

VII. Elementy Kosmologii a Fizyka Oddziaływań Elementarnych

Kosmologiczny paradygmat (M. Rees, 1997)

The Universe is expanding from a hot big bang in which the light elements were synthesized.

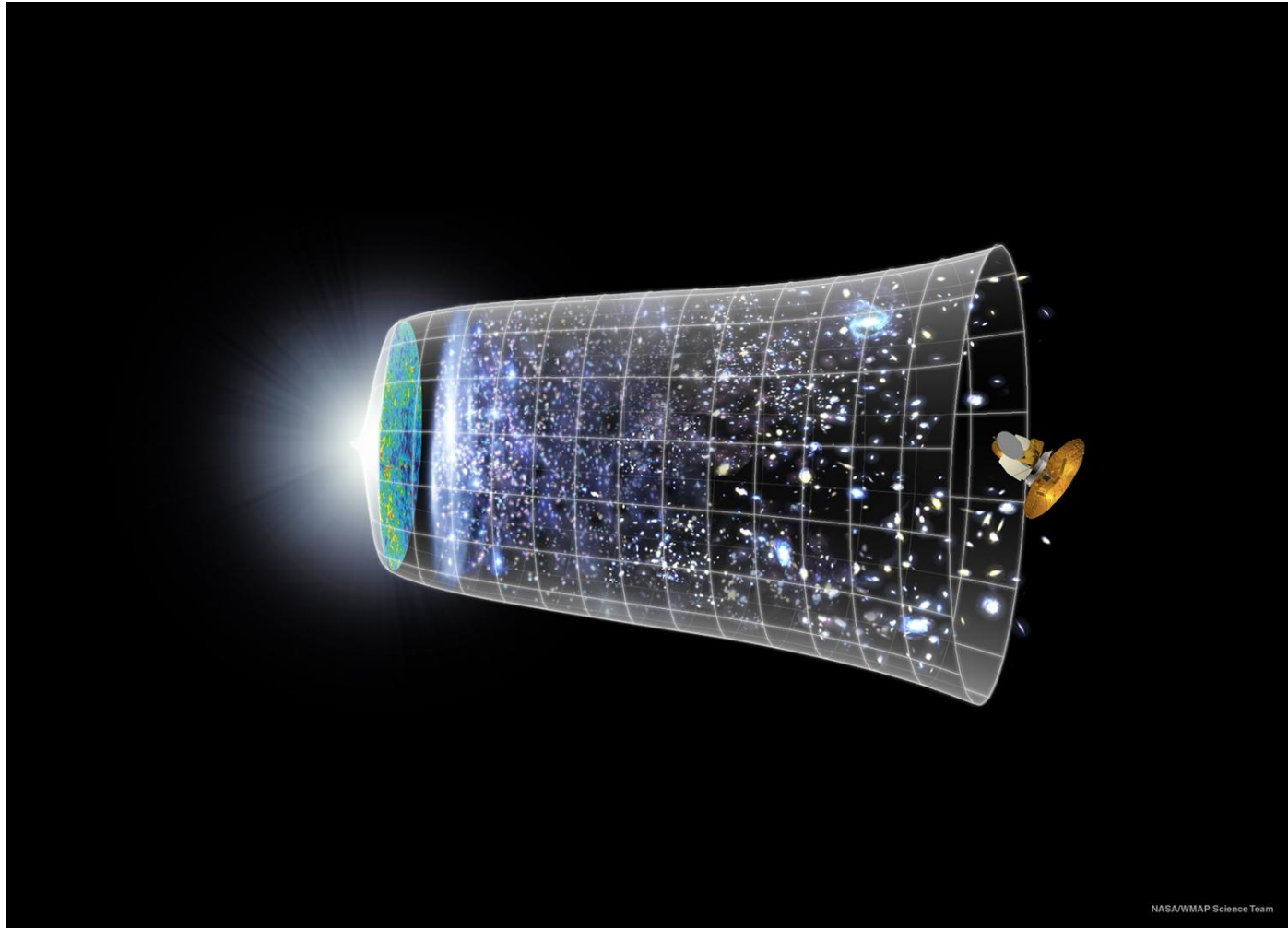
There was a period of inflation which led to a ``flat'' universe today.

Structure was seeded by gaussian irregularities which are the relics of quantum fluctuations and is dominated by cold dark matter.

