

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład IX

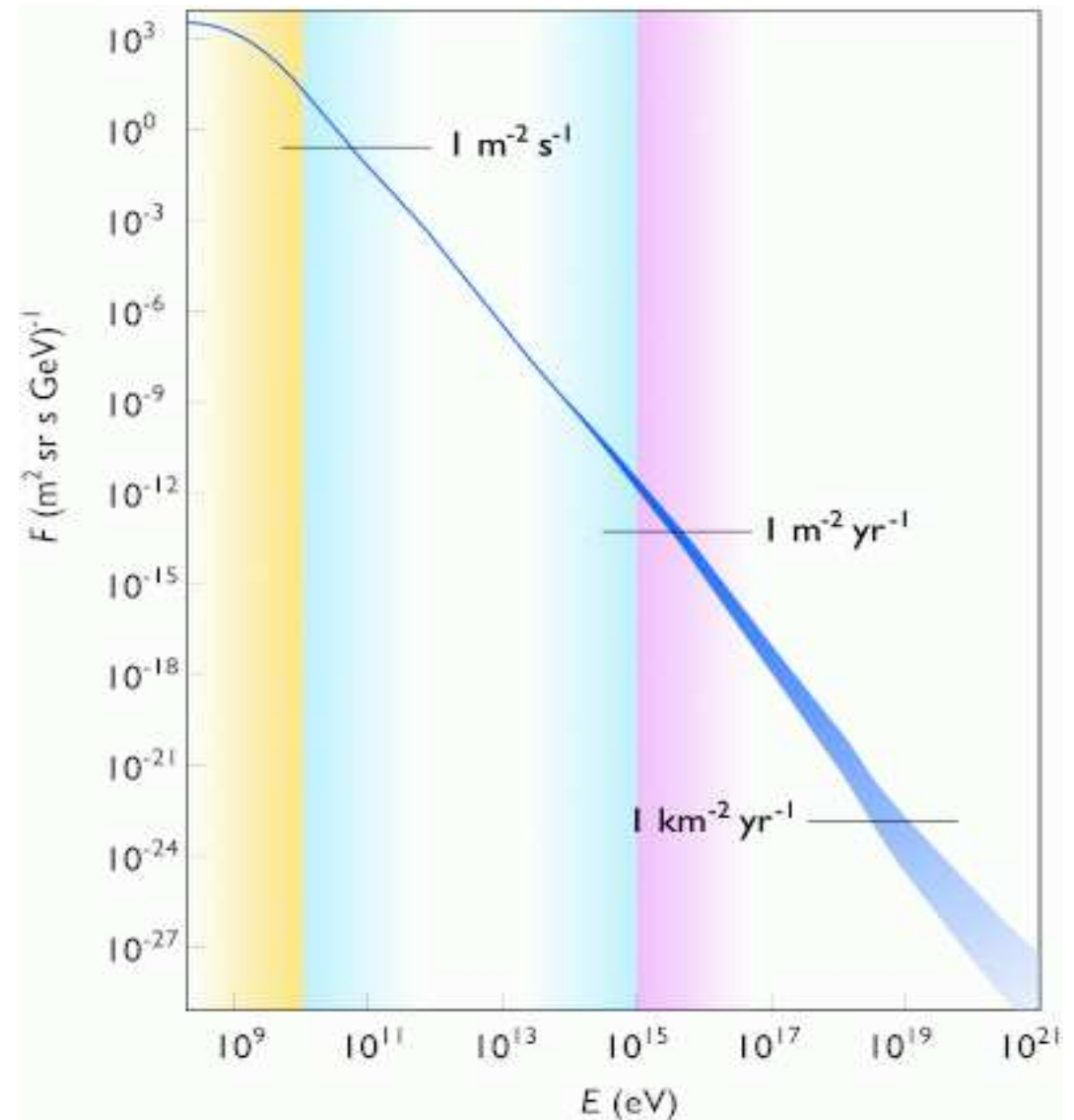
- Wielkie pęki atmosferyczne
- Eksperyment KASKADE
- Eksperyment TUNKA

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

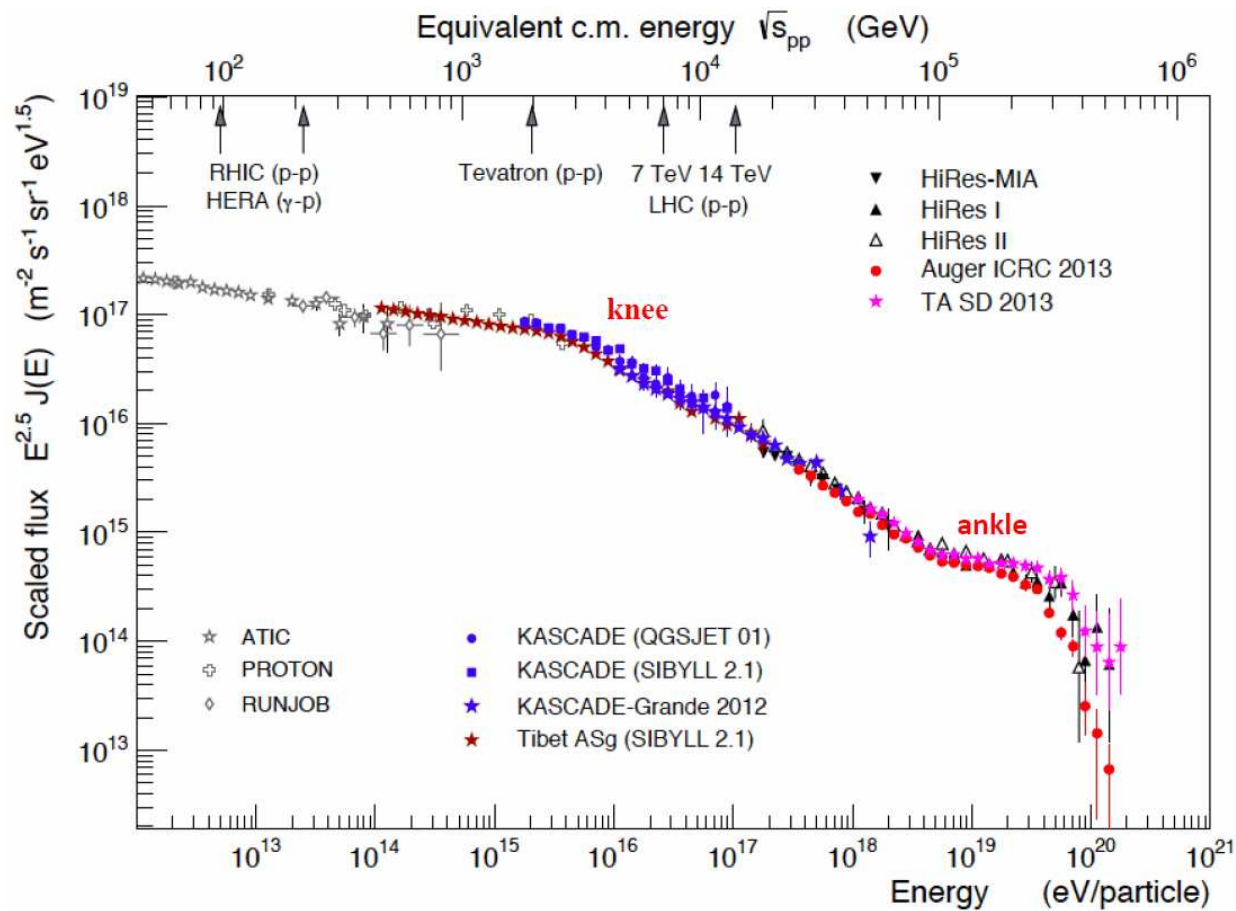


Promieniowanie kosmiczne

Widmo

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

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



Promieniowanie kosmiczne

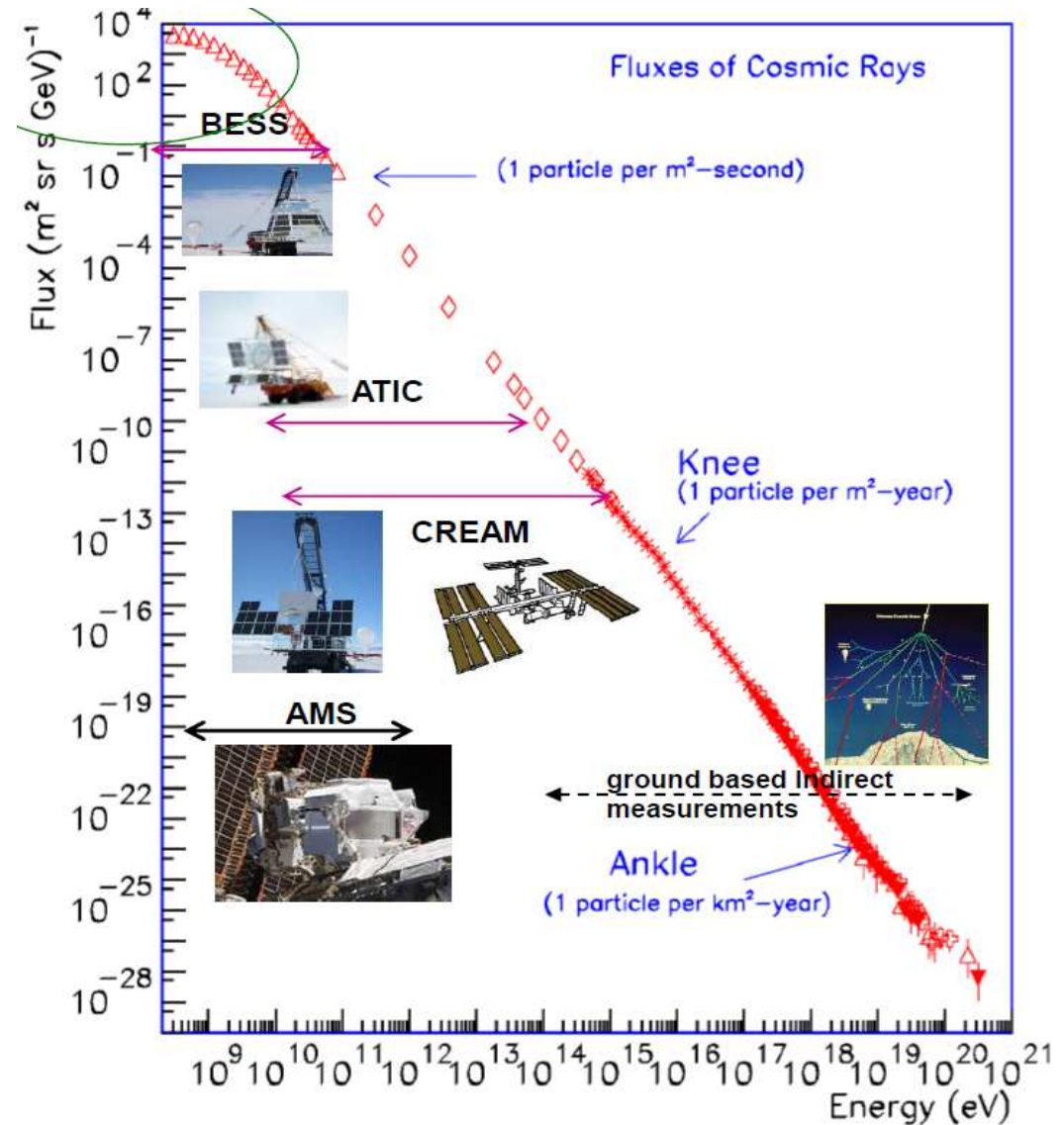
Pomiar bezpośredni

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

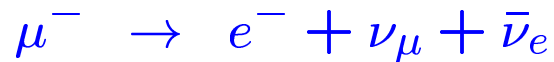
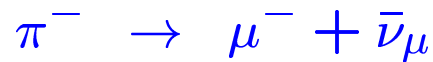
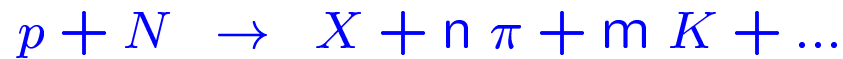
⇒ możliwa jedynie detekcja pośrednia na powierzchni Ziemi



Promieniowanie kosmiczne

Wtórne promieniowanie kosmiczne

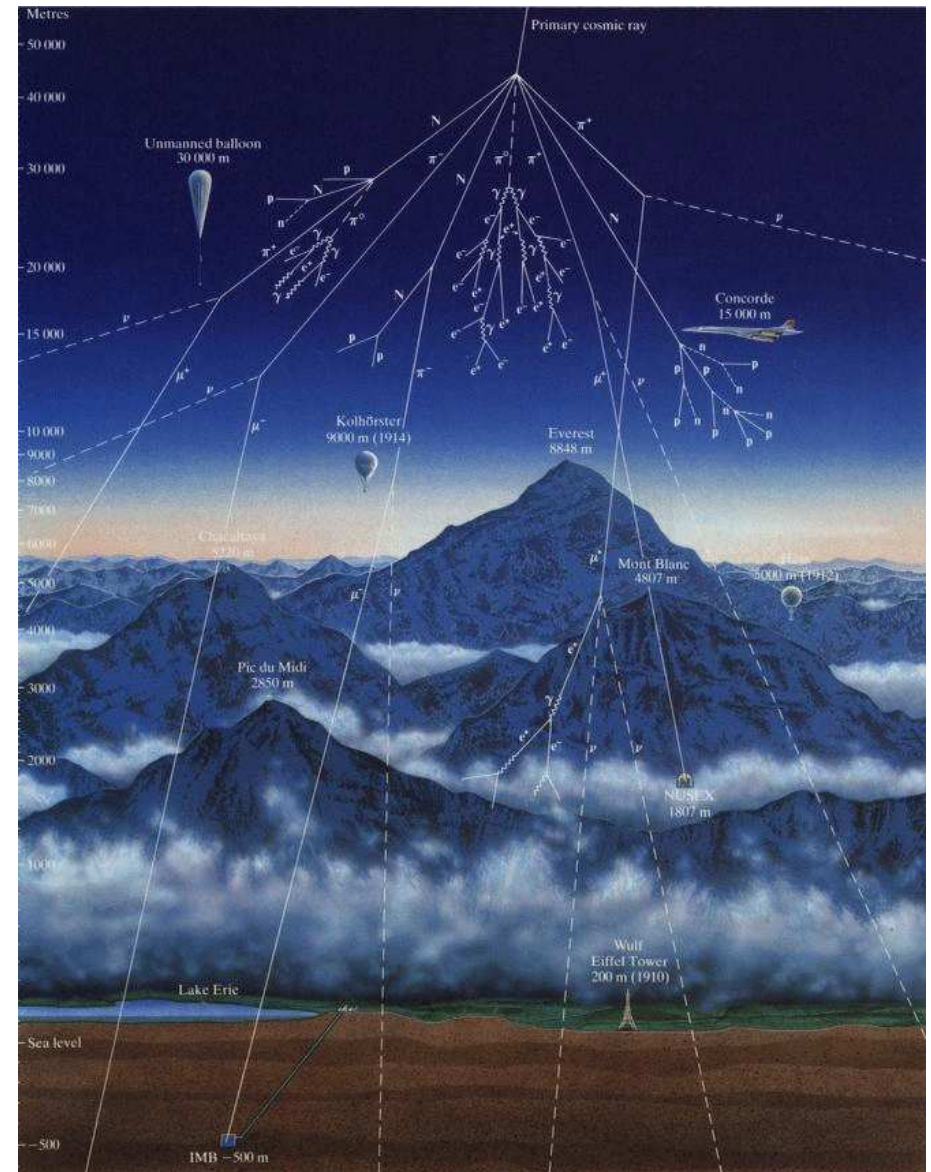
Promieniowanie pierwotne oddziałuje w atmosferze Ziemi. Produkowane są liczne cząstki wtórne, głównie **piony** i **kaony**:



Docierają do powierzchni Ziemi

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

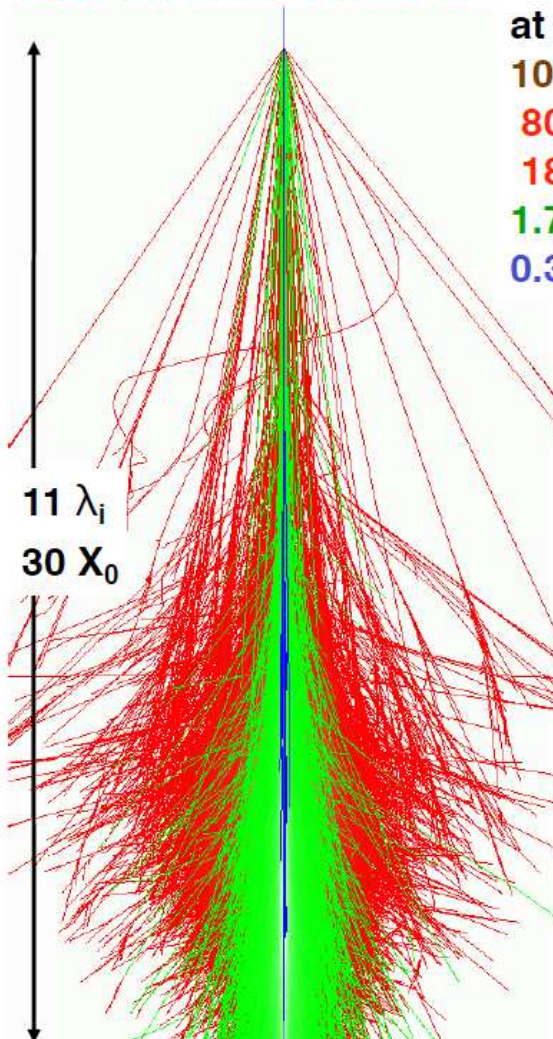
Łącznie rzędu 180 na $m^2 \cdot s$
większość w zakresie energii rzędu GeV



Promieniowanie kosmiczne

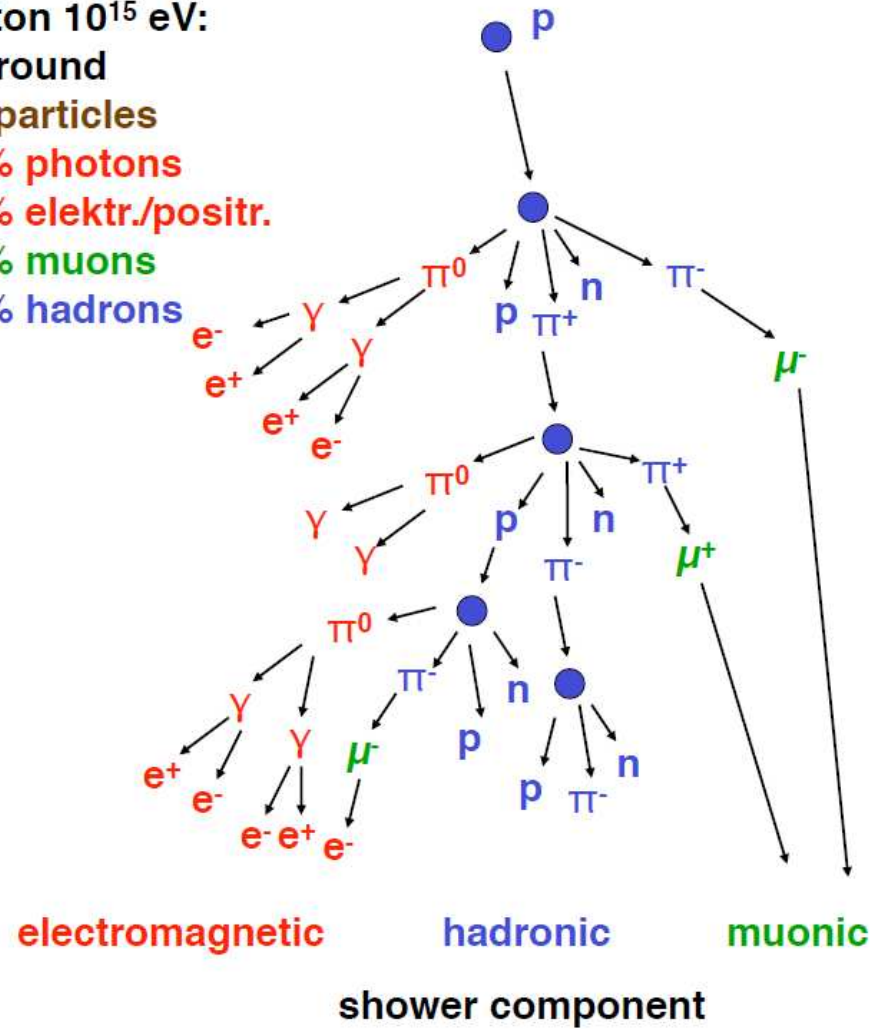
Wielkie pęki atmosferyczne

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

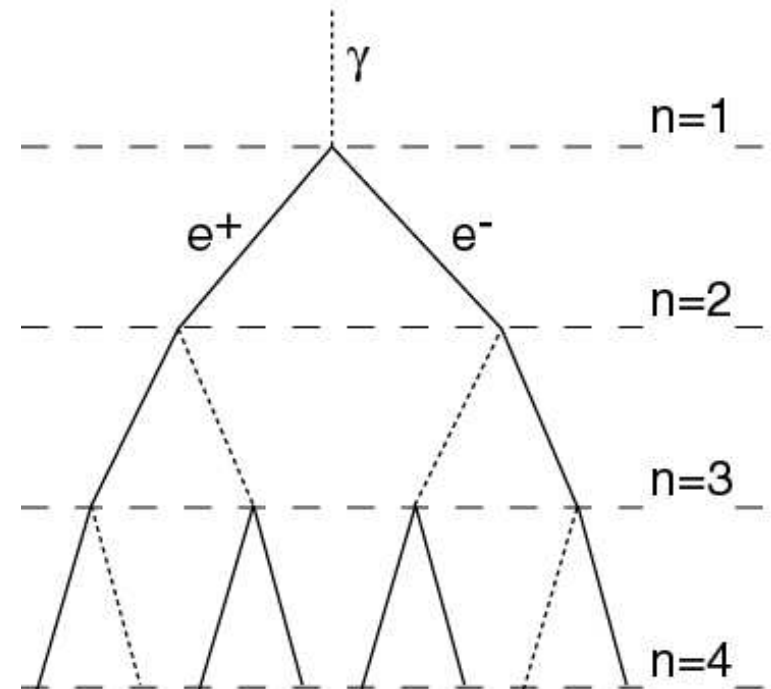
Rozwój kaskady kończy się gdy energia cząstek spada do poziomu energii krytycznej $E_c = 85 \text{ MeV}$

Liczba cząstek w maksimum kaskady:

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

Pozycja maksimum:

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

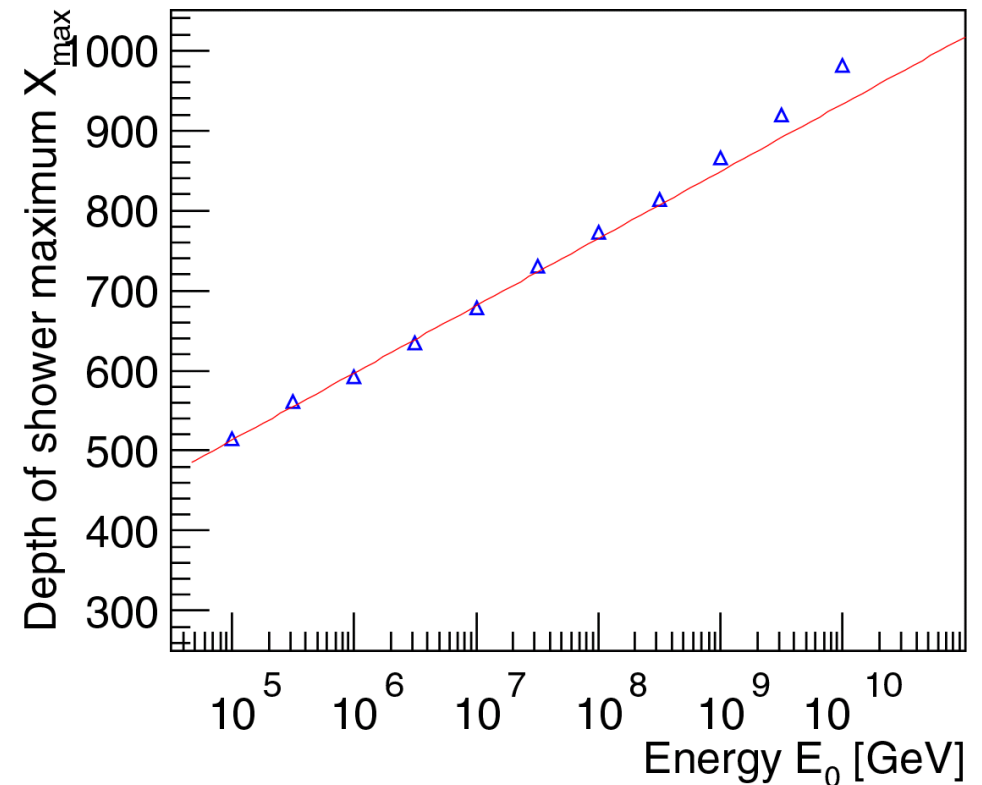
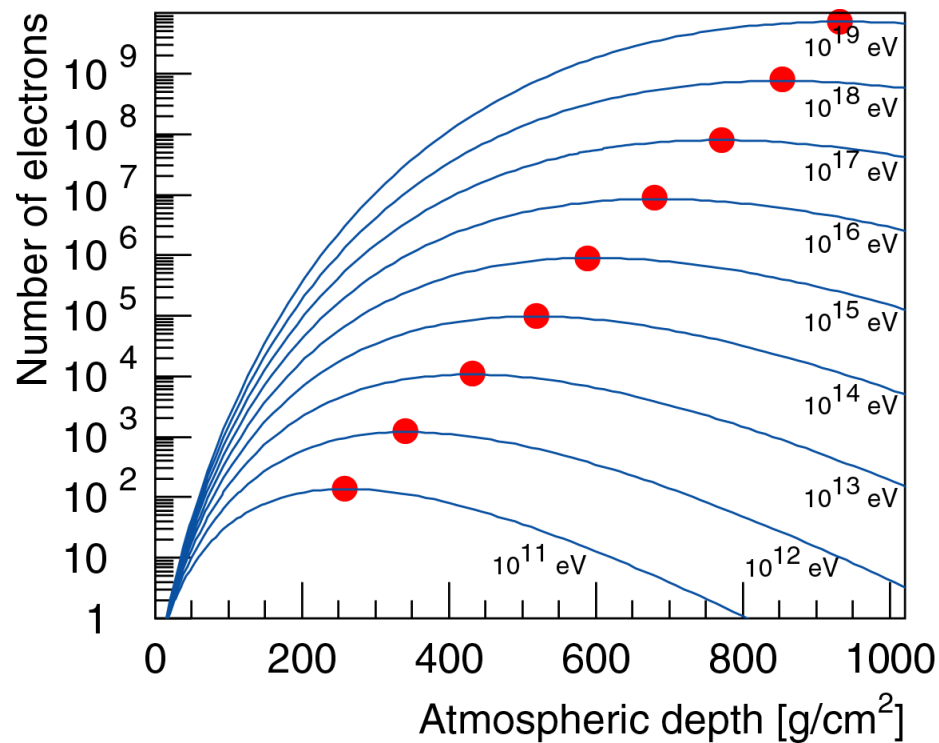


Wielkie pęki atmosferyczne

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

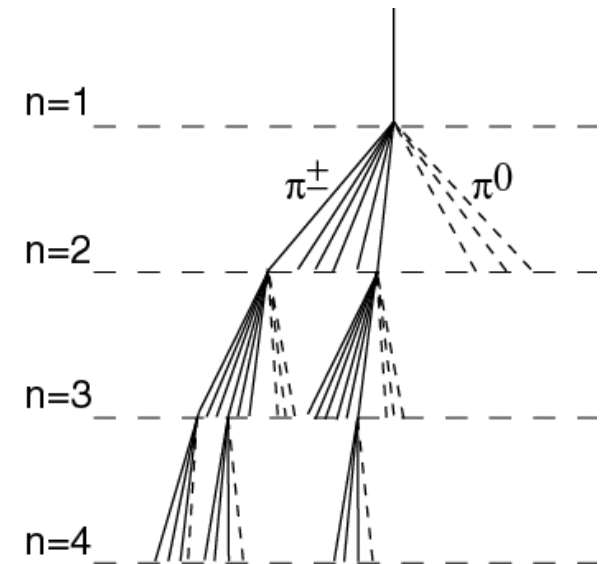
Energia krytyczna $E_c^\pi \sim 20 \text{ GeV}$

