

# Fizyka cząstek: detektory

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

## Wykład VII

Eksperymenty nieakceleratorowe

- Pomiar neutronów

# Neutrino

## Przekrój czynny

Przekrój czynny na oddziaływanie neutrin z materią jest **niewyobrażalnie mały**.

Dla neutrin o energii rzędu 1 MeV

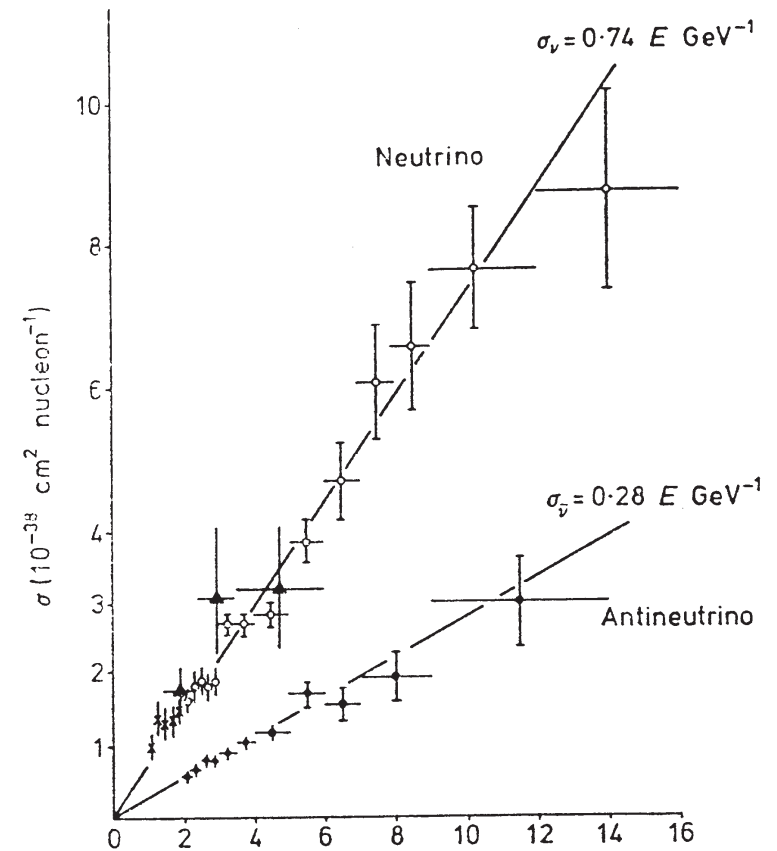
$$\sigma_{\nu N} \sim 10^{-43} \text{ cm}^2 = 10^{-19} \text{ b}$$

Odpowiada to średniej **drodze swobodnej** w materii rzędu **lat świetlnych !!!**

Przekrój czynny na oddziaływanie neutrin z materią **rośnie z energią**, ale tylko liniowo...

Badanie neutrin możliwe jest tylko w oparciu o **bardzo intensywnego źródła**...

**Słońce, promieniowanie kosmiczne, reaktory jądrowe, oddziaływania cząstek...**  
**oraz ogromne detektory...**

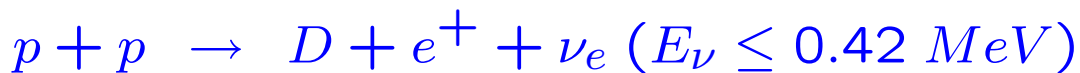


# Neutrina słoneczne

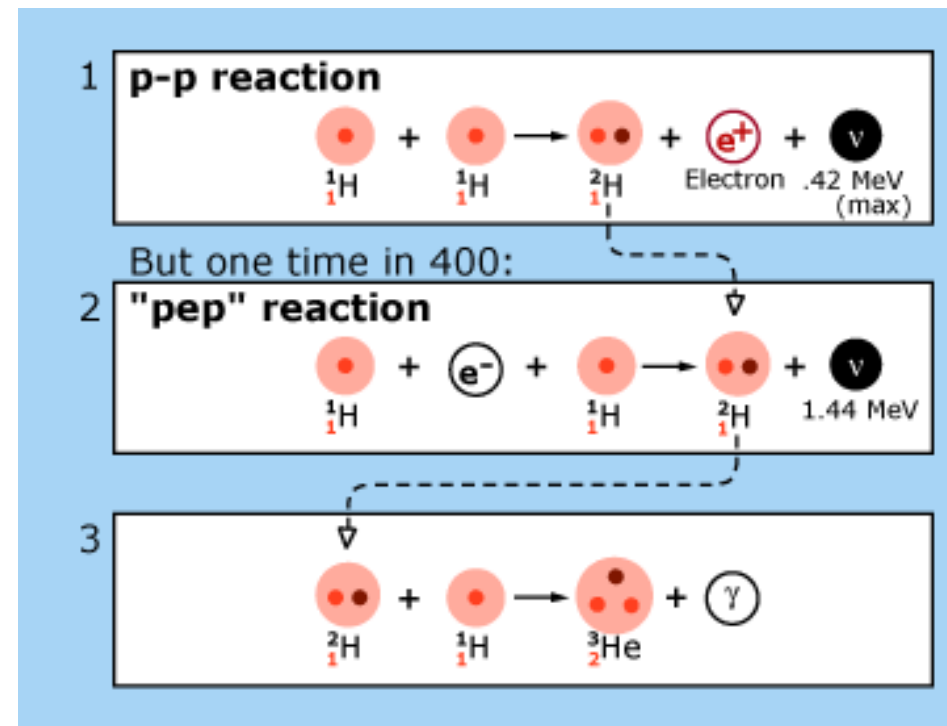
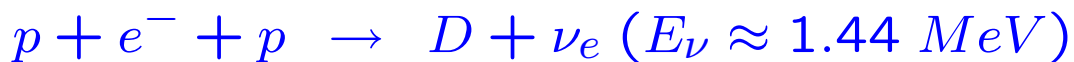
## Produkcja neutrin

**Słońce** jest nie tylko źródłem promieniowania elektromagnetycznego, ale też niezwykle intensywnym źródłem neutrin elektronowych.

Ogromna **większość** neutrin pochodzi z reakcji **p-p**:



jednak **wyższe energie** uzyskują neutrina z reakcji **“pep”**:



# Neutrina słoneczne

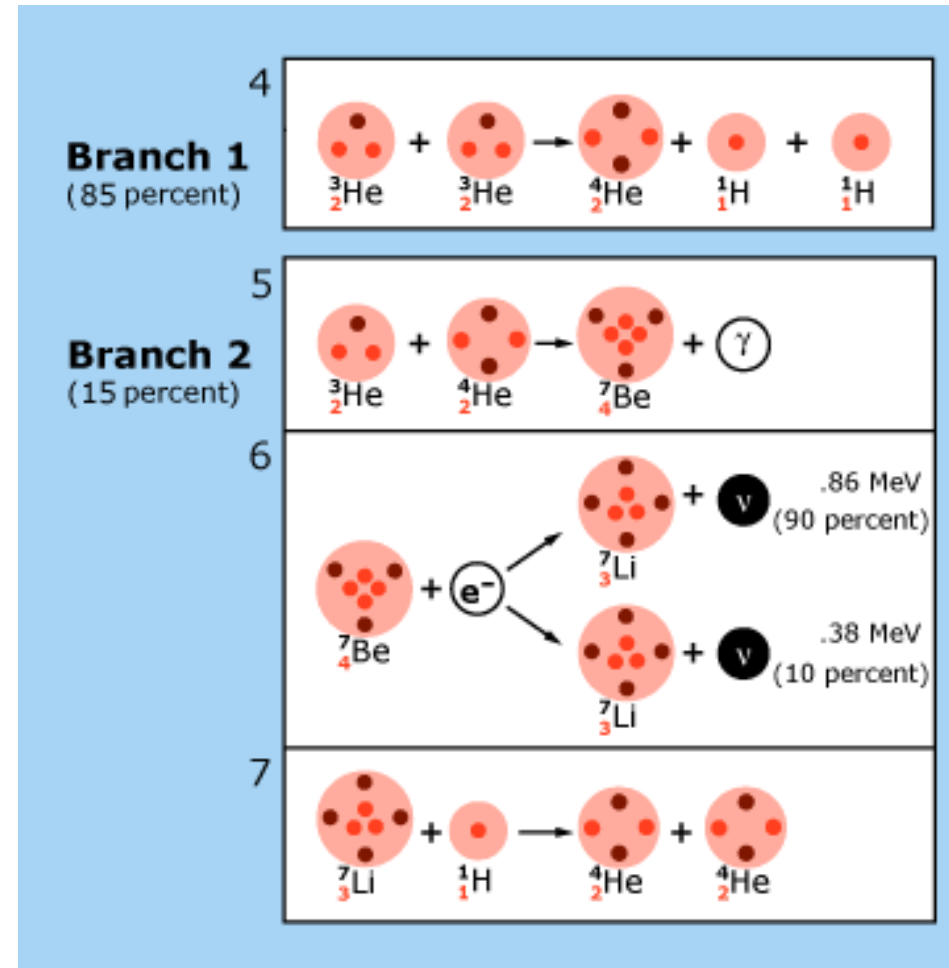
## Produkcja neutrin

Dalsze reakcje syntezy  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^7\text{Be}$  i  ${}^7\text{Li}$  prowadzą do emisji dodatkowych neutrin.

Neutrino z przemiany  ${}^7\text{Be}$



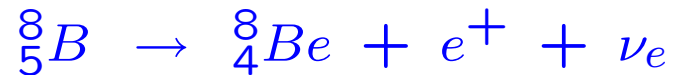
mają jednak energie **poniżej 1 MeV**



# Neutrina słoneczne

## Produkcja neutrin

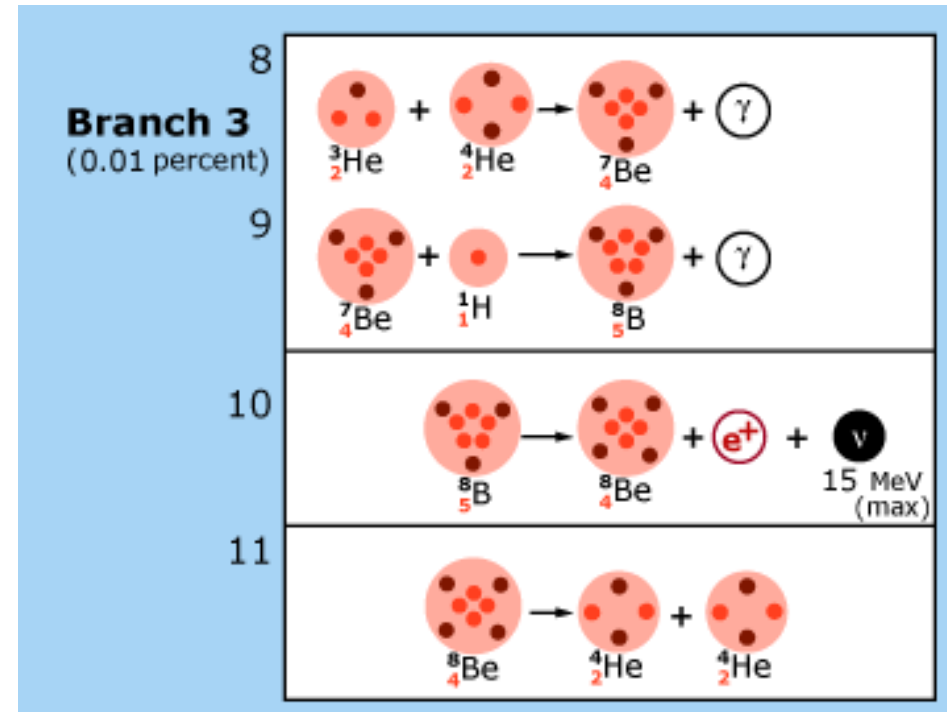
Źródłem wysokoenergetycznych neutrin jest przemiana  ${}^8B$



w której energia emitowanych neutrin dochodzi do **15 MeV**

Tylko te neutrina mogą być mierzone w detektorach cząstek elementarnych.

Np. w Super-Kamiokande mierzymy neutrina o  $E_\nu > 5-7 \text{ MeV}$ ...



# Neutrina słoneczne

## Widmo energii

Widmo energii **neutrino elektronowych** produkowanych w reakcjach jądrowych na słońcu  $\Rightarrow$

**Strumień neutrino** o energiach poniżej kilku MeV może być zmierzony **metodami radiochemicznymi**: mierzymy produkcję powstających **izotopów**:

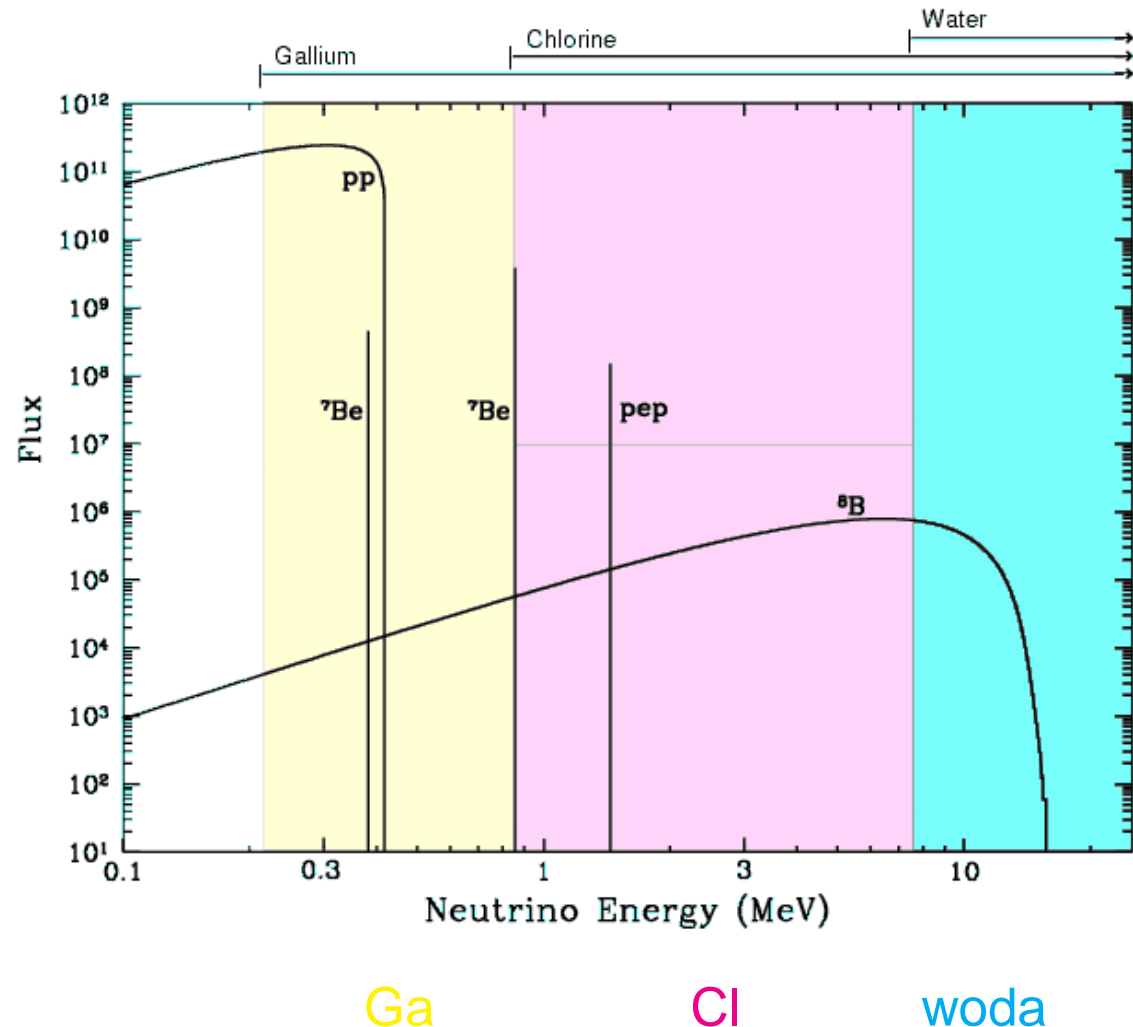


(eksperyment Homestake)



(SAGE, GALLEX, GNO)

**Tylko neutrino elektronowe !**



# Neutrino

## Eksperyment Super-Kamiokande

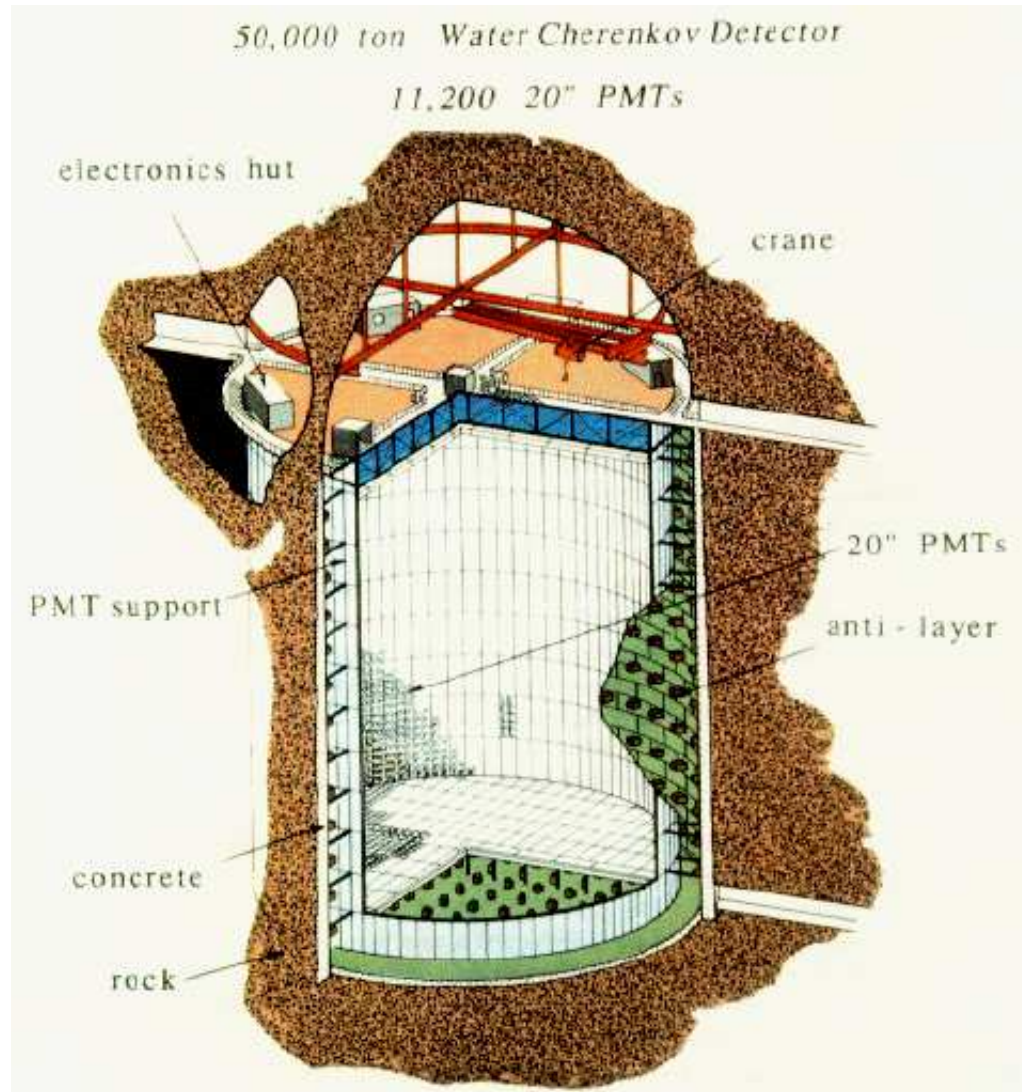
**Japonia**, w starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona **woda**

11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy!) rejestruje przechodzące cząstki

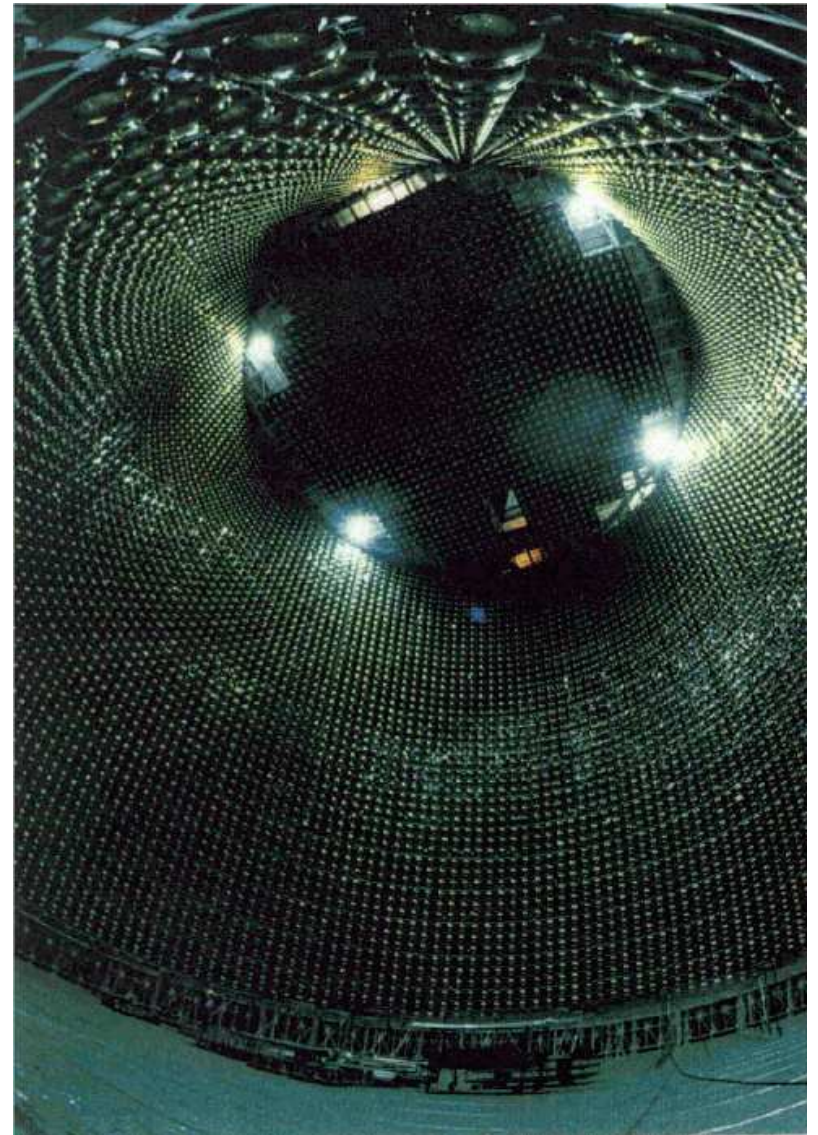
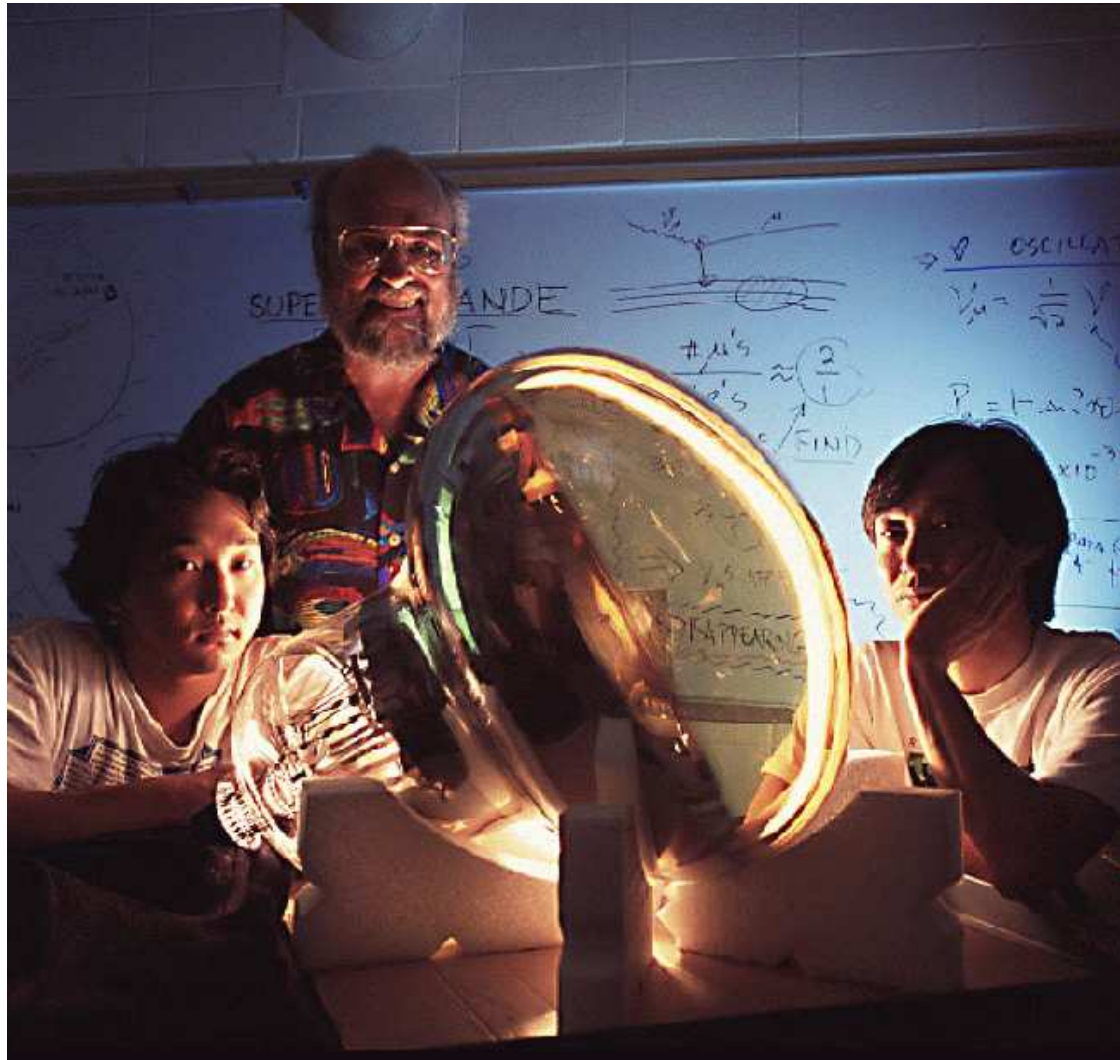
rejestrowane jest

**promieniowanie Czerenkowa**

Jak można mierzyć tak małe sygnały ( $\sim 5MeV$ ) w tak ogromnym detektorze?