Epoki w historii Wielkiego Wybuchu

Epoka	t_{lower}	t_{upper}	Wydarzenia
Augustyńska		0	?
Plancka		10^{-43}	? ; Kwantowa grawitacja
GUT	10^{-43}	10^{-36}	Grawitacja oddziela się od GUT
Elektrosłaba	10^{-36}	10^{-12}	E-w oddziela się od QCD; inflacja, reheating; BBN; łamanie SUSY
Kwarkowa	10^{-12}	10^{-6}	SSB; masy fermionów
Hadronowa	10^{-6}	10^0	Oddzielają się BB neutrina
Leptonowa	1	3 min	Anihilacja (anty)materii, nie ma nowych par $l^+ l^-$
Fotonowa	3min	380 000 lat	Zdominowana przez fotony: $<70\ 000$, nukleosynteza: $3\text{min} < t < 20\ \text{min}$, recombinacja= $380\ 000$

$a(t)$



NASA/WMAP Science Team

Plan Cz. VII

- **Modele Wszechświata Friedmana-Robertsona-Walkera**
- **Dane doświadczalne:**
 - CMB (WMAP)
 - SN II / Lyman Forest
 - Krzywe rotacyjne
 - Nukleosynteza
- **Tworzenie struktur we Wszechświecie**
- **Nukleosynteza w Wielkim Wybuchu**
- **Ciemna Materia i Ciemna Energia**
- **Łamanie CP i zniknięcie Antymaterii**

VII.1 Modele Wszechświata Friedmana-Robertsona-Walkera

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

$$k = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ +1 \end{pmatrix}; \quad k = a_0^2 H_0^2 (\Omega_0 - 1)$$

$$H = \frac{\dot{a}}{a}$$

Ekspansja Hubbla

$$\frac{a(t_{\text{emisji}})}{a(t_0)} = \frac{1}{z + 1}$$

$$t(z) = \frac{1}{H_0 (z + 1)^{3/2}}$$

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

Precyzja $\Delta T = 10^{-6} \text{K}$; $\Delta \text{kąta} = 0.2^\circ$

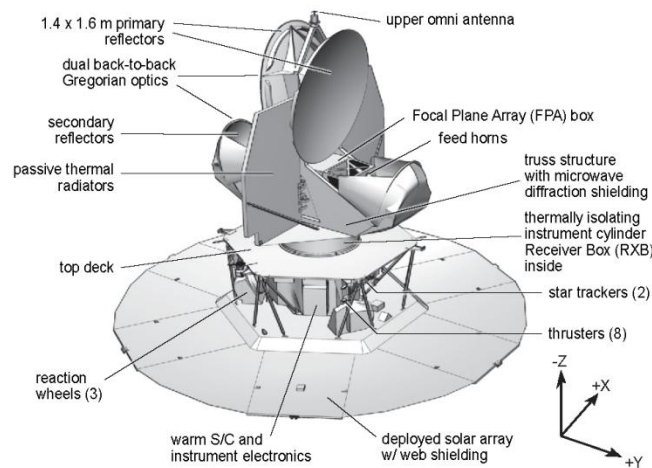
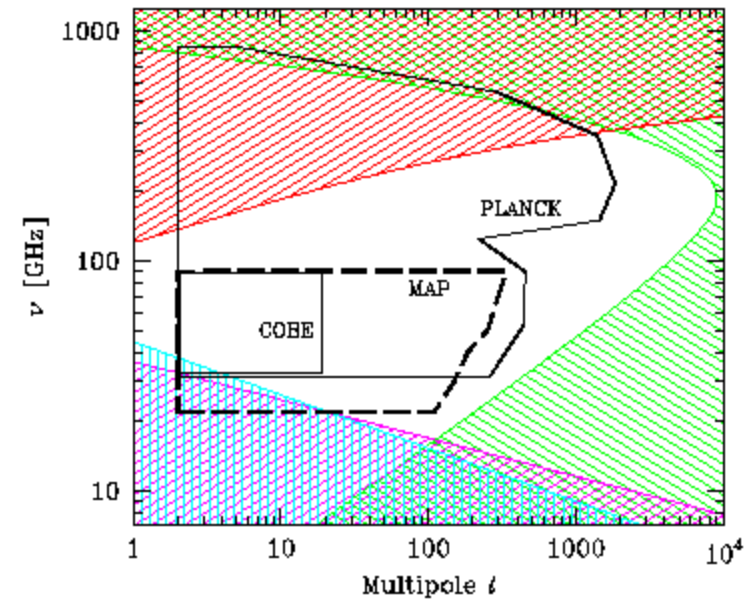
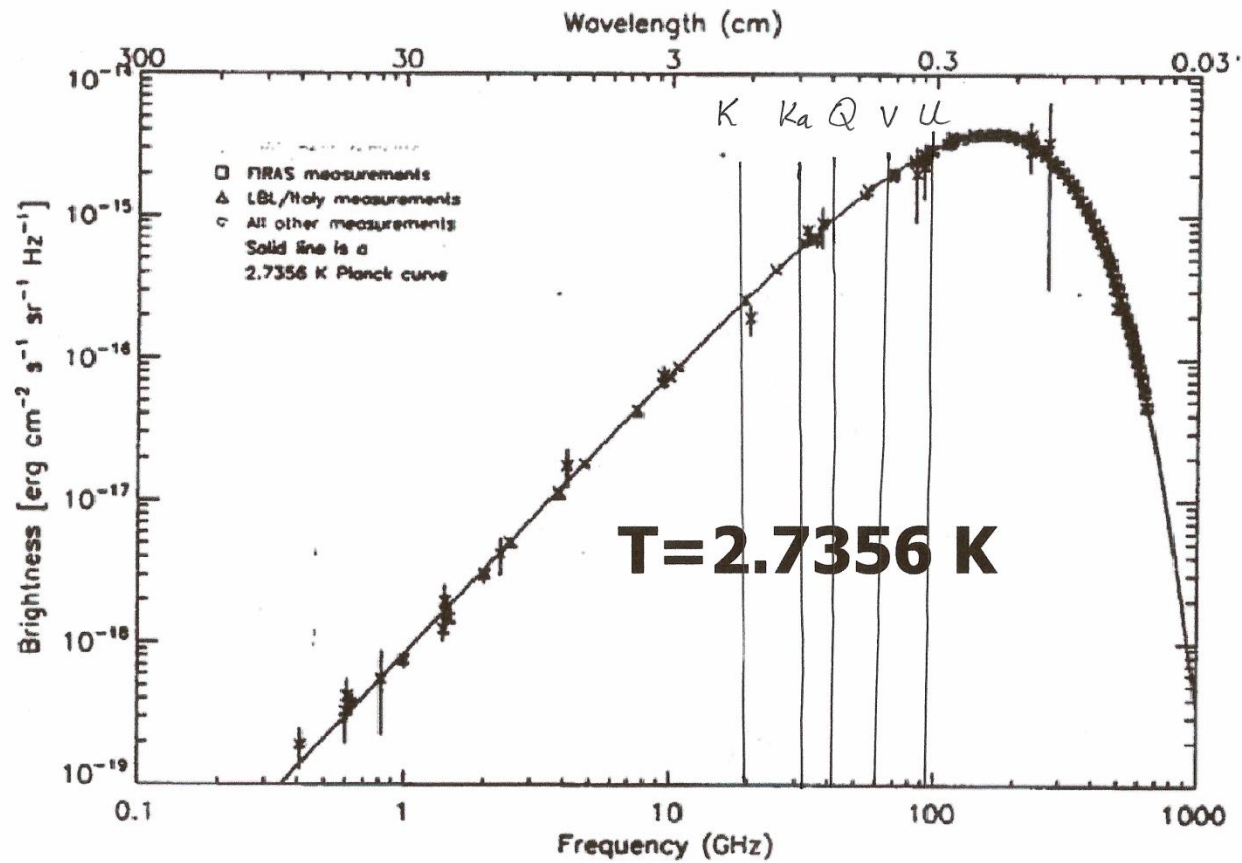


