

# Czy kosmiczna zupa jest za słona?

Wojciech A. HELLWING\*

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

Obraz ten diametralnie zmieniły odkrycia, które stały się następstwem gwałtownego rozwoju możliwości obserwacyjnych w ostatnich dwóch dekadach. Mowa o odkryciu faktu, iż całkiem niedawno Wszechświat z fazy spowalniającej ekspansji wszedł w fazę przyspieszonej ekspansji oraz ustaleniu, że dane silnie faworyzują płaski model czasoprzestrzeni 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 nową fizykę, która manifestuje się jak taki składnik) przyjęło się nazywać *ciemną energią*.

\*Centrum Astronomiczne Mikołaja Kopernika w Warszawie

W 1998 roku dwa zespoły (*Supernova Cosmology Project* i *High-Z Supernova Team*) niezależnie odkryły, na podstawie diagramu Hubble’a skonstruowanego dla odległych supernowych, iż lokalny Wszechświat przyspiesza swoją ekspansję. Od tego czasu odkrycie to zostało potwierdzone przez wiele następných 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 –  $\Lambda$ , którą Albert Einstein wprowadził do równań OTW, by – paradoksalnie – uzyskać statyczny Wszechświat. Gdy w latach 20. XX wieku Edwin Hubble odkrył ucieczkę galaktyk, Einstein wprowadzenie  $\Lambda$  do równań OTW 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  $\Lambda$  odpowiada energii próżni, która wywiera ujemne ciśnienie, powodując powstanie siły odpychającej, działającej na odległościach kosmologicznych. Tak klasycznie rozumiana stała kosmologiczna może być utożsamiona z kwantową energią 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  $\Lambda$  różniącą się od wartości obserwowanej o czynnik rzędu  $10^{120}$ . Dlatego większość obecnych modeli teoretycznych ciemnej energii zakłada, iż jakaś nieznaną symetrię wymusza wartość klasycznej (związanej z energią próżni) stałej kosmologicznej równą zero, i tak modyfikuje efektywną stałą kosmologiczną, by wyjaśnić akcelerację Wszechświata.

Kosmologowie badając ewolucję zimnego Kosmosu wypełniają czasoprzestrzeń 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  $p = w\rho c^2$ . Tutaj  $p$  oznacza ciśnienie,  $\rho$  gęstość,  $c$  zaś to prędkość światła. Parametr  $w$  przybiera różne wartości dla różnych składników. Dla promieniowania mamy  $w = 1/3$ , dla materii  $w = 0$ , a dla stałej kosmologicznej  $w = -1$ . Dla takiego opisu ukuto nawet obiegowy termin „kosmicznej zupy”, której różne składniki odpowiadają różnym formom energii w Kosmosie.

Słynnym już pomysłem na ciemną energię jest właśnie kosmiczny płyn doskonały w postaci pola skalarne, który szumnie nazwano *kwintesencją*. W modelu tym za efektywną stałą kosmologiczną odpowiada pole skalarne, które ewoluuje 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  $\Lambda$  z parametrem  $w$  równym  $-1$ . Dla odpowiednio dobranej funkcji potencjału gęstość energii związana z kwintesencją zaczyna dominować nad innymi formami energii we Wszechświecie na późnych etapach ewolucji i tym samym powoduje obserwowaną ekspansję czasoprzestrzeni. Kwintesencja jest jednak czysto fenomenologicznym modelem, gdyż jak na razie żadna teoria fizyczna nie przewiduje istnienia jednorodnego i izotropowego pola skalarne kwintesencji, którego potencjał wynikałby *explicite* z teorii. To nie jedyny problem tego modelu. Możliwe jest bowiem stworzenie modeli pól skalarnych o całkiem odmiennych od kwintesencji lagranżjanach (np. pole tachionowe), które równie dobrze udają stałą kosmologiczną. Co gorsza, nie można dokonać rozróżnienia między tymi modelami na podstawie obserwacji historii ewolucyjnej Wszechświata (czy np. jasności odległych supernowych).

Wystarczy bowiem odpowiednio skonstruować funkcję potencjału, by różne lagranżjany (więc różne pola skalarne) prowadziły do tej samej zadanej postaci ewolucji.

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 rękami 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 Czapłygina* (UGC). Gaz Czapłygina to płyn doskonały, który podlega egzotycznemu równaniu stanu. Nazwa pochodzi od nazwiska znanego rosyjskiego fizyka, Siergieja Aleksiejewicza Czapłygina (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 opisu ciemnej energii i ciemnej materii w ramach jednej teorii. W podejściu tym zakłada się, że ciemna materia i energia stanowią jedną mieszaninę wypełniającą Wszechświat. Oba składniki płynu doskonałego mogą wzajemnie ze sobą oddziaływać poprzez transfer energii. Odpowiednie dobranie parametrów  $A$  i  $\alpha$  powoduje, że wzmożony transfer energii od składnika ciemnej materii do składnika o ujemnym ciśnieniu (ciemnej energii) następuje dopiero na późnych etapach 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 Czapłygina wyprowadza się z lagranżjanu w postaci zaczerpniętej z nieliniowej teorii uogólnionego elektromagnetyzmu Borna–Infelda. Hipoteza ta napotyka jednak dosyć poważne trudności w kontekście formowania się struktury 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 нефизycznych 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 na ciemną energię. 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 „przesolenie”. Posługując się analogią możemy powiedzieć, że jednak chcemy, by 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’a–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 były, są do zaniedbania na odległościach kosmologicznych. Aby móc wyjaśnić obserwowany fenomen ciemnej energii, musielibyśmy sięgnąć po nową niskoenergetyczną teorię grawitacji, 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 niejako w pięciowymiarowej przestrzeni. 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, tzw. *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 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 skali przejścia (rzędu 3 Gpc) istnieją pewne specyficzne dla tej teorii efekty, które można by zaobserwować na znacznie mniejszych 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, że wyjaśnienia zagadki ciemnej energii przyniesie nam nowy i fascynujący obraz Wszechświata, w którym przyszło nam żyć.