

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład VII

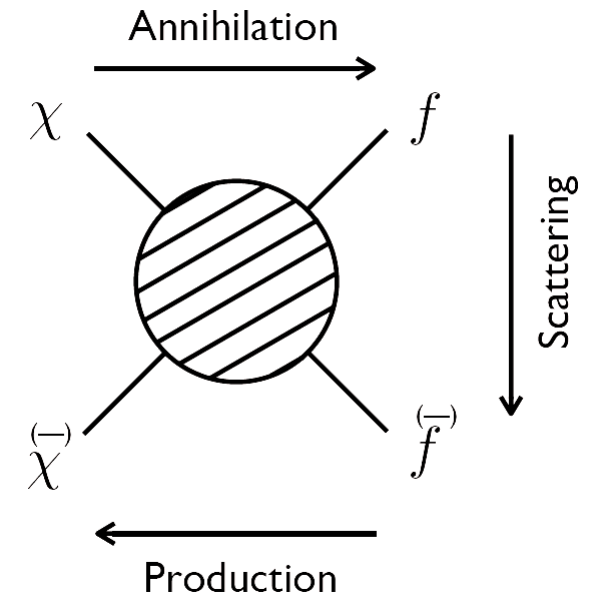
- Satelitarne pomiary promieniowania kosmicznego
 - AMS-2
- Promieniowanie kosmiczne
- Mechanizm przyspieszania
- Supernova Remnants
- Promieniowanie UHE

Ciemna materia

Poszukiwanie

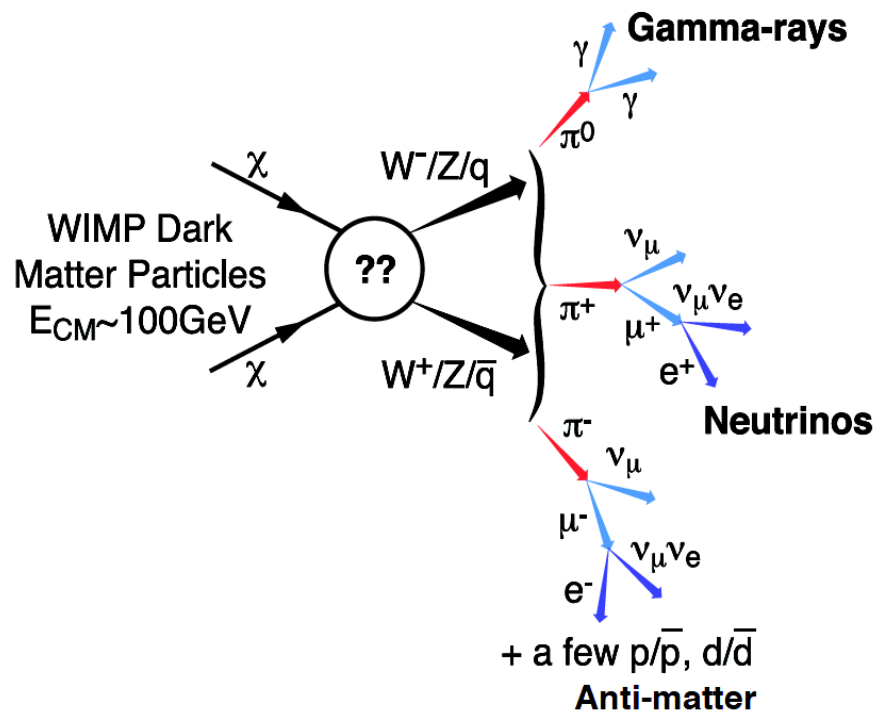
Niezależnie od modelu, możemy poszukiwać cząstek ciemnej materii (DM) na trzy sposoby:

- produkcja
bezpośrednia produkcja cząstek ciemnej materii
np. w LHC
- detekcja bezpośrednia
poszukiwanie sygnałów oddziaływania DM
(rozpraszania) w detektorach
- detekcja pośrednia
poszukiwanie sygnałów oddziaływania (anihilacji)
DM we Wszechświecie



Detekcja pośrednia

Anihilacja DM



Przyjmujemy, że cząstki ciemnej materii uległy “wymrożeniu” wraz z rozszerzaniem się Wszechświata. Ich gęstość była zbyt mała aby mogły efektywnie anihilować...

