



# Neutrinowe Obserwatorium Sudbury: Obserwacja zmiany zapachu neutrin słonecznych<sup>1</sup>

Wykład noblowski wygłoszony 8 grudnia 2015

Arthur B. McDonald

Queen's University, Kingston, Canada

Opublikowany w języku polskim za zgodą Nobel Foundation

©the Nobel Foundation 2015

Przekład dokonany przy wsparciu finansowym Fundacji Pro-Physica

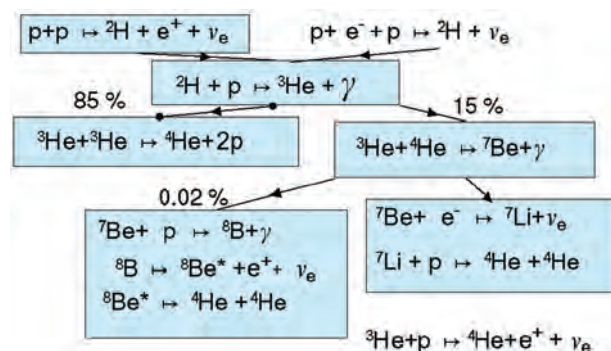
**Słowa kluczowe:** neutrina, oscylacje neutrin, neutrina aktywne i sterylne, neutrina słoneczne, efekt msw, radioaktywność  
**Keywords:** neutrinos, neutrino oscillations, active and sterile neutrinos, solar neutrinos, msw effect, radioactivity

## 1. Neutrina słoneczne

Procesy fuzji jądrowych, które zasilają Słońce energią, zachodzą w tak wysokich temperaturach, że jądra atomów są w stanie łączyć się ze sobą. W procesach tych powstaje olbrzymia liczba cząstek elementarnych zwanych neutrinami. Jak już usłyszeli Państwo od mojego przyjaciela i naukowego kolegi, profesora Kajity, neutrina oddziałują wyłącznie słabo i grawitacyjnie dzięki czemu mogą przechodzić przez Ziemię bardzo mało lub w ogóle nie oddziałując.

To właśnie neutrina ze Słońca są przedmiotem naszych pomiarów dokonywanych w Neutrinowym Obserwatorium Sudbury (SNO), ulokowanym 2 kilometry pod ziemią, w kopalni w pobliżu Sudbury w Kanadzie. Wykorzystując ciężką wodę jako główny element specjalnie zaprojektowanego detektora, udało nam się ustalić ponad wszelką wątpliwość, że neutrina elektronowe zanim doleczą do naszego detektora, zmieniają się w jedno z dwóch pozostałych aktywnych neutrin o innym zapachu. Taka ich zmiana wymaga, by miały one niezerową masę. Obie te właściwości neutrin, [zmienianie przez nie zapachu i niezerowa masa,]<sup>2</sup> nie są przewidywaniami modelu standardowego oddziaływań cząstek elementarnych. Uogólnienia tego modelu, mające uwzględnić te właściwości neutrin, mogą dać nam bardziej kompletne zrozumienie Wszechświata na bardziej fundamentalnym poziomie.

Badanie Słońca i procesów zasilających je energią było przedmiotem zainteresowania od wielu już lat i jest oczywiste, że jak to ujął Izaak Newton „możemy spojrzeć dalej, dzięki temu, że stoimy na barkach gigantów”. Pionierami badania fizyki reakcji jądrowych zachodzących w Słońcu byli laureaci nagrody Nobla Hans Bethe i Willy Fowler: Bethe (1967) za swoje prace na temat produkcji energii w gwiazdach za pośrednictwem reakcji jądrowych, a Fowler (1983) za opracowanie szczegółów reakcji proton-proton (*p-p*) oraz innych reakcji, które są odpowiedzialne za powstawanie większości pierwiastków we wnętrzach gwiazd i supernowych. Ogólny wniosek, jaki wynikał z ich prac, był taki, że tzw. cykl *pp* pokazany na ryc. 1 jest głównym źródłem wytwarzanej w Słońcu energii.



Ryc. 1. Cykl *pp* reakcji jądrowych, który dominuje wytwarzanie energii w Słońcu i daje różne liczby neutrin o różnych energiach. Strumienie i energie tych neutrin są pokazane na ryc. II

1. Nagrodę Nobla z fizyki w roku 2015 podzielili między siebie Arthur B. McDonald i Takaaki Kajita. Artykuł jest tekstem jednego z dwóch wykładów wygłoszonych z tej okazji (przyp. red.).

2. Teksty w nawiasach kwadratowych dodał tłumacz z uwagi na zbyt zwięzły, a czasem wręcz niezrozumiały język oryginału (przyp. red.).

zumienie fizyki Słońca i gwiazd. Podczas mojego tam pobytu spotkałem dwóch innych pionierów badań Słońca i neutrin: Raya Davisa (otrzymał nobla w roku 2002), który dokonał pierwszych pomiarów [strumienia docierających do Ziemi] neutrin słonecznych i Johna Bahcalla, który zapoczątkował kompletne i dokładne obliczenia liczby neutrin emitowanych przez Słońce. Ich pionierskie badania dały początek temu, co później stało się znane jako problem neutrin słonecznych, gdyż pomiary Davisa wykazały, iż liczba neutrin elektronowych docierających do Ziemi jest trzykrotnie mniejsza niż obliczona przez Bahcalla [1]. Możliwym powodem takiej niezgodności mógł być błąd eksperymentalny lub niedobra teoria. Jeszcze inna hipoteza została rzucona w roku 1968, tj. w tym samym czasie, gdy Davis rozpoczynał swój eksperyment, przez innych pionierów na polu fizyki neutrin. Mianowicie Gribov i Pontecorvo wysunęli myśl, że być może neutrina elektronowe ze Słońca oscylują w neutrino o innym zapachu (w tym czasie wiedziano już, że oprócz elektronowych istnieją także neutrina mionowe). Gdyby ich hipoteza była prawdziwa, nie byłyby one rejestrowane przez detektor Davisa, który reagował tylko na neutrina elektronowe. Była to pewna wariacja teoretycznego pomysłu, jaki Pontecorvo wysunął był [3] jeszcze w roku 1958, zgodnie z którym neutrina elektronowe mogłyby oscylować w elektronowe antyneutrino.

## 2. Początki Neutrinowego Obserwatorium Sudbury

Naukowa grupa badawcza Sudbury Neutrino Observatory Scientific Collaboration (SNO) powstała w roku 1984. Jej rzecznikami byli profesor Herb Chen z Uniwer-

sytetu Kalifornijskiego w Irvine (USA) i profesor George Ewan z Uniwersytetu Królowej w Kingston w prowincji Ontario w Kanadzie. W roku 1985 dołączyła do niej Wielka Brytania, której rzecznikiem był dr David Sinclair z Uniwersytetu w Oksfordzie. Cel eksperymentu, w którym jądra deuteru obecne w ciężkiej wodzie miały umożliwić wykrywanie dwóch różnych reakcji – jednej inicjowanej tylko przez neutrina elektronowe produkowane w Słońcu i drugiej inicjowanej przez neutrina wszystkich trzech zapachów - został przedstawiony w pracy Chena [4]. Porównanie częstości zachodzenia tych dwóch reakcji wykrywających neutrina pochodzące z rozpadu  $^{18}\text{B}$  w Słońcu miało pozwolić jednoznacznie ustalić, bez konieczności odwoływania się do [teoretycznych] obliczeń strumienia pierwotnych neutrin słonecznych, czy neutrina elektronowe zmieniają się w neutrina pozostałych trzech zapachów. Ponadto druga reakcja wykrywająca neutrina mogła być wykorzystana do dokładnego pomiaru strumienia neutrin elektronowych pochodzących z rozpadu  $^{18}\text{B}$ , niezależnie od tego czy oscylacje neutrin zachodzą, czy nie.

