

Uniwersytet Warszawski

Wydział Fizyki

Magdalena Chilkiewicz

Nr albumu: 211033

**Doświadczenia z neutronami akceleratorowymi
i wpływ przesyłania wiązek neutronowych na
środowisko**

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

Praca wykonana pod kierunkiem
dr Katarzyny Grzelak
Uniwersytet Warszawski

Warszawa, wrzesień 2005

Oświadczenie kierującego pracą

Oświadczam, że niniejsza praca została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie tytułu zawodowego.

Data

Podpis kierującego pracą

Oświadczenie autora pracy

Świadom odpowiedzialności prawnej oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

Oświadczam również, że przedstawiona praca nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem tytułu zawodowego w wyższej uczelni.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja pracy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Data

Podpis autora pracy

Streszczenie

Niniejsza praca poświęcona jest opisowi neutrinowych eksperymentów akceleratorowych i ich wpływu na środowisko naturalne. Zawiera wprowadzenie do fizyki neutrin, omawia historię neutrin i źródła pochodzenia. Zaprezentowano tu głównie doświadczenia akceleratorowe, w których neutrina przebywają dalekie odległości od źródła do detektora. W pracy przeprowadzono dyskusję na temat szkodliwości przesyłania wiązek neutrinowych. Omówiono jakie cząstki powstające przy ich produkcji stanowią zagrożenie dla ludzi i przyrody oraz opisano jak się zabezpiecza przed szkodliwym ich działaniem.

Słowa kluczowe

Neutrino, akcelerator, środowisko, promieniowanie jonizacyjne, oscylacje neutrin, cząstki elementarne.

Dziedzina pracy (kody wg programu Socrates-Erasmus)

13200

*Pragnę serdecznie podziękować dr Katarzynie Grzelak
za cenne uwagi i wszelką pomoc w napisaniu niniejszej pracy,
za życzliwość, wyrozumiałość i poświęcenie.*

Rozdział 1. Wprowadzenie	6
Rozdział 2. Model Standardowy	7
2.1. Budowa materii	7
2.1.1. Kwarki i leptony	7
2.1.2. Podział na fermiony i bozony	8
2.2. Rodzaje oddziaływań fundamentalnych.....	9
2.2.1. Oddziaływania elektromagnetyczne	9
2.2.2. Oddziaływania słabe	9
2.2.3. Oddziaływania silne.....	10
2.2.4. Oddziaływania grawitacyjne.....	10
Rozdział 3. Neutrino.....	12
3.1. Historia neutrin	12
3.2. Pochodzenie neutrin	14
3.2.1. Źródła naturalne	14
3.2.2. Źródła sztuczne	17
3.2.3. Oscylacje neutrin	18
Rozdział 4. Eksperymenty neutrinowe.....	22
4.1. Doświadczenia z neutrinami nieakceleratorowymi.....	22
4.1.1. Doświadczenie Raymonda Davisa (1967).....	22
4.1.2. Super – Kamiokande.....	23
4.1.3. SNO (<i>Sudbury Neutrino Observatory</i>)	25
4.1.4. KamLAND.....	26
4.2. Doświadczenia z neutrinami akceleratorowymi	27
4.2.1. Rodzaje, budowa i zasada działania akceleratorów	28
4.2.2. Produkcja neutrin akceleratorowych	31
4.2.3. Metody detekcji neutrin	33
4.3. Eksperymenty akceleratorowe z długą bazą	34
4.3.1. K2K.....	35
4.3.2. MINOS.....	35
4.3.3. Przyszłe projekty akceleratorowe	36
Rozdział 5. Oddziaływanie promieniowania z materią	38
5.1. Biologiczne efekty promieniowania.....	40
5.2. Zasady ochrony radiologicznej	42
Rozdział 6. Wpływ eksperymentów neutrinowych na środowisko	44
6.1. Produkcja wiązek neutrin a ochrona środowiska	44
6.1.1. Promieniowanie natychmiastowe i szczątkowe.....	45
6.1.2. Powietrze	47
6.1.3. Wody gruntowe.....	47
6.2. Wpływ przesyłania wiązek neutrinowych na otoczenie	48
6.3. Detektory do detekcji neutrin	52
Rozdział 7. Podsumowanie	53
Literatura	54

Rozdział 1. Wprowadzenie

Celem niniejszej pracy jest zapoznanie czytelnika z neutrinami – cząstkami będącymi „...najmniejszą porcją rzeczywistości, jaką kiedykolwiek człowiek wymyślił”, jak to określił niegdyś F. Reines – oraz opisanie wpływu eksperymentów badających neutrina na środowisko. Pierwsze rozdziały traktują o Modelu Standardowym, opisującym podstawowe składniki materii i oddziaływania fundamentalne, oraz obrazują historię i pochodzenie neutrin. Ma to na względzie pokazanie ich miejsca w świecie fizyki cząstek elementarnych. Kolejne zawierają krótką prezentację eksperymentów z neutrinami nieakceleratorowymi, których rezultaty przyniosły wiele ważnych odkryć dotyczących właściwości neutrin. Następnie przedstawiono budowę akceleratorów – urządzeń przyspieszających cząstki do wysokiej energii – i sposób wytwarzania wiązek neutrinowych przy ich pomocy. W pracy skupiono się tylko na neutrinowych eksperymentach akceleratorowych, w których wiązki neutrin przesyłane są na duże odległości (rzędu kilkuset km). Są to tzw. eksperymenty z długą bazą pomiarową. Osobny rozdział przeznaczono na omówienie sposobów oddziaływania promieniowania z materią i opis zasadniczych aspektów ochrony radiologicznej. W rozdziale szóstym omówiono wpływ przeprowadzanych eksperymentów neutrinowych na środowisko naturalne, głównie w oparciu o literaturę dotyczącą programu fizycznego NuMI (*Neutrinos at the Main Injector*).

Neutrina były początkowo pomysłem czysto teoretycznym – w 1930 roku Wolfgang Pauli wysunął hipotezę o ich istnieniu, aby wytłumaczyć brakującą część energii w rozpadzie β . Po 26 latach po raz pierwszy zaobserwowano oddziaływanie neutrina – bezpośredni dowód jego istnienia. Rozwijająca się fizyka cząstek elementarnych zrodziła potrzebę budowy akceleratorów, które stały się obok promieniowania kosmicznego źródłem cząstek o wysokich energiach. Dzięki nowym urządzeniom stało się możliwe wytwarzanie intensywnych strumieni cząstek, a dodatkowo uzyskano możliwość kontrolowania ich parametrów. Pozwoliło to zgłębić dotychczasową wiedzę o budowie materii oraz własnościach cząstek elementarnych i podstawowych oddziaływań. W 1962 roku wytworzono w akceleratorze pierwszą wiązkę neutrinową i odkryto różne typy (zapachy) neutrin: mionowe i elektronowe.

Doświadczenia z neutrinami akceleratorowymi wiążą się jednak z pewnym zagrożeniem dla środowiska. Same neutrina oddziałują słabo i nie są aż tak niebezpieczne – choć przez każdy cm^2 naszego ciała w czasie jednej sekundy przechodzi ich ponad 40 mld (głównie ze Słońca). Większy problem tkwi w ogromnej masie detektorów rejestrujących oddziaływania tych cząstek, a przede wszystkim w powstawaniu przy produkcji neutrin cząstek naładowanych, które – jako promieniowanie jonizujące – mają szkodliwy wpływ na organizmy żywe i mogą przyczynić się do powstania izotopów promieniotwórczych, a tym samym – skażenia środowiska.

Promieniowanie jonizujące powstaje również w reakcjach indukowanych przez same neutrina. W poniższej pracy oszacowano jak częste są oddziaływania neutrin z obecnie produkowanych wiązek neutrin i jakie jest skażenie promieniotwórcze środowiska na przykładzie programu NuMI w ośrodku Fermilab.

Rozdział 2. Model Standardowy

2.1. Budowa materii

Przez całe stulecia ludzie starali się odpowiedzieć na pytanie z czego zbudowana jest materia. Jeszcze w latach 50 – tych XX wieku sądzono, że podstawowym jej składnikiem są trzy cząstki: proton, neutron i elektron. Rok 1964 przyniósł nowe spojrzenie na budowę jąder atomowych. Konstrukcja akceleratorów pozwalających wnikać głęboko w strukturę atomu zrewolucjonizowała poglądy na jego budowę. Okazało się, że protony i neutrony nie stanowią najmniejszej formy materii, ale są zbudowane z jeszcze mniejszych cząstek, zwanych kwarkami. Te zaś oddziałują ze sobą poprzez wymianę tak zwanych gluonów. Współczesna fizyka postrzega kwarki jako najbardziej fundamentalne składniki materii.

2.1.1. Kwarki i leptony

Dziesięciolecia pracy badawczej doprowadziły do sformułowania modelu teoretycznego dotyczącego cząstek elementarnych i oddziaływań fundamentalnych materii, zwanego Modelem Standardowym (opracowanego przez Glashowa, Salama i Weinberga). Sformułowano go w 70 – tych latach XX wieku i do dziś jest on najlepszym opisem wiążącym niemal wszystkie obserwacje z zakresu fizyki cząstek elementarnych w jedną całość. Zgodnie z tym opisem, materia zbudowana jest z sześciu rodzajów kwarków, sześciu rodzajów leptonów i cząstek przenoszących oddziaływanie.

Pierwszą grupę stanowią kwarki obdarzone ładunkami o wartościach $+2/3$ le lub $-1/3$ le , gdzie e jest ładunkiem elektronu ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C). Model Standardowy wyróżnia sześć rodzajów kwarków i sześć rodzajów antykwarków. Pogrupowane są one w trzy rodziny: górny u i dolny d , powabny c i dziwny s oraz prawdziwy t i piękny b .

W drugiej grupie cząstek, zwanych leptonami, znajduje się elektron, mion i taon (wraz z ich antycząstkami – pozytonem, anty-mionem i anty-taonem) oraz trzy neutralne cząstki: neutrino elektronowe, mionowe i taonowe (jak również antyneutrino). Ładunek elektryczny naładowanych leptonów wyraża się liczbą całkowitą. Najbardziej znany z nich – elektron e – ma ładunek ujemny, podobnie jak pozostałe, o wiele cięższe, leptony – mion μ i taon τ . Każdemu z naładowanych leptonów odpowiadają odpowiednie neutrino, co określają indeksy: ν_e , ν_μ i ν_τ . Długo wierzono, że neutrino są cząstkami bezmasowymi¹. Obecnie panuje powszechne przekonanie, że jednak mają masę, ale bardzo małą. Wyznaczono jedynie górne ograniczenia mas neutrin. Aktualne limity to: $m(\nu_e) < 3$ eV, uzyskany dzięki badaniom rozpadu beta, $m(\nu_\mu) < 0.19$ MeV, uzyskany z rozpadu mionu i $m(\nu_\tau) < 18.2$ MeV, określony na podstawie rozpadu taonu [1].

Kwarki i leptony uporządkowane są w trzy rodziny, co przedstawia Tab. 2.1.

¹ Dopiero w 1998 roku eksperyment Super – Kamiokande udowodnił, że neutrino mają masę (przez odkrycie zjawiska oscylacji).

Tab. 2.1. Fundamentalne składniki materii [2]

Cząstka	Zapach	Q / e
Kwarki	u c t	+ 2/3
	d s b	- 1/3
Leptony	e ⁻ μ ⁻ τ ⁻	-1
	ν _e ν _μ ν _τ	0

Leptony mogą istnieć jako swobodne cząstki, z kolei kwarki występują jedynie w kombinacjach. Cząstki zbudowane z trzech kwarków nazywamy barionami, natomiast z dwóch kwarków – mezonami². Tylko proton i neutron są stabilnymi barionami. Zbudowane są z najlżejszych kwarków u i d w następujących kombinacjach: uud (proton) i ddu (neutron). Kwarki cięższe (s, c, b, t) wchodzi w skład cząstek niestabilnych, które szybko ulegają rozpadowi na kombinacje lżejszych kwarków u i d. Podobnie jest w przypadku cięższych leptonów μ i τ, które rozpadają się na lżejsze leptony lub kwarki.

Wszystko, z czego zbudowana jest materia ziemską, składa się z pierwszej rodziny kwarków i leptonów (neutrino elektronowe powstaje w rozpadach promieniotwórczych β). Cząstki z drugiej i trzeciej rodziny możemy obserwować w promieniowaniu kosmicznym i produkować w akceleratorach³.

2.1.2. Podział na fermiony i bozony

Wszystkie cząstki elementarne możemy podzielić na fermiony i bozony. Pierwsze z nich mają spin⁴ połówkowy ($1/2 \hbar$, $3/2 \hbar$,...). Do fermionów zaliczamy cząstki, które są podstawowym budulcem materii, a więc kwarki i leptony oraz cząstki będące ich kombinacjami (np. protony, neutrony). Fermiony podlegają statystyce Fermiego – Diraca, w której obowiązuje zakaz Pauliego. W myśl zakazu, niemożliwe jest istnienie dwóch cząstek w tym samym stanie kwantowym.

Bozony są cząstkami elementarnymi o spinie całkowitym. Podlegają one statystyce Bosego – Einsteina (tu nie obowiązuje zasada Pauliego). To właśnie bozony odpowiedzialne są za przenoszenie oddziaływań pomiędzy cząstkami. Bozonami są również złożone cząstki, które składają się z parzystej liczby fermionów.

Jądro atomowe może być fermionem lub bozonem – zależy to od liczby protonów i neutronów. Jeśli jest ona parzysta, jądro jest bozonem, jeśli nieparzysta – fermionem.

² Mezony to cząstki zbudowane z pary kwark – antykwark. Najcięższym odkrytym mezonem jest stan top – antytóp o masie około 400 razy większej od masy protonu [2].

³ Akcelerator – urządzenie do przyspieszania naładowanych, stabilnych cząstek (patrz podrozdział 4.2.).

⁴ Spin – wewnętrzny moment pędu cząstki, nie wiąże się on z ruchem cząstek w przestrzeni.

2.2. Rodzaje oddziaływań fundamentalnych

W poprzednim rozdziale omówiona została budowa materii. W poniższym przedstawiono cztery rodzaje oddziaływań fundamentalnych: elektromagnetyczne, słabe, silne i grawitacyjne. Każde z nich jest rezultatem wymiany bozonów – nośników oddziaływań.

2.2.1. Oddziaływania elektromagnetyczne

Jeszcze na początku XIX – go wieku traktowano elektryczność i magnetyzm jako dwa różne zjawiska fizyczne. Obecnie wiadomo, że oddziaływanie elektryczne i magnetyczne są odmiennymi przejawami jednej siły elektromagnetycznej, która – w odróżnieniu od grawitacji – może przyciągać bądź odpychać od siebie różne obiekty. Ładunki jednoimienne i te same bieguny magnetyczne⁵ odpychają się, zaś przeciwne – przyciągają. Oddziaływania elektromagnetyczne zachodzą pomiędzy kwarkami i naładowanymi leptonami za pośrednictwem fotonów. Prawa rządzące tymi oddziaływaniami zostały zebrane w całość, na której opiera się elektrodynamika klasyczna. Dokonał tego J.C. Maxwell, publikując w 1864 roku „Dynamiczną teorię pola elektromagnetycznego”. Równania Maxwella wyczerpująco opisują oba rodzaje oddziaływań. Do najważniejszych konsekwencji owych równań należy zaliczyć wykazanie istnienia fal elektromagnetycznych⁶.

Rola oddziaływania elektromagnetycznego ze względu na nieskończony zasięg jest ogromna. Odpowiada ono za zdecydowaną większość makroskopowych cech materii. Kieruje procesami rozpraszania elektronów na protonach i elektronach. Siły kulombowskie⁷, będące przejawem tego rodzaju oddziaływania, warunkują istnienie atomów. Ponadto wiązania międzycząsteczkowe i struktura krystaliczna są również efektem oddziaływania elektromagnetycznego. Nośnikiem oddziaływań elektromagnetycznych są fotony.

2.2.2. Oddziaływania słabe

Przejawy oddziaływań słabych nie są widoczne w życiu codziennym. Oddziaływania słabe mają bardzo mały zasięg, rzędu 10^{-18} m. Mogą zachodzić pomiędzy leptonami i kwarkami. Odpowiadają między innymi za jądrowy rozpad β , w wyniku czego powstaje proton, elektron i antyneutrino elektronowe:



Zgodnie z zasadą zachowania liczby leptonowej⁸, po obu stronach równania występuje taka sama liczba leptonowa.

⁵ Ładunki magnetyczne nie istnieją, występują jedynie dipole magnetyczne, czyli układy dwóch różnoimiennych biegunów (płn. i płd.); dipolami są np. magnesy.

⁶ Zaburzenie rozchodzące się w przestrzeni na skutek zmian pola elektrycznego lub magnetycznego.

⁷ Siły oddziaływania elektrostatycznego między naładowanymi ciałami; są one wprost proporcjonalne do iloczynu ładunków elektrycznych tych ciał i odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości między nimi.

⁸ Liczba leptonowa jest jedną z liczb kwantowych i podobnie jak każda z nich jest zachowana w układzie izolowanym; określa różnicę pomiędzy liczbą leptonów i antyleptonów w układzie.

Oddziaływania słabe zachodzą poprzez wymianę naładowanych bozonów W^\pm i obojętnego Z^0 . Nośniki te⁹ mają bardzo duże masy (Tab. 2.2.), dlatego omawiane oddziaływania mają niezmiernie mały zasięg.

W latach 60-tych ubiegłego stulecia została wysunięta teoria dotycząca unifikacji oddziaływań słabych i elektromagnetycznych – potwierdzona eksperymentalnie w roku 1983, kiedy odkryto bozony W i Z. Wytworzono je w akceleratorze SPS (CERN) na skutek zderzenia przeciwbieżnych, wysokoenergetycznych wiązek protonów i antyprotonów. Za sformułowanie teorii oddziaływań elektroslabych, S. Glashow, S. Weinberg, oraz A. Salam otrzymali w 1979 roku Nagrodę Nobla.

2.2.3. Oddziaływania silne

Oddziaływanie silne jest najsilniejsze ze wszystkich rodzajów oddziaływań w przyrodzie. Podobnie jak słabe, nie jest obserwowalne w makroświecie, co jest spowodowane małym zasięgiem (10^{-15} m). Oddziaływania silne odpowiadają za utrzymywanie jąder atomowych w całości. Elementarną cząstką będącą nośnikiem oddziaływań silnych jest bezmasowy, elektrycznie obojętny, gluon. Oddziaływanie za pomocą gluonów nie pozwala na istnienie swobodnych kwarków. Kwarki występują jedynie w kombinacjach. Tworzą bariony (np. protony i neutrony) i mezony, które należą do wspólnej grupy określanej mianem hadronów – cząstek oddziaływujących silnie.

2.2.4. Oddziaływania grawitacyjne

Grawitacja jest najwcześniej odkrytym i najbardziej rozpowszechnionym oddziaływaniem w przyrodzie, choć paradoksalnie jest najslabsze. I. Newton jako pierwszy opisał to oddziaływanie, stwierdzając że siła powodująca ruch planet wokół Słońca, jak i siła powodująca spadek ciał na powierzchni Ziemi, to przejaw jednego oddziaływania – grawitacji. Sformułował on prawo powszechnego ciężenia, w myśl którego siła grawitacji (siła powszechnego ciężenia) dwóch oddziaływających ciał jest wprost proporcjonalna do iloczynu ich mas i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między nimi:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (2.2)$$

gdzie $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ – stała grawitacji

Siła powszechnego ciężenia ma charakter przyciągający i nieskończony zasięg – podobnie jak oddziaływanie elektromagnetyczne. Jak wynika z powyższego wzoru, tylko ciała posiadające masę mogą ze sobą oddziaływać. W przypadku mas typowych dla fizyki cząstek elementarnych, oddziaływanie grawitacyjne można całkowicie pominąć. Hipotetyczną cząstką przenoszącą tego rodzaju oddziaływania jest grawiton, którego istnienia jak dotąd niestety nie stwierdzono.

