

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład III

- Wielki Wybuch
- Ewolucja Wszechświata
- Promieniowanie tła
- Eksperyment PLANCK

Prawo Hubble'a

Przesunięcie ku czerwieni

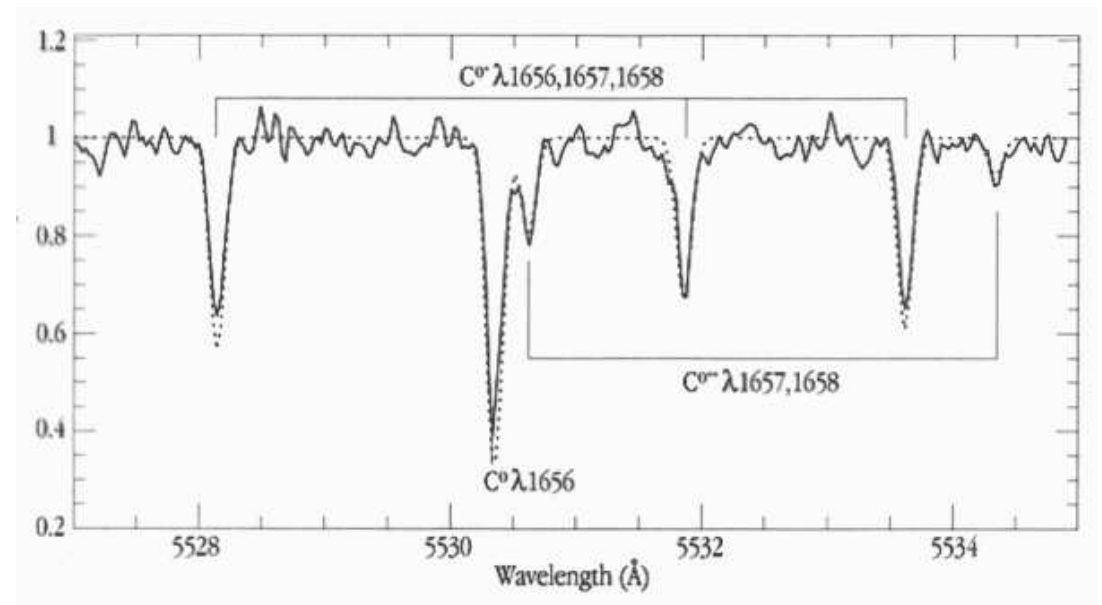
Jeśli źródło światła oddala się od obserwatora następuje wydłużenie fali:

$$\lambda' = \lambda \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \equiv \lambda (1 + z)$$

$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$: przesunięcie ku czerwieni (ang. "redshift")

W widmach odległych gwiazd zaobserwowano linie znanych nam pierwiastków wyraźnie przesunięte ku czerwieni.

Linie węgla w widmie kwazara PKS 1232+0815:



Widoczne przesunięcie odpowiada $z=2.34$

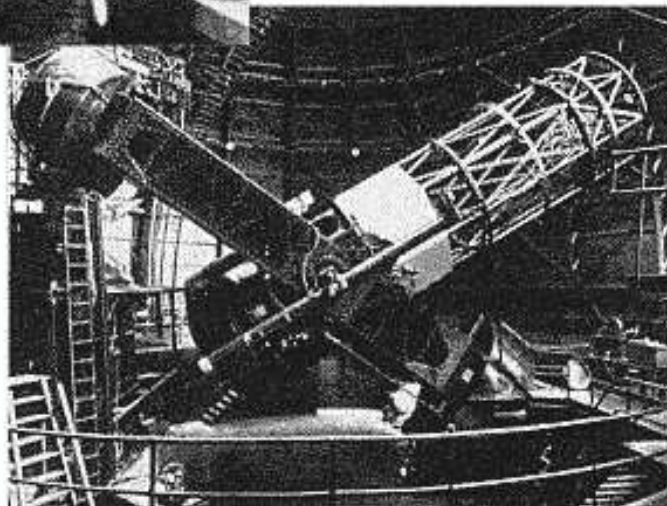
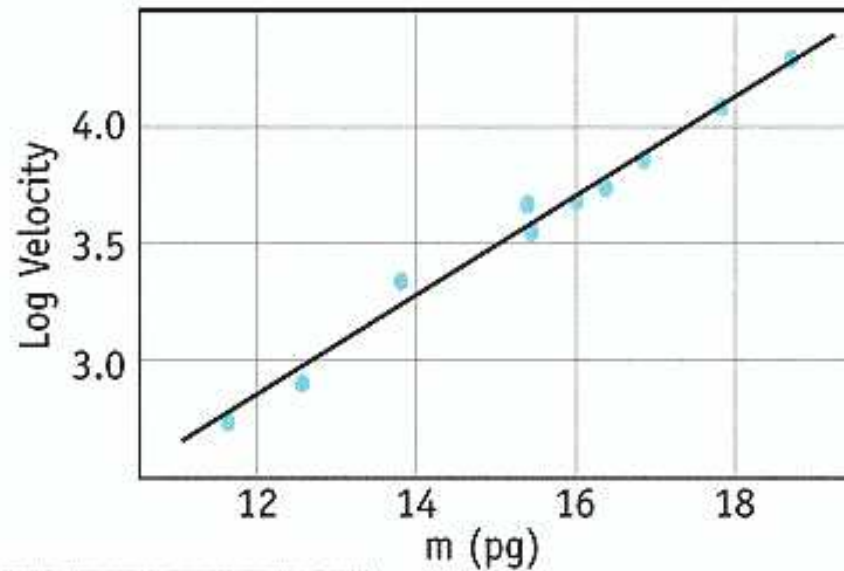
$$(\lambda' = 3.34 \lambda) !$$

Prawo Hubble

DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE



Edwin Hubble



Mt. Wilson
100 Inch
Telescope

Prawo Hubble'a

Przesunięcie ku czerwieni

Przesunięcie ku czerwieni w widmach odległych galaktyk zaobserwował po raz pierwszy Hubble w 1929 r.

Zauważył on też, że prędkość 'ucieczki' rośnie z odległością: (prawo Hubble'a)

$$v = H r$$

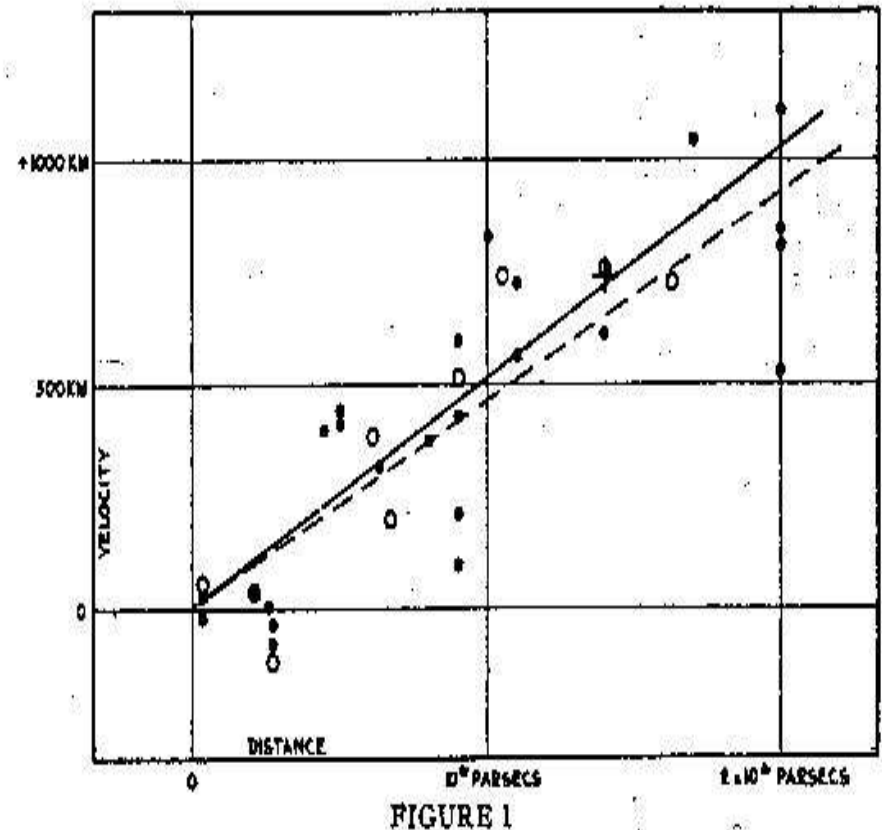
r - odległość od Ziemi, H - stała Hubble'a

Wartość podana przez Hubble'a:

$$H \approx 500 \text{ km/s/Mpc}$$

prawie rząd wielkości za dużo :-)

Oryginalne wyniki Hubble'a:



Prawo Hubble'a

Przesunięcie ku czerwieni

Przesunięcie ku czerwieni w widmach odległych galaktyk zaobserwował po raz pierwszy **Hubble** w 1929 r.

Zauważył on też, że **prędkość** 'ucieczki' **rośnie z odległością**: (prawo Hubble'a)

$$v = H r$$

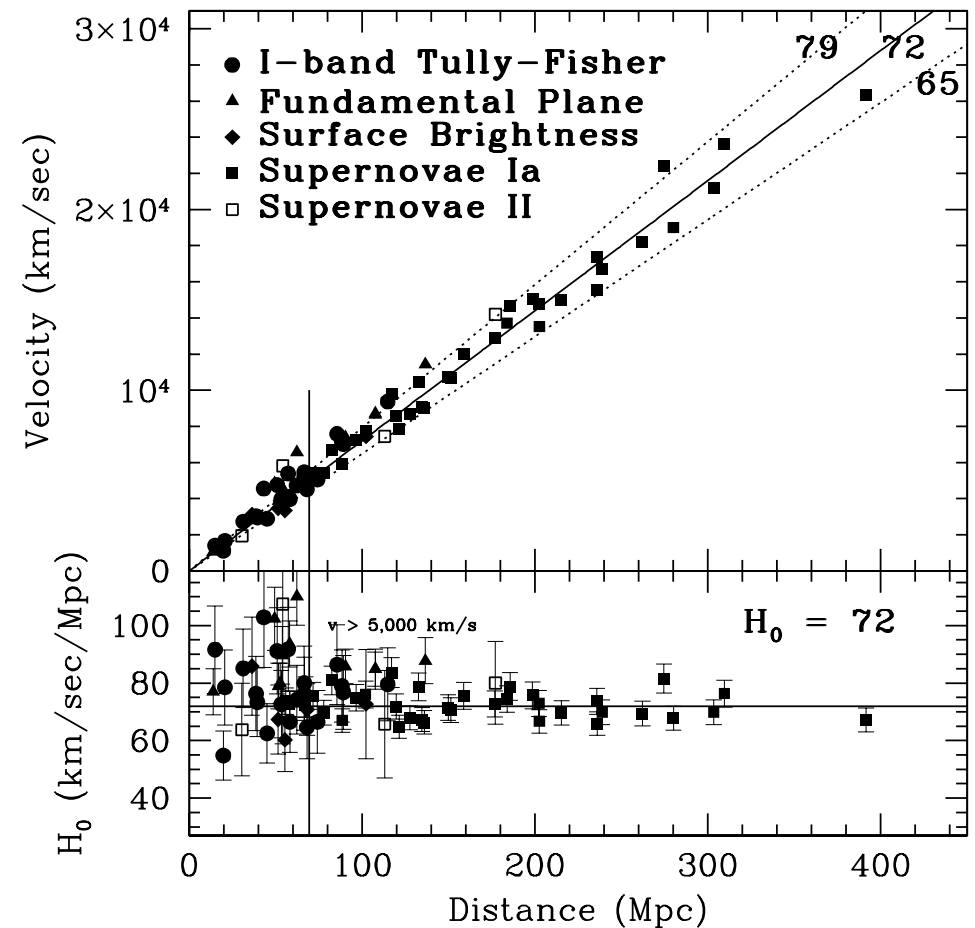
r - odległość od Ziemi, H - stała Hubble'a

Wartość podana przez Hubble'a:

$$H \approx 500 \text{ km/s/Mpc}$$

prawie rząd wielkości za dużo :-)

Obecne pomiary: $H \sim 70 \text{ km/s/Mpc}$

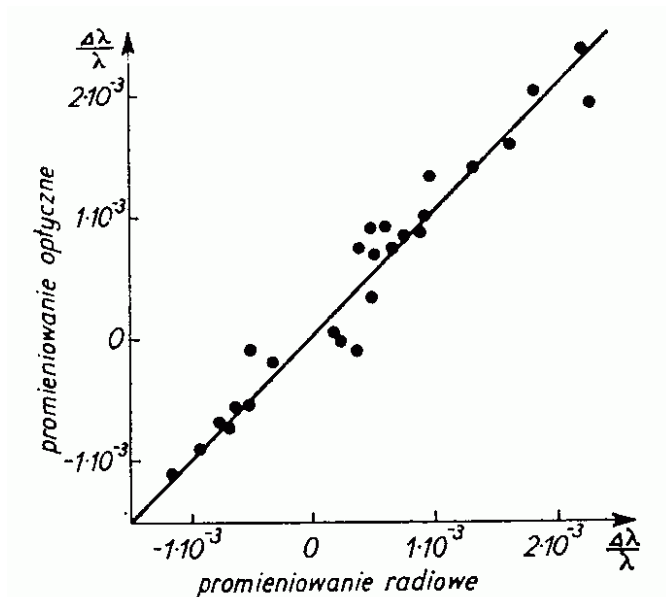


Prawo Hubble'a

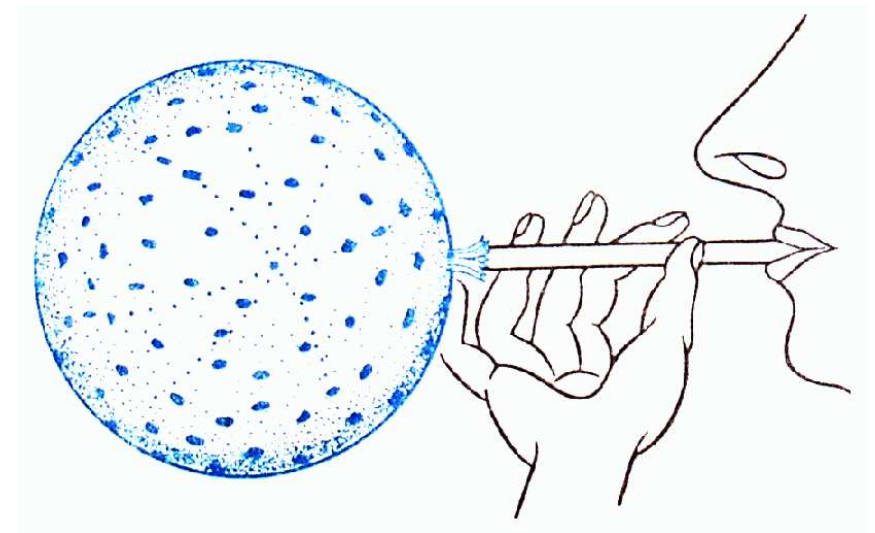
Przesunięcie ku czerwieni

Obserwowane przesunięcie jest **takie samo** w **całym** zakresie **widma** promieniowania elektromagnetycznego.

Porównanie przesunięcia w zakresie optycznym i radiowym:



Obserwacja Hubble'a, że **wszystkie** obiekty **oddalają się**, **nie wyróżnia** w żaden sposób naszego układu odniesienia.



Dowolne dwa obiekty oddalać się będą w ten sam sposób.

Ewolucja Wszechświata

Zasada kosmologiczna

Kosmologia zajmuje się opisem Wszechświata na odległościach większych od rozmiarów wszystkich znanych nam struktur \Rightarrow “skala kosmologiczna”

Zasada kosmologiczna: w skalach kosmologicznych Wszechświat jest **jednorodny** i **izotropowy** \Rightarrow **materia** jest rozłożona **równomiernie**

Przyjmuje się, że w trakcie ewolucji **Wszechświat** cały czas znajdował się (w dobrym przybliżeniu) w stanie **równowagi termodynamicznej**.
Poszczególne rodzaje cząstek anihilują w tym samym tempie co są produkowane.
Skala czasowa tych procesów \ll tempo rozszerzania

W miarę **rozszerzania Wszechświata** maleje średnia energia cząstek (**temperatura**).
Cząstki zbyt **masywne** przestają być “reprodukowane” i **zanikają**...

Albo też “**odprzegają się**”, jeśli zanika ich oddziaływanie z innymi cząstkami...

