# Fizyka neutrin

- Źródła neutrin
- Neutrina reliktowe
- Geoneutrina
- Neutrina z wybuchu Supernowych
- Neutrina słoneczne
  - reakcje termojądrowe źródłem neutrin słonecznych
  - widmo energetyczne
  - metody detekcji
- Deficyt neutrin słonecznych
  - eksperymenty radiochemiczne (Homestake, GALLEX/GNO)
  - eksperymenty z licznikami Czerenkowa
    - (Kamiokande, SuperKamiokande, SNO)

**Model Standardowy**:

3 rodziny kwarków i leptonów o spinie 1/2

**Neutralne leptony – neutrina i antyneutrina :** 

- oddziałują tylko słabo
- neutrina i antyneutrina jedyne fundamentalne fermiony o masie równej zero
- w Naturze istnieją tylko lewoskrętne neutrina oraz prawoskrętne anyneutrina
- oddzielne zachowanie 3 liczb leptonowych
  L<sub>e</sub>, L<sub>u</sub>, L<sub>τ</sub>

Rodziny leptonowe : naładowany (  $e,\mu,\tau$  ) i neutralny lepton (  $v_e, v_\mu, v_\tau$ )



Dane ze zderzacza e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> LEP ( pomiar szerokości rezonansu Z<sup>0</sup>) są zgodne z istnieniem tylko 3 zapachów neutrin ( $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ )

# Silna ewidencja doświadczalna na oscylacje neutrin :

eksp. ze słonecznymi, atmosferycznymi, reaktorowymi i akceleratorowymi neutrinami

→ przynajmniej 2 typy neutrin mają masę i 3 zapachy leptonowe się mieszają

→ Model Standardowy wymaga modyfikacji

- neutrina ze źródeł naturalnych :
  - słoneczne
  - atmosferyczne
  - z wybuchu Supernowych
  - reliktowe (pozostałość po Wielkim Wybuchu)
  - z naturalnej promieniotwórczości Ziemi
- wiązki neutrin z akceleratorów i reaktorów jądrowych

#### Naturalne źródła neutrin



Strumienie neutrin ze źródeł naturalnych w funkcji energii neutrin

Neutrina reliktowe – pozostałość po Wielkim Wybuchu

• Produkcja neutrin  $v_e$ ,  $v_{\mu}$ ,  $v_{\tau}$  we wczesnym Wszechświecie w słabym procesie :

 $e^+ + e^- \leftrightarrow v + \bar{v}$ 

b. mały przekrój czynny na ten proces powoduje, że czas m-dzy zderzeniami dla powyższej reakcji staje się dłuższy niż czas ekspansji neutrin

- Neutrina wychodzą ze stanu równowagi termicznej z pozostałą materią i promieniowaniem przy kT < 3 MeV co odp. czasowi od Wielkiego Wybuchu t > 10<sup>-2</sup> s (T - temperatura, k - stała Boltzmanna)
- $\rightarrow$  odprzęgnięcie neutrin od materii i promieniowania oraz niezależna ekspansja
- Średnia gęstość liczby neutrin i antyneutrin (dla 3 zapachów) ≈ 340 cm<sup>-3</sup>
- Obecna temperatura neutrin reliktowych ~ 1.95 K
- $\rightarrow$  Bardzo niskie energie energie rzędu meV  $\rightarrow$  bardzo trudne do zaobserwowania

Kosmiczne tło neutrinowe dotychczas niemierzalne

- Neutrina pochodzące z rozszczepienia promieniotórczych izotopów uranu (U), toru (Th), potasu (K), radu (Ra) ... we wnętrzu naszej planety
- Rozpady  $\beta$  są źródłem antyneutrin elektronowych, strumień geoneutrin  $\phi \sim 6 \cdot 10^6$  cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>



#### Warstwowa struktura gwiazdy



### Neutrina z wybuchu Supernowych

### Ewolucja gwiazd o masie > 10 mas Słońca

Fuzja lżejszych pierwiastków w cięższe aż do osiągnięcia grupy żelaza ( <sup>56</sup>Fe ma max. energię wiązania na nukleon )