Tab. 2.2. podsumowuje omówione w poprzednich podrozdziałach najważniejsze cechy oddziaływań fundamentalnych:

Tab. 2.2. Oddziaływania fundamentalne [2]

⁹ Wymiana bozonu W^\pm powoduje zmianę ładunku oddziaływującej cząstki, zaś w przypadku wymiany Z^0 taka zmiana nie ma miejsca. Stąd też nazywa się je odpowiednio oddziaływaniami słabymi przez prądy naładowane i neutralne [2].

	Elektromagnetyczne	Słabe	Silne	Grawitacyjne
cząstka przenosząca oddziaływania	foton	W^\pm Z	gluon	grawiton (nie odkryty)
masa [GeV] ¹⁰	0	80,2 91,2	0	0
zasięg [m]	∞	10^{-18}	$\leq 10^{-15}$	∞
źródło	ładunek elektryczny	„ładunek słaby”	„ładunek kolorowy”	masa
stała sprzężenia	$\frac{1}{137}$	$1.17 \cdot 10^{-5}$	≤ 1	$5 \cdot 10^{-40}$

¹⁰ 1 eV – energia cząstki o ładunku elementarnym uzyskana na skutek napięcia 1 V; 1 eV = $1.6 \cdot 10^{-19}$ J = $1.8 \cdot 10^{-36}$ kg (dla $c=1$ energia i masa mają te same jednostki, $E=mc^2$); 1 GeV = 10^9 eV.

Rozdział 3. Neutrino

„ Neutrino działają na wyobraźnię fizyków. Są jak kapryśne primadonny, które bardzo trudno namówić na występ, ale jeśli się to uda, to spektakl jest wspaniały. ”¹¹

Neutrino są cząstkami pozbawionymi ładunku elektrycznego, o spinie połówkowym i niezmiernie małej masie. Uczestniczą w oddziaływaniach słabych. Wyróżniamy trzy rodzaje (tzw. zapachy) neutrin, które przyporządkowujemy trzem zapachom naładowanych leptonów. Poniżej przedstawiono najważniejsze wydarzenia z historii tych cząstek [2, 3, 4].

3.1. Historia neutrin

1930

Niemiecki fizyk Wolfgang Pauli, zapostulował istnienie cząstki, którą E. Fermi nazwał trzy lata później neutrinem. Była to w istocie desperacka próba ratowania zasady zachowania energii podczas przemiany jądrowej β . Założenie istnienia nowej cząstki było nieodzowne by wytłumaczyć to zjawisko. W przypadku rozpadu dwuciałowego, zgodnie z prawem zachowania energii i pędu, wylatujący z jądra elektron nie może mieć dowolnej prędkości. Energia elektronów powinna zawsze mieć konkretną wartość, tymczasem fakty doświadczalne wymykały się prawom fizyki, dając całe widmo prędkości i energii. Niektórzy naukowcy podawali już w wątpliwość słuszność podstawowych praw fizyki. *"Nie ma żadnego argumentu zarówno doświadczalnego, jak i teoretycznego, który by bronił prawa zachowania energii w tym przypadku"* - twierdził fizyk Niels Bohr, autorytet ówczesnych czasów. Inne zdanie miał w tej sprawie Pauli. By potwierdzić uniwersalność dotychczasowych teorii i zasad, uczony wpadł na pomysł, że musi istnieć cząstka, która będzie odpowiedzialna za brakującą część energii podczas rozpadu neutronu na proton i elektron. Założył, że wraz z elektronem opuszcza ona jądro pierwiastka promieniotwórczego niosąc „zgubioną” energię. I dopiero suma energii elektronu i zaproponowanej cząstki jest stała – zgodnie z prawem zachowania. Jednak w eksperymentach widoczne były tylko promienie beta, zaś nowa cząstka nie dawała żadnych obserwowalnych dowodów swego istnienia. Pauli uważał, że dzieje się tak ze względu na brak ładunku elektrycznego, masę bliską zera i bardzo słabe oddziaływanie z materią.

1956

Na doświadczalne potwierdzenie swej sensacyjnej teorii uczony czekał aż 26 lat, kiedy to zaciekawieni nowym zjawiskiem i możliwością detekcji tajemniczej cząstki, Frederick Reines i Clyde Cowan – jako pierwsi – zaobserwowali oddziaływania neutrin pochodzących z reaktora w Savannah River.

¹¹ A. Para, A. Zalewska, Neutrino w Cern i pod Alpami, *Rzeczpospolita*, 19 października 2004, str. 4.

1962

Eksperyment w Brookhaven National Laboratory w USA z pierwszą wytworzoną przy użyciu akceleratora wiązką neutrin pozwolił odkryć drugi, obok elektronowych, rodzaj neutrin – mionowe.

1967

Pierwszy eksperyment rejestrujący neutrina pochodzące z przemian jądrowych zachodzących w Słońcu. Dokonał tego R. Davis, używając detektora zawierającego 600 ton płynu do czyszczenia, umieszczonego w kopalni w Homestake (Południowa Dakota). Liczba rejestrowanych neutrin elektronowych okazała się być o połowę mniejsza od przewidywań teoretycznych Modelu Słonecznego.

1969

Bruno Pontecorvo i Vladimir Gribov postulują istnienie oscylacji¹² neutrin, które tłumaczyłyby deficyt neutrin słonecznych.

1975-1977

Odkrycie leptonu τ i kwarku b, co świadczyło o istnieniu kolejnej – trzeciej – rodziny kwarkowo – leptonowej (a w związku z tym i neutrina taonowego).

1989

Akceleratorowy eksperyment w CERN (LEP – Large Electron – Positron Collider) pozwolił stwierdzić, że są tylko trzy rodziny lekkich neutrin (lżejszych niż połowa masy Z^0).

1998

Prace badawcze nad neutrinami z promieniowania kosmicznego w eksperymencie Super – Kamiokande; ich wynik silnie potwierdza hipotezę oscylacji neutrin.

2002

- SNO (Sudbury Neutrino Observatory) wyjaśnia problem związany z deficytem neutrin słonecznych, wskazując na przemianę neutrin elektronowych w inny zapach,
- Eksperyment KamLAND dostarcza dowodu na oscylacje antyneutrin, których źródłem są reaktory jądrowe

2004/2005

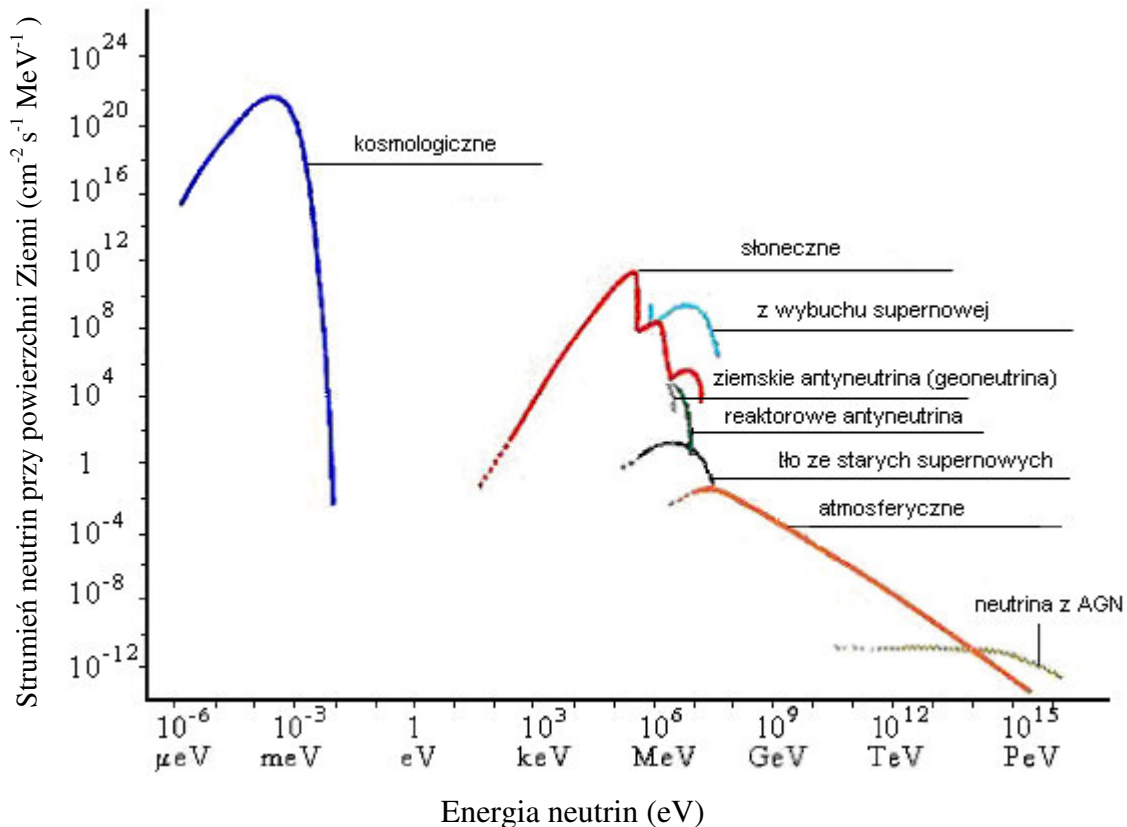
Na podstawie zebranych danych Super – Kamiokande i KamLAND pokazują kształt oscylacji neutrin – bezpośredni dowód na istnienie tego zjawiska.

Druga połowa ubiegłego stulecia stała pod znakiem badania i głębszego poznania tych subatomowych cząstek, wyjaśniania wielu niezrozumiałych zjawisk związanych z nimi i zaskakujących odkryć. Neutrina przeszły w drugiej połowie XX wieku długą drogę od hipotetycznych cząstek po ważny instrument badawczy, służący m.in. poznaniu procesów zachodzących na Słońcu. Dziś wiadomo, że są one integralną częścią fundamentalnej teorii dotyczącej cząstek elementarnych i podstawowych oddziaływań w otaczającym świecie.

¹² Przemiana jednego rodzaju (zapachu) neutrina w drugi. Szczegóły w podrozdziale 3.2.3.

3.2. Pochodzenie neutrin

Neutrino są najbardziej rozpowszechnionymi po fotonach cząstkami Wszechświata. W każdym jego cm^3 znajduje się około 330 neutrin. W całej przestrzeni kosmicznej jest ich aż 10^9 razy więcej niż nukleonów [5]. Na Rys. 3.1. przedstawiono strumienie neutrin pochodzących z różnych źródeł naturalnych i reaktorów jądrowych:

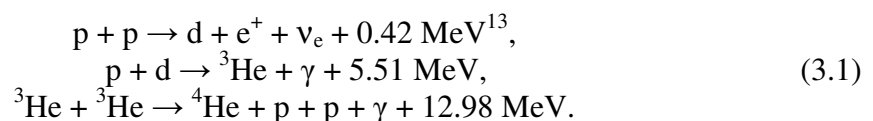


Rys.3.1. Strumień neutrin ze źródeł naturalnych i reaktorów jądrowych w funkcji energii neutrin. AGN – neutrino z aktywnych jąder galaktyk [2]

3.2.1. Źródła naturalne

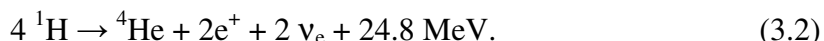
Słońce

Ze Słońca dociera do powierzchni Ziemi najwięcej neutrin ($6 \cdot 10^{10}$ /s/cm², [5]) Powstają jako produkt uboczny w szeregu reakcji jądrowych, które zachodzą we wnętrzu gwiazdy. W 1938 roku H. Bethe zanalizował podstawowe procesy termojądrowe w Słońcu, za co otrzymał Nagrodę Nobla w roku 1967. Energia słoneczna jest głównie wynikiem przemiany jąder wodoru w jądra helu. Poniżej przedstawiono główne reakcje termojądrowe dla cyklu proton – proton (pp) [5]:



¹³ d (deuteron) – jądro deuteru, ciężkiego wodoru ${}^2_1\text{H}$.

Zapisując sumarycznie powyższe równania otrzymujemy:



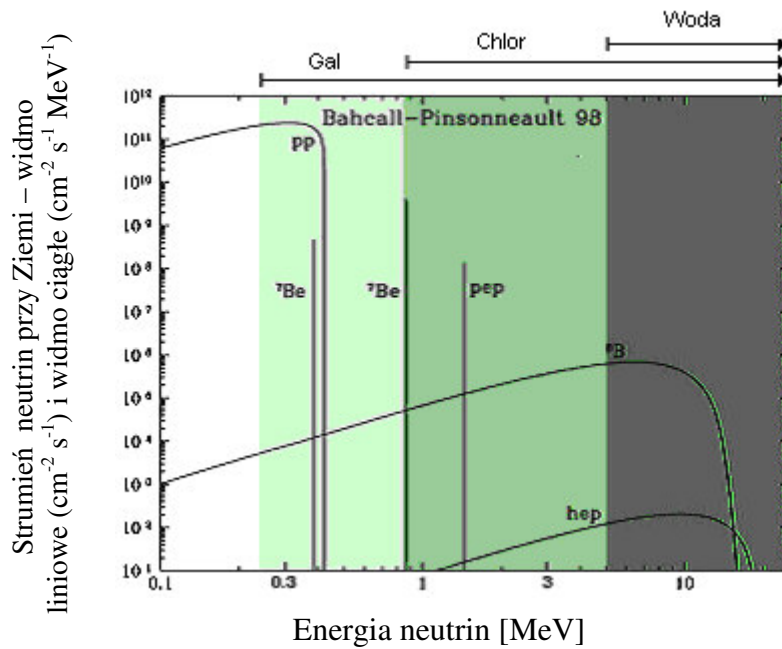
Strumień neutrin wyprodukowanych w powyższej reakcji jest największy (85 % całkowitego), a neutrina niosą energię około 0.5 MeV. Neutrina wytwarzane są też w cyklu pep, hep oraz w trakcie produkcji i rozpadu berylu ^7Be – 15 % i boru ^8B – 0.01 %. Najważniejsze reakcje termojądrowe zachodzące na Słońcu przedstawia Tab. 3.1.

Oszacowano, że około 2 % emitowanej energii słonecznej uwalniane jest w postaci neutrin. Są to przede wszystkim cząstki o energiach poniżej 1 MeV. Z faktu nikłego oddziaływania tych cząstek z jakąkolwiek materią, również i Słońce nie stanowi dla nich przeszkody. Po upływie zaledwie 8 minut docierają już do powierzchni naszej planety¹⁴. Stąd ich nieoceniona rola w pracach badawczych nad procesami zachodzącymi na Słońcu. W ciągu sekundy z gwiazdy wydostaje się ich mniej więcej $2 \cdot 10^{38}$ /s /cm² [6]. Energia docierających do Ziemi neutrin słonecznych zależy od rodzaju reakcji, w której powstały te cząstki.

Tab. 3.1. Wartości energii i strumieni neutrin pochodzenia słonecznego emitowanych w przemianach jądrowych [6, 7]

Symbol przemiany jądrowej	Równanie reakcji	Energia neutrin [MeV]	Strumień neutrin przy powierzchni Ziemi (s ⁻¹ cm ⁻²)
pp	$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$	≤ 0.423	$6 \cdot 10^{10}$
^7Be	$^7\text{Be} + e^- \rightarrow ^7\text{Li} + \nu_e$	0.86 (90%), 0.38 (10%)	$5 \cdot 10^9$
^8B	$^8\text{B} \rightarrow ^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$	≤ 15	$6 \cdot 10^6$
pep	$p + e^- + p \rightarrow d + \nu_e$	1.44	$1.4 \cdot 10^8$
hep	$^3\text{He} + p \rightarrow ^4\text{He} + e^+ + \nu_e$	≤ 18.8	$8 \cdot 10^3$

¹⁴ Obserwacja fotonów, które powstają wewnątrz Słońca, przynosi „przestarzałe” wiadomości dotyczące procesów jądrowych na Słońcu, ponieważ cząstki te rozpraszają się w materii słonecznej i dopiero po upływie miliona lat wydostają się na zewnątrz.



Rysunek 3.2. Widma energii i strumienie neutrin pochodzenia słonecznego emitowanych w przemianach jądrowych; u góry podano zakresy czułości detektorów wypełnionych wodą, chlorem oraz galem. Jak widać, najbardziej czuły jest detektor z galem, który rejestruje neutrina już od energii około 0.25 MeV [5]

Z Rys. 3.2. i Tab. 3.1. widać, że najwięcej neutrin produkowanych jest w przemianie pp, jednak odznaczają się najniższymi energiami. Z kolei najbardziej energetyczne neutrina (do energii kilkunastu MeV) powstają w wyniku rozpadu ^8B i hep, jednak ich strumień jest znacznie mniejszy. Widma energii neutrin powstających w obu tych reakcjach są ciągłe. W przypadku rozpadu ^7Be mamy widmo liniowe, ponieważ następuje tu wychwytywanie elektronu z orbity i emisja neutrin o określonych energiach.

Atmosfera ziemna

Neutrino atmosferyczne powstają na skutek oddziaływania pierwotnego promieniowania kosmicznego¹⁵ z górną warstwą atmosfery ziemskiej. Powstają wtedy głównie mezony π ¹⁶, które rozpadając się dają początek leptonom μ i neutrinom mionowym ν_μ (3.3). Miony rozpadają się, w wyniku czego powstają ν_μ i ν_e . (3.4). Neutrino atmosferyczne posiadają znacznie wyższą energię (rzędu GeV) niż neutrina pochodzenia słonecznego.

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (3.3)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu, \quad \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (3.4)$$

¹⁵ To różnego rodzaju wysokoenergetyczne cząstki, głównie protony i cząstki α .

¹⁶ π – pion, najlżejszy mezon; zbudowany z kwarków u i d; występuje w stanach π^+ , π^- , π^0 [2].

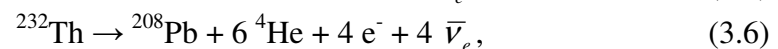
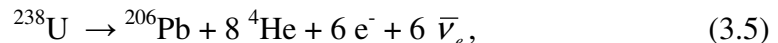
Przestrzeń kosmiczna

Neutrino kosmiczne są ważnym instrumentem badawczym Wszechświata i mogą przynieść wiele nowych informacji na jego temat. Spektrum energii neutrin docierających do nas z przestrzeni kosmicznej to wiele rzędów wielkości. Najbardziej energiczne neutrino mają energie rzędu kilku tysięcy TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV} = 10^3 \text{ GeV}$). Pochodzą z różnych źródeł, zarówno z naszej Galaktyki, jak i spoza niej. Strumienie wysokoenergetycznych neutrin są jednak bardzo małe i dla wiązki o energii rzędu TeV należałoby zbudować detektor o pojemności co najmniej 1 km^3 (wypełniony np. czystą wodą), żeby zebrać w przeciągu kilku lat wystarczającą liczbę danych doświadczalnych. Przewiduje się, że najwięcej jest neutrin reliktowych¹⁷ (kosmologicznych), ale z powodu bardzo małych energii nie zostały jeszcze nigdy zarejestrowane.