Wielki Wybuch

Początki Wszechświata

Przyjmujemy, że Wszechświat rozpoczął swoją ewolucję od **pojedynczego punktu**, osobliwości, o nieskończonej gęstości energii...

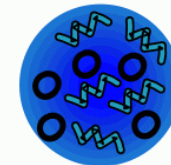
10^{-43} sekundy

Wszechświat **rozszerza się bardzo szybko** (tzw. **inflacja**), nierozróżnialne oddziaływania (nośniki) są w równowadze z materią i antymaterią, np: $W^+W^- \leftrightarrow q\bar{q}$

The big



10^{-43} seconds



10^{32} degrees

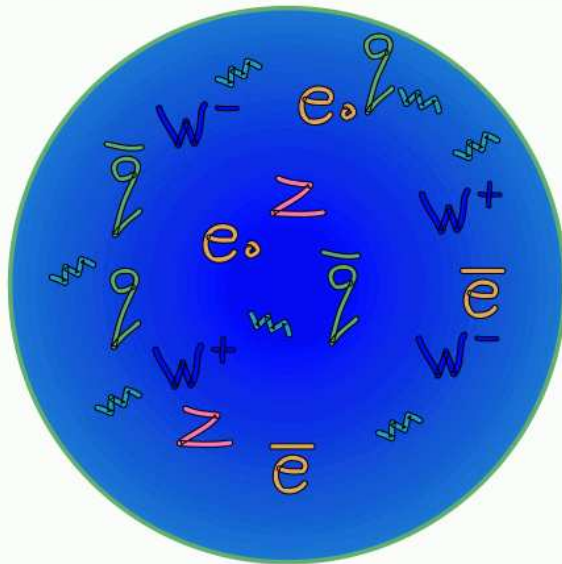
<http://outreach.web.cern.ch/outreach/public/CERN/PicturePacks/BigBang.html>

Wielki Wybuch

10^{-34} sekundy

Rozszerzanie \Rightarrow spadek energii cząstek. Materia znajduje się w stanie **Plazmy Kwarkowo-Gluonowej** (QGP). Oddziaływania silne oddzielają się od elektroslabych.

10^{-34} seconds

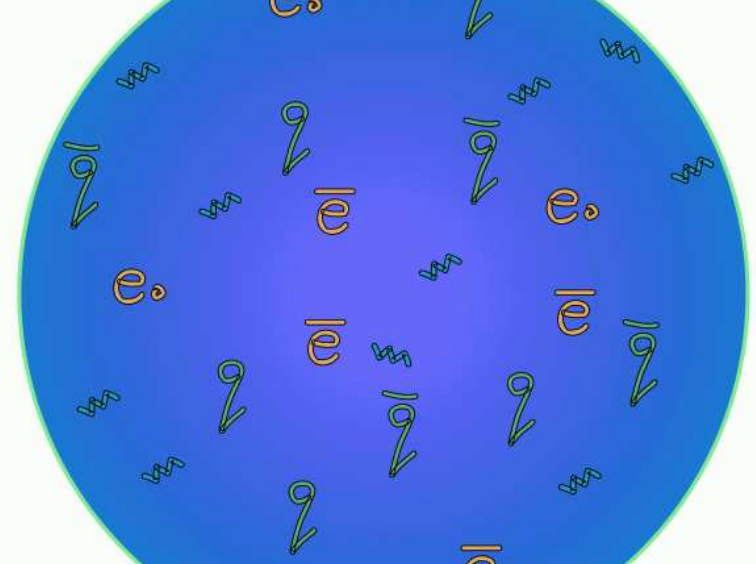


10^{27} degrees

10^{-10} sekundy

Oddzielenie oddziaływań elektromagnetycznych i słabych. **Zanikają swobodne bozony W^\pm i Z^0** (do tej pory w równowadze z fotonami).

10^{-10} seconds



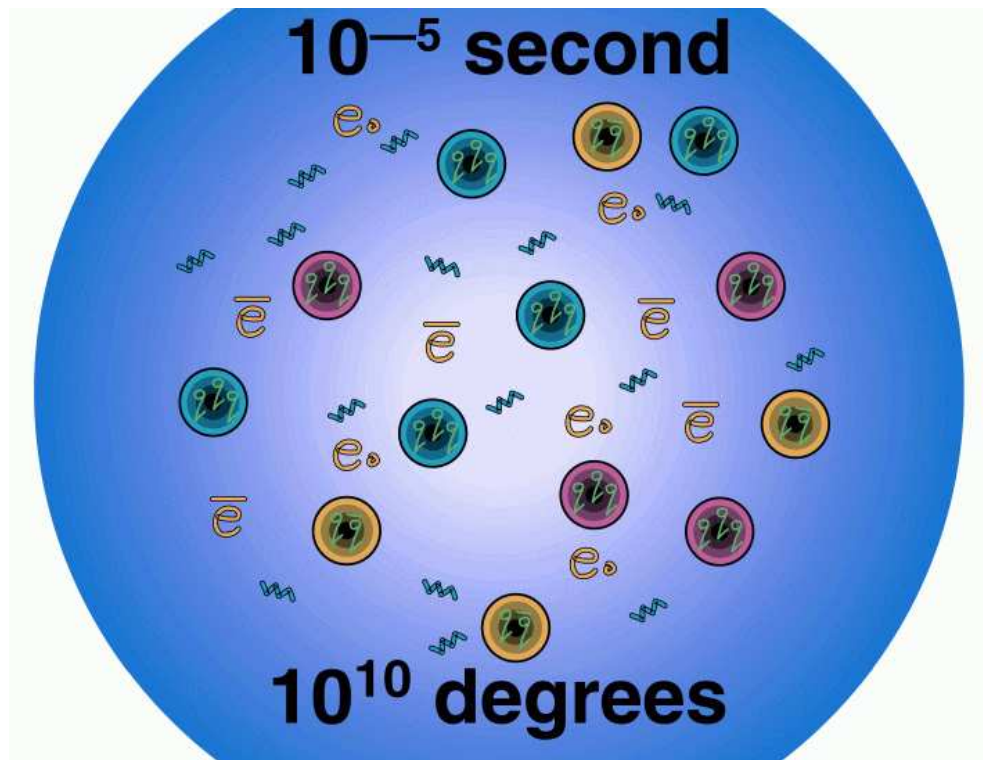
10^{15} degrees

Wielki Wybuch

10^{-5} sekundy

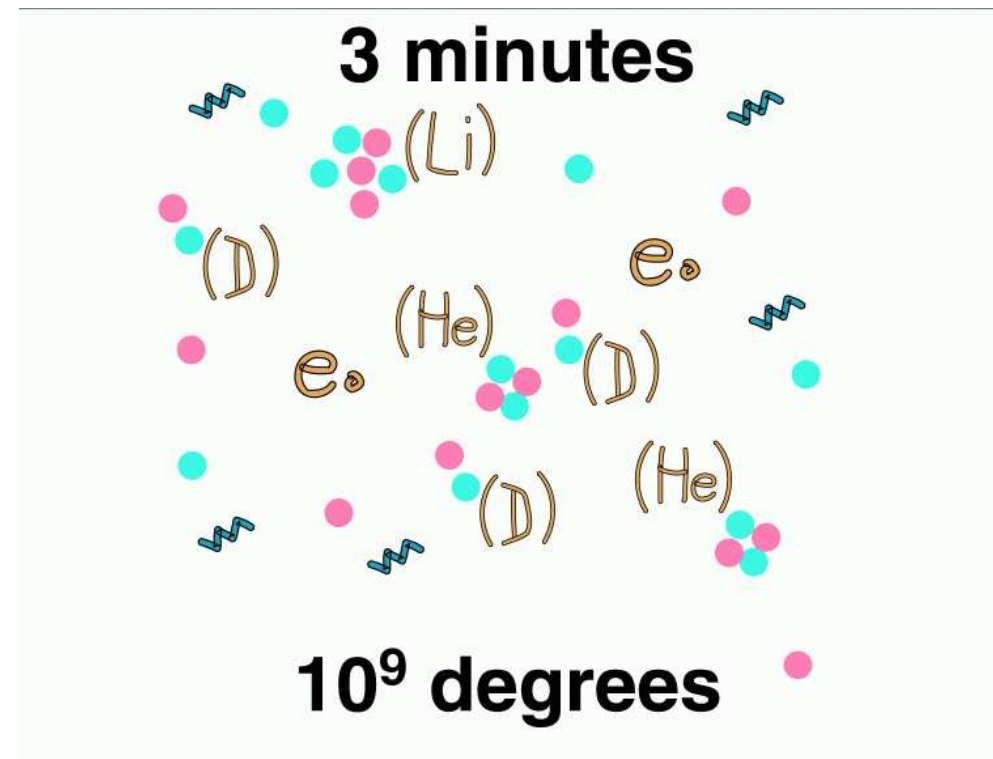
Kwarki formują **neutrony i protony**. **Antymateria zaczyna zanikać** bo promieniowanie jest już zbyt słabe aby ją wciąż wytwarzać.

W międzyczasie naruszenie $B - \bar{B} \dots$



3 minuty

Protony i neutrony tworzą **jądra lekkich pierwiastków**. Wraz z zanikiem reakcji termojądrowych ustala się zawartości różnych izotopów we Wszechświecie.



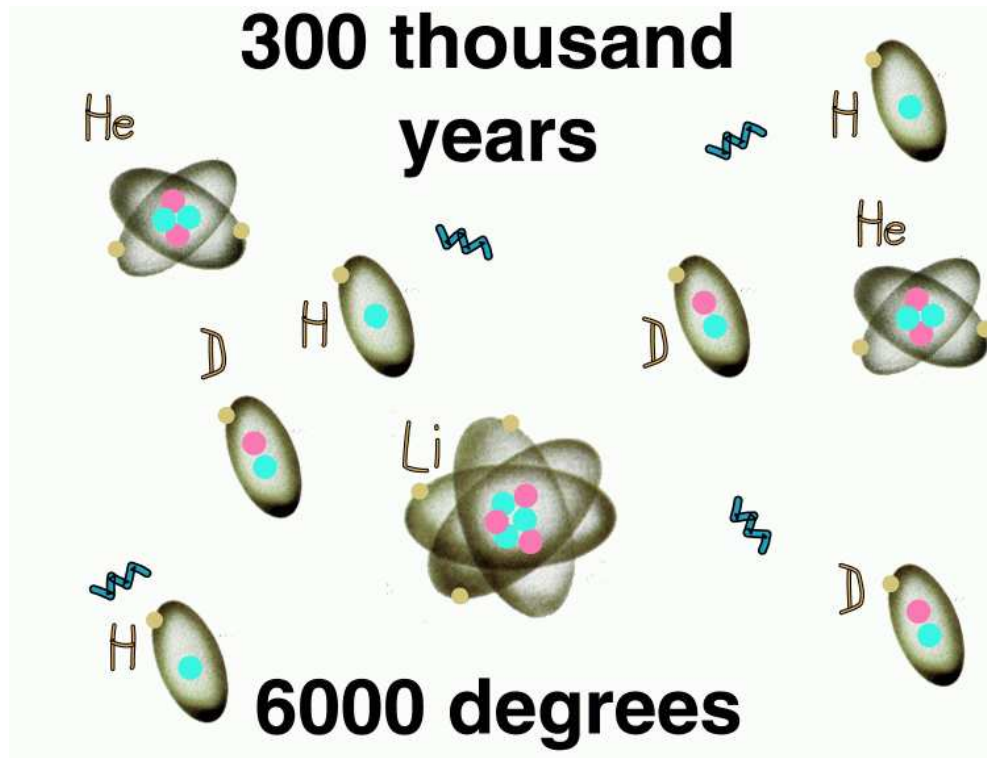
Wielki Wybuch

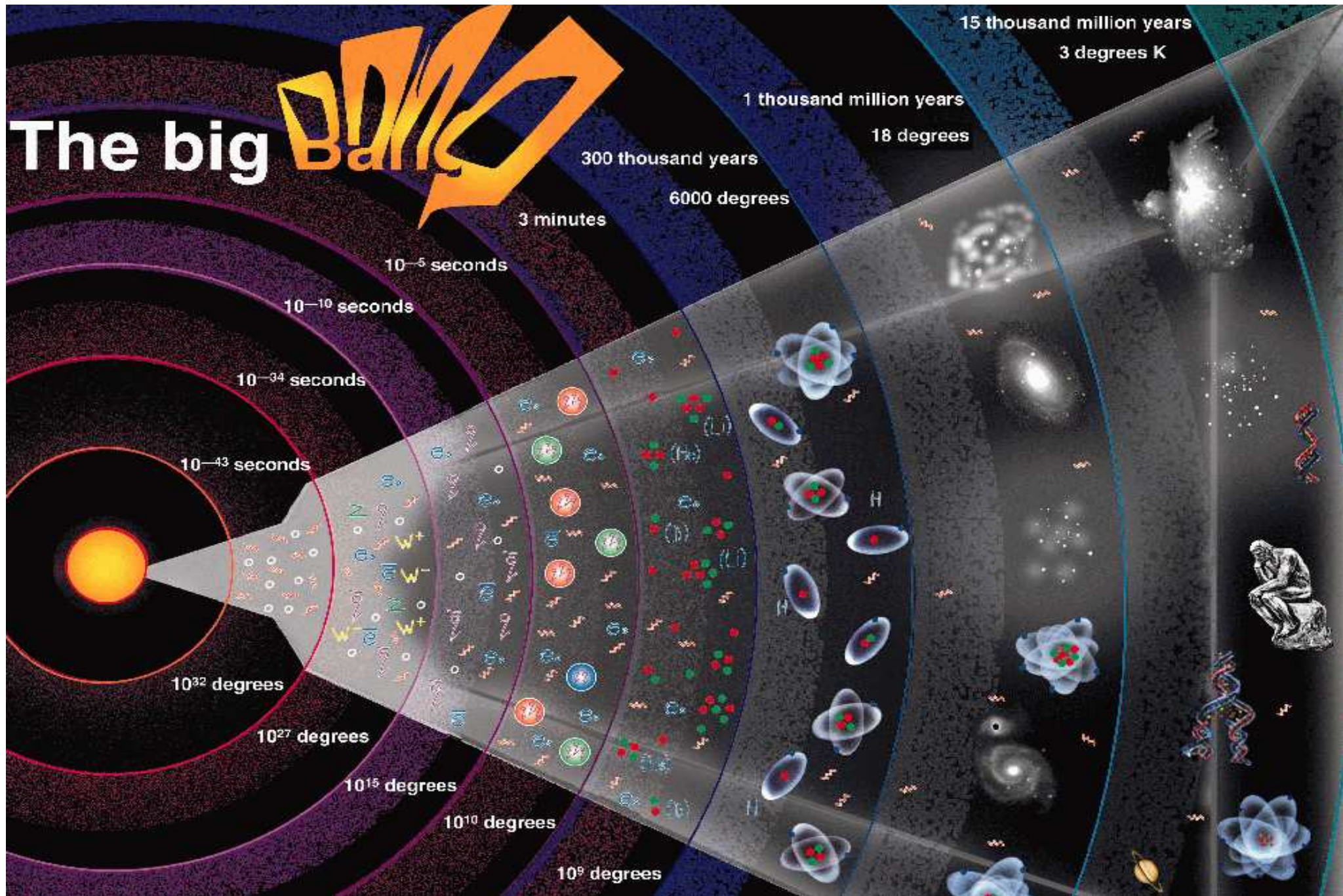
300 000 lat

Elektrony wychwytywane przez jądra tworzą atomy. Wszechświat staje się **przezroczysty dla fotonów**.

1 000 000 000 lat

Formacja galaktyk, synteza ciężkich pierwiastków w gwiazdach.





Wielki Wybuch

Sukcesy modelu Wielkiego Wybuchu

- Tłumaczy rozszerzanie się Wszechświata
- Tłumaczy obecność mikrofalowego promieniowania tła
- Tłumaczy fluktuacje mikrofalowego promieniowania tła
- Tłumaczy skład Wszechświata (pierwotna nukleosynteza)

Pytania na które wciąż nie mamy pełnej odpowiedzi

- Dlaczego zanikła antymateria?
- Jak formowały się struktury we Wszechświecie?
- Czym jest ciemna materia?
- Czy istnieje ciemna energia?

Ewolucja Wszechświata

Zasada kosmologiczna

Zasada kosmologiczna: w skalach kosmologicznych Wszechświat jest **jednorodny** i **izotropowy** \Rightarrow materia jest rozłożona **równomiernie**

Zamiast 'przepływu' materii we Wszechświecie (pozycja zależna od czasu: $r = r(t)$), możemy opisać **ewolucję Wszechświata** wprowadzając **układ współporuszający się**.

