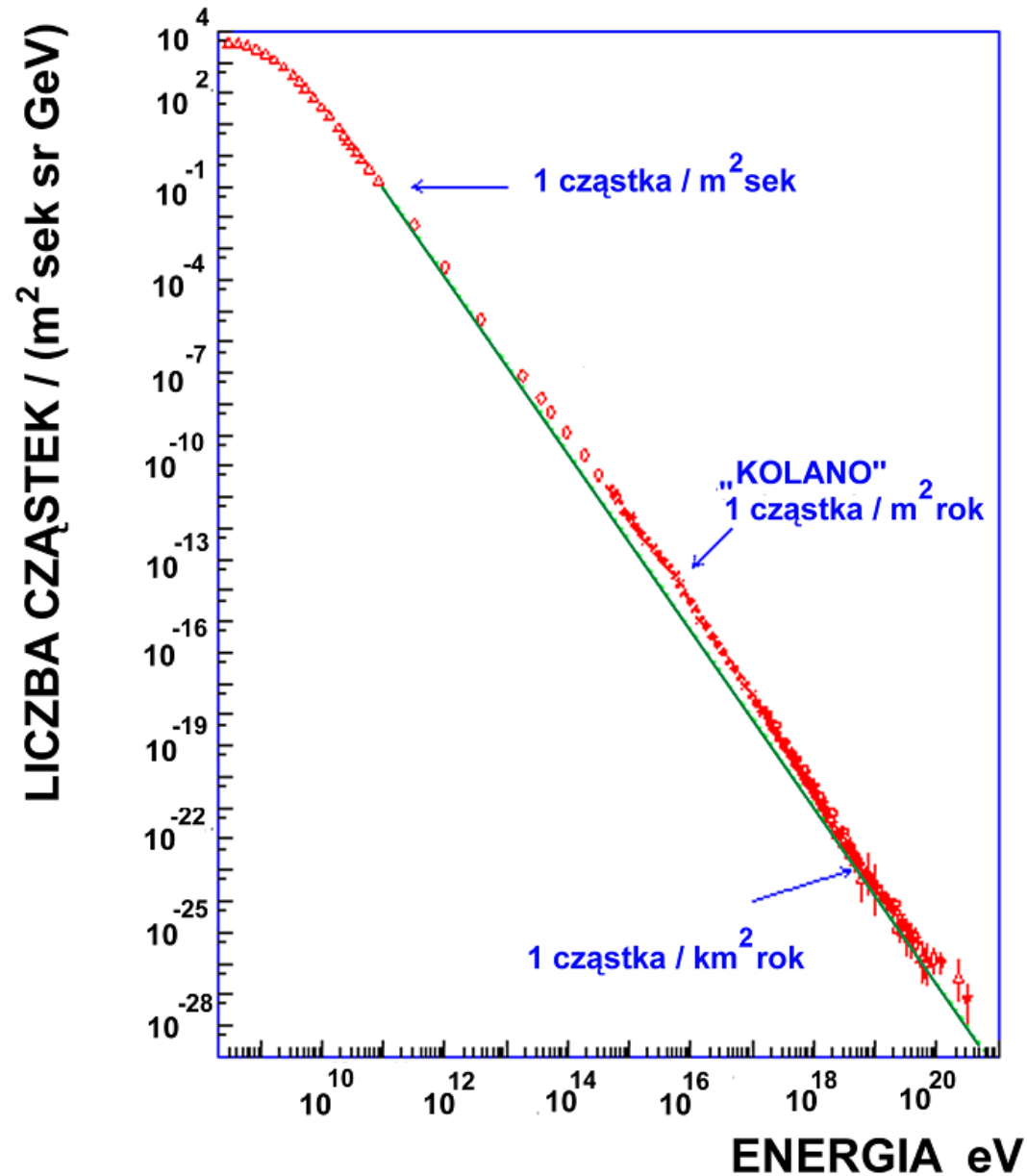


Astrofizyka promieni kosmicznych-2

Henryk Wilczyński

Widmo energii promieni kosmicznych



Detekcja promieni kosmicznych

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

λ_p droga oddziaływania protonu

L_R jednostka radiacyjna

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

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

widmo energetyczne, skład chemiczny

skład izotopowy

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

Rejestracja wielkich pęków atmosferycznych na
powierzchni Ziemi

zbiorcze widmo energetyczne

skład chemiczny (przybliżony)

typy detektorów „bezpośrednich”

detektory „aktywne”

liczniki elektroniczne

spektrometry

det. promieniowania przejścia

...

wszechstronne pomiary

skomplikowane

drogie

delikatne

detektory „pasywne”

emulsje jądrowe

komory emulsyjne

tanie

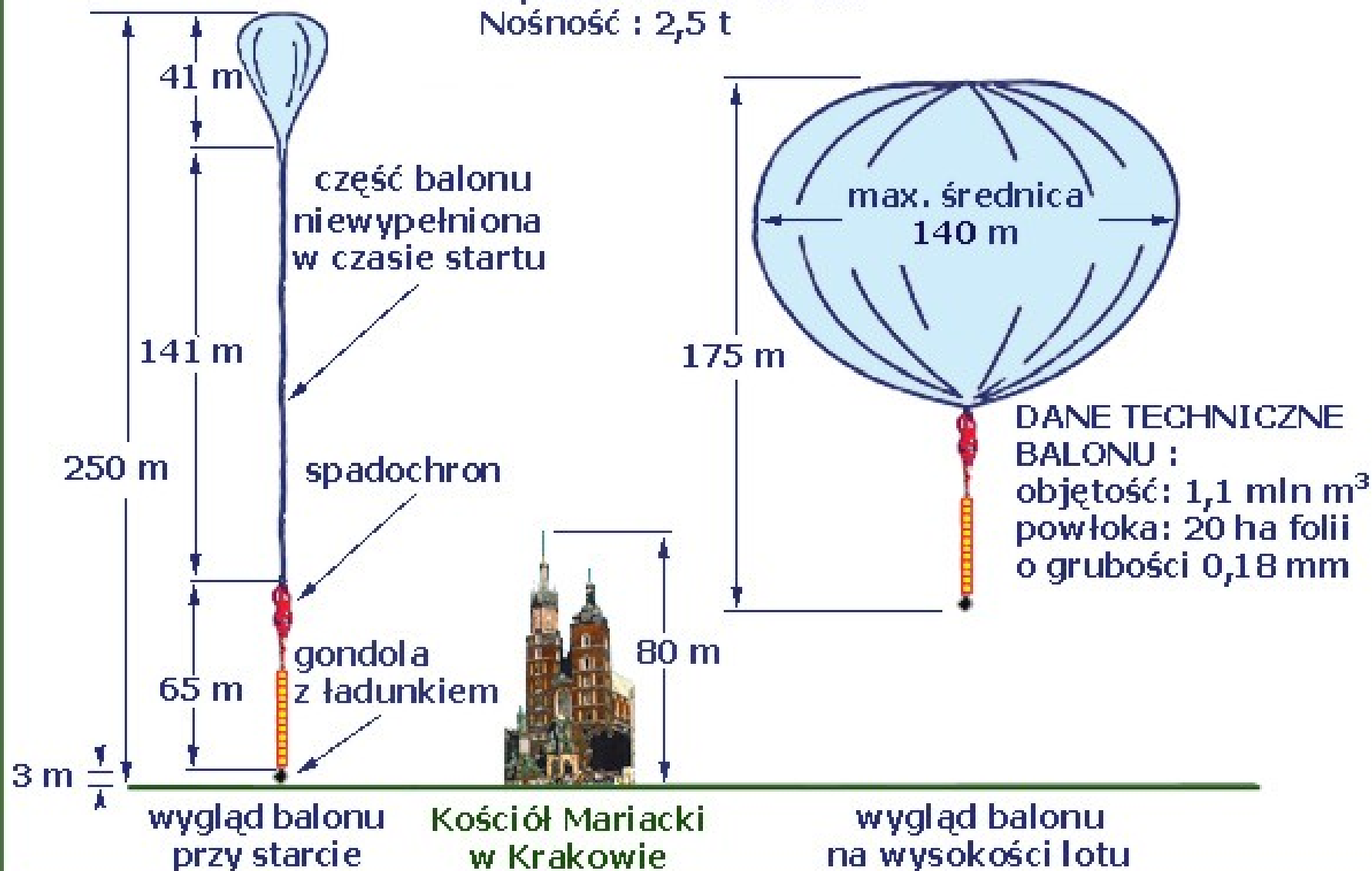
odporne na uszkodzenia

pracochłonne

DUŻY BALON STRATOSFERYCZNY DO BADAŃ NAUKOWYCH

Wysokość lotu: 40 km

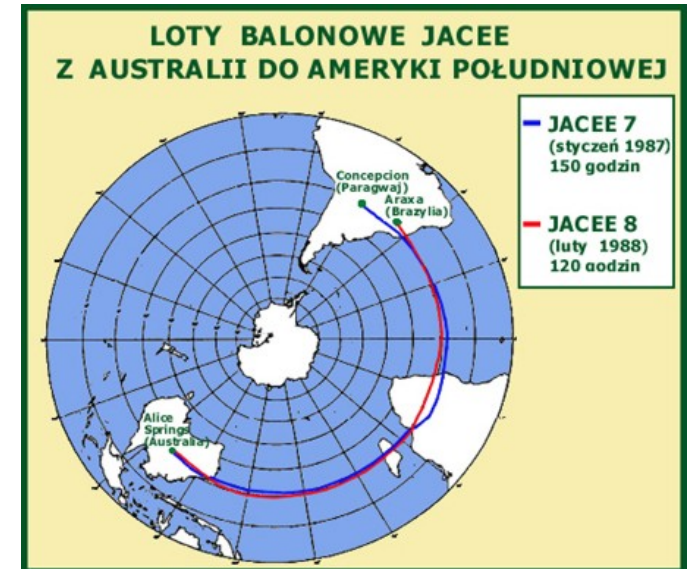
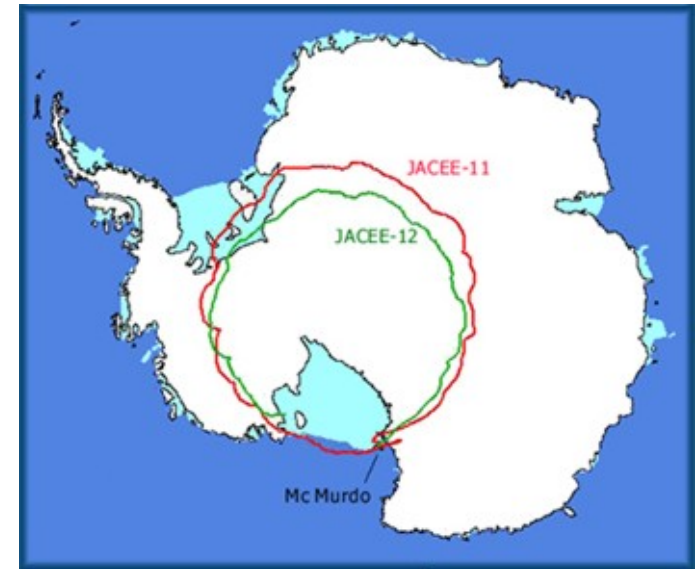
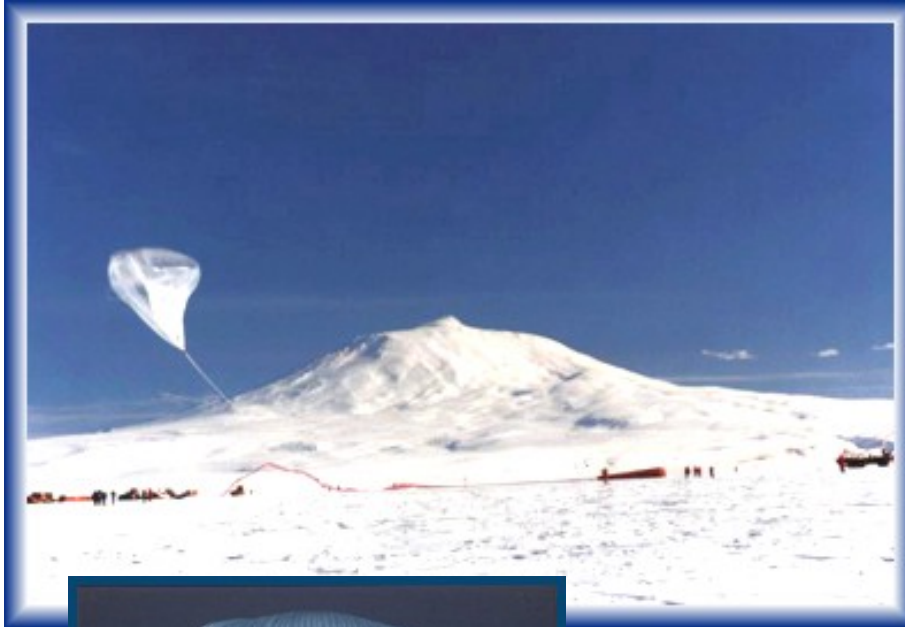
Nośność : 2,5 t



