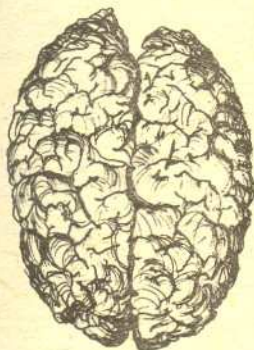


Czego nie wiemy o neutrinach? (I)

Nadzieje i utrapienia astronomii neutrinowej



Neutrino reliktowe są (podobnie jak zarejestrowane przed 15 laty reliktowe promieniowanie elektromagnetyczne) pozostałością po wczesnych etapach ekspansji Wszechświata, gdy stanowił on gęstą i gorącą mieszaninę materii i promieniowania.

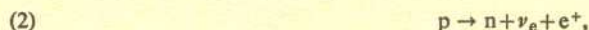


Teoria wybuchów gwiazd supernowych jest w chwili obecnej daleka od doskonałości, wiemy jednak prawie na pewno, że takim wybuchem kończą swoje istnienie gwiazdy o masach rzędu 10 mas Słońca, które wypaliły cały zapas energii jądrowej, tworząc żelazne jądro. Z punktu widzenia możliwości uzyskiwania energii na drodze syntezy termojądrowej jądro takie stanowi „kupę żużlu”, bowiem żelazo jest pierwiastkiem o maksymalnej energii wiązania, przypadającej na jeden nukleon. Ciśnienie w centralnych częściach takiej gwiazdy nie może już zrównoważyć sił grawitacji. Jądro gwiazdy ulega gwałtownemu procesowi kurczenia, w którym cała zmagazynowana w nim energia grawitacyjna zostaje uwolniona w postaci potężnego strumienia neutrin. Jednocześnie dochodzi do rozbłysku optycznego i odrzucenia w przestrzeń zewnętrznych warstw gwiazdy.

Neutrino jest elektrycznie obojętną cząstką elementarną, która nie odczuwa ani oddziaływań silnych (które utrzymują protony i neutrony wewnątrz jądra atomowego), ani elektromagnetycznych (które utrzymują elektron wewnątrz atomu). Neutrino reagują jedynie na siły grawitacyjne oraz na tzw. oddziaływania słabe, które wywołują procesy takie, jak rozpad neutronu



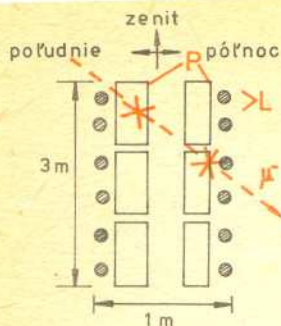
lub reakcja, zamieniająca protony na neutrony



gdzie ν_e i $\bar{\nu}_e$ oznaczają odpowiednio neutrino i antyneutrino elektronowe. Prócz $\bar{\nu}_e$ i ν_e , które we wszystkich reakcjach występują wspólnie z elektronami e^- i pozytonami e^+ , istnieją jeszcze neutrino mionowe ν_μ i $\bar{\nu}_\mu$, związane z mionami μ^+ i μ^- . Prawdopodobnie istnieją również neutrino ν_τ i $\bar{\nu}_\tau$ związane z tzw. ciężkim leptonem τ^+ i jego antycząstką τ^- . Siły rządzące oddziaływaniami neutrin z materią są najsłabsze spośród wszystkich poznanych dotąd rodzajów oddziaływań występujących w przyrodzie.

