

**BADANIE ODDZIAŁYWAŃ
NEUTRIN ZA POMOCĄ
KOMORY TPC
WYPEŁNIONEJ CIEKŁYM
ARGONEM**

Justyna Łagoda

21.10.2005

PLAN

- obecny stan wiedzy o oscylacjach neutrin – krótkie przypomnienie
- komora projekcji czasowej wypełniona ciekłym argonem – **ICARUS**
 - rekonstrukcja przypadków
 - badanie światła scyntylicyjnego
- klasyfikacja przypadków oddziaływań CC neutrin ν_τ
 - wpływ polaryzacji powstałego leptonu τ na wyniki klasyfikacji
- przyszłość technologii ciekłoargonowej

OSCYLACJE

- macierz mieszania

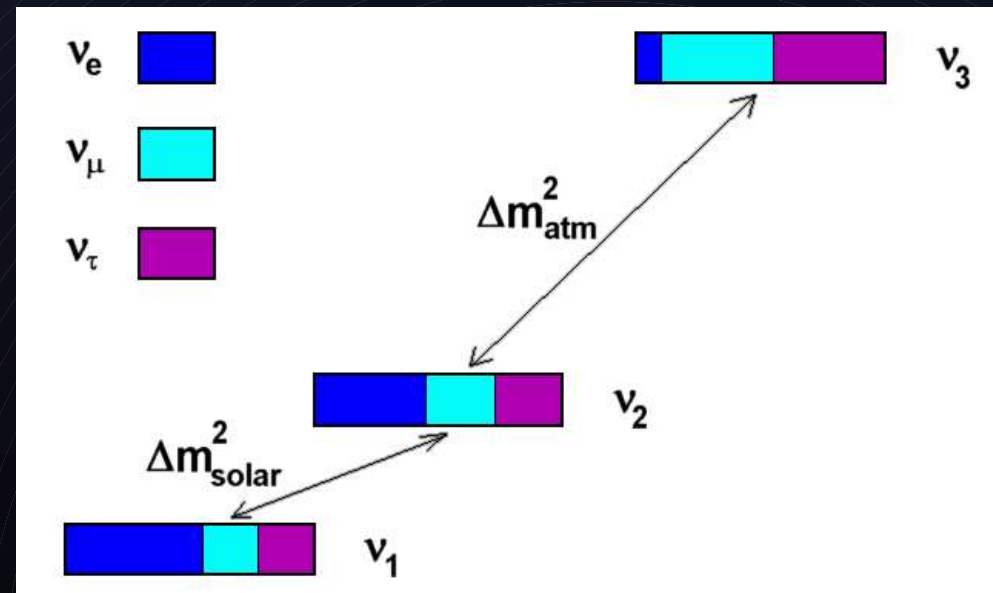
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad U = \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} e^{-i\phi} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} e^{i\phi} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}$$

- **3** kąty mieszania $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$
- **1** faza łamania CP ϕ
- **2** niezależne różnice mas:
 $\Delta m_{12}^2 = \Delta m_{\text{solar}}^2, \Delta m_{23}^2 = \Delta m_{\text{atm}}^2$

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

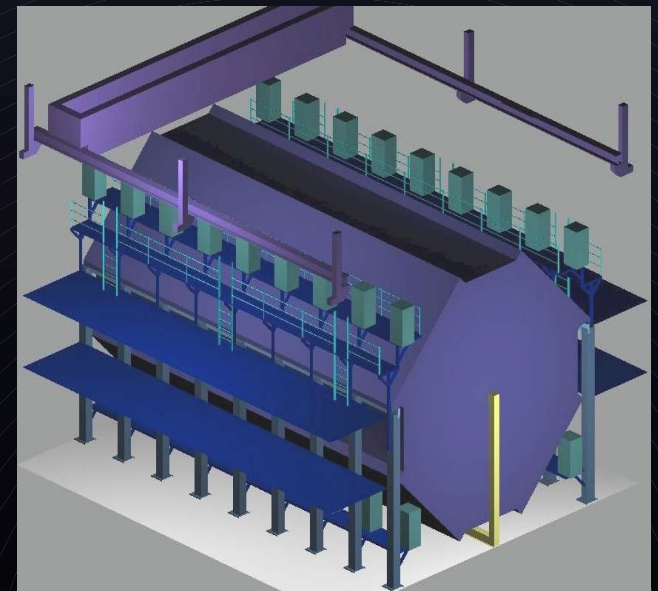
$$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

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

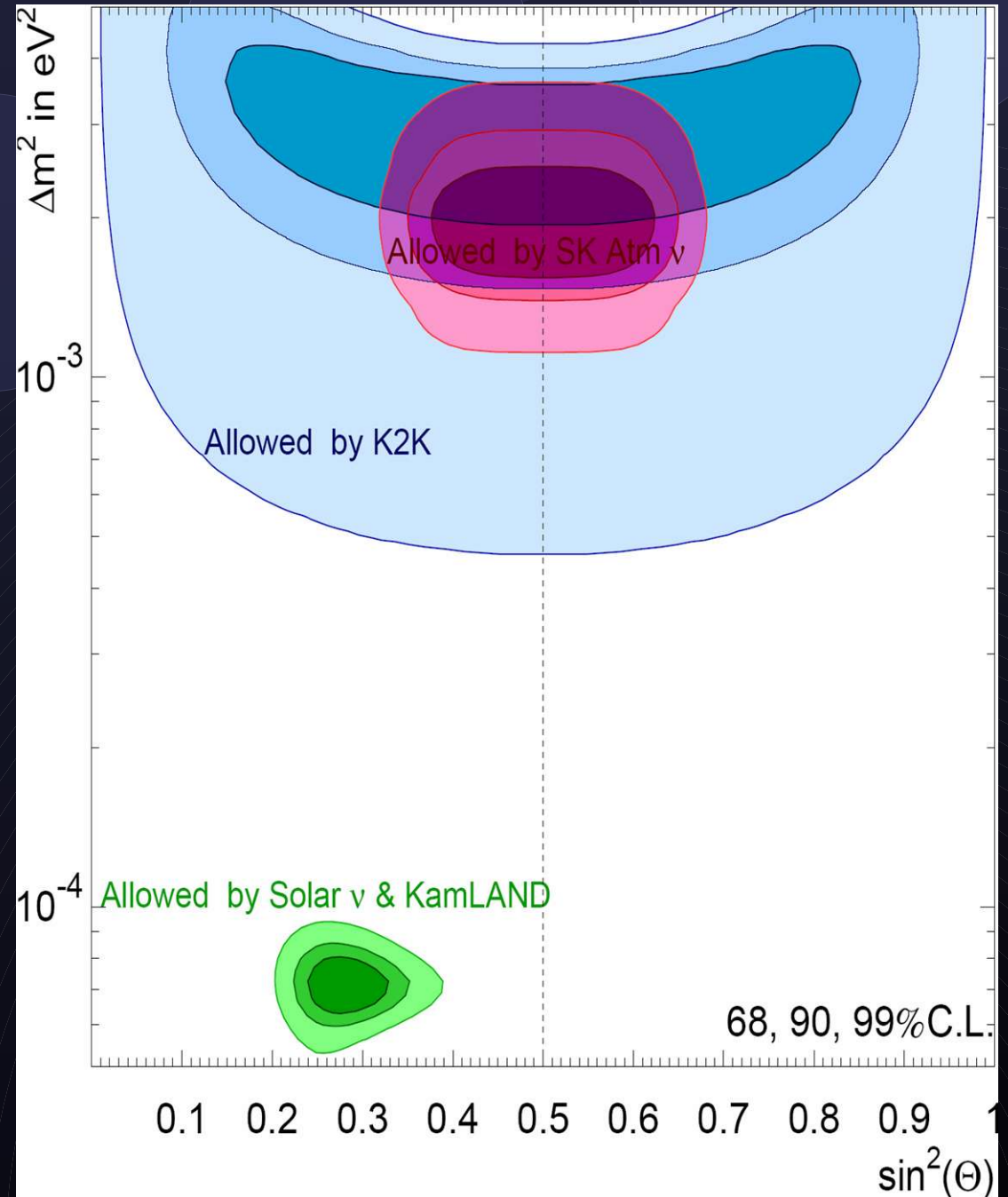


POMIARY PARAMETRÓW OSCYLACJI

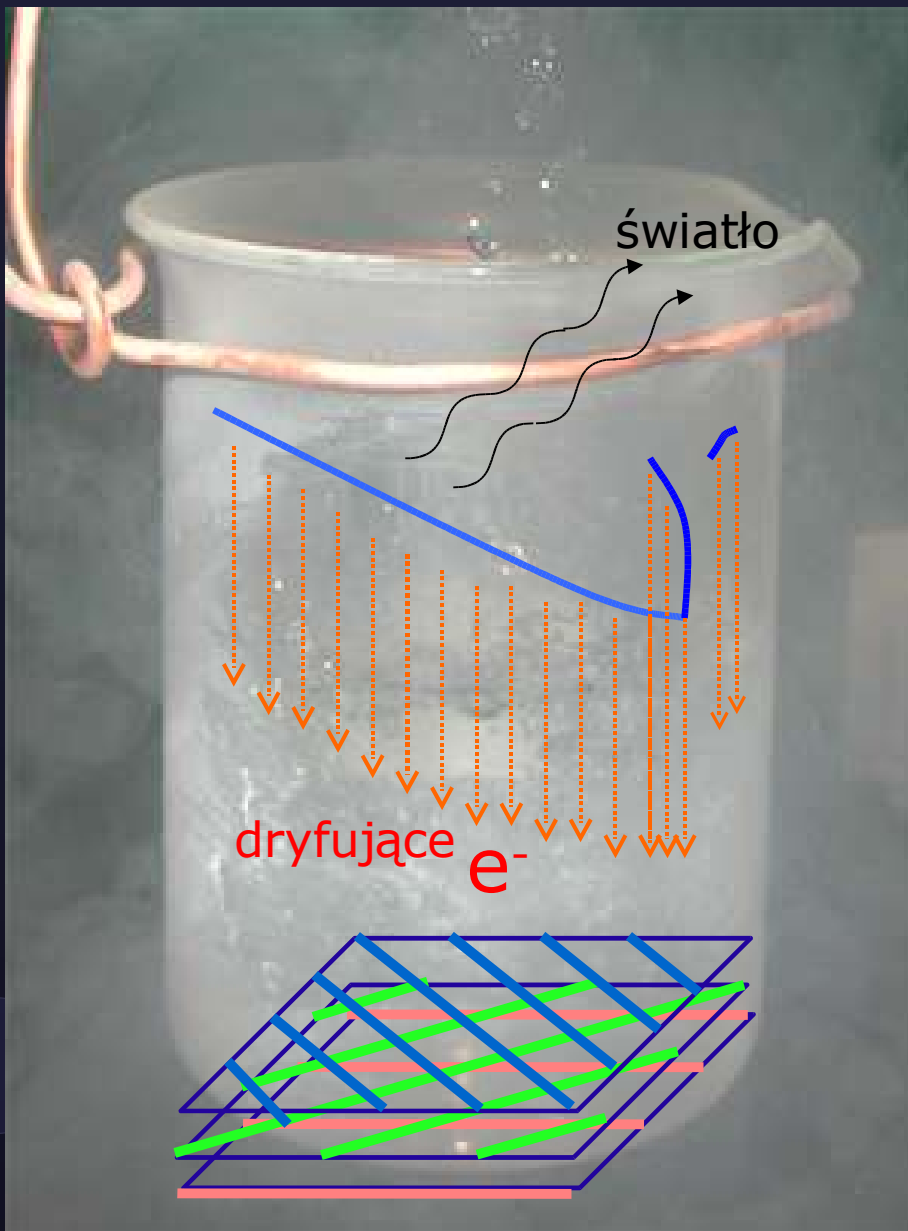
- $\Delta m^2_{\text{solar}}, \theta_{12}$ – neutrina **słoneczne** i **reaktorowe** (SNO, KamLAND)
- $\Delta m^2_{\text{atm}}, \theta_{23}$ – neutrina **atmosferyczne** i **akceleratorowe z długą bazą** (LBL) (SuperK, K2K, MINOS, OPERA, ICARUS)
 - potwierdzenie oscylacji w ν_{τ} – OPERA, ICARUS
- θ_{13} – najlepszy limit z CHOOZ
 - $\sin^2 2\theta_{13} < 0.12$
 - w przyszłości – MINOS, T2K, ...
- **łamane CP** – T2K, fabryki neutrin
- **hierarchia mas** – fabryki neutrin



PARAMETRY OSCYLACJI



CIEKŁY ARGON



- gęstość: 1.4 g/cm^3
- długość radiacyjna: 14 cm
(19.55 g/cm^2)
- długość na oddziaływanie: 84 cm
(117.2 g/cm^2)
- $dE/dx(\text{mip}) = 2.1 \text{ MeV/cm}$
($1.529 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$)
- elektroujemność: 0
- śr. energia na produkcję pary elektron-jon: 23.6 eV
- śr. energia na produkcję fotonu: 19.5 eV

TECHNIKA DETEKCJI

- możliwości i zalety:
 - **trójwymiarowa rekonstrukcja** przypadków oddziaływania (nawet skomplikowanych)
 - **pomiar energii** powstałych cząstek
 - **identyfikacja cząstek** (dE/dx , rozpady)
 - **niski** próg energetyczny detekcji
 - **dobra** rozdzielczość przestrzenna i energetyczna
 - **stała** czułość i możliwość wyboru ciekawych zdarzeń
- testy kolejnych prototypów
 - źródło γ (3 t)
 - wiązka neutrinowa WANF (50 l)
 - promieniowanie kosmiczne (3 t, 14 t, 300 t)

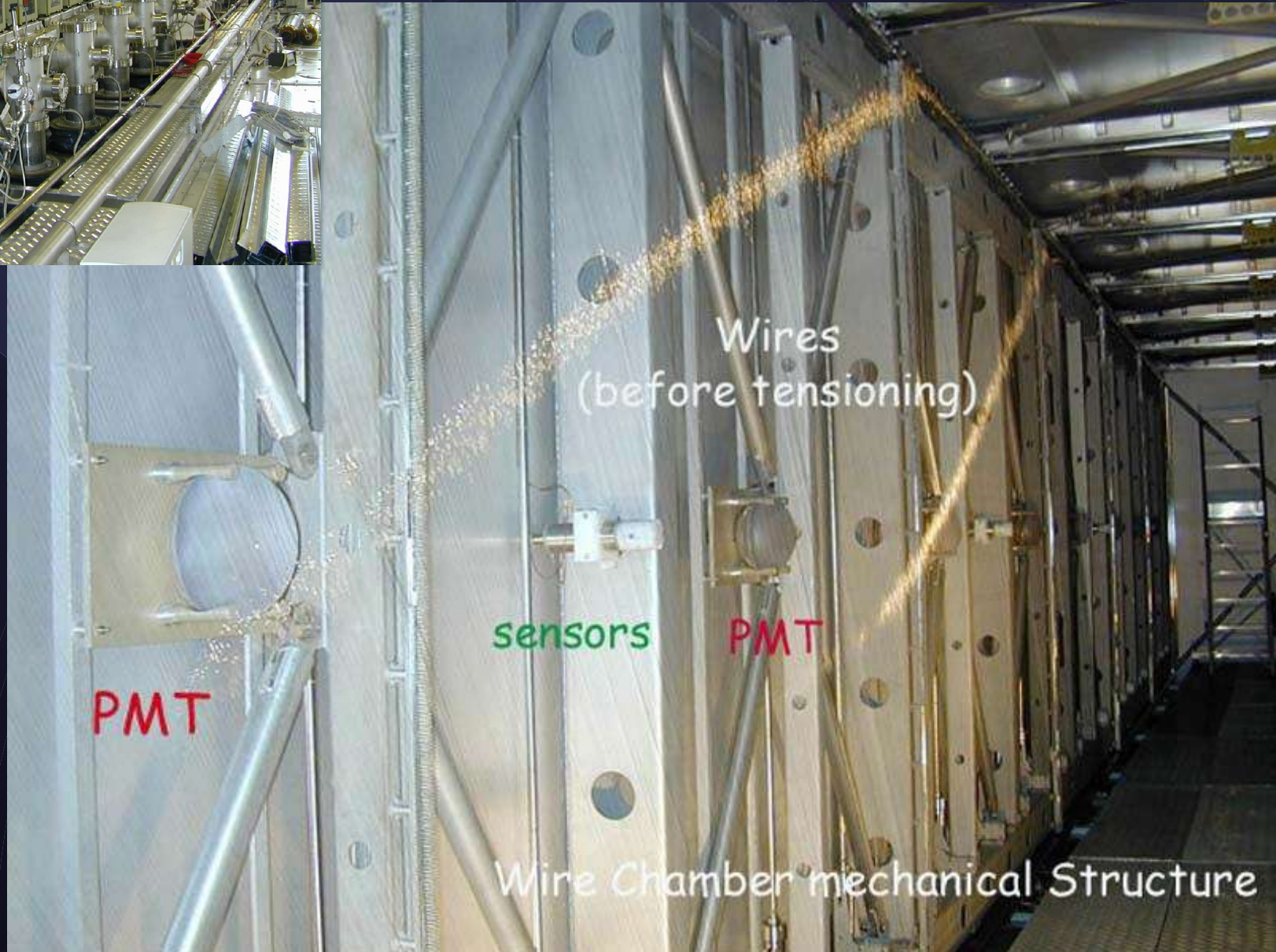
MODUŁ ICARUSA

- wymiary modułu **20x7x4 m³**
- wypełniony superczystym **ciekłym argonem** (aktywną tarczą)
o masie ok. **600 ton**
 - wymagana czystość argonu poniżej 0.1 ppb
- długość dryfu 150 cm
- natężenie pola 500 V/cm
- 3 płaszczyzny drutów odczytu (odległość 3 mm)
- przestrzenna zdolność rozdzielcza porównywalna z komorami pęcherzykowymi (3x3x0.6 mm³)