# Super-Kamiokande





## Napelnianie



# Super-Kamiokande

## Tło

Mimo ogromnej masy detektora oczekiwano jedynie około **30 przypadków** oddziaływań neutrin słonecznych **na dobę**.

Przypadki skrajnie niskich energii (rzędu 10 MeV) - konieczność **redukcji tła**.

Główne tło: **naturalna promieniotwórczość**.

Stężenie radonu w powietrzu w kopalni  $\sim 3000 Bq/m^3$

- ⇒ hermetyczne drzwi, intensywna wentylacja powietrzem zewnętrznym
- ⇒ cała komora wyłożona specjalną plastikową osłoną zabezpieczającą przed przenikaniem radonu ze skał
- ⇒ hermetyczny zbiornik, dopełniony specjalnie oczyszczonym powietrzem ( $3mBq/m^3$ ) pod ciśnieniem wyższym od atmosferycznego
- ⇒ intensywne filtrowanie wody (ok. 35 t/h, czyli cały detektor w ok. 2 miesiące)

# Super-Kamiokande

## Wyzwalanie

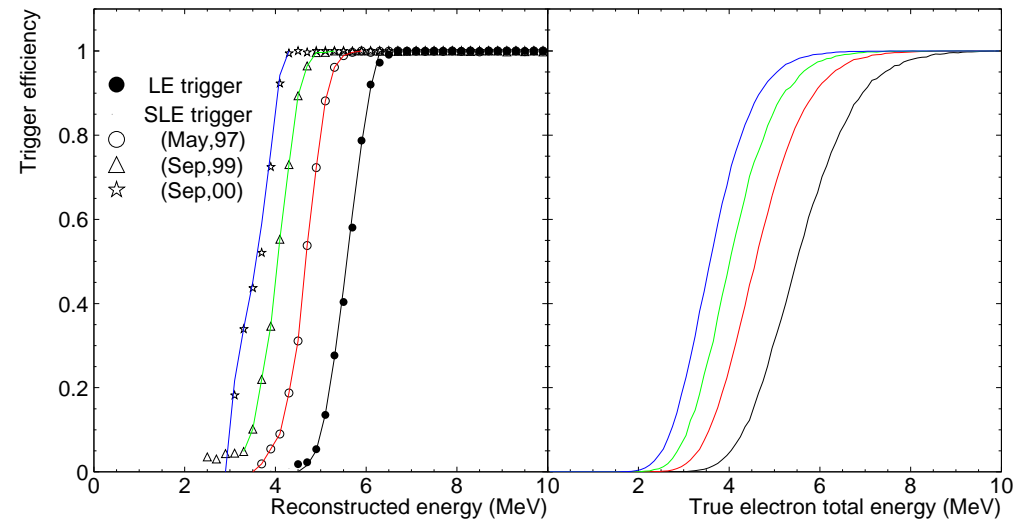
Średni poziom sygnału z pojedynczego fotopowielacza: 3.5 kHz.

Układ wyzwalania wymagał przyjęcia sygnału z wielu PMT w oknie czasowym 200 ns.

Średnia oczekiwana liczba zliczeń: ok. 8.

Różne progi wyzwalania:

- High Energy (HE) - 33 PMT
- Low Energy (LE) - 29 PMT
- Super Low Energy (SLE) - 24 PMT



Próg wyzwalania mógł być obniżony w miarę oczyszczania detektora.

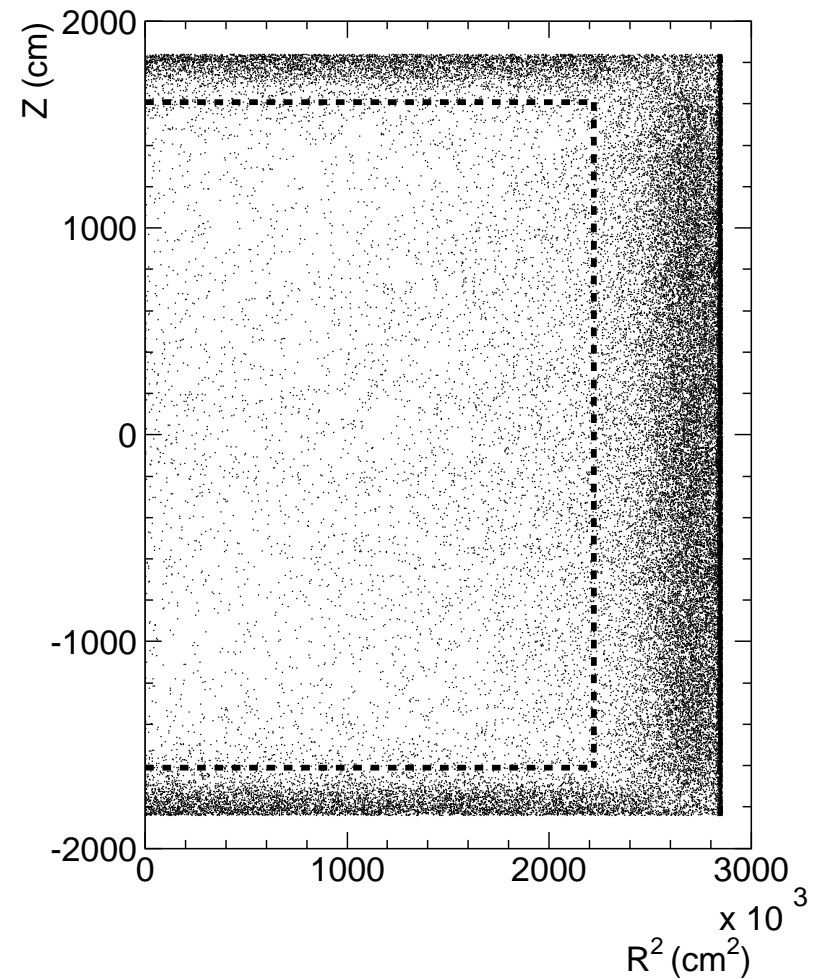
# Super-Kamiokande

## Wyzwalanie

Typowy rozkład rekonstruowanych wierzchołków po wstępnej selekcji przypadków niskiej energii (próg 5 MeV).

Wyraźny wkład **naturalnej promieniotwórczości** ścian komory.

Przerywana linia: “fiducial volume”  
obszar z którego wybieramy przypadki do dalszej analizy.



# Super-Kamiokande

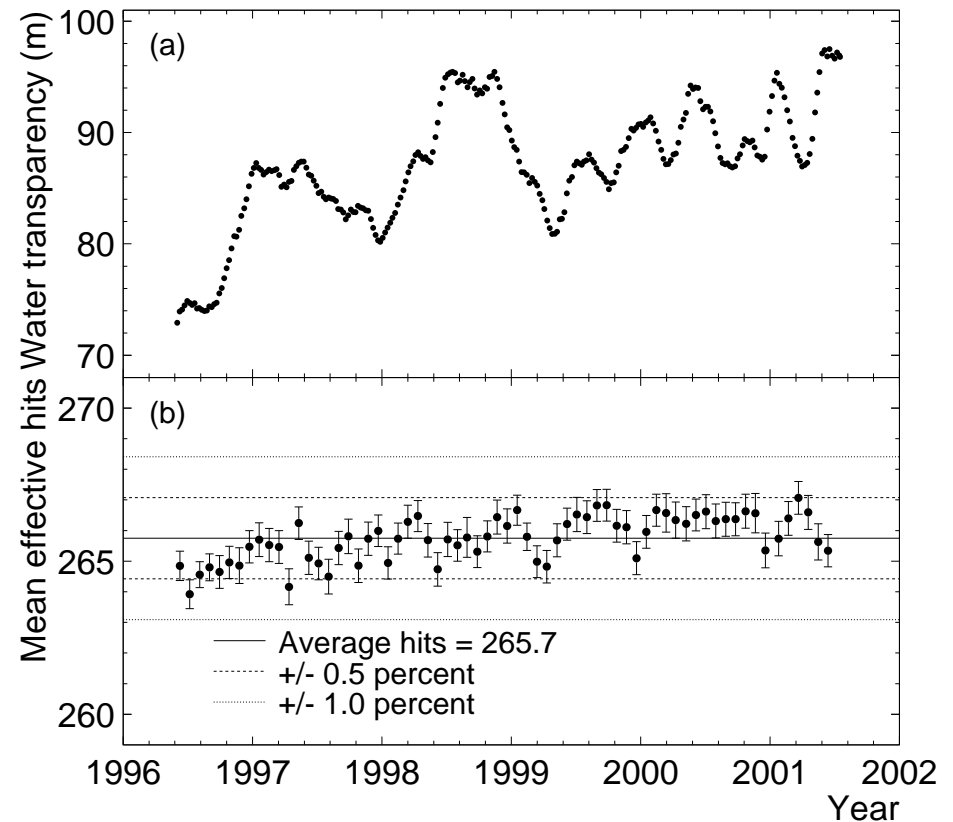
## Kalibracja

Fotony przebiegają w wodzie do 60 m  
- **atenuacja światła** musi być dokładnie znana i monitorowana.

Można ją wyznaczyć z obserwacji sygnału z **rozpadu zatrzymujących się mionów**.

Około 1500 “kalibracyjnych” rozpadów dziennie.

Wystarcza do bardzo dokładnego monitorowania zmian w **skali tygodni**.



# Super-Kamiokande

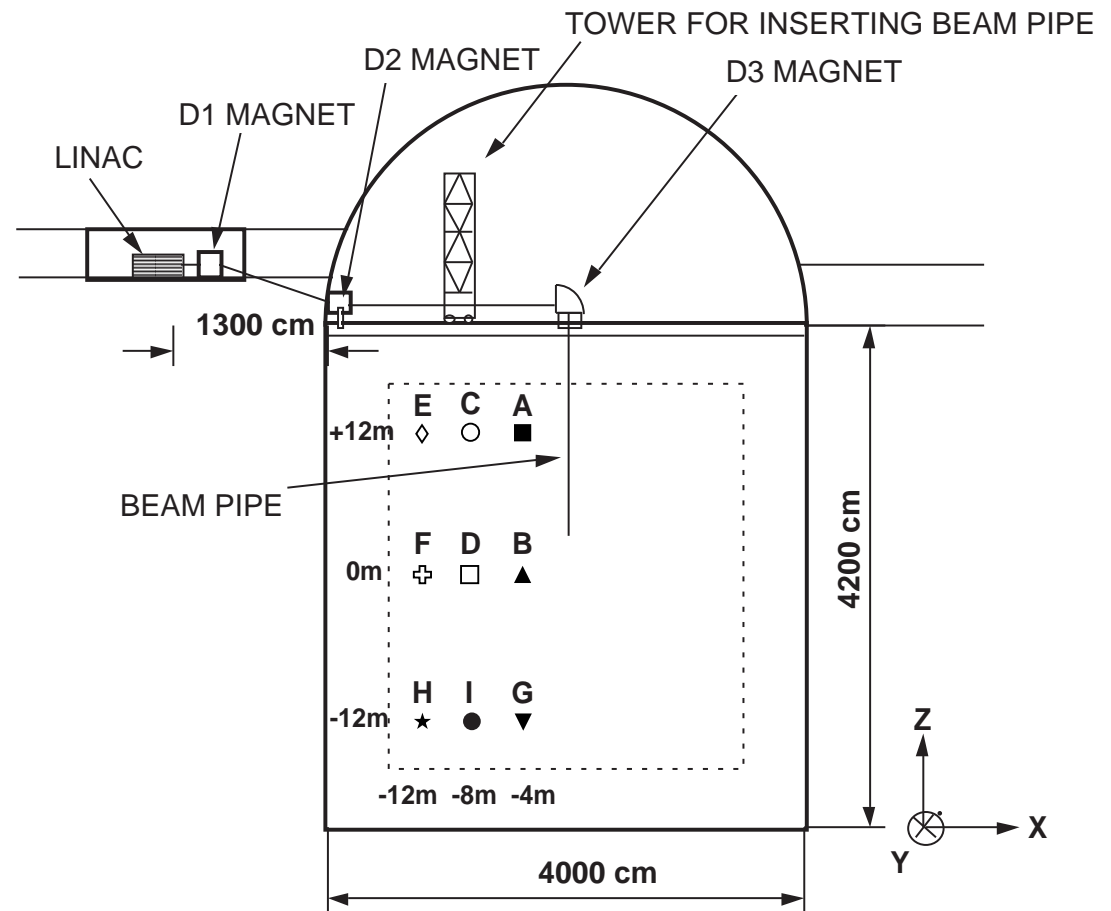
## Kalibracja

Kalibracja energetyczna: kluczowa przy niskich energiach.

Główna metoda:

własny akcelerator (!) 5-16 MeV  
(zakres energii mierzonych neutrin)

Wiązka wprowadzana pionowo w kilku wybranych punktach.



# Super-Kamiokande

## Kalibracja

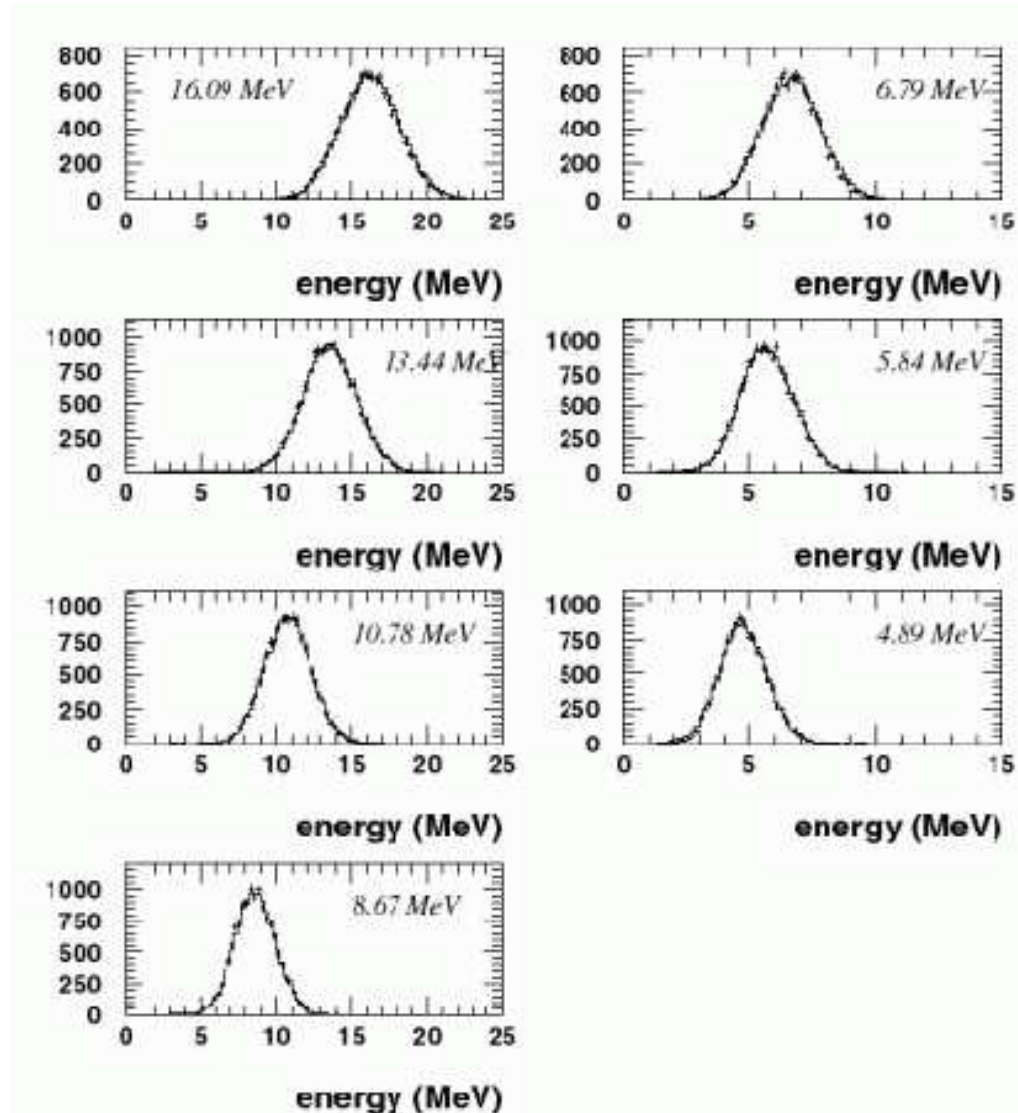
Wyniki kalibracji przy pomocy akceleratora

Rozdzielczość energetyczna

- 18.4% przy 5 MeV
- 14.2% przy 10 MeV
- 11.3% przy 20 MeV

Tłumacząc to na parametry kalorymetru

$$\frac{\sigma}{E} \approx \frac{1.2\%}{\sqrt{E[\text{GeV}]}} \oplus 7.6\%$$

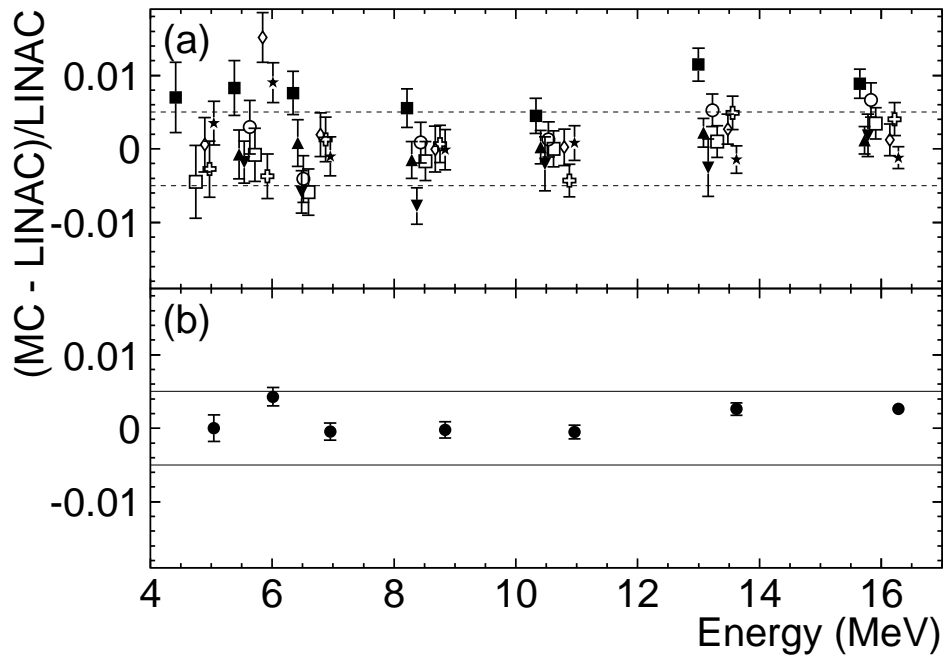


# Super-Kamiokande

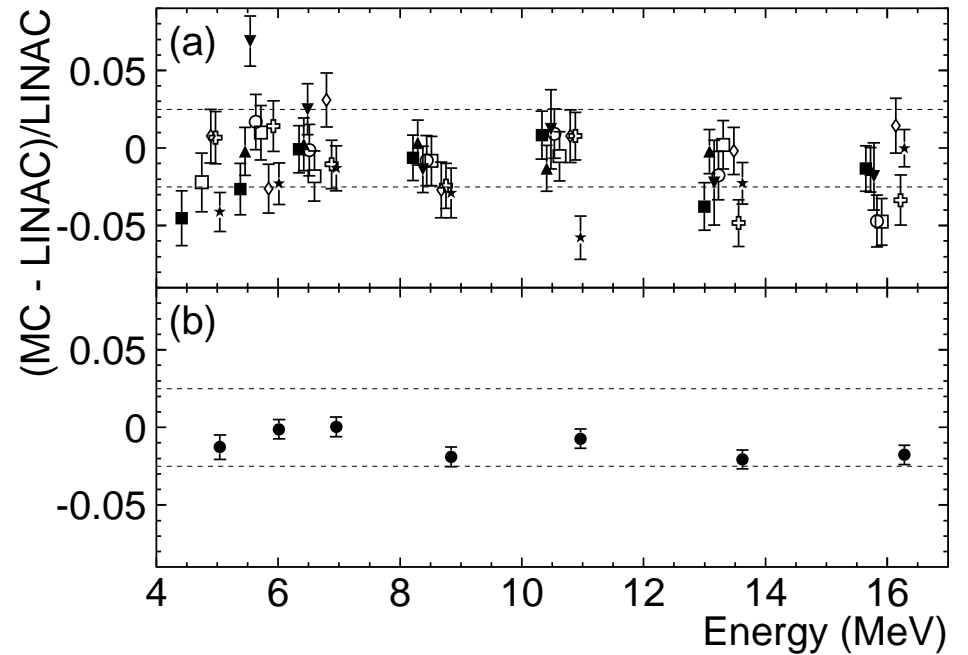
## Kalibracja

Wyniki kalibracji przy pomocy akceleratora

Skala energii



Rozdzielczość



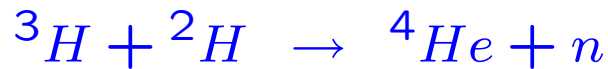


# Super-Kamiokande

## Kalibracja

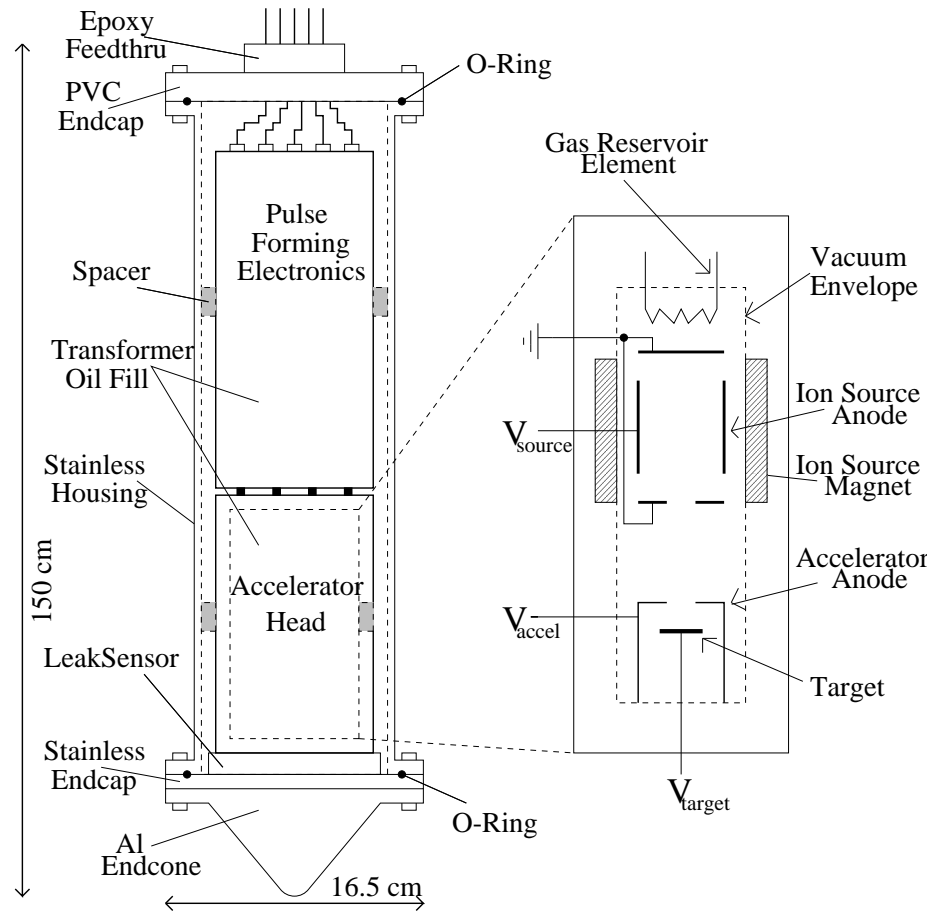
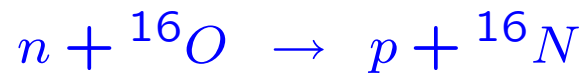
Wada akceleratora: tylko wybrane pozycje i jeden kierunek wiązki (pionowy).