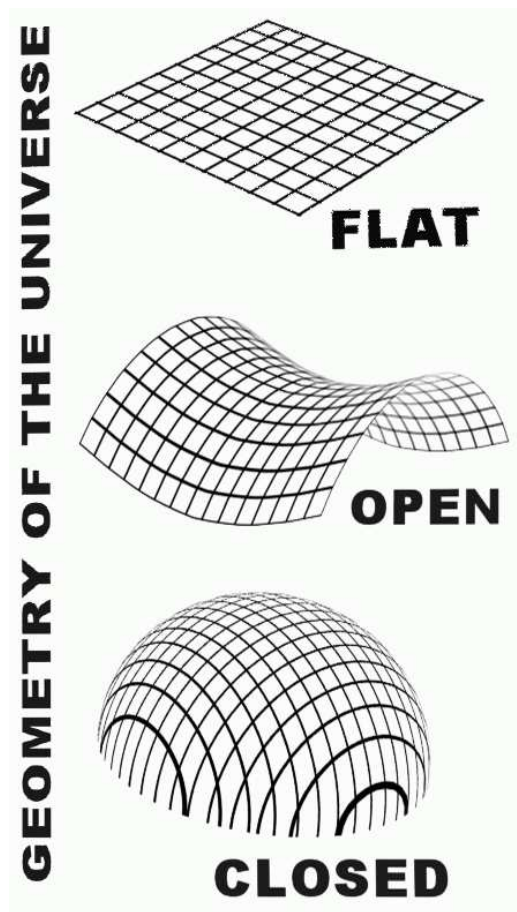
W układzie tym **materia** (uśredniona na skalach kosmologicznych) **spoczywa** ($r = r_0$). Zmianę odległości między obiektami opisujemy poprzez wprowadzenie **zależnej od czasu metryki**:

$$ds^2 = dt^2 - R^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - k r^2} + r^2 (d\theta^2 + d\phi^2 \sin^2 \theta) \right]$$

metryka Friedmanna-Robertsona-Walkera, $k = -1, 0, 1$: krzywizna przestrzeni

Ewolucja Wszechświata

Krzywizna przestrzeni



$$k = 0$$

$$k = -1$$

$$k = +1$$

Równania Friedmann'a

W metryce FRW Równanie Einsteina sprowadza się do równań na skalę $R(t)$:

$$H^2 = \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{R^2} + \frac{1}{3}\Lambda$$

$$\frac{\ddot{R}}{R} = \frac{\Lambda}{3} - \frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p)$$

gdzie: ρ - gęstość materii, p - ciśnienie

Stałą kosmologiczną Λ wprowadził do swojego równania Einstein, aby 'uratować' statyczny i płaski Wszechświat.

Ewolucja Wszechświata

Gęstość krytyczna

Z równań Friedmanna wynika również zależność między gęstością materii we Wszechświecie a krzywizną przestrzeni.

Gęstość krytyczna:

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \sim 10^{-26} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \sim 10 \frac{\text{GeV}}{c^2/\text{m}^3}$$

Parametry gęstości

(gęstość w jednostkach ρ_c):

$$\Omega_m = \frac{\rho}{\rho_c}$$
$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H^2}$$

Jeśli $\Omega_{tot} = \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$

⇒ Wszechświat jest 'płaski' (euklidesowy)
krzywizna $k = 0$

Jeśli $\Omega_{tot} < 1$

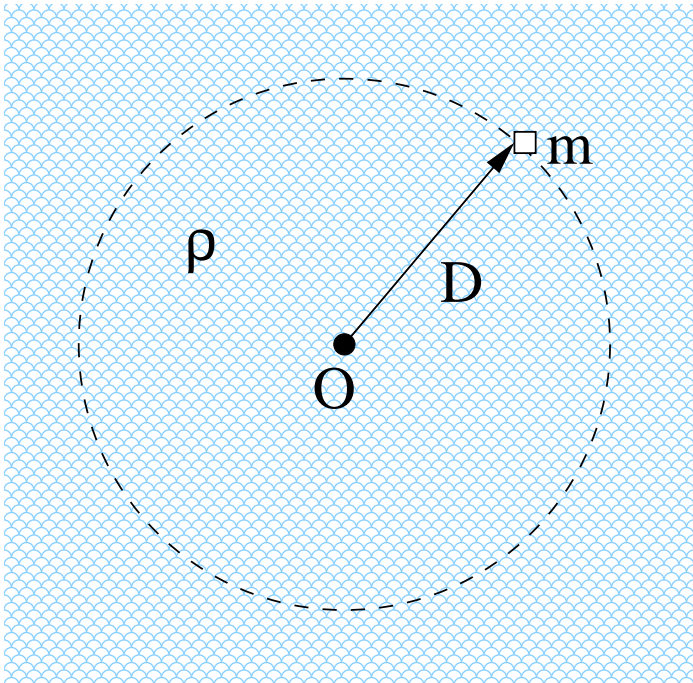
⇒ Wszechświat 'otwarty'
krzywizna $k = -1$

Jeśli $\Omega_{tot} > 1$

⇒ Wszechświat 'zamknięty'
krzywizna $k = +1$

Ewolucja Wszechświata

Model klasyczny



Przyspieszenie masy m znajdującej się w odległości $D = r \cdot R(t)$ od początku układu:

$$m\ddot{D} = -\frac{GmM}{D^2} = -\frac{Gm}{D^2} \cdot \frac{4\pi}{3} D^3 \rho$$

Sprowadza się do równania na $R(t)$ ($r = \text{const}$):

$$\ddot{R} = -\frac{4\pi G}{3} \rho R$$

Natomiast zasada zachowania energii:

$$\frac{m\dot{D}^2}{2} - \frac{GmM}{D} = \text{const}$$

Prowadzi do:

$$\dot{R}^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho R^2 - k$$

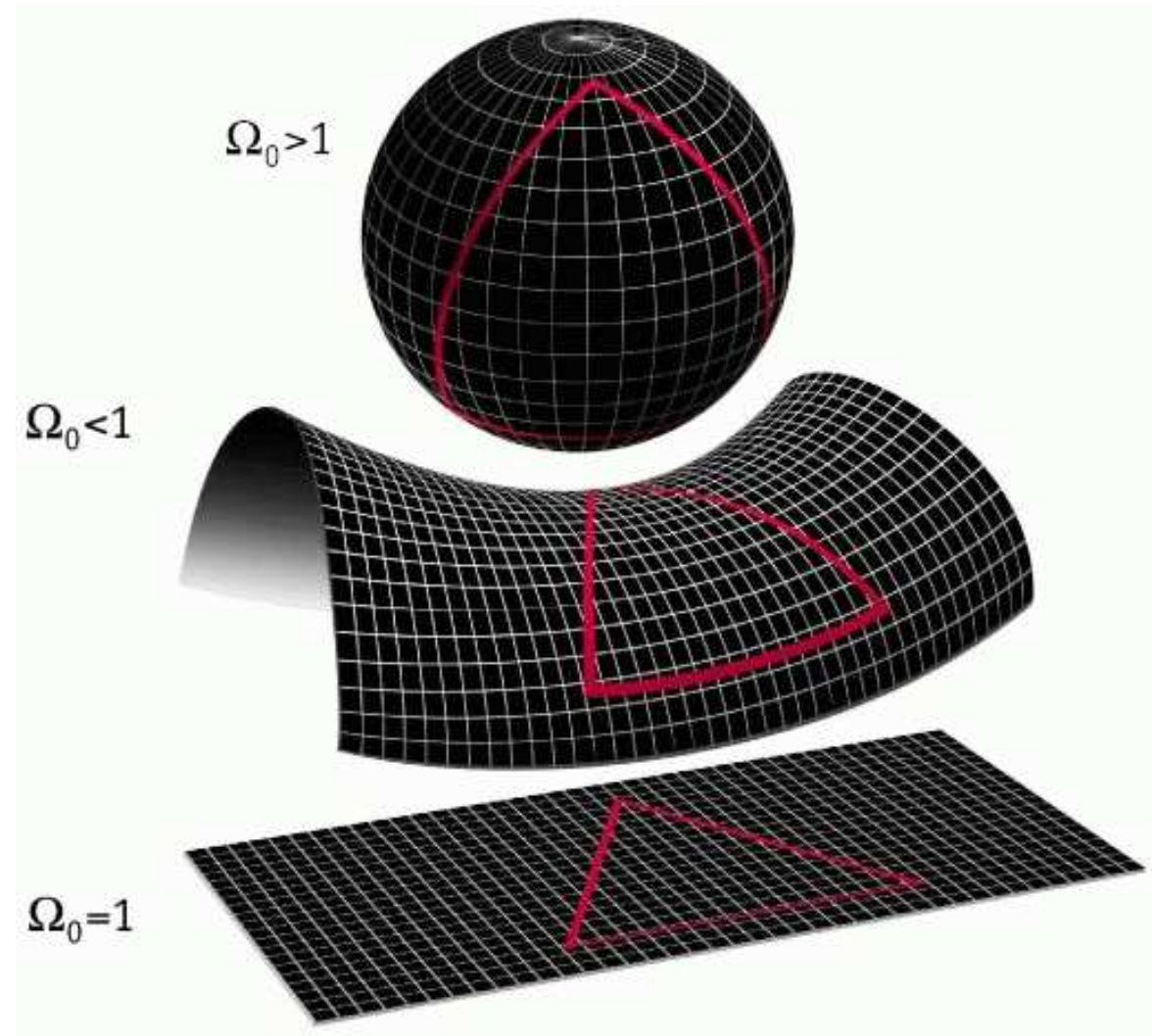
Znak k jest przeciwny znakowi całkowitej energii...

Ewolucja Wszechświata

Całkowita **gęstość materii/energii** we Wszechświecie decyduje też o **geometrii przestrzeni** na skalach kosmologicznych!

Lokalnie wiemy, że przestrzeń jest **płaska** (suma kątów trójkąta wynosi 180°).

Ale na dużych odległościach trudno to sprawdzić...



Ewolucja Wszechświata

Szczególny przypadek: $\Lambda = 0$

⇒ gęstość materii (krzywizna przestrzeni) określa jednoznacznie charakter ewolucji:

$$\Omega_m < 1 \quad (k = -1)$$

⇒ Wszechświat będzie zawsze rozszerzał się

$$\Omega_m = 1 \quad (k = 0)$$

⇒ asymptotycznie Wszechświat “zatrzyma” się

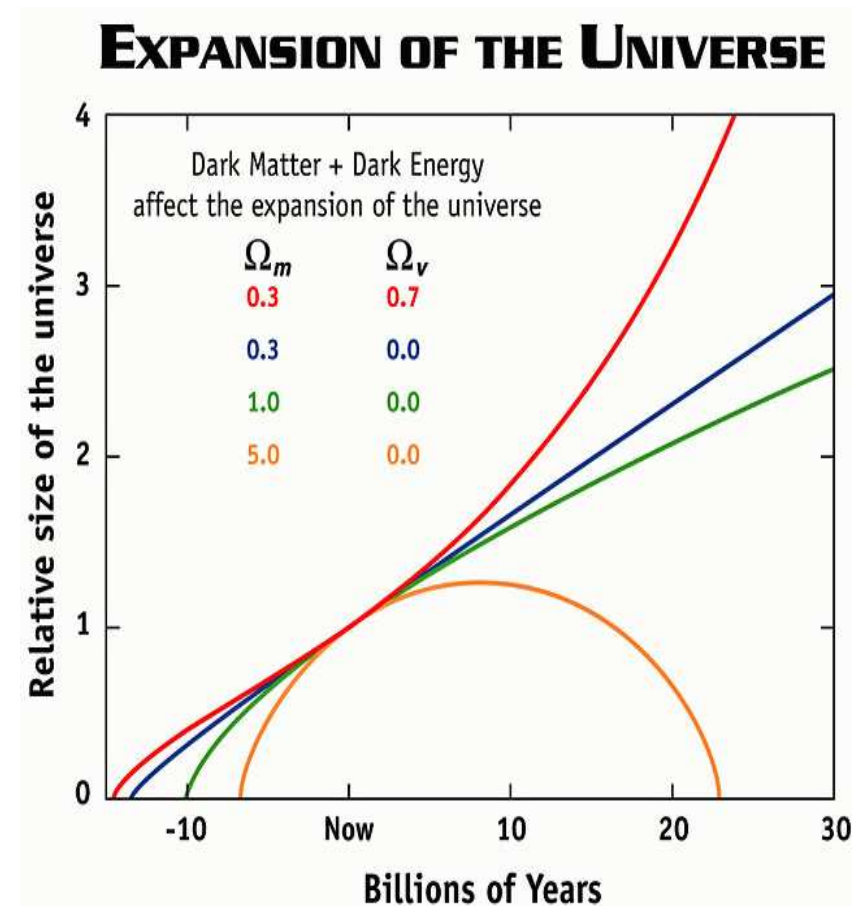
$$\Omega_m > 1 \quad (k = +1)$$

⇒ Wszechświat kiedyś zacznie się zapadać

Do opisu ewolucji Wszechświata wystarczą (w najprostszym modelu) trzy parametry:

$$H, \Omega_m, \Omega_\Lambda$$

Scenariusze ewolucji Wszechświata



Promieniowanie tła

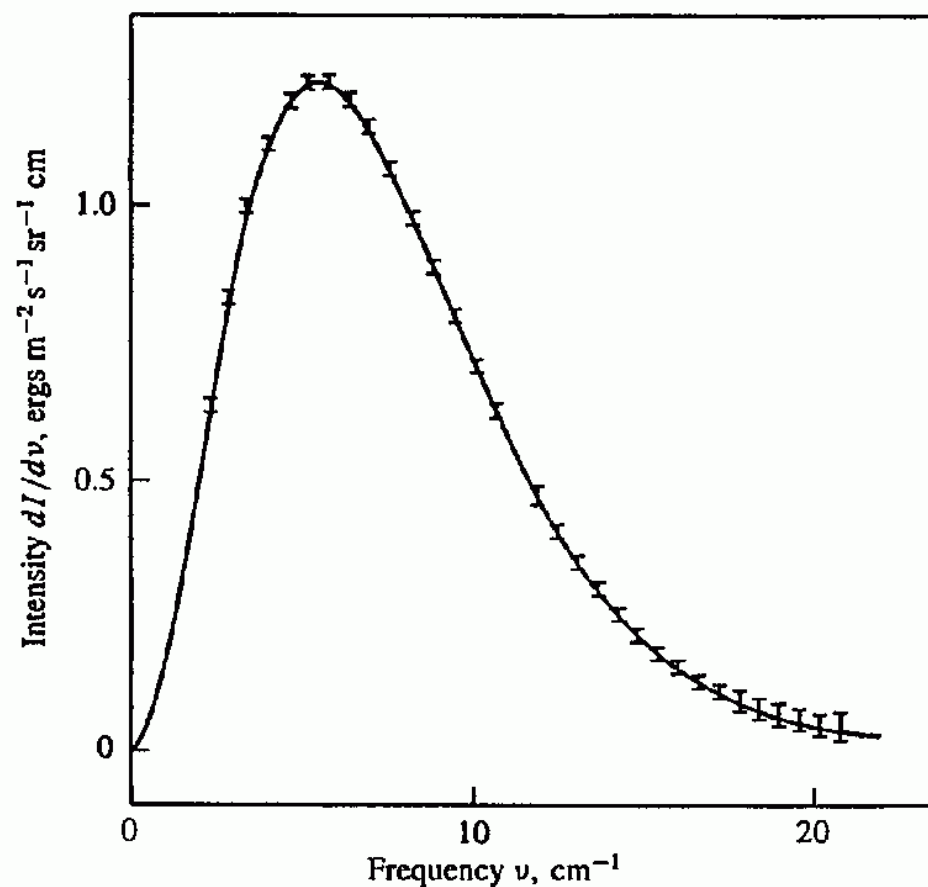
Odkrycie

Mikrofalowe promieniowanie tła (CMB) zostało odkryte w 1965 roku przez A.A.Penzisa i R.W.Wilsona.

