

Kun je de Oerknal horen?

Bram Achterberg

Afdeling Sterrenkunde

IMAPP, Radboud Universiteit Nijmegen

A L I E N



In space no one can hear you scream.

TWENTIETH CENTURY-FOX PRESENTS

A L I E N

© 1979 TWENTIETH CENTURY-FOX

TOM SKERRITT SIGOURNEY WEAVER VERONICA CARTWRIGHT HARRY DEAN STANTON
JOHN HURT IAN HOLM and YAPHET KOTTO ^{AS} PARKER

EXECUTIVE PRODUCER RONALD SHUSETT PRODUCED BY GORDON CARROLL, DAVID GILER and WALTER HILL DIRECTED BY RIDLEY SCOTT
STORY BY DAN O'BANNON and RONALD SHUSETT SCREENPLAY BY DAN O'BANNON MUSIC JERRY GOLDSMITH PANAVISION® EASTMAN KODAK COLOR®
PRINTS BY DELUXE®



MOTION PICTURE SOUNDTRACK AVAILABLE ON 20TH CENTURY-FOX RECORDS & TAPES.

READ THE WARNER BOOK

A work of fiction. All names of persons and places are fictitious. In no way intended to defame or libel any person or persons. All rights reserved. © 1979 Twentieth Century-Fox Film Corporation. All rights reserved.

Een paar basisfeiten over ons heelal:

- Het heelal expandeert: de afstanden tussen verre (groepen van) sterrenstelsels wordt steeds groter;
- De materiedichtheid in het heelal neemt steeds verder af: dezelfde hoeveelheid massa in een steeds groter volume!
- De temperatuur van de diffuse materie in het heelal daalt steeds verder.

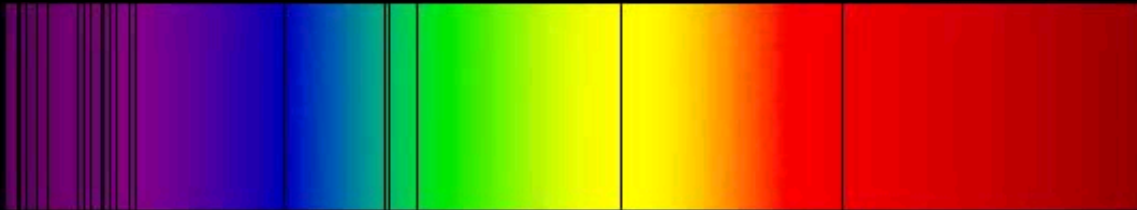
Hoe weten we dat eigenlijk?

- We zien de beweging van verre sterrenstelsels van ons af uit *Dopplerverschuiving*;
- De *vluchtsnelheid* van de beweging van ons weg is evenredig met hun afstand (Hubble's wet);
- We meten de overblijfselen van de vroege, dichte en hete fase van ons heelal:
 1. de *Kosmische Achtergrondstraling*
 2. de producten van *vroege kernfusie* in het heelal

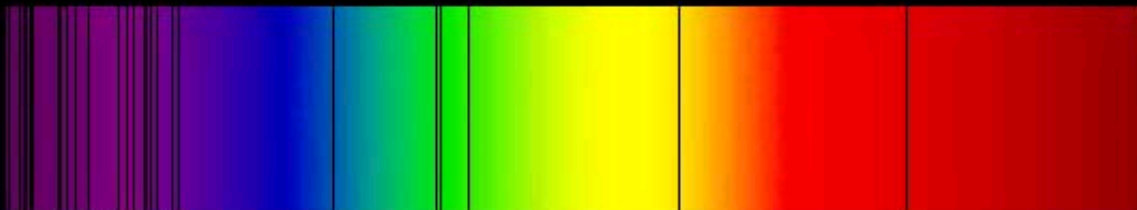
1925: de roodverschuiving van verre sterrenstelsels als functie van hun afstand

Al in 1912 ontdekt door Vesto Slipher!

Absorptielijnen in het spectrum van de Zon



Absorptielijnen in het spectrum van een sterrenstelsel,
met een vluchtsnelheid $0.07c$



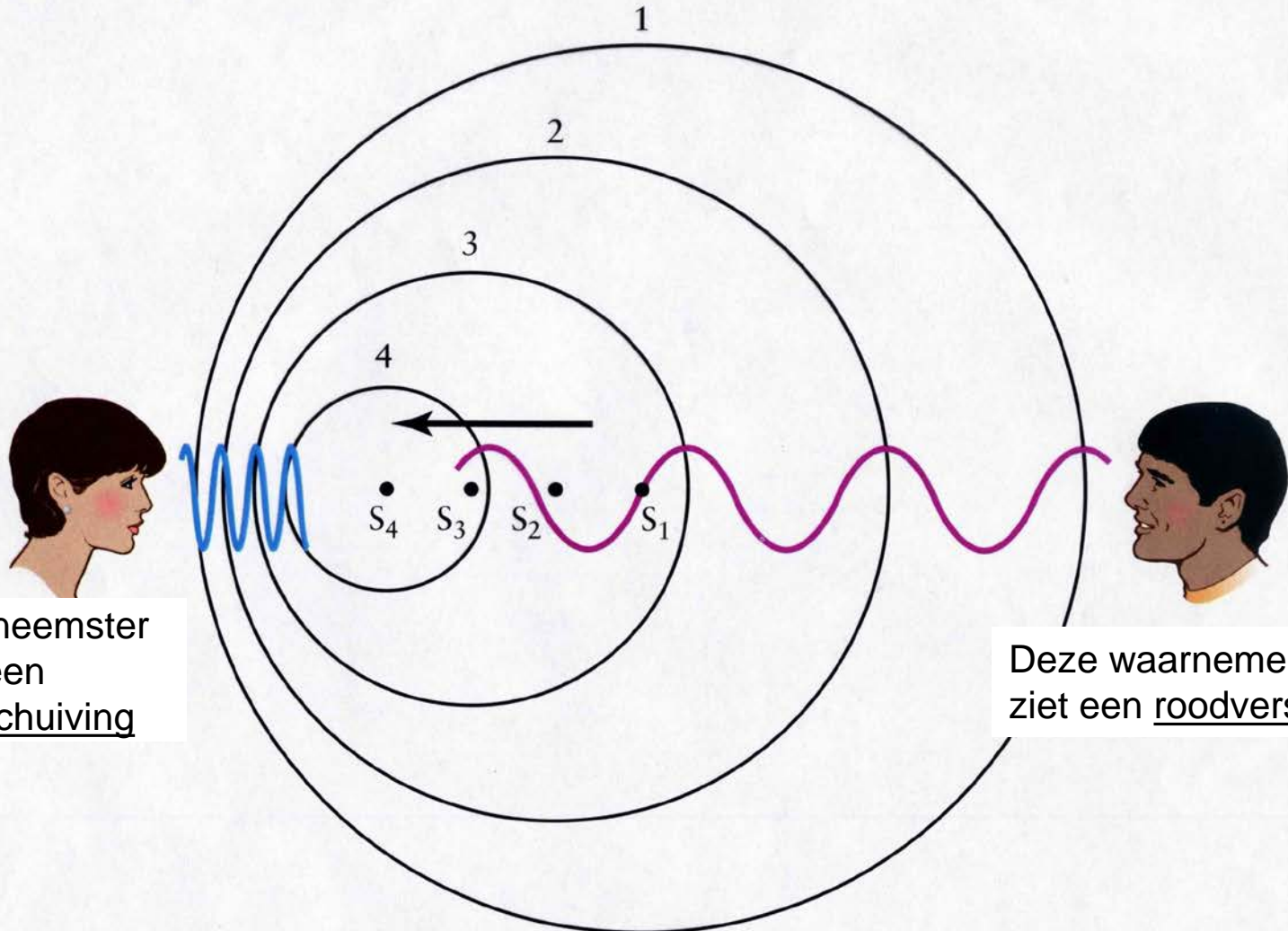
Korte golflengte

λ



Lange golflengte

Roodverschuiving en het Doppler Effect



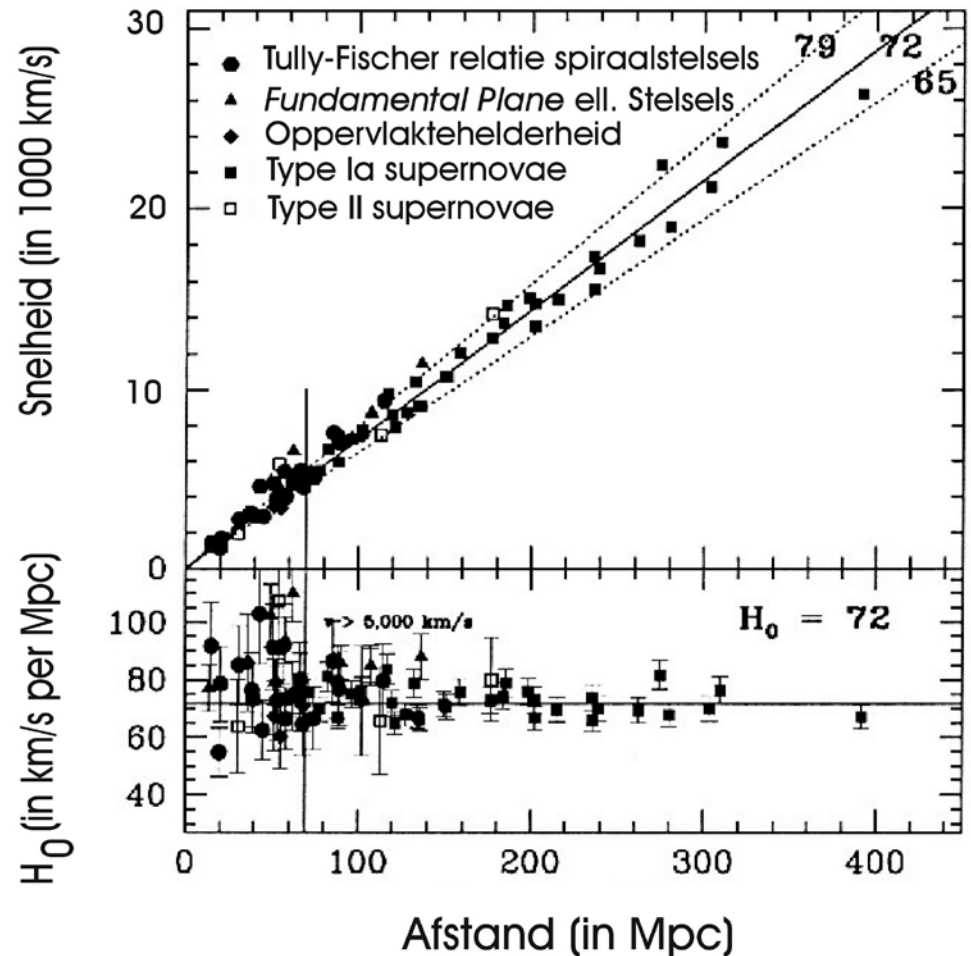
Deze waarnemster
ziet een
blauwverschuiving