Gdy masa żelaznego jądra stanowi  $\approx 1.5 M_{SUN}$ ciśnienie grawitacyjne > ciśn. zdegenerowanego gazu elektronowego w żelaznym jądrze  $\rightarrow$  grawitacyjny kolaps jądra gwiazdy gęstość jądra rośnie do gęstości materii jądrowej  $\rho \approx 2 \cdot 10^{14} \text{ gcm}^{-3} \rightarrow \text{ powstrzymanie implozji}$ 

Podczas zapadania grawitacyjnego:- jądra Fe rozpadają się na neutrony i protony- zachodzi proces neutronizacjie^- + p  $\rightarrow$  n +  $v_e$ (wychwyt e^- przez protony)

# Powstaje gwiazda neutronowa

(jakby gigantyczne jądro atomowe składające się głównie z neutronów)

- Emisja neutrin elektronowych z procesu neutronizacji w ciągu milisekundy
- Po uzyskaniu gęstości materii jądrowej uwięzienie neutrin w jądrze gwiazdy (dla E<sub>v</sub> ~ 10 MeV średnia droga swobodna neutrin  $\lambda$  ~ 0.1 km ) 7

#### Wybuch supernowej



Zewnętrzne warstwy jądra gwiazdy i jej otoczka opadają na zdegenerowany rdzeń i odbijają się od niego → powstaje fala uderzeniowa rozchodząca się od środka na zewnątrz, stymulująca wybuch supernowej → uwolnienie uwięzionych neutrin

Poza neutronizacją produkcja (anty)neutrin (wszystkie zapachy) zachodzi także w procesach  $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \nu_e \overline{\nu}_e$ ,  $\nu_\mu \overline{\nu}_\mu$ ,  $\nu_\tau \overline{\nu}_\tau$ ,

gdzie pary e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> są generowane przez fotony ( pary  $v\overline{v}$  , e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> i  $\gamma$  w równowadze termicznej )

## Podczas ochładzania się gwiazdy neutronowej

ok. 99% uwolnionej energii grawitacyjnej ( E<sub>graw</sub> ≈ 17%M<sub>SUN</sub>c<sup>2</sup>) jest emitowane w postaci kilku-sekundowego rozbłysku neutrinowego ( ~10<sup>58</sup> neutrin)

- 1% energia kinetyczna eksplozji
- 0.01% fotony rozświetlające całą galaktykę

Świetlność neutrin L<sub>v</sub>  $\approx$  3 · 10<sup>53</sup> erg/ 3 sec  $\approx$  3 · 10<sup>19</sup> L<sub>SUN</sub> , L<sub>SUN</sub> – świetlność Słońca

#### Neutrina z wybuchu Supernowych



Jednoczesna obserwacja sygnału neutrinowego z Supernowej 1987A ( w ramach niepewności eksp.)



ObrazniebawWielkimObłokuMagellanaprzed wybuchem2 dni po wybuchu

Główny kanał detekcji  $\overline{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ 

Energia elektronów zarejestrowanych przez wodne liczniki Czerenkowa w eksp. Kamiokande (Japonia) oraz IMB (USA) i teleskop scyntylacyjny eksp. Baksan (Rosja)  $\rightarrow$  widmo energii neutrin, < E<sub>y</sub> > ~(10-15) MeV

- Ograniczenia na masę  $\overline{\nu}_{\rm e}$
- Informacje dot. sprzężeń neutrin w Modelu Standardowym

- Reakcje w jakich powstają neutrina słoneczne, zakres energii, detekcja
- Pomiary strumienia neutrin elektronowych docierających na Ziemię ze Słońca
  - $\rightarrow$  deficyt neutrin słonecznych  $\rightarrow$  oscylacje neutrin rozwiązaniem problemu
- Oscylacje neutrin ↔ neutrina mają masę

Reakcje termojądrowe zachodzące we wnętrzu Słońca : (procesy spalania wodoru i przekształcania go w hel)

- są źródłem energii słonecznej
- są intensywnym źródłem neutrin elektronowych

cykl proton-proton (pp):



Strumień neutrin słonecznych  $\phi(v) = 7 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 

99 % energii słonecznej pochodzi ze spalania wodoru ( cykl pp )



$$3. \quad {}^{3}\text{He} + {}^{3}\text{He} \rightarrow {}^{4}\text{He} + 2p$$

Aby otrzymać jedno jądro <sup>4</sup>He z reakcji 3 : 2 · reakcja 1 + 2 · reakcja 2 + reakcja 3

