

Promieniowanie naturalne badane w
eksperymentach neutrinowych jako źródło
informacji o strukturze Ziemi

Sławomir Mianowski
Nr albumu: 211 133
Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki

Praca licencjacka
na kierunku Fizyka Środowiska
w Zakładzie Fizyki Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych

Praca wykonana pod kierunkiem:
prof. Danuty Kielczewskiej
dr Katarzyny Grzelak
Uniwersytet Warszawski

Warszawa, wrzesień 2005

Streszczenie

W pracy tej ukazano rolę promieniowania naturalnego w poznaniu budowy i dynamiki procesów zachodzących wewnątrz naszej planety. Dokonano krótkiej charakterystyki modeli geochemicznych opisujących budowę Ziemi. Wykorzystując wiedzę o składzie chemicznym i stosunkach masowych pierwiastków w tych modelach, przeanalizowano sposób wyznaczenia całkowitej masy U, Th i K wewnątrz planety oraz ilości ciepła powstającego w ropadach tych pierwiastków. Opisano projekt KamLAND, który poprzez detekcję geantyneutrino podjął próbę weryfikacji przewidywań teoretycznych.

Słowa kluczowe

Promieniowanie naturalne, antyneutrino, rozpad beta, budowa geologiczna Ziemi, strumień ciepła, projekt KamLAND.

Dziedzina pracy (kody wg programu Socrates-Erasmus)

13200

Spis treści

1	Wstęp	2
2	Wprowadzenie do fizyki neutrin	4
2.1	Świat cząstek elementarnych	4
2.2	Rozpad β	5
2.3	Ilość ciepła wydzielana w rozpadzie β na przykładzie ^{238}U	8
3	Rozpady promieniotwórcze zachodzące we wnętrzu Ziemi	10
3.1	Pomiary ciepła emitowanego przez Ziemię	11
3.2	Modele geochemiczne Ziemi	13
3.3	Rola U, Th i K w procesie produkcji ciepła	14
4	Detekcja geo-antyneutrin	18
4.1	Od Kamiokande do KamLAND	18
4.2	Zasada pomiaru i rola tła	21
4.3	Pierwsze wyniki	26
4.4	Najnowsze dane	28
5	Podsumowanie i wnioski	30
A	Energia cząstki α	33
B	Masa jądra atomu i energia wiązania	34
C	Jednostki miar w projekcie KamLAND	37

Rozdział 1

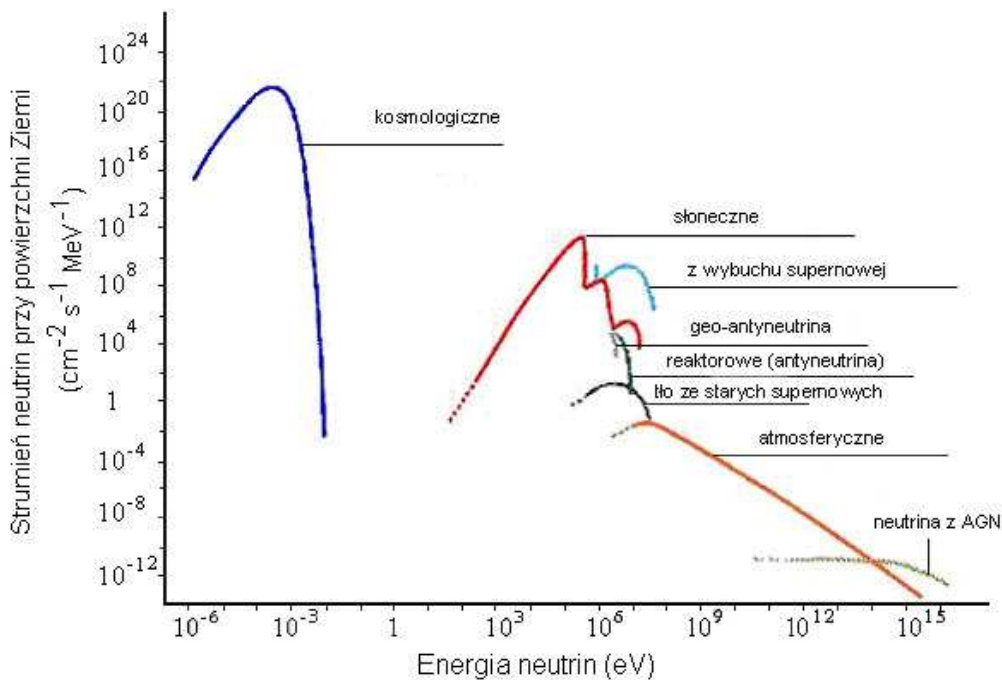
Wstęp

Neutrino są cząstkami elektrycznie obojętymi, o spinie $1/2\hbar$, bardzo słabo oddziaływującymi z materią. Należą one do rodziny leptonów i mają swój odpowiednik w postaci antycząstek. Ostatnie eksperymenty: Super-Kamiokande, SNO i KamLAND dowiodły, że neutrino oscylują, a co za tym idzie ich masa jest różna od zera. Źródłem tych cząstek są m.in. przemiany termojądrowe zachodzące w Słońcu, rozpady naturalnych pierwiastków promieniotwórczych na Ziemi oraz promieniowanie kosmiczne. Potrafimy wytwarzać je także sztucznie, co wykorzystywane jest w doświadczeniach akceleratorowych i reaktorowych. Należy sobie zdać sprawę, że przez każdy centymetr kwadratowy naszego ciała, w każdej sekundzie przenika kilka miliardów neutrin i antyneutrin z różnych źródeł i o różnej energii. Skalę tego procesu przedstawia rys. 1.1, który prezentuje źródła neutrin wraz z wartościami energii i strumienia przy powierzchni Ziemi. Neutrino oprócz tego, iż stanowią integralną część naszego środowiska, odgrywają ważną rolę poznawczą w otaczającym nas świecie. Problematyką neutrin zajmują się liczne eksperymenty, między innymi: Super-Kamiokande, KamLAND (w Japonii), MINOS (w Stanach Zjednoczonych), SNO (w Kanadzie), CHOOZ (w Europie).

W pracy tej postanowiono skupić się nad projektem KamLAND, który oprócz swego głównego celu, jakim jest badanie antyneutrin reaktorowych, zajął się ich “naturalnym” odpowiednikiem, a mianowicie geo-antyneutrinami.

Na podstawie ich analizy naukowcy próbują rozwikłać zagadkę dotyczącą wciąż nie do końca poznanej budowy geologicznej naszej planety. Starają się oni oszacować ilość ciepła jaka powstaje w reakcjach naturalnych ropadów promieniotwórczych. Informacje uzyskane dzięki tym cząstkom mogą przyczynić się do poznania dynamiki procesów zachodzących wewnątrz Ziemi, kierunku ich zmian oraz wynikającego z tego wpływu na środowisko.

W rozdziale pierwszym pracy po krótko przybliżono historię neutrin, przedstawiono problemy z jakimi zmagali się fizycy, by je zarejestrować, a co



Rysunek 1.1: Źródła neutron wraz z wartościami strumienia i energii. AGN - neutron z aktywnych jąder galaktyk.

za tym idzie potwierdzić hipotezę Pauliego o ich istnieniu. W dalszej części zaprezentowano podstawowe modele geochemiczne: CI, BSE, FR I i FR II, w oparciu o które stara się obecnie opisywać wnętrze Ziemi oraz rozlokowanie pierwiastków w skorupie i płaszczu planety. Dysponując wiedzą o stosunkach masowych wybranych pierwiastków w modelach, przybliżono sposób wyznaczenia całkowitych mas: uranu, toru i potasu oraz ich powiązania z produkowanym ciepłem. W rozdziale czwartym przedstawiono budowę detektora KamLAND, zasadę jego działania - sposób detekcji antyneutrino. Zaprezentowano pierwsze dane, które obejmują 145.1 dni prowadzenia pomiarów. Zakresem badań obejmują one głównie antyneutrino reaktorowe dla których geo-antyneutrino stanowiły tło. Przedstawiono też najnowsze wyniki opublikowane w lipcu 2005 roku, obejmujące 749.1 dni pracy detektora, które w całości poświęcone były detekcji i analizie geo-antyneutrino.

Rozdział 2

Wprowadzenie do fizyki neutrin

2.1 Świat cząstek elementarnych

Obecnie rozróżniamy dwa podstawowe rodzaje cząstek. Ich podział opiera się na zróżnicowaniu ze względu na spin ¹: całkowity (np. \hbar , $2\hbar$ ².) - mówimy wtedy o bozonach i połówkowy (np. $\frac{1}{2}\hbar$, $\frac{3}{2}\hbar$) - w przypadku fermionów. Oddziaływania fundamentalne są efektem wymiany cząstek pośredniczących, które są bozonami. Do rodziny fermionów należy sześć kwarków i sześć leptonów, które są podstawowymi składnikami materii. Jak dowiemy się później, każdej cząstce towarzyszy także odpowiednia antycząstka. Neutrina należą do rodziny leptonów, mają zerowy ładunek, bardzo małą masę i oddziałują słabo. Szczegółowy podział cząstek przedstawiają tabelki 2.1, 2.2.

Cząstka	Zapach			$\frac{Q}{ e }$
leptony	e^-	μ^-	τ^-	-1
	ν_e	ν_μ	ν_τ	0
kwarki	u	c	t	$+\frac{2}{3}$
	d	s	b	$-\frac{1}{3}$

Tablica 2.1: Fundamentalne składniki materii.

Kwarki swobodnie nie występują w przyrodzie. Mogą one tworzyć dwie konfiguracje: bariony, co odpowiada stanowi trójkwarkowemu (QQQ) oraz

¹Spin jest to własny moment pędu danej cząstki w układzie w którym cząstka spoczywa. Własny oznacza tu taki, który nie wynika z ruchu danej cząstki względem innych cząstek, lecz tylko z samej natury tej cząstki. Każdy rodzaj cząstek elementarnych ma odpowiedni dla siebie spin [1].

² $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, $h = 6,6260755(40) \times 10^{-34} J \cdot s$ - stała Plancka

Typ oddziaływania	Cząstka pośrednicząca
silne	gluon (G)
elektromagnetyczne	foton (γ)
słabe	W^\pm, Z^0
grawitacyjne	grawiton (g)

Tablica 2.2: Bozony pośredniczące. Grawiton jak do tej pory pozostał nieodkryty.

mezony, zbudowane z kwarka i antykwarka ($Q\bar{Q}$). Przykłady obu przedstawia tabelka 2.3.

Bariony	Skład	Mezony	Skład
p	uud	π^+	$u\bar{d}$
n	udd	K^0	$d\bar{s}$
Λ	uds	K^-	$\bar{u}s$
Ω^-	sss	ω^0	$u\bar{u}$

Tablica 2.3: Przykładowe hadrony i ich budowa kwarkowa.

