

Model Słońca i kłopoty z wysyłanymi ze Słońca neutrinami

Każde fizyczne odkrycie poszerza naszą wiedzę i pogłębia rozumienie świata. Bywają jednak odkrycia, które prowadzą do nowych pytań, bardziej fundamentalnych niż te, na które zdołały odpowiedzieć.

FREDERICK REINES

Wstęp

Temat poruszony w niniejszej pracy jest problemem aktualnych poszukiwań i badań fizyków na całym świecie. Neutrino są jednymi z najbardziej zagadkowych tworów natury. Cząstki te właściwie od początku sprawiały naukowcom wiele kłopotów. Tak jest również i dzisiaj. Odkrycie zjawiska oscylacji neutrin wiąże się ze zmianami w dotychczasowym pojmowaniu świata cząstek elementarnych. Dowodzi to bowiem, że neutrino, cząstki które w Modelu Standardowym są bezmasowe, posiadają masę. Drugim odkryciem bezpośrednio powiązanim z umasowionymi neutrinami jest potwierdzenie naruszenia zasady zachowania liczby leptonowej. Tak więc zanoszą się na to, że najbliższa przyszłość fizyki będzie stała pod znakiem nowych poszukiwań i odkryć.

Problem neutrinowy będący motywem działań wielu laboratoriów i instytutów badawczych niezwykle trudno jest potraktować w sposób skrótowy. Głównym powodem jest tutaj ciągły i szybki postęp w badaniach. Fizyka cząstek jest dzięki temu coraz bardziej fascynująca. Pomimo tych niewątpliwych sukcesów wiele problemów w opracowaniu zagadnienia przysparza brak literatury w języku polskim. Większość wiadomości w językach obcych dostępna jest właściwie tylko przez internet. W mojej pracy zdecydowałam się częściowo oprzeć na wiadomościach internetowych, przyjmując za wiarygodne te, które zamieszczane są na stronach macierzystych instytutów badawczych. Istnieją co prawda artykuły zamieszczane w naszych czasopismach popularnonaukowych, ale nie tłumaczą one istoty poruszanych zagadnień. Podczas pracy nad niniejszym zagadnieniem skorzystałam z uprzejmości Pani dr hab. Danuty Kiełczewskiej z Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego, która jest w Polsce prekursorem doświadczeń nad oscylacją neutrin. W tym miejscu pragnę Pani Kiełczewskiej złożyć wyrazy podziękowania za cierpliwość, wyrozumiałość i naświetlenie zagadnienia oscylacji neutrin. Dzięki niej mogłam zamieścić również w moim opracowaniu niektóre dane liczbowe.

SPIS TREŚCI

1. <i>Streszczenie</i>	<i>str. nr 2</i>
2. <i>Trochę historii</i>	<i>str. nr 4</i>
3. <i>Trochę matematyki</i>	<i>str. nr 6</i>
4. <i>Budowa Słońca</i>	<i>str. nr 8</i>
- <i>jądro</i>	<i>str. nr 8</i>
- <i>otoczka konwekcyjna</i>	<i>str. nr 11</i>
- <i>atmosfera</i>	<i>str. nr 11</i>
5. <i>Neutrino</i>	<i>str. nr 15</i>
6. <i>Detekcja neutrin słonecznych</i>	<i>str. nr 18</i>
- <i>Homestake</i>	<i>str. nr 19</i>
- <i>Gallex</i>	<i>str. nr 20</i>
- <i>SAGE</i>	<i>str. nr 21</i>
- <i>Super-Kamiokande</i>	<i>str. nr 22</i>
- <i>SNO</i>	<i>str. nr 24</i>
7. <i>Próby wyjaśnień</i>	<i>str. nr 26</i>
8. <i>Oscylacje neutrin</i>	<i>str. nr 28</i>
9. <i>Ciekawostki</i>	<i>str. nr 30</i>
10. <i>Zakończenie</i>	<i>str. nr 32</i>
11. <i>Bibliografia</i>	<i>str. nr 33</i>

Streszczenie

Słońce jest najbliższą nam gwiazdą, od czasów starożytnych poddawaną obserwacjom. Jego historia sięga wstecz aż o około 4,5 miliarda lat. W porównaniu z wiekiem Wszechświata jest to więc gwiazda stosunkowo młoda. Z racji jego szczególnej pozycji na naszym niebie stanowi ono jak gdyby rodzaj wzorca, do którego odnosimy wielkości fizyczne innych gwiazd. Z daleka Słońce wydaje się jednorodną i gładką kulą gazu. Jest to jednak odczucie subiektywne. Dokonując obserwacji przez specjalistyczne przyrządy astronomiczne widać kipiącą i ulegającą ciągłym zmianom powierzchnię. Są to widome dowody „życia” naszej gwiazdy dziennej, której energię zapewniają termonuklearne reakcje zachodzące w jej wnętrzu. W samym centrum, gdzie temperatura osiąga ponad 15 mln. Kelwinów produkowana jest energia, która powstaje w procesie syntezy czterech protonów w jądro atomu helu. Wysokoenergetyczne promieniowanie przenoszone jest na zewnątrz najpierw w procesie promieniowania, a następnie konwekcji. Oprócz fotonów w reakcjach powstaje olbrzymia ilość neutrin – bardzo przenikliwych cząstek elementarnych, które osiągają powierzchnię gwiazdy w ciągu dwóch sekund. Ponieważ nieprzezroczystość materii słonecznej nie pozwala nam zajrzeć do środka, wiedzę o budowie Słońca czerpiemy m.in. z tzw. modeli słonecznych. Informacje będące wynikiem analiz tych modeli potwierdzamy metodami obserwacyjnymi. Zanim wyprodukowany w jądrze foton zostanie wyemitowany w przestrzeń międzyplanetarną może minąć nawet kilkaset tysięcy lat. Natomiast neutrina opuszczające gwiazdę niosą aktualne informacje o procesach zachodzących w jej centrum. Zagadnieniem pomiaru słonecznych neutrin jako pierwszy zajął się Raymond Davis budując w 1968 roku pierwszy na świecie detektor neutrin. Przeprowadzone przez niego badania dały 30% spodziewanego wyniku. Tak oto narodził się problem zwany po angielsku Solar Neutrino Problem. Inne detektory zbudowane w późniejszych latach potwierdziły zaobserwowany przez Davisa deficyt neutrin. Detektory w ogóle możemy podzielić na dwie grupy. Do pierwszej zaliczamy te, które oparte są na zasadzie radiochemicznej jak Homestake, GALLEX czy SAGE. Drugą stanowią tzw. detektory wodne – Super Kamiokande czy SNO. Pierwsza grupa posiadała stosunkowo niski próg czułości (233keV dla detektorów gallowych, oraz 814keV dla detektora chlorowego). Z detektorami gallowymi wiązano duże nadzieje, bowiem w niskim zakresie energetycznym powstaje większość neutrin słonecznych. Tymczasem rozwiązania zagadki dostarczyły detektory wodne. Dzięki nim odkryto zjawisko oscylacji neutrin, polegające na zmianie zapachu neutrina. Warunkiem oscylacji jest jednak umasowione neutrin. W Modelu Standardowym zakładano, że neutrina nie posiadają mas spoczynkowych. Nie było to poparte danymi doświadczalnymi. W związku z wynikami eksperymentów prowadzonych przez zespoły Super Kamiokande, oraz SNO, zjawisko oscylacji neutrin zostało potwierdzone. Ten niewątpliwym sukces nauki może być czynnikiem, dzięki któremu trzeba będzie poddać

weryfikacji wspomniany wyżej Model Standardowy. Kłopot polega na tym, że nie można podać jednoznacznych wartości mas poszczególnych neutrin. Neutrino bowiem składa się z trzech stanów kwantowych, z których każdy posiada inną masę. Różnica pomiędzy poszczególnymi zapachami jest taka, że każde z neutrin posiada różne proporcje tych stanów. Detektor zaś licząc poszczególne ich kombinacje, mierzy te proporcje w odległości jaka dzieli go od źródła neutrin. Dokonując odkrycia zjawiska oscylacji wykonano kolejny krok ku Teorii Wielkiej Unifikacji. Należy nadmienić, że w eksperymencie Super Kamiokande bierze udział zespół pracowników naukowych z Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego. Inicjatorem badań nad oscylacjami neutrin była w Polsce dr hab. Danuta Kielczewska [20].

Trochę historii

Gdzieś na peryferiach Drogi Mlecznej, w jednym z jej spiralnych ramion, w odległości 8,5 kiloparseka od środka leży mała żółta gwiazda – Słońce. Wśród innych gwiazd niczym szczególnym się nie wyróżnia. Jest żółtym karłem i charakteryzuje się przeciętnymi rozmiarami, masą, temperaturą powierzchni, gęstością itd. Jest to zupełnie przeciętna gwiazda, i tylko jej bliskość sprawia, że dla nas, mieszkańców Ziemi ma ona tak wielkie znaczenie. Z astronomicznego punktu widzenia stanowi ono jedyny przypadek, w którym możemy badać zjawiska zachodzące w różnych miejscach tarczy gwiazdy. Tymczasem inne, nawet najbliższe gwiazdy są tak odległe, że w ogniskach największych teleskopów obrazy ich pozostają tylko świecącymi punktami. Słońce tak jak i inne gwiazdy naszej Galaktyki znajduje się w ciągłym ruchu. W ciągu niespełna 250 milionów lat dokonuje pełnego obiegu jej centrum, a także zmierza z prędkością 20km/s w kierunku gwiazdozbioru Herkulesa. O Słońcu możemy mówić bardzo dużo, jednak czy zdajemy sobie sprawę z jego rozmiarów, temperatury, budowy i wpływu na nas, mieszkańców Ziemi? Co byśmy nie powiedzieli, warto jednak zawsze pamiętać, że Słońce jest twórcą życia na Ziemi.

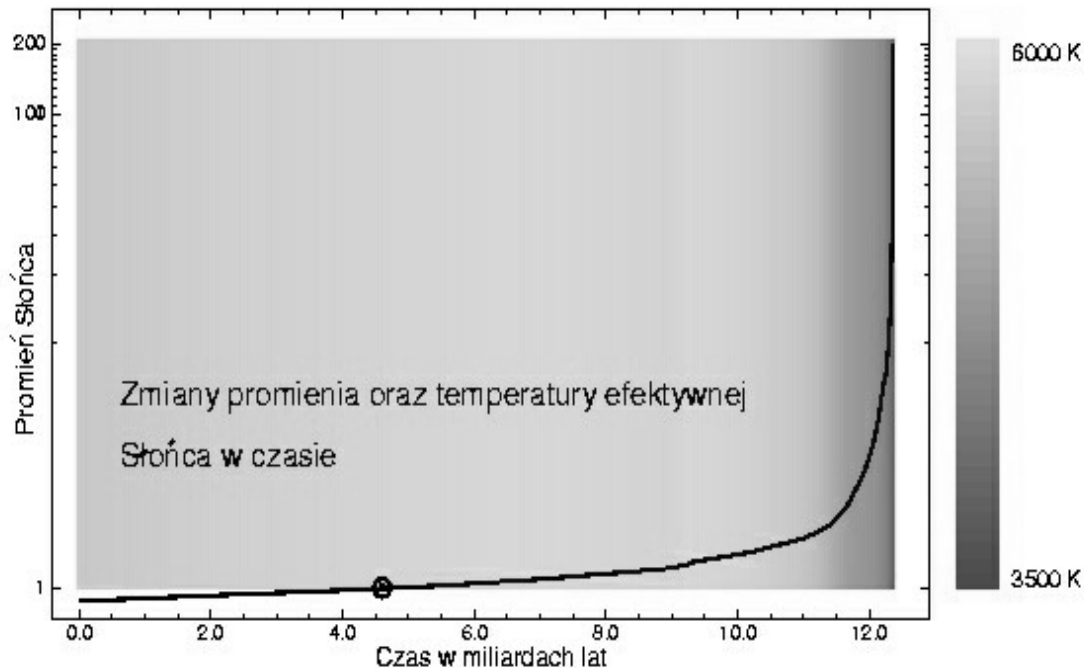
Naszą opowieść o Słońcu, jego budowie, procesach w nim zachodzących i o tym, jak długo będzie ono żyło musimy rozpocząć od bardzo odległej przeszłości. A więc

zaczynamy

***Dawno dawno temu
gdzieś na obrzeżach Galaktyki...***

nasze Słońce było olbrzymim i bardzo rozrzedzonym obłokiem gazowym. Mijały lata, miliony lat, w wyniku wzajemnego przyciągania cząsteczek, a później na skutek działania sił grawitacji obłok ten stawał się coraz mniejszy i gęstszy. Z najbliższych okolic Wszechświata dopływała materia. Masa obłoku powiększała się, a energia grawitacyjna kondensujących się cząstek zamieniała się w ciepło, które ogrzewało jego centrum. W wyniku tego procesu rozgrzana materia zaczęła świecić. Słońce osiągnęło stadium protogwiazdy. Kiedy temperatura wewnątrz wzrosła do kilkunastu milionów stopni nastąpił zapłon paliwa termojądrowego – powstała nowa gwiazda. Od tego momentu emitowana z jądra energia cieplna wysyłana jest na zewnątrz i ogrzewa otulające je gazy, a także wytwarza ciśnienie skierowane również na zewnątrz, które zapobiega całkowitej ich kondensacji pod wpływem sił grawitacji. W ten właśnie sposób Słońce osiągnęło stan równowagi. Oznacza to, iż ma swój ustalony rozmiar, stałą temperaturę powierzchni oraz emituje określoną ilość energii na zewnątrz. Astronomowie uważają, że na tym etapie życia, gwiazda znajduje się na tak zwanym ciągu głównym. Jest to określenie jej położenia na wykresie Hertzsprung - Russella.

Aby nasze rozważania były kompletne powinniśmy spróbować odpowiedzieć sobie na pytanie co czeka naszą gwiazdę w przyszłości. Reakcje termojądrowe zachodzące wewnątrz Słońca są bowiem powodem ciągłych zmian jego składu chemicznego. Wodór, który stanowi dzisiaj podstawowe paliwo podtrzymujące jego „życie” bez przerwy ulega zamianie w hel. Obecnie zawartość wodoru stanowi około 50% jego zawartości początkowej, a zapasy te muszą się kiedyś wyczerpać. Aby zobaczyć efekt końcowy posłużmy się poniższym rysunkiem. Na osi poziomej odłożony został wiek Słońca w miliardach lat, liczony od momentu rozpoczęcia reakcji jądrowych, zaś na osi pionowej (w skali logarytmicznej) jego promień wyrażony w jednostkach promienia Słońca obecnego.