 $4p \rightarrow ^{4}He + 2e^{+} + 2v_{e} + 26.2 \text{ MeV} 90\% \text{ strumienia neutrin słonecznych}$   $\downarrow energia \text{ produkowana w procesach fuzji}$   $+ 2e^{+} + 2v_{e} + 26.2 \text{ MeV}$ 

Transformacja 4 jąder wodoru w jądro helu <sup>4</sup>He dostarcza energii 26.2 MeV 11 promieniowanej przez Słońce Cykl ppll : reakcje 1 – 3

reakcje syntezy <sup>3</sup>He i <sup>4</sup>He oraz przemiany <sup>7</sup>Be prowadzą do emisji dodatkowych niskoenergetycznych neutrin (Ev < 1 MeV)



Cykl pplll : reakcje 1 – 3

reakcje syntezy <sup>3</sup>He i <sup>4</sup>He oraz przemiany <sup>7</sup>Be i <sup>8</sup>B prowadzą do emisji wysokoenergetycznych neutrin ( Ev < 15 MeV ),

które mogą być mierzone w detektorach cząstek elementarnych



# Hydrogen burning: Proton-Proton Chains



Rejestracja elektronowych neutrin słonecznych – b. ważna dla potwierdzenia hipotezy reakcji termojądrowych w Słońcu<sup>14</sup> Strumień  $v_e$ [ cm<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>]

#### Widmo energetyczne neutrin słonecznych



w funkcji Ev, obliczone w Standardowym Modelu Słońca (Standard Solar Model, SSM)

- Szybkość reakcji wywoływanych przez  $v_e$ , będących podstawą ich detekcji, zależy od strumienia neutrin, energii progowej i przekroju czynnego nad progiem
- $\sigma \sim E_{\nu^3} \rightarrow$  neutrina o wyższych energiach ( z reakcji pep, rozpadu <sup>7</sup>Be i <sup>8</sup>B ) dają znaczący wkład do szybkości reakcji, mimo mniejszego strumienia niż neutrina "pp"



Wszystkie eksperymenty rejestrujące elektronowe neutrina słoneczne wykazały, że ich strumień jest mniejszy w porównaniu z przewidywaniami Standardowego Modelu Słońca

**Deficyt neutrin słonecznych** 

#### **Deficyt neutrin słonecznych**

Pierwsza obserwacja w eksperymencie radiochemicznym Homestake (kopalnia złota w Południowej Dakocie / USA, zbieranie danych od 1968 przez ok. 30 lat)



Pomiar produkcji izotopu argonu w reakcji Davisa – Pontecorvo :

 $\nu_{e}$  + <sup>37</sup>Cl  $\rightarrow$  <sup>37</sup>Ar + e<sup>-</sup>

Raymond Davis – autor eksp. Homestake, odkrywca neutrin słonecznych Bruno Pontecorvo – m. in autor hipotezy o oscylacji neutrin

- zbiornik z 615 tonami ( 380000 I ) związku chloru ( dichloroetylen C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub> )
- energia progowa dla tej reakcji Ev = 0.814 MeV ( teoretycznie eksp. czuły na  $v_e$  z <sup>7</sup>Be, ale praktycznie rejestruje neutrina z rozpadu <sup>8</sup>B )
- promieniotwórczy izotop argonu <sup>37</sup>Ar metodami chemicznymi jest wydzielany ze zbiornika, liczba atomów argonu szacowana ze stopnia promieniotwórczości próbki → wyznaczenie strumienia neutrin

(średni czas życia <sup>37</sup>Ar - 35 dni, częstość zachodzenia reakcji ~ 1 atom / 2 dni)

wielkie wyzwanie eksperymentalne – co dwa miesiące wydobycie ok. 30 atomów argonu spośród 2 · 10<sup>30</sup> atomów chloru w zbiorniku

#### Wyniki eksperymentu Homestake

#### Zmierzone strumienie neutrin słonecznych w jednostkach SNU

(Solar Neutrino Unit – jednostka tradycyjnie używana do opisu liczby reakcji wywoływanych przez neutrina słoneczne – odp. zachodzeniu 1 reakcji na sekundę na  $10^{36}$  atomów, 1 SNU =  $10^{-36}$ /s)



 $\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau$  ??

