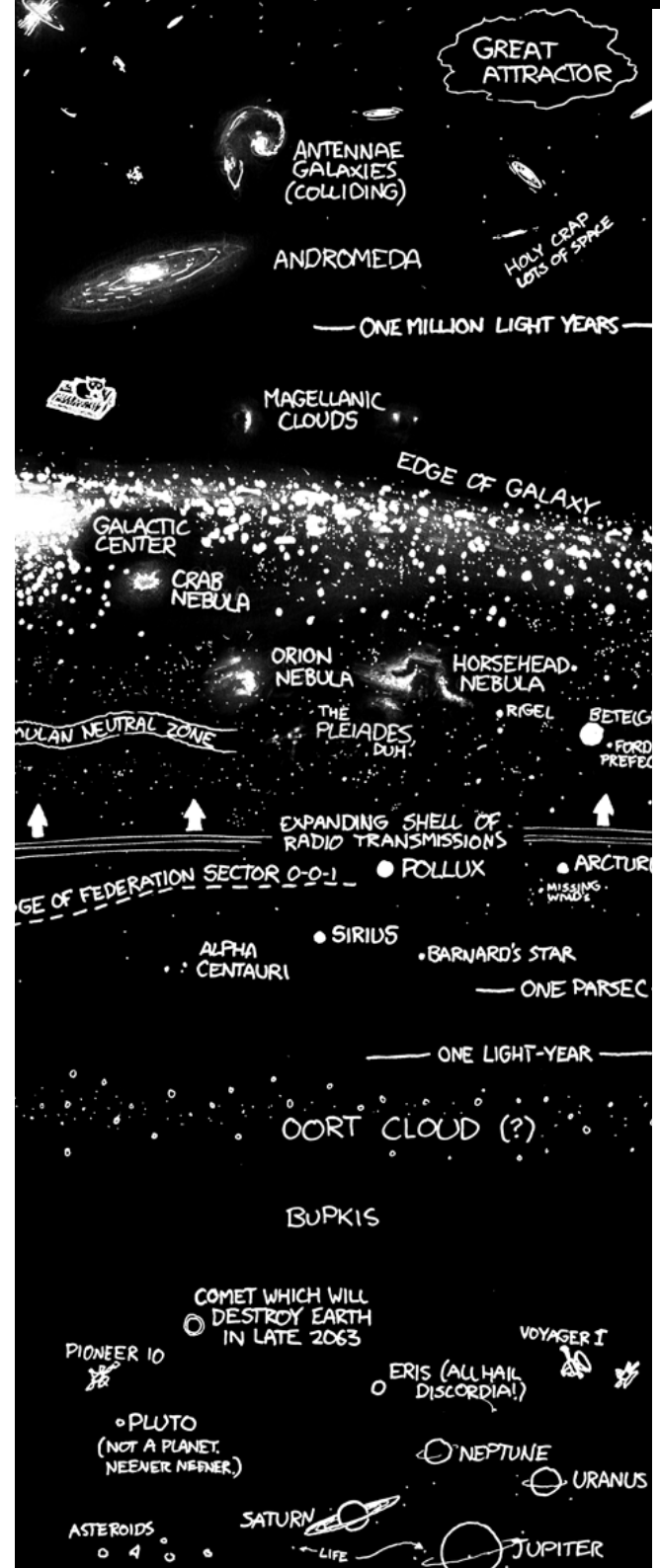
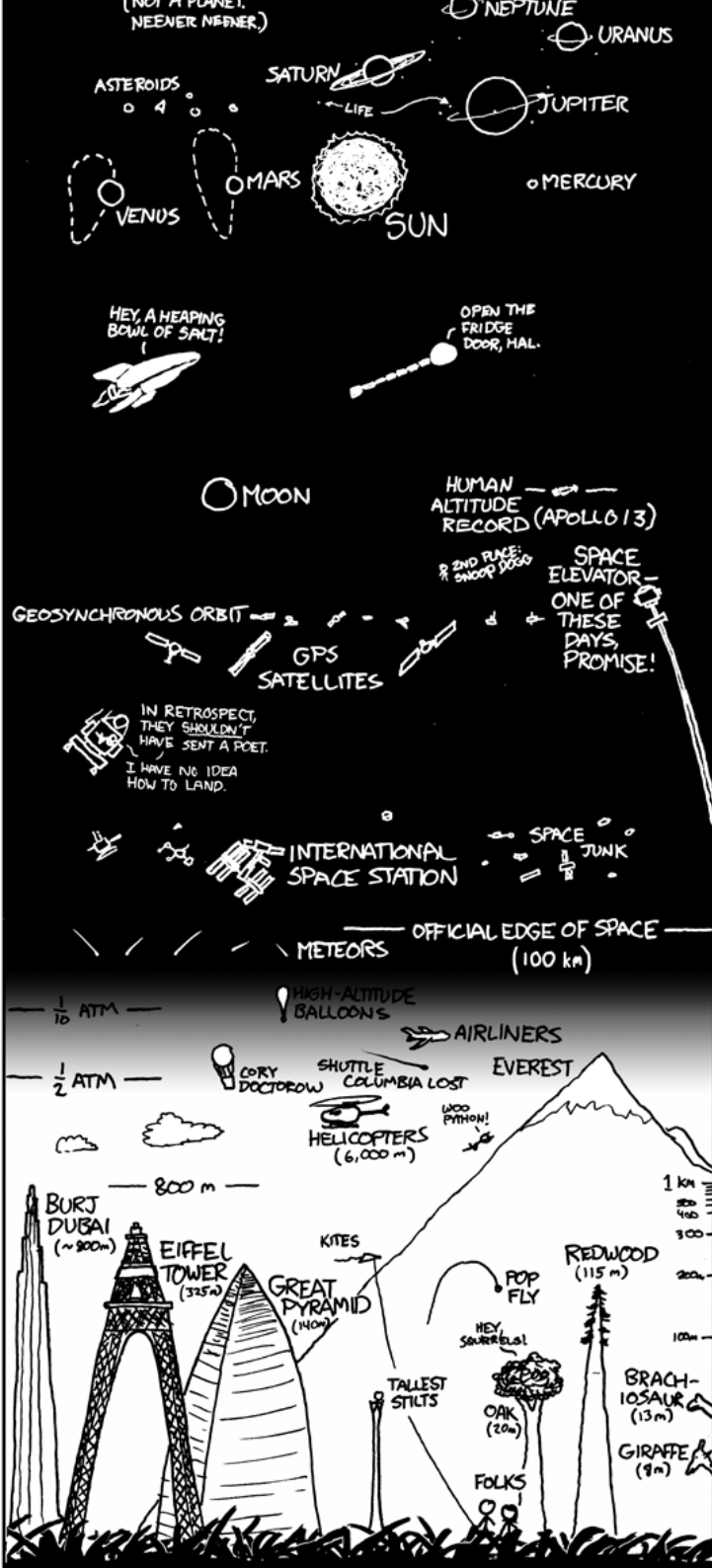


De Afstandsladder

Aaneenschakeling van methodes:

- Radar ranging
- Parallax
- Variabele sterren (RR Lyrae & Cepheiden)
- Maser afstanden
- Supernovae
- Tully-Fisher & Fundamental Plane
- Hubble expansie

