

Stała kosmologiczna Einsteina

Henryk Drozdowski

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Fizyki, Zakład Fizyki Dielektryków

Sto lat temu, w 1917 roku Albert Einstein dążył do rozwiązania poważnego problemu, a mianowicie pogodzenia swojej nowej teorii grawitacji, Ogólnej Teorii Względności (OTW), z ówczesnymi obserwacjami astronomicznymi Wszechświata. Podobnie jak znakomita większość jemu współczesnych był przekonany, że Wszechświat jest statyczny. Najbardziej dramatyczną konsekwencją OTW Einsteina było przewidywanie, że cały Wszechświat powinien się rozszerzać. Jednak w tym czasie czołowi astronomowie zapewniali Einsteina, że Wszechświat jest statyczny (ani się nie rozszerza, ani nie kurczy). Zgodnie z OTW ten pożądaný przez wszystkich stan był nieosiągalny. W desperacji Einstein *ad hoc* wprowadził do swoich równań człon kosmologiczny Λ (lambda), który przeciwstawiał się grawitacji i umożliwiał uzyskanie rozwiązania statycznego. W oryginalnej wersji równań Einsteina człon kosmologiczny nie występował; został wprowadzony przez Einsteina, gdy okazało się, że rozwiązania opisujące Wszechświat nie są statyczne.

Po odkryciu ekspansji Wszechświata wydawało się, że stała kosmologiczna nie jest do niczego potrzebna w fizycznym obrazie świata. Zapomniana przez lata stała kosmologiczna dostarcza obecnie możliwego wytłumaczenia zmian w tempie rozszerzania się Wszechświata. W swym dzisiejszym wcieleniu człon kosmologiczny wynika nie z teorii względności, lecz z mechaniki kwantowej. Nowa koncepcja członu kosmologicznego nie ma nic wspólnego z koncepcją Einsteina sprzed stu lat! Ostatnio pojawiło się wiele różnych koncepcji teoretycznych próbujących wytłumaczyć, czym jest stała kosmologiczna.

Niniejszy artykuł jest próbą analizy problemu stałej kosmologicznej Einsteina dla potrzeb nauczania fizyki.

1. Istota Ogólnej Teorii Względności Einsteina

W Szczególnej Teorii Względności (STW) Einstein rozszerzył zasady inwariancji Galileusza i Newtona tak, aby były spełnione nie tylko przez równania mechaniki, ale również przez sformułowane przez Maxwella równania elektrodynamiki [1]. Poddał on gruntownej analizie warunki, w jakich przeprowadza się pomiary przestrzeni i czasu w fizyce, i udowodnił, że uzyskiwane w ten sposób wielkości długości i trwania w czasie zależą w istotny sposób od stanów względnego ruchu ciał mierzonych. Ostatecznym wynikiem STW jest to, iż równania ruchu Einsteina oraz równania pól elektrodynamicznych Maxwella są niezmiennicze we wszystkich inercjalnych układach odniesienia.

Jednak STW przyznawała uprzywilejowane stanowisko pewnej szczególnej klasie układów odniesienia w formułowaniu równań zarówno mechaniki, jak i elektrodynamiki. Dla Einsteina taka sytuacja była niepokojąca i niewłaściwa, skoro z kinematycznego punktu widzenia (czyli przy analizie zmiany położenia ciał bez

odwoływania się do sił jako czynników warunkujących te zmiany) wszelki ruch jest względny.

Ogólna Teoria Względności wykazała, że geometria jest nieodłączną częścią fizyki. W teorii tej Einstein wskazał geometrii miejsce równoważne temu, które zajmuje materia. Sprawił, że geometria stała się obiektem dynamicznym; fizycy zaczęli pytać się o jej ewolucję i kształt.

Ogólna Teoria Względności łączy materię z geometrią za pomocą równania Einsteina:

$$G[g] = T, \quad (1)$$

gdzie G jest wielkością, którą obliczamy za pomocą obiektu g i jego pochodnych, natomiast T jest obiektem opisującym materię. Rozwiązywanie tego równania polega na znajdowaniu g .