Deze waarnemer
ziet een roodverschuiving

Hubble's wet: vluchtsnelheid is evenredig met afstand



Edwin Hubble

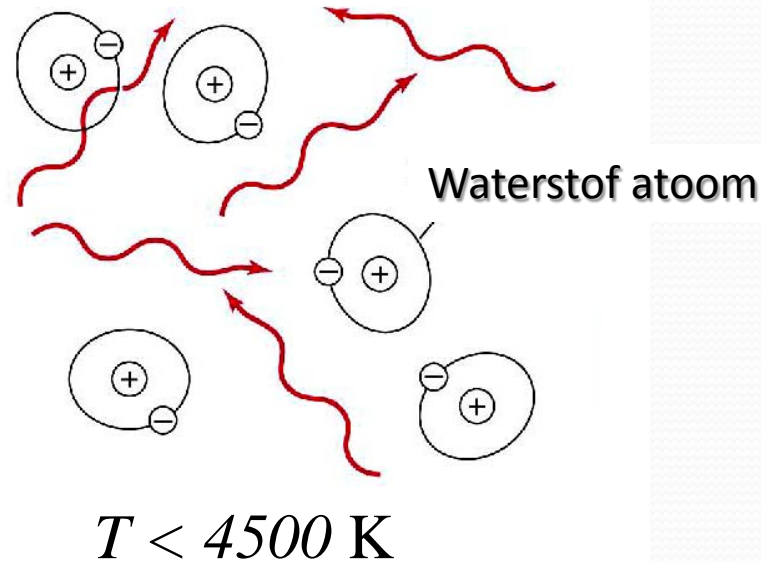
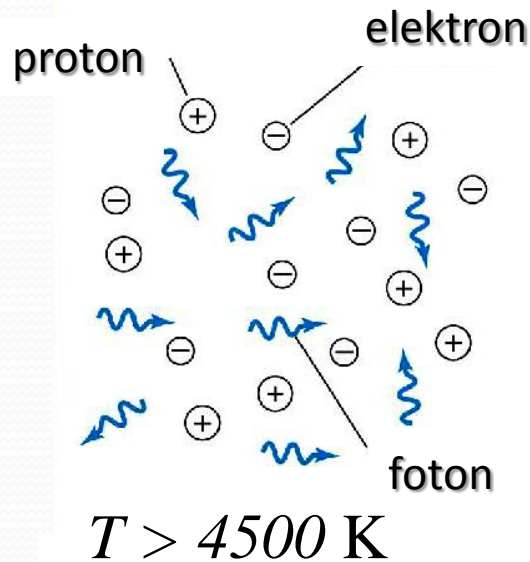


De 100 inch (2,5m) Hooker Telescope

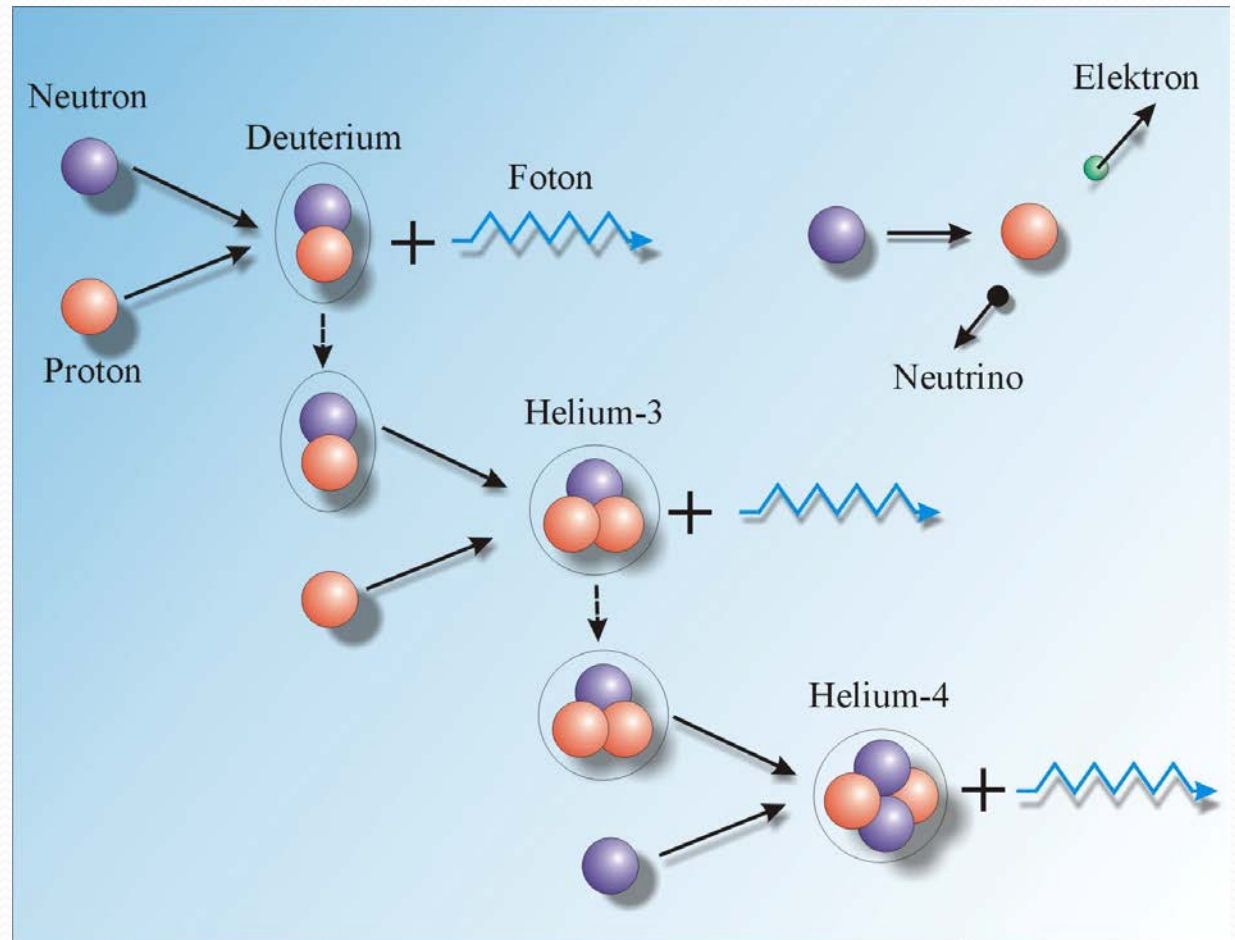
De eerste telescoop waarmee afzonderlijke sterren in andere sterrenstelsels werden gezien

Kosmische achtergrondstraling

Penzias & Wilson
(1962: ontdekkers van de
Kosmische Achtergrondstraling)

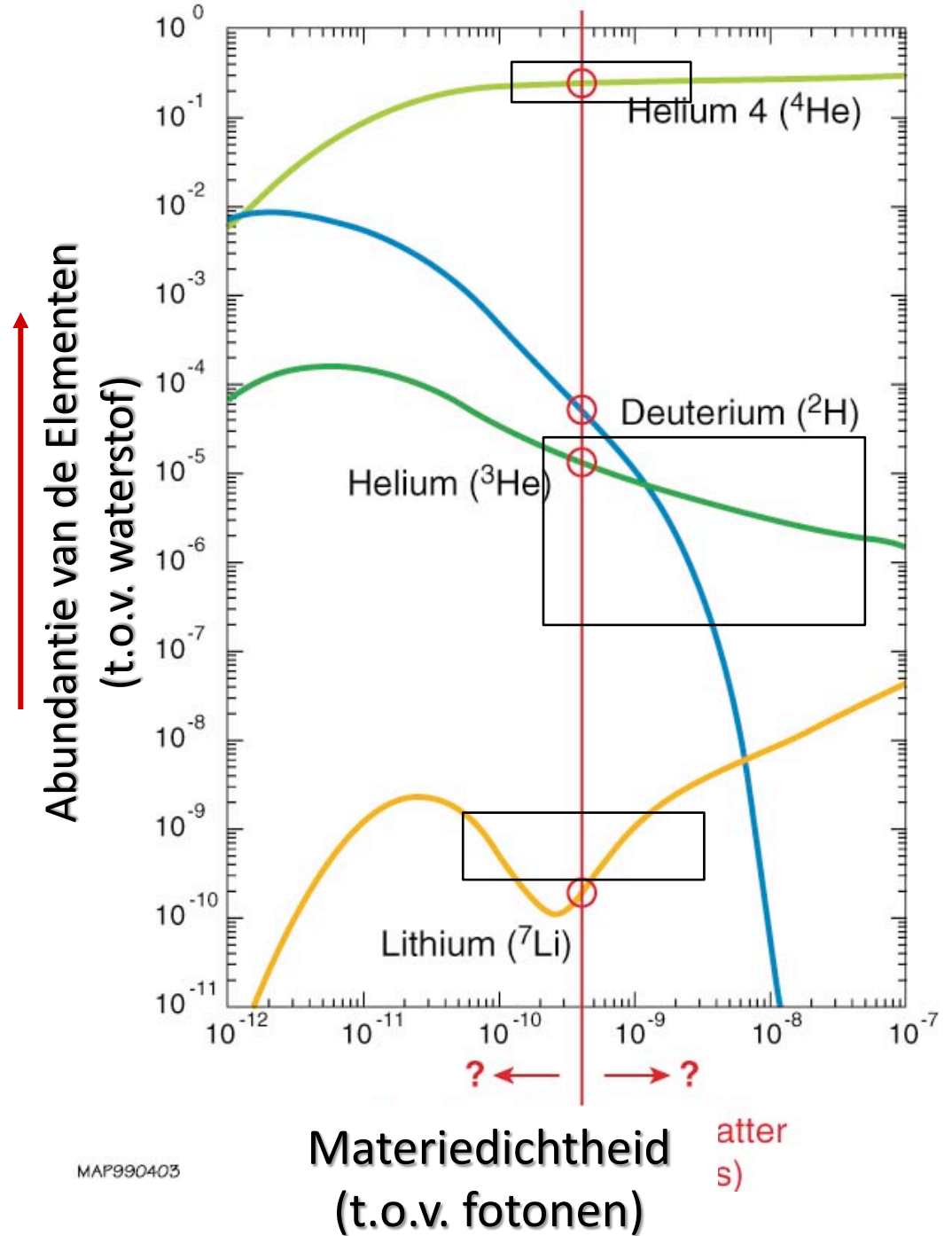


De vroege (voorwereldlijke) kernfusie:



Waterstofverbranding

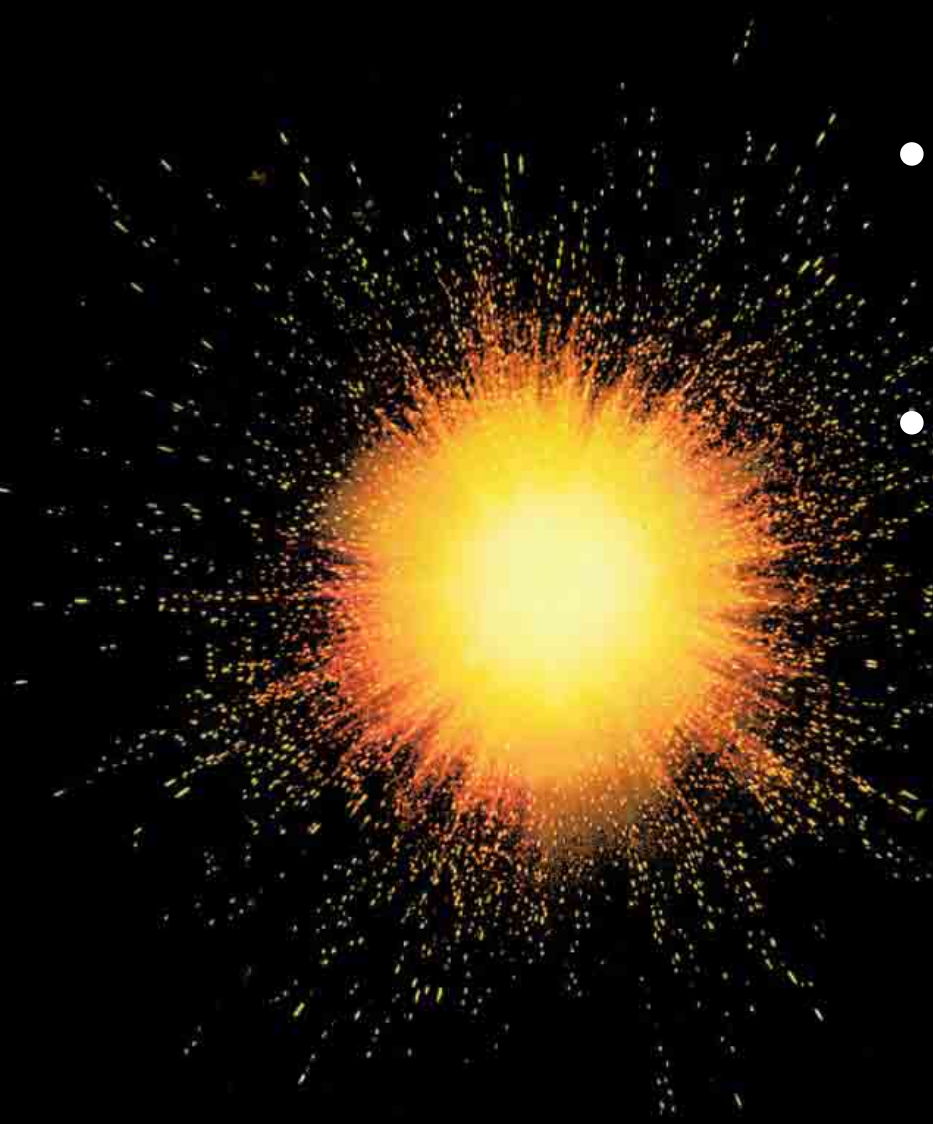
Een berekening van de opbrengst:



CONCLUSIES:

- Ons heelal had een zeer heet en dicht begin!
- Ons heelal heeft een eindige leeftijd !
(~14 miljard jaar)

Dit is de essentie van de
Oerknaltheorie!



