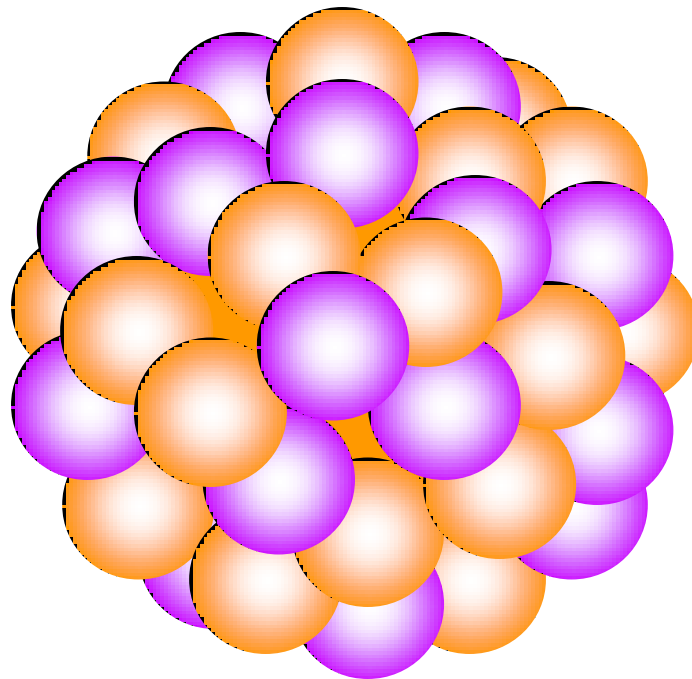


Fizyka jądrowa i cząstek elementarnych

Wykład 11 – Początki Wszechświata



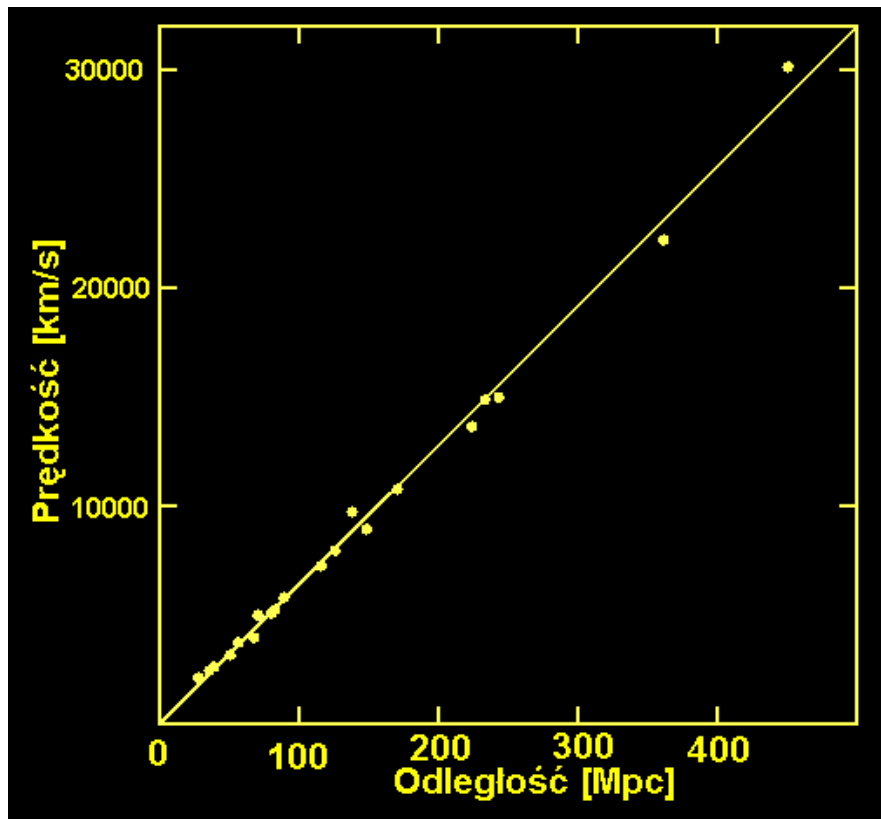
Początki Wszechświata

COSMOLOGY MARCHES ON



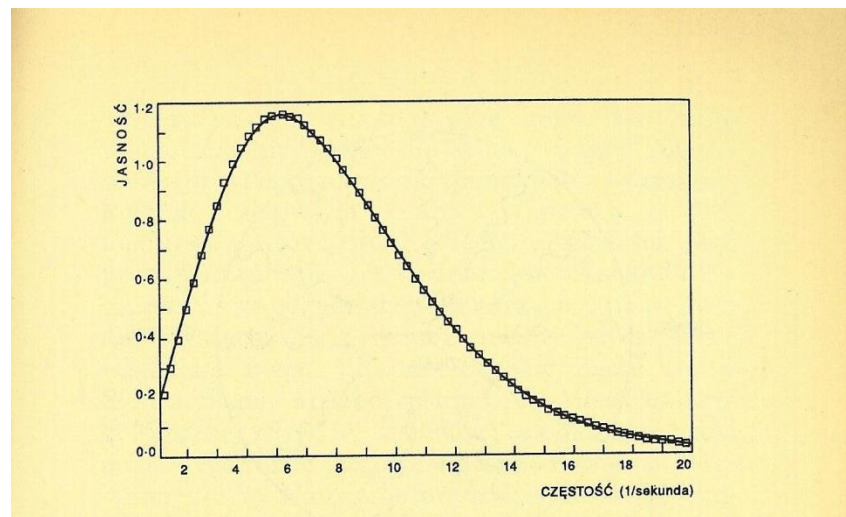
Dane obserwacyjne

Odkrycie Hubble'a w 1929 r.



$$v = H \cdot r$$

Promieniowanie tła w 1964 r.
(Arno Penzias i Robert Wilson).



Skład Wszechświata: jakie
cząstki i w jakim stosunku
ilościowym tworzą Wszechświat.

