Problemy z modelem Słońca

w świetle najnowszych wyników

eksperymentu Borexino

Sławomir Stachniewicz, IF PK

1. Wstęp

Słońce ze względu na swą bliskość jest najlepiej poznaną gwiazdą. Budowa i ewolucja gwiazd to najlepiej poznane działy astrofizyki. W takim razie wydawać by się mogło, że Słońce nie powinno mieć przed nami żadnych tajemnic – tymczasem wcale tak nie jest. W 2001 r. wydawało się, że wyjaśniono ostatnią zagadkę – tzw. problem neutrin słonecznych – ale już dwa lata później pojawiła się następna i jej rozwiązanie napotyka na duże trudności.

2. Dlaczego Słońce świeci?

Energia emitowana przez Słońce jest produkowana w reakcjach jądrowych zachodzących w jego wnętrzu. Większość tych reakcji jest wywołana przez oddziaływania silne, pozostałe zachodzą w wyniku oddziaływań słabych. We wnętrzu Słońca dominuje cykl p-p:

$$
\begin{aligned}
{}^{1}_{1}\mathbf{H} + {}^{1}_{1}\mathbf{H} &\longrightarrow {}^{2}_{1}\mathbf{H} + \boldsymbol{e}^{+} + \boldsymbol{\nu}_{e}\ \textbf{(pp)} \\
{}^{2}_{1}\mathbf{H} + {}^{1}_{1}\mathbf{H} &\longrightarrow {}^{3}_{2}\mathbf{He} + \boldsymbol{\gamma} \\
{}^{3}_{2}\mathbf{He} + {}^{3}_{2}\mathbf{He} &\longrightarrow {}^{4}_{2}\mathbf{He} + \mathbf{2}\ {}^{1}_{1}\mathbf{H}\ \textbf{(69\%)}
\end{aligned}
$$

zamiast ostatniej reakcji w 31% przypadków mamy

$$
\begin{aligned}
{}^{3}_{2}\mathbf{He} + {}^{4}_{2}\mathbf{He} &\rightarrow {}^{7}_{4}\mathbf{Be} + \boldsymbol{\gamma} \\
{}^{7}_{4}\mathbf{Be} + \boldsymbol{e}^{-} &\rightarrow {}^{7}_{3}\mathbf{Li} + \boldsymbol{\nu}_{e}\ \mathbf{(99.7\%)\ (Be)} \\
{}^{7}_{3}\mathbf{Li} + {}^{1}_{1}\mathbf{H} &\rightarrow \mathbf{2}\ {}^{4}_{2}\mathbf{He}
\end{aligned}
$$

zaś w 0.3% z 31%

$$
\begin{aligned}
{}^{7}_{4}\mathbf{Be} + {}^{1}_{1}\mathbf{H} &\rightarrow {}^{8}_{5}\mathbf{B} + \boldsymbol{\gamma} \\
{}^{8}_{5}\mathbf{B} &\rightarrow {}^{8}_{4}\mathbf{Be}^{*} + \boldsymbol{e}^{+} + \boldsymbol{\nu}_{e}\ \mathbf{(B)} \\
{}^{8}_{4}\mathbf{Be}^{*} &\rightarrow \mathbf{2}\ {}^{4}_{2}\mathbf{He}
\end{aligned}
$$

gdzie $\boldsymbol{e}^{-}$, $\boldsymbol{e}^{+}$ i $\boldsymbol{\nu}_{e}$ to odpowiednio elektron, pozyton i neutrino elektronowe, zaś $\boldsymbol{\gamma}$ to foton.

W cyklu p-p są ponadto możliwe dwie reakcje w których są produkowane neutrina:

$$
\begin{aligned}
{}^{1}_{1}\mathbf{H} + {}^{1}_{1}\mathbf{H} + \boldsymbol{e}^{-} &\longrightarrow {}^{2}_{1}\mathbf{H} + \boldsymbol{\nu}_e \ \textbf{(pep)} \\
{}^{3}_{2}\mathbf{He} + {}^{1}_{1}\mathbf{H} + \boldsymbol{e}^{-} &\longrightarrow {}^{4}_{2}\mathbf{He} + \boldsymbol{\nu}_e \ \textbf{(hep)}
\end{aligned}
$$

Pewną rolę odgrywa również cykl CNO:

$$
\begin{aligned}
{}^{12}_{6}\mathbf{C} + {}^{1}_{1}\mathbf{H} &\longrightarrow {}^{13}_{7}\mathbf{N} + \boldsymbol{\gamma} \\
{}^{13}_{7}\mathbf{N} &\longrightarrow {}^{13}_{6}\mathbf{C} + \boldsymbol{e}^{+} + \boldsymbol{\nu}_e \ \textbf{(N)} \\
{}^{13}_{6}\mathbf{C} + {}^{1}_{1}\mathbf{H} &\longrightarrow {}^{14}_{7}\mathbf{N} + \boldsymbol{\gamma} \\
{}^{14}_{7}\mathbf{N} + {}^{1}_{1}\mathbf{H} &\longrightarrow {}^{15}_{8}\mathbf{O} + \boldsymbol{\gamma} \\
{}^{15}_{8}\mathbf{O} &\longrightarrow {}^{15}_{7}\mathbf{N} + \boldsymbol{e}^{+} + \boldsymbol{\nu}_e \ \textbf{(O)} \\
{}^{15}_{7}\mathbf{N} + {}^{1}_{1}\mathbf{H} &\longrightarrow {}^{12}_{6}\mathbf{C} + {}^{4}_{2}\mathbf{He}
\end{aligned}
$$

