

**Materia barionowa -  
skąd się wzięła i ile jej jest?**

## 1. Wstęp

W obecnie obowiązującym modelu kosmologicznym Wszechświat jest zdominowany przez dwa hipotetyczne składniki – **niebarionową ciemną materię** oraz **ciemną energię**. Obydwa można uzasadnić w sposób teoretyczny ale tego pierwszego nie udało się (jak dotąd?) potwierdzić eksperymentalnie, zaś w drugim przypadku nawet trudno sobie wyobrazić, w jaki sposób można to zrobić. Na domiar złego, jest (a przynajmniej do niedawna był) problem z ilością tej materii o której wiemy, że istnieje, czyli materią **barionową**.

## 2. Skąd się wzięła materia barionowa?

Odpowiedź jest krótka i treściwa: z **bariogenezy**. Bariogeneza to proces, w którym została naruszona równowaga między barionami i antybarionami (gdyby była równowaga, niektóre części Wszechświata byłyby zbudowane z antymaterii i można byłoby zaobserwować produkty anihilacji na granicach obszarów). Skala tego naruszenia prawdopodobnie jest opisywana przez iloraz gęstości liczby barionów i fotonów  $\eta = n_B/n_\gamma$ , który jest rzędu  $\eta \simeq 6 \cdot 10^{-10}$ .

Andriej Sacharow w 1967 roku podał trzy warunki bariogenezy:

1. Muszą istnieć oddziaływania łamiące zachowanie liczby barionowej.

2. Oddziaływania te muszą łamać symetrie C i CP. Gdyby była zachowana symetria C, antycząstki byłyby produkowane z równym prawdopodobieństwem co cząstki. Łamanie CP jest potrzebne do tego, żeby było różne prawdopodobieństwo dla procesu zamiany cząstki na antycząstkę z odwróceniem spinu w porównaniu z procesem odwrotnym.
3. Proces musi przebiegać przy braku równowagi termodynamicznej. W stanie równowagi liczba cząstek powinna być taka sama.

Największy problem jest z warunkiem nr 1, i właśnie on służy do klasyfikacji modeli.

**Bariogeneza GUT** – u podstaw leżą teorie wielkiej unifikacji, w których oddziaływania silne, słabe i elektromagnetyczne

są zunifikowane przy energiach rzędu  $10^{15} - 10^{16}$  GeV. Symetria jest łamana wskutek rozpadów bardzo ciężkich cząstek łamiących symetrie B, C i CP. Cząstki te muszą mieć czas życia dłuższy niż ówczesny wiek Wszechświata. Podstawowy problem: modele inflacyjne kompletnie rozmywają wszelkie wcześniejsze asymetrie.

**Bariogeneza elektroslaba** – t'Hooft (1976) zauważył, że anomalne rozwiązania równań pola mogą zachowywać jedynie różnicę **B-L** (takie rozwiązania nazwano **sfaleronami**). Efekt: zamiana 3 antyleptonów w 9 kwarków lub na odwrót. Główny problem: łamanie symetrii C i CP w oddziaływaniach słabych jest zdecydowanie zbyt małe, żeby ten mechanizm był efektywny. Potrzeba dodatkowego źródła łamania CP, np. **supersymetrii**.

**Bariogeneza przez leptogenezę** – połączenie powyższych dwóch hipotez. Po zakończeniu inflacji została wygenerowana asymetria między leptonami i antyleptonami (podobny proces: rozpad ciężkich i długożyciowychneutrino Majorany). Efekt: niezerowa liczba leptonowa. Aż do podziału oddziaływań elektro-słabych leptony mogą być zamieniane w bariony w procesach zachowujących  $B-L$  a łamiących  $B+L$ . Jedną z konsekwencji: **asymetria leptonowa** – nadmiar antyneutrino. Efekt bardzo trudny do weryfikacji (nie możemy zmierzyć tła niskoenergetycznych neutrino).