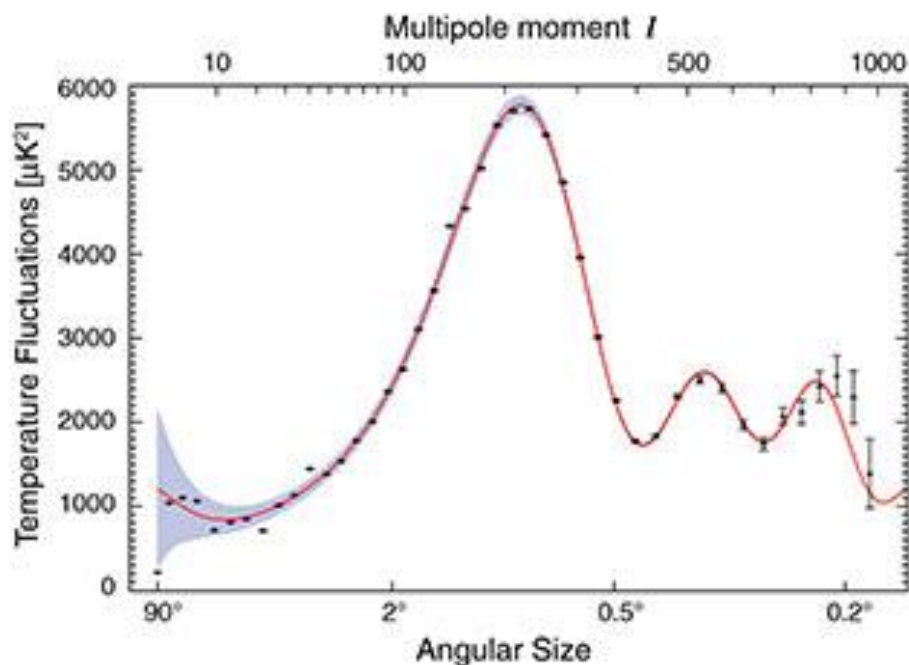
Figure 1.1: Spacecraft Overview. View of the spacecraft in the deployed configuration with major components labeled. The primary and secondary reflectors as well as the two thermal radiators are clearly visible in the upper portion of the image. The cold and warm section of the radiometers are housed in the FPA and RXB respectively and are located in the core of the spacecraft under the primary reflectors. All the support electronics (AEU, DEU, PDU, MAC, LMAC), gyros, star-trackers, and reaction wheels are mounted on the hexagonal hub at the base of the spacecraft. While at L2, the optics, instrument and support electronics are constantly in the shade of the solar array and never exposed to solar radiation.



