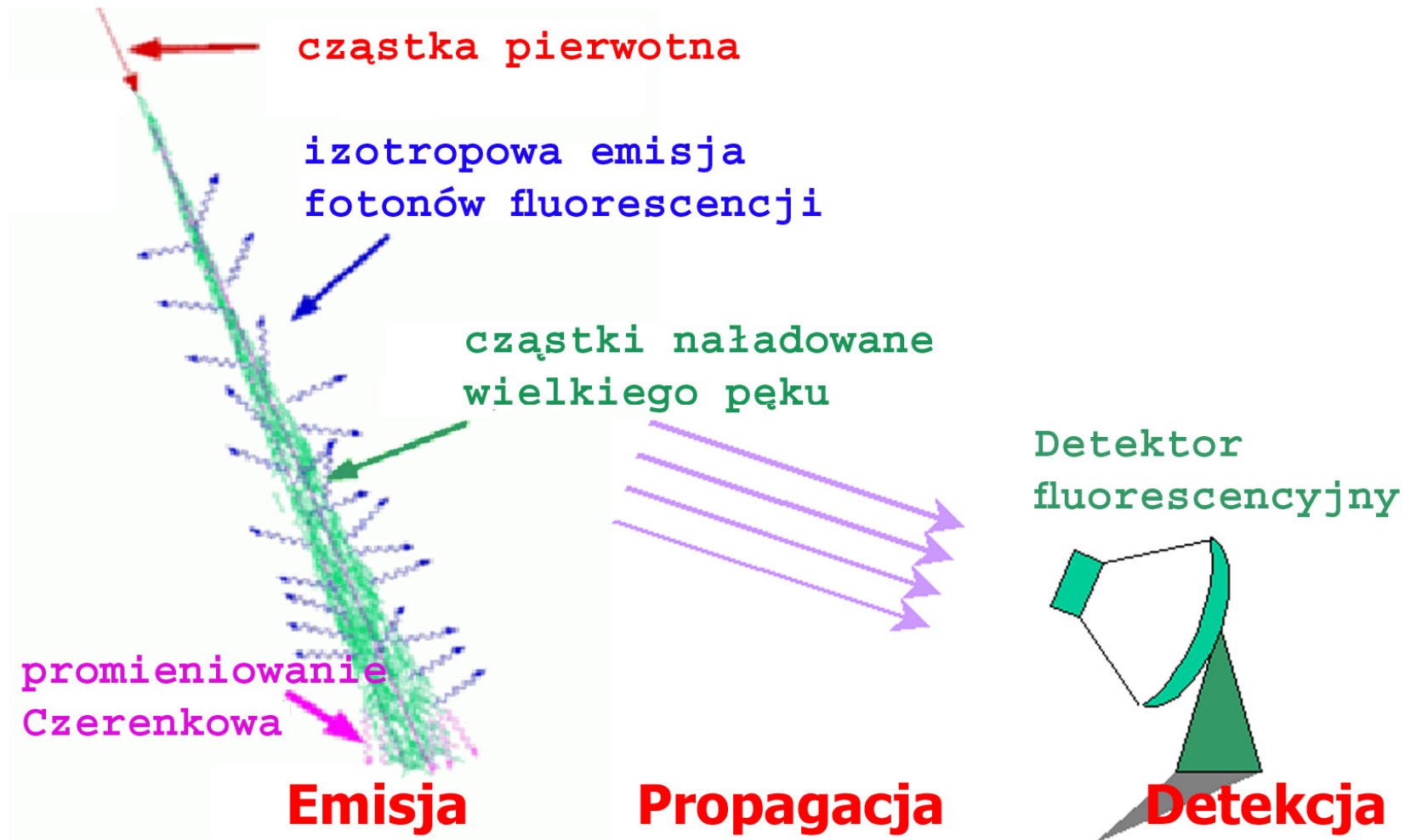


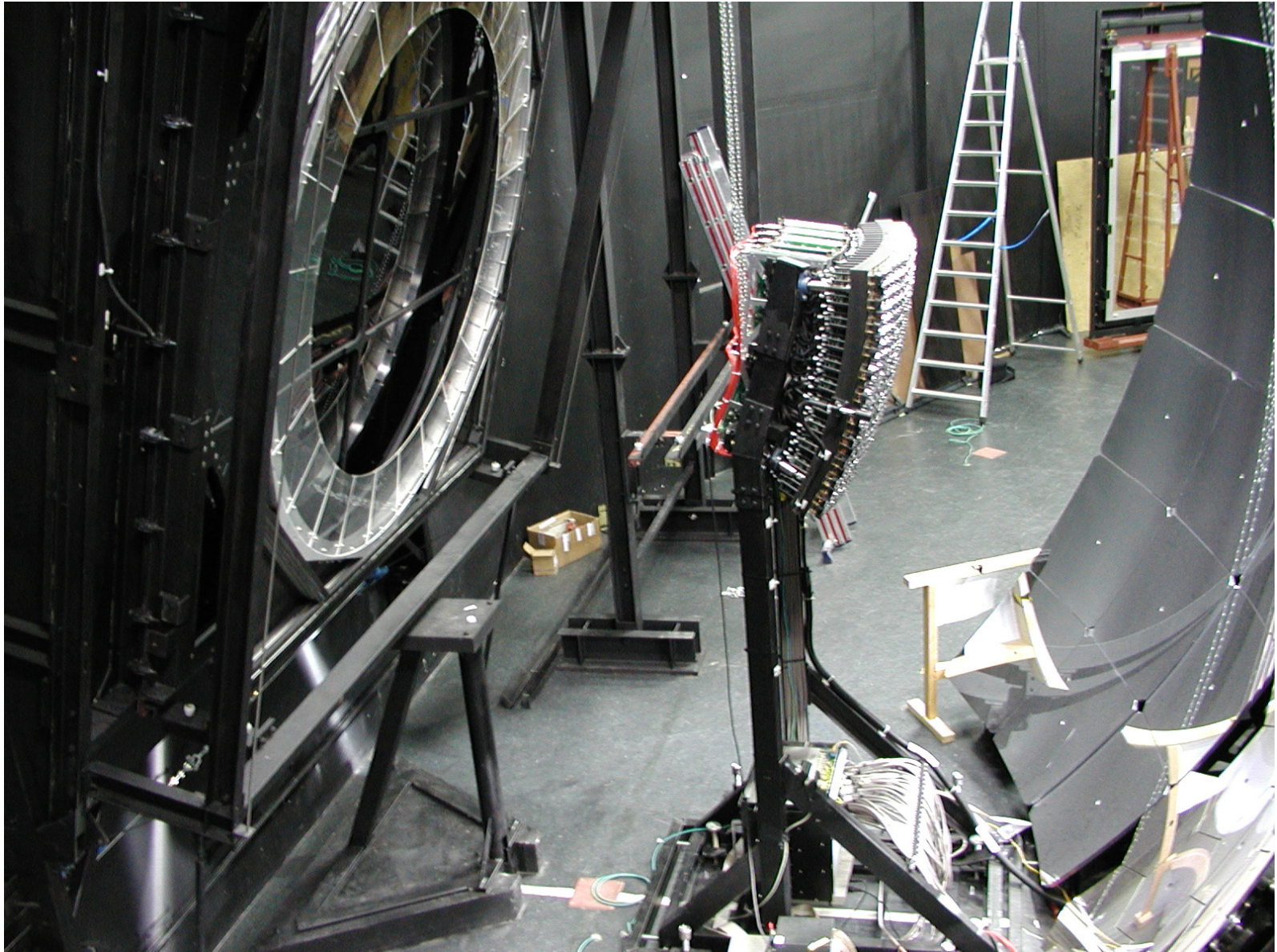
Astrofizyka promieni kosmicznych-5

Henryk Wilczyński

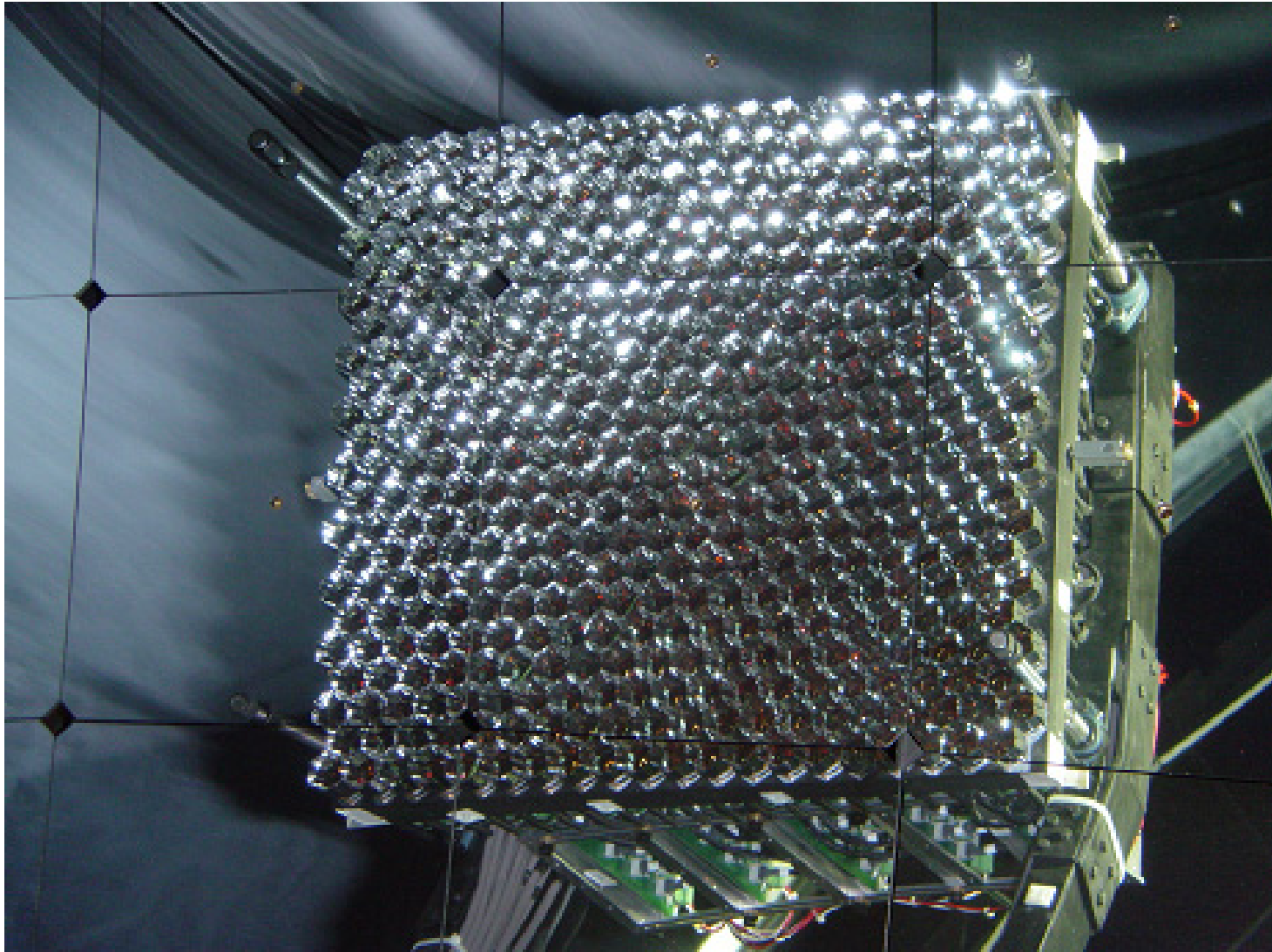
Pomiar wielkiego pęku metodą fluorescencyjną



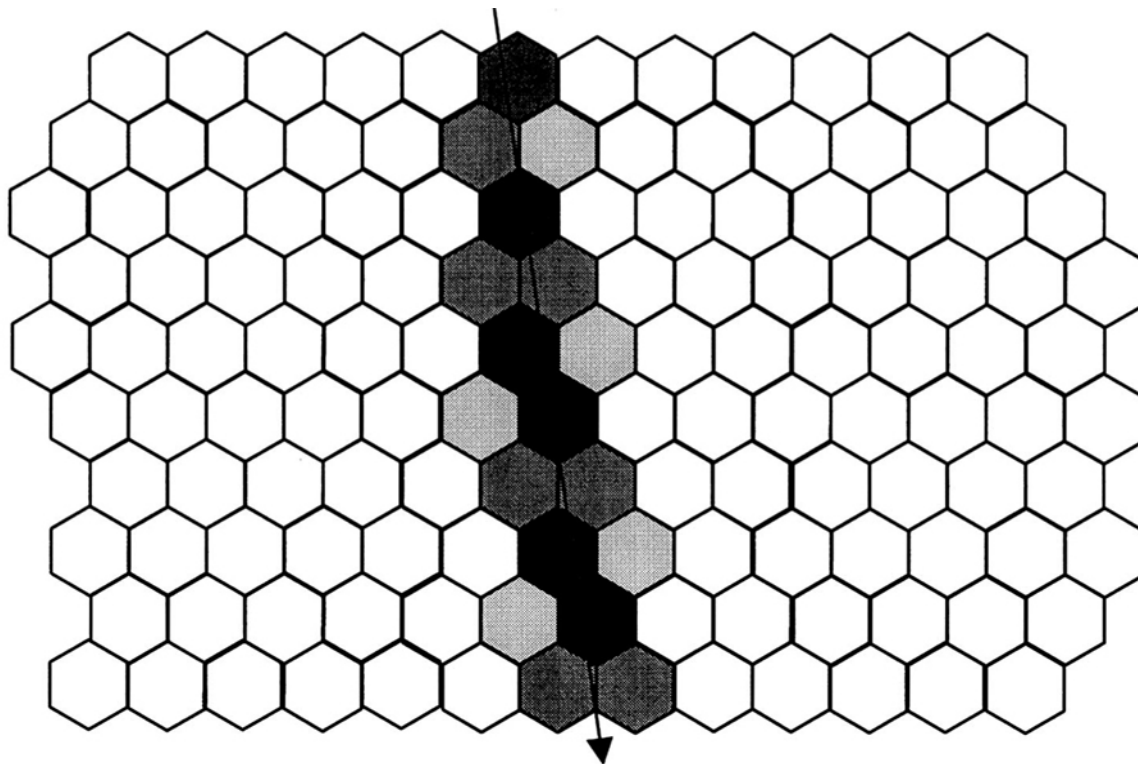
Teleskop fluorescencyjny



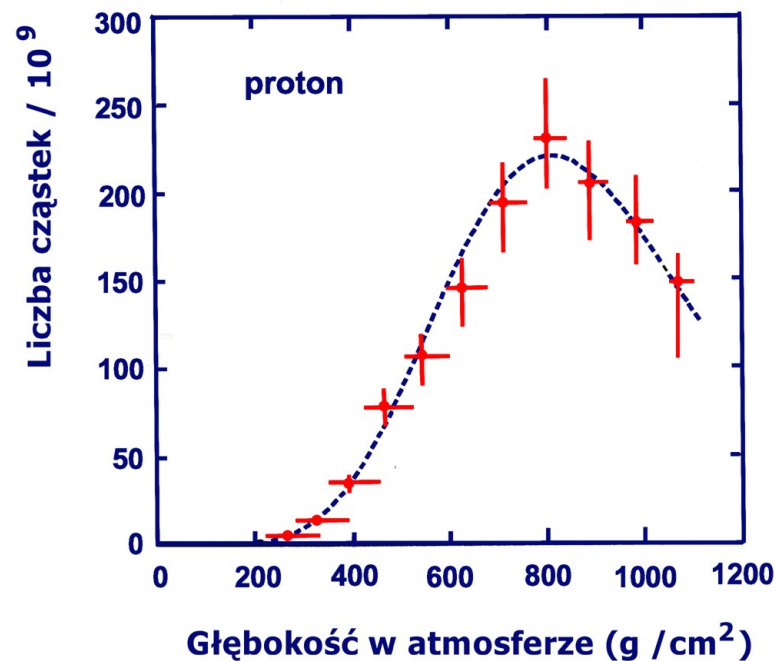
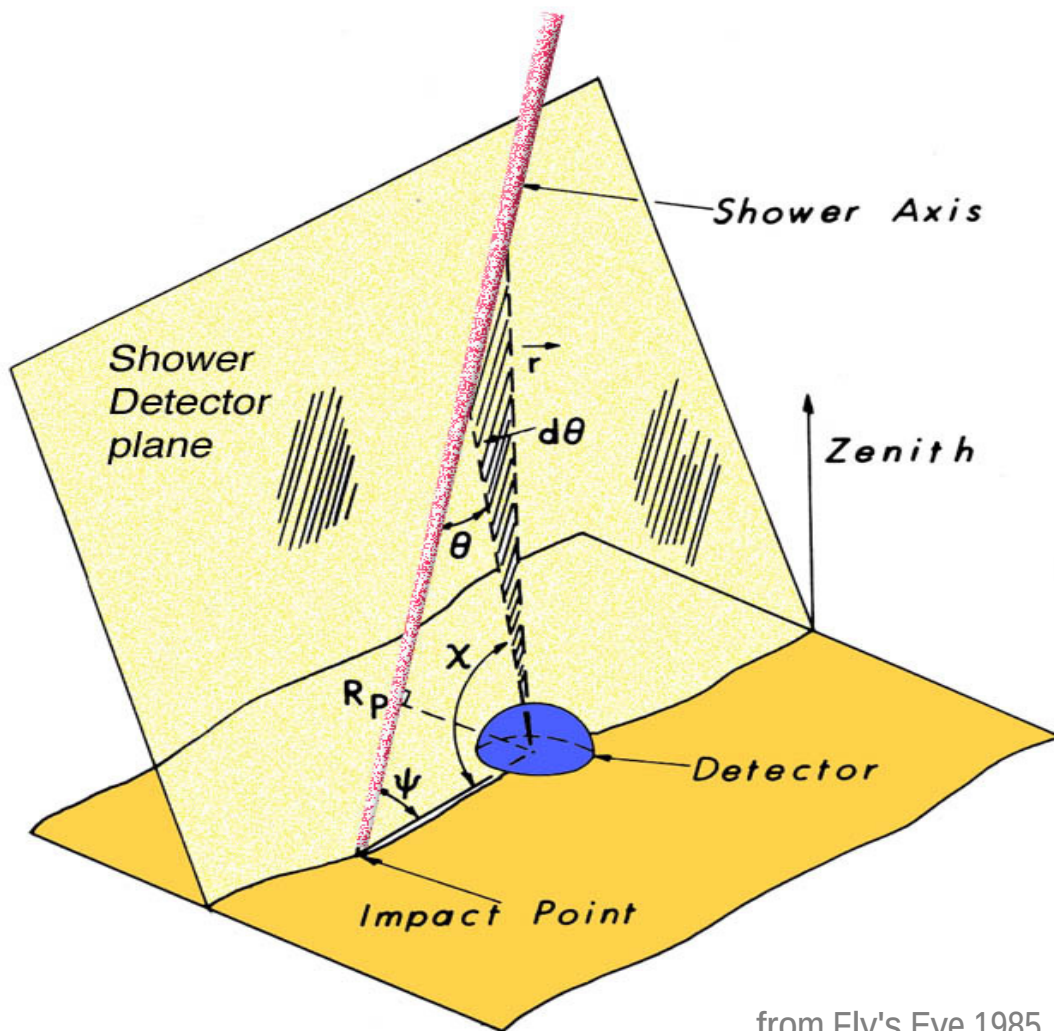
Kamera teleskopu



Ślad pęku w kamerze

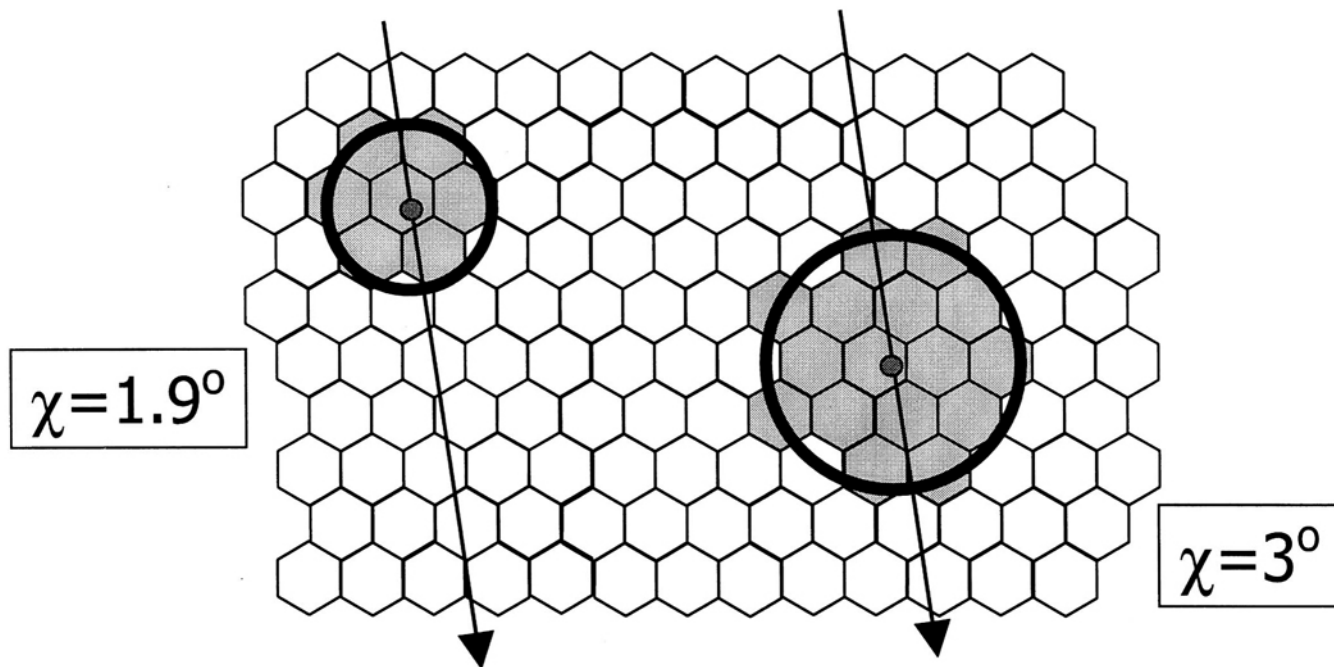


Detekcja metodą fluorescencyjną



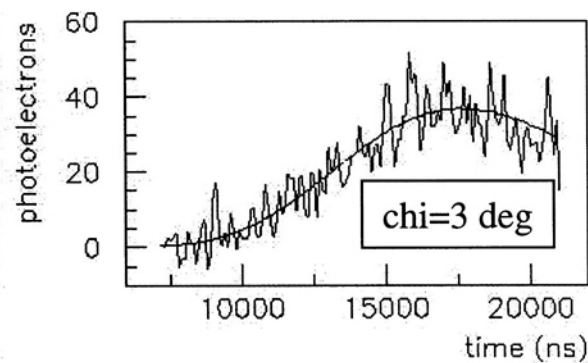
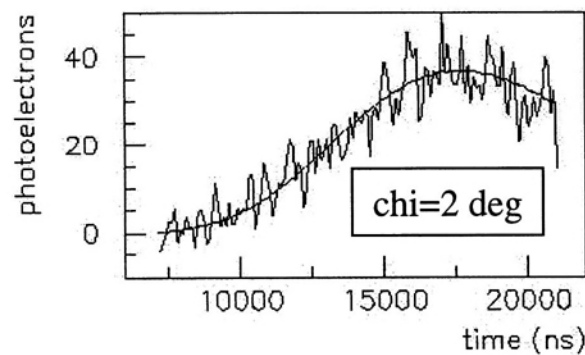
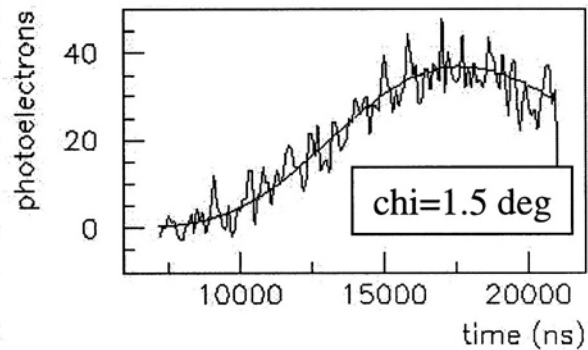
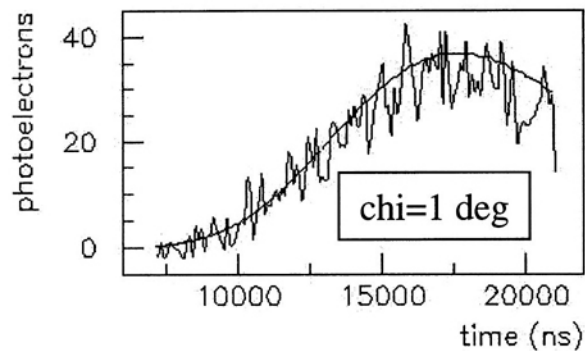
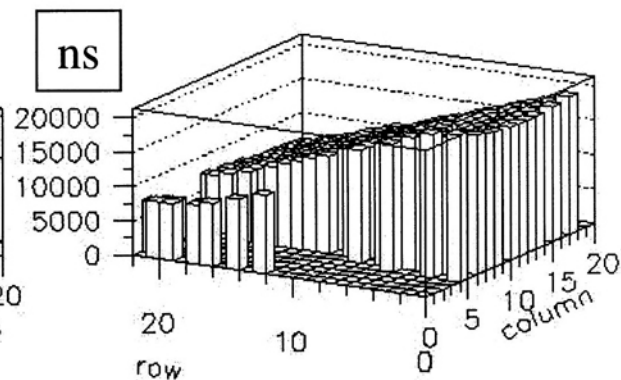
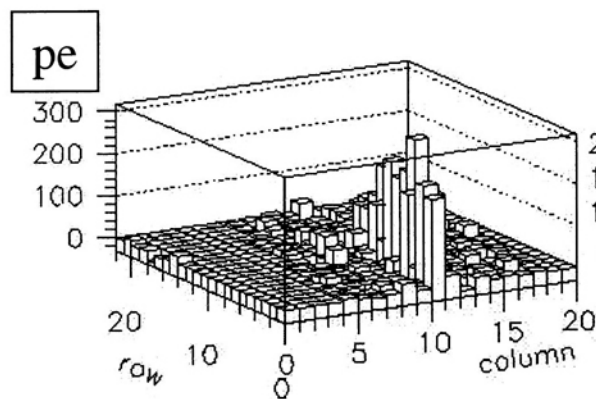
from Fly's Eye 1985

Obraz chwilowy pęku

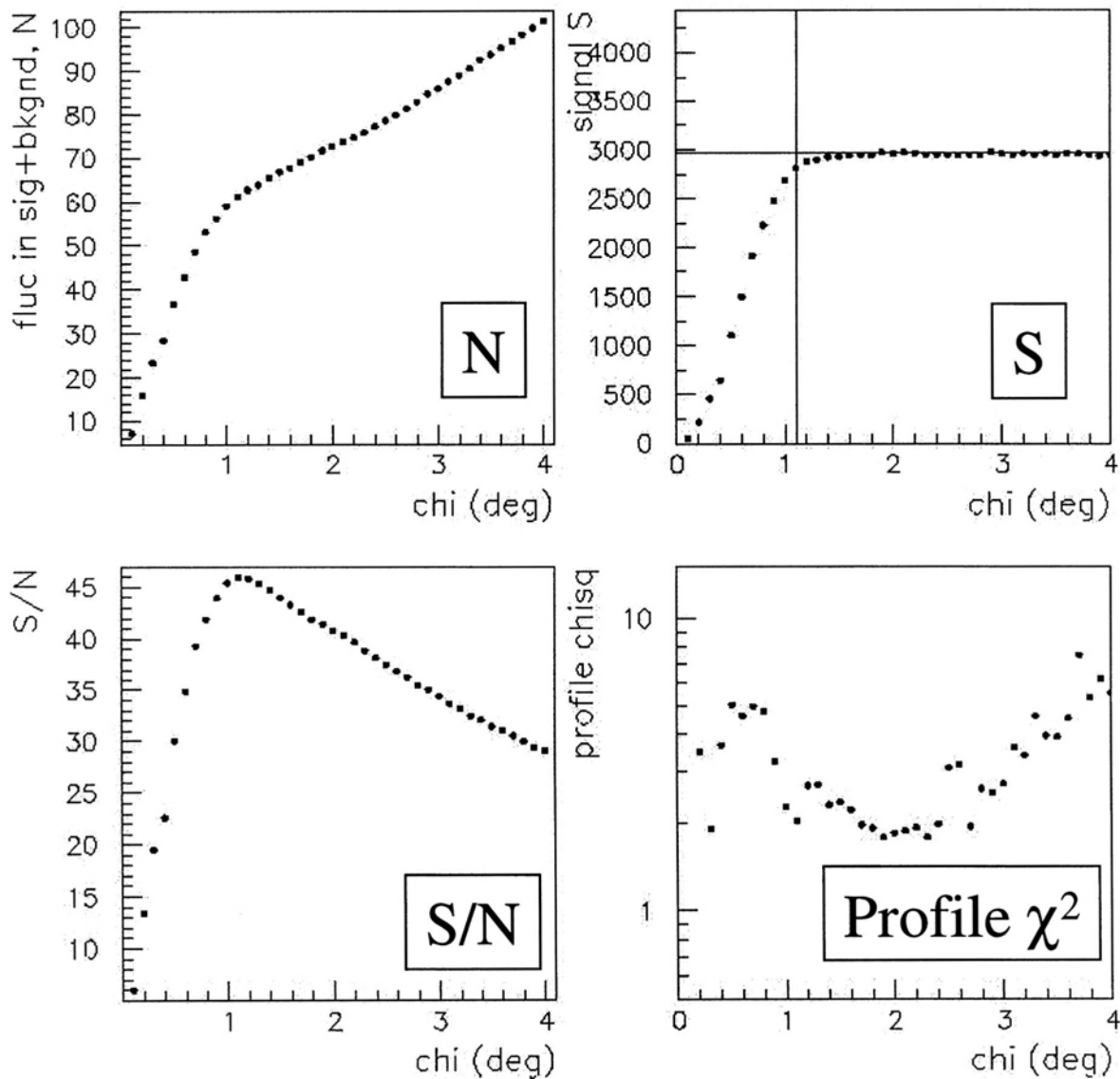


które piksele zawierają prawdziwy sygnał?