Modelem dla OTW jest 4-wymiarowa rozmaitość Riemanna, w której czwartą współrzędną jest czas. Czterowymiarową czasoprzestrzeń opisać można za pomocą różnych struktur matematycznych. Najprostszą możliwą strukturą matematyczną jest rozmaitość różniczkowalna. Rozmaitość jest różniczkowalna, gdy każdemu punktowi przyporządkujemy różniczkowalne funkcje od współrzędnych. Oznacza to, że określono na rozmaitości pole skalarne. Jeżeli każdemu punktowi rozmaitości różniczkowalnej przyporządkujemy wektor styczny do krzywej, przechodzącej przez ten punkt, to otrzymamy zbiór wszystkich możliwych wektorów, który tworzy przestrzeń styczną do rozmaitości. Najważniejszym polem określonym na rozmaitości różniczkowalnej o strukturze Riemanna jest pole tensora metrycznego (g oznacza pole). Operacja ta definiuje odległość pomiędzy dwoma punktami na rozmaitości. Symetryczny i dodatnio określony tensor metryczny $g_{\mu\nu}$ występuje w wyrażeniu na kwadrat elementu długości na rozmaitości Riemanna:

$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^{n-1} \sum_{\nu=0}^{n-1} g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu. \quad (2)$$

Tensor metryczny $g_{\mu\nu}$ ma postać macierzy kwadratowej o 16-tu składowych, które są funkcjami współrzędnych:

$$ds^2 = \begin{pmatrix} dx^0 & dx^1 & dx^2 & dx^3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g_{00} & g_{01} & g_{02} & g_{03} \\ g_{10} & g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{20} & g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{30} & g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx^0 \\ dx^1 \\ dx^2 \\ dx^3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}. \quad (4)$$

Nazwa *tensor metryczny* pochodzi stąd, że znając składowe tego tensora potrafimy napisać metrykę danej czasoprzestrzeni. Skąd jednak uzyskać składowe tensora metrycznego? Einstein pierwszy utożsamiał składowe tensora metrycznego z potencjałami pola grawitacyjnego. Stanowi to ośnowę OTW. Potencjał pola grawitacyjnego musi być tensorem. Einstein rozumiał rolę potencjałów grawitacyjnych i wprowadził metrykę, pojęcie geometryczne do opisu pola grawitacyjnego.

Źródłem pola grawitacyjnego jest rozkład mas, energii i pędów, który zakrzywia czasoprzestrzeń. Zakrzywienie czasoprzestrzeni z kolei określa ruchy (przyspieszenia) materii w czasoprzestrzeni. Jest to fundamentalna idea OTW.

Geometria OTW zadana jest przy pomocy formy Riemanna (2):

$$d s^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu.$$

Należy teraz podać równanie pola grawitacyjnego Einsteina, które określa związek między krzywizną czasoprzestrzeni i rozkładem oraz ruchem materii we Wszechświecie:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = -\chi T_{\mu\nu}, \quad (5)$$

gdzie $R_{\mu\nu}$ jest tensorem krzywizny Ricciego, R – promień (skalar) krzywizny Ricciego, $g_{\mu\nu}$ jest tensorem metrycznym, natomiast $\chi = 8\pi \frac{G}{c^4}$ – stała grawitacji Einsteina, czyli stała „sprzężenia” geometrycznej struktury czasoprzestrzeni (lewa strona równania) z rozkładem materii (prawa strona); widać, że χ co do wielkości jest proporcjonalna do stałej grawitacji Newtona G , zaś $T_{\mu\nu}$ jest tensorem energii-pędu: określa on energię i pęd materii – źródło krzywizny. Tak więc tensor $T_{\mu\nu}$ zależy od metryki $g_{\mu\nu}$, czyli $T_{\mu\nu}(g_{\mu\nu})$. Całe wyrażenie znajdujące się po lewej stronie równania (5) nazywa się też tensorem Ricciego; $R_{\mu\nu}$, $g_{\mu\nu}$, R określają krzywiznę czasoprzestrzeni, natomiast tensor energii-pędu $T_{\mu\nu}$ zależy od rozkładu i ruchu materii.

Równanie (5) uczy, że materia „mówi” przestrzeni, jak ma być zakrzywiona, natomiast przestrzeń „mówi” materii, jak ma się poruszać; równanie to czytane z lewa na prawo określa, jak geometria przestrzeni determinuje ruchy materii; czytane na odwrót uczy, jak rozkład materii określa geometrię przestrzeni. Czasami określa się równanie (5), podane w zwartej postaci w liczbie mnogiej, jako równania Einsteina. W rzeczywistości składa się z dziesięciu oddzielnych równań.