Pozycja [5] spisu literatury zawiera listę szesnastu pierwszych członków tej organizacji. Są oni także uwiecznieni na fotografii (ryc. 2) zrobionej w roku 1986 na spotkaniu w Laboratoriach Jądrowych w Chalk River w Kanadzie. W tym czasie uzyskana już była od Kanadyjskiej Agencji Atomowej Ltd. (AECL) wstępna zgoda na wypożyczenie z kanadyjskich rezerw 1000 ton ciężkiej wody i była już wstępnie zatwierdzona przez kompanię INCO Limited, właściciela kopalni Creighton w pobliżu Sudbury w Ontario, lokalizacja, którą znalazł profesor Ewan



Ryc. 2. Fotografia niektórych członków zespołu Sudbury Neutrino Observatory Scientific Collaboration (SNO) uczestniczących w spotkaniu w Chalk River w roku 1986. Od lewej: Davis Earle, Mort Bercovich, David Sinclair, John Simpson, Doug Hallman, Hay Boon Mak, Peter Doe, Henry Lee, Clif Hargrove, Hugh Evans, Peter Skensved, Herb Chen, Dan Kessler, George Ewan, Richard Allen i Art McDonald. Z pierwotnych członków nieobecni są na zdjęciu m.in. Walter Davidson, Barry Robertson, Robert Storey

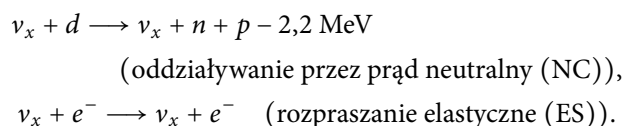
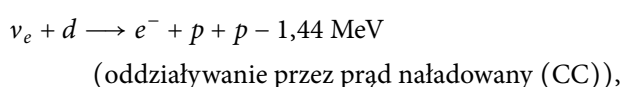
i uznał za najbardziej odpowiednią dla głęboko pod ziemią położonego laboratorium mającego badać radioaktywność. Niestety, profesor Chen zmarł wskutek leukemii w roku 1987, mniej więcej sześć miesięcy po wykonaniu fotografii przedstawionej na ryc. 2.

Dla zespołu była to wielka strata. Jego członkowie zachowali jednak pamięć o nim i o jego naukowych celach przy kontynuowaniu prac nad projektem układu eksperymentalnego i przy wystąpieniach o finansowanie przedsięwzięcia. Pracowałem wtedy na uniwersytecie w Princeton i przejąłem po nim rolę rzecznika grupy amerykańskiej; wkrótce dołączył do mnie profesor Eugene Beier z uniwersytetu pensylwańskiego w Filadelfii. Grupa rozrosła się znacznie w kilku następnych latach i około roku 1989 w jej skład wchodziło już 14 instytucji z Kanady, USA i Wielkiej Brytanii. By dokończyć projekt układu eksperymentalnego i jego lokalizacji wykonana została znaczna praca i z końcem roku 1989 agencje wszystkich trzech państw przyznały finansowanie. W tym to roku przenieśliśmy się z Princeton na Uniwersytet Królowej i biorąc odpowiedzialność za międzynarodowe przedsięwzięcie, zostałem dyrektorem Instytutu SNO, a także dyrektorem Sudbury Neutrino Observatory Scientific Collaboration.

Pierwotnie zespół zrzeszał Kanadyjską Agencję Atomową Ltd. (Laboratoria Chalk River), Uniwersytet w Carleton, Uniwersytet Laurentjański, Kanadyjską Narodową Radę Badań Naukowych, Uniwersytet Oksfordzki, Uniwersytet w Princeton, Uniwersytet Królowej, Uniwersytet Kalifornijski w Irvine i Uniwersytet Guelph. W roku 1989 do wymienionych instytucji dołączył Uniwersytet Pensylwański, Narodowe Laboratoria w Los Alamos, Narodowe Laboratorium im. Lawrence'a w Berkeley, Uniwersytet Brytyjskiej Kolumbii i Narodowe Laboratorium w Brookhaven. Liczebność grupy wzrosła do ok. 70 badaczy. Ostateczna liczba autorów podpisujących prace SNO wynosiła 274. Większość dodatkowych autorów stanowili doktoranci i postdokowie, co jasno uwidacznia ważny edukacyjny aspekt tego naukowego przedsięwzięcia.

### 3. Detekcja neutrin w SNO

Dzięki jądrom deuteru zawartym w cząsteczkach ciężkiej wody (składającej się w ponad 99,92% z cząsteczek  $D_2O$ ) wypełniającej detektor SNO możliwe było rejestrowanie trzech różnych oddziaływań neutrin. Dwóch wspomnianych wyżej i trzeciego, którym było ich elastyczne rozpraszanie na elektronach, które zachodzi w każdym ośrodku:



$x$  oznacza tu elektron, mion lub tau. W reakcjach pierwszego typu mogą brać udział tylko neutrina elektronowe. Powstaje w nich wysokoenergetyczny elektron, który wysyłając promieniowanie Czerenkowa wytwarza w detektorze stożek światła rejestrowany przez układ fotosensorów. W drugiej reakcji (NC) wszystkie [wymienione, tj. aktywne] neutrina mogą brać udział na równych prawach. Powstaje w niej swobodny neutron, który w trzech różnych fazach działania detektora SNO był obserwowany różnymi sposobami. Porównując odpowiednio wykalibrowane szybkości zachodzenia tych dwóch reakcji było możliwe ustalenie, czy elektronowe neutrina słoneczne zmieniły się w neutrina o innym zapachu przed dotarciem do detektora.

Trzecia reakcja (ES) zachodzi rzadziej niż pozostałe dwie i jest głównie czuła na neutrina elektronowe (sześć razy bardziej niż na neutrina dwóch pozostałych zapachów<sup>3</sup> przy energiach, jakie mają neutrina słoneczne). Powstaje w niej wysokoenergetyczny elektron i rozkład kątowy elektronów pochodzących z tej reakcji ma silne maksimum w kierunku do przodu w stosunku do kierunku, z którego nadleciało neutrin, czyli do kierunku od Słońca i dzięki temu reakcja ta może być odróżniona od pozostałych dwóch.

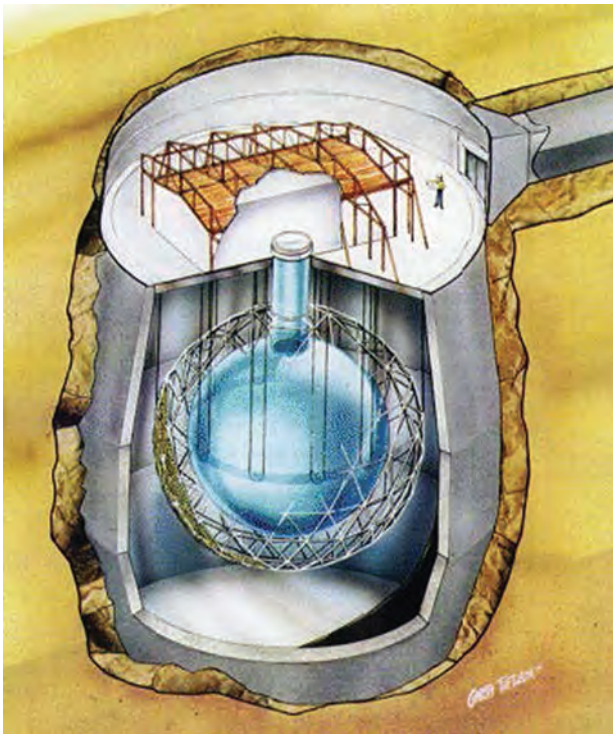
Eksperyment SNO miał trzy różne fazy. W fazie pierwszej użyta była czysta ciężka woda i swobodne neutrony powstające w reakcji NC wykrywano poprzez ich wychwyty przez jądra deuteru. Przy wychwycie takim powstaje promieniowanie gamma, czyli foton o energii 6,25 MeV, który w procesie Comptona wytwarza następnie elektron emitujący promieniowanie Czerenkowa. W drugiej fazie do ciężkiej wody dodano 2 tony ultraczystej soli NaCl, tak iż swobodne neutrony były wychwytywane głównie przez jądra chloru, wytwarzając kaskadę promieni gamma o sumarycznej energii około 8,6 MeV. Zwiększyło to efektywność wychwyty neutronów z 14% do 40% i spowodowało, że światło rozchodzące się w detektorze wskutek tej reakcji stało się izotropowe, co pozwoliło rozdzielić statystycznie przypadki oddziaływań NC od oddziaływań CC dających stożkowy rozkład światła. W fazie trzeciej do ciężkiej wody został wprowadzony niezależny układ detektorów neutronów, które wypełniał hel 3 ( $^3\text{He}$ ), co umożliwiło bezpośred-