Profil podłużny



Sygnal i szum

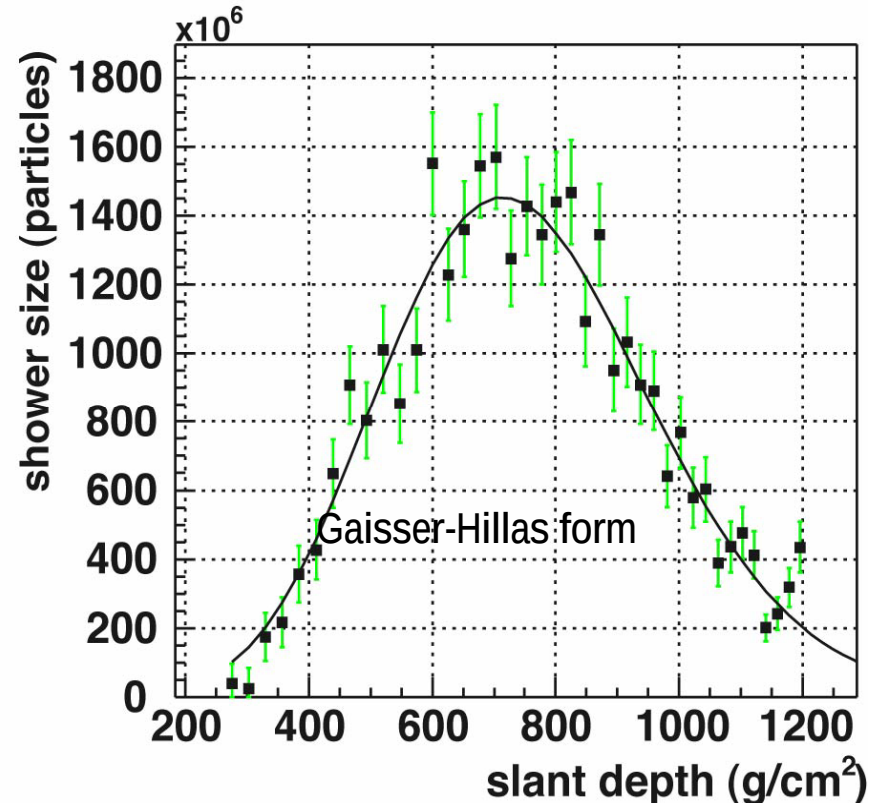
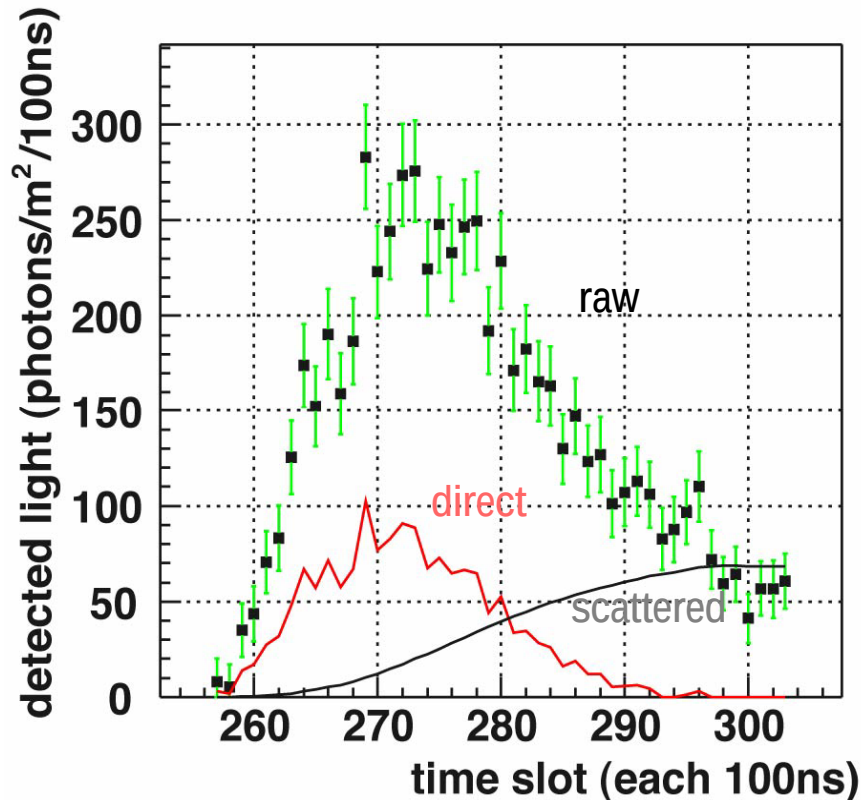


Poprawka na światło czerenkowskie

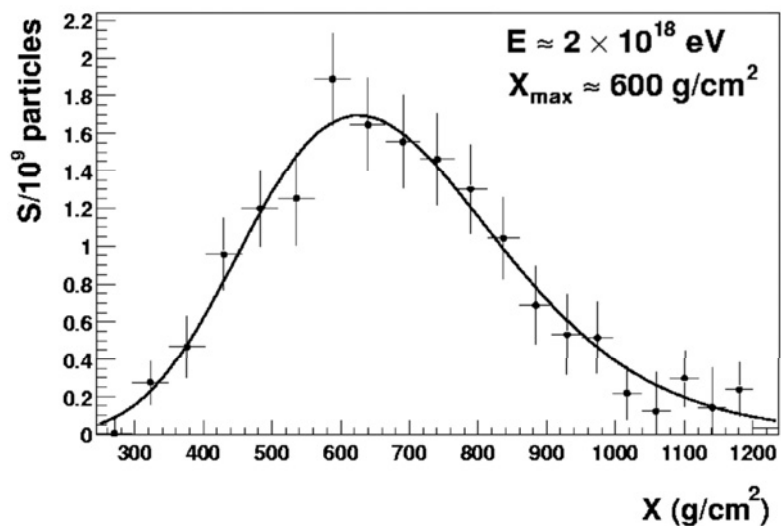
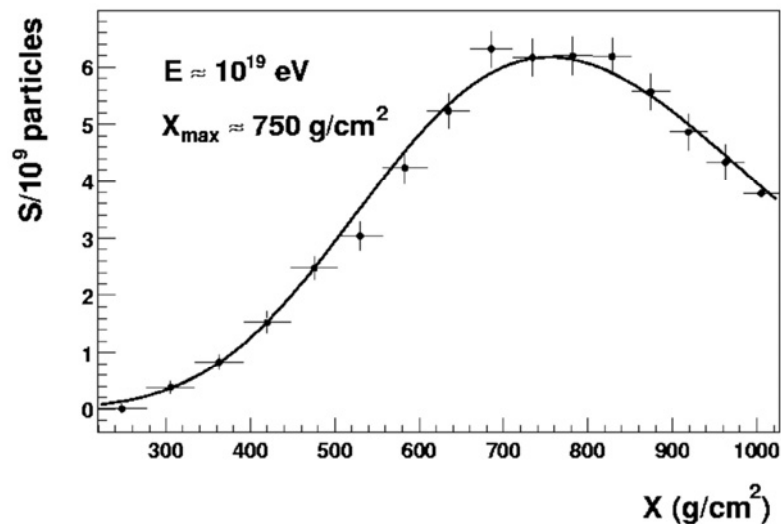
Rozpraszanie światła na drodze między wielkim pękiem a detektorem

→ Osłabienie sygnału fluorescencji

→ Rozpraszanie fotonów czerenkowskich w kierunku detektora



Profil podłużny rozwoju pęku



Kalibracja detektora fluorescencyjnego

Wydajność fluorescencji

Efekty atmosferyczne:

- monitorowanie aerozoli (laser, Lidar)

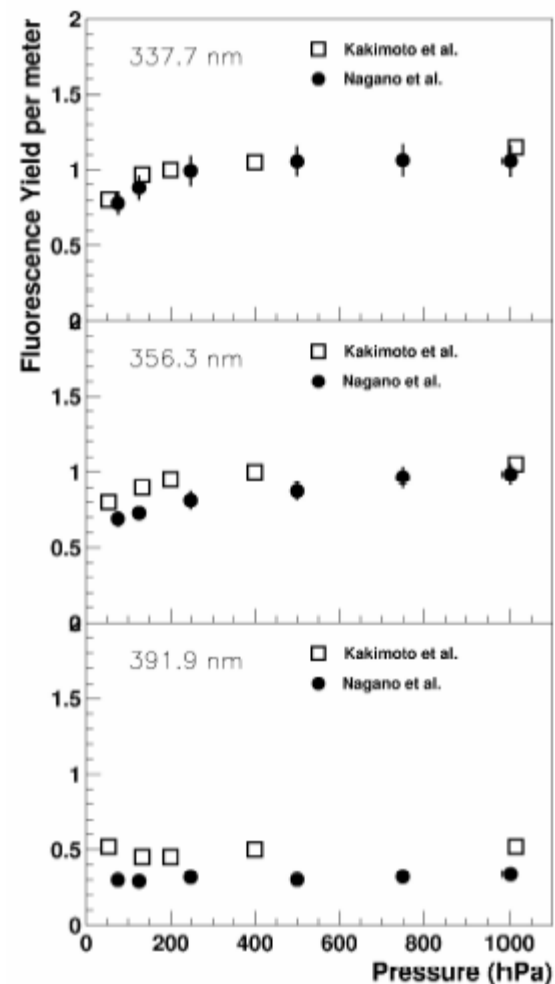
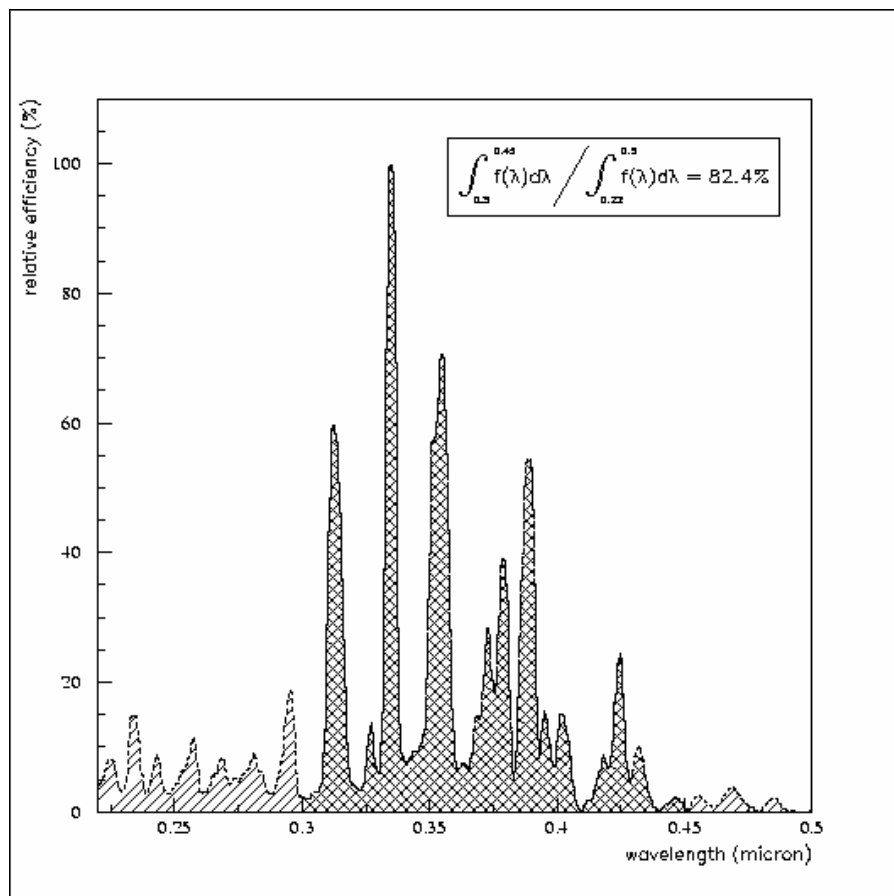
- monitorowanie rozkładów gęstości atmosfery

- monitorowanie chmur

Kalibracja optyczna i elektroniczna detektora

Modelowanie rozwoju i detekcji wielkiego pęku

Widmo fluorescencji azotu

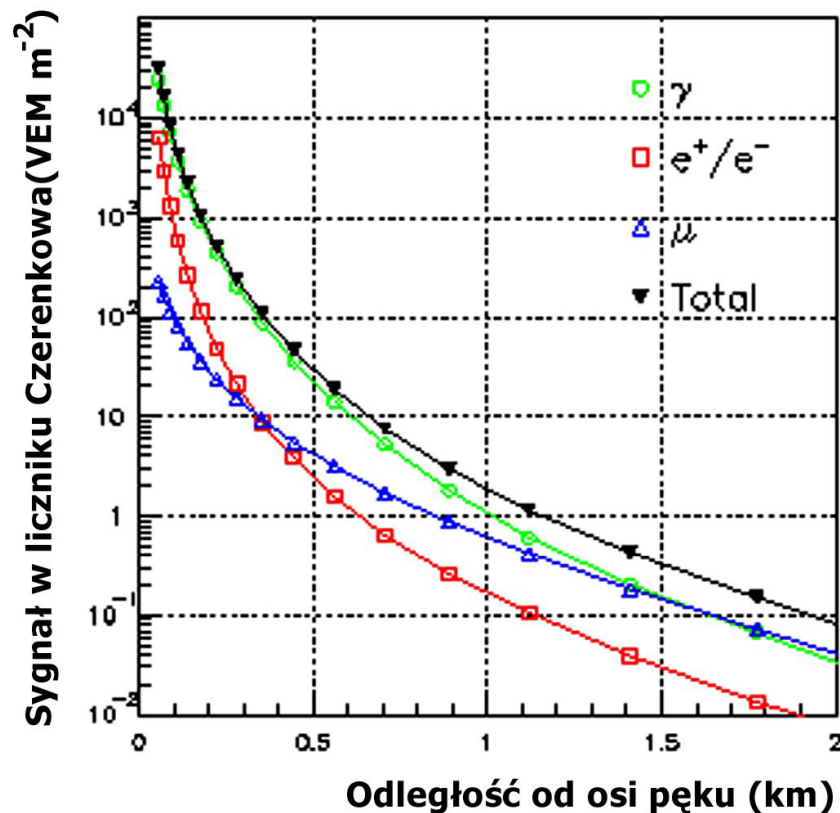
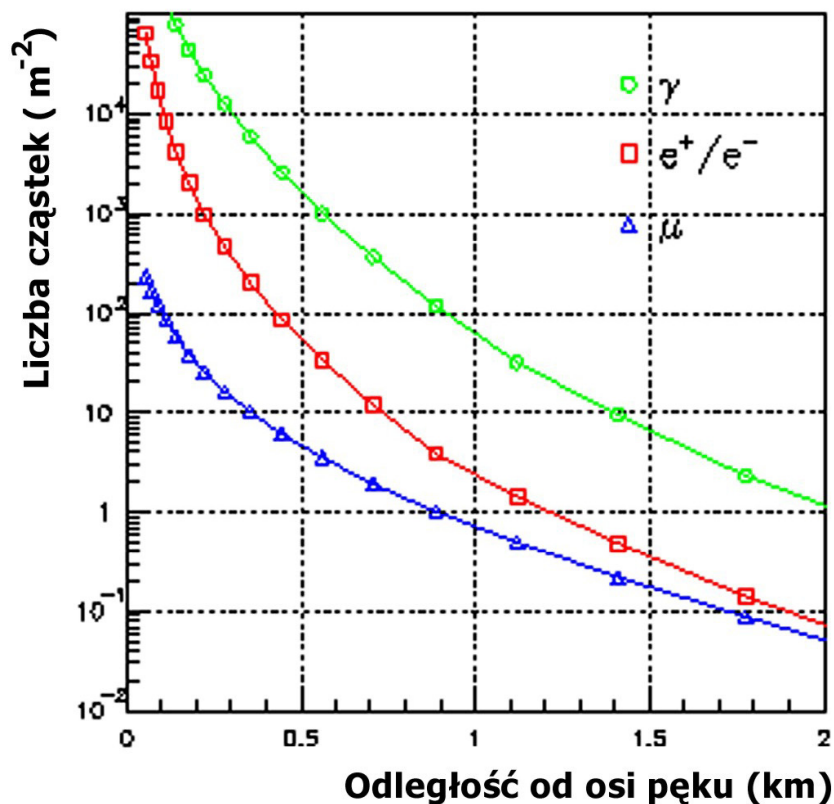


Rozpraszanie światła w atmosferze
 $F = F_0 \exp(-x/d)$ $d \sim \lambda^4$ (Rayleigh)

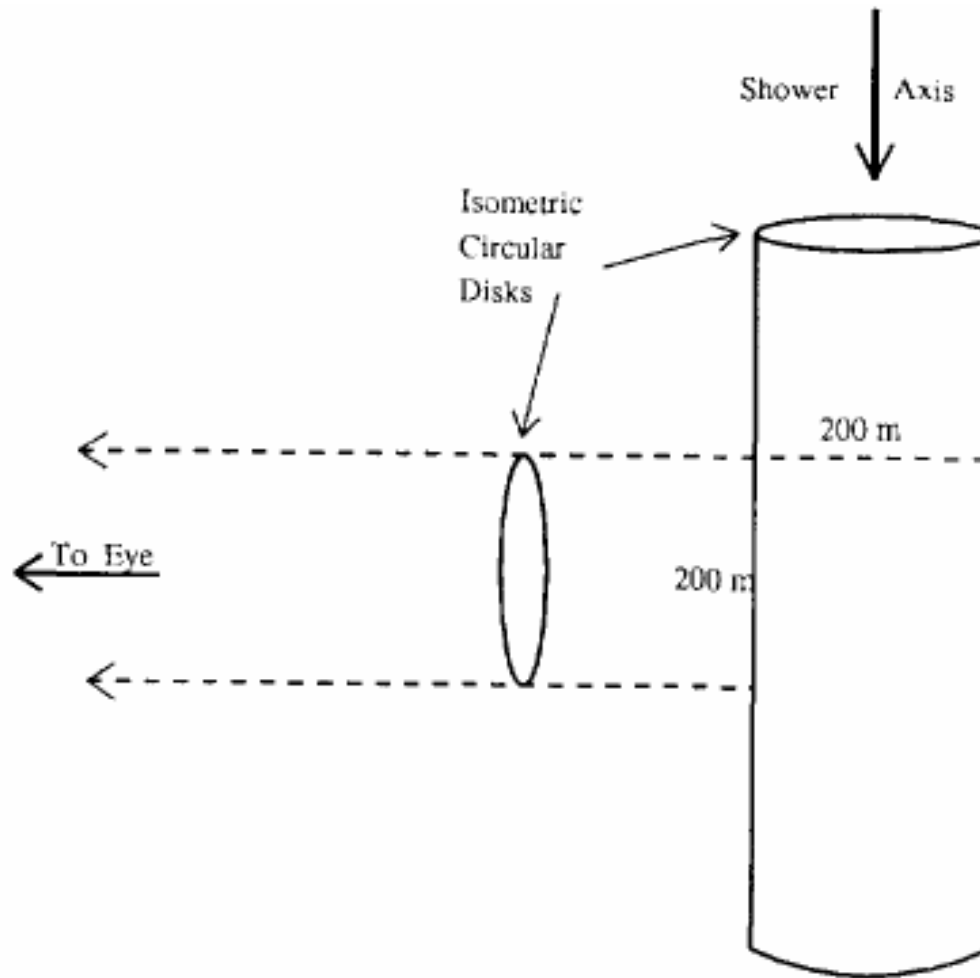
wydajność fluorescencji

Rozkłady poprzeczne cząstek w pęku

proton $E_0 = 10^{19}$ eV

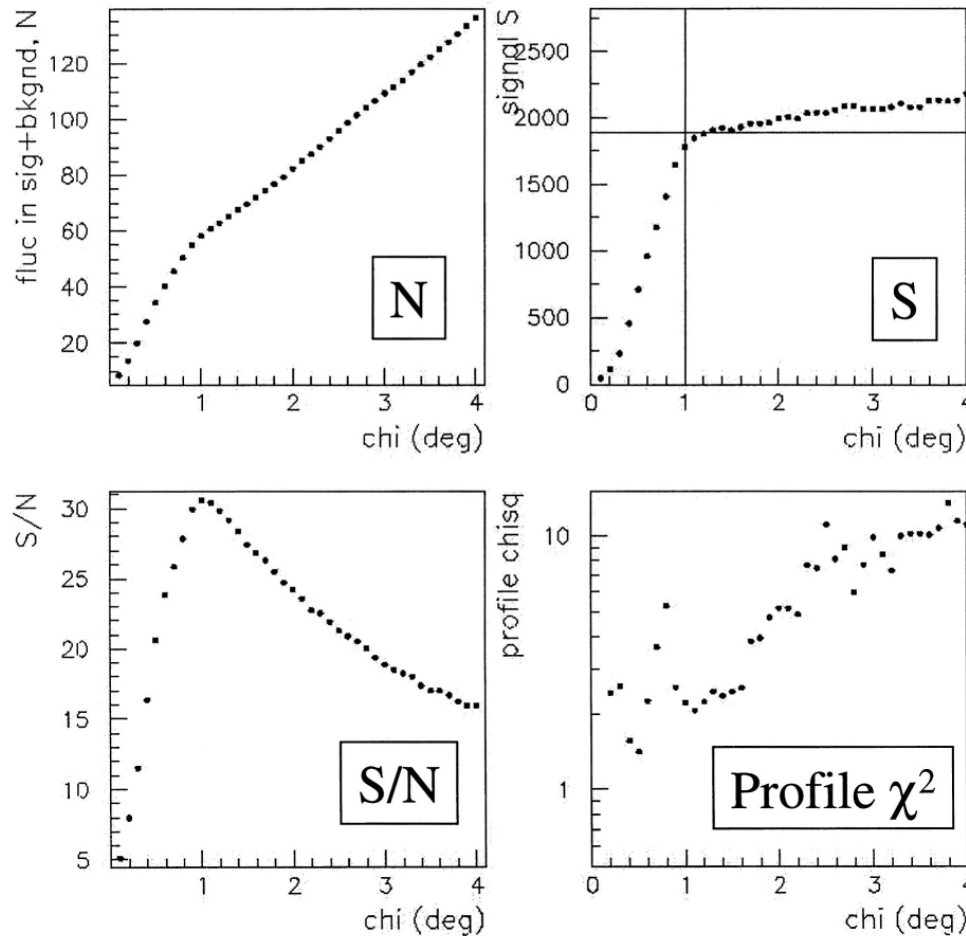


Obraz optyczny pęku



obraz frontu pęku jest zawsze kołowy!

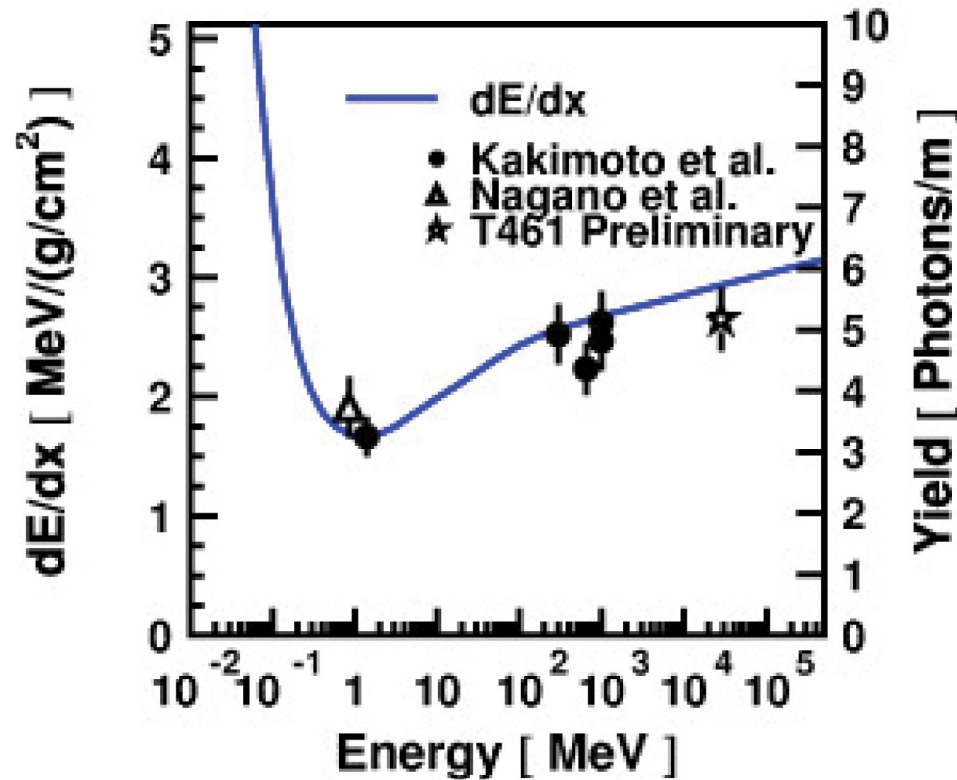
Zbieranie światła pęku



Rozciągnięty obraz pęku → gubienie części sygnału poza $\chi_{S/N}$

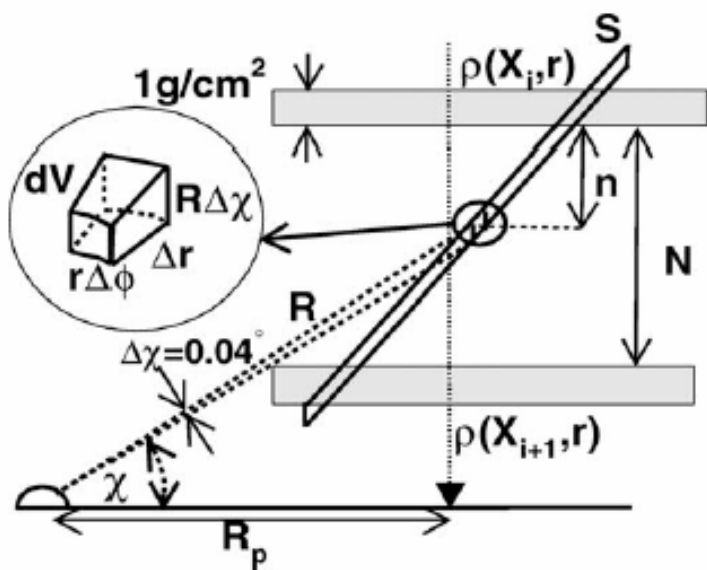
→ konieczna poprawka w procedurze wyznaczania energii

Emisja światła fluorescencji



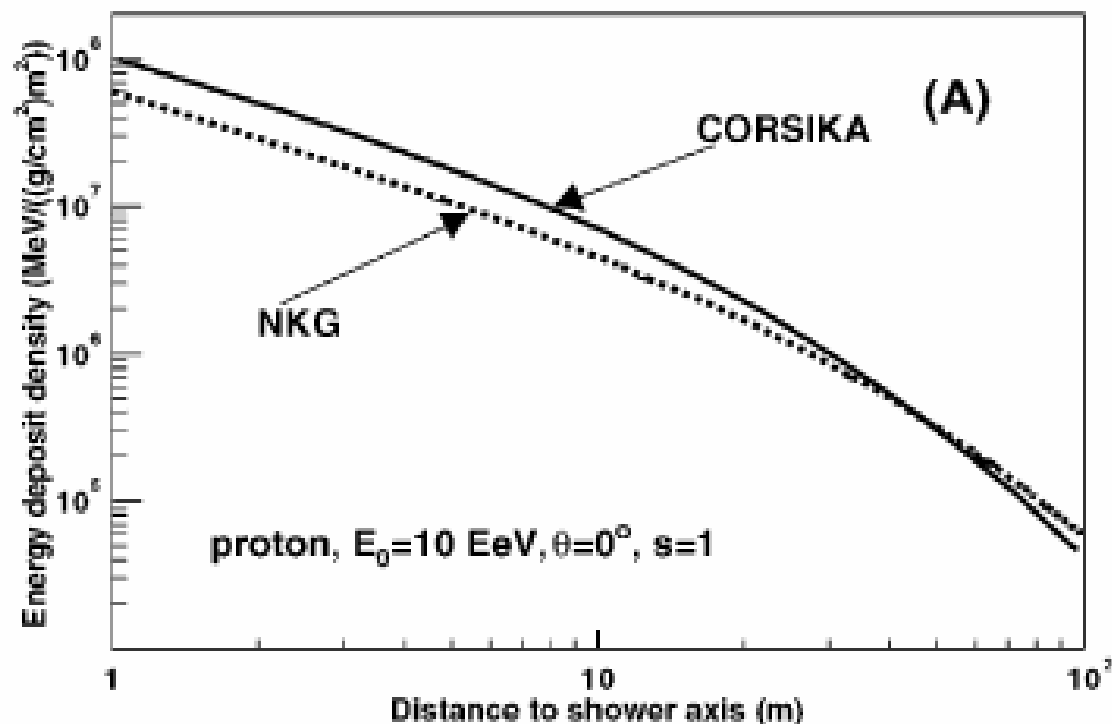
Obraz pęku zależy od rozkładu energii pozostawionej w powietrzu,
a nie od rozkładu liczby cząstek!