Rys. nr 1 – zależność promienia Słońca i temperatury jego powierzchni od wieku gwiazdy [http://www.zacmienie.heron.com.pl/sun_l1.htm]

Kółkiem na wykresie zaznaczono położenie Słońca w chwili obecnej. Przyjęto, że liczy sobie ono ponad cztery i pół miliarda lat. Jednocześnie kolorem oznaczono temperaturę efektywną powierzchni w danym momencie czasu. Z wykresu widać, że przez dosyć długi okres czasu nic specjalnego się nie wydarzy, mimo wszystko jednak czeka nas powolny i ciągły wzrost temperatury gwiazdy. Spoglądając na skalę czasu możemy jednak spać spokojnie - będzie się to wszystko odbywać w iście żółwym tempie. Po wyczerpaniu paliwa wodorowego w centralnej części nastąpi wzrost temperatury jądra i zapłon reakcji syntezy helu, prowadzącej ostatecznie do powstania jąder węgla. Wydzielili się większa niż dotychczas energia, która spowoduje, że zewnętrzne warstwy gwiazdy zaczną się rozprężyć i stygnąć. Efektem będzie czerwony kolor jej powierzchni. Promień Słońca gwałtownie wzrośnie i osiągnie wartość ponad dwustukrotnie większą niż obecnie. Stanie się ono czerwonym olbrzymem. By uzmysłowić sobie wielkość tych rozmiarów wystarczy powiedzieć, że dwie najbliższe Słońca planety - Merkury i Wenus znajdą się pod jego powierzchnią. Zaś końcowym etapem ewolucji Słońca będzie stadium białego karła. Po wypaleniu się helu spuchnięte, zewnętrzne warstwy zostaną odrzucone tworząc

mgławicę planetarną. Centralna część gwiazdy pozostanie jako mała, bardzo gęsta gwiazda zwana białym karłem. Ponieważ siły grawitacji będą zbyt małe, aby stworzyć warunki do dalszych termojądrowych reakcji - syntezy nagromadzonych jąder węgla, będzie ona powoli stygnąć wypromieniowując nagromadzoną energię.

Trochę matematyki

Słońce należy do gwiazd I-wszej populacji, tzn. takich, które powstały stosunkowo późno w historii Galaktyki. Materia która je tworzy została wzbogacona pierwiastkami ciężkimi, stanowiącymi pozostałości po wybuchach starszych gwiazd, których ewolucja dawno już się zakończyła. Z uwagi na specyficzne warunki obserwacyjne (rozciągłość i duże natężenie promieniowania) wymaga ono stosowania zupełnie innych przyrządów i metod obserwacyjnych niż pozostałe gwiazdy. Dlatego też w celu prowadzenia badań Słońca powstał specjalny dział astronomii – heliofizyka.

Aby obliczyć masę Słońca dokonajmy założenia, że planeta o masie m porusza się wokół Słońca z prędkością v po okręgu o promieniu R . Efektem takiego ruchu jest działanie na planetę siły dośrodkowej, która jest wynikiem wzajemnego przyciągania grawitacyjnego tych ciał. Siła ta określona prawem powszechnego ciężenia wyraża się wzorem:

$$F = G * \frac{M_s * m}{R^2} \quad (1)$$

gdzie G jest stałą grawitacji. Siłę dośrodkową wyraża znany nam wzór:

$$F_d = \frac{m * v^2}{R} \quad (2)$$

Porównując ze sobą te dwie siły możemy obliczyć masę ciała centralnego, w tym wypadku Słońca. Jeżeli ponadto uwzględnimy zależność pomiędzy prędkością liniową a kątową:

$$v = \omega * R = \frac{2 * \pi * R}{T} \quad (3)$$

z porównania tego otrzymamy wzór na trzecie prawo Keplera

$$\frac{T^2}{R^3} = \frac{4 * \pi^2}{G * M_s} = const. \quad (4)$$

Teraz możemy obliczyć wartość iloczynu $G * M_s$ którego „wartość znana jest z dużo większą dokładnością niż wartość stałej grawitacji mierzonej laboratoryjnie. Toteż niepewność wyznaczenia masy Słońca ($M_s = 1,9891 \pm 0,0012$) * 10^{30} [kg] wynika głównie z błędu pomiaru G . Wartość promienia Słońca ($R_s = 6,9626 \pm 0,0007$) * 10^8 [m] wyznaczono na podstawie pomiarów średnicy kątowej tarczy słonecznej przy znanej - w momencie pomiaru - odległości Ziemia-Słońce” [5]. Znajomość tych dwóch

parametrów pozwala nam obliczyć średnią gęstość Słońca, która okazuje się niewiele większa od gęstości wody.

$$\rho = \frac{M_s}{V_s} = \frac{3 * M_s}{4 * \pi * R_s^3} = 1408 [kg * m^{-3}] \quad (5)$$

Ponadto możemy również obliczyć wartość przyspieszenia grawitacyjnego na powierzchni Słońca:

$$g_s = \frac{G * M_s}{R_s^2} = 274 [m * s^{-2}] \quad (6)$$

Bardzo ważnym parametrem, który możliwy jest do bezpośredniego pomiaru, jest stała słoneczna S. Zdefiniowana jest ona jako strumień energii promienistej Słońca w odległości równej jednej jednostce astronomicznej. Jej związek z mocą promieniowania Słońca L_s określony jest za pomocą wzoru [5]:

$$L_s = 4\pi * r^2 * S \quad (7)$$

gdzie $r=1AU$. Moc tę definiuje się jako całkowitą energię wypromieniowaną przez Słońce w jednostce czasu, we wszystkich długościach fal widma elektromagnetycznego. Do pomiarów stałej słonecznej służy pyrhelimetr. Zasadniczą jego częścią jest wnęka, absorbująca wszystkie wpadające do niej kwanty promieniowania. Z uwagi na to, że około 23% promieniowania słonecznego pochłania atmosfera ziemska, dokładne pomiary stałej słonecznej można uzyskać tylko z obserwacji pozaatmosferycznych. „Zmierzona w ten sposób wartość wynosi: $S = (1367 \pm 2) [W * m^{-2}]$ i daje moc promieniowania $L_s = (3,845 \pm 0,006) * 10^{26} [W]$ ” [5].

Moc promieniowania wyrażona w wielkościach gwiazdowych jest absolutną jasnością bolometryczną, której znajomość pozwala określić temperaturę efektywną powierzchni gwiazdy - T_{ef} . Stamtąd bowiem pochodzi większość promieniowania odbieranego przez przyrządy obserwacyjne. Związek pomiędzy tymi parametrami określa relacja:

$$L_s = 4\pi R_s^2 \sigma T_{ef}^4 \quad (8)$$

gdzie σ jest stałą Stefana-Boltzmannna [36].

Po obliczeniu, z powyższego wzoru otrzymamy dla Słońca wartość $T_{ef} = (5777 \pm 2,5) [K]$.

Jeżeli moc promieniowania przyrównamy do wzoru Einsteina

$$E = m * c^2 \quad (9)$$

otrzymamy masę jaką Słońce traci w ciągu każdej sekundy:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{3,845 * 10^{26} [W]}{(3 * 10^8)^2 [m * s^{-2}]^2} = 4,27 * 10^9 [kg * s^{-1}].$$

Gdyby przyjąć założenie, że w ciągu całego swojego „życia” (4,6 miliarda lat) Słońce zmniejszało swą masę w takim tempie, to całkowita utrata masy przez

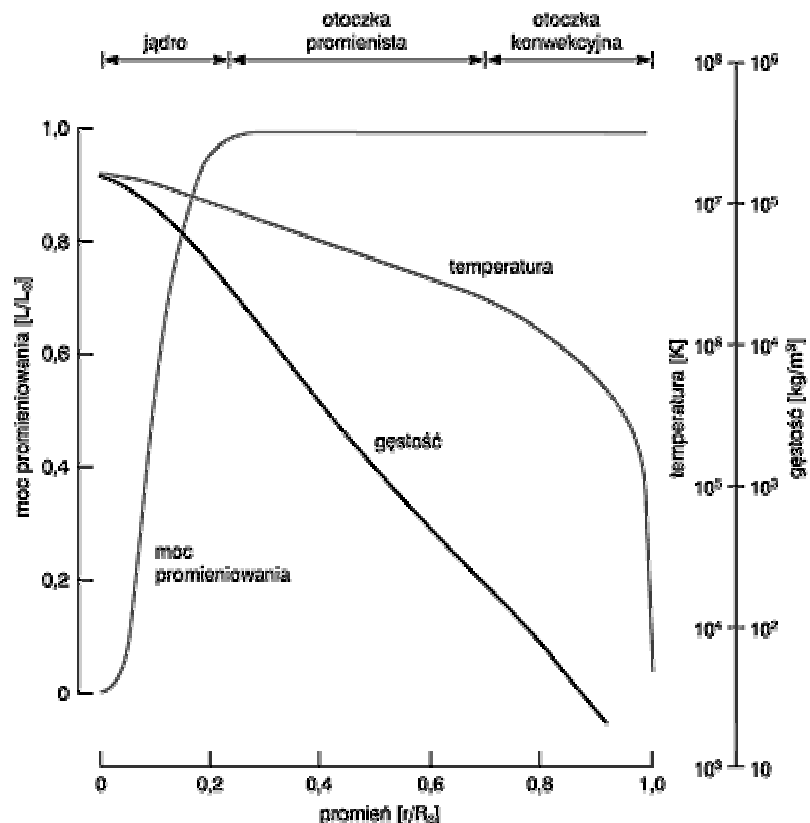
promieniowanie wyniosłoby około $6,11 \times 10^{26}$ kg. Wartość ta stanowi około 3‰ jego obecnej masy. Ponieważ jeden procent swojej masy Słońce traci w ciągu około 150 miliardów lat, dlatego ten efekt zwykle pomija się podczas obliczania modelu Słońca.

Budowa Słońca

Rozpatrując budowę Słońca wyróżnić możemy wyróżnić w nim trzy podstawowe elementy. Są to: jądro, otoczka i atmosfera. Spróbujmy prześledzić jak zmieniają się w nich podstawowe parametry fizyczne gwiazdy. W tym celu posłużmy się poniższym wykresem.

Rys. nr 2 – wykres zależności temperatury, gęstości i mocy promieniowania w funkcji promienia Słońca [34]

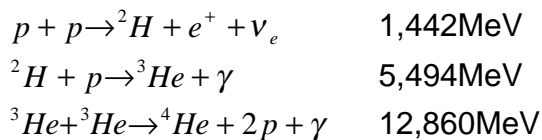
W jądrze Słońca panują ekstremalne warunki fizyczne – temperatura osiąga wartość 15 mln Kelvinów, a ciśnienie 10^{16} paskali (Pa). Moc promieniowania L rośnie wraz z odległością od środka tylko w jądrze, później jest wielkością stałą. Inaczej temperatura i gęstość, które zmniejszają się wraz z odległością od centrum. Spoglądając na górną skalę widać, że jądro sięga do około $0,25 R_S$, zaś do $0,7 R_S$ rozciąga się otoczka promienista zwana inaczej jądrem zewnętrznym. Dalej rozciąga się strefa konwekcyjna, która przechodzi w atmosferę.



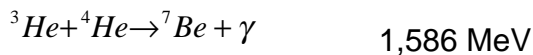
Jądro

Jądro Słońca podzielić można na dwie części: jądro wewnętrzne – w którym wytwarzana jest energia, oraz jądro zewnętrzne przenoszące wyprodukowaną energię na drodze promieniowania. W jądrze wewnętrznym stanowiącym około 2% całkowitej objętości Słońca skoncentrowana jest prawie cała jego masa. Tam w kuli o promieniu $0,25R_S$ w termonuklearnych reakcjach syntezy jądrowej produkowane jest ponad 95% jego całkowitej energii. Pozostałe 5% powstaje w wyższych warstwach, gdzie temperatura jest już niższa. Tempo reakcji nuklearnych zanika w nich wraz z odległością od centrum według funkcji wykładniczej. Wynika to z zależności pomiędzy temperaturą, a szybkością zachodzenia reakcji jądrowych.

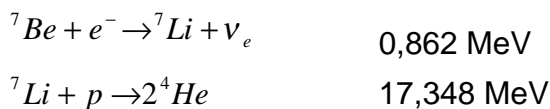
Proces wytwarzania energii w naszej gwiazdzie polega na fuzji czterech protonów (jąder atomu wodoru) w jądro atomu helu. Zachodzi on głównie na drodze szeregu reakcji tworzących tzw. cykl protonowo-protonowy (pp). Jak wiemy w tak wysokiej temperaturze jaka panuje w jądrze Słońca, materia występuje w stanie zjonizowanym, a ponadto jej cząstki obdarzone są dużymi prędkościami. Jeżeli dwa jony (czyli protony) zbliżą się do siebie na odległość mniejszą od 10^{-15} metra – jest to zasięg oddziaływań silnych, siły jądrowe (oddziaływania silne) przewyższą siły odpychania elektrostatycznego. W efekcie te dwa protony połączą się tworząc jądro deuteru, które składa się z protonu i neutronu. Deuter natychmiast przyłącza kolejny proton tworząc izotop helu. Ostatnim etapem jest połączenie dwóch izotopów helu w powszechnie występujący we Wszechświecie atom helu (dwa protony i dwa neutrony). W ten sposób powstaje 99% energii. Alternatywną drogą zamiany wodoru w hel jest cykl węglowo-tlenowy (CNO). Wydajnie przebiega on jednak w wyższych temperaturach, dlatego w jądrze Słońca stanowi on źródło tylko około 1% energii. Zgodnie ze Standardowym Modelem Słońca [27] cykl pp posiada trzy gałęzie. Najczęstszym spośród nich i wytwarzającym najwięcej energii jest cykl pp-I. Zachodzi on w 86% przypadków, i składa się z następujących reakcji:



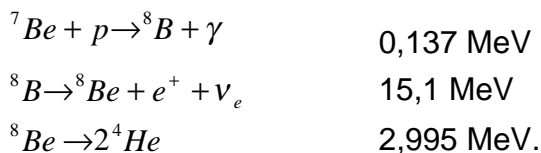
Obok podano ilość energii w megaelektronowoltach (MeV), jaka uwalniana jest w czasie tych reakcji. W pozostałych czternastu procentach przypadków zamiast ostatniej reakcji połączenia dwóch izotopów helu, może dojść do utworzenia berylu w reakcji:



umożliwia to powstanie w efekcie końcowym helu na dwa sposoby. Najczęściej, bo w 99%, w łańcuchu reakcji pp-II:



lub znacznie rzadziej poprzez łańcuch pp-III:



W przedostatniej reakcji powstaje nietrwałe, wzbudzone jądro berylu, które szybko rozpada się na dwie cząstki alfa. Niezwykle rzadko, bo w jednym przypadku na czterysta, zamiast pierwszej reakcji cyklu pp-I zachodzi tzw. reakcja pep:



Zysk energetyczny obu reakcji jest identyczny, jednak ze względu na sporadyczność występowania reakcji pep udział jej w produkcji energii można zaniedbać. Należy jednak nadmienić, że jest ona źródłem wysokoenergetycznych neutrin, których strumień można zaobserwować na Ziemi [5].

Niezależnie od drogi, której efektem końcowym jest hel, masa czterech protonów biorących udział w reakcji jest większa niż masa utworzonego jądra helu. Różnica masy (około 0,71%) zostaje zamieniona na energię, którą możemy obliczyć korzystając z równania Einsteina, podającego zależność pomiędzy masą a energią. I tak:

masa protonu wynosi	$1,6724 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
masa jądra atomu helu wynosi	$6,6438 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
masa czterech protonów	$6,6896 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
minus masa jądra atomu helu	$6,6438 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
równa się defekt masy	$0,0458 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Ze wzoru Einsteina

$$E = m \cdot c^2 \quad E = 0,0458 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2$$

$$E = 4,1162 \cdot 10^{-12} \text{ [J]}$$

Ponieważ $1 \text{ J} = 6,243 \cdot 10^{12} \text{ MeV}$ to z przeliczenia wychodzi, że wyzwolona w reakcji termojądrowej energia wynosi 25,697 MeV. Ponadto w wyniku anihilacji pary elektron – pozyton pojawia się energia w łącznej ilości równej sumie mas spoczynkowych obu cząstek: $2m_e c^2 = 1,022 \text{ MeV}$. Całkowity zysk energetyczny tego cyklu wynosi więc:

$$25,697 + 1,022 = 26,72 \text{ MeV}$$

Energia ta jest unoszona ku powierzchni gwiazdy w 98% przez fotony, a w pozostałej części przez neutrina. Zaznaczmy, że Słońce produkuje **tylko** neutrina elektronowe.

