

Astrofizyka promieni kosmicznych-4

Henryk Wilczyński

Detekcja promieni kosmicznych

GRUBOŚĆ ATMOSFERY ZIEMI $\approx 11 \lambda_p \approx 27 L_R$

λ_p droga oddziaływania protonu

L_R jednostka radiacyjna

DETEKCJA BEZPOŚREDNIA $E < 10^{15} \text{ eV}$

Rejestracja cząstki pierwotnej poza atmosferą
(satelity, balony w stratosferze)

widmo energetyczne, skład chemiczny

skład izotopowy

DETEKCJA POŚREDNIA $E > 10^{14} \text{ eV}$

Rejestracja wielkich pęków atmosferycznych na
powierzchni Ziemi

zbiorcze widmo energetyczne

skład chemiczny (przybliżony)

Kaskada elektromagnetyczna

„toy model” (Heitler 1944)

liczba cząstek po n pokoleniach

$$N = 2^n = 2^{X/\lambda}$$

energia na cząstkę

$$E(X) = E_0/N(X)$$

mnożenie cząstek aż do $E(X)=E_c$ (en. krytyczna)
w maksimum kaskady

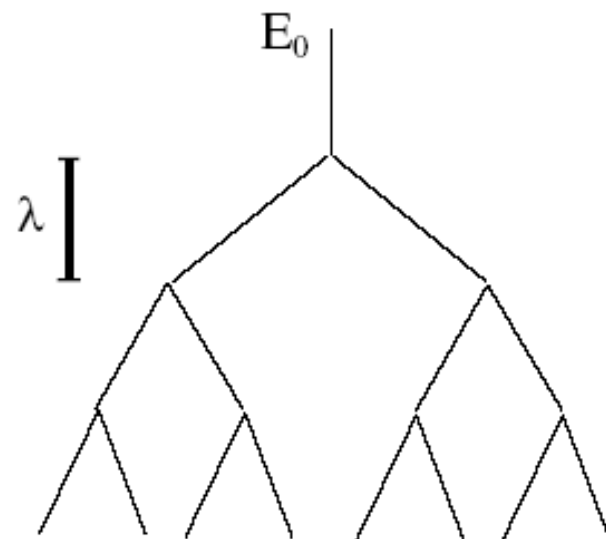
$$N(X_{\max}) = E_0/E_c$$

$$X_{\max} = \lambda \ln(E_0/E_c)/\ln 2$$

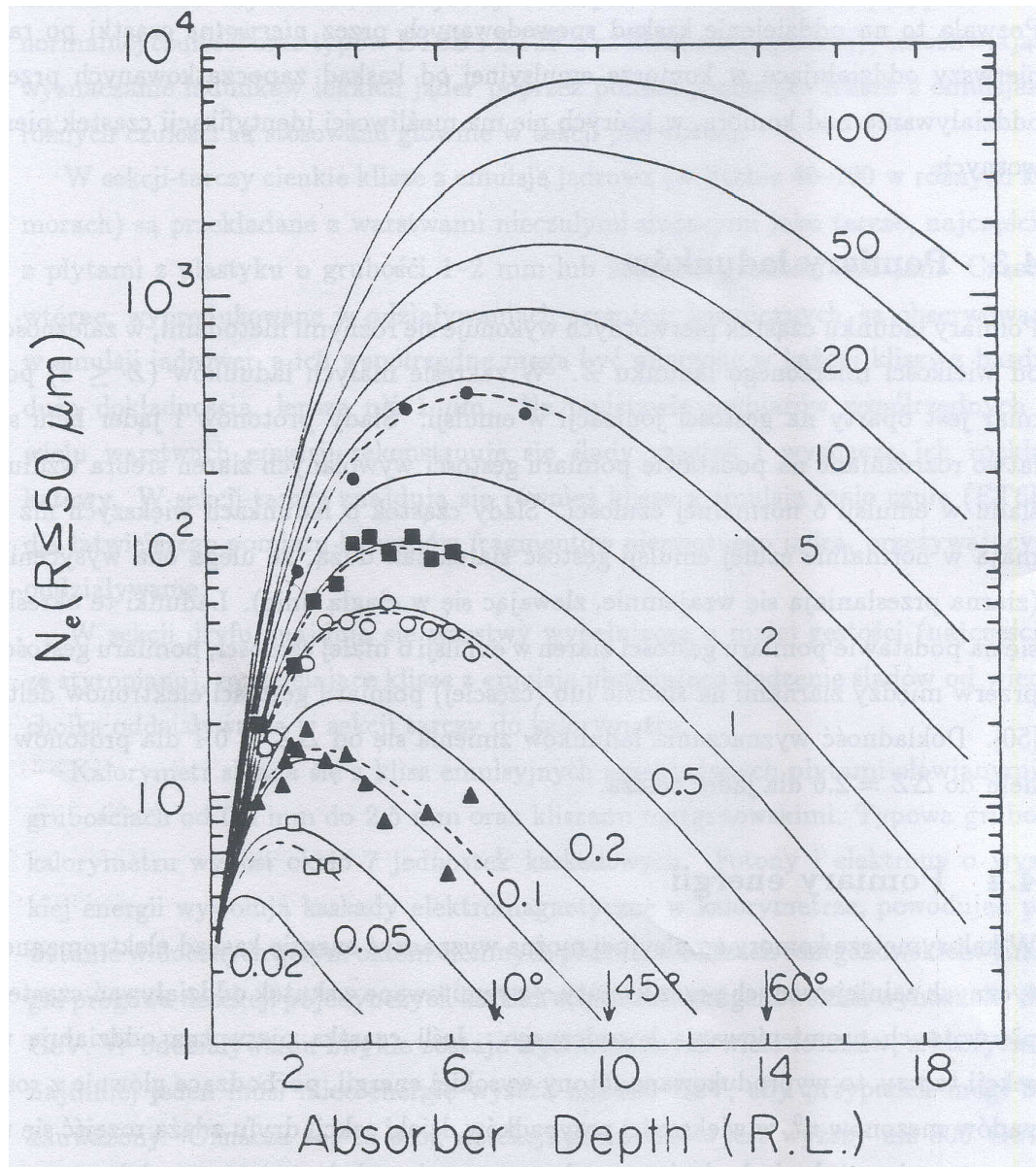
czyli

$$N_{\max} \propto E_0$$

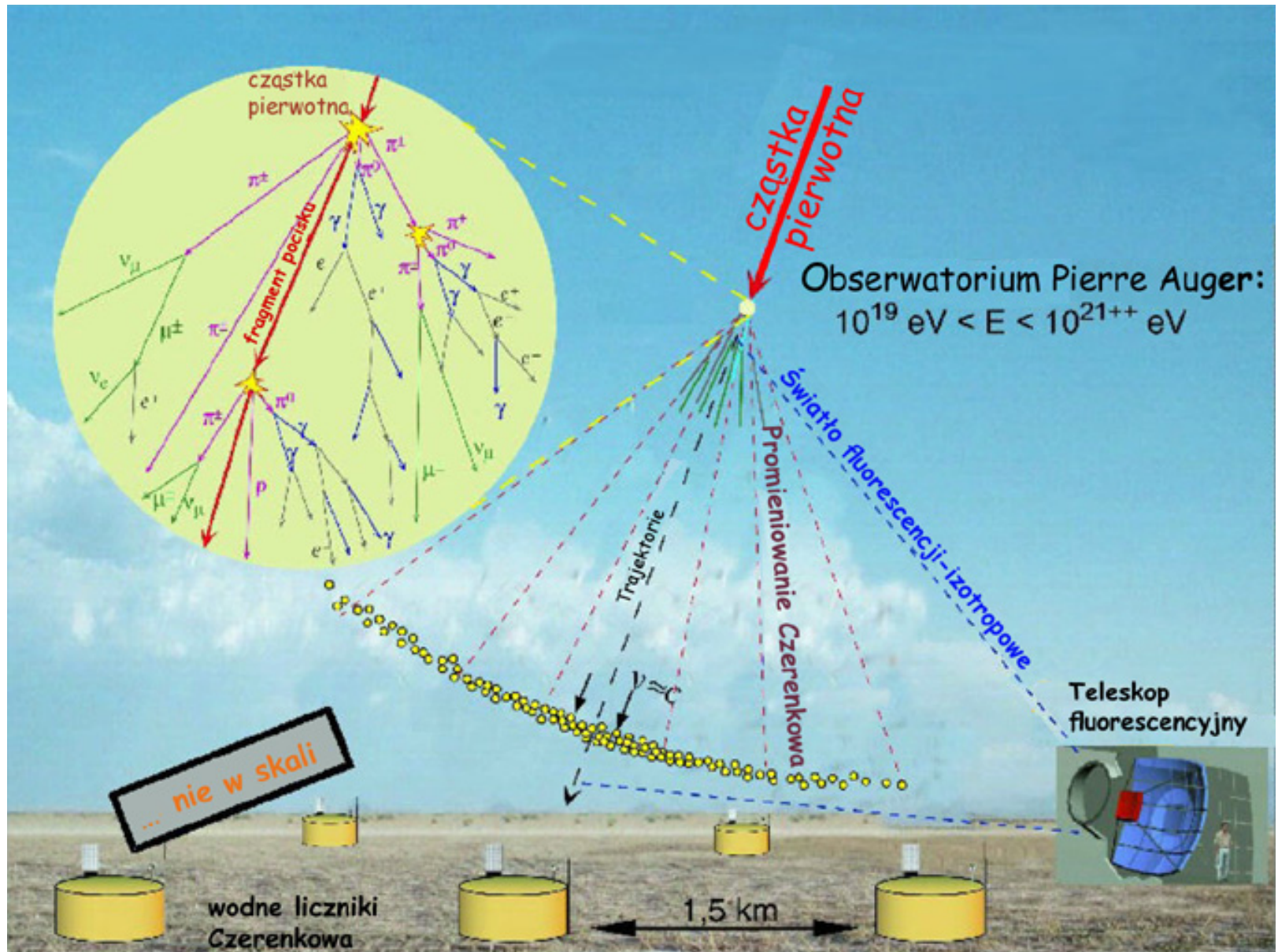
$$X_{\max} \propto \ln E_0$$



profil podłużny kaskady EM



Wielki pęk atmosferyczny



Rozkład cząstek w wielkim pęku

Profil podłużny: liczba cząstek w pęku w funkcji głębokości X (Gaisser-Hillas)

$$N_e(X) = N_{max} \left(\frac{X - X_0}{X_{max} - X_0} \right)^{(X_{max} - X_0)/\lambda} \exp((X_{max} - X)/\lambda)$$

X_0 = początek rozwoju pęku

λ = droga oddziaływania

rozkład poprzeczny (Nishimura-Kamata-Greisen)

$$\rho_N(X, r) = \frac{N_e(X)}{r_M^2} \left(\frac{r}{r_M} \right)^{s-2} \left(1 + \frac{r}{r_M} \right)^{(s-4.5)} \frac{\Gamma(4.5 - s)}{2\pi\Gamma(s)\Gamma(4.5 - 2s)}$$

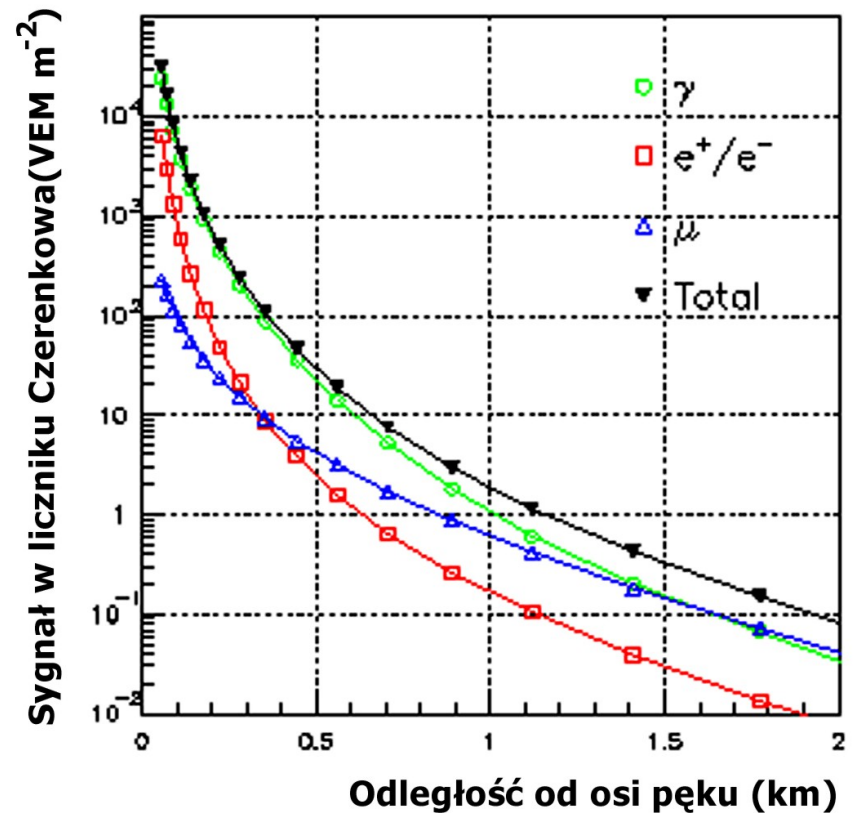
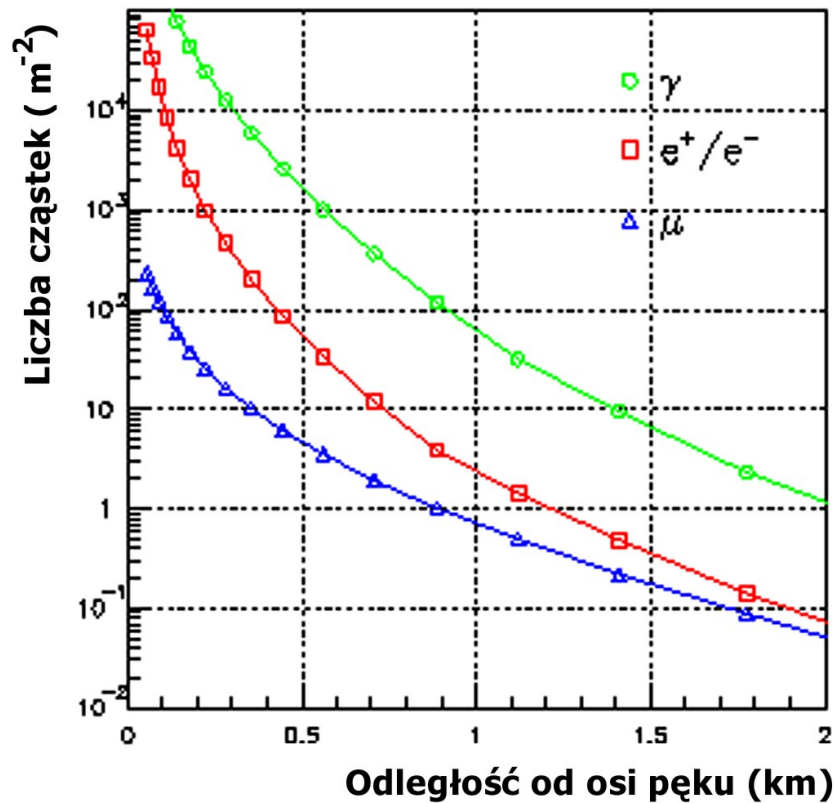
r_M = promień Molieré'a

