

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład IX

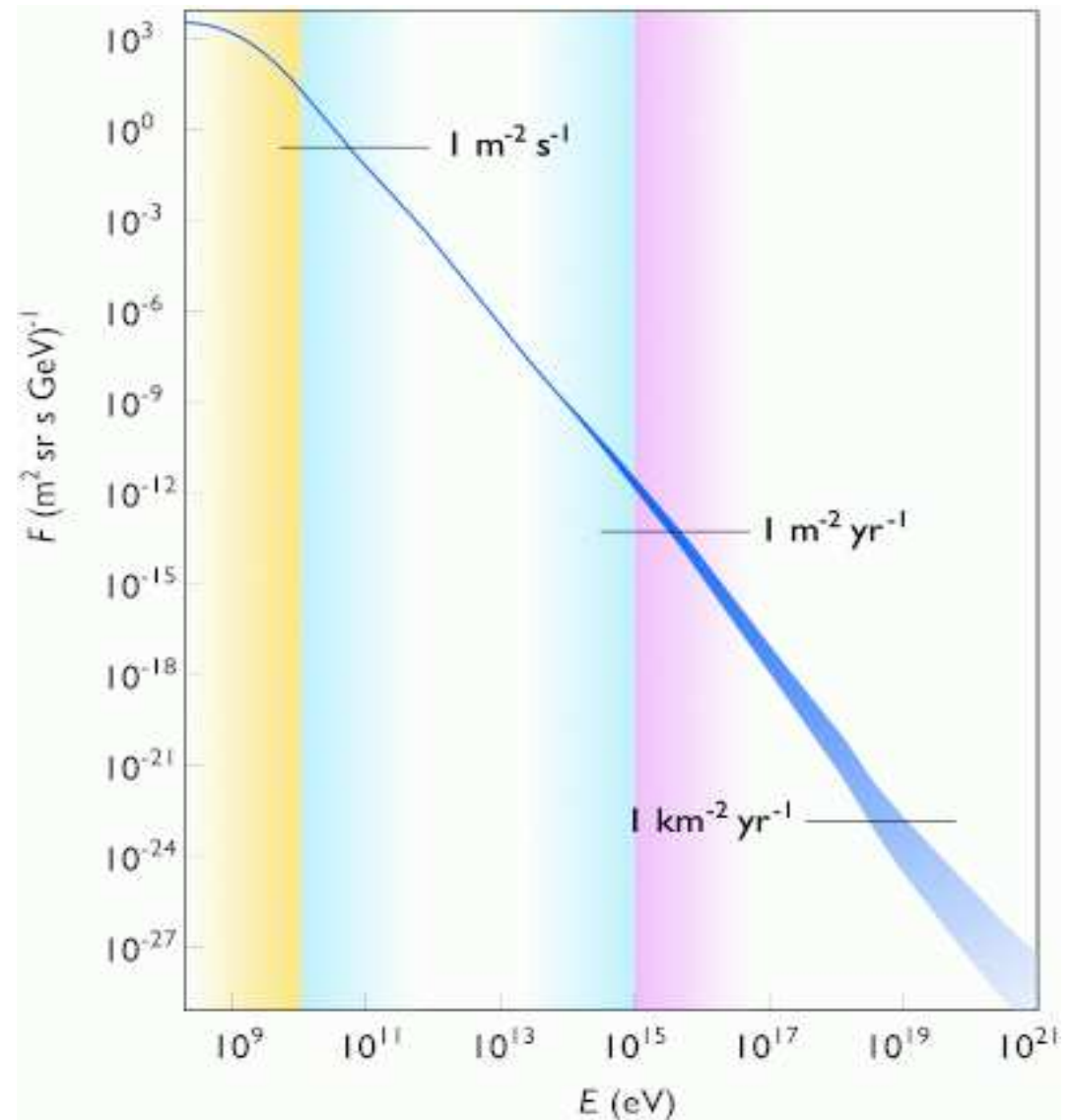
- Wielkie pęki atmosferyczne
- Eksperyment KASKADE
- Eksperyment AUGER

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

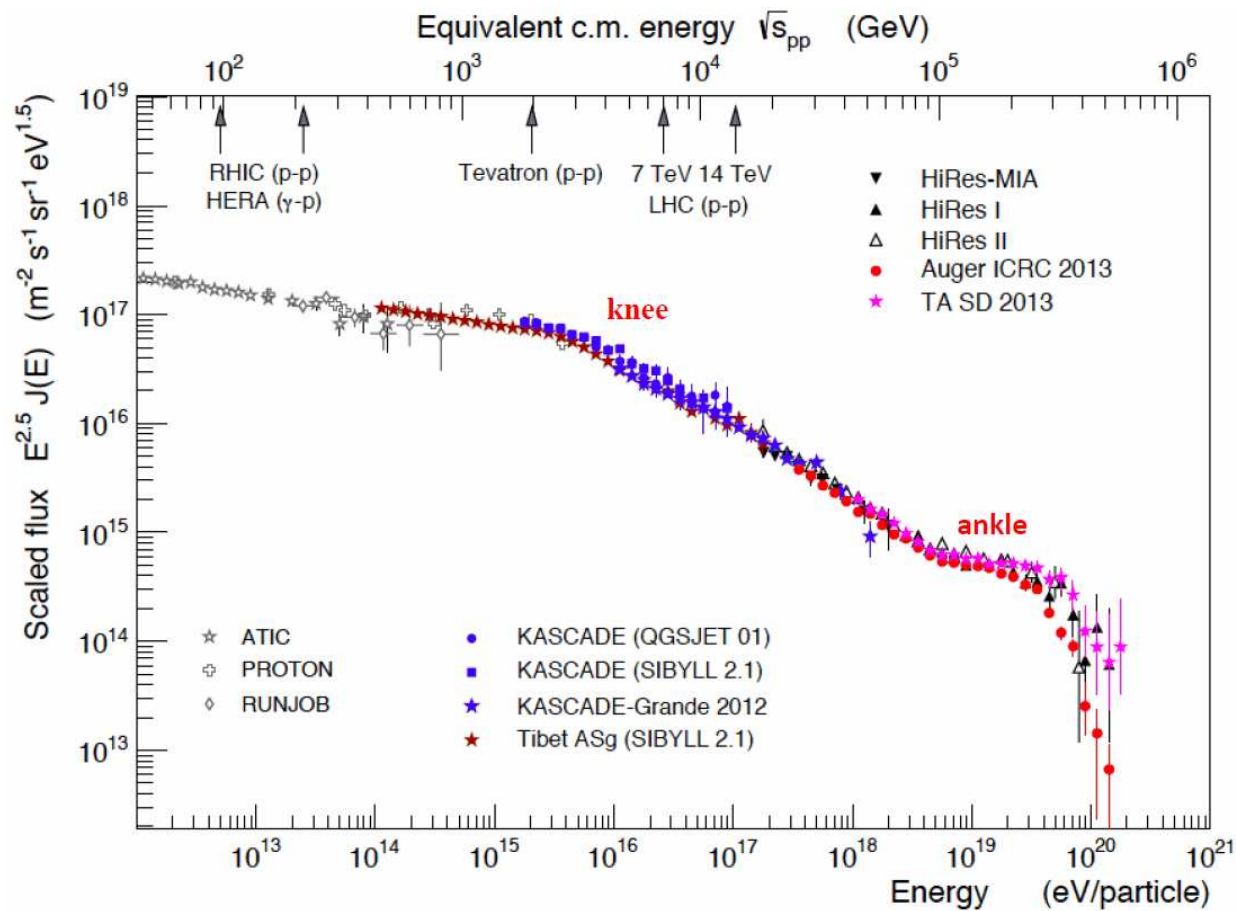


Promieniowanie kosmiczne

Widmo

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

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



Promieniowanie kosmiczne

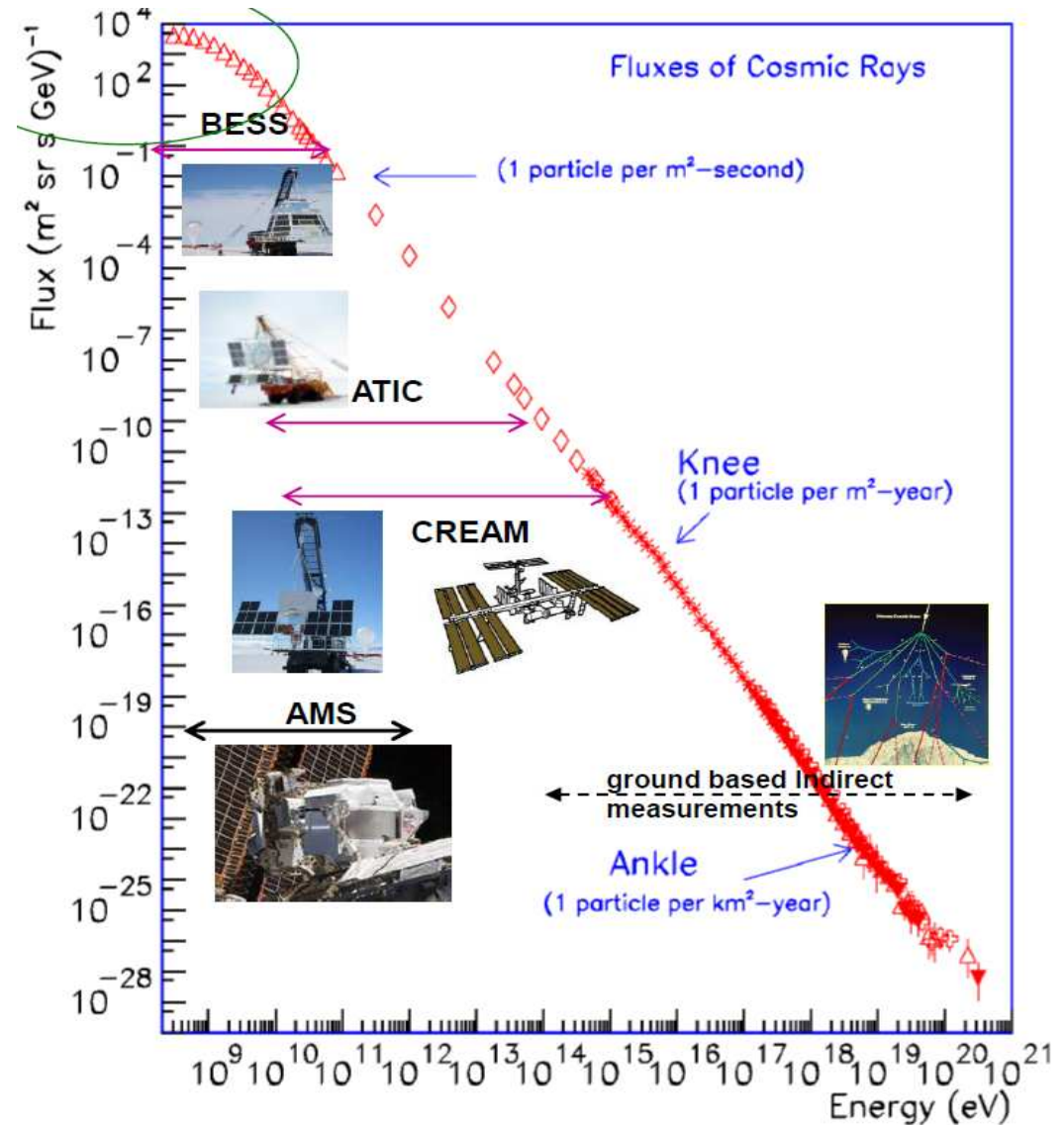
Pomiar bezpośredni

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

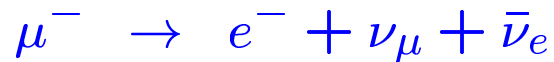
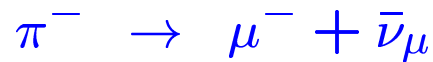
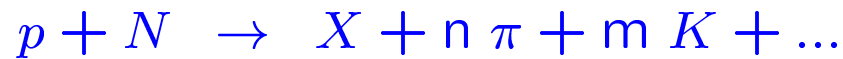
⇒ możliwa jedynie detekcja pośrednia na powierzchni Ziemi



Promieniowanie kosmiczne

Wtórne promieniowanie kosmiczne

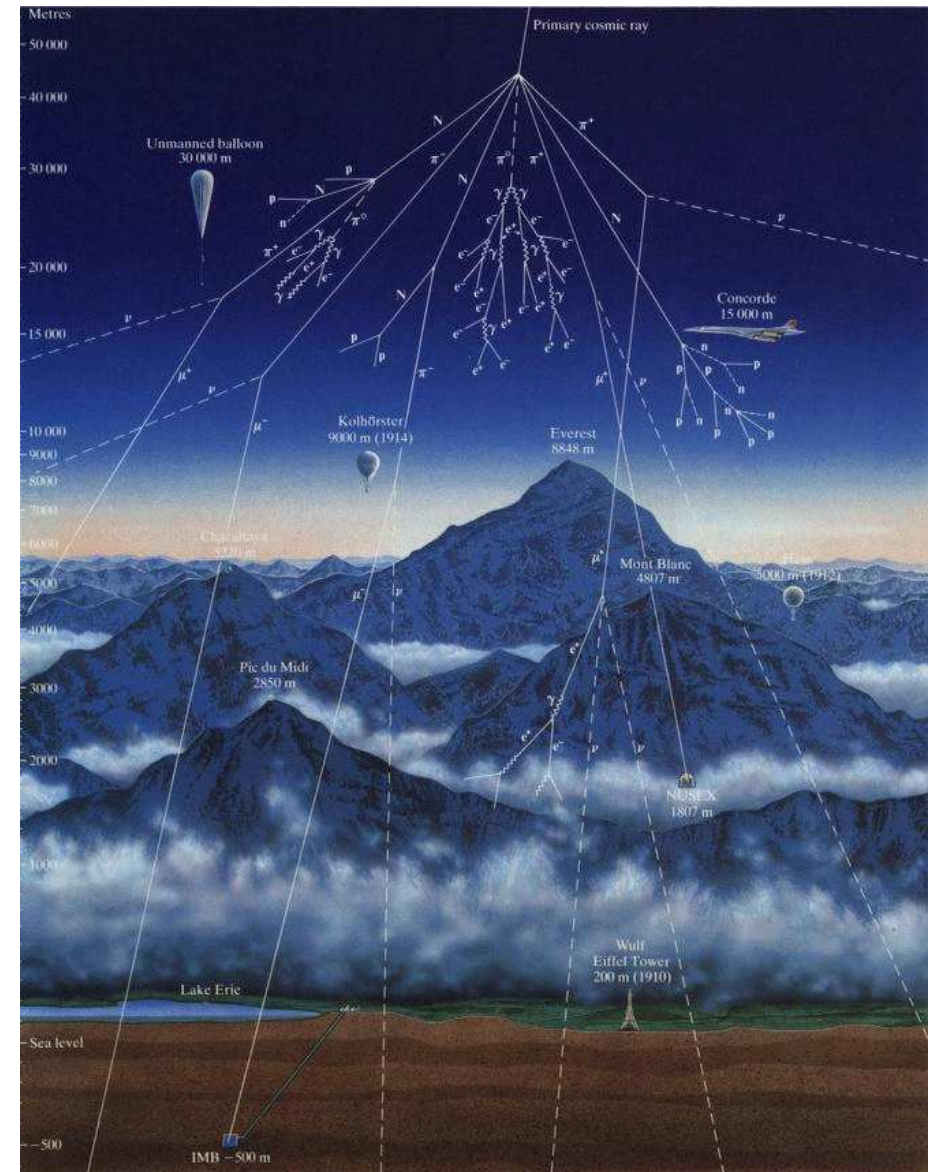
Promieniowanie pierwotne oddziałuje w atmosferze Ziemi. Produkowane są liczne cząstki wtórne, głównie **piony** i **kaony**:



Docierają do powierzchni Ziemi

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

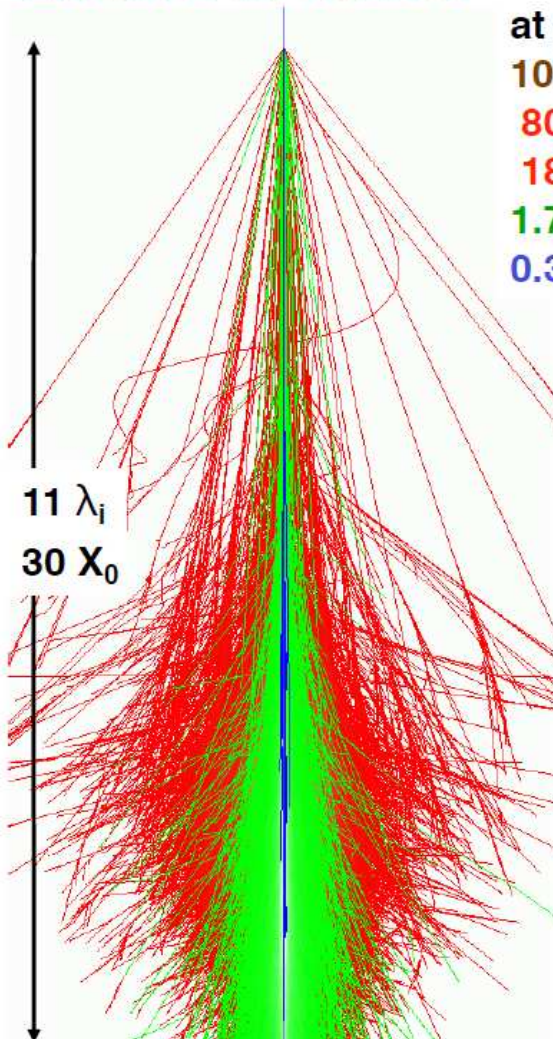
Łącznie rzędu 180 na $m^2 \cdot s$
większość w zakresie energii rzędu GeV



Promieniowanie kosmiczne

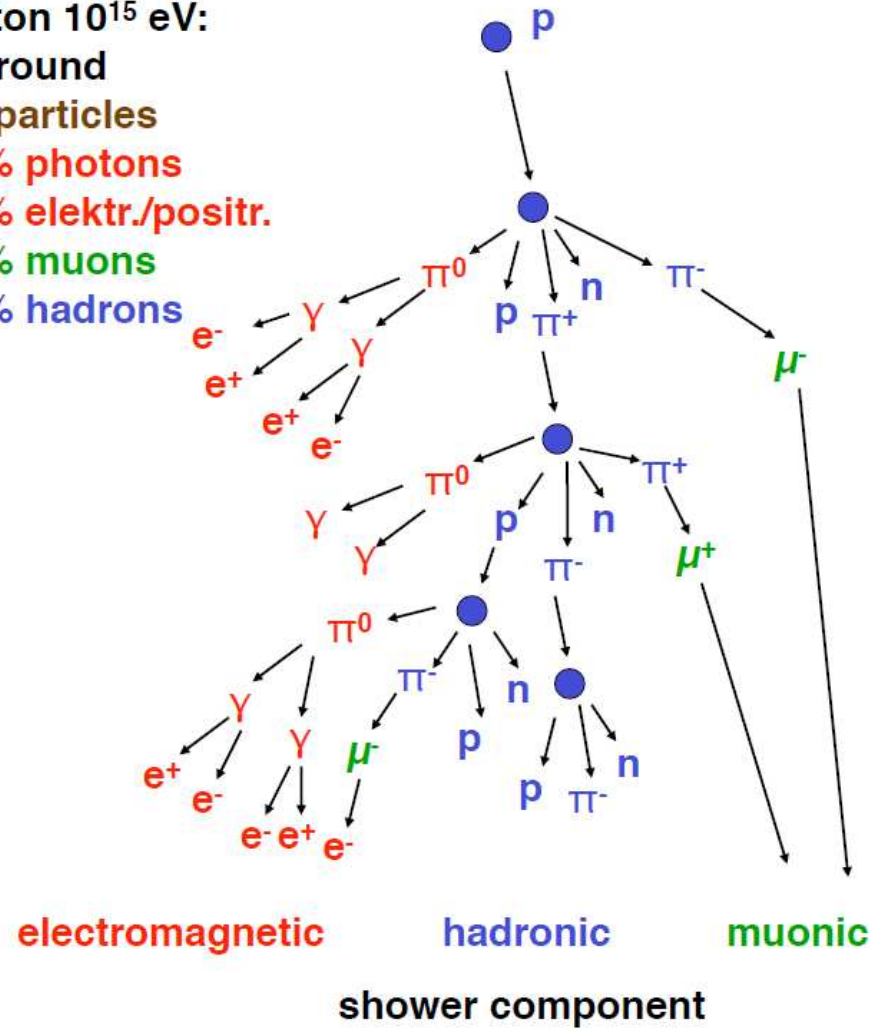
Wielkie pęki atmosferyczne

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 $d_{\frac{1}{2}} = X_0 \cdot \ln 2$

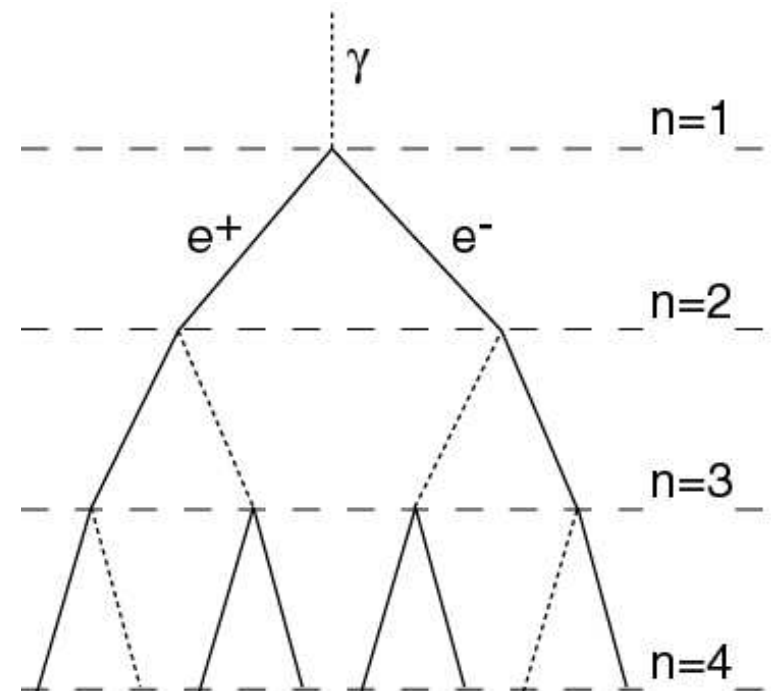
Rozwój kaskady kończy się gdy energia cząstek spada do poziomu energii krytycznej $E_c = 85 \text{ MeV}$

Liczba cząstek w maksimum kaskady:

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

Pozycja maksimum:

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

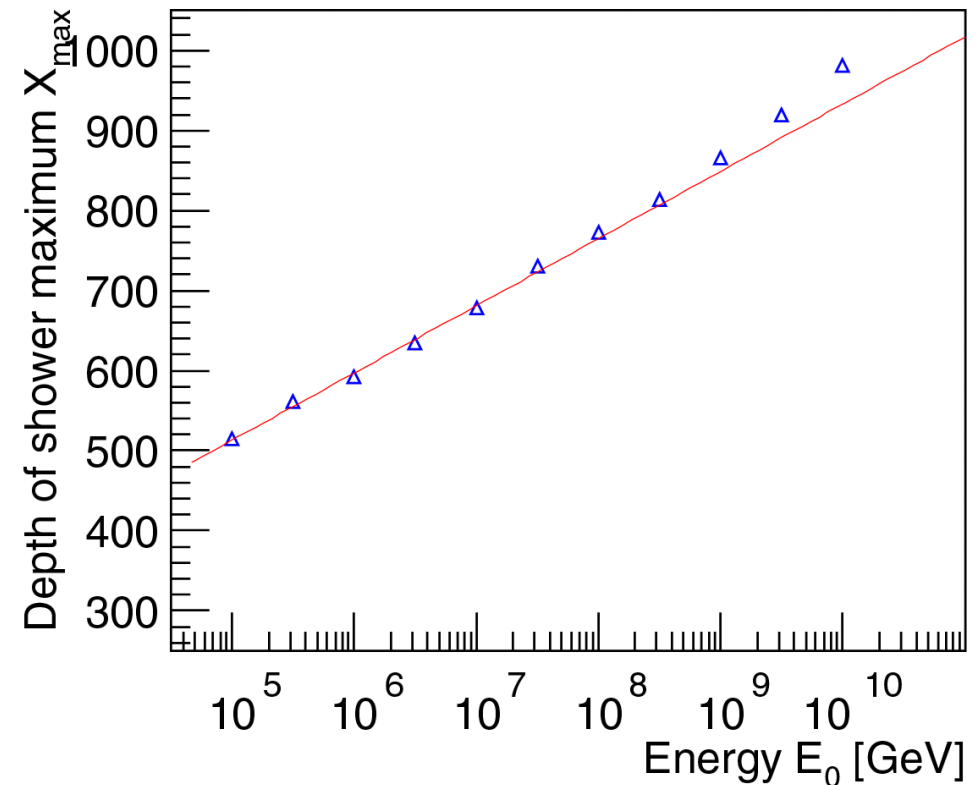
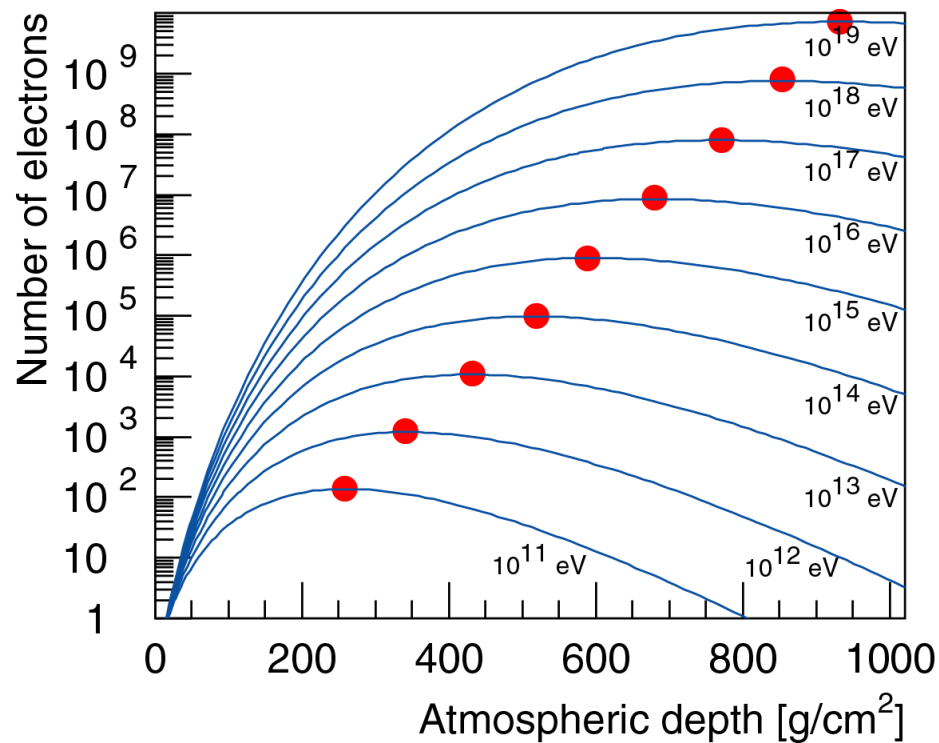


