

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład IX

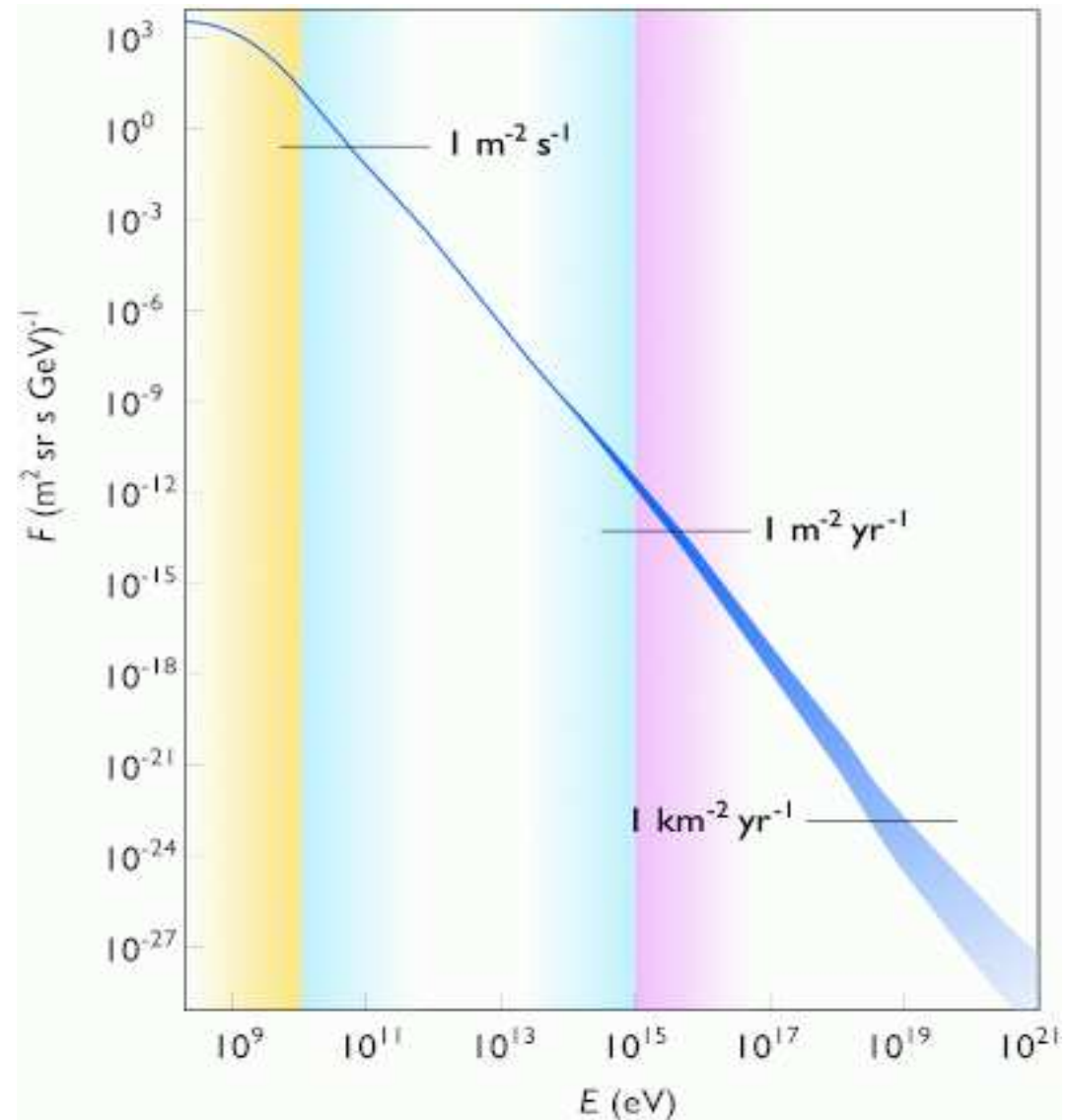
- Wielkie pęki atmosferyczne
- Eksperyment KASKADE
- Eksperyment AUGER
- Poszukiwanie źródeł UHECR
- Projekt JEM-EUSO
- Radiowa detekcja pęków atmosferycznych

Promieniowanie kosmiczne

Widmo

Pierwotne promieniowanie kosmiczne (cząstki naładowane) docierające do atmosfery Ziemi

Przyjmuje się, że promieniowanie do energii rzędu 10^{15-16} eV przyspieszane jest w falach uderzeniowych rozchodzących się po wybuchu supernowych \Rightarrow mechanizm Fermiego

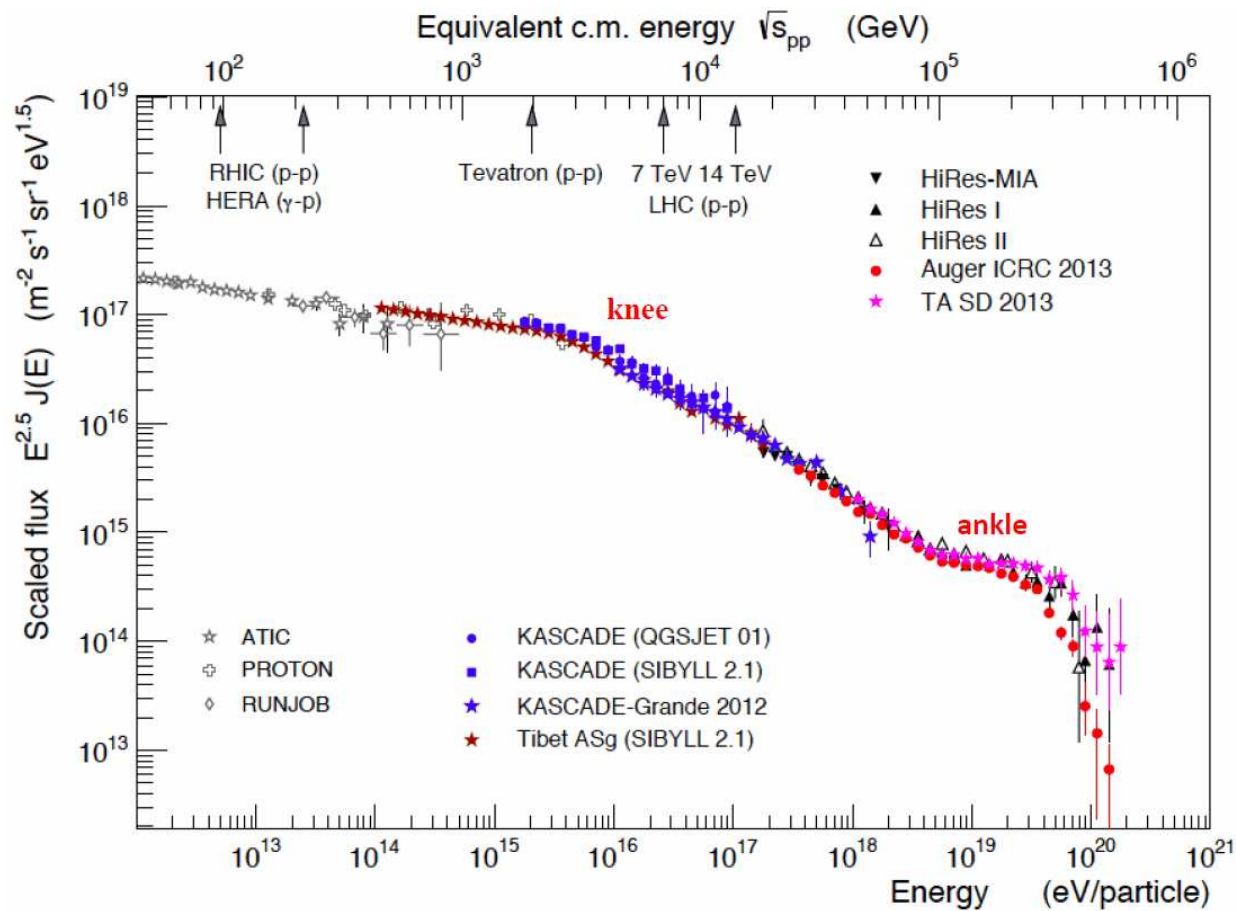


Promieniowanie kosmiczne

Widmo

Powyżej 10^{15} – 10^{16} eV obserwujemy zmiany w nachyleniu widma.

⇒ mogą sugerować różne inne i/lub mechanizmy produkcji...



Promieniowanie kosmiczne

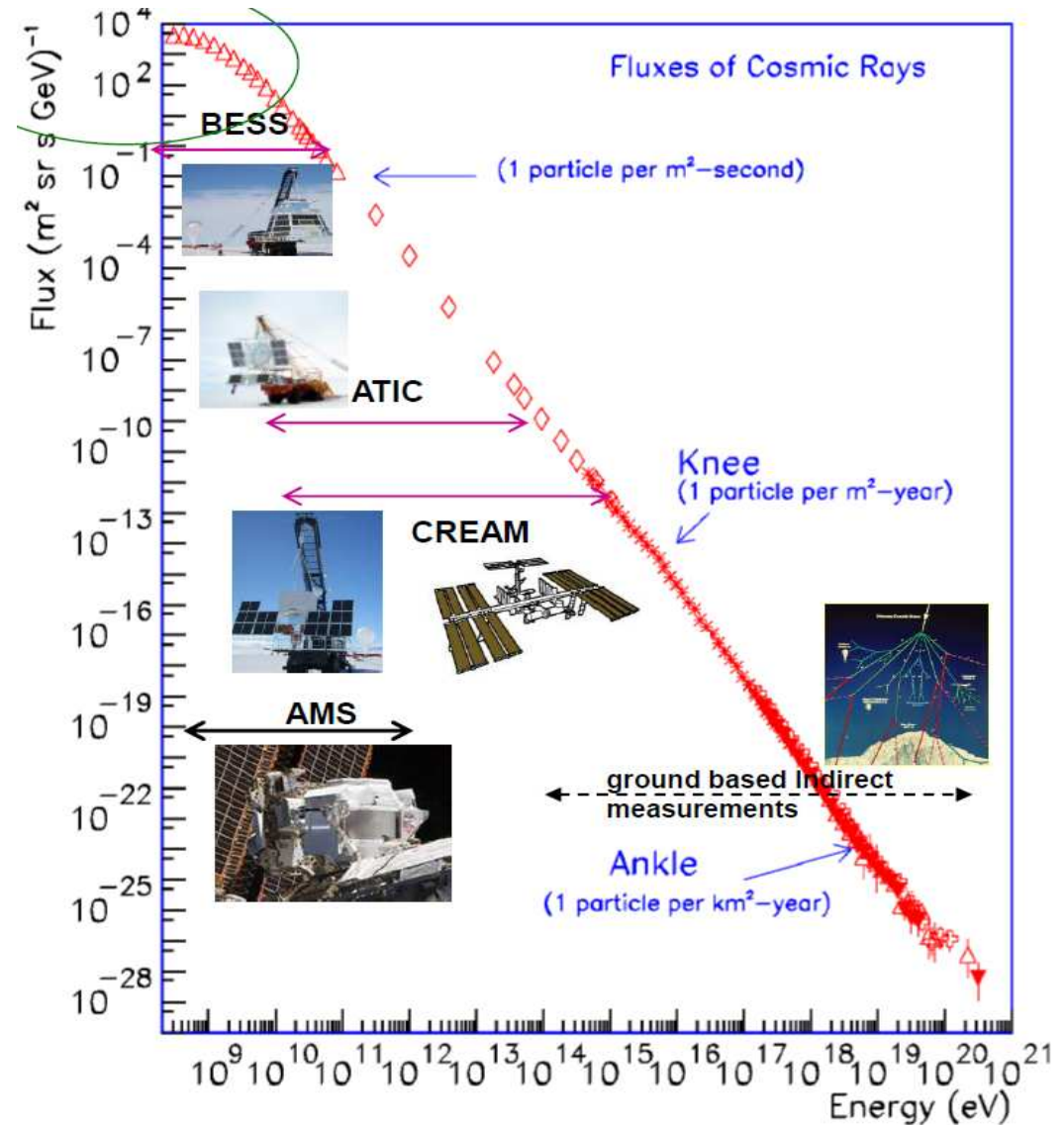
Pomiar bezpośredni

Pierwotne promieniowanie kosmiczne można mierzyć:

- poza atmosferą ziemską - eksperymenty satelitarne
- w górnych warstwach atmosfery - eksperymenty balonowe

Ale powyżej 10^{15} eV strumień staje się zbyt mały

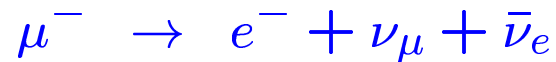
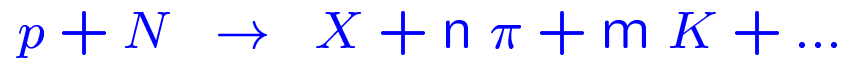
⇒ możliwa jedynie detekcja pośrednia na powierzchni Ziemi



Promieniowanie kosmiczne

Wtórne promieniowanie kosmiczne

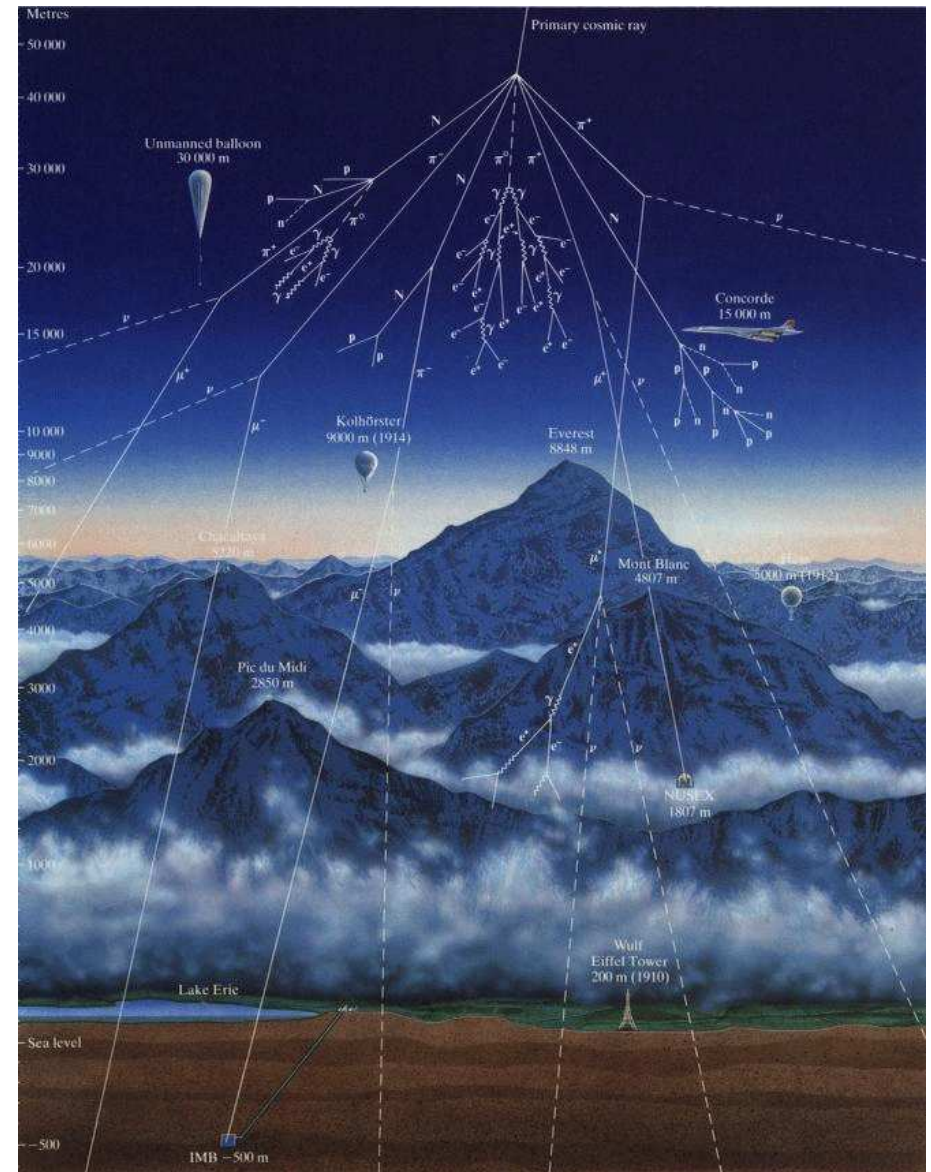
Promieniowanie pierwotne oddziałuje w atmosferze Ziemi. Produkowane są liczne cząstki wtórne, głównie **piony i kaony**:



Docierają do powierzchni Ziemi

- miony $\mu^\pm \sim 70\%$
- elektrony $e^\pm \sim 25\%$
- protony, piony $\pi^\pm \sim 3\%$

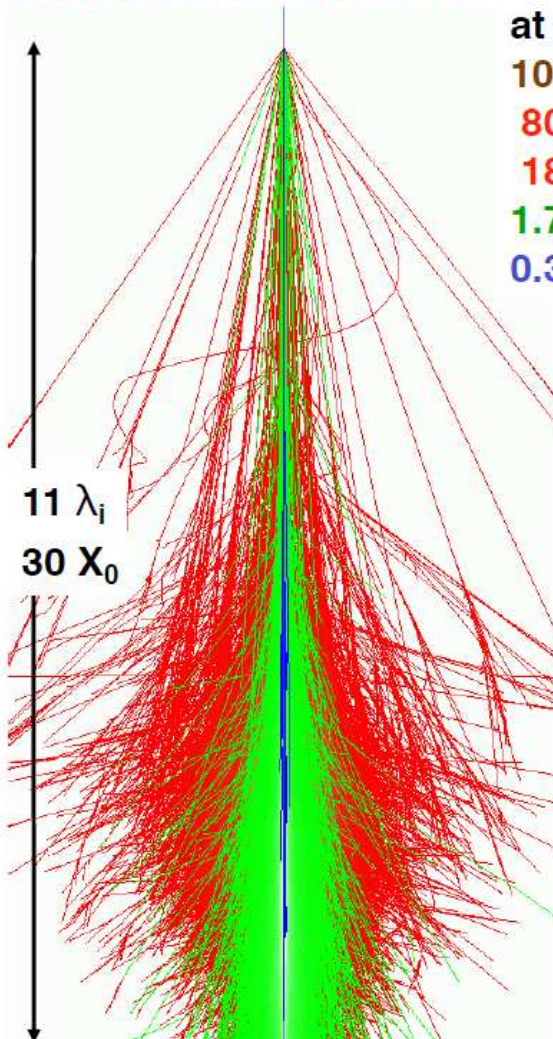
Łącznie rzędu 180 na $m^2 \cdot s$
większość w zakresie energii rzędu GeV



Promieniowanie kosmiczne

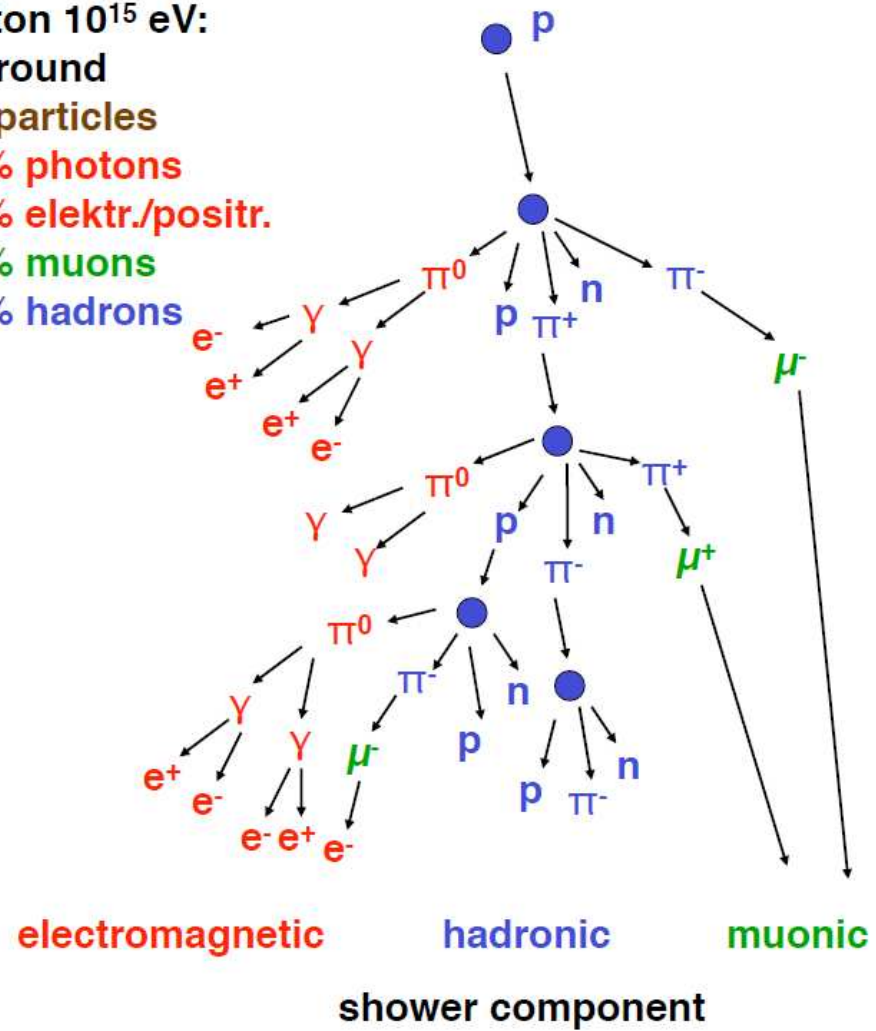
Wielkie pęki atmosferyczne

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

Rozwój kaskady W przypadku kaskady elektromagnetycznej.

Droga radiacyjna w powietrzu $X_0 = 36.7 \text{ g/cm}^2$

Podział energii średnio po przebyciu $d_{\frac{1}{2}} = X_0 \cdot \ln 2$

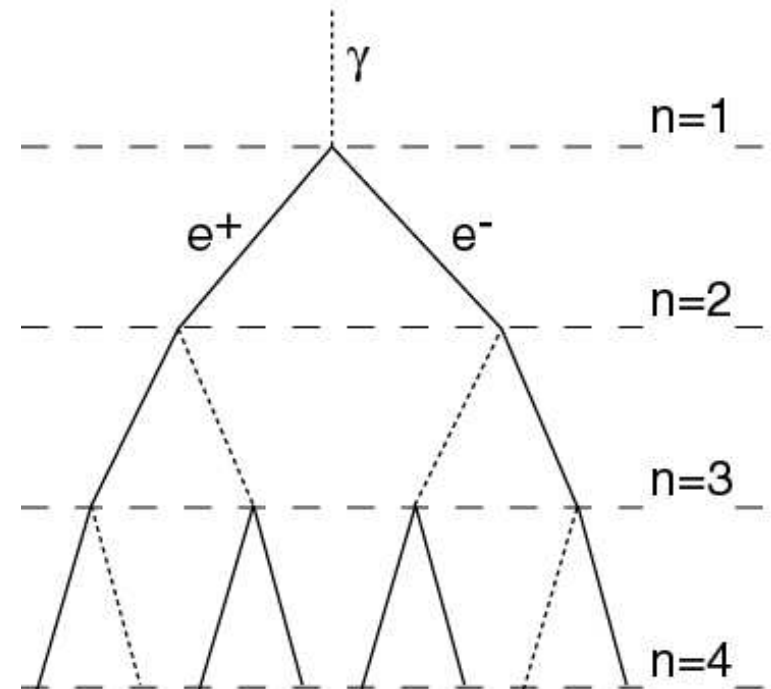
Rozwój kaskady kończy się gdy energia cząstek spada do poziomu energii krytycznej $E_c = 85 \text{ MeV}$

Liczba cząstek w maksimum kaskady:

$$N_{max} \sim \frac{E_0}{E_c}$$

Pozycja maksimum:

$$x_{max} \sim X_0 \cdot \ln \frac{E_0}{E_c}$$

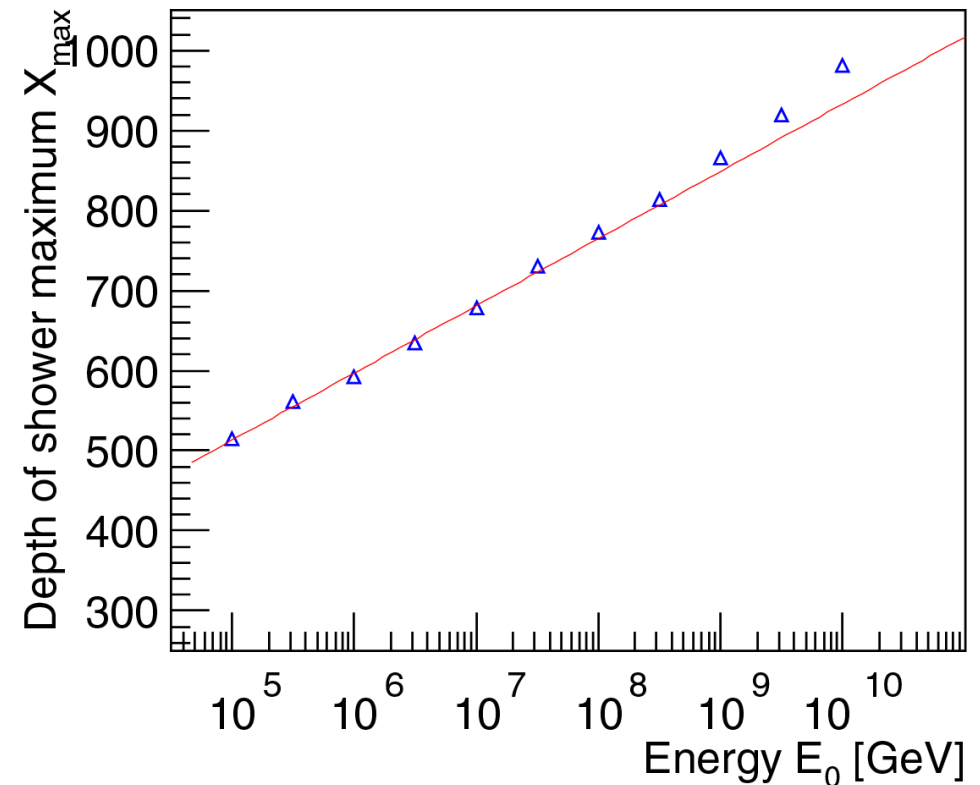
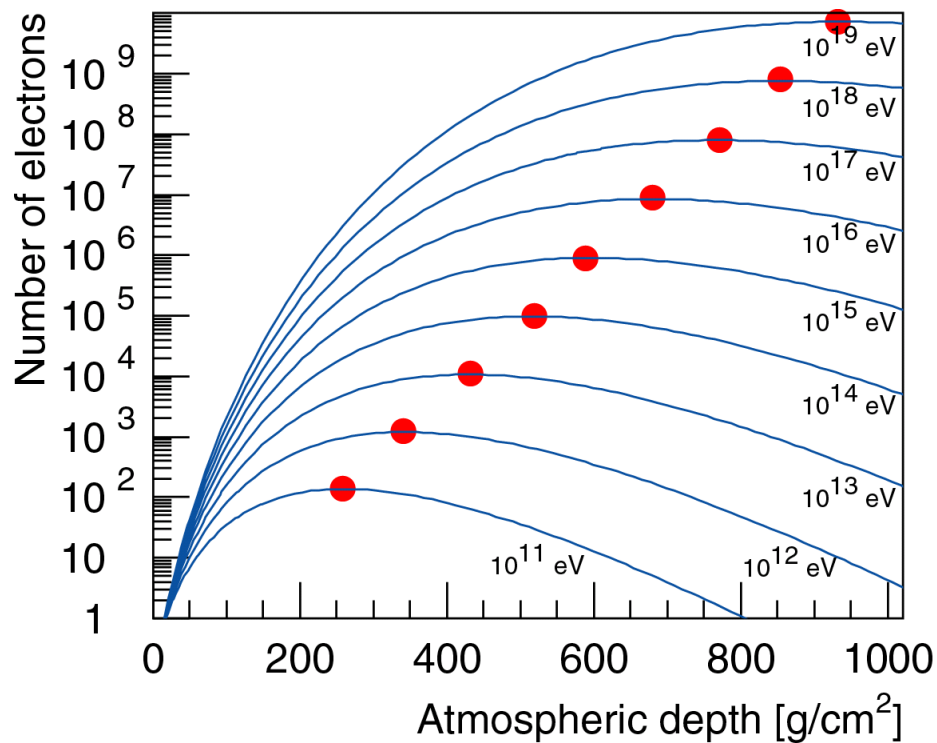


Wielkie pęki atmosferyczne

Rozwój kaskady W przypadku kaskady elektromagnetycznej.

Wyniki symulacji numerycznej rozwoju kaskady. Głębokość maksimum kaskady:

$$X_{max}^{\gamma} \approx 600 \frac{g}{cm^2} + 84 \frac{g}{cm^2} \cdot \log_{10} \left(\frac{E_0}{1 PeV} \right)$$



Wielkie pęki atmosferyczne

Rozwój kaskady W przypadku kaskady hadronowej.

Dominują procesy typu $\pi + A \rightarrow A' + N\pi$ ($N \sim 15$)

Średnia droga π na oddziaływanie: $\lambda_{int} \sim 120 \text{ g/cm}^2$

Średnio 1/3 pionów to $\pi^0 \Rightarrow$ natychmiast się rozpadają

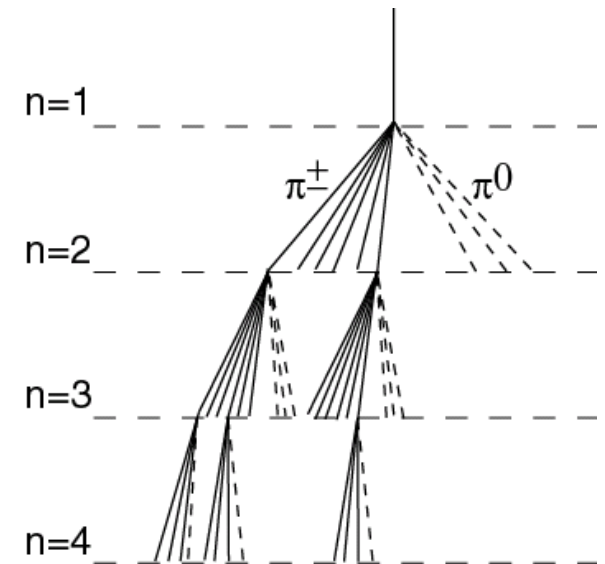
Energia krytyczna $E_c^\pi \sim 20 \text{ GeV}$

poniżej tej energii zaczynają dominować rozpady...

Liczba cząstek naładowanych w maksimum kaskady:

$$N_{max}^{ch} \sim \left(\frac{E_0}{E_c} \right)^{0.85}$$

gdzie wykładnik 0.85 wynika z założonej krotności cząstek oraz stosunku pionów naładowanych do obojętnych



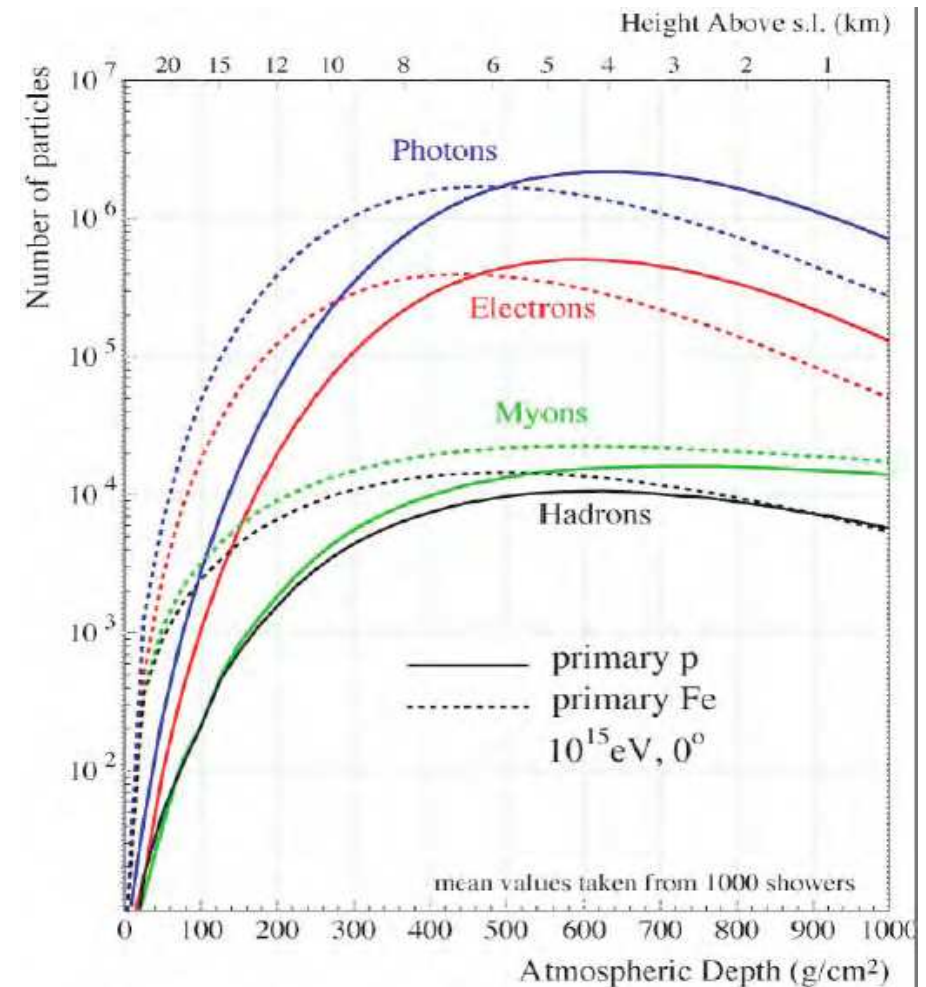
Wielkie pęki atmosferyczne

Profil podłużny

W przypadku ciężkich jąder przyjmujemy, że oddziaływanie jądra o energii E_0 i liczbie masowej A odpowiada złożeniu A oddziaływań protonów o energii E_0/A .

⇒ zasięg ciężkich jąder w atmosferze jest mniejszy niż protonów o tej samej energii

⇒ jedno z głównych kryteriów oceny składu promieniowania



Wielkie pęki atmosferyczne

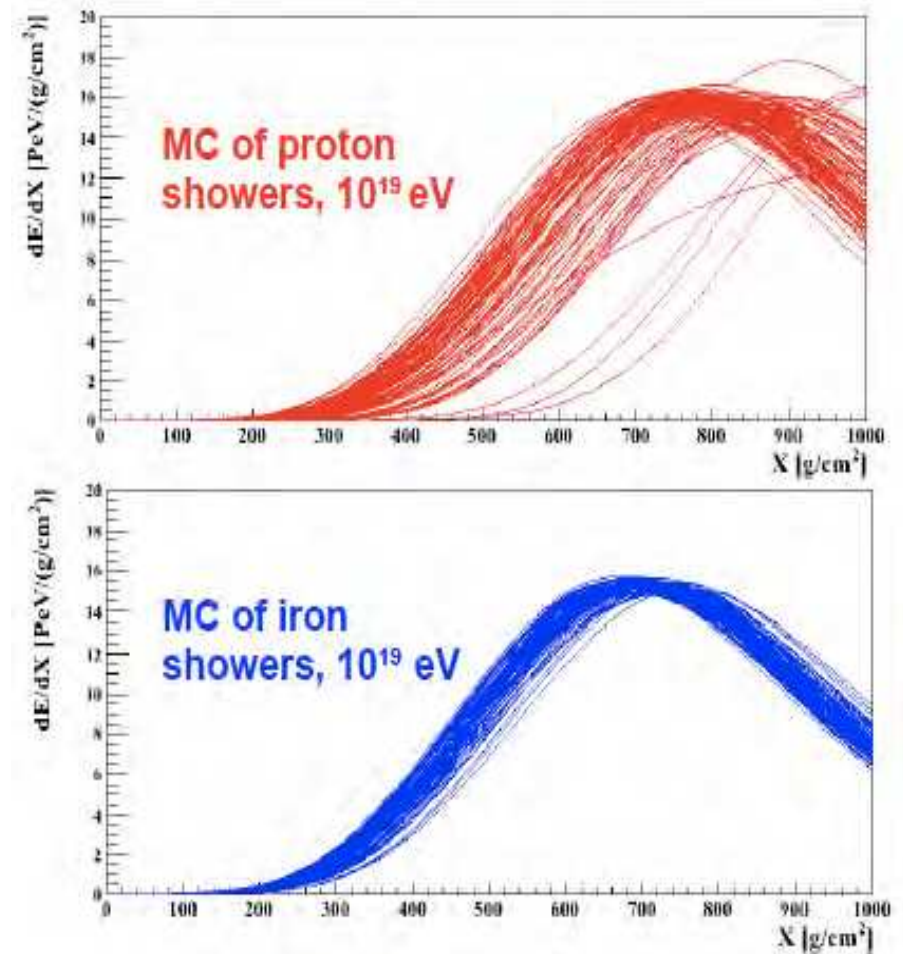
Profil podłużny

W przypadku **ciężkich jąder** przyjmujemy, że oddziaływanie jądra o energii E_0 i liczbie masowej A odpowiada złożeniu A oddziaływań protonów o energii E_0/A .

⇒ zasięg ciężkich jąder w atmosferze jest mniejszy niż protonów o tej samej energii

⇒ jedno z głównych kryteriów oceny składu promieniowania

Kaskady wywołane przez ciężkie jądra podlegają też mniejszym fluktuacjom...



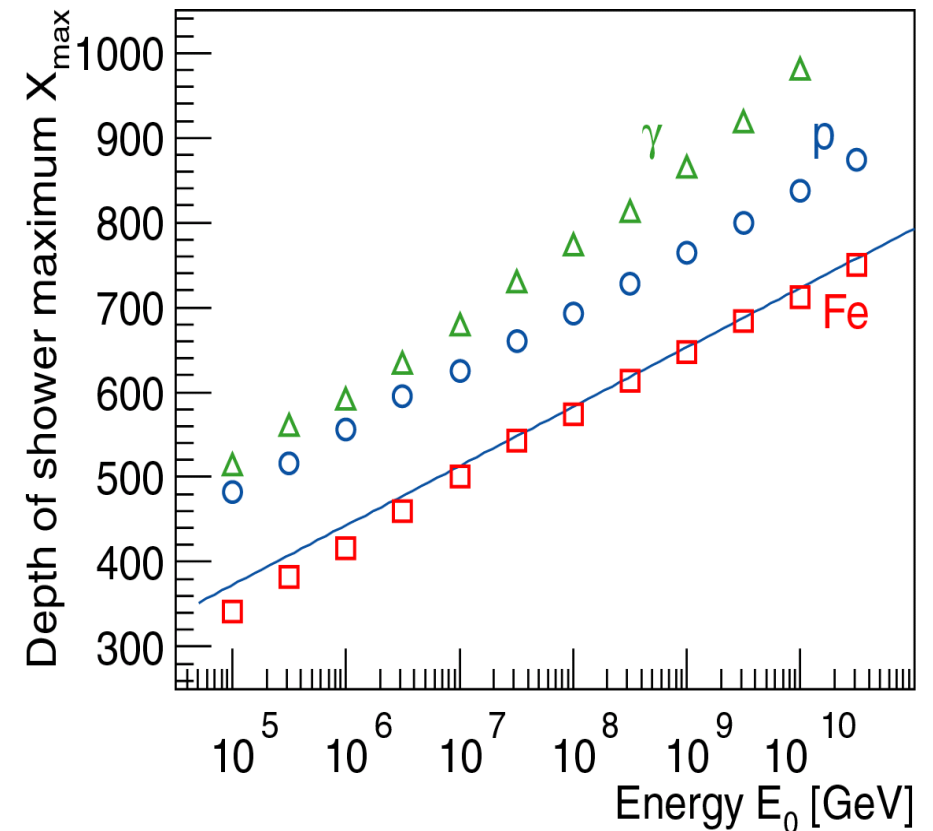
Wielkie pęki atmosferyczne

Profil podłużny

W przypadku **ciężkich jąder** przyjmujemy, że oddziaływanie jądra o energii E_0 i liczbie masowej A odpowiada złożeniu A oddziaływań protonów o energii E_0/A .

