

Ciemna materia i ciemna energia

w kosmologii

1. Wstęp

„Wiem, że nic nie wiem” oraz „odtworzenie jajka z jajecznicą” – te stwierdzenia znakomicie opisują stan naszej wiedzy na temat Wszechświata. Lawinowo rośnie ilość danych obserwacyjnych, ale one tylko rzucają światło na kolejne obszary naszej niewiedzy.

Standardowy Model Kosmologiczny wydawał się znakomitym opisem Wszechświata, ale ciągle nie udaje się tego opisu domknąć, ciągle coś nie pasuje. Aby wyjaśnić niezgodności z obserwacjami, trzeba było wprowadzić ciemną materię (barionową i niebarionową), modele inflacyjne (albo cykliczne), w końcu ciemną energię. Tematem wykładu są te „ciemne” składniki Wszechświata.

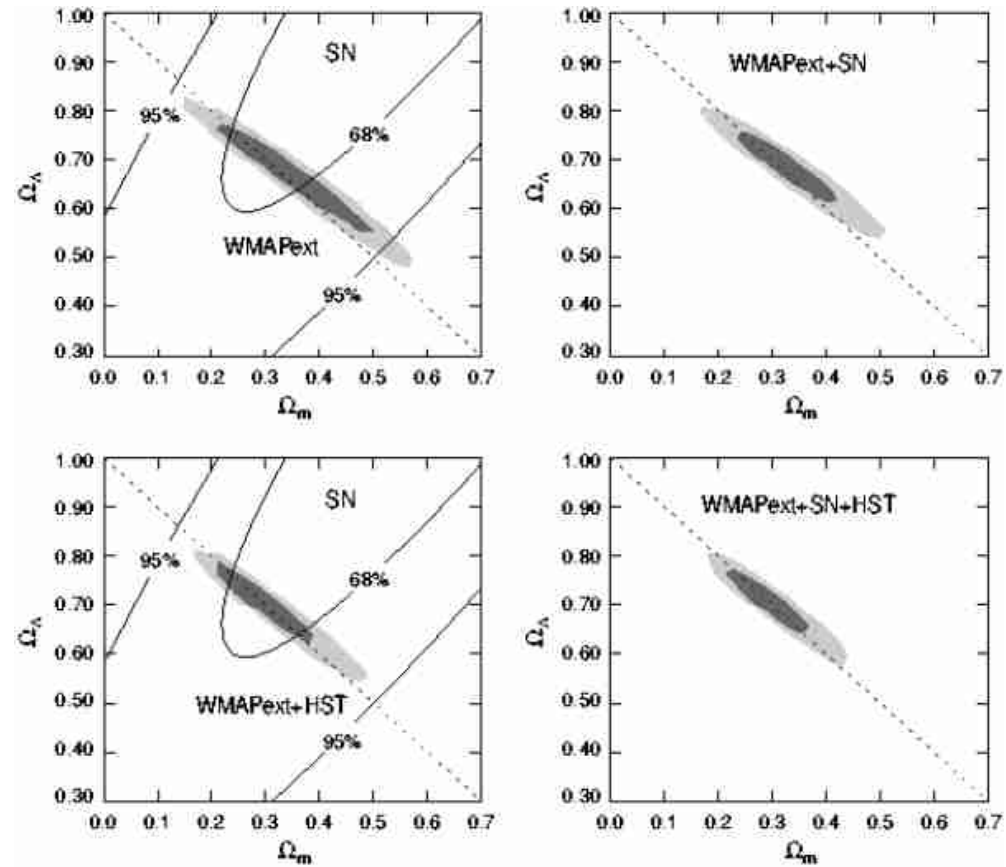
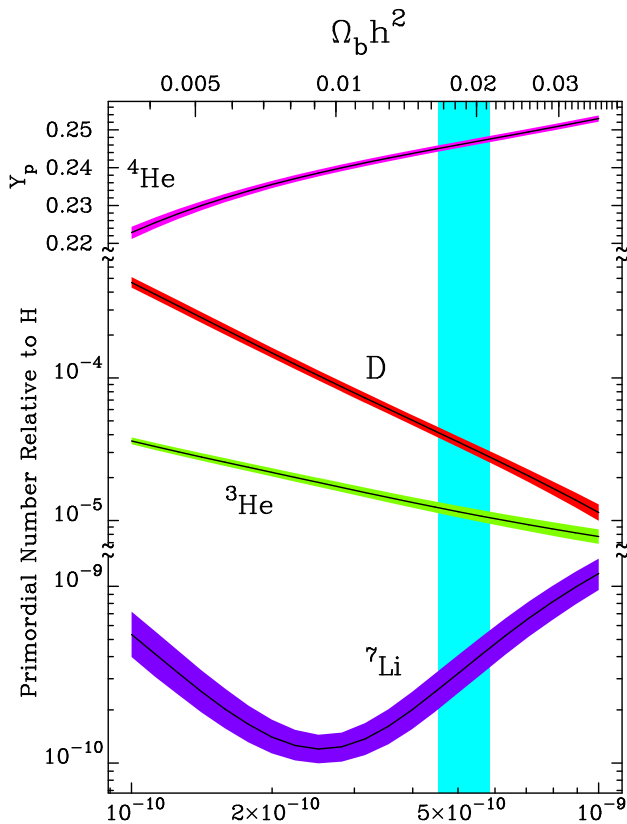
2. Deficyt masy

