



Kwantowanie grawitacji. Co to znaczy?

Jerzy Jurkiewicz

Instytut Fizyki UJ

Świat, w którym żyjemy określa skalę zjawisk, która dla nas jest dostępna zmysłami i rozumiała. Patrząc nocą w czyste niebo widzimy gwiazdy i mgławice stanowiące elementy Wszechświata – obiekty, których obserwacje stały się możliwe dzięki teleskopom. W znacznie mniejszej skali, dzięki stale ulepszanym narzędziom badawczym poznaliśmy szereg tajemnic mikroświata: najpierw w skali atomów, potem cząstek elementarnych. Aby obserwacje tych zjawisk były możliwe konieczne było dostosowanie aparatów pomiarowych do coraz mniejszej skali zjawisk, prowadząc eksperymenty przy użyciu cząstek o coraz większej energii. Ten związek wynika z zasady nieoznaczoności Heisenberga: $\Delta x \Delta p \approx \hbar$, gdzie \hbar jest stałą Plancka.

Można postawić pytanie, czy jest możliwe nieograniczone zmniejszanie skali i czy idąc w tym kierunku będziemy odkrywać kolejne nowe formy oddziaływań w przyrodzie?

Odpowiedź na to pytanie wydaje się być związana z istnieniem dokładnie czterech typów oddziaływań: silnych, słabych, elektromagnetycznych i grawitacyjnych. Najslabszym z nich jest oddziaływanie grawitacyjne. Istnieje tu pozorną sprzeczność: to właśnie to oddziaływanie jest odpowiedzialne za wiele zjawisk w skali kosmicznej, ale jednocześnie właśnie ono pozostaje wciąż niezbadaną zagadką w kwantowym obrazie Wszechświata. **Można przewidzieć, że typowa skala, przy której kwantowe efekty grawitacyjne staną się dominujące to tzw. skala Plancka.** Określa ona zakres odległości wyrażony przez fundamentalne stałe fizyki: c – prędkość światła, \hbar – stałą Plancka i G – stałą Newtona.

Stała Plancka to wielkość utworzona z powyższych stałych o wymiarze metra: $\sqrt{\hbar G/c^3} = 1,62 \times 10^{-35}$ m. Jest ona niewyobrażalnie mała w porównaniu nawet ze skalą typową dla cząstek elementarnych. Eksperymentalne badanie efektów kwantowej grawitacji wymagałoby użycia gigantycznych energii, nieosiągalnych w dzisiejszych eksperymentach.

Wiemy dziś, że takie skale energii były typowe dla najwcześniejszych momentów istnienia Wszechświata, tuż po Wielkim Wybuchu. Tam być może kryje się odpowiedź na tak fundamentalne pytania, jak czemu Wszechświat jest trójwymiarowy, jaka jest geneza czasu, dlaczego mamy akurat takie oddziaływania w przyrodzie?

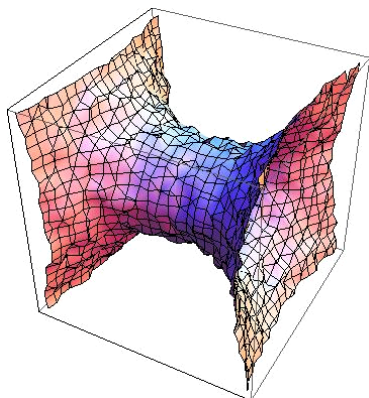
Konsekwencje Wielkiego Wybuchu możemy obserwować teraz, w czasie, w którym żyjemy. Pośrednio możemy więc zweryfikować szereg przewidywań teoretycznych konfrontując je z obserwacjami. Postaram się wytłumaczyć, dlaczego zbudowanie kwantowej teorii naszego Wszechświata może być zadaniem trudnym, jeśli wystartujemy z kwantowego obrazu zjawisk.

