

# Metody eksperymentalne w fizyce wysokich energii

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

## Wykład VII

### Eksperymenty nieakceleratorowe

- Pomiar neutronów
- Pierre Auger
- Poszukiwanie ciemnej materii

# Neutrino

## Przekrój czynny

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

Dla neutrin o energii rzędu 1 MeV

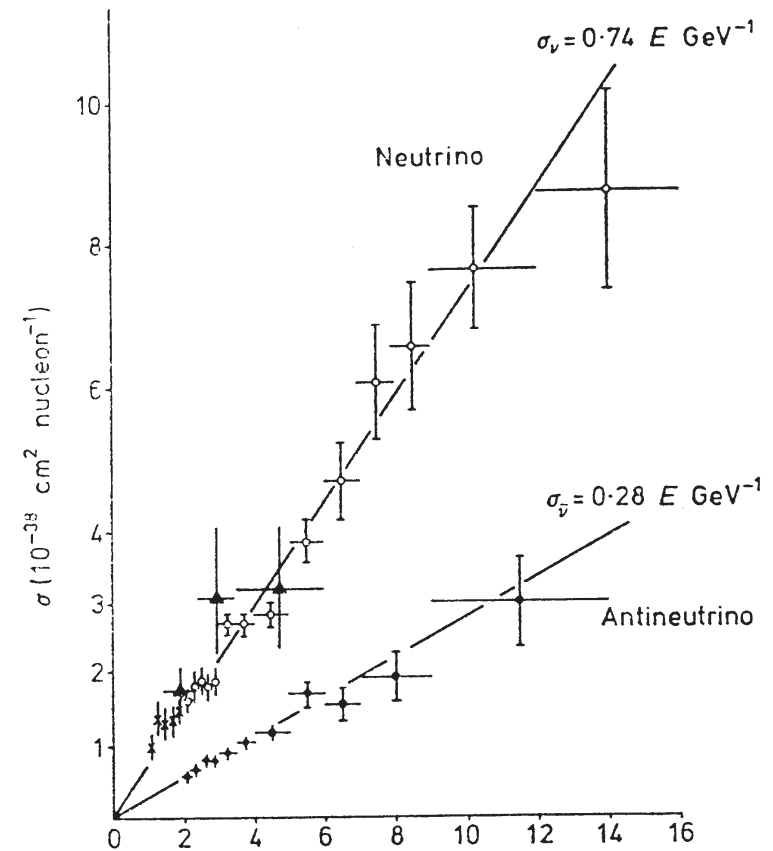
$$\sigma_{\nu N} \sim 10^{-43} \text{ cm}^2 = 10^{-19} \text{ b}$$

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...**

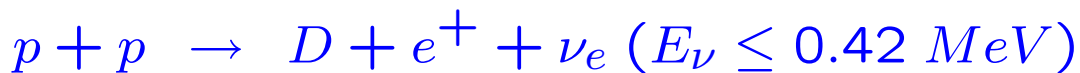


# Neutrina słoneczne

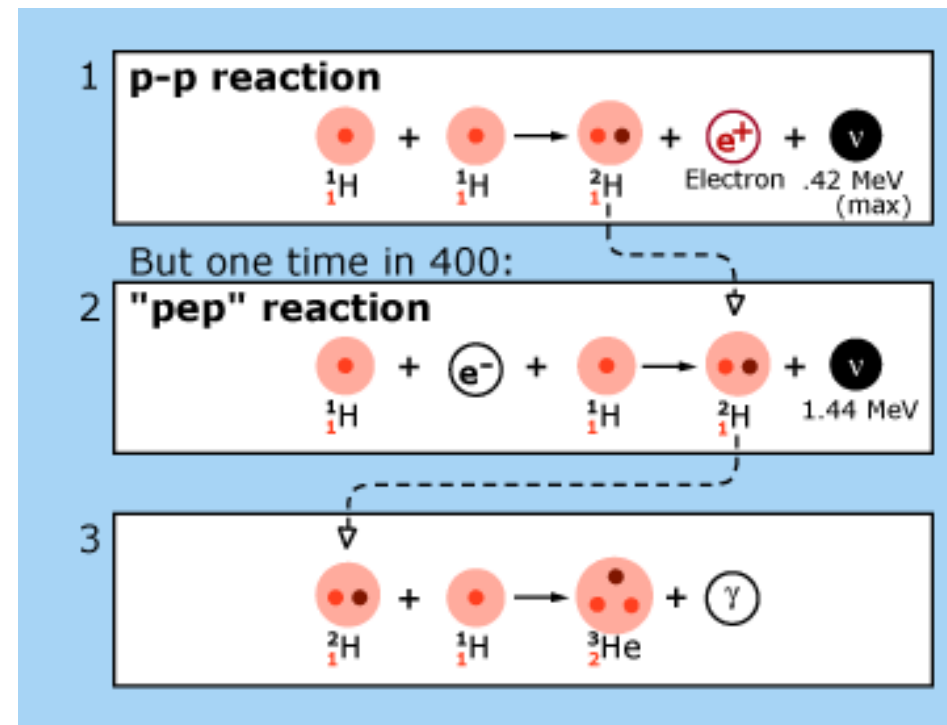
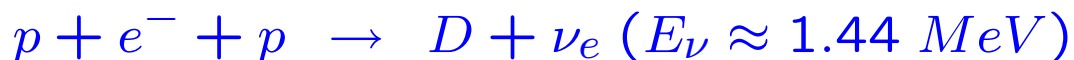
## Produkcja neutrin

**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

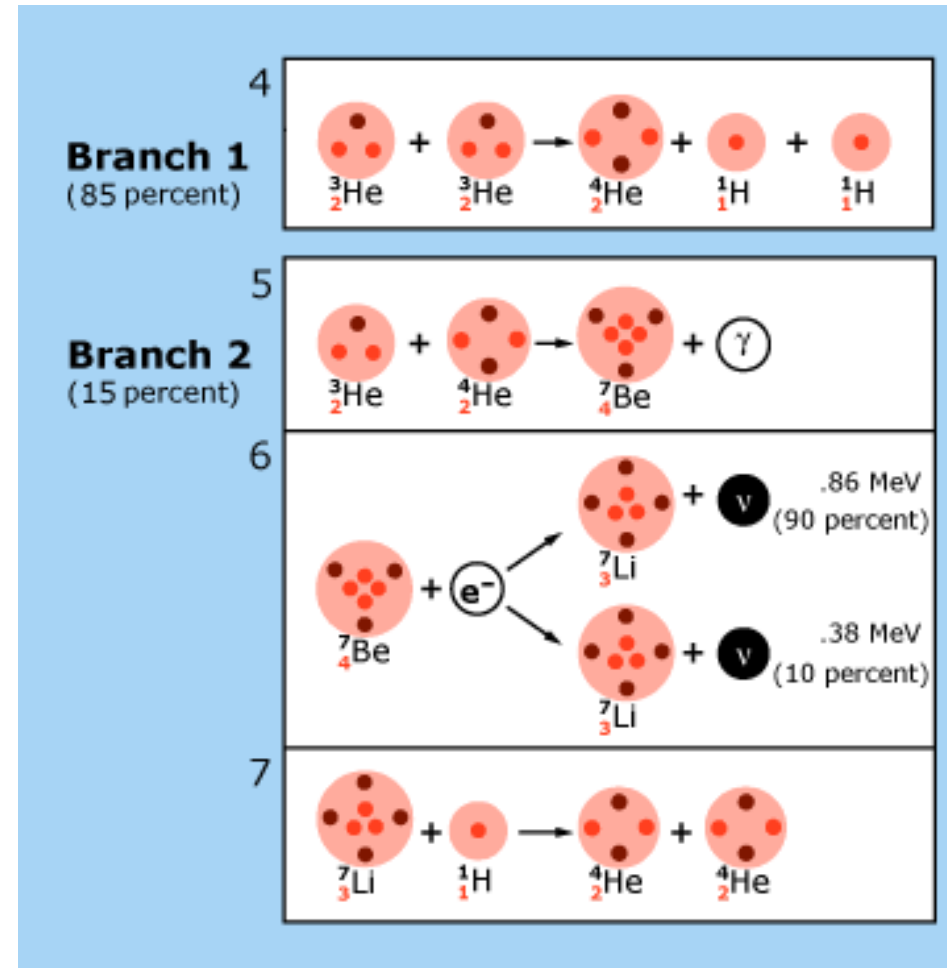
## Produkcja neutrin

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

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



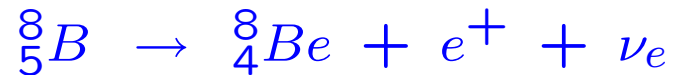
mają jednak energie **poniżej 1 MeV**



# Neutrina słoneczne

## Produkcja neutrin

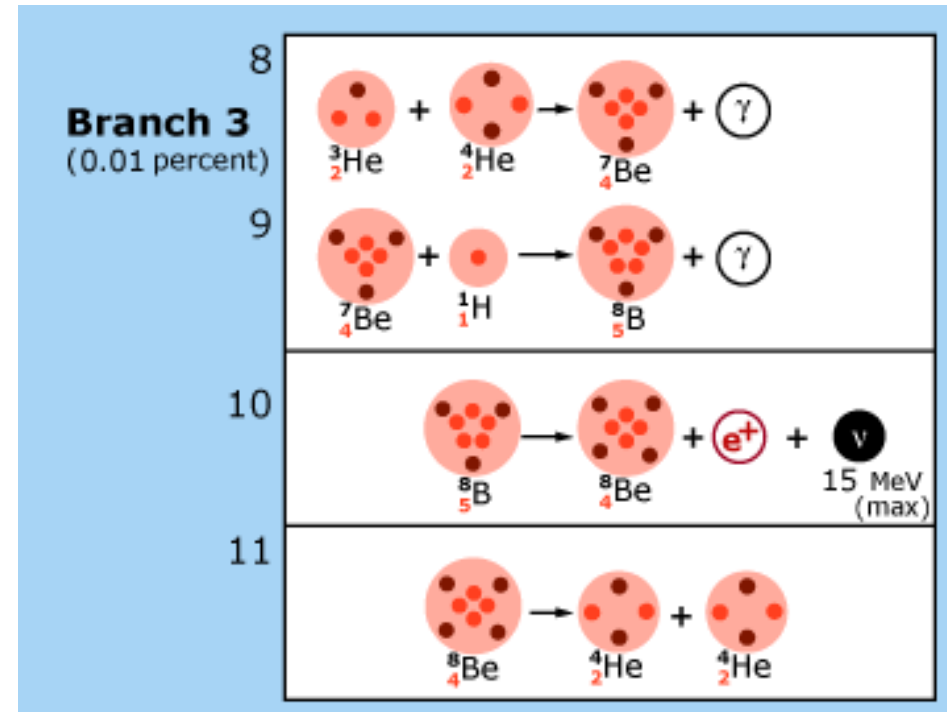
Źródłem wysokoenergetycznych neutrin jest przemiana  ${}^8B$



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**:

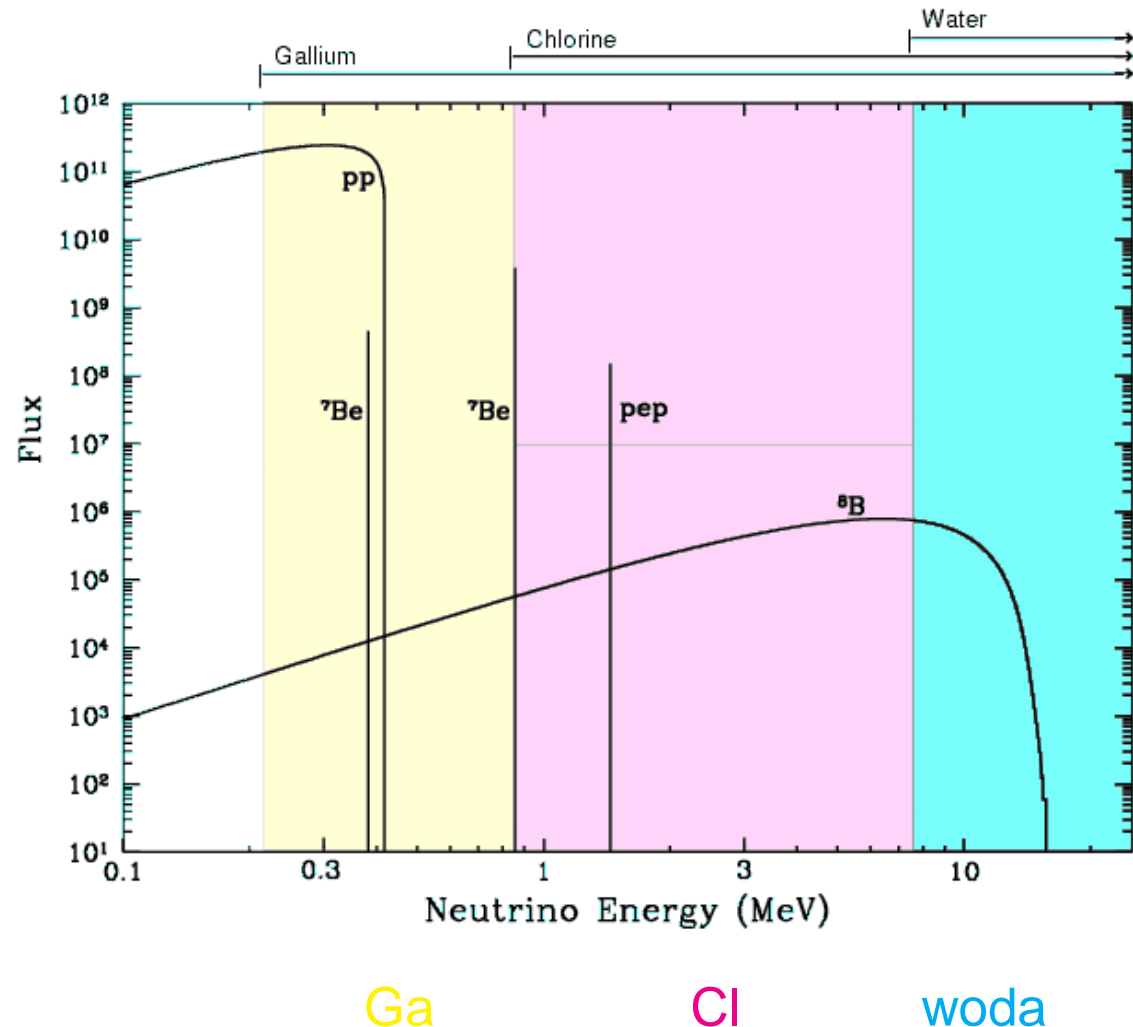


(eksperyment Homestake)



(SAGE, GALLEX, GNO)

**Tylko neutrino elektronowe !**



# Neutrino

## Eksperyment Super-Kamiokande

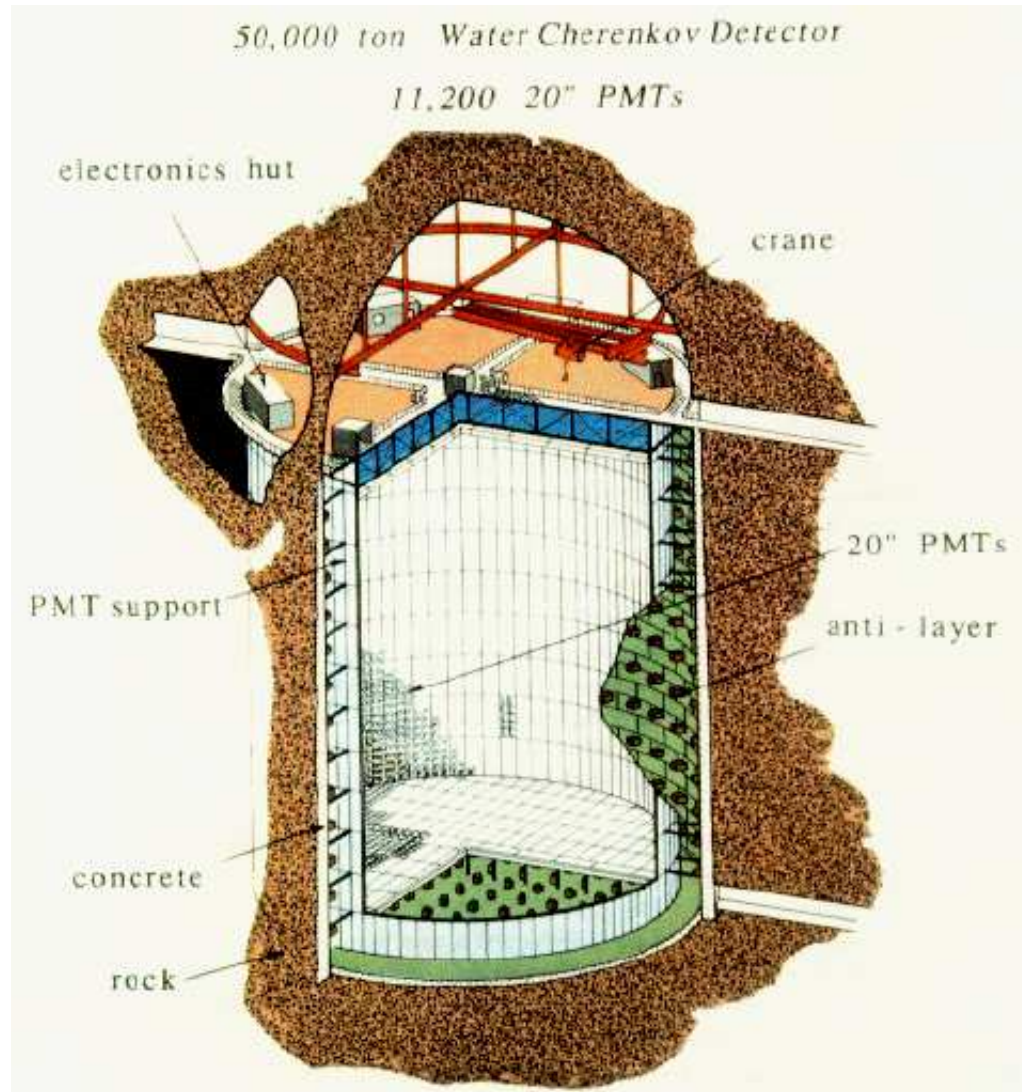
**Japonia**, w starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona **woda**

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

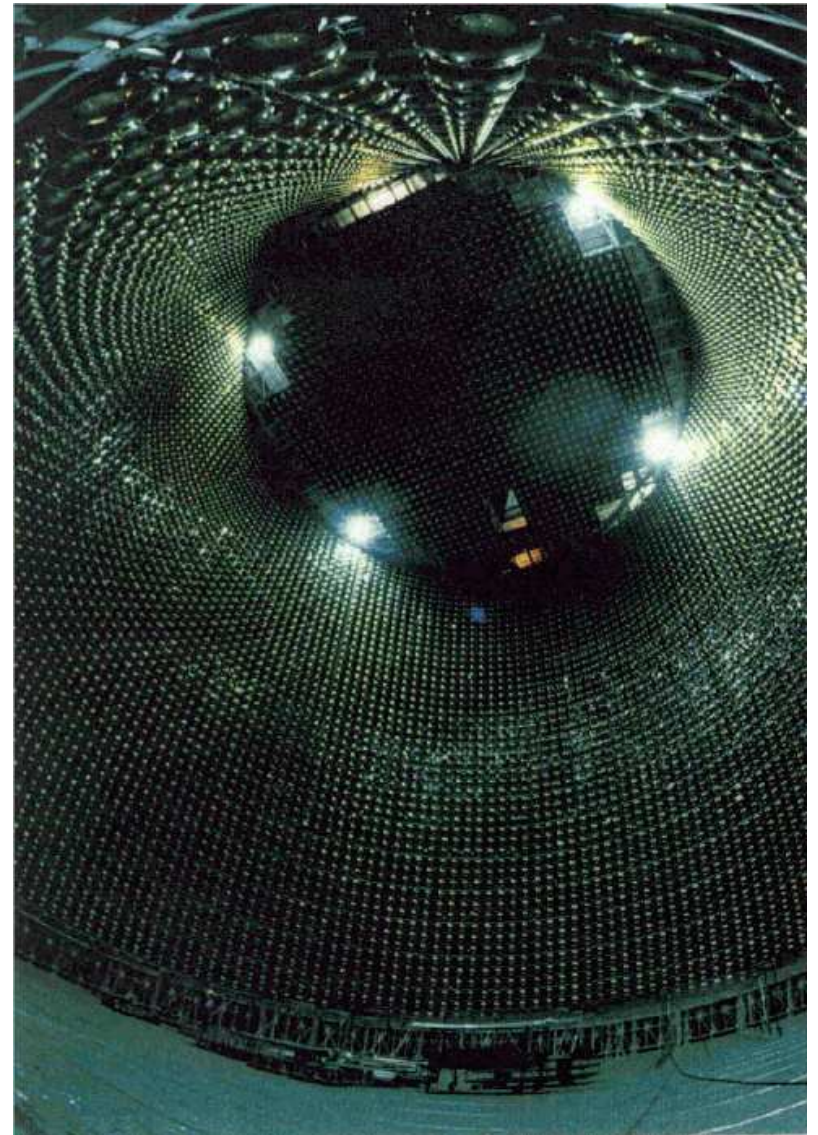
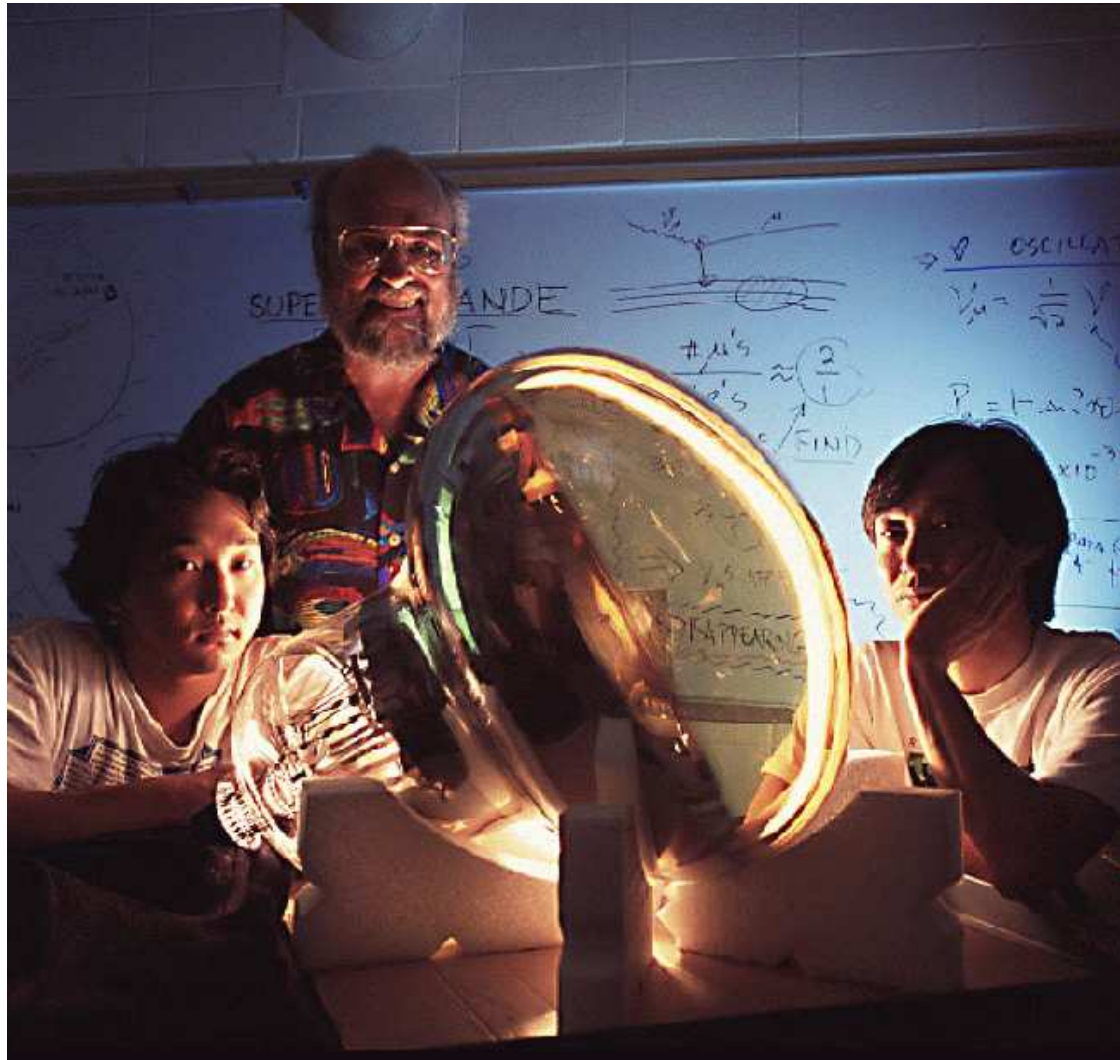
rejestrowane jest

**promieniowanie Czerenkowa**

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



# Super-Kamiokande





## Napełnianie



# 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

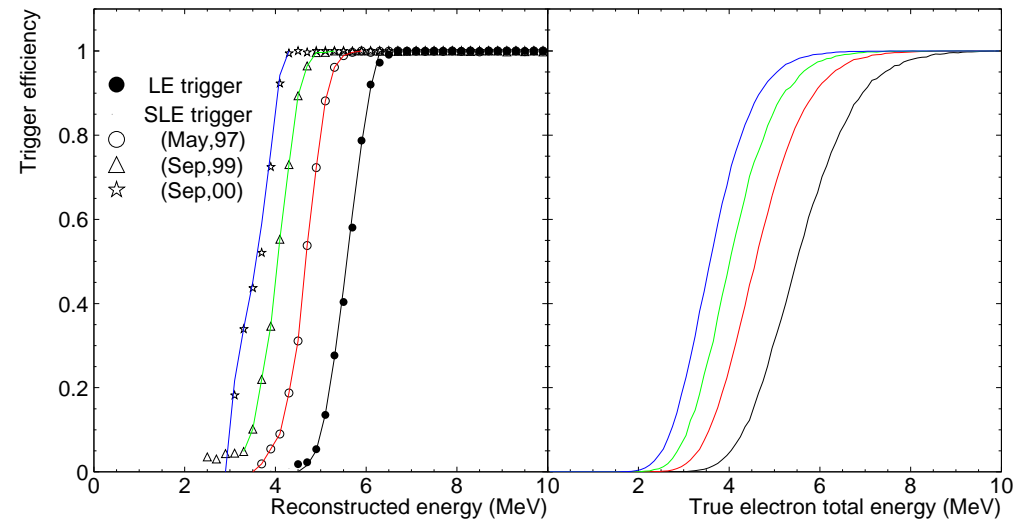
Średni poziom sygnału z pojedynczego fotopowielacza: 3.5 kHz.

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 obniżany w miarę oczyszczania detektora.

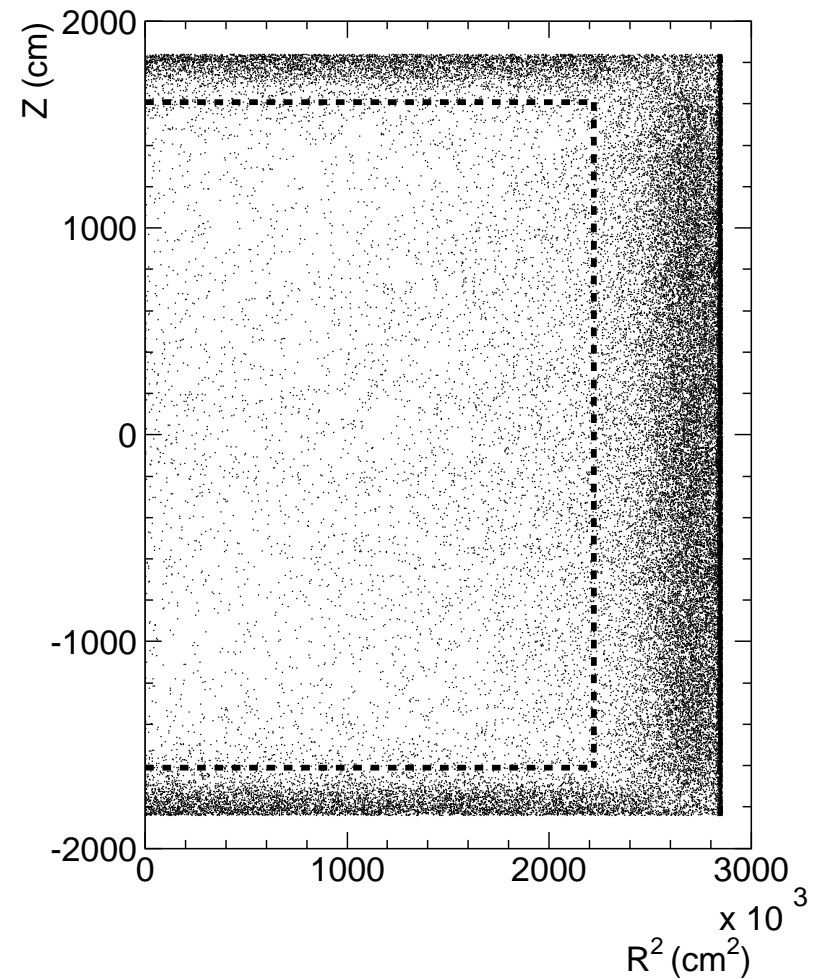
# Super-Kamiokande

## 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

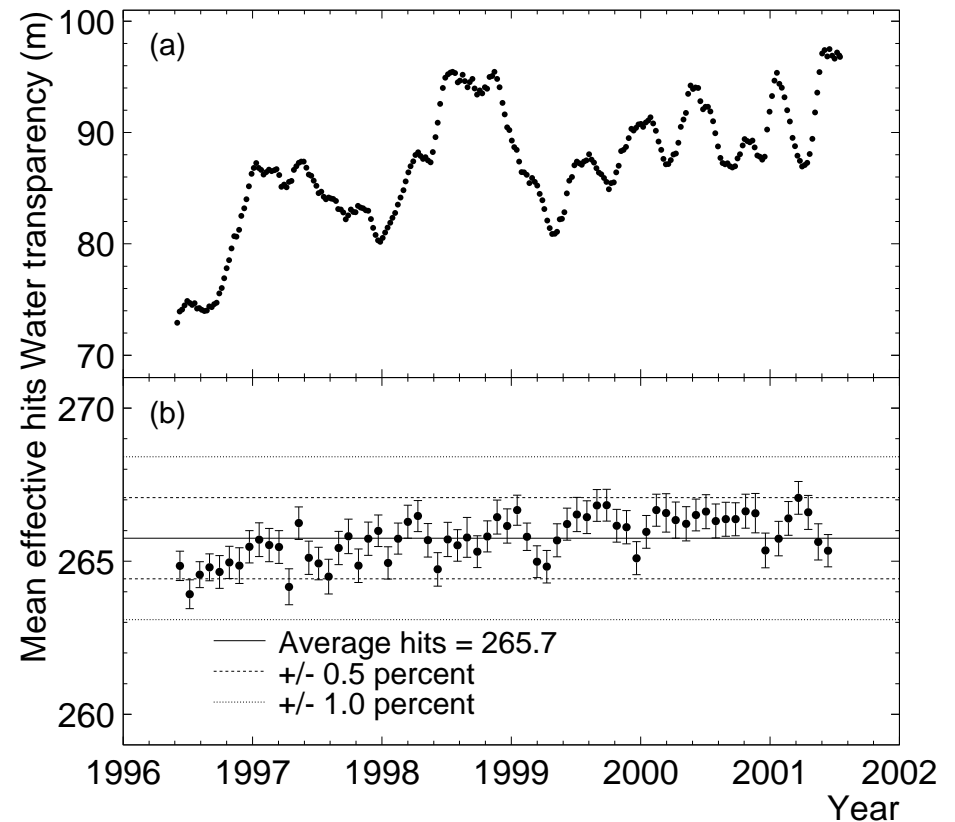
## Kalibracja

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

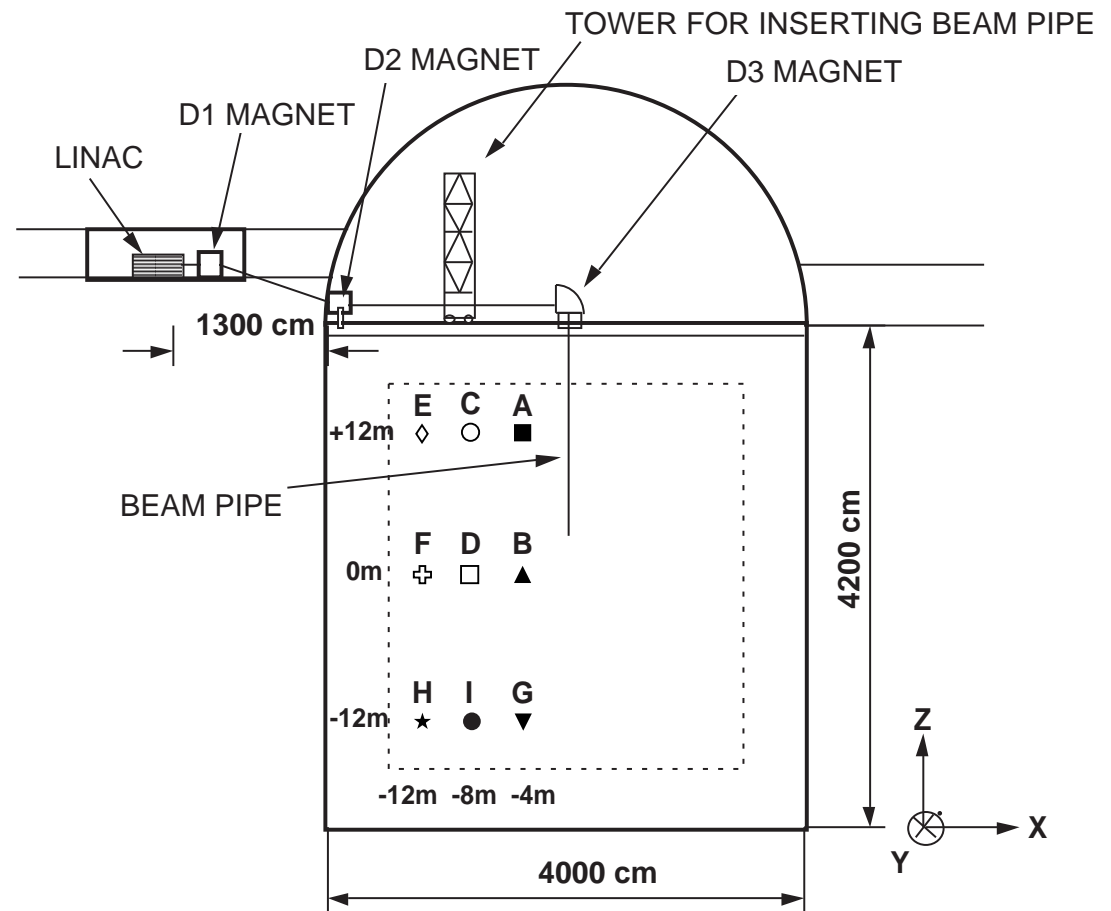
## Kalibracja

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

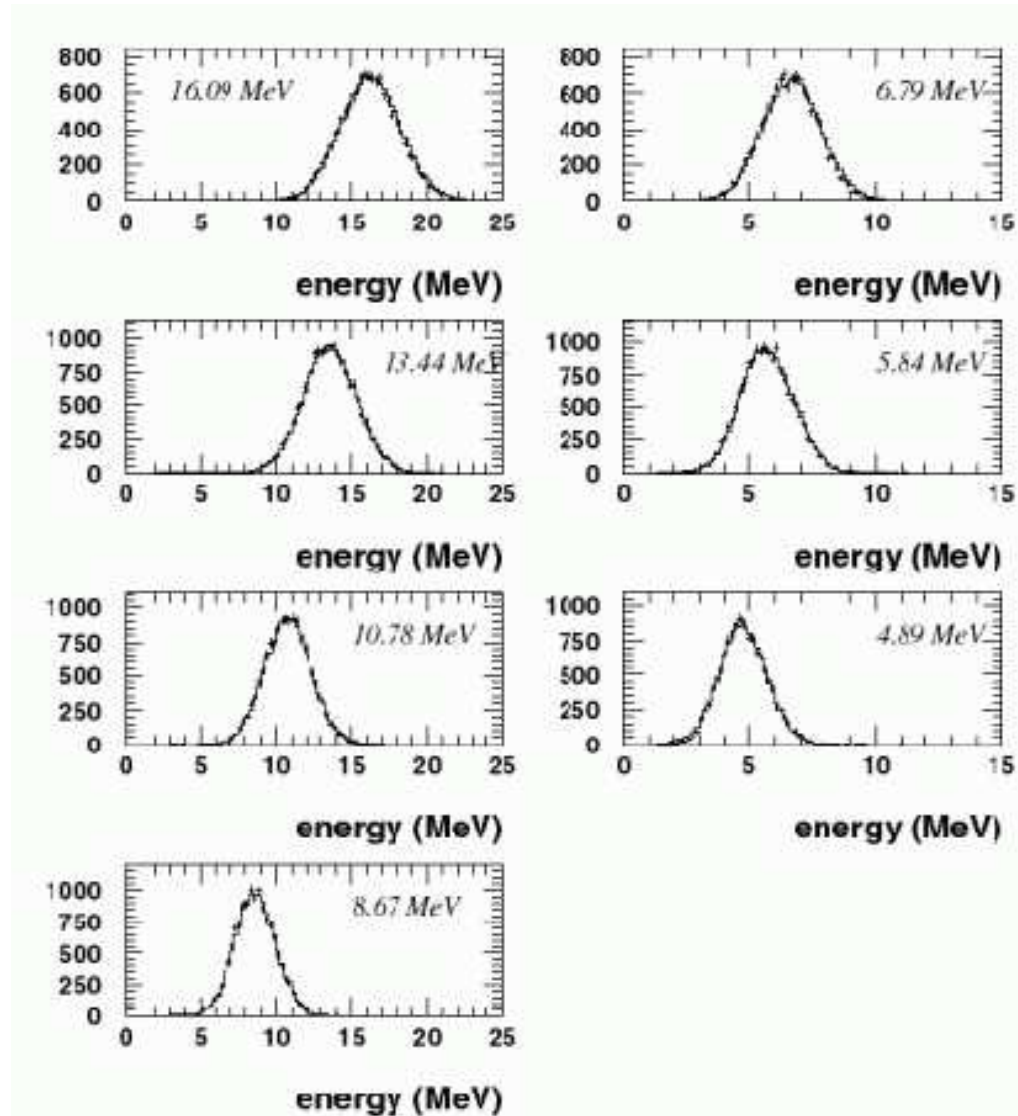
Wyniki kalibracji przy pomocy akceleratora