2.2 Rozpad β

W historii fizyki neutrina zajmują szczególne miejsce. Można powiedzieć, iż same wdarły się one w świat cząstek elementarnych, tłumacząc reakcję rozpadu β , dla której, jak się wydawało, nie były spełnione fundamentalne zasady zachowania energii i pędu:

$$n \longrightarrow p + e^- \dots \quad (2.1)$$

Początkowo zakładano, iż w reakcji 2.1 w wyniku rozpadu powstaje tylko proton i elektron. Przypuszczano, iż przebiega ona analogicznie do rozpadu α , jak to ma miejsce np. w przypadku ameryku:

$${}_{95}^{241}Am \longrightarrow {}_{93}^{237}Np + \alpha \quad (2.2)$$

Energia powstającej w tej reakcji cząstki α jest dokładnie określona i wynosi³:

$$E_\alpha = \frac{m_{Am}^2 c^4 + m_\alpha^2 c^4 - m_{Np}^2 c^4}{2m_{Am} c^2} \quad (2.3)$$

gdzie: c - prędkość światła, m_{Am} - masa ameryku, m_{Np} - masa neptuna, m_α - masa cząstki α .

Widmo energii w rozpadzie α jest zatem dyskretne (rys. 2.1). Tęgo samego spodziewano się po rozpadzie β . Tymczasem okazało się, że mamy do czynienia z widmem ciągłym elektronu (rys. 2.2), gdzie maksymalna energia elektronu (E_{emax}), przy założeniu zerowej masy neutrina, wynosi:

$$E_{emax} = E_n - E_p \quad (2.4)$$

gdzie: E_n - energia neutronu, E_p - energia protonu.

Oznacza to, iż musi istnieć trzeci produkt reakcji 2.1, który charakteryzuje się zerowym ładunkiem, niedużą masą i bardzo słabo oddziałuje z materia. Takim obiektem jest właśnie neutrino (antyneutrino), co z języka włoskiego oznacza: mały neutron. Prawidłowo zapisana reakcja 2.1 ma postać:



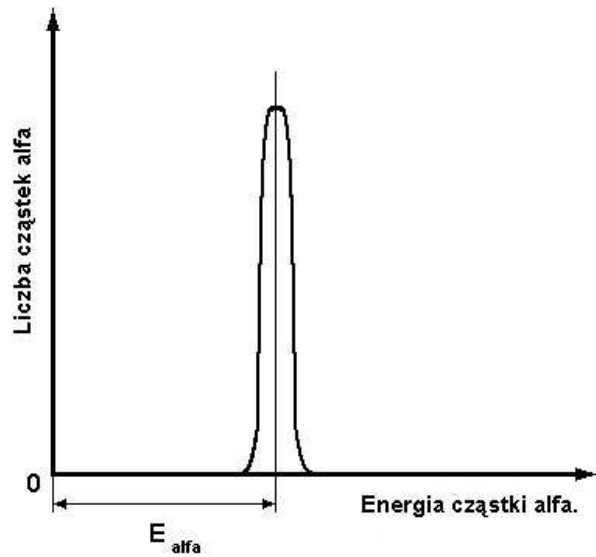
Reakcję tą nazywamy rozpadem β^- , który polega na samorzutnej przemianie neutronu w proton wraz z emisją elektronu i antyneutrino. W odróżnieniu od rozpadu β^+ (2.6), do którego zajścia potrzebne jest dostarczenie energii z zewnątrz, może ona wystąpić samoistnie.



Istnienie neutrin zapostulował Pauli w 1930 roku, a jego hipoteza czekała jeszcze blisko 30 lat na jej pierwsze doświadczalne potwierdzenie. Już rok później (1931) drugi wielki fizyk Paul Adrien Maurice Dirac, wysunął przypuszczenie, że każda cząstka musi mieć swój odpowiednik w postaci antycząstki, tzn. cząstki o tej samej masie i czasie życia, ale przeciwnym znaku ładunku i momentu magnetycznego. Dziś wiemy, że w przyrodzie występują między innymi protony i antyprotony, elektrony i pozytony, neutrony i antyneutrony. Tak też jest w przypadku neutrin (ν) i antyneutrin ($\bar{\nu}$). Pozostał zatem tylko problem potwierdzenia ich występowania. Problem tkwił w bardzo słabym oddziaływaniu neutrin (antyneutrin) z materią. Przekrój czynny (σ)⁴ tych leptonów dla energii rzędu 1 MeV wynosi ok. $10^{-19}\text{b} = 10^{-47}\text{m}^2$,

³Wyprowadzenie wzoru na energię cząstki α znajduje się w Dodatku A.

⁴ σ jest miarą prawdopodobieństwa zajścia reakcji na jednostkę czasu i na jednostkę strumienia padających cząstek. Jednostka: 1 barn [$1\text{b}=10^{-28}\text{m}^2$]



Rysunek 2.1: Widmo dyskretne cząstek α .

co sprawia, że mimo ich dużego strumienia (L)⁵ (np. na Ziemi dla neutrin słonecznych: $L \sim 6 \times 10^{10} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) detekcja neutrin jest bardzo trudna. O powadze ówczesnej sytuacji niech świadczą słowa Pauliego: *“Zrobiłem coś strasznego. Zaproponowałem cząstkę, której nie sposób zarejestrować”* [2]. Jednak, jak się okazało, taka sytuacja ma też swoje dobre strony. Neutrino i ich antycząstki mogą dostarczyć nam niezmięnionej informacji o swym źródle nawet po przebyciu odległości rzędu setek tysięcy kilometrów.

Pierwsze rezultaty pojawiły się w 1956 roku, gdy Frederick Reines i Clyde Cowan odkryli oddziaływania antyneutrin pochodzących z reaktora jądrowego w Savannah River. Ich plan zakładał, że skoro potrzeba warstwy wody o grubości 10^{20}cm , aby zaobserwować oddziaływanie pojedynczego antyneutrina, to 10^{20} antyneutrin wystarczy, aby doszło do oddziaływania jednego z nich w warstwie wody o grubości 1cm.

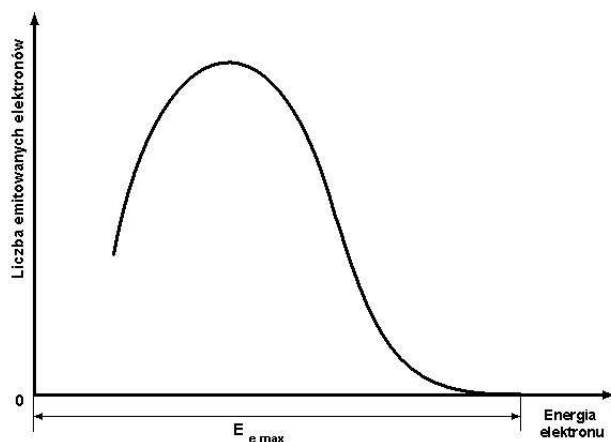
Reines i Cowan wykorzystali w swym eksperymencie reakcję odwrotną do (2.5), a mianowicie:



Energia progowa w równaniu 2.7 ma wartość 1.8 MeV. Proces ten jest charakterystyczny dla $\bar{\nu}$ w odróżnieniu od ν , które nie mogą oddziaływać z protonem, choćby ze względu na zasadę zachowania liczby leptonowej⁶. Własność

⁵Strumień równy jest liczbie neutrin emitowanych na jednostkę czasu i powierzchni.

⁶Dla leptonów liczba leptonowa wynosi 1, a dla antyleptonów -1.



Rysunek 2.2: Zarejestrowane widmo elektronu w rozpadzie β . $E_{e\max}$ - maksymalna energia elektronu.

ta została wykorzystana do rozróżnienia tych cząstek. Dla neutrin otrzymujemy:



Za ten eksperyment obaj badacze dostali w 1995 roku Nagrodę Nobla. Niestety Cowan już wtedy nie żył. Początkowo zakładano, iż neutrina nie mają masy. Wykrycie oscylacji⁷ zmieniło ten pogląd. Pomiar wykazuje jednak, iż masa neutrin jest bardzo mała. Porównane masy leptonów przedstawia tabela 2.4.

Lepton naładowany	Masa [MeV]	Lepton obojętny	Masa [MeV]
e	0.511	ν_e	≤ 0.003
μ	105.66	ν_μ	≤ 0.19
τ	1777	ν_τ	≤ 18

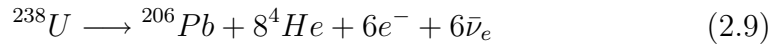
Tablica 2.4: Masy leptonów.

2.3 Ilość ciepła wydzielana w rozpadzie β na przykładzie ^{238}U

Uran, podobnie jak tor i potas, jest pierwiastkiem, który w sposób naturalny ulega rozpadowi w szeregu promieniotwórczym. Elementami takiego

⁷Przemiana jednego rodzaju (zapachu) neutrin w inny.

szeregu są rozpady β , którym towarzyszy emisja elektronu i antyneutrino elektronowego, co przedstawia nam poniższy sumaryczny zapis:



Elektron dysponując pewną energią kinetyczną, oddziałuje z materią w wyniku czego wydzielane jest do otoczenia ciepło. Podobnie jest w przypadku cząstki α , jednak jej energia kinetyczna, a zatem i emitowane ciepło są dużo mniejsze. Antyneutrino elektronowe oddziałują bardzo rzadko i ich wkład jest zaniedbywalny.

W celu obliczenia ilości ciepła wydzielonego w czasie procesu 2.9, wprowadźmy oznaczenia:

- m_U - masa atomu uranu (${}^{238}_{92}\text{U}$)
- m_{Pb} - masa atomu ołowiu (${}^{206}_{82}\text{Pb}$)
- m_α - masa cząstki α (${}^4_2\text{He}$)

Równanie zachowania energii dla 2.9 przyjmuje postać:

$$m_U = m_{Pb} + 8m_\alpha + 6m_e + Q \quad (2.10)$$

gdzie Q jest ilością energii wydzielonej w wyniku reakcji (głównie pod postacią energii kinetycznej elektronu, a także energii kinetycznej neutrino i cząstki α), masę neutrino w tym procesie możemy pominąć.

Masę jądra atomu możemy odczytać z odpowiednich tablic (m.in. układu okresowego pierwiastków), bądź wyliczyć ją uwzględniając całkowitą liczbę protonów i neutronów w jądrze oraz energię wiązania⁸. Podstawiając wszystkie wartości liczbowe w równaniu 2.10, możemy wyliczyć, iż ilość wydzielonego ciepła wynosi około 51 MeV. Jak się później okaże, reakcja 2.9 odegra istotną rolę w poznaniu wewnętrznej budowy naszej planety - Ziemi.