Drugie narzędzie: "generator DT" - źródło neutronów.



Izotropowy strumień neutronów 14.2 MeV.

W oddziaływaniu z tlenem (w wodzie):

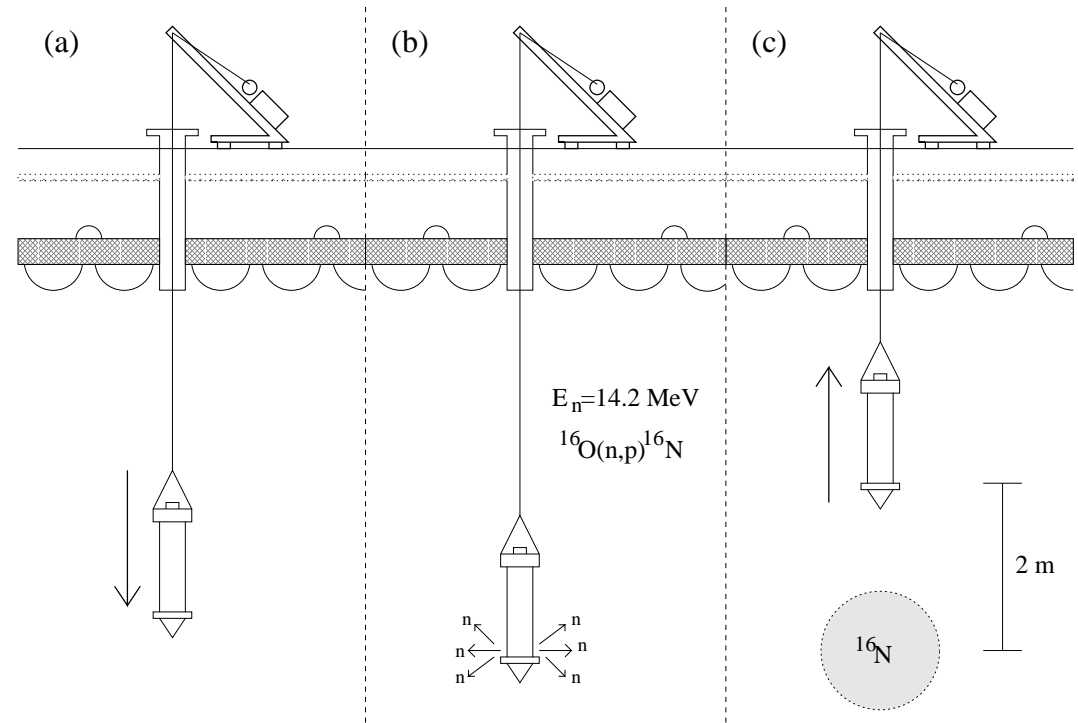
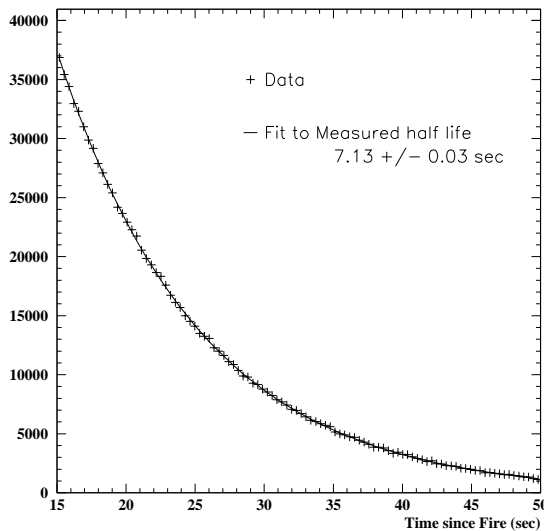


# Super-Kamiokande

## Kalibracja

Rozpady  $^{16}\text{N}$  dokładnie znane:

- 66%:  $6.129\text{MeV } \gamma + 4.29\text{MeV } \beta$
- 28%:  $10.419\text{MeV } \beta$



Rozpady  $^{16}\text{N}$  mierzone po wyciągnięciu “generatora”

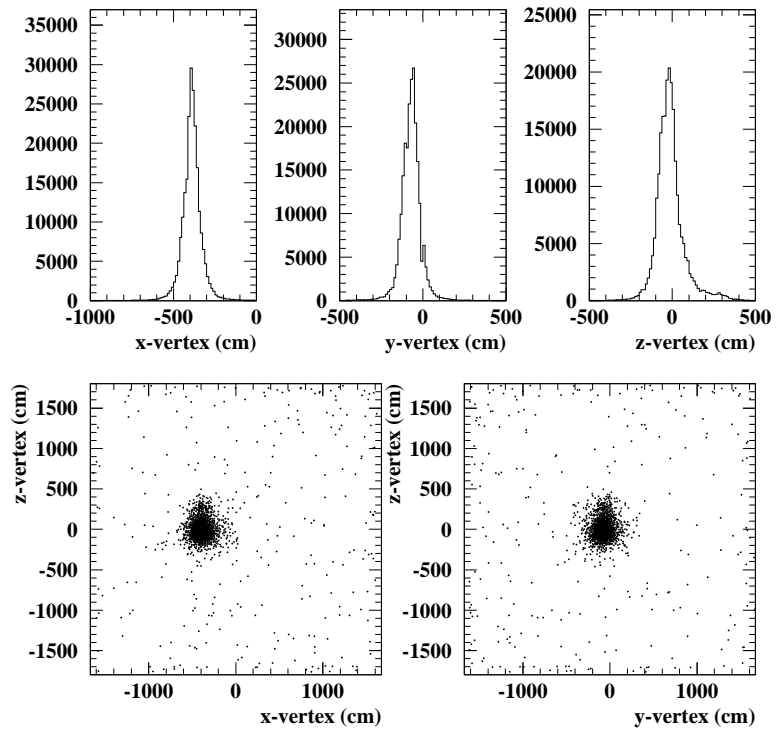
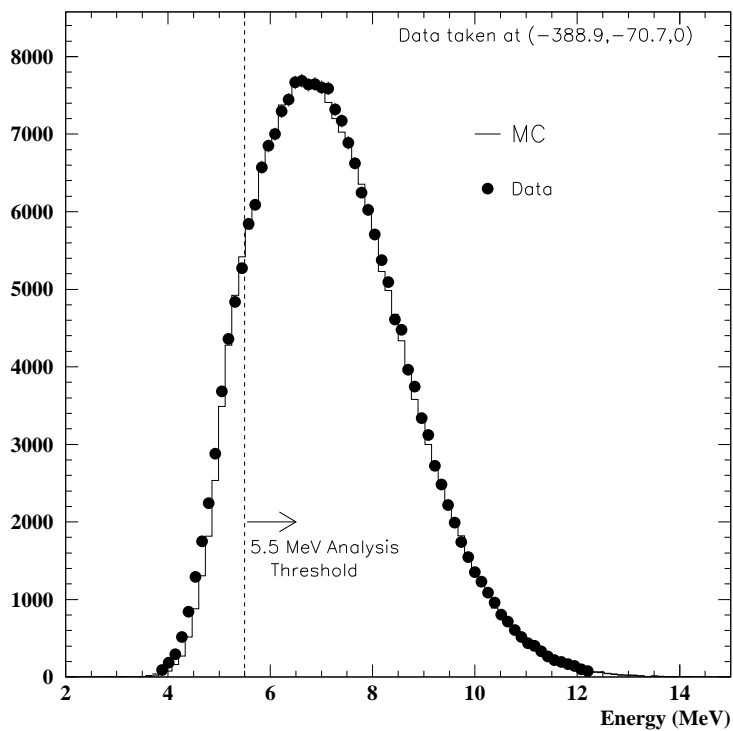
# Super-Kamiokande

## Kalibracja

Mierzone rozkłady dla przypadków kalibracyjnych  $^{16}\text{N}$ :

Energii

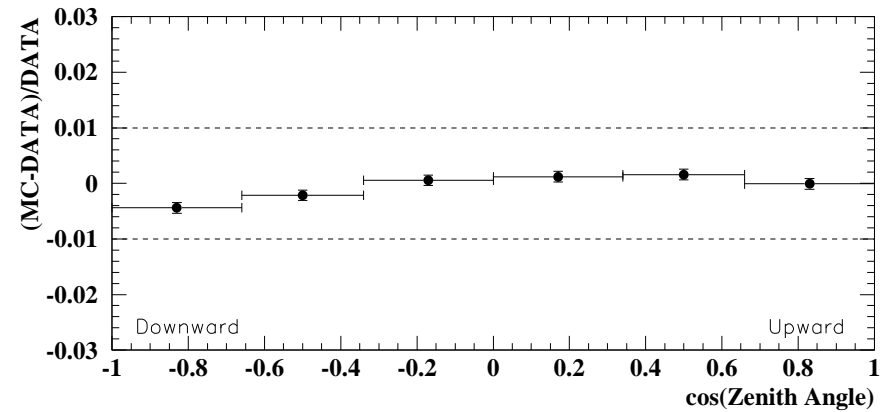
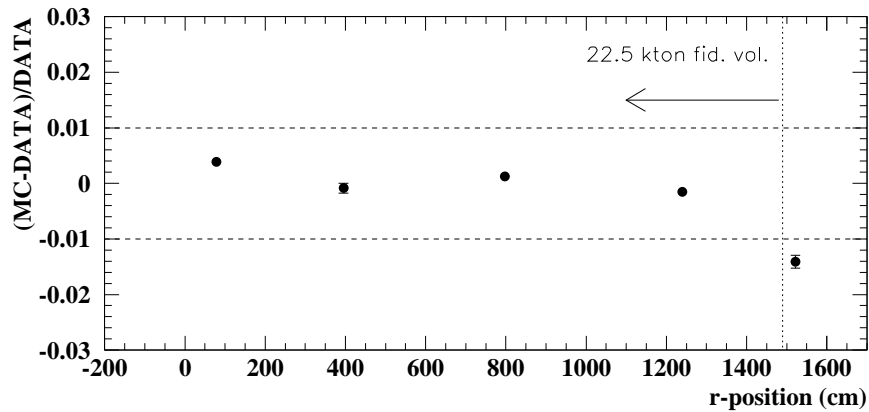
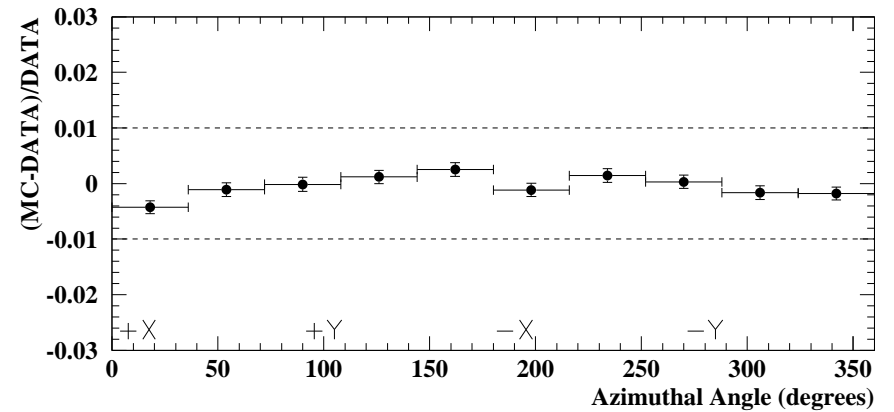
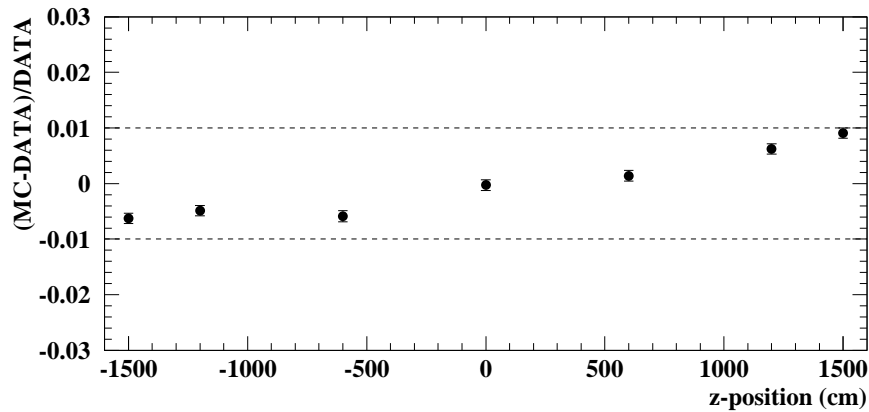
Położenia wierzchołka



# Super-Kamiokande

## Kalibracja

Skala energii nie zależna od pozycji i kąta emisji elektronu

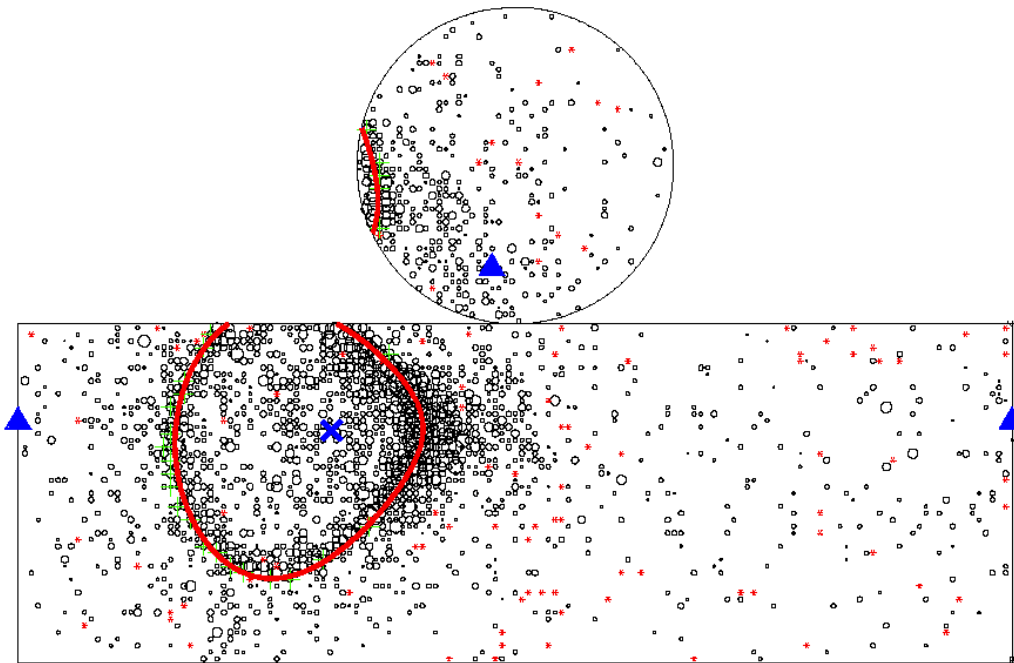


# Super-Kamiokande

## Neutrino elektronowe

Przypadek  $\nu_e n \rightarrow e^- p$

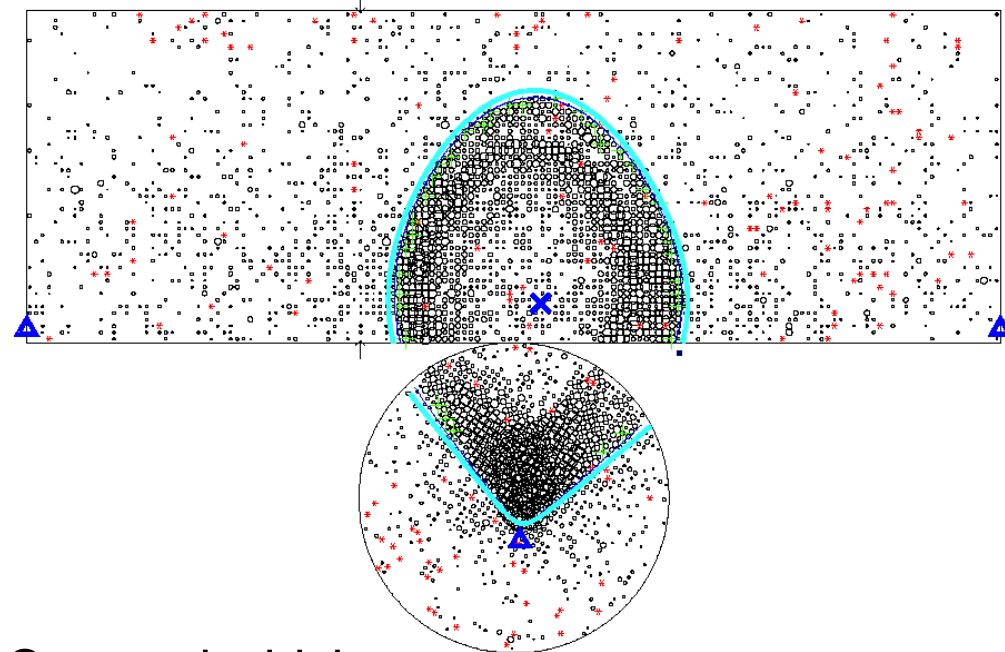
Krótki zasięg elektronu - “cienki” pierścień



## Neutrino mionowe

Przypadek  $\nu_\mu n \rightarrow \mu^- p$

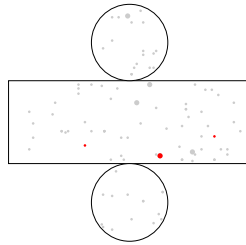
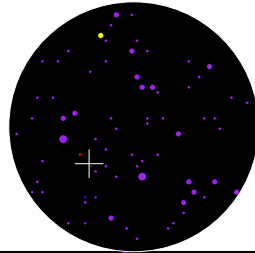
Długa droga w wodzie - “gruby” pierścień.



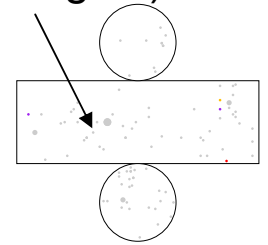
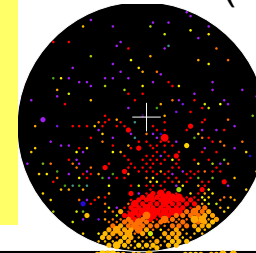
Czasami widzimy  
też opóźniony sygnał  $e^-$  z rozpadu  $\mu^-$ .

# Particle identification

Single Cherenkov ring  
electron-like event

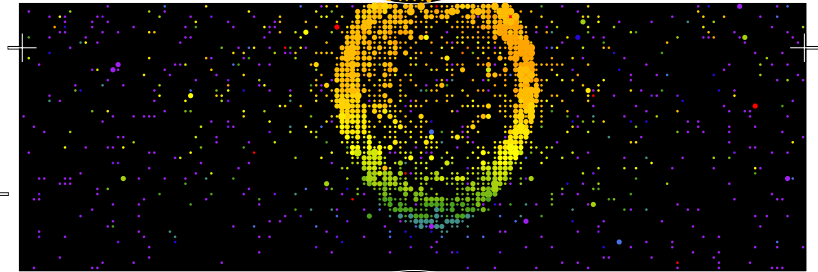
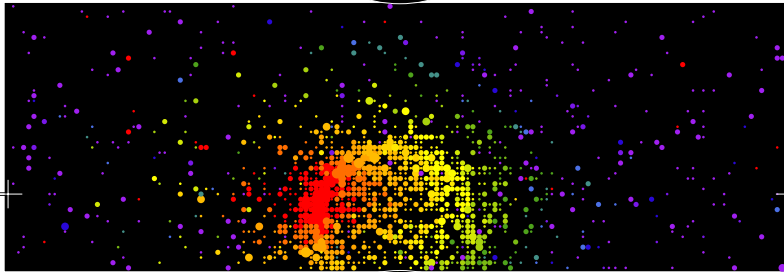


Single Cherenkov ring  
muon-like event



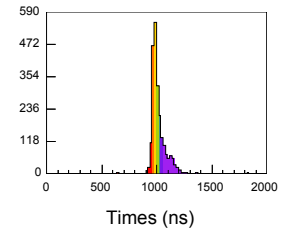
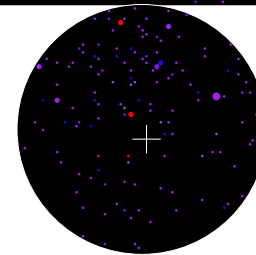
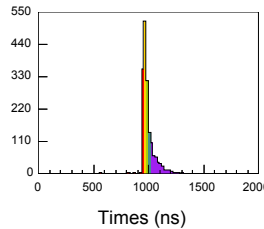
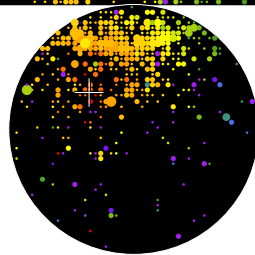
Outer detector  
(no signal)

Time (ns)  
 • < 958  
 • 958- 963  
 • 963- 968  
 • 968- 973  
 • 973- 978  
 • 978- 983  
 • 983- 988  
 • 988- 993  
 • 993- 998  
 • 998-1003  
 • 1003-1008  
 • 1008-1013  
 • 1013-1018  
 • 1018-1023  
 • 1023-1028  
 • >1028



Color: timing

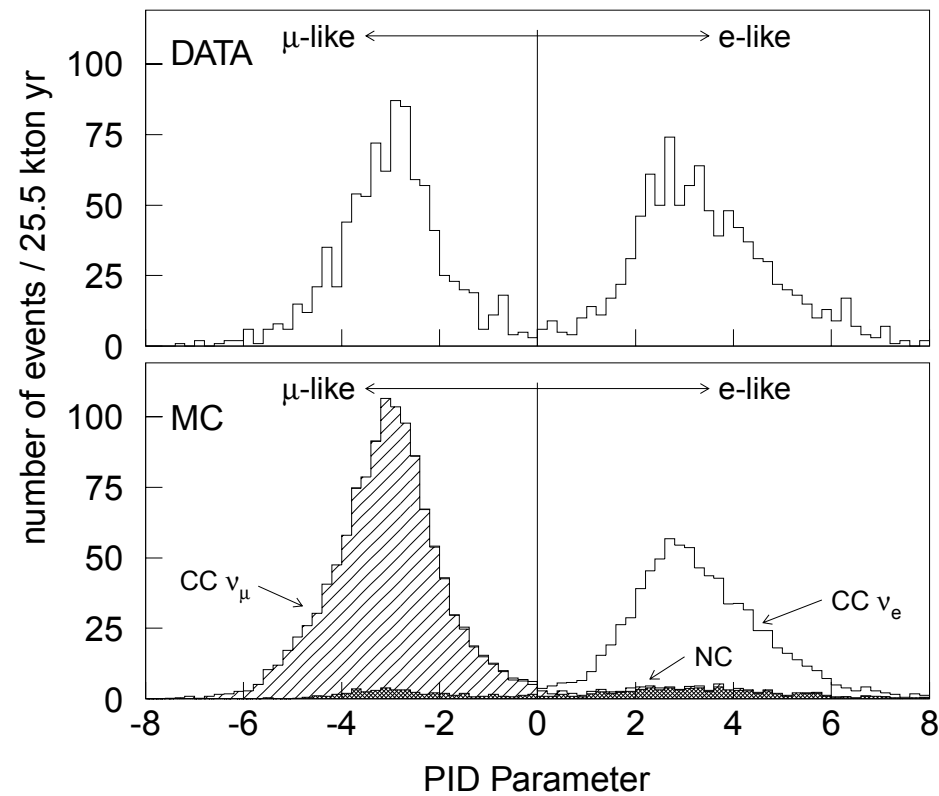
Size: pulse height



Particle ID

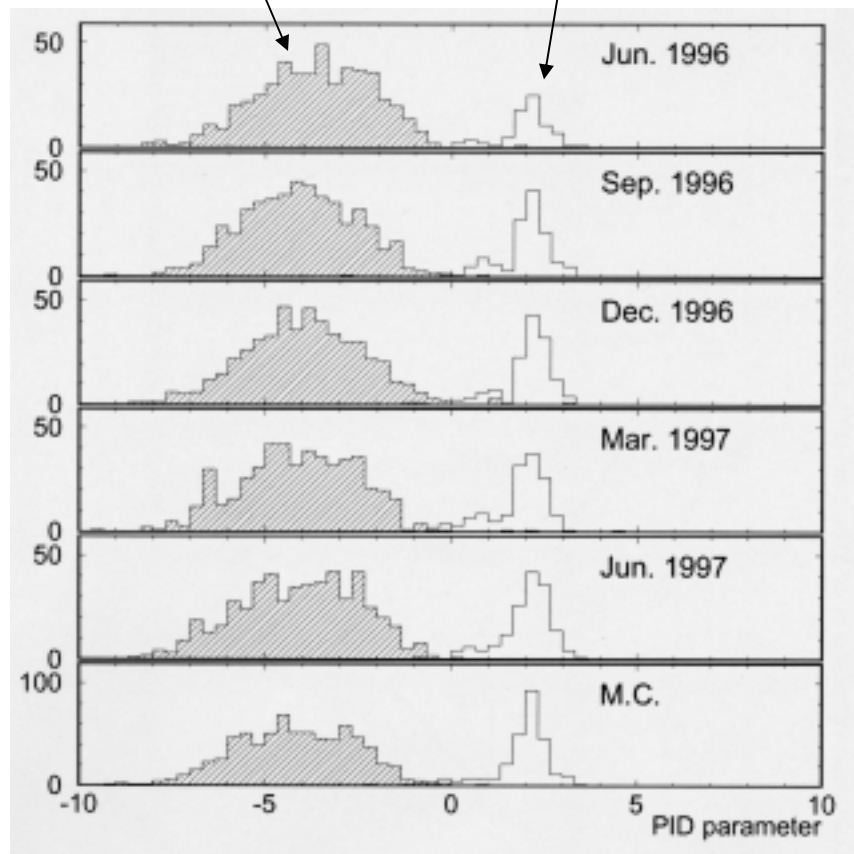
$$\log(L) = \sum_{\theta < 70 \text{ deg}} \left( \frac{p.e.(obs'd) - p.e._{e \text{ or } \mu}(\text{expected})}{\sigma_{p.e.}} \right)^2$$