⇒ zasięg ciężkich jąder w atmosferze jest mniejszy niż protonów o tej samej energii

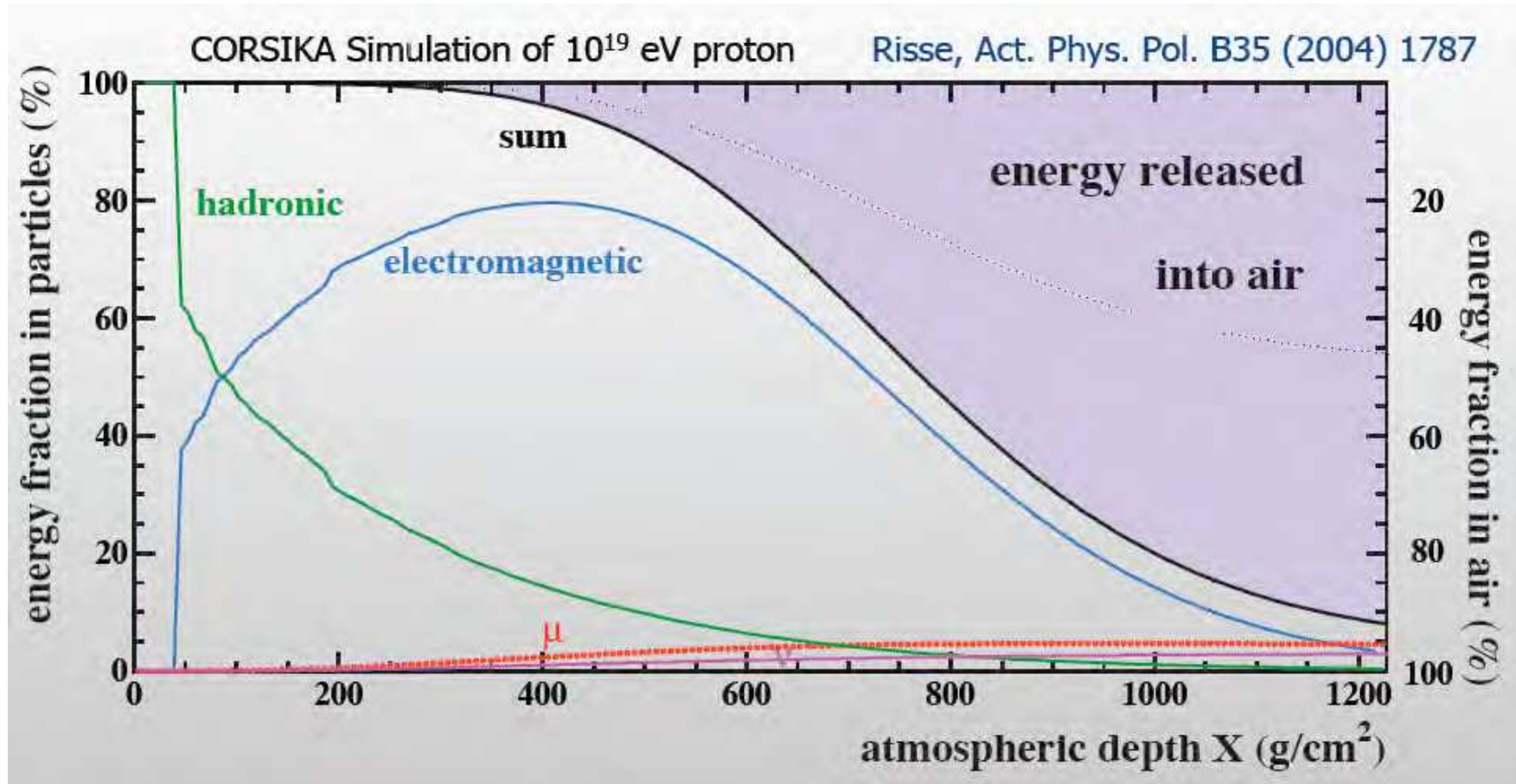
⇒ jedno z głównych kryteriów oceny składu promieniowania



Wielkie pęki atmosferyczne

Profil podłużny

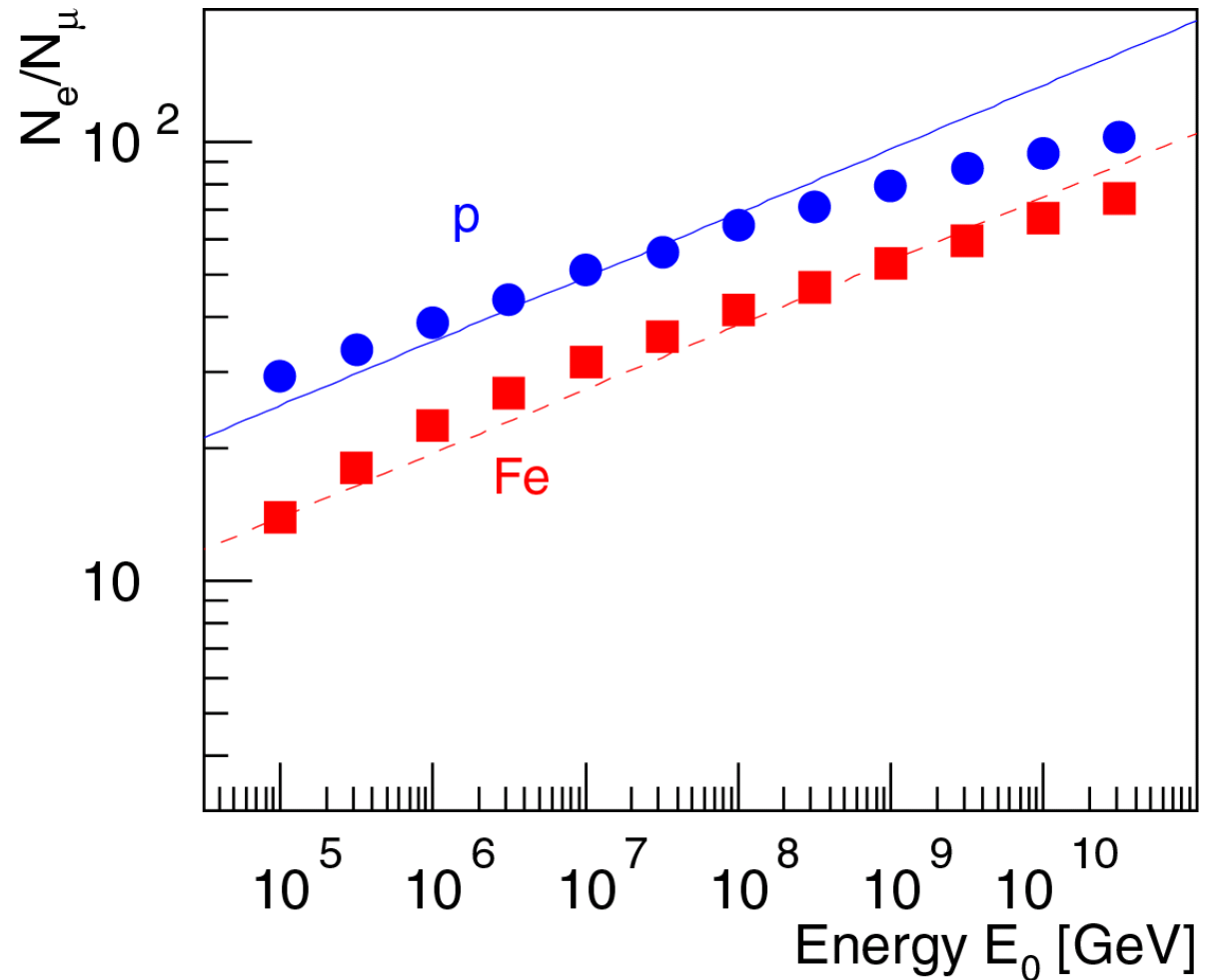
Przy powierzchni Ziemi przeważają miony i elektrony



Wielkie pęki atmosferyczne

Profil podłużny

Stosunek liczby elektronów i mionów w kaskadzie może także służyć określeniu składu promieniowania



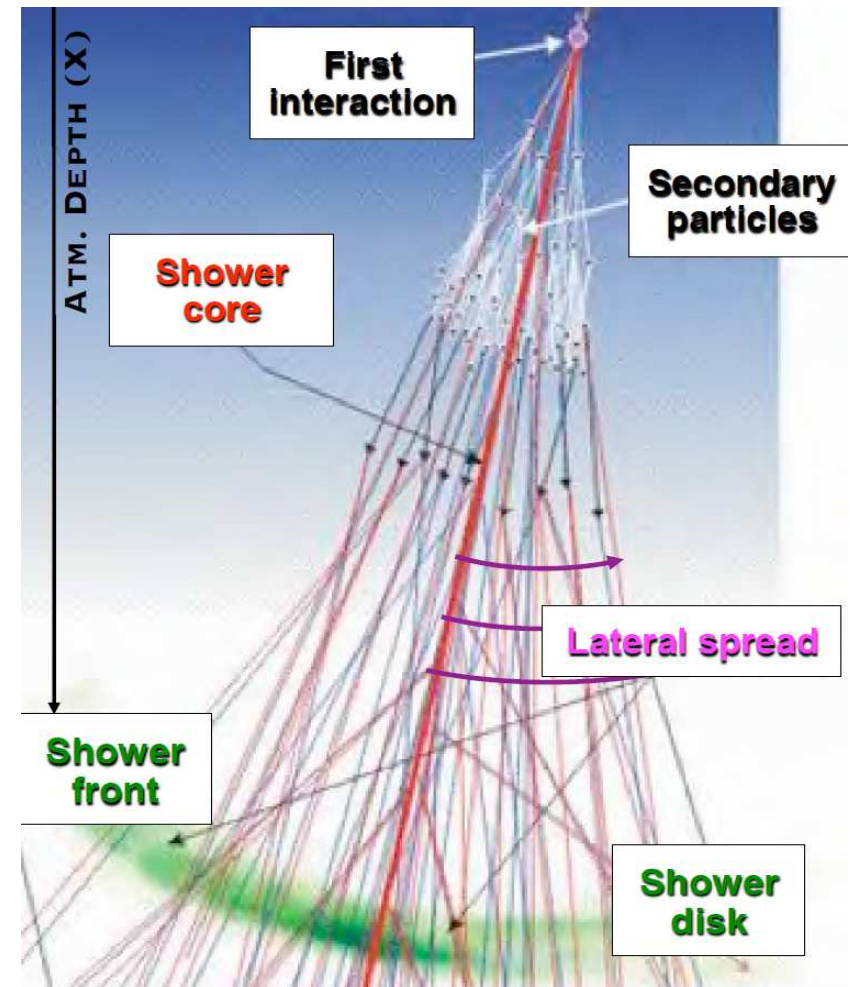
Wielkie pęki atmosferyczne

Profil poprzeczny

Cząstki wtórne rozwijającej się kaskady tworzą wąską wiązkę \Rightarrow rdzeń.

Początkowy pęd poprzeczny oraz wielokrotne rozpraszanie w atmosferze prowadzi do poszerzania się kaskady \Rightarrow profil poprzeczny

Ze względu na różnice dróg w atmosferze czoło kaskady tworzy cienki, zakrzywiony dysk.

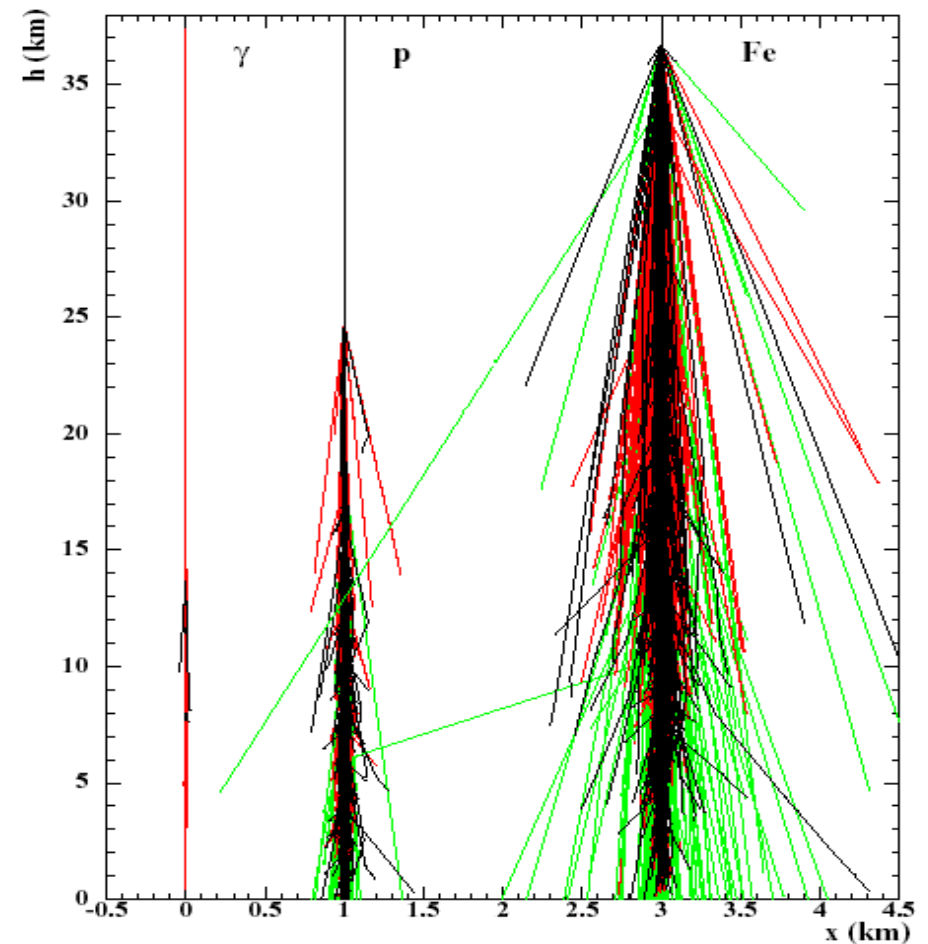


Wielkie pęki atmosferyczne

Profil poprzeczny

Rozmiar poprzeczny kaskady o zadanej energii także zależy od rodzaju cząstki:

- najwęższe kaskady dla fotonów (i elektronów)
- najszersze dla ciężkich jąder



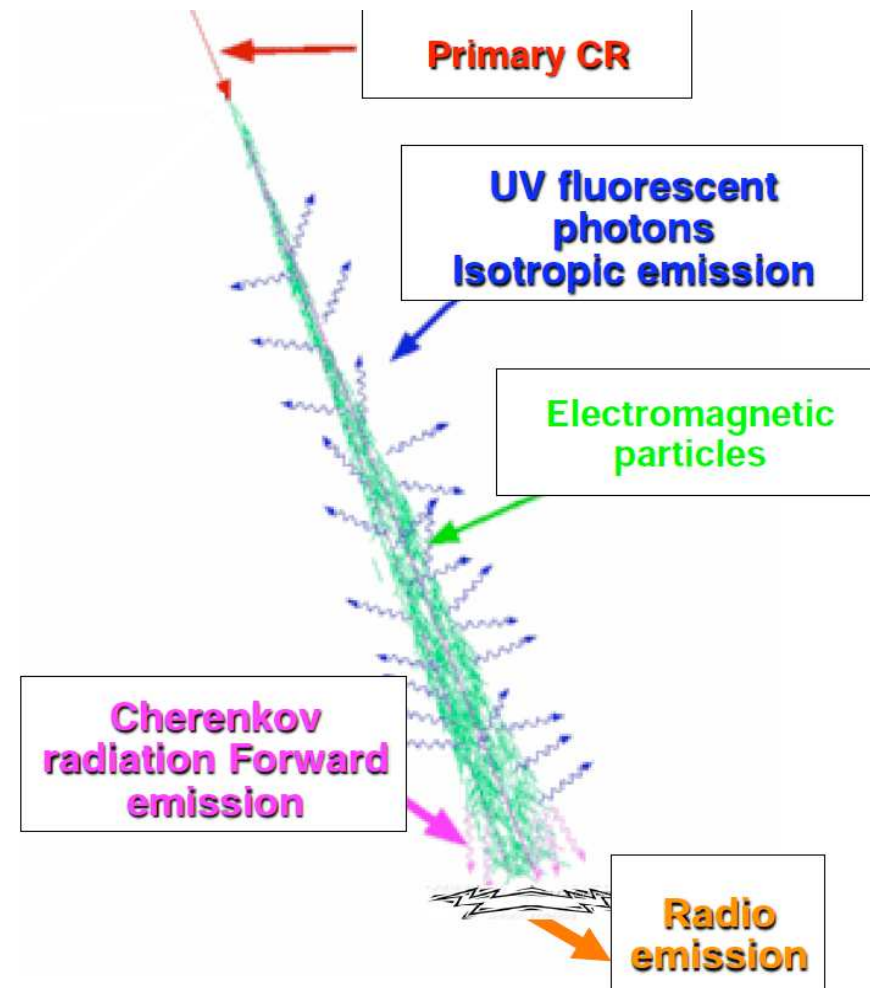
Wielkie pęki atmosferyczne

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...

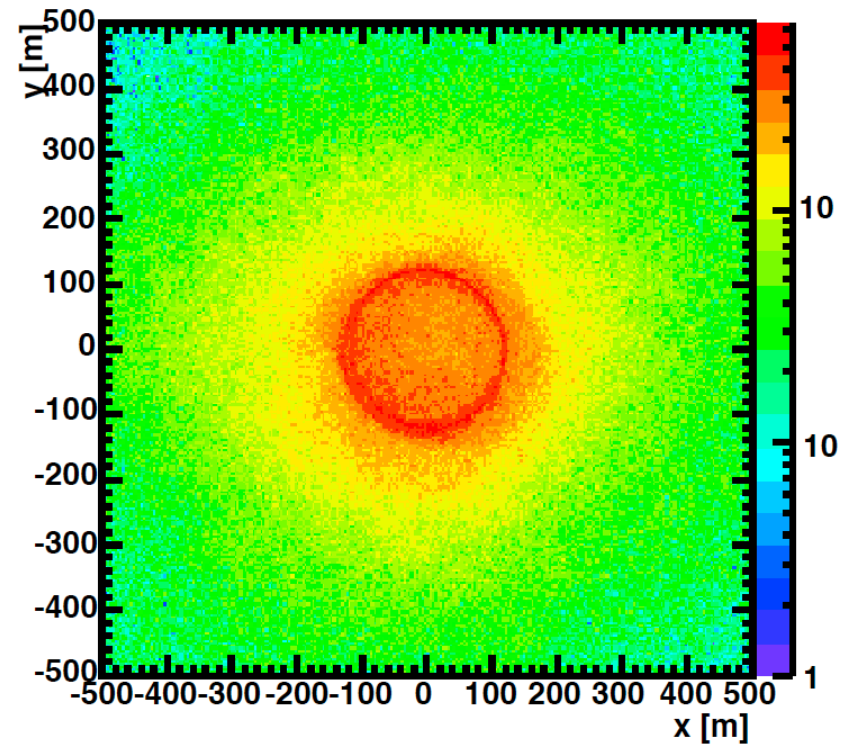
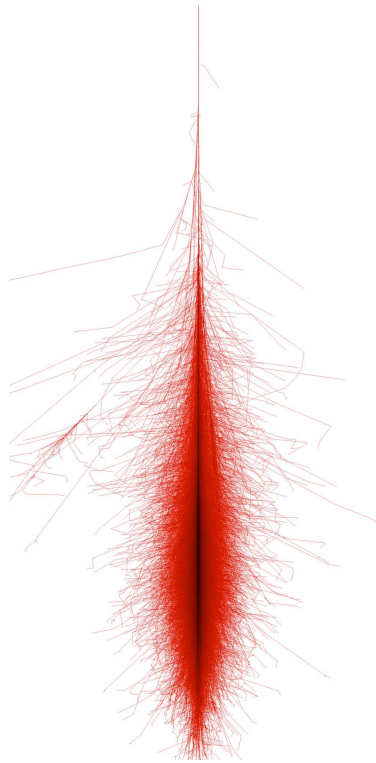


Wielkie pęki atmosferyczne

Promieniowanie Czerenkowa

Bardzo słaba (~ 10 fotonów/m²) emisja w ultrafiolecie (300–550 nm) pochodząca głównie od składowej elektromagnetycznej kaskady.

Foton

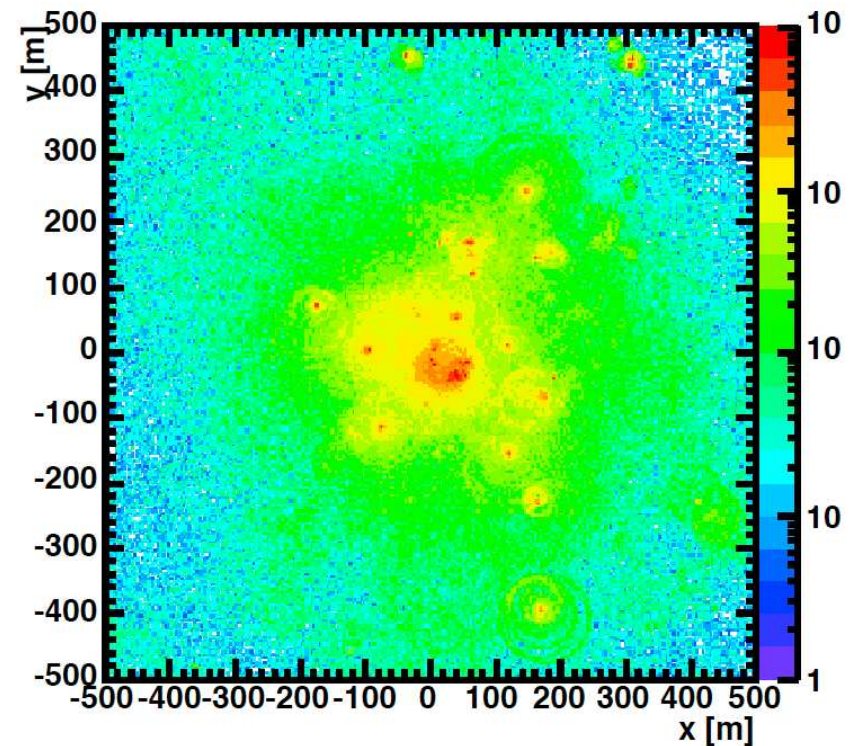
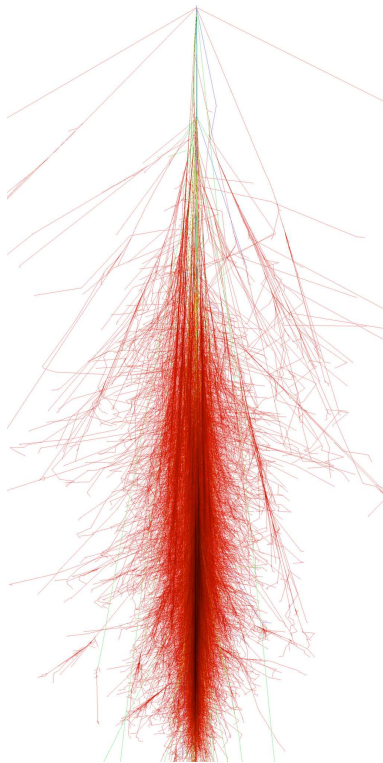


Wielkie pęki atmosferyczne

Promieniowanie Czerenkowa

Bardzo słaba (~ 10 fotonów/m²) emisja w ultrafiolecie (300–550 nm) pochodząca głównie od składowej elektromagnetycznej kaskady.

Proton



Wielkie pęki atmosferyczne

Fluorescencja

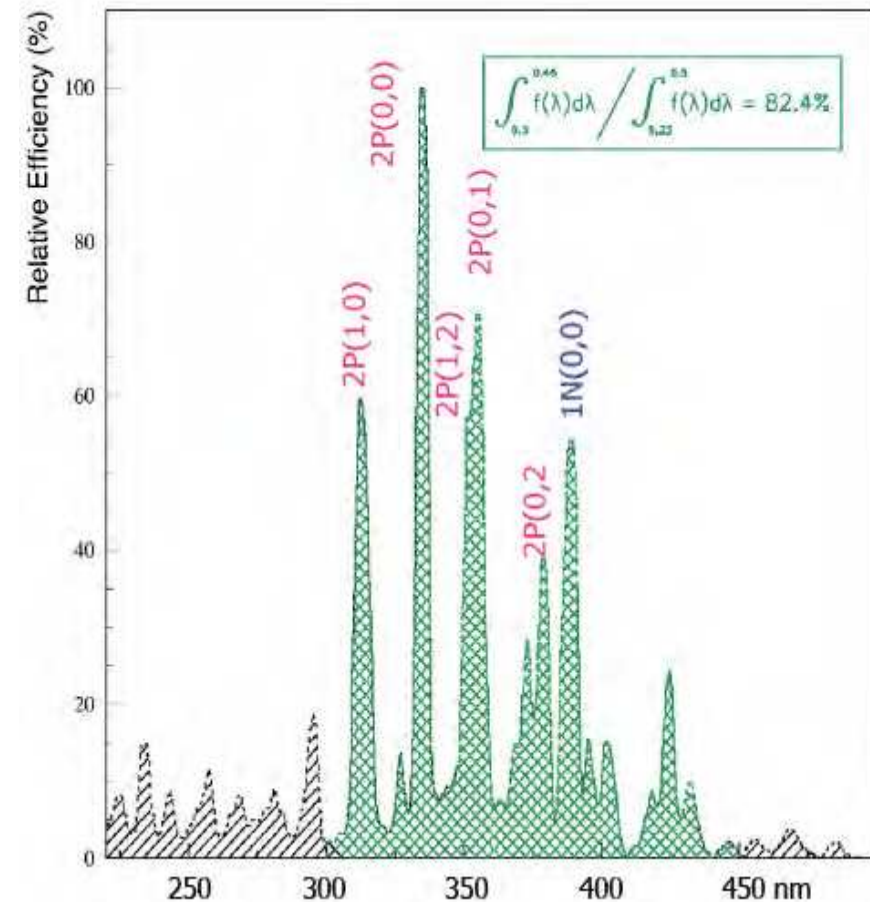
Obserwujemy głównie promieniowanie ultrafioletowe wzbudzonych cząsteczek azotu, w przedziale długości fali między 300 a 400 nm.

Emitowane w ten sposób jest jedynie ok. 0.5% energii traconej przez kaskadę w atmosferze.

Dodatkowo jest to promieniowanie izotropowe, możemy “łapać” jedynie niewielką jego część

⇒ możliwe do wykorzystania jedynie przy najwyższych energiach ($> 10^{17}$ eV)

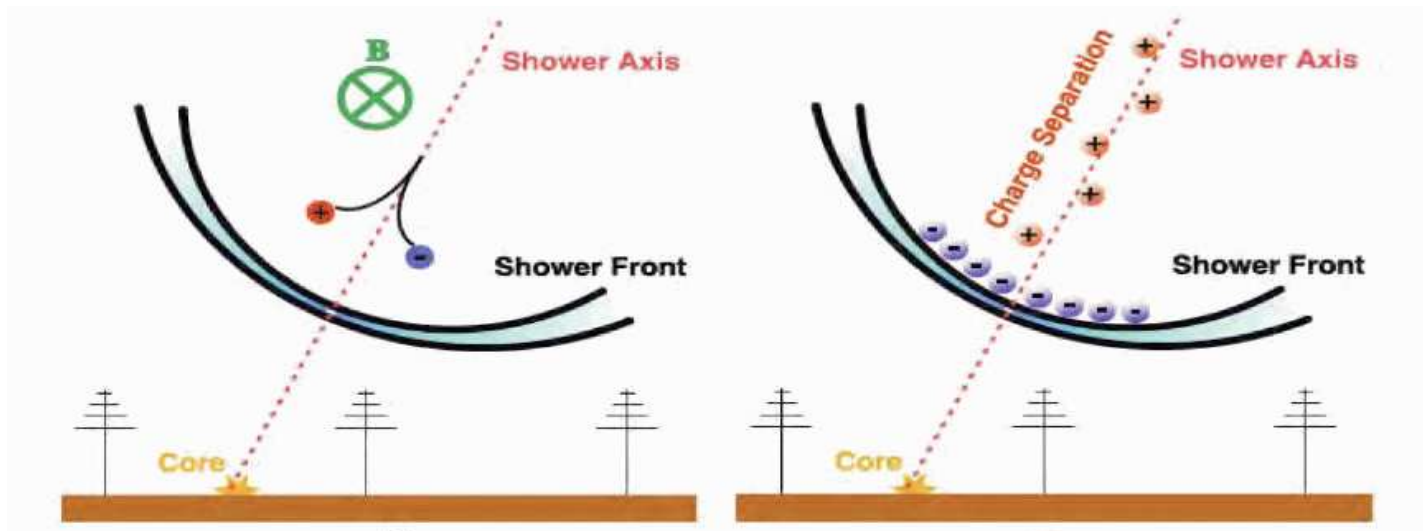
Wymaga szczególnych warunków obserwacyjnych (bezchmurne niebo, bezksiężycowa noc)



Wielkie pęki atmosferyczne

Emisja radiowa

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



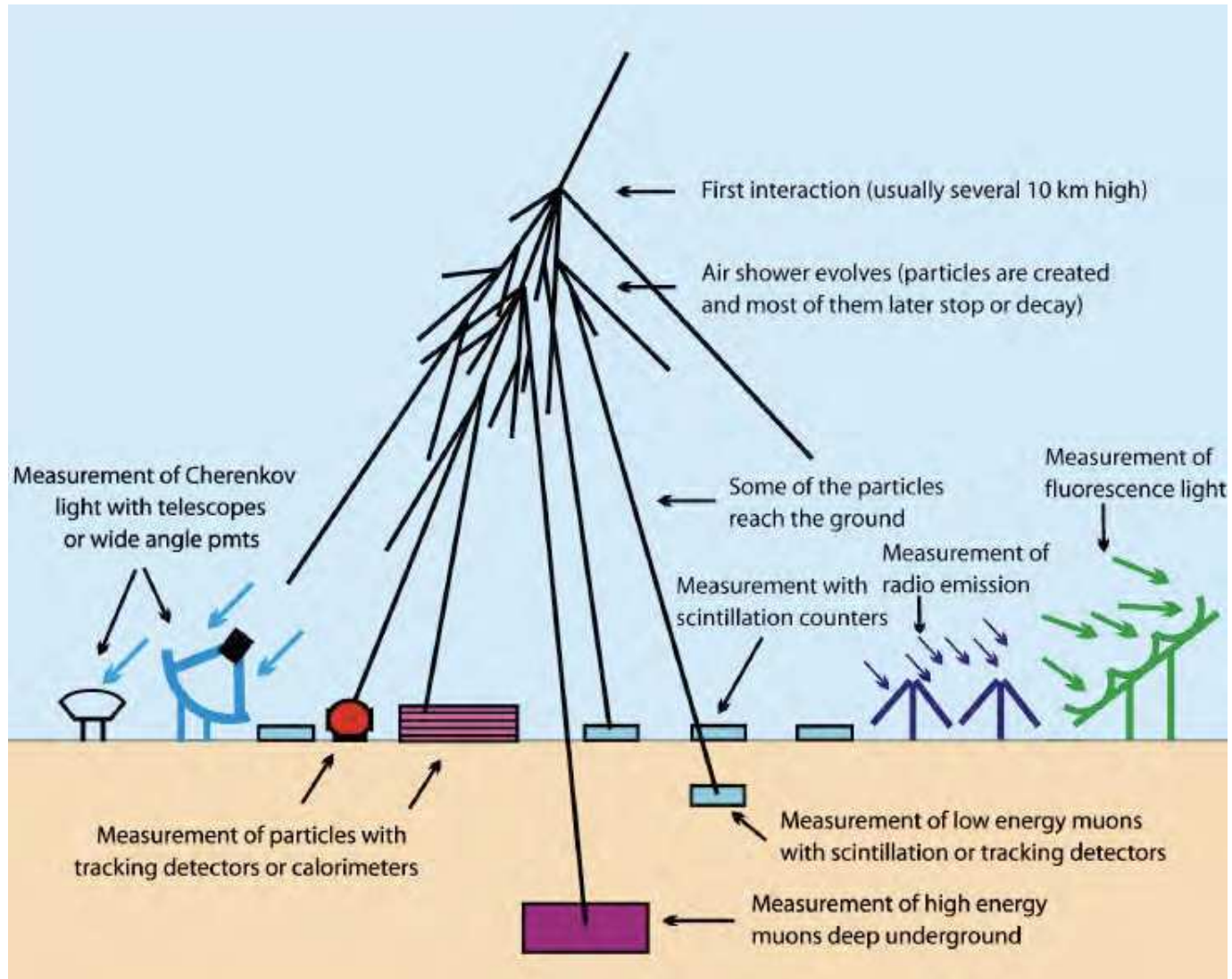
Wpływ ziemskiego pola magnetycznego (efekt geomagnetyczny)

Efekt Askariana:

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

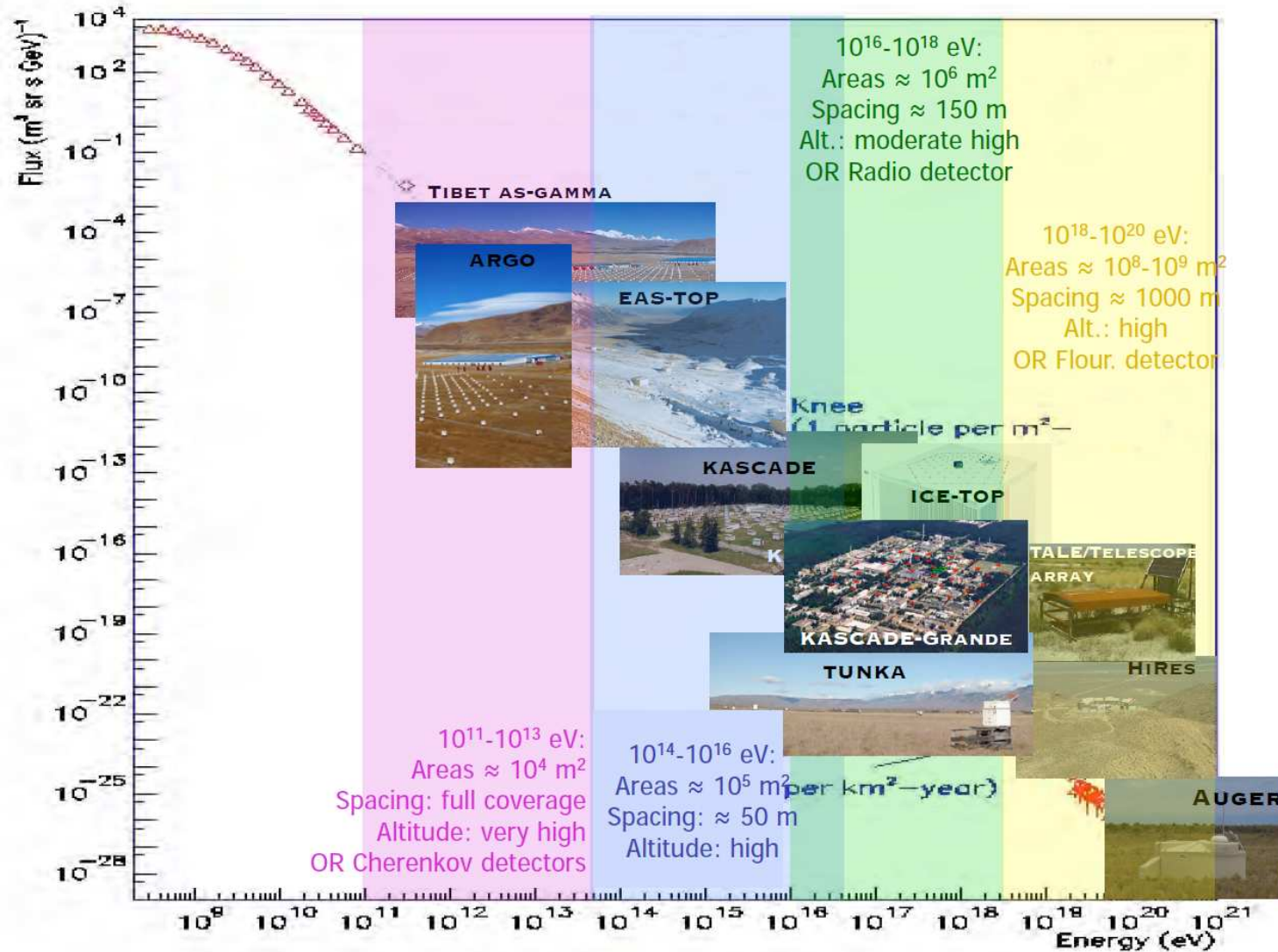
Wielkie pęki atmosferyczne

Metody detekcji



Wielkie pęki atmosferyczne

Eksperymenty

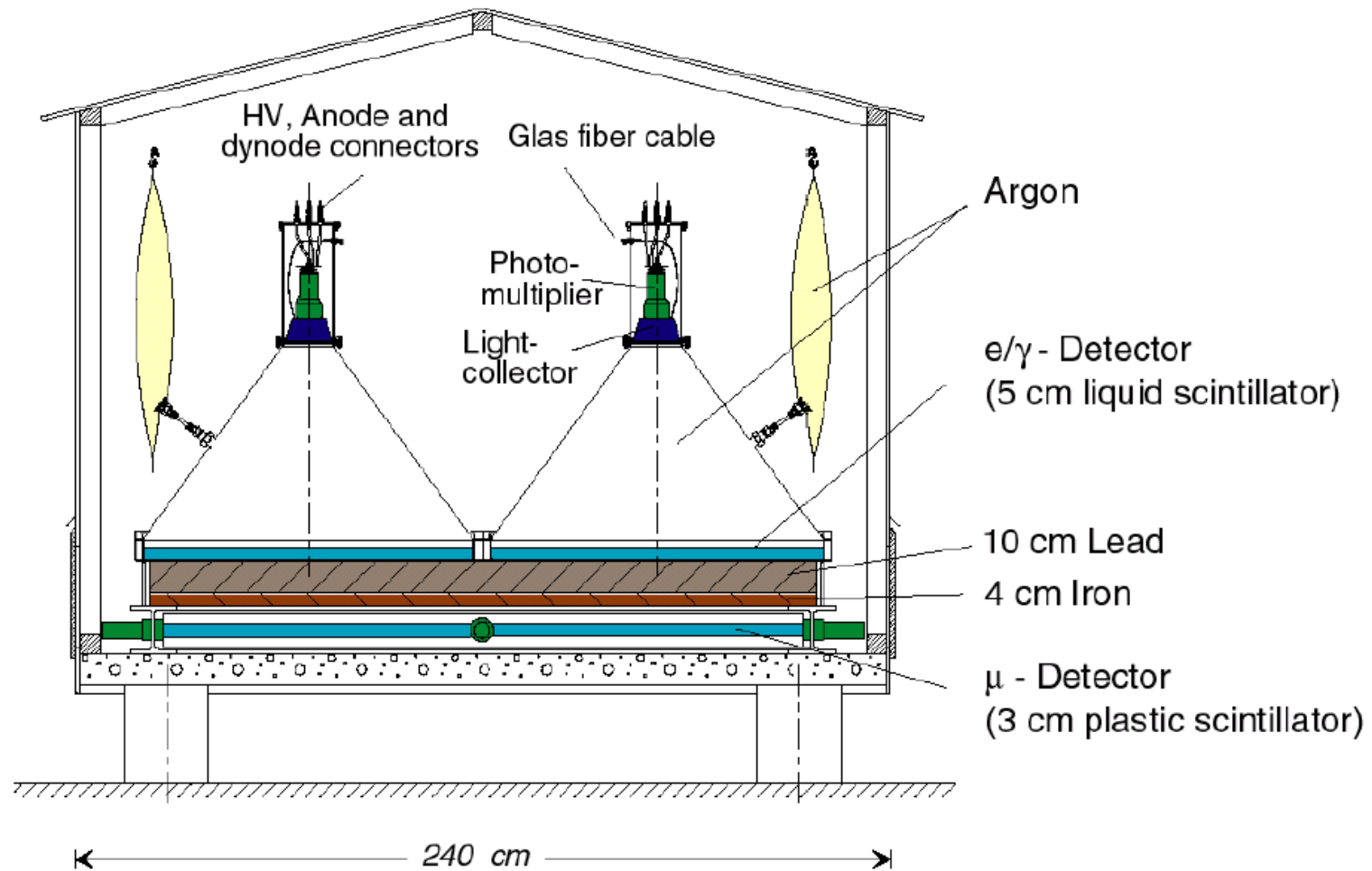


Detektor KASKADE (KIT, Karlsruhe)



KASKADE

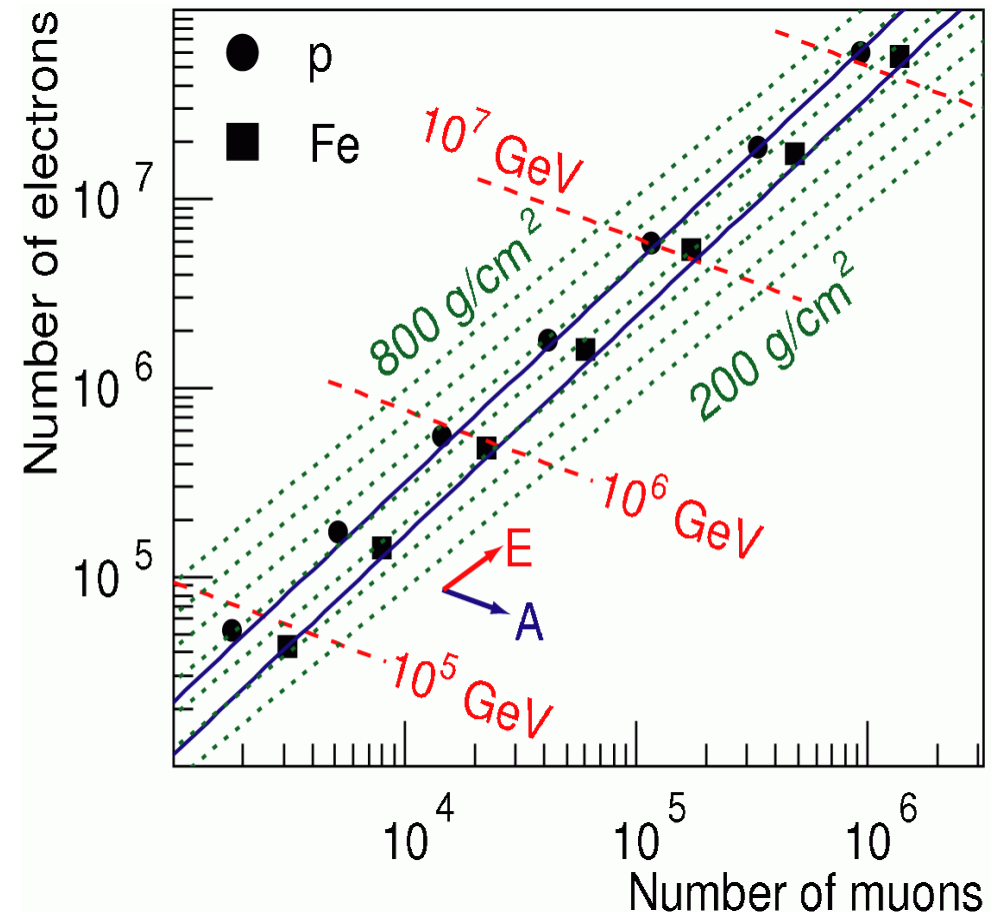
Detektor



KASKADE

Detektor

Mierząc niezależnie rozkłady elektronów i mionów docierających do powierzchni Ziemi, można wnioskować nie tylko o energii ale i typie cząstki pierwotnej.



KASKADE

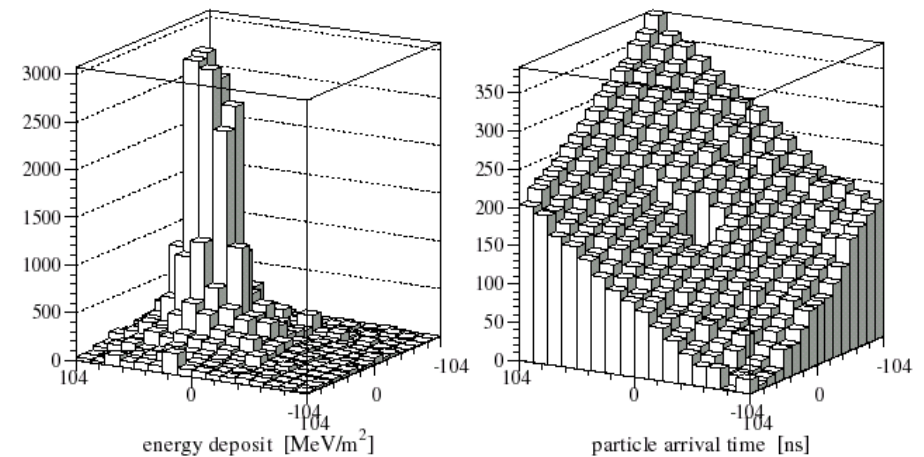
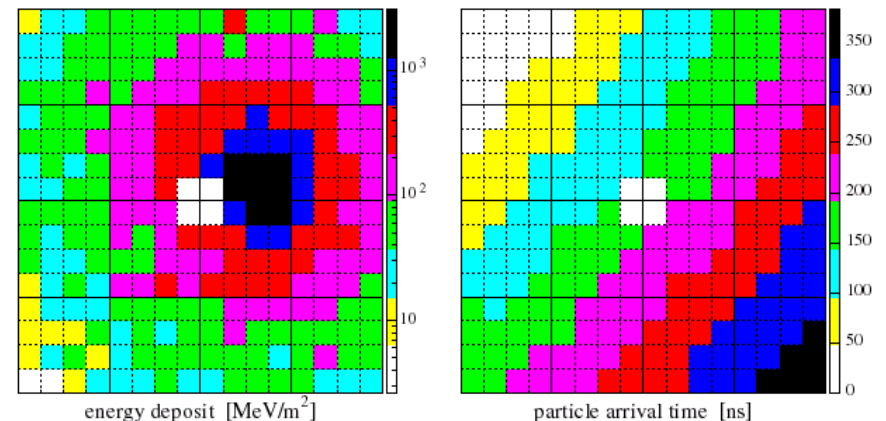
Wyniki

Przykładowy przypadek zmierzonego pęku atmosferycznego.

