

Rozdmuchany Wszechświat

Prof. dr Marek DEMIAŃSKI



Od kilkunastu lat kosmologia przeżywa prawdziwy renesans. Powodem tego olbrzymiego zainteresowania Wszechświatem są związki, jakie występują między współczesnymi teoriami cząstek elementarnych a wczesnymi etapami ewolucji Wszechświata. Związki te pojawiły się, gdy zaczęto konstruować modele tak zwanych teorii wielkiej unifikacji.

Na poziomie elementarnych zjawisk można wyróżnić cztery podstawowe oddziaływania: grawitacyjne, słabe, elektromagnetyczne i silne (jądrowe). Spoglądając na tę listę oddziaływań elementarnych można się zastanawiać, do czego naturze potrzebna jest taka różnorodność. Od dość dawna przypuszczano, że ta różnorodność jest tylko pozorna, że przy energiach wyższych niż te, z którymi mamy do czynienia na co dzień, wszystkie oddziaływania będą jednakowo silne. Na pierwszy rzut oka najbardziej podobne do siebie są oddziaływania grawitacyjne i elektromagnetyczne. Nic więc dziwnego, że początkowo próbowano skonstruować teorię unifikującą właśnie te dwa oddziaływania. Sam wielki Einstein spędził ostatnie trzydzieści lat swego życia starając się skonstruować taką teorię. Dopiero na początku lat sześćdziesiątych znakomity amerykański fizyk Steven Weinberg i niezależnie Pakistańczyk Abdus Salam podali teorię unifikującą oddziaływania elektromagnetyczne i słabe. Konstrukcja tej nowej teorii była możliwa dzięki zastosowaniu nowego formalizmu tak zwanej teorii pól cechowania. Teoria Weinberga — Salama, która następnie została uzupełniona przez Glashowa, przewiduje istnienie nowych cząstek, spełniających rolę kwantów pola. Cząstki te powinny mieć różną od zera masę spoczynkową. Wielkim sukcesem teorii Salama — Weinberga było bezpośrednie odkrycie tych cząstek. Jeszcze zanim teoria unifikacji oddziaływań słabych i elektromagnetycznych została obserwacyjnie potwierdzona, zaczęto badać możliwości unifikacji oddziaływań silnych, słabych i elektromagnetycznych. Teorie takie noszą nazwę teorii wielkiej unifikacji lub w skrócie GUT od angielskiej ich nazwy Grand Unified Theories. Podobnie jak teoria Salama — Weinberga teorie wielkiej unifikacji korzystają z formalizmu teorii pól cechowania i przewidują istnienie nowych cząstek. Te nowe cząstki zwane bozonami pośrednimi powinny mieć bardzo dużą masę spoczynkową, tak dużą, że nie ma najmniejszych szans na to, aby mogły być one bezpośrednio wytwarzane w jakimś ziemskim laboratorium. Trudno też wyobrazić sobie jakiś astrofizyczny proces, w którym mogłyby powstawać cząstki o tak dużej masie. Jedynie w bardzo wczesnych etapach ewolucji Wszechświata panowały odpowiednie warunki do spontanicznego powstawania bozonów pośrednich, stąd obecne duże zainteresowanie tym, co działo się w bardzo młodym Wszechświecie.

Nasze obecne wyobrażenia o wczesnych fazach ewolucji Wszechświata opierają się na kilku obserwacyjnych faktach. Po pierwsze, Wszechświat się rozszerza i galaktyki rozbiegają się z prędkościami proporcjonalnymi do ich odległości. Po drugie, Wszechświat wypełniony jest jednorodnie promieniowaniem termicznym, którego obecna temperatura wynosi zaledwie trzy stopnie powyżej absolutnego zera. Jeżeli do tego dodamy założenie, że materia w Wszechświecie oddziałuje ze sobą zgodnie z ogólną teorią względności, to na tej podstawie możemy skonstruować model wielkiego wybuchu. W telegraficznym skrócie model wielkiego wybuchu przewiduje, że początkowo Wszechświat był bardzo gęsty (formalnie nieskończenie gęsty), bardzo gorący i rozszerzał się bardzo szybko. Przypuszcza się, że wszystkie składniki materii znajdowały się wówczas w stanie równowagi termodynamicznej. Jeżeli tak, to łatwo można odtworzyć pierwotny skład materii. W miarę rozszerzania się temperatura promieniowania, które było podstawowym składnikiem, opadała. Z gęstej i gorącej „zupy kwantowej” powstały protony i neutrony. Kiedy temperatura opadła do kilku miliardów stopni, powstał hel. Jak wynika z obecnych obserwacji, pierwotna przedgalaktyczna materia składała się w 25% z helu i w 75% z wodoru. Gdy temperatura spadła do około 4000 K, elektrony mogły na trwałe wiązać się z jądrami tworząc neutralne atomy. Liczba swobodnych elektronów gwałtownie zmalała i od tego momentu fotony zaczęły się rozchodzić praktycznie swobodnie. Był to bardzo ważny moment w historii Wszechświata. Fotony, które zostały

wówczas wyemitowane, obserwujemy obecnie jako reliktyowe tło promieniowania elektromagnetycznego. Od tego też momentu obłoki neutralnej materii mogły zacząć kurczyć się, co doprowadziło w końcu do powstania galaktyk i gwiazd.

