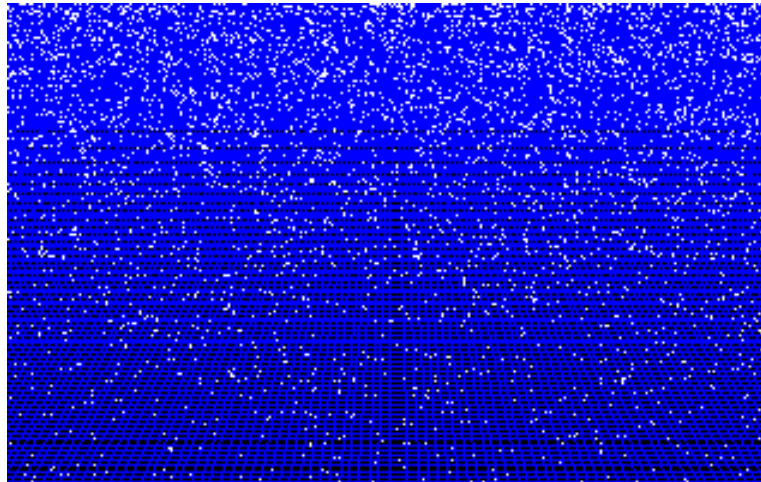


Thermodynamica

rol in de moderne fysica



Jo van den Brand

HOVO: 4 december 2014

Inhoud

- **Kosmologie**
 - Algemene relativiteitstheorie
 - Kosmologie en Big Bang
 - Roodverschuiving
- **Thermodynamica**
 - Fase-overgangen (entropie)
- **Nucleosynthese**
 - Big Bang en synthese in sterren
 - Abondantie van helium-4
- **Standaard zonnemodel**
 - Temperatuur in de zon
- **Kosmische microgolf-achtergrondstraling**
 - Temperatuur en fluctuaties

Kosmische microgolf achtergrondstraling

Het oerplasma was in thermisch evenwicht door reacties als $\gamma + \gamma \leftrightarrow e^+ + e^-$

Reacties verlopen naar beide kanten voor $T \approx m_e$

Na voldoende afkoeling was paarproductie onmogelijk

Thermisch evenwicht door Compton verstrooiing $e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$

Elektronen zijn via elektromagnetische interacties in evenwicht met protonen

Foto-ionisatie van waterstofatomen door $^1\text{H} + \gamma \leftrightarrow p + e^-$

Na voldoende afkoeling wordt waterstofatoom stabiele: fotonen ontkoppelen

Freeze-out temperatuur $T_f \approx 0.25 \text{ eV}$

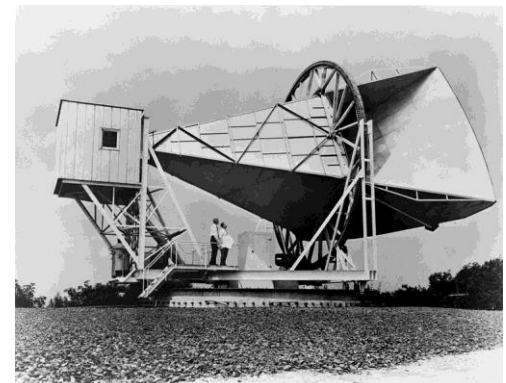
Nu afgekoeld tot $T = 2.7255 \text{ K}$

CMBR was voorspeld door Ralph Alpher en Robert Herman in 1948 (5 K)

Waargenomen door Arno Penzias en Robert Wilson van Bell Telephone Laboratories in 1965



1978



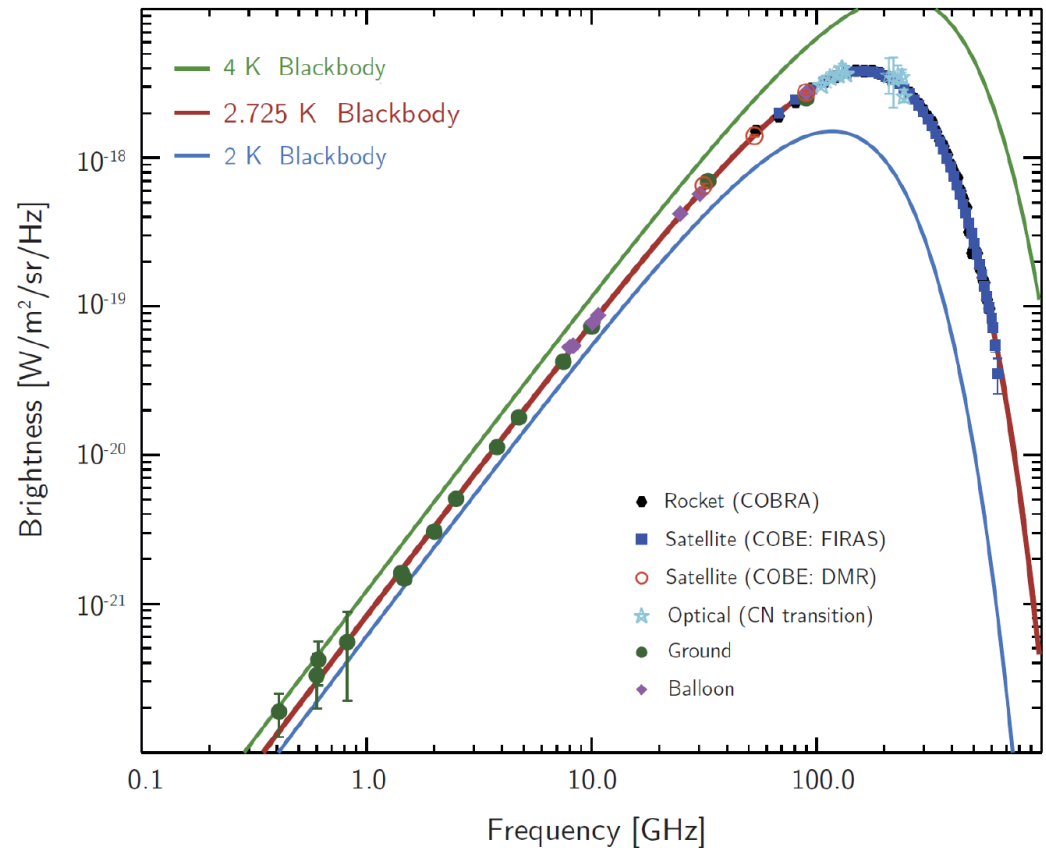
Perfekte zwarte straler

De CMBR heeft temperatuur $T_\gamma = 2.7255 \pm 0.0006 \text{ K}$ (1σ)

COBE werd gelanceerd op 18 november 1989



COBE



Perfekte zwarte straler

Freeze-out temperatuur $T_f \approx 0.25$ eV

Temperatuur nu $T_0 = 2.725$ K

Roodverschuiving $z = 1100$, want $T_0 = \frac{1}{1+z} T_e$

Freeze-out gebeurde 380.000 jaar na oerknal

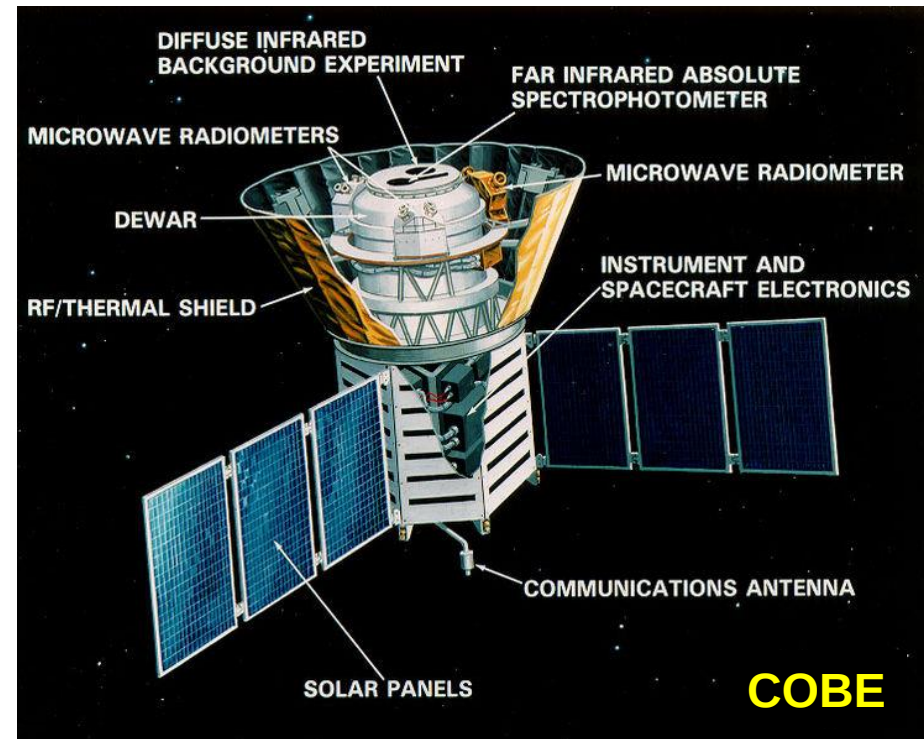
Huidige stralingsdichtheid $\rho_{R\gamma} = \frac{\pi^2}{30} g_{\gamma}^{\text{totaal}} T^4 = 0.261 \text{ MeV/m}^3$