3. W przypadku neutrin elektronowych ta reakcja zachodzi przez prądy neutralne (czyli wymianę wirtualnego bozonu  $Z^0$ ) i przez prądy naładowane (wymianę wirtualnego  $W$ ), a w przypadku pozostałych zapachów tylko przez prądy neutralne (przyp. tłum.).

nią detekcję neutronów powstających w reakcjach typu prądów neutralnych.

#### 4. Detektor SNO

Na ryc. 3 pokazano artystyczną wizję detektora SNO [7] umieszczonego w beczkowskkształtnym wydrążeniu skalnym wysokim na 34 m i o średnicy 22 m, zlokalizowanym dwa kilometry pod ziemią, w kopalni należącej do kompanii INCO/Vale Creighton w pobliżu Sudbury w prowincji Ontario w Kanadzie.



Ryc. 3. Schematyczny widok SNO

Tysiąc ton ciężkiej wody wzbogaconej deuterem do 99,92% (wartej 300 milionów dolarów kanadyjskich) jest zamknięte w przezroczystym akrylowym pojemniku mającym średnicę 12 m i ścianki grubości 5,6 cm. Pojemnik ten jest otoczony przez 9438 czujników światła (fotopowielacze) zamontowanych na tworzących linie geodezyjne ramach wykonanych z nierdzewnej stali. Wydrążenie skalne jest wyrównane nieprzenikalnym dla wody i radonu urylonowym plastikiem. Wydrążenie to na zewnątrz akrylowego pojemnika jest całe wypełnione zwykłą wodą oczyszczoną tak, by była miliard razy czystsza niż woda z kranu, gdy chodzi o zawartość pierwiastków należących do łańcuchów promieniotwórczych rozpadów uranu i toru.

Zaprojektowanie i skonstruowanie dwa kilometry pod ziemią tego masywnego i skomplikowanego detektora w ultraczystych warunkach było wielkim osiągnięciem inżynierskim. Przy realizacji tej jedynej w swoim rodzaju konstrukcji mieliśmy szczęście współpracować

z zespołem bardzo zdolnych inżynierów, techników i pracowników budowlanych. Kierowane przez swoich liderów grupy naukowe tworzące zespół podzieliły między siebie odpowiedzialność za większe części tego projektu, takie jak akrylowy pojemnik, ramy podtrzymujące fotopowielacze, układ wodny, elektronika, zbieranie danych, kalibracja, symulacje i analiza danych. Grupy te zajęły się swoimi odcinkami pracy w całości: od stworzenia projektu, przez budowę i doprowadzenie ich do stanu odpowiadającego technicznemu i naukowemu wymogom. Koordynację między grupami zapewniały regularne spotkania i dyskusje.

Wszystkie elementy detektora zostały starannie wybrane i przetestowane tak, by wykazywały jak najniższą radioaktywność, a powietrze w całym laboratorium było utrzymywane w nadzwyczaj wysokiej czystości (jego stopa sześcienna zawierała mniej niż 2000 cząsteczek pyłu o średnicy większej niż pół mikrona). Ustalono, że w całym skonstruowanym detektorze było mniej niż 1 gram pyłu kopalnianego. Utrzymanie ultra niskiego poziomu radioaktywności w detektorze i w ciężkiej wodzie było niezwykle istotne, gdyż każdy kwant gamma o energii wyższej niż 2,2 MeV (jaką mają fotony powstające w łańcuchach radioaktywnych rozpadów toru i uranu) mógł spowodować rozbicie jakiegoś jądra deuteru, wytworzyć swobodny neutron i dać sygnał, jaki daje reakcja typu NC neutrina. Utrzymując bardzo niską radioaktywność (dzięki zawartości toru niższej niż  $3 \times 10^{-15}$  grama na gram ciężkiej wody) i dokładnie kontrolując skład wody udało się zapewnić, że liczba neutronów powstających w wyniku przypadkowego rozbijania jąder deuteru przez kwanty gamma była dużo mniejsza niż neutronów powstających w reakcjach neutrin. Tło pochodzące od takich rozpadów radioaktywnych było dokładnie mierzone poprzez badanie próbek wody pod kątem obecności w niej produktów rozpadów radioaktywnych należących do łańcucha rozpadu toru i poprzez analizowanie danych dotyczących reakcji zachodzących przy niskich energiach, które są zdominowane przez radioaktywność. Podobne kroki podjęto, by ograniczyć wpływ rozpadów uranu i by kontrolować domieszkę zwykłej wody w wodzie ciężkiej.

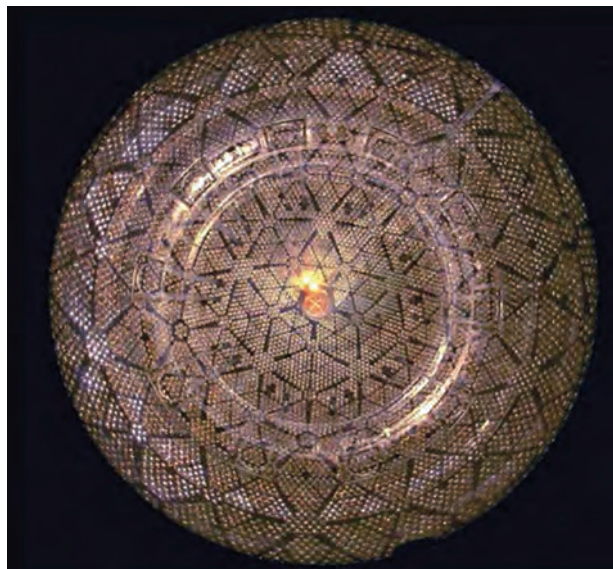
Rycina 4 przedstawia detektor w trakcie jego konstrukcji, gdy akrylowa sfera została już złożona ze 122 części dostatecznie małych, by mogły przejść przez podziemny chodnik stanowiący dojście do komory.

Na ryc. 5 pokazano skompletowany detektor przed napełnieniem go wodą, a na ryc. 6 zamieszczono zdjęcie zrobione szerokokątnym obiektywem skierowanym od spodu do góry na sferę tworzoną przez fotopowielacze.