Pomimo bardzo dużego ciśnienia panującego w jądrze Słońca materia wewnątrz gwiazdy podlega formule Clapeyrona, i zachowuje się jak gaz doskonały. Tempo reakcji termojądrowych, jak wspomniano wyżej, zależy bardzo silnie od temperatury. Wzrost temperatury w jądrze powoduje zwiększenie tempa produkcji energii, co pociąga za sobą wydajniejsze ogrzewanie gazu i wzrost ciśnienia. Większe ciśnienie unosi materię, powodując rozszerzanie się jądra. Teraz z kolei spada temperatura. W rezultacie tempo reakcji jądrowych zmniejsza się do wartości wyjściowych. Podobne, lecz odwrotne zjawisko wystąpi przy spadku temperatury: Ostatecznie tempo wytwarzania energii ustala się na takim poziomie, by ciśnienie gazu utrzymywało ciężar materii spoczywającej na jądrze. Dzięki tej ustalonej równowadze wewnątrz Słońca jest samoregulującym się reaktorem termojądrowym.

Ponad jądrem wewnętrznym znajduje się jądro zewnętrzne. Temperatura w nim jest niższa i dlatego zachodzące tam reakcje termojądrowe nie są już tak wydajne. W tej strefie energia wyprodukowana w centrum jest transportowana ku powierzchni w postaci promieniowania. Transport energii odbywa się w warunkach równowagi promienistej, tzn. że całkowita energia wnoszona do pewnej objętości

przez fotony jest równa całkowitej energii fotonów opuszczających tę objętość. Kwanty energii rozpraszane są w zjonizowanej materii słonecznej ciągle zmieniając kierunek. Pobudzone jony chwilowo zwiększają swoją energię, przekazując ją następnym. W ten sposób po zygzakowatych torach, bardzo powoli energia przesącza się w kierunku powierzchni. Czas potrzebny fotonowi na pokonanie tej skomplikowanej drogi może wynosić nawet kilka milionów lat.

Otoczka konwekcyjna

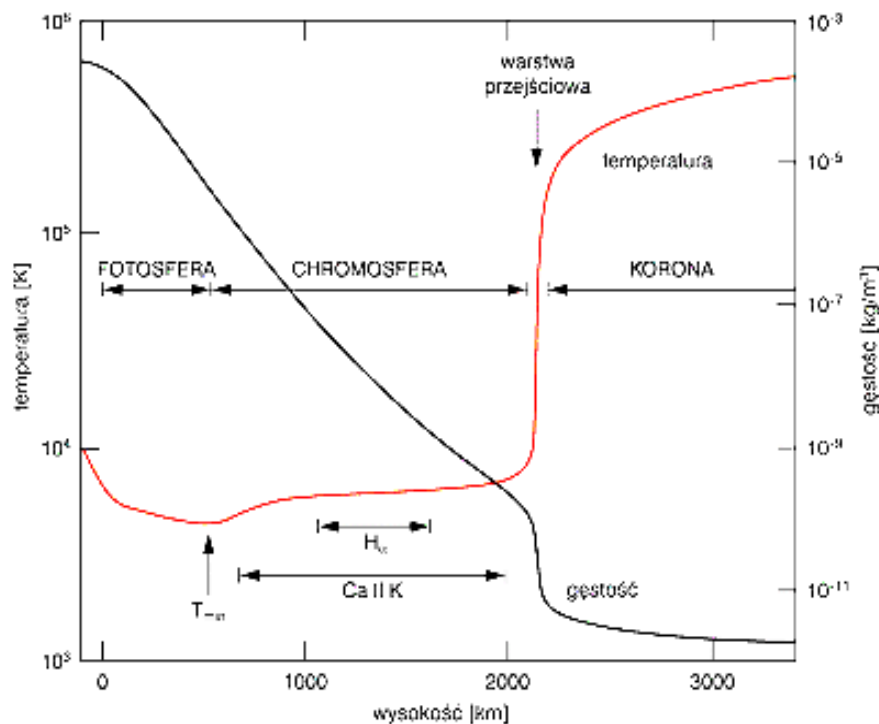
W odległości około $0,7R_S$ zaczyna się sfera zwana otoczką konwekcyjną. Temperatura w niej obniża się, i najpierw hel a potem wodór przestają być całkowicie zjonizowane. Jest to powodem wzrostu nieprzezroczystości materii. Niezjonizowane, lub częściowo zjonizowane atomy absorbują docierające z wnętrza fotony i ulegają wzbudzeniu. Rośnie energia wewnętrzna gazu i promieniowanie, które jest teraz intensywnie pochłaniane, przestaje być wydajnym środkiem transportu energii. Równowaga promienista zostaje zachwiana, a dalszy transport energii przejmują konwekcja termiczna. Podstawowym nośnikiem są tu olbrzymie bąble gazu poruszające się w materii słonecznej na przemian w górę i w dół. Gaz ogrzewając się zwiększa swoją objętość, i staje się lżejszy od otoczenia. Siła wyporu unosi w górę powstałe bąble gorącego gazu, który wraz z sobą unosi zgromadzone ciepło. Proces ten znany jest nam na Ziemi, gdzie nazywamy go turbulencją. Podczas ruchu w górę gorący bąbel oddaje ciepło do otoczenia, po czym ochłodzony opada. Proces ten wymuszony jest przez różnicę temperatur pomiędzy dnem otoczki konwekcyjnej a powierzchnią Słońca. Otoczka konwekcyjna rozciąga się do samej powierzchni Słońca. Zewnętrzne jej warstwy obserwować możemy na powierzchni w postaci stale zmieniającego się wzoru granul. Teraz fotony, które powstały w jądrze jako wysokoenergetyczne promieniowanie rentgenowskie i promieniowanie gamma, na powierzchni są emitowane przeważnie jako promieniowanie optyczne i podczerwone.

Unoszona przez bąble ku powierzchni gwiazdy energia przekształcana jest częściowo w fale akustyczne, które są zaburzeniami ciśnienia generowanymi przez turbulencje. Są to właściwie fale poddźwiękowe. Długość ich sięga kilometrów, a częstotliwość miliherców. Zagadnieniami tymi zajmuje się heliosejsmologia, której głównym zadaniem jest wykrywanie i analiza drgań prostych zwanych modami. Dany mod o określonej częstotliwości może pojawić się pod powierzchnią Słońca wtedy, gdy na odpowiedniej głębokości panuje odpowiednia gęstość i temperatura. Warunki te są różne dla różnych modów. Komputerowa analiza danych, oraz szybsza propagacja w ośrodku o wyższej temperaturze pozwala dokonywać sondowania Słońca, podobnie jak za pomocą fal sejsmicznych sonduje się naszą planetę. Obliczona przez heliosejsmologów temperatura jądra Słońca jest tylko o 0,1% mniejsza od teoretycznej, wynoszącej 15,5mln stopni [13].

Atmosfera Słońca

Atmosfera jest najlepiej poznanym obszarem Słońca. Tworzą ją zewnętrzne jego warstwy, które są dostępne bezpośrednim obserwacjom. Właściwie nie można określić granicy pomiędzy „powierzchnią” gwiazdy, której Słońce właściwie nie posiada, a atmosferą. Konwekcyjna otoczka w sposób ciągły przechodzi w atmosferę. Podział atmosfery (na fotosferę, chromosferę i koronę) jest często wygodny, ale ponieważ aktywność słoneczna przejawia się we wszystkich jej warstwach - należy tę atmosferę traktować jako całość. Każda z warstw charakteryzuje się odmiennymi właściwościami fizycznymi. Analizując przedstawiony

poniżej wykres można stwierdzić, że wraz z odległością od powierzchni Słońca maleje gęstość materii słonecznej przy jednoczesnym wzroście temperatury. W fotosferze temperatura spada osiągając swoje minimum około 4100K na granicy z chromosferą, w której następuje wolny wzrost temperatury. Gęstość materii zaś spada w obu warstwach równomiernie. Gwałtowny skok temperatury do około 25000K następuje w górnych warstwach chromosfery i dalej aż do 2mln Kelwinów w koronie. Tam też korona słoneczna przechodzi w przestrzeń międzyplanetarną, i gwałtownie spada gęstość.



Rys. nr 3 –
Wykres rozkładu
temperatury i
gęstości w
atmosferze
Słońca. [34]

Fotosfera

Fotosferą nazywamy najniższą warstwę atmosfery słonecznej, w której powstaje obserwowane widmo ciągłe i liniowe. Tworzy ona tzw. widzialną powierzchnię Słońca. Jest to dosyć umowna granica gazowej kuli słonecznej, i zależy od długości fali światła na której obserwujemy Słońce. Można ją więc określić jako cienką warstwę o grubości nieco ponad 100km, poza którą nie możemy sięgnąć optycznymi przyrządami obserwacyjnymi. Obserwowana ostrość brzegu tarczy gwiazdy jest efektem szybkiego wzrostu nieprzezroczystości materii wraz z głębokością. Dlatego na brzegu widoczne są wyższe i bardziej chłodne warstwy niż w środku, zaś jasność w środku tarczy jest największa. Efekt ten nazywany jest pociemnieniem brzegowym. Słoneczna fotosfera jest miejscem, gdzie obserwujemy olbrzymią różnorodność zjawisk dynamicznych, z których większość związana jest z procesami konwekcyjnymi. Uzyskany w dużych powiększeniach obraz fotosfery Słońca ujawnia jej drobną, ziarnistą strukturę, tzw. granulację. Granule są to bardzo nietrwałe jasne obszary o rozmiarach rzędu tysiąca kilometrów otoczone ciemniejszymi pasmami. Ich rozmieszczenie i kształty ulegają ciągłym zmianom. Krótki czas życia granul (około 10 minut), oraz ciągły ruch materii dają efekt „gotującego się ryżu”. Powstawanie granul wiąże się ze zmianą warunków transportu energii ze środka gwiazdy. W dolnych warstwach fotosfery fotony stają się ponownie wydajniejszym środkiem jej transportu. Wynurzająca się z otoczki

konwekcyjnej materia gwałtownie traci swoją energię na rzecz promieniowania. Szybko i wydajnie chłodzony gaz zwiększa swoją gęstość, staje się cięższy od otoczenia i opada. Granule są więc górnymi częściami wstępujących prądów konwekcyjnych, dzięki którym materia z cieplejszych obszarów wypływa na powierzchnię Słońca. Ruchy konwekcyjne w otoczce zachodzą w różnych skalach. Generalnie możemy stwierdzić, że większe komórki konwekcyjne charakteryzują się mniejszą prędkością przepływu materii. Procesy te zachodzą również w skali 10^8 m (100 tysięcy km). Do niedawna wnioskowano o tym jedynie pośrednio, na podstawie ruchów długo żyjących niejednorodności fotosfery (takich jak komórki supergranulacji, plamy słoneczne, czy włókna magnetyczne). Dopiero w 1998 r. obserwacje prowadzone przez satelitę *SOHO* wykazały obecność na Słońcu gigantycznych komórek konwekcyjnych. Ruch w tej skali odbywa się bardzo powoli (rzędu kilku m/s) i obejmuje całą głębokość warstwy konwekcyjnej. Na powierzchni Słońca zaś - obszary rozciągające się ponad 30° szerokości heliograficznej. W fotosferze obserwowane są również fale akustyczne. Są to fale dwojakiego rodzaju. Pierwsze z nich to te, które odbijając się od fotosfery tworzą widmo drgań będących przedmiotem badań heliosejsmologicznych. Drugie przechodząc wyżej, unoszą ze sobą energię mechaniczną. Energia ta przenoszona do wyższych warstw atmosfery, gdzie powoduje ich nagrzewanie.

Granulacja nie jest jedyną formą niejednorodności fotosfery. Również pole magnetyczne wpływa na jasność tej warstwy. Duże koncentracje pola tworzą pory i plamy słoneczne, które są ciemniejsze od otoczenia. Są to obszary fotosfery o temperaturze niższej niż otoczenie. Obserwując dobrze rozwiniętą plamę dostrzeżemy w niej ciemniejszy cień (umbra), będący jak gdyby jej jądrem, o temperaturze od około 4300 do 4700 K. Cień jest otoczony jaśniejszym półcieniem (penumbra). Plamy powstają w obszarach koncentracji silnych pól magnetycznych, o indukcji sięgającej kilkuset militesli. Najmniejsze plamy mają średnicę około 100 km, największe, widoczne gołym okiem, aż 90000 km. Czas życia plamy zależy od jej wielkości: najmniejsze plamy trwają kilka godzin, największe nawet kilka miesięcy. Plamy są charakterystyczne dla tzw. aktywnych rejonów na Słońcu i ściśle wiążą się z aktywnością słoneczną, zmieniającą się w przybliżeniu w cyklu 11-letnim. Pojawiają się one na szerokościach heliograficznych około 35° przeważnie parami po obu stronach równika. Na uwagę zasługuje fakt, że pierwsza plama z każdej pary - na półkuli północnej - stanowi północny biegun magnetyczny, a druga południowy. W następnych 11-tu latach proces powtarza się z tym, że biegunowość plam jest przeciwna. Możemy więc stwierdzić, że mamy do czynienia z 22 letnim magnetycznym cyklem słonecznym. Dzięki obserwacjom plam słonecznych odkryto nierównomierność obrotu tarczy słonecznej. Słońce nie obraca się jak ciało sztywne. Okres obrotu warstw powierzchniowych, które są dostępne obserwacjom, rośnie wraz z szerokością heliograficzną. Najszybciej wiruje strefa równikowa, która obraca się raz na około 25 dni. Na szerokości 60° okres obrotu wynosi 31 dni, a w pobliżu bieguna około 35 dni. Oś obrotu Słońca jest nachylona do płaszczyzny ekliptyki pod kątem $82^\circ 45'$.

Całe promieniowanie zarówno w zakresie widzialnym, jak i podczerwonym pochodzi z fotosfery. Przeciętna jej temperatura wynosi 5780 K, i zawiera miejsca cieplejsze i chłodniejsze. Widmo emitowane przez fotosferę jest ciągłe z maksimum w okolicy $\lambda=475$ nanometrów (nm). W chłodniejszych jej warstwach powstają ciemne, absorpcyjne linie Fraunhofera.