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



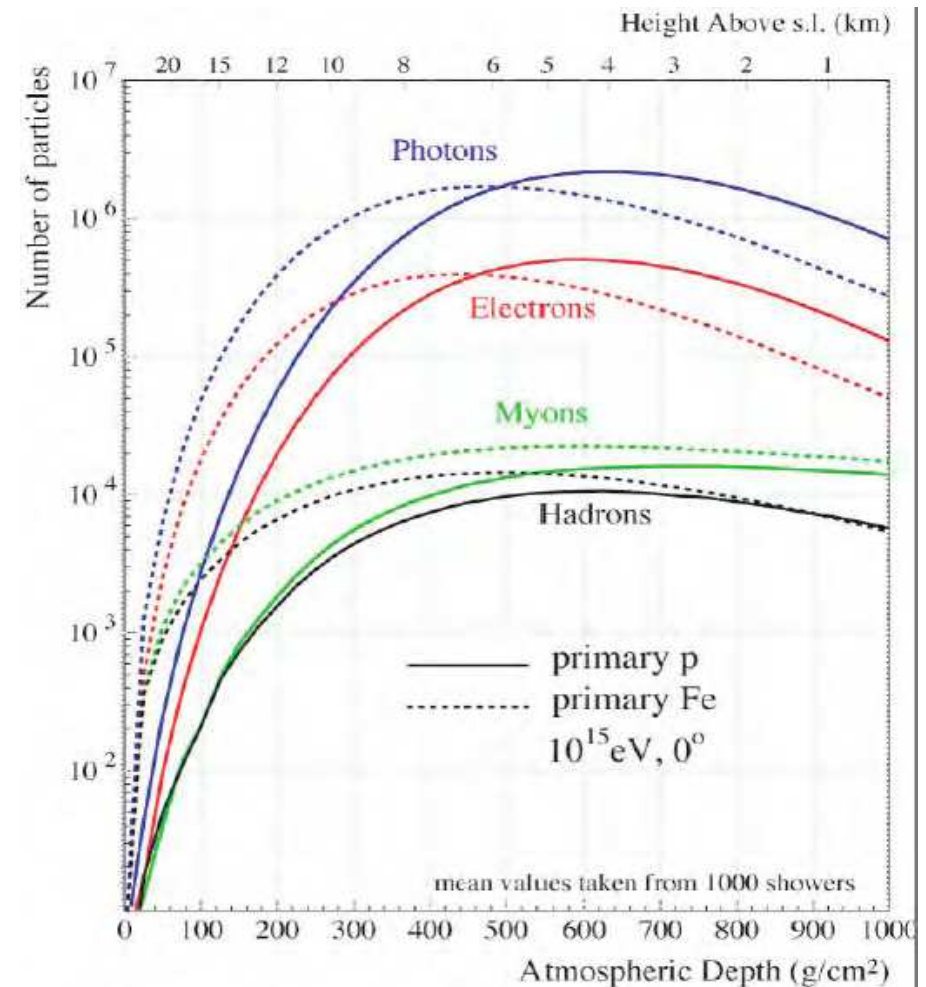
Wielkie pęki atmosferyczne

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



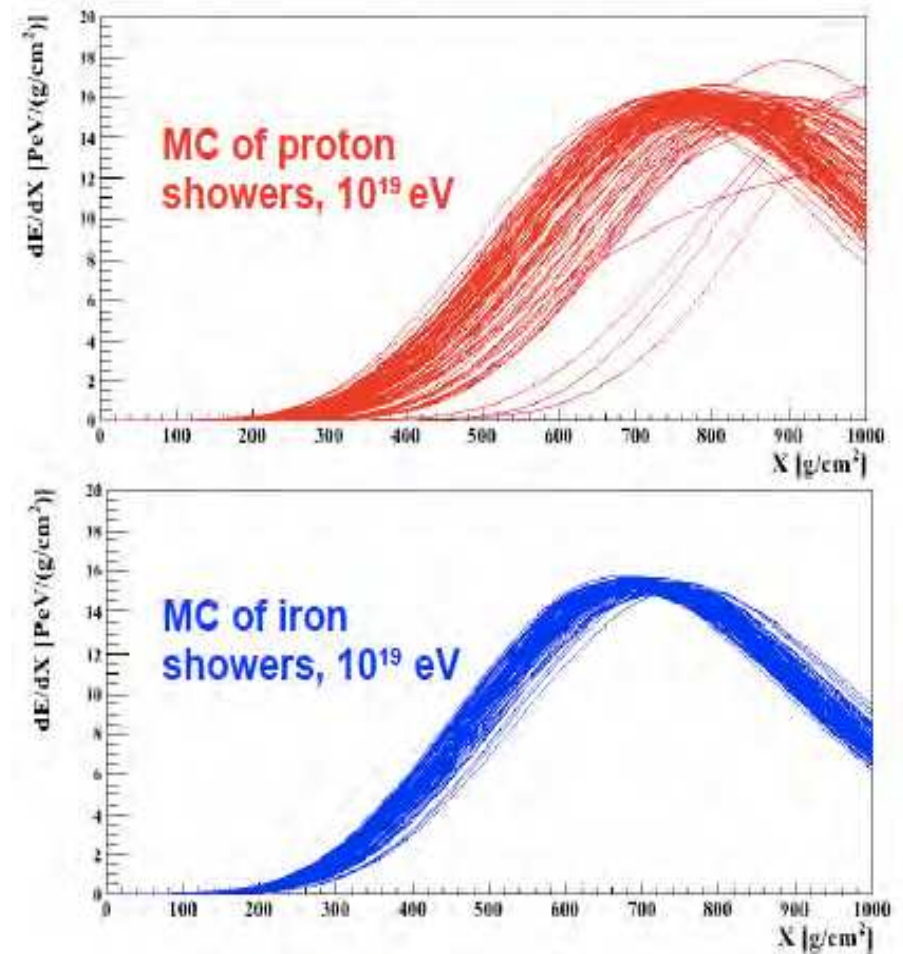
Wielkie pęki atmosferyczne

Profil podłużny

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



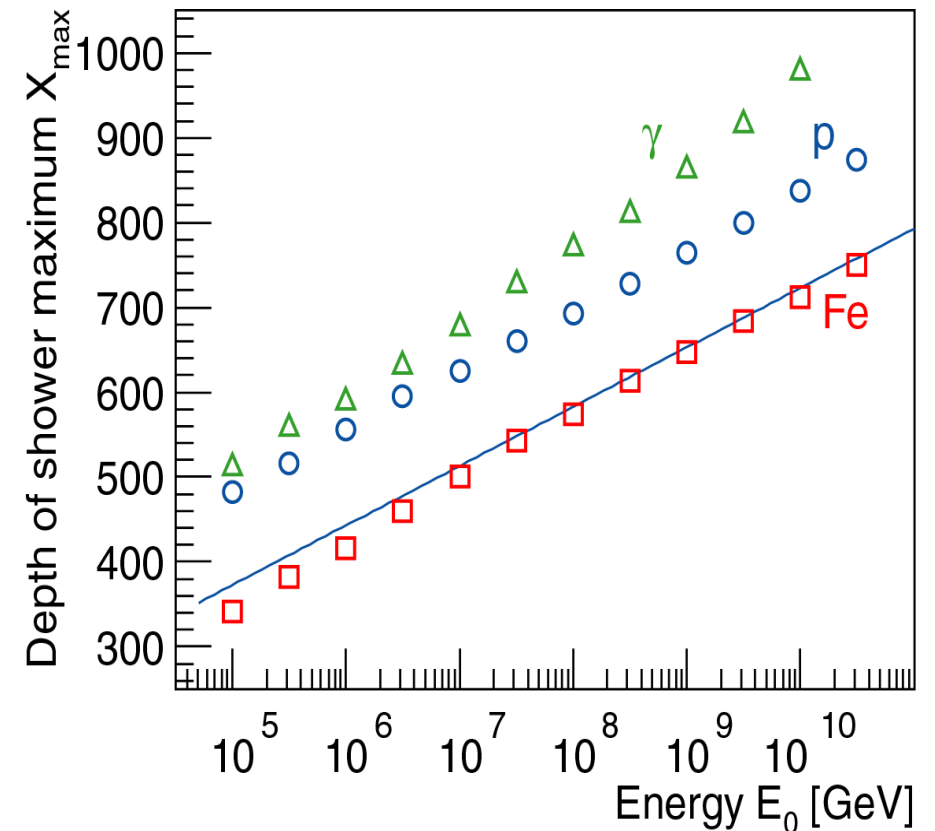
Wielkie pęki atmosferyczne

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

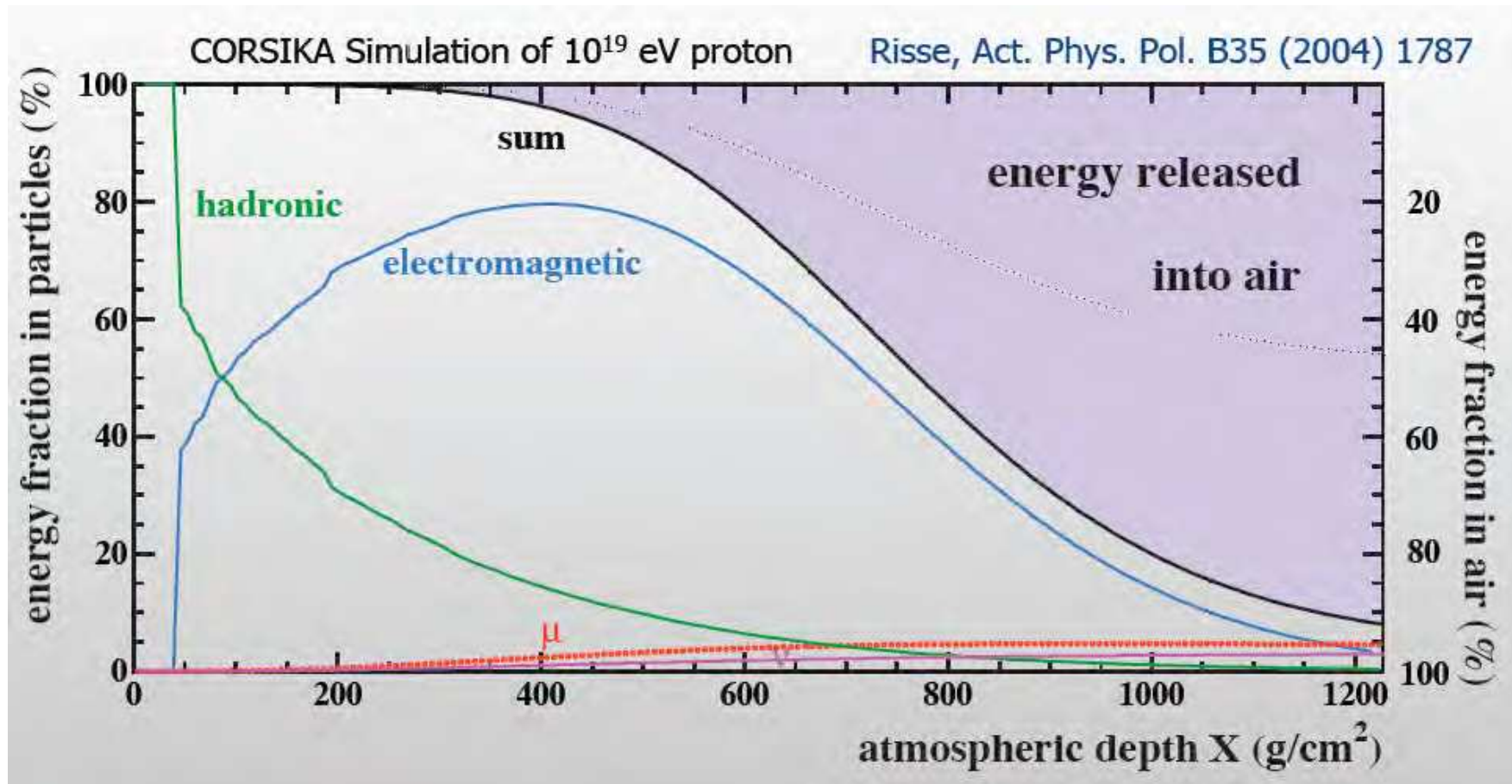
⇒ jedno z głównych kryteriów oceny składu promieniowania



Wielkie pęki atmosferyczne

Profil podłużny

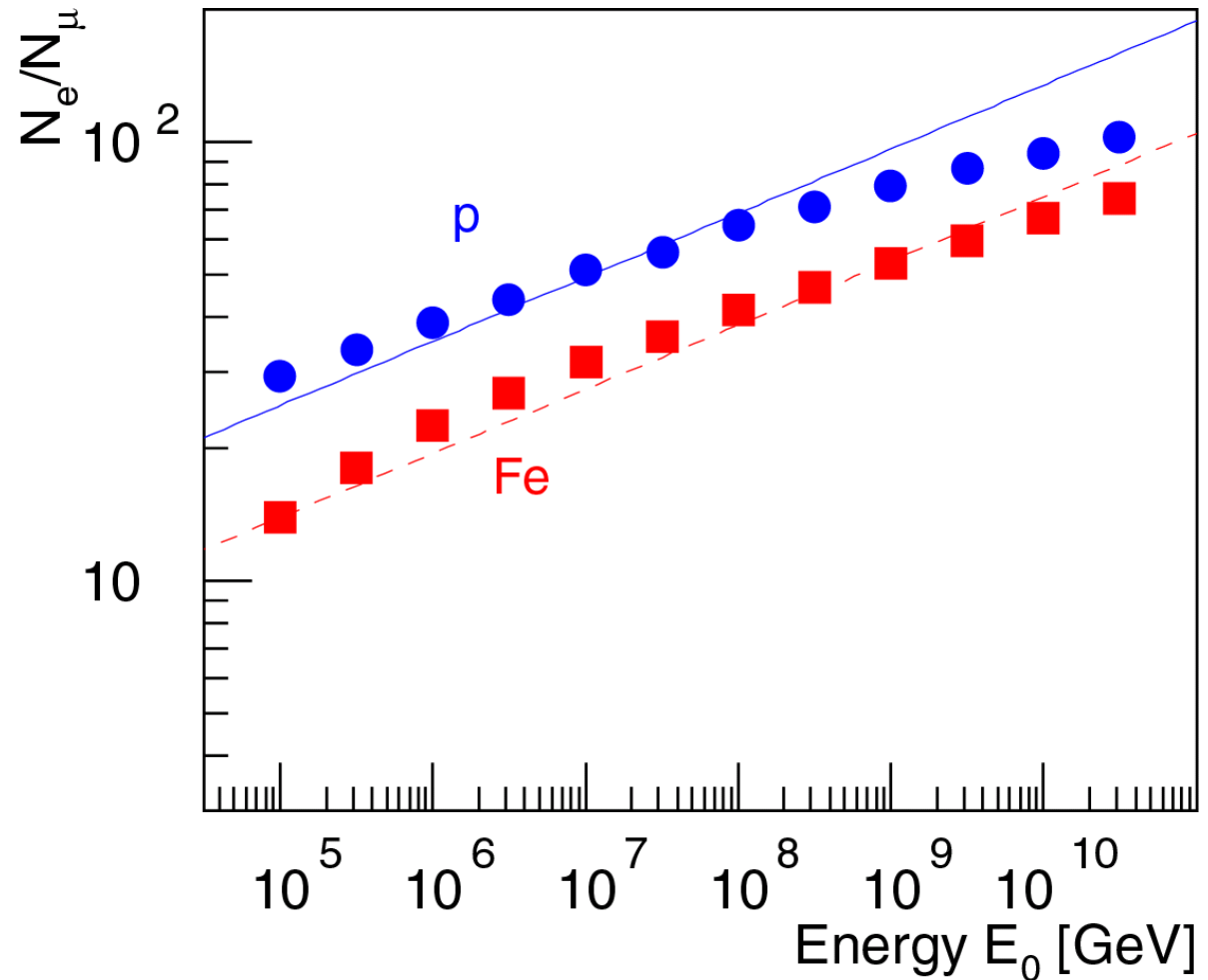
Przy powierzchni Ziemi przeważają miony i elektrony



Wielkie pęki atmosferyczne

Profil podłużny

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



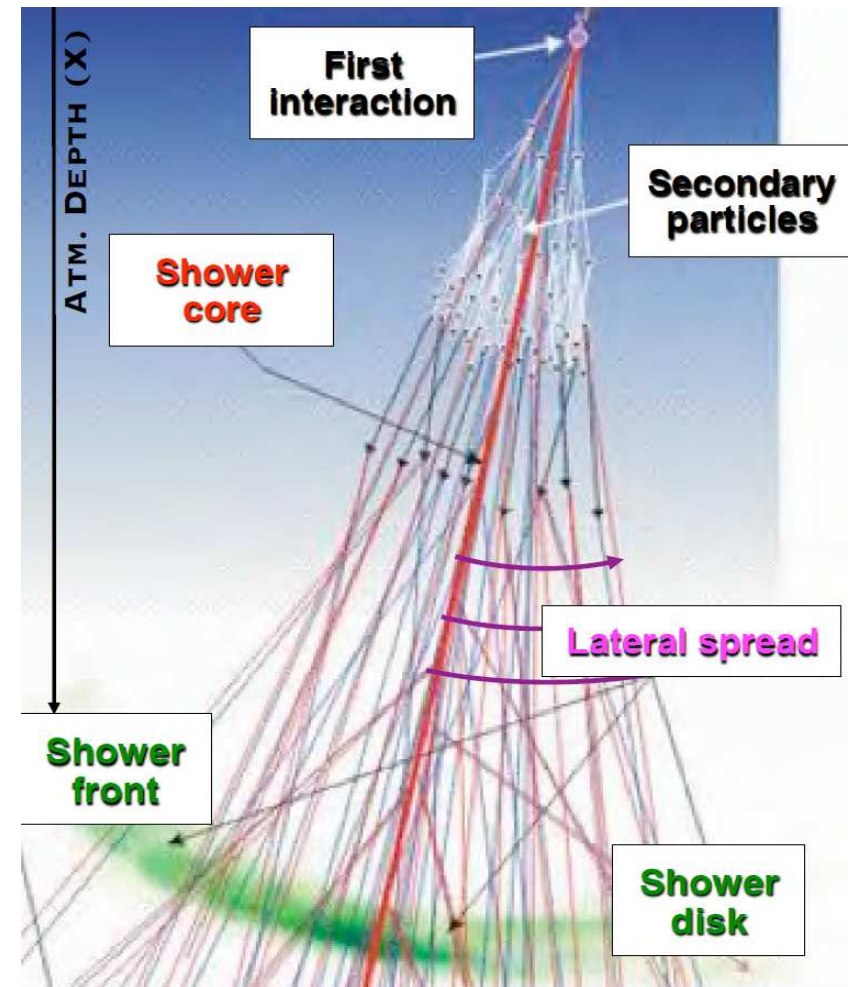
Wielkie pęki atmosferyczne

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.