Wielkie pęki atmosferyczne

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

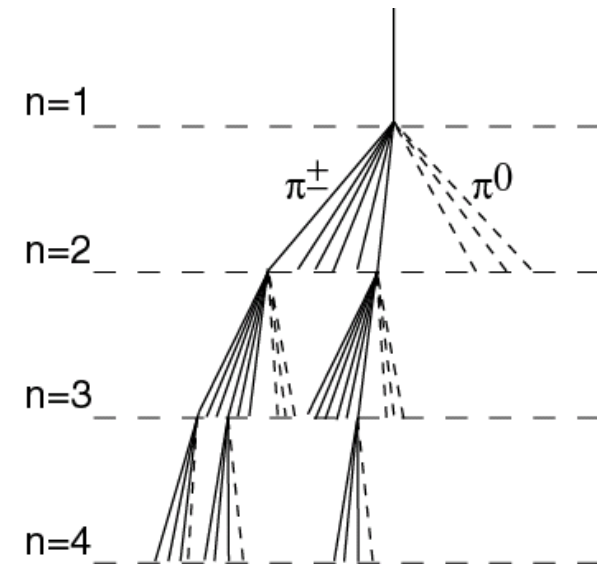
Energia krytyczna $E_c^\pi \sim 20 \text{ GeV}$

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



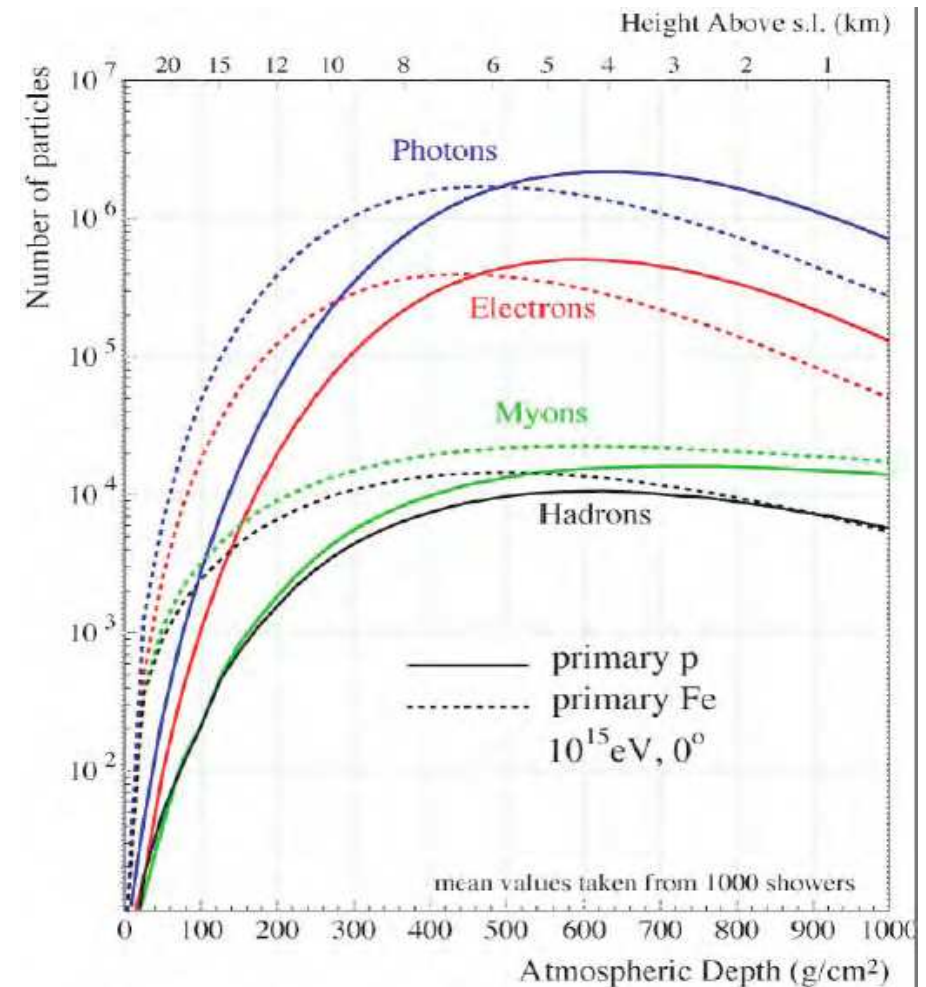
Wielkie pęki atmosferyczne

Profil podłużny

W przypadku **ciężkich jąder** przyjmujemy, że oddziaływanie jądra o energii E_0 i liczbie masy 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



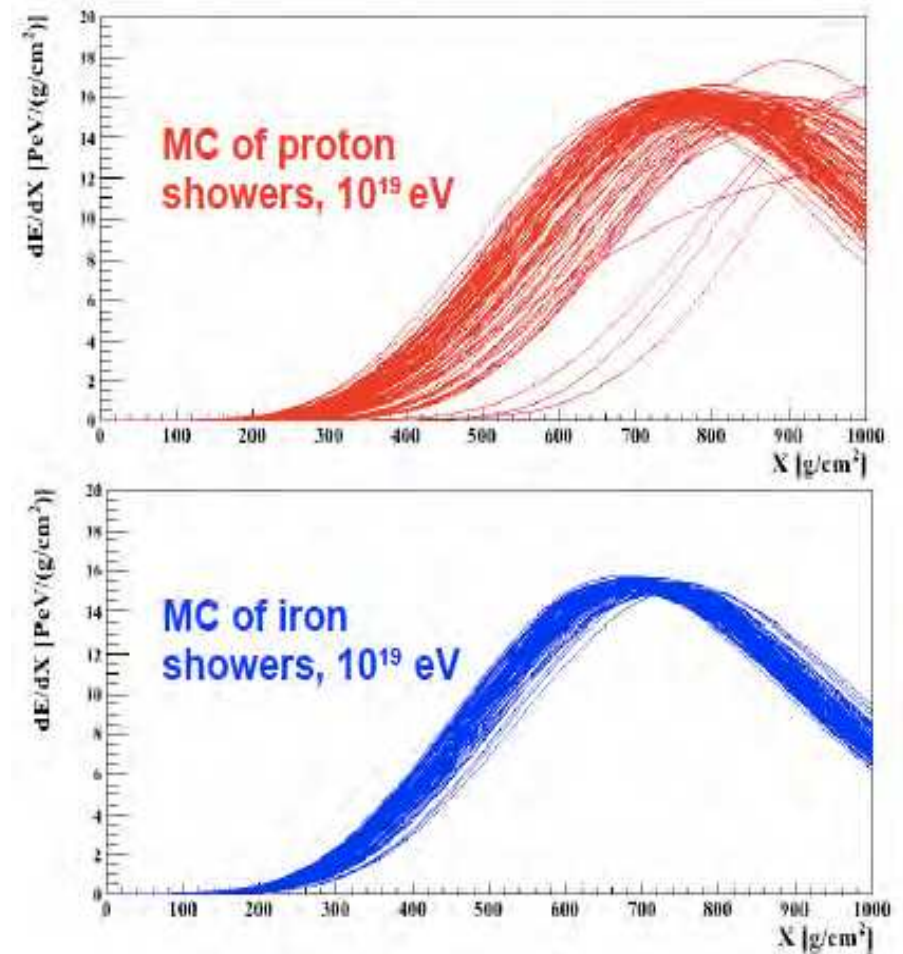
Wielkie pęki atmosferyczne

Profil podłużny

W przypadku **ciężkich jąder** przyjmujemy, że oddziaływanie jądra o energii E_0 i liczbie masy 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



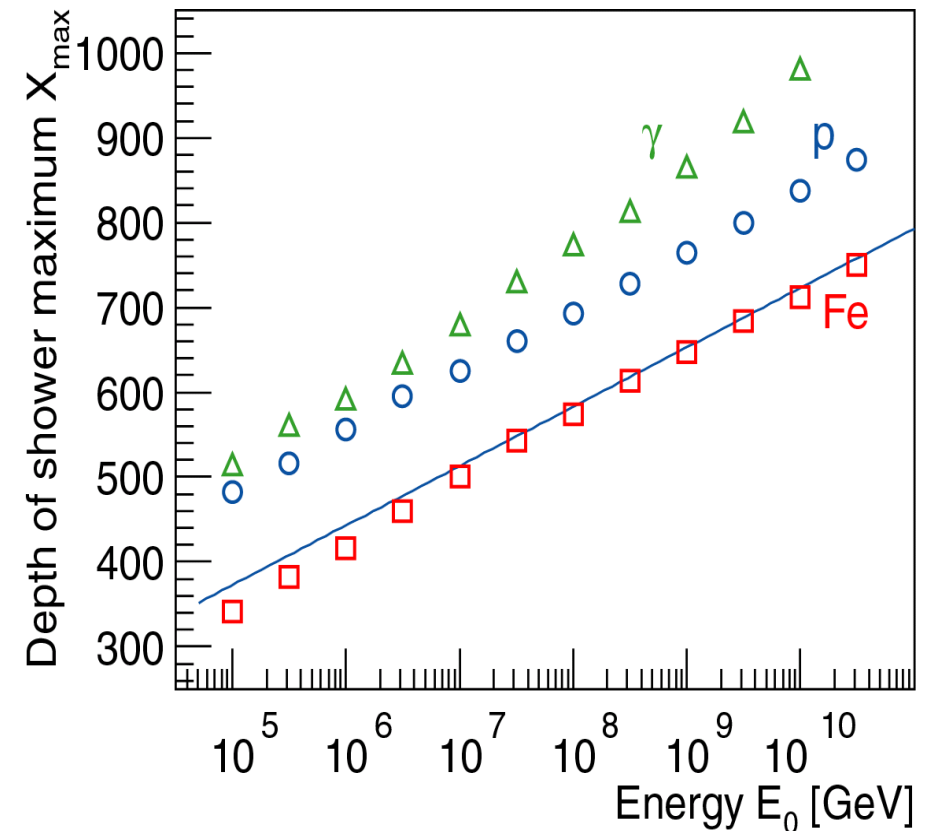
Wielkie pęki atmosferyczne

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

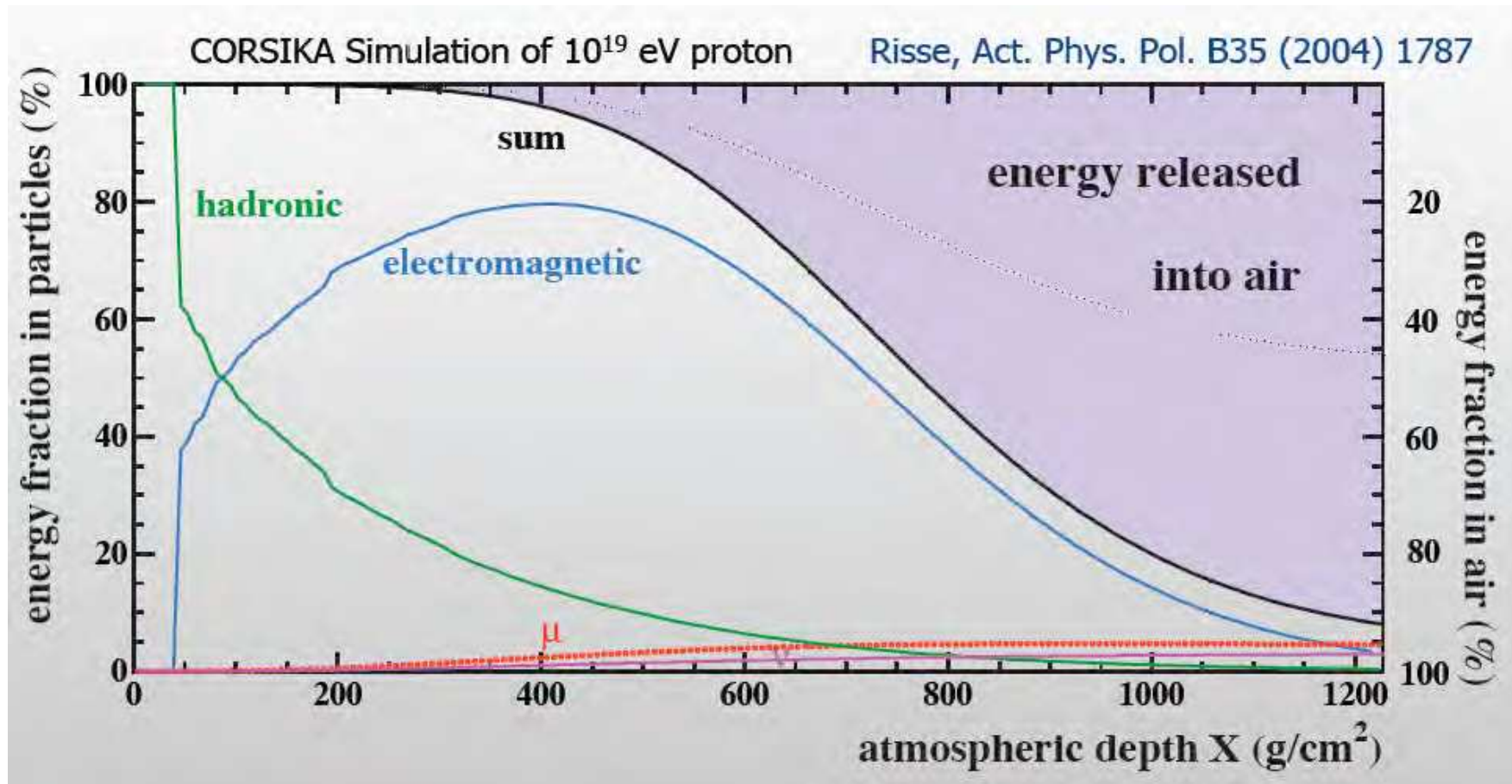
⇒ jedno z głównych kryteriów oceny składu promieniowania



Wielkie pęki atmosferyczne

Profil podłużny

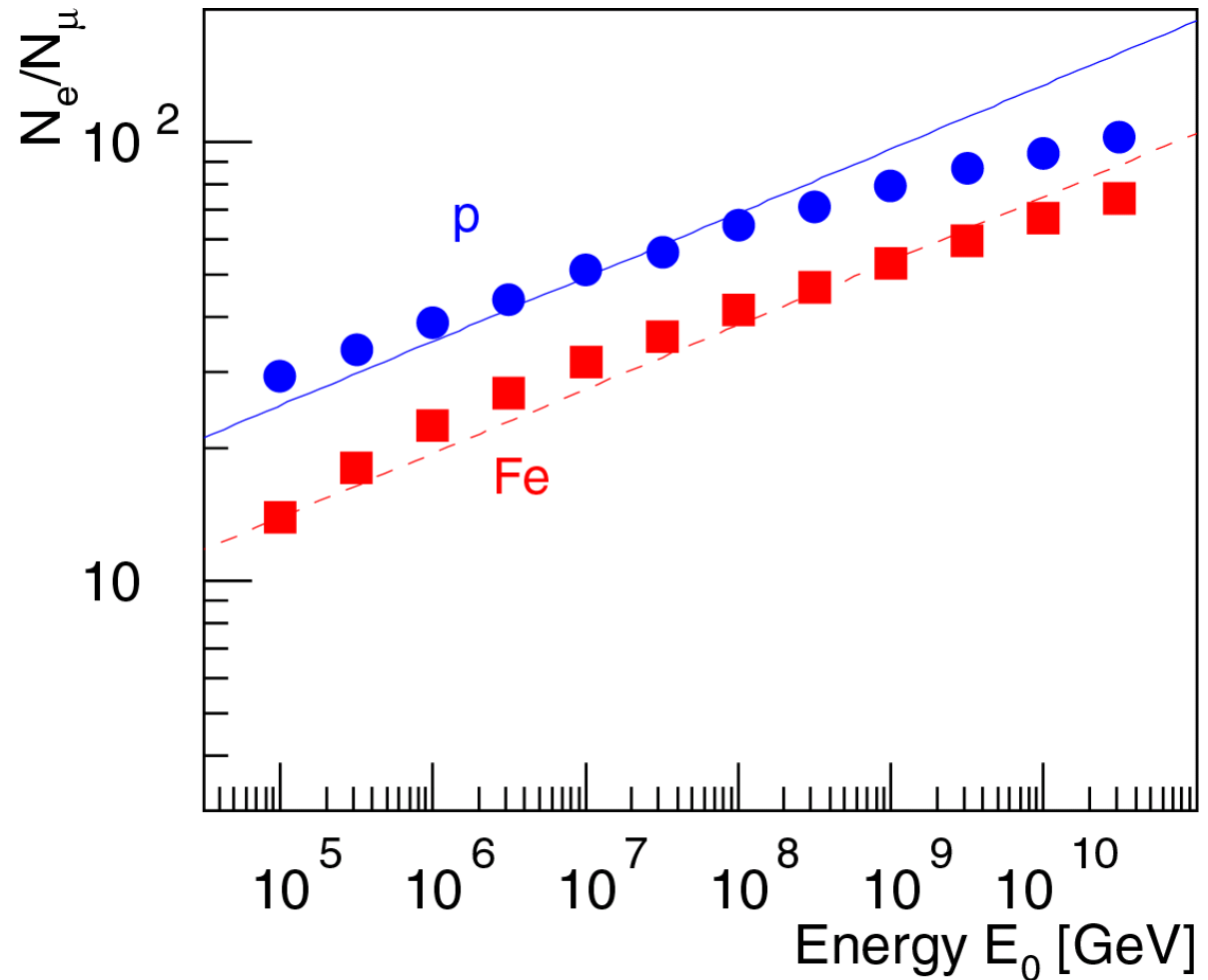
Przy powierzchni Ziemi przeważają miony i elektrony



Wielkie pęki atmosferyczne

Profil podłużny

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



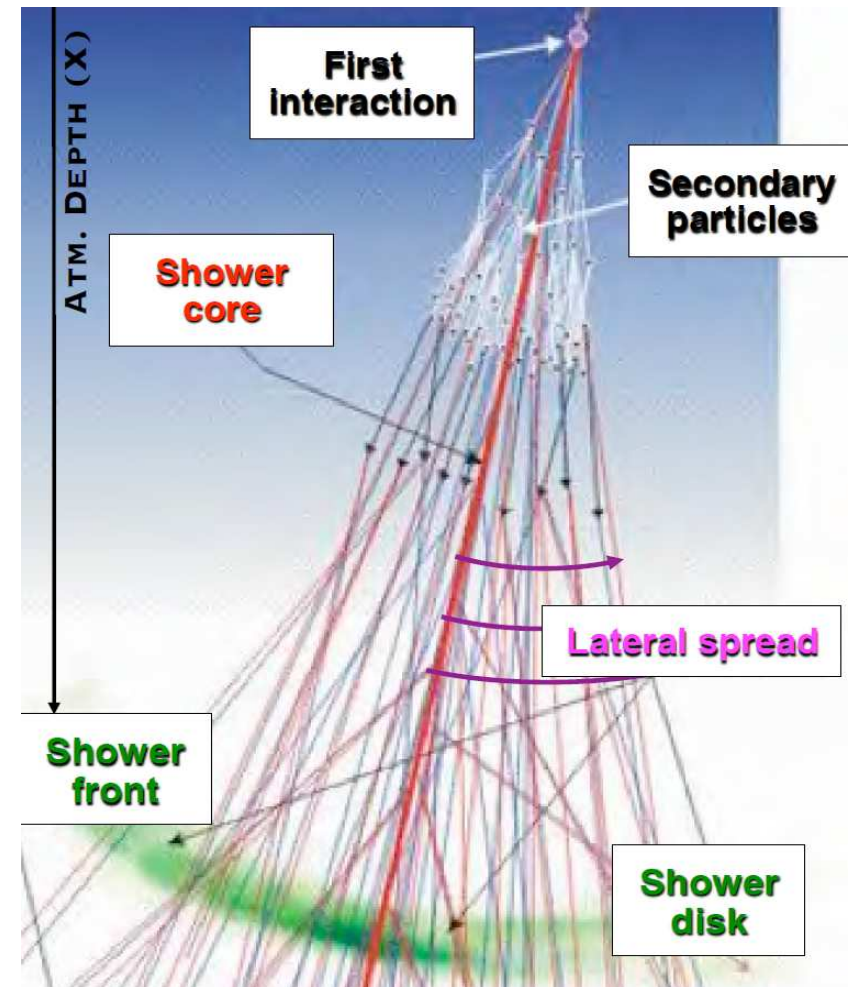
Wielkie pęki atmosferyczne

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.

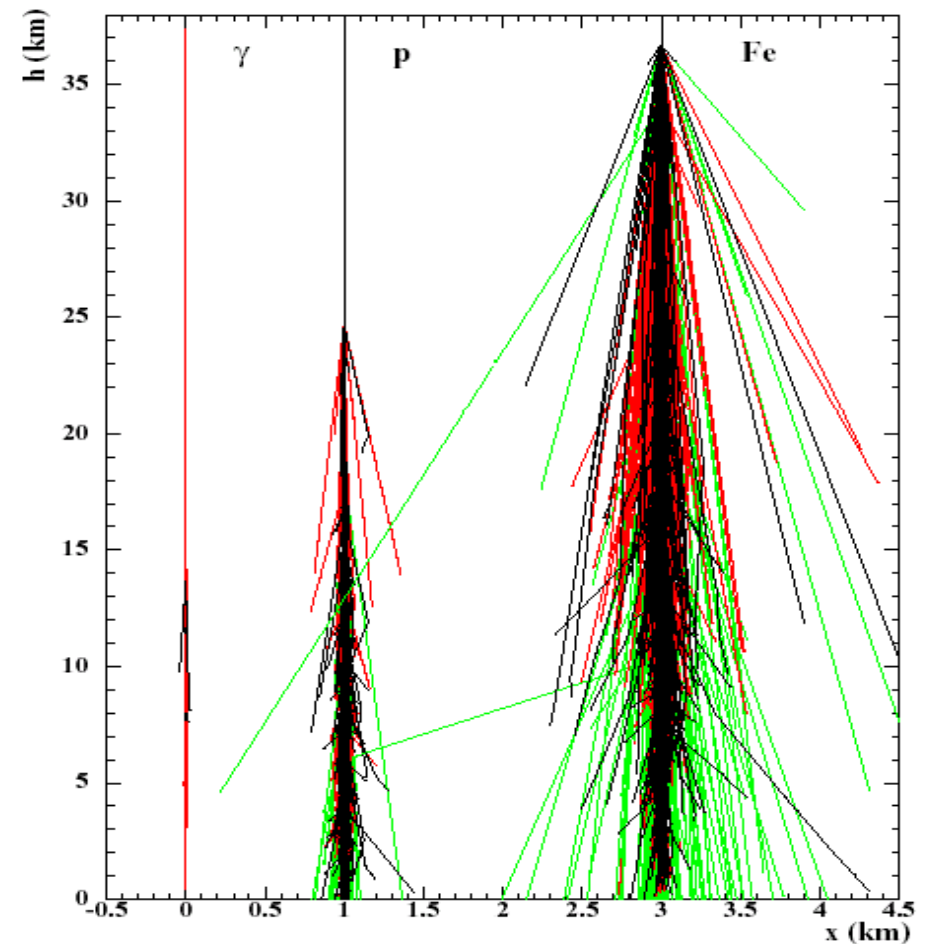


Wielkie pęki atmosferyczne

Profil poprzeczny

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

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



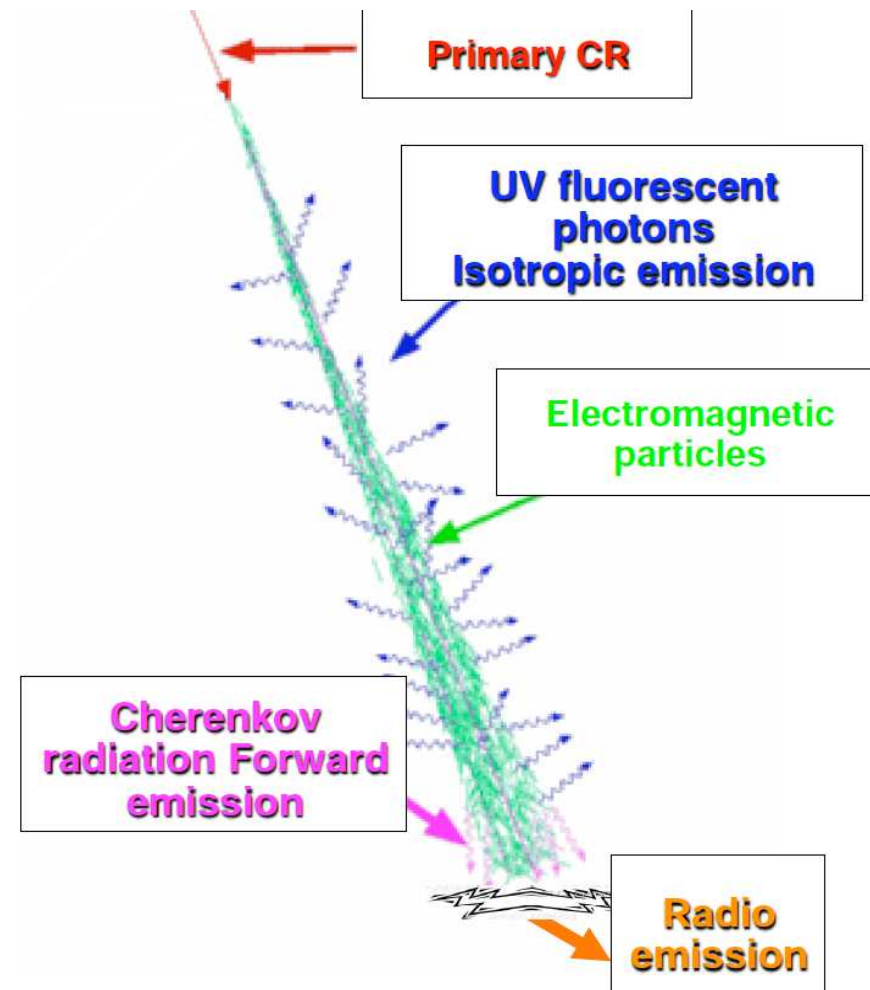
Wielkie pęki atmosferyczne

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...