Podstawy teoretyczne

Ogólna teoria względności (1917)

Równanie Friedmana opisujące globalną ewolucję Wszechświata

$$H^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{R^2}$$

H - stała Hubble'a ($v = H \cdot R$)

G – stała grawitacji

ρ - gęstość materii Wszechświata

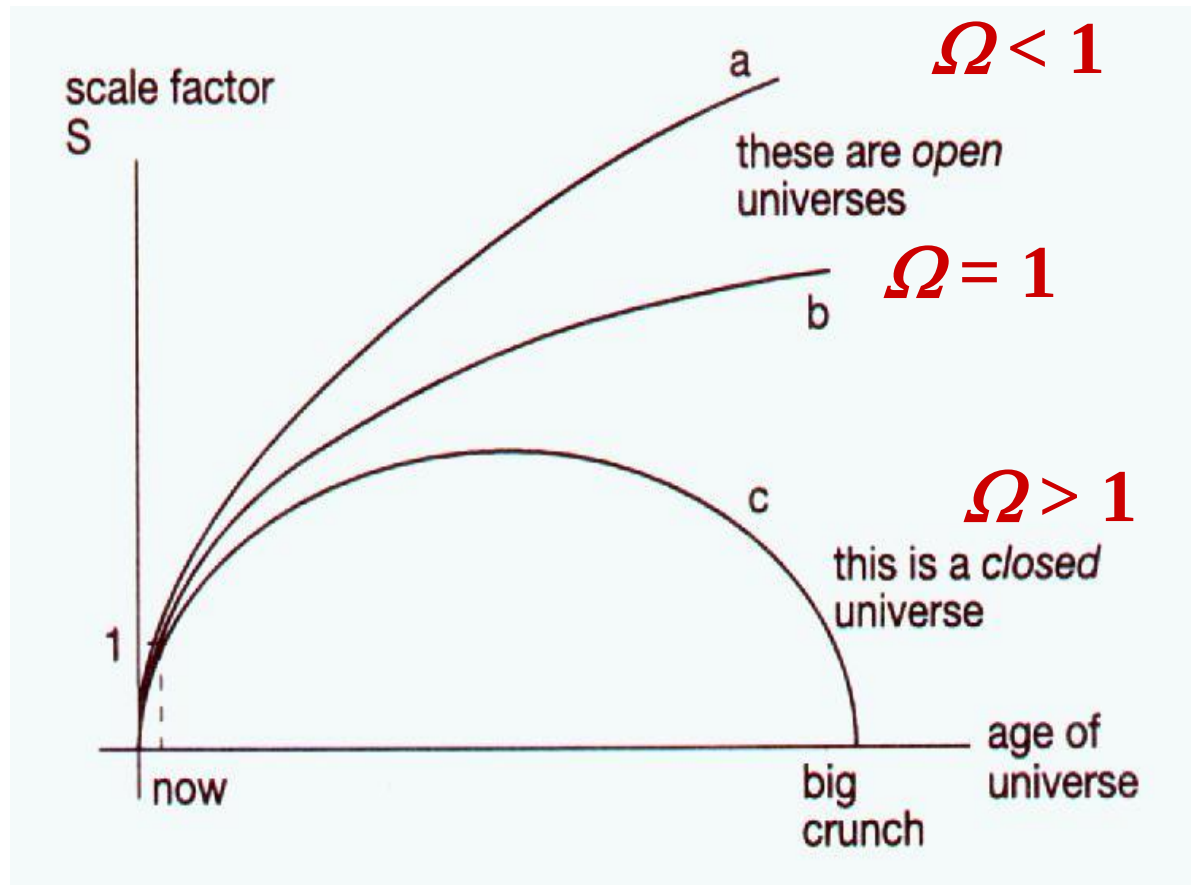
c – prędkość światła

k – zakrzywienie przestrzeni

R – czynnik skali – mierzy średnie oddalenie dwóch punktów
(np. gromad galaktyk)

$$\Omega = \rho / \rho_k$$

Ten parametr wyznacza przyszłość
Wszechświata



W miarę rozszerzania się Wszechświata maleje zarówno gęstość rzeczywista, jak i krytyczna. Stosunek tych gęstości Ω jest stały.

Jeśli wyznaczymy Ω , odkryjemy przyszłość Wszechświata

Einstein dodał do równania stałą kosmologiczną Λ , aby „ratować” płaski i statyczny Wszechświat.

$$H^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{R^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

Λ - reprezentuje siłę odpychającą, równoważącą przyciąganie grawitacyjne – dzięki niej pojawia się rozwiązanie równania opisujące statyczny Wszechświat.

W 1922 r. Aleksander Friedman znalazł wszystkie rozwiązania równania i wykazał, że nawet dodanie stałej kosmologicznej nie zapewni stałości Wszechświata.

Einstein nazwał dodanie stałej kosmologicznej swoją największą pomyłką, jednak obecnie wcale nie jest oczywiste, że wynosi ona zero!

Era Plancka

10^{-44} s

Temperatura 10^{32} K

Aby opisać Wszechświat w erze Plancka, trzeba połączyć teorię grawitacji z mechaniką kwantową.

Długość Plancka:

$$l_p = 1,66 \cdot 10^{-33} \text{ cm}$$

Próby skwantowania grawitacji

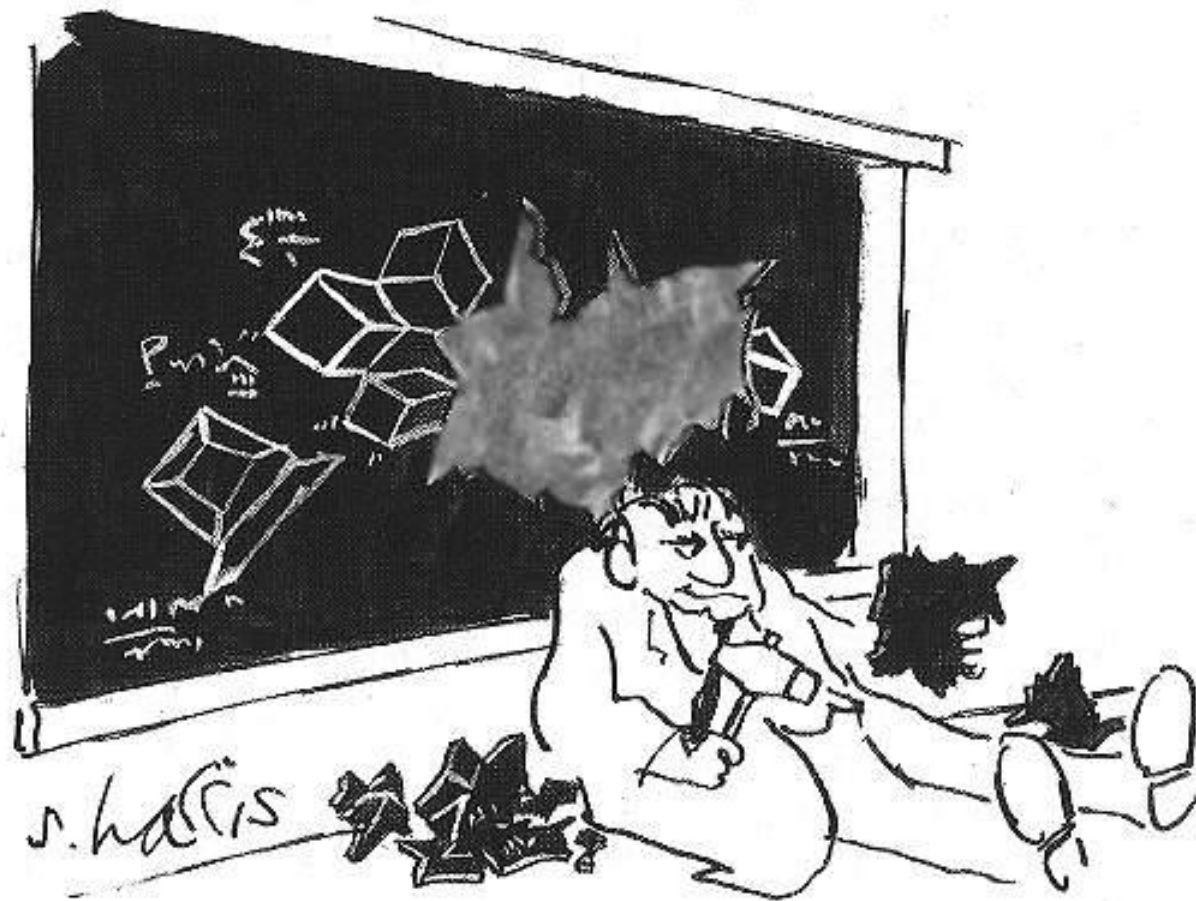
W kwantowo-grawitacyjnym reżimie czas nie może być zewnętrznym parametrem, który numeruje następujące po sobie stany.