Rozdzielczość energetyczna

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

Tłumacząc to na parametry kalorymetru

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

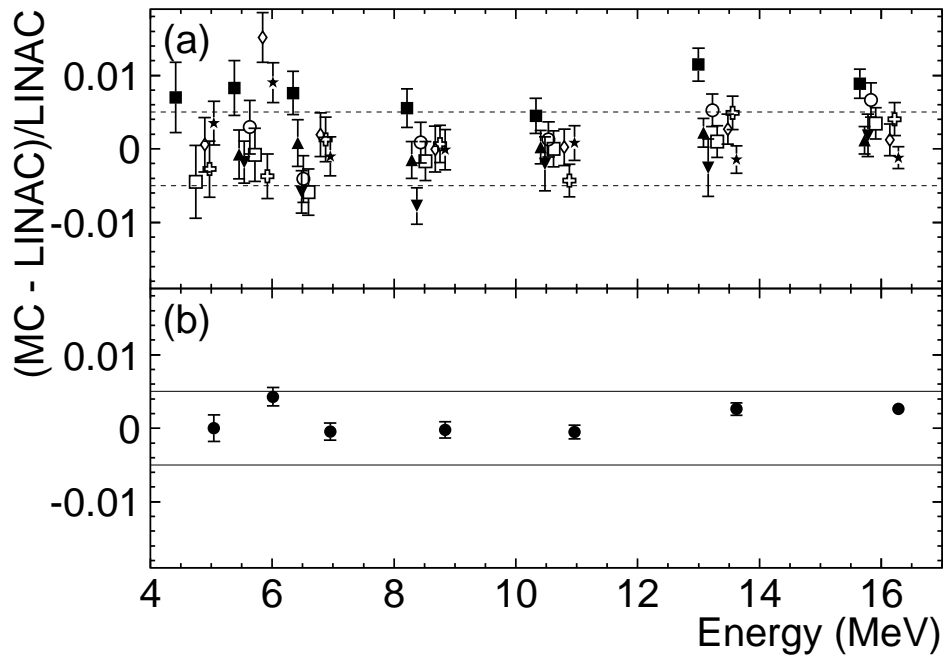


# Super-Kamiokande

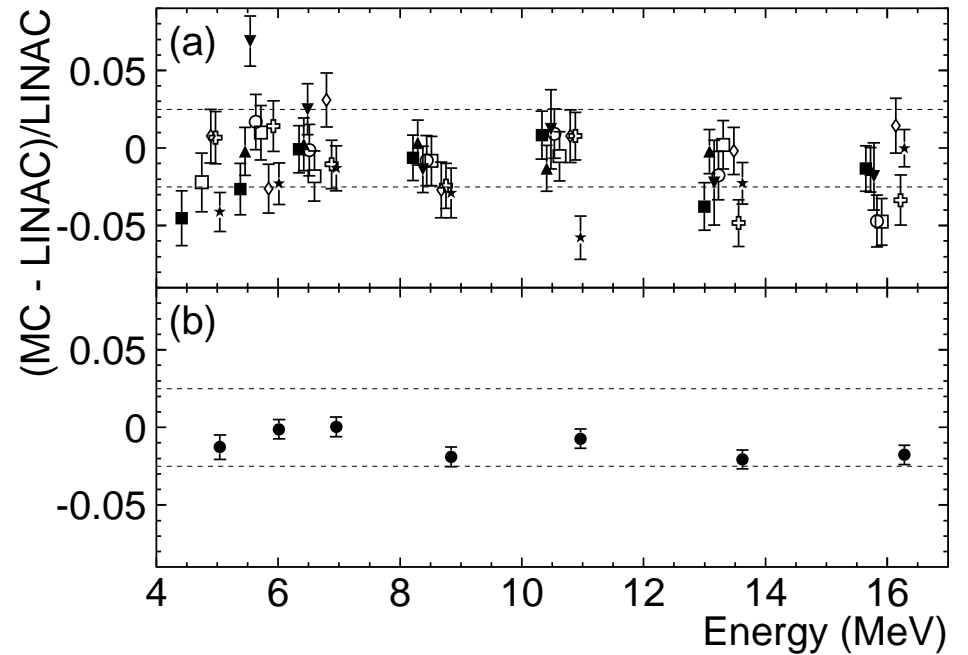
## Kalibracja

Wyniki kalibracji przy pomocy akceleratora

Skala energii



Rozdzielczość



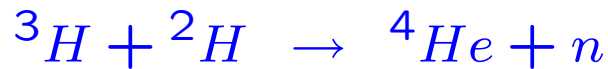


# Super-Kamiokande

## Kalibracja

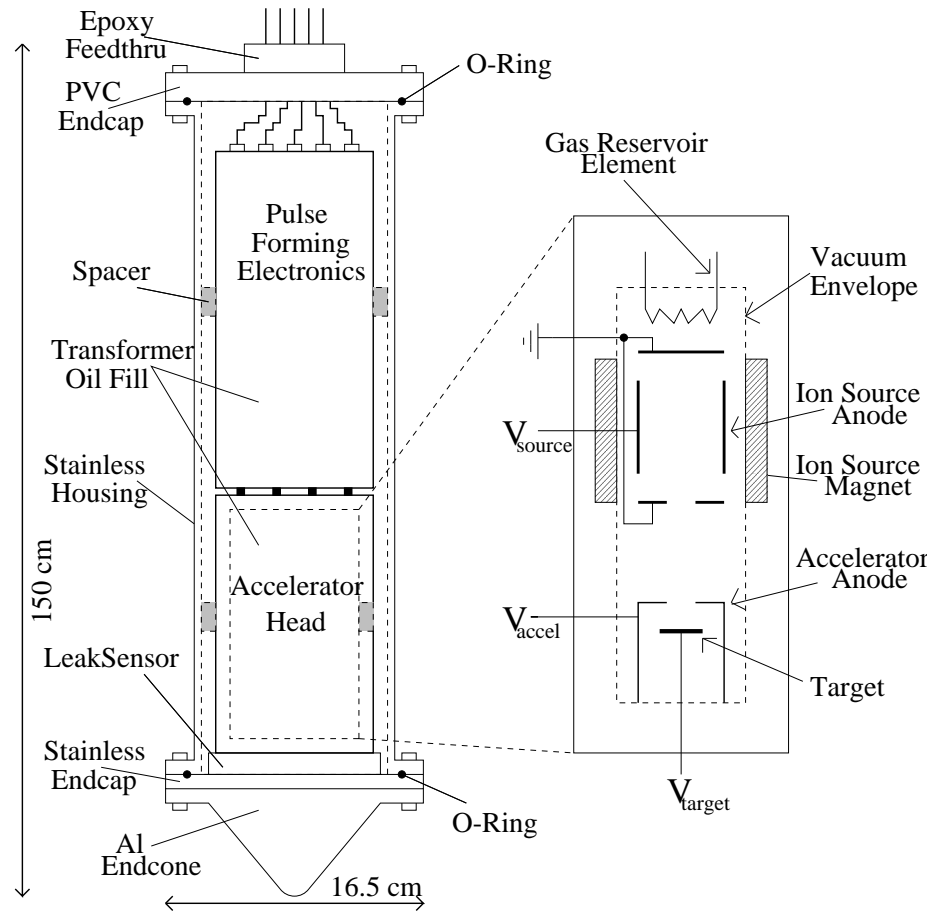
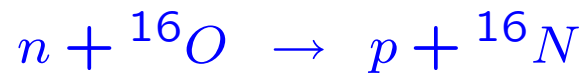
Wada akceleratora: tylko wybrane pozycje i jeden kierunek wiązki (pionowy).

Drugie narzędzie: "generator DT" - źródło neutronów.



Izotropowy strumień neutronów 14.2 MeV.

W oddziaływaniu z tlenem (w wodzie):

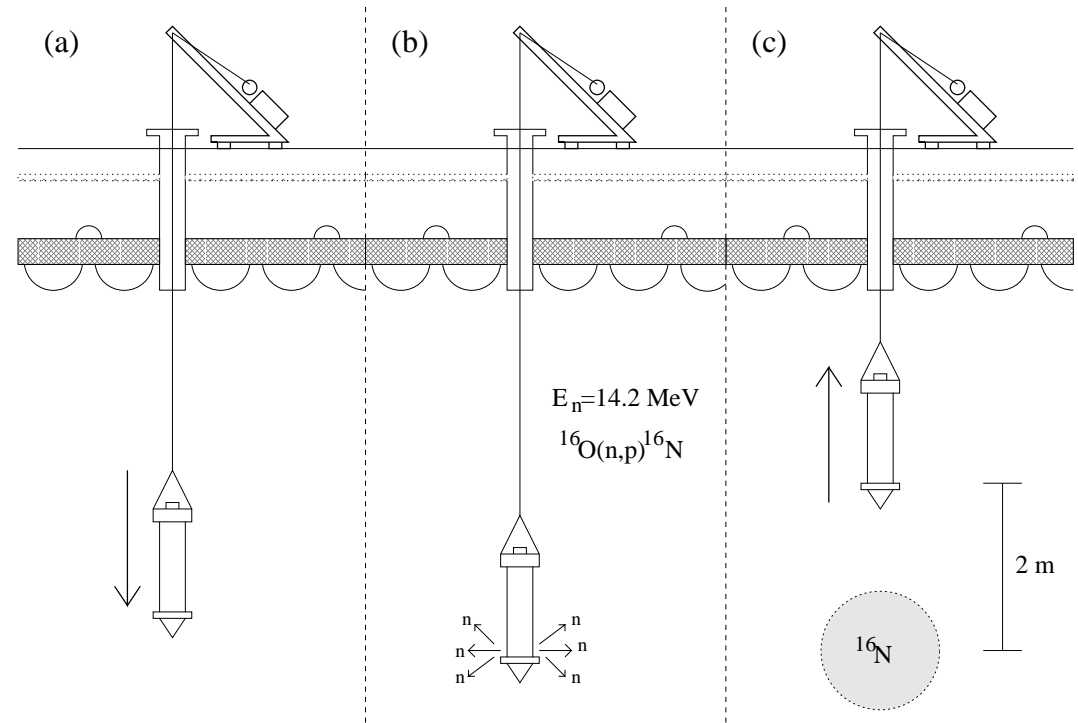
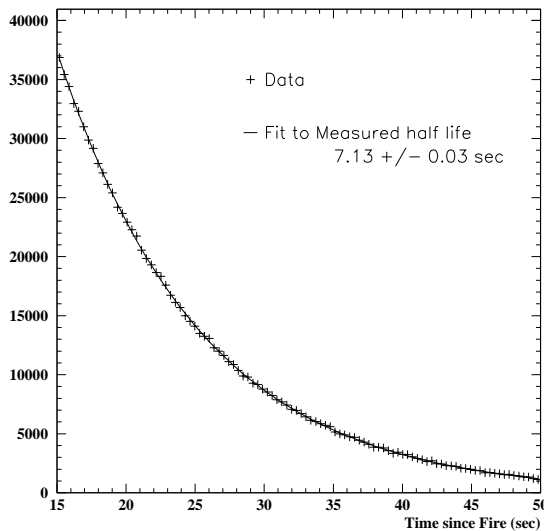


# Super-Kamiokande

## 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”

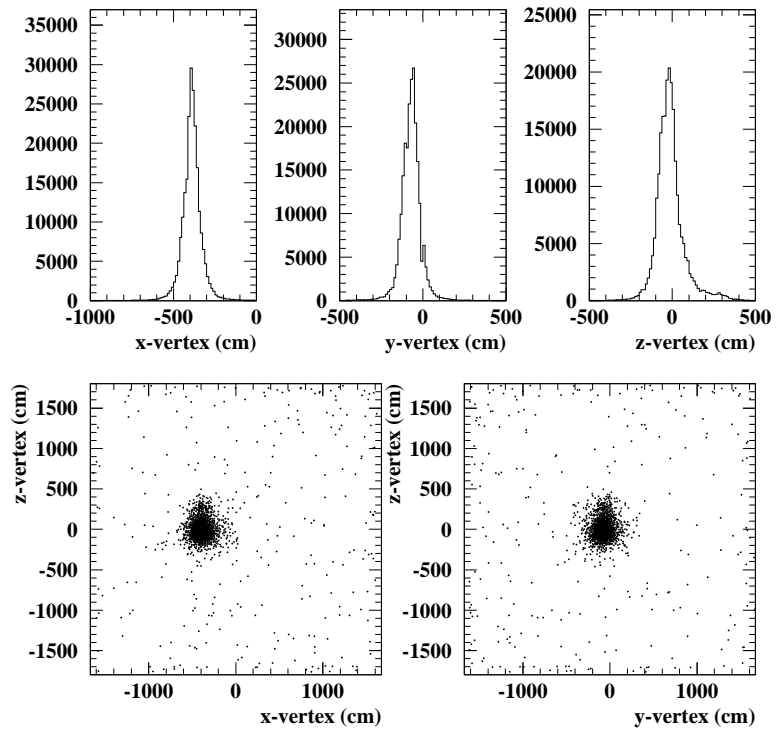
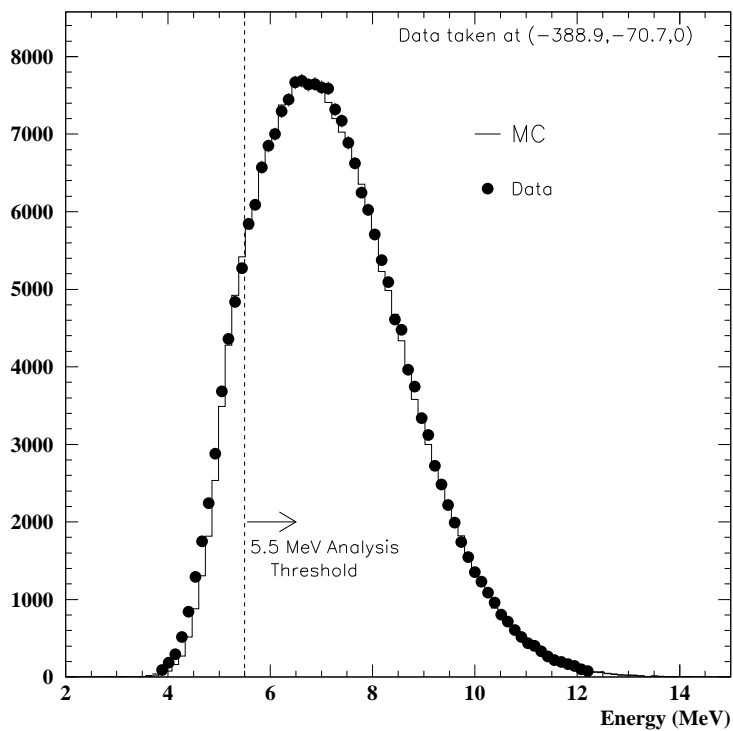
# Super-Kamiokande

## Kalibracja

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

Energii

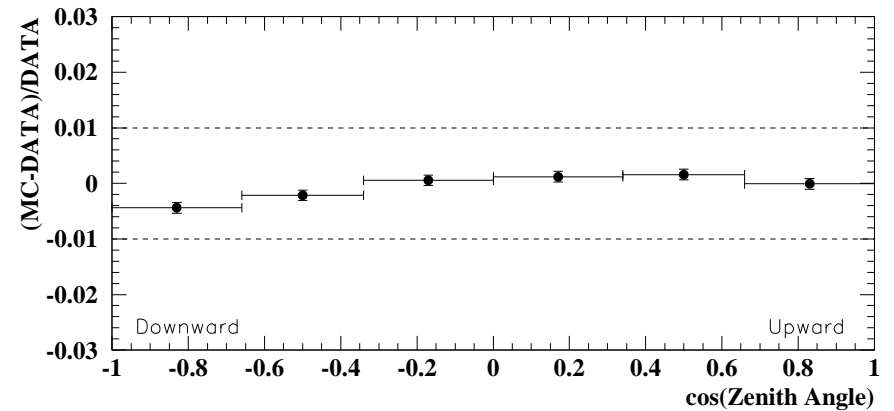
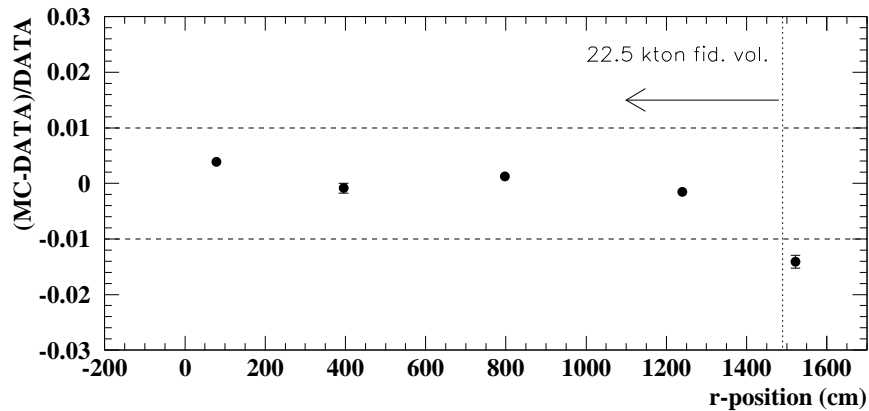
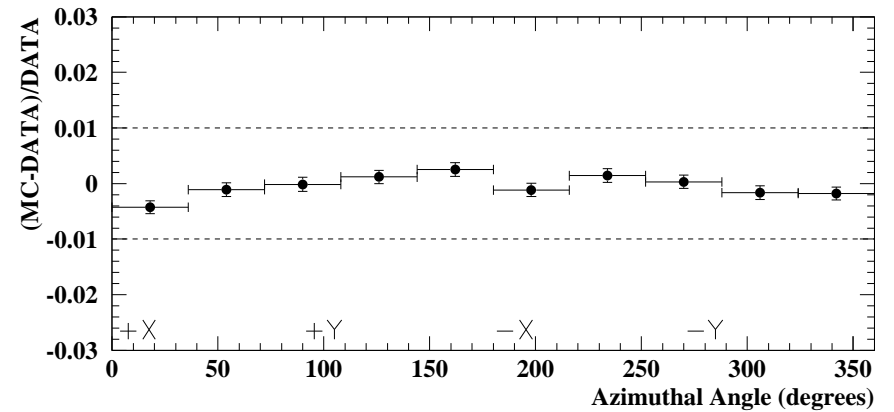
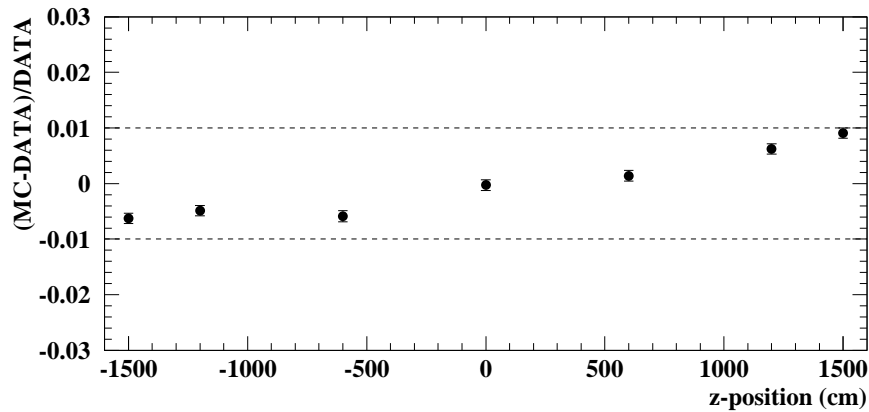
Położenia wierzchołka



# Super-Kamiokande

## Kalibracja

Skala energii nie zależna od pozycji i kąta emisji elektronu



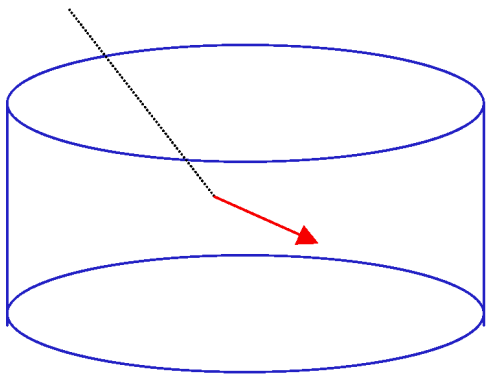
# Super-Kamiokande

## Klasyfikacja przypadków

Przypadki które rozpoznajemy jako **oddziaływania neutrin**:

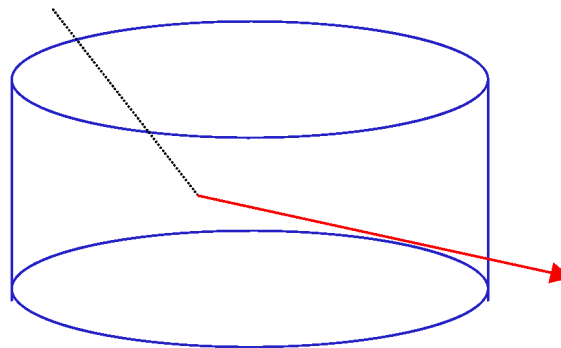
### FC: Fully Contained

Elektron lub niskoenergetyczny mion **wyprodukowany** w detektorze **zatrzymuje się** w nim



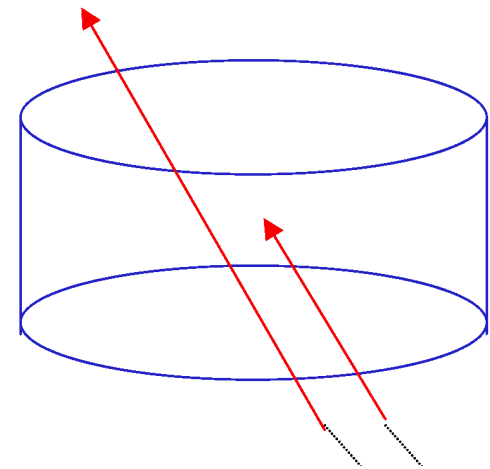
### PC: Partially Contained

Wysokoenergetyczny mion **wyprodukowany** w środku **ucieka** z detektora



### Upward

Miony **wpadające** do detektora **od dołu**

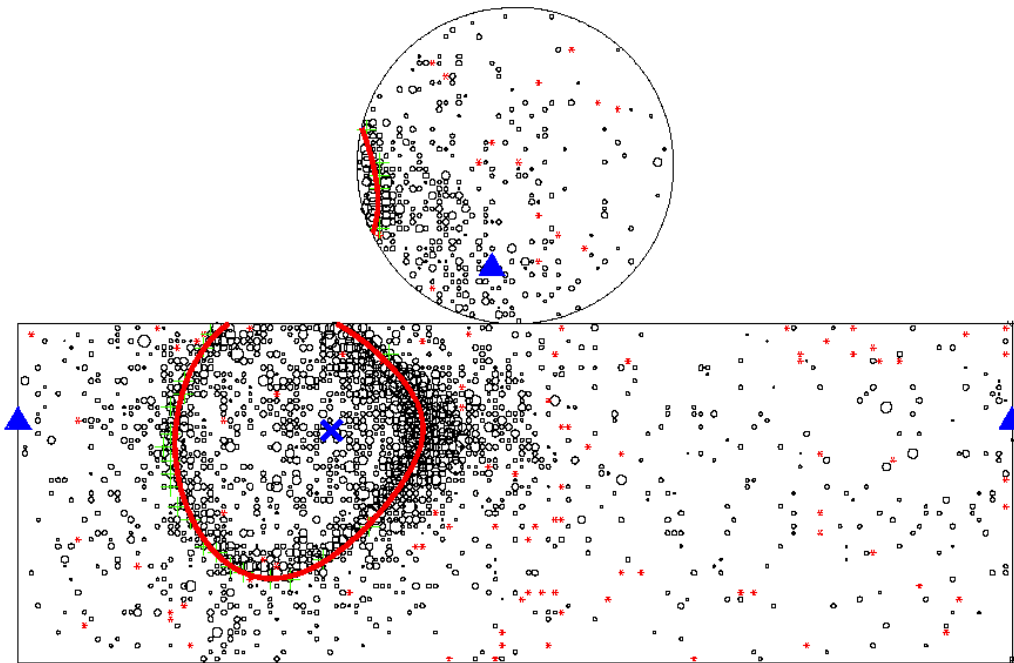


# Super-Kamiokande

## Neutrino elektronowe

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

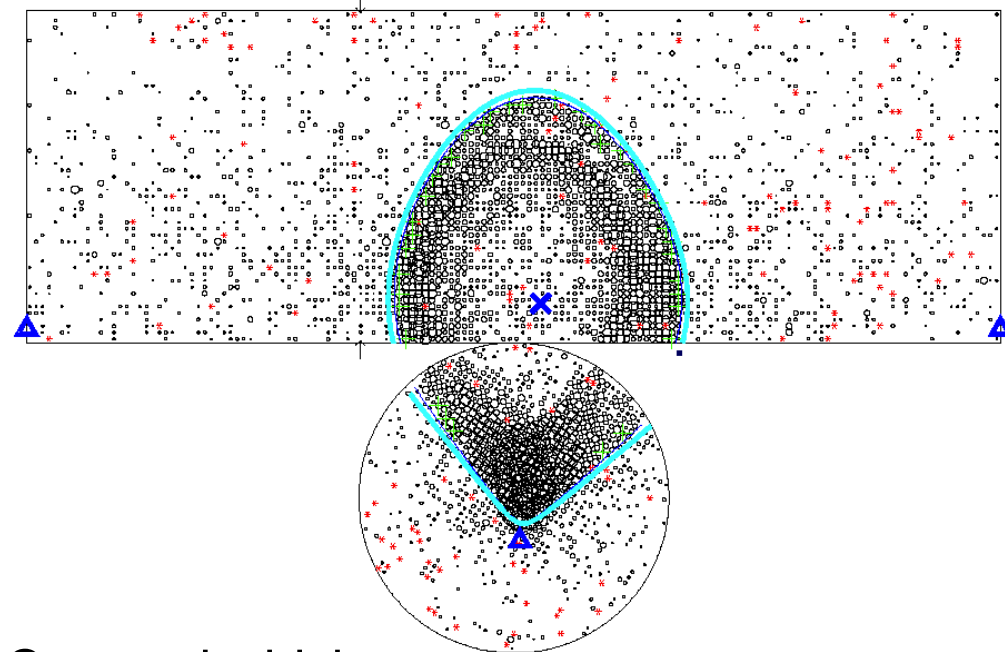
Krótki zasięg elektronu - “cienki” pierścień



## Neutrino mionowe

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

Długa droga w wodzie - “gruby” pierścień.

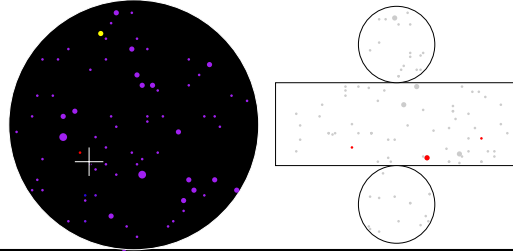


Czasami widzimy

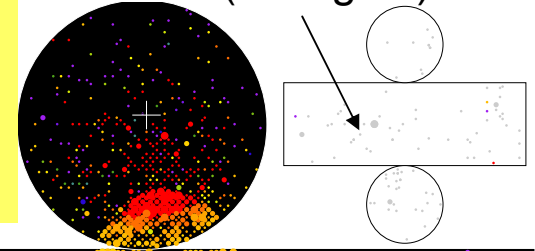
też opóźniony sygnał  $e^-$  z rozpadu  $\mu^-$ .

# Particle identification

Single Cherenkov ring **electron-like** event

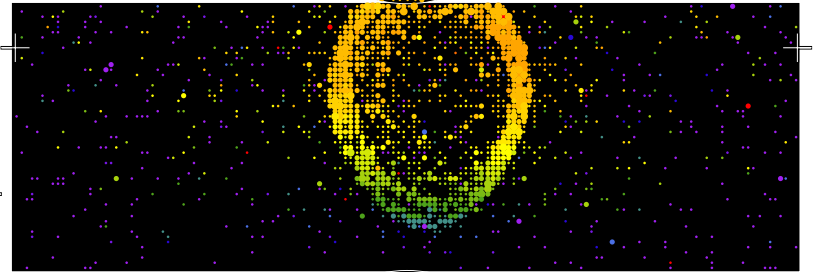
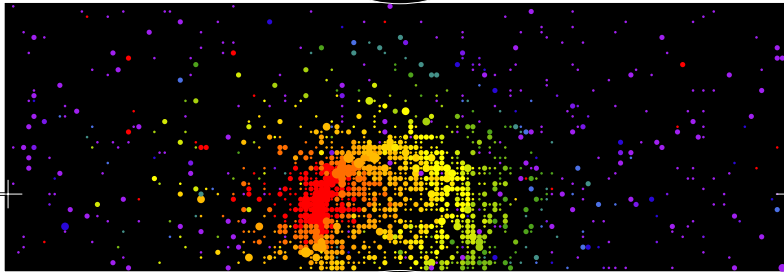


Single Cherenkov ring **muon-like** event



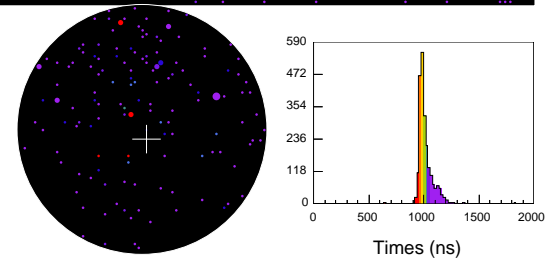
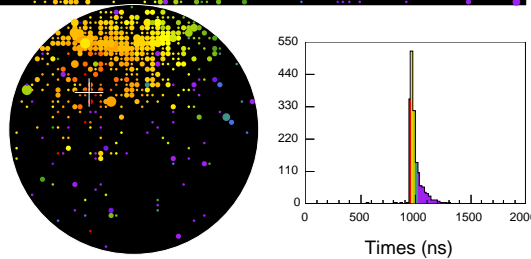
Time (ns)

- < 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

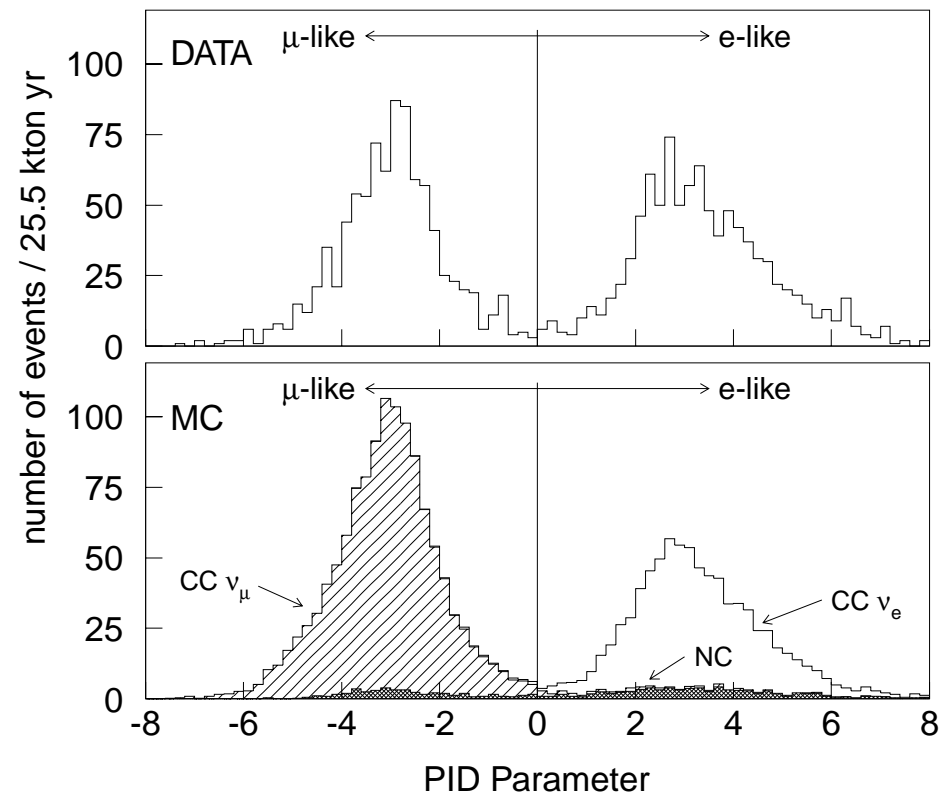
Size: pulse height



Particle ID

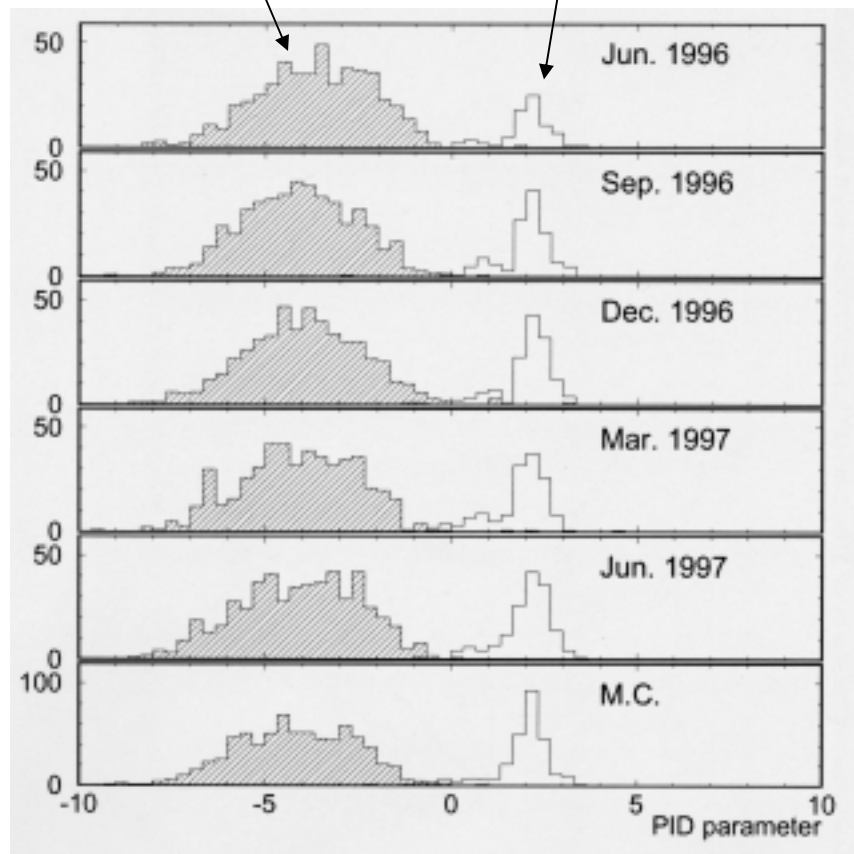
$$\log(L) = \sum_{\theta < 70 \text{ deg}} \left( \frac{p.e.(obs'd) - p.e._{e \text{ or } \mu}(\text{expected})}{\sigma_{p.e.}} \right)^2$$

