



Gwiazdy a fizyka mikroświata

Tadeusz Lesiak

Instytut Fizyki Jądrowej w Krakowie

1. Wstęp

Minione stulecie było dla fizyki przełomowe, także ze względu na zrozumienie ścisłego związku między zachowaniem podstawowych cegiełek materii a Wszechświatem jako całością. Na przykładzie losów gwiazd, ukazanych na rys. 1, spróbujmy prześledzić, jak zjawiska występujące przy najmniejszych i największych skalach odległości przenikają się wzajemnie.

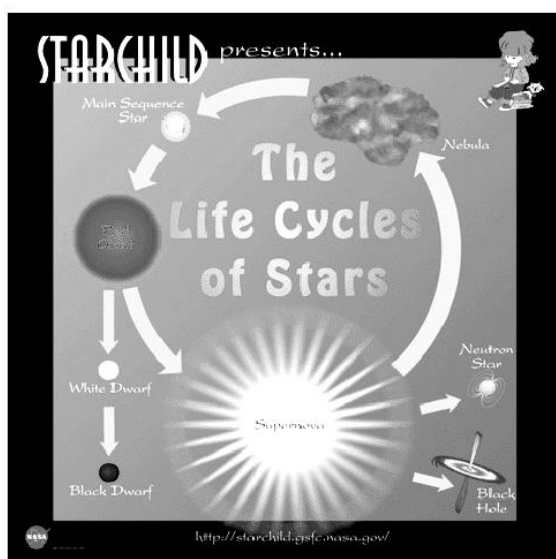
2. Narodziny gwiazdy

Materia międzygwiazdowa, występująca w postaci gazu i pyłu, wypełnia kosmos dość niejednorodnie. Ma ona wyraźną tendencję do koncentracji w obłokach, które są gęstsze od przeciętnej gęstości materii w otaczającej przestrzeni. Tym samym i przyciąganie grawitacyjne pomiędzy składnikami obłoku jest w nich nieco silniejsze niż w otoczeniu. Dostatecznie gęste obłoki, stając się niestabilne, kurczą się (zapadają) pod wpływem własnej siły ciężenia. Typowa masa obłoku gazu i pyłu kosmicznego odpowiada masie wielu tysięcy Słońc. Podczas zapadania można w nim wyróżnić mniejsze obszary, kurczące się szybciej niż otoczenie. One to, zwane protogwiazdami, stanowią zalążki przyszłych gwiazd. Pojedynczy obłok stać się może źródłem całej gromady młodych gwiazd.

Przypatrzmy się bliżej pojedynczej protogwieździe. Podczas zapadania wraz ze wzrostem gęstości podnosi się także jej temperatura. O tym, że ściskany gaz ulega podgrzaniu, można się łatwo przekonać, używając ręcznej pompki rowerowej. W miarę wzrostu temperatury materia protogwiazdy, złożona głównie z wodoru, ulega jonizacji, tzn. jej atomy zostają pozbawione elektronów.

Podgrzewanie kurczącego się obłoku powoduje, że jego materia, składająca się głównie z protonów, czyli jąder wodoru, zaczyna poruszać się coraz szybciej. Protony są jednak obdarzone dodatnim ładunkiem elektrycznym. Aby mogły pokonać wzajemne odpychanie elektrostatyczne, muszą uzyskać ogromną energię kinetyczną, odpowiadającą temperaturze rzędu kilkunastu milionów kelwinów. Protony mogą wówczas zbliżyć się do siebie na odległość na tyle małą, by poddać się przyciągającemu wpływowi **oddziaływań silnych** (patrz przypis). W wyniku kilku reakcji zwanych cyklem Bethego cztery protony zamieniają się w trwałe jądro helu, zbudowane z dwóch protonów i dwóch neutronów. Procesowi temu towarzyszy emisja elektronów, pozytonów, neutrin oraz fotonów. Skąd się wzięły neutrony? Powstały one z protonów poprzez tzw. rozpad β , za który odpowie-

działne są **oddziaływania słabe** (patrz przypis). Dla naszej protogwiazdy kluczowe jest przy tym to, że masa jądra helu jest mniejsza od sumy mas czterech protonów. Zgodnie z zasadą równoważności masy i energii nadwyżka masy pojawia się w postaci energii. Z chwilą rozpoczęcia procesu syntezy (fuzji) termojądrowej protogwiazda traci w naszym ziemskim nazewnictwie przedrostek „proto”. Status gwiazdy osiągają jedynie takie obłoki materii międzygwiazdowej, których masa przekracza około 8 procent masy naszego Słońca.