**Bariogeneza z ciemną materią** – np. hylogeneza (2010), ciemna materia ma być złożona ze słabo oddziaływujących cząstek o masach kilku GeV obdarzonych liczbą barionową. By-

łyby to **ciemne antybariony**, czyli całkowita liczba barionowa  
Wszechświata byłaby równa zero.

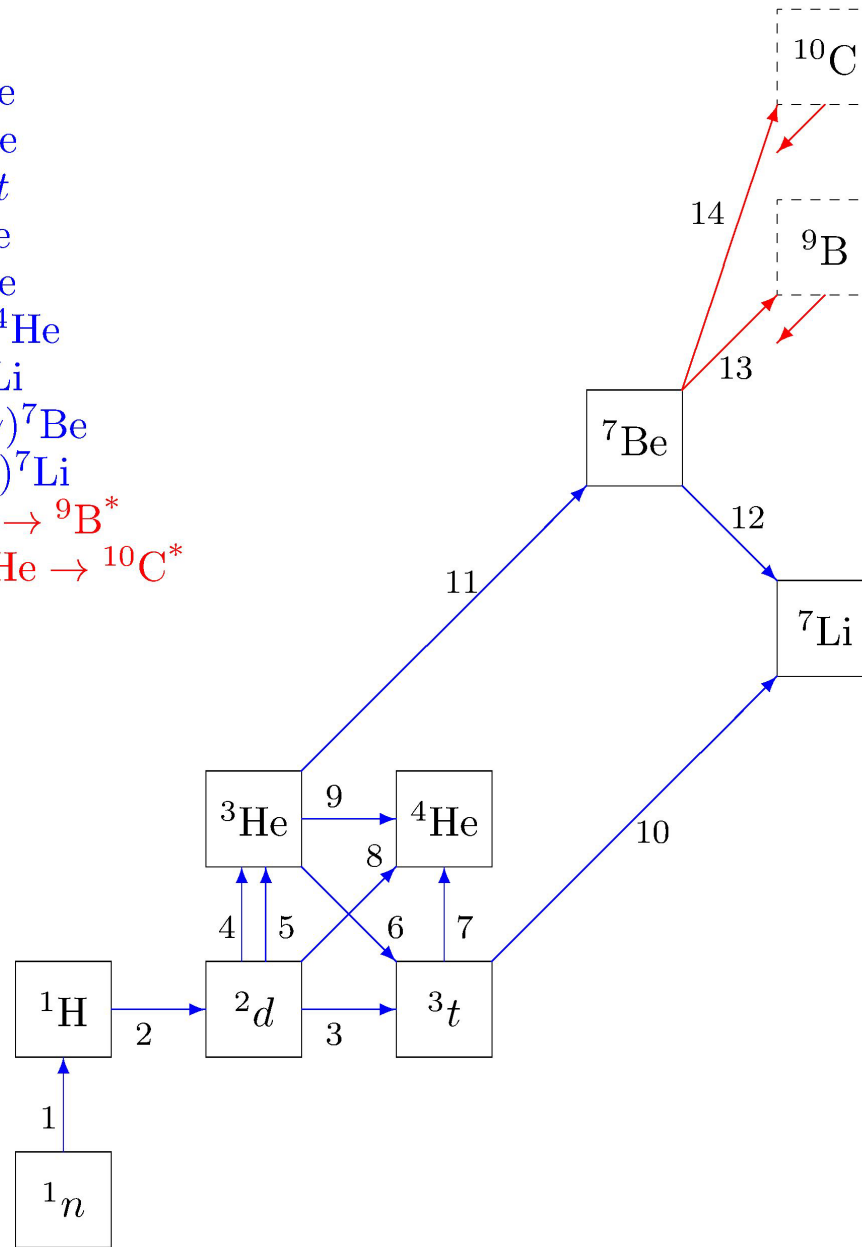
### 3. Ile jest materii barionowej we Wszechświecie?