lub

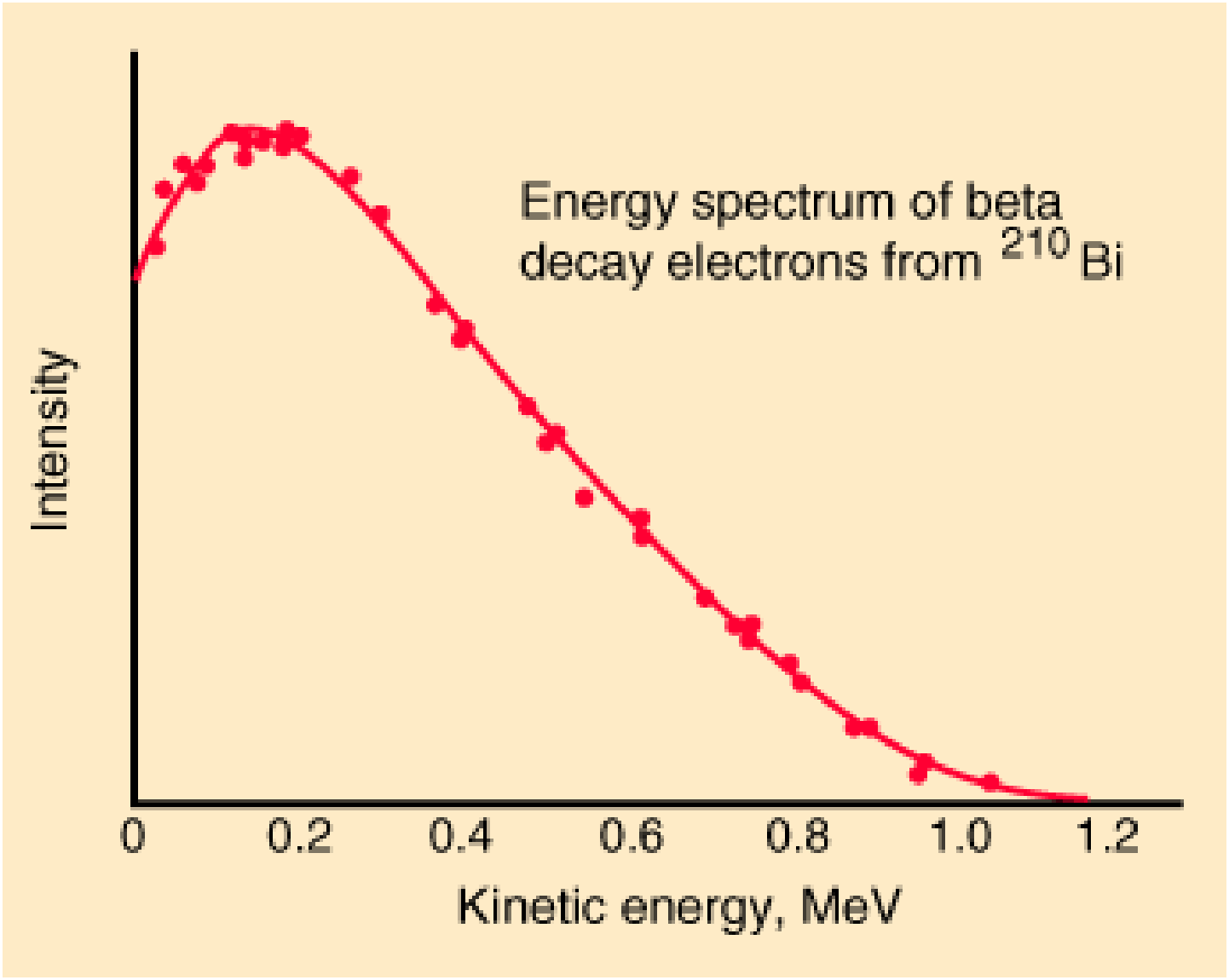
$$
\begin{aligned}
{}^{15}_{7}\mathbf{N} + {}^{1}_{1}\mathbf{H} &\rightarrow {}^{16}_{8}\mathbf{O} + \boldsymbol{\gamma} \\
{}^{16}_{8}\mathbf{O} + {}^{1}_{1}\mathbf{H} &\rightarrow {}^{17}_{9}\mathbf{F} + \boldsymbol{\gamma} \\
{}^{17}_{9}\mathbf{F} &\rightarrow {}^{17}_{8}\mathbf{O} + \boldsymbol{e}^{+} + \boldsymbol{\nu}_{e} \ \mathbf{(F)} \\
{}^{17}_{8}\mathbf{O} + {}^{1}_{1}\mathbf{H} &\rightarrow {}^{14}_{7}\mathbf{N} + {}^{4}_{2}\mathbf{He}
\end{aligned}
$$

gdzie węgiel, azot i tlen pełnią rolę katalizatorów.

Reakcje oznaczone skrótami w nawiasach to są reakcje, w których są produkowane neutrina. Neutrina te dość swobodnie przenikają na zewnątrz Słońca i część z nich dociera do Ziemi.

3. Co to są neutrina?

Neutrina są cząstkami elementarnymi które zostały *wymyślone* po to, żeby wyjaśnić pozorny brak zachowania energii w rozpadach β. Typowe widmo energetyczne dla rozpadu β widać na przedstawionym na kolejnej stronie rysunku (wg `http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu`):



Typowe widmo rozpadu β.