*Czas staje się elementem kwantowej gry –
ma charakter probabilistyczny.*

Stany Wszechświata nie następują po sobie w sposób konieczny; istnieje jedynie określone prawdopodobieństwo układania się poszczególnych stanów w następujące po sobie ciągi. I dopiero przy przejściu przez próg Plancka prawdopodobieństwa dążą do jedności i wyłania się deterministyczna ewolucja z czasem jako zewnętrznym parametrem.

Michał Heller, „Kosmologia kwantowa”

PROPONENT OF 11-DIMENSIONAL SUPERGRAVITY
TRYING TO DIAGRAM IT

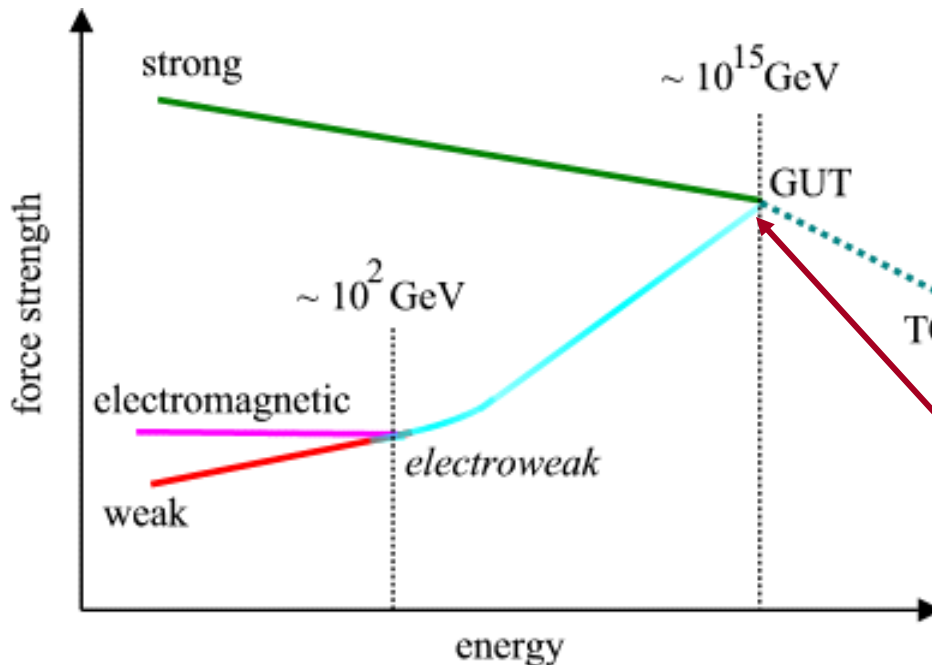


Oddziaływania

grawit.	elektrosłabe			silne (kolorowe)		
grawiton (?)		masa [GeV]	ładunek		masa [GeV]	ładunek
	γ	0	0			
	W^+	80.4	+1			
	W^-	80.4	-1			
	Z^0	91.2	0			
				g - gluon	0	0
				superoktet SU(3) 8 stanów koloru		

Unifikacja oddziaływań

Przy wielkich energiach oddziaływania słabe i elektromagnetyczne są porównywalne – oddziaływania elektroslabe.



Jeszcze większe energie → zrównanie oddziaływań elektroslabych i silnych

TOE – Theory Of Everything *nie istnieje!*

GUT – Grand Unified Theory *nie potwierdzona doświadczalnie!*

Teoria Wielkiej Unifikacji

GUT – Grand Unified Theory

Modele supersymetryczne (SUSY)

Tuż po erze Plancka przy temperaturach powyżej 10^{28} K ($E_{\text{GUT}} = 10^{16}$ GeV) Wszechświat wypełniała mieszanina kwarków, leptonów oraz cząstek przenoszących oddziaływanie — fotonów, bozonów W i Z oraz gluonów.

Nierozróżnialne oddziaływania (nośniki) są w równowadze z materią i antymaterią.

Przykład: $W^+W^- \leftrightarrow q\bar{q}$

Oddziaływania elektromagnetyczne, słabe i silne są nierozróżnialne.

GUT wymaga istnienia dodatkowych nośników oddziaływań – 12 bozonów (i antybozonów) X ($\bar{X}$)

Problemy do wyjaśnienia...

Cząstki i antycząstki pojawiają się i anihilują zawsze parami. Obowiązuje prawo zachowania liczby barionowej i leptonowej.

Dlaczego więc we Wszechświecie nie ma równej ilości materii i antymaterii?

Drugim ważnym faktem obserwacyjnym jest dramatyczna przewaga ilości fotonów (tła relikтового) nad ilością barionów $\eta = n_b/n_\gamma \leq 10^{-9}$

Jak to wytłumaczyć?