połowa modułu

ICARUS

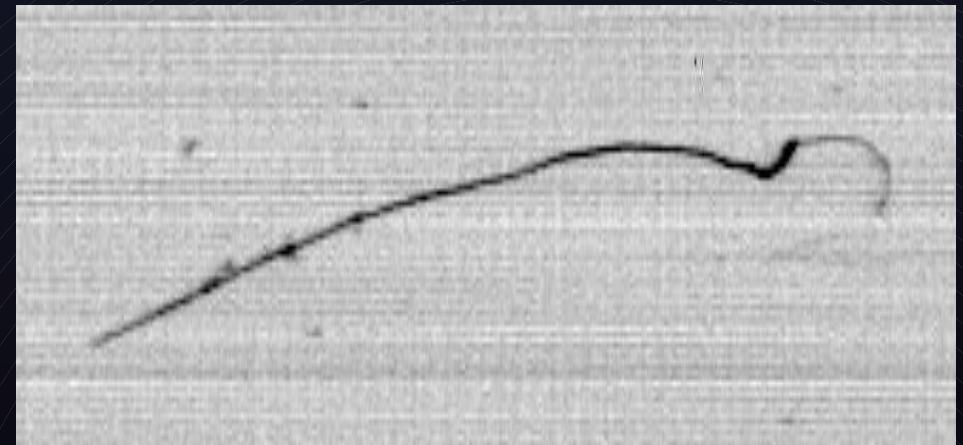
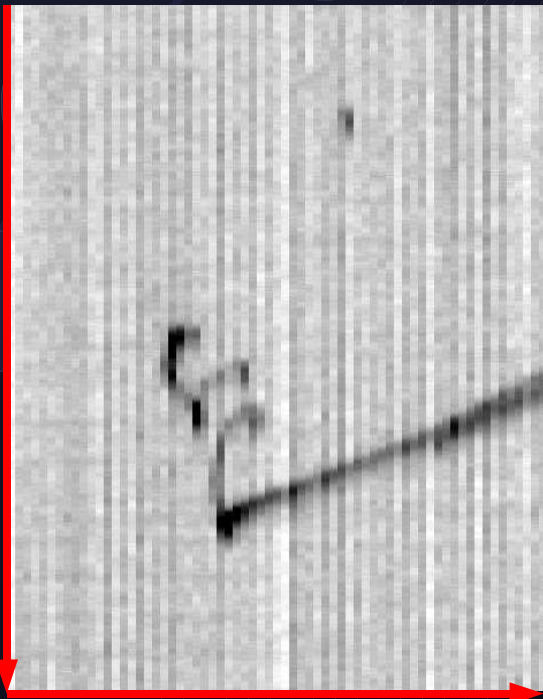
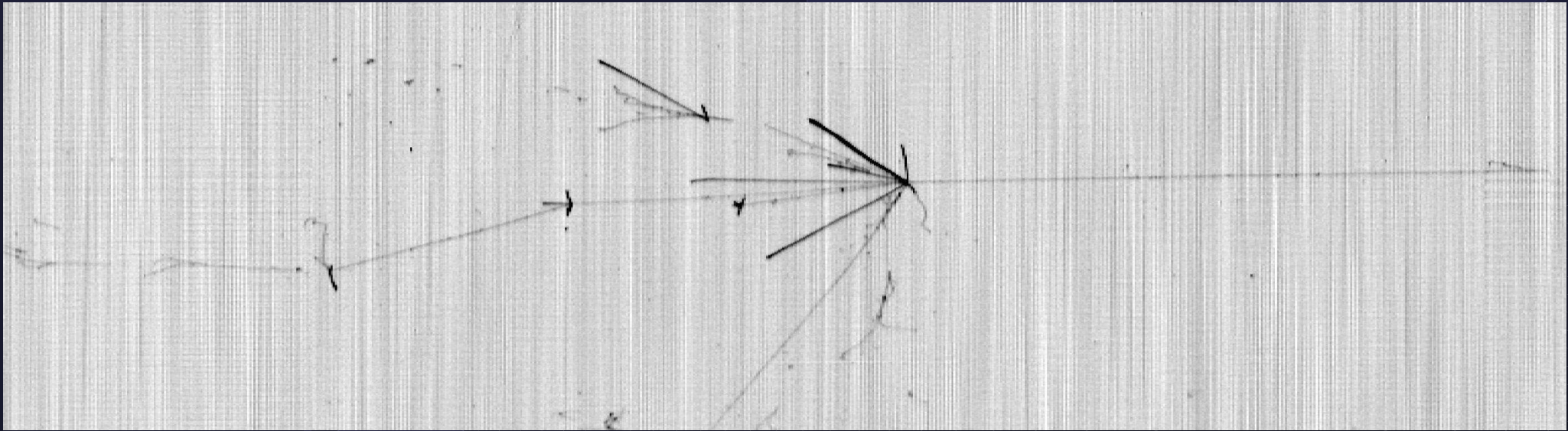


TESTY ICARUSA

- run techniczny w 2001 roku
- trzy miesiąca sprawdzania wszystkich systemów, w tym jeden miesiąc zbierania danych
- różnorodne przypadki oddziaływania promieni kosmicznych
 - jeden z układów wyzwalałania zaprojektowany i zbudowany przez grupę warszawską
- Nucl. Inst. Meth.,
A527 (2004) 329-410



PRZYKŁADY PRZYPADKÓW

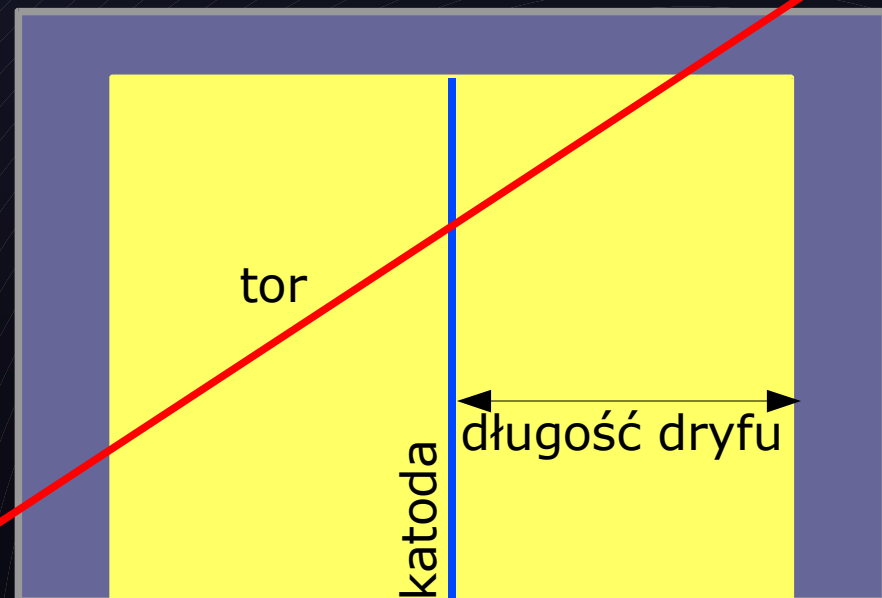
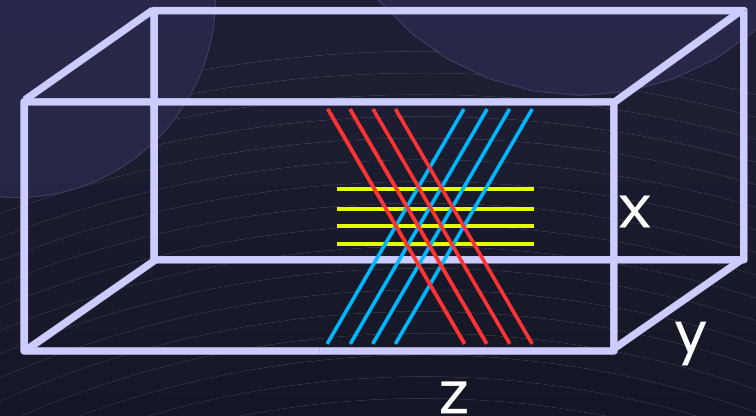


czas

nr drutu

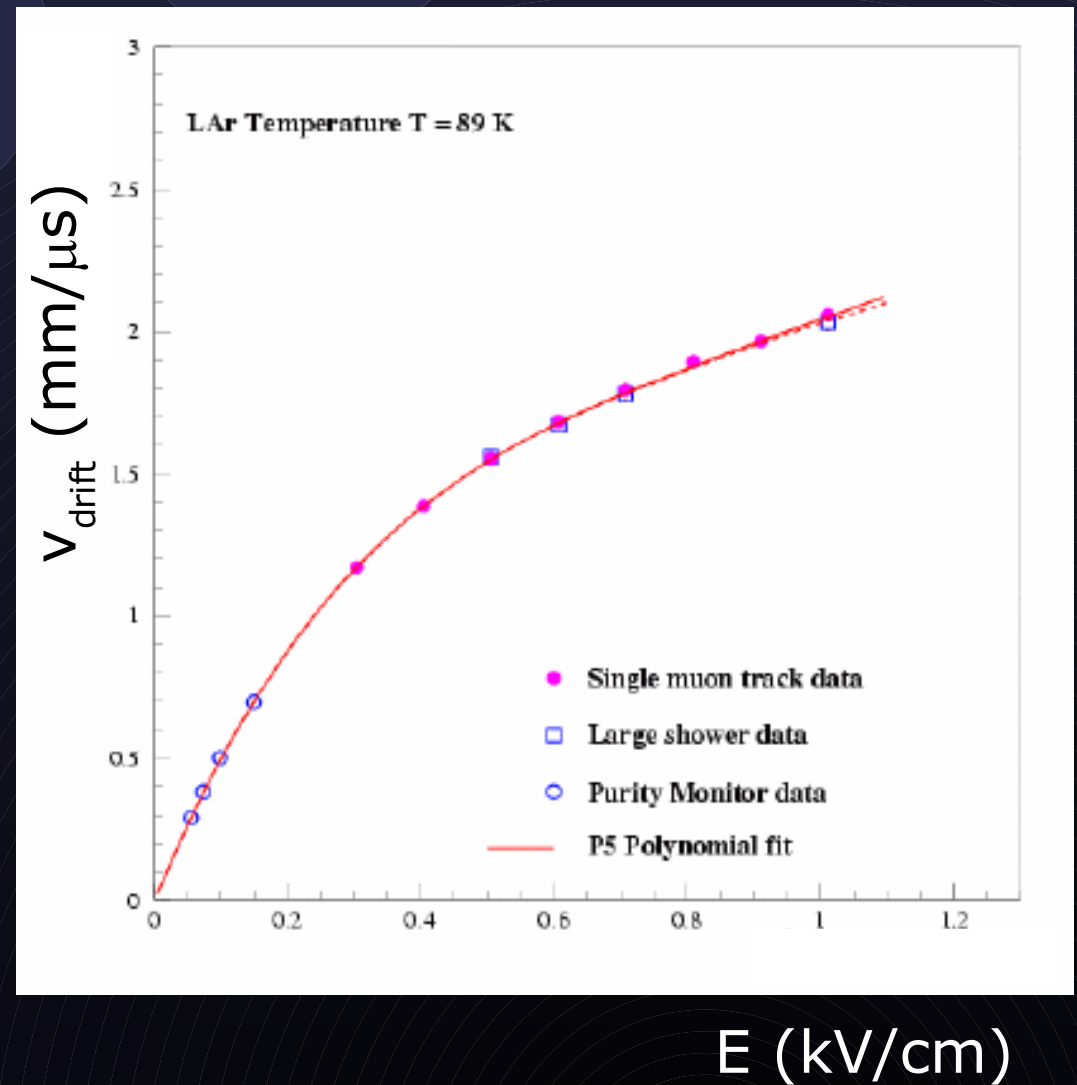
REKONSTRUKCJA TRÓJWYMIAROWA

- powiązanie numerów drutów z układem detektora (2 współrzędne)
- trzecia współrzędna – wzdłuż kierunku dryfu
- pomiar prędkości dryfu elektronów oparty na analizie torów zebranych podczas testów
 - tory przecinające pełen obszar dryfu



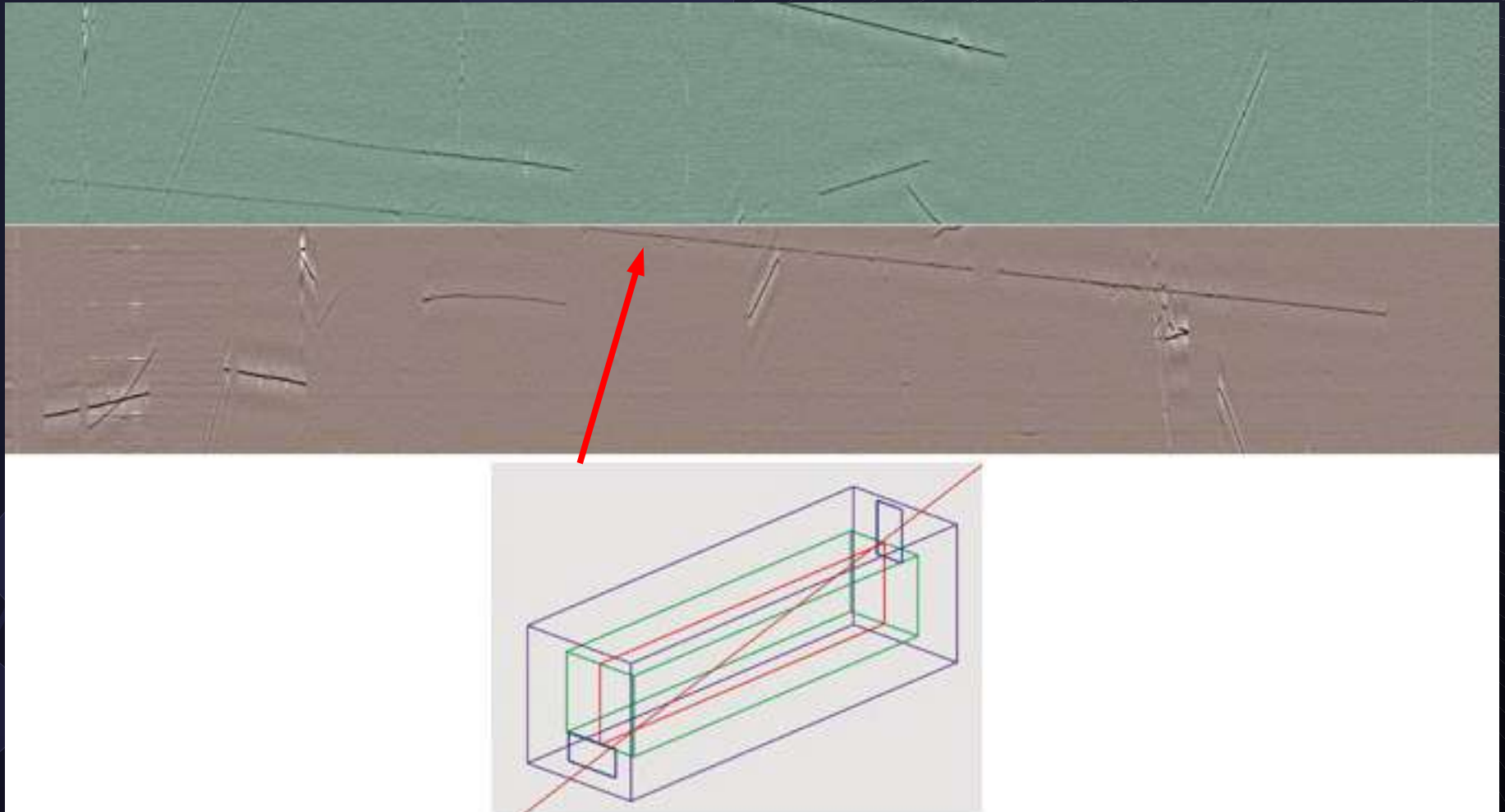
PRĘDKOŚĆ DRYFU

- pomiar dla kilku wartości natężenia pola elektrycznego
- wynik $1.56 \text{ mm}/\mu\text{s}$ używany przy rekonstrukcji (Nucl. Inst. Meth., A516 (2004) 68-79)