# Particle ID results



=99%

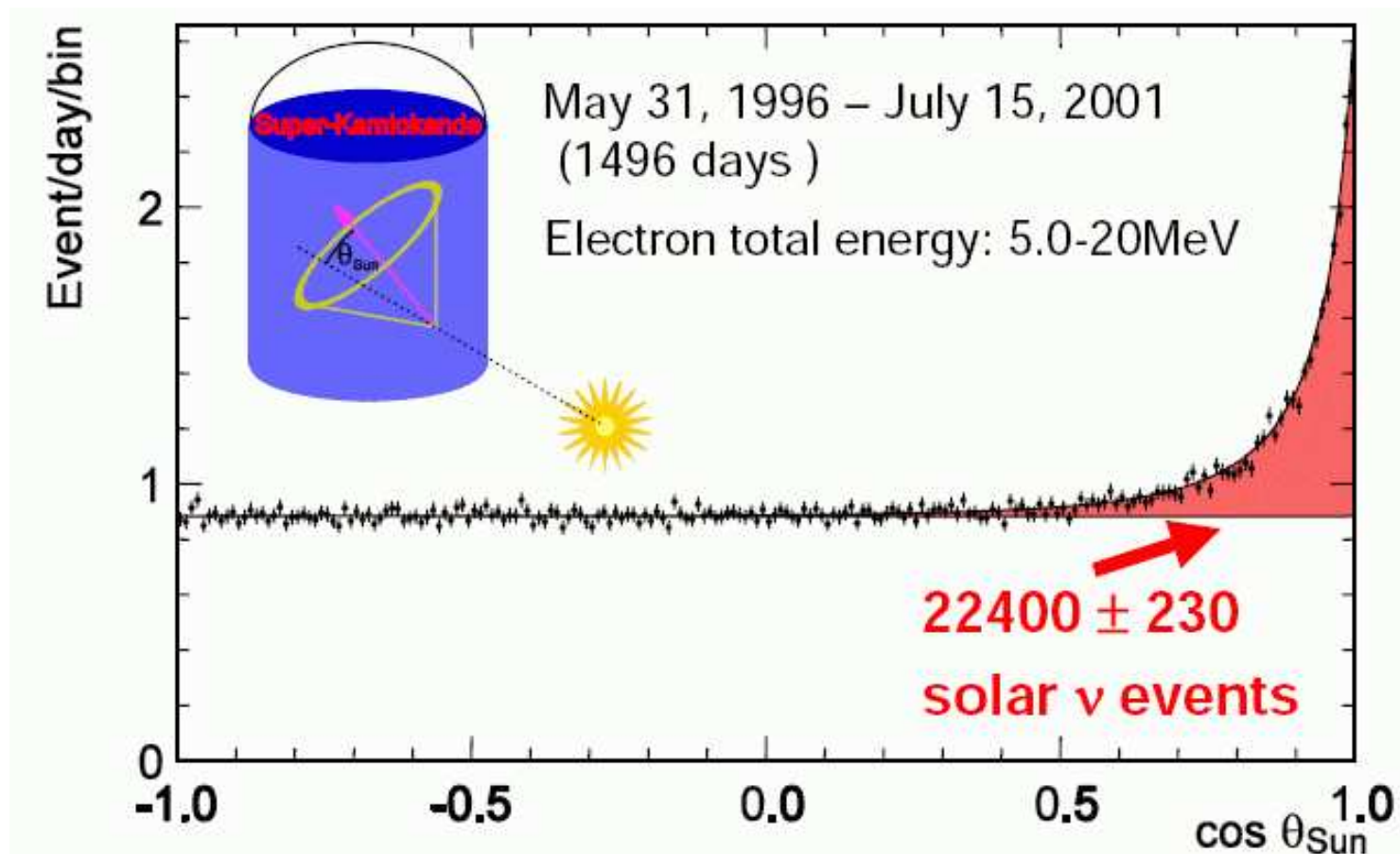
Cosmic ray  $\mu$   $\rightarrow$  e from  $\mu$  decay



# Super-Kamiokande

## Obserwacja neutrin słonecznych

Oddziaływania **neutrin słonecznych** możemy odróżnić od oddziaływań neutrin atmosferycznych mierząc **kąt rozproszenia** elektronu względem **kierunku od słońca**:

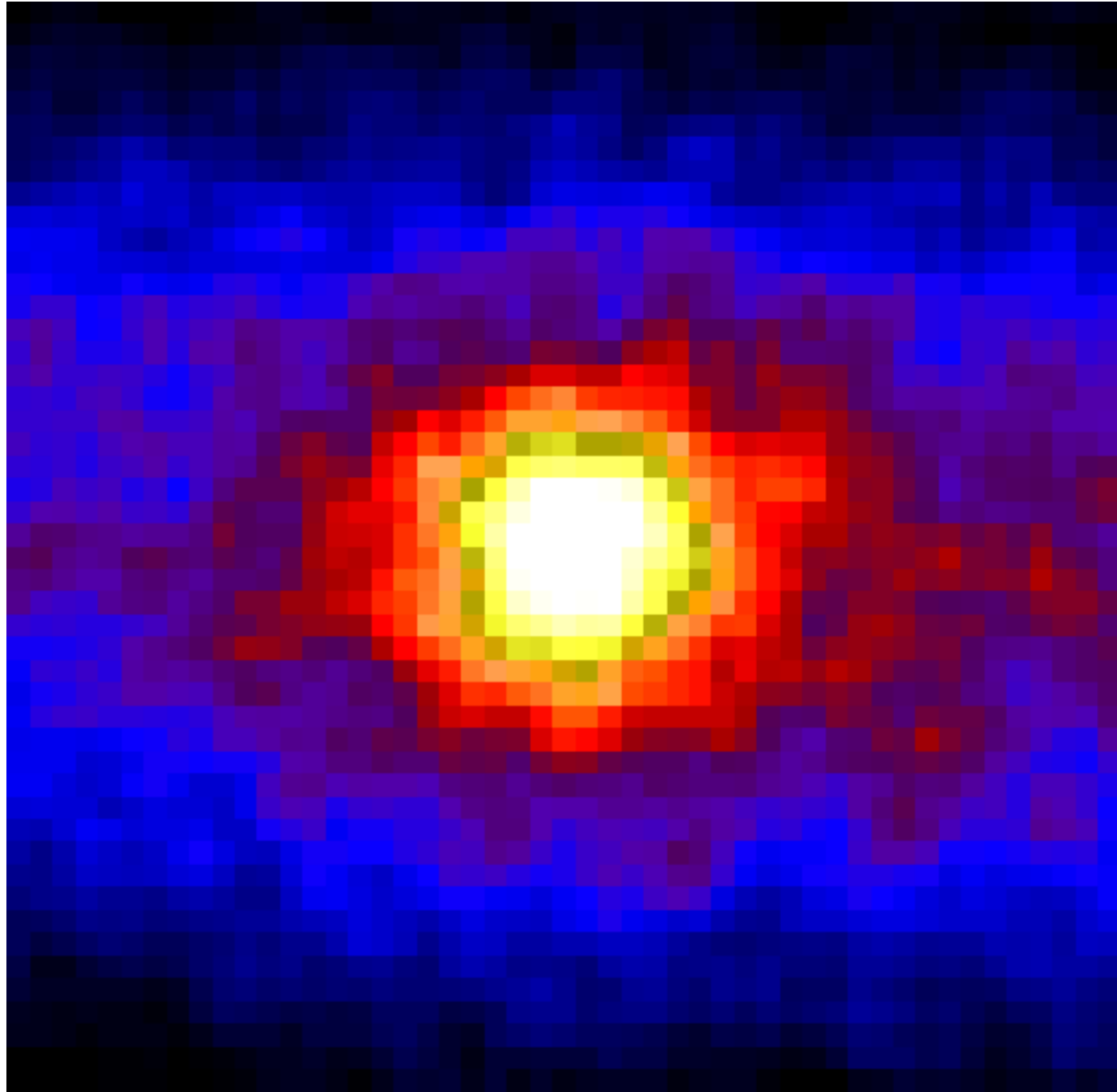




## Super-Kamiokande

“Zdjęcie” Słońca  
w “świele” neutrin

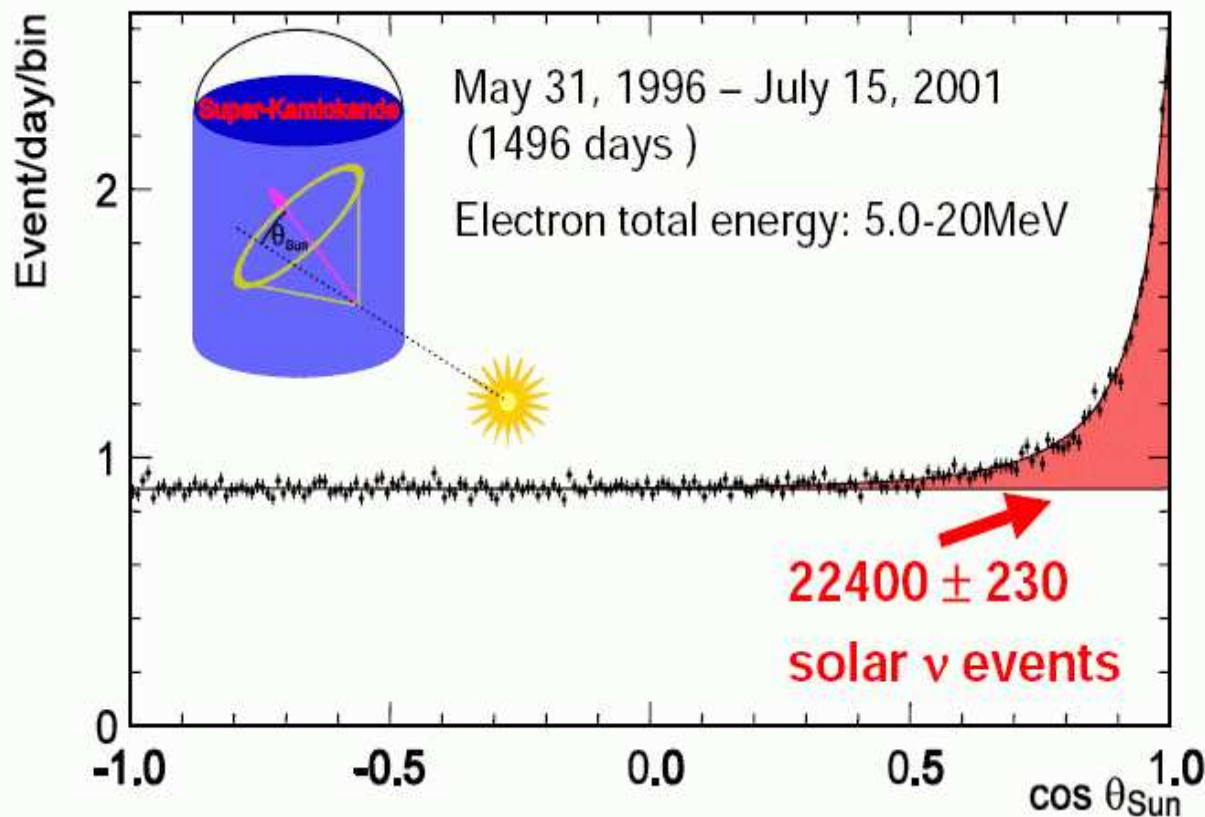
rzeczywisty rozmiar  
Słońca  $\sim \frac{1}{2}$  pixla



# Super-Kamiokande

## Obserwacja neutrin słonecznych

Oddziaływania **neutrin słonecznych** możemy odróżnić od oddziaływań innych neutrin mierząc **kąt emisji** elektronu względem **kierunku od słońca**



Zmierzono:

$$\Phi_S^{(B)} = 2.4 \pm 0.1 \cdot 10^6 \frac{1}{s \cdot \text{cm}^2}$$

Przewidywania:

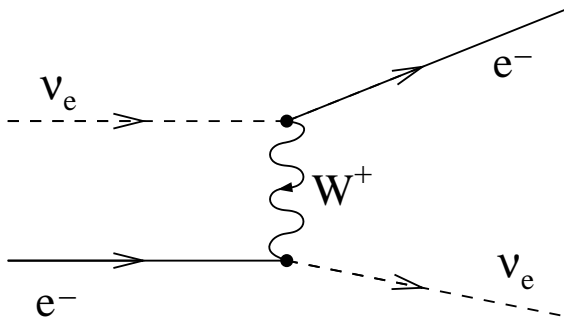
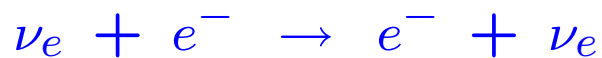
$$\Phi_S^{(B)} = 5.3 \pm 0.6 \cdot 10^6 \frac{1}{s \cdot \text{cm}^2}$$

Deficyt neutrin słonecznych był już mierzony w latach '60 XX w. !

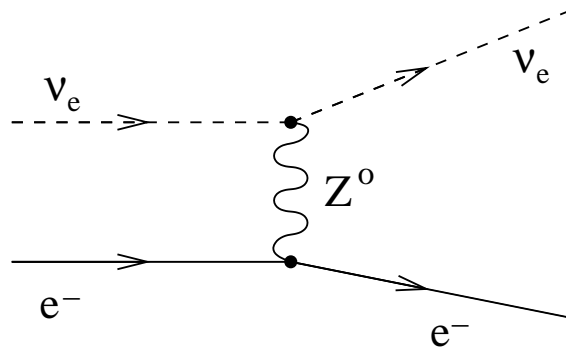
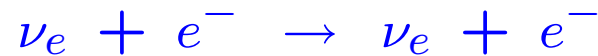
**Ale zrozumieliśmy to dopiero w wieku XXI.**

# Super-Kamiokande

Neutrina słoneczne obserwowane w SK pochodzą głównie z reakcji typu **CC**

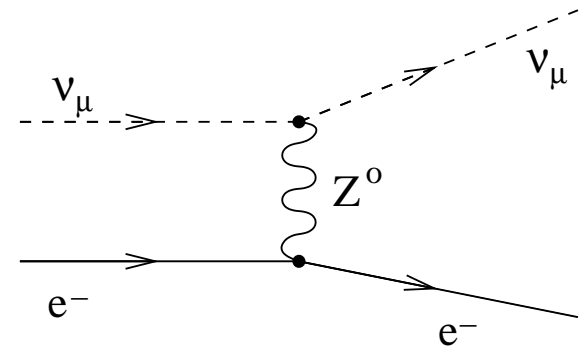
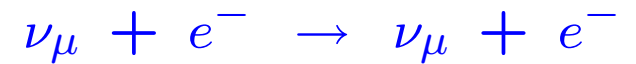


Możliwa jest też detekcja  $\nu_e$  poprzez proces typu **NC**:



przekrój czynny  $\sim 5$  razy mniejszy...

Ale proces typu **NC** możliwy jest też dla innych neutrin, np:



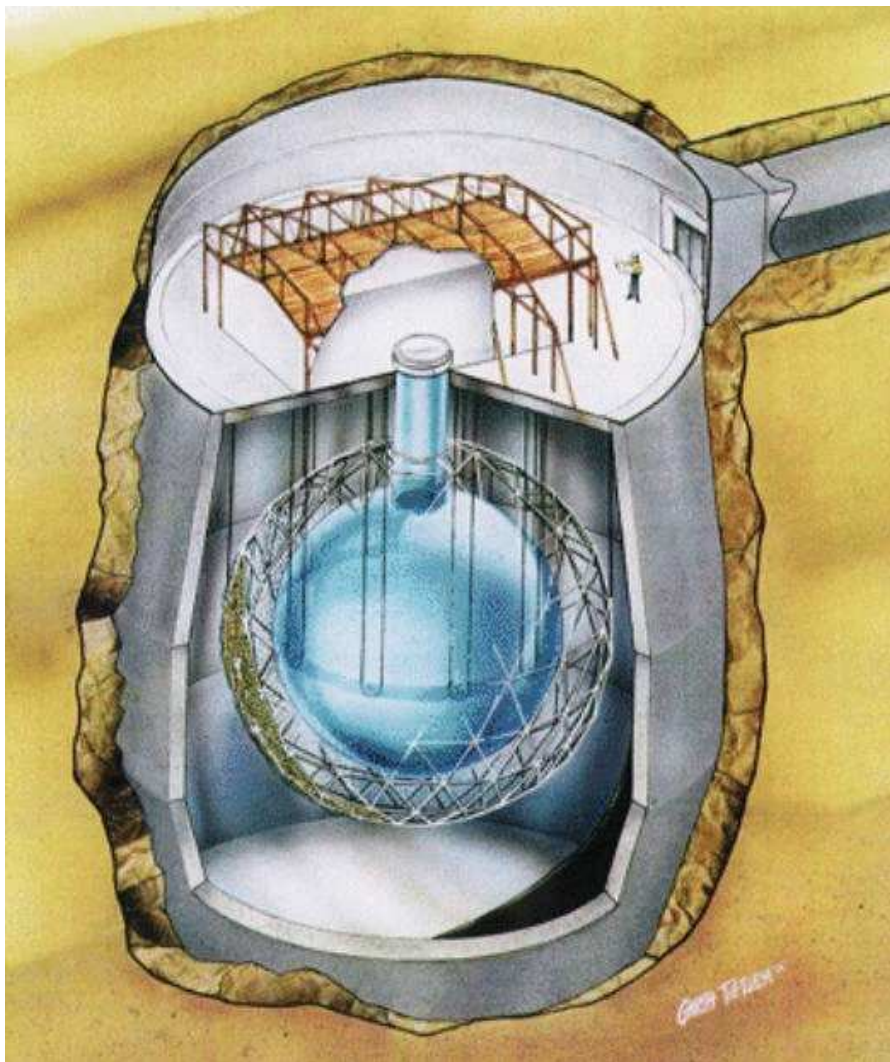
(także dla  $\nu_\tau$ )

Pomiar Super-Kamiokande:

$$\Phi^{SK} \approx \Phi_{\nu_e} + 0.154 \cdot (\Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau})$$

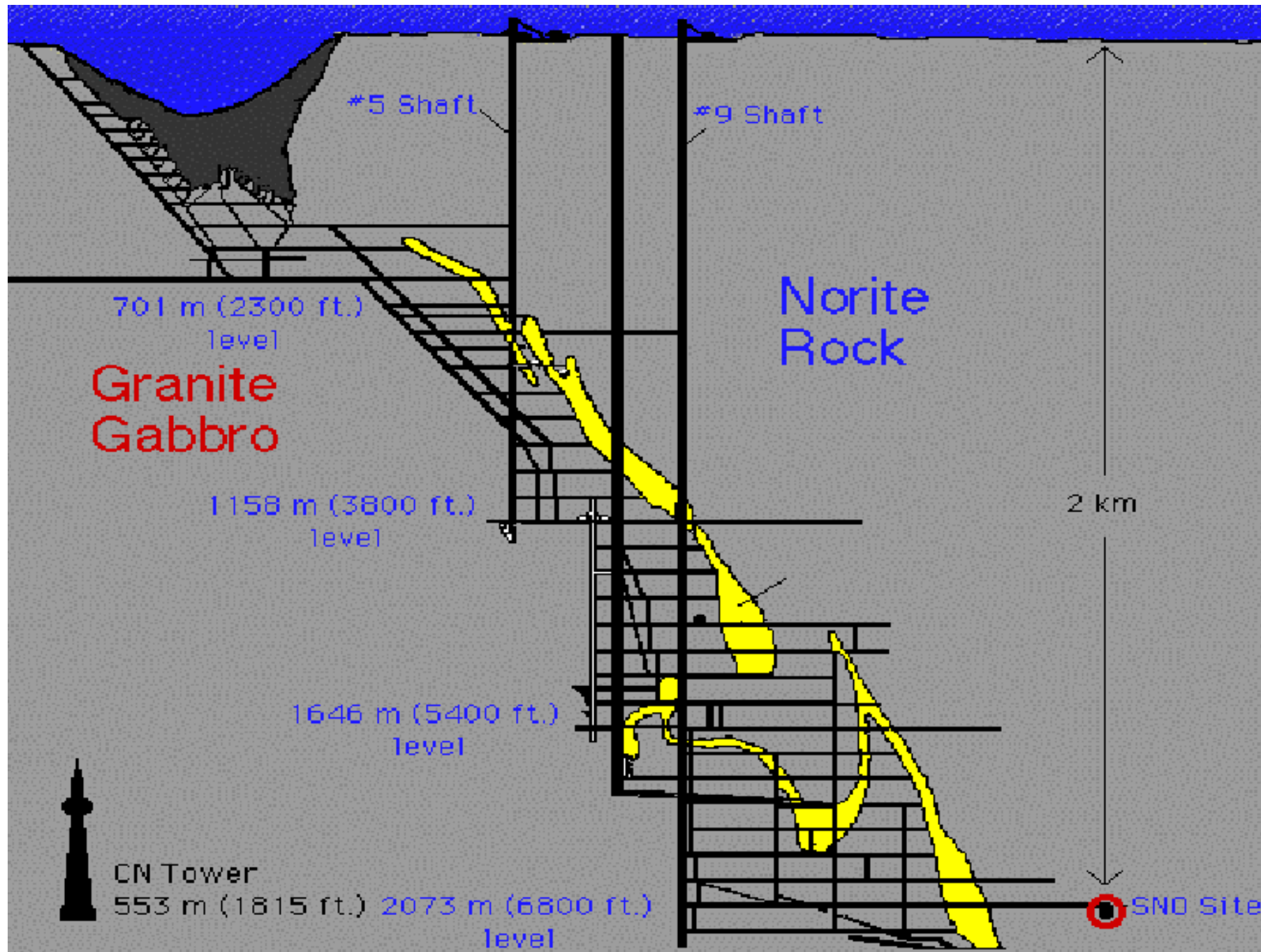
# SNO

## Eksperyment SNO (Sudbury Neutrino Observatory)



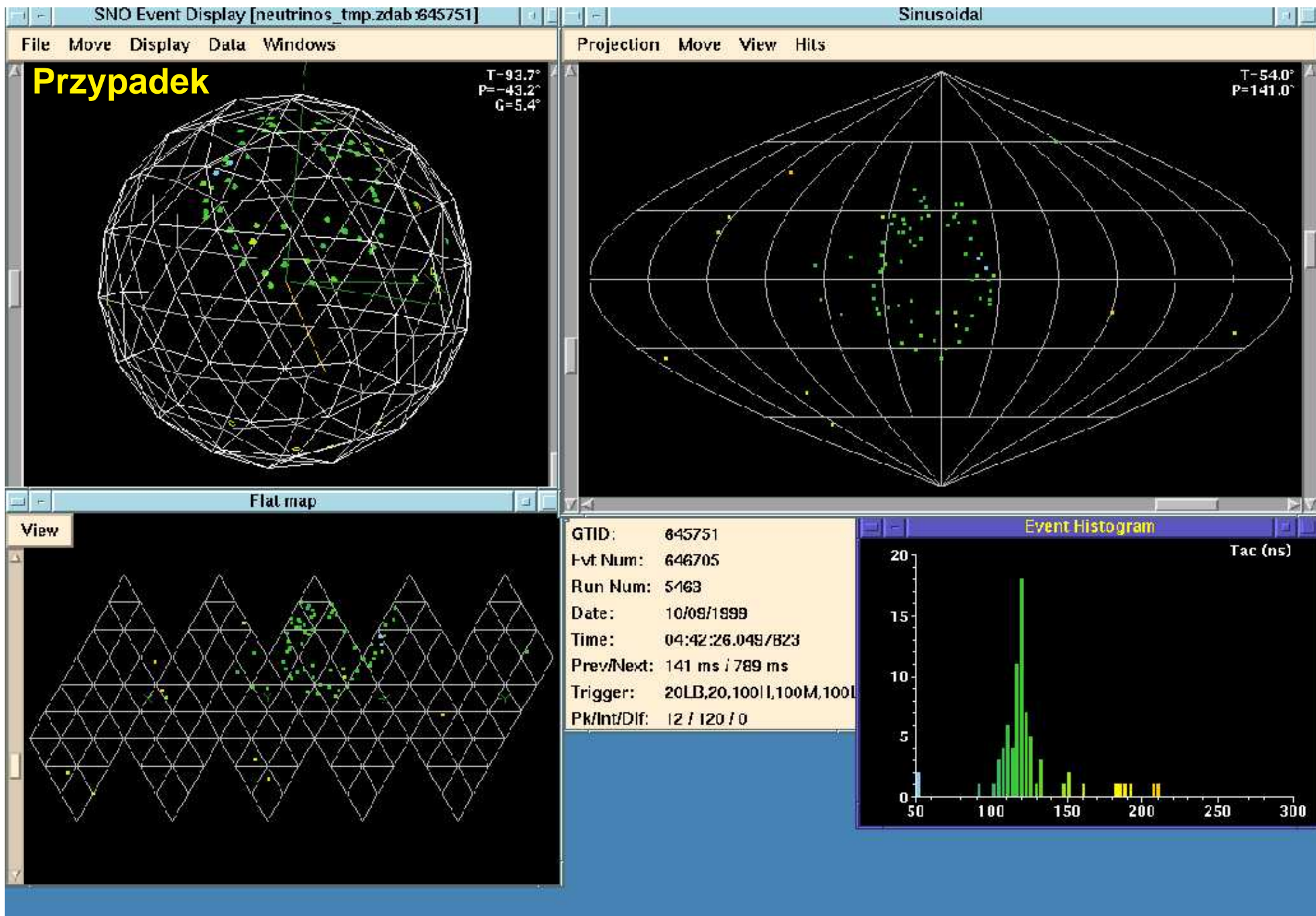
- ogromny zbiornik wypełniony 7000 t wody ( $H_2O$ )
- w środku kula wypełniona 1000 t ciężkiej wody ( $D_2O$ )
- promieniowanie Czerenkowa mierzone przez ok. 9500 fotopowielaczy.
- całość umieszczona na głębokości ponad 2000 m