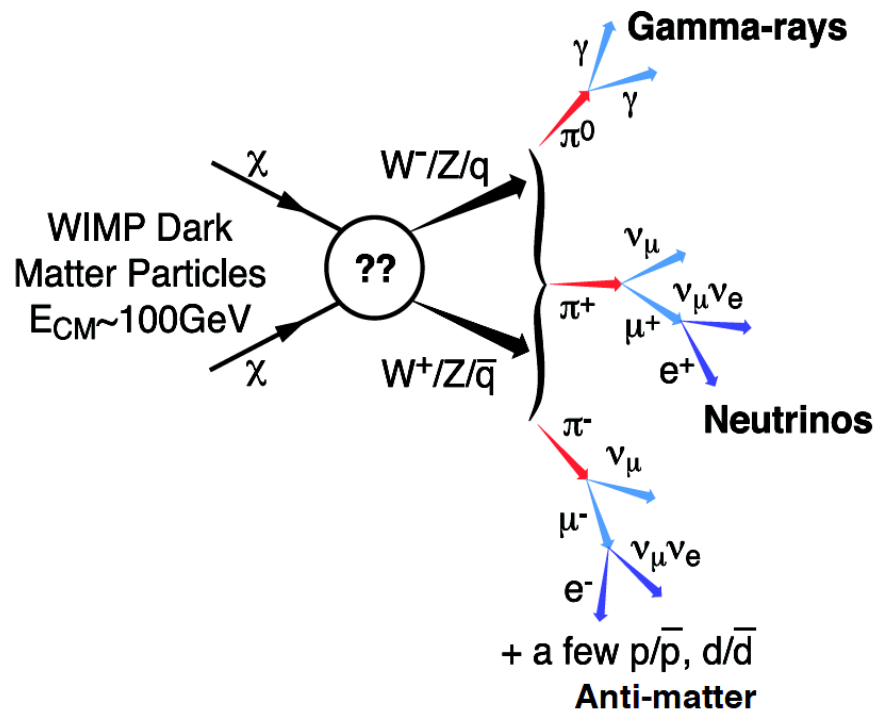
Ale ciemna materia uczestniczy w tworzeniu struktur we Wszechświecie! Więc na małych skalach odległości jej gęstość może być o wiele rzędów wielkości większa niż gęstość średnia (tak jak normalnej materii).

⇒ może znów zachodzić anihilacja

Podobnie jak w gwiazdach znów zachodzi nukleosynteza...