Rozkład światła w obrazie pęku

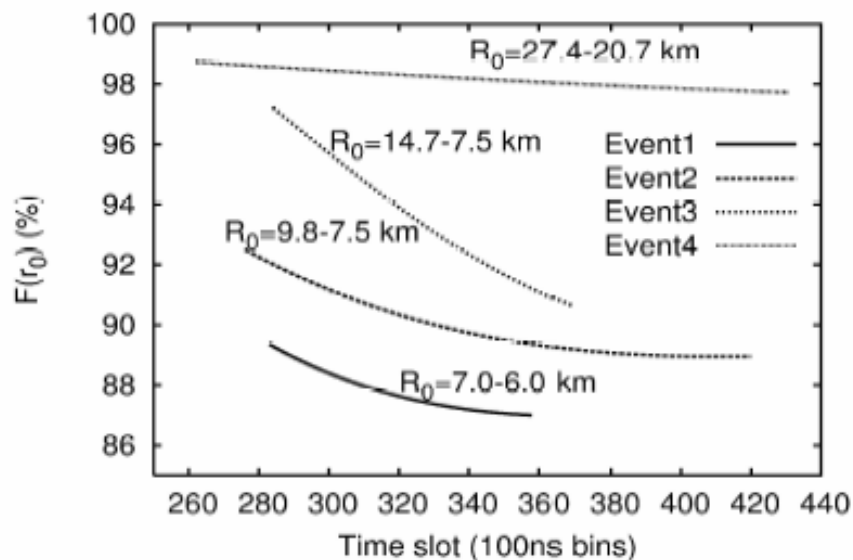
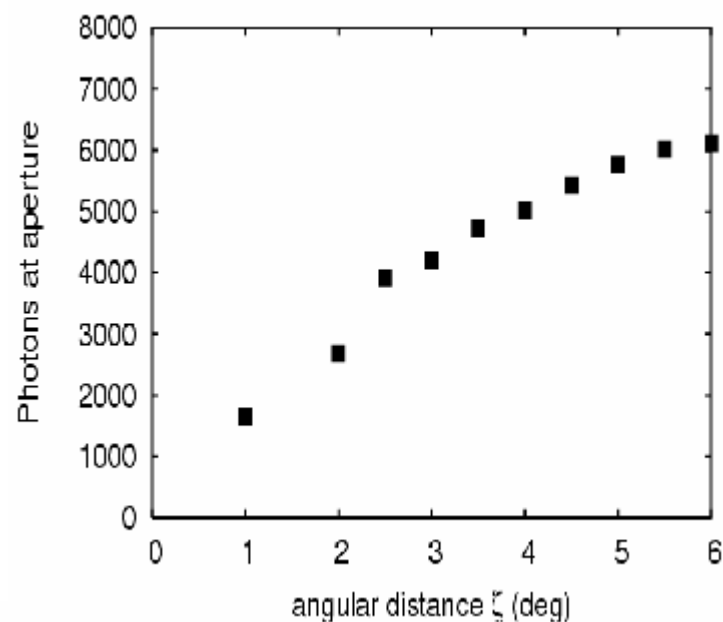
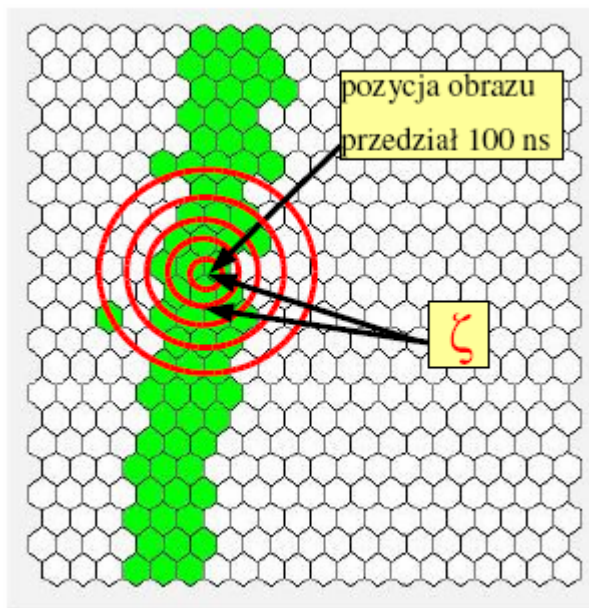


symulacja rozwoju pęku

rozkład energii pozostawionej
różni się od rozkładu gęstości
cząstek



Wielkość obrazu pęku



symulacje CORSIKA

Rozpraszanie światła w atmosferze

Rayleigh: rozpraszanie na molekułach

$$T_R(\lambda) = \exp \left[-\frac{(X_v^{eye} - X_v(h))}{\cos(\beta) X_R} \left(\frac{400nm}{\lambda} \right)^4 \right], \quad d\sigma/d\Omega \propto 1 + \cos^2 \theta$$

Mie: rozpraszanie na aerozoluach

$$T_{Mie} = \exp \left[\frac{1}{L_{Mie}^{h=0} \cos(\beta)} \frac{h_{Mie}}{\cos(\beta)} \left(\exp \left(-\frac{h}{h_{Mie}} \right) - \exp \left(-\frac{h_{eye}}{h_{Mie}} \right) \right) \right], \quad d\sigma/d\Omega \propto e^{-\theta/26.7^\circ}$$

Rozpraszanie światła na drodze między wielkim pękiem a detektorem:

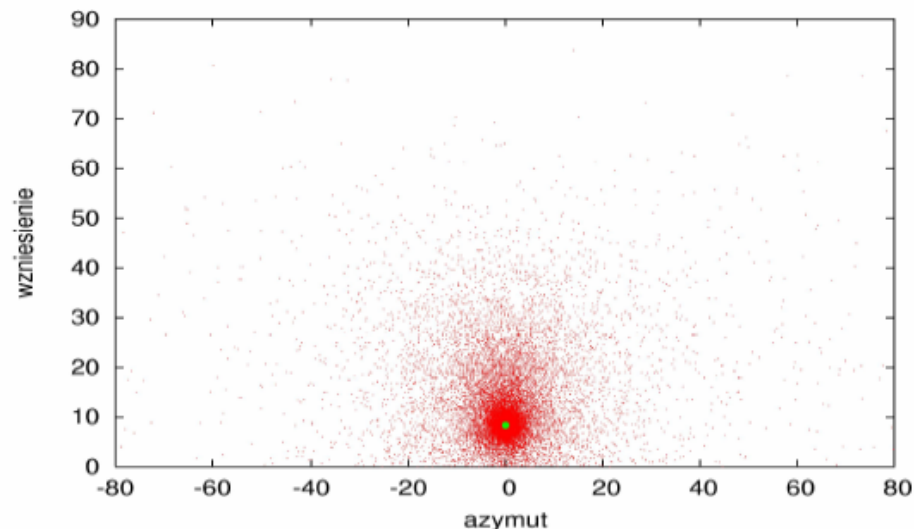
→ osłabienie sygnału

W dotychczasowej procedurze rekonstrukcji pęku uwzględnione pojedyncze rozpraszanie fotonów czerenkowskich w kierunku detektora → dodatkowe tło

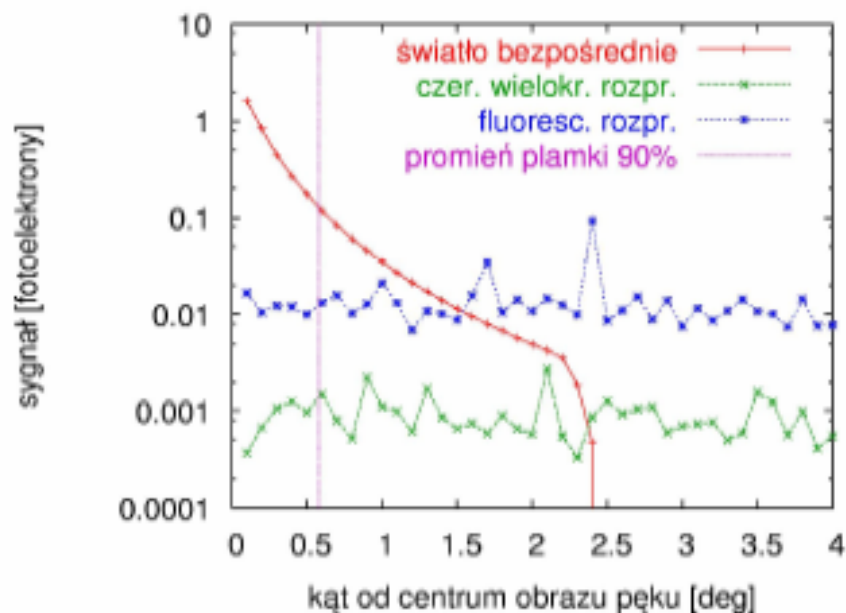
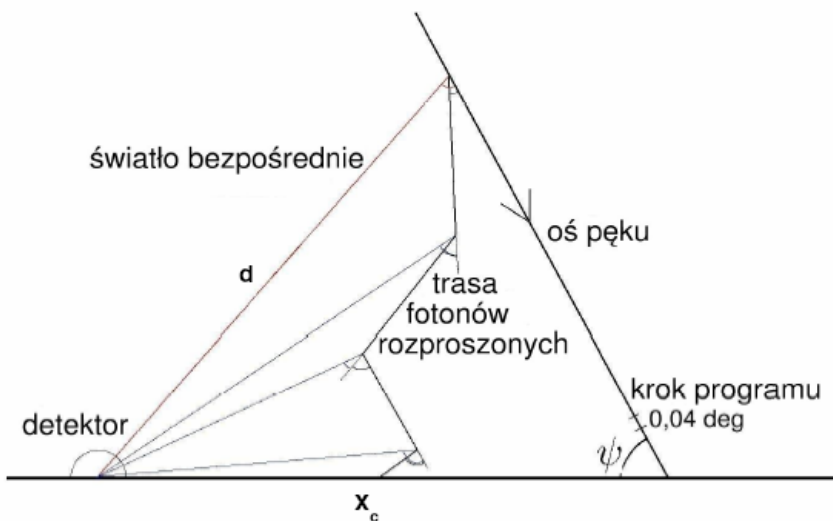
Wielokrotne rozpraszanie → dodatkowy sygnał w detektorze

Rozkład kątowy światła rozproszonego

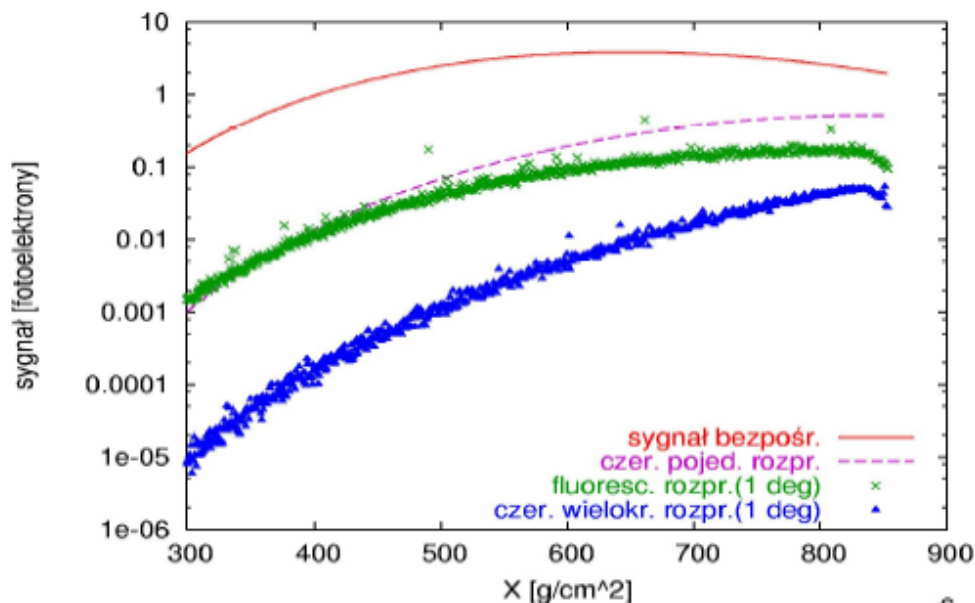
Pęk pionowy, 10 EeV, odległość 15 km



Obszar, z którego przybywa 90% bezpośredniego światła od wielkiego pęku i
rozkład sygnału fotonów wielokrotnie rozproszonych na niebie

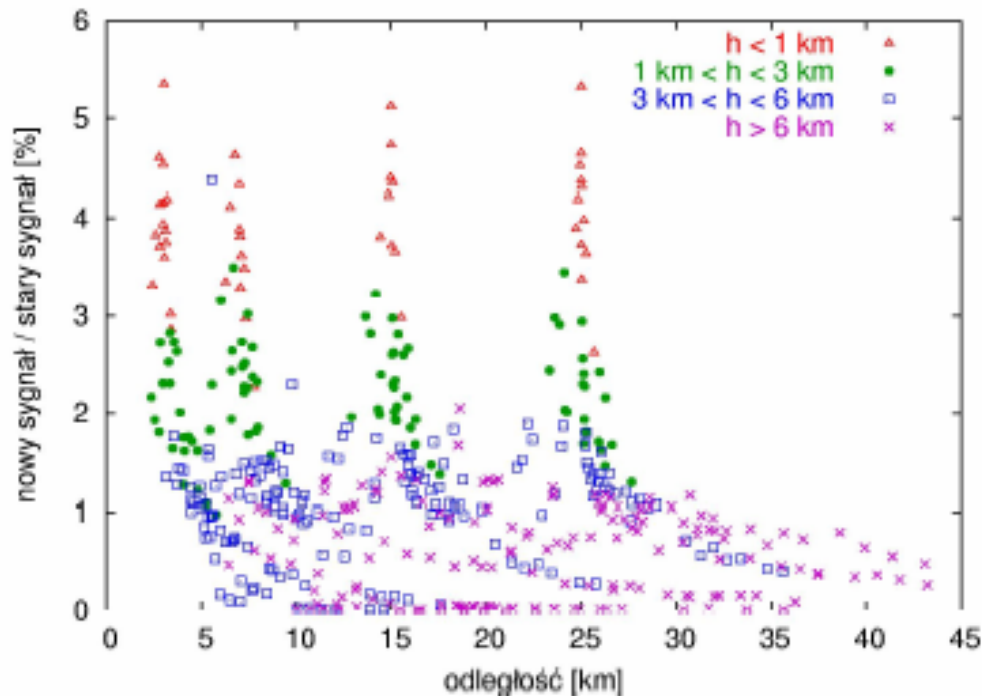


Wkład wielokrotnego rozpraszania

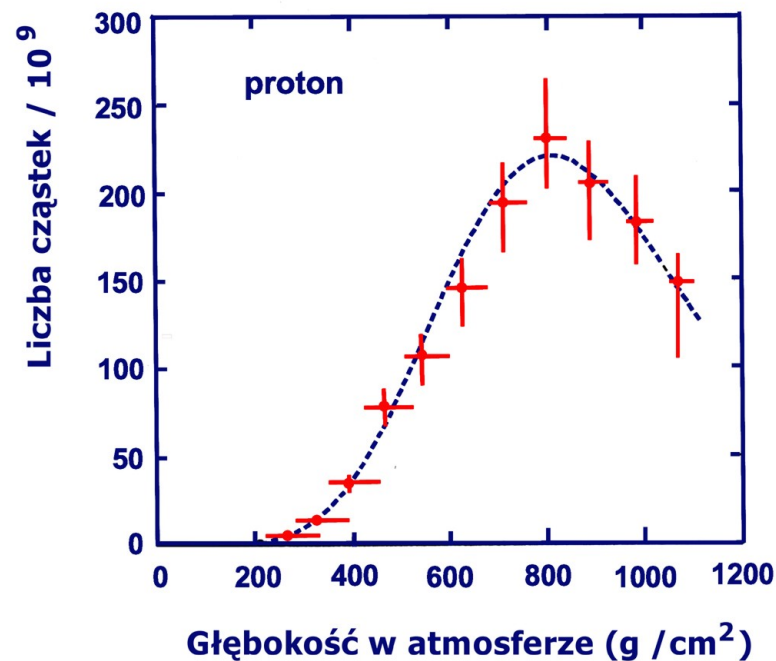
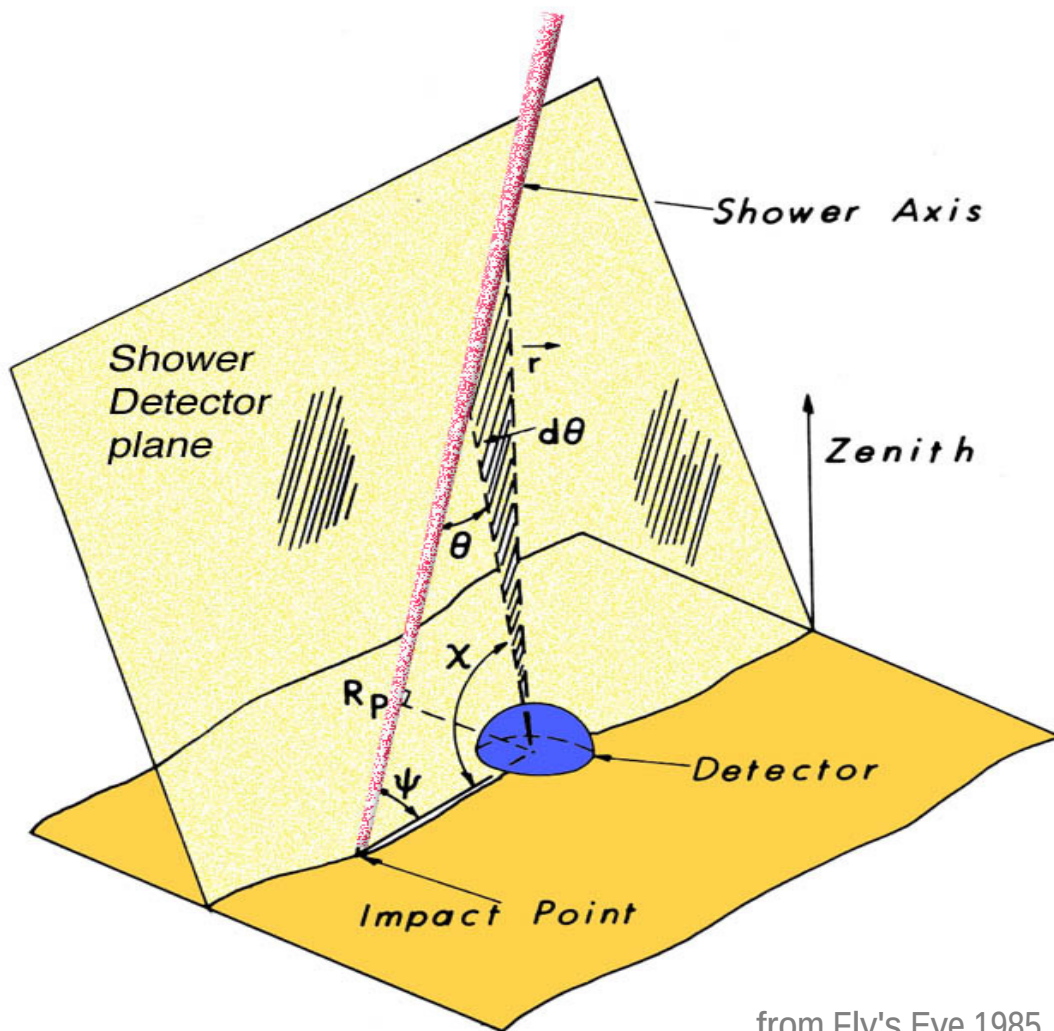


wkład światła rozproszonego do
profilu podłużnego pęku
(1 deg od środka obrazu)

wkład rozproszonych fotonów
fluorescencji
w obszarze zawierającym 90%
sygnału

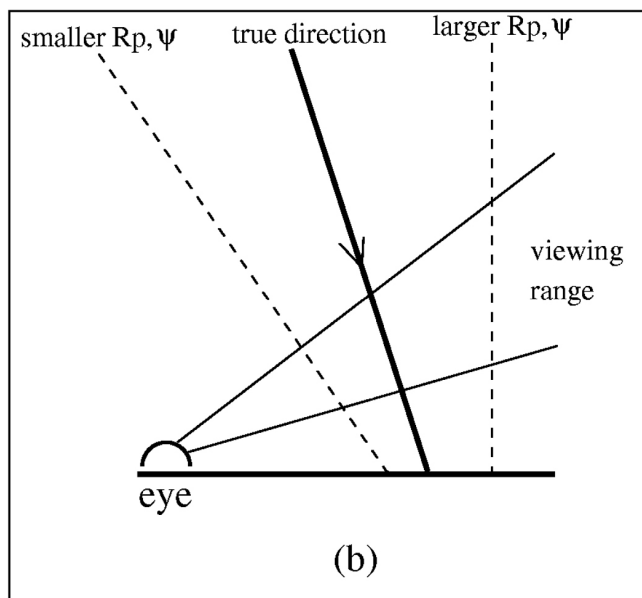
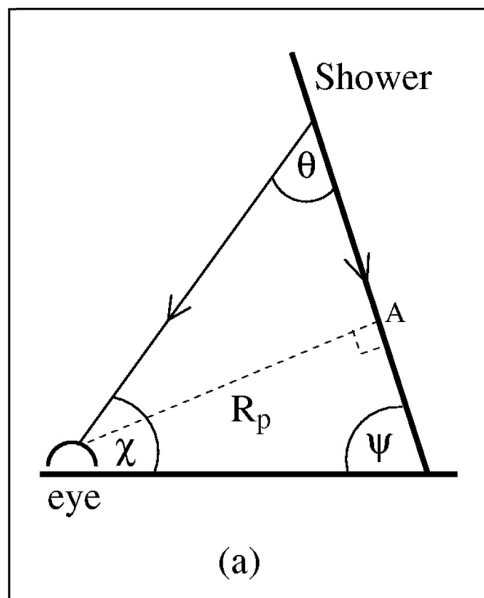


Detekcja metodą fluorescencyjną



from Fly's Eye 1985

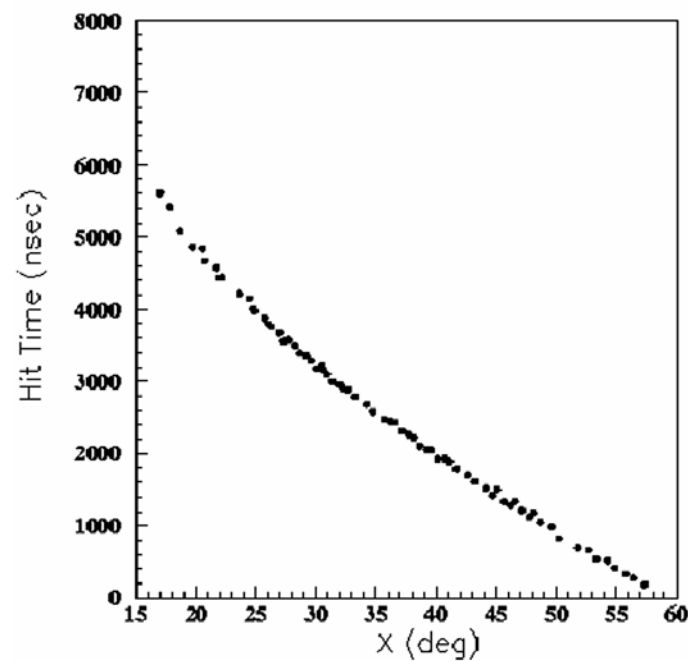
Rekonstrukcja geometryczna (mono)



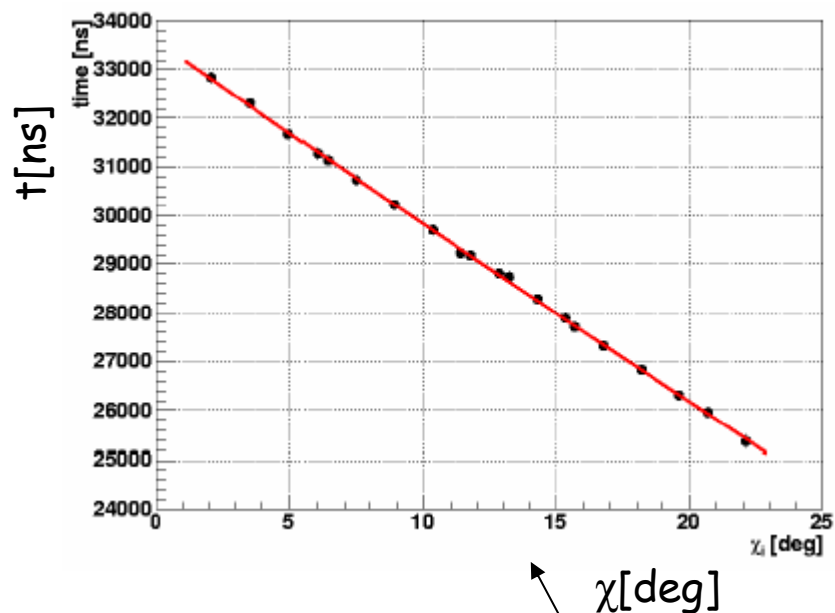
rekonstrukcja w płaszczyźnie SDP:

R_p, ψ

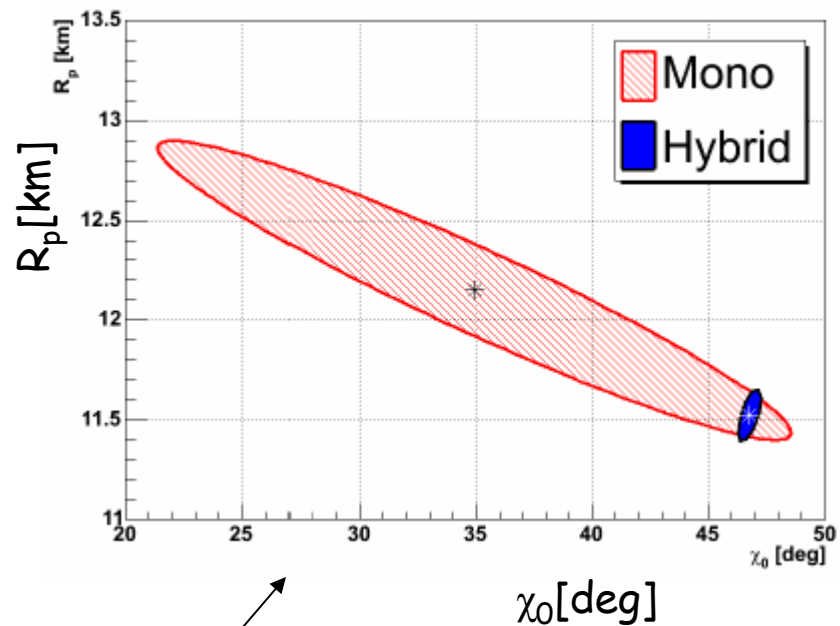
$$t_i = t_0 + R_p/c \tan((x_0 - x_i)/2)$$