⁸Sposób wyliczania masy jądra atomu i energii wiązania przedstawiono w Dodatku B.

Rozdział 3

Rozpady promieniotwórcze zachodzące we wnętrzu Ziemi

Wraz z wykryciem neutrina i antyneutrina zaczęto sobie zadawać pytanie o ich pochodzenie oraz o informacje, jakich mogą one nam dostarczyć. W przypadku neutrin możemy dowiedzieć się m.in. o budowie Słońca (neutrina słoneczne). Antyneutrina z kolei, przyczyniają się do coraz lepszego poznania świata nam dużo bliższego, a mianowicie wnętrza Ziemi. Dlatego też im chciałbym poświęcić szczególną uwagę i wprowadzić przy tej okazji termin geo-antyneutrina, rozumiany jako antyneutrina pochodzenia ziemskiego. Źródłem geo-antyneutrin są reakcje rozpadu promieniotwórczego, zachodzące przede wszystkim w skorupie i płaszczu Ziemi w wyniku obecności pierwiastków promieniotwórczych.

Ziemia pod względem geologicznym jest zbudowana z kilku warstw, które różnią się między sobą zarówno składem chemicznym jak i własnościami fizycznymi. Jako główne z nich, licząc od powierzchni, możemy wyróżnić: skorupę, płaszcz i jądro.

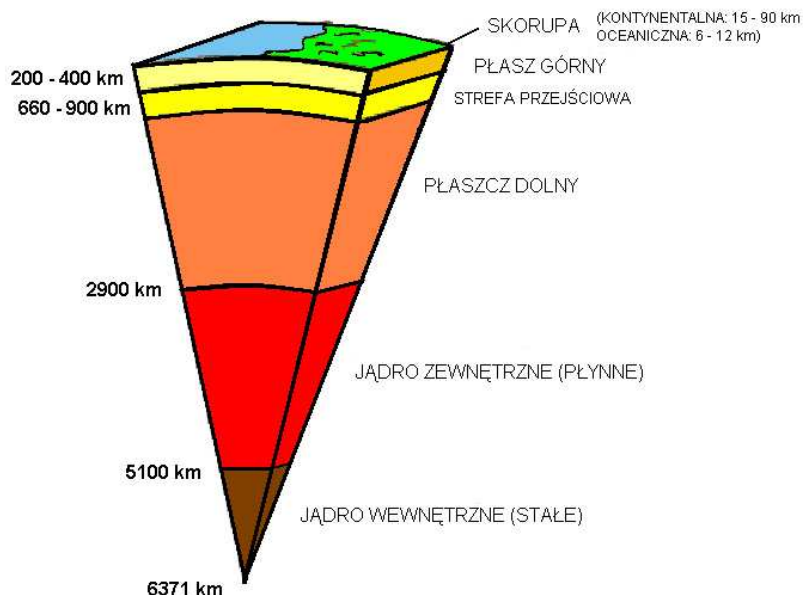
Skorupa jest najbardziej zewnętrzną i zarazem najcieńszą warstwą Ziemi. Stanowi ona $\sim 0.5\%$ promienia planety. Wyróżniamy jej dwa typy: część kontynentalną o grubości średnio 35-40 km, gęstości $\sim 2.8 \text{ g/cm}^3$, wieku ~ 2.8 mld lat i część oceaniczną: grubość - średnio 6-12 km, gęstość $\sim 2.5-3.3 \text{ g/cm}^3$, wiek - najstarsza część oceaniczna ~ 180 mln lat [3].

Następną warstwą jest płaszcz. W jego obrębie też wyróżniamy dwie warstwy: górną - sięgającą do głębokości 200-400 km oraz dolną od 660-900 do 2900 km, niekiedy rozdzielone strefą przejściową. Gęstość w nich wynosi odpowiednio $3.2-3.4 \text{ g/cm}^3$ i 6.0 g/cm^3 .

Ostatnią część stanowi jądro planety. Występuje ono od głębokości około 2900 km. Składa się z dwóch części: jądra zewnętrznego - występującego najprawdopodobniej w stanie ciekłym i stałego wewnętrznego - o promieniu

ok. 1250 km. Temperaturę jądra, przy panującym tam ogromnym ciśnieniu, ocenia się na ok. 6800 K, a gęstość osiąga 8 g/cm^3 .

Przekrojącą budowę planety przedstawia rys. 3.1.



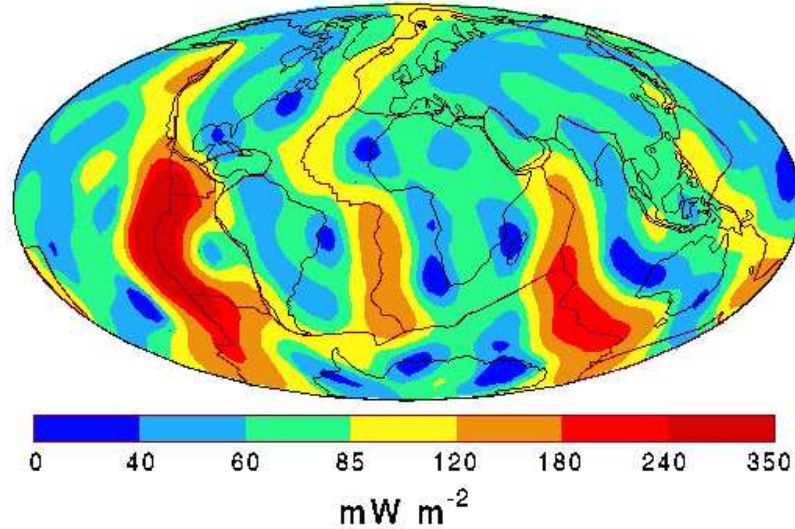
Rysunek 3.1: Uproszczony model budowy Ziemi [3].

3.1 Pomiary ciepła emitowanego przez Ziemię

W reakcji rozpadu β (2.9), wydzielana jest energia, w której skład wchodzi energia kinetyczna elektronu i neutrina. Ta pierwsza, jak już wspomniano, jest absorbowana przez otaczające skały i zamieniana na ciepło. Nasuwa się zatem pytanie: jak dużo nasza planeta go produkuje? By na to odpowiedzieć, musimy poznać kilka faktów.

Strumień ciepła emitowany przez Ziemię różni się w zależności od położenia geograficznego, co jest wywołane odmiennym rozlokowaniem pierwiastków promieniotwórczych we wnętrzu planety. Na rysunku 3.2 przedstawiona jest mapa strumienia ciepła emitowanego przez Ziemię, otrzymana na podstawie pomiarów wykonanych w 24000 punktach zaznaczonych na rys. 3.3 Na rysunku 3.2 obszary, których nie zbadano (dotyczy to zwłaszcza części oceanicznej), uzupełniono o dane oszacowane na podstawie wiedzy o budowie geologicznej i tektonicznej tych terenów. Dla części kontynentalnej wartość strumienia z dobrym przybliżeniem szacuje się na $H_K = 60 \text{ mW/m}^2$, z ko-

Strumień ciepła emitowany przez Ziemię.



Rysunek 3.2: Dystrybucja strumienia ciepła na Ziemi wyznaczona na podstawie punktów pomiarowych z rys. 3.2. Czarne linie reprezentują granice płyt tektonicznych i kontynentów. Wartość ciepła na niezbadanych terenach w części kontynentalnej i oceanicznej wyznaczono na podstawie szacowań geologicznych i tektonicznych[4].

lei dla części oceanicznej, stanowiącej ok. 70% powierzchni globu, strumień ciepła jest znany znacznie słabiej. Ma to zatem wpływ na naszą wiedzę o całkowitym strumieniu ciepła (H_T) oraz dokładność z jaką go znamy.

Spróbujmy przybliżyć H_T za pomocą strumienia pochodzącego od części kontynentalnej. Znając średni promień Ziemi ($R_Z = 6371$ km) i korzystając ze wzoru na pole powierzchni kuli (S) oraz przyjmując dla uproszczenia, że planeta ma kształt nie geoidy a kuli, dostajemy:

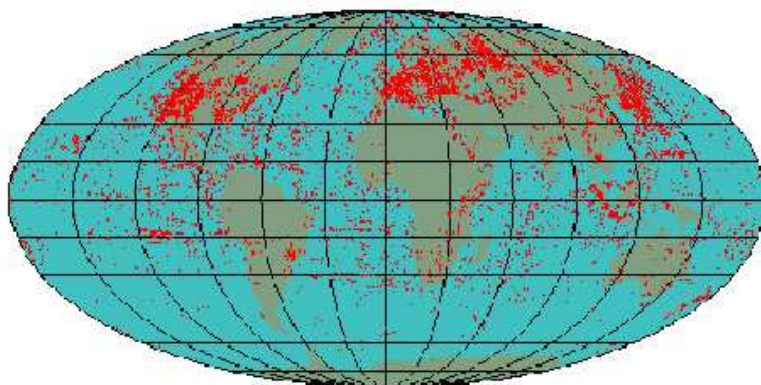
$$S = 4 \cdot \pi \cdot R_Z^2 = 5.1 \times 10^{14} m^2 \quad (3.1)$$

Zatem całkowita ilość ciepła produkowanego przez Ziemię wynosi:

$$H_T = H_K \cdot S = 30TW \quad (3.2)$$

Zmierzona w oparciu o punkty pomiarowe z rysunku 3.3 ilość ciepła wynosi $H_T = (44 \pm 1)$ TW. Podany błąd nie uwzględnia niepewności systematycznej związanej ze słabą znajomością części oceanicznej.

Punkty użyte do pomiaru ciepła emitowanego przez Ziemię



Rysunek 3.3: Rozlokowanie punktów (czerwony kolor) do pomiaru ciepła emitowanego przez Ziemię[4].

3.2 Modele geochemiczne Ziemi

Globalny skład Ziemi przybliżany jest za pomocą kilku modeli geochemicznych [5]. Różnią się one między sobą m.in. sposobem rozlokowania pierwiastków promieniotwórczych, jak i szacunkową ilością ciepła produkowanego przez Ziemię. Jednak żaden z nich, jak do tej pory, nie został w pełni potwierdzony i uznany za poprawny. Prowadzone obecnie badania nad geantytraminami mają za zadanie je zweryfikować.