Roodverschuiving, snelheid en afstand (1)

Hubble's waarneming:

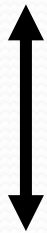
$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{lab}}}{\lambda_{\text{lab}}} \text{ is evenredig met afstand } D$$

Doppler's formule:

$$z = \frac{\text{bronsnelheid}}{\text{lichtsnelheid}} = \frac{V}{c} \quad (\text{als } V \ll c)$$

Roodverschuiving, snelheid en afstand (2)

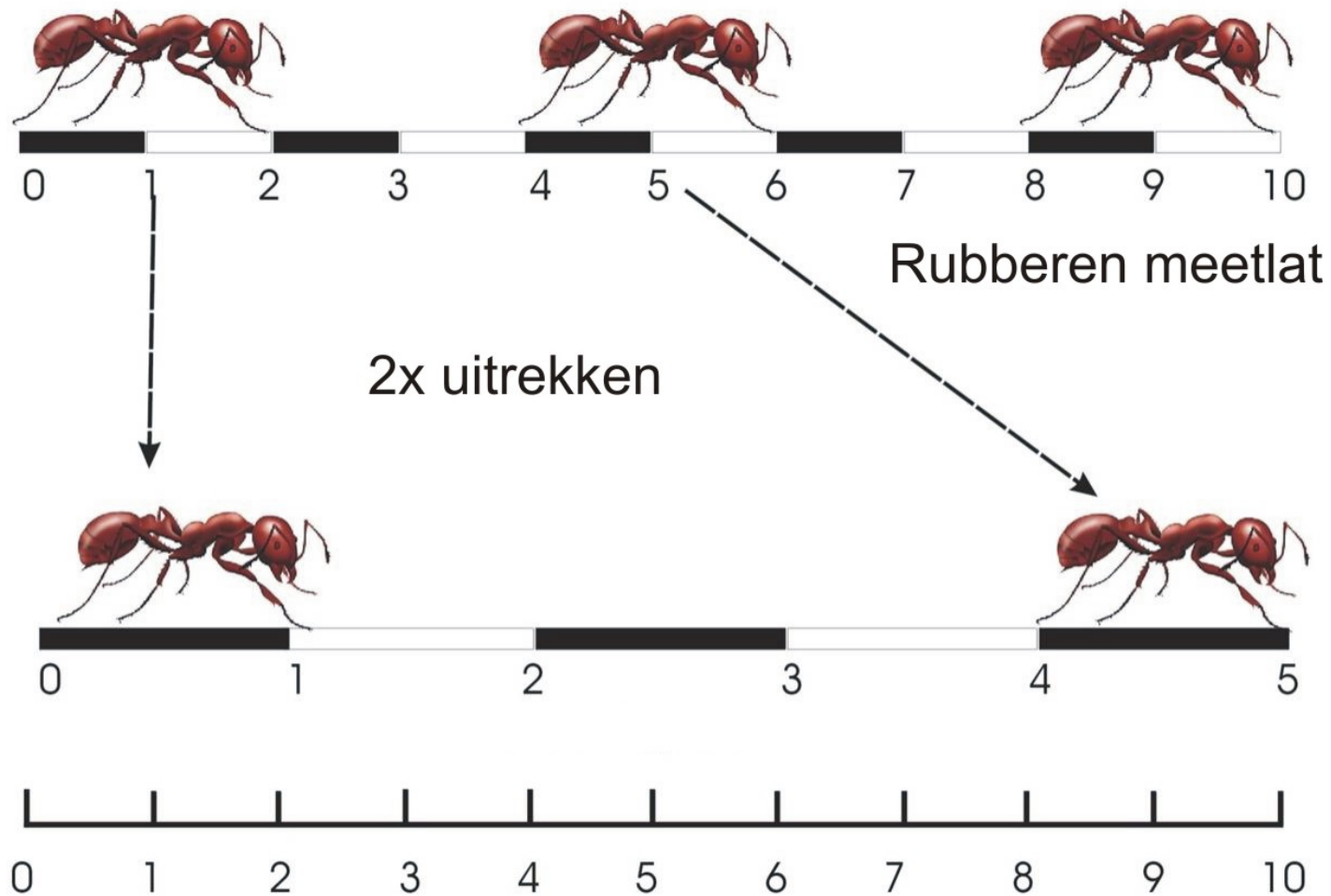
Hubble's waarneming:



Doppler's formule

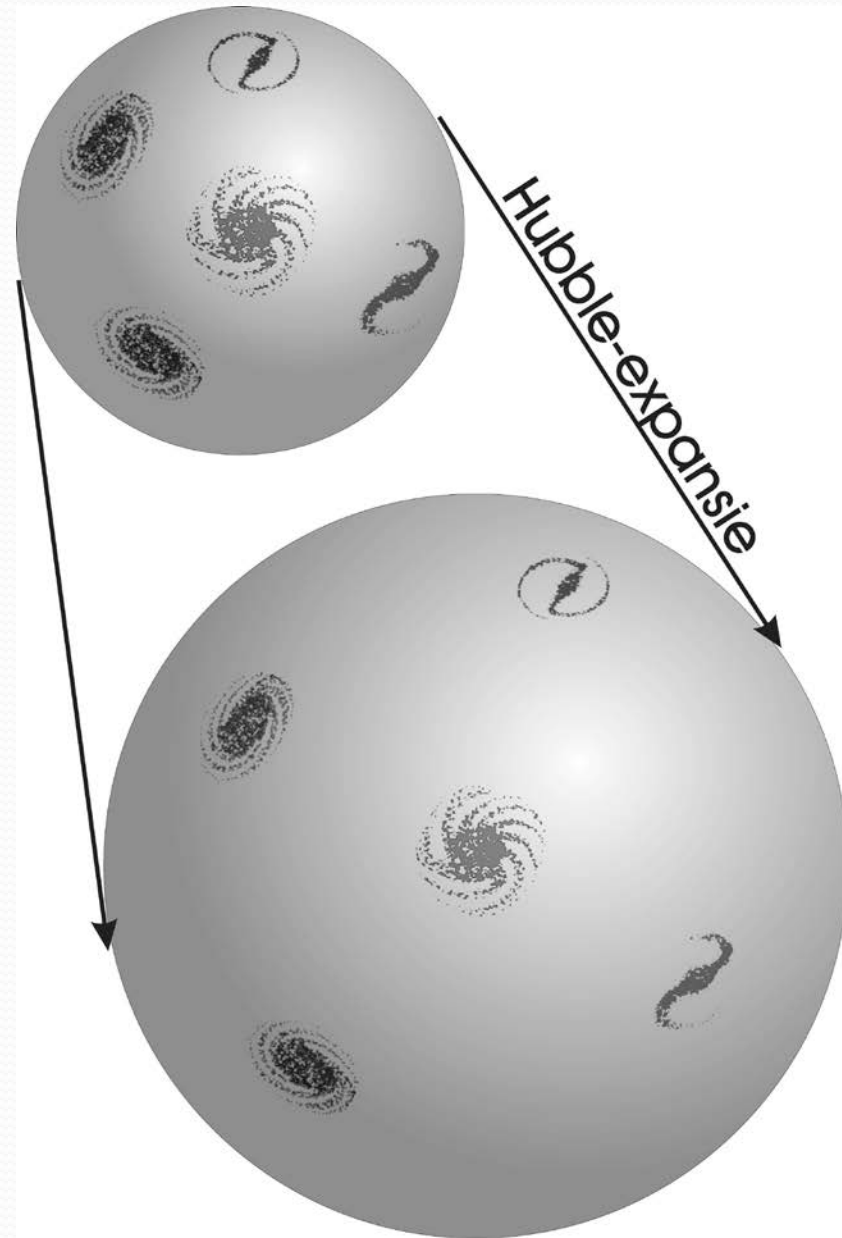
$$V = H_0 \times D \quad (\text{Hubble's wet!})$$

Hubble's wet in een één-dimensionaal *Mierenheelaal*

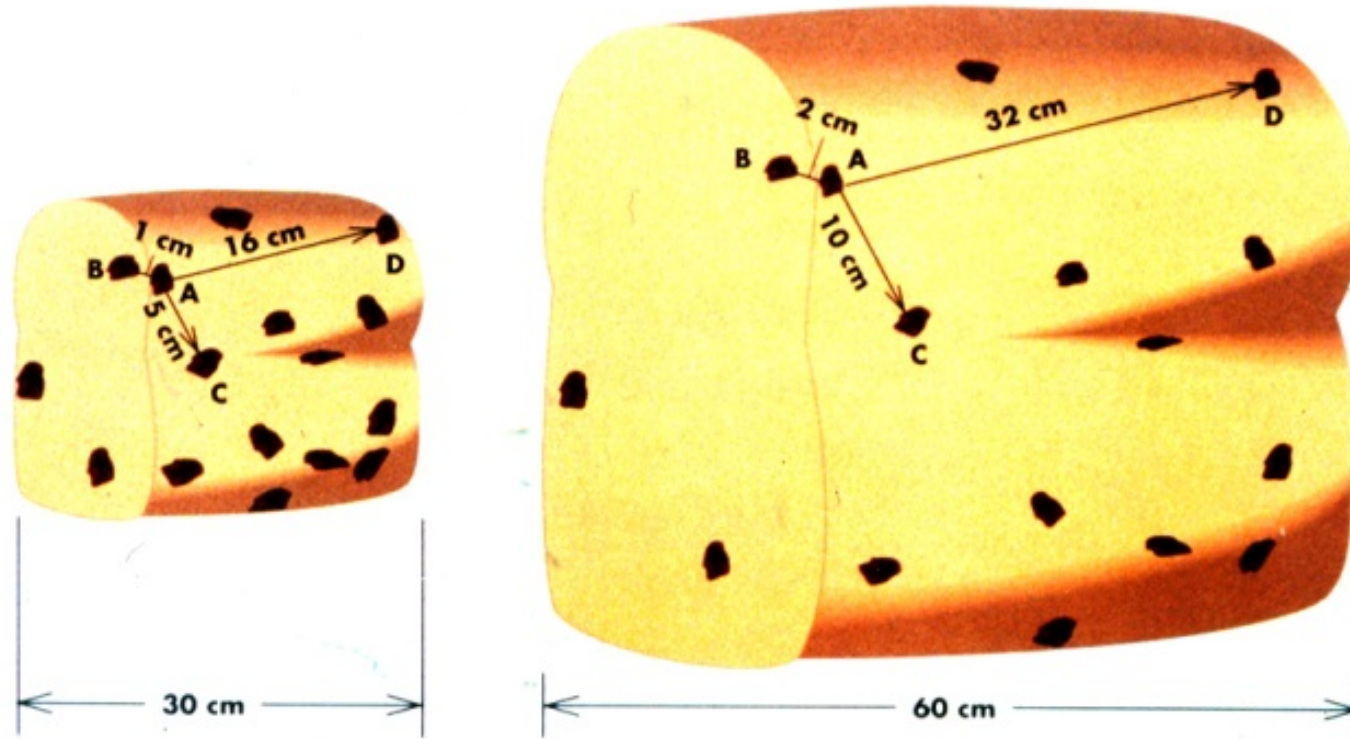


De ballon- analogie

(in twee
dimensies!)