Na to pytanie można odpowiedzieć tylko pośrednio. Najlepszym wiarygodnym sposobem oszacowania jej ilości wydaje się **teoria pierwotnej nukleosyntezy**.

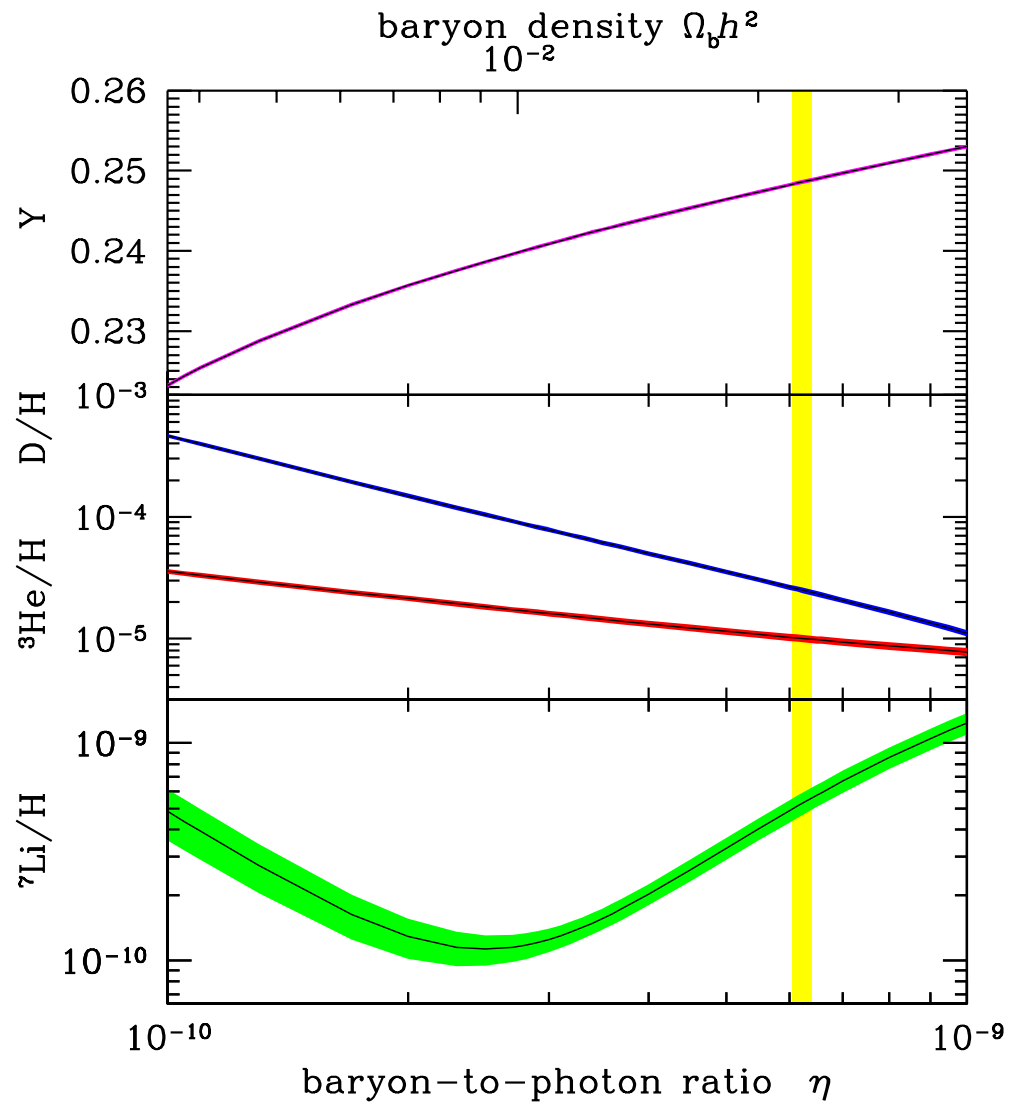
We wczesnym Wszechświecie panowały wysokie temperatury. W miarę ochładzania i ekspansji Wszechświata cięższe, mniej stabilne cząstki wypadały z równowagi, nie mogły być odtwarzane i rozpadały się. Kiedy Wszechświat miał ok. 10 sekund (proces trwał do ok. 20 minut), to samo przytrafiło się **neutronom**, które mogły rozpaść się na **protony, elektrony i antyneutrino** lub wejść w skład **pierwszych jąder atomowych** (stąd nukleosynteza). Po tym skład chemiczny Wszechświata to ok.  $3/4$  wodoru,  $1/4$  helu i śladowe ilości cięższych pierwiastków.