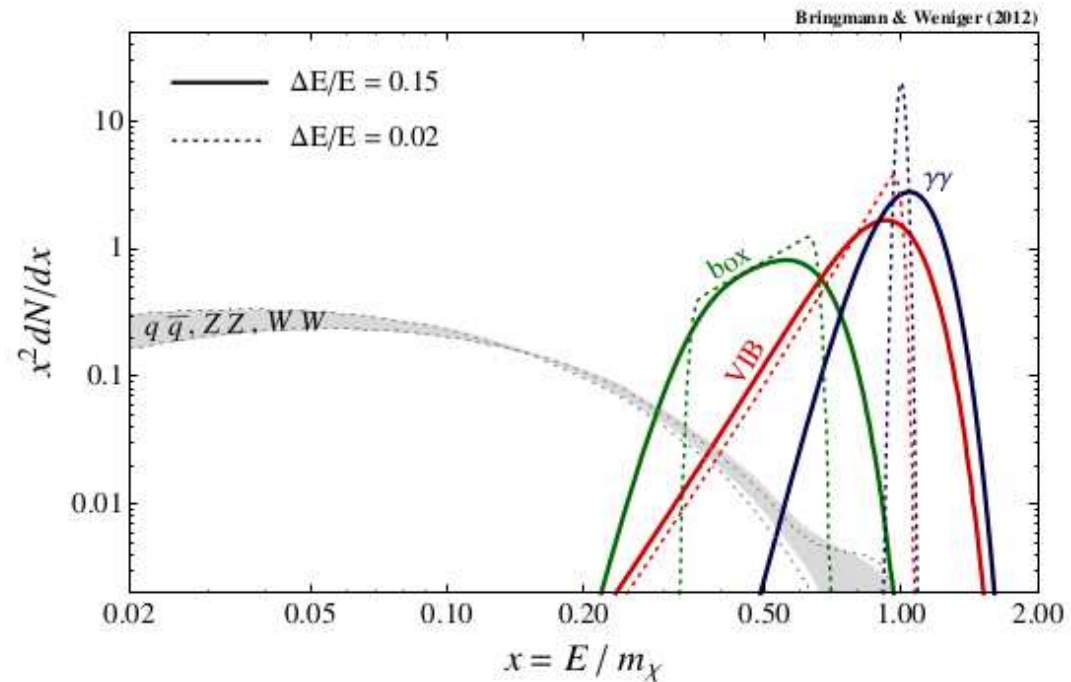
Detekcja pośrednia

Anihilacja DM



Oczekiwane widmo γ z anihilacji DM

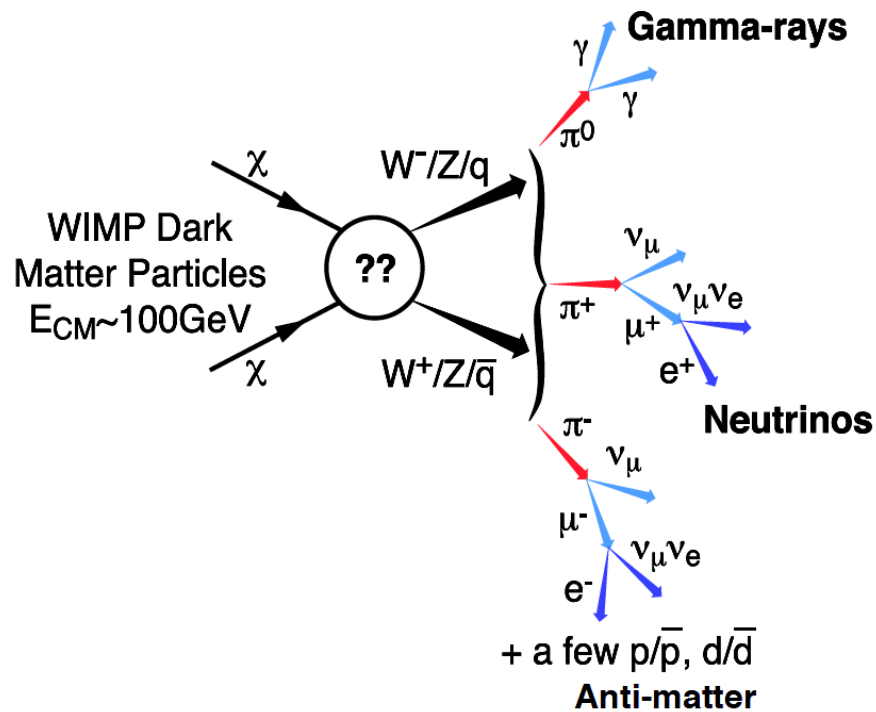
Bezpośrednie produkty reakcji:



⇒ maksimum dla $E \sim m_\chi$

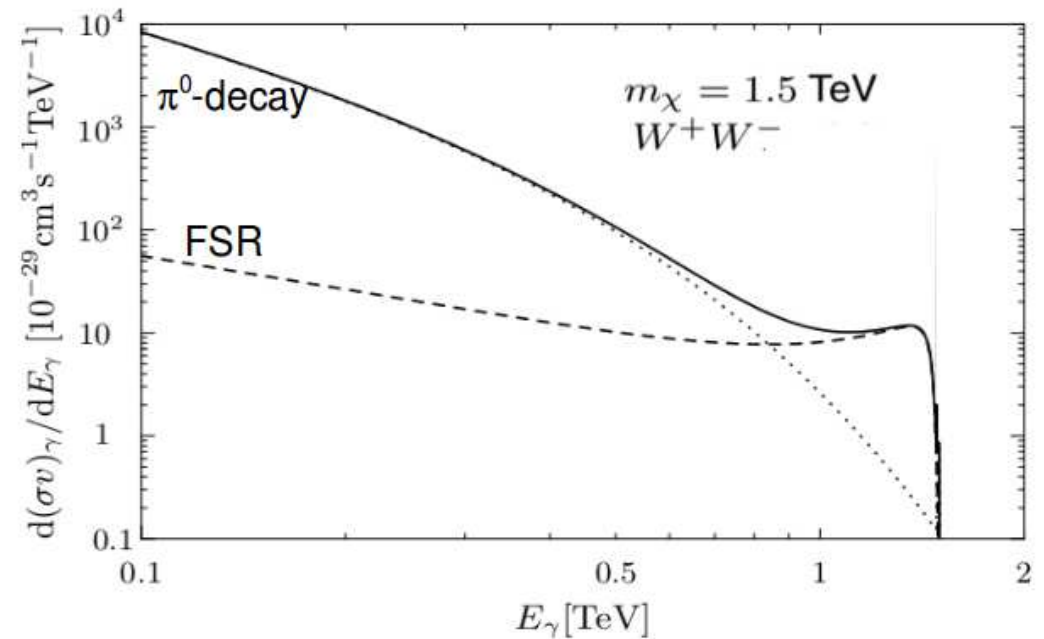
Detekcja pośrednia

Anihilacja DM



Oczekiwane widmo γ z anihilacji DM

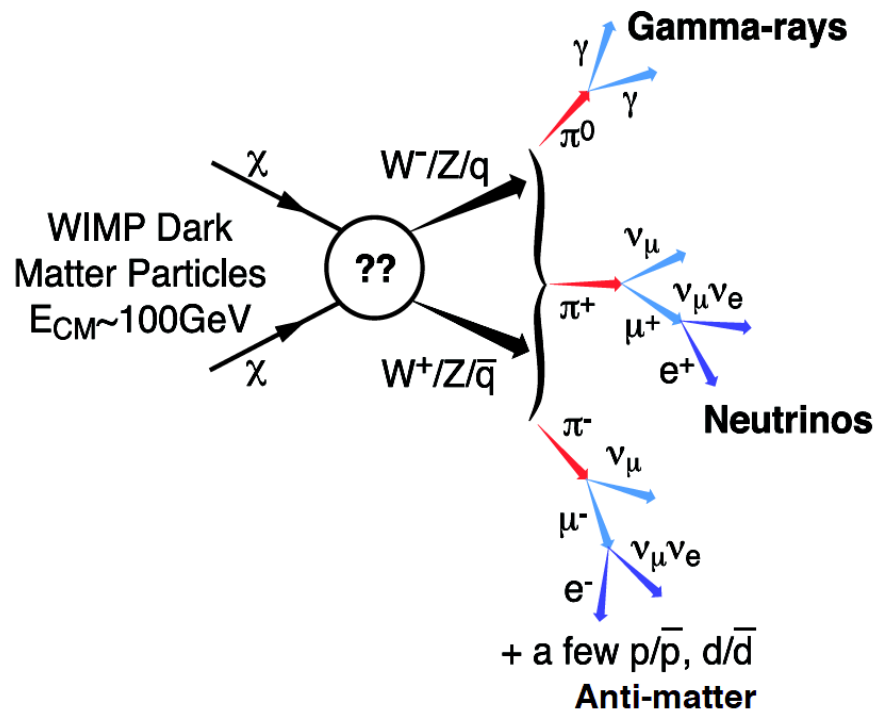
Pośrednie produkty reakcji:



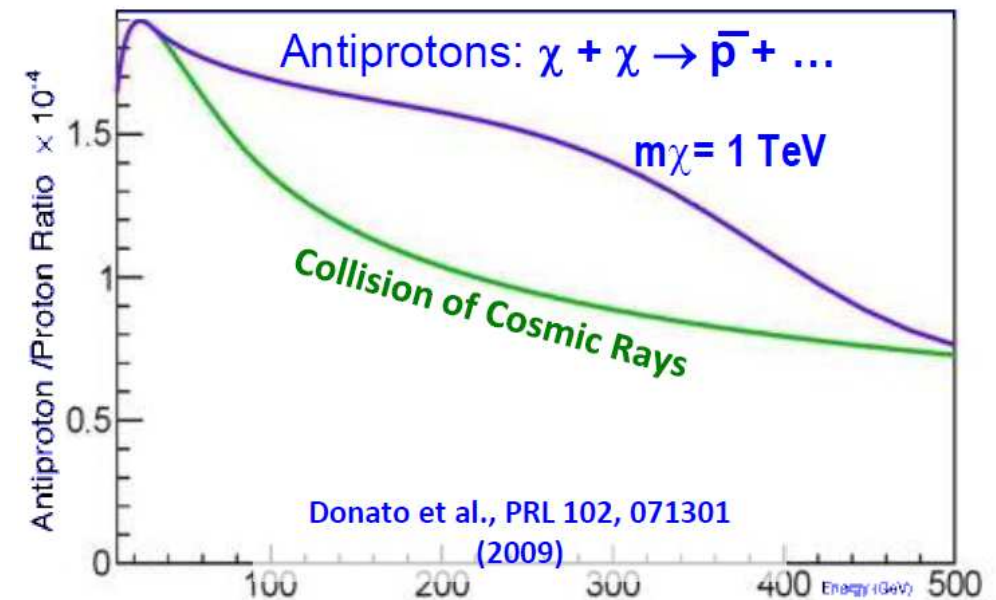
\Rightarrow obcięcie widma dla $E \sim m_\chi$