Komt overeen met $\Omega_{R\gamma} h^2 = 2.6 \times 10^{-5}$

Dichtheid fotongas

$$n_{\gamma} = \frac{2\zeta(3)}{\pi^2} T^3 \approx 410 \text{ cm}^{-3}$$

Satelliet weg van 300 K straling van Aarde



Dipoolasymmetrie

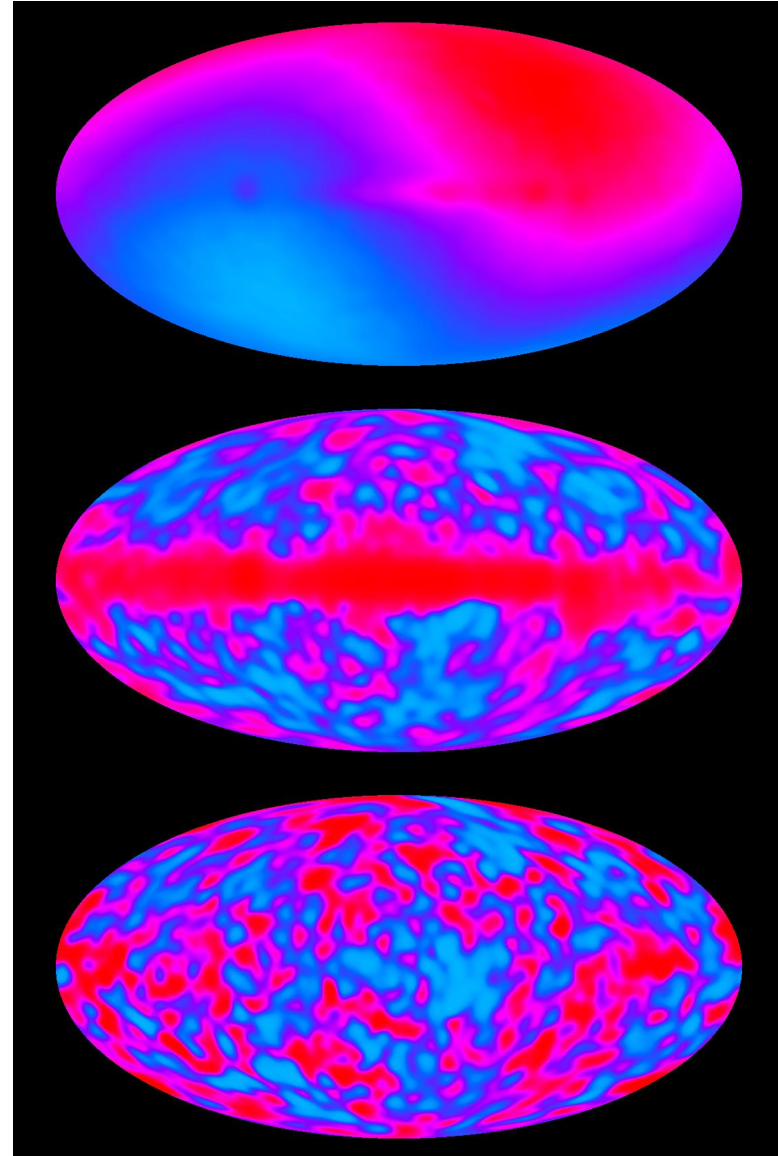
Er is een grote asymmetrie in de CMBR (in de orde van 10^{-3}) door de peculiar snelheid van 368 km/s van de Aarde ten opzichte van de Hubble flow van de straling

Amplitude 3.353 ± 0.024 mK

Doppler formule $T(\theta) = T_0 [1 + (v/c) \cos \theta]$

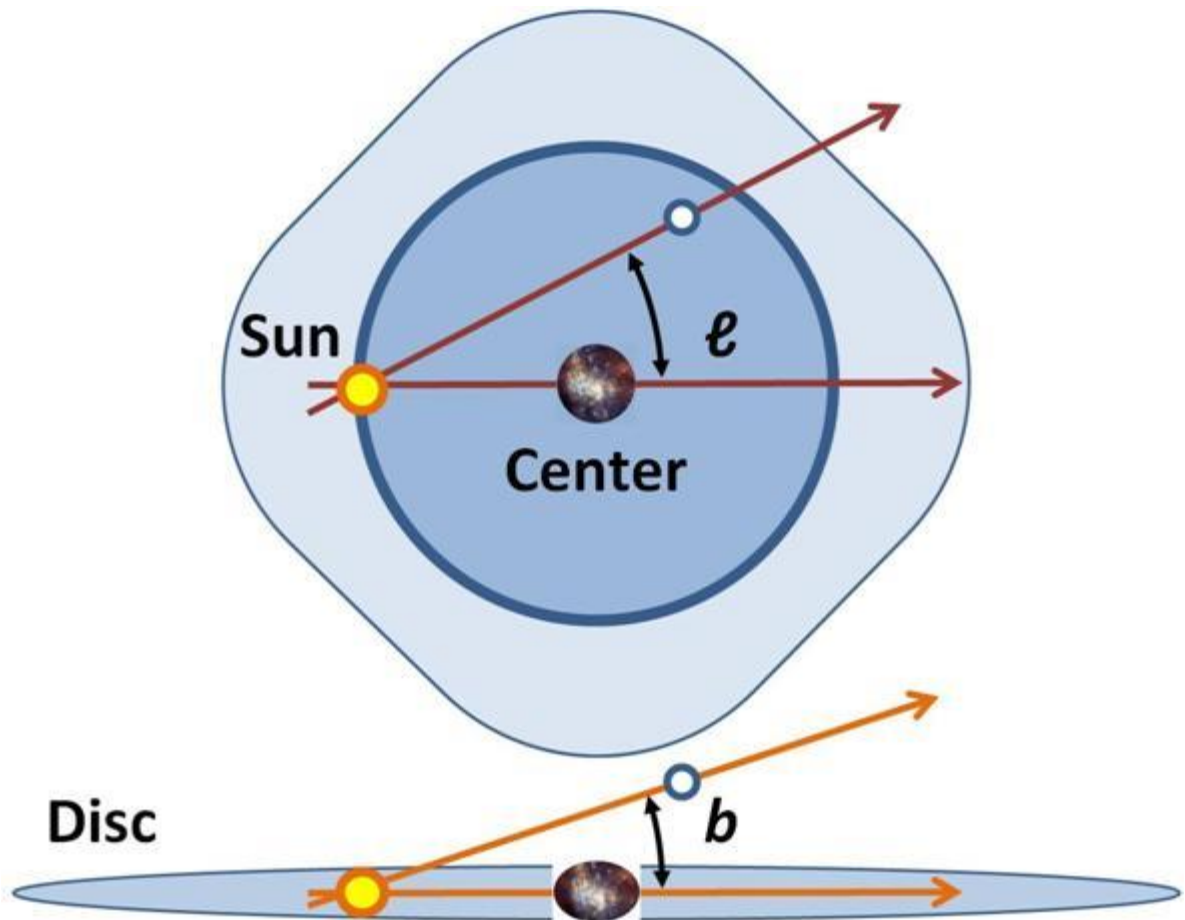
Er is ook een quadrupool term door verstrooiing van de CMBR aan stof