- 1:  $n \rightarrow p e \nu$
- 2:  $n(p, \gamma)d$
- 3:  $d(d, p)t$
- 4:  $d(p, \gamma)^3\text{He}$
- 5:  $d(d, n)^3\text{He}$
- 6:  $^3\text{He}(n, p)t$
- 7:  $t(d, n)^4\text{He}$
- 8:  $d(d, \gamma)^4\text{He}$
- 9:  $^3\text{He}(d, p)^4\text{He}$
- 10:  $t(\alpha, \gamma)^7\text{Li}$
- 11:  $^4\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$
- 12:  $^7\text{Be}(n, p)^7\text{Li}$
- 13:  $^7\text{Be} + d \rightarrow ^9\text{B}^*$
- 14:  $^7\text{Be} + ^3\text{He} \rightarrow ^{10}\text{C}^*$



Uproszczonego schematu pierwotnej nukleosyntezy



Przewidywania teorii pierwotnej nukleosyntezy

Jak widać, głównym parametrem dopasowania jest ilość barionów przypadających na foton, którą można powiązać z odpowiednim ułamkiem gęstości krytycznej dla barionów (gęstość liczby fotonów jest znana). Zawartość helu  $^4\text{He}$  (oznaczona jako  $Y$ ) zmienia się bardzo niewiele, w przeciwieństwie do zawartości deuteru  $^2\text{D}$ , helu  $^3\text{He}$  i litu  $^7\text{Li}$ . Po uwzględnieniu wyników 7 lat obserwacji satelity WMAP otrzymano wartość  $\eta = (6.9 \pm 0.15) \cdot 10^{-10}$ . Nowsze dane, uzupełnione o opublikowane do 2015 roku dane z misji Planck, dają wartość  $\Omega_b h^2 = 0.02222(44)$ , a po uzupełnieniu o inne ograniczenia  $0.02229(28)$ , przy czym  $h = 0.676(6)$ .

Do teorii bardzo dobrze pasują obserwowane pierwotne zawartości helu 4, deuteru i helu 3, jest problem z litem 7:

- ⇒  ${}^4\text{He}$ : teoria 0.249, obserwacje 0.2561(108)
- ⇒ D/H: teoria 2.62, obserwacje 2.82(20) [ $\times 10^{-5}$ ]
- ⇒  ${}^3\text{He}/\text{H}$ : teoria 0.98, obserwacje 1.1(2) [ $\times 10^{-5}$ ]
- ⇒  ${}^7\text{Li}$ : teoria 4.39, obserwacje 1.58(31) [ $\times 10^{-10}$ ]

Ten problem jest nazywany kosmologicznym problemem litu (Cosmological lub Primordial Lithium Problem).

Pojawiło się wiele pomysłów na jego rozwiązanie. Można je podzielić na trzy kategorie:

- ⇒ astrofizyczne (źle zmierzona abundancja?)
- ⇒ fizyka jądrowa (reakcje zaburzające produkcję litu 7)
- ⇒ poza Modelem Standardowym (zmiany w fizyce cząstek, niestandardowa kosmologia).

Jak dotąd, żadne z tych rozwiązań nie cieszy się większym uznaniem.