Pasma K, Ka, Q, V, U WMAP



Różnice temperatur WMAP



$$\frac{\Delta T(\theta, \phi)}{T} = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

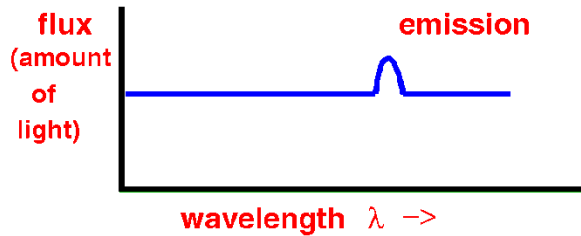
$$\ell \approx \frac{100^\circ}{\theta}$$

$$C_l = \langle |a_{lm}|^2 \rangle$$

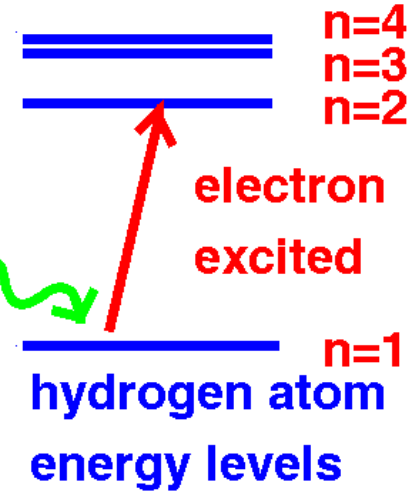
- The angle subtends a length on the surface of last scattering that would now, by the Hubble expansion of the universe, be about 200Mpc per degree (1Mpc is approximately 3 million light-years). Therefore, the corresponding multipole is determined by density fluctuations on that wavelength scale. For example, the density fluctuations of wavelength around 2Mpc, which seed galaxies, subtend an angle of around an arcminute; those of 20Mpc that seed clusters of galaxies subtend about 10 arcminutes; and those of around 200Mpc that seed the largest structures seen today subtend about 1 degree. (All of these distances were a thousand times smaller at the time of last scattering, when the linear size of the universe was a thousand times smaller. But it is conventional to quote "comoving separations" as they would be now.)

Widma Lymana

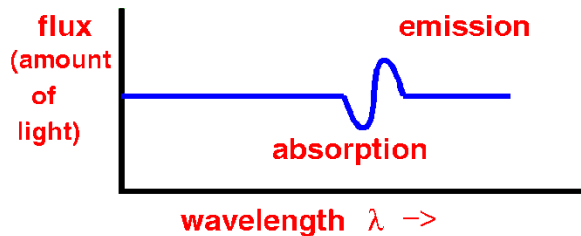
No absorbing clouds



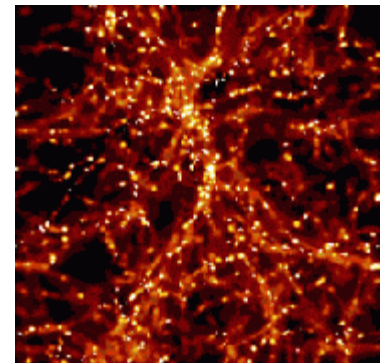
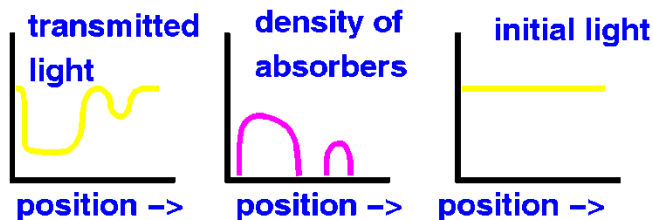
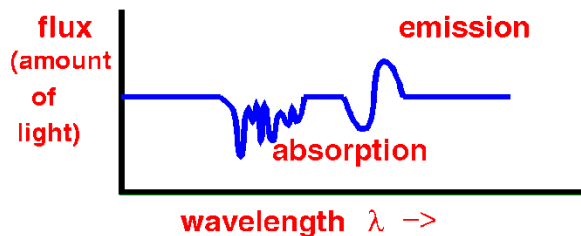
$$\lambda(z) = \lambda_{\text{emitted}} (z + 1); z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$