Równania Einsteina (5) można przedstawić w łatwiejszej do zrozumienia z punktu widzenia dydaktyki fizyki – symbolicznej postaci:

$$\text{KRZYWIZNA (tensor Ricciego)} = 8 \times G \text{ MATERIA (tensor energii-pędu)}. \quad (6)$$

Struktura graficzna równań (5) jest następująca: po lewej stronie znajdują się wyrazy geometryczne – tensor Ricciego; po prawej stronie – wyrazy odpowiedzialne za materię (tensor energii-pędu). Schematycznie można równania pola grawitacyjnego Einsteina zapisać następująco:

$$\text{Geometria czasoprzestrzeni} \Leftrightarrow \text{Rozkład mas, energii i pędów}. \quad (7)$$

Istnieje związek między geometrią czasoprzestrzeni a zjawiskami w niej zachodzącymi: procesy we Wszechświecie sprawiają, że czasoprzestrzeń się zakrzywia, a zakrzywienie czasoprzestrzeni wpływa na ruch materii i na procesy w niej zachodzące. Ogólna Teoria Względności jest więc teorią dynamiczną. Traktuje ona jedynie o tym, jak materia jest powiązana z geometrią czasoprzestrzeni; nie potrafi natomiast niczego powiedzieć o pochodzeniu i budowie tej materii.

W rzeczywistym Wszechświecie materia i promieniowanie są w przybliżeniu równomiernie rozłożone w przestrzeni. W tej sytuacji, z równań Einsteina (5) wynika, że Wszechświat się rozszerza lub kurczy. Dokonując uogólnienia swoich równań na cały Wszechświat, Einstein opierał się na postulacie doskonałej zasady kosmologicznej, czyli na założeniu, że Wszechświat jest: 1) jednorodny, 2) izotropowy oraz 3) stacjonarny. Równania te spełniały powyższe założenia pod warunkiem jednak, że istnieje coś, co kompensuje grawitacyjne efekty materii i promieniowania.

2. Wielowiekowe przekonanie o niezmienności Wszechświata

Obraz Wszechświata statycznego był głęboko zakorzeniony w myśli Zachodu, począwszy od czasów Arystotelesa. Wszechświat jest statyczny – sądził Arystoteles – ponieważ każda inna koncepcja prowadziłyby do kłopotliwych pytań o jego powstanie. Wiara w statyczny Wszechświat zapewniała komfort filozoficzny: nie trzeba było wracać do pytania, co zdarzyło się „na początku”. „Tego świata, jednego i tego samego świata wszechrzeczy, nie stworzył ani żaden z bogów, ani żaden z ludzi, lecz był on, jest i będzie wiecznie żyjącym ogniem, który według miary rozplómienia się i według miary gaśnie” – napisał Heraklit z Efezu prawie dwa i pół tysiąca lat temu.

Mocne i niezachwiane przekonanie o niezmienności Kosmosu istniało także w umysłach przenikliwych obserwatorów nieba. Tycho (Tyge) Brahe był świadkiem zjawiska, mającego charakter eksplozywny – rozbłysku supernowej (1572). A oto, jak to zjawisko opisał: „Ostatniego roku (1572) w miesiącu listopadzie ... zauważyłem nową niezwykle gwiazdę, przewyższającą jasnością wszystkie inne... Byłem tak tym zaskoczony, że nie powstydzilem się zwątpić w wiarygodność świadectwa moich oczu... Gdyż zgodnie z przekonaniem wszystkich filozofów, potwierdzonym wyraźnie przez fakty, w obszarach eterycznych świata niebieskiego nie może być żadnych zmian, ani w sensie powstawania, ani zanikania; a niebo i ciała niebieskie ani rosną, ani maleją, ani też ulegają jakimkolwiek bądź innym

zmianom, ani pod względem liczebności, ani rozmiarów, ani świecenia, lecz pozostają zawsze niezmiennie pod każdym względem”.

Newton dowodził, że Wszechświat nie może się globalnie rozszerzać ani kurczyć, ponieważ taki ruch wymagałby istnienia środka. Jednakże materia, według Newtona, rozszkana w nieskończonej przestrzeni nie wyznacza żadnego środka. Newton opowiedział się więc ostatecznie za arystotelesowską tradycją niezmiennego Wszechświata.