Na podstawie pomiaru czasu można bardzo dokładnie określić kierunek kaskady ($\Delta\alpha \sim 0.5^\circ - 1.2^\circ$)

Na podstawie mierzonego sygnału (\Rightarrow liczby cząstek) można określić rozmiary i energię kaskady

e/ γ -Detectors, Run 1, Event 71089, 96-03-05 22:07:48.956078



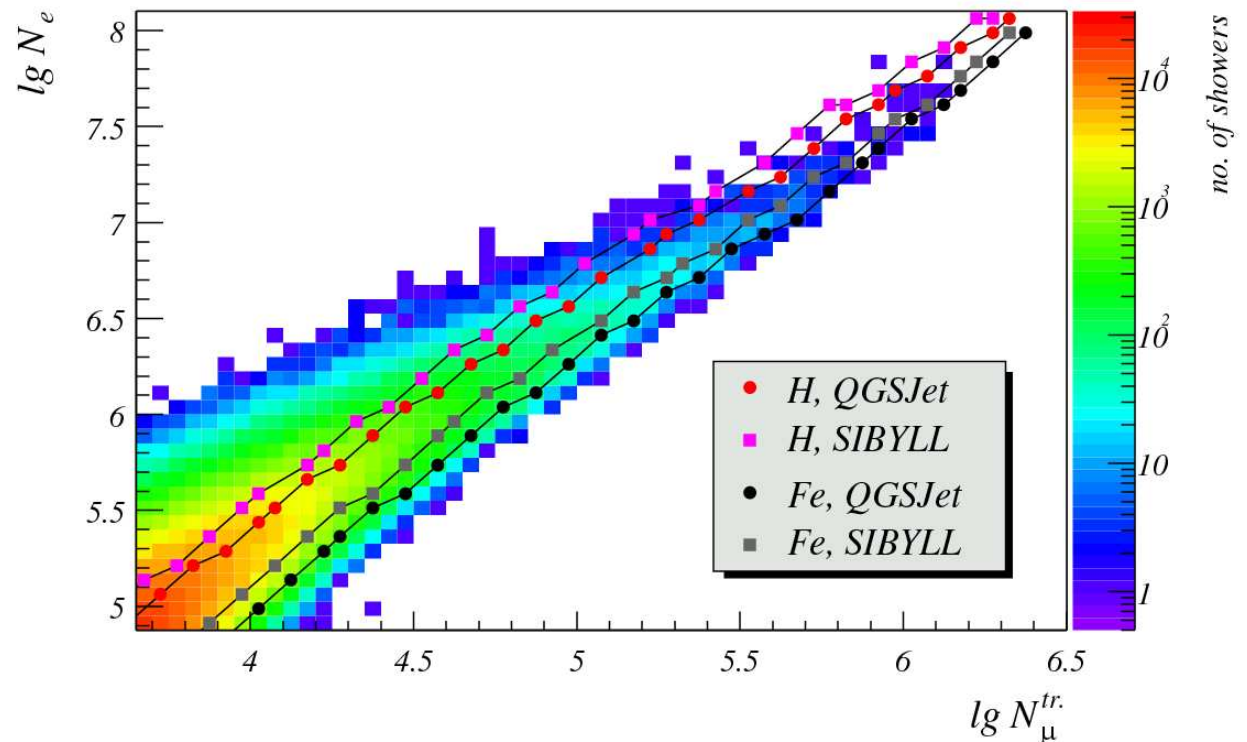
KASKADE

Wyniki

Zmierzony rozkład kaskad.

Na podstawie porównania z symulacją można wnioskować, że kaskady o najwyższej energii częściej są wywoływane przez ciężkie jądra niż kaskady o niższych energiach.

Ale niepewności związane z symulacją są wciąż duże...



Detektor KASKADE GRANDE (KIT, Karlsruhe)



KASKADE GRANDE

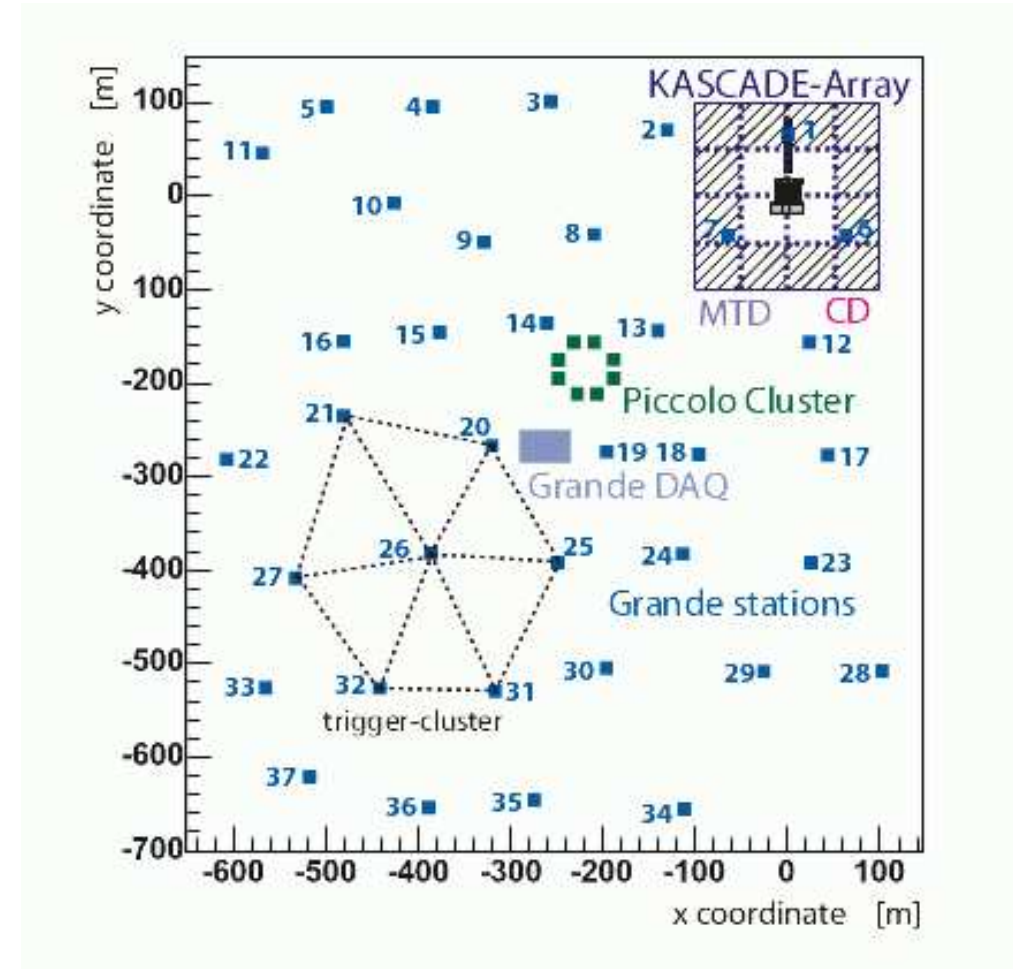
KASKADE od 1996

- 252 detektory co 13 m
- pokrycie $200 \times 200 \text{ m}^2$
- energie $10^{14} - 10^{17} \text{ eV}$

KASKADE GRANDE od 2001 (?)

- 37 detektorów co ok. 130 m
- pokrycie ok. $700 \times 700 \text{ m}^2$
- detektor centralny
- energie do 10^{18} eV

Eksperyment zakończony w 2009...



KASKADE GRANDE

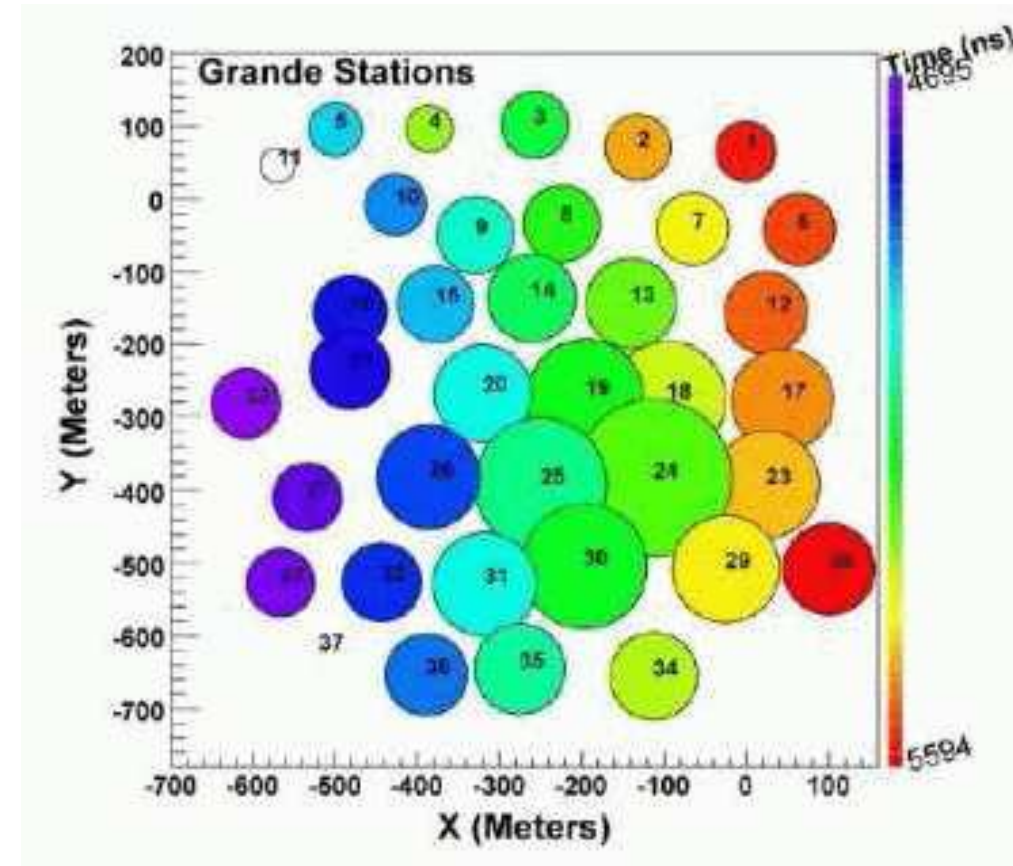
KASKADE od 1996

- 252 detektory co 13 m
- pokrycie $200 \times 200 \text{ m}^2$
- energie $10^{14} - 10^{17} \text{ eV}$

KASKADE GRANDE od 2001 (?)

- 37 detektorów co ok. 130 m
- pokrycie ok. $700 \times 700 \text{ m}^2$
- detektor centralny
- energie do 10^{18} eV

Eksperyment zakończony w 2009...



Przykładowa kaskada

KASKADE GRANDE

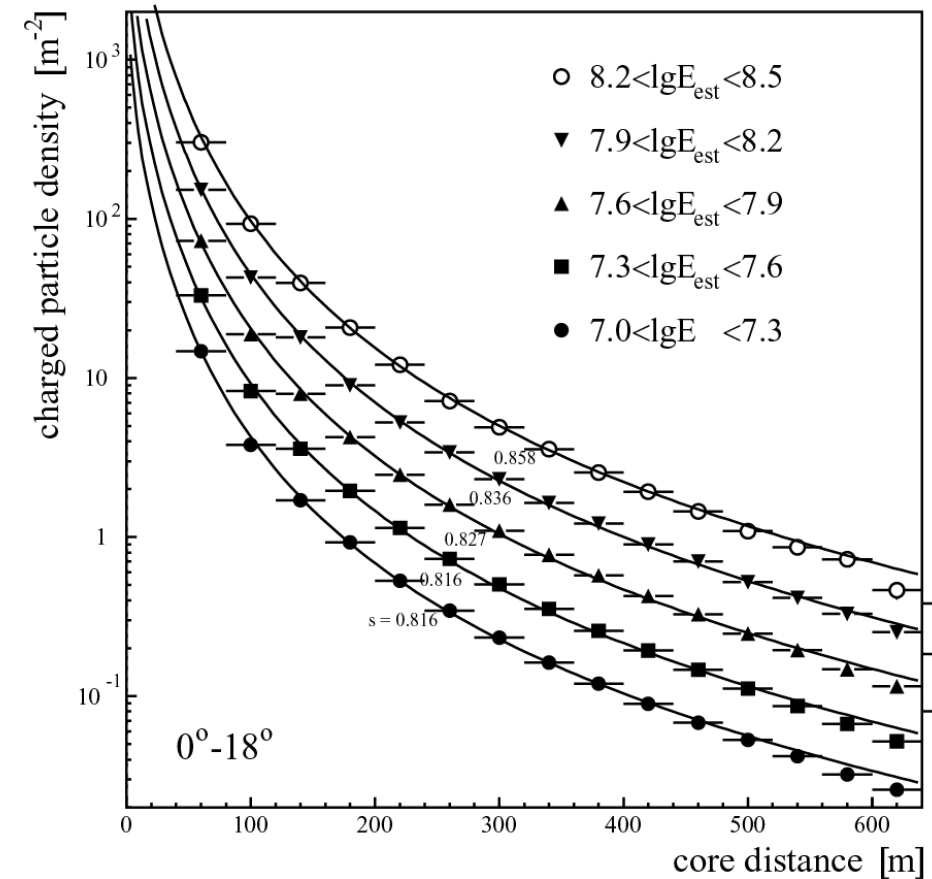
Pomiar energii

Niestety detektory były rozłożone zbyt daleko od siebie, żeby precyzyjnie określić gęstość cząstek w rdzeniu pęku

⇒ niepewność energii

Przy tych energiach kształt kaskady jest dość powtarzalny

⇒ wystarczy rekonstruować gęstość cząstek w ustalonym miejscu profilu



KASKADE GRANDE

Pomiar energii

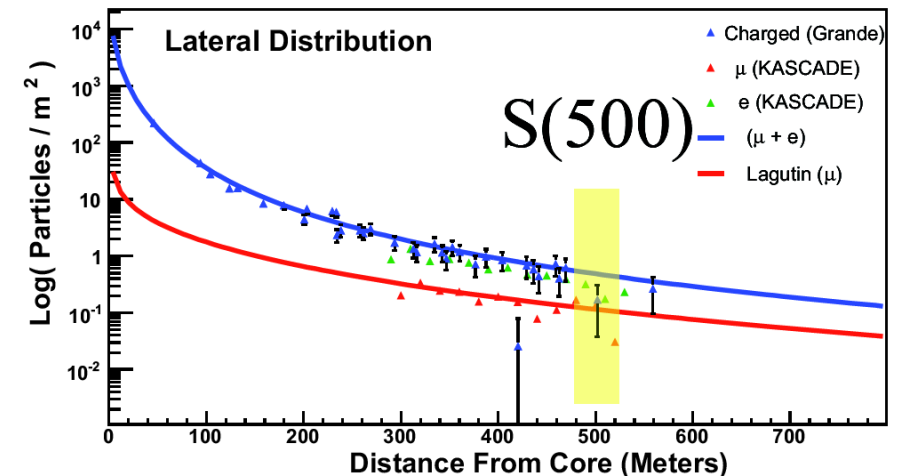
Niestety detektory były rozłożone zbyt daleko od siebie, żeby precyzyjnie określić gęstość cząstek w rdzeniu pęku

⇒ niepewność energii

Przy tych energiach kształt kaskady jest dość powtarzalny

⇒ wystarczy zmierzyć gęstość cząstek
w ustalonym miejscu profilu

Dla KASKADE GRANDE optymalny do rekonstrukcji energii okazał się pomiar gęstości cząstek w odległości 500 m od osi kaskady

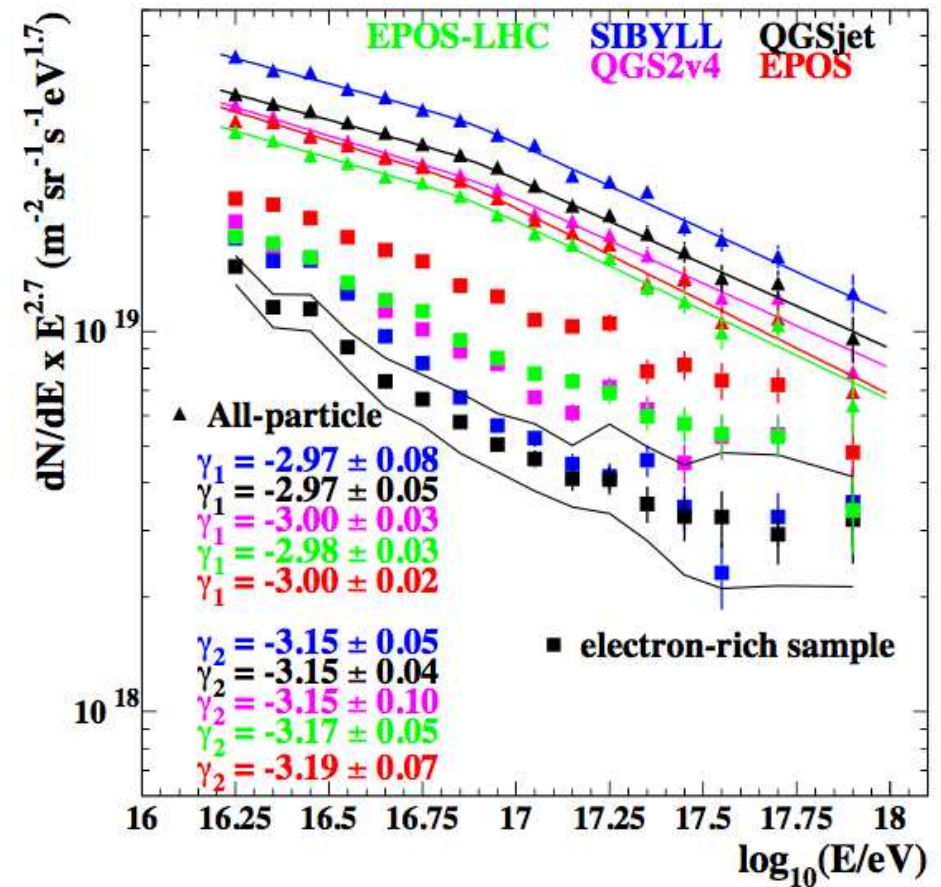
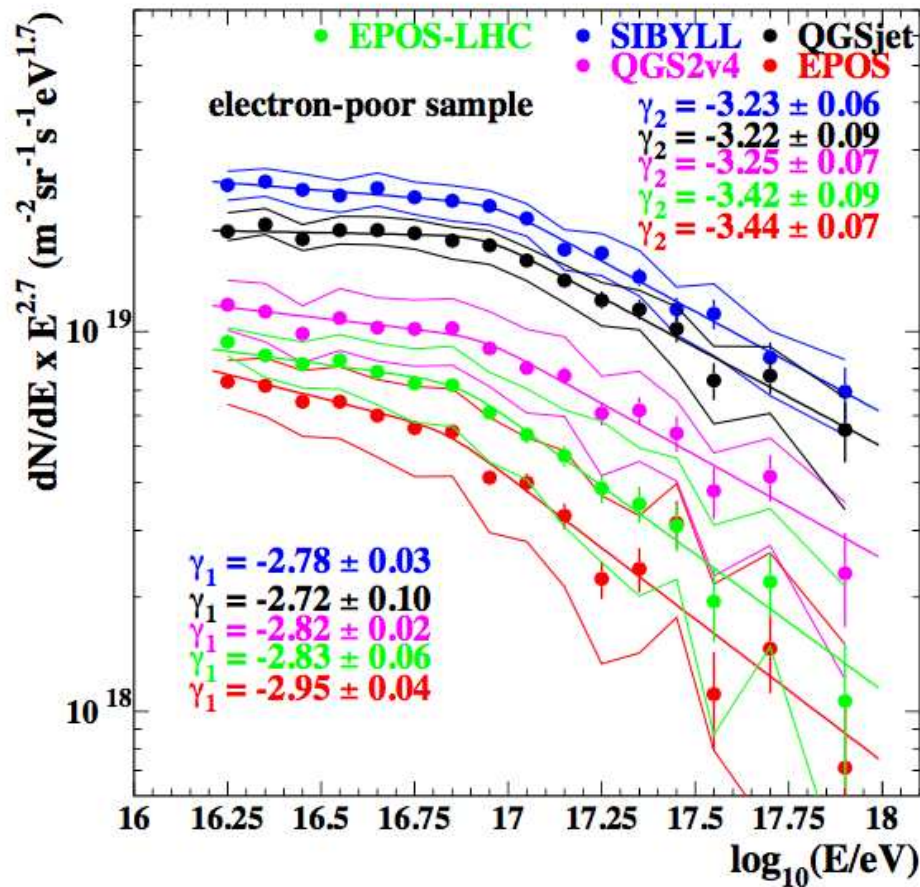


KASKADE GRANDE

Zależność od modelu

Duże niepewności systematyczne związane z modelowaniem oddziaływań w atmosferze

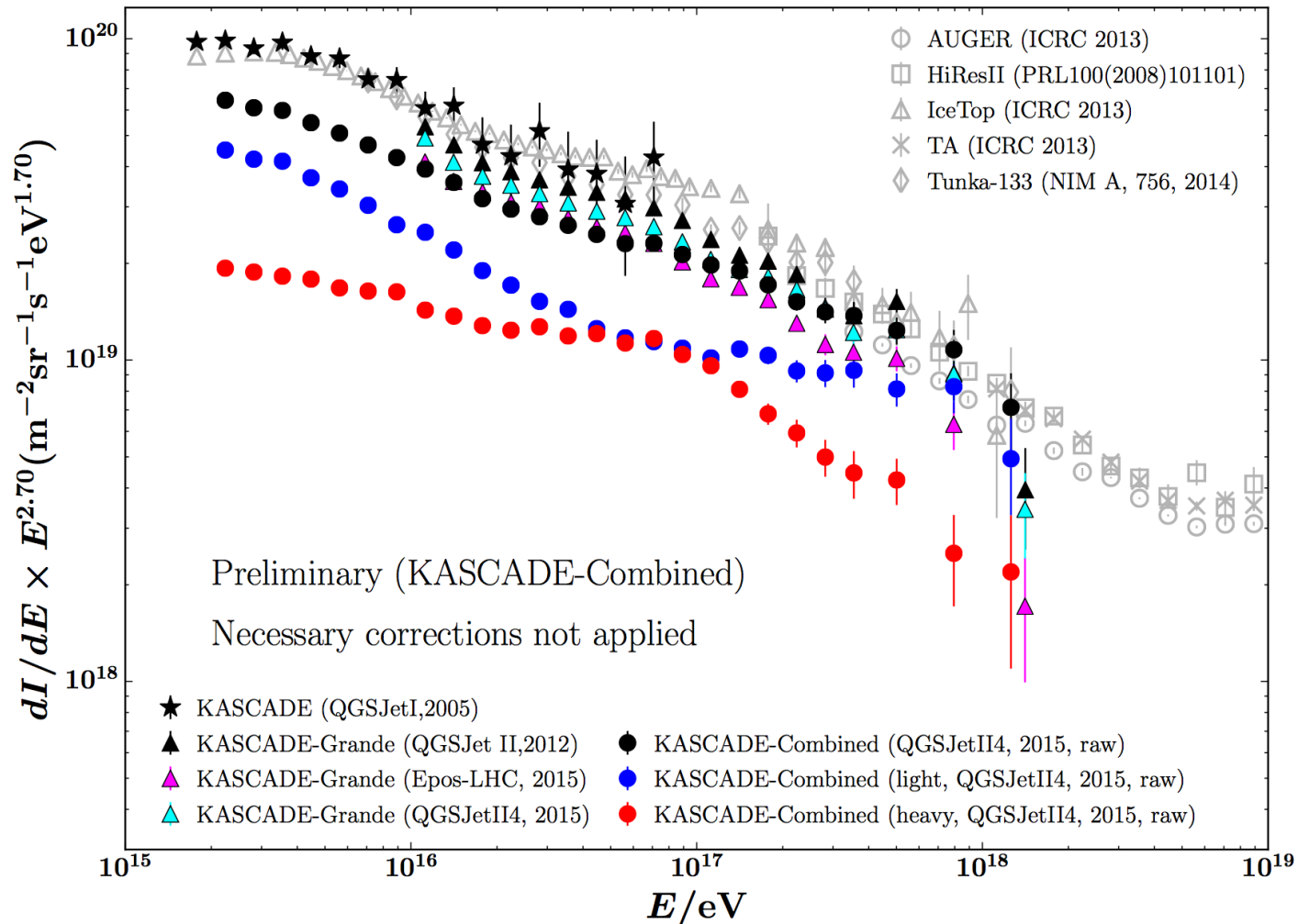
Dane LHC pozwoliły na ich istotne zmniejszenie \Rightarrow modele EPOS-LHC, QGS2v4



KASKADE GRANDE

Wyniki 2015

Nowe wyniki wykorzystujące modele oddziaływań oparte na danych LHC:



Pierre Auger Observatory



AUGER

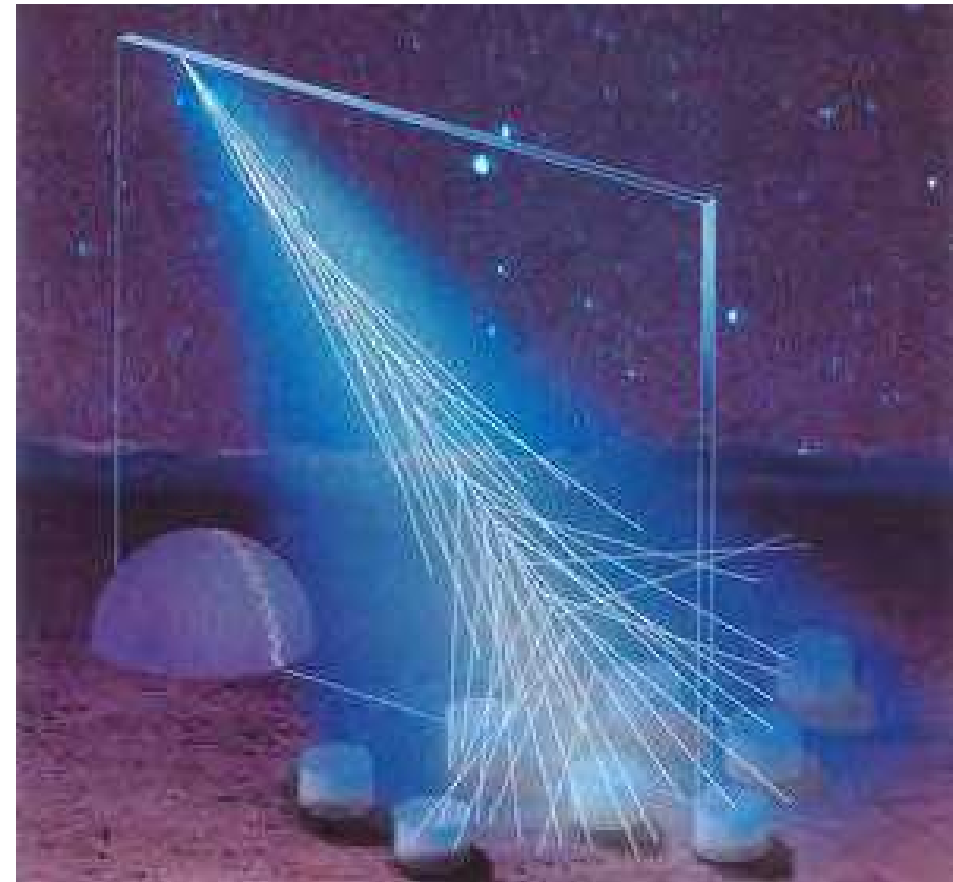
Obserwatorium Pierre Auger

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

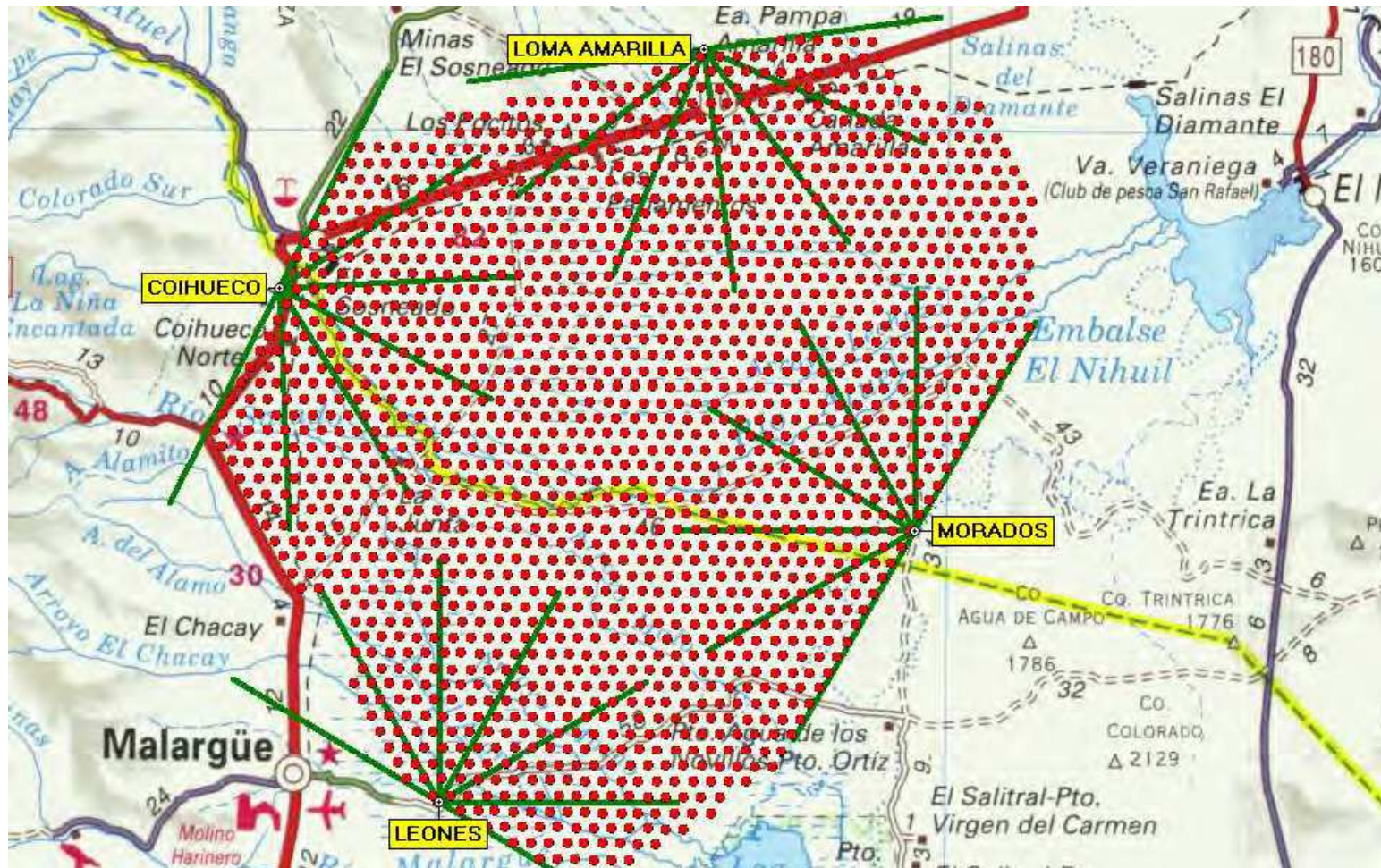
Duża statystyka dzięki bardzo dużej powierzchni detektora.

Duża dokładność dzięki **hybrydowej** metodzie detekcji: cząstki naładowane + fluorescencja



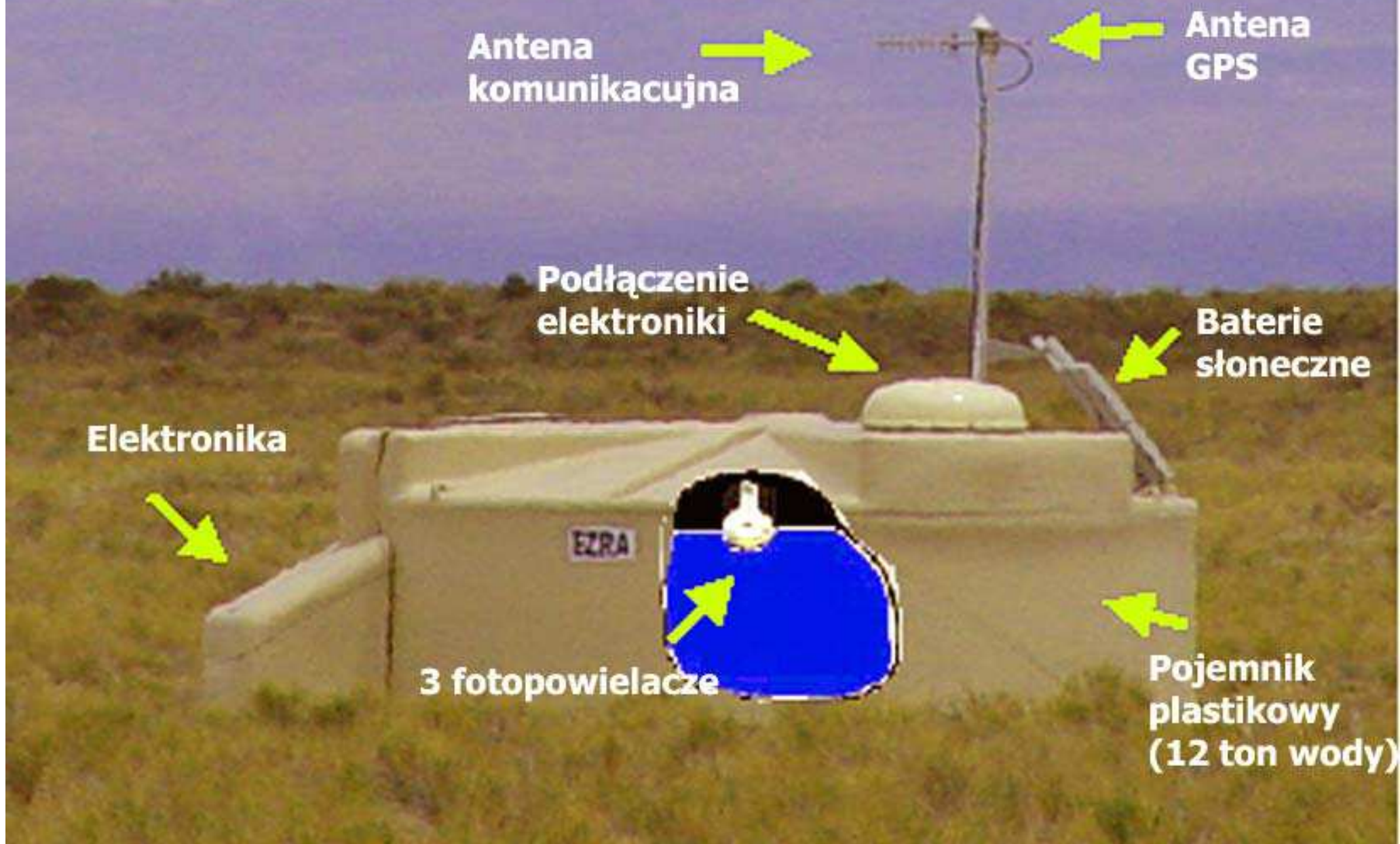
AUGER

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

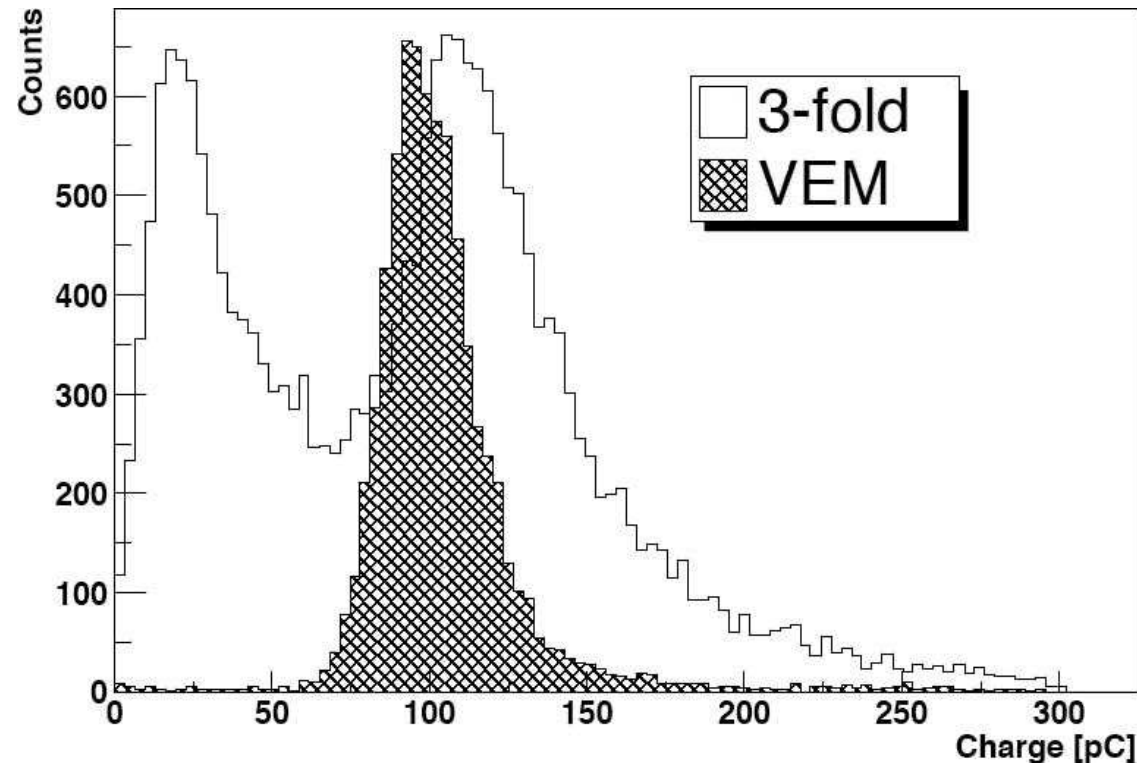


AUGER

Kalibracja

Kalibracja detektorów powierzchniowych opiera się na **pomiarze mionów kosmicznych**.

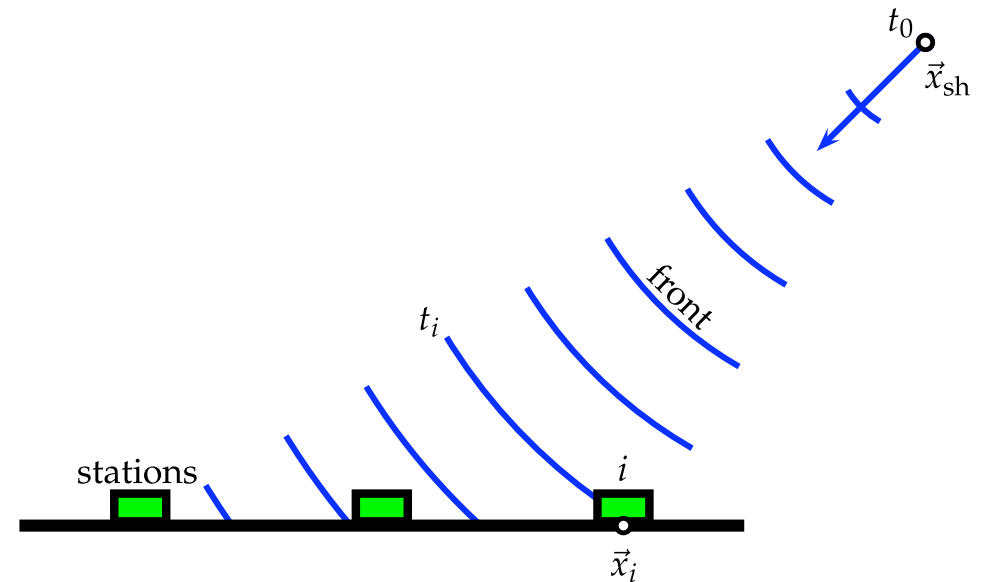
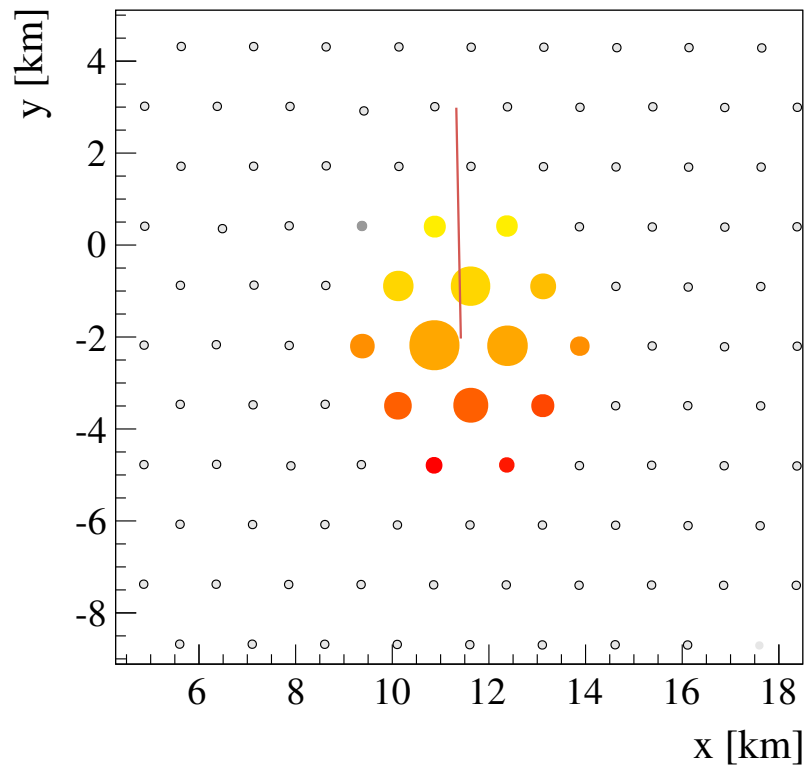
Dwa tryby pomiaru: koincydencja 3 fotopowielaczy lub wyzwalenie zewnętrznym scntnylatorem. W obu przypadkach wyraźnie widoczne maksimum VEM (Very Energetic Muon)



AUGER

Detektor powierzchniowy

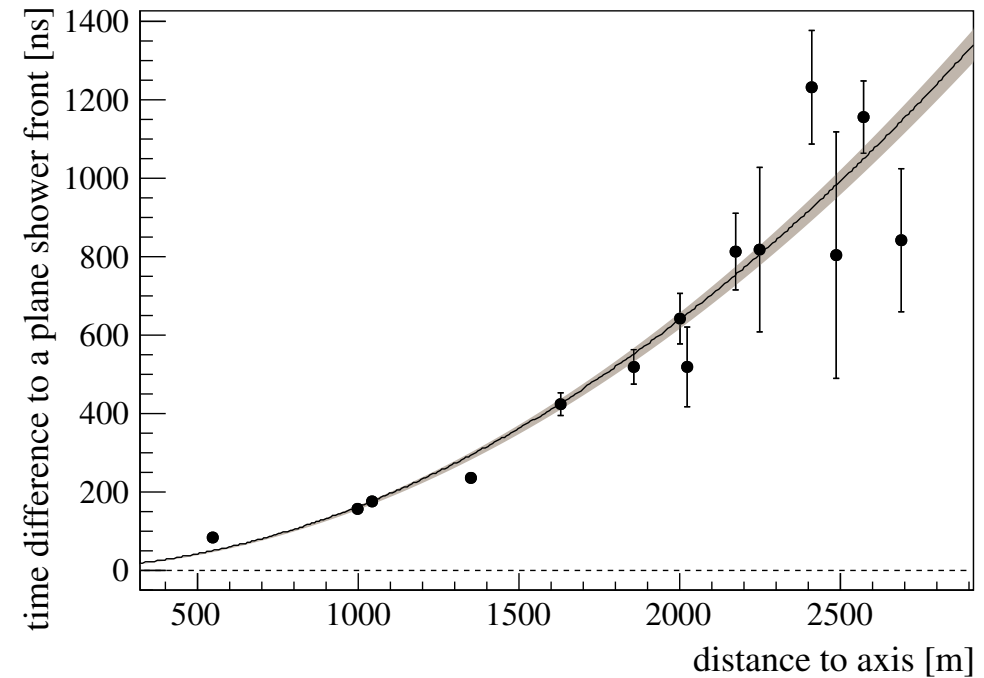
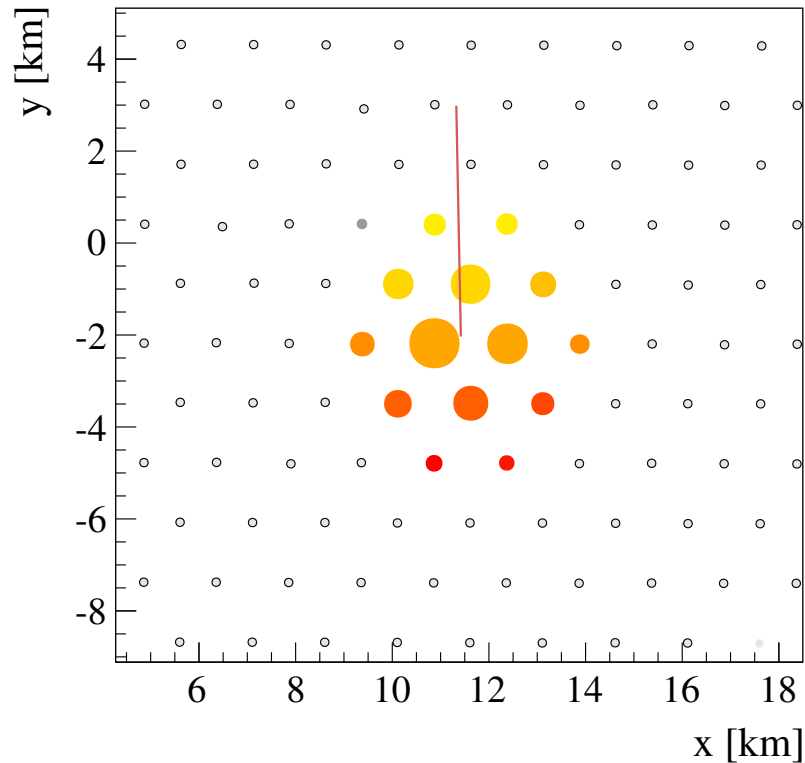
Detektory powierzchniowe mierzą liczbę cząstek (sygnał w jednostkach VEM) i czas ich przejścia. Profil czasowy pozwala na rekonstrukcję kierunku.