Chromosfera

Chromosfera zwana inaczej kolorową sferą jest następną warstwą atmosfery słonecznej, i znajduje się ponad fotosferą. Ma ona postać bardzo postrzępionej, niejednorodnej, czerwonej otoczki. Kolor ten zawdzięcza wodorowej linii H α o długości fali 656,28nm, leżącej w czerwonej części widma. Gęstość chromosfery jest tak niska, że jej blask zanika wobec blasku całej tarczy słonecznej. Dlatego jej obserwacje możemy przeprowadzać tylko podczas trwających kilka sekund całkowitych zaćmień Słońca, lub korzystając ze specjalistycznych urządzeń takich jak koronografy czy spektroheliografy. Charakterystyczny dla chromosfery jest brak równowagi termodynamicznej, dlatego oglądana przy brzegu Słońca chromosfera ma nieregularne zarysy (tzw. bryzgi chromosferyczne nazywane fachowo - spicule). Ich średnice sięgają 2000km, a wznoszą się na wysokość do 10000km z prędkością rzędu 20km/s. Właśnie wyrzucane wysoko jasne fontanny materii powodują że obok siebie istnieją gorące i chłodne kolumny gazu. Olbrzymie wysoki rozżarzonej świecącej materii nad chromosferą, obserwowane za pomocą specjalnych przyrządów noszą nazwę protuberancji. Na podstawie wyglądu protuberancji oraz prędkości i właściwości ruchu materii można je podzielić na klasy:

- Protuberancje spokojne - ruch materii i zmiana kształtu są powolne. Czas ich trwania wynosi kilka tygodni, a nawet miesięcy; obserwuje się je we wszystkich szerokościach heliograficznych.
- Protuberancje aktywne - zachodzą w nich dość szybkie ruchy strumieni materii od protuberancji do fotosfery i od jednej protuberancji do drugiej.
- Protuberancje erupcyjne albo wybuchowe - z wyglądu przypominają olbrzymie fontanny sięgające 1,7 milionów km nad powierzchnią Słońca. Zachodzi w nich szybki ruch materii. Protuberancje te wznoszą się z olbrzymimi prędkościami rzędu setek km/s i dość szybko zmieniają swe kształty.
- Protuberancje koronalne - powstają nad chromosferą w postaci niedużych obłoków zlewających się potem w jedną chmurę, z której oddzielnymi strugami opuszczają się w dół ku chromosferze strumienie świecącej materii.

Interesującym zjawiskiem jest wzrost temperatury chromosfery wraz ze wzrostem wysokości. Wzrost ten wynika z nietermicznego ogrzewania wyższych warstw gazu. Turbulencje zachodzące w fotosferze są źródłem fal mechanicznych, akustycznych i hydromagnetycznych. Propagacja tych fal w wyższych warstwach atmosfery powoduje ich nagrzewanie. Energia mechaniczna fal akustycznych ogrzewa chromosferę, zaś fale hydromagnetyczne unoszą energię do korony słonecznej. Innym źródłem ogrzewania chromosfery są lokalne zjawiska związane z polem magnetycznym. Brzegi komórek supergranulacji, gdzie zbiera się pole magnetyczne, są nieco gorętsze od otoczenia (również w chromosferze). Tworzą one jasną sieć chromosferyczną pokrywającą się z siecią fotosferyczną. W chromosferze powstają również rozbłyski, których przyczyną jest anihilacja pola magnetycznego lub gwałtowna erupcja tegoż pola ponad powierzchnię Słońca. Najczęściej występują one nad aktywnymi rejonami fotosfery, a więc tam, gdzie wraz z materią unoszone są linie pola magnetycznego. Rozbłyski są źródłem intensywnego promieniowania krótkofalowego i korpuskularnego. Silne rozbłyski mogą też być przyczyną powstawania protuberancji. Tuż ponad chromosferą znajduje się warstwa przejściowa, w której na przestrzeni 1000 km temperatura wzrasta gwałtownie do około miliona Kelwinów. Tak duży wzrost temperatury nie może być wyjaśniony za pomocą rozpraszania fal akustycznych, gdyż ich strumień jest zbyt mały, a ponadto są prawie w całości dyssypowane (rozpraszane) w chromosferze. Ogrzewanie

korony przypisuje się falom hydromagnetycznym, rozchodzącym się wzdłuż linii sił pola magnetycznego. Fale takie nie ulegają rozproszeniu w chromosferze, lecz propagują się znacznie wyżej, gdzie ostatecznie powodują wzrost energii termicznej gazu.

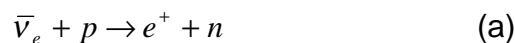
Korona

Korona stanowi najbardziej zewnętrzną warstwę atmosfery słonecznej i przechodzi w sposób ciągły w przestrzeń międzyplanetarną. Rozciąga się ona na odległość kilku promieni Słońca od jego powierzchni i ma bardzo małą gęstość. Ponieważ jej jasność jest około miliona razy mniejsza od jasności fotosfery, obserwowana może być tylko w czasie zaćmienia Słońca lub za pomocą koronografu. Obserwacje korony prowadzone są nie tylko w zakresie promieniowania widzialnego, ale również w zakresie fal radiowych, dalekiego ultrafioletu i promieniowania rentgenowskiego. Kształt i wielkość korony zależą od fazy cyklu aktywności słonecznej, której przyczyną są zmiany zachodzące w polu magnetycznym Słońca. W okresie minimum aktywności jest ona nieregularna, w maksimum - duża i kulista. Ponieważ temperatura korony jest bardzo wysoka, większość materii występuje w niej w postaci silnie zjonizowanych atomów. Właśnie wskutek rozproszenia fotonów wysyłanych przez fotosferę na zjonizowanej materii i cząstkach pyłu międzyplanetarnego powstaje charakterystyczne dla korony metalowo-niebieskie światło. W koronie następuje powolny spadek ciśnienia gazu. W konsekwencji nie jest ona tworem stałym, lecz w sposób ciągły rozszerza się w ośrodek międzygwiazdowy. W ten sposób powstaje tzw. wiatr słoneczny który składa się z elektrycznie naładowanych cząstek gazu koronalnego, których prędkości termiczne przekroczyły lokalną wartość prędkości ucieczki i wyphywają ze Słońca. Razem z materią wynoszone jest ze Słońca pole magnetyczne, którego linie sił zawijają się z powodu ruchu obrotowego Słońca. Za sprawą wiatru ze Słońca w ciągu 1 sekundy wyphywa około 5 mln ton materii. W odległości około 100 jednostek astronomicznych ciśnienie wiatru staje się porównywalne z ciśnieniem materii międzygwiazdowej. Ten obszar wyznacza granicę heliosfery.

Neutrino

Zanim odpowiemy sobie na pytanie co to właściwie jest neutrino prześledźmy pokrótce jego historię. Otóż podczas eksperymentów związanych z badaniami rozpadów promieniotwórczych okazało się, że w rozpadzie β energia jego końcowych produktów była mniejsza od sumy energii cząstek początkowych. Zjawisko rozpadu promieniotwórczego jest następstwem promieniotwórczych cech cząstek tworzących jądro atomowe (protonów i neutronów). Przyjęto, że rozpad β^- (emisja elektronu) – następuje wskutek zachodzącej w jądrze przemiany neutronu w proton, zaś rozpad β^+ (emisja pozytonu) jest skutkiem przemiany protonu w neutron. Emisja cząstek β , czy też fotonów są to zjawiska do siebie podobne. Atom, który znajduje się w stanie wzbudzenia nie zawiera fotonów oczekujących na emisję. Powstają one dopiero w procesie przechodzenia atomu w stan o mniejszej energii. Podobnie jądra atomowe, w tym również te ulegające promieniotwórczemu rozpadowi β , nie zawierają ani elektronów, ani pozytonów. Powstają one w jądrze atomowym dopiero podczas zmiany stanu ładunkowego nukleonów. Zgodnie ze współczesnymi poglądami nukleony występują w dwóch kwantowych stanach ładunkowych: jako dodatni proton, lub obojętny neutron.

Historia badań promieniotwórczego rozpadu β obfitowała w wiele zagadek. Poważne trudności sprawiło wyjaśnienie struktury widma energetycznego cząstek β . Jeżeli ich emisja następuje w wyniku przejścia jądra atomowego z jednego stanu do drugiego, oraz energetyczne widmo jądra jest liniowe (opierano się tu na doświadczeniach z rozpadem α , i analogią do emisji fotonów – promieniowanie γ), to cząstki β również powinny charakteryzować się widmem liniowym. Jednak widma energetyczne cząstek β które obserwowano okazały się widmami ciągłymi. Energia wyrzucanych z jąder elektronów przyjmowała wszystkie wartości zaczynając od zera, a na pewnej górnej granicy kończąc. Z doświadczeń wynikało, że maksymalna energia cząstek β emitowanych przez jednakowe jądra zawsze równa się różnicy poziomów energetycznych tych jąder. Jednak przeważająca większość elektronów miała mniejszą energię. Stąd wysnuto wniosek, że pewna jej część gdzieś znika. Próbowano to wyjaśnić na różne sposoby. Na przykład tak, że wszystkie wyrzucane z jądra elektrony mają jednakową energię. Zanim jednak opuszczą preparat promieniotwórczy, tracą jej część wskutek zderzeń z atomami próbki. Jeżeli takie rozumowanie jest poprawne, to substancja emitująca promieniowanie β powinna się samoistnie ogrzewać. Próby wykrycia takiego samorzutnego ogrzewania się próbki nie zakończyły się pomyślnie, energia znikała gdzieś bez śladu. Niektórzy fizycy będąc pod wpływem wyników przeprowadzanych doświadczeń przypuszczali nawet, że podczas promieniotwórczego rozpadu β nie obowiązuje zasada zachowania energii. Dodatkowych problemów przysparzał spin jądra. Wartość spinu zależy od liczby masowej. Jądra o parzystej liczbie masowej mają spin całkowity, zaś te o nieparzystej – połówkowy. Podczas rozpadu β liczba masowa jądra nie ulega zmianie. Nie zmienia się także jego spin. Jądro wyjściowe i to powstałe w wyniku rozpadu mają taki sam spin. Problemem był emitowany z jądra elektron, którego spin okazał się połówkowy. Zgodnie z zasadą zachowania spinu, uwzględniając połówkowy spin elektronu, spin jądra winien ulec zmianie. Tego efektu jednak nie zaobserwowano. Obydwa te problemy rozwiązał w 1930 roku Szwajcarski fizyk Wolfgang Pauli. Wywnioskował on, że wśród produktów tego rozpadu musi znajdować się trzecia cząstka, ale oddziaływująca z materią na tyle słabo, że nie da się jej wykryć. Ponadto cząstka ta musi mieć taki sam spin jak elektron. W ten właśnie sposób Pauli „uratował” zasadę zachowania energii. Trzy lata później Enrico Fermi nazwał tę cząstkę neutrinem. Doświadczalne potwierdzenie hipotezy Pauliego nastąpiło w 1956 roku. Frederic Reines i Clyde Cowan za pomocą reaktora jądrowego w Savannah River zaobserwowali neutrino. Dopiero po prawie czterdziestu latach w 1995 roku Reines otrzymał za to nagrodę Nobla. W celu doświadczalnego wykrycia neutrino postanowiono skorzystać z odwrotnego rozpadu beta. W trakcie doświadczenia antyneutrino z reaktora przelatują przez zbiornik wypełniony wodą. W czasie przelotu przez wspomniany zbiornik niektóre z nich zderzały się z protonami. Zachodziła wtedy reakcja:

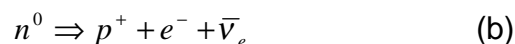


Wyprodukowane w ten sposób pozytony anihilowały natychmiast ze swymi antycząstkami, czyli elektronami. W wyniku tego powstawały dwa fotony (kwanty promieniowania gamma). Natomiast neutrony były absorbowane przez jądra kadmu występujące w wodzie jako domieszka. To również prowadziło do emisji fotonów. Poszukiwano w/w błysków światła, których rejestracja stanowiła potwierdzenie istnienia antyneutrino. W celu wykalibrowania detektora badania prowadzono zarówno przy włączonym jak i wyłączonym reaktorze. Dzięki temu określono procentową

liczbę neutrin pochodzących od promieniowania kosmicznego, stanowiącą zakłócenia. Zaobserwowana w doświadczeniu liczba fotonów była zgodna z przewidywaniami teoretycznymi. Tym samym doświadczalnie zarejestrowano neutrino. W 1962 roku okazało się, że w świecie cząstek elementarnych istnieją dwa neutrino. Trzej Amerykanie: Leon Lederman, Melvin Schwartz i Jack Steinberger udowodnili, że neutrino powstające w rozpadzie mionu różnią się od neutrin powstających w rozpadzie neutronu. Rodzina neutrin powiększyła się ponownie w 1975 roku, kiedy Martin Perl ze współpracownikami odkryli jeszcze jeden - trzeci rodzaj neutrin związanych z leptonem tau albo po prostu taonem [15]. Natomiast w 1991 roku uzyskano eksperymentalny dowód, że istnieją tylko trzy rodzaje neutrin, a więc neutrino taonowe jest już ostatnim.

Spróbujmy więc odpowiedzieć na pytanie – co to jest neutrino? Neutrino jest to maleńka, ale za to bardzo stabilna cząstka elementarna posiadająca znikomą masę, oraz zerowy ładunek elektryczny. Rozróżniamy trzy rodzaje neutrin: elektronowe, mionowe i taonowe. Dwie ostatnie cząstki powiązane są z cięższymi leptonami, które powstają w wysokoenergetycznych zderzeniach i istnieją tylko przez chwilę. Każde z trzech neutrin posiada ponadto swoją antycząstkę różniącą się kierunkiem spinu. Ponieważ neutrino nie mają ładunku, w związku z tym prawie wcale nie reagują z materią. Pierwotnie fizycy zakładali, że neutrino mają masę zerową. Jednak od kilkunastu lat zaczęli coraz bardziej skłaniać się ku poglądowi, że jest inaczej. Neutrino podlega oddziaływaniom słabym, oraz o ile ma masę, grawitacyjnym. Podobnie jak pozostałe cegiełki, z których zbudowana jest materia - takie jak kwarki czy elektrony, nie ma ono wewnętrznej struktury. Oznacza to, że jest nierozciąglę, czyli w sensie matematycznym punktowe, a także elementarne, bo nie można go „podzielić”. Emisja neutrin unoszących z jądra część energii towarzyszy promieniotwórczemu rozpadowi beta. W zależności od rodzaju przemiany (beta- lub beta+) nazywane są one antyneutrinem lub neutrinem i różnią się od siebie kierunkiem spinu. Przemianom beta- towarzyszy powstanie antyneutrino, zaś skutkiem przemiany beta+ jest m.in. neutrino.

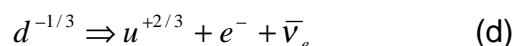
Mówiąc o rozpadzie β , jako o źródle neutrin przyjrzyjmy się rozpadowi neutronu:



Neutron i proton należą do grupy barionów, z których każdy składa się z kwarków. Ich skład kwarkowy wygląda następująco.

$$n = \begin{bmatrix} d^{-1/3} \\ d^{-1/3} \\ u^{+2/3} \end{bmatrix} \quad p = \begin{bmatrix} d^{-1/3} \\ u^{+2/3} \\ u^{+2/3} \end{bmatrix} \quad (c)$$

Wygląda na to, że efektem w/w rozpadu jest przemiana kwarku dolnego w kwark górny.



Podczas rozpadu β kwark $d^{-1/3}$ emituje bozon W^- przekształcając się w kwark $u^{-2/3}$. Ten z kolei rozpada się na e^- i $\bar{\nu}_e$ [35]. Nie jest natomiast możliwa spontaniczna przemiana protonu w neutron. Proton jest bowiem najniższym stanem energetycznym trzech kwarków, i nie może sam przejść do stanu wyższego jakim jest neutron – bowiem masa neutronu jest większa niż masa protonu.

