



Gdzie się podziały neutrino słoneczne

Doc. dr Jerzy W DOWCZYK

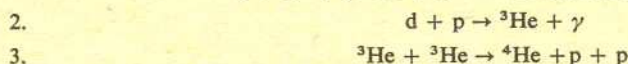
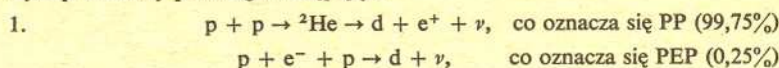
Doświadczenie Davisa zostało omówione w Delcie 1/1978.

Od szeregu lat uważa się, iż źródłem energii słonecznej jest fuzja jądrowa, czyli tak zwane jądrowe spalanie wodoru. Ostatnio został przeprowadzony eksperyment, który w pewnym stopniu zachwiał wiarę w poprawność tego, zdawałoby się bardzo ugruntowanego poglądu. Celem niniejszego artykułu jest wskazanie przyczyn zaniepokojenia, wynikającego z zaskakującego rezultatu eksperymentu prowadzonego przez Davisa, oraz omówienie niektórych, dość zresztą spekulatywnych sugestii wysuniętych w celu wyjaśnienia tego rezultatu.

Według obecnie przyjętego obrazu wnętrza Słońca a także innych gwiazd zbudowane jest z tak zwanej plazmy, to znaczy mieszaniny praktycznie w pełni zjonizowanych atomów (czyli pozbawionych otoczki elektronowej jąder) i swobodnych elektronów. Wśród jąder atomowych dominują swobodne jądra atomów wodoru — protony. Proces „spalania” wodoru polega na łączeniu się czterech protonów w jedno jądro atomu helu czyli cząstkę α . Powstaniu każdego jądra helu towarzyszy wydzielenie się dwóch neutrino w rezultacie przemiany dwóch protonów w neutrony. W procesie przemiany protonu w neutron powstaje również pozyton. Wydzielenie się pozytonu w niektórych przypadkach może być zastąpione przez bezpośredni wychwyt swobodnego elektronu. To ostatnie zjawisko z punktu widzenia badania neutrino jest interesujące, gdyż takiemu procesowi towarzyszy wydzielenie neutrino o ściśle określonej energii, a więc w rezultacie zajścia tego zjawiska powstaje monoenergetyczny strumień neutrino. Proces przemiany protonu w neutron, zachodzący poprzez emisję neutrino i pozytonu, jest rozpadem na trzy ciała i w rezultacie neutrino może mieć praktycznie dowolną energię niższą od pewnej maksymalnej. W tym przypadku mówimy o ciągłym widmie neutrino.

Proces przemiany wodoru w hel nie zachodzi bezpośrednio, gdyż prawdopodobieństwo jednoczesnego „spotkania” się czterech protonów jest niezmiernie małe — proces ten zachodzi stopniowo. Zostały zaproponowane dwie zasadnicze drogi prowadzące do stopniowego połączenia czterech protonów, czyli tak zwane cykle. Pierwszy z nich nazywa się cyklem protonowym, drugi zaś cyklem węglowo-azotowym.

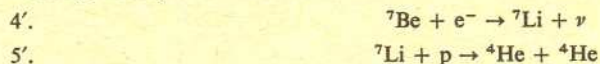
Cykl protonowy przebiega następująco



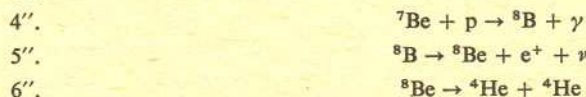
Możliwe są także inne zakończenia tego cyklu, zamiast reakcji „3” może zajść reakcja



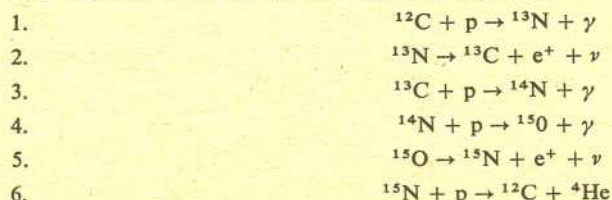
z dalszą historią



lub



Cykl węglowo-azotowy przebiega w sposób następujący



W procesie tym węgiel i azot odgrywają rolę katalizatorów, biorą one udział w reakcjach, ale ich ilość po zajściu całego cyklu pozostaje nie zmieniona.