AUGER

Detektor powierzchniowy

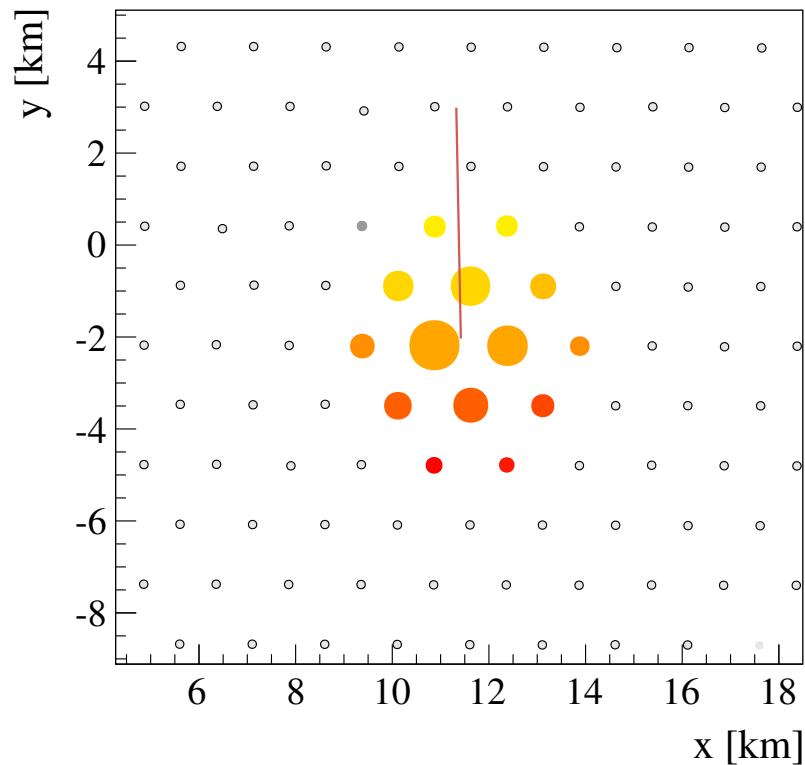
Detektory powierzchniowe mierzą liczbę cząstek (sygnał w jednostkach VEM) i czas ich przejścia. Profil czasowy pozwala na rekonstrukcję kierunku.



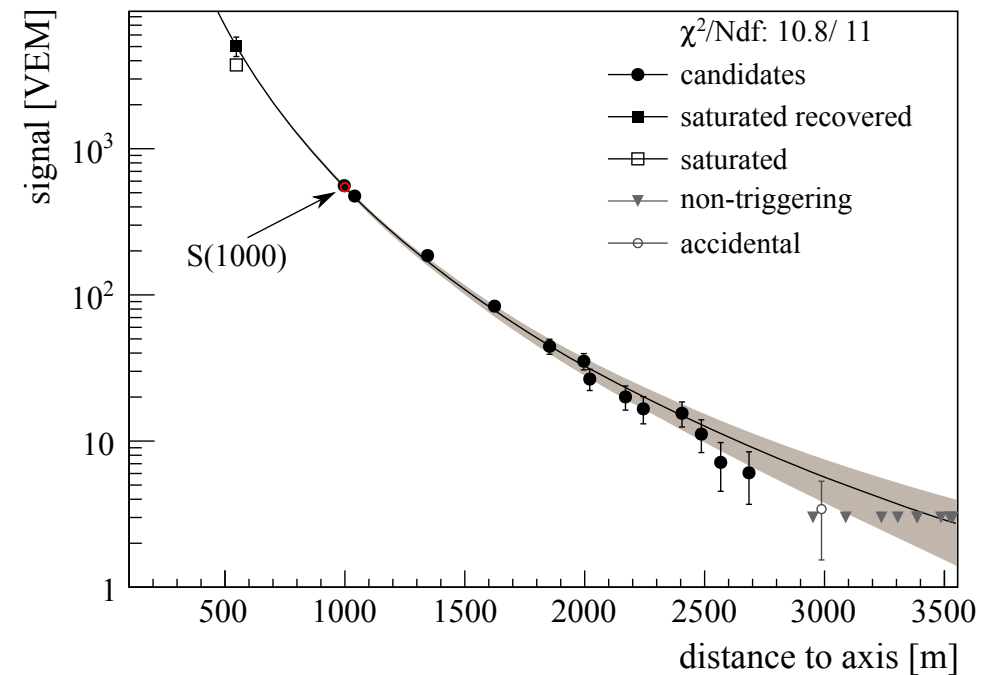
AUGER

Detektor powierzchniowy

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



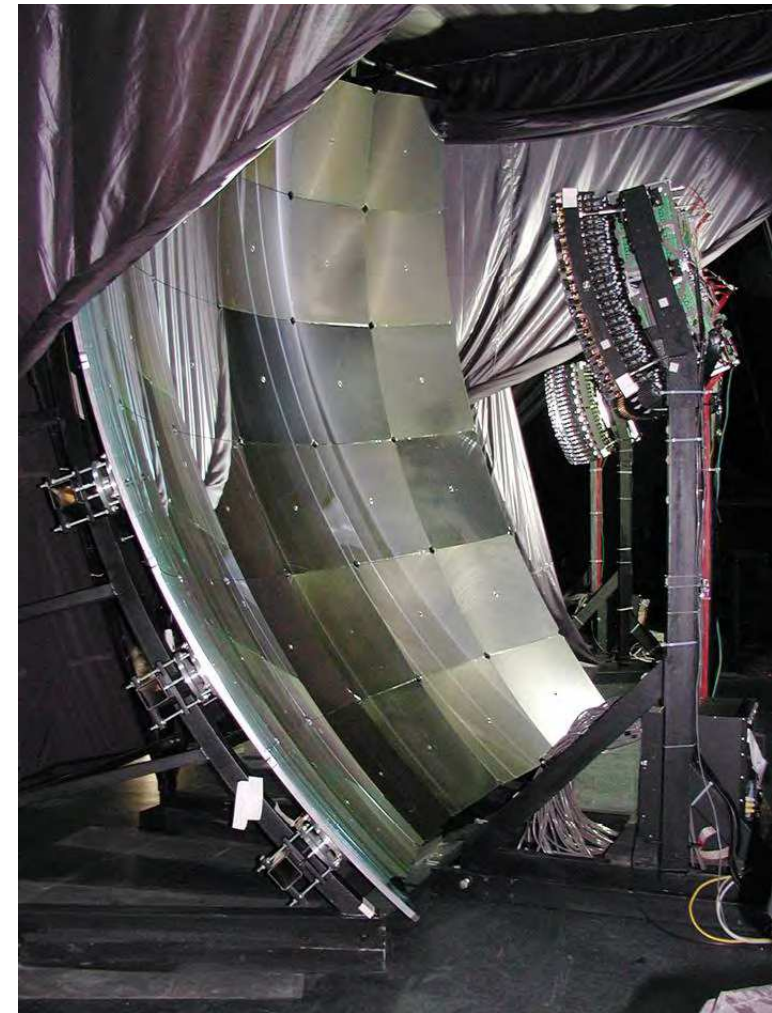
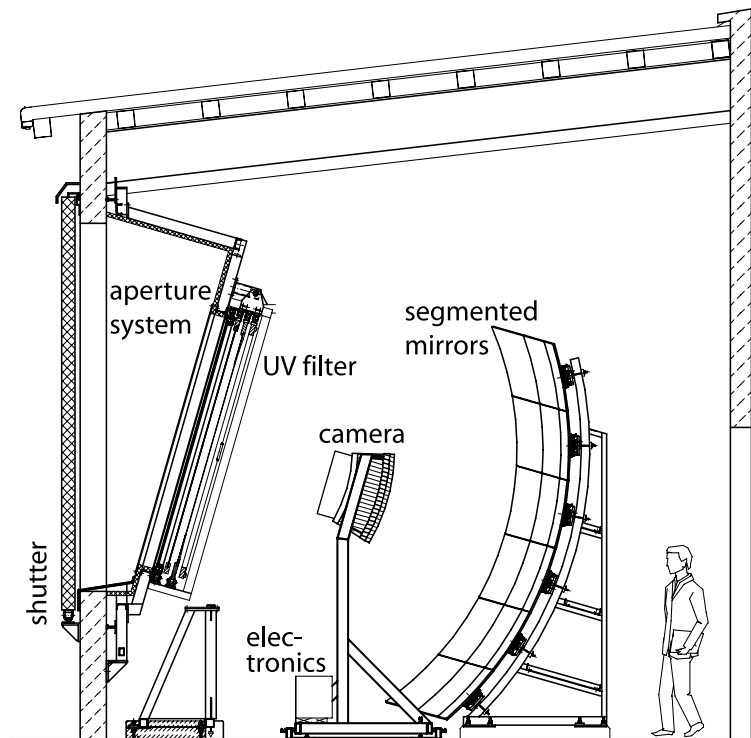
Energia wyznaczana z gęstości cząstek 1000 m od rdzenia kaskady.



AUGER

Teleskop fluorescencyjny

Schemat teleskopu

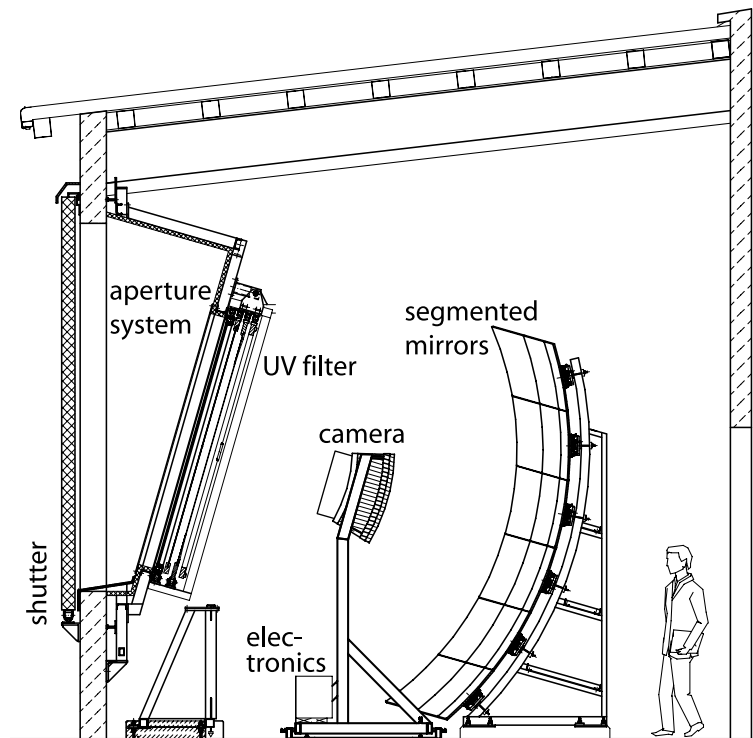


Zwierciadło o średnicy 3.4 m, matryca 440
fotopowielaczy rejestrujących promieniowanie UV

AUGER

Teleskop fluorescencyjny

Schemat teleskopu



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

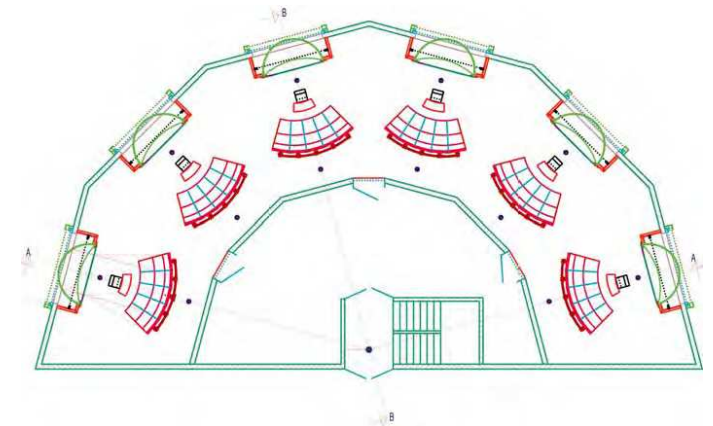
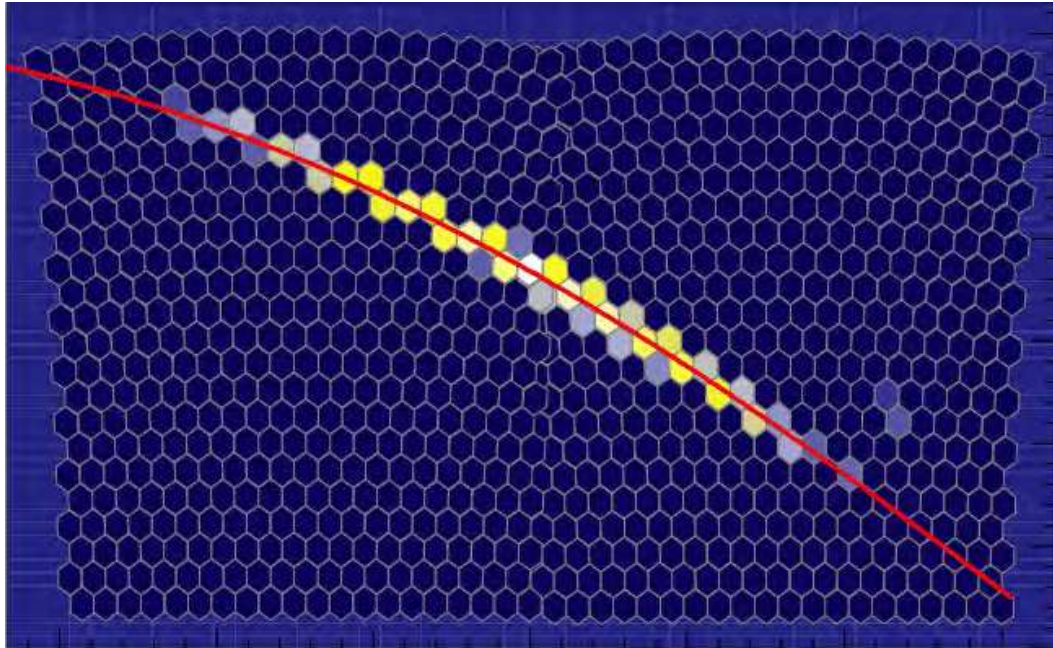
AUGER

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 !

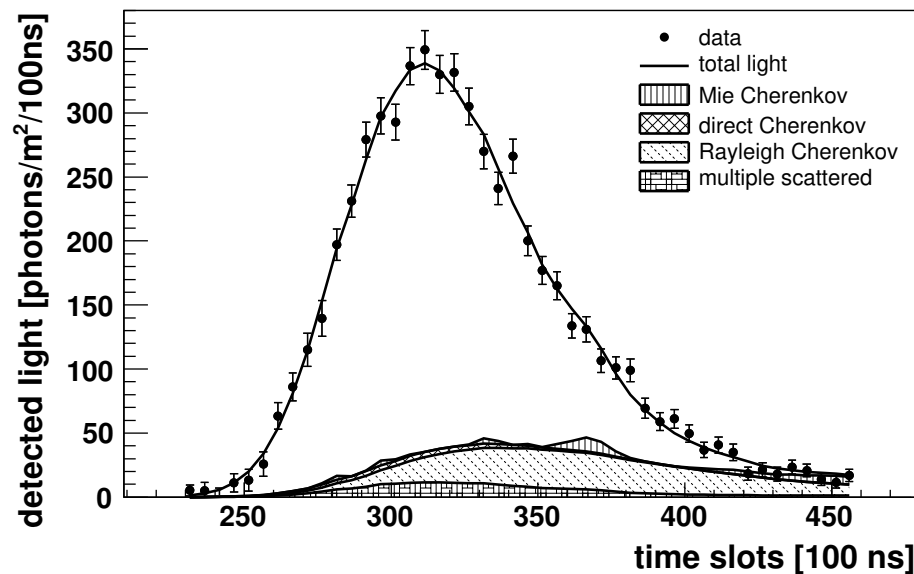


AUGER

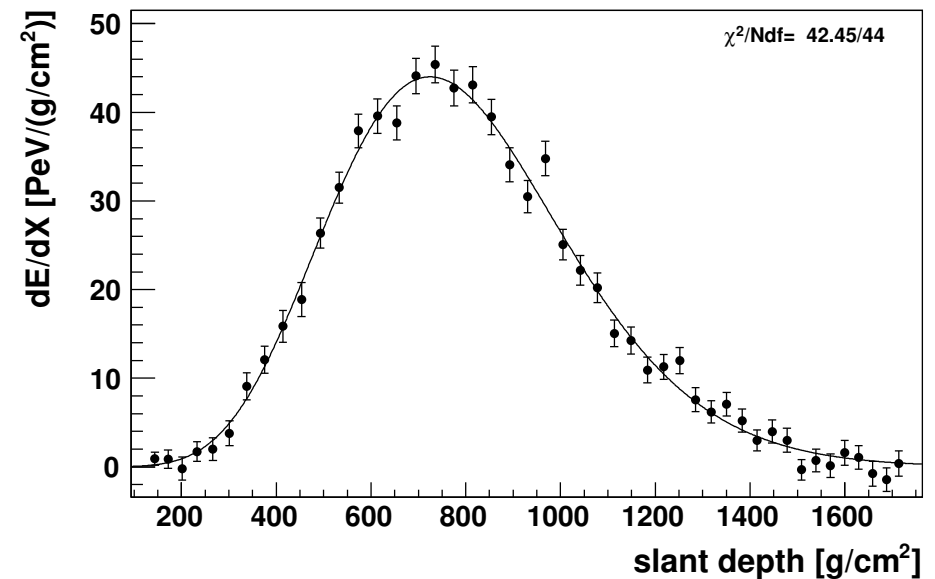
Teleskop fluorescencyjny

Przykład zrekonstruowanego profilu kaskady.

Rozkład czasowy przychodzącego sygnału
(fluorescencja + prom. Czerenkowa)



Dopasowany profil podłużny
(pozycja 2-D + czas)

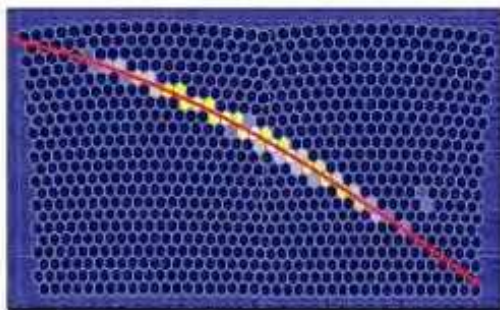
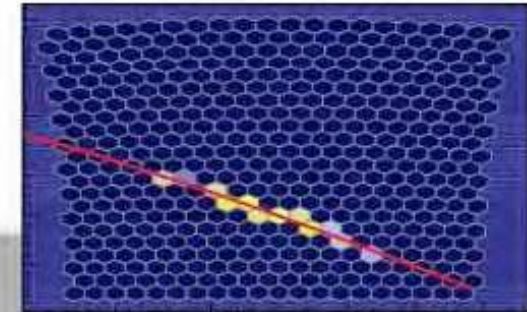


AUGER

Przypadki hybrydowe

Event: 1364365

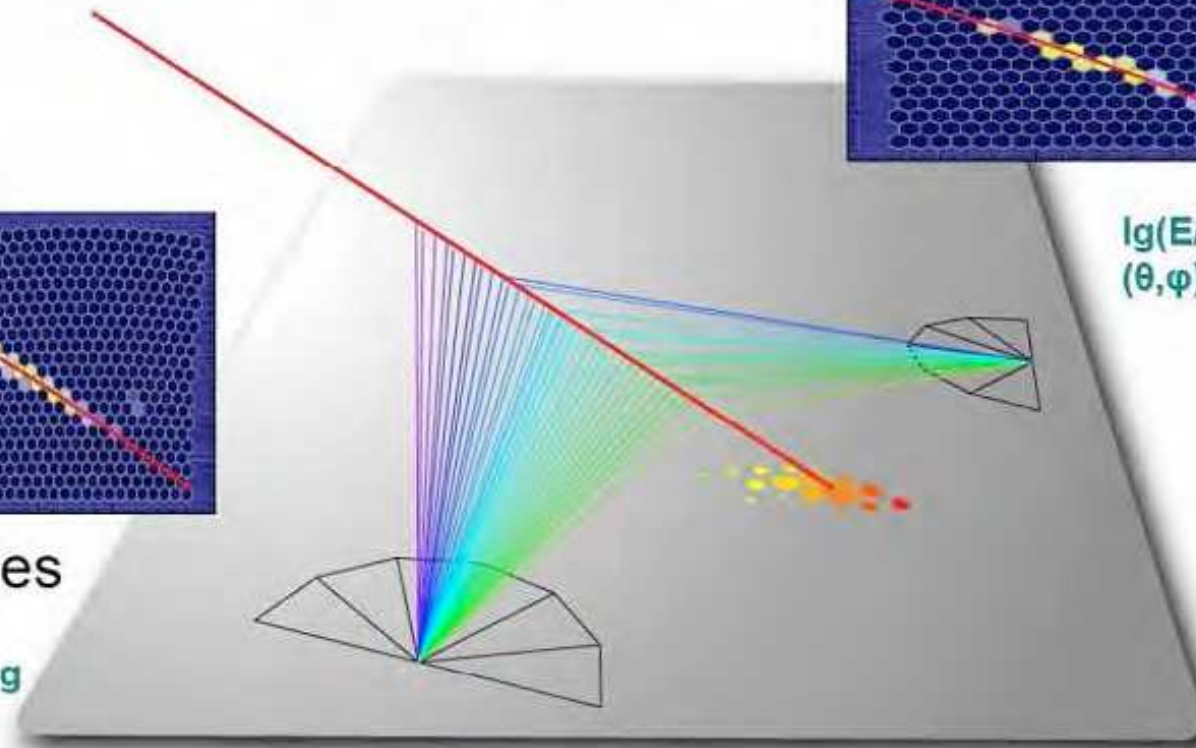
Los Morados



Los Leones

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

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



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

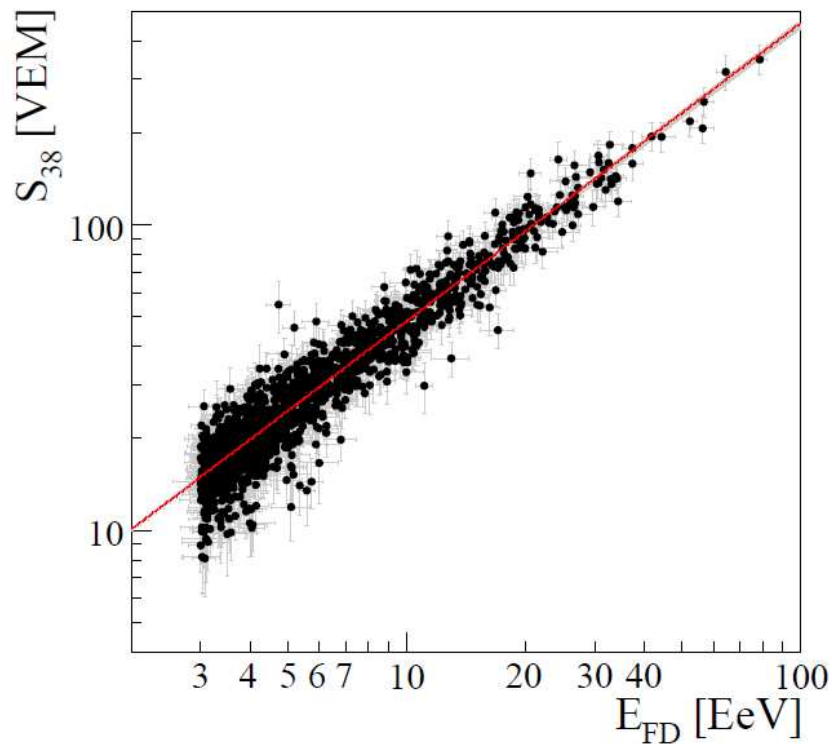
AUGER

Przypadki hybrydowe

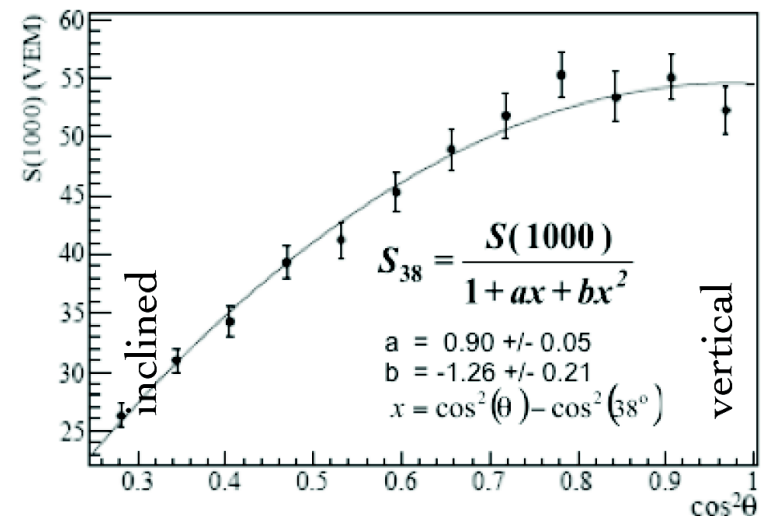
Pomiar energii dwoma metodami - bardzo dobra korelacja:

Pozwala na absolutną kalibrację energii z detektorów powierzchniowych.

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



S_{38} - gęstość cząstek po poprawce na pochłanianie w atmosferze (normalizacja do $\theta = 38^\circ$)



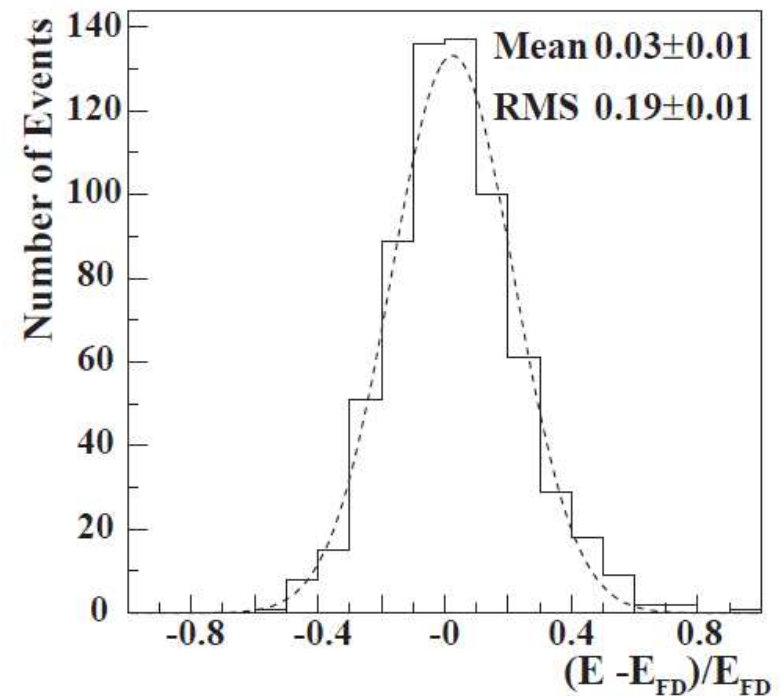
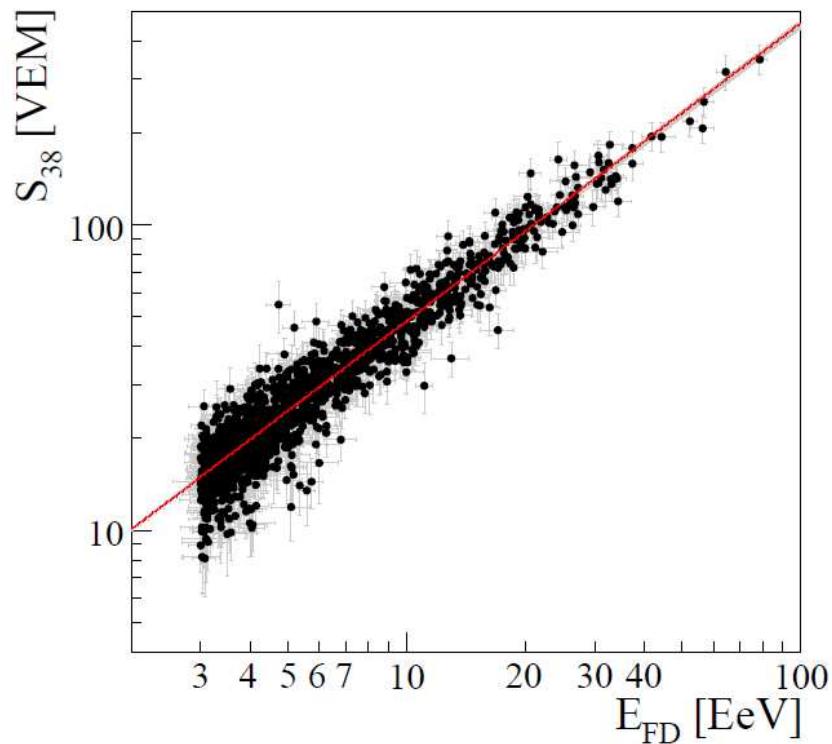
AUGER

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

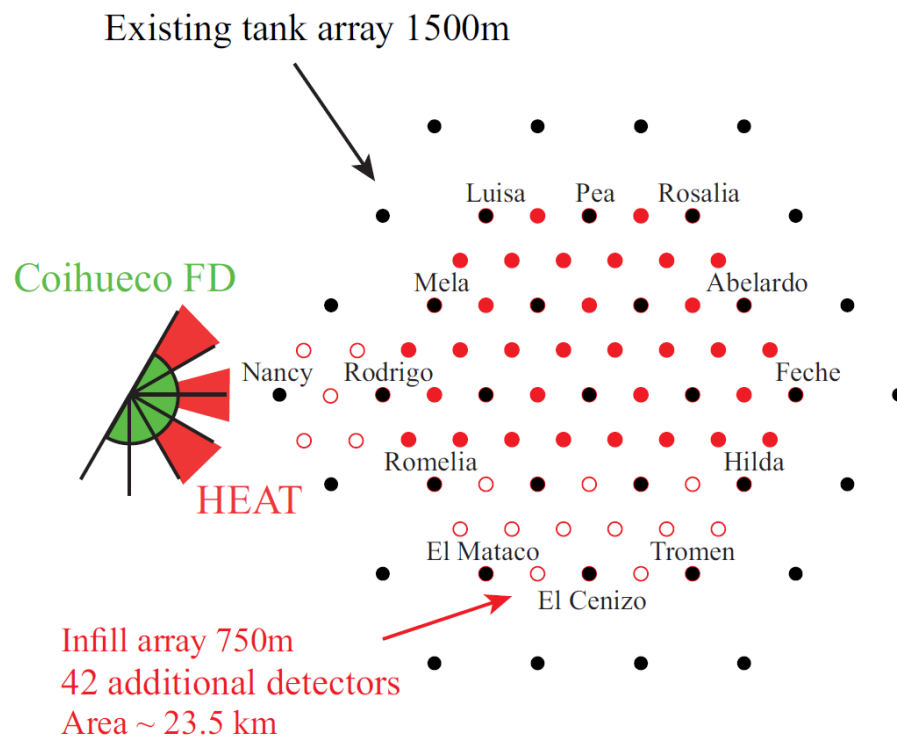


AUGER

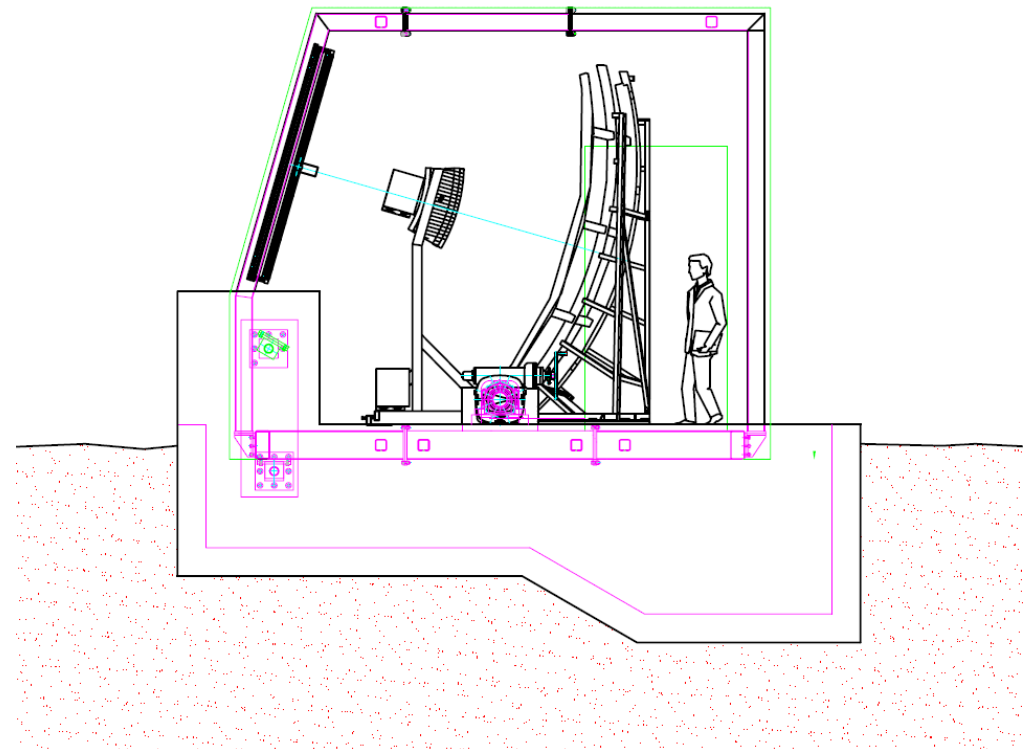
Rozbudowa systemu

Dodatkowe detektory powierzchniowe,
dla obniżenia progu energii

Teleskopy fluorescencyjne pod dużymi kątami
⇒ zwiększenie akceptacji



“zwykły” detektor

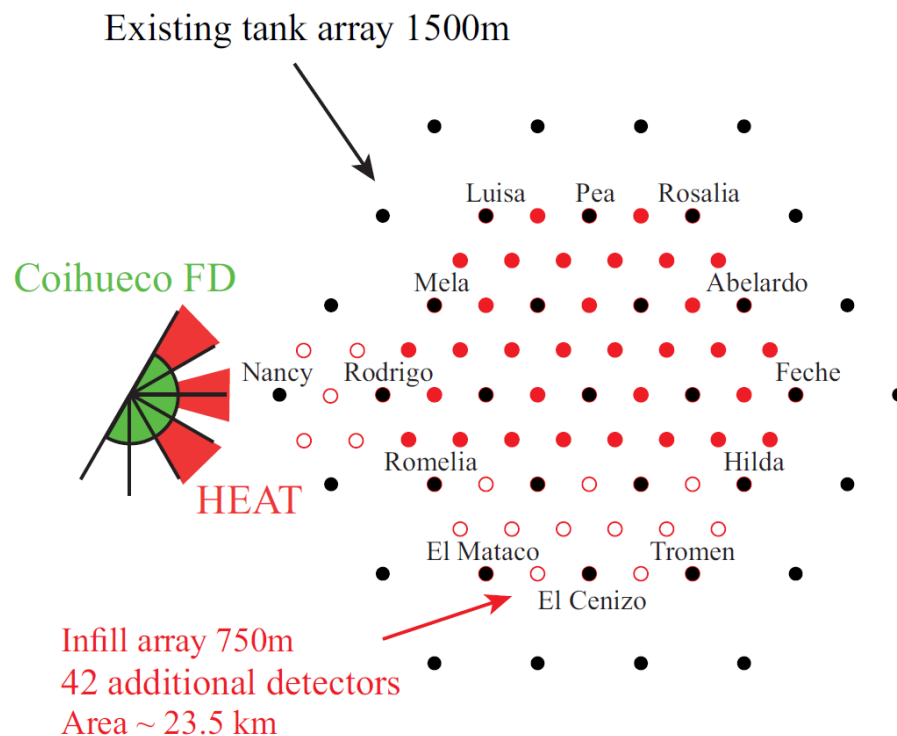


AUGER

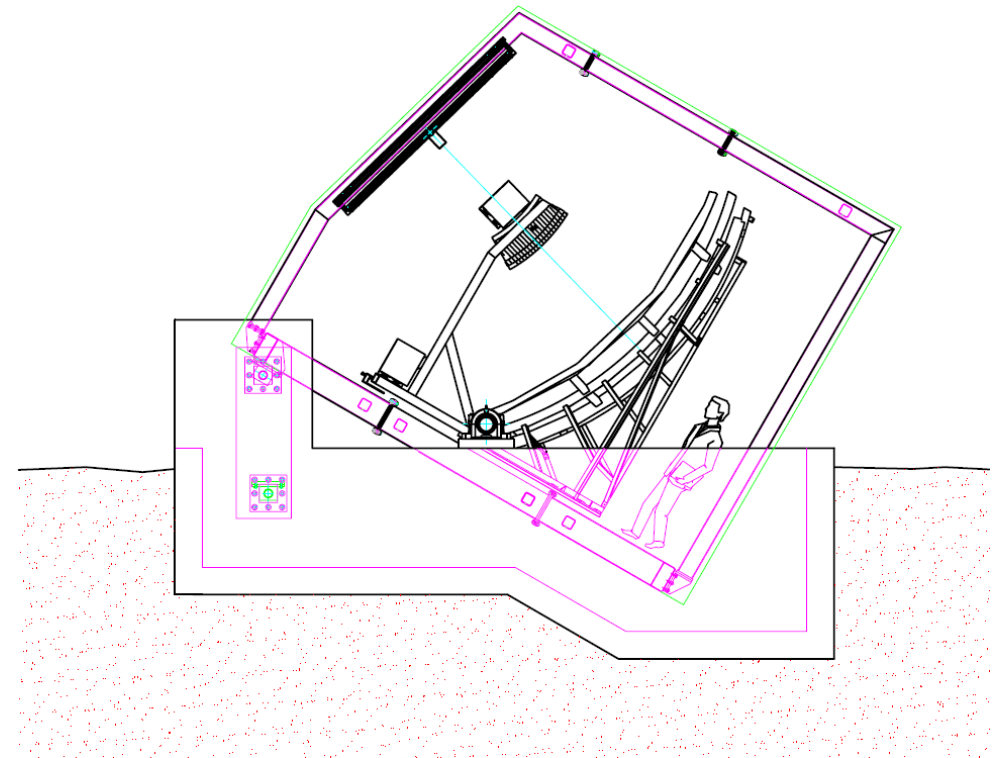
Rozbudowa systemu

Dodatkowe detektory powierzchniowe,
dla obniżenia progu energii

Teleskopy fluorescencyjne pod dużymi kątami
⇒ zwiększenie akceptacji



detektor typu HEAT

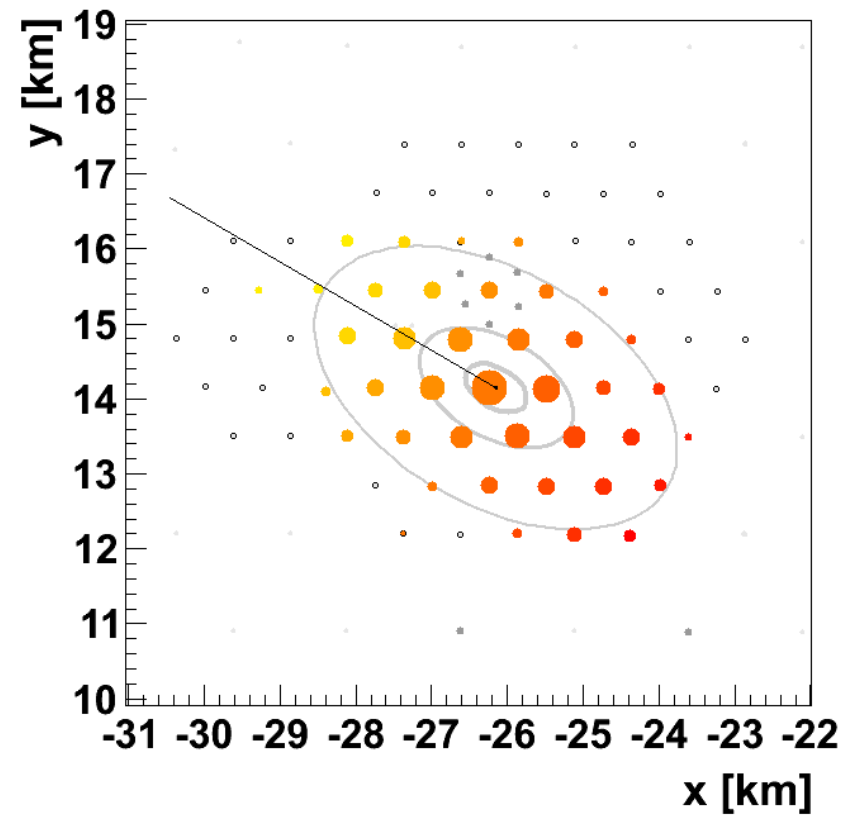
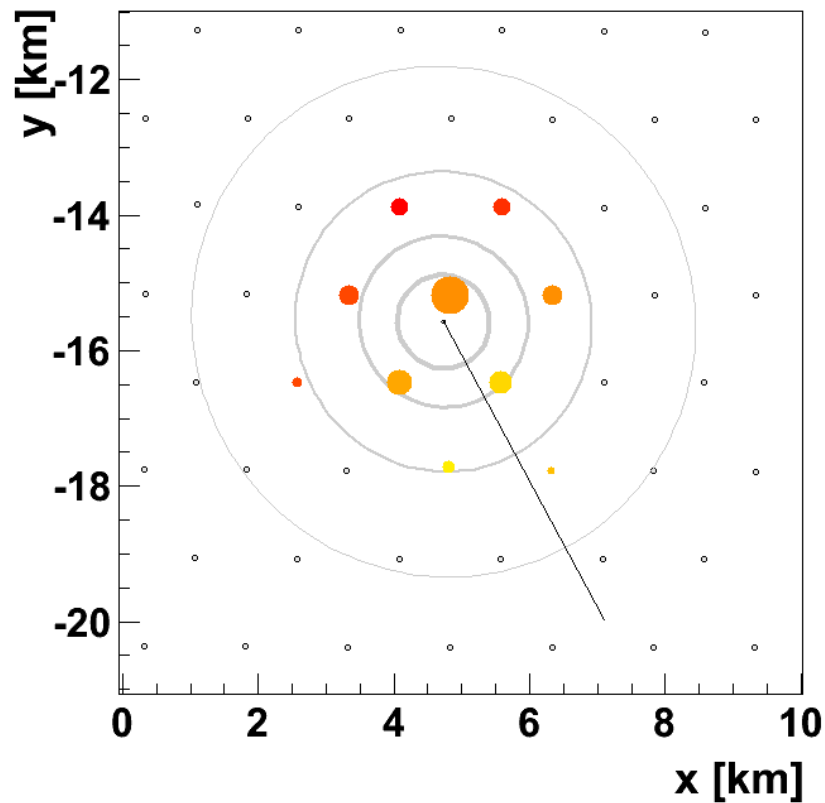


AUGER

Rozbudowa systemu

Detektory SD-1500 w pełni efektywne dopiero dla $E > 3 \cdot 10^{18}$ eV

Detektory SD-750 pozwalają mierzyć już od $E > 3 \cdot 10^{17}$ eV



AUGER

Bardzo nachylone kaskady

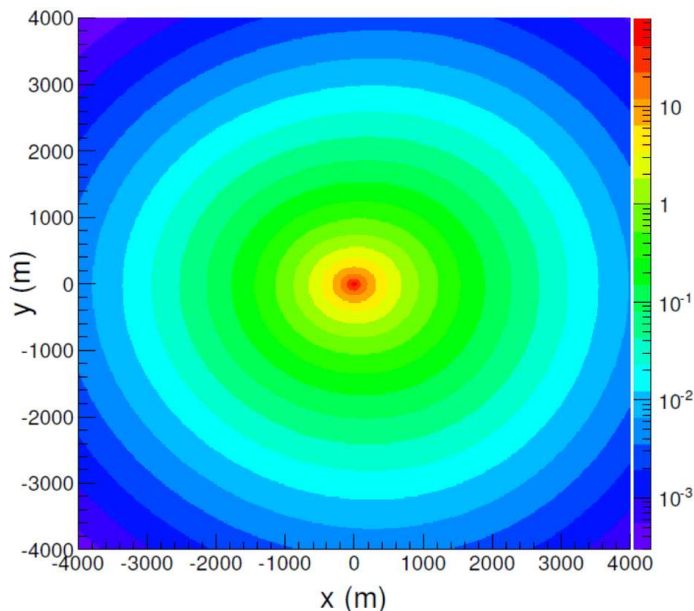
Udało się też opracować metodę dokładnej rekonstrukcji energii dla kaskad najwyższych energii nachylonych pod kątem 60° do 80° do zenitu

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

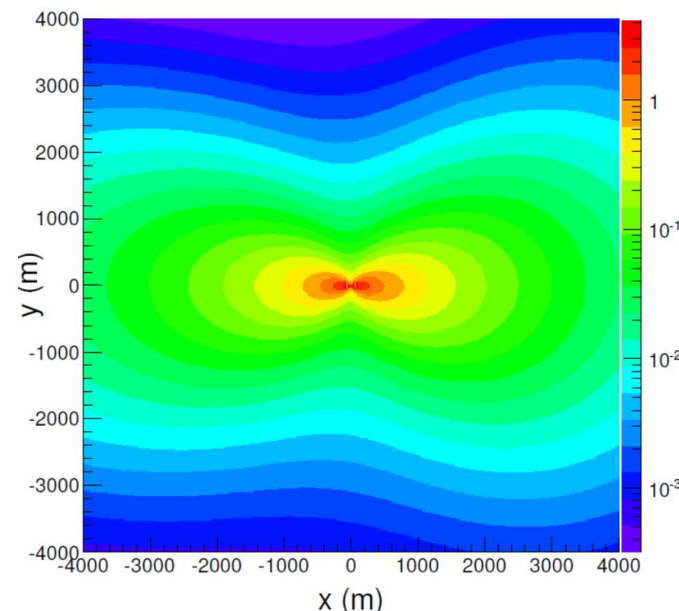
⇒ większe pokrycie sfery niebieskiej (!)