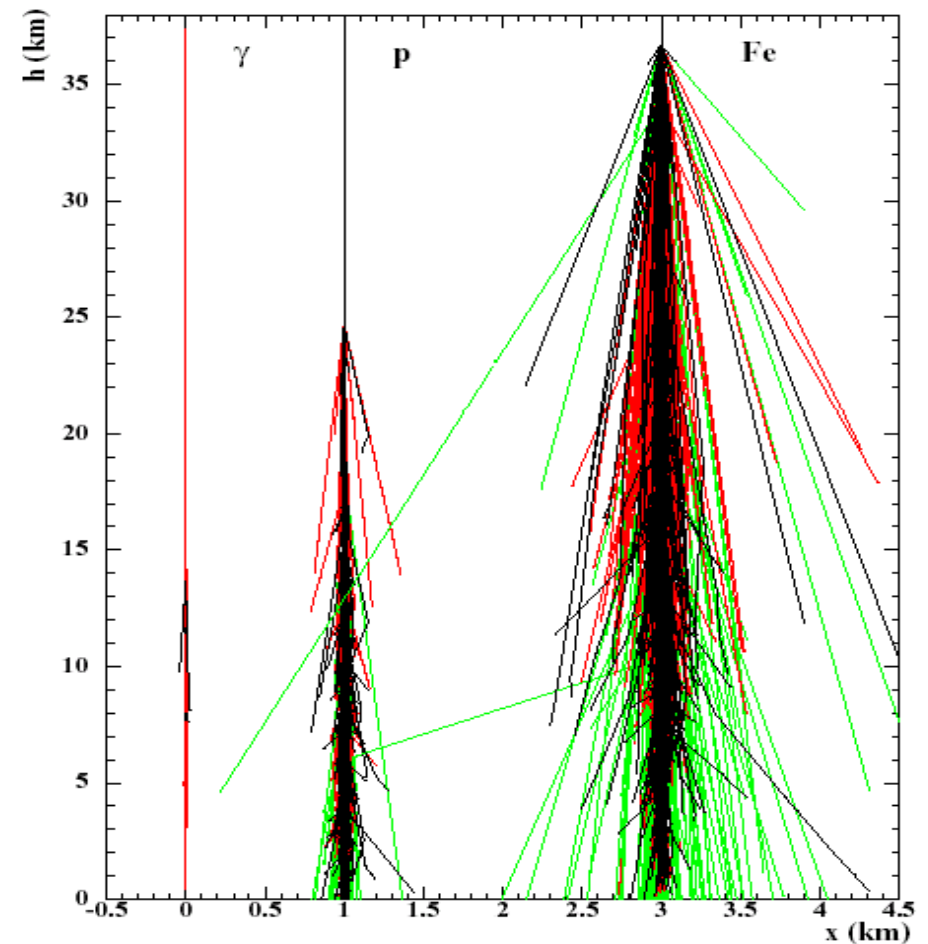


Wielkie pęki atmosferyczne

Profil poprzeczny

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

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



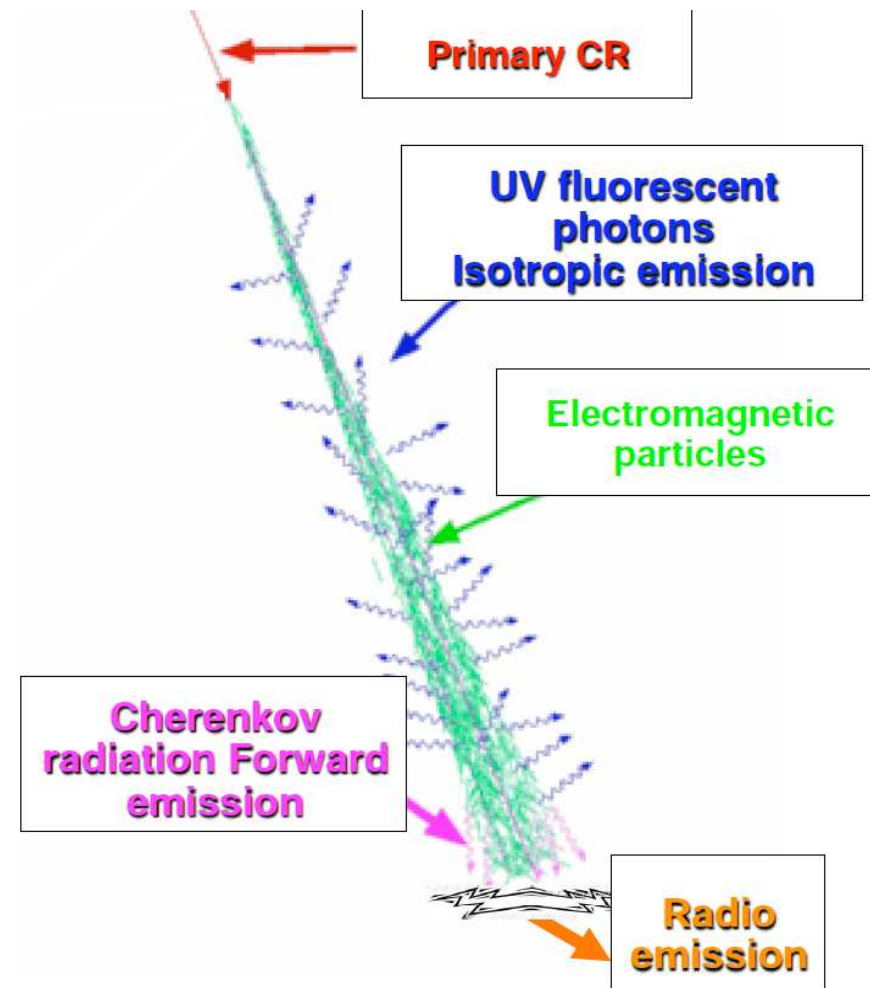
Wielkie pęki atmosferyczne

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...

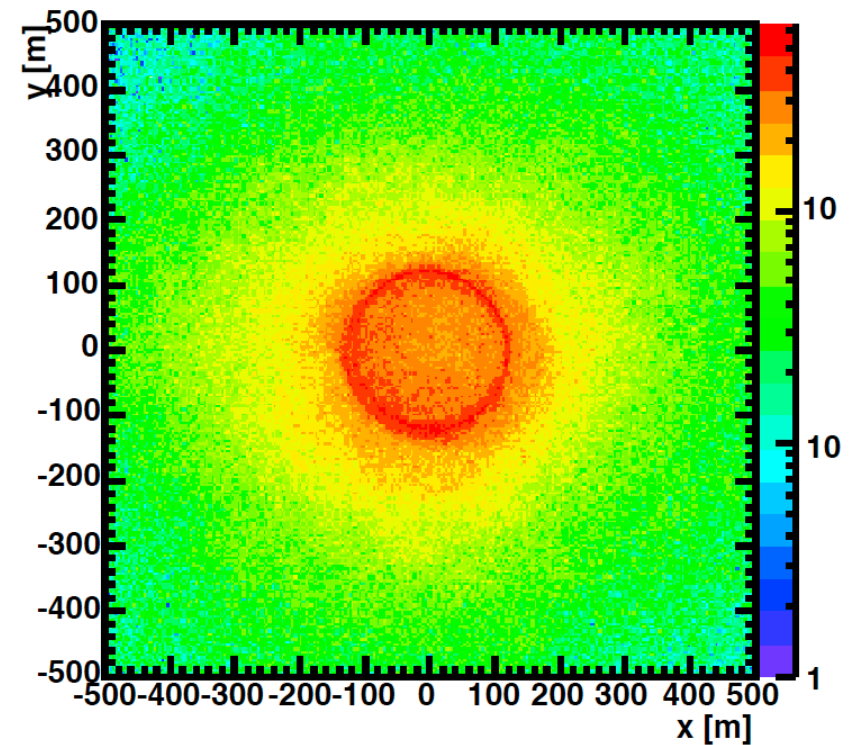
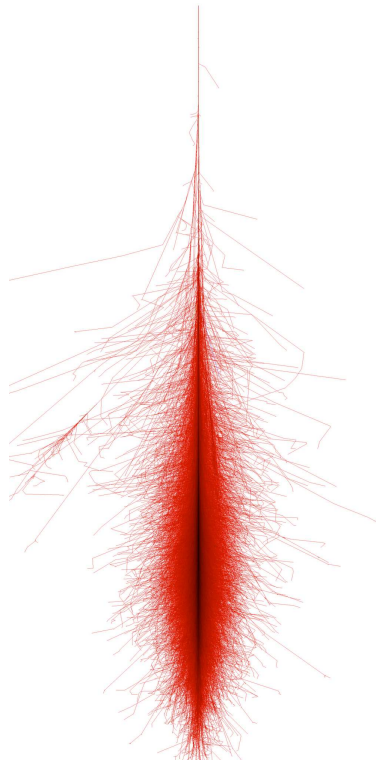


Wielkie pęki atmosferyczne

Promieniowanie Czerenkowa

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

Foton

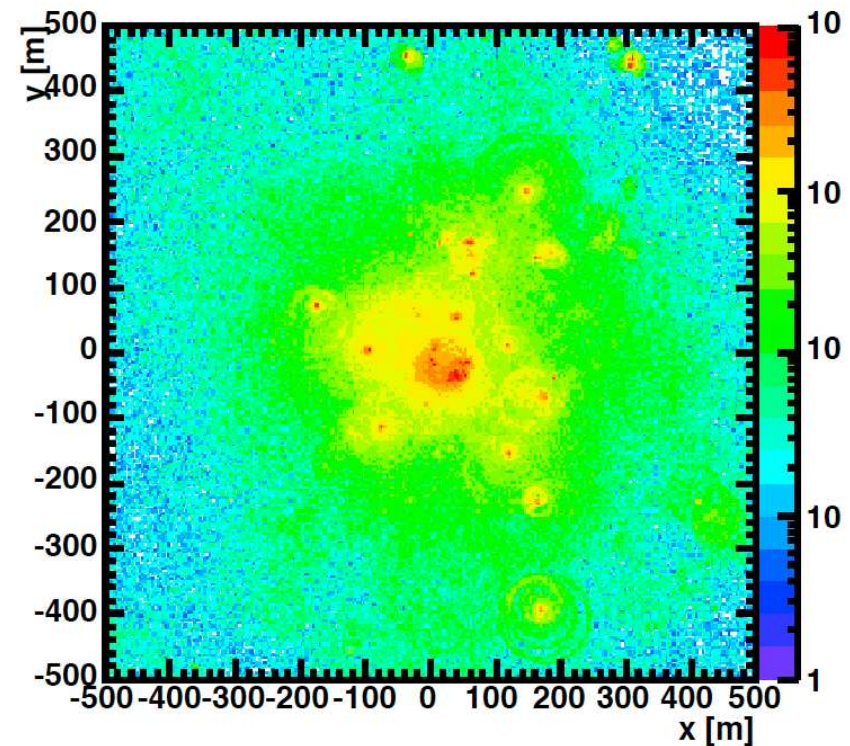
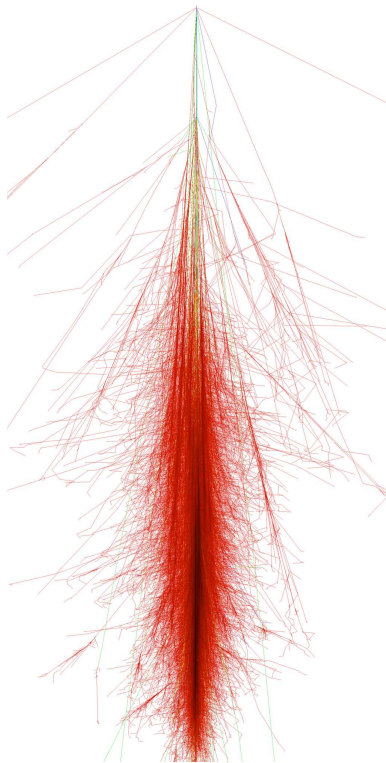


Wielkie pęki atmosferyczne

Promieniowanie Czerenkowa

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

Proton



Wielkie pęki atmosferyczne

Fluorescencja

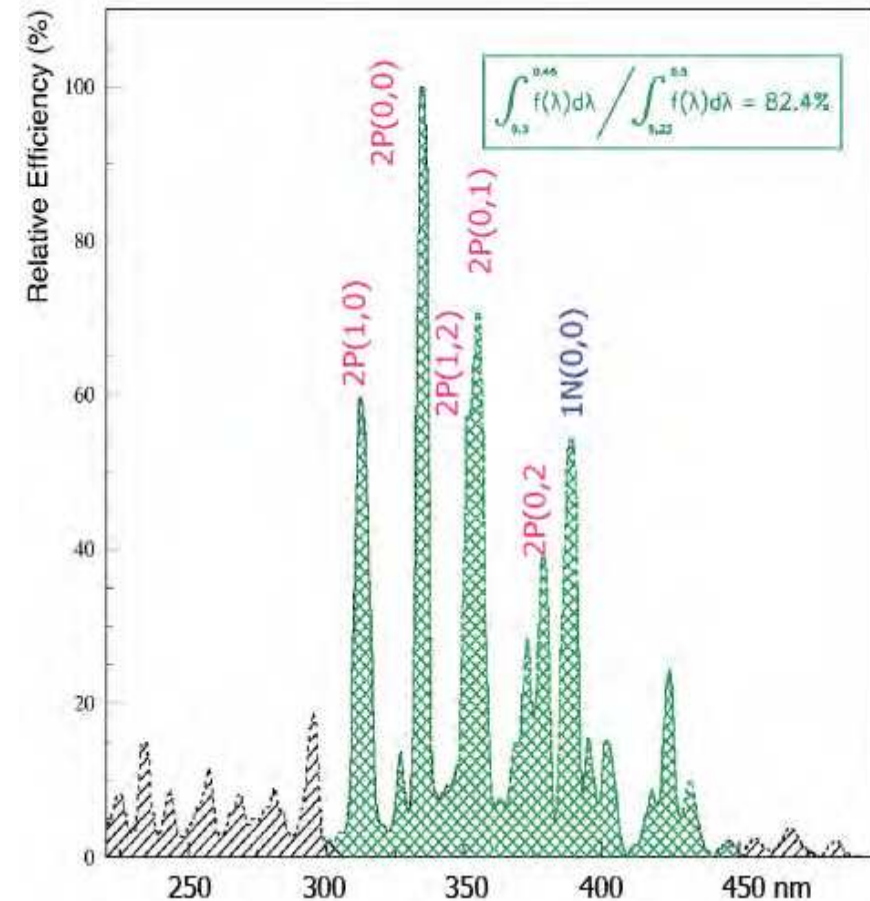
Obserwujemy głównie promieniowanie ultrafioletowe wzbudzonych cząsteczek azotu, w przedziale długości fali między 300 a 400 nm.

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)

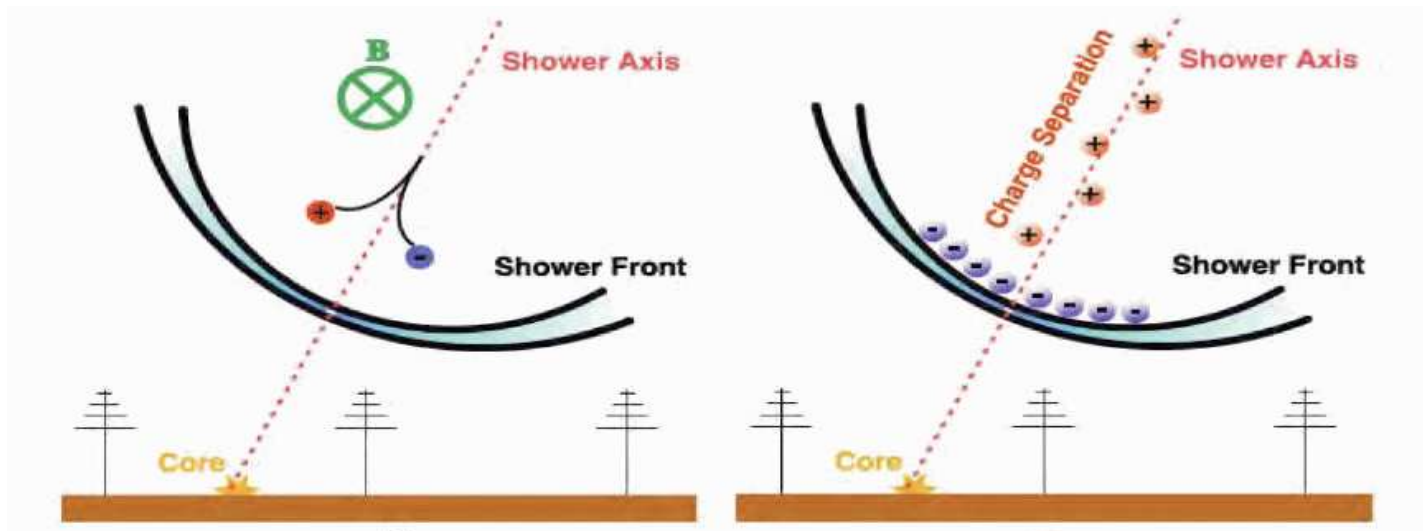
Wymaga szczególnych warunków obserwacyjnych (bezchmurne niebo, bezksiężycowa noc)