Rozwiązanie zadania M 151. Wykorzystując znaną nierówność $a+b > 2\sqrt{ab}$, słuszną dla liczb nieujemnych a, b , otrzymujemy

$$\frac{\sin x}{2} + \frac{\cos x}{2} > 2 \cdot \frac{1}{2} (\sin x + \cos x)$$

$$\text{Ponieważ } \sin x + \cos x = \sin x + \sin\left(\frac{\pi}{2} - x\right) =$$

$$= 2 \sin \frac{\pi}{4} \cos\left(x - \frac{\pi}{4}\right) = \frac{2}{\sqrt{2}} \cos\left(x - \frac{\pi}{4}\right) >$$

$$> \frac{2}{\sqrt{2}} \text{ i funkcja } x \rightarrow 2^x \text{ jest rosnąca,}$$

$$\text{więc } 2^{\frac{\sin x}{2} + \frac{\cos x}{2}} > 2^{1-1/\sqrt{2}}$$



Rozwiązanie zadania M 152. Niech x będzie ceną gwoźdźcia, y — ceną haka i z — ceną nakrętki. Mamy wówczas

$$10x + 4y + z = 21,$$

$$7x + 3y + z = 16.$$

Oczywiście dane te nie wystarczają do wyznaczenia x, y, z , może jednak wystarczą do wyznaczenia sumy $x+y+z$. Pomnożmy obydwie strony pierwszego równania przez a , drugiego zaś przez b :

$$10ax + 4ay + az = 21a,$$

$$7bx + 3by + bz = 16b.$$

Dodając stronami te równania otrzymujemy (*) $(10a+7b)x + (4a+3b)y + (a+b)z = 21a + 16b$.

Powinno więc być $10a+7b = 4a+3b = a+b = 1$.

Ten układ, mimo że ma więcej równań niż niewiadomych, ma dokładnie jedno rozwiązanie: $a = -2, b = 3$. Podstawiając te wartości do (*) otrzymujemy $x+y+z = 6$

Który z omówionych wyżej cykli odgrywa decydującą rolę, zależy od temperatury wnętrza gwiazdy (oczywiście, aby cykl węglowo-azotowy mógł zachodzić, niezbędna jest pewna, chociaż w rzeczywistości bardzo niewielka, domieszka węgla). Przy niższych temperaturach łatwiej realizuje się cykl protonowy, gdyż ładunki wchodzących do reakcji jąder są mniejsze, a tym samym mniejsze są siły ich wzajemnego odpychania. Przy podwyższeniu temperatury, kiedy energia kinetyczna rośnie, zaczynają zachodzić reakcje z węglem i azotem. Ilość tych reakcji szybko przewyższa ilość wyjściowych reakcji cyklu protonowego, gdyż wydajność produkcji deuteru nawet w bardzo wysokich temperaturach pozostaje względnie niska (wprawdzie ^2He jest produkowany z dużą wydajnością, ale jądra ^2He są bardzo nietrwałe ze względu na rozpad na dwa protony, tak że rozpad $^2\text{He} \rightarrow d + e^+ + \nu$ zachodzi tylko dla znikomej ilości powstałych jąder).