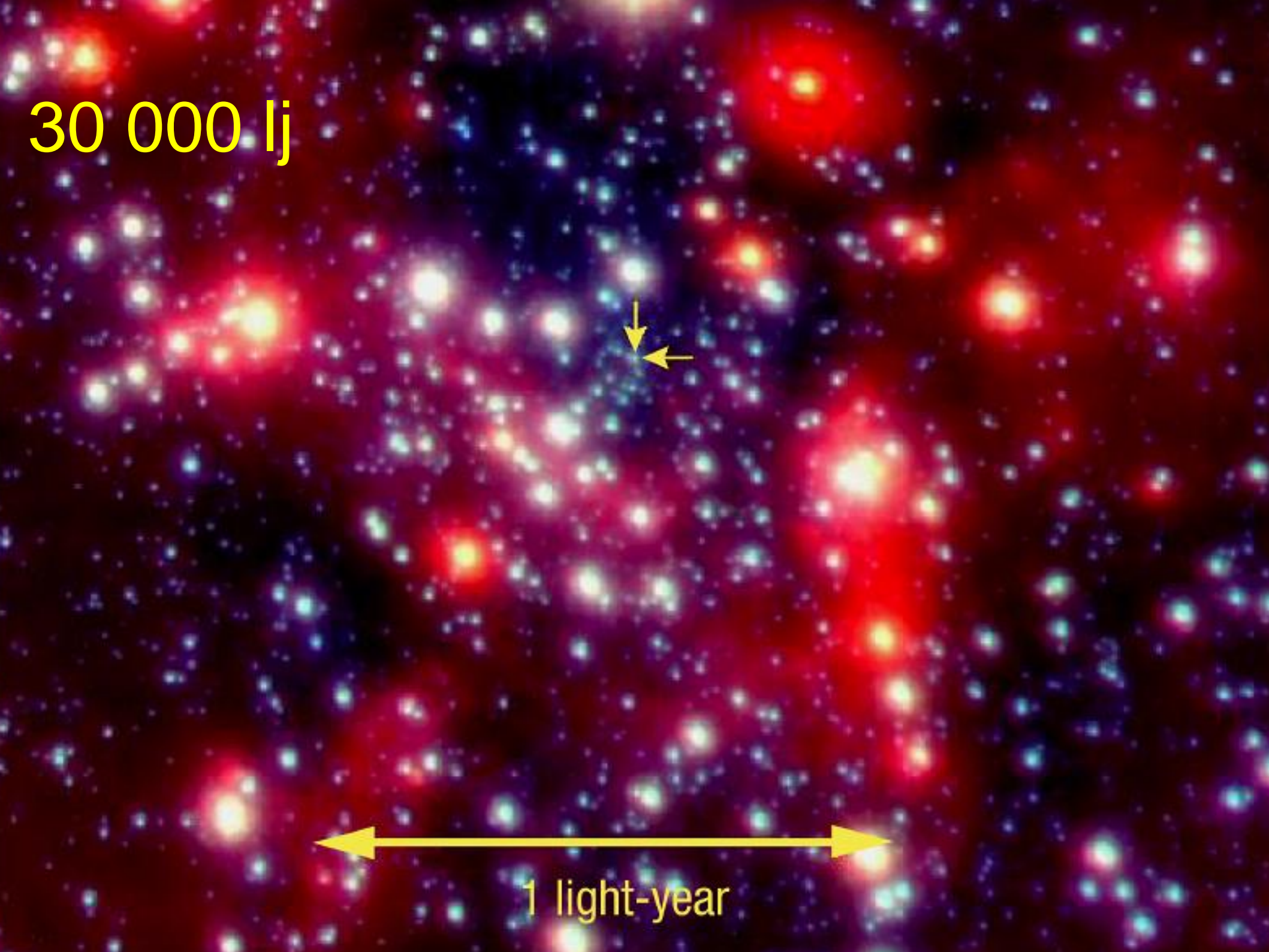




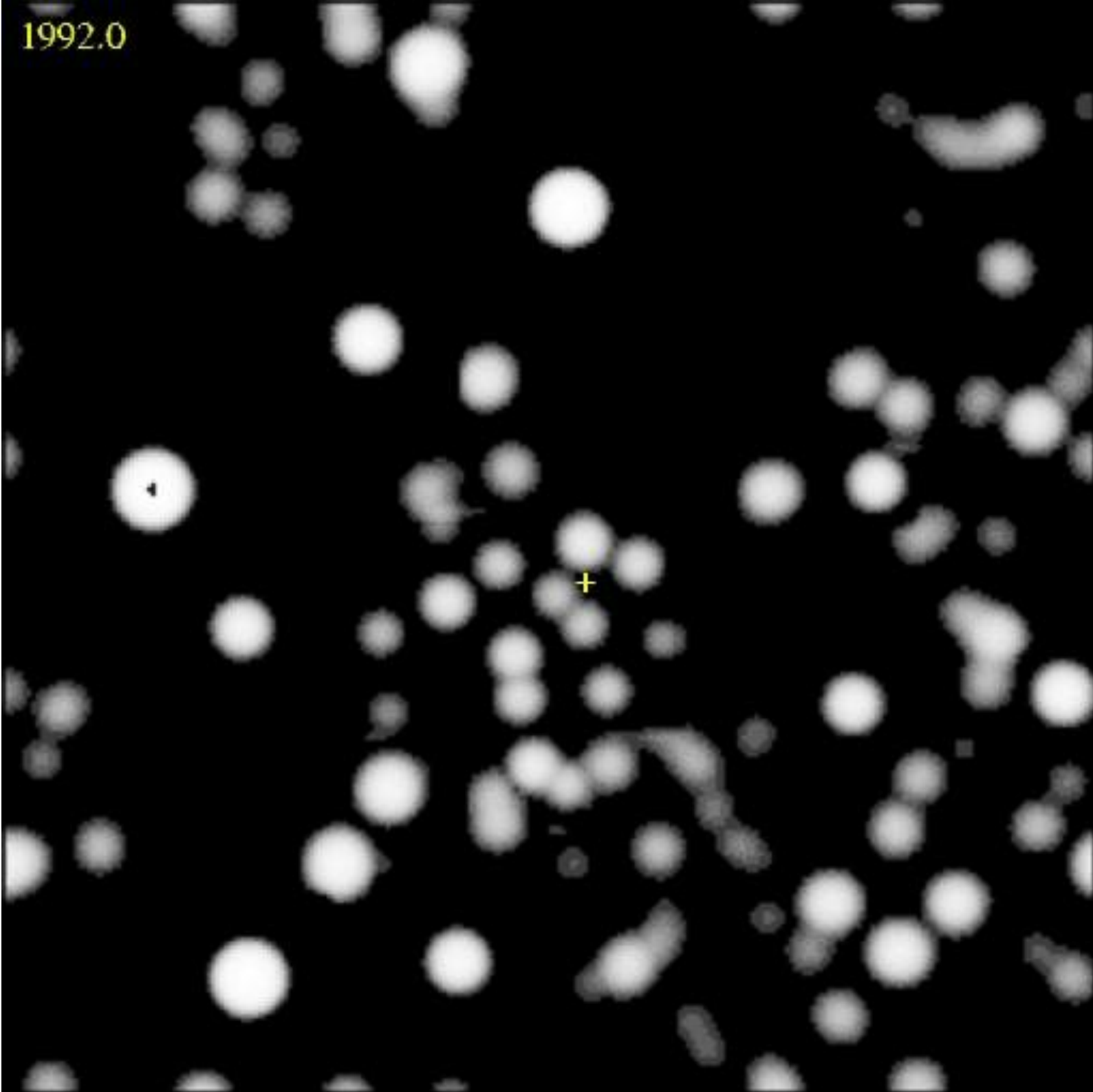
30 000 lj



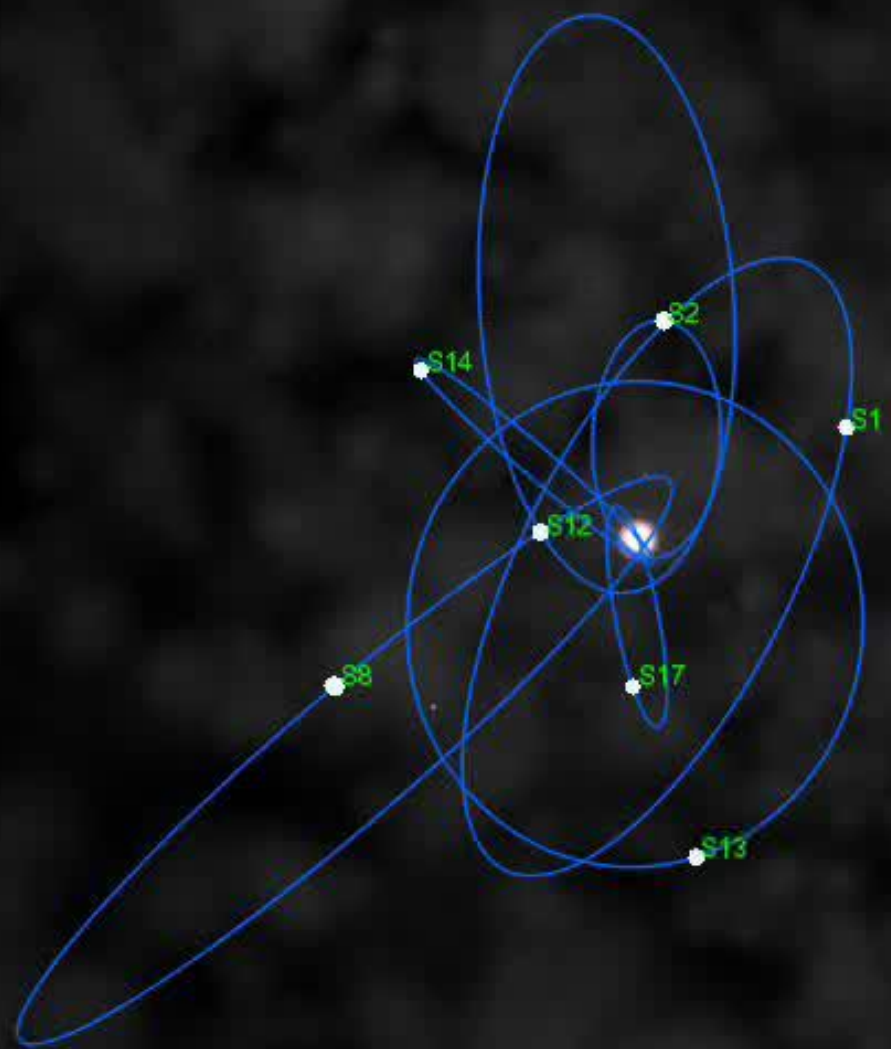
1 light-year



1992.0



1993 09 09 13:58:59 UTC
45000000* faster



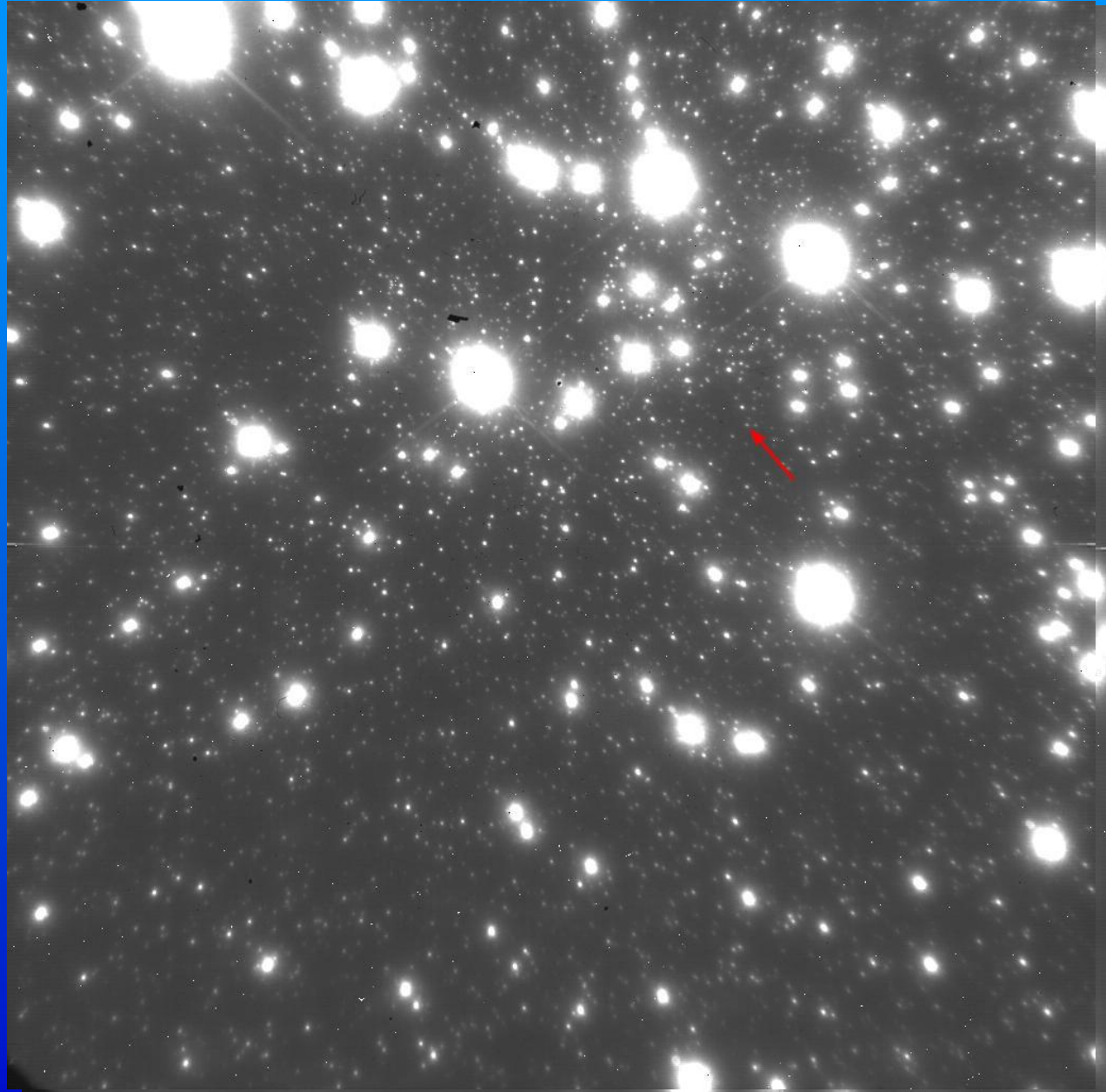
| -10 light days - |

Speed: 0.000 m/s

Follow GC
FOV: 13° 59' 60.0" (1.00x)

