Struny – kolejna unifikacja?

Dr Krzysztof A. MEISSNER,

Dr Jacek PAWEŁCZYK

Rozpatrując ruch Ziemi dokoła Słońca z powodzeniem możemy traktować Ziemię i Słońce jako obiekty punktowe. Przybliżenia powyższego nie możemy, oczywiście, stosować, gdy interesujemy się podróżami na Ziemi: Ziemia jawi się nam wówczas jako kula. W wielu sytuacjach cząsteczki i atomy mogą być uważane za obiekty punktowe. Dopiero, gdy zdolność rozdzielcza postrzegania jest dostatecznie duża, zaczynamy dostrzegać ich strukturę. Analizując budowę atomu możemy z kolei jądro atomowe i elektrony traktować jako punktowe. Zwiększając zdolność rozdzielczą stwierdzamy, że jądro ma skończone wymiary. Możemy uważać je za kulkę o rozmiarach 10^{-15} m wypełnioną protonami i neutronami. Protony i neutrony zbudowane są z kwarków. A kwarki? A elektrony? Z doświadczenia wiemy, że elektrony nie mają struktury aż do odległości rzędu 10^{-18} m. Założenie punktowości prowadzi jednak do wielu komplikacji w teorii. Może elektron to też mała kulka? Dotychczas ilekroć stwierdzaliśmy strukturę jakiegoś obiektu, pierwszym dobrym przybliżeniem było przyjęcie, że jest to kulka – obiekt trójwymiarowy. Otóż w teorii strun zakłada się, że elektron i inne cząstki elementarne są obiektami jednowymiarowymi – strunami o długości rzędu 10^{-35} m. W artykule tym opiszemy pewne idee leżace u podstaw teorii strun. Teoria ta ma opisywać wszystkie znane oddziaływania fundamentalne w jednolity sposób, czyli pretenduje do miana teorii unifikującej wszystkie oddziaływania. Napisaliśmy „pretenduje", ponieważ jest to dopiero pewną (bardzo pociągającą z teoretycznego punktu widzenia) hipotezą. Na doświadczalne potwierdzenie lub odrzucenie tej teorii musimy jeszcze poczekać. Początki teorii strun sięgają 1968 roku, natomiast pierwsze konsystentne sformułowania i zastosowania do opisu cząstek elementarnych pochodzą z lat 1981–84.

Jak opisać świat, którego nie można zobaczyć bezpośrednio? Cząstki elementarne tworzą właśnie taki świat postrzegany przez nas tylko za pomocą detektorów i klisz fotograficznych. Interpretacja, czyli sposób patrzenia i rozumienia tego, co się dzieje w przyrządach pomiarowych, dostarczana jest przez teorię. Oczywiście, zanim teoria stanie się przyjętym sposobem widzenia świata, musi być sprawdzona w wielu eksperymentach.

W fizyce wyróżniamy cztery rodzaje oddziaływań fundamentalnych. Są to oddziaływania elektromagnetyczne, słabe, silne oraz grawitacja. Dwa pierwsze rodzaje oddziaływań udało się ostatnio zunifikować – zbudowano tzw. model GSW (Glashowa-Salama-Weinberga), za który jego autorzy otrzymali w roku 1978 nagrodę Nobla. Powiedzmy dokładniej, co oznacza unifikacja w tym przypadku. Rozpatrzmy oddziaływanie dwóch rodzajów cząstek: neutrin i elektronów. Neutrina są cząstkami oddziałującymi tylko słabo, natomiast elektrony oddziałują również elektromagnetycznie (jak wiadomo, elektrony mają ładunek elektryczny $Q = -e$, natomiast neutrina $Q = 0$). Zasięg oddziaływań słabych jest bardzo mały – rzędu $r_0 = 10^{-18}$ m. Oznacza to, że neutrino bardzo słabo oddziałuje z obiektami znajdującymi się dalej niż r_0. Z tego powodu Ziemia dla neutrin jest prawie przezroczysta (przypomnijmy, że odległość między jądrami atomów w materii Ziemi, wynosząca około 10^{-10} m, jest ogromna w stosunku do r_0). Elektrony oddziałując również elektromagnetycznie zatrzymują się po przebyciu niewielkiej drogi. Unifikacja oddziaływań elektromagnetycznych i słabych mówi, że dla odległości mniejszych od r_0 różnice między obu siłami zanikają i mamy teorię z jednym oddziaływaniem. Ponadto model GSW pokazuje, dlaczego oddziaływania słabe mają tak krótki zasięg.