# Particle ID results



=99%

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

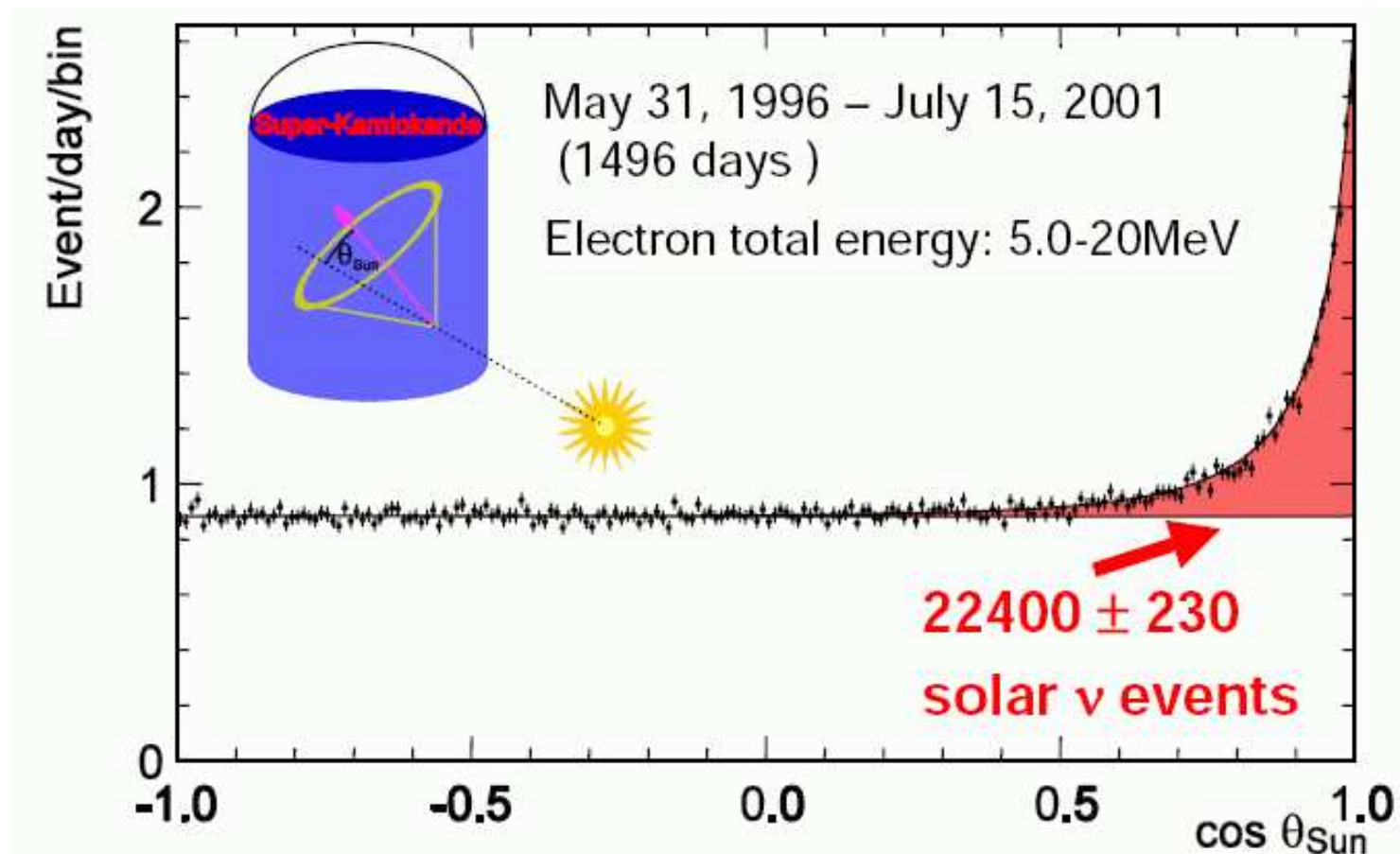




# Super-Kamiokande

## Obserwacja neutrin słonecznych

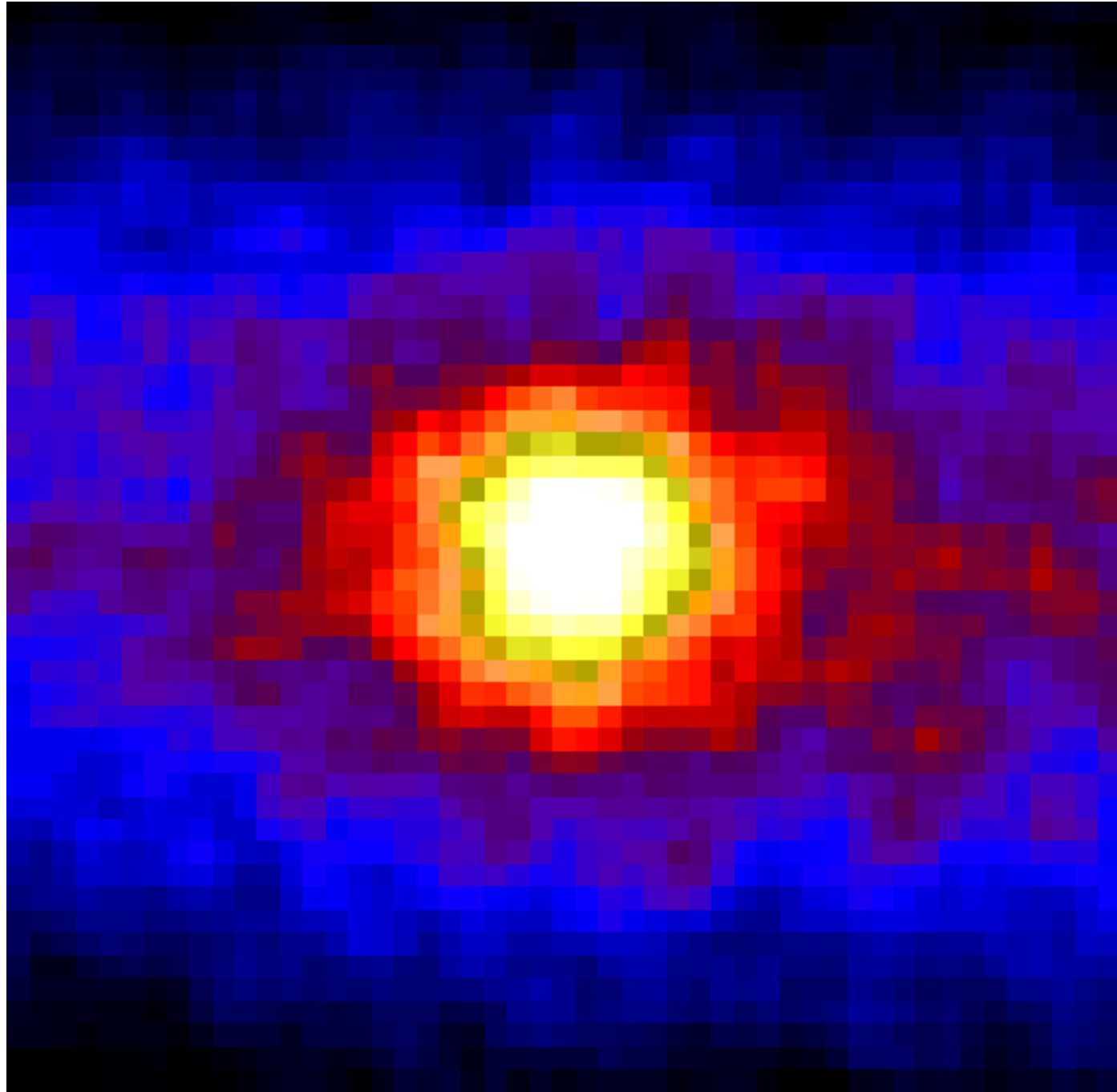
Oddziaływania **neutrin słonecznych** możemy odróżnić od oddziaływań neutrin atmosferycznych mierząc **kąt rozproszenia** elektronu względem **kierunku od słońca**:



## Super-Kamiokande

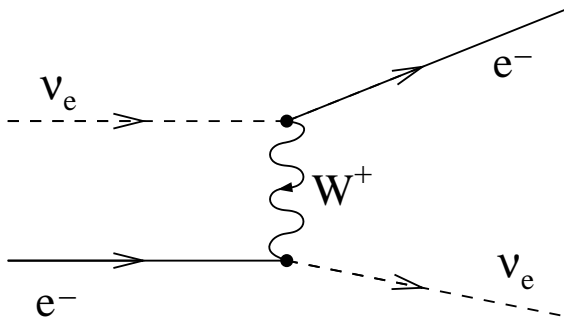
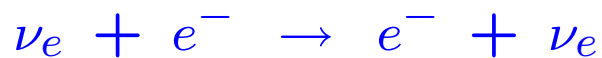
“Zdjęcie” Słońca  
w “świele” neutrin

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

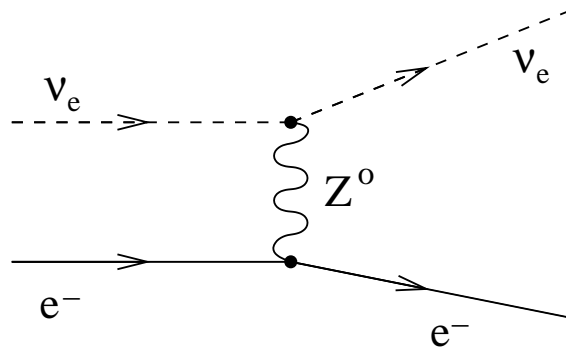
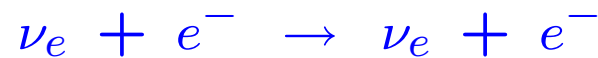


# Super-Kamiokande

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

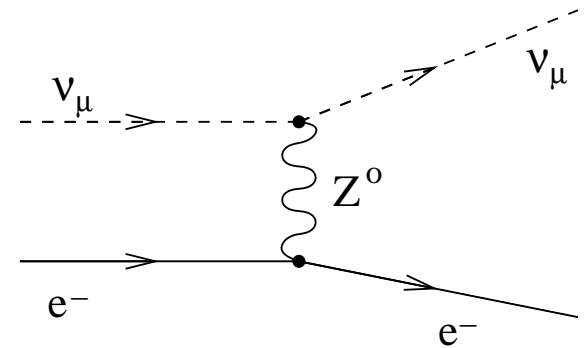
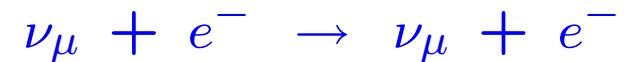


Możliwa jest też detekcja  $\nu_e$  poprzez proces typu **NC**:



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

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



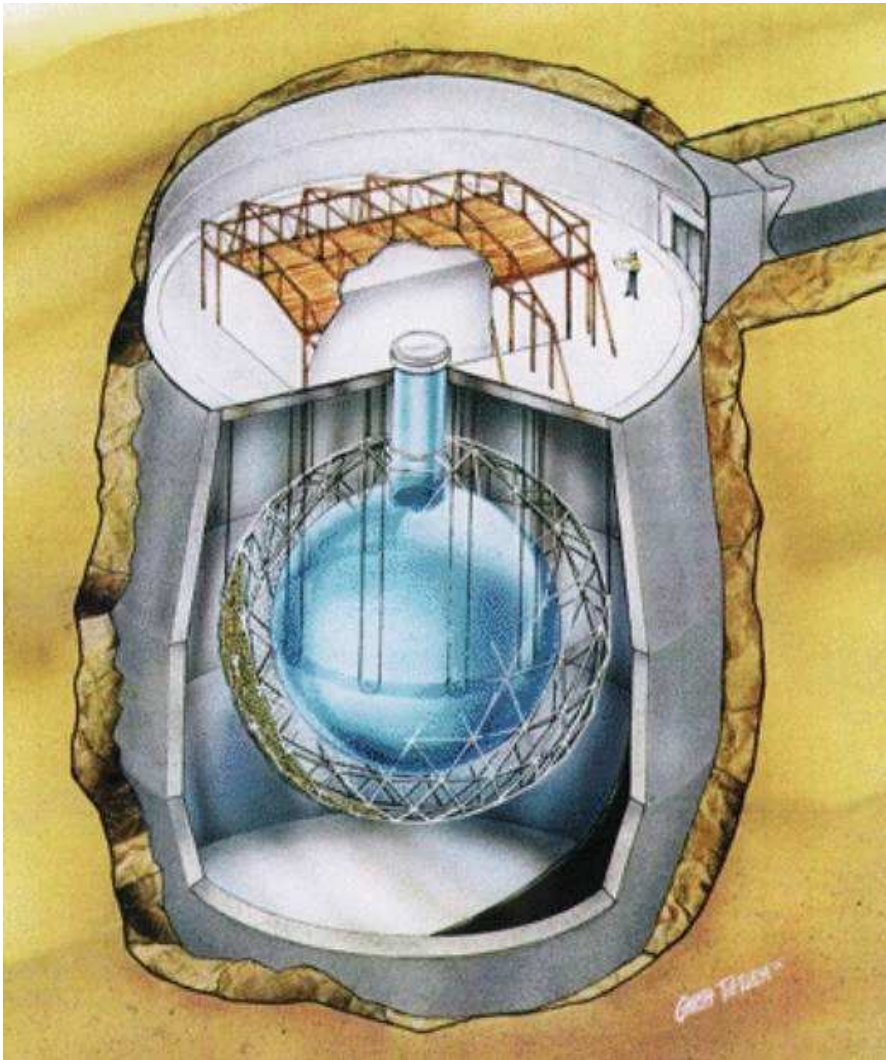
(także dla  $\nu_\tau$ )

Pomiar Super-Kamiokande:

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

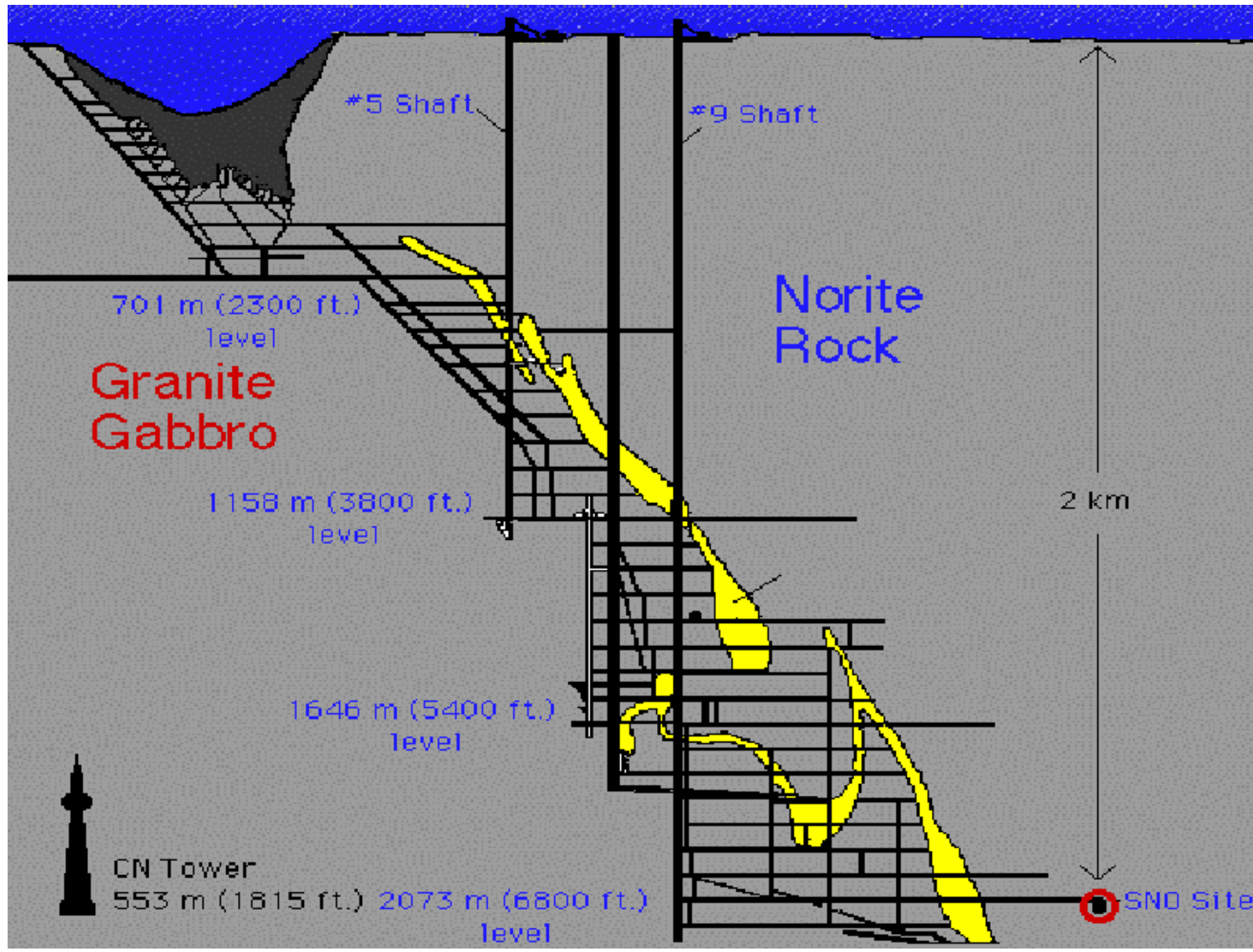
# SNO

## Eksperyment SNO (Sudbury Neutrino Observatory)



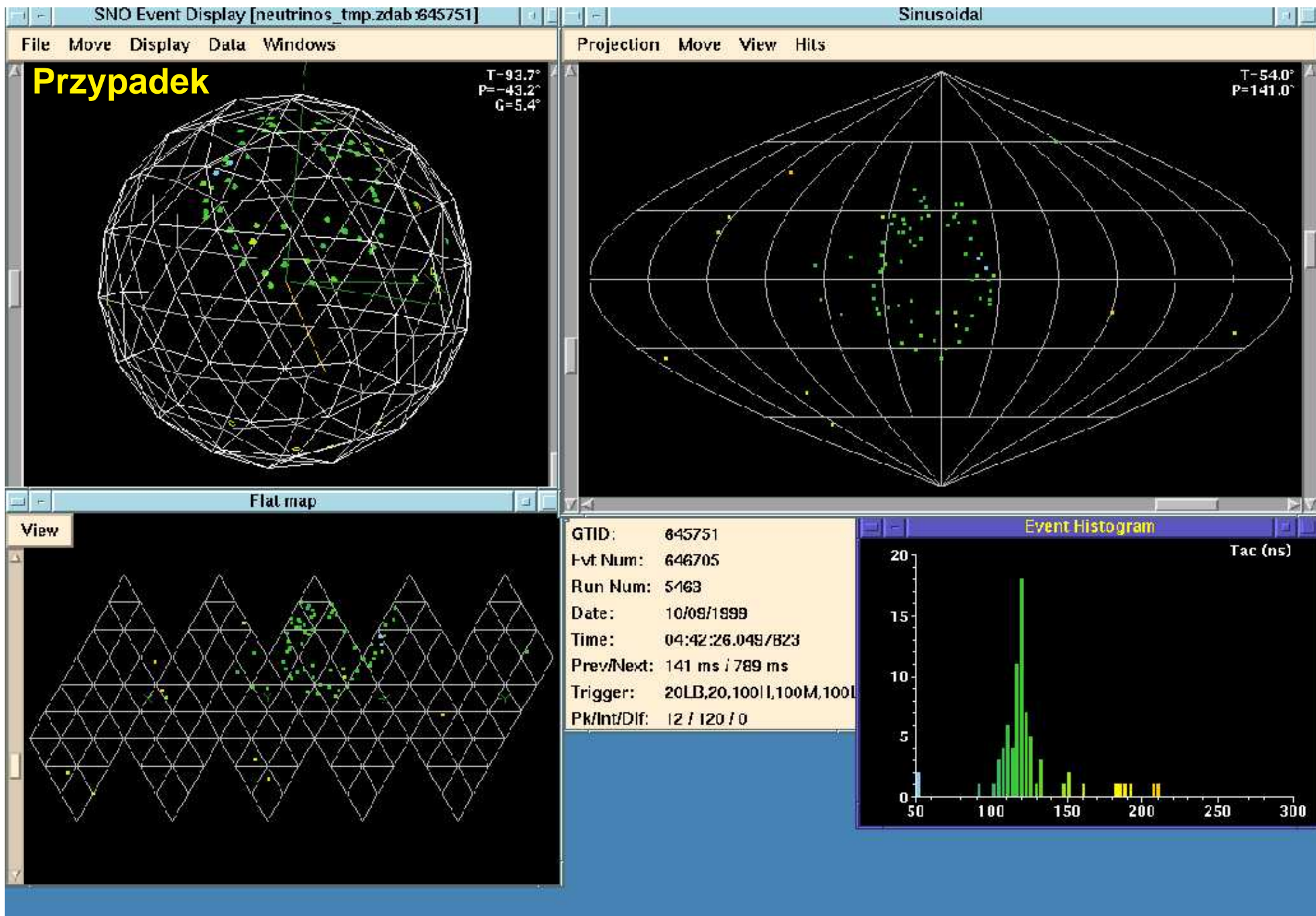
- ogromny zbiornik wypełniony 7000 t wody ( $H_2O$ )
- w środku kula wypełniona 1000 t **ciężkiej wody** ( $D_2O$ )
- promieniowanie Czerenkowa mierzone przez ok. 9500 fotopowielaczy.
- całość umieszczona na głębokości ponad 2000 m

# SNO



## Fotopowielacze





# SNO

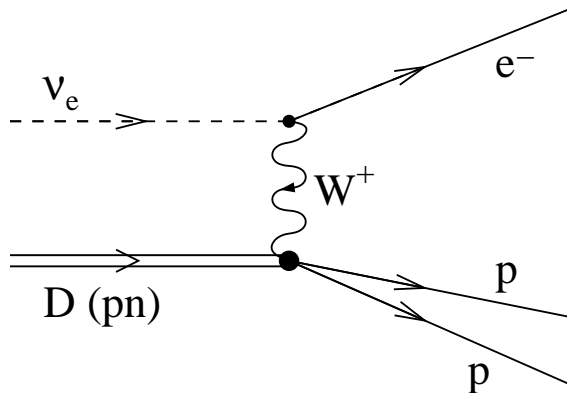
## Detekcja neutrin

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



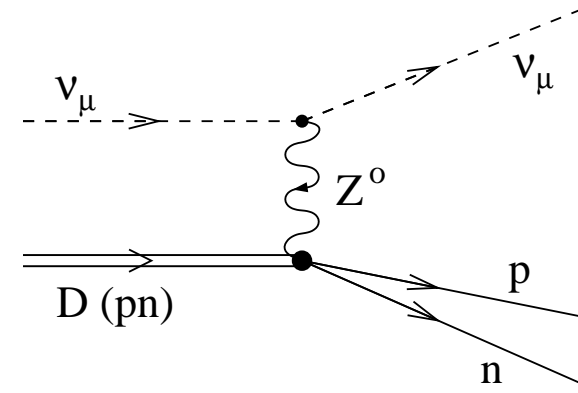
$$\sim \Phi_{\nu_e} + 0.154 \cdot (\Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau}) \Rightarrow \text{informacja o wszystkich typach neutrin}$$

Zastosowanie ciężkiej wody umożliwia dodatkowo pomiar rozpraszania na deuterze:



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

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



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

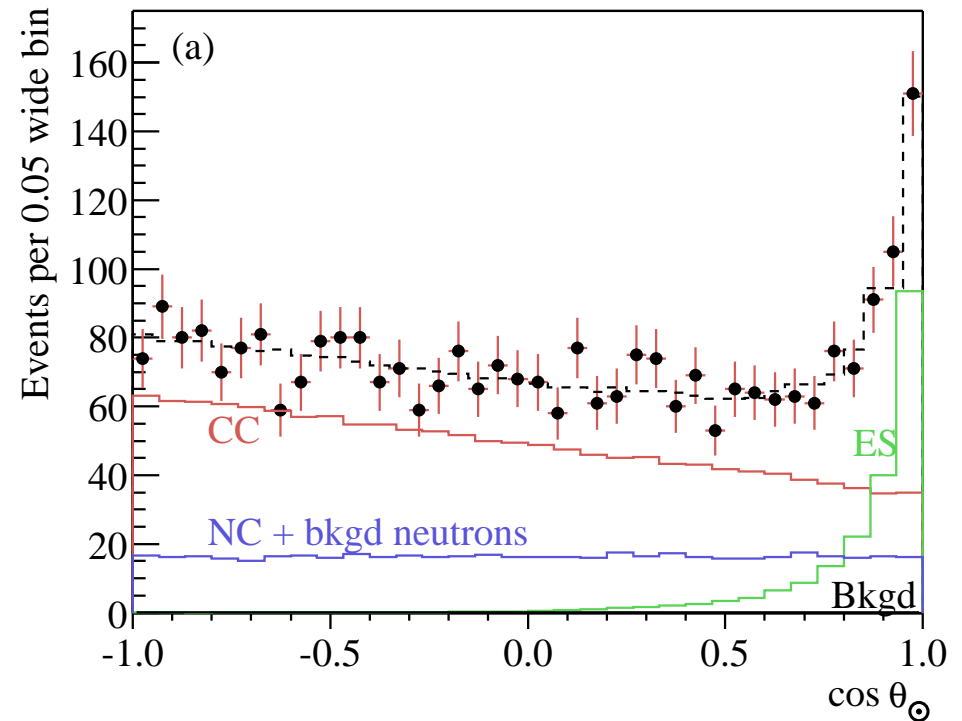
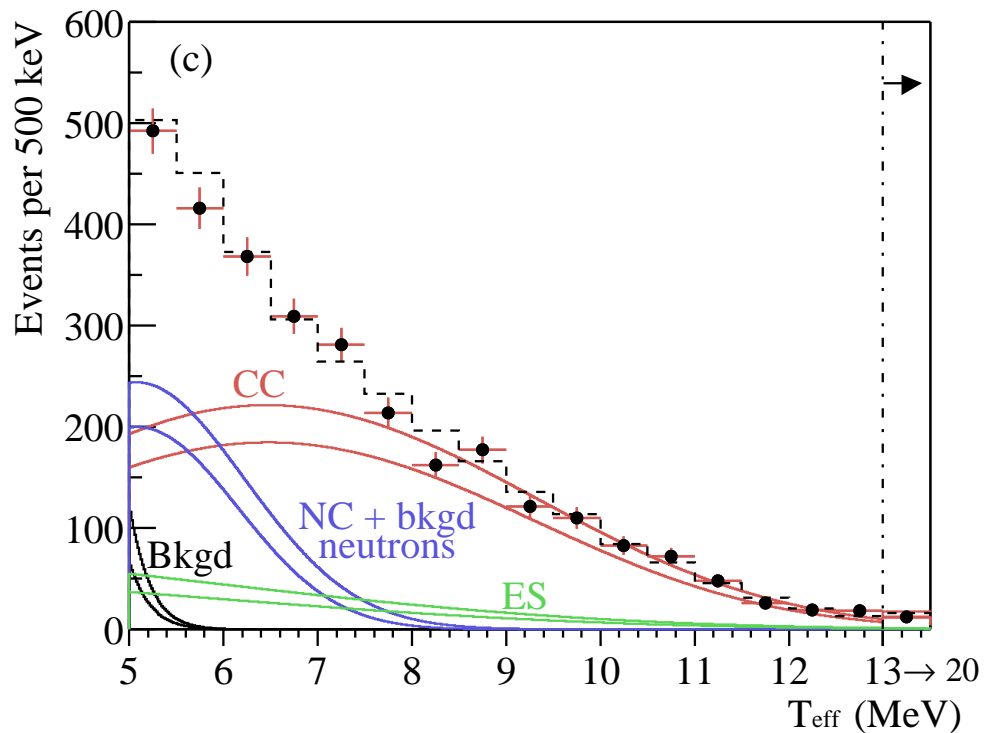
$\Rightarrow$  informacja o **wszystkich neutrinach**



# 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  $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ):

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

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

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

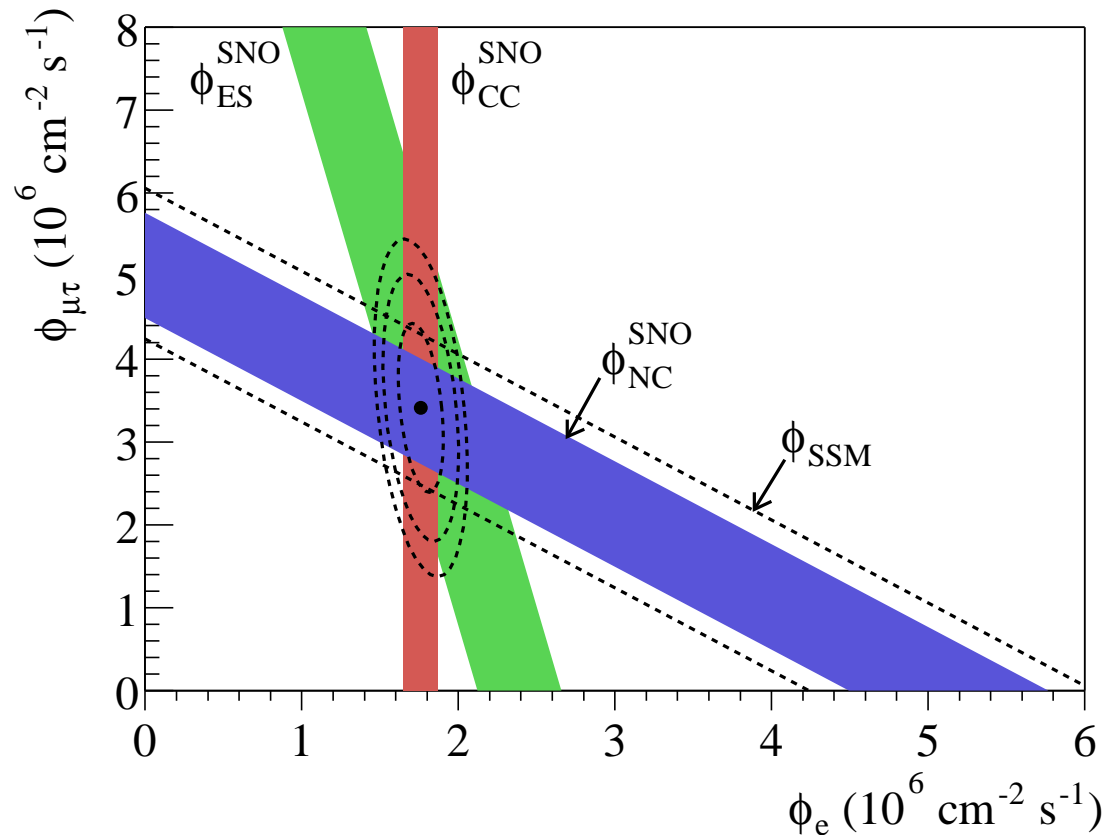
Przewidywania SSM

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

Dobra zgodność dla całkowitego strumienia neutrin.

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

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

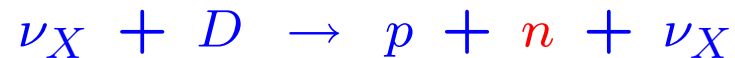


# SNO

## Pomiar procesów NC

Największy błąd statystyczny ma pomiar strumienia w procesie NC.