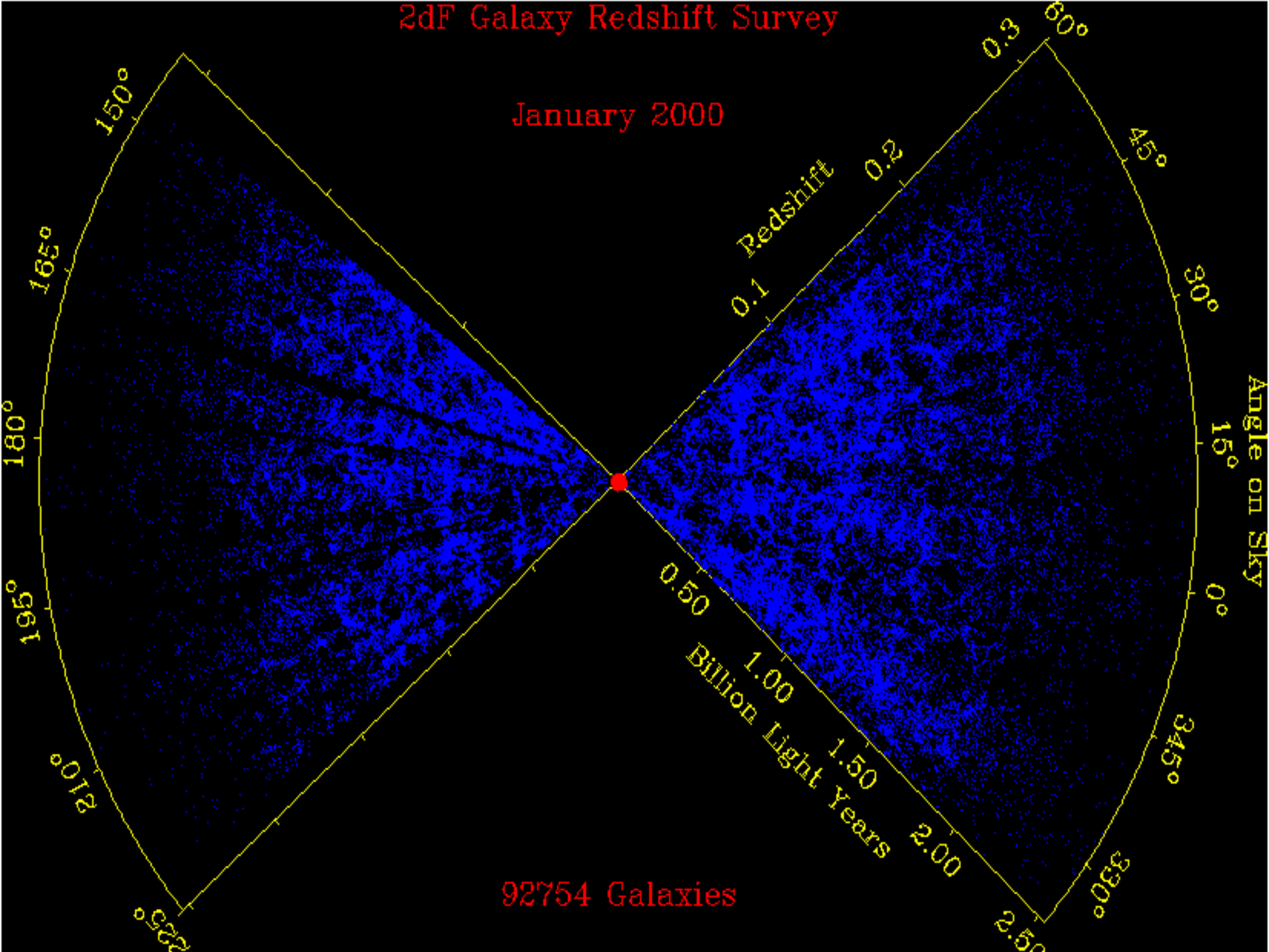
VLT + NAOS/Conica

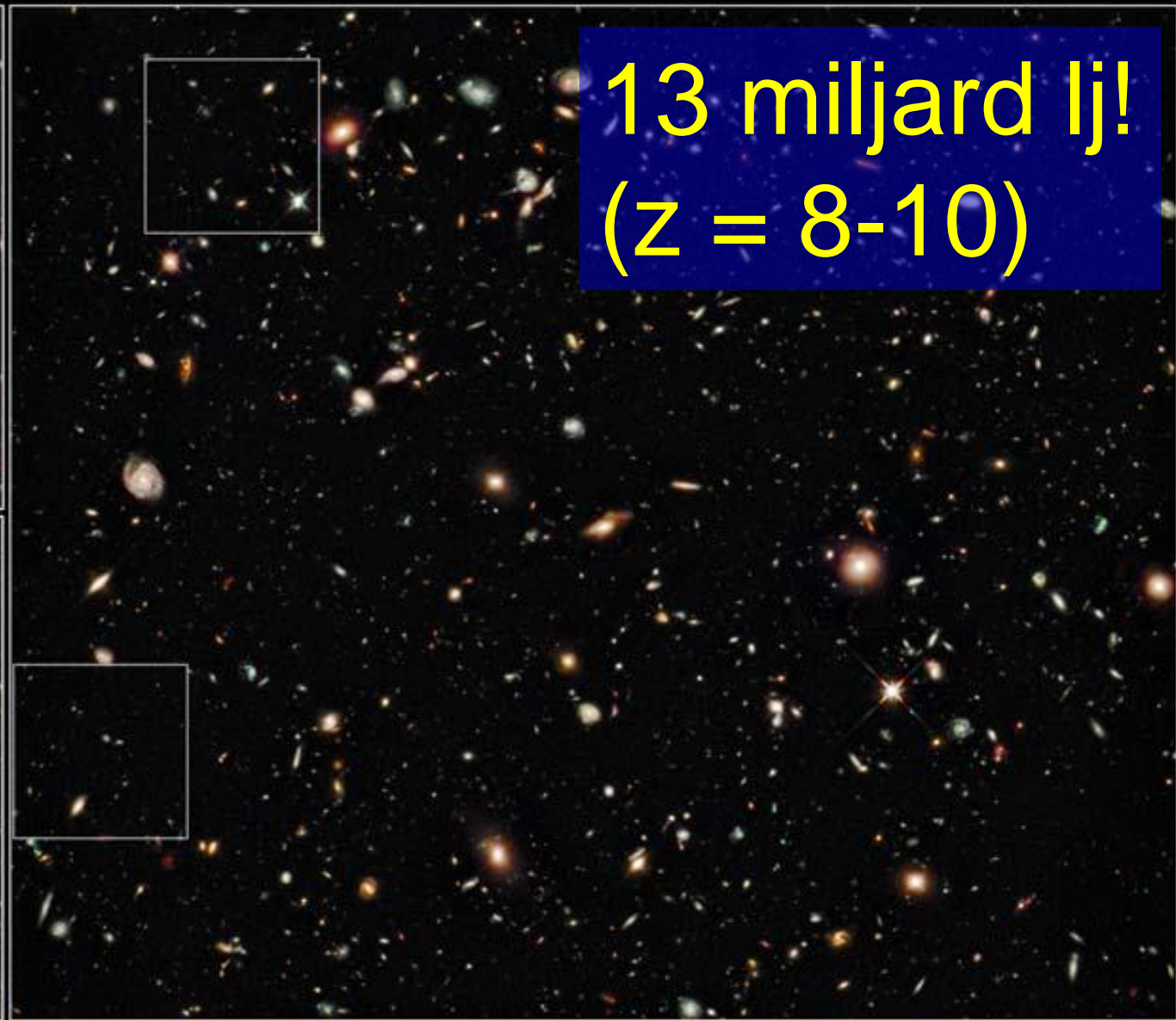
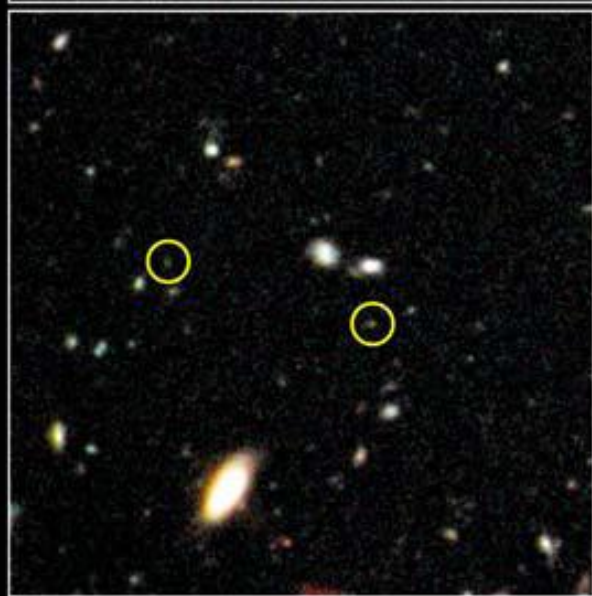
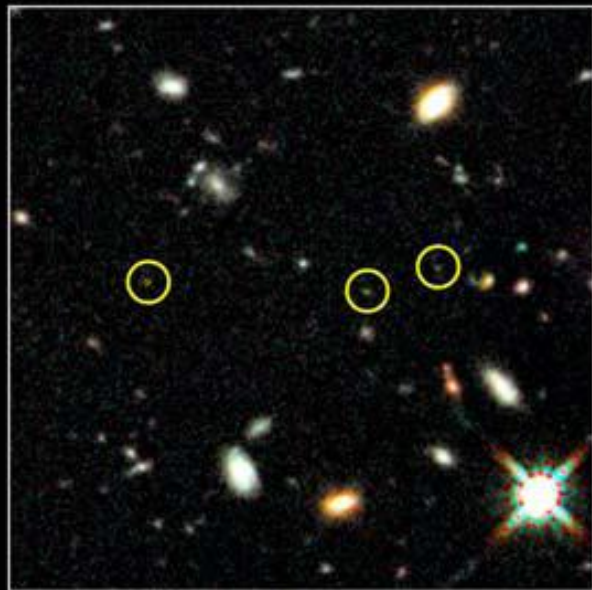