Rekonstrukcja hybrydowa



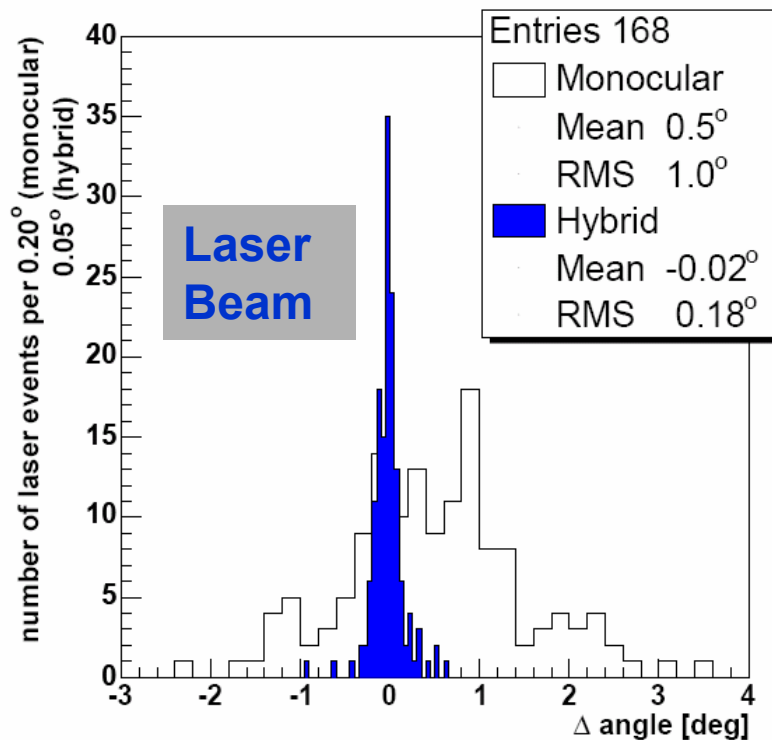
mono: wyzn. 3 parametry



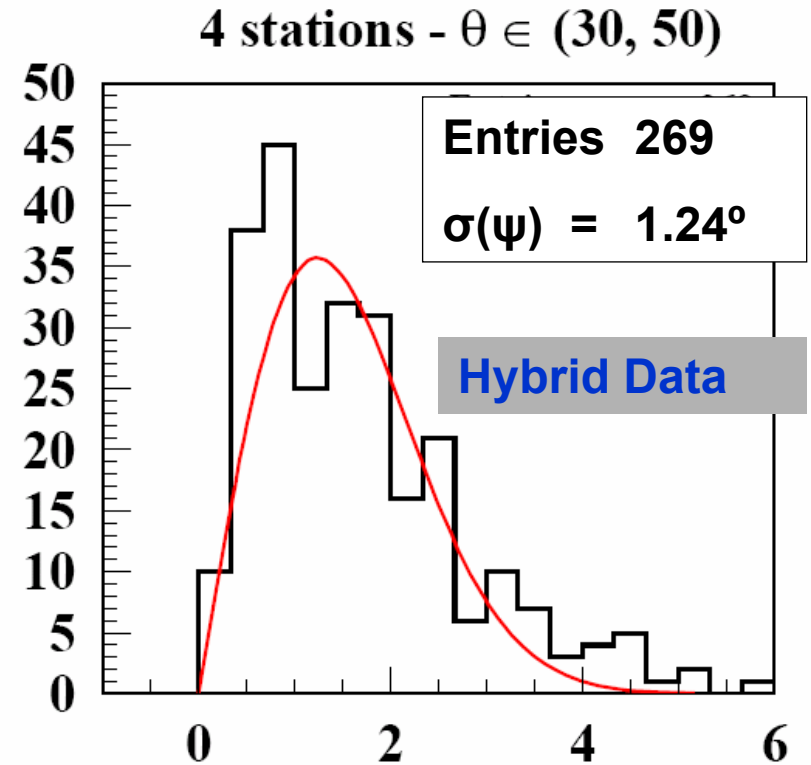
hybrid: T_0 z det. powierzchn.

$$t(\chi) = T_0 + \frac{R_p}{c} \tan \left[\frac{(\chi_0 - \chi)}{2} \right]$$

Rozdzielczość kątowna



Angle in laser beam /FD detector plane

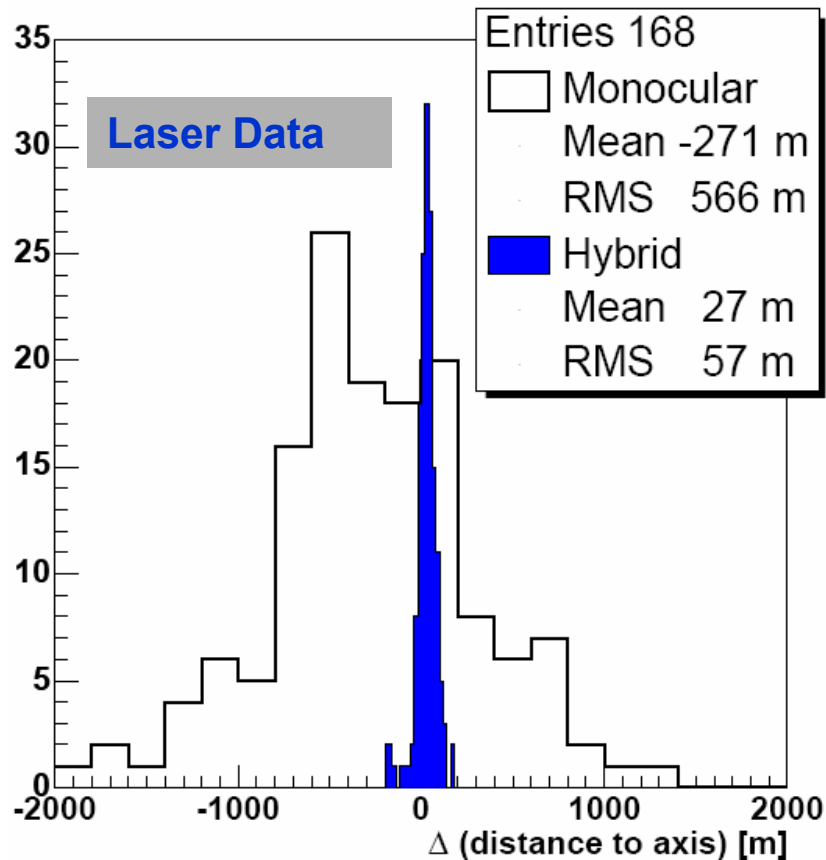


Hybrid-SD only space angle difference

Hybrid Angular resolution
(68% CL)
0.6 degrees (mean)

Surface array Angular resolution (68% CL)
 $< 2.2^\circ$ for 3 station events ($E < 3 \text{ EeV}$, $\theta < 60^\circ$)
 $< 1.7^\circ$ for 4 station events ($3 < E < 10 \text{ EeV}$)
 $< 1.4^\circ$ for 5 or more station events ($E > 10 \text{ EeV}$)

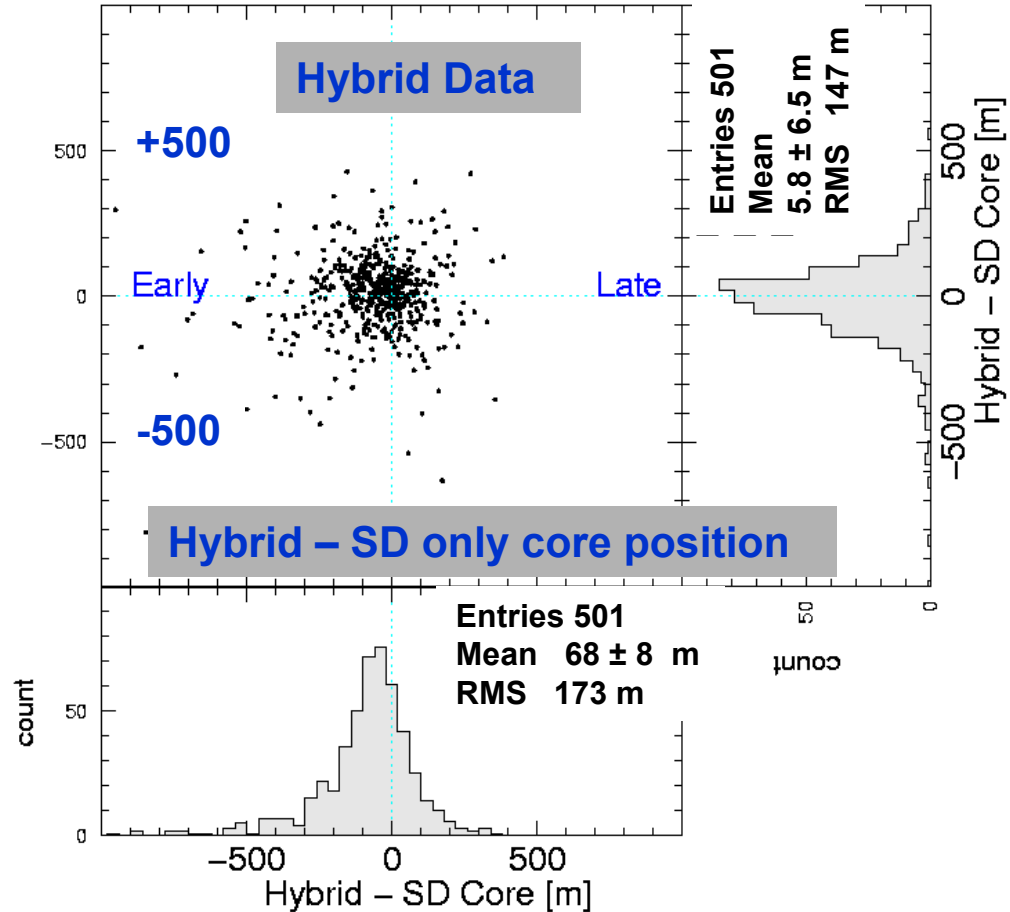
Dokładność wyznaczania osi



Laser position – Hybrid and FD only (m)

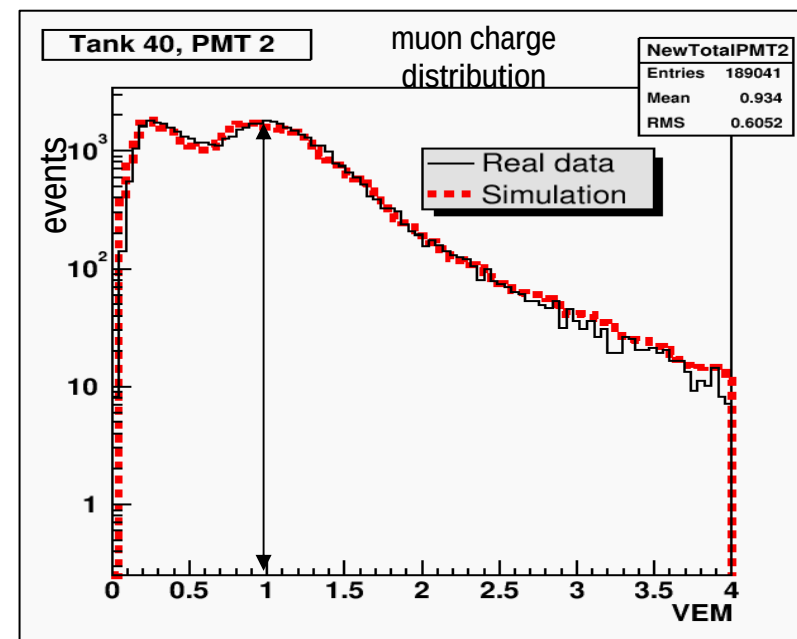
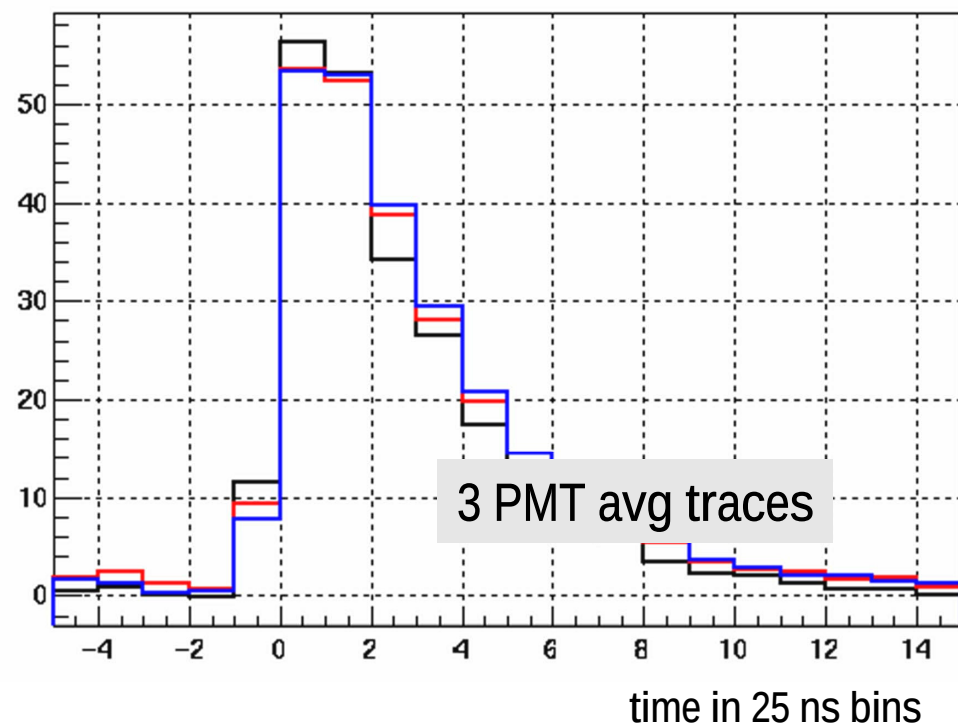
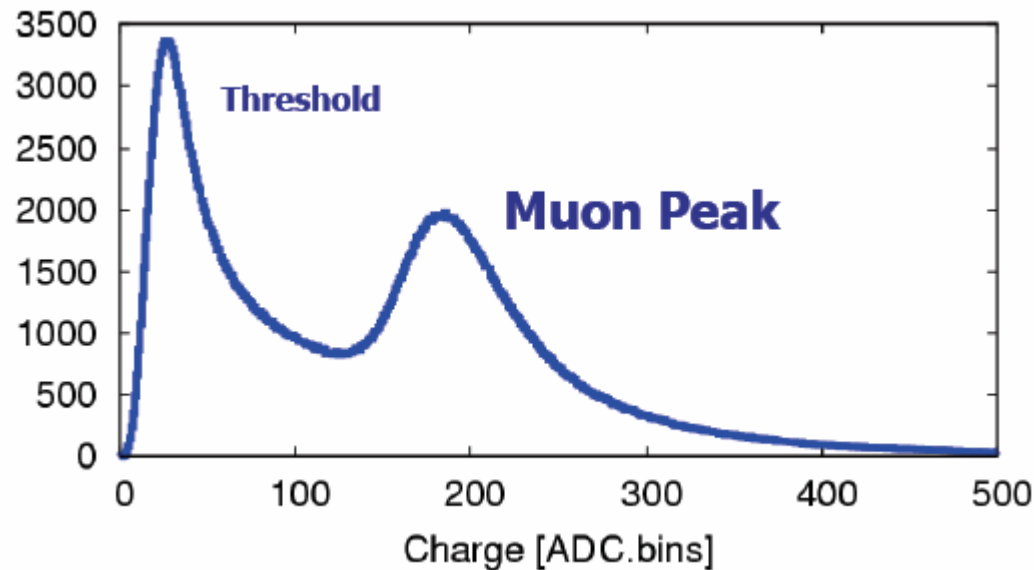
Core position resolution

- Hybrid: < 60 m

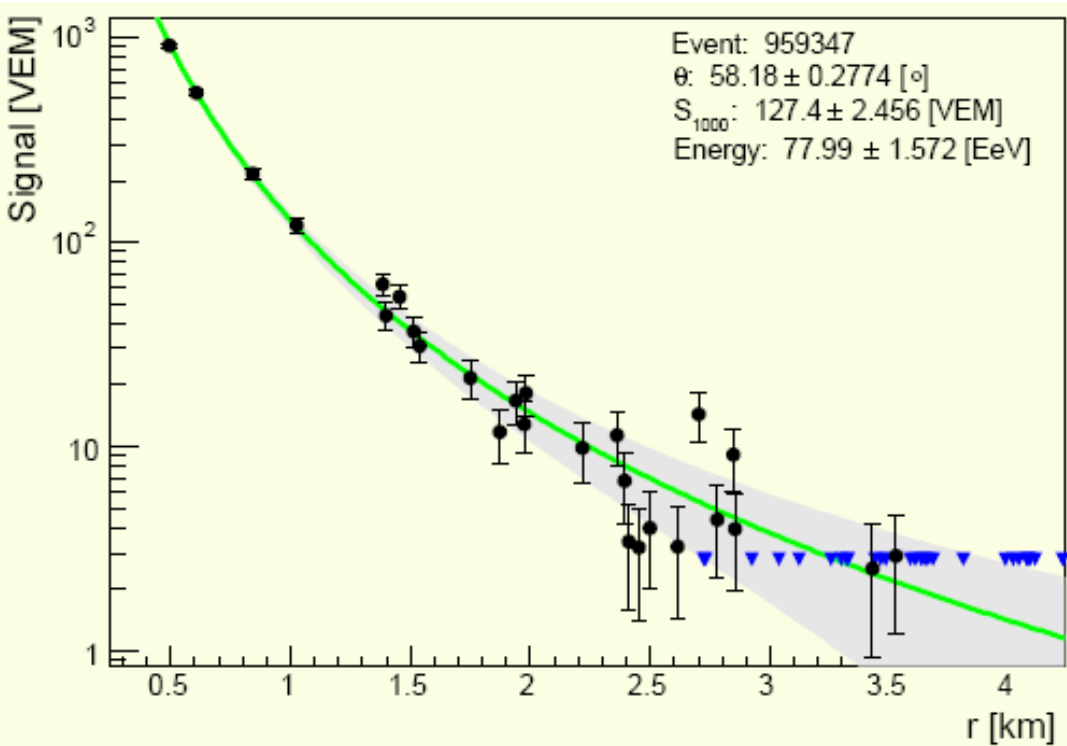


Surface array: ~ 150 m

Kalibracja detektorów czerenkowskich



Poprzeczny rozkład cząstek



rozkład poprzeczny zależy od nachylenia
 pęku, słabo od energii

funkcja rozkładu potrzebna do
 wyznaczenia osi pęku
 (używane są różne parametryzacje)

funkcja typu NKG:

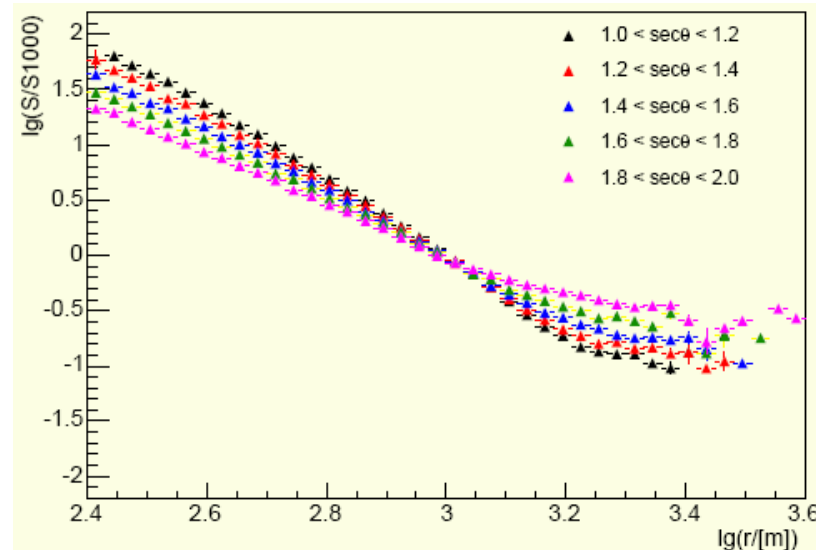
$$S(r) = A \left(\frac{r}{r_s} \left(1 + \frac{r}{r_s} \right) \right)^{-\beta}$$