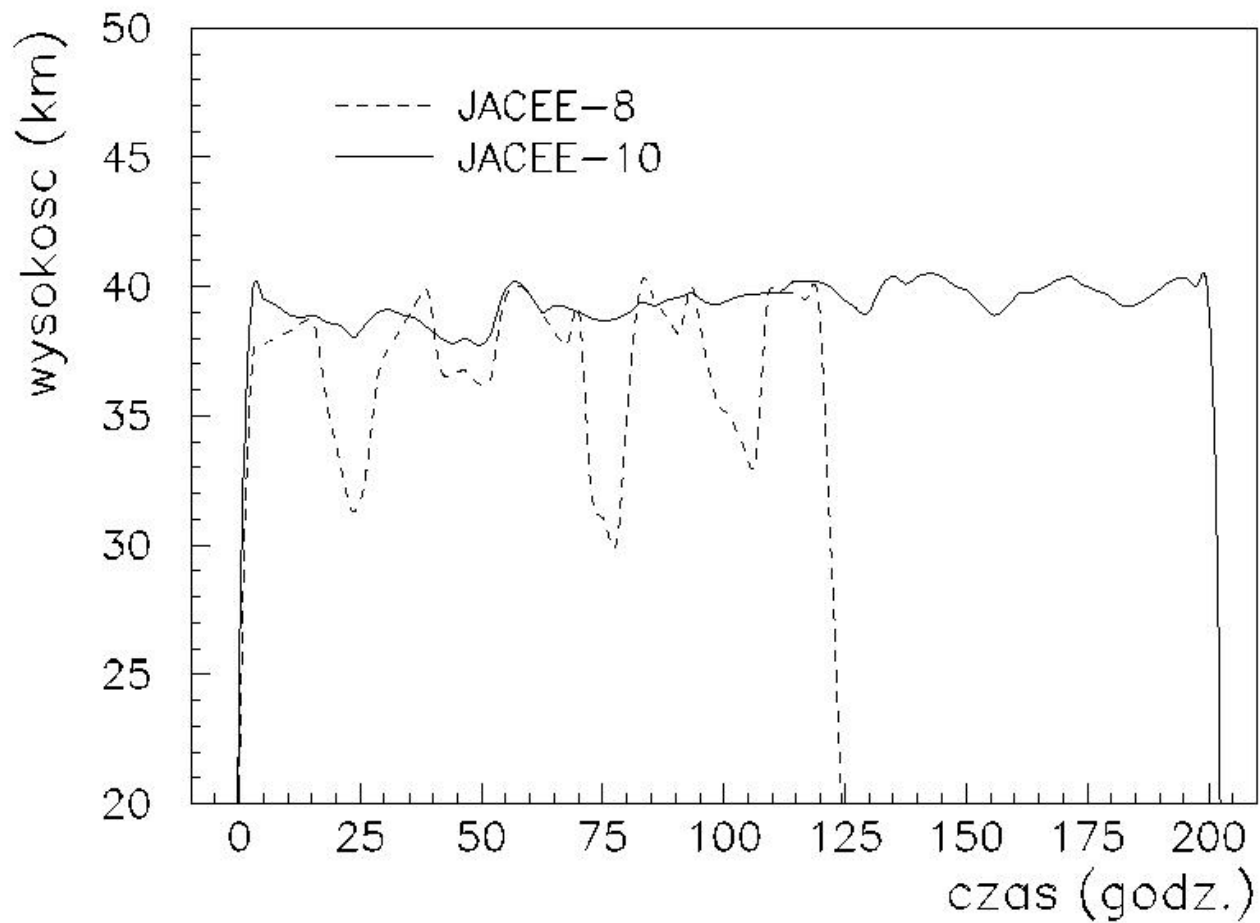
balon stratosferyczny



Detekcja bezpośrednia

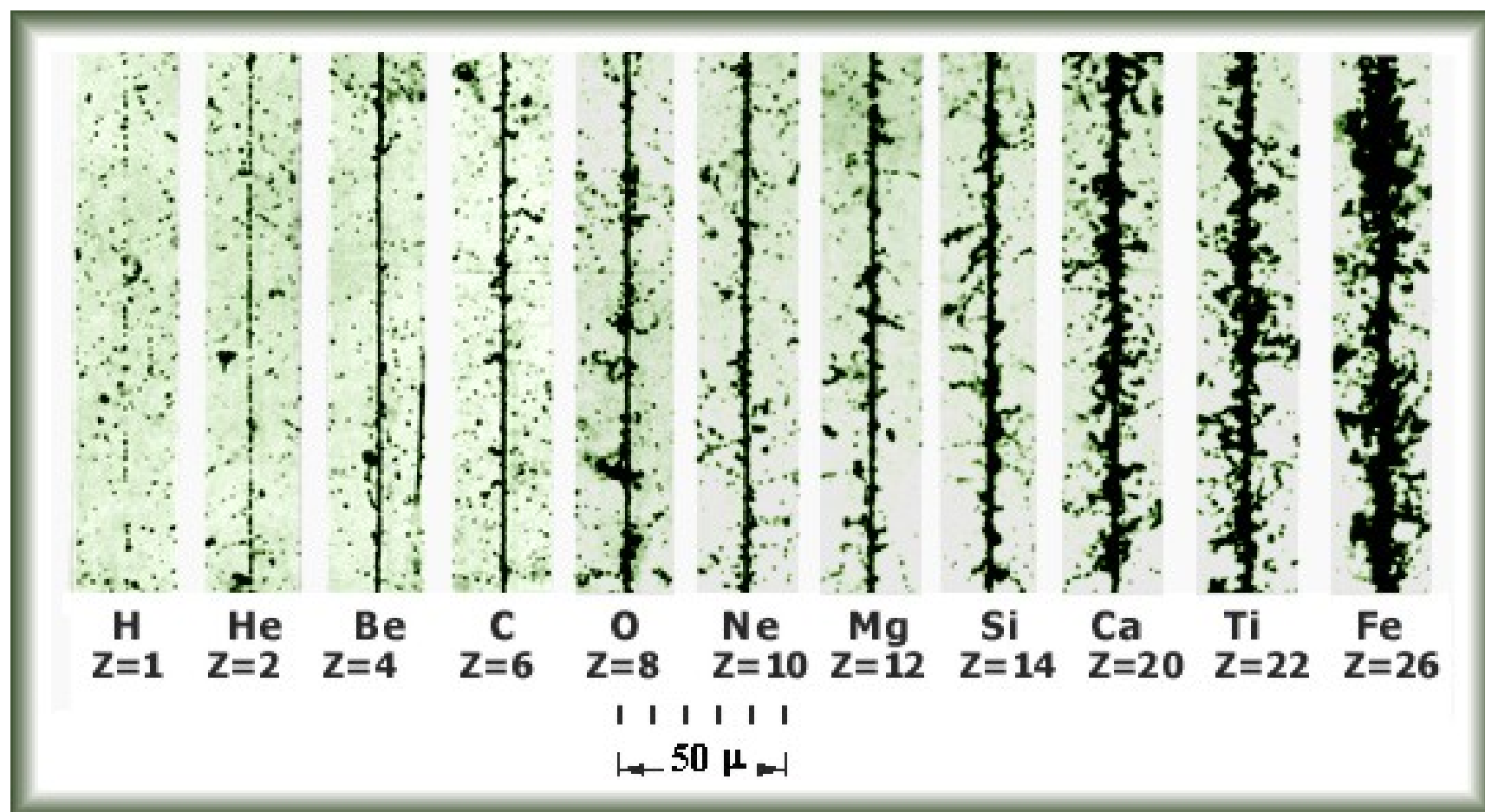


wysokość lotu detektora



wyznaczanie ładunku w emulsji

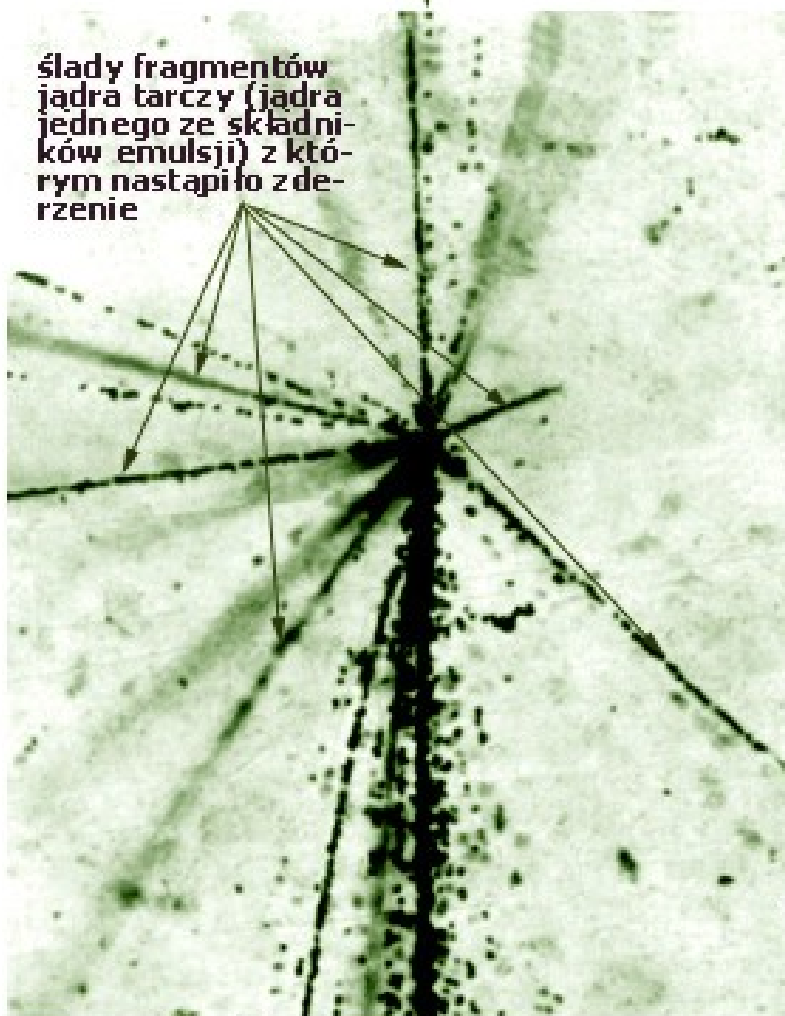
pomiar gęstości ziaren, przerw, elektronów delta



Oddziaływanie jądrowe w emulsji

śląd pozostawiony przez cząstkę pierwotną, (w tym wypadku jądro He o energii 30 TeV), która zderzyła się z jednym z jąder atomów w emulsji

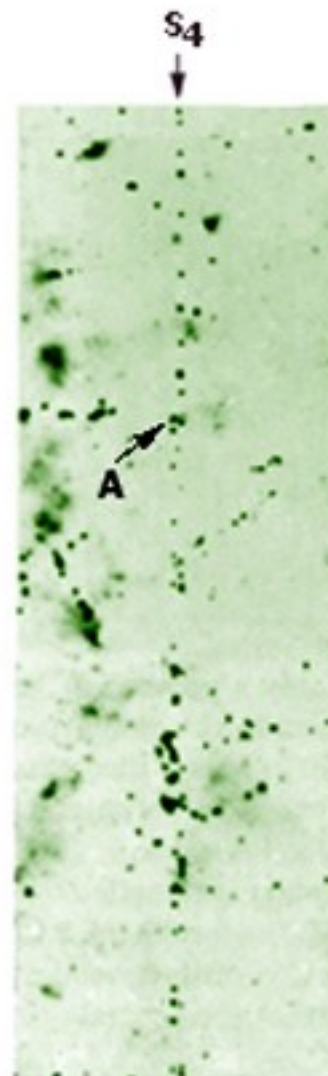
ślady fragmentów jądra tarczy (jądra jednego ze składników emulsji) z którym nastąpiło zderzenie



ślady pojedynczych cząstek wyprodukowanych w zderzeniu

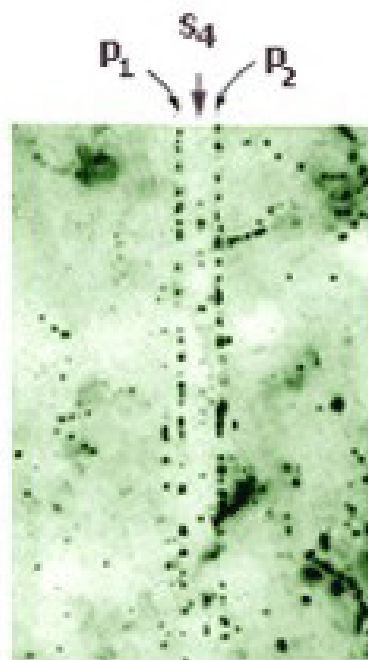


Obszar, w którym znajduje się wiele nałożonych na siebie śladów cząstek wyprodukowanych w zderzeniu (wśród nich ślad s4 pokazany obok)

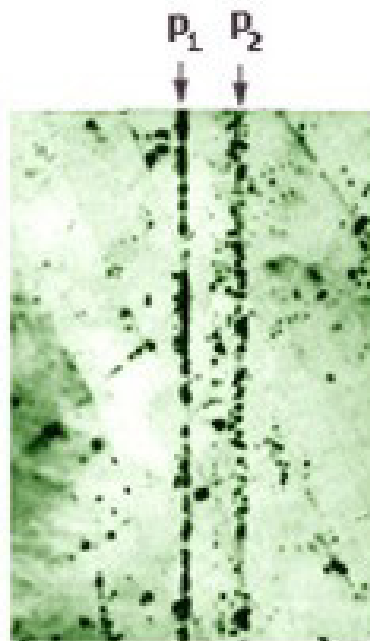


0,3cm p₁ s₄

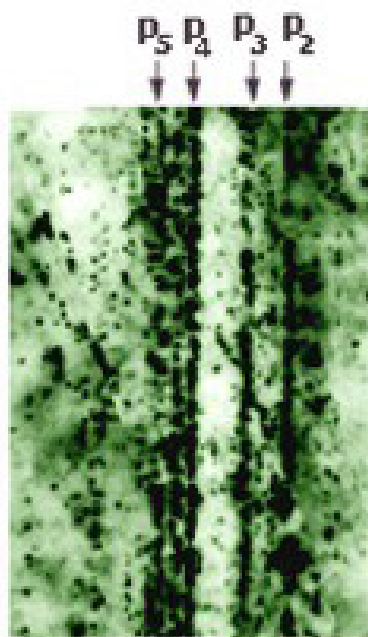
kaskada elektromagnetyczna



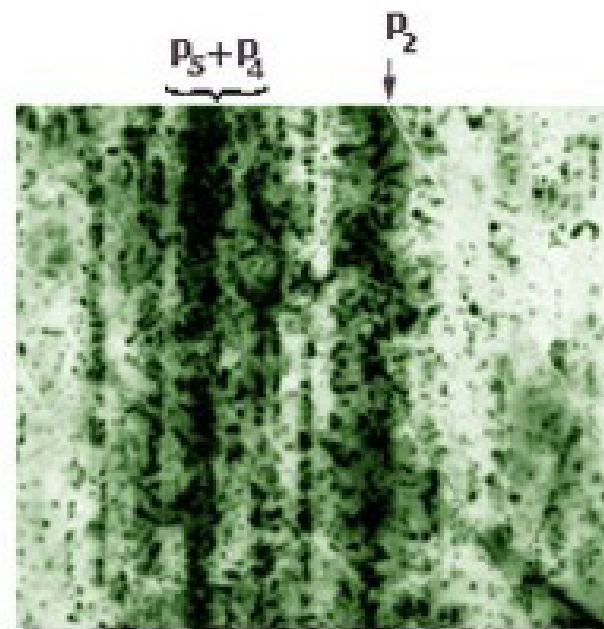
3,3 cm



4,7 cm



10,4 cm



18,8 cm

Kaskada elektromagnetyczna

„toy model” (Heitler 1944)