Jak dotąd, nie zbudowano teorii unifikującej wszystkie oddziaływania. Największe problemy stwarza grawitacja. Istniejąca teoria grawitacji Einsteina (jej przybliżeniem jest teoria Newtona) jest teorią klasyczną, nie dającą się pogodzić z mechaniką kwantową. Przyjrzyjmy się bliżej temu problemowi.

W kwantowej teorii grawitacji powinna występować stała o wymiarze długości (tzw. długość Plancka l_P) utworzona z trzech fundamentalnych stałych wymiarowych: stałej grawitacji G, stałej Plancka $\hbar$ charakteryzującej efekty kwantowe, oraz prędkości światła c w następujący sposób: $l_P = \sqrt{G\hbar/c^3} = 1,6 \times 10^{-35}$ m. Jaka jest interpretacja tej skali długości i jaki ma ona związek z kwantowym opisem grawitacji?

W teoriach kwantowych istnieją tzw. zasady nieoznaczoności Heisenberga mówiące o maksymalnych, możliwych do osiągnięcia dokładnościach pomiarów odpowiednich wielkości fizycznych. Jedną z nich jest zasada wiążąca nieoznaczoność pomiaru energii układu i czasu dostępnego na ten pomiar: $\Delta E \Delta t \geq \hbar$. W czasie Δt sygnał poruszający się z prędkością światła sonduje obszar o długości $\Delta x = c\Delta t$, a więc powyższą zasadę zapiszemy jako $\Delta E \Delta x \geq \hbar c$. Nieoznaczoność energii ΔE prowadzi do fluktuacji masy danego układu zgodnie ze wzorem Einsteina $\Delta E = \Delta M c^2$. Zobaczmy, jak teoria grawitacji ingeruje w ten opis.

W teorii grawitacji Einsteina każdy obiekt o masie m posiada charakterystyczny promień (tzw. promień Schwarzschilda) $R_s = 2Gm/c^2$. Jeżeli obiekt ma rozmiary mniejsze niż R_s, to żadne sygnały (informacje) z wnętrza sfery o promieniu R_s nie wychodzą na zewnątrz – ciało jest czarną dziurą. Oznacza to, że nie możemy próbkować obszaru wewnątrz sfery Schwarzschilda. Promień Schwarzschilda fluktuacji kwantowej ΔM jest równy $R_{\Delta M} = 2G\Delta M/c^2$. Nieoznaczoność położenia Δx powinna być większa niż $R_{\Delta M}$, gdyż obszar wewnątrz sfery Schwarzschilda jest niedostępny dla próbkowania. Zgodność mechaniki kwantowej i klasycznej (tzn. niekwantowej) teorii grawitacji narzuca warunek na minimalne Δx: $\Delta x_{min} = R_{\Delta M}$. Z warunku tego obliczamy $\Delta x_{min} = 2G\hbar/(c^3 \Delta x_{min})$, skąd $\Delta x_{min} = \sqrt{2G\hbar/c^3} = \sqrt{2} l_P$. Widzimy więc, że Δx_{min} jest tego samego rzędu co długość Plancka l_P. (Odpowiada temu $\Delta M \approx M_P = 1,2 \times 10^{19} \mathrm{GeV}/c^2$, gdzie M_P jest tzw. masą Plancka, czyli ponad dziesięć trylionów mas protonu; jak dotąd nie znamy żadnej cząstki elementarnej o masie większej niż sto mas protonu.) Mówiąc w skrócie, jeśli chcemy badać przestrzeń (lub cząstki) na odległościach rzędu l_P, to musimy uwzględnić kwantowe efekty grawitacji.