$$A = S(1000) \times 3.47^\beta \quad r_s = 700 \text{ m}$$

$$\beta = a(E) + b (\sec \theta - 1)$$

$$a(E) = (2.26 \pm 0.02) + (0.20 \pm 0.01) \lg(E/E_{\text{TeV}})$$

$$b = 0.98 \pm 0.02$$

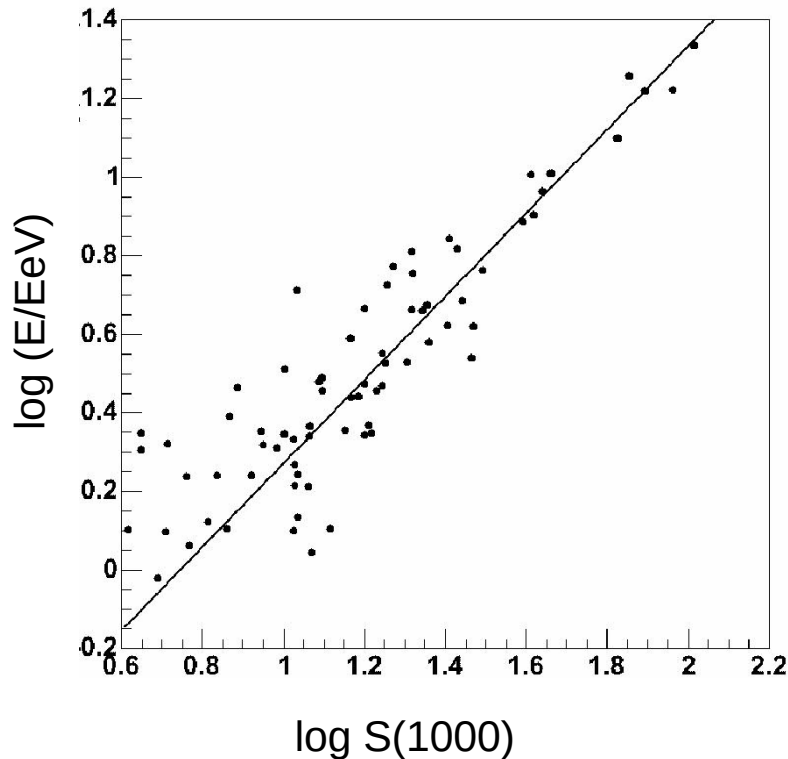


Auger: pierwsza ocena widma energii

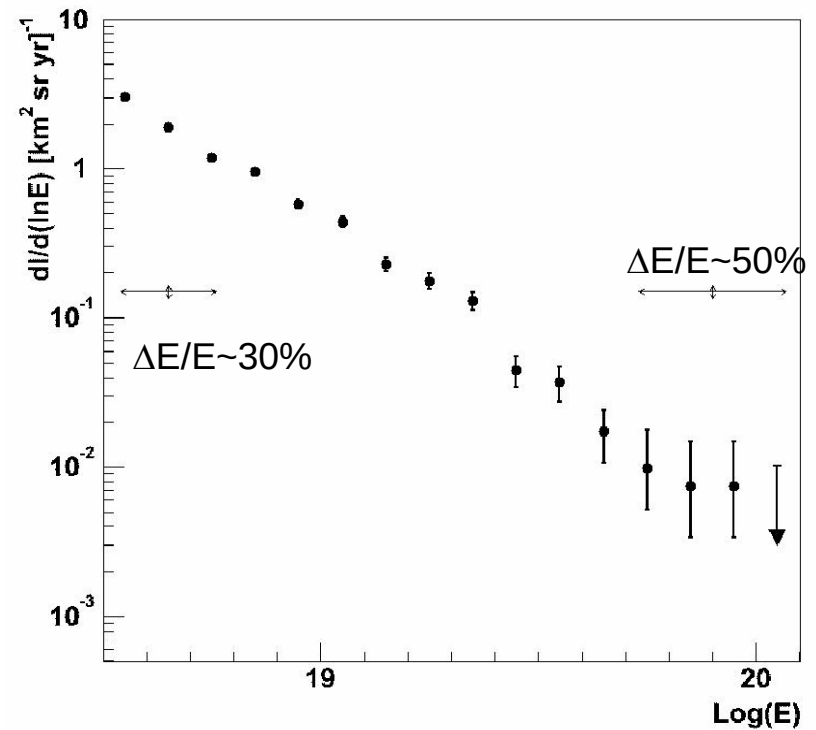
dane: 01/2004 - 05/2005

3525 przypadków $E > 3 \text{ EeV}$; $\theta < 60^\circ$

Kalibracja sieci powierzchniowej
za pomocą det. fluorescencyjnego

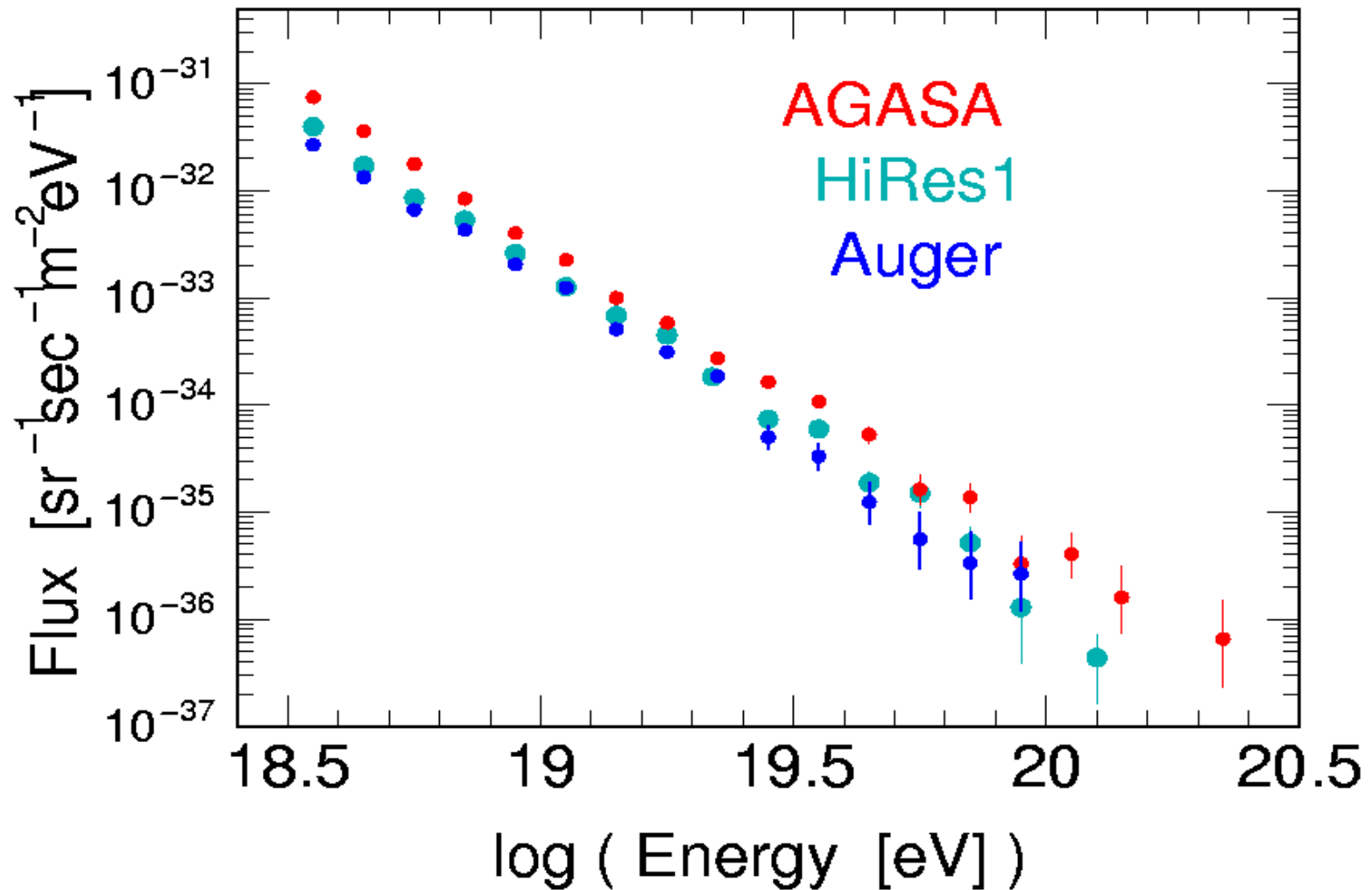


Widmo z det. powierzchniowego



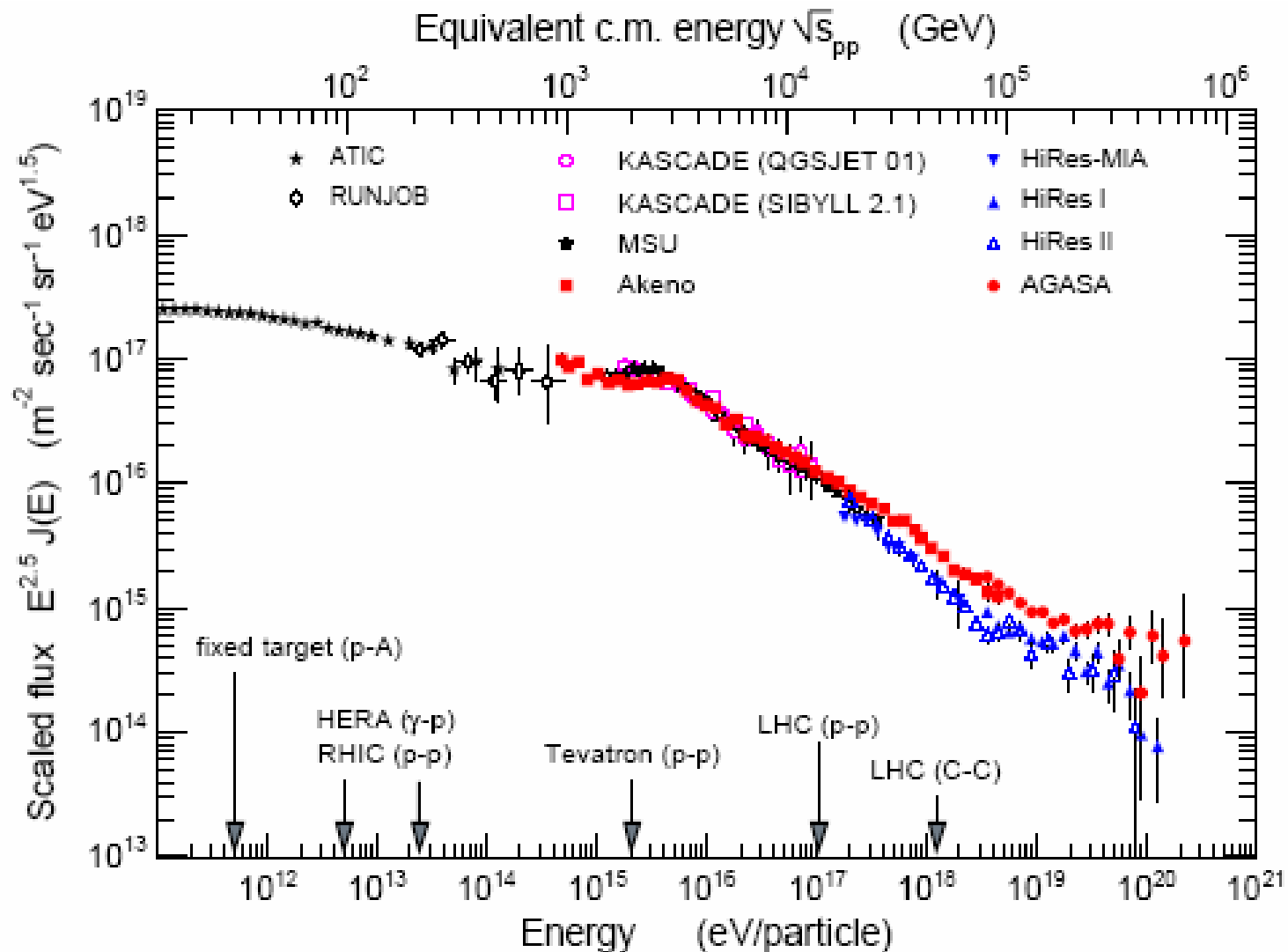
widmo niezależne od składu promieni kosmicznych i od modelu oddziaływania!

Widmo energii



błędy systematyczne detekcji ?

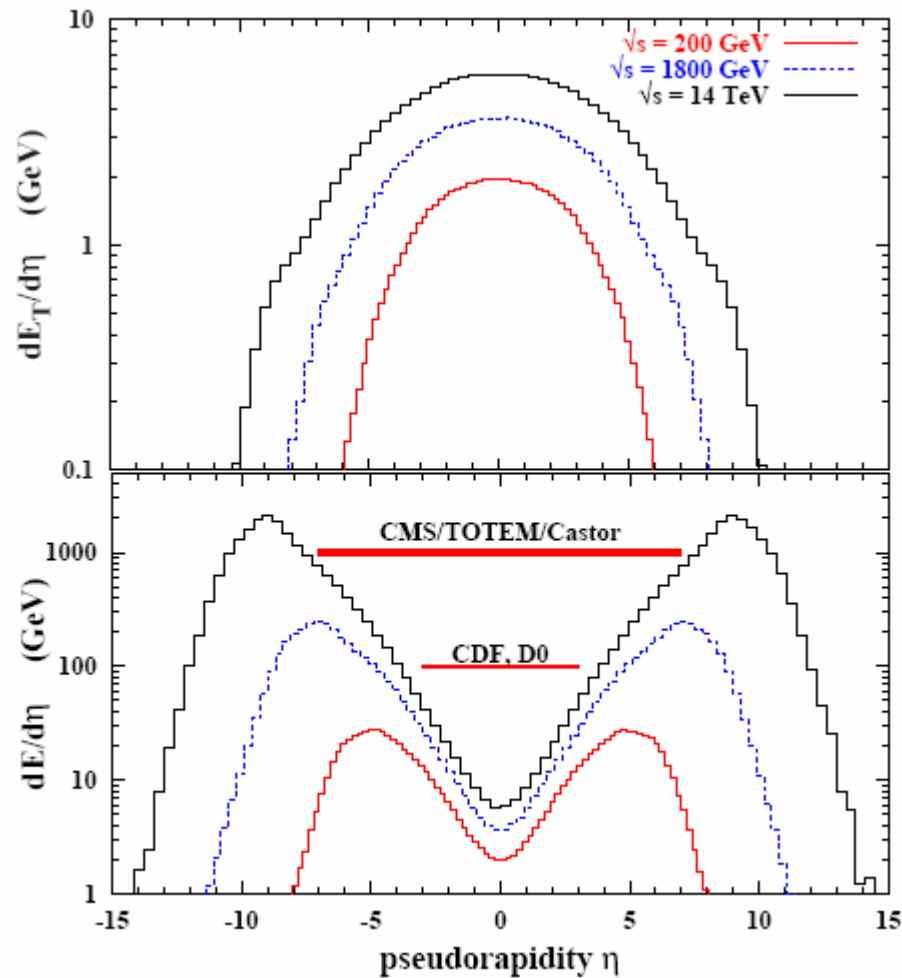
Energie akceleratorów i promieni kosmicznych



w badaniach wielkich pęków

trzeba **ekstrapolować** własności oddziaływań jądrowych do wysokich energii

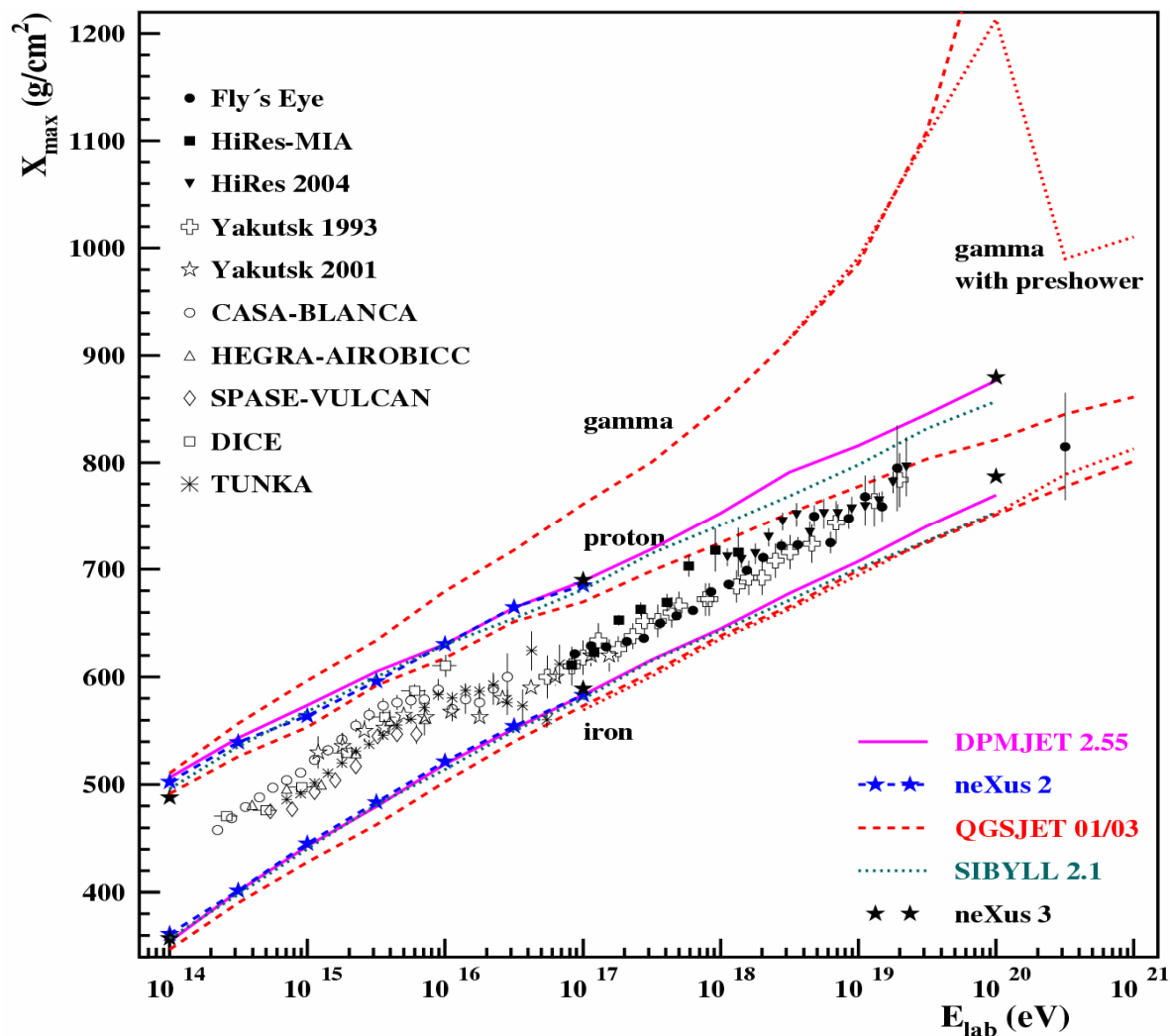
Akseleratory a promienie kosmiczne



w zderzaczu cząstek badamy obszar centralny
o rozwoju wielkiego pęku decydują cząstki w obszarze fragmentacji pocisku („w przód”)

Skład promieni kosmicznych

Głębokość maksimum rozwoju wielkiego pęku w funkcji energii



interpretacja danych zależy od modelu!

Identyfikacja cząstki pierwotnej w sieci powierzchniowej

model superpozycji

pierwotny proton

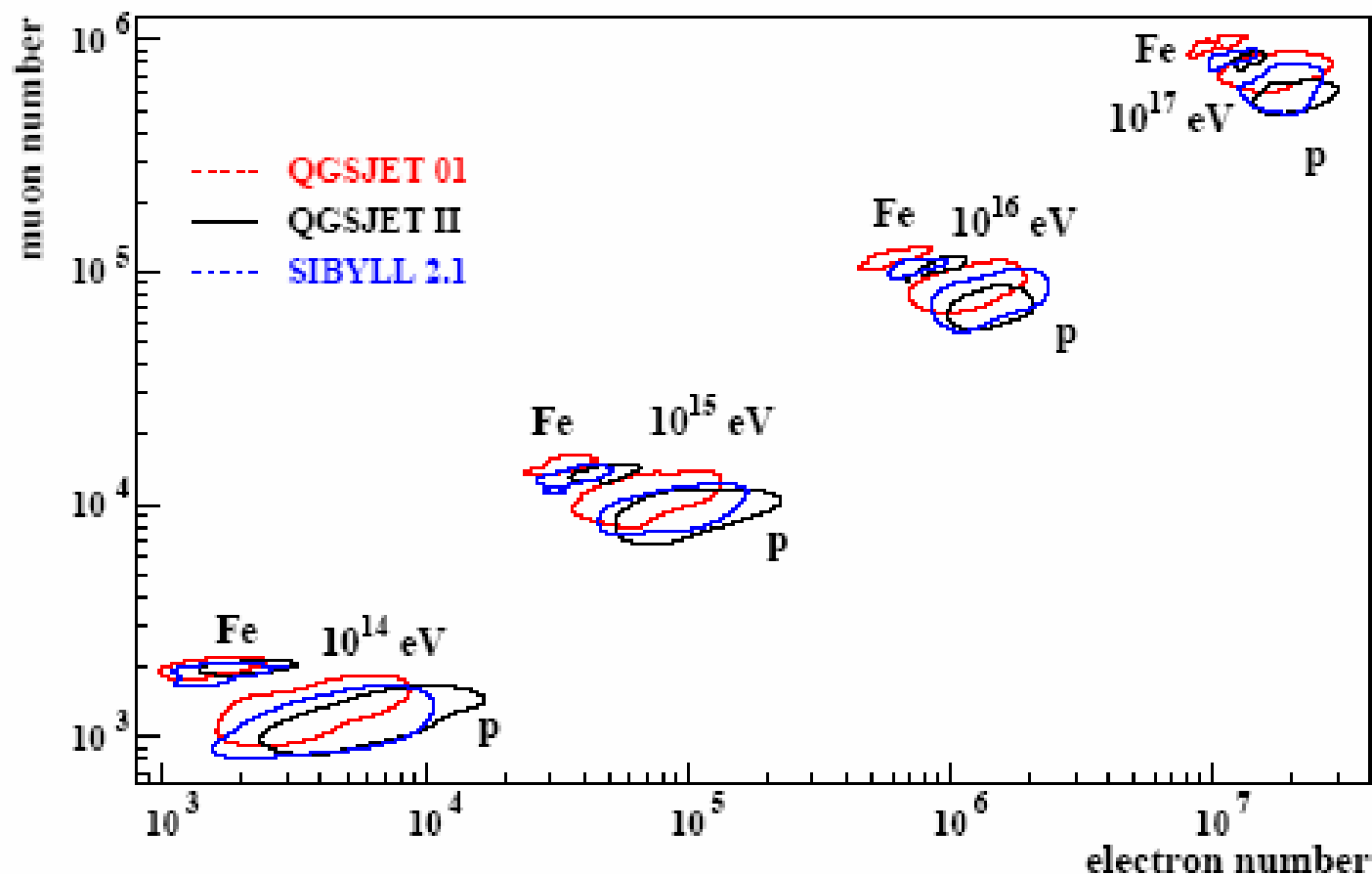
$$N_e \sim E \ln E$$

$$N_\mu \sim E^{0.89}$$

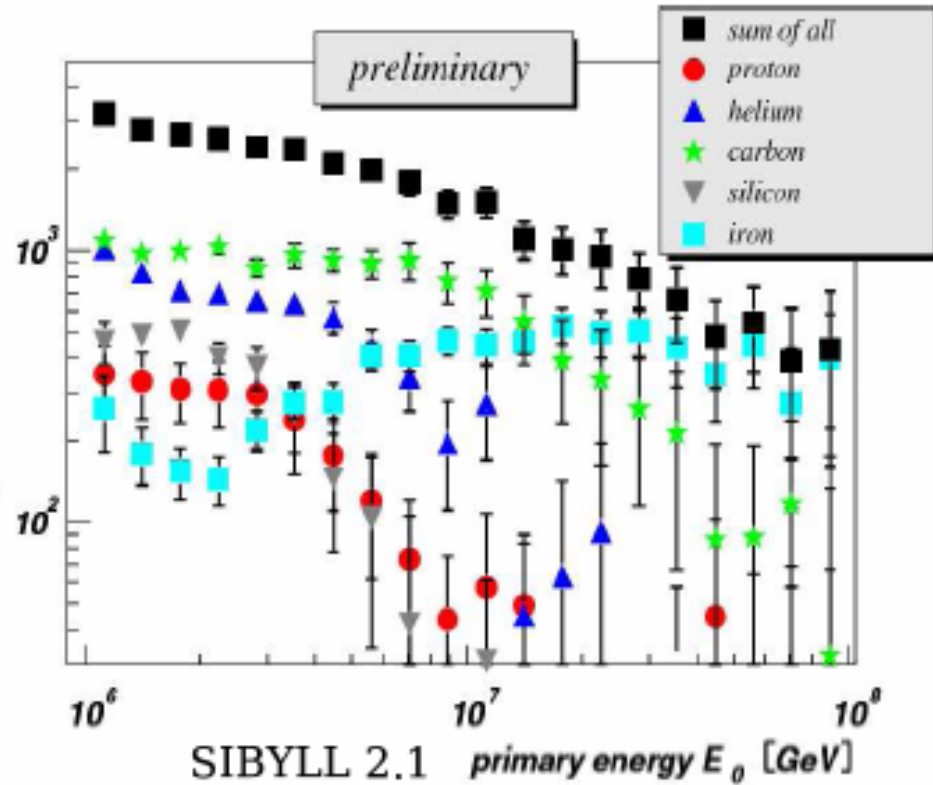
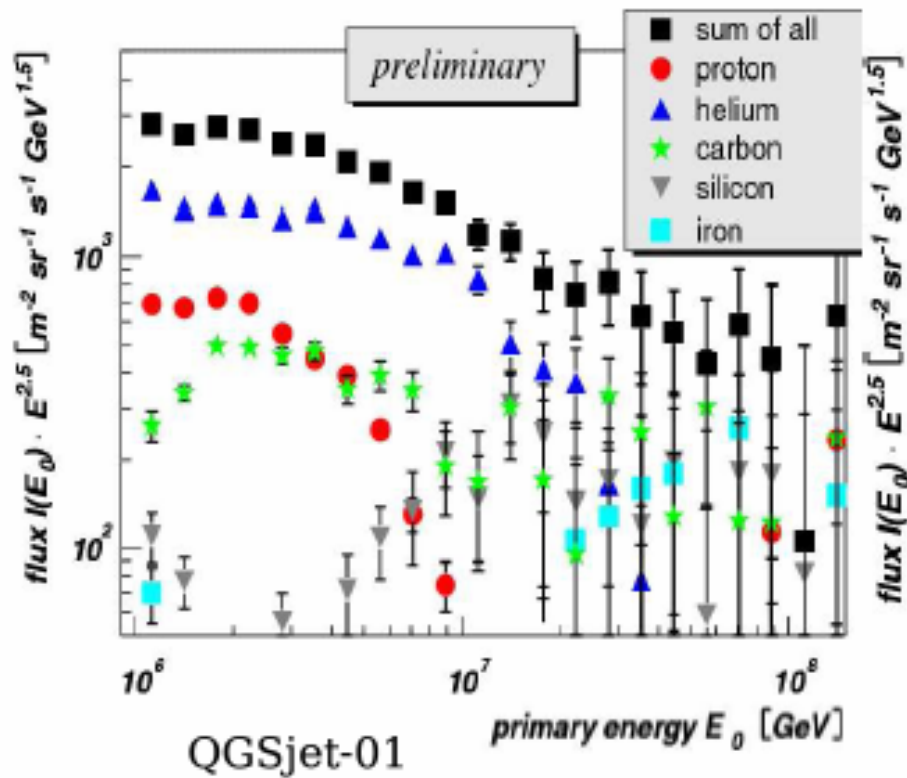
pierwotne jądro E, A

$$N_e \sim E \ln(E/A)$$

$$N_\mu \sim A (E/A)^{0.89}$$



Identyfikacja pierwotnych -KASCADE



interpretacja danych zależy od modelu

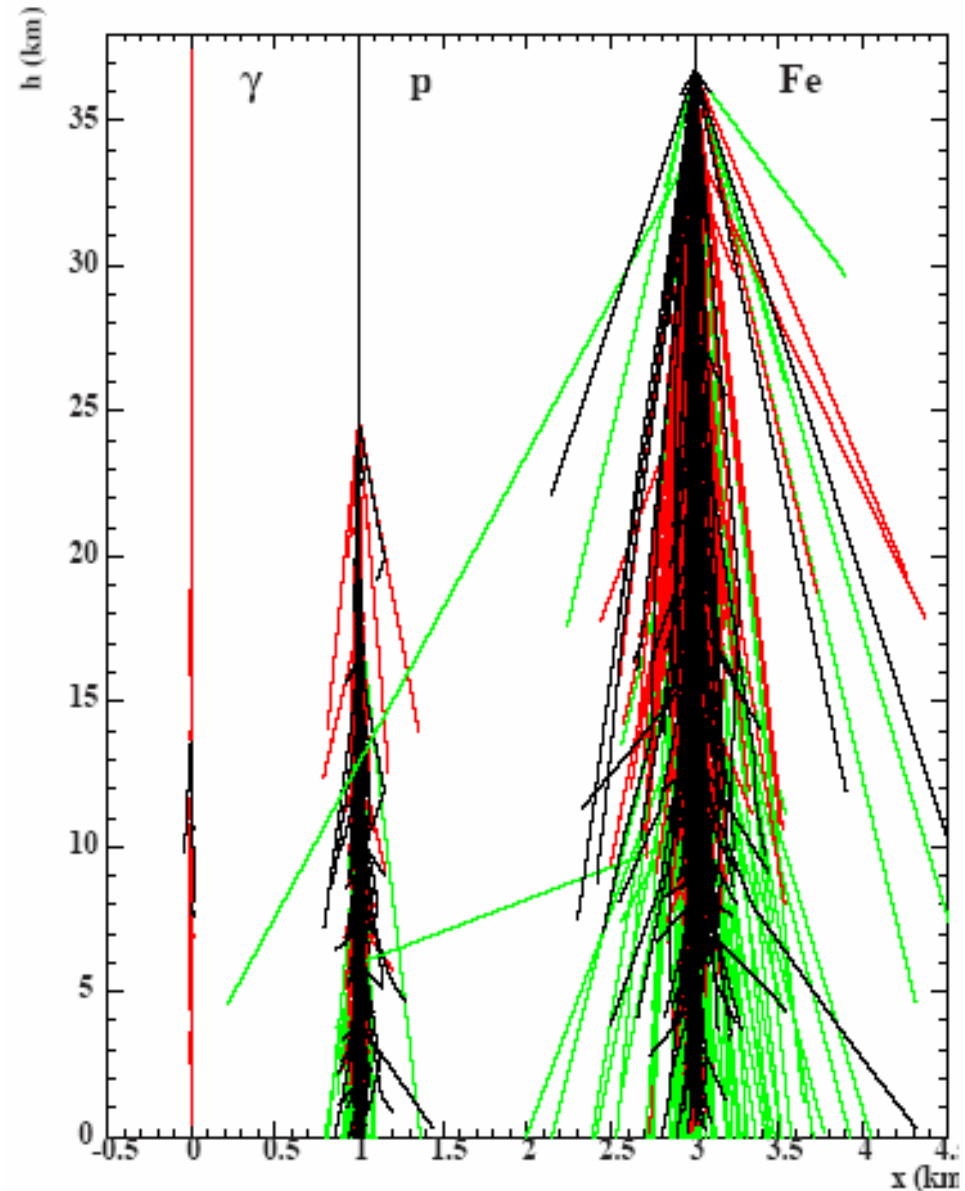
Symulacje wielkich pęków

produkcja cząstek
propagacja, rozpady
straty energii, wpływ pola
magn.

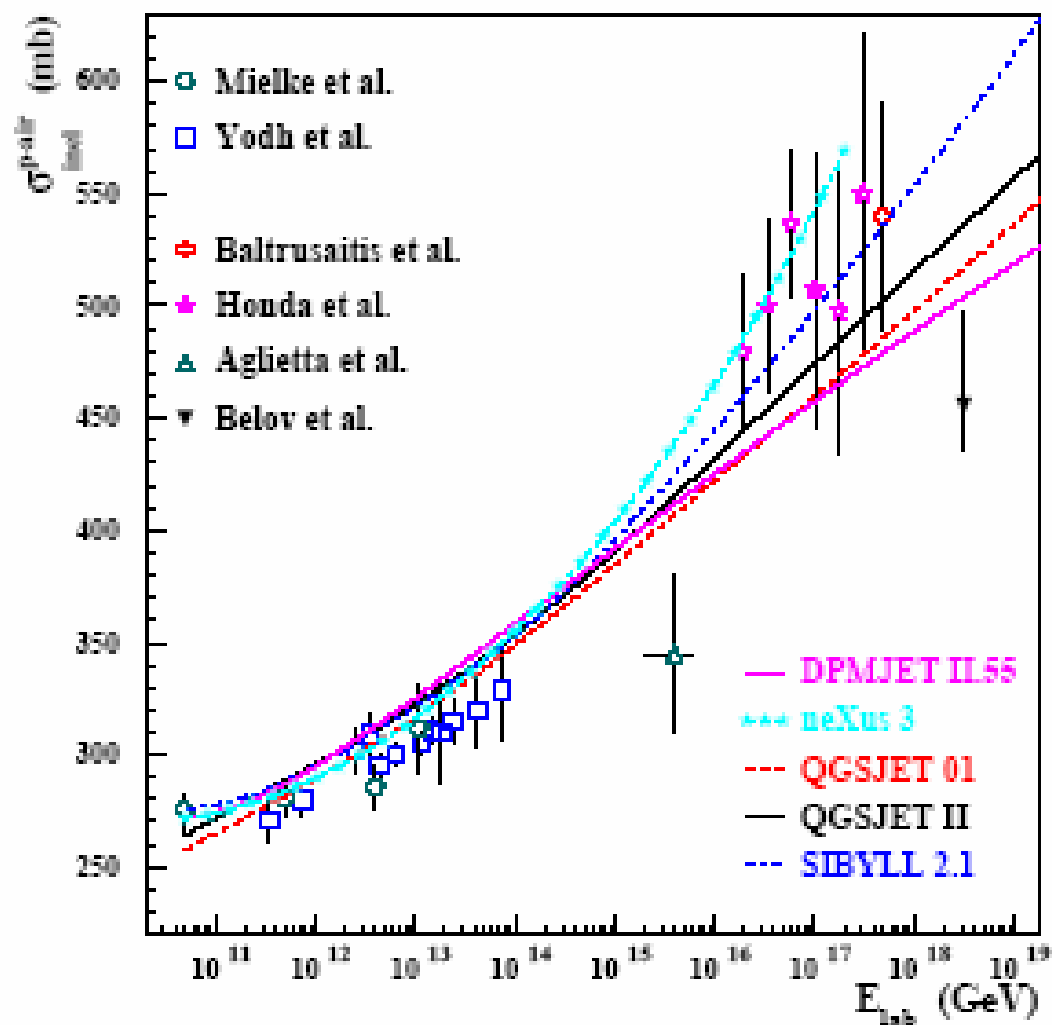
CORSIKA (Heck et al.)
AIRES (Sciutto et al.)
SENECA (Drescher et al.)

...

najważniejsze źródło błędów
systematycznych:
niepewność charakterystyk
produkcji wielorodnej



Przekrój czynny



$\sigma(p-air)$ można wyznaczyć z własności pęku

Symulacje wielkich pęków

wymagania:

czas $\sim 1h * E/10^{15} \text{ eV}$, plik wynikowy $\sim 300 \text{ MB} * E/10^{15} \text{ eV}$ na przypadek

→ przy 10^{20} eV : 10^{11} cząstek → 11 lat CPU, 30 TB na przypadek!