# SNO



## Fotopowielacze





# SNO

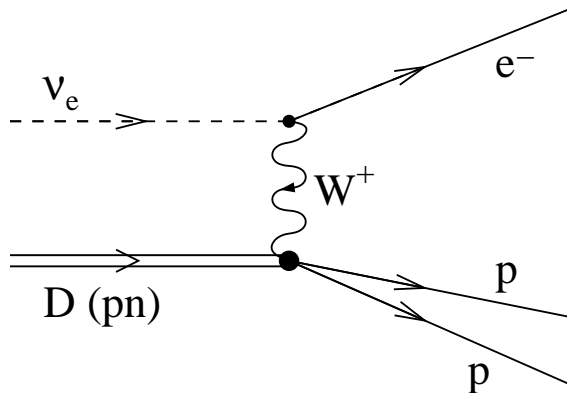
## Detekcja neutrin

Jak w SK możemy zmierzyć sygnał pochodzący z rozpraszania neutrin na elektronach:



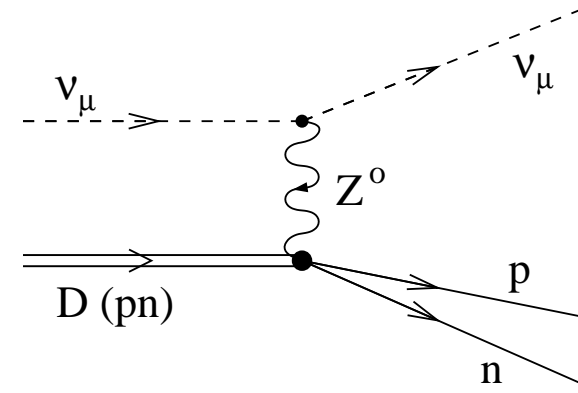
$$\sim \Phi_{\nu_e} + 0.154 \cdot (\Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau}) \Rightarrow \text{informacja o wszystkich typach neutrin}$$

Zastosowanie ciężkiej wody umożliwia dodatkowo pomiar rozpraszania na deuterze:



$$\sim \Phi_{\nu_e}$$

$\Rightarrow$  informacja o **neutrinach elektronowych**



$$\sim \Phi_{\nu_e} + \Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau}$$

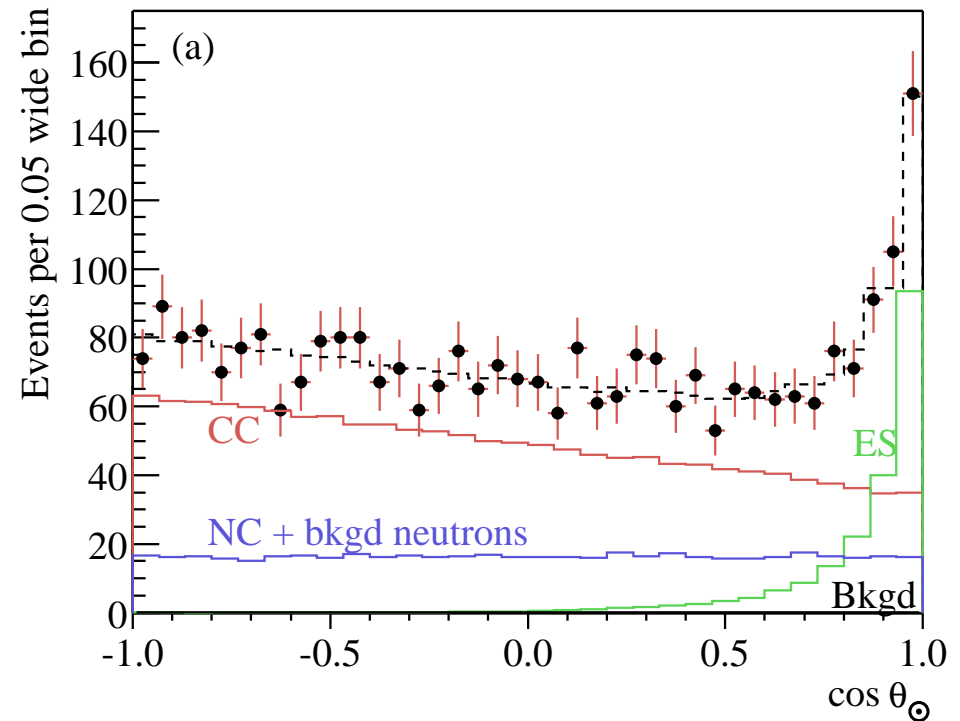
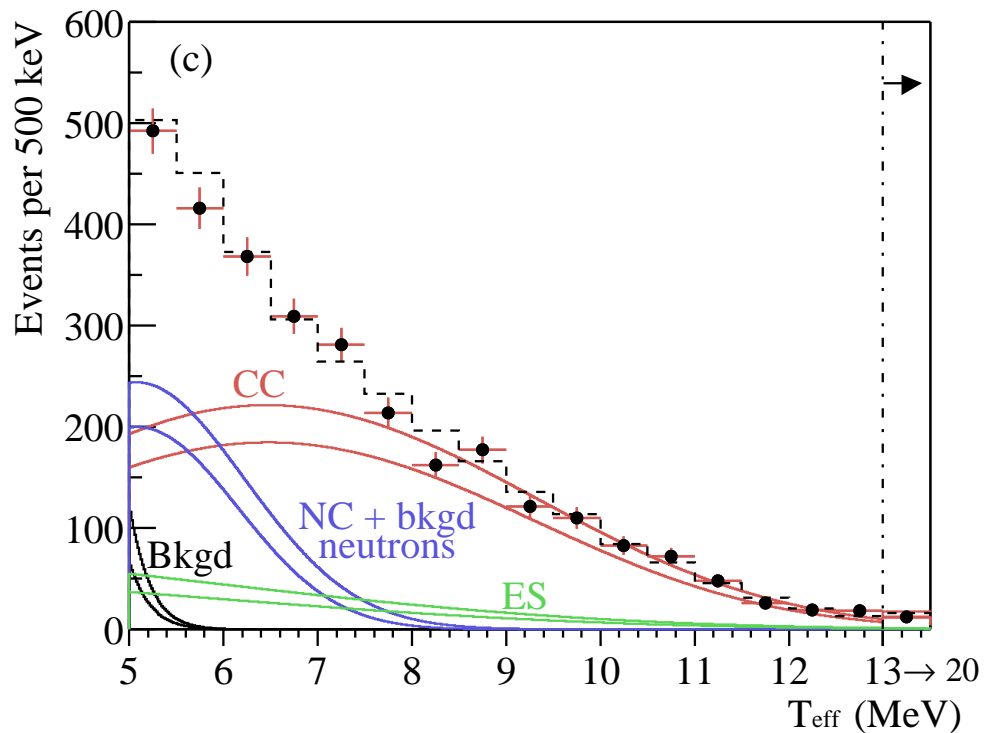
$\Rightarrow$  informacja o **wszystkich neutrinach**



# SNO

## Wyniki

Wkłady od poszczególnych procesów można rozdzielić na podstawie mierzonych rozkładów energii i kąta rozproszenia:



# SNO

## Wyniki (“Phase I” - $D_2O$ )

Z dopasowania uzyskujemy  
(w jednostkach  $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ):

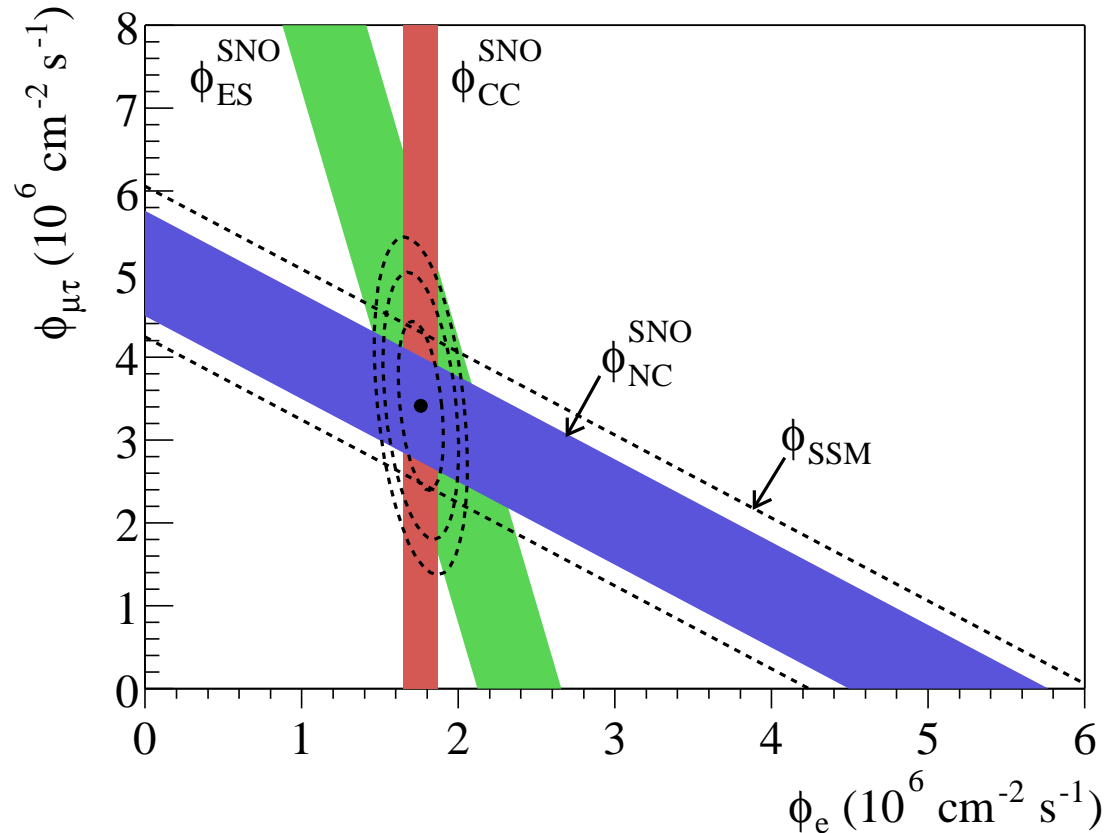
$$\Phi_{CC} = 1.76 \pm 0.05 \pm 0.09 = \Phi_{\nu_e}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{ES} &= 2.39 \pm 0.24 \pm 0.12 \\ &= \Phi_{\nu_e} + \varepsilon(\Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau}) \\ &\quad (SK : 2.32 \pm 0.09) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{NC} &= 5.09 \pm 0.44 \pm 0.46 \\ &= \Phi_{\nu_e} + \Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau} \end{aligned}$$

Przewidywania SSM

$$\Phi^{SSM}(\nu_e) = 5.15 \pm 0.95$$



Dobra zgodność dla całkowitego strumienia neutrin.

W miejsce “brakujących”  $\nu_e$  obserwujemy  $\nu_\mu$  i  $\nu_\tau$

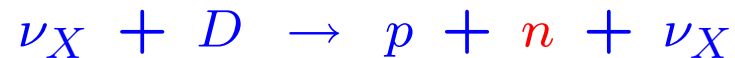
$$\Phi(\nu_\mu + \nu_\tau) = 3.41 \pm 0.45 \pm 0.48 \approx 2 \times \Phi_{\nu_e} \quad (\text{po równo})$$

# SNO

## Pomiar procesów NC

Największy błąd statystyczny ma pomiar strumienia w procesie NC.

Identyfikacja tych przypadków wymaga pomiaru niskoenergetycznych neutronów:

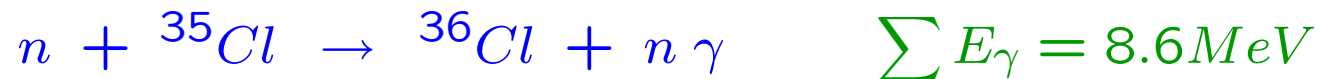


Eksperyment SNO próbował to zrobić na 3 sposoby:

- Phase I (1999-2001): pomiar oddziaływań neutronów z  $D_2O$



- Phase II (2001-2002): pomiar oddziaływań neutronów z jądrami chloru



- Phase III (2004-2006): pomiar przy użyciu dedykowanych liczników

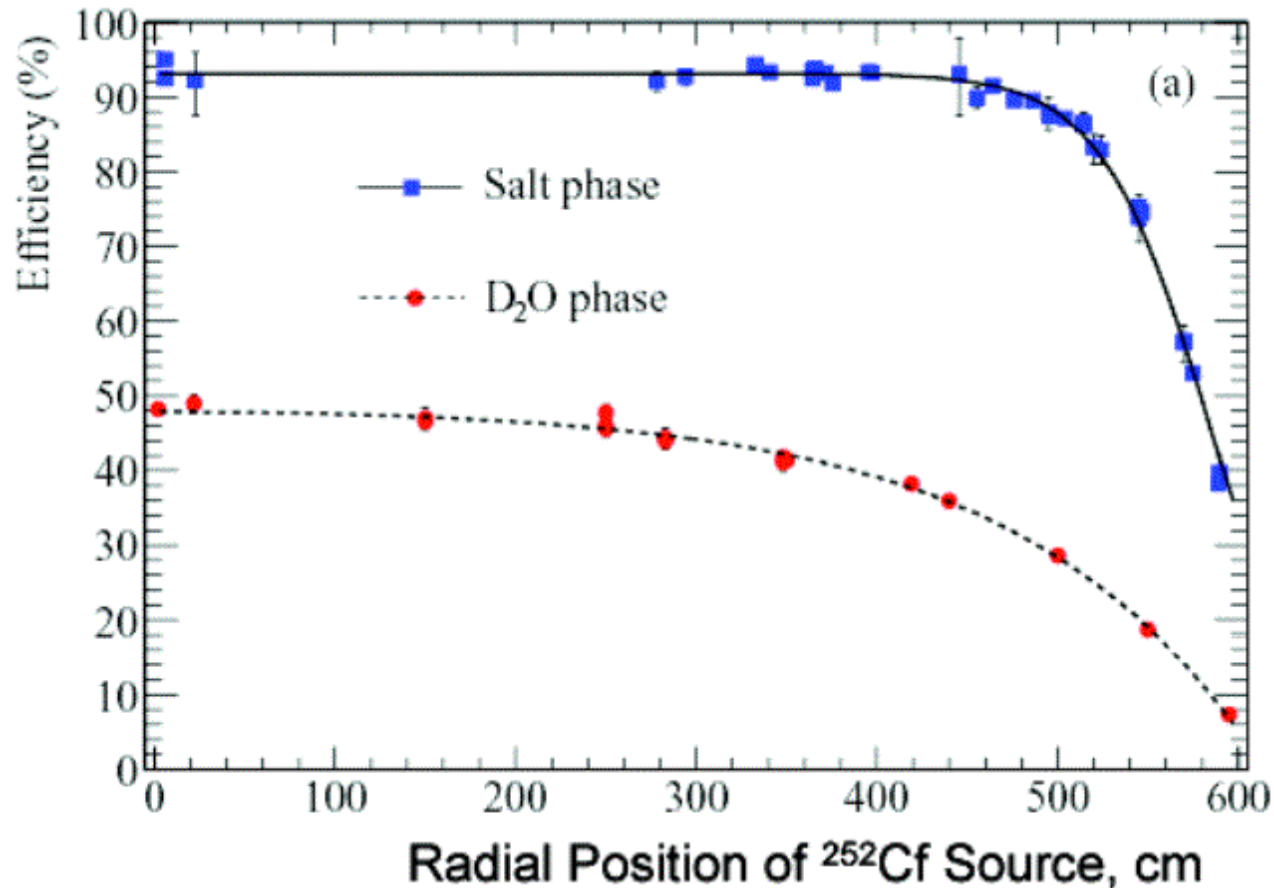
# SNO

## Phase II

Oddziaływanie z jądrami chloru stało się możliwe gdy w roku 2001 w dektorze SNO do wody... **dosypano soli**.

Jądra chloru mają dużo większy przekrój czynny na wychwytywanie neutronu - ponad dwukrotnie podniosła się efektywność rejestracji przypadków typu NC.

⇒ mniejszy **błąd statystyczny** w pomiarze całkowitego strumienia neutronów



# SNO

## Wyniki (Phase I + Phase II)

Z łącznego dopasowania  
(w jednostkach  $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ):

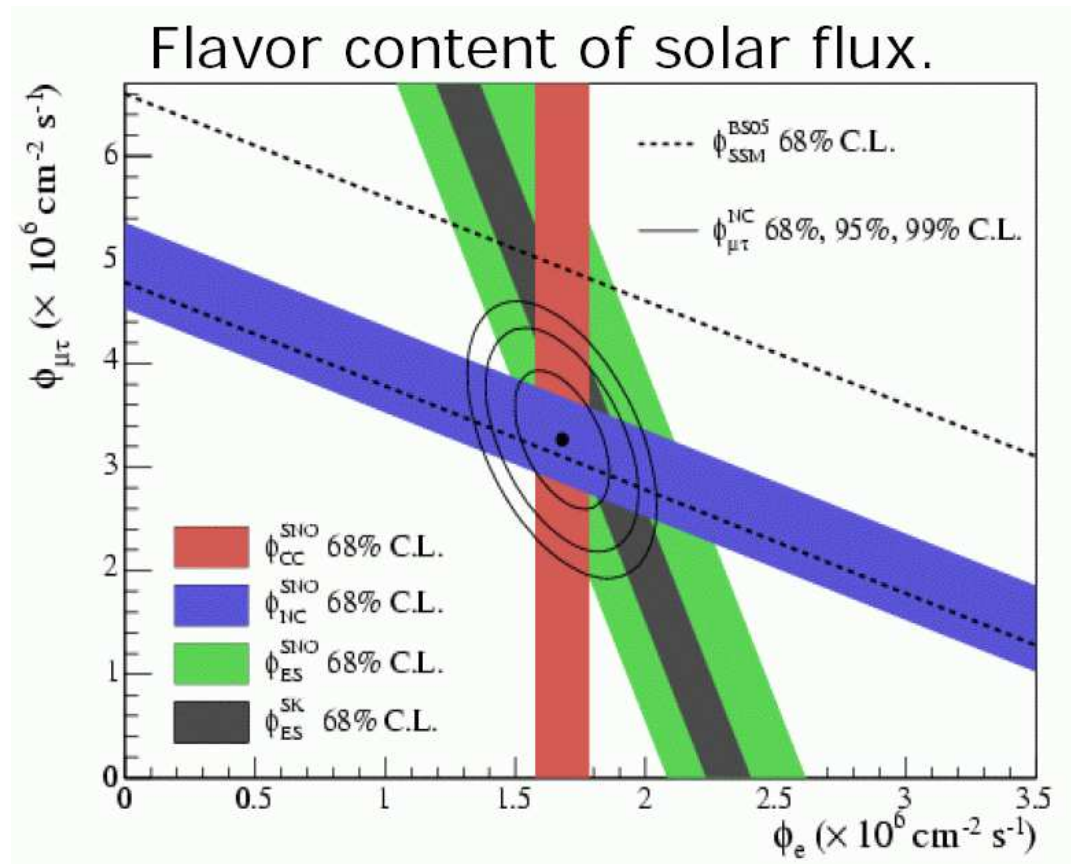
$$\Phi_{CC} = 1.68 \pm 0.06 \pm 0.09 = \Phi_{\nu_e}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{ES} &= 2.35 \pm 0.22 \pm 0.15 \\ &= \Phi_{\nu_e} + \varepsilon(\Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau}) \\ &\quad (SK : 2.32 \pm 0.09) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{NC} &= 4.94 \pm 0.21 \pm 0.36 \\ &= \Phi_{\nu_e} + \Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau} \end{aligned}$$

Przewidywania SSM (nowe)

$$\Phi^{SSM}(\nu_e) = 5.82 \pm 1.34$$



# SNO

## Phase III

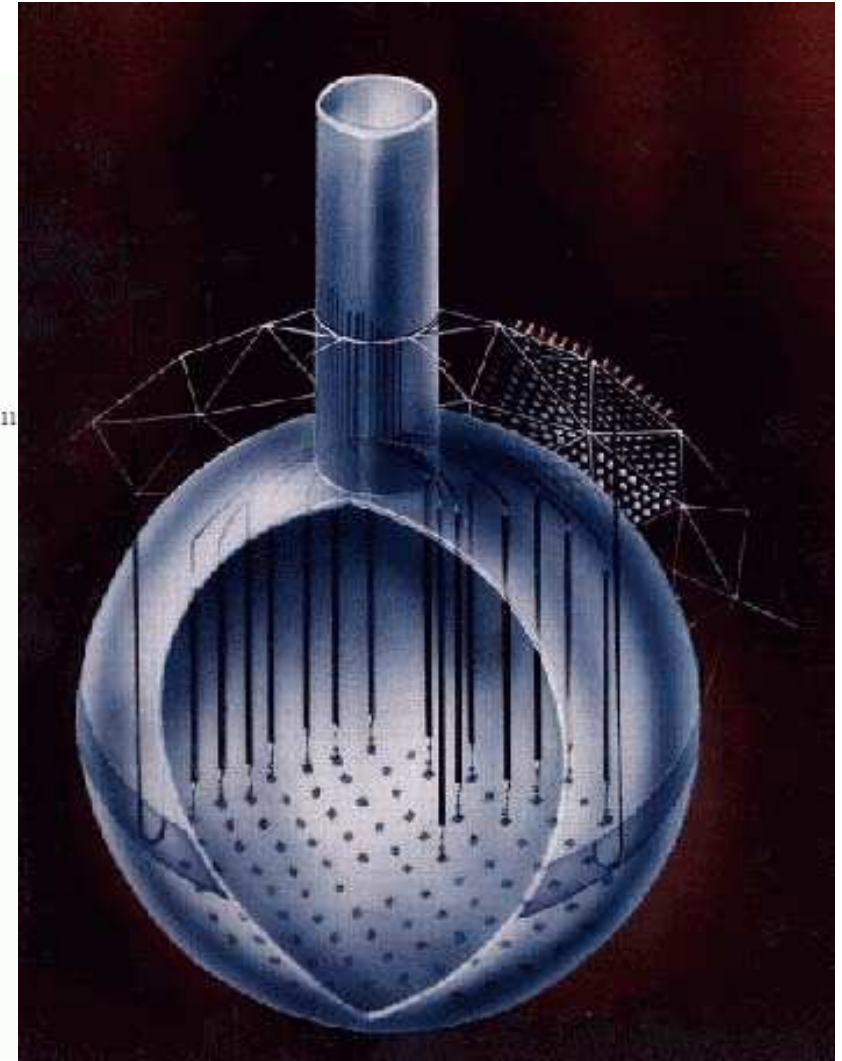
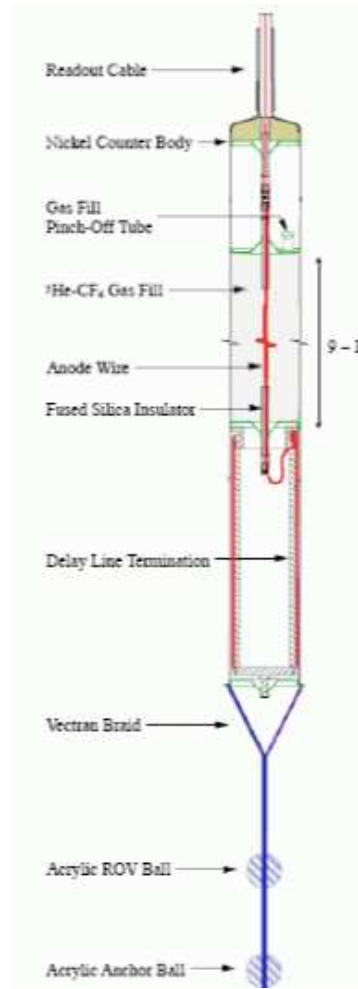
Pomiar neutronów przy pomocy dedykowanych liczników.