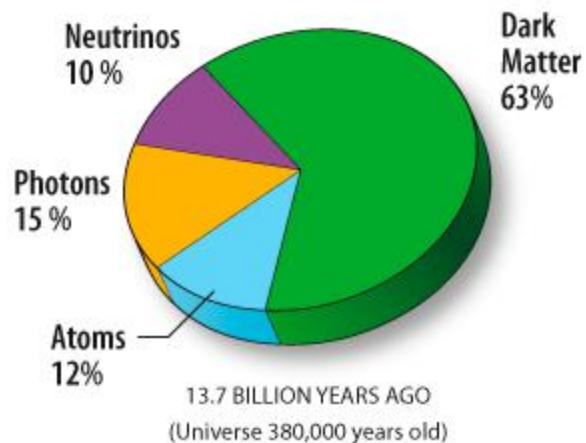
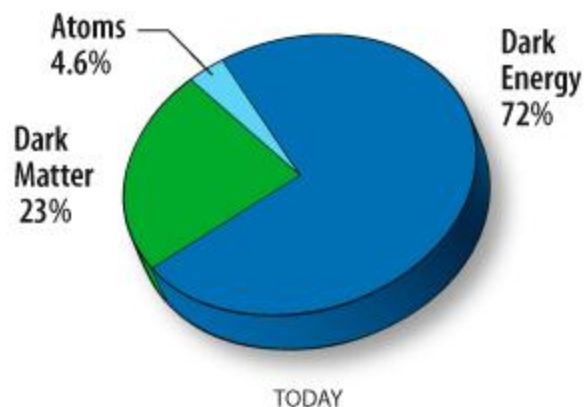
One absorbing cloud close by



Several absorbing clouds



Dane z WMAP, SNIa i dopasowania modelowe



Koniec rekombinacji i obecnie

Ciemna materia i ciemna energia

Fluktuacje CMB → całkowita gęstość energii = gęstości krytycznej ε_{cr} . Gęstość barionowa stanowi zaledwie 0.046 gęstości krytycznej. Istnieje niebarionowa składowa - **ciemna materia DM** (0.23 gęstości krytycznej). Ciśnienie DM jest zerowe. DM wydaje się zbierać w skupiska (niestabilność grawitacyjna).

Pozostała część energii to **ciemna energia DE**, która wywiera ujemne ciśnienie. Może to być albo stała kosmologiczna ($p_{\Lambda} = -\varepsilon_{\Lambda}$) albo jakieś pola skalarne (kwintesencja? moduli?) o $p = w\varepsilon$, $-1 < w < -1/3$.

Gęstości fotonów i neutrin:

Obecnie $\varepsilon_{\gamma 0} = 10^{-34} \text{ g/cm}^3$ co stanowi $10^{-5} \varepsilon_{cr}$, $T = 2.73 \text{ K}$.

Dla trzech rodzajów bezmasowych neutrin $T = 1.9 \text{ K}$ i ich obecna gęstość energii = $0.68 \varepsilon_{\gamma 0}$.

Jak było w przeszłości?

Gęstości energii promieniowania, zimnej materii (DM i barionowej) i DE zmieniają się z przesunięciem do czerwieni z jak:

$$\varepsilon_{\gamma} = \varepsilon_{\gamma 0} (1+z)^4$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{cr} \Omega_m (1+z)^3$$