Model chondryczny Ziemi (CI)

W modelu tym zakłada się, że skład pierwiastkowy Ziemi jest podobny do tego, jaki jest w najstarszych meteorytach, meteorytach chondrycznych. Stosunki masowe w tych meteorytach są następujące:

$$M_{Th}/M_U = 3.8, M_K/M_U = 7 \times 10^4, M_U/M_{Si} = 7.3 \times 10^{-8} \quad (3.3)$$

Uran i tor wnoszą porównywalny wkład do produkcji ciepła, każdy o czynnik ponad dwa razy mniejszy od potasu (porównaj tab. 3.4). Całkowity strumień ciepła jest szacowany tu na ok. 30 TW. Zakładana całkowita masa płaszczki Ziemi wynosi 4.1×10^{24} kg, co stanowi 68% masy globu. Koncentracja uranu w płaszczku to około 0.006 ppm.

Bulk Silicate Earth (BSE) Model

Model BSE także korzysta z informacji zawartej w meteorytach chondrycznych. Budowa części zewnętrznej (płaszczka i skorupa) jest wyznaczona na tej podstawie. W jądrze model zakłada brak uranu i toru. Stosunki masowe w części zewnętrznej to:

$$M_{Th}/M_U = 3.8, \quad M_K/M_U = 10^4, \quad M_U/M_{Si} = 9.4 \times 10^{-8} \quad (3.4)$$

Przewidywana według niego ilość ciepła, jaką produkuje Ziemia głównie z U i Th, to ok. 19 TW. Koncentracja uranu w płaszczu wynosi 0.01 ppm.

Fully Radiogenic (FR I) Model

Zakłada on stosunek K/U zgodny z ziemskimi pomiarami oraz stosunek Th/U taki jak w meteorytach chondrycznych. W modelu FR I ilości pierwiastków są tak przeskalowane, żeby otrzymać całkowity strumień ciepła 40 TW, co odpowiada wzrostowi o czynnik dwa w porównaniu do BSE. Koncentracja uranu w płaszczu wynosi około 0.03 ppm.

Zmodyfikowany Fully Radiogenic (FR II) Model

Model ten jest podobny do poprzedniego. Ilość U i Th też jest przeskalowana w stosunku do BSE, jednak całkowity strumień ciepła pochodzi wyłącznie od U i Th, z całkowitym pominięciem K. Koncentracja uranu w płaszczu w tym modelu wynosi ok. 0.04 ppm.

3.3 Rola U, Th i K w procesie produkcji ciepła

Geo-antineutrino pochodzące z rozpadu U, Th i K stanowią naturalne promieniotwórcze składniki Ziemi. Dostarczają one informacje o budowie wnętrza planety. W czasie rozpadów U, Th i K wydzielane są różne ilości energii (tab. 3.1). Każdy z tych pierwiastków charakteryzuje się też innymi własnościami. Tabela 3.2 przedstawia odpowiednio:

- czas połowicznego rozpadu pierwiastka ($\tau_{1/2}$)
- maksymalną energię $\bar{\nu}$ (E_{Max})
- ilość ciepła emitowanego z 1 kg (ϵ_H)
- ilość $\bar{\nu}$ emitowana z 1 kg w czasie 1 s ($\epsilon_{\bar{\nu}}$)

Istnieje ścisły związek pomiędzy strumieniem geoantyneutrino ($L_{\bar{\nu}}^{geo}$) (3.5), ilością ciepła (H_G) z rozpadu U, Th i K (3.6) oraz całkowitą masą (m_c) tych składników w Ziemi [6].

$$L_{\bar{\nu}}^{geo} = 7.4 \times m_c(U) + 1.6 \times m_c(Th) + 27 \cdot 10^{-4} \times m_c(K) \quad (3.5)$$

$$H_G = 9.5 \times m_c(U) + 2.7 \times m_c(Th) + 3.6 \cdot 10^{-4} \times m_c(K) \quad (3.6)$$

W powyższych wzorach masa wyrażona jest w jednostkach: 10^{17} kg, strumień geo-antyneutrino: 10^{24} s⁻¹ i ciepło: 10^{12} W. Ich zastosowanie umożliwia nam samodzielne wyznaczenie szukanych wielkości na podstawie wybranych modeli, co przedstawiono poniżej. Modele: FR I i FR II są modyfikacją BSE, zatem pominięto je w tych wyliczeniach.

Reakcja rozpadu	Q [MeV]
$^{238}U \longrightarrow ^{206}Pb + 8^4He + 6e^- + 6\bar{\nu}$	51.7
$^{232}Th \longrightarrow ^{208}Pb + 6^4He + 4e^- + 4\bar{\nu}$	42.7
$^{40}K \longrightarrow ^{40}Ca + e^- + \bar{\nu}$	1.32

Tablica 3.1: Reakcje rozpadu β dla U, Th i K ([6]).

Pierwiastek	$\tau_{1/2}$ [10^9 lat]	E_{Max} [MeV]	ϵ_H [W/kg]	$\epsilon_{\bar{\nu}}$ [$kg^{-1} \cdot s^{-1}$]
^{238}U	4.47	3.26	0.95×10^{-4}	7.41×10^7
^{232}Th	14.0	2.25	0.27×10^{-4}	1.63×10^7
^{40}K	1.28	1.31	0.36×10^{-8}	2.69×10^4

Tablica 3.2: Własności U, Th i K ([6]).

Chcąc znaleźć ciepło emitowane przez naszą planetę w wyniku rozpadów promieniotwórczych należy wyznaczyć całkowite masy tych pierwiastków w Ziemi (pozostałe pierwiastki w tym procesie mają znikomy wkład).

By to uczynić, niezbędna jest nam znajomość stosunków masowych pierwiastków w prezentowanych wcześniej modelach (3.3 i 3.4) oraz wiedza o całkowitej masie krzemu (m_{Si}) w Ziemi, którą szacuje się na ok. 10-15% masy planety, tj. $m_{Si}=8.96 \times 10^{23}$ kg. Otrzymane wartości całkowitych mas U, Th i K przedstawia tab.3.3. Niepewność zamieszczonych w niej wyników, według różnych autorów, oceniana jest na 10-15% [7].

Podstawiając otrzymane w tab. 3.3 wyniki do równań 3.5 i 3.6 otrzymujemy końcowe wartości powstałego ciepła i strumienia geo-antyneutrino. Prezentują to tabele: 3.4 i 3.5.

	Model		Jednostka
	CI	BSE	[kg]
m_U	0.65	0.84	10^{17}
m_{Th}	2.48	3.20	10^{17}
m_K	4.58	0.84	10^{21}

Tablica 3.3: Otrzymane wartości całkowitych mas U, Th i K dla modeli CI i BSE.

Model	CI	
Wielkość	$L_{\bar{\nu}}^{geo}$	H_G
Jednostka	$[10^{24} \cdot s^{-1}]$	$[TW]$
^{238}U	4.8	6.2
^{232}Th	4.0	6.7
^{40}K	123.7	16.5
Σ	132.5	29.4

Tablica 3.4: Ostateczne wartości produkowanego ciepła i strumienia ge-antyneutrín z rozpadu U, Th i K dla modelu CI.

Otrzymane w ten sposób wyniki pomiaru ciepła generowanego przez Ziemię z rozpadu U, Th i K, wyznaczone za pomocą równań: 3.5 i 3.6, są zgodne z tymi, które przytaczają autorzy [6].

Podsumowując:

- całkowitą masę pierwiastków U, Th i K można wyznaczyć z 15% niepewnością
- na tej podstawie możemy wyliczyć strumień ge-antyneutrín i ilość ciepła przez nie produkowaną

Model	BSE	
Wielkość	$L_{\bar{\nu}}^{geo}$	H_G
Jednostka	$[10^{24} \cdot s^{-1}]$	$[TW]$
^{238}U	5.9	7.6
^{232}Th	5.0	8.5
^{40}K	21.6	3.3
Σ	32.5	19.4

Tablica 3.5: Ostateczne wartości produkowanego ciepła i strumienia ge-antyneutrín z rozpadu U, Th i K dla modelu BSE.

- największy wkład do produkowanego ciepła w modelu BSE ma tor (jest on jednak porównywalny z wkładem uranu), zaś w modelu CI - potas
- największy wkład do wielkości strumienia geo-antyneutrin w obu modelach ma potas
- modele: CI i BSE przewidują odpowiednio, że ok. 75% i 50% całkowitego strumienia ciepła z Ziemi pochodzi z rozpadu U, Th i K.

Rozdział 4

Detekcja geo-antyneutrin

4.1 Od Kamiokande do KamLAND

KamLAND jest obecnie największym eksperymentem mającym na celu detekcję i poznanie własności niskoenergetycznych $\bar{\nu}$. Nazwę swą zawdzięcza skrótowi od słów: *Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector*. Powstał on na bazie dwóch poprzednich doświadczeń: Kamiokande (1983-1995) i Super-Kamiokande (od 1996).

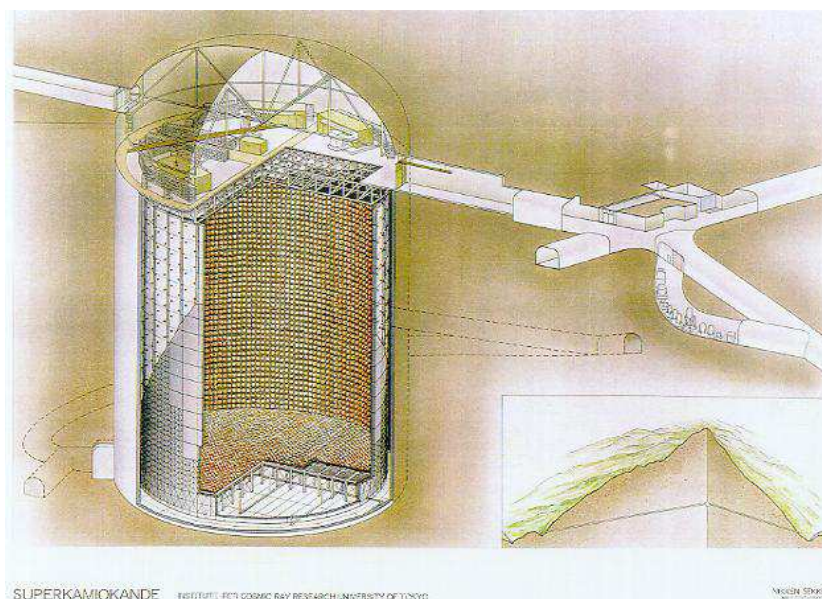
Projekt Kamiokande powstał w celu wykrycia zjawiska rozpadu protonu. Przyczyną zmiany zainteresowania i kierunku badań był m.in. fakt, iż neutrino stanowiły główne tło w owych poszukiwaniach. Zastosowanie w detektorze cieczy (w Kamiokande wody) o współczynniku załamania (n), umożliwiło szybsze poruszanie się cząstek niż światła, którego prędkość (v) w “nowym” ośrodku wyniosła $v = \frac{c}{n}$, gdzie c - prędkość światła. Zjawisku temu towarzyszy promieniowanie Czerenkowa, które polega na spójnej emisji fotonów wzdłuż toru naładowanej cząstki. Fotony te tworzą stożek świetlny, który rejestrowany jest przez fotodetektory, dlatego też bardzo ważne jest zachowanie dużej czystości wody. Efekt ten przypomina powstanie fali uderzeniowej, np. gdy samolot przekracza prędkość dźwięku. Promieniowanie Czerenkowa nie jest wywołane bezpośrednio przez neutrino. W procesie ich oddziaływania pojawiają się naładowane leptony: elektrony i miony, które mają duże prędkości i to one są w stanie emitować promieniowanie Czerenkowa. Fotony Czerenkowa rejestrowane są przez fotodetektory.