Identyfikacja tych przypadków wymaga pomiaru niskoenergetycznych neutronów:

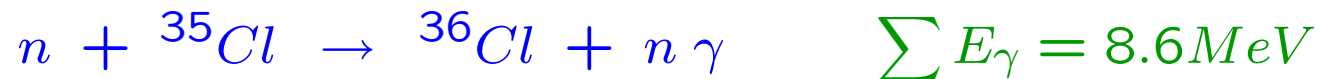


Eksperyment SNO próbował to zrobić na 3 sposoby:

- 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

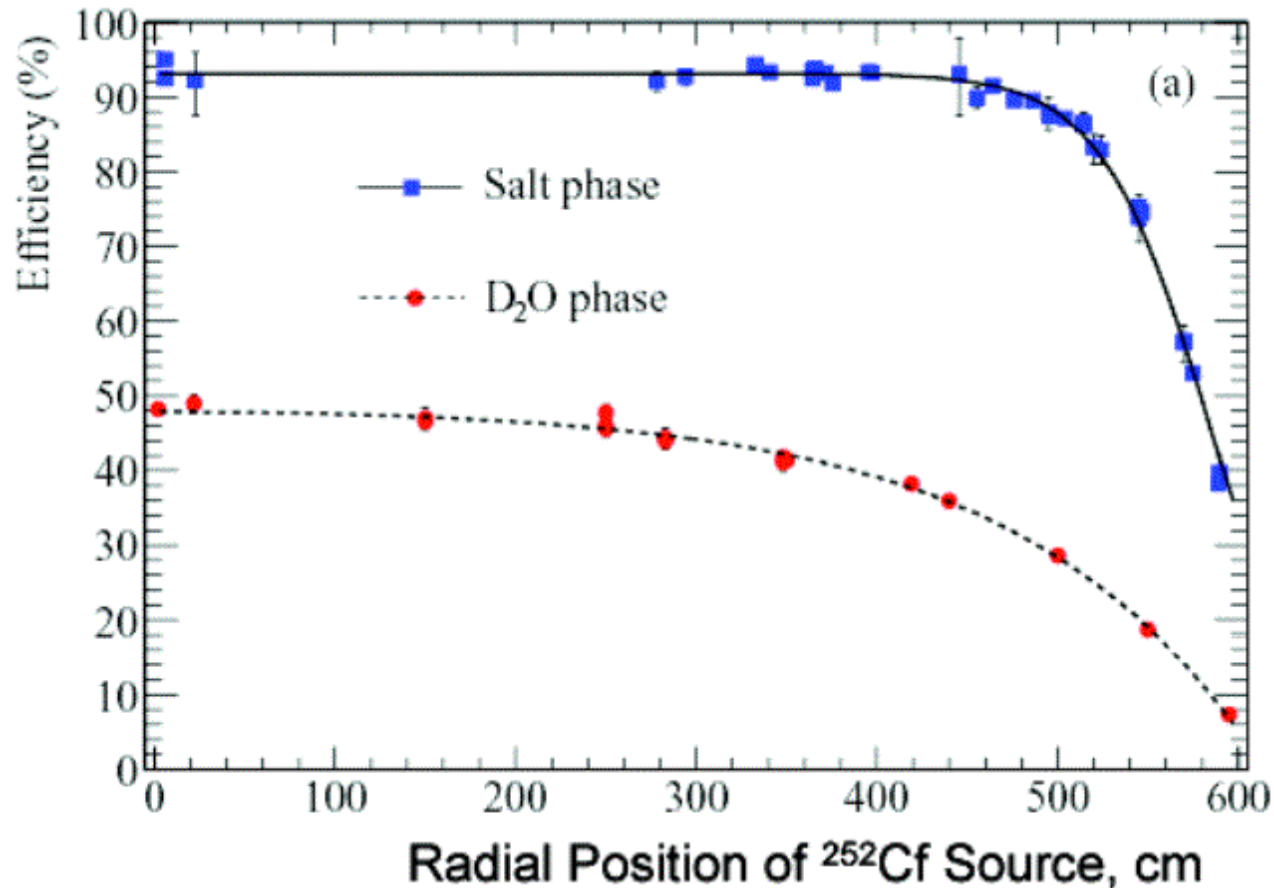
# SNO

## 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  $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ):

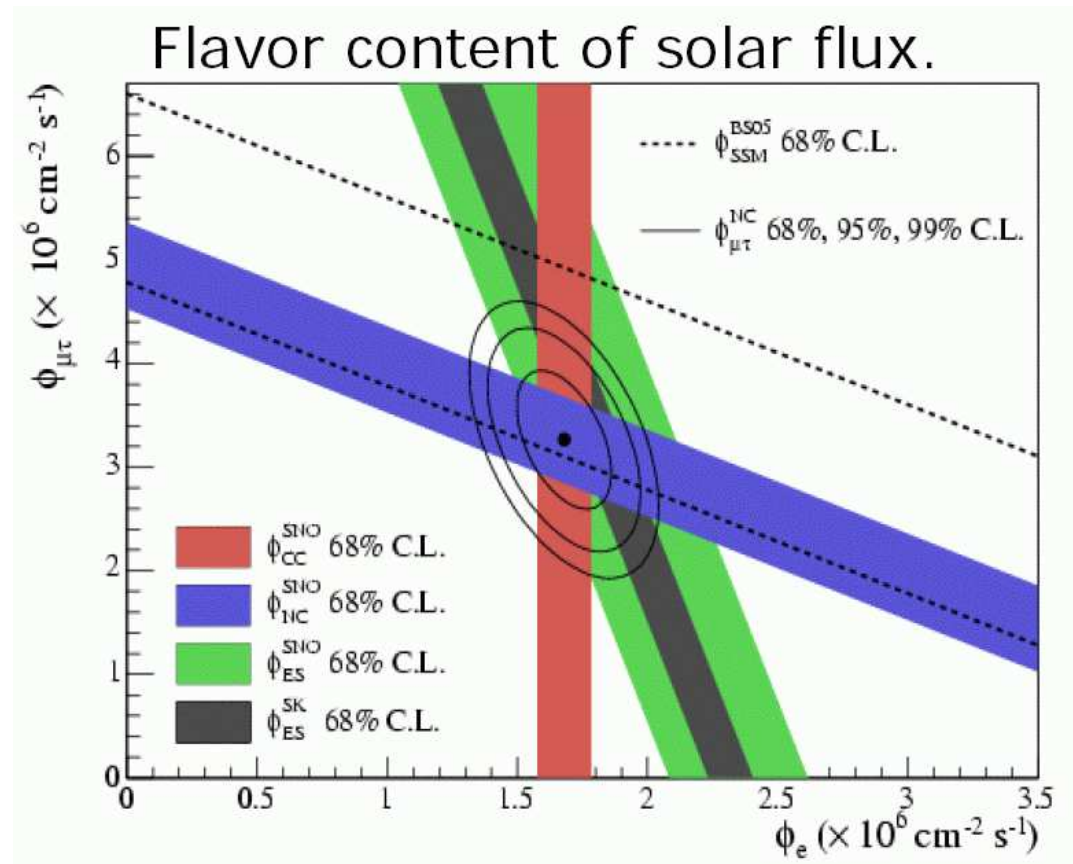
$$\Phi_{CC} = 1.68 \pm 0.06 \pm 0.09 = \Phi_{\nu_e}$$

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

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

Przewidywania SSM (nowe)

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



# SNO

## Phase III

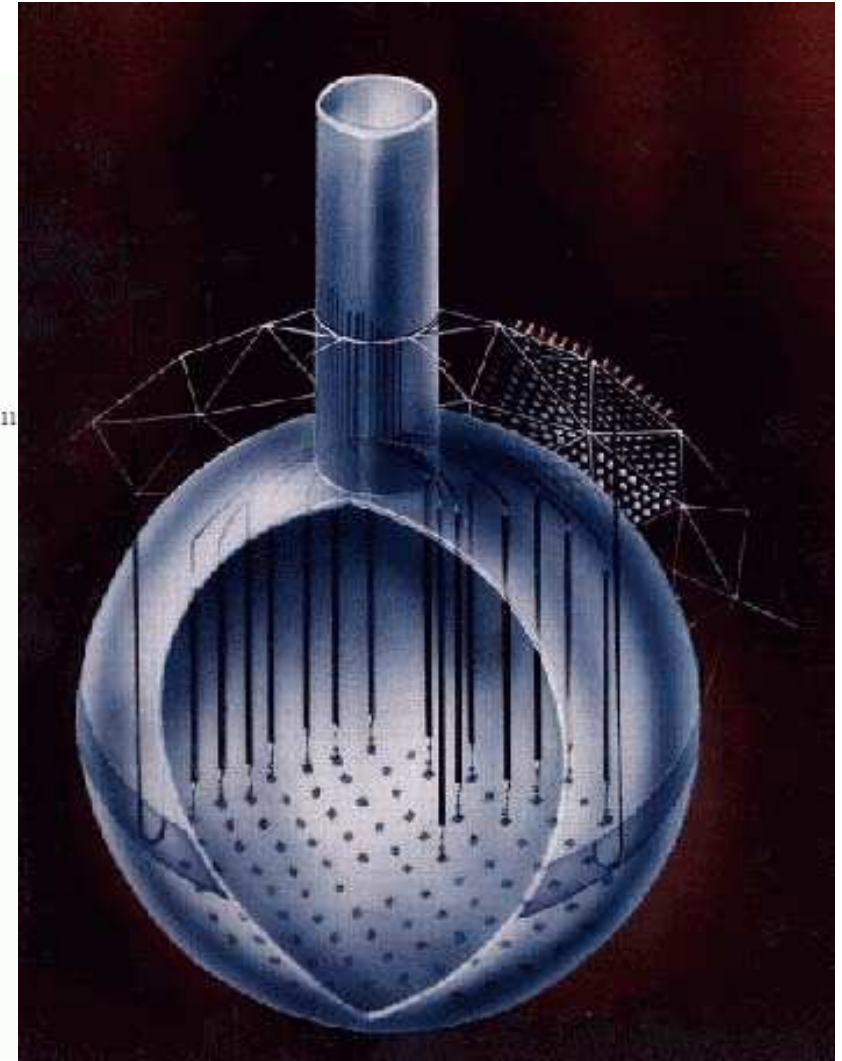
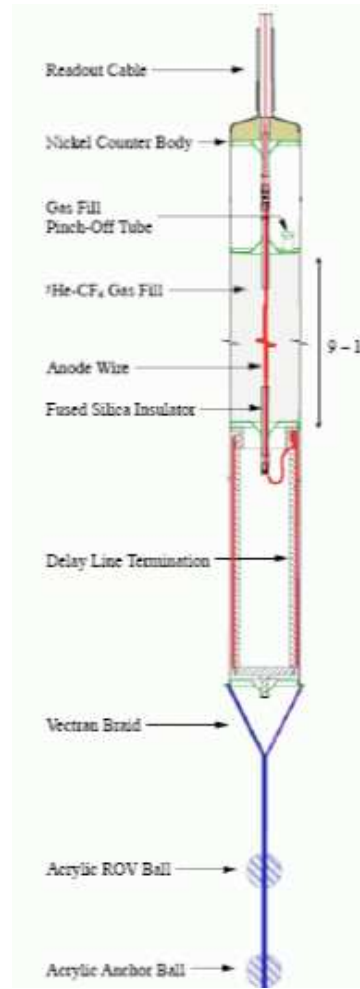
Pomiar neutronów przy pomocy dedykowanych liczników.

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



Pojedynczy licznik: 2-3 m.

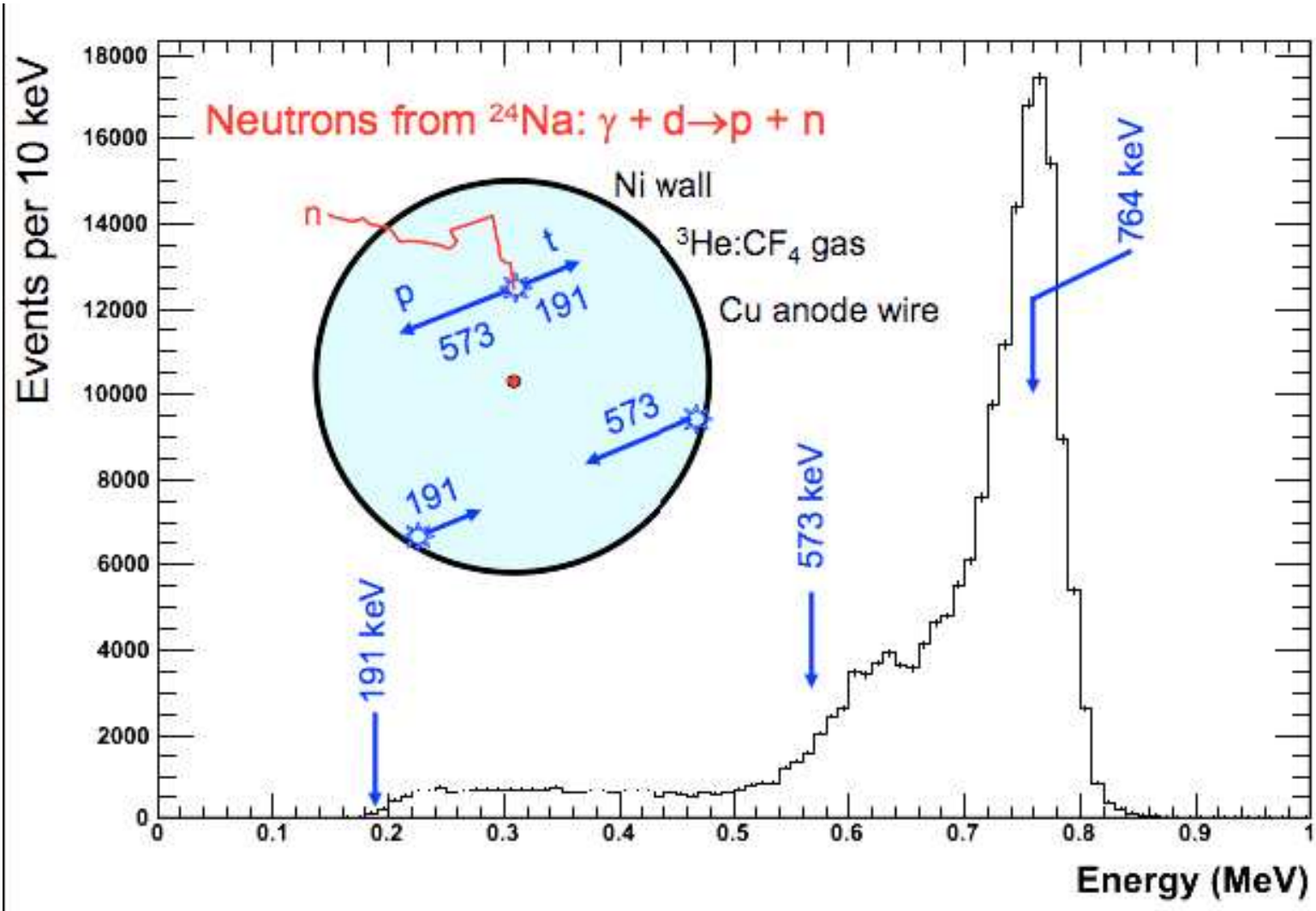
36 strun z licznnikami rozmieszczonych na siatce  $1 \times 1\text{m}^2$



# SNO

## Phase III

### Wyniki kalibracji



# SNO

## Wyniki (Phase III)

Wyniki dopasowania

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

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

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

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

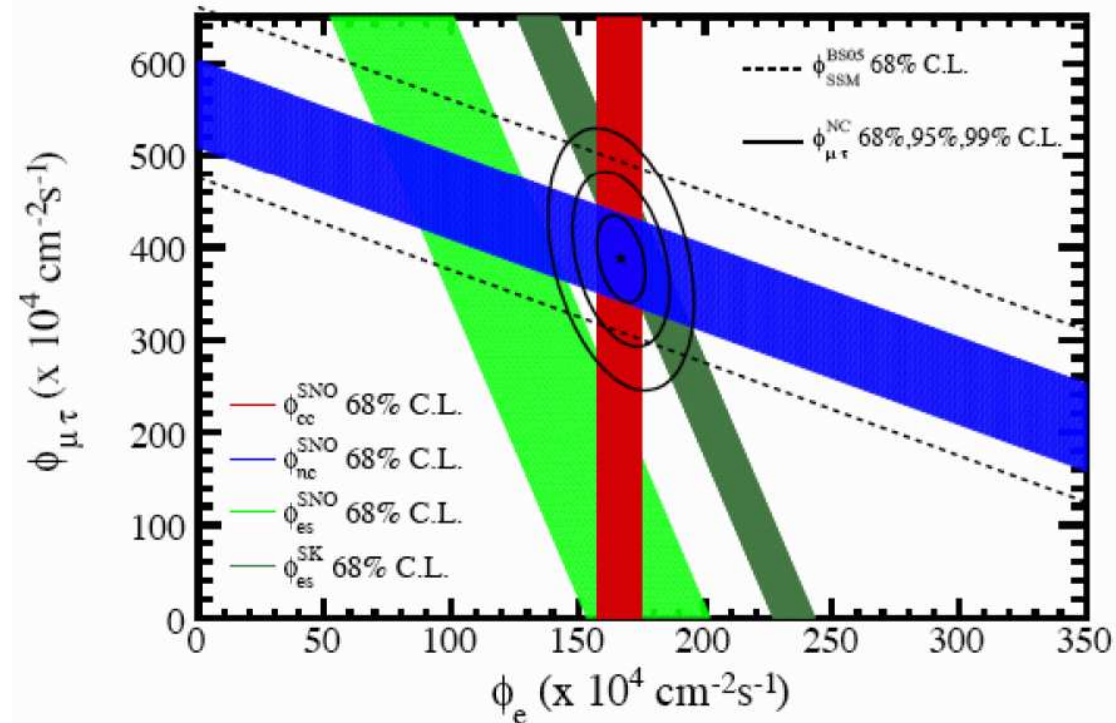
(SK :  $2.32 \pm 0.09$ )

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

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

Przewidywania SSM (nowe)

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





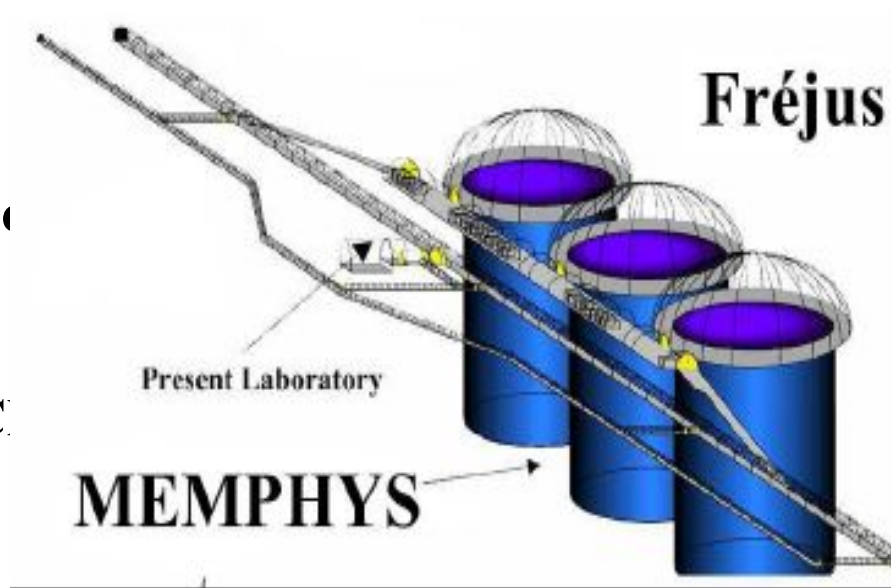
# **LAGUNA: Large Apparatus for Grand Unification and Neutrino Astrophysics**

## **Three detector technologies:**

- **water Cherenkov: MEMPHYS,  
mass 420-1000 kton**
- **liquid scintillator: LENA,  
mass 30-70 kton**
- **liquid argon: GLACIER,  
mass 50-100 kton**

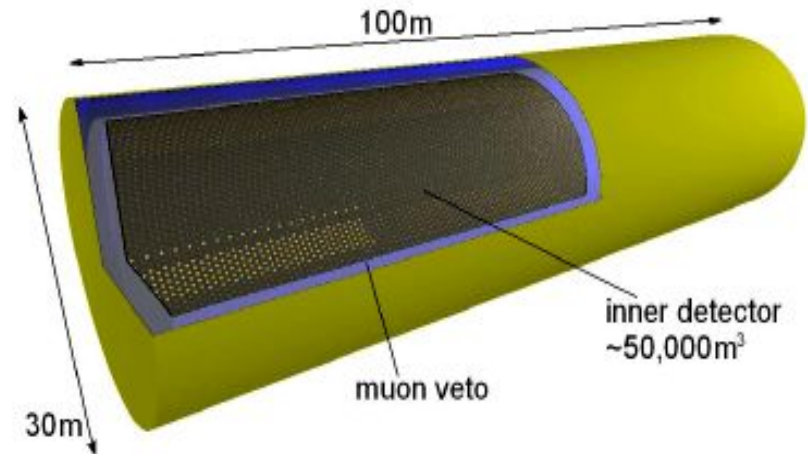
# MEMPHYS (water Cherenkov)

- extrapolation of Super-Kamiokande detector
- 3-5 tanks in shafts 65m diameter and 65m height
- ~81000 12'' PMTs (30% surface coverage) or 20'' PMTs (40% coverage)
- possibility of introducing GdCl<sub>3</sub> (decrease of background by tagging neutrons from inverse beta decay)



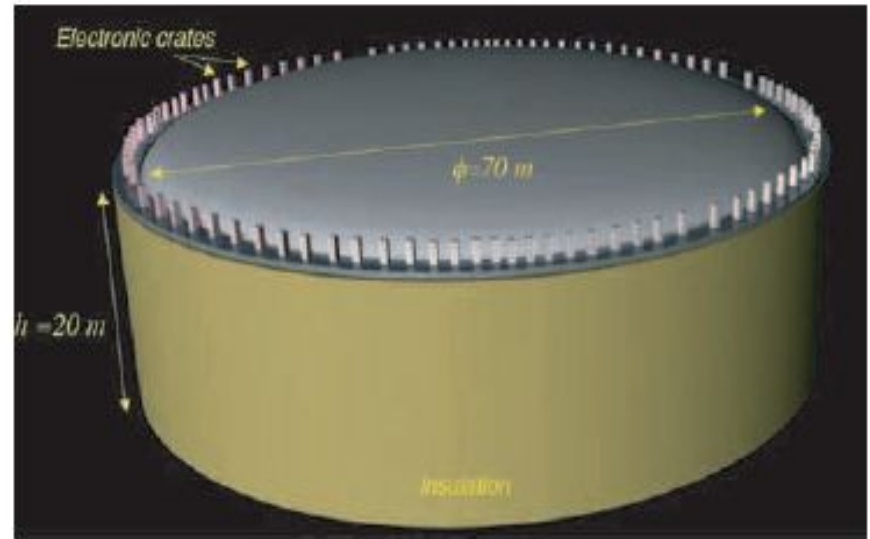
# LENA (liquid scintillator)

- **one cylindrical tank (vertical or horizontal)**
- **inner volume contains about 50000m<sup>3</sup> of liquid scintillator**
- **scintillation light detected by 12000 20'' PMTs (30% surface coverage)**
- **outer part (muon veto) filled with water**
- **technology used in KamLAND and Borexino detectors**



# GLACIER (liquid argon)

- **liquid argon (LAr) Time Projection Chamber (TPC)**
- **3D reconstruction of events using information provided by ionization in LAr and light (scintillation and Cherenkov) readout by PTMs**
- **bi-phase mode (drifting electrons from liquid phase are extracted into gas phase and amplified)**
- **LAr TPC pioneered by the ICARUS experiment**





# Pierre Auger Cosmic Ray Observatory

# Obserwatorium Pierre Auger

Badanie promieni kosmicznych w zakresie najwyższych obserwowanych energii,  $E > 10 \text{ EeV}$  ( $>10^{19} \text{ eV}$ ):

**skład**

lekkie czy ciężkie jądra, fotony, neutrino, ??

**widmo energii**

kształt widma w zakresie efektu GZK

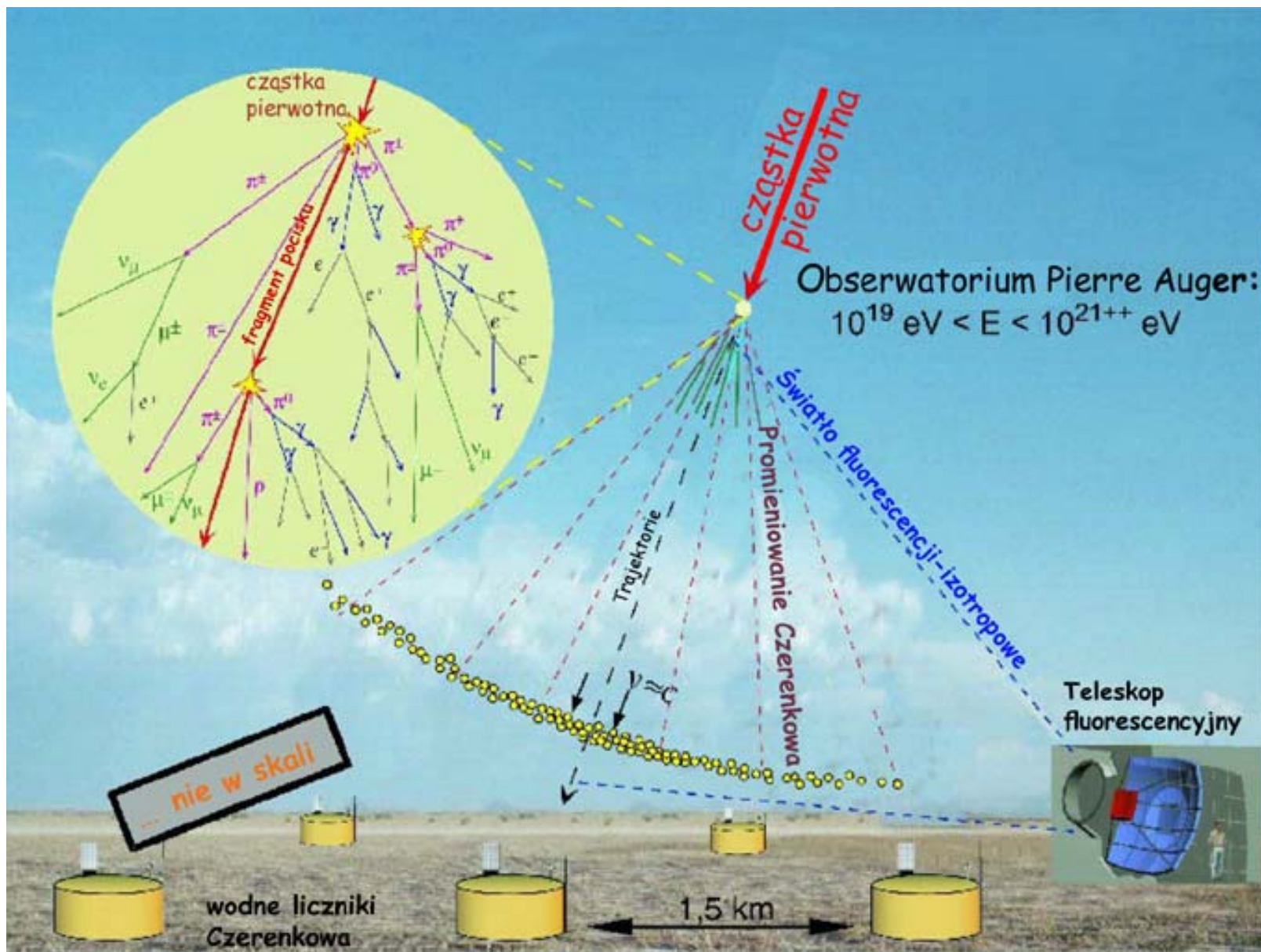
**rozkład kierunkowy**

anizotropia, źródła punktowe

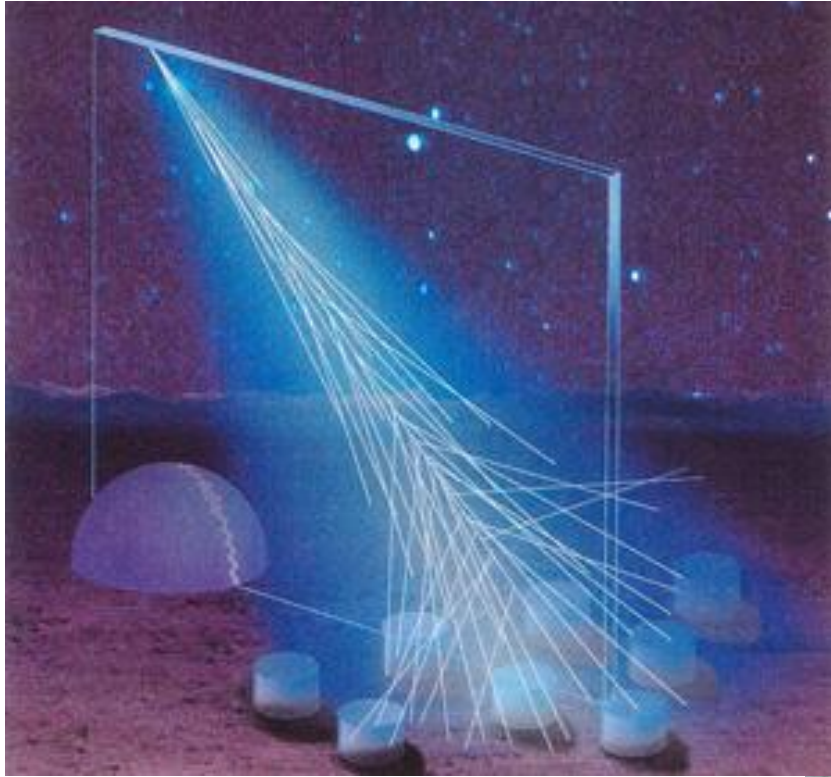
→ wyjaśnienie ich pochodzenia ???

- obserwacja całego nieba - detektory w Argentynie i w USA
- $2 * 3000 \text{ km}^2$  → duża statystyka danych
- hybrydowa detekcja wielkich pęków: dwa układy detektorów

# Wielki pęk atmosferyczny



# Pierre Auger Cosmic Ray Observatory



Use earth's atmosphere as a calorimeter. 1600 water Cherenkov detectors with 1.5km distance.

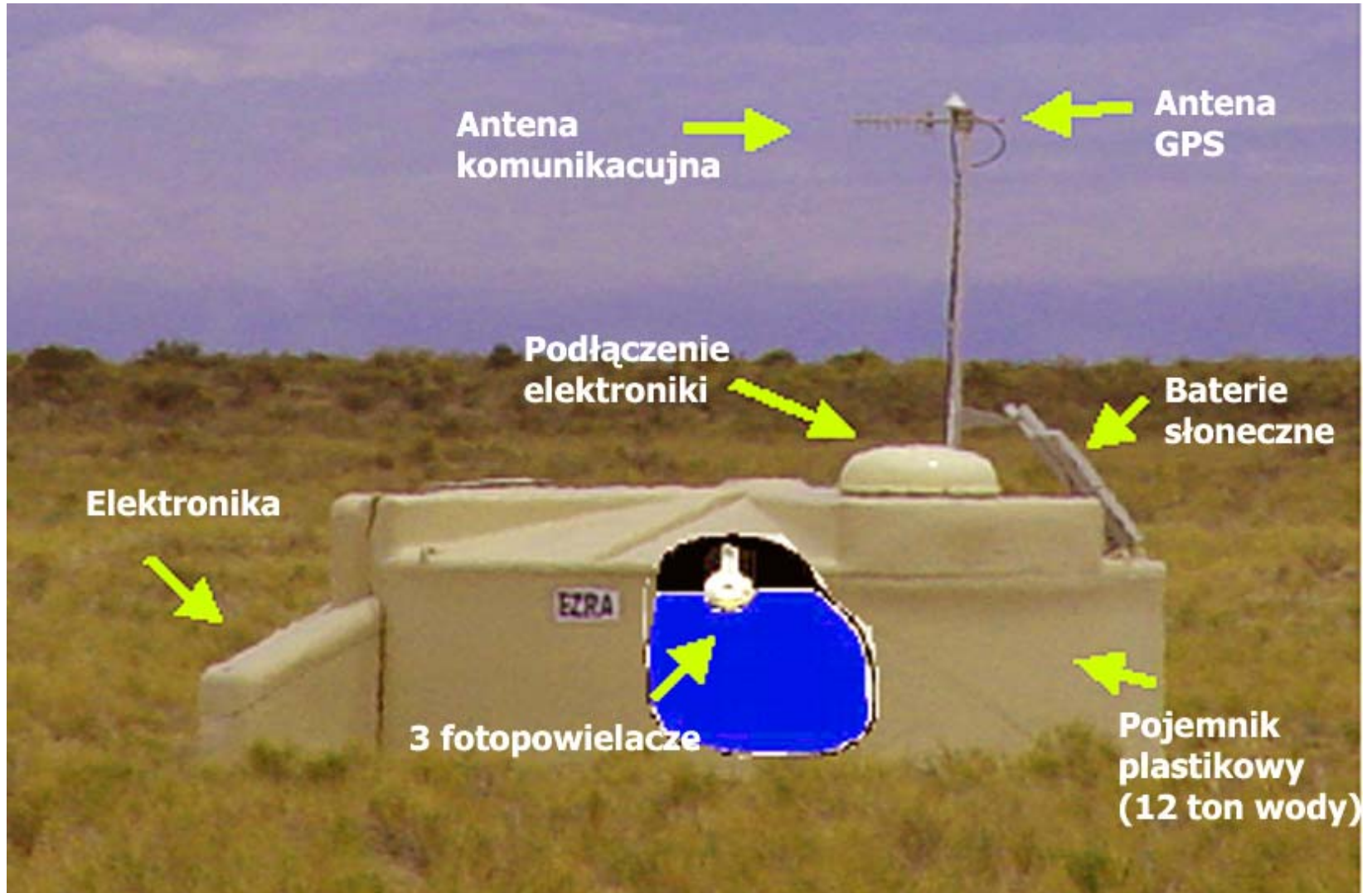
Placed in the Pampa Amarilla in western Argentina.