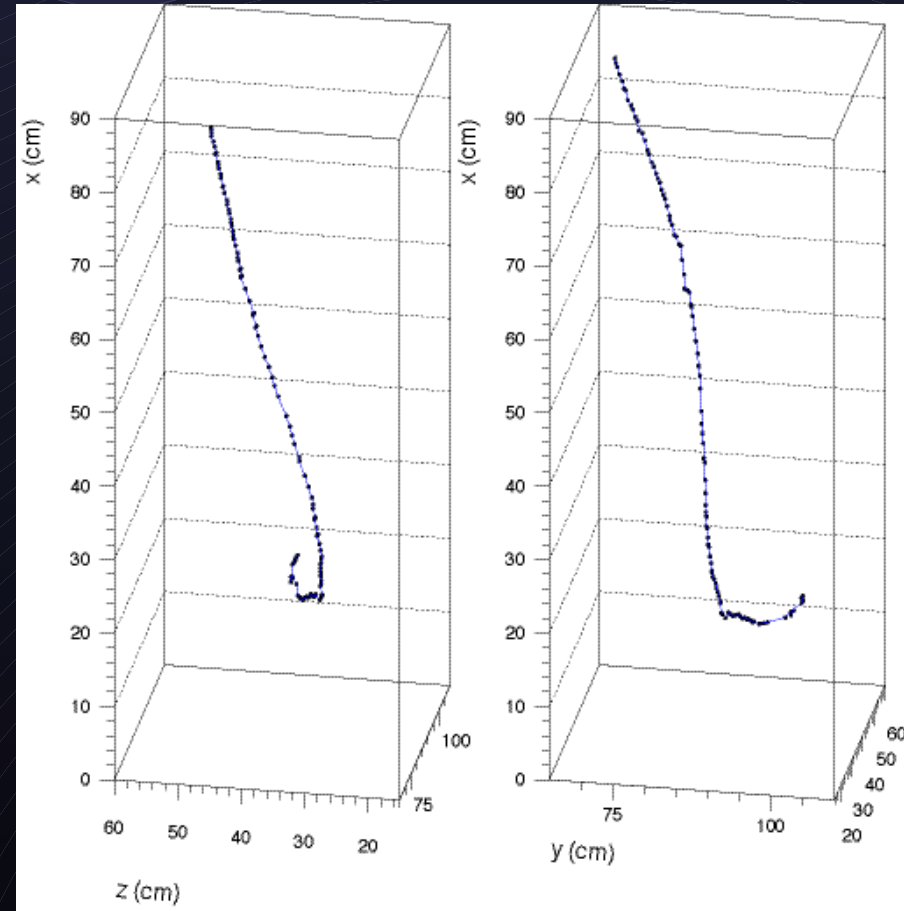
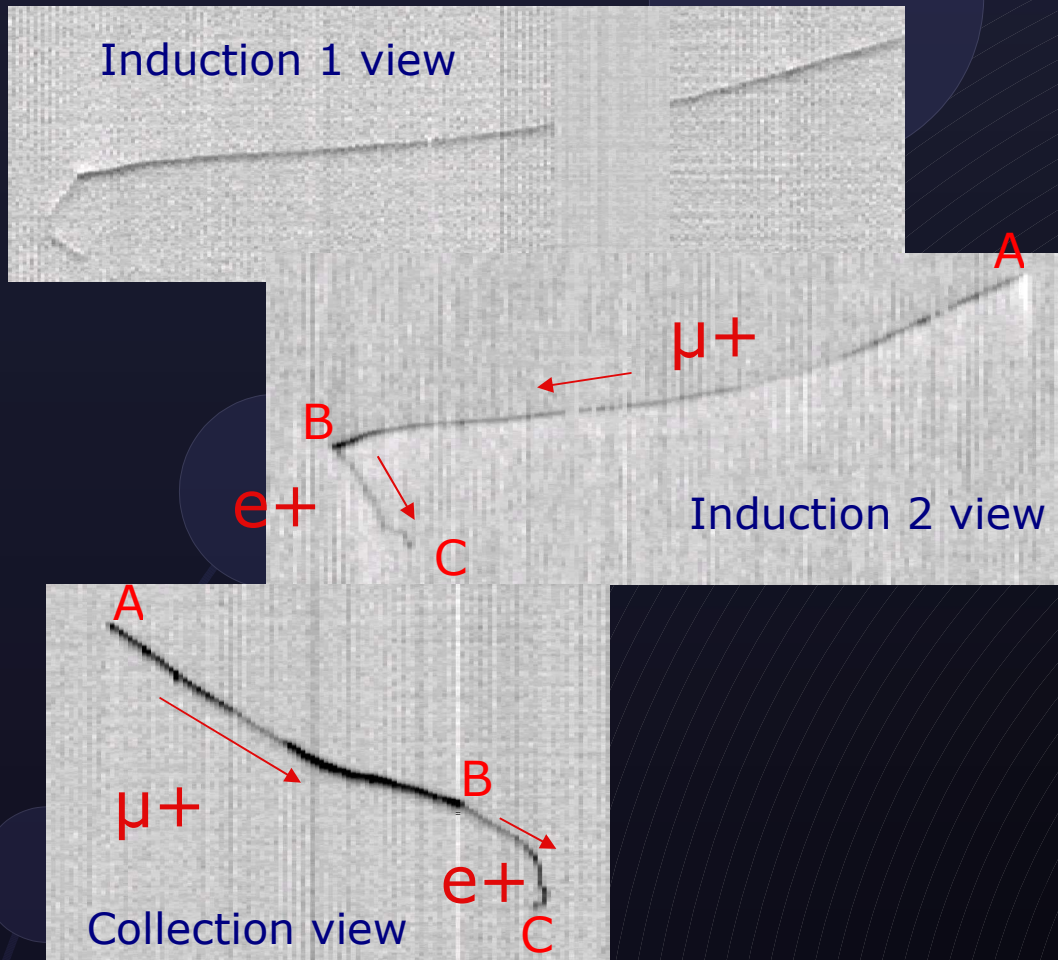
REKONSTRUKCJA TRÓJWYMIAROWA

- Tor długości ok. 18 m



REKONSTRUKCJA TRÓJWYMIAROWA

- Tory rozpadających się mionów

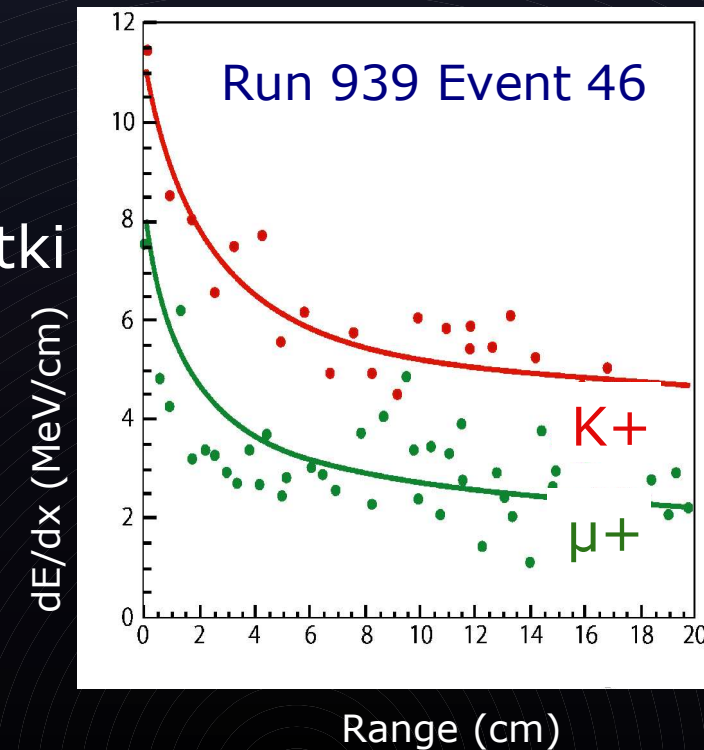
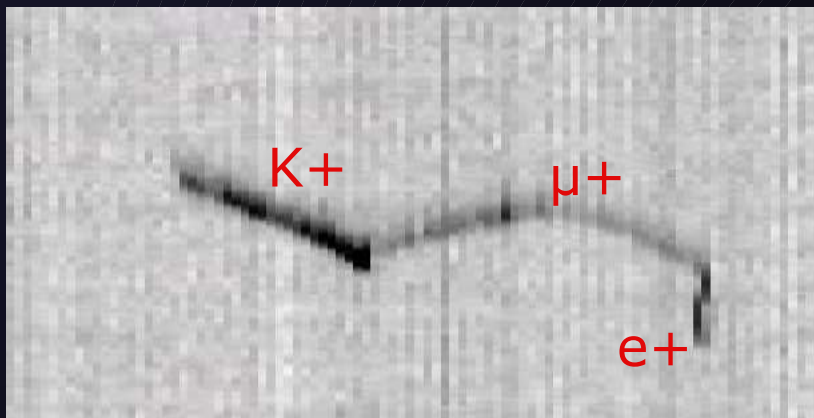


Run 939 event 95

$T_e = 36.2$ MeV
Zasięg = 15.4 cm

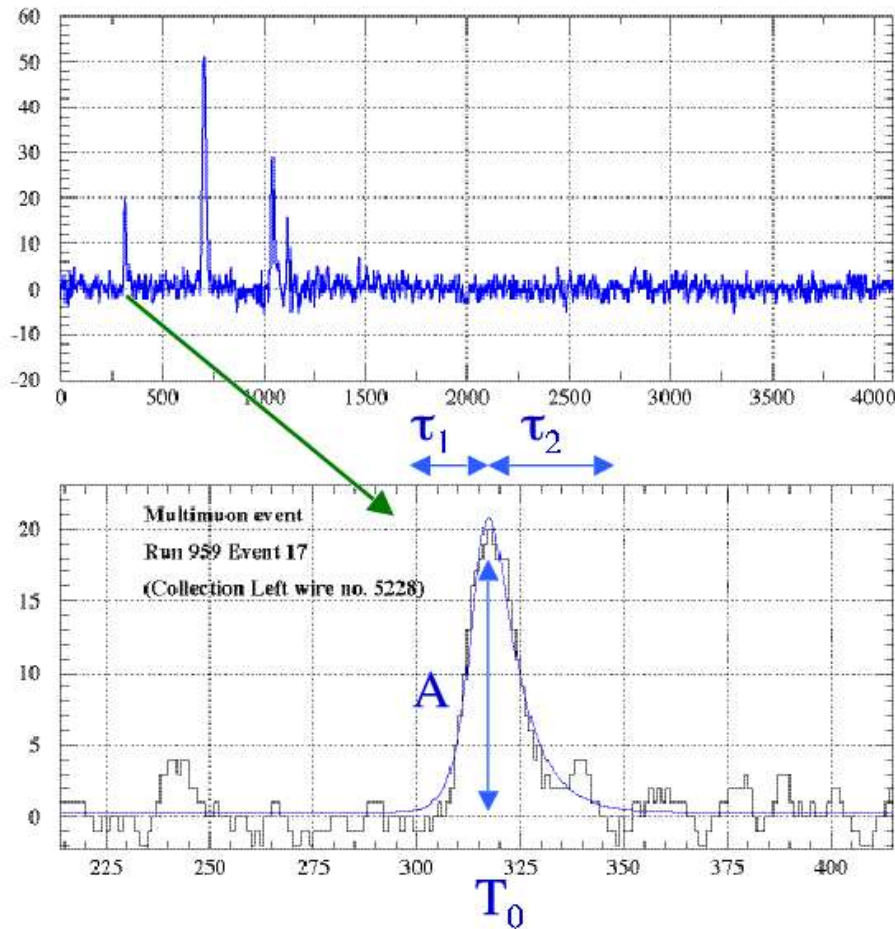
REKONSTRUKCJA ENERGII I PĘDU

- Możliwości:
 - rekonstrukcja kalorymetryczna (energia)
 - rekonstrukcja z zasięgu
 - relatywistyczny wzrost dE/dx (pęd)
 - wielokrotne rozpraszanie kulombowskie (pęd)
- Identyfikacja cząstek
 - profil strat energii wzdłuż toru cząstki
 - niezależny pomiar energii i pędu cząstki



REKONSTRUKCJA ENERGII – SYGNAŁY

- przebieg sygnału na pojedynczym drucie



numeryczne całkowanie
dopasowanej funkcji

$$f(t) = B + A \frac{e^{-\frac{t-T_0}{t_2}}}{1 + e^{-\frac{t-T_0}{t_1}}}$$

lub

sumowanie ADC kolejnych
próbek czasowych (dla
kaskad, gdzie sygnały
nachodzą na siebie)

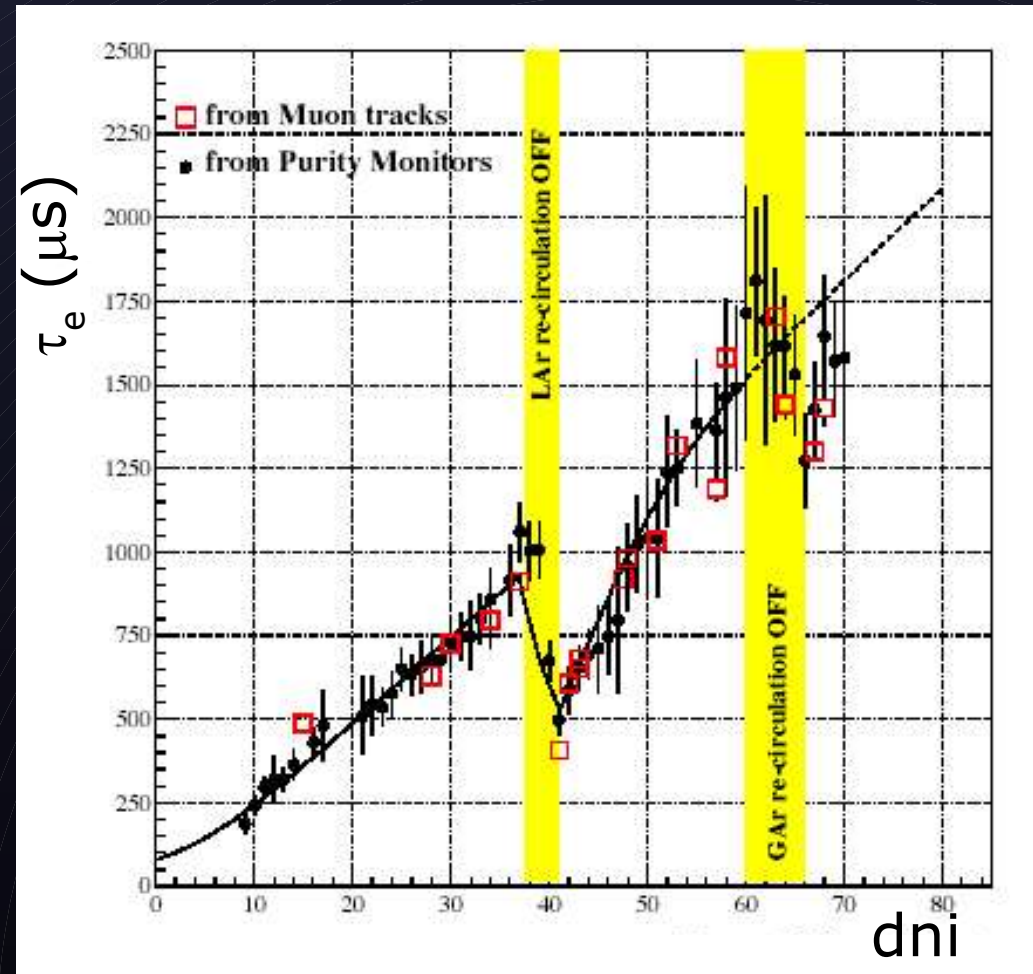
REKONSTRUKCJA ENERGII – POPRAWKI I KALIBRACJA