Bozony X i Y

- Ładunek = $\pm 1/3$ i $\pm 4/3$
- Ładunek kolorowy R, G, B *Leptokwarki*
- Ładunek leptonowy
- Masa $\approx 10^{16}$ GeV

Bozony X w oddziaływaniach z kwarkami (q) i leptonami (l) mogą powodować przemiany kwarku w antykwark (i odwrotnie) oraz kwarku w lepton (i odwrotnie).

"Przy temperaturach GUT (10^{28} K) symetria i prostota osiągną poziom, na którym istnieje tylko jeden rodzaj materii (lepto-kwark?) i jedno oddziaływanie z całym wachlarzem cząstek-nośników oraz... no tak, dynda tam jeszcze z boku grawitacja." - Leon Lederman

Leptoquark Centauros

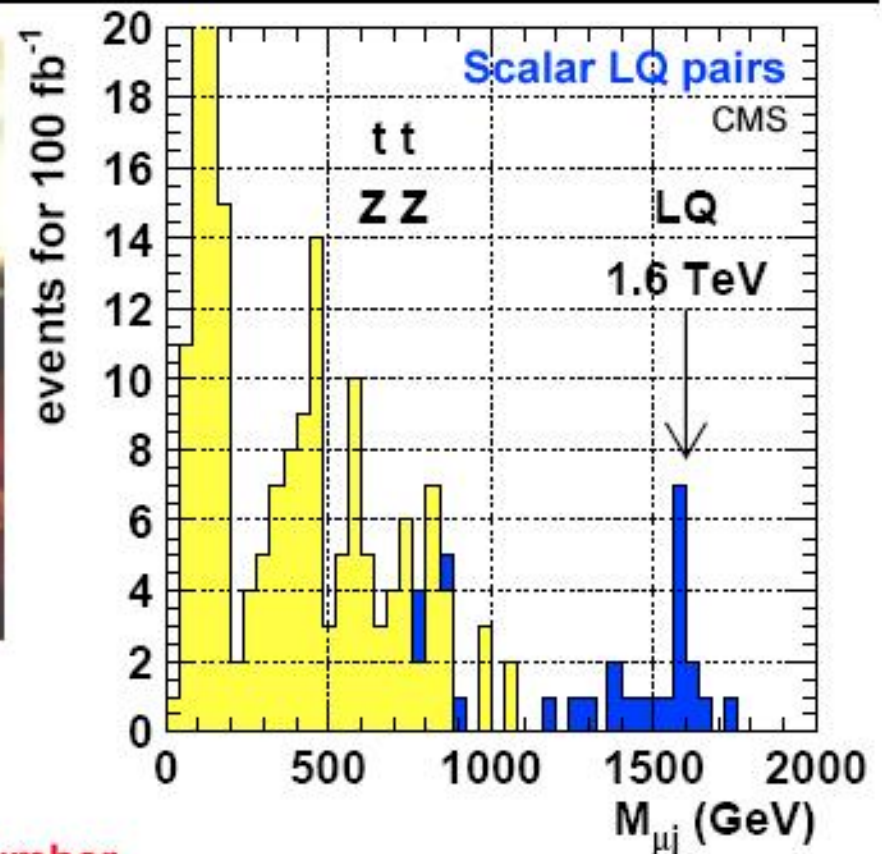


LQ are half lepton, half quark hybrids, appearing in models with symmetry of leptons & quarks.

They carry both leptonic & barionic number.

Production: $qq \rightarrow LQ LQ$, $qg \rightarrow LQ$ Decay: $LQ \rightarrow l q$

LQ can be discovered at LHC up to $M_{LQ} \sim 1.6$ GeV.



Bozony X

Rozpady bozonów X:

$$X \rightarrow \bar{q} + \bar{q}$$

$$\bar{X} \rightarrow q + q$$

$$X \rightarrow q + l$$

$$\bar{X} \rightarrow \bar{q} + \bar{l}$$

Bozony X

Przy temperaturach $T > 10^{28}$ K pary $X + \text{anty-}X$ powstają i anihilują zupełnie symetrycznie.

Gdy jednak temperatura spada poniżej 10^{27} K, kreacja i anihilacja par staje się coraz mniej prawdopodobna, wzrasta zaś szansa spontanicznego rozpadu.

Prawdopodobieństwa różnych kanałów rozpadów mogą być różne:

$$X \xrightarrow{p_1} \bar{q} + \bar{q}$$

$$\bar{X} \xrightarrow{p_2} q + q$$

$$X \xrightarrow{1-p_1} q + l$$

$$\bar{X} \xrightarrow{1-p_2} \bar{q} + \bar{l}$$

Jeśli $p_1 = p_2$, to po rozpadach pozostaną równe ilości kwarków i antykwarków oraz leptonów i antyleptonów.

Jeśli $p_1 \neq p_2$, to pozostanie pewna nadwyżka materii nad antymaterią.

Bozony X

Różnica p_1 i p_2 rzędu 10^{-9} wystarczy do wyjaśnienia obserwowanego obecnie stosunku ilości barionów do fotonów we Wszechświecie.

Jak wielka była nadwyżka materii nad antymaterią?



Na 30 mln antykwarków przypadało (30 mln + 1) kwarków

Teoria inflacji

Problemy, które trzeba wyjaśnić:

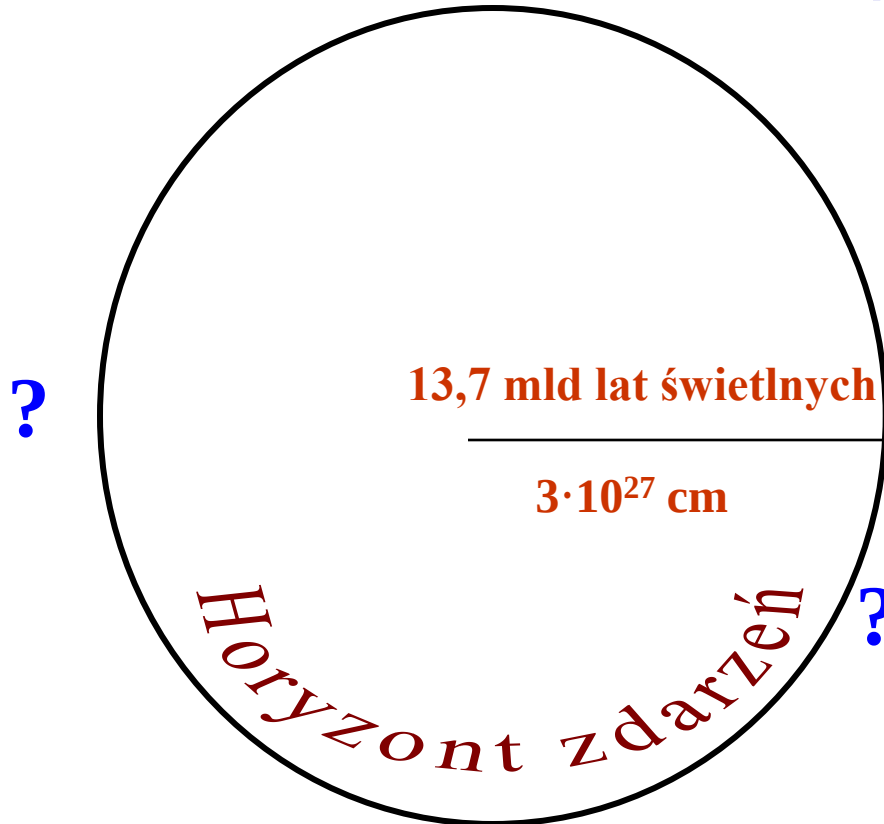
- Problem horyzontu
- Problem monopoli magnetycznych
- Problem płaskości Wszechświata