Astronomowie zapewniali Einsteina, że Wszechświat jest niezmienny, statyczny. Potwierdzały to obserwacje astronomiczne: w miejsce „gasnących” gwiazd „zapalają się” nowe, a ich ruchy są powolne i przypominają ruchy molekuł w chmurze gazu – mimo ich występowania chmura jako całość nie zmienia się. Wszechświat dla astronoma stanowi olbrzymie (nieskończone?) rojowisko gwiazd tkwiących niemal nieruchomo w przestrzeni i wypełniających ją z grubsza równomiernie (gdy średniować po bardzo dużych obszarach). Wszechświata nie uważano za byt, który ma swą historię w czasie. Skoro powstał kiedyś, to musi być już niezmienny, aż do końca swego istnienia. Wszechświat jako całość miał być jedynym układem, który pozostaje niezmienny. Lokalnie wszystko się zmienia (heraklityjskie „wszystko płynie”), a zarazem miejscowe zmiany bieżą tak, że globalnie nic się nie zmienia, jako całość Uniwersum tkwi w bezruchu.

Licząca dwa i pół tysiąca lat wiara w niezmiennosc Wszechświata załamała się w 1929 roku, gdy astronom amerykański Edwin Hubble ogłosił odkrycie prawa powszechnej ucieczki galaktyk [2]. Odkrycie rozszerzającego się Wszechświata spowodowało radykalny przewrót w dotychczasowych, powszechnie przyjętych poglądach na naturę Wszechświata. Okazało się, że Wszechświat ewoluuje. Aby „powstrzymać ekspansję” Wszechświata Einstein dopisał człon kosmologiczny Λ pomnożony przez tensor metryczny czasoprzestrzeni $g_{\mu\nu}$ (który określa odległości) do lewej strony równania pola (5):

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = - \chi T_{\mu\nu}, \quad (8)$$

ponieważ uważał, że opisuje on właściwości samej przestrzeni. Stała kosmologiczna opisuje „antygravitacyjną” siłę, która nie ma żadnego źródła; wynika ona z samej struktury czasoprzestrzeni.

Stała kosmologiczna powoduje, iż czasoprzestrzeń ma naturalną tendencję do ekspansji, która dokładnie równowazy przyciąganie materii: dzięki temu Wszechświat jest statyczny [3].

Skoro Wszechświat się rozszerza, to musiał wystąpić czynnik zapoczątkowujący to rozszerzanie się. Teoria Gorącego Wielkiego Wybuchu [4] jest ekstrapolacją wstecz odkrycia zjawiska rozszerzającego się Wszechświata. Jak doszło do Wielkiego Wybuchu? Dlaczego tak się stało? Standardowy Model Kosmologiczny traktuje ekspansję Wszechświata jako założenie wyjściowe. Nie tłumaczy Wielkiego Wybuchu.

3. Teoria inflacyjnego stadium ewolucji Wszechświata

Teoria inflacji daje odpowiedź na dwa pytania: co spowodowało ekspansję Wszechświata? W jaki sposób praktycznie cała materia i energia powstały w tym samym momencie? Paradygmat inflacyjny uzupełnia teorię Wielkiego Wybuchu poprzez opis, w jaki sposób cały proces Wielkiego Wybuchu został zapoczątkowany. Jaki mechanizm fizyczny mógł spowodować inflację Wszechświata? Wszystkie teorie cząstek elementarnych tłumaczące mechanizm inflacji Wszechświata opierają się na pojęciu próżni kwantowej. Właśnie inflacyjny scenariusz ewolucji Wszechświata zwrócił uwagę na problem próżni kwantowej. Próżnia kwantowa zapoczątkowała i podtrzymała inflację.

Spróbujmy dokonać rekonstrukcji warunków panujących we Wszechświecie tuż przed samą inflacją. Odtwarzanie tej historii stanowi najbardziej pasjonującą szaradę naszych czasów. Przyjmijmy – za Hellerem [5] – iż „początkowa osobliwość nie jest ani punktem, ani częścią (choćby o zerowych rozmiarach) czasoprzestrzeni, ani Wielkim Wybuchem”. Wszechświat istnieje w pobliżu początkowego stanu osobliwego: liczy 10^{-35} s od chwili osobliwej. W scenariuszu inflacyjnym zakłada się, że ewolucja Wszechświata zaczęła się od stanu próżni, który nie miał najniższej energii. Stąd nazywa się go „próżnią fałszywą”. Stan ten tworzy się w czasie 10^{-35} s.