De krentenbrood-analogie (drie dimensies)



Na expansie met een factor 2

1900-1925: een revolutie in de natuurkunde

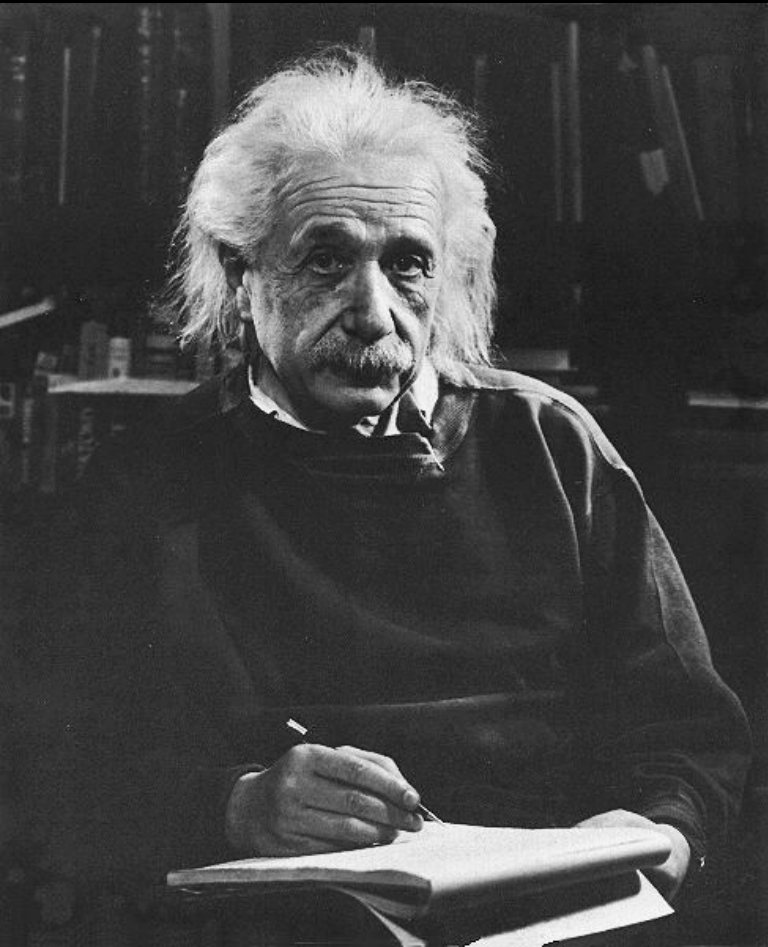
- 1900: Planck legt de basis voor de *Quantummechanika*;
- 1905: Einstein publiceert de *Speciale Relativiteitstheorie*;
- 1917: Einstein publiceert de *Algemene Relativiteitstheorie*, een nieuwe theorie voor de Zwaartekracht;
- 1925: Friedmann geeft de vergelijkingen voor een *Expanderend Heelal*, gebaseerd op Einstein's Relativiteit.

De Hoofdrolspelers:

Einstein,

Friedmann &

Hubble



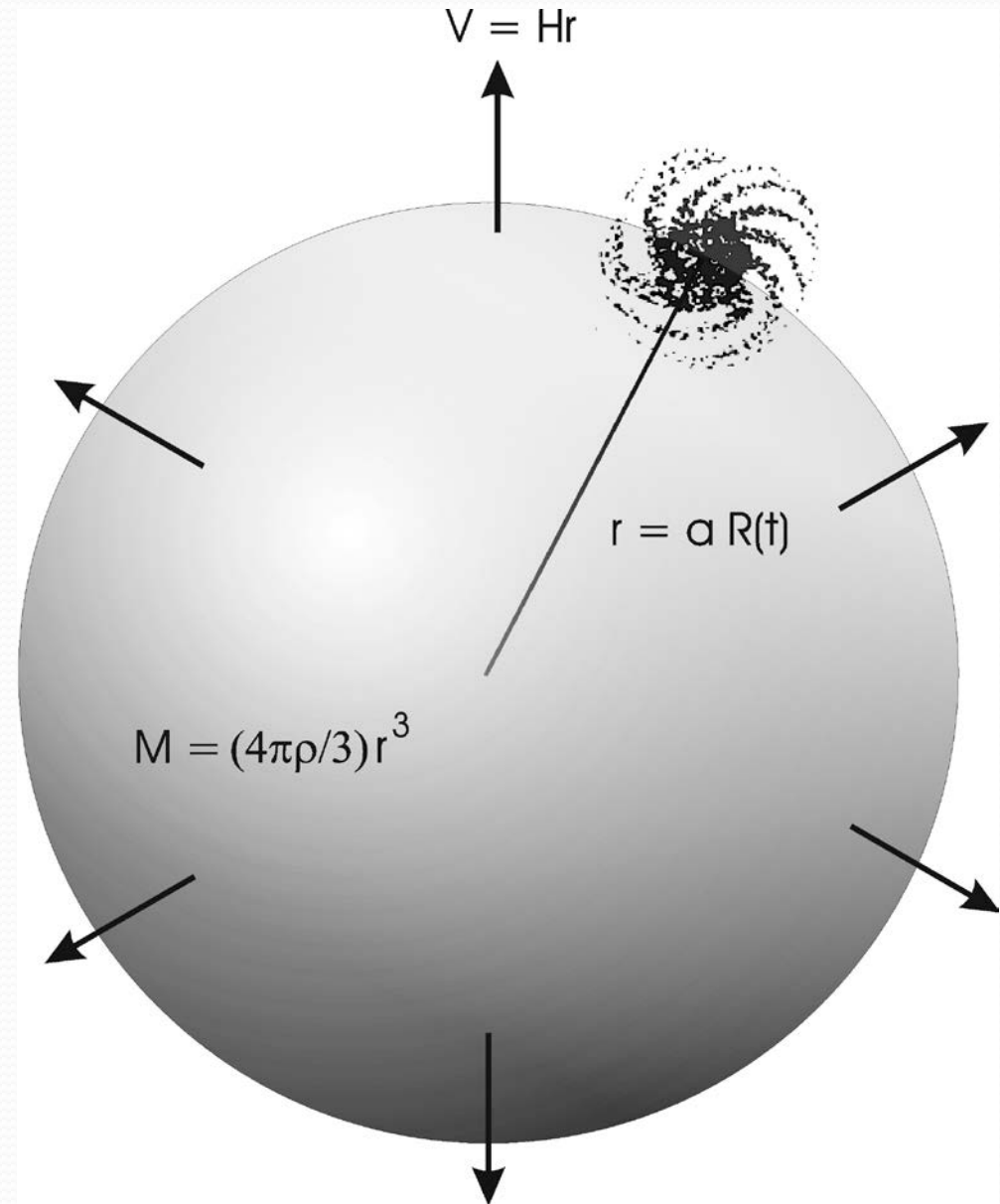
Zwaartekracht en Relativiteit

Onderwerp	Newton	ART (Einstein)
Ruimte en tijd	Aparte zaken: géén oorzakelijk verband	Gemeenschappelijke beschrijving in een vier-dimensionale <i>ruimte-tijd</i>
Ruimte:	De ruimte is vlak (Euclidisch), absoluut en onveranderlijk (statisch); Deze drie-dimensionale ruimte is voor iedere waarnemer gelijk	De ruimte is (in het algemeen gesproken) dynamisch (veranderlijk) en gekromd; Vlakke, statische ruimtes zijn speciaal!
Tijd:	Tijdsmeting geeft voor iedere waarnemer hetzelfde resultaat: de kloksnelheid is voor alle waarnemers gelijk!	De tijdsmeting hangt af van de bewegingstoestand van de waarnemer en/of van het zwaartekrachtsveld waarin hij of zij zich bevindt; De kloksnelheid is niet voor iedereen hetzelfde.
Lichtsnelheid:	Formeel oneindig groot (∞)	Altijd gelijk aan c ($= 2.99 \times 10^8$ m/s), ongeacht de snelheid van de waarnemer!
Gravitatie:	Gravitatie is een kracht die deeltjesbanen in de vlakke ruimte kromt	Gravitatie kromt de ruimte zelf, waardoor deeltjesbanen krom lijken vanuit 'vlak perspectief'
Bron van gravitatie:	rustmassa m	energie E (via $m_{\text{eff}} = E/c^2$)
Afstand:	De afstand tussen twee punten in de 3-dimensionale ruimte is gelijk voor iedere waarnemer	De afstand tussen twee gebeurtenissen in de 4-dimensionale ruimte-tijd is gelijk voor iedere waarnemer

Friedmann's wet via Newtons wetten (!)

- Deze afleiding gebruikt *Newtonse Zwaartekracht*;
- Friedmann gebruikt *Algemene Relativiteitstheorie*;
- Vergelijking ziet er *hetzelfde* uit, maar....
- De *interpretatie* is anders!

Test-sterrenstelsel met
massa m ,
op de rand van een
uniform gevulde en
expanderende bol
met massa M en
straal $r(t) = aR(t)$.



Newtoniaanse afleiding:

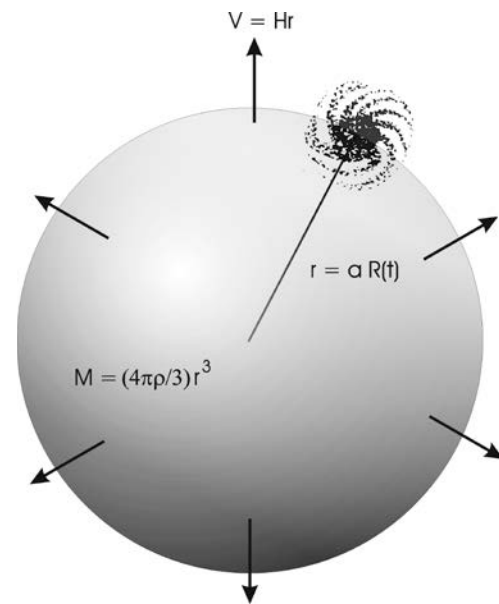
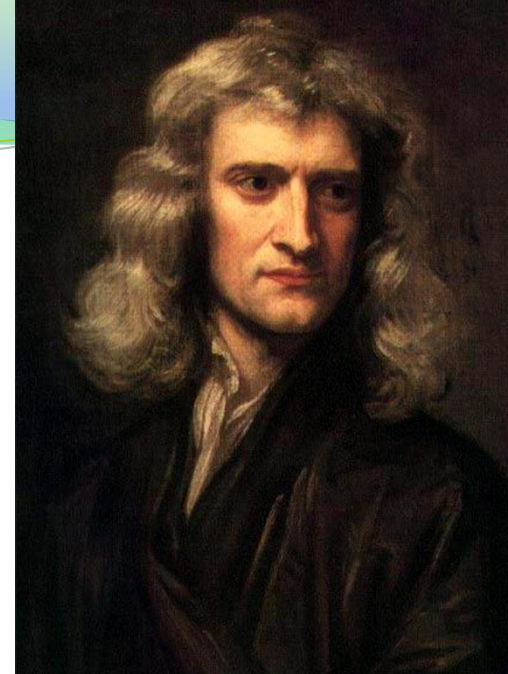
Test-sterrenstelsel met massa m :

$$E = \frac{1}{2} mV^2 - \frac{GMm}{r} = \text{constant}$$

Universele expansie: $r = aR(t)$

Hubble's wet: $V = Hr$

Massabehoud: $M = \frac{4\pi}{3} \rho r^3 = \text{constant}$

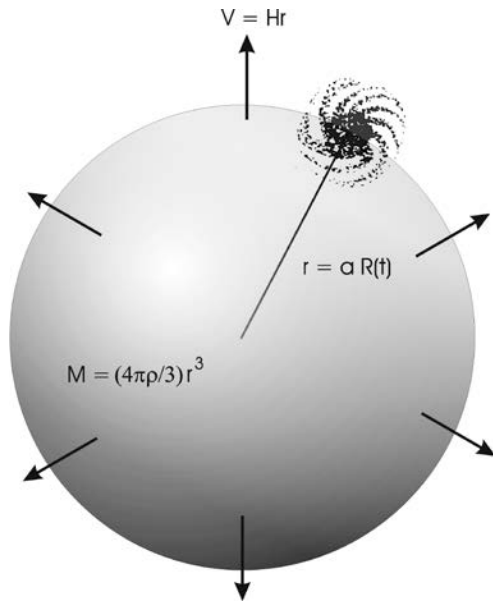


Energie-behoud:

$$E = \underbrace{\frac{1}{2} m V^2}_{\text{kinetische energie}} - \underbrace{\frac{GMm}{r}}_{\text{gravitationele potentiele energie}}$$