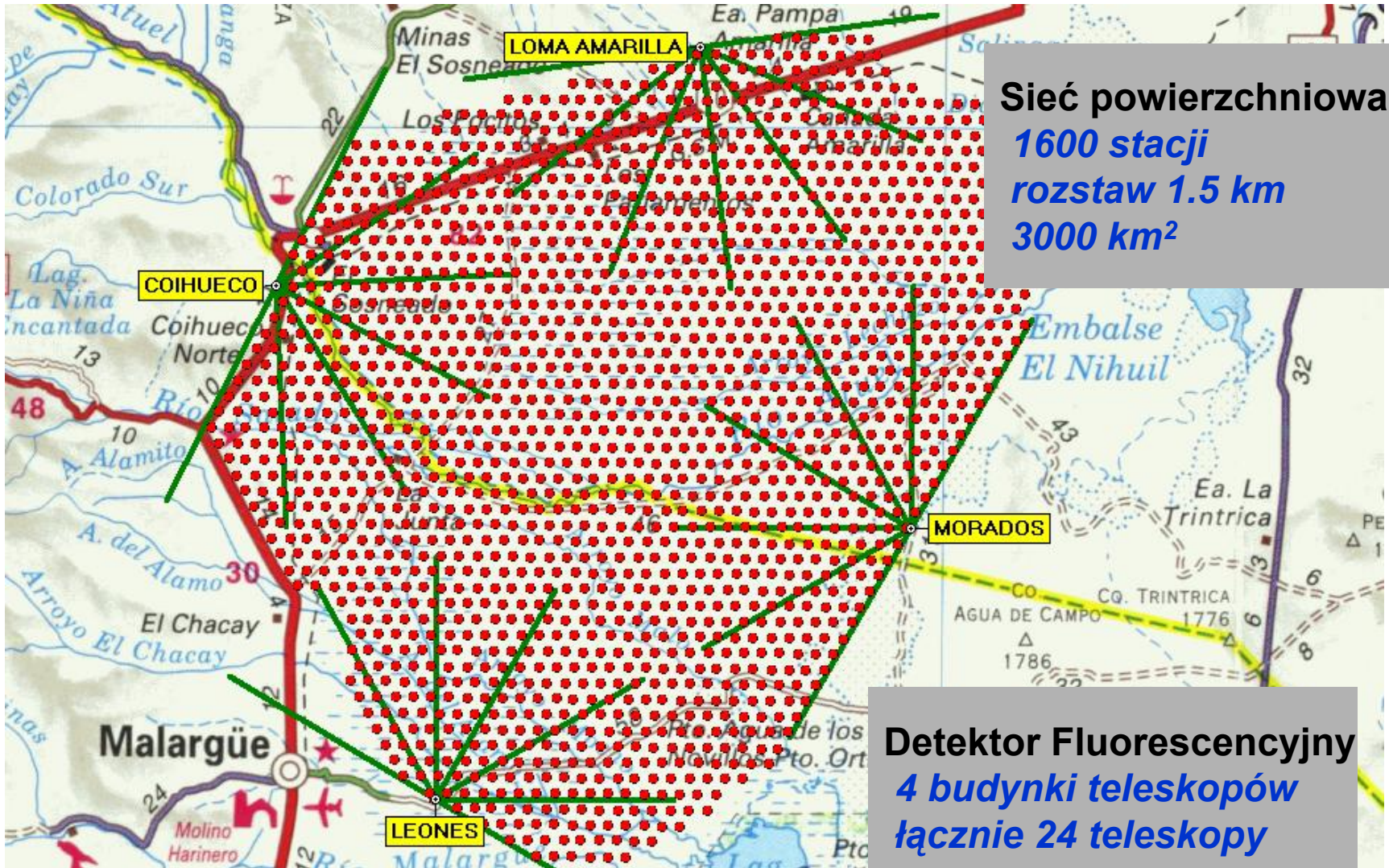




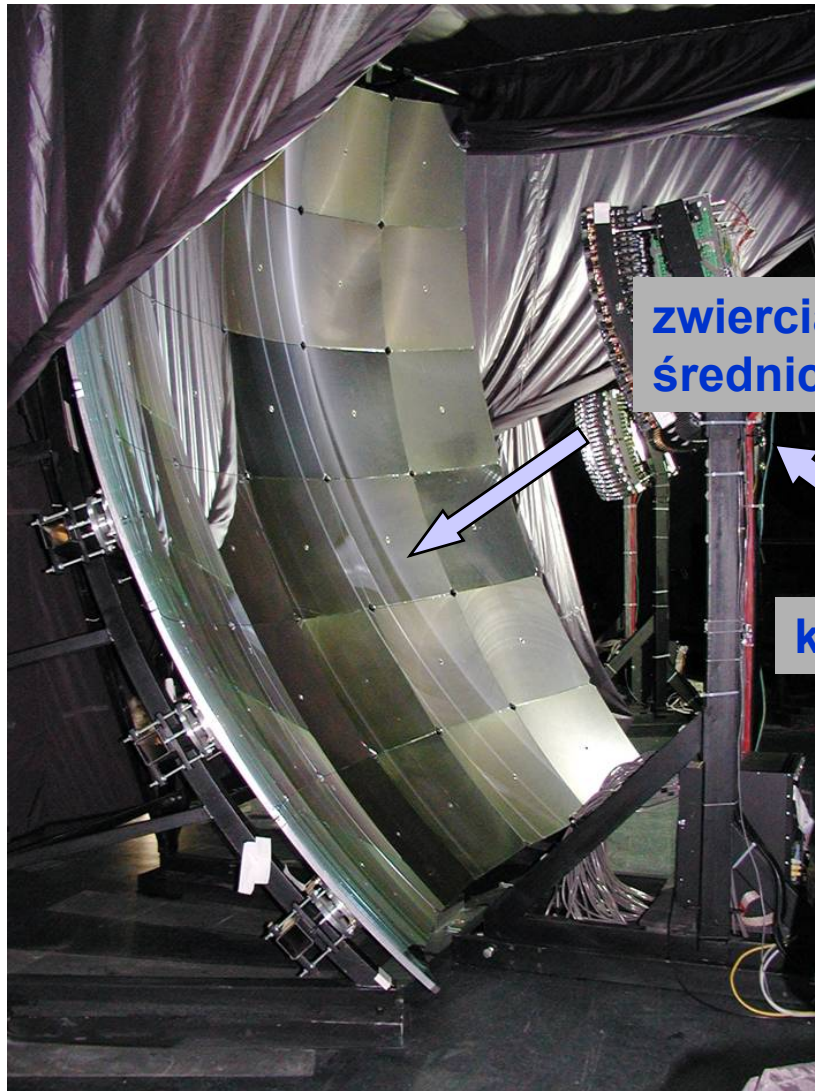
# Detektor naziemny



# Obserwatorium Pierre Auger

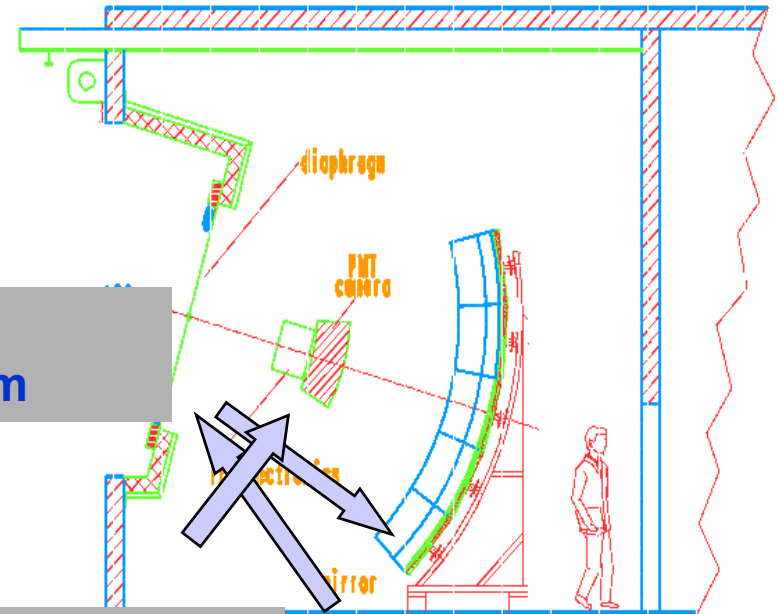


# Detektor Fluorescencyjny

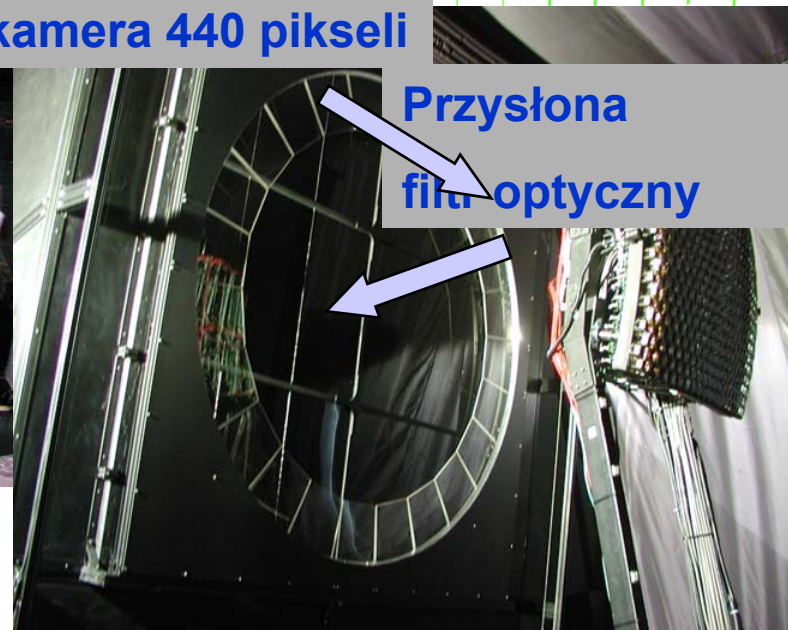


zwierciadło  
średnicy 3.4 m

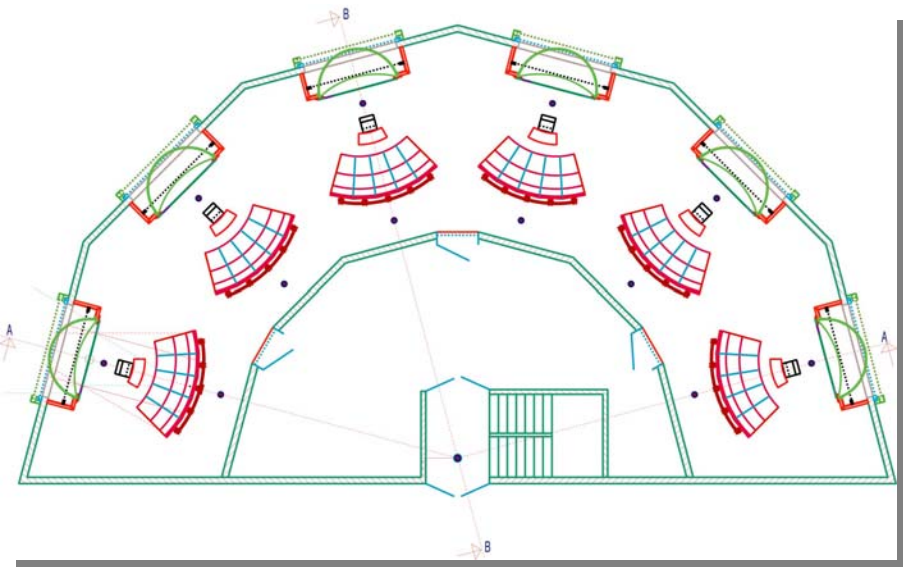
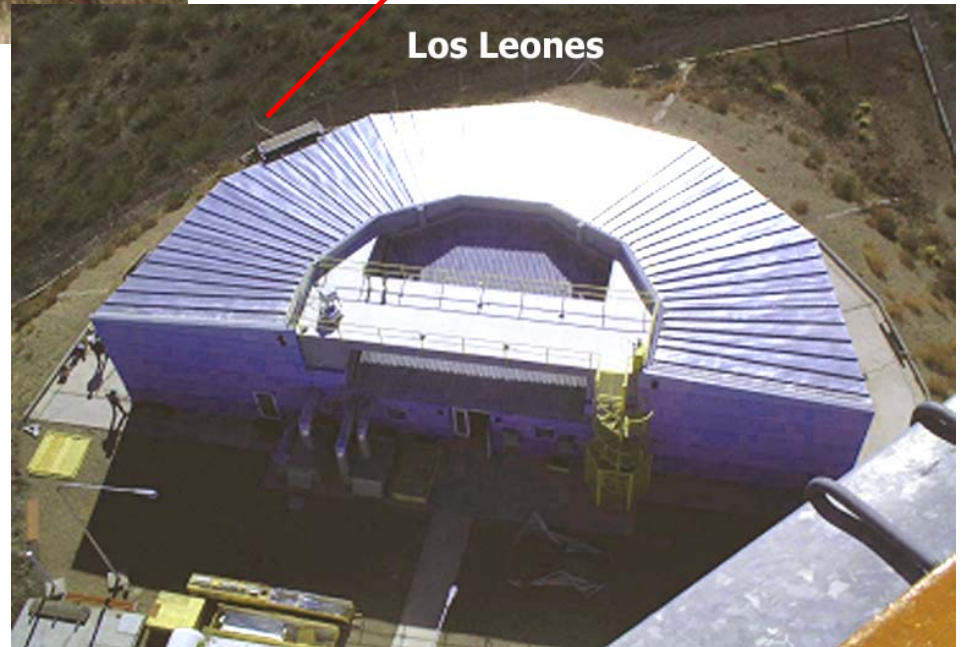
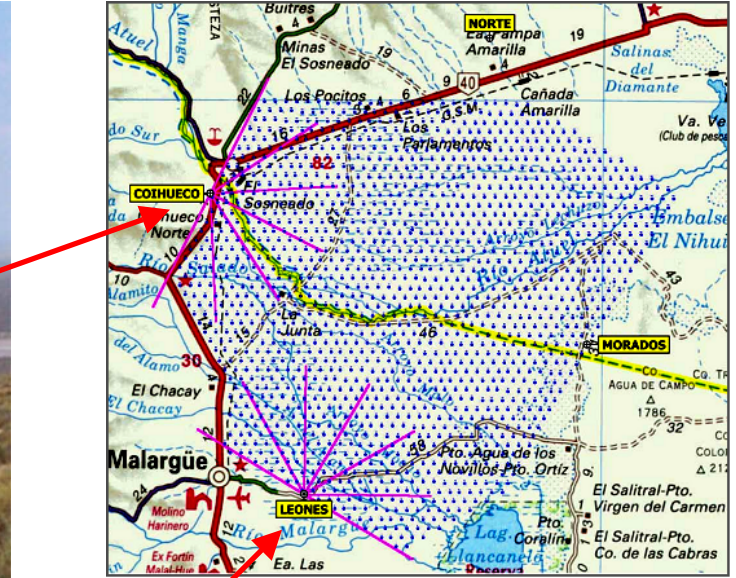
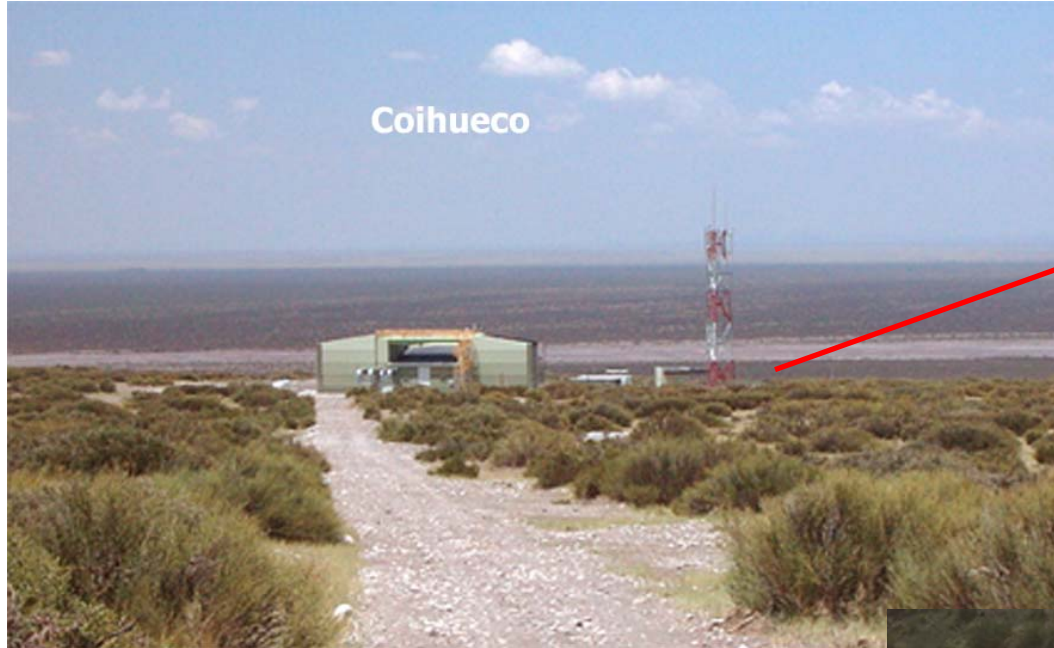
kamera 440 pikseli



Przysłona  
filtr optyczny



# Detektorji fluorescencyjne



# Goals of the Observatory

Detection with high statistics of cosmic rays with energies  $>10^{19}$  eV.



## Spectrum

→ Requires a good energy determination  $\approx 20 - 30 \%$



## Arrival directions

→ Angular resolution  $\approx 1^\circ$



## Composition

→ Fast electronics to measure details of the shower front (SD)

→ Field of view to observe shower development (FD)

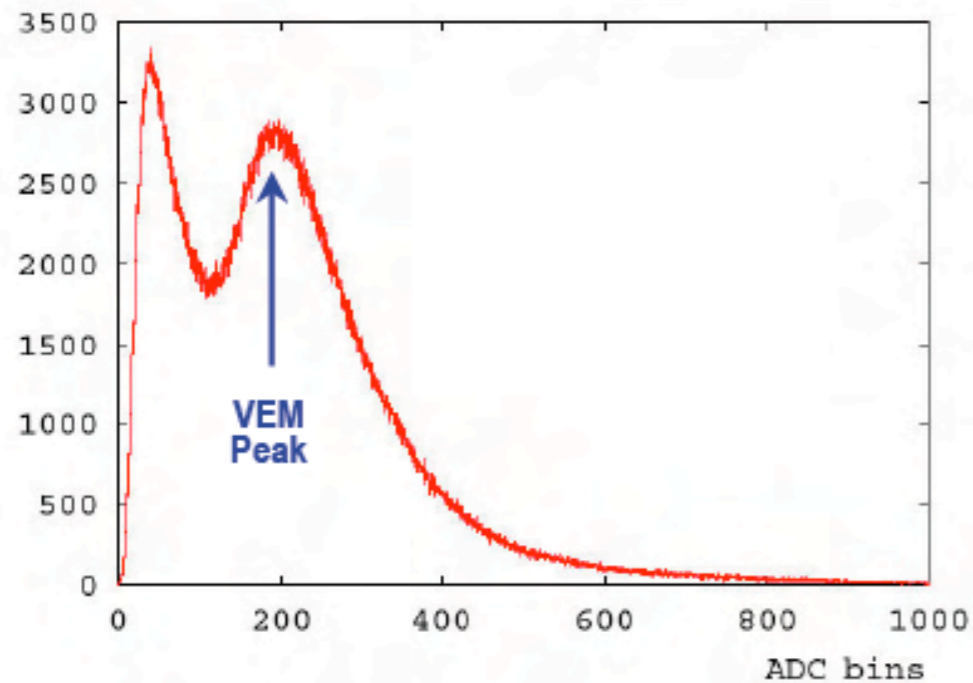
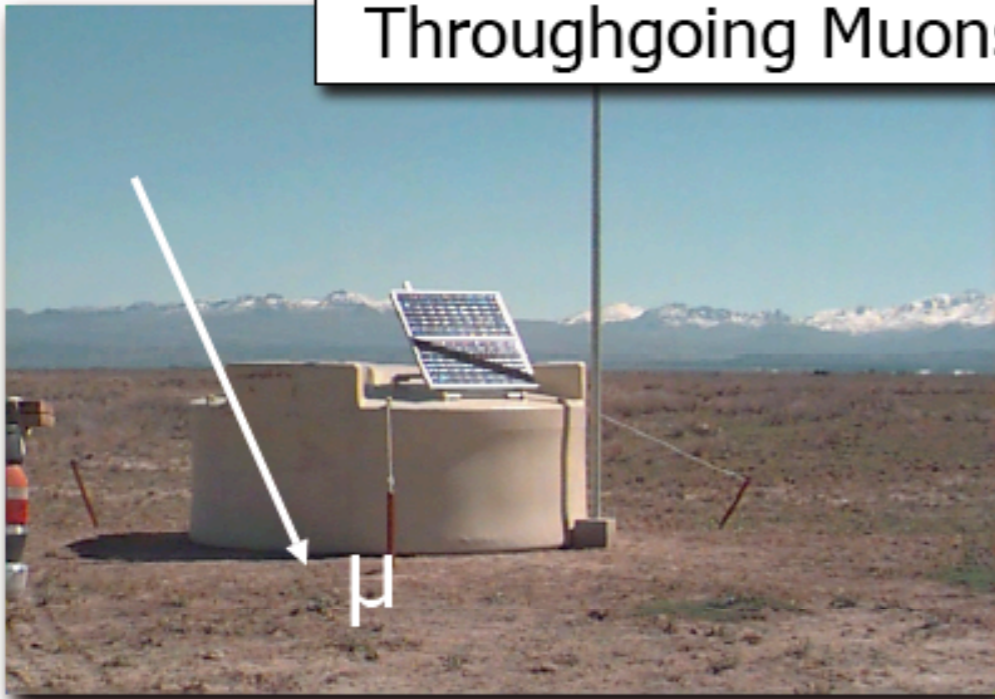


Science results

# Detector Calibration

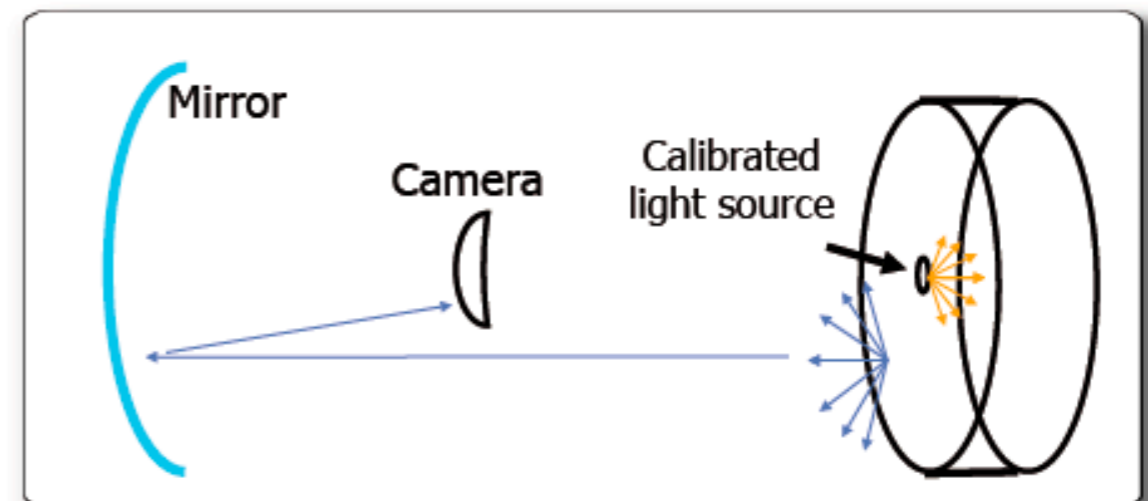
## Ground-Array

### Throughgoing Muons



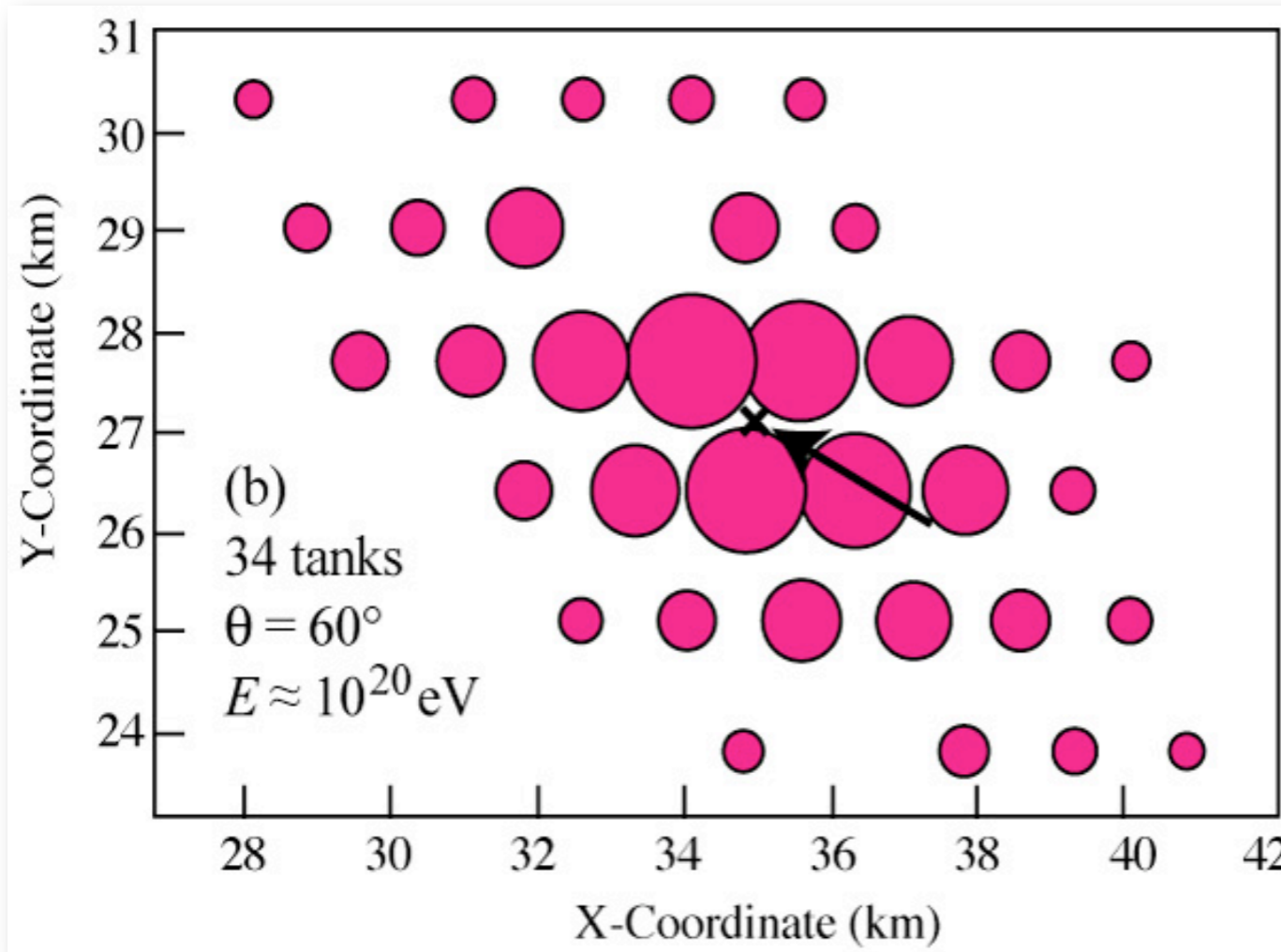
## Fluorescence Telescopes

### Diffuse Lightsource

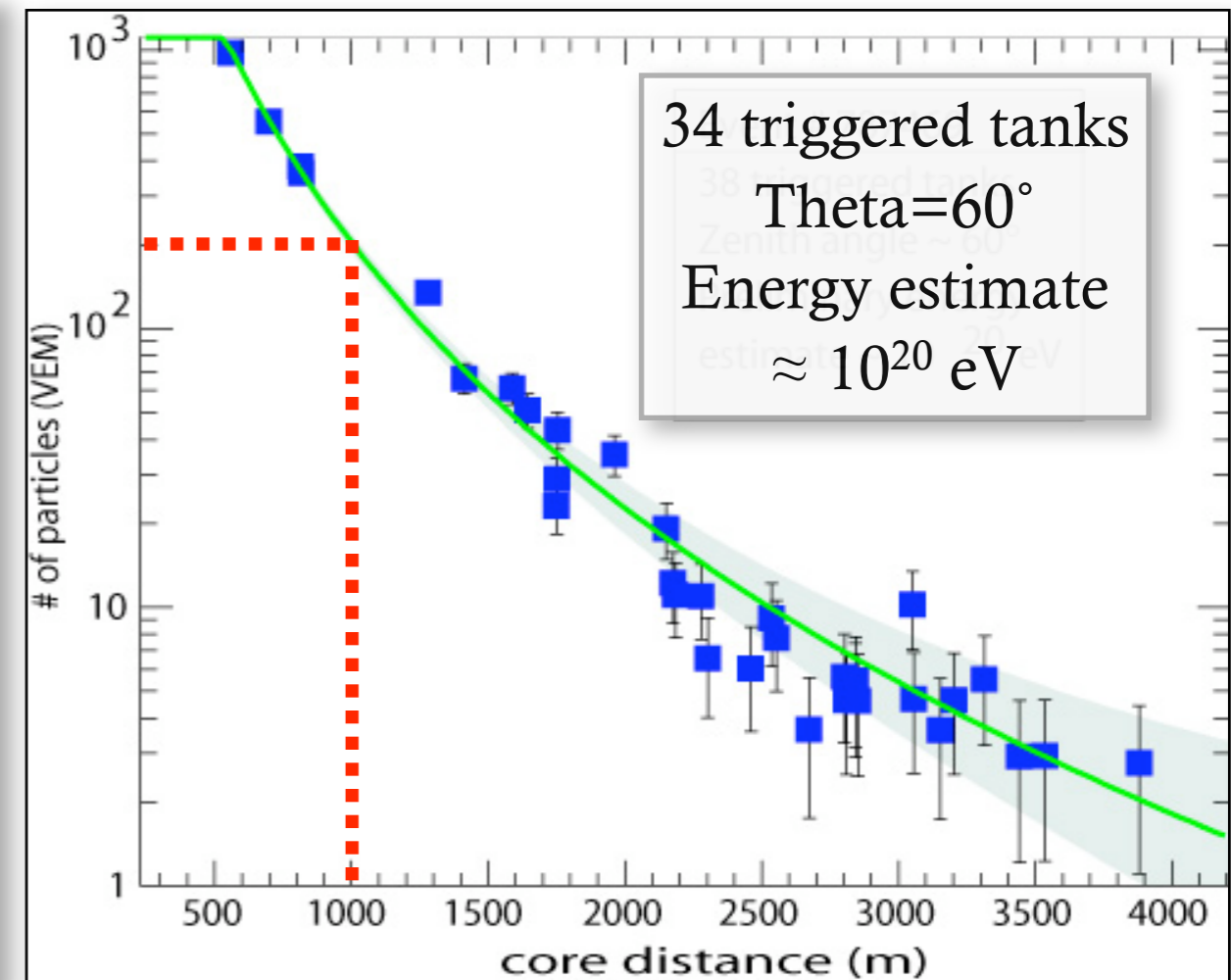


# Primary energy determination: SD

SD measures the lateral structure of the shower at ground



One event seen by SD



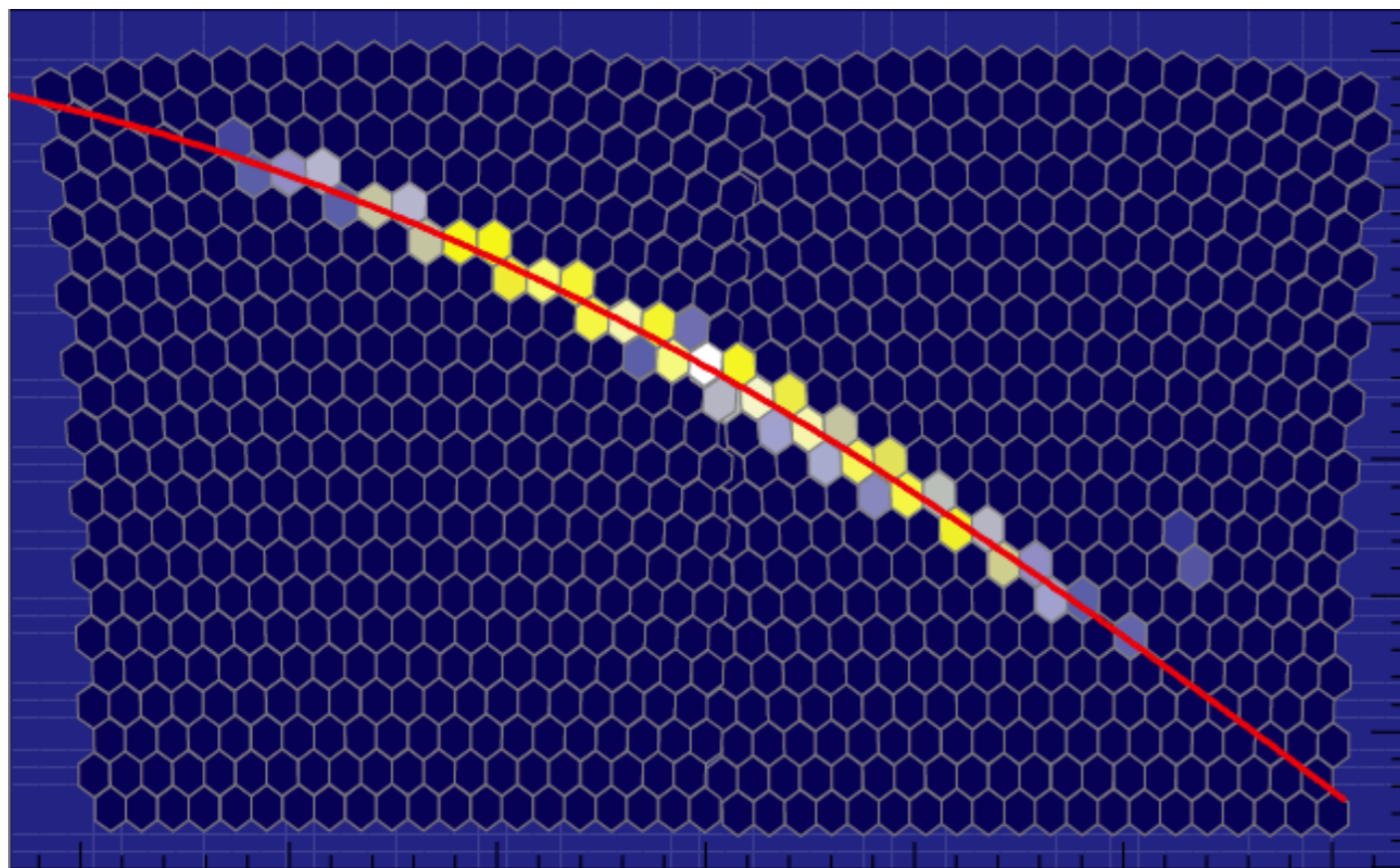
Particle lateral distribution

- ◆ Reconstruct geometry (arrival direction & impact point)
- ◆ Fit particle lateral distribution (LDF)
- ◆ **S(1000)** [signal at 1000 m] is the **Auger energy estimator**  
(“ideal” distance depends on detectors spacing)

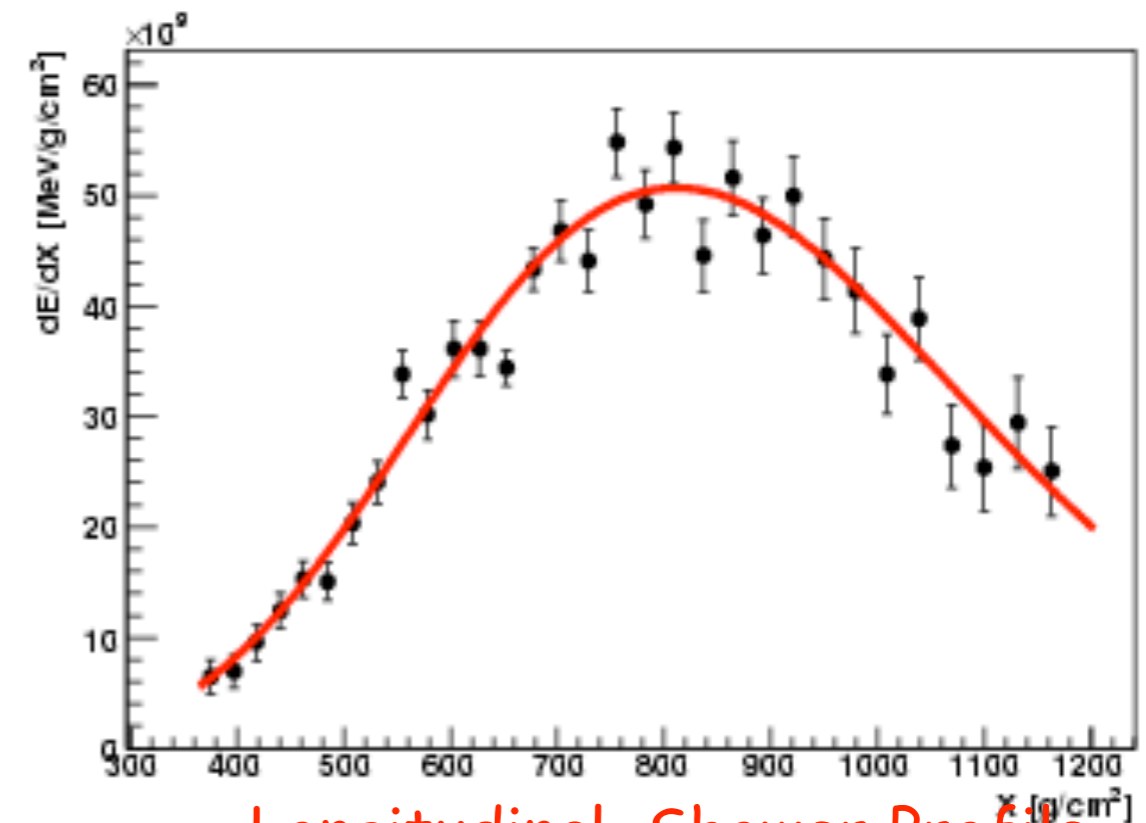


# Primary energy determination: FD

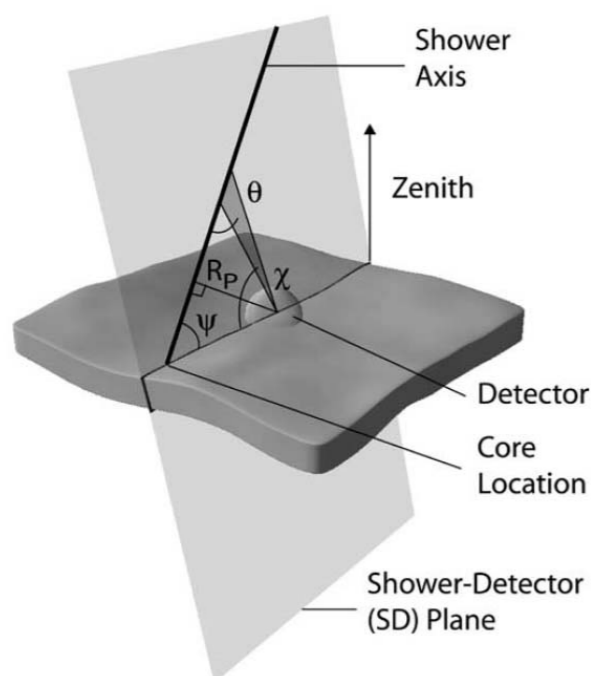
FD records the longitudinal profile of the shower during its development in atmosphere