Problem horyzontu

Niezależnie od jakości teleskopów, nie możemy obserwować dowolnie odległych obiektów. Największa odległość, w której światło zdążyło dotrzeć do obserwatora w czasie istnienia Wszechświata wynosi :

$$R = T \cdot c$$

Gdzie: T – wiek Wszechświata, c – prędkość światła

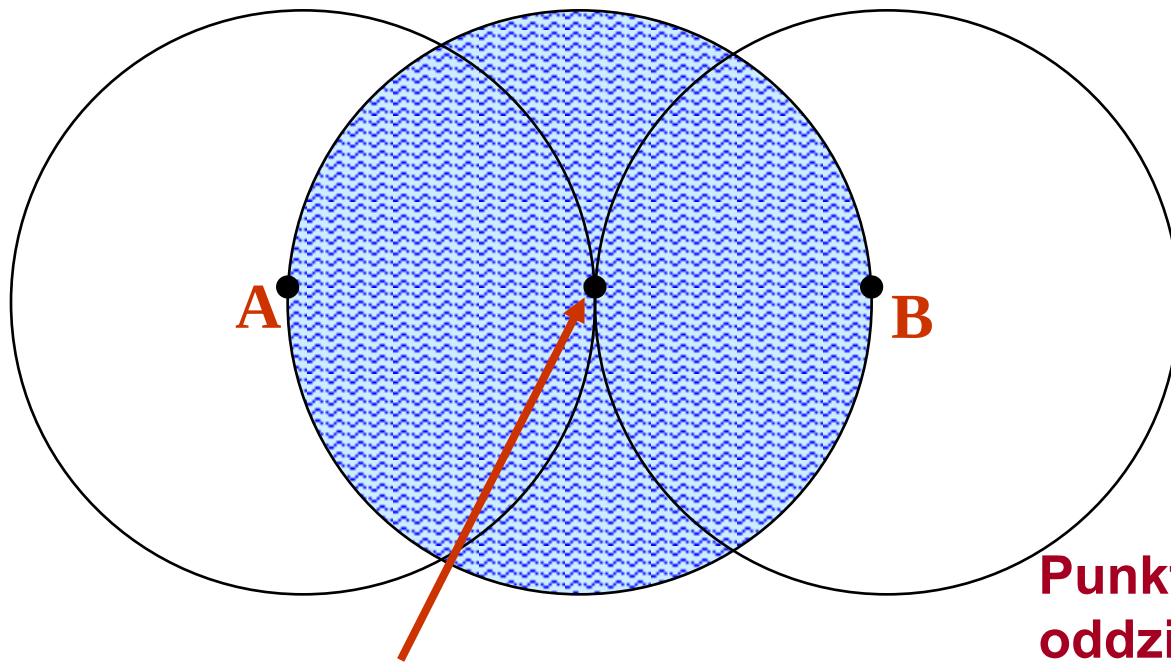


Horyzont można też zdefiniować podstawiając do prawa Hubble'a maksymalną prędkość ucieczki galaktyk równą prędkości światła:

$$c = H \cdot R \Rightarrow R = \frac{1}{H} \cdot c = T \cdot c$$

Problem horyzontu

Obserwujemy we wszystkich kierunkach wysoką jednorodność Wszechświata, zarówno w skali wielkoskalowej (galaktyki, gromady galaktyk), jak i promieniowania mikrofalowego, którego natężenie i temperatura są identyczne we wszystkich kierunkach z dokładnością do 1/1000.



Nasza galaktyka

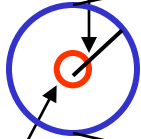
Punkty A i B nie mogły ze sobą oddziaływać od początku istnienia Wszechświata, więc skąd ta jednorodność...?

Problem horyzontu

$$T = 3 \cdot 10^{28} \text{ K}$$

$$T = 3 \text{ K}$$

3 mm



Ekspansja o
czynniki 10^{28}

$3 \cdot 10^{27} \text{ cm}$

Obecny horyzont
zdarzeń

Horyzont zdarzeń

$$3 \cdot 10^{-25} \text{ cm}$$

$$\text{Wiek} = 10^{-35} \text{ s}$$

$$\text{Wiek} = 10^{17} \text{ s}$$

W wieku 10^{-35} s Wszechświat składał się z ogromnej liczby niezależnych, rozdzielonych obszarów?? **Sprzeczność z obserwowaną jednorodnością!**

Problem monopoli magnetycznych

P. Dirac (w 1931): dopuszczalne jest istnienie monopoli magnetycznych o wartości:

$$g = n \left(\frac{4\pi\hbar c}{2e} \right)$$

Teorie Wielkiej Unifikacji przewidują powstanie ogromnej liczby monopoli magnetycznych – cząstek o masach 10^{16} razy większych niż masa protonu. Z obliczeń wynika, że monopoli byłoby teraz tysiące razy więcej niż protonów czy neutronów.

