



Barionowe Oscylacje Akustyczne, czyli kwintesencja kosmologii

19 marca 2025 roku **grupa badawcza DESI** (Dark Energy Spectroscopic Instrument) ogłosiła wyniki, które podważają istnienie stałej kosmologicznej – przynajmniej w tej postaci, w jakiej rozumiemy ją obecnie.

Aby zrozumieć, skąd wziął się ten wniosek, cofnijmy się niemal do początku historii Wszechświata, do epoki, w której był on wypełniony gorącą, gęstą plazmą elektronów i barionów (głównie protonów i neutronów). Plazma ta podlegała lokalnym fluktuacjom ciśnienia, wynikającym z konkurencji dwóch efektów: z jednej strony oddziaływania grawitacyjnego, a z drugiej – ciśnienia fotonów, które w tak gęstym ośrodku nie mogły jeszcze propagować się swobodnie.

Wraz z rozszerzaniem się Wszechświata plazma ulegała rozrzedzeniu i ochłodzeniu. Gdy ostatecznie doszło do procesu zwanego rekombinacją, fluktuacje ciśnienia zostały „zapisane” w rozkładzie materii. Dziś możemy odczytać ich skalę w skalach odległości między galaktykami.

Właśnie tego zadania podjął się zespół badawczy DESI. Instrument ten pozwolił skonstruować trójwymiarową mapę odległych galaktyk i kwazarów obejmującą ogromną część obserwowalnego Wszechświata. Wymagało to zarówno precyzyjnego pomiaru separacji kątowych obiektów na niebie, jak i ich przesunięć ku czerwieni, które stanowią miarę odległości kosmologicznej. Celem tych pomiarów było zbadanie **barionowych oscylacji akustycznych (BAO)**, czyli reliktywnych fluktuacji ciśnienia pierwotnej plazmy. To właśnie ten relikw z wczesnego Wszechświata stał się kluczowym narzędziem współczesnej kosmologii obserwacyjnej.

Analiza danych przeprowadzona przez grupę DESI wskazuje, że najlepiej dopasowane modele kosmologiczne to te, w których wpływ ciemnej energii maleje w czasie. Oznaczałoby to, że nie jest ona stałą kosmologiczną w pierwotnym sensie, w jakim pojawia się w równaniach Einsteina, lecz dynamicznym polem skalarnym ewoluującym wraz z ekspansją Wszechświata. Tego rodzaju scenariusze były wcześniej rozważane w pracach teoretycznych pod nazwą **kwintesencji**.

W ramach krótkiej dygresji – kosmologowie dla własnej wygody definiują równania stanu każdego składnika Wszechświata (promieniowanie, materia, ciemna energia) poprzez iloraz ciśnienia i gęstości tegoż składnika:

$$\omega = p/\rho c^2,$$

co – z wyjątkiem tradycyjnej stałej kosmologicznej – przekłada się na tempo ekspansji Wszechświata proporcjonalne do

$$a(t) \sim t^{2/3(\omega+1)},$$

w przypadku gdyby Wszechświat wypełniał tylko ten jeden składnik.

Dla materii $\omega_M = 0$ (materia nie wywiera żadnego ciśnienia), dla promieniowania $\omega_R = 1/3$, a dla stałej kosmologicznej $\omega = -1$. Modele **kwintesencji** – w największym skrócie – zmieniają równanie stanu

ciemnej energii w taki sposób, że $-1 < \omega < 0$ (najlepsze dopasowanie wypada dla $\omega \sim -0,8$). Oznacza to, że ekspansja Wszechświata pozostaje przyspieszona, lecz słabiej niż w przypadku stałej kosmologicznej, a w zależności od ewolucji $\omega(t)$ może w przyszłości przejść w fazę hamowania.

W literaturze rozważa się również fantomową ciemną energię o równaniu stanu $\omega < -1$, co prowadzi do scenariusza „Big Rip”.

Taki wynik oznaczałby ogromną zmianę w naszym rozumieniu Wszechświata. W standardowym modelu Λ CDM zawartość Wszechświata obejmuje promieniowanie, materię oraz stałą kosmologiczną, którą można interpretować jako własność samej czasoprzestrzeni – jej inherentną skłonność do przyspieszonej ekspansji. Wyniki DESI sugerują jednak odmienną narrację: zamiast niezmiennych własności geometrii mielibyśmy do czynienia z fizycznym polem, sprzężonym z grawitacją i zmieniającym się w czasie.

Póki co, należy się jednak wstrzymać z przesadnym entuzjazmem. Analiza DESI nie opiera się wyłącznie na własnych danych, lecz wykorzystuje również obserwacje mikrofalowego promieniowania tła (CMB) oraz zestawu danych dotyczących supernowych typu Ia. W zależności od przyjętego wariantu analizy preferencja dla modelu z malejącą ciemną energią mieści się w przedziale od $2,8\sigma$ do $4,2\sigma$. Standardy fizyki fundamentalnej wymagają poziomu istotności 5σ , a zatem nie można jeszcze mówić o odkryciu. Ponadto nie jest to bezpośredni pomiar zmienności stałej kosmologicznej, lecz wniosek pośredni, wynikający z globalnego dopasowania modeli do danych obserwacyjnych.

Można jednak z dużym przekonaniem stwierdzić, że nadchodzące lata coraz precyzyjniejszych pomiarów kosmologicznych mają realny potencjał do gruntownego przeformułowania naszego obecnego obrazu Wszechświata.

Wiktor MATYSZKIEWICZ

Dla zainteresowanych dalszą lekturą polecamy:
<https://www.desi.lbl.gov/2025/03/19/desi-dr2-results-march-19-guide/>