

Oddziaływania elementarne i wczesny Wszechświat

Stefan POKORSKI, Krzysztof TURZYŃSKI

Oddziaływania silne, słabe i elektromagnetyczne, w pełni zrozumiane w ramach Modelu Standardowego, są odpowiedzialne za nukleosyntezę i tworzenie się neutralnych atomów. Standardowy Model Kosmologiczny razem z Modelem Standardowym oddziaływań elementarnych daje w pełni zgodny z obserwacjami opis historii Wszechświata, począwszy od pierwszej sekundy po Wielkim Wybuchu. W tym momencie temperatura Wszechświata wynosiła około 10 miliardów kelwinów i wciąż panowała równowaga termodynamiczna między elektronami, neutronami, fotonami, protonami, neutronami i jądrami atomowymi, przy czym, zgodnie z rozkładem statystycznym, tych ostatnich było znikomo mało z uwagi na ich dużą masę. Wraz z dalszym obniżaniem się temperatury Wszechświata podstawowe procesy zapewniające równowagę termodynamiczną między protonami, neutronami i innymi cząstkami – tj. przemiany β , czyli np. proces $p + e \leftrightarrow n + \nu$ – zaczęły przebiegać zbyt wolno w porównaniu z tempem rozszerzania się Wszechświata. Neutrony przestały więc być w równowadze termodynamicznej z resztą cząstek. Oznaczmy przez T_n temperaturę, przy której to nastąpiło. Stosunek gęstości neutronów do gęstości protonów (decydujący w ostatecznym rozrachunku o liczbie jąder atomowych) przestał zmniejszać się wraz ze spadkiem temperatury otoczenia i ustalił się na poziomie przewidywanym przez rozkład statystyczny dla temperatury T_n . Ponieważ neutrony są nieco cięższe od protonów, stosunek liczby neutronów do liczby protonów zależał w istotny sposób od temperatury T_n , a ta zaś od liczby rodzajów neutrino i siły oddziaływań słabych (w Standardowym Modelu Kosmologicznym ten stosunek wynosi około 1/6). Nieodwracalne już rozpady β , przekształcające neutrony w protony, elektrony i neutrino, spowodowały następnie dalszy spadek liczby neutronów oraz wzrost liczby protonów (stosunek liczb tych cząstek spadł do obecnej wartości 1/7).

Drugi etap nukleosyntezy polegał na łączeniu protonów i neutronów w jądra atomowe. Początkowo proces ten przebiegał w sposób odwracalny, gdyż znajdujące się we Wszechświecie fotony miały wciąż energie na ogół wystarczające do rozbijania nowo powstających jąder. Dopiero w miarę spadku temperatury Wszechświata energie fotonów zmniejszyły się na tyle, że jądra atomowe nie ulegały już rozpadowi – moment ten zależał od siły wiązania protonów i neutronów w jądra, czyli od właściwości oddziaływań silnych. W rezultacie prawie wszystkie neutrony zostały związane w jądra izotopu helu ${}^4\text{He}$ (zwane inaczej cząstkami α), zawierające dwa protony i dwa neutrony. Można stąd obliczyć, że wytworzone w ten sposób jądra ${}^4\text{He}$ stanowiły 25% pierwotnej materii barionowej. Oprócz tego powstały niewielkie domieszki jąder helu ${}^3\text{He}$, deuteru ${}^2\text{H}$ (mniej więcej 0,001%–0,1% ogólnej liczby jąder w zależności od początkowej liczby protonów i neutronów) oraz litu ${}^7\text{Li}$ (mniej więcej 10^{-9} ogólnej liczby jąder).

Nawet niewielka zmiana w fizyce opisywanej przez Model Standardowy oddziaływań elementarnych miałaby dramatyczne skutki dla nukleosyntezy. Gdyby liczba rodzajów neutrino była inna, czyli różna od 3, lub gdyby oddziaływania słabe były jeszcze słabsze (np. cząstki W^\pm i Z^0 miały większe masy), to zmieniłby się także stosunek liczby neutronów do liczby protonów. Warto także podkreślić, że proces pierwotnej nukleosyntezy zależał w istotny sposób od tego, czy we Wszechświecie podczas produkcji pierwszych jąder atomowych znajdowała się znacząca liczba cząstek niewystępujących w Modelu Standardowym. Obecność takich „intruzów” znacznie zmieniłaby przebieg całego

procesu i prowadziłyby do powstania innych ilości lekkich pierwiastków niż wynika to z danych obserwacyjnych. Dlatego pierwotna nukleosynteza jest ważnym testem wzajemnej zgodności Standardowego Modelu Kosmologicznego i teorii oddziaływań elementarnych.