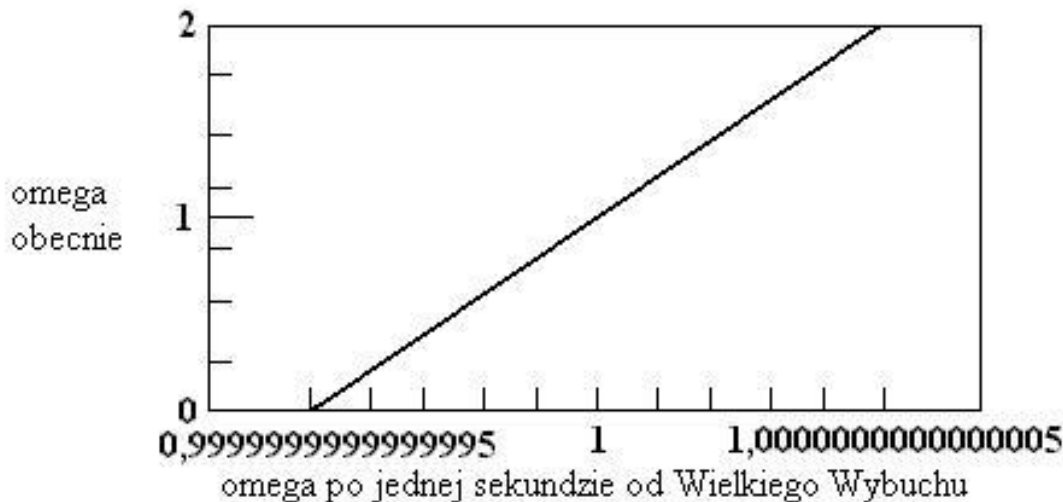
Jednak monopole nie są obserwowane!

Problem płaskości Wszechświata

Względna gęstość materii we Wszechświecie:

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_k}$$

Dane obserwacyjne i teoretyczne przewidywania ograniczają dzisiejszą wartość Ω do przedziału od 0,1 do 2.



Początkowa wartość Ω była bardzo niestabilna i jakiegokolwiek odchylenie od wartości 1 szybko wzrosłoby w czasie.

Problem płaskości Wszechświata

Aby dzisiejsza Ω mieściła się w żądanym przedziale, początkowa jej wartość musiała być równa jedności z dokładnością większą niż 1 na 10^{-15} .

Początkowy Wszechświat był bardzo płaski!

Warunki początkowe Wszechświata zostały dostrojone z wielką precyzją, aby mógł powstać dzisiejszy świat. Małe wahanie na początku ewolucji Wszechświata sprawiłoby, że zapadłby się w krótkim czasie lub materia tak szybko by się oddalała, że nie powstałyby gwiazdy i planety.

Skąd to wykalibrowanie warunków początkowych?

Wszechświat inflacyjny

Po upływie czasu Plancka Wszechświat o temperaturze 10^{14} GeV podlegał Wielkiej Unifikacji Oddziaływań (oddziaływania silne, słabe i elektromagnetyczne nie różniły się).

Wszechświat zawierał obszary „**falszywej próżni**” wypełnione ogromną energią – ewolucja była kontrolowana przez oddziaływania ze skalarnym polem „inflatonu”).

„**Falszywa próżnia**” to obszar o zadziwiających właściwościach:

- jej gęstość nie zmienia się wraz z rozszerzaniem się
- wytwarza ona ujemne ciśnienie

Z ciśnieniem jako formą energii związana jest grawitacja.

Ujemne ciśnienie prowadzi do odpychającej siły grawitacyjnej – odpowiada tej sytuacji niezerowa stała kosmologiczna Λ .

Nastąpiła ekspansja!

Wszechświat inflacyjny

Wzór kosmologiczny:

$$H^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{R^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

gdzie:

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

Te człony maleją
gwałtownie podczas
rozszerzania

Zostaje:

$$\left(\frac{\dot{r}}{r}\right)^2 = \frac{\Lambda}{3} \quad \rightarrow \quad \dot{r} = \sqrt{\frac{\Lambda}{3}} \cdot r$$

Rozwiązanie równania:

$$r(t) = \exp\left(\sqrt{\frac{\Lambda}{3}} \cdot t\right)$$

Ekspansja wykładnicza!

Wszechświat inflacyjny

Wykładnicza ekspansja zakończyła się w chwili 10^{-34} s po Wielkim Wybuchu.

Jak powiększył się w tym czasie Wszechświat?

$$r(t) = \exp\left(\sqrt{\frac{\Lambda}{3}} \cdot t\right) = \exp(H \cdot t)$$

Załóżmy, że inflacja zaczęła się w chwili $T = H^{-1} = 10^{-36}$ s

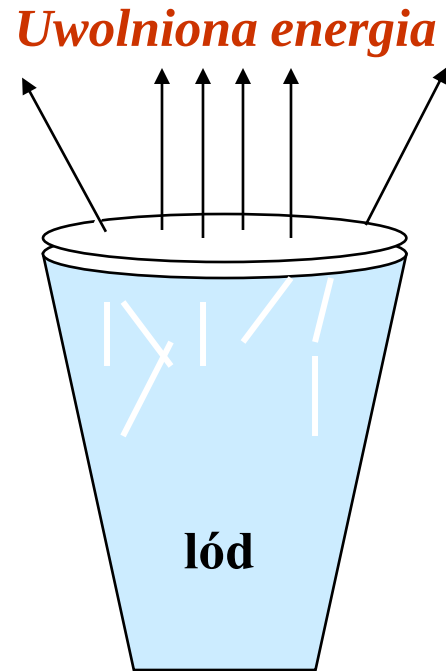
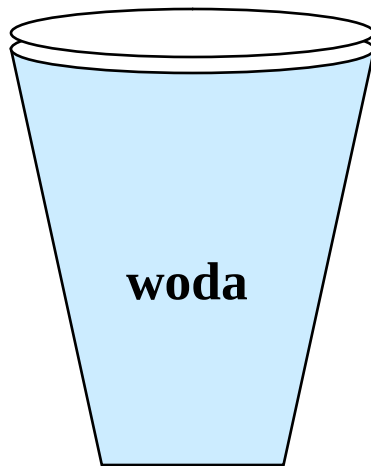
$$\frac{r_{kon}}{r_{pocz}} = \exp\left(H(t_{kon} - t_{pocz})\right) = e^{99} \approx 10^{43}$$

Wszechświat powiększył się w ułamku sekundy do rozmiarów wielokrotnie przekraczających wszystko co możemy obserwować!

