



Czy kosmiczna zupa jest za słona?

Wojciech A. Hellwing¹

Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika PAN, Warszawa

Jeszcze 10–15 lat temu wydawało się, iż współczesna kosmologia wyrastająca z podstaw jakie na początku zeszłego stulecia nakreślili Einstein, Friedman, Lemaître, Robertson, Hubble i inni, jest zasadnym i coraz lepiej funkcjonującym obrazem Wszechświata. Równania Friedmana, które pojawiły się w wyniku zastosowania ogólnej teorii względności (OTW) Alberta Einsteina do opisu jednorodnego i izotropowego Kosmosu, dawały obraz ekspandującej przestrzeni, której ewolucja jest zdominowana najpierw przez promieniowanie a później materię.

Obraz ten diametralnie zmieniły odkrycia, które stały się następstwem gwałtownego rozwoju możliwości obserwacyjnych w ostatnich dwóch dekadach. Mowa o odkryciu, że całkiem niedawno Wszechświat z fazy spowalniającej ekspansji wszedł w fazę ekspansji przyspieszonej oraz ustaleniu, że dane silnie faworyzują płaski model przestrzeni z wkładem materii do gęstości krytycznej rzędu zaledwie 1/3.

Konieczne stało się poszukiwanie natury „paliwa”, które napędza kosmiczną ekspansję i dopełnia zarazem gęstość Wszechświata do gęstości krytycznej. Ów tajemniczy składnik (bądź nowa fizyka, która manifestuje się jak taki składnik) przyjęło się nazywać ciemną energią.

W 1998 roku dwa zespoły (*Supernova Cosmology Project* i *High-Z Supernova Team*), na podstawie diagramu Hubble’a skonstruowanego dla odległych supernowych, odkryły niezależnie, iż lokalny Wszechświat przyspiesza swoją ekspansję. Od tego czasu odkrycie to zostało potwierdzone przez wiele następnych obserwacji i jest obecnie powszechnie uznawane przez kosmologów. Jednakże mimo ciągłego wzrostu dokładności i ilości danych obserwacyjnych dotyczących fenomenu ciemnej energii wciąż wiemy bardzo mało na temat charakteru „paliwa” napędzającego kosmiczną ekspansję.

Pierwszym i oczywistym kandydatem na ciemną energię była niezerowa stała kosmologiczna – Λ , którą Albert Einstein wprowadził do równań ogólnej teorii względności by, paradoksalnie, uzyskać statyczny wszechświat. Gdy w latach 20. XX wieku Edwin Hubble odkrył ucieczkę galaktyk, wprowadzenie Λ do równań OTW Einstein nazwał swoją największą pomyłką. Okazuje się jednak, że po raz kolejny intuicja nie myliła genialnego uczonego, gdyż obecne oszacowania obserwacyjne wskazują z 99% pewnością na dodatnią wartość tej stałej. Niezerowa wartość Λ odpowiada energii próżni, która wywiera ujemne ciśnienie powodując powstawanie siły odpychającej, działającej w kosmologicznej skali odległości. Klasycznie rozumiana stała kosmologiczna może być utożsamiona z kwantową

¹ pchela@camk.edu.pl

energiją fluktuacji próżni. Jak wiemy z teorii kwantów, próżnia fizyczna nie jest „pusta”, wypełnia ją morze pojawiających się i znikających wirtualnych cząstek i pól kwantowych. Niestety, kwantowanie energii próżni daje absurdalnie olbrzymią wartość Λ , różniącą się od wartości obserwowanej o czynnik rzędu 10^{120} ! Dlatego większość obecnych modeli teoretycznych opisujących ciemną energię zakłada, iż jakaś nieznaną symetrię ustawia wartość klasycznej (związanej z energią próżni) stałej kosmologicznej równą zero i zajmuje się modelowaniem efektywnej stałej kosmologicznej, by wyjaśnić akcelerację Wszechświata.

Kosmologowie, badając ewolucję zimnego² Kosmosu, wypełniają przestrzeń różnymi *plynami doskonałymi*. Każdy taki płyn doskonały modeluje inny składnik Wszechświata i ma swoje własne równanie stanu (równanie wiążące gęstość energii z ciśnieniem) w ogólnej postaci $p = \omega \rho c^2$. Tutaj p oznacza ciśnienie, ρ gęstość, zaś c to prędkość światła. Parametr ω przybiera różne wartości dla różnych składników. Dla promieniowania mamy $\omega = 1/3$, dla materii $\omega = 0$, zaś dla stałej kosmologicznej $\omega = -1$. Dla takiego opisu ukuto nawet obiegowy termin „kosmicznej zupy”, której różne składniki odpowiadają różnym formom energii w Kosmosie.