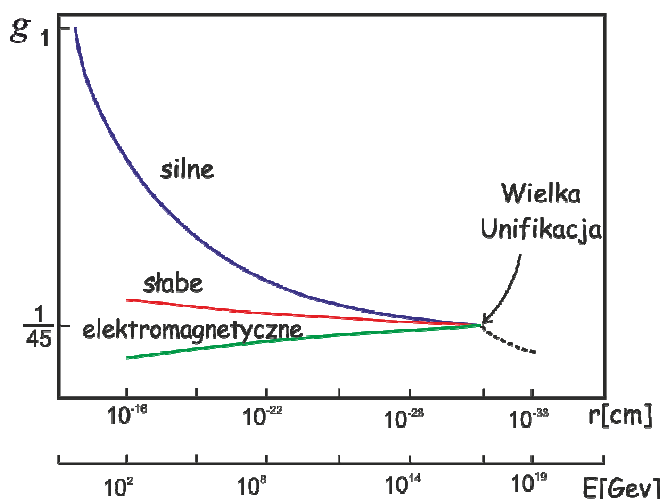
Pierwotny Wszechświat znajdował się więc w stanie fałszywej próżni (rys. 1). „Na samym początku była próżnia; dziwny rodzaj pustki, nicieść nie zawierająca przestrzeni, czasu ani materii, żadnego światła ni dźwięku. Lecz prawa przyrody były już gotowe, a owa dziwna pustka kryła w sobie potencjał. Jak ogromny głąz na wierzchołku wyniosłej skały...” [6].



Rys. 1. Początkowy stan kwantowy Wszechświata [7]

Przed inflacją Wszechświat miał bardzo małe rozmiary rzędu 10^{-30} cm, był ściśnięty do rozmiaru cząstki elementarnej. Cały dziś obserwowalny Wszechświat zajmował maleńką objętość, wewnątrz której wszystko ze wszystkim było w „przyczynowym kontakcie” [4]. Rozmiar horyzontu zdarzeń zrównał się ze skalą zaburzenia. Kwantowa nieoznaczoność sprawiła, że gęstość wczesnego Wszechświata była gdzieś większa, w innych zaś obszarach niższa [8]. Oznacza to, że Wszechświat o obszarze 10^{-30} cm nie był idealnie gładki: istniały w nim mikroskopijne kwantowe fluktuacje, zaburzenia gęstości. W jednych miejscach Wszechświat był trochę gęstszy niż w innych. W każdym miejscu przestrzeni istniały niewielkie kwantowe fluktuacje statystyczne gęstości materii. W niemal jednorodnym rozkładzie pierwotnej materii pojawiły się niewielkie zmarszczki. W takich warunkach kwantowe fluktuacje obejmowały cały świat. Istniała więc elementarna więź między kosmologią a mikroświatem. Gdyby Wszechświat zaczął się rozwijać od kompletnej jednorodności, pozostałby taki i nie pojawiłoby się nic, co mogłoby sprawić, że materia zaczęła się gromadzić – tu, tam czy w jakimkolwiek innym miejscu [8].

Gdy Wszechświat liczył $t = 10^{-35}$ s, przy energiach rzędu $E = 10^{15}$ GeV ($T = 10^{28}$ K) nastąpiła Wielka Unifikacja Sił: oddziaływania jądrowe silne i słabe oraz elektromagnetyczne były zunifikowane, to znaczy miały równą moc. Wszechświatem rządziła jedna uniwersalna siła: poszczególne oddziaływania nie miały swojej tożsamości. Dzieje się tak dlatego, że ich stałe sprzężenia, które określają intensywność wymiany nośników sił: fotonów między ładunkami elektrycznymi, bozonów W i Z w oddziaływaniach słabych jądrowych i gluonów w oddziaływaniach silnych między kwarkami, zmieniają się wolno z energią, aby przy energii 10^{15} GeV uzyskać identyczne wartości (rys. 2) [9].



Rys. 2. Wpływ fluktuacji próżni na efektywne natężenia oddziaływań elektromagnetycznych, słabych i silnych jądrowych

Zadziwiające jest, że kwantowe fluktuacje zostały „rozciągnięte” w okresie inflacji do ogromnych, astronomicznych rozmiarów i dostrzeżone przez satelity COBE i WMAP.