Jak łatwo zauważyć, neutrino powstają tylko w niektórych z wyżej wypisanych reakcji. Reakcje te są zestawione w poniższej tabelce

Reakcja	E_{\max} [MeV]	Typ widma neutrin
$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu$	[PP] 0,420	ciągłe
$p + e^- + p \rightarrow d + \nu$	[PEP] 1,44	monoenergetyczne
$^7\text{Be} + e^+ \rightarrow ^7\text{Li} + \nu$	0,861 (90%) 0,383 (10%)	monoenergetyczne
$^8\text{B} \rightarrow ^8\text{Be} + e^+ + \nu$	14,06	ciągłe
$^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + e^+ + \nu$	1,24	ciągłe
$^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu$	1,7	ciągłe

W celu ułatwienia ilościowej dyskusji problemu rejestracji neutrin, wygodnie jest określić jednostkę charakteryzującą wydajność tej rejestracji (wydajność ta zależy od natężenia i energii neutrin). Taka jednostka o nazwie SNU (solar neutrino unit) została zdefiniowana jako jeden wychwyty neutrina na sekundę na 10^{36} cząstek rozpatrywanego materiału. W przypadku eksperymentu Davisa 1 SNU oznacza w przybliżeniu 1 wychwyty na 5 dni.

Szczegółowe obliczenia teoretyczne dają następujące wartości w przypadku reakcji z chlorem

Cykl węglowo-azotowy	35 SNU
Standardowy model reakcji termojądrowej	5,6 SNU
w tym rozpad ^8B	4,3 SNU
Reakcja proton — proton	0,3 SNU

Różnica między cyklem węglowo-azotowym a cyklem protonowym związana jest przede wszystkim z faktem, iż próg energetyczny reakcji neutrin z chlorem jest stosunkowo wysoki (0,81 MeV) i w rezultacie w procesie rejestrowane są tylko neutrino z mniej ważnych procesów tego cyklu (przede wszystkim z rozpadu ^8B), natomiast neutrino z podstawowego procesu łączenia dwóch protonów w deuter są jedynie reprezentowane przez bardzo rzadki proces PEP.

Wyrażony w tych samych jednostkach rezultat eksperymentu Davisa, po uwzględnieniu poprawek na tło wywołane oddziaływaniami promieniowania kosmicznego, jak również tło samego licznika służącego do pomiaru zawartości ^{37}Ar , wynosi $0,2 \pm 1,0$ SNU.

Występuje więc wyraźna rozbieżność z oczekiwaniami z cyklu węglowo-azotowego, co nie jest specjalnie zaskakujące, gdyż już wcześniej uważano, iż ten cykl nie odgrywa decydującej roli w generacji energii w Słońcu. Faktem, który wzbudził ogromne zainteresowanie a także duże zaniepokojenie astrofizyków, jest wyraźna rozbieżność między tym wynikiem a wartością 5,6 SNU, oczekiwaną w standardowym modelu reakcji termojądrowej.

Podjęto szereg prób wyjaśnienia tego zjawiska, wysuwając szereg spekulatywnych hipotez. Należy jednak od razu na wstępie podkreślić, iż żadna z tych hipotez nie jest zadowalająca, mimo że wiele z nich, formalnie rzecz biorąc, tłumaczy zjawisko braku neutrin słonecznych. W dalszym ciągu artykułu postaram się omówić niektóre z nich.

Najogólniej rzecz biorąc, hipotezy te można podzielić na trzy klasy. Do pierwszej klasy należy zaliczyć te, które mówią, iż źródłem energii słonecznej jest jądro „spalanie” wodoru (jak to wynika z wcześniejszych rozważań, ta możliwość jak na razie nie jest wykluczona), ale aktualna teoria budowy wnętrza Słońca jest niepoprawna i proces reakcji termojądrowej przebiega inaczej (na przykład cały proces zachodzi jedynie poprzez pierwszy łańcuch cyklu protonowego). Do drugiej klasy można zaliczyć hipotezy stwierdzające, iż w produkcji energii słonecznej odgrywa rolę proces różny od reakcji spalania wodoru. I wreszcie do trzeciej — hipotezy stwierdzające, iż proces reakcji termojądrowej zachodzi w Słońcu normalnie, ale z jakiegoś powodu wytworzone neutrino do nas nie docierają.