liczba cząstek po n pokoleniach

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

energia na cząstkę

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

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

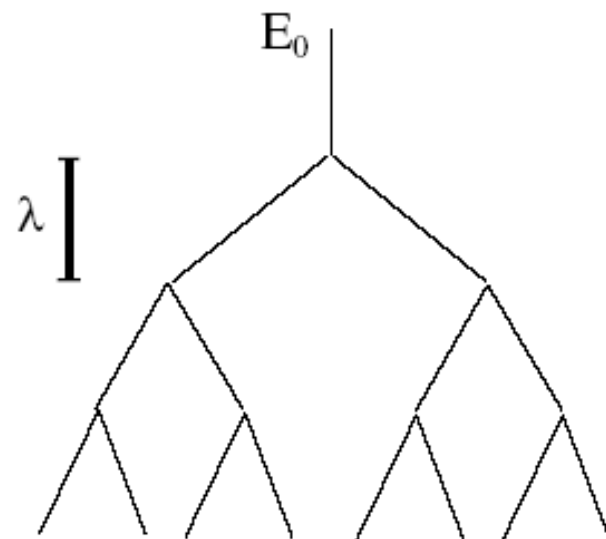
$$N(X_{\max}) = E_0/E_c$$

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

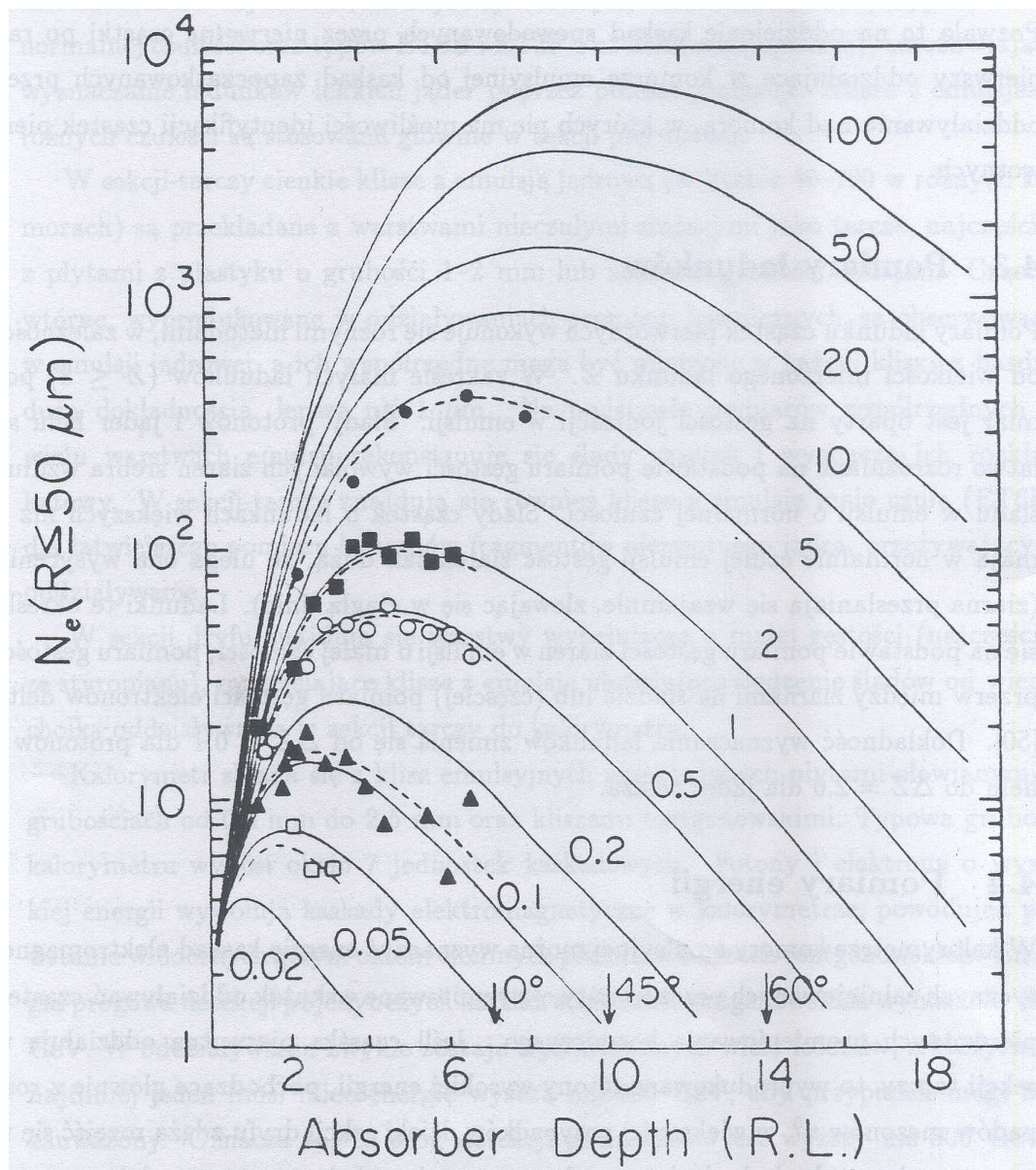
czyli

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

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



profil podłużny kaskady



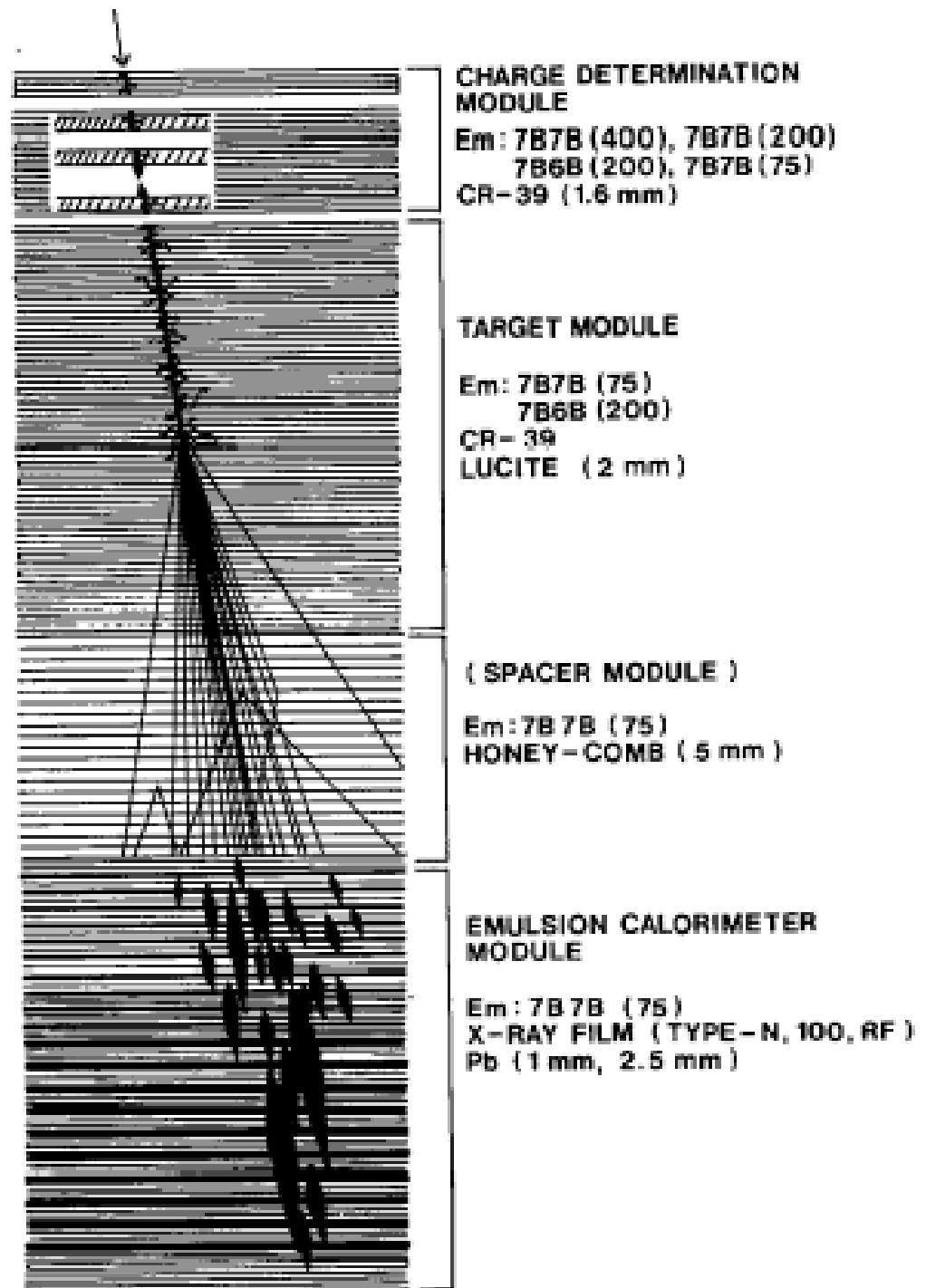
Komora emulsyjna JACEE

grubość kalorymetru ~ 7 RL

próg detekcji $\Sigma E_\gamma \geq 300 \text{ GeV}$

dokł. wyznaczania ładunku

$$\sigma_Z \approx \begin{matrix} 0.1 & p \\ 2.0 & Fe \end{matrix}$$



Wyznaczanie energii

zaczernienie kliszy rentgenowskiej

$$D = -\log(I/I_0)$$

$$D = D_0 (1 - 1/(1+\alpha n))$$

uwzględniając tło

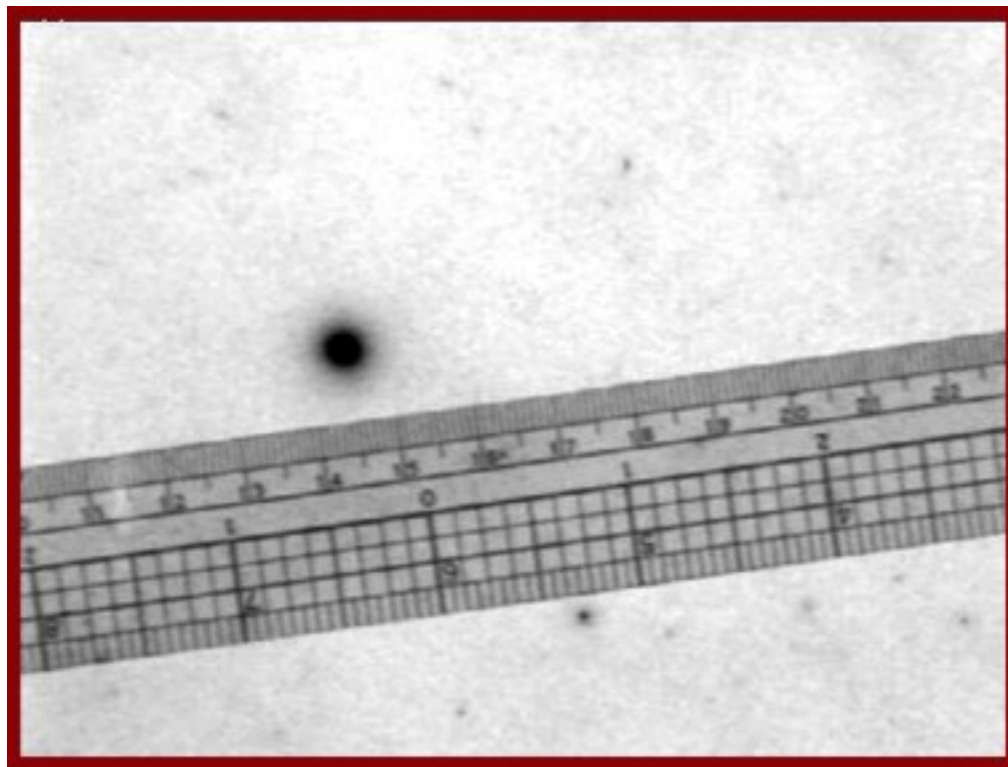
$$D_{\text{net}} = D_{\text{tot}} - D_b$$

Dokładność wyznaczania energii całkowitej

$$\sigma(E_m) = \sigma(\Sigma E_\gamma) \approx 18\% \quad \text{dla p}$$

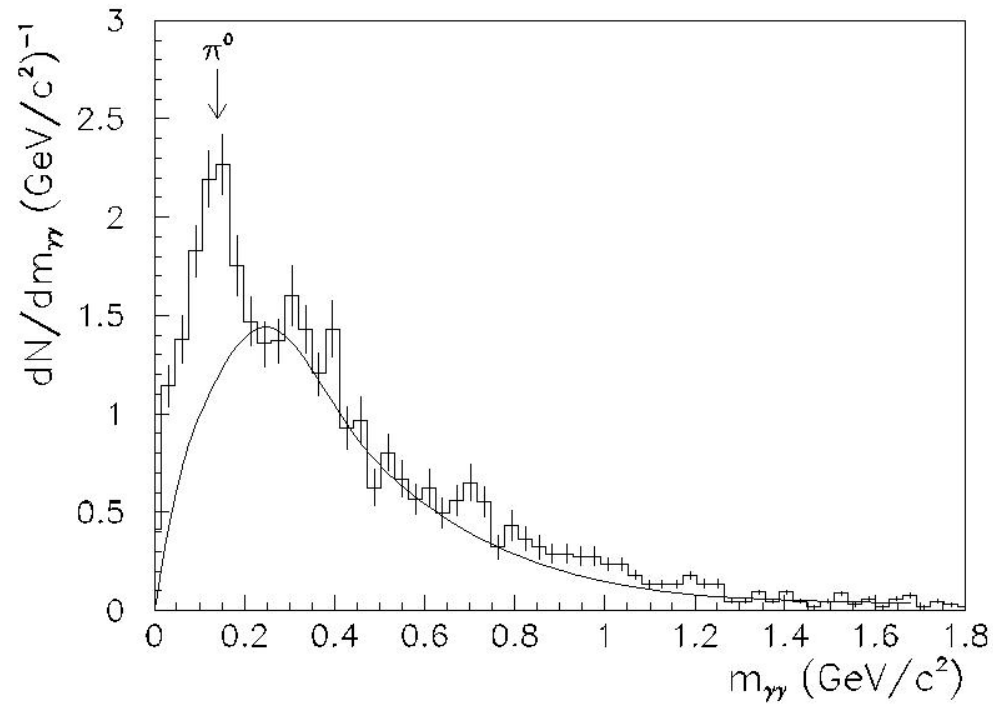
$$23\% \quad \text{dla He}$$

$$42\% \quad \text{dla Fe}$$



wyznaczanie energii

rozkład masy niezmienniczej $\gamma\gamma$



$\sigma(E_\gamma) \approx 22\%$ dokł. pomiaru energii fotonu

Akceptancja geometryczna

strumień cząstek przechodzących przez detektor

$$G(E)dE = \frac{1}{W(S\Omega PT)} N(E, E + dE)$$

czas
prawdop. oddział. i detekcji
kąt bryłowy
powierzchnia

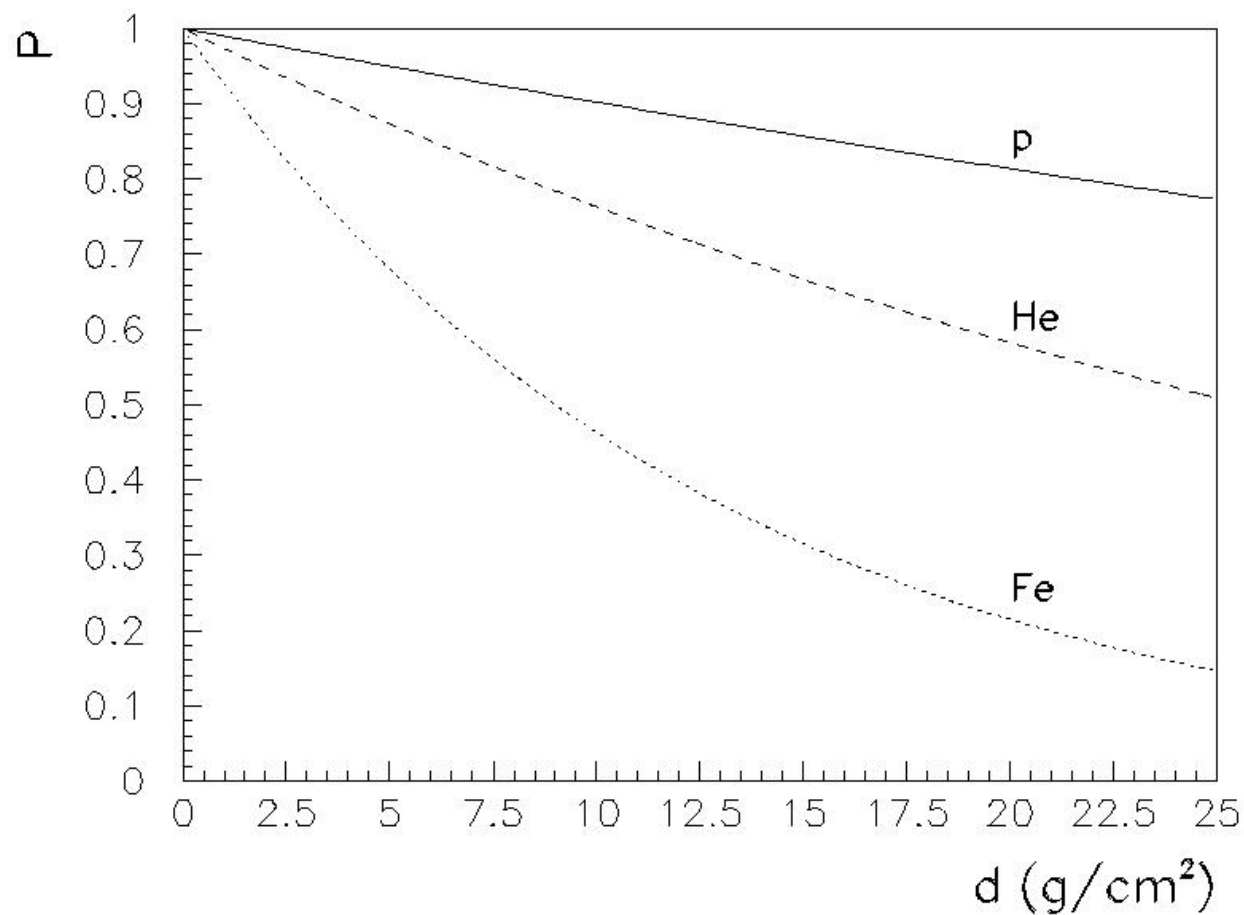
współczynnik wydajności detekcji

$$W(S\Omega PT) = \int \dots \int P_I(A, \lambda(x, y, \theta, \varphi)) \cdot P_D(A, \theta, t, E_m) dx dy d\theta d\varphi \cdot T$$

prawdop. oddziaływania
w detektorze

prawdop. detekcji

transmisja promieni kosmicznych przez atmosferę



poprawka na oddziaływania w atmosferze

~ 6% dla p

~ 40% dla Fe

Wyznaczanie widma

wyznaczamy widmo w funkcji $E_m = \Sigma E_\gamma$

obserwowane widmo

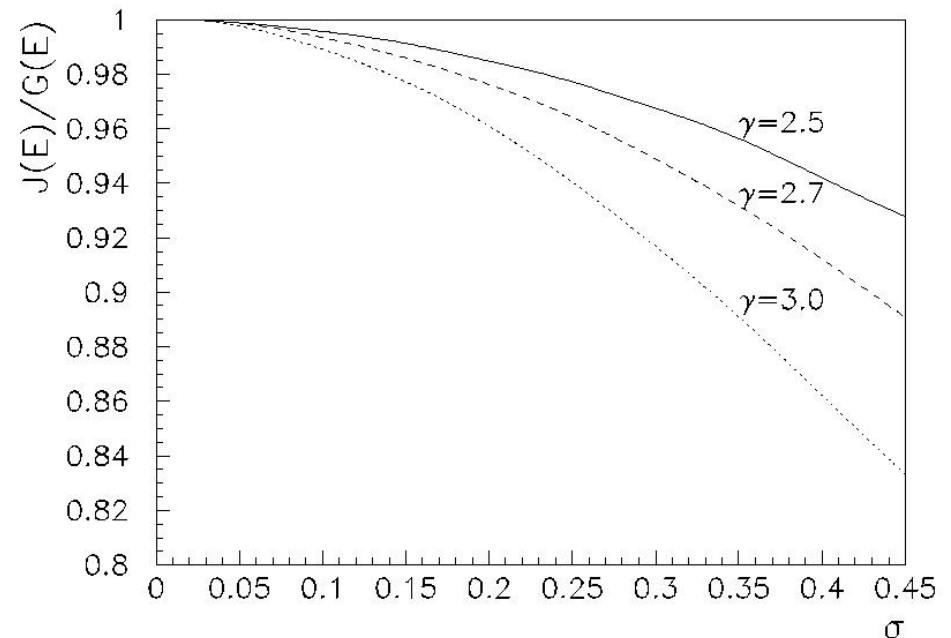
$$G(E_m) = \int_0^\infty J(\varepsilon) \frac{\exp(-(\varepsilon - E_m)^2 / 2\sigma_\varepsilon^2)}{\sqrt{2\pi}\sigma_\varepsilon} d\varepsilon$$