Wielkością charakteryzującą ruch cząstki punktowej jest iloczyn energii i czasu ruchu zwany działaniem S zdefiniowanym

$$S = \int_{t_0}^{t} E\,\mathrm{d}t = \frac{1}{2} m_0 \int_{t_0}^{t} \left(\frac{\mathrm{d}\vec{x}}{\mathrm{d}t}\right)^2 \mathrm{d}t \,.$$

Dla obiektów $(d-1)$ wymiarowych uogólnieniem tego wzoru jest następująca formuła

$$S = \sum_{a,b=1}^{d} \int \sqrt{-\det g} \times \\ \times (g^{-1})^{ab} \left(\frac{\partial \vec{x}}{\partial \sigma^a} \frac{\partial \vec{x}}{\partial \sigma^b}\right),$$

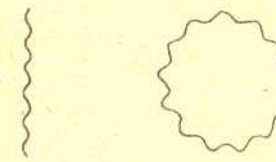
gdzie σ^1 jest czasem, pozostałe $(d-1)$ zmiennych σ^a parametryzują dany obiekt, a g pewną macierzą symetryczną charakteryzującą kształt tego obiektu. Dla strun $(d=2)$ macierz g ma cztery elementy, z czego trzy są niezależne. Wynik na S nie powinien zależeć od sposobu wyboru zmiennych σ^1 i σ^2. Zamieniając zmienne można ustalić dwa z trzech niezależnych elementów definiujących g otrzymując np.

$$g = \begin{pmatrix} f & 0 \\ 0 & -f \end{pmatrix}.$$

Jej wyznacznik $\det g = -f^2$, a macierz odwrotna ma wówczas postać,

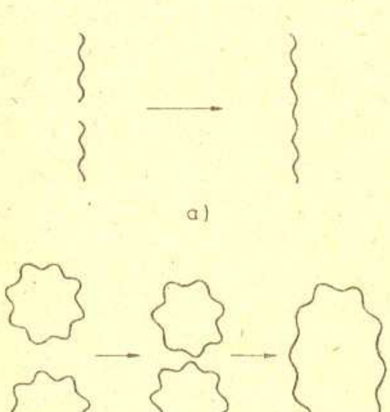
$$g^{-1} = \begin{pmatrix} 1/f & 0 \\ 0 & -1/f \end{pmatrix}.$$

Stąd widać, że działanie w ogóle nie zależy od funkcji f, czyli od wyboru g. W związku z tym kształt (geometria) strun nie wpływa na działanie S, to znaczy na ich ruch i oddziaływanie. Dla obiektów więcej wymiarowych wniosek ten nie jest prawdziwy.



a) b)

Rys. 1



Rys. 2

Teorie kwantowe operujące obiektami punktowymi jako obiektami fundamentalnymi z reguły narażone są na pewne trudności. Zajmijmy się elektronami i ich oddziaływaniem elektromagnetycznym. Z doświadczenia wiadomo, że elektron nie ma żadnej struktury aż do odległości rzędu 10^{-18} m i w teorii pola ekstrapolujemy ten wynik zakładając, że elektron jest cząstką punktową. Siła oddziaływania dwóch elektronów ma wartość określoną prawem Coulomba $F = e^2/(4\pi\epsilon_0 r^2)$. Jeśli odległość r między elektronami maleje do zera, to siła F rośnie do nieskończoności. Z tego powodu w teorii kwantowej obiektów punktowych pojawiają się nieskończoności. Można je, co prawda, usunąć przez odpowiednie przepisy w teoriach oddziaływań silnych i elektrosłabych, ale nie udaje się tego zrobić w kwantowej teorii grawitacji Einsteina.

W tym miejscu nasuwa się myśl: „Może powyższa ekstrapolacja zakładająca punktowość cząstek jest zła i należy zająć się teoriami obiektów rozciągłych, które, być może, nie miałyby nieskończoności". Na przykład można próbować zbudować elektrodynamikę elektronów jako rozciągłych kulek o jakimś promieniu a, co spowodowałoby, że wzór na siłę Coulomba moglibyśmy stosować jedynie dla odległości $r > a$. Oprócz nowych trudności, jakie pojawiają się w takiej teorii, powstaje problem elementarności obiektu – przecież musielibyśmy zadać rozkład ładunku w kulce. A dlaczego dany rozkład miałby być lepszy niż inne? Poza tym powstaje pytanie o geometrię obiektu: dlaczego kulka, a nie np. elipsoida? Wydaje się, że pojęcia „obiekt rozciągły" i „obiekt fundamentalny" trudno byłoby ze sobą uzgodnić, ponieważ musielibyśmy dostarczyć dodatkowych informacji (rozkład ładunku, geometria) o naszym obiekcie.