Neutrino mogą powstawać w wyniku eksplozji supernowych. W 1987 roku zarejestrowano impuls neutrinowy (obserwowany m.in. w detektorze Kamiokande) pochodzący z wybuchu supernowej SN 1987A w Wielkim Obłoku Magellana. Impuls ten pojawił się 7 godzin wcześniej niż impuls optyczny [2].

Rozpady promieniotwórcze w Ziemi

W wyniku procesów rozszczepienia jąder naturalnych pierwiastków we wnętrzu Ziemi mogą również powstawać neutrino. Są to głównie antyneutrino o przeciętnej energii 2,5 MeV. Pochodzą z rozpadów uranu, toru i potasu zawartych w skałach (schematy rozpadów 3.5 – 3.7, [8]).



Liczba neutrin emitowanych w czasie jednej sekundy z 1 kg danego pierwiastka wynosi: $7.41 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ (dla ${}^{238}\text{U}$), $1.63 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ (dla ${}^{232}\text{Th}$) i $2.69 \cdot 10^4$ (dla ${}^{40}\text{K}$). Biorąc pod uwagę całkowitą masę tych pierwiastków w kuli ziemskiej, można oszacować liczbę neutrin emitowanych w ciągu 1s przez Ziemię: $5.9 \cdot 10^{24} \text{ s}^{-1}$ (${}^{238}\text{U}$), $5.0 \cdot 10^{24} \text{ s}^{-1}$ (${}^{232}\text{Th}$), $21.6 \cdot 10^{24} \text{ s}^{-1}$ [8].

3.2.2. Źródła sztuczne

Oprócz naturalnych – ziemskich i pozaziemskich – źródeł neutrin, istnieją ponadto źródła sztuczne. Należą do nich reaktory jądrowe i urządzenia specjalnie zbudowane do produkcji cząstek elementarnych – akceleratory.

Reaktory jądrowe

Reaktory jądrowe produkują – jako produkt uboczny – duże ilości neutrin. Strumień neutrin z reaktora silnie zależy od jego mocy. Reaktor o mocy 3 GW wytwarza $6 \cdot 10^{20} / \text{s} / \text{cm}^2$ neutrin [9]. Jest to wartość o kilkanaście rzędów wielkości większa od natężenia strumienia pochodzącego z naturalnych rozpadów pierwiastków promie-

¹⁷ Te, które narodziły się w czasie Wielkiego Wybuchu.

niotwórczych, a niemal o dziesięć rzędów większa od strumienia neutrin pochodzących ze Słońca.

Dzięki tym urządzeniom po raz pierwszy zaobserwowano neutrina (antyneutrina). F. Reines i C. Cowan przeprowadzali badania w pobliżu reaktora jądowego w Savannah River. Wykorzystali intensywny strumień antyneutrin elektronowych ($\bar{\nu}_e$) z reaktora i tarczę protonów będących składnikiem ciekłego scyntylatora (pojemność podziemnego detektora zawierającego rozpuszczony chlorek kadmu to około 1400 litrów). Do detekcji neutrin użyto odwrotnego rozpadu β :



W efekcie oddziaływania antyneutrin z tarczą protonów powstają pozytony i neutrony. Pozyton ulega anihilacji¹⁸ w materiale detektora w wyniku oddziaływania z elektronem, czego konsekwencją jest emisja dwóch fotonów o energii 0,51 MeV. Z kolei neutron zostaje wychwycony przez jądro kadmu. Tu również następuje emisja kwantów γ (cała ich energia to 9 MeV). Sygnaturą oddziaływania antyneutrin jest pomiar czasu tych dwóch sygnałów w ściśle określonym odstępie czasowym.

Akceleratory

Akceleratory to urządzenia umożliwiające przyspieszanie i zderzanie paczek wysokoenergetycznych naładowanych cząstek: protonów, elektronów czy ciężkich jonów (są to tzw. pociski).

W drugiej połowie ubiegłego stulecia uzyskano pierwsze wiązki neutrinowe z akceleratorów. Wykorzystuje się tu strumień wyprowadzonych z akceleratora protonów, które następnie uderzają w tarczę, w wyniku czego powstają przede wszystkim piony i kaony. Naładowane cząstki jednego znaku są następnie ogniskowane i kierowane do tunelu rozpadowego. Neutrina powstają z rozpadów mezonów, głównie pionów naładowanych.

Produkcja neutrin akceleratorowych zostanie szczegółowo omówiona w podrozdziale 4.2.2.

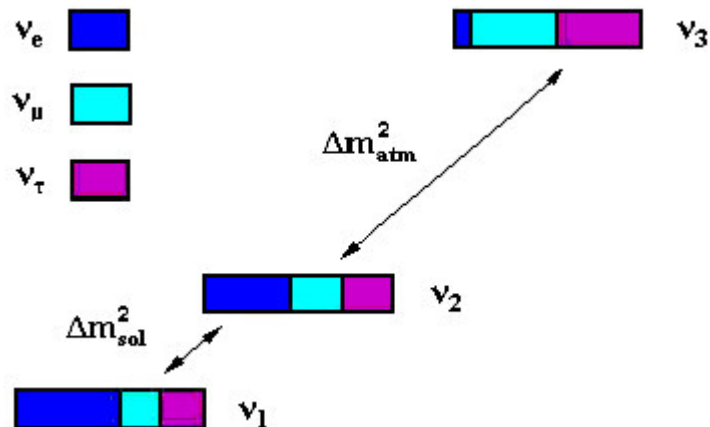
3.2.3. Oscylacje neutrin

Fizyka neutrin stała się jedną z wiodących i najszybciej rozwijających się dziedzin w fizyce cząstek elementarnych od momentu ogłoszenia wyników eksperymentu Super – Kamiokande w 1998 roku dotyczących oscylacji neutrin. Odkrycie to dało solidne podstawy do rozwoju nowej dziedziny badań, których celem było dokładne zbadanie zjawiska oscylacji, niosącego ze sobą poważne konsekwencje – nadanie masy neutrinom. Pomimo faktu, że pojedyncze neutрино może niewiele ważyć, w przestrzeni kosmicznej jest ich na tyle dużo, by stanowiły pokaźny ułamek masy Wszechświata.

Zjawisko oscylacji może zachodzić jedynie w przypadku swobodnych cząstek o różnych masach. Neutrina produkowane są w oddziaływaniach słabych w trzech zapachach. W modelu oscylacji każdy rodzaj neutrina jest superpozycją stanów własnych ν_1 , ν_2 i ν_3 o określonej masie (pakietów falowych). Pakiety falowe o niejednakowej masie poruszają się z różnymi prędkościami. Po pokonaniu pewnej odległości lżejszy pakiet,

¹⁸ Unicestwienie cząstki i antycząstki przy ich spotkaniu.

mający większą prędkość, zaczyna wyprzedzać inny. W rezultacie fale interferują¹⁹ ze sobą i dochodzi do przejść pomiędzy zapachami neutrin, czyli mieszania. Przykładowo, jeżeli w oddziaływaniu słabym zostało wyprodukowane neutrino elektronowe, to w wyniku oscylacji w odległości L możemy zarejestrować neutrino mionowe lub taonowe. To, jaki rodzaj cząstki będzie zarejestrowany w danym momencie, zależy od przebiegu interferencji.

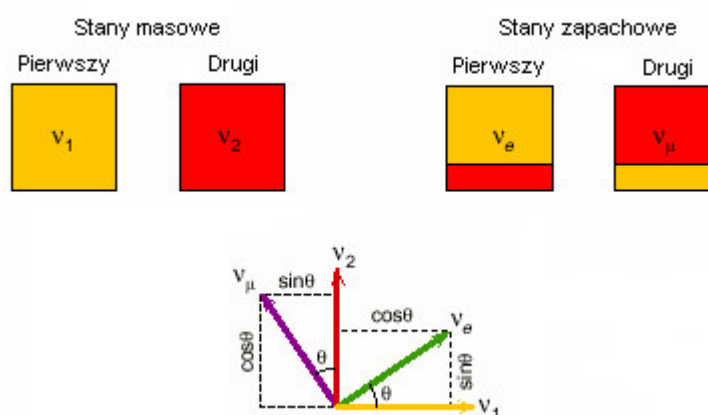


Rys. 3.3. Trzy stany masowe neutrin jako kombinacje zapachowe stanów zapachowych [5]

Powyższa ilustracja schematycznie przedstawia proporcje, w jakich stan o danej masie jest złożeniem stanów o różnych zapachach (przy normalnej hierarchii mas ($\Delta m_{12} < \Delta m_{23} < \Delta m_{13}$)).

Model oscylacji zostanie poniżej opisany w uproszczonej wersji – przy założeniu, że istnieją tylko dwa zapachy neutrin [10].

Stany kwantowe różnych typów neutrin: $|\nu_e\rangle$ i $|\nu_\mu\rangle$ to kombinacje liniowe stanów masowych $|\nu_1\rangle$ i $|\nu_2\rangle$ o masach m_1 i m_2 .



Rys. 3.4. Graficzne ilustracje związków pomiędzy różnymi stanami neutrin (stanami własnymi masy i stanami oddziaływań słabych) [5]

¹⁹ Zjawisko nakładania się na siebie fal o jednakowej częstotliwości i tworzenia fali wypadkowej o zwiększonej, bądź zmniejszonej amplitudzie – w zależności od różnicy faz między falami składowymi.

Na Rys. 3.4. przedstawiono stany masowe i zapachowe neutrin. Stany ν_e i ν_μ są pokazane w postaci mieszanek kolorów odpowiadających stanom masowym ν_1 (żółty) i ν_2 (czerwony). Oba zbiory stanów są reprezentowane przez układ jednostkowych wektorów na płaszczyźnie. Oba układy są obrócone względem siebie o kąt θ . Można to zapisać w następujący sposób:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

↑
macierz mieszania

gdzie:

θ – kąt mieszania między stanami zapachowymi a stanami masowymi

Mieszanie następuje zgodnie z poniższymi związkami:

$$\begin{aligned} |\nu_e\rangle &= \cos \theta |\nu_1\rangle + \sin \theta |\nu_2\rangle \\ |\nu_\mu\rangle &= -\sin \theta |\nu_1\rangle + \cos \theta |\nu_2\rangle \end{aligned} \quad (3.10)$$

Jeśli kąt mieszania θ jest mały, wówczas $\cos \theta$ jest bliski jedności i neutrino elektronowe składa się przeważnie ze stanu o masie m_1 , podczas gdy neutrino mionowe składa się głównie ze stanu o masie m_2 . Jeśli kąt mieszania jest maksymalny, czyli wynosi $\pi / 4$ (wtedy $\cos \theta = \sin \theta = 1/\sqrt{2}$), każdy stan kwantowy posiada równe ilości dwóch stanów masowych [10].

Prawdopodobieństwo, że neutrino mionowe pozostanie nadal neutrinem mionowym na odległości L od punktu początkowego zależy od czterech parametrów: kąta mieszania θ , kwadratu różnicy mas dwóch stanów Δm^2 (w eV), energii neutrina E (w MeV) oraz długości drogi L (mierzonej w metrach) i wynosi:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E} \right) \quad (3.11)$$

Prawdopodobieństwo przekształcenia się neutrina mionowego w elektronowe na drodze L dane jest związkiem:

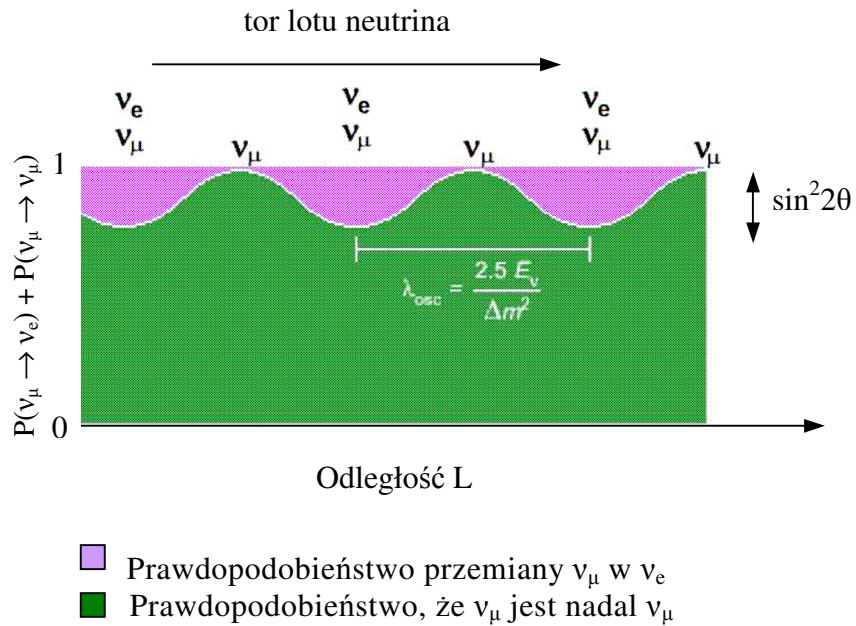
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E} \right) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\pi L}{\lambda_{osc}} \right) \quad (3.12)$$

gdzie:

λ_{osc} - to długość oscylacji w metrach (odległość między dwoma możliwymi maksimumami); λ_{osc} zależy od energii neutrina i o odwrotności kwadratu różnicy mas:

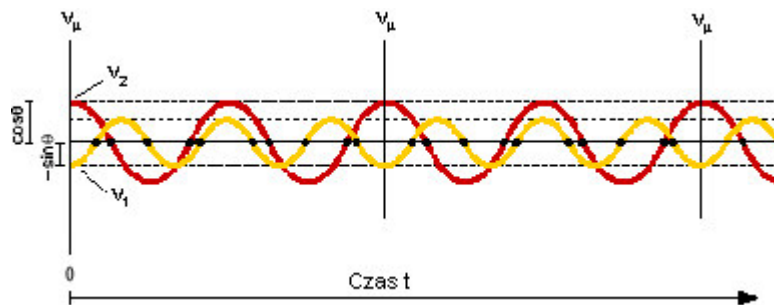
$$\lambda_{osc} = 2.5 E_\nu / \Delta m^2 \quad (3.13)$$

Prawdopodobieństwa oscylacji na dystansie L od punktu początkowego, określone związkami (3.11) i (3.12), przedstawia Rys. 3.5.



Rys. 3.5. Oscylacje neutrin na drodze L [11]

Ewolucję neutrina mionowego w czasie przedstawia Rys. 3.6. poniżej:



Rys. 3.6. Oscylacja neutrina mionowego w czasie. Neutrino mionowe jest produkowane w czasie $t=0$ jako kombinacja stanów masowych: $\nu_\mu = -\sin\theta\nu_1 + \cos\theta\nu_2$. Amplituda każdego stanu masowego przedstawia oscylacje w czasie [5].

Podsumowując, neutrino mionowe produkowane w czasie $t = 0$ podróżuje z prędkością bliską prędkości światła. Prawdopodobieństwo $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$ znalezienia neutrina mionowego po pewnym czasie zmniejsza się poniżej jedynki do minimalnej wartości $1 - \sin^2 \theta$, by znów z powrotem wzrosnąć do jedynki. Zmiana ta ma charakterystyczną periodyczną długość oscylacji $\lambda_{osc} \cong cT$, gdzie T to okres oscylacji neutrina.

Głównym zadaniem eksperymentów badających zjawisko oscylacji neutrin jest podanie przekonującego dowodu na to, że taki proces rzeczywiście występuje, a także wyznaczenie parametrów modelu oscylacji neutrin: różnic mas Δm^2 i kątów mieszania.

Rozdział 4. Eksperymenty neutrinowe

4.1. Doświadczenia z neutronami nieakceleratorowymi

Eksperymenty z neutronami nieakceleratorowymi, którym poświęcone będą kolejne podrozdziały, polegają na badaniu neutron słonecznych, atmosferycznych i reaktorowych. Doświadczeń tego typu jest znacznie więcej, w pracy opisane są tylko te, które dostarczyły wyników przełomowych dla fizyki neutron.

4.1.1. Doświadczenie Raymonda Davisa (1967)

Za pioniera prac badawczych nad neutronami pochodzenia słonecznego uważa się Raymonda Davisa, który jako pierwszy zaobserwował te cząstki jeszcze w roku 1967. Jego doświadczenie miało być potwierdzeniem teorii, że synteza termojądrowa stanowi źródło energii słonecznej. Ponadto wydarzenie to dało początek nowej dziedzinie badań naukowych, w których neutrona miały dostarczać cennej wiedzy dotyczącej naszej najbliższej gwiazdy. Układ eksperymentalny znajdował się w kopalni „Homestake” (Dakota Południowa), na głębokości 1,5 km w celu zminimalizowania różnego rodzaju zakłóceń. Ogromny detektor wypełniony był 615 tonami środka chemicznego (ciekły tetrachloroetylen – C_2Cl_4). Przybywające ze Słońca cząstki powodowały przemianę atomów chloru (wchodzących w skład cieczy wypełniającej detektor) w atomy argonu (4.1), które z kolei wykrywane były metodami radiochemicznymi:



Liczba tak wytworzonych radioaktywnych izotopów argonu dawała informacje tylko o liczbie zarejestrowanych neutron (brak było jakichkolwiek wiadomości o energii reagujących cząstek, kierunku, z którego przybywały, a także czasie zajścia zdarzenia; nie można zatem było stwierdzić czy na pewno ich źródłem jest Słońce). Obliczenia teoretyczne Modelu Słonecznego przewidywały, że w ciągu doby powinno się zaobserwować jeden atom argonu, a tymczasem detektor rejestrował jeden taki akt średnio na dwa dni²⁰. Podejrzewano, że posłużono się złą techniką, że błąd tkwił w niewłaściwej metodzie detekcji neutron lub też model teoretyczny opisujący zjawiska zachodzące na Słońcu jest nieprawidłowy. Jednak wiele razy sprawdzano rachunki i nie wykryto żadnych błędów, a kolejne eksperymenty, wykonywane przez wiele lat, dostarczały podobnych danych [4].

Doświadczenie H. Davisa zapoczątkowało w fizyce neutron nowy kierunek badań, a problem niezgodności liczby obserwowanych neutron słonecznych z przewidywaniami modelu teoretycznego nazwano problemem neutron słonecznych.

W 1969 roku Vladimir Gribov i Bruno Pontecorvo postawili hipotezę o oscylacji neutron, która wyjaśniałaby wyniki eksperymentalne. W drodze ze Słońca na Ziemię, neutrona przekształcałyby się z elektronowych w mionowe lub taonowe. Oscylacje zachodzą jedynie dla cząstek obdarzonych masą. Gdyby więc ta teoria okazała się prawdą,

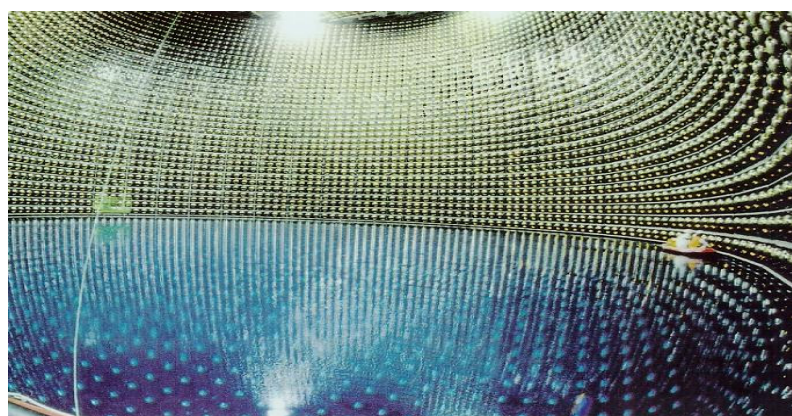
²⁰ Za swe osiągnięcia, H. Davis wraz z Masatoshim Koshiwą otrzymał w 2002 roku Nagrodę Nobla.

należałoby przebudować Model Standardowy, który uznaje neutrina jako cząstki bezmasowe.