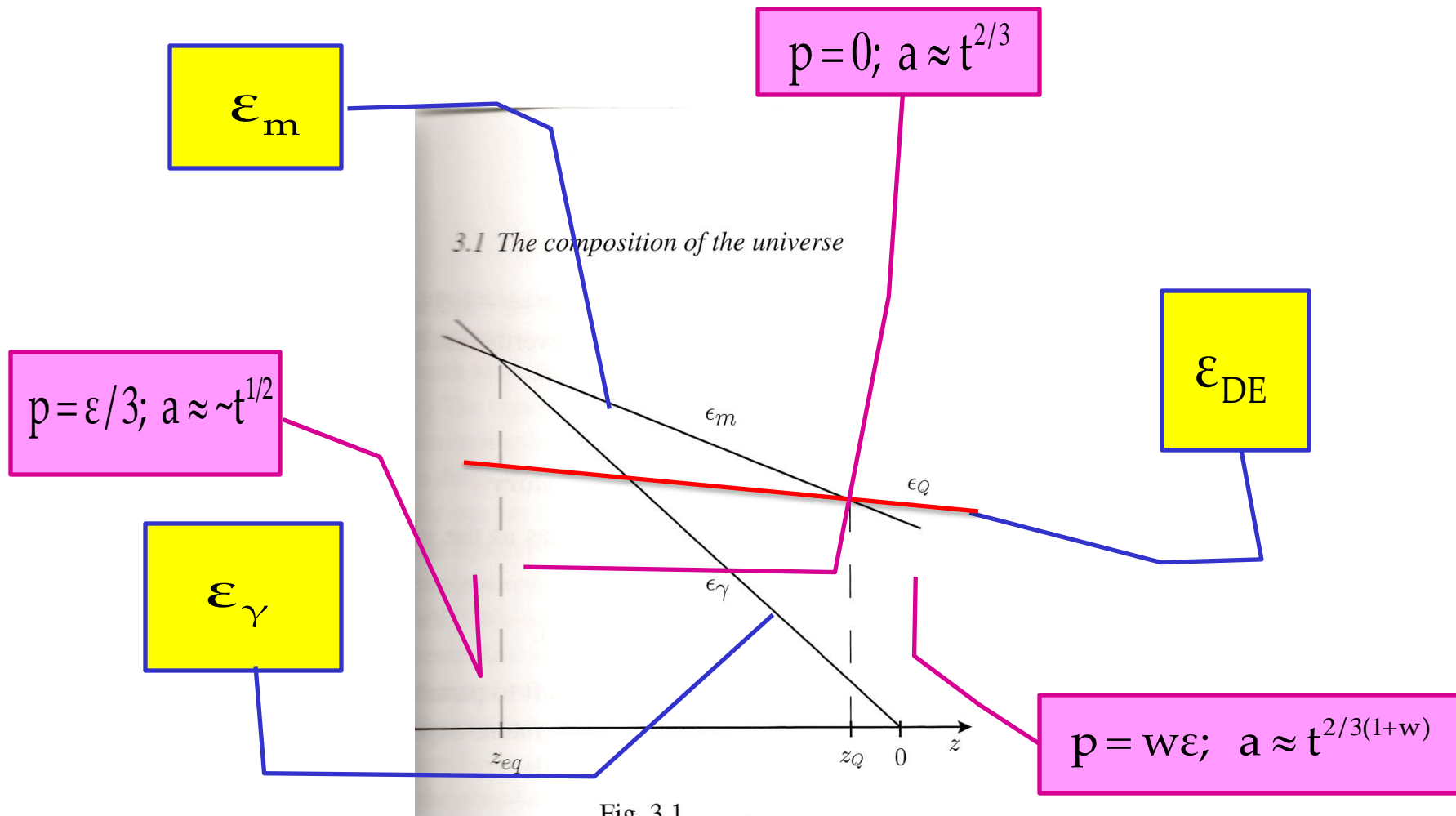
$$\varepsilon_{DE} = \varepsilon_{cr} \Omega_{DE} (1+z)^{3(1+w)} ;$$

$$z_{DE} = \left(\frac{\Omega_{DE}}{\Omega_m} \right)^{-1/3w} - 1$$

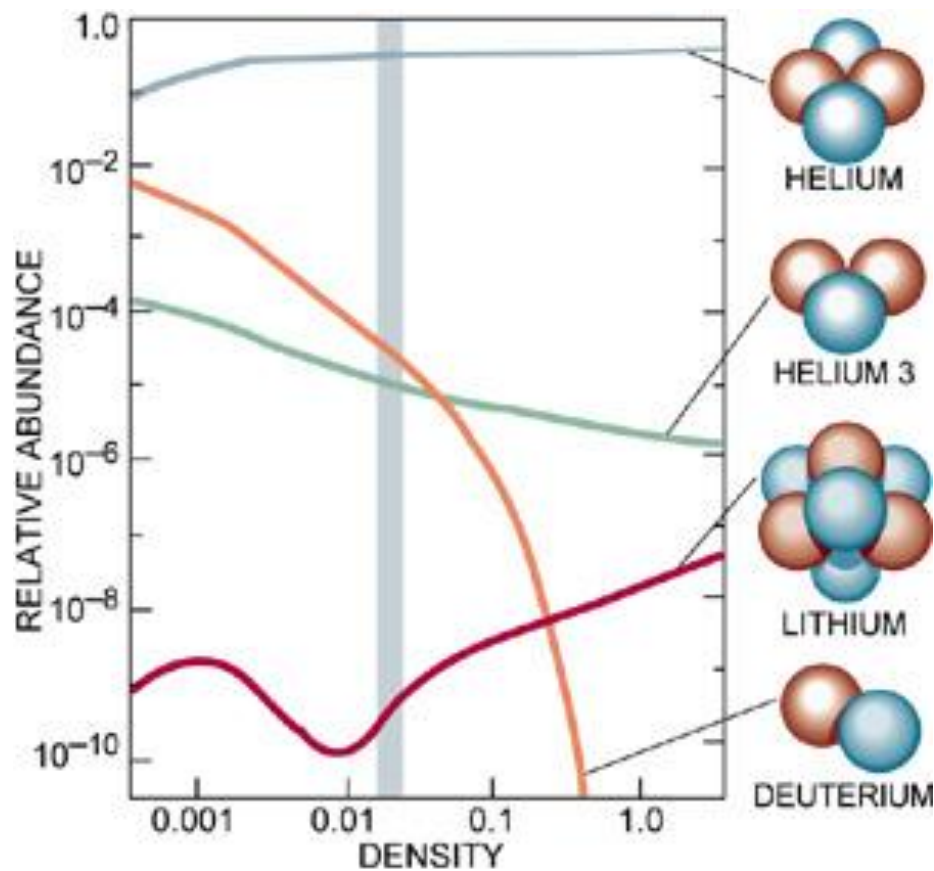
$$z_{eq} = \frac{\varepsilon_{cr 0} \Omega_m}{\varepsilon_{\gamma 0}} - 1$$

