

Najmniejsze odległości

Krzysztof A. MEISSNER, Warszawa

Problem najmniejszych odległości może oznaczać tak naprawdę trzy różne problemy:

- jeden eksperymentalny, czyli jakie najmniejsze odległości jesteśmy teraz w stanie zmierzyć,
- drugi teoretyczny, czyli jakie najmniejsze odległości jesteśmy w stanie opisywać w ramach obecnie istniejących teorii,
- a trzeci, to problem, czy w ogóle istnieją najmniejsze odległości, czyli takie, że mniejszych już nie ma – choć problem nie jest nowy, gdyż już Zenon z Elei w swoim słynnym paradoksie zakładał, że najmniejszych odległości nie ma i przestrzeń można dzielić w nieskończoność – jeżeli miałbym powiedzieć, jaka jest o tym nasza **wiedza**, to powinienem narysować na tablicy duży znak zapytania, ukłonić się i uśiąść, jeżeli zaś miałbym powiedzieć, jakie są na ten temat **spekulacje**, to zająłbym Państwu kilka dni; i jedno i drugie nie znalazłoby zrozumienia u organizatorów... , jednak o dwóch najbardziej rozwiniętych propozycjach postaram się później krótko opowiedzieć.

Zapytajmy najpierw jak mierzymy odległość? Przez długi czas stosowano jednostki naturalne jak łokcie czy stopy, by ze względu na oczywiste wady tego sposobu pomiaru przejść do uzgodnionego wzorca z Sèvres. Wzorzec okazał się jednak mało wzorcowy przy osiągniętych w XX wieku dokładnościach pomiaru i wprowadzono jako jednostkę częstość pewnego przejścia w atomie cezu 133, co przy zdefiniowaniu prędkości światła jest równoważne jednostce długości. Wzorzec ten zapewnia obecnie dokładność lepszą niż sekunda odchylenia na milion lat. Przy dużych odległościach najdokładniejszym sposobem pomiaru jest właśnie pomiar liczby fal (np. metodami interferencyjnymi), które mieszczą się na mierzonym odcinku, lub też czasu przelotu wiązki światła laserowego. Jak jednak badać odległości krótsze niż długość fali w tym wzorcu?

By zmierzyć daną odległość należy stosować cząstki np. fotony, których długość fali jest wystarczająco krótka, krótsza niż badana odległość. Z kolei małe długości fal wiążą się z dużymi pędami (a więc energiami), gdyż w relacji de Broglie'a pęd jest odwrotnie proporcjonalny do długości fali. Stąd akceleratory osiągające coraz to wyższe energie badają coraz mniejsze odległości – obecnie budowany akcelerator LHC w Cernie osiągnie ok. 14 TeV (14 bilionów elektronowoltów), co odpowiada około 10^{-20} m, czyli 1/100000 średnicy jądra atomowego, i tę odległość można uznać za najkrótszą (wkrótce) dostępną eksperymentalnie.

By lepiej uzmysłować sobie, jak świat tak małych odległości różni się od świata, z którym mamy zwykle do czynienia, dobrze jest wyobrazić sobie materię podgrzaną do tak wysokiej temperatury. W takiej temperaturze nie ma atomów – ponieważ energia wiązania atomów (rzędu elektronowoltów) jest dużo mniejsza, więc jakakolwiek próba utworzenia atomu przez elektron i jądro kończyłaby się natychmiast uderzeniem wystarczająco energetycznej cząstki, by elektron od jądra z powrotem oderwać. Co więcej, nie ma również jąder – ponieważ energia wiązania jąder (rzędu megaelektronowoltów) jest również dużo mniejsza, więc jakakolwiek próba związania protonów i neutronów nie może być udana. Nie może być udana również z innego powodu – ponieważ w tej temperaturze po prostu nie ma protonów ani neutronów; powyżej energii rzędu gigaelektronowolta istnieją swobodne kwarki i gluony, a nie ich stany związane. Zresztą w tej temperaturze oprócz tworzących protony i neutrony kwarków u i d są jeszcze cztery inne kwarki s, c, b i t, oraz prawdopodobnie całe zoo innych cząstek, które mamy nadzieję znaleźć w akceleratorze LHC w Genewie. Jednak w naszym gorącym pudełku nawet znane nam obecnie cząstki zachowują się zupełnie inaczej, bo np. nie mają zwykłego ładunku tylko tzw. hiperładunek – np. elektron dzieli się na prawy elektron o hiperładunku -1 i lewy elektron

o hiperładunku $-1/2$ i nie ma tam oddziaływania Coulomba, lecz oddziaływanie silne i elektroslabe.