2dF Galaxy Redshift Survey

January 2000

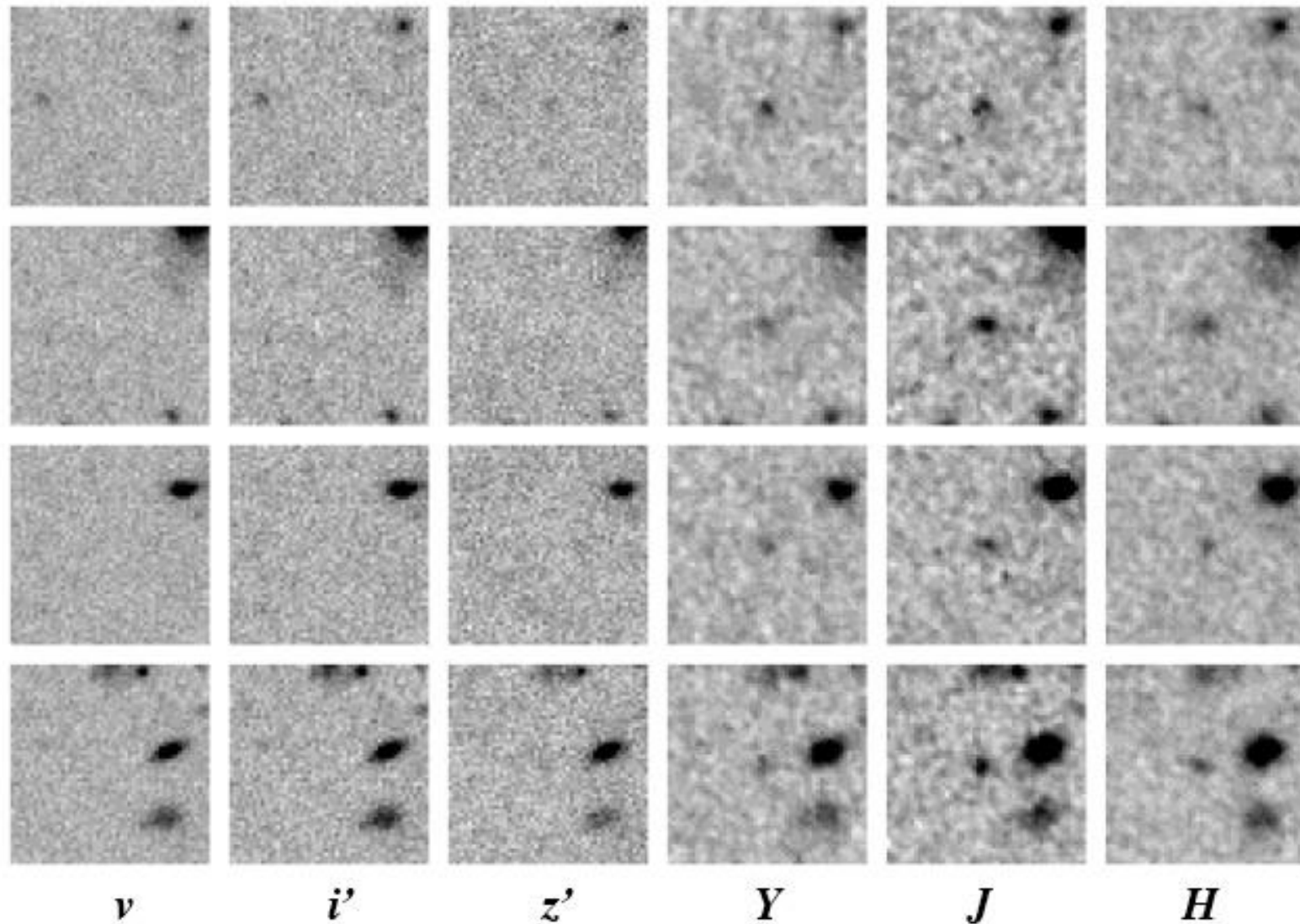




13 miljard lj!
($z = 8-10$)

Hubble Ultra Deep Field • Infrared
Hubble Space Telescope • WFC3/IR

J drop outs

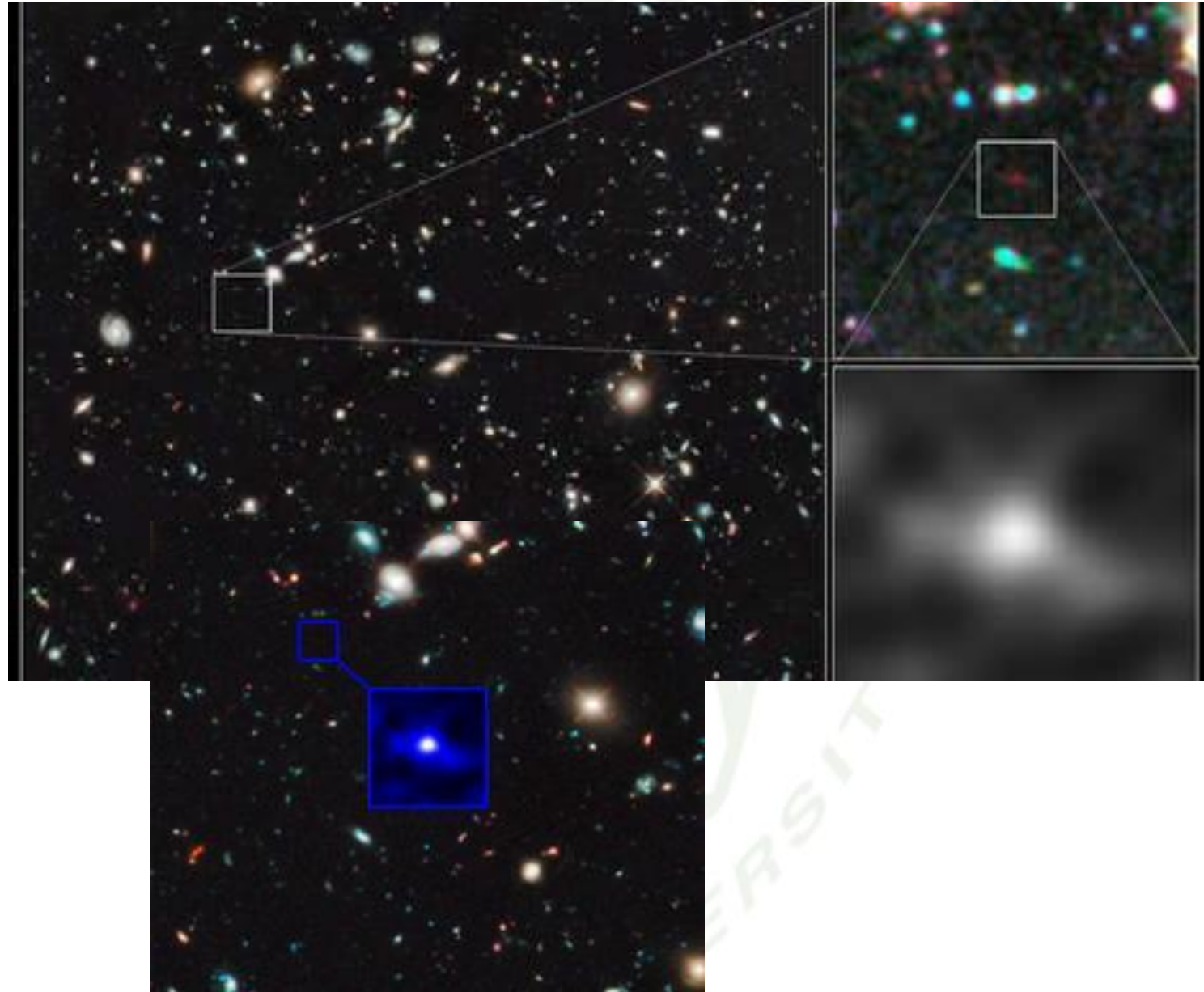


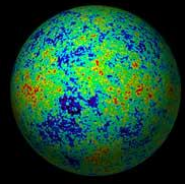
Vorige week in Nature

Bouwens,
Franx

J-band drop
outs toch niet
echt

Maar 1
melkwegstelsel
bij $z = 10$





Hoe ver kunnen we terug?