Początek – późne lata 1930-e, gdy Shapley odkrył gromady galaktyk. Fakt, że gromadzą się w grupy, wydawał się trudny do zrozumienia. Rozkład wydawał się być bardzo anizotropowy i stwierdzono, że warunki początkowe ekspansji mogły być drastycznie zmienione przez oddziaływanie grawitacyjne.

W tym samym czasie Zwicky analizując rozkład prędkości w gromadach galaktyk wywnioskował, że w skali megaparseków struktury nie mogły osiągnąć stanu związanego bez istotnego udziału nieświecącej materii związanej z galaktykami. Oort w swojej analizie grawitacyjnego przyspieszenia prostopadłego do płaszczyzny galaktyki również stwierdził, że tylko ok. 1/2 masy całkowitej tworzy widzialne gwiazdy.

W miarę postępu wielkoskalowych pomiarów prędkości galaktyk w odległych gromadach problem ciemnej materii stawał się coraz bardziej poważny. Najbardziej znamienym przykładem są krzywe rotacji w galaktykach spiralnych – widać kilka razy mniejszą masę niż oczekiwano.

Problem występuje również w kosmologii. Pomiar anizotropii mikrofalowego promieniowania tła, ograniczenia z wielkoskalowej struktury Wszechświata i obserwacje SN Ia wskazują, że gęstość materii powinna być rzędu **0.3 gęstości krytycznej Wszechświata**, zaś standardowy model pierwotnej syntezy ${}^4\text{He}$, ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{He}$ oraz ${}^7\text{Li}$ w zestawieniu z obserwacjami wskazuje na to, że **$\Omega_b h^2 \simeq 0.02$** , co zostało potwierdzone przez misje WMAP, Planck i wiele innych obserwacji.



Ograniczenia z nukleosyntezy, WMAP, SN Ia i wielkoskalowej struktury Wszechświata

3. Ciemna materia

Najprostszym i zdecydowanie najbardziej popularnym rozwiązaniem problemu niewidocznej masy jest dodanie niewidocznego składnika, tzw. ciemnej materii. Ze względu na wspomniane ograniczenia na ilość materii barionowej (a co za tym idzie, również barionowej ciemnej materii), musiałaby to być materia niebarionowa. Ze względu na ograniczenia obserwacyjne wchodziłaby w grę głównie tzw. zimna ciemna materia (Cold Dark Matter, CDM), ewentualnie ciepła ciemna materia (Warm Dark Matter, WDM). Najpopularniejsi kandydaci:

- ⇒ WIMP (Weak Interacting Massive Particles), zwłaszcza tzw. najlżejszy partner supersymetryczny (neutralino?)
- ⇒ aksjony