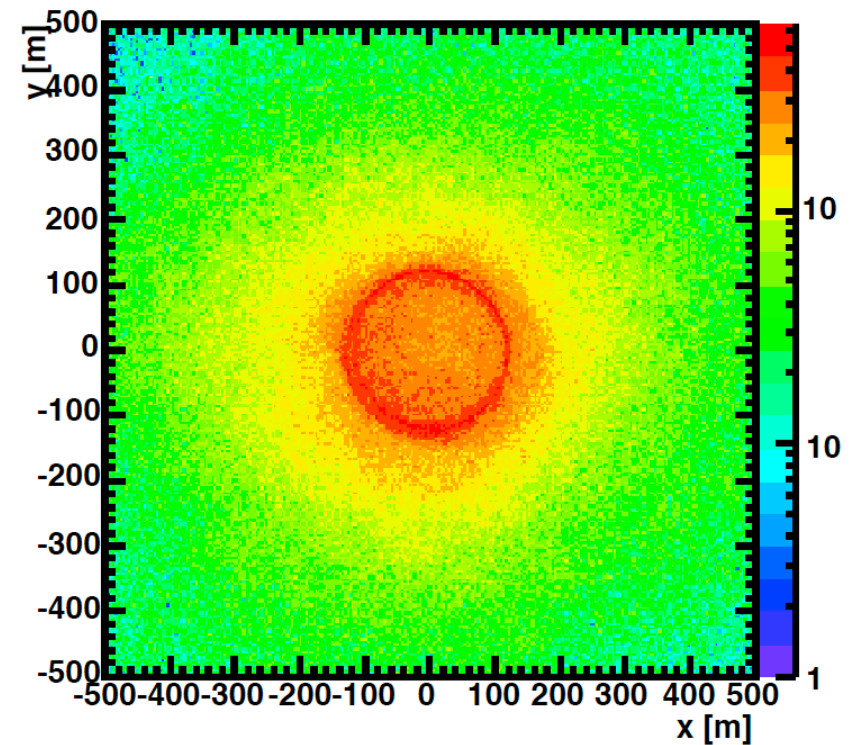
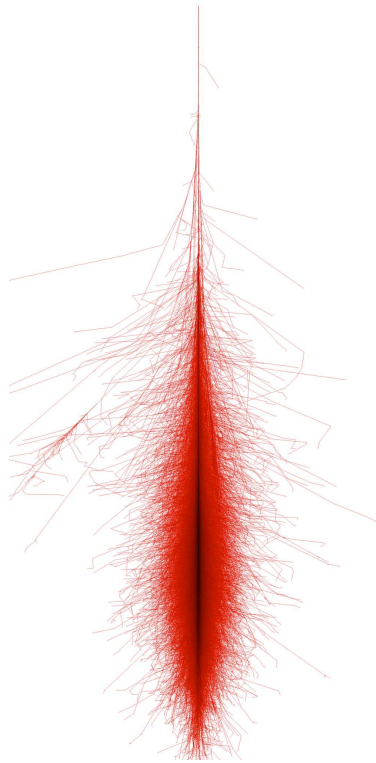


Wielkie pęki atmosferyczne

Promieniowanie Czerenkowa

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

Foton

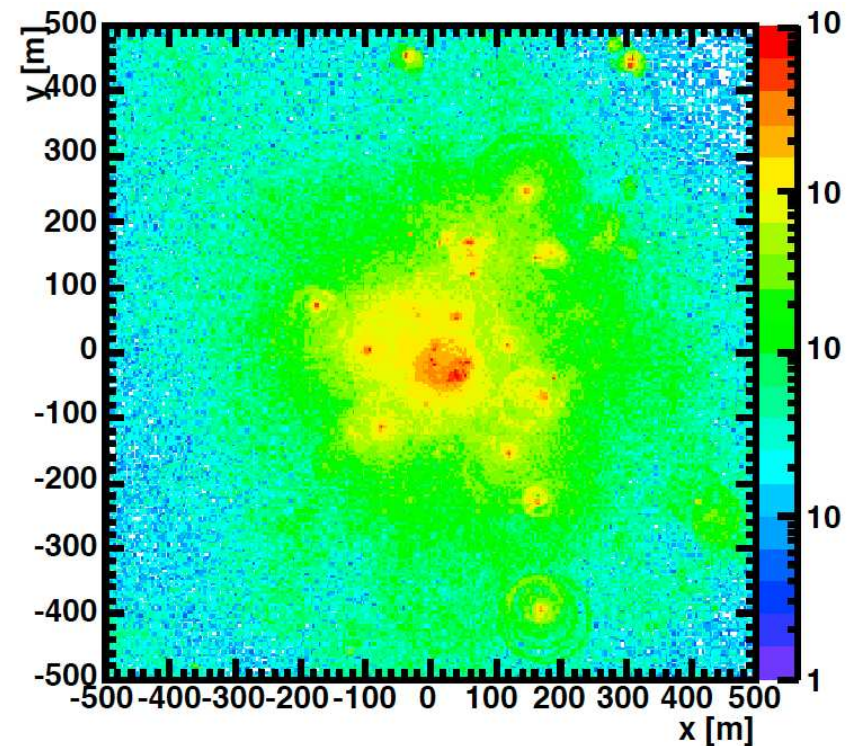
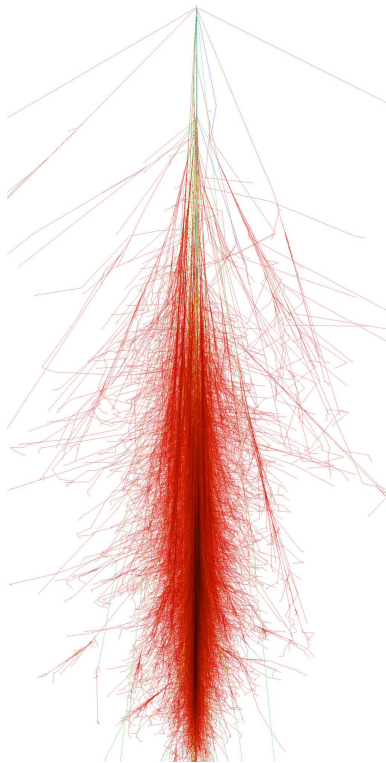


Wielkie pęki atmosferyczne

Promieniowanie Czerenkowa

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

Proton



Wielkie pęki atmosferyczne

Fluorescencja

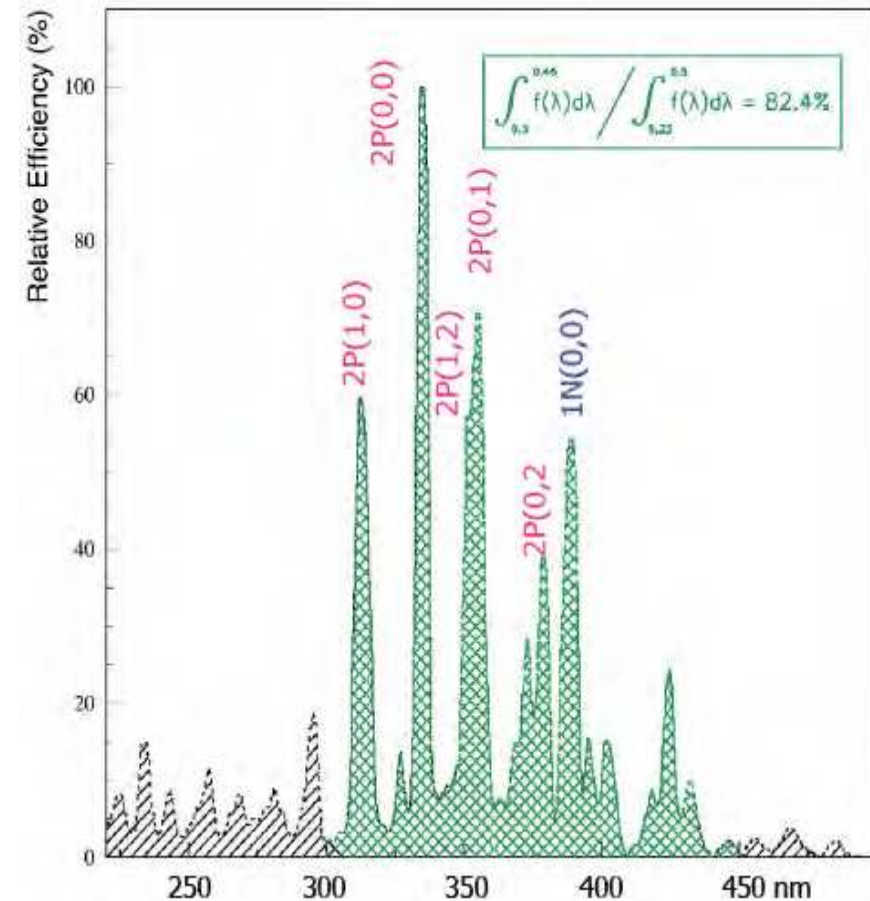
Obserwujemy głównie promieniowanie ultrafioletowe wzbudzonych cząsteczek azotu, w przedziale długości fali między 300 a 400 nm.

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)

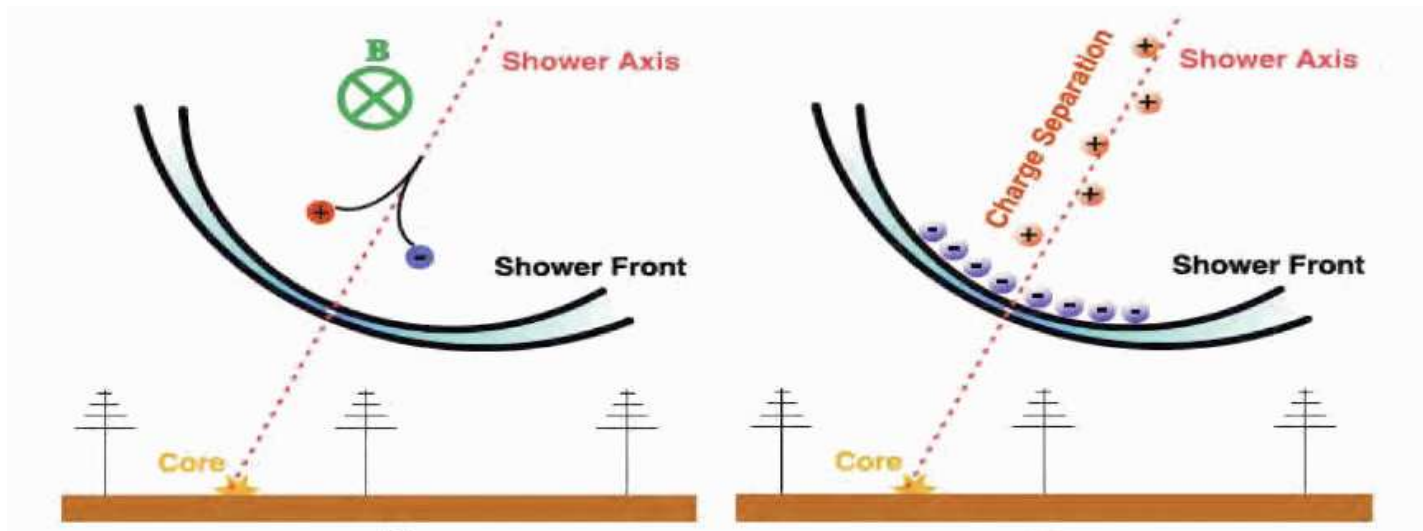
Wymaga szczególnych warunków obserwacyjnych (bezchmurne niebo, bezksiężycowa noc)



Wielkie pęki atmosferyczne

Emisja radiowa

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



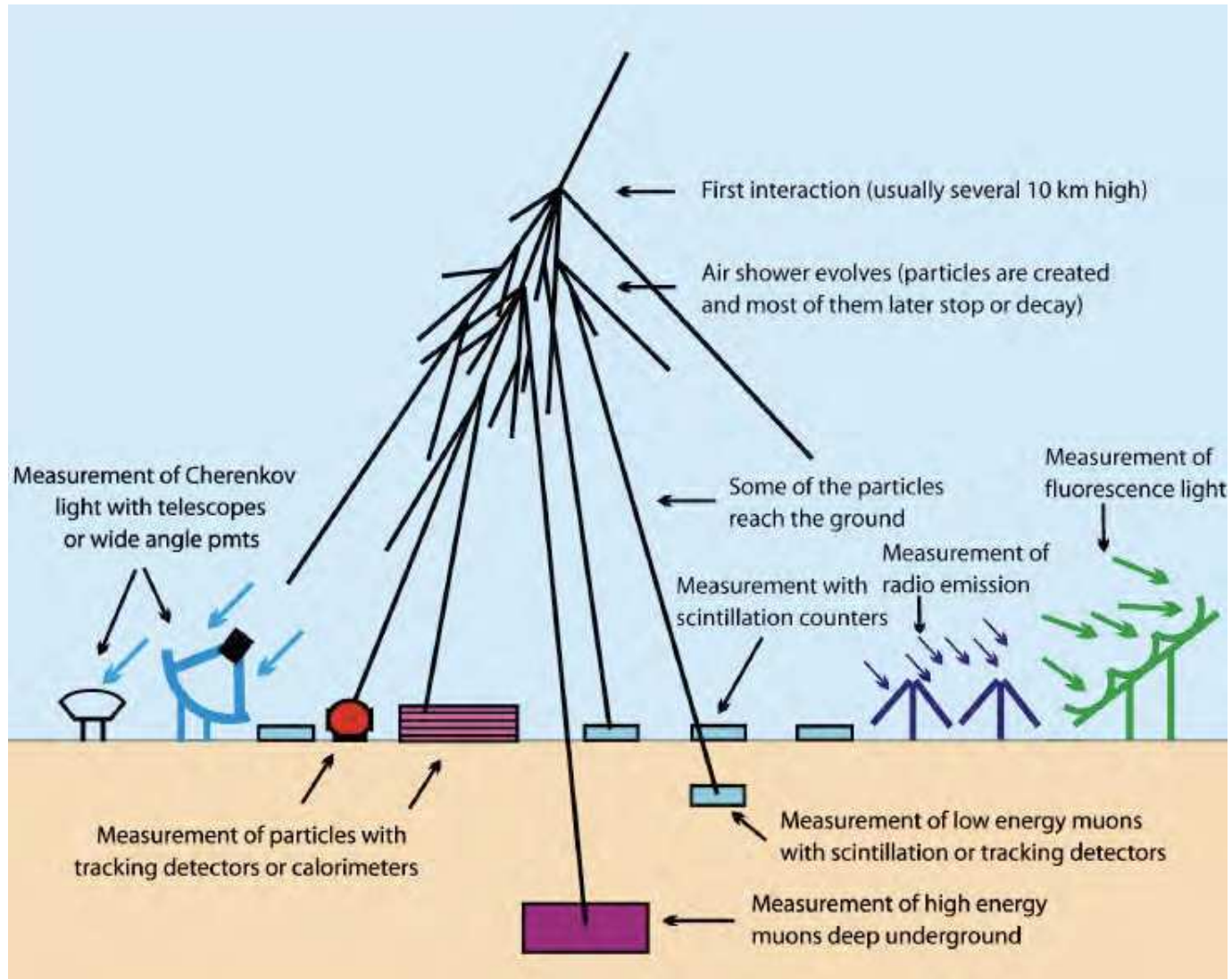
Wpływ ziemskiego pola magnetycznego (efekt geomagnetyczny)

Efekt Askariana:

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

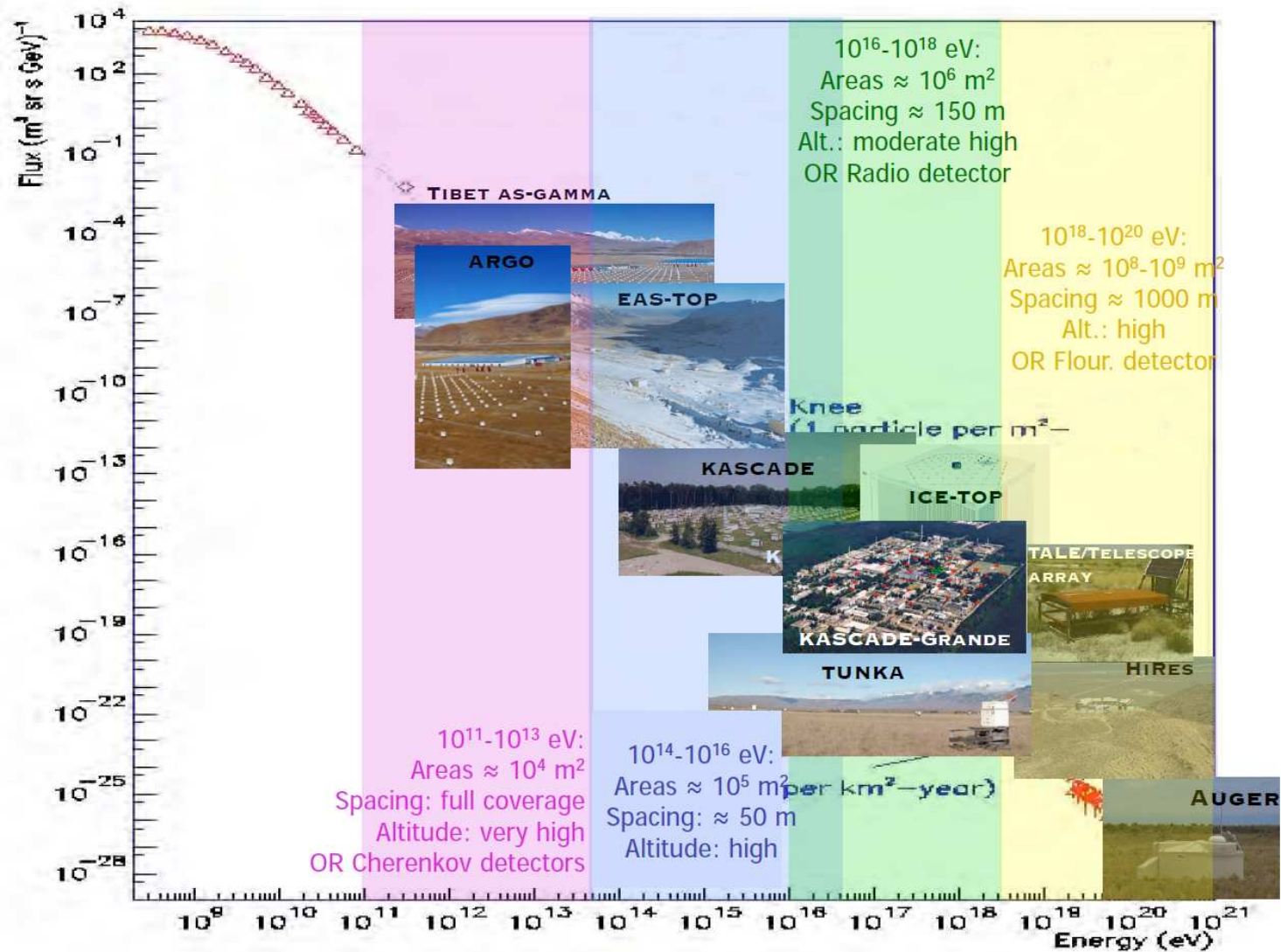
Wielkie pęki atmosferyczne

Metody detekcji



Wielkie pęki atmosferyczne

Eksperymenty

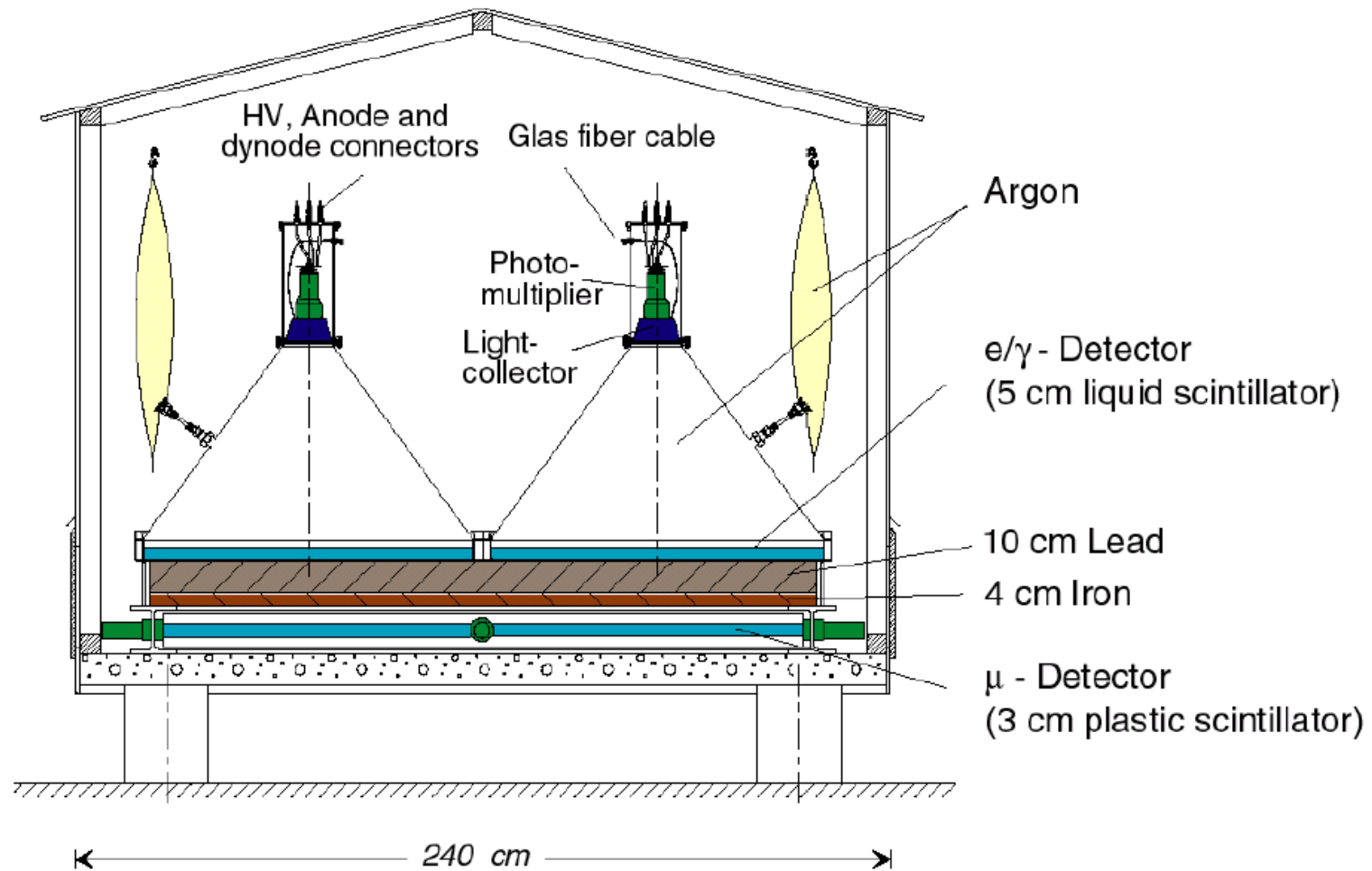


Detektor KASKADE (KIT, Karlsruhe)