Fakt, że obserwacje dotyczące rozpowszechnienia lekkich pierwiastków zgadzają się bardzo dobrze z przewidywaniami teoretycznymi, jest ważnym, niezależnym od doświadczeń, w których cząstki elementarne zderzane są w akceleratorach, potwierdzeniem, iż Model Standardowy oddziaływań

elementarnych jest doskonałą teorią przy energiach cząstek nieprzekraczających 10^{11} eV. Niemniej jednak, jak już pisaliśmy w pierwszym artykule (*Delta* 1/2005), jest ona prawdopodobnie przybliżeniem jakiejś głębszej teorii, podobnie jak teoria grawitacji sformułowana przez Newtona jest bardzo dobrym przybliżeniem ogólnej teorii względności Einsteina dla niezbyt dużych (w skali kosmicznej) mas i prędkości oddziałujących obiektów. Fizyka oddziaływań elementarnych dostarcza obecnie przede wszystkim argumentów teoretycznych za istnieniem teorii bardziej podstawowej niż Model Standardowy. Jej poszukiwanie, obok odkrycia cząstki Higgsa, było główną motywacją do budowania nowego akceleratora cząstek LHC w CERN-ie. Z drugiej strony, istnieją zagadkowe fakty kosmologiczne związane z procesami, które miały miejsce przed nukleosyntezą: brak antymaterii, istnienie ciemnej materii i energii próżni, istnienie bardzo małych niejednorodności energii w niezwykle jednorodnym Wszechświecie i związana z tym idea inflacji mającej miejsce przed prawdziwym Wielkim Wybuchem, czyli chwilą, w której Wszechświat stał się gorący. Nie licząc mas neutrin, zagadki te są obecnie głównymi argumentami empirycznymi za istnieniem bardziej podstawowej teorii oddziaływań elementarnych. Co więcej, liczba i precyzja dostępnych danych obserwacyjnych dotyczących tych faktów kosmologicznych pozwala uznać wczesny Wszechświat za doskonałe laboratorium do badania oddziaływań elementarnych.

Czy argumenty teoretyczne dostarczane przez fizykę oddziaływań elementarnych i empiryczne argumenty kosmologiczne są już wystarczające do sformułowania tej bardziej podstawowej teorii? Na razie jeszcze nie. Jak wspomnieliśmy w pierwszym artykule, istnieje zaledwie (aż?!) kilka spójnych koncepcji teoretycznych rozszerzenia Modelu Standardowego, z których najciekawszą i najbardziej elegancką jest bez wątpienia hipoteza istnienia dodatkowej przybliżonej symetrii w przyrodzie, zwanej supersymetrią. Zagadki kosmologiczne nie faworyzują wprawdzie jednoznacznie supersymetrii jako właściwego rozszerzenia Modelu Standardowego, ale często dają się łatwiej rozwiązać w ramach takiej teorii, nakładając na nią jednocześnie istotne ograniczenia.

Najbardziej wyrazistym przykładem jest przewidywane przez teorię supersymetryczną *neutralino*, nowa i ciężka cząstka pozbawiona ładunku elektrycznego, słabo oddziałująca z innymi cząstkami. Z tego powodu neutralina byłaby świetnym materiałem na ciemną materię. Jednak, aby gęstość tworzących ciemną materię neutralin była równa gęstości ciemnej materii wyznaczonej z obserwacji mikrofalowego promieniowania tła, muszą mieć one ściśle określone właściwości, które mogą być niezależnie sprawdzone w LHC – jest to część programu badawczego tego urządzenia oraz wielu innych eksperymentów.

Inną konsekwencją supersymetrii jest możliwość prostego wyjaśnienia, dlaczego mogła zajść inflacja i w szczególności, dlaczego energia potencjalna pola

wywolującego inflację nie została natychmiast zamieniona na energię kinetyczną, jak dzieje się to np. w przypadku krążka znajdującego się na równi pochyłej. W teoriach supersymetrycznych energia potencjalna niektórych pól ma tzw. kierunki zerowe odpowiadające w naszym przykładzie równi o zerowym nachyleniu, a jeśli uwzględnić poprawki kwantowe i efekty związane z naruszeniem supersymetrii – równi o bardzo małym nachyleniu. W takiej sytuacji energia potencjalna krążka byłaby zamieniana na jego energię kinetyczną bardzo wolno. Podobny efekt zachodzi w przypadku pola powodującego inflację: w teorii supersymetrycznej jego energia potencjalna pozostawałaby przez krótki okres czasu praktycznie stała. Ten okres to właśnie okres inflacji, w którym nastąpiło znaczne i gwałtowne rozszerzenie się Wszechświata. Po nim nastąpiła szybka zamiana energii potencjalnej na energię kinetyczną cząstek, czyli podgrzanie Wszechświata.