⇒ masywne neutrina

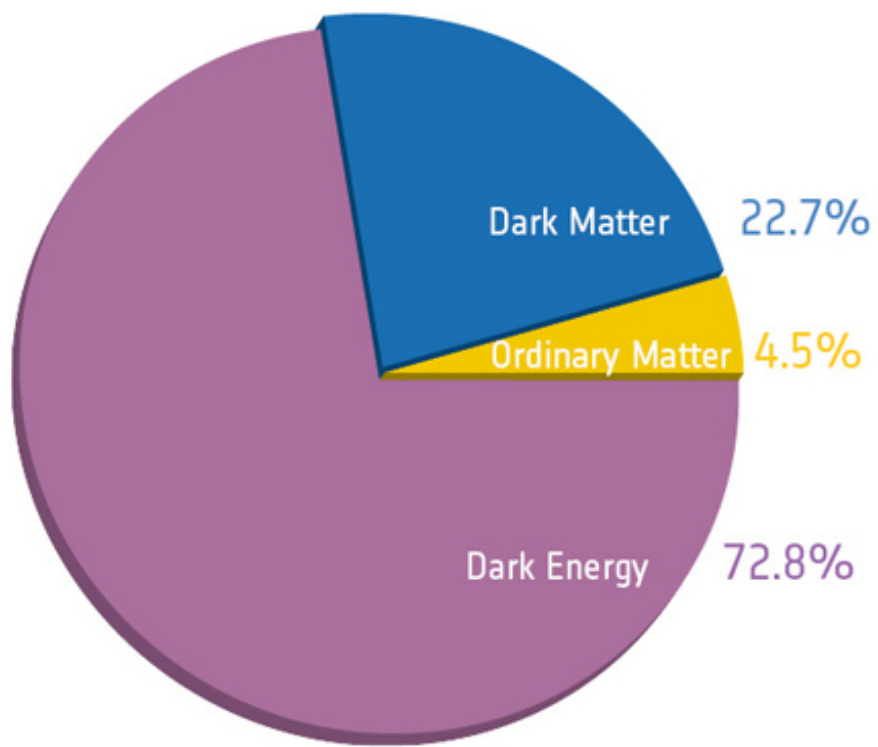
⇒ monopole.

Problem w tym, że to wszystko są cząstki hipotetyczne, nie wykryte nawet pośrednio. W świecie nauki coraz wyraźniej czuć zniecierpliwienie wywołane brakiem sukcesów na tym polu – a co za tym idzie, coraz głośniejsze powątpiewania w ich istnienie.

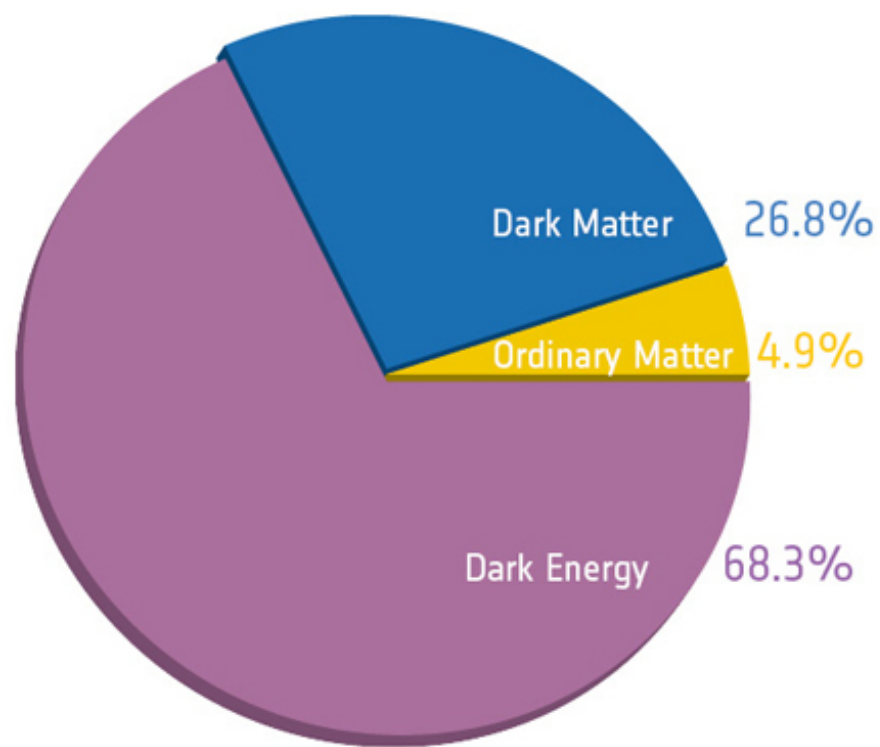
4. Obraz Wszechświata według WMAP i Plancka

Satelita **Microwave Anisotropy Probe** (MAP, zwany później **WMAP** czyli Wilkinson MAP), wystrzelony na orbitę w 2001 r., w ciągu 9 lat swoich obserwacji dostarczył bardzo dokładnych danych dotyczących anizotropii mikrofalowego promieniowania tła. W 2009 roku wystrzelono satelitę Planck, który dostarcza jeszcze dokładniejszych danych.

Wszechświat ma się składać z ok. **5% zwykłej materii**, **27% z niebarionowej ciemnej materii** i **68% z tzw. ciemnej energii**. Tego typu liczby są podawane od szeregu lat i mogą się różnić od powyższych w granicach 10% .