Wielkie pęki atmosferyczne

Emisja radiowa

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



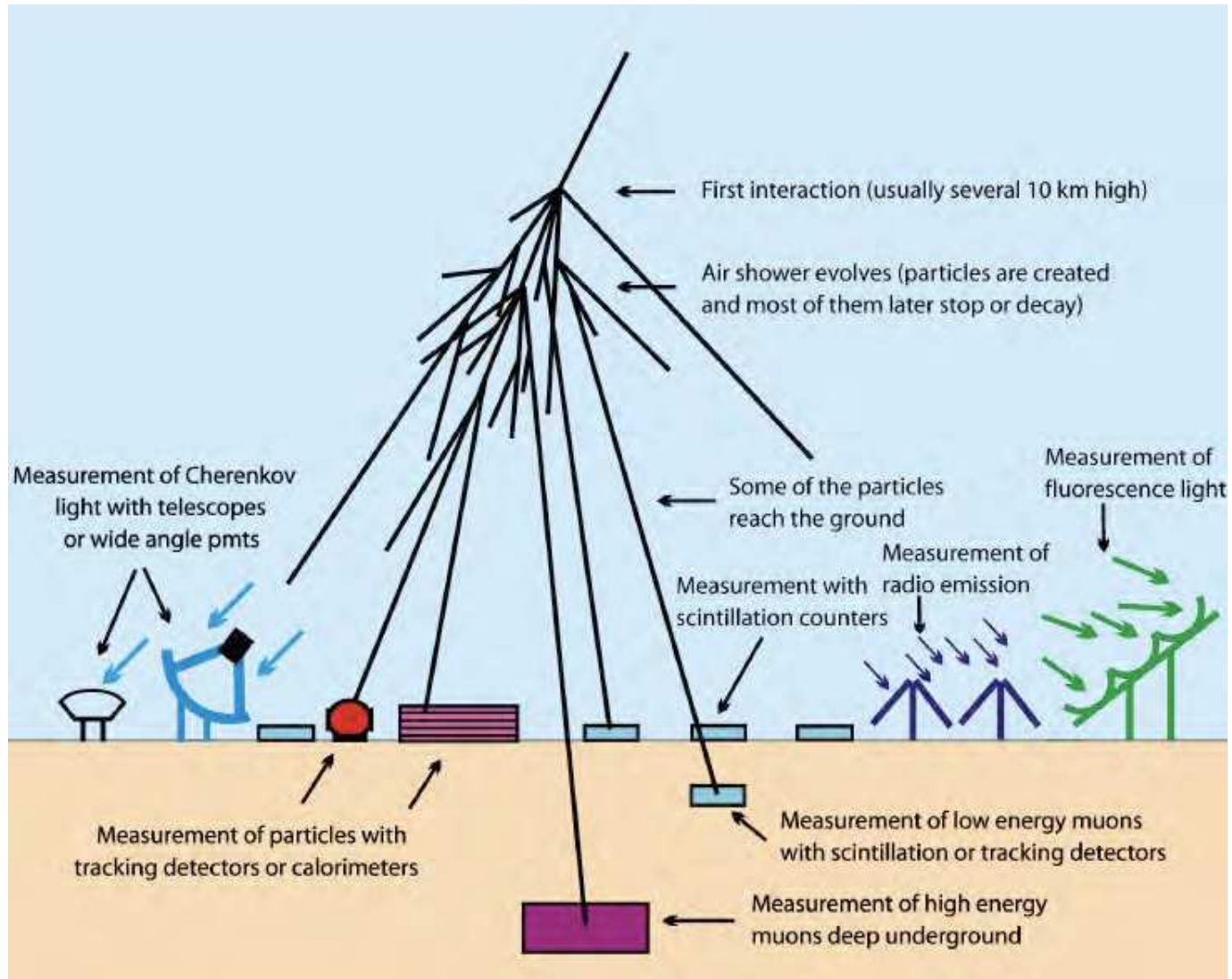
Wpływ ziemskiego pola magnetycznego (efekt geomagnetyczny)

Efekt Askariana:

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

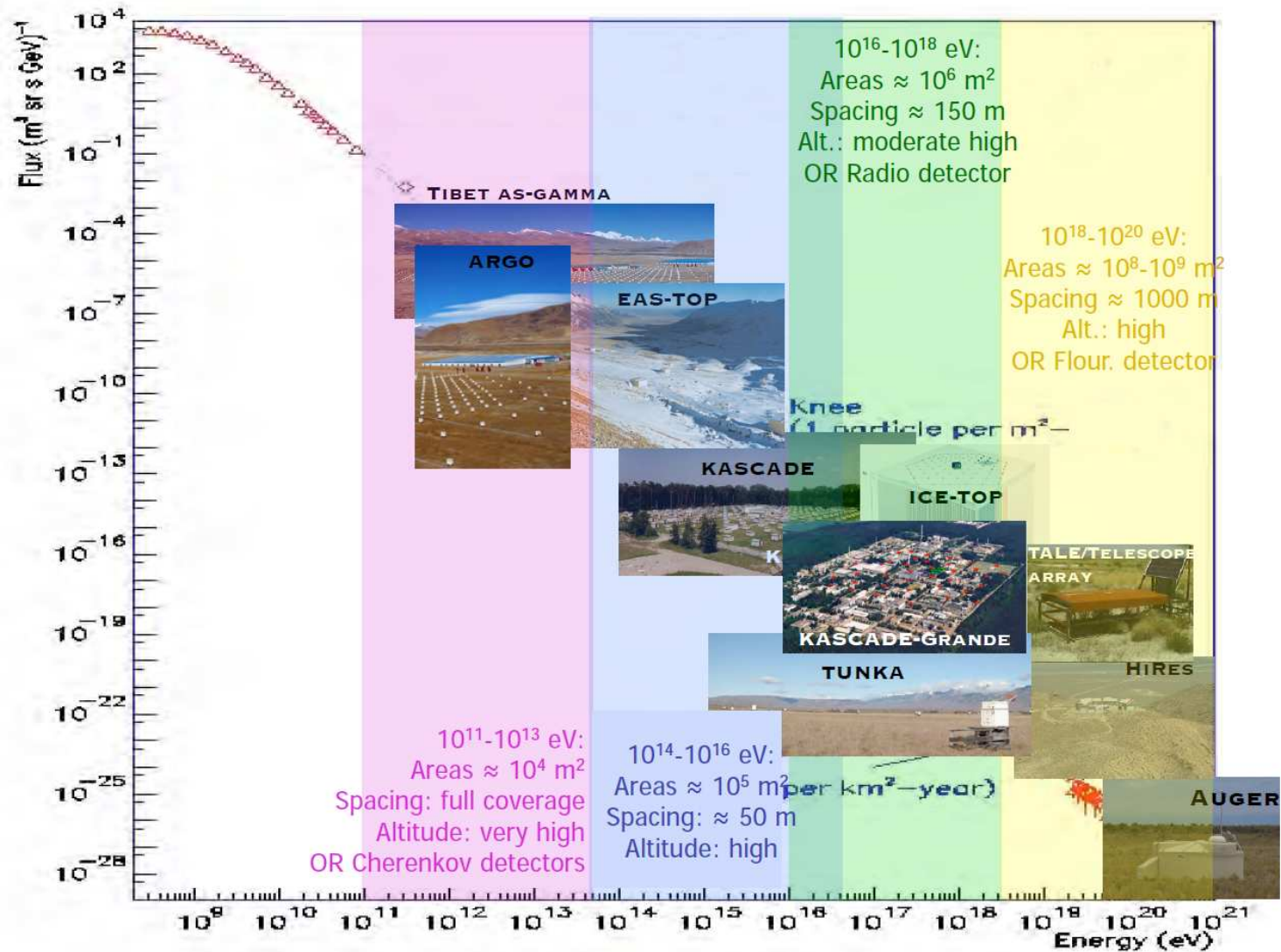
Wielkie pęki atmosferyczne

Metody detekcji



Wielkie pęki atmosferyczne

Eksperymenty

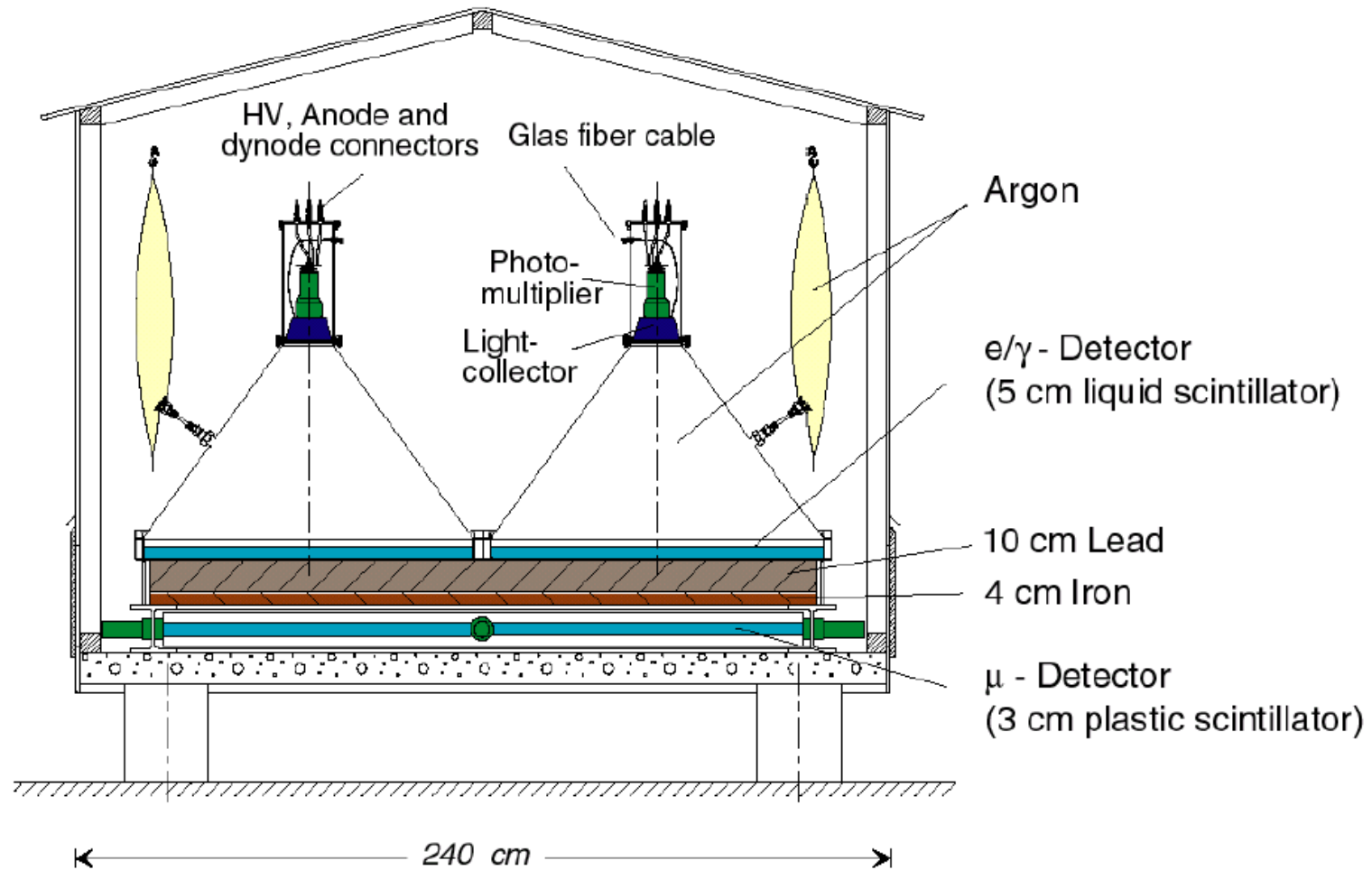


Detektor KASKADE (KIT, Karlsruhe)