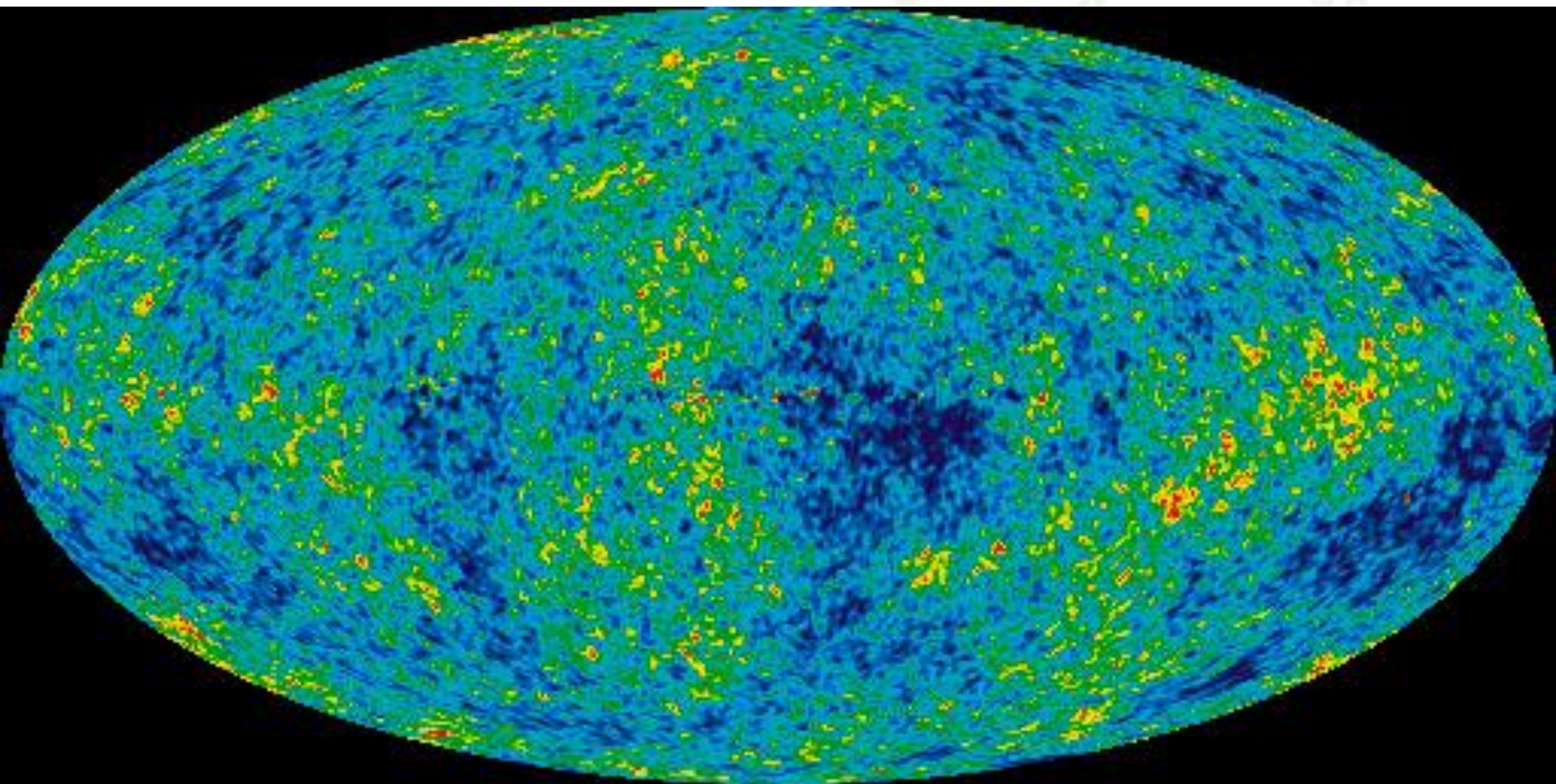
- Terug in tijd: heelal steeds heter
- Gamow, Alpher (1948)
 - Mogelijke verklaring elementen He etc. (temperatuur voor H fusie $\sim 10^9$ K) \rightarrow volgende week
 - Bij temperatuur $\sim 10\,000$ K \rightarrow waterstof ioniseert ($p + e^-$)
 - Daarvoor: straling “gevangen” door verstrooiing met electronen
 - Daarna: straling beweegt vrij door Heelal
 - Door uitzetting Heelal worden fotonen “langer”. Temperatuur daalt, nu $T \sim 5$ K
- Nog zichtbaar?
 - Jaren 60: Dicke, Peebles (Princeton) gaan op zoek



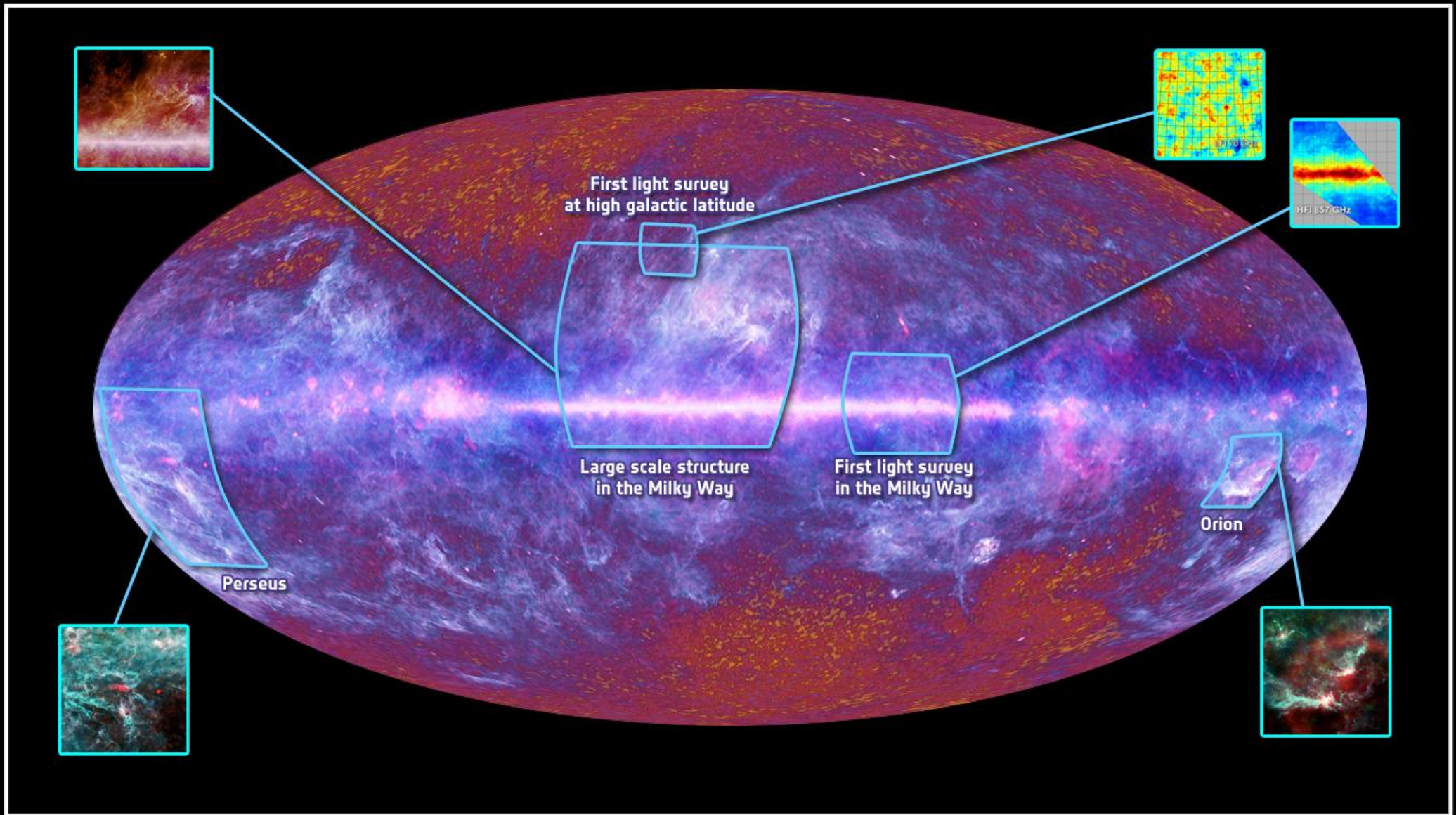
Gamow

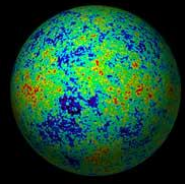


Alpher



WMAP

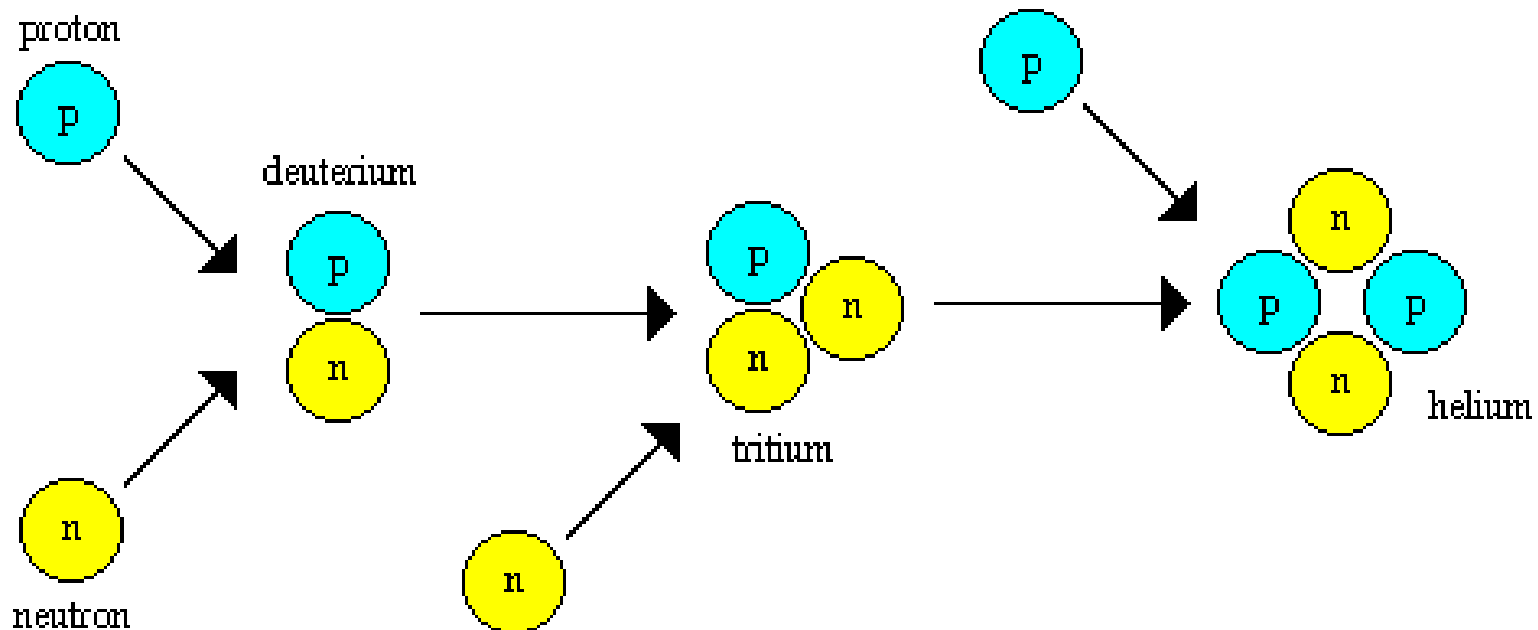




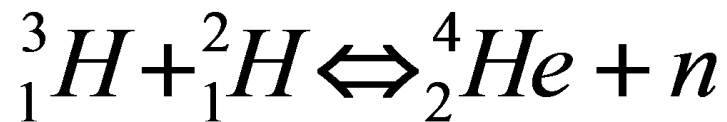
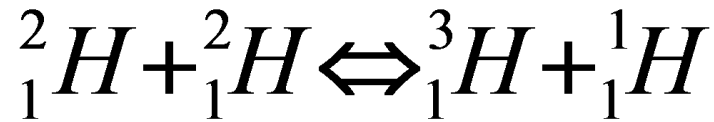
En voor de ontkoppeling?

- Temperatuur nog hoger
- Dichtheid nog hoger
→ Kernfusie mogelijk!

Beneden $T \sim 10^9$ K combineren neutronen en protonen, eerst tot Deuterium en vervolgens tot Helium (~ 25 %):



Reacties



De ouderdom van het heelal is dan 4 minuten!

Waarom duurt dit kort?