Liczniki gazowe:  
mieszanka  ${}^3\text{He} : \text{CF}_4$ .



Pojedynczy licznik: 2-3 m.

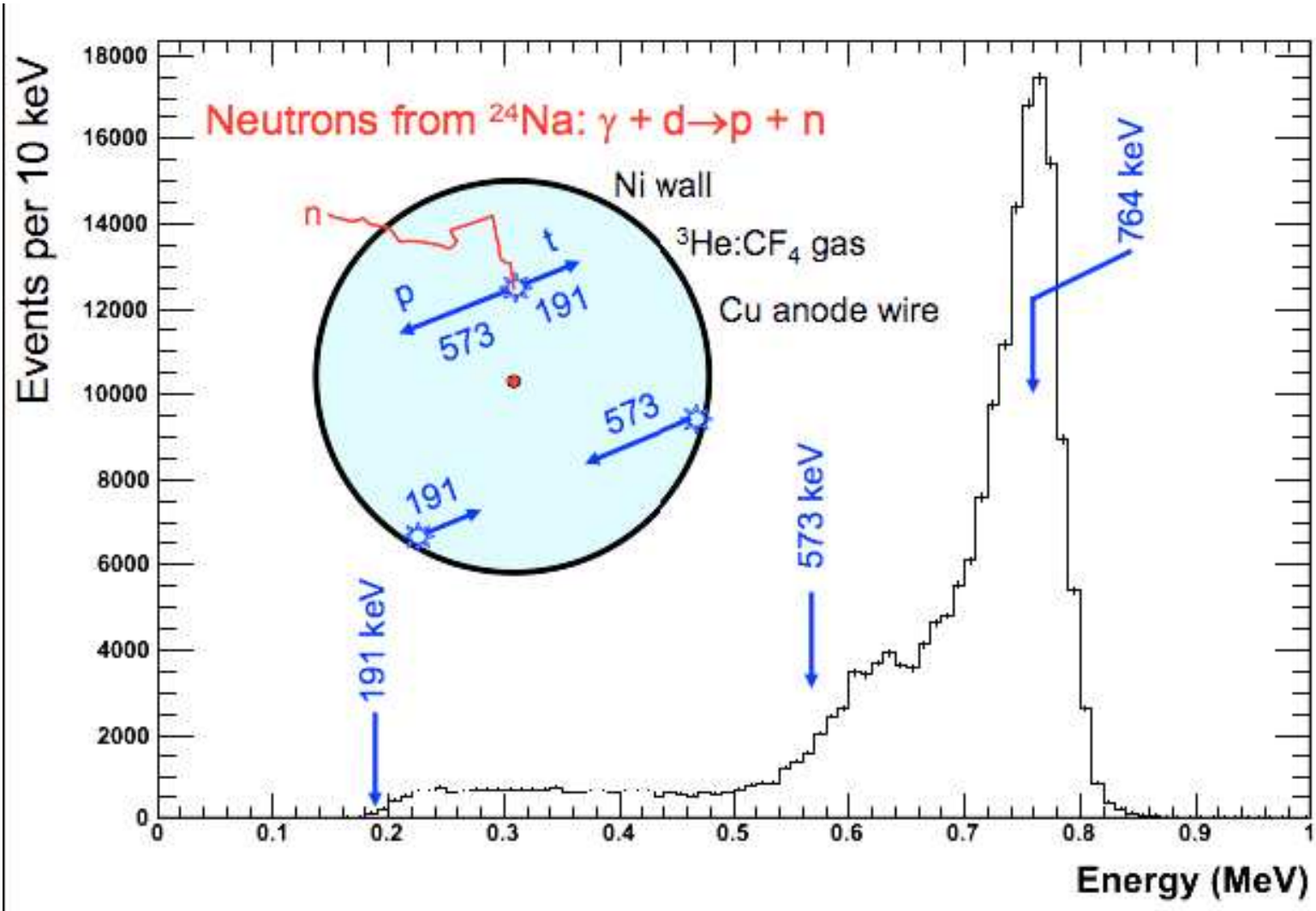
36 strun z licznikami rozmieszczonych na siatce  $1 \times 1\text{m}^2$



# SNO

## Phase III

### Wyniki kalibracji



# SNO

## Wyniki (Phase III)

Wyniki dopasowania

(w jednostkach  $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ):

$$\Phi_{CC} = 1.67 \pm 0.09 = \Phi_{\nu_e}$$

$$\Phi_{ES} = 1.77 \pm 0.26$$

$$= \Phi_{\nu_e} + \varepsilon(\Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau})$$

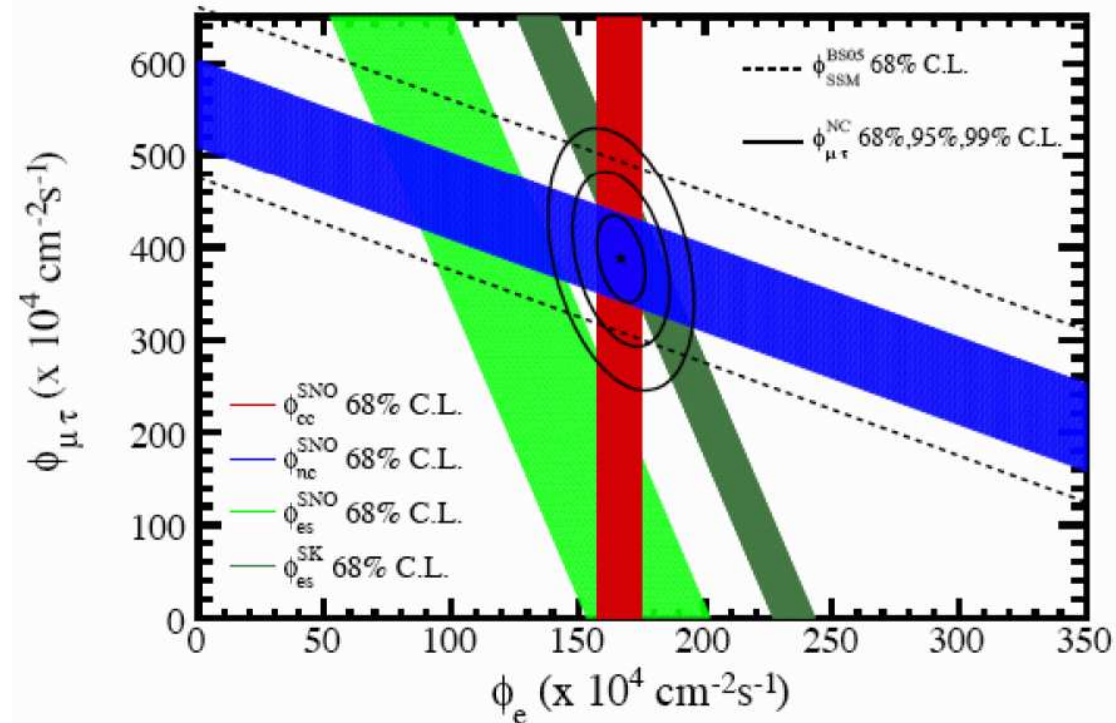
(SK :  $2.32 \pm 0.09$ )

$$\Phi_{NC} = 5.54 \pm 0.48$$

$$= \Phi_{\nu_e} + \Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau}$$

Przewidywania SSM (nowe)

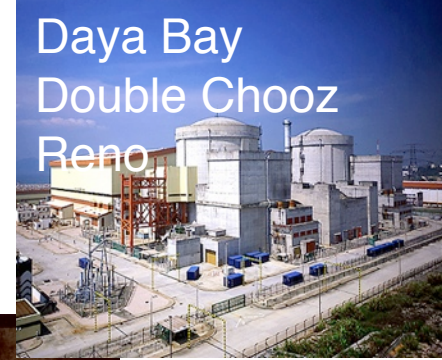
$$\Phi^{SSM}(\nu_e) = 5.69 \pm 0.91$$





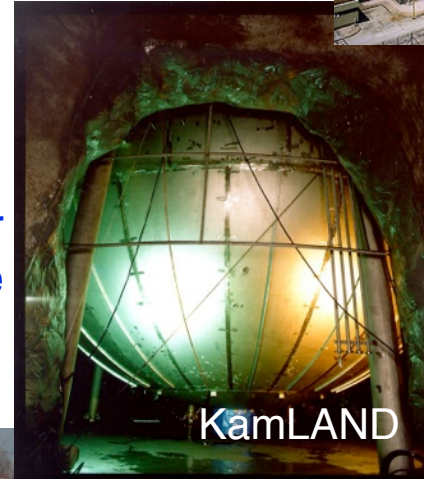
# Neutrino Physics at Reactors

**Next** - Discovery and precision measurement of  $\theta_{13}$



**2008** - Precision measurement of  $\Delta m_{12}^2$ . Evidence for oscillation

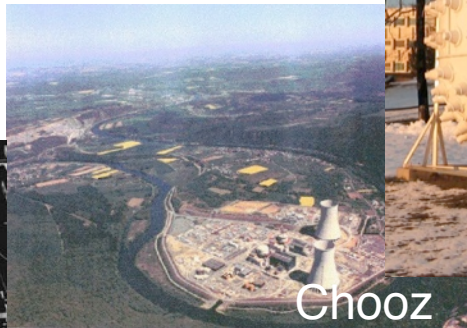
**2003** - First observation of reactor antineutrino disappearance



**1995** - Nobel Prize to Fred Reines at UC Irvine

**1980s & 1990s** - Reactor neutrino flux measurements in U.S. and Europe

**1956** - First observation of (anti)neutrinos



## Past Reactor Experiments

- Hanford
- Savannah River
- ILL, France
- Bugey, France
- Rovno, Russia
- Goesgen, Switzerland
- Krasnoyarsk, Russia
- Palo Verde
- Chooz, France

55 years of liquid scintillator detectors  
a story of varying baselines...

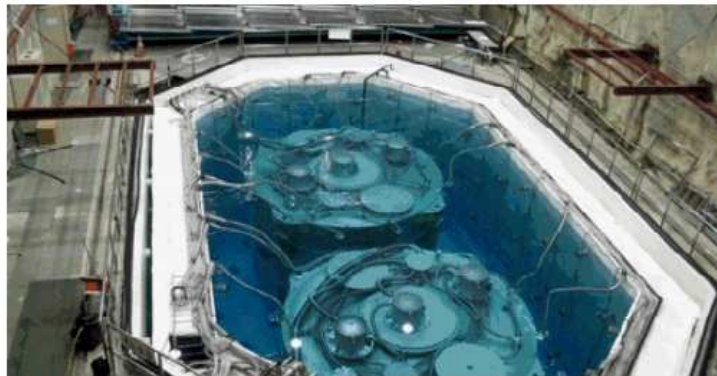
# Daya Bay, Chiny



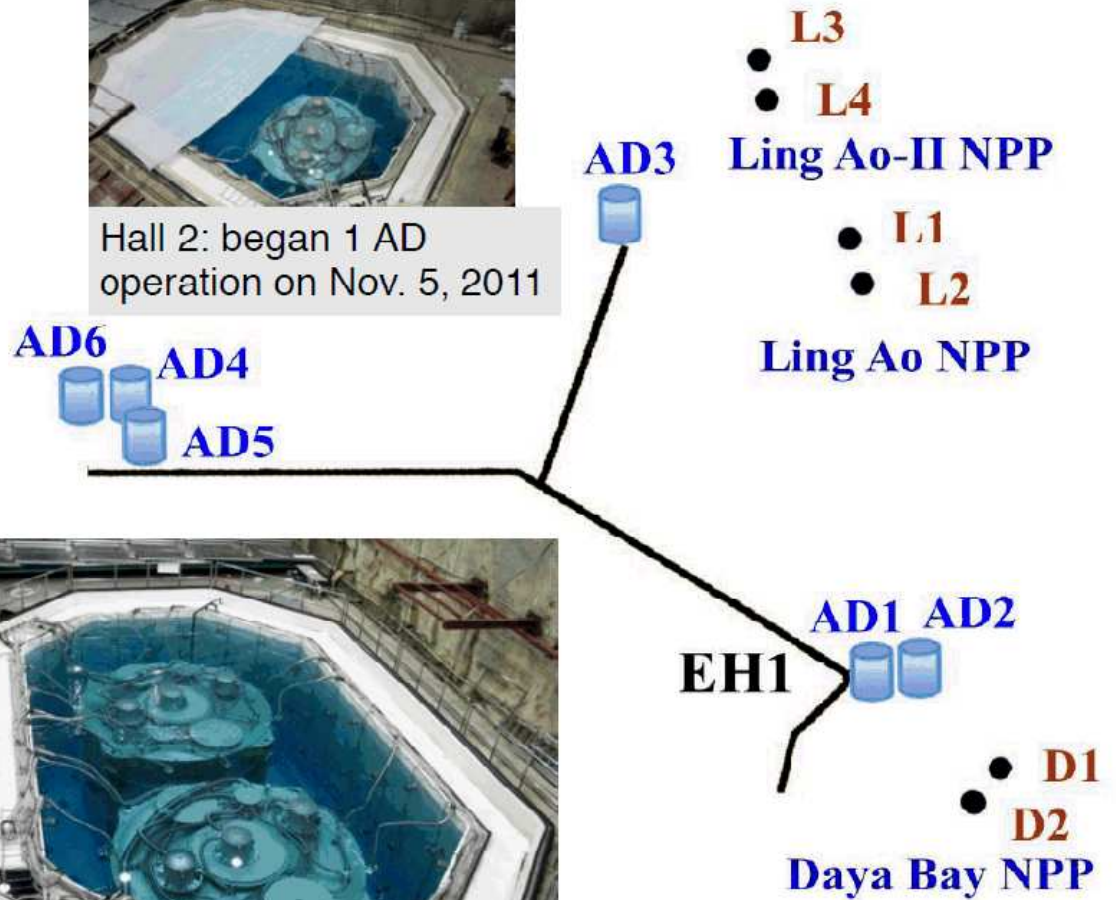
Hall 3: began 3 AD operation on Dec. 24, 2011



Hall 2: began 1 AD operation on Nov. 5, 2011



Hall 1: began 2 AD operation on Sep. 23, 2011



# Measuring $\theta_{13}$ with Reactor Experiments

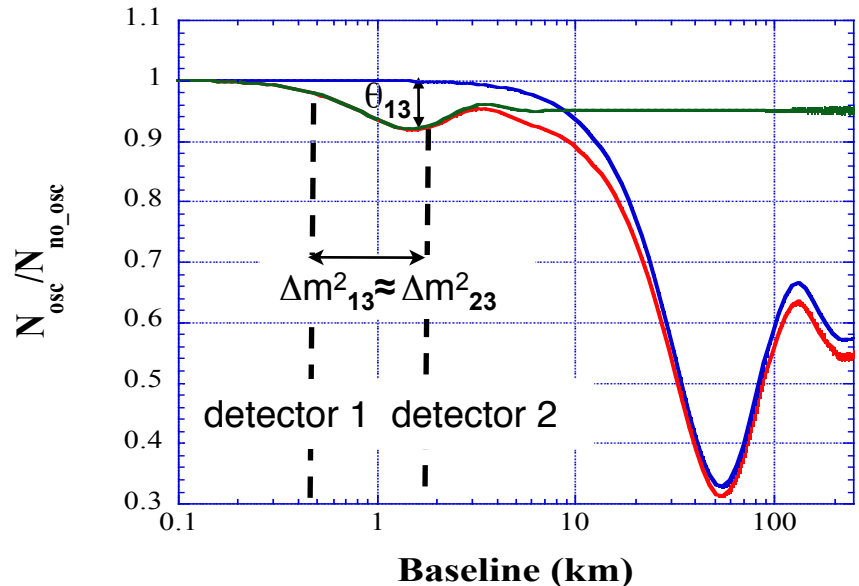
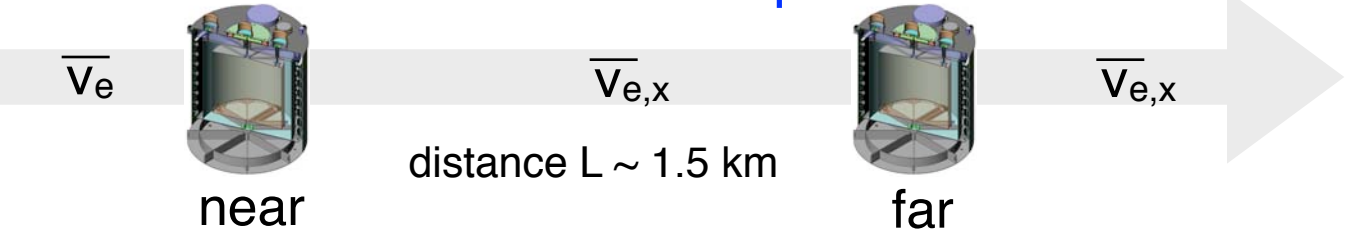


**Absolute Reactor Flux**  
Largest uncertainty in previous measurements

**Relative Measurement**  
Removes absolute uncertainties!

First proposed by L. A. Mikaelyan and V.V. Sinev,  
Phys. Atomic Nucl. 63 1002 (2000)

## Near-Far Concept



$$\frac{N_f}{N_n} = \left( \frac{N_{p,f}}{N_{p,n}} \right) \left( \frac{L_n}{L_f} \right)^2 \left( \frac{\epsilon_f}{\epsilon_n} \right) \left[ \frac{P_{\text{sur}}(E, L_f)}{P_{\text{sur}}(E, L_n)} \right]$$

far/near  $\bar{v}_e$  ratio

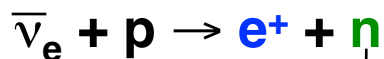
target mass

distances

efficiency

oscillation deficit

# Daya Bay Antineutrino Detection



0.3 b  $\rightarrow + p \rightarrow D + \gamma$  (2.2 MeV) (delayed)

49,000 b  $\rightarrow + Gd \rightarrow Gd^* \rightarrow Gd + \gamma$ 's (8 MeV) (delayed)

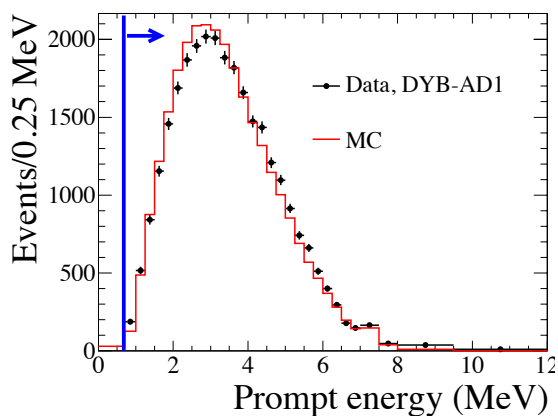
prompt+delayed coincidence provides distinctive signature

**Prompt positron:** carries antineutrino energy

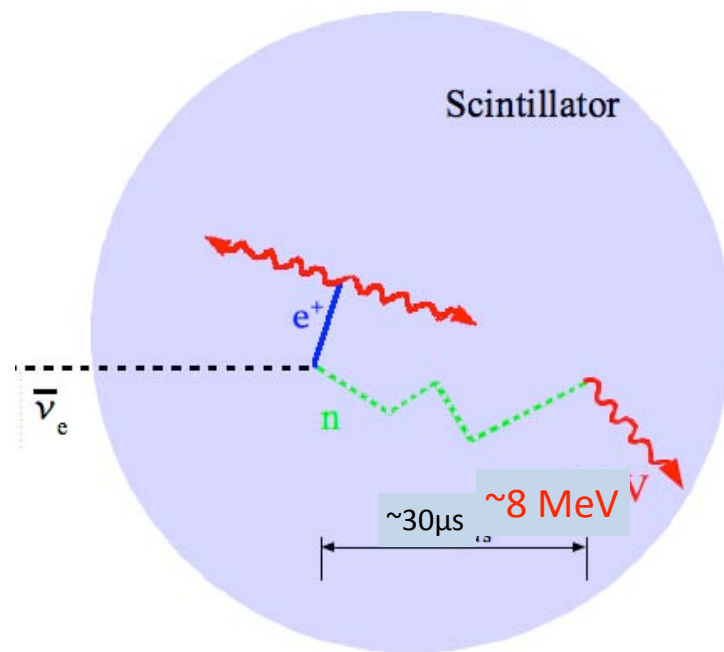
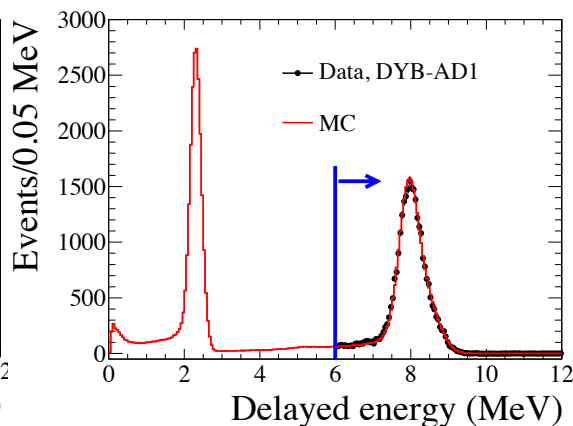
$$E_{e^+} \approx E_{\nu} - 0.8 \text{ MeV}$$

**Delayed neutron capture:** tags antineutrino signal

Prompt Energy Signal

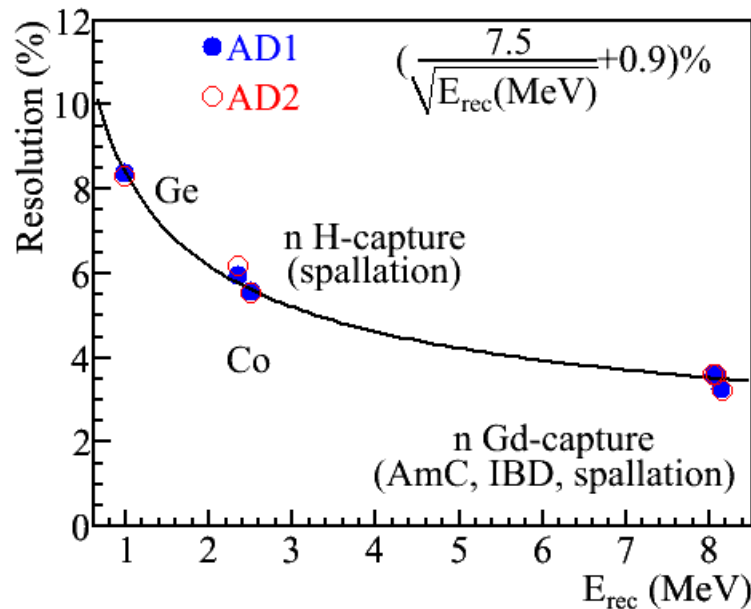
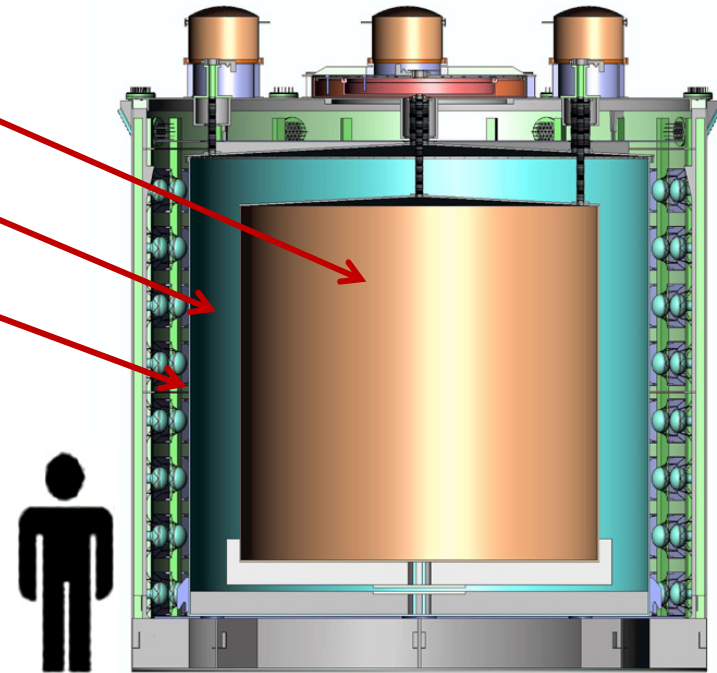