eksp. Davisa jest czuły tylko na  $v_e$ 

2002 – nagroda Nobla dla Raymonda Davisa, autora eksp. Homestake i jednego z pionierów astrofizyki neutrinowej Wyniki eksp. Homestake zostały potwierdzone przez kolejne eksp. neutrin słonecznych : eksp. radiochemiczne : GALLEX / GNO (Gran Sasso, Włochy), SAGE (Rosja) technika liczników Czerenkowa : Kamiokande i SuperKamiokande (Japonia) oraz SNO (Kanada)



Detektory radiochemiczne GALLEX / GNO i SAGE ( dziesiątki ton galu ) czułe tylko na  $v_e$ 

 $\nu_e$  +  $^{71}\text{Ga} \rightarrow ^{71}\text{Ge}$  + e<sup>-</sup>

Niska energia progowa dla tej reakcji E<sub>v</sub> = 0.233 MeV → rejestracja neutrin z cyklu ppl o energii poniżej 0.420 MeV GALLEX po raz pierwszy zarejestrował te neutrina Wydajność detekcji ~ 1 dla produkcji

kilku atomów Ge / dzień



Obserwacja neutrin słonecznych przez elastyczne rozpraszanie  $v_e$  na elektronach

$$\nu_{e}$$
 + e^-  $\rightarrow$   $\nu_{e}$  + e^-

Rozproszone elektrony o odp. dużej energii emitują promieniowanie Czerenkowa wykrywane przez fotopowielacze Ve

- czułość na neutrina słoneczne o energii Ev > 5 MeV ( neutrina borowe  $~^8B \rightarrow {}^8B^*$  + e<sup>+</sup> + v<sub>e</sub> )
- dla niższych energii dominuje tło od promieniotwórczości naturalnej – rozpady  $\beta$  )
- metoda detekcji czuła na kierunek neutrin (elektrony sa produkowane głównie w kierunku neutrin)

**Eksperyment SuperKamiokande** 

Detektor w starej kopalni pod górą Kamioka w Japonii

- Zbiornik o wysokości 40 m i średnicy 40 m wypełniony 50 000 tonami wody (H<sub>2</sub>O)
- Otoczony ok. 11 000 fotopowielaczy
- 1 km pod ziemią





**Eksperyment SuperKamiokande** 

Detektor w starej kopalni pod górą Kamioka w Japonii

- Zbiornik o wysokości 40 m i średnicy 40 m wypełniony 50 000 tonami wody (H<sub>2</sub>O)
- Otoczony ok. 11 000 fotopowielaczy
- 1 km pod ziemią

Obserwacja neutrin słonecznych przez elastyczne rozpraszanie  $\nu_{\rm e}\,$  na elektronach atomowych

 $\nu_{e}$  + e^-  $\rightarrow$   $\nu_{e}$  + e^-

Rozproszone elektrony o odp. dużej energii emitują promieniowanie Czerenkowa wykrywane przez fotopowielacze Ve

- czułość na neutrina słoneczne o energii Ev > 5 MeV ( neutrina borowe  $~^8B \rightarrow {}^8B^*$  + e<sup>+</sup> + v<sub>e</sub> )
- dla niższych energii dominuje tło od promieniotwórczości naturalnej – rozpady β)
- metoda detekcji czuła na kierunek neutrin (elektrony sa produkowane głównie w kierunku neutrin)



#### **Eksperyment SuperKamiokande**

$$\nu_e$$
 + e<sup>-</sup>  $\rightarrow$  e<sup>-</sup> +  $\nu_e$ 



Neutrina słoneczne rejestrowane w detektorze pochodzą głównie z reakcji charged current (CC)



Cosinus kąta m-dzy rozproszonym elektronem i kierunkiem Słońca

$$\nu$$
 + e<sup>-</sup>  $\rightarrow$   $\nu$  + e<sup>-</sup>



Wkład od neutrin wszystkich zapachów, które oddziałały w procesie neutral current (NC) jest mniejszy;  $\sigma_{NC} (v_e) \sim \sigma_{CC} (v_e) / 5$ 

$$\phi^{s\kappa} \approx \phi_{\nu e} + 0.154 \cdot (\phi_{\nu \mu} + \phi_{\nu \tau})$$

- eksp. SuperKamiokande zmierzył wyraźny
  sygnał neutrin pochodzących ze Słońca
- zmierzony strumień neutrin stanowi ok. 45% strumienia przewidywanego przez Standardowy Model Słońca