KASKADE

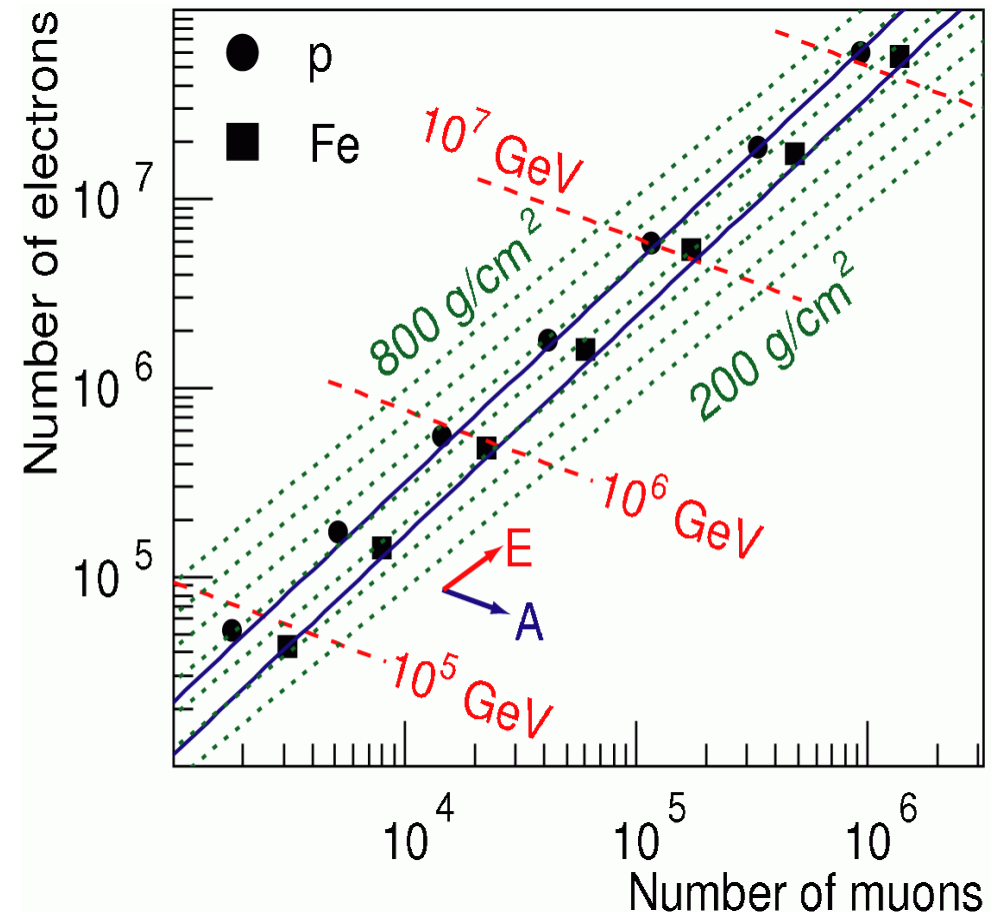
Detektor



KASKADE

Detektor

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



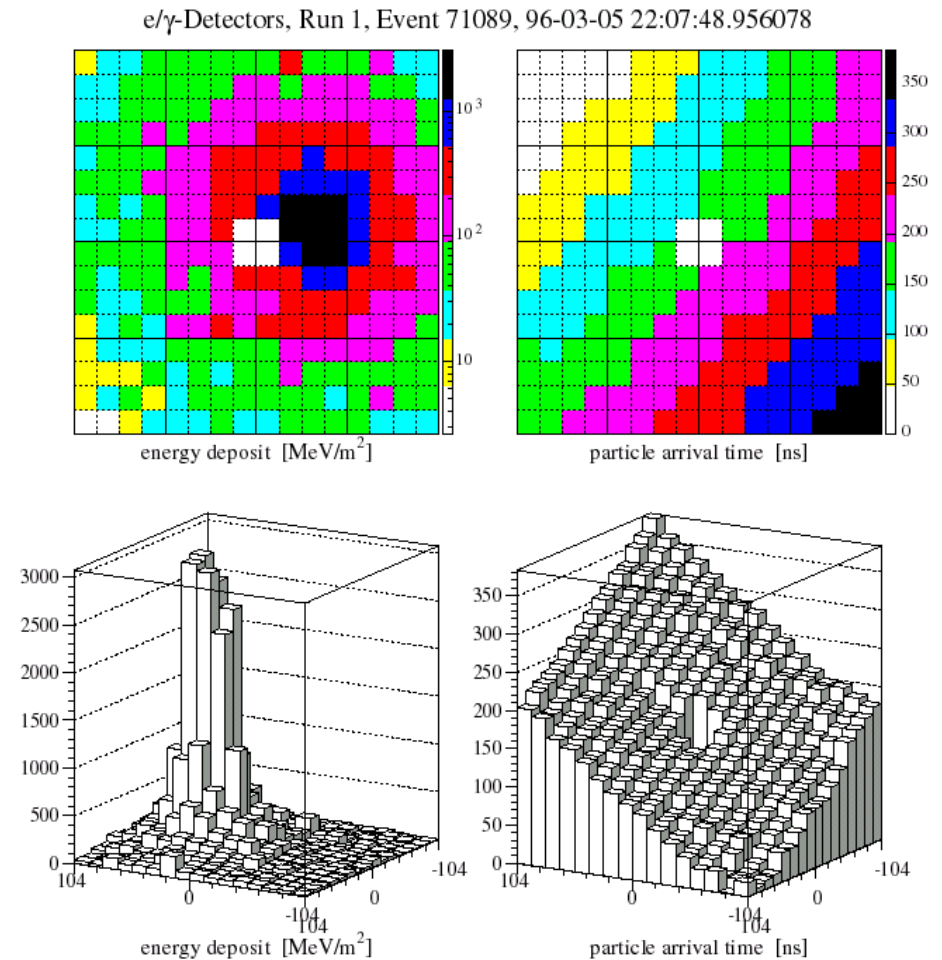
KASKADE

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



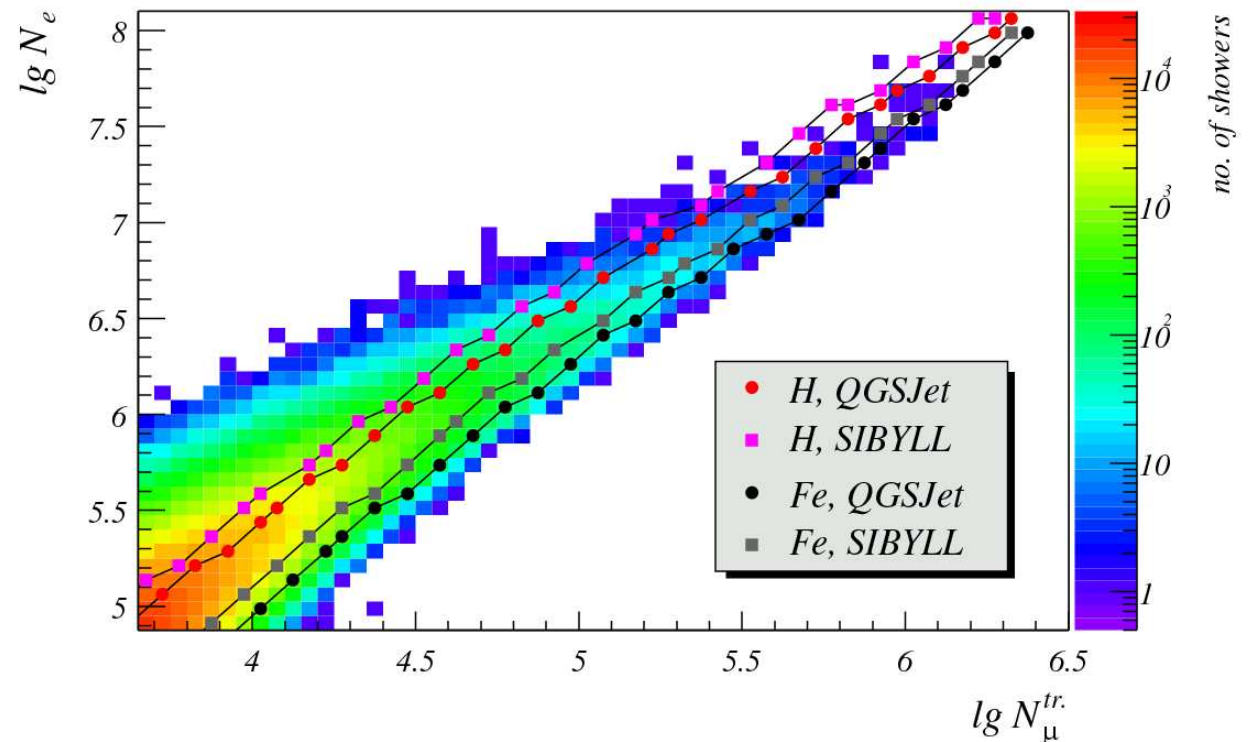
KASKADE

Wyniki

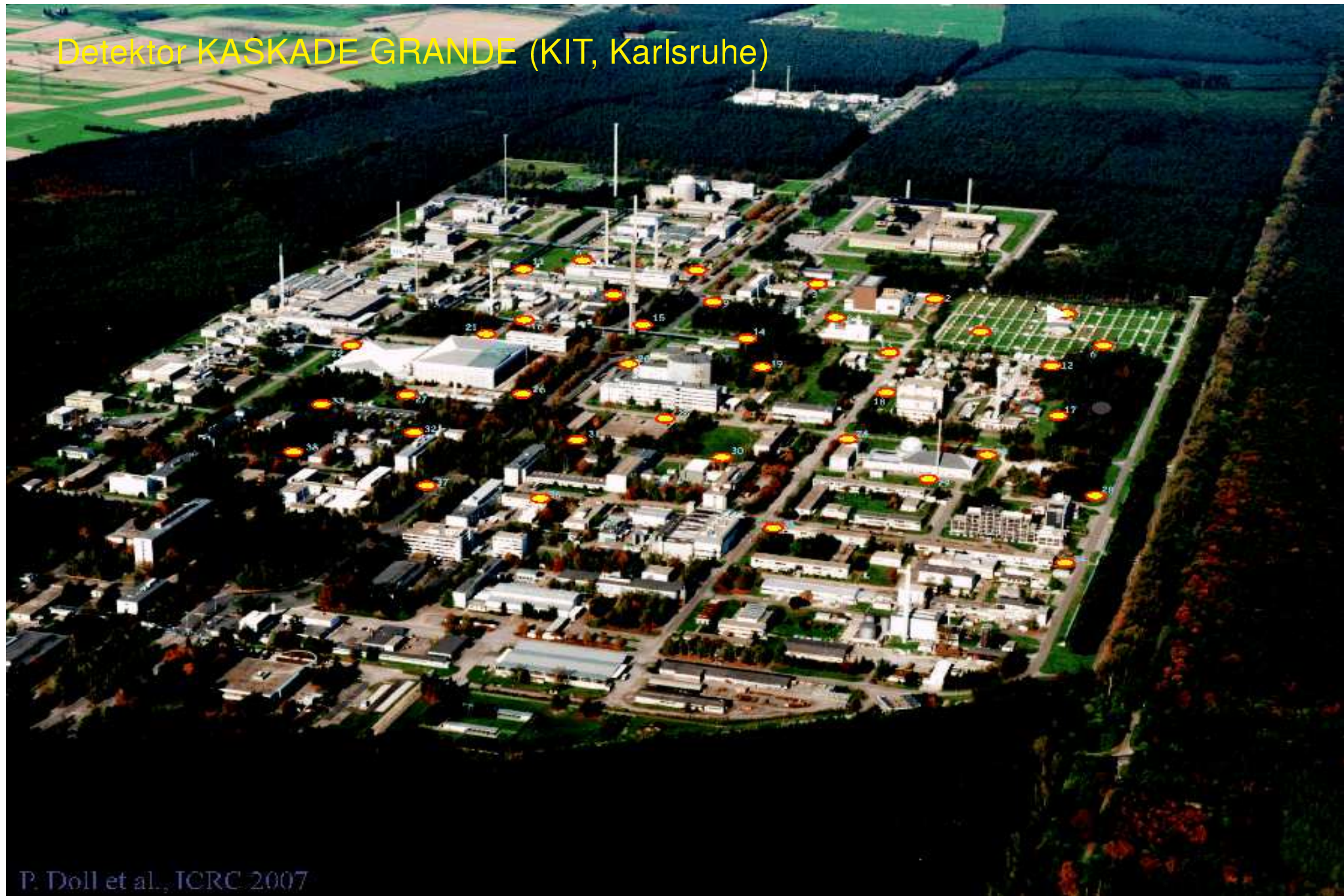
Zmierzony rozkład kaskad.

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

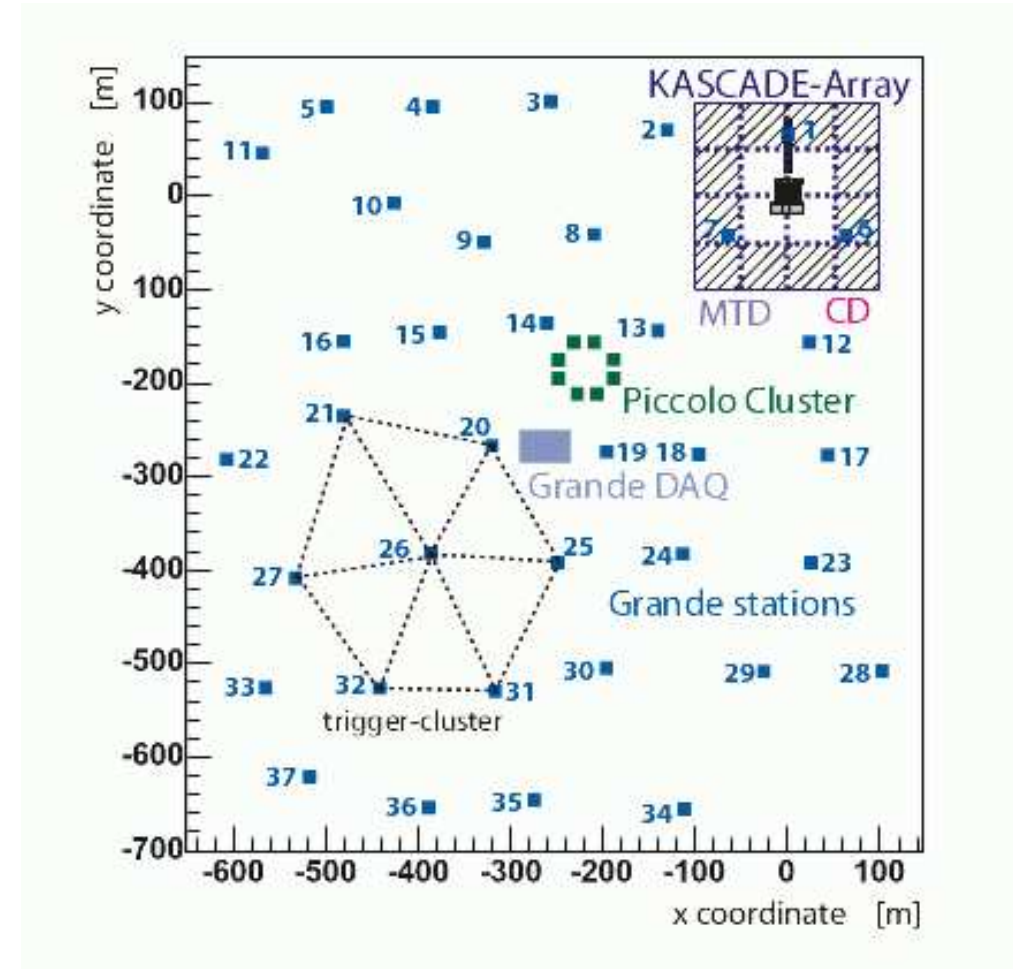
KASKADE od 1996

- 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

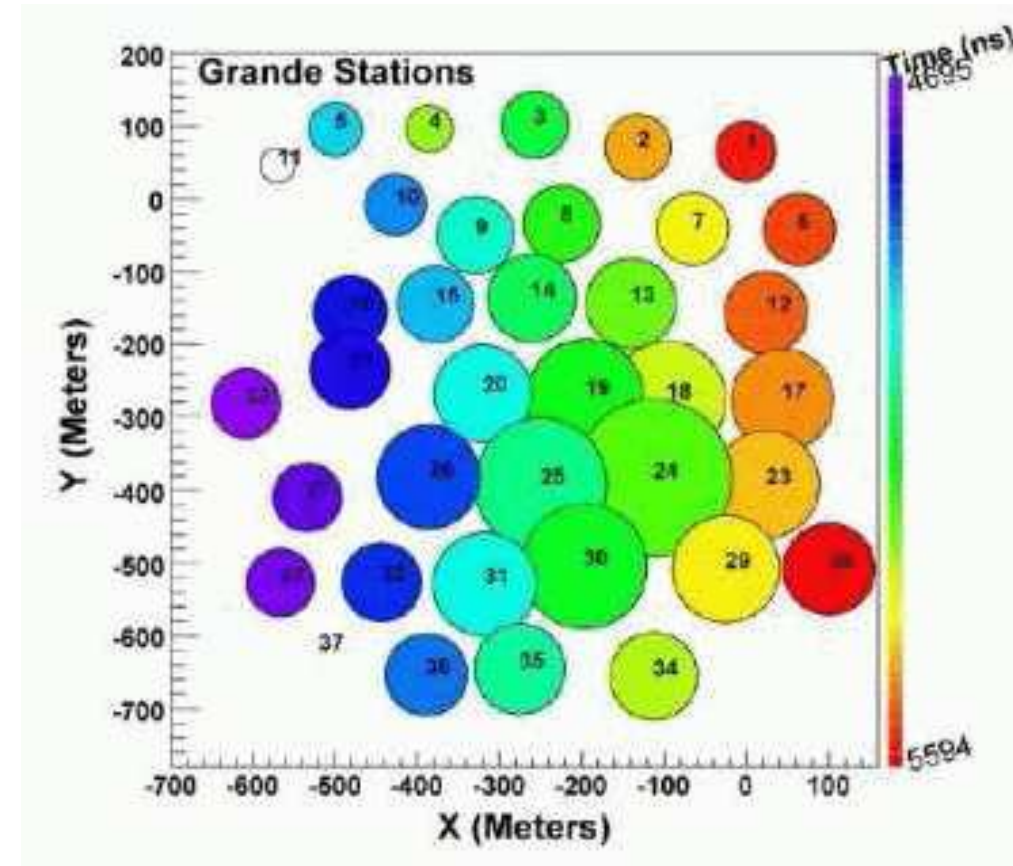
KASKADE od 1996

- 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...



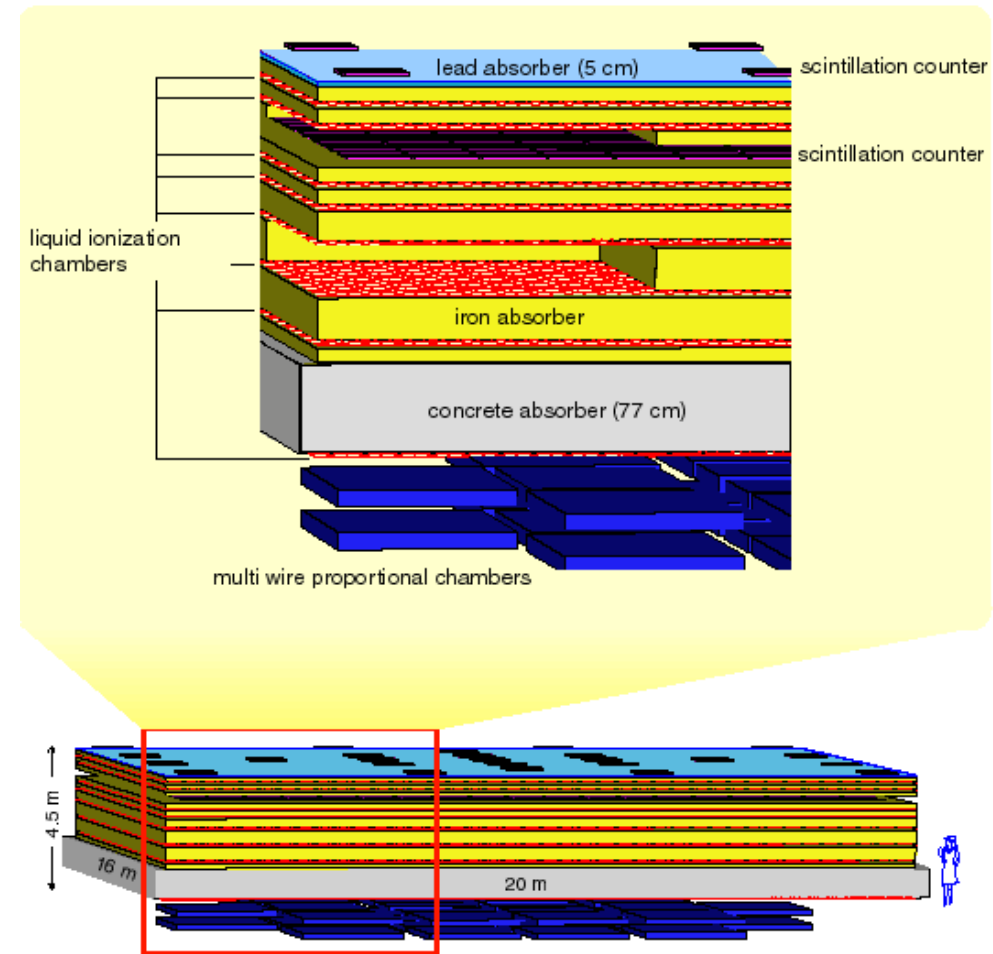
Przykładowa kaskada

KASKADE GRANDE

Detektor centralny

Kalorymetr hadronowy + detektor mionowy

⇒ dodatkowa informacja o składzie i profilu



KASKADE GRANDE

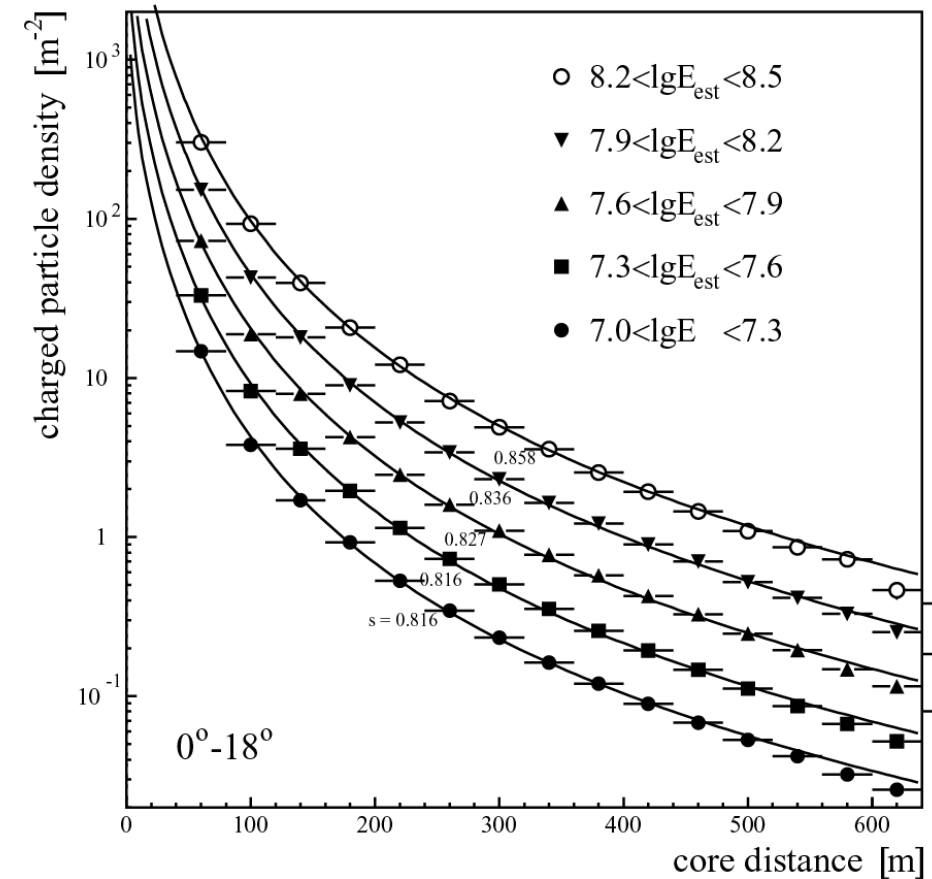
Pomiar energii

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 rekonstruować gęstość cząstek w ustalonym miejscu profilu



KASKADE GRANDE

Pomiar energii

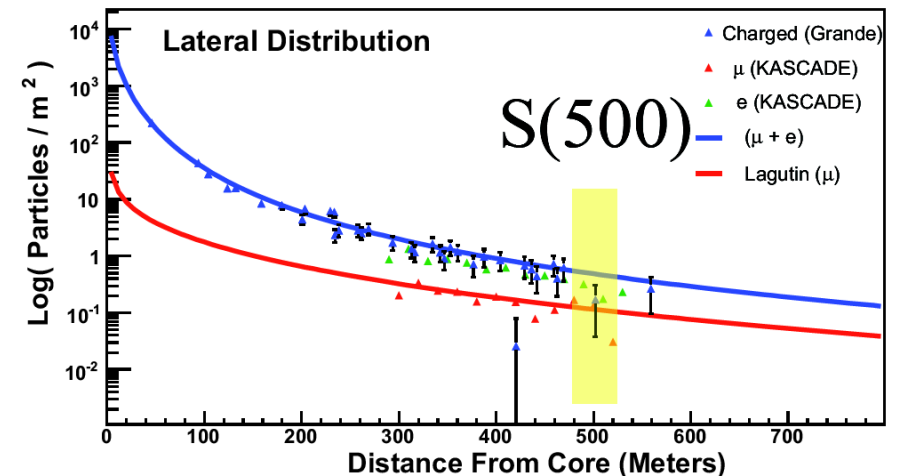
Niestety detektory były rozłożone zbyt daleko od siebie, żeby precyzyjnie określić gęstość cząstek w rdzeniu pęku

⇒ 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

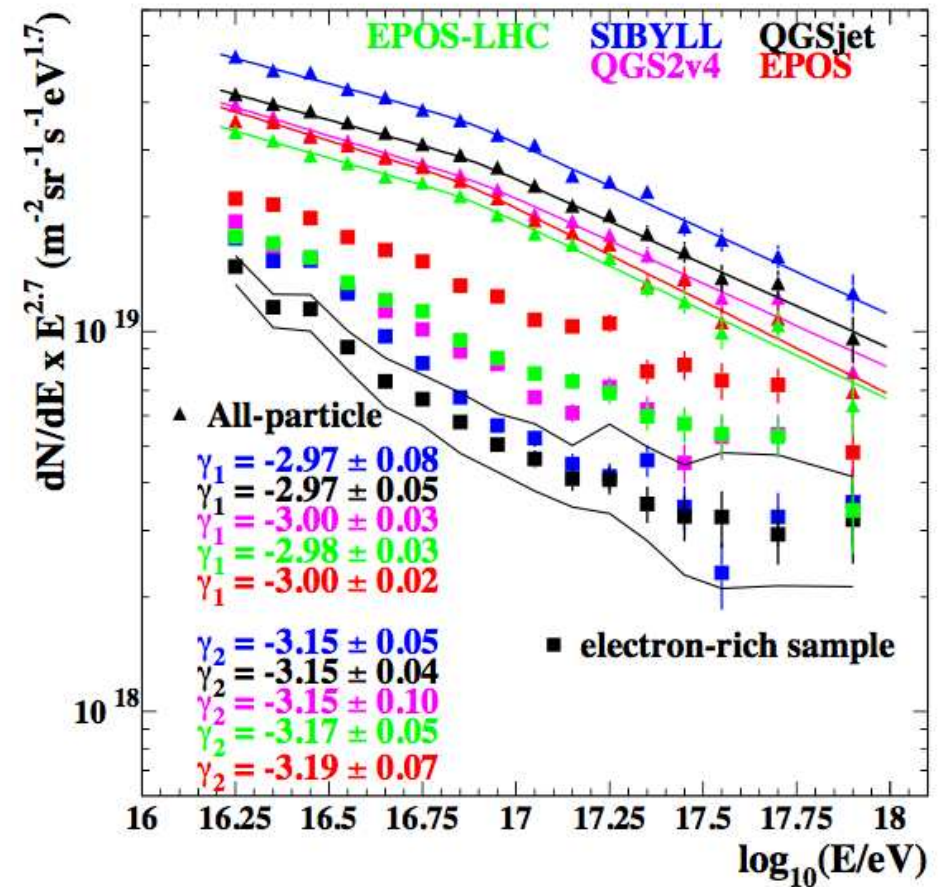
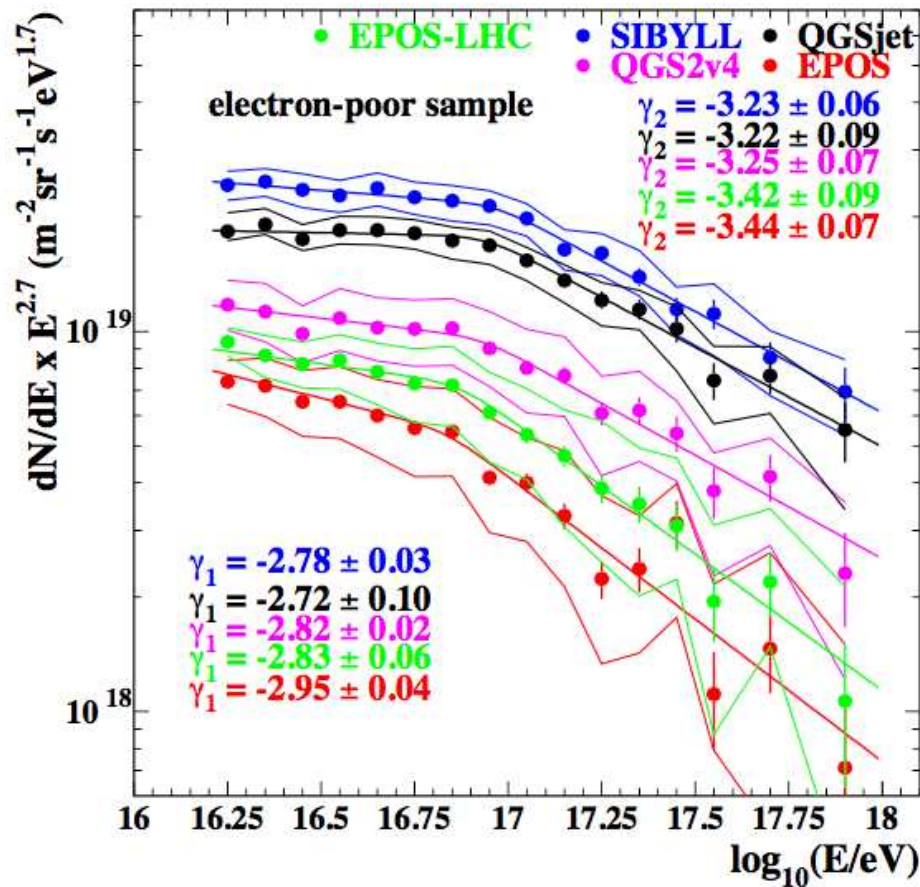