- współczynnik kalibracji C (zamiana ADC na fC)
- poprawka na skończony czas życia elektronów dryfu τ_e
- współczynnik rekombinacji R (parametryzacja prawem Birksa)

$$Q = \frac{A Q_0}{1 + k_B \frac{dE}{dx}}$$

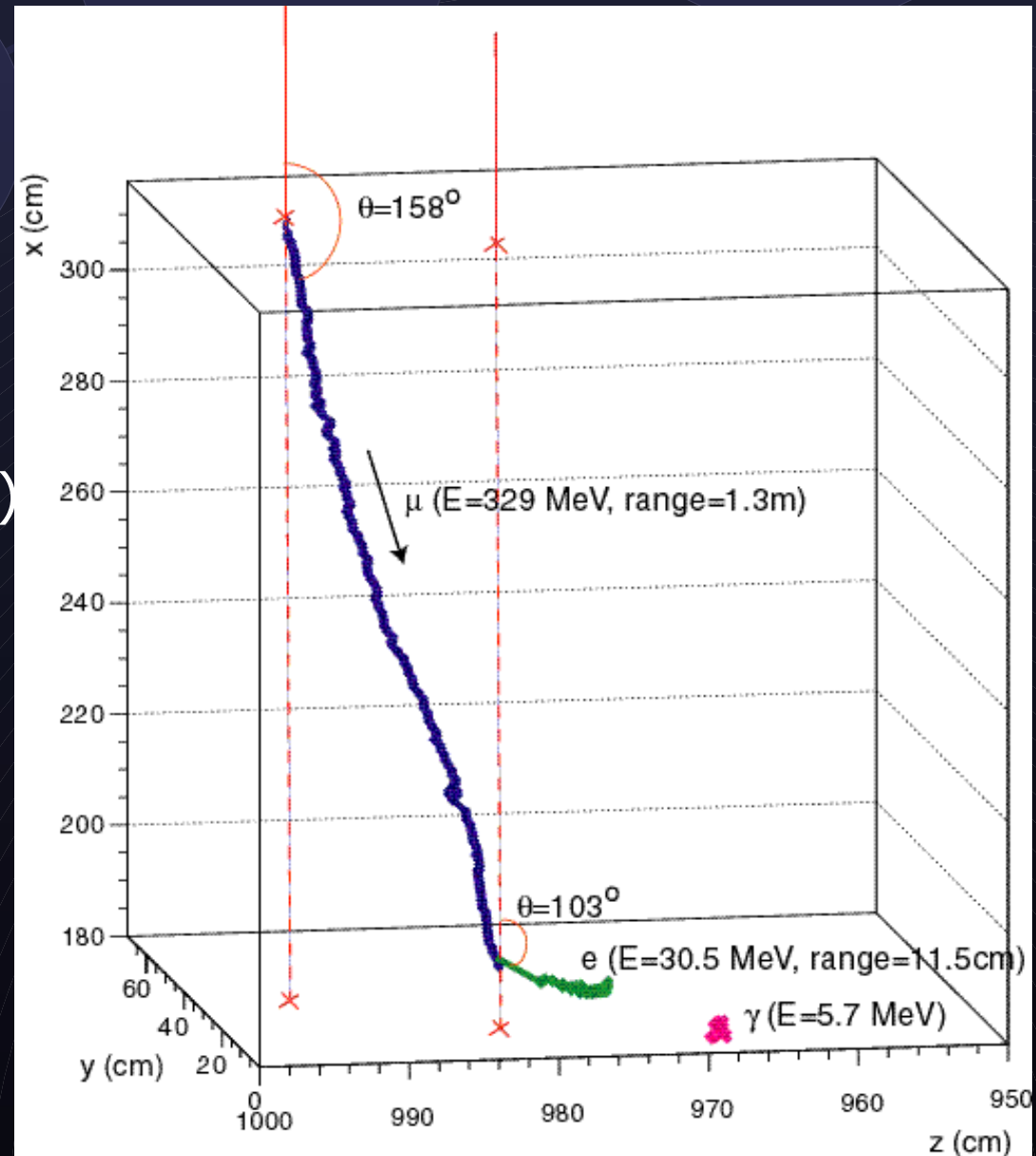
$$E = \frac{W_{ion} C Q_{hit} \exp(t_d / \tau_e)}{R}$$

- Nucl. Inst. Meth. A508 (2003) 287-294
- Nucl. Inst. Meth. A523 (2004) 275-286



REKONSTRUKCJA ENERGII – ROZPADY MIONÓW

- pomiar widma elektronów z rozpadu mionów zatrzymujących się
- selekcja przypadków
- rekonstrukcja energii elektronów (bez wliczania energii fotonów hamowania)
- symulacja poddana identycznemu procesowi rekonstrukcji



WIDMO ELEKTRONÓW

$$\frac{dP}{dx}(x) = \frac{1}{N} x^2 \left(3(1-x) + \frac{2}{3} \rho(4x-3) + 3\eta \frac{m_e}{E_{\max}} \frac{1-x}{x} + \frac{1}{2} f(x) \right)$$

parametr Michela uzyskany z najlepszego dopasowania (zakładając $-0.02 < \eta < 0.006$)

$$\rho = 0.72 \pm 0.06 \pm 0.08$$

$$(\text{SM: } \rho = 0.75 \quad \eta = 0)$$

Rozdzielczość energetyczna dla niskoenergetycznych elektronów

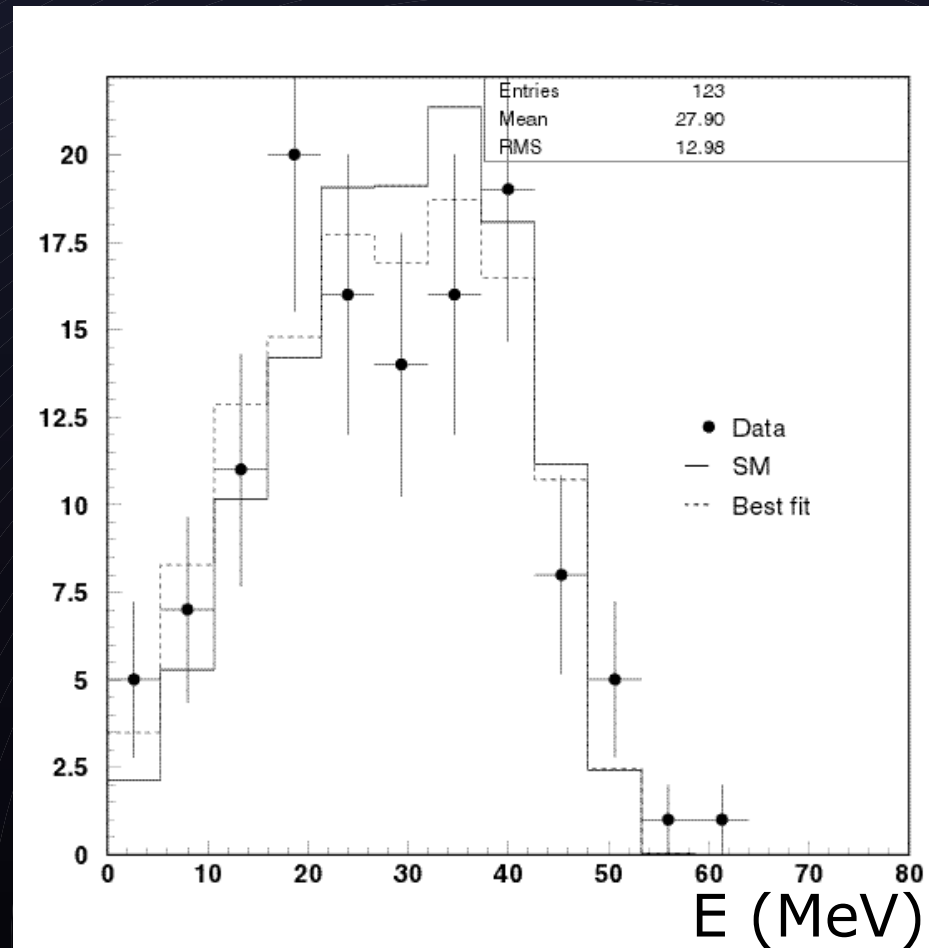
$$\frac{\sigma}{E} = \frac{(11 \pm 1)\%}{\sqrt{E(\text{MeV})}} \oplus (1.97 \pm 0.05)\%$$

Eur. Phys. J. C33 (2004) 233-241

N – normalizacja

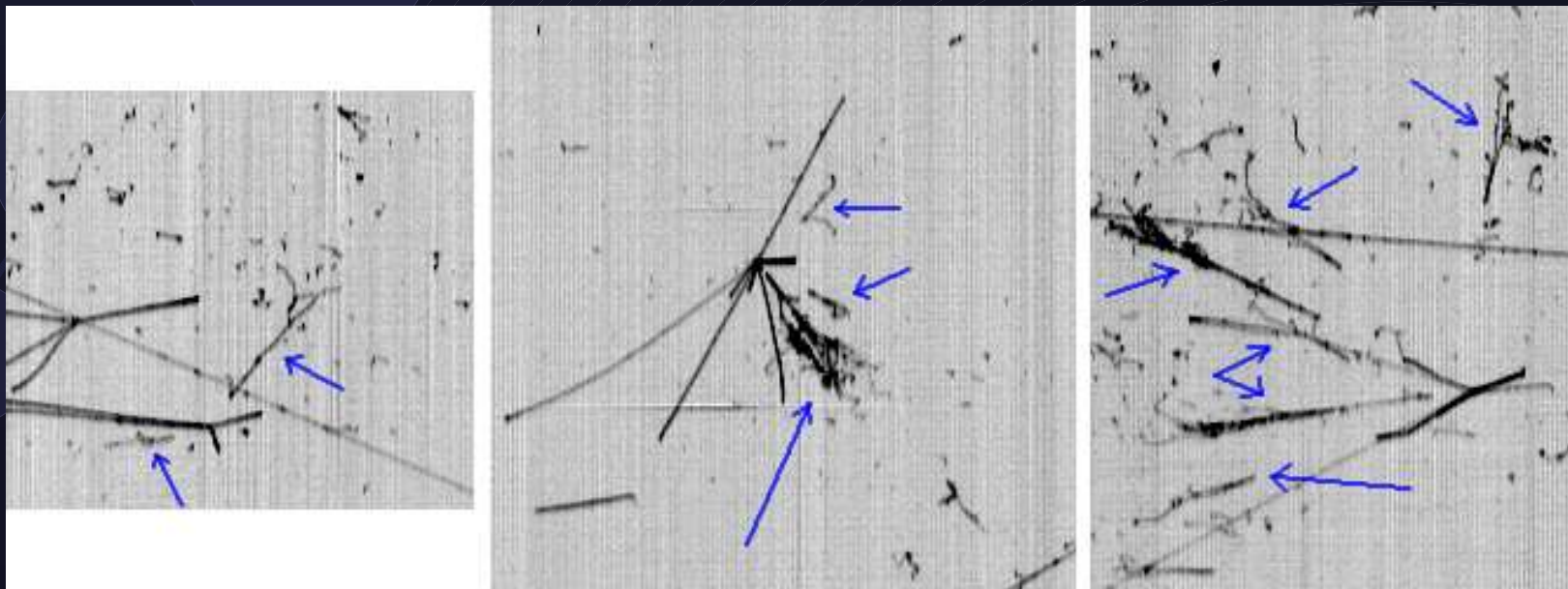
$$x = E/E_{\max}$$

$$E_{\max} = 52.8 \text{ MeV}$$



REKONSTRUKCJA ENERGII – MASA π^0

- selekcja przypadków
- pomiar energii kaskad elektromagnetycznych
- rekonstrukcja kąta między kaskadami

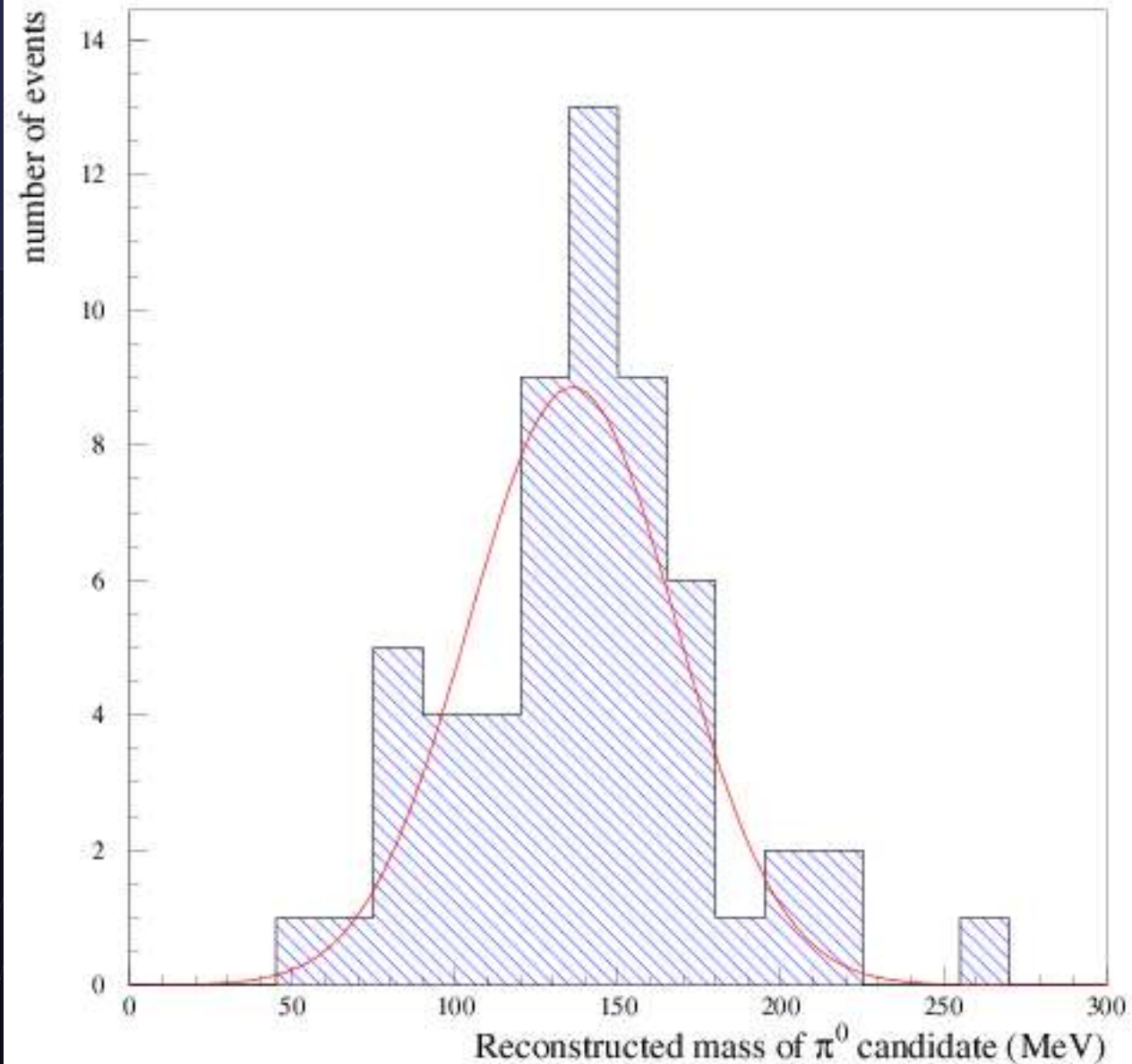


MASA π^0

- tu – 58 przypadków
- pomiary i analiza wciąż trwają

masa: 136.4 MeV
szerokość: 31.8 MeV

- znaleziono kilka przypadków o masach między 420 a 631 MeV (η^0 ?)