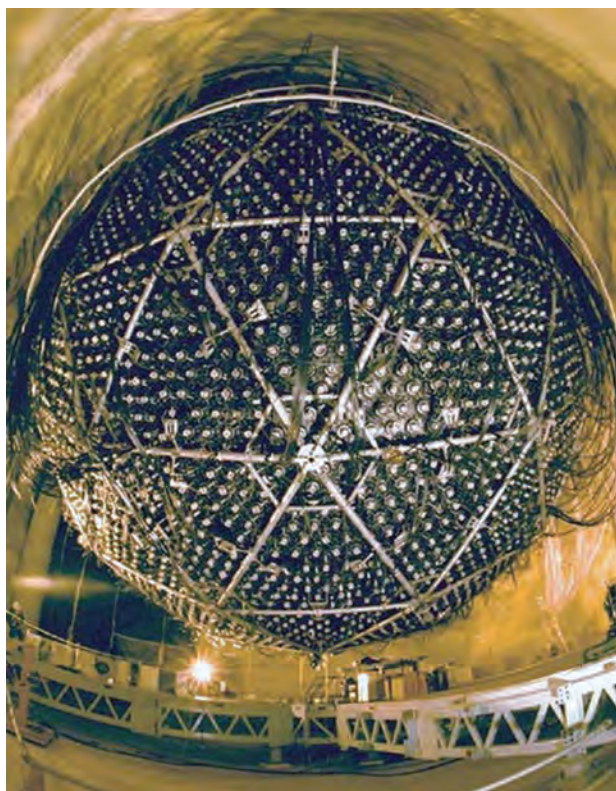
Rycina 7 przedstawia część układu oczyszczającego wodę wraz z wchodzącym w jego skład układem pozwa-



Ryc. 4. Detektor SNO w czasie konstrukcji



Ryc. 6. Fotopowielacze detektora SNO



Ryc. 5. Detektor przed wypełnieniem go wodą

lającym mierzyć bardzo niski poziom radioaktywności poprzez przepływ wody przez specjalnie zaprojektowane filtry do pomiaru zawartości produktów rozpadu toru i uranu. Innym radioaktywnym składnikiem, którego obecność musiała być silnie ograniczona i kontrolowana, był radon w postaci gazowej. Ograniczenie jego zawartości osiągnięto izolując ciężką wodę gazowym azotem otrzymywanym z ciekłego azotu doprowadzonego do wrzenia w dużych naczyniach Dewara. Gaz ten miał bardzo niską zawartość radonu, a układ został zaprojektowany tak, by uniknąć dopływu do wody powietrza z kopalni poprzez wymuszanie przepływu czystego azotu nad wodą nawet w trakcie zmian ciśnienia w kopalni.



Ryc. 7. Część układu oczyszczania wody

Zwykła woda [wypełniająca resztę wydrążenia] była najpierw odgazowywana, a następnie nagazowywana przez doprowadzanie do wrzenia azotu o niezwykle niskiej zawartości radonu. Dzięki tym wszystkim zabezpieczeniom w jednej tonie ciężkiej wody zachodził dziennie tylko jeden radioaktywny rozpad należący do łańcucha rozpadów toru i uranu, co wystarczało, by można było skutecznie rejestrować reakcje neutrin.

## 5. Pomiary wykonane przez SNO

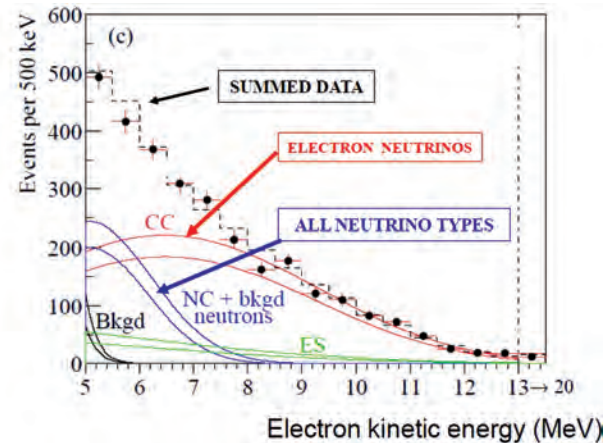
Fotopowielacze przekształcały fotony światła wytworzonego przez oddziaływania neutrin w ciężkiej wodzie w impulsy elektroniczne kształtowane przez specjalnie zaprojektowane obwody. Impulsy te wraz z tymi wytwarzanymi przez radioaktywne tło były zbierane przez układy komputerowe. Dane te, w celu wydzielenia z nich sygnałów oddziaływania neutrin, były starannie analizowane przy użyciu informacji na temat siły impulsu i czasu ich przybycia do wszystkich fotopowielaczy uruchomionych przez neutrinową reakcję. Razem zbiór takich informacji nazywa się przypadkiem albo zdarzeniem. Informacja

była dokładnie analizowana, by odróżnić przypadki neutrinowe od tych spowodowanych radioaktywnością lub innymi efektami aparaturowymi.

Na ryc. 8 przedstawiono wykres dotyczący przypadków zebranych w pierwszej fazie działania eksperymentu, w której detektor był wypełniony czystą ciężką wodą. Przedstawione tu dane pochodzą z najbardziej wewnętrznej, tworzącej kulę o średnicy 11 m, części wody i zostały zebrane w ciągu 306 dni działania detektora. Pokazano także przewidywane kształty krzywych odpowiadających przypadkom reakcji typu CC, NC i ES oraz danych ekstrapolowanych z niższych energii, odpowiadających tłu pochodzącemu z radioaktywności. Wykresy te otrzymano za pomocą symulowania metodą Monte Carlo impulsów oczekiwanych z detektora, dokładnie wykalibrowanego przez pomocnicze pomiary wyrzystujące źródła emitujące znane ilości promieni gamma, neutronów i elektronów o znanych energiach. Źródła te mogły być na specjalnym wysięgniku przeniesione przez około 70% objętości detektora w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach, co umożliwiło otrzymanie dokładnej mapy jego czułości.

Rozkład liczby przypadków reakcji typu NC w funkcji energii jest z dużą dokładnością określony przez promienie gamma o energii 6,25 MeV emitowane przy wychwycie swobodnych neutronów przez jądra deuteru. Można go było dokładnie wykalibrować używając do tego celu źródła promieni gamma o energiach 6,13 MeV pochodzących z rozpadu  $^{16}\text{N}$ . Azot ten był wytwarzany w osłoniętym miejscu w podziemnym laboratorium niedaleko od detektora i doprowadzony do ciężkiej wody rurkami kapilarnymi [8]. Przyczynę wnoszoną przez przypadki tła pochodzące z radioaktywności generującej w detektorze promieniowanie Czerenkowa, pokazany [na wykresie] czarnymi liniami, został obliczony na podstawie pomiarów wykonanych na osłoniętych torowych i uranowych źródłach przeniesionych przez detektor na wspomnianym wysięgniku umożliwiającym manipulowanie źródłami kalibrującymi. Liczba swobodnych neutronów wytwarzanych przy rozbijaniu jąder deuteru promieniami gamma pochodzącymi z rozpadów uranu i toru została obliczona na podstawie pomiarów obecności, w objętościach zajmowanych przez wodę ciężką i zwykłą, pierwiastków należących do łańcuchów rozpadów uranu i toru oraz na podstawie pomiarów (mniejszego) przyczynku pochodzącego od znanej radioaktywności innych materiałów, z których wykonany był detektor. Zawartość pierwiastków, należących do łańcuchów rozpadu toru i uranu, w całej objętości wody, wyznaczono pobierając bezpośrednio próbki wody przepuszczanej przez filtry wypełnione dwutlenkiem manganu lub wodnym tlenkiem tytanu, analizując przypadki niskoenergetycznych rozpadów toru i uranu oraz wykorzystując

izotropowość światła rejestrowanego przez detektor do odróżnienia przypadków rozpadu tych dwu pierwiastków. Przyczynki pochodzące od promieniowania Czerenkowa i od neutronów powstających wskutek przypadkowego rozbijania jąder deuteru przez promienie gamma stanowiły odpowiednio 8% i 12% całkowitej liczby przypadków rejestrowanych oddziaływań typu NC neutrin. Łączny błąd systematyczny liczby przypadków takich oddziaływań wyniósł tylko 4%.