s = parametr wieku

$$s \equiv \frac{3X/X_l}{X/X_l + 2\ln(E_0/\epsilon_0)}$$

Rozkłady poprzeczne cząstek w pęku

proton $E_0 = 10^{19}$ eV



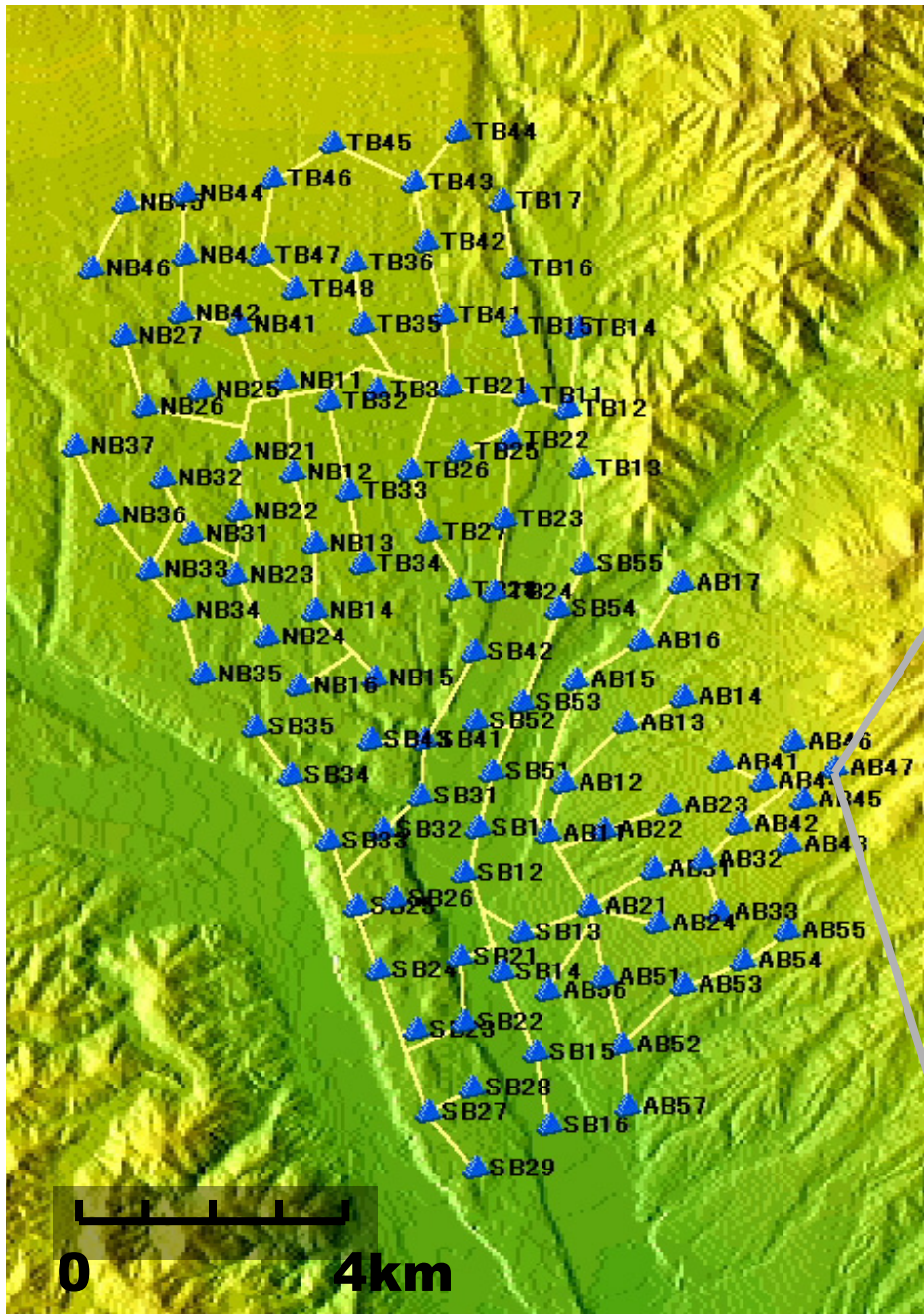
Sieć detektorów naziemnych

CASA



AGASA: Akeno Giant Air Shower Array

111 detektorów elektronów
27 detektorów mionów



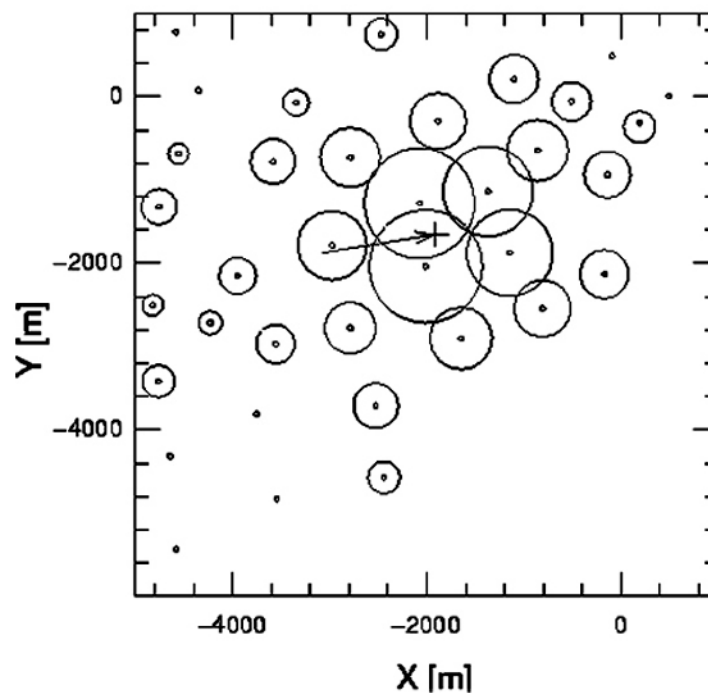
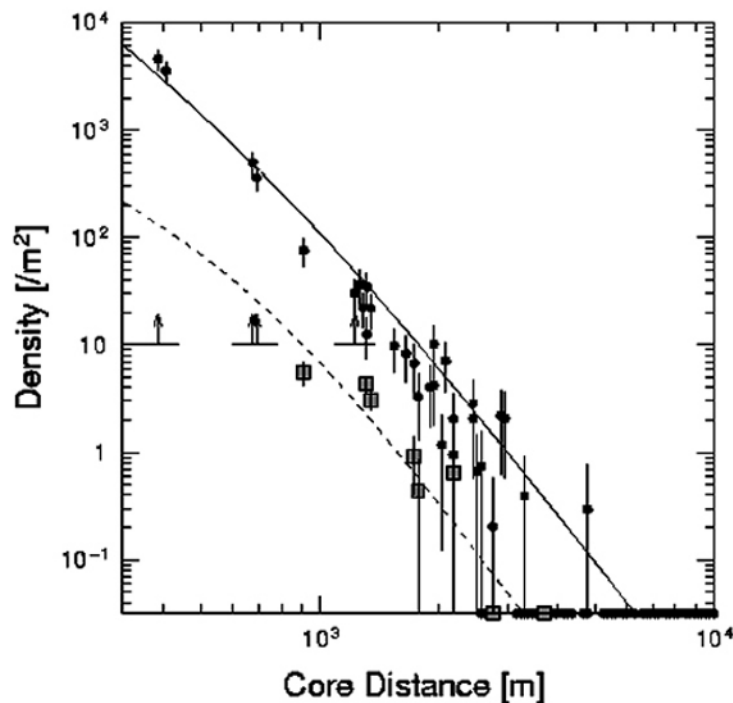
Rekonstrukcja pęku w sieci naziemnej

wyznaczamy poprzeczny rozkład cząstek w wielkim pęku

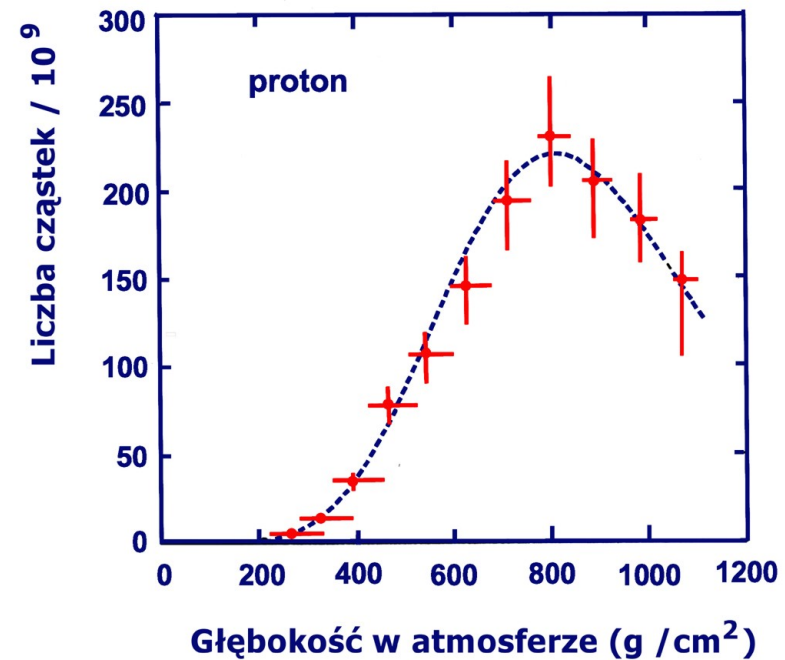
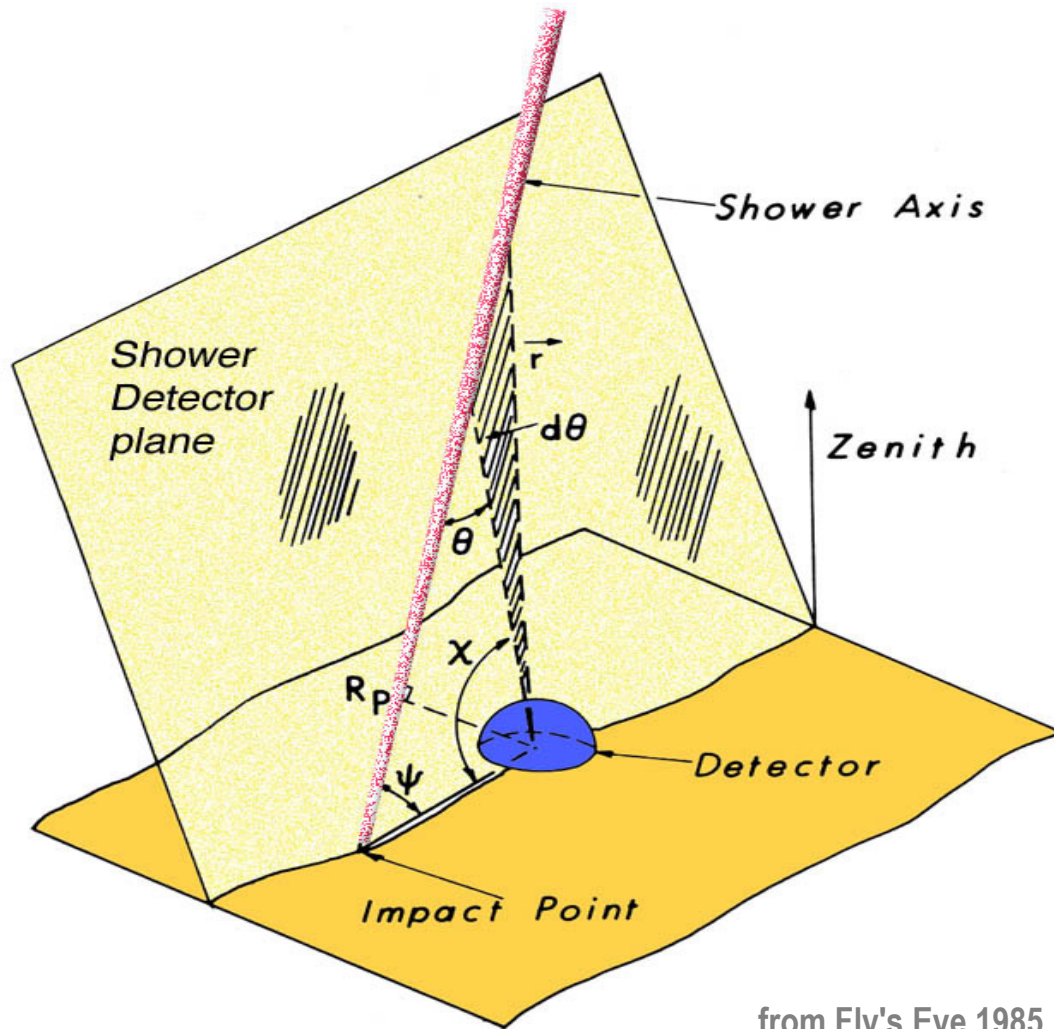
$$\rho(r) \propto k r^{-(n+f(r))}$$

$$E_0 = a \rho_{600}^b$$

Przypadek najwyższej energii z detektora AGASA ($E \sim 2.5 \times 10^{20}$ eV)