Wszechświat inflacyjny

Inflacja zakończyła się przejściem fazowym – „fałszywa próżnia” zamieniła się w **próżnię prawdziwą** wypełnioną cząstkami. Towarzyszyło temu wyzwolenie ogromnej energii, która ponownie „podgrzała” Wszechświat

Analogia:



Podczas przejścia fazowego uwalnia się energia

Wszechświat inflacyjny

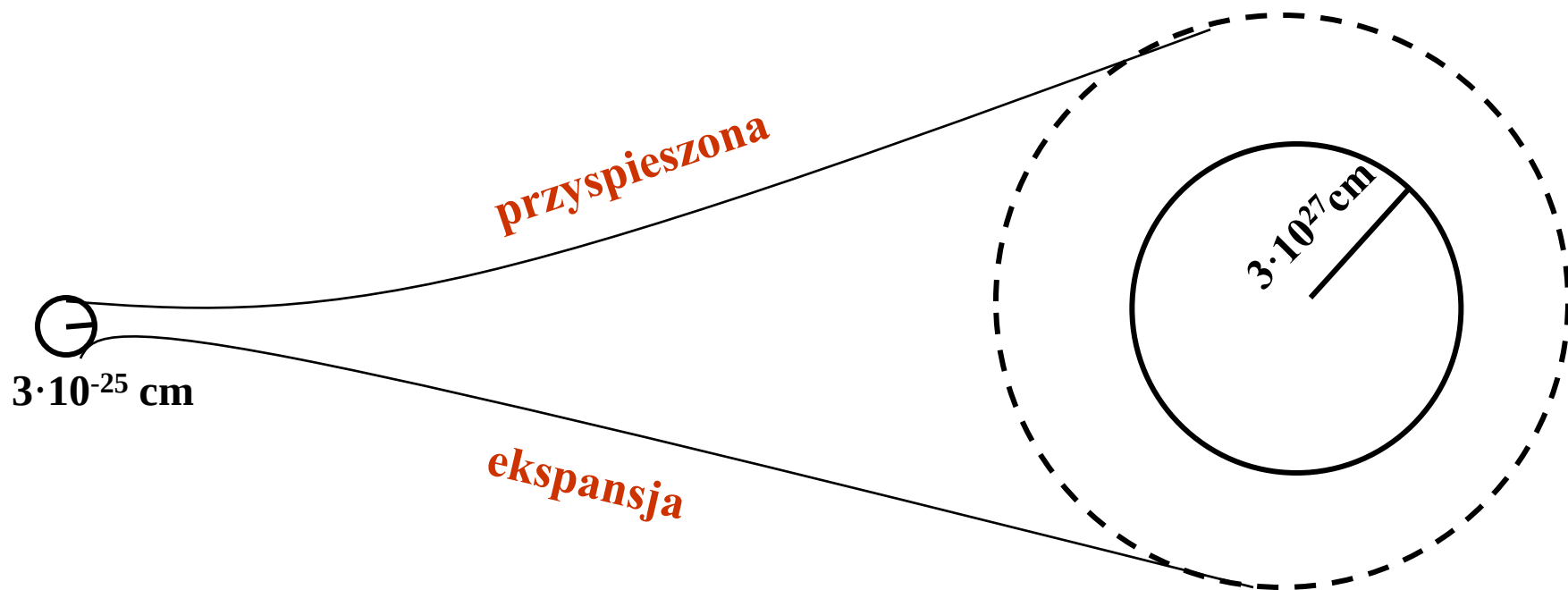
Po zakończeniu okresu inflacji Wszechświat rozszerza się dalej ze stałą kosmologiczną równą zero.

Teorię inflacji zaproponował w 1981 roku **Alan Guth** teoretyk fizyki cząstek elementarnych zajmujący się Teorią Wielkiej Unifikacji.



Wszechświat inflacyjny

Rozwiązanie problemu jednorodności Wszechświata:



Obserwowalny Wszechświat powstał z bardzo małego jednorodnego obszaru.

Wszechświat inflacyjny

Rozwiązanie problemu monopoli:

Na skutek inflacji gęstość monopoli, jeśli istniały, spadła do nieskończenie małej wartości.

Wszechświat inflacyjny

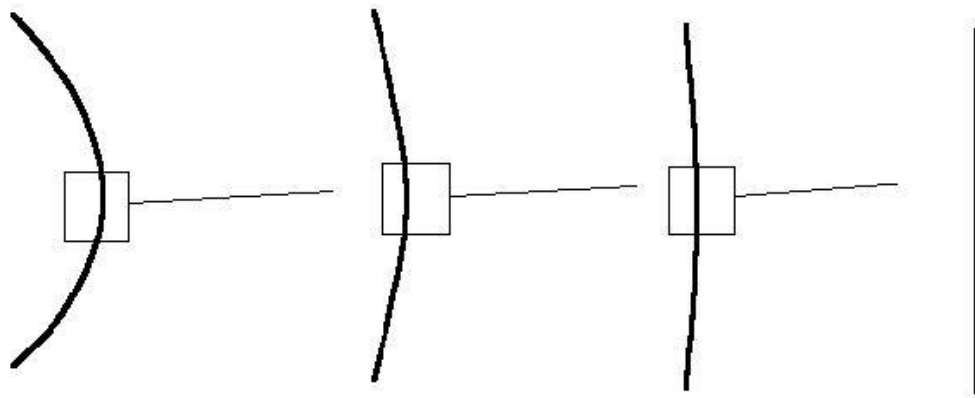
Rozwiązanie problemu płaskości Wszechświata:

Z równania Friedmana dla Wszechświata inflacyjnego można otrzymać związek:

$$|\Omega(t) - 1| \propto \exp\left(-\sqrt{\frac{4\Lambda}{3}} \cdot t\right)$$

Oznacza on, że Ω szybko dąży do jedności

Obecny Wszechświat jest płaski!



Historia Wszechświata

10^{-34} s

Temperatura 10^{27} K

Materia w postaci **plazmy kwarkowo-gluonowej**.

Wszechświat wypełniają swobodne *kwarki, gluony, leptony, bozony W i Z, fotony*, które oddziałują ze sobą.

Oddziaływanie **silne** oddziela się od oddziaływania **elektroslabego**.

Od tej chwili oddziaływania te znacznie różnią się wielkością.

Era hadronowa

10^{-9} s

Temperatura 10^{15} K (250 GeV)

Kwarki łączą w hadrony, które są cząstkami relatywistycznymi.

Kreacja i anihilacja par hadronów jest w równowadze.

Hadrony, leptony i nośniki oddziaływań (fotony, bozony W i Z) są w równowadze termodynamicznej.

Oddziaływanie słabe oddziela się od elektromagnetycznego.

Era hadronowa

W miarę ekspansji i stygnięcia Wszechświata przestają być produkowane najcięższe i nietrwałe hadrony.

Przy **80 GeV** przestają być też produkowane bozony W i Z

Przy **$T < 10^{12}$ K** także protony i neutrony przestają być cząstkami relatywistycznymi.

Jednocześnie zaczyna się przewaga procesów anihilacji tych cząstek nad kreacją par.