KASKADE

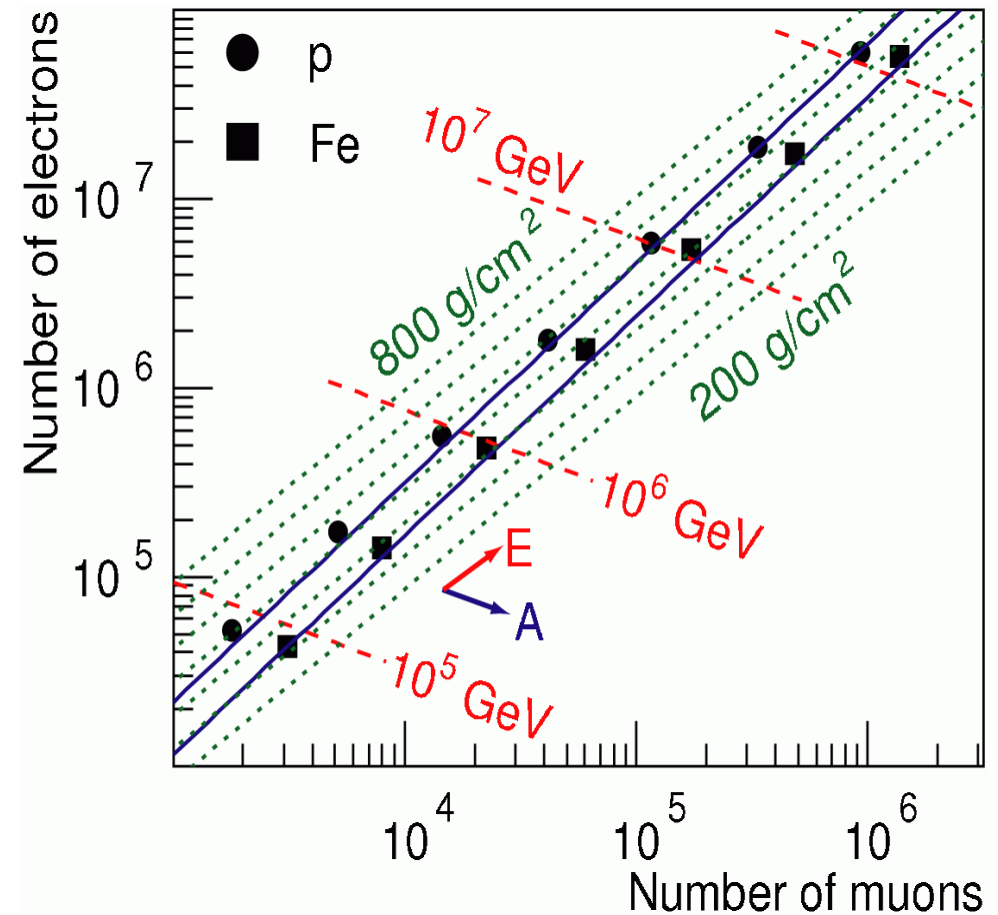
Detektor



KASKADE

Detektor

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



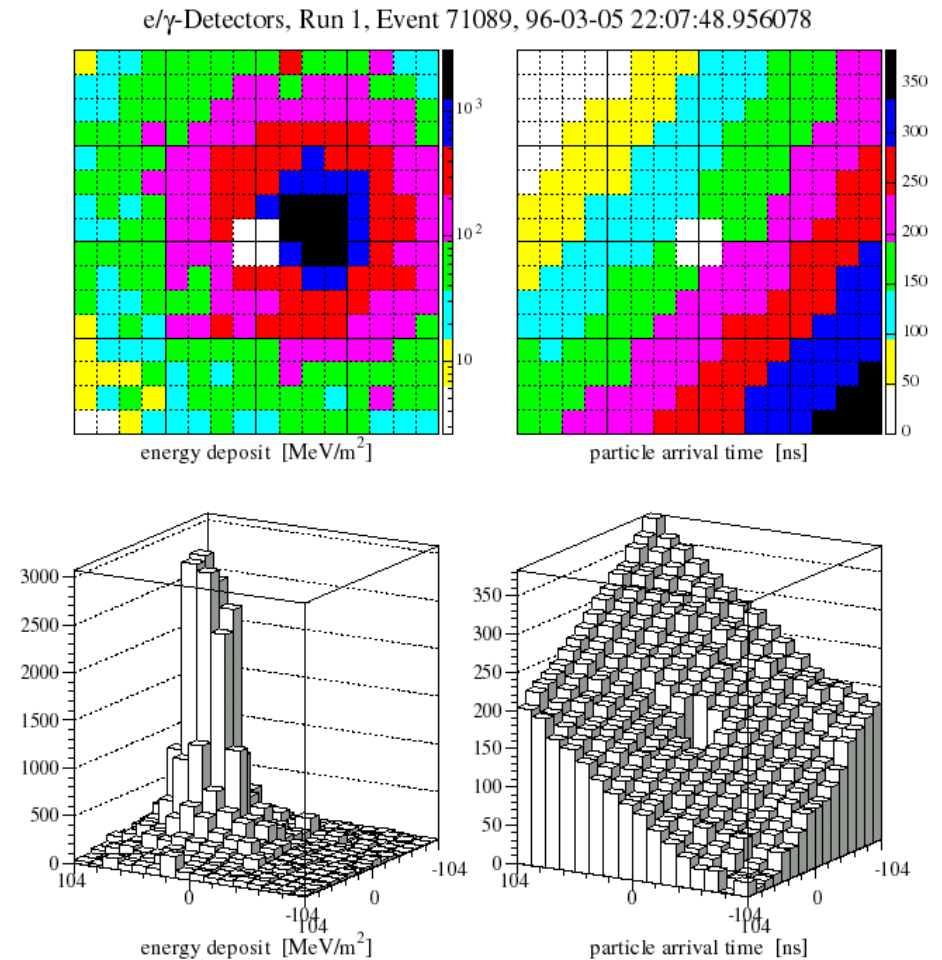
KASKADE

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



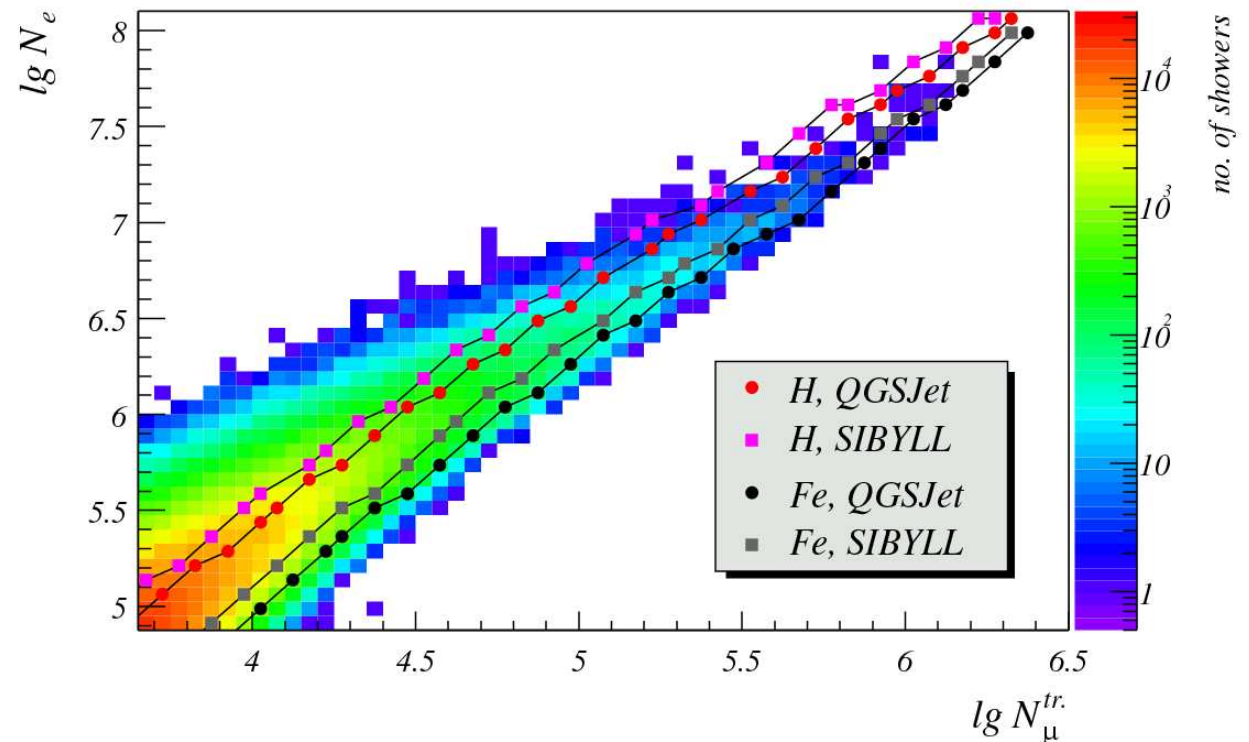
KASKADE

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

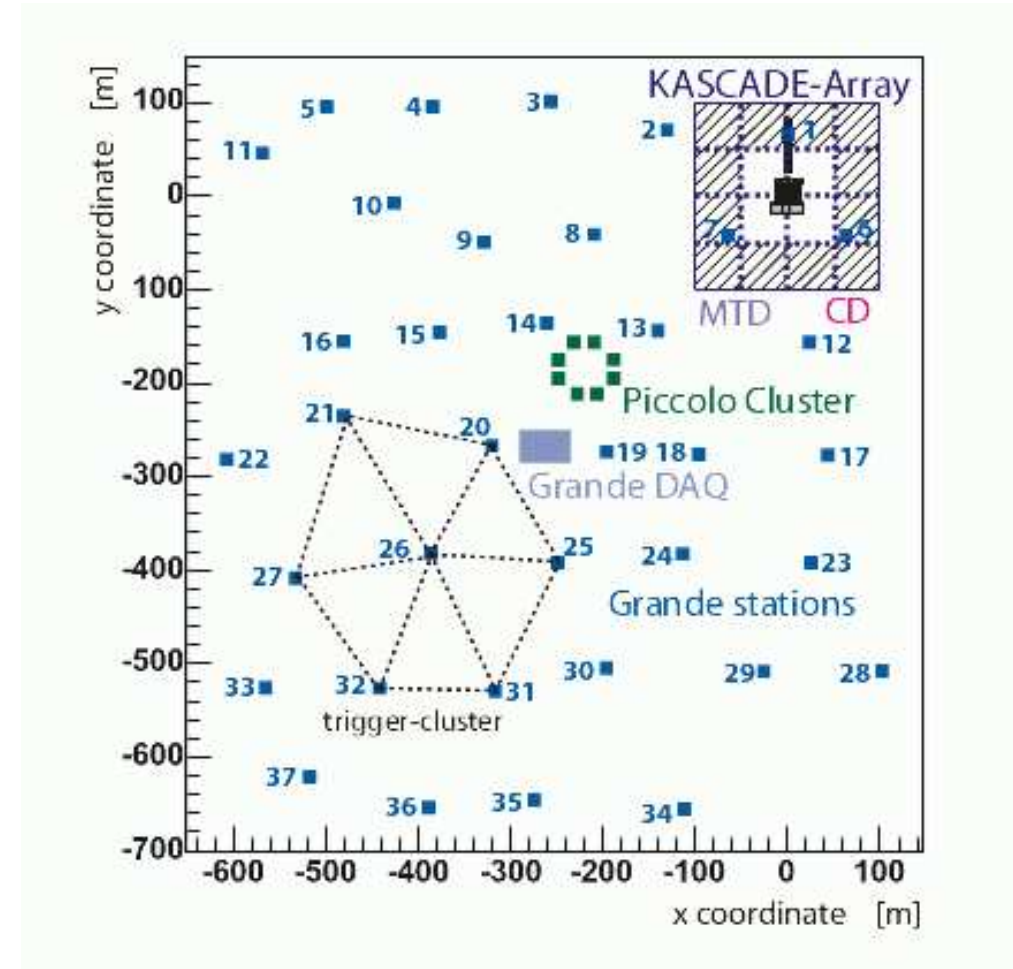
KASKADE od 1996

- 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

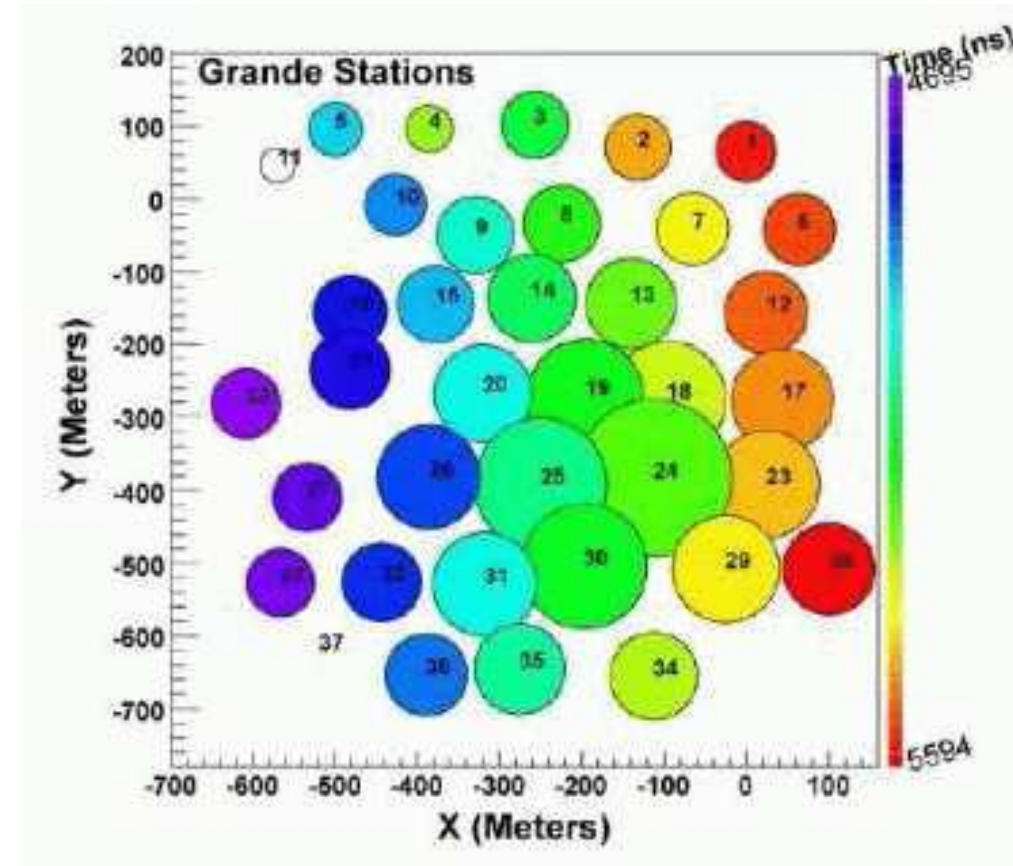
KASKADE od 1996

- 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...