Przykładowe symulacje powierzchniowej gęstości mionów:

$\theta = 70^\circ$



$\theta = 84^\circ$



Wyraźny wpływ pola magnetycznego Ziemi ⇒ zależność od kąta azymutalnego

Energia z dopasowania do symulowanego rozkładu przestrzennego dla $E = 10^{19}$ eV

AUGER

Dokładność pomiaru

Od uruchomienia w 2004 roku współpraca AUGER doskonaliła metody rekonstrukcji energii i kierunku kaskad. Zestawienie wyników:

Detektory powierzchniowe ($\theta < 60^\circ$):

- 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°

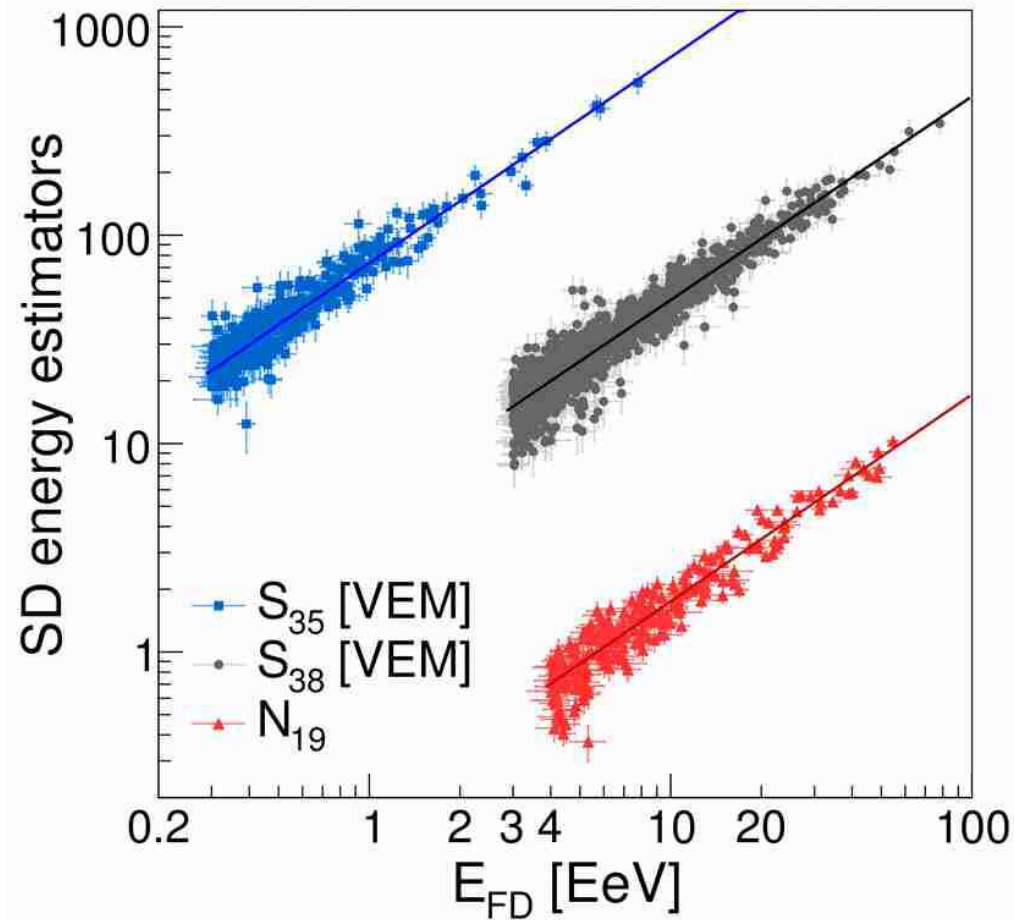
Przypadki pod dużymi kątami ($60^\circ < \theta < 80^\circ$):

- dokładność pomiaru energii:
ok. 19% (tylko wysokie energie)
- dokładność pomiaru kierunku:
nie gorsza niż 0.5°

AUGER

Dokładność pomiaru

Wyniki kalibracji różnych klas przypadków powierzchniowych

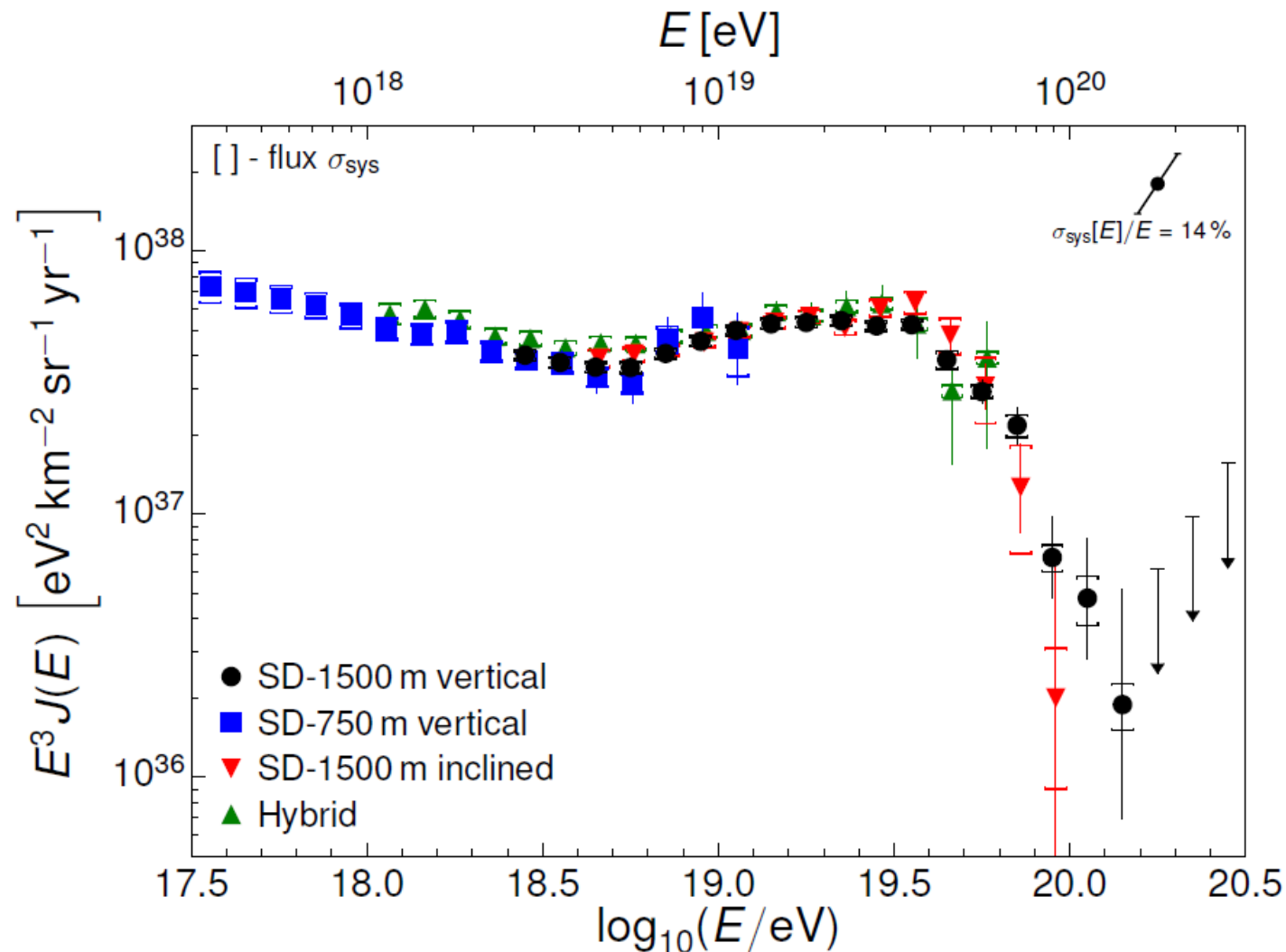


N_{19} - normalizacja nachylonej kaskady do kaskady **protonowej(!)** o $E = 10^{19}$ eV

AUGER

Widmo energii

Dobra zgodność widma wyznaczonego różnymi metodami, także dla małych i dużych kątów.

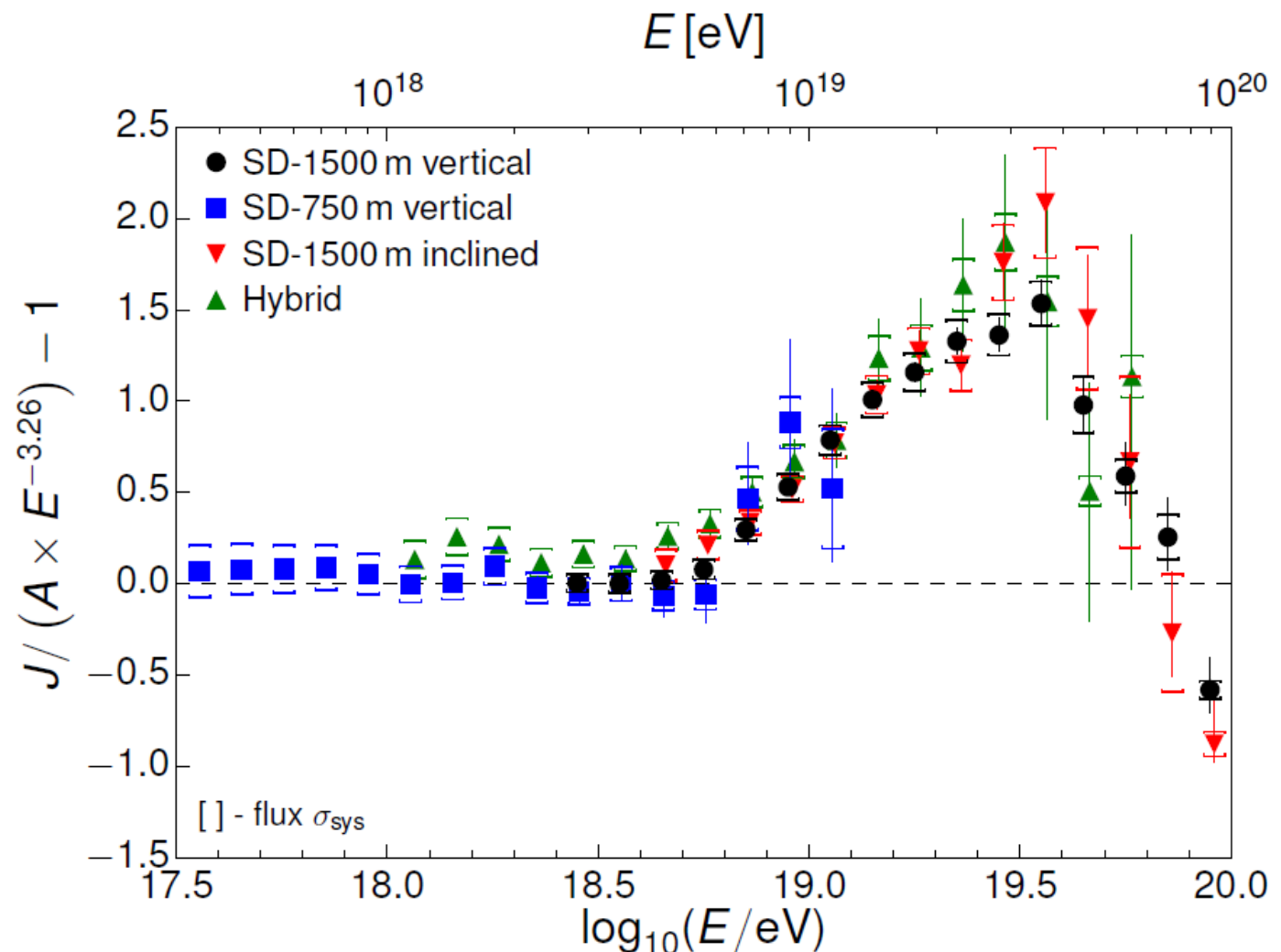


AUGER

Widmo energii

Dobra zgodność widma wyznaczonego różnymi metodami, także dla małych i dużych kątów.

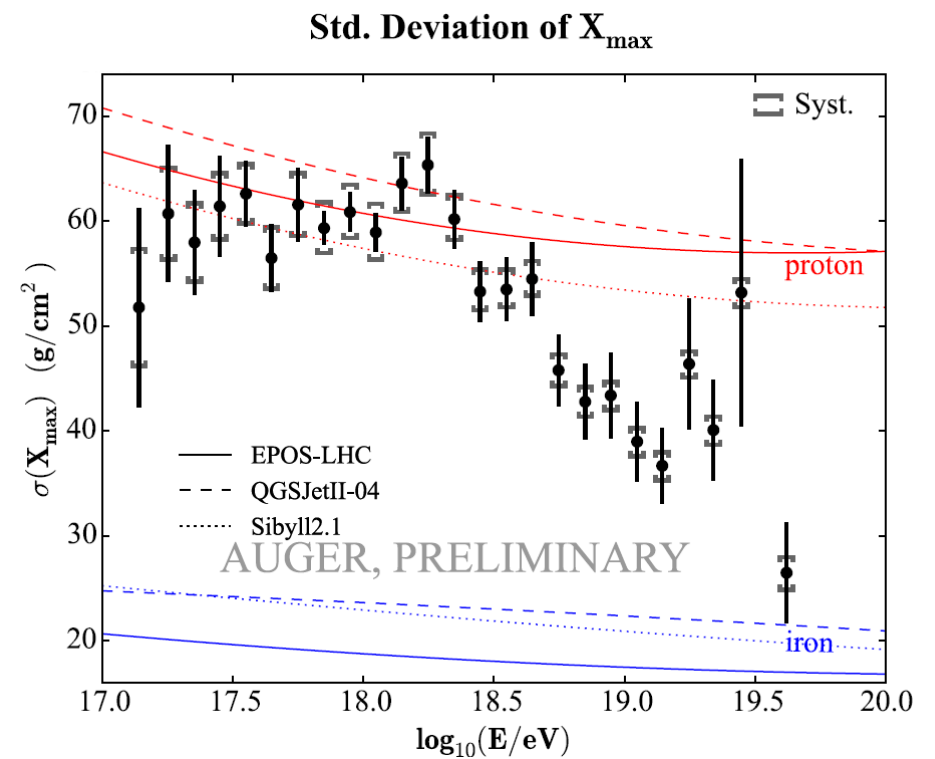
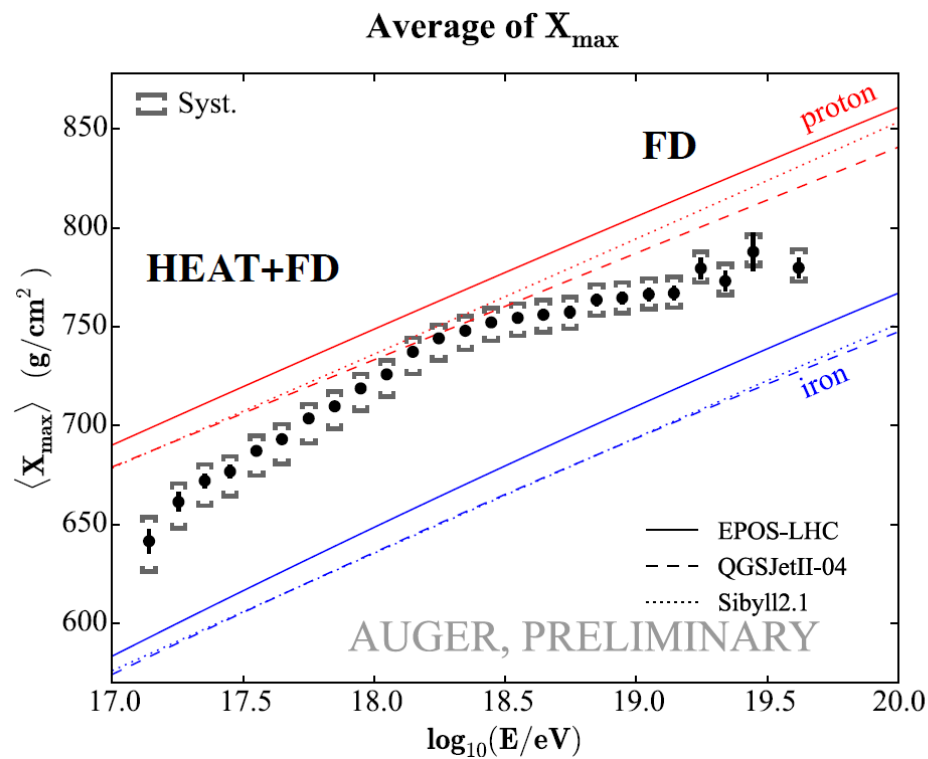
Wyraźne “załamanie” widma przy $4 \cdot 10^{19}$ eV



AUGER

Skład promieniowania

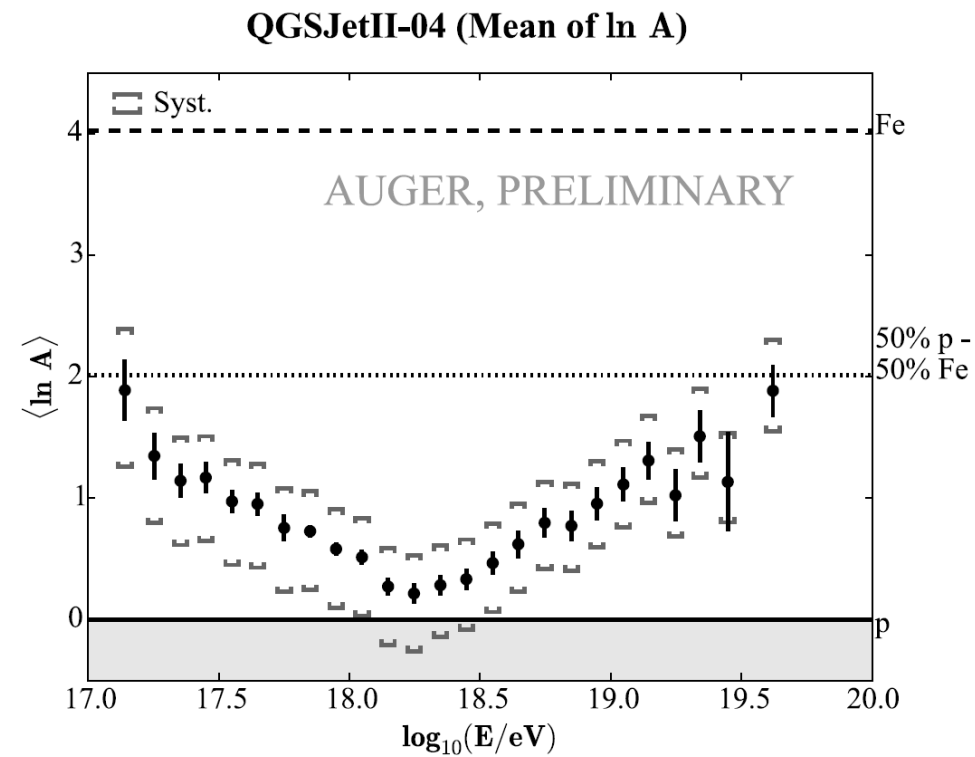
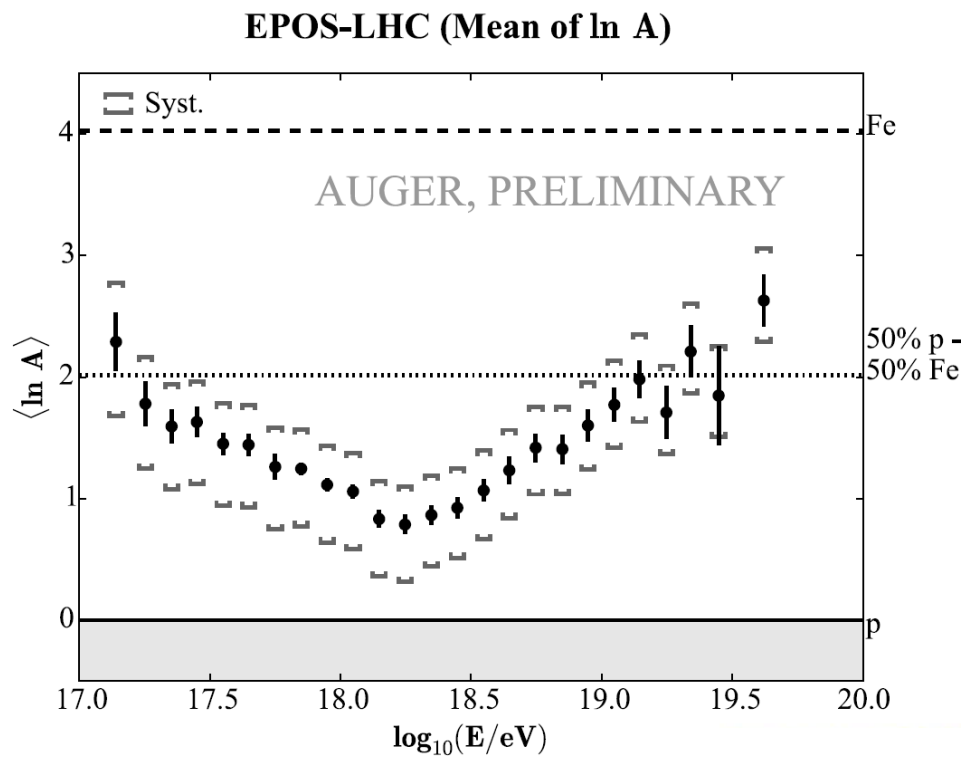
Porównanie mierzonej pozycji maksimum kaskady (średnia i dyspersja), w funkcji energii, z przewidywaniami modeli



AUGER

Skład promieniowania

Wyznaczany skład promieniowania (średnia wartość $\ln A$) w funkcji energii

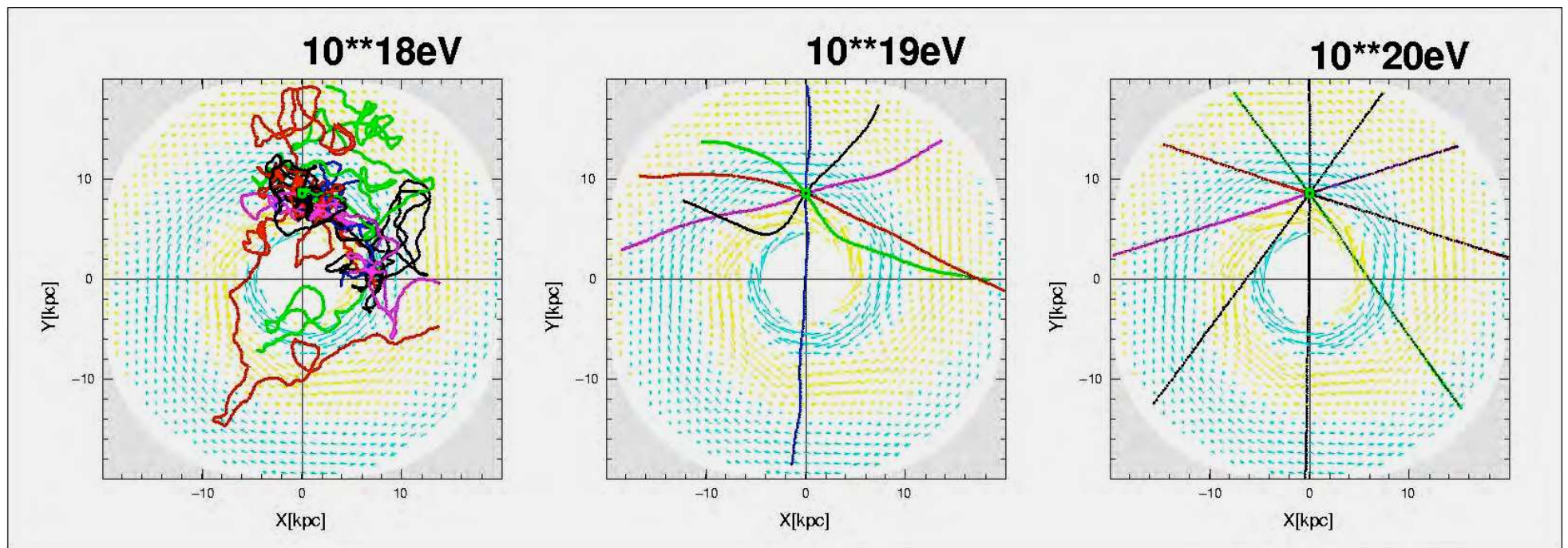


Promieniowanie kosmiczne

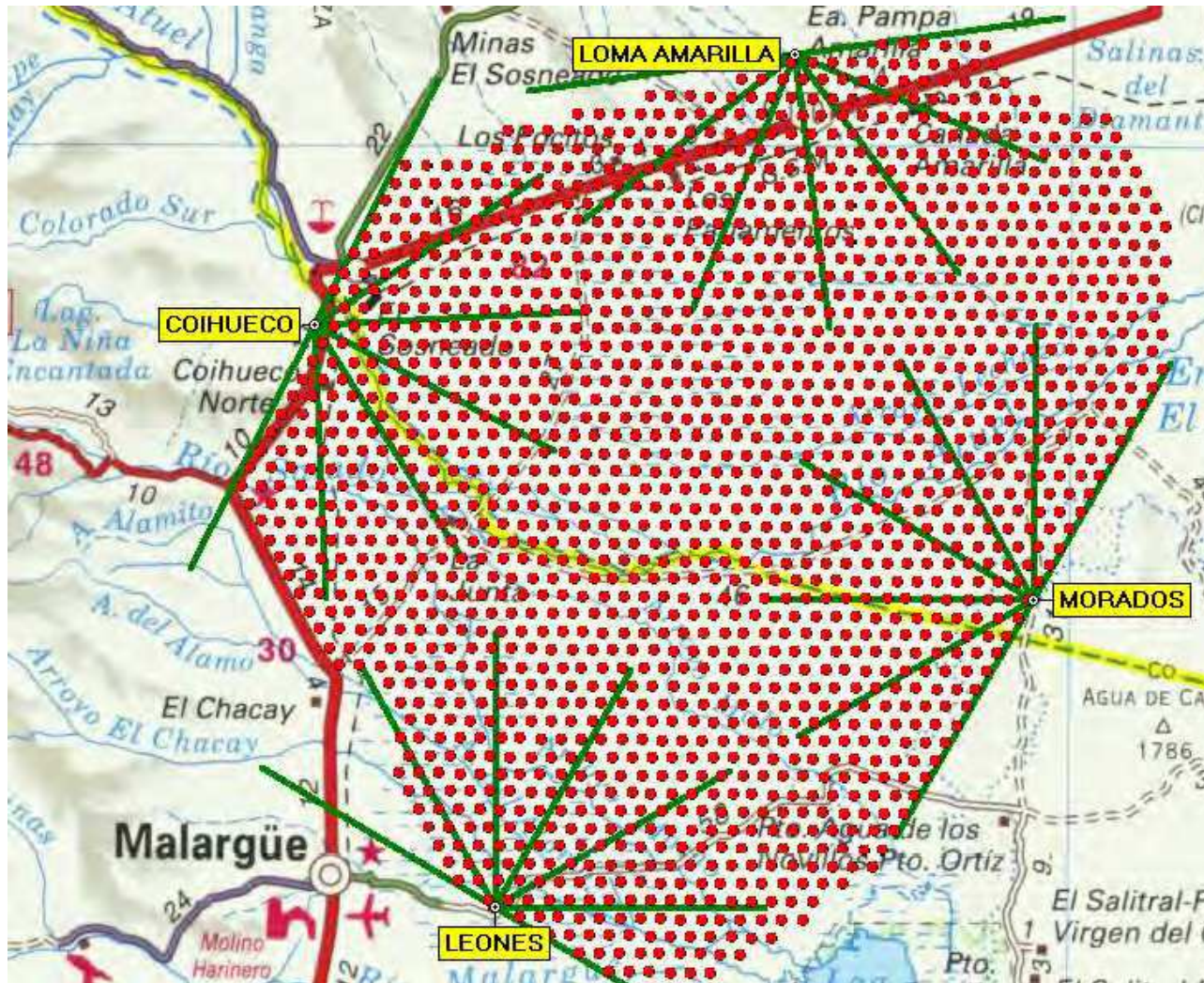
Poszukiwanie źródeł

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 $1 - 2^\circ$

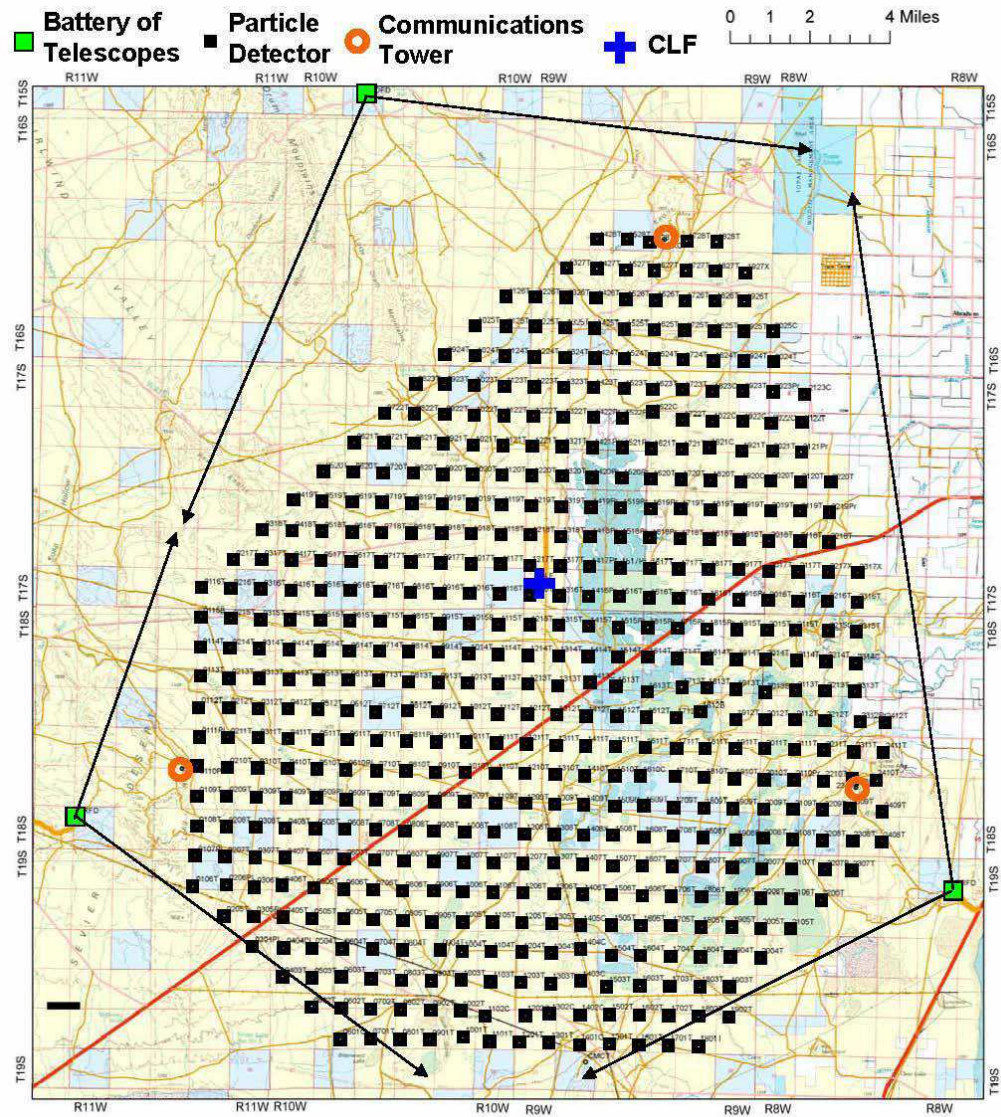


AUGER



3000 km², Argentyna

Telescope Array



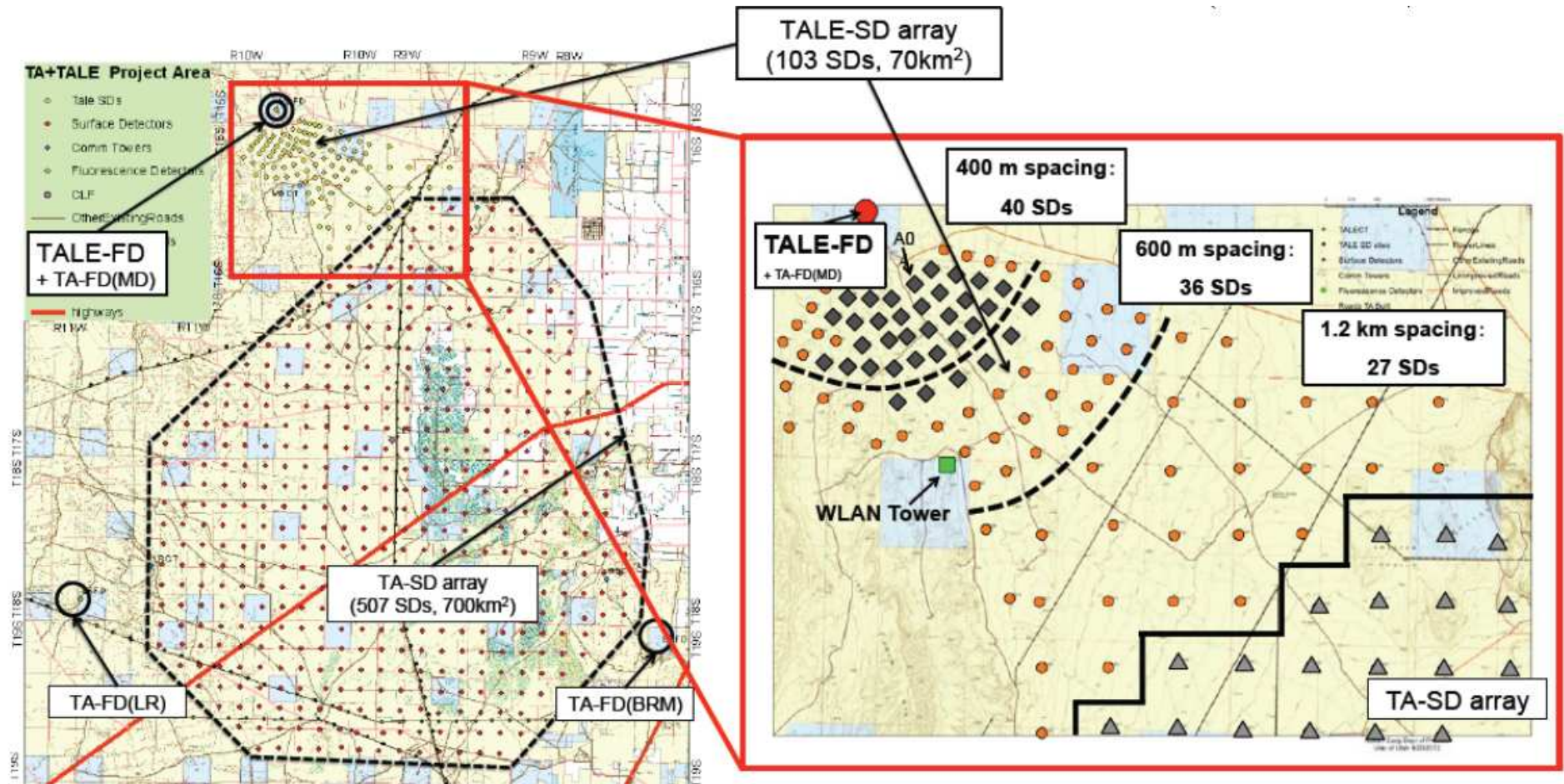
700 km², Utah, USA

A.F. Żarnecki

Wykład IX

Telescope Array

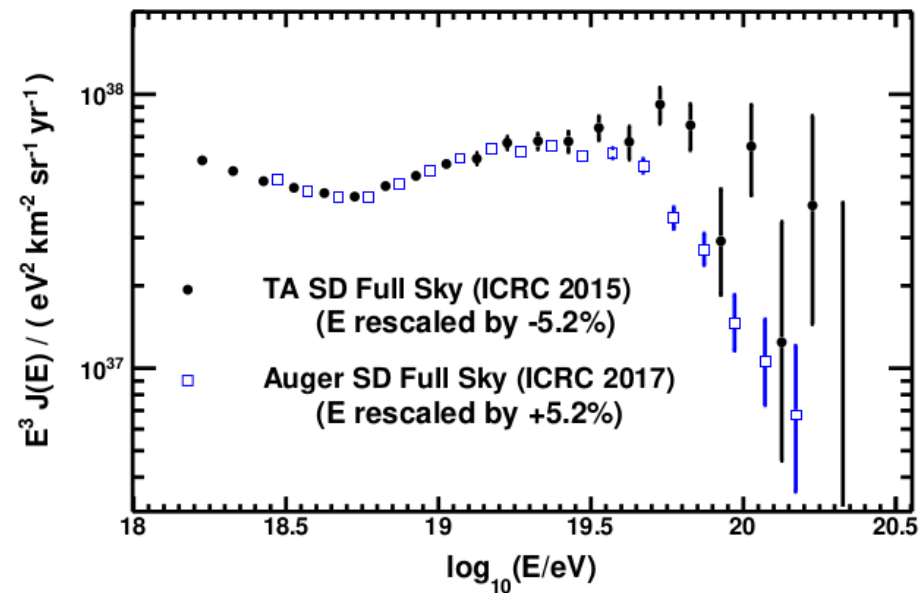
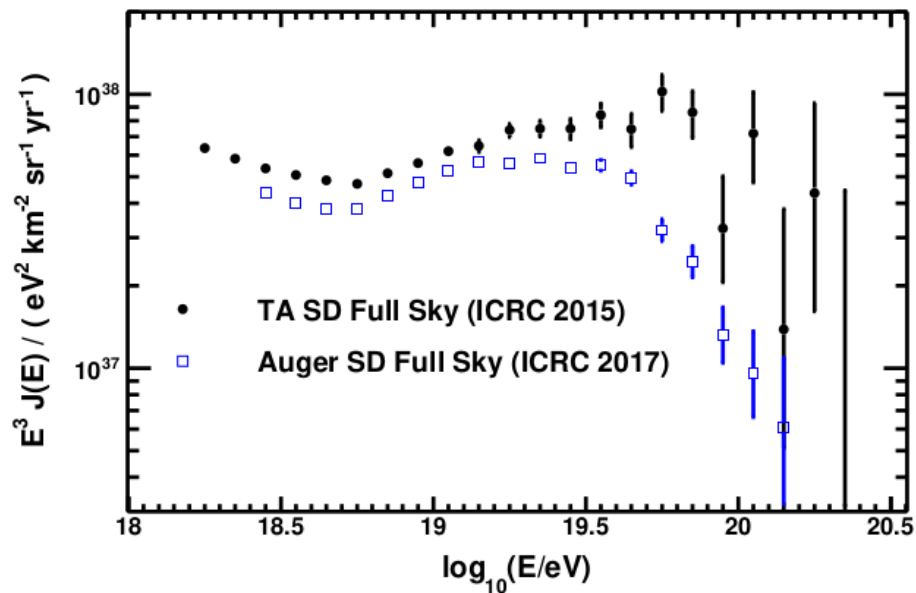
W ostatnich latach detektor rozbudowany o część niskoenergetyczną



Nowe teleskopy UV pozwalają także na bezpośredni pomiar prom. Czerenkowa

TA vs Auger

Wyniki 2017 (uzgodnione)



Konieczna poprawka skali energii w granicach niepewności systematycznych...