KASKADE GRANDE

Zależność od modelu

Duże niepewności systematyczne związane z modelowaniem oddziaływań w atmosferze

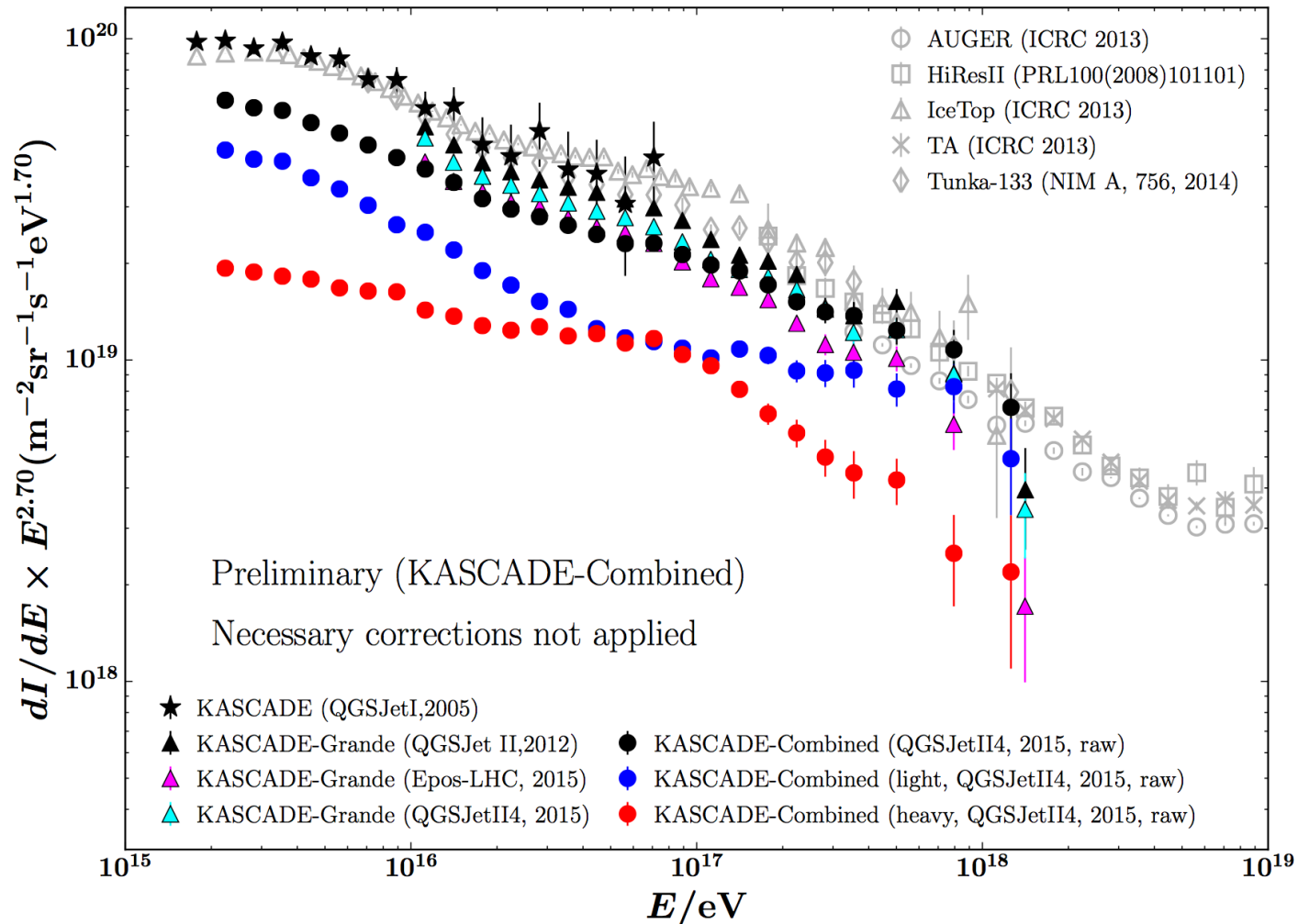
Dane LHC pozwoliły na ich istotne zmniejszenie \Rightarrow modele EPOS-LHC, QGS2v4



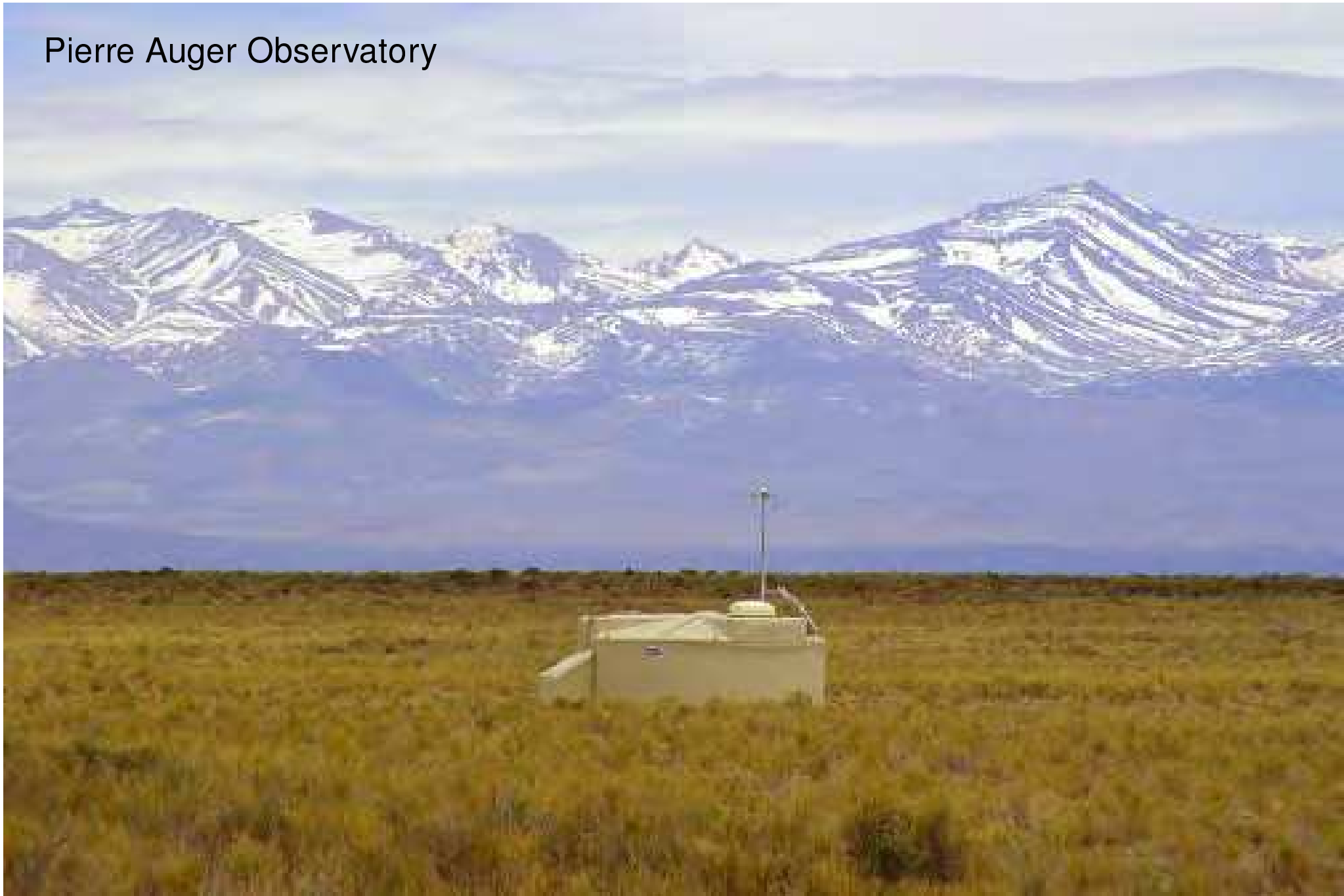
KASKADE GRANDE

Wyniki 2015

Nowe wyniki dotyczące strumienia promieniowania kosmicznego



Pierre Auger Observatory



AUGER

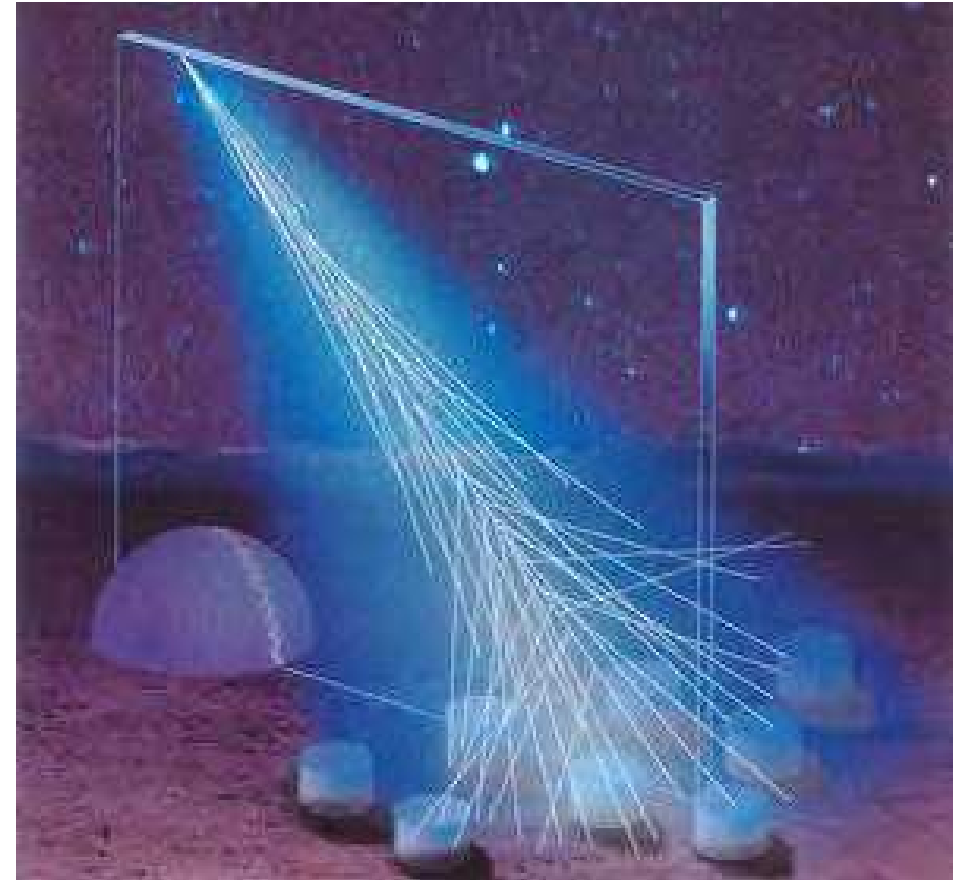
Obserwatorium Pierre Auger

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

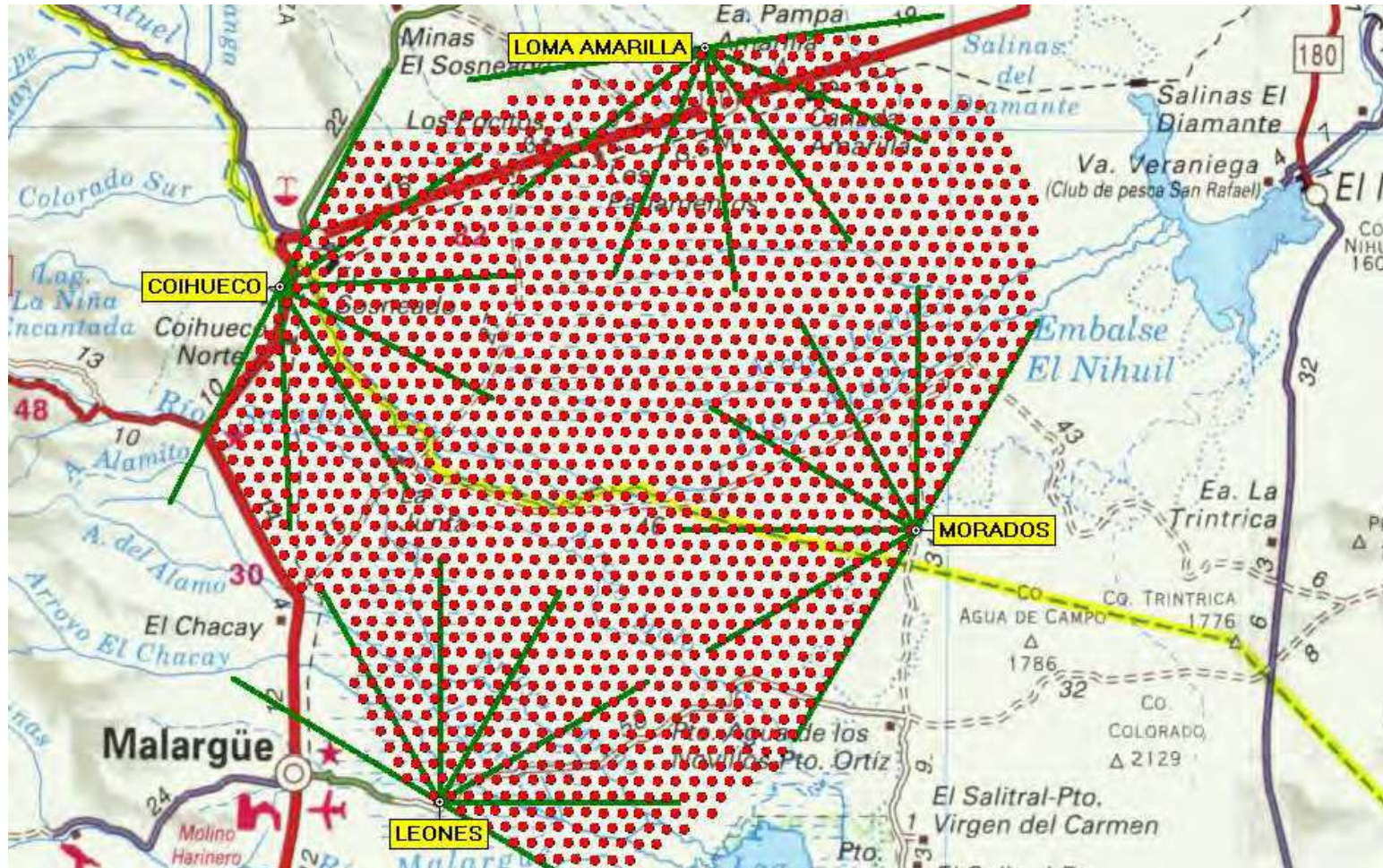
Duża statystyka dzięki bardzo dużej powierzchni detektora.

Duża dokładność dzięki hybrydowej metodzie detekcji: cząstki naładowane + fluorescencja



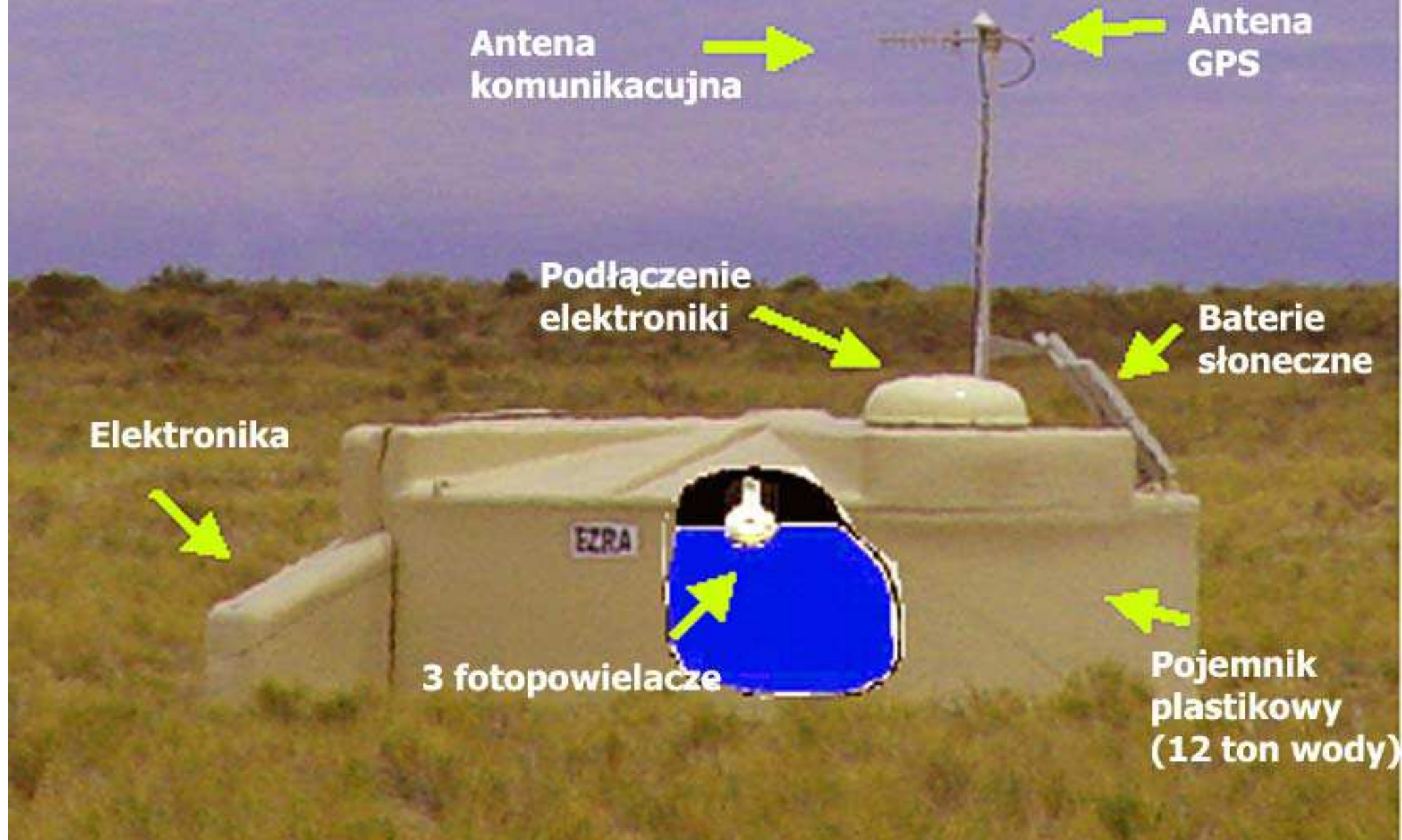
AUGER

1600 detektorów powierzchniowych rozstawionych co 1.5 km na obszarze 3000 km²



24 teleskopy mierzące światło fluorescencyjne zgrupowane w 4 obserwatoriach

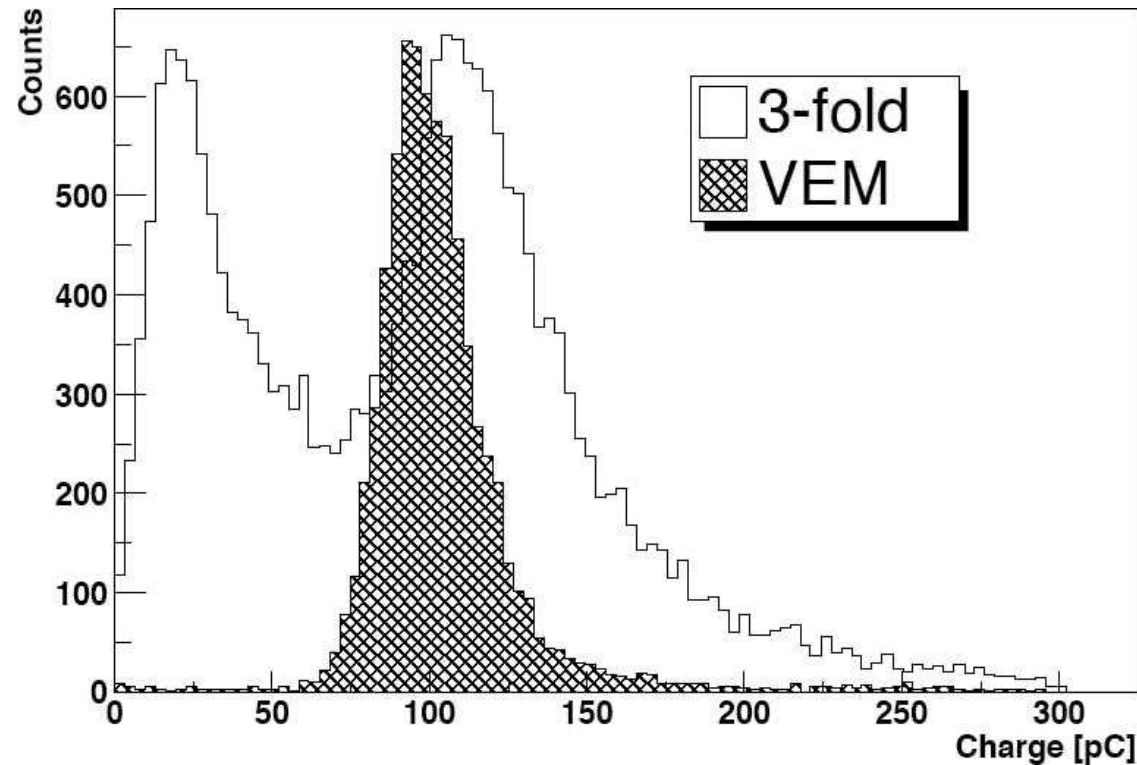
Detektor powierzchniowy AUGER: pomiar promieniowania Czereknowa w wodzie



AUGER

Kalibracja

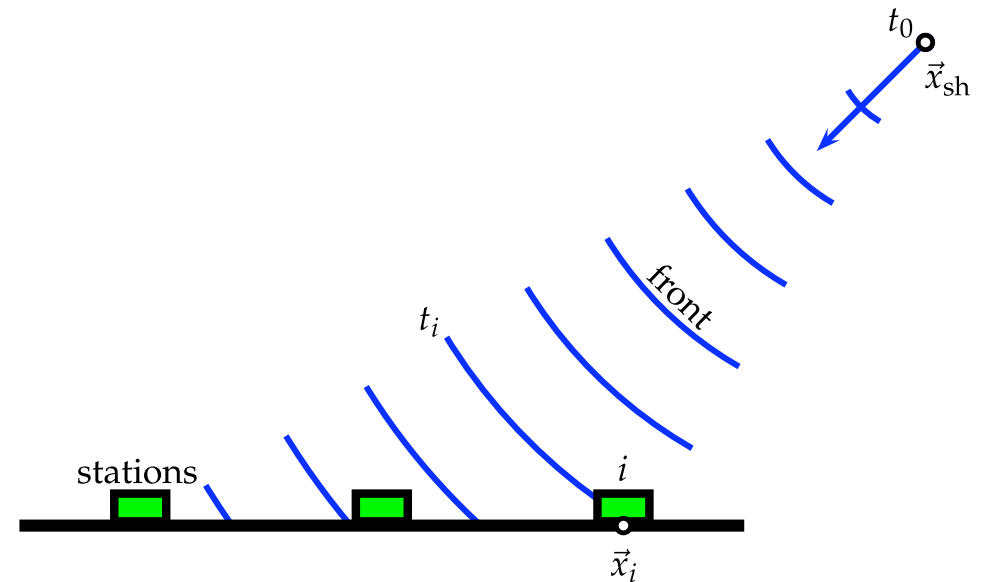
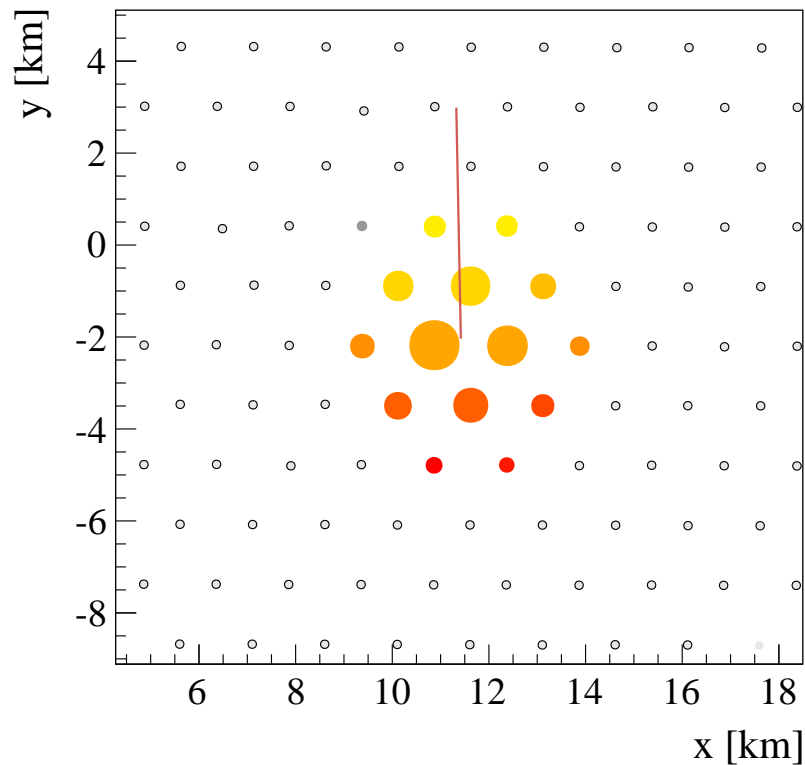
Kalibracja detektorów powierzchniowych opiera się na pomiarze mionów kosmicznych. Dwa tryby pomiaru: koincydencja 3 fotopowielaczy lub wyzwalenie zewnętrznym scntnylatorem. W obu przypadkach wyraźnie widoczne maksimum VEM (Very Energetic Muon)