4.1.2. Super – Kamiokande

Japoński eksperyment Super – Kamiokande²¹ jest następcą eksperymentu Kamiokande (prowadzonego w latach 1980 – 1995), którego program naukowy obejmował pierwotnie poszukiwanie rozpadu protonu. Stąd budowa dużego podziemnego detektora w celu zmniejszenia poziomu tła pochodzącego od reakcji wywołanych przez neutrina atmosferyczne. Nigdy nie udało się zarejestrować zjawiska rozpadu protonu, ale zauważono pewne anomalie dotyczące liczby przybywających neutronów atmosferycznych. Szybko zatem uzupełniono program eksperymentu o badania tych cząstek.

Detektor eksperymentu Super – K ulokowany jest w kopalni na głębokości 1 km w mieście górniczym Kamioka. Wykonany z nierdzewnej stali zawiera 50 tys. ton czystej wody, na które „patrzy” ponad 11 tysięcy fotopowielaczy – światłoczułych detektorów (Rys.4.1.).



Rys. 4.1. Wnętrze detektora Super – K [12]

Pierwsze zadanie detektora Super – K polegało na obserwacji docierających do Ziemi neutronów atmosferycznych. Sygnaturą pojawienia się neutronów ν_e i ν_μ było zarejestrowanie odpowiednio elektronów i mionów. W detektorze rejestrowano zdarzenia typu CC (patrz podrozdział 4.2.3.) (4.2 – 4.3):

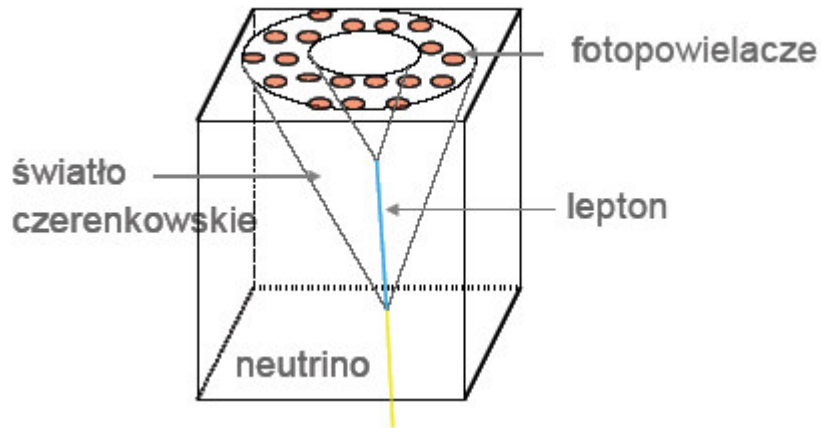


Reakcja ta wykrywana jest przez fotopowielacze dzięki towarzyszącym jej niebieskawym błyskom światła. Błyski te są efektem promieniowania Czerenkowa. Kiedy naładowana cząstka (np. mion lub elektron) przechodzi przez materię z prędkością większą od prędkości światła²² w tym ośrodku, wówczas emituje promieniowanie Czerenkowa w formie stożka wokół toru swego ruchu. Jego oś wskazuje na kierunek ruchu cząstki (analogia do fali uderzeniowej samolotu przekraczającego prędkość dźwięku). Fotony Czerenkowa tworzą na ścianie detektorów obraz w postaci świetlnego pierścienia

²¹ W dalszej części pracy będzie używany skrót Super – K.

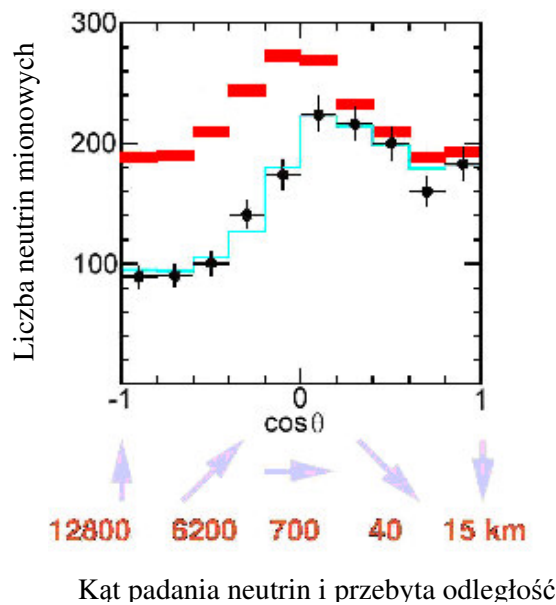
²² Nie narusza to relatywistycznej teorii Einsteina, ponieważ w wodzie jest ona mniejsza o 25 % (wynosi 225 tys. km/s); zaś cząstki o wysokich energiach mogą poruszać się z prędkością bliską prędkości światła.

(Rys.4.2.). Na podstawie jego kształtu, rozmiaru i intensywności można określić cechy naładowanej cząstki, co daje z kolei informację o tym, z jakiego rodzaju neutrino powstała [3]. Dużą zaletą eksperymentu Super – K jest możliwość bezpośredniego zliczania neutrino w momencie ich oddziaływania z jądrami wody. Dodatkowo mamy informację o energii i kierunku, z którego przybyły.



Rys. 4.2. Schemat świetlistego pierścienia powstającego w wyniku oddziaływania neutrino z ośrodkiem [11]

Obliczenia teoretyczne przewidywały, że na każde neutrino elektronowe przypadają dwa neutrino mionowe (patrz schematy 3.3 i 3.4). Zatem stosunek obu tych wielkości powinien wynosić 1:2 Tymczasem po wielu miesiącach zliczeń okazało się, że stosunek tych wielkości wynosi 1.3:1 [3]. Aby sprawdzić ten wynik postanowiono zbadać liczbę neutrino przybywających z przeciwnych stron Ziemi. Detektor rejestrował



- przewidywana liczba neutrino przy braku oscylacji
- przewidywana liczba neutrino przy założeniu, że podlegają zjawisku oscylacji
- wyniki pomiarów eksperymentu Super - K

Rys. 4.3. Wykres zależności obserwowanych w detektorze Super – K neutrino mionowych od odległości i kąta padania [11]

cząstki przychodzące pod różnymi kątami, w szczególności te, które przychodziły z góry i te, które po przebyciu prawie 13 tys. km nadlatywały z przeciwnej strony kuli ziemskiej. I tu również naukowcy znaleźli anomalie – neutrin mionowych z przeciwnej strony Ziemi przybyło o połowę mniej niż z góry; neutrin elektronowych było tyle samo z góry, co z dołu [3].

Niedobór neutrin mionowych stanowi mocny dowód na potwierdzenie zjawiska oscylacji neutrin. Rys. 4.3. pokazuje, że liczba neutrin docierających do detektora pasuje do modelu uwzględniającego zjawisko oscylacji. Neutrin mionowych, które mają dłuższą drogę do przebycia dochodzi mniej (po przejściu bardzo długiej drogi połowa z nich zmienia zapach i nie zostaje zarejestrowana).

Poza odkryciem oscylacji neutrin atmosferycznych (1998 rok), eksperyment Super – K przyczynił się również do wyjaśnienia problemu neutrin słonecznych. Detektor Czerenkowa umożliwia obserwację neutrin słonecznych poprzez rejestrację elektronów, biorących udział w procesie elastycznego rozpraszania (4.4):



Zaobserwowano jedynie połowę z przewidywanej teoretycznie liczby neutrin słonecznych. Deficyt neutrin słonecznych – podobnie jak atmosferycznych – tłumaczono występowaniem mieszania pomiędzy różnymi zapachami neutrin.

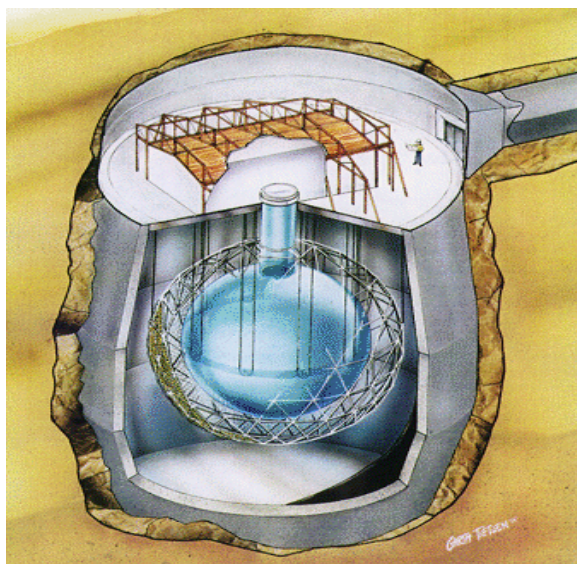
Podsumowując, główne wyniki otrzymane w eksperymencie Super – K pokazały zależność strumienia neutrin atmosferycznych docierających do powierzchni ziemi od kąta padania, a także oscylacyjny charakter zależności liczby rejestrowanych przypadków od L/E^{23} .

4.1.3. SNO (*Sudbury Neutrino Observatory*)

Eksperyment SNO został zaprojektowany przede wszystkim w celu badania neutrin pochodzenia słonecznego i znalezienia bezpośredniego dowodu potwierdzającego zjawisko oscylacji neutrin. Mieści się głęboko pod Ziemią (2 km), w kopalni niklu w Kanadzie²⁴ (Rys. 4.4.). Różni się od Super-K tym, że wypełnia go ciężka woda (8 tys. ton). Cząsteczka takiej wody zbudowana jest z atomu tlenu i dwóch atomów deuteru – ciężkiego wodoru. Zatem w pojedynczej molekuale takiej wody mamy dodatkowo dwa neutrony. Te dodatkowe neutrony służą nowej metodzie obserwacji neutrin słonecznych, polegającej na tym, że w jednym eksperymencie rejestruje się nie tylko neutrina elektronowe, ale wszystkie rodzaje tych cząstek – na podstawie innej reakcji [4]. Idea eksperymentu jest następująca: neutrina elektronowe wywołują tylko jeden rodzaj reakcji w wyniku oddziaływania z jądrami deuteru, pozostałe zapachy zaś mogą uczestniczyć w innych reakcjach. Jeśli do Ziemi docierałyby jedynie neutrina elektronowe (tylko takie wytwarzane są we wnętrzu naszej gwiazdy), czyli na swej drodze nie zmieniałyby zapachu, to całkowita liczba przybywających do powierzchni Ziemi neutrin wszystkich trzech generacji powinna być równa liczbie neutrin elektronowych. Gdyby tak nie było, wówczas neutrina przybywające ze Słońca musiałyby zmieniać zapach w czasie 8 – minutowej podróży do Ziemi.

²³ Wyniki z przełomu 2004 i 2005 roku.

²⁴ Główny zbiornik, który wypełnia 1000 ton ciężkiej wody, jest przezroczysty i ma średnicę 12 m; otacza go ponadto 7000 ton zwykłej ultraczystej wody; na wodę „patrzy” 9500 fotonowielaczy umieszczonych na wewnętrznej stronie sfery o 18 –metrowej średnicy.



Rys. 4.4. Schemat detektora SNO [5]

Wszystkie trzy zapachy neutrin mają szansę rozszczepienia jąder deuteru, zwanych deutronami, na proton i neutron (4.5):



natomiast neutrino elektronowe wchodzi wyłącznie w poniższą reakcję²⁵:



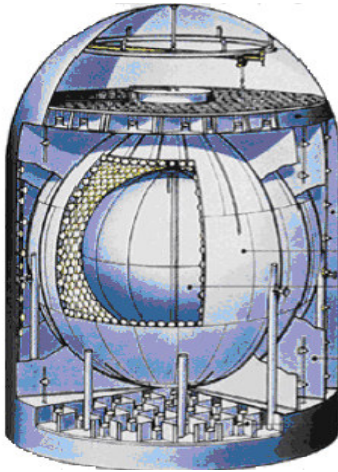
W rezultacie powstaje elektron. Trzecią reakcją pozwalającą wykryć neutrino wszystkich zapachów jest ich rozpraszanie na elektronach. Jednak metoda taka jest mniej dokładna niż ta z rozbiciem jądra deuteru.

W eksperymencie SNO stwierdzono, że wiązka neutrin elektronowych to jedynie połowa wszystkich zarejestrowanych zapachów tych cząstek. Skoro we wnętrzu Słońca produkowane są tylko neutrino elektronowe, po drodze muszą przeobrażać się w taonowe lub mionowe [4] (był to pierwszy wielki wynik SNO – dowód na to, że neutrino elektronowe ze Słońca nie tylko znikają, ale także odnajdują się w innym zapachu). Rezultaty badań SNO pokazały, że dobrze rozumiano procesy termojądrowe zachodzące na Słońcu, a także że neutrino mają masę.

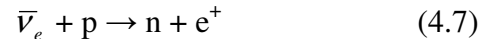
4.1.4. KamLAND

Eksperyment ten zajmuje się badaniem antyneutrin elektronowych pochodzących z japońskich i koreańskich reaktorów jądrowych (85 % sygnałów pochodzi z reaktorów znajdujących się w odległości 140 – 340 km). Jego detektor, wypełniony ciepłym scyntylatorem, ulokowany jest w kopalni miasta górniczego Kamioka (na głębokości 1km), a więc tam, gdzie znajduje się detektor Super – K [4]. Wypełnia go 1000 t ciepłego scyntylatora, na który „patrzy” 2100 fotopowielaczy (Rys. 4.5.).

²⁵ Jest ono absorbowane przez neutron.



Detektor eksperymentu KamLAND rejestruje nie tylko antyneutrino elektronowe, ale również antyneutrino ziemskie (geoneutrino), produkowane przez rozpady ^{238}U oraz ^{232}Th w Ziemi. Odróżnienie neutrin reaktorowych od geoneutrin polega głównie na identyfikacji ich energii. Energia geoneutrin pochodzi z zakresu 1.7 - 3.4 MeV, podczas gdy reaktorowe mają odpowiednio wyższą energię. Do detekcji antyneutrin KamLAND wykorzystuje reakcję:



Rys. 4.5. Schemat detektora eksperymentu KamLAND [5]

Do detekcji antyneutrin KamLAND wykorzystuje tę samą metodę co F. Reines i C. Cowan, opisaną w podrozdziale 3.2.2.

Eksperyment KamLAND pokazał zjawisko oscylacji dla neutrin reaktorowych i wykazał oscylacyjny kształt zależności liczby rejestrowanych cząstek od L/E . Zebrane dane dotyczące oscylacji antyneutrin elektronowych są zgodne z wynikami uzyskanymi w eksperymencie SNO badającym neutrino elektronowe. W Tab. 4.1. zebrano podstawowe informacje dotyczące omawianych eksperymentów z neutrinami nieakceleratorowymi.

Tab. 4.1. Eksperymenty z neutrinami nieakceleratorowymi – podsumowanie

Eksperyment	Źródło neutrin	Metody detekcji	Masa detektora (t)	Reakcja
Homestake	Słońce	Metody radiochemiczne	615	$\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$
Super – K	Atmosfera	Detektor Czerenkowa	50000	$\nu_{e(\mu)} + N \rightarrow e(\mu) + X,$
	Słońce			$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$
SNO	Słońce	Detektor Czerenkowa	8000	$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-,$ $\nu_{e, \mu, \tau} + d \rightarrow p + n + \nu_{e, \mu, \tau}$
KamLAND	Reaktor jądrowy	Błyski scyntylacyjne	6200	$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$

4.2. Doświadczenia z neutrinami akceleratorowymi

Omawiane w poprzednim podrozdziale doświadczenia z neutrinami nieakceleratorowymi – słonecznymi, atmosferycznymi czy reaktorowymi – wykorzystywały źródła neutrin, których nie można kontrolować ani modyfikować. W takich eksperymentach nie można mieć wpływu ani na strumień neutrin, ani na widmo ich energii. Liczba oddziaływań neutrin jest głównie kontrolowana przez zmianę rozmiaru detektorów, od którego zależy szansa zarejestrowania neutrina. Postanowiono więc wytwarzać neutrino

przy pomocy akceleratorów – urządzeń przyspieszających wiązki naładowanych cząstek do wysokich energii.

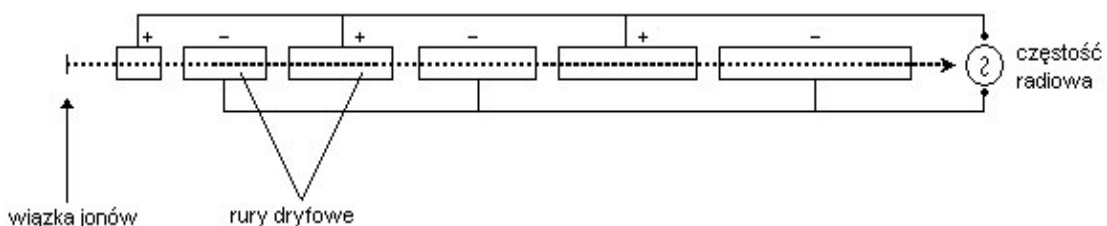
Dużą zaletą użycia akceleratorów do produkcji neutrin jest fakt, że można kontrolować kierunek, widmo energii i rodzaj tak wytworzonych cząstek. Poprzez odpowiednie ustawienie detektora ma się też wpływ na odległość od źródła neutrin L (wzory 3.11 i 3.12). Energie neutrin i odległość od źródła neutrin do punktu ich detekcji można więc modyfikować w taki sposób, aby pomiar przeprowadzany był tam, gdzie spodziewany efekt oscylacji jest największy (w maksimum oscylacji).

We wszystkich typach akceleratorów, naładowane cząstki przyspieszane są za pomocą pola elektrycznego \mathbf{E} (działa na nie siła $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$). Najstarszym takim urządzeniem, a zarazem najprostszym, jest akcelerator Van de Graaffa, pracujący w oparciu o źródło wysokiego, stałego napięcia. W ten sposób można uzyskać jedynie energię sięgającą kilku – kilkuset MeV, w zależności od typu cząstki. Chcąc osiągnąć większe energie, należy wykorzystać źródło napięcia zmiennego o wysokiej częstotliwości. Ponadto trzeba zapewnić synchronizację ruchu naładowanych cząstek ze zmianami napięcia, by otrzymać kolejne pchnięcia przyspieszające cząstki. Do przyspieszania cząstek do wysokich energii służą akceleratory liniowe i kołowe.

4.2.1. Rodzaje, budowa i zasada działania akceleratorów

Wyróżniamy dwa typy akceleratorów – liniowe i kołowe (synchrotrony). Akceleratory liniowe wykorzystują tzw. rury dryfowe jako elementy służące do przyspieszania cząstek. Są one ustawione liniowo obok siebie (Rys. 4.6.) i podłączone naprzemiennie do przeciwnych biegunów generatora napięcia. Wytwarzana przez źródło wiązka naładowanych cząstek (protonów lub elektronów) przechodzi po liniach prostych przez kolejne rury dryfowe, ulegając przyspieszeniu w przerwach pomiędzy nimi (w środku rur pole elektryczne ma wartość zerową). Następnie wiązka jest wyprowadzana na zewnętrzną tarczę. Urządzenia te wykorzystuje się jako układy wprowadzające dla kołowych akceleratorów.

Energie otrzymywane w protonowych akceleratorach liniowych (źródłem protonów są jony wodoru) sięgają kilkudziesięciu MeV; zależą od jego długości i różnicy napięć pomiędzy poszczególnymi rurami.