„prawdziwe”

zdolność rozdzielcza

wstawiając $J(\varepsilon) = \varepsilon^{-\gamma}$ wyliczamy $J(E)/G(E)$ w funkcji σ_E i γ

poprawka: 4% dla p
11% dla Fe



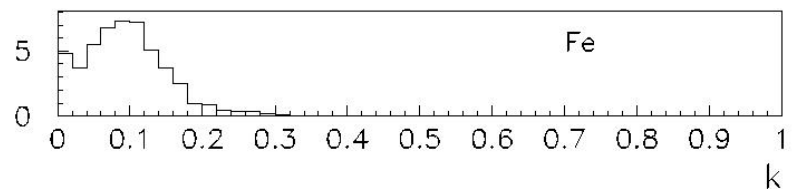
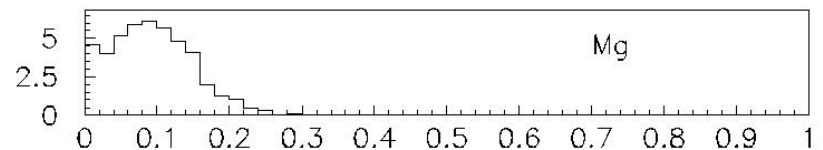
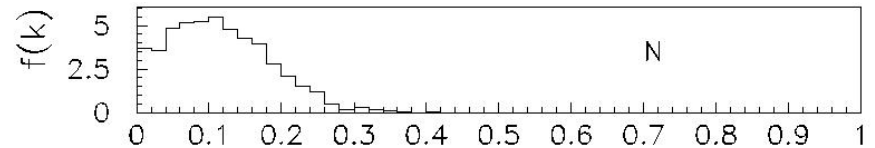
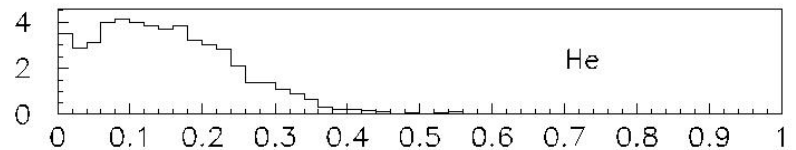
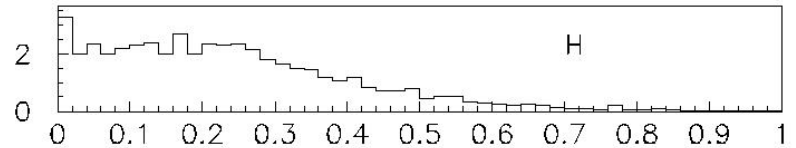
wyznaczanie widma

Mierzymy $E_m = \Sigma E_\gamma$, chcemy wyznaczyć E_0

$$E_m = k E_0$$

→ duża niepewność wyznaczania energii pojedynczego przypadku

rozkłady współczynnika nieelastyczności k



widmo pierwotne

jeśli $I(E_0)$ - prawdziwe widmo cząstek pierwotnych
 $J(E_m)$ - widmo wyznaczone

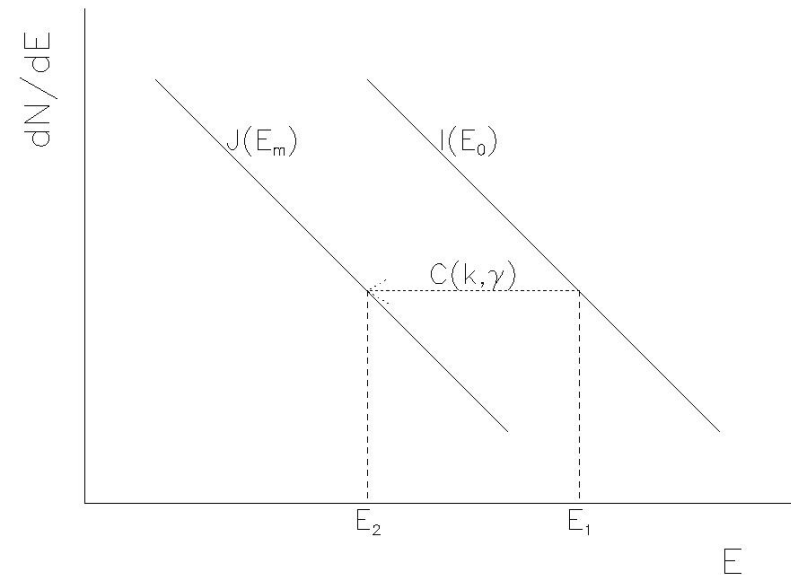
$$I(E_0)dE_0 = I_0 E_0^{-\gamma} dE_0$$

to

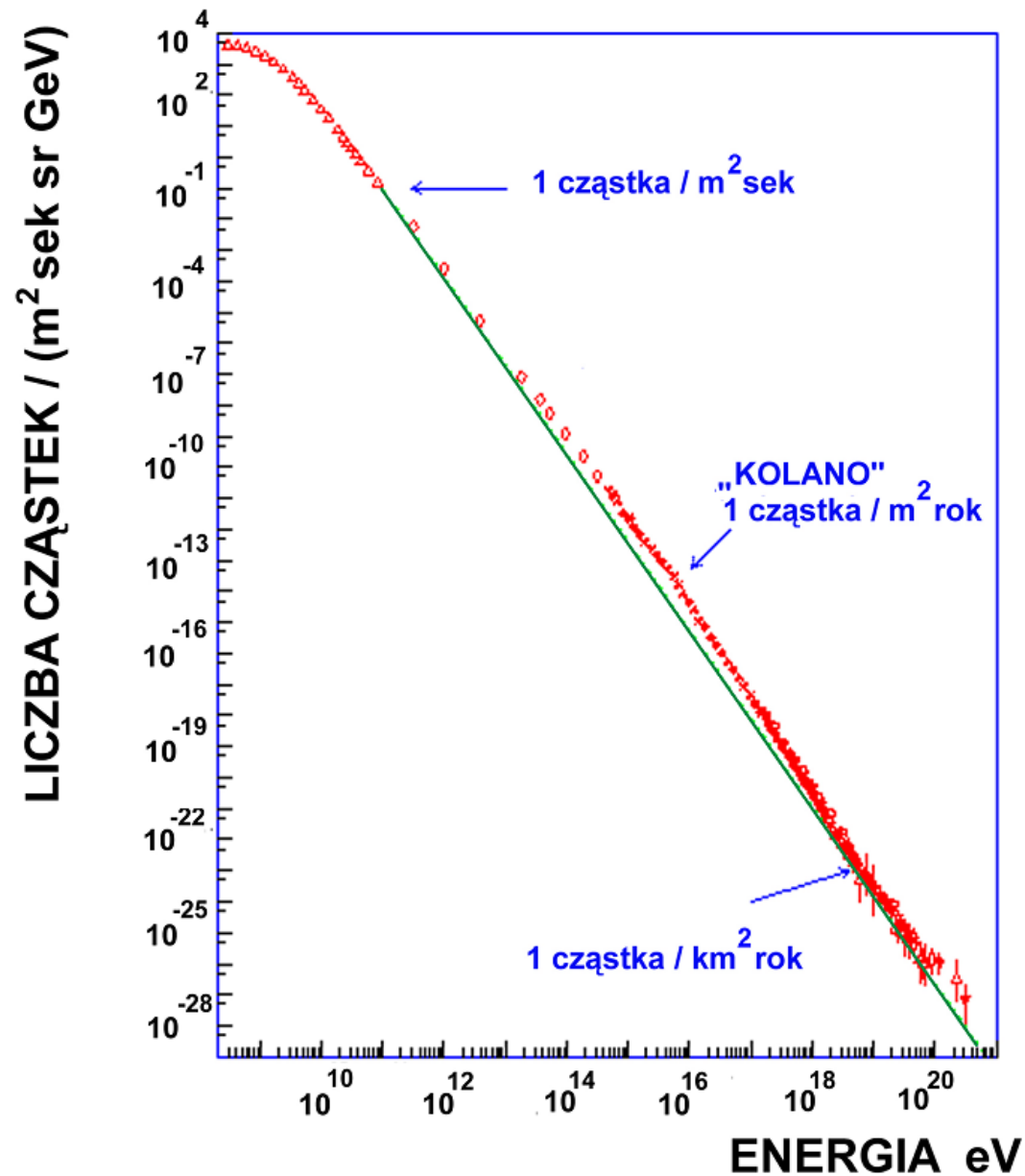
$$\begin{aligned} J(E_m)dE_m &= dE_m \int_k \int_{E_0} f(k)dk I_0 E_0^{-\gamma} dE_0 \delta(E_m - kE_0) \\ &= I_0 E_m^{-\gamma} dE_m \int_0^1 k^{\gamma-1} f(k)dk \end{aligned}$$

jednoznaczna relacja między **widmem** $J(E_m)$
i **widmem** $I(E_0)$
nachylenia takie same, ale widma przesunięte
na skali energii o czynnik

$$C(k, \gamma) = \left(\int_0^1 k^{\gamma-1} f(k)dk \right)^{-1/(\gamma-1)}$$



Widmo energii promieni kosmicznych



Detekcja promieni kosmicznych

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

λ_p droga oddziaływania protonu

L_R jednostka radiacyjna

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

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

widmo energetyczne, skład chemiczny

skład izotopowy

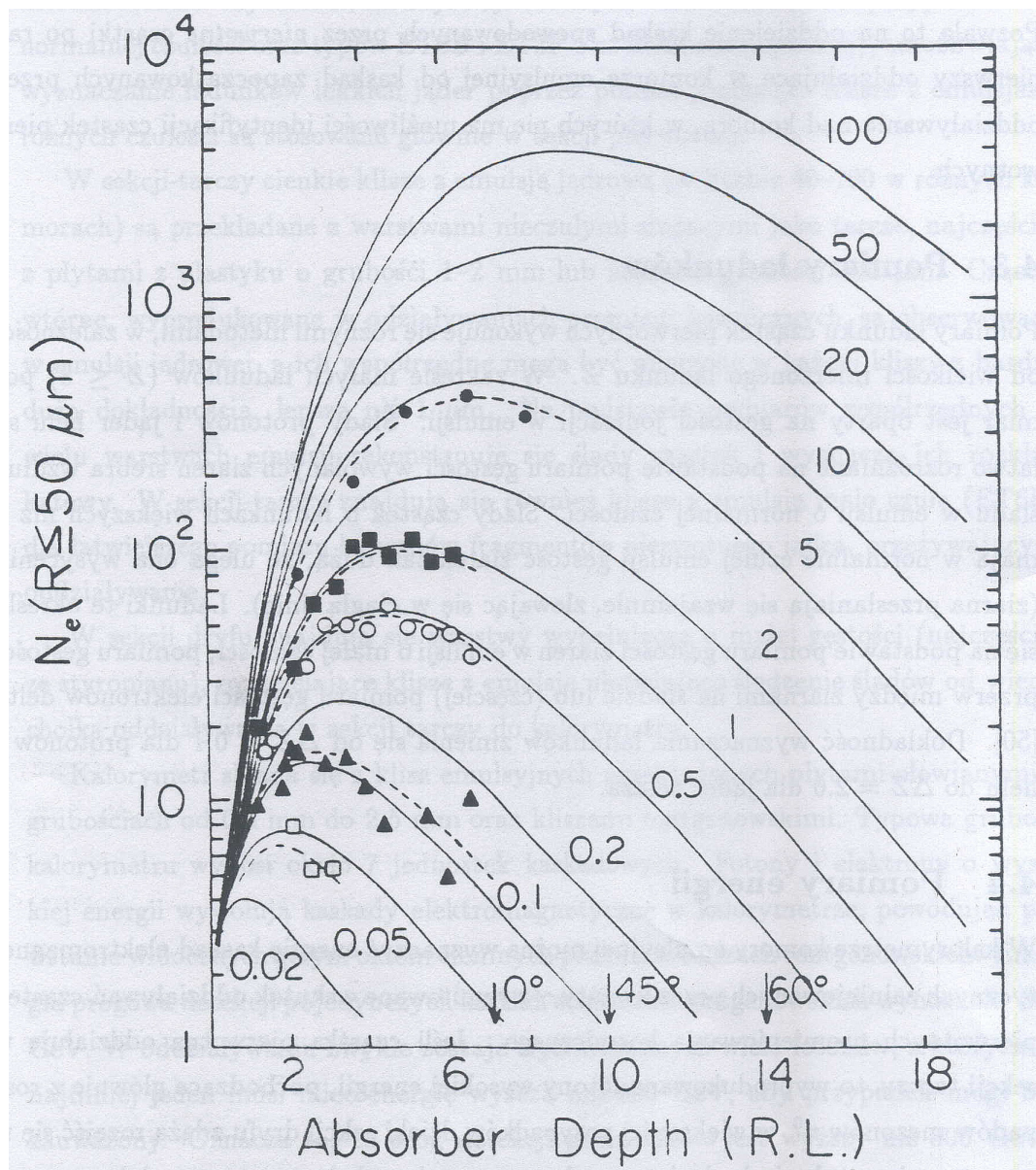
DETEKCJA POŚREDNIA $E > 10^{14} \text{ eV}$

Rejestracja wielkich pęków atmosferycznych na
powierzchni Ziemi

zbiorcze widmo energetyczne

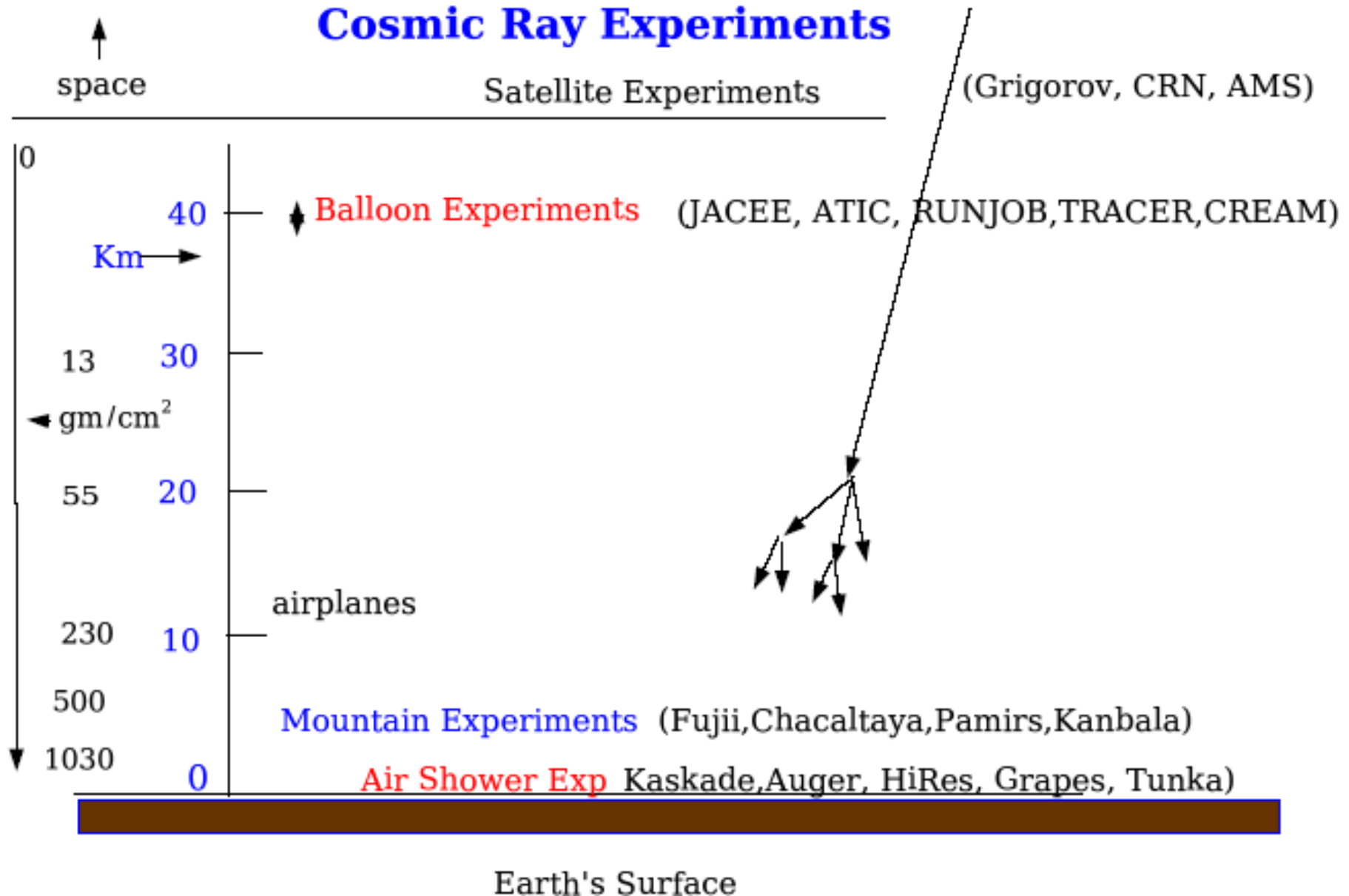
skład chemiczny (przybliżony)