AUGER

Detektor powierzchniowy

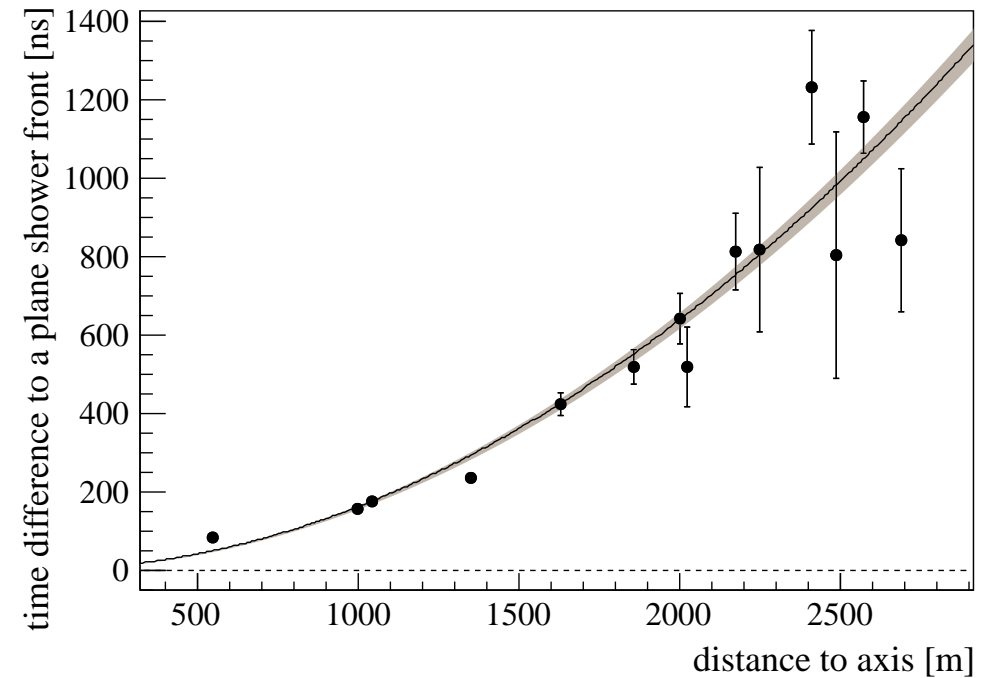
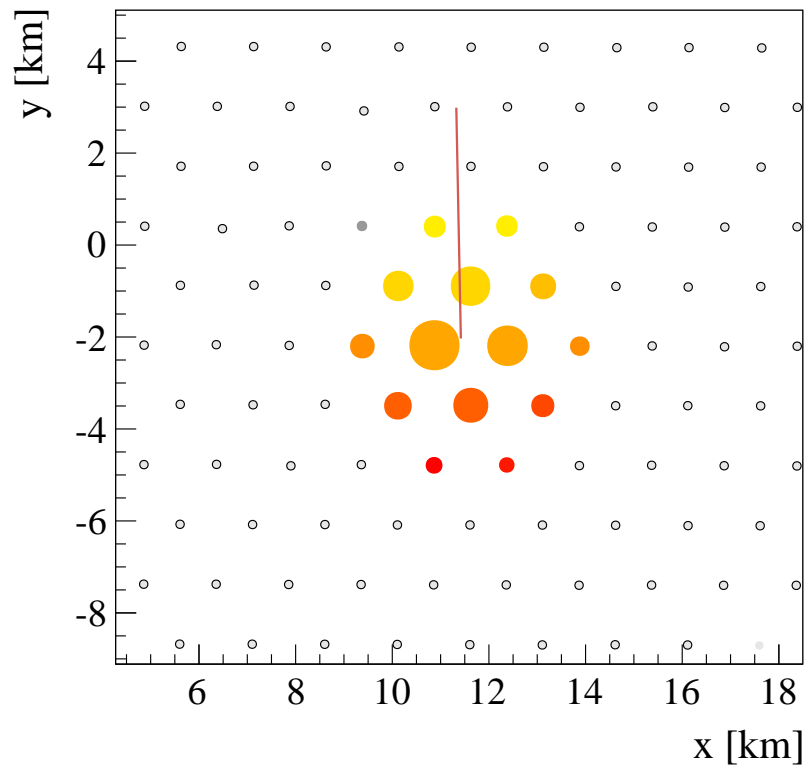
Detektory powierzchniowe mierzą liczbę cząstek (sygnał w porównaniu z VEM) i czas ich przejścia. Profil czasowy pozwala na rekonstrukcję kierunku.



AUGER

Detektor powierzchniowy

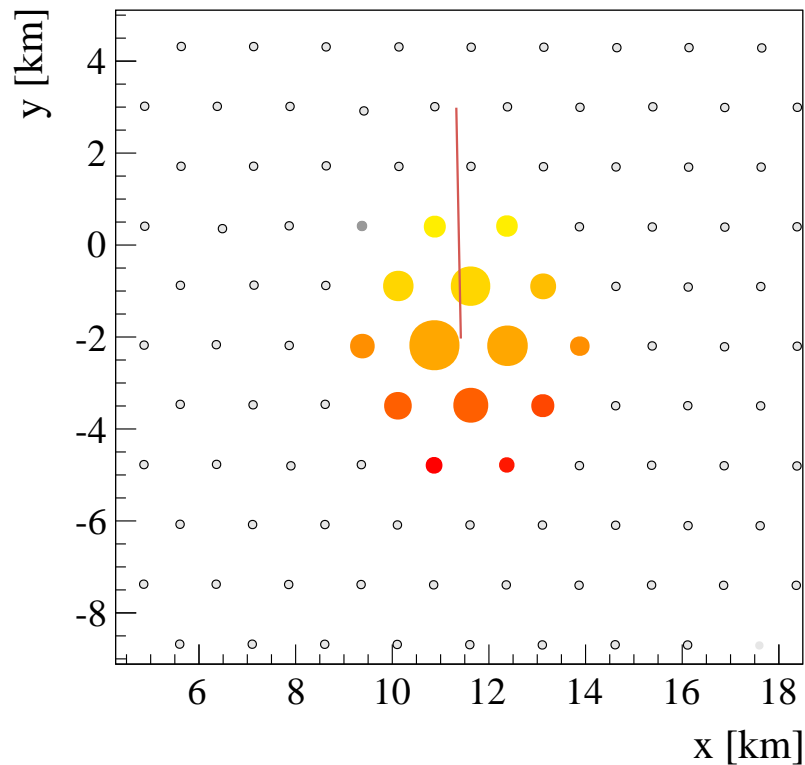
Detektory powierzchniowe mierzą liczbę cząstek (sygnał w porównaniu z VEM) i czas ich przejścia. Profil czasowy pozwala na rekonstrukcję kierunku.



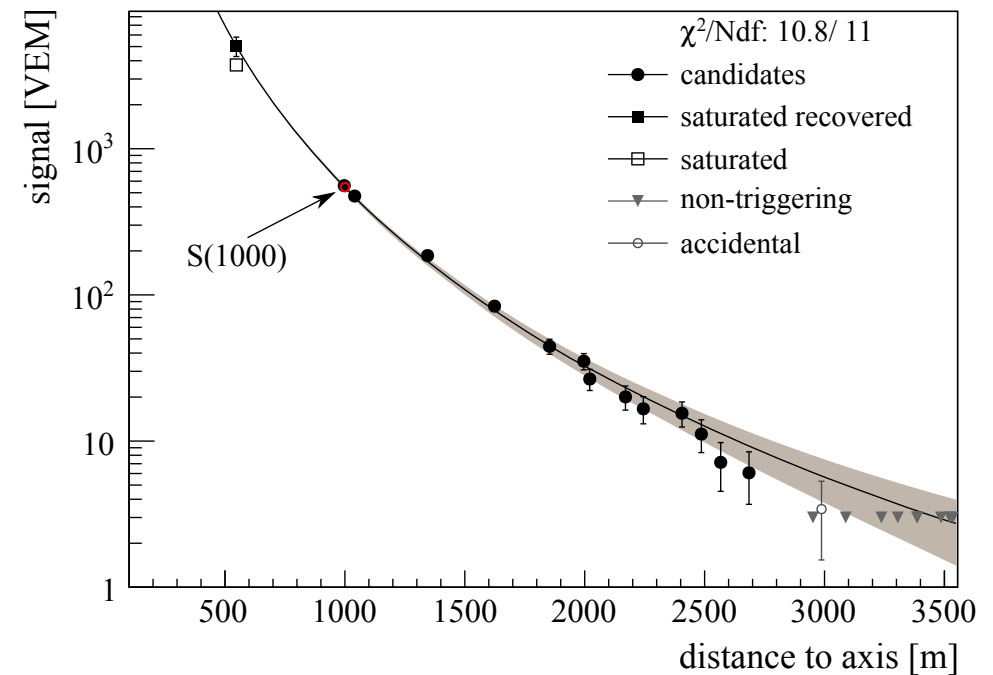
AUGER

Detektor powierzchniowy

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



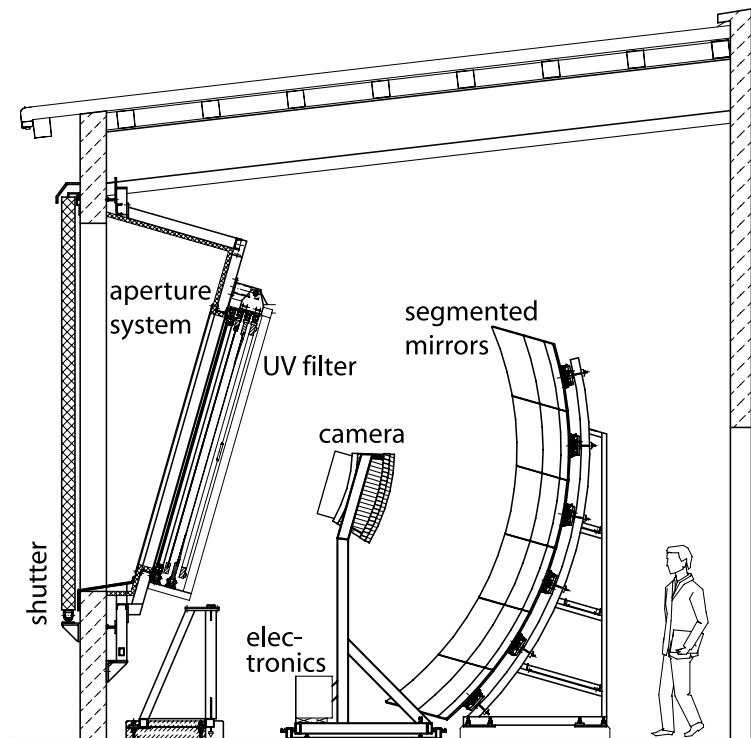
Energia wyznaczana z gęstości cząstek 1000 m od rdzenia kaskady.



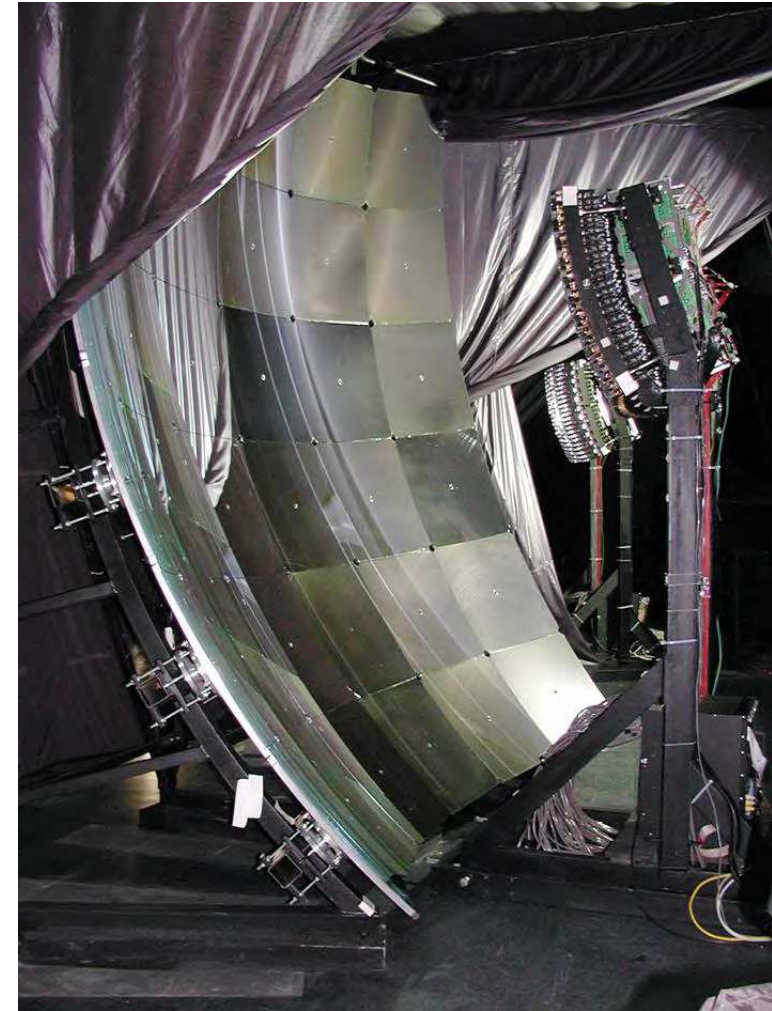
AUGER

Teleskop fluorescencyjny

Schemat teleskopu

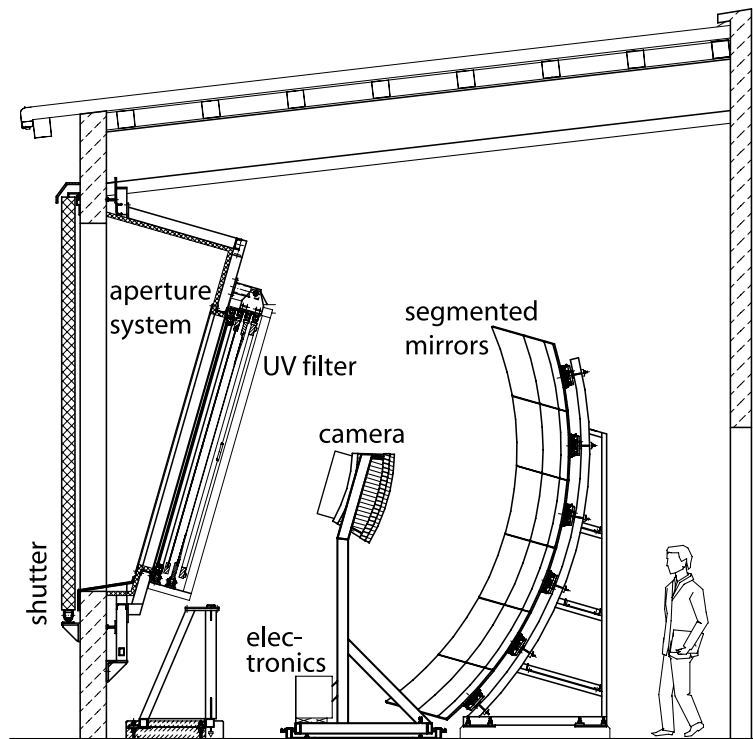


Zwierciadło o średnicy 3.4 m, matryca 440
fotopowielaczy rejestrujących promieniowanie UV



Teleskop fluorescencyjny

Schemat teleskopu



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

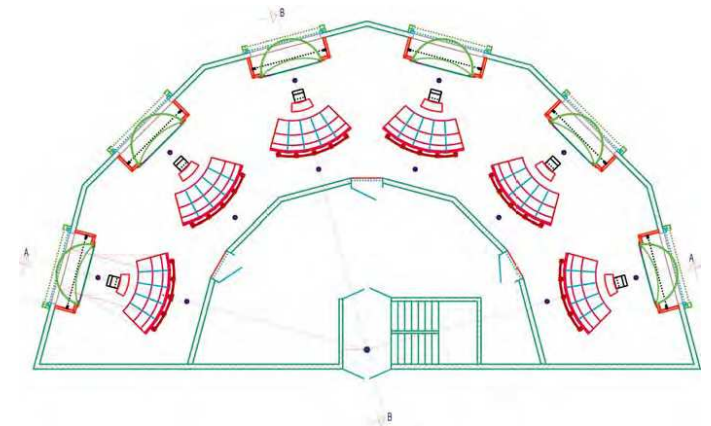
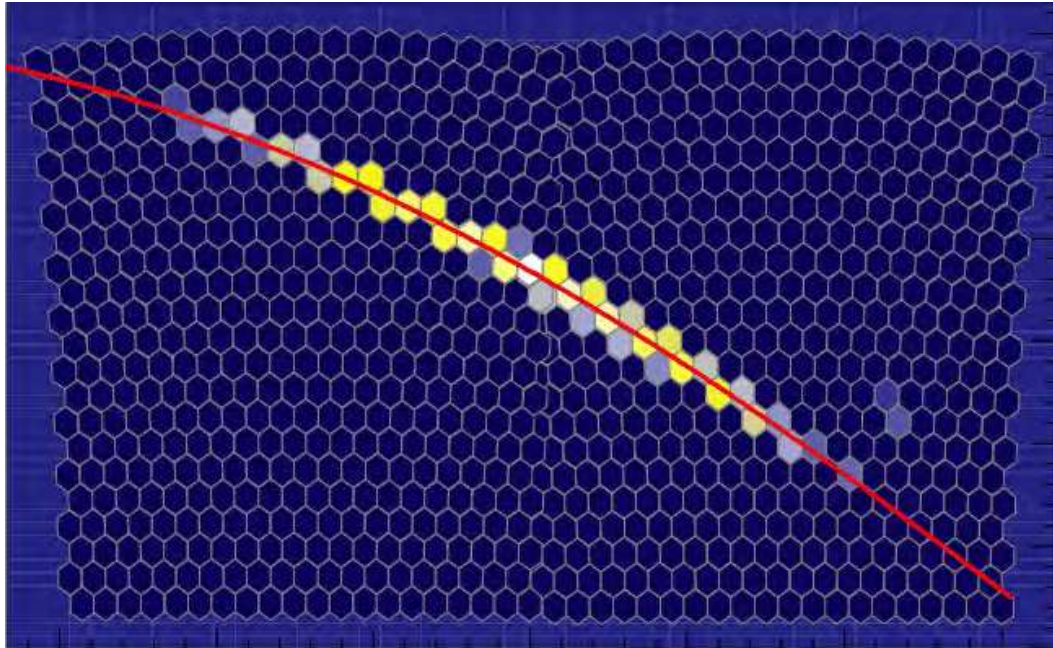
AUGER

Teleskop fluorescencyjny

Obraz wielkiego pęku atmosferycznego zarejestrowany przez jeden z teleskopów.

Rejestrowana jest amplituda sygnału, precyzyjnie mierzony jest też profil czasowy

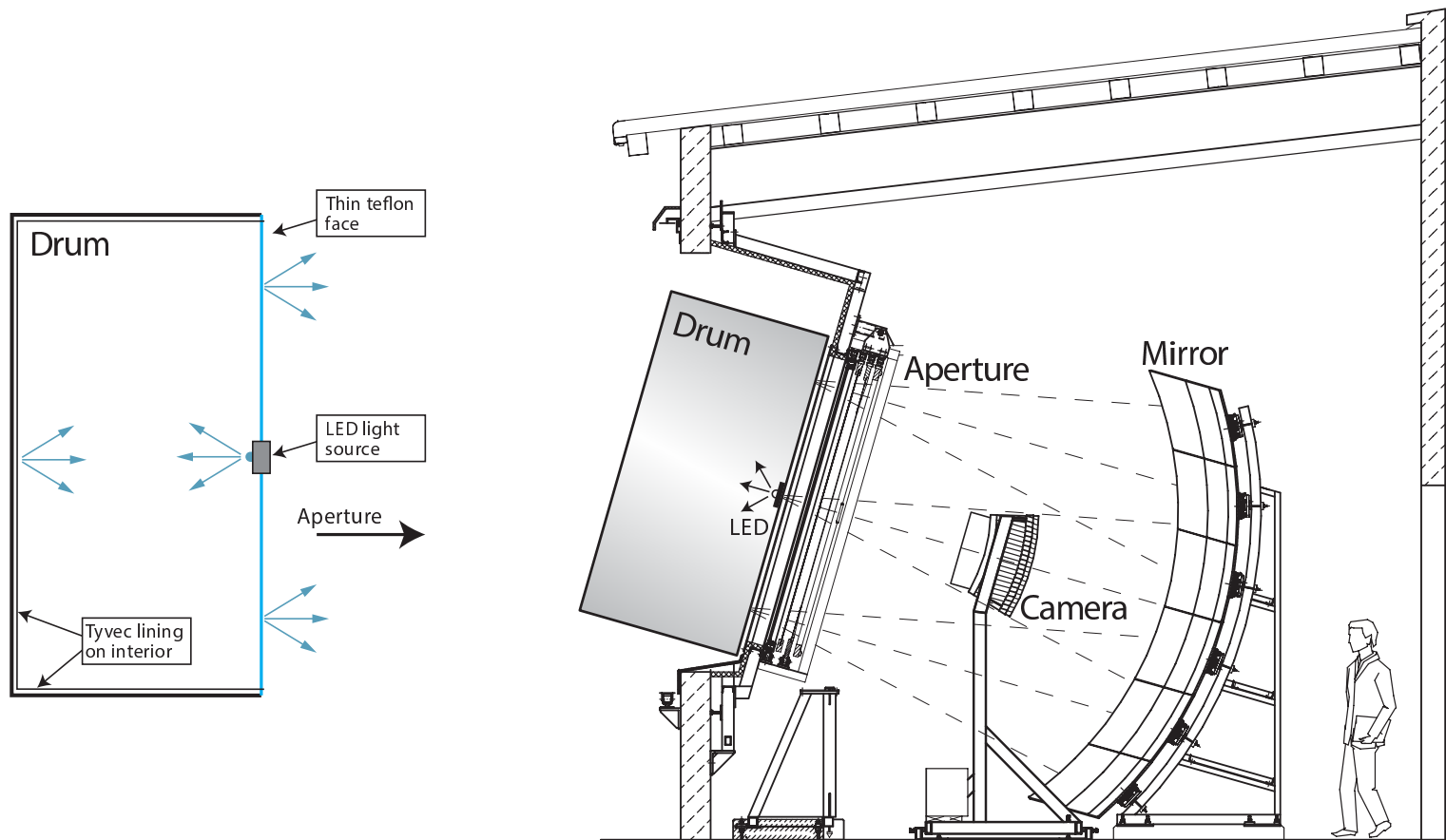
⇒ pełna rekonstrukcja 3-D !