Ryc. 8. Zebrane w pierwszej fazie działania eksperymentu SNO dane pokazujące liczbę przypadków w funkcji energii kinetycznej [powstałego w reakcji] elektronu

Wykorzystując dane pokazane na wykresie (ryc. 8) oraz dodatkowe informacje dotyczące każdego z możliwych typów oddziaływania neutrin ze szczególnym uwzględnieniem [dedukowanego na podstawie szczegółowej analizy sygnału] kierunku [z którego nadleciało neutrin] i miejsca zajścia oddziaływania w objętości ciężkiej wody został wykonany test hipotezy, że neutrina elektronowe nie zmieniają swojego zapachu przed dotarciem do detektora SNO. Hipoteza niezachodzenia zmiany zapachu neutrina została wyeliminowana, po uwzględnieniu połączonych błędów statystycznych i systematycznych, na poziomie 5,3 odchylenia standardowego, co odpowiada szansie mniejszej niż jedna na milion, że zapach neutrina nie ulega zmianie. Otrzymane na podstawie danych, przy założeniu, że rozkład energii elektronowych neutrin pochodzących z reakcji  $^8\text{B}$  w Słońcu nie jest niczym modyfikowany, najlepsze dopasowanie strumienia neutrin elektronowych i sumarycznego strumienia neutrin mionowych i taonowych jest (w jednostkach  $10^6$  neutrin na centymetr kwadratowy na sekundę) następujące

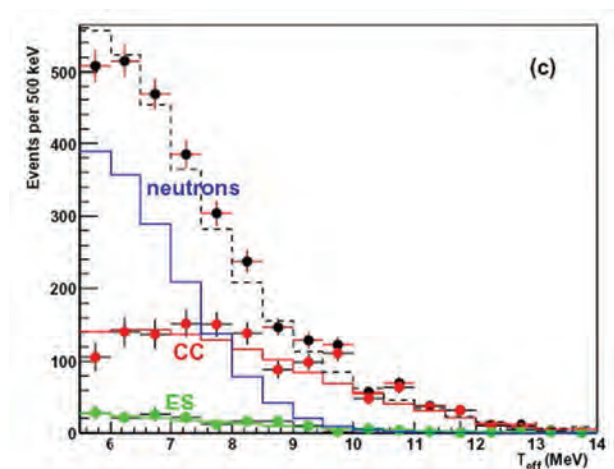
$$\phi_e = 1,76_{-0,05}^{+0,05}(\text{stat.})_{-0,09}^{+0,09}(\text{synt.}),$$

$$\phi_{\mu\tau} = 3,41_{-0,45}^{+0,45}(\text{stat.})_{-0,45}^{+0,48}(\text{synt.}).$$

To „najlepsze dopasowanie” pokazuje, iż około dwie trzecie neutrin elektronowych wyprodukowanych w centralnej części Słońca zmieniło się przed osiągnięciem przez

nie detektora SNO w pozostałe dwa rodzaje aktywnych neutrin.

Bardziej szczegółowa naukowa dyskusja tych wyników jest przedstawiona w dwóch pracach [9] zespołu SNO opublikowanych w roku 2002. Wyniki te były zgodne z podanymi w poprzedniej pracy [10] z roku 2001, w której dane dotyczące oddziaływań typu CC w detektorze SNO neutrin pochodzących z reakcji  $^8\text{B}$  zostały porównane z wynikami dotyczącymi tych samych neutrin rejestrowanych przez detektor Superkamiokande poprzez ich reakcje typu ES w zwykłej wodzie. Tamto wcześniejsze porównanie wykazało było nieadekwatność hipotezy niewystępowania zmiany zapachu na poziomie 3,3 odchylenia standardowych.

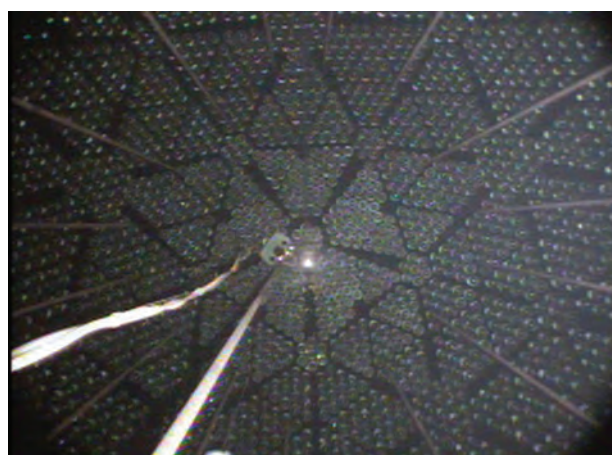


Ryc. 9. Dane z drugiej fazy eksperymentu pokazujące liczbę przypadków w funkcji efektywnej energii kinetycznej elektronu

Wyniki drugiej fazy eksperymentu, w której w ciężkiej wodzie rozpuszczono dwie tony NaCl przedstawia wykres pokazany na ryc. 9. Porównanie z wykresem z ryc. 8 pokazuje, że liczba wykrywanych przypadków oddziaływań typu NC wzrosła dzięki zwiększeniu się efektywności detekcji swobodnych neutronów z 14% do 40%. W tej fazie różnica w izotropowości światła emitowanego w wyniku oddziaływań typu NC i typu CC została wykorzystana jako dodatkowy sposób odróżniania przypadków tych dwóch oddziaływań, co jeszcze bardziej zwiększyło dokładność.

Wyniki uzyskane w drugiej fazy eksperymentu [11] są zgodne z otrzymanymi w fazie pierwszej, ale są od tamtych dokładniejsze: znacznie polepszyła się dokładność pomiaru całkowitego strumienia neutrin z reakcji  $^8\text{B}$  za pomocą oddziaływań typu NC. Ponadto, odróżnianie przypadków oddziaływań typu NC od tych typu CC na podstawie stopnia izotropii emitowanego światła umożliwiło niezależne wyznaczenie z tych drugich reakcji kształtu energetycznego widma neutrin elektronowych. Wyznaczone widmo jest zgodne z przewidywanym [teoretycznie] widmem energii neutrin elektrono-

wych powstających w rozpadzie  $^8\text{B}$  w Słońcu i zgodne z założeniami poczynionymi przy otrzymywaniu z danych zebranych w fazie pierwszej „najlepszego dopasowania” strumieni neutrin. Hipoteza, że neutrina nie oscylują została teraz wykluczona na poziomie ponad 7 odchylenia standardowych, czyli szansa jej prawdziwości spadła do mniej niż jednej na 400 miliardów. Całkowity strumień wszystkich zapachów neutrin został wyznaczony teraz znacznie dokładniej i okazał się doskonale zgodny z obliczonym [teoretycznie] przez Bahcalla i innych na podstawie tzw. standardowego modelu Słońca.



Ryc. 10. Zdalnie sterowana łódź podwodna instalująca przed trzecią fazą eksperymentu jeden z (wielu, tworzących cały układ) detektorów neutronów wypełnionych  $^3\text{He}$

W trzeciej fazy eksperymentu w objętości wypełnionej ciężką wodą za pomocą zdalnie sterowanej łodzi podwodnej zainstalowany został, mający łącznie długość 400 metrów, układ wypełnionych  $^3\text{He}$  detektorów neutronów o bardzo niskim poziomie tła [6]. Na ryc. 10 widzimy fotografię łodzi w trakcie instalowania ostatnich detektorów. Można dostrzec, że łódź ma kolor zielony matowy, a nie taki, jaki mógłby być wybrany przez kogoś o trochę bardziej artystycznej duszy, czyli takiej, jaką jest obdarzona większość fizyków. Oczywiście wybraliśmy Żółtą Łódź Podwodną i taki był też pierwotny kolor łodzi. Traf jednak chciał, że żółta farba była zbyt radioaktywna, żeby można było ją zaakceptować, więc musieliśmy ją zdrapać i zadowolić się bardziej prozaicznym kolorem zielonym, jaki widać na fotografii. Jest to tylko jeden z przykładów procesów [obróbki], jakim musieliśmy poddać wiele materiałów wykorzystanych w detektorze, aby sprostać naszym ostrym wymaganiom dotyczącym radioaktywności a zarazem przykład jednej z niespodzianek, z jakimi się można spotkać prowadząc tak skomplikowany eksperyment jak nasz.