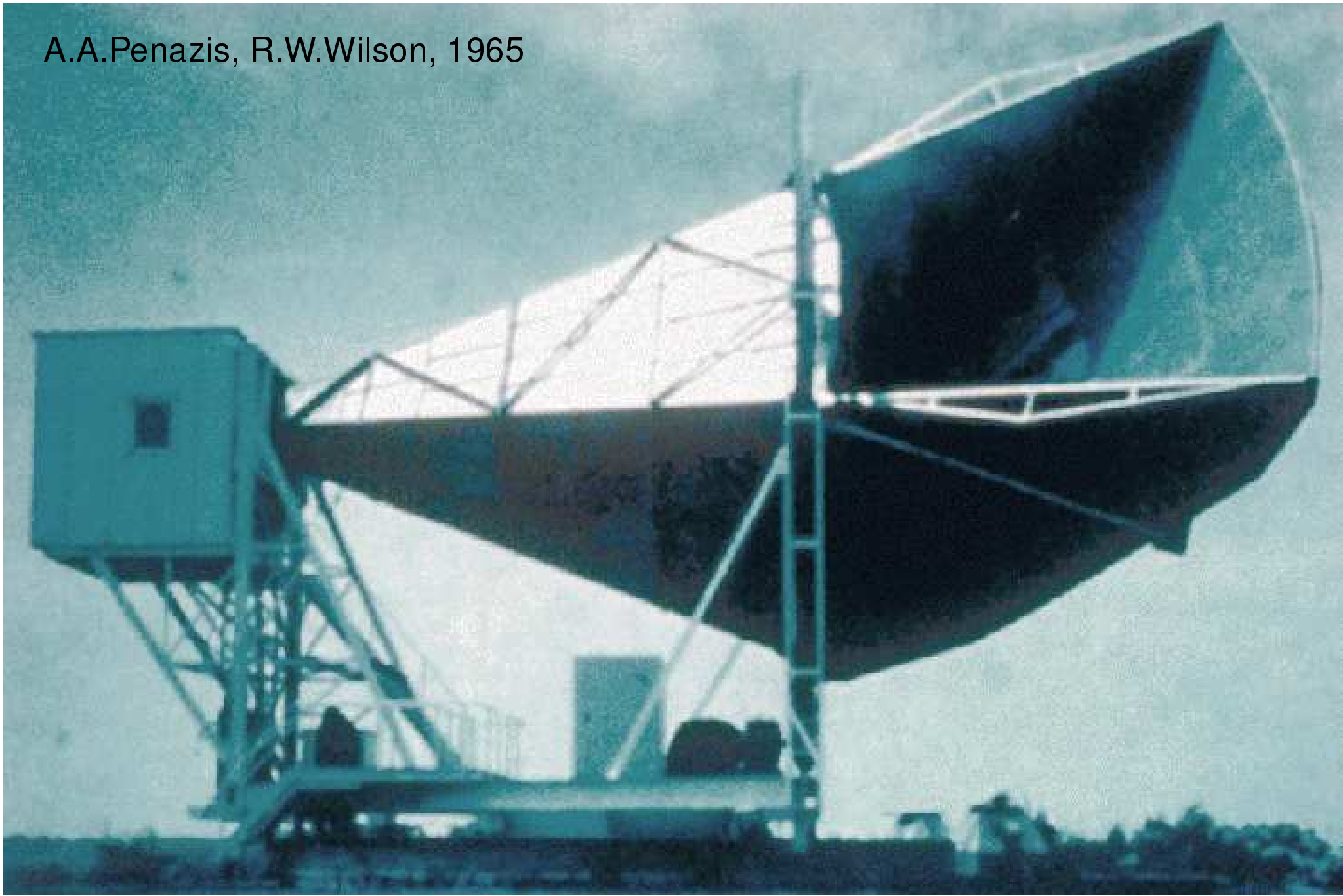
Rozkład widmowy promieniowania zgadza się z widmem promieniowania ciała doskonale czarnego.

$$T = 2.725 \pm 0.002 \text{ K}$$

Wyniki z satelity COBE: (1999)



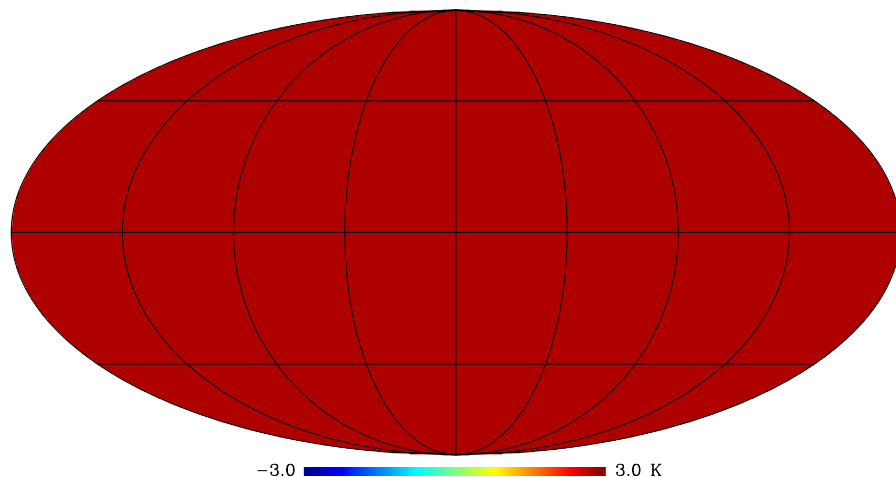
A.A.Penazis, R.W.Wilson, 1965



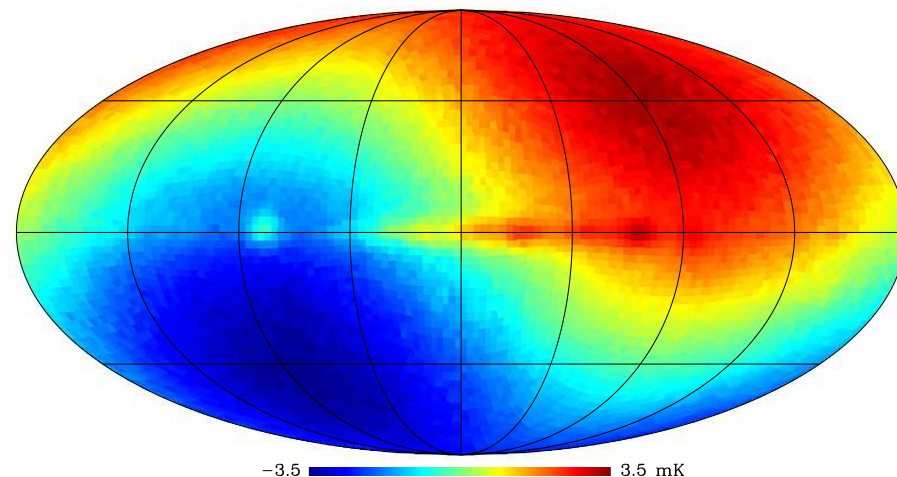
Promieniowanie tła

Rozkład kątowy

W pierwszym przybliżeniu ($\Delta T \sim 1K$)
promieniowanie tła jest **izotropowe**:



Jednak gdy przyjrzymy się bliżej
($\Delta T \sim 1mK$):

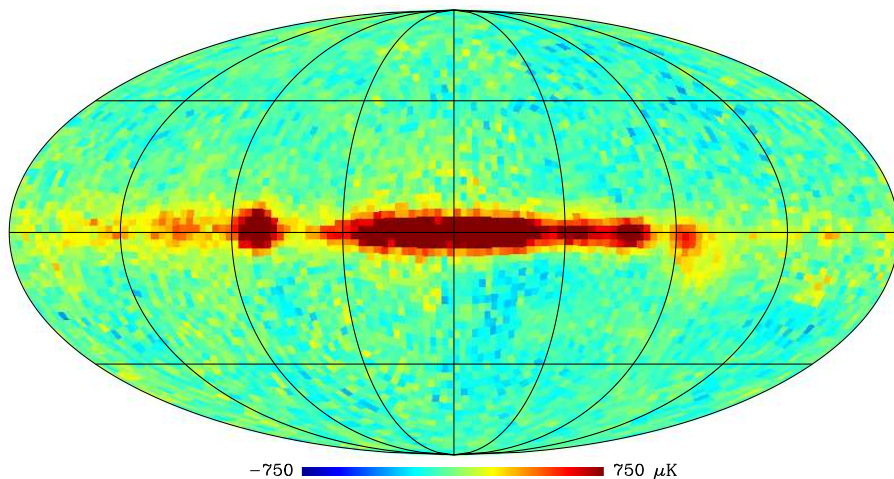


widzimy wpływ **ruchu Ziemi** względem
'globalnego' układu.

Promieniowanie tła

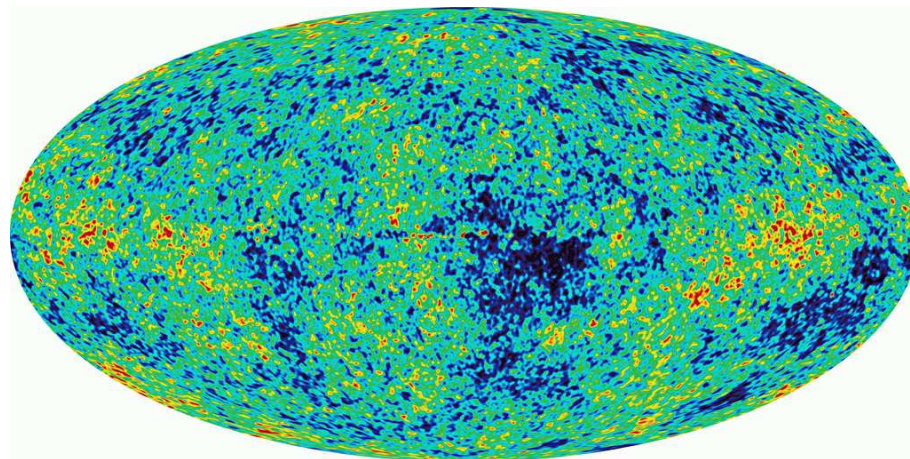
Rozkład kątowy

Odejmując wpływ efektu Dopplera
($\Delta T \sim 200 \mu K$):

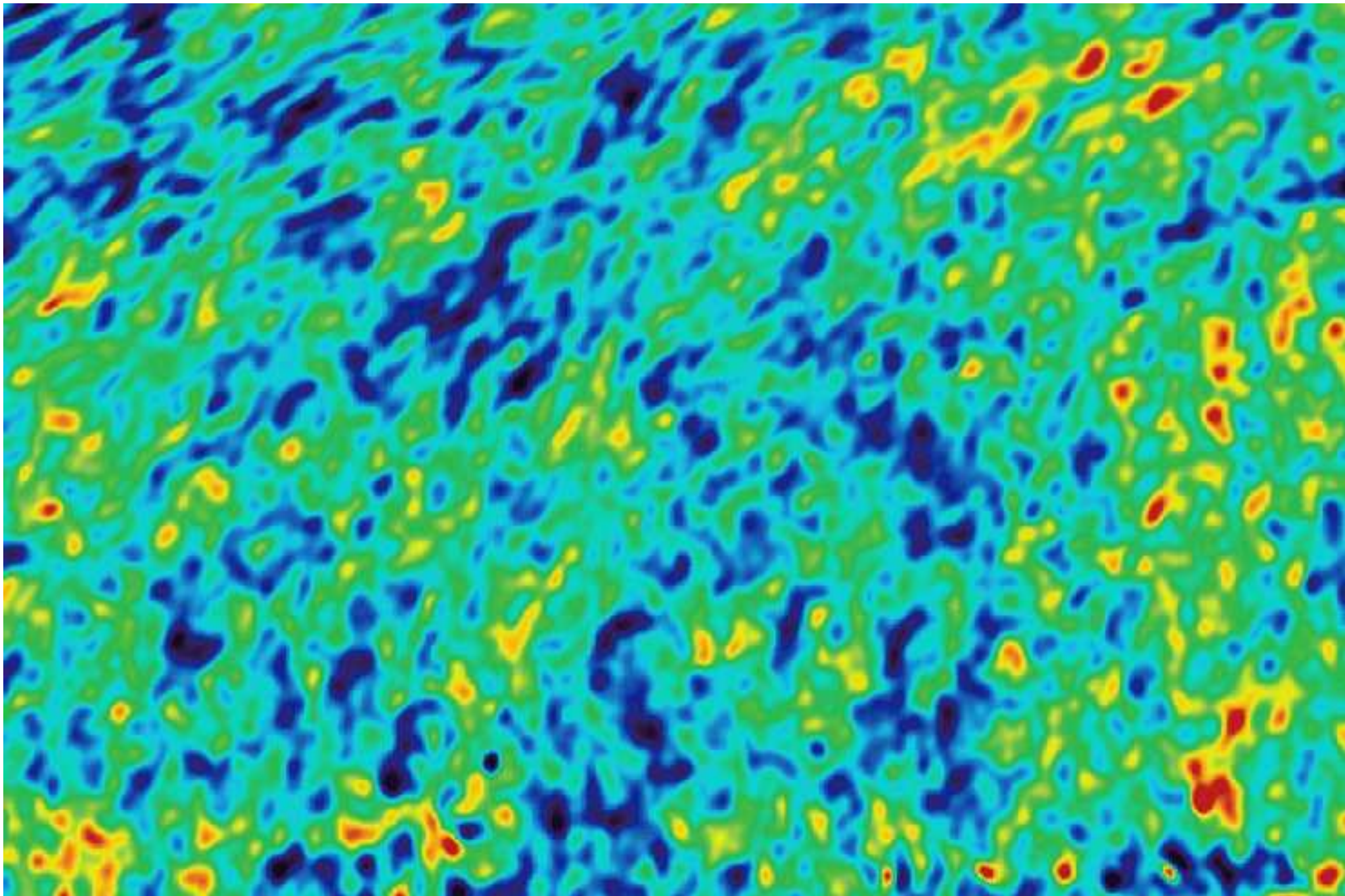


⇒ widzimy promieniowanie naszej galaktyki (Drogi Mlecznej)...

Odejmując promieniowanie Galaktyki i innych znanych źródeł ($\Delta T \sim 100 \mu K$):



⇒ zaczyna być ciekawie !!!



Promieniowanie tła

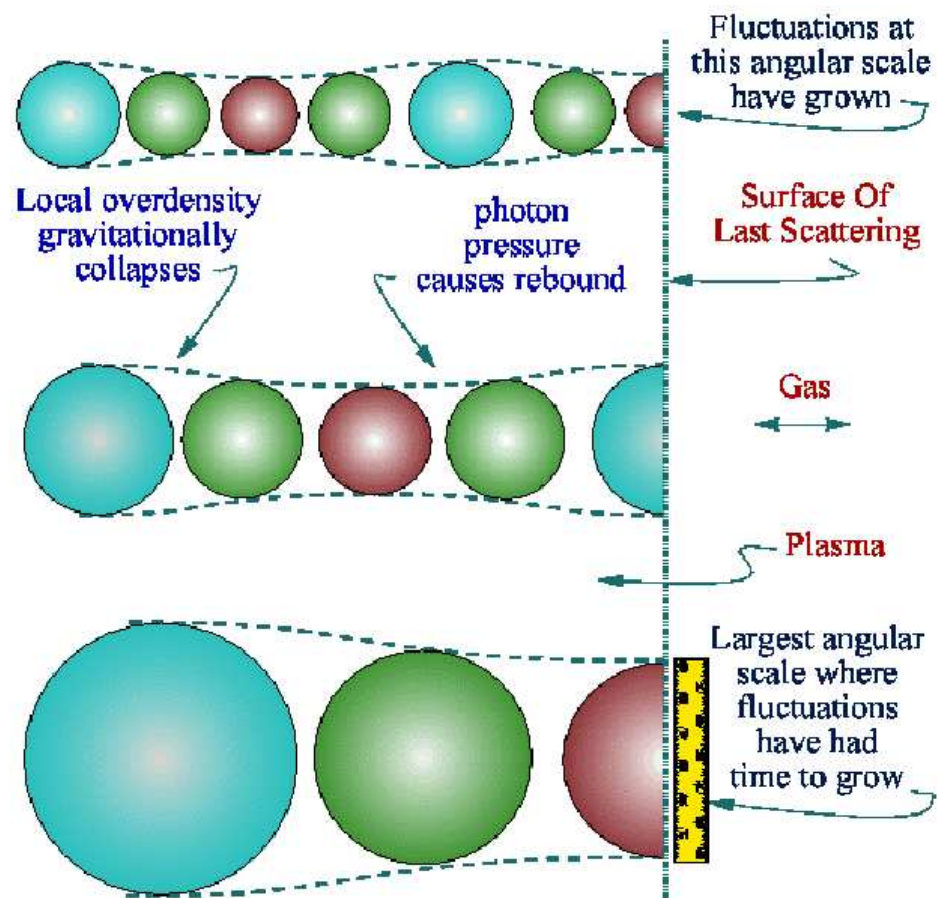
Fluktuacje

Fluktuacje promieniowania wynikają z faktu, że Wszechświat w momencie 'oddzielenia' promieniowania nie był 'statyczny'.