Rys. 1. Cykl życiowy gwiazd w ujęciu popularyzatorskim NASA

Uważni czytelnicy mogą w tym miejscu łatwo wymienić kilka interesujących zjawisk, należących do fizyki mikroświata, których wyjaśnienie jest konieczne dla zrozumienia, „jak działa” tak duży obiekt jak gwiazda.

Po pierwsze, wiek XX rozszerzył arsenał znanych nam sił przyrody o dwa nowe, wspomniane powyżej, oddziaływania. Przyczyna, dla której wcześniej znano jedynie grawitację oraz siłę elektromagnetyczną, była stosunkowo prosta – nowe oddziaływania, zwane silnymi i słabymi, są odczuwalne jedynie przy niezwykle małych odległościach.

Po drugie, reakcje syntezy jądrowej są obecnie szczegółowo opisywane przez fizykę jądrową. Dzięki niej rozumiemy dokładnie mechanizm działania słonecznego pieca termojądrowego. Mamy jedynie trudności techniczne z przeprowadzeniem fuzji termojądrowej w sposób kontrolowany.

Po trzecie, czy wiemy skąd się wzięły znane nam z lekcji chemii pierwiastki? W szczególności około trzech czwartych materii stanowi wodór, niemal całą resztę hel, a pozostałe pierwiastki to w sumie mniej niż jeden procent masy Wszechświata? Okazuje się, że potrafimy dość dokładnie odpowiedzieć na to pytanie. Wyjaśnienie tych zjawisk będzie jednak łatwiejsze pod koniec tego artykułu, po prześledzeniu całej ewolucji gwiazd.

Mikroświat i Wszechświat spotykają się tutaj jeszcze w jednym, zgoła nieoczekiwanym miejscu. Gwiazdy, galaktyki, ich gromady i supergromady powstały dzięki istnieniu we wczesnym Wszechświecie fluktuacji jego gęstości. Ale czy potrafimy wyjaśnić, jaka jest przyczyna tych fluktuacji? Dziś podejmuje się liczne próby zrozumienia tego problemu. Każda z nich opiera się na najnowszym osiągnięciach z dziedziny fizyki cząstek elementarnych.

Zapewne najbardziej przekonującego wyjaśnienia dostarczają modele zakładające kosmiczną inflację. Przewidują one, że Wszechświat miał w początkach swojej ewolucji fazę niezwykle szybkiej, być może nawet eksponencjalnej ekspansji. Niewyobrażalnie szybko Wszechświat podwajał swoje rozmiary, rozszerzając się wtedy nawet 10^{50} razy. Źródłem inflacji jest tajemnicza cząstka elementarna zwana inflatonem. Powinna ona być blisko spokrewniona z cząstką Higgsa, dzięki której masy podstawowych cegiełek materii (leptonów i kwarków) oraz nośników sił elektroslabych (bozonów W i Z) różnią się od zera. Można by sądzić, że tak niewyobrażalnie wielkie „rozdęcie” rozmiarów Wszechświata musiało spowodować idealne wygładzenie rozkładu materii w nim zawartej. Z mechaniki kwantowej wynika jednakże, że taka doskonała jednorodność jest nieosiągalna. Nie pozwala na nią jedna z podstawowych zasad mikroświata, zwana **zasadą nieoznaczoności Heisenberga** (patrz przypis). Głosi ona, że dla pewnych par wielkości fizycznych, niemożliwe jest jednoczesne określenie ich wartości z dowolnie wielką dokładnością. Jedną z takich par jest energia i czas. Ta fundamentalna „ułamność” w dokładności określenia energii cząstek oznacza, że nawet w próżni, na poziomie mikroskopowym, w odpowiednio krótkich odcinkach czasu dopuszczalne są fluktuacje energii. Musiały one także wystąpić przy końcu fazy inflacji, gdy inflatony przekazywały swą energię cząstkom elementarnym, tworzącym materię naszego współczesnego Wszechświata. Można również zastosować podobne rozumowanie do drugiej zmiennej pary, tj. do czasu, i stwierdzić, że zasada nieoznaczoności dopuszcza fluktuacje czasu zakończenia inflacji. Tam gdzie skończyłaby się ona trochę później, gęstość materii byłaby nieco większa. Wielkość tych fluktuacji, obliczona w ramach modeli inflacyjnych, okazała się zadziwiająco dobrze zgodna z wartością, jaka wynika z obserwacji galaktyk oraz ich gromad. W dodatku w ostatnich latach okazało się, że to właśnie przy założeniu wystąpienia inflacji można poprawnie opisać rozkład zaburzeń temperatury mikrofalowego promieniowania tła.