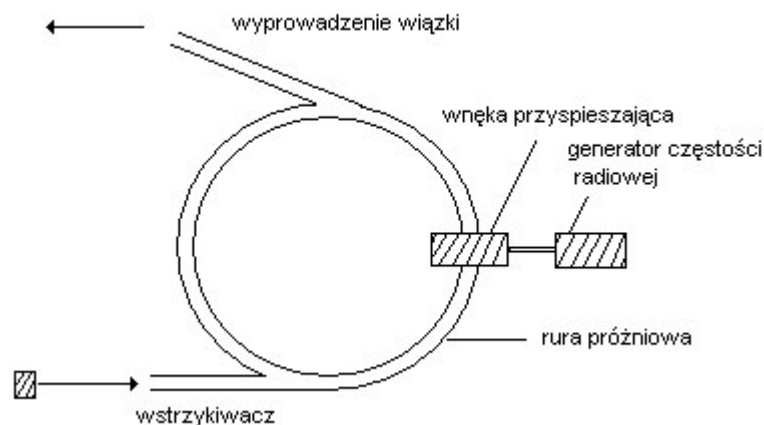


Rys. 4.6. Schemat protonowego akceleratora liniowego. Przyspieszanie jonów zachodzi w przerwach między rurami dryfowymi, umieszczonymi w rurze próżniowej [2]

Kiedy przyspieszanymi cząstkami są elektrony, można uzyskać energie rzędu 50 GeV. W elektronowych akceleratorach liniowych rury dryfowe są jednakowej długości, ponieważ elektrony o energii rzędu już kilku MeV poruszają się z prędkością bliską prędkości światła. Największy elektronowy akcelerator liniowy znajduje się w Uniwersytecie Stanforda w Stanach Zjednoczonych i ma długość 3 km [2].

W akceleratorach kołowych przyspieszane cząstki poruszają się po okręgach lub po ich łukach, co jest wynikiem działania pola magnetycznego \mathbf{B} , które jest prostopadłe

do trajektorii cząstek (Rys.4.7.). Pole elektryczne \mathbf{E} działa we wnękach przyspieszających, umieszczonych na pewnych odcinkach drogi, powodując przyspieszanie cząstek. Pole magnetyczne \mathbf{B} i zmiany pola elektrycznego \mathbf{E} , w miarę rosnącej prędkości cząstek, muszą być odpowiednio zwiększane (synchronizowane) – żeby utrzymać wiązkę na zakrzywionym torze i skutecznie ją przyspieszać (stąd nazwa „synchrotron”). Odpowiednie magnesy zapewniają kolimację wiązki. Maksymalne energie (które zależą od promienia pierścienia i największej wartości \mathbf{B}) uzyskiwane w akceleratorach kołowych sięgają od kilkuset GeV (w przypadku użycia standardowych magnesów) do 1 TeV (przy użyciu magnesów nadprzewodzących) [2]. Przykładem protonowego akceleratora kołowego jest *Tevatron* – synchrotron w Fermilabie.



Rys. 4.7. Schemat synchrotronu [13]

Przy akceleratorach, zarówno liniowych jak i kołowych, można wyróżnić dwa typy eksperymentów: ze stacjonarną tarczą i z wiązkami przeciwbieżnymi.

W eksperymentach akceleratorowych ze stacjonarną tarczą, wytworzone w akceleratorach wiązki naładowanych cząstek przyspieszane są do dużej energii, a następnie wyprowadzane są z niego i kierowane w stronę tarczy. W wyniku zderzenia powstają cząstki wtórne, które rozpadając się mogą produkować np. neutrino. W zderzaczach²⁶ wiązki krążą przeciwbieżnie i w pewnym momencie się zderzają. W miejscu zderzenia wiązek umieszcza się detektor, który rejestruje produkty powstałe w wyniku zderzenia.

Przyspieszanie wiązek do wysokich energii odbywa się zwykle etapami. Cząstki przyspieszane są przez zespoły akceleratorów liniowych i kołowych. Przykładem jest kompleks akceleratorów w Fermilabie – jeden z największych ośrodków badawczych cząstek elementarnych [14].

²⁶ Przykładem zderzacza jest akcelerator LHC – Wielki Zderzacz Hadronów. Mieści się w Europejskim Laboratorium Fizyki Cząstek – CERN pod Genewą; będzie zderzał przeciwbieżne wiązki protonów, każda o ogromnej energii 7 TeV (przewidywany rok ukończenia budowy akceleratora – 2007) [2].



Rys. 4.8. Schemat kompleksu akceleratorów w ośrodku Fermilab [14]

Na kompleks akceleratorów w ośrodku Fermilab (Rys. 4.8.) składa się: *Pre – accelerator* (wstępny akcelerator), *Linac* (akcelerator liniowy), *Booster* (akcelerator kołowy), *Main Injector* (akcelerator kołowy), *Tevatron* (akcelerator kołowy) i Źródło Antyprotonów składające się z układu tarczy i dwóch synchrotronów (*Debuncher* i *Accumulator*). Poniżej zostaną omówione krótko poszczególne akceleratory:

- *Pre – accelerator* – jest pierwszym akceleratorem; jest to źródło ujemnie naładowanych jonów przyspieszanych przez akcelerator liniowy. Składa się ze źródła umieszczonego w naładowanej elektrycznie kopule (750 kV). Źródło jonizuje wodór gazowy (powstaje H). Zjonizowany gaz jest przyspieszany do energii 750 keV. *Pre – accelerator* przyspiesza wiązkę antyprotonów co 66ms,
- *Linac* – to kolejny etap przyspieszania ujemnie naładowanych jonów wodoru; przyspiesza je od 750 keV do 400 MeV. Może przyspieszyć wiązkę raz na 66ms
- *Booster* – przejmuje ujemnie naładowane jony wodoru z akceleratora liniowego i pozbawia je elektronów. Protony przyspieszane są od energii 400 MeV do 8000 MeV (8 GeV). *Booster* jest pierwszym akceleratorem kołowym w kompleksie. Składa się z serii magnesów i wnek przyspieszających. Wiązka protonów może być kierowana do kolejnego akceleratora kołowego (*Main Injector*) lub wyprowadzana do produkcji wiązki neutrinowej na potrzeby eksperymentu MiniBOONE. Podobnie jak *Linac*, *Booster* przyspiesza wiązkę raz na 66 ms,
- *Main Injector* (MI) – akcelerator kołowy (o obwodzie siedem razy większym od obwodu *Boostera*). MI posiada 18 wnek przyspieszających, które mogą przyspieszać protony z *Boostera* o energii 8 GeV do energii albo 120 GeV albo 150

GeV, w zależności od ich przeznaczenia. Jeśli celem jest skierowanie wiązki do *Tevatronu*, końcowa energia wiązki wynosi 150 GeV. Wiązka jest przyspieszana do energii 120 GeV jeśli jest wyprowadzana do produkcji antyprotonów lub do produkcji wiązki neutrinowej NuMI. MI przyspiesza wiązkę raz na około 2 s,

- *Tevatron*²⁷ – jest największym akceleratorem w Fermilab, jego obwód to około 7.5 km. W *Tevatronie* zderzają się przeciwbieżne wiązki protonów i antyprotonów (*Tevatron* przyspiesza protony i antyprotony od energii 150 GeV do 980 GeV). W miejscu zderzeń umieszczone są detektory D0 i CDF.

Źródło antyprotonów:

- Tarcza – (wykonana z niklu) kierowane są na nią protony z MI; w wyniku zderzenia produkowanych jest dużo rozmaitych cząstek, które przy pomocy magnesów są selekcyonowane pod względem pędu i znaku ładunku; antyprotony o energii 8 GeV kierowane są do akceleratora *Debuncher*,
- *Debuncher* – jest jednym z dwu synchrotronów tworzących Źródło Antyprotonów. Ma kształt „zaokrąglonego” trójkąta o promieniu 90 m. *Debuncher* nie przyspiesza wiązki tak jak inne akceleratory, ale utrzymuje wiązkę przy stałej energii 8 GeV. Głównym jego zadaniem jest przechwytywanie antyprotonów pochodzących z rejonu tarczy i wstępne chłodzenie²⁸ wiązki,
- *Accumulator* – jest drugim synchrotronem wchodzącym w skład Źródła Antyprotonów. Ma kształt zaokrąglonego trójkąta o promieniu 75 m i ulokowany jest w tym samym tunelu co *Debuncher*. Podobnie jak *Debuncher* chłodzi wiązkę antyprotonów o energii 8 GeV i przechowuje antyprotony do czasu aż będą potrzebne. Antyprotony z *Accumulatora* mogą być skierowane do MI.

4.2.2. Produkcja neutrin akceleratorowych

W akceleratorze nie można przyspieszać cząstek niestabilnych ani nienaładowanych, stąd do produkcji neutrin wykorzystuje się tzw. wiązkę pierwotną (np. protony), która po wyprowadzeniu z akceleratora kierowana jest w stronę tarczy. W wyniku zderzeń z tarczą produkowane są różnego rodzaju cząstki naładowane. Stanowią one wiązkę wtórną, której skład, pęd i znak ładunku można selekcyonować za pomocą odpowiednich przesłon i magnesów odchylających. Takimi metodami otrzymuje się np. wtórne wiązki hadronów (jak π , K) i leptonów (μ , ν).

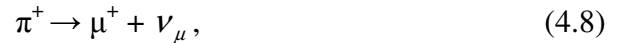
Szczegółowy opis wytwarzania neutrin zostanie omówiony na podstawie wiązki NuMI. Metoda produkowania neutrin jest następująca: wytworzone w akceleratorze protony o energii 120 GeV kierowane są na grafitową tarczę (Rys.4.9.). Wiązka protonów opuszcza akcelerator w sposób impulsowy co 1.9 s. W chwili obecnej intensywność jej wynosi około $2.5 \cdot 10^{13}$ protonów/puls [14]. Wiązka protonów (przed tarczą) jest stale monitorowana na całej długości od momentu wyprowadzenia z akceleratora. Wszelkie odchylenia od toru nominalnego są automatycznie korygowane (m.in. dlatego, żeby zmniejszyć radiację). Powstałe w wyniku zderzenia protonów z tarczą cząstki dodatnie²⁹ (głównie piony i kaony) są ogniskowane za pomocą dwóch rogów magnetycznych (*ang.* horns), a następnie przechodzą przez rurę rozpadową o długości 675 m,

²⁷ Nazwa Tevatron pochodzi od uzyskanej w nim energii rzędu TeV (1 TeV = 10^{12} eV). Zderzając przeciwbieżne wiązki protonów i antyprotonów w tym akceleratorze odkryto w 1995 r. kwark t oraz neutrinonowe (2000 r.).

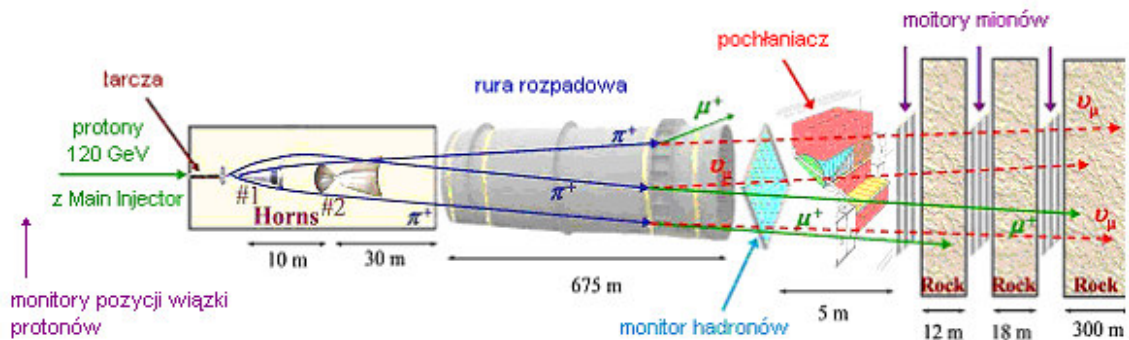
²⁹ Chłodzenie wiązki polega na zmniejszeniu rozrzutu pędu cząstek wchodzących w skład wiązki.

³⁰ Cząstki ujemne są deogniskowane.

gdzie większość z nich rozpada się. Neutrino mionowe powstają przede wszystkim w wyniku rozpadu (4.8):

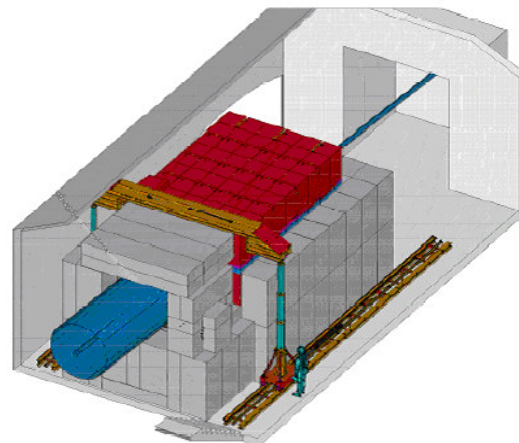


Choć własny czas życia pionów to zaledwie $t = 2.60 \cdot 10^{-8}$ s [13], tunel rozpadowy ma długość kilkuset metrów, ponieważ należy uwzględnić lorentzowskie wydłużenie czasu życia pionów i pomnożyć czas własny przez czynnik $\gamma = E/m$ (masa pionu wynosi 139.57 MeV, energia np. 10 GeV), co daje wartość $t = 1.86 \cdot 10^{-6}$ s. Teraz jak pomnożymy uzyskany czas przez prędkość światła $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s (piony poruszają się z prędkością bliską prędkości światła) otrzymamy długość drogi rozpadu około 558 m.



Rys. 4.9. Schemat układu do produkcji neutronów w eksperymencie MINOS [14]

Czystą wiązkę neutronów uzyskuje się poprzez zastosowanie różnego rodzaju absorbentów. Za rurą rozpadową znajduje się absorbent złożony z aluminiowego jądra chłodzonego wodą, otoczonego stalowymi blokami i betonem (Rys. 4.10.), który zatrzymuje – na skutek oddziaływań – wszystkie hadrony wychodzące z rury rozpadowej.

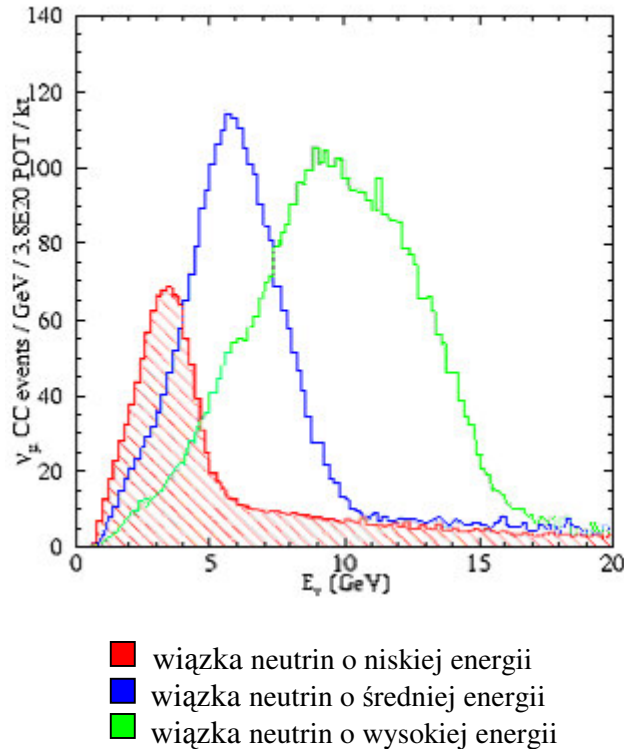


Rys. 4.10. Schemat absorbenta hadronów [14].

Pozostałe miony odfiltrowywane są – poprzez straty jonizacyjne – w ponad 300 m skały znajdującej się przed najbliższym detektorem. Neutrino zaś rozpoczynają 2.5 – milisekundową podróż do detektora MINOS położonego blisko granicy z Kanadą.

W eksperymentach akceleratorowych, w których produkuje się neutrino w wyniku rozpadu pionów i kaonów, wytworzona wiązka neutrin składa się przede wszystkim z ν_μ z domieszką $\bar{\nu}_\mu$. Zawierać także śladowe ilości (około 1 %) ν_e i $\bar{\nu}_e$, powstałych z rozpadów kaonów i mionów

Zmieniając położenie tarczy względem rogów magnetycznych można zmieniać spektrum energii dla wyjściowej wiązki neutrin. Na Rys. 4.11. pokazane są możliwe widma energii neutrin dla wiązki NuMI.



Rys. 4.11. Widma energii neutrin w zależności od ustawienia tarczy – przy jednakowych położeniach rogów magnetycznych [14].

4.2.3. Metody detekcji neutrin

Detekcja neutrin opiera się na rejestrowaniu cząstek powstałych w wyniku oddziaływania neutrina z materiałem wypełniającym detektor. Ponieważ neutrino uczestniczą w oddziaływaniach słabych, detektory muszą mieć ogromne masy – by zwiększyć szansę oddziaływania z ośrodkiem. Różne eksperymenty neutrinowe wykorzystują różne sposoby detekcji, np. w doświadczeniu Raymonda Davisa posługiwano się metodami radiochemicznymi wykrywającymi nowo powstałe jądra promieniotwórcze w efekcie oddziaływania neutrina, eksperyment Super – K, którego detektor wypełnia czysta woda, wykorzystuje promieniowanie Czerenkowa emitowane przez szybko poruszający się naładowany lepton; w eksperymencie KamLAND znajdują się detektory scyntylacyjne, wykorzystujące błyski świetlne powstające przy wzbudzeniu atomów ośrodka przy przejściu naładowanej cząstki.

W dowolnym detektorze neutrin zachodzą podstawowe procesy z udziałem cząstek powstałych w wyniku oddziaływania neutrin. Należą do nich zdarzenia typu CC (*ang.* Charged Current) oraz zdarzenia typu NC (*ang.* Neutral Current).

Zdarzenia typu CC wywołane są oddziaływaniem przez prądy naładowane – poprzez wymianę bozonów W^\pm . Zachodzą wedle schematów (4.9) [2]:

$$\begin{aligned}
\nu_e + N &\rightarrow e^- + X, \\
\nu_\mu + N &\rightarrow \mu^- + X, \\
\nu_\tau + N &\rightarrow \tau^- + X,
\end{aligned}
\tag{4.9}$$

gdzie:

N – jądro atomowe

X – końcowy stan hadronowy

W wyniku oddziaływań CC dochodzi do zmiany ładunku oddziaływującej cząstki. Dany rodzaj neutrino rozpoznaje się poprzez detekcję naładowanego leptonu (e^- lub μ^-). Wedle podobnych schematów oddziałują antyneutrino – wtedy w wyniku oddziaływania powstaje mion dodatni. Gdy neutrino oddziałuje z pojedynczym nukleonem, np. $\nu_e + n \rightarrow e^- + p$ to proces taki nazywamy kwazi – elastycznym (dominuje on dla niskich energii neutrino, poniżej 1 GeV).

W 1973 roku w CERN przeprowadzono doświadczenie, w którym uzyskano stan końcowy bez naładowanego leptonu. Reakcje te zachodziły zgodnie ze schematami (4.10) [2]:

$$\begin{aligned}
\nu_\mu + N &\rightarrow \nu_\mu + X, \\
\bar{\nu}_\mu + N &\rightarrow \bar{\nu}_\mu + X.
\end{aligned}
\tag{4.10}$$

Procesy tego typu noszą nazwę zdarzeń typu NC i zachodzą dla wszystkich rodzajów neutrino. Wywołane są przez prądy neutralne (nie zmieniające ładunku oddziałującej cząstki) i występują rzadziej niż zdarzenia typu CC [2].