Neutrino należą do leptonów, a te wraz z kwarkami tworzą fermiony o spinie $1/2$. Oprócz spinu cząstki te charakteryzuje jeszcze tzw. skrętność. Jest to kierunek wektora spinu względem kierunku wektora prędkości. Wyjaśnijmy o co tu chodzi. Poruszający się fermion może posiadać wektor spinu zgodny z kierunkiem wektora prędkości (wtedy jest prawoskrętny), bądź przeciwny (wtedy jest lewoskrętny). Istnieje możliwość zmiany skrętności fermionu np. przez zatrzymanie cząstki i zmuszeniu jej do ruchu w przeciwną stronę. Zauważmy, że nie zmienia się wtedy kierunek spinu, tylko zwrot wektora prędkości. W wypadku neutrino, przy założeniu że nie posiadają one masy, obowiązuje jednak zachowanie skrętności (ponieważ poruszają się z prędkością światła, i nie można ich zatrzymać). Zaobserwowano, iż istnieją tylko lewoskrętne neutrino, i prawoskrętne antyneutrino. Jeżeli jednak założymy że neutrino posiadają masę, to nie mogą one poruszać się z prędkością światła, i można zmienić ich skrętność (kierunek pędu na przeciwny). Ponieważ, jak wspomniano wyżej, nie zmienia się wtedy spin, cząstka nie stanie się antycząstką. Jeżeli tak, to będziemy mieli neutrino i antyneutrino każde w dwu stanach skrętności. Musimy więc – przynajmniej w teorii – zaakceptować istnienie prawoskrętnych neutrino i lewoskrętnych antyneutrino. Ponieważ jednak nie zaobserwowano rozpadów z udziałem w/w przypisano im zerowy ładunek oddziaływania słabego – oznacza to że w tych procesach nie biorą one udziału. Te postacie neutrino nazwano sterylnymi, i w niektórych teoriach traktowane są one jako czwarta generacja neutrino - co ciekawe bez powiązań z leptonami.

Najbardziej znanymi fabrykami neutrino obok akceleratorów są gwiazdy, gdzie powstają one w wyniku reakcji termojądrowych, podczas których proton przemienia się w neutron (patrz główna reakcja cyklu pp). Pomimo iż wydaje się że poznaliśmy neutrino dosyć dobrze, ciągle dostarcza nam ono niespodzianek. W 1998 roku stwierdzono, że neutrino posiadają masę. Oznacza to kres Modelu Standardowego w jego obecnej postaci. Teoria, której przewidywania zawsze znajdowały potwierdzenie w późniejszych badaniach naukowych musi teraz zmienić swoje założenia.

Detekcja neutrino słonecznych

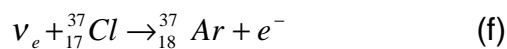
Neutrino mogą zostać zaobserwowane jedynie podczas oddziaływania z materią. Polega to na ich zderzeniach z innymi cząstkami. Są one bardzo przenikliwe, i praktycznie bez przeszkód przenikają przez całą naszą planetę. Liczba wytwarzanych neutrino jest olbrzymia. Na 1 metr kwadratowy powierzchni naszej planety pada w ciągu sekundy 10^{14} neutrino. [<http://zebu.uoregon.edu/~soper/Sun/solarneutrinos.html>]. Jednak duża przenikliwość stanowi poważny problem przy rejestracji ich strumienia. Detektor neutrino musi zawierać bardzo dużo tzw. atomów tarczy, oraz być umieszczony głęboko pod powierzchnią Ziemi, aby zmniejszyć do minimum wpływ zakłóceń zewnętrznych. Dlatego neutrino pułapki mają olbrzymie rozmiary i aby coś w nie złapać, trzeba bardzo długo czekać. W celu detekcji słonecznych neutrino budowano olbrzymie, podziemne detektory.

HOMESTAKE

Pierwsze doświadczenie mające na celu zbadanie neutrin wysyłanych ze Słońca miało miejsce w Homestake, w południowej Dakocie. Raymond Davis zbudował w 1968 roku pierwszy na świecie detektor neutrin słonecznych. Był to tzw. detektor chlorowy - ogromny zbiornik o pojemności 600 tys. litrów wypełniony cieczą zawierającą chlor ³⁷ zwaną tetrachloroetylenem (C₂Cl₄). Aby wyeliminować zakłócenia ze strony promieniowania kosmicznego, zbiornik umieszczony został w podziemiach nieczynnej kopalni złota. Neutrino przylatujące ze Słońca oddziaływały z izotopem chloru zmieniając jeden z neutronów w jego jądrze w proton. Na poziomie nukleonu była więc to reakcja:

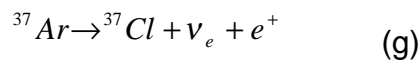


Tym samym otrzymywano argon ³⁷

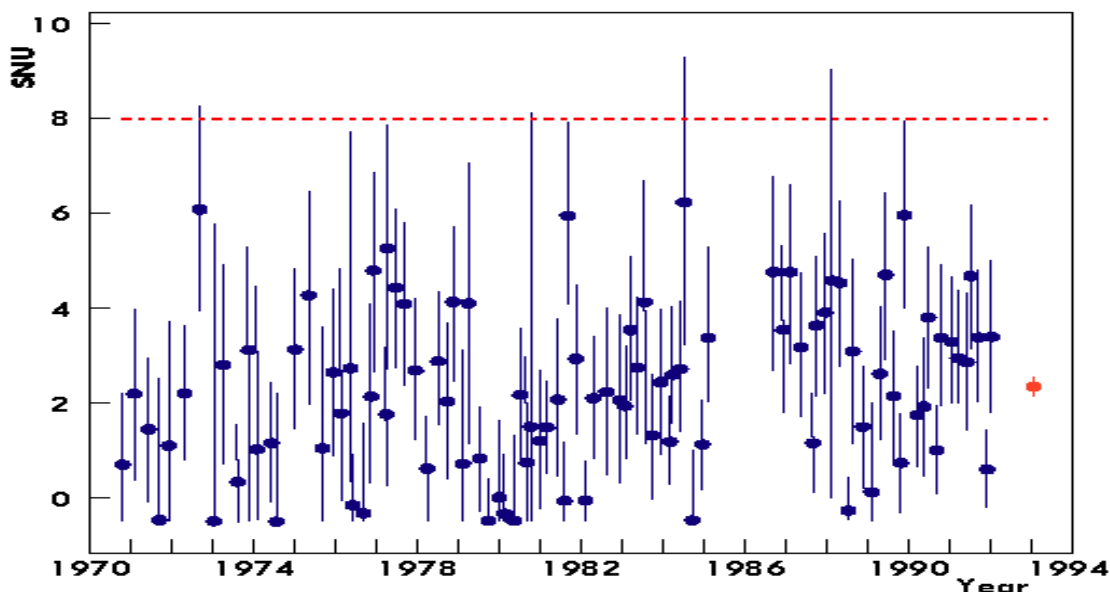


Aby reakcja taka mogła zajść, energia nadbiegających neutrin musi przewyższać 814 kiloelektronowoltów (keV). Neutrino takie powstają w reakcji pep oraz w reakcjach cyklu pp-II i pp-III, które zachodzą znacznie rzadziej niż główny cykl pp-I, toteż oczekiwany strumień jest stosunkowo mały.

Mimo bardzo dużej masy medium użytej do detekcji neutrin, w doświadczeniu tym rejestrowano średnio jeden akt absorpcji neutrina słonecznego na dwa dni! Powstający izotop argonu jest niestabilny i rozpada się w końcowym etapie zgodnie z reakcją:



Powstały argon oddzielano od chloru z dziewięćdziesięcio-procentową sprawnością, zaś jego rejestracji dokonywano za pomocą superczułych liczników, zdolnych zarejestrować rozpad promieniotwórczy w tempie jednego atomu na miesiąc. Trwający już ponad 30 lat eksperyment pozwala określić ilość rejestrowanych neutrin na ok. 2,56 SNU (Solar Neutrino Unit, 1 SNU = 10⁻³⁶ reakcji na 1 atom na 1 sekundę), oznacza to jednostkę strumienia zdefiniowaną jako 10⁻³⁶ wychwytyń neutrin na sekundę i na jeden atom detektora. Teoretycznie oszacowana ilość neutrin w badanym zakresie energii jest ok. 7.3 SNU czyli prawie trzy razy większa. Rachunki wielokrotnie sprawdzono i nie znaleziono błędu, a tymczasem eksperyment Davisa przez kolejne lata rejestrował stale zbyt mało neutrin.

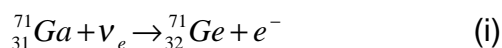


Rys. nr 4 rezultaty eksperymentu HOMESTAKE w ciągu kolejnych 24 lat na podstawie: [http://wwwlapp.in2p3.fr/neutrinos/neutimg/nexp/homestake_result.gif]

Tak oto pojawił się problem neutrino słonecznych. Zbyt ważny był to wynik, żeby można było poprzestać na jednym eksperymencie. Eksperyment Davisa może rejestrować tylko neutrino o dużych energiach, które produkowane są stosunkowo rzadko. Charakteryzuje się wysokim progiem detekcji (814 keV). Olbrzymia część neutrino powstaje natomiast w cyklu pp-I, a ich energia jest mniejsza od 420 keV. W tym kierunku poszły dalsze badania, które w założeniu miały dać obraz widma niskoenergetycznych neutrino.

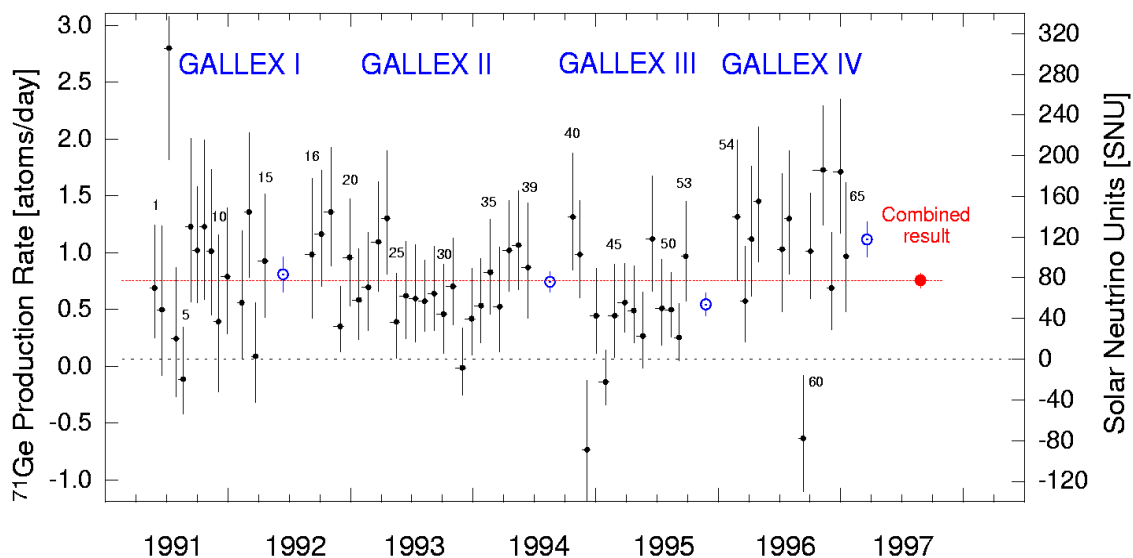
GALLEX

Na początku lat 90-tych rozpoczęły pracę dwa nowe detektory w których medium wychwytyjącym neutrino był pierwiastek gal. Jednym z nich był niemiecko-włosko-francuski projekt Gallex, przygotowany przez Instytut Fizyki Jądrowej im. Maxa Plancka w Heidelbergu. Zbiornik o wysokości 8m i średnicy 4m z zawartością 30 ton chlorku galu GaCl_3 umieszczono na głębokości 1000m pod masywem Gran Sasso w Apeninach. Efektem bombardowania jąder galu przez neutrino jest tutaj promieniotwórczy pierwiastek german Ge-71 .



Każdy rozpad jądra germanu rejestrowany jest w postaci impulsu elektrycznego. Zastosowanie galu jako tarczy pozwoliło na obniżenie wartości progowej wykrywania neutrino. Rejestrowano tu neutrino o energii z przedziału $233\text{keV} < E_\nu < 420\text{keV}$. Powinno się więc zarejestrować większy strumień neutrino, które powstają w dominującym cyklu pp-I. Teoretyczny strumień przewidywany w modelach standardowych wynosi 132 ± 7 SNU. Powstający german zostaje odseparowany za pomocą metod radiochemicznych, po czym mierzy się liczbę jego jąder. Wydobywanie jąder germanu odbywa się raz na trzy tygodnie. Oceniając eksperyment z grubsza stwierdzono, że średnio dziennie powstaje jeden atom germanu. Trwający od 1991 roku eksperyment podzielony został na etapy, zaś

całkowity program zakończony został w 1997 roku. Średni otrzymany rezultat eksperymentu wyniósł $77,5 \pm 8$ SNU. Co prawda mierzony strumień jest duży, lecz w dalszym ciągu stwierdza się znaczący niedobór neutrin słonecznych.

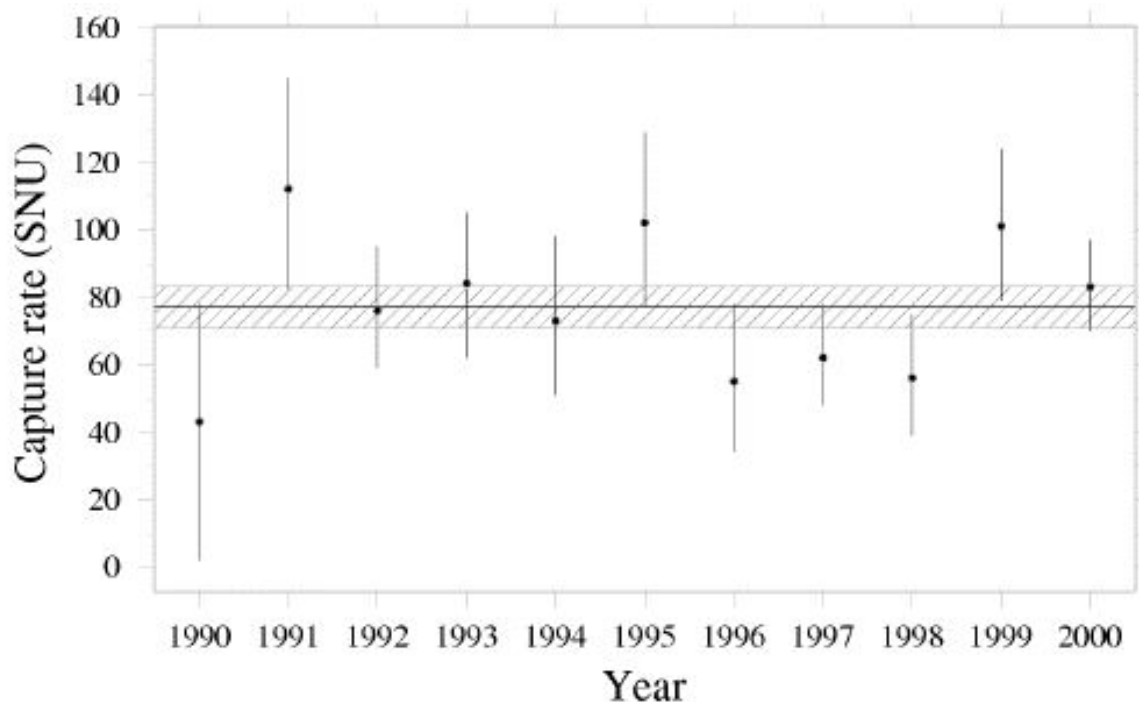


Rys. nr 5 rezultaty eksperymentu GALLEX na podstawie: [\[http://www.mpi-hd.mpg.de/kirsten/gallex/record.htm\]](http://www.mpi-hd.mpg.de/kirsten/gallex/record.htm)

SAGE

Podobnie było w amerykańsko-rosyjskim eksperymencie SAGE, który rozpoczął się w 1990 roku. Tutaj też jako tarcze wychwytną zastosowano pierwiastek gal. Około 55 ton ciekłego metalu umieszczono w zbiorniku pod górą Andyrski w obserwatorium w Baksan na północ od Kaukazu. Pomiar efektu zaabsorbowania neutrin polegał na ekstrakcji powstającego, jak w powyższej reakcji, germanu.