Detekcja pośrednia

Anihilacja DM



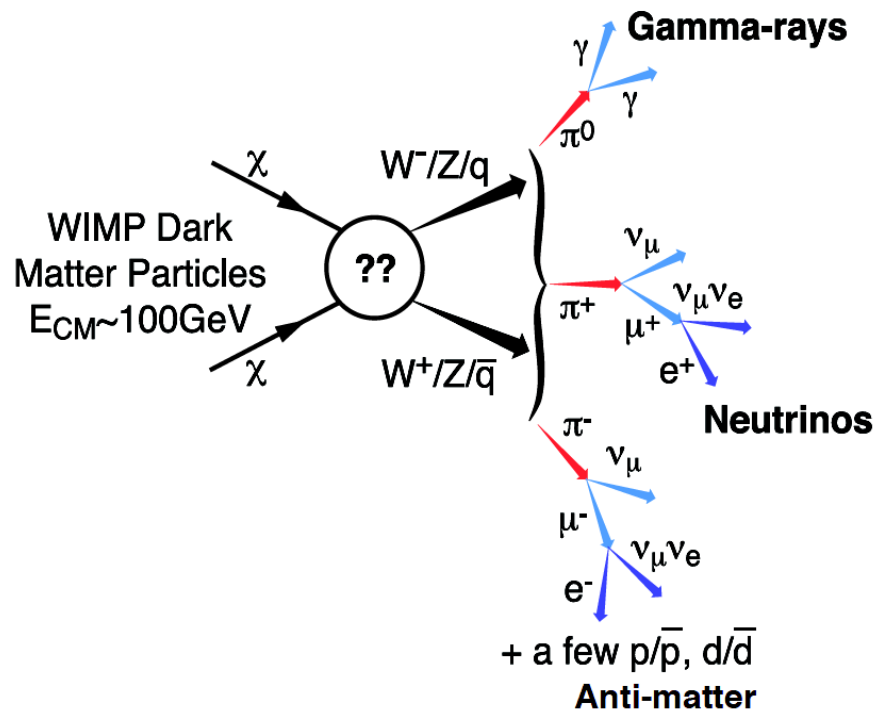
Oczekiwane widmo antyprotonów:



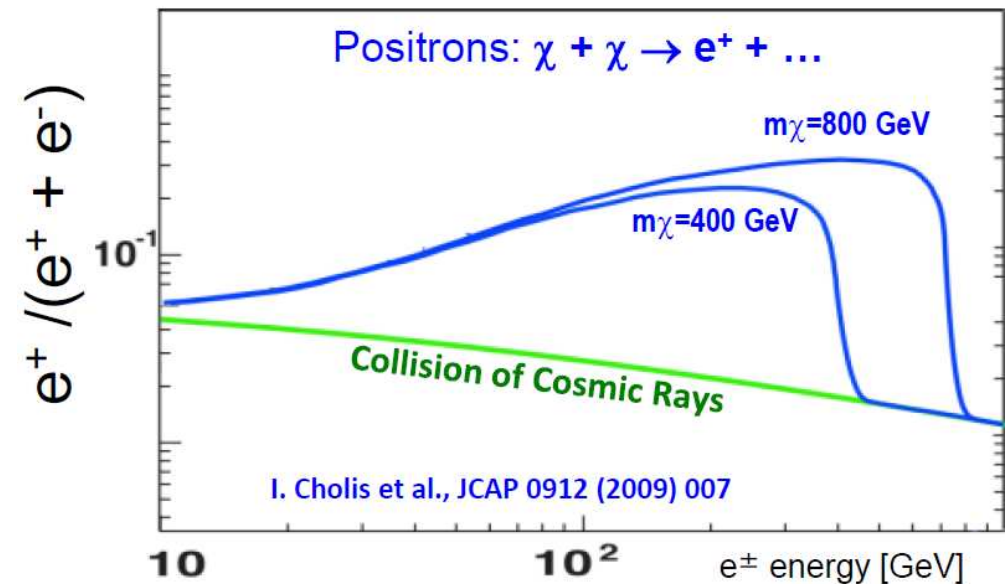
\Rightarrow wyraźna nadwyżka (ponad tło wynikające z oddziaływania promieniowania kosmicznego) oczekiwana dla $E \leq m_\chi$

Detekcja pośrednia

Anihilacja DM



Oczekiwane widmo pozytonów:

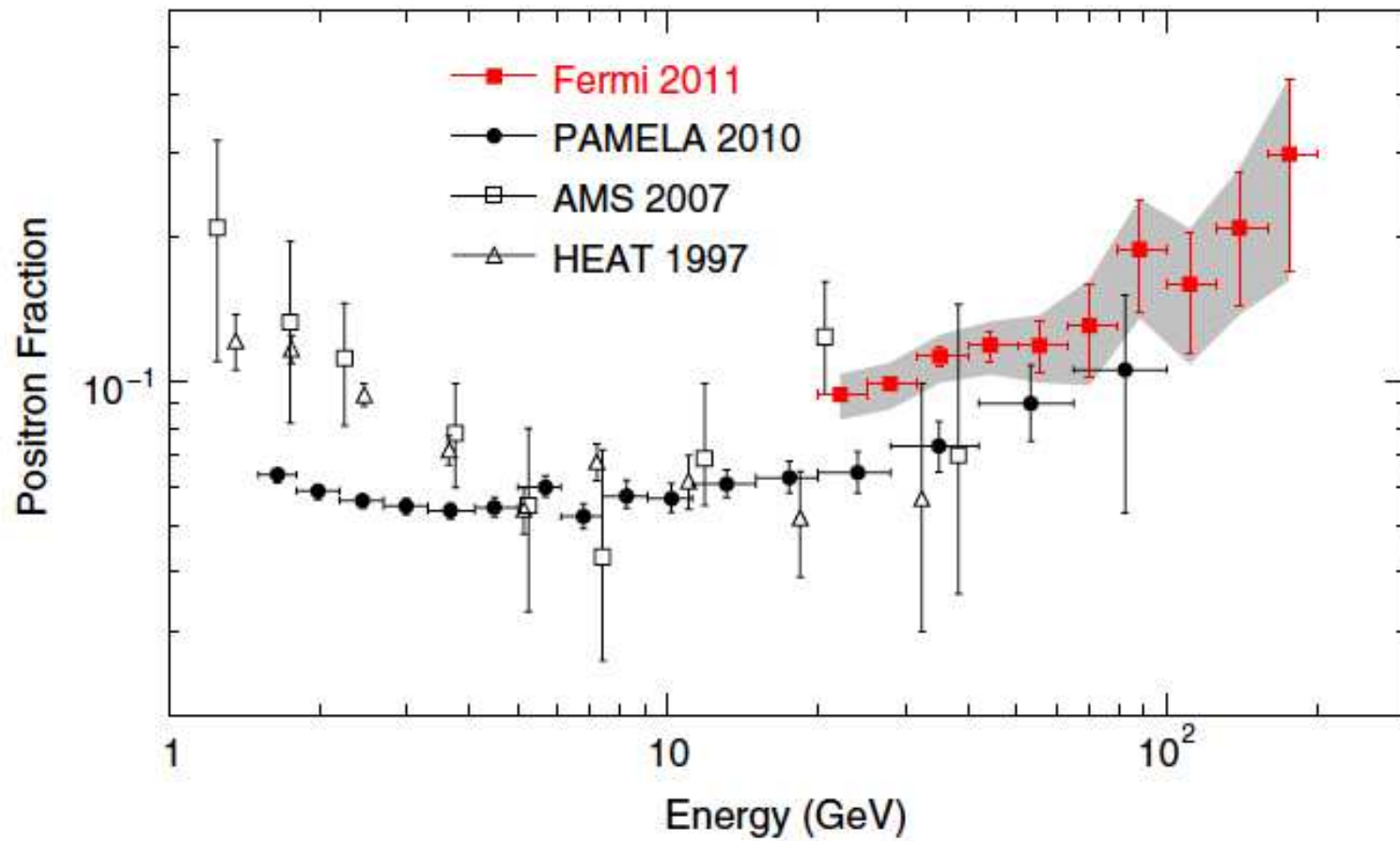


⇒ wyraźna nadwyżka (ponad tło wynikające z oddziaływania promieniowania kosmicznego) oczekiwana dla $E \leq m_\chi$