gdzie $\varepsilon_{cr} = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$

Zależność składu od z: ery promieniowania, materii i DE



Nukleosynteza w Wielkim Wybuchu



Obliczenia modelowe
porównane z
pomiarami

Pod koniec ery leptonowej, przy $T \leq 10^{10}$ K (ok. 1 MeV), w równowadze znajdują się następujące reakcje oddziaływań słabych:



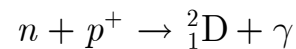
W równowadze, stosunek ilości neutronów i protonów $[\frac{n}{p}]$, określony jest prawem Boltzmann'a:

$$\left[\frac{n}{p} \right] = e^{\frac{-(m_n - m_p)}{kT}}$$

$$\Delta m = m_n - m_p = 1.3 \text{ MeV}$$

W miarę ekspansji temperatura spada, a wraz z nią maleje $[\frac{n}{p}]$ (od ok. 0.6 na pocz. ery leptonowej do ok. 0.2 pod jej koniec).

Przy temperaturach ok. 0.1 MeV równowaga wyżej wymienionych reakcji stopniowo załamuje się, a bardziej prawdopodobny staje się nieodwracalny rozpad beta $n \rightarrow p^+ + e^- + \tilde{\nu}_e$. W okolicy tej temperatury mogą już utrzymać się produkty pierwszej reakcji nukleosyntezy:



Tempo tej reakcji zależy od:

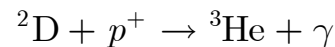
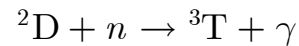
- temperatury (częstotliwość i energia zderzeń),
- stosunku $[\frac{n}{p}]$,
- koncentracji samych barionów, czyli od wielkości $\eta = \frac{n_b}{n_\gamma}$.

Deuter i Hel

Neutron ma więc w tych warunkach dwie możliwości:

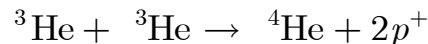
- 1) reakcja z protonem i synteza deuteru,
- 2) spontaniczny rozpad beta.

Przez pierwsze sekundy przybywa nam deuteru. Gdy jego ilość względem wodoru osiągnie $[\frac{D}{H}] \approx 10^{-3}$, prawdopodobne stają się reakcje syntezy nuklidów trójcząstkowych — trytu 3T oraz izotopu helu 3He :



Na skutek tych reakcji ubywa deuteru i jego obfitość stabilizuje się stopniowo na poziomie ok. $[\frac{D}{H}] \approx 5 \cdot 10^{-5}$.

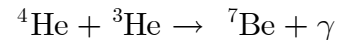
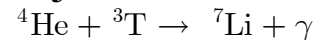
Gdy względna koncentracja 3He osiągnie też ok. $[\frac{{}^3He}{H}] \approx 10^{-5}$, to zaczyna zachodzić kolejna reakcja:



To właśnie w pierwszych kilku minutach nukleosyntezy powstała zasadnicza ilość helu we wszechświecie.