Detekcja metodą fluorescencyjną



from Fly's Eye 1985

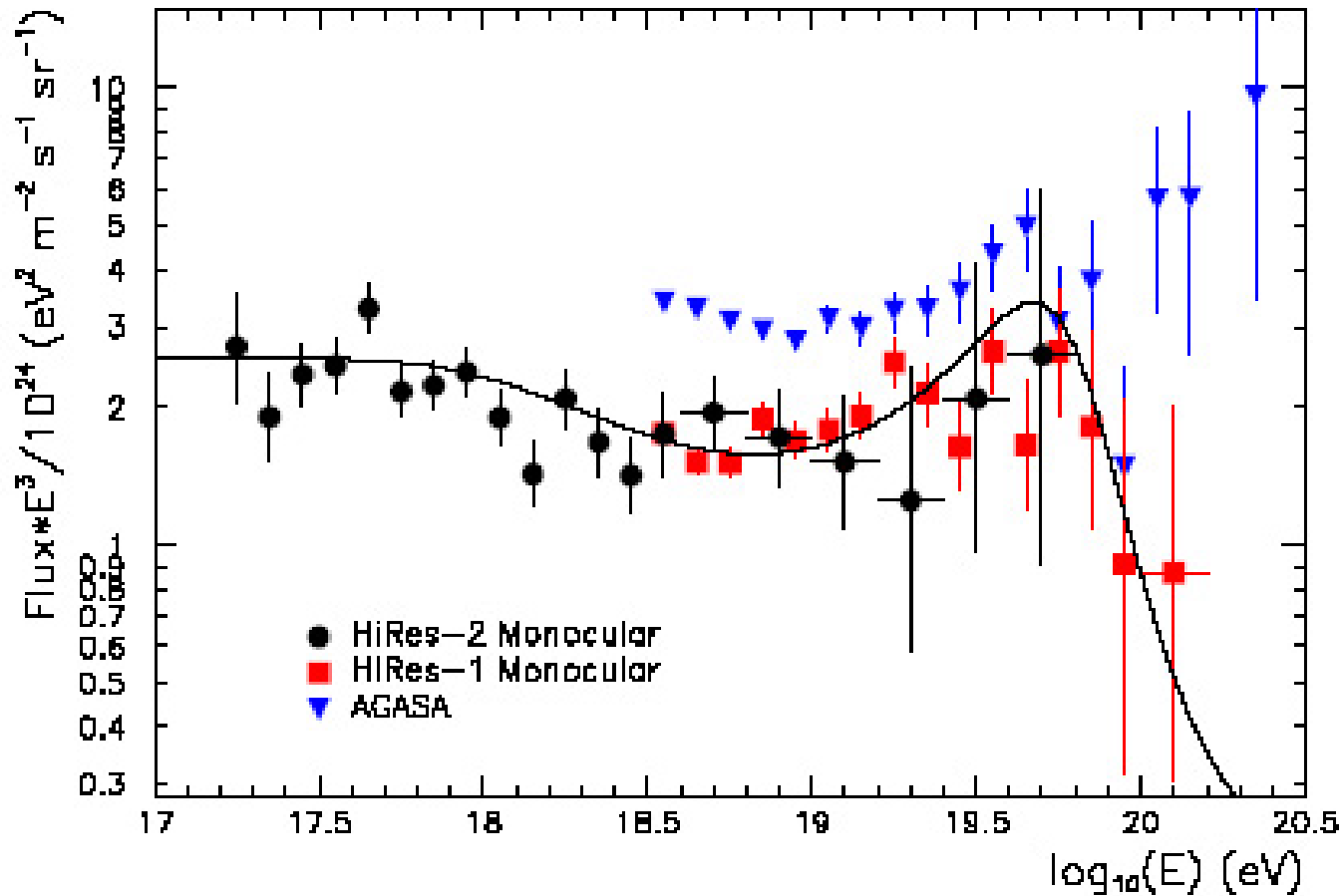
Detektor „Oko Muchy”



HiRes



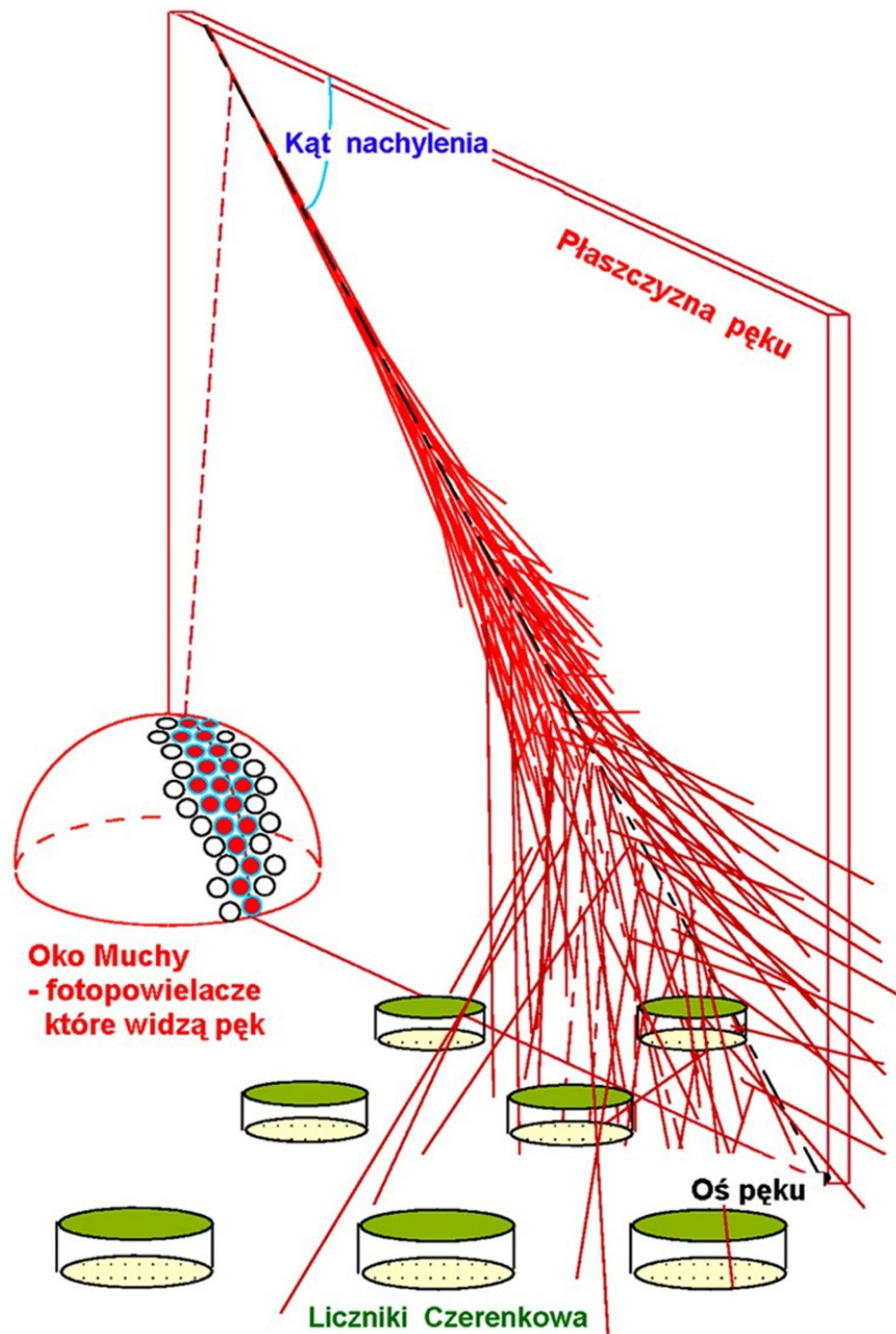
Widmo AGASA i HiRes



niezgodność widm wynikiem użycia różnych technik detekcji ?

Szansa na poprawę danych

Hybrydowa detekcja wielkich pęków (Projekt Pierre Auger)



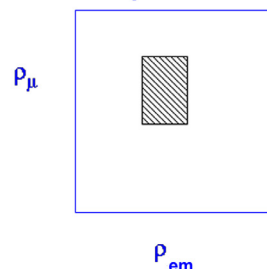
Wzajemna kalibracja obu typów detektorów

Oba detektory mierzą
ten sam pęk używając
różnych obserwacji

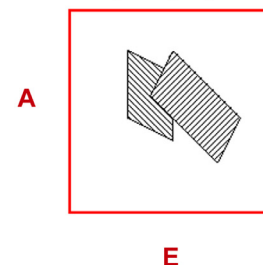
IDENTYFIKACJA CZĄSTEK PIERWOTNYCH

- Detektor powierzchniowy : gęstość mionów i elektronów
- Detektor fluorescencyjny : profil kaskady ($X_{\max}$)

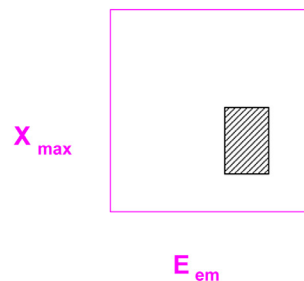
Detektor powierzchniowy



Detekcja hybrydowa



Detektor fluorescencyjny



Obserwatorium Pierre Auger

Badanie promieni kosmicznych w zakresie najwyższych obserwowanych energii, $E > 10 \text{ EeV}$:

skład

lekkie czy ciężkie jądra, fotony, neutrina, ??

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

LOKALIZACJA PÓŁNOCNEGO I POŁUDNOWEGO OBSERWATORIUM PIERRE AUGER



**LOKACJA PÓŁNOCNA:
PROWERS COUNTY,
COLORADO (USA)**

320 km (S-E) od Denver

Wysokość npm : 1125 m

Szerokość geogr : 37,45N

Długość geogr : 102,45W

**LOKACJA POŁUDNIOWA :
EL NIHUIL, MENDOZA
ARGENTYNA**
80 km (S-W) od San Rafael

Wysokość npm : 1300 m

Szerokość geogr : 35,2 S

Długość geogr : 69,2 W



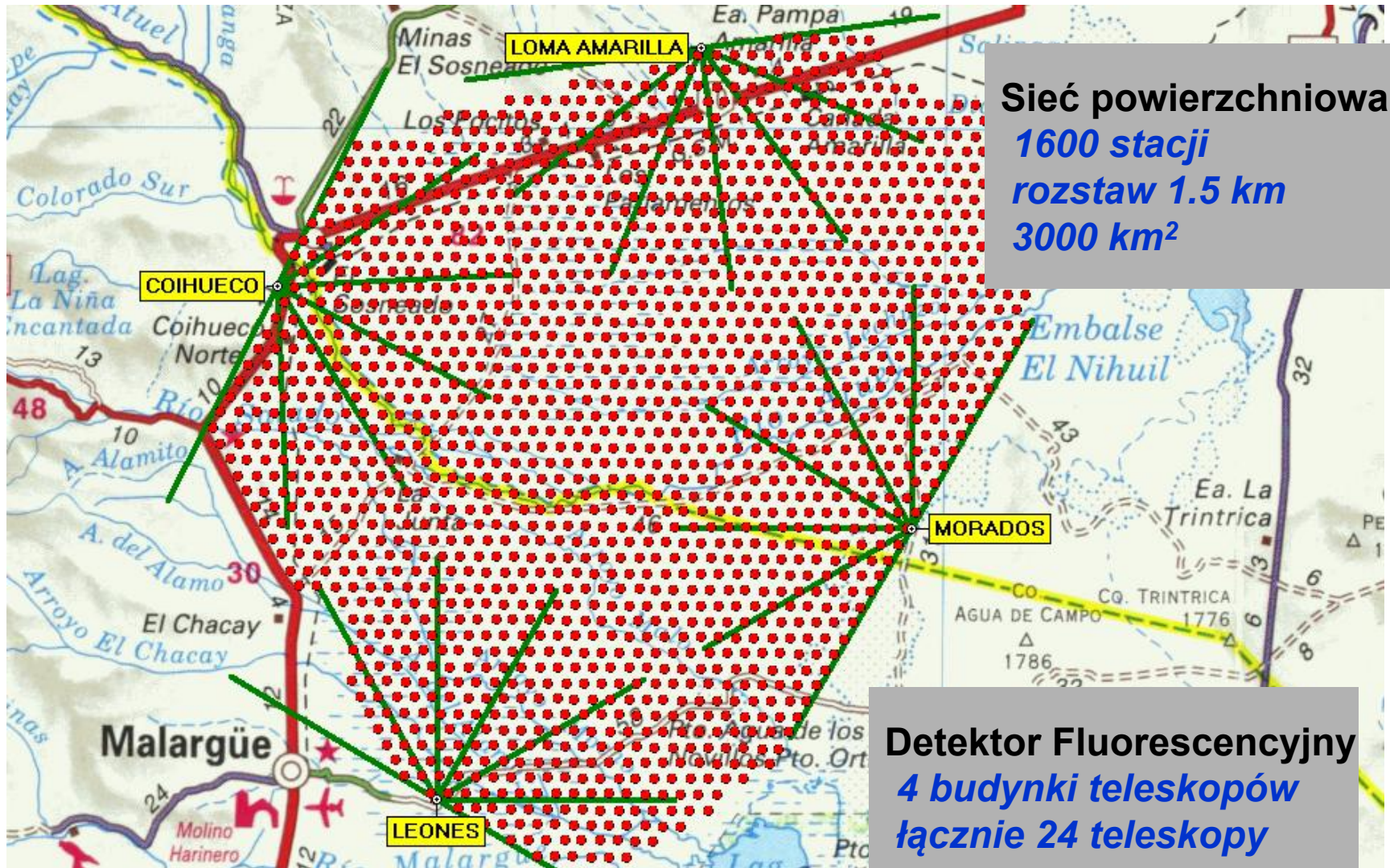
Kampus południowego Obserwatorium Pierre Auger