3. Wiek średni gwiazdy

„Dorosła” gwiazda stanowi zbudowany przez naturę reaktor, w którym w sposób kontrolowany zachodzą reakcje fuzji termojądrowej. Panuje w niej niemal doskonała równowaga między siłą grawitacji, dążącą do ściśnięcia gwiazdy, a skierowanym na zewnątrz ciśnieniem. Jego źródłem są zachodzące w jądrze gwiazdy reakcje syntezy. Energia w nich wydzielana przechodzi w postać energii kinetycznej cząstek gwiazdy. Ten najspokojniejszy okres (jeśli można mówić o stabilizacji we wnętrzu termojądrowego pieca) jest tym krótszy, im większa jest masa gwiazdy. Może on trwać od „tylko” milionów lat dla największych gwiazd o masie rzędu kilkudziesięciu mas Słońca, do miliardów lat, dla siostr naszej macierzystej gwiazdy.

Z chwilą, gdy w rdzeniu gwiazdy zaczyna się wyczerpywać wodorowe paliwo jądrowe, siła grawitacji zaczyna przeważać nad równoważącym ją dotąd ciśnieniem. Materia rdzenia, składającego się już głównie z helu, ulega ponownie ścisnaniu, a wraz z nim – podgrzewaniu. Temperatura podnosi się w końcu na tyle, że reakcje syntezy termojądrowej wodoru przenoszą się do otoczki gwiazdy. Ta ostatnia „dla ochłody” rozszerza się wówczas, co prowadzi do obniżenia jej temperatury. Promień gwiazdy rośnie kilkadziesiąt razy, a jej jasność powiększa się nawet kilkusetkrotnie. W tej fazie swojej ewolucji gwiazda w pełni zasłużenie nosi nazwę olbrzyma. Taki los czeka nasze Słońce za około 5 miliardów lat. Powiększy się ono wtedy na tyle, że jego promień będzie w przybliżeniu taki jak promień orbity Merkurego.

Dalsze losy gwiazdy toczą się już znacznie szybciej i są zależne od jej masy. Przypatrzmy się bliżej najlżejszym z gwiazd, o masach rdzenia nie przekraczających połowy masy Słońca. Dla takich „lekkich” gwiazd wzrost temperatury jest niewystarczający do ponownego rozpalenia termojądrowego pieca, tym razem dzięki syntezie jąder helu. Aby do tego doszło, temperatura gwiazdy musi osiągnąć 100 milionów kelwinów. Nim to nastąpi, do głosu dojdzie **zasada wykluczania**, zwana też **zakazem Pauliego** (patrz przypis). To ona odpowiada za wstrzymanie zapadania się lekkiej gwiazdy. Zakaz Pauliego sprowadza się tutaj do niemożności dowolnie gęstego upakowania swobodnych elektronów, występujących w zapadającym się rdzeniu gwiazdy, obok jąder helu powstałych uprzednio w wyniku syntezy termojądrowej. Przez „upakowanie”, należy rozumieć rozmieszczenie co najwyżej dwóch elektronów, o przeciwnie skierowanych spinach, w kolejnych dostępnych komórkach w przestrzeni pędu. Im bardziej masywna gwiazda, tym większa jest jej temperatura. Tym samym dla należących do niej elektronów jest dostępnych więcej poziomów energetycznych. Mniejsze gwiazdy są zatem bardziej podatne na efekty kwantowomechaniczne, wynikające z zakazu Pauliego.

Z gwiazd o masach rdzenia mniejszych niż około 50% masy naszego Słońca, po eksplozji, która odrzuca tzw. mgławicę planetarną, zostaje biały karzeł. Obiekt ten charakteryzuje się bardzo małymi rozmiarami i olbrzymią gęstością. Dla białego

karła ponownie zatem ujawnia się rola zakazu Pauliego, gdyż w jego wnętrzu ciśnienie gęsto upakowanych elektronów równoważy siłę ciężenia, skutecznie zapobiegając jego dalszemu zapadaniu się pod wpływem siły grawitacji. W białym karle nie mogą już zachodzić reakcje syntezy termojądrowej. Stygnąc, wypromieniowuje on w kosmiczną pustkę resztki zmagazynowanej w nim energii, stając się w końcu tzw. czarnym karłem.