Before Planck



After Planck

Składniki Wszechświata według WMAP i Plancka

5. Ciemna energia

Nawet jeśli uwierzymy w istnienie niebarionowej ciemnej materii, razem z materią barionową powinna dawać wkład równy ok. 32% gęstości krytycznej (wymaganej do tego, żeby Wszechświat był **płaski**, w co wierzy zdecydowana większość kosmologów). Zostaje nam, bagatela, 68% . Ponadto, większość również wierzy w **przyspieszoną ekspansję Wszechświata**, którą wydają się sugerować obserwacje odległych supernowych. Najczęściej wymienia się dwa rozwiązania: rehabilitacja **stałej kosmologicznej** lub wprowadzenie **ciemnej energii**.

Stała kosmologiczna została zaproponowana przez Einsteina po to, żeby wprowadzić model statyczny i powstrzymać nieuchronne kurczenie się Wszechświata. Odkrycie przez Hubble'a

ucieczki galaktyk obaliło ten model i Einstein nazwał wprowadzenie stałej kosmologicznej **największym błędem w jego życiu**. Później złośliwi twierdzili, że największym błędem nie było to, że ją wprowadził ale to, że się z niej wycofał. Efektywnie ta stała (jeśli jest dodatnia) powoduje powstanie dodatkowego odpychania, które działa zwłaszcza na dużych odległościach.

Podobny efekt można uzyskać w inny sposób – przez wprowadzenie dodatkowego składnika do materii we Wszechświecie. W przybliżeniu tzw. cieczy doskonałej (ciśnienie jest proporcjonalne do gęstości masy pomnożonej przez c^2 , czyli gęstości energii) równania kosmologiczne wyglądają następująco:

Równanie Friedmanna

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

Równanie Raychaudhuri

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

Równanie ruchu cieczy

$$R^3\dot{p} = \frac{d}{dt} [R^3(\rho + p)]$$

gdzie Λ to właśnie stała kosmologiczna. Zamiast niej można wprowadzić ciemną energię. Wtedy mielibyśmy trzy składniki:

⇒ materia („pył”): $p = 0$

⇒ promieniowanie: $p = \frac{1}{3}\rho$

⇒ ciemna energia: $p = -w\rho$

Stała kosmologiczna odpowiadałaby ciemnej energii o $w = 1$, pozostałe wartości występują w modelach typu **quintessence** ($w < 1$) i **superquintessence** ($w > 1$).

Po podstawieniu powyższych wartości do równań otrzymujemy różny typ zależności gęstości od czynnika skali i różne tempo ekspansji Wszechświata. Ogólnie rzecz biorąc

$$\rho \sim R^{-3(1+\alpha)}$$

a w szczególności

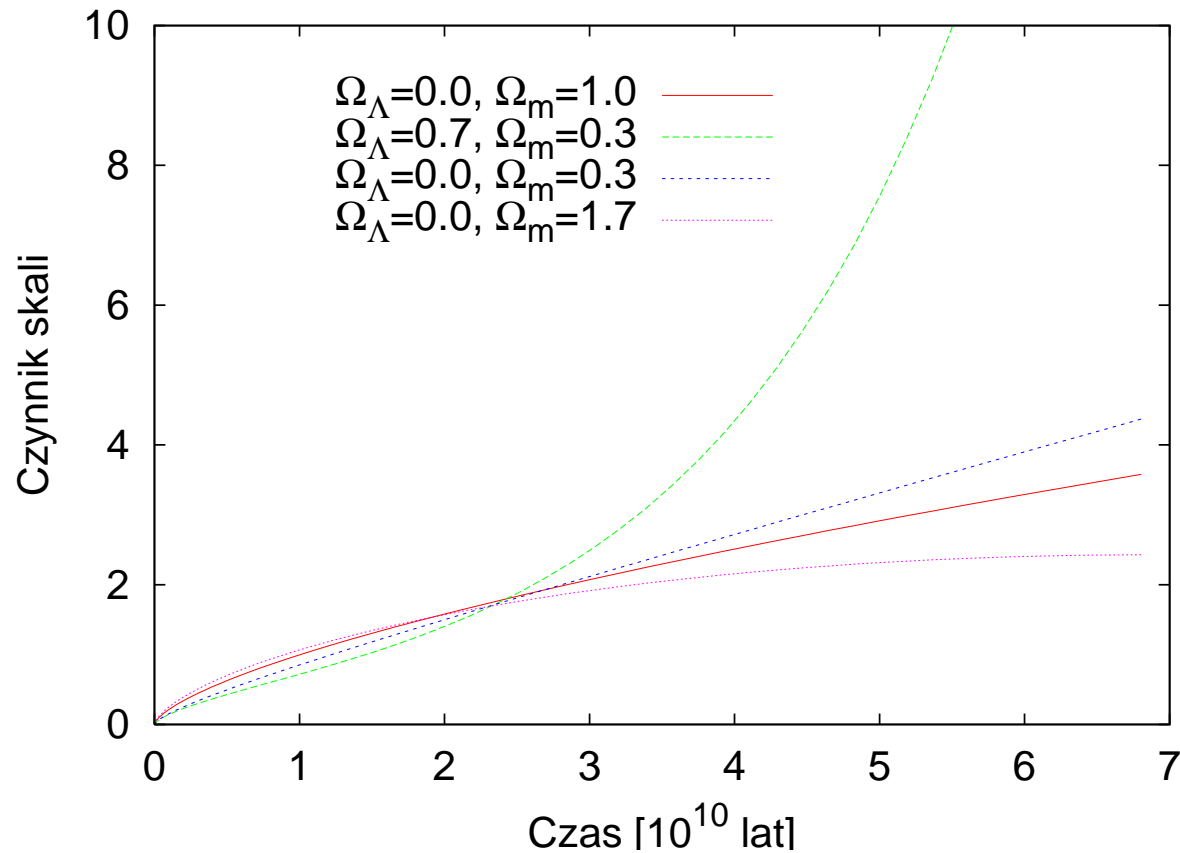
$$\Rightarrow \text{pył: } \rho \sim R^{-3}, R \sim t^{2/3}$$