„odchudzanie” wielkiego pęku (thinning)

wprow. próg energii: $E_{th} = \varepsilon E_0$ (typowo $\varepsilon = 10^{-4} - 10^{-7}$)

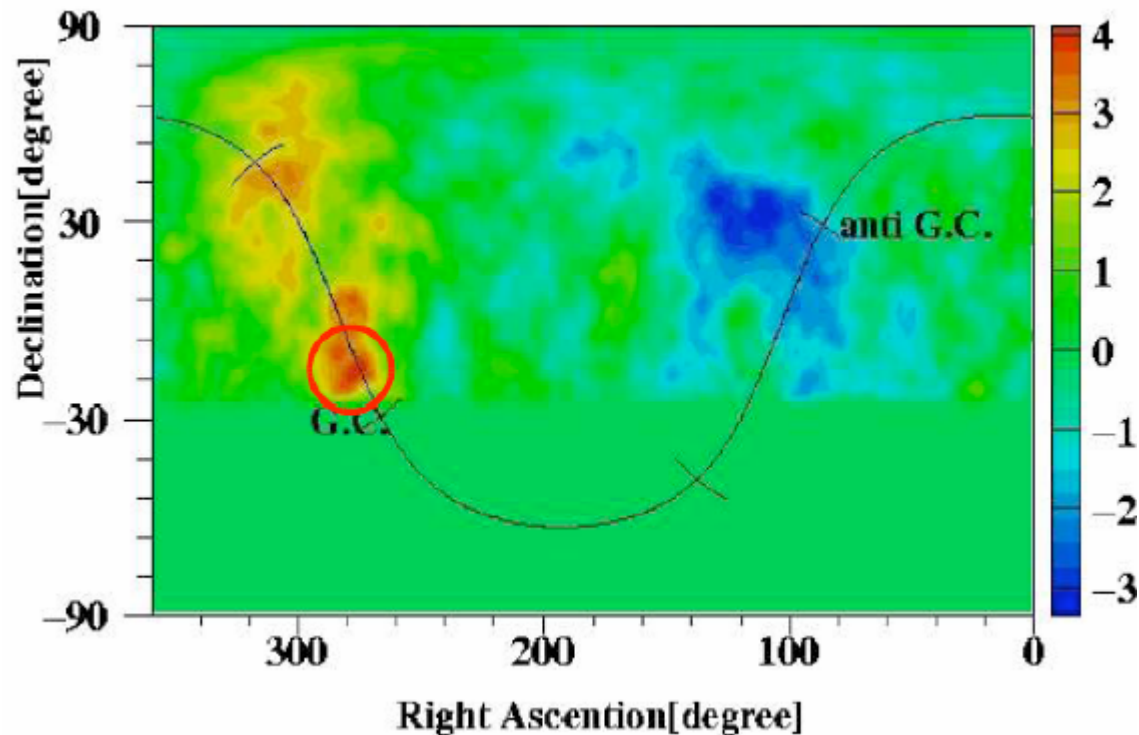
śledzimy wszystkie cząstki $E > E_{th}$

nieliczne cząstki $E < E_{th}$ (z większą wagą)

→ zachowanie energii, krotności cząstek, zwiększenie fluktuacji

Anizotropia promieni kosmicznych

AGASA: nadmiar $\sim 4.5\sigma$ blisko centrum Galaktyki $1 < E < 2.5$ EeV; 20 deg
413.6 spodziewanych, 506 przyp. obserwowanych (+22%)



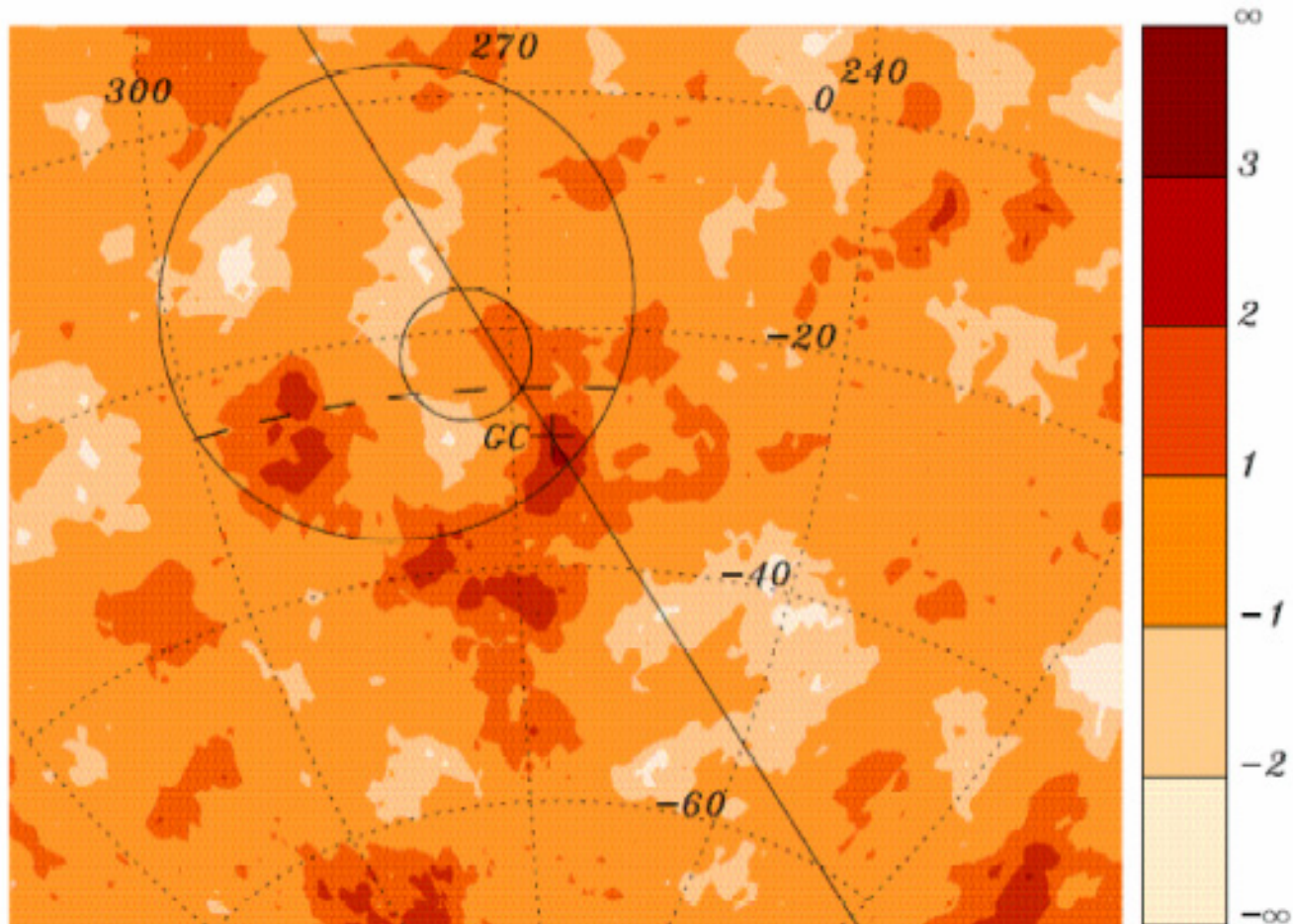
SUGAR: nadmiar $\sim 2.9\sigma$ $0.8 < E < 3.2$ EeV; 5.5 deg
11.8 przyp. spodz., 21.8 przyp. obserw. (+85%)

→ galaktyczne pochodzenie promieni kosmicznych o $E \sim 1$ EeV?

Anizotropia - centrum Galaktyki

Auger:

Obszar AGASA (20°, 1-2.5 EeV): 2116 przyp. obs., 2160 spodz.
(próbka danych: 4 x AGASA)

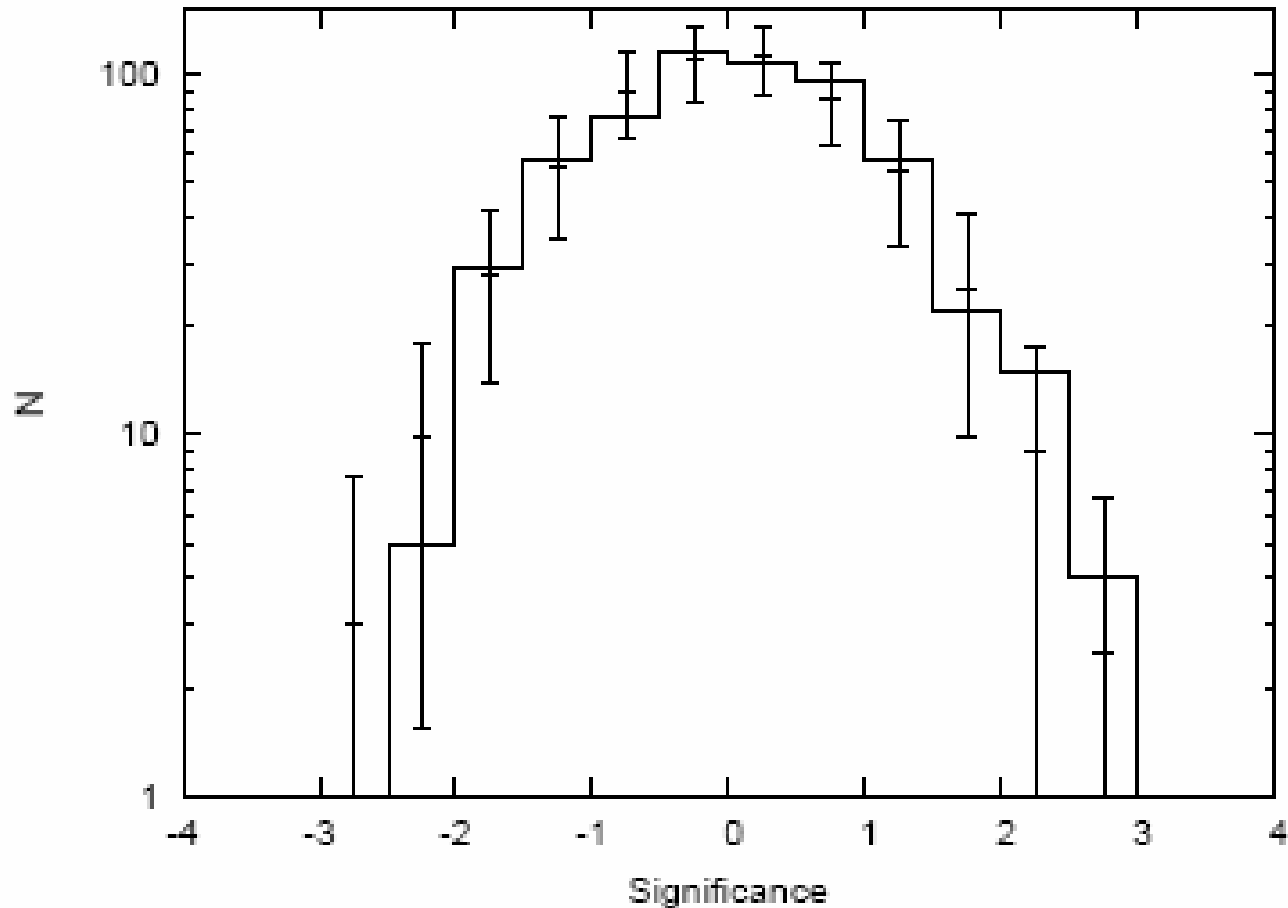


Anizotropia - centrum Galaktyki

porównanie z rozkładem izotropowym

histogram: dane Auger

punkty: izotropa $\pm 2\sigma$

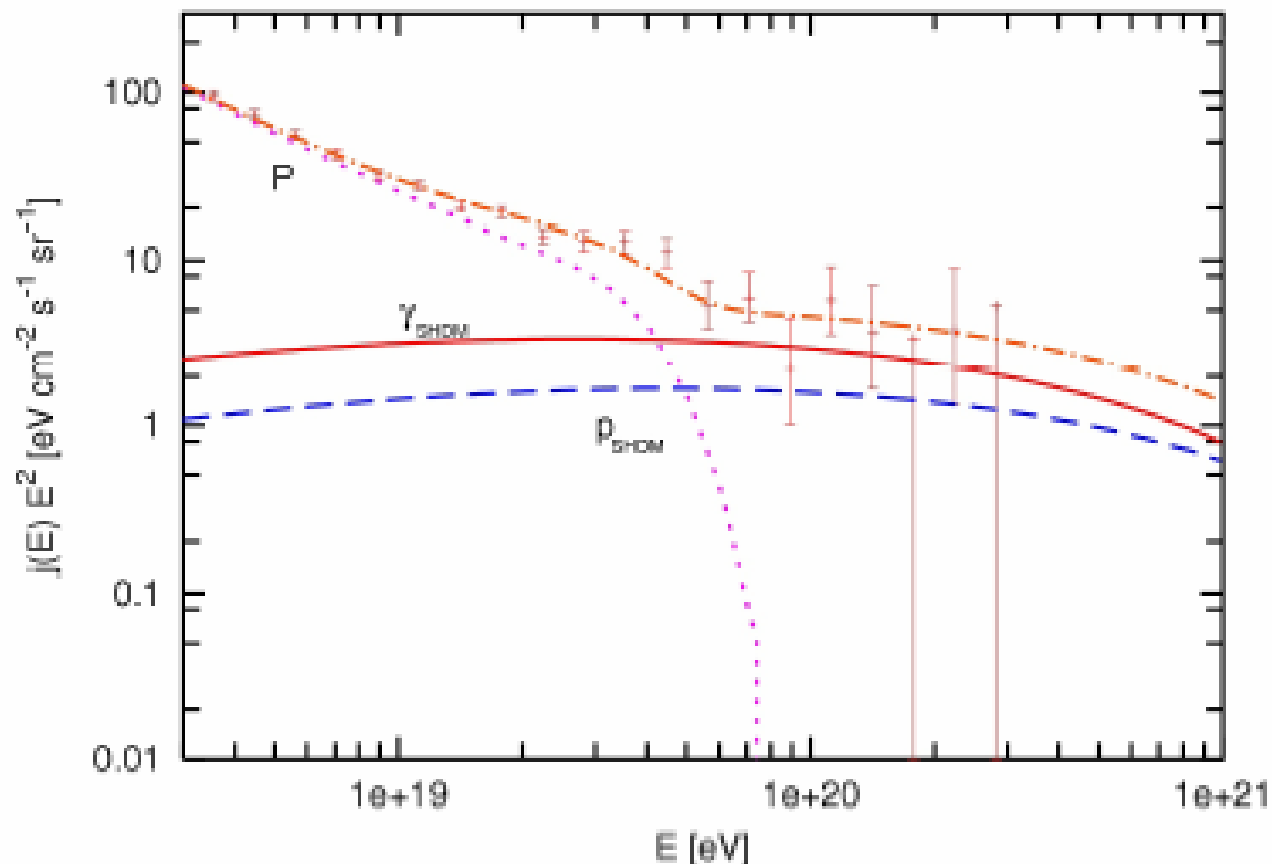


→ nie widać nadmiaru z centrum Galaktyki

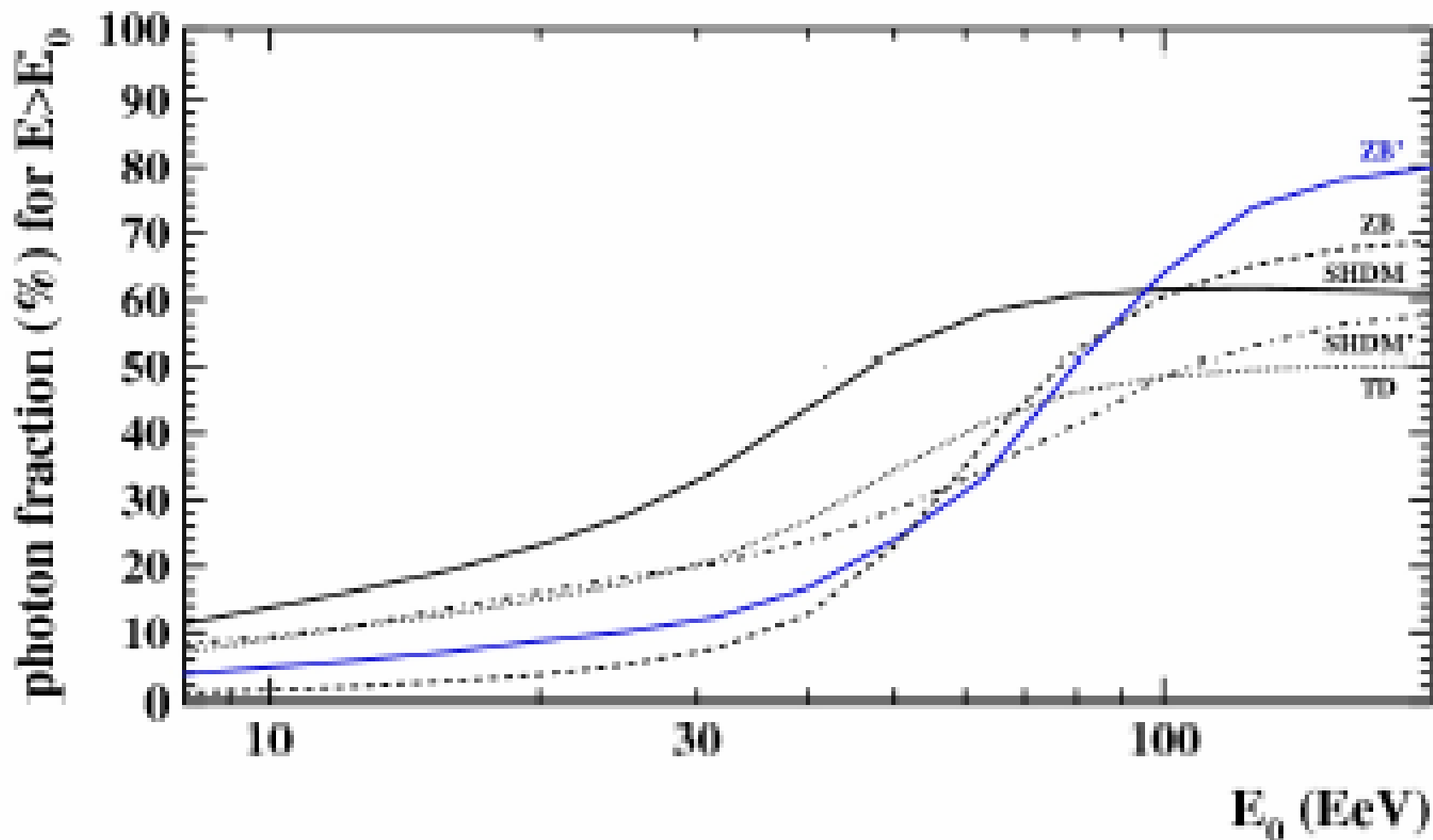
Promienie kosmiczne: fotony?

Scenariusze egzotyczne pochodzenia promieni kosmicznych („top-down”):
dominacja fotonów i neutrino

rozpady superciężkich cząstek (SHDM)
- fit do danych AGASA

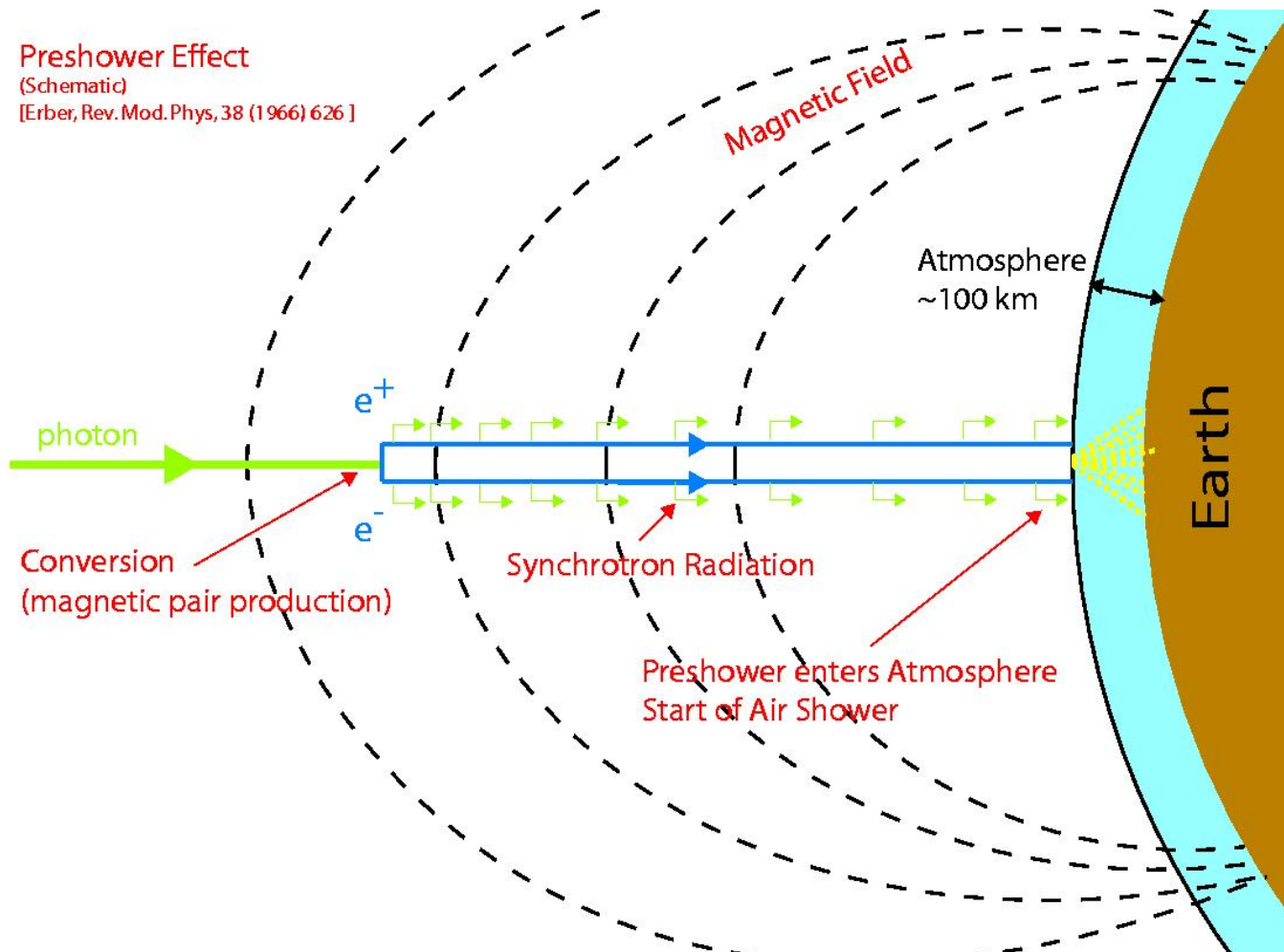


Strumień fotonów w scenariuszach „egzotycznych”



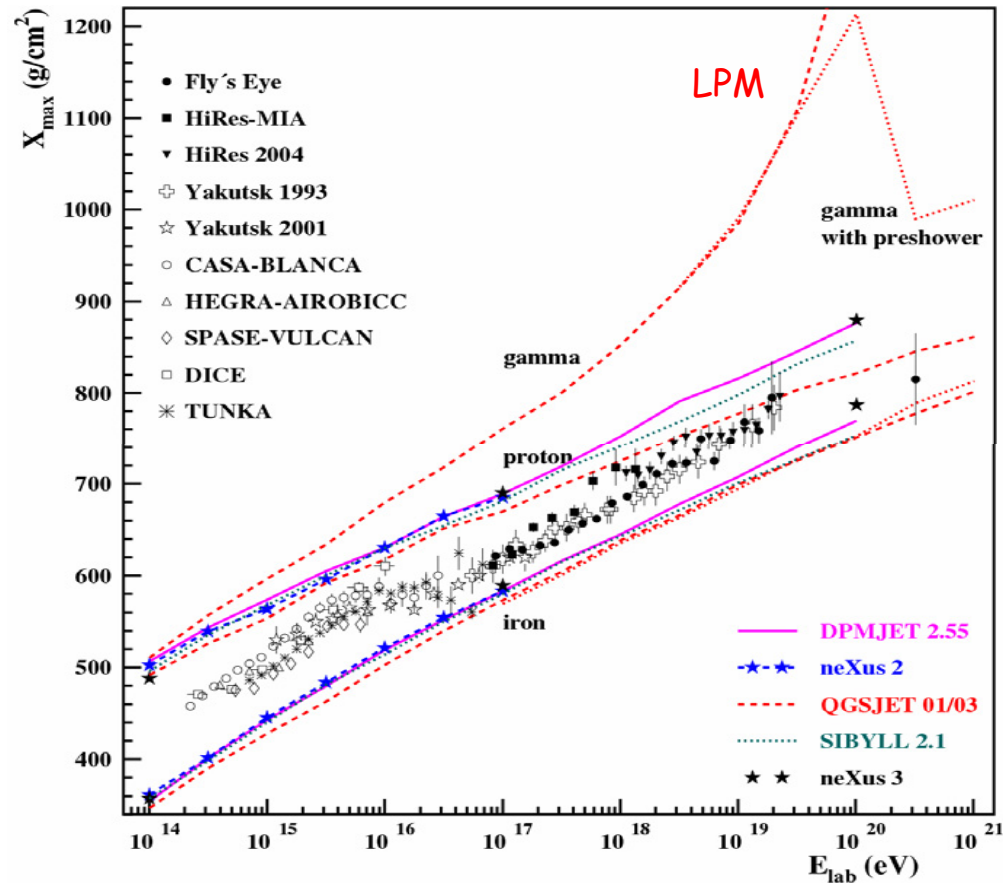
spodziewana dominacja fotonów przy najwyższych energiach