Delayed Energy Signal



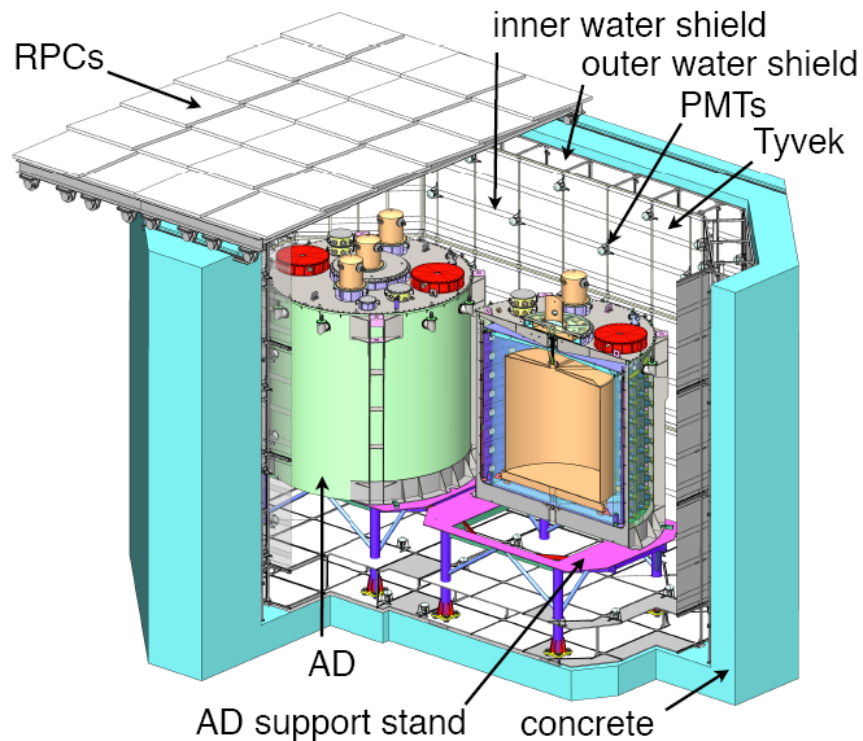
# Anti-neutrino Detector (AD)

- ◆ **Three zones modular structure:**
  - I. target: Gd-loaded scintillator**
  - II.  $\gamma$ -catcher: normal scintillator**
  - III. buffer shielding: oil**
- ◆ **192 8" PMTs/module**
- ◆ **Two optical reflectors at the top and the bottom, Photocathode coverage increased from 5.6% to 12%**



**Target: 20 t, 1.6m**  
 **$\gamma$ -catcher: 20t, 45cm**  
**Buffer: 40t, 45cm**  
**Total weight: ~110 t**

# Muon Veto Detector



## Two active cosmic-muon veto's

- Water Cerenkov: Eff. > 97%
- RPC Muon tracker: Eff. > 88%

### ◆ Water Cerenkov detector

- ⇒ High purity de-ionized water in pools also for shielding
- ⇒ First stage water production in hall 4
- ⇒ Local water re-circulation & purification

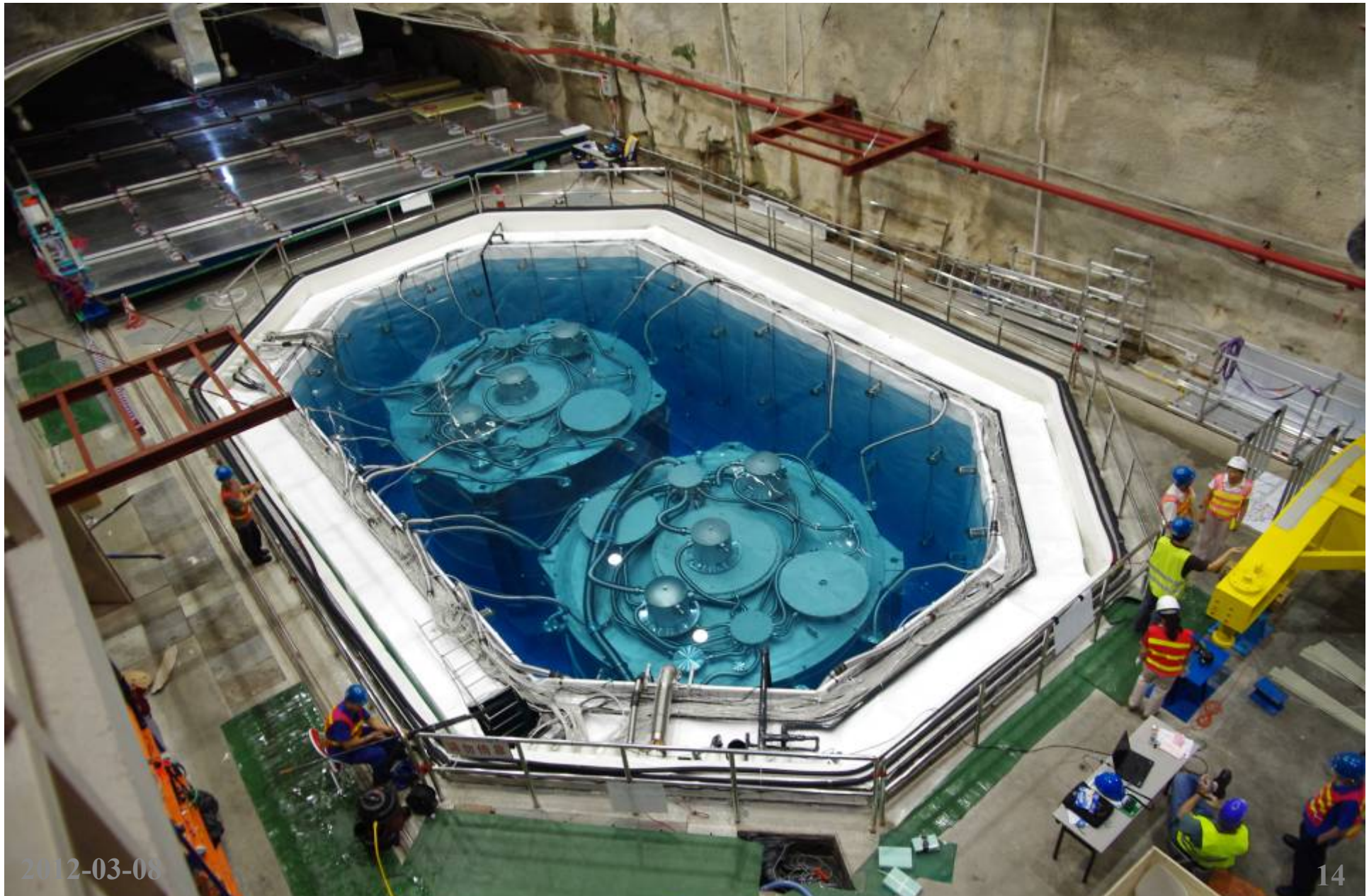
### ◆ RPCs

- ⇒ 4 layers/module
- ⇒ 54 modules/near hall, 81 modules/far hall
- ⇒ 2 telescope modules/hall

### ◆ Water Cerenkov detector

- ⇒ Two layers, separated by Tyvek/PE/Tyvek film
- ⇒ 288 8" PMTs for near halls; 384 8" PMTs for the far hall

# Two ADs Installed in Hall 1



2012-03-08

# Hall 1 (two ADs) Started the Operation on Aug. 15, 2011





# Automatic Calibration System

## ◆ Three Z axis:

⇒ One at the center

✓ For time evolution, energy scale, non-linearity...

⇒ One at the edge

✓ For efficiency, space response

⇒ One in the  $\gamma$ -catcher

✓ For efficiency, space response

## ◆ 3 sources for each z axis:

⇒ LED

✓ for  $T_0$ , gain and relative QE

⇒  $^{68}\text{Ge}$  ( $2 \times 0.511$  MeV  $\gamma$ 's)

✓ for positron threshold & non-linearity...

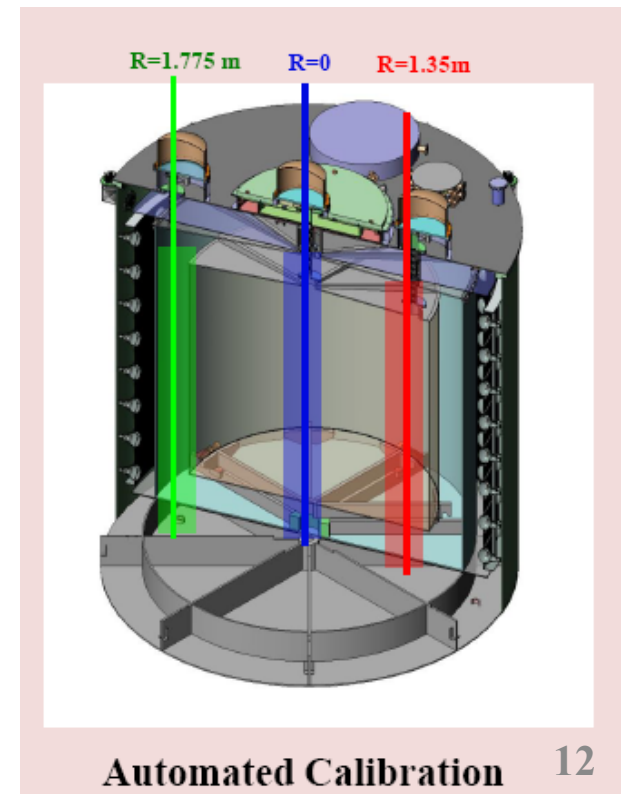
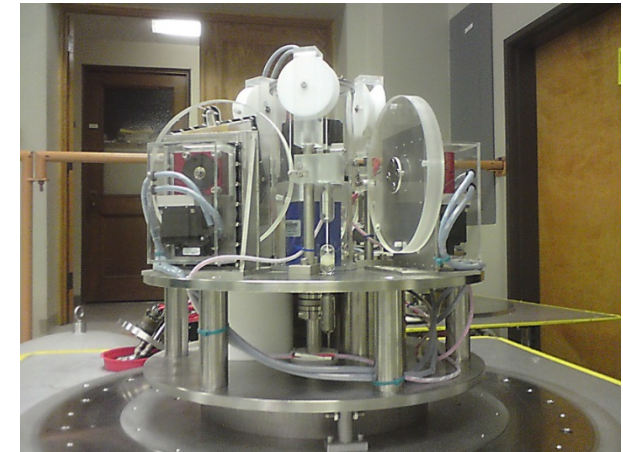
⇒  $^{241}\text{Am}$ - $^{13}\text{C}$  +  $^{60}\text{Co}$  (1.17+1.33 MeV  $\gamma$ 's)

✓ For neutron capture time, ...

✓ For energy scale, response function, ...

## ◆ Once every week:

⇒ 3 axis, 5 points in Z, 3 sources



# Trigger Performance

## ◆ Threshold for a hit:

⇒ AD & pool:  $\frac{1}{4}$  PE

## ◆ Trigger thresholds:

⇒ AD:  $\sim N_{\text{HIT}}=45$ ,  $E_{\text{tot}} = \sim 0.4$  MeV

⇒ Inner pool:  $N_{\text{HIT}}=6$

⇒ Outer pool:  $N_{\text{HIT}}=7$  (8 for far hall)

⇒ RPC: 3/4 layers in each module

## ◆ Trigger rate(EH1)

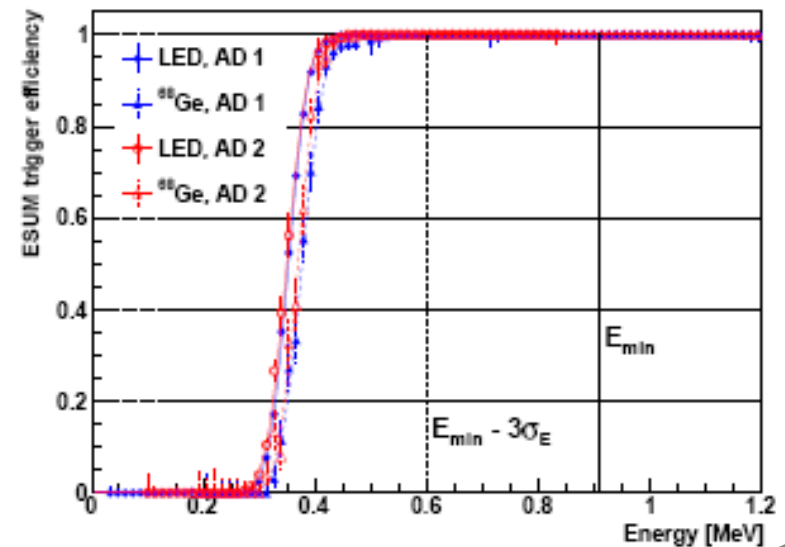
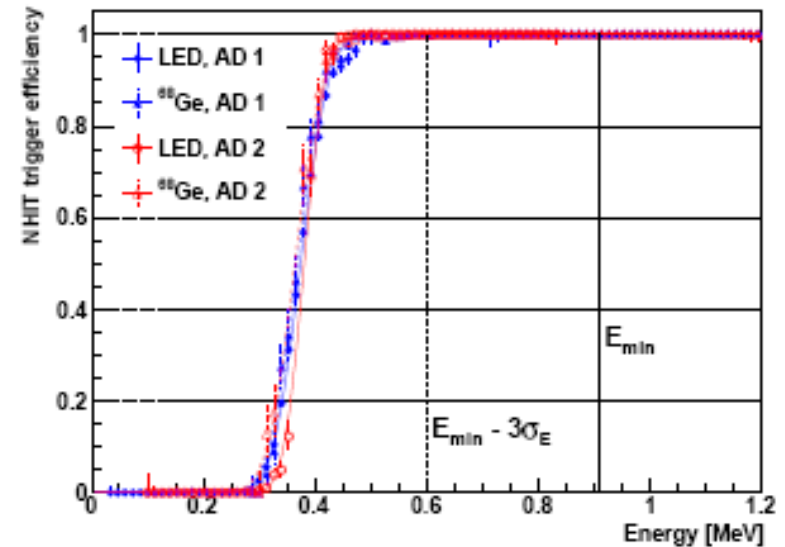
⇒ AD singles rate:

✓  $>0.4$ MeV,  $\sim 280$ Hz

✓  $>0.7$ MeV,  $\sim 60$ Hz

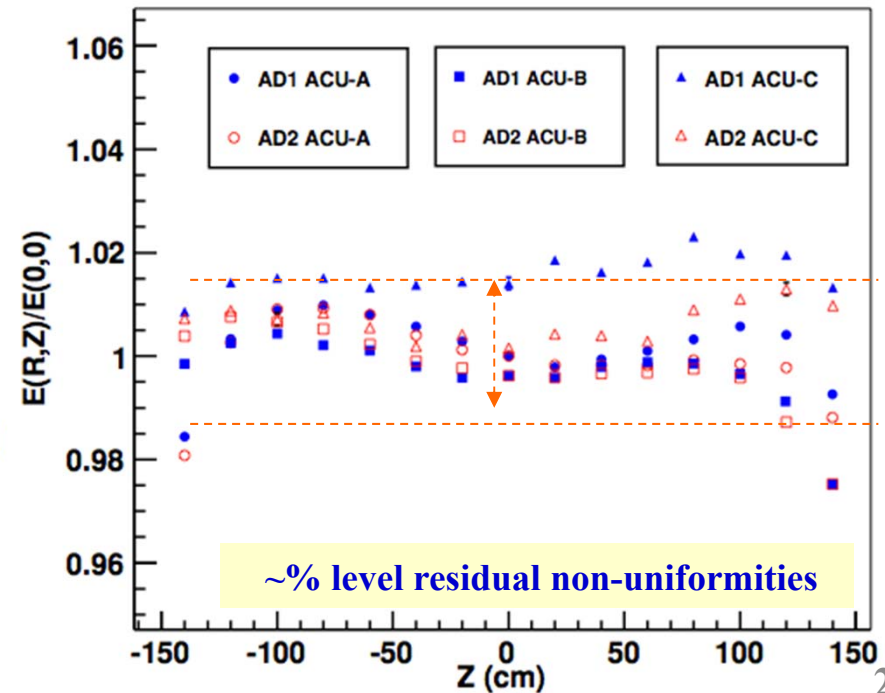
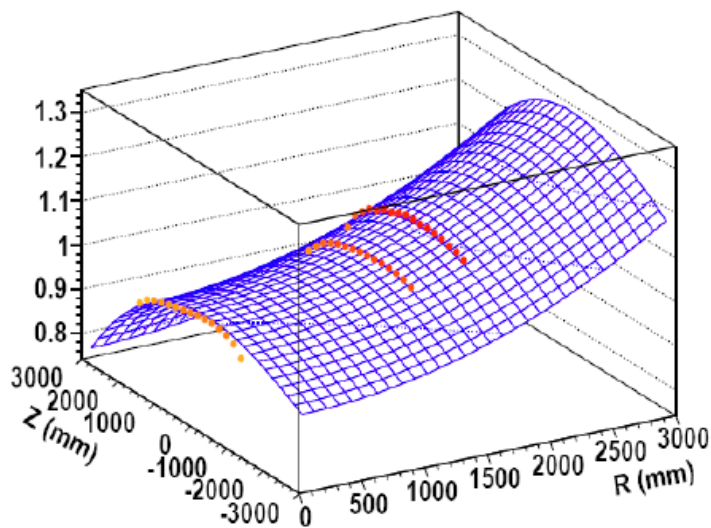
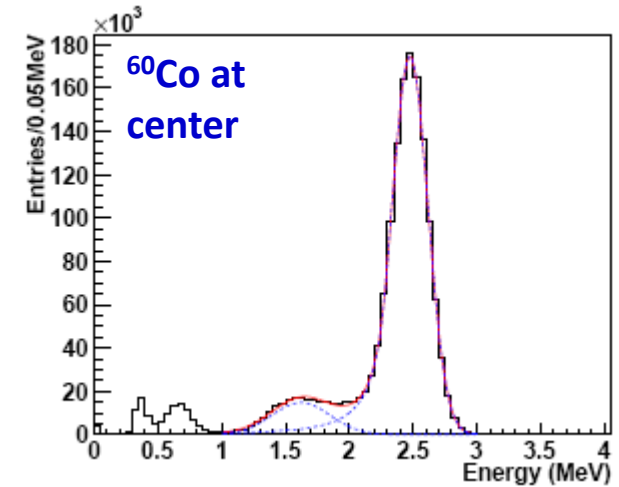
⇒ Inner pool rate:  $\sim 170$  Hz

⇒ Outer pool rate:  $\sim 230$  Hz

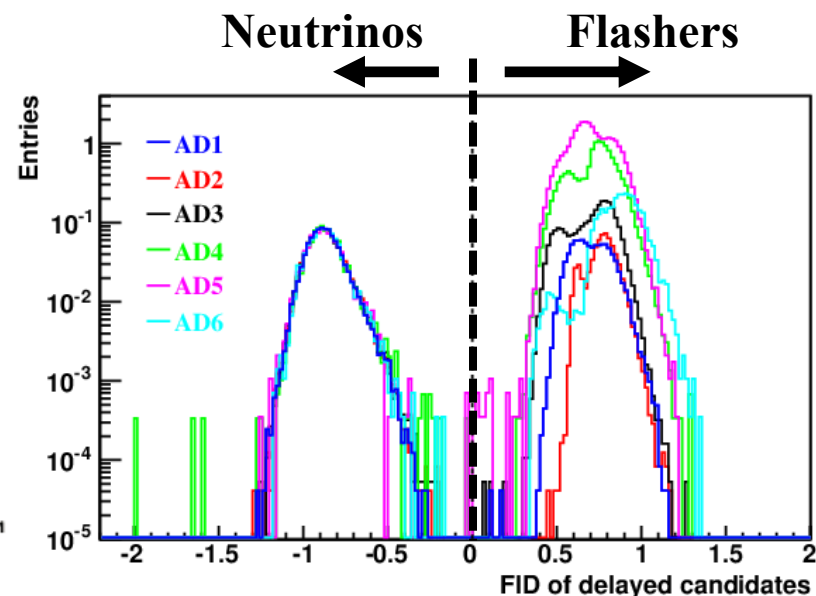
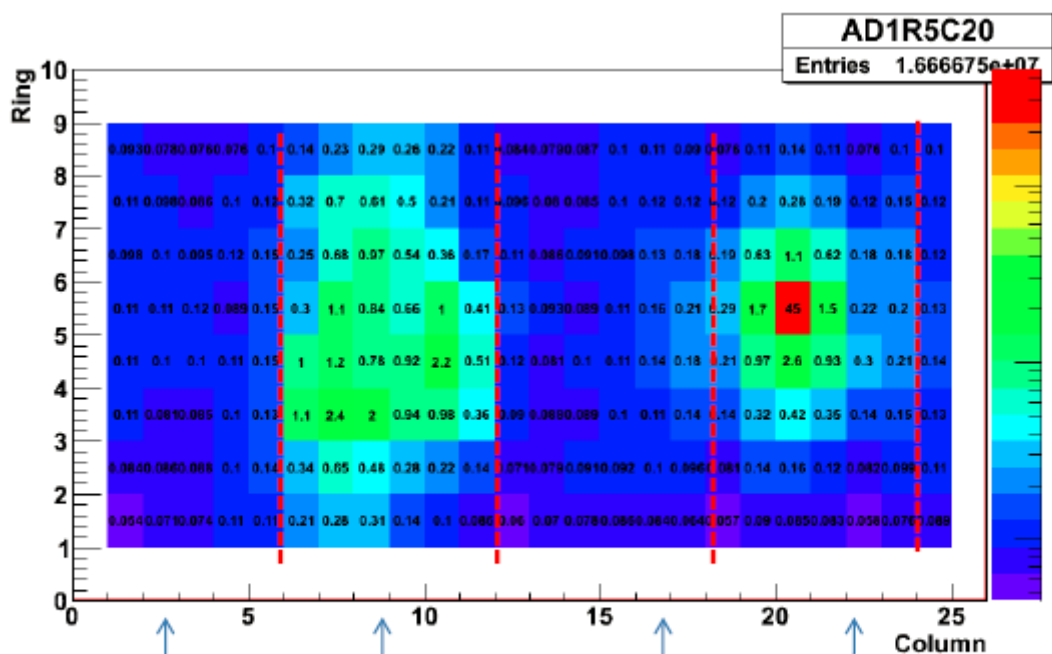


# Event Reconstruction: Energy Calibration

- ◆ PMT gain calibration → No. of PEs in an AD
- ◆  $^{60}\text{Co}$  at the center → raw energies,
  - ⇒ time dependence corrected
  - ⇒ different for different ADs
- ◆  $^{60}\text{Co}$  at different R & Z to obtain the correction function,  $f(R,Z) = f_1(R) * f_2(Z)$ 
  - ⇒ space dependence corrected
  - ⇒ same for all the ADs



# Flashers: Imperfect PMTs



Quadrant 4    Quadrant 3    Quadrant 2    Quadrant 1, where the hottest PMT locates

$$\log_{10} \left( \left( \frac{Quadrant}{1.} \right)^2 + \left( \frac{MaxQ}{0.45} \right)^2 \right) < 0$$

$$Quadrant = Q3/(Q2+Q4)$$

$$MaxQ = \max Q / \sum Q$$

- ◆ Spontaneous light emission by PMT
- ◆ Topology: a hot PMT + near-by PMTs and opposite PMTs
- ◆ ~ 5% of PMT, 5% of event
- ◆ Rejection: pattern of fired PMTs

**Inefficiency to neutrinos:**

**0.024% ± 0.006%(stat)**

**Contamination: < 0.01%**

# Neutrino Event Selection

## ◆ Pre-selection

- ⇒ Reject Flashers
- ⇒ Reject Triggers within  $(-2 \mu\text{s}, 200 \mu\text{s})$  to a tagged water pool muon

## ◆ Neutrino event selection

### ⇒ Multiplicity cut

- ✓ Prompt-delayed pairs within a time interval of  $200 \mu\text{s}$
- ✓ No triggers ( $E > 0.7\text{MeV}$ ) before the prompt signal and after the delayed signal by  $200 \mu\text{s}$

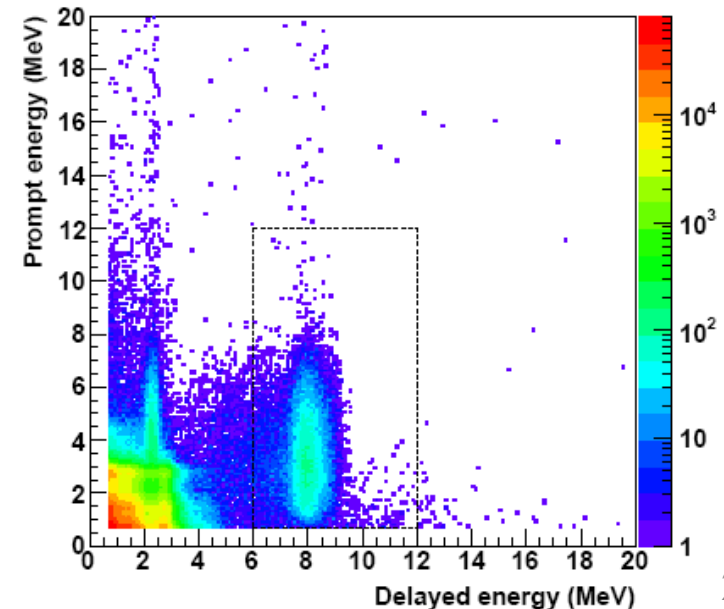
### ⇒ Muon veto

- ✓ *1s* after an AD shower muon
- ✓ *1ms* after an AD muon
- ✓ *0.6ms* after an WP muon

⇒  $0.7\text{MeV} < E_{\text{prompt}} < 12.0\text{MeV}$

⇒  $6.0\text{MeV} < E_{\text{delayed}} < 12.0\text{MeV}$

⇒  $1\mu\text{s} < \Delta t_{e^+-n} < 200\mu\text{s}$



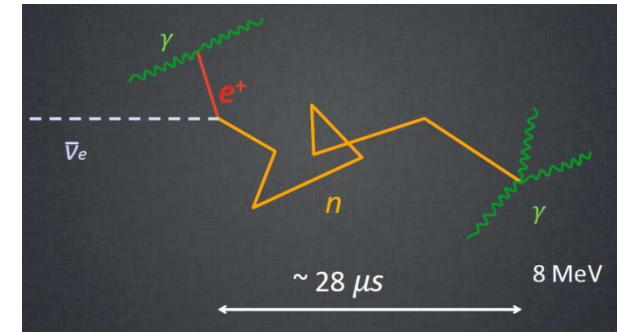
# Event Signature and Backgrounds

◆ **Signature:**  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$

⇒ **Prompt:**  $e^+$ ,  $E$ : 1-10 MeV,

⇒ **Delayed:**  $n$ ,  $E$ : 2.2 MeV@H, 8 MeV @ Gd

⇒ **Capture time:** 28  $\mu$ s in 0.1% Gd-LS



◆ **Backgrounds**

⇒ **Uncorrelated:** random coincidence of  $\gamma\gamma$ ,  $\gamma n$  &  $nn$

✓  $\gamma$  from U/Th/K/Rn/Co... in LS, SS, PMT, Rock, ...