Następcą projektu Kamiokande jest już wspomniany wcześniej Super-Kamiokande. Rozmiary użytego detektora, w porównaniu do poprzednika, wzrosły dziesięciokrotnie. Oto niektóre parametry:

- wysokość walca: 41.4 m
- średnica walca: 39.3 m

- ilość super czystej wody: 50000 t
- ilość fotopowielaczy: 11146

Schemat budowy detektora Super-Kamiokande przedstawia rys 4.1.



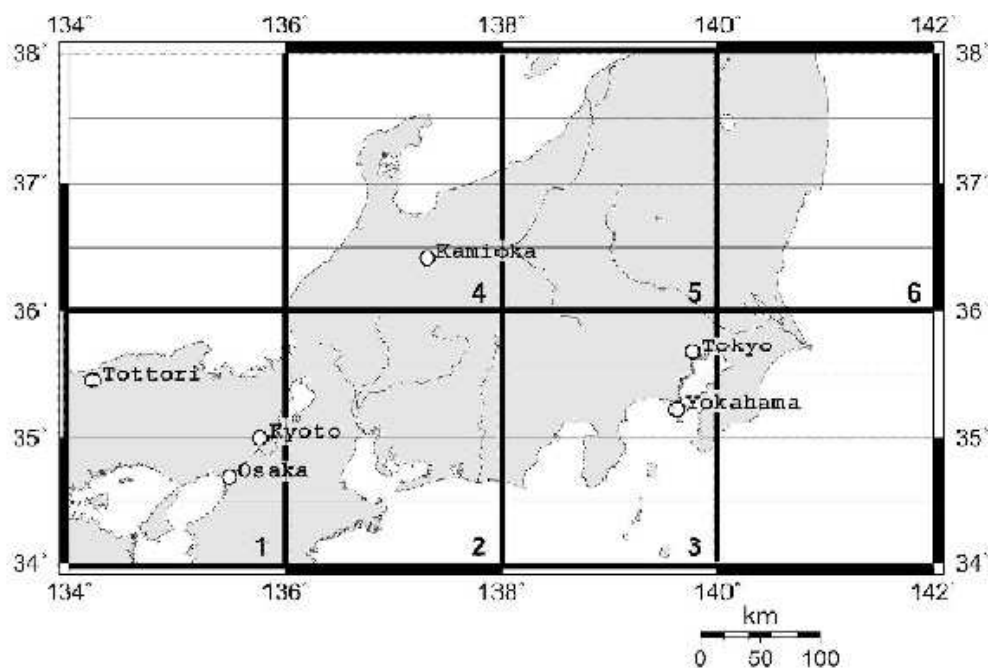
Rysunek 4.1: Uproszczony model budowy detektora Super-Kamiokande.

W XI 2001 roku miała miejsce poważna awaria detektora Super-Kamiokande. Zapadnięcie się jednego z fotopowielaczy wywołało falę uderzeniową, która dała początek “reakcji łańcuchowej”, w wyniku czego zniszczeniu uległo około 8000 innych fotopowielaczy. Detektor ten został jednak odbudowany i obecnie dalej prowadzi badania nad neutronami.

Budowa detektora KamLAND

Projekt KamLAND został zlokalizowany na miejscu eksperymentu Kamiokande, w starej kopalni, pod górą Kamioka w Japonii (rys. 4.2). Wybór lokalizacji nie był przypadkowy. Umożliwia on bowiem wykorzystanie znajdujących się w różnych odległościach 51 elektrowni atomowych w Japonii i 18 w Korei Południowej do przesyłu strumienia antyneutrino elektronowych w kierunku detektora. W eksperymencie tym chciano sprawdzić, czy antyneutrino reaktorowe także podlegają zjawisku oscylacji.

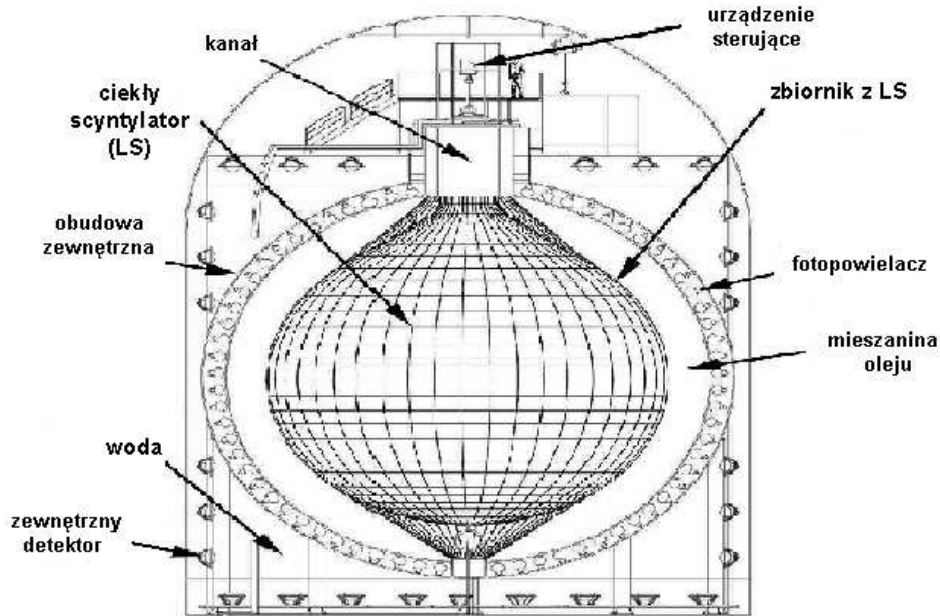
“Sercem” KamLANDu jest sferyczny zbiornik o średnicy 13 m wykonany z przezroczystego nylonu o grubości 135 μm , zawierający 1 kt ultra czystej cieczy, tzw. ciekły scyntylator (LS), który jest mieszaniną w



Rysunek 4.2: Lokalizacja projektu KamLAND.

80% dodekanu, 20% 1,2,4-Trimetylobenzenu i 1.52 g/l 2,5-Dipentyloksazolu [8]. Całość jest otoczona drugą sferyczną konstrukcją wykonaną ze stali o średnicy 18 m. Pomiędzy tymi powierzchniami znajduje się specjalna mieszanina oleju, której zadaniem jest izolacja od promieniowania zewnętrznego. System detektorów stanowi zestaw 1879 fotopowielaczy zamontowanych po wewnętrznej stronie zbiornika zewnętrznego, z czego 1325 o średnicy 43.18 cm i 554 starszych, pochodzących jeszcze z eksperymentu Kamiokande, o średnicy 50.8 cm. Zbiornik ten jest z kolei otoczony przez 3.2 kt wody i 225 następnymi fotopowielaczami, które tworzą zewnętrzny detektor promieniowania Czerenkowa (OD). Czulość detektora wewnętrznego została ustalona na 200 zliczeń, co odpowiada energii ok. 0.7 MeV, jednak wartość ta maleje do 120 zliczeń w ciągu 1 ms, co umożliwia pomiar niższych energii. Budowę KamLANDu przedstawia rys. 4.3.

Detektor wewnętrzny jest wykalibrowany przy użyciu promieni γ pochodzącymi z takich pierwiastków jak: ^{68}Ge , ^{65}Zn , ^{60}Co i Am-Be, rozmieszczonych w różnych miejscach wzdłuż jego osi pionowej. Zapewnia to prawidłowy pomiar energii w zakresie 0.5-7.6 MeV, który został oparty na liczbie wykrytych fotoelektronów, z uwzględnieniem poprawek na dokładność fotopowielaczy, gęstość ich rozmieszczenia, kąt pomiaru, a nawet cień rzucony przez zawieszane liny oraz pochłanianie światła (atenuacja) przez ciekły



Rysunek 4.3: Budowa detektora KamLAND.

scyntylicator i mieszaninę oleju.

4.2 Zasada pomiaru i rola tła

W detekcji antyneutrino elektronowych KamLAND posługuje się reakcją 4.1, jaka zachodzi w ciekłym scyntylatorze:

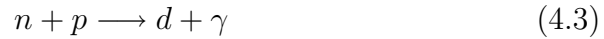


Identyfikacja oddziaływania antyneutrino z protonem okazała się możliwa dzięki metodzie opóźnionych koincydencji, czyli zbieżności dwóch sygnałów, których źródłem są produkty reakcji 4.1: n i e^+ . Ulegają one bowiem następującym oddziaływaniom:

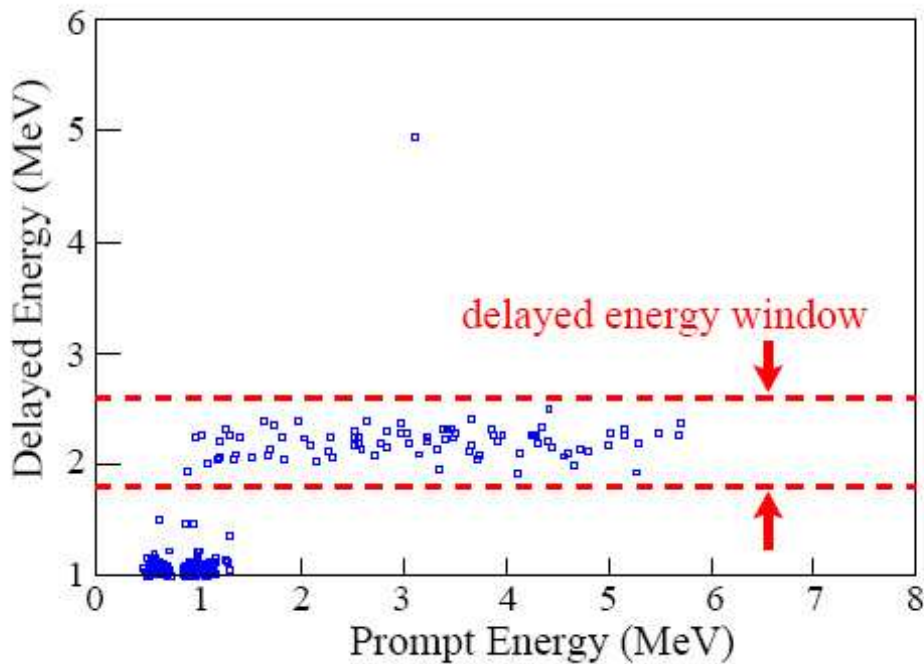
- pozyton anihiluje z elektronem w wyniku czego otrzymujemy dwa kwanty γ



- dochodzi do wychwytu neutronu na protonie - powstaje deuter oraz opóźniony o ok. $200 \mu\text{s}$ w stosunku do reakcji 4.2 kwant γ o energii 2.2 MeV



Rejestrowaną energię fotonów z wychwytu neutronu na protonie w funkcji energii pozytonu przedstawia rys. 4.4.