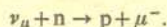
Zdaniem kosmologów cały Wszechświat wypełniony jest neutrinami reliktowymi i w każdym centymetrze sześciennym jest ich średnio 450. Oddziaływanie neutrin z materią jest jednak tak słabe, że możemy wraz z naszą planetą poruszać się w gęstym strumieniu neutrin reliktowych, zupełnie tego nie zauważając. Jednak wpływ oddziaływań słabych na bieg wypadków we Wszechświecie wcale nie jest „słaby”. Gdyby oddziaływania te wyłączyły się nagle, zgasłoby Słońce i inne gwiazdy. Energia w gwiazdach produkowana jest dzięki reakcjom jądrowym, w których wodór spalany jest na hel. Jądro helu składa się z dwóch neutronów i dwóch protonów, więc aby reakcja ta mogła zajść, trzeba, aby połowa protonów (jąder atomów wodoru) przekształciła się w neutrony, co można osiągnąć tylko dzięki procesom takim, jak reakcja (2). Wskutek silnego oddziaływania promieniowania ze zjonizowaną materią średnia droga swobodna fotonów (tj. średnia długość drogi, po przebyciu której foton zostanie rozproszony lub pochłonięty) jest rzędu kilku centymetrów, co stanowi 10^{-10} promienia typowej gwiazdy. Dzięki temu fotony powstające we wnętrzach gwiazd nie mają żadnych szans na wydostanie się na zewnątrz. Całe promieniowanie docierające do nas ze Słońca pochodzi z zewnętrznych warstw jego atmosfery. Zupełnie inaczej zachowują się neutrino, wyprodukowane w jego wnętrzu w wyniku reakcji termojądrowej. Średnia droga swobodna takich cząstek w zjonizowanym wodorze o gęstości odpowiadającej gęstościom występującym we wnętrzach gwiazd sięga kilku lat świetlnych. Słońce jest więc dla neutrin bardziej przejrzyste niż najlepsze szkło optyczne dla światła. Badając neutrino słoneczne można byłoby uzyskać informacje o tym, co dzieje się w środku „typowej gwiazdy w średnim wieku”, jaką jest nasze Słońce. Pozwoliłoby to na bezpośrednie przetestowanie modeli takich gwiazd. Systematyczne poszukiwania prowadzone są przez R. Davisa przy pomocy detektora, zawierającego 600 ton ciekłego chloru węgla (C_2Cl_4), umieszczonego na głębokości 1,5 kilometra pod ziemią w porzuconej kopalni w Południowej Dakocie. Tak gruba warstwa pełni rolę filtra przepuszczającego neutrino i pochłaniającego inne cząstki, docierające do nas z kosmosu, które mogłyby wprowadzić zakłócenia. Metoda detekcji sprowadza się do rejestracji atomów radioaktywnego izotopu argonu ^{37}Ar , powstających w wyniku zderzeń neutrin elektronowych z jądrami atomów chloru ^{37}Cl . Prędkość powstawania ^{37}Ar , zmierzona przez Davisa, wynosi 0,3–0,4 atomu dziennie w porównaniu z 0,9 atomu dziennie, przewidywanymi przez model budowy wewnętrznej Słońca. Przyczyna tej rozbieżności jest nieznana. Być może należy skorygować model Słońca. Strumień neutrin zależy bardzo silnie od temperatury panującej we wnętrzu gwiazdy: wystarczyłoby zmniejszenie tej temperatury od modelowej wartości $1,5 \times 10^7\text{K}$ do $1,3 \times 10^7\text{K}$, aby otrzymać wynik zgodny z obserwacjami. Innym wytłumaczeniem byłyby tzw. oscylacje neutrin, o których będzie mowa w drugiej części tego artykułu.

Energia unoszona przez neutrino wyemitowane przez gwiazdę „zwyczajną” nie przekracza kilku procent energii emitowanej przez nią w postaci fal elektromagnetycznych i dlatego jest wysoce prawdopodobne, że Słońce jest jedyną „zwyczajną” gwiazdą, którą będzie można badać metodami astronomii neutrinowej — inne gwiazdy są po prostu za daleko. Zupełnie inaczej przedstawiają się możliwości obserwowania neutrin emitowanych w czasie wybuchu gwiazd supernowych w naszej Galaktyce. Gwiazda supernowa wytwarza w ciągu kilku dni taką ilość energii, jaką Słońce wypromieniowuje w ciągu miliarda lat (supernowa, która eksplodowała w roku 1054 w naszej Galaktyce, była dobrze widoczna na niebie nawet w dzień!). Energia ta uwalniana jest w postaci promieniowania elektromagnetycznego, strumienia neutrin oraz energii kinetycznej zewnętrznej otoczki gwiazdy, która zostaje odrzucona w czasie wybuchu. Wartości energii, uwalnianej tymi trzema sposobami, są tego samego rzędu wielkości, wybuchom supernowych powinny więc towarzyszyć silne rozbłyski neutrinowe. Badając takie rozbłyski można byłoby sprawdzić poprawność naszych wyobrażeń o przebiegu końcowych etapów ewolucji gwiazd.



Teleskop neutrinowy, stanowi układ pojemników P , wypełnionych scyntylatorem tj. cieczą, która pobudzana jest do świecenia przez przechodzące miony. Każdy pojemnik ze scyntylatorem wyposażony jest w parę liczników fotonów L . Rejestrowane są wyłącznie miony, przychodzące pod małymi kątami do płaszczyzny horyzontu, tj. tylko takie, które uruchamiają jednocześnie dwie pary liczników (dowolną parę po lewej i dowolną parę po prawej).

Źródłem rozbłysków neutrinowych mogą być również procesy gwałtownego zapadania się jąder galaktyk. Pierwsze neutrina wysokoenergetyczne, pochodzące prawdopodobnie od supernowych, zarejestrowali w roku 1965 fizycy amerykańscy w kopalni złota w Afryce Południowej na głębokości 3 km. Następnie doświadczenie to zostało powtórzone w Indiach. W obu przypadkach rejestrowano miony wyprodukowane w wyniku reakcji