Choć wygląda to na opowieść science fiction, wydaje się, że potrafimy taką gorącą zupę dość dobrze opisać i z punktu widzenia teoretycznego problem może tkwić w szczegółach składu cząstek, ale nie w samym opisie. Nadal jest to kwantowa teoria pola – choć z coraz to większą liczbą cząstek i z innymi, być może nieznanymi, oddziaływaniami, ale schemat jest cały czas podobny.

Pytanie brzmi: skoro nawet przy bilionach elektronowoltów wydaje się, że wiemy jak opisywać materię, to czy w ogóle i jeżeli tak, to dla jakich energii, ta nasza wiedza się załamuje?

Aby spróbować odpowiedzieć na to pytanie zauważmy, że w opisie tym w ogóle nie występowała grawitacja. Powód jest prosty – przy oddziaływaniach cząstek, od najmniejszych energii aż do energii rzędu bilionów elektronowoltów, grawitacja jest całkowicie zaniedbywalna – jest miliardy miliardów razy mniejsza niż oddziaływania silne czy elektroslabe. To, że my nie jesteśmy zmiażdżeni przez siły elektromagnetyczne, że planety i Księżyc krążą po ogromnych orbitach danych przez prawa grawitacji, wynika tylko z tego, że ani my ani ciała kosmiczne nie są (na szczęście) makroskopowo naładowane. Tu można dać przykład porównania sił: nie jest problemem, aby podnieść magnes leżący na stole drugim magnesem z odległości powiedzmy 1 cm – aby to zrobić grawitacyjnie, trzeba by umieścić nad leżącym magnesem na wysokości 1 cm masę dwukrotnie większą niż masa wieży Eiffela, co nie należałoby do łatwych zadań.

Jednak to zaniedbywanie grawitacji nie jest słuszne dla wszystkich energii – siła oddziaływania grawitacyjnego rośnie bardzo szybko (kwadratowo) z energią zderzających się cząstek, podczas gdy pozostałe oddziaływania zależą od energii bardzo słabo (logarytmicznie). Przy pewnej energii musi nastąpić spotkanie – ta energia to tzw. energia Plancka. Jest ona gigantyczna z punktu widzenia obecnie osiąganym energii w akceleratorach – wynosi ok. 10^{19} GeV, czyli różnica wynosi szesnaście rzędów wielkości – ale w teorii napisać na kartce taką liczbę nie jest już takim problemem... Spodziewamy się, że właśnie przy tej energii kończy się stosowalność kwantowej teorii pola i dla energii wyższych powinniśmy stosować teorię, która obejmuje również tę silnie związaną, przypuszczalnie kwantową grawitację. Ponieważ mamy dopiero kandydatów na taką ogólniejszą teorię, więc odpowiedź na pytanie, jakie są najmniejsze odległości możliwe obecnie do znanego nam opisu teoretycznego brzmi: odwrotność 10^{19} GeV czyli ok. 10^{-35} m. Oznacza to, że od odległości największych, czyli promienia obecnie obserwowalnego Wszechświata 10^{26} m, aż do długości Plancka 10^{-35} m, czyli przez ponad sześćdziesiąt rzędów wielkości czasoprzestrzeni wydaje się być ciągłą, a nawet gładką różnorodnością – jest to imponujący zakres, ale czy jest tak również dla odległości mniejszych?

Na razie, z powodu oczywistego braku bezpośrednich danych doświadczalnych, musimy się przy szukaniu odpowiedzi na to pytanie zadowolić czysto teoretycznymi kryteriami wewnętrznej spójności, elegancji, prostoty. Choć kryteria te są na ogół zadziwiająco skuteczne, to w sposób nieunikniony są obciążone ryzykiem błędu (*de gustibus non est disputandum*).

Istnieją dwa modele choć częściowo spełniające te wymagania i na tyle rozwinięte, że można je nazwać teoriami, które próbują opisać rzeczywistość na odległościach mniejszych niż 10^{-35} m: teoria strun i pętlowa kwantowa grawitacja. Obie nie są kwantowymi teoriami pola w zwykłym sensie i obie mają swoje wady i zalety.

Pętlowa grawitacja jest teorią sformułowaną całkowicie abstrakcyjnie i choć stara się odpowiedzieć na pytania o zjawiska na odległości Plancka (w szczególności czasoprzestrzeni jest w tej teorii dyskretna) to na obecnym etapie nie można jej zadawać pytań w rodzaju, jaka jest odległość między mną a Państwem. Podstawowym wymaganiem w tej teorii jest niezmienniczość ze względu na dyfeomorfizmy czasoprzestrzeni i cała teoria jest budowana w oparciu o tę

symetrię. Nie jest wykluczone, że tak radykalne podejście jest podejściem właściwym, ale jest to na tyle odległe od kwantowej teorii pola cząstek, że brakuje nam wyobraźni, jak tę teorię dalej rozwijać – w szczególności jak dodać pola materii, czy – przede wszystkim – jak dla dużych odległości dokonać przejścia do klasycznej teorii grawitacji Einsteina z pojęciem metryki jako pojęciem podstawowym.