Świat kwantowy bardzo różni się od świata, który widzimy w naszej skali. Własnością materii, którą trudno pojąć naszą intuicją jest falowa natura procesów kwantowych. Pojedynczy elektron rozpraszany na przeszkodzie dyfrakcyjnej okazuje się jednocześnie zakreślać różne tory ruchu, a następnie podlegać zjawisku interferencji. **Richard Feynman zaproponował sformułowanie mechaniki kwantowej, w którym układ fizyczny podlega czasowej ewolucji w taki sposób, że dopuszcza wszystkie możliwe tory (trajektorie), nawet bardzo odległe od klasycznych.** Tzw. amplituda przejścia kwantowego jest sumą dokładnie określonych przyczynków od wszystkich trajektorii. W konsekwencji następuje „rozmycie” trajektorii wokół rozwiązania klasycznego, a szerokość tego rozmycia jest proporcjonalna do $\sqrt{\hbar}$. Metoda sumy po trajektoriach leży u podstaw budowy fundamentalnych teorii fizyki i jest jednym z głównych narzędzi tzw. kwantowej teorii pola.

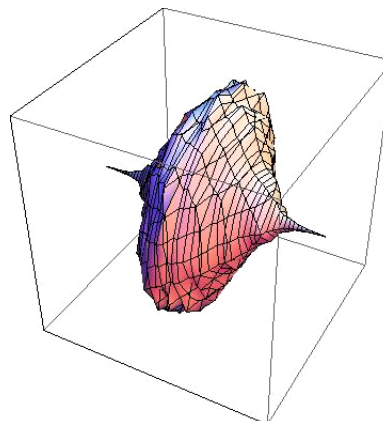
Czy metodę sumy po trajektoriach można zastosować w kwantowej teorii grawitacji? Mówiąc o grawitacji mamy zazwyczaj na myśli prawo Newtona, które mówi, z jaką siłą przyciągają się dwa ciała o pewnych masach. Ogólna Teoria Względności Alberta Einsteina wiąże siły grawitacyjne z geometrycznymi własnościami przestrzeni przewidując, że masowa cząstka „zakrzywia” przestrzeń wokół siebie. Najprostsza wersja kwantowej grawitacji jest próbą opisanie tych geometrycznych stopni swobody, na razie bez uwzględnienia cząstek. Równania Einsteina przewidują, że w takiej sytuacji powinniśmy otrzymać gładką geometrię bez żadnych pofałdowań. To jest jednak wynik klasyczny, nieuwzględniający kwantowej natury świata. Możemy spodziewać się, że uwzględnienie efektów kwantowych musi spowodować rozmycie geometrii, która nawet bez materii jest pofałdowana, przynajmniej w skali Plancka.

Wyobraźmy sobie, że Wszechświat jest dwuwymiarowy, a nie trójwymiarowy. Załóżmy też, że jest on zamknięty i wygląda jak pofałdowana powierzchnia balonika. O takiej powierzchni mówimy, że ma topologię dwuwymiarowej sfery. Powierzchnię taką możemy deformować, zmieniając sposób pofałdowania, ale tak, żeby powierzchnia nie rozpadła się, ani nie powstała w niej brzegi. Różne sposoby pofałdowania odpowiadają różnym realizacjom geometrii powierzchni. Każda taka realizacja „geometrii powierzchni” to punkt możliwej trajektorii, opisującej ewolucję dwuwymiarowego zamkniętego Wszechświata. Pełna trajektoria to podanie sposobu, w jaki geometria po-

wierzchni zmieniała się w czasie. Taka „historia geometrii” określa czasoprzestrzeń.



Przykładowa ewolucja jednowymiarowego
Wszechświata w czasie rzeczywistym



Przykładowa ewolucja jednowymiarowego
Wszechświata w czasie urojonym

Kwantowy opis układu, zgodnie z teorią Feynmana powinien prowadzić do opisu ewolucji Wszechświata jako sumy „po wszystkich trajektoriach”, z których każda daje pewien określony przyczynek do amplitudy kwantowej. Problemem jest jednak określenie, co oznacza sumowanie „po wszystkich” czasoprzestrzeniach. Geometryczne stopnie swobody dają ogromną swobodę wyboru potencjalnych trajektorii. Może należy uwzględnić również takie przypadki, kiedy balonik – Wszechświat rozpada się na dwa mniejsze baloniki? Takie baloniki mogłyby się sklejać i znowu rozpadać. Jeśli topologia Wszechświata może zmieniać się w czasie, czasoprzestrzeń wyglądałaby jak ser szwajcarski albo gąbka. Inna wersja ewolucji dopuszcza rozpad Wszechświata, ale nie pozwala na jego powtórne sklejanie. Oznaczałoby to, że powstają tzw. „dzieci-światy” (*baby universes*), które przestają się ze sobą kontaktować. **Geometria Wszechświata, w którym żyjemy powinna realizować uśrednioną ewolucję kwantową.** Intuicja podpowiada nam, że takie egzotyczne, topologiczne wzbudzenia geometrii nie powinny się pojawiać, ale być może to jest tylko kwestia skali, w jakiej żyjemy?