Stan fałszywej próżni był stanem o maksymalnej (doskonałej) symetrii. Stan maksymalnej symetrii jest stanem niestabilnym. Fałszywa próżnia kwantowa była sama w sobie nietrwała. Miała różne stany, które różniły się między sobą energią (poziomami energetycznymi). Dąży ona – jak wszystkie stany wzbudzone w mechanice kwantowej – do przejścia do stanu podstawowego, czyli do prawdziwej próżni. Te kwantowe przejścia (o stałej amplitudzie) między stanami fizycznymi (poziomami energetycznymi) są kwantowymi fluktuacjami, widocznymi jako „zmarszczki” w reliktowym promieniowaniu tła kosmicznego.

Stan taki trwał do momentu przekroczenia pewnej temperatury zwanej temperaturą krytyczną. W tym momencie nastąpiło przejście fazowe: „skroplenie próżni”, czyli przejście do stanu próżni „prawdziwej” o najniższej energii. Przejście takie nastąpiło prawdopodobnie po kilkudziesięciu tyknięciach [10]. Z wydzielonej przy tym energii powstała – jak się uważa – obserwowana obecnie materia i promieniowanie. Wydzielaty się przy tym ogromne ilości ciepła. Świadectwem tego procesu może być mikrofalowe promieniowanie tła o temperaturze 2,7 K, wypełniająca obecnie całą przestrzeń kosmiczną. Gdy skończyła się inflacja – do głosu dochodzi Wielki Wybuch.

Inflacja trwała 10^{-30} s. Fałszywa próżnia załamała się. W temperaturze 10^{15} GeV nastąpiło przejście fazowe i oddziaływania silne odłączyły się od elektrostałych. Wirtualne cząstki stały się rzeczywistymi. Rozpad „fałszywej próżni” polegał na tym, że inflacja Wszechświata rosła, zaś „fałszywa” próżnia stawała się „przechłodzona”. Inflacja Wszechświata ustała po przekroczeniu temperatury krytycznej T_k . Gdy $T > T_k$ nastąpiło „przejście fazowe”, czyli „skroplenie próżni”. „Fałszywa” próżnia przeszła do stanu najniższego poziomu energetycznego, czyli do stanu próżni „prawdziwej”. Amplituda przejść między stanami fizycznymi była stała ($A = const$).

4. Nowe wcielenie stałej kosmologicznej Einsteina. Fałszywa próżnia kwantowa Wszechświata ewoluuje zgodnie z równaniami OTW Einsteina!

Dla Einsteina stała kosmologiczna była kłopotliwym dodatkiem, natomiast w teoriach kwantowych pojawienie się stałej kosmologicznej można uzasadnić fizycznie. Zauważył to już w 1967 roku rosyjski fizyk Jakow B. Zeldowicz. Konieczność uwzględnienia członu kosmologicznego w teorii kwantowej wynika z tego, że pusta przestrzeń jest wypełniona energią o niezerowej gęstości. Przyczyną inflacji miałyby być efekt odpychania wywołany energią próżni kwantowej, prowadzący do takich samych skutków jak wprowadzenie stałej kosmologicznej.

Gęstość energii próżni ρ_p pomnożona przez $g_{\mu\nu}$ musi się znaleźć po prawej stronie równania pola (5) – tam gdzie są inne formy energii:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = -\chi (T_{\mu\nu} + \rho_p g_{\mu\nu}). \quad (9)$$

Człon kosmologiczny Einsteina $\Lambda g_{\mu\nu}$ i kwantowa energia próżni $\rho_p g_{\mu\nu}$ są matematycznie równoważne, ale fizykalnie nie mają ze sobą nic wspólnego! Człon kosmologiczny Einsteina jest właściwością przestrzeni; kwantowa energia próżni jest formą energii związaną z wirtualnymi parami cząstka – antycząstka. W próżni takie pary nieustannie powstają, by po chwili ponownie zniknąć. Stała kosmologiczna jest proporcjonalna do gęstości energii próżni.

Człon $\rho_p g_{\mu\nu}$ opisuje „tajemniczą” formę energii wypełniającą całą przestrzeń, która jest odpowiedzialna za wzrost tempa ekspansji Wszechświata. Ta forma energii ma przedziwne właściwości: jej gęstość energii pozostaje stała pomimo ekspansji kosmicznej i której grawitacja działa odpychająco.