DANE / SSM =  $0.465 \pm 0.005$ 

Deficyt neutrin słonecznych

#### **Eksperyment SuperKamiokande**

### Rozkład energii elektronów zmierzony w procesie

 $\nu_e$  + e<sup>-</sup>  $\rightarrow$   $\nu_e$  + e<sup>-</sup>



### Neutrinogram Słońca z eksperymentu SuperKamiokande



Rzeczywisty rozmiar Słońca ~ 1/2 pixla

Niska przestrzenna zdolność rozdzielcza neutrinogramu wynikiem wielokrotnego rozpraszania kulombowskiego niskoenergetycznych elektronów z procesu v<sub>e</sub> + e<sup>-</sup> $\rightarrow$  v<sub>e</sub> + e<sup>-</sup>

#### **Eksperyment SNO**

(Sudbury Neutrino Observatory, Kanada, 1999 – 2006)

rozwiązanie zagadki neutrin słonecznych po ok. 35 latach : silny dowód na transformację wewnątrz Słońca neutrin  $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$  lub / i  $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ 

- kulisty akrylowy zbiornik o średnicy 12 m wypełniony 1000 t D<sub>2</sub>O – ciekły licznik Czerenkowa
- wewnętrzna (5300 t) i zewnętrzna (1700 t) osłona wodna
- promieniowanie Č mierzone przez ~ 9500 fotopowielaczy
- detektor w kopalni na głębokości ponad 2000 m





3 fazy eksperymentu : ( 3 różne techniki detekcji neutronów )

- tylko D<sub>2</sub>O
- D<sub>2</sub>O + 2 tony NaCl
- D<sub>2</sub>O + liczniki proporcjonalne wypełnione <sup>3</sup>He

### 3 metody obserwacji neutrin słonecznych :

- $v_{X}$  + e<sup>-</sup>  $\rightarrow v_{X}$  + e<sup>-</sup> rozpraszanie elastyczne
- $v_e^{}$  + d  $\rightarrow p + p + e^{-}$  proces poprzez prądy naładowane ( charged current, CC )
- $v_X + d \rightarrow p + n + v_X$  proces poprzez prądy neutralne (neutral current, NC)

# 3 techniki detekcji neutronów :

- $n + d \rightarrow t + \gamma + 6.25 \text{ MeV}$  faza I, tylko  $D_2O$
- $n + {}^{35}CI \rightarrow {}^{36}CI + \gamma + 8.6 \text{ MeV}$  faza II,  $D_2O + NaCI$

jądra sodu mają duży przekrój czynny na wychwyt neutronów  $\rightarrow$  dwukrotny wzrost wydajności na detekcję przypadków NC  $\rightarrow$  poprawa statystycznej separacji sygnałów NC i CC  $\rightarrow$  znaczący wzrost precyzji w pomiarze strumieni  $\nu_e$  i  $\nu_X$ 

•  $n + {}^{3}\text{He} \rightarrow p + t + 0.76 \text{ MeV}$  faza III, D2O + liczniki proporcjonalne wypełnione 3He

mniejsze korelacje m-dzy zmierzonymi strumieniami neutrin  $v_e$  i  $v_{X,}$  zmniejszenie niepewności w pomiarze kąta mieszania neutrin

#### **Budowa detektora SNO**



#### Fotopowielacze



#### http://www.sno.phy.queensu.ca

#### Widok dolnej części powłoki akrylowej i fotopowielaczy



### SNO – detekcja neutrin

- 1. <u>Elastyczne rozpraszanie</u> <u>neutrin na elektronach</u> (ES)
- Czułość na <u>wszystkie zapachy neutrin</u> ( proces NC ) – ale dominacja procesów z  $v_e$  *e* częstość (ES) ~  $\phi(v_e)$  + 0.154 (  $\phi(v_{\mu}) + \phi(v_{\tau})$  )
- Detekcja promieniowania Č rozproszonych elektronów

# 2. <u>Rozpraszanie na deuterze - CC</u>



- $\nu_e$  + d  $\rightarrow$  p + p + e<sup>-</sup>
- tylko  $v_e$  uczestniczą w tej reakcji
- detekcja promieniowania Č elektronów
- częstość reakcji (CC) ~ φ(ν<sub>e</sub>)