## 4. Materia barionowa – ile jest, a ile widać?

Najprostszym sposobem zliczania materii barionowej jest oszacowanie masy zawartej w dobrze widocznych obiektach – gwiazdach i galaktykach. Odpowiedni przyczynek do masy Wszechświata  $\Omega_{vis} \simeq 0.005$ , czyli ok. 10 razy mniej niż przewiduje teoria.

Gdzie jeszcze można szukać materii? Między gwiazdami i galaktykami – np. obłoków gazu międzygwiazdowego i międzygalaktycznego. Istnieje też **barionowa ciemna materia** w postaci zwartych obiektów nie emitujących promieniowania, np. planet, brązowych karłów, białych karłów, gwiazd neutronowych, czarnych dziur, również bardzo słabych, małomasywnych gwiazd.

Ciągle wychodzi za mało – w najlepszym wypadku połowa tego, co potrzeba.

Jesienią ubiegłego roku pojawiły się dwie publikacje, które rzucają nowe światło na problem brakującej materii barionowej. Dwie grupy użyły efektu Sunjajewa-Zeldowicza (SZ), żeby oszacować ilość materii między galaktykami.

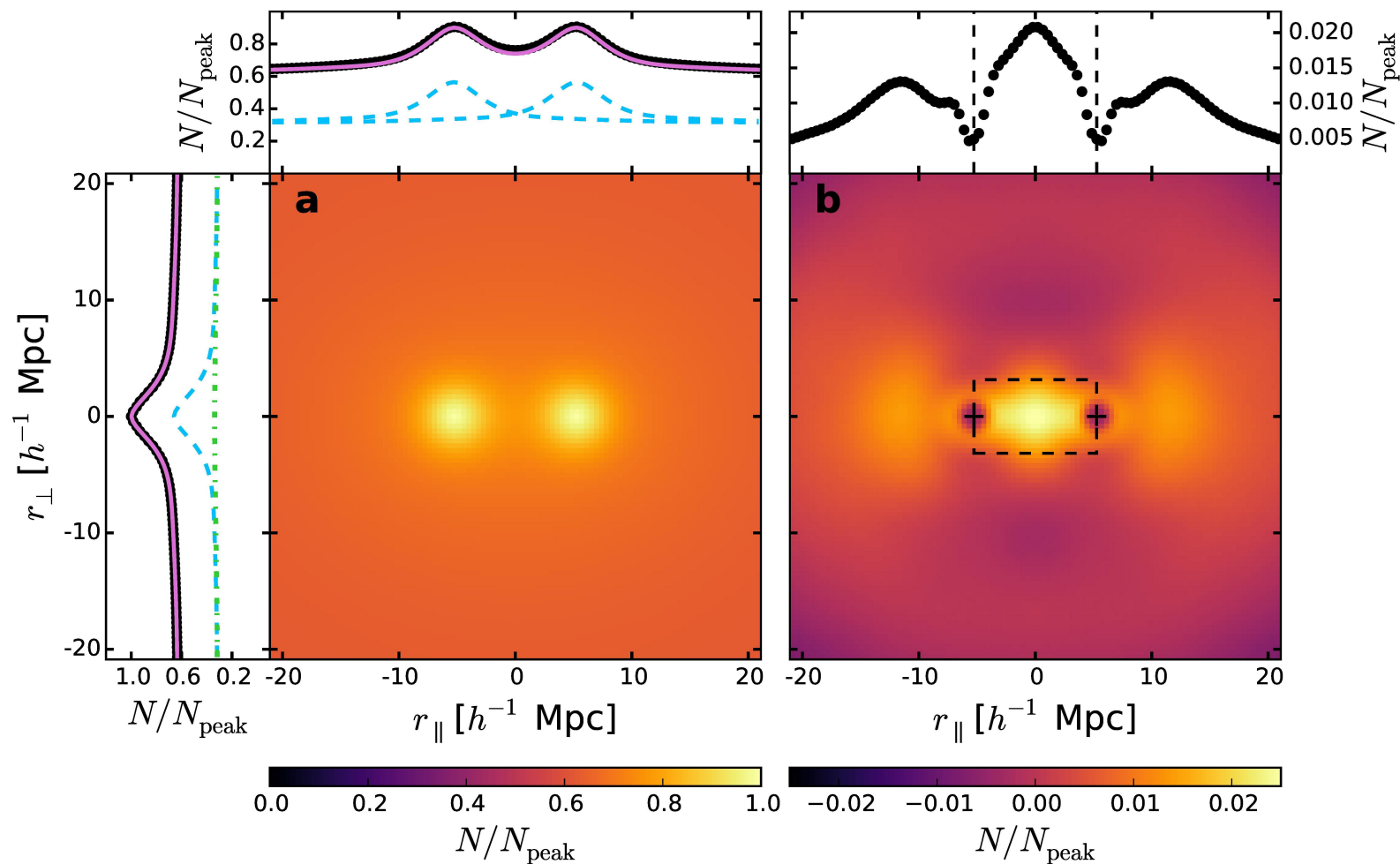
Efekt SZ polega na zaburzeniu kosmicznego promieniowania tła przez elektrony o wysokiej energii za pomocą odwrotnego rozpraszania comptonowskiego. O ile przy efekcie Comptona foton traci część energii przy zderzeniu z niskoenergetycznym elektronem, tu dzieje się na odwrót i to wysokoenergetyczny elektron przekazuje część energii fotonowi. Efekt może być:

- ⇒ termiczny (elektrony mają wysoką energię dzięki temperaturze)
- ⇒ kinematyczny (elektrony mają wysoką energię dzięki ruchom wewnątrz większych mas)
- ⇒ polaryzacyjny.

Obydwie grupy korzystały z wyników obserwacji satelity Planck opublikowanych w 2015 roku oraz z danych Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Anna de Graaff ze współpracownikami oraz Hideki Tanimura ze współpracownikami analizowali pary galaktyk (odpowiednio 1 020 334 i ok. 260 000 par) niewiele oddalonych od siebie, dzięki czemu mogą być powiązane fizycznie i mogą istnieć między nimi włókna (filaments) materii. Wyniki porównywali z wynikami dla par bliskich optycznie ale oddalo-



nych fizycznie. Obydwie grupy znalazły dowody na to, że takie włókna istnieją, gaz ma wysoką temperaturę a jego gęstość przekracza 3- (Tanimura) lub 6-krotnie (de Graaff) średnią gęstość materii we Wszechświecie. Obydwie grupy uważają ich wyniki za wzajemnie zgodne, gdyż przyjęły nieco inne kryteria doboru par galaktyk.



Zestawione wyniki dla miliona par galaktyk (po lewej) i różnice między wynikami a kombinacją obydwu izotropowych halo.

## 5. Podsumowanie

Być może jedna z zagadek w kosmologii – gdzie się podziała brakująca część materii barionowej – została właśnie rozwiązana. Przysłowiową łyżką dziegciu w beczce miodu jest problem zawartości litu 7, gdyż nieco podważa on główną teorię, na podstawie której jest szacowana zawartość materii barionowej we Wszechświecie. Ta historia pokazuje, że w nauce – a zwłaszcza w przypadku tak rozmytej i bazującej na wielu kanałach obserwacji dziedzinie, jaką jest kosmologia – nic nie jest dane raz na zawsze i w każdej chwili może wyskoczyć jakiś problem, który może doprowadzić nawet do całkowitego zawalenia modelu.

Kosmologia jest dziedziną nauki, w której takich problemów jest całe mnóstwo – począwszy od samego modelu (przyspieszona ekspansja czy stała prędkość? Wielki Wybuch czy modele cykliczne?) aż do coraz drobniejszych szczegółów (ciemna materia czy zmodyfikowana grawitacja/dynamika? czy istnieje ciemna energia i czy jest to coś w rodzaju stałej kosmologicznej, modelu quintessence lub modelu super-quintessence?). Ogólny model nadal się trzyma ale nie wiadomo, jak długo wytrzyma.