Cały czas 'oscylował' wokół stanu równowagi, w którym ciśnienie promieniowania równoważy przyciąganie grawitacyjne ⇒

Charakter fluktuacji w promieniowaniu tła zależy od rozmiarów Wszechświata w chwili oddzielenia promieniowania...

⇒ zależy od parametrów kosmologicznych

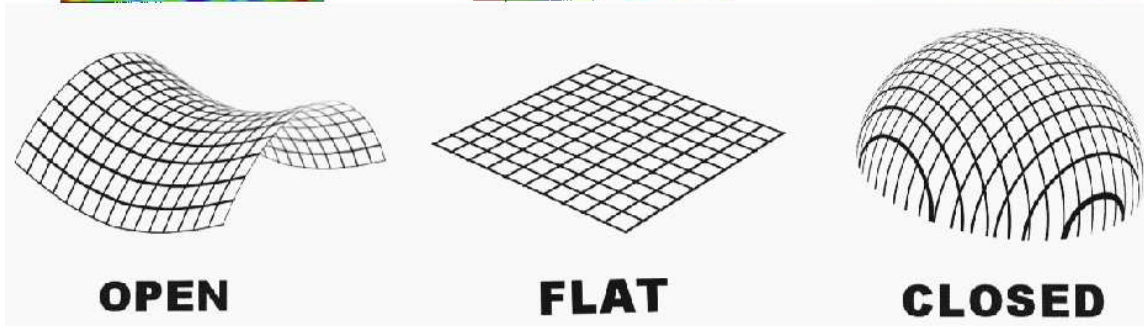
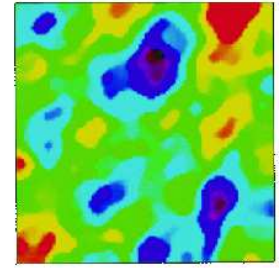
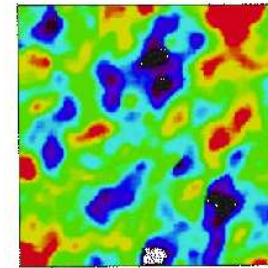
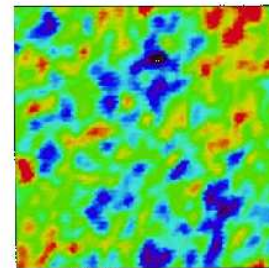
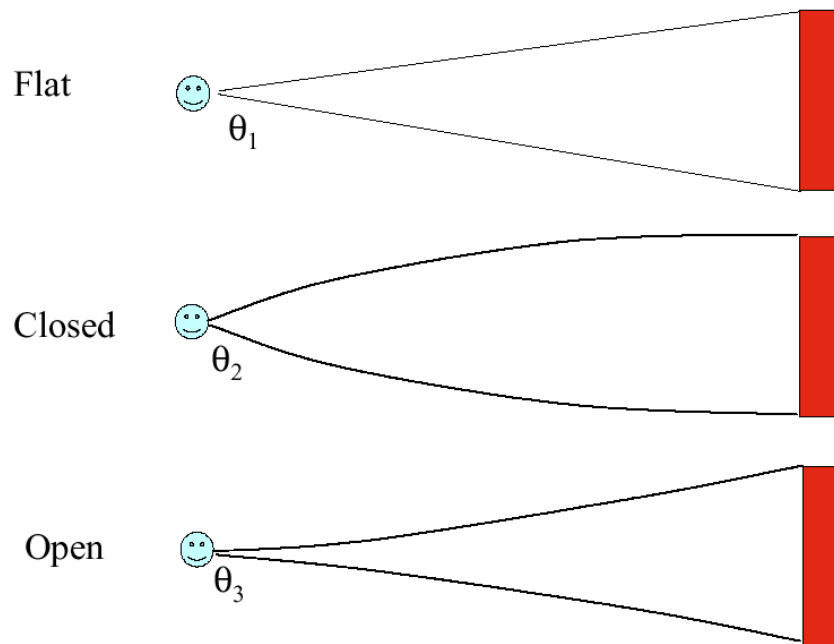


Promieniowanie tła

Fluktuacje

Rozmiary fluktuacji jakie obecnie obserwujemy zależy też silnie od krzywizny Wszechświata !

Wyniki symulacji:



Promieniowanie tła

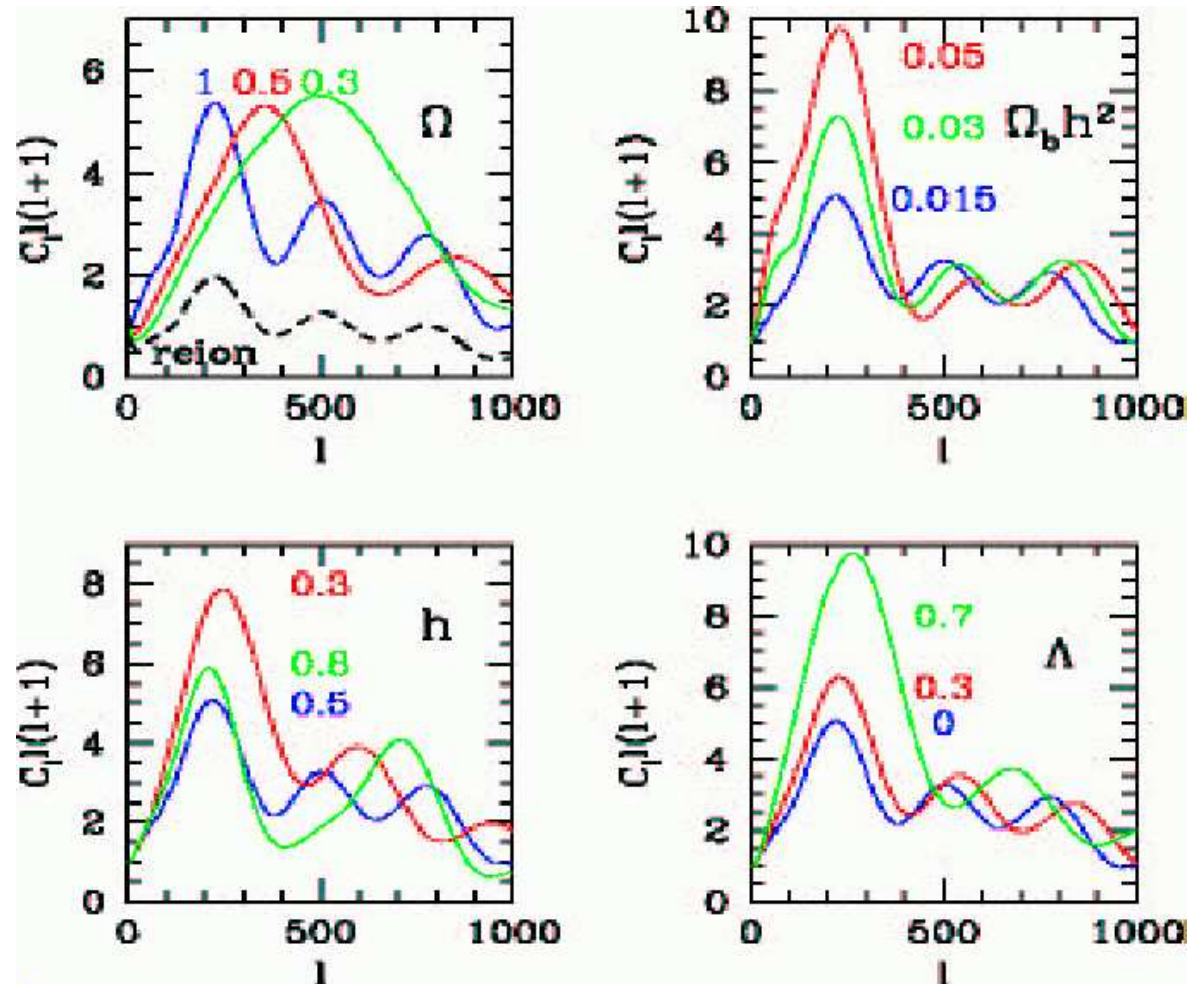
Fluktuacje

Aby opisać rozkład fluktuacji dzieli się obraz na małe kawałki (pixle), a następnie rozkłada uzyskaną macierz korelacji na wielomiany Legendre'a w $\cos \theta_{ij}$ (odległości kątowej).

Oczekiwany rozkład natężenia dla poszczególnych 'multipoli' (wielomianów danego rzędu) zależy od parametrów modelu

np. dla płaskiego Wszechświata ($\Omega = 1$) oczekujemy dominującego wkładu od $l \sim 200$

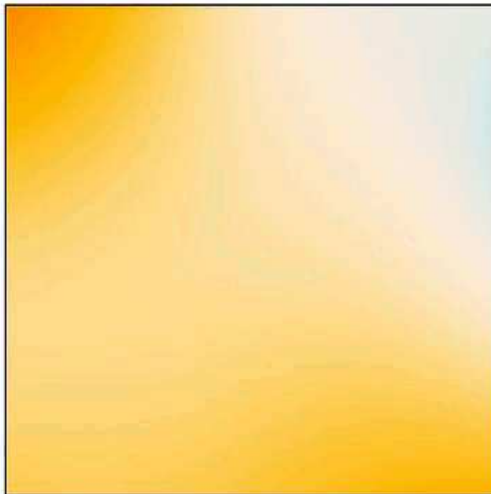
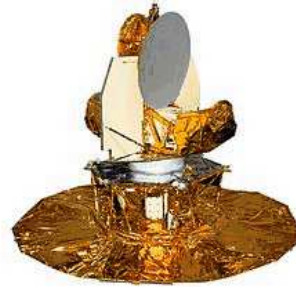
Wyniki symulacji dla różnych wartości parametrów:



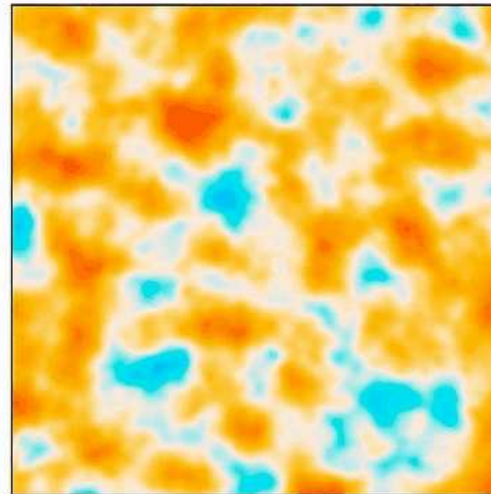
Promieniowanie tła

Misje satelitarne

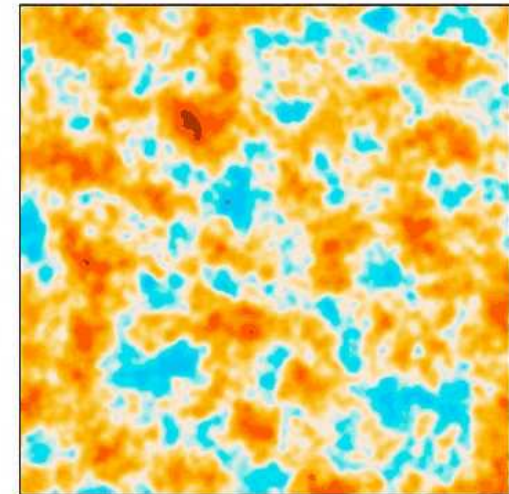
najlepszy sposób na precyzyjne pomiary



COBE
1989

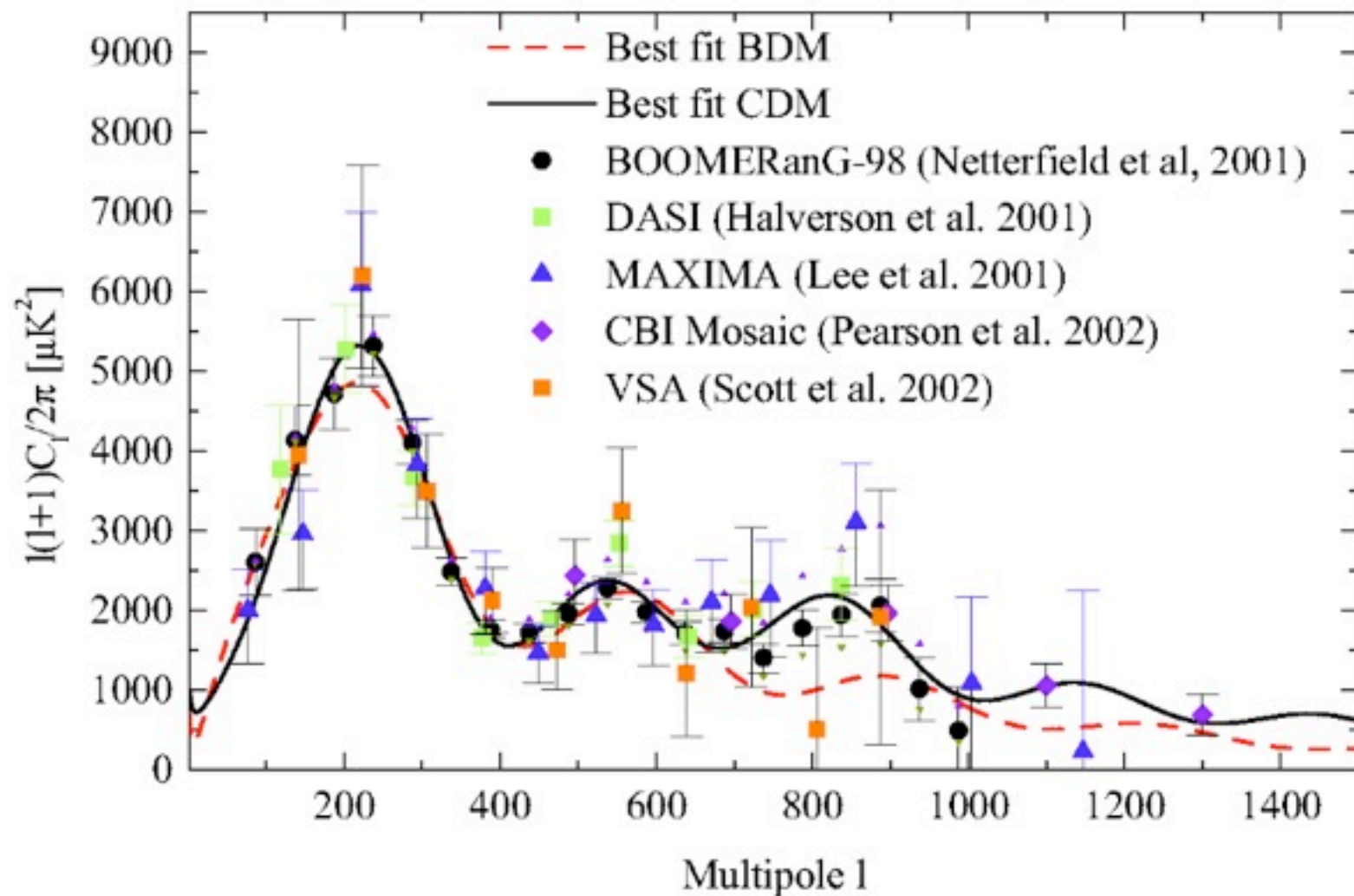


WMAP
2001



Planck
2009

CMB anisotropies pre-WMAP (January 2003)