Rysunek 4.4: Rejestrowana energia fotonów z wychwytu neutronu na protonie w funkcji energii pozytonu (prompt energy) [8]. Przypadki o energii pozytonu ok. 0.7 MeV pochodzą z opóźnienia układu wyzwalania. Punkty znajdujące się pomiędzy czerwonymi, przerywanymi liniami odpowiadają sygnałom powstałym w wyniku wychwytu neutronu na protonie.

Powstałe w tych reakcjach kwanty γ powodują wybicie elektronów z powłok atomowych, bądź też ulegają reakcji odwrotnej do 4.2 i z powrotem konwertują do pary e^- i e^+ . Powstałe elektrony, przy przejściu przez materię, powodują przejście atomów do stanu wzbudzonego, te z kolei powracając do podstawowego emitują fotony, które są rejestrowane przez fotopowielacze.

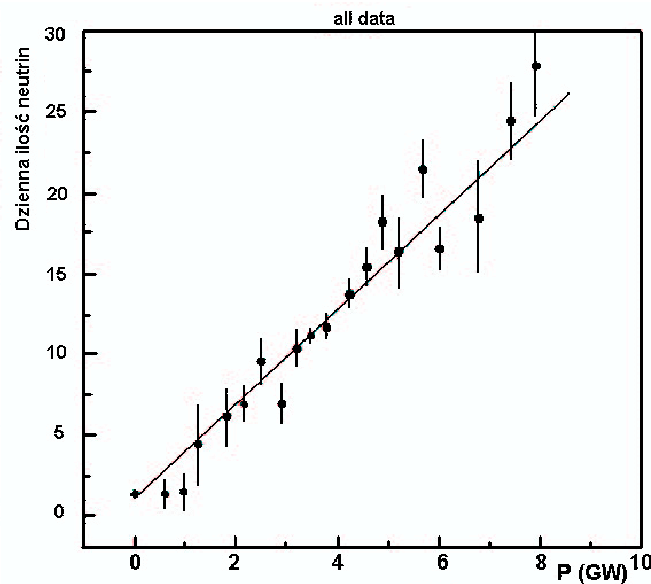
Jednym z pierwszych zadań programu było oszacowanie liczby antyneutrino reaktorowych jaka powinna być rejestrowana przez detektor. Ponad 79% strumienia (L) docierającego do KamLANDu pochodzi z 26 elektrowni

położonych w odległości od 138 do 214 km. Strumień ten zależy od mocy reaktora (P) i jest do niego proporcjonalny jak:

$$L \sim P/4\pi R^2 \quad (4.4)$$

gdzie R jest odległością między reaktorem a detektorem, $\Delta P_{sys} = \pm 2\%$ - błąd systematyczny pomiaru mocy reaktora

Otrzymuje się w ten sposób liniową zależność dziennej liczby antyneutrino reaktorowych od mocy reaktora. Liczbę $\bar{\nu}_e^{reakt.}$ w zależności od P przedstawia rysunek 4.5.

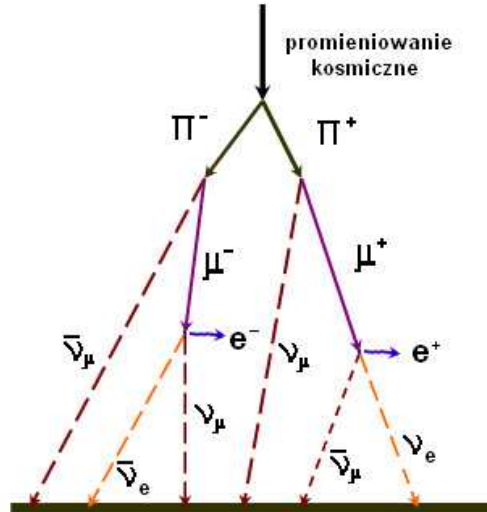


Rysunek 4.5: Dzienna ilość rejestrowanych antyneutrino reaktorowych w zależności od mocy reaktora [9].

Problem w pomiarach stanowiło tło, pochodzące m.in. z promieniowania kosmicznego i naturalnej promieniotwórczości Ziemi, które imitowało sygnały pochodzące z oddziaływań antyneutrino reaktorowych w detektorze.

Promieniowanie kosmiczne oddziaływując z górną warstwą atmosfery, powoduje powstawanie pionów π^\pm , które ulegają rozpadowi (rys. 4.6) na miony i neutrino atmosferyczne:



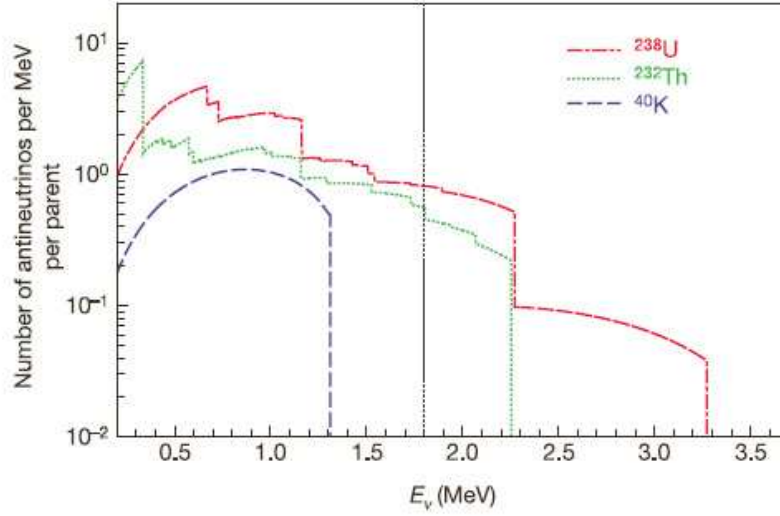


Rysunek 4.6: Rozpad pionów i mionów w atmosferze ziemskiej.

Analogiczne reakcje zachodzą dla π^- i μ^- .

Ich przejściu przez detektor towarzyszy dostateczna ilość promieniowania, by powstał w nim fałszywy sygnał. Umieszczenie całego projektu ok. 2700 m pod ziemią znacznie ograniczyło to zjawisko, jednak całkowicie go nie wyeliminowało. Także otaczające detektor skały są źródłem promieniowania γ i neutronów. Zbieżność w czasie sygnałów: fotonów o energii ok. 2.2 MeV oraz emitowanych fotonów (ze wzbudzonych atomów), powoduje zaakceptowanie przypadku jako kandydata na oddziaływanie antyneutrino z reaktora. By zidentyfikować te przypadki i oddzielić je od właściwych danych zastosowano, okalający część wewnętrzną detektora, zbiornik z wodą (OD). Skuteczność tej metody izolacji wynosi ponad 92%, a przy zastosowaniu jeszcze ochronnej warstwy z oleju oraz metody koincydencji, która wydatnie zmniejsza tło, wzrasta powyżej 99%.

Kolejnym problemem okazały się geo-antyneutrino. Leptony te, jak już wspomniano w rozdziale pierwszym, pochodzą z promieniotwórczych reakcji rozpadu m.in. toru, uranu i potasu. Nie były one tutaj pożądanym efektem, gdyż fałszowały wyniki pomiarów antyneutrin reaktorowych. Jedynie antyneutrino pochodzące z potasu nie stanowią problemu. Jak pokazuje nam rys. 4.7, ich maksymalna energia jest zbyt niska, by zostały one zarejestrowane przez KamLAND, dla którego dolna granica rejestrowanej energii wynosi 1.7 MeV.



Rysunek 4.7: Widmo energii antyneutrino emitowanych w rozpadach U, Th i K [10]. Pionowa linia przedstawia wartość energii poniżej której KamLAND nie rejestrował przypadków.

W celu eliminacji pozostałych przypadków tła postanowiono wykorzystać fakt, iż energia geo-antineutrino jest niższa niż tych pochodzących z reaktorów jądrowych. Progową energię, poniżej której rejestrowane przypadki były uważane za tło, ustalono na 2.6 MeV. Skąd taka wartość? Przecież energia antyneutrino elektronowych ją przewyższa (tab. 3.2).

Przeanalizujmy zatem dokładniej równanie 4.1. Zapisując dla tej reakcji zasadę zachowania energii oraz pomijając energię kinetyczną neutronu (można uznać, że on spoczywa) otrzymujemy:

$$E_{\bar{\nu}} + m_p = m_{e^+} + E_{e^+}^{kin} + m_n \quad (4.7)$$

gdzie: odpowiednio $E_{\bar{\nu}}$, $E_{e^+}^{kin}$, m_p , m_{e^+} , m_n - energia: $\bar{\nu}$, kinetyczna pozytonu, masy: protonu, pozytonu, neutronu.

Stąd $E_{e^+}^{kin}$ wynosi:

$$E_{e^+}^{kin} = E_{\bar{\nu}} - (m_n - m_p) - m_{e^+} = E_{\bar{\nu}} - 0.78 MeV \quad (4.8)$$

Podstawiając za $E_{\bar{\nu}}$ wartość 3.26 MeV otrzymamy: 2.48 MeV. Jak więc widać geo-antineutrino emitowane z ^{238}U i ^{232}Th wnoszą w pomiar wkład o energii < 2.49 MeV. Zatem by wyeliminować te przypadki, wartość progową energii ustalono na 2.6 MeV.