Wyniki eksperymentu SAGE były często kwestionowane, gdyż początkowo nie zarejestrowano ani jednego neutrina. Późniejsze pomiary wykazywały strumienie 20 SNU lub 85 SNU, a obecnie podawana wartość wynosi 67 ± 7 SNU (wyniki eksperymentu Gallex dają obserwowany strumień 77 ± 8 SNU). W detektorze SAGE rejestruje się średnio około jednego atomu germanu dziennie. Wprawdzie strumień niskonenergetycznych neutrin jest istotnie duży, lecz niezgodność z teorią w dalszym ciągu pozostaje znacząca i wymaga szczegółowego wyjaśnienia.



Rys. nr 6 rezultaty eksperymentu SAGE na podstawie:

[\[http://ewi.npl.washington.edu/SAGE/SAGEResults.html\]](http://ewi.npl.washington.edu/SAGE/SAGEResults.html)

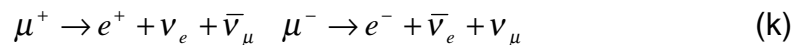
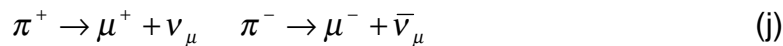
SUPER KAMIOKANDE

O ile w poprzednio przedstawionych detektorach neutrino oddziaływały z nukleonami zmieniając skład jądra, to detektory nowej generacji – wodne opierają się na zupełnie innej zasadzie. Nadlatujące neutrino wybija elektron z orbity atomowej medium, które stanowi woda. Ponieważ energia neutrino jest dużo większa od masy elektronu, po wybiciu z orbity elektron zachowuje kierunek jego lotu. Elektron poruszając się w wodzie z prędkością nadświetlną, wysyła przed siebie strumień światła – jest to tzw. Promieniowanie Czerenkowa. Jest ono emitowane pod stałym kątem 41° względem osi wyznaczonej przez kierunek lotu, i na ścianę detektora pada świetlny pierścień. Kąt ten wynika ze stosunku prędkości cząstki do prędkości światła w danym ośrodku.

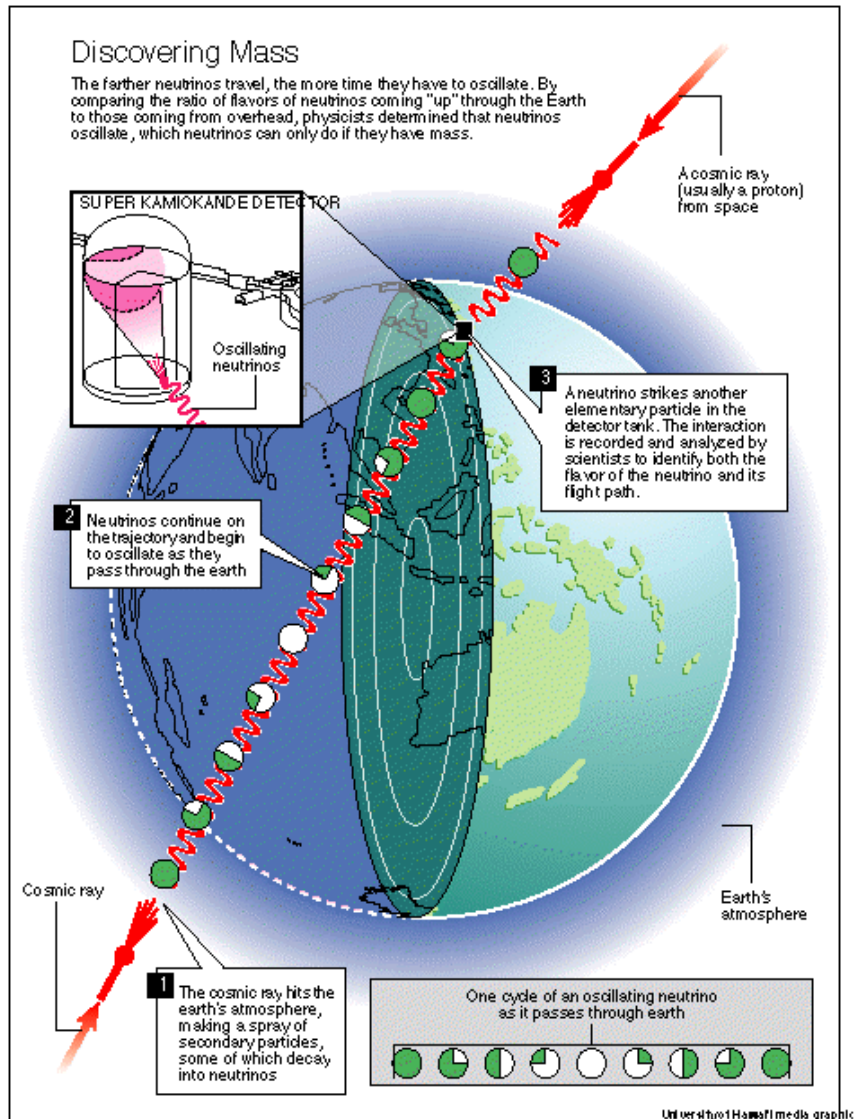
Pierwszym zbudowanym detektorem działającym na powyższej zasadzie był Kamiokande, którego nazwa powstała od **Kamioka Nucleon Decay Experiment**. Zlokalizowany 1000m pod powierzchnią ziemi, i zawierający 3000 ton wody. Zbudowano go w 1983 roku w celu poszukiwania rozpadu protonu. Od 1986 roku rejestrował on neutrino słoneczne. Super-Kamiokande jest drugą wersją urządzenia. Znajduje się w Alpach Japońskich 1000 metrów pod ziemią w kopalni Kamioka. W środku skalistego wnętrza góry Ikeno Yama, wydrążono wielką komorę, która mieści stalowy cylinder o średnicy i wysokości około 40 m. Jest on wypełniony przez 50 tys. ton ultraczystej wody, która była filtrowana przez kilka miesięcy i ma przezroczystość optyczną około 100 m. Na wszystkich ścianach cylindra umieszczono łącznie 11 146 fotopowielaczy o średnicy 0.5 m, których zadaniem jest rejestracja błysków światła wywołanego przez promieniowanie Czerenkowa. Jest ono wytwarzane przez relatywistyczne elektrony, które uzyskały odpowiednią energię na skutek zderzeń ze strumieniem neutrin słonecznych. W tym eksperymencie neutrino słoneczne liczy się

"na bieżąco" średnio kilkanaście dziennie. Światne sygnały powodują powstanie impulsów elektrycznych, odczytywanych przez układy elektroniczne. Informacje przesyłane są do komputerów, za pomocą których fizycy obliczają kierunek neutrina oraz jego energię. Instrument zbiera dane bez przerwy od kwietnia 1996 roku. Detektor Super-Kamiokande jest największym detektorem neutrin na świecie. Zbudowany został przez zespół 114 fizyków z 22 japońskich i amerykańskich laboratoriów. Obecnie w doświadczeniu uczestniczą również fizycy z Uniwersytetu Warszawskiego.

Także w tym eksperymencie widać mniej neutrin, niż to wynika z obliczeń. Obserwowany deficyt neutrin ze Słońca jest więc realny. Detektor Super-Kamiokande prowadzi również badania neutrin atmosferycznych i akceleratorowych. Potrafi on rozróżniać neutrina elektronowe i mionowe. Na tej podstawie opracowany został eksperyment zliczania neutrin dochodzących do detektora „z góry” i „z dołu” – z antypodów. Podczas bombardowania górnych warstw atmosfery przez wysokoenergetyczne promieniowanie kosmiczne powstają kaskady cząstek wtórnych. Powstałe w ten sposób mezony – piony i miony podczas przelotu przez atmosferę ulegają rozpadowi. Reakcje ich rozpadu przebiegają następująco:



Z tych reakcji wynika, że powstaje dwa razy więcej neutrin i antyneutrion mionowych niż elektronowych. Policzono ilość neutrin obu zapachów dolatujących do detektora z góry. Otrzymano stosunek ilości neutrin mionowych do elektronowych 2:1. Identyczne obliczenia wykonano dla cząstek z dołu. W tym wypadku proporcja ta wynosiła 1,3:1. Neutrina lecące od góry miały do przebycia kilkanaście kilometrów, i na tej trasie niewielka ich ilość podlegała oscylacjom. Zaś te z antypodów miały do pokonania średnicę Ziemi, więc na dystansie około 12800 km. mogłyby podlegać oscylacjom w mionowe i taonowe. Porównano też ze sobą ilość neutrin obu zapachów dolatujących z obu kierunków. „Przy braku efektu oscylacji stosunek ten powinien być równy jedności (tyle samo neutrin danego typu z góry co z dołu). W przypadku neutrin elektronowych faktycznie stosunek ten był bliski jedności. Inaczej natomiast było dla neutrin mionowych. Ich ilość dolatująca z dołu była prawie o połowę mniejsza niż tych z góry. Oznacza to, że w większości zachodził proces przekształcania neutrin mionowych w taonowe. Zaś udział przemiany neutrin mionowych w elektronowe jest zaniedbywalny ilościowo” [35]. Zapach neutrina zdradzają leptony. Zwykły, trwały elektron towarzyszy neutrinu z pierwszej generacji. Cięższy od niego, krótko żyjący mion neutrinu drugiej generacji. Na poniższym rysunku przedstawiono schematycznie opisane wyżej doświadczenie. Zespół Super-Kamiokande wspólnie z naukowcami laboratorium KEK znajdującym się w odległości około 250 km od Super-Kamiokande przygotował również inny eksperyment pod nazwą K2K. Polega on na puszczaniu w kierunku detektora Super-Kamiokande sztucznie wytworzonej wiązki neutrin. Ta wiązka jest dwukrotnie analizowana (oddzielnie w każdym laboratorium). Ma to celu potwierdzenie zjawiska oscylacji neutrin. Podobne eksperymenty przygotowują naukowcy z Tevatronu pod Chicago, oraz z laboratorium CERN pod Genewą we współpracy z Gran Sasso pod Rzymem.



Niedawno podczas napełniania zbiornika detektora Super-Kamiokande wodą doszło do awarii. Uszkodzeniu uległa około połowa fotopowielaczy. Tym samym wszelkie eksperymenty związane z tym detektorem stanęły pod znakiem zapytania. W chwili obecnej zapadła już decyzja, że Super-Kamiokande zostanie odbudowany. Do końca roku 2002 ma zostać do tego celu użyta ta część fotopowielaczy, które nie zostały uszkodzone. Zostaną one rozmieszczone równomiernie na wszystkich ścianach. Jest więc realna nadzieja, że eksperyment K2K będzie kontynuowany w 2003 roku.

Rys. nr 7 Ilustracja prawdopodobnego efektu oscylacji neutrin dobiegających do detektora Super-K z antypodów:

[<http://iftia6.univ.gda.pl/~fizjks/kwarki/kwark12/kwark12.html>]

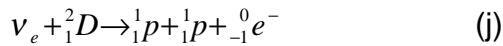
SNO

Detektor neutrin SNO zbudowano w Kanadzie, w kopalni niklu Creighton na głębokości 2073 m. Skrót ten oznacza Sudbury Neutrino Observatory. Obiektem badawczym jest w tym wypadku zbiornik ciężkiej wody o pojemności 1000 ton. Sam detektor posiada kształt kuli, zaś świetlnych błysków wypatruje 9456 czujników. Zamieniają one wspomniane błyski na impulsy elektryczne, zliczane przez aparaturę elektroniczną. Kula zawieszona jest wewnątrz 30-to metrowej komory w kształcie beczki, którą wypełnia zwykła woda. Za pomocą deuteru może on rozróżnić neutrina elektronowe od neutrin innych zapachów. Ponieważ w ciężkiej wodzie liczba wykrywalnych oddziaływań neutrin jest wyższa niż w wodzie zwykłej, możliwe było znaczne zmniejszenie ilości medium. Tak znaczne zmniejszenie rozmiarów w porównaniu z Super-Kamiokande pozwoliło na poważne obniżenie kosztów. Swoją pracę SNO rozpoczął w kwietniu 1999 roku. Średnio wychwyconych zostaje około 10 neutrin dziennie [28]. Detektor ten rejestruje neutrina powstałe w wyniku rozpadu ^8B .

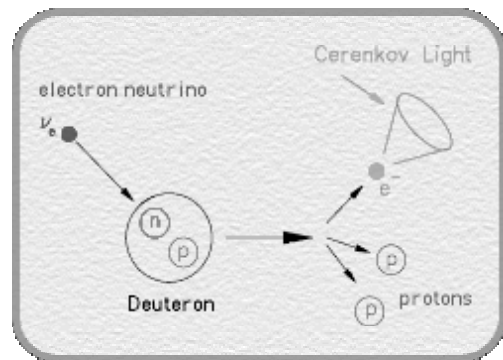
Pomiarowi podlegają następujące reakcje jądrowe zachodzące w medium (ilustracje na podstawie [28]).

a) Charged Current Reaction

Reakcja ta może być wywołana tylko przez neutrino elektronowe. Wymaga tego zachowanie całkowitej liczby leptonów **określonego** typu (neutrino elektronowe może wyprodukować tylko elektron, a nie np. mion). Zachodzi ona wtedy, gdy nadlatujące neutrino uderza w jądro atomu deuteru. Skutkiem tego, zgodnie z modelem oddziaływań słabych, następuje przemiana neutronu w proton, i neutrino w elektron za pośrednictwem bozonu W.

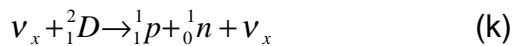


Zgodnie z zasadami mechaniki kwantowej, jako najlżejsza cząstka przejmuje największą ilość energii neutrino, i poruszając się w ośrodku z prędkością nadświetlną emituje promieniowanie Czerenkowa. Kiedy będą zachodziły oscylacje neutrino, widmo ich energii będzie odbiegało od kształtu teoretycznego. Standardowy Model Słońca przewiduje około 30 takich reakcji dziennie.