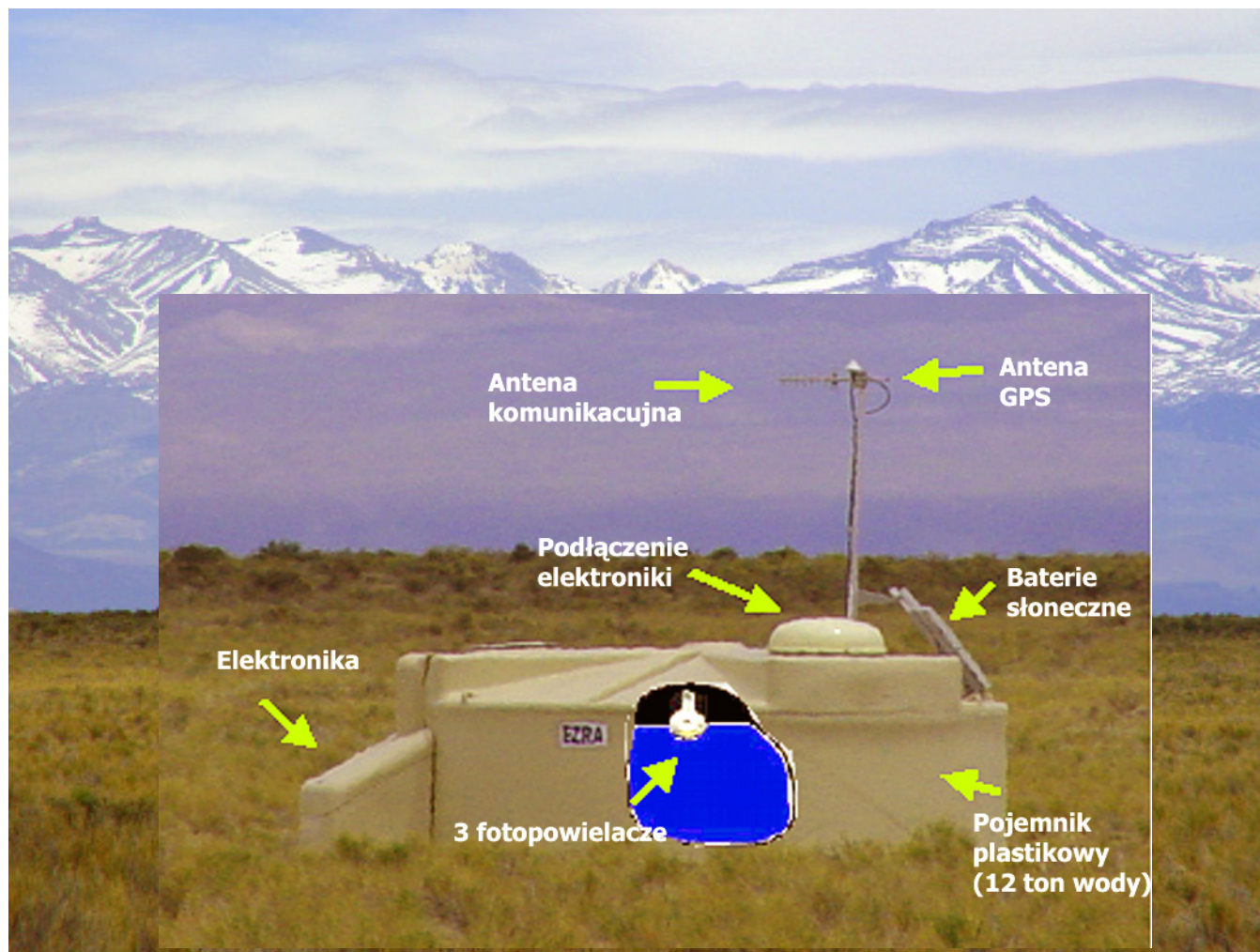
<http://auger.ifj.edu.pl>

www.auger.org

Obserwatorium Pierre Auger



Detektor naziemny



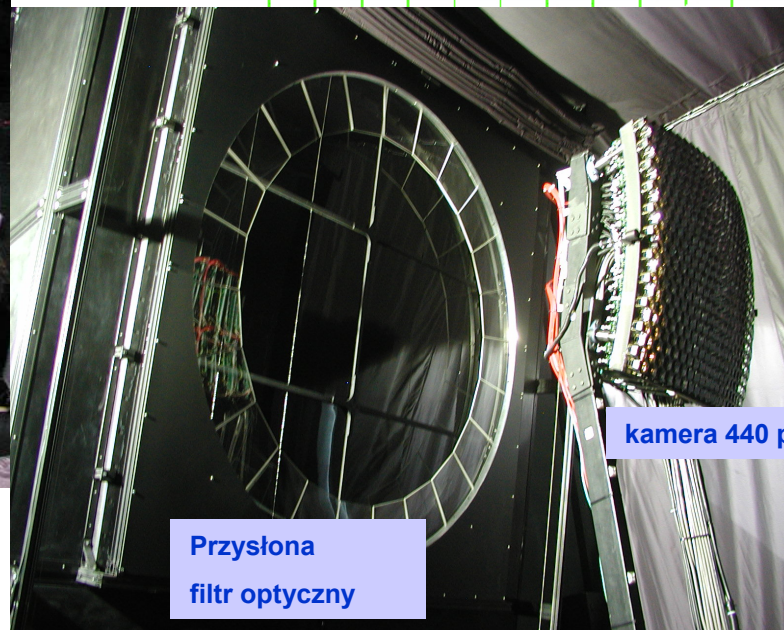
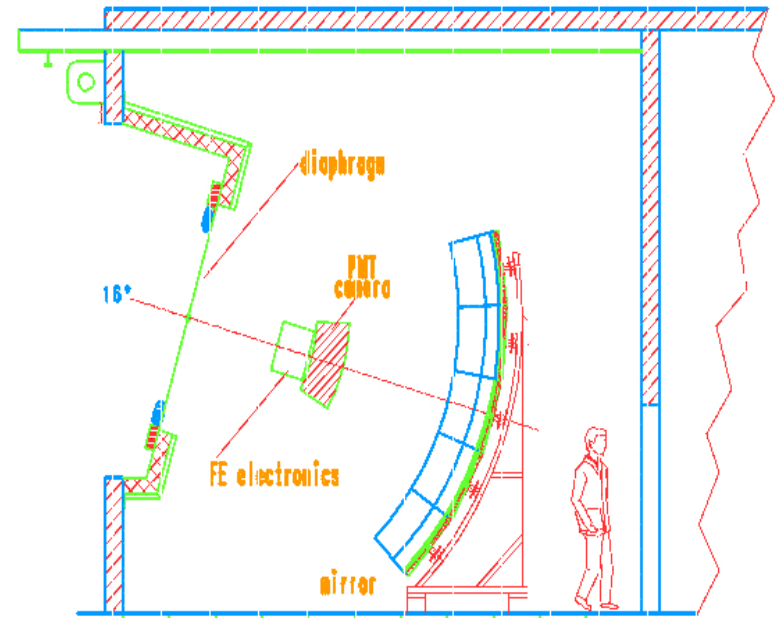
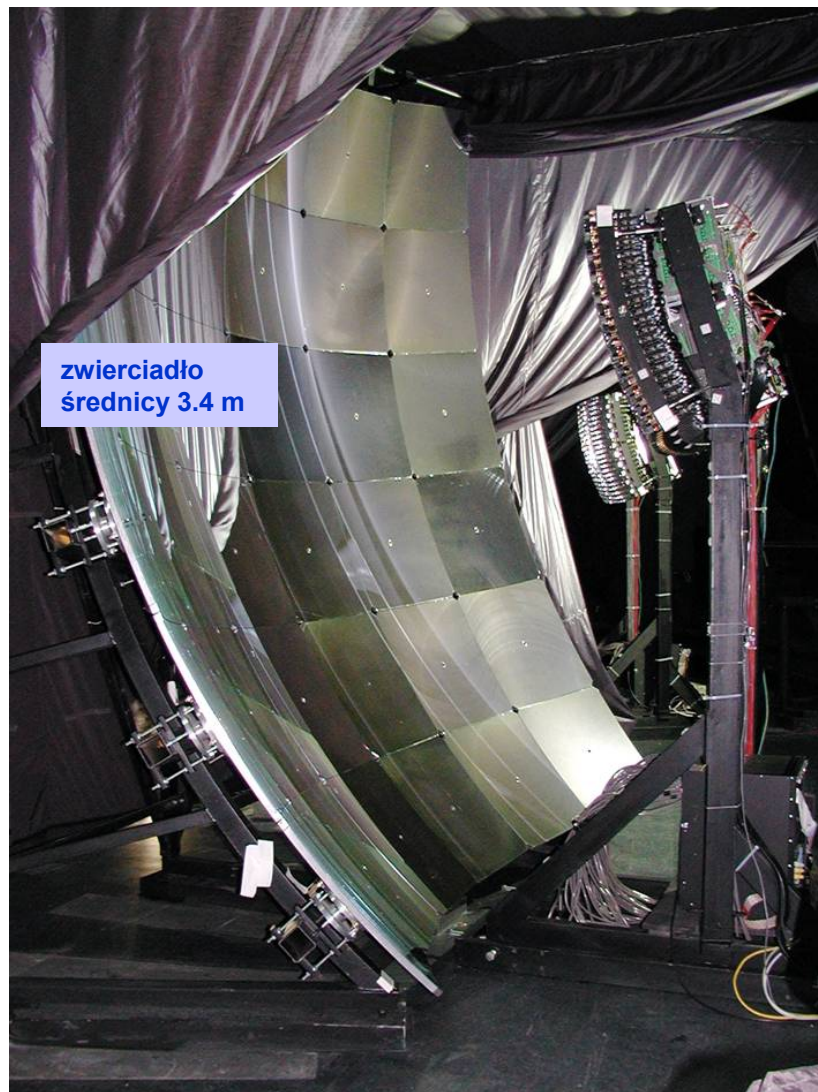
Nowa dostawa detektorów z fabryki



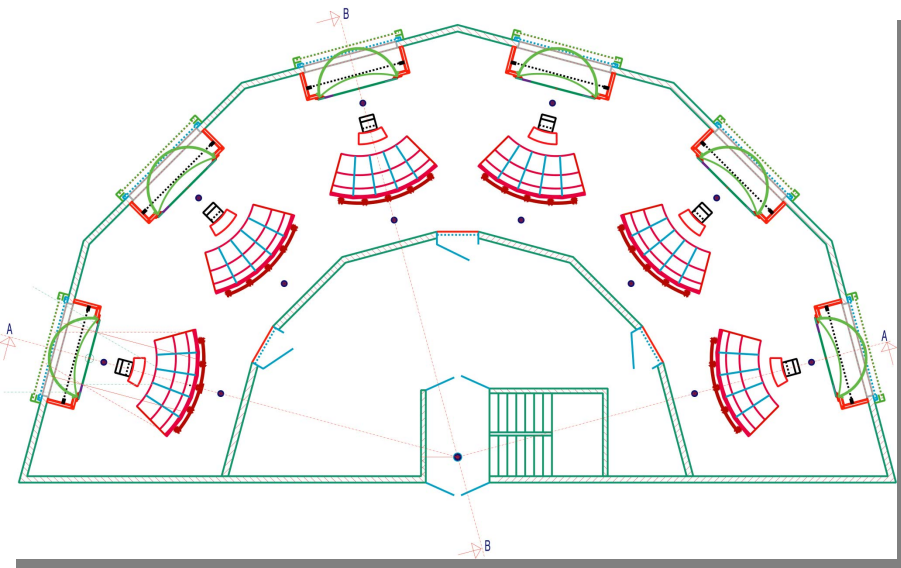
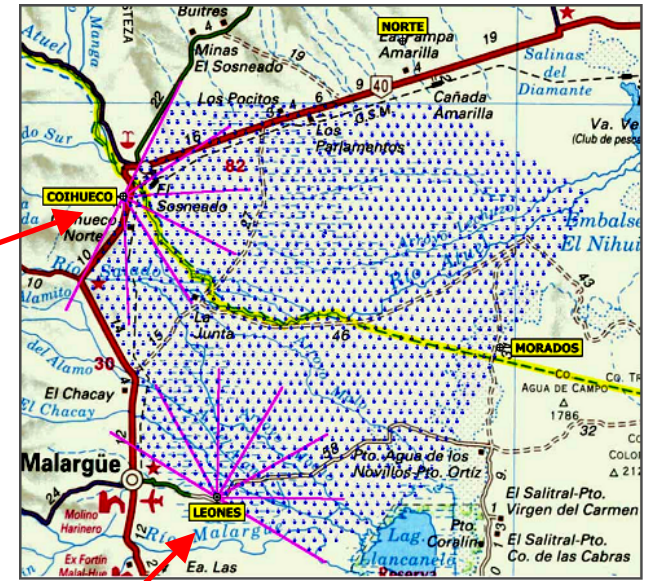
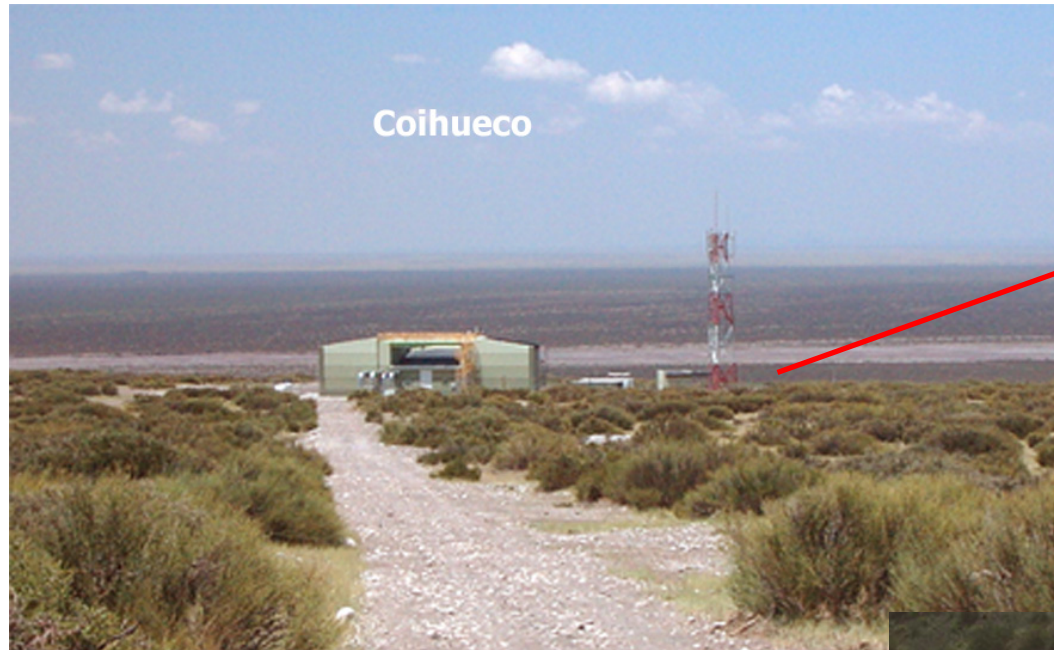
Rozmieszczanie detektorów powierzchniowych