$$\Rightarrow \text{promieniowanie: } \rho \sim R^{-4}, R \sim \sqrt{t}$$

$$\Rightarrow \text{stała kosmologiczna: } \rho = \text{const}, R \sim e^{t\sqrt{\Lambda/3}}$$

Widać, że gęstość maleje najszybciej dla promieniowania – a to oznacza, że wprawdzie ten czynnik odgrywa coraz mniejszą rolę, lecz w przeszłości było wprost przeciwnie – dla dostatecznie małego czynnika skali dominował. To oznacza, że ewolucja

wczesnego Wszechświata była zdominowana przez promieniowanie.



Ewolucja Wszechświata w modelach płaskim, płaskim ze stałą kosmologiczną, otwartym i zamkniętym.

6. Skąd się bierze ciemna energia?

Wersja krótka i złośliwa: z sufitu, zaś papier zniesie wszystko. A tak poważniej, tego typu rozwiązania pojawiają się przy badaniu tzw. **energii próżni**. W fizyce nigdy nie znamy absolutnej wartości energii potencjalnej, zawsze bierzemy ją w odniesieniu do czegoś. W szczególności, **energia próżni nie musi być równa zero**.

Jeśli badamy próżnię o niezerowej energii to okazuje się, że tej energii towarzyszy równocześnie **bardzo silne, ujemne ciśnienie** a ponieważ ciśnienie w Ogólnej Teorii Względności daje trzykrotnie większy wkład do przyciągania niż energia, w efekcie daje to odpychanie – efekt identyczny z efektem stałej kosmologicznej.

$$\rho_{\Phi} = \frac{1}{2}\dot{\Phi}^2 + V(\Phi)$$

$$p_{\Phi} = \frac{1}{2}\dot{\Phi}^2 - V(\Phi)$$

$$\dot{\Phi}^2 \ll V(\Phi) \Rightarrow p_{\Phi} \simeq -\rho_{\Phi}$$

W podobny sposób można uzasadnić inflację kosmologiczną (wraz z mechanizmami jej początku i końca). W ten sposób otrzymuje się ciemną energię o $w = 1$, można też wprowadzać pola dające inną wartość parametru w .

7. Podsumowanie

W obecnej postaci modelu kosmologicznego Wszechświat byłby 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. Sceptycy (w tym piszący te słowa) uważają je za dorażną łątaninę, mającą podtrzymać upadający model. Z drugiej strony, dla tego modelu brak całościowej alternatywy.

Być może uda się znaleźć rozwiązanie w ramach istniejącego modelu – zamiast ciemnej materii może być Zmodyfikowana Dynamika Newtonowska, zamiast ciemnej energii może

być np. Relativistic Theory of Gravity z niezerową masą grawitonu (też hipotetycznego) albo inna hipoteza, w której materia nie wpływa na ewolucję Wszechświata.