✓  $n$  from  $\alpha$ -n,  $\mu$ -capture,  $\mu$ -spallation in LS, water & rock

⇒ **Correlated:**

✓ **Fast neutrons:** prompt— $n$  scattering, delayed— $n$  capture

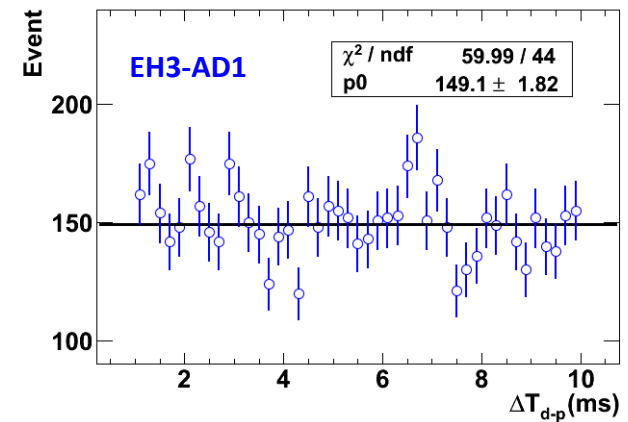
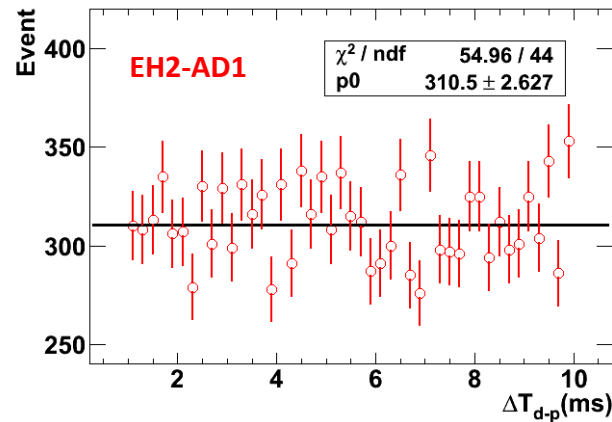
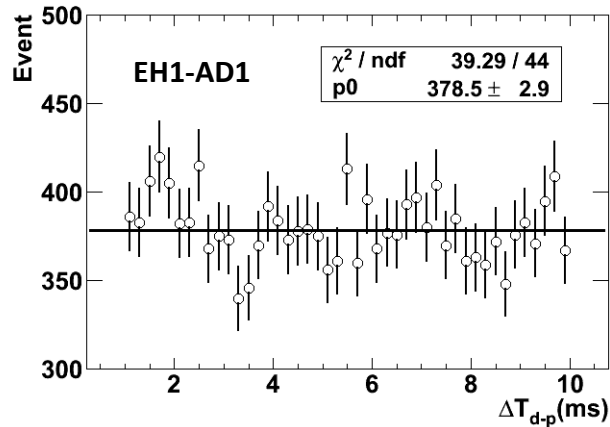
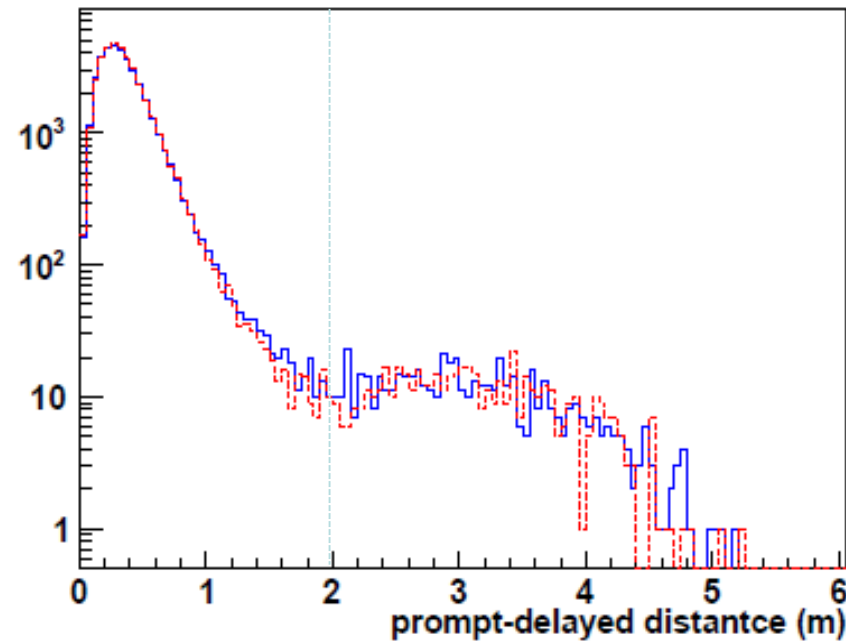
✓  **$^8\text{He}/^9\text{Li}$ :** prompt— $\beta$  decay, delayed— $n$  capture

✓ **Am-C source:** prompt— $\gamma$  rays, delayed— $n$  capture

✓  **$\alpha$ -n:**  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$

# Accidental Backgrounds: Cross Checks

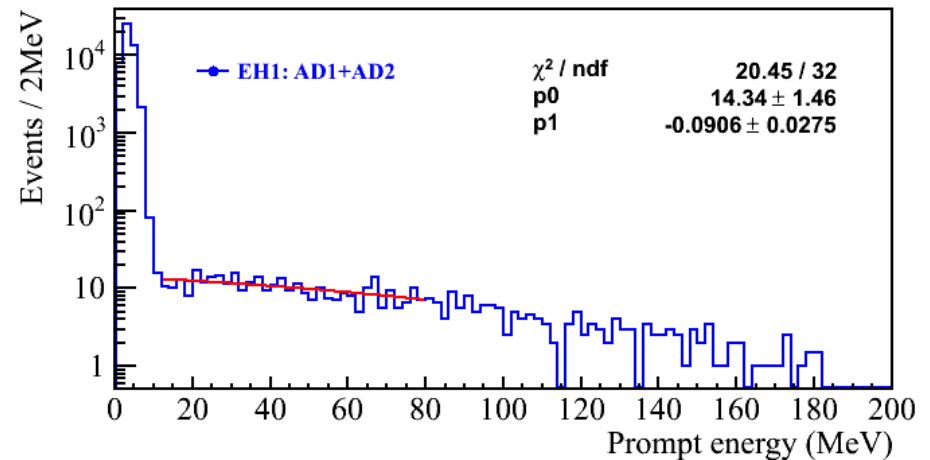
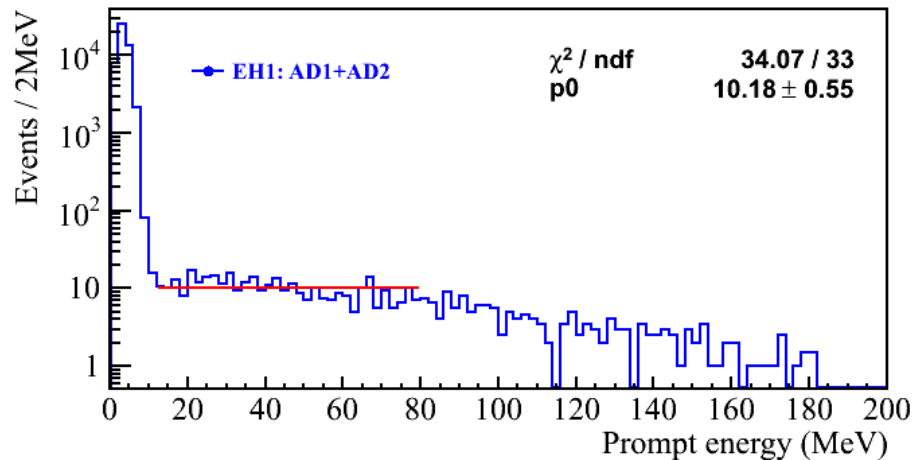
- ◆ Prompt-delayed distance distribution. Check the fraction of prompt-delayed pair with distance > 2m
- ◆ Off-window coincidence → ‘measure’ the accidental background
- ◆ Results in agreement within 1%.



Uncertainty: < 1%

# Fast Neutrons

- ◆ Extend the prompt energy spectrum to high energy by relax the prompt energy cut
- ◆ Fit the energy spectrum in the [12MeV, 100MeV] range, and estimate backgrounds in the [0.7MeV, 12MeV] region
- ◆ Take a zero-order or first order polynomial fit, and take their differences as systematics





# Backgrounds – ${}^8\text{He}/{}^9\text{Li}$

- ◆ **Cosmic  $\mu$  produced  ${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$  in LS**
  - ⇒  $\beta$ -decay + neutron emitter
  - ⇒  $\tau({}^8\text{He}/{}^9\text{Li}) = 171.7\text{ms}/257.2\text{ms}$
  - ⇒  ${}^8\text{He}/{}^9\text{Li}$ ,  $\text{Br}(n) = 12\%/48\%$ ,  ${}^9\text{Li}$  dominant
  - ⇒ Production rate follow  $E_\mu^{0.74}$  power law

## ◆ **Measurement:**

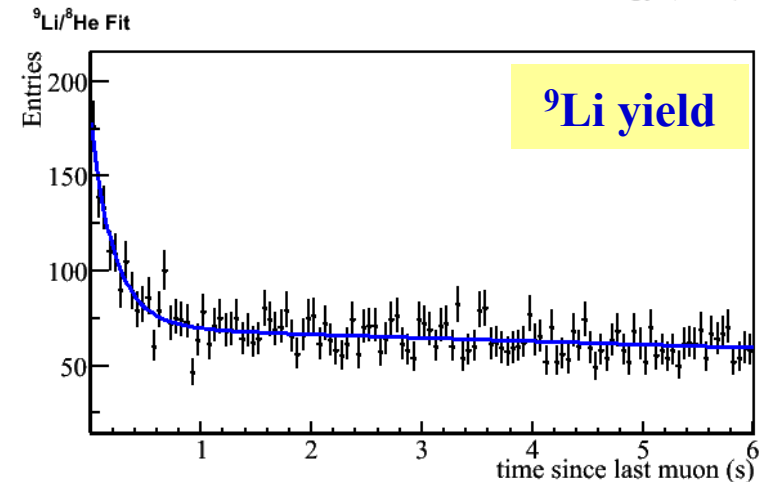
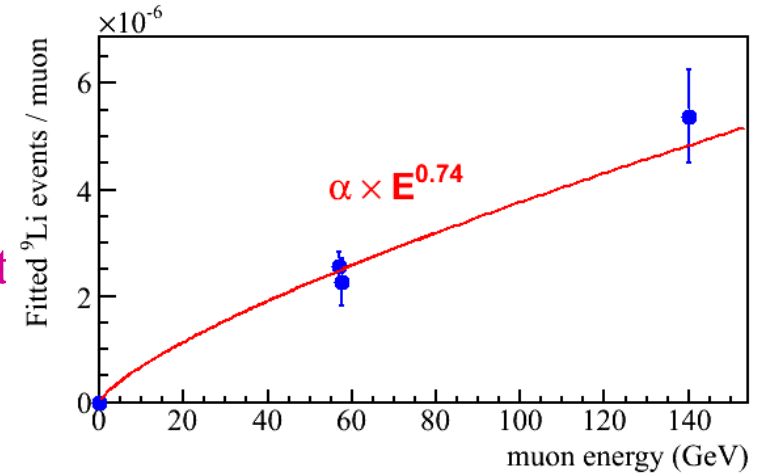
- ⇒ **Time-since-last-muon fit**

$$f(t) = B/\lambda \cdot e^{-t/\lambda} + S/T \cdot e^{-t/T}$$

- ⇒ **Improve the precision by reducing the muon rate:**

- ✓ Select only muons with an energy deposit  $>1.8\text{MeV}$  within a  $[10\mu\text{s}, 200\mu\text{s}]$  window
- ✓ Issue: possible inefficiency of  ${}^9\text{Li}$

- ⇒ **Results w/ and w/o the reduction is studied**



**Error follows**

$$\sigma_b = \frac{1}{N} \cdot \sqrt{(1 + \tau R_\mu)^2 - 1}$$

# Uncertainty Summary

	Detector		Uncorrelated
	Efficiency	Correlated	
Target Protons		0.47%	0.03%
Flasher cut	99.98%	0.01%	0.01%
Delayed energy cut	90.9%	0.6%	0.12%
Prompt energy cut	99.88%	0.10%	0.01%
Multiplicity cut		0.02%	<0.01%
Capture time cut	98.6%	0.12%	0.01%
Gd capture ratio	83.8%	0.8%	<0.1%
Spill-in	105.0%	1.5%	0.02%
Livetime	100.0%	0.002%	<0.01%
Combined	78.8%	1.9%	0.2%

For near/far oscillation, only uncorrelated uncertainties are used.

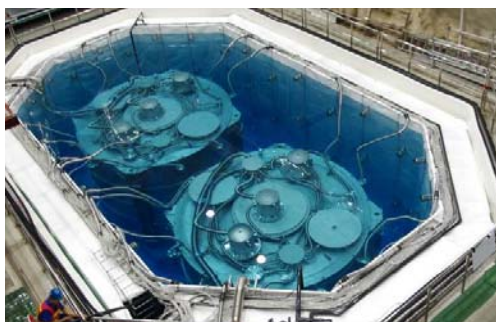
Largest systematics are smaller than far site statistics (~1%)

	Reactor	
	Correlated	Uncorrelated
Energy/fission	0.2%	Power 0.5%
$\bar{\nu}_e$ /fission	3%	Fission fraction 0.6%
		Spent fuel 0.3%
Combined	3%	Combined 0.8%

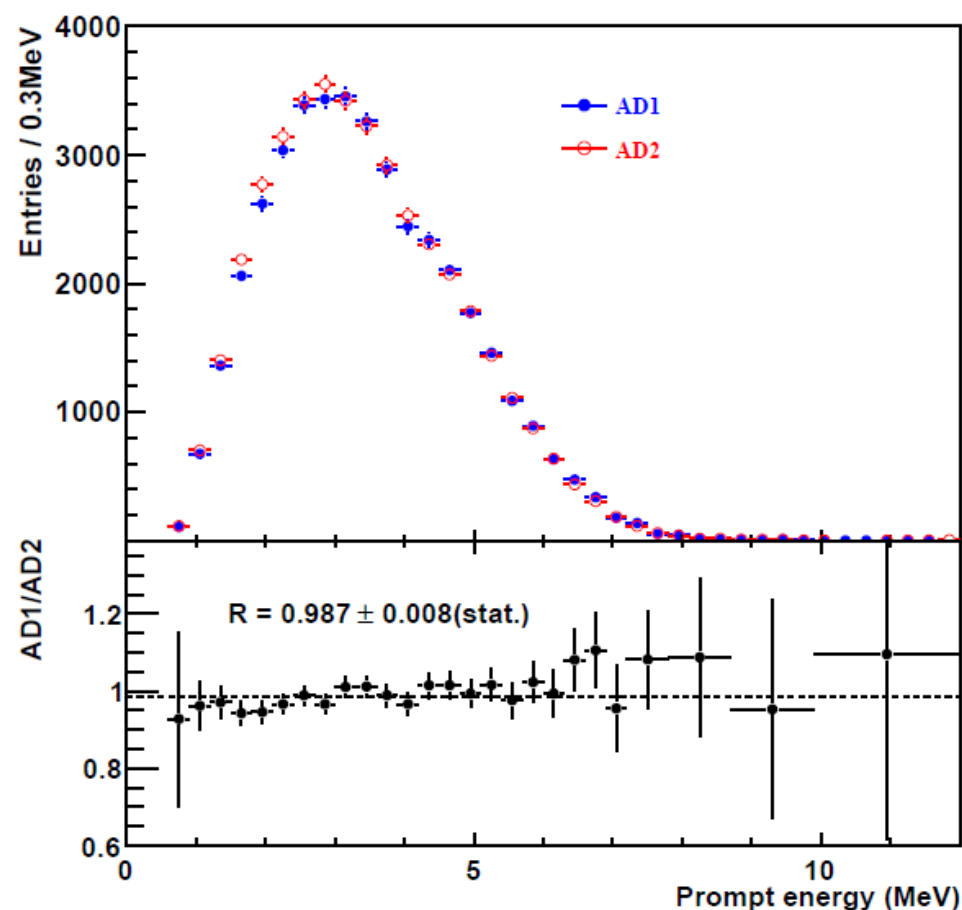
Influence of uncorrelated reactor systematics reduced (~1/20) by far vs. near measurement.

# Side-by-side Comparison

- ◆ Expected ratio of neutrino events from AD1 and AD2: **0.981**
- ◆ Measured ratio:  **$0.987 \pm 0.008(\text{stat}) \pm 0.003$**

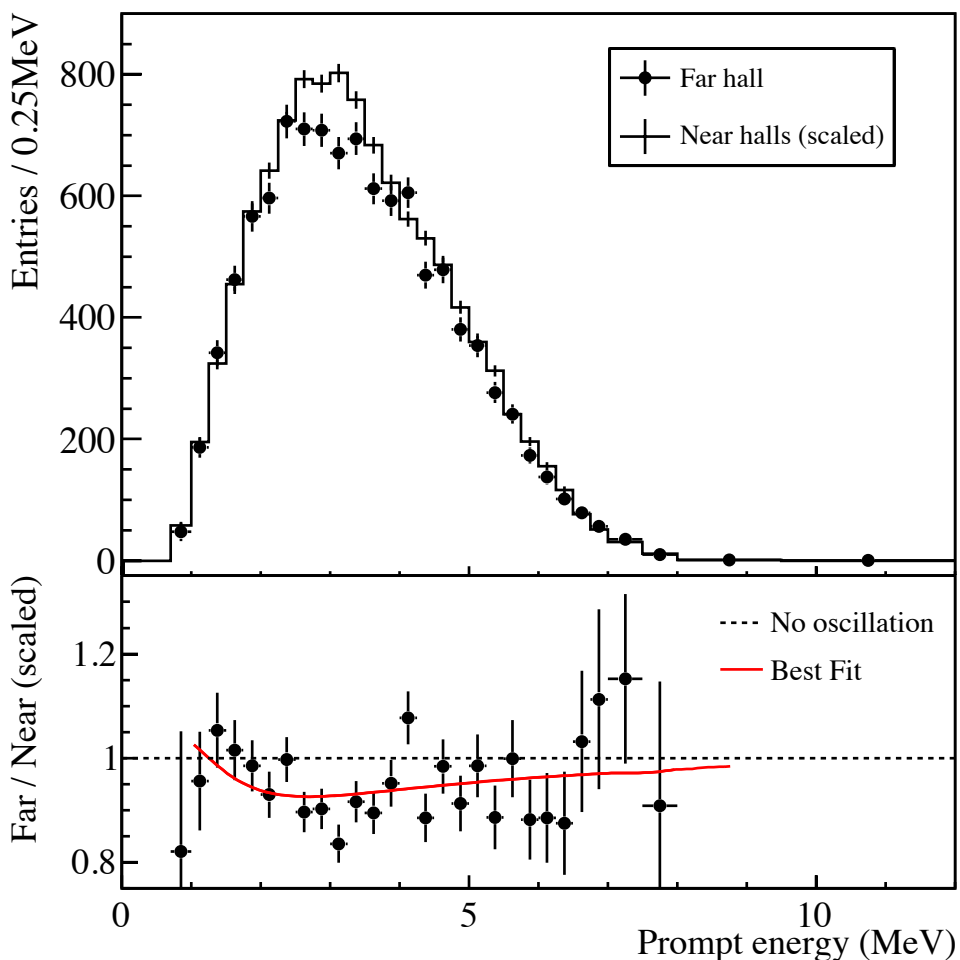


- The ratio is not 1 because of target mass, baseline, etc.
- This final check shows that systematic errors are under control



# Far vs. Near Comparison

## Compare measured rates and spectra



$$R = \frac{Far_{measured}}{Far_{expected}} = \frac{M_4 + M_5 + M_6}{\sum_{i=4}^6 (\alpha_i(M_1 + M_2) + \beta_i M_3)}$$

$M_n$  are the measured rates in each detector. Weights  $\alpha_i, \beta_i$  are determined from baselines and reactor fluxes.

$$R = 0.940 \pm 0.011 \text{ (stat)} \pm 0.004 \text{ (syst)}$$

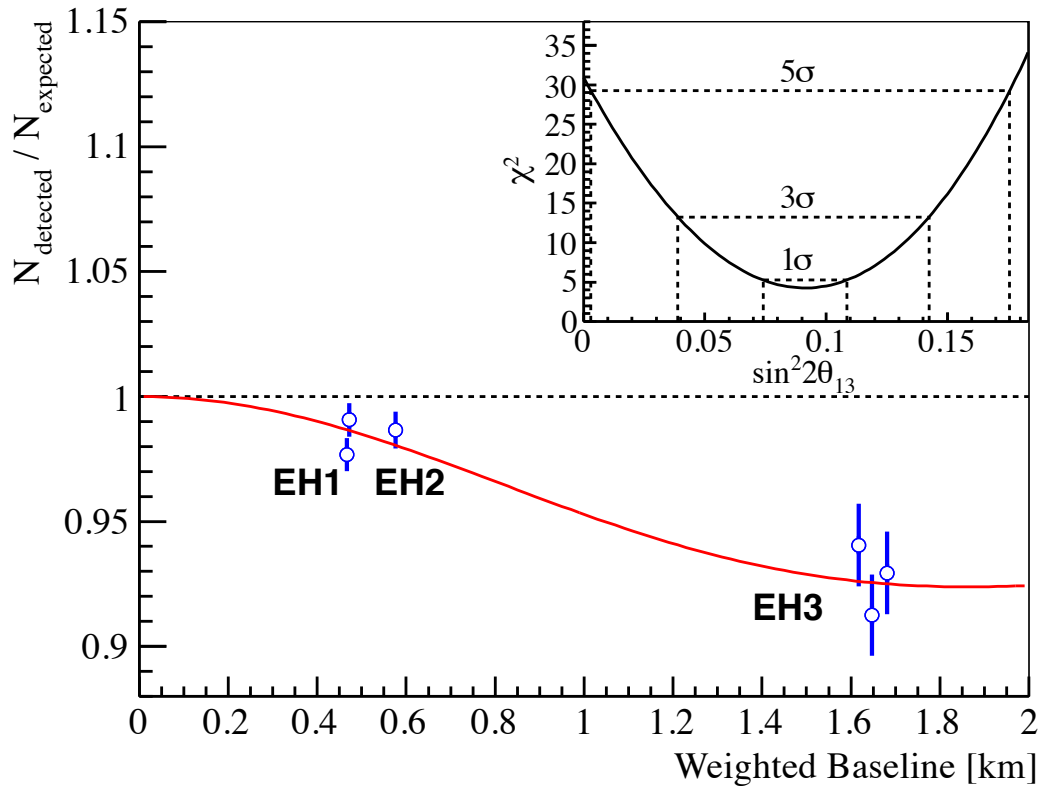
Clear observation of far site deficit ( $\sim 6\%$ ).

Spectral distortion consistent with oscillation.\*

\* Caveat: Spectral systematics not fully studied;  $\theta_{13}$  value from shape analysis is not recommended.

# Rate Analysis

Estimate  $\theta_{13}$  using measured rates in each detector.



Uses standard  $\chi^2$  approach.

Far vs. near relative measurement.  
[Absolute rate is not constrained.]

Consistent results obtained by independent analyses, different reactor flux models.

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016 \text{ (stat)} \pm 0.005 \text{ (syst)}$$

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0 \text{ excluded at } 5.2\sigma$$

# Oscylacje neutrin

## Najnowsze wyniki

marzec-kwiecień 2012

Eksperyment Daya Bay jako pierwszy potwierdził ponad wszelką wątpliwość oscylacje między 1 i 3 generacją neutrin. Zmierzony “kąć mieszania”:

$$\sin \theta_{13} = 0.092 \pm 0.017$$

różny od zera (efekt na poziomie  $5.2\sigma$ )

Tym samym poznaliśmy już wszystkie kąć mieszania neutrin

- $\theta_{12}$  z neutrin słonecznych
- $\theta_{23}$  z neutrin atmosferycznych