One event seen by FD



Longitudinal Shower Profile

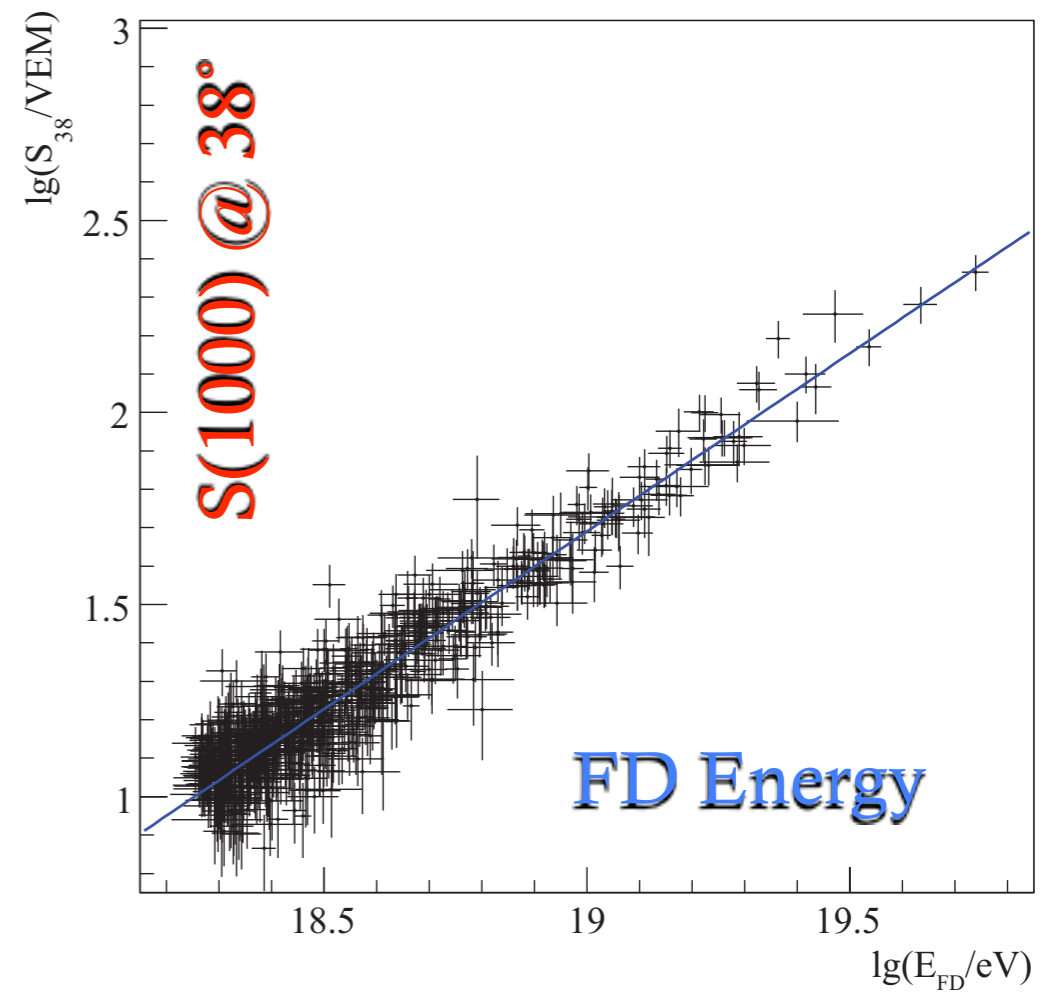
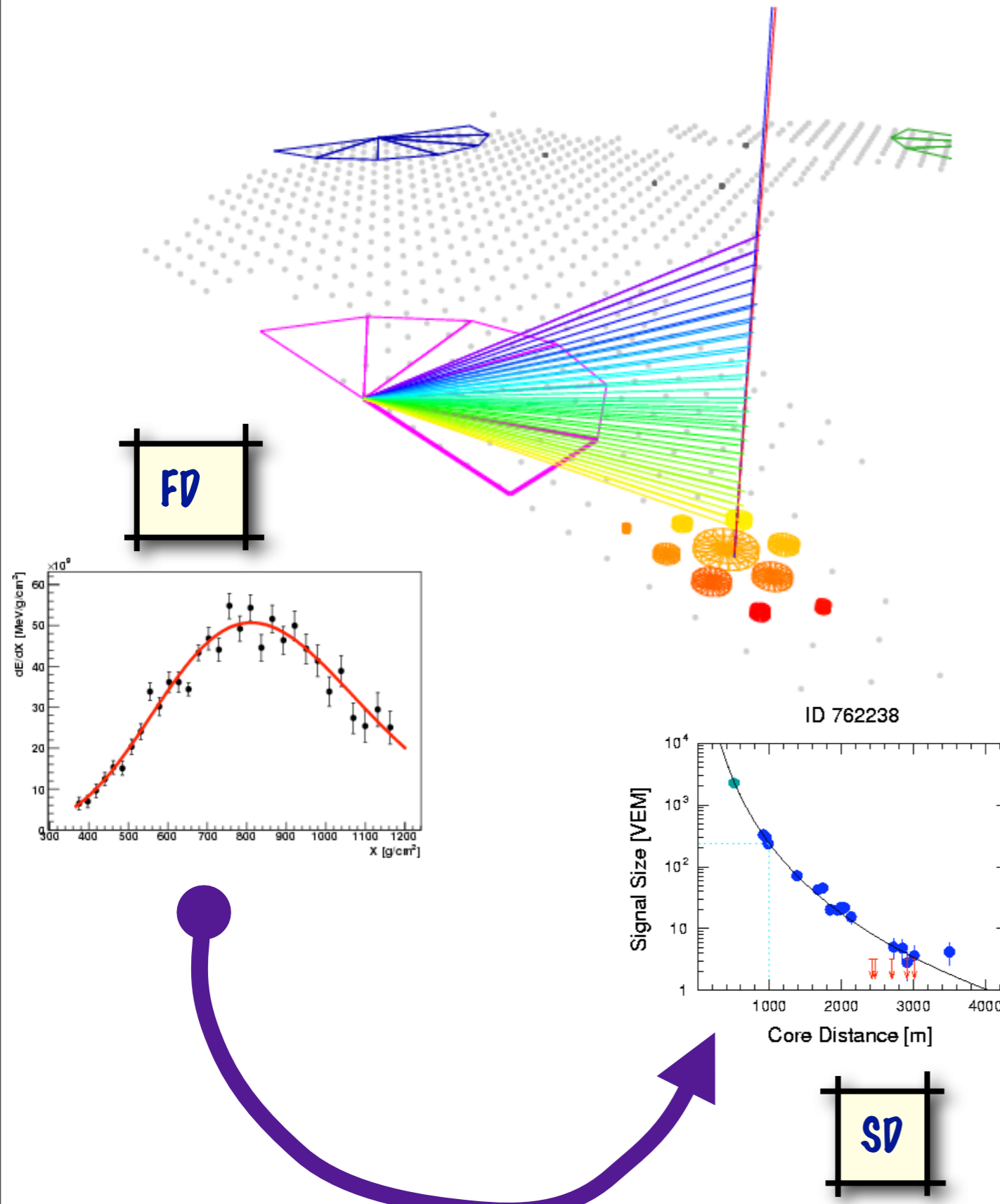


- ♦ Reconstruct geometry (shower detector plane, SDP, and shower axis in SDP)
- ♦ Fit longitudinal shower profile
- ♦  $E \propto$  area under the curve
- ♦ Calorimetric measurement

$$\int \frac{dE}{dX} dX \sim E$$

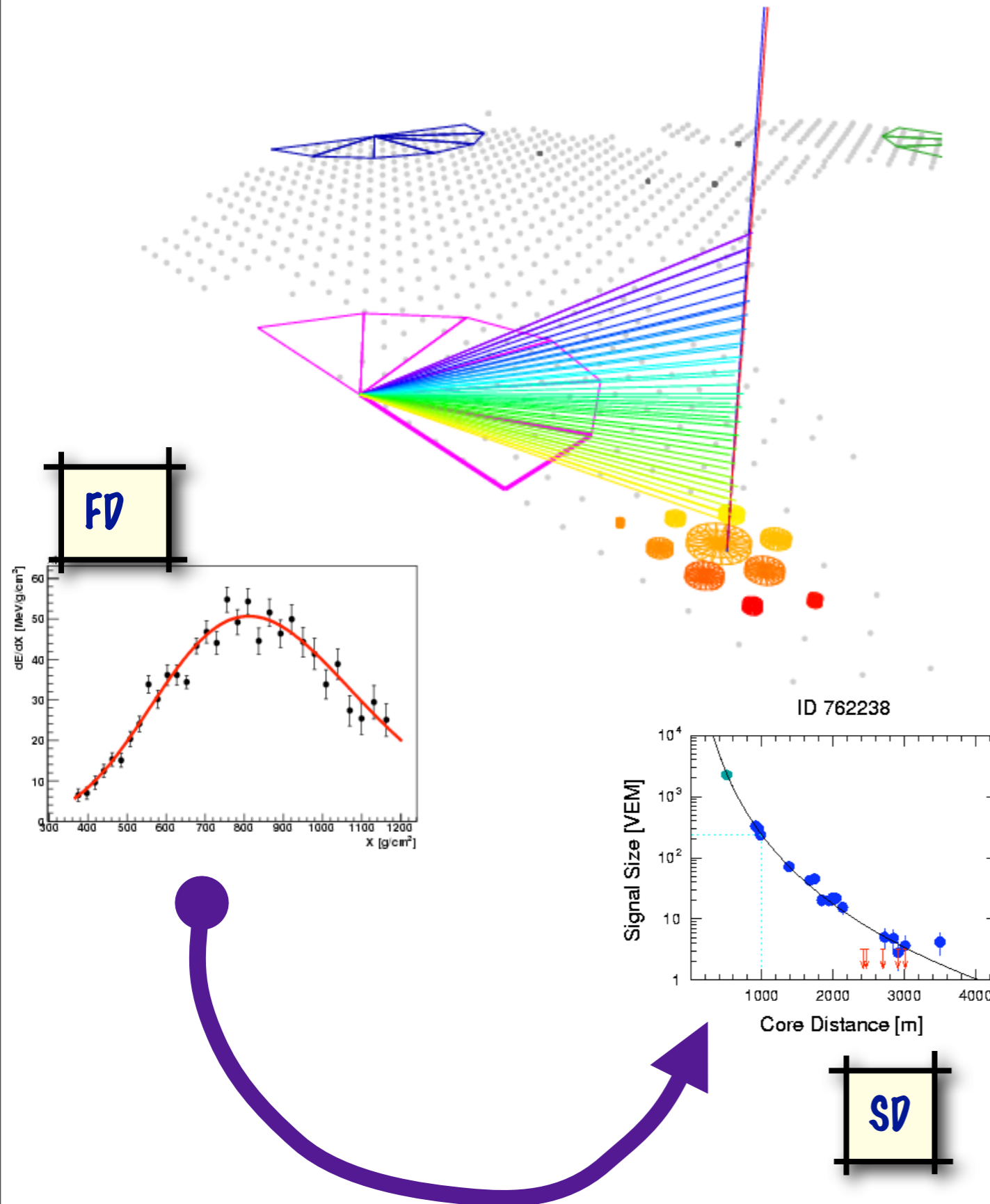
# Primary energy determination: SD+FD

Hybrid Events are used to calibrate the SD energy estimator,  $S(1000)$  (converted to the median zenith angle,  $S_{38}$ ) from the FD calorimetric energy



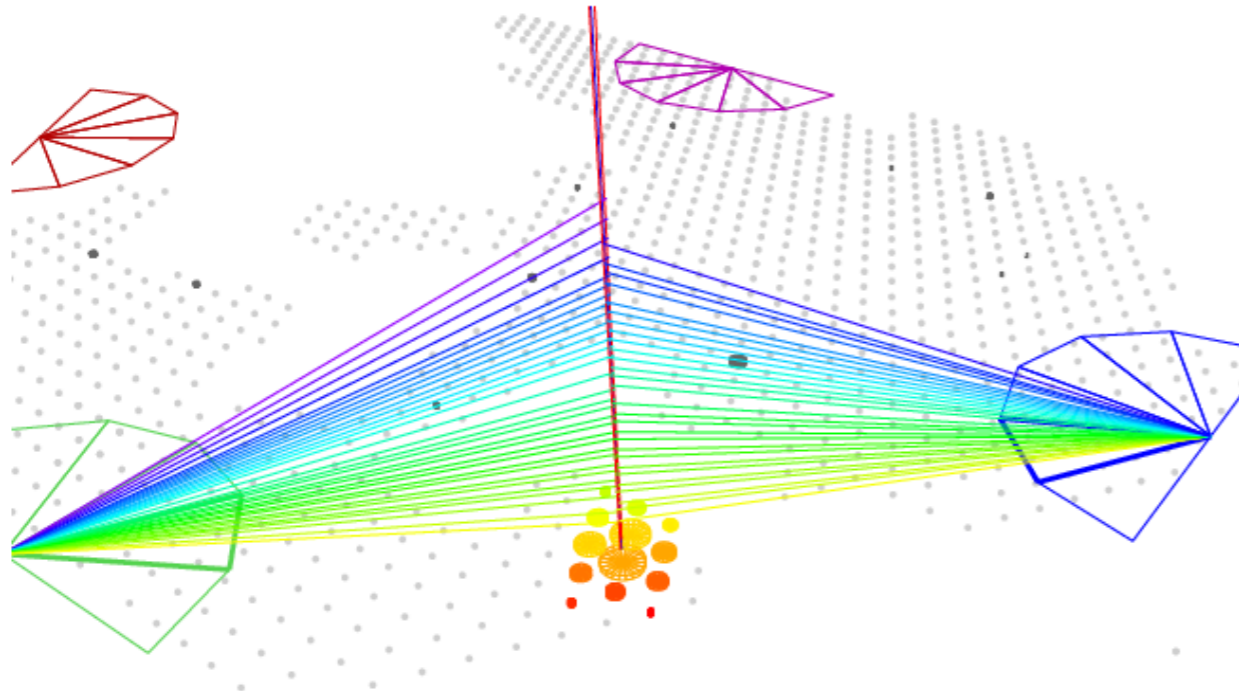
# Primary energy determination: SD+FD

Hybrid Events are used to calibrate the SD energy estimator,  $S(1000)$  (converted to the median zenith angle,  $S38$ ) from the FD calorimetric energy



Energy resolution:  
statistical  $\approx 19\%$

# FD Energy systematic uncertainty

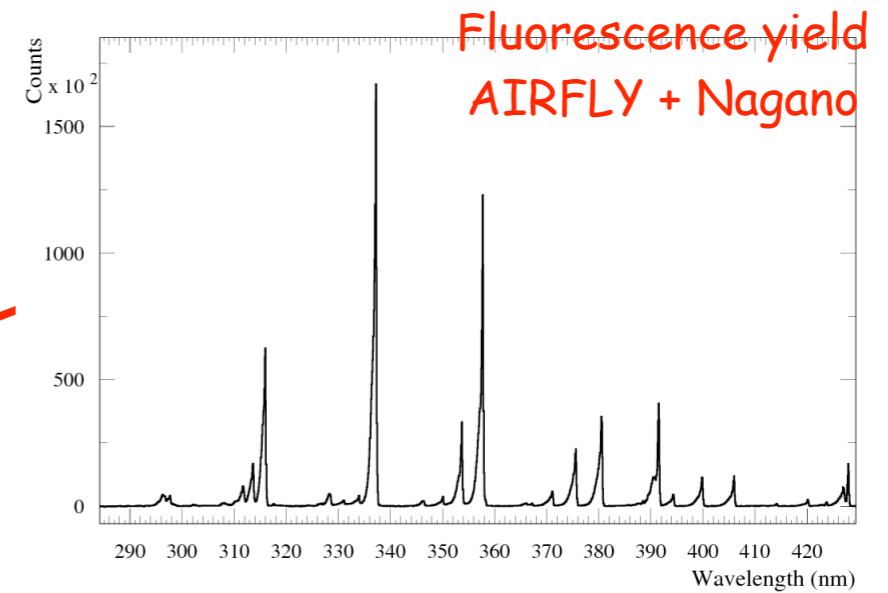


Stereo events

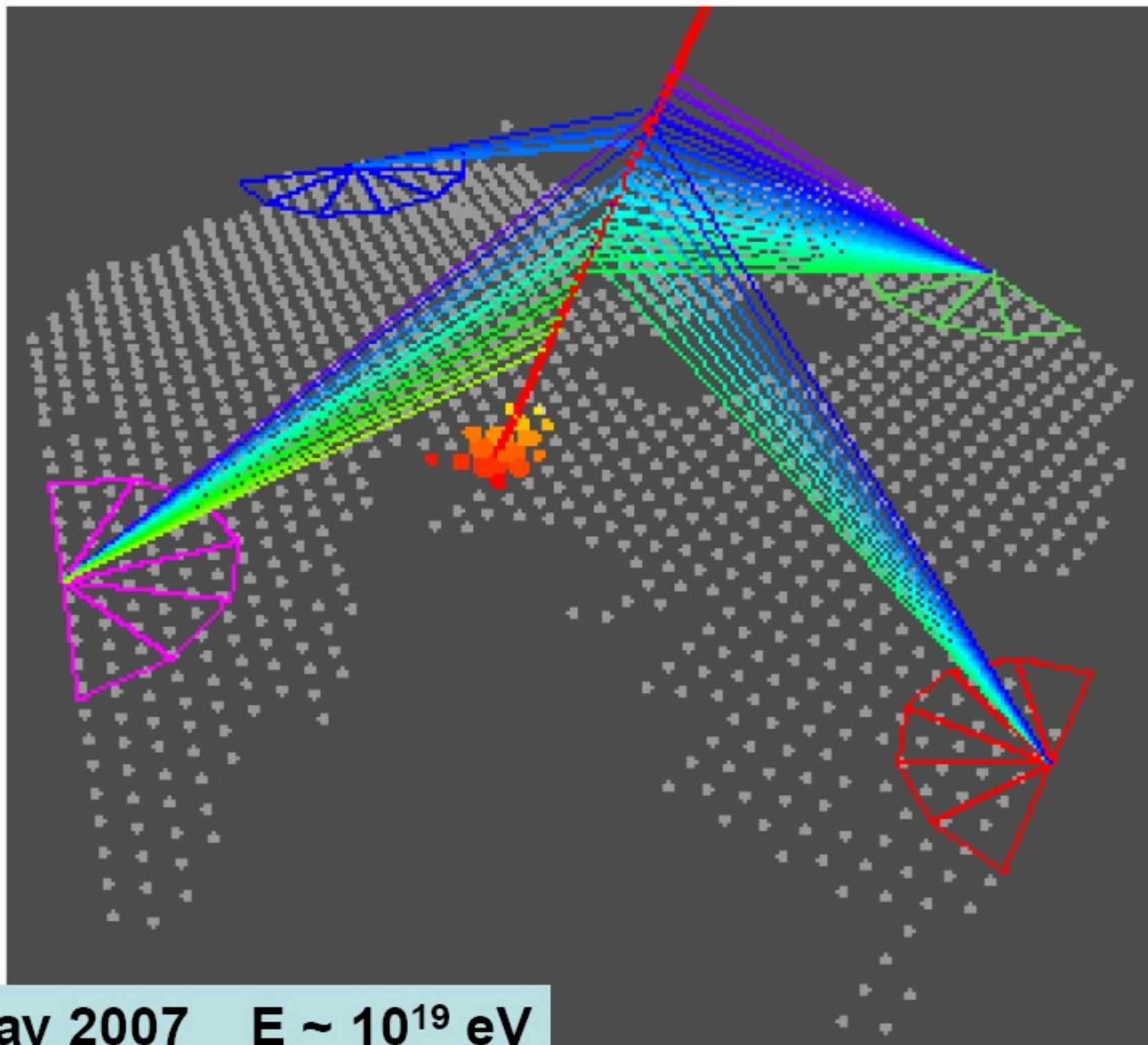
⇒ reconstruction uncertainty

▶ 10%, consistent with MC

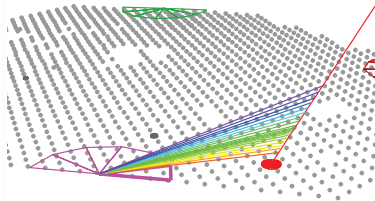
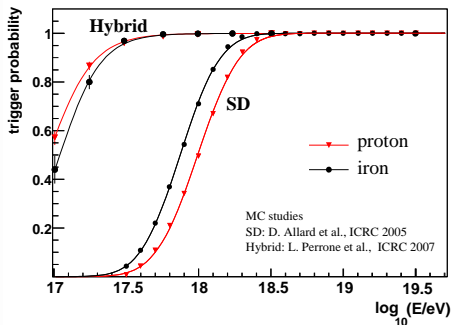
Source	Systematic uncertainty
Fluorescence yield	14%
P,T and humidity effects on yield	7%
Calibration	9.5%
Atmosphere	4%
Reconstruction	10%
Invisible energy	4%
<b>TOTAL</b>	<b>22%</b>



Total FD E uncertainty: 22%

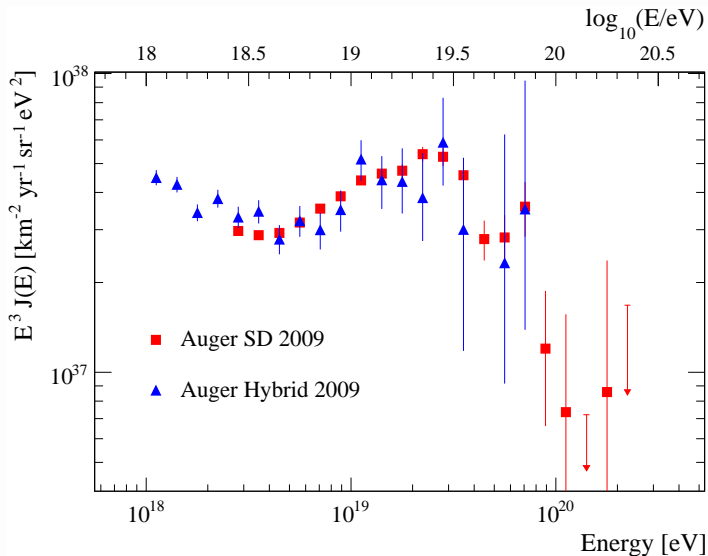


# Extending the energy range with hybrid events



- ▶ energy threshold  $10^{18}$  eV covering the ankle region
- ▶ good energy resolution  $\sigma(E)/E < 10\%$
- ▶ calorimetric energy measurement

# Energy spectrum from hybrid data

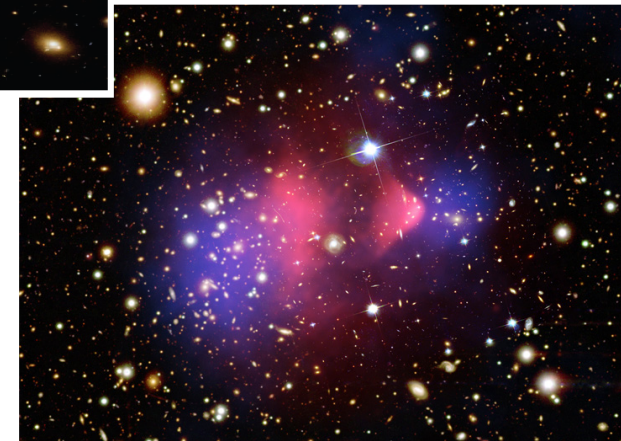
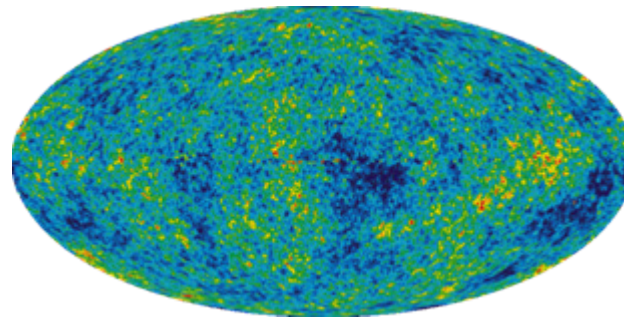
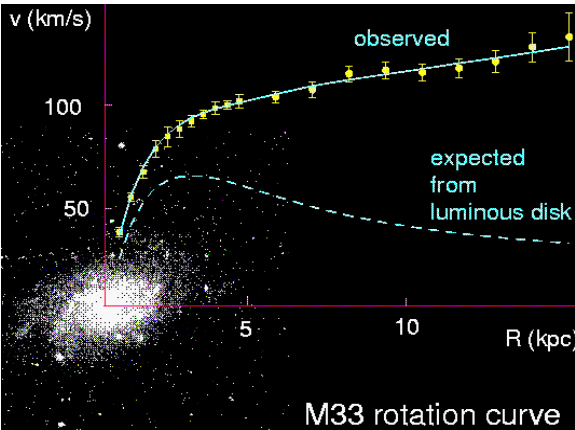


# Dark Matter: Why and How?

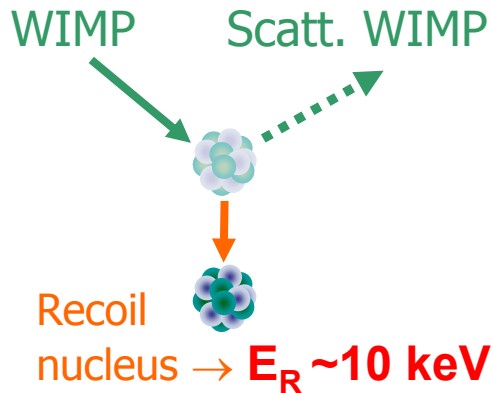


F. Zwicky  
1898-1974

**DM searches:**  
Prof. E. Aprile,  
Tue 21<sup>st</sup>, 9:00



## Direct detection of WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles):



Count rate:  
**<  $10^{-2}$  evt/kg/day!**

### Challenges to overcome:

- $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ;
- Neutrons;
- $\mu$ -induced events;

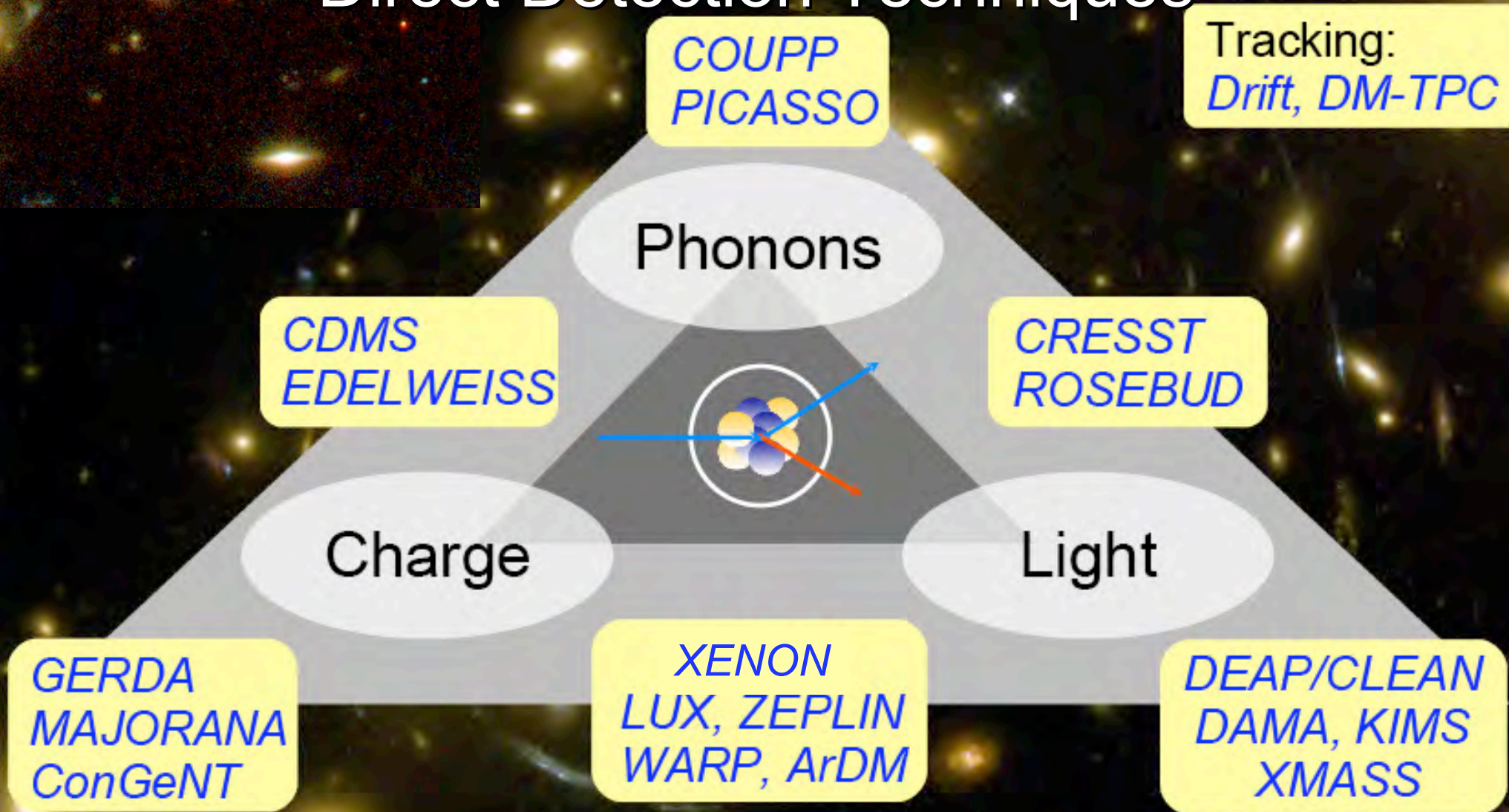
### Way to go:

- low radioactivity;
- powerful rejection;
- background knowledge;



# Dark Matter

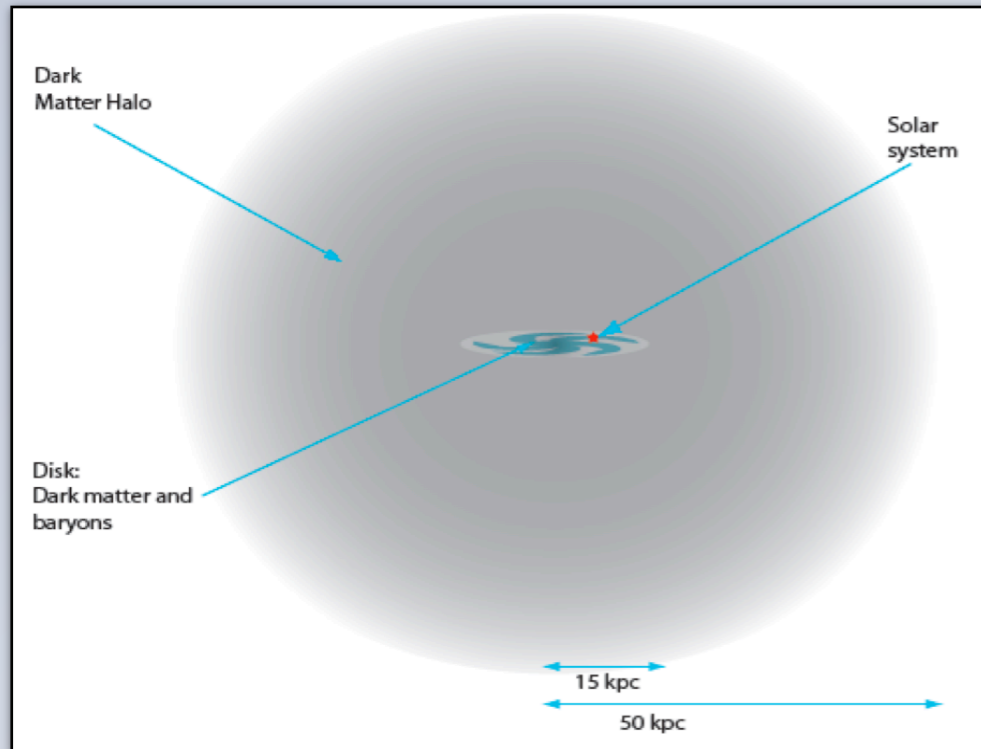
## Direct Detection Techniques



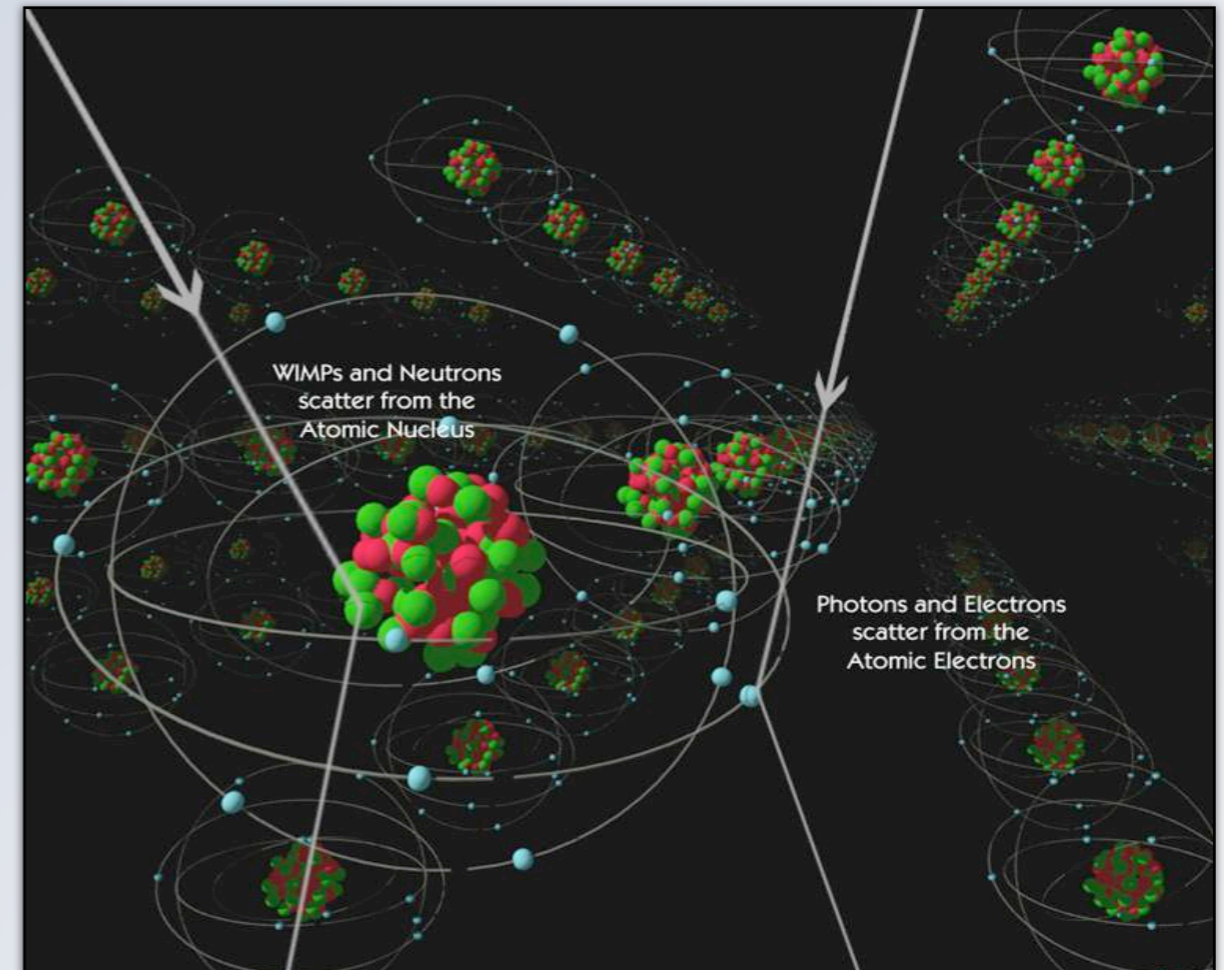
M. Schumann

Szukamy bardzo rzadkiego procesu: konieczna koincydencja dwóch sygnatur.