AUGER

Kalibracja

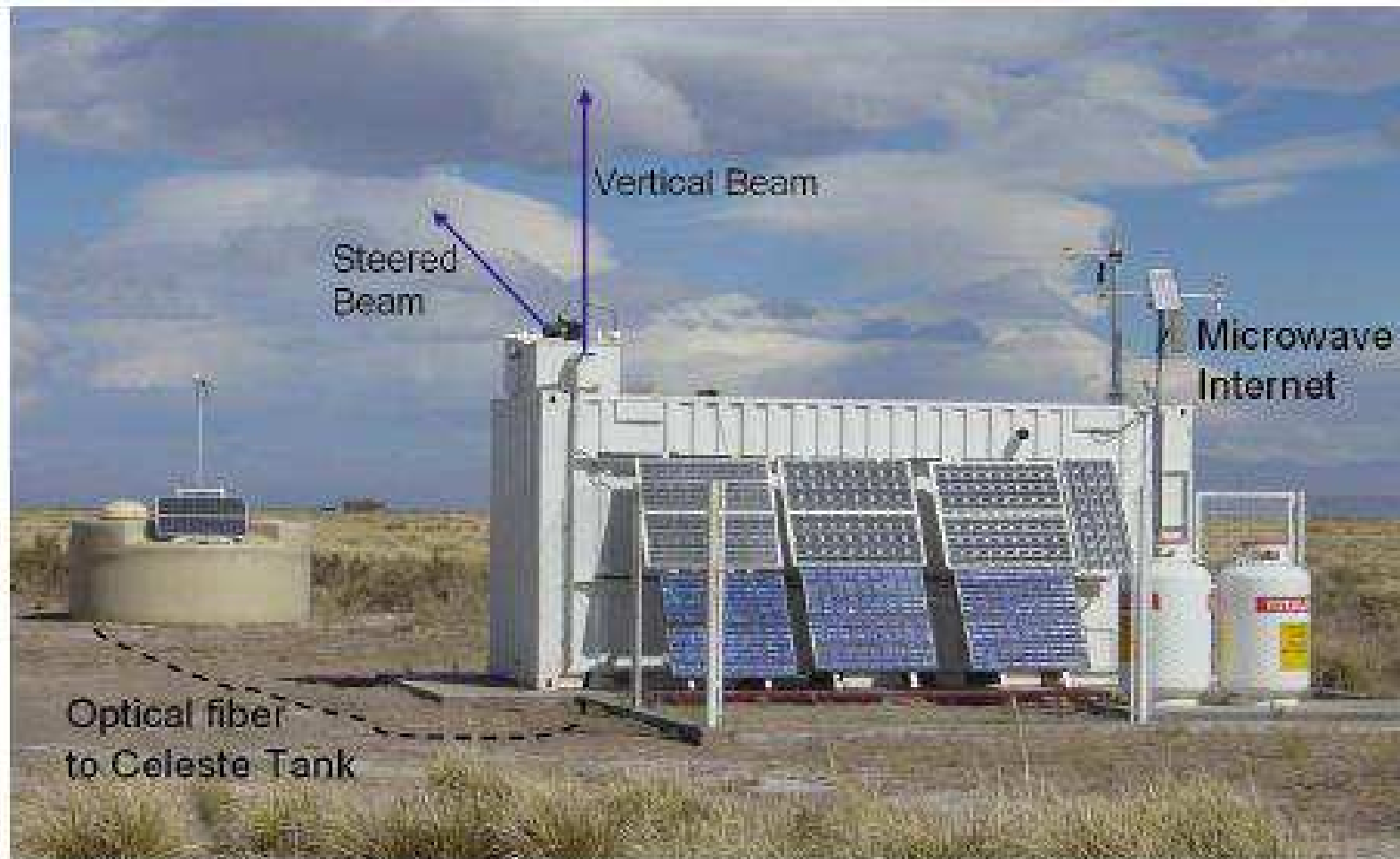
Kalibracja poszczególnych fotopowielaczy i elektroniki - źródła światła rozproszonego



AUGER

Kalibracja

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

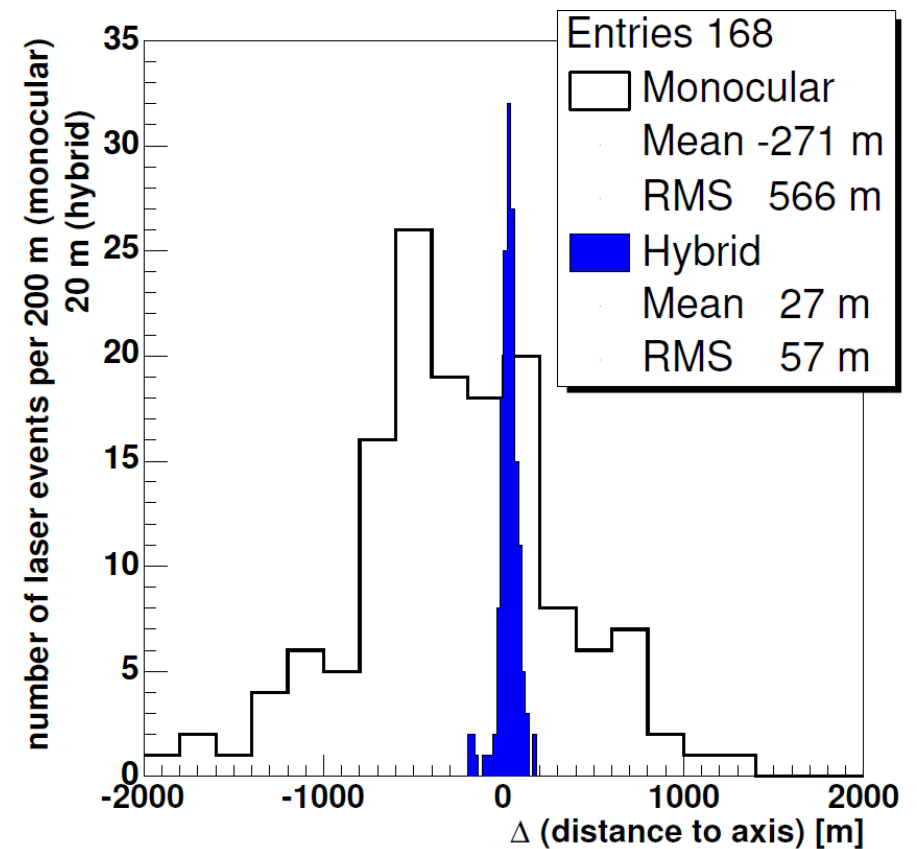
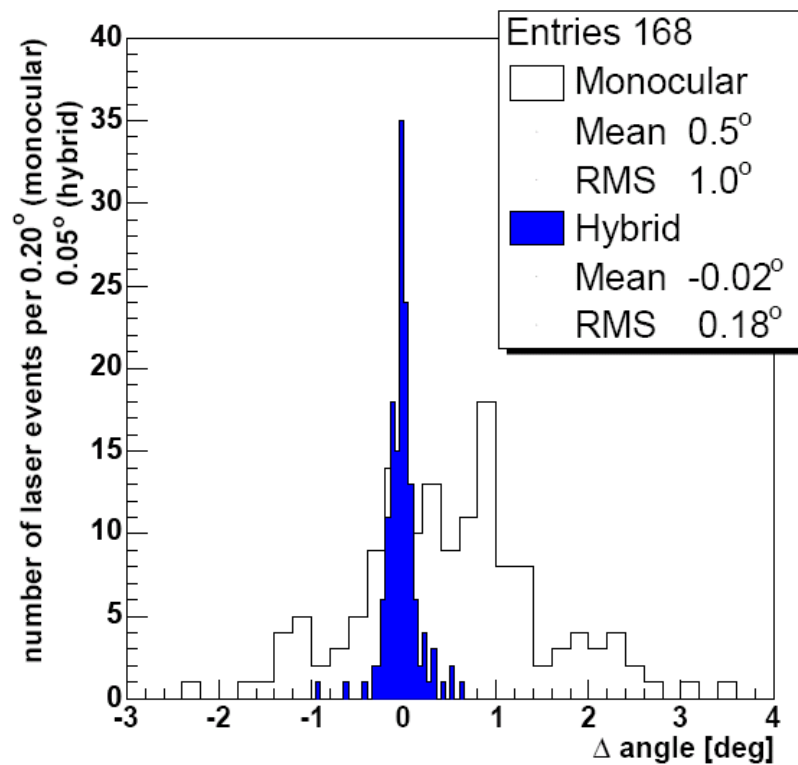


AUGER

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:

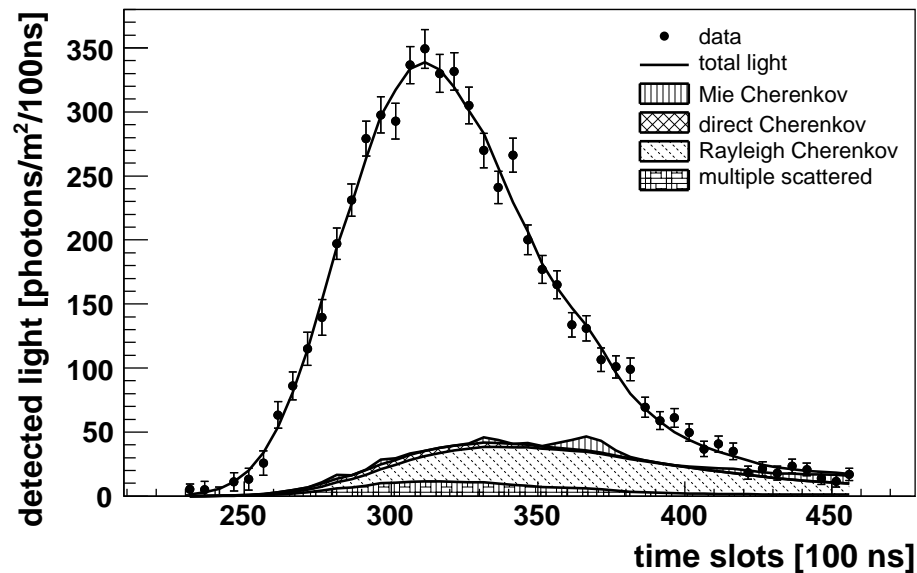


AUGER

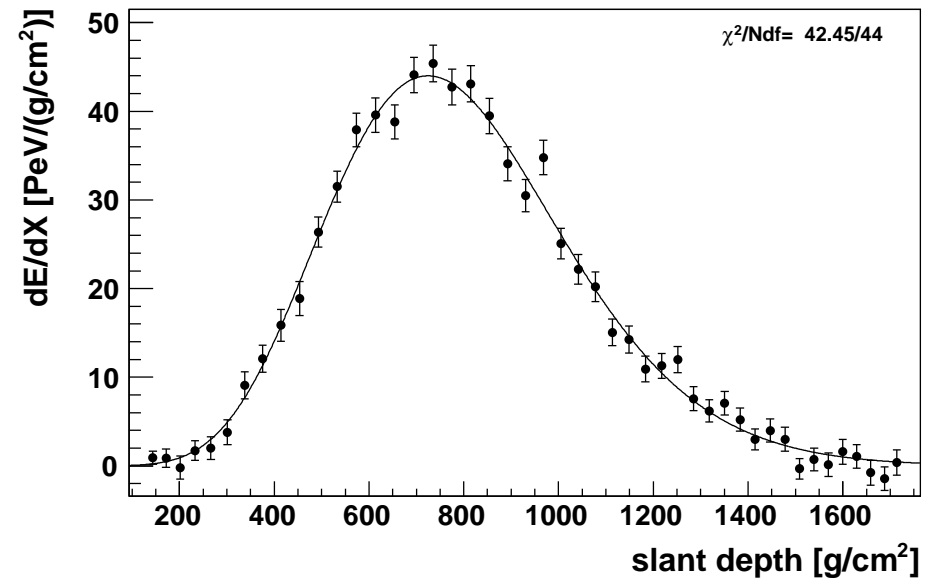
Teleskop fluorescencyjny

Przykład zrekonstruowanego profilu kaskady.

Rozkład czasowy przychodzącego sygnału
(fluorescencja + prom. Czerenkowa)



Dopasowany profil podłużny
(pozycja 2-D + czas)

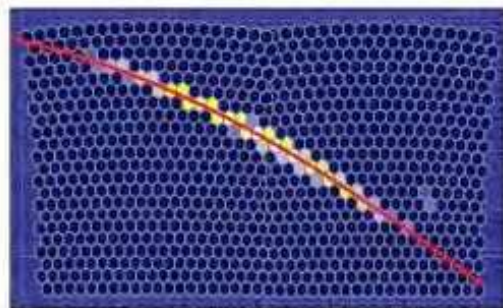
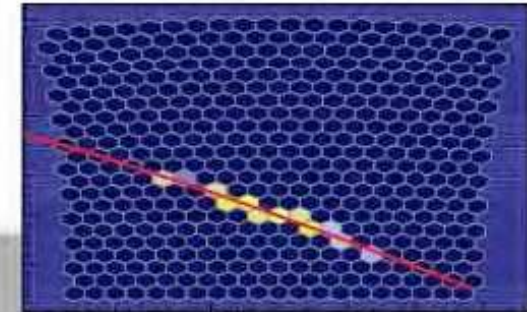


AUGER

Przypadki hybrydowe

Event: 1364365

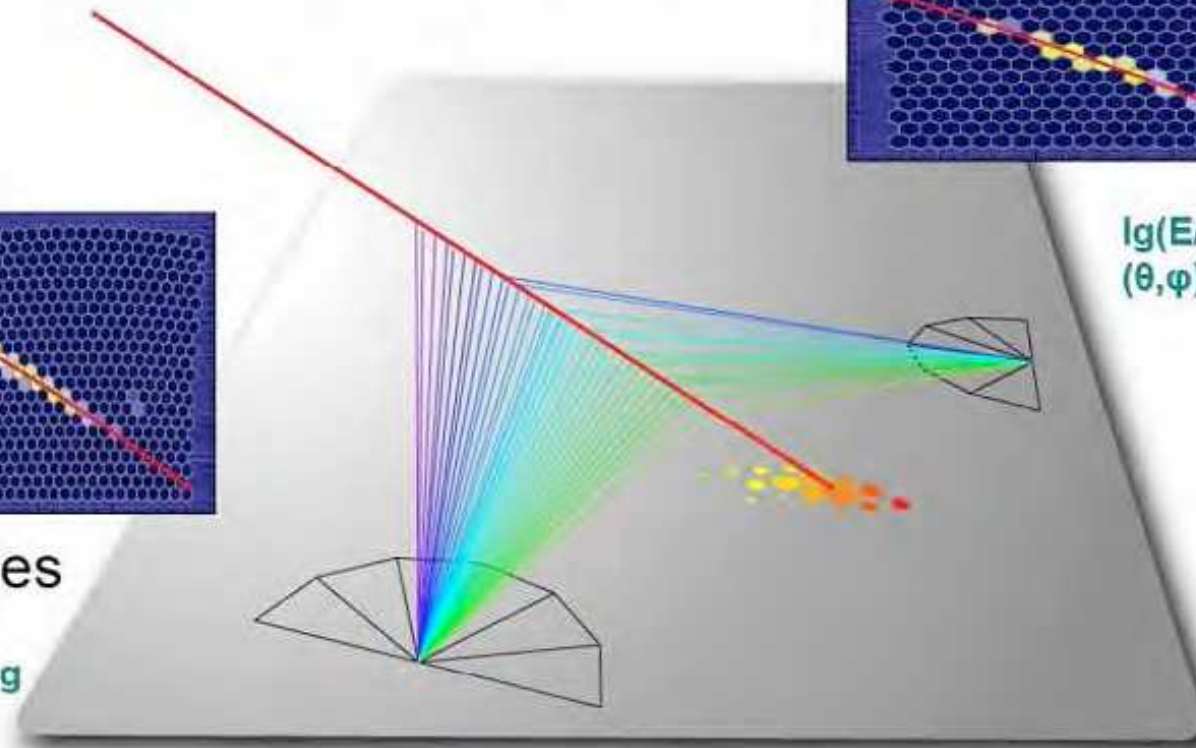
Los Morados



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

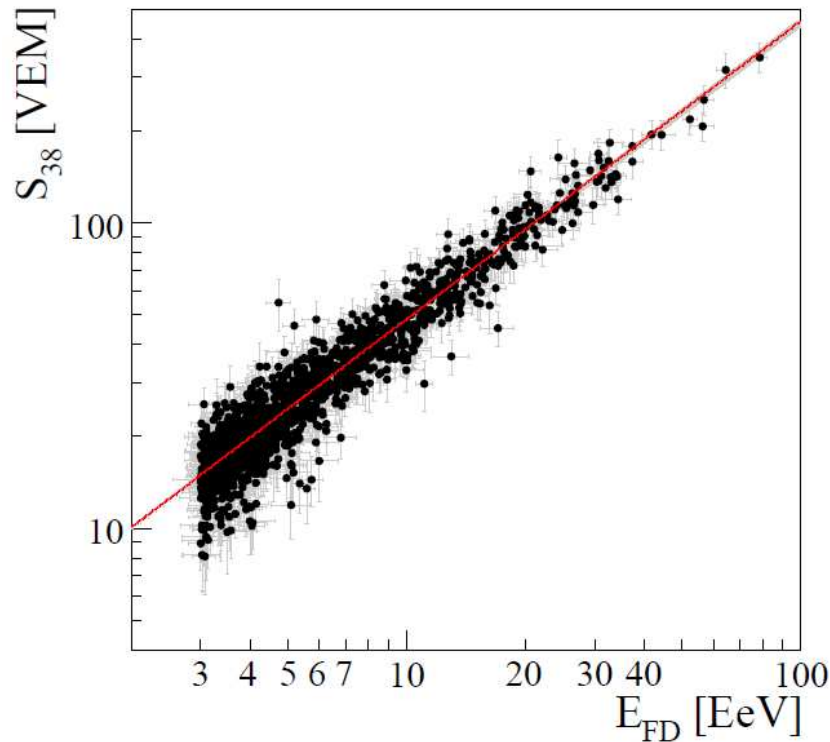
AUGER

Przypadki hybrydowe

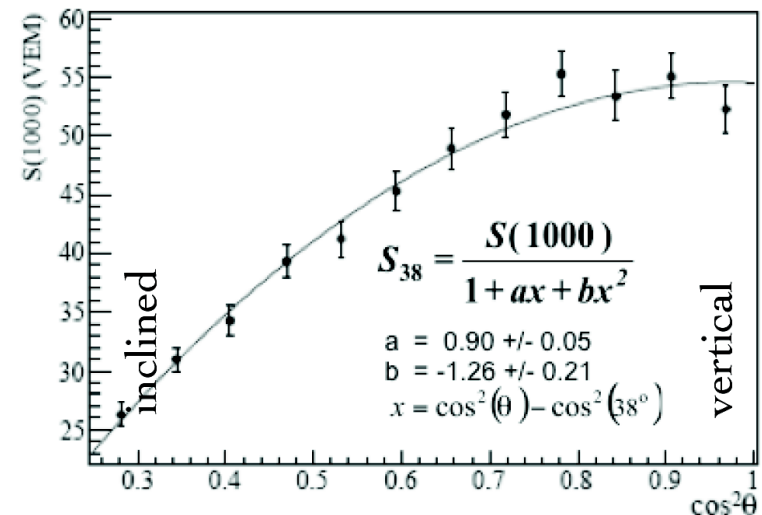
Pomiar energii dwoma metodami - bardzo dobra korelacja:

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 $\theta = 38^\circ$)



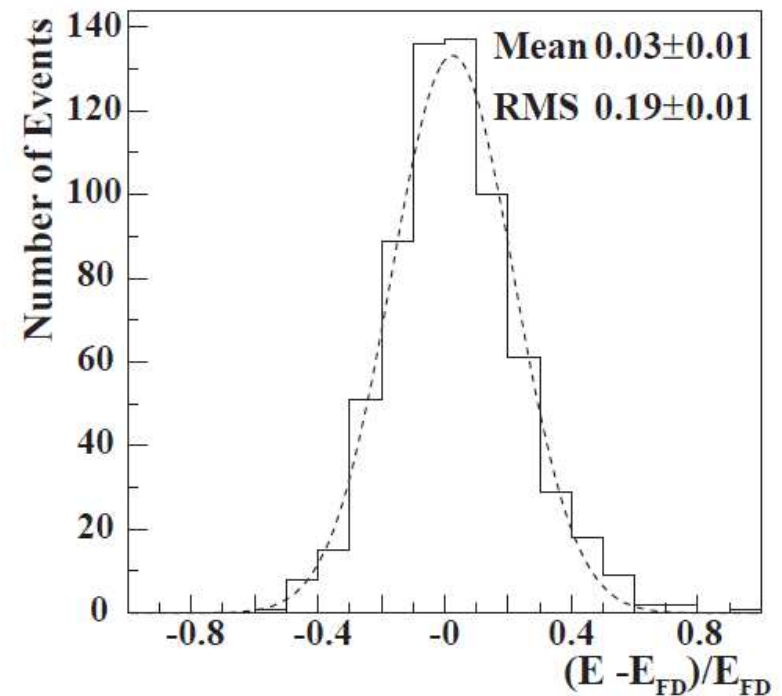
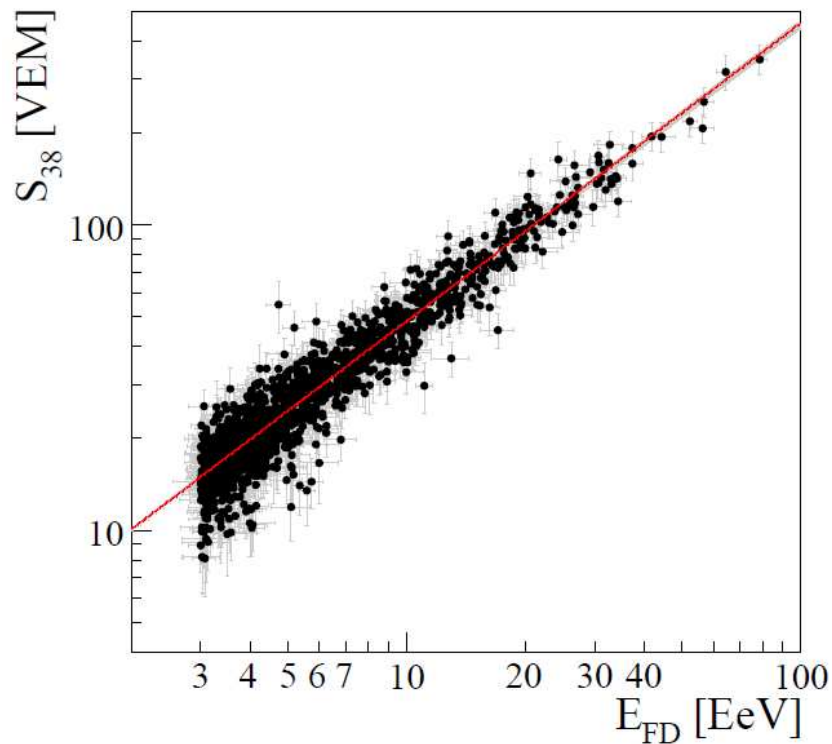
AUGER