Amplitude $6 \mu\text{K} \leq Q_{\text{rms}} \leq 17 \mu\text{K}$

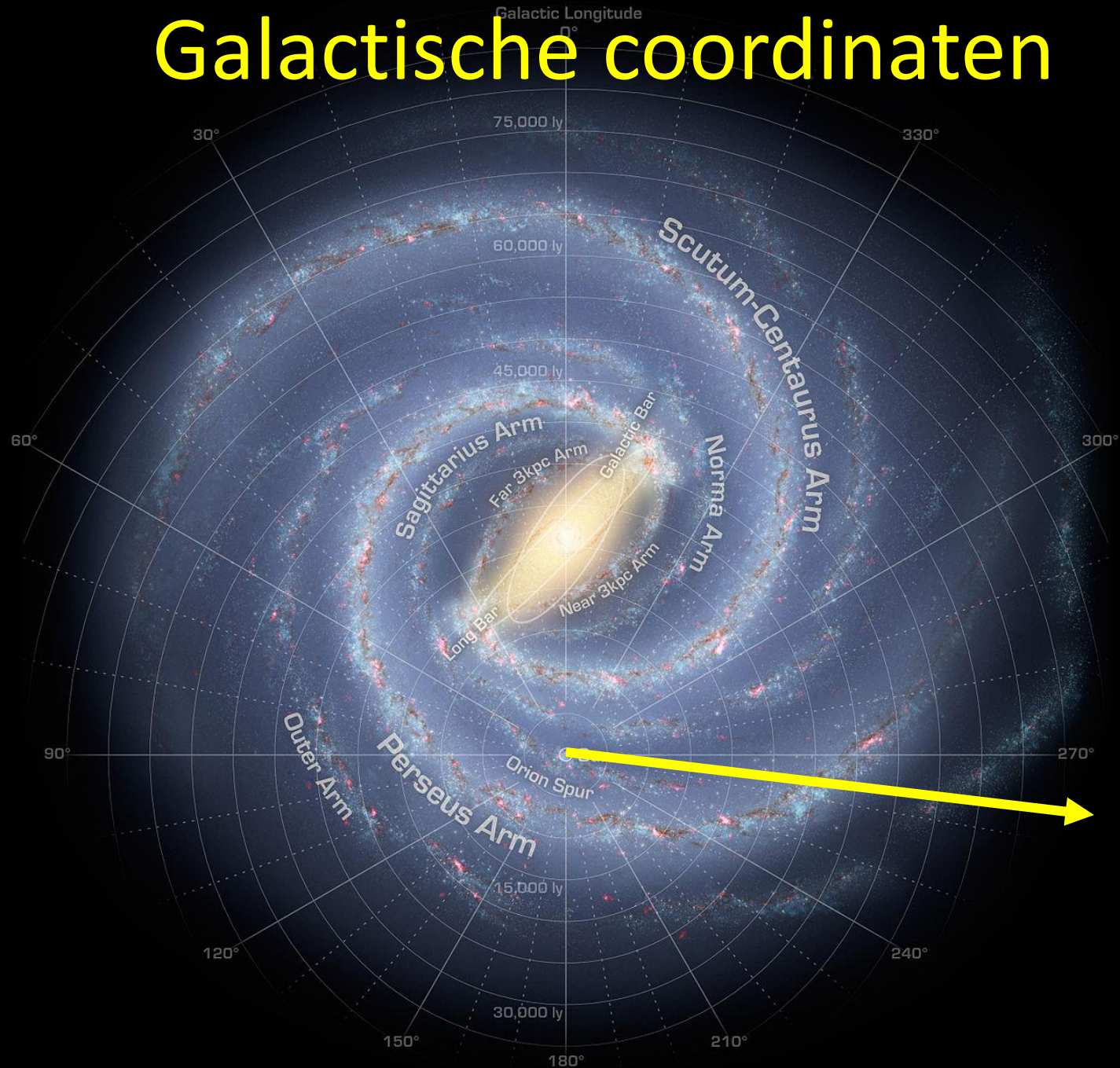


Galactische coördinaten

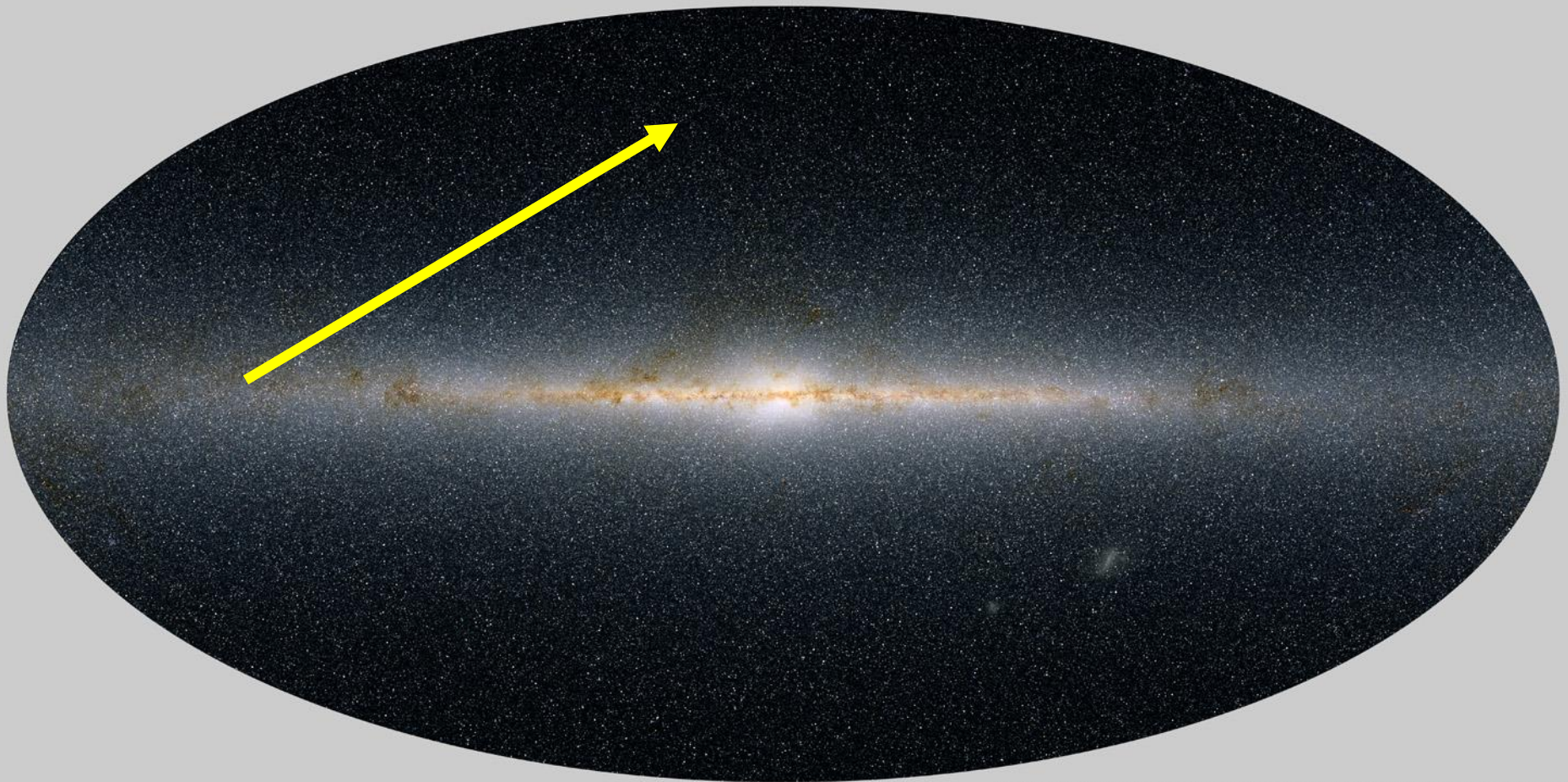
We bewegen in de richting $(l, b) = (264^{\circ}.26 \pm 0.^{\circ}33, 48.^{\circ}22 \pm 0.13^{\circ})$