Jaka jest przyszłość cięższych gwiazd? Ich zapadanie będzie trwać aż do chwili, gdy temperatura wzrośnie na tyle, by mogła się w nich rozpocząć termojądrowa synteza jąder helu, prowadząca do powstania jąder węgla. Gdy cały hel zamieni się w węgiel, znów zaczyna się zapadanie, któremu towarzyszy wzrost temperatury. Zależnie od masy gwiazdy, jej elektrony mogą się „zbuntować”, tzn. zadziała dla nich zakaz Pauliego i gwiazda przejdzie w stan białego karła lub też rozpocznie się następny etap fuzji termojądrowej: synteza jąder węgla, prowadząca do powstania jąder tlenu. Tak czy owak, w gwieździe powstanie znów ciśnienie równoważące zginiatającą ją grawitację. Ten cykl może wystąpić wiele razy. Jego najważniejsze etapy to synteza prowadząca kolejno do powstania coraz cięższych jąder: węgla (^{12}C), tlenu (^{16}O), neonu (^{20}Ne), magnezu (^{24}Mg), krzemu (^{28}Si), siarki (^{32}S) i tak dalej, aż do żelaza (^{56}Fe). W nawiasach podano chemiczne symbole wymienionych pierwiastków wraz z ich liczbą masową, tj. liczbą nukleonów w jądrze. Łatwo zauważyć, że główny mechanizm syntezy polega na stopniowym dodawaniu jąder helu (^4He). Proces ten kończy się na jądrach żelaza, ponieważ ich energia wiązania na pojedynczy nukleon jest największa. Aż do żelaza, w drodze fuzji lżejszych jąder, energia jest wydzielana kosztem utraty niewielkiej części masy gwiazdy. Dalsza synteza wymagałaby już dostarczania energii z zewnątrz, zamiast jej wydzielania kosztem masy produktów reakcji. Każda kolejna faza odbywa się w wyższej temperaturze i trwa coraz krócej. Przykładowo, dla gwiazdy kilkadziesiąt razy cięższej od Słońca spalanie wodoru odbywa się w temperaturze rzędu 50 milionów kelwinów i trwa kilka milionów lat. Dla węgla wyimaginowany termostat jądrowego pieca pokazałby już prawie miliard kelwinów, ale za to paliwa tego wystarcza gwieździe jedynie na kilkaset lat. Synteza cięższych pierwiastków to już kwestia tylko pojedynczych lat, a nawet dni i godzin. „Popioły” z poprzedniej fazy fuzji termojądrowej stają się paliwem w następnym etapie ewolucji gwiazdy. W ten sposób cięższe gwiazdy próbują przedłużyć swój byt, wykorzystując w sposób maksymalnie oszczędny paliwo jądrowe.

4. Zgon i życie po śmierci gwiazd

Jaka emerytura czeka „starą”, ciężką gwiazdę „po przejściach”? Paliwo jądrowe jest już wyczerpane i jej rdzeń jest zbudowany głównie z żelaza. Grawitacja jednak nigdy nie daje za wygraną i gwiazda ponownie zaczyna się zapadać. Jeśli masa gwiazdy-staruszka nie przekracza 1,4 masy Słońca, to doświadczy ona stosunkowo łagodnej eutanazji. Jej kresem będzie biały karzeł. Cięższe gwiazdy są skazane

na zakończenie swego życia w gwałtownych konwulsjach, znanych jako wybuch supernowej (dotyczy to tzw. supernowych typu drugiego). Jak łatwo się domyślić, astrofizycy znają także supernowe typu pierwszego. Ich wybuchy mają miejsce w podwójnych układach gwiazd. Jedną z nich jest żarłocznym białym karłem, wysysającym materię od bratniej gwiazdy. Jeśli w wyniku tego procesu zdarzy się, że biały karzeł „zacznie mieć nadwagę”, tzn. gdy jego masa przekroczy masę Słońca o 40 procent, dochodzi do wybuchu. Z popiołów eksplozji supernowych wyłaniają się dziwne kosmiczne bestie: gwiazdy neutronowe i czarne dziury. Czasem może się zdarzyć, że cała gwiazda ulega rozerwaniu, nie pozostawiając po sobie żadnego, war-tego dalszego opisu, obiektu.

Podczas ściskania efekty syntezy termojądrowej zostają niemal całkowicie zniweczone. Ogromna większość jąder ulega bowiem rozbiciu, tworząc „gaz” protonów i neutronów. Co więcej, przy ogromnej gęstości, rzędu 10^{13} kg/m³, dochodzi do głośno oddziaływanie słabe, mające niezwykle mały zasięg rzędu 10^{-18} m. Dzięki niemu bardzo gęsto upakowane protony i elektrony ulegają przemianom w neutrony i neutrino. Podczas dalszego ściskania, przy gęstości rzędu 10^{17} kg/m³, znów dochodzi do głośno mechanika kwantowa. Tym razem to upakowanie neutronów, które, podobnie jak elektrony, mają spin połówkowy, staje się maksymalne. Na podstawie zakazu Pauliego pojawia się zatem ciśnienie neutronów, zapobiegające dalszemu zapadaniu się gwiazdy. Tak rodzi się gwiazda neutronowa. Jej promień wynosi przeciętnie jedynie kilkanaście kilometrów, a na jednej łyżeczce do herbaty zmieści się ilość materii tego gigantycznego „jądra atomowego” o masie sięgającej miliarda ton!