Zaskakującą cechą tego widma jest rozkład ciągły, od zera do energii maksymalnej, w przybliżeniu równej energii rozpadu. Oznacza to, że do zbilansowania zasad zachowania energii, pędu oraz spinu potrzebujemy dodatkowej cząstki, zwanej neutrinem. Widmo nie może być tłumaczone emisją γ gdyż ta wprawdzie często towarzyszy rozpadom β, ale ma charakter liniowy. Kształt widma sugerował, że neutrina maja zerową masę spoczynkową.

Neutrina mają następujące właściwości:

$\Rightarrow$ brak ładunku elektrycznego

$\Rightarrow$ bardzo mała (ale niezerowa) masa spoczynkowa

$\Rightarrow$ spin połówkowy

$\Rightarrow$ fermion (podlega statystyce Fermiego-Diraca)

$\Rightarrow$ poruszają się z prędkością bliską prędkości światła

$\Rightarrow$ bardzo słabo oddziaływują z materią, cząstki bardzo przenikliwe i przez to niesłychanie trudna do zarejestrowania

$\Rightarrow$ neutrina są lewoskrętne a antyneutrina prawoskrętne (neutrina Diraca) lub są swoimi własnymi antycząstkami a „antyneutrina" różnią się tylko skrętnością (neutrina Majorany).

4. Detekcja neutrin słonecznych

W obserwacjach Słońca największym problemem jest wykrywanie neutrin. Oddziaływują one w sposób słaby, czyli reakcje z innymi cząstkami są bardzo rzadkie. Nawet takie ciała niebieskie jak Ziemia czy Słońce są dla nich prawie przezroczyste – ale nie całkiem i dzięki temu możemy je wykrywać. Służą do tego ogromne detektory stale monitorowane przez aparaturę pomiarową. Na początku zasadniczo były trzy typy detektorów:

⇒ **chlorowe** – zbiorniki C_2Cl_4

⇒ **galowe** – zbiornik $GaCl_3 + HCl$ (GALLEX) lub metalicznego Ga (SAGE)

⇒ **wodne** – wypełnione wodą lub ciężką wodą

W detektorach chlorowych wykorzystywano reakcję

$$\boldsymbol{\nu_e + {}^{37}_{17}\mathrm{Cl} \longrightarrow {}^{37}_{18}\mathrm{Ar} + e^-} \ ,$$

zaś w detektorach galowych reakcję

$$\boldsymbol{\nu_e + {}^{71}_{31}\mathrm{Ga} \longrightarrow {}^{71}_{32}\mathrm{Ge} + e^-} \ .$$

Pomiar przeprowadzano w kilku krokach: najpierw przez jakiś czas prowadzono „naświetlanie" neutrinami, następnie oddzielano powstały argon lub german, zliczano ich ilość, uwzględniano również te jądra argonu i germanu które już zdążyły się rozpaść (${}^{37}_{18}\mathbf{Ar}$ zamienia się w ${}^{37}_{17}\mathbf{Cl}$ z okresem połowicznego rozpadu ok. 35 dni, zaś ${}^{71}_{32}\mathbf{Ga}$ zamienia się w ${}^{71}_{31}\mathbf{Ge}$ z okresem połowicznego rozpadu ok. 11 dni) i na tej podstawie można było oszacować liczbę neutrin które przeszły przez detektor w danym czasie.

W przypadku detektorów wodnych zasada jest zupełnie inna: neutrino zderza się z elektronem, przekazuje mu część swej energii, którą następnie ten elektron wypromieniowuje (tzw. promieniowanie Czerenkowa), co jest na bieżąco rejestrowane przez aparaturę.

O skali trudności związanych z tymi pomiarami niech świadczy fakt, że w eksperymencie Homestake (140 ton C_2Cl_4) obserwowano 0.3 reakcji dziennie, w eksperymentach SAGE i GALLEX (60 ton Ga, 60 ton $GaCl_3$) 1.5 i 0.75 reakcji dziennie, zaś w eksperymencie KamiokaNDE (680 ton wody) 0.3 reakcji dziennie. W czasie jednej „sesji" eksperymentu GALLEX po trzytygodniowej ekspozycji w ok. 60 tonach substancji było obecnych zwykle ok. 14 atomów Ge, które należało oddzielić, co było robione w sposób chemiczny (były zamieniane na

$^{71}GeH_4$), a następnie ich rozpady były wykrywane przy pomocy detektorów promieniowania. Podobnie było w przypadku eksperymentu SAGE. Z kolei w eksperymencie Homestake w celu oddzielenia powstałego argonu co parę tygodni przez zbiornik przepuszczano bąble helu.

We wszystkich eksperymentach neutrinowych trzeba też uwzględnić tło, tj. neutrina pochodzące z innych źródeł. To „tło" wcale nie musiało być małe, o czym się przekonano w 1987 roku kiedy wybuchła supernowa SN1987A – wtedy nagle zarejestrowano stosunkowo dużo (w KamiokaNDE kilka) neutrin.

5. Za mało neutrin?

Problem zaczął się w momencie, gdy spróbowano zmierzyć strumień neutrin pochodzących ze Słońca w eksperymencie Homestake - okazało się, że był o połowę za mały w stosunku do oczekiwań. Dalsze pomiary i kolejne eksperymenty potwierdziły tę rozbieżność: w eksperymencie Homestake zmierzony strumień był w granicach 32% oczekiwanego, w eksperymentach galowych ok. 54% a w eksperymentach wodnych KamiokaNDE i SuperKamiokaNDE ok. 50%.

Pojawiło się wiele prób rozwiązania problemu. Zasadniczo można było wyróżnić dwie kategorie: zakładające modyfikację fizyki (np. właściwości cząstek, przekrojów czynnych na reakcje

jądrowe itp.) i astrofizyczne (dodające jakieś procesy wewnątrz Słońca).