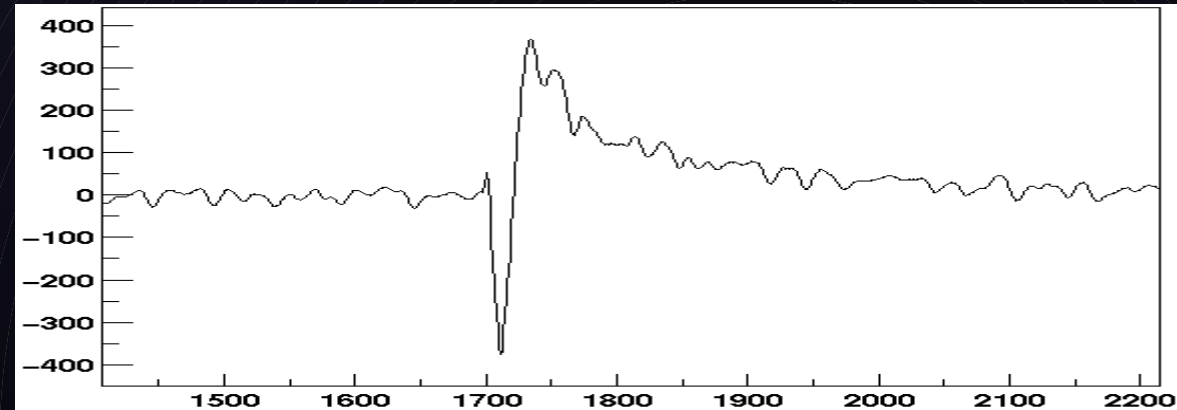
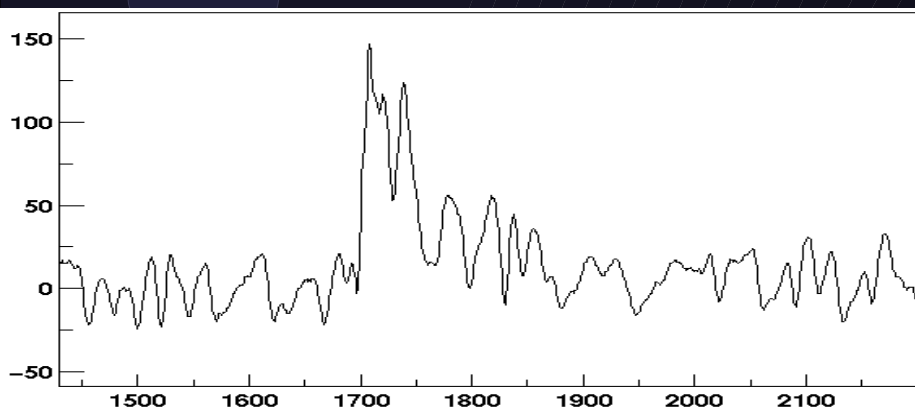
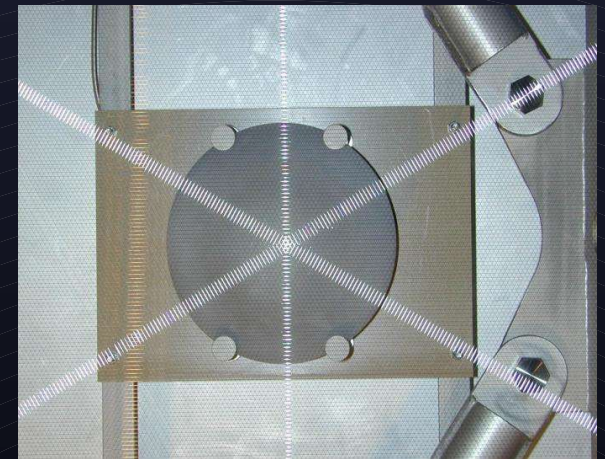


ŚWIATŁO SCYNTYLACYJNE ARGONU

- zastosowanie:
 - układ wyzwalania
 - wyznaczanie absolutnego czasu zdarzenia (T0)
- 2 procesy produkcji:
 - $\text{Ar}^* + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}_2^* \rightarrow 2\text{Ar} + \gamma$
 - $\text{Ar}^+ + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}_2^+ + e^- \rightarrow \text{Ar}_2^* \rightarrow 2\text{Ar} + \gamma$
- $\lambda = 128 \text{ nm}$ – daleki ultrafiolet
- liczba fotonów zależna od pola elektrycznego (10-20 tys. na 1 MeV dla m.i.p. przy $E = 300 \text{ V/cm}$)

ANALIZA SYGNAŁÓW

- **idea**: porównanie zarejestrowanych sygnałów z symulacją przejścia zrekonstruowanego toru przez detektor
- zła jakość sygnałów
 - niedopasowana elektronika
 - duże szумы
- wybór kryteriów czasu przyścia i wysokości sygnału



SYMULACJA ŚWIATŁA (GEANT 3)

- **produkcja**
 - scyntylacje (założenie: 10000 γ na 1 MeV energii zdeponowanej w argonie)
 - promieniowanie czerenkowskie (115-600 nm), generacja przez wbudowane funkcje GEANTa
- **rozchodzenie się**
 - rozpraszanie Rayleigha
 - odbicia od katody i ścian (współczynniki otrzymane z pomiarów)
 - czy zachodzi absorpcja?
- **detekcja**
 - efektywność układu PMT+wavelength shifter (pomiar efektywności na powierzchni PMT)

ROZPRASZANIE RAYLEIGHA

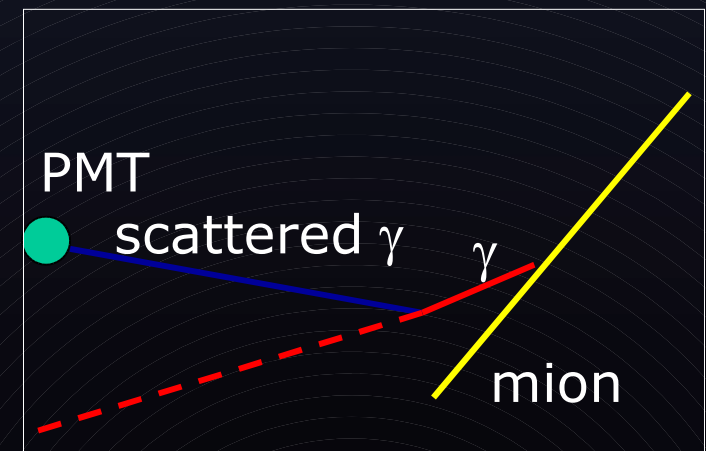
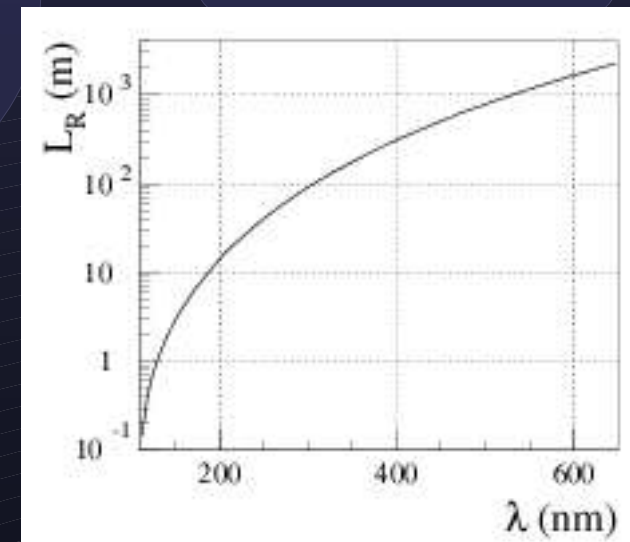
- prawdopodobieństwo rozpraszania:

$$P(\lambda, D) = 1 - \exp(-D/L_R(\lambda))$$

- rozkład kątowy rozproszonych fotonów

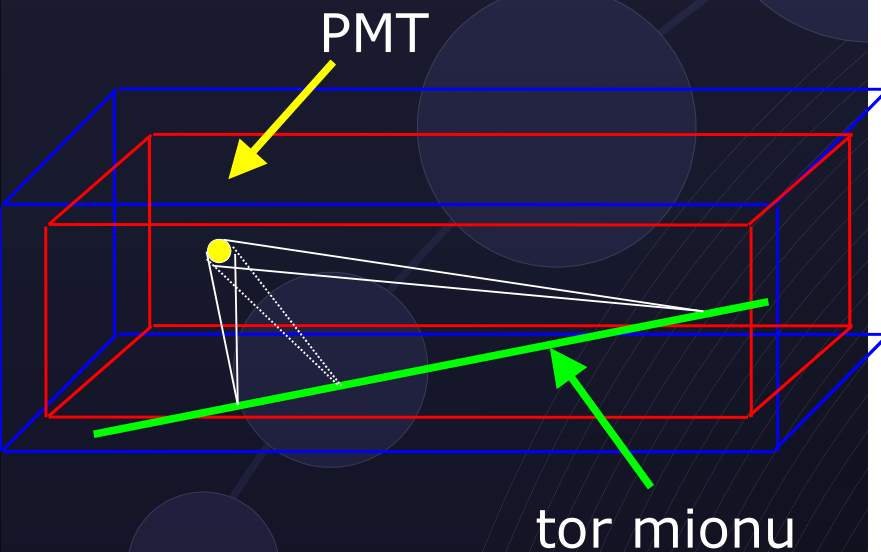
$$R(\cos \theta_R) = 1 + \cos^2 \theta_R$$

- testy poprawności algorytmu dla punktowego źródła i sferycznego detektora
- wzrost liczby fotonów przy małych odległościach źródła od PMT, spadek przy dużych

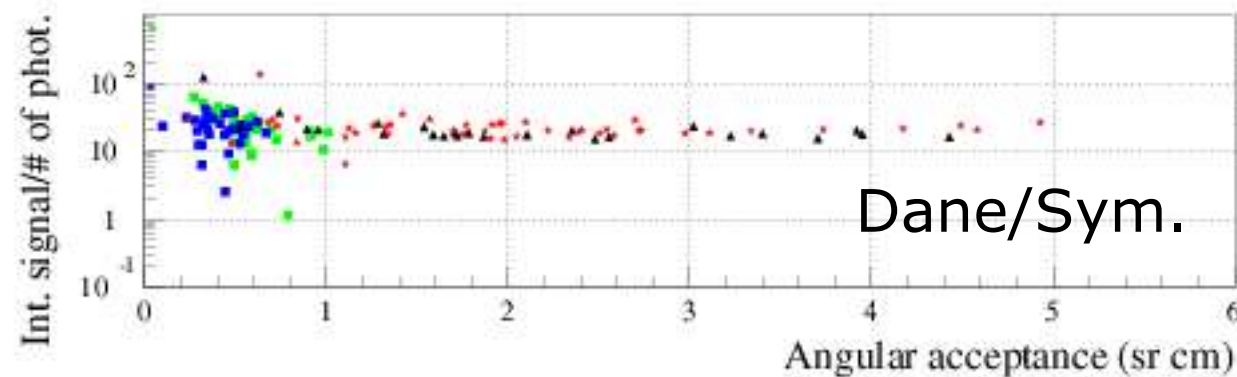
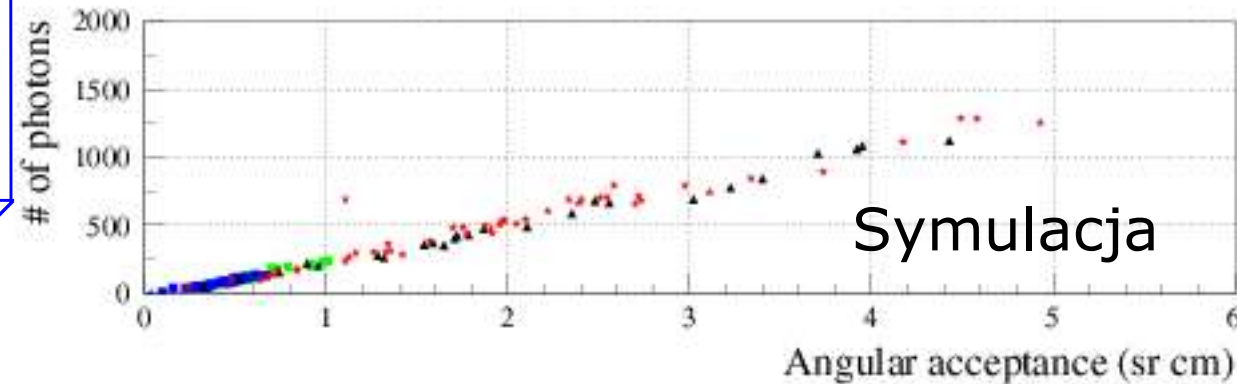
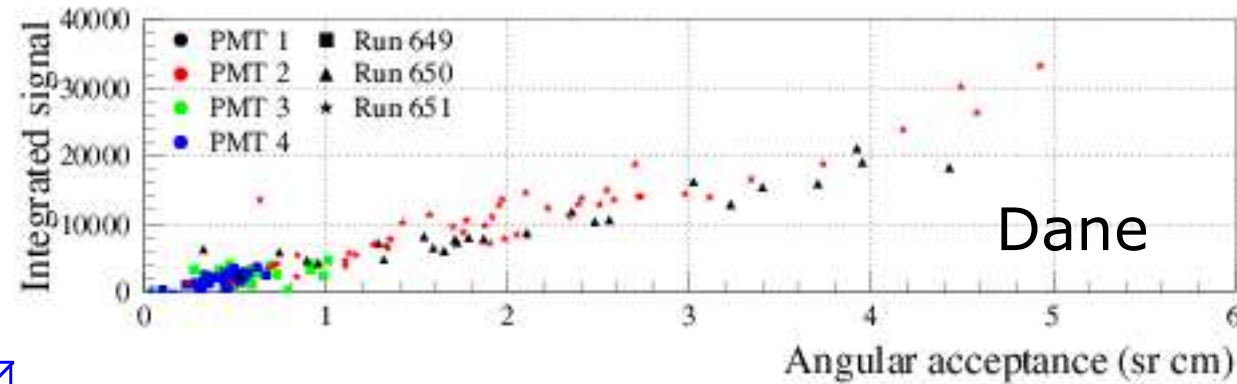


PORÓWNANIA

- prezentacja wyników w funkcji „akceptacji kątowej”



- otrzymana w symulacji liczba fotonów jest średnią



PROGRAM FIZYCZNY ICARUSA

- **wiązka CNGS**
 - monitorowanie strumienia ν_{μ}
 - analiza topologii przypadków
 - poszukiwanie ν_{τ}
- **neutrino atmosferyczne** – obserwacja zdarzeń niskoenergetycznych (poniżej progu SuperK) oraz skomplikowanych
- **neutrino z supernowej**
- poszukiwanie **rozpadu protonu** (kanały z kaonem, $n \rightarrow e^{-}K^{+}$)

KLASYFIKACJA PRZYPADKÓW τ

- analiza przeprowadzona dla wiązki CNGS i neutrin atmosferycznych
- oczekiwany sygnał oddziaływań CC neutrin ν_τ jest poniżej procenta
 - podział na klasy o różnym stosunku sygnału do tła
- wykorzystanie faktu, że **neutrina z rozpadu leptonu τ** unoszą część **pędu i energii** – odpowiedni dobór zmiennych
- klasyfikacja za pomocą sieci neuronowych
- badanie zależności rozkładów zmiennych oraz efektywności klasyfikacji od **polaryzacji** leptonu τ

PRZYGOTOWANIE DO KLASYFIKACJI

- 3 klasy przypadków: z elektronem (**1E**), z mion (**1M**), bez leptonów naładowanych (**0L**)

wiązka	1E	1M	0L
CNGS	16.75%	0.13%	1.44%
atmosferyczne	0.67%	0.65%	1.88%

- cząstki, które będą „widziane” w detektorze:

- elektrony, miony, kaony naładowane
- fotony z rozpadu π^0
- piony naładowane o pędzie $>50\text{MeV}/c$
- protony o pędzie $>250\text{MeV}/c$

- wybór zmiennych:

- pęd całkowity, brakujący pęd poprzeczny, pęd poprzeczny leptonu (1E,1M) lub najszybszej cząstki (0L)...
- liczebności elektronów, protonów, pionów, fotonów

SYMULACJA – NUANCE

- jeden z najlepszych generatorów oddziaływań neutrin
 - rozpraszanie na elektronach
 - rozpraszanie quasi-elastyczne
 - procesy rezonansowe (zdominowane przez produkcję Δ)
 - rozpraszanie głęboko nieelastyczne
 - procesy koherentne i dyfrakcyjne
- rozpady leptonu τ – TAUOLA
 - rozpady leptonowe, z produkcją $\pi, \rho, a, K, K^*, n\pi$ i wielopionowe
 - uwzględnia wpływ polaryzacji