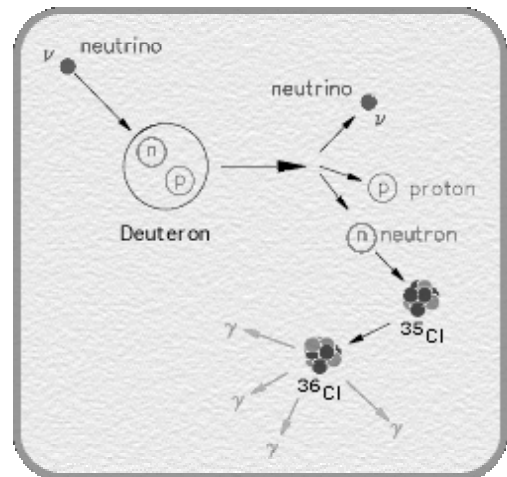


b) Neutral Current Reaction

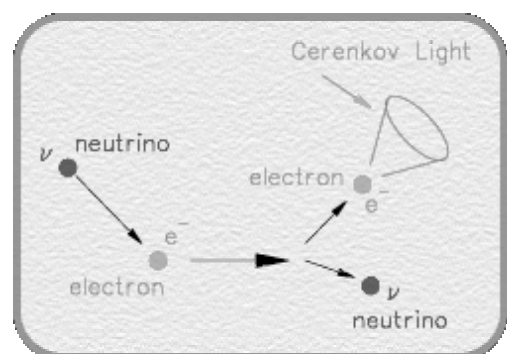
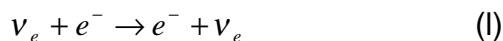
Reakcja ta jest rozbiem jądra atomowego deuteru na elementy składowe. Uwolnione wskutek zderzenia neutrony rozbiegają się we wszystkich kierunkach.



Możliwość obserwacji zdarzenia daje nam rejestracja promieniowania gamma, emitowanego podczas przyłączenia swobodnego neutronu przez jądro innego atomu. Promieniowanie to rejestrowane jest analogicznie jak promieniowanie Czerenkowa. Reakcja ta pozwala zaobserwować wszystkie zapachy neutrino. Na rysunku obok pokazano schwytanie neutronu przez jądro atomu ^{35}Cl , który znajduje się w ośrodku postaci związku NaCl. Następuje to podczas tzw. Opcji solnej doświadczenia. W ciężkiej wodzie rozpuszcza się wtedy ponad 2 tony NaCl [28]. Podobnie jak wyżej Standardowy Model Słońca przewiduje powstanie w detektorze SNO około 30 takich neutronów dziennie.



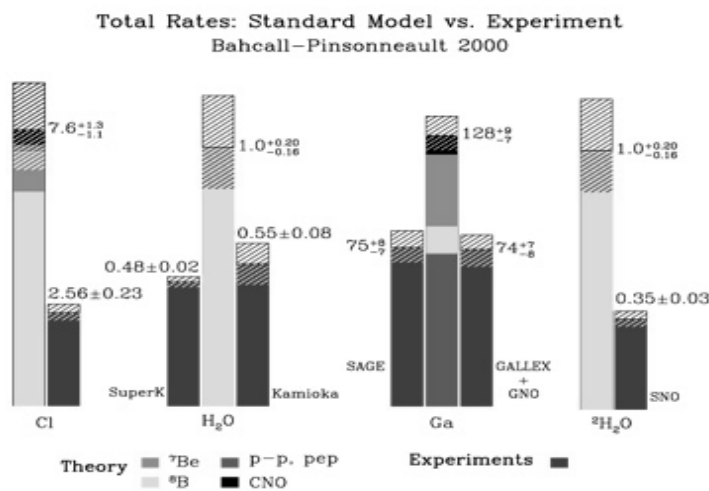
c) Rozpraszanie elektronów



Ta reakcja zachodzi zarówno w ciężkiej jak i w zwykłej wodzie. Chociaż czuła jest ona na wszystkie zapachy neutrin, dominują w niej neutrina elektronowe. Neutrino może współdziałać z elektronem bez jego przekształcenia. Przekazuje mu ono jedynie energię (efekt kuli bilardowej). Energia układu po zderzeniu dzieli się pomiędzy elektron i neutrino. Kierunek emisji elektronu pozwala na określenie kierunku, z którego pojawiło się neutrino. W tym wypadku Standardowy Model Słońca przewiduje jedynie około 3 takich przypadków dziennie.

Próby wyjaśnień

Tak więc wszystkie eksperymenty, w których rejestruje się neutrina słoneczne, dają wyniki niezgodne z obliczeniami. Ponieważ, jak wspomnieliśmy, widać w nich różne części widma energii neutrin, nie chodzi tu o prostą niezgodność o stały czynnik, mogący wskazywać, że obliczenia przeprowadzono wadliwie. Na poniższym wykresie pokazano graficznie całkowitą liczbę neutrin produkowanych przez Słońce w poszczególnych reakcjach termojądrowych, oraz pokazano zarejestrowaną ich ilość w przeprowadzonych eksperymentach.



Rys. nr 8 graficzne ujęcie eksperymentów neutrinowych
[\[http://www.sns.ias.edu/~jnb/\]](http://www.sns.ias.edu/~jnb/)

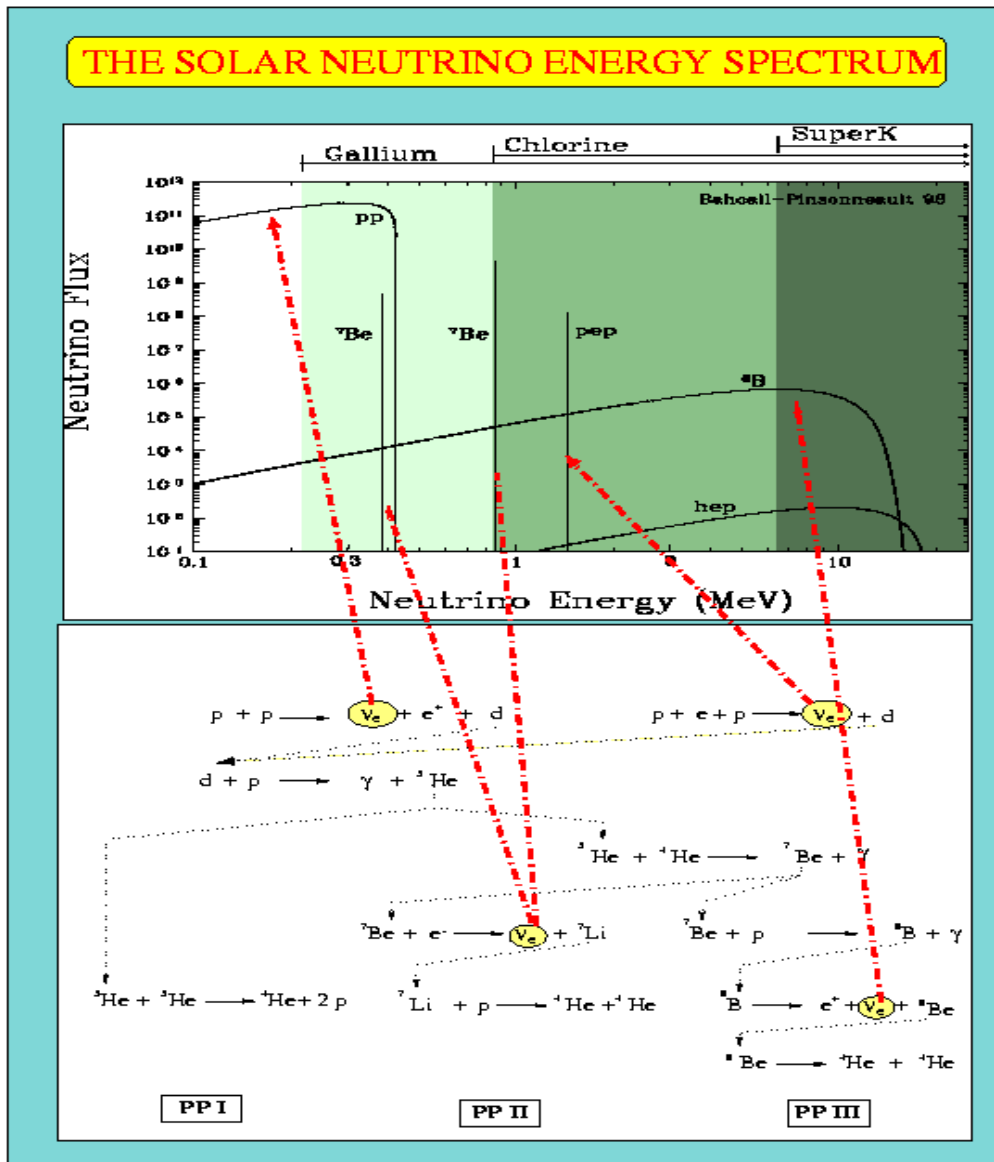
Próby wyjaśnienia rozbieżności pomiędzy pomierzoną a oczekiwaną liczbą słonecznych neutrin były bardzo liczne. Wyniki doświadczeń interpretowane były na różne sposoby, na których podstawie rozważano następująco:

1. Odwoływano się do innych niż standardowy modeli Słońca, a także do szczególnych własności neutrin. Ponieważ mniejsza emisja neutrin wiązałaby się z niższą temperaturą jądra Słońca, w tym kierunku ewoluowały niestandardowe modele jego budowy. Postulowano między innymi: szybszy ruch obrotowy jądra, niż rotacja warstw powierzchniowych, istnienie w jądrze silnego pola magnetycznego, niższej niż w zewnętrznych warstwach obfitości pierwiastków ciężkich, czy też wydajne mieszanie materii w jądrze, co niwelowałoby wzrost zawartości helu ku centrum. Modele te jednak pozostają w sprzeczności z innymi obserwowanymi cechami Słońca. Potwierdzenia słuszności standardowego modelu dowodzi wspomniana już wcześniej heliosejsmologia. Badania prędkości rozchodzenia się fal dźwiękowych we

wnętrzu Słońca pozwalają odtworzyć nie tylko rozkład temperatury wewnątrz gwiazdy, ale również prędkości obrotu warstw podpowierzchniowych.

2. Innym postulatem była możliwość otrzymywania błędnych wyników w przeprowadzanych doświadczeniach. Jednak z powodu deficytu neutrin potwierdzanego w kolejnych eksperymentach możliwość ta została jednoznacznie odrzucona.
3. Brano również pod uwagę rozbieżności czasowe pomiędzy obserwowanymi neutronami, które powstały kilka minut przed zarejestrowaniem, a fotonami emitowanymi z fotosfery, które jak wcześniej wspomniano bardzo długo dyfundowały ku powierzchni gwiazdy. Jeżeli ten projekt okazałby się prawdą, byłibyśmy świadkami gwałtownych (w kosmicznej skali czasowej) zmian w tempie reakcji termojądrowych zachodzących w jądrze Słońca. I ta ewentualność została odrzucona przez naukowców.
4. Wreszcie ostatni z możliwych powodów, który jak wskazują doświadczenia jest najbardziej prawdopodobny, to udowodniony fakt oscylacji neutrin.

Na wykresie zamieszczonym na następnej stronie zobrazowano strumienie neutrin w funkcji ich energii. Analizując ten wykres widzimy, że powstające w reakcjach neutrina charakteryzują się swoimi „widmami energii”. Zaczynają się one przeważnie od zera, a kończą na jakiejś energii maksymalnej, właściwej dla danego typu reakcji. Biorąc np. pod uwagę neutrina powstałe w rozpadzie ${}^8\text{B}$ widać, że ich maksymalna energia wynosi do 14MeV. Na wykresie tym zaznaczono również pionowymi liniami prostymi tzw. neutrina monoenergetyczne, które mają ściśle określone energie. Należą do nich neutrina z rozpadów berylu, oraz reakcji typu pep. Ponadto kolorami zaznaczone są czułości poszczególnych detektorów, czyli minimalne energie neutrin, które dany detektor jest w stanie wykryć. Poddając wykres dalszej analizie możemy stwierdzić, że najwięcej neutrin powstaje w reakcjach cyklu pp. Ponieważ skala liczby neutrin jest logarytmiczna, nie oddaje ona wizualnie różnicy w ilości rejestrowanych cząstek. Maksymalna energia neutrin powstających w reakcji pp wynosi 420 keV, a podczas rozpadu boru (pp-III) - 14,02 MeV. Przy zamianie berylu w lit (pp-II) najczęściej, bo w 90%, powstają neutrina o energii 862 keV; rzadziej (w 10%) - o energii 384 keV. Sporadycznie zachodząca reakcja pep jest źródłem neutrin o energii 1,422 MeV. Jak jednak widać w dalszym ciągu spora ilość neutrin leży poniżej czułości detektorów galowych.



Rys. nr 9 Widmo słonecznych neutrin wg. Standardowego Modelu Słońca
[\[http://www.lngs.infn.it/site/exppro/gno/spectrum.gif\]](http://www.lngs.infn.it/site/exppro/gno/spectrum.gif)

Oscylacje neutrin

Trudności w zrozumieniu na czym polega problem oscylacji wiąże się ściśle z problemem masy neutrina. Należy mocno zaznaczyć, że świat cząstek elementarnych nie podlega prawom mechaniki klasycznej, która jest słuszna dla ciał makroskopowych. Prawa opisujące wszechświat cząstek mikroświata są prawami mechaniki kwantowej. Zasadnicza różnica pomiędzy tymi dwoma działami nauki polega na tym, że w mechanice kwantowej występują wielkości fizyczne komplementarne, tj. takie, których jednoczesny pomiar jest niemożliwy. Mówi o tym Zasada Heisenberga. Dla neutrin jednym z przykładów komplementarnych wielkości fizycznych jest z jednej strony ich zapach, a z drugiej strony ich masa. Wielkości te nie mogą być jednocześnie zmierzone jeżeli masa jest różna od zera. Okazuje się, że neutrina charakteryzują się tzw. Masą Diraca określaną jako superpozycję stanów kwantowych neutrin lewo i prawoskrętnych. Ponadto mogą one jeszcze posiadać

dwie tzw. masy Majorany, lewą i prawą, która podobnie jak poprzednio jest superpozycją stanów kwantowych, lecz tym razem neutrin i antyneutrin. W poniższej tabeli zastawiono dotychczas poznane własności neutrin.

Tabela nr 1 - Dane neutrin podano na podstawie:

[\[http://www.lapp.in2p3.fr/neutrinos/ankes.html\]](http://www.lapp.in2p3.fr/neutrinos/ankes.html)

	Spin	Masa	Spin magnetyczny	Przekrój czynny nukleonu dla 1 GeV
ν_e	1/2	< 2.8 eV	< $5.8 \cdot 10^{-20}$ MeV/T	około 10^{-38} cm ²
ν_μ	1/2	< 170 keV	< $4.3 \cdot 10^{-20}$ MeV/T	około 10^{-38} cm ²
ν_τ	1/2	< 18.2 MeV	< $3.1 \cdot 10^{-17}$ MeV/T	około 10^{-38} cm ²

Wartości mas podane w tabeli są ich górnymi granicami. Nie są to więc wartości ostateczne. Fakt doświadczalnego wyznaczenia górnych wartości mas oznacza, że wykonane eksperymenty nie miały dostatecznej czułości aby wyznaczyć mniejsze masy.

Zajmijmy się teraz wyjaśnieniem problemu neutrin słonecznych w oparciu o zjawisko ich oscylacji, tj. zamiany neutrin elektronowych na mionowe i taonowe, podczas ich ucieczki ze Słońca. Warunkiem koniecznym oscylacji jest posiadanie przez neutrina masy spoczynkowej różnej od zera. Wyniki pomiarów strumieni neutrin powstających w atmosferze Ziemi, prowadzonych w ramach eksperymentu Super Kamiokande i opublikowane w 1998 r. zdają się potwierdzać to założenie. Pamiętać bowiem należy, że przyjęcie zerowej masy neutrin nastąpiło w Modelu Standardowym niejako a priori, i nie oparte zostało na żadnych pomiarach.