Interesujące jest zbadanie konsekwencji, do których prowadzi połączenie teorii wielkiej unifikacji z modelem wielkiego wybuchu. Początkowo, na bardzo wczesnych etapach ewolucji, temperatura była bardzo wysoka, a więc wysoka była też średnia energia cząstek i oddziaływania słabe, silne i elektromagnetyczne były nieodróżnialne. W końcu temperatura spadła na tyle, że średnie energie cząstek były niższe od energii progowej i nastąpiło spontaniczne złamanie symetrii. Pamiętajmy, że symetria zostaje złamana, gdy pola Higgsa przyjmują niezerową wartość. Pole Higgsa jest na ogół wielokomponentowe, a więc kiedy jest różne od zera, wyróżnia pewien kierunek. Kierunek ten może być zupełnie dowolny. Można przypuszczać, że kierunek ten będzie taki sam w obszarach, które są przyczynowo związane. Na granicy takich obszarów kierunki pól Higgsa będą różne. Tego typu defekty mogą przejawiać się jako nowe cząstki — monopole magnetyczne. Z oszacowań wynika, że monopole magnetyczne powinny mieć bardzo dużą masę spoczynkową. Łatwo jest teraz ocenić obecną gęstość monopoli magnetycznych. Przyjmijmy, że w każdym obszarze przyczynowo spójnym w momencie łamania symetrii powstał jeden monopol magnetyczny. Wiedząc jaka jest energia, przy której następuje łamanie symetrii, można obliczyć rozmiary tych obszarów, a zatem i obecną gęstość monopoli magnetycznych. Dochodzi się w ten sposób do zadziwiającego wyniku, średnia gęstość masy monopoli magnetycznych powinna być o około sto miliardów razy większa od oszacowanej średniej gęstości Wszechświata. Jest to oczywiście sprzeczność.

Model wielkiego wybuchu wprawdzie bardzo dobrze opisuje historię Wszechświata, jednak ma szereg słabych punktów. Na przykład zupełnie nie wyjaśnia obserwowanego faktu izotropowości temperatury promieniowania reliktyowego. Dwie anteny ustawione na przeciwległe obszary nieba odbierają fotony, które nie miały szans oddziaływać ze sobą, a pomimo to ich średnie energie są takie same. Oczywiście może to być wynikiem odpowiednio dobranych warunków początkowych. Nie wyjaśnia to jednak niczego i znacznie bardziej zadowalające byłoby znalezienie jakiegoś fizycznego mechanizmu wyrównywania temperatury promieniowania reliktyowego. Średnia gęstość materii we Wszechświecie jest bardzo bliska krytycznej gęstości, która oddziela modele kosmologiczne rozszerzające się wiecznie od modeli, w których po fazie rozszerzania następuje kurczenie. Ta dziwna koincydencja też nie znajduje wyjaśnienia w ramach modelu wielkiego wybuchu. Z obserwacji wynika, że w odpowiednio dużej skali materia jest rozłożona jednorodnie. Tego też nie wyjaśnia model wielkiego wybuchu.

Cztery lata temu Alan Guth zaproponował nowy model wczesnej ewolucji Wszechświata, który częściowo wyjaśnia te trudności modelu wielkiego wybuchu. Istotną rolę w tym modelu odgrywa pole Higgsa. Pole Higgsa, jak każde pole fizyczne, niesie ze sobą pewną energię. W bardzo wczesnych etapach gęstość energii pola Higgsa jest równa zeru. Po przejściu do stanu ze złamaną symetrią energia ta jest różna od zera. Guth zauważył, że uwzględnienie tej energii w równaniach opisujących dynamikę rozszerzania się Wszechświata prowadzi do bardzo interesujących konsekwencji. Po przejściu do stanu ze złamaną symetrią tempo rozszerzania się Wszechświata bardzo szybko zaczyna zależeć tylko od gęstości energii pola Higgsa. Gęstość energii pola Higgsa jest stała i wobec tego tempo rozszerzania się Wszechświata jest stałe. Tempo rozszerzania się jest stałe, gdy Wszechświat rozszerza się wykładniczo. Wykładniczo maleje wówczas temperatura i gęstość materii.