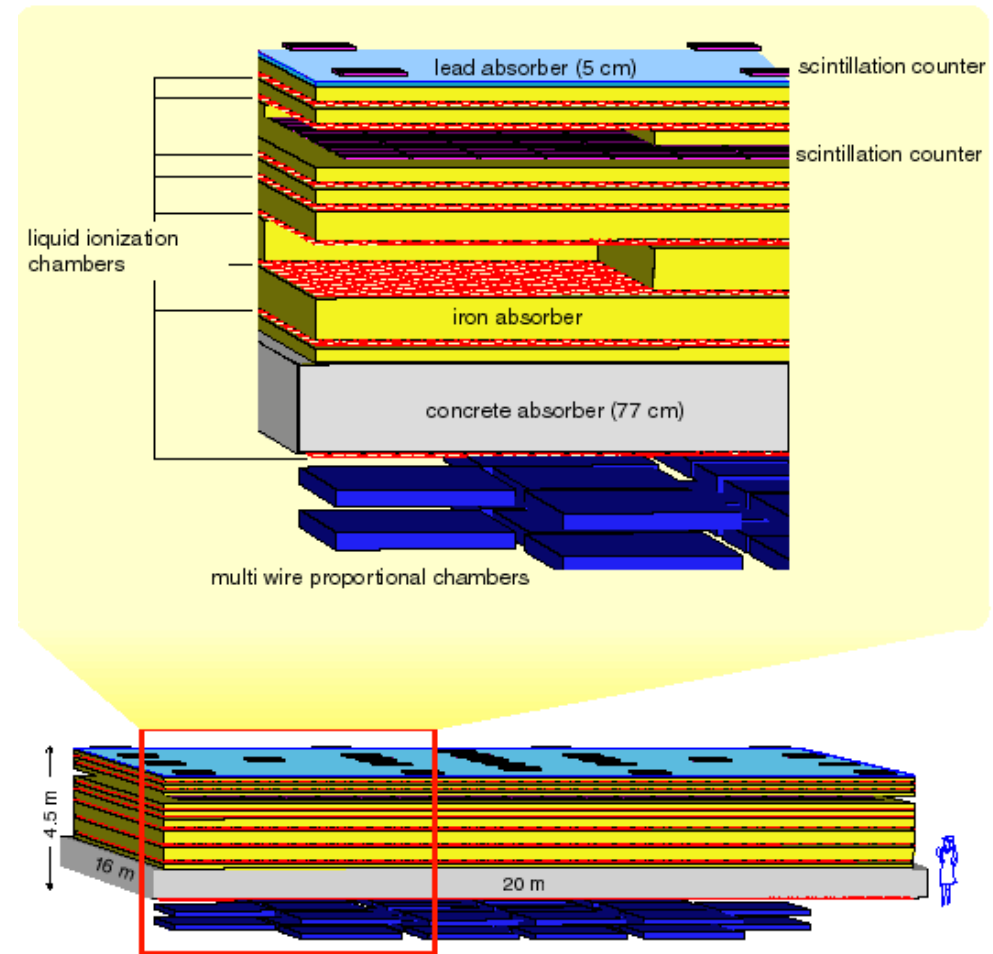
Przykładowa kaskada

KASKADE GRANDE

Detektor centralny

Kalorymetr hadronowy + detektor mionowy

⇒ dodatkowa informacja o składzie i profilu

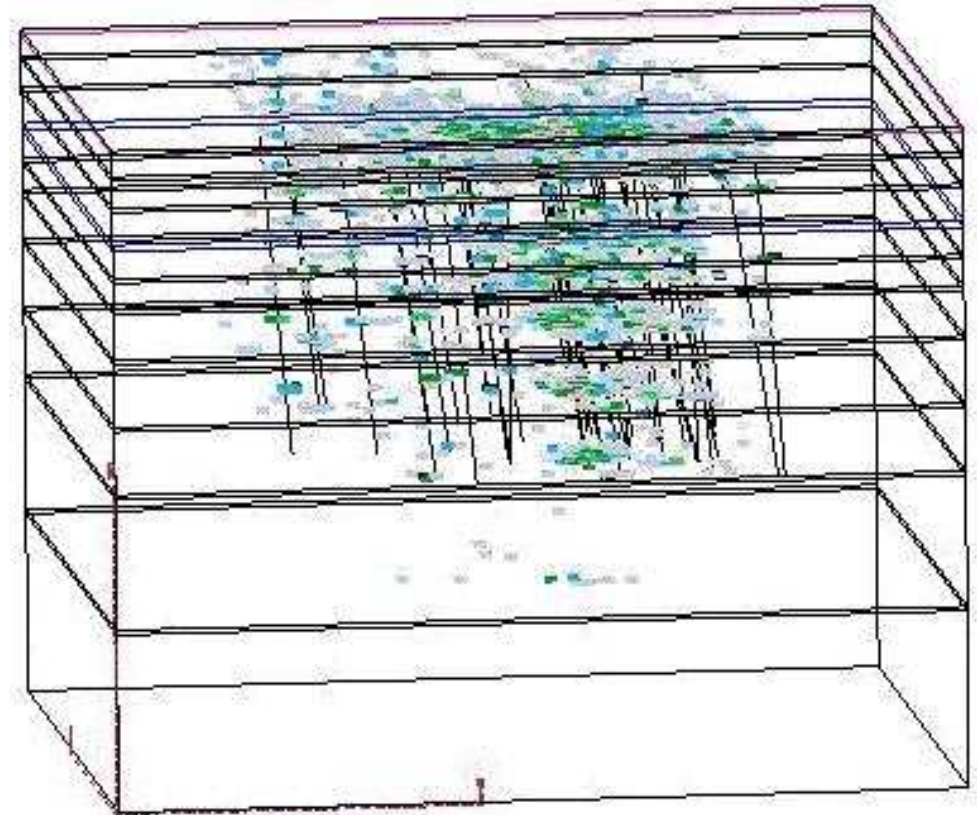


KASKADE GRANDE

Detektor centralny



Przykładowy przypadek pęku



Wysoka granularność \Rightarrow precyzyjna rekonstrukcja wielu torów

KASKADE GRANDE

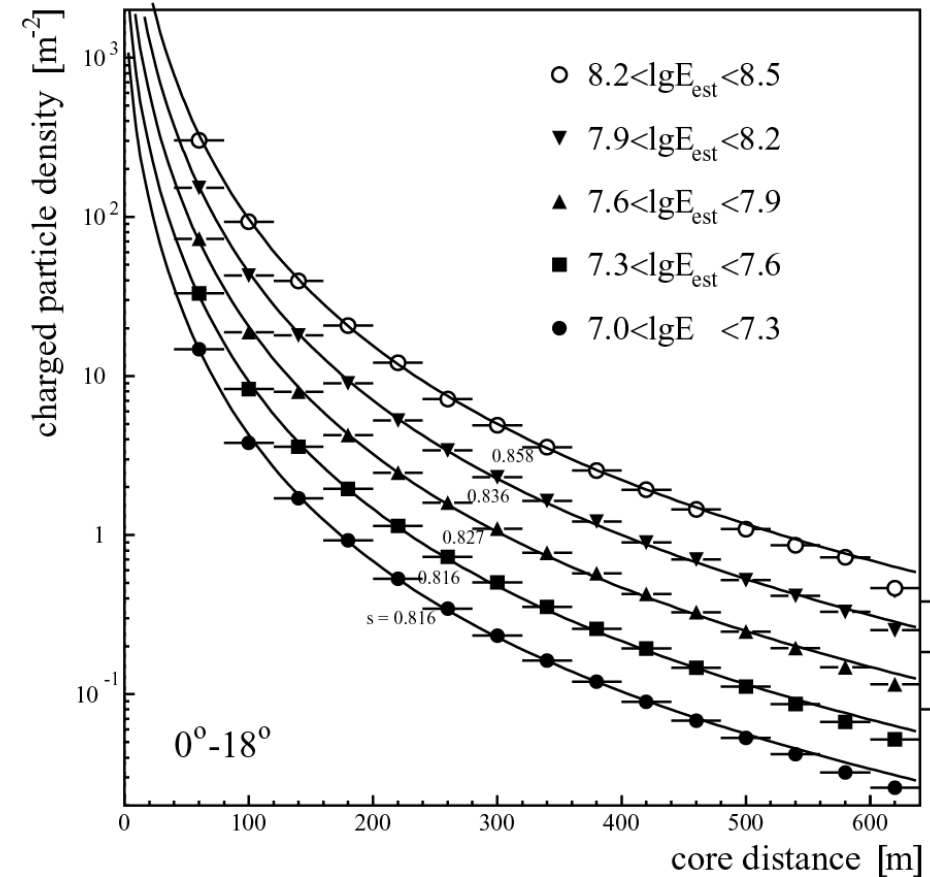
Pomiar energii

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



KASKADE GRANDE

Pomiar energii

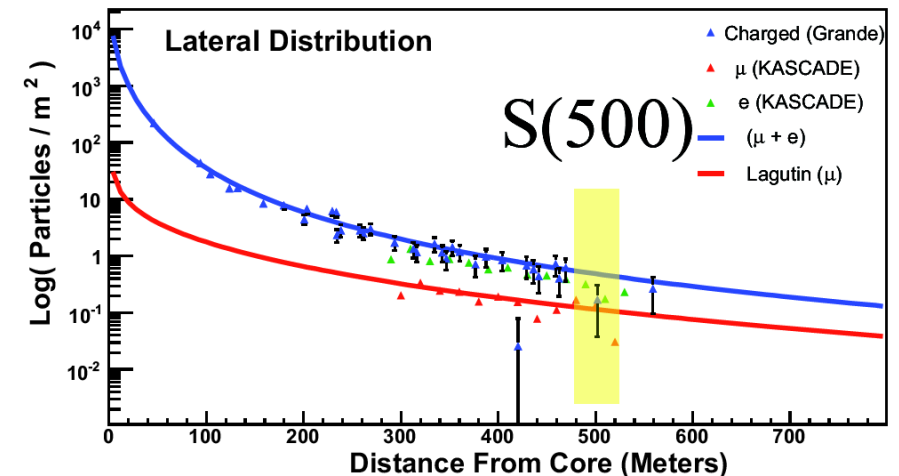
Niestety detektory były rozłożone zbyt daleko od siebie, żeby precyzyjnie określić gęstość cząstek w rdzeniu pęku

⇒ niepewność energii

Przy tych energiach kształt kaskady jest dość powtarzalny

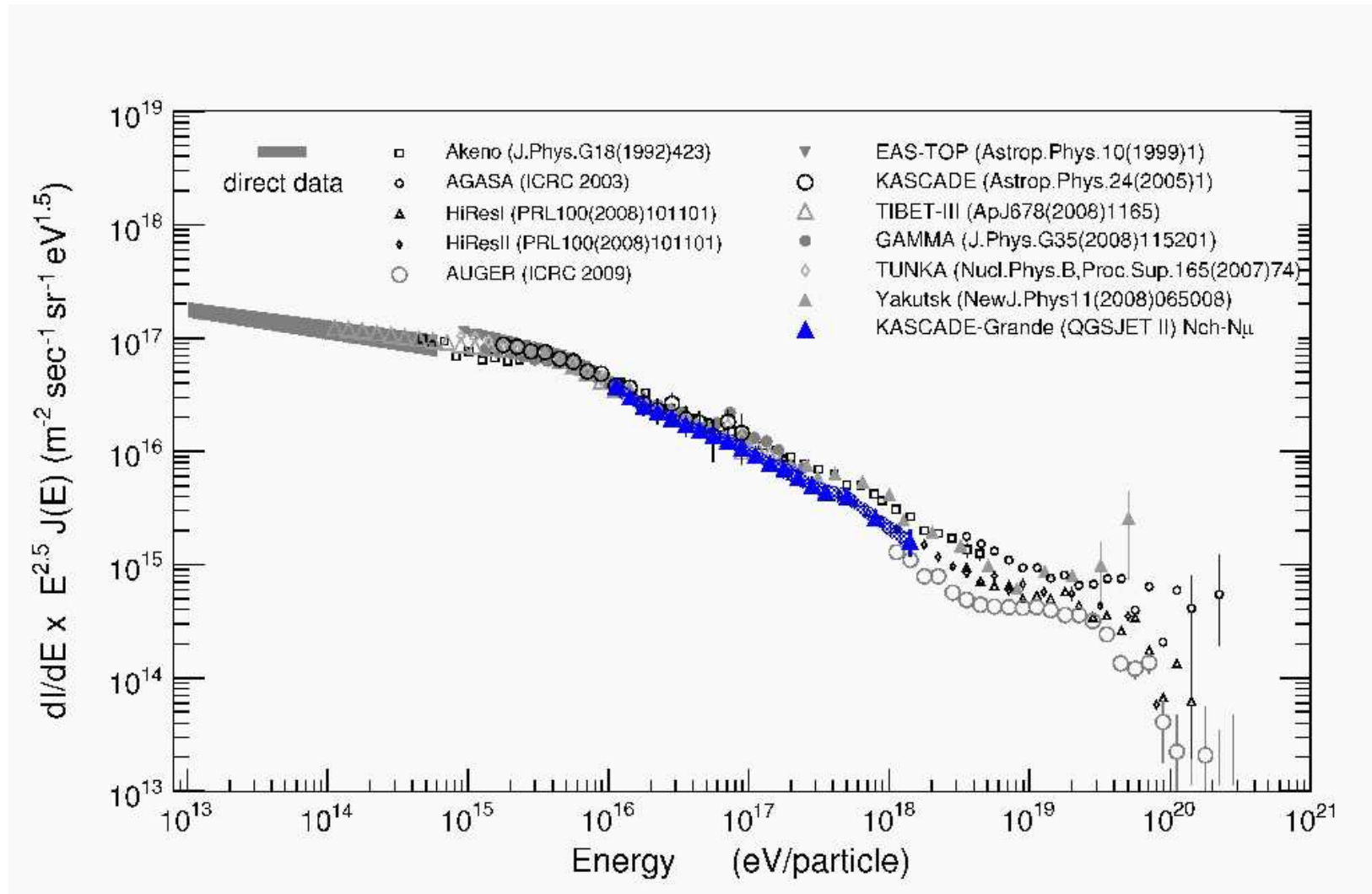
⇒ wystarczy zmierzyć gęstość cząstek
w ustalonym miejscu profilu

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



KASKADE GRANDE

Wyniki



Detektor TUNKA koło jeziora Bajkał



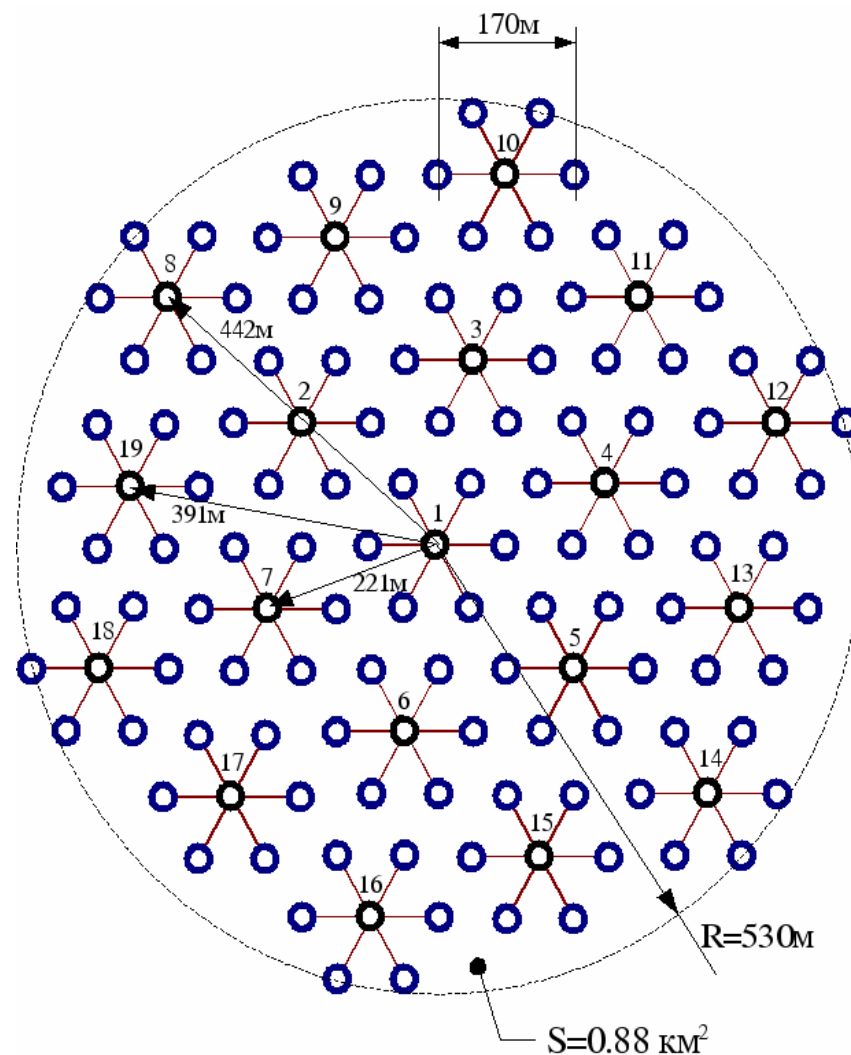
TUNKA-133

Detektor

Obszar około 1 km².

133 detektory w 19 klastrach (2009).

W każdym detektorze pojedynczy fotopowielacz o średnicy 20 cm



TUNKA-133

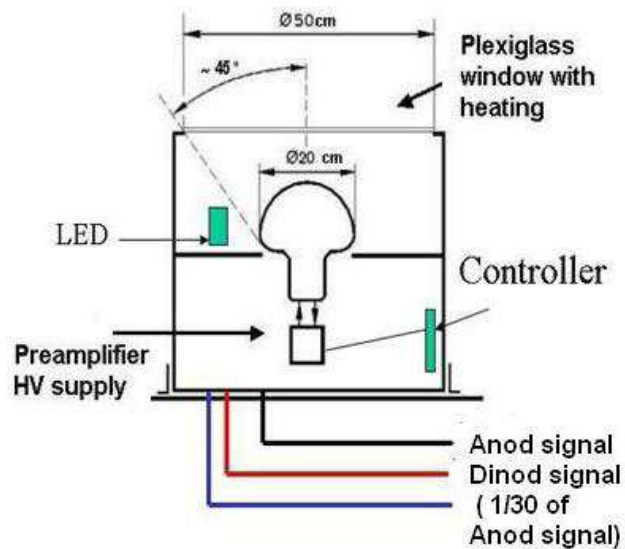
Detektor

Każdy fotopowielacz odczytywany przez 12-bit FADC 200 MHz (co 5 ns).

Klastry (po 7 PM) połączone linkiem optycznym (1Gb Ethernet):

⇒ synchronizacja, wyzwalanie i transmisja danych.

Wyzwalanie: “zapalone” przynajmniej 3 detektory w oknie $0.5\mu s$



TUNKA-133

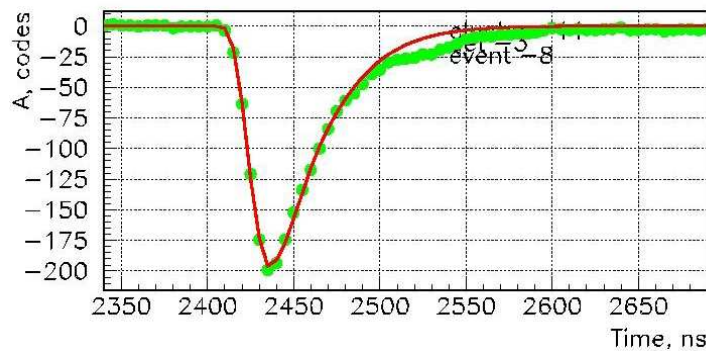
Detektor

Wysoka częstość próbkowania pozwala zrekonstruować:

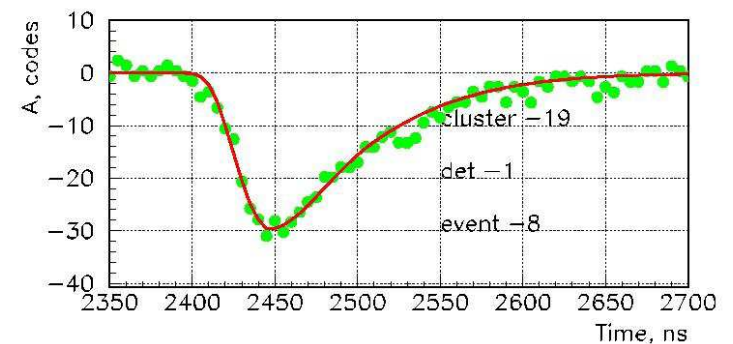
- czas przyścia impulsu (zdefiniowany w 1/4 wysokości)
- całkowity ładunek (pole pod krzywą)
- szerokość impulsu

Impuls obserwowany wzdłuż osi pęku jest krótszy niż na jego brzegach:

Impuls blisko osi pęku



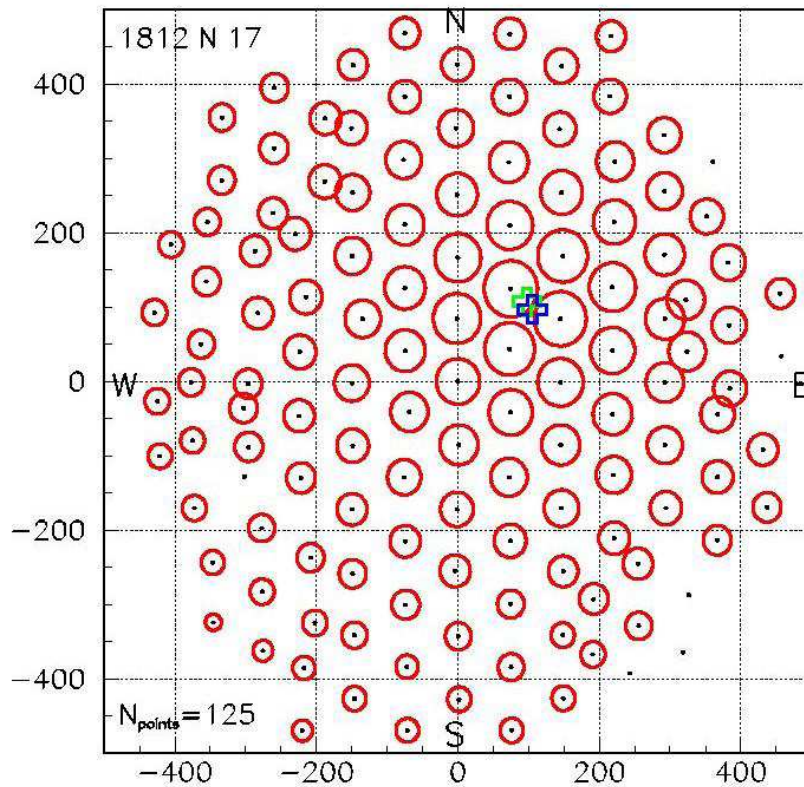
Impuls na brzegu pęku



TUNKA-133

Rekonstrukcja

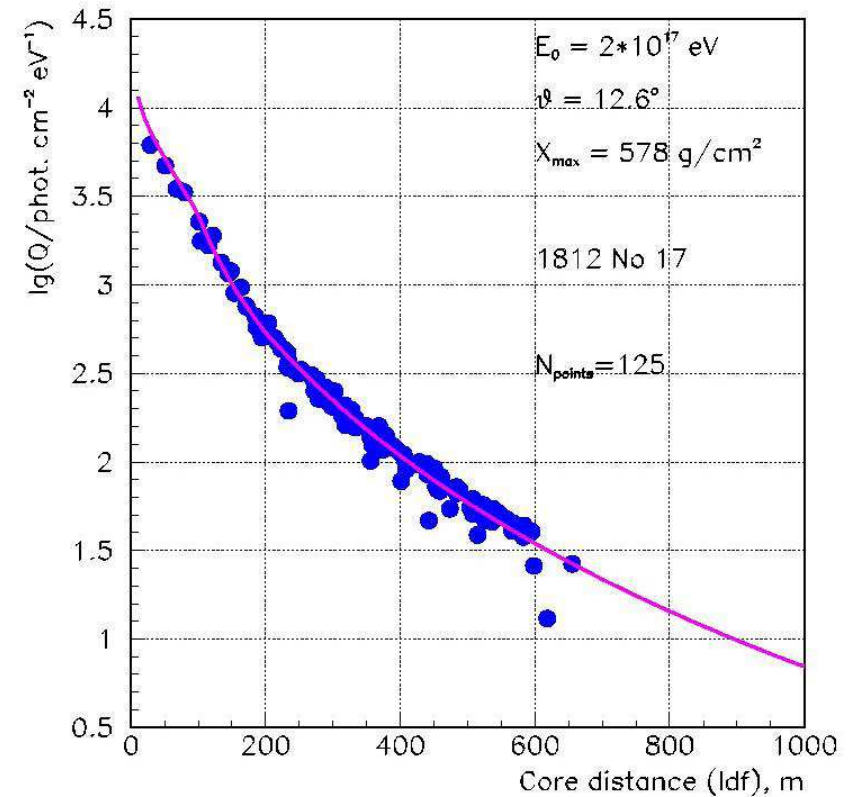
Przykładowy przypadek



125 “zapalonych” detektorów

Narysowane kółka: $r \sim \log I$

Dopasowanie profilu kaskady



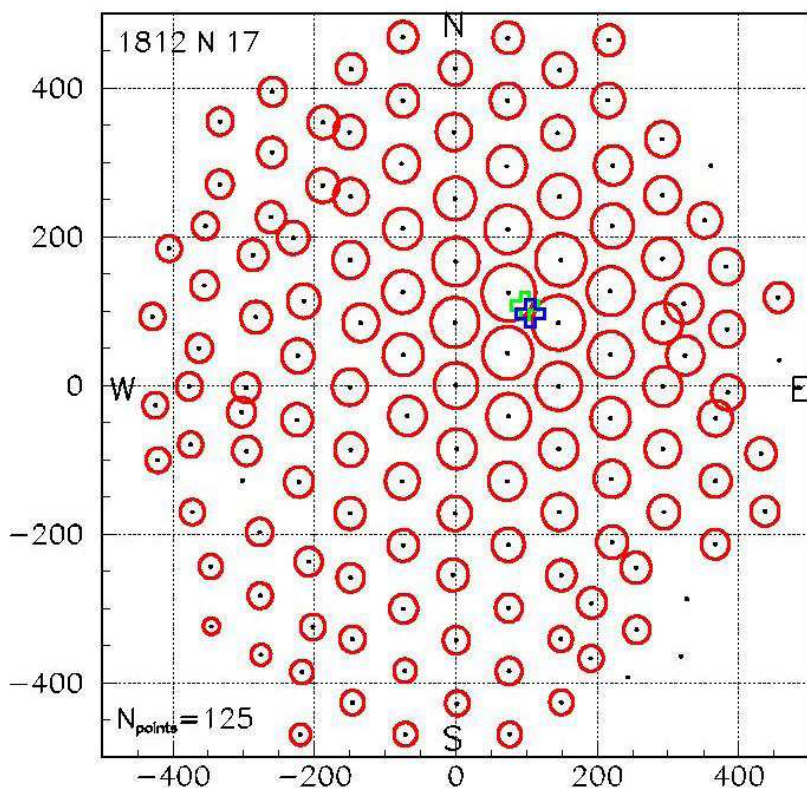
$$E = 2 \cdot 10^{17} \text{ eV}$$

$$\Theta = 12.6^\circ$$

TUNKA-133

Rekonstrukcja

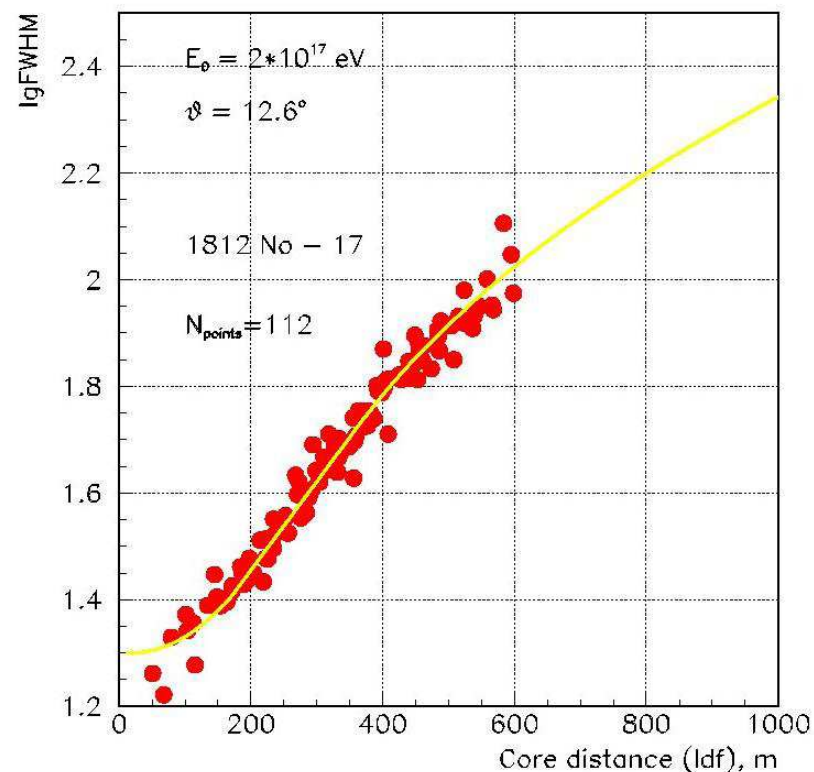
Przykładowy przypadek



125 “zapalonych” detektorów

Narysowane kółka: $r \sim \log I$

Dopasowanie szerokości impulsu



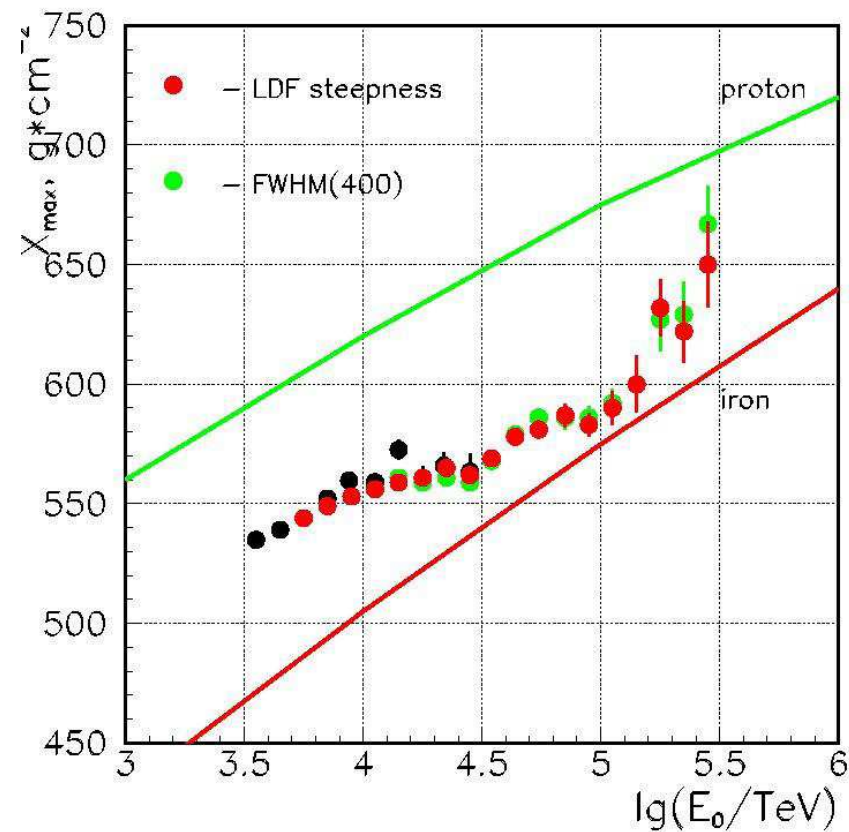
$$E = 2 \cdot 10^{17} \text{ eV}$$

$$\Theta = 12.6^\circ$$

TUNKA-133

Wyniki

Dopasowując profil poprzeczny kaskady można ocenić nie tylko energię, ale też jej wysokość w atmosferze \Rightarrow informacja o składzie promieniowania

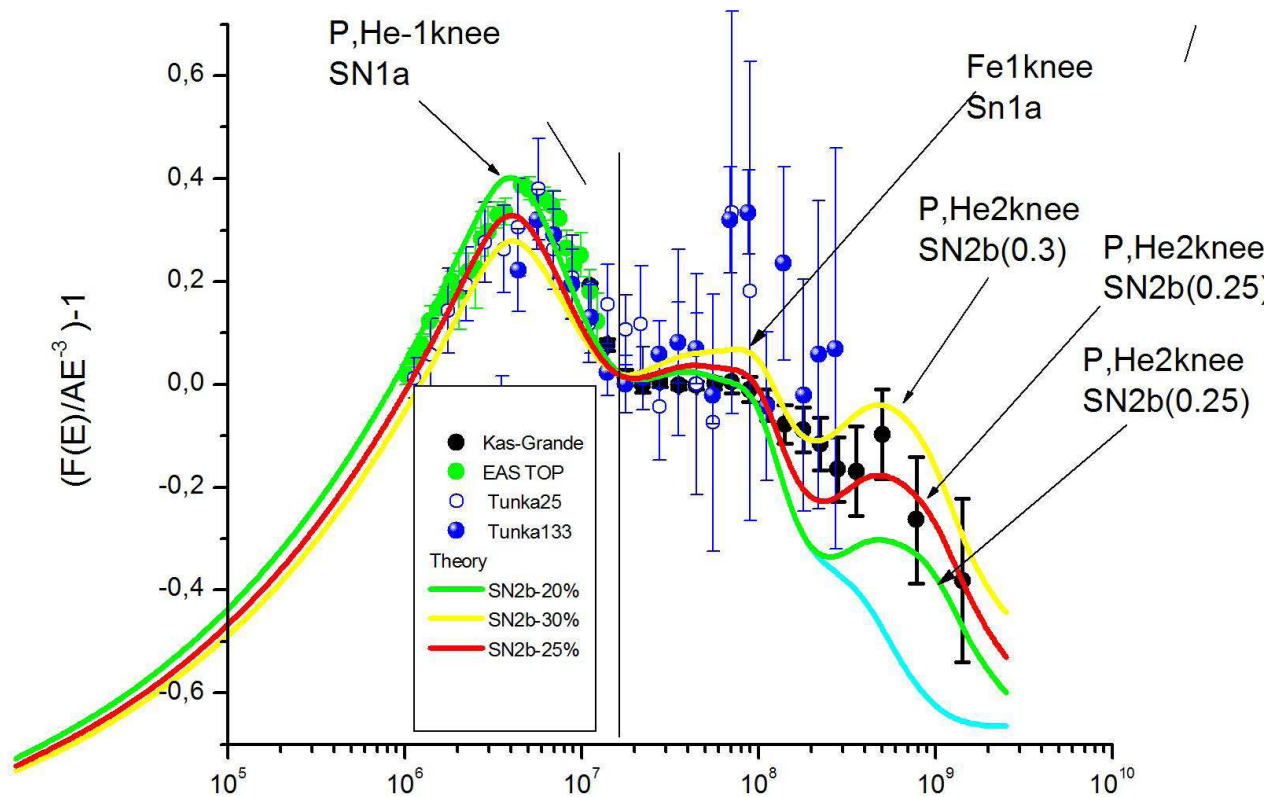


TUNKA-133

Wyniki

Mierzony rozkład energii w zgodzie z innymi pomiarami.

Potwierdzone istnienie “garbu” przy energii ok. 10^{17} eV

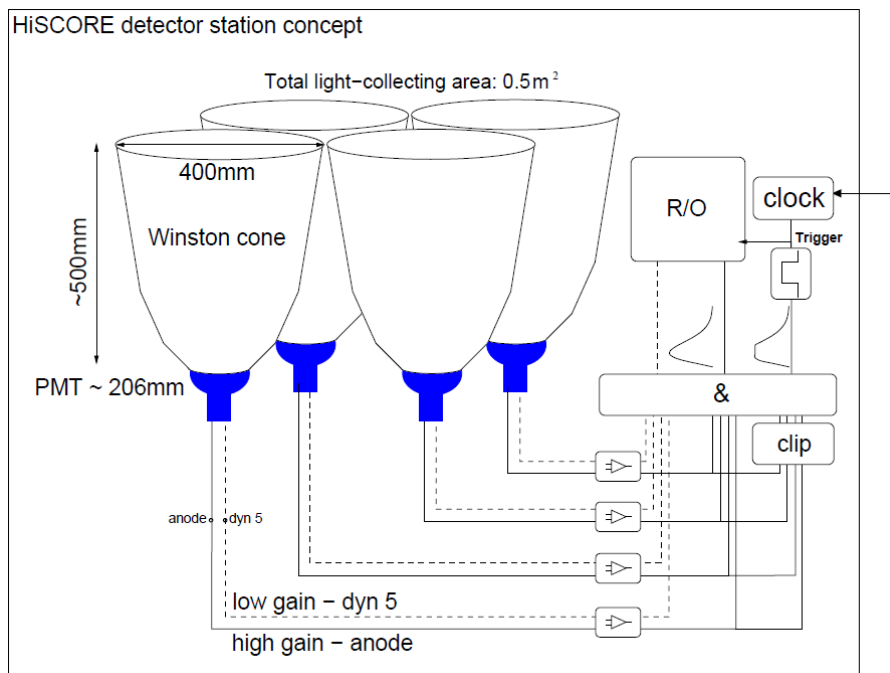


HiSCORE

HiSCORE Hundred Square km Cosmic ORigin Explorer

Nowy projekt detektora wykorzystującego promieniowanie Czerenkowa.

Większa efektywność zbierania światła i pole widzenia, w porównaniu z TUNKA.



Testy w ramach współpracy zespołów TUNKA i KASKADE (KIT Karlsruhe, DESY)

29 stacji zainstalowanych na Syberii w XII 2014

Docelowo 4489 detektory na 100km^2