BERYL i LIT

Ponieważ nie ma stabilnych nuklidów o masach atomowych 5 i 8, więc hel jest głównym (po wodorze) pierwiastkiem, który pozostaje po tej epoce. Pewna niewielka jego część zdąży jeszcze wejść w reakcje:

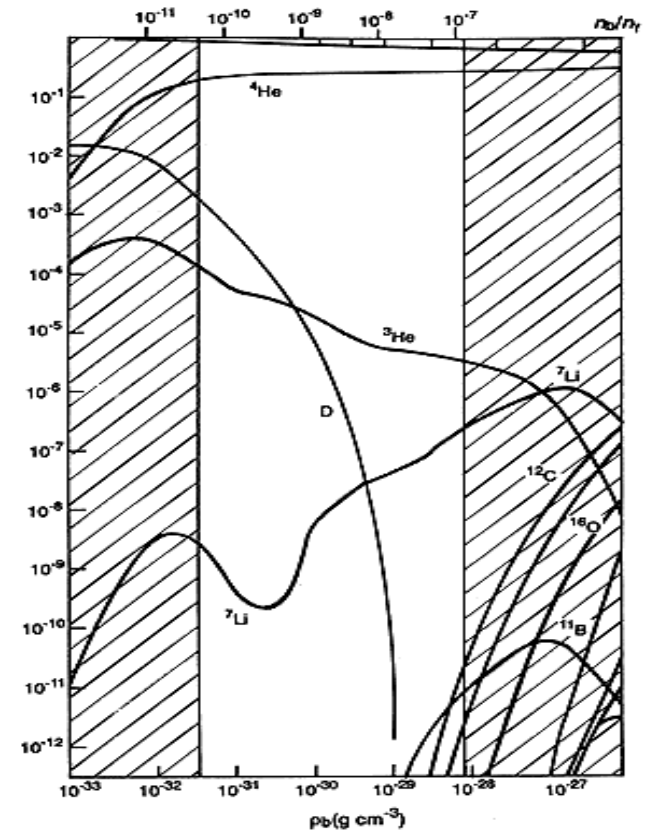
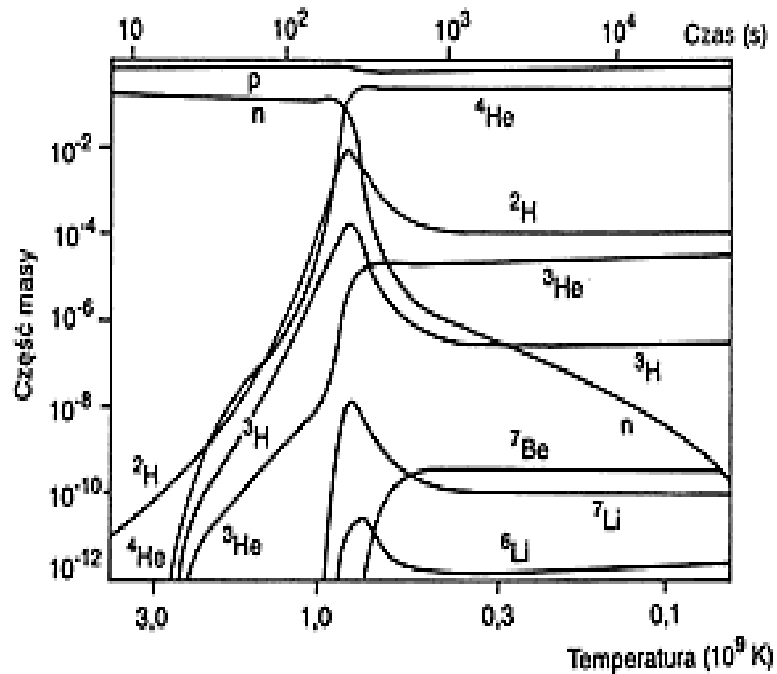


Ewentualna reakcja: ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Be} + \gamma$ daje całkowicie nietrwały izotop berylu, mający okres połowicznego rozpadu ok. 0.8 s.

Dla kolejnych reakcji, jak np. cykl ${}^3\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$, jest już „za zimno”. Przez te kilkaset sekund trwania nukleosyntezy, Wszechświat rozszerzając się ostygł do $T < 10^8$ K i jego gęstość też znacznie spadła. Po dalszych kilku tysiącach sekund radioaktywny tryt stopniowo rozpada się na ${}^3\text{He}$, zaś ${}^7\text{Be}$ przez wychwyt elektronu przekształca się w ${}^7\text{Li}$.

Pierwotna nukleosynteza na tym się kończy. Na resztę pierwiastków trzeba poczekać aż wyprodukują je gwiazdy. Jednak **zasadnicza obfitość helu we Wszechświecie w ilości** $[\frac{{}^4\text{He}}{\text{H}}] \approx 0.1$ **ustaliła się wówczas.** Późniejsza ewolucja gwiazd już jej radykalnie nie zmieniła.

Obfitość jako funkcja czasu i gęstości



Obfitość helu jako funkcja liczby generacji neutrin

Był to ważny test
modelu
standardowego przed
pomiarami rozpadów
 Z^0