Fotony: kaskada wstępna



Efekt istotny dla $E_\gamma > 10^{19}$ eV
zależy od E_γ i B_T

Xmax



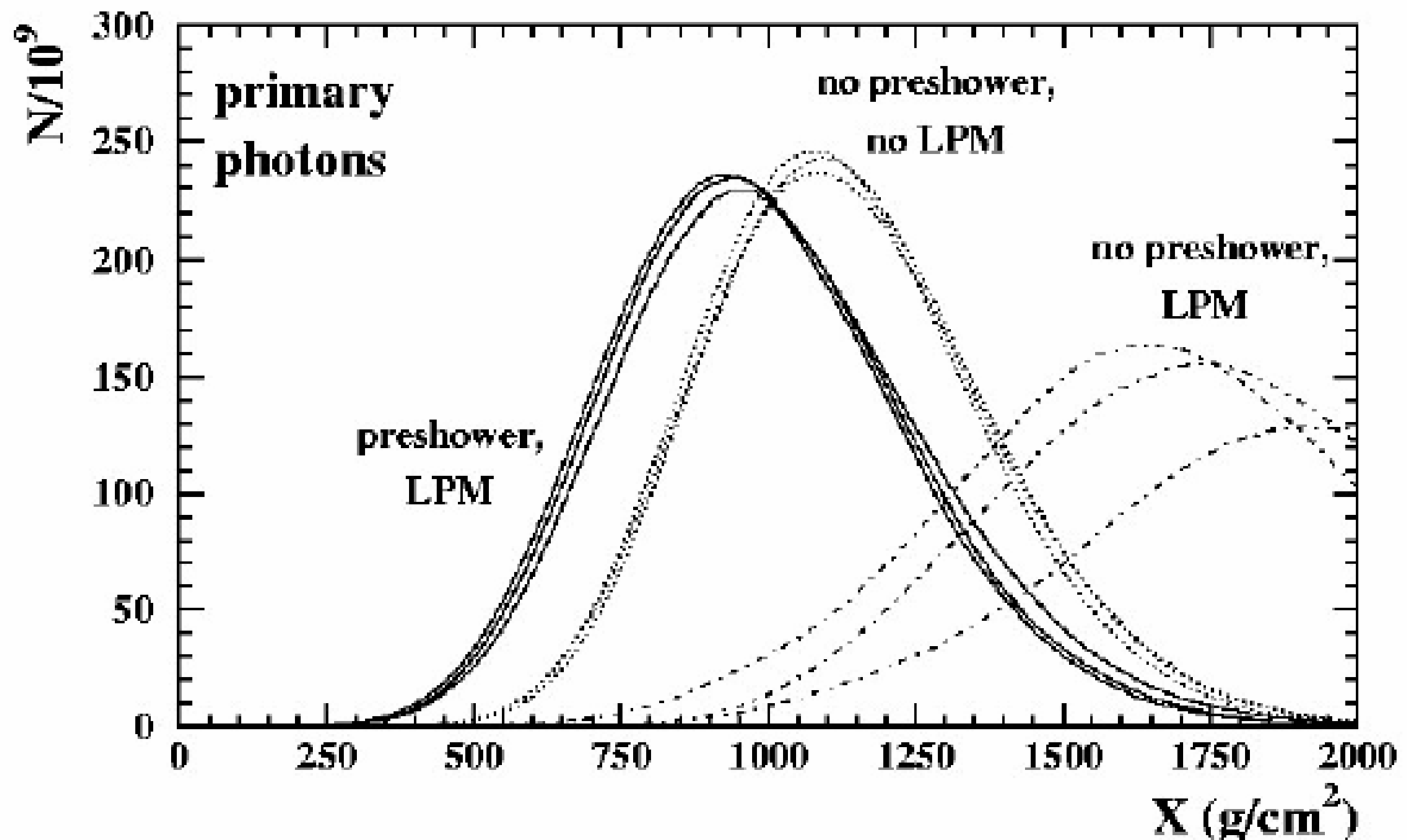
Efekt LPM (Landau-Pomeranczuk-Migdał)

redukcja przekr. cz. na prod. par i prom.hamowania

efekt rośnie z energią i gęstością powietrza

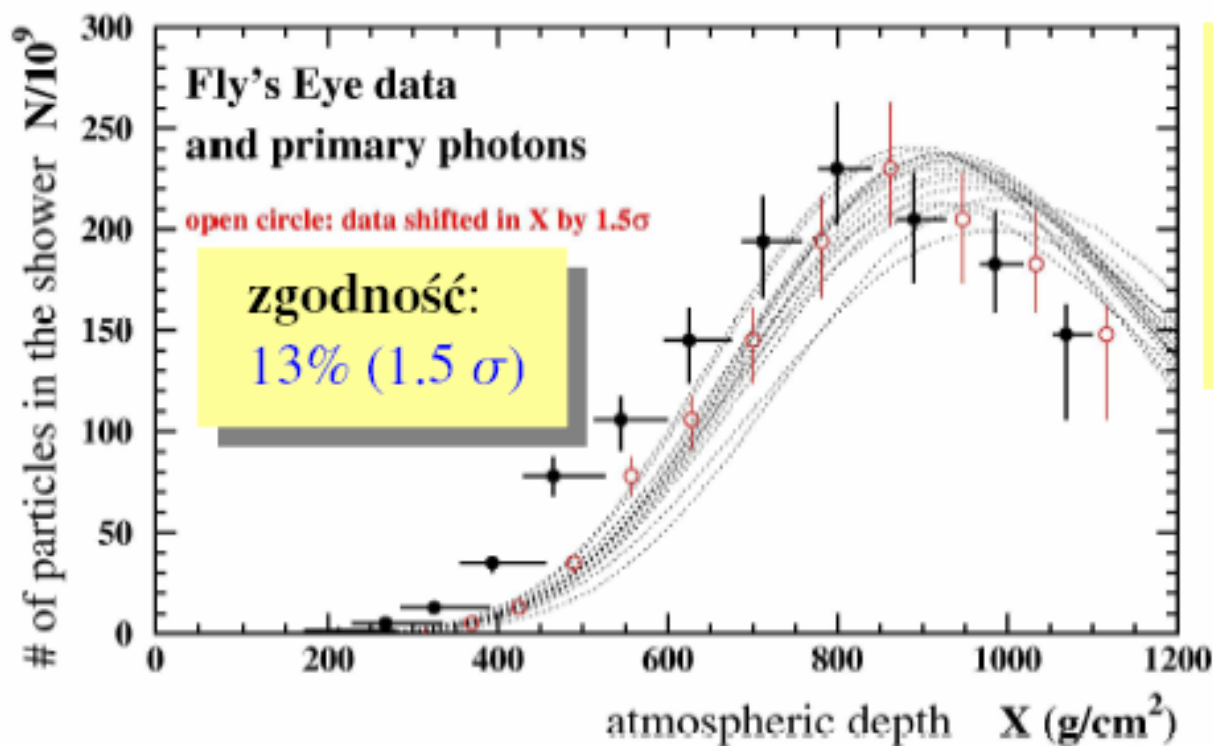
→ spowolnienie rozwoju pęku

Profil „fotonowego” wielkiego pęku



Przypadek o rekordowej energii

CORSIKA + PRESHOWER: 1000 w. pęków inicjowanych przez fotony

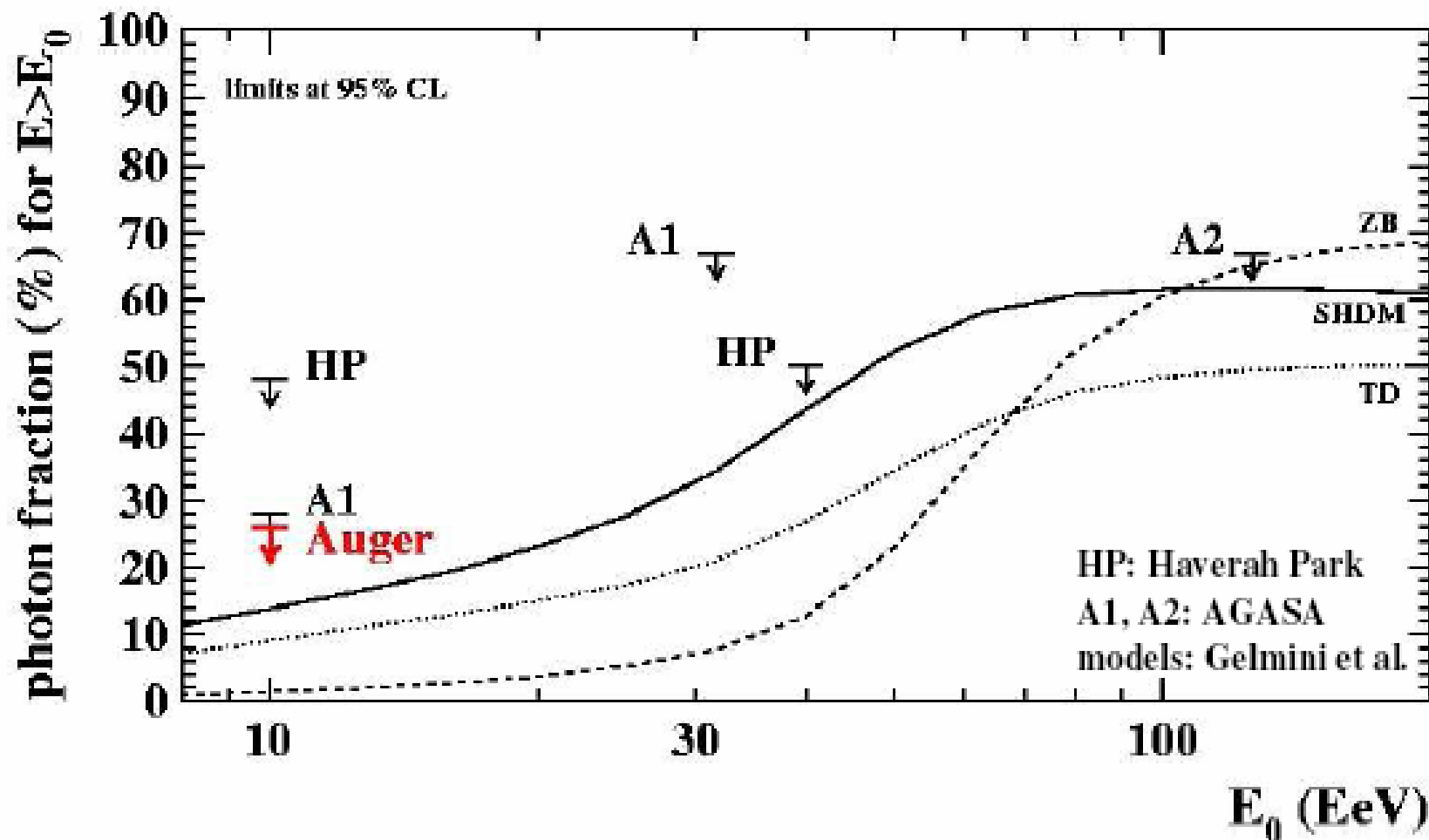


energia [10^{18} eV]:	320 ⁺⁹² ₋₉₄
X_{max} [g/cm^2]:	815 ⁺⁶⁰ ₋₅₃
zenit [deg]:	43.9 ^{+1.8} _{-1.3}
azymut [deg]:	31.7 ^{+4.2} _{-6.1}

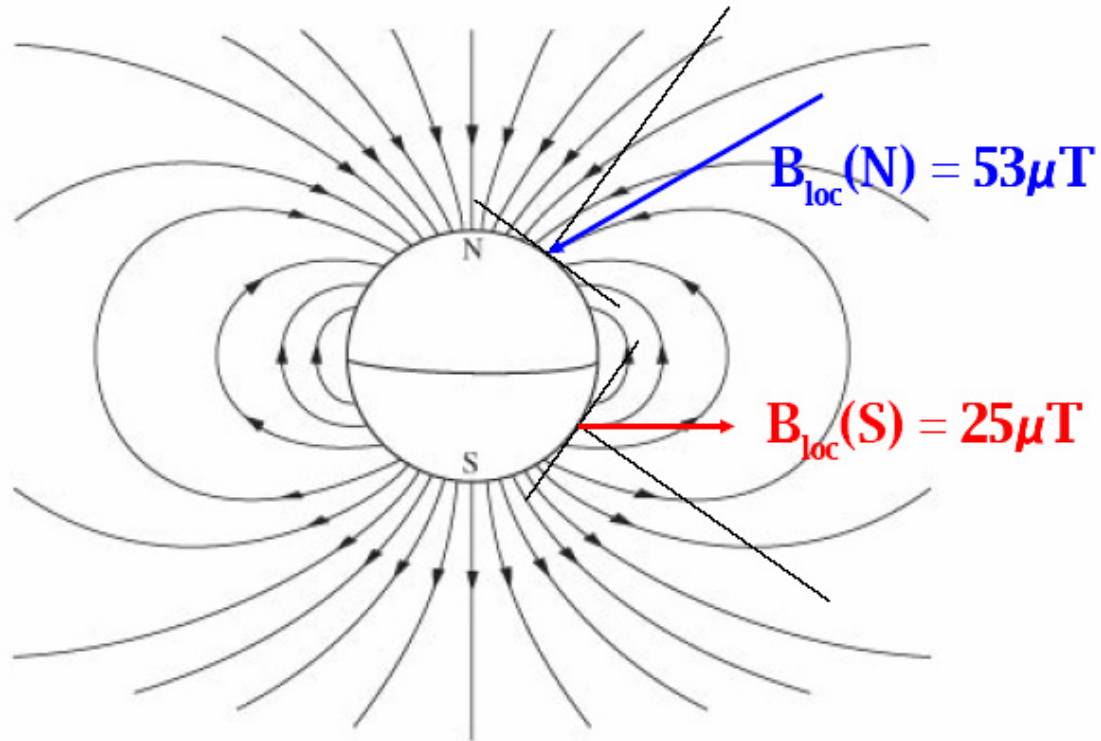
bezpieczny wniosek:

➔ hipoteza, że to był foton nie jest poparta danymi, ale nie może być odrzucona !

Eksperymentalne ograniczenia na strumień fotonów



Pole geomagnetyczne



Cechy pęku fotonowego zależą od położenia geograficznego
- możliwa lepsza identyfikacja źródeł

Neutrino

Grubość atmosfery: pionowo $\sim 1000 \text{ g/cm}^2$
 $\sim 11 \lambda_p$
 $\sim 27 L_R$
poziomo $\sim 36\,000 \text{ g/cm}^2$
 $\sim 400 \lambda_p$
 $\sim 970 L_R$

Prawdopodobieństwo oddziaływania neutrino o $E=10^{19} \text{ eV}$:
 $\sim 10^{-5}$ na 1000 g/cm^2

→ neutrino „z góry” rzadko oddziałują w powietrzu
„z dołu” nie przechodzą przez Ziemię

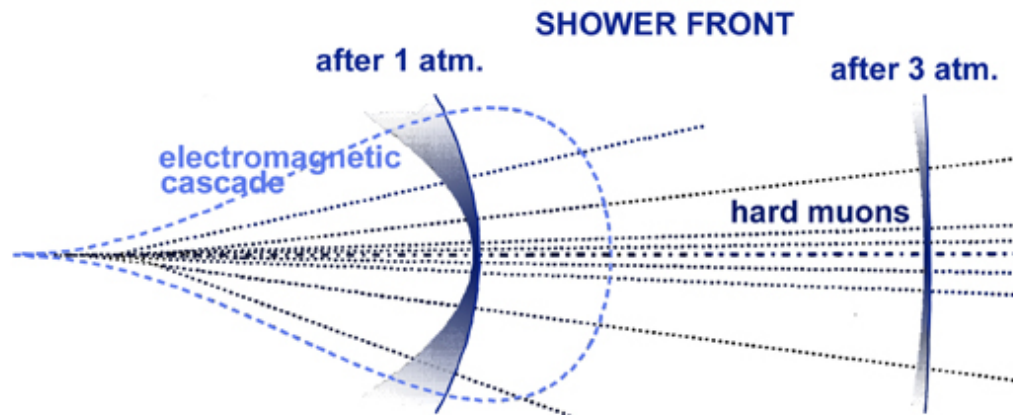
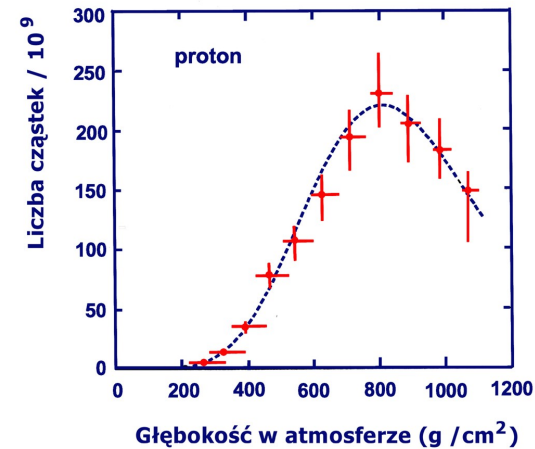
→ „poziome” wielkie pęki?

Neutrino

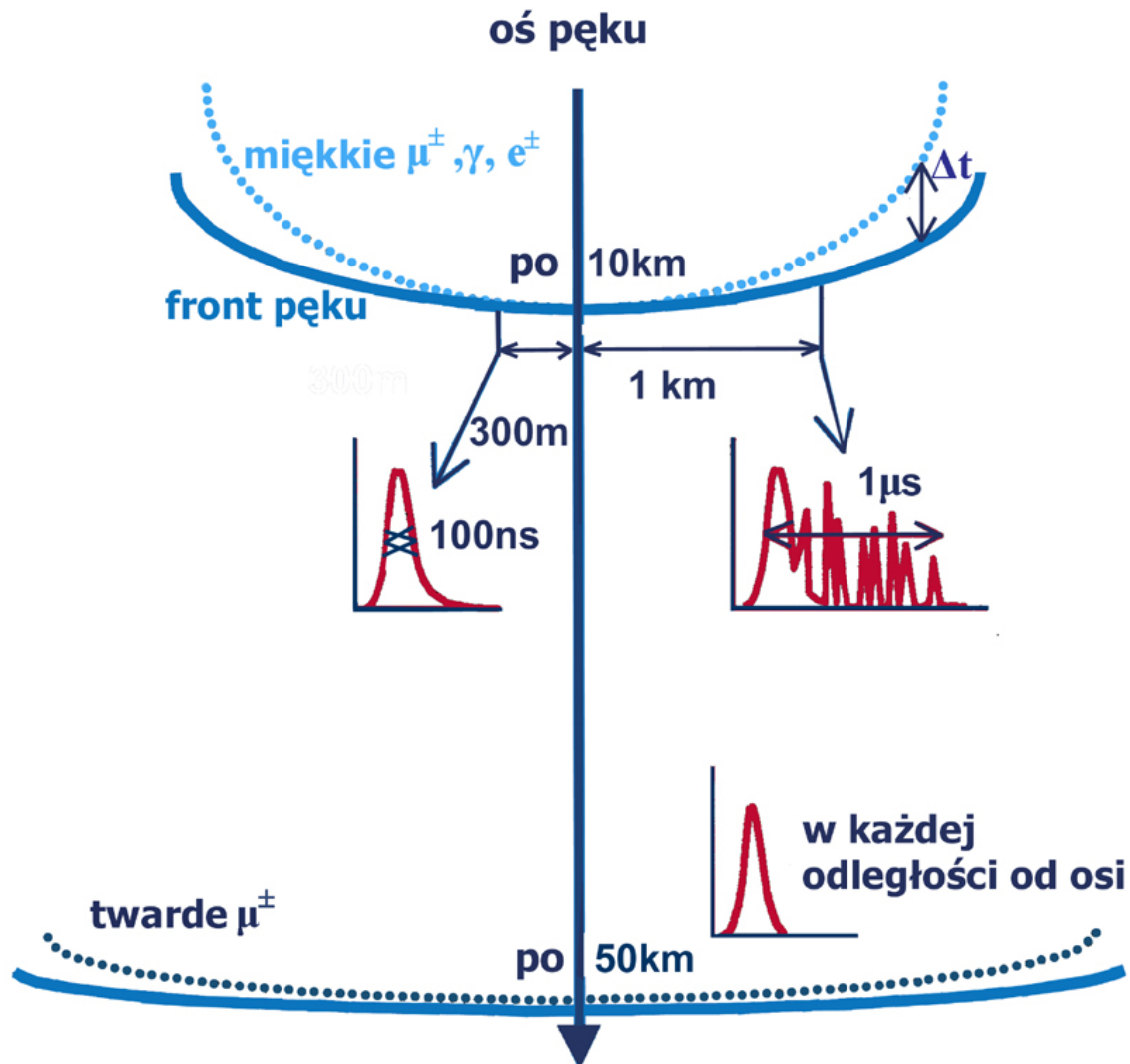
Poziome wielkie pęki

„hadronowe” zaczynają się wysoko w atmosferze
składowa e.m. rozwija się i wygasa wysoko nad gruntem,
miony docierają do gruntu - „stary” pęk
→ cienki, płaski front pędu $R_{\text{curv}} \sim 100 \text{ km}$

„neutrinowe” mogą zaczynać się głęboko w atmosferze
na gruncie „młody” pęk
→ gruby, zakrzywiony front pędu $R_{\text{curv}} \sim 10 \text{ km}$



Struktura czasowa frontu pęku

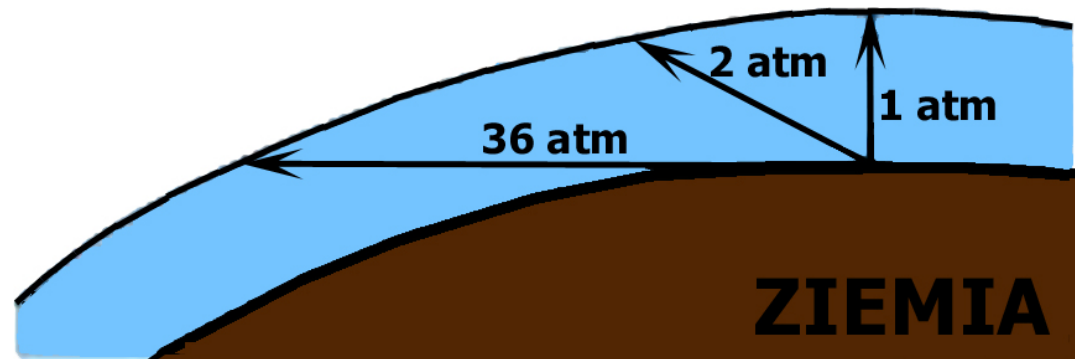


Neutrino: poziome pęki atmosferyczne

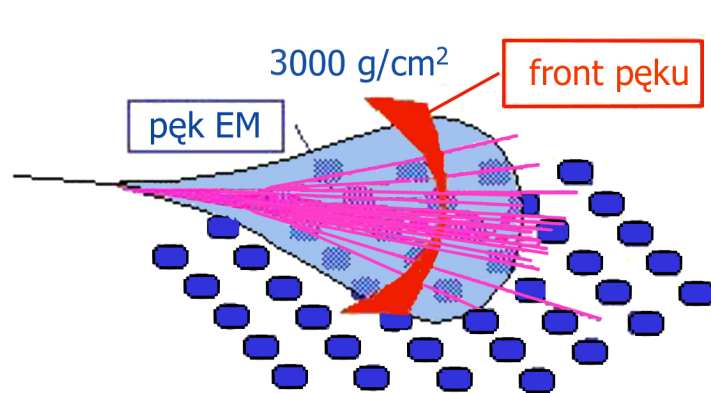
Atmosfera:

1 000 g/cm² pionowo

36 000 g/cm² poziomo



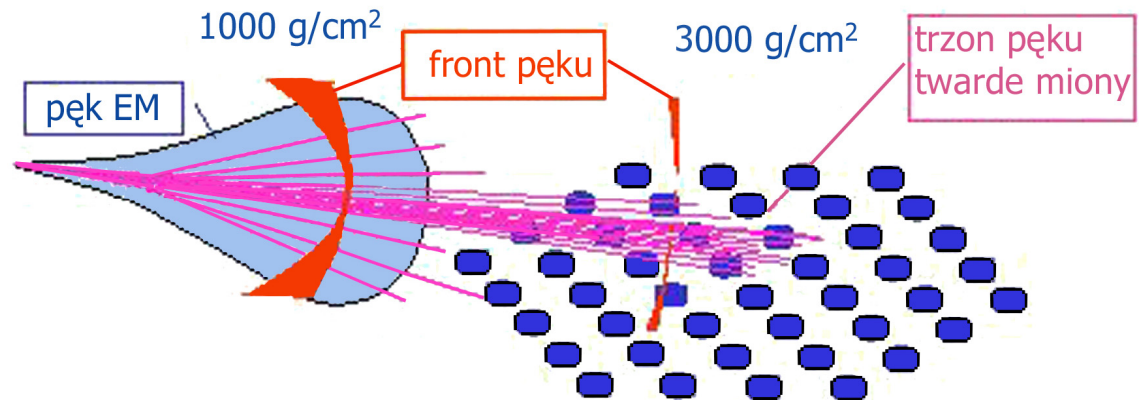
„młody” pęk



Sygnał:

kilka przypadków rocznie
obfite EM, wypukły gruby front pęku
długotrwały impuls

„stary” pęk



Tło:

tysiące przypadków rocznie
ubogie EM, bogate w μ , płaski cienki front
krótkotrwały impuls

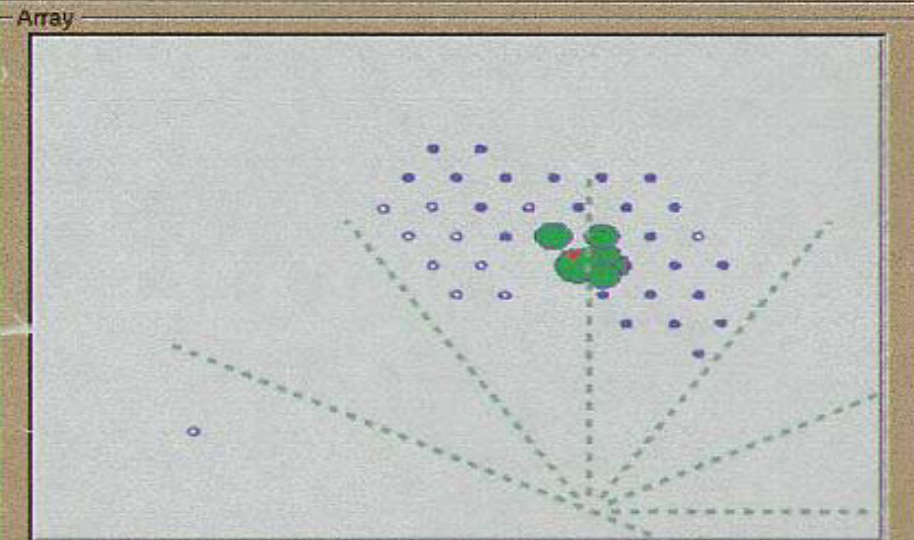
Auger: obserwacja młodego pęku

Control

File Configure Experts only...

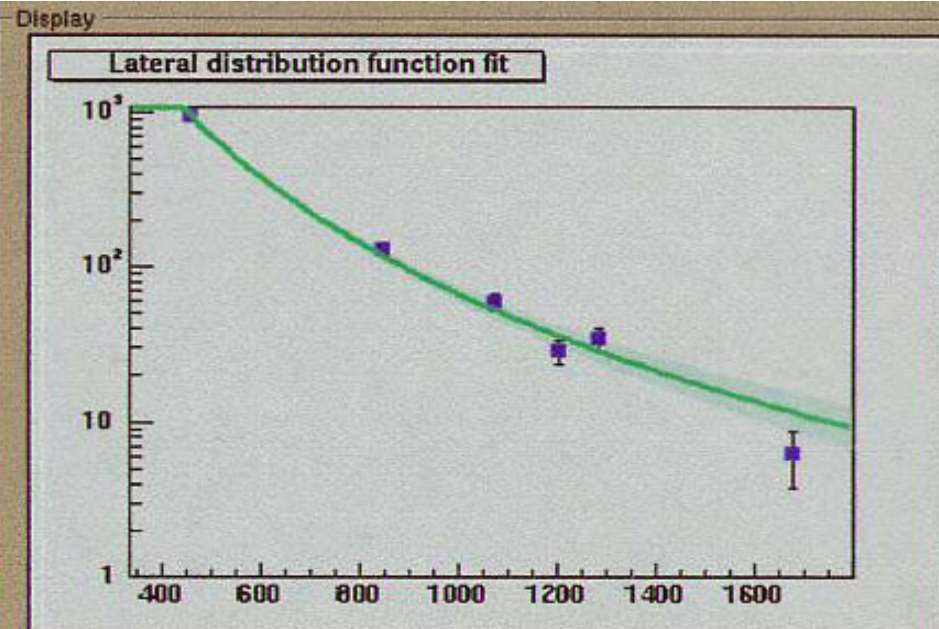
Reconstruct Previous Next Get # Update 7

#00204512: Thu May 23 18:51:25 2002	0044 (0 ns, 28.6 VEM)
#00206123: Sat May 25 13:06:17 2002	0036 (248 ns, 129.8 VEM)
#00206482: Sat May 25 23:21:15 2002	0046 (625 ns, 59.4 VEM)
#00206647: Sun May 26 04:14:01 2002	0063 (658 ns, 951.2 VEM)
#00207118: Sun May 26 18:04:11 2002	0049 (1014 ns, 8.2 VEM)
#00207829: Mon May 27 13:05:51 2002	0067 (1063 ns, 34.6 VEM)
#00208468: Tue May 28 07:52:57 2002	
#00208500: Tue May 28 08:34:47 2002	
#00210444: Thu May 30 13:55:27 2002	
#00211337: Fri May 31 13:25:07 2002	
#00212191: Sat Jun 1 12:00:28 2002	
#00212227: Sat Jun 1 13:03:27 2002	
#00213106: Sun Jun 2 12:57:57 2002	
#00213261: Sun Jun 2 16:48:00 2002	