profil podłużny kaskady



Eksperymenty

Cosmic Ray Experiments

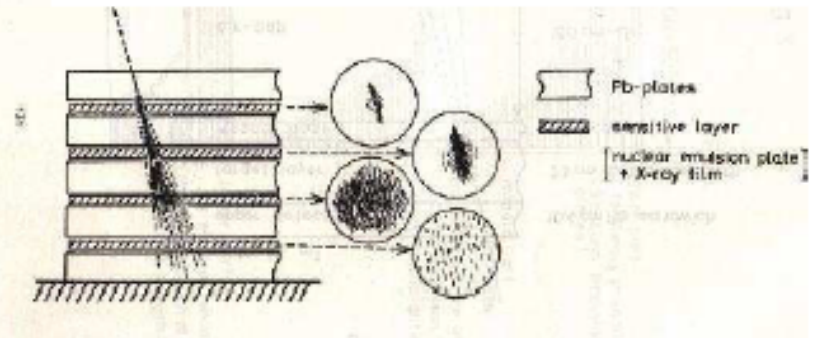
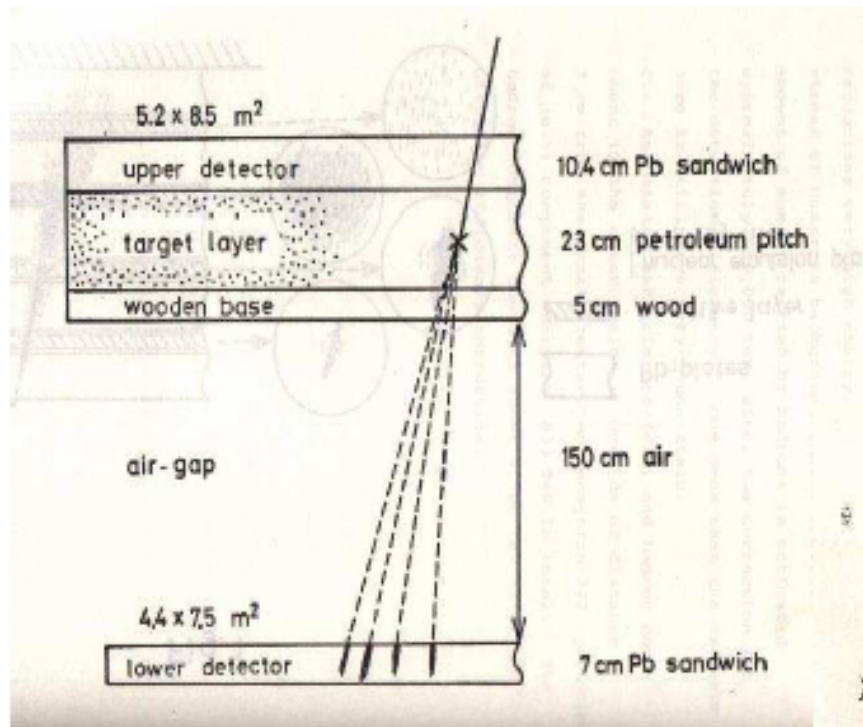




Laboratorium
Chacaltaya w Boliwii
(5200 mnpm)

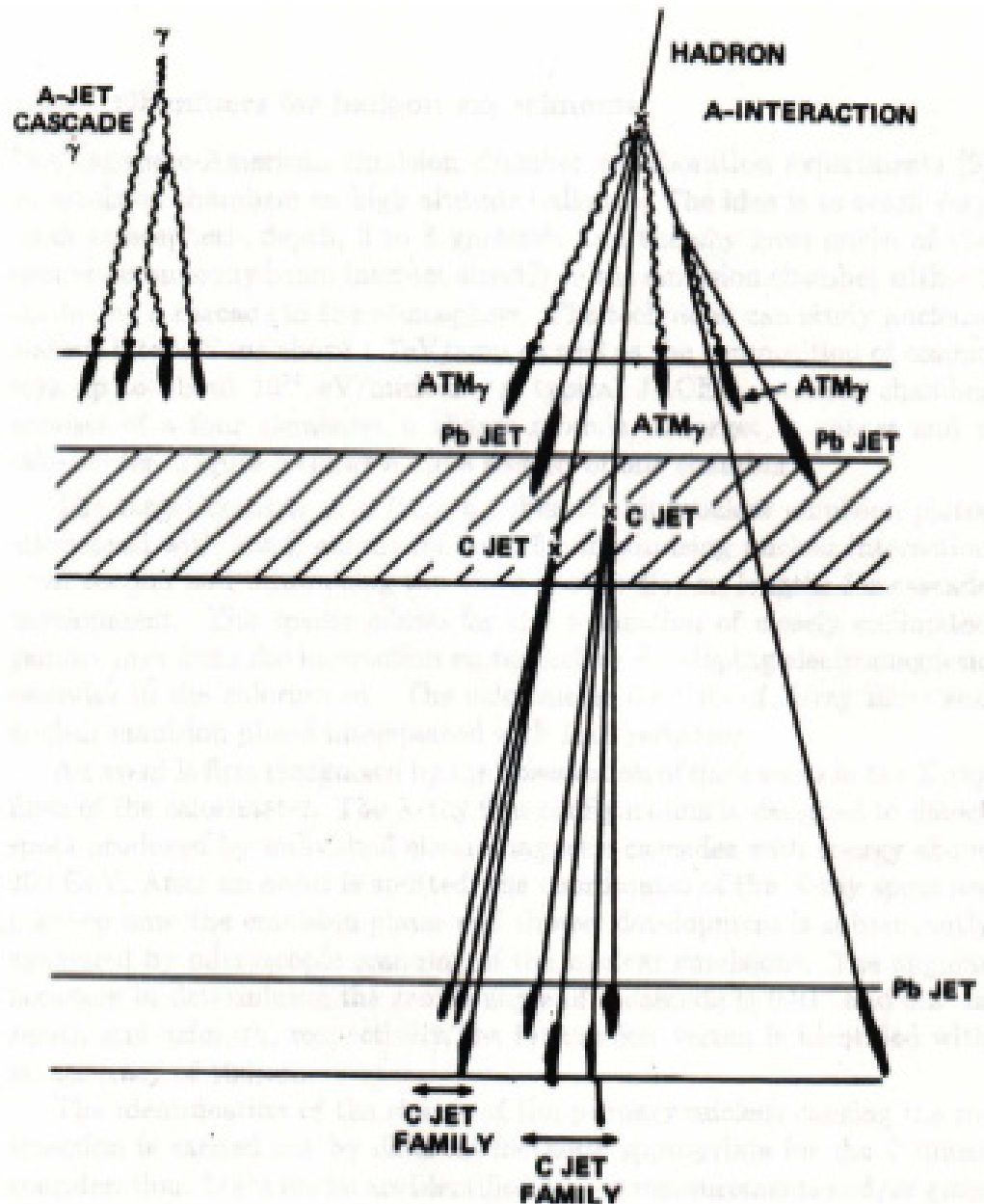
Eksperymenty wysokogórskie

Example of Mountain Level EC Detectors:
Large collecting areas and high energy threshold ~ TeV
Brazil-Japan Chacaltaya Chamber
At 17,000 feet



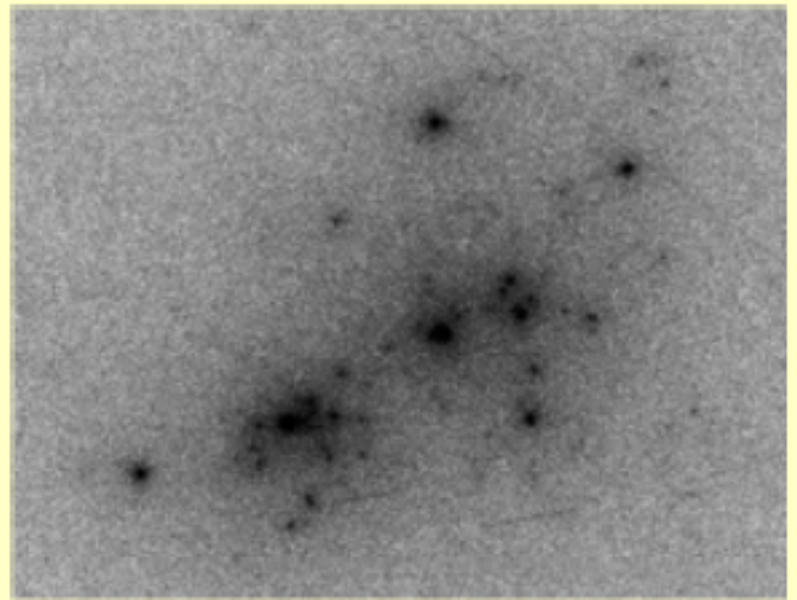
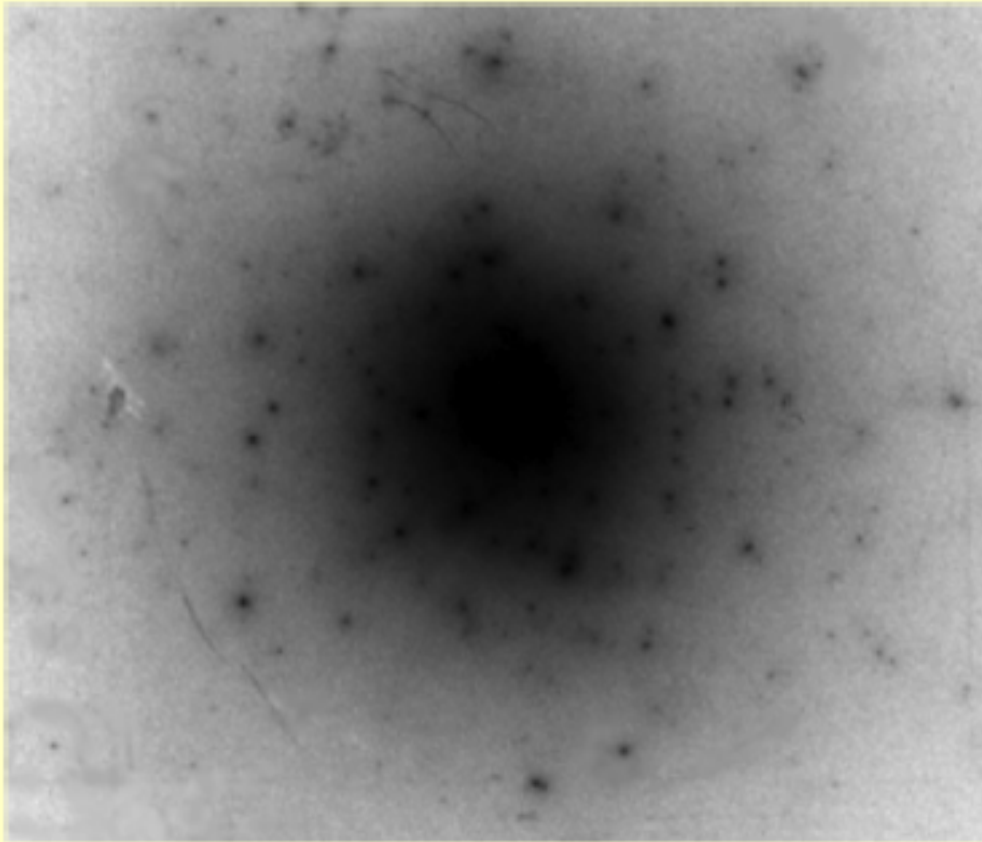
Active elements: emulsions. A typical C-jet event

kaskady w komorze emulsyjnej

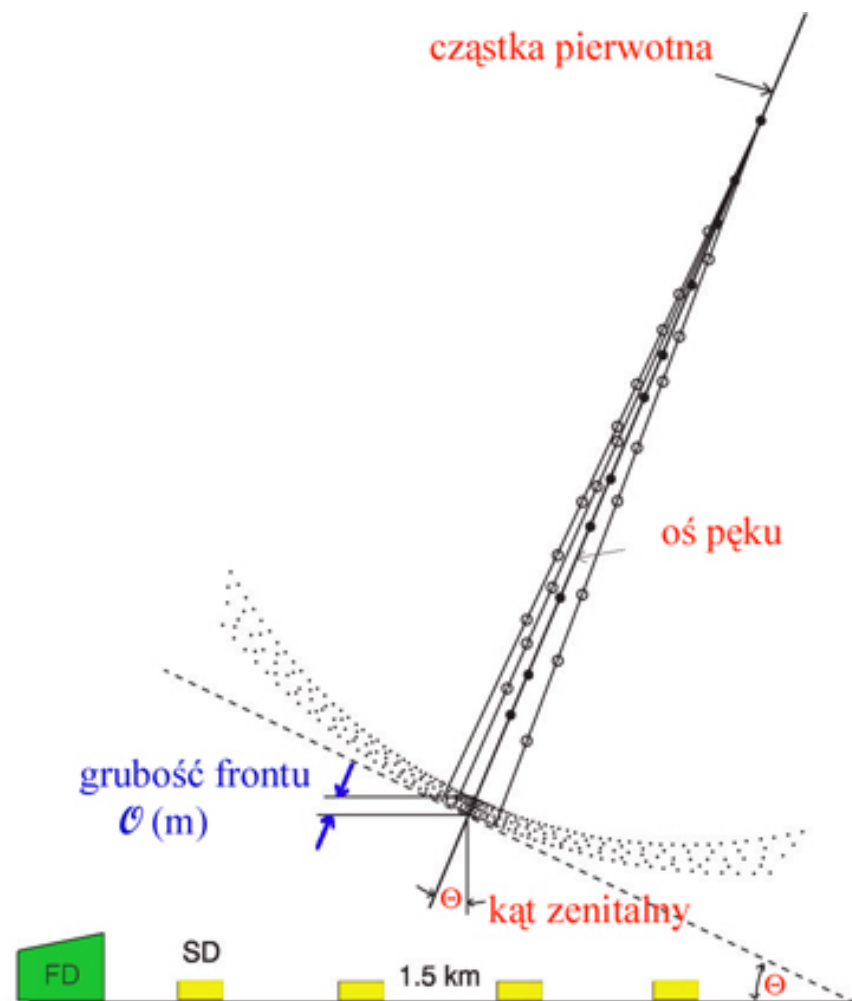
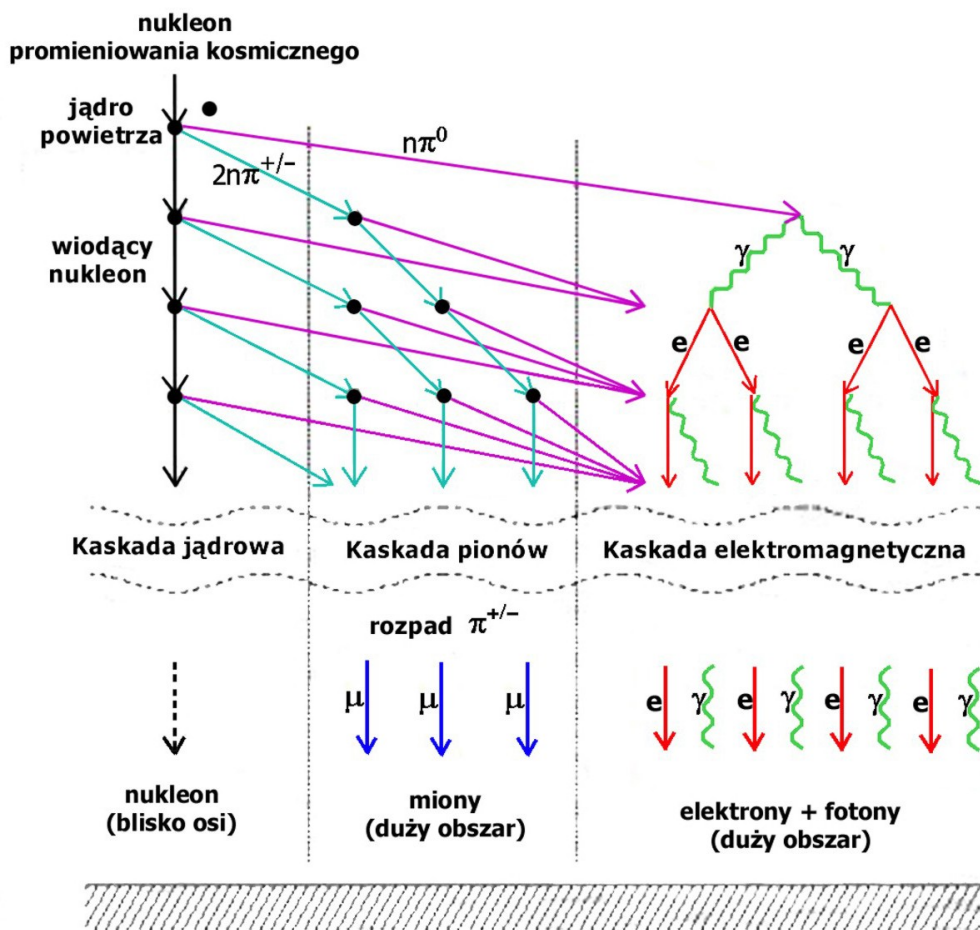


kaskady w komorze emulsyjnej

Examples of emulsion chamber events (one layer each)