Zainstalowane detektory neutronów posłużyły do wykonania pomiarów reakcji typu CC i NC metodą mającą zupełnie inne niepewności systematyczne, niż metody wykorzystane w dwóch pierwszych fazach. Wyniki

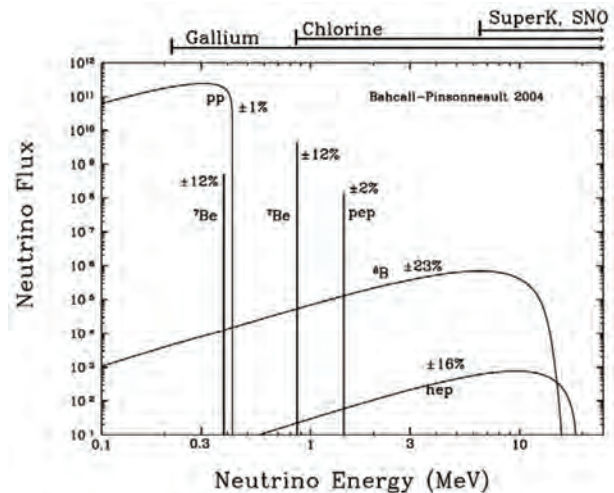
fazy trzeciej [12] także okazały się, w granicach błędów, zgodne z uzyskanymi w fazach pierwszej i drugiej. Zwiększyło to ogólną dokładność wszystkich wyników i dało nam dodatkowo poczucie, że poprawnie odróżniamy przypadki oddziaływań typu CC i NC. Przy analizie danych SNO zbieranych w trzech fazach zastosowane zostały różne podejścia w taki sposób, by końcowy ich rezultat nie był widoczny dla wykonujących analizę aż do momentu, gdy wszystkie parametry, które miały być użyte, były już w pełni wyznaczone.

Końcowa analiza łącząca dane ze wszystkich trzech faz dała ostatecznie liczbę  $0,317 \pm 0,016(\text{stat.}) \pm 0,009(\text{syst.})$  jako stosunek strumienia neutrin elektronowych do strumienia wszystkich neutrin [13]. Ten końcowy wynik pokazuje jasno, że ponad dwie trzecie neutrin elektronowych zmienia się w neutrina pozostałych dwóch zapachów przed osiągnięciem detektora SNO. Zmierzony całkowity strumień neutrin pochodzących z rozpadu  ${}^8\text{B}$  w Słońcu wynosi  $5,25 \pm 0,16(\text{stat.}) + 0,11 - 0,13(\text{syst.})$  milionów neutrin na centymetr kwadratowy na sekundę. Wynik ten zgadza się z [teoretycznymi] obliczeniami [14] strumienia neutrin pochodzących z rozpadu  ${}^8\text{B}$  w Słońcu, ale jest bardziej dokładny i jako taki jest teraz, w połączeniu z innymi obserwacjami, np. heliosejsmologicznymi, wykorzystywany [15] do ulepszenia modeli Słońca.

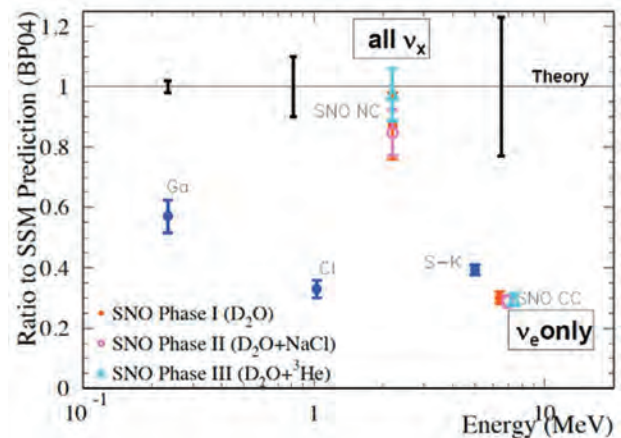
## 6. Porównanie wyników SNO z innymi pomiarami neutrin słonecznych

Po pionierskim pomiarze przez Davisa [1, 16] strumienia neutrin słonecznych (wykorzystującym oddziaływanie neutrin elektronowych z chlorem), ale przed otrzymaniem wyników przez SNO prowadzono kilka innych eksperymentów rejestrujących tylko neutrina elektronowe (wykorzystujących radiochemiczne metody detekcji przy użyciu galu) [17] lub wykrywających przede wszystkim te właśnie neutrina poprzez ich elastyczne rozpraszanie na elektronach w lekkiej wodzie (detektory Kamiokande i Superkamiokande) [18]. Minimalna energia neutrina konieczna, by mogło ono być zarejestrowane w każdym z tych eksperymentów, jest zaznaczona nad górną ramką wykresu pokazującego obliczone strumienie neutrin powstających w różnych reakcjach cyklu  $pp$  zachodzącego w Słońcu (ryc. 11). Wyniki uzyskane przez te inne eksperymenty są graficznie przedstawione na wykresie z ryc. 12. Z wykresu tego widać, że mierzone strumienie są od dwóch do trzech razy mniejsze niż oczekiwane na podstawie obliczeń wykonanych w ramach modeli Słońca.

Na ryc. 12 pokazane są także wyniki pomiarów SNO z trzech różnych faz jego działania. Widoczna jest ich wzajemna zgodność. Widać też, że otrzymany całkowity strumień wszystkich neutrin pozostaje w dobrej zgodności z przewidywaniami modeli Słońca, a wyznaczony



Ryc. 11. Strumienie neutrin słonecznych obliczone [19] z uwzględnieniem zbioru reakcji cyklu  $pp$  pokazanego na ryc. 1. Nad wykresem zaznaczone zostały progi energetyczne na zarejestrowanie neutrina elektronowego przez eksperymenty wykorzystujące chlor, gal i lekką wodę



Ryc. 12. Stosunki zmierzonych strumieni neutrin do strumienia neutrin elektronowych wytwarzanych w centralnej części Słońca, obliczone [19] na podstawie Standardowego Modelu Słońca

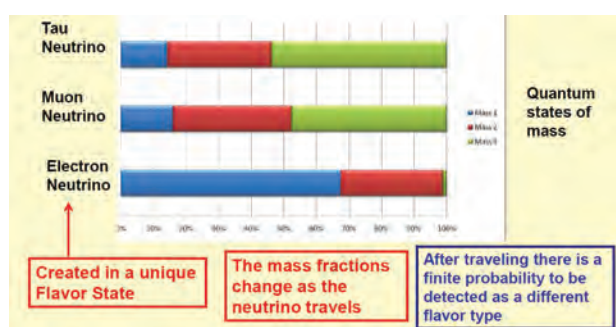
strumień neutrin elektronowych jest, wskutek zmiany zapachu neutrin, około trzykrotnie mniejszy niż przewidywany. Należy także zauważyć, że różnica pomiędzy stosunkiem [mierzonego] strumienia [neutrin elektronowych do strumienia tychże neutrin przewidywanego bez uwzględnienia oscylacji] wyznaczonym przez SNO z reakcji typu CC, a tym samym stosunkiem wyznaczonym przez eksperyment Superkamiokande jest spowodowana przede wszystkim tym, że proces elastycznego rozpraszania wykorzystany w tym drugim eksperymencie rejestruje w pewnym stopniu także i neutrina pozostałych dwóch zapachów. Ten właśnie fakt został wykorzystany w pracy [10] do wyznaczenia (z ograniczoną dokładnością) całkowitego strumienia neutrin słonecznych.