⇒ próg przy $E \sim m_\chi$

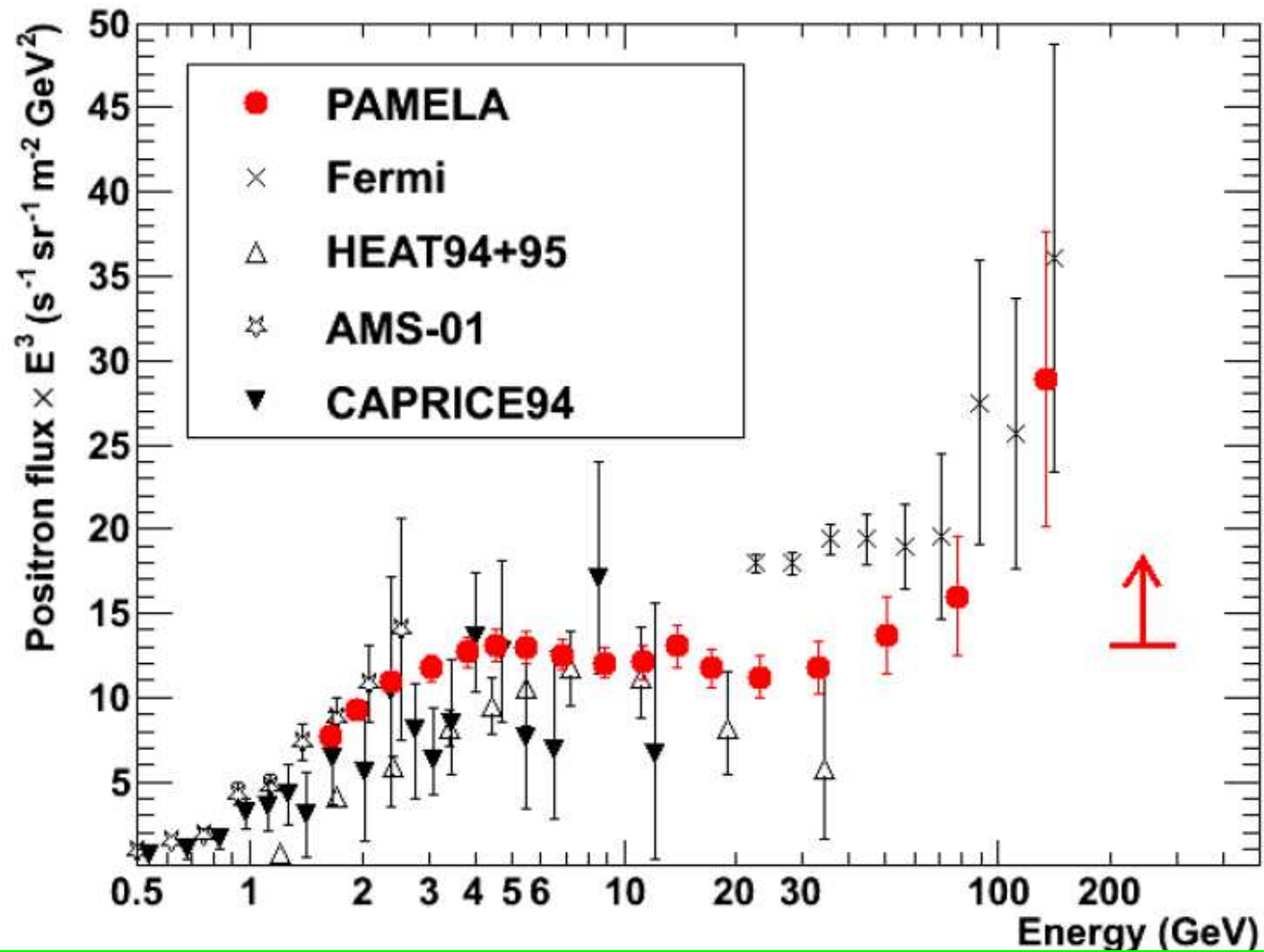
Fermi-LAT

Wyniki pomiaru e^\pm



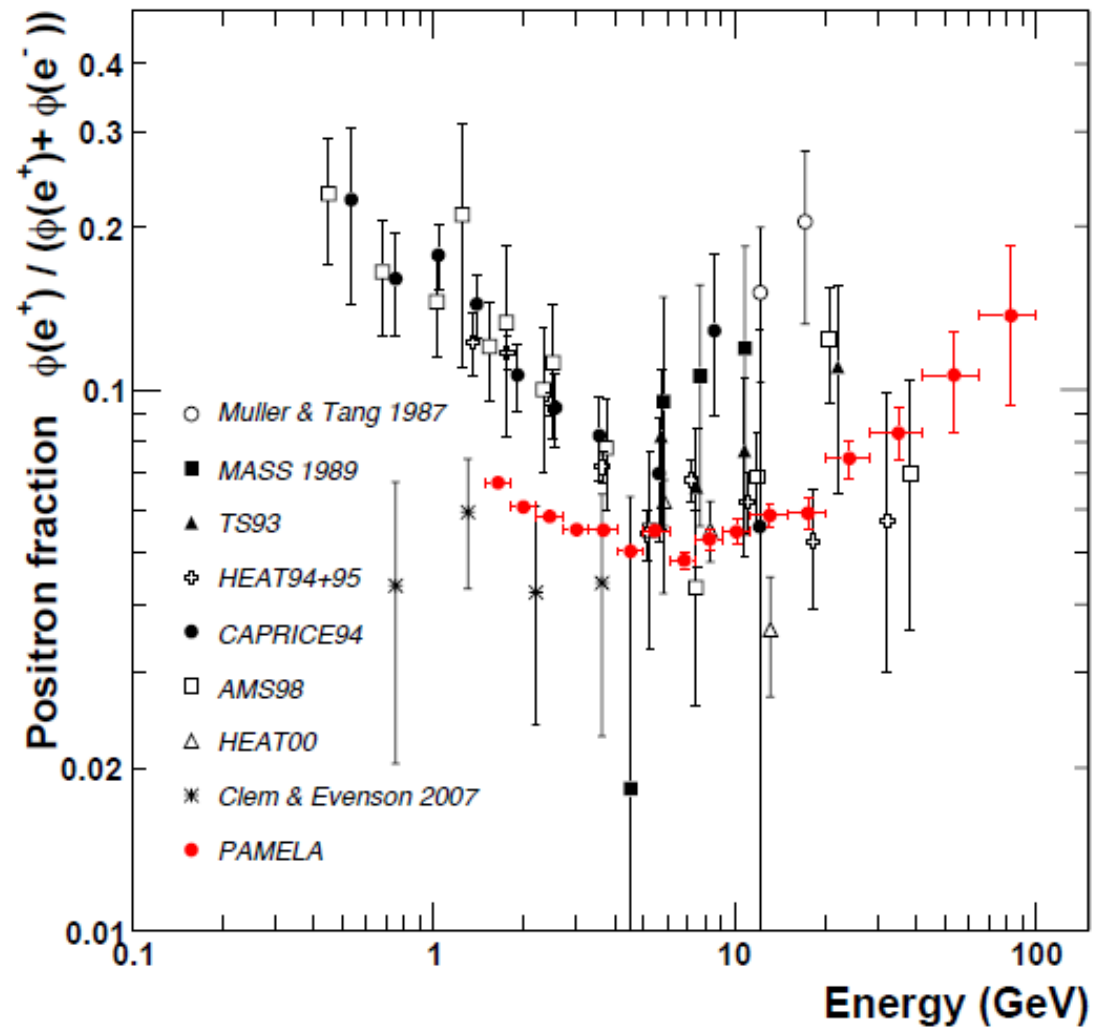
PAMELA

Wyniki pomiaru e^+



PAMELA

Wyniki pomiaru e^+



Detekcja pośrednia

AMS-02