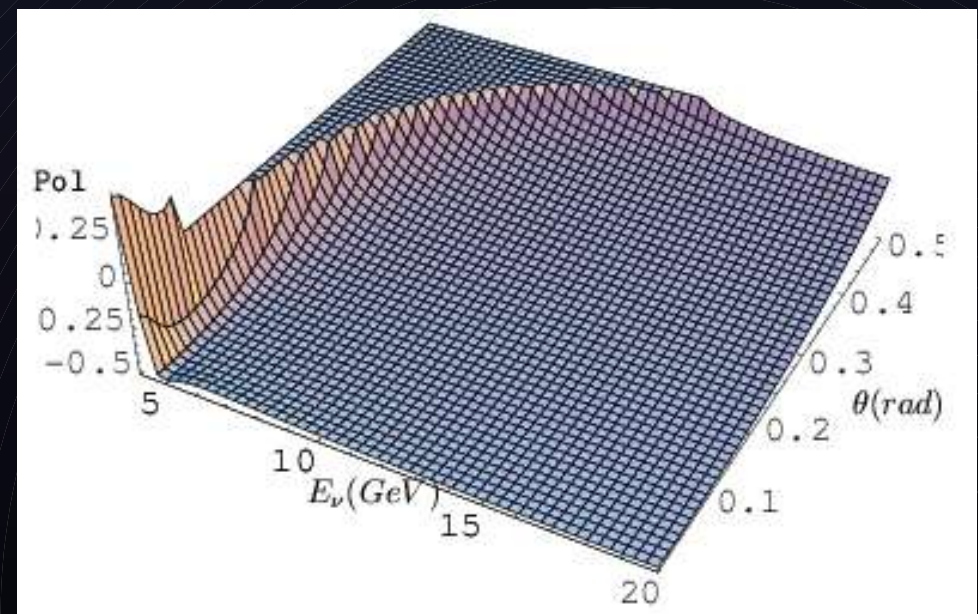
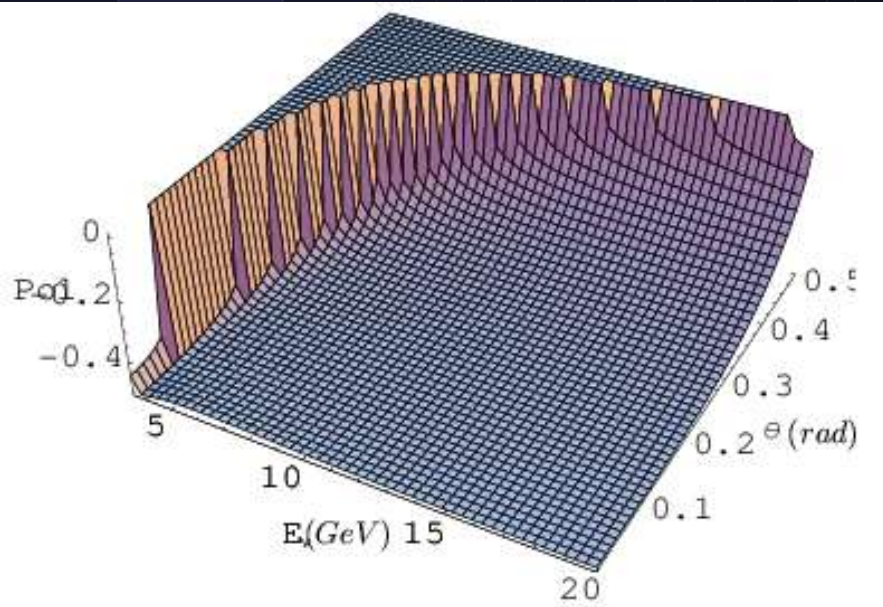
POLARYZACJA τ

- DIS – Albright&Jarlskog, Nucl. Phys. B84 (1975) 467-492
- Hagiwara, Matawari, Yokoya – Nucl. Phys. B668 (2003) 364-384
 - obliczenia w innym układzie dla procesów DIS, QE, RES (produkcja Δ), bez ruchu Fermiego

$$\vec{s} = (s_x, s_y, s_z) = \frac{P}{2} (\sin \theta_P \cos \phi_P, \sin \theta_P \sin \phi_P, \cos \theta_P)$$

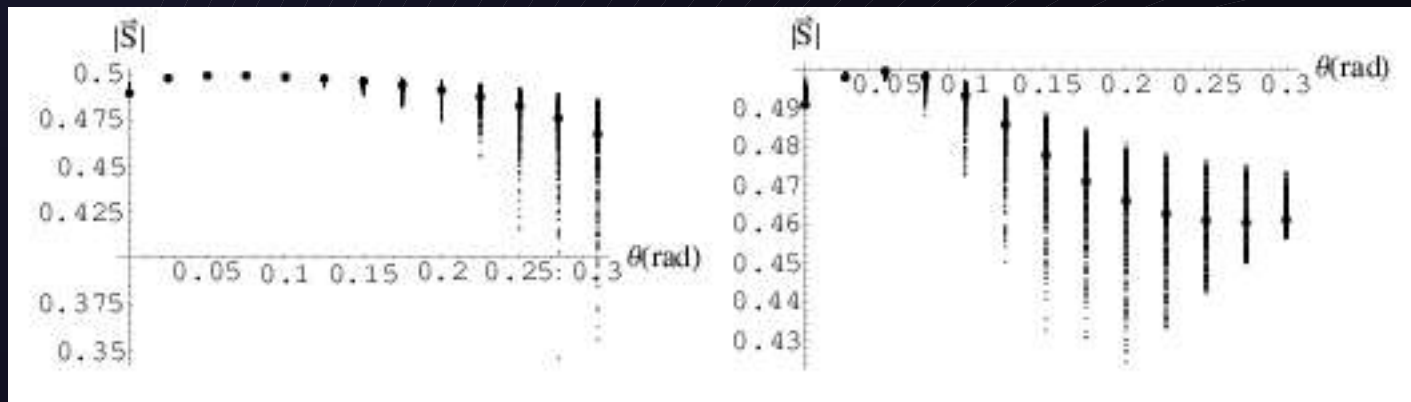
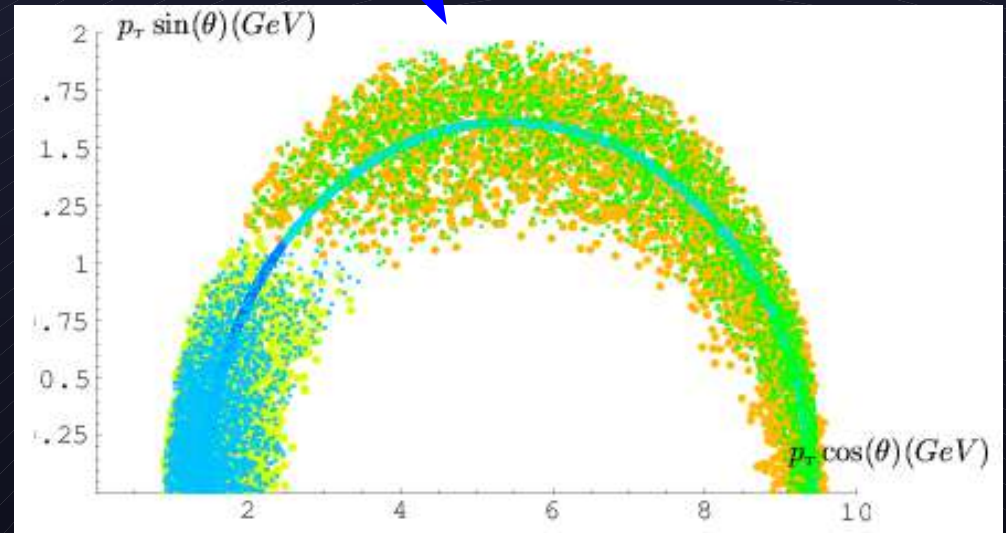
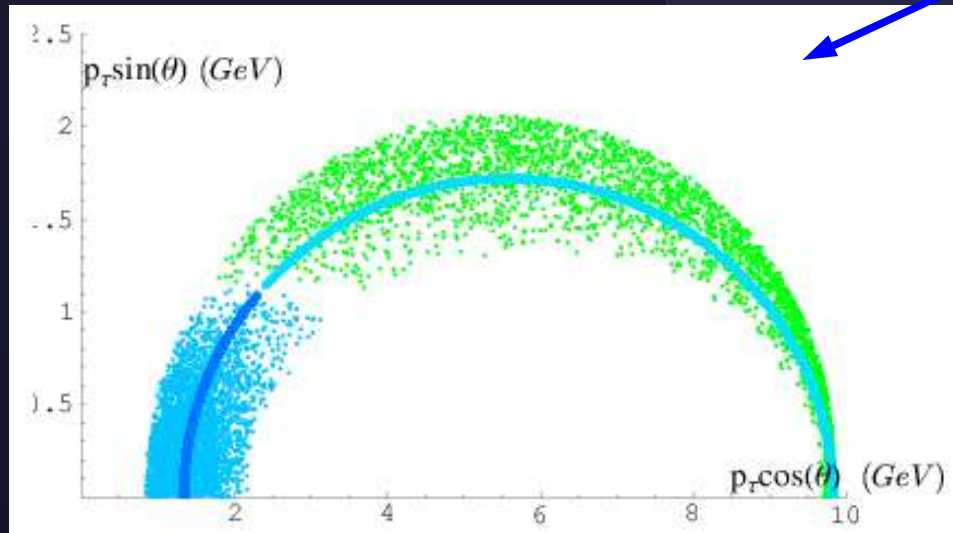
QE

RES



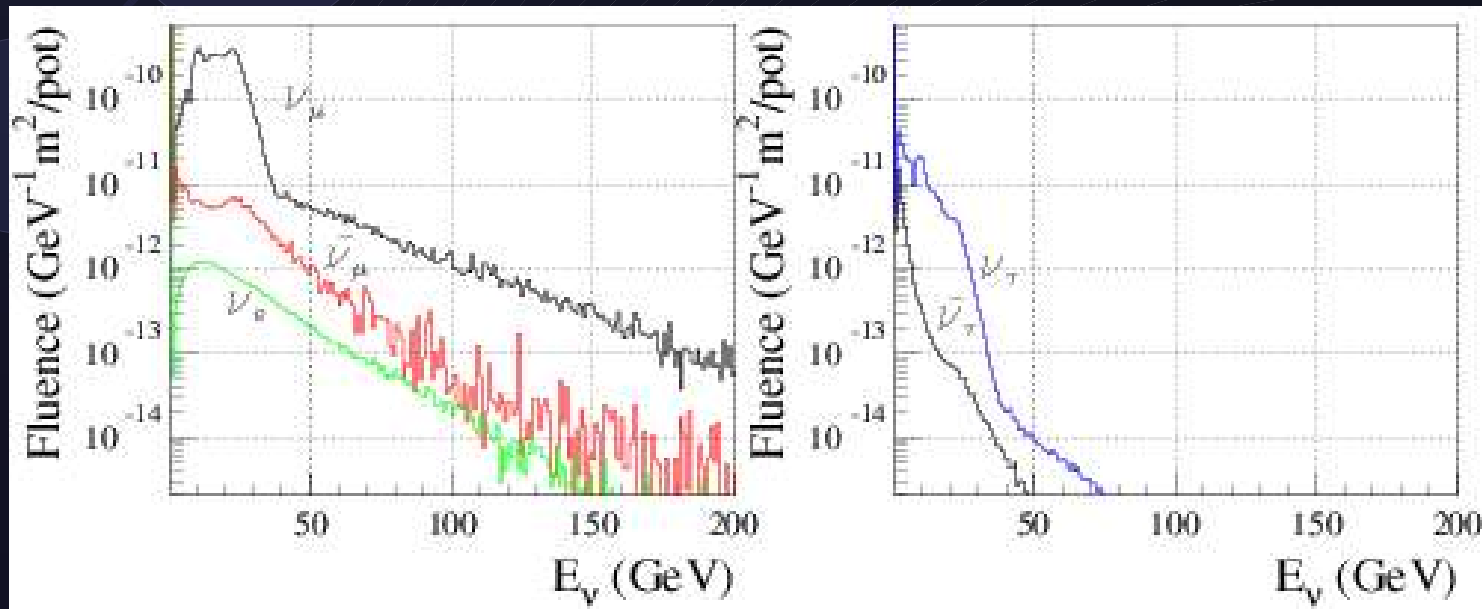
RUCH FERMIEGO A POLARYZACJA τ

- uwzględnienie ruchu Fermiego dla QE i RES
 - przeliczył K. Kurek



WIĄZKA CNGS

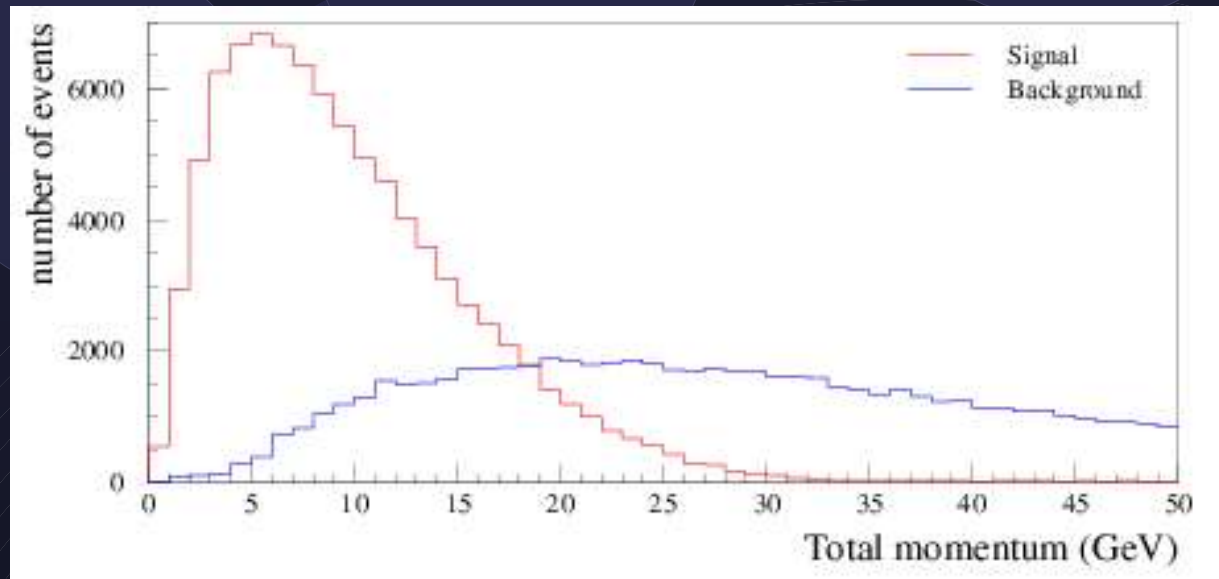
- produkowana przy SPS
- bardzo czysta wiązka neutrin mionowych ($0.8\% \nu_e$, $2.1\% \bar{\nu}_\mu$, $0.07\% \bar{\nu}_e$)
- średnia energia ok. 18 GeV
- odległość CERN-Gran Sasso 732 km