Galactische koordinaten



Galactische coordinaten

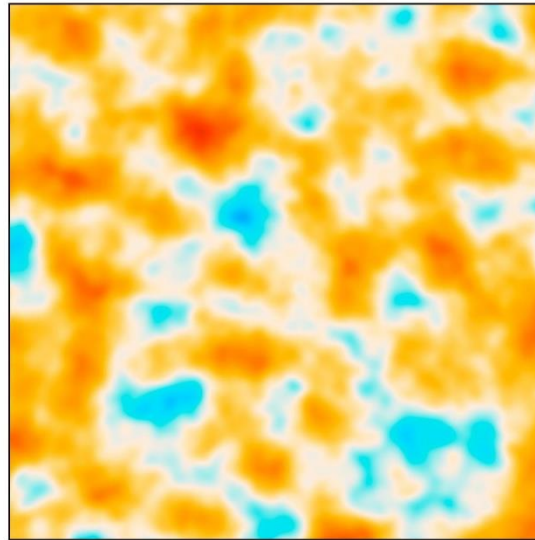
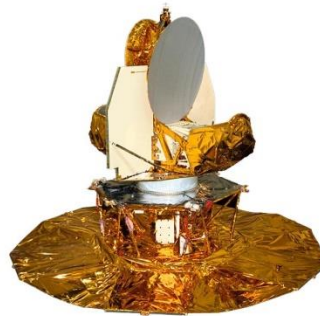


Planck

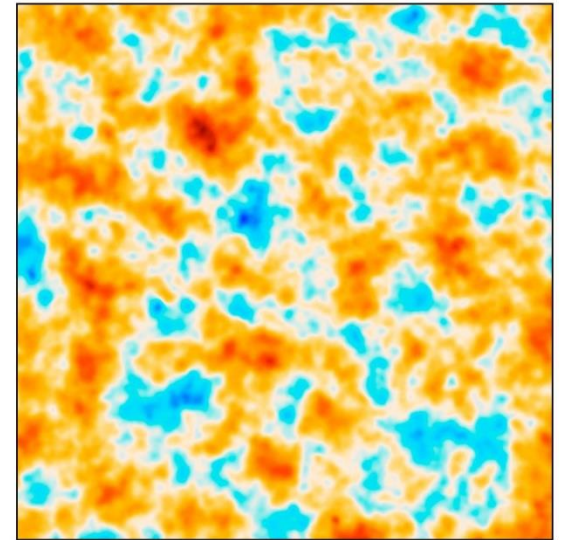
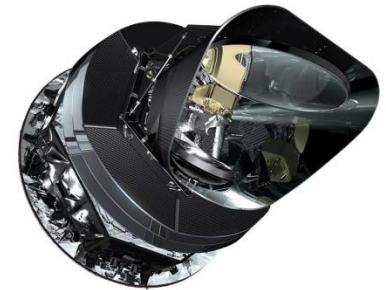
COBE werd gelanceerd op 14 mei 1990



COBE



WMAP



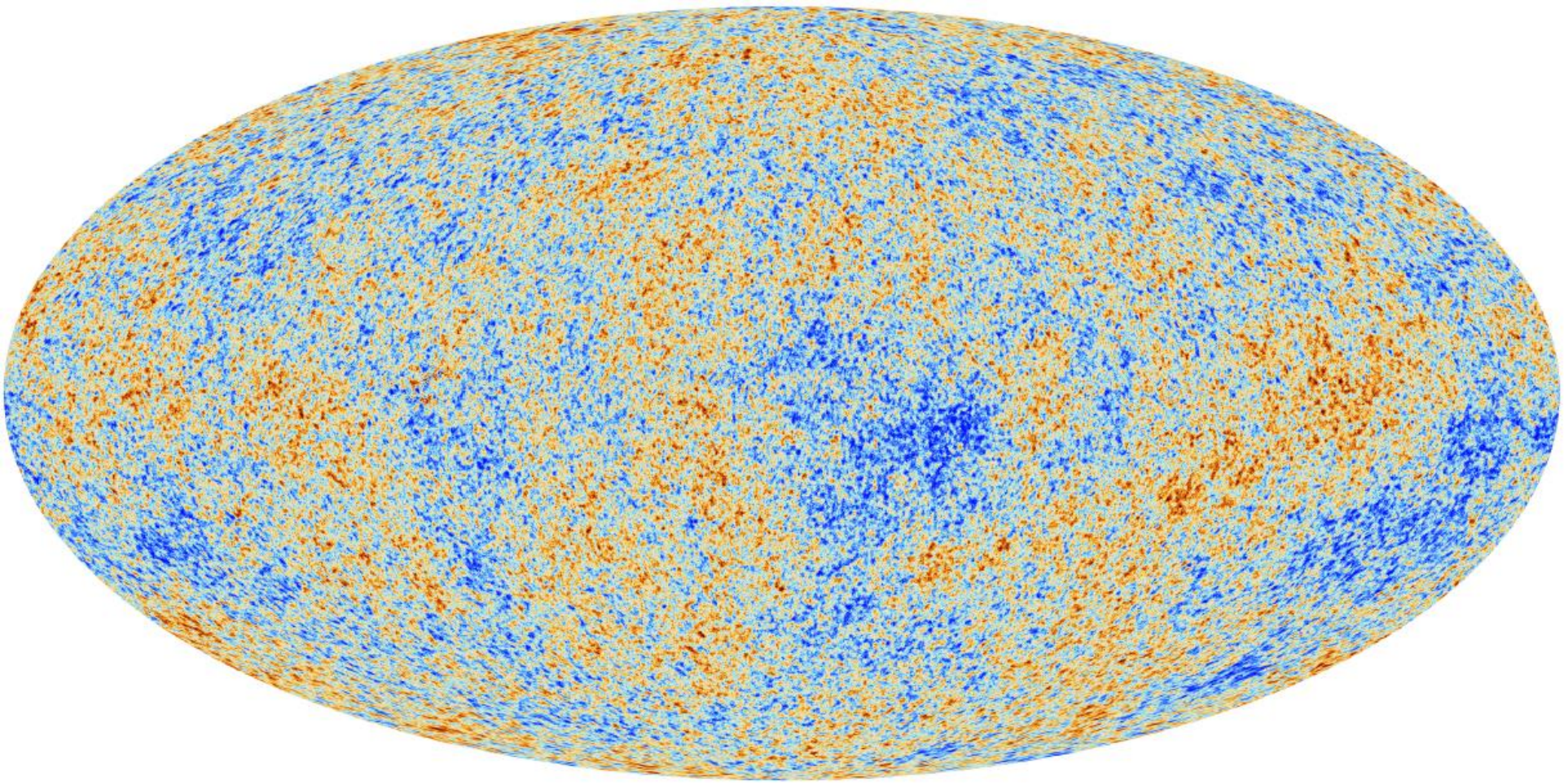
Planck

Correcties op de Planck data



Fluctuaties

Na alle correcties, zien we de CMBR fluctuaties



Analyse van fluctuaties

Definieer een punt aan de hemel met vector $\hat{\mathbf{n}}$

Dit punt heeft een temperatuurfluctuatie $\Theta(\hat{\mathbf{n}}) \equiv \delta T(\hat{\mathbf{n}})/\bar{T}$

↑ gemiddelde temperatuur

Correlatie tussen twee punten $\hat{\mathbf{n}}$ en $\hat{\mathbf{n}}'$ is dan $C(\theta) \equiv \langle \Theta(\hat{\mathbf{n}}) \Theta(\hat{\mathbf{n}}') \rangle$

↑ $\cos \theta \equiv \hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{n}}'$

Expandeer in sferisch-harmonische functies

$$\Theta(\hat{\mathbf{n}}) = \Theta(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \Theta_{lm} Y_{lm}(\hat{\mathbf{n}})$$

↑

$$Y_{lm}(\hat{\mathbf{n}}) = Y_{lm}(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{(2l+1)}{4\pi} \frac{((l-m)!)^2}{(l+m)!}} P_l^m(\cos \theta) e^{im\phi}$$

↑

Expansiecoëfficiënten

$$\Theta_{lm} = \int \Theta(\hat{\mathbf{n}}) Y_{lm}^*(\hat{\mathbf{n}}) d\Omega$$

$$P_l^m(x) \equiv \frac{(1-x^2)^{m/2}}{2^l l!} \frac{d^{m+l}}{dx^{m+l}} (x^2-1)^l$$