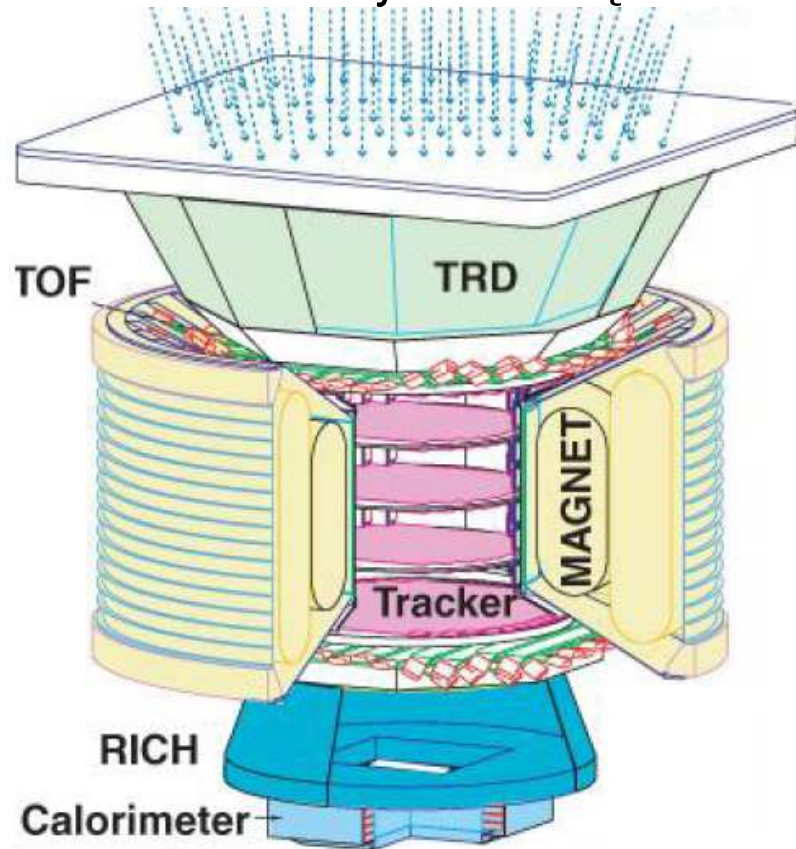
Eksperyment na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS), uruchomiony w 2011.



AMS-02

Detektor orbitalny

Detektor uniwersalny strukturą bardzo podobny do eksperymentów HEP.



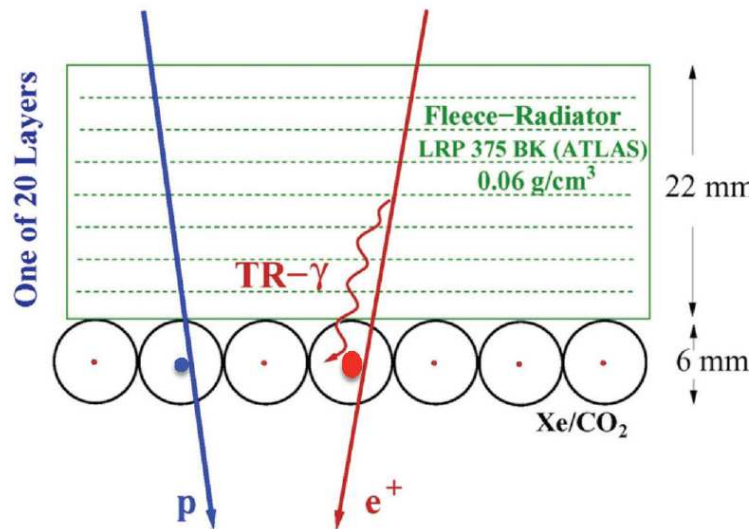