Hubble's wet: $V(t) = Hr$

Massa in bol: $M = \frac{4\pi}{3} \rho r^3$

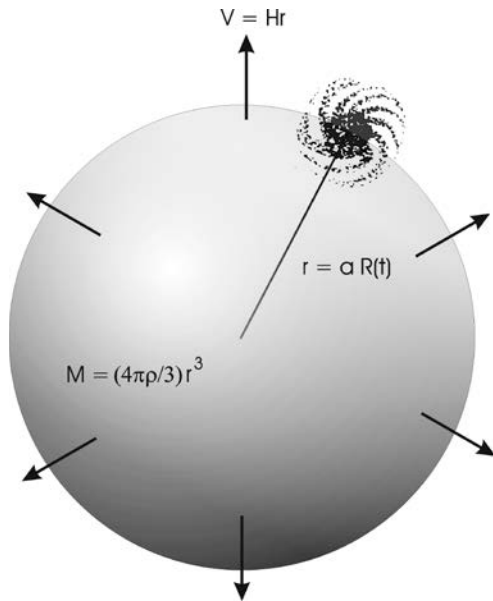


Energie-behoud:

$$E = \underbrace{\frac{1}{2} m V^2}_{\text{kinetische energie}} - \underbrace{\frac{GMm}{r}}_{\text{gravitationele potentiele energie}}$$

Hubble's wet: $V(t) = Hr$

Massa in bol: $M = \frac{4\pi}{3} \rho r^3$



$$E = \underbrace{\frac{1}{2} m H^2 r^2}_{\text{kinetische energie}} - \underbrace{\frac{4\pi G \rho}{3} m r^2}_{\text{gravitationele potentiele energie}}$$

Energiebehoud + Hubble's wet geeft dus:

$$\frac{m}{2} H^2 r^2 - \frac{4\pi G m}{3} \rho r^2 = E$$

Uitdelen van de gemeenschappelijke factor

$$\frac{1}{2} m r^2 = \left(\frac{m a^2}{2} \right) R^2 :$$

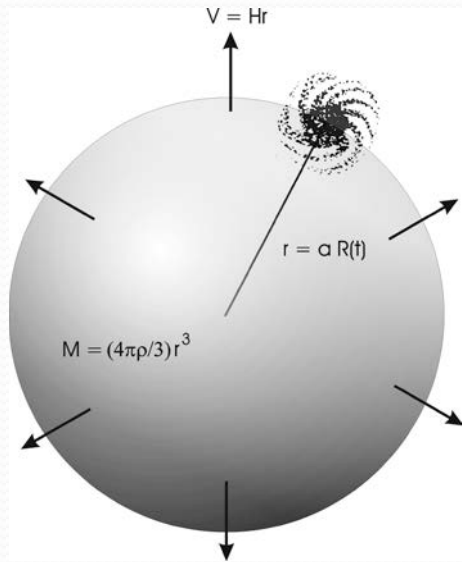
$$H^2(t) = \left(\frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho(t) - \frac{k}{R^2}$$

met $k = -2E / m a^2 = \text{constant}$



Alexander Friedmann

Type oplossingen (*globale indeling*)



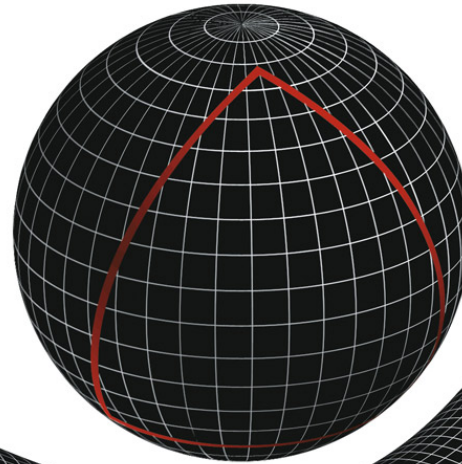
$k < 0$	$E > 0$	open heelal De expansie gaat altijd verder als de tijd voortschrijdt; $r \rightarrow \infty$ en $dr/dt = \text{constant} > 0$ als $t \rightarrow \infty$. Het open heelal duurt eeuwig.
$k = 0$	$E = 0$	vlak heelal Grensgeval: de expansie stopt als $r \rightarrow \infty$, $t \rightarrow \infty$, zodat $dr/dt = 0$ als $t \rightarrow \infty$. Ook het vlakke heelal duurt eeuwig;
$k > 0$	$E < 0$	gesloten heelal In de toekomst stopt de expansie ($r = r_{\text{max}}$ op tijdstip $t = t_{\text{max}}$) met $dr/dt = 0$ op $t = t_{\text{max}}$. Het heelal stort daarna weer in; Het heelal heeft een eindige levensduur, gelijk aan $2 t_{\text{max}}$.

Betekenis van de parameter k :

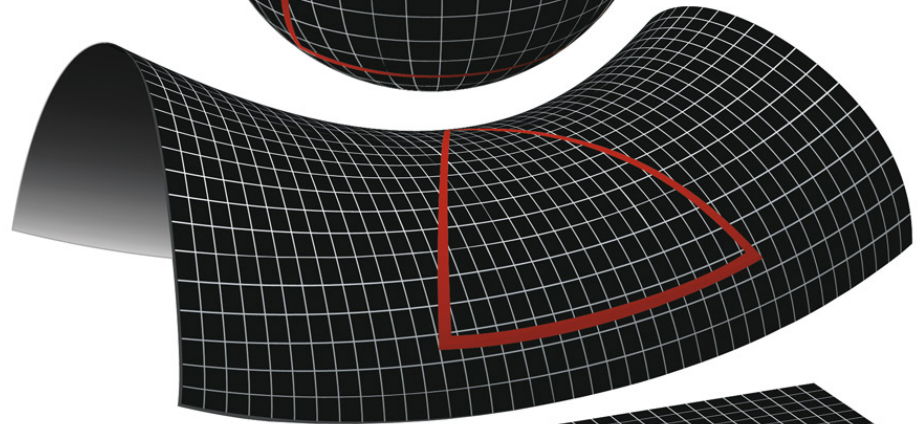
Relativiteitstheorie:

het teken van k
bepaalt de
geometrie van het
heelal

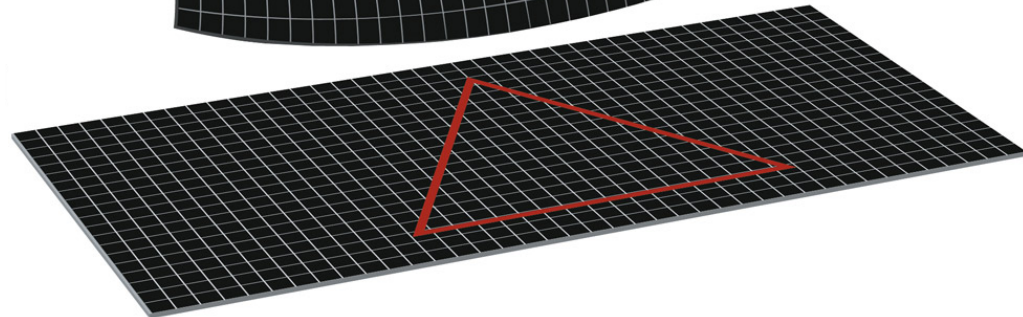
$$k > 0 \quad (E < 0)$$



$$k < 0 \quad (E > 0)$$

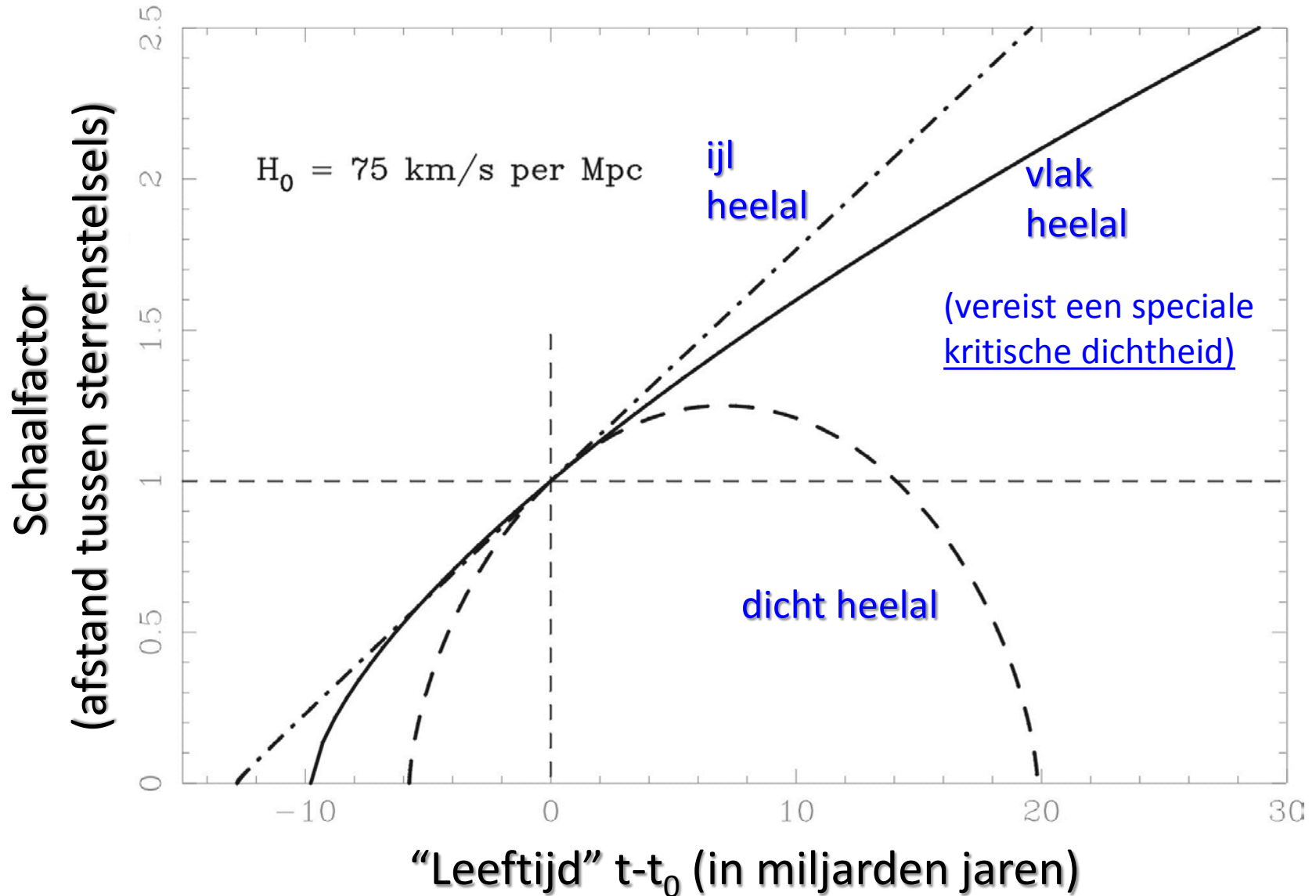


$$k = 0 \quad (E = 0)$$



Standaardheelal (Friedmann, 1924)

evolutie heelal



Kritische Dichttheid: de speciale dichttheid van het vlakke model

$$H_0^2 = \frac{8\pi G \rho_0}{3} \Leftrightarrow \rho_0 = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \equiv \rho_{\text{kr}}$$