Rozwiązanie problemu dominacji materii nad antymaterią także wymaga rozszerzenia Modelu Standardowego. Ponieważ podczas inflacji Wszechświat praktycznie opustoszał, przewaga materii nad antymaterią musiała powstać po inflacji w wyniku szczególnych właściwości jakiegoś rodzaju oddziaływań elementarnych. Oddziaływania te powinny odróżniać cząstki od antycząstek, np. prawdopodobieństwo produkcji cząstek powinno być większe niż prawdopodobieństwo produkcji antycząstek. Musiała być także naruszona równowaga termodynamiczna, gdyż w przeciwnym razie każdemu procesowi produkcji cząstki towarzyszyłby odwrotny proces – anihilacja cząstki.

W Modelu Standardowym oddziaływania silne i elektromagnetyczne nie rozróżniają cząstek i antycząstek. Własność tę mają jedynie oddziaływania słabe, co zostało wykazane doświadczalnie przez obserwację samorzutnej zamiany mezonów K^0 i B^0 – pewnych cząstek złożonych z par kwark-antykwar – w odpowiadające im antycząstki. Jednak naruszenie symetrii cząstka-antycząstka w oddziaływaniach słabych jest bardzo niewielkie i nie wystarcza do wyjaśnienia obserwowanej we Wszechświecie asymetrii pomiędzy materią i antymaterią. Naturalnym, dodatkowym źródłem naruszenia symetrii między cząstkami i antycząstkami mogą być rozpady ciężkich cząstek N – tych samych, których istnienie wyjaśnia elegancko bardzo małe w porównaniu z innymi cząstkami wartości masy neutrin. Na wczesnych etapach historii Wszechświata cząstki te powinny były wypełniać przestrzeń kosmiczną na równi z materią, antymaterią i fotonami. Przy ochładzaniu się Wszechświata równowaga termodynamiczna tych cząstek została naruszona, tzn. rozpadały się one, lecz przestały już efektywnie zachodzić procesy ich produkcji. Od strony teoretycznej jest bardzo prawdopodobne, że w wyniku rozpadów ciężkich partnerów neutrin może powstać więcej antyleptonów (antycząstek) niż leptonów (cząstek). W wyniku dalszych oddziaływań opisywanych

przez Model Standardowy nadwyżka antyleptonów nad leptonami może przekształcić się na nadwyżkę kwarków nad antykwarkami. W wyniku dalszego ochładzania się Wszechświata wszystkie antykwarki zanihilowały z kwarkami, tworząc fotony, natomiast z nadwyżki kwarków utworzone zostały bariony: protony i neutrony. Opisany wyżej mechanizm nosi nazwę *bariogenezy przez leptogenezę*, czyli generacji nadwyżki barionów nad antybarionami wskutek uprzedniego wytworzenia asymetrii między leptonami i antyleptonami. Wprawdzie supersymetria nie jest konieczna, aby ten mechanizm mógł zachodzić, ale jest on naturalny tylko w teorii supersymetrycznej ze względu na bardzo dużą różnicę skali elektroslabej i skali mas ciężkich cząstek N : $M_N/M_{W^\pm, Z^0} \sim 10^{12}$, która, jakkolwiek mniejsza od $M_P/M_{W^\pm, Z^0} \sim 10^{16}$, także wymaga wyjaśnienia.

Podsumowanie

Nie ma obecnie wątpliwości co do silnego związku między fizyką oddziaływań elementarnych i kosmologią. Nie jest to jednak wciąż związek partnerski. Kosmologia

dostarcza na razie najlepszych empirycznych argumentów za koniecznością rozszerzenia Modelu Standardowego, natomiast fizyka oddziaływań elementarnych – argumentów teoretycznych i konkretnych koncepcji takiego rozszerzenia. Kosmologia nie wyróżnia jeszcze wyraźnie żadnej z koncepcji teoretycznych. Konkretnie idee teoretyczne, pochodzące z fizyki oddziaływań elementarnych, wyznaczają jednak pewne ramy rozwiązywania zagadek kosmologicznych i są zarazem ograniczane przez dane płynące z obserwacji kosmosu. Z punktu widzenia fizyki oddziaływań elementarnych najciekawszą koncepcją teoretyczną rozszerzającą Model Standardowy jest teoria supersymetryczna, która także ułatwia wyjaśnienie zagadek kosmologicznych. Jednak ostateczna weryfikacja tej teorii będzie możliwa dopiero dzięki akceleratorowi LHC. Jeśli teoria supersymetryczna okaże się prawdziwa, będzie to zasadniczy krok zarówno w kierunku pełniejszego zrozumienia pochodzenia skali elektroslabej i mas znanych dziś cząstek, jak też do pełnego zrozumienia wczesnej historii Wszechświata.