

# Grawitina przypadki we Wszechświata przeszłości zamierzchłej

Marcin BADZIAK\*

Marzeniem wielu fizyków jest sformułowanie zunifikowanej teorii wszystkich znanych oddziaływań. (Więcej o oddziaływaniach elementarnych można przeczytać w specjalnym wydaniu *Delty* 5/2000.) Obecnie najpoważniejszym kandydatem na taką teorię jest teoria superstrun. Typową skalą masową jest tu masa Plancka, która jest  $10^{19}$  razy większa od masy protonu. Dla porównania, w akceleratorze LHC w CERN-ie będzie można wyprodukować cząstki mniej więcej 1000 razy cięższe od protonu. Oznacza to, że bezpośrednie badanie teorii superstrun, polegające na wyprodukowaniu wzbudzonych stanów superstrunowych w zderzeniach cząstek, jest raczej poza zasięgiem ludzkich możliwości. Eksperymentalnie można weryfikować tylko niskoenergetyczne przybliżenie teorii strun – supersymetryczne rozszerzenie obecnie obowiązującej teorii oddziaływań, czyli Modelu Standardowego. Supersymetria wiąże właściwości cząstek o spinie całkowitym i połówkowym. Supersymetrycznym partnerem grawitonu, hipotetycznej cząstki przenoszącej oddziaływania grawitacyjne, jest grawitino – fermion o spinie  $3/2$ . Ze względu na to, że supersymetria nie jest dokładną symetrią przyrody, grawitino (w odróżnieniu od hipotetycznego grawitonu) musi mieć masę różną od zera.

Czy możemy coś powiedzieć o możliwych własnościach grawitina, mimo że nie wiemy, jaką ta cząstka miałaby mieć masę, oraz mimo że cząstka ta oddziałuje tylko grawitacyjnie, czyli znacznie słabiej niż wszelkie znane cząstki? Odpowiedź na to pytanie jest twierdząca. Okazuje się bowiem, że od własności grawitina zależy historia Wszechświata. I tak jak archeologowie poznają dziś np. dzieje cywilizacji sumeryjskiej, badając znajdowane w ziemi ślady kultury materialnej, fizycy przypatrują się uważnie wyglądowi i składowi Wszechświata, szukając śladów niezwykłych oddziaływań – nieznanymi jeszcze cząstek, może nawet podlegających egzotycznym prawom fizyki.

Taką pozostałością z kosmicznej przeszłości jest mikrofalowe promieniowanie tła wypełniające Wszechświat. Obserwując je, stwierdzono, że zwykła materia w postaci neutralnych atomów (składających się z protonów, neutronów i elektronów) stanowi zaledwie 4% całkowitej energii Wszechświata. Nieznane jest pochodzenie pozostałych 96% energii. Cała znana nam materia podlega przyciąganiu grawitacyjnemu. Gdyby była ona jedynym składnikiem Wszechświata, jego ekspansja ulegałaby spowolnieniu. Jednakże z obserwacji odległych supernowych wynika, że Wszechświat najprawdopodobniej rozszerza się obecnie z przyspieszeniem. (Możliwe są też inne, mniej powszechnie akceptowane wytłumaczenia, patrz

artykuł Krzysztofa Bolejki – *Delta* 5/2008.) Oznacza to, że musi istnieć forma energii, która powoduje przyspieszoną ekspansję Wszechświata. Jest ona nazywana ciemną energią i stanowi 73% całkowitej energii Wszechświata. Odpowiedź na pytanie, co stanowi ciemną energię, jest jednym z największych wyzwań dla współczesnej fizyki. Pozostałe 23% stanowi tzw. ciemna materia. Mimo że nie wiadomo, czym ona dokładnie jest, to jednak zostały poznane niektóre jej właściwości. Na pewno jest to materia nieoddziałująca z fotonami: nie świeci (stąd jej nazwa) i nie rozprasza promieniowania odległych galaktyk. Mogą ją stanowić cząstki, które oddziałują tylko słabo i grawitacyjnie. Ponadto muszą one być stabilne, a przynajmniej żyć na tyle długo, by nie rozpadły się do chwili obecnej. Spośród cząstek Modelu Standardowego powyższe kryteria spełniają neutrino. Neutrino mają bardzo małą masę. W związku z tym, w trakcie tworzenia się struktur wielkoskalowych, czyli galaktyk oraz gromad i supergromad galaktyk, poruszały się z prędkościami bliskimi prędkości światła. Taka szybko poruszająca się ciemna materia powodowałaby „rozłazenie się” skupisk materii o małych rozmiarach. Jednak obserwacje i symulacje komputerowe wskazują, iż najpierw tworzyły się mniejsze struktury, z których dopiero w toku ewolucji formowały się galaktyki, gromady i supergromady galaktyk. Z tego wynika, że większość ciemnej materii we Wszechświecie musi stanowić tzw. zimna ciemna materia, czyli cięższe cząstki, poruszające się z prędkościami nierelatywistycznymi. Okazuje się, że aktualnie najlepszym kandydatem na zimną ciemną materię jest najlżejsza cząstka supersymetryczna. W wielu modelach to właśnie grawitino ma najmniejszą masę spośród wszystkich cząstek supersymetrycznych, a na dodatek jest cząstką stabilną. W typowych modelach masa grawitina jest rzędu 1 do 100 mas protonu. Jest to na tyle dużo, by grawitina poruszały się z prędkościami nierelatywistycznymi i nie przeszkadzały przy tworzeniu się najmniejszych struktur we Wszechświecie. Ponadto wiele modeli przewiduje obecną gęstość energii grawitin na poziomie obserwowanej gęstości ciemnej materii. Nie ma zatem przeszkód, by to właśnie grawitina stanowiły ciemną materię.