Status

Trigger of this event: NEA3

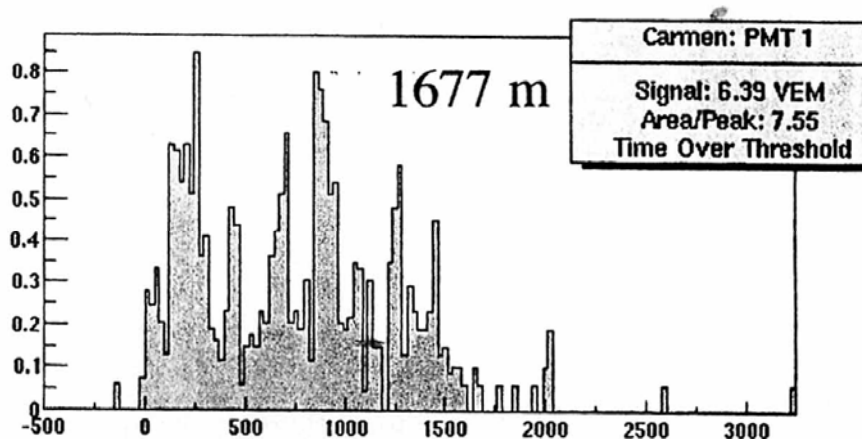
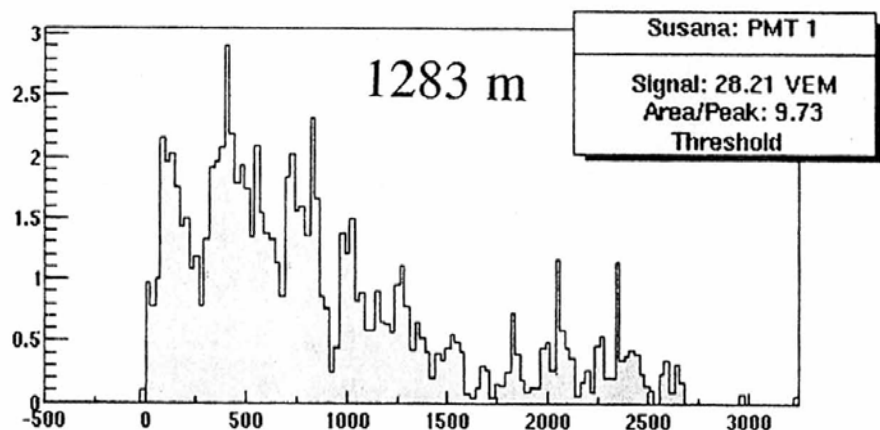
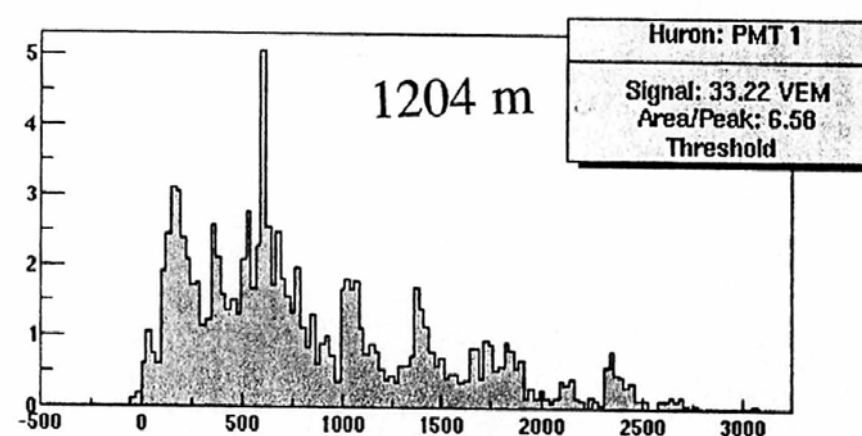
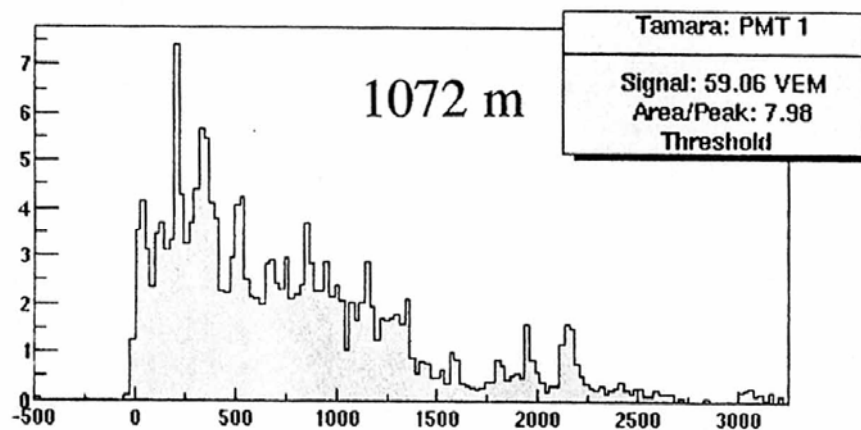
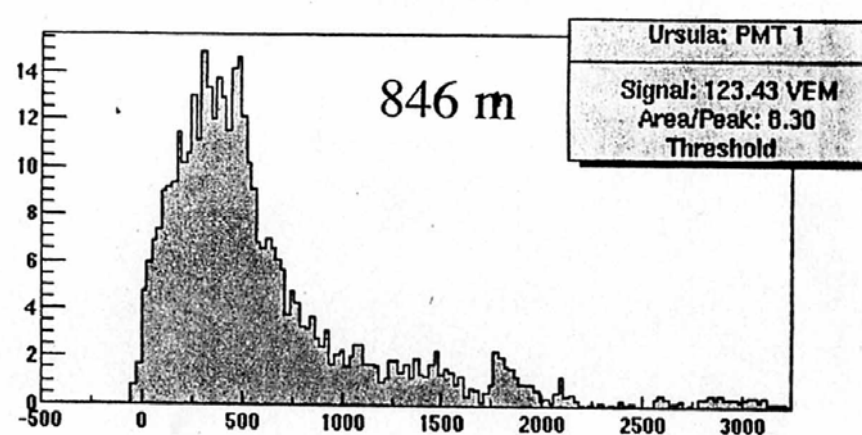
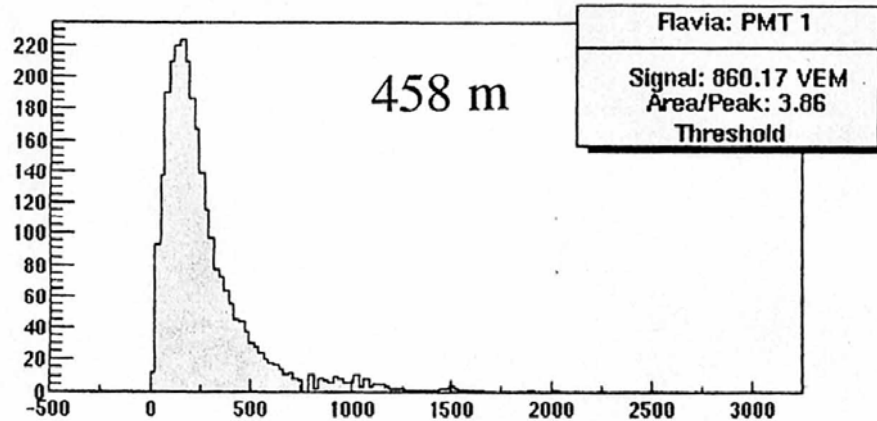


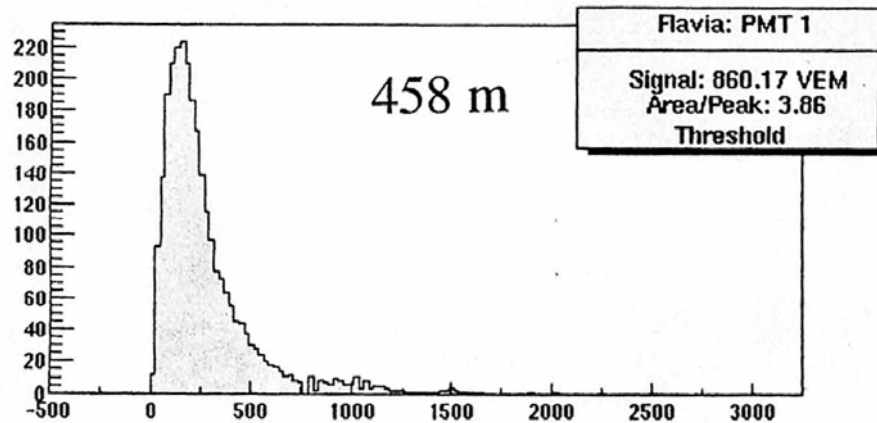
Easting= 458740 ± 35m
Northing= 6083187 ± 11m
dt= 32.4ns

Theta= 13.3 ± 0.7 deg
Phi= 50.1 ± 2.2 deg

R= 4.0 ± 0.2 km.

S(1000)= 67.27 ± 5.96 VEM
E= 16.05 EeV ± 9%

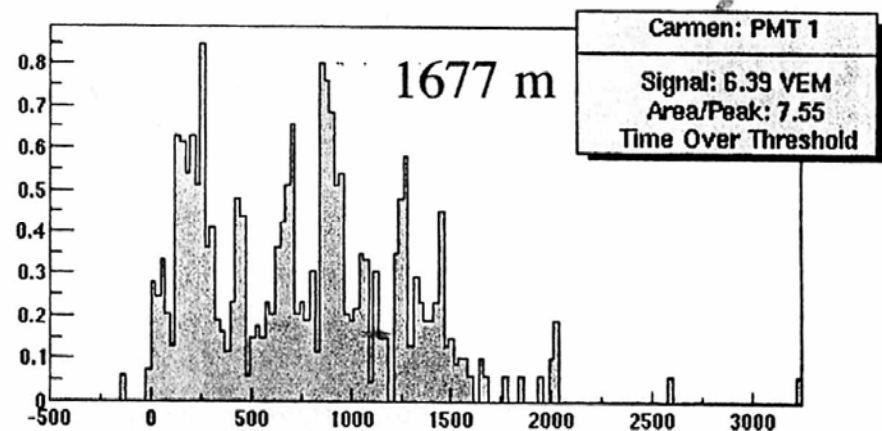




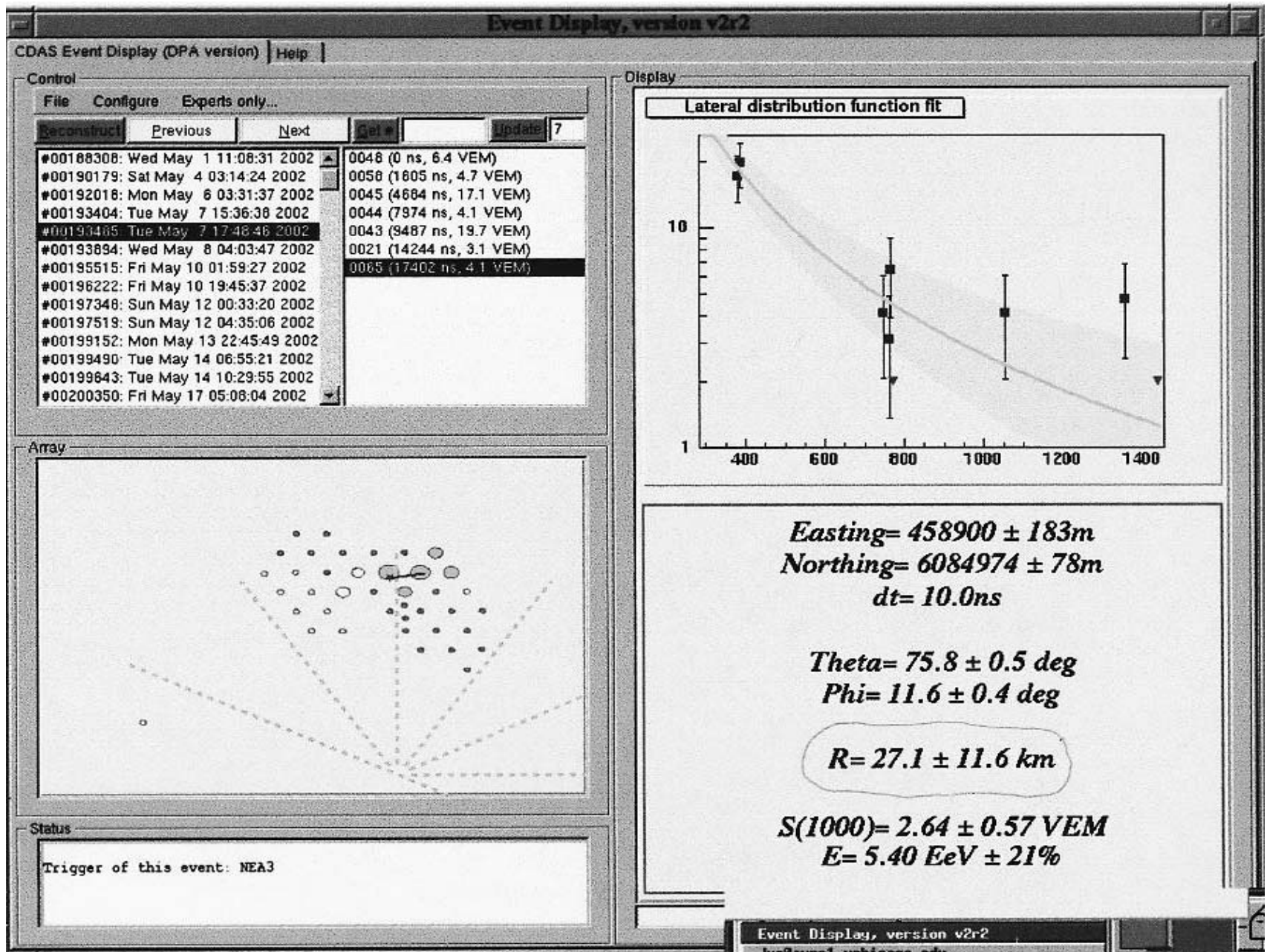
Near PMT

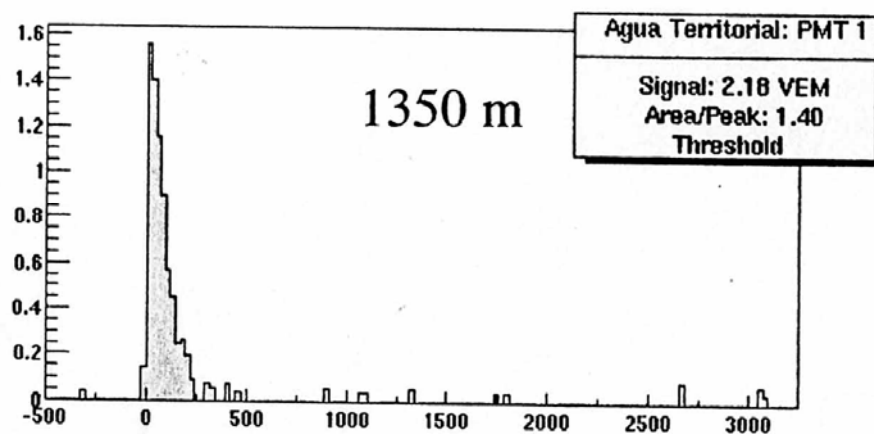
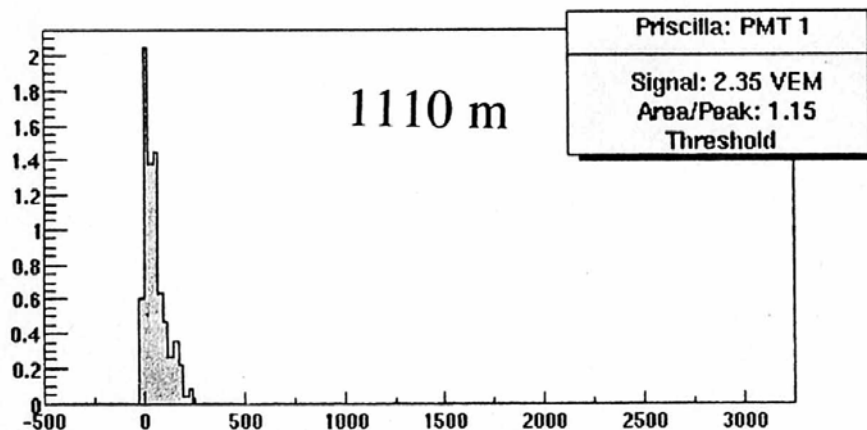
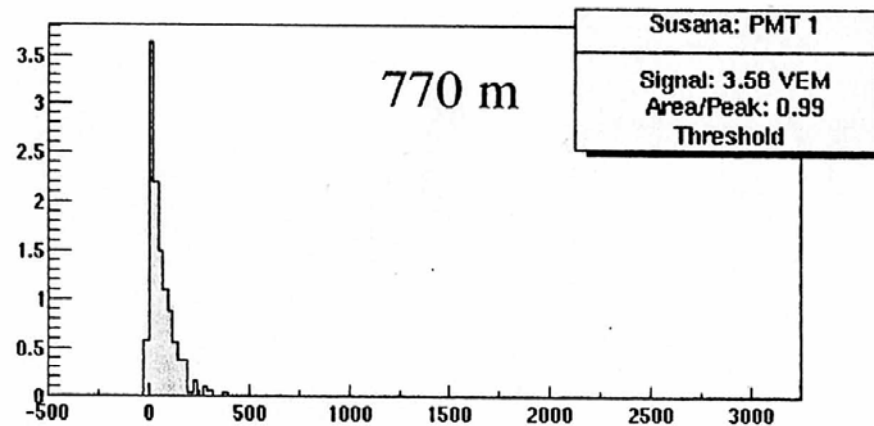
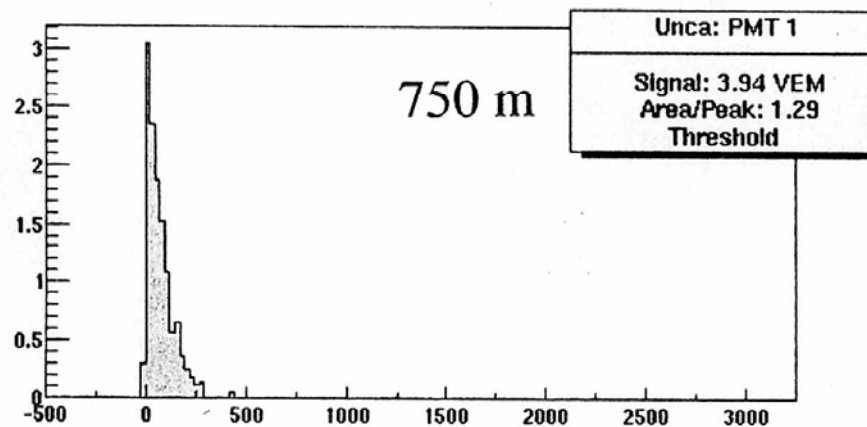
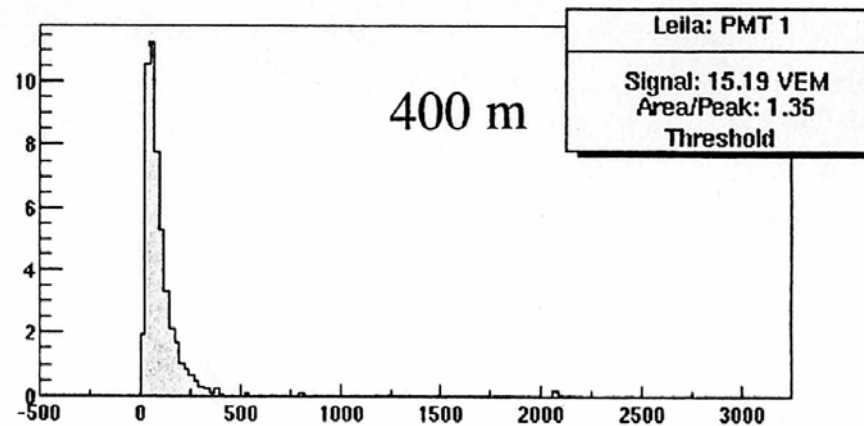
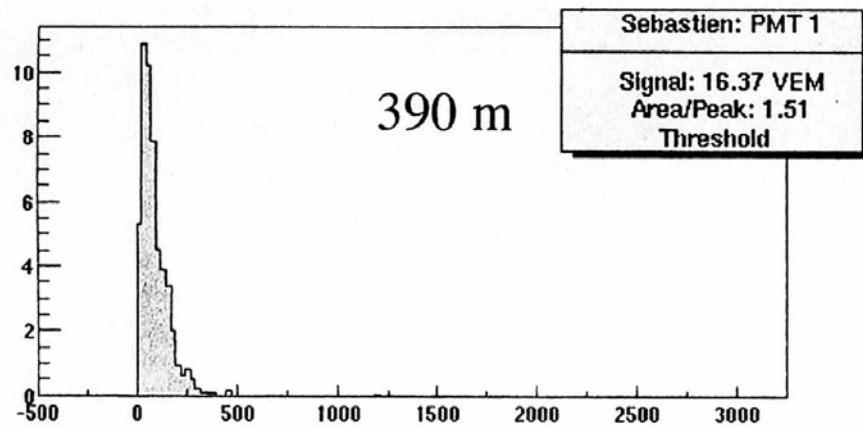
Distance ratio = 3.7 Density ratio = 134
this is a 'young shower', lots of electrons

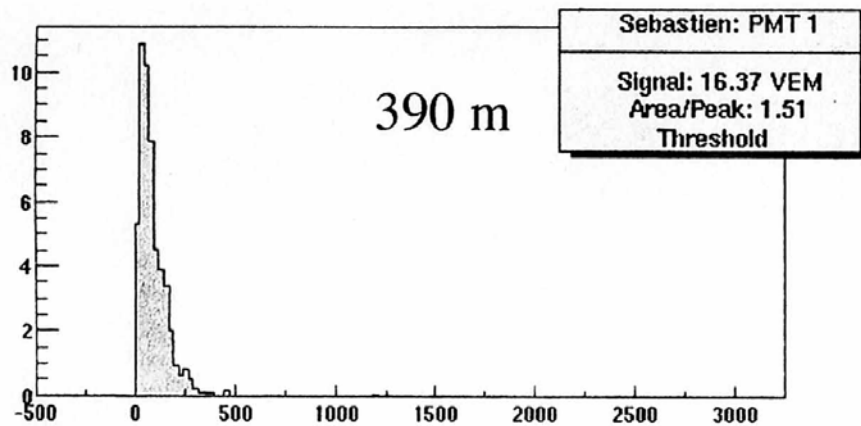
Far PMT



Auger: obserwacja starego pęku



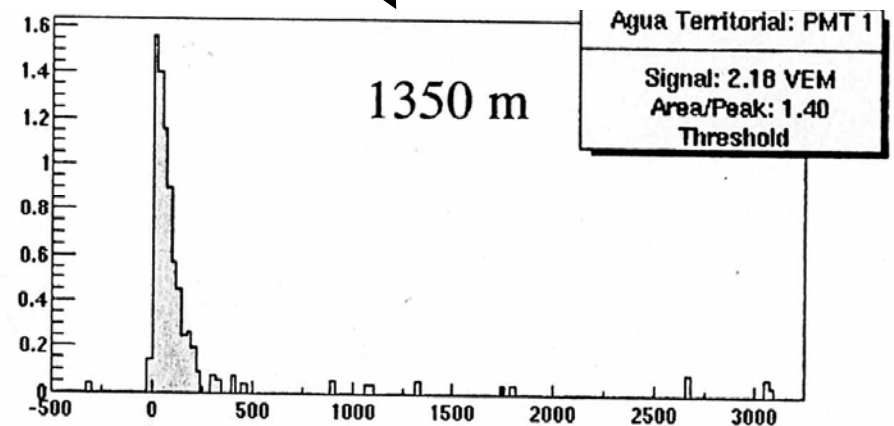




Near PMT

Distance ratio = 3.5 Density ratio = 7.5
this is an old shower', mostly muons

Far PMT



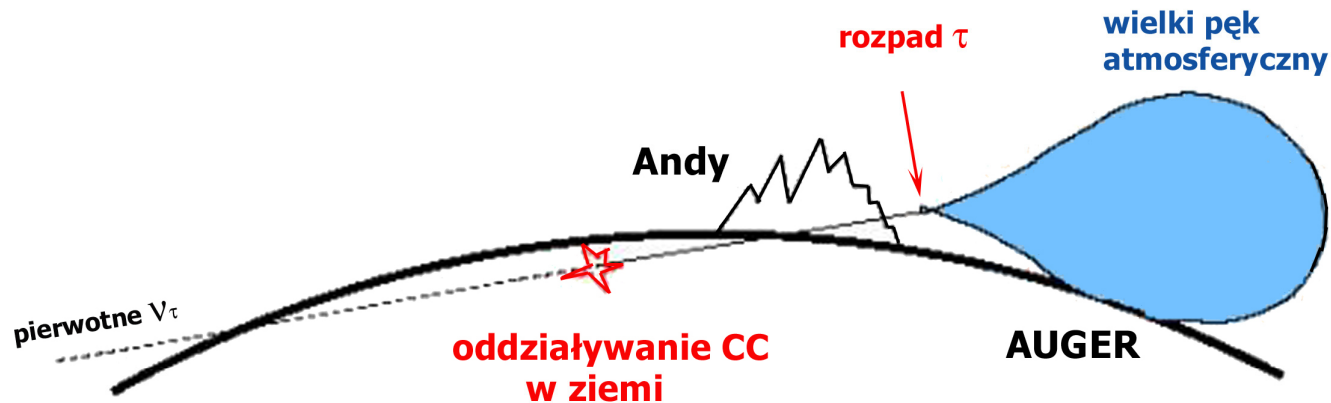
Detekcja neutrin taonowych

Zasady:

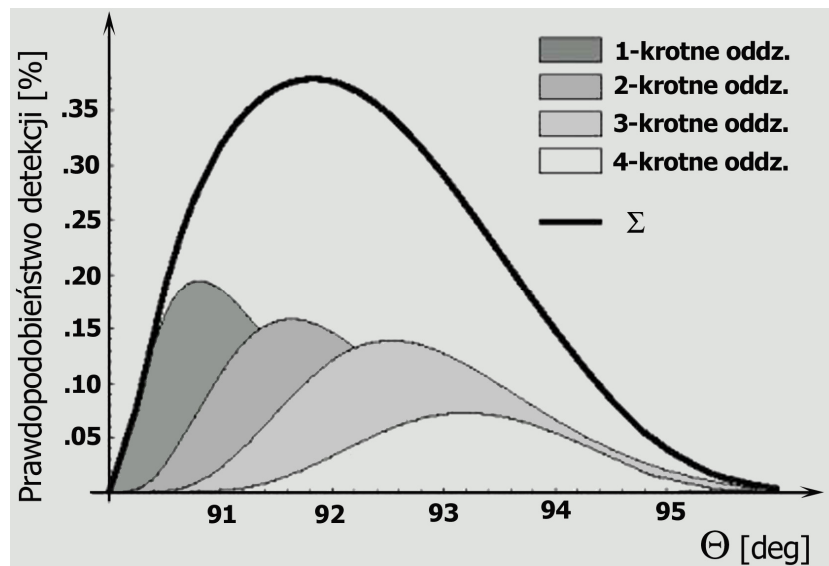
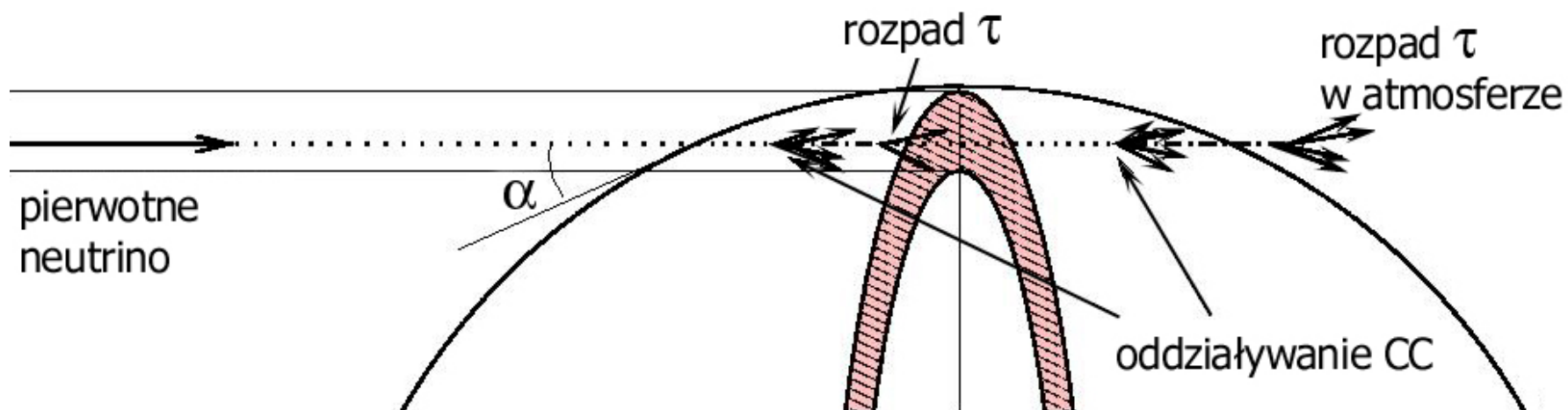
- Długość oddziaływania w gruncie ~ 300 km przy 10^{18} eV
- Droga rozpadu tau ~ 50 km przy 10^{18} eV
- 1° pod horyzontem $\Rightarrow 200$ km skał
- Maksimum pęku ~ 10 km po rozpadzie

W praktyce $85^\circ < \theta_z < 95^\circ$

Okno AUGER: $10^{17} - 10^{20}$ eV



Detekcja ν_τ z wielokrotną regeneracją



Podsumowanie

Dotychczasowe dane nie pozwalają na rozstrzygnięcie

czy istnieje obcięcie GZK w widmie energii?

czy istnieją „punktowe” źródła promieni kosmicznych?

jaki jest skład promieni kosmicznych?

Źródła promieni kosmicznych skrajnie wysokich energii pozostają nieznane:

przyspieszanie w znanych obiektach astrofizycznych?

procesy egzotyczne?

scenariusze „hybrydowe”, np. łamanie niezmienniczości Lorentza?

Projekt Pierre Auger dostarczy potrzebnych danych eksperymentalnych?

→ znakomite perspektywy pracy badawczej!