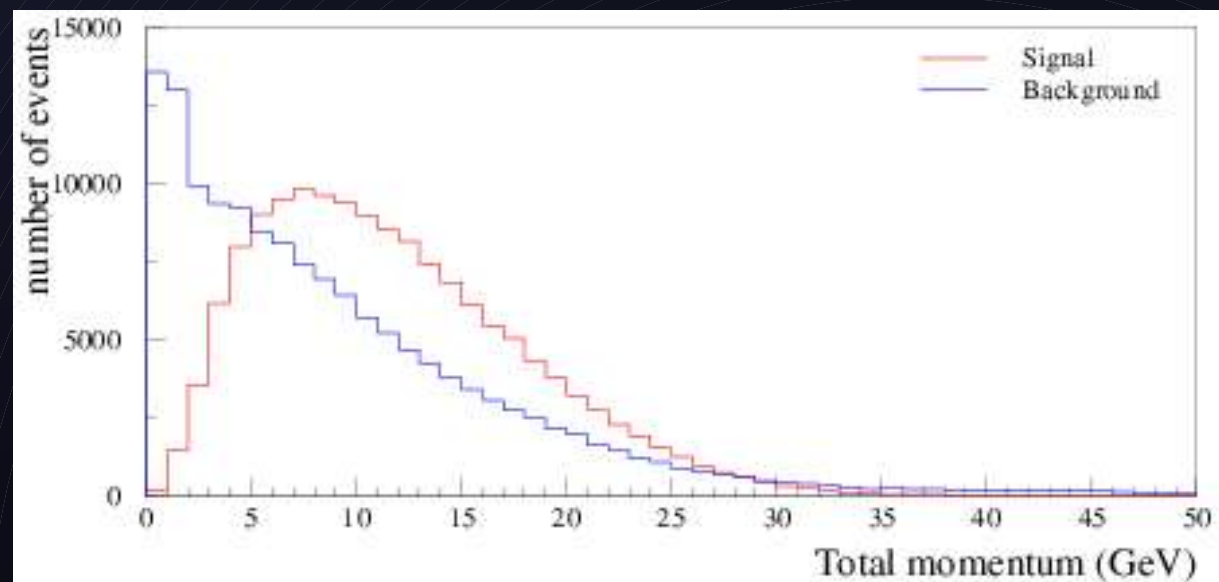
PRZYKŁADOWE ROZKŁADY

- całkowity pęd przypadku

1E

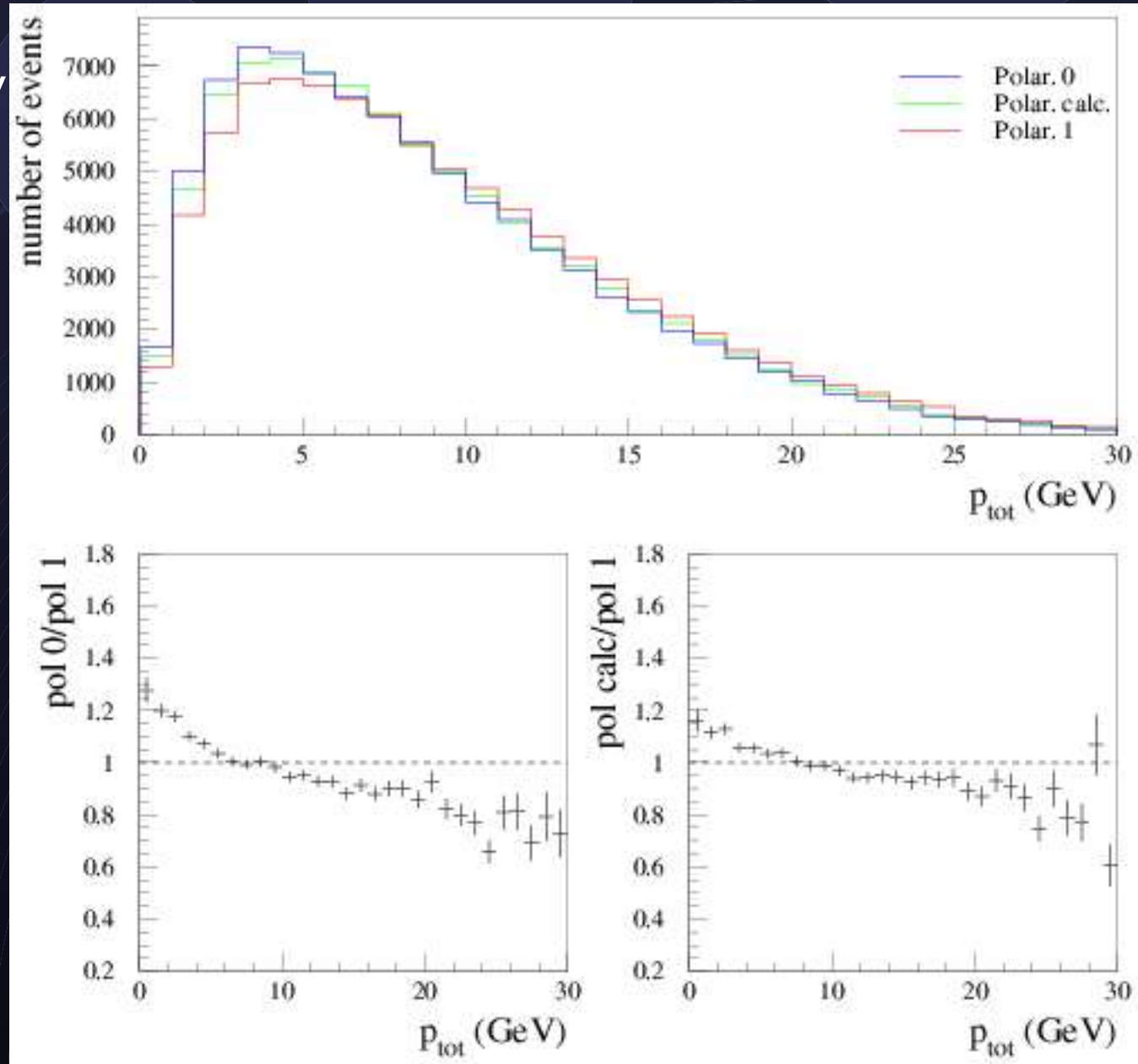


0L



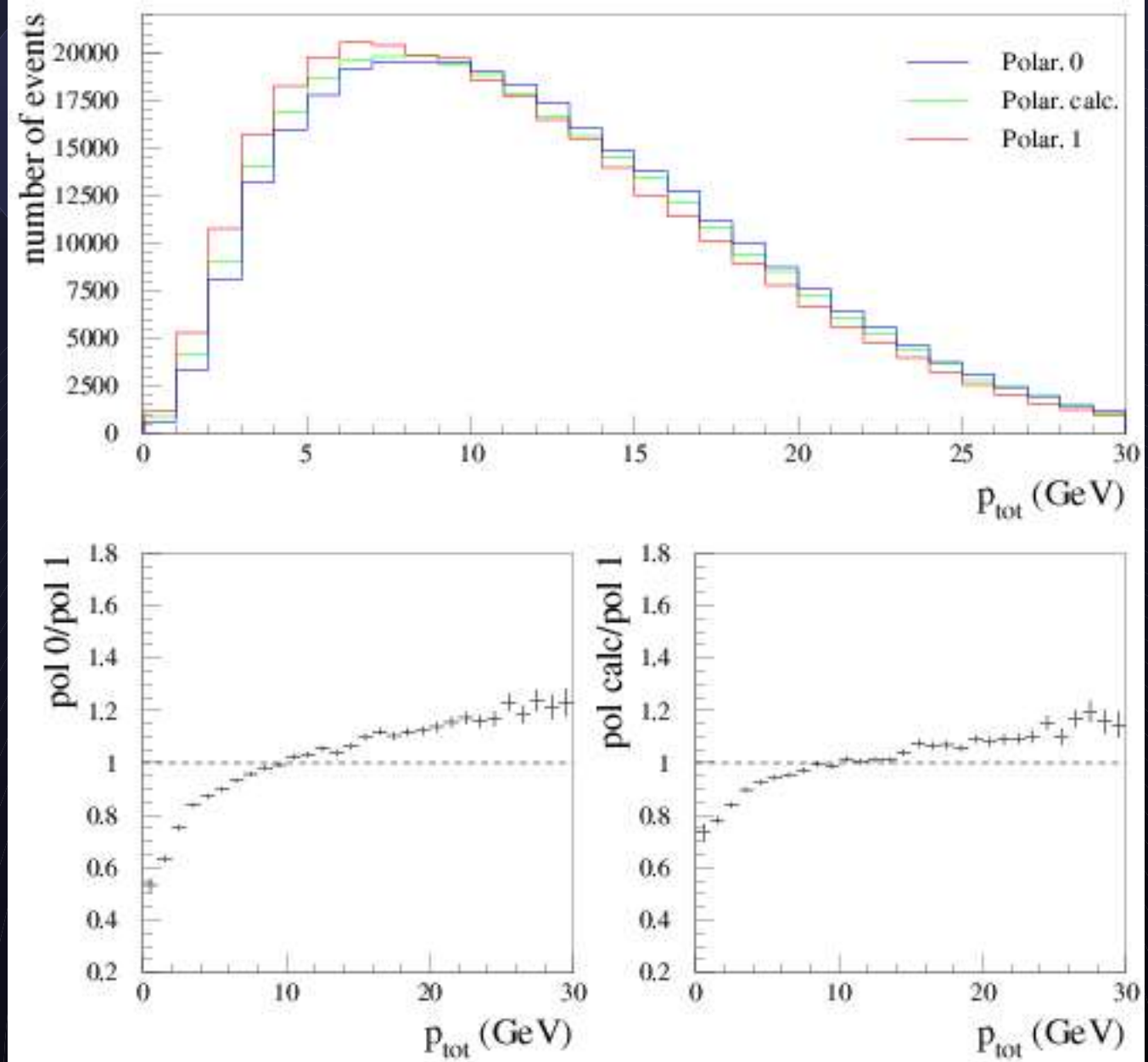
WPŁYW POLARYZACJI – 1E

- na ogół mały (np. pęd całkowity dla próbki spolaryzowanej o 5% wyższy w 1E,1M)
- próbka w pełni spolaryzowana jest bardziej podobna do tła



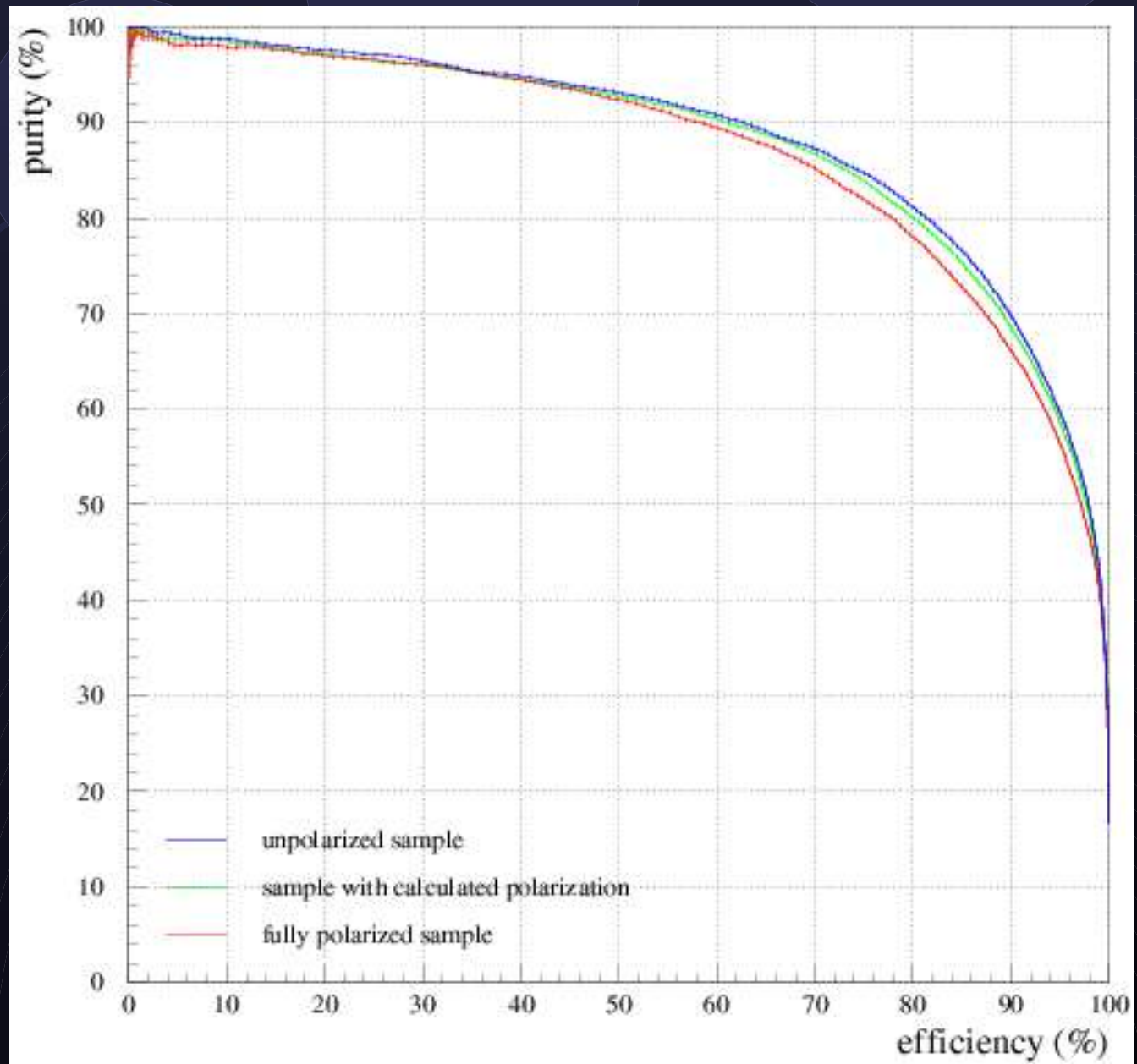
WPŁYW POLARYZACJI – 0L

- odwrotny efekt dla klasy 0L
- w 1E, 1M – lepton naładowany emitowany częściej do przodu
- w 0L – do przodu emitowane neutrino