Wyjątek wśród wszystkich obiektów rozciągłych stanowią struny, czyli skończone obiekty jednowymiarowe. Struna może być obiektem fundamentalnym w tym sensie, że każdy rozkład ładunku na strunie (i każda geometria, czyli wygląd struny) jest równouprawniony i prowadzi do tego samego oddziaływania (patrz uwaga na marginesie). Teoria strun, mająca za cel opisać oddziaływania fundamentalne w jednolity sposób, jest charakteryzowana jedną stałą o wymiarze długości (rozmiar struny), której kwadrat oznaczany jest zwykle przez α'. Stała ta może być wyznaczona z żądania zgodności z teorią grawitacji Einsteina dla obiektów makroświata. Warunek ten daje związek: $\sqrt{\alpha'} \approx l_P$. W ten sposób wprowadzona poprzednio fundamentalna długość Plancka uzyskała jasną interpretację – jest to rozmiar strun.

Mamy dwa rodzaje strun: otwarte i zamknięte (rys. 1a i 1b). (Obecnie wydaje się, że do opisu fizyki świata cząstek elementarnych bardziej nadają sie struny zamknięte.) A co wspólnego ze strunami mają cząstki elementarne, np. elektron? Każdy wie, że struna może drgać. Jasne jest, że drgająca struna ma większą energię (a więc i masę) niż struna nie drgająca. Okazuje się, że cząstki nam znane (foton, elektron, neutrino, itd.) odpowiadają najmniej energetycznym drganiom struny (w odróżnieniu od struny gitarowej tutaj istnieje więcej niż jedno drganie o najniższej energii). Bardziej energetyczne drgania mają ogromne masy równe wielokrotnościom masy Plancka. Cząstki odpowiadające tym drganiom nie mogą być więc bezpośrednio obserwowane w eksperymentach.

Istnieje prosty sposób wprowadzenia oddziaływania strun polegający na sklejaniu końców strun dla struny otwartej (rys. 2a) i sklejaniu dwóch strun zamkniętych do nowej struny zamkniętej (rys. 2b). Siła oddziaływania między dwiema strunami, odpowiadającymi np. elektronom, dla dużych odległości (dużo większych niż rozmiar struny) zachowuje się tak samo jak dla ładunków punktowych, tzn. maleje z kwadratem odległości. Można powiedzieć, że na odległościach dużo większych od l_P nie widać struktury struny – oddziałują one jak ładunki punktowe, tzn. zgodnie z prawem Coulomba. Natomiast dla małych odległości siła ta jest bardzo istotnie modyfikowana, ponieważ istotną rolę zaczyna odgrywać rozmiar strun. W ten sposób prawo Coulomba jest silnie modyfikowane dla odległości między strunami $r < l_P$. Efekt ten umożliwia sformułowanie teorii strun tak, że nie występują w niej omawiane poprzednio nieskończoności. Na odległościach dużo większych od długości Plancka teoria strun odtwarza ogólną strukturę znanych do tej pory modeli oddziaływań fundamentalnych, czyli modelu GSW, modelu oddziaływań silnych i teorii grawitacji Einsteina. Jest to rzeczywiście teoria unifikująca, gdyż opisuje wszystkie znane oddziaływania i cząstki za pomocą jednego obiektu.

Teoria strun jest bardzo śmiałą ekstrapolacją dotychczas znanych teorii oddziaływań fundamentalnych, której jeszcze nie udało się w żaden sposób sprawdzić. Głównym powodem zajmowania się nią jest fakt, że we wszystkich oddziaływaniach (również w kwantowej teorii grawitacji) istnienie skończonego rozmiaru struny pozwala uniknąć wspomnianych powyżej nieskończoności – jest to jedyna znana (i sensowna matematycznie) teoria o tej własności.