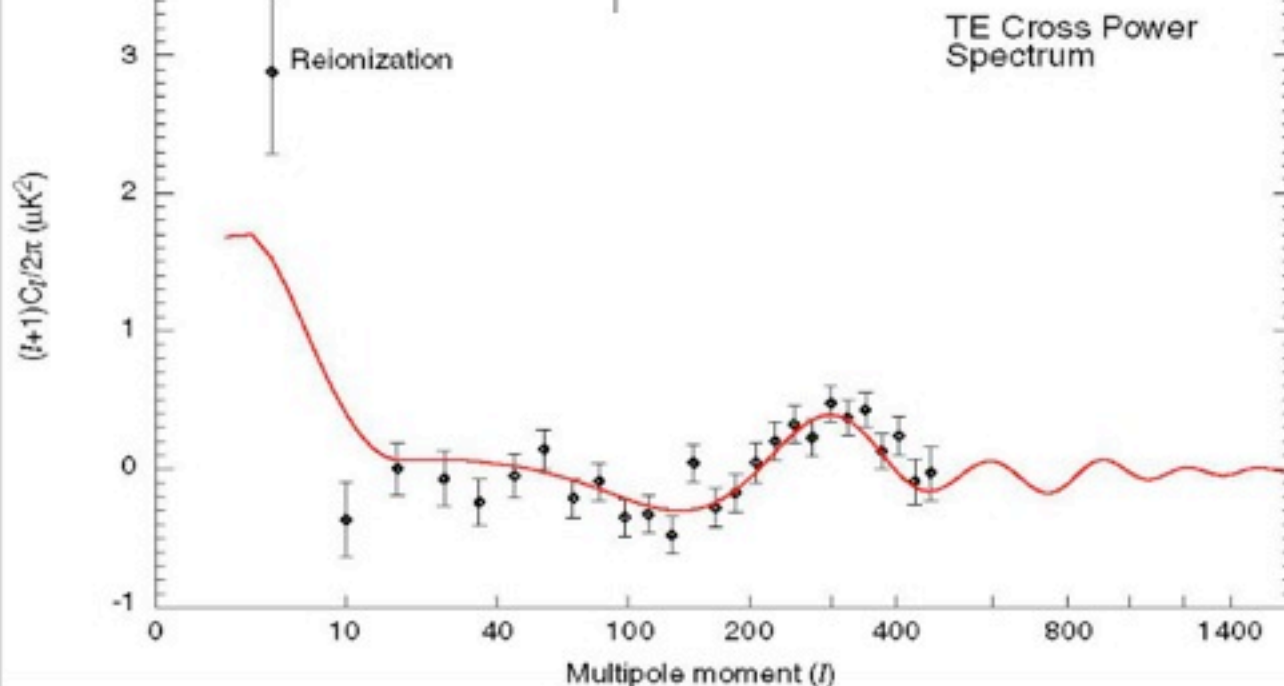
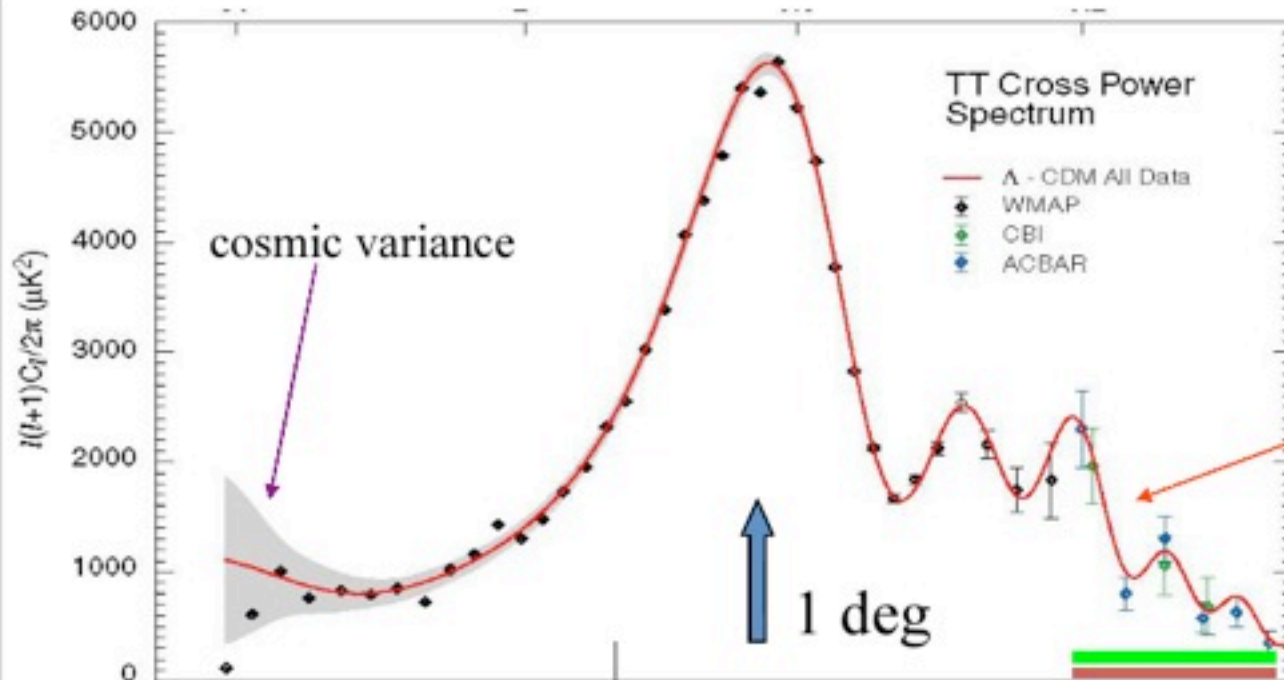


Temperature

85% of sky

Best fit model

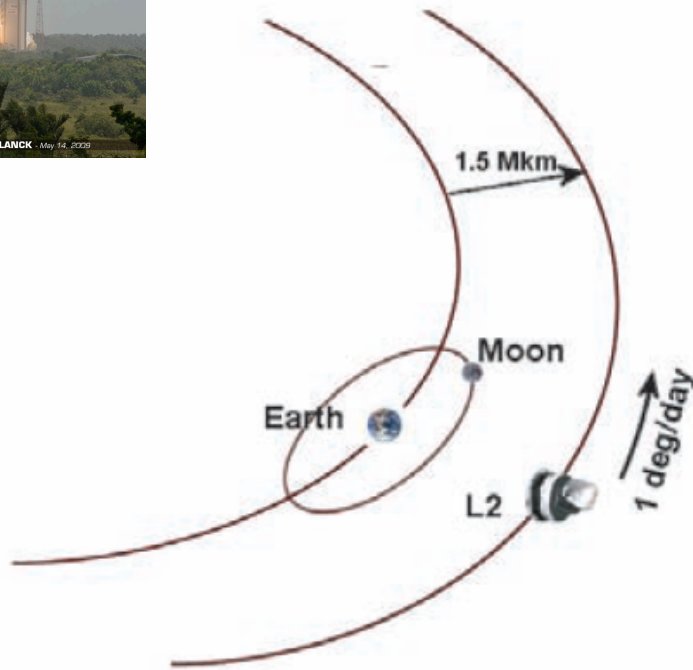
Spergel et al, 2003



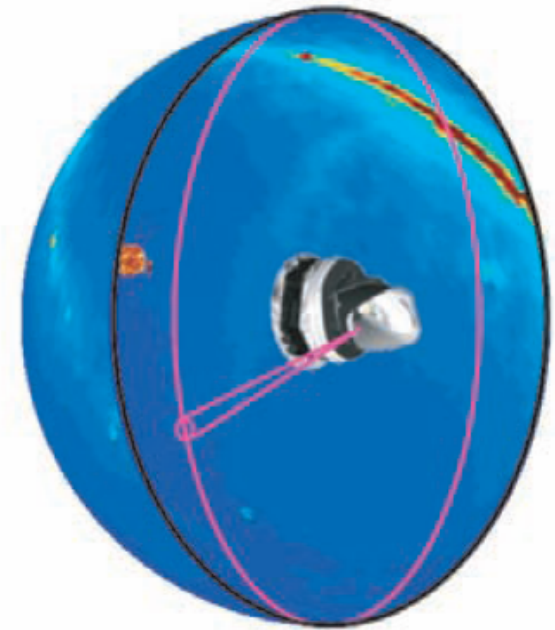
Temperature-polarization

The Planck satellite

- Launched by ESA and placed in L2 orbit in 2009. Full scan every 6 month.



1 rotation per minute



10% of time for tiny manoeuvres
(data not used)

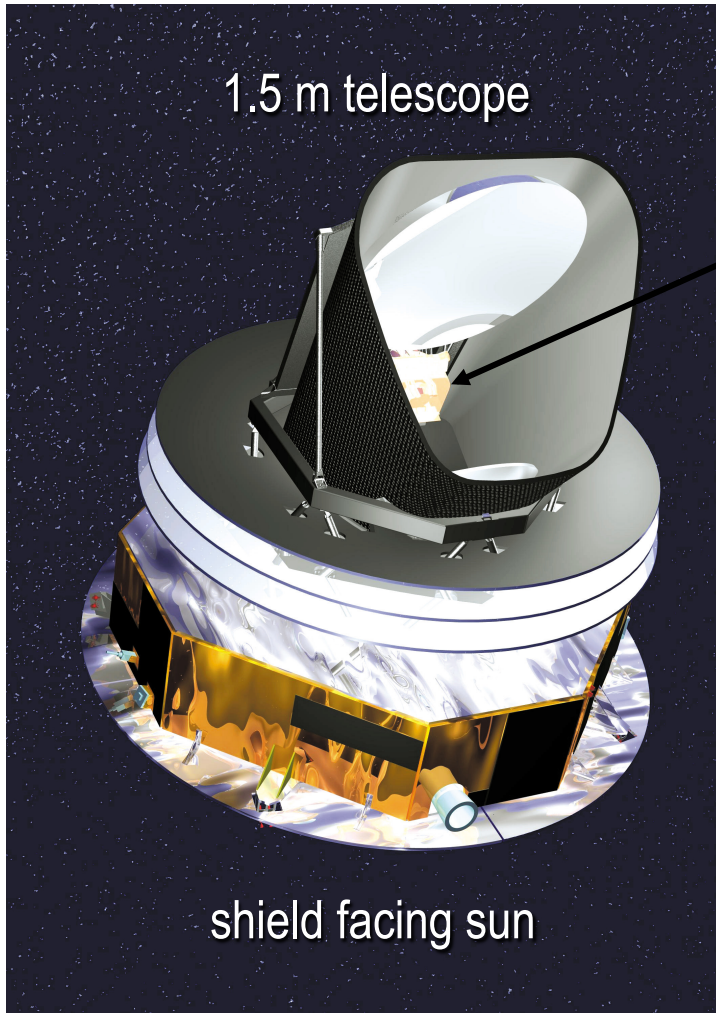
- Cost: 5 cents/european/yr (700ME), 400-650 scientists
- 2 tons, 4.2m diameter, 36'000 l of ^4He , 12'000 l of ^3He

The Planck satellite

- Launched by ESA and placed in L2 orbit in 2009. Full scan every 6 month.
- 75 detectors cover 9 frequency channels
- **Planck strengths:** large and redundant sky coverage, number of channels & detectors, **low detector noise (25 x better than WMAP)**. Resolution intermediate between WMAP (3 x better) and ACT, SPT.
- HFI requires complex cryogenic cooling at 0.1K (dilution of ^3He in ^4He). Designed for > 2 scans, achieved 5. Turned off in Jan 2012 (due to ^3He level).
- LFI requires cooling at 20K with ^4He only and proceeded until few weeks ago (8 scans).
- **2013 release restricted to “nominal mission”, 15 months, > 2 scans.** Further temperature data + polarization maps differed to 2014 - 2015.



The Planck satellite



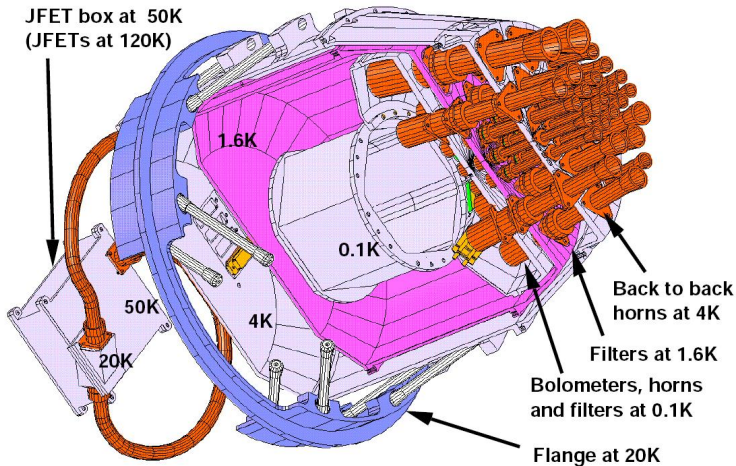
2 instruments:

- LFI (led by Italy)
 - HEMTs (transistors)
 - cooled at 20K
 - sensitive to 30-100 GHz
- HFI (led by France/UK)
 - bolometer array
 - cooled at 0.1K
 - sensitive to 100-857 GHz

HFI Bolometers array

Planck

Satellite
Cryogenics
Instruments
Performance
Orbit and scanning
strategy
Published results
Timeline
(Other results)



Sensitivity

PLANCK	LFI			HFI					
Center freq (GHz)	30	44	70	100	143	217	353	545	857
Angular resolution (FWHM arcmin)	33	24	14	10	7.1	5.0	5.0	5.0	5.0
Sensitivity in I [$\mu\text{K.deg}$] [$\sigma_{\text{pix}} \Omega_{\text{pix}}^{1/2}$]	2.7	2.6	2.6	1.0	0.6	1.0	2.9		
Sensitivity in Q or U [$\mu\text{K.deg}$] [$\sigma_{\text{pix}} \Omega_{\text{pix}}^{1/2}$]	4.5	4.6	4.6	1.8	1.4	2.4	7.3		

From the Planck "Blue book"

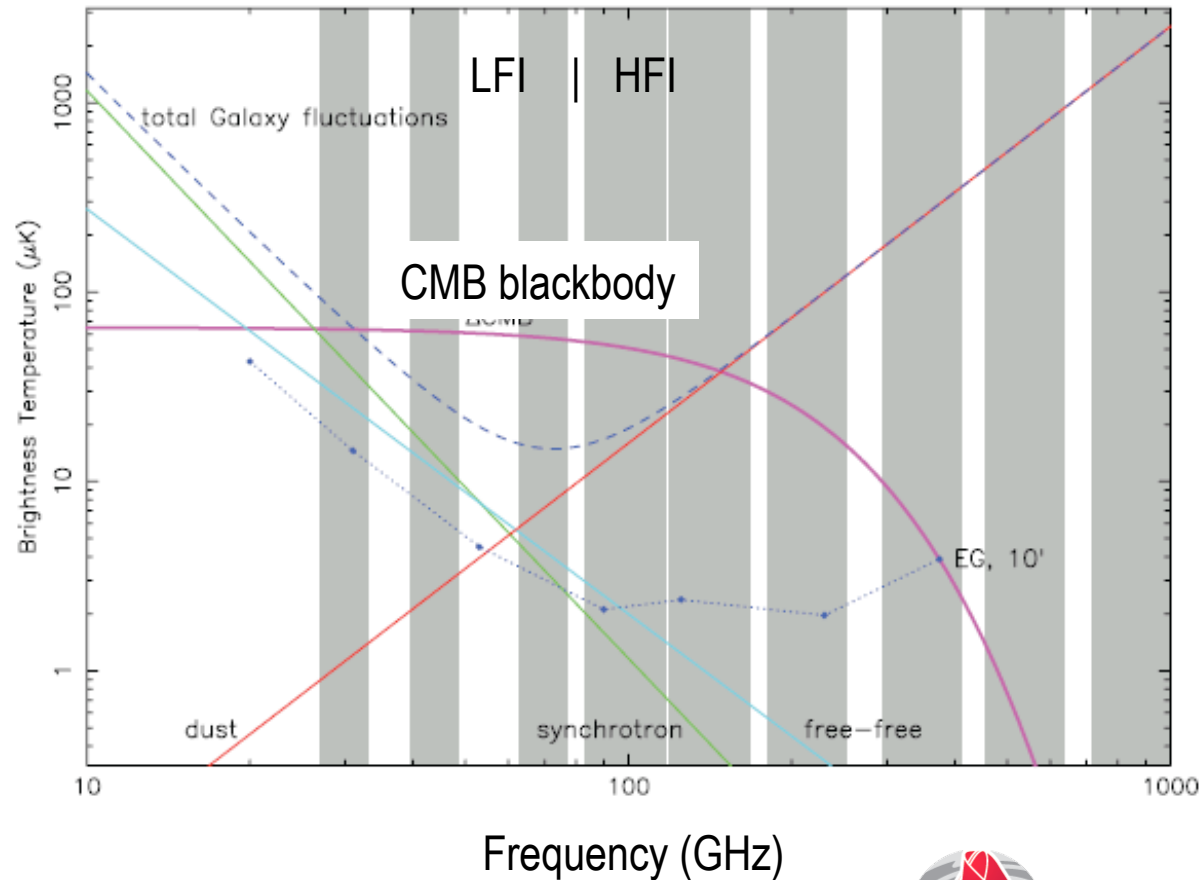
WMAP center freq.	23	33	41	61	94
Angular resolution (FWHM arcmin)	49	37	29	20	12.6
Sensitivity in I [$\mu\text{K.deg}$], 1 yr (8 yr)	12.6 (4.5)	12.9 (4.6)	13.3 (4.7)	15.6 (5.5)	15.0 (5.3)