# Direct Detection of WIMPs



**Spherical Isothermal Halo**  
**Max. Boltz.  $\nu$  distribution,**  
 **$\langle v \rangle \sim 230 \text{ km/s}$**



## Build a good mousetrap!

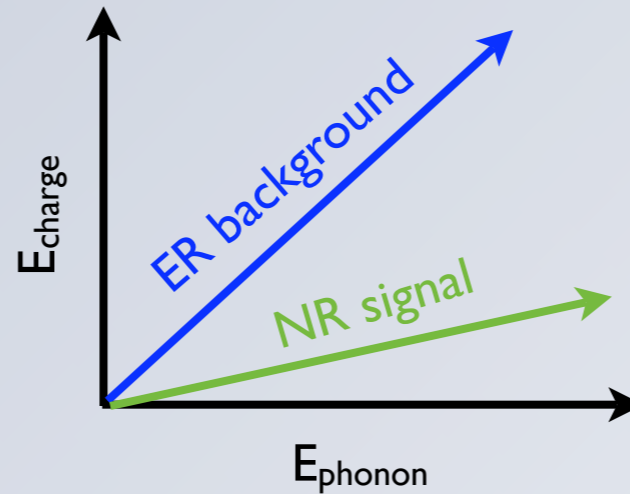
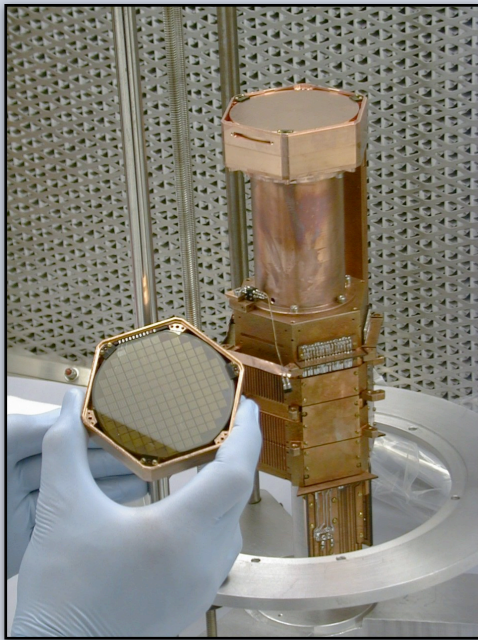
- Choose target material to “see” recoils
- Discriminate NRs from ERs
- Reduce background

RARE EVENT SEARCH

**“See” Nuclear Recoils**  
 **$\langle E_r \rangle \sim 30 \text{ keV}$ ,  $\sim 1 \text{ event/kg/100days}$**

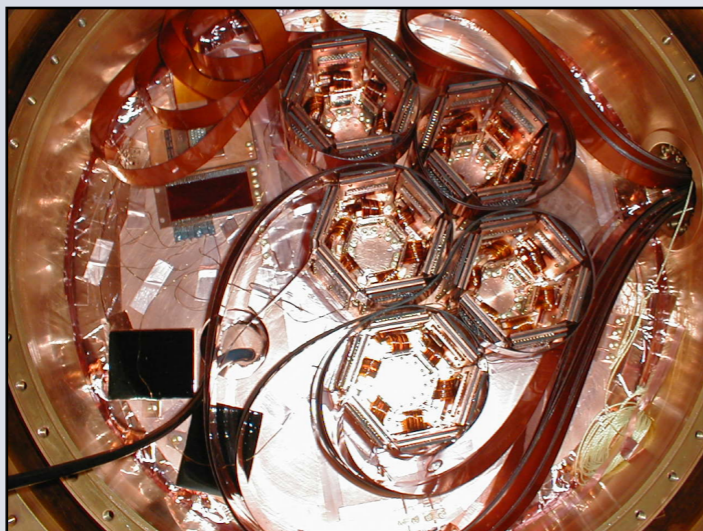
# CDMS-2 in a nutshell

**Ge & Si** target masses



**Allow  $< 1$  background event to maximize discovery potential**

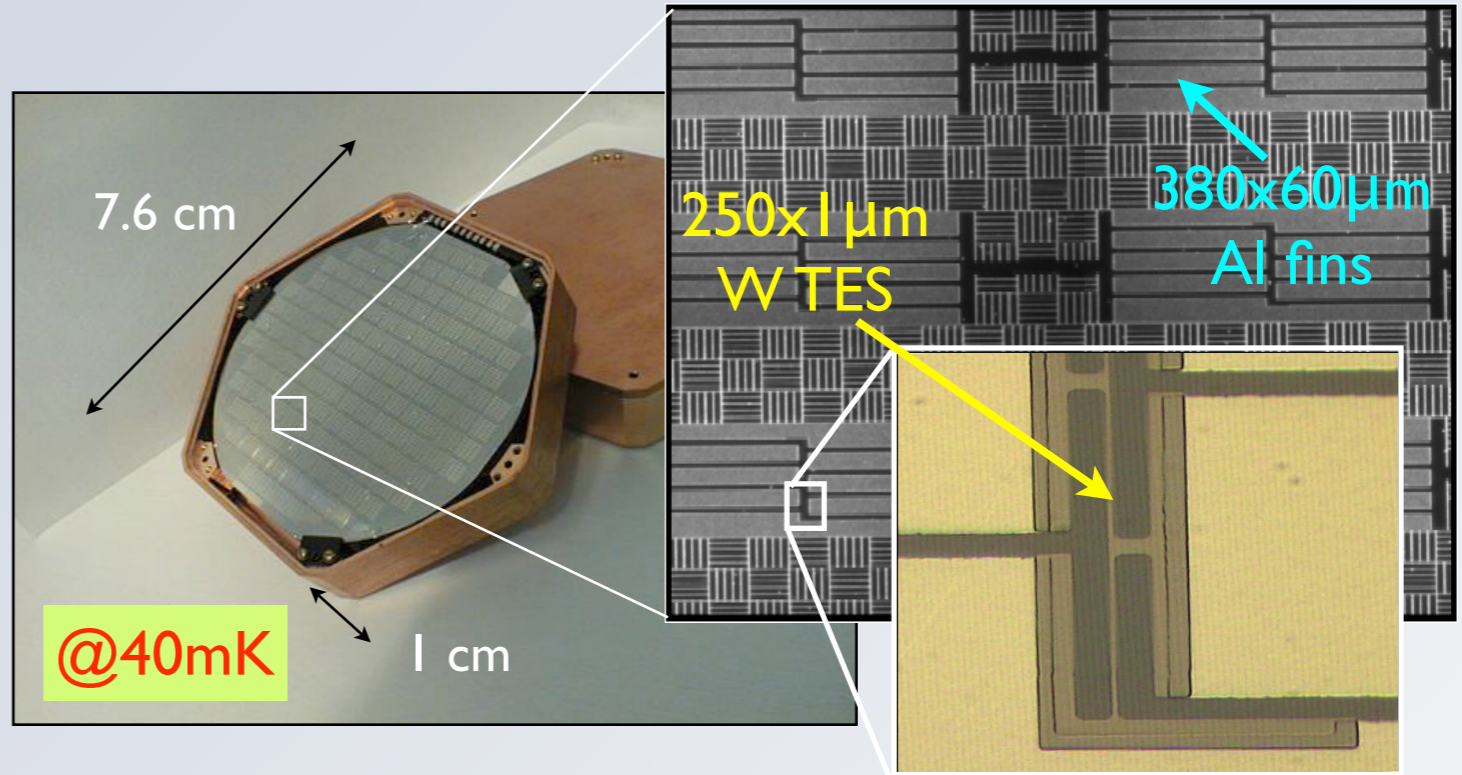
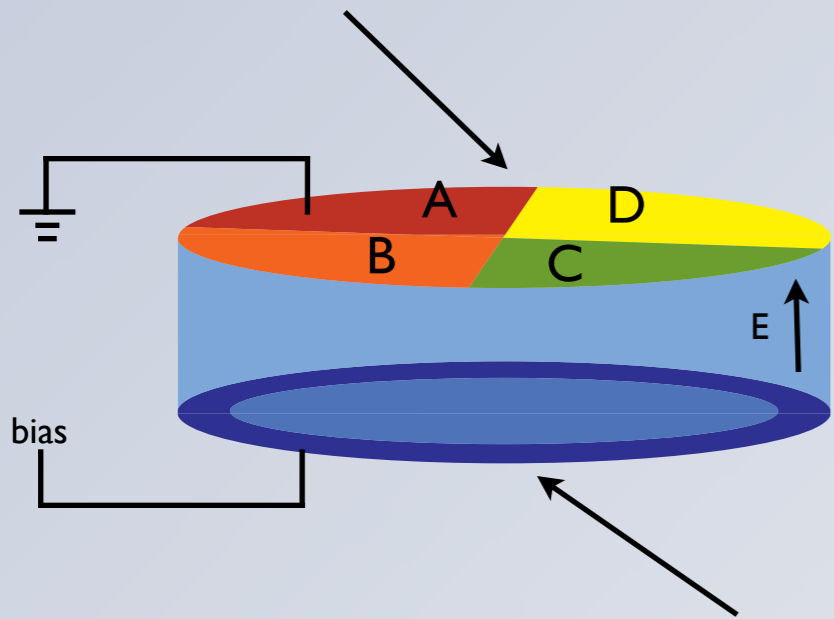
Event by event **discrimination** of nuclear and electron recoils using **ionization** and **phonon** signals



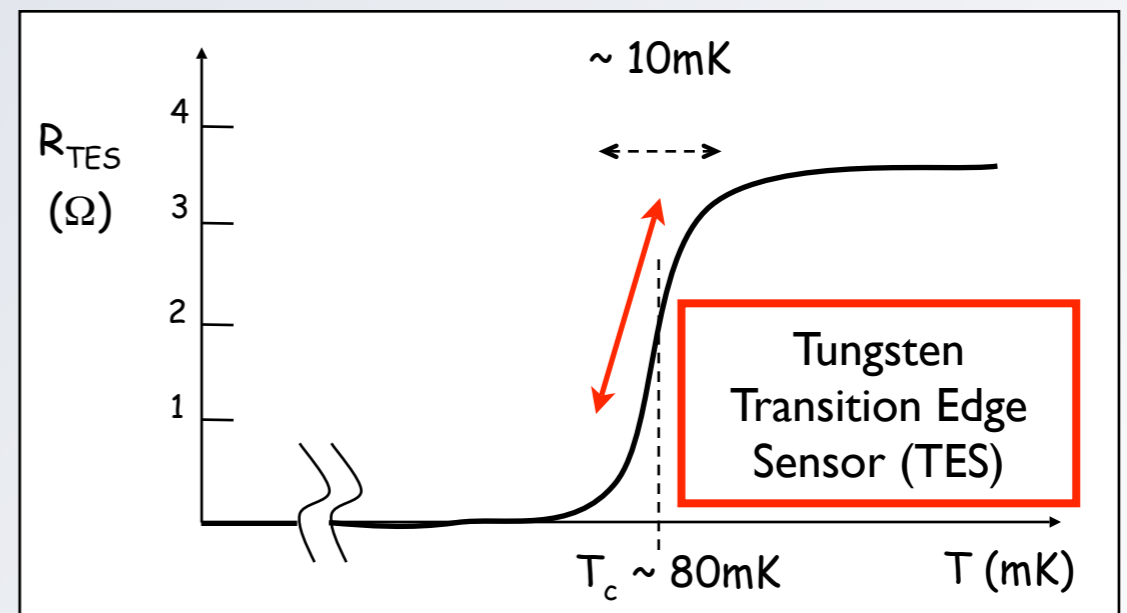
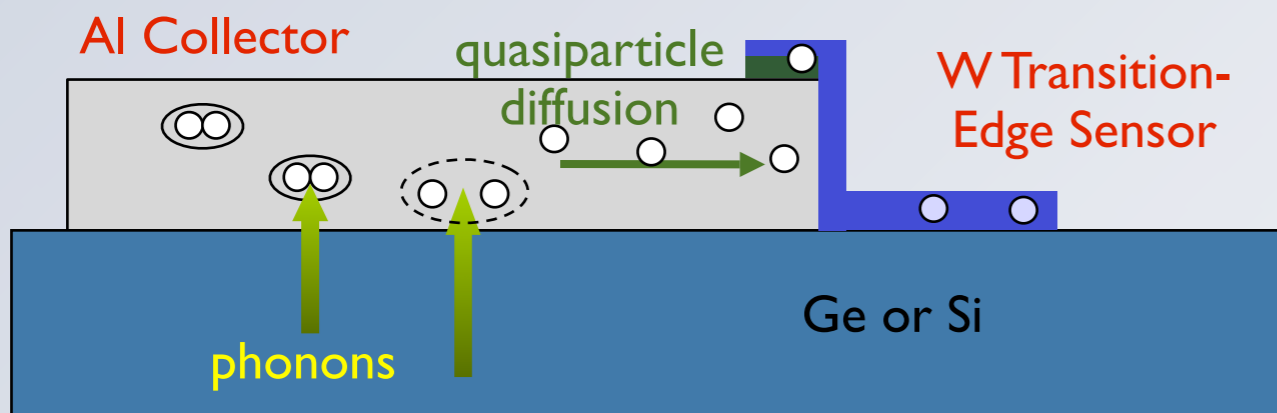
**Control Backgrounds** by going underground, using clean materials and shielding

# ZIP: Z-sensitive Ionization & Phonon Detectors

**Phonon readout:** 4 quadrants of superconducting Al phonon absorbers and W Transition-Edge Sensors

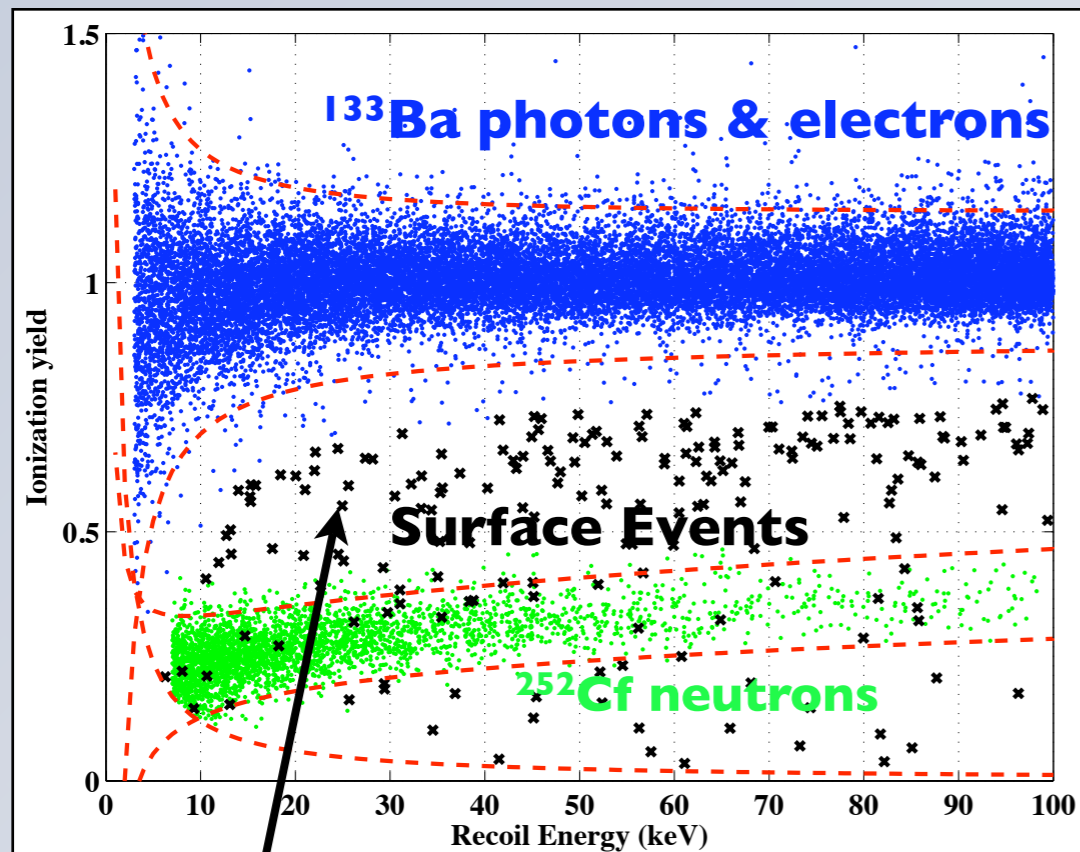


**Charge readout:** 2 concentric electrodes for measurement and fiducial volume

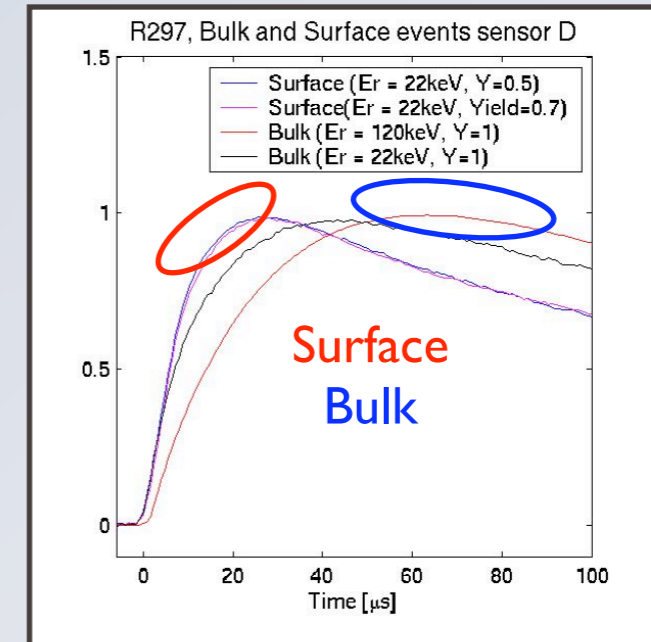


# Basic Discrimination principles

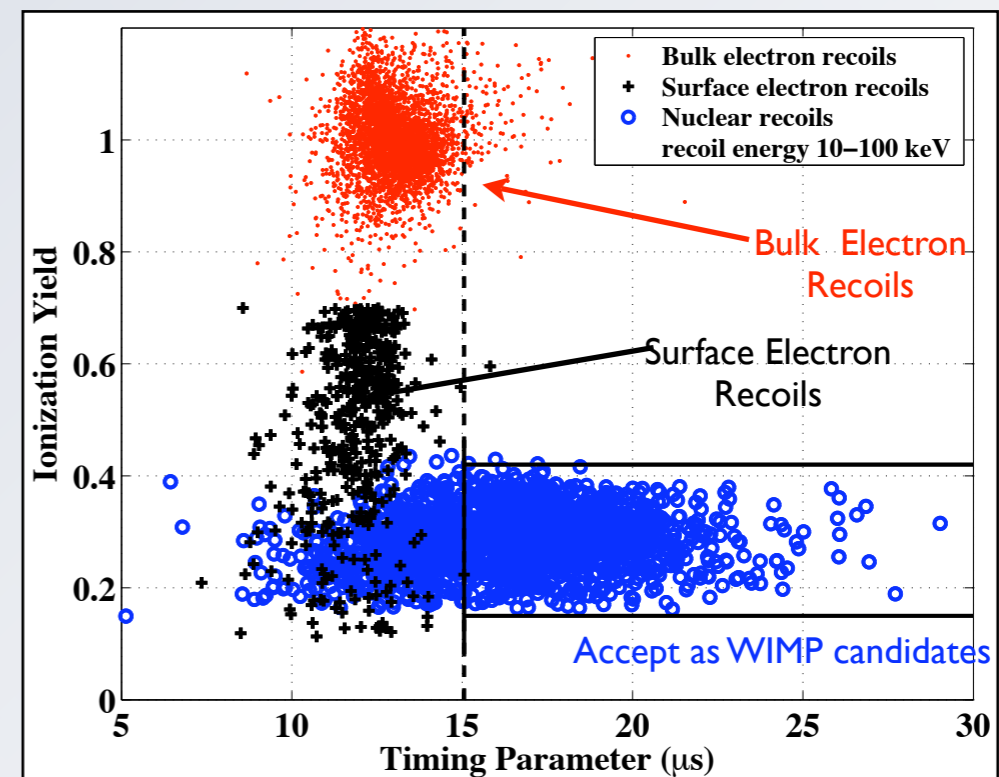
Reject bulk electron recoils using  $\gamma = Q/E_{\text{recoil}}$



- Events within 10 micron “dead layer” have poor charge collection
- Electrons, x-rays low energy gammas from contamination of surfaces surrounding detectors



Reject surface events using promptness of phonon pulse



# Background Control in CDMS-2

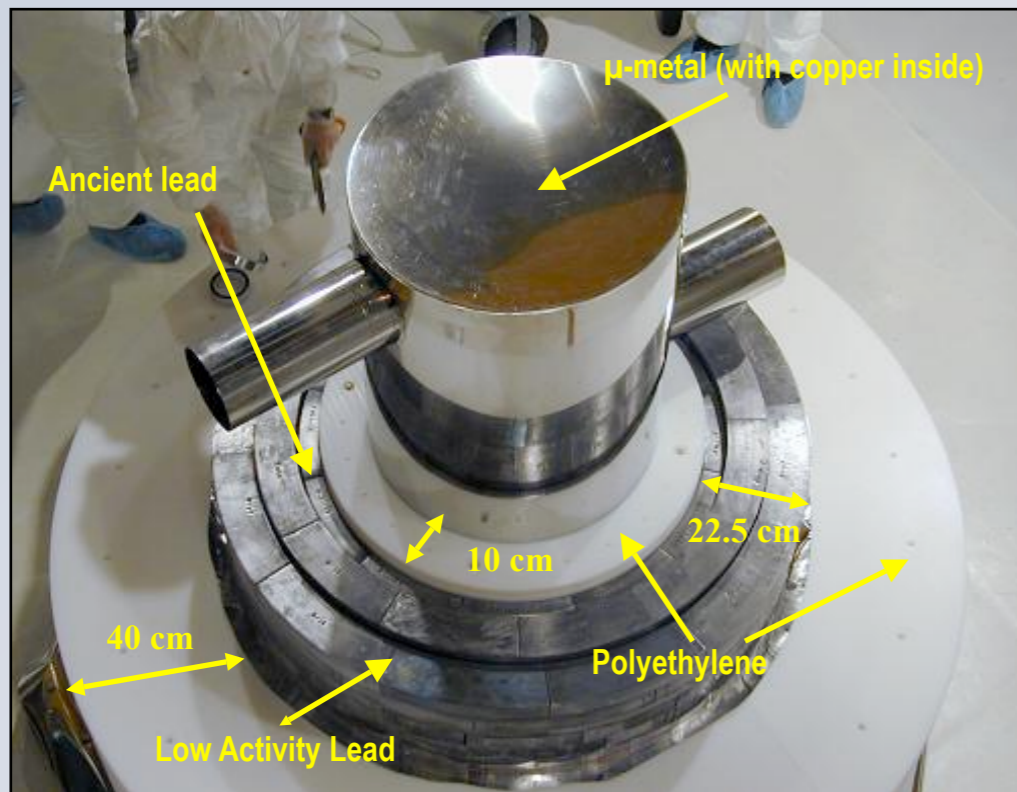


LEVEL NO. 27  
2341 FEET BELOW THE SURFACE  
689 FEET BELOW SEA LEVEL

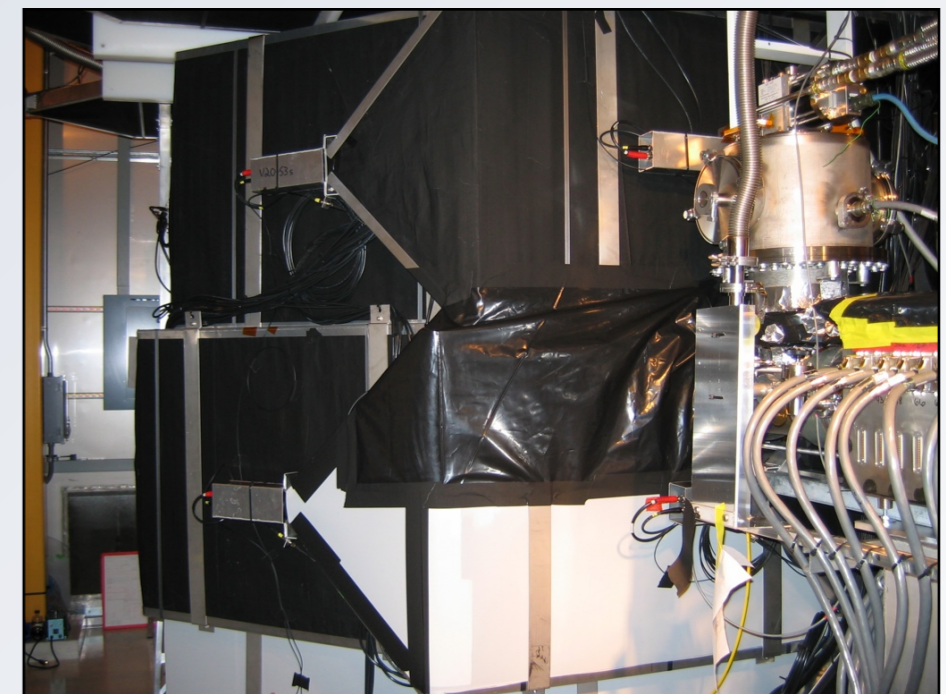
Soudan Underground Lab



RF shielded class  
10,000 clean room

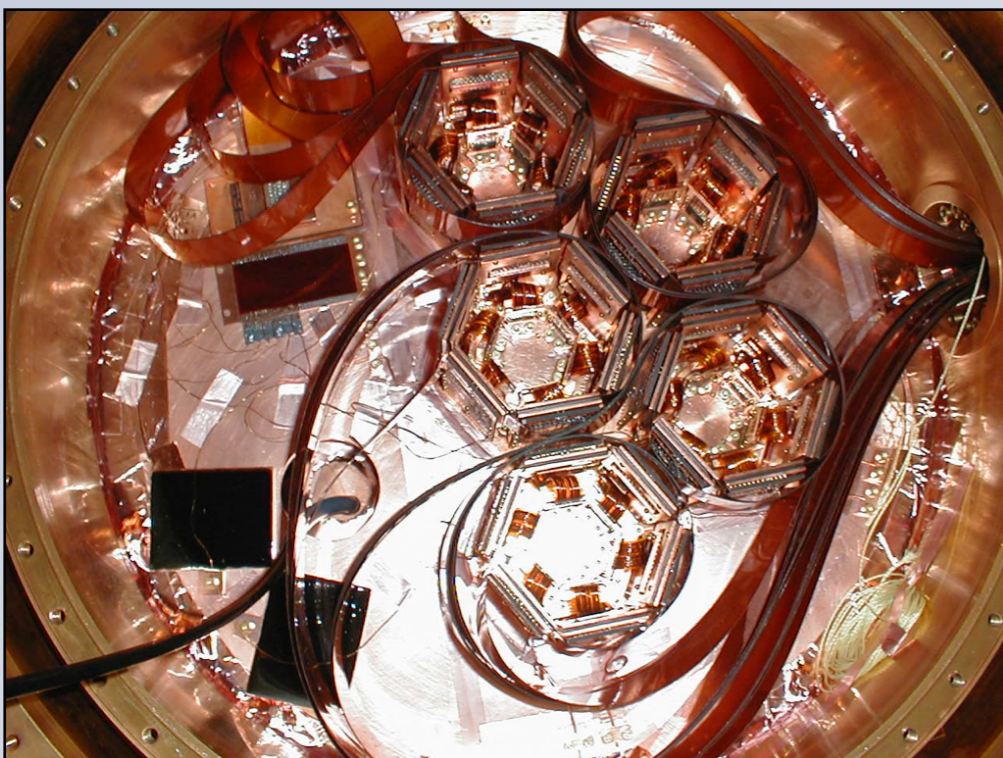


Passive shielding



Plastic scintillator muon veto

# CDMS-2 @ Soudan



	T1	T2	T3	T4	T5
Z1	G6	S14	S17	S12	G7
Z2	G11	S28	G25	G37	G36
Z3	G8	G13	S30	S10	S29
Z4	S3	S25	G33	G35	G26
Z5	G9	G31	G32	G34	G39
Z6	S1	S26	G29	G38	G24

Side View

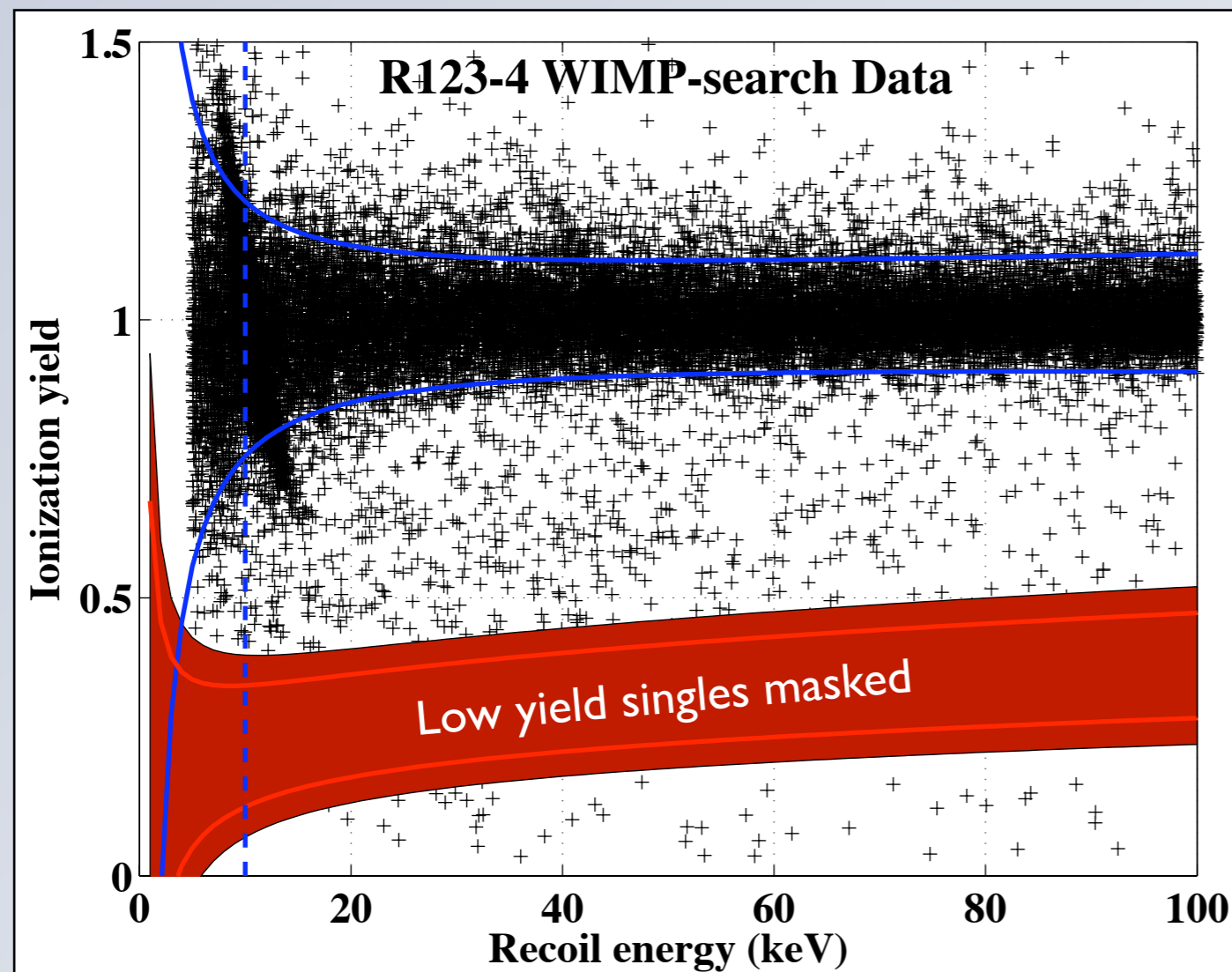
- 30 detectors installed and operating in Soudan since June 2006.
  - 4.75 kg of Ge, 1.1 kg of Si
- Seven Total Data Runs:
  - R123 - R124:
    - taken: (10/06 - 3/07) (4/07 - 7/07)
    - exposure: ~400 kg-d (Ge “raw”)
    - PRL 102, 011301 (2009)
  - R125 - R128
    - taken: (7/07 - 1/08) (1/08 - 4/08)  
(5/08 - 8/08) (8/08 - 9/08)
    - exposure: ~ 750 kg-d (Ge “raw”)
    - Under Analysis
  - R129:
    - taken: (11/08 - 3/09)

# CDMS-2 : First Five Tower Result

PRL 102, 011301 (2009)

## Blind Analysis:

Event selection and efficiencies were calculated without looking at the signal region of the WIMP-search data.



## Event Selection:

- Energy threshold ( $10-100$  keV)
- Veto-anticoincident
- Single-scatter
- Inside fiducial volume
- 2-sigma Nuclear Recoil
- Phonon timing



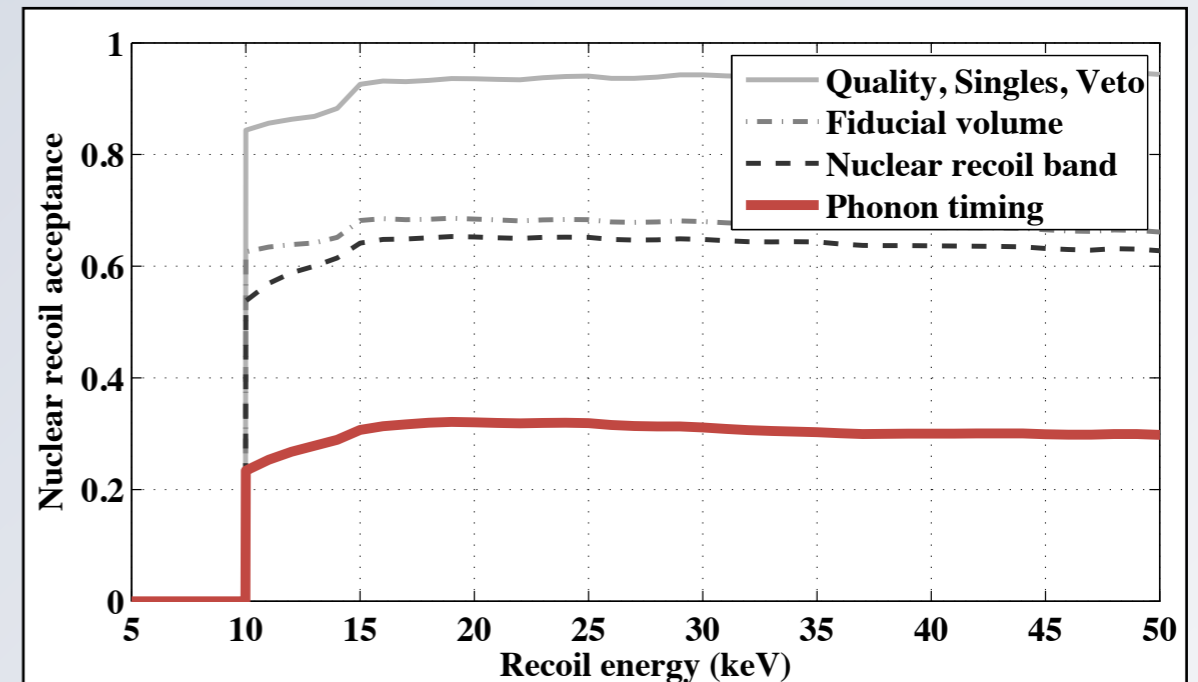
# CDMS-2 : First Five Tower Result

PRL 102, 011301 (2009)

## Surface Background

Estimated number of background events to pass surface cut in Ge

$$0.6^{+0.5}_{-0.3} (\text{stat.})^{+0.3}_{-0.2} (\text{syst.})$$



## Neutron Background

Poly Cu ( $\alpha, n$ ):  $< 0.03$

Pb (fission):  $< 0.1$

Cosmogenic:  $< 0.1$  (MC 0.03-0.05)

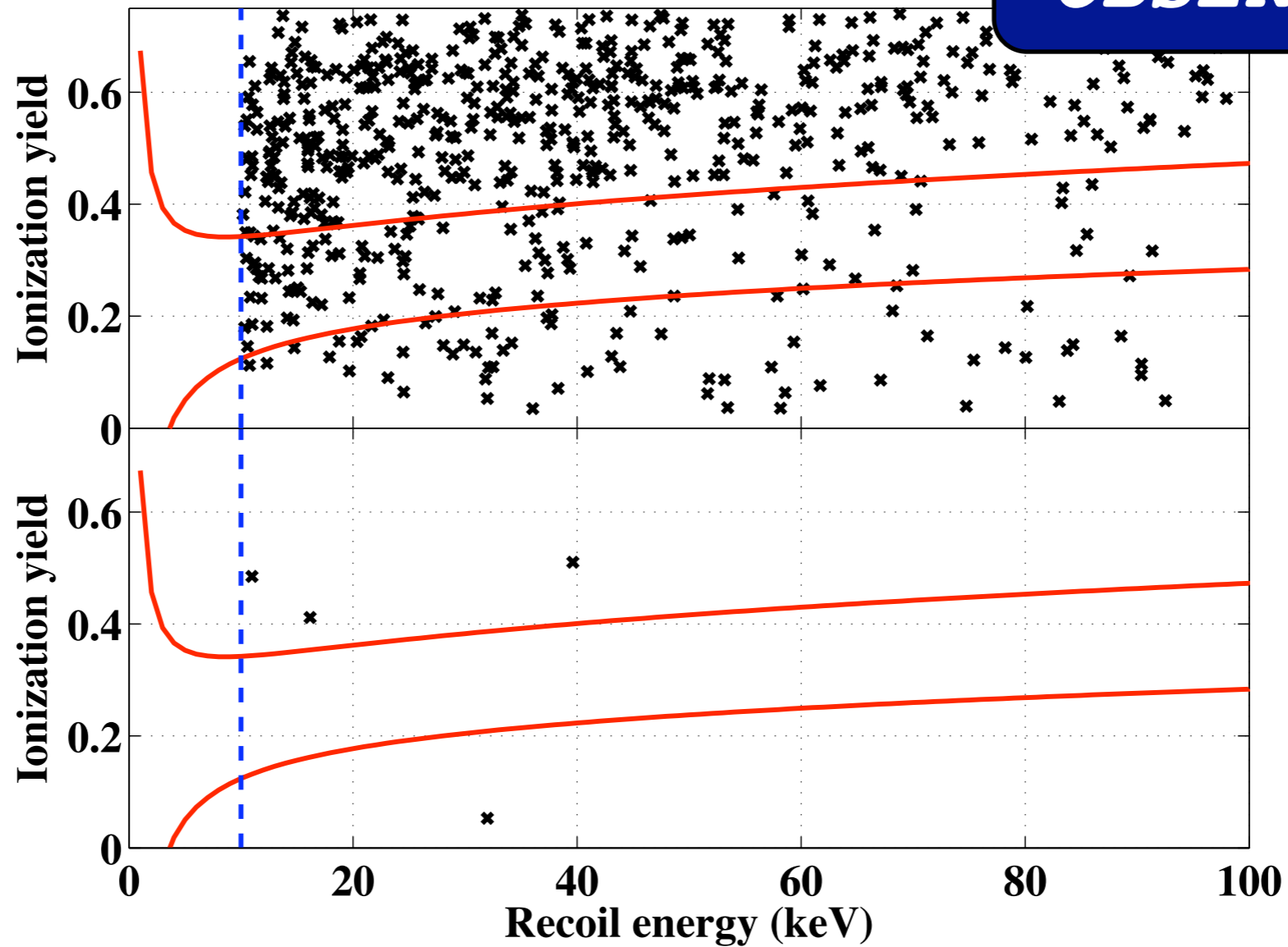
398 raw kg-d  
121 kg-d WIMP equiv. @ 60  
GeV/c<sup>2</sup> (10 - 100 keV  
analysis energy range)