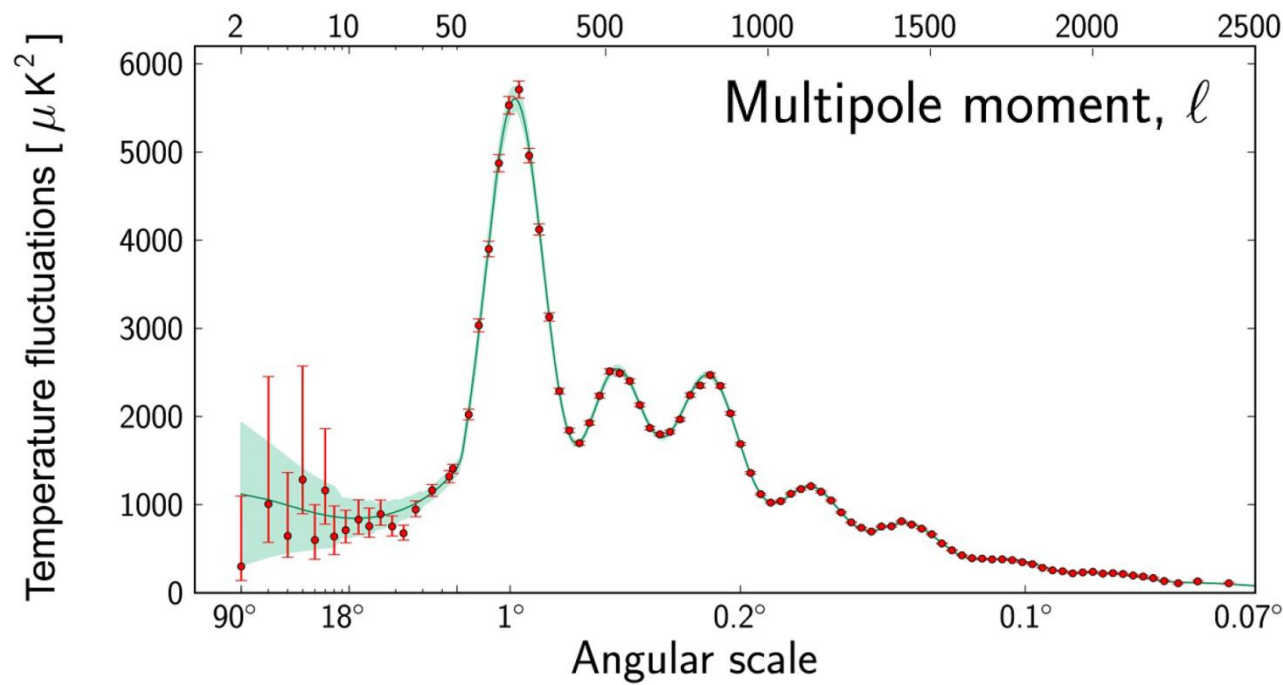
Power spectrum van CMBR

Informatie over temperatuurfuctuaties is gecondenseerd in power spectrum

We zien 7 pieken met verschillende amplituden

Data zijn in perfecte overeenstemming met Λ CDM model

Het oerplasma wordt aangeslagen tijdens inflatie, waarbij er dichtheidsverstoringen met hoge snelheid door het plasma gaan. Dat levert deze pieken



Akoestische oscillaties

Beschouw een deel van het plasma

Continuïteitsvergelijking $\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$

Dichtheid $\rho = \rho_0(1 + \delta(t, \mathbf{x}))$

We vinden $\frac{\partial \delta(t, \mathbf{x})}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} = 0$

Veranderingen in snelheidsveld geven dichtheidsverschillen

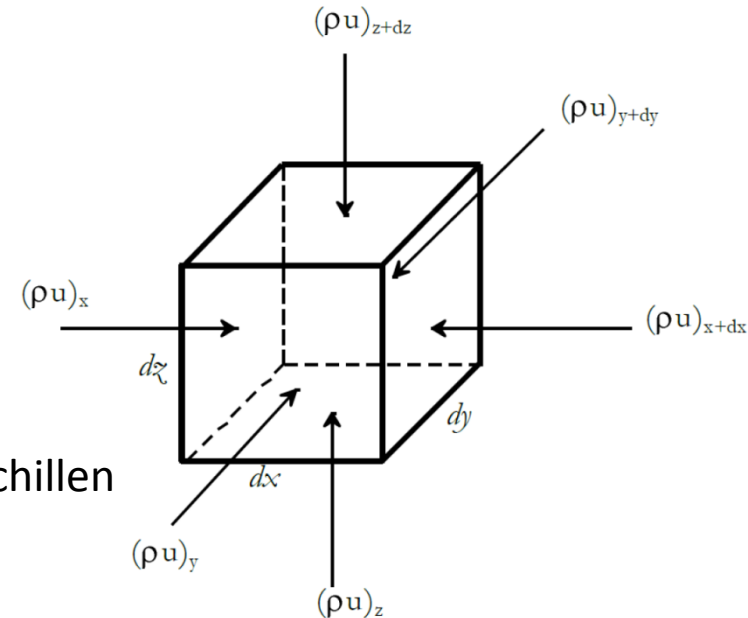
Vergelijking van Euler $\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla p = 0$

We vinden $\rho_0(1 + \delta(t, \mathbf{x})) \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla p = 0 \rightarrow \rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla p = 0$

Combineren geeft de akoestische golfvergelijking

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - v_s^2 \nabla^2 \right) \delta(t, \mathbf{x}) = \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - v_s^2 \nabla^2 \right) \frac{\delta \rho}{\rho} = 0$$

$$v_s = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{\text{adiabatisch}}} = \frac{c}{\sqrt{3}}$$



Akoestische oscillaties

Beschouw akoestische golfvergelijking in een expanderend heelal

Twee modificaties:

Afstanden nemen continu toe $\mathbf{x}(t) = a(t)\mathbf{x}_0$

$$\Rightarrow \rho_0(t, \mathbf{x}) = \frac{\rho_0}{a^3(t)} \quad \text{en} \quad \mathbf{v}_0(t, \mathbf{x}) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}\mathbf{x}$$

Golven veroorzaken massaverdichtingen en die koppelen gravitationeel aan de golven

Gebruik poissonvergelijking $\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho \rightarrow \nabla^2(\delta\phi) = 4\pi G \rho_0 \delta(t, \mathbf{x})$

$$\uparrow \phi = \phi_0 + \delta\phi \longrightarrow \phi_0(t, \mathbf{x}) = \frac{2\pi G \rho_0 r^2}{3}$$

Akoestische golfvergelijking in expanderend heelal

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} + 2 \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \frac{\partial}{\partial t} + \left(\frac{k^2 v_s^2}{a^2(t)} - 4\pi G \rho_0 \right) \right] \delta(t, \mathbf{k}) = 0$$