T te hoog: kernen vernietigd

T te laag: geen fusie meer

Vorming van helium

Moeilijk om elementen zwaarder dan He te maken
(geen stabiele elementen met $A=5,6$)

'Alle' neutronen gebruikt voor vorming He

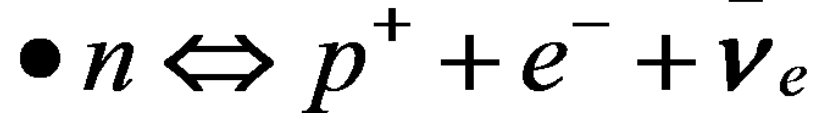
$$\frac{n_n}{n_p} \approx 0.15$$

$$Y = \frac{M_{He}}{M_{tot}} = \frac{4 \times (n_n / 2)}{n_n + n_p} = \frac{0.3}{1.15} \approx 0.26$$

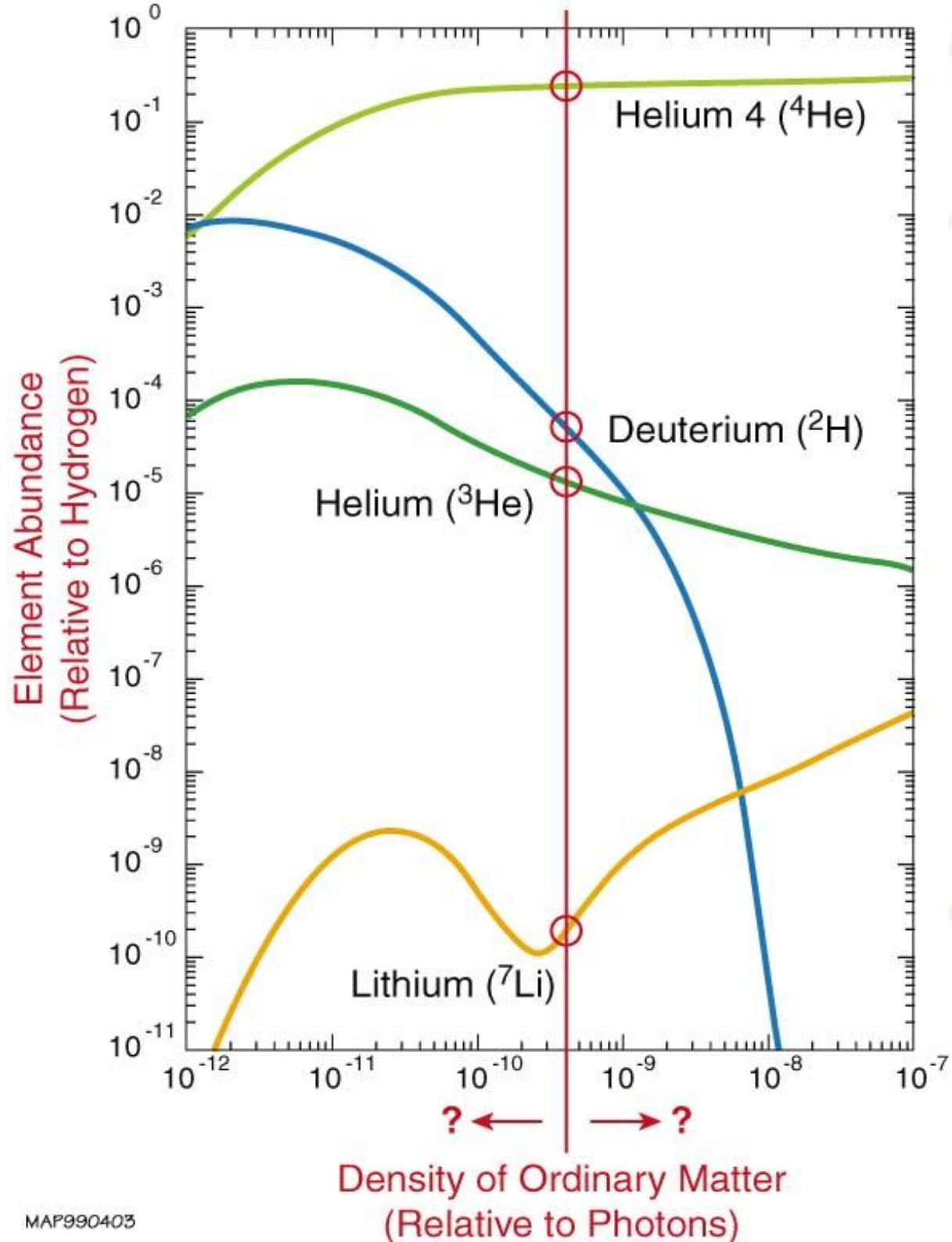
Nucleosynthese I

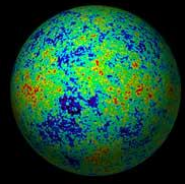
$T > 10^{10} \text{ K}$ ($kT = 0,86 \text{ MeV}$):

neutronen en protonen met elkaar in evenwicht



n/p vriest in omdat e+/e- annihileren

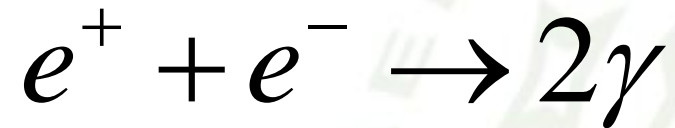




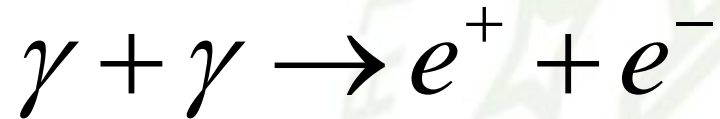
En nog verder terug?

Bij $T \sim 10^{10}$ K ($t \sim 1$ s)

electron – positron annihilatie



wint van

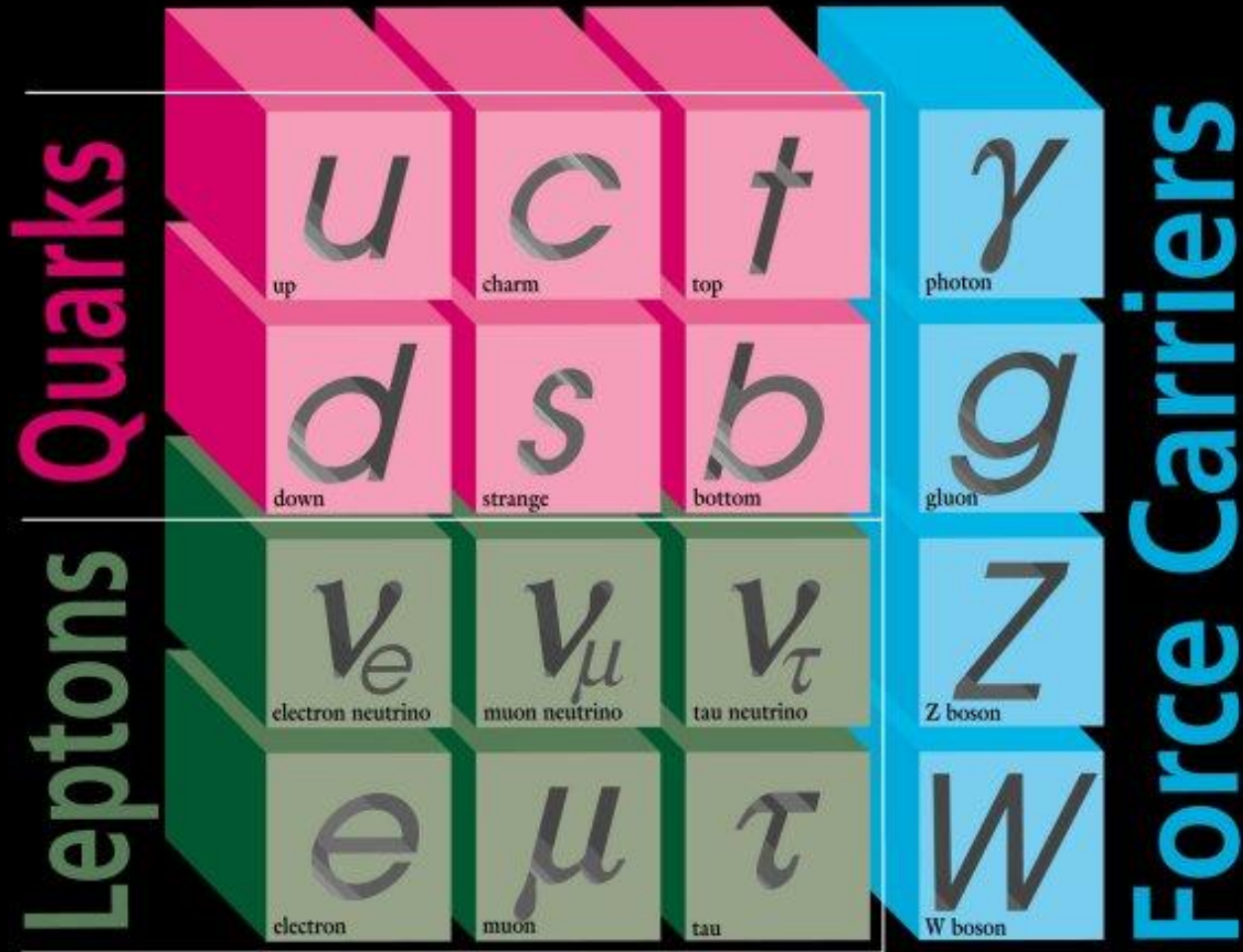


Bij $T \sim 10^{11}$ K ($t \sim 10^{-2}$ s)

Ontkoppeling van neutrino's van rest materie

ELEMENTARY PARTICLES

Boven
van vri
gluonp



as
rk-

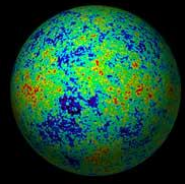
I II III
Three Generations of Matter

Baryogenese II

Daarbeneden combineren quarks en antiquarks tot gewone materie (baryonen):

$p (=uud)$ en $n (=udd)$.

Het heelal is dan enkele microseconden oud.



Hoe ver kan je teruggaan?