Era hadronowa

Era hadronowa zbliża się do końca po ok. 10^{-4} s, przechodząc w erę leptonową.

Prawie wszystkie protony i neutrony anihilują (dodając fotony do tła promieniowania).

Pozostaje nadwyżka materii nad antymaterią.

Czas trwania ery hadronowej (10^{-4} s) wydaje się być znikomo krótki. Jednak czas życia większości hadronów i skala czasowa oddziaływań silnych to ok. 10^{-24} s, a więc 20 rzędów wielkości mniej.

Dla nich era ta trwa bardzo długo.

Era leptonowa

10^{-4} s

Temperatura 10^{11} K (10 MeV)

Leptony (także neutrina) są w równowadze termodynamicznej z promieniowaniem.

W epoce leptonowej, jedynymi relatywistycznymi **bozonami** są fotony zaś relatywistycznymi **fermionami** trzy generacje **leptonów** oraz ich antycząstki.

$$(e, \nu_e), (\mu, \nu_\mu), (\tau, \nu_\tau)$$

Na początku ery leptonowej w równowadze są procesy kreacji i anihilacji par **lepton – antylepton**.



Liczba **leptonów** równa liczbie **fotonów**

Era leptonowa

W miarę spadku temperatury (a więc i energii fotonów) następuje najpierw nieodwracalna anihilacja **taonów** (jako najcięższych), a następnie **mionów**.

Najdłużej utrzymuje się równowaga reakcji i anihilacji par **elektron – pozyton** oraz ich oddziaływań z **neutrinami**.

$$\gamma + \gamma \leftrightarrow e^+ + e^- \leftrightarrow \begin{matrix} \gamma + \gamma \\ \nu + \bar{\nu} \end{matrix}$$

Temperatura progowa na produkcję par **elektron – pozyton** $T = 6 \cdot 10^9 \text{ K}$

Temperatura w środku Słońca
 $T = 15 \cdot 10^6 \text{ K}$

Era leptonowa

Tuż po **pierwszej sekundzie** gęstość i temperatura zwały tak, że średni czas pomiędzy zderzeniami **neutrin** i **antyneutrin** przekroczył czas życia Wszechświata, a ich średnia droga swobodna wzrosła na tyle, iż stały się cząstkami swobodnymi.

Neutrino utraciły równowagę termodynamiczną z innymi cząstkami.



Powstało tło neutrinowe

*Trudno je wykryć
doświadczalnie!*

Era leptonowa

W 14 sekundzie temperatura spadła do $3 \cdot 10^9$ K –
poniżej progu produkcji par elektron-pozyton

Elektrony i pozytony uległy
anihilacji, pozostawiając po sobie
olbrzymie ilości fotonów.  **Zwiększenie**
temperatury fotonów

Od tej chwili średnio na **jeden nukleon** przypadał
mniej więcej **miliard fotonów**.

Główne składniki Wszechświata to **fotony i neutrina**.

Nukleosynteza

Nukleosynteza – powstawanie jąder przez łączenie się nukleonów lub lżejszych jąder - może zachodzić w określonym przedziale temperatur:

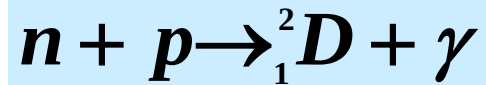
- **Temperatura zbyt niska – produkty reakcji mają za małą energię, aby zbliżyć się dostatecznie.**
- **Temperatura za wysoka – powstałe w syntezie jądra rozpadną się.**

Nukleosynteza

1 s

Temperatura $\approx 10^{10}$ K (0,1 MeV)

W okolicy tej temperatury mogą już utrzymać się produkty pierwszej reakcji nukleosyntezy:



Neutron ma w tych warunkach dwie możliwości:

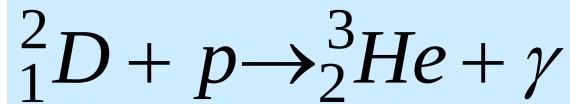
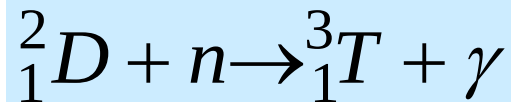
- 1) reakcja z protonem i synteza deuteru,
- 2) spontaniczny rozpad beta.

Nukleosynteza

Przez pierwsze sekundy przybywa deuteru.

Gdy jego ilość względem wodoru osiągnie wartość prawdopodobne stają się reakcje syntezy trytu i izotopu ^3He :

$$\left[\frac{D}{H} \right] \approx 10^{-3}$$



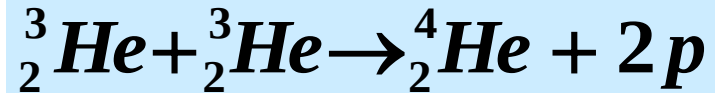
Na skutek tych reakcji ubywa deuteru i jego obfitość stabilizuje się stopniowo na poziomie około:

$$\left[\frac{D}{H} \right] \approx 3 \cdot 10^{-5}$$

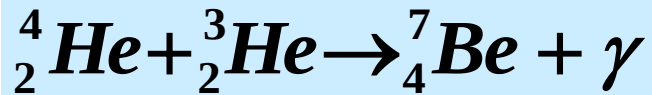
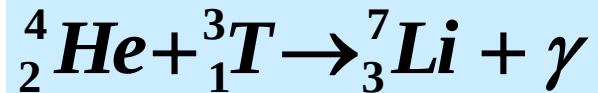
Nukleosynteza

Gdy względna koncentracja ${}^3\text{He}$ osiągnie około
to zaczyna zachodzić kolejna reakcja:

$$\left[\frac{{}^3_2\text{He}}{H} \right] \approx 10^{-5}$$



Pewna niewielka część ${}^4\text{He}$ zdąży jeszcze wejść w reakcje:



Nukleosynteza

Nukleosynteza kończy się po około 3 minutach.

Dla kolejnych reakcji, jak np. cykl $3^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C} + \gamma$ jest już „za zimno”.

Wszechświat rozszerzając się ostygł do $T \approx 10^8 \text{ K}$

Po dalszych kilku tysiącach sekund radioaktywny tryt stopniowo rozpada się na ^3He , zaś ^7Be przez wychwyt elektronu przekształca się w ^7Li .

Ustaliła się zasadnicza obfitość helu we Wszechświecie w ilości:

$$\left[\frac{{}^4_2\text{He}}{H} \right] \approx 0,1$$

(22% - 24%) masy wodoru stanowi masa ^4He