Opisane zdarzenia typu CC i NC należą do oddziaływań półleptonowych. Jeszcze przed ich odkryciem zaobserwowano zdarzenia z udziałem samych tylko leptonów (zdarzenia leptonowe) typu [2]:

$$\begin{aligned}
\nu_\mu + e^- &\rightarrow e^- + \nu_\mu, \\
\bar{\nu}_\mu + e^- &\rightarrow e^- + \bar{\nu}_\mu.
\end{aligned}
\tag{4.11}$$

Tego rodzaju reakcje należą do procesów elastycznych – natura obiektu, z którym oddziałuje neutrino nie zmienia się.

4.3. Eksperymenty akceleratorowe z długą bazą

Eksperymenty akceleratorowe z długą bazą polegają na rejestrowaniu neutrino, które po przebyciu kilkuset kilometrów docierają do detektora (Rys. 4.12.) W ten sposób można badać zjawisko ich oscylacji. Pierwszym takim doświadczeniem był eksperyment K2K, pozostałe programy badawcze związane są z wiązkami NuMI w Stanach Zjednoczonych, CNGS (CERN – Gran Sasso) w Europie (opisany w podrozdziale 4.3.3.) i wiązką Tokai – Kamioka w Japonii.



Rys. 4.12. Schemat eksperymentów z długą bazą pomiarową. Bliski detektor jest zawsze ustawiony niedaleko źródła neutrin, zaś daleki oddalony jest o setki kilometrów. Rysunek pokazuje schematycznie rozmycie wiązki neutrin (wartości liczbowe podane są dla wiązki NuMI) [14].

4.3.1. K2K

K2K był pierwszym eksperymentem mierzącym ubytek akceleratorowych neutrin mionowych z wiązki (o typowej energii 1.3 GeV), która wytwarzana była w źródle na terenie ośrodka KEK w Japonii, oddalonego o 250 km od detektora Super – K. Jeszcze na obszarze ośrodka KEK znajdowało się kilka detektorów (300 m od źródła), których celem był pomiar i charakterystyka wiązki neutrin tuż po jej wyprodukowaniu, zanim doszło do zjawiska oscylacji. Służyło to porównaniu jej z wiązką w detektorze Super – K i oceny liczby oddziaływań neutrin mionowych w przypadku braku oscylacji.

Eksperyment K2K gromadził dane od czerwca 1999 do lipca 2001 roku. W ciągu tych dwóch lat zarejestrowano 56 oddziaływań [9], przy czym założenia teoretyczne – wykluczające zjawisko oscylacji – przewidywały około 80 takich przypadków. Ponadto otrzymane wyniki były zgodne z wynikami uzyskanymi w eksperymencie Super – K, badającego neutrina atmosferyczne.

4.3.2. MINOS³⁰

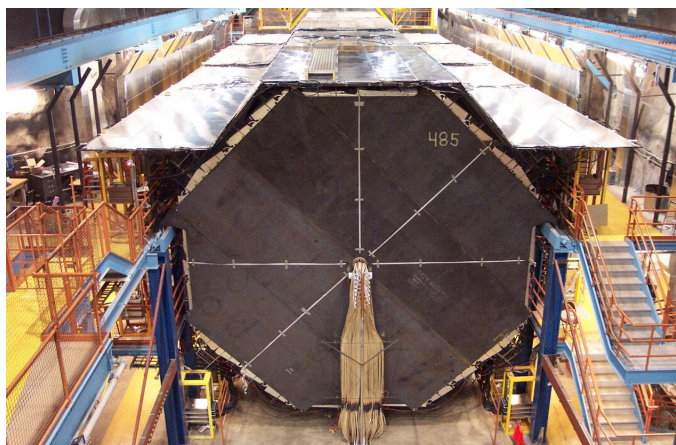
MINOS jest kolejnym eksperymentem akceleratorowym z długą bazą pomiarową, który zaczął zbierać dane. Wiązka neutrin (NuMI) o średniej energii 2 – 4 GeV, wytwarzana w ośrodku Fermilab pod Chicago, przebywa drogę 735 km i dociera do detektora MINOS położonego w kopalni Soudan w stanie Minnesota. Podobnie jak w przypadku eksperymentu K2K, tu również pierwszy detektor ustawiony jest w pobliżu (1 km) źródła, by prowadzić obserwacje dotyczące właściwości neutrin jeszcze na początku ich podróży.

Oba detektory – bliski i daleki – zbudowane są w oparciu o ten sam podstawowy projekt:

- składają się z naprzemiennych warstw stali i scyntylatora w postaci pasków o szerokości 4 cm (2.54 cm stali i 1 cm stałego scyntylatora),
- paski scyntylatora w kolejnych warstwach ustawione są pod kątem prostym względem siebie.

Bliski detektor MINOSA'a waży 1000 t i składa się z 282 płaszczyzn o maksymalnej wysokości 3.8 m. Daleki ma masę 5400 t i zbudowany jest z 485 warstw o maksymalnej wysokości 8 m (Rys. 4.13.).

³⁰ Skrót od *Main Injector Neutrino Oscillation Search*



Rys. 4.13. Zdjęcie dalekiego detektora eksperymentu MINOS [14]

Daleki detektor rejestruje oddziaływania neutrin atmosferycznych i cząstek promieniowania kosmicznego od lipca 2003 roku. Pierwsze neutrina z wiązki NuMI zostały wyprodukowane na początku 2005 roku.

Zadaniem eksperymentu MINOS – pierwszego użytkownika wiązki NuMI – jest wyznaczenie parametrów oscylacji neutrin z dużą dokładnością.

4.3.3. Przyszłe projekty akceleratorowe

Mimo wielu odkryć dotyczących neutrin i ich właściwości, nadal pozostaje wiele pytań bez odpowiedzi. Jednym z najważniejszych jest to, jakie wartości przyjmują brakujące (jeszcze nie zmierzone) parametry oscylacji. Chcąc odpowiedzieć na te pytania trzeba sięgnąć po nowe metody badań. Potrzebne będą akceleratory o większej mocy (produkujące intensywniejsze wiązki) i lepsze – wykorzystujące nowe technologie, większe – detektory tych cząstek.

Jednymi z przyszłych eksperymentów akceleratorowych będą eksperymenty budowane w Europie przy wiązce CNGS (uruchomienie wiązki neutrin przewidywane jest na rok 2006). Z wiązką CNGS związane są eksperymenty ICARUS³¹ oraz OPERA³² (detektory są w trakcie budowy). W pierwszym eksperymencie wiązka neutrin o średniej energii 20 GeV przesyłana będzie z CERN do oddalonego o 730 km detektora ICARUS we Włoszech. Pierwszy istniejący moduł detektora ICARUS, wypełnionego ciekłym argonem, posiada masę 600 ton. Przechodzące przez detektor naładowane cząstki powodują jonizację i wzbudzenia atomów argonu. Powstałe elektrony jonizacji dryfują w polu elektrycznym w kierunku brzegu detektora. Tam są rejestrowane przez płaszczyzny drutów. Zastosowana technika detekcyjna pozwoli na identyfikację cząstek i pomiar energii nowopowstałych cząstek, a także da możliwość ich trójwymiarowej rekonstrukcji w razie oddziaływania (dwie współrzędne drutowe i jedna czasowa).

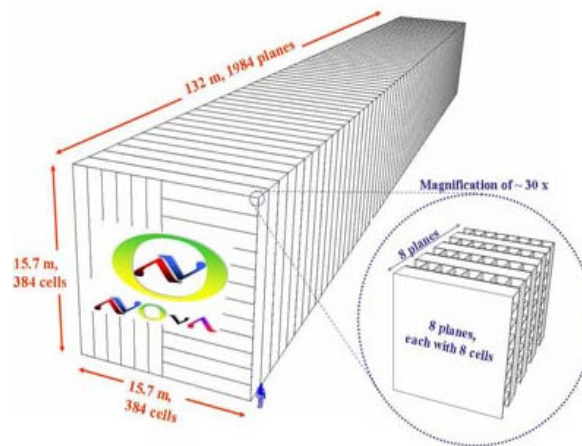
Drugim eksperymentem związanym z wiązką CNGS jest OPERA. Detektor tego eksperymentu (2 kt ołowiu i 0.04 kt emulsji fotograficznej) będzie umieszczony – podobnie jak poprzedniego programu – w laboratorium Gran Sasso we Włoszech. Głównym celem obydwu eksperymentów było poszukiwanie neutrin taonowych w wiązce neutrin mionowych. Okazało się, że niezwykle interesujące będzie także poszukiwanie neutrin elektronowych, które przeoscyłowały z neutrin mionowych.

³¹ Skrót od *Imaging Cosmic Rays And Rare Underground Signals*.

³² Skrót od *Oscillation Project with Emulsion Racking Apparatus*.

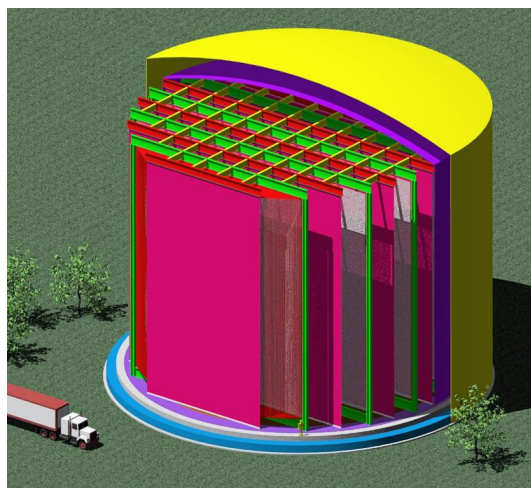
Jeśli chodzi o projekty z dalszej przyszłości, wyróżniają się one znacznie większą skalą. Należą do nich eksperyment T2K (w Japonii), którego dalekim detektorem jest Super – K. Intensywna wiązka neutrin będzie miała do pokonania 295 km, by dotrzeć do dalekiego detektora. Naukowcy myślą o zastąpieniu go detektorem Hyper – K, o podobnej budowie co Super – K, ale dużo większej masie (1 Mt).

Inny projekt, związany z wiązką NuMI, nosi nazwę NOvA (w Stanach Zjednoczonych). Budowa tego detektora opierać się będzie na podobnej zasadzie co konstrukcja MINOS'a, lecz nowy detektor będzie o wiele większy (o wymiarach 15.7 m × 15.7 m × 132 m i masie 30 kt) i zamiast stałego scyntylatora będzie ciekły scyntylator, umieszczony w kwadratowych rurkach z PCV (Rys. 4.14.).



Rys. 4.14. Schemat detektora NOvA [15 a)]

Również w Stanach Zjednoczonych pojawił się projekt – pod nazwą FLARE – jeszcze większego detektora, ważącego 50 kt i wypełnionego ciekłym argonem (jego wymiary to: wysokość 30 m, średnica 40m). Ogromną skalę tego zamysłu przedstawia Rys. 4.15. W planach są też projekty zakładające budowę detektora, który mieściłby w sobie 100 kiloton ciekłego argonu.



Rys. 4.15. Schemat detektora FLARE [15 b)]

Rozdział 5. Oddziaływanie promieniowania z materią

Pod pojęciem „promieniowanie” kryje się duża rodzina zjawisk fizycznych. Poniżej będzie mowa o promieniowaniu korpuskularnym, które można zdefiniować jako strumień cząstek emitowanych przez dany układ materialny. Źródłem promieniowania może być np. atom, jądro, Słońce. Promieniowanie można podzielić na jonizujące i niejonizujące. Jonizacja polega na odrywaniu elektronów z elektrycznie obojętnych atomów, co prowadzi do wytworzenia par jonów: ujemnych elektronów i jonów naładowanych dodatnio. Część elektronów ma wystarczająco dużą energię, żeby powodować dalszą jonizację ośrodka. Takie elektrony noszą nazwę elektronów δ . Oprócz jonizacji istnieją też procesy niejonizacyjne, do których należą np. błyski scyntylacyjne (powstające przy wzbudzeniu atomów ośrodka przy przejściu naładowanej cząstki, w wyniku czego emitowane zostają fotony) i promieniowanie Czerenkowa.

W dalszej części rozważane będzie tylko promieniowanie jonizujące. Oddziaływanie promieniowania jonizującego z materią wiąże się z utratą przez nie energii. Przechodząca przez ośrodek materialny cząstka przekazuje część swojej energii elektronom w sposób bezpośredni lub za pomocą cząstki wtórnej.

Straty energii na jonizację ośrodka opisuje wzór Bethego – Blocha [13]:

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi r_e^2 m_e N_A c^2 z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I} - \beta^2 \right] \quad (5.1)$$

gdzie:

dx - odcinek drogi przebytej przez cząstkę w ośrodku (w $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$),

r_e - promień elektronu, $r_e = e^2 / (m_e c^2)$,

m_e - masa elektronu ($9.109 \cdot 10^{-31}$ kg),

N_A - liczba Avogadra,

z - ładunek cząstki (wyrażony w e),

Z, A - liczba atomowa i masowa,

β - prędkość cząstki, $\beta = v / c$,

γ - czynnik Lorentza, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$,

I - efektywny potencjał jonizacji (stała jonizacji dla danego ośrodka), $I \approx 11.5Z$ eV.

Z równania (5.1) wynika, że straty energii są wprost proporcjonalne do kwadratu ładunku cząstki, nie zależą od masy cząstki i przy nierelatywistycznych prędkościach, są odwrotnie proporcjonalne do kwadratu prędkości.

Cząstki elementarne można podzielić na następujące grupy – kryterium podziału stanowi sposób ich oddziaływania z materią [13, 16]:

- lekkie cząstki naładowane, np. elektrony, pozytony,
- ciężkie cząstki naładowane, np. protony, miony, kaony, piony,
- wysokoenergetyczne fotony (promieniowanie gamma, promieniowanie X),
- ciężkie cząstki obojętne, np. neutrony,
- lekkie cząstki obojętne, np. neutrina.

Elektrony (promieniowanie β^-) i pozytony (promieniowanie β^+) emitowane są przez jądra atomowe. Oddziaływanie promieniowania β z materią prowadzi przede wszystkim do jonizacji bezpośredniej i powstania promieniowania hamowania (każdy ładunek elektryczny ulegający przyspieszeniu emituje promieniowanie). Utrata energii elektronów i pozytonów następuje skokowo, a tory ruchu nie są liniami prostymi. W przypadku pozytonu, zwykle po jego pełnym spowolnieniu następuje anihilacja z emisją dwóch fotonów.

Ciężkie cząstki naładowane, m.in. nietrwałe piony, miony i kaony, które powstają przy produkcji neutrin, wywołują wzbudzenie atomów lub ich jonizację. Kolejne zderzenia z atomami ośrodka powodują niewielkie zmiany kierunku pędu, zatem tor ruchu pozostaje linią prostą. W każdym zderzeniu występuje mała strata energii.

Z kolei oddziaływanie wysokoenergetycznych fotonów z materią może powodować absorpcję lub rozpraszanie. Należy podkreślić, że promieniowanie gamma przekazuje swoją energię głównie elektronom. Najważniejsze procesy prowadzące do tego to zjawisko fotoelektryczne (przekazanie całej energii kwantu gamma jednemu związanemu elektronowi i emisja tego elektronu), efekt Comptona (rozpraszanie fotonów na elektronach) i produkcja par (zamiana fotonu na parę cząstek). W procesach tych kwanty γ znacznie zmieniają energię i kierunek ruchu. Promieniowanie γ i X są bardzo przenikliwe, jonizują ośrodek w sposób pośredni (najpierw foton przekazuje swoją energię elektronowi, który – jako cząstka wtórna – przyczynia się do jonizacji).

Kolejną kategorię poświęcono elektrycznie obojętnym neutronom, które przekazują swoją energię materii za pośrednictwem wtórnej cząstki naładowanej, powstałej w wyniku pierwotnego oddziaływania. Neutrony oddziałują niemal wyłącznie z jądrami atomowymi ośrodka, przez który przechodzą. Efektem tego oddziaływania może być rozproszenie neutronu (ma wtedy miejsce znacząca zmiana energii i kierunku ruchu) lub jego wychwycenie. Promieniowanie neutronowe jest jednym z najbardziej groźnych dla organizmów żywych, z tego względu, że neutrony są cząstkami obojętnymi, wobec tego bez problemu wnikają w jądra atomowe i przedostają się przez wszelkie osłony ochronne.

Wraz ze wzrostem energii neutronów, zmienia się prawdopodobieństwo zajścia różnych procesów w wyniku ich oddziaływania z materią. Neutrony o energii poniżej 0.5 eV określamy jako powolne, zaś powyżej tej wartości mamy do czynienia z neutronami prędkimi.

Neutrony powolne uczestniczą przede wszystkim w procesach sprężystego rozproszenia i zapoczątkowują różne reakcje jądrowe, w rezultacie których często powstaje wtórne promieniowanie o dużej energii kinetycznej. W przypadku prędkich neutronów głównym procesem staje się rozproszenie. W wyniku zderzenia z jądrem atomowym neutron przekazuje część swojej energii jądrze odrzutu lub protonowi, które stanowią promieniowanie wtórne. Promieniowanie to przekazuje do środowiska swą energię na drodze procesów charakterystycznych dla ciężkich cząstek naładowanych [16]. Najwolniejsze neutrony (o energii około 0.025 eV) nazywane są neutronami termicznymi.

Jeśli chodzi o lekkie cząstki obojętne, jak neutrina, oddziaływania z jakąkolwiek materią są niewielkie. Jako cząstka nie posiadająca ładunku elektrycznego, uczestnicząca jedynie w oddziaływaniach słabych jest trudna do detekcji. Przeszywa przestrzeń kosmiczną, planety, nasze ciała z prędkością bliską prędkości światła, nie zwalniając tempa ani nie pozostawiając żadnych śladów – bo bardzo rzadko oddziałuje z materią. Można powiedzieć, że czyni to je tym samym cząstkami niegroźnymi dla ludzi i środowiska [16].

5.1. Biologiczne efekty promieniowania

Biologiczne efekty promieniowania są wynikiem jonizacji lub wzbudzenia atomów komórek organizmów żywych. Im wyższa dawka promieniowania, tym wyższe niebezpieczeństwo obumarcia żywej komórki. Na skutek działania radiacji powstają w organizmie wolne rodniki czy jony, które mają znaczny wpływ na wszelkie procesy chemiczne zachodzące w komórkach – uszkadzają bądź zmieniają skład komórek, np. przyczyniają się do rozerwania nici DNA, a w związku z tym do mutacji genetycznych, zmian nowotworowych. Uszkodzenie kwasów nukleinowych może doprowadzić do zaburzenia podstawowych zadań komórki, do których należą m.in. podział i synteza białek. Jednak komórki posiadają pewne zdolności naprawcze, umożliwiające usuwanie uszkodzonych odcinków nici DNA [16]. Dlatego też istnieją limity dopuszczalnych dawek promieniowania (dawki graniczne), które oceniono za jeszcze nieszkodliwe dla organizmu ludzkiego.

W większych dawkach promieniowanie może być niebezpieczne dla organizmów żywych. Osoby, które pracują przy sprzęcie emitującym promieniowanie czy obsługują radioaktywne materiały powinny zachowywać wszelkie środki ostrożności i znać elementarne zasady dotyczące efektów działania radiacji oraz limity dopuszczalnych dawek. W niniejszym podrozdziale omówione zostaną m.in. jednostki stosowane w dozymetrii – nauce o metodach pomiaru dawek promieniotwórczych i aktywności materiałów radioaktywnych.