W zjawisku oscylacji nie następuje zmiana masy, zmienia się tylko zapach neutrina. Jest to zjawisko kwantowe polegające na tym, że od źródła do odbiornika (detektora) wędruje „paczka” trzech stanów kwantowych, z których każdy ma określoną masę. Jeżeli założymy, że są to masy m_1 m_2 m_3 , to każde z neutrin: elektronowe, mionowe i taonowe składa się z tych stanów, lecz każde w innych proporcjach. Stąd wynika, że neutrino o danym zapachu nie posiada jednej określonej masy. We wspomnianej wyżej paczce każda ze składowych będzie poruszała się z inną prędkością - zależną od masy - im większa masa tym mniejsza prędkość. Detektor może więc zarejestrować inne proporcje stanów m_1 m_2 m_3 , od tych, jakie wyemitował nadajnik. Ponieważ zaś to właśnie te proporcje decydują o zapachu neutrina, może okazać się, że zarejestrowano inne neutrino od tego, które zostało wysłane. W eksperymencie Super-Kamiokande zmierzono prawdopodobieństwo z jakim zachodzi przemiana neutrina mionowego w taonowe. Na tej podstawie wyznaczono różnicę mas głównych składowych obu neutrin. Otrzymane wyniki pozwalają z dużą pewnością stwierdzić, że:

- $(m_3)^2 - (m_2)^2 = 0,003\text{eV}^2$ z badań neutrin atmosferycznych,

- $(m_2)^2 - (m_1)^2 = 0,00006\text{eV}^2$ z badań neutrin słonecznych.

Ostatni wynik oceniany jest już z mniejszą pewnością [30]. Jeżeli powyższe wyniki połączy się z ograniczeniem masy neutrina elektronowego oraz pewnymi informacjami kosmologicznymi, wtedy otrzymamy następujące ograniczenia:

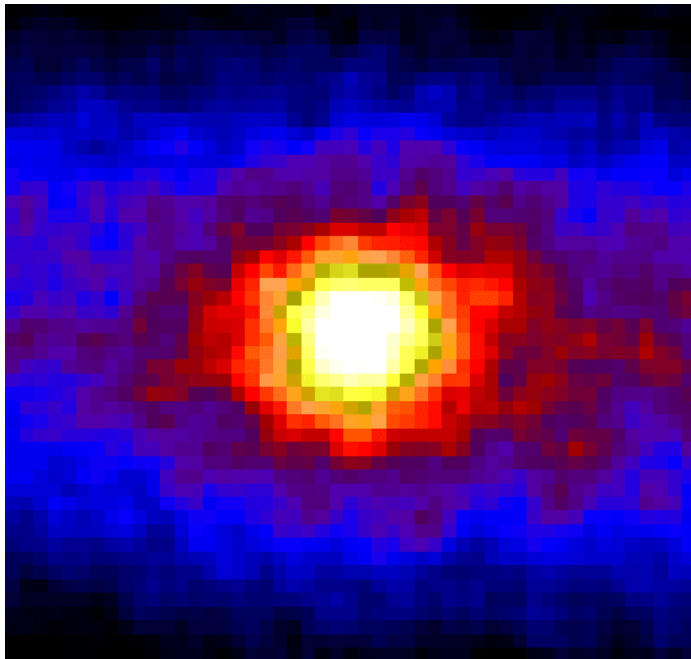
$$0,05\text{eV} < m_1 + m_2 + m_3 < 8,4\text{eV}.$$

Istnieją też inne próby tłumaczenia deficytu neutrin słonecznych. Jak zwykle w tak poważnych sytuacjach, fizycy sięgają do pomysłów desperackich. Jednym z nich jest przypuszczenie, że istnieje jeszcze co najmniej jedno neutrin "sterylne" (patrz str.18), nie oddziałujące z materią. Ta egzotyczna cząstka byłaby nieobserwowalna, toteż zwykłe neutrina mogłyby się zamieniać w neutrina sterylne i umykać próbom wykrycia. Wprowadzenie do gry tak niezwykłego obiektu mogłoby rozwiązać większość obecnych kłopotów. Widać tu wyraźną analogię do Pauliego, oraz jego desperackiej idei nieobserwowalnej cząstki. Trudno dzisiaj ocenić, czy w tym wypadku historia się powtórzy?

Ciekawostki:

1. We wrześniu 1999 roku, pojawiły się wyniki dokładnej analizy zmienności w czasie obserwowanego na Ziemi strumienia neutrin słonecznych. Już wcześniej ustalono, że strumień ten - wbrew podejrzeniom - nie jest skorelowany ze zmianami aktywności słonecznej. Obecnie dwaj fizycy ze Stanfordu, Peter Sturrock i Günther Walther, przeanalizowali wszystkie dane światowe i doszli do wniosku, że liczba neutrin dochodzących ze Słońca zmienia się periodycznie z okresem 21,3 dni. Jest to zupełnie nowe zagadnienie dotyczące Standardowego Modelu Słońca. Trzeba będzie znaleźć wytłumaczenie tej periodyczności, która wskazuje na niewielkie, aczkolwiek cyklicznie stałe zmiany tempa reakcji termojądrowych w jądrze Słońca.

2. Fotografia obok to tzw. „neutrinowe zdjęcie”. Przedstawia ona Słońce widziane przy pomocy neutrin [30]. Uzyskane ono zostało po po 500-dobowym "naświetlaniu" przez detektor Super Kamiokande. Słoneczna tarcza ma na nim średnicę około 15° . Jak ono powstało? Neutrino w detektorze wybija elektrony z orbit atomów dzięki temu, że ich energia jest dużo większa od masy elektronu. Elektrony te lecą w tym samym kierunku, w którym leciało neutrin. Takie elektrony o energii powyżej 1 MeV przebiegając przez materię wywołują tzw. kaskadę elektromagnetyczną. W jej wyniku tworzy się wiele elektronów o niższej energii. One wysyłają promieniowanie Czerenkowa, ale kierunki mają rozmyte o 15 stopni.



Te 15 stopni to dokładność, z jaką możemy odtworzyć w detektorze kierunek neutrin. Dlatego średnica tarczy słonecznej jest znacznie większa niż w rzeczywistości.

3. Żaden z tych detektorów nie mierzył przepływu neutrin ${}^7\text{Be}$ bezpośrednio. Radiochemiczne eksperymenty z użyciem galu i chloru wykrywały zjawiska powyżej poziomu energii odpowiadającemu przemianie nuklearnej, bez zapisywania zmiany energii zjawisko po zjawisku. Z tego powodu nie mogły określić jaka część całkowitego przepływu należy do dwóch monoenergetycznych linii ${}^7\text{Be}$ w widmie neutrin słonecznych. Wszystkie detektory wodne Czerenkowa, włączając SNO, mają zbyt wysoką wartość progową energii, aby wykryć neutrina ${}^7\text{Be}$. Z tego powodu skonstruowano detektor Borexino, który ma najniższą wartość progową energii ze wszystkich dotychczas skonstruowanych detektorów. Wykorzystano w nim spektroskopię scyntytacji cieczy, podstawową metodę dla wykrywania cząstek w fizyce nuklearnej i wysokoenergetycznej.
4. Zupełnie inne i nietypowe rozwiązanie wyjaśniające z jednej strony deficyt słonecznych neutrin, a problem brakującej masy Wszechświata zaproponowali amerykańscy naukowcy William Press i David Spergel oraz niezależnie od nich John Faulkner i Roland Gilliland. Ich hipoteza mówiła, że „nieznane cząstki subatomowe, nazywane słabo oddziałującymi masywnymi cząstkami (skrót angielski WIMPs), powstałe w dużych ilościach we wczesnym Wszechświecie, to owa niewidzialna materia, której istnienie wynika z dynamicznych studiów wielkoskalowej struktury Wszechświata, a której dotychczas nie udało się zaobserwować. Cząstki te mogłyby się skupiać wokół masywnych obiektów (np. Słońca) i gdyby ponadto posiadały odpowiednie cechy - brać udział w redystrybucji energii wewnątrz Słońca, doprowadzając do obniżenia strumienia neutrin z reakcji borowej do poziomu obecnie obserwowanego.”

Zakończenie

Zagadnienia poruszone w niniejszej pracy siłą rzeczy musiały zostać omówione bardzo skrótowo. Zarówno budowie Słońca, jak i niedoborowi neutrin słonecznych należałoby poświęcić odrębną pracę, obejmującą wiele ważnych, aczkolwiek nie poruszonych tu zagadnień. Chociaż więc są to tematy ze sobą

powiązane, dzisiejsza nauka każdemu z nich poświęca osobne rozdziały. I tak na pewno zasługuje na omówienie pole magnetyczne Słońca, które jest głównym zawiadowcą ruchu materii wewnątrz i na zewnątrz gwiazdy. Nie wolno nam zapominać o sukcesach odnotowanych dzięki satelitom obserwującym Słońce spoza atmosfery. Najbardziej znanym jest chyba SOHO umieszczone na orbicie wokółsłonecznej w miejscu, gdzie równoważą się siły przyciągania Ziemi i Słońca. Inne niezwykle cenne informacje otrzymujemy dzięki dynamicznemu rozwojowi heliosejsmologii, stanowiącej nową gałąź heliofizyki. Słońce stanowi kopalnię wiedzy na temat budowy gwiazd, którą z racji jego bliskości możemy szczegółowo poznawać. Niewątpliwie jednak każde „zagadnienie słoneczne” wymagałoby odrębnego opracowania, jednak poświęcenie chociażby kilku skrótowych zdań każdemu z nich wymagałoby napisania kilku tomów. Podobnie wygląda problem niedoboru słonecznych neutrin. Ten aktualny temat będący motywem działań wielu laboratoriów i instytutów nie nadąża z powodu ciągłego i szybkiego postępu w badaniach. Ostatnie odkrycia dotyczące oscylacji neutrin powodują konieczność zweryfikowania dotychczasowej wiedzy z dziedziny cząstek. Znosi się na to, że trzeba będzie od nowa napisać podręczniki fizyki cząstek. Spowoduje to konieczność zgłoszenia „do poprawki” Modelu Standardowego, oraz bardziej dokładnego przyjrzenia się zasadom zachowania liczb leptonowych. Oscylacje przeczą bowiem zasadzie zachowania liczby leptonowej osobno w każdej generacji. Zasada ta została sformułowana jedynie na podstawie obserwacji i nie jest znana w przyrodzie żadna symetria, która by ją narzucała. Możliwe, że Model Standardowy jest jedynie przybliżeniem bardziej ogólnej teorii zwanej Teorią Wielkiej Unifikacji. Rozwiązanie zagadki neutrin ma bardzo wielkie znaczenie również z punktu widzenia kosmologicznego. Całkowita masa wszystkich neutrin może stanowić do kilkunastu procent masy Wszechświata. Może wtedy uda się odpowiedzieć na pytanie – czy Wszechświat będzie rozszerzał się bez końca?

Bibliografia:

1. Józef S. Szklowski: „Życie gwiazd” – wydawnictwo Wiedza Powszechna, Warszawa 1982.
2. S. A. Kapłan: „Fizyka gwiazd” – Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1963.
3. Rudolf Kippenhann: „Na tropie tajemnic Słońca” – Wydawnictwo Prószyński i spółka, Warszawa 1997.

4. Marcin Kubiak: „Gwiazdy i materia międzygwiazdowa” – Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1994.
5. Encyklopedia Geograficzna Świata część VIII – Wszechświat, Kraków 1997.
6. R. Robbins, W. Jefferys, S. Shawl: „Discovering astronomy” – John Wiley & Sons INC, New York 1995.
7. Thomas Arny: „Explorations an introduction to astronomy” – Mc Graw-Hill Companiec INC, Boston 1998.
8. P.G. Kulikowski: „Poradnik miłośnika astronomii” – Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1976.
9. John Lewis: „Physics and Chemistry of the Solar System” – Academic Press INC, San Diego California 1995.
10. Praca zbiorowa: „Encyklopedia Fizyki Współczesnej” – Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1983.
11. Robert M. Eisberg: „Podstawy Fizyki Współczesnej” – Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1968.
12. Jerzy Jatzak: : „Neutrino kosmiczne” – wydawnictwo Wiedza Powszechna, Warszawa 1971.
13. J. Osarczuk, M. Różyczka: „Zajrzeć do Słońca” – Wiedza i Życie 2001, nr 4; str. 24.
14. A. K. Wróblewski: „Czy neutrino ma masę?” – Wiedza i Życie 1996, nr 1; Internet - <http://www.wiedzaizycie.pl/96011700.htm>
15. A. K. Wróblewski: „Rok neutrin” – Wiedza i Życie 1999, nr 1; Internet - <http://www.wiedzaizycie.pl/99012800.htm>
16. J. Osarczukl: „Zajrzeć do wnętrza Słońca” – Urania 2000, nr 5; str.196.
17. N. Grevesse, J. Sauval: „Skład chemiczny Słońca” – Urania 2000, nr 6; str. 248.
18. Kenneth Lang: „SOHO odkrywa tajemnice Słońca” – Świat Nauki 1997, nr 5; str. 58.
19. Danuta Kielczewska: „Tajemnice brakujących neutrin” – Delta 1999, nr 2; str. 4.
20. Wojciech Królikowski: „Masy neutrin” – Postępy Fizyki 2001, zeszyt 4; str. 169.
21. Rudolf Mössbauer: „Problem neutrin słonecznych” – Postępy Fizyki 1998, zeszyt 3; str. 137.
22. Jarosław Pióro: „Zagadka słonecznego neutrino” – Postępy Astronomii 1991, nr 4; str.164.
23. Borexino experiment – Internet <http://almime.mi.infn.it/>
24. Kam-Land – Internet <http://www.awa.tohoku.ac.jp/html/KamLAND/index.html>
25. Implications of neutrino mass – Internet <http://dept.physics.upenn.edu/neutrino/jhu/jhu.html>

26. SAGE The Russian-American Gallium solar neutrino Experiment – Internet <http://ewi.npl.washington.edu/SAGE/sage.html>
27. John Bahcall's [Solar Neutrino Pages](http://www.sns.ias.edu/~jnb/) – Internet <http://www.sns.ias.edu/~jnb/>
28. The Sudbury Neutrino Observatory – Internet <http://www.sno.phy.queensu.ca/>
29. Welcome to GALLEX – Internet - <http://www.mpi-hd.mpg.de/kirsten/gallex.html>
30. Danuta Kielczewska: „Na tropie masy neutrin” – referat wygłoszony na Sesji P2 na XXXV Zjeździe Fizyków Polskich – Internet <http://physics.uwb.edu.pl/ptf/zjazd/danka-w.htm>
31. Kamioka Obserwatory – Internet <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
32. Super-Kamiokande Official Home Page – Internet <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/index.html>
33. History of the Neutrinos – Internet <http://wwwlapp.in2p3.fr/neutrinos/aneut.html>
34. Wirtualny Wszechświat – Internet <http://www.wiw.pl/astrofizyka/slonce/>
35. Leptony, hadrony, kwarki – Internet <http://iftia6.univ.gda.pl/~fizjks/kwarki/kwarki.html>
36. Paweł Artymowicz: „Astrofizyka układów planetarnych” – Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1995.
37. Andrzej Pawuła: „Rola procesów jądrowych w kształtowaniu środowiska naturalnego” – Internet <http://main.amu.edu.pl/~pawula/IF-PW.html>