Blue book: [http://www.rssd.esa.int/SA/PLANCK/docs/Bluebook-ESA-SCI\(2005\)1_V2.pdf](http://www.rssd.esa.int/SA/PLANCK/docs/Bluebook-ESA-SCI(2005)1_V2.pdf)

The Planck satellite

- Launched by ESA and placed in L2 orbit in 2009. Full scan every 6 month.
- 75 detectors cover 9 frequency channels

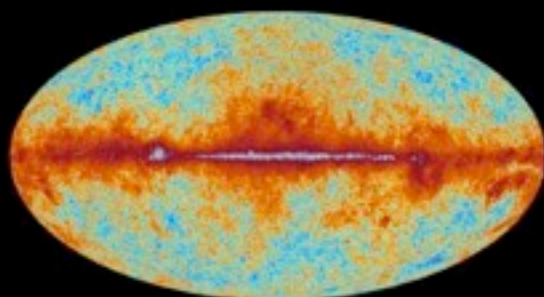
detectors:



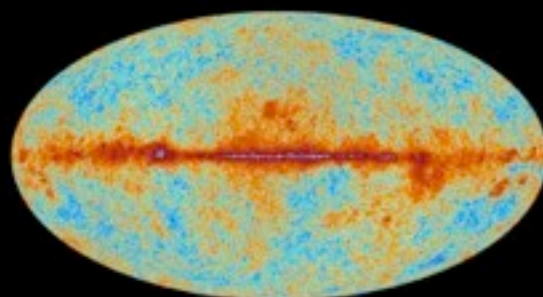


planck

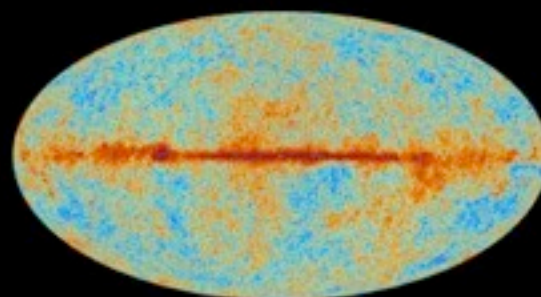
The sky as seen by Planck



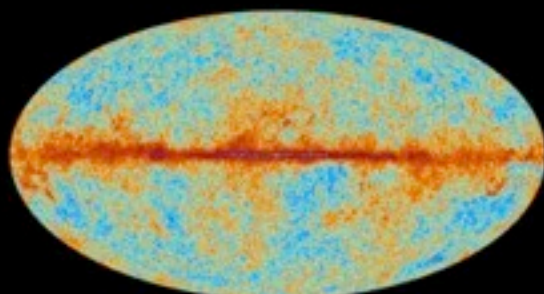
30 GHz



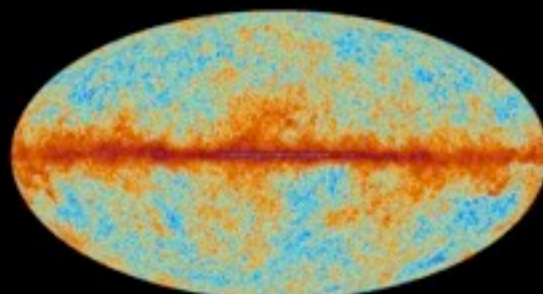
44 GHz



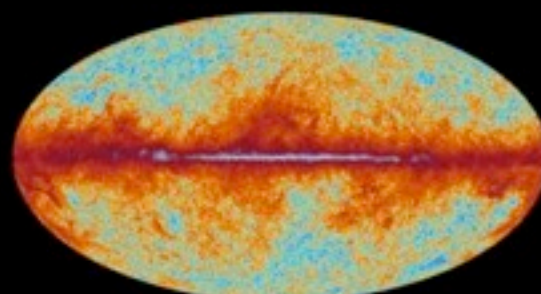
70 GHz



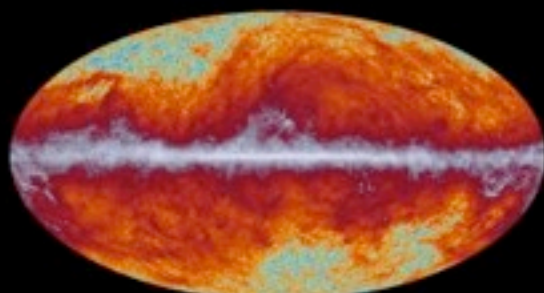
100 GHz



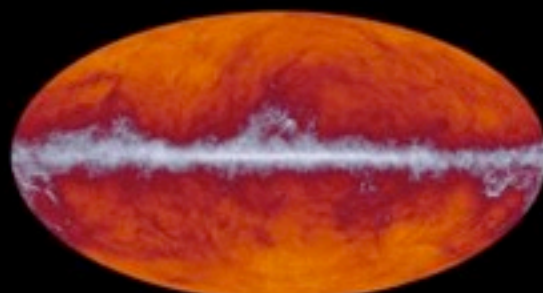
143 GHz



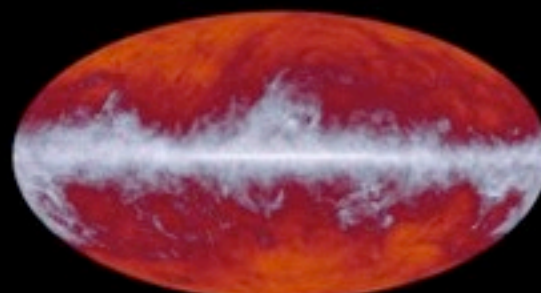
217 GHz



353 GHz

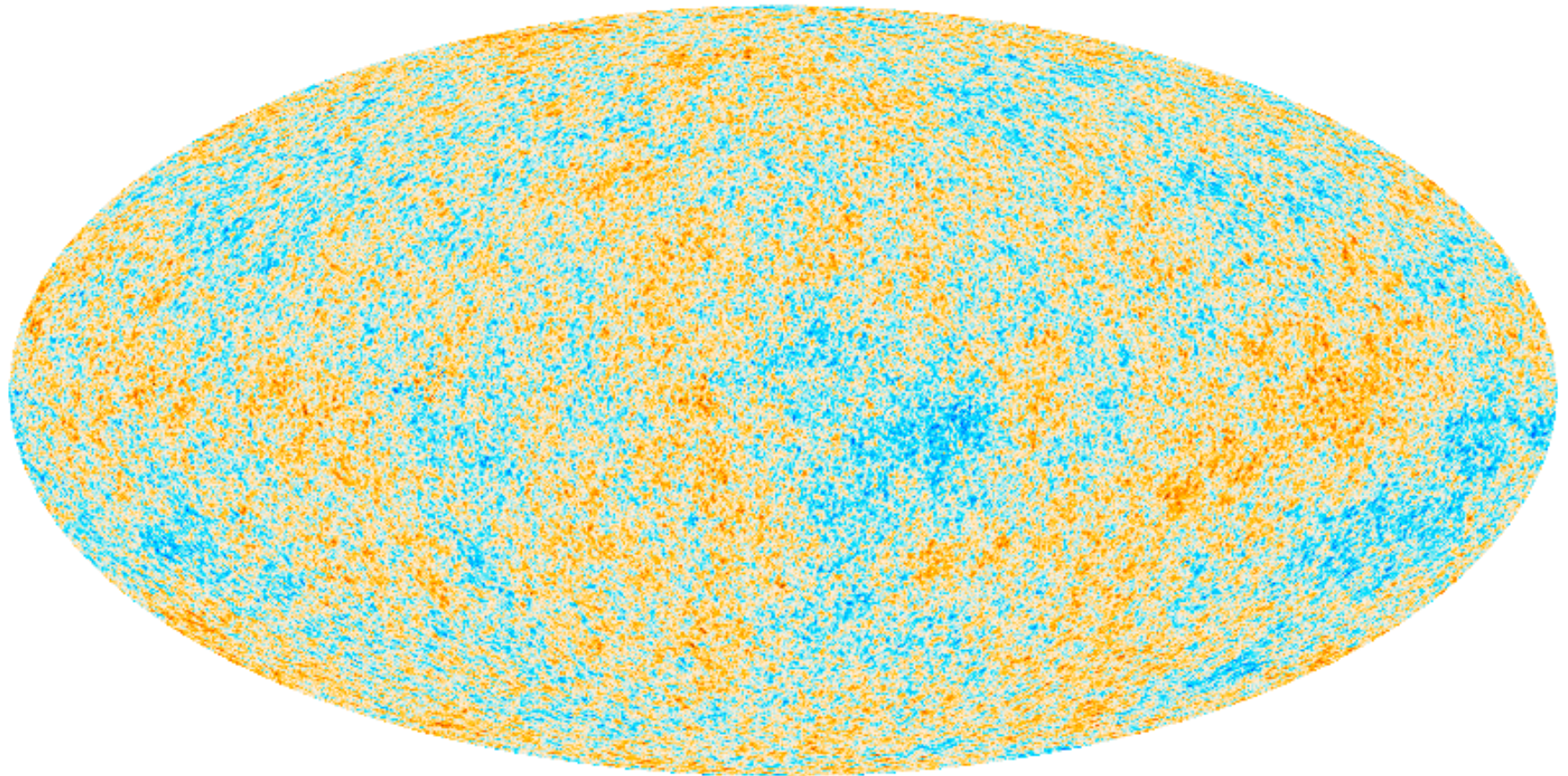


545 GHz



857 GHz

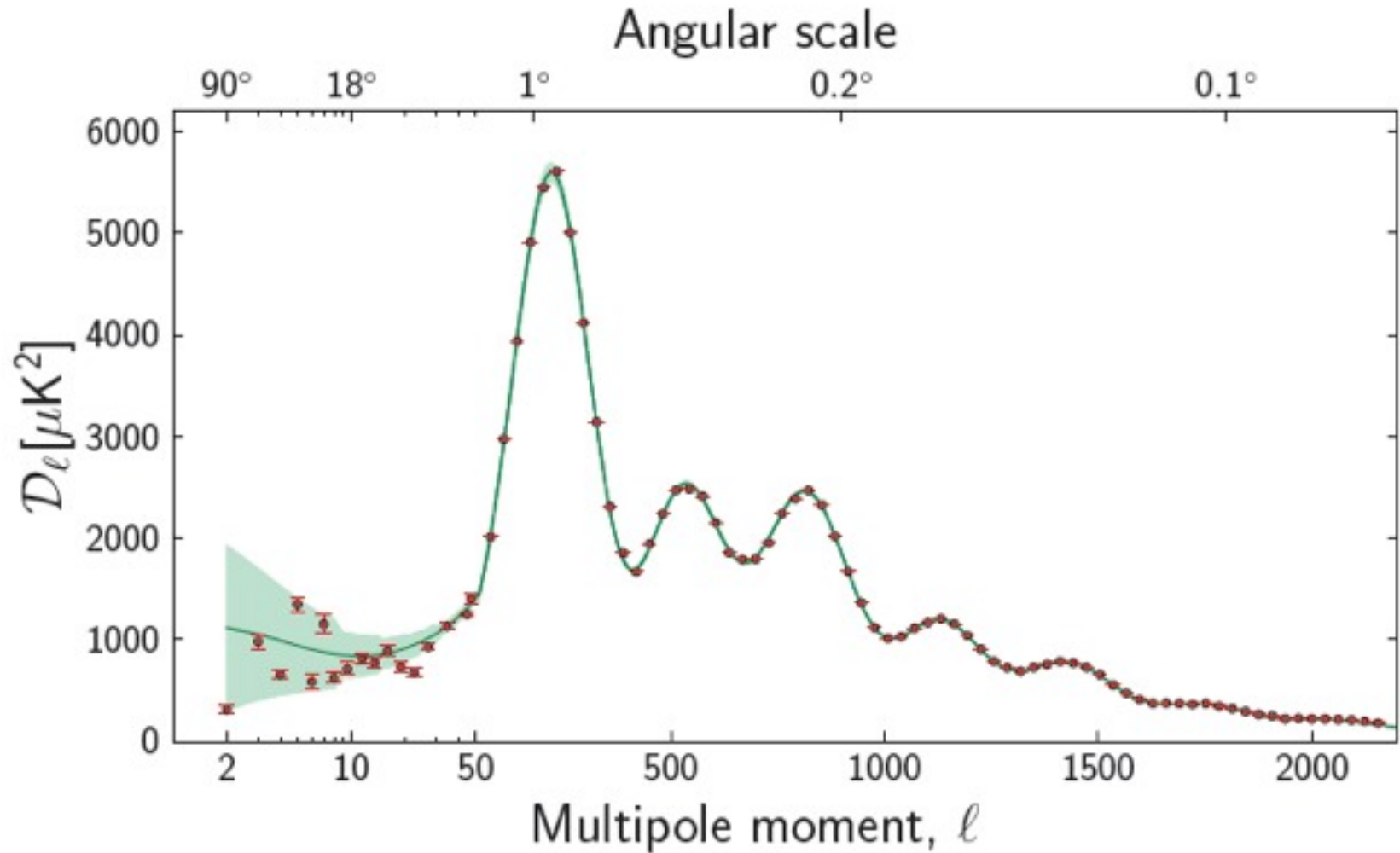
From time-ordered data to maps



-500  500 μK_{CMB}

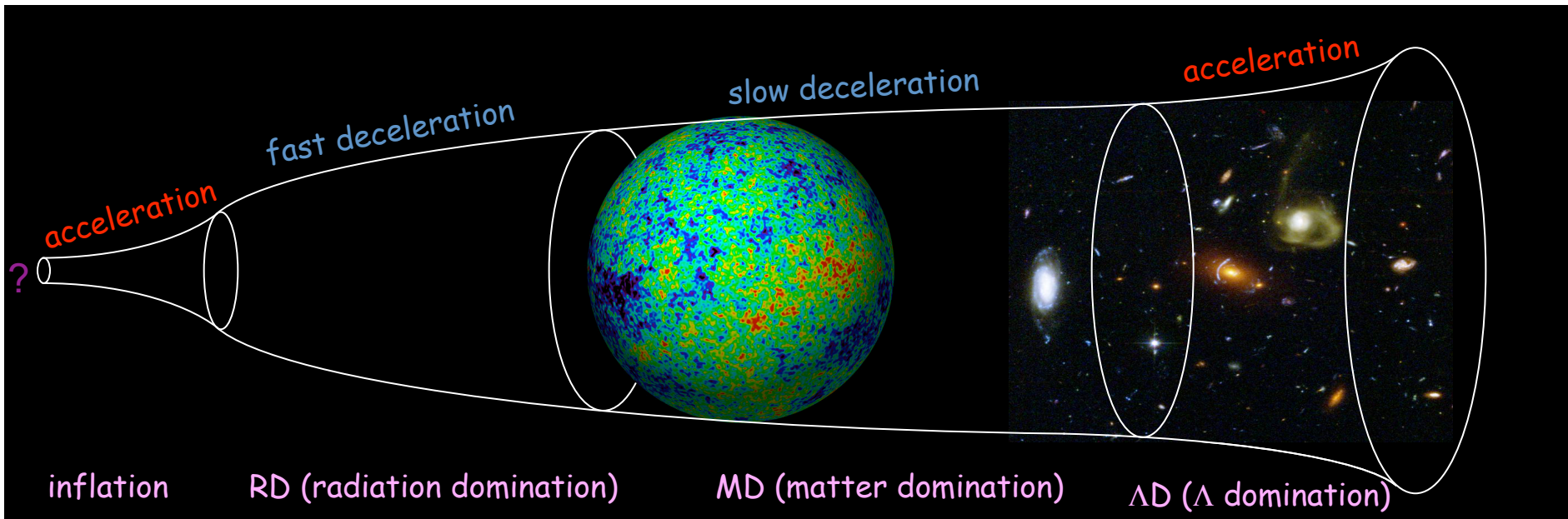
Combined CMB map

Planck 2013 TT angular spectrum



Fitting the minimal model

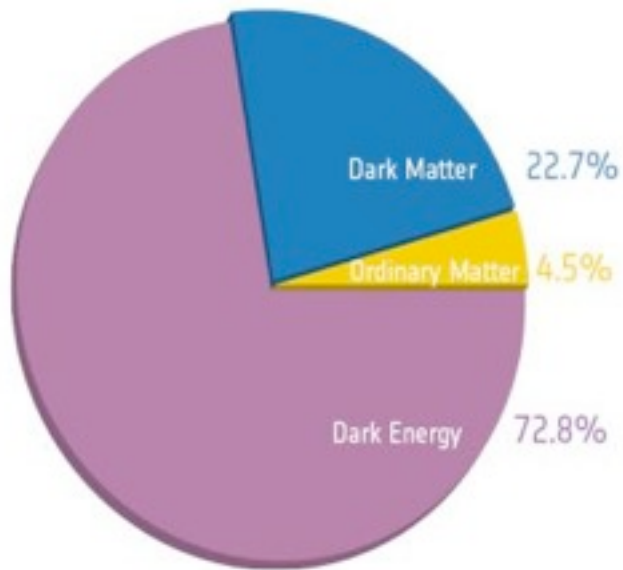
- Minimal Λ CDM model relies on assumption of flat, homogeneous universe with **5 components** (photons, baryons, CDM, neutrinos, Λ) and **4 stages** :