Drugą teorią, znacznie bardziej rozwiniętą, jest teoria strun. Opiera się ona na, wydaje się dość niewinnym, założeniu, że cząstki fundamentalne nie są obiektami punktowymi, a jednowymiarowymi z wewnętrznym naprężeniem. Dla odległości większych niż rozmiar strun teoria ta sprowadza się do teorii obiektów punktowych (prawie, gdyż występują w niej również obiekty wyżej wymiarowe tzw. brany, których nie umiemy uwzględnić w pełnej teorii). Istnieje w tej teorii pojęcie odległości, można wprowadzić materię, istnieje pojęcie grupy cechowania, istnieje symetria dyfeomorfizmów (ale ma raczej marginalne znaczenie), więc zawiera w sobie teorię grawitacji, są tylko dwa problemy.

Jeden to za słabo rozwinięta matematyka, by odpowiadać na pytania, co się naprawdę dzieje na skali Plancka. Teoria strun w sposób zupełnie nieoczekiwany domaga się wyników z bardzo zaawansowanej matematyki, z których część istnieje (jak pewne tożsamości dotyczące nieskończonych iloczynów – jak formuła potrójnego iloczynu Jacobiego – czy wielomiany charakterystyczne w teorii węzłów), a część nie istnieje (jak np. jawna charakteryzacja przestrzeni Calabi–Yau, teoria reprezentacji nieskończenie wymiarowych algebr hiperbolicznych – czy jawnych rozwiązań równań hierarchii w konforemnej teorii pola).

Drugi problem to fakt, że mimo dwudziestu lat intensywnej pracy nie udało się znaleźć takiej wersji teorii, która by w niskich energiach była tożsama ze znakomicie sprawdzonym dla tych energii Modelem Standardowym. Wynika to być może z faktu, że ostatnio twierdzi się, że w teorii strun istnieje monstrualna liczba stanów próżni (padają różne oszacowania: 10^{100} do 10^{500}) i trafienie na stan, który po przejściu do niskich energii przechodzi w Model Standardowy, to jak zdobycie głównej nagrody w nieco mniej przyjaznym totolotku, w którym losuje się nie 6 a 20 liczb i z zakresu nie od 1 do 49 a od 1 do 1 000 000 – stąd nie dziwnego, że jeszcze tego stanu próżni nie znaleźliśmy. Ja jestem jednak sceptyczny wobec takiego postawienia zagadnienia, bo to przypuszczalnie znaczy, że nie znamy jeszcze zasady czy prawa, które po prostu zdecydowaną większością z tych stanów odrzucają jako niefizyczne.

Wracając do głównego tematu, istnieje heurystycznie uzasadnione przypuszczenie, że w teorii strun istnieje najmniejsza odległość, tzn. tak mała, że mniejszej już zbadać nie można. To przypuszczenie opiera się na następującym obrazku – zwiększając energię możemy zmniejszać odległości między strunami. Jeżeli jednak odległości stają się porównywalne z długością strun, sytuacja się zmienia. Wynika to z wewnętrznego naprężenia strun – struna może absorbować energię przez zwiększanie swojej długości. Gdy pompujemy coraz większą energię w układ, od pewnego momentu struny nie zmniejszają już wzajemnych odległości, tylko wręcz przeciwnie, puchną. Oznacza to, że ponieważ w tej teorii mamy do dyspozycji tylko struny, to nie można badać odległości mniejszych niż ich długość, czyli mniejszych niż długość Plancka. Jak już mówiłem, nie potrafimy obrazka tego do końca uzasadnić ilościowo, ale wydaje się jakościowo dość przekonujący.

Na koniec przytoczmy zdanie Einsteina: „Jeżeli jakaś idea nie wydaje się na początku absurdalna, to nic z niej nie będzie” – być może jest to kluczem do pytania o najmniejsze odległości (choć trzeba przestrzec przed odwracaniem tego zdania, co np. politycy często robią, i twierdzeniem, że jeżeli jakaś idea wydaje się absurdalna, to na pewno coś z niej będzie. . .). Być może teorie, które znamy obecnie, spełniają to kryterium, ale po pięćdziesięciu latach szukania wydaje się, że kwantowa grawitacja opisująca takie odległości powinna być teorią przy pierwszym zetknięciu szokującą jeszcze bardziej niż teoria strun czy pętlowa grawitacja. Czas pokaże, czy przypuszczenie to jest słuszne.