Na tak uformowaną gwiazdę neutronową nadal opada pozostała materia gwiazdy. Dalsze ściskanie jest już jednak zakazane przez zasady fizyki mikroświata. Rdzeń neutronowy działa teraz jak doskonała sprężyna, która po maksymalnym jej ściśnięciu odrzuca od siebie napierający ciężar. Powoduje to niezwykle gwałtowne i widowiskowe zjawisko, zwane wybuchem supernowej. Wokół rdzenia powstaje skierowana na zewnątrz, potężna fala uderzeniowa. W jej podtrzymaniu podstawową rolę odgrywają neutrino. One to, ulegając absorpcji ekspandującej materii gwiazdy, dostarczają nowej energii fali uderzeniowej. Ta ostatnia ma postać skokowego wzrostu gęstości, temperatury i ciśnienia, rozprzestrzeniającego się z prędkością naddźwiękową. W ziemskiej skali możemy być świadkami podobnego zdarzenia, obserwując na niebie odrzutowiec, przekraczający barierę dźwięku. W ten sposób gwiazda pozbywa się znaczącej ilości swojej masy. Energia fali uderzeniowej, związanej z wybuchem supernowej, jest tak wielka, że wystarcza do zsyntetyzowania pierwiastków cięższych od żelaza w eksplodującej materii.

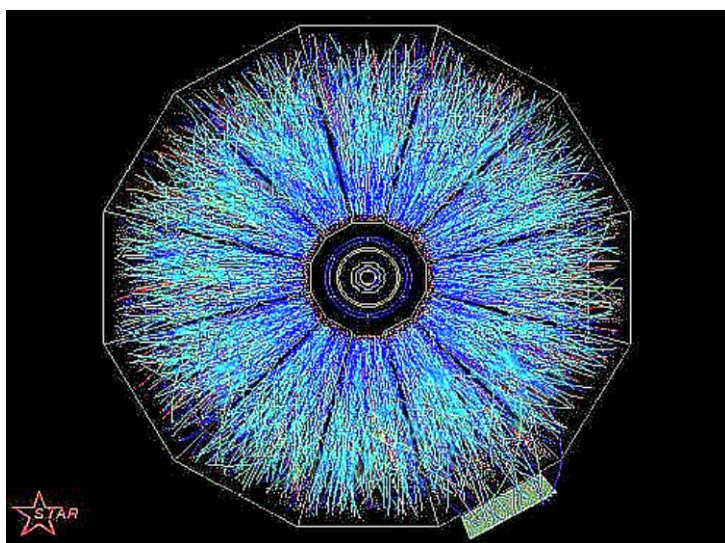
Tuż po wybuchu supernowej gwiazda neutronowa może utrzymać status gwiazdy neutronowej jedynie wtedy, gdy nie jest zbyt ciężka. Jeśli masa tego, co pozostało po wybuchu supernowej, przekroczy około trzech mas Słońca, to nic nie po-

wstrzyma jej ostatecznego zapadnięcia się do czarnej dziury. Podczas takiego kolapsu dochodzi do zadziwiających zjawisk. Według ogólnej teorii względności, każdy obiekt obdarzony masą zakrzywia otaczającą go czasoprzestrzeń. W zapadającej się do czarnej dziury gwiazdzie neutronowej gęstość materii oraz zakrzywienie czasoprzestrzeni stają się tak wielkie, że nawet fotony nie mogą się z niej wydostać na zewnątrz. Czarna dziura staje się tym samym doskonałym kosmicznym cenzorem. Nie ma bowiem sposobu, by uzyskać informację o tym, co dzieje się w jej wnętrzu lub – jak mówimy – za jej horyzontem. Fizyka kwantowa modyfikuje jednakże ten „czarny” obraz, pozwalając dziurze na uchYLENIE RĄBKA jej tajemnic.

Czarna dziura jest bowiem, podobnie jak wszystkie ciała, zanurzona w fizycznej próżni. Ta ostatnia nie jest wcale tak beznadziejnie pusta i spokojna. Próżnia fizyczna występuje wszędzie tam, skąd usunięte zostały wszystkie cząstki i kwanty wszelkich pól fizycznych, przenoszących oddziaływania. Nawet wtedy jednak w przestrzeni mogą na krótką chwilę „z niczego” pojawiać się pary cząstki i antycząstki, zwane wirtualnymi. Ich powstawanie dopuszcza zasada nieoznaczoności Heisenberga, a zatem znów dotykamy tutaj fizyki mikroświata. Próżnia w otoczeniu czarnej dziury jest jednocześnie wypełniona niezwykle silnym polem grawitacyjnym. W tych ekstremalnych warunkach może się zdarzyć, że jedna z cząstek wirtualnej pary znajdzie się w obrębie horyzontu czarnej dziury i zostanie wówczas niemal natychmiast przez nią pochłonięta. Druga cząstka, znajdując się poza horyzontem, może oddalić się w przestrzeń, unosząc tym samym część masy i energii czarnej dziury. Tak więc te ostatnie wcale nie są doskonale czarne. Czarna dziura, pozbawiona możliwości „pożerania” innych obiektów kosmicznych, wcale nie trwałaby wiecznie. Promieniując w opisany powyżej sposób, może się kurczyć i tracić swą masę. Może nawet całkowicie wyparować, ale byłoby to dość czasochłonne – jakieś 10^{65} lat! W miarę upływu czasu energia czarnej dziury jest wypromieniowywana coraz szybciej. Kresem jej życia byłaby niezwykle gwałtowna eksplozja.