 $v_x + e^- \rightarrow v_x + e^-$ 

# 3. <u>Rozpraszanie na deuterze - NC</u>



• wychwyt neutronów przez deuter :

 $n + d \rightarrow t + 6.25 \text{ MeV } \gamma$ 

- detekcja promieniowania Č elektronów rozproszonych przez γ z wychwytu n
- pomiar całkowitego strumienia neutrin dla E<sub>v</sub> > 2.2 MeV (neutrina borowe)

częstość reakcji (NC) ~  $\phi(v_e) + \phi(v_u) + \phi(v_\tau)$ 



Przykładowy przypadek oddziaływania zarejestrowany przez fotodetektory eksperymentu SNO

# Wyniki pomiarów SNO (faza I + II)

Rozkłady energii i kąta rozpraszania

elektronów  $\rightarrow$  rozdzielenie wkładów od procesów ES, CC i NC

Jednostki [ 10<sup>6</sup> cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> ]

 $\phi_{cc} = 1.68 \pm 0.06 \pm 0.09 = \phi(v_e)$   $\phi_{NC} = 4.94 \pm 0.21 \pm 0.36 = \phi_{TOT}$   $= \phi(v_e) + \phi(v_\mu) + \phi(v_\tau)$   $\phi(v_e) / \phi_{TOT} \sim 1 / 3$ "znikanie" neutrin elektronowych

Zgodność z pomiarami fazy III <u>Standardowy Model Słońca</u>  $\phi_{TOT} = 5.05 \pm 1.00$ 



Wyniki eksperymentu SNO i Super-Kamiokande. Na osi poziomej znajduje się wynik pomiaru strumienia neutrin elektronowych, na osi pionowej wynik pomiaru strumienia pozostałych dwu neutrin.

$$v_e + d \rightarrow p + p + e^- \qquad v_X + d \rightarrow p + n + v_X$$
  
SNO SK  $v_e + e^- \rightarrow v_e + e^-$ 

• Zgodność zmierzonego <u>całkowitego</u> strumienia neutrin z przewidywaniami SSM

Silna ewidencja na transformację (~ 2/3 ) słonecznych neutrin elektronowych na  $\nu_{\mu}$ i  $\nu_{\tau}$  wewnątrz Słońca

Name	Location	Mass	Reaction	Start
Homestake	S.Dakota USA	615	<sup>37</sup> Cl(v <sub>e</sub> ,e <sup>-</sup> ) <sup>37</sup> Ar	1968 stopped
SAGE	Baksan, Russia	50	<sup>71</sup> Ga (v <sub>e</sub> ,e <sup>-</sup> ) <sup>71</sup> Ge	1990 stopped
Galex/GNO	Gran Sasso, Italy	30	<sup>71</sup> Ga (v <sub>e</sub> ,e <sup>-</sup> ) <sup>71</sup> Ge	1992 stopped
Kamiokande	Kamioka, Japan	2000	$\nu_{x}e^{\text{-}} \rightarrow \nu_{x}e^{\text{-}}$	1986 stopped
Super Kamiokande	Kamioka, Japan	50000	$\nu_x e^{\scriptscriptstyle -} \to \nu_x e^{\scriptscriptstyle -}$	1996
SNO	Sudbury, Canada	8000	$\nu_{\textbf{e}} d {\rightarrow} \textbf{ e}^{\text{-}} \textbf{ pp}$	1999 stopped
			$\nu_{x}d \rightarrow \nu_{x}$ np	2001 stopped
			$\nu_{x}e^{\scriptscriptstyle -} \to \nu_{x}e^{\scriptscriptstyle -}$	1999 stopped
Borexino	Gran Sasso, Italy	300	$\nu_{x}e^{\text{-}} \rightarrow \nu_{x}e^{\text{-}}$	2007
				soon
KamLand	Kamioka, Japan	1000	reactor antineutrinos	2001

#### Eksperymenty badające neutrina słoneczne

**Borexino** – detektor z ciekłym scyntylatorem, dotychczas wyniki dot. neutrin słonecznych z reakcji <sup>7</sup>Be i <sup>8</sup>B, planowane badania strumieni v z procesów ppl, pep i CNO

KamLand – detektor z ciekłym scyntylatorem dedykowany do badań antyneutrin reaktorowych, czuły także na neutrina słoneczne