Detektor Fluorescencyjny



Detektory fluorescencyjne



Observatorium Pierre Auger



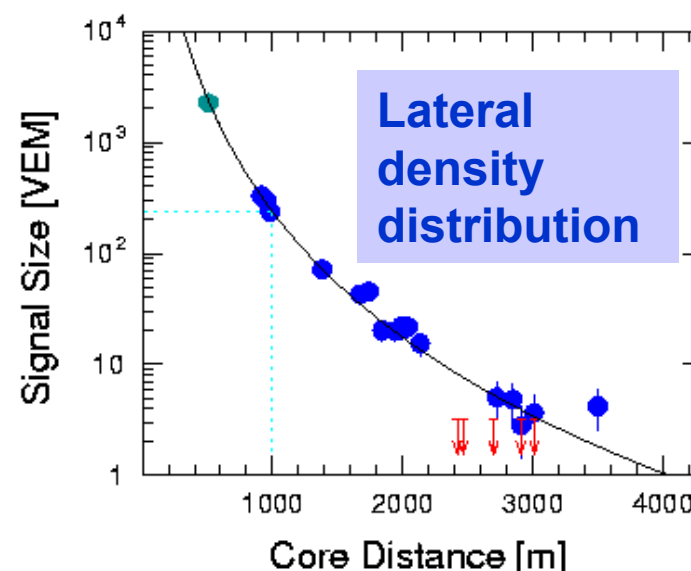
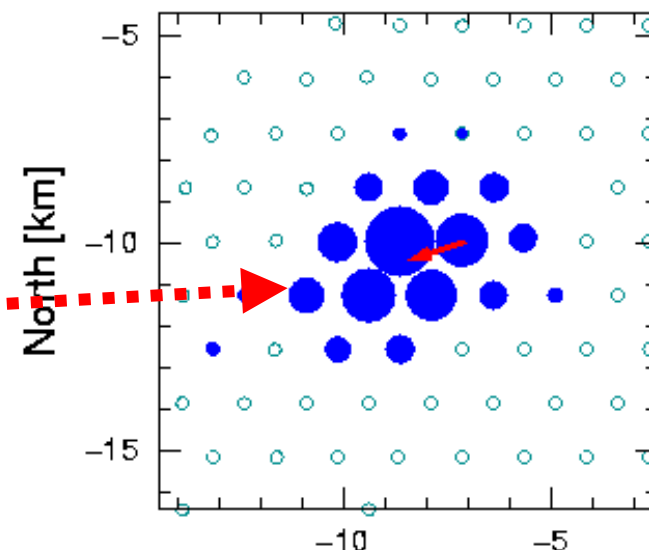
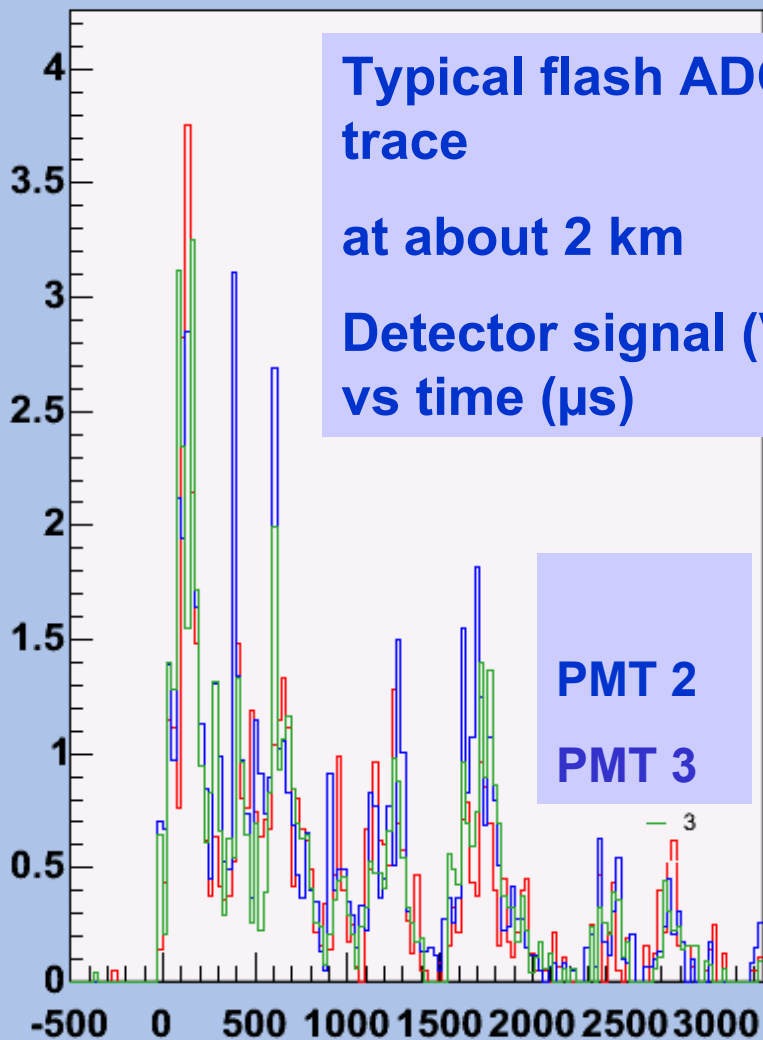
Rekonstrukcja w detektorze powierzchniowym

$\theta \sim 48^\circ$, ~ 70 EeV

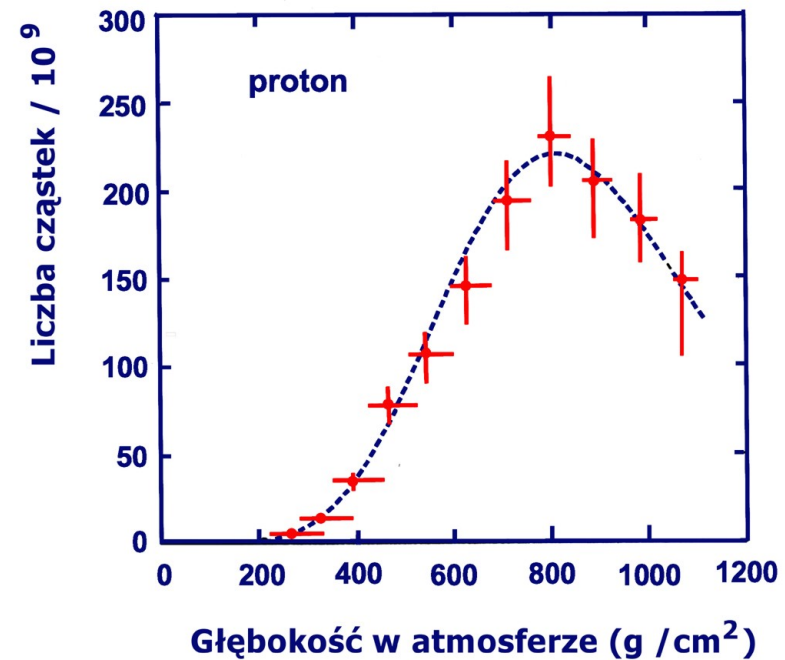
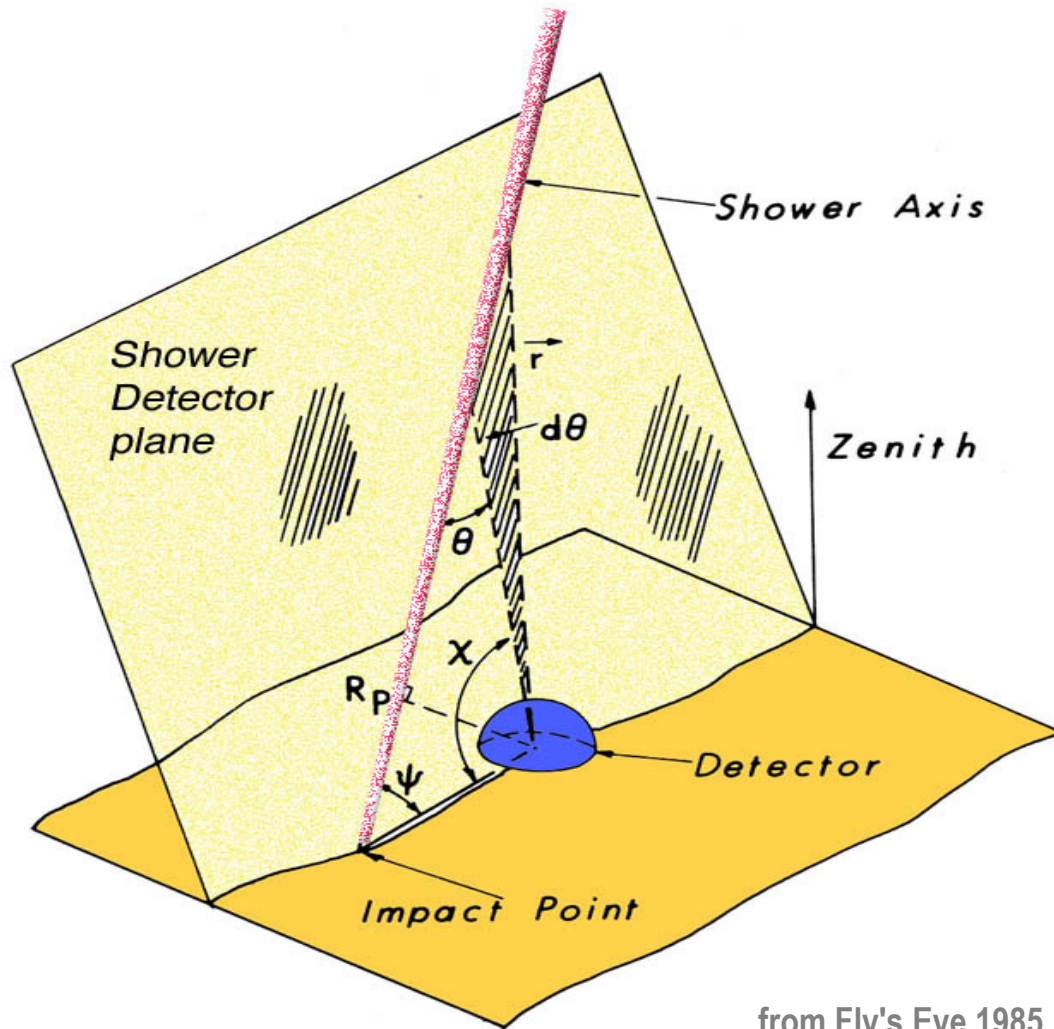
ID 762238

18 detectors triggered

Typical flash ADC trace
at about 2 km
Detector signal (VEM)
vs time (μs)

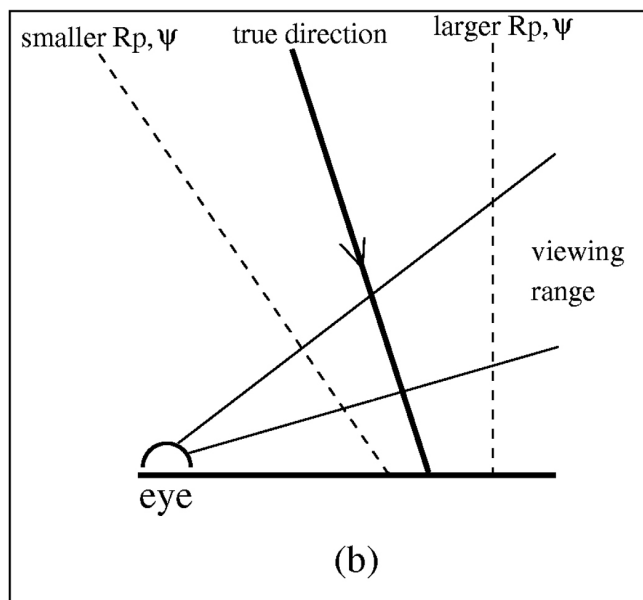
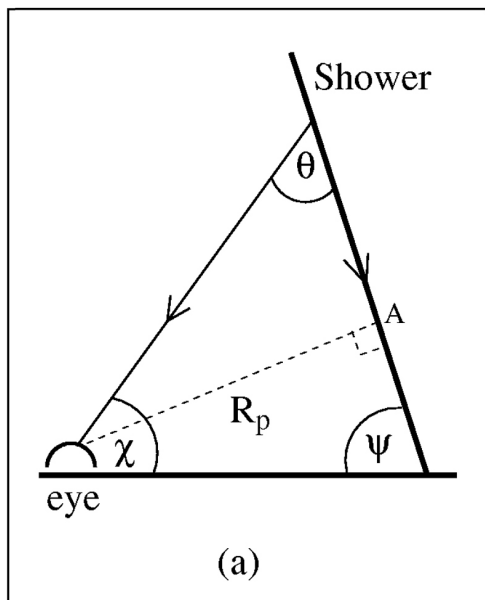


Detekcja metodą fluorescencyjną



from Fly's Eye 1985

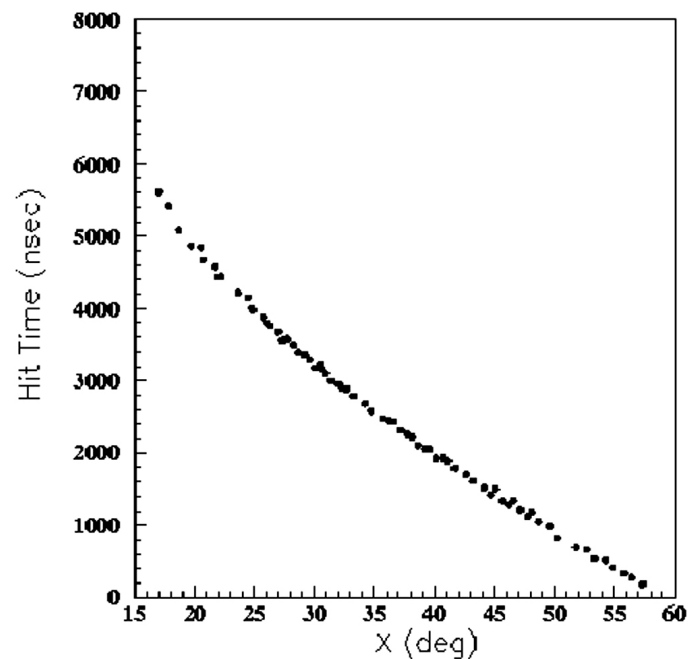
Rekonstrukcja geometryczna (mono)