Plasma in vroege heelal gedraagt zich als een perfecte vloeistof

Initiele quantumfluctuaties veroorzaken verdichtingen en structuur

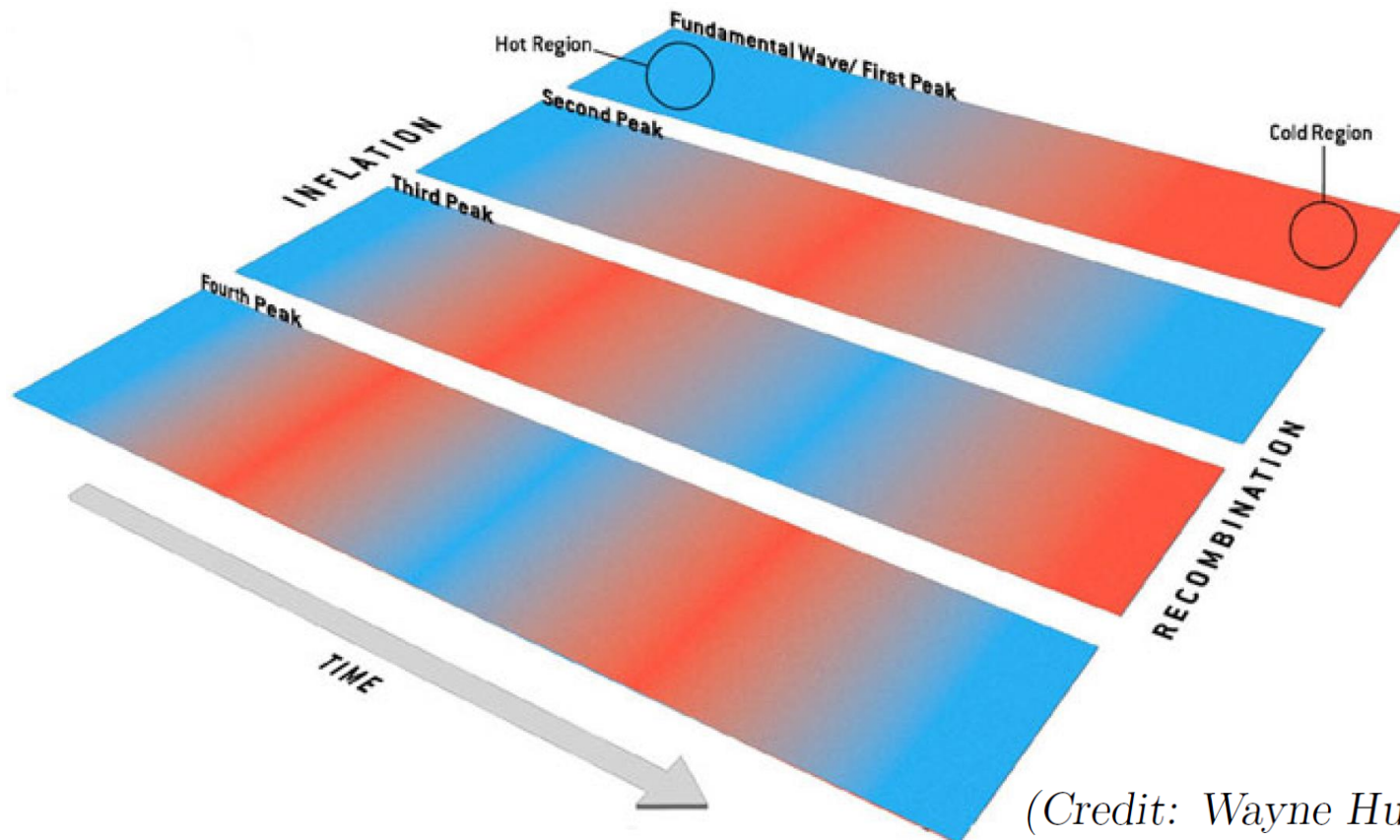
Akoestische oscillaties

Inflatie slaat het plasma aan op *alle* schalen

De snelheid waarmee verstoringen door het plasma gaan is bekend $v_s = \frac{c}{\sqrt{3}}$

De tijd van recombinitie ligt vast: 380.000 jaar

Er geldt $\omega t_{\text{ontk}} = kv_s t_{\text{ontk}} = n\pi$ met $n = 1, 2, 3, \dots$



(Credit: Wayne Hu)

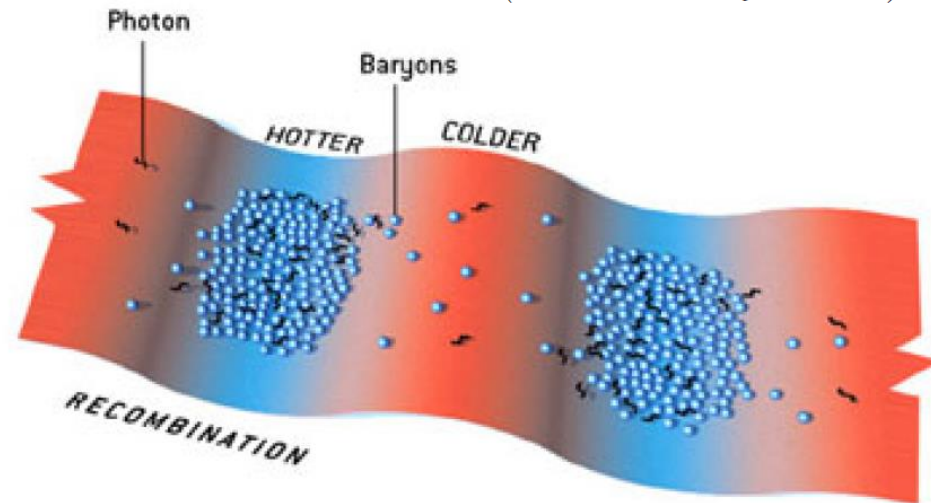
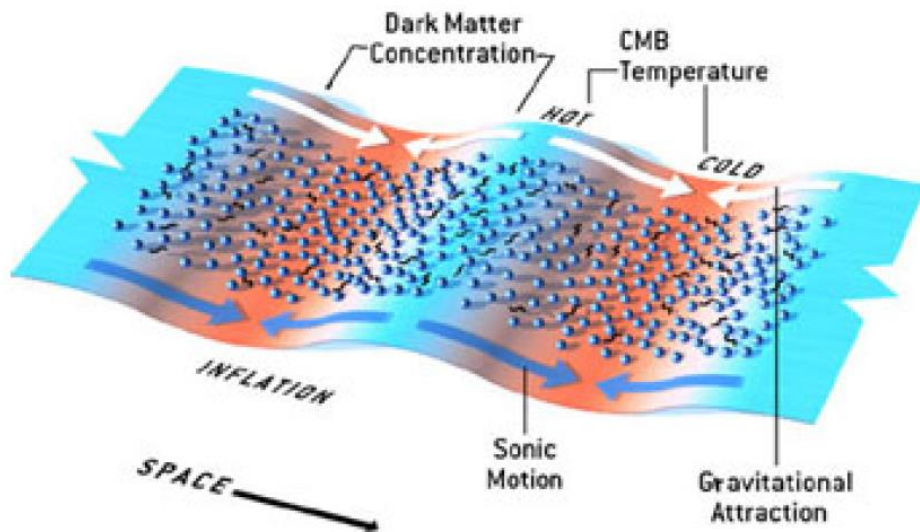
Akoestische oscillaties

Samenspel tussen baryonische materie en donkere materie

Baryonische materie voelt de fotondruk

Donkere materie geeft gravitationele interactie

Bij fundamentele golf in fase, bij tweede piek in tegenfase



(Credit: Wayne Hu)

Kromming van het heelal

Golflengte van de sterkste oscillaties

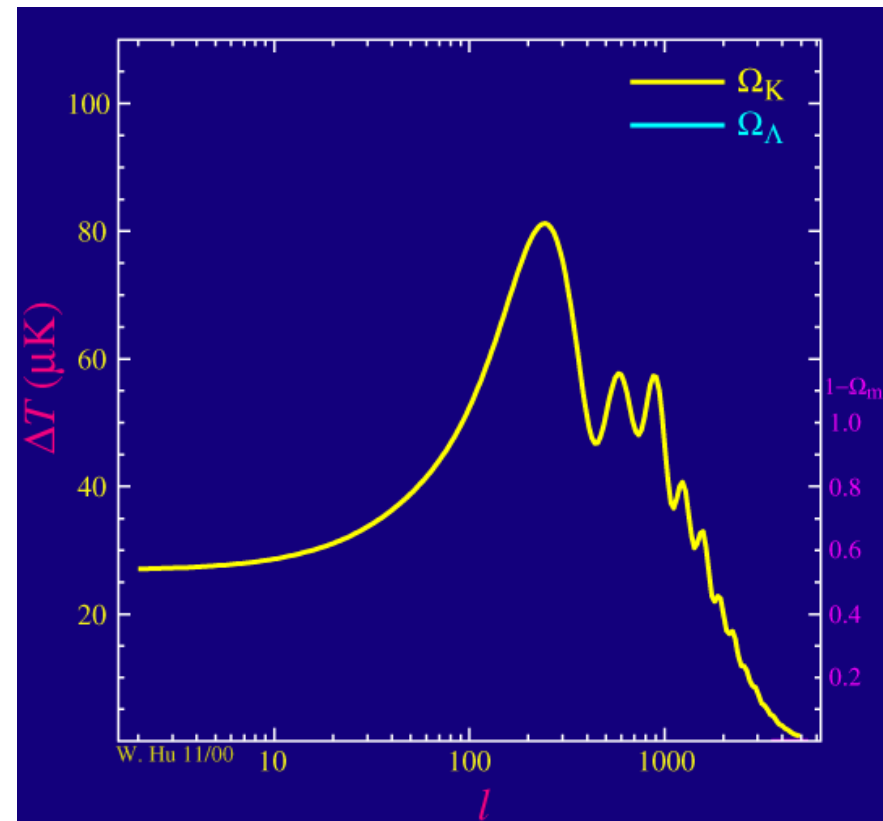
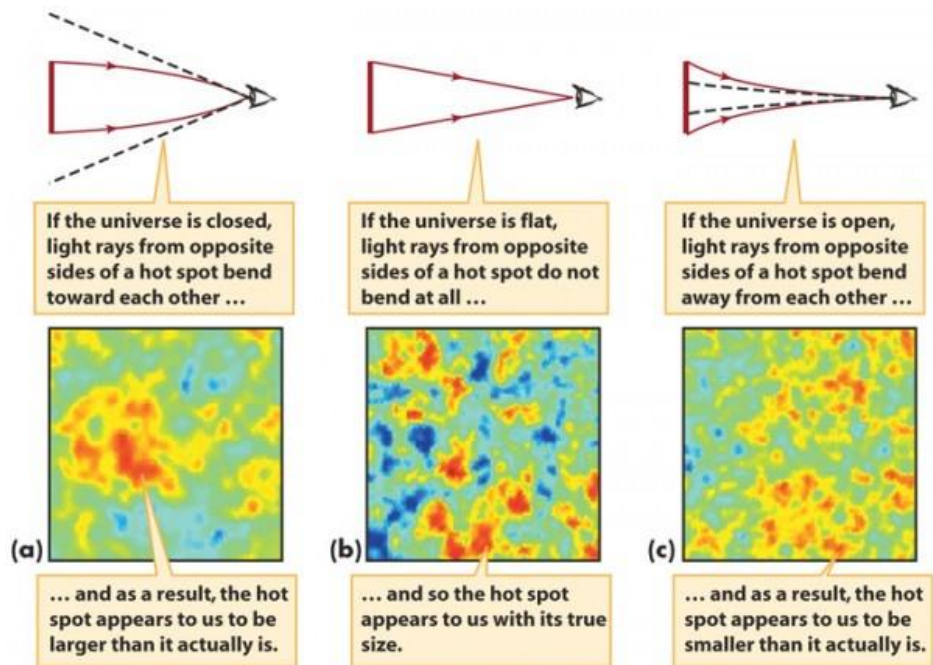
$$\lambda_{\text{recomb}} \approx 2v_s t_{\text{recomb}} \approx \frac{2v_s t_{\text{recomb}}}{\sqrt{3}} \approx \frac{2 \times 380.000}{\sqrt{3}} \text{ lichtjaar} \approx 438.000 \text{ lichtjaar}$$