Wszechświat staje się praktycznie rzecz biorąc pusty. Epoka wykładniczego rozszerzania się nie trwa jednak zbyt długo. Aby to wyjaśnić, rozpatrzmy następujący prosty model. Wyobraźmy sobie ustawioną na stole półkulistą czaszę, na czubku tej czaszy ustawiamy małą kulkę metalową. Kulka znajduje się w stanie równowagi nietrwałej. Delikatne uderzenie w stół nie powoduje zmiany jej stanu, mniej delikatne trącenie stołu spowoduje stoczenie się kulki. Kulka znajdująca się na czubku czaszy ma pewną, różną od zera energię potencjalną, energia ta podczas staczania się zostaje zamieniona na energię kinetyczną. W modelu Gutha cały Wszechświat można porównać do naszej kulki, kiedy znajduje się ona na czubku czaszy, jej stała energia potencjalna jest analogiem gęstości energii pola Higgsa; podczas staczania się energia ta zostaje zamieniona





na inne formy energii i w końcu dzięki różnym oddziaływaniom przejawia się jako energia cieplna.

Model Gutha nosi nazwę modelu inflacyjnego. Podczas wykładniczego rozszerzania bardzo szybko rosną rozmiary Wszechświata, tak jak nominalne wartości banknotów podczas inflacji. Wykładnicze powiększanie się rozmiarów Wszechświata sprawia, że ta część Wszechświata, którą obecnie obserwujemy, mogła powstać z bardzo małego fragmentu, tak małego, że mieścił się on wówczas w obszarze przyczynowo spójnym. W tym obszarze dzięki różnego rodzaju oddziaływaniom materia mogła być rozłożona jednorodnie. W ten sposób model ten wyjaśnia obserwowaną jednorodność Wszechświata w dużej skali. Obszar ten następnie znacznie się rozszerzył (rozdmuchał) i ponieważ warunki fizyczne były takie same w każdym punkcie tego obszaru, po podgrzaniu temperatura wszędzie była taka sama. Mamy więc wyjaśnienie obserwowanej izotropii promieniowania reliktowego. Pozostaje jedynie wyjaśnić sprawę monopoli magnetycznych i średniej gęstości we Wszechświecie. Jak wspominaliśmy, obszar, z którego powstał obecnie obserwowany Wszechświat, był mniejszy od obszaru przyczynowo spójnego, a więc mógł zawierać jeden monopol, bądźmy hojni, powiedzmy, że zawierał ich kilkadziesiąt. W późniejszych fazach ewolucji monopole magnetyczne nie powstają, więc w obecnie obserwowanym Wszechświecie może istnieć zaledwie kilkadziesiąt monopoli magnetycznych i ich średnia gęstość jest zanedbywalnie mała. Podczas wykładniczego rozszerzania gęstość energii pola Higgsa jest stała, natomiast inne wielkości determinujące tempo rozszerzania wykładniczo maleją i pod koniec tej fazy są zanedbywalnie małe. Wszechświat, który rozszerza się tak, że tempo rozszerzania zależy tylko od średniej gęstości energii, ma z definicji gęstość krytyczną. Model inflacyjny przewiduje więc, że średnia gęstość materii we Wszechświecie powinna być równa gęstości krytycznej.

Model inflacyjny jest tylko jednym z przykładów odkrywanych obecnie związków między teoriami wielkiej unifikacji a kosmologią. Jest zadziwiające, że mikroświat i makroświat są ze sobą w tak niezwykły sposób powiązane.



Zadania

Redaguje mgr Witold MARCISZEWSKI

M 418. Ciąg liczb $a_1, a_2, \dots, a_n, \dots$ określony jest następująco: $a_1 = a_2 = 1, a_n = \frac{a_{n-1}^2 + 2}{a_{n-2}}$.

Wykazać, że wszystkie liczby tego ciągu są całkowite.
Rozwiązanie na str. 7

M 419. Czy dla każdego sposobu ułożenia kwadratu 6×6 z 18 kostek domina 2×1 można podzielić kostki na dwie grupy tworzące dwa mniejsze prostokąty?

Rozwiązanie na str. 4

M 420. Dany jest dowolny czworościan $ABCD$ i punkt M . Wykazać, że sześć płaszczyzn, z których każda zawiera jedną krawędź czworościanu i jest równoległa do prostej przechodzącej przez M i środek przeciwległej krawędzi, ma punkt wspólny.

Rozwiązanie na str. 5

Redagują mgr Tomasz TRATKIEWICZ i mgr Włodzimierz ZIELICZ

F 186. Odejmując od ciężaru naczynia z gazem ciężar samego naczynia można znaleźć ciężar gazu. Dlaczego jest to poprawna metoda, mimo że większość cząsteczek nie ma żadnego kontaktu z naczyniem, a jedynie znikoma część zderza się ze ściankami?

Rozwiązanie na str. 6

F 187. Gaz jest podgrzewany lub ochładzany przez zmianę temperatury ścianek naczynia. Czy ciśnienie gazu na ścianki jest większe, gdy są one cieplejsze, czy gdy są chłodniejsze niż gaz?

Rozwiązanie na str. 14