Mimo to końcówka widma pozostaje wyraźnie różna!

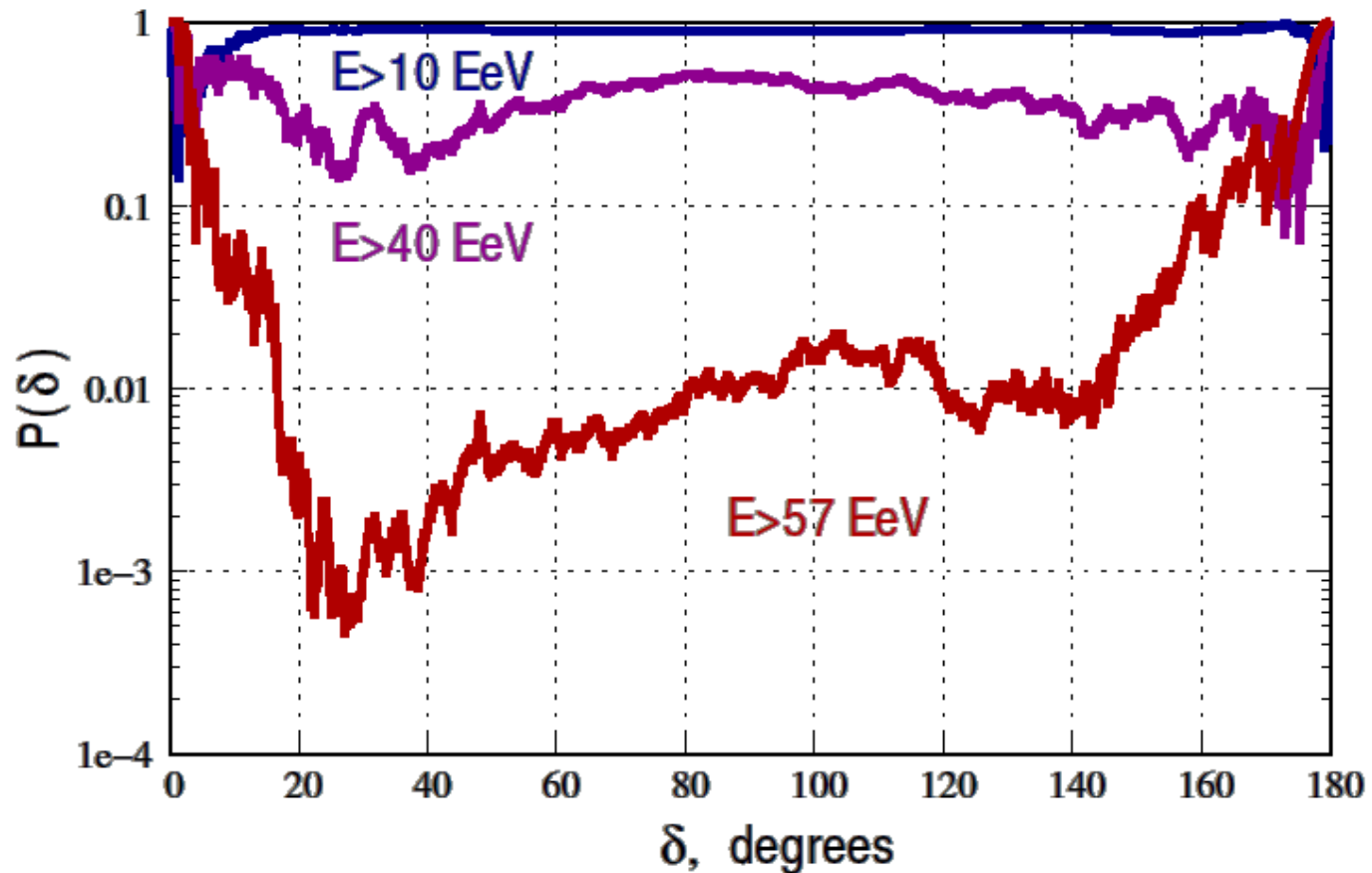
Energia przy której następuje “odcięcie” widma wyraźnie wyżej w TA...

Ale detektory patrzą na różny obszar nieba...

Telescope Array

Autokorelacja

Zliczanie par przypadków o zadanej różnicy kątowej między kierunkami.



Prawdopodobieństwo, że obserwacja jest zgodna z rozkładem izotropowym.

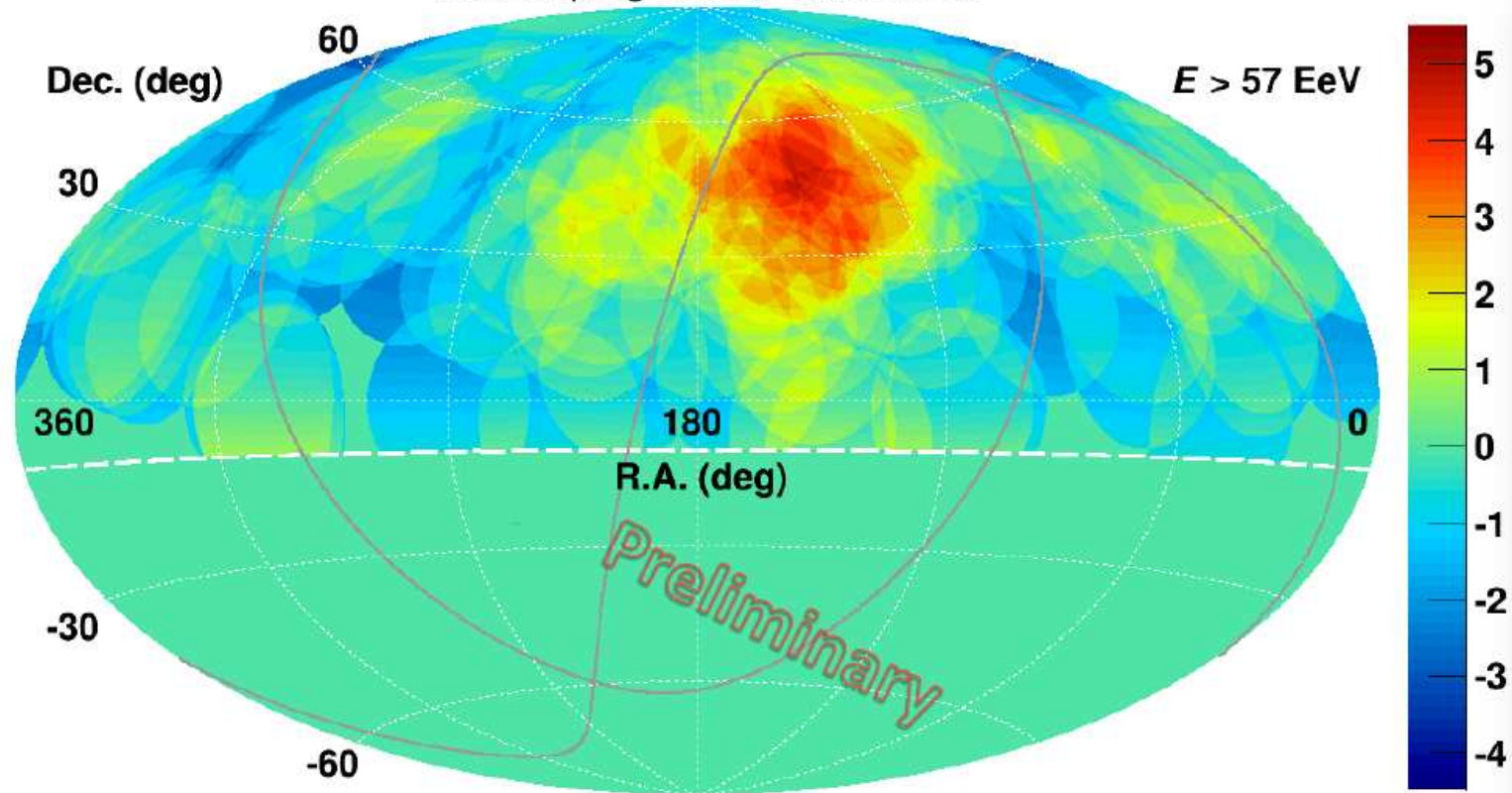
Telescope Array

Znaczoność anizotropii

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

Significance Map (Li-Ma) 7 years

Oversampling with 20°-radius circle

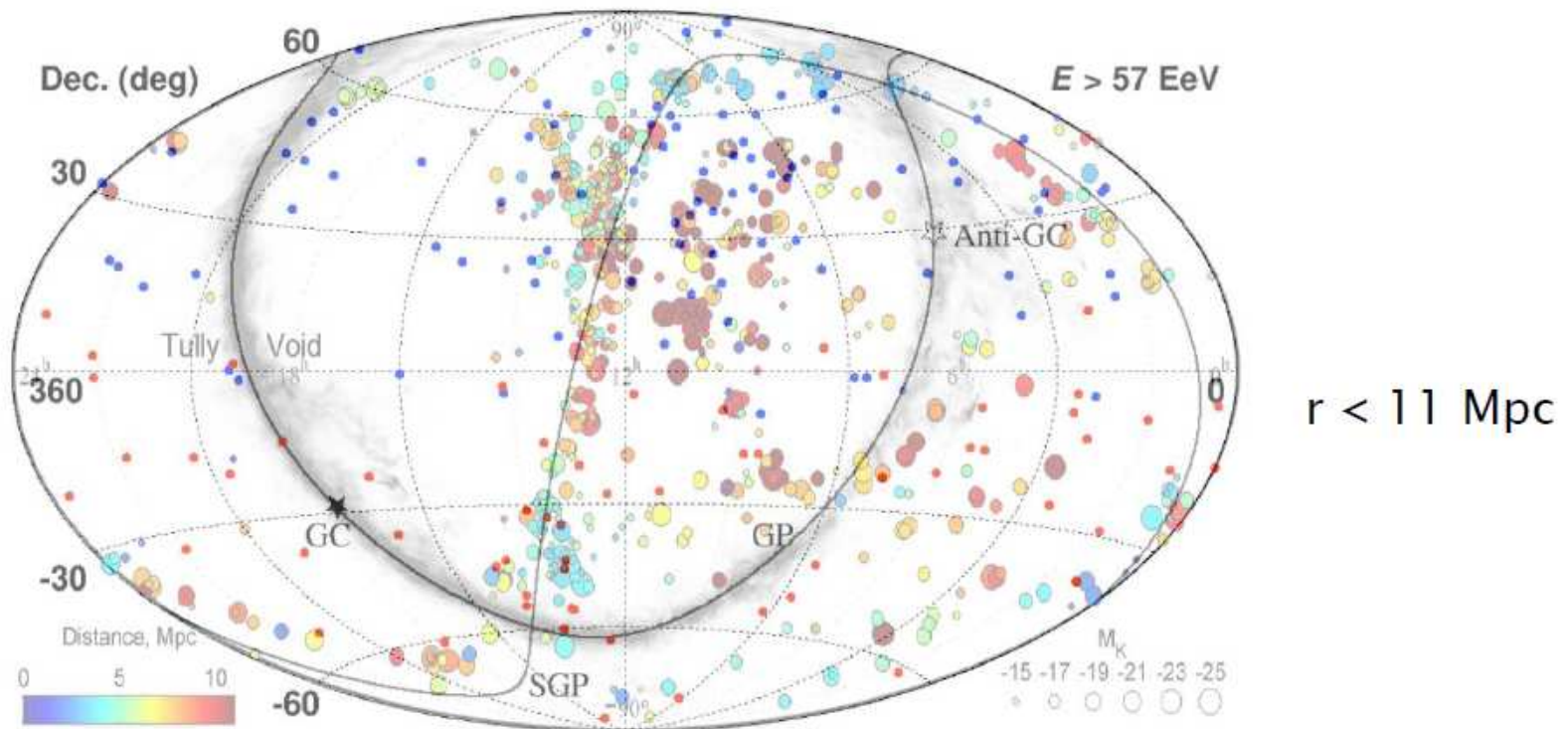


$$N_{obs} = 24, N_{iso} = 6.88 \Rightarrow P = 5.07\sigma \Rightarrow \text{globalne } 3.4\sigma \text{ (} p = 3.7 \cdot 10^{-4} \text{)}$$

Telescope Array

Korelacja z lokalnymi strukturami

LSS - Large Scale Structures



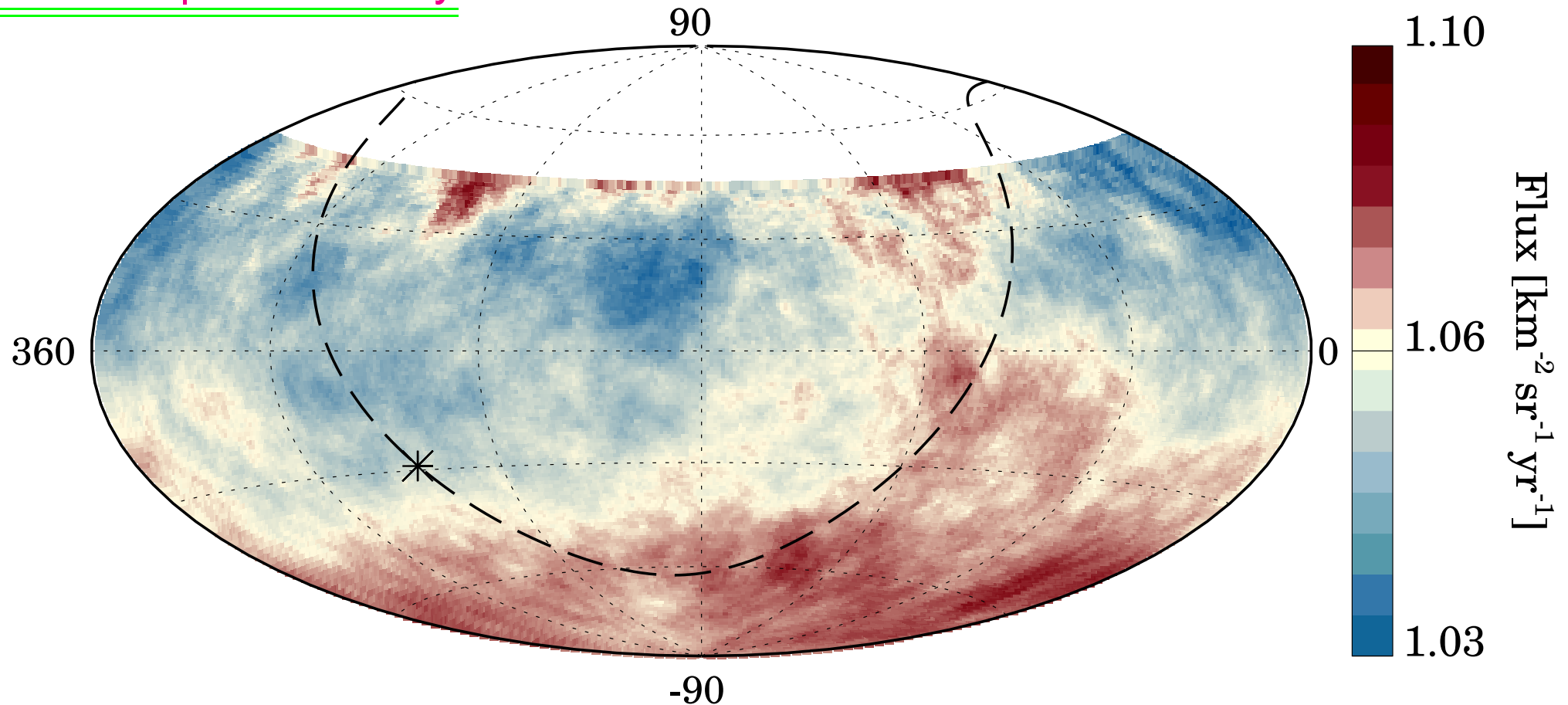
Blue dots: TA events

Red dots: Auger events

Statystyka wciąż zbyt mała na wyciągnięcie jednoznacznych wniosków...

AUGER

Rozkład przestrzenny



Dla energii 4 – 8 EeV

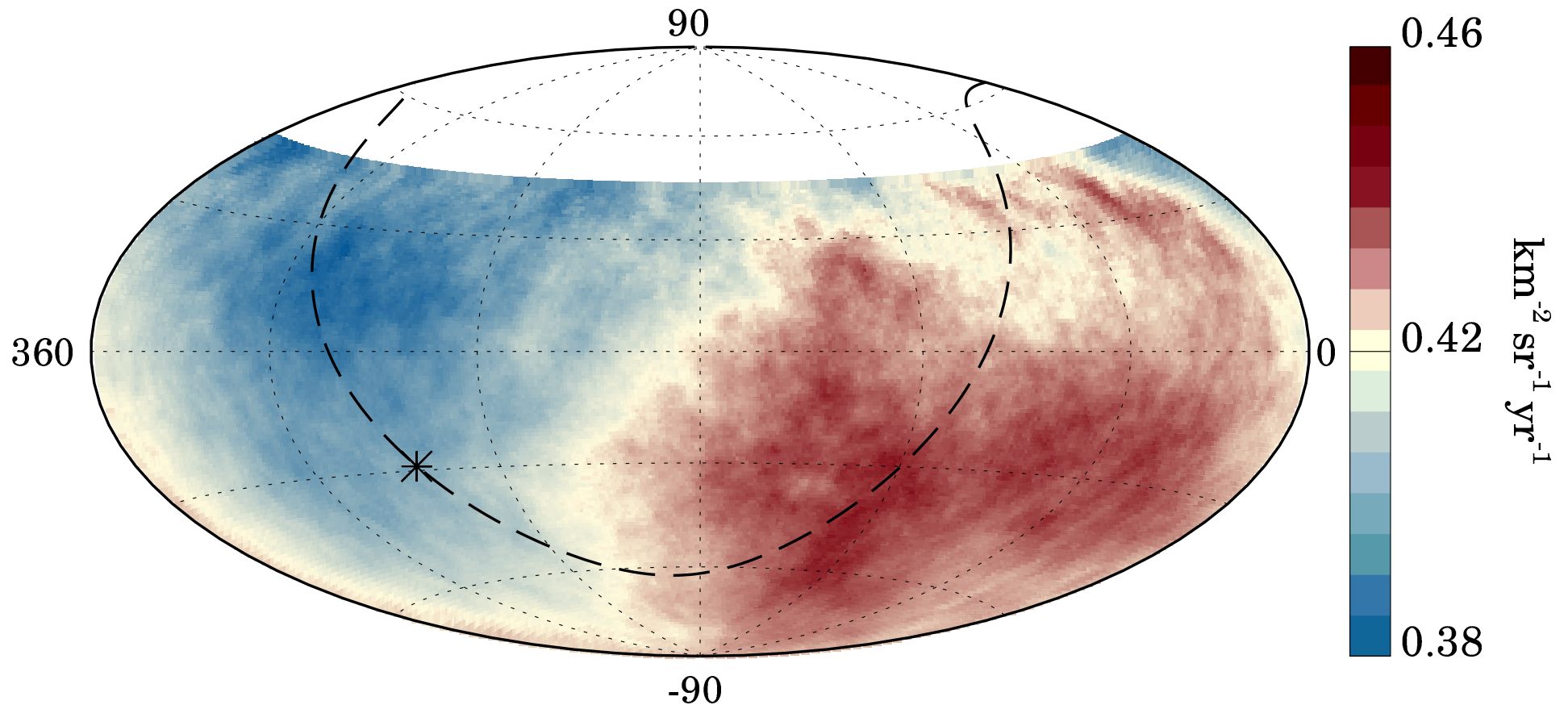
amplituda ok. 3%

Położenia przypadków rozmyte profilem o szerokości 45°

AUGER

Rozkład przestrzenny

(Science 2017)



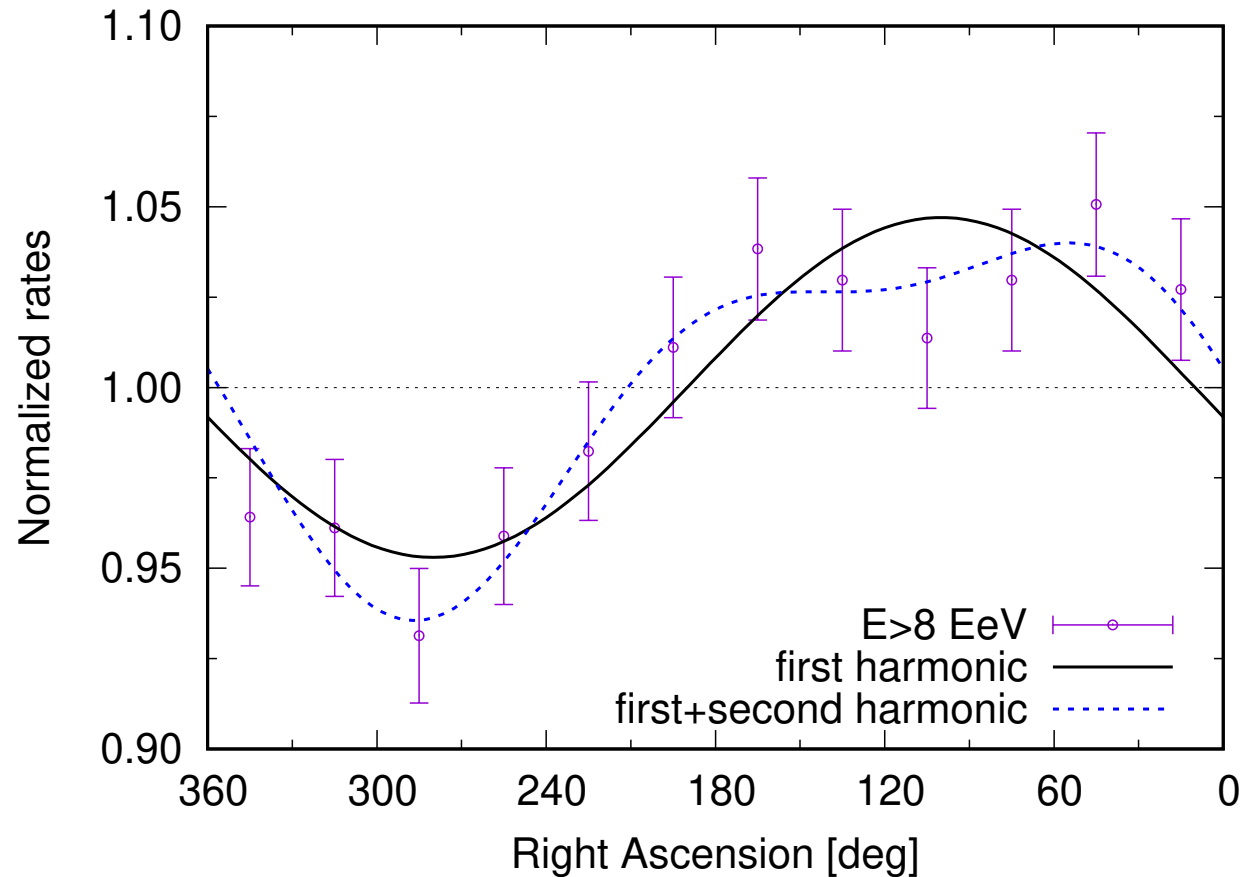
Dla energii $> 8 \text{ EeV}$

amplituda ok. 20%

Położenia przypadków rozmyte profilem o szerokości 45°

AUGER

Rozkład przestrzenny



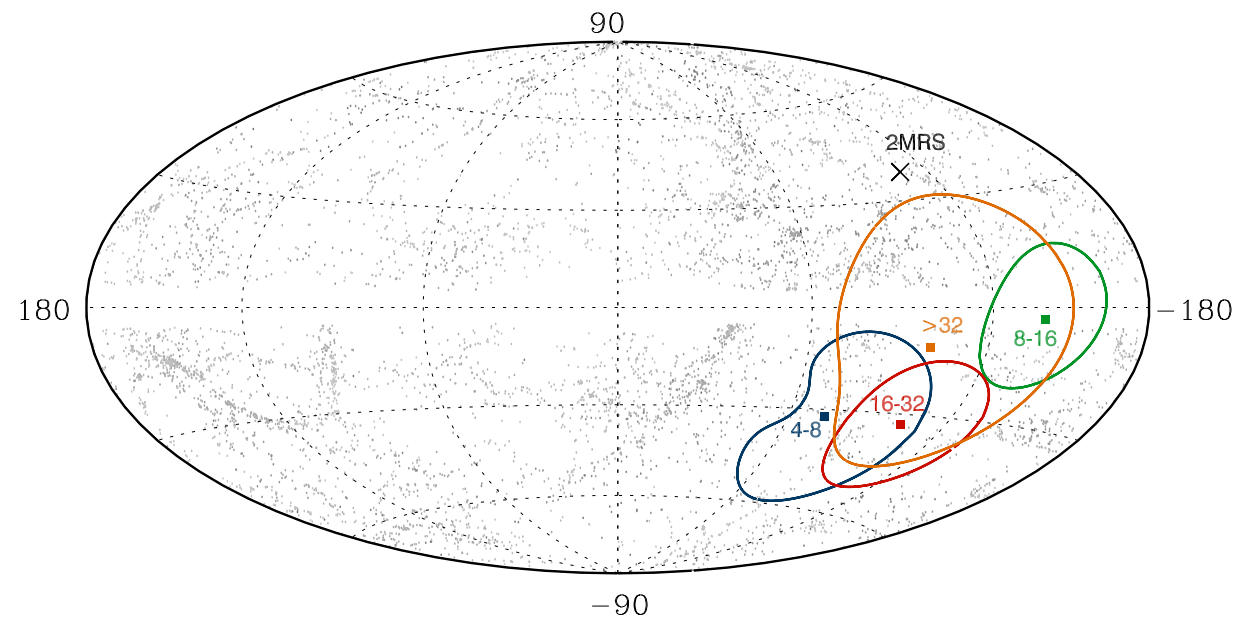
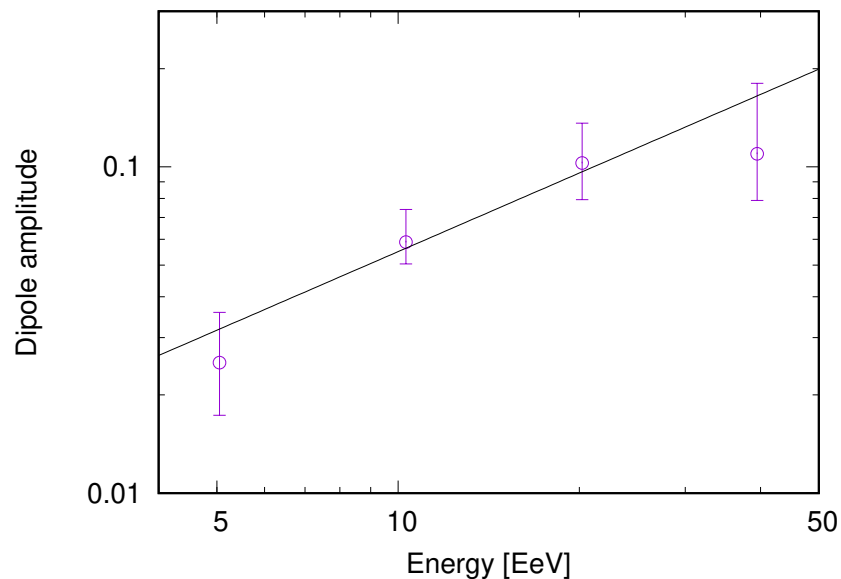
Anizotropia obserwowana na poziomie 5.2σ ($p = 2.6 \cdot 10^{-8}$)

AUGER

Rozkład przestrzenny (Wyniki 2018)

Amplituda obserwowanej anizotropii rośnie wyraźnie z energią.

Natomiast pozycja na niebie nie zmienia się, statystycznie niezależne próbki o różnych energiach wskazują ten sam kierunek...

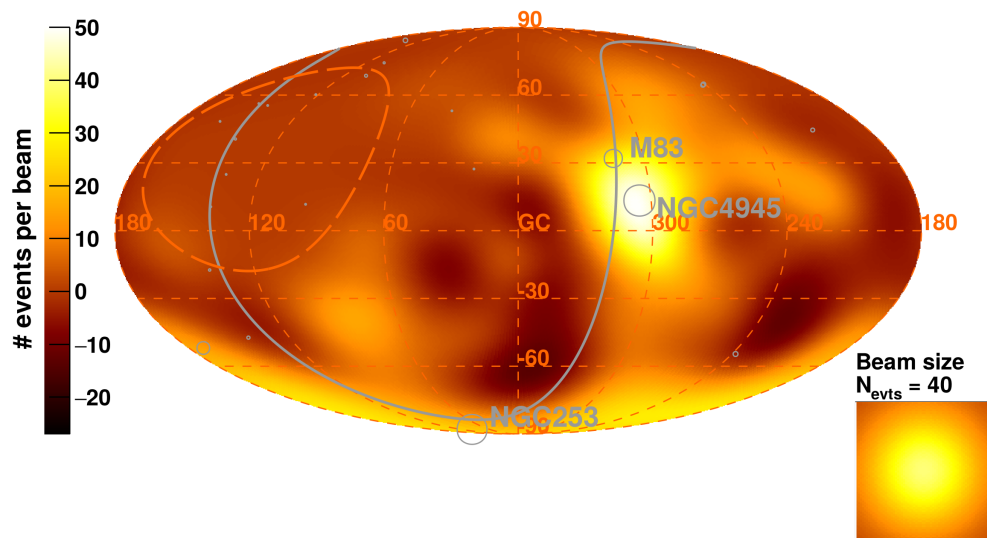


AUGER

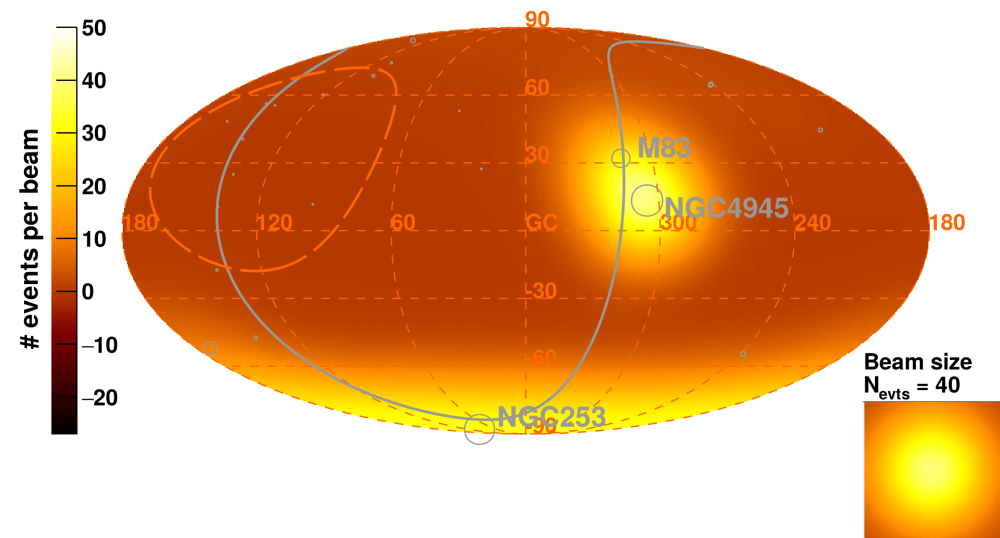
Rozkład przestrzenny (wyniki 2018)

Dla przypadków najwyższych energii dostrzeżono też korelację z położeniami **galaktyk gwiazdotwórczych**

Observed Excess Map - $E > 39$ EeV



Model Excess Map - Starburst galaxies - $E > 39$ EeV



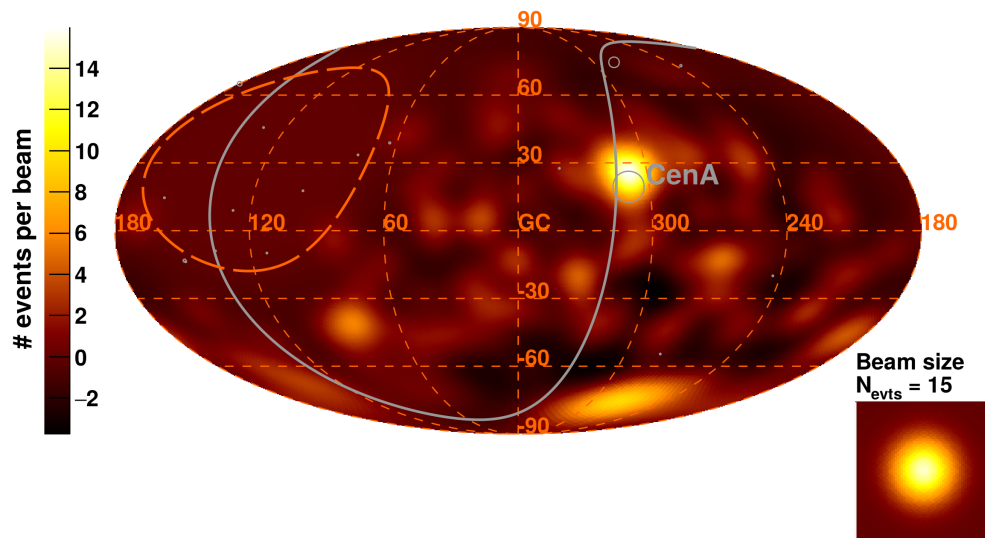
Wkład ok. 10%. Efekt na poziomie 4σ

AUGER

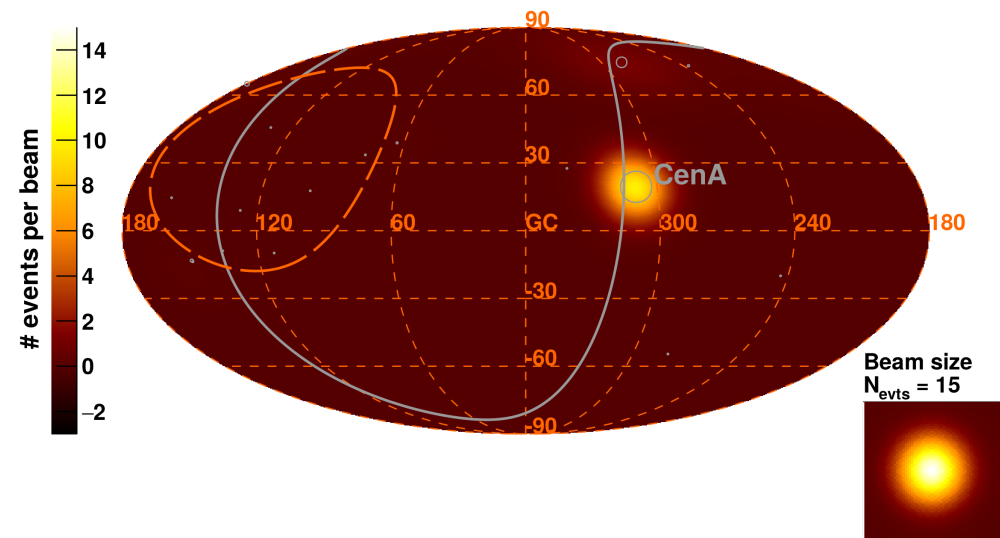
Rozkład przestrzenny (wyniki 2018)

Dla przypadków najwyższych energii dostrzeżono też korelację z położeniami galaktyk gwiazdotwórczych, czy też **aktywnych jąder galaktyk...**

Observed Excess Map - $E > 60$ EeV



Model Excess Map - Active galactic nuclei - $E > 60$ EeV

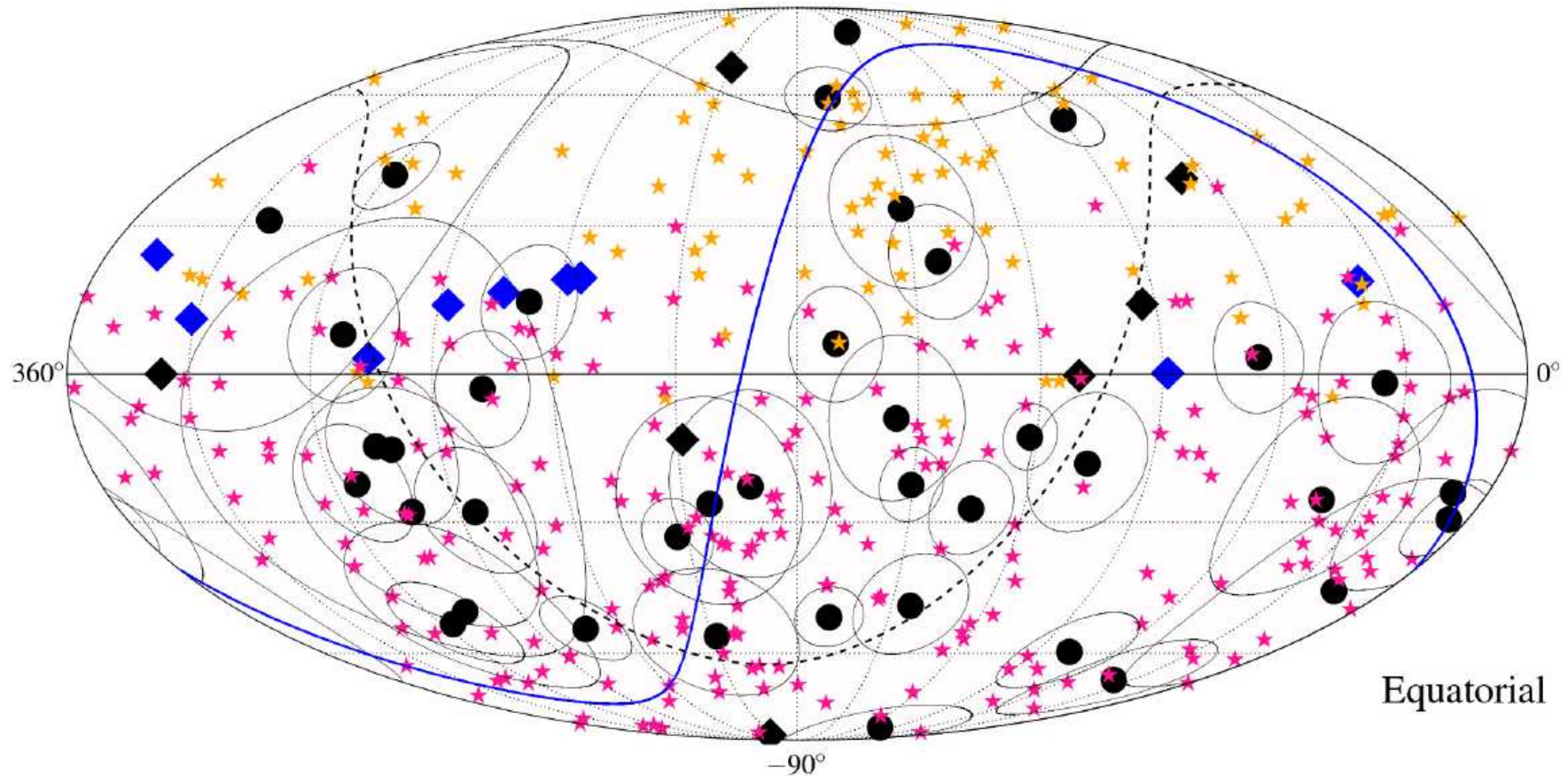


Wkład ok. 7%. Efekt na poziomie 2.7σ

AUGER + TA

Korelacja z IceCube

przypadki najwyższych energii: neutrino TeV - PeV

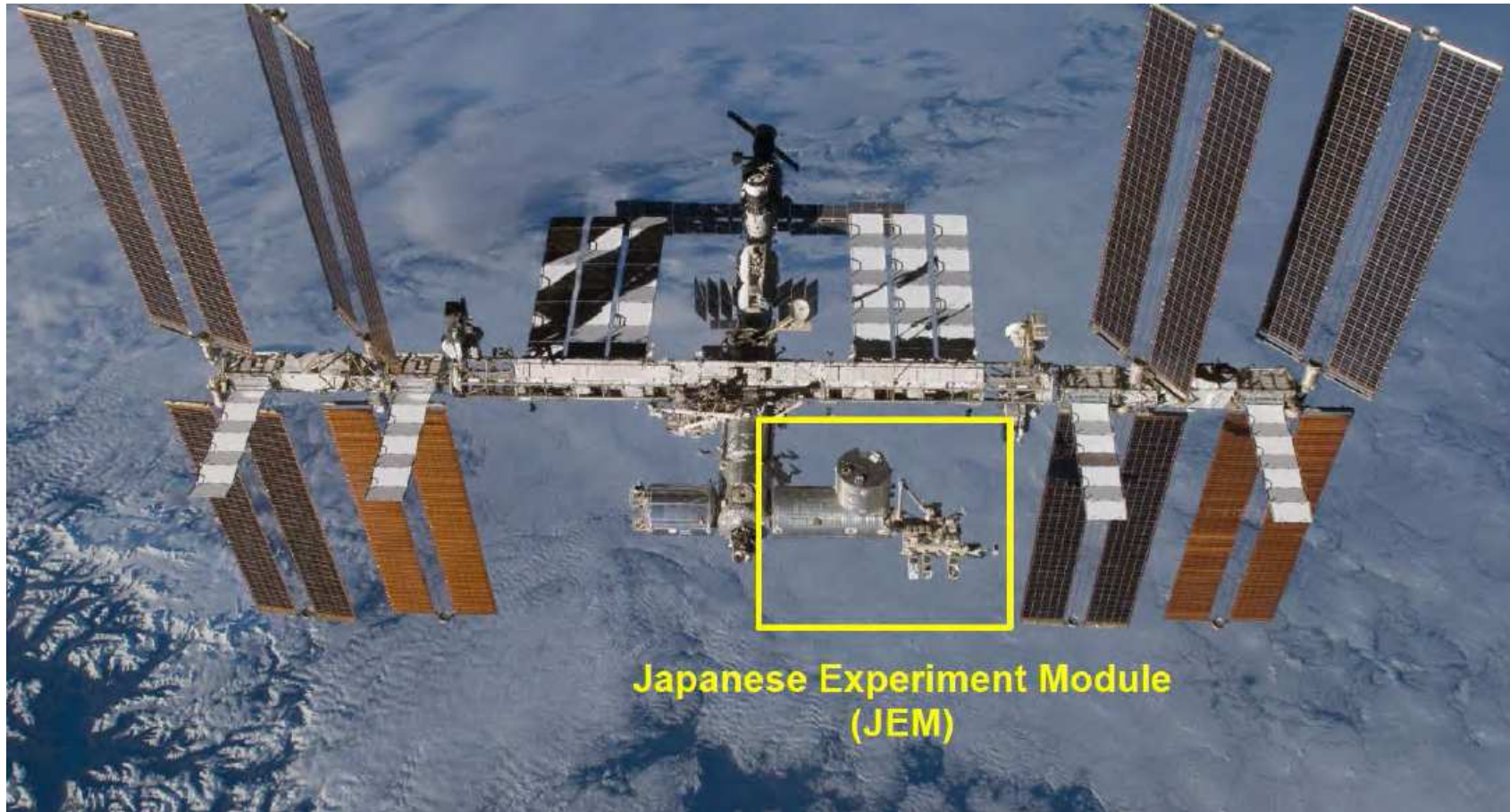


Widoczna korelacja kaskad (●) i torów (◇) neutrinowych z UHECR dla rozdzielczości ok. 20° (na poziomie znaczoneści $\sim 2.6\sigma$) \Rightarrow potrzebna większa statystyka...