Z hipotez należących do pierwszej klasy można wymienić sugestię, iż produkcja energii w centralnej części Słońca zachodzi okresowo i że w chwili obecnej rdzeń Słońca znajduje się w przejściowym okresie o niskiej temperaturze, podczas gdy temperatura powierzchni Słońca jest rezultatem promieniowania energii wydzielonej wcześniej, w okresie gdy temperatura rdzenia była wysoka i reakcje termojądrowe zachodziły obficie (proces propagacji energii od rdzenia do powierzchni trwa około dziesięciu milionów lat)



Został nawet zaproponowany mechanizm mogący doprowadzić do tego rodzaju oscylacji, oparty na założeniu, iż okresowo do rdzenia, w wyniku ruchów materii słonecznej, wprowadzana jest znaczna ilość ^3He . Powoduje to szybkie „spalanie” i gwałtowne wydzielenie energii prowadzące do ekspansji rdzenia, a tym samym do obniżenia jego temperatury i przerwania procesu spalania. Szczegółowe obliczenia pokazują jednak, iż mechanizm taki spowodowałby co najmniej dziesięcioprocentową zmianę jasności Słońca na przestrzeni ostatniego miliona lat, podczas gdy analiza historii klimatu Ziemi wyklucza zmiany większe niż rzędu 3%.

Inna, bardziej jeszcze spekulatywna hipoteza jest oparta na założeniu, iż Słońce formowało się w dwóch etapach. W pierwszym powstał rdzeń o masie zawierającej około połowy masy Słońca, zbudowany z materiału o małej zawartości helu i dużej zawartości metali, zaś druga, bardziej powierzchniowa połowa masy Słońca została dodana później. W takim rdzeniu ze względu na małą koncentrację helu dalsze łańcuchy cyklu protonowego realizowałyby się ze znacznie niższym prawdopodobieństwem, a tym samym wydajność produkcji wysokoenergetycznych neutrin znacznie by się obniżyła.

Niska zawartość helu w materiale gwiazdowym jest jednak trudna do wytłumaczenia. W desperackim poszukiwaniu innego źródła energii słonecznej wysunięto hipotezę, iż we wnętrzu Słońca zlokalizowana jest niewielka „czarna dziura” o masie około 10^{-5} masy Słońca. Czarne dziury są to hipotetyczne obiekty o gęstości materii tak wielkiej, iż siły grawitacji dominują nad wszystkimi innymi siłami, nawet siłami oddziaływań jądrowych. Czarne dziury pochłaniają materię z otaczającej przestrzeni powodując wydzielanie się energii. Czarna dziura o wymienionej wyżej masie prowadziłaby do wyzwolenia około połowy energii emitowanej przez Słońce. W tym modelu rejestrowano by neutrina na poziomie około 1 SNU.

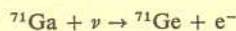
Hipoteza ta oprócz oczywistej spekulatywności ma jeszcze jedną wadę: wymaga, aby Słońce było wyjątkową gwiazdą. Badanie ewolucji gwiazd w zasadzie wyklucza hipotezę, iż większość gwiazd zbudowana jest na czarnych dziurach. Hipoteza, iż niewielka część ogólnej populacji gwiazd ma tę cechę, oczywiście nie może być eksperymentalnie wykluczona.

Przejdźmy do trzeciej klasy hipotez czyli do pytania, co mogłoby stać się z neutrinami na ich drodze od Słońca do Ziemi. Wysunięto tutaj dwie hipotezy, obie oparte na założeniu, iż masa neutrina jest większa od zera. Według pierwszej z tych hipotez neutrina ulegają rozpadowi z czasem życia ($\tau(1 \text{ MeV}) \leq 30 \text{ s}$) dostatecznie krótkim, aby ich strumień na drodze do Ziemi od Słońca uległ dostatecznemu osłabieniu. Zjawisko to wymaga założenia, iż istnieją jakieś dwie inne lżejsze cząstki elementarne, na które może rozpaść się neutrin.