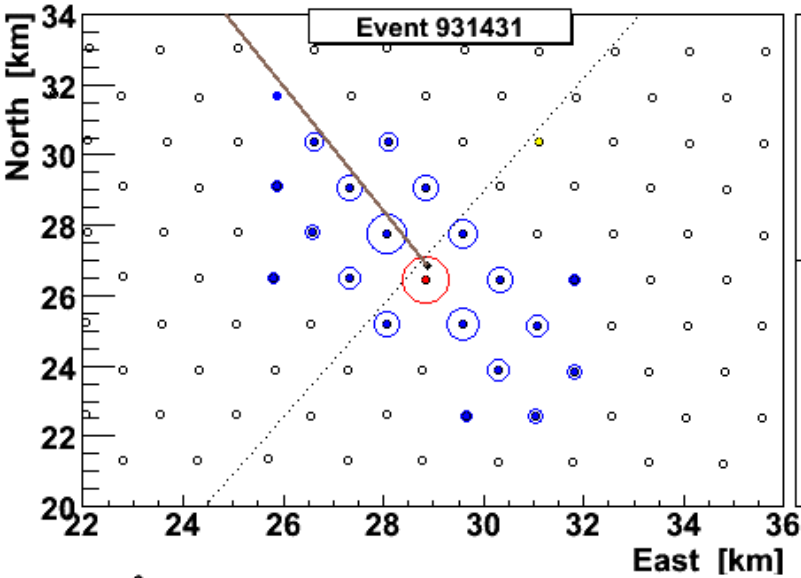
rekonstrukcja w płaszczyźnie SDP:

R_p, ψ

$$t_i = t_0 + R_p/c \tan((\chi_0 - \chi_i)/2)$$

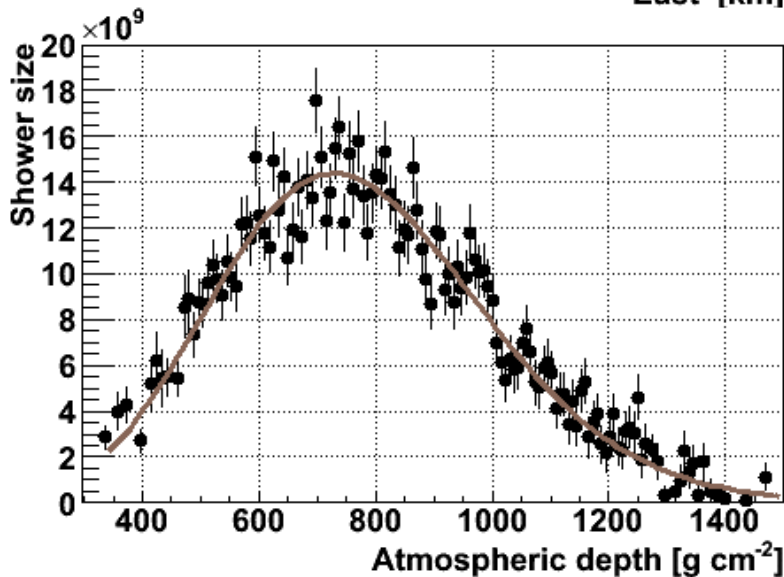


Rekonstrukcja hybrydowa



Core location
 Easting 468693 ± 59
 Northing 6087022 ± 80
 Altitude = 1390 m a.s.l.

Shower Axis
 $\theta = (62.3 \pm 0.2)^\circ$
 $\phi = (119.7 \pm 0.1)^\circ$



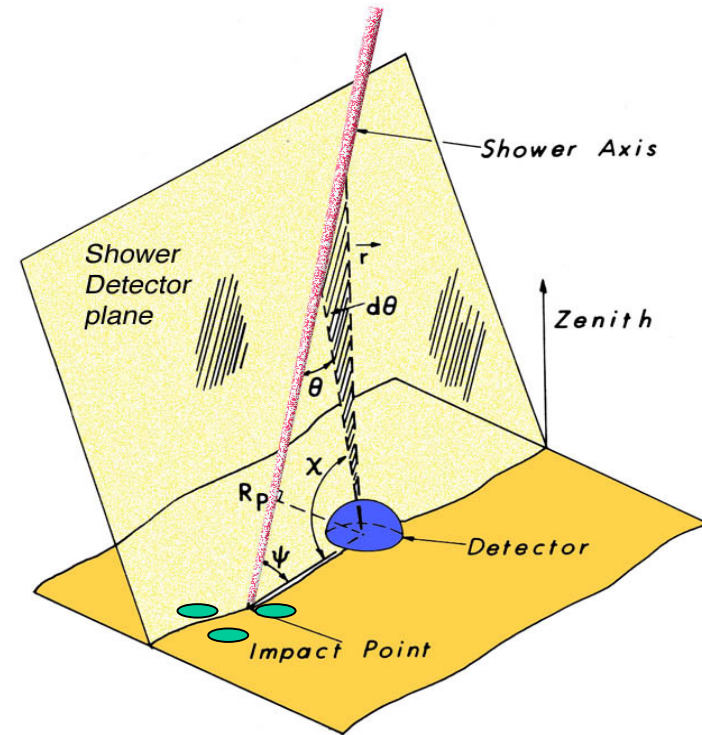
Energy Estimate:

$$X_{\text{max}} = (728 \pm 20) \text{ g cm}^{-2}$$

$$\chi^2/\text{dof} = 258 / 134$$

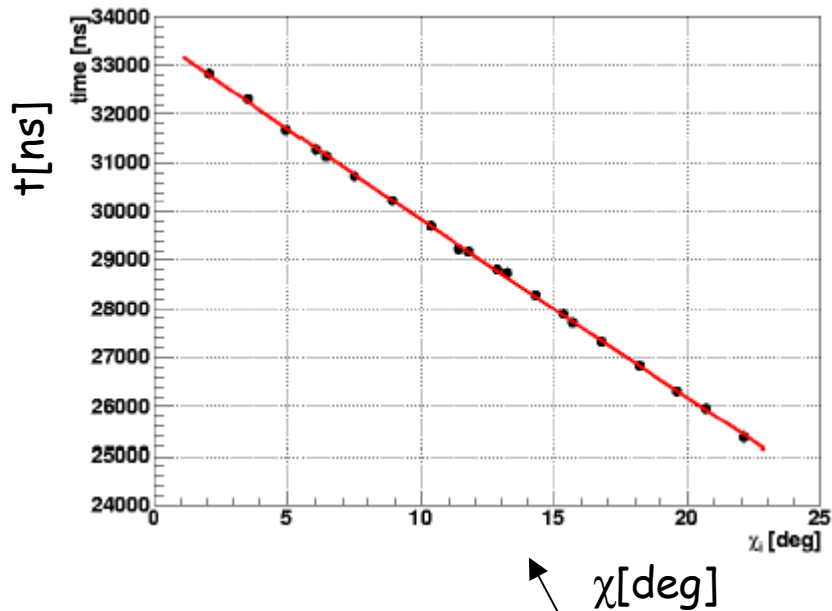
$$E_{\text{em}} = (21 \pm 5) \text{ EeV}$$

$$E_{\text{tot}} = (23 \pm 6) \text{ EeV}$$

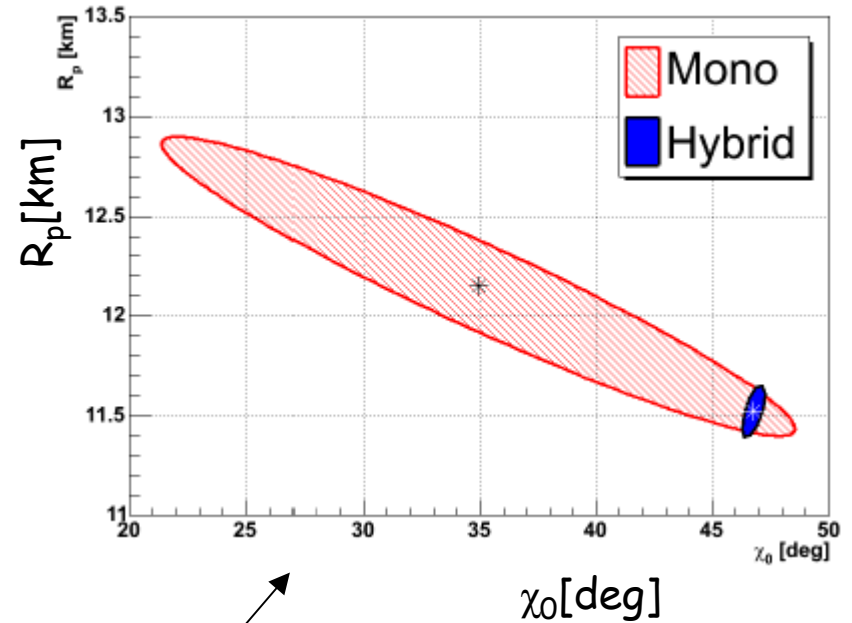


Precyzyjna rekonstrukcja geometrii przy użyciu czasu sygnałów w SD umożliwia dużą dokładność rekonstrukcji energii i X_{max}

Rekonstrukcja hybrydowa



mono: wyzn. 3 parametry



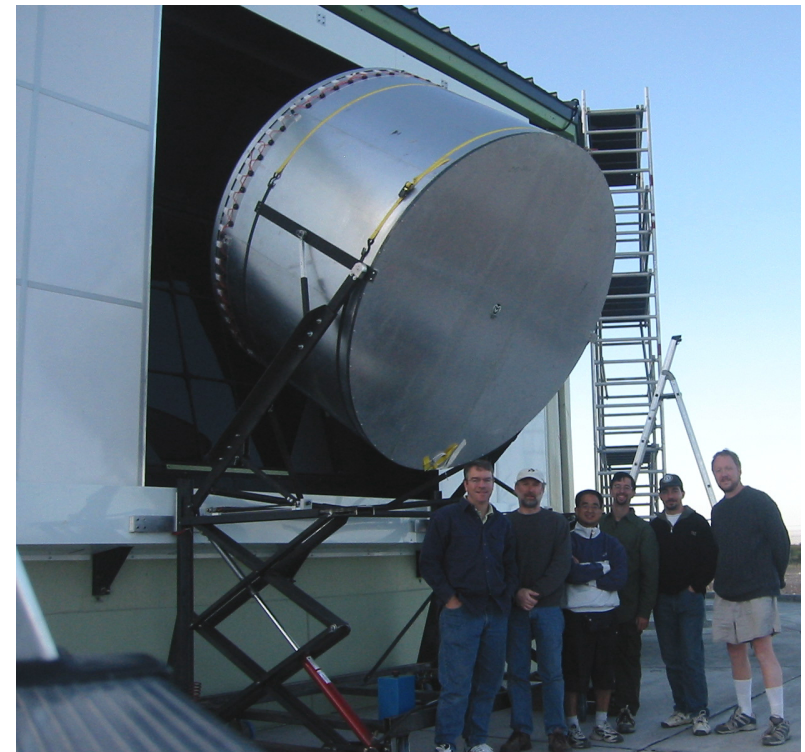
hybrid: T_0 z det. powierzchn.

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

Monitorowanie atmosfery i kalibracja



Centralny Laser



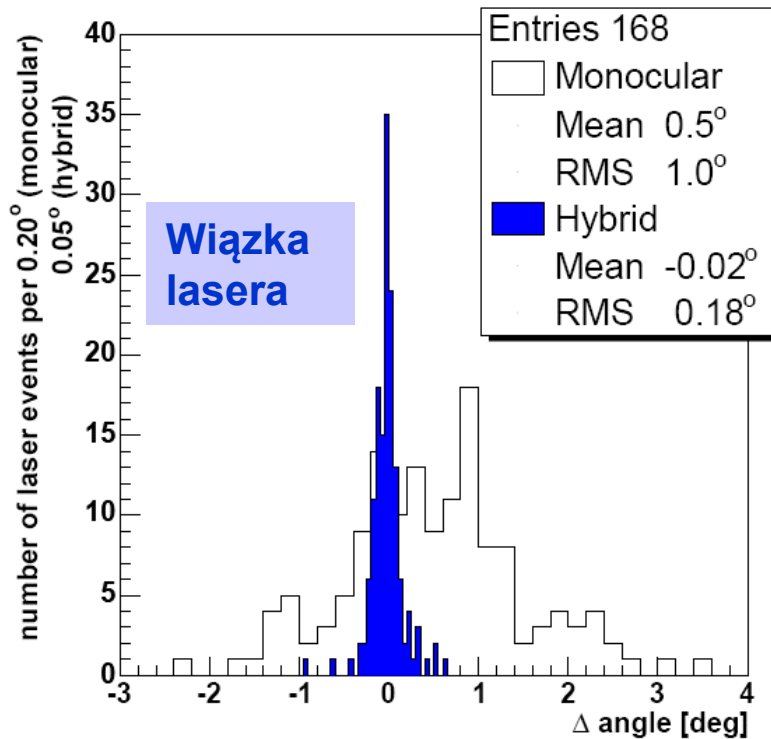
Kalibracja absolutna



**Lidar w każdym oku
fluorescencyjnym**

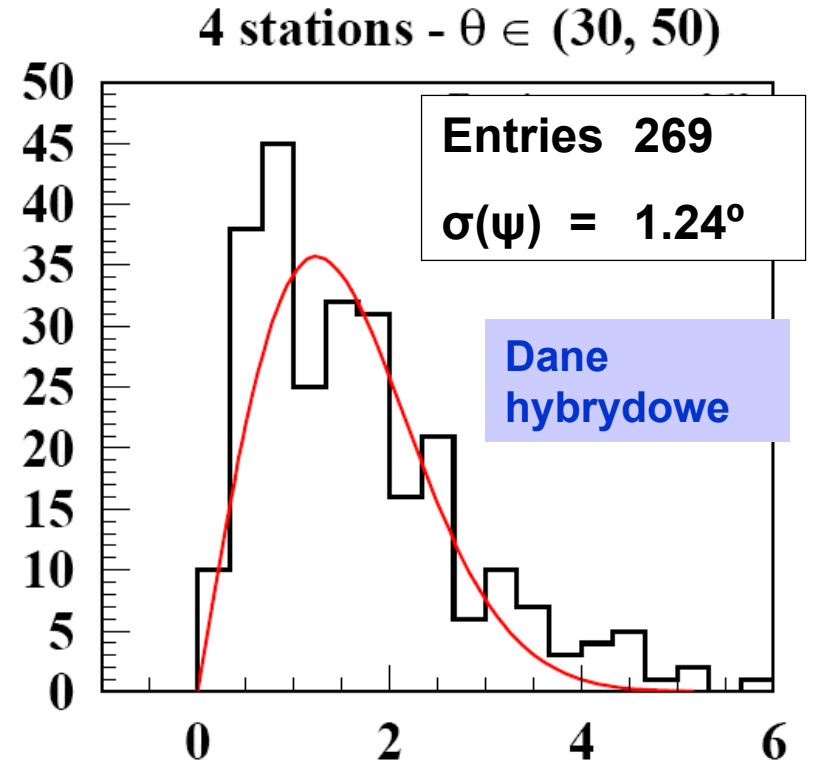
**Cylinder do równomier-
nego oświetlenia kamery**

Rozdzielczość kątowna



Różnica kąta prawdziwego i zmierzonego

Hybrydowa rozdzielczość
kątowna (68% CL)
 0.6 deg (średnio)

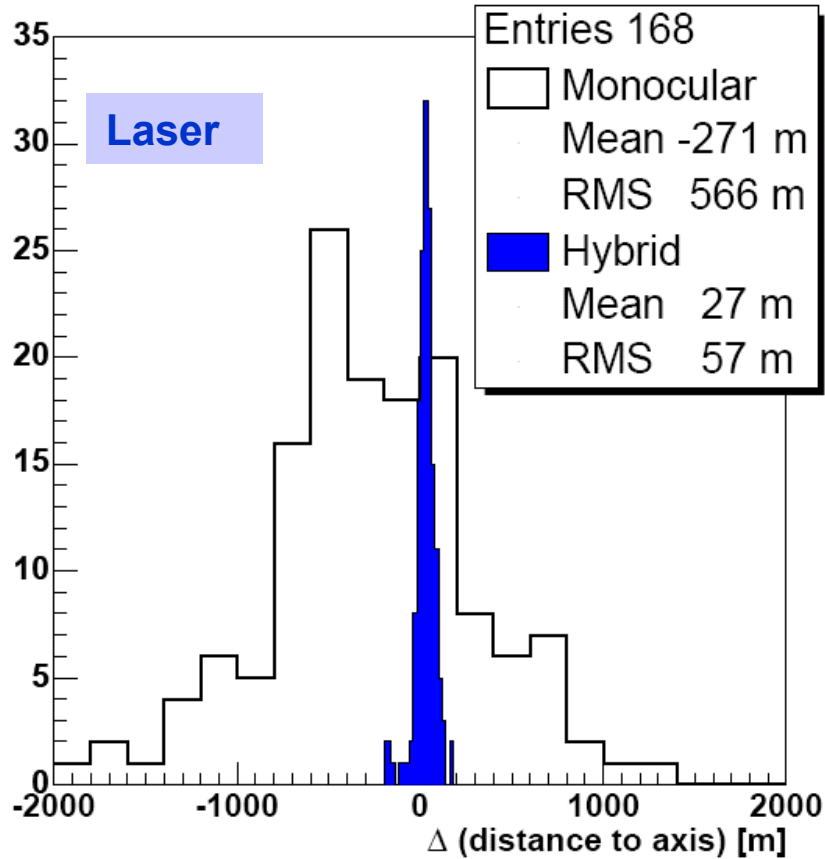


Różnica kąta wyznaczonego hybrydowo i SD

Rozdzielczość kątowna sieci powierzchniowej
(68% CL)

- $< 2.2^\circ$ dla 3 stacji ($E < 3 \text{ EeV}$, $\theta < 60^\circ$)
- $< 1.7^\circ$ dla 4 stacji ($3 < E < 10 \text{ EeV}$)
- $< 1.4^\circ$ dla 5 lub więcej stacji ($E > 10 \text{ EeV}$)

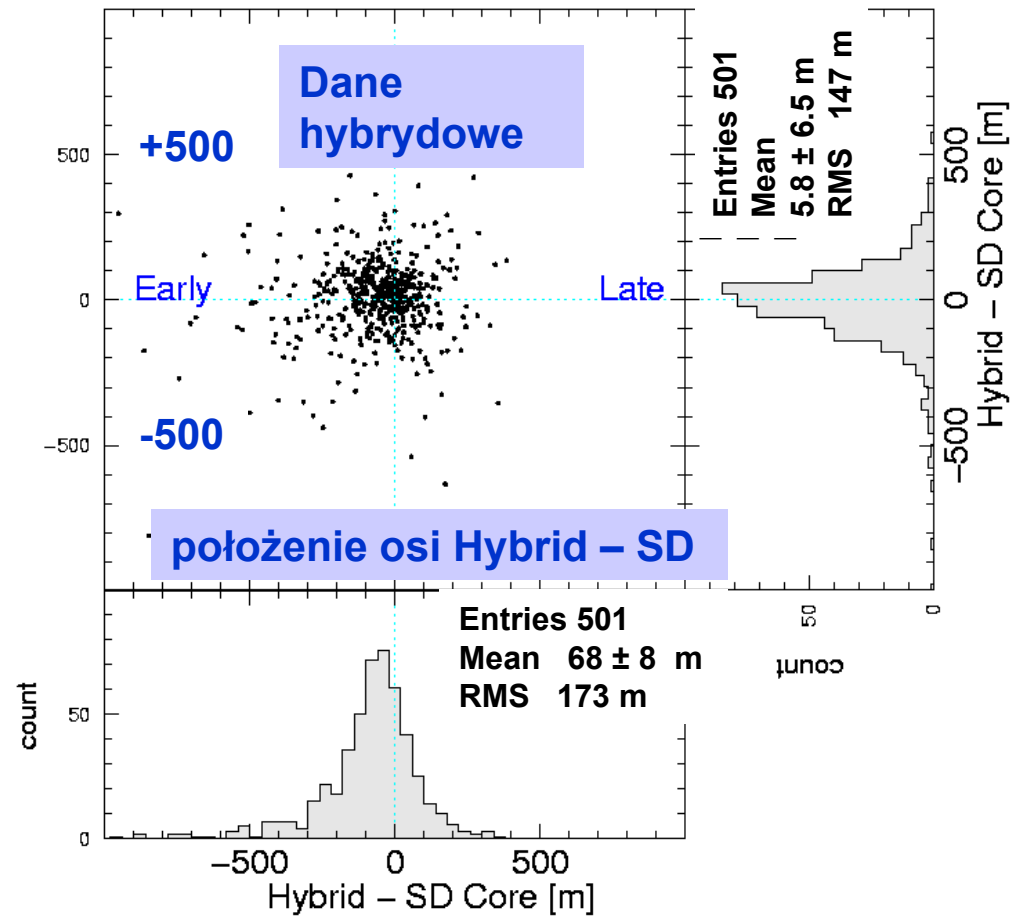
Dokładność wyznaczania osi



Położenie lasera – Hybrid i FD (m)

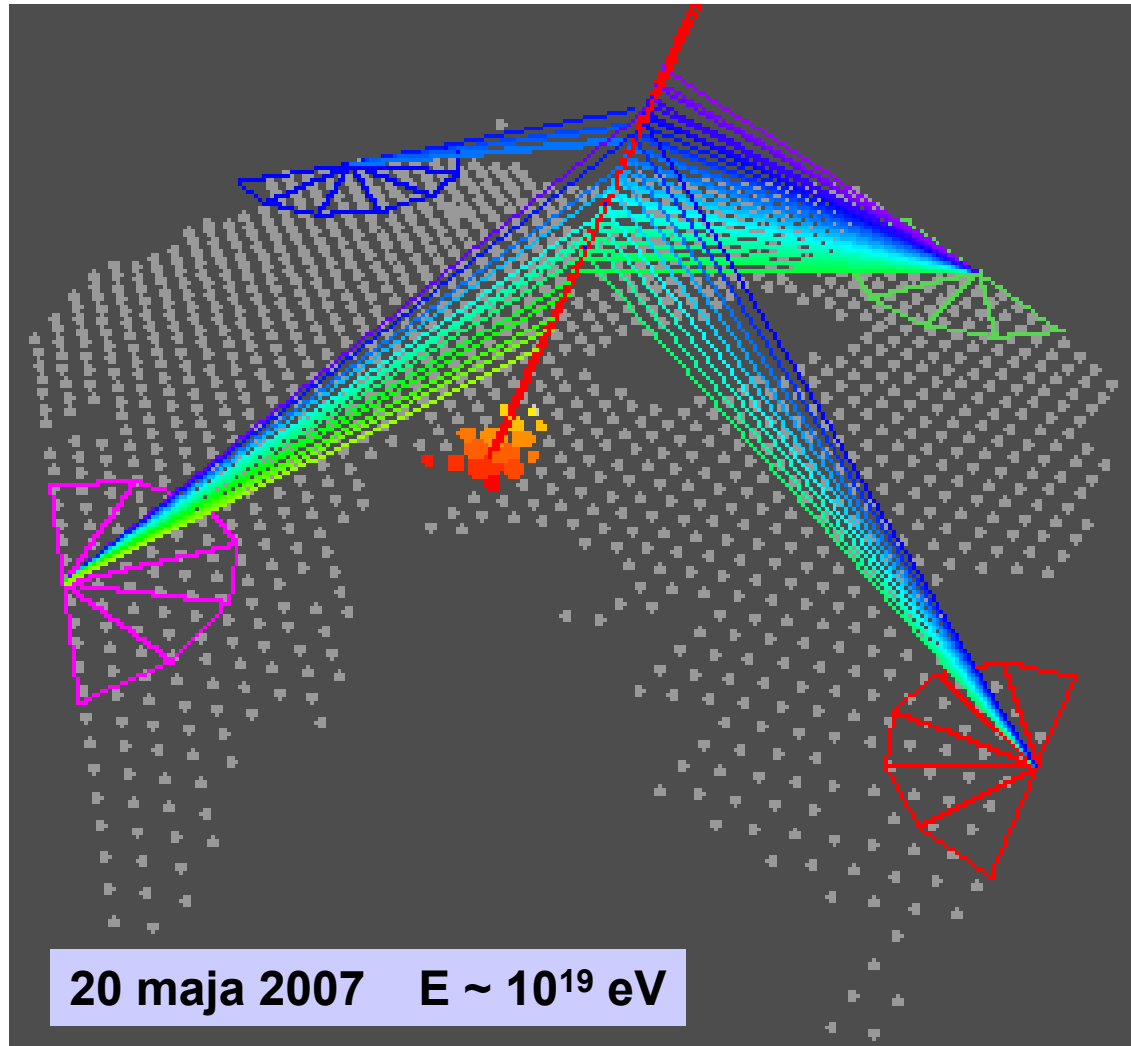
Rozdzielczość wyznaczenia osi

- Hybrid: < 60 m

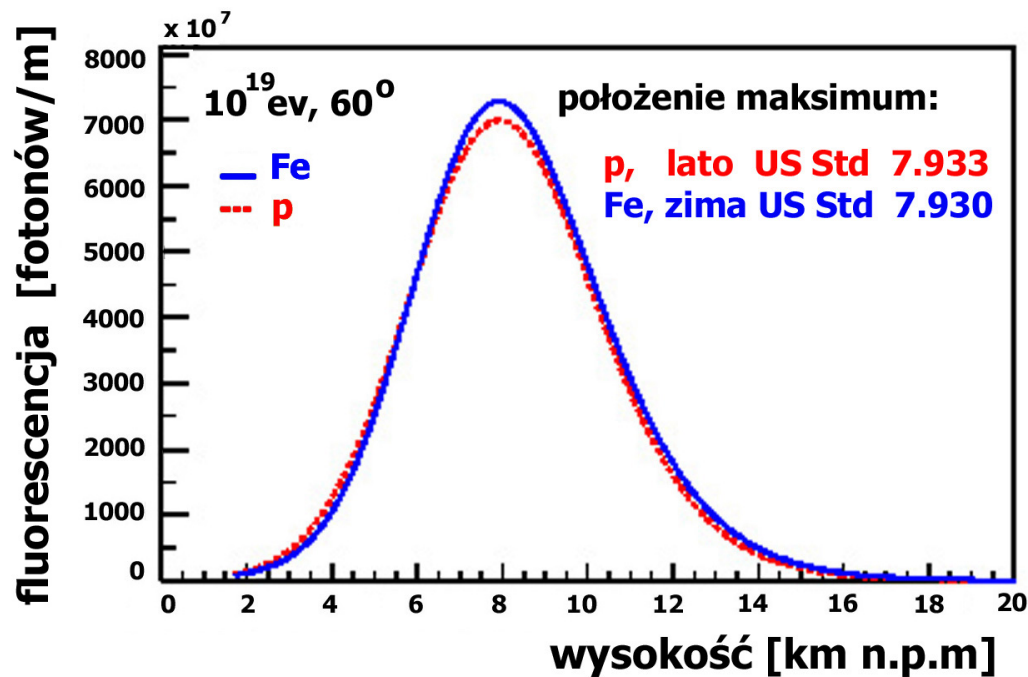
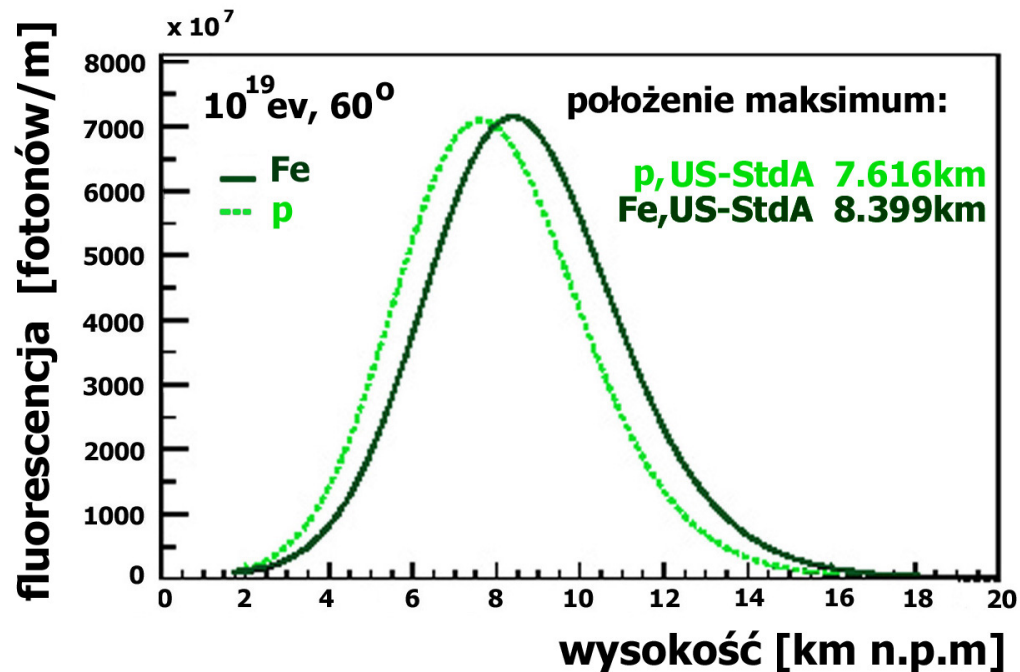


Sieć powierzchniowa: ~ 150 m

Pierwszy bok 4-krotnie stereoskopowy



Położenie maksimum pęku



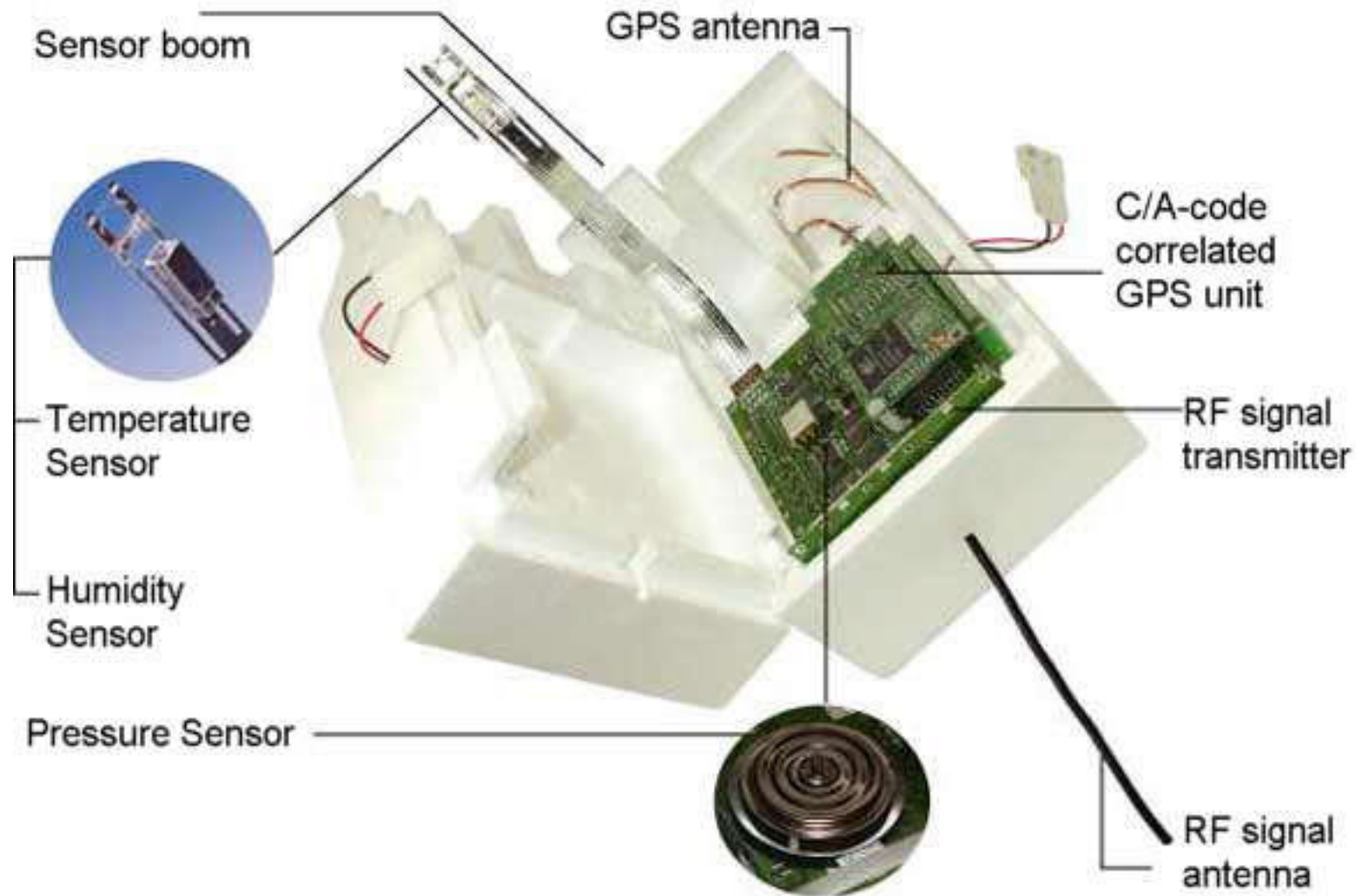
Potrzebny profil głębokości
atmosferycznej

$$X(h) = \int_h^\infty \rho(h) dh$$

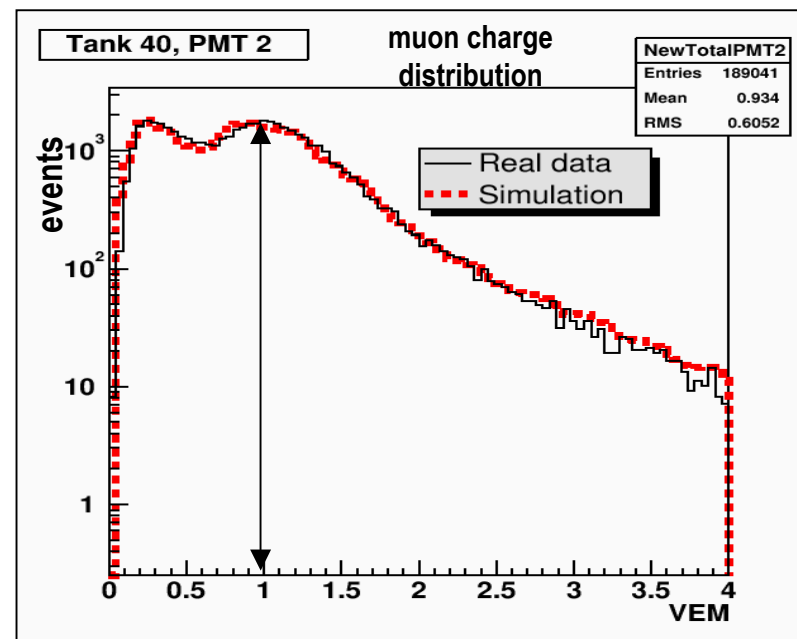
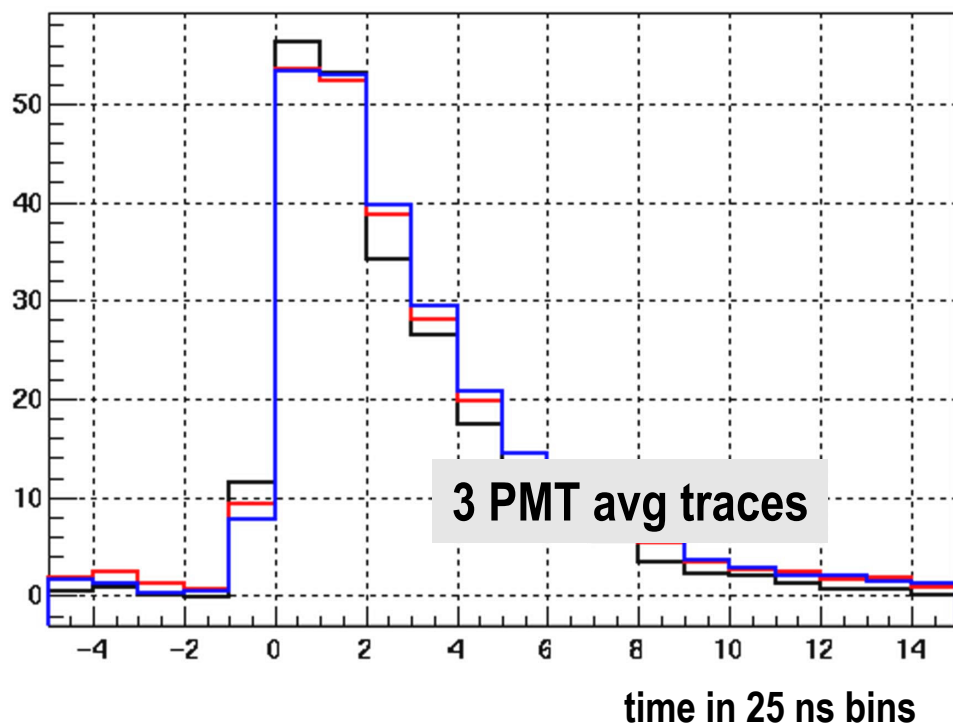
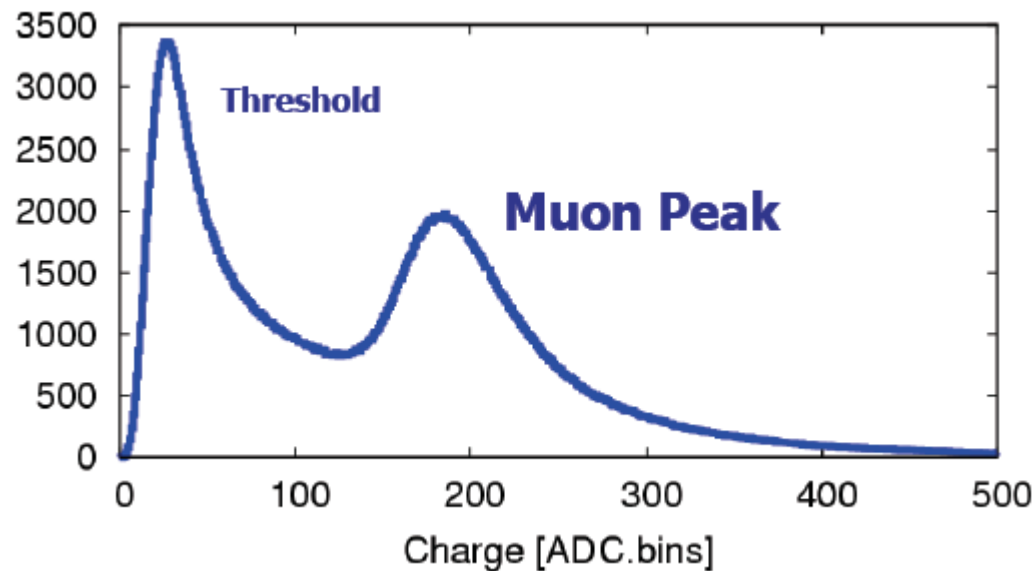
Radiosondaże atmosfery na terenie Obserwatorium Pierre Auger w Argentynie



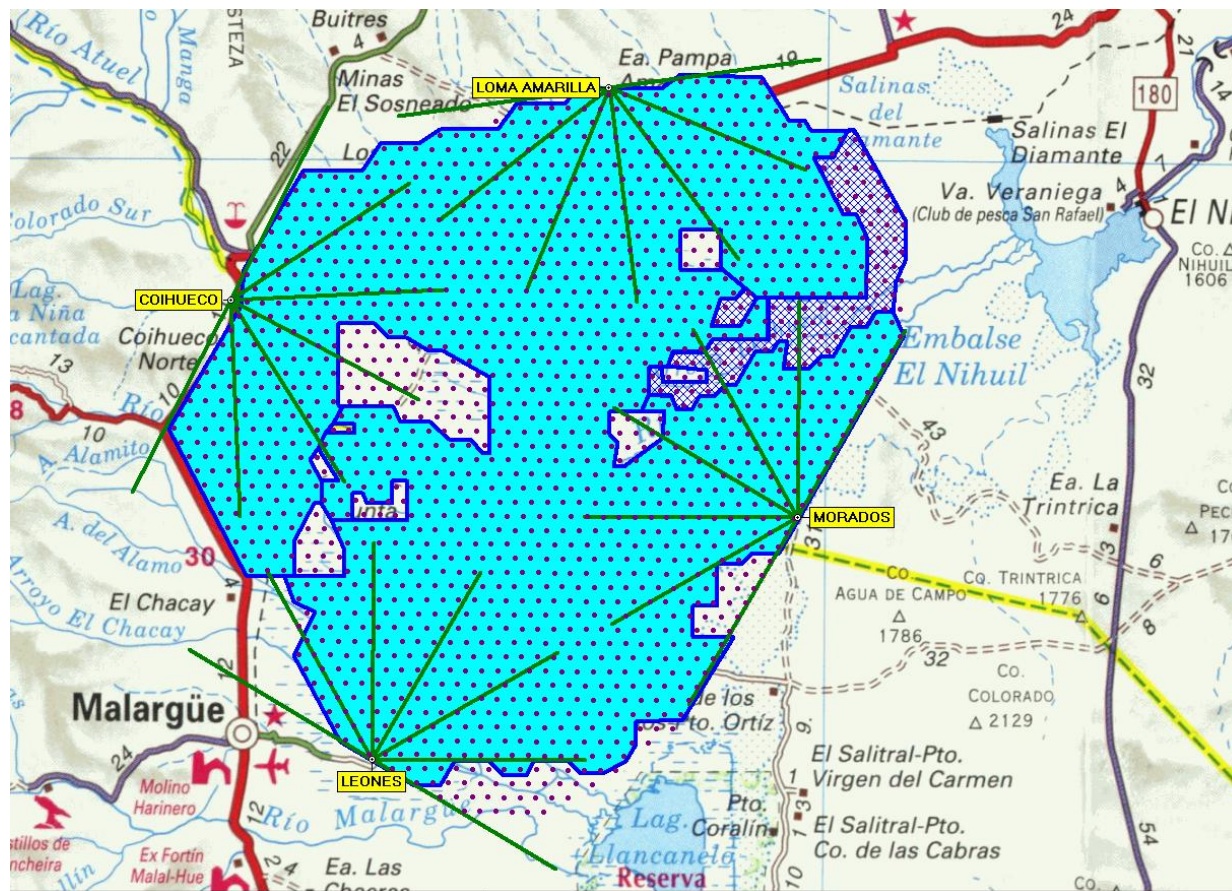
RadioSonda



Kalibracja detektorów czerenkowskich



Postęp budowy Obserwatorium



luty 2008

1601 rozmieszczonych
1572 napełnionych
1520 zbierających dane

Wszystkie 4 budynki det.
fluorescencyjnego ukończone,
każdy z 6 teleskopami

Ostatni detektor powierzchniowy



Obserwatorium Pierre Auger w Google Earth