## 7. Oscylacje neutrin i zmiana zapachu

Oscylowanie neutrin i zmienianie przez nie zapachu oznacza, że muszą one mieć niezerowe masy. Gdyby bowiem miały zerowe masy, tak jak przewiduje to mo-



del standardowy oddziaływań cząstek elementarnych, podróżowałyby z prędkością światła i w ich własnym układzie odniesienia nie istniałaby miara czasu, której można by użyć do zdefiniowania procesu oscylacji. Zaakceptowany obecnie model oscylacji neutrin wykorzystuje pracę [20] Makiego, Nakagawy i Sakaty oraz prace [2, 3] Pontecorvo. Zgodnie z tym modelem, kwantowy stan zapachowy neutrina, w jakim ono powstaje, może być przedstawiony, jak to schematycznie zobrazowano na ryc. 13, jako superpozycja kwantowych stanów neutrin o określonych masach. Gdy neutrino pierwotnie powstałe w stanie o określonym zapachu przemieszcza się w przestrzeni, rozkład tego stanu na stany o określonej masie ulega zmianie. Gdy następnie dokonywany jest pomiar [(neutrino inicjuje w detektorze reakcję)], stan neutrina ma częściowo skład (w sensie superpozycji stanów o określonej masie) taki, jak stan neutrina elektronowego, częściowo taki, jak stan neutrina mionowego, a częściowo taki, jak neutrino taonowego. To determinuje ułamek przypadków, w których jest ono przy pomiarze rejestrowane jako jedno z tych trzech neutrin.



Ryc. 13. Schematyczne przedstawienie oscylacji neutrin

W przypadku neutrin elektronowych występuje jeszcze inny efekt (zwany efektem MSW), odkryty przez Michejewa i Smirnowa, którzy rozwinęli idee Wolfensteina [21]. Efekt ten dodaje się do efektów oscylacji. Gdy neutrino elektronowe przechodzi przez gęste obszary wnętrza Słońca, które są bogate w elektrony, efekt MSW może modyfikować oscylacje: zmienia np. stan neutrin elektronowych powstających w rdzeniu Słońca w rozpadach  $^8\text{B}$  w czysty stan neutrina o masie  $m_2$ ; neutrino pozostaje następnie w tym stanie, aż do jego zarejestrowania na Ziemi. Takie jest właśnie wyjaśnienie mierzonego przez SNO składu zapachowego neutrin pochodzących ze Słońca. Ustalenie, że efekt ten rzeczywiście występuje, wynika z porównania [22] szczegółowych przewidywań, wykorzystujących obliczone na podstawie modeli Słońca strumienie neutrin, skutków oscylacji neutrin w Słońcu i wpływu na nie efektu MSW z wynikami otrzymanymi w eksperymentach z detektorami chlorowymi, galowymi, wodnymi, w tym z wynikami SNO oraz z wynikami dotyczącymi oscylacji antyneutrin wytwarzanych na Ziemi

przez reaktory. Więcej informacji na ten temat można znaleźć w pracy [13]. Na podstawie efektu MSW wiemy też, że masa  $m_2$  jest większa niż masa  $m_1$ .

## 8. Przyszłe pomiary

Od czasu otrzymania pierwszych wyników w eksperymentach Superkamiokande i SNO uruchomiono wiele innych eksperymentów rejestrujących neutrina. Pomogły one ustalić właściwości tych cząstek i scharakteryzować ich oscylacje. Pozostało jednak kilka pytań dotyczących tych zagadnień i powstają lub są planowane nowe eksperymenty mające dać na te pytania odpowiedzi.

Sam detektor SNO także przechodzi przemianę. Nowy eksperyment zwany SNO+ będzie próbował zarejestrować proces radioaktywnego rozpadu, znany jako podwójny bezneutrinowy rozpad beta, jąder telluru rozpuszczonego w ciekłym scyntylatorze, który zastąpi ciężką wodę wypompowaną już z detektora. Jeśli taki rzadki rozpad zostanie zaobserwowany, będzie on dowodem, że neutrina są swoimi własnymi antycząstkami (cząstki takie nazywają się fermionami Majorany). Uda się przy tym wyznaczyć bezwzględne masy neutrin. Na razie pomiary oscylacji pozwoliły wyznaczyć jedynie różnice [kwadratów] mas poszczególnych neutrin. Planowane jest też przeprowadzenie za pomocą detektora SNO+ pomiarów neutrin słonecznych o niższych energiach oraz neutrin wytwarzanych w Ziemi i w reaktorach jądrowych. Detektor ten będzie także wykorzystany do poszukiwania neutrin powstających w zachodzących w naszej galaktyce wybuchach supernowych.

Laboratorium obecnie działające pod kierownictwem prof. Davida Sinclaira zostało rozbudowane i pod nazwą SNOLAB mieści kilka uzupełniających eksperymentów, wśród których jest eksperyment mający bezpośrednio poszukiwać cząstek ciemnej materii oraz inny, mający rejestrować neutrina pochodzące z supernowych. Całkowita objętość wydrążonego w skale laboratorium jest trzykrotnie większa niż pierwotnego obszaru badawczego eksperymentu SNO; aby lepiej kontrolować radioaktywność, całe wydrążenie i laboratorium jest utrzymywane w czystości odpowiadającej klasie 200 jakości powietrza, a nawet lepszej. Więcej szczegółów można znaleźć pod adresem: [www.snolab.ca](http://www.snolab.ca)

## Podziękowania

Kończąc chciałbym wyrazić moje najserdeczniejsze podziękowania wielkiej liczbie współpracowników, którzy przyczynili się do sukcesu, jaki osiągnął eksperyment SNO. Kompletny zbiór 263 autorów naukowych publikacji zespołu SNO jest następujący:

Adam Cox, Aksel L. Hallin, Alain Bellerive, Alan Smith, Alan Poon, Alexander Wright, Allan Myers,

Alysia Marino, André Krüger. André Roberge, Andre Krumins, Andrew Ferraris, Andrew Hime, Anett Schülke, Anthony Noble, Araz Hamian, Arthur McDonald, Aubra Anthony, Azriel Goldschmidt, Barry Robertson, Bassam Aharmim, Bei Cai, Benjamin Monreal, Bernard Nickel, Berta Beltran, Bhaskar Sur, Blair Jamieson, Brandon Wall, Brent VanDevender, Brian Morrisette, Bruce Cleveland, Bryan Fulsom, Bryce Moffat, Carsten Krauss, Catherine Mifflin, Charles Currat, Charles Duba, Charlotte Sims, Christian Nally, Christian Oullet, Christine Kraus, Christopher Kyba, Christopher Howard, Christopher Jillings, Christopher Tunnell, Christopher Waltham, Clarence Virtue, Colin Okada, Darren Grant, David Anglin, David Sinclair, David Waller, David Wark, Davis Earle, Diane Reitzner, Dimpal Cauchan, Doug Halman, Douglas Cowen, Douglas McDonald, Duncan Hepburn, Ed Frank, Edward Clifford, Michael Dragowsky, Emmanuel Bonvin, Eric Norman, Erik Saettler, Etienne Rollin, Eugene Guillian, Eugene Beier, Fabrice Fleurot, Feng Zhang, Ferenc Dalnoki-Veress, Fraser Duncan, Gabriel D. Orebi Gann, Geoffrey Miller, George Doucas, George Ewan, Gerhard Bühler, Gersende Prior, Gordana Tešić, Gordon McGregor, Gregory Harper, Guy Jonkmans, Gwen Milton, Hadi Fergani, Hamish Robertson, Hans Bichsel, Hans Mes, Hardy Seifert, Hay Boon Mak, Heidi Munn, Helen M. O'Keeffe, Hendrick Labranche, Henry Lee, Hok Seum, Wan Chan Tseung, Huaizhang Deng, Hugh Evans, Hui-Siong Ng, Ian Lawson, Ilan Levine, Ira Blevis, Jacques Farine, James Cameron, James Hall, James Loach, James Leslie, Jaret Heise, Jason Detwiler, Jason Hewett, Jason Pun, Jason Goon, Jeanne Wilson, Jeffrey Secrest, Jeremy Lyon, Jerry Wilhelmy, Jessica Dunmore, Jian-Xiong Wang, Jimmy Law, Jocelyn Monroe, John Amsbaugh, John Boger, John Orrell, John Simpson, John Wilkerson, Jon Hykawy, Jose Maneira, Joseph Formaggio, Joseph Banar, Joseph Germani, Joshua Klein, Juergen Wendland, Kai Zuber, Kara Keeter, Kareem Kazkaz, Karsten Heeger, Katherine Frame, Kathryn Schaffer, Keith Rielage, Kenneth McFarlane, Kevin Graham, Kevin Lesko, Kevin McBryde, Khalil Boudjemline, Klaus Kirch, Laura Kormos, Laura Stonehill, Laurel Sinclair, Louise Heelan, Malcolm Fowler, Manuel Anaya, Marc Bergevin, Marcus Thomson, Maria Isaac, Marie DiMarco, Mark Boulay, Mark Chen, Mark Howe, Mark Kos, Mark Neubauer, Martin Moorhead, Masa Otori, Melin Huang, Melissa Jerkins, Michael Bowler, Michael Browne, Michael Lay, Michael Lowry, Michael Miller, Michael Thorman, Michal Shatkay, Mike Schwendener, Miles Smith, Minfang Yeh, Miriam Diamond, Mitchell Newcomer, Monica Dunford, Morley O'Neill, Mort Bercovitch, Myung Chol Chon, Naeem Ahmed, Nathaniel Tagg, Neil McCauley, Nicholas Jelley, Nicholas West, Nikolai Starinsky, Nikolai Tolich, Noah Oblath, Noel Gagnon, Nuno