Na początku kilka definicji [16]:

- aktywność źródła promieniowania jonizującego – liczba rozpadów w jednostce czasu; jednostką aktywności jest bekerel: $1 \text{ Bq} = 1 \text{ rozpad/s}$; inną jednostką aktywności jest kiur: $1 \text{ Ci} = 3.70 \cdot 10^{10} \text{ rozpadów/s}$ (w przybliżeniu jest to aktywność jednego grama radu – ^{226}Ra),
- dawka pochłonięta D – energia E promieniowania przekazana jednostce masy m danej substancji; wyrażamy ją w grejach ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$):

$$D = \frac{E}{m} \quad (5.2)$$

- moc dawki \dot{D} - dawka pochłonięta w danej jednostce czasu:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (5.3)$$

Jednostki: mGy/h, Gy/rok.

Biologiczne skutki napromieniowania zależą od typu promieniowania i rodzaju tkanki czy narządu. Zdefiniowano w związku z tym dwa pojęcia: dawki równoważnej i dawki efektywnej.

- dawka równoważna H – dawka pochłonięta przez dany narząd lub tkankę; obliczamy ją ze wzoru:

$$H_T = \sum_R w_R D_{TR} \quad (5.4)$$

gdzie:

w_R - czynnik wagowy danego rodzaju promieniowania (Tab. 5.1.),

D_{TR} - dawka pochłonięta, dotyczy danego typu promieniowania R i określonej tkanki T.

Tab. 5.1. Czynniki wagowe danego rodzaju promieniowania [16]

Rodzaj i zakres energii promieniowania	Czynnik wagowy w_R
Fotony wszystkich energii	1
Elektrony i miony wszystkich energii	1
Neutrony <10 keV	5
10 keV– 100 keV	10
100 keV – 2 MeV	20
2 MeV – 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protony > 2 MeV	5
Cząstki α , ciężkie jony	20

Jednostką dawki równoważnej jest sivert ($1\text{Sv} = \text{J/kg}$) i rem ($1 \text{ rem} = 0.01 \text{ Sv}$).

- dawka efektywna E – określa skuteczność dawki równoważnej działającej na całe ciało i bierze pod uwagę wrażliwość danej tkanki na promieniowanie; obliczamy ją ze wzoru:

$$E = \sum_T w_T H_T \quad (5.5)$$

gdzie:

w_T - czynnik wagowy danej tkanki (Tab. 5.2.),

H_T - dawka równoważna.

Dawkę efektywną wyrażamy w Sv. Służy ona do określania dawek granicznych; ocenia ryzyko nierównomiernego napromieniowania organizmu człowieka.

Tab. 5.2. Czynniki wagowe tkanek [16]

Narząd (tkanka)	Czynnik wagowy w_T
Gruczoły płciowe	0.20
Czerwony szpik kostny	0.12
Jelito grube	0.12
Płuca	0.12
Żołądek	0.12
Pęcherz moczowy	0.05
Gruczoły sutkowe	0.05
Wątroba	0.05
Przełyk	0.05
Tarczycyca	0.05
Skóra	0.01
Powierzchnia kości	0.01
Pozostałe	0.05
Całe ciało	1.00

Podsumowując, konsekwencje biologiczne wpływu promieniowania zależą głównie od dawki pochłoniętej. Inne czynniki decydujące o tym to:

- typ promieniowania (zależność od wielkości jonizacji),
- rodzaj narządu, tkanki (różny stopień wrażliwości),
- moc dawki,
- zakres obszaru napromieniowania,
- kondycja zdrowotna osobnika, który znalazł się pod wpływem promieniowania.

5.2. Zasady ochrony radiologicznej

Ochrona radiologiczna to wszelkie działania podjęte w celu ochrony ludzi i przyrody przed szkodliwym działaniem promieniowania. Składają się na nią przepisy prawne, odnoszące się do bezpieczeństwa ludzi pracujących przy źródłach promieniowania i narażonych na ich szkodliwy wpływ. Określone są też warunki, jakie powinny spełniać osoby pracujące w specjalnych laboratoriach. Zadaniem ochrony radiologicznej jest umożliwienie nam wszystkim korzystanie ze zdobyczy nauki w taki sposób, aby wykorzystać dobra wypływające ze stosowania źródeł promieniotwórczych przy jak najmniejszym stopniu narażenia zdrowia człowieka.

Nie można mieć oczywiście wpływu na wielkość promieniowania z naturalnych źródeł (ze skorupy ziemskiej, przestrzeni kosmicznej). Wszelkie zagadnienia związane z ochroną radiologiczną dotyczą źródeł sztucznych.

Stosując źródła promieniotwórcze należy brać pod uwagę podstawowe zasady: po pierwsze, uzasadnienie stosowania promieniowania; znaczy to, że wszelkie korzyści z tego wynikające – społeczne, ekonomiczne – powinny być znacznie wyższe niż ewentualne niepożądane konsekwencje zdrowotne czy związane z tym wysokie koszty; po drugie, optymalizacja ochrony radiologicznej – chodzi o możliwie jak najlepsze spożytkowanie nakładów finansowych, by zmniejszyć ryzyko napromieniowania; celem optymalizacji jest osiągnięcie maksimum bezpieczeństwa przy minimalnych kosztach ochrony przed radiacją; i po trzecie – przestrzeganie wymogów dotyczących dawek granicznych.

Trzeciej zasadzie poświęcimy nieco więcej uwagi. Przekroczenie dawek granicznych nie może być akceptowalne. W przypadku pracowników w otoczeniu źródeł promieniowania, dotyczą one sumy dawek pochodzących ze wszystkich źródeł. Jeśli chodzi o narażenie postronnego człowieka, dawki graniczne stanowią sumę dawek ze źródeł sztucznych.

Dawki graniczne zostały ustalone przez Międzynarodową Komisję Ochrony Radiologicznej (ICRP). W myśl zasad ICRP przyjęto, że dawki graniczne dla osób narażonych zawodowo³³ wynoszą [16]:

1. 20 mSv/rok – dawka efektywna (na rok po uśrednieniu – w czasie 5 lat),
2. 50 mSv – takiej wartości dawki efektywnej nie można osiągnąć w żadnym roku pracy,
3. 150 mSv – dawka równoważna w przypadku soczewki oka (w każdym roku kalendarzowym),
4. 500 mSv – dawka równoważna dla skóry (na 1 cm²) i kończyn (w każdym roku kalendarzowym).

Dla osób postronnych dawki graniczne wynoszą:

1. 1 mSv – dawka efektywna (w ciągu całego roku),
2. 15 mSv – dawka równoważna dla soczewki (1 rok),
3. 50 mSv – dawka równoważna dla skóry (1 rok).

Oprócz pojęcia dawki granicznej istnieje termin Akceptowalnej Dawki Diennej (ADI), określającej ilość codziennie wchłanianej danej substancji, która nie wywołuje ujemnych skutków w organizmie człowieka. Przekroczenie jej nie musi spowodować niekorzystnych efektów zdrowotnych, jak w przypadku dawki granicznej. Stąd wartości ADI są o wiele mniejsze niż wartości graniczne.

Wszelkie stosowane zabezpieczenia mają za zadanie nie tylko ochronę pracownika i osób postronnych, ale też ochronę środowiska. Dlatego ważna jest właściwa organizacja pracy ze źródłami promieniotwórczymi, odpowiednio dobrane urządzenia w laboratorium, wykończenie pomieszczeń, stosowanie przyrządów do wykrywania, a także pomiaru skażeń promieniotwórczych – w pobliskiej wodzie, glebie i powietrzu. Jednym ze sposobów zmniejszania narażenia jest stosowanie odpowiednich do danego rodzaju promieniowania osłon. Mamy różne ich rodzaje – ze względu na różną przenikliwość poszczególnych rodzajów promieniowania (np. materiały ciężkie, jak ołów, stosuje się w przypadku promieni γ i X, z kolei przed promieniowaniem β uchroni nas już lekkie aluminium). Oprócz osłon, dawka pochłonięta zależy też od czasu naświetlenia i odległości od źródła. W ramach ochrony radiologicznej działa zasada ALARA (*ang.* As Low As Reasonably Achievable) – „tak mało, jak jest to rozsądnie osiągalne”, a więc tak powinno się organizować pracę ze źródłami promieniotwórczymi, aby człowiek był narażony na jak najmniejsze dawki promieniowania.

Człowiek zawsze był i będzie poddany działaniu promieniowania, które jest przecież elementem przyrody. Chęć poznania budowy naszego świata i dążenie do rozwoju doprowadziło do tego, że sami wprowadziliśmy do środowiska dodatkowe, sztuczne źródła promieniowania. Należy jedynie pamiętać, aby korzystać ze zdobyczych techniki w sposób racjonalny i prowadząc badania naukowe robić to w sposób racjonalny oraz przestrzegać wszelkich form ochrony zdrowia i życia człowieka.

³³ Dotyczy osób powyżej 18 – go roku życia.

Rozdział 6. Wpływ eksperymentów neutrinowych na środowisko

Neutrino oddziałują tylko słabo i przesyłanie wiązek neutrin o obecnej intensywności nie ma większego wpływu na otoczenie. Większym problemem jest samo miejsce produkcji, które wiąże się ze skażeniem radioaktywnym, i detekcji – będące potencjalnym źródłem skażenia chemicznego. Kolejne rozdziały poświęcone będą opisowi zagrożeń związanych z produkcją neutrin oraz omówieniu zastosowanych rozwiązań w celu zminimalizowania ujemnego wpływu eksperymentów neutrinowych na środowisko.

6.1. Produkcja wiązek neutrin a ochrona środowiska

Wytwarzanie neutrin akceleratorowych wiąże się z produkcją innych cząstek – między innymi pionów, mionów, fotonów, termicznych i szybkich neutronów. Dlatego stosuje się specjalne zabezpieczenia wokół urządzeń doświadczalnych, zwłaszcza radioaktywnej tarczy i tunelu rozpadowego, by nie doprowadzić do wydostania się szkodliwych cząstek na zewnątrz i skażenia środowiska.

Ważnym względem w programie NuMI była chęć zachowania możliwości konfiguracji wiązki neutrin. Następnym tego było zaprojektowanie pomieszczenia, w którym znajduje się tarcza i ogniskujące rogi magnetyczne. Zachowanie takiej elastyczności niesłychanie utrudnia ochronę radiacyjną, której celem jest zminimalizowanie możliwości rekonfiguracji wiązki, po tym jak urządzenie zacznie działać. Projekt eksperymentu musi silnie uwzględniać zasady ochrony radiologicznej, obejmującej wszystkie potencjalne źródła promieniowania na etapie produkcji neutrin, a więc obszar tarczy, tunelu rozpadowego oraz absorbenta hadronów i mionów. Tarcza stacjonarna, na której roztrząskują się wysokoenergetyczne protony z akceleratora, staje się bardzo radioaktywna. Powietrze wewnątrz tarczy jest silnie skażone (tam powstają naładowane piony i kaony), dlatego obszar ten musi być objęty staranną ochroną. Ujemne piony i kaony są deogniskowane w Holu Tarczy³⁴, stąd pomieszczenie to otaczają bloki betonowe by nie dopuścić do wydostania się naładowanych cząstek na zewnątrz. Oprócz zabezpieczeń mechanicznych istnieją środki ochronne w postaci monitorów działania całego systemu. Przed tarczą umieszczone są monitory pozycji pierwotnej wiązki protonów. Małe odchylenia są natychmiast korygowane, jeśli są większe – wiązka jest automatycznie zatrzymywana. Monitoruje się także kształt wiązki i jej straty, żeby wiązka nie była za szeroka i część protonów nie zaczęła oddziaływać z otoczeniem.

By nie doprowadzić do szkodliwego wpływu wiązki wtórnej, czyli naładowanych hadronów i mionów, stosuje się wokół tunelu rozpadowego osłony betonowe oraz (zaraz za tunelem rozpadowym) pochłaniacz wykonany z rdzenia aluminiowego, otoczony dodatkowo stalą i zabezpieczony warstwą betonu. Ponadto kontroluje się kierunek biegu wiązki wtórnej. Służą do tego monitory hadronów i mionów. Dzięki nim można dokładnie określić, w którą stronę poruszają się naładowane cząstki – a więc czy cały układ eksperymentalny działa prawidłowo i nie zagraża otoczeniu. Nad poziomem

³⁴ Hol Tarczy – podziemne pomieszczenie, w którym usytuowana jest tarcza oraz rogi magnetyczne i ich osłony.

radiacji czuwają też detektory, dzięki którym można obserwować ubytek cząstek z pierwotnego strumienia. Jeśli straty będą obserwowalne, czyli poziom radiacji będzie za wysoki w obrębie strumienia i tunelu rozpadowego, nastąpi samoczynnie zamknięcie urządzenia.

Dojście personelu do obszaru przed tarczą, a także w obrębie tarczy, tunelu rozpadowego, absorbenta hadronów i mionów jest zabronione w trakcie pracy urządzenia (w czasie „przelotu” wiązki). Również po zderzeniu potrzeba kilku dni, aby zmniejszył się jej szkodliwy wpływ i można było się nią zajmować. Pracownicy nie mogą przebywać w bezpośrednim sąsiedztwie tarczy, gdyż grozi im napromieniowanie (tarczą zajmują się specjalne urządzenia). Każdy fizyk, który schodzi w okolice detektora, musi przejść odpowiednie przeszkolenie. Wszędzie umieszczone są monitory radiacji. Wyniki pomiaru radioaktywności w krytycznych miejscach są monitorowane 24 godziny/dobę przez fizyków na szczytce i zapisywane (archiwizowane). Wstęp do obszaru o podwyższonej radiacji jest ograniczony i poddany surowym restrykcjom lub całkowicie zabroniony.

Przy produkcji wiązki neutrin takiej jak NuMI występują cztery typy radiacji, które stanowią potencjalne źródło zagrożenia: natychmiastowa, szczątkowa, skażenie powietrza i skażenie gleby, skał i wód gruntowych. Następne rozdziały poświęcone są opisowi wpływu na środowisko wymienionych komponentów po zastosowaniu wszystkich omówionych powyżej osłon ochronnych.

6.1.1. Promieniowanie natychmiastowe i szczątkowe

Radiacja natychmiastowa występuje w akceleratorach i wokół systemów wiązek wyprowadzanych z akceleratora. Istnieje tylko podczas pracy urządzenia. Ten rodzaj promieniowania może zawierać przede wszystkim termiczne neutrony, szybkie neutrony, fotony i/lub miony. Po zastosowaniu wszystkich osłon promieniowanie natychmiastowe stanowi problem głównie w obszarze wyprowadzania pierwotnej wiązki protonów z akceleratora *Main Injector*, pomieszczenia doprowadzającego moc oraz w obszarze górnego szybu i bocznego tunelu.

Poniżej przedstawione zostaną wartości dawek promieniowania na poszczególnych elementach układu produkcyjnego neutrin. Tab. 6.1. oraz Tab. 6.2. zawierają dawki w obrębie pierwotnego i wtórnego strumienia – podczas prawidłowego działania urządzenia i w razie awarii.

Tab. 6.1. Wartości dawek promieniowania w obrębie pierwotnego strumienia cząstek [14]

Obszar	Dawka podczas normalnej pracy (mrem/h)	Dawka w razie awarii (mrem/puls) ³⁵
Wyjściowy kanał wentylacyjny	0.29	1.51
Pomieszczenia znajdujące się w sąsiedztwie Holu Tarczy	$2.44 \cdot 10^{-3}$	0.013
Drzwi do Holu Tarczy	0.25	1.31

³⁵ Sens ma podawanie wartości dawki/puls w razie awarii (a nie np. dawki/h), ponieważ w razie wypadku nie będzie dalszych pulsów. Jeśli radiacja podwyższy się gdzieś poza dopuszczalny limit, to po pierwszym pomiarze wiązka jest automatycznie zatrzymywana.

W obrębie wiązki wtórnej ważne są dwa obszary ze względu na szkodliwość działania: pomieszczenie doprowadzające moc oraz obszar szybu przylegający do Holu Tarczy. Dwa detektory będą zlokalizowane w tym rejonie – jeden w pomieszczeniu doprowadzającym moc, drugi w okolicy szybu.

Tab. 6.2. Wartości dawek promieniowania w obrębie wiązki wtórnej [14]

Obszar	Dawka podczas normalnej pracy (mrem/h)
Pomieszczenia znajdujące się w sąsiedztwie Holu Tarczy	$1.36 \cdot 10^{-3}$
Drzwi do Holu Tarczy	0.74
Pomieszczenie doprowadzające moc	2.77

Szacowana wartość dawki w obszarze pochłaniacza hadronów wynosi 7 mrem/h, w tunelu rozpadowym – mniej niż 0.05 mrem/h [14].

Radiacja szczątkowa dotyczy tego, co pozostaje po przejściu wiązki. Promieniowanie szczątkowe to niemal wyłącznie kwanty γ , czasem obecne jest promieniowanie β . W poniższej tabeli umieszczone są szacunkowe wartości dawek promieniowania w różnych częściach układu do produkcji neutrin (Tab. 6.4.)

Tab. 6.4. Szacunkowe wartości dawek promieniowania szczątkowego [14]

Lokalizacja	Wartość dawki
Hol Tarczy: dół betonowej osłony	~ 2 mrem/h
Hol Tarczy: ściany pomieszczenia wokół pierwszego rogu magnetycznego	80 rem/h
Hol Tarczy: tarcza	6000 rem/h
Hol Tarczy: ściana przed tarczą	~ 2 mrem/h
Obszar rozpadu: wyjście bezpieczeństwa (skała i beton)	~ 100 mrem/h
Obszar rozpadu: rura rozpadowa	30 – 200 rem/h
Absorber hadronów: aluminiowe jądro wokół wiązki	~ 100's rem/h
Absorber hadronów: bloki aluminiowego jądra	~ 10's rem/h
Absorber hadronów: bloki betonowe	~ 1's rem/h

6.1.2. Powietrze

Skażenie³⁶ powietrza jest wynikiem oddziaływań pierwotnych i wtórnych cząstek z jądrami atomowymi cząsteczek powietrza (lub innego gazowego ośrodka). Dodatkowym źródłem skażenia jest kurz, pochodzący z naturalnych erozji lub pracy nad radioaktywnymi komponentami akceleratora. Radioaktywność powietrza stanowi największy problem dla NuMI. Do skażenia powietrza przyczynia się przede wszystkim obecność izotopów węgla ^{11}C i azotu ^{13}N z niewielką domieszką ^{15}O i ^{41}Ar ; wszystkie mają względnie krótki czas połowicznego rozpadu. Izotop ^{11}C , mający 20-minutowy czas życia, stanowi największy problem. Dlatego zastosowano system opóźnionej wentylacji, żeby krótkożyłowe radionuklidy zdołały się rozpaść zanim zaczną oddziaływać z otoczeniem.

6.1.3. Wody gruntowe

Skażenie (zanieczyszczenie) wód podziemnych może nastąpić wtedy, gdy radionuklidy, produkowane w glebie lub skale otaczającej akcelerator i miejsce produkcji wiązki, mogą dostać się do przepływającej przez ziemię wody. Do skażenia może również dojść wtedy, gdy wiązka hadronów wyprodukuje nuklid promieniotwórczy, a mianowicie promieniotwórczy izotop wodoru o jądrze złożonym z jednego protonu i dwóch neutronów (^3H - tzw. tryt), bezpośrednio w wodzie zgromadzonej w glebie lub skale.