W późniejszym procesie pozyton anihiluje z elektronem (równanie 4.2) w wyniku czego wydzielana jest energia równa $2 \times m_e$. Zatem energię, jaką rejestruje detektor (oznaczymy ją jako $E_{rejestr.}$), możemy zapisać jako:

$$E_{rejestr.} = E_{e^+}^{kin} + 2 \times m_e \quad (4.9)$$

4.3 Pierwsze wyniki

KamLAND miał za zadanie potwierdzić oscylacje $\bar{\nu}$, a co za tym idzie zweryfikować “nową” teorię, iż neutrino mają masę różną od zera. Dane zebrane po 145.1 dniach pomiaru (162 tony·rok¹) i opublikowane w 2002 roku[8], przedstawiają się następująco:

- oczekiwana liczba przypadków $\bar{\nu}_e$ (N_{exp}), przy założeniu, że nie mają masy, wyniosła: 86 ± 5.6
- liczba przypadków pochodząca od tła (N_{tla}), czyli m.in. geo-antineutrino, wyniosła: 0.95 ± 0.99
- zmierzona liczba $\bar{\nu}_e$ (N_{zm}) wyniosła: 54

Dysponując tymi wartościami możemy wyznaczyć stosunek zmierzonej liczby antyneutrino elektronowych pomniejszonych o liczbę przypadków tła do oczekiwanej liczby przy założeniu, że antyneutrino nie oscylują:

$$\begin{aligned} N &= \frac{N_{zm} - N_{tla}}{N_{exp}} \\ &= 0.611 \end{aligned} \quad (4.10)$$

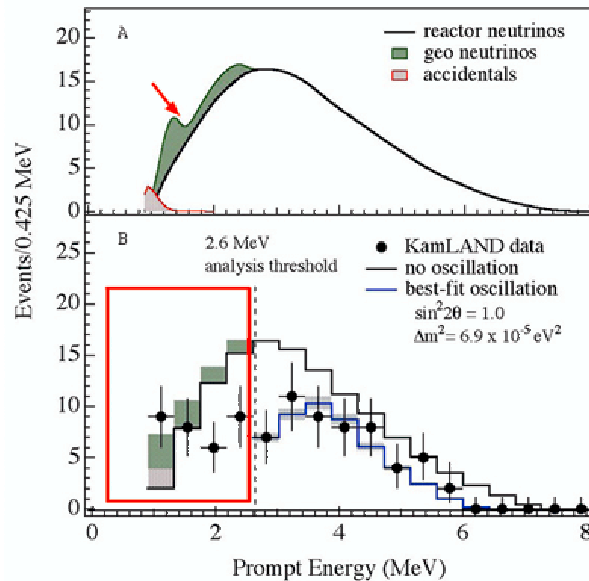
Błąd systematyczny wyniósł w tym przypadku: $\Delta N_{sys} = 0.041$, natomiast błąd statystyczny: $\Delta N_{stat} = 0.085$. Ostateczny wynik możemy zapisać jako:

$$N = 0.611 \pm 0.085 \pm 0.041$$

By stwierdzić, czy otrzymany wynik jest zgodny z wartością oczekiwaną w ramach trzech odchyłeń standardowych, przeprowadzono test 3σ (4.11). Jego wynik okazał się negatywny, tzn. zaobserwowano wyraźne znikanie antyneutrino elektronowych, a tym samym otrzymane dane, podobnie, jak w SNO, zaprzeczyły założeniu zerowej masy neutrino. Prawdopodobieństwo, że prezentowane wyniki w projekcie KamLAND są zgodne z Modelem Standardowym wyniosło poniżej 0.05%.

$$|N_{exp} - (N_{zm} - N_{tla})| < 3 \cdot (\Delta N_{sys}^2 + \Delta N_{stat}^2)^{1/2} \quad (4.11)$$

¹Wyjaśnienie pojęcia *ekspozycji* oraz jej jednostki: tona·rok znajduje się w Dodatku C.



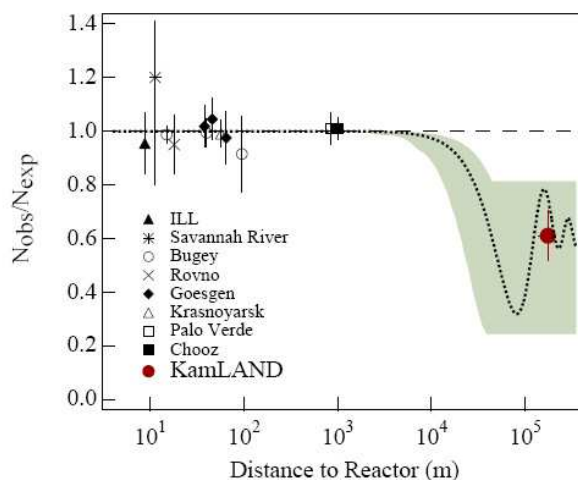
Rysunek 4.8: Widmo energii antyneutrino elektronowych[8]. Część A przedstawia widmo antyneutrino bez uwzględnienia oscylacji. Część B - linia czarna przedstawia ile powinno być antyneutrino jeśli nie ma oscylacji, linia niebieska - dopasowanie do wyników pomiarowych przy założeniu, że antyneutrino oscylują. Kolorem zielonym oznaczono geo-antyneutrino, zaś różowym - pozostałe przypadki tła.

Rys. 4.8 przedstawia widmo energii antyneutrino elektronowych. Część A przedstawia spektrum energii, gdy zmiany zapachu nie wzięto pod uwagę. Część B prezentuje wyniki pomiarów wraz z uwzględnionymi błędami. Linia czarna przedstawia ile powinno być antyneutrino jeśli nie ma oscylacji, linia niebieska - dopasowanie do wyników pomiarowych przy założeniu, że antyneutrino oscylują. Przerywaną linią pionową oznaczono wartość graniczną energii, poniżej której rejestrowane przypadki uważane były za tło. Kolorem zielonym oznaczono geo-antyneutrino, zaś różowym - pozostałe przypadki tła.

Liczba geo-antyneutrino, która najlepiej odpowiada temu dopasowaniu to: 4 z ^{238}U i 5 z ^{232}Th .

Z kolei rys. 4.9 prezentuje stosunek zmierzonej liczby neutrino reaktorowych do spodziewanej w funkcji odległości od reaktora dla KamLANDu i poprzednich eksperymentów. Krzywa kropkowana odpowiada oscylacjom, zaś linia przerywana ich brakowi.

Dysponując oszacowaną wartością strumienia geo-antyneutrino, podjęto próbę wyznaczenia ilości ciepła produkowanego z rozpadu U i Th. Okazało się



Rysunek 4.9: Stosunek zmierzonej liczby neutronów do spodziewanej w funkcji odległości od reaktora[8]. Kropkowana linia odpowiada przypadkowi występowania oscylacji, przerywana (pozioma) - brak oscylacji neutronów.

jednak, że ekspozycja jest w tym przypadku zbyt mała. Wartość ciepła, przy uwzględnionej liczbie danych, mogła przyjąć dowolną wartość z przedziału 0-110 TW.

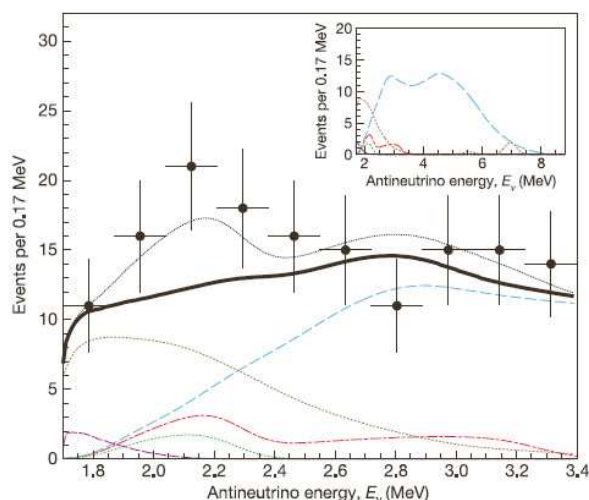
Podsumowując, w 2002 roku w projekcie KamLAND zaobserwowano zjawisko oscylacji dla antyneutronów elektronowych i dokonano wstępnego oszacowania liczby geo-antyneutronów.

4.4 Najnowsze dane

Najnowsze wyniki uzyskane w KamLAND, opublikowane 28 lipca 2005 [11] w "Nature", dostarczają nowych informacji na temat ilości ciepła produkowanego przez Ziemię. Dane opracowane w tym artykule obejmują 749.10 ± 0.50 dni pracy detektora, co odpowiada ekspozycji: 836.80 ± 0.60 ton·rok.

Sposób detekcji cząstek był identyczny z tym prezentowanym w podrozdziale 3.2. Jednak tu za główny cel postawiono sobie analizę geo-antyneutronów. Całkowita liczba zarejestrowanych w czasie doświadczenia $\bar{\nu}_e$ o energii z zakresu 1.7-3.4 MeV wyniosła 152. Otrzymane w ten sposób widmo energii przedstawia rys. 4.10.

Na przytoczoną wartość składają się antyneutrony pochodzące z rozpadu Th i U, jak i pozostałe przypadki odgrywające tu rolę tła. Do tych ostatnich należy zaliczyć neutrony powstałe w wyniku oddziaływania cząstki



Rysunek 4.10: Rozkład energii antyneutrino [11]. Punkty z błędami - dane doświadczalne; czarna linia - spodziewane spektrum energii; gruba czarna linia - spodziewane spektrum z wyłączeniem geo-antineutrino; linia: czerwona - spodziewany sygnał z uranu, zielona - z toru, niebieska - tło z $\bar{\nu}_e$ reaktorowych, brązowa - tło od $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$, purpurowa - przypadkowe koincydencje.

α (z rozpadu ^{210}Po) z ^{13}C (w reakcji: $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$). Powstały w wyniku tej reakcji neutron ulega wychwyceniu na protonie z opóźnioną o ok. $200 \mu\text{s}$ emisją sygnału, który imituje ten z rozpadu β . Liczbę wszystkich neutronów wyznaczono na 93 ± 22 , zaś tych, które dają fałszywy sygnał, oszacowano na 42 ± 11 . Innym źródłem tła są antyneutrino reaktorowe, których liczbę w tym przedziale energii wyznaczono na 80.4 ± 7.2 . Pozostałe przypadki, pochodzące m.in. z promieniowania kosmicznego, wnoszą znikomy wkład. Całkowitą liczbę tła oszacowano na 127 ± 13 . Biorąc pod uwagę podane informacje, liczbę geo-antineutrino oszacowano na 25^{+19}_{-18} .

Uzyskane przez naukowców dane wykazały, iż górny limit ilości ciepła wytwarzanego przez Ziemię w wyniku rozpadu Th i U wynosi 60 TW. Nieduża statystyka pomiarów nadal nie pozwala na określenie, który z geochemicznych modeli jest prawidłowy.

Dotychczasowe rozważania pokazują, iż bardzo ważną rolę w procesie poznawczym ilości produkowanego ciepła w Ziemi odgrywa statystyka. Wciąż zbyt mała liczba danych powoduje, że przytoczone w tej pracy wartości obciążone są dużymi niepewnościami. Uniemożliwia to jednoznaczny identyfikację poprawnego modelu opisującego budowę Ziemi. Widać więc, że niezbędne jest dalsze prowadzenie eksperymentu.