Wielki pęk atmosferyczny



Sieć detektorów naziemnych

KASCADE

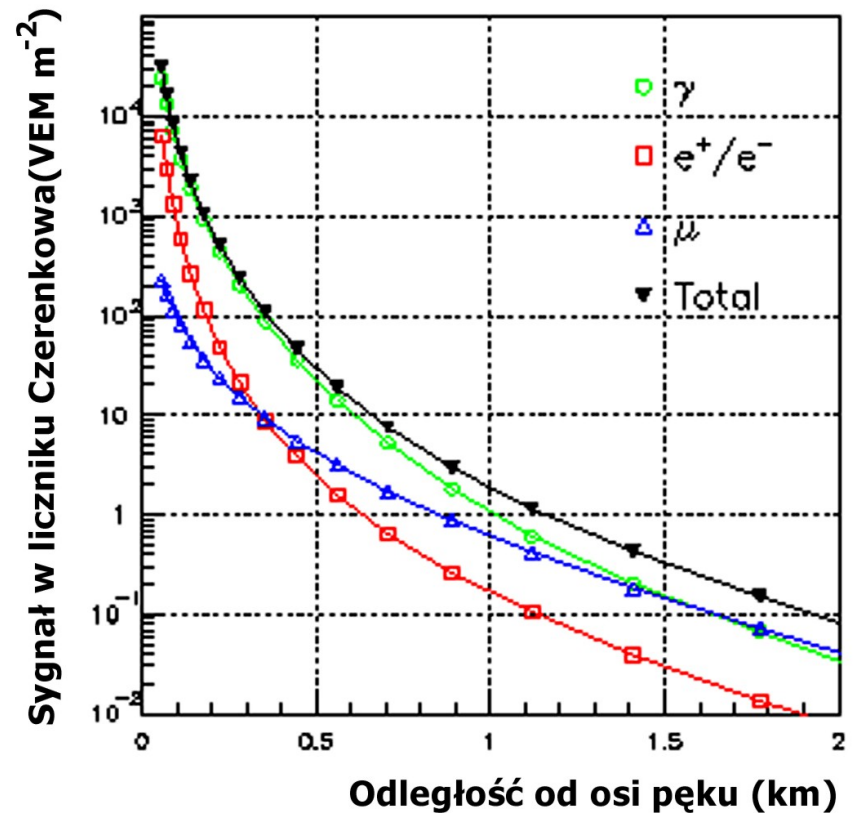
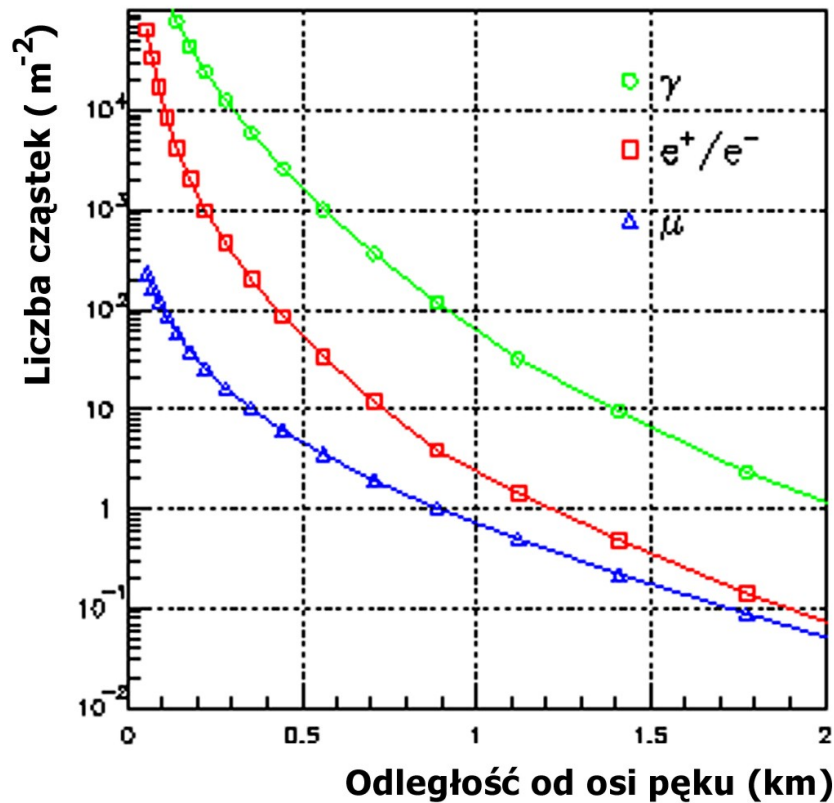
Measurements of air showers in the energy range $E_0 = 100 \text{ TeV} - 80 \text{ PeV}$