JEM-EUSO

Dalsze powiększanie układów detekcyjnych na powierzchni Ziemi bardzo kosztowne.

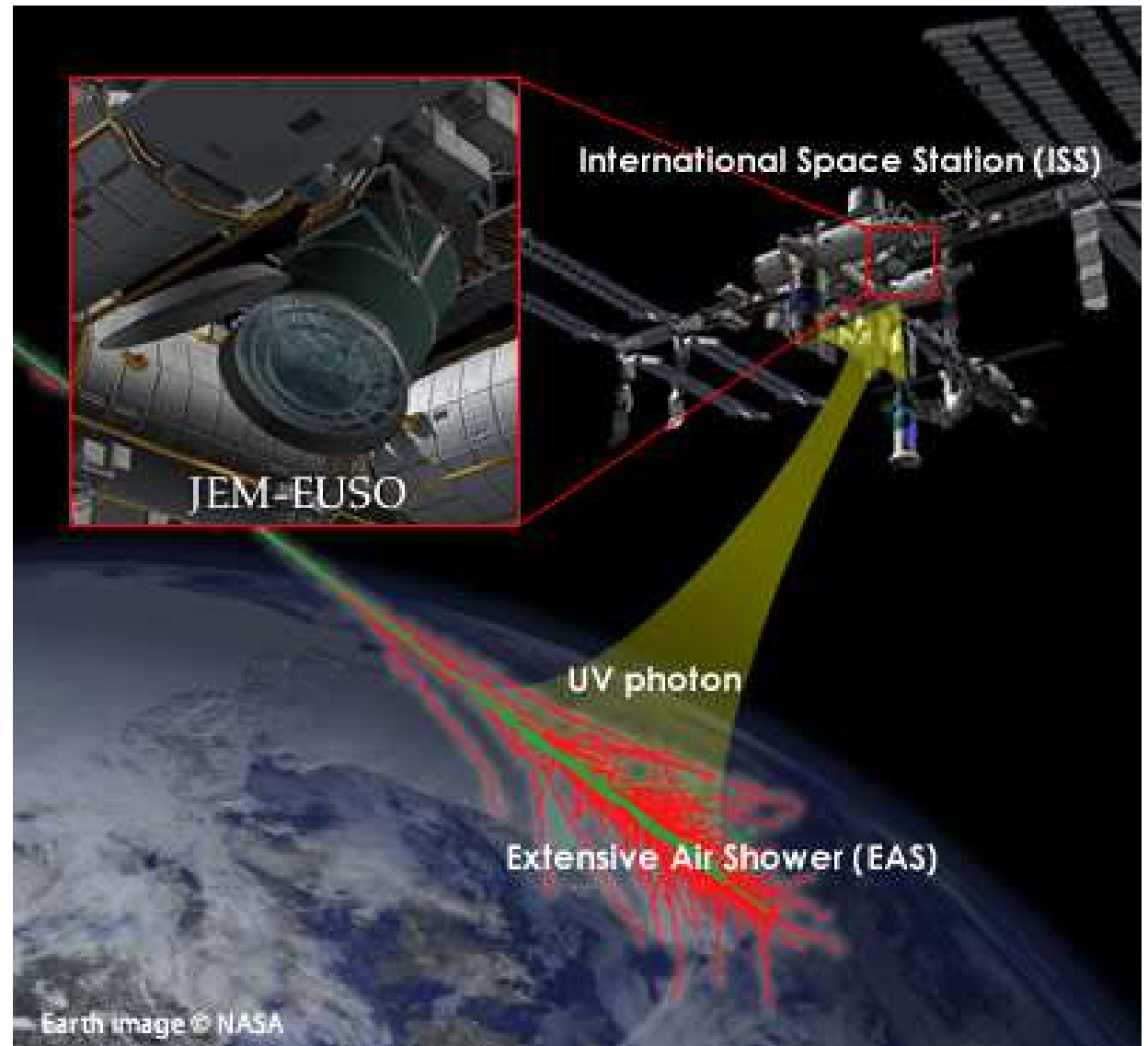
⇒ projekt obserwacji z kosmosu, z Japońskiego Modułu Eksperymentalnego na ISS



JEM-EUSO

Zasada działania

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



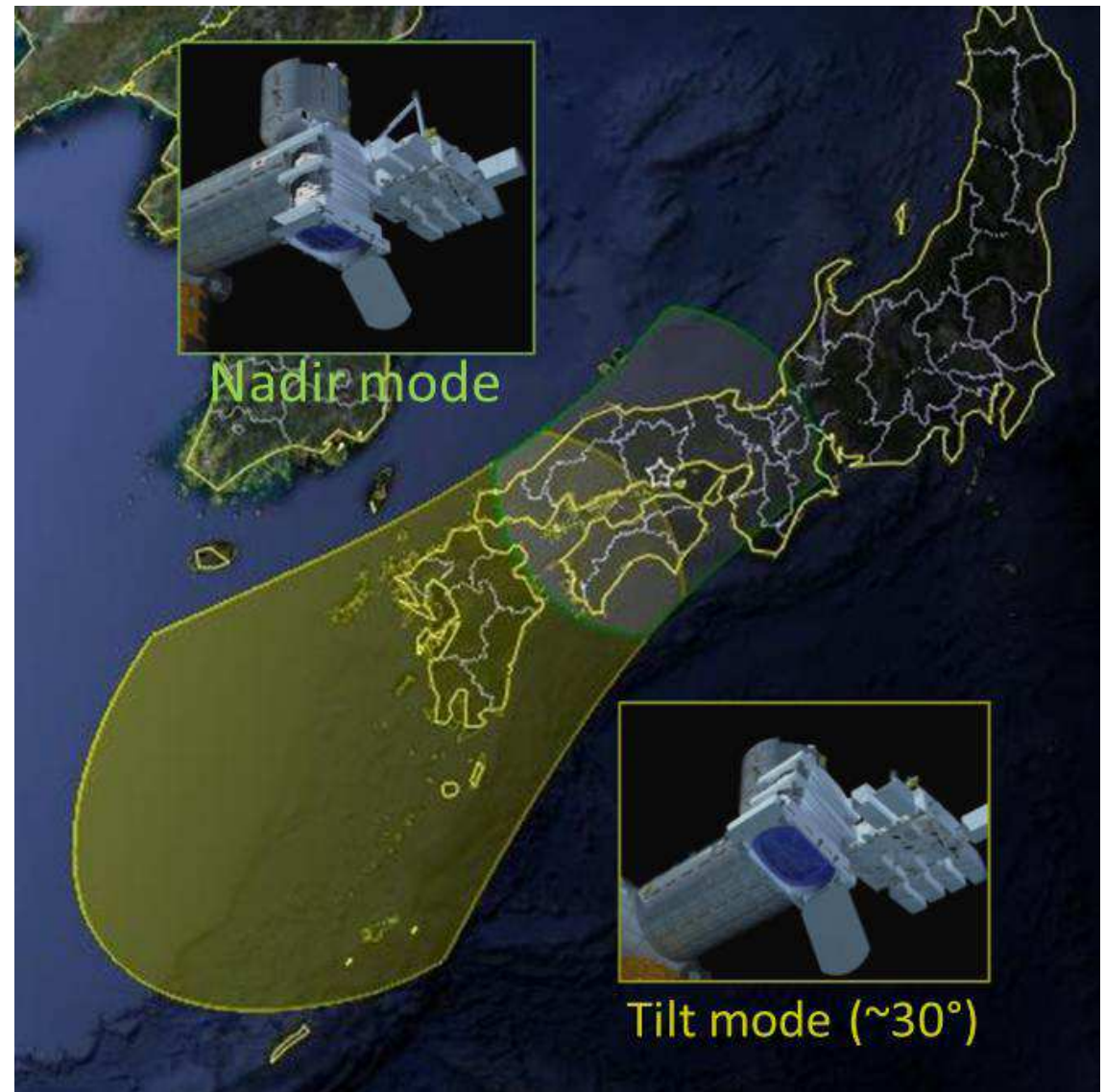
JEM-EUSO

Zasada działania

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

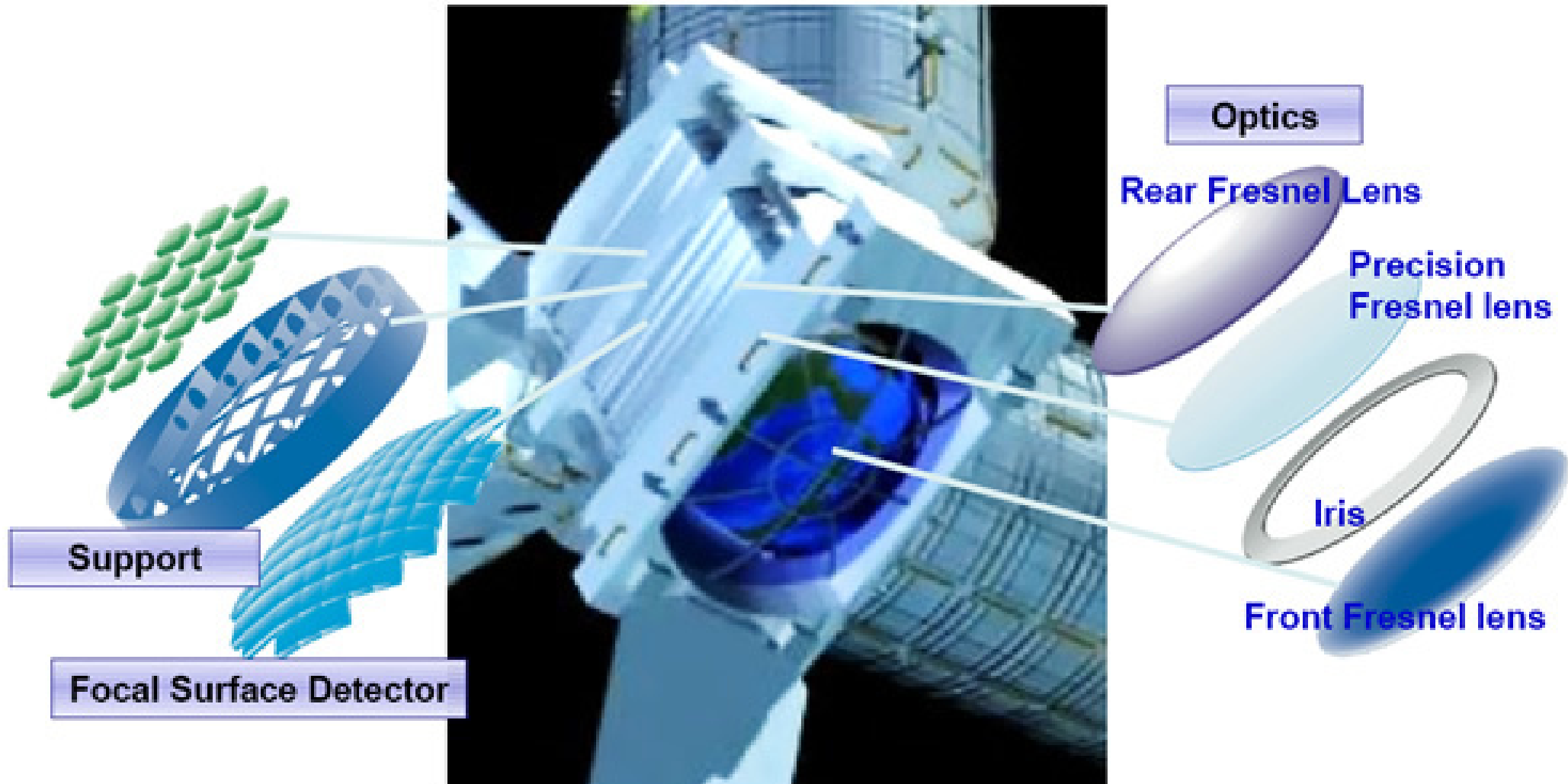
Z wysokości 400 km można obserwować powierzchnię od ok. 140 000 km² (obserwacja pionowo) do ok. 300 000 km² (obserwacja pod kątem 30°)

100× AUGER !!!



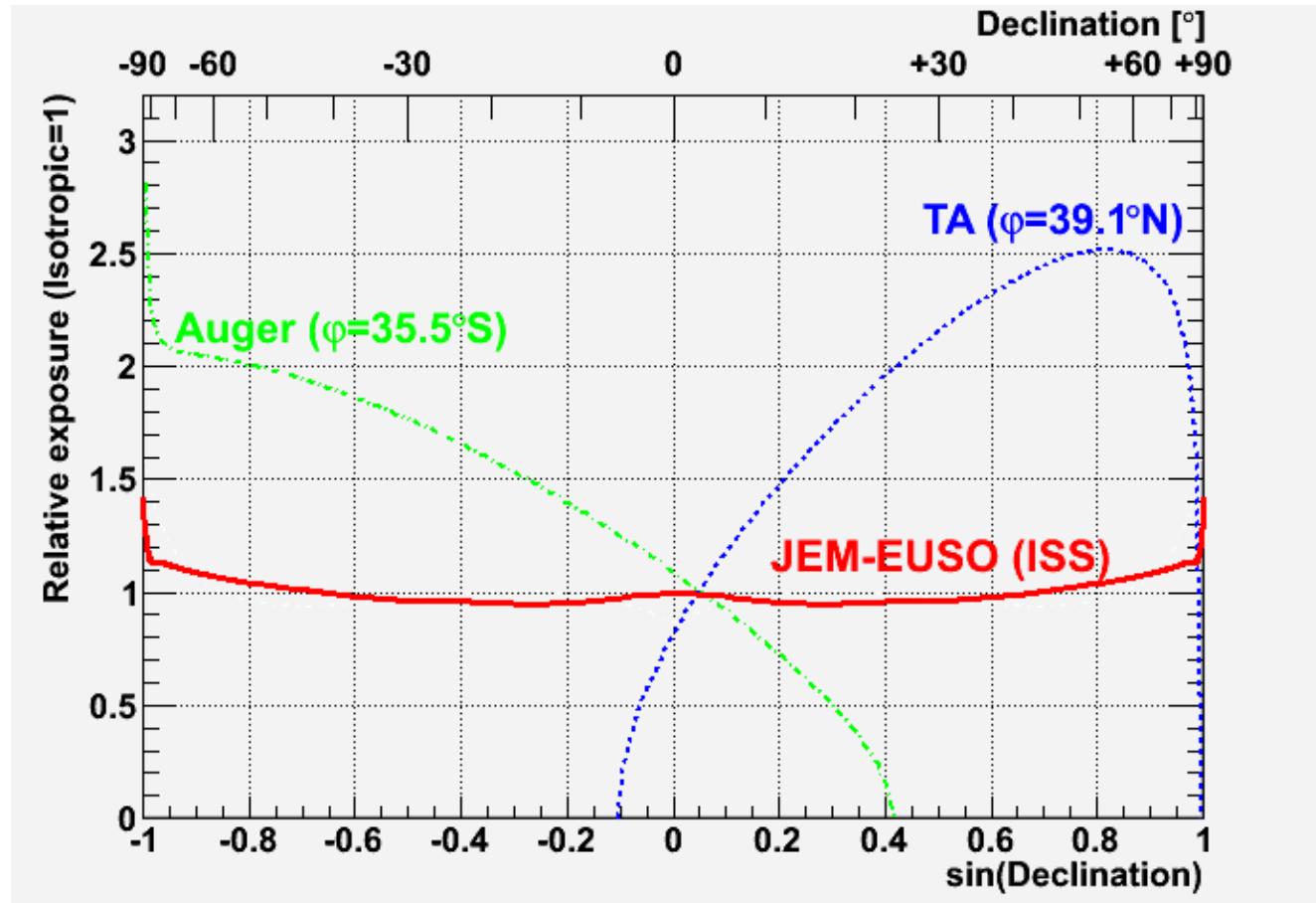
JEM-EUSO

Schemat



JEM-EUSO

Obszar obserwacji



Ponieważ ISS krąży po orbicie nachylonej ok. 52° do równika cała sfera niebieska dostępna jest obserwacjom \Rightarrow kluczowe dla poszukiwania źródeł

JEM-EUSO

Status projektu

Przeprowadzono testy z prototypem naziemnym (we współpracy z Telescope Array)

Pierwszy próbny lot balonowy (~ 40 km) w 2014

Właśnie odbył się 14 dniowy lot (24 kwietnia - 7 maja 2017) balonem NASA

Super Pressure Balloon (SPB) kolejny planowany w 2022

Przygotowywany detektor Mini-EUSO - obserwacje z wnętrza ISS.

Dwie soczewki o średnicy 25 cm, 1 moduł detekcyjny (2304 piksele).

Instalacja na ISS przewidziana na początku 2019 (?).

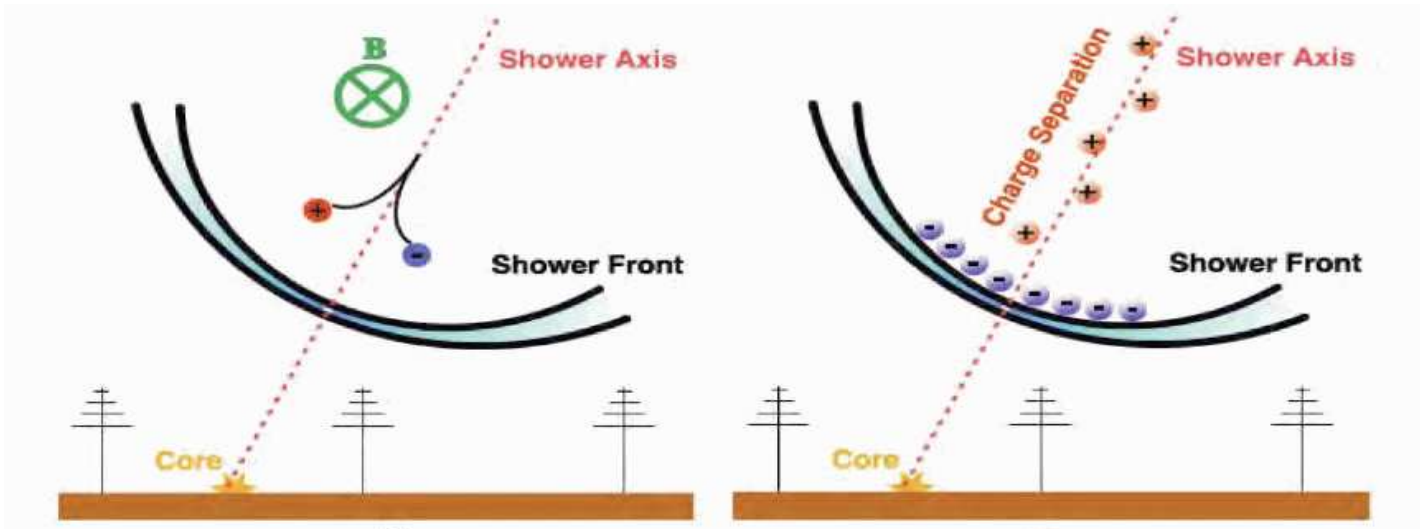
Start głównej misji, pierwotnie planowany na 2017, został odsunięty w czasie ($\gg 2020$).

Rozważana też mniejsza, uproszczona wersja, oparta na wykorzystaniu zwierciadła i jednej soczewki korekcyjnej: K-EUSO.

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

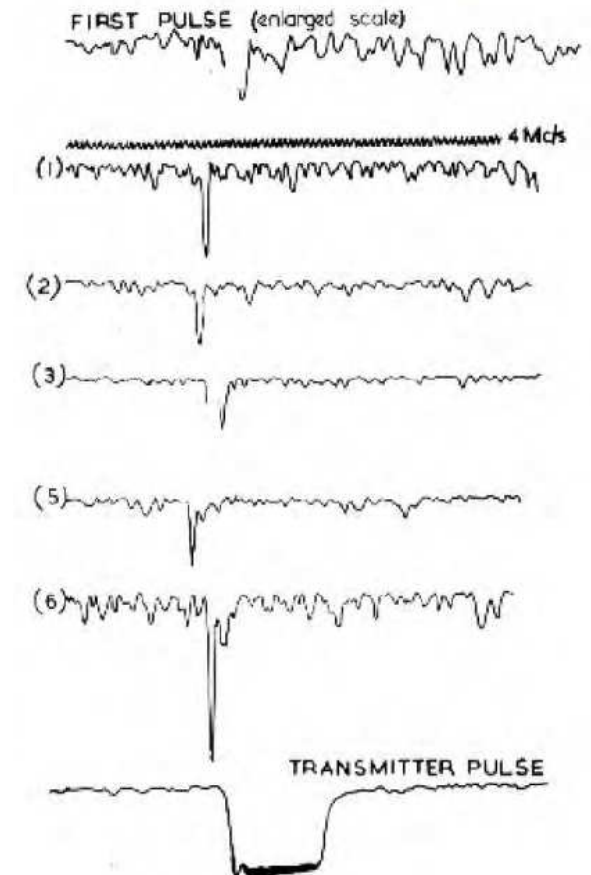
Emisja radiowa

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



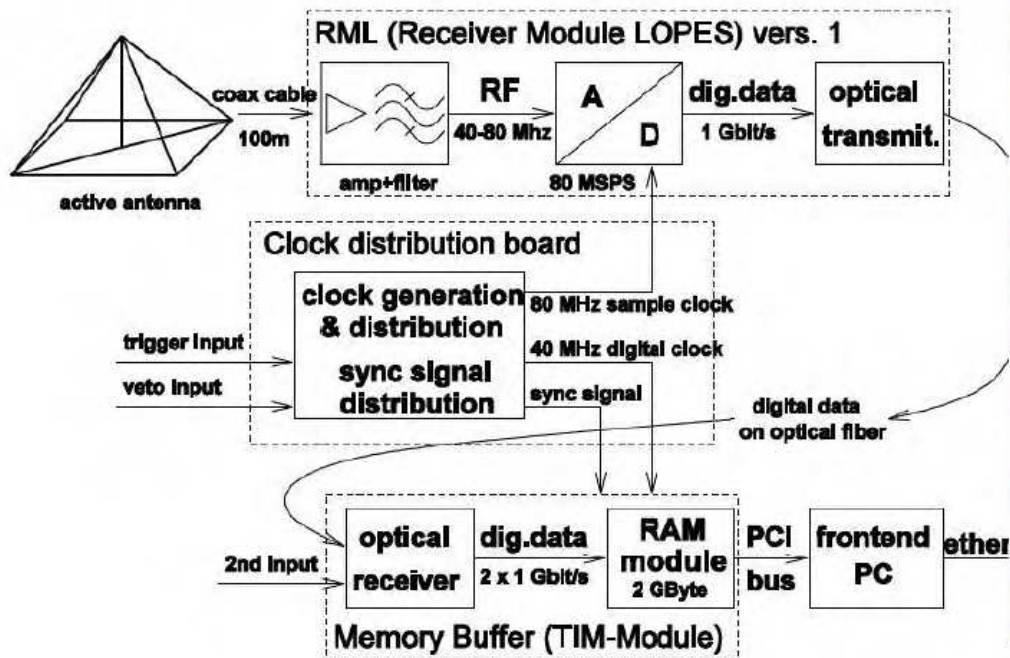
Jelley et al. (1965)

Wielkie pęki atmosferyczne

Detekcja radiowa

Zainteresowanie detekcją radiową ponownie na początku XXI wieku

Detektor LOPES zbudowany przy detektorze KASKADE (2003)



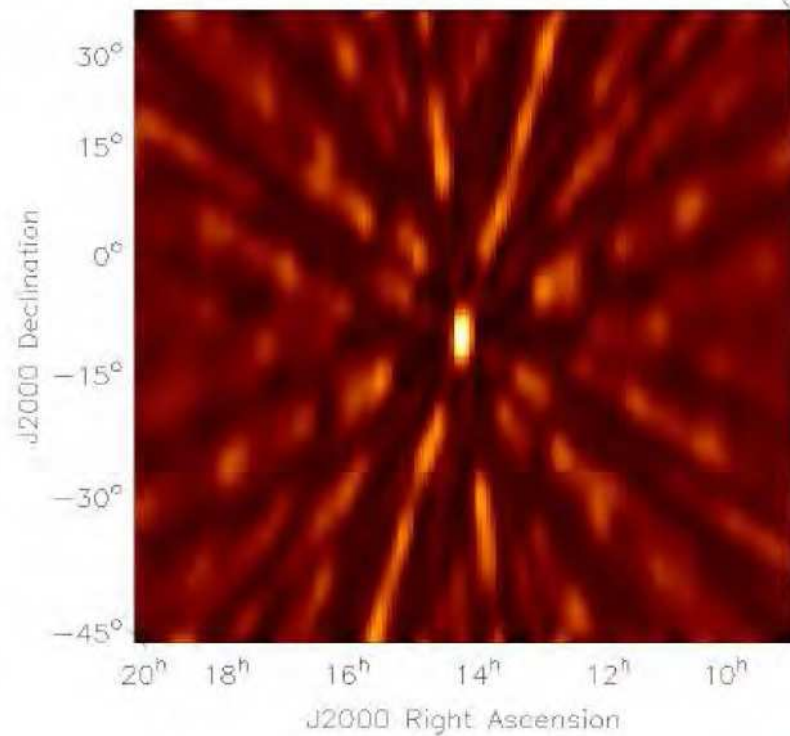
Detekcja radiowa

LOPES

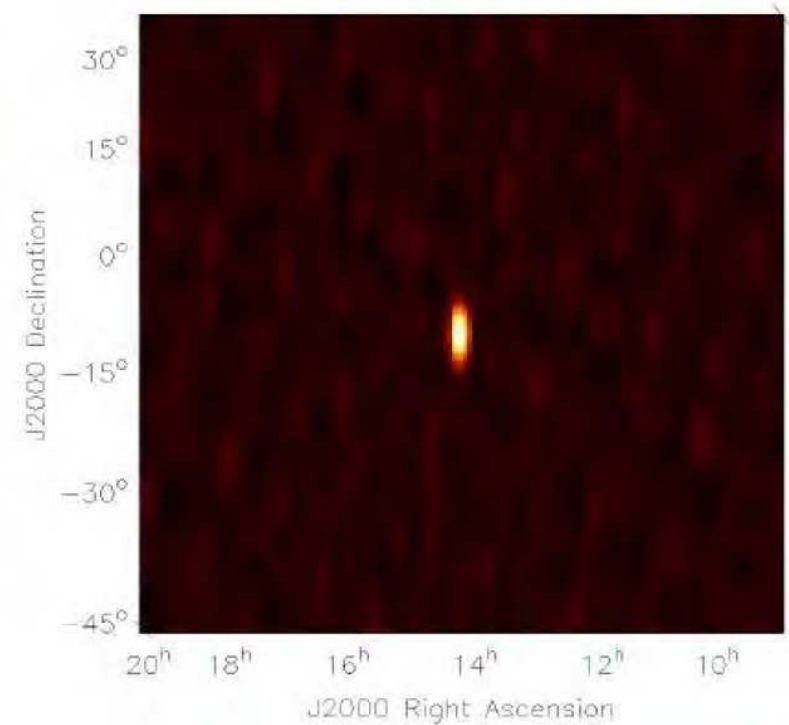
Przypadek wybuchu słonecznego mierzonego 8 antenami w paśmie 45-75 MHz

Rozkład pasujących kierunków:

Przed filtrowaniem



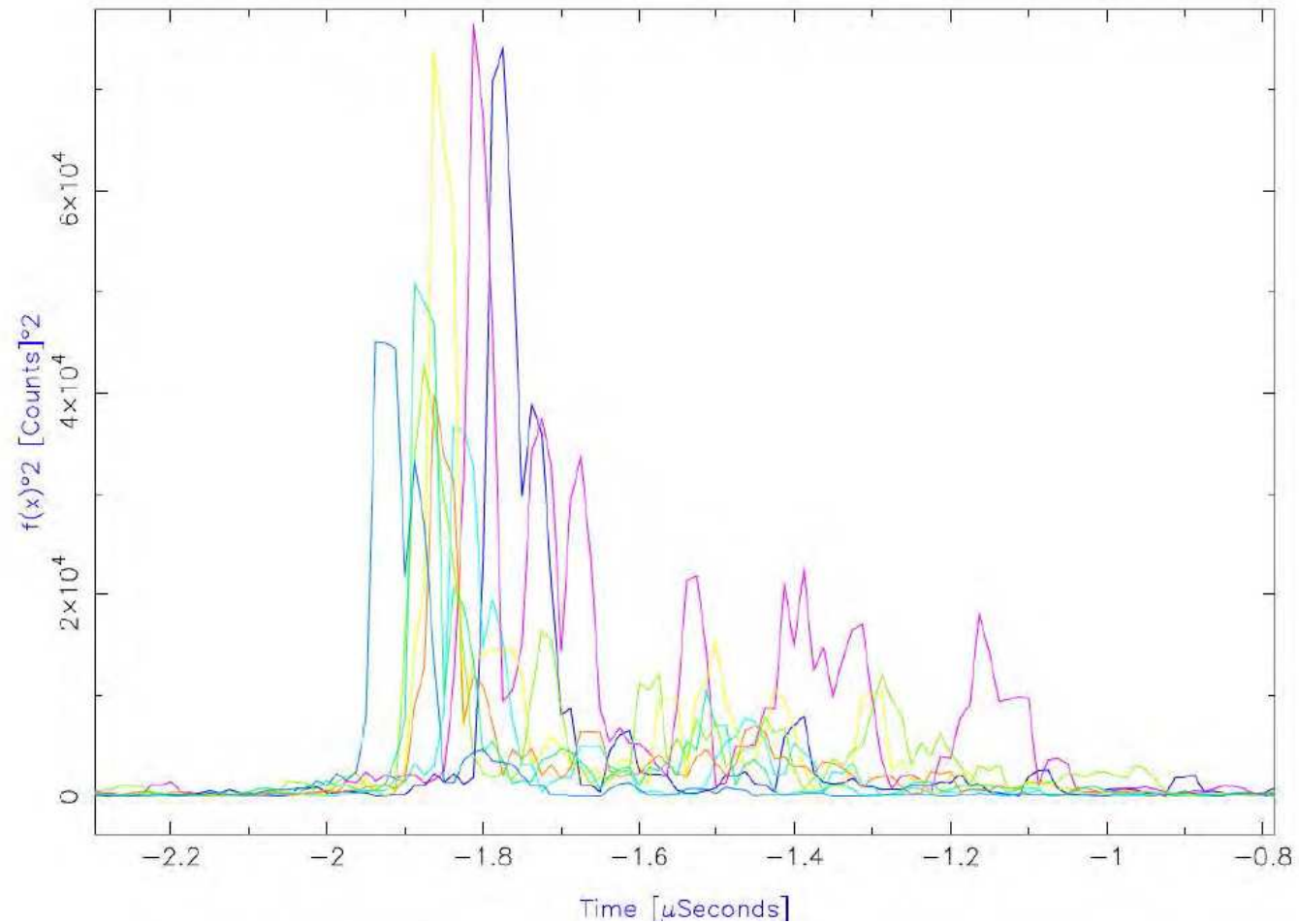
Po filtrowaniu



Detekcja radiowa

LOPES

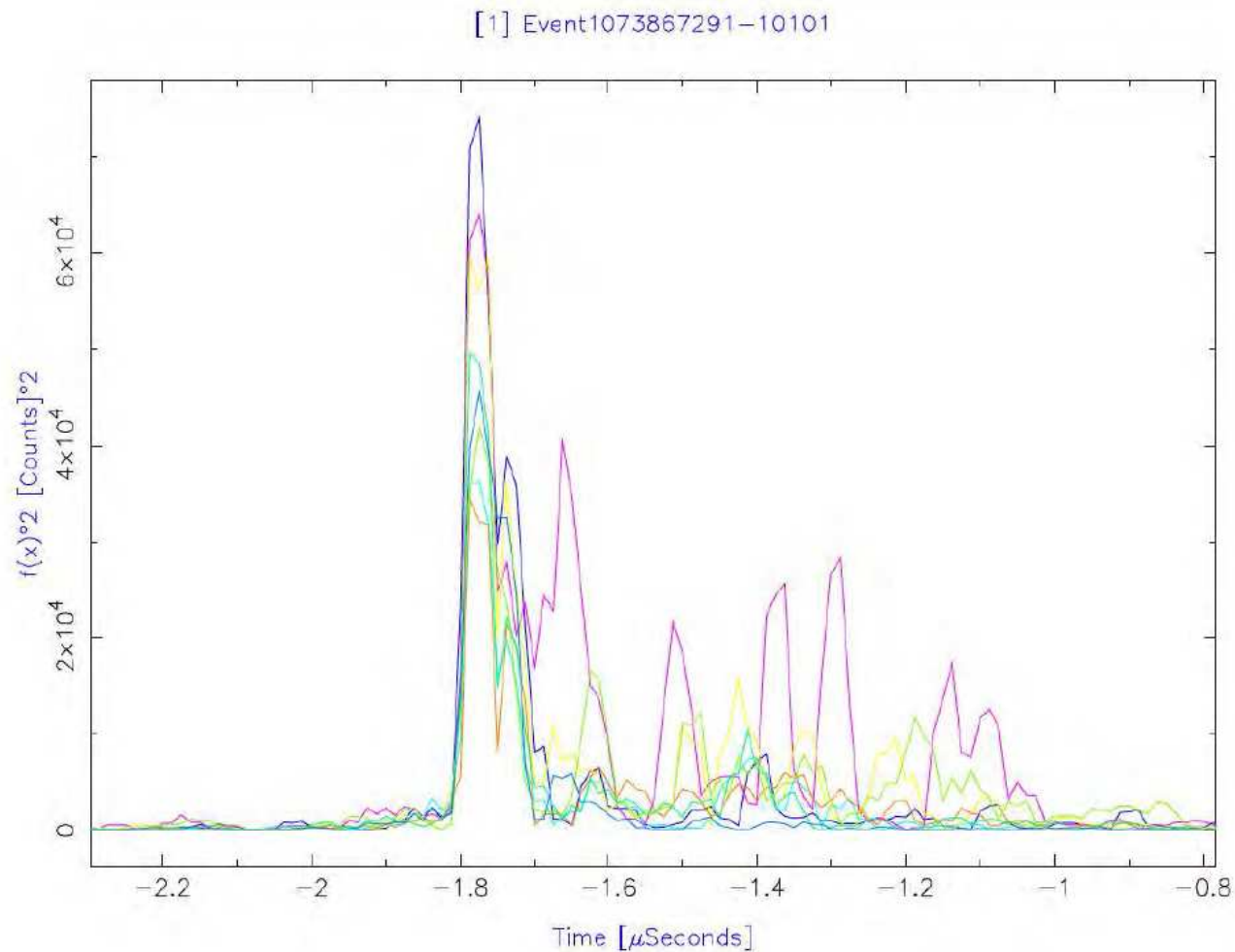
Przypadek mierzonej kaskady, przed dopasowaniem kierunku pęku:



Detekcja radiowa

LOPES

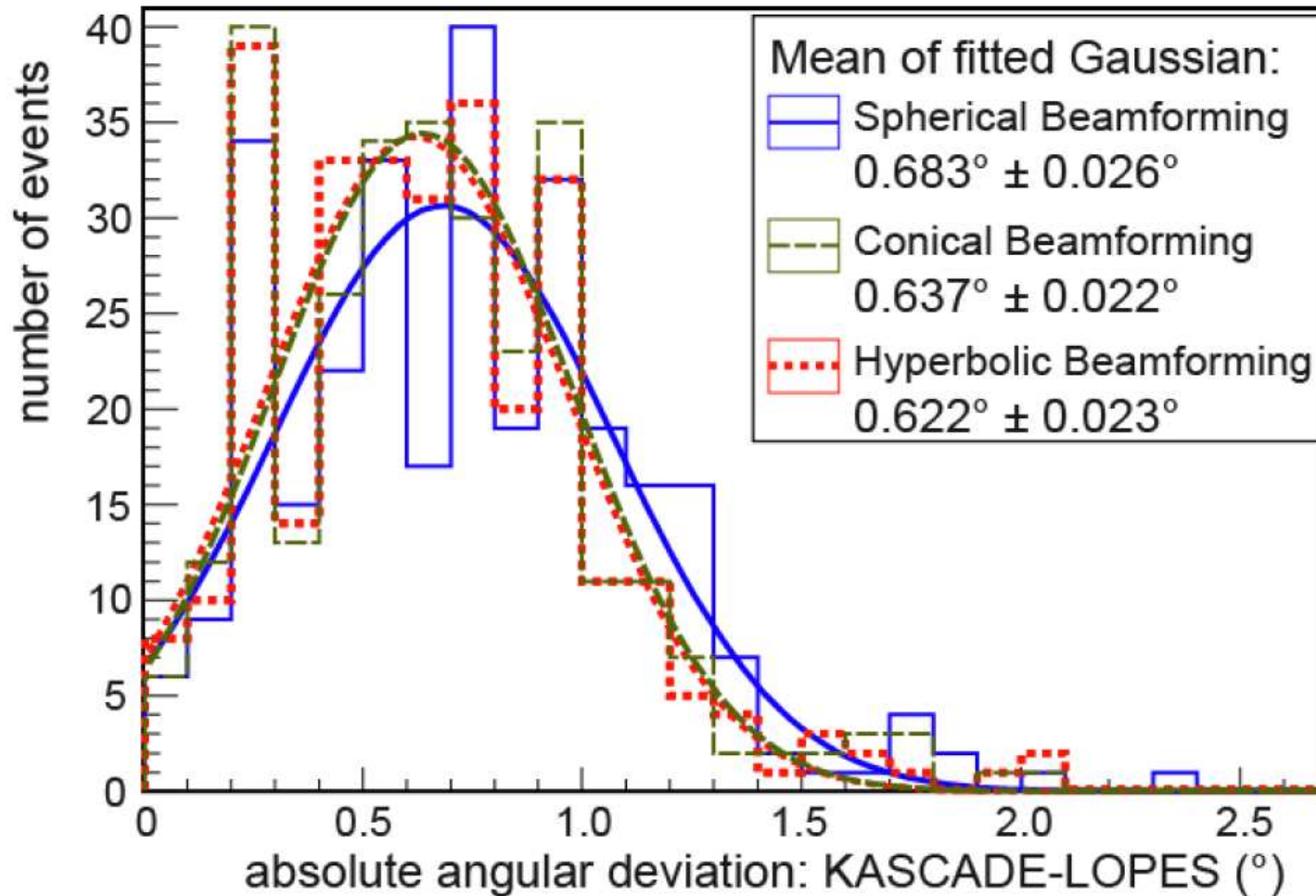
Przypadek mierzonej kaskady, po dopasowaniu kierunku pęku:



Detekcja radiowa

LOPES

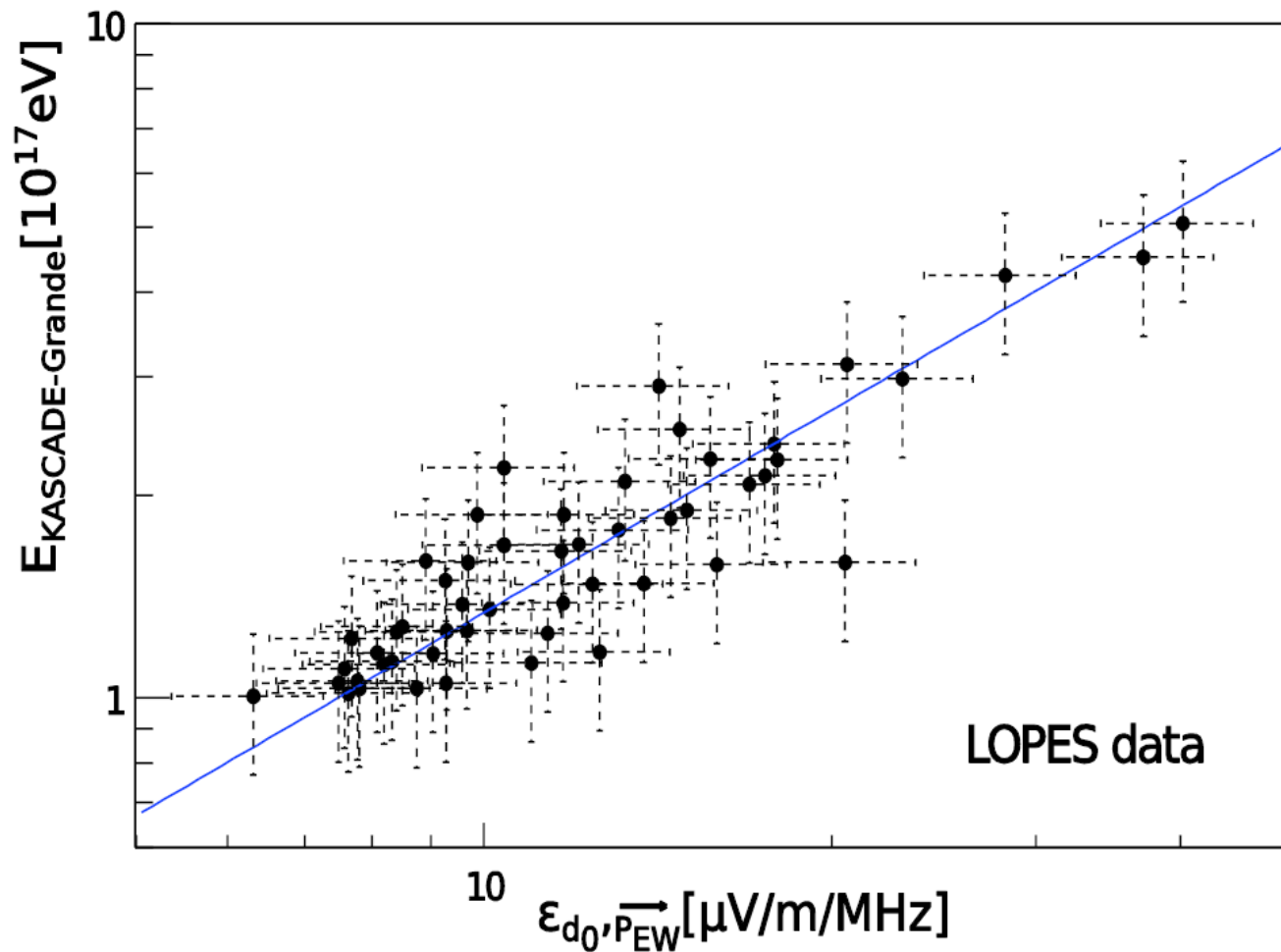
Dokładność wyznaczenia kierunku z porównania z detektorem KASCADE-Grande.