Na takie i wiele innych pytań próbujemy znaleźć odpowiedź w ramach teorii Kauzalnych Dynamicznych Triangulacji. Niestety większość z nich nie wyraża się prostymi wzorami matematycznymi. Pomocą okazuje się komputer, który pozwala budować trajektorie Wszechświata, oczywiście w pewnym przybliżeniu, a w konsekwencji badać, które z nich są „typowe”. **Matematyczna sztuczka polega na traktowaniu czasu jako wielkości zespolonej $t = a + i b$, gdzie $i^2 = -1$ jest jednostką „urojoną”.** Gdyby czas był czysto urojony ($a = 0$)

każda trajektoria Wszechświata pojawiałaby się z pewnym rzeczywistym i dodatnim „prawdopodobieństwem”. Dzięki temu możemy badać, które trajektorie są najważniejsze i jaki Wszechświat jest przewidywany przez naszą teorię. **Drugą sztuczką jest rozważanie geometrii zbudowanych z elementarnych klocków, tzw. sympleksów**, dzięki czemu komputer potrafi zapamiętać i przekształcać różne geometrie. Po wykonaniu obliczeń powinniśmy wrócić do rzeczywistego „prawdziwego” czasu.

Odpowiedzi są czasami zgodne z naszą intuicją: okazuje się na przykład, że egzotyczne czasoprzestrzenie opisane powyżej, gdzie topologia ulega zmianie, nie prowadzą do sensownej teorii, która w dużej skali przypominałaby Wszechświat, w którym żyjemy. Musimy ograniczyć się do takiej klasy trajektorii, w których Wszechświat ma stałą strukturę topologiczną, w naszym przykładzie jest przez cały czas topologicznym balonikiem – sferą, ale oczywiście ze zmieniającymi się w czasie pofałdowaniami i całkowitym rozmiarem. To jest geneza nazwy teorii: **kausalność lub przyczynowość oznacza, że w każdym punkcie ewolucji układ „wie”, w którą stronę biegnie czas.**

Gdyby Wszechświat mógł się rozpaść, istniałyby w czasoprzestrzeni punkty „osobliwe”, gdzie istniałaby możliwość wyboru Wszechświata, w którym chcemy się znaleźć.

Odpowiedzi zależą też od wymiaru Wszechświata. Najciekawszy jest oczywiście przypadek, gdy Wszechświat jest trójwymiarowy. Okazuje się, że najważniejsze trajektorie układają się wokół dobrze określonego rozwiązania klasycznych równań Einsteina, przynajmniej dla wielkości mierzącej rozmiar Wszechświata w funkcji czasu. Ten wynik pokazuje, że być może jesteśmy na właściwej drodze do zbudowania teorii kwantowej grawitacji, chociaż oczywiście droga do celu jest jeszcze bardzo długa. Klasyczne rozwiązanie otrzymane w naszych rachunkach, po przepisaniu dla rzeczywistego czasu, opisuje tzw. maksymalnie symetryczny zamknięty Wszechświat de Sittera, którego rozmiar eksponencjalnie rośnie z czasem. Dla czasu urojonego rozwiązanie ma postać czterowymiarowej sfery (tzw. Wszechświat anty-de Sittera).

Interesujące są własności układu dla bardzo małych odległości: okazuje się, że pewne wielkości fizyczne zachowują się tak, jakby czasoprzestrzeń była dwuwymiarowa na małych odległościach i czterowymiarowa na dużych. Takie dziwne zachowanie wymiarów przestrzeni pojawia się również w innych próbach konstrukcji kwantowej grawitacji.

Komputer coraz częściej okazuje się niezbędnym narzędziem w badaniu teorii fizycznych. W naszym przypadku obliczenia prowadzimy na dużym klastrze komputerów, chociaż wiele ważnych wyników udało się nam uzyskać na pojedynczych komputerach, podobnych do tych, które wielu z nas ma w swoim domu. Opisane wyżej układy nie zawierają (jeszcze) materii. To kolejne problemy, które stoją przed nami.