Dziś możemy w pewnym stopniu odtworzyć w ziemskim laboratorium stan materii występujący we wnętrzu gwiazdy neutronowej. Dokonują tego fizycy cząstek elementarnych, badający zderzenia jąder atomowych, przyspieszanych do ogromnych prędkości w potężnych zderzaczach. Prace te prowadzono w latach dziewięćdziesiątych w Europejskim Laboratorium Cząstek Elementarnych (CERN) pod Genewą. Obecnie są one kontynuowane przy jeszcze wyższych energiach zderzeń w Brookhaven National Laboratory, niedaleko Nowego Jorku (rys. 2 przedstawia jedno ze zderzeń jądro-jądro, zarejestrowanych w tym laboratorium). W takich zderzeniach materia jądrowa jest jednocześnie ściskana oraz podgrzewana. Jej gęstość może być nawet dwudziestokrotnie większa od gęstości panującej w jądrze atomowym, a temperatura może przewyższać żar słonecznego pieca termojądrowego aż sto tysięcy razy. Wszystko wskazuje na to, że materia prze-

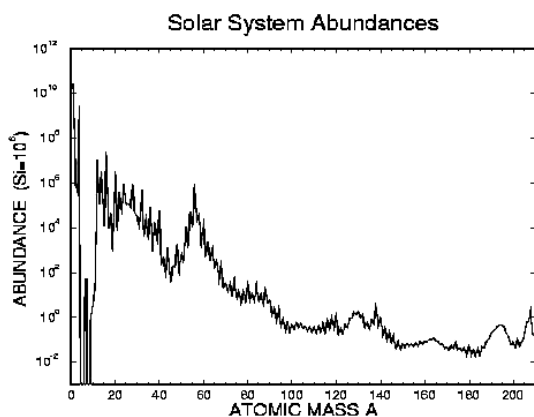
chodzi wówczas w stan plazmy kwarkowo-gluonowej. Od lat sześćdziesiątych XX stulecia nukleony nie są już uważane za najbardziej podstawowe cegiełki materii, lecz za obiekty złożone z trzech kwarków. Za ich utrzymywanie w stanie hadronu odpowiadają oddziaływania silne, przenoszone przez cząstki zwane gluonami. Natura tych sił jest taka, że w naszych ziemskich warunkach nie jest możliwe wyizolowanie pojedynczego kwarka. Jednakże we wczesnym Wszechświecie, w gwiazdach neutronowych oraz w zderzeniach relatywistycznych jąder, przeprowadzanych w ziemskich zderzaczach, materia bywa tak bardzo ściśnięta lub podgrzana, że zamienia się w gaz swobodnych kwarków i gluonów, czyli plazmę kwarkowo-gluonową.



Rys. 2. Typowe zderzenie dwóch jąder, obserwowane w zderzaczu RHIC w eksperymencie STAR, widoczne w płaszczyźnie prostopadłej do toru trajektorii zderzających się jąder. Widać tory kilkuset cząstek elementarnych, wyprodukowanych w wyniku zderzenia i zarejestrowanych w aparaturze, której elementy są rozmieszczone radialnie względem osi zderzenia. Czyż ta ilustracja nie kojarzy się raczej ze światem gwiazd niż cząstek elementarnych?

Jest wielce prawdopodobne, że to właśnie supernowe stanowią najpotężniejszy akcelerator, jakim dysponują fizycy cząstek elementarnych. Odbywa się to w dodatku zupełnie za darmo, bez obciążania kieszeni podatnika. Chodzi tutaj o strumień cząstek docierających nieustannie do Ziemi z przestrzeni kosmicznej. Składa się on w około 86 procentach z protonów i w 13 procentach z jąder helu. Resztę stanowią cięższe jądra oraz elektrony. Obserwacje ostatnich lat prowadzą