# CDMS-2 : First Five Tower Result

PRL 102, 011301 (2009)

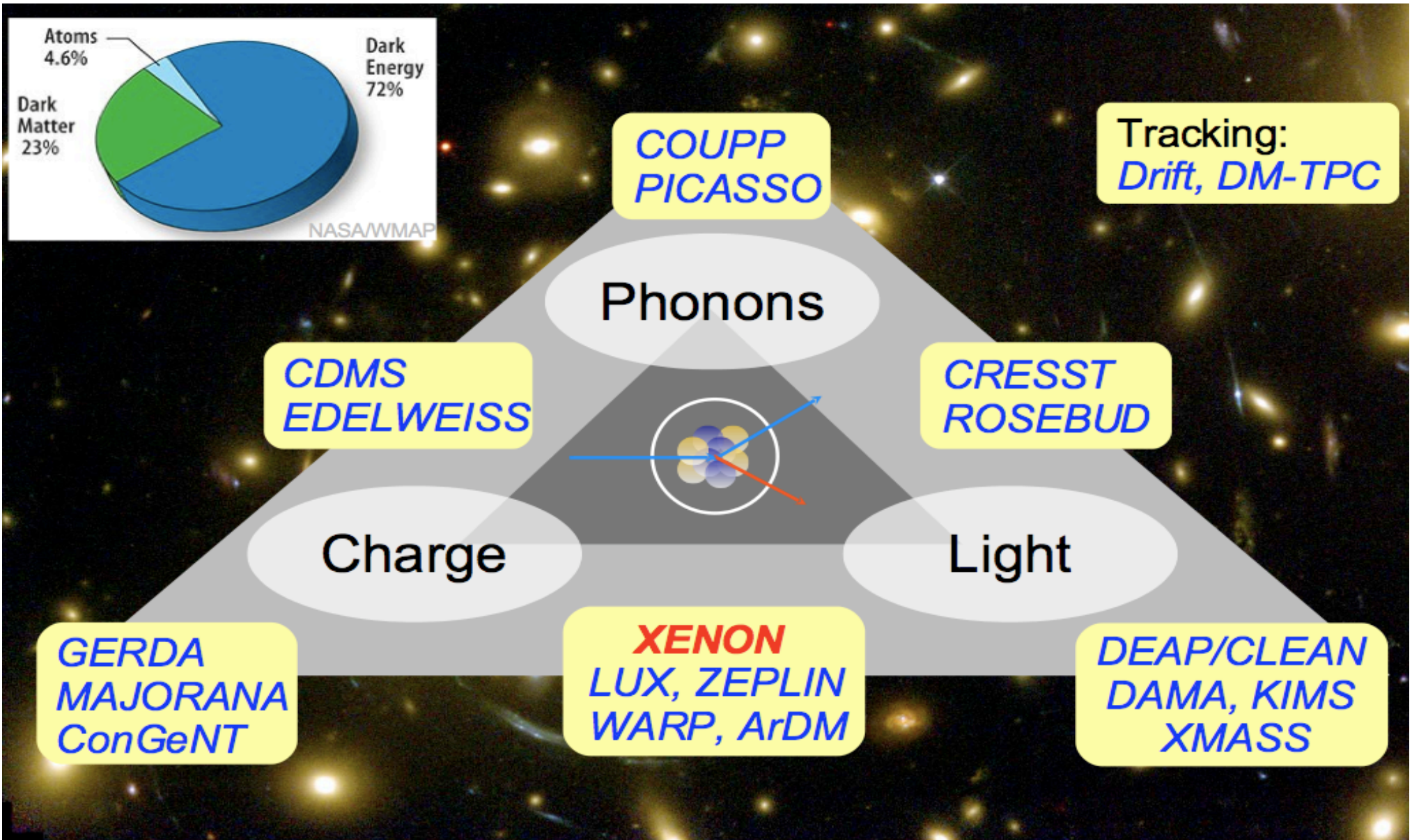
**NO EVENTS  
OBSERVED!**

FAIL  
timing cut



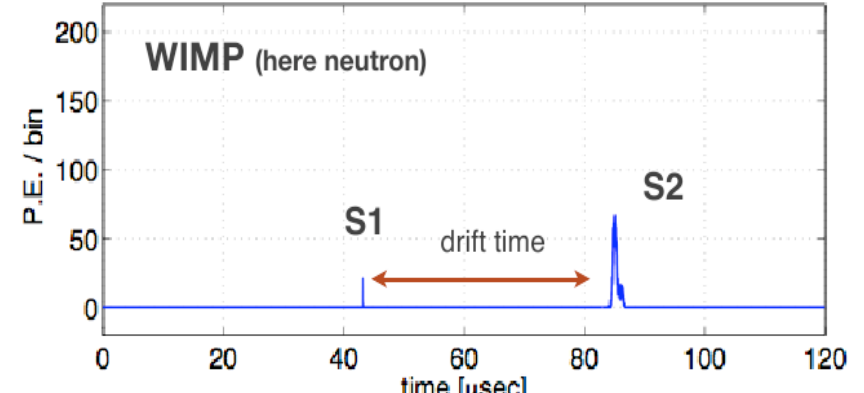
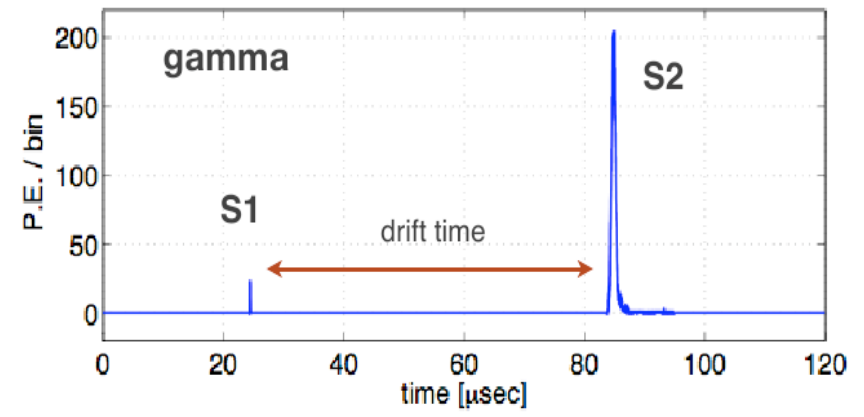
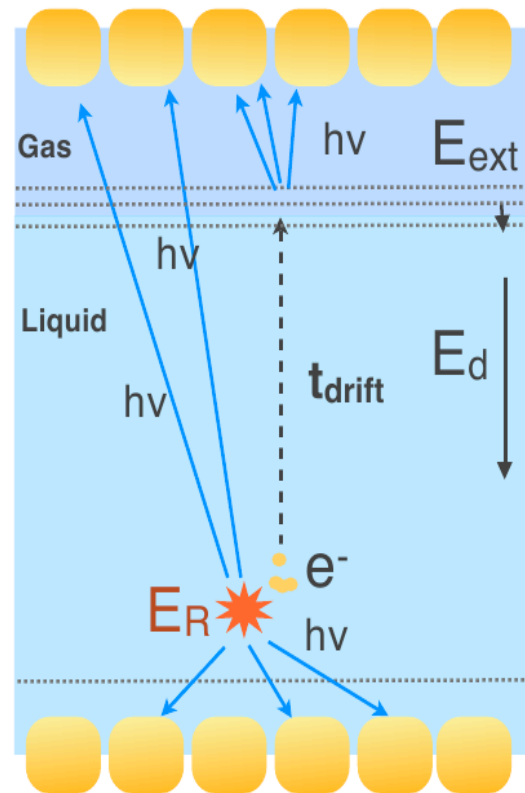
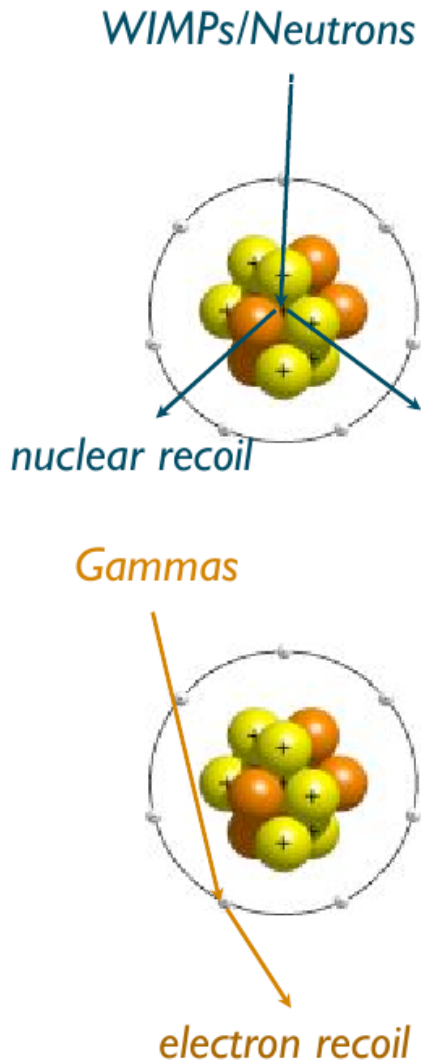
PASS  
timing cut

# Dark Matter Direct Detection



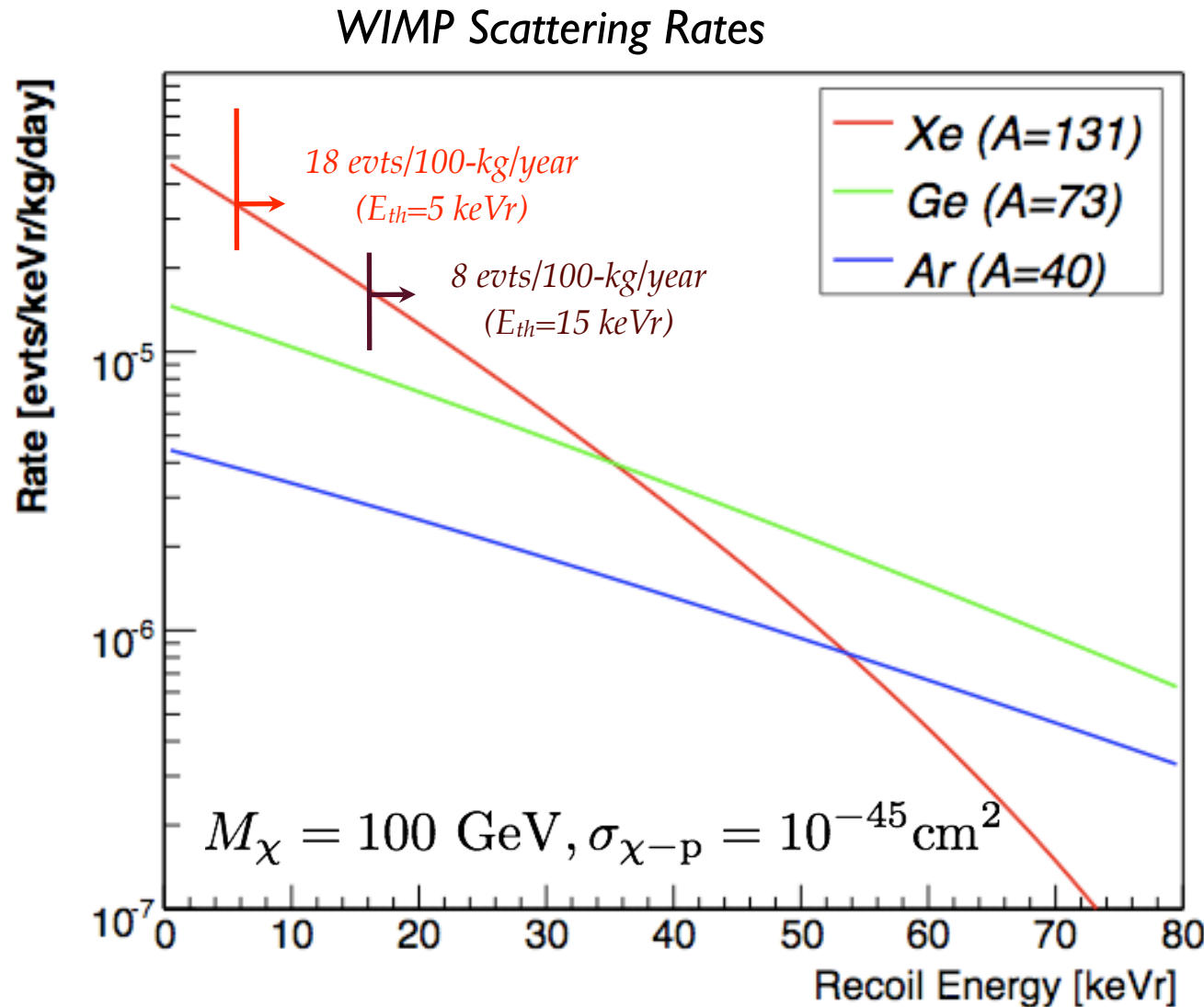
# Double phase TPC

- Primary scintillation signal (S1)
- Electrons drift over 30 cm max distance
- Electrons are extracted and accelerated generating secondary scintillation signal
- The time difference between the two signals gives information on event position in z



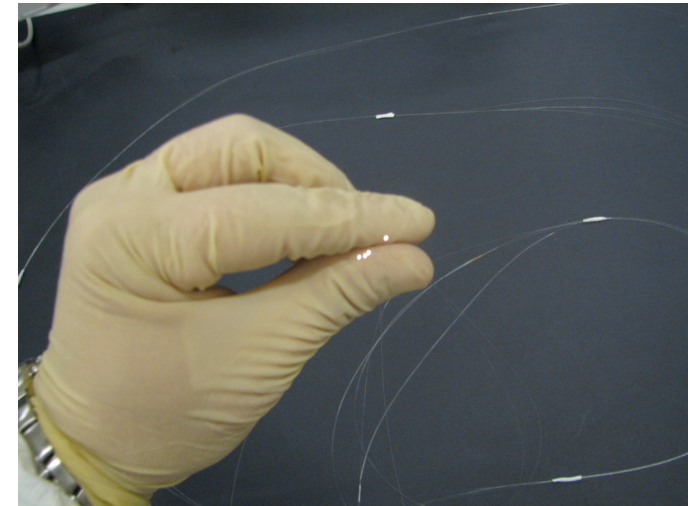
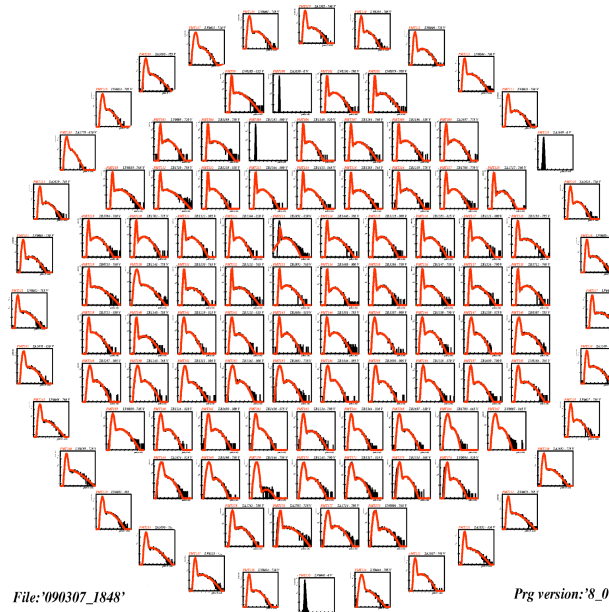
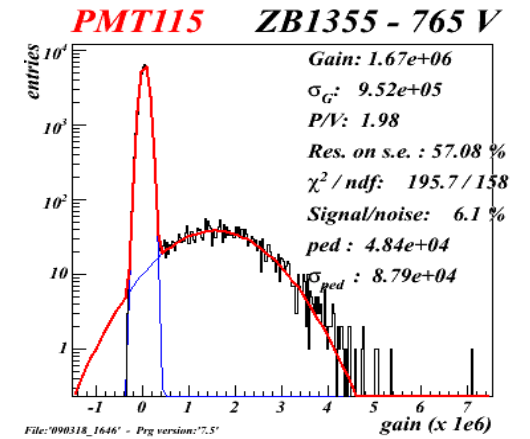
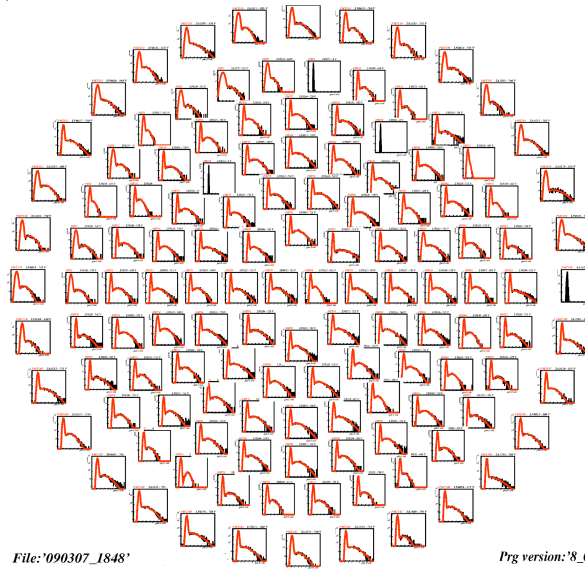
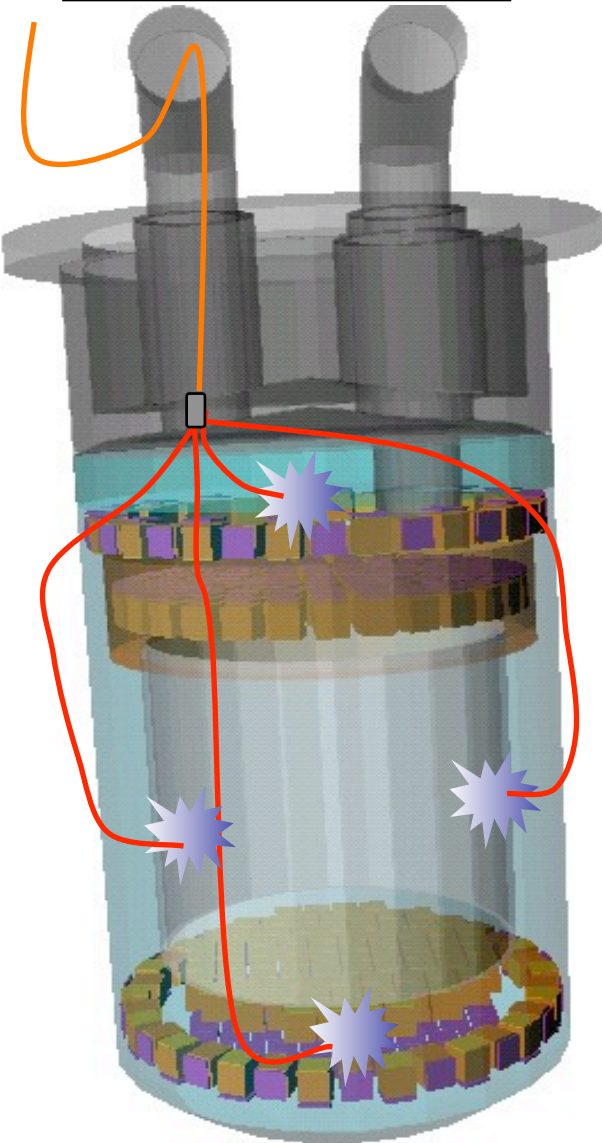
# Why Liquid Xenon?

- ✓ large mass (ton scale)
- ✓ easy cryogenics
- ✓ low energy threshold (a few keV)
- ✓  $A \sim 131$  (good for SI)
- ✓  $\sim 50\%$  odd isotopes (SD)
- ✓ background suppression
  - good self shielding features ( $\sim 3$  g/cm<sup>3</sup>)
  - low intrinsic radioactivity
  - gamma background discrimination
  - position sensitive (TPC mode)

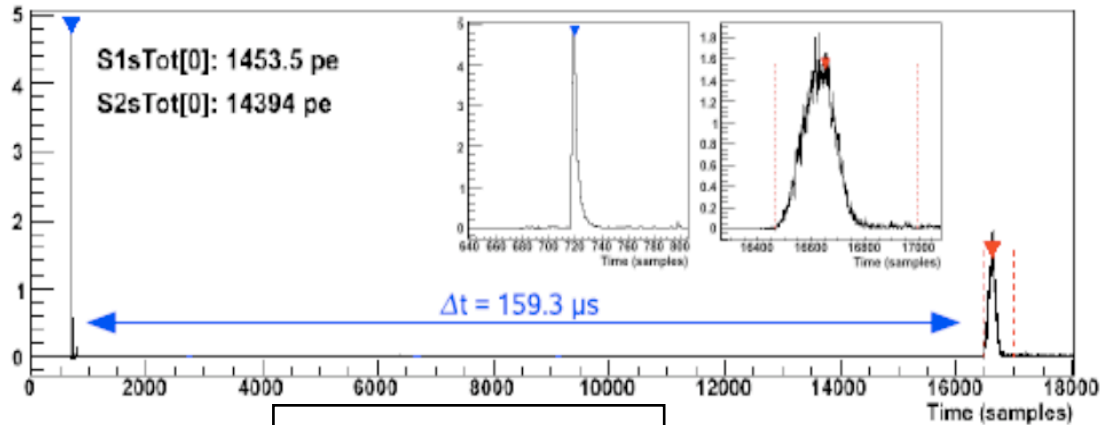


# Xenon100: PMT light calibration

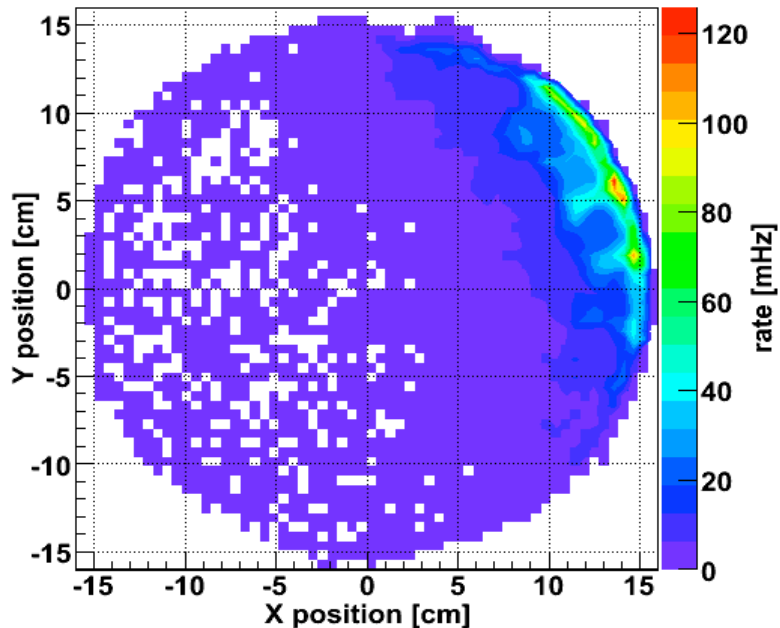
4 optical fibers



# Xenon100: Position reconstruction

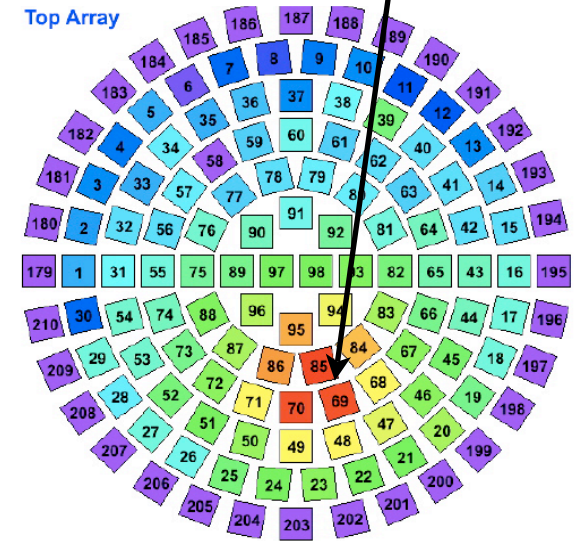


drift time  $\rightarrow z$



Cs137 from the side

Very localized S2 hit pattern (xy position information)

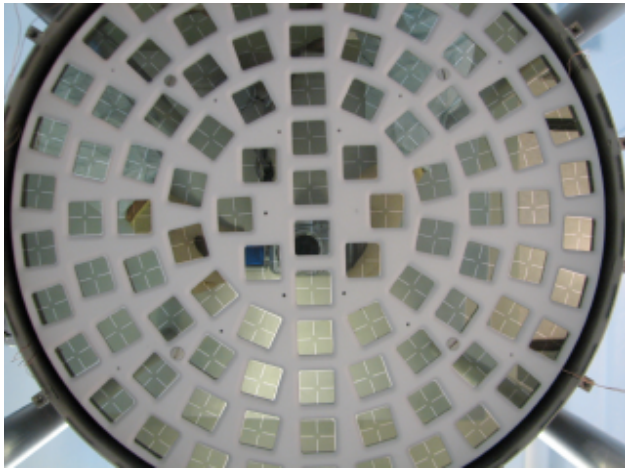


3 different methods for xy position reconstruction:  
 neural network  
 support vector machine  
 Least squares minimization

# What is inside has to be carefully selected

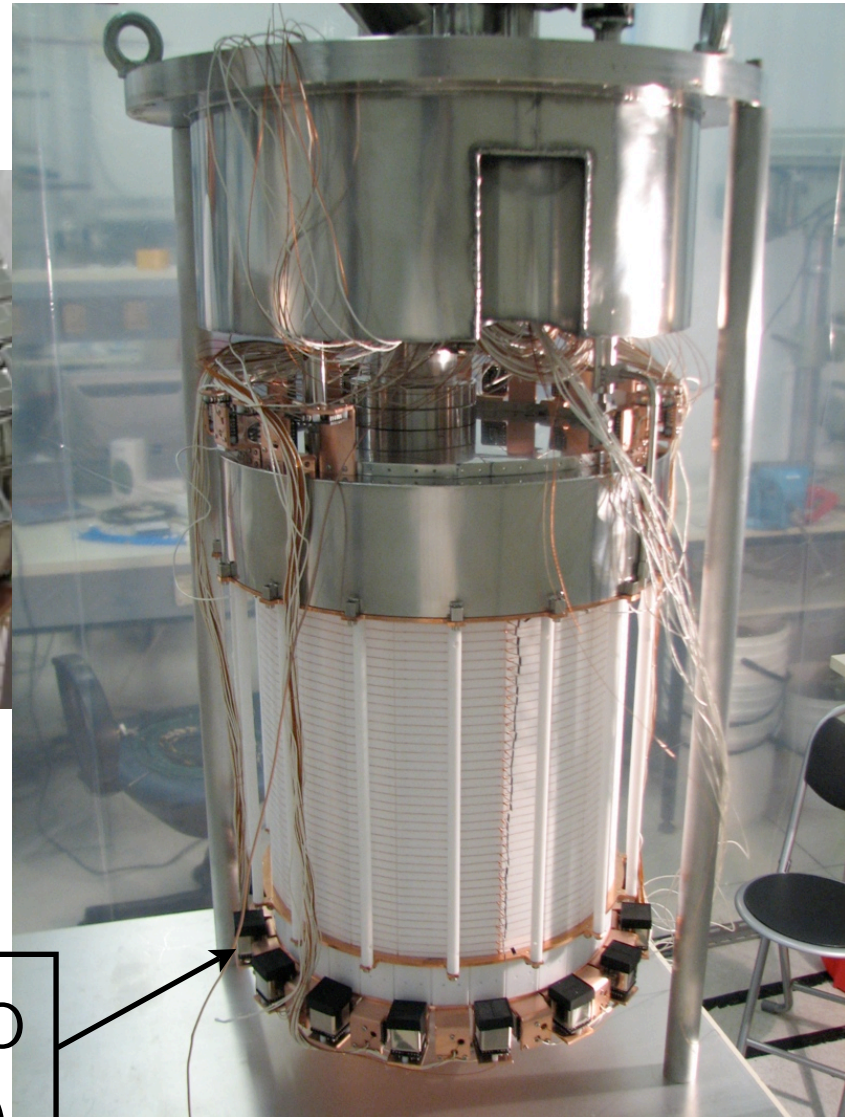


242 (Hamamatsu R8520) 1"x1"  
low radioactivity PMTs



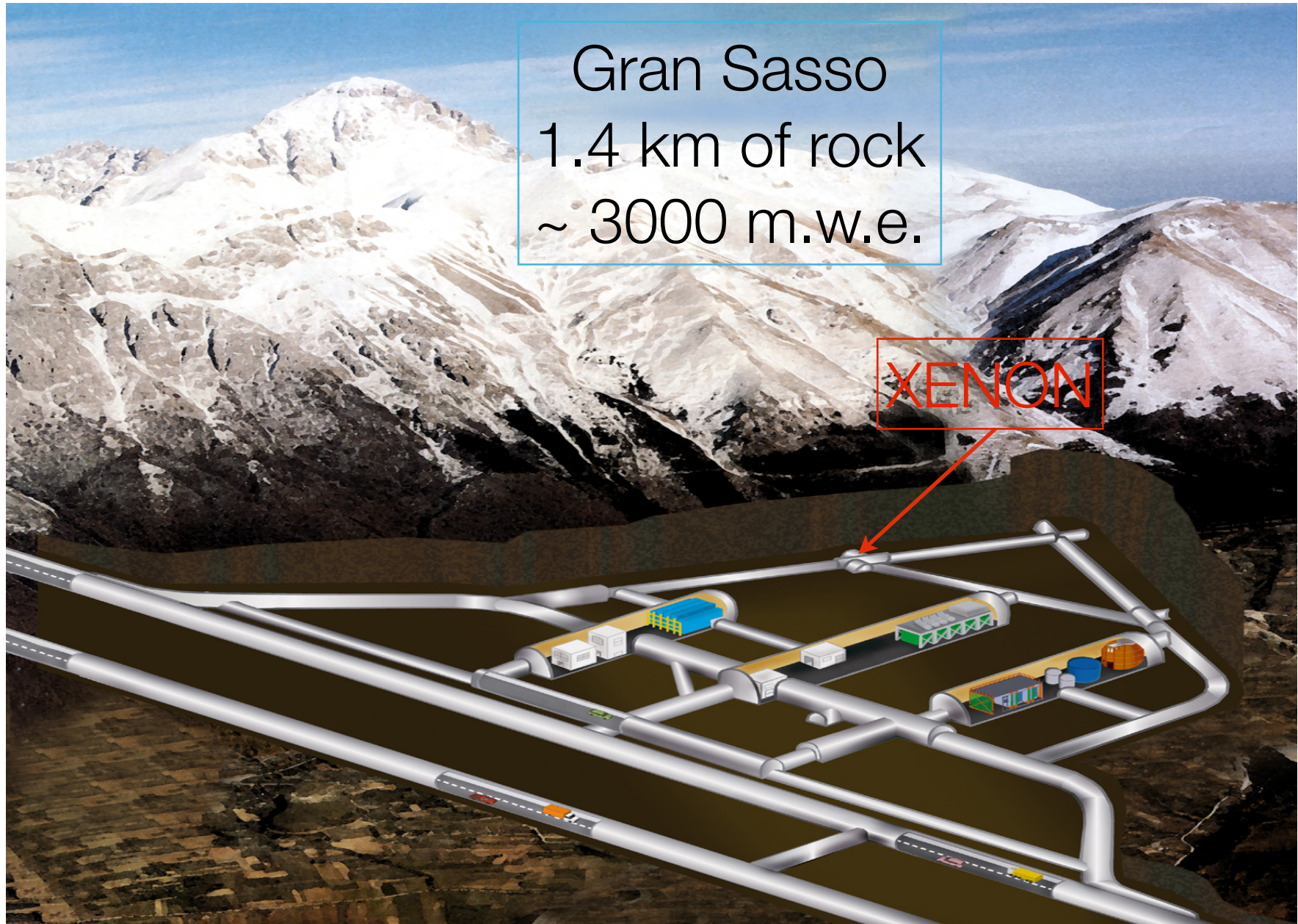
SS  
PTFE  
Copper  
Cables  
Screws

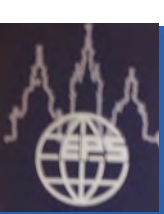
100 kg LXe Active veto  
(side, top and bottom)





Install the detector underground...

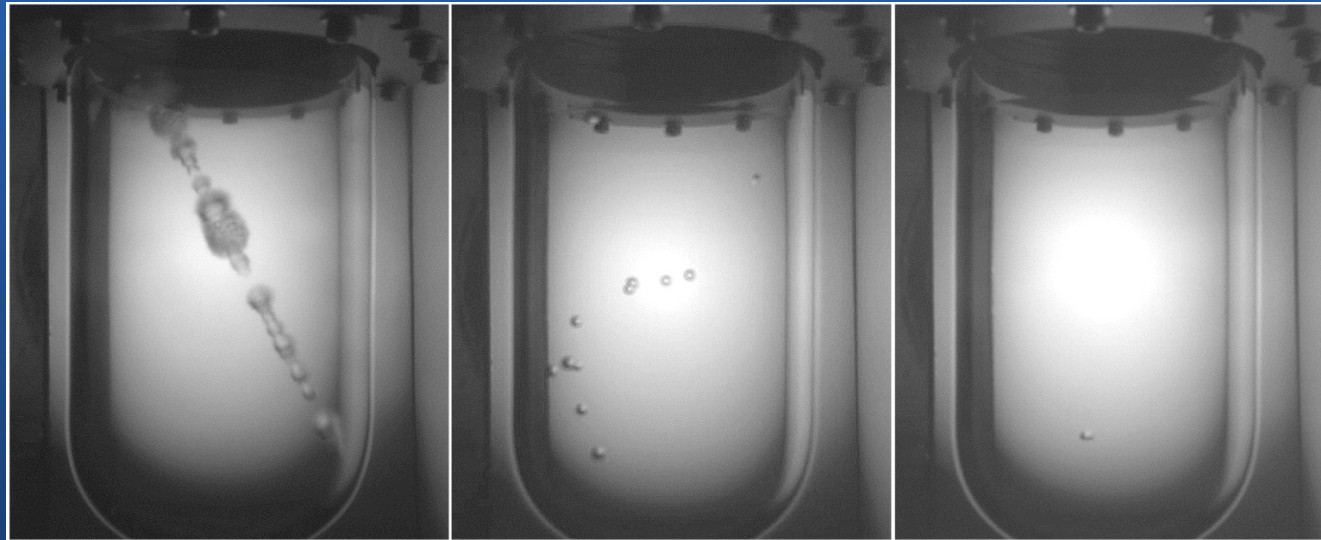




# Warm Liquid Dark Matter Detector

## \* COUPP

- Room Temp Bubble Chamber,  $\text{CF}_3\text{I}$ , 2 kg tested



A CCD camera takes pictures at 50 Hz. Chamber triggers on appearance of bubble in the frame.

Single bubble DM signature.

- New 20 and 60 kg chambers will go underground in 2010