Planck schaal

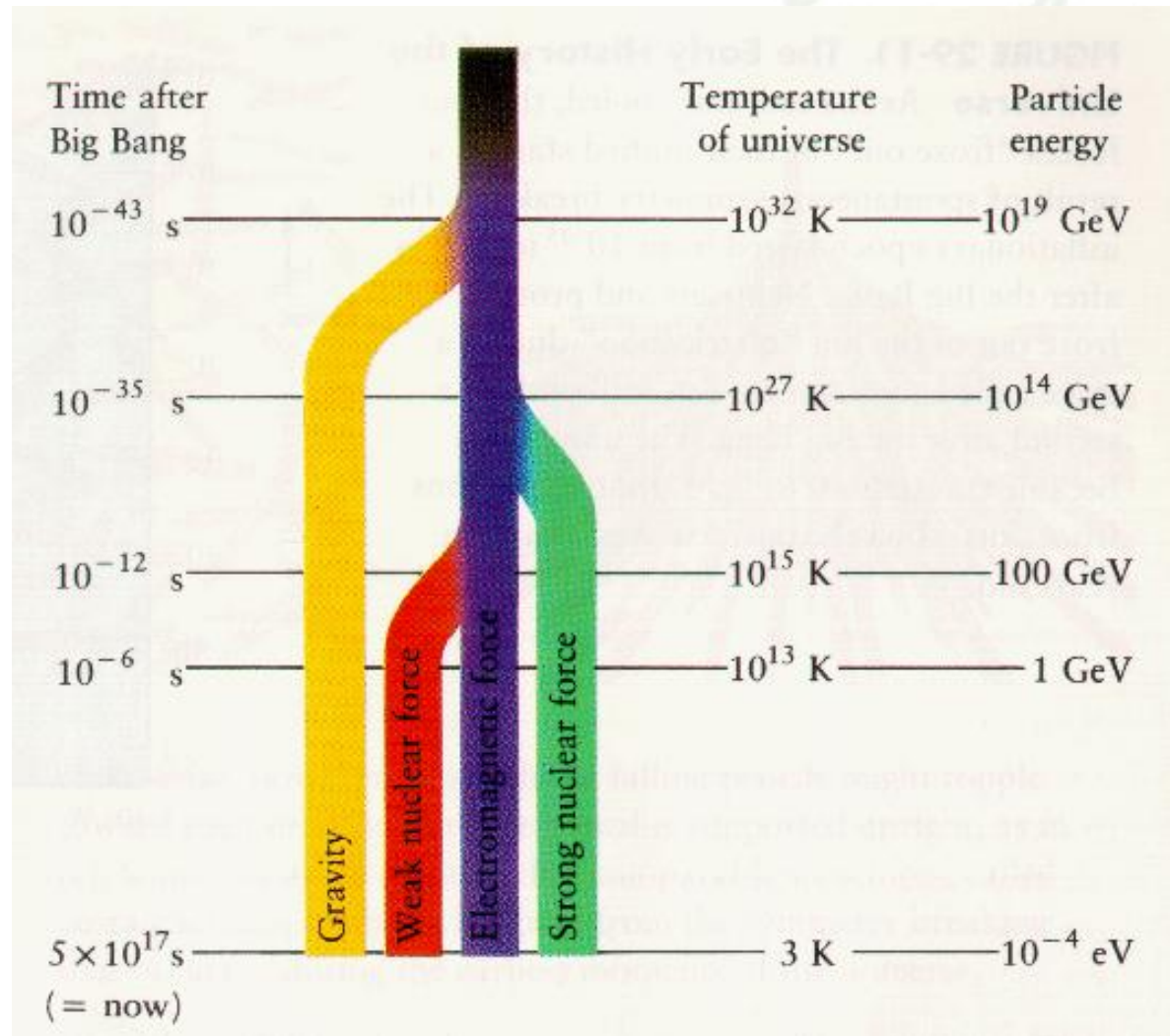
$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

$$\lambda_M = \frac{\hbar}{Mc}$$

$$R_s = \lambda_M \Rightarrow m_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 2.3 \times 10^{-5} \text{ g}$$

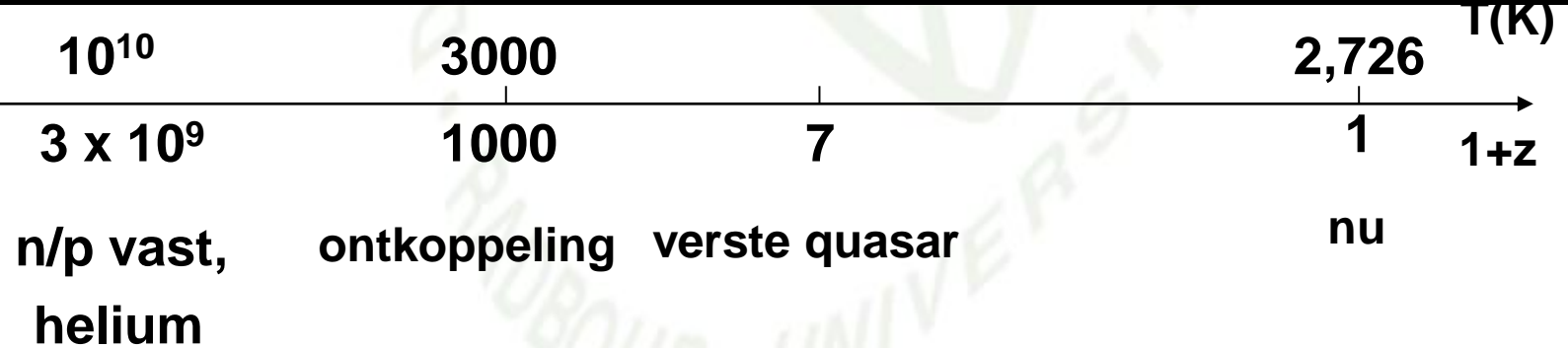
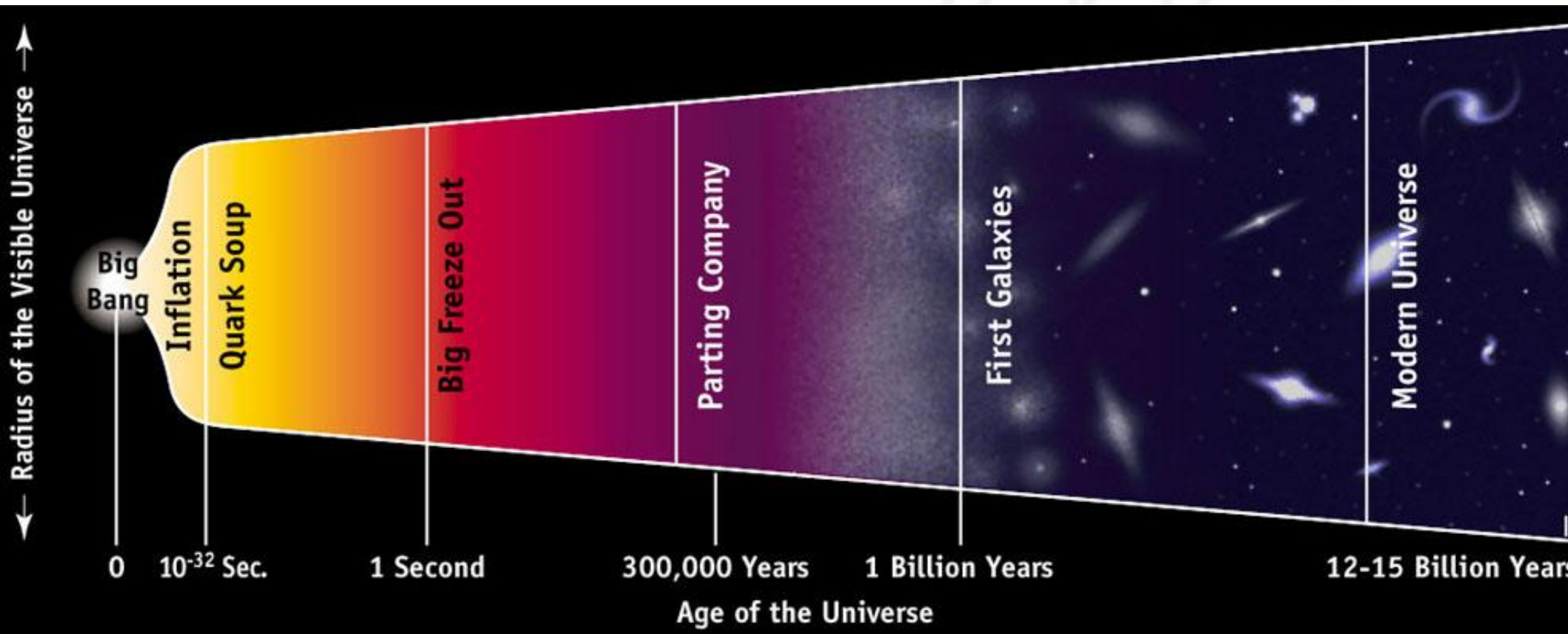
$$E_{pl} = 1.36 \cdot 10^{19} \text{ GeV}, t_{pl} = 5 \cdot 10^{-44} \text{ s}$$

Unificatie van krachten



Kosmologie (par 11.7)

Geschiedenis van het Heelal



Theorie van het heelal is theorie van de zwaartekracht!

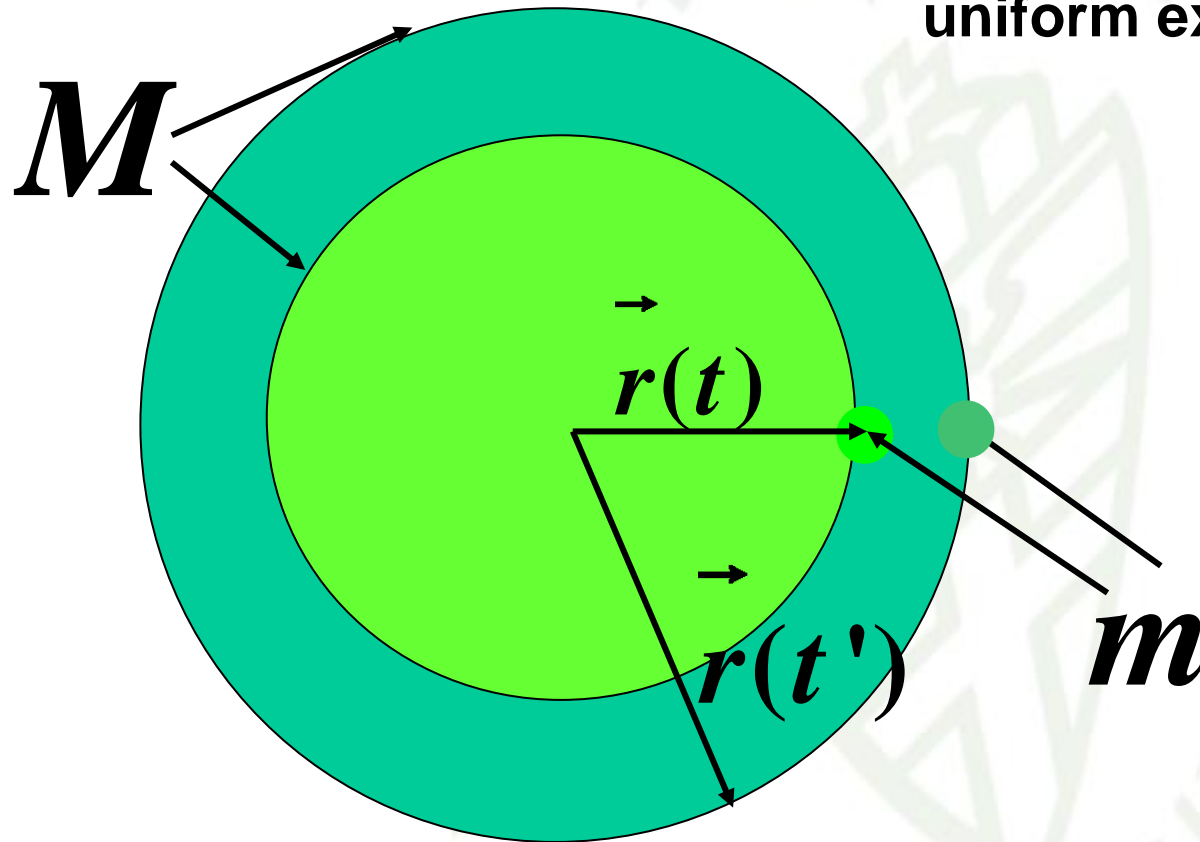
- Isaac Newton 1642 – 1727
- Albert Einstein 1875 - 1955:
Algemene Relativiteitstheorie 1915