bowiem do wniosku, że promieniowanie kosmiczne o energiach aż do 10^{18} elektronowolta (eV) pochodzi z wybuchów supernowych. Energia kinetyczna cząstek promieniowania kosmicznego może być jeszcze bardziej imponująca – nawet 10^{20} elektronowolta, tj. ponad 50 dzuli. A mamy przecież do czynienia z obiektami mikroświata! Mechanizm przyspieszania do tych najbardziej ekstremalnych energii jest jednak nieznan. Cząstki promieniowania kosmicznego w zderzeniach z atomami i cząsteczkami ziemskiej atmosfery tworzą kaskady wtórnych cząstek elementarnych. Część z nich dociera do powierzchni Ziemi i może być zarejestrowana w odpowiednich detektorach. Dzięki badaniom promieniowania kosmicznego po raz pierwszy zaobserwowano tak szacowne cząstki, jak pozyton, mion, pion, kaon czy wiele hiperonów, co zaowocowało niemałą liczbą Nagród Nobla z dziedziny fizyki. Także obecnie, w dobie wielkich i kosztownych akceleratorów cząstek elementarnych, ten „kosmiczny zderzacz” jest niejednokrotnie źródłem ciekawych pomiarów. Warto pamiętać, że jego istnienie w znacznej części zawdzięczamy supernowym. Ich wybuchy mogą też odgrywać ważną rolę przy narodzinach gwiazd, dostarczając obłokom materii międzygwiazdowej pierwszego impulsu, rozpoczynającego ich dalsze kurczenie aż do powstania gwiazd.



Rys. 3. Krzywa rozpowszechnienia pierwiastków w Układzie Słonecznym, uzyskana w oparciu o badania meteorytów oraz widma słonecznego. Oś pionowa jest przedstawiona w skali logarytmicznej oraz wykalibrowana w ten sposób, że obfitość krzemu (Si) wynosi 10^6

Teraz możemy powrócić do wyjaśnienia rozpowszechnienia pierwiastków we Wszechświecie (rys. 3), czyli tzw. nukleosyntezy. To właśnie tutaj chyba najlepiej przenika się wzajemnie kosmologia z fizyką cząstek elementarnych i fizyką jądrową. Proces przebiega w trzech odrębnych etapach, z których każdy może być wdzięcznym tematem obszernego artykułu. Pierwsza faza nukleosyntezy należy

już do zamierchłej przeszłości. Dokonała się ona około pierwszej sekundy od Wielkiego Wybuchu. Wszechświat był wtedy naprawdę gorący – jego temperatura wynosiła rzędu 10^{10} kelwinów. Początkowo, około 0,1 s po Wielkim Wybuchu, populacje protonów i neutronów były równoliczne. Stopniowo neutronów jednak ubywało, ponieważ jako cięższe od protonów ulegały one poprzez rozpad β przemianie w protony. Pod koniec tej fazy wszystkie dostępne neutrony zostały, wraz z częścią protonów, wykorzystane jako budulec do syntezy deuteronów (^2H). Dalsze reakcje syntezy, z udziałem deuteronów i protonów, doprowadziły do powstania jąder helu-4 (^4He), czyli cząstek α , oraz reszkowych ilości trytu (^3H), helu-3 (^3He) i litu (^7Li). Jądra cięższych pierwiastków nie mogły wówczas powstać, ponieważ temperatura i gęstość rozszerzającego się i stygnącego Wszechświata były już na to za niskie (warto zauważyć, że ilość wytworzonego helu w stosunku do wodoru jest określona przez liczbę neutronów w ówczesnym Wszechświecie). Odpowiednie do tego warunki zostały jednak stworzone w bardzo gorących wnętrzach gwiazd. Tam właśnie odbywa się do dziś drugi, a zarazem dominujący w naszych czasach, akt procesu nukleosyntezy. W jego wyniku powstają wszystkie pierwiastki, aż do żelaza. Ukoronowaniem nukleosyntezy jest jej trzeci etap, odbywający się, także i dzisiaj, w wybuchach gwiazd supernowych. Towarzyszą im na tyle ekstremalne warunki, że możliwe jest tworzenie nawet najcięższych jąder, takich jak ołów, uran i tor. Dominującym mechanizmem syntezy jest wówczas doklejanie do istniejącego jądra kolejnych neutronów. Warto dodać, że proces ten przebiega nieco odmiennie dla obu typów supernowych, ze względu na różnice w mechanizmie ich eksplozji. Supernowe nie tylko wytwarzają ciężkie pierwiastki, ale i rozpylają w przestrzeń międzygwiazdową jądra z drugiej i trzeciej fazy nukleosyntezy, zasilając w nie przyszłe gwiazdy i planety następnych generacji.