Słyszynym już pomysłem na ciemną energię jest właśnie kosmiczny płyn doskonały w postaci pola skalarnego, który szumnie nazwano *kwintesencją*. W modelu tym za efektywną stałą kosmologiczną odpowiada pole skalarne, które ewoluje powoli w dół swojego potencjału. Oznacza to, że człony kinetyczne w lagranżjanie kwintesencji są małe w porównaniu z członami potencjalnymi. Dzięki temu kwintesencja może imitować Λ z parametrem ω równym -1 . Dla odpowiednio dobranej funkcji potencjału gęstość energii związana z kwintesencją zaczyna dominować nad innymi formami energii we Wszechświecie w późnych etapach ewolucji i tym samym powoduje obserwowaną przyspieszoną ekspansję przestrzeni. Kwintesencja jest jednak czysto fenomenologicznym modelem, gdyż jak na razie żadna teoria fizyczna nie przewiduje istnienia jednorodnego i izotropowego pola skalarnego, którego potencjał wynikałby *explicite* z teorii. To nie jedyny problem tego modelu. Możliwe jest bowiem stworzenie modeli innych pól skalarnych o całkiem odmiennych od kwintesencji lagranżjanach (np. pole tachionowe), które równie dobrze udają stałą kosmologiczną. Co gorsza, nie można dokonać rozróżnienia pomiędzy tymi modelami na podstawie obserwacji historii ewolucyjnej Wszechświata (czyli np. jasności blasku odległych supernowych). Wystarczy bowiem odpowiednio skonstruować funkcję potencjału, by różne lagranżjany (więc różne pola skalarne) prowadziły do tej samej zadanej postaci ewolucji.

² Przez zimny rozumiemy tu taki stan, w którym różne składniki (promieniowanie, materia barionowa, ciemna materia itd.) nie są względem siebie w stanie równowagi termodynamicznej.

Nie jest wiadome, czy którakolwiek z odmian teorii kwantowej (teoria strun, supersymetria itp.) będzie w stanie przewidzieć dokładną postać potencjału i wyjaśnić fizyczny mechanizm stojący za kwintesencją. Dlatego kosmologowie nie siedzą z założonymi rękoma czekając aż fizycy wysokich energii znajdą właściwą odpowiedź. W ciągu ostatnich kilku lat zostało zaproponowanych kilka bardzo ciekawych, alternatywnych wobec kwintesencji, modeli ciemnej energii.

Jednym z owych alternatywnych modeli jest tzw. model *uogólnionego gazu Czapygina* (UGC). Gaz Czapygina to płyn doskonały, który podlega egzotycznemu równaniu stanu. Nazwa pochodzi od nazwiska znanego rosyjskiego fizyka Siergieja Aleksiejewicza Czapygina (1869–1942), który jako pierwszy sformułował równanie stanu postaci $p = -A/\rho^\alpha$. Model UGC jest atrakcyjny ze względu na to, iż daje on możliwość opisanie ciemnej energii i ciemnej materii w ramach jednej teorii. W podejściu tym zakłada się, iż ciemna materia i energia stanowią jedną mieszaninę wypełniającą Wszechświat. Oba składniki płynu doskonałego mogą ze sobą oddziaływać poprzez transfer energii. Odpowiednie dobranie parametrów A i α powoduje, że wzmożony transfer energii od składnika ciemnej materii do składnika o ujemnym ciśnieniu (ciemnej energii) następuje dopiero dla późnych etapów ewolucji. Dzięki temu epokę przyspieszonej ekspansji (czyli dominacji ciemnej energii) poprzedza długa epoka dominacji materii, co jest w zgodzie z obserwacjami. Warto zaznaczyć również, iż w modelu tym własności uogólnionego gazu Czapygina wyprowadza się z lagranżjanu w postaci zaczerpniętej z nieliniowej teorii uogólnionego elektromagnetyzmu Borna-Infelda. Hipoteza ta napotyka jednak na dosyć poważne trudności w kontekście formowania się struktur we Wszechświecie. Składnik utożsamiany z ciemną energią powoduje, że prędkość dźwięku w UGC staje się bardzo duża, gdy energia z ciemnej materii jest przekazywana do ciemnej energii. Efekt ten powodowałby powstawanie niefizycznych oscylacji czy wręcz eksponencjalnych „erupcji” w widmie mocy fluktuacji gęstości materii, co oczywiście nie jest obserwowane. Kosmologowie pracują obecnie nad rozwiązaniem tego problemu, a sam model pozostaje wciąż ciekawą alternatywą pozwalającą opisać dwa mroczne składniki Kosmosu.