5. Wszechświat rozszerza się coraz szybciej

Laureatami Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki w 2011 roku zostali astrofizycy: Saul Perlmutter, Adam Riess oraz Brian Schmidt. Byli oni kierownikami zespołów obserwacyjnych znanych jako: *Supernova Cosmology Project* (Perlmutter) w Lawrence Berkeley National Laboratory w Caltech i międzynarodowego konsorcjum *High-Z Supernova Search Team* (Riess, Schmidt). Celem obserwacji supernowych typu Ia (które są wybuchami termojądrowymi białych karłów) było zbadanie najbardziej odległych supernowych, które są eksplozjami gwiazd na granicy obserwowalnego Wszechświata. Odkryto kilkaset supernowych. Obserwacje te prowadzą do wniosku, że rozszerzanie się Wszechświata przyspiesza. Oznacza to, że znana nam materia stanowi maksymalnie 4% składników Wszechświata. Pozostałe to: ciemna materia (około 23%) i ciemna energia (około 73%).

Obserwacje gwiazd supernowych w odległych galaktykach doprowadziły w 1998 roku do odkrycia, że galaktyki oddalają się od siebie z narastającą szybkością. Szacuje się, że galaktyki oddalają się od siebie coraz szybciej już od około pięciu miliardów lat. Okazało się więc, że rozszerzanie Wszechświata nie tylko nie zwalnia, ale obecnie znacząco przyspiesza!

Jedynym sensownym wytłumaczeniem obserwacji noblistów z 2011 roku jest istnienie stałej kosmologicznej, czyli powszechnie występującej siły odpychającej. Klasycznie rozumiana stała kosmologiczna może być utożsamiona z kwantową energią fluktuacji próżni. Próżnia fizyczna nie jest „pusta”, wypełnia ją „morze” pojawiających się i znikających wirtualnych cząstek i pól kwantowych [10]. Bardzo mała wartość Λ powoduje, że siła ta ujawnia się tylko na kosmologicznych odległościach, przewyżczając przyciąganie grawitacyjne pozostałych składników Wszechświata.

Jakie są konsekwencje odkrycia przyspieszenia ekspansji Wszechświata? W ramach OTW Einsteina można opisać zjawisko przyspieszonej ekspansji. Wystarczy założyć, że zasadniczy wkład do średniej gęstości energii Wszechświata wnosi

wspomniana ciemna energia. Podstawową jej cechą jest dodatnia wartość i niezmiennosc gęstości (czyli energii w jednostce objętości) w długich interwałach czasu kosmologicznego. Ta właściwość ciemnej energii generuje ujemne ciśnienie, powodujące przyspieszoną ekspansję Kosmosu.

6. Podsumowanie

Współczesna kosmologia obserwacyjna potwierdziła, że ciemna materia stanowi większość masy w galaktykach. Większość masy we Wszechświecie występuje w postaci jednorodnie rozmieszczonego składnika, który działa jak stała kosmologiczna Einsteina, powodując przyspieszenie ekspansji Wszechświata.

Literatura

- [1] H. Drozdowski, *Szczególna teoria względności Alberta Einsteina a pozytywizm*. [W:] *Lectiones & Acroases Philosophicae IX*, 1, 161–181 (2016).
- [2] H. Drozdowski, *Związek kosmologii z fizyką cząstek elementarnych*. [W:] *Problemy dydaktyki fizyki*, ISBN 978-83-7432-992-7, str. 67–74, Czeszów-Wrocław 2013.
- [3] S. Hawking, *Teoria wszystkiego. Powstanie i losy Wszechświata*, Zysk i S-ka, Poznań 2003.
- [4] S. Singh, *Wielki Wybuch. Narodziny Wszechświata*, Albatros, Wyd. A. Kuryłowicz, Warszawa 2007.
- [5] M. Heller, *Osobliwy Wszechświat*, PWN, Warszawa 1991.
- [6] L. Lederman, D. Teresi, *Boska cząstka*, Prószyński i S-ka, Warszawa 1993.
- [7] M.L. Kutner, *Astronomy. A Physical Perspective*, Cambridge University Press 2003.
- [8] A.H. Guth, *Wszechświat inflacyjny. W poszukiwaniu nowej teorii pochodzenia Kosmosu*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2000.
- [9] J.D. Barrow, *Księga Wszechświatów*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2011.
- [10] H. Drozdowski, *Energia motorem Wszechświata*. [W:] *Zjawisko energii w nauce, sztuce i kulturze*, ISBN 978-83-938829-1-5, str. 11–26, Wyd. Naukowe UAM, Poznań 2016.