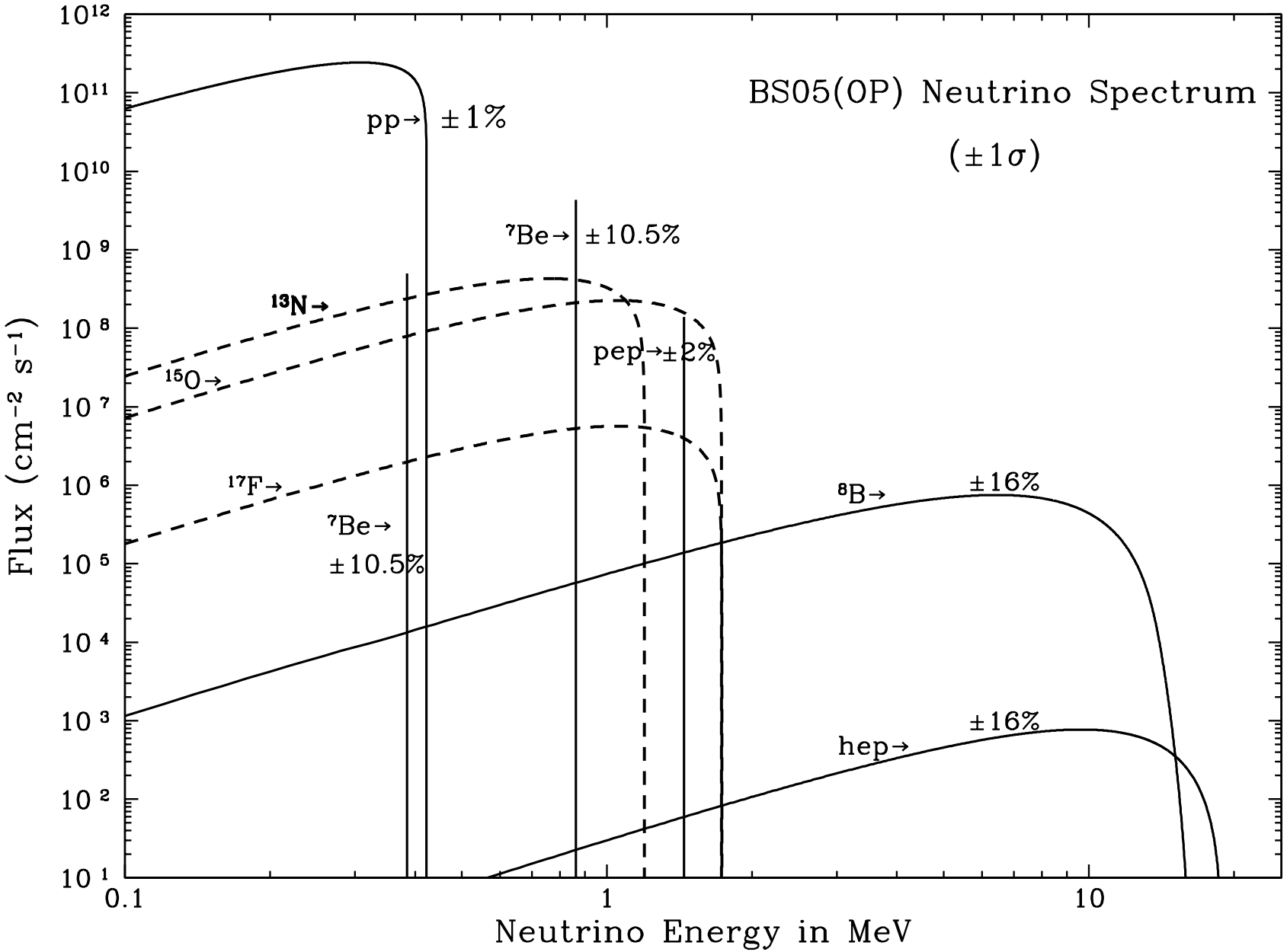
Najbardziej popularna była hipoteza oscylacji neutrin, czyli tzw. model MSW (Michejew–Smirnow–Wolfenstein). Ta hipoteza zakłada, że neutrina nie są bezmasowe i że w związku z tym mogą oscylować. Neutrina wytworzone w centrum Słońca byłyby neutrinami elektronowymi, zaś po dotarciu na Ziemię część z nich stawałaby się się neutrinami mionowymi lub taonowymi, które nie były wykrywane przez starsze eksperymenty. W tym modelu i przy założeniu standardowych modeli Słońca (zwłaszcza modeli Bahcalla i współpracowników) uzyskiwano najlepszą zgodność z obserwacjami.

Z inną hipotezą wystąpił A. Dar. Stworzył własny model Słońca: uwzględnił niektóre czynniki nie uwzględniane przez innych jak efekty częściowej jonizacji, efekty ewolucji przed wstąpieniem na ciąg główny, ewentualną nierównowagę jądrową itp. „Naciągał" też wartości niektórych przekrojów czynnych (zwłaszcza $\mathbf{S}_{17}$ czyli na reakcję $^{7}\mathbf{Be}(\boldsymbol{p},\boldsymbol{\gamma})^{8}\mathbf{B}$). Model tylko częściowo rozwiązywał problem neutrin ale poza tym był niemal tak dobrze zgodny z obserwacjami jak modele standardowe.