$$H_0 \simeq 67 \text{ km/s per Mpc} = \frac{1}{4,60 \times 10^{17} \text{ s}}$$

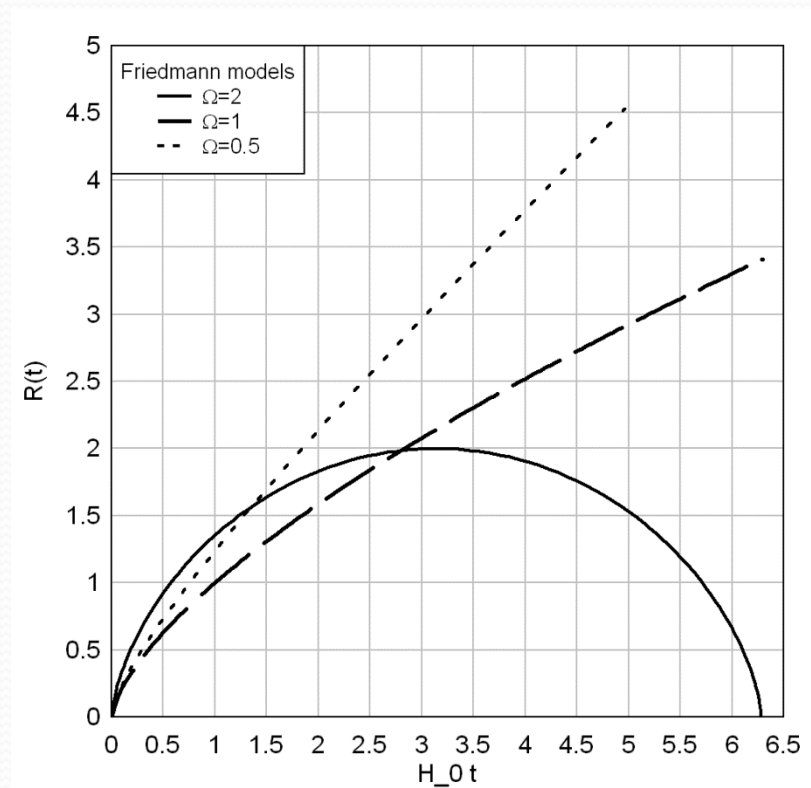
$$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 / \text{kg}^2$$

$$\Rightarrow \rho_0 = 8,46 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$$

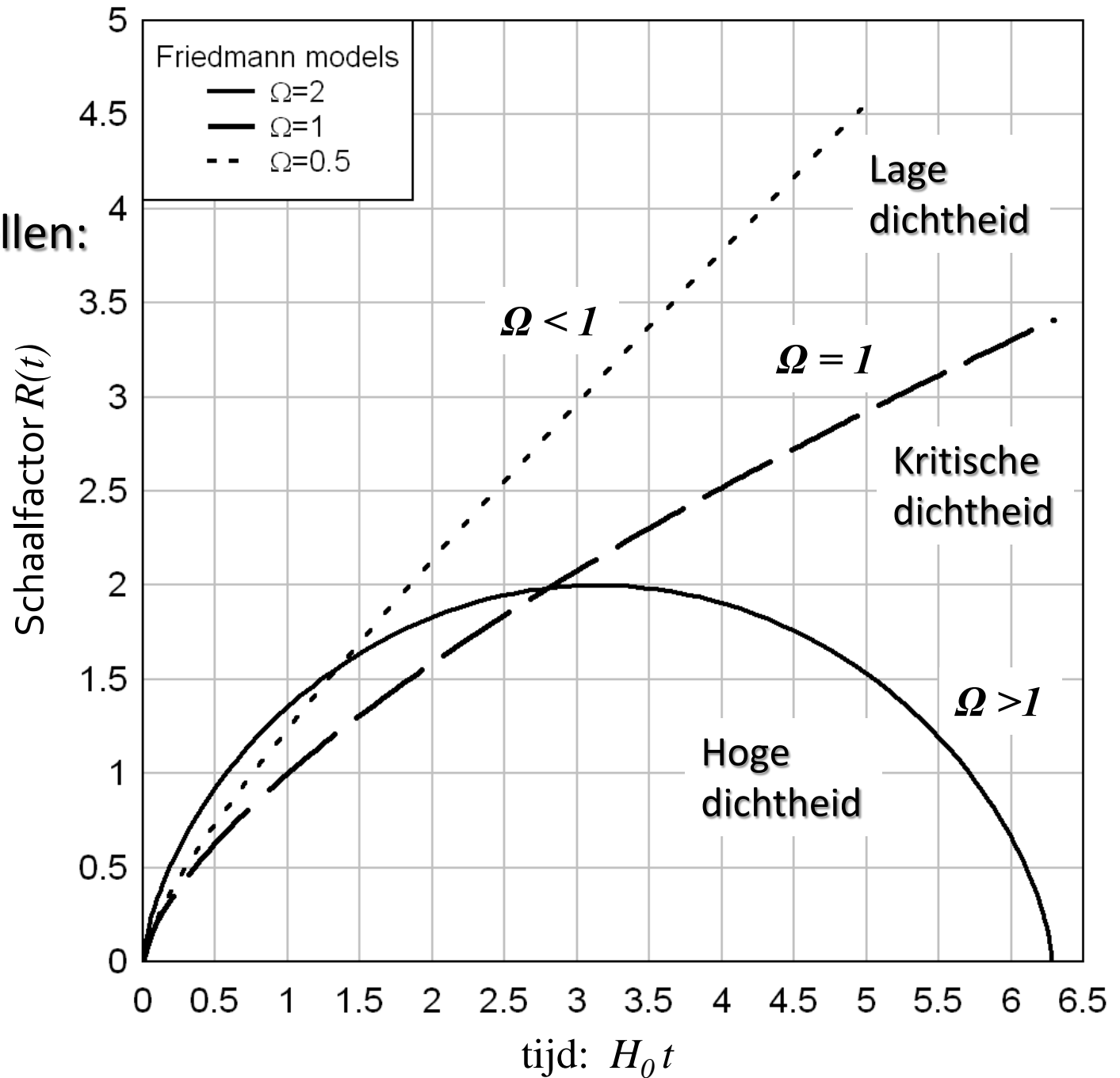
De Omega-parameter(s)

$$\Omega = \frac{\text{massa-dichtheid}}{\text{kritische dichtheid}} = \frac{8\pi G \rho}{3H^2}$$

1. Meet Ω en je kent de toekomst van het heelal!
2. Een vlak heelal heeft altijd $\Omega=1$

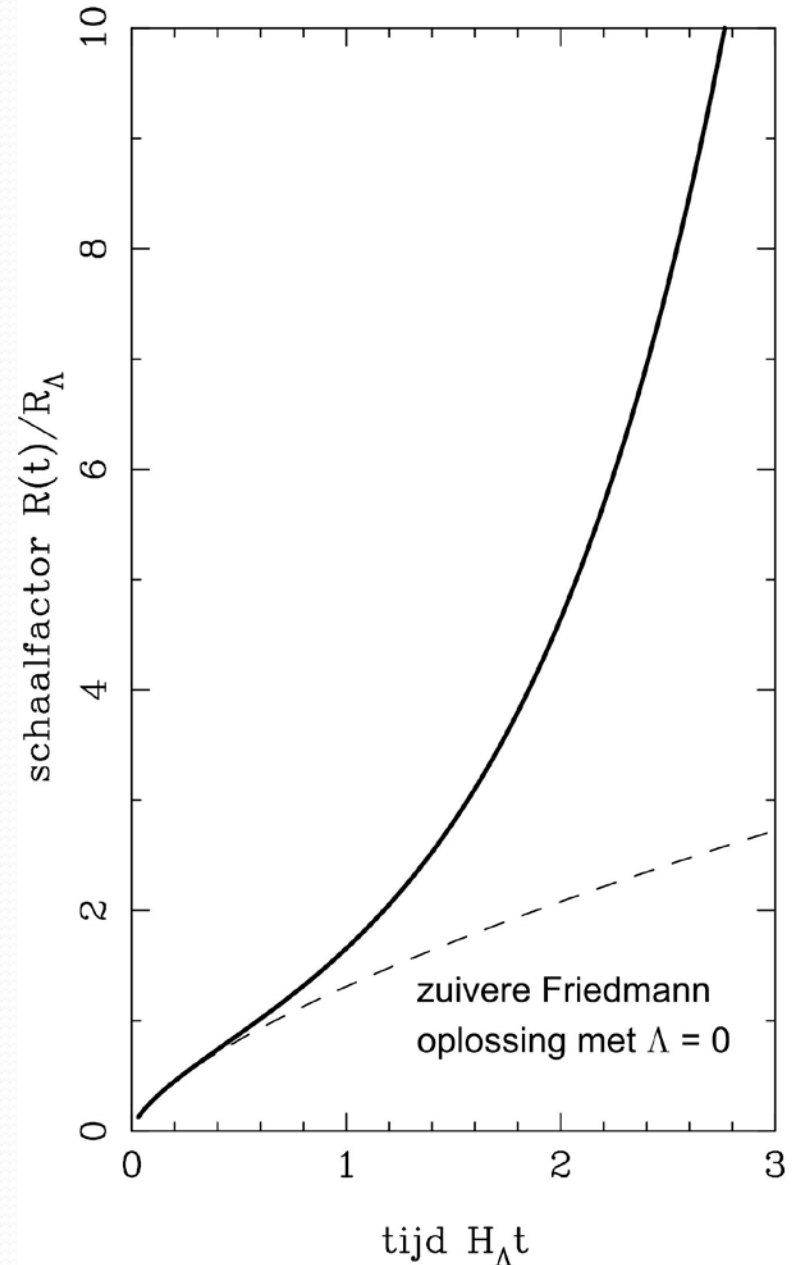


Kosmologische classificatie van Friedmann modellen:



Een waarschuwing:
ons heelal blijkt
ingewikkelder
in elkaar te zitten!

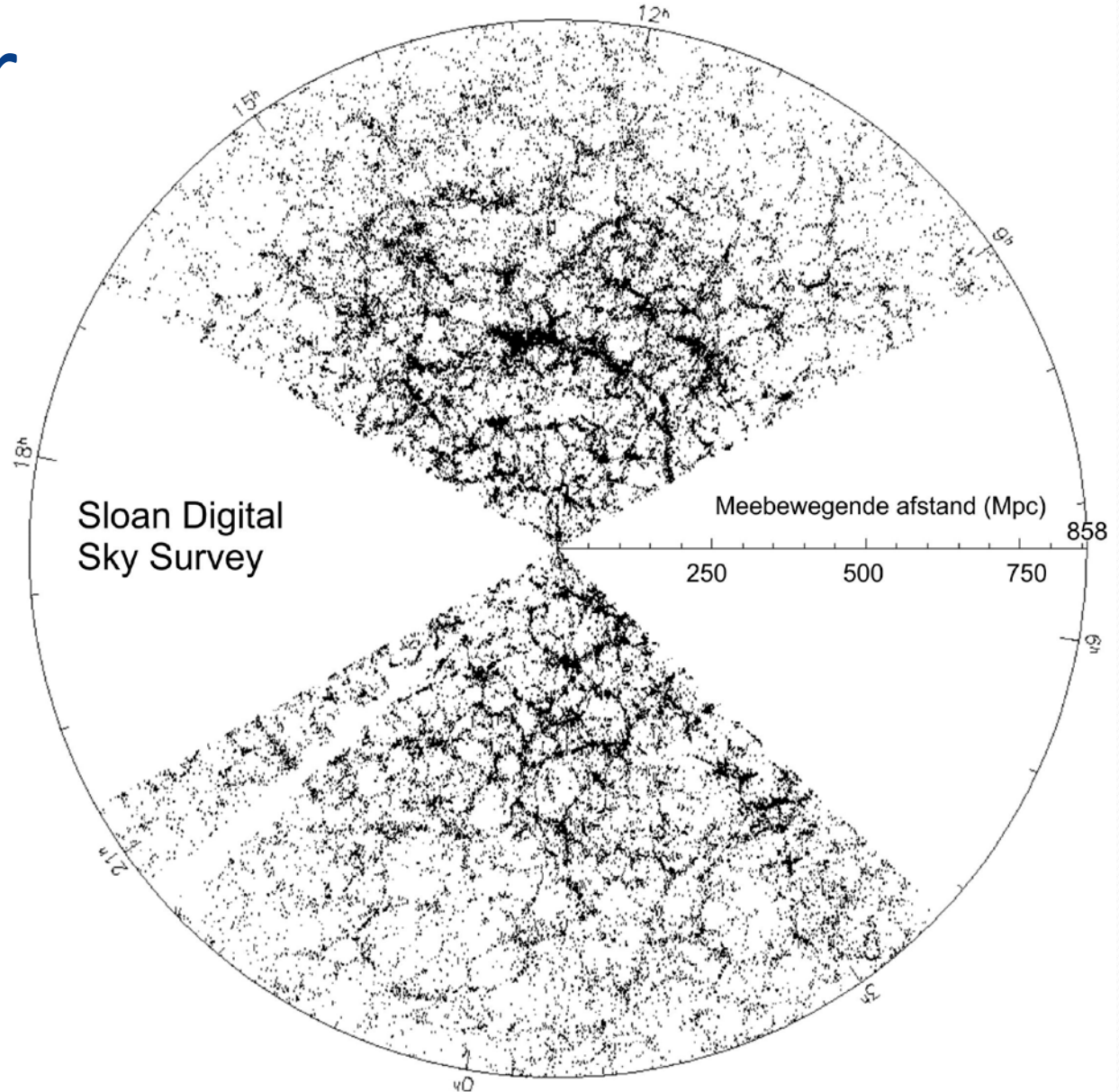
Lemaitre heelal: expansie



Deel 2

Vorming van sterrenstelsels en
“voorwereldlijk geluid”

Structuur in het heelal



A visualization of the Millennium Simulation, showing a complex, interconnected network of dark purple and blue filaments and nodes, representing the large-scale structure of the universe. The background is a dense, textured field of these colors, with brighter yellow and orange spots scattered throughout, indicating regions of higher density or star formation. A horizontal scale bar is located at the top left, consisting of a white line with vertical end caps, labeled "1 Gpc/h".