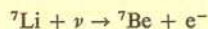
W rzeczywistości wiadomo, iż w przyrodzie istnieją dwa neutrina, jedno stowarzyszone z elektronem, drugie zaś stowarzyszone z mionem, jednakże bezpośredni rozpad słonecznego neutrina elektronowego na neutrin mionowe i jakąś inną cząstkę jest mało prawdopodobny, gdyż powinien pociągać za sobą rozpad mionu na elektron i tę cząstkę, a taki proces nie jest eksperymentalnie obserwowany. Ogólnie rzecz biorąc, hipoteza rozpadu wyjaśnia wynik eksperymentu neutrinowego, ale budzi zastrzeżenia jako mało elegancka, gdyż wymyślona jedynie w celu wyjaśnienia wyniku tego eksperymentu. Inną hipotezę podobnego typu (tzw. oscylacje neutrin) omówimy w najbliższym czasie w osobnym artykule.

Jak widać z powyższych rozważań, mimo wielu mniej lub bardziej desperackich prób wyjaśnienia rezultatu eksperymentu dotyczącego neutrin słonecznych, sytuacja pozostaje nadal bardzo tajemnicza. Wydaje się, iż warunkiem dalszego postępu jest przeprowadzenie niezależnego eksperymentu. Szczególnie interesujący byłby eksperyment pozwalający bezpośrednio rejestrować neutrina z procesu PP, gdyż natężenie tych neutrin jest znacznie większe a także praktycznie niezależne od modelu Słońca, a zależne jedynie od jego mierzonej eksperymentalnie jasności (chyba że wydajność procesu termojądrowego jest zmienna w czasie, jak to sugerowała jedna z dyskutowanych uprzednio hipotez).

W chwili obecnej uważa się, iż najlepszym eksperymentem tego typu byłby eksperyment wykorzystujący reakcję



Próg tej reakcji wynosi 0,233 MeV, a czas połowicznego zaniku radioaktywnego germanu 71 — około 11 dni. Eksperyment ten pozwoliłby definitywnie rozstrzygnąć problem pochodzenia energii słonecznej, a także w dużym stopniu zweryfikować hipotezy o rozpadzie i oscylacji neutrin. Do przeprowadzenia tego eksperymentu teoretycznie potrzebne jest jedynie 20 ton czystego galu (waga tarczy w eksperymencie Davisa wynosi 600 ton). Koszt tego eksperymentu jednakże jest bardzo wysoki, gdyż gal jest materiałem bardzo drogim. Znacznie tańszym byłby eksperyment oparty na reakcji



Proces ten ma wprawdzie stosunkowo wysoki próg (0,861 MeV), nie pozwalający rejestrować neutrin pochodzących z procesu PP, ale ma znacznie wyższy przekrój czynny na rejestrację neutrin PEP. Obliczenia pokazują, iż w przypadku modelu standardowej reakcji termojądrowej otrzymujemy około 34 SNU, z czego jedynie około 14 SNU pochodzi od neutrin z rozpadu ^8B .



Rozwiązanie zadania P 51. Ze względu na symetrię wystarczy rozpatrzyć połowę liny, pokazaną na rysunku. Całkowity nacisk na belkę od obu połówek liny będzie oczywiście dwa razy większy. Odległość AB (równą BC) oznaczmy przez dx . Jest oczywiste, że $dx = \frac{1}{2} dh$. Prędkość

spadającej części liny wynosi $v = \sqrt{2gh}$. Nacisk pochodzący od połówki liny jest równy części liny zwisającej z belki, N_1 , powiększonemu o szybkość zmian pędu, N_2 , podczas przechodzenia punktu A liny do punktu C . Mamy

$$N_1 = \frac{1}{2} h g \rho$$

$$N_2 = \frac{dp}{dt} = v \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} v g \frac{dh}{dt} = \frac{1}{2} v^2 g = g h g \rho$$

Suma $N_1 + N_2$ wynosi $\frac{3}{2} g h g \rho$. Osiąga ona

największą wartość dla największej możliwej wartości h równej $2l$. Największą wartością $N_1 + N_2$ jest więc $3glg\rho$. Wobec tego, zgodnie z uwagą poczynioną na początku, musi być spełniony związek $6glg\rho < N_0$.