Dat is dan 134 kpc en dit is een “standaardmaat”, nu $1 + z_{\text{recomb}} \approx 1092$ dus 146 Mpc

Planck toont karakteristieke hoekgrootte $\theta_{\text{recomb}} = 0.010388 \pm 0.000027 \text{ rad}$

De hoekafstand is dan

$$D_A = \lambda_{\text{recomb}} / \theta_{\text{recomb}} \approx 14.1 \pm 0.16 \text{ Gpc}$$

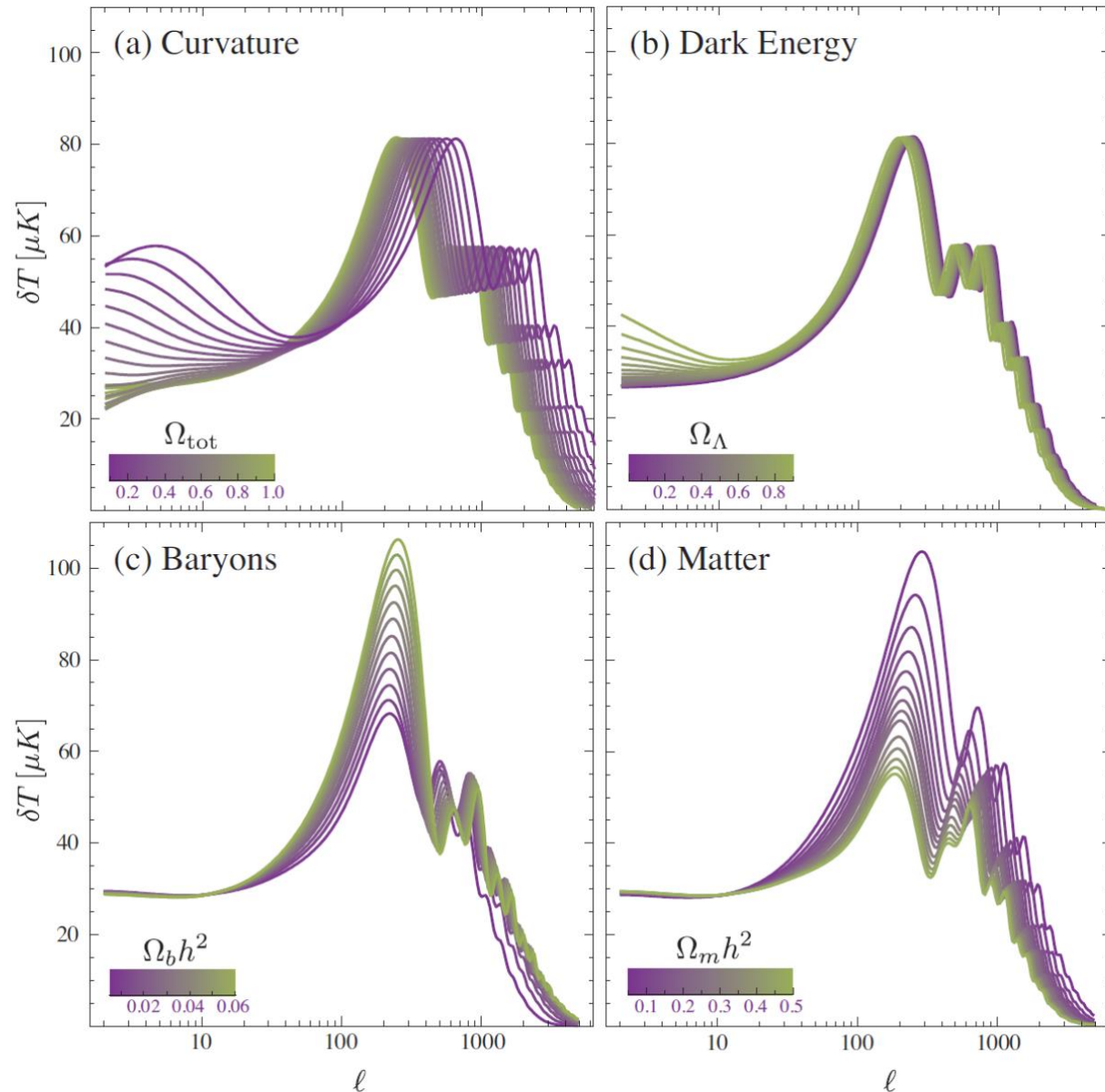


Kosmologische parameters

Gevoelig voor kromming,
en de bijdragen van
baryonische en donkere
materie

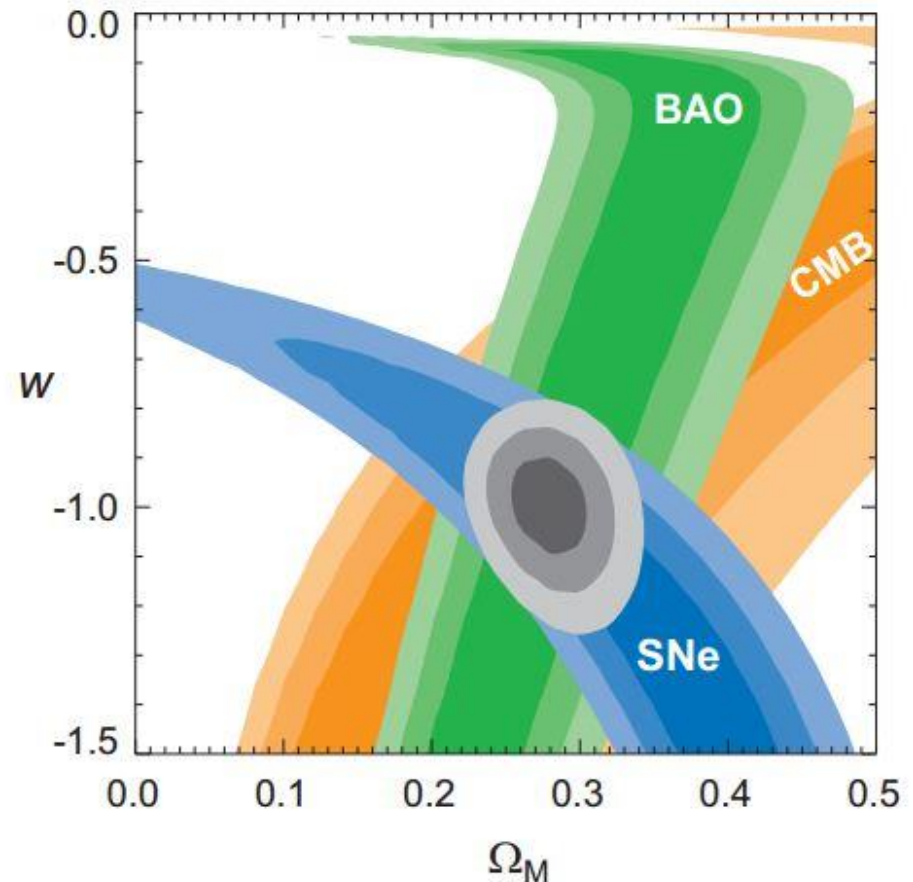