↳ = Karlsruhe Shower Core and Array Detector

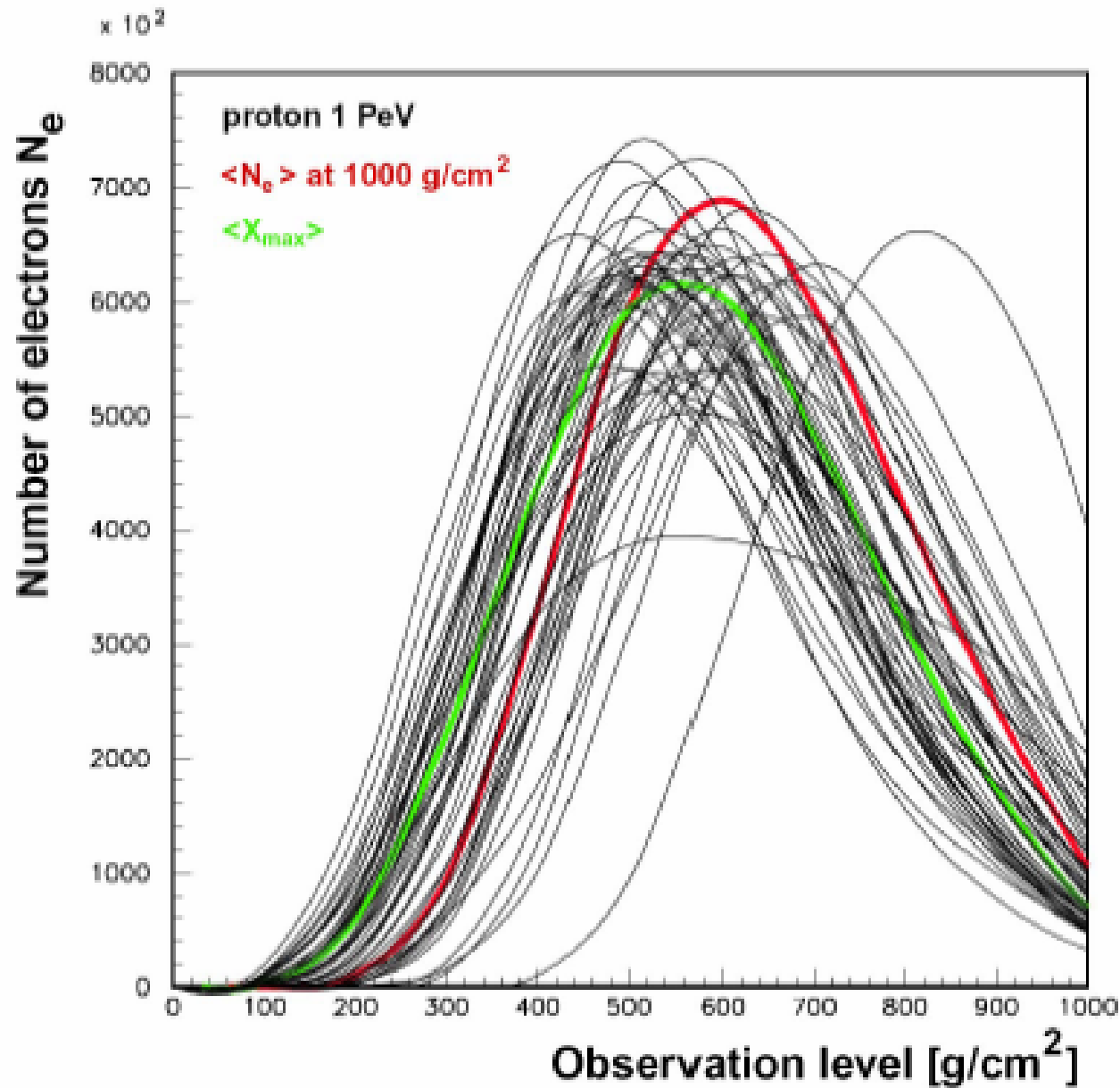


Rozkłady poprzeczne cząstek w pęku

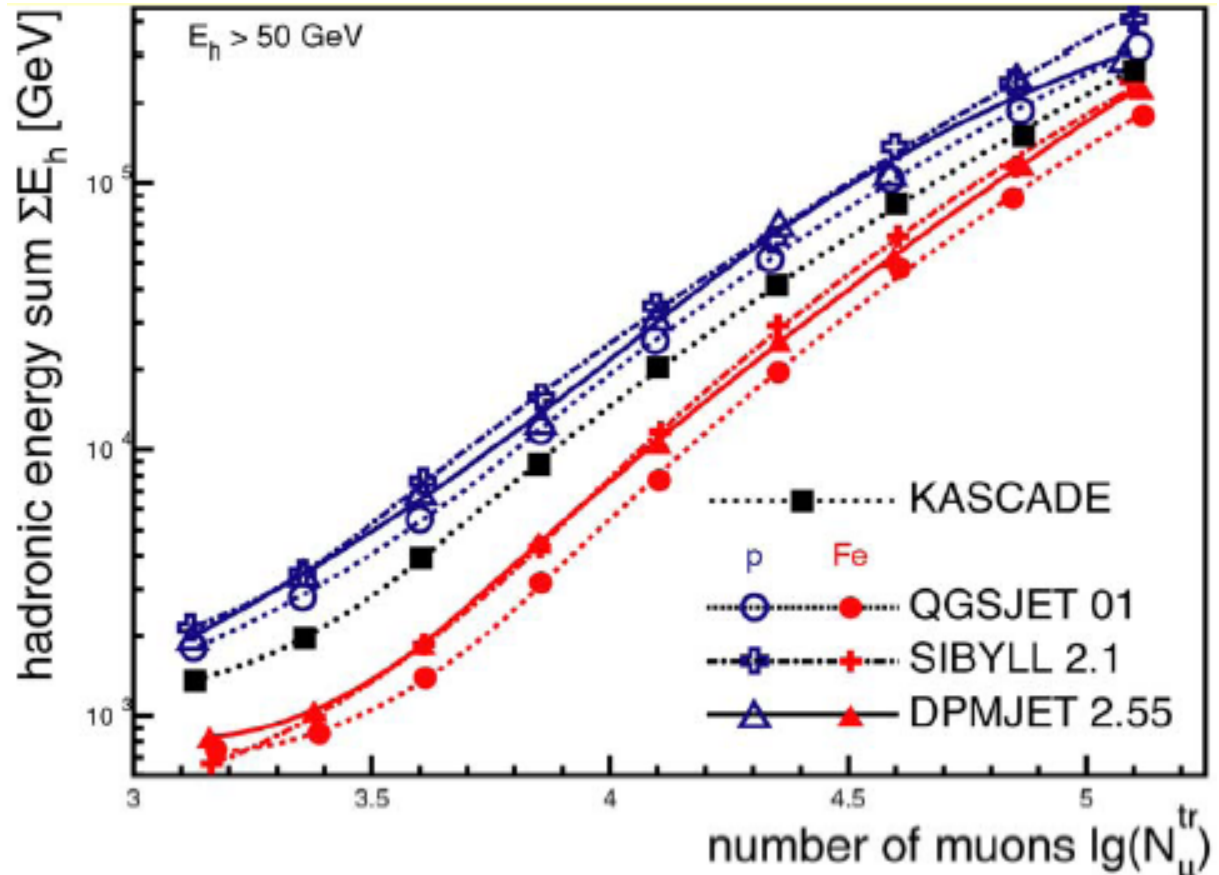
proton $E_0 = 10^{19}$ eV



rozwój podłużny pęku



Analiza danych



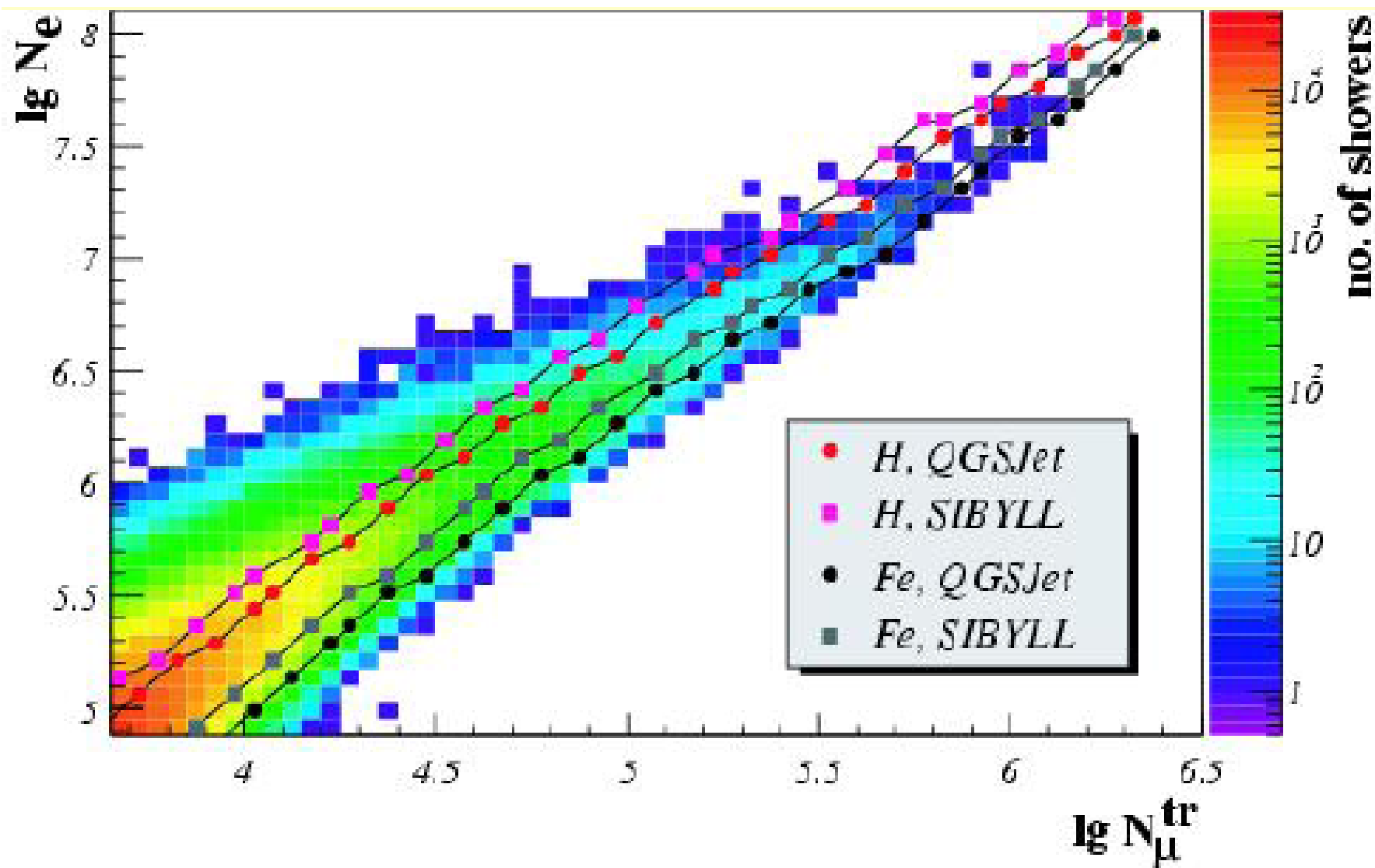
pomiar pośredni

mierzymy N_e , N_{μ}
wyznaczamy E , A

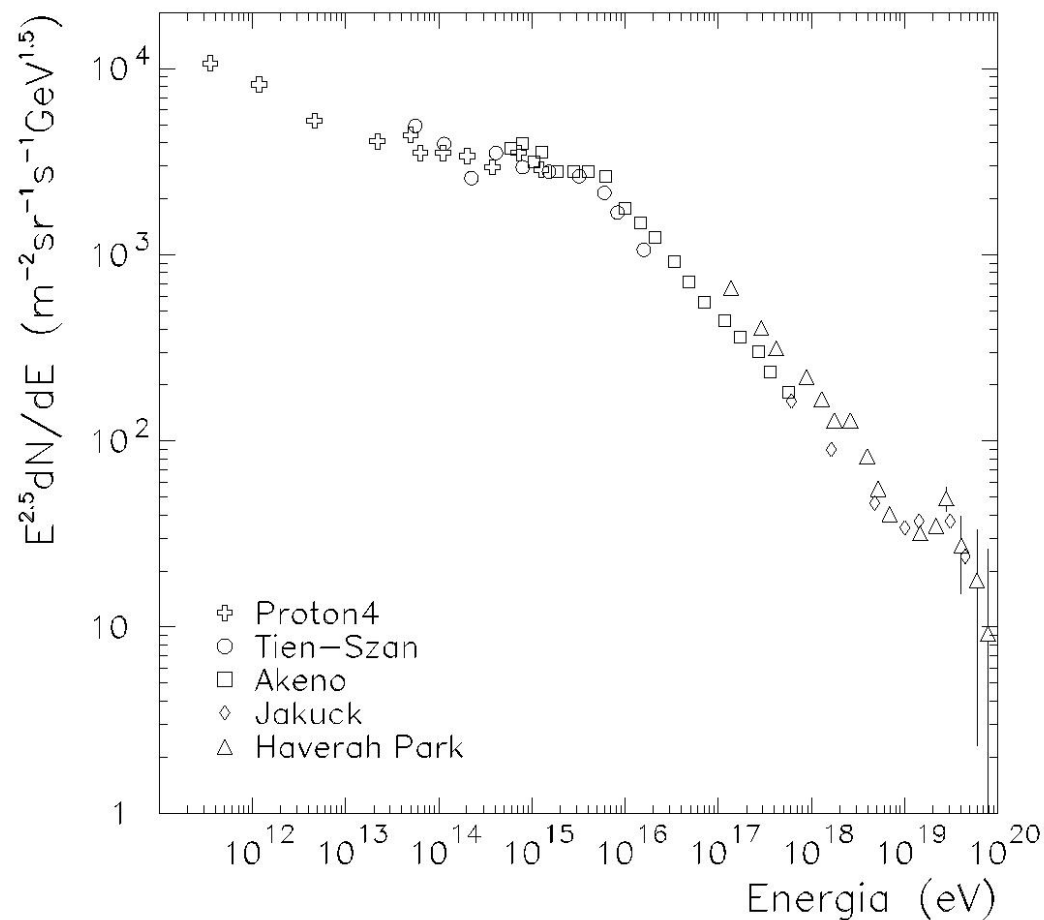
własności oddziaływania?

(przekrój czynny,
rozkłady krotności i energii produkowanych cząstek)

interpretacja danych a model oddziaływania



załamanie widma



$\sim E^{-2.7}$ poniżej 10^{15} eV

$\sim E^{-3.1}$ powyżej 10^{16} eV - wyjaśnienie???

Załamanie („kolano”) widma

załamanie wynikiem

- zmiany mechanizmu akceleracji ?
- efektów propagacji ?
- własności źródeł ?

Akceleracja

- zwykłe supernowe $E_{\max} = Z 10^{14} \text{ eV}$
- „wind-SN” $E_{\max} = Z 10^{17} \text{ eV}$

źr. pozagalaktyczne $E > 10^{18} \text{ eV}$

→ zmiana składu - obciążenia widm poszczególnych pierwiastków

Propagacja

ucieczka - zmiana składu

Własności źródeł

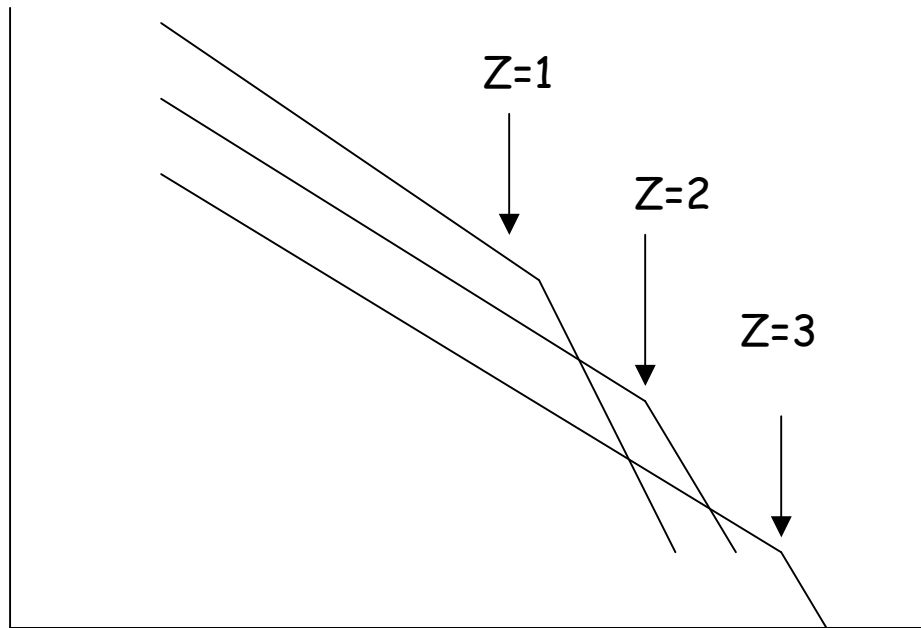
np. pulsar wewnątrz SNR

załamanie wynikiem oddziaływań

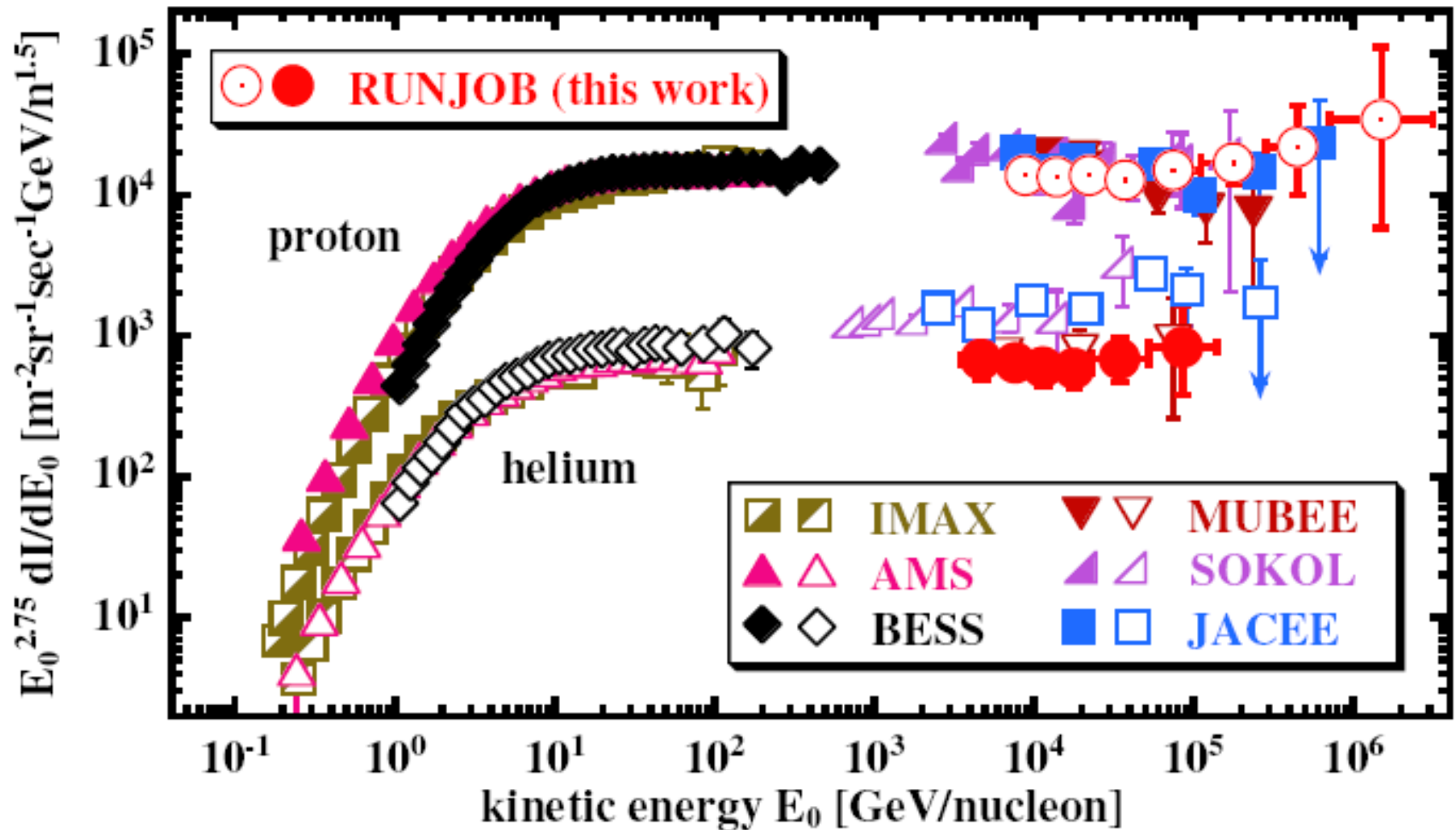
(p: fotoprodukcja; jądra: fragmentacja (γ, p) i (γ, n))