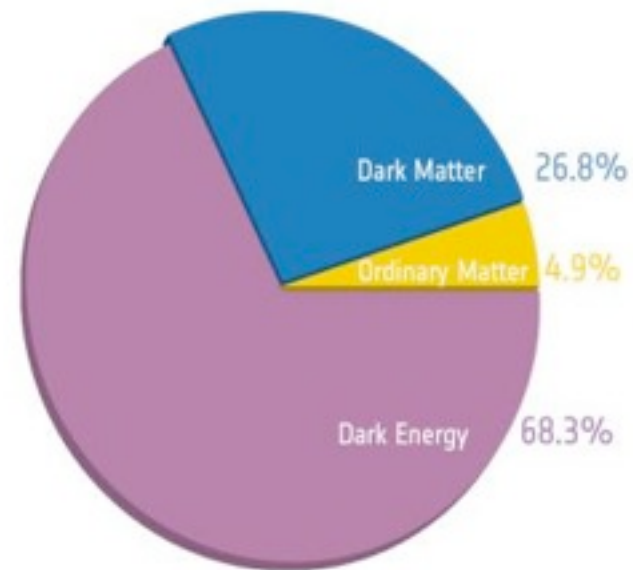
- 6 free parameters** (abundance of **baryons**, **CDM**, **Λ** ; **amplitude** and **spectral index** of primordial fluctuations ; epoch of **reionisation** due to star formation)

Parameter	<i>Planck</i> (CMB+lensing)		<i>Planck</i> +WP+highL+BAO	
	Best fit	68 % limits	Best fit	68 % limits
$\Omega_b h^2$	0.022242	0.02217 ± 0.00033	0.022161	0.02214 ± 0.00024
$\Omega_c h^2$	0.11805	0.1186 ± 0.0031	0.11889	0.1187 ± 0.0017
$100\theta_{MC}$	1.04150	1.04141 ± 0.00067	1.04148	1.04147 ± 0.00056
τ	0.0949	0.089 ± 0.032	0.0952	0.092 ± 0.013
n_s	0.9675	0.9635 ± 0.0094	0.9611	0.9608 ± 0.0054
$\ln(10^{10} A_s)$	3.098	3.085 ± 0.057	3.0973	3.091 ± 0.025
Ω_Λ	0.6964	0.693 ± 0.019	0.6914	0.692 ± 0.010
σ_8	0.8285	0.823 ± 0.018	0.8288	0.826 ± 0.012
z_{re}	11.45	$10.8_{-2.5}^{+3.1}$	11.52	11.3 ± 1.1
H_0	68.14	67.9 ± 1.5	67.77	67.80 ± 0.77
Age/Gyr	13.784	13.796 ± 0.058	13.7965	13.798 ± 0.037
$100\theta_*$	1.04164	1.04156 ± 0.00066	1.04163	1.04162 ± 0.00056
r_{drag}	147.74	147.70 ± 0.63	147.611	147.68 ± 0.45
$r_{drag}/D_V(0.57)$	0.07207	0.0719 ± 0.0011		

The basic content of the Universe



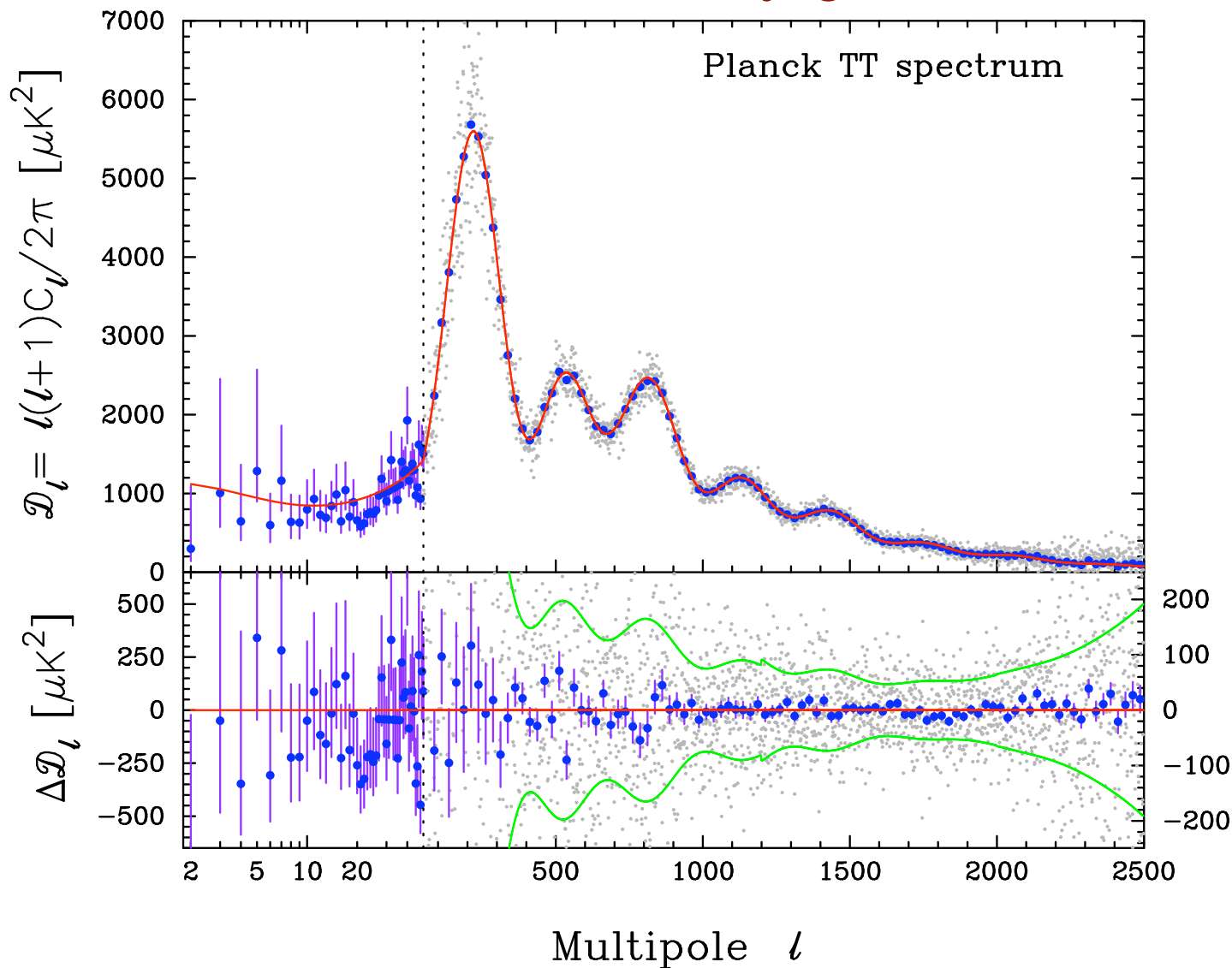
Before Planck



After Planck

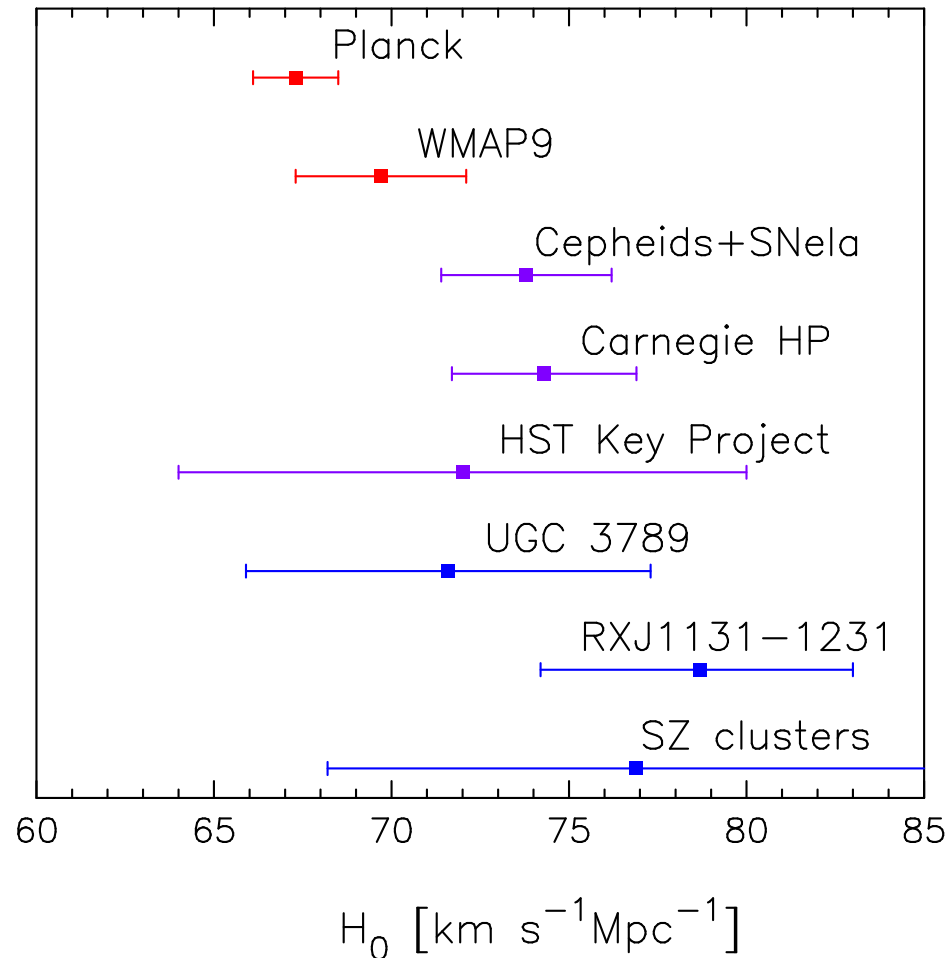
...has changed!

Λ CDM is a very good fit



Comparison with other datasets: Hubble Constant

The value of the Hubble constant from Planck is in tension with the Riess et al. 2011 result.



$$\text{Planck + WP} \quad H_0 = 67.3^{+1.2}_{-1.1} \text{ [km/s/Mpc]}$$

$$\text{HST (Riess et al.)} \quad H_0 = 73.8^{+2.4}_{-2.4} \text{ [km/s/Mpc]}$$

Planck best-fit vs. other observations

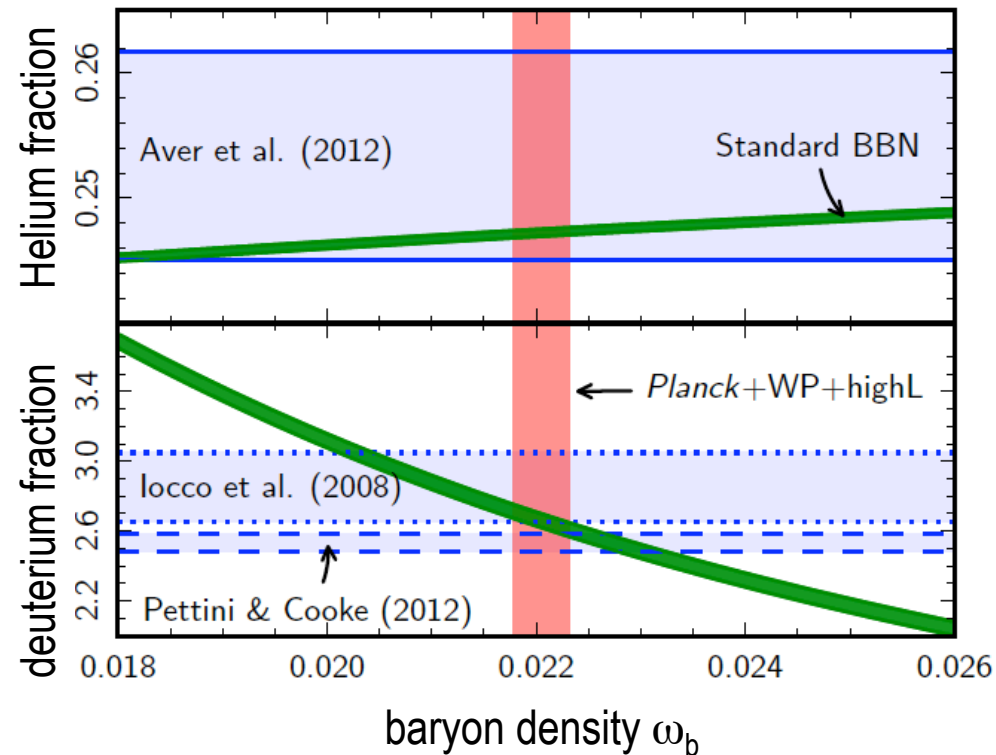
Using Planck + WP, at 1-sigma:

- Peak scale 0.060%
- Baryon density 1.3%
- CDM density 2.3%
- Primordial amplitude 2.5%
- Primordial spectral index 0.76%
- Reionization optical depth 0.13%

Derived (model-dependent) parameters:

- Hubble parameter
- Λ fractional density

consistency with theory of Nucleosynthesis
and measurement of primordial D, He



Planck best-fit vs. other observations

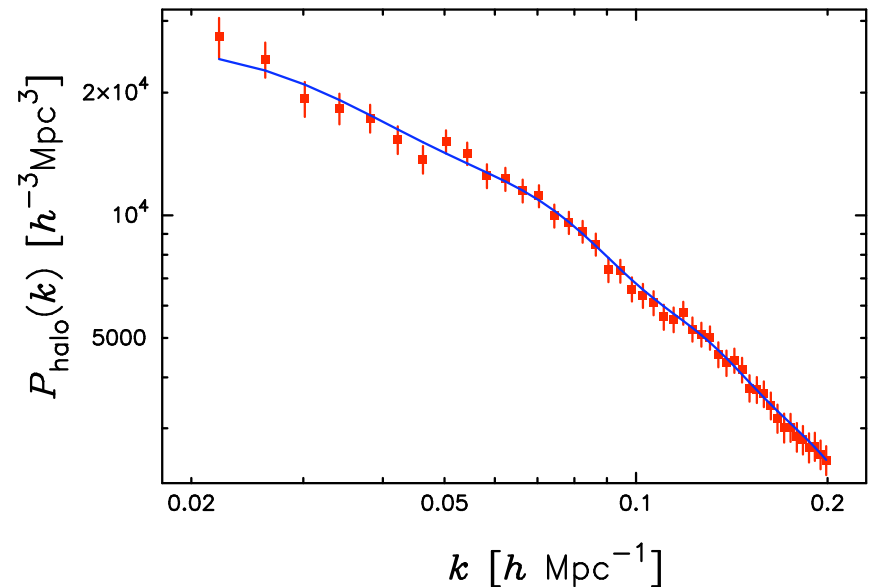
Using Planck + WP, at 1-sigma:

- Peak scale 0.060%
- Baryon density 1.3%
- CDM density 2.3%
- Primordial amplitude 2.5%
- Primordial spectral index 0.76%
- Reionization optical depth 0.13%

Derived (model-dependent) parameters:

- Hubble parameter
- Λ fractional density

consistency with
galaxy 2-pt correlation



Planck best-fit vs. other observations

Using Planck + WP, at 1-sigma:

- Peak scale 0.060%
- Baryon density 1.3%
- CDM density 2.3%
- Primordial amplitude 2.5%
- Primordial spectral index 0.76%
- Reionization optical depth 0.13%

Derived (model-dependent) parameters:

- Hubble parameter
- Λ fractional density

consistency with
preliminary (raw) polarization spectrum