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

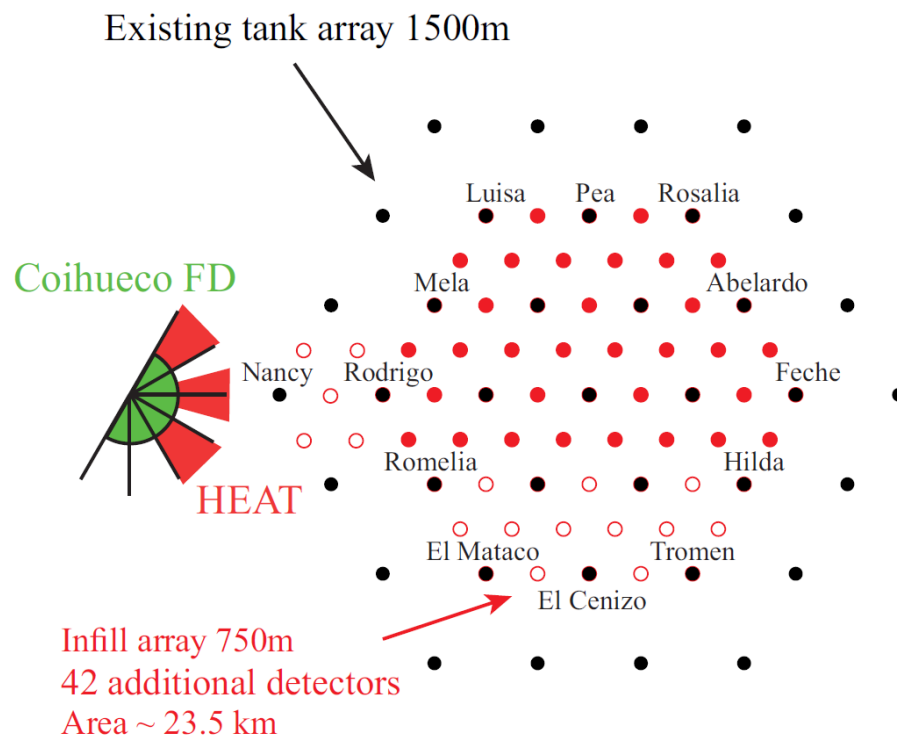


AUGER

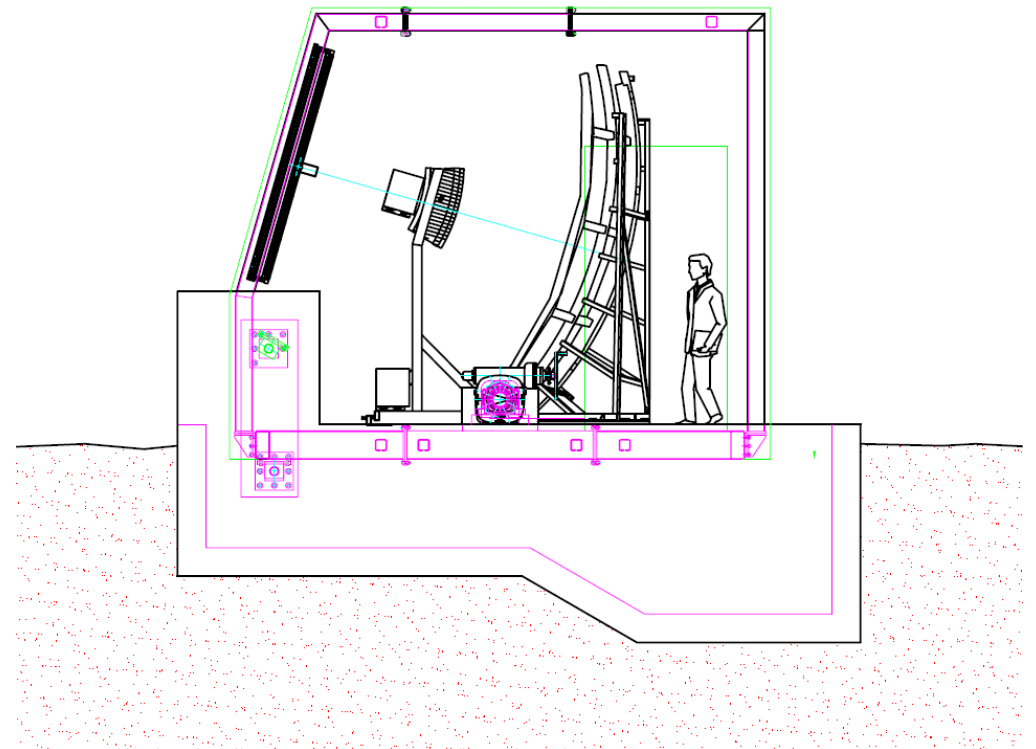
Rozbudowa systemu

Dodatkowe detektory powierzchniowe,
dla obniżenia progu energii

Teleskopy fluorescencyjne pod dużymi kątami
⇒ zwiększenie akceptacji



“zwykły” detektor

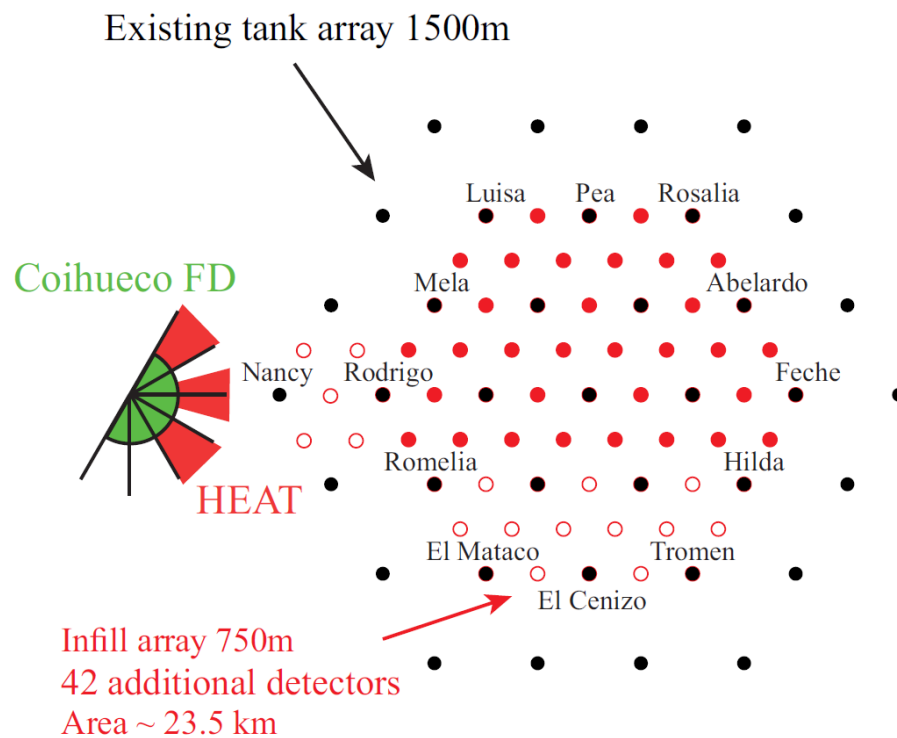


AUGER

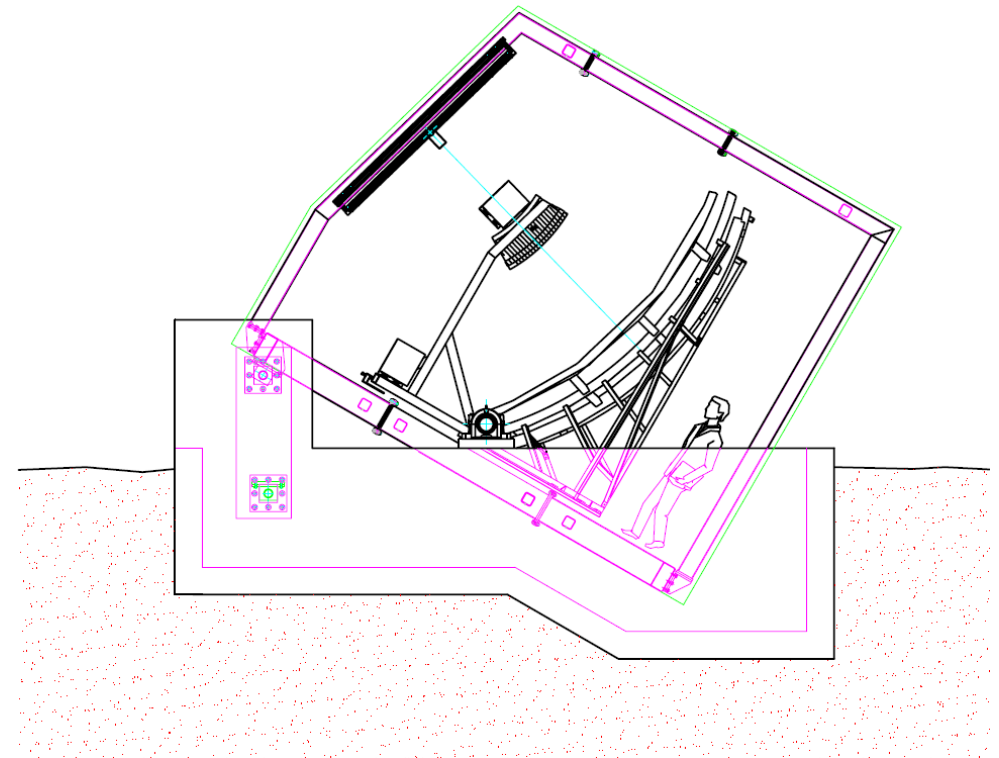
Rozbudowa systemu

Dodatkowe detektory powierzchniowe,
dla obniżenia progu energii

Teleskopy fluorescencyjne pod dużymi kątami
⇒ zwiększenie akceptacji



detektor typu HEAT

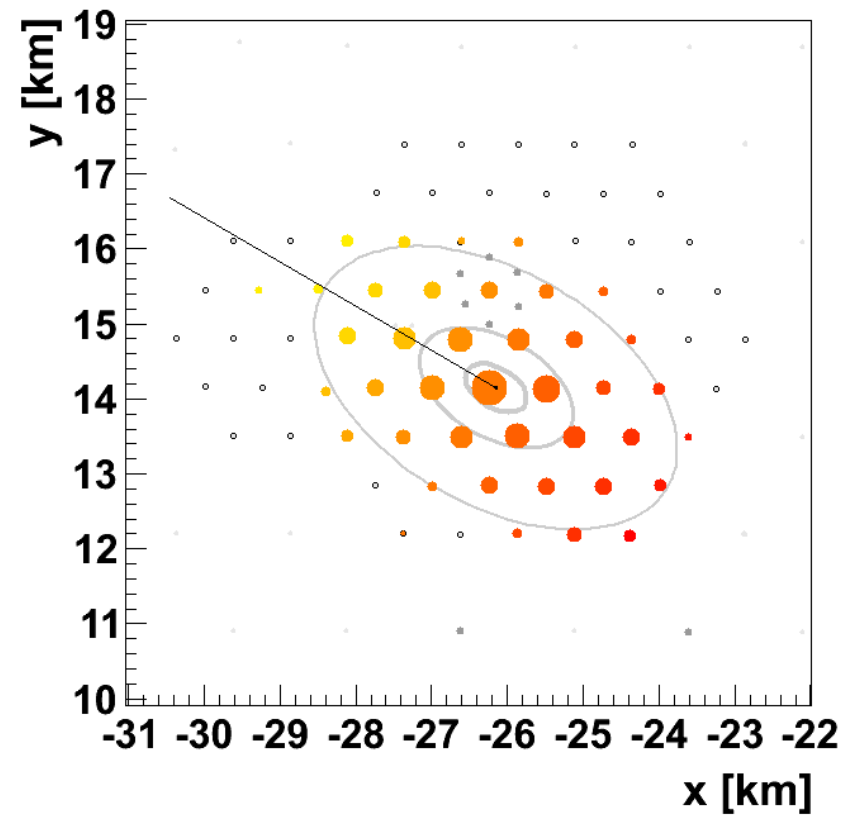
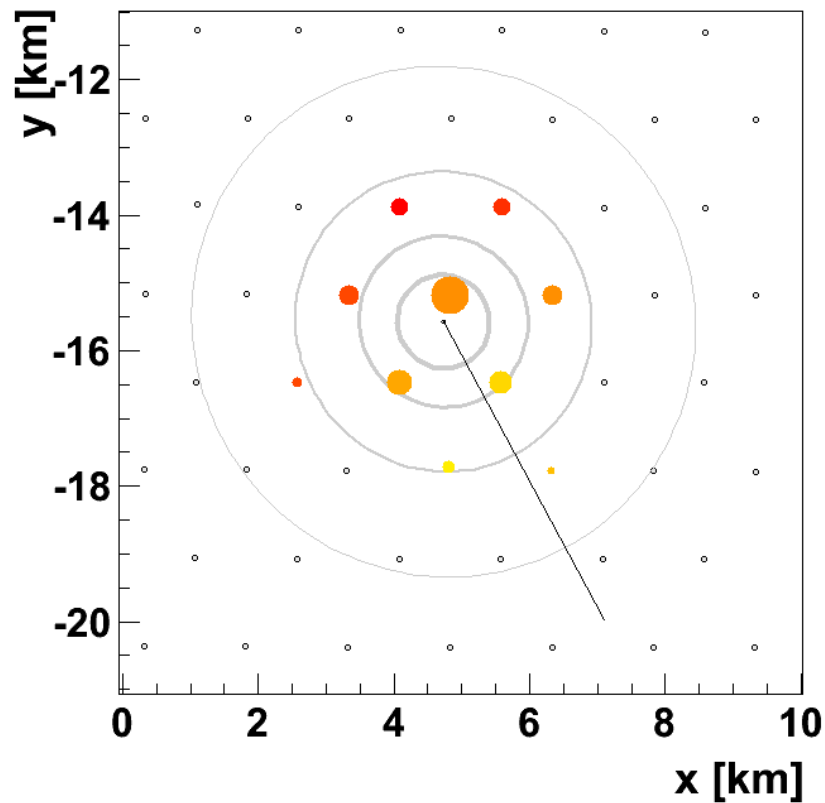


AUGER

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

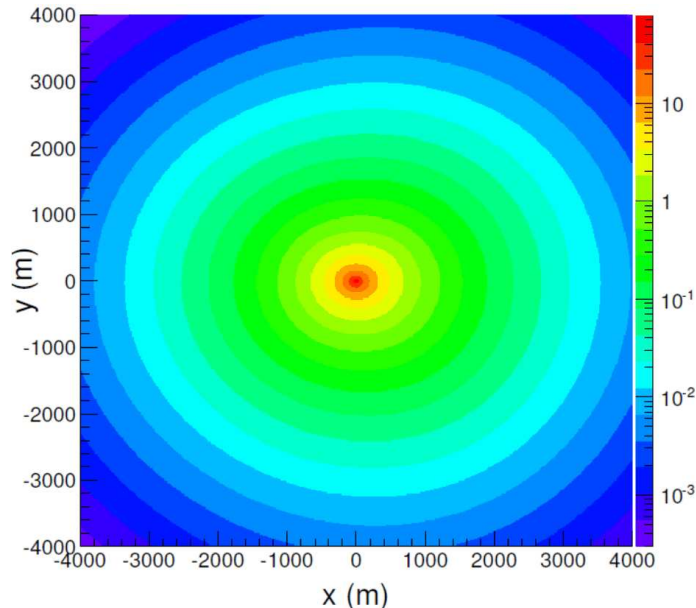
Udało się też opracować metodę dokładnej rekonstrukcji energii dla kaskad najwyższych energii nachylonych pod kątem 60° do 80° do zenitu

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

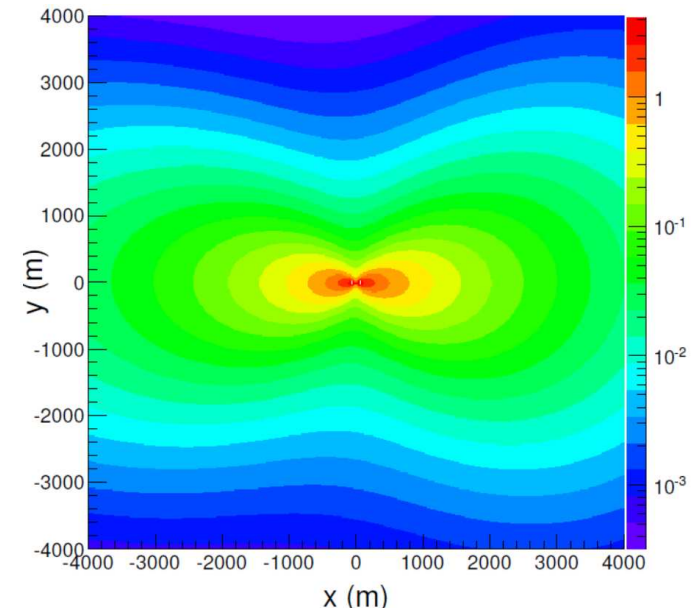
⇒ większe pokrycie sfery niebieskiej (!)

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°

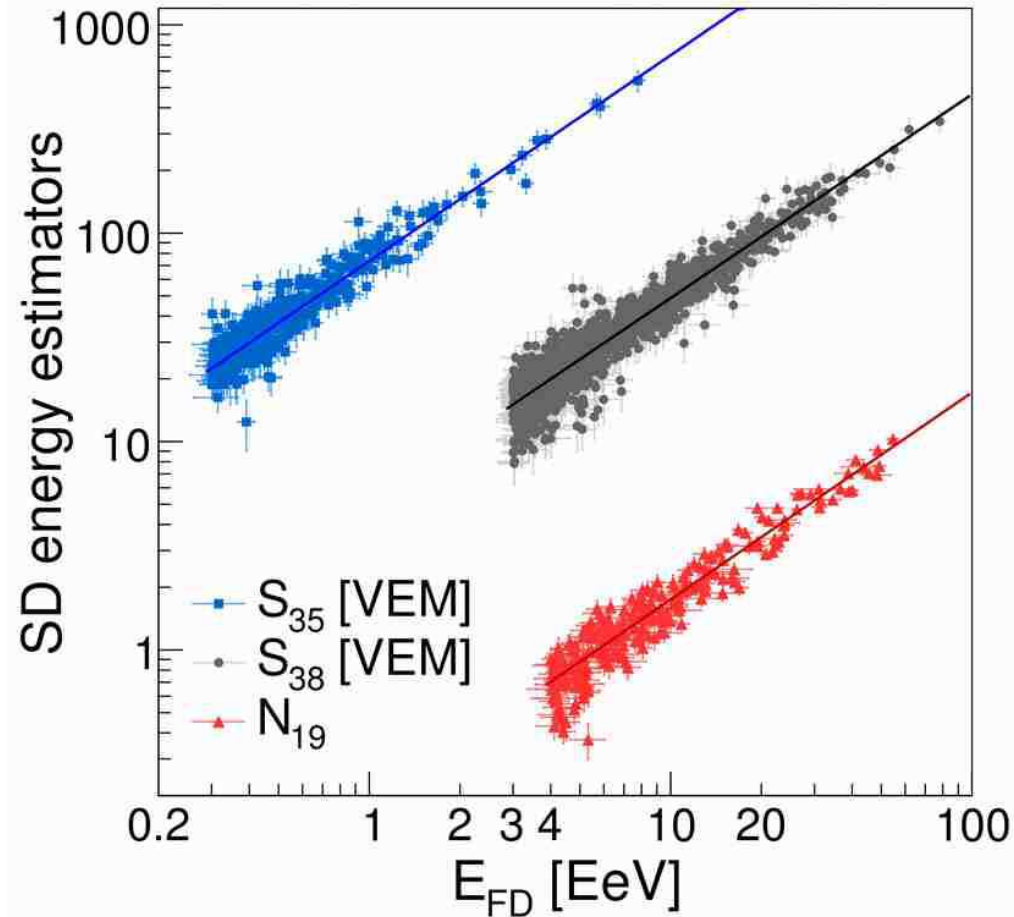
Przypadki pod dużymi kątami ($60^\circ < \theta < 80^\circ$):

- 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

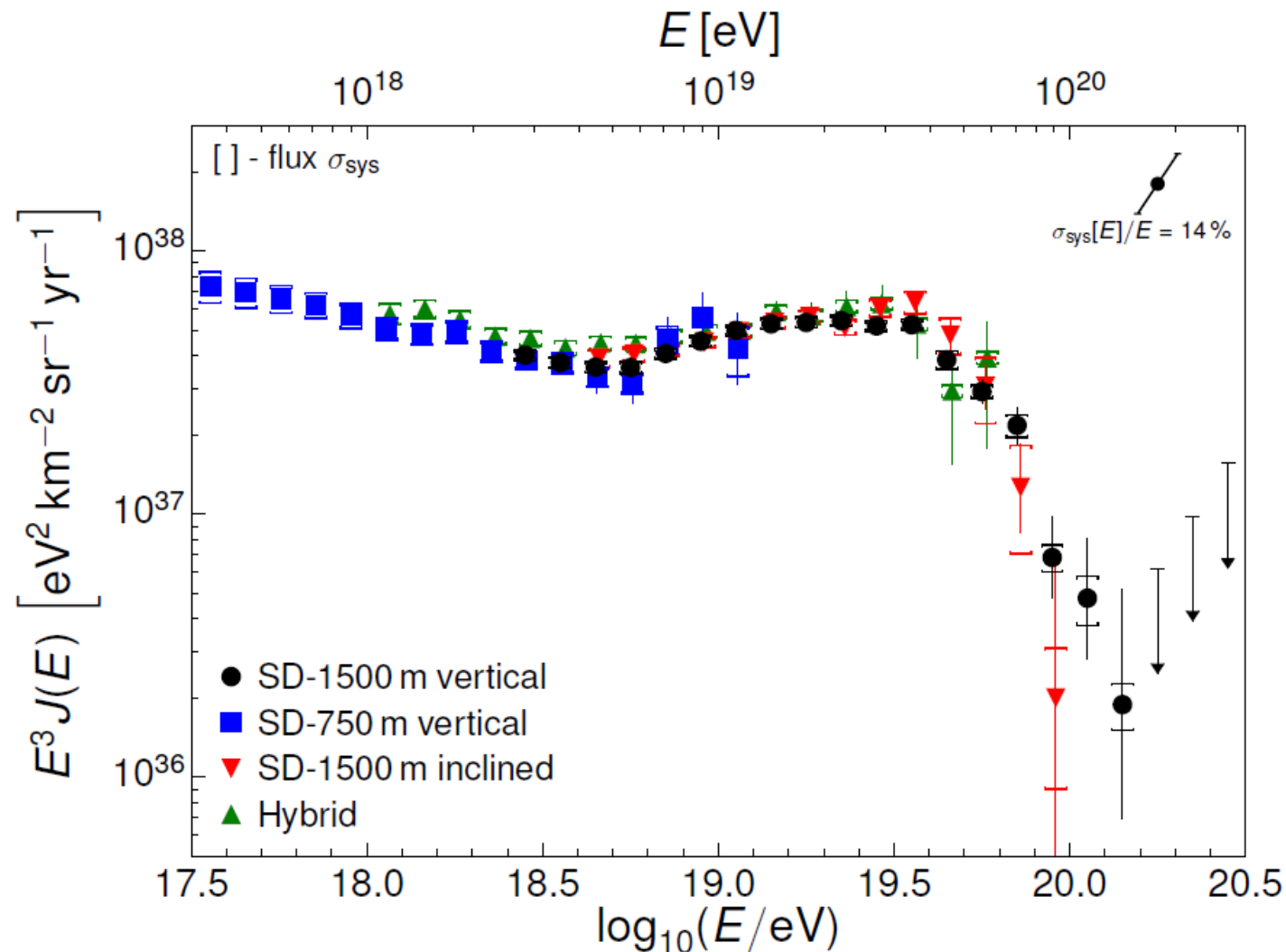


N_{19} - normalizacja nachylonej kaskady do kaskady **protonowej(!)** o $E = 10^{19}$ eV

AUGER

Widmo energii

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

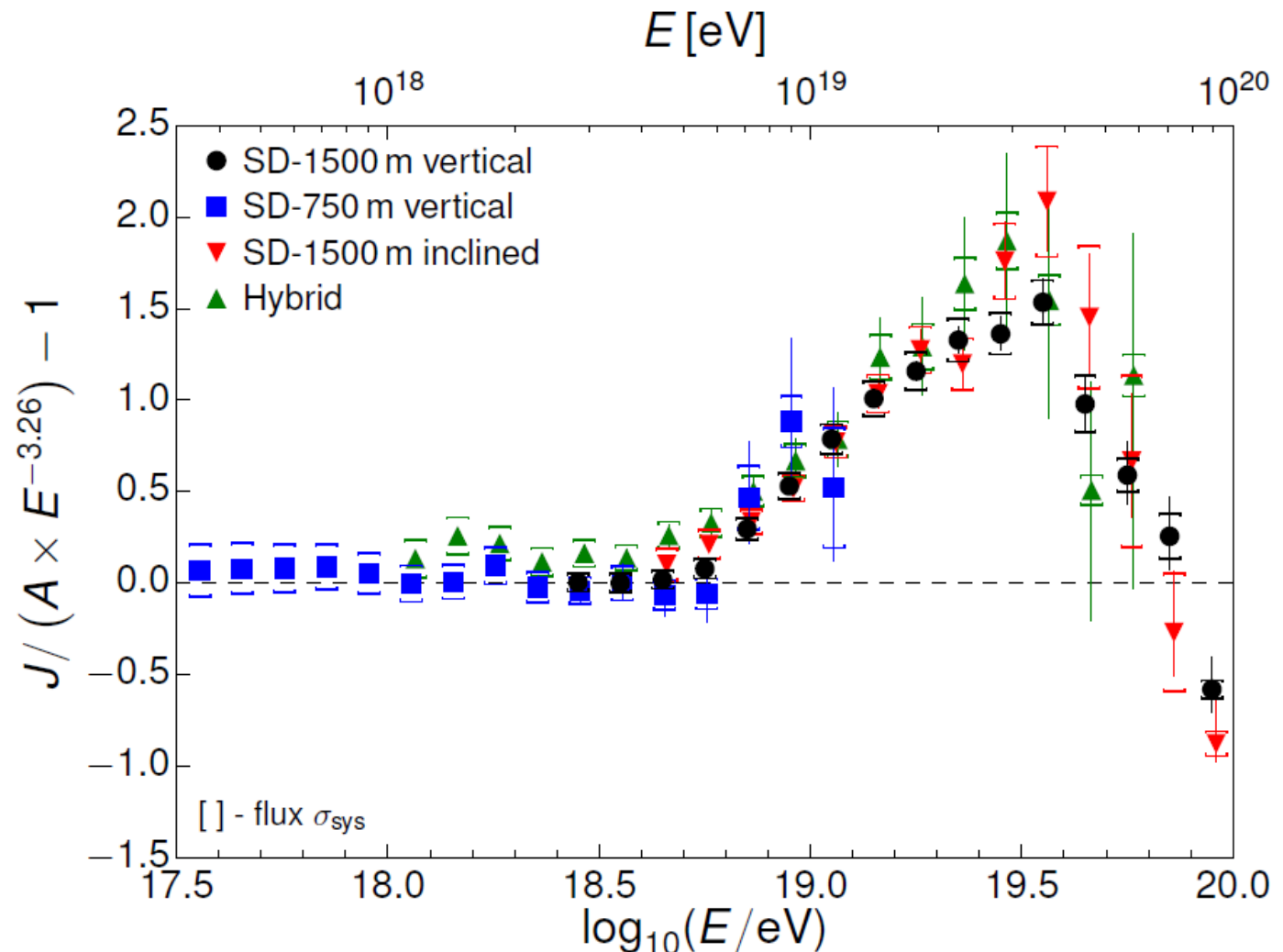


AUGER

Widmo energii

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

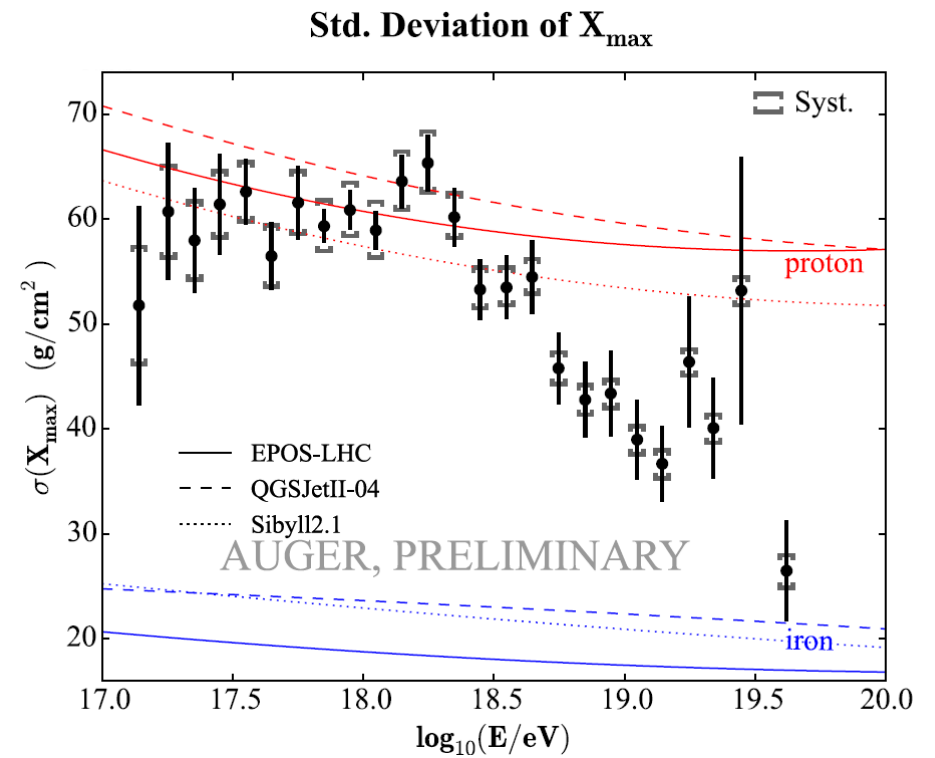
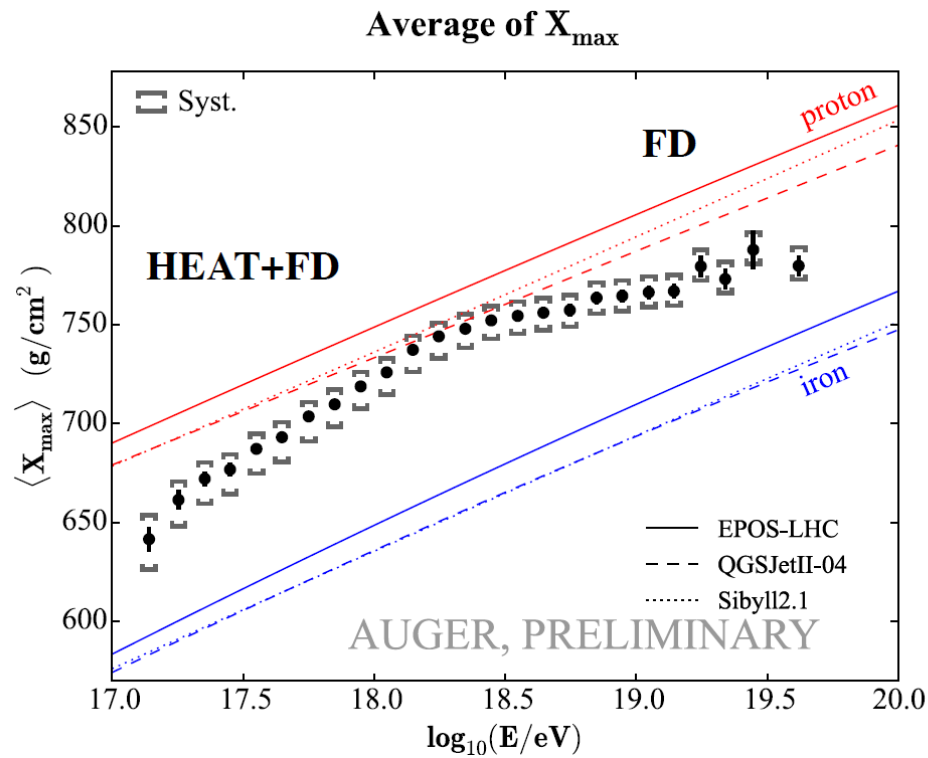
Wyraźne “załamanie” widma przy $4 \cdot 10^{19}$ eV



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