Rozdział 5

Podsumowanie i wnioski

Odkrycie neutrin zapoczątkowało narodziny nowej dziedziny nauki, której zakres zastosowania daleko wykracza poza fizykę cząstek elementarnych. Lep-
tony te, z jednej strony umożliwiły wyjaśnienie reakcji rozpadu β , z drugiej -
zmuszają do zweryfikowania założeń Modelu Standardowego o zerowej masie
neutrin na skutek wykrycia oscylacji.

Neutrino są jednak przede wszystkim wszechobecna częścią naszego
środowiska. Pozwalają na jego dalsze poznanie, a w szczególności dostarczają
informacji o bilansie cieplnym Ziemi.

Przeprowadzone metodami termicznymi pomiary wykazują, że ilość
emitowanego przez Ziemię ciepła wynosi około 44 TW. Wartość ta
nie uwzględnia jednak w sposób precyzyjny części oceanicznej, która stan-
owi ponad 70% powierzchni globu. Powodem tego jest mała liczba punktów
pomiarowych.

Bardzo ważnymi, jeśli nie najważniejszymi elementami w bilansie ciep-
nym planety okazały się: uran, tor i potas. Ich wkład został wyznaczony w
oparciu o modele geochemiczne, które opisują stosunki masowe tych pier-
wiastków. Szacuje się, że ilość ciepła jaka towarzyszy rozpadom U, Th i K
to 19 TW w przypadku modelu BSE i 30 TW - w modelu CI.

Znikomy przekrój czynny na oddziaływanie neutrin sprawia, że ich re-
jestracja wymaga niezwykle wyrafinowanych metod badawczych. Okazało
się jednak, że taka sytuacja ma też swoje dobre strony i może zostać wyko-
rzystana w geofizyce. Zarejestrowane neutrino i ich antycząstki dostarczają
niezmienionej informacji o swym źródle! Wykorzystując ten fakt, za cel po-
stawiono sobie dokładniejsze poznanie geologii planety, gdyż jak do tej pory
nie znaleziono jednoznacznego sposobu na rozstrzygnięcie, który z modeli opi-
sujących budowę Ziemi jest poprawny.

Taką próbę weryfikacji podjął eksperyment KamLAND. Uzyskane do
tej pory dane uniemożliwiają jednak identyfikację, który z modeli geoche-

micznych jest właściwy. Mała statystyka rejestrowanych geo-antyneutrino oraz duże tło sprawiają, iż wyznaczona ilość ciepła obciążona jest dużą niepewnością. Górna granica wydzielanego ciepła z rozpadu uranu i toru wynosi 60 TW.

Pomiar strumienia geo-antyneutrino, a co za tym idzie ciepła emitowanego przez Ziemię w wyniku rozpadów promieniotwórczych, przyczyni się do poznania dynamiki procesów zachodzących wewnątrz Ziemi, kierunku ich zmian oraz wynikającego z tego wpływu na środowisko. Przykładem tego mogą być procesy odpowiedzialne za trzęsienia ziemi i wybuchy wulkanów.

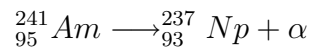
Bibliografia

- [1] www.wikipedia.pl
- [2] F. Reines, wykład noblowski, *Postępy Fizyki* 47, 423 (1996)
- [3] <http://eduseek.interklasa.pl/artykuly/arttykul/ida/2323/>
- [4] http://geophysics.ou.edu/geomechanics/notes/heatflow/global_heat_flow.htm
- [5] Mc. Donough, S. Sun, *Chem. Geol.* 120, 223 (1995)
- [6] arXiv:hep-ph/0409152 v1, G. Fiorentini, M. Lissia, F. Mantovani and R. Vannucci, *Geo-Neutrinos: a short review*, (2004)
- [7] W. F. McDonough, *Compositional Model for The Earths Core*, pp. 547-568. *In The Mantle and Core* (ed. R.W. Carlson.) *Vol. 2 Treatise on Geochemistry* (eds. H.D. Holland and K.K. Turekian), Elsevier-Pergamon, Oxford (2003)
- [8] arXiv:hep-ex/0212021 v1, K. Eguchi, S. Enomoto, K. Furuno, *First Results from KamLAND: Evidence for Reactor Anti-Neutrino Disappearance.*, 09.12.2002
- [9] prof. A. Z. Żarnecki. *Elementy fizyki cząstek elementarnych*, wykład VIII: *Neutrino (2)*
- [10] T. Araki, S. Enomoto, *Nature: Neutrino Geophisics and Observation of Geo-neutrinos at KamLAND.*, vol 436 (28.07.2005)
- [11] T. Araki, *et al. Nature* 436, 499 - 503 (2005)
- [12] www.fuw.edu.pl/marta/Jadra_dalekie_od_stabilnosci.pdf

Dodatek A

Energia cząstki α

Przykładem dwuciałowej reakcji rozpadu jest rozpad ameryku. W wyniku tego procesu otrzymujemy cząstkę α i neptun. Sumaryczny zapis tego procesu wygląda następująco:



Zapisując zasadę zachowania pędu i energii dla tej reakcji uzyskujemy:

$$p_{\text{Np}} = p_{\alpha}$$

$$E_{\text{Am}} = m_{\text{Am}}c^2 = E_{\text{Np}} + E_{\alpha}$$

Stosując przekształcenia otrzymujemy:

$$E_{\text{Np}} = E_{\text{Am}} - E_{\alpha} = m_{\text{Am}}c^2 - E_{\alpha}$$

Wiemy też, że:

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2 \longrightarrow p^2c^2 = E^2 - m^2c^4$$

Stąd otrzymujemy po kolei:

$$E_{\alpha}^2 = m_{\alpha}^2c^4 + E_{\text{Np}}^2 - m_{\text{Np}}^2c^4$$

$$E_{\alpha}^2 = m_{\alpha}^2c^4 + (m_{\text{Am}}c^2 - E_{\alpha})^2 - m_{\text{Np}}^2c^4$$

$$E_{\alpha}^2 = m_{\alpha}^2c^4 + m_{\text{Am}}^2c^4 - 2m_{\text{Am}}c^2E_{\alpha} + E_{\alpha}^2 - m_{\text{Np}}^2c^4$$

$$E_{\alpha} = \frac{m_{\alpha}^2c^4 + m_{\text{Am}}^2c^4 - m_{\text{Np}}^2c^4}{2m_{\text{Am}}c^2}$$

Dodatek B

Masa jądra atomu i energia wiązania

Ogólną postać wyrażenia na masę jądra atomu możemy zapisać jako:

$$m_X = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - A \cdot \bar{B} \quad (\text{B.1})$$

gdzie:

- X - dany pierwiastek
- A,Z - odpowiednio: liczba masowa i atomowa pierwiastka
- m_e - masa elektronu (0.511MeV)
- m_n - masa neutronu (939.566MeV)
- m_p - masa protonu (938.272MeV)
- \bar{B} - energia wiązania na nukleon

Energia wiązania w jądrze może być wyznaczona na podstawie półempirycznego wzoru [12]:

$$\bar{B} = a_V - a_S \cdot A^{-1/3} - a_C \cdot \frac{Z^2}{A^{4/3}} - a_{SYM} \frac{(A - 2 \cdot Z)^2}{A^2} + \frac{\delta}{A} \quad (\text{B.2})$$

gdzie $\bar{B} = \frac{B}{A}$ jest średnią energią wiązania przypadającą na jeden nukleon.

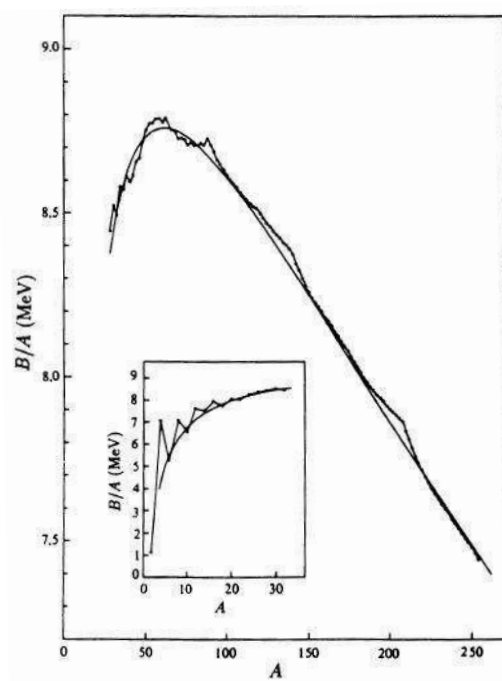
gdzie:

- $a_V = 15.67 \text{ MeV}$ - stała proporcjonalna do A (wynika z krótkiego zasięgu sił jądrowych)

- $a_S = 17.23$ MeV - ujemny wpływ powierzchni (nukleony nie mają sąsiadów do oddziaływania)
- $a_C = 0.714$ MeV - ujemny wpływ oddziaływania elektrostatycznego protonów
- $a_{SYM} = 23.29$ MeV - symetria oddziaływania między protonami i neutronami (zmniejszenie energii wiązania przy asymetrii liczby protonów względem liczby neutronów)
- $\delta = 11.2$ MeV - energia dwójkowania, wynika z faktu szczególnie dużej energii wiązania dla jąder o parzystej liczbie protonów i parzystej liczbie neutronów

$$\delta = \begin{cases} +\Delta & \text{jądra parzysto-parzyste (Z i N)} \\ 0 & \text{jądra nieparzyste (A)} \\ -\Delta & \text{jądra nieparzysto-nieparzyste (Z i N)} \end{cases}$$

Wartości średniej energii wiązania na nukleon w zależności od liczby masowej przedstawia rysunek B.1



Rysunek B.1: Średnia energia wiązania na nukleon dla jąder dla dowolnej liczby masowej [12].

Dodatek C

Jednostki miar w projekcie KamLAND

Jedną z wielkości używanych w projekcie KamLAND jest ekspozycja. Jej jednostką jest: tona·rok. Oto jej pochodzenie:

Liczba oddziaływań w detektorze wyraża się wzorem:

$$N = L \cdot T \cdot \sigma \cdot n \cdot V$$

gdzie: L - strumień neutrin ($\frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$), T - czas naświetlania neutronami (s), σ - przekrój czynny (cm^2), n - liczba jąder tarczy w jednostce objętości ($\frac{1}{\text{cm}^3}$), V - objętość (cm^3).

Podstawiając za:

$$n \cdot V = n/d \cdot V \cdot d$$

gdzie d to gęstość ($\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$), otrzymujemy:

$$n \cdot V = n/d \cdot M$$

gdzie M to masa detektora.

Ostatecznie otrzymujemy:

$$N = L \cdot \sigma \cdot n/d \cdot (T \cdot M)$$

gdzie $T \cdot M$ mierzy “ilość danych w eksperymencie” (ekspozycję).