Baros, Olivier Simard, Patrick Tsang, Paul Keener, Peter Wittich, Peter Doe, Peter Watson, Peter Skensved, Peter Thornewell, Philip Harvey, Pierre Luc Drouin, Pillalammarr Jagam, Ranpal Dosanjh, Reda Tafirout, Reena Meijer Drees, Reyco Henning, Richard Allen, Richard Ford, Richard Helmer, Richard Hemingway, Richard Kouzes, Richard Hahn, Richard Lange, Richard Ott, Richard Tappin, Richard Van Berg, Richard Van de Water, Rizwan Haq, Robert Black, Robert Boardman, Robert Stokstad, Robert Heaton, Robert Komar, Robin Ollerhead, Rushdy Ahmad, Ryan MacLellan, Ryan Martin, Ryuta Hazama, Salvador Gil, Sarah Rosendahl, Scott Oser, Sean McGee, Shahnoor Habib, Sherry Majerus, Simon Peeters, Stanley Seibert, Steffon Luoma, Steven Elliott, Steven Biller, Steven Brice, Teresa Spreitzer, Thomas Andersen, Thomas J. Radcliffe, Thomas J. Bowles, Thomas Kutter, Thomas Sonley, Thomas Steiger, Timothy Van Wechel, Tom Burritt, Tudor Costin, Tyron Tsui, Vadim Rusu, Vladimir Novikov, Walter Davidson, William Frati, William Handler, William Heintzleman, William Locke, William McLatchie, Xin Chen, Xin Dai, Yaroslav Tserkovnyak, Yasuo Takeuchi, Yekaterina Opachich, Yuen-Dat Chan.

I jeszcze jedenaście osób, które już zmarły: Herbert Chen, John C. Barton, John Cowan, Andre Hamer, Clifford Hargrove, Barry C. Knox, Jan Wouters, Peter Trent, Robert Storey, Keith Rowley i Neil Tanner.

Przypadł mi w udziale prawdziwy przywilej kierowania jako dyrektor przedsięwzięciem, w którym uczestniczyła ta grupa utalentowanych i pracujących ciężko i z wielkim poświęceniem badaczy. Chciałbym także wyrazić uznanie dla grupy równie utalentowanych i równie ciężko pracujących inżynierów, techników, konstruktorów oraz personelu administracyjnego SNO. Sukces jaki osiągnęliśmy był naprawdę sukcesem wszystkich członków całego zespołu, których wspierali także ich małżonkowie i rodziny. Jestem zaszczycony, że mogłem z tymi ludźmi pracować i jestem im wdzięczny za wszystkie ich wysiłki.

Chciałbym także podziękować wszystkim agencjom i administracjom tych instytucji, które wspierały nas przez te długie lata, jakie zajęło przeprowadzenie całego eksperymentu. Szczególne słowa uznania należą się Kanadyjskiej Agencji Atomowej Ltd. (AECL) za wypożyczenie ciężkiej wody oraz spółce INCO/Vale za jej wsparcie udzielane niezmiennie najpierw SNO, a obecnie SNOLAB.

#### Literatura

1. R. Davis Jr., D. S. Harmer and K. C. Hoffman, *Phys. Rev. Lett.* **20**, 1205 (1968); J. N. Bahcall, N. A. Bahcall and G. Shaviv, *Phys. Rev. Lett.* **20**, 1209 (1968).

2. V. Gribov and B. Pontecorvo, *Phys. Lett.* **25B**, 493 (1969).
3. B. Pontecorvo, *Sov. Phys. JETP* **7**, 172 (1958).
4. H. H. Chen, *Phys. Rev. Lett.* **55**, 1534 (1985).
5. D. Sinclair, A.L. Carter, D. Kessler, E.D. Earle, P. Jagam, J.J. Simpson, R.C. Allen, H.H. Chen, P.J. Doe, E.D. Hallman, W.F. Davidson, A.B. McDonald, R.S. Storey, G.T. Ewan, H. B. Mak, B.C. Robertson, *Il Nuovo Cimento C9*, 308 (1986).
6. J. Amsbaugh et al., *Nucl. Instr. Meth A* **A579**, 1054 (2007).
7. J. Boger et al. (SNO Collaboration), *Nucl. Instr. and Meth.* **A449**, 172 (2000).
8. M.R. Dragowsky, A. Hamer, Y.D. Chan, R. Deal, E.D. Earle, W. Frati, E. Gaudette, A. Hallin, C. Hearn, J. Hewett, G. Jonkmans, Y. Kajiyama, A.B. McDonald, B.A. Moffat, E.B. Norman, B. Sur, N. Tagg, *Nucl. Instr. and Meth.* **A481**, 284–296 (2002).
9. Q. R. Ahmad et al. (SNO Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **89** 011301 (2002); Q. R. Ahmad et al. (SNO Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **89**, 011306 (2002).
10. Q. R. Ahmad et al. (SNO Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **87**, 07301 (2001).
11. S. N. Ahmed et al. (SNO Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **92**, 181301 (2004).
12. B. Aharmim et al (SNO Collaboration) *Phys. Rev. Lett.* **101**, 111301 (2008).
13. B. Aharmim et al, (SNO Collaboration), *Phys. Rev. C* **88**, 025501 (2013).
14. A. M. Serenelli, S. Basu, J. W. Ferguson, and M. Asplund, *Astrophys. J. Lett.* **705**, L123 (2009).
15. I. Lopes and S. Turck-Chieze, *Astrophys. J.* **765**, 14 (2013).
16. B. T. Cleveland et al, *Astrophysical Jour.* **496**, 505 (1998).
17. J. N. Abdurashitov et al. (SAGE Collaboration), *Phys. Rev. C* **80**, 015807 (2009), contains combined analysis with the following references; M. Altmann et al. (GNO Collaboration), *Physics Letters B* **616**, 174 (2005); F. Kaether, Datenanalyse der Sonnenneutrino-experiments Gallex, Ph.D. thesis, Heidelberg (2007).
18. K. Abe et al. (Super-Kamiokande Collaboration), *Phys. Rev. D* **83**, 052010 (2011).
19. J. N. Bahcall and M. H. Pinsonneault, *Phys. Rev. Lett.* **92**, (2004) 121301.
20. Z. Maki, M. Nakagawa, and S. Sakata, *Prog. Theor. Phys.* **28**, 870 (1962).
21. L. Wolfenstein, *Phys. Rev. D* **17**, 2369 (1978); S. Mikheyev and A. Smirnov, *Sov. J. Nucl. Phys.* **42**, 913 (1985).
22. K. Abe et al. (Kamland Collaboration), *Phys. Rev. C* **84**, 035804 (2011).

*Przekład Piotr Chankowski*