Czyż nie jest poruszające, gdy uświadamiamy sobie, że woda, którą pijemy, zawiera atomy wodoru powstałe w pierwszych sekundach istnienia Wszechświata, a składniki naszego powietrza, takie jak tlen, azot i dwutlenek węgla, zostały wytworzone miliardy lat temu w termojądrowym piecu pobliskiej, nieistniejącej już gwiazdy? Spojrzenie na każdą złotą lub srebrną błyskotkę może rodzić refleksję, że pochodzi ona w prostej linii od wybuchu jakiejś supernowej. Atomy naszego ciała nie mogłyby w ogóle powstać, gdyby nie praca gwiazdowych reaktorów. Chyba równie silnie daje do myślenia fakt, że obecnie naprawdę dosyć dokładnie potrafimy sobie wyobrazić, odtworzyć, a nawet obliczyć, jak odbywają się te wszystkie procesy. Aby tego dokonać, konieczne jest jednak połączenie wiedzy o Wszechświecie jako całości z nauką płynącą ze znajomości zachowań cząstek elementarnych i jąder atomowych.

Znajdujące się na następnej stronie przypisy sporządzono w oparciu o *Słownik fizyki*, Prószyński i S-ka, wyd. III, 1999.

Przypisy:

Oddziaływanie słabe jest odpowiedzialne m.in. za rozpady β cząstek i jąder atomowych. W jego wyniku neutron ulega dezintegracji, a powstają proton, elektron i antyneutrino. Oddziaływania te odbywają się w drodze wymiany wektorowych bozonów pośredniczących W i Z . Charakteryzuje je bardzo mały zasięg, rzędu 10^{-18} m.

Przemiana β stanowi rodzaj oddziaływania słabego. W jego wyniku nietrawne jądro atomowe ulega transformacji w jądro o tej samej liczbie masowej, lecz innej liczbie atomowej. Przemiana ta, na poziomie nukleonów, polega na zmianie neutronu w proton z jednoczesną emisją elektronu i antyneutrino elektronowego ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$) lub na zmianie protonu w neutron połączonym z emisją pozytonu i neutrino elektronowego ($n \rightarrow p + e^+ + \nu_e$). Nazwa pochodzi od tego, że pierwotnie elektrony i pozytony nazywano cząstkami β .

Oddziaływanie silne umożliwia trwałe połączenie kwarków w nukleonach oraz nukleonów w jądrze atomowym. Odbywa się ono w drodze wymiany pomiędzy kwarkami pozbawionych masy cząstek zwanych gluonami. Ich zasięg jest rzędu 10^{-15} m, co pokrywa się z typowym rozmiarem nukleonu. Przy większych odległościach stają się one na tyle „silne”, że uniemożliwiają obserwację swobodnych kwarków.

Zasada nieoznaczoności (nieokreśloności) Heisenberga głosi, że wśród wielkości fizycznych opisujących układ kwantowy można wyróżnić pary, dla których niemożliwe jest jednoczesne określenie wartości obu tych obserwabli z dowolnie wielką precyzją. Taka szczególna relacja wiąże m.in. pęd i położenie, a także czas i energię układu kwantowego. Iloczyn nieokreśloności pomiaru zmiennych pary musi być większy niż $h/4\pi$, gdzie h jest stałą Plancka. W szczególności dla energii (E) i czasu (t) ich nieokreśloności spełniają związek $\Delta E \cdot \Delta t \geq h/4\pi$, co dopuszcza fluktuację energii układu, o ile fluktuacje są dostatecznie krótkotrwałe.

Zasada wykluczania (zakaz) Pauliego – w mechanice kwantowej stan cząstki jest określony przez podanie jego energii, pędu oraz wewnętrznego momentu pędu, zwanego także spinem. Ta ostatnia wielkość nie ma bezpośredniego odpowiednika w świecie dostępnym naszym zmysłom i wszelkie porównania cząstki do wirującego bąka są mylące. Spin podawany jest zwykle w jednostkach $h/2\pi$, gdzie $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J · s. Dla elektronu i neutronu, tj. cząstek należących do bohaterów tego artykułu, wynosi on $1/2$ i w żargonie bywa nazywany połówkowym.

W układzie złożonym z identycznych cząstek o spinie połówkowym, zakaz Pauliego pozwala na obecność tylko jednej cząstki znajdującej się w danym stanie kwantowym o określonych wartościach energii, pędu i spinu. Kolejne poziomy energetyczne układu wielu cząstek zajmowane są w sposób maksymalnie oszczędny – cały układ dąży do stanu o możliwie najmniejszej energii.

Bozon Higgsa – patrz artykuł Andrzeja Białasa „Natura boi się próżni”, *Foton 72*, Wiosna 2001, str. 4.

Redakcja poleca: Marcus Chown, *The Magic Furnace*, wyd. J. Cape, 1999. Wydawnictwo ZYSK właśnie przygotowuje do druku tłumaczenie Jacka Bieronii.