Mimo że stabilne grawitino jest bardzo dobrym kandydatem na ciemną materię, wiąże się z nim poważny problem kosmologiczny. W bardzo wczesnym Wszechświecie grawitina były produkowane w ogromnych ilościach. Gęstość energii grawitin musiała być bardzo duża, co prowadziło do szybkiego zapadnięcia się Wszechświata pod wpływem przyciągania grawitacyjnego – chyba że masa grawitina byłaby mniejsza niż milionowa część masy protonu. Jednakże niezwykle trudno skonstruować realistyczny model z tak lekkim grawitinem. Od masy grawitina zależy też czas życia drugiej co do lekkości cząstki supersymetrycznej. Jeśli byłby on zbyt długi,

\*Instytut Fizyki Teoretycznej, Wydział Fizyki  
Uniwersytetu Warszawskiego

rozpady tych ostatnich cząstek zagrażałyby procesowi pierwotnej nukleosyntezy. Proces ten rozpoczął się około sekundy po Wielkim Wybuchu. Wcześniej, gdy Wszechświat był bardziej gorący, jądra atomowe nie mogły na trwałe powstać ze względu na ogromną gęstość wysokoenergetycznych fotonów (na jeden barion we Wszechświecie przypada ponad miliard fotonów). Fotony te rozбивały większość nowo tworzonych jąder i prawie cała materia barionowa składała się ze swobodnych protonów i neutronów, które przeistaczały się jedne w drugie wskutek oddziaływań słabych. Ze względu na to, że neutron jest trochę cięższy od protonu, neutronów było mniej niż protonów i asymetria ta narastała wraz z obniżaniem się temperatury. Około sekundy po Wielkim Wybuchu Wszechświat ochłodził się do tego stopnia, że oddziaływania słabe praktycznie ustały. W tym czasie na jeden neutron przypadało sześć protonów. Jednak jądra atomowe nie mogły powstawać w znaczących ilościach jeszcze przez około minuty, gdyż wysokoenergetycznych fotonów było nadal zbyt dużo. W trakcie tej minuty część neutronów zdążyła się rozpaść (czas połowicznego rozpadu neutronu wynosi 10,5 minuty) i na jeden neutron przypadało już siedem protonów. Jest to o tyle ważne, że prawie wszystkie neutrony zostały potem związane w jądra helu  ${}^4\text{He}$ . Stąd można obliczyć, że  ${}^4\text{He}$  powinien stanowić około 25% materii barionowej we Wszechświecie. Pozostałe 75% barionów pozostało w postaci swobodnych protonów, które później związały się z elektronami, tworząc neutralny wodór. W procesie pierwotnej nukleosyntezy powstały również śladowe ilości kilku innych lekkich jąder: deuteru  ${}^2\text{H}$  i helu  ${}^3\text{He}$  (stanowiące około  $10^{-5}$  wszystkich jąder) oraz litu  ${}^7\text{Li}$  (około  $10^{-9}$  wszystkich jąder). Te wartości dobrze zgadzają się z obserwacjami. Prawidłowe przewidywanie zawartości lekkich jąder we Wszechświecie jest ogromnym sukcesem Standardowego Modelu Kosmologicznego opartego na Modelu Standardowym oddziaływań elementarnych.