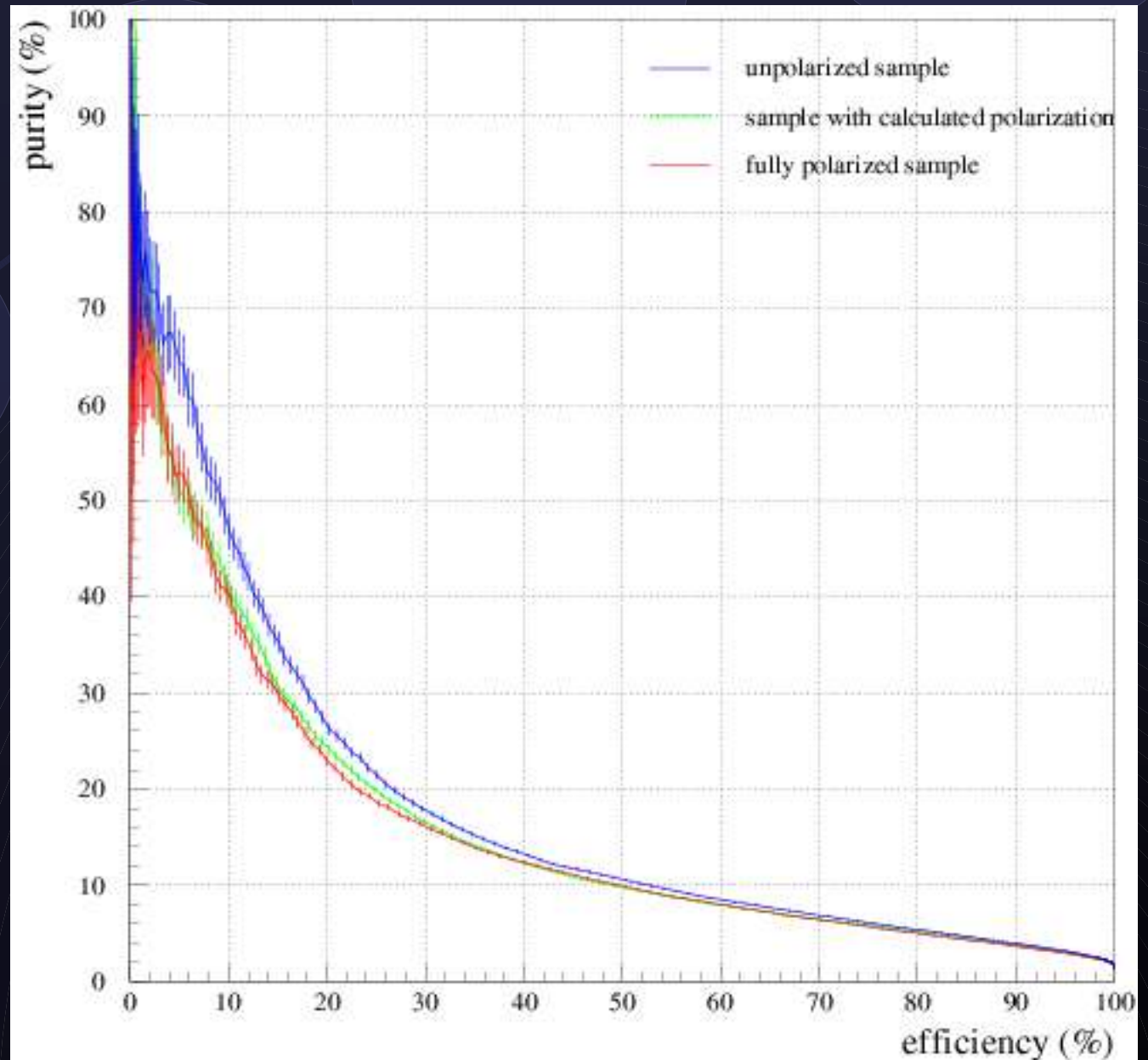
WYNIKI KLASYFIKACJI – 1E

- klasa 1E
„golden channel”
- zawartość
sygnału 16.75%



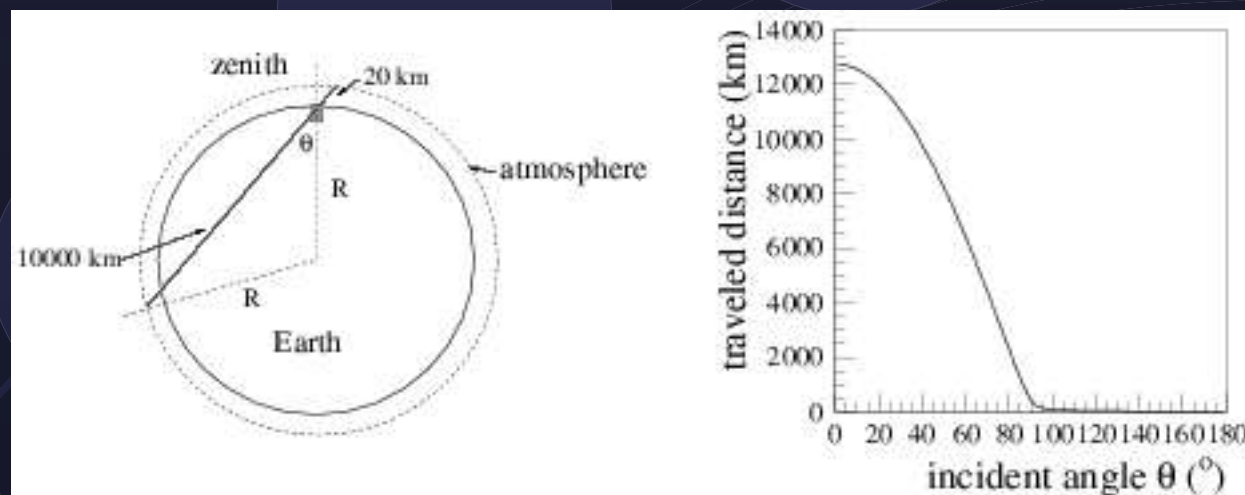
WYNIKI KLASYFIKACJI – OL

- zawartość sygnału 1.44%



NEUTRINA ATMOSFERYCZNE

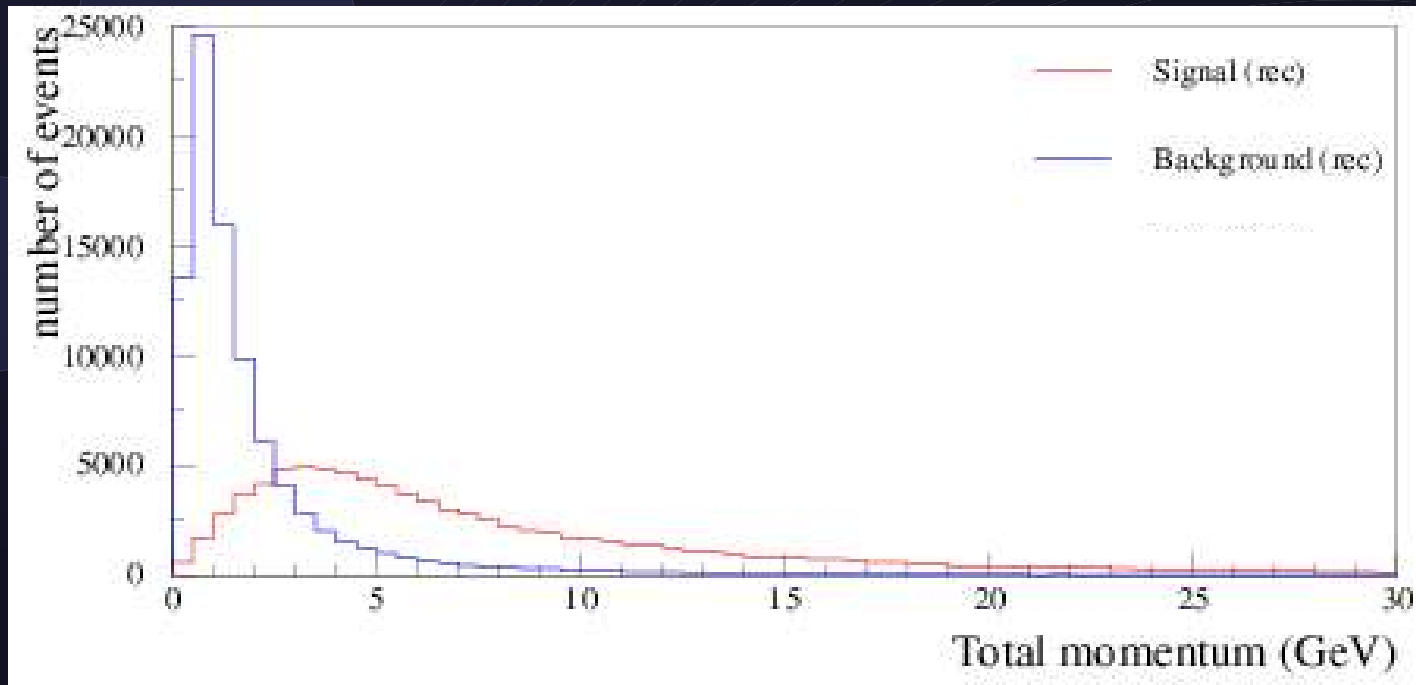
- prawdopodobieństwo oscylacji zależy od drogi neutrino



- wybór neutrin przychodzących „z dołu”, by zwiększyć stosunek sygnału do tła
- **kierunek** pierwotnego neutrino znany tylko z rekonstrukcji produktów oddziaływania

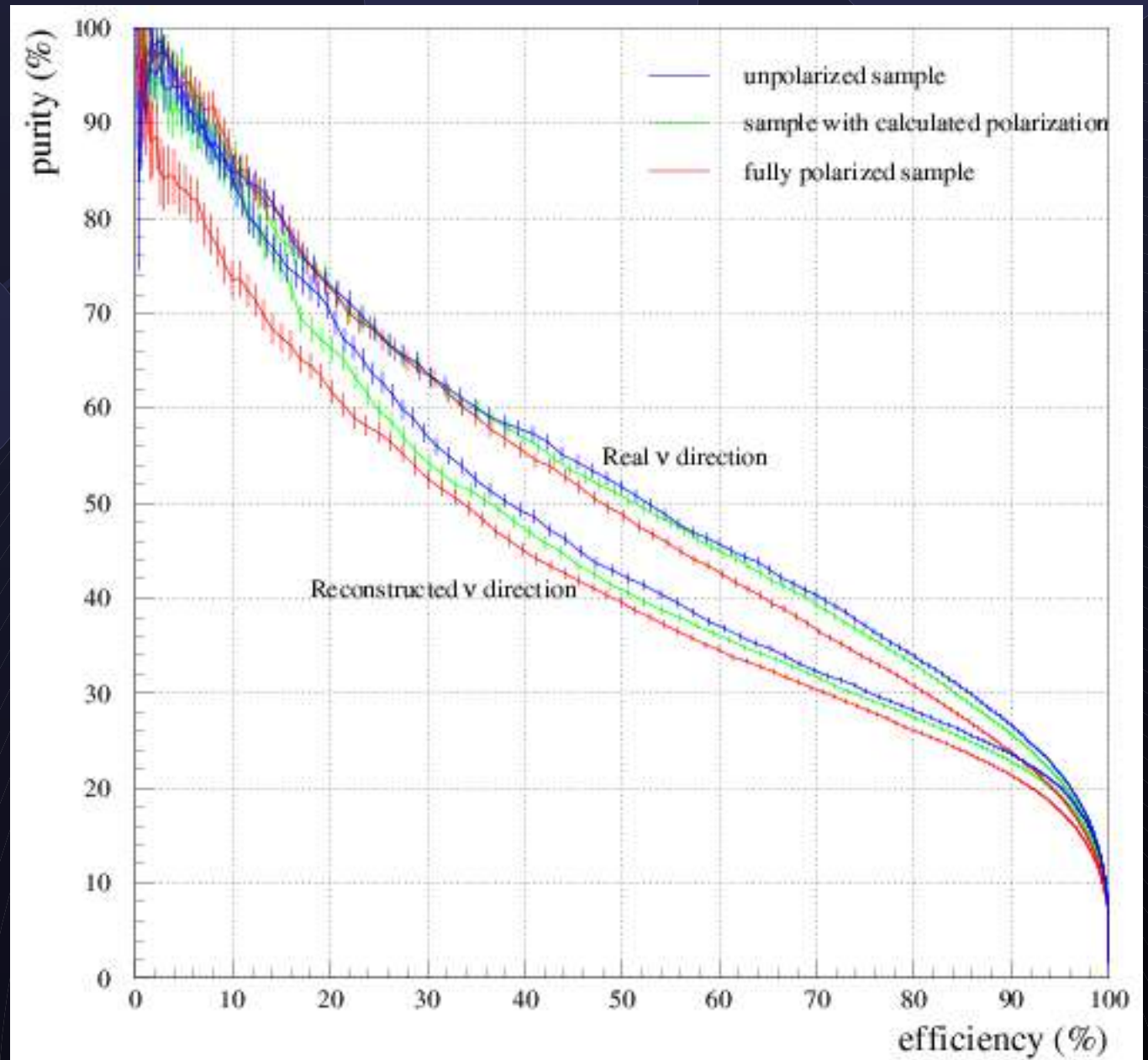
PRZYKŁADOWY ROZKŁAD

- Klasa 1E (pozostałe bardzo podobne)
 - tło to przypadki niskoenergetyczne – inaczej niż dla CNGS



WYNIKI KLASYFIKACJI – OL

- zawartość sygnału 1.887%



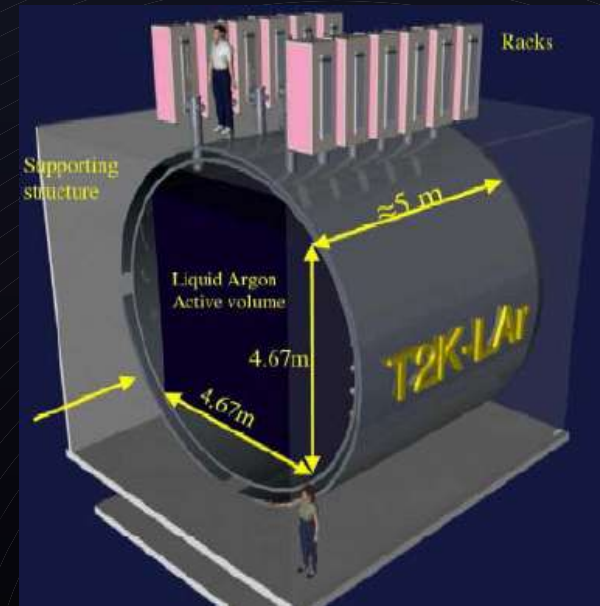
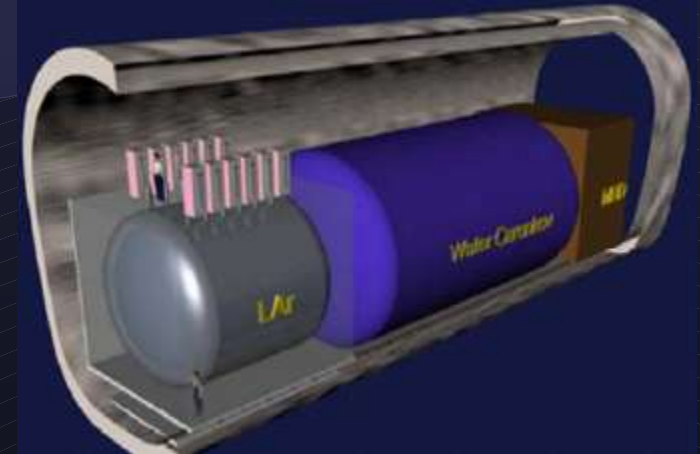
PRZYSZŁOŚĆ ICARUSA

- mało prawdopodobny znaczący wynik fizyczny dla ν_τ
- detektor **nie będzie** rozbudowywany
 - opóźnienia w realizacji projektu
 - zbieg niekorzystnych okoliczności
- detektor znajduje się w podziemnym laboratorium Gran Sasso, gdzie jest przygotowywany do uruchomienia
- dostarczy danych cennych z punktu widzenia rozwoju i lepszego zrozumienia technologii
- istnieją już następne projekty detektorów ciekłoargonowych...



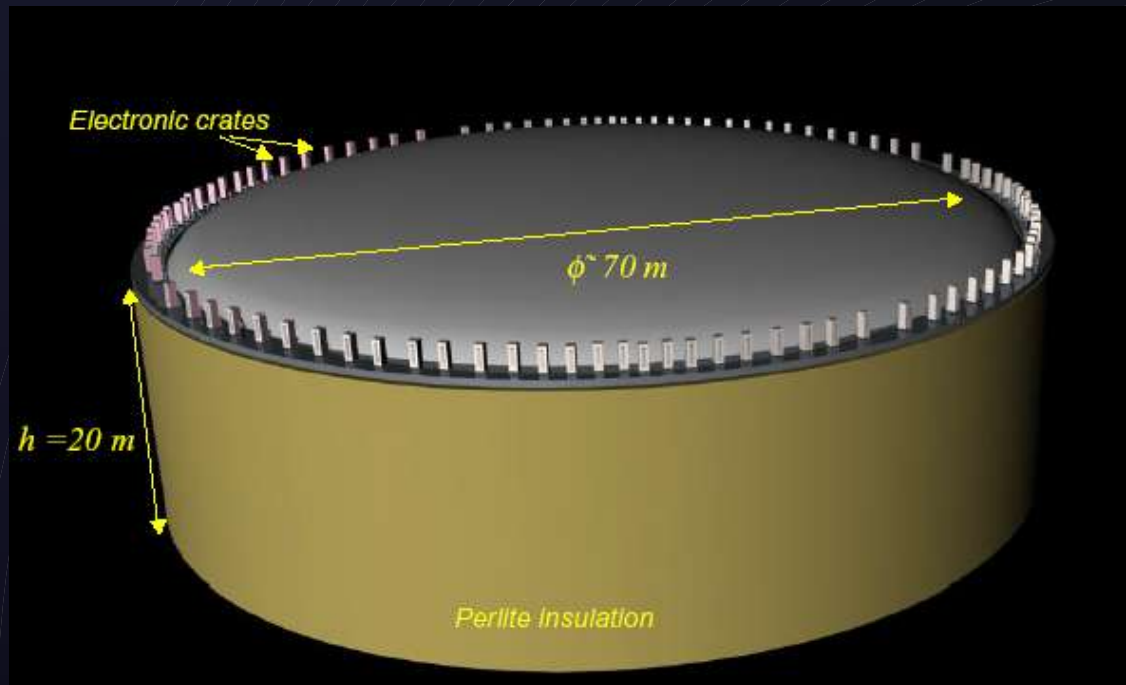
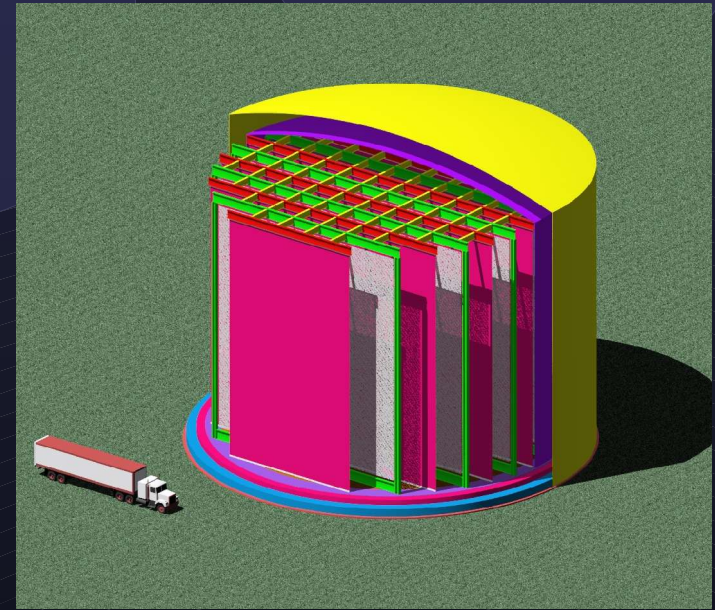
PRZYSZŁOŚCIOWE PROJEKTY Z CIEKŁYM ARGONEM – T2K

- T2K – ok. 2009 r., Japonia
- faza I: pomiar θ_{13}
- faza II: poszukiwanie łamania CP
- 3 detektory – bliski, w odległości 2 km i daleki (docelowo detektor HyperK – 1MT wody)
- TPC z ciekłym argonem (100 ton)
 - pomiary widma wiązki
 - pomiary przekrojów czynnych
 - pomiary składowej elektronowej wiązki



DALSZA PRZYSZŁOŚĆ...

- **FLARE** (USA), 90 kt ciekłego argonu
- **GLACIER**, 100 kt ciekłego argonu, detektor dwufazowy (ciecz i gaz)
 - θ_{13}
 - łamanie CP
 - hierarchia mas



PODSUMOWANIE

- przeprowadzone testy pokazują duże możliwości technologii ciekłoargonowej
- pierwszy duży detektor (ICARUS) powinien zacząć zbierać dane w ciągu roku
 - być może wyniki fizyczne
 - z pewnością dalsze usprawnienia techniczne (elektronika) i ulepszenie algorytmów skanowania i rekonstrukcji
- duże zainteresowanie – plany budowy dalszych detektorów (o różnych masach)
- polska grupa – ICARUS, T2K



DODATEK



LICZBY PRZYPADKÓW

- **supernowa** w odległości 10 kpc

model	ES	CC	NC
bez oscylacji	8	40	182
hierarchia normalna	8	200	182
hierarchia odwrócona	8	153	182

- **neutrino atmosferyczne** ($2.5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$, rok)

	cont.	total
e-like	20	40
μ -like	13	34

- **neutrino z CNGS**

- ν_{τ} (5 lat) – 3 (w kanałach rozpadu w elektron lub ρ)
- ν_{μ} (rok) – ok. 1300