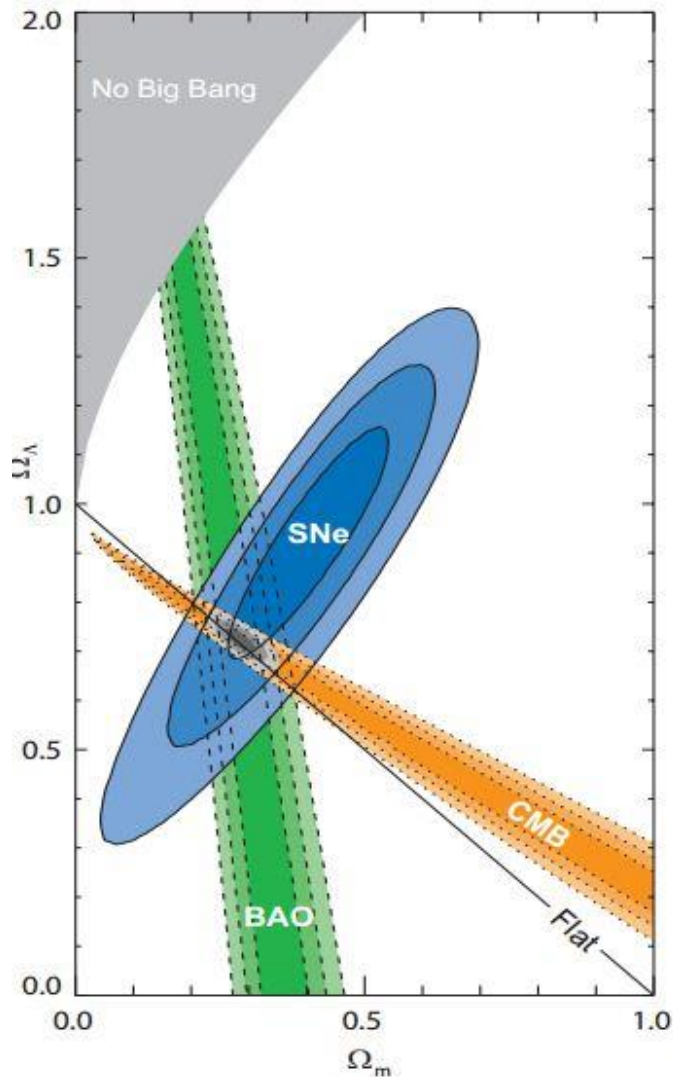
Minder gevoelig voor de
bijdrage van donkere
energie

Combineer CMBR data
met data van andere
experimenten, zoals SNIa,
BAO, *etc.*



Moderne kosmologie

Combineer CMBR data met data van andere experimenten, zoals SNIa, BAO, etc.



Moderne kosmologie

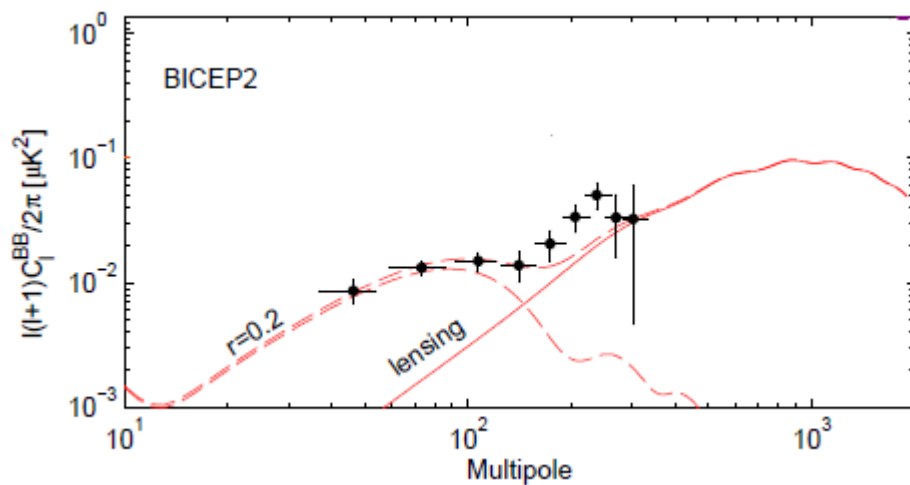
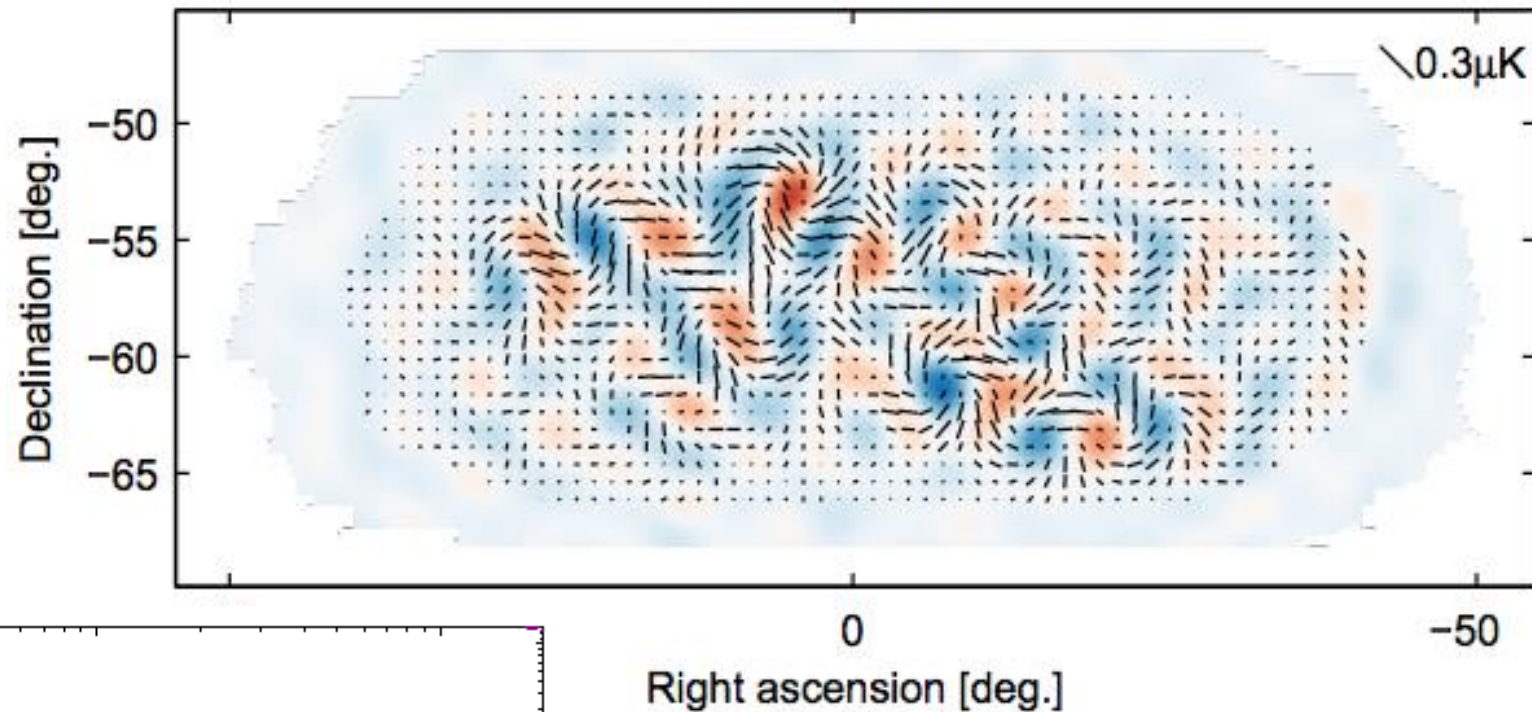
BICEP2 op de Zuidpool



Moderne kosmologie

Polarisatie van de CMBR

BICEP2: B signal



Signalen van inflatie?!