Należy podkreślić, że przebieg pierwotnej nukleosyntezy jest niezwykle czuły na odstępstwa od Modelu Standardowego. Na przykład, istnienie dodatkowej, czwartej generacji lekkich neutrin spowodowałoby zahamowanie oddziaływań słabych przy wyższej temperaturze. W konsekwencji stosunek neutronów do protonów byłby większy i powstałoby więcej helu  ${}^4\text{He}$ , niż obserwujemy we Wszechświecie. Dlatego, konstruując rozszerzenia Modelu Standardowego, należy uważać, by nowe cząstki i oddziaływania nie zaburzyły w sposób znaczący przebiegu pierwotnej nukleosyntezy. Dotyczy to w szczególności rozpadów cząstek supersymetrycznych na grawitino i „zwykle” cząstki, produkty takich rozpadów są bowiem bardzo energetyczne i, zderzając się z lekkimi jądrami, mogą powodować ich dalsze przekształcenia w niezgodzie z obserwacjami. Niebezpieczeństwa tego można by uniknąć, gdyby wszystkie takie rozpady zaszły jeszcze przed rozpoczęciem pierwotnej nukleosyntezy. Jednak żeby do tego doszło, cząstki supersymetryczne

musiałyby być ponad 10 000 razy cięższe od protonu, czyli dużo cięższe, niż zakładają realistyczne modele supersymetrii.

W rozwiązaniu opisanego wyżej kosmologicznego problemu grawitina może pomóc inflacja, która najprawdopodobniej miała miejsce w bardzo wczesnym Wszechświecie. Inflacja to okres bardzo szybkiego – i przyspieszonego – rozszerzania się Wszechświata. Tłumaczy ona wiele niewyjaśnionych własności Wszechświata, takich jak jednorodność i izotropowość w dużych skalach oraz zerowa krzywizna. Ponadto fluktuacje kwantowe pola napędzającego inflację są oczywistym źródłem pierwotnych niejednorodności gęstości materii, które mogły dać początek obserwowanym dzisiaj galaktykom. Mimo że nie zostało jeszcze zrozumiane, dlaczego doszło do inflacji, to nie ma już dziś większych wątpliwości, że jest ona częścią historii Wszechświata. Wróćmy jednak do pytania, jak inflacja może pomóc w rozwiązaniu kosmologicznego problemu grawitina. Otóż jednym ze skutków błyskawicznego rozszerzenia się Wszechświata jest zmniejszenie gęstości wszystkich cząstek, w tym grawitin, praktycznie do zera. Okres inflacji powoduje więc, że Wszechświat staje się pusty, co nijak nie przypomina tego, co obserwujemy. Po inflacji musi nastąpić podgrzanie Wszechświata, czyli produkcja cząstek, która poprzedza jego standardową ewolucję opisywaną modelem Wielkiego Wybuchu. (Można by powiedzieć, że proces podgrzania dosłownie realizuje znaczenie metafory „Wielki Wybuch”.) Proces podgrzania mógłby jednak doprowadzić do pojawienia się kosmologicznego problemu grawitina na nowo, gdyż nie ma żadnego powodu, by grawitina nie były produkowane w zderzeniach cząstek także po inflacji. Ale ilość tak produkowanych grawitin zależy od temperatury podgrzania, czyli temperatury, jaką osiągnął Wszechświat po inflacji. Dlatego rozwiązanie kosmologicznego problemu grawitin wymaga odpowiednio niskiej temperatury podgrzania. Istnienie górnego ograniczenia na temperaturę podgrzania może być o tyle kłopotliwe, że obserwowana dziś asymetria między ilością barionów i antybarionów we Wszechświecie musiała wytworzyć się po inflacji. Zbyt niska temperatura podgrzania mogłaby z kolei spowodować, że taka asymetria by się nie wygenerowała. Nad poszukiwaniem rozsądnego kompromisu między tymi dwoma ograniczeniami pracuje dziś wielu fizyków.

Czy grawitino istnieje? Na to pytanie częściowo mogą odpowiedzieć już niebawem wyniki z LHC. Czy tworzy ono ciemną materię we Wszechświecie? Jaki jest związek grawitina z inflacją i ewolucją Wszechświata? Na te pytania wciąż chcemy odpowiedzieć. Jednak niezależnie od tego, jakie są te odpowiedzi, z rozważań naszych wynika, że Wszechświat potrafi wziąć w karby rozpasaną wyobraźnię fizyków, a zrozumienie jego ewolucji dostarcza silnych ograniczeń na właściwości egzotycznych cząstek – także i tych, których z uwagi na ich duże masy lub nikłą siłę oddziaływań nigdy w akceleratorach nie wyprodukujemy.