$\langle \ln A \rangle \approx \text{const}$ do załamania, powyżej - protony

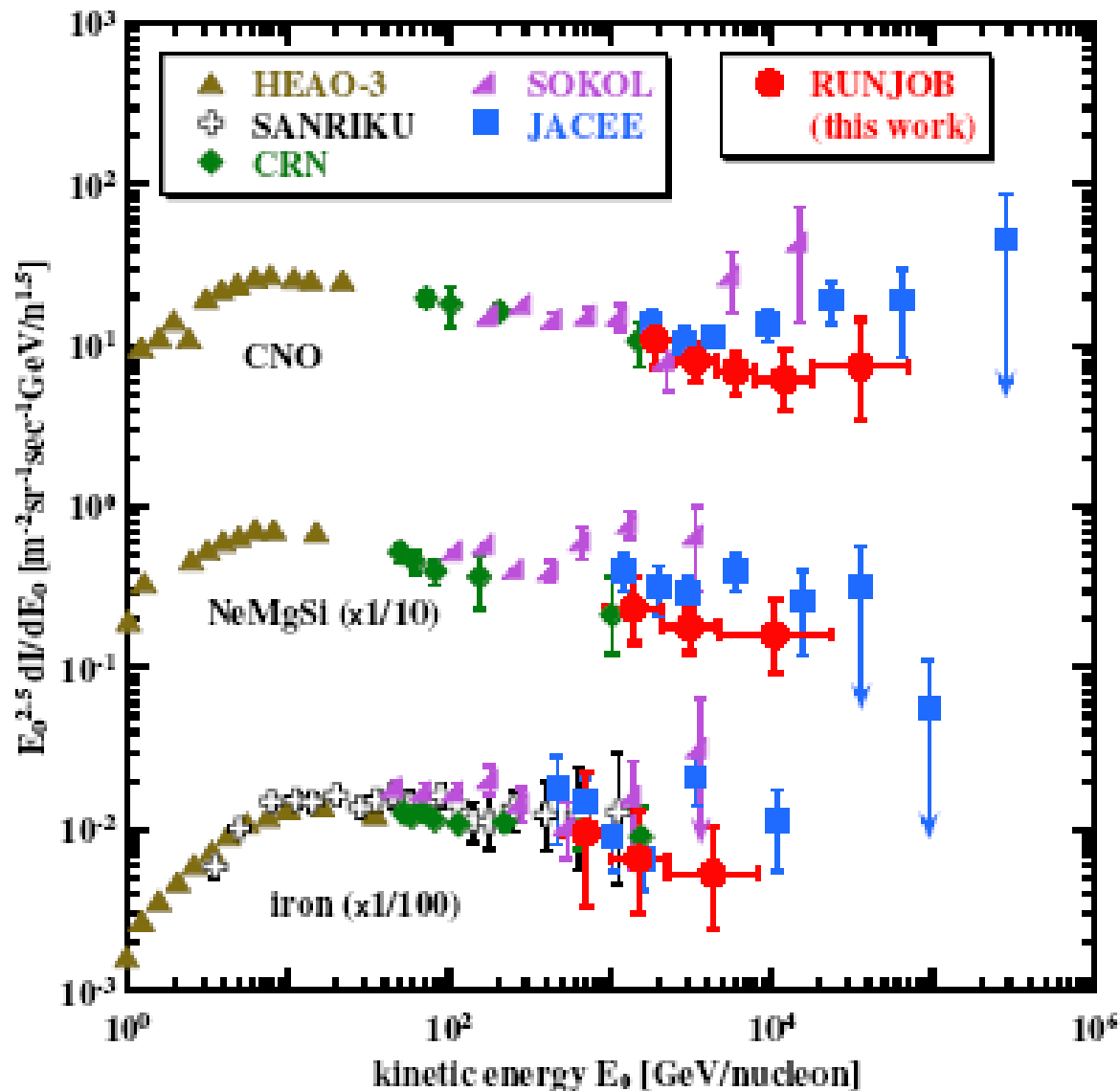
oczekiwany kształt widma



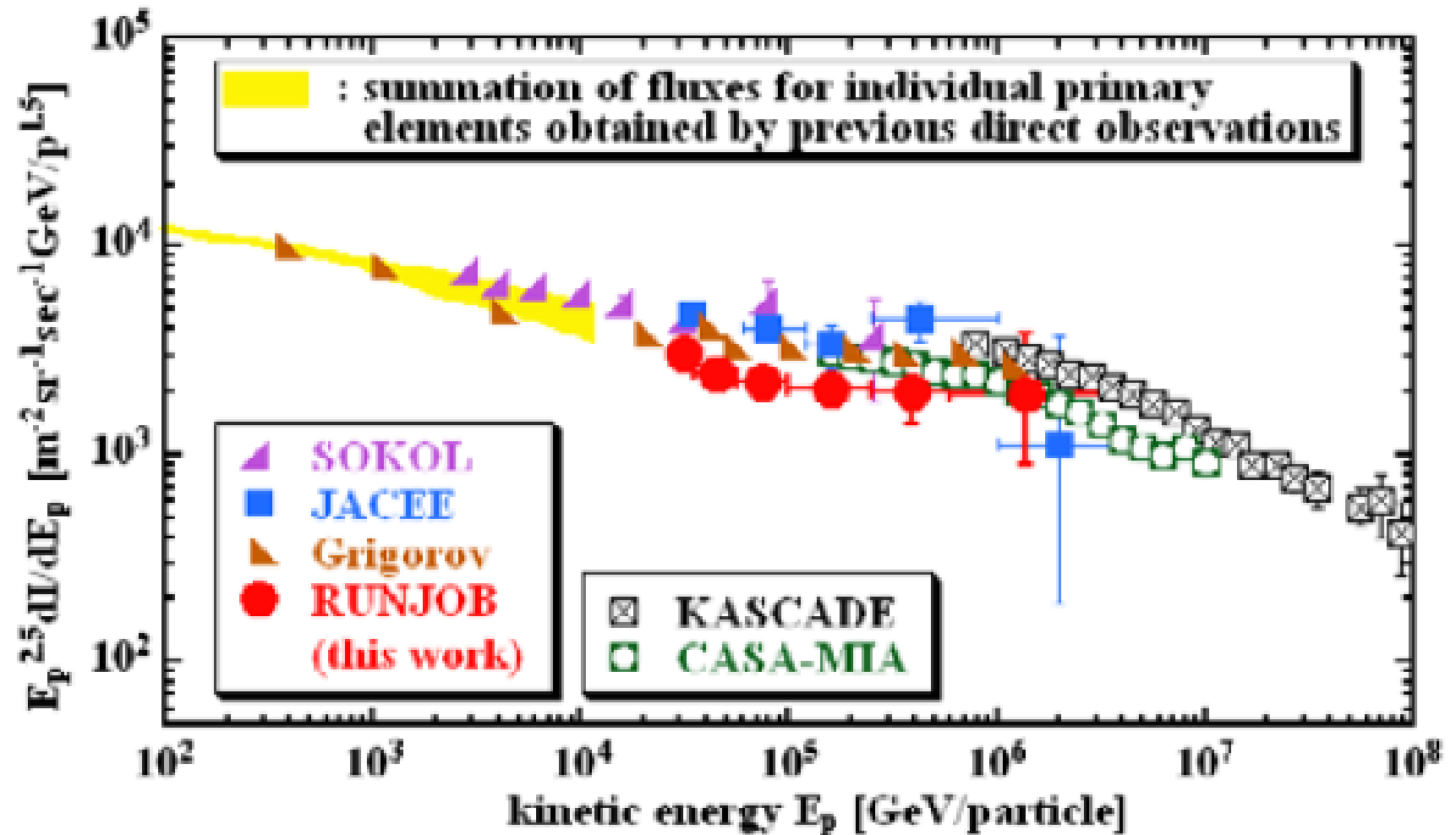
widma p, He



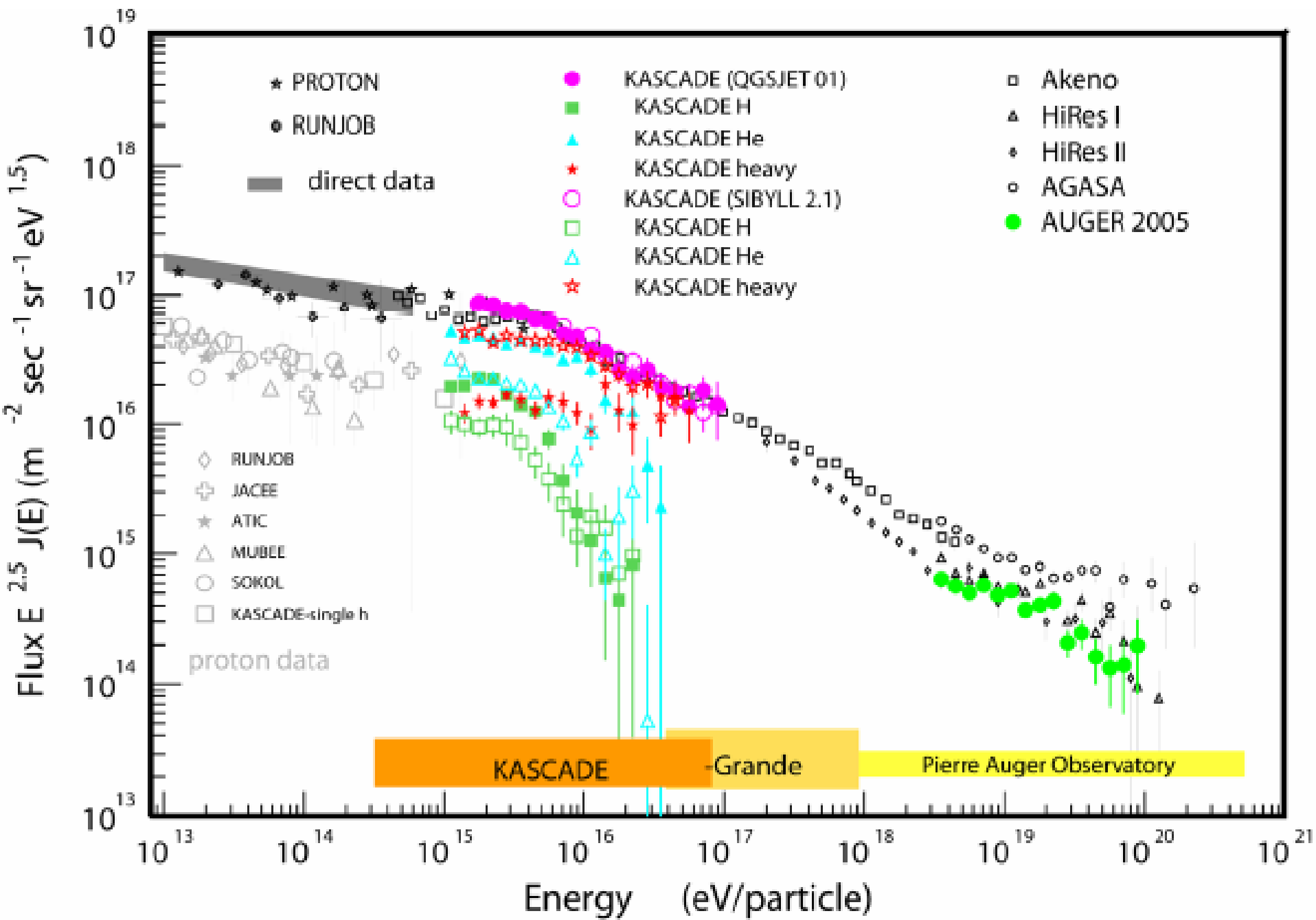
widma ciężkich jąder



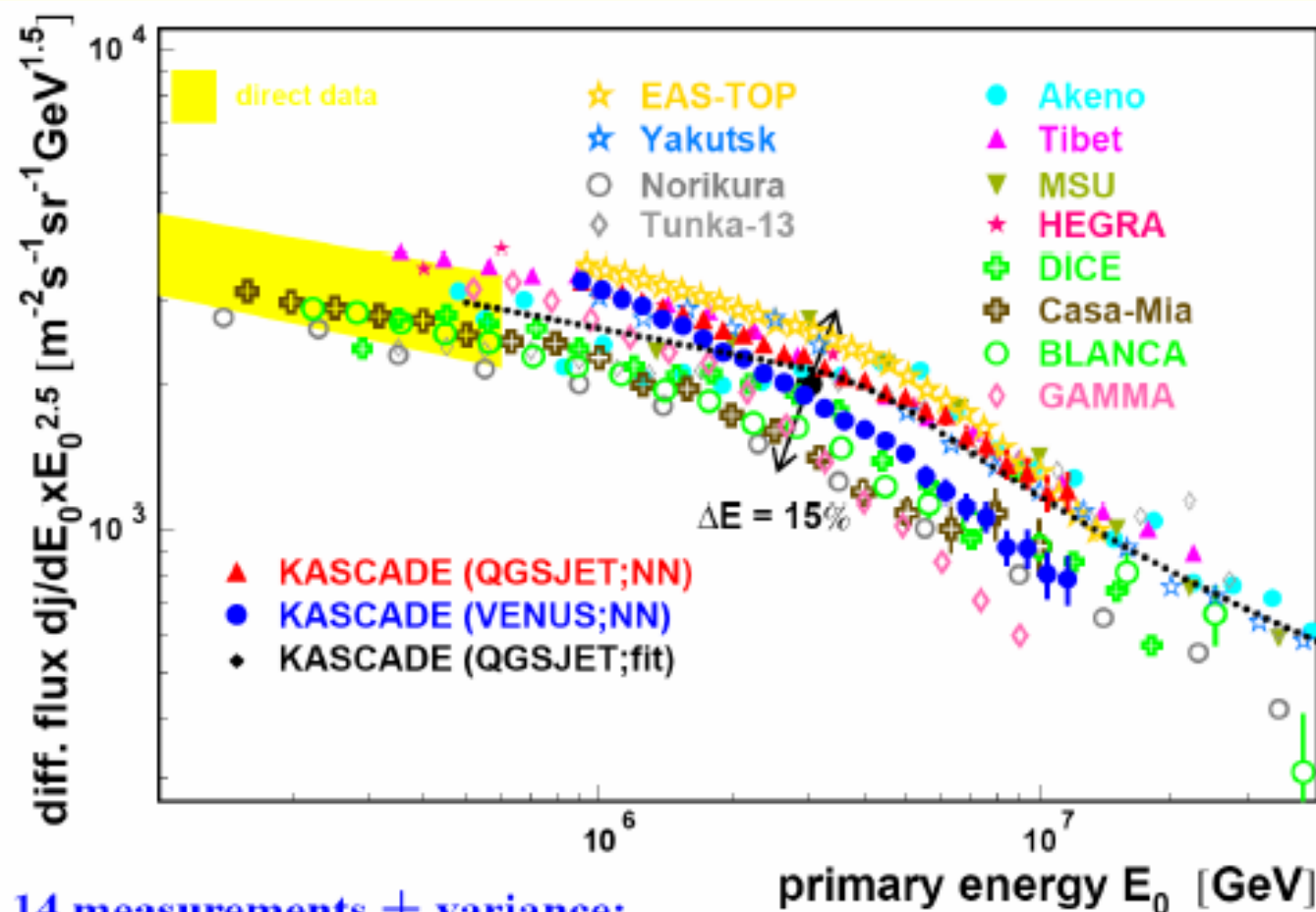
widmo zbiorcze



widmo zbiorcze



Experimental results: energy spectrum



Average values from 14 measurements $\pm$ variance:

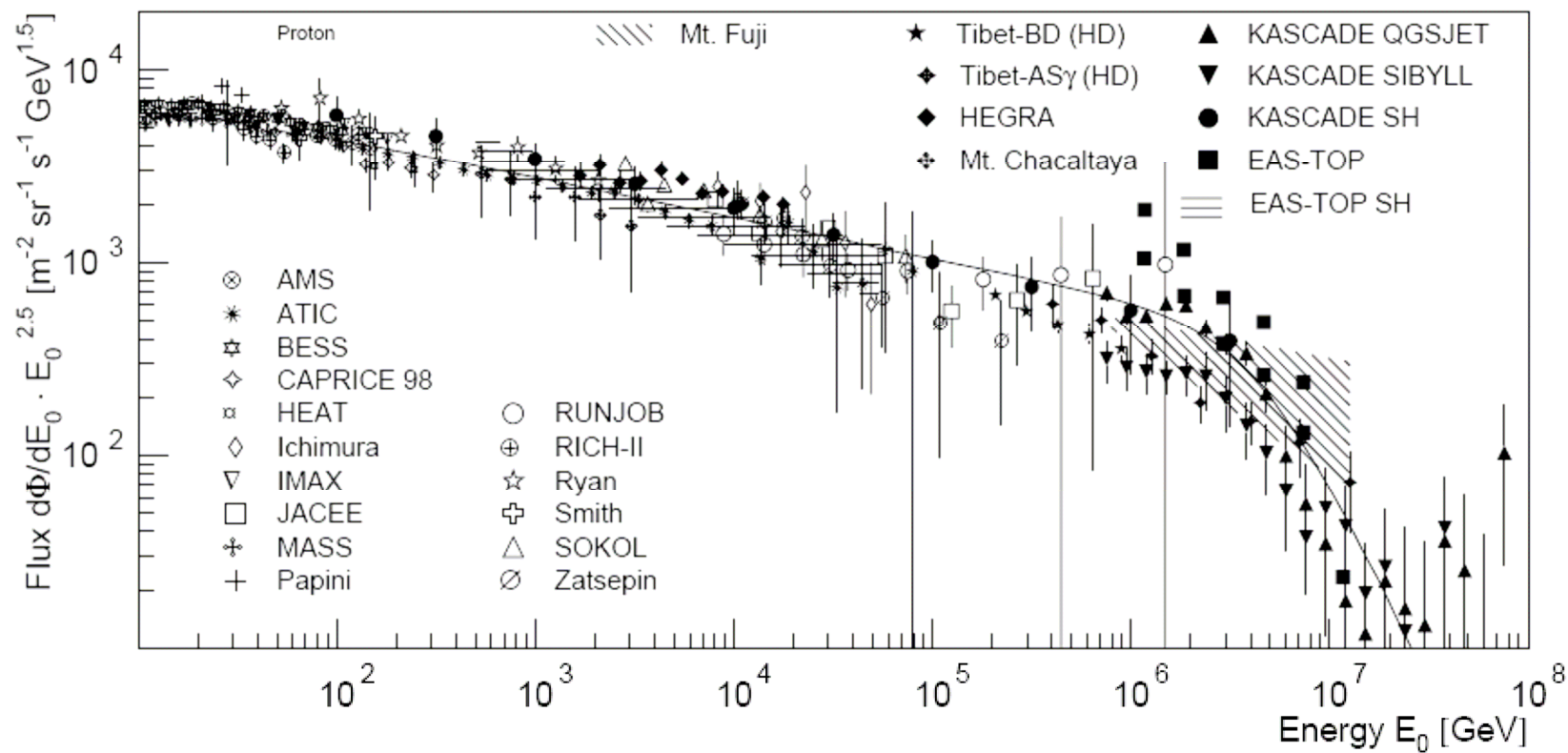
$$E_k = (3.2 \pm 1.2) \cdot 10^{15} \text{ eV}$$

$$\text{slope below knee: } \gamma_1 = -(2.68 \pm 0.06)$$

$$\text{slope above knee: } \gamma_2 = -(3.06 \pm 0.08)$$

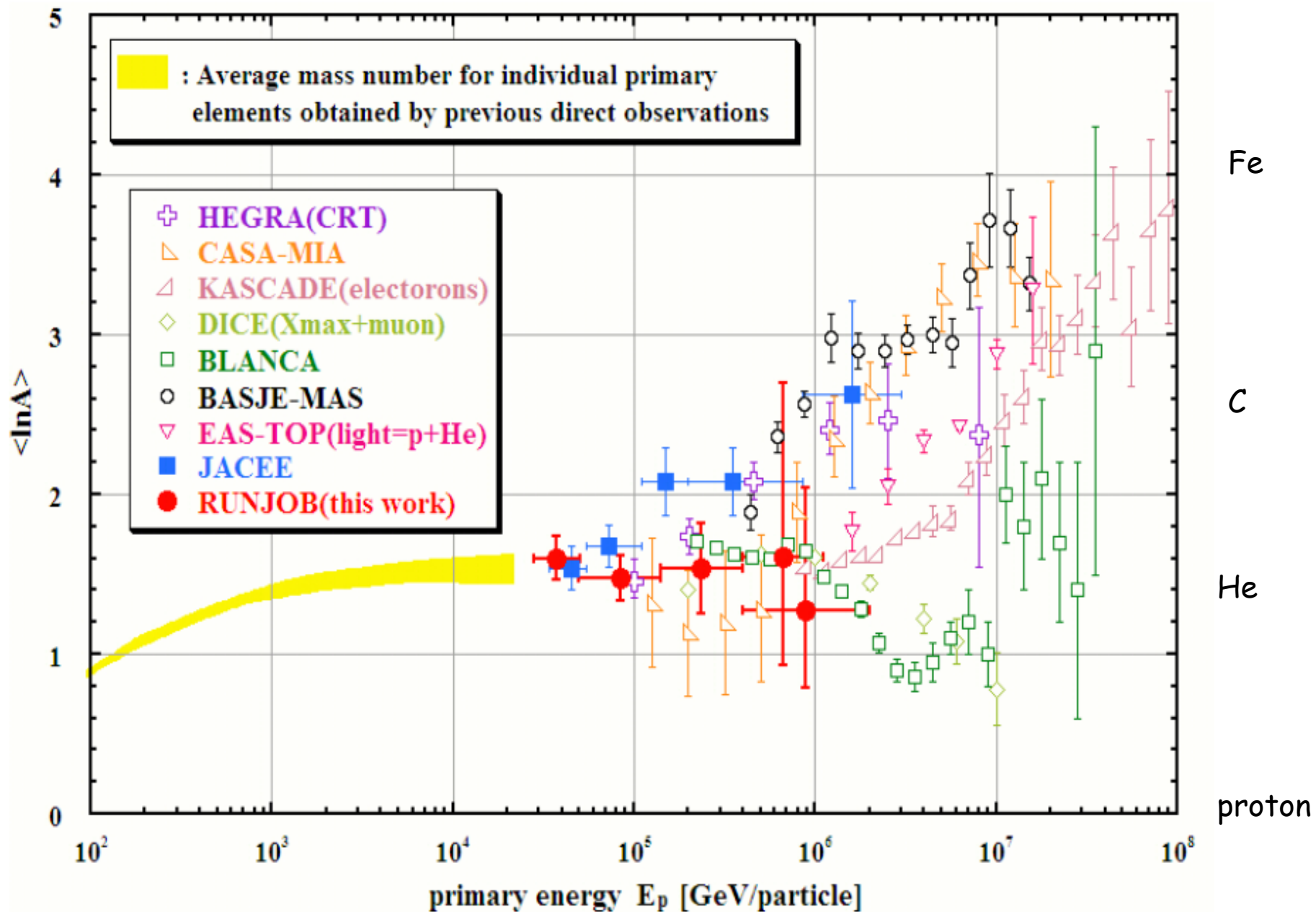
$$\text{flux at 1 PeV: } (2.73 \pm 0.70) \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{TeV}^{-1}$$

widmo protonów



Compilation of **proton** energy spectra

skład masowy



Podsumowanie - 1

Promienie kosmiczne o energiach $< 10^{15}$ eV pochodzą z Galaktyki
- wybuchy supernowych głównym kandydatem

Załamanie („kolano”) w widmie energii wynikiem zmiany
procesu przyspieszania?
warunków propagacji?
??

Nieźła zgodność różnych eksperymentów co do istnienia, położenia i kształtu „kolana”

Skład zmienia się na rzecz ciężkich pierwiastków
- spójne z przyspieszaniem przez supernowe - ale brak dowodu

Dane doświadczalne z pomiarów bezpośrednich są zbyt ubogie dla ustalenia natury „kolana”