Zolang $v \ll c$ en $\sqrt{\frac{2GM}{R}} \ll c$

is Newton een goede benadering voor Einstein!

De Friedmannvergelijkingen

Homogeen koud gas,
uniform expanderend



De Friedmannvergelijkingen

Uitdijing heelal representeert kinetische energie

Massa verdeling potentiële energie

Totale energie constant:

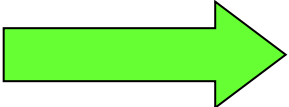
$$E = K + W = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{GMm}{r} = \text{const.}$$

De Friedmannvergelijkingen

$$E = K + W = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{GMm}{r} = \text{const.}$$

$$M = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho$$

$$r(t) = R(t)x$$


$$\left(\frac{v}{R} \right)^2 - \frac{8\pi G\rho}{3} = \frac{2E}{mR^2 x^2} \equiv -\frac{k}{R^2}$$

$$\left(\frac{v}{R}\right)^2 - \frac{8\pi G\rho}{3} = -\frac{k}{R^2}$$

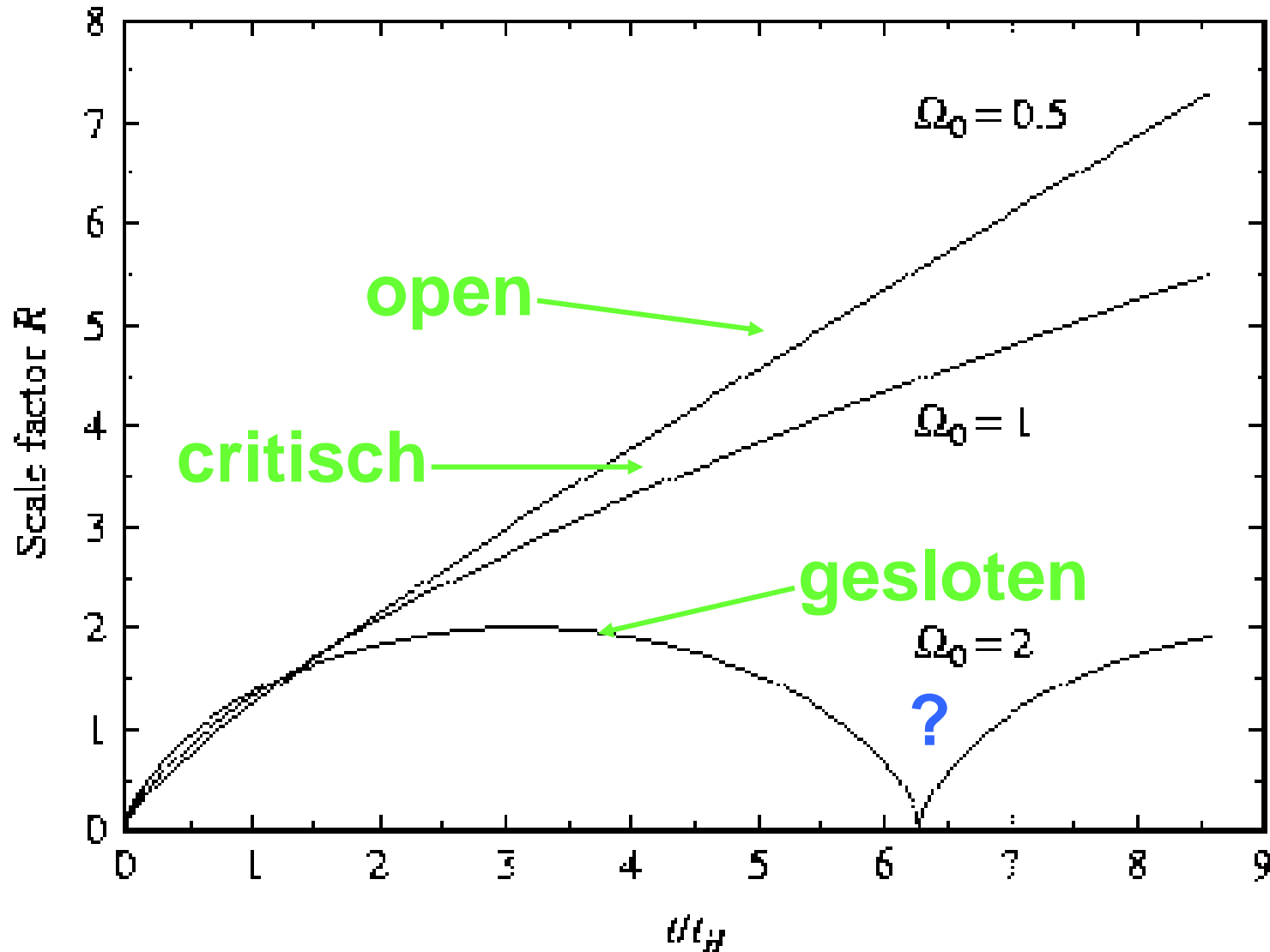
“Constante” van Hubble $H \equiv \frac{v}{R}$

Som geschreven in termen kritische dichtheid

$$1 - \frac{\rho}{\rho_c} = -\frac{k}{H^2 R^2}$$

$$1 - \Omega_M = -\frac{k}{H^2 R^2}$$

Wat is de waarde van k ?



$k < 0$

$k = 0$

$k > 0$

Oplossingen van de Friedmannvergelijkingen

Hoe verandert ρ als R verandert?

Twee gevallen:

- Critisch heelal met koud materiegas
- Critisch heelal met relativistisch gas

Critisch heelal met koud materieegas

Dichtheid gedomineerd door materiedeeltjes

$$\longrightarrow \rho \propto R^{-3}$$

$$\left(\frac{v}{R}\right)^2 - \frac{8\pi G\rho}{3} = -\frac{k}{R^2} = 0$$

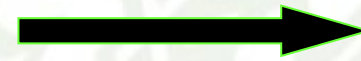
v is verandering R
In de tijd



$$R(t) \propto t^{2/3}$$

Critisch heelal met relativistisch gas “straling”

Dichtheid gedomineerd door
energie deeltjes ($E=mc^2$)



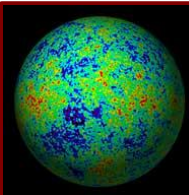
$$\rho \propto R^{-4}$$

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 - \frac{8\pi G\rho}{3} = -\frac{k}{R^2} = 0$$

\dot{R} is verandering R
In de tijd



$$R(t) \propto t^{1/2}$$



Intermezzo: v uit R(t) oplossen

Hoe werkt dat?

$$R(t) \sim \sqrt{t}$$

Hoe groter t, hoe groter R
(snelheid positief)

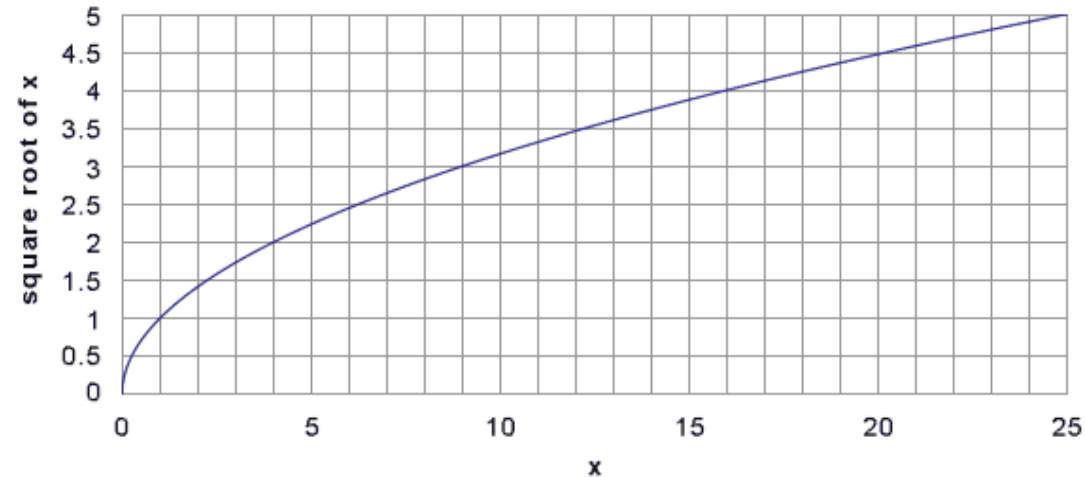
Hoe groter t, hoe *langzamer* R
groter wordt (v wordt kleiner)

Dus als t groter: R↑, v↓

Voor $R(t) \sim \sqrt{t}$ geldt juist

$$v^2 \sim 1/R^2$$

(en voor $R(t) \sim t^{2/3}$ $v^2 \sim 1/R$)



$$\left(\frac{v^2}{R^2} \right) - \frac{\dots}{R^4} = 0 \rightarrow v^2 - \frac{\dots}{R^2} = 0$$

op ieder moment t!

$$\left(\frac{v^2}{R^2} \right) - \frac{\dots}{R^3} = 0 \rightarrow v^2 - \frac{\dots}{R} = 0$$

Evolutie van dit heelal