Hol Tarczy i rura rozpadowa przechodząca przez podziemny zbiornik wody jest potencjalnym źródłem skażenia. Dlatego z rozważaniem analizuje się procesy, które mogą prowadzić do potencjalnego zanieczyszczenia zasobów wód podziemnych. Tab. 6.3. przedstawia dopuszczalne stężenia ^{22}Na i ^3H w wodach gruntowych i powierzchniowych:

Tab. 6.3. Dopuszczalne limity koncentracji izotopów ^{22}Na i ^3H w wodach podziemnych i powierzchniowych [14]³⁷

	^{22}Na (pCi/ml)	^3H (pCi/ml)
Wody podziemne	0.4	20
Wody powierzchniowe	10	2000

³⁶ Do opisu skażenia promieniotwórczego używa się następujących jednostek: Bq/kg, Ci/kg, Bq/l, Ci/l – w przypadku skażenia objętościowego oraz Bq/m², Ci/m² – skażenie powierzchniowe, Bq/m³ – skażenie powietrza.

³⁷ Podana w tabeli jednostka Ci (kiur) jest dawną jednostką aktywności; 1 Ci = 3.7 · 10¹⁰ rozpadów/s. Jest to zatem duża jednostka, dlatego poziom aktywności mierzy się w pCi, 1 pCi = 10⁻¹² Ci.

Suma części składowych zanieczyszczeń radionuklidami musi być mniejsza od jedynki dla wszystkich radionuklidów:

$$\sum_i \frac{C_i}{C_{reg_i}} \leq 1 \quad (6.1)$$

gdzie:

C_i – koncentracja radionuklidu i w wodzie,

C_{reg_i} – koncentracja regulowana limitem.

Obszar w obrębie wiązki pierwotnej jest podzielony na kilka sekcji pod względem geologii i geometrii [14]. Zarówno geometria, jak i geologia oddziałuje na tempo przepływu wody:

- typ 1: obejmuje obszar lodowcowy, woda podróżuje tu powoli (około 1cm/rok) przez glebę do poziomu podziemnego zbiornika wody, w ten sposób większość pierwiastków radioaktywnych ulega rozpadowi zanim do niego dojdzie,
- typ 2: znajduje się w podziemnym zbiorniku wody i skale lodowcowej; jest to obszar, któremu należy poświęcać najwięcej uwagi; tutaj określenie prędkości wody jest trudne z powodu zmiennej natury geologicznej w tym regionie; jednak szybkość przepływu (od 1 do 15 metrów na rok) jest na tyle mała by mogło dojść do skażenia wody blisko tunelu. Dodatkowo wody znajdujące się w okolicy strumienia zbierane są przez tunel pełniący rolę studni zbierającej radioaktywną wodę, która nie nadaje się do spożycia.

Pozostałe sekcje (typ 3) mają dużą prędkość przepływu (od kilkuset do kilku tysięcy metrów na rok) – co nie pozwala wodzie stać się bardzo radioaktywną – i nie dopuszczają do tego, aby skażona woda dostała się do studni z wodą pitną.

Operacja NuMI włącza rozległy program monitoringu laboratoryjnego. Próbki wody ze studzien, które są integralną częścią monitoringu środowiskowego, będą początkowo badane każdego miesiąca.

6.2. Wpływ przesyłania wiązek neutrinowych na otoczenie

Chcąc pisać o szkodliwości oddziaływania wiązek neutrinowych, należy wprowadzić pojęcie przekroju czynnego. Jest to prawdopodobieństwo zajścia określonego zdarzenia (np. zderzenia cząstek padających na tarczę z jądrami atomowymi tarczy) przypadającego na jednostkę czasu i jednostkę strumienia cząstek padających. Liczbowo równy jest szybkości reakcji na cząstkę tarczy na jednostkę strumienia padających cząstek [2]. Przekrój czynny wyrażamy w barnach: $1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$. Często stosuje się mniejsze jednostki, jak milibarny (10^{-3} b), pikobarny (10^{-12} b).

Chcąc oszacować liczbę oddziaływań neutrin na jednostkę czasu na jednostkę objętości wprowadźmy reakcję:



gdzie:

A – oznacza strumień cząstek padających, czyli wiązkę neutrin,

B – oznacza cząstki znajdujące się w tarczy,
 C i D – cząstki powstałe w wyniku zderzenia z tarczą.

Niech n_A oznacza koncentrację neutrin (liczbę neutrin na jednostkę objętości), n_B – liczbę cząstek typu B na jednostkę objętości. Strumień neutrin, które przechodzą prostopadle przez tarczę o grubości dx w danej jednostce czasu i na jednostkę powierzchni jest równy [2]:

$$\Phi = n_A v_i \quad (6.3)$$

gdzie:

v_i – prędkość padających na tarczę cząstek.

W miarę zagłębiania się w materię, zmniejsza się strumień wiązki. Należy też uwzględnić fakt przesłaniania „celów” przez cząstki typu B. Dlatego rozpatruje się cienką warstwę dx materiału tarczy. W przypadku neutrin oba te czynniki nie odgrywają większej roli, gdyż neutrina oddziałują niesłychanie rzadko. Jeśli przez σ oznaczymy przekrój czynny każdej cząstki typu B (przekrój jednostkowy), to szansa zderzenia się dowolnego neutrina z cząstką w tarczy wynosi [2]:

$$\sigma n_B dx \quad (6.4)$$

W danej jednostce czasu zachodzi zatem:

$$\Phi \sigma n_B dx \quad (6.5)$$

reakcji, zaś prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia:

$$W = \Phi \sigma \quad (6.6)$$

Liczbę oddziaływań można najogólniej zapisać w postaci:

$$\text{liczba zdarzeń} = \text{strumień} \cdot \text{liczba „celów”} \cdot \text{przekrój czynny} \quad (6.7)$$

Chcąc zatem zwiększyć liczbę oddziaływań należy mieć dużą liczbę cząstek i „celów”. W doświadczeniach z neutrinami akceleratorowymi wiąże się to z wyprodukowaniem intensywnego strumienia neutrin i dużą masą detektorów (kilka kiloton), pamiętając przy tym, by wpływ tła był jak najmniejszy (stąd detektory umieszcza się pod ziemią).

W ramach ochrony radiologicznej, opartej na przykładzie wiązki NuMI, określone są dopuszczalne wartości energii i natężenia strumienia protonów padających na tarczę stacjonarną. Projekt Fermilab *Main Injector* zezwala na to, by energia protonów akceleratorowych sięgała nie więcej niż 120 GeV. Program fizyczny NuMI zakłada, że maksymalne natężenie protonów wysyłanych z akceleratora *Main Injector* w kierunku tarczy to $4 \cdot 10^{13}$ protonów na każde 1.87 sekundy (jest to tzw. Bezpieczna Powłoka). Fizyczny cel eksperymentu MINOS zakłada, że w ciągu roku wysłane zostanie $3.7 \cdot 10^{20}$ protonów na tarczę. Dla celów ochrony radiacyjnej, powyższe wielkości tłumaczy się na maksymalną intensywność $2.1 \cdot 10^{13}$ protonów na sekundę.

Poniżej przeprowadzono obliczenia dotyczące liczby oddziaływań wiązki neutrin w danej jednostce objętości. Do oszacowania przyjęto:

- intensywność wiązki protonów $I = 2.1 \cdot 10^{13}$ protonów/s,
- współczynnik $\alpha = 10$ (potrzebny do określenia strumienia neutrin; informuje ile neutrin powstaje w wyniku zderzenia z tarczą jednego protonu),
- powierzchnie $s_1 = 1 \text{ m}^2$ i $s_2 = 1 \text{ km}^2$, przez które należy podzielić iloczyn $I \cdot \alpha$, aby otrzymać wartość strumienia neutrin w odległości odpowiednio około 1 km od źródła wiązki i w odległości kilkuset km od źródła wiązki (powierzchnie s_1 i s_2 przybliżają rozmiar wiązki neutrin odpowiednio w rejonie bliskiego i dalekiego detektora; w rzeczywistości wiązka neutrin się rozbiega – jak schematycznie pokazuje to Rys. 4.12. – w miarę oddalania się od źródła strumień na jednostkę powierzchni jest coraz mniejszy),
- przekrój czynny na oddziaływanie neutrina $\sigma = 10^{-38} \text{ cm}^2$ (odpowiada on neutrinom o energii 1 GeV; przekrój czynny rośnie z energią) [5].

Żeby uzyskać strumień neutrin trzeba pomnożyć intensywność I przez współczynnik α i podzielić przez określoną powierzchnię. Otrzymana wartość strumienia neutrin w odległości około 1 km od źródła wiązki to $21 \cdot 10^{13} \text{ /s/m}^2$, a w odległości kilkuset kilometrów od źródła wynosi $21 \cdot 10^7 \text{ /s/m}^2$. Chcąc obliczyć liczbę „celów” należy wyznaczyć liczbę nukleonów (n_b) na jednostkę objętości. Potrzebna jest zatem liczba Avogadra N_A , która określa liczbę cząsteczek w jednym molu dowolnej substancji: $N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ /mol}$. Liczbę jąder atomowych na jednostkę objętości można obliczyć ze wzoru:

$$n_b = N_A \cdot \rho / A \quad (6.8)$$

gdzie:

ρ – gęstość materiału tarczy, na którą padają neutrina,

A – liczba masowa danego pierwiastka (liczba nukleonów w jądrze atomowym).

Szacowania przeprowadzono rozpatrując kostkę ołowianą (liczba masowa $A = 207$, gęstość $\rho = 11.34 \text{ g/cm}^3$). Korzystając ze wzoru (6.8) otrzymujemy $n_b = 0.329 \cdot 10^{23} \text{ /cm}^3$ jąder atomowych. Żeby dostać liczbę nukleonów w jednostce objętości należy liczbę jąder pomnożyć przez A , co daje wartość $68.1 \cdot 10^{23}$. W celu wyznaczenia liczby oddziaływań neutrin w 1 m^3 ołowiu mnożymy uzyskany wynik zgodnie ze wzorem (6.7) i jeszcze przez objętość (jeśli chcemy znać liczbę oddziaływań w określonej objętości), co daje w rezultacie około 1430 oddziaływań /s – w odległości około 1 km od źródła – i $14.3 \cdot 10^{-4}$ oddziaływań /s w odległości kilkuset kilometrów od źródła produkcji wiązki.

Chcąc oszacować liczbę oddziaływań neutrin w ciele człowieka (lub innym żywym organizmie) przyjęto, że organizm ludzki składa się tylko z wody (liczba masowa wody $A = 18$, gęstość $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$). Wtedy łatwo można obliczyć w przybliżeniu objętość człowieka, ponieważ 1l (1 dm^3) wody waży 1kg. Czyli biorąc średnią wagę człowieka 70 kg mamy objętość 0.07 m^3 . Zgodnie ze wzorem (6.8) liczba jąder atomowych wynosi $0.334 \cdot 10^{23} \text{ /cm}^3$, zaś liczba nukleonów – $6.01 \cdot 10^{23} \text{ /cm}^3$. Zatem liczba oddziaływań neutrin w człowieku o przeciętnej wadze wynosi około $0.88 \cdot 10^{-5} \text{ /s}$ w odległości kilkuset kilometrów. Obliczenia przeprowadzono tylko dla rejonu oddalonego o kilkaset kilometrów od źródła, ponieważ w okolicy bliskiego detektora osoby postronne nie mają dostępu (poza tym obszar ten znajduje się pod ziemią).

Policzono również dawkę efektywną na rok. Przyjęto, że oddziaływujące neutrinom miało energię 1GeV i cała pochłonięta energia to 1GeV, czyli $E = 1 \text{ GeV} = 1.6 \cdot 10^{-28} \text{ J}$ (rozpatrujemy ciało człowieka o masie 70 kg). Dawka pochłonięta (5.2) przez organizm człowieka wynosi zatem $D = 0.23 \cdot 10^{-29} \text{ Gy}$. Przyjmujemy, że czynnik wagowy w_R jest równy jeden. Wobec tego dawka równoważna (5.4) jest równa $H_T = 1 \cdot 0.23 \cdot 10^{-29} = 0.23 \cdot 10^{-29} \text{ Sv}$. Zakładamy, że czynnik wagowy w_T jest równy jeden (całe ciało). Wtedy

dawka efektywna jest równa dawce równoważnej i wynosi $E = 0.23 \cdot 10^{-29}$ Sv. Żeby otrzymać dawkę efektywną na rok, trzeba pomnożyć uzyskany wynik przez liczbę oddziaływań /s neutrin w objętości człowieka ($0.88 \cdot 10^{-5}$ /s) i przez liczbę sekund w roku ($3600 \cdot 24 \cdot 365$). Otrzymujemy w ten sposób wartość $E = 6.4 \cdot 10^{-28}$ Sv (jest to wartość i tak zawyżona, ponieważ człowiek nie przybywa przez cały rok w polu działania wiązki neutrin).

6.3. Detektory do detekcji neutrin

Z faktu nikłego oddziaływania neutrin z jakąkolwiek materią, potrzebne są ogromne detektory w celu zarejestrowania choćby kilku przypadków oddziaływań tych cząstek. Tu m.in. przejawia się szkodliwość eksperymentów z neutrinami. Problemem staje się skala – detektory o wielkiej masie wypełnione ciekłym scyntylatorem lub argonem i umieszczone głęboko pod ziemią (w celu zredukowania tła) w razie ich uszkodzenia stanowiłyby niebezpieczne zagrożenie dla środowiska. Wyciek materiału detektora mógłby doprowadzić do skażenia chemicznego wód gruntowych. Awaria detektora zawierającego ciekły argon mogłaby spowodować śmierć osób znajdujących się pod ziemią, ponieważ argon wypiera z powietrza tlen. Na przykład w detektorze Borexino we Włoszech (laboratorium Gran Sasso) użytych jest około 1.3 kiloton ciekłego scyntylatora (trójmetylobenzenu). Substancja ta jest bardzo toksyczna – łatwo rozpuszcza wiele materiałów. Dlatego ważne jest dokładne uszczelnianie pomieszczeń, podłogi, by w razie awarii nie dopuścić do skażenia terenu.

Rozdział 7. Podsumowanie

Świat fizyki neutrin jest niezwykle ciekawy. Odkąd po raz pierwszy pojawiły się „na arenie”, wielokrotnie dostarczały trudności naukowcom starającym się lepiej poznać te nieuchwytne cząstki, mimo że jest ich wszędzie bardzo dużo – są produktem ubocznym pracy reaktorów jądrowych, powstają m.in. w reakcjach termojądrowych zachodzących we wnętrzu Słońca i w rozpadach promieniotwórczych w Ziemi. Potrzeba zrozumienia fundamentalnej struktury materii i natury Wszechświata doprowadziła fizyków do zaprojektowania eksperymentów, których celem stało się dokładniejsze zbadanie własności tych subatomowych cząstek. Tak rozpoczęły się doświadczenia z neutrinami pochodzenia naturalnego, bądź wytwarzanymi przez człowieka przy użyciu akceleratorów, urządzeń które odegrały doniosłą rolę w badaniu substruktury jądra i oddziaływań fundamentalnych w jądrze atomowym. W niniejszej pracy omówiono jedynie akceleratorowe eksperymenty z długą bazą pomiarową, w których wiązki neutrinowe przesyłane są na duże odległości.

Słabe oddziaływania neutrin powodują, że np. neutrino o energii 10 MeV przechodzące przez powierzchnię Ziemi ma średnią drogę oddziaływania rzędu 10^{13} km. Oznacza to, że musi ono przebyć drogę 10^{13} km, aby wreszcie mogło oddziaływać z materią [5]. Jeśli jednak oddziałuje, wytwarza w stanie końcowym naładowany hadron, będący cząstką szkodliwą dla środowiska. W pracy przeprowadzono analizę zagrożenia środowiska, wynikającego z przesyłania wiązek neutrinowych. Wyniki obliczeń pokazały, że neutrino bardzo słabo oddziaływują i nawet bardzo duże ich strumienie – takie jak te produkowane w akceleratorach (rzędu 10^{13} /cm²/s) – nie stanowią zagrożenia dla środowiska ani ludzi. Liczba rzędu 10^{-5} oddziaływań zachodzących w ciele człowieka w czasie sekundy daje wyraźny temu dowód. Oczywiście istnieje prawdopodobieństwo, że neutrino może okazać się szkodliwe w razie gdy nastąpi oddziaływanie z komórką naszego ciała, jednak szansa takiego zdarzenia jest niebywale mała. Zagrożenia stwarza natomiast produkcja neutrin, podczas której powstają groźne cząstki uboczne. Dlatego wymagane są odpowiednie zabezpieczenia i ochrona ludzi oraz przyrody przed promieniowaniem podczas przeprowadzania eksperymentów z wiązkami neutrin, takie jak osłony betonowe wokół urządzeń doświadczalnych, warstwy skały i żelaza zatrzymujące szkodliwe cząstki naładowane. Do działań ochronnych należy ciągłe monitorowanie wiązki.

Podsumowując, z produkcją neutrin akceleratorowych wiąże się kilka potencjalnych zagrożeń otoczenia, jak skażenie wód gruntowych, zanieczyszczenie powietrza, napromieniowanie ludzi. Ośrodki badawcze, takie jak Fermilab, stosują jednak niesłychanie rozwinięte systemy zabezpieczeń, które z sukcesem ograniczają wpływ produkcji i przesyłania wiązek neutrinowych na środowisko do bezpiecznego minimum.

Literatura

- [1] Strona web: <http://www.pdg.lbl.gov/pdg.html>
- [2] D. H. Perkins, *Wstęp do fizyki wysokich energii*, PWN, Warszawa 2004.
- [3] E. Kearns, T. Kajita, Y. Totsuka, Na tropie mas neutrin, *Świat Nauki*, październik 1999
- [4] A. B. McDonald, J. R. Klein, D. L. Wark, Zagadka neutrin słonecznych, *Świat Nauki*, maj 2003
- [5] Strona web: <http://www.neutrino.fuw.edu.pl/public/wyklad>
- [6] Strona web: <http://www.postepy.camk.edu.pl>
- [7] J. N. Bahcall, *Astrophysical neutrinos*, 2001
- [8] G. Fiorentini, M. Lissia, F. Mantovani and R. Vannucci, Geo-Neutrinos, *A short review*, 2004
- [9] Strona web: <http://www.aneksy.pwn.pl>.
- [10] R. Slansky, S. Raby, T. Goldman, G. Garvey, *The oscillating neutrino. An introduction to neutrino masses and mixings*, Los Alamos Science 25, 1997
- [11] Strona web: <http://www.fuw.edu.pl/~ajduk/IFD/ifdsymp04/Lagoda.pdf>
- [12] Obserwatorium Kamioka, Institute for Cosmic Ray Research, Uniwersytet Tokijski.
- [13] E. Skrzypczak, Z. Szepliński, *Wstęp do fizyki jądra atomowego i cząstek elementarnych*, PWN, Warszawa 2001.
- [14] NuMI Technical Design Handbook, strona web: <http://www.fnal.gov/>
- [15] a) Strona web: <http://arxiv.org/abs/hep-ex/0503053>, *NovA: Proposal to Build a 30 Kiloton Off-Axis Detector to Study Neutrino Oscillations in the Fermilab NuMI Beamline*, by NOvA Collaboration (D.S. Ayres et al.), 2004
b) Strona web: <http://arxiv.org/abs/hep-ex/0408121>, *FLARE, Fermilab Liquid Argon Experiments: Letter of Intent FLARE Fermilab Liquid ARGon Experiments*, L. Bartoszek et al, 2004
- [16] A. Z. Hryniewicz, *Człowiek i promieniowanie jonizujące*, PWN, Warszawa 2001.