1 Gpc/h

Millennium Simulation

10.077.696.000 particles

Moderne simulatie van structuurvorming

($z = 0$)



Centrale vraag:

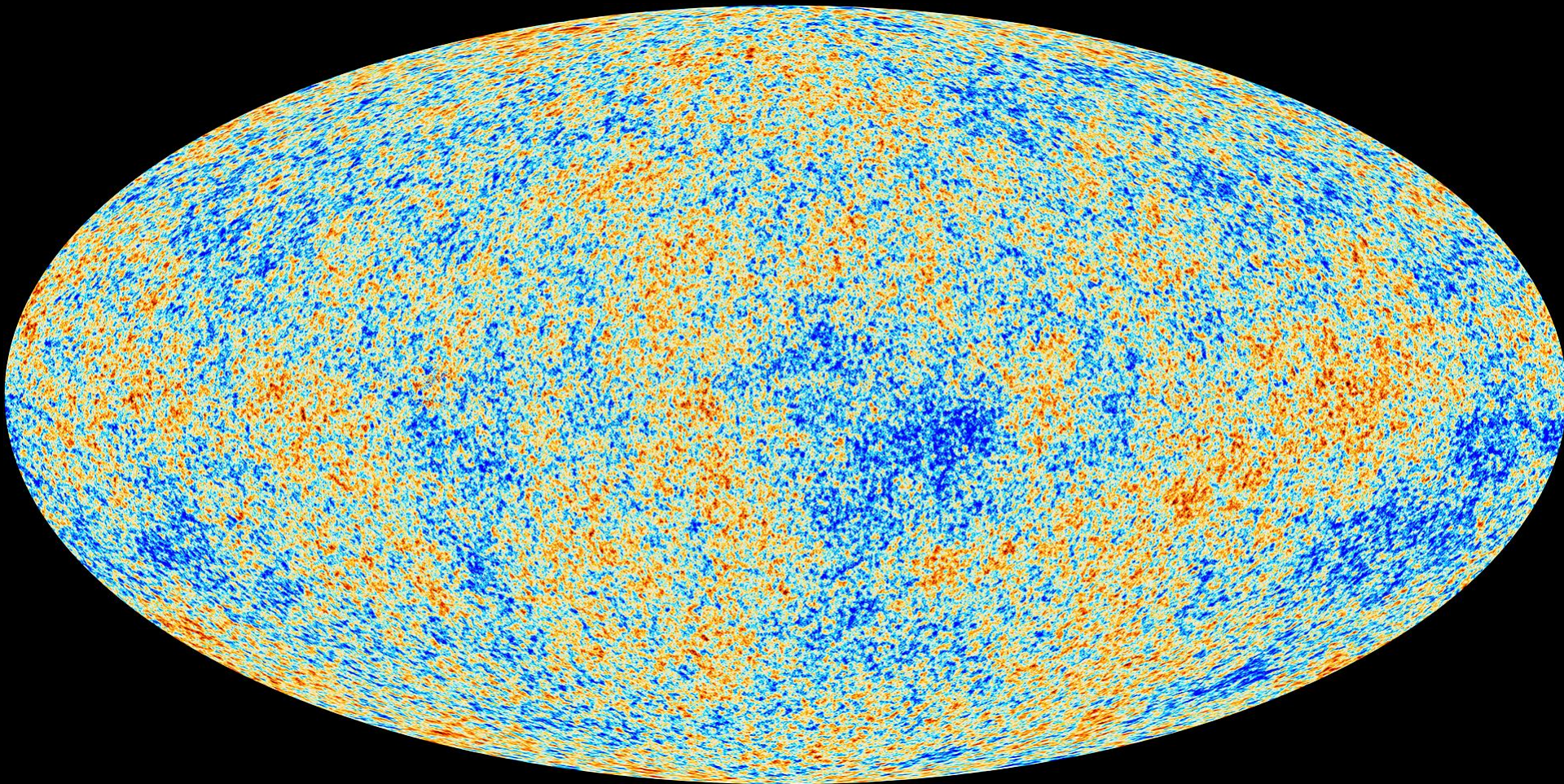
Kunnen kleine massa-opeenhopingen in het Heelal groeien?

Wat weten we?

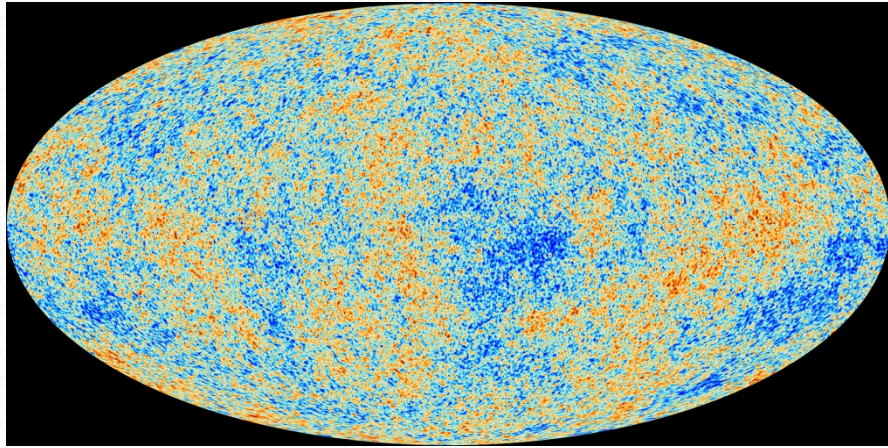
Toen ons heelal ~ 50.000 jaar oud was was het vrijwel *uniform*...

Het had overal *vrijwel* dezelfde dichtheid en dezelfde temperatuur!

Achtergrondstraling: “snapshot” van
de situatie 50,000 jaar na de Oerknal

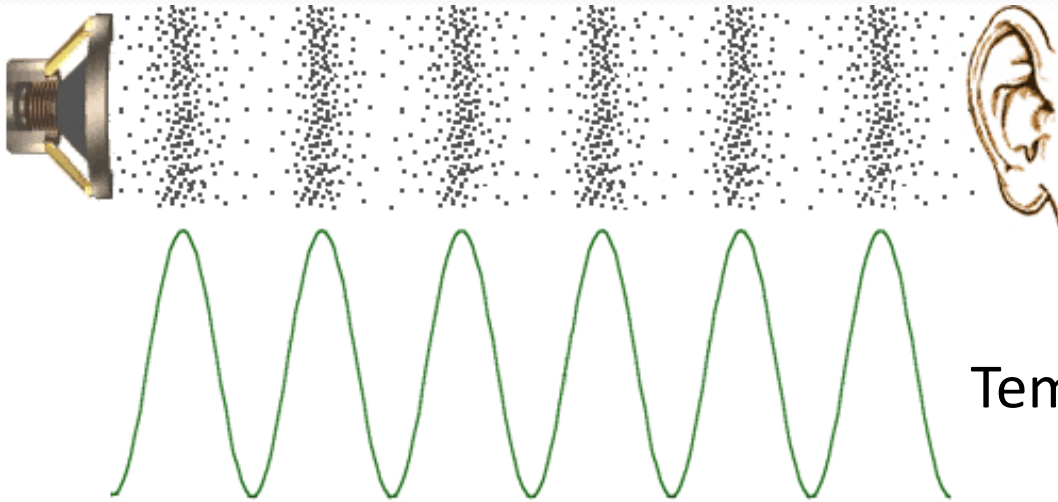


Zicht op de eerste geluidsgolven



Minieme temperatuurswisselingen:

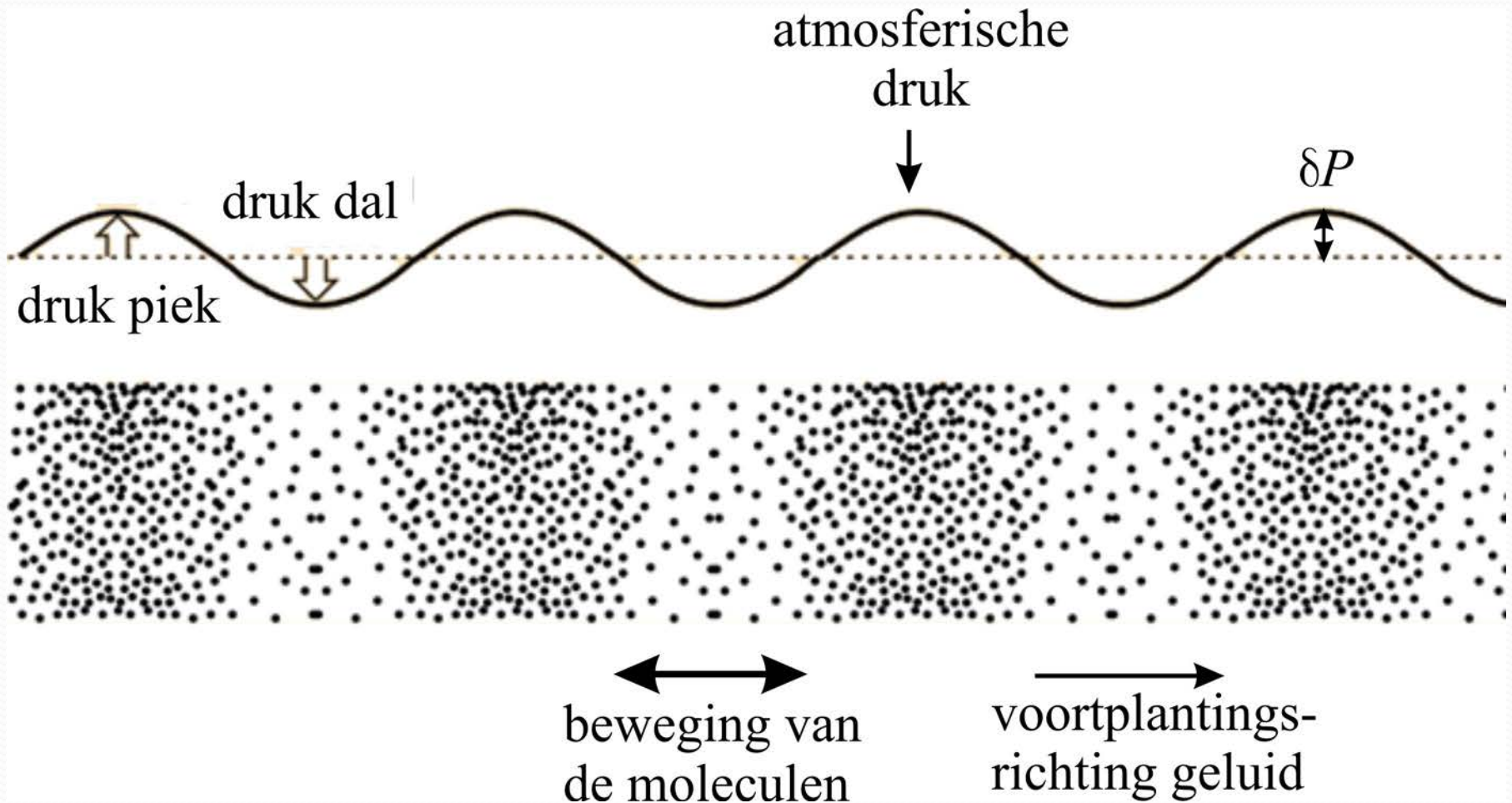
$$|\delta T| \sim 3 \cdot 10^{-5} T = 0.0001 \text{ K}$$