To tylko bardzo krótki przegląd współczesnych koncepcji ciemnej energii; w rzeczywistości, gdybyśmy chcieli przedstawić mnogość rozważanych przez naukowców pomysłów na owo tajemnicze „paliwo” napędzające obecną przyspieszoną ekspansję Wszechświata, musielibyśmy napisać opasłe tomy. Być może wspomniana kosmiczna zupa jest już wystarczająco „słona” i dodawanie do niej nowego składnika, który miałby opisywać ciemną energię, spowoduje tylko jej „przesolenie”. Posługując się analogią, możemy powiedzieć, że wolelibyśmy, aby nasza kosmiczna zupa była smaczna, czyli dobrze opisywała obserwowany Wszechświat. Jak zatem wyjaśnić fakt, iż galaktyki rozbiegają się coraz szybciej wbrew przyciągającej je grawitacji? Odpowiedź może leżeć właśnie w samej naturze grawitacji.

Dotychczas kosmologia opierała się na OTW Einsteina, milcząco ekstrapolując jej zakres stosowania od rozmiarów Układu Słonecznego do całego Wszechświata. Ponieważ OTW została dokładnie sprawdzona tylko w naszym układzie planetarnym, użycie jej do opisu całego Kosmosu jest rozszerzeniem „na wiarę” o rząd wielkości 10^{13} ! Oczywiście OTW przez szereg lat była jedynym dostępnym „narzędziem” dla kosmologii i, co więcej, ma wspaniałe osiągnięcia na tym polu (jak model Lemaître-Friedmana). Być może trudności związane z opisaniem ciemnej energii są pierwszym sygnałem wskazującym na nasz brak głębszego zrozumienia natury grawitacji. Nie mam tu na myśli sławnej i wciąż poszukiwanej kwantowej teorii grawitacji, której efekty, jakiegokolwiek by nie były, są do pominięcia w kosmologicznych skalach odległości. Aby móc wyjaśnić obserwowany fenomen ciemnej energii musielibyśmy opracować nową niskoenergetyczną teorię grawitacji, dla której OTW jest tylko szczególnym przypadkiem, obowiązującym dla odległości mniejszych niż promień Wszechświata. Taką próbą modyfikacji teorii Einsteina jest grawitacja DGP (od autorów: Dvali Gabadadze-Porrati). Zakłada ona, iż żyjemy uwięzieni na trójwymiarowej *branie* zanurzonej w pięciowymiarowej czasoprzestrzeni. Dodatkowy, nieskończony wymiar przestrzenny jest dostępny jednak tylko dla grawitacji, która „wycieka” z naszej *brany* do tzw. pustki. W tej teorii istnieje nowa uniwersalna stała przyrody, tak zwana *odległość przejścia*. Odległość ta charakteryzuje dystans, na którym czterowymiarowe prawa grawitacji (czyli OTW) załamują się i przechodzą w pięciowymiarowe. Odległość przejścia jest porównywalna z obecnym promieniem Wszechświata. Teoria ta tłumaczy obserwowaną akcelerację Kosmosu właśnie przez osłabienie grawitacji na olbrzymich odległościach. Przejście z fazy spowolnionej ekspansji do fazy przyspieszonej jest tłumaczone tym, że Wszechświat musiał osiągnąć odpowiednie rozmiary, by wyżejwymiarowy efekt grawitacyjny stał się znaczący. Okazuje się jednak, że mimo olbrzymiej wartości odległości przejścia rzędu 3 Gpc (gigaparseków) istnieją pewne specyficzne dla tej teorii efekty, które można by zaobserwować na znacznie krótszych odległościach. Już w niedalekiej przyszłości czułość naszych instrumentów powinna osiągnąć próg wymagany do detekcji takich efektów.

Niezależnie od tego, który model ostatecznie okaże się prawdziwy, możemy z pewnością powiedzieć, iż przyroda zaskoczyła nas po raz kolejny. Dlatego pewne jest, iż wyjaśnienie zagadki ciemnej energii przyniesie nam nowy i fascynujący obraz Wszechświata, w którym przyszło nam żyć.

W kosmologii **brany** to obiekty podobne do naszego czterowymiarowego Wszechświata, które poruszają się w hiperprzestrzeni o większej liczbie wymiarów. Dwuwymiarowa brana rozpostarta (zanurzona) w 3 wymiarach to po prostu znana nam wszystkim membrana (fizycznie realizowana np. w głośnikach).