

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

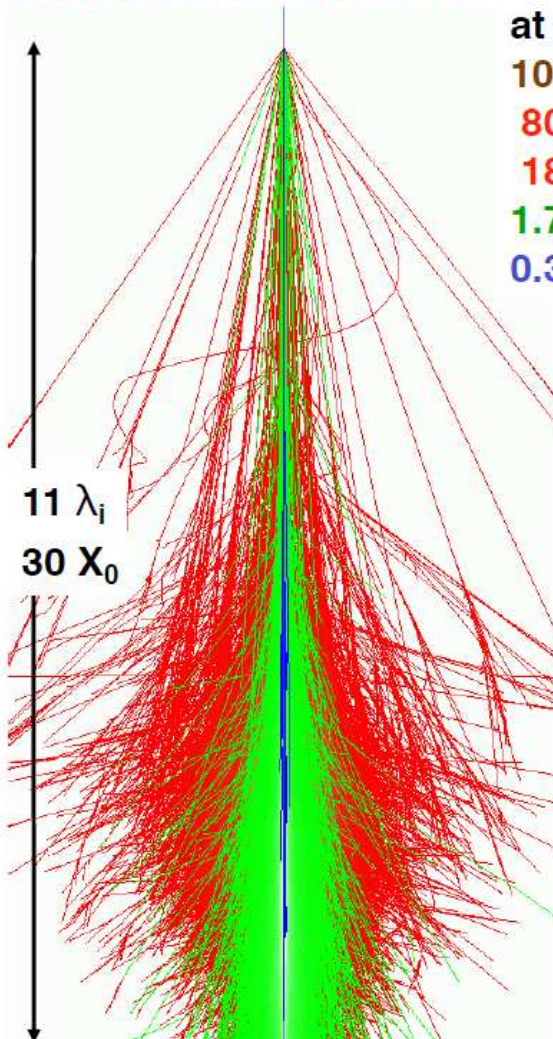
Wykład X

- Eksperyment AUGER
- Projekt JEM-EUSO
- Radiowa detekcja pęków atmosferycznych

Promieniowanie kosmiczne

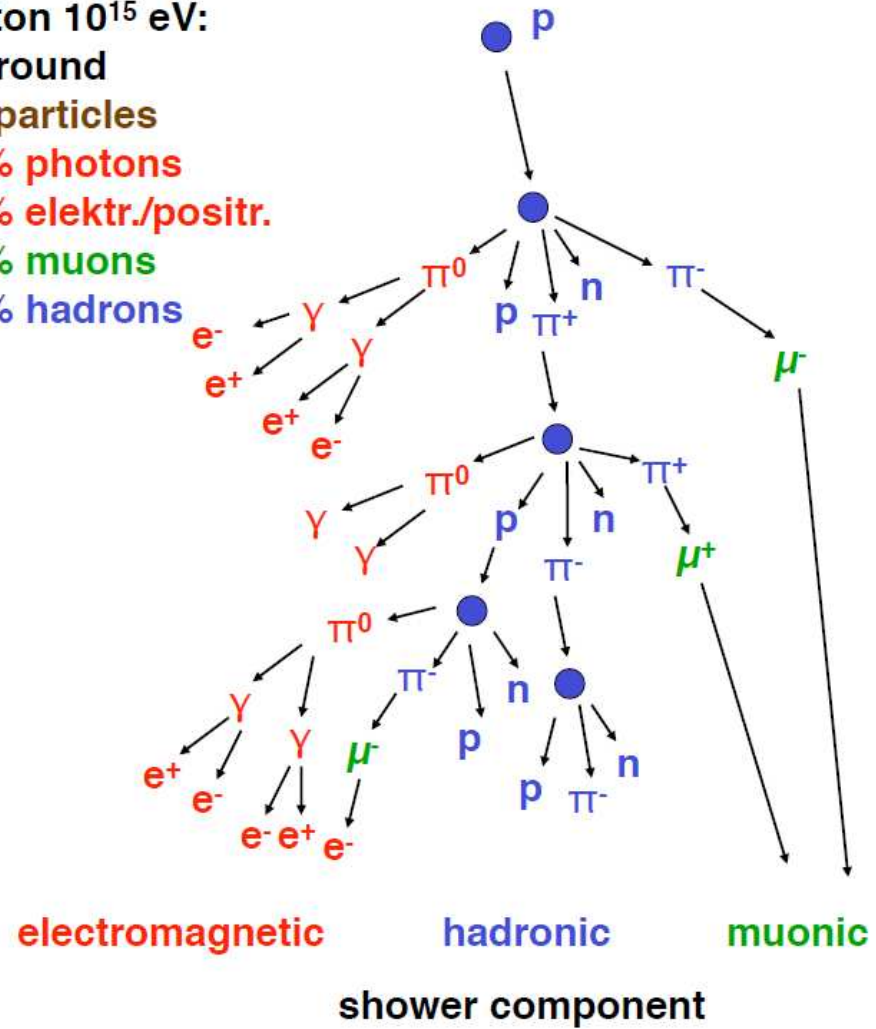
Wielkie pęki atmosferyczne

Extensive air showers



Proton 10^{15} eV:
at ground

10⁶ particles
80% photons
18% elektr./positr.
1.7% muons
0.3% hadrons



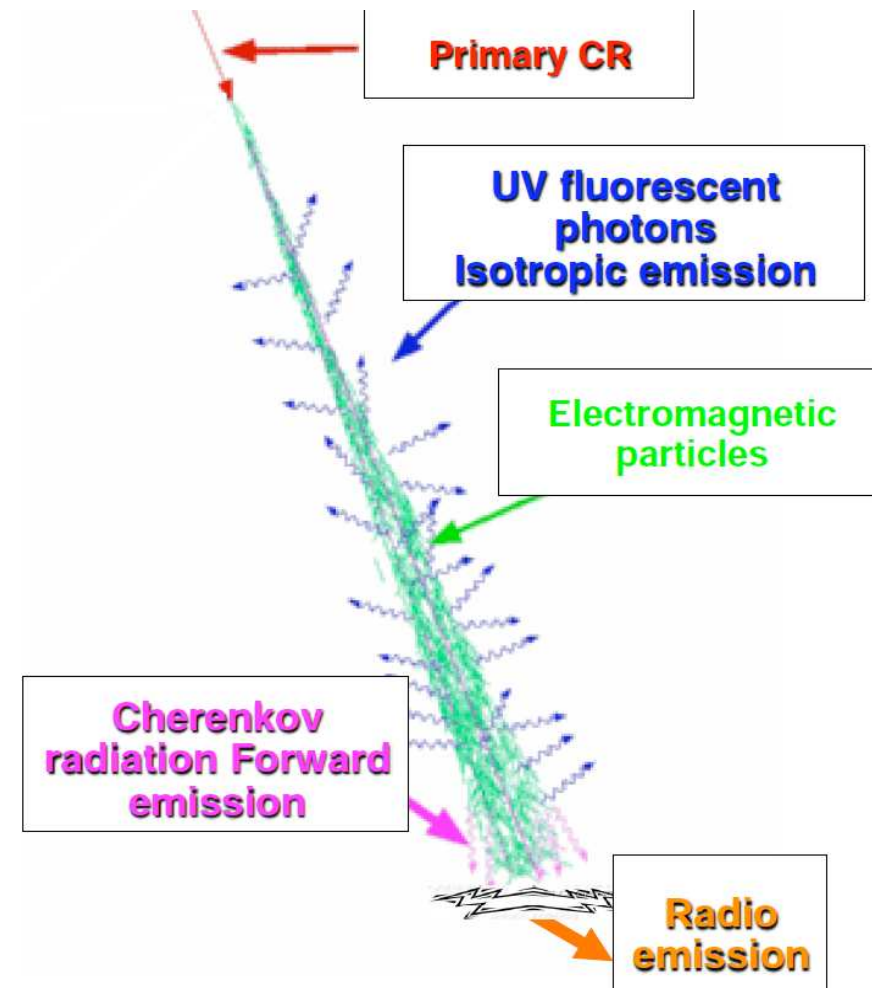
Wielkie pęki atmosferyczne

Metody detekcji

Pęki atmosferyczne możemy badać mierząc:

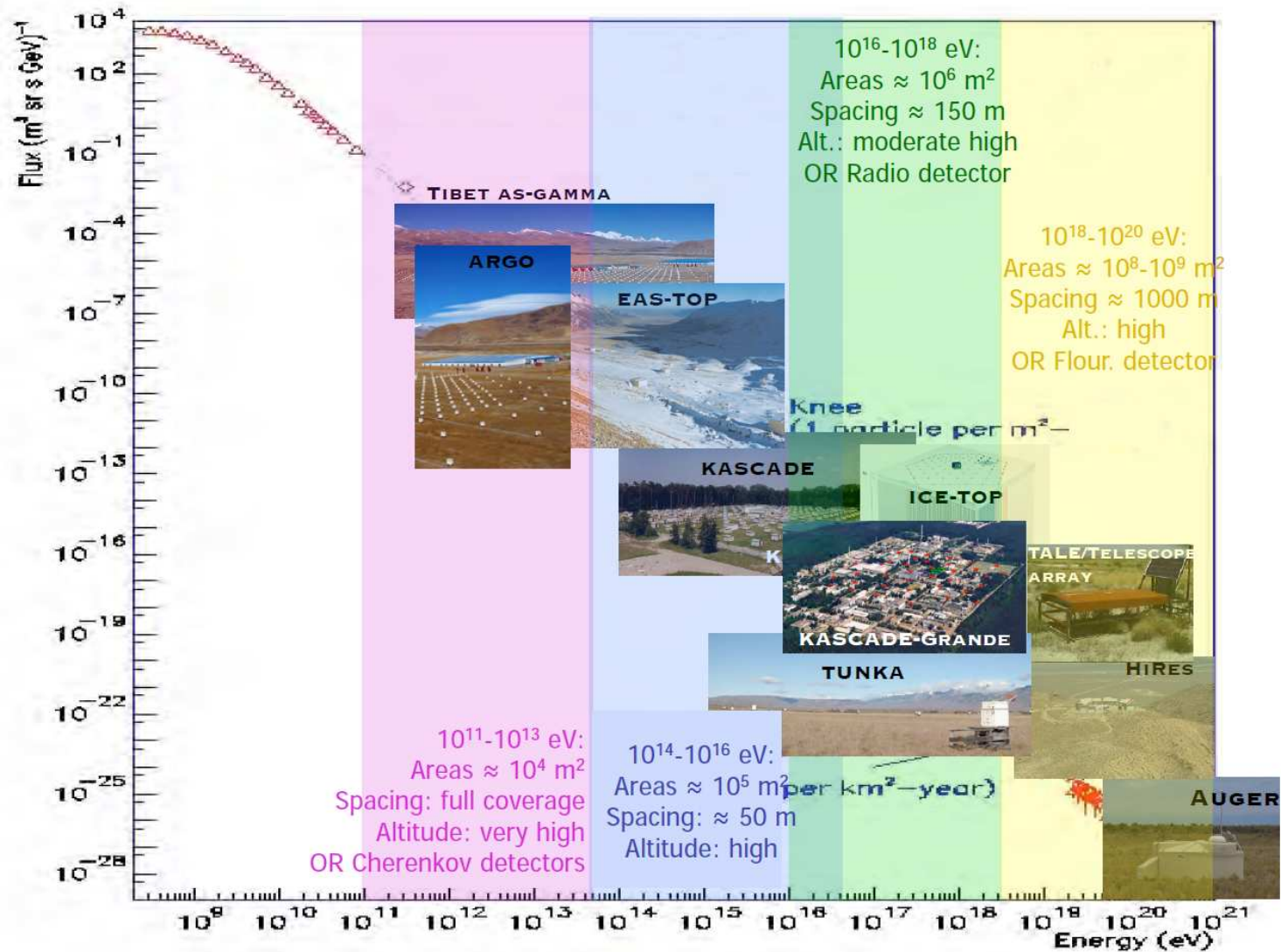
- cząstki naładowane na powierzchni Ziemi głównie elektrony i miony
- promieniowanie Czerenkowa produkowane przez elektrony w rdzeniu
- fluorescencje cząsteczek atmosfery wzbudzanych przez rozwój kaskady
- emisję radiową (!)

Różne eksperymenty stosują różne podejścia...

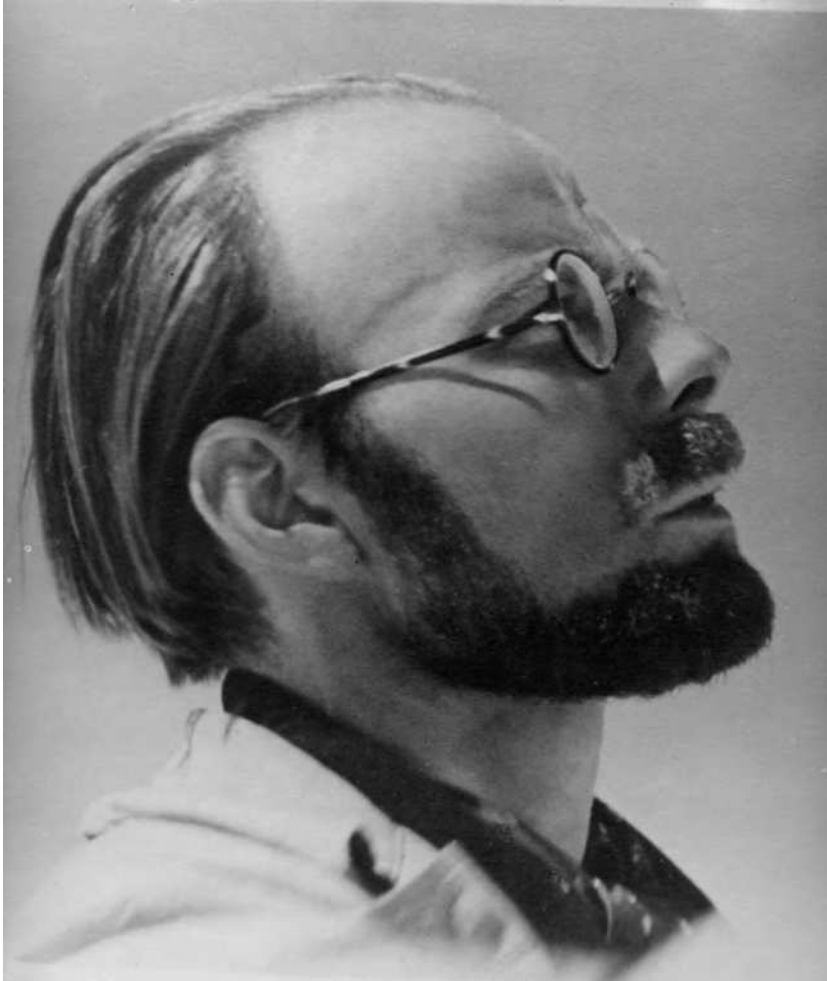


Wielkie pęki atmosferyczne

Eksperymenty



AUGER



Pierre Auger

Fizyk francuski (1899-1993).

W roku 1930 rozpoczął badania kaskad promieniowania kosmicznego.

Zainstalował sieć liczników Geigera z układem do pomiaru koincydencji na dachach Instytutu Curie w Paryżu.

Pierre Auger Observatory



AUGER

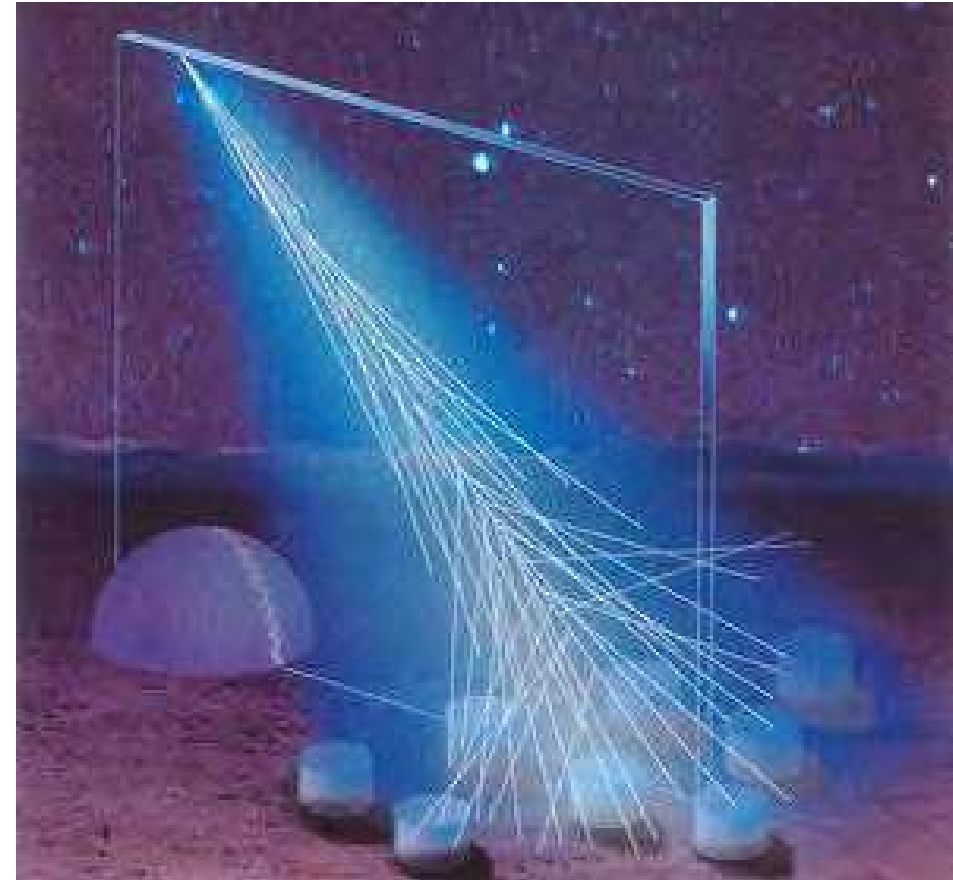
Obserwatorium Pierre Auger

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

- widmo energii
poszukiwanie efektu GZK
- skład
lekkie czy ciężkie jądra
- rozkład kierunkowy
poszukiwanie źródeł

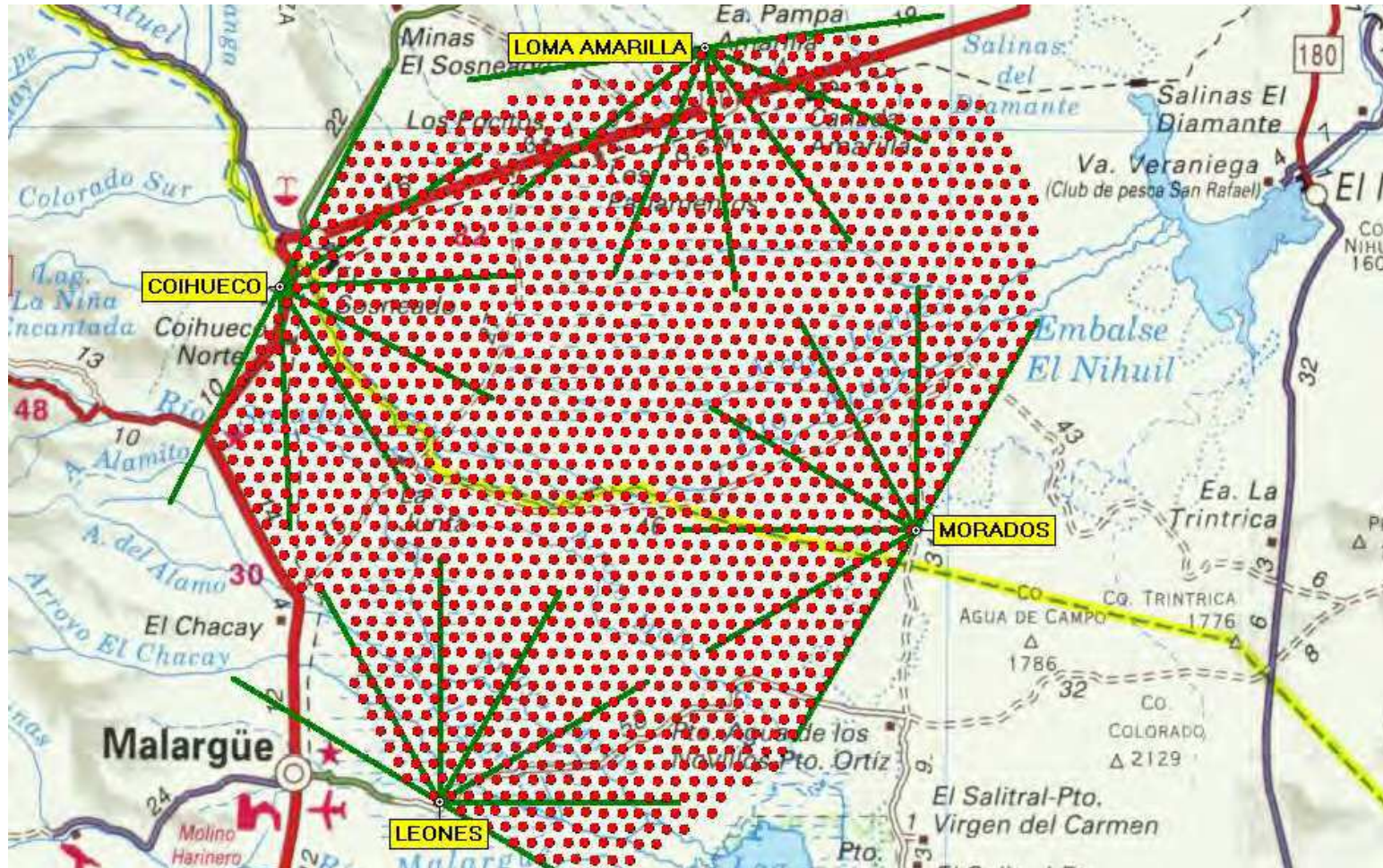
Duża statystyka dzięki bardzo dużej powierzchni detektora.