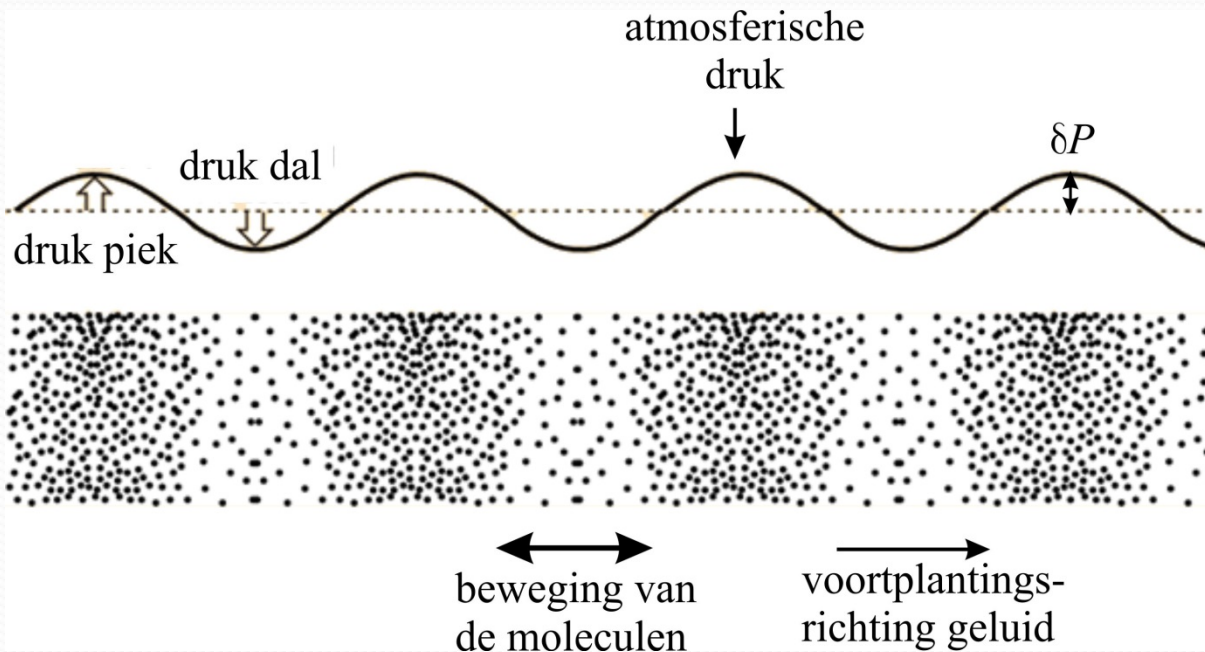
Geluidsgolf

Temperatuurswisseling δT

Een geluidsgolf (op aarde, of in het heelal)



Drukvariatie geeft **ook** een temperatuursvariatie!

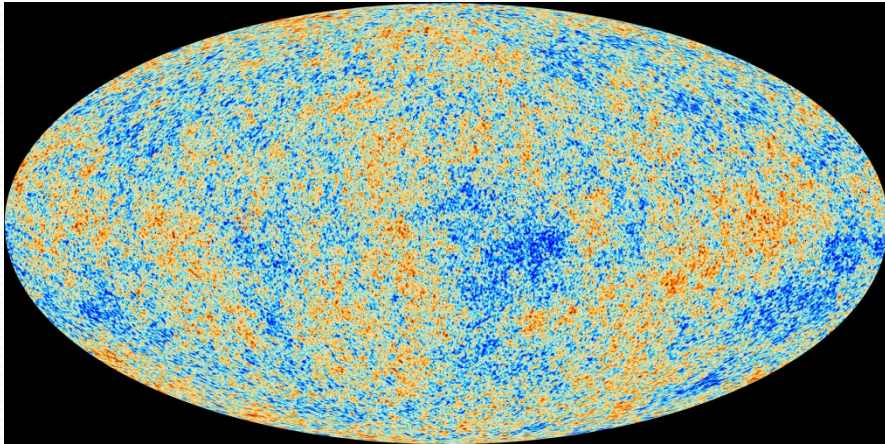


In het vroege, hete Heelal:

$$\frac{\delta T}{T} \approx \frac{1}{3} \frac{\delta P}{P}$$

Conclusie:

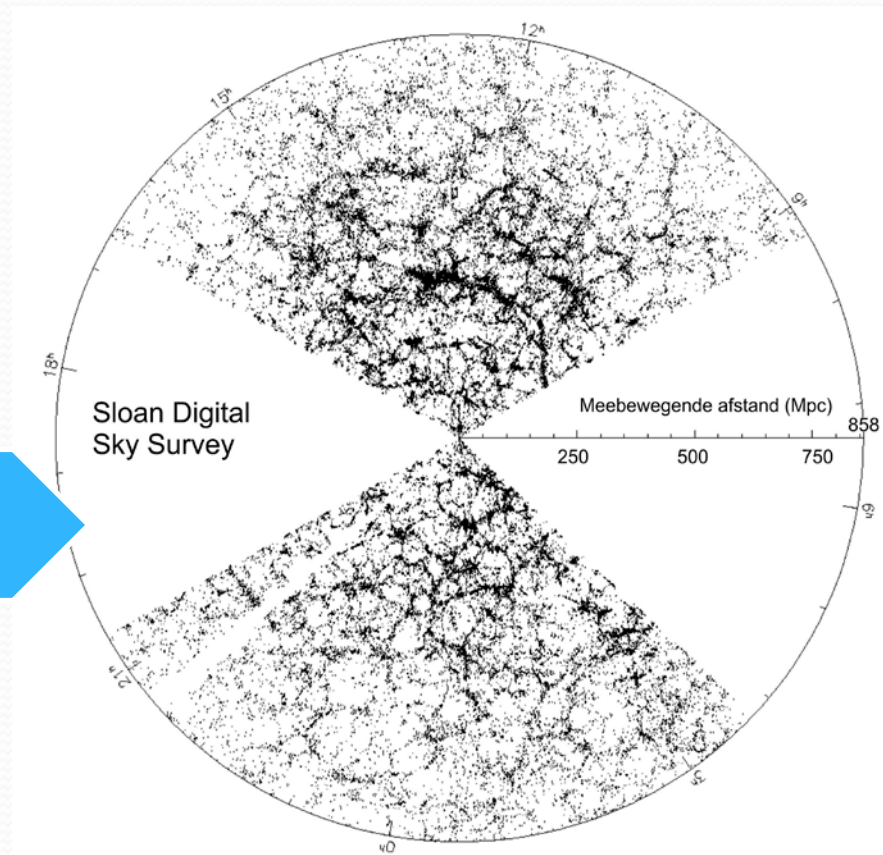
we kunnen de eerste
geluidsgolven zien!



Van
geluidsgolf

Via
zwaartekracht

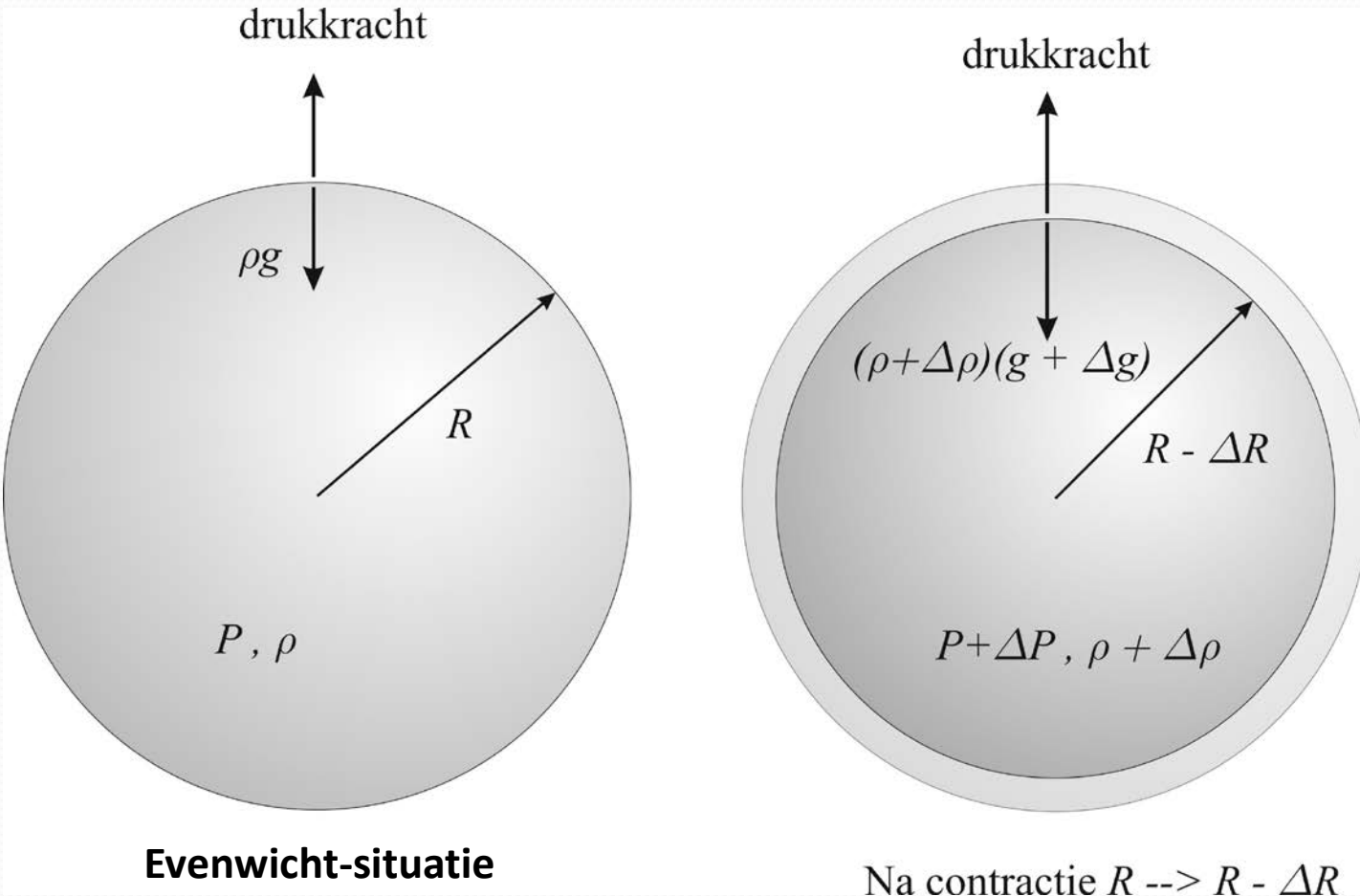
Naar grote-
schaal
structuur





Groei van kleine massa-opeenhopingen: verzamelend vermogen van de zwaartekracht

“Voldoend grote massa-opeenhopingen
storten onder hun eigen gewicht in”
(Jeans, 1923)



Zwaartekracht wint als straal R (en $M = 4\pi\rho R^3/3$) voldoende groot is.

Eindconclusie:

- Je kunt geluid in het heelal niet horen, maar wel zien:
 - Vroeger: ingevroren in de temperatuurswisselingen in de Kosmische Achtergrondstraling;
 - Nu in de uit de geluidsgolven ontstane *grote-schaal structuur* in het Heelal.