Detekcja radiowa

LOPES

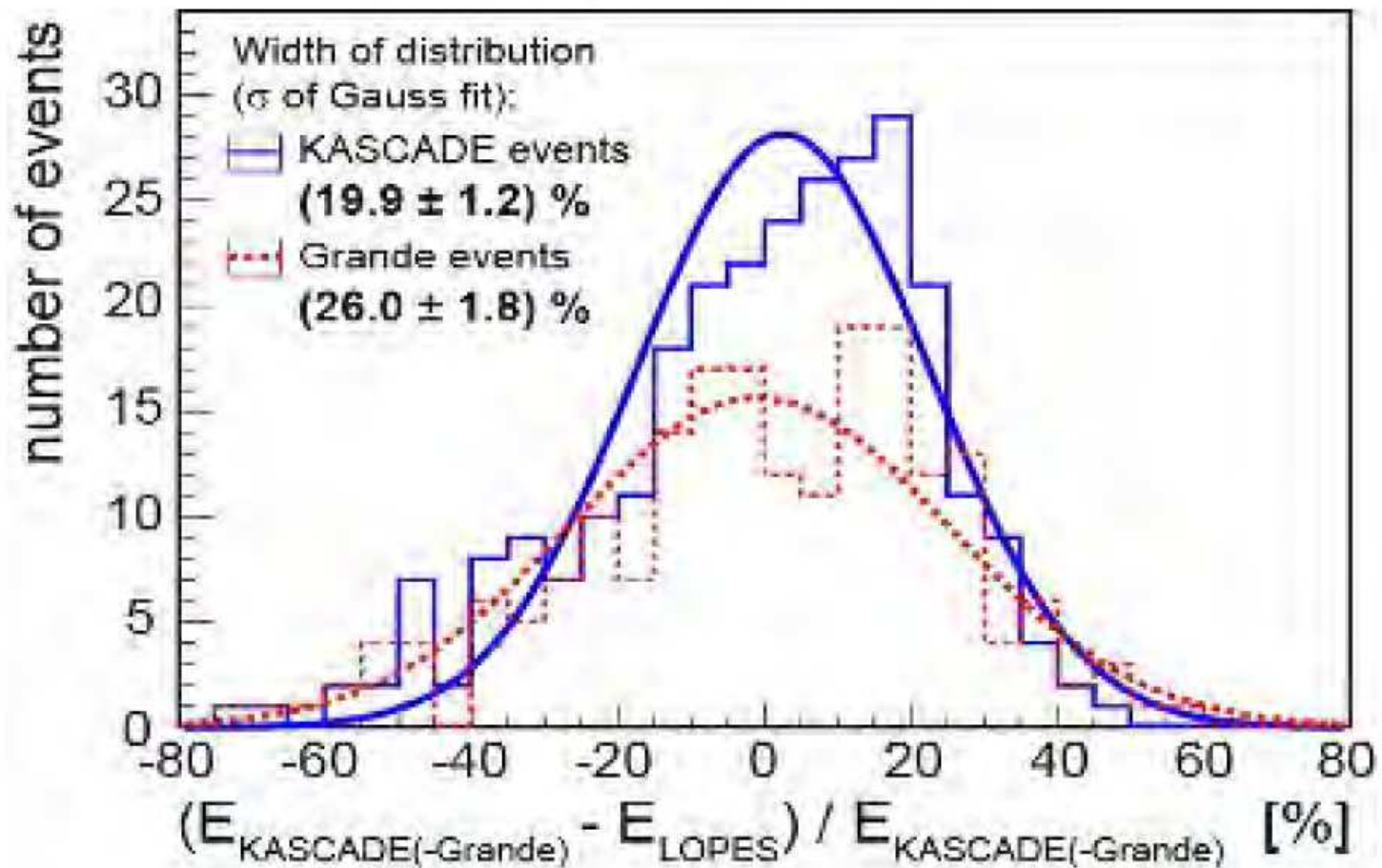
Dokładność wyznaczenia energii z porównania z detektorem KASCADE-Grande.

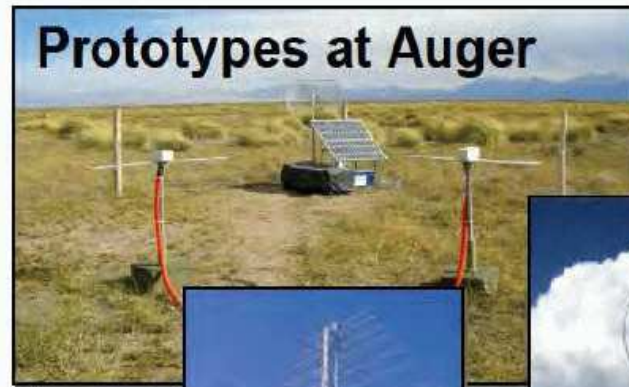


Detekcja radiowa

LOPES

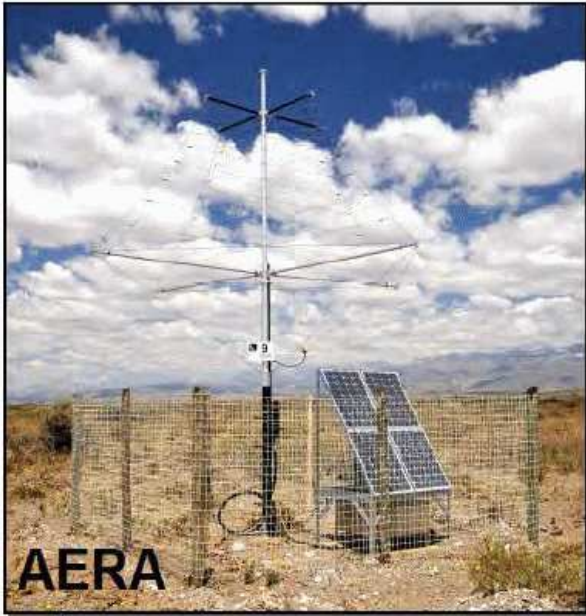
Dokładność wyznaczenia energii z porównania z detektorem KASCADE-Grande.





Falcke & Gorham propose „geosynchrotron approach“

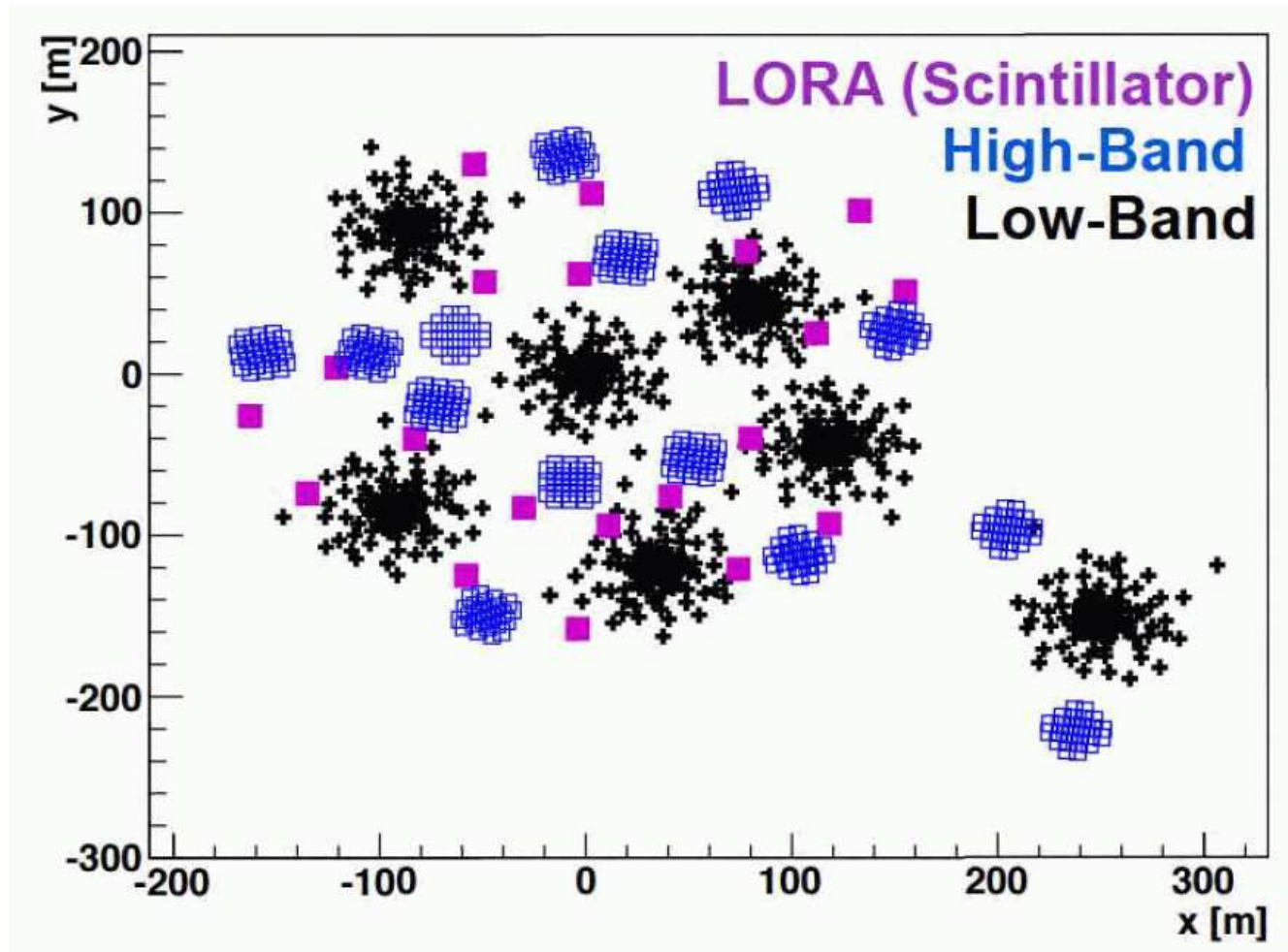




Detekcja radiowa

LOFAR

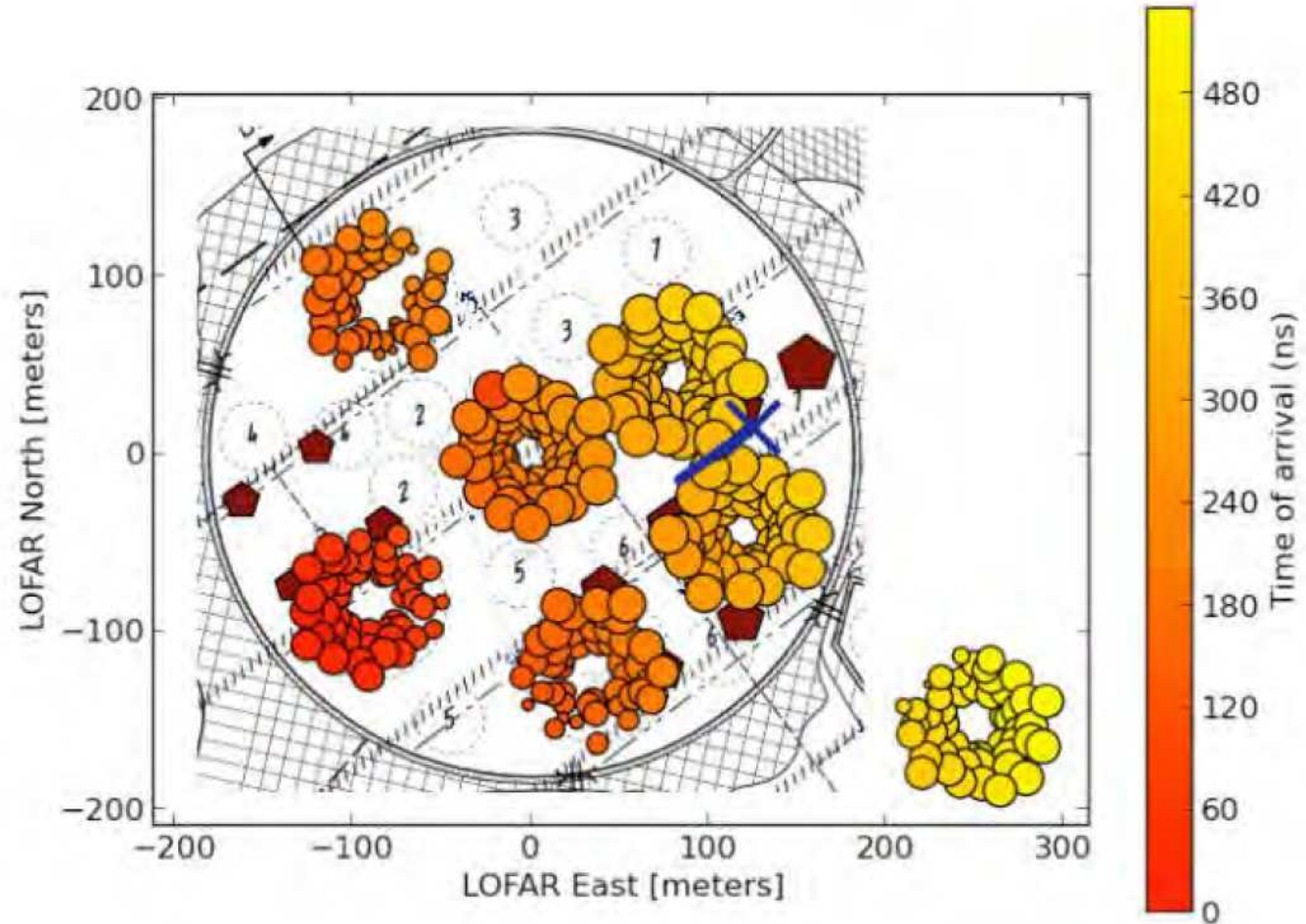
Zestawy anten pracujących w zakresie 30-80 MHz i 120-240 MHz + scyntylatory



Detekcja radiowa

LOFAR

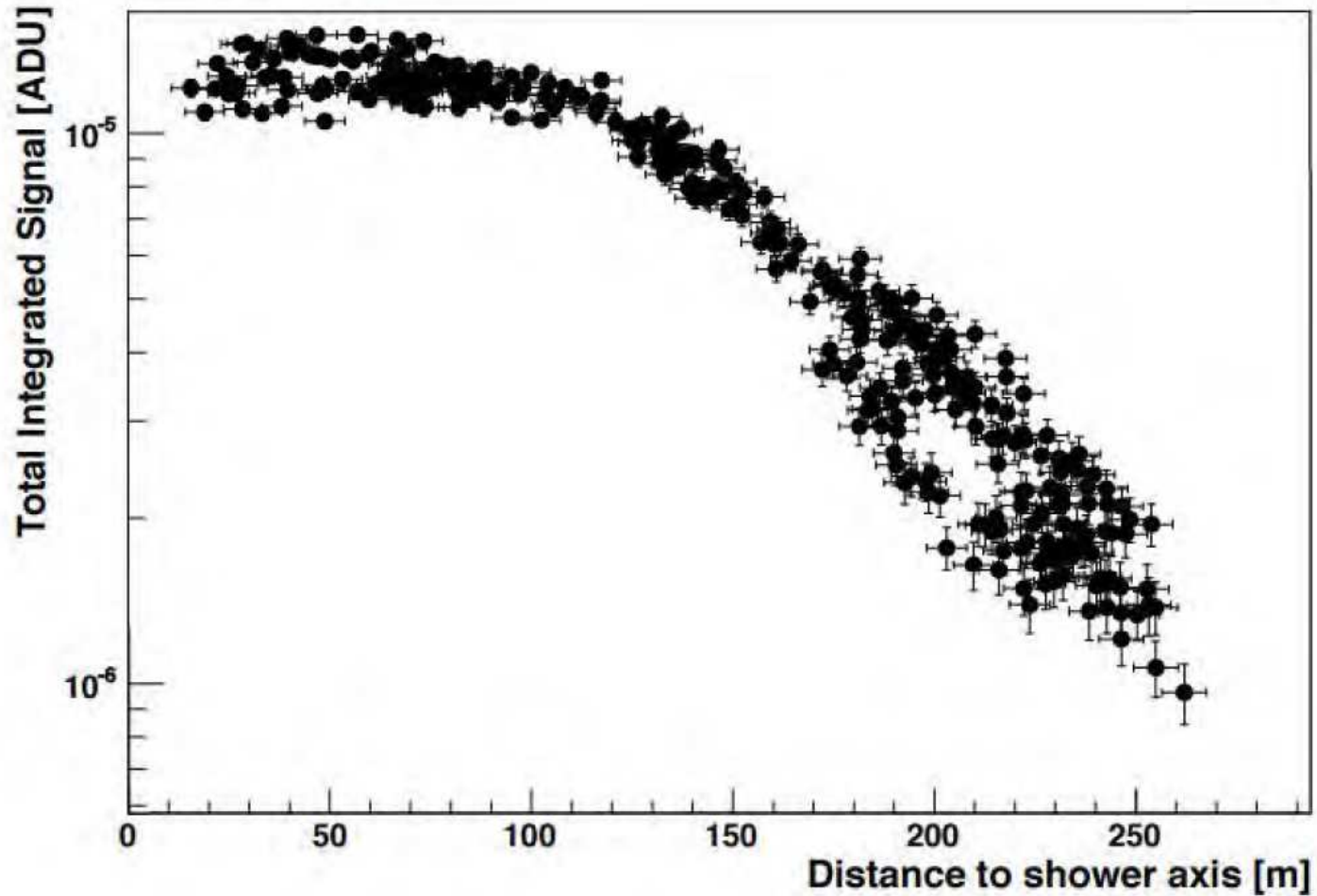
Przykładowy przypadek detekcji pęku (30-80 MHz)



Detekcja radiowa

LOFAR

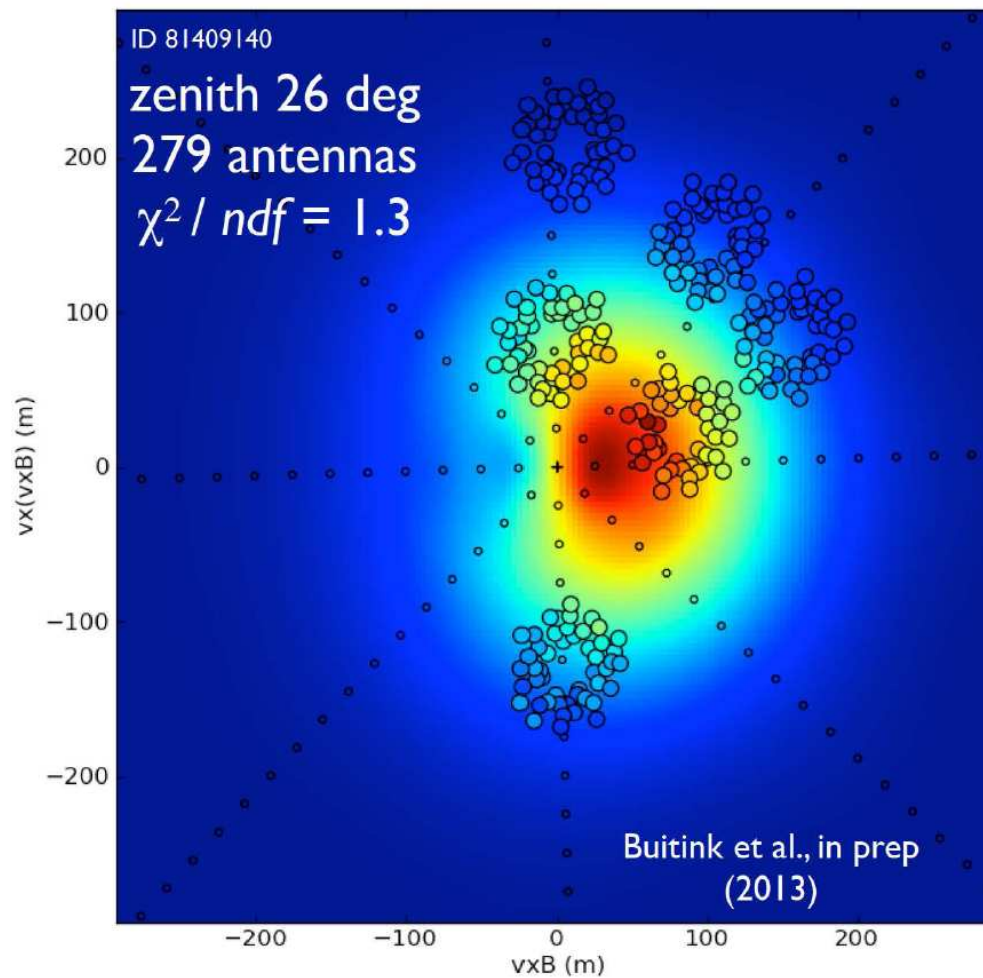
Przykładowy przypadek detekcji pęku (30-80 MHz) \Rightarrow rekonstrukcja profilu



Detekcja radiowa

LOFAR

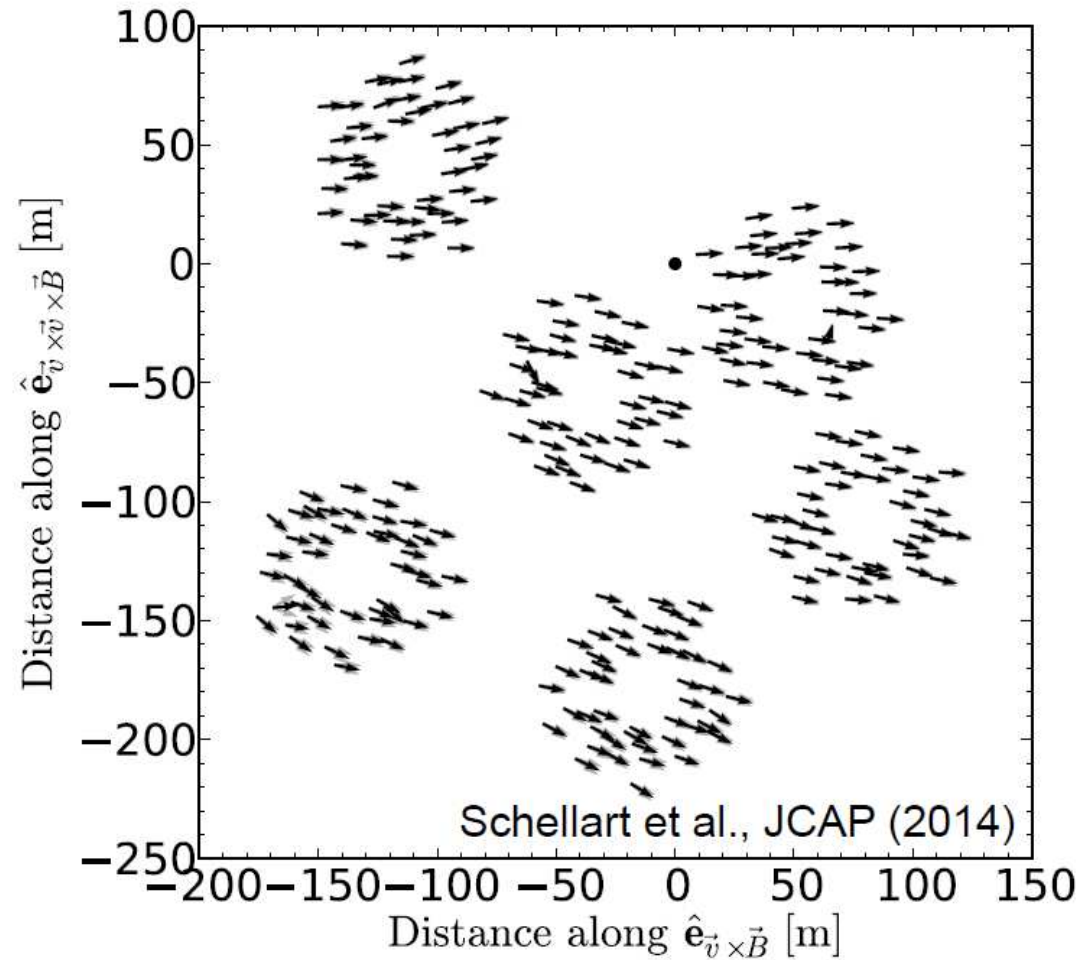
Dopasowanie modelu rozwoju kaskady



Detekcja radiowa

LOFAR

Rekonstrukcja kierunku liniowej polaryzacji fali



Detekcja radiowa

AERA

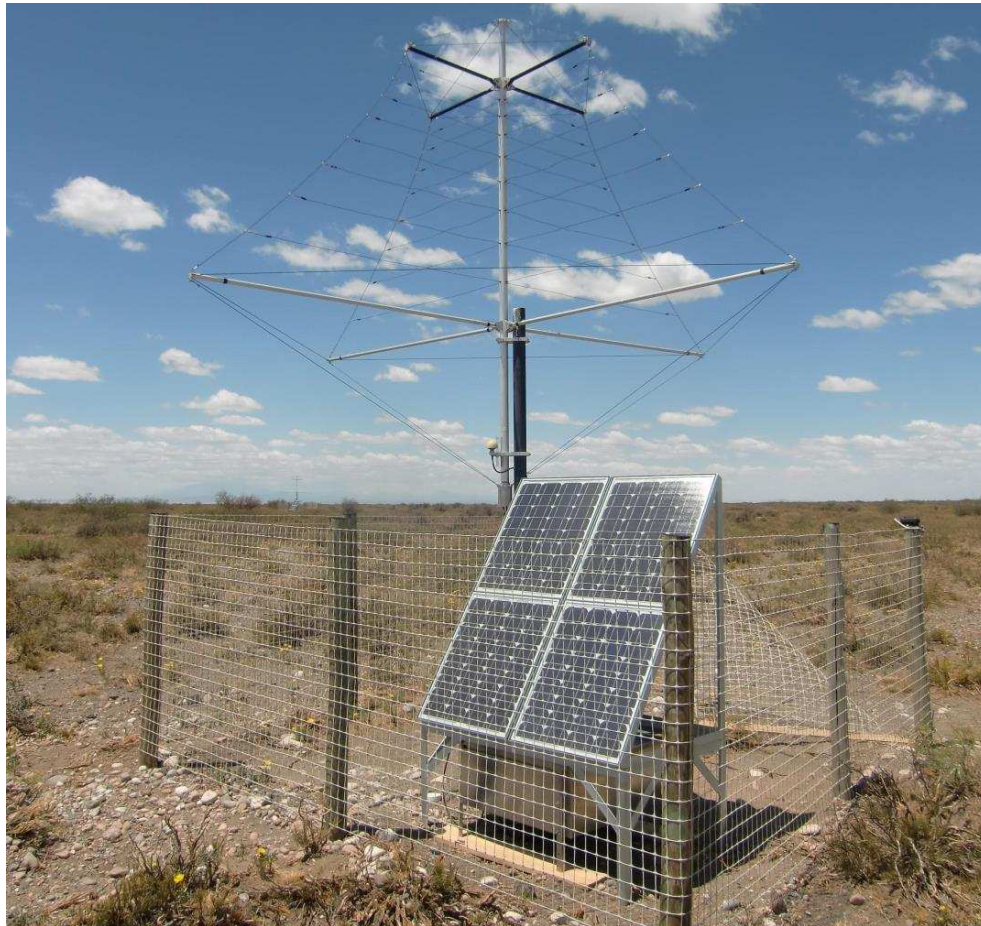
Auger Engineering Radio Array



Detekcja radiowa

AERA

Auger Engineering Radio Array



Pierwsza instalacja: 24 detektory co 144 m
Kampania pomiarowa: 2011–2013

Logarytmiczno-periodyczne, podwójne
anteny dipolowe.

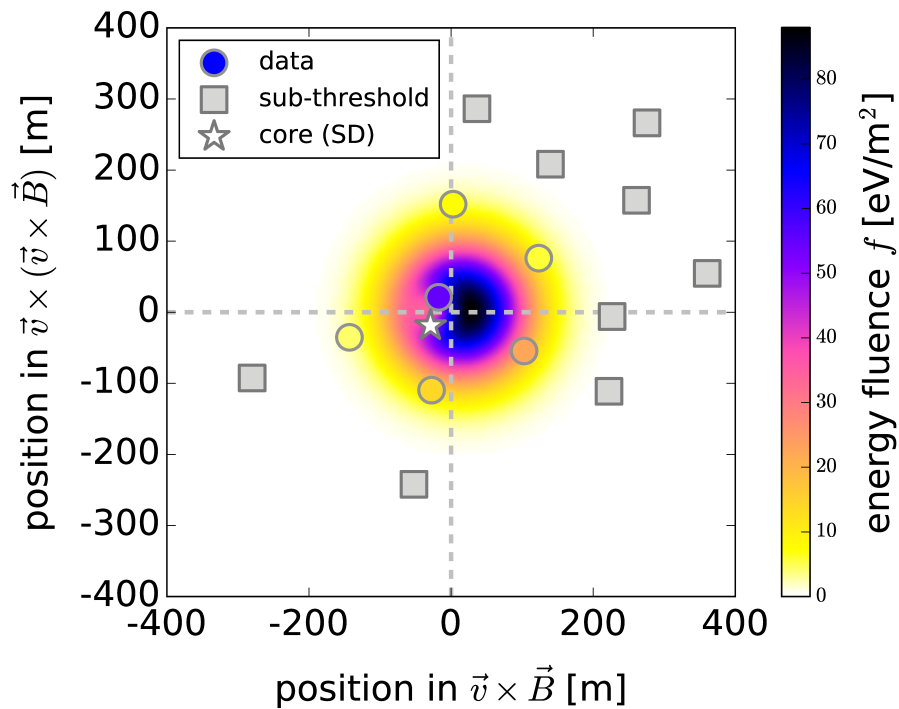
Sygnal próbkowany z częstotliwością 200 MHz.
Mierzona emisja fal elektromagnetycznych
w przedziale 30–80 MHz

Obecnie rozbudowane do 153 stacji

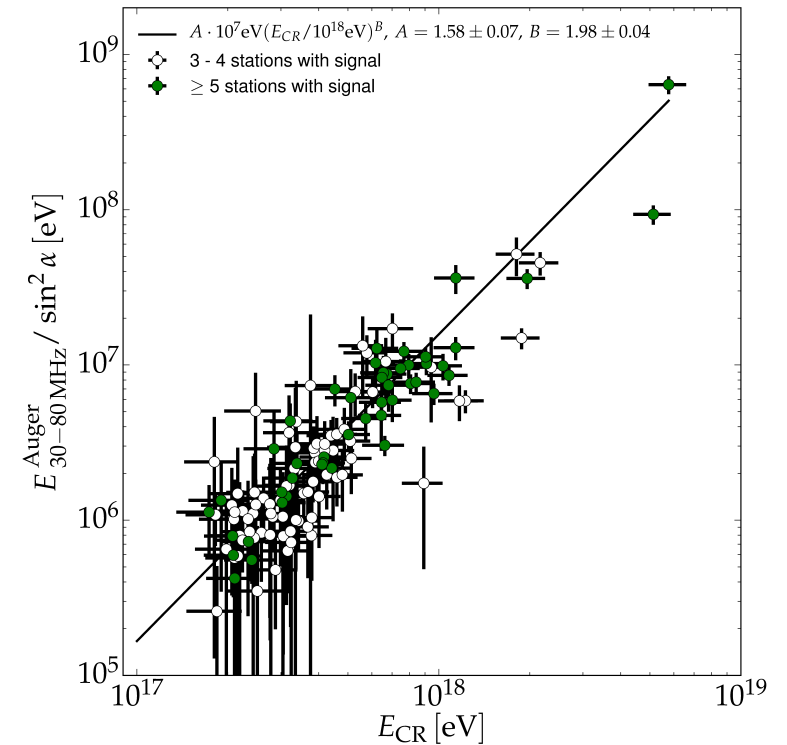
Detekcja radiowa

AERA Auger Engineering Radio Array

Przykładowy przypadek



Kalibracja z detektorami SD750

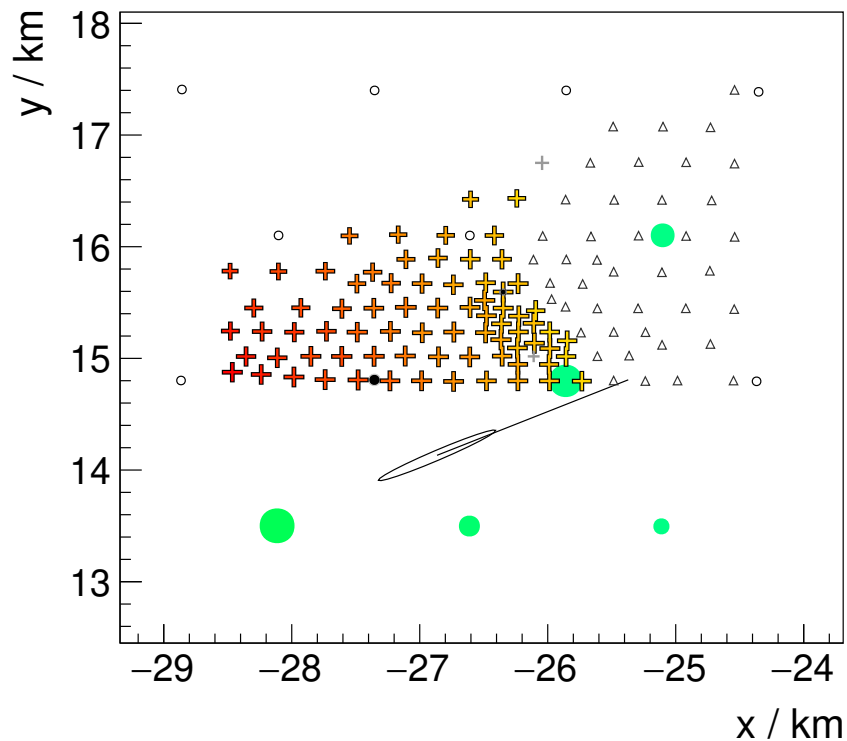


$$E_{\text{radio}} \sim E_{\text{CR}}^2 \quad (!)$$

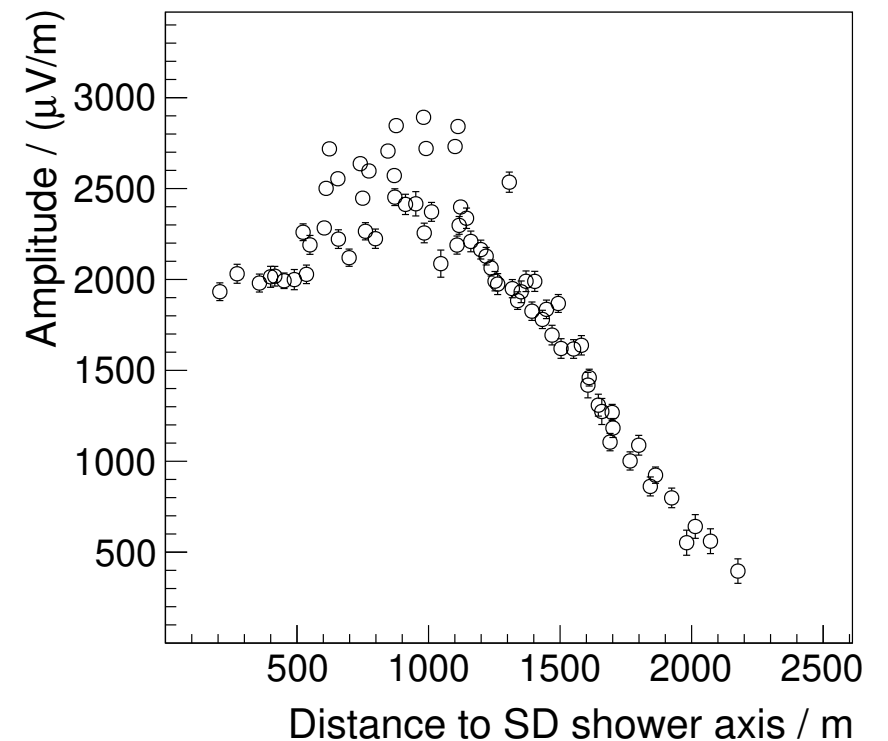
Detekcja radiowa

AERA Auger Engineering Radio Array

Przykładowy przypadek



Rekonstruowany profil kaskady

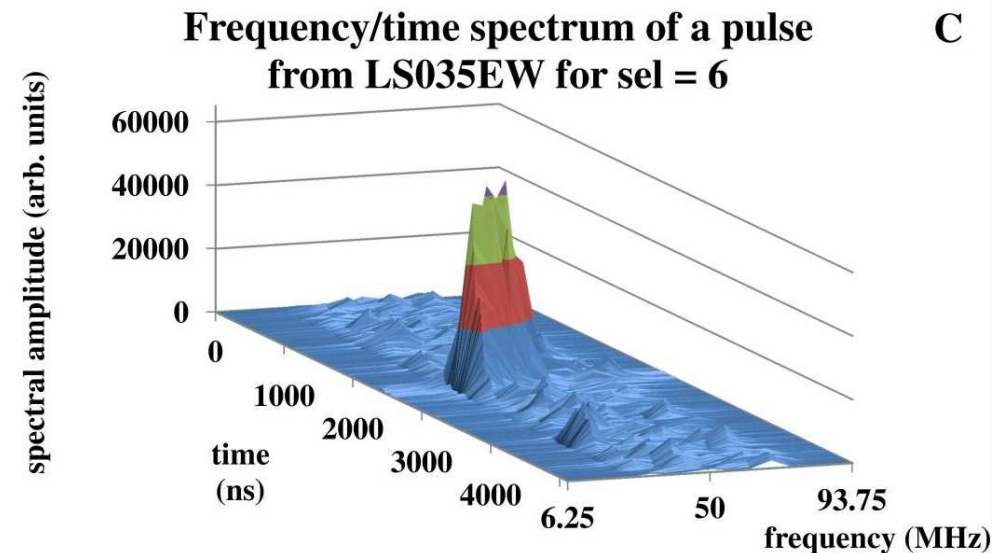
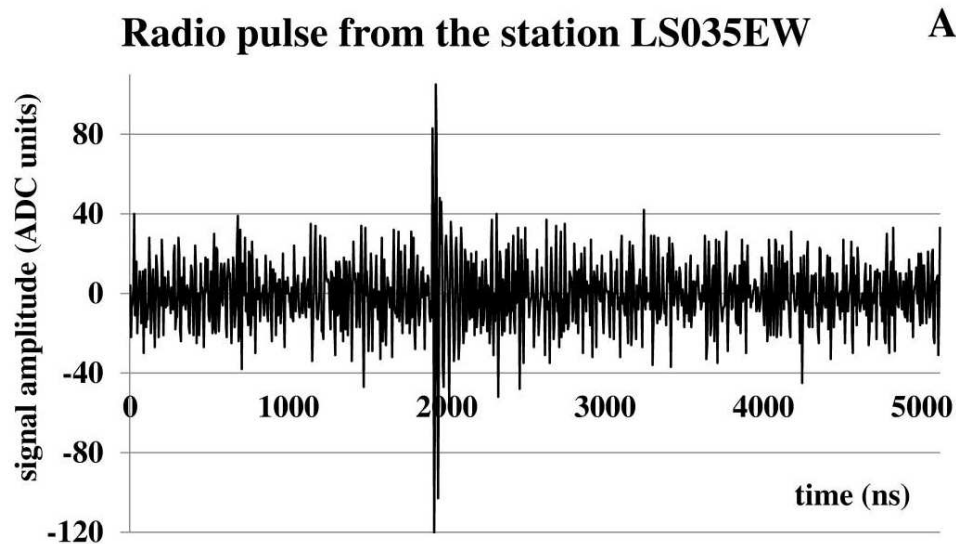


Detekcja radiowa

AERA Auger Engineering Radio Array

Rozwój szybkich układów programowalnych typu FPGA pozwala na analizę widma sygnału w czasie rzeczywistym

⇒ możliwość autonomicznego wyzwalania zbierania danych



Z. Szadkowski, IEEE Real Time Conference, Padova, June 2016

Detekcja radiowa

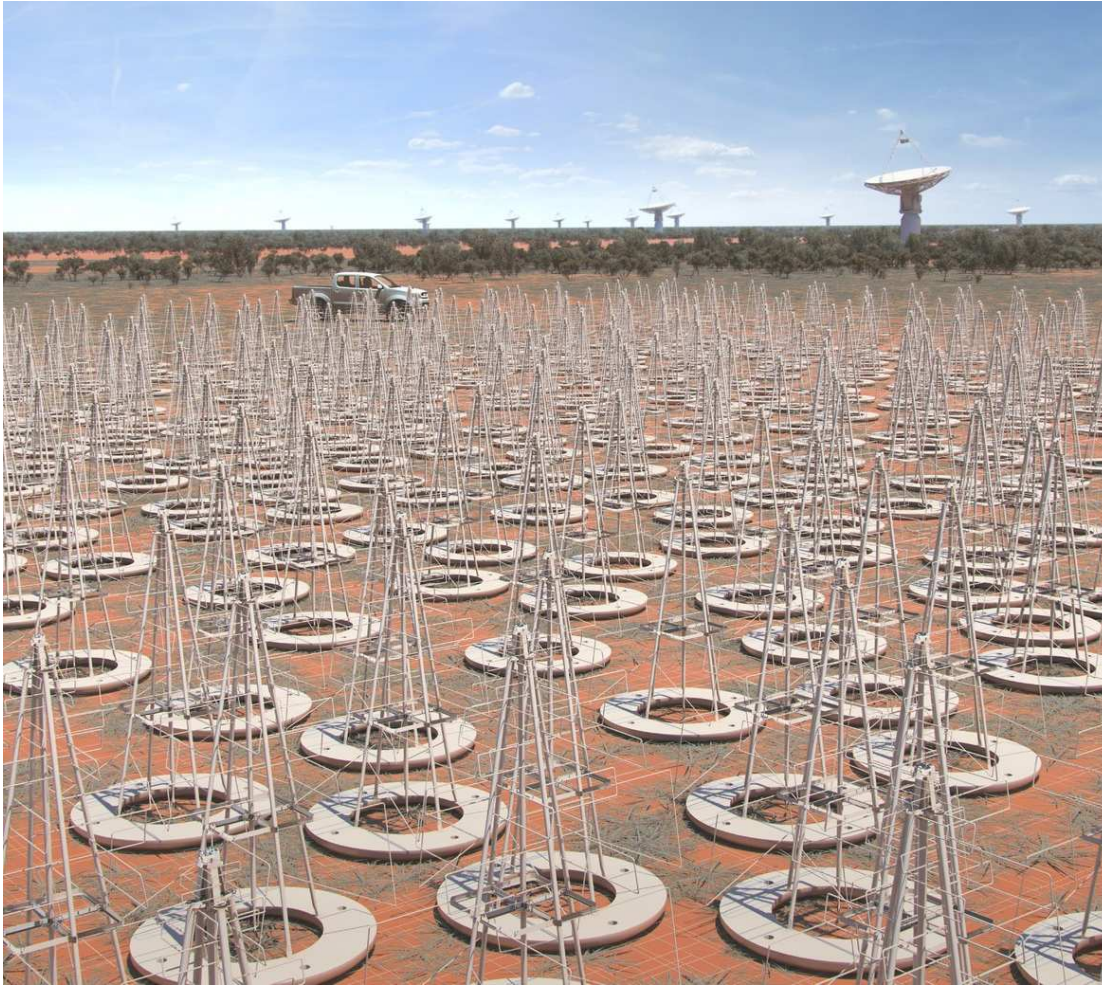
Szerokopasmowe anteny

Obiecujący kierunek - szerokopasmowe anteny z bardzo szybkim przetwarzaniem danych.



Detekcja radiowa

SKA Square Kilometre Array, Australia



Planowana instalacja ok. 130'000 anten w 500 grupach odległych o nie więcej niż 65 km.

Zbierane ok. 160 TB/s danych!

Kluczowa anliaza w czasie rzeczywistym...

Detekcja radiowa

Perspektywy

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

Główny problem: bardzo silne tło

- ⇒ dotychczasowe pomiary naogół wyzwalane innego typu detektorem
- ⇒ czysto radiową detekcja możliwa w dużych układach

Nowa jakość w badaniach UHECE: detektory są stosunkowo tanie, odporne na warunki, pracują w dzień i w nocy, można budować bardzo duże układy detekcyjne...

Technologia możliwa do zastosowania także w pomiarach wysokoenergetycznego promi. gamma (promieniowanie w atmosferze) i neutrin (promieniowanie w wodzie lub lodzie).