Duża dokładność dzięki hybrydowej metodzie detekcji: cząstki naładowane + fluorescencja



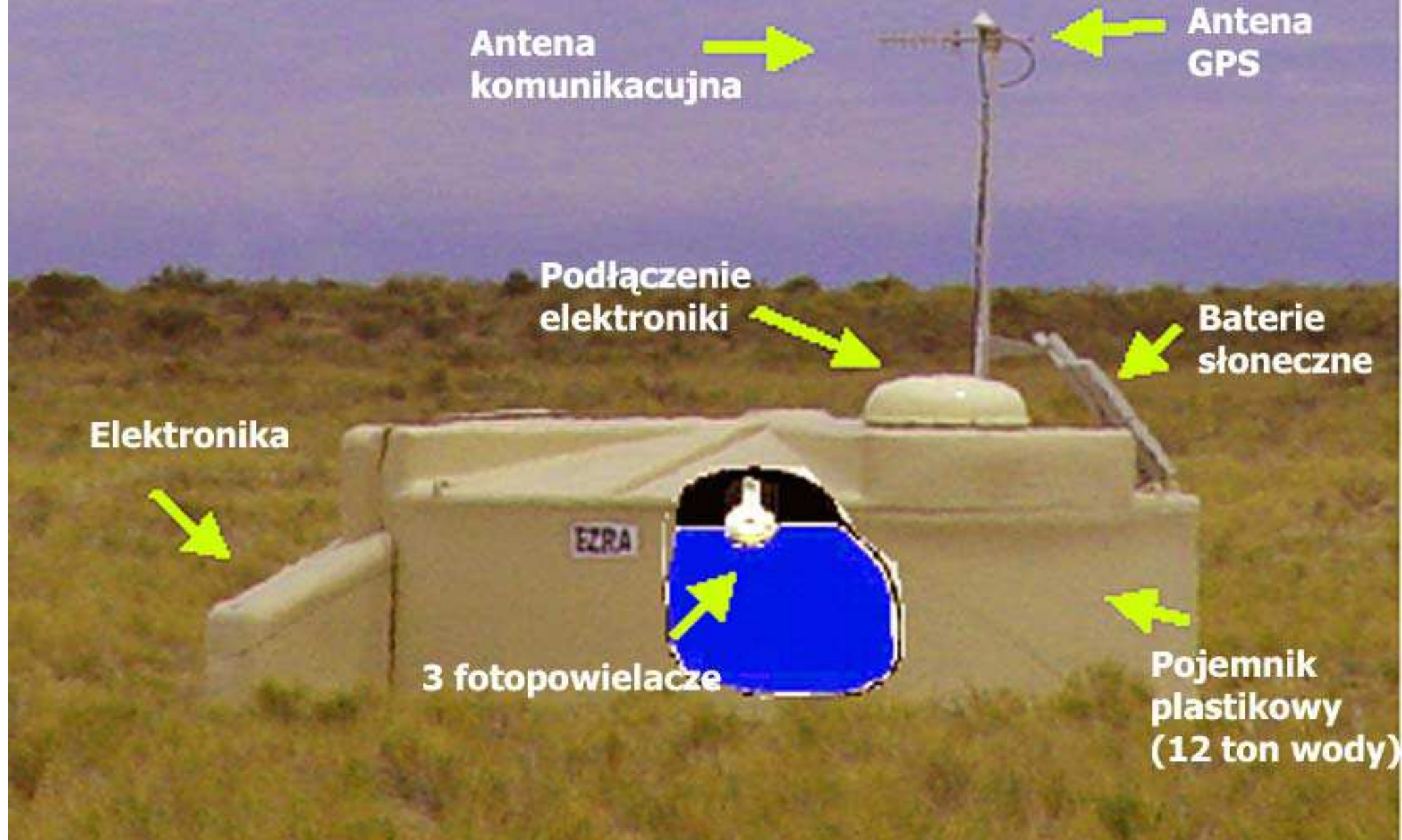
AUGER

1600 detektorów powierzchniowych rozstawionych co 1.5 km na obszarze 3000 km²



24 teleskopy mierzące światło fluorescencyjne zgrupowane w 4 obserwatoriach

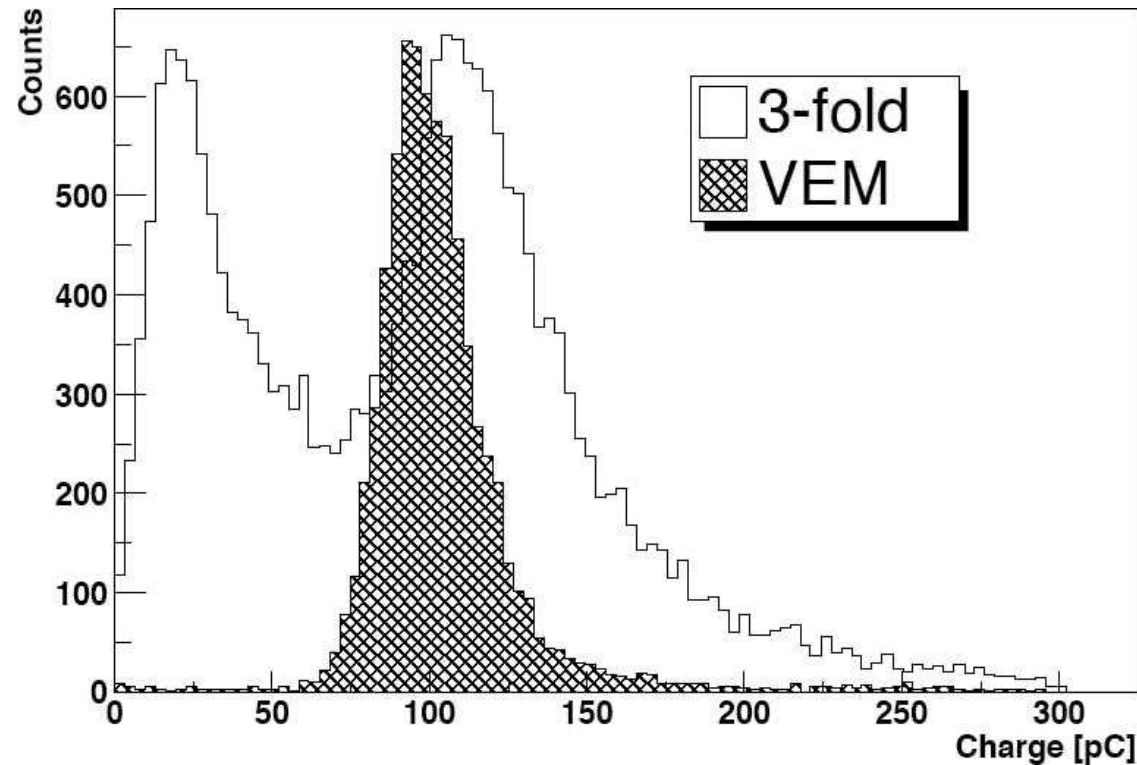
Detektor powierzchniowy AUGER: pomiar promieniowania Czereknowa w wodzie



AUGER

Kalibracja

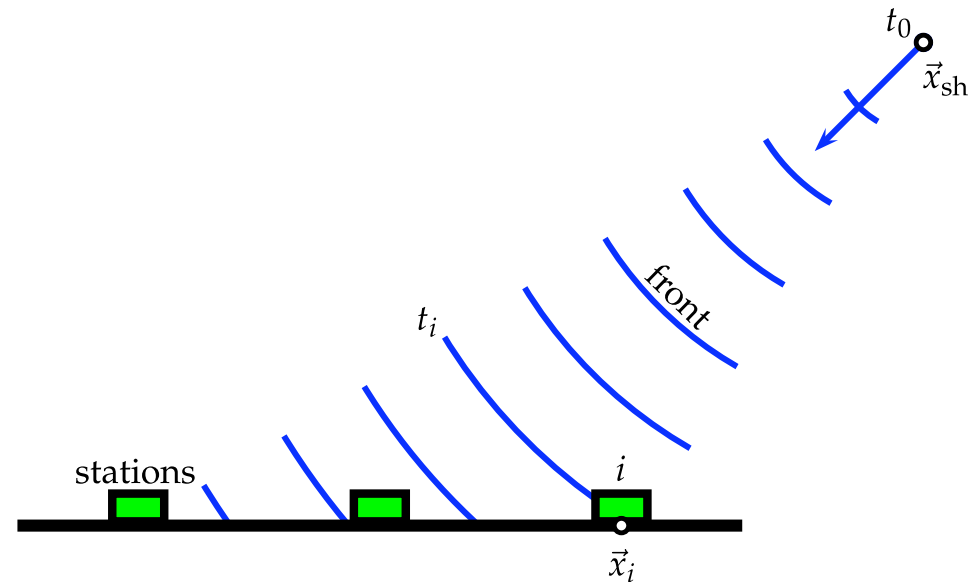
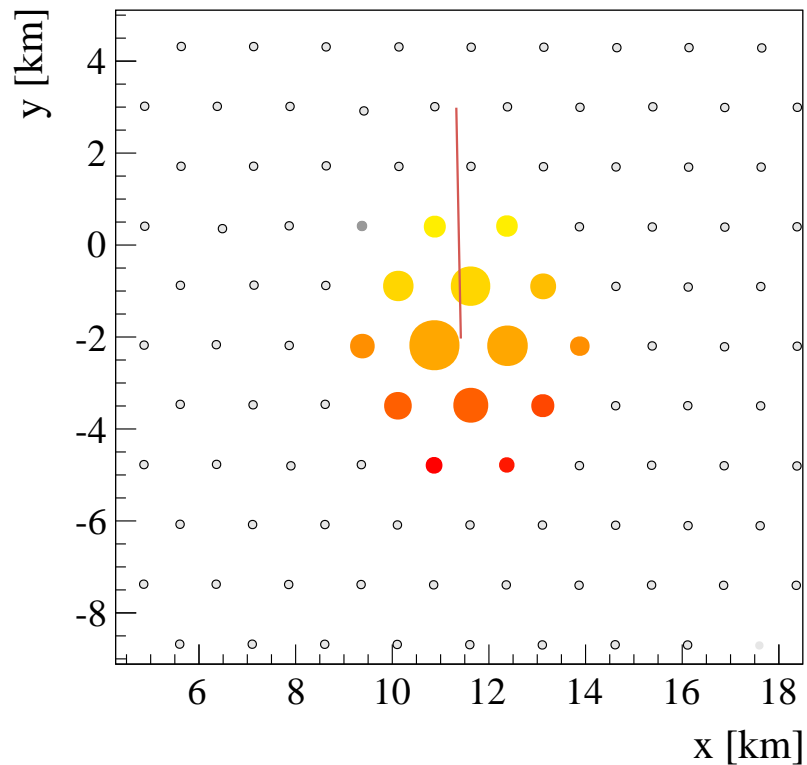
Kalibracja detektorów powierzchniowych opiera się na pomiarze mionów kosmicznych. Dwa tryby pomiaru: koincydencja 3 fotopowielaczy lub wyzwalenie zewnętrznym scntnylatorem. W obu przypadkach wyraźnie widoczne maksimum VEM (Very Energetic Muon)



AUGER

Detektor powierzchniowy

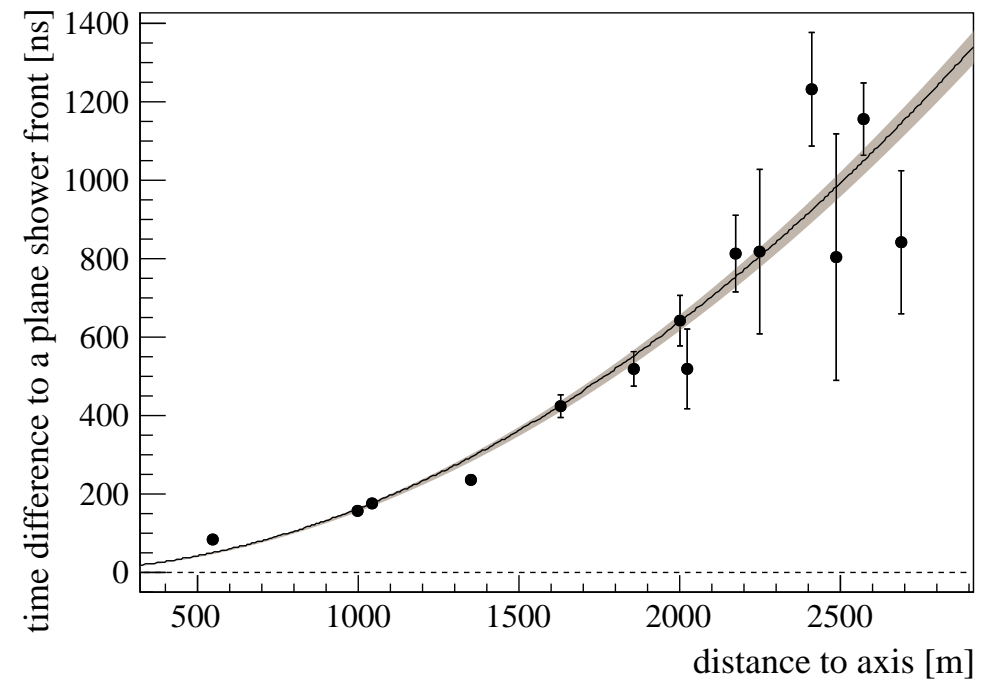
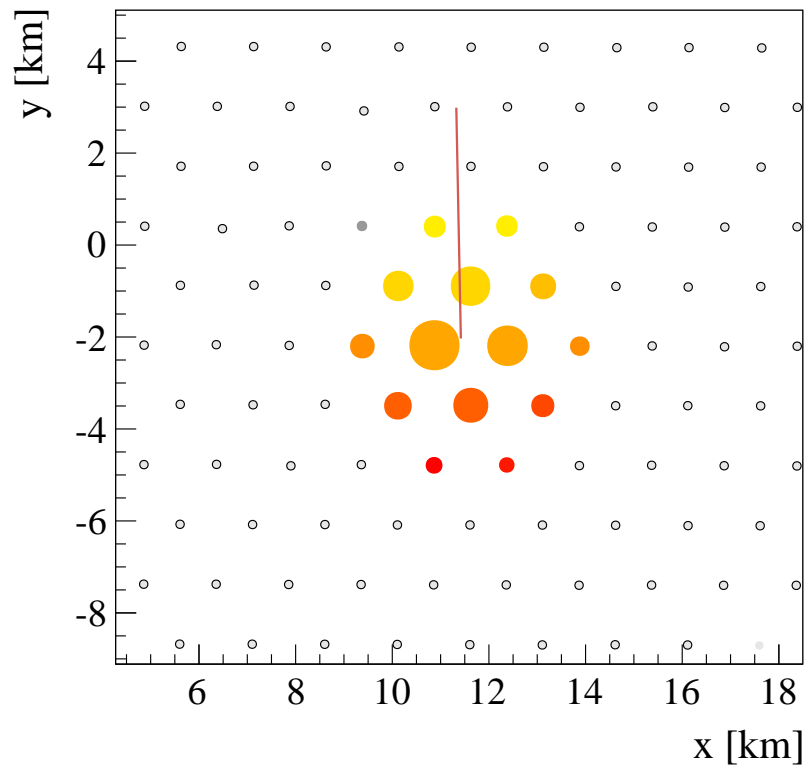
Detektory powierzchniowe mierzą liczbę cząstek (sygnał w porównaniu z VEM) i czas ich przejścia. Profil czasowy pozwala na rekonstrukcję kierunku.



AUGER

Detektor powierzchniowy

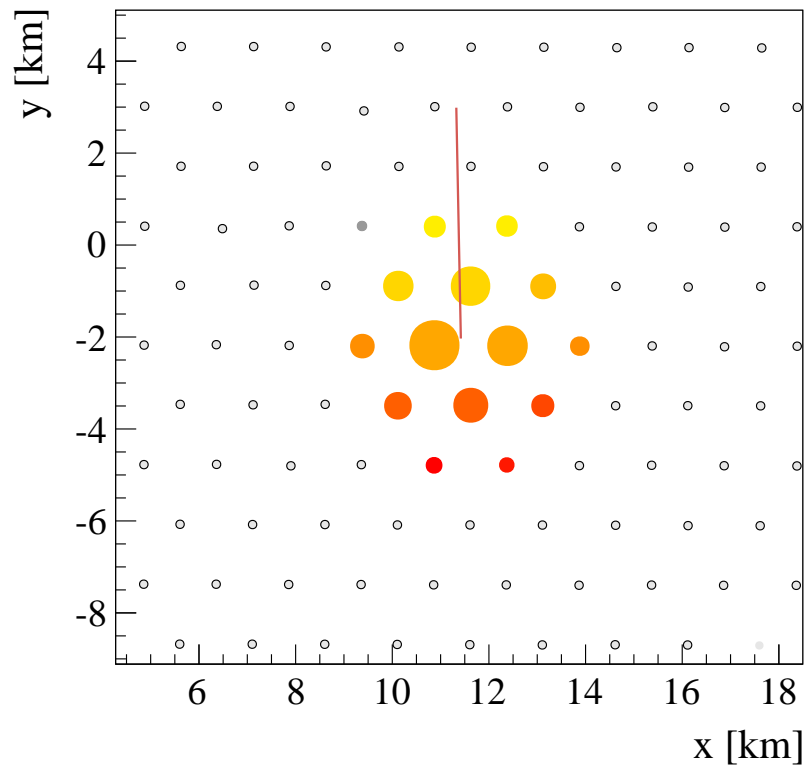
Detektory powierzchniowe mierzą liczbę cząstek (sygnał w porównaniu z VEM) i czas ich przejścia. Profil czasowy pozwala na rekonstrukcję kierunku.



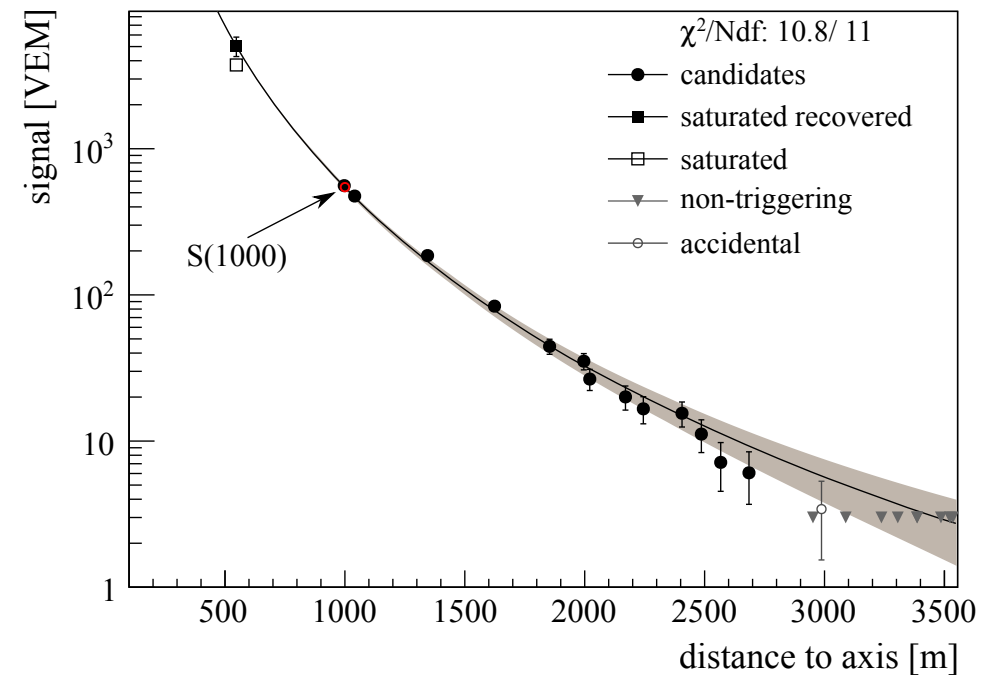
AUGER

Detektor powierzchniowy

Detektory powierzchniowe mierzą liczbę cząstek (sygnał w porównaniu z VEM) i czas ich przejścia. Profil poprzeczny (+kąąt) na oszacowanie energii.



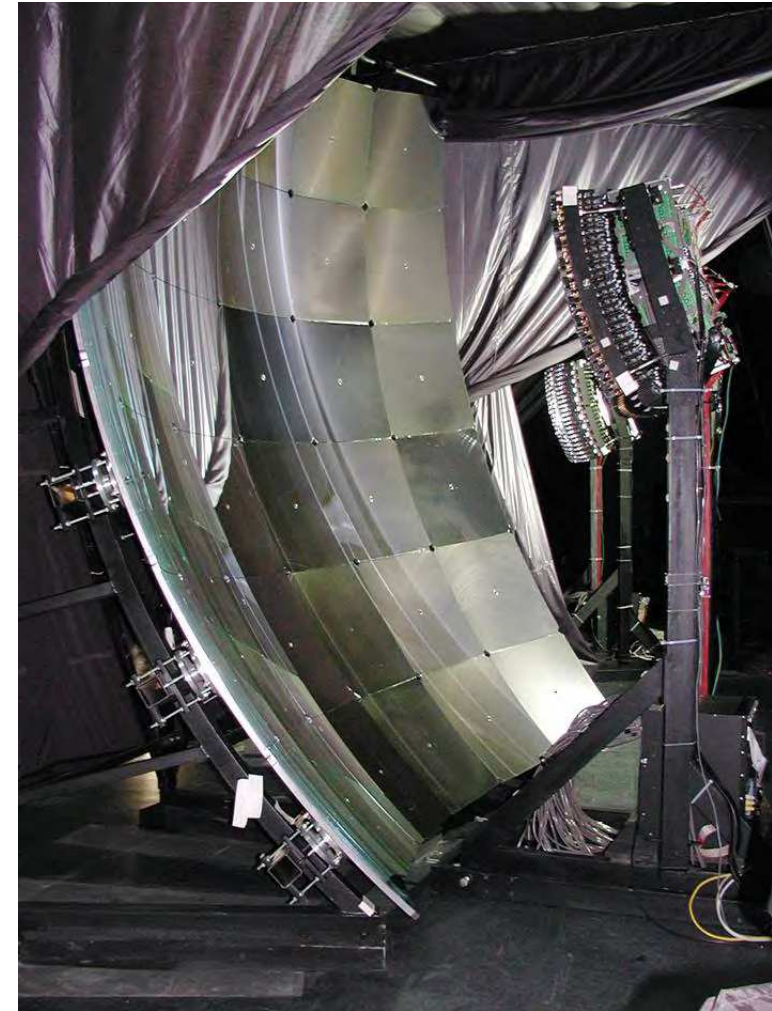
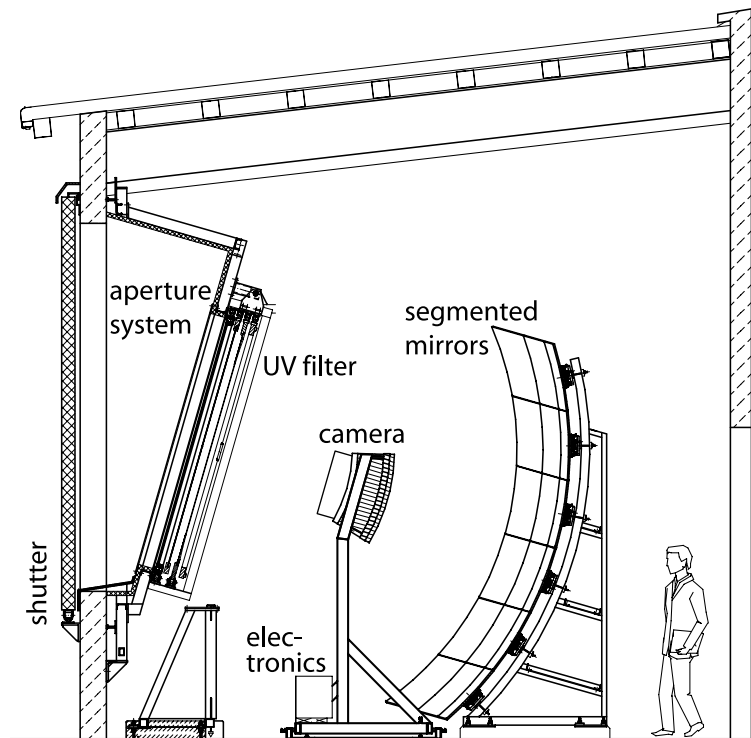
Energia wyznaczana z gęstości cząstek 1000 m od rdzenia kaskady.



AUGER

Teleskop fluorescencyjny

Schemat teleskopu

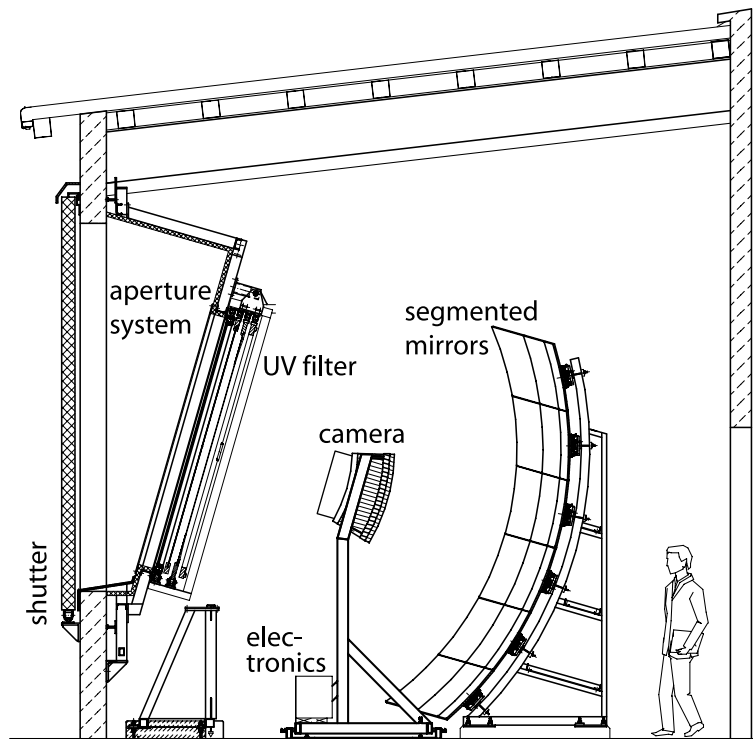


Zwierciadło o średnicy 3.4 m, matryca 440
fotopowielaczy rejestrujących promieniowanie UV

AUGER

Teleskop fluorescencyjny

Schemat teleskopu



Zwierciadło o średnicy 3.4 m, matryca 440
fotopowielaczy rejestrujących promieniowanie UV

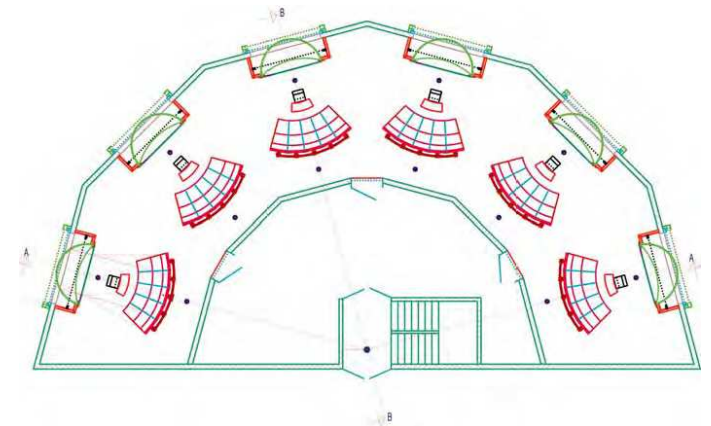
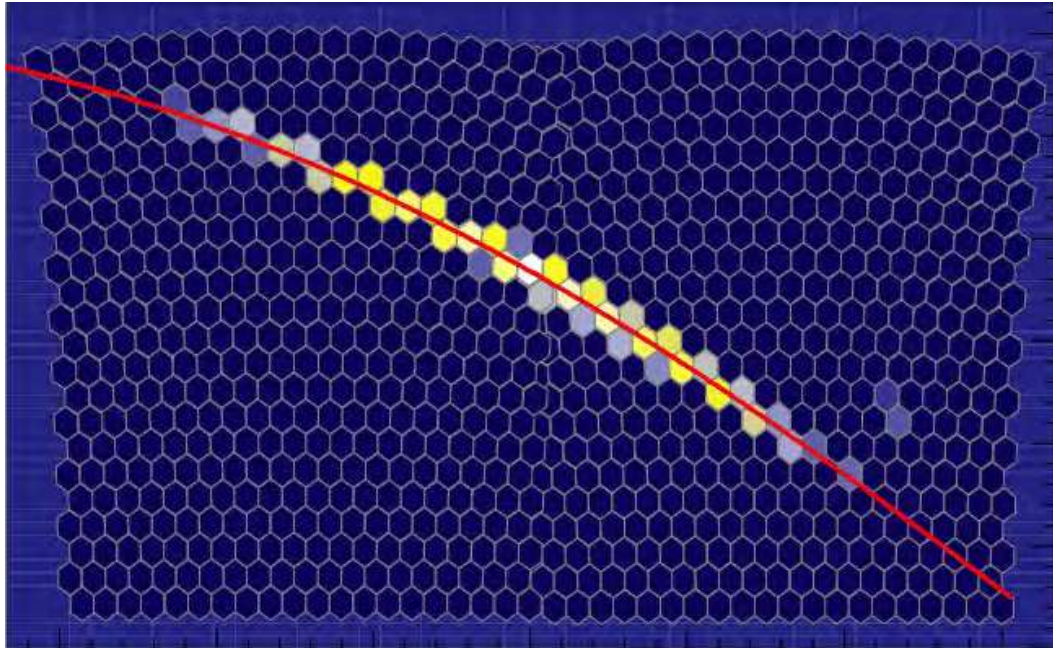
AUGER

Teleskop fluorescencyjny

Obraz wielkiego pęku atmosferycznego zarejestrowany przez jeden z teleskopów.

Rejestrowana jest amplituda sygnału, precyzyjnie mierzony jest też profil czasowy

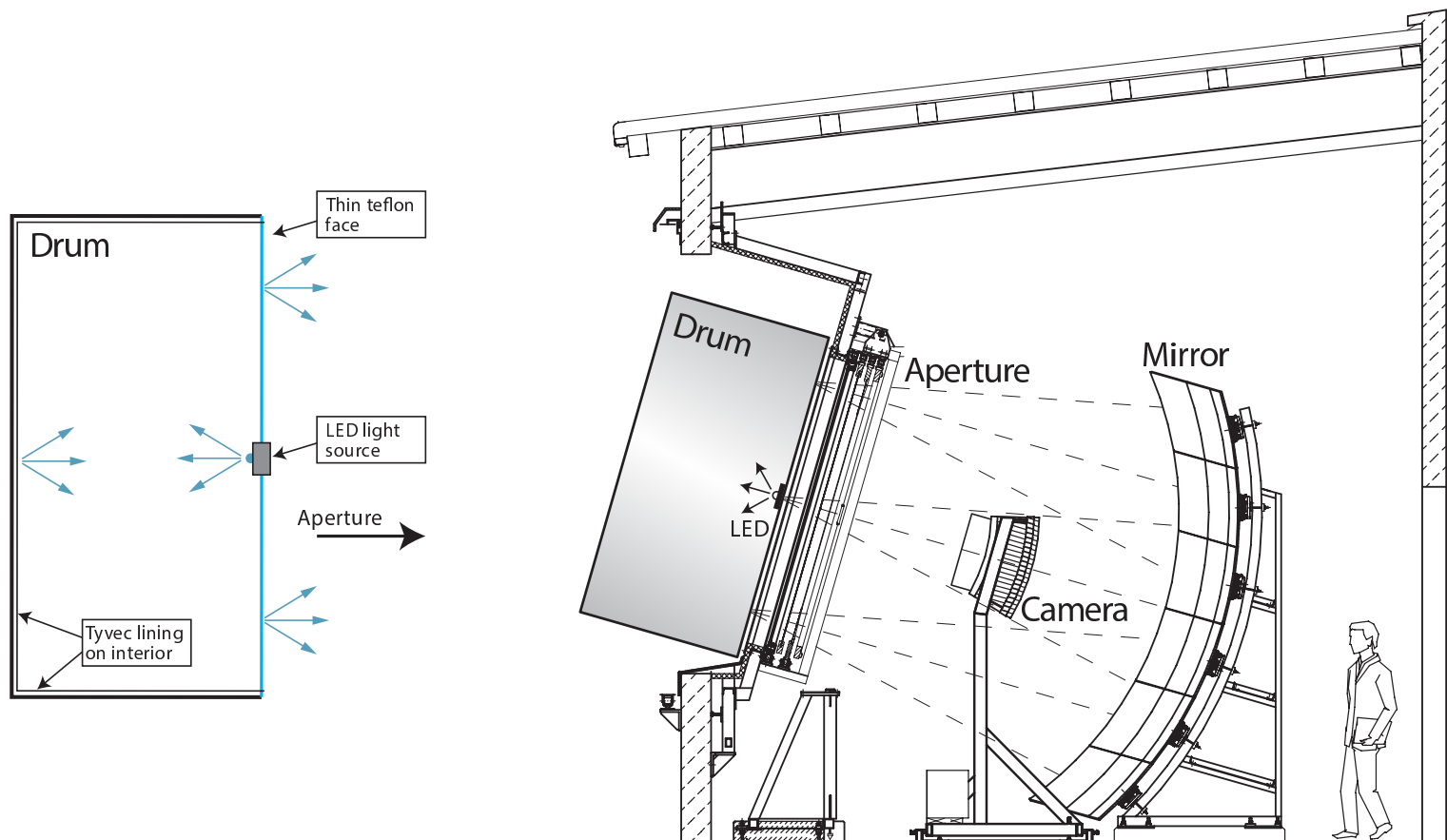
⇒ pełna rekonstrukcja 3-D !



AUGER

Kalibracja

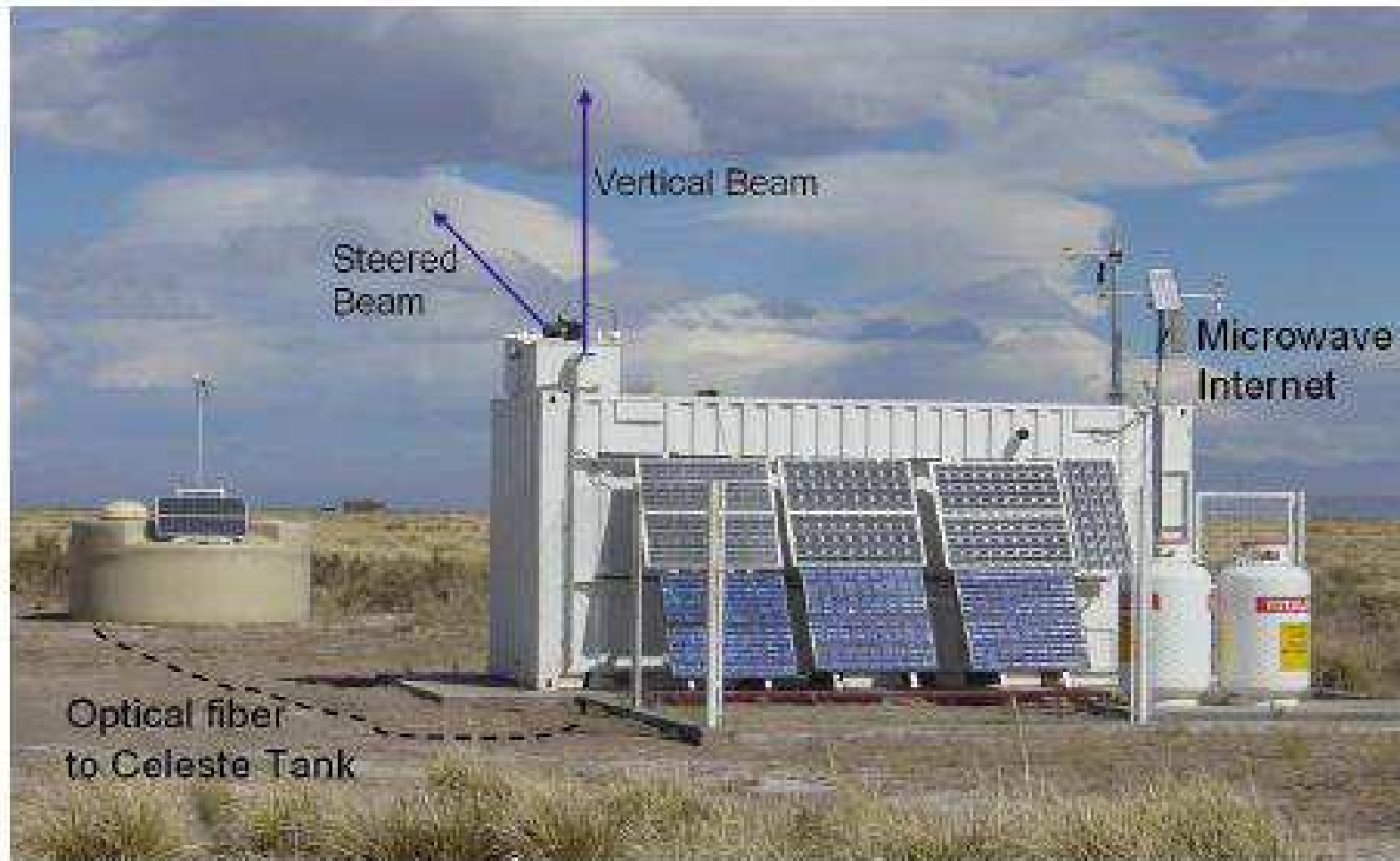
Kalibracja poszczególnych fotopowielaczy i elektroniki - źródła światła rozproszonego



AUGER

Kalibracja

Kalibracja odczytu przy pomocy lasera UV. Impulsy o mocy od 7 mJ (\sim energia GZK)

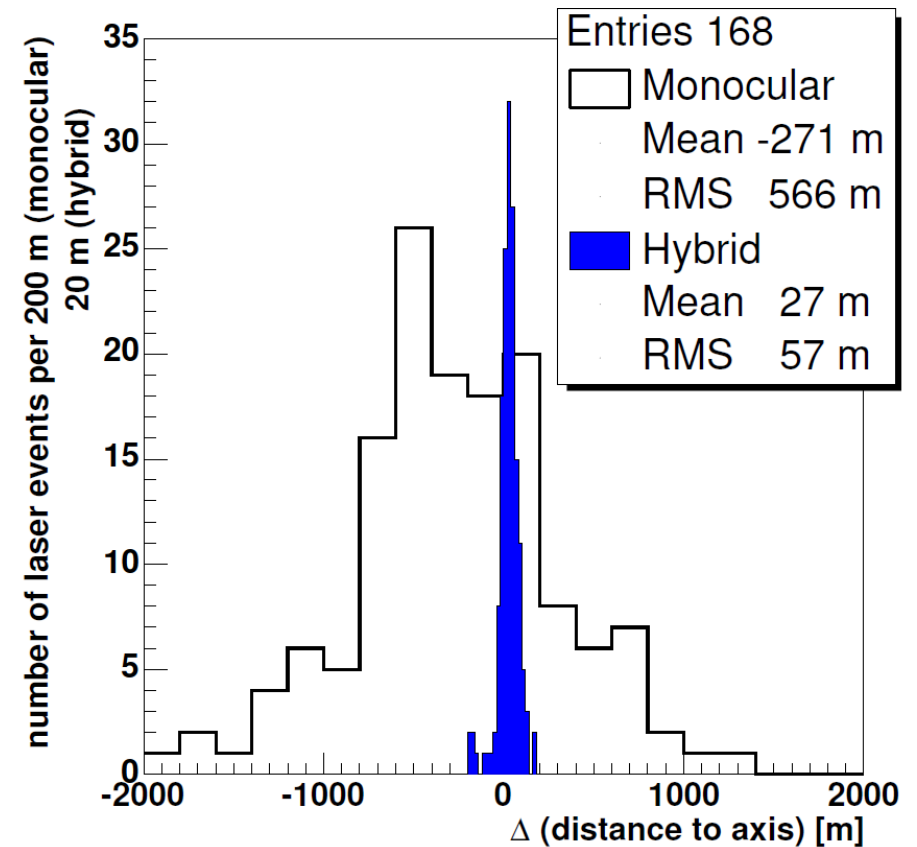
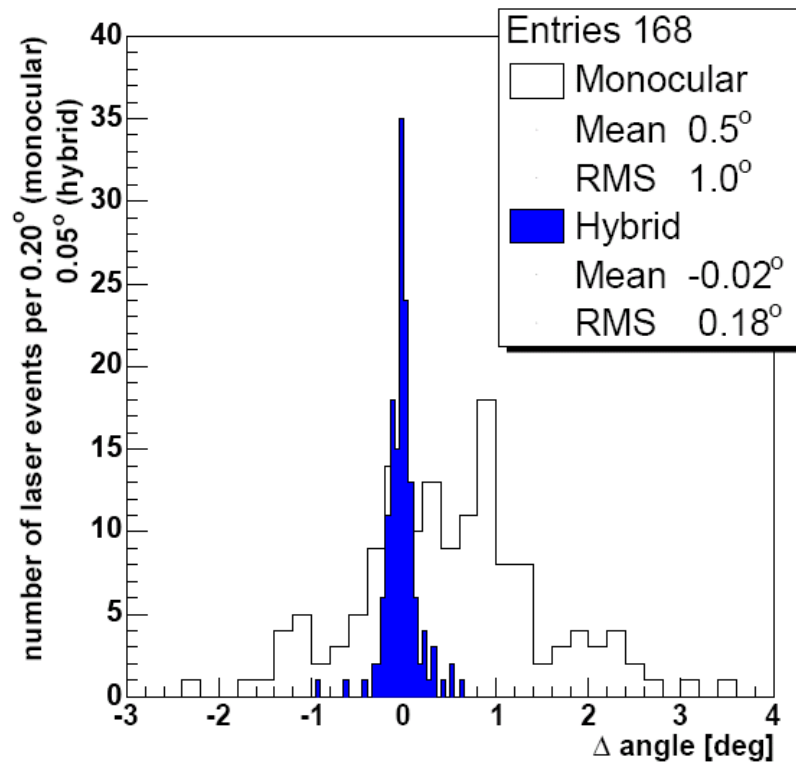


AUGER

Kalibracja

Kalibracja odczytu przy pomocy lasera UV. Impulsy o mocy od 7 mJ (\sim energia GZK)

Sprawdzenie dokładności rekonstrukcji pozycji i kierunku pęku z obserwacji jednym/wieloma teleskopami:

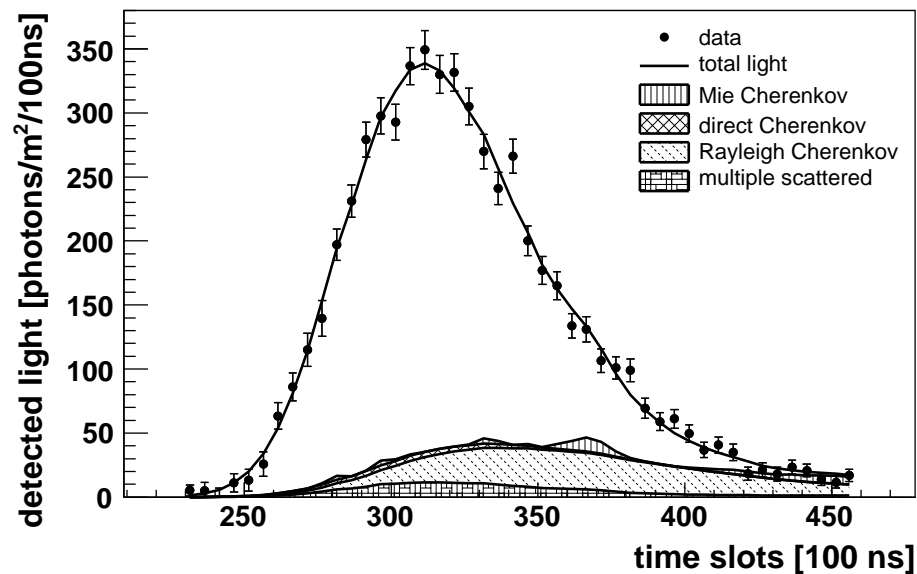


AUGER

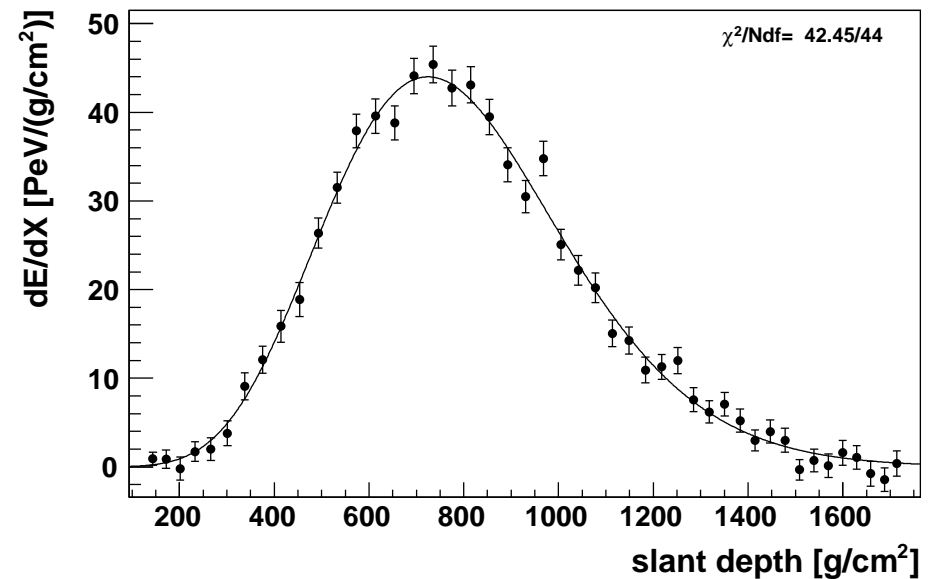
Teleskop fluorescencyjny

Przykład zrekonstruowanego profilu kaskady.

Rozkład czasowy przychodzącego sygnału
(fluorescencja + prom. Czerenkowa)



Dopasowany profil podłużny
(pozycja 2-D + czas)

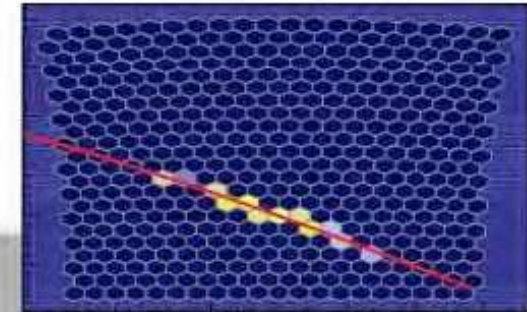


AUGER

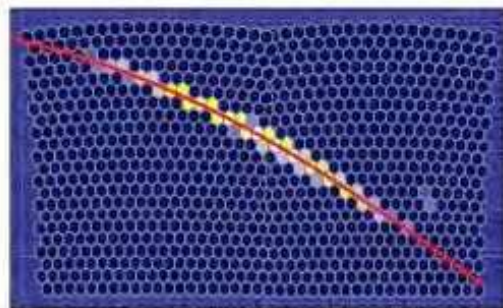
Przypadki hybrydowe

Event: 1364365

Los Morados

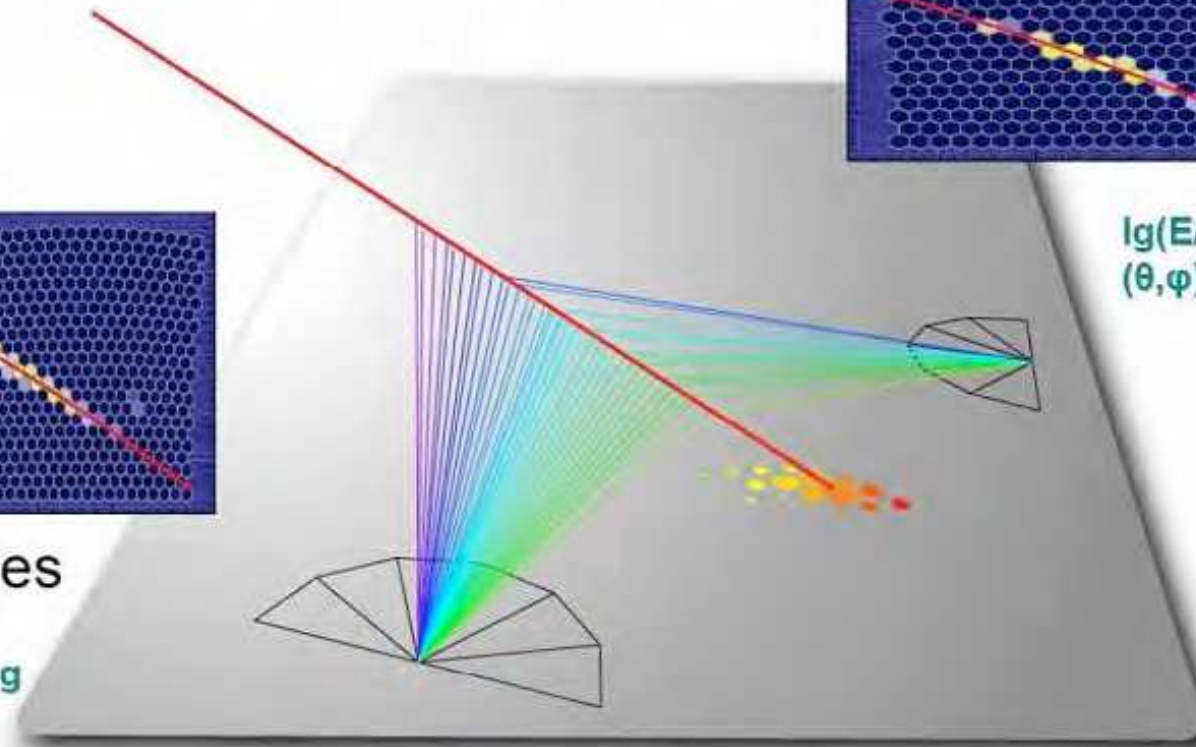


$\lg(E/eV) \sim 19.2$
 $(\theta, \varphi) = (63.7, 148.4)$ deg



Los Leones

$\lg(E/eV) \sim 19.3$
 $(\theta, \varphi) = (63.7, 148.3)$ deg



SD array: $\lg(E/eV) \sim 19.1$
 $(\theta, \varphi) = (63.3, 148.9)$ deg

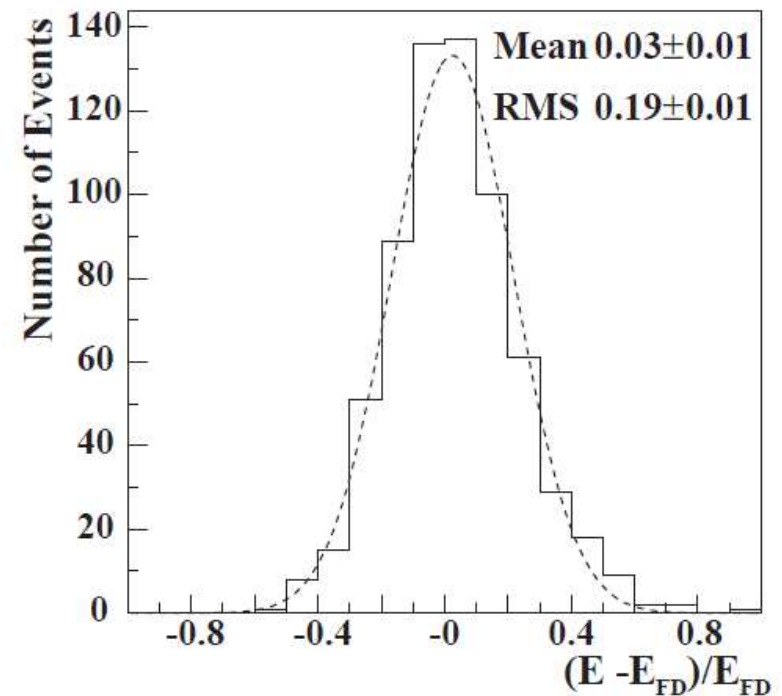
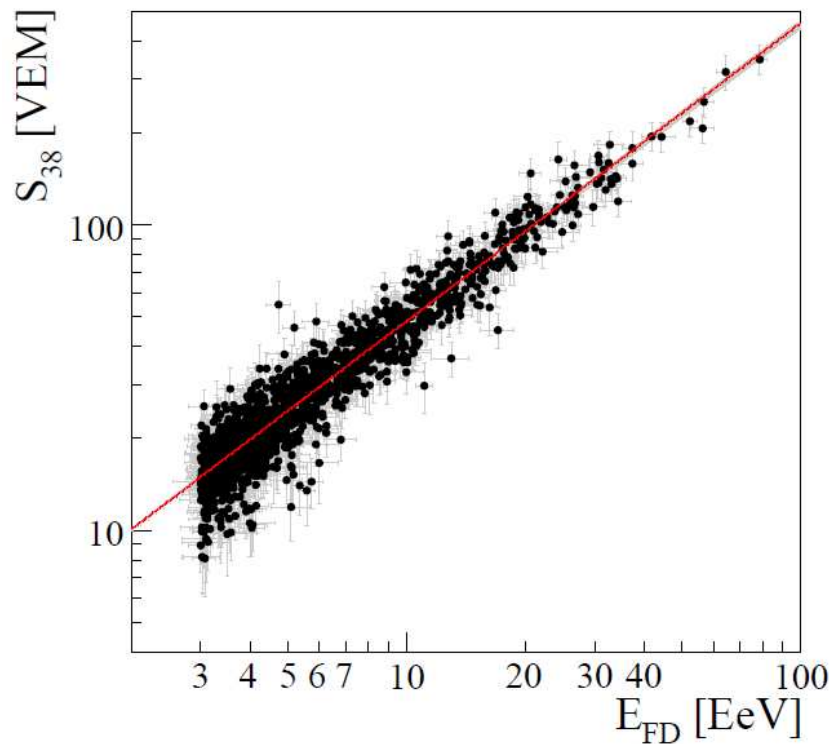
AUGER

Przypadki hybrydowe

Pomiar energii dwoma metodami - bardzo dobra korelacja:

Pozwala na absolutną kalibrację energii z detektorów powierzchniowych.

To bardzo ważne, bo detektory fluorescencyjne działają tylko $\sim 10\%$ czasu



AUGER

Dokładność pomiaru

Od uruchomienia w 2004 roku współpraca AUGER doskonalila metody rekonstrukcji energii i kierunku kaskad. Nowe zestawienie przedstawione w lutym 2015:

Detektory powierzchniowe

- dokładność pomiaru energii:
16% (niskie E) do 12 % (wysokie E)
- dokładność pomiaru kierunku:
od 1.6° (3 stacje) do 0.9° (> 5 stacji)

Przypadki hybrydowe:

- dokładność pomiaru energii:
8% (teleskopy fluorescencyjne)
- dokładność pomiaru kierunku:
 0.6°

Ostatnio udalo się też opracować metodę dokładnej rekonstrukcji energii dla wysokoenergetycznych kaskad nachylonych pod kątem 60° do 80° do zenitu

⇒ znaczący (29%) wzrost statystyki przypadków o $E > 4 \times 10^{18}$ eV.

⇒ większe pokrycie sfery niebieskiej (!)

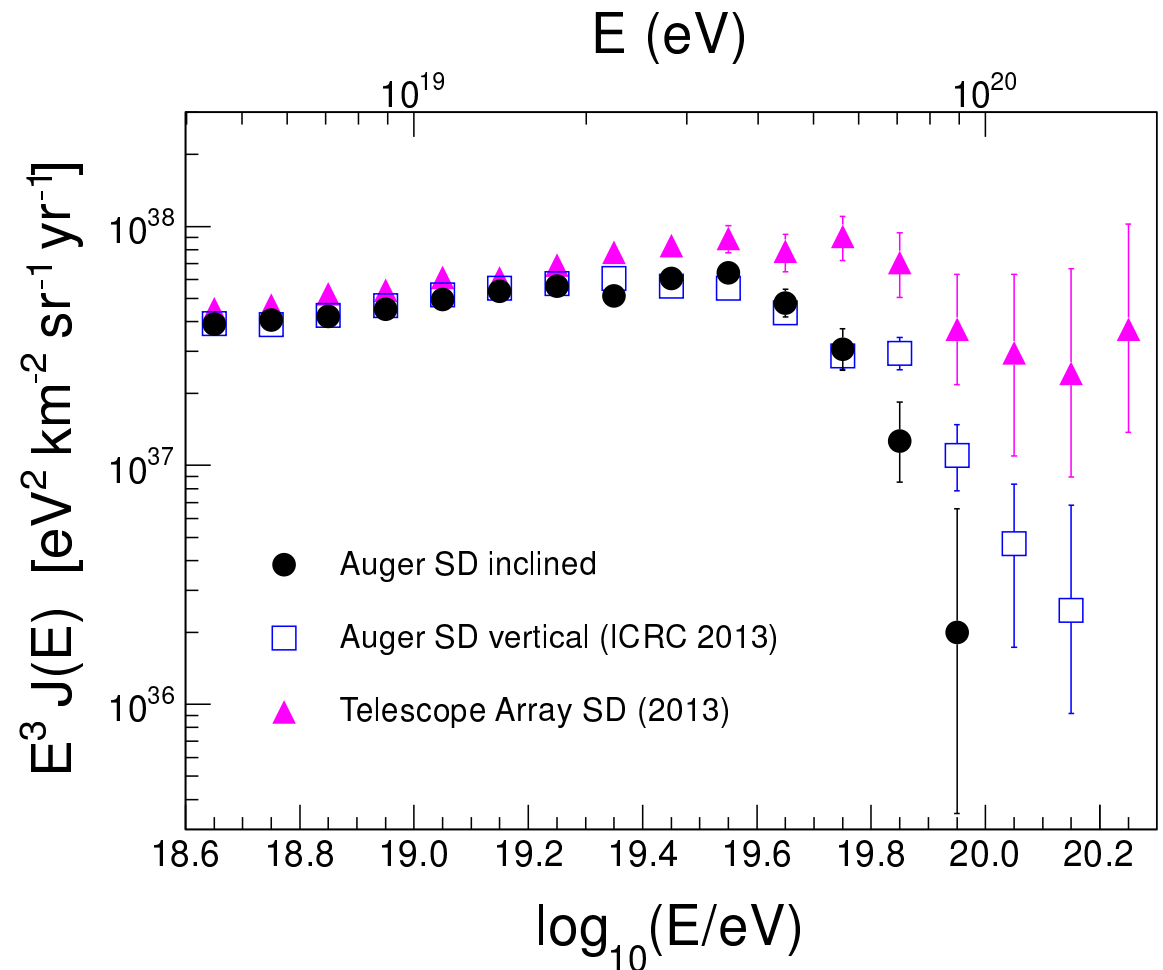
AUGER

Widmo energii

Wyraźne “załamanie” widma powyżej $4 \cdot 10^{19}$ eV.

Dobra zgodność widma wyznaczonego z pęków mierzonych dla małych i dużych kątów.

Różnice z wynikami Telescope Array (TA; półkula północna)

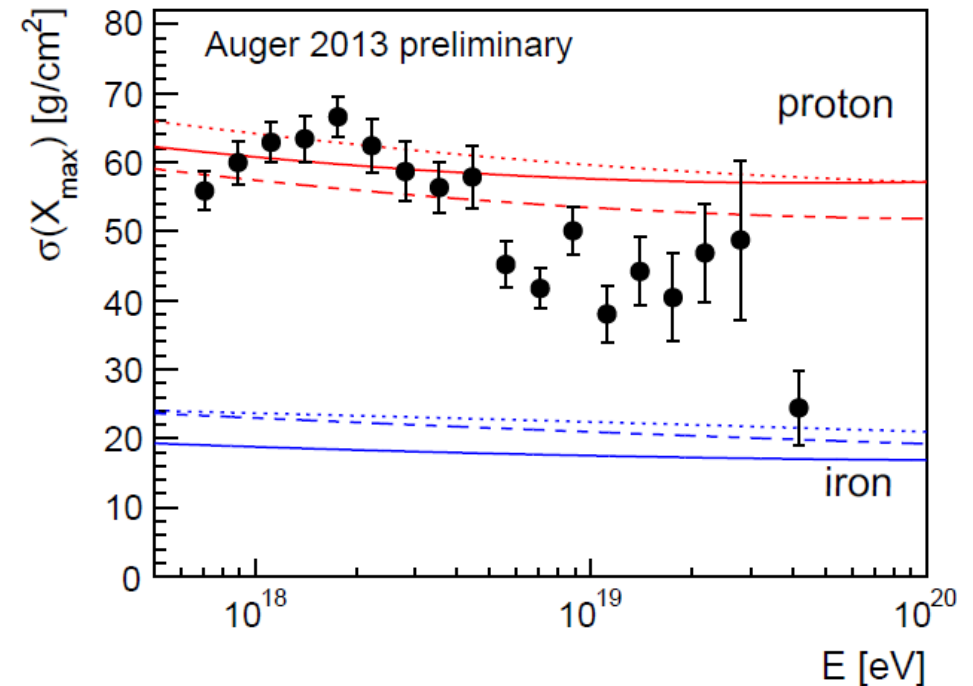
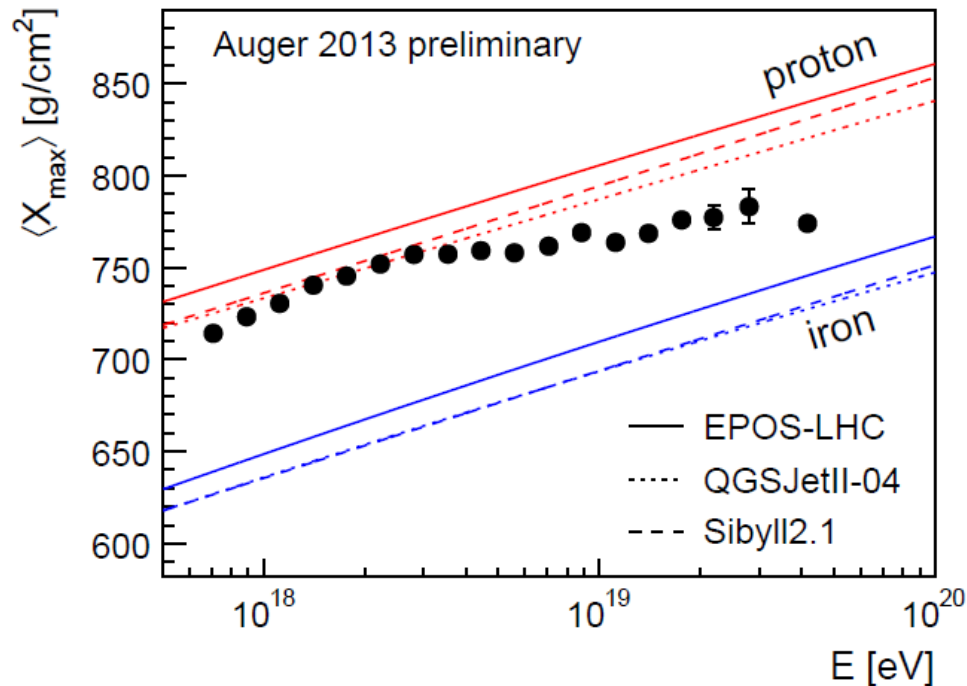


AUGER

Skład promieniowania

Dla energii ok. 10^{18} dominujący wkład protonów (lub lekkich jąder).

Dla wyższych energii rośnie wkład ciężkich jąder...



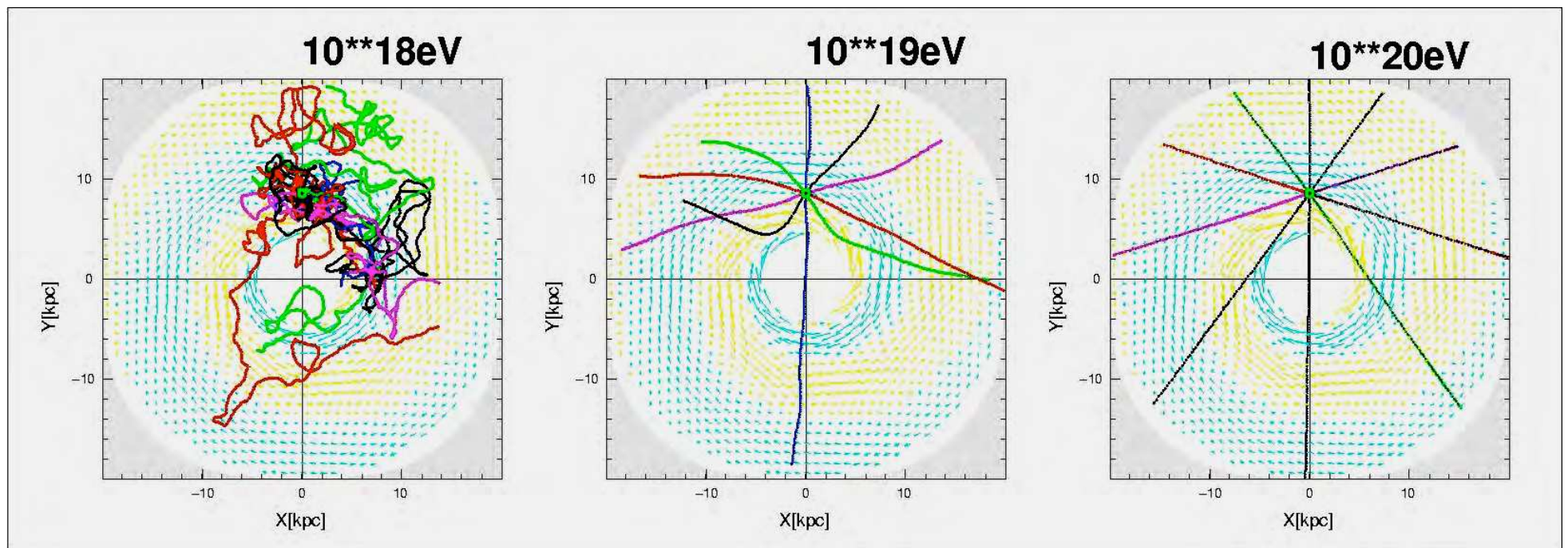
Przewidywania teoretyczne dużo dokładniejsze po uwzględnieniu wyników LHC...

Promieniowanie kosmiczne

Poszukiwanie źródeł

Dla energii poniżej 10^{18} eV cząstki naładowane są całkowicie randomizowane przez pola magnetyczne w naszej Galaktyce. Ale dla wyższych energii kierunek z którego obserwujemy cząstkę jest skorelowany z pozycją źródła.

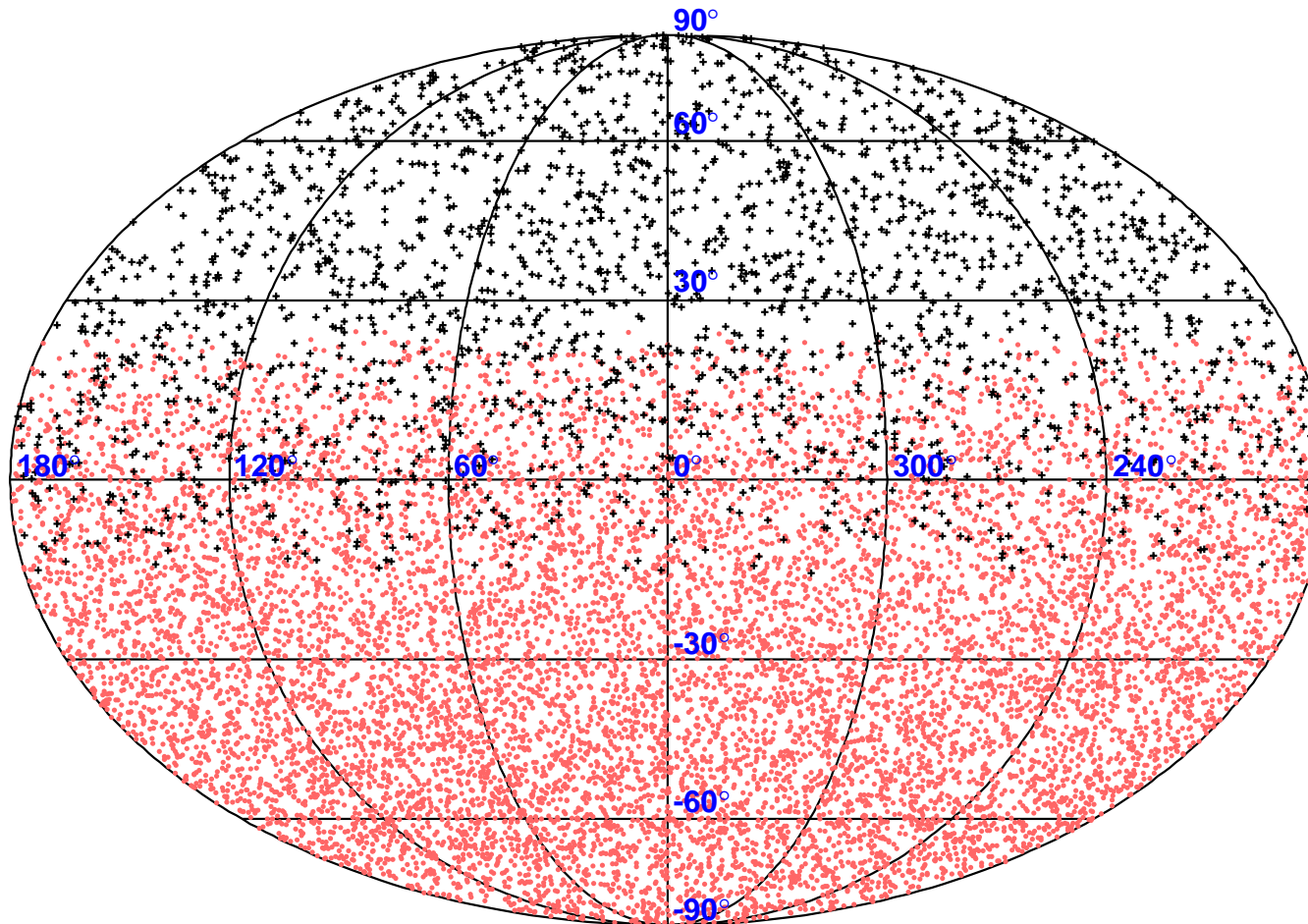
Dla protonów $E \sim 10^{20}$ eV odchylenia na poziomie $1 - 2^\circ$



AUGER + TA

Rozkład przestrzenny

dla przypadków $E > 10^{19}$ eV

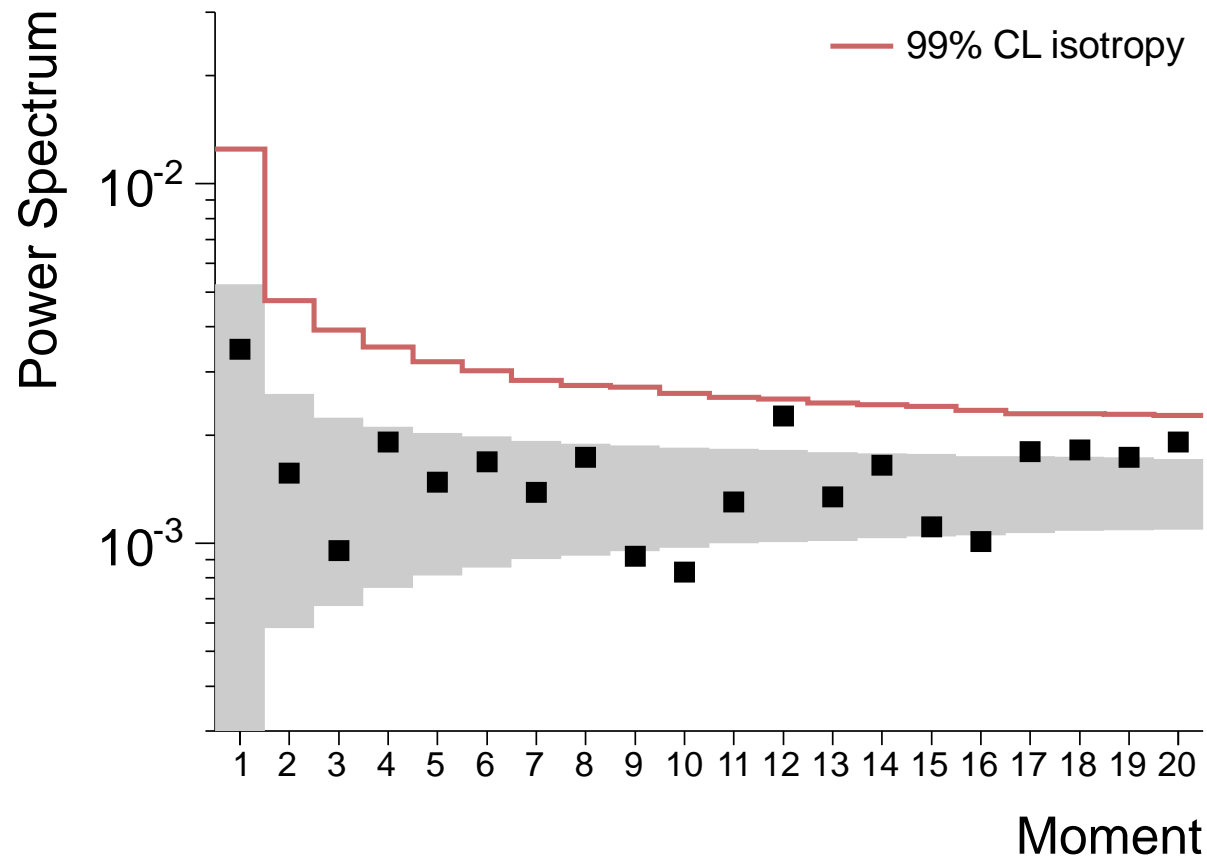


AUGER + TA

Rozkład przestrzenny

dla przypadków $E > 10^{19}$ eV

Zmierzone odstępstwa od rozkładu izotropowego (rozkład na harmoniki sferyczne)

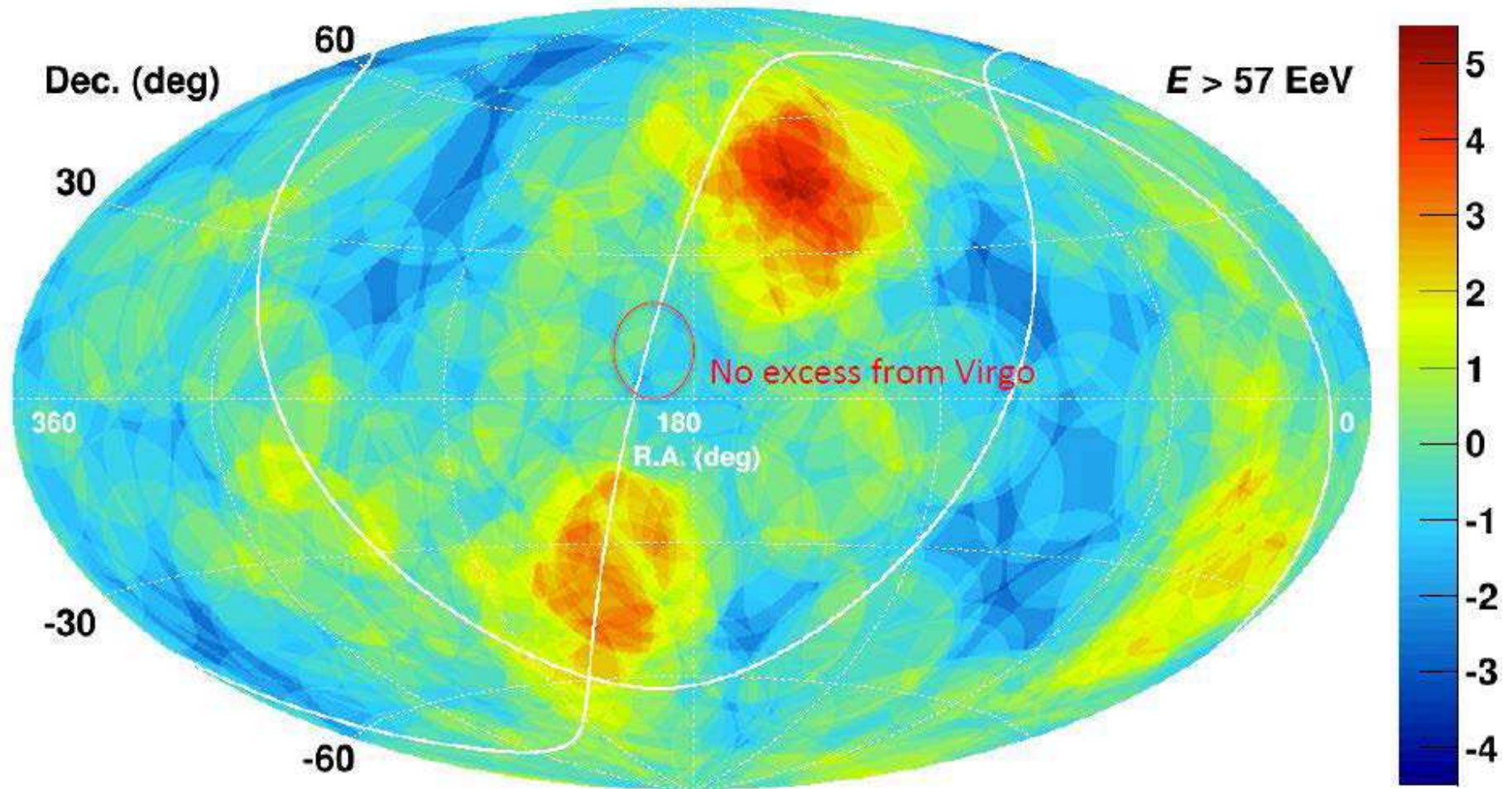


Natężenia składowych zgodne z oczekiwaniami dla rozkładu izotropowego

AUGER + TA

Rozkład przestrzenny

dla przypadków $E > 5.7 \cdot 10^{19}$ eV



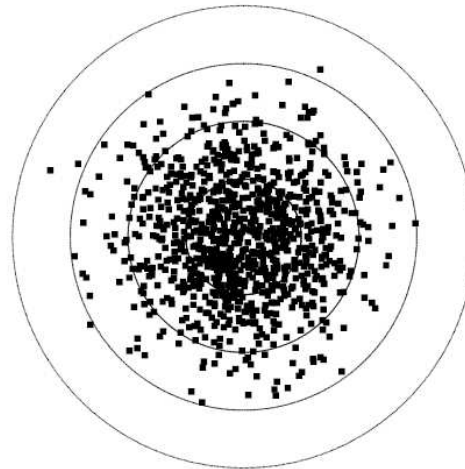
Anizotropia

Rozkład przestrzenny

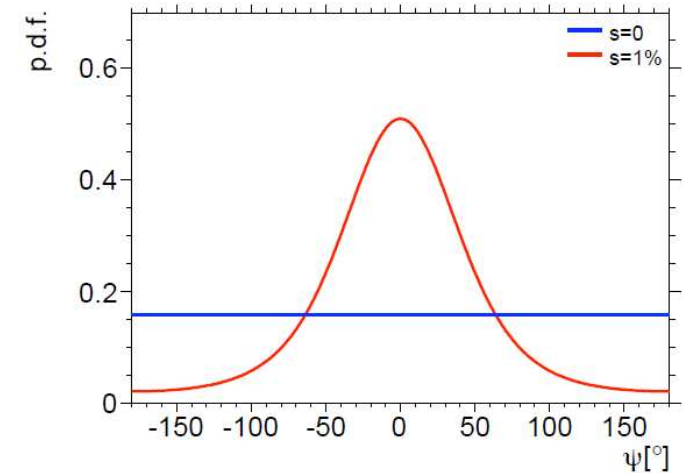
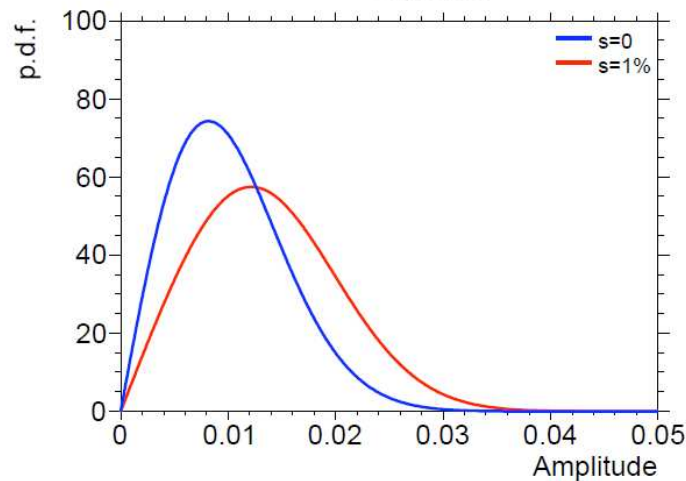
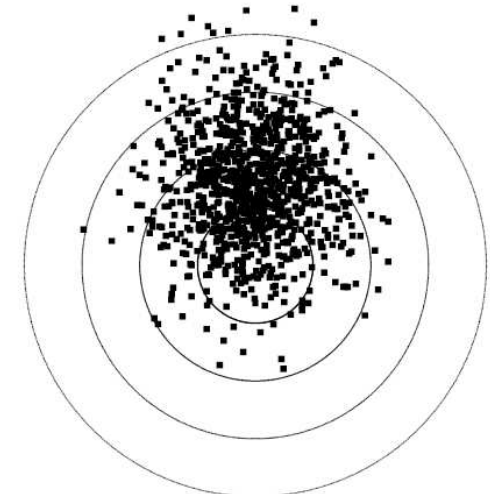
Przy niewielkiej statystyce przypadków, natężenia poszczególnych multipoli są wyznaczane z dużą niepewnością.

Sygnatury możemy szukać w wyznaczonej fazie dipola \Rightarrow

Pure isotropy



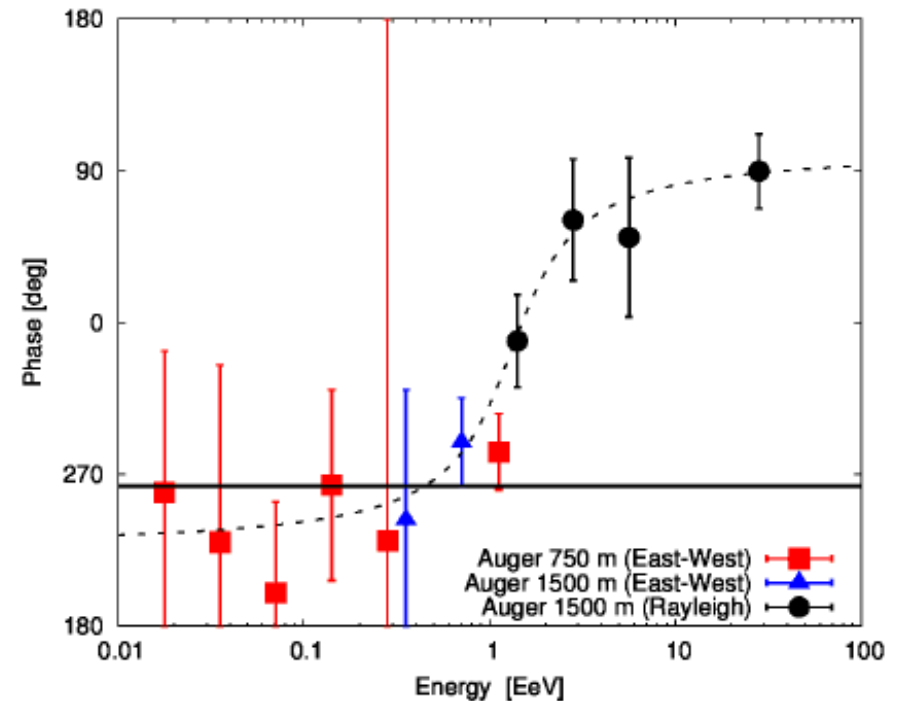
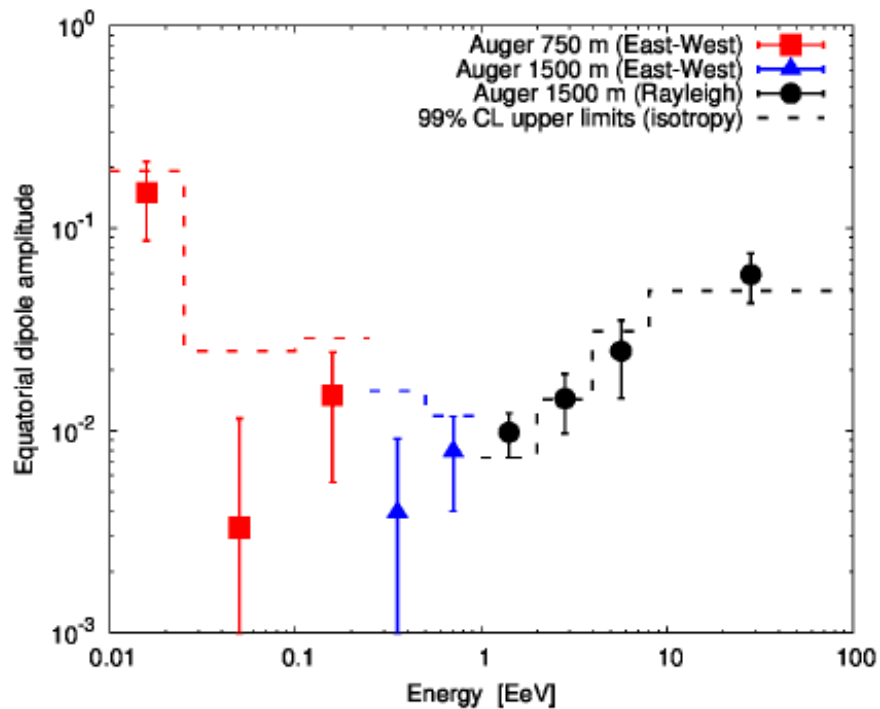
Almost isotropy
(signal size = mean noise)



AUGER + TA

Anizotropia

Wyniki dopasowania amplitudy i fazy składowej dipolowej



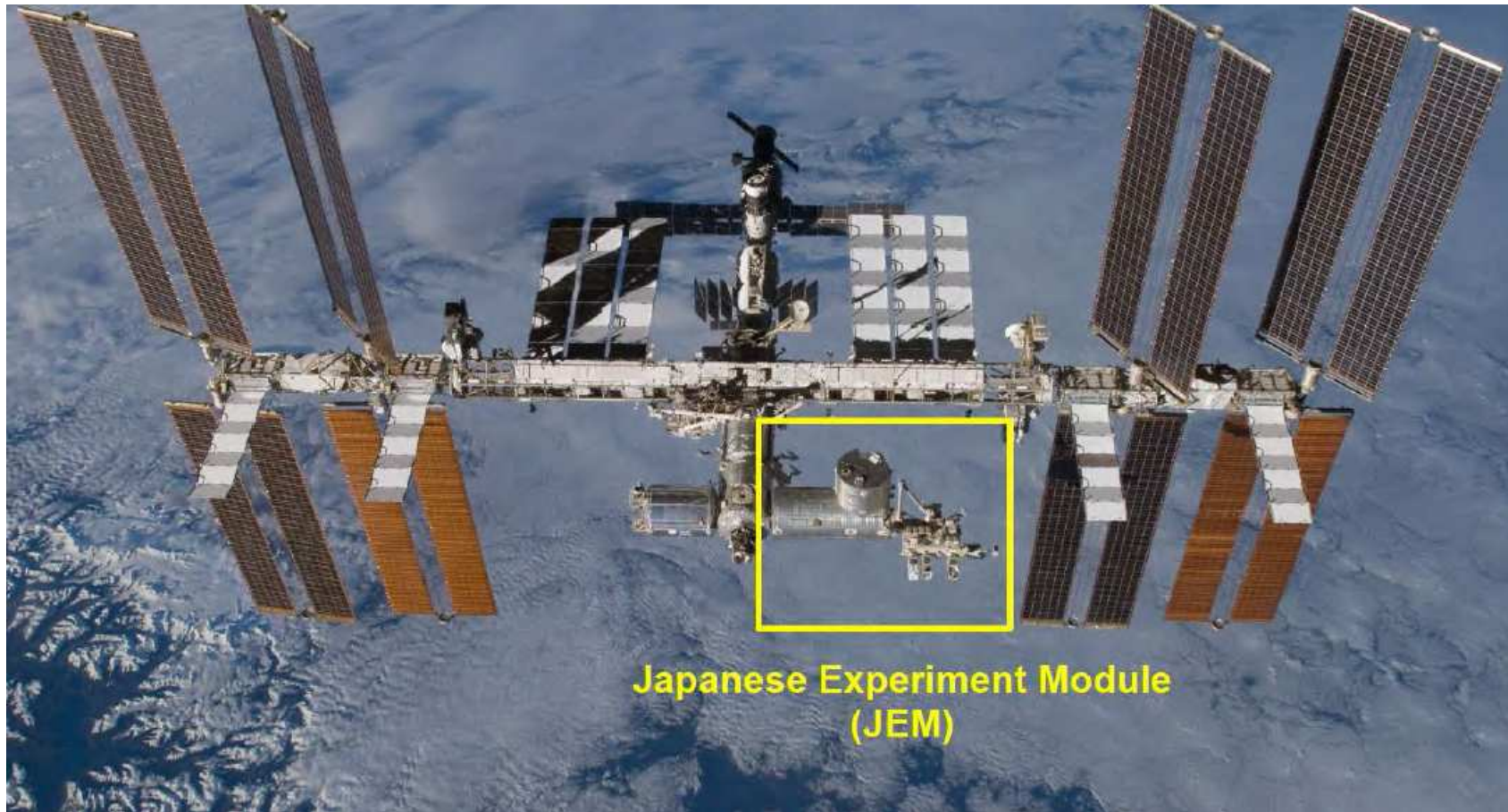
W czterech kolejnych binach prawdopodobieństwo fluktuacji na poziomie 1% ?!

Ale wciąż nie znaleziono korelacji z żadnymi znanymi źródłami/strukturami...

JEM-EUSO

Dalsze powiększanie układów detekcyjnych na powierzchni Ziemi bardzo kosztowne.

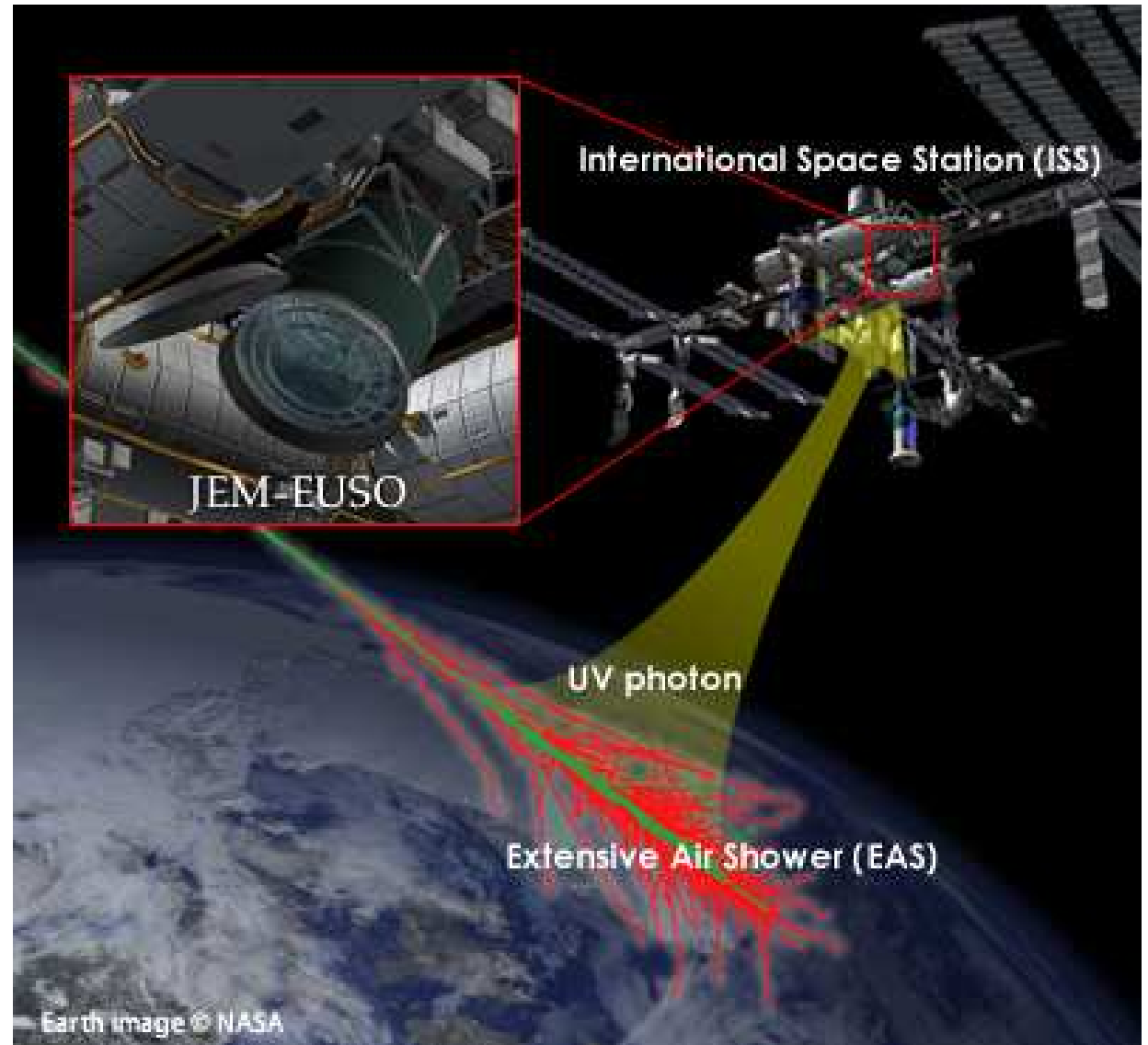
⇒ projekt obserwacji z kosmosu, z Japońskiego Modułu Eksperymentalnego na ISS



JEM-EUSO

Zasada działania

Detekcja promieniowania UV wytwarzanego przy przejściu pęków atmosferycznych: fluorescencja i promieniowanie Czerenkowa



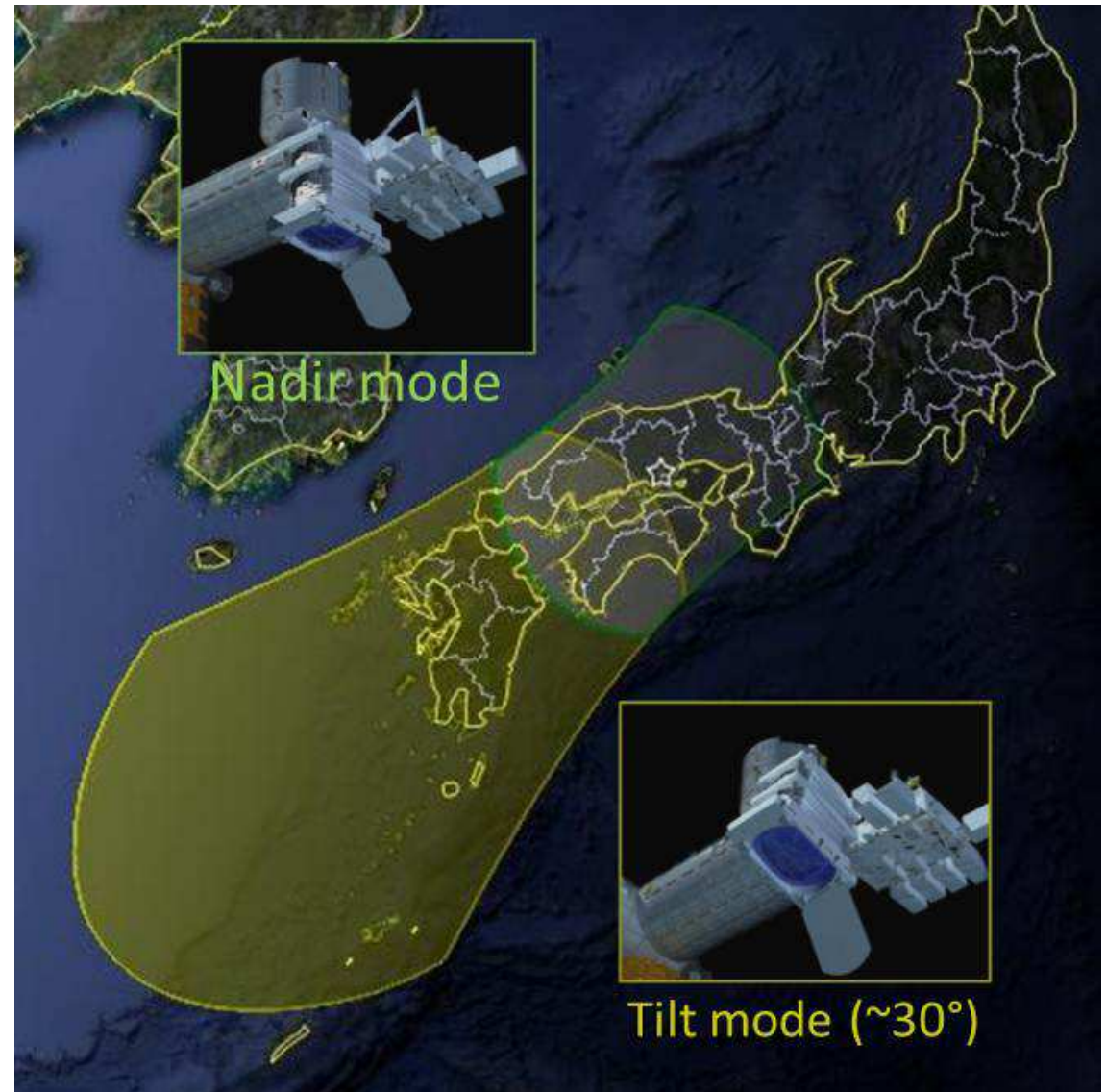
JEM-EUSO

Zasada działania

Detekcja promieniowania UV wytwarzanego przy przejściu pęków atmosferycznych: fluorescencja i promieniowanie Czerenkowa

Z wysokości 400 km można obserwować powierzchnię od ok. 140 000 km² (obserwacja pionowo) do ok. 300 000 km² (obserwacja pod kątem 30°)

100× AUGER !!!



JEM-EUSO

Schemat detektora

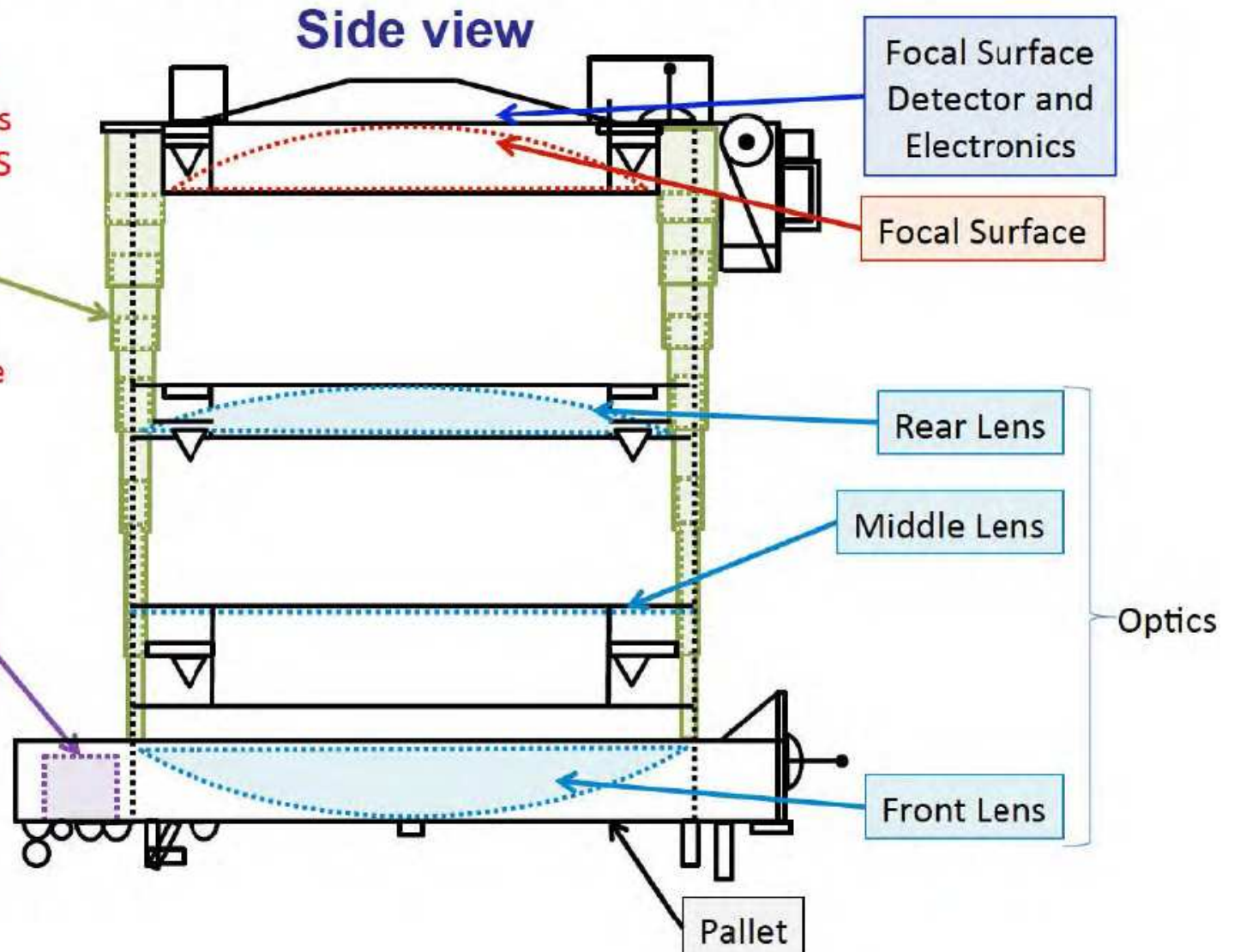
JEM-EUSO

Telescope will be deployed after it is attached at the ISS

Deployment Mechanism

Other options are under study.

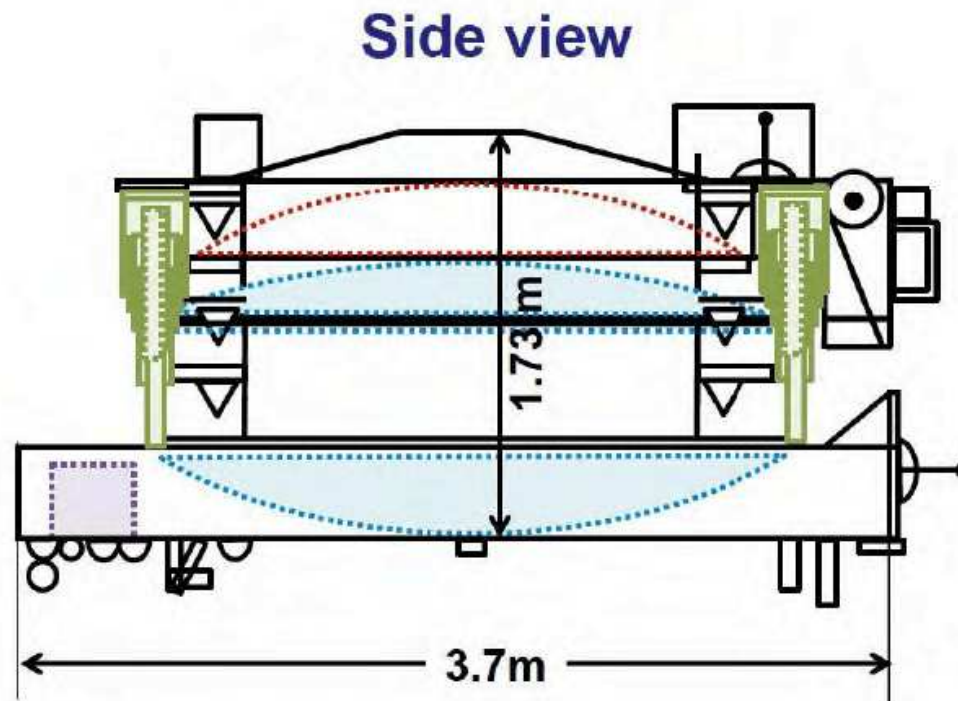
Atmospheric Monitoring System



JEM-EUSO

Schemat detektora

Do wyniesienia na orbitę detektor musi być złożony:



JEM-EUSO

Budowa detektora

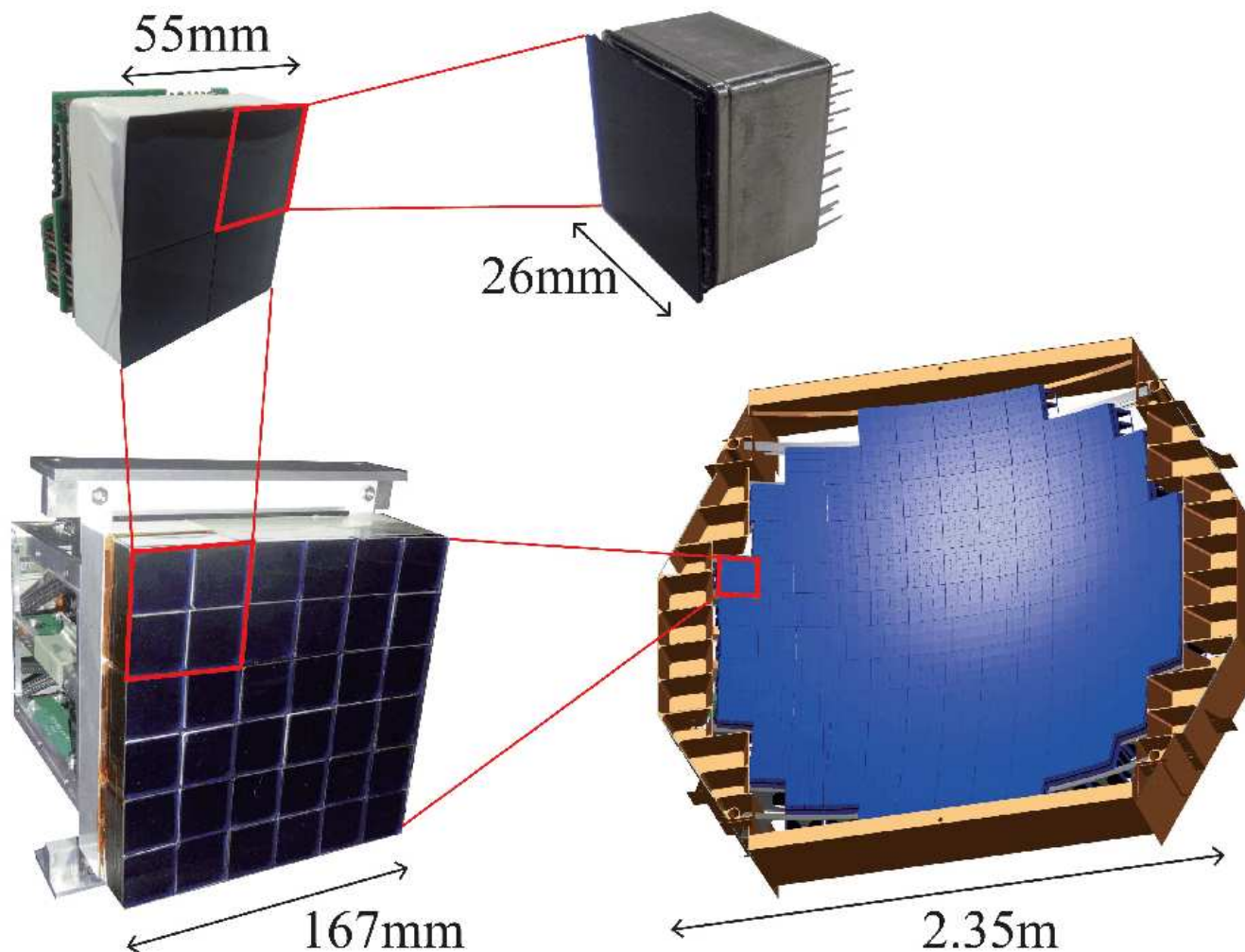
Prototypowe soczewki frenalowskie - kluczowy element detektora



JEM-EUSO

Budowa detektora

Powierzchnia ogniskowa: 4.5 m^2 , 320 000 pixeli (wieloanodowe fotopowielacze)

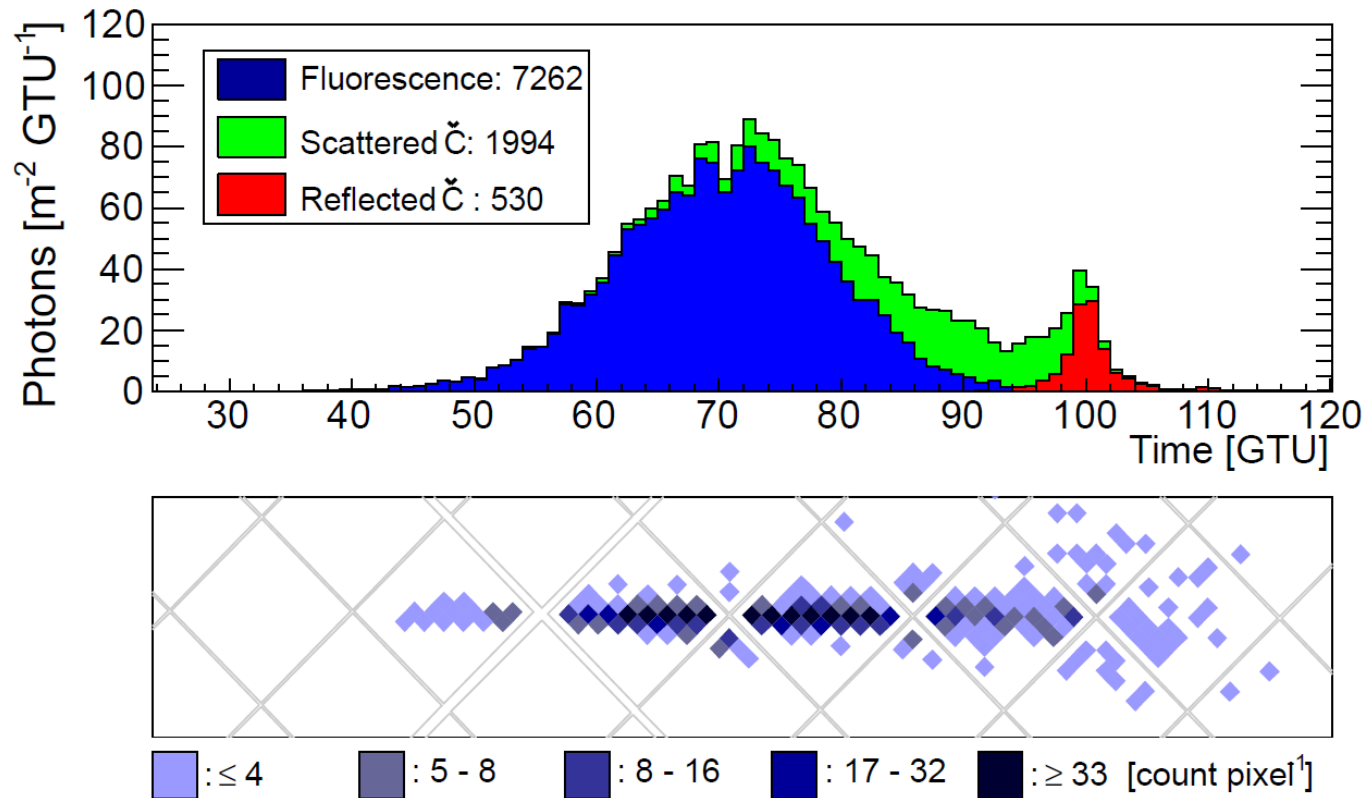


JEM-EUSO

Zasada działania

Pomiar promieniowania 300-430 nm, z czasem ekspozycji $2.5 \mu s$ (GTU).

Wyraźnie widoczny wkład od promieniowania Czerenkowa (rozproszonego i odbitego od Ziemi) \Rightarrow możliwość rekonstrukcji wysokości pęku w atmosferze



JEM-EUSO

Testy prototypów



JEM-EUSO

Testy prototypów



JEM-EUSO

Status projektu

Przeprowadzono testy z prototypem naziemnym (we współpracy z Telescope)

Przeprowadzono pierwszy próbny stratosferyczny (~ 40 km) lot balonowy

Przygotowywany jest detektor Mini-EUSO, który ma przeprowadzić wstępne obserwacje **z wnętrza** ISS (koniec 2016 ?)

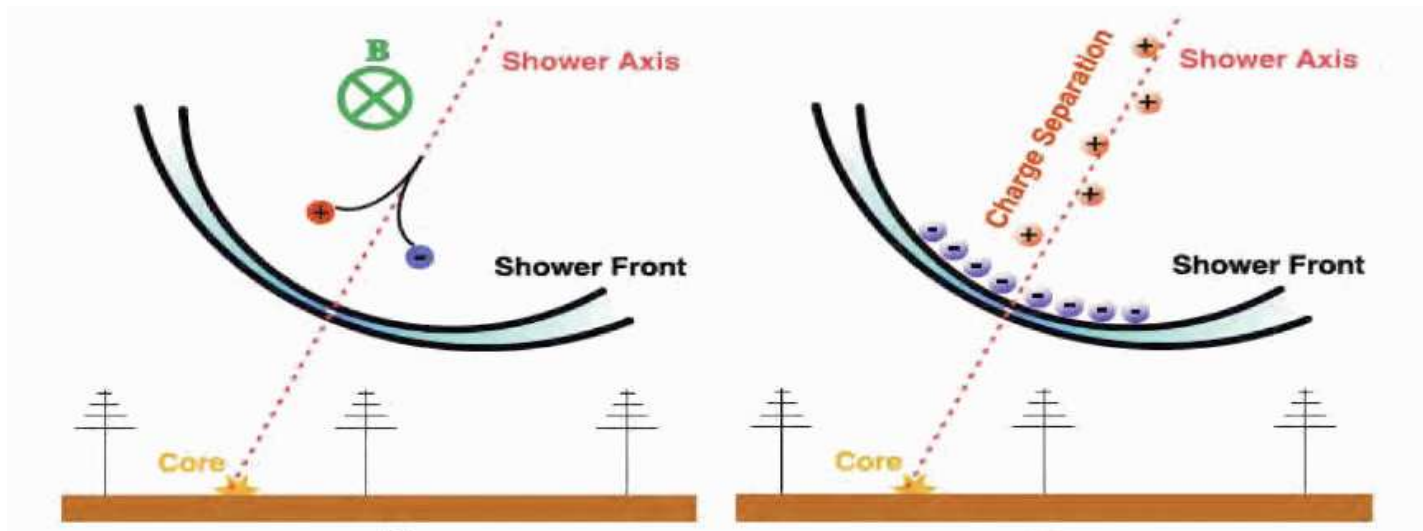
Niestety, z powodu problemów finansowych start głównej misji, pierwotnie planowany na 2017, został odsunięty w czasie (>2020).

Rozważana instalacja na ISS mniejszej wersji K-EUSO już w 2018 (?)

Wielkie pęki atmosferyczne

Emisja radiowa

Powstaje w wyniku pojawienia się separacji przestrzennej ładunków ujemnych i dodatnich w kaskadzie. Dwa mechanizmy separacji:



Wpływ ziemskiego pola magnetycznego (efekt geomagnetyczny)

Efekt Askariana:

- w wyniku anihilacji e^+ na froncie kaskady przeważają elektrony
- ⇒ emitują koherentne promieniowanie w zakresie radiowym

Wielkie pęki atmosferyczne

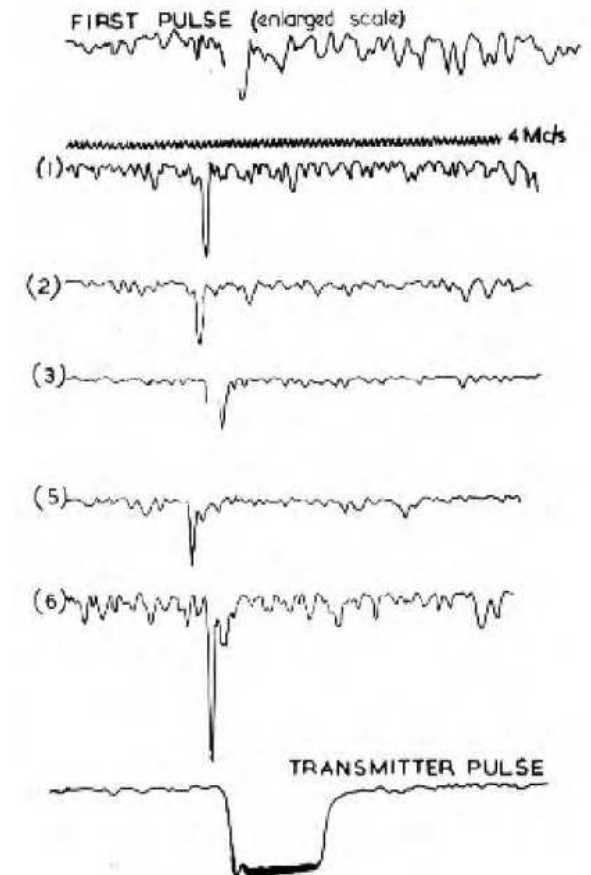
Emisja radiowa

Odkryta już w 1965 roku (pasmo 44 MHz)

Szereg prac teoretycznych i doświadczalnych na przełomie lat 60 i 70.

Pod koniec lat 70 badania w dziedzinie radioastronomii skierowały się w kierunku wyższych częstotliwości

⇒ zanik zainteresowania detekcją pęków



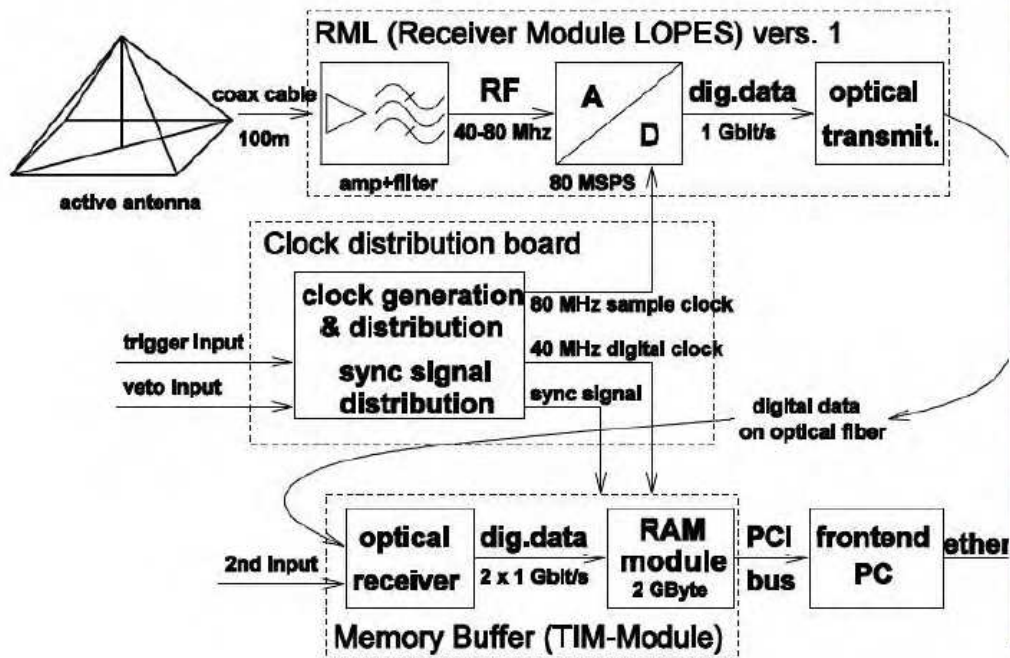
Jelley et al. (1965)

Wielkie pęki atmosferyczne

Detekcja radiowa

Zainteresowanie detekcją radiową ponownie na początku XXI wieku

Detektor LOPES zbudowany przy detektorze KASKADE (2003)



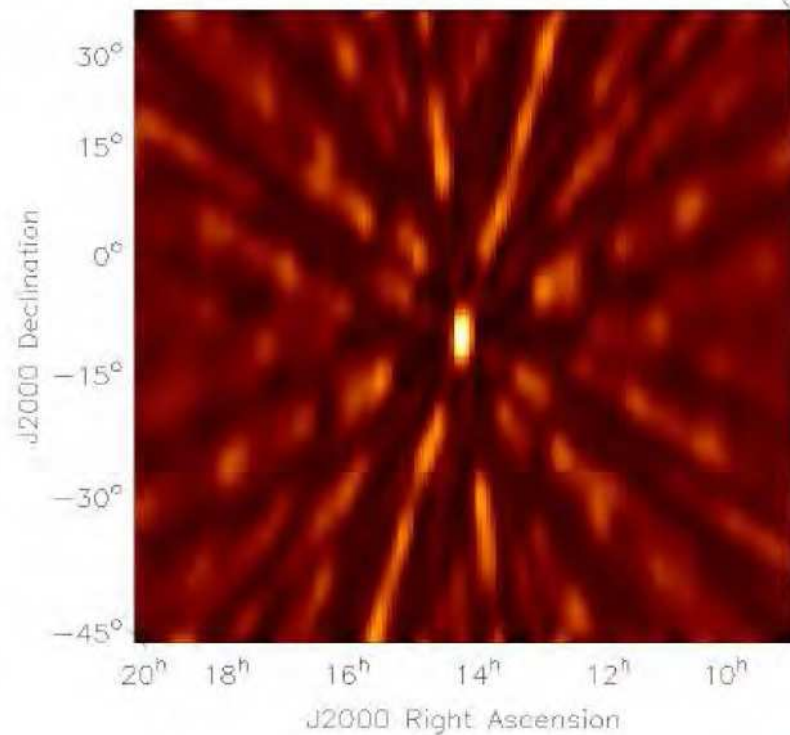
Detekcja radiowa

LOPES

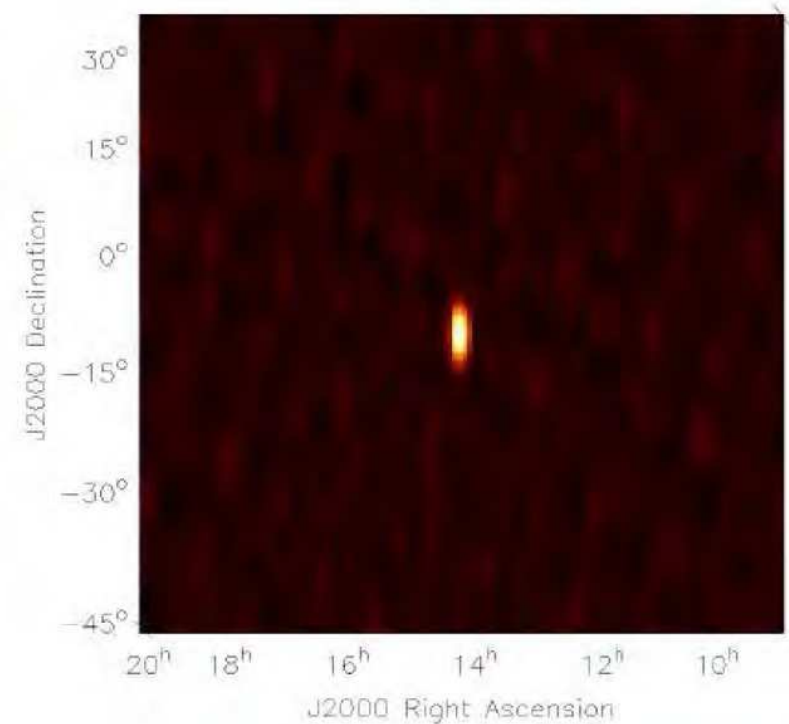
Przypadek wybuchu słonecznego mierzonego 8 antenami w paśmie 45-75 MHz

Rozkład pasujących kierunków:

Przed filtrowaniem



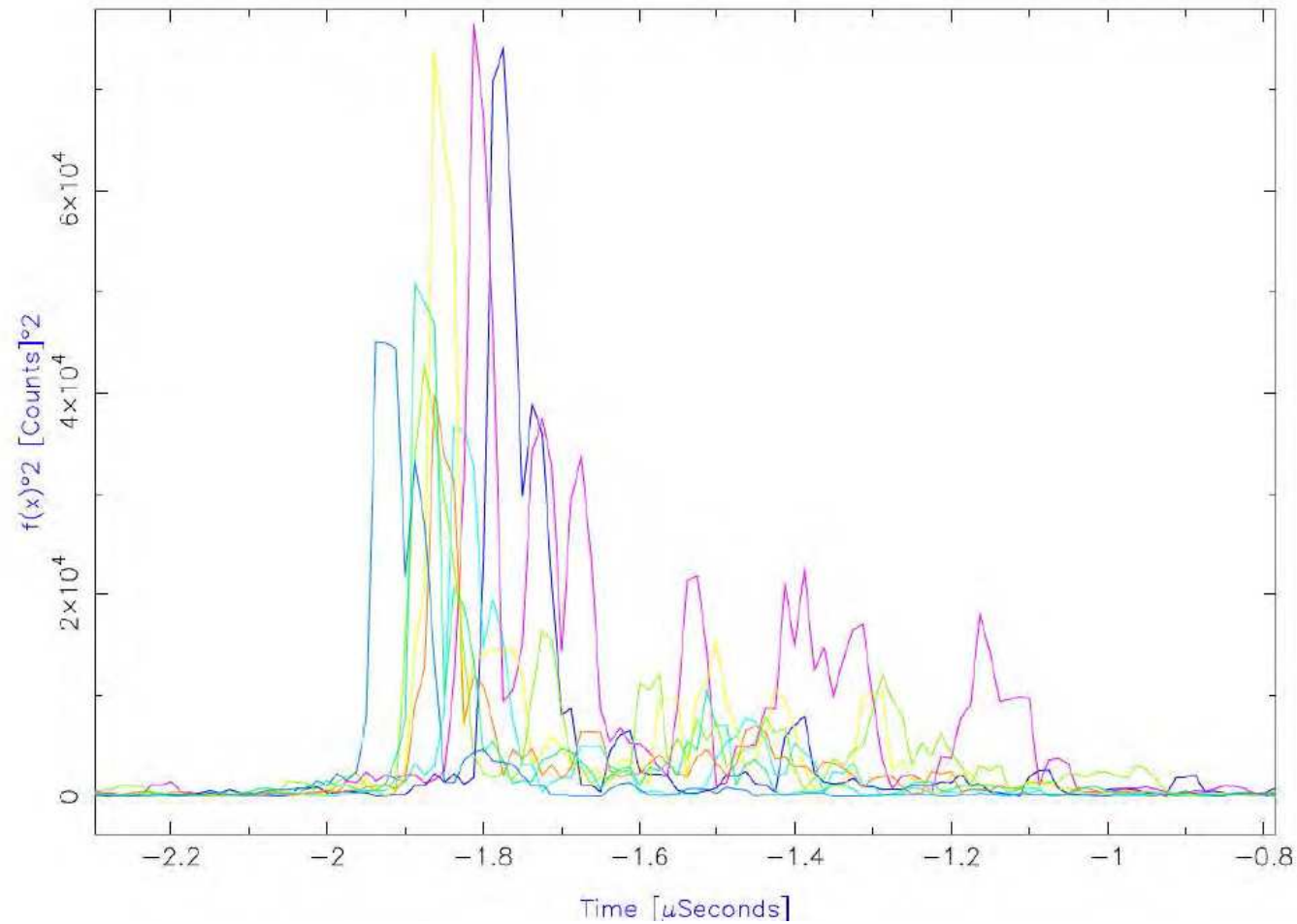
Po filtrowaniu



Detekcja radiowa

LOPES

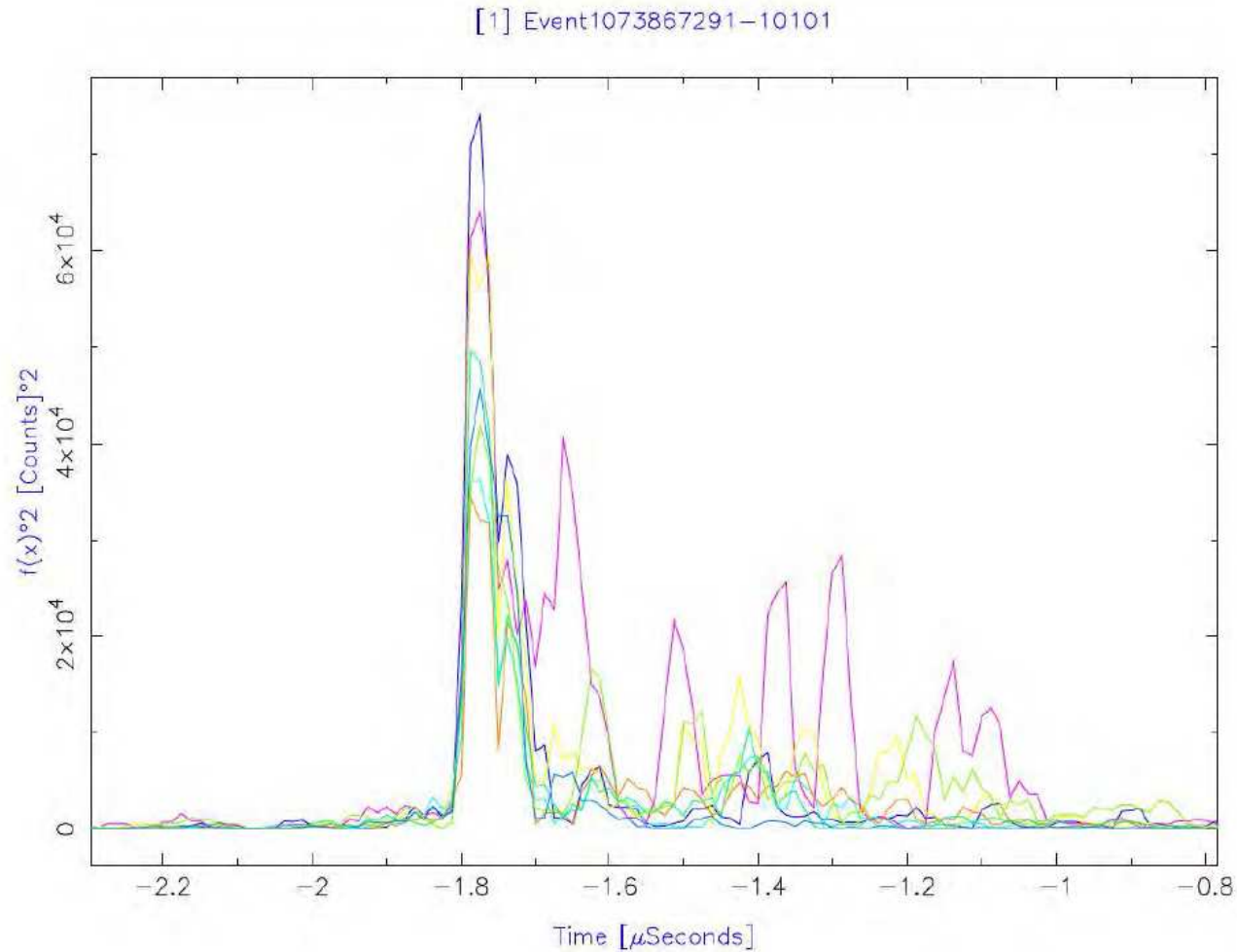
Przypadek mierzonej kaskady, przed dopasowaniem kierunku pęku:



Detekcja radiowa

LOPES

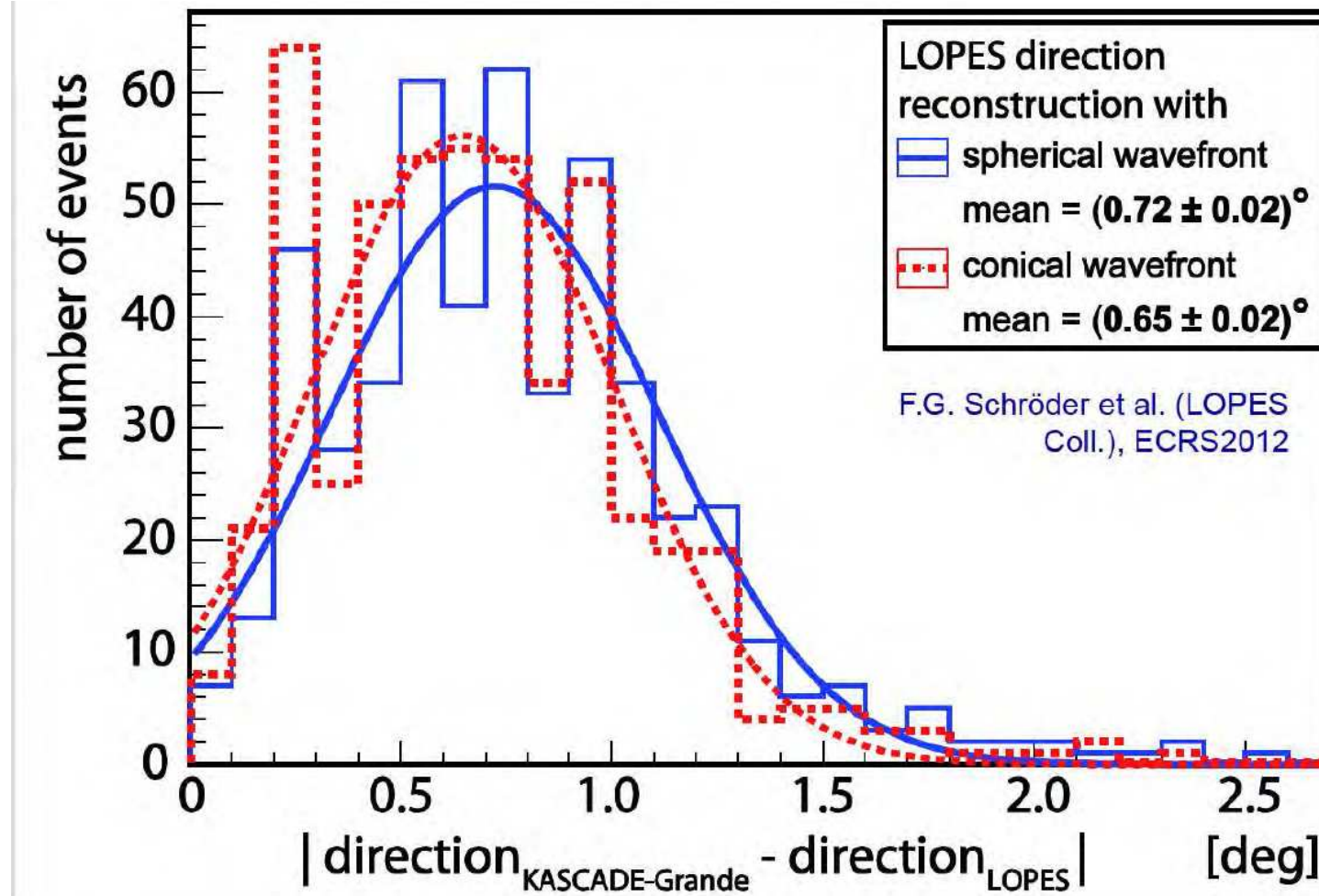
Przypadek mierzonej kaskady, po dopasowaniu kierunku pęku:



Detekcja radiowa

LOPES

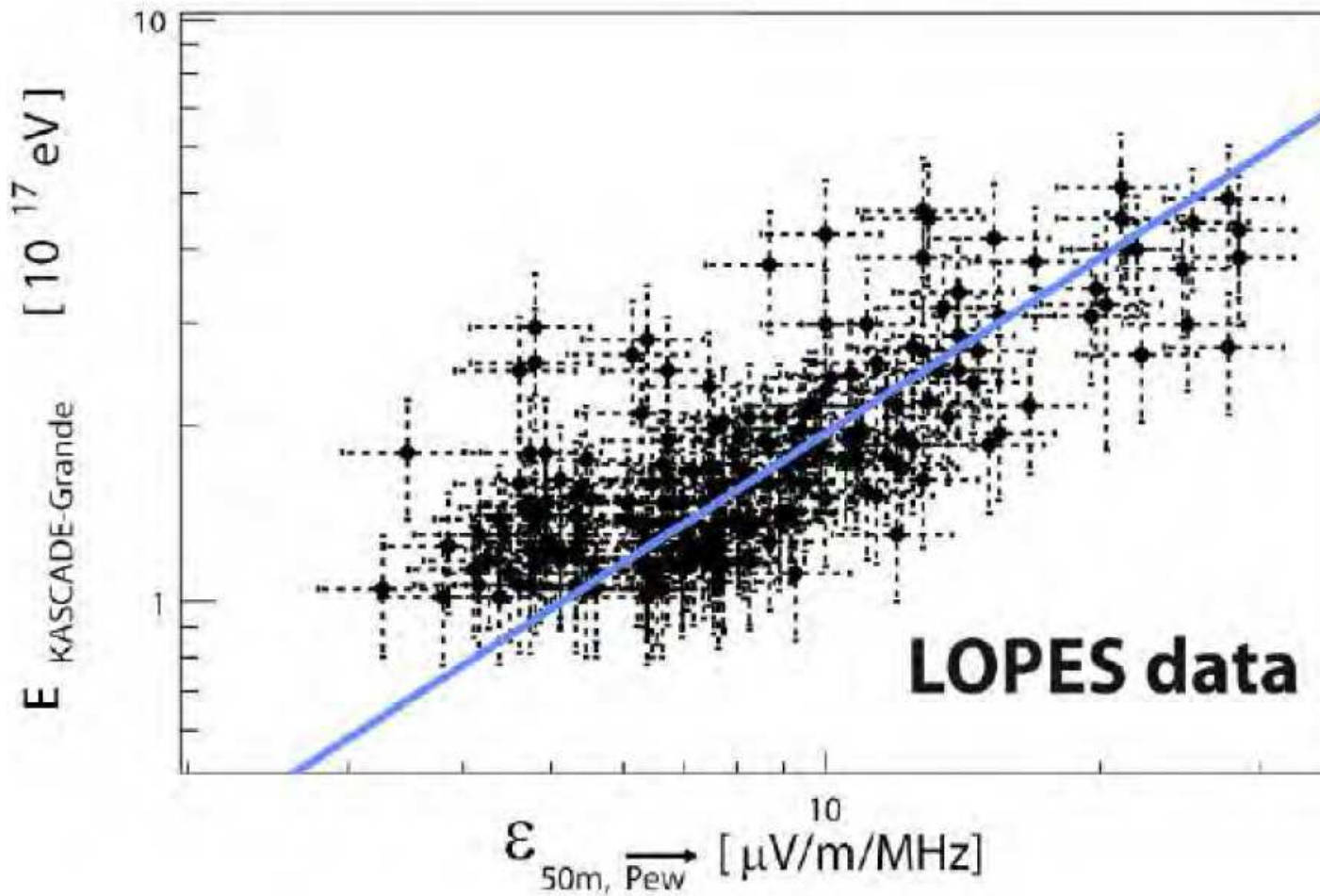
Dokładność wyznaczenia kierunku z porównania z detektorem KASCADE-Grande.



Detekcja radiowa

LOPES

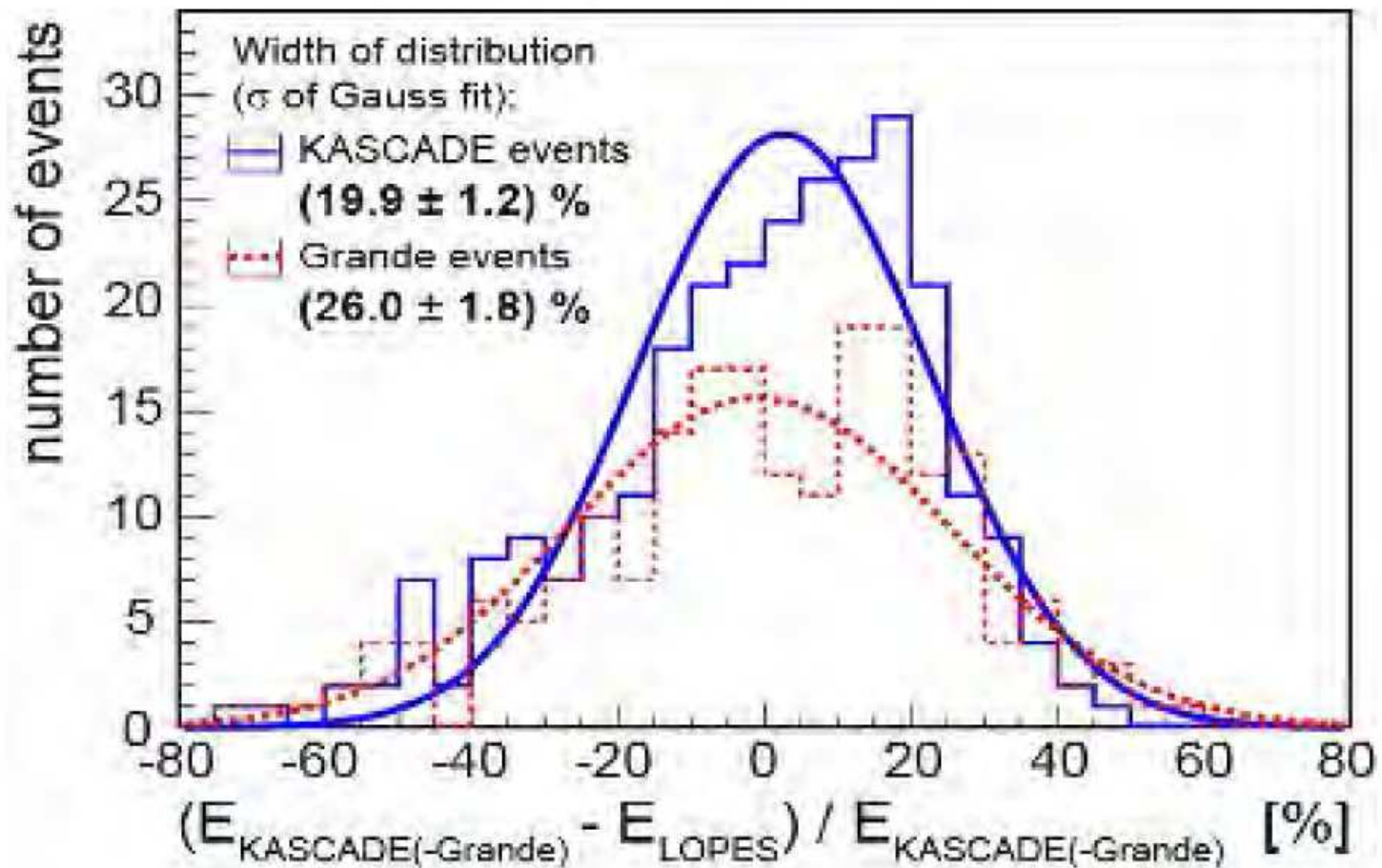
Dokładność wyznaczenia energii z porównania z detektorem KASCADE-Grande.

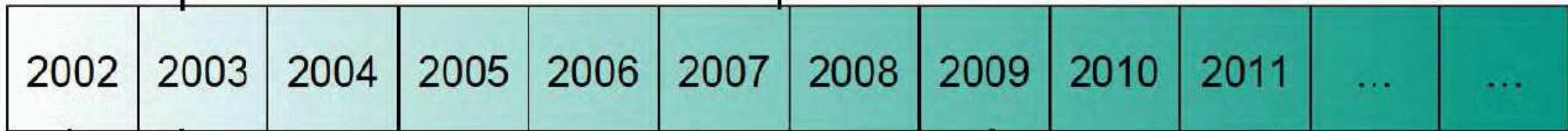
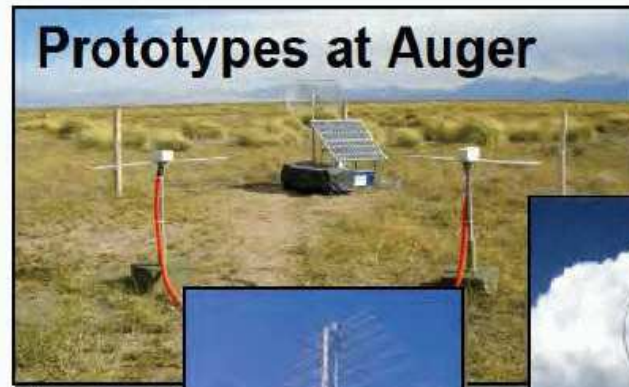


Detekcja radiowa

LOPES

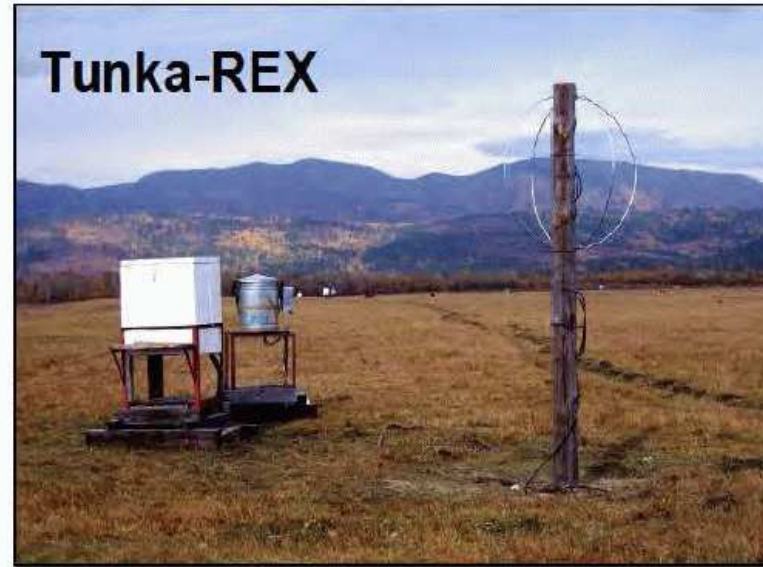
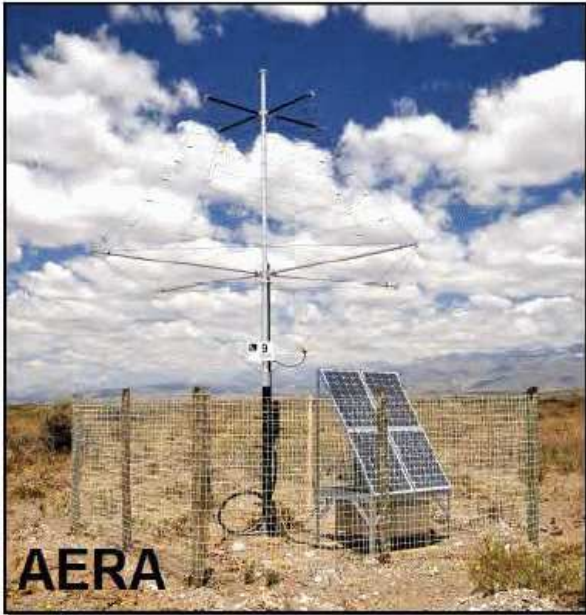
Dokładność wyznaczenia energii z porównania z detektorem KASCADE-Grande.





Falcke & Gorham propose „geosynchrotron approach“

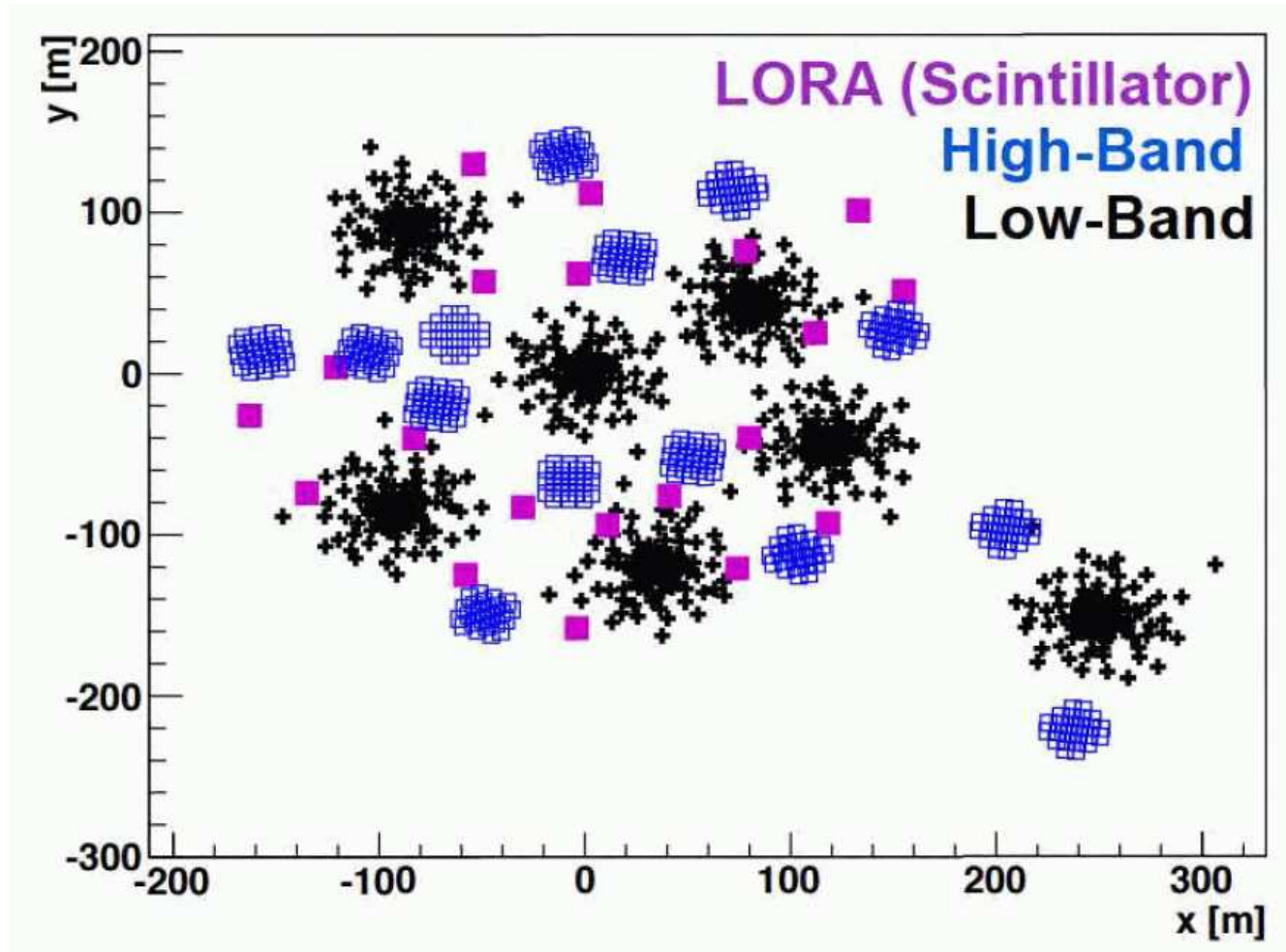




Detekcja radiowa

LOFAR

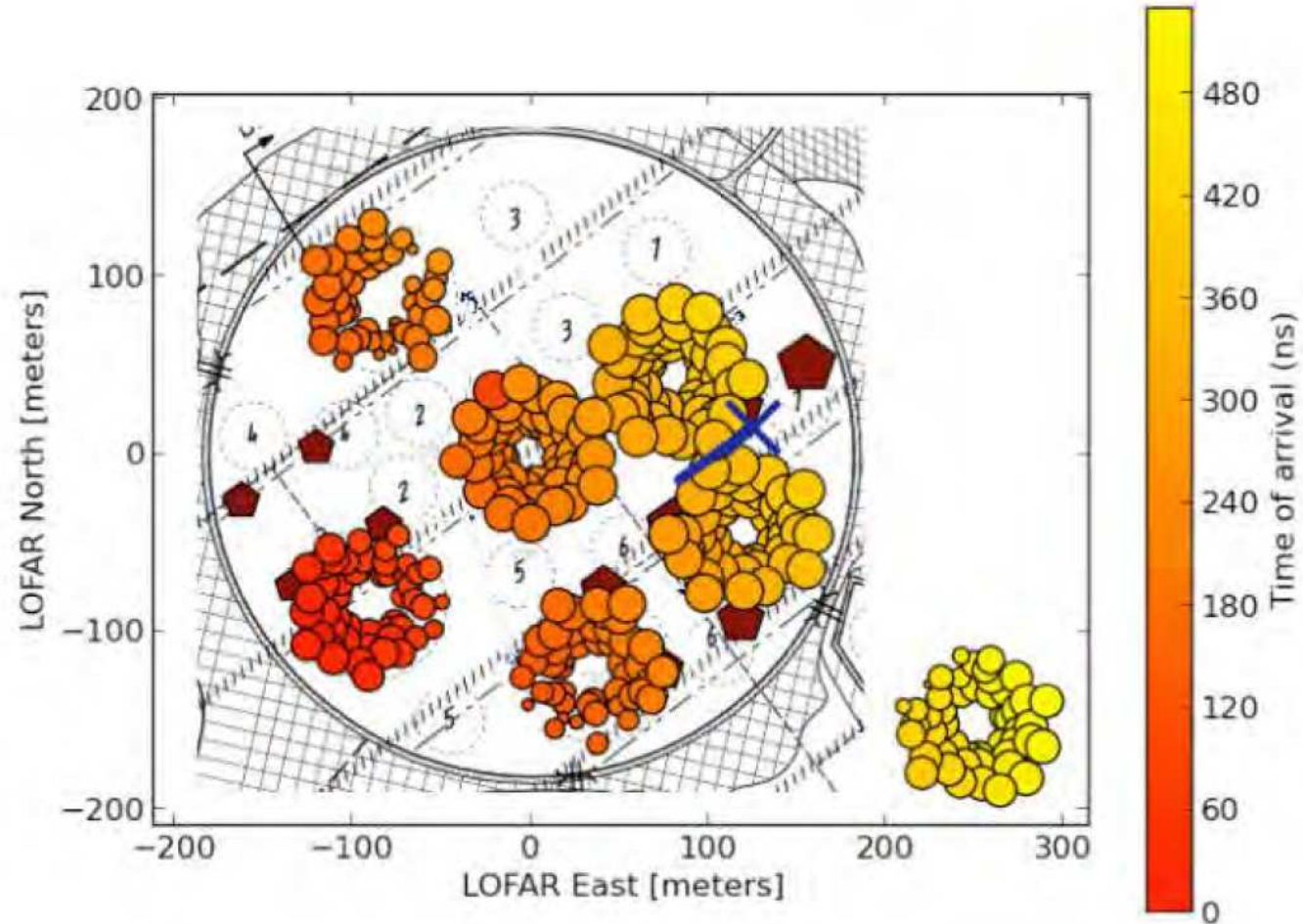
Zestawy anten pracujących w zakresie 30-80 MHz i 120-240 MHz + scyntylatory



Detekcja radiowa

LOFAR

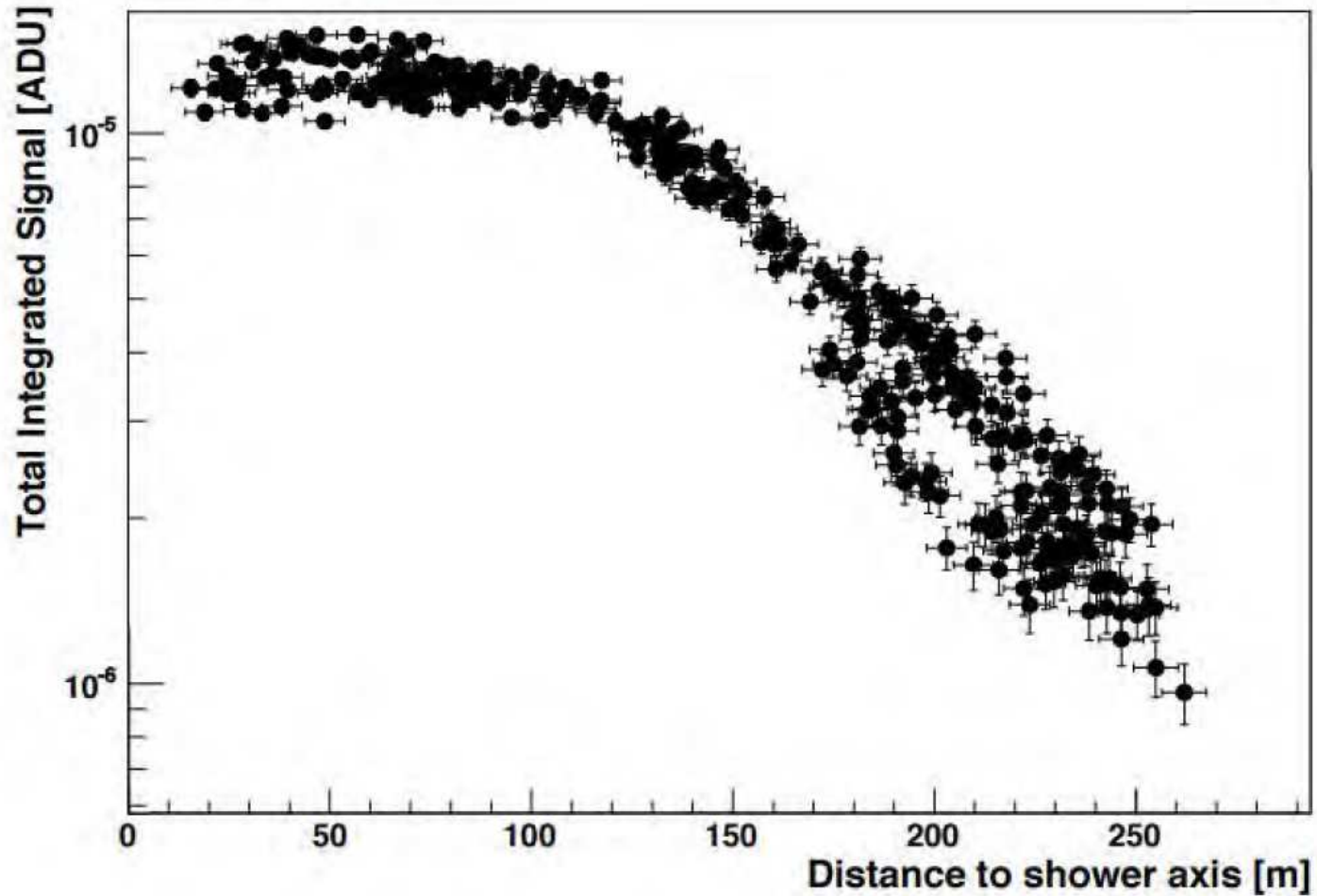
Przykładowy przypadek detekcji pęku (30-80 MHz)



Detekcja radiowa

LOFAR

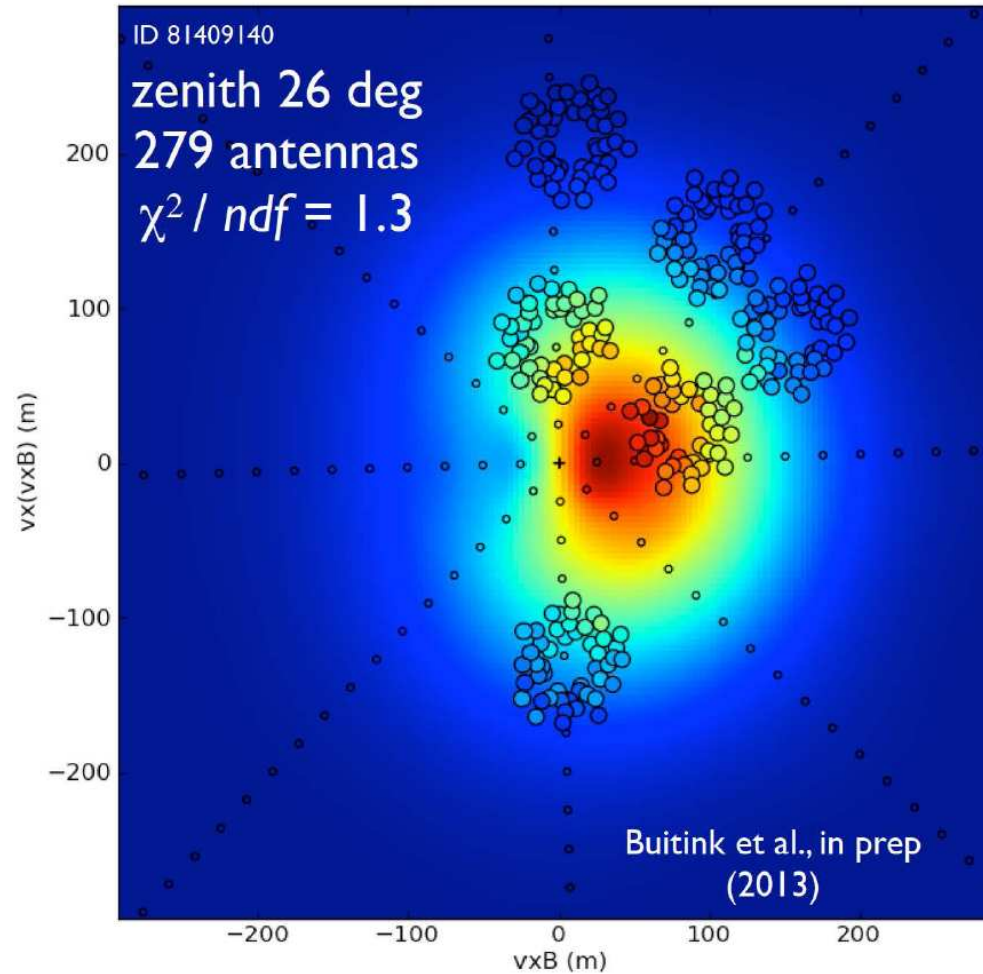
Przykładowy przypadek detekcji pęku (30-80 MHz) \Rightarrow rekonstrukcja profilu



Detekcja radiowa

LOFAR

Dopasowanie modelu rozwoju kaskady



Detekcja radiowa

Perspektywy

Możliwość pomiaru pęków atmosferycznych w zakresie fal radiowych przetestowana przez wiele eksperymentów: możliwa dokładna rekonstrukcja kierunku i energii.

Główny mankament: bardzo silne tło

⇒ pomiar radiowy wymaga wyzwiania innego typu detektorem

na razie możemy tylko wykorzystywać jako “uzupełnienie” detektorów

Ale szereg projektów jest już rozwijanych, żeby umożliwić czysto radiową detekcję pęków atmosferycznych.

Byłby to przełom bo detektor jest bardzo tani, odporny na warunki, moglibyśmy budować bardzo duże układy detekcyjne...