Rejestrowane były tylko te cząstki, które trafiły do detektora pod małymi kątami do płaszczyzny horyzontu, tj. wyłącznie miony wyprodukowane przez neutrina, które przeszły przez grubą warstwę ziemi. W ten sposób pozbyto się mionów, wyprodukowanych w atmosferze przez promienie kosmiczne (bowiem takie miony wpadałyby do detektora pod kątami bliskimi 90°). Taki detektor pozwalał również na przybliżone ustalenie kierunku, z którego zostały wyemitowane neutrina, będąc tym samym rodzajem prymitywnego teleskopu. W roku 1978 dwa podobne teleskopy zostały uruchomione w Związku Radzieckim. Niestety, czułość wszystkich istniejących teleskopów neutrinowych jest ciągle jeszcze niewielka, a wyniki osiągnięte do tej pory — nadal skromne (od roku 1965 do 1979 zarejestrowano zaledwie kilkaset mionów). Istnieją również niezwykle ambitne (i kosztowne) projekty detektorów neutrin wysokich energii, które prawdopodobnie zostaną zrealizowane w najbliższej przyszłości. Jeden z takich projektów oparty jest na fackie, że wysokoenergetyczne cząstki naładowane, wyprodukowane przez neutrina, poruszając się w wodzie powinny wywołać gwałtowny wzrost temperatury w wąskich obszarach, przylegających do ich torów (i mających postać „rurek”), co z kolei powoduje powstanie fali akustycznej. Rolę detektora w omawianym doświadczeniu pełni woda morska wypełniająca obszar oceanu o objętości około 100 km^3 . Fale akustyczne rejestrowane są przez mikrofony umieszczone co 100 m w sześcianie o boku 4,5 km.

Najtrudniejszym i jednocześnie najbardziej interesującym zadaniem astronomii neutrinowej jest rejestracja neutrin reliktowych. Rejestrując te cząstki, zyskalibyśmy możliwość odtworzenia warunków, jakie panowały we Wszechświecie od chwili, gdy od „wielkiego wybuchu” upłynęła zaledwie sekunda, bowiem od tej chwili Wszechświat stał się całkowicie przezroczysty dla neutrin. Warto przy tym zdawać sobie sprawę z tego, że fotony reliktowe przestały oddziaływać z materią znacznie później, niż neutrina, bo dopiero po upływie około miliona lat od „wielkiego wybuchu”, gdy Wszechświat rozszerzył się na tyle, aby temperatura zmalała do 3000 K i elektrony (będące zresztą główną przyczyną nieprzezroczystości gwiazd) połączyły się z protonami, tworząc neutralny wodór. Niestety, niskoenergetyczne neutrina reliktowe tak słabo oddziałują ze zwykłą materią, że nikt nie jest w stanie wymyślić metody pozwalającej na rejestrowanie tych cząstek.

Widać z powyższego, że perspektywy badawcze otwierające się przed astronomią neutrinową przedstawiają się niezwykle kusząco — neutrina przeświatłają bowiem „na wylot” niemal cały Wszechświat (mogłyby stanowić doskonałą falę nośną do przesyłania informacji na dowolnie wielkie odległości bez najmniejszych zakłóceń, jak słusznie zauważył Stanisław Lem w „Głosie Pana”). Jednak słabe oddziaływanie neutrin z materią — cecha, dla której wiążemy tak wielkie nadzieje z astronomią neutrinową — jest jednocześnie głównym źródłem jej kłopotów. Przezroczysty dla neutrin jest bowiem nie tylko Wszechświat, ale i nasze przyrządy pomiarowe.

Roman JUSZKIEWICZ

Jądra atomowe o egzotycznym składzie

Najtrwalsze są jądra atomowe o określonym stosunku liczby neutronów do liczby protonów. Jądra te tworzą na mapie nuklidów tzw. ścieżkę trwałości β . Jądro, które nie leży na tej ścieżce, ulega przemianom β i w rezultacie, poprzez zmianę składu, zostaje na nią sprowadzone. Jądra spoza ścieżki trwałości są w większości wytwarzane sztucznie w reakcjach jądrowych. Tylko stosunkowo mała ich część powstaje przez rozpad jąder ciężkich występujących w przyrodzie. Obecnie potrafimy wytwarzać i badać jądra położone daleko od ścieżki trwałości. Mają one od ok. 20 neutronów mniej (albo więcej) niż jądro tego samego pierwiastka położone na ścieżce. Stąd też i własności takiego jądra są często bardzo różne od własności odpowiedniego jądra na ścieżce, a czasy życia bardzo krótkie, rzędu drobnych części sekundy.

Ścieżka trwałości nie jest nieskończenie długa. Urywa się ona na jądrze ${}^{209}\text{Bi}$, które jest najcięższym jądrem trwałym. Wszystkie jądra cięższe rozpadają się przez rozszczepienie lub rozpad α . Przyczyną jest tu wzrost odpychania kulombowskiego naładowanych elektrycznie protonów, przy wzroście ich liczby (liczba atomowa Z) w jądrze. Jeszcze tylko trzy nuklidy: ${}^{232}\text{Th}$, ${}^{235}\text{U}$ i ${}^{238}\text{U}$ mają dostatecznie długie czasy życia, rzędu miliardów lat, by przetrwać na Ziemi od czasu jej powstania. Wszystkie inne jądra nietrwałe, występujące w sposób naturalny na Ziemi, są produktami rozpadu tych trzech. W sposób sztuczny udało się dokonać syntezy jąder aż do $Z = 106$, (wytworzone ostatnio pierwiastki nie mają jeszcze uzgodnionej, oficjalnej nazwy).