Pozostałe modele dawały znacznie gorszą zgodność z danymi obserwacyjnymi. Np. W.C. Haxton postulował dodatkowe mieszanie $^{3}\mathbf{He}$ we wnętrzu Słońca ale nie było to zgodne z obserwacjami heliosejsmologicznymi. Były też inne propozycje: obniżenie temperatury centralnej, zmiana składu chemicznego,

przyjęcie starszej wersji równania stanu, założenie braku dyfuzji, pominięcie reakcji $^3\mathbf{He}(\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\gamma})^7\mathbf{Be}$ ($\mathbf{S}_{34} = \mathbf{0}$), różne modele egzotyczne typu emisja aksjonów ale one również więcej psuły niż wyjaśniały, a zwłaszcza znacznie gorzej pasowały do danych heliosejsmologicznych.

Pod koniec lat 1990. dokładniej zmierzono kwestionowane przez Dara przekroje czynne i okazało się, że pomiary były wyraźnie sprzeczne z przyjmowanymi przez niego wartościami, w efekcie Dar zajął się czymś innym. Pozostali też stopniowo dawali za wygraną. Wprawdzie pojawiały się nowe modele (np. zakładające istnienie „gorących bąbli" we wnętrzu Słońca) ale nie wzbudzały większego zainteresowania.



Przewidywane strumienie neutrin

6. A jednak MSW

W 2001 r. nastąpił przełom: ogłoszono pierwsze wyniki obserwacji nowego eksperymentu, SNO (Sudbury Neutrino Observatory). Jest on podobny do KamiokaNDE i SuperKamiokaNDE, ale zamiast wody ($\mathbf{H_2O}$) zastosowano ciężką wodę ($\mathbf{D_2O}$). SNO wykrywał neutrina $^8\mathbf{B}$ w wyniku reakcji:

$\Rightarrow \boldsymbol{\nu_e} + \boldsymbol{d} \rightarrow \boldsymbol{p} + \boldsymbol{p} + \boldsymbol{e^-}$ prąd naładowany CC

$\Rightarrow \boldsymbol{\nu_x} + \boldsymbol{d} \rightarrow \boldsymbol{p} + \boldsymbol{n} + \boldsymbol{\nu_x}$ prąd neutralny NC

$\Rightarrow \boldsymbol{\nu_e} + \boldsymbol{e^-} \rightarrow \boldsymbol{\nu_e} + \boldsymbol{e^-}$ rozpraszanie na elektronach ES

przy czym

$\Rightarrow$ CC jest czuły tylko na $\boldsymbol{\nu_e}$

$\Rightarrow$ NC jest czuły na wszystkie typy neutrin ($\boldsymbol{\nu}_e$, $\boldsymbol{\nu}_\mu$ i $\boldsymbol{\nu}_\tau$)

$\Rightarrow$ ES jest czułe na wszystkie typy neutrin ale głównie $\boldsymbol{\nu}_e$

w związku z czym było możliwe odróżnienie całkowitego strumienia neutrin od strumienia $\boldsymbol{\nu}_e$, co w zasadzie nie było możliwe dla wcześniejszych eksperymentów.

Wyniki były zgodne z przewidywaniami modelu MSW, tzn. całkowity strumień neutrin był zgodny z przewidywaniami standardowych modeli Słońca ale tylko część z nich to neutrina elektronowe. Oscylacje neutrin zostały potwierdzone w 2004 r. przez japoński eksperyment KamLAND, w którym mierzono widma antyneutrin elektronowych pochodzących z reaktorów jądrowych a wcześniej przez obserwacje neutrin atmosferycznych oraz eksperyment LSND.

7. Problem metaliczności Słońca

Już był w ogródku, już witał się z gąską... Wydawało się, że problemy ze Słońcem to zamknięty rozdział ale na horyzoncie pojawił się kolejny. Okazało się, że zawartości ciężkich pierwiastków we wnętrzu Słońca mogą być inne niż dotychczas sądzono – a to spowodowało pewne zamieszanie.

Poprzednio do szacowania zawartości pierwiastków we wnętrzu Słońca stosowano kody hydrostatyczne i 1-wymiarowe czyli zakładające sferyczną symetrię. Pomiary były zgodne z danymi pochodzącymi z meteorytów. Zastosowanie zależnych od czasu kodów 2- i 3-wymiarowych do analizy linii absorpcyjnych spodowało dwukrotne obniżenie szacowanej zawartości ciężkich pierwiastków w strefie konwekcyjnej (np. Asplund, Gre-

vesse i Sauval 2005), a to stoi w sprzeczności z danymi heliosejsmologicznymi. Na razie nie ma definitywnego rozwiązania tego problemu. M.in. jest poważna różnica między „starymi" i „nowymi" wartościami promienia strefy konwekcyjnej i powierzchniowej zawartości helu podczas gdy wartości wynikające z obserwacji heliosejsmologicznych są prawie idealnie zgodne ze „starymi" (Basu i Antia, 2004):

Wielk.	Obs.	Stare	Nowe
$\boldsymbol{R_{\rm CZ}/R_\odot}$	$\mathbf{0.713 \pm 0.001}$	$\mathbf{0.713 \pm 0.004}$	$\mathbf{0.728 \pm 0.004}$
$\boldsymbol{Y_{\rm surf}}$	$\mathbf{0.2485 \pm 0.0034}$	$\mathbf{0.243 \pm 0.035}$	$\mathbf{0.229 \pm 0.035}$

Nie ma to większego wpływu na strumień neutrin. Wprawdzie wartości przewidywane nie zawsze są zgodne – niektóre różnice parokrotnie przekraczają szacowane błędy modeli – ale ciągle jest to w granicach błędów obserwacyjnych, więc obserwacje neutrin na razie nie pozwalają rozstrzygnąć, które modele są lepsze.

Oprócz tego są dwa poważne problemy, które utrudniają wybranie optymalnego modelu:

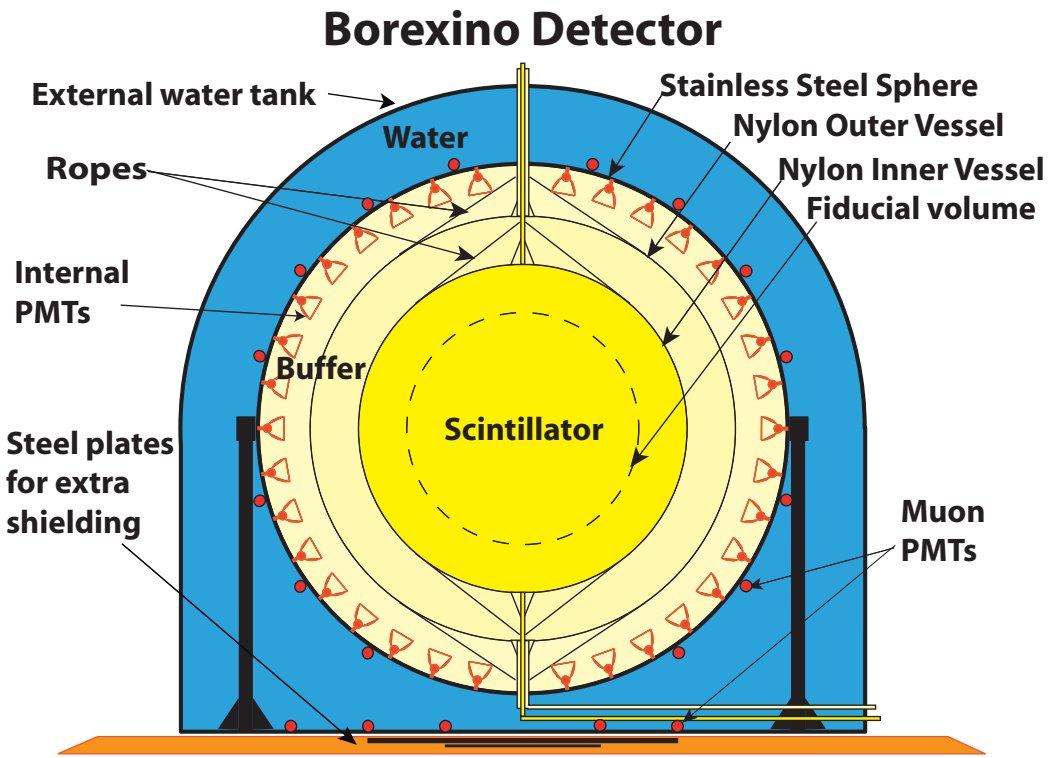
$\Rightarrow$ trudne do oszacowania niepewności w modelach atmosfery

$\Rightarrow$ niepewności w analizie spektroskopowej składu atmosfery.

Mimo, iż od tego czasu upłynęło kilkanaście lat, problem nadal nie został rozwiązany. W praktyce ciągle funkcjonują modele Słońca o większej i mniejszej metaliczności.

8. Eksperyment Borexino i jego wyniki

Borexino to detektor wypełniony 278 tonami ciekłego scyntylatora (mieszanina pseudokumenu PC i krystalicznego fluoru PPO), mierzący neutrina słoneczne w czasie rzeczywistym. Jest umieszczony w laboratorium Gran Sasso (tym samym, w którym wcześniej działał GALLEX), głęboko pod ziemią (równoważnik ok. 3800 m wody - redukcja strumienia mionów o czynnik rzędu miliona). Jego głównym celem jest wykrywanie neutrin berylowych. Budowa trwała przez wiele lat i została ukończona 15 V 2007 r. a w następnym dniu wykonano pierwsze pomiary.



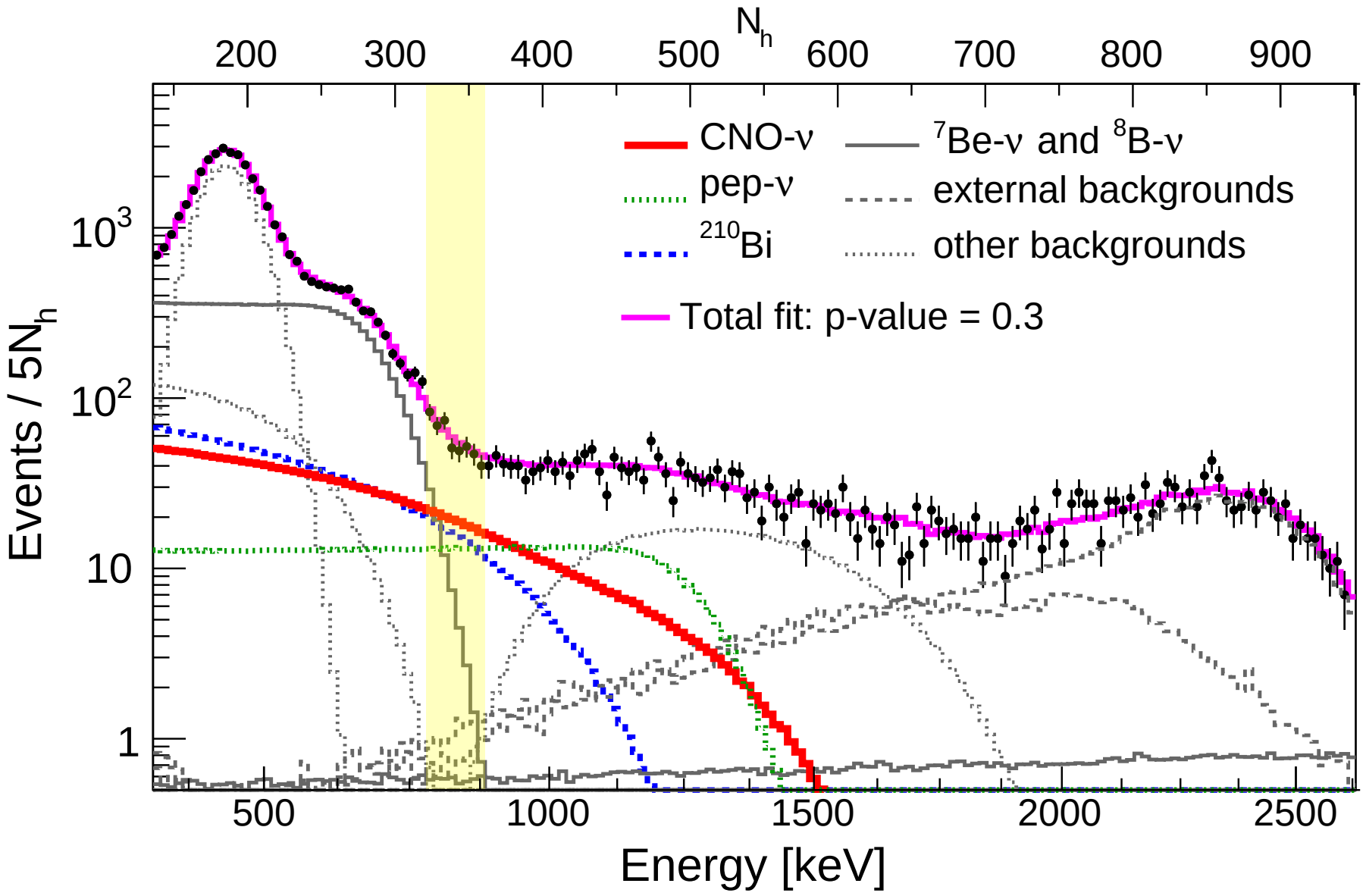
Schemat detektora Borexino

Wyniki z pierwszych 246 dni ciągłych obserwacji (opublikowane w sierpniu 2008 r.) prowadzonych przy pomocy części detektora (w której jest zawarte 100 ton scyntylatora) są w bardzo dobrej zgodności z modelem MSW-LMA (Large Mixing Angle czyli duży kąt mieszania). Ten model przewiduje, że oscylacje neutrin są zdominowane przez oscylacje próżniowe przy niskich energiach ($< \mathbf{2}$ MeV) oraz przez oscylacje rezonansowe, zachodzące w centrum Słońca, przy wyższych energiach ($> \mathbf{5}$ MeV), z gładkim przejściem dla energii pośrednich. Borexino jest pierwszym eksperymentem, który jest w stanie mierzyć neutrina z obydwu zakresów.

Przez następne lata kolejne porcje wyników eksperymentu były dozowane oszczędnie. Informowano o niektórych szczegółowych wynikach (np. pomiarze strumienia neutrin pochodzą-

cych z cyklu p-p albo wykryciu neutrin pep) ale nie publikowano żadnych przełomowych danych.

W maju 2020 roku (publikacja elektroniczna, artykuł w $Nature$ ukazał się w październiku) ogłoszono, że po raz pierwszy udało się zmierzyć sygnał od neutrin pochodzących z cyklu CNO. Nie jest to może wynik, który powalałby na kolana, ale jest to dodatkowe potwierdzenie faktu, że modele Słońca są zadadniczo słuszne i że w jego wnętrzu część energii jest produkowana właśnie w tym cyklu.



Strumienie neutrin mierzonych przez Borexino

W 2022 roku opublikowano nowe wyniki obserwacji neutrin z cyklu CNO (przedstawione dalej dane i wykresy pochodzą z prac `arXiV:2205.15975` oraz *Vinyoles, Serenelli, Villante (2018)*). Brak sygnału od neutrin CNO wykluczono na poziomie 7 odchyleń standardowych (a już 3 odchylenia odpowiadają poziomowi ufności 99,7%) i stwierdzono, że dane pasują do wyższej zawartości węgla i azotu we wnętrzu Słońca. To jest kolejne potwierdzenie faktu, że – teoretycznie bazujące na bardziej realistycznych założeniach – modele o niskiej metaliczności (np. warianty modelu AGS09) gorzej pasują do obserwacji niż modele tworzone według starych reguł (np. warianty modelu GS98). Jak widać, ścieżki rozwoju nauki bywają dość kręte.

	GS98	AGSS09met	Obs
$\Phi(\mathrm{pp})$	$5.98(1 \pm 0.006)$	$6.03(1 \pm 0.005)$	$5.971^{+0.037}_{-0.033}$
$\Phi(\mathrm{pep})$	$1.44(1 \pm 0.01)$	$1.46(1 \pm 0.009)$	1.448 ± 0.013
$\Phi(\mathrm{hep})$	$7.98(1 \pm 0.30)$	$8.25(1 \pm 0.30)$	19^{+12}_{-9}
$\Phi(^7\mathrm{Be})$	$4.93(1 \pm 0.06)$	$4.50(1 \pm 0.06)$	$4.80^{+0.24}_{-0.22}$
$\Phi(^8\mathrm{B})$	$5.46(1 \pm 0.12)$	$4.50(1 \pm 0.12)$	$5.16^{+0.13}_{-0.09}$
$\Phi(^{13}\mathrm{N})$	$2.78(1 \pm 0.15)$	$2.04(1 \pm 0.14)$	≤ 13.7
$\Phi(^{15}\mathrm{O})$	$2.05(1 \pm 0.17)$	$1.44(1 \pm 0.16)$	≤ 2.8
$\Phi(^{17}\mathrm{F})$	$5.29(1 \pm 0.20)$	$3.26(1 \pm 0.18)$	≤ 85
Y_S	0.2426 ± 0.0059	0.2317 ± 0.0059	0.2485 ± 0.0035
R_CZ	0.7116 ± 0.0048	0.7223 ± 0.0053	0.713 ± 0.001

Porównanie aktualnych modeli Słońca opartych na starych i nowych założeniach

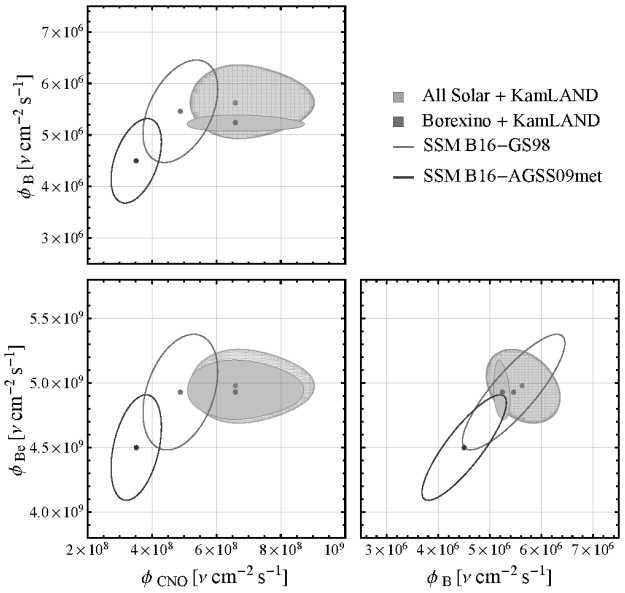


Figure 4. Results of the global analysis of solar neutrino and KamLAND reactor data (grey regions) and of Borexino only + KamLAND (green regions) in the Φ_B-Φ_{Be}, Φ_B-Φ_{CNO}, and Φ_{Be}-Φ_{CNO} planes. The predictions of high-metallicity SSM B16-GS98 model (red) and low-metallicity SSM B16-AGSS09met (blue) are also shown. The best fit values of $\Delta m^2_{21} = 7.50^{+0.17}_{-0.18} \times 10^{-5}\,\mathrm{eV}^2$ and $\tan\theta_{12} = 0.43^{+0.04}_{-0.02}$.

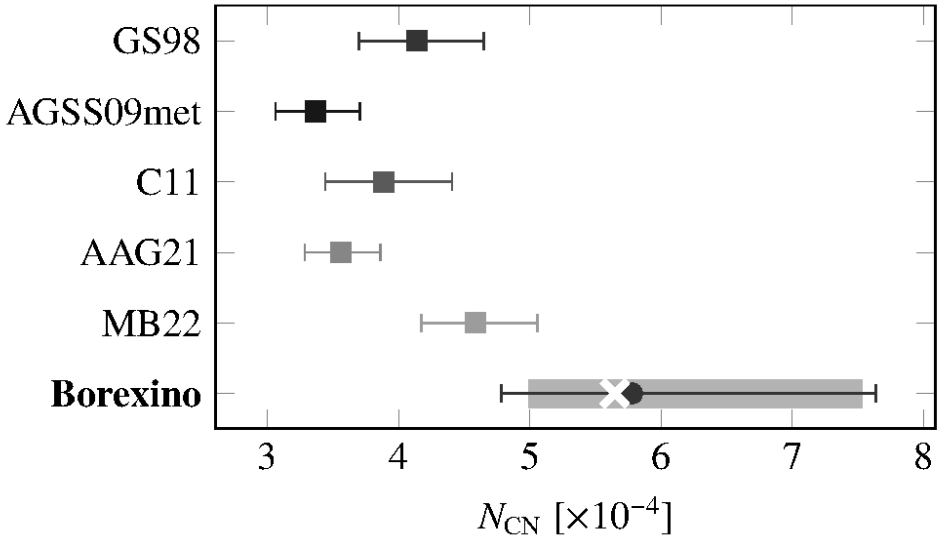


Figure 5. Comparison of abundance of (C + N)/H in the solar photosphere, N_{CN}, from spectroscopy (squares) and from the Borexino measurement (circle). The gray area highlights the uncertainty due to the precision of the CNO rate measurement. The white cross marks the result of the very same study repeated changing the reference SSM from the B16-GS98 to the B16-AGSS09met.

Porównanie aktualnych modeli Słońca z wynikami Borexino

9. Podsumowanie

Pod koniec 2001 roku problem modelu Słońca wydawał się być rozwiązany, gdyż wyjaśniono zagadkę neutrin i wyglądało na to, że od tej pory wystarczy stopniowo poprawiać dokładność Standardowego Modelu Słońca. Tymczasem nieco ponad dwa lata później $jak\ diabełek\ z\ pudełka$ wyskoczył problem z nowymi, teoretycznie lepszymi modelami ale dającymi gorsze przewidywania, i jak dotąd nie znalazł zadowalającego rozwiązania. Kto wie, ile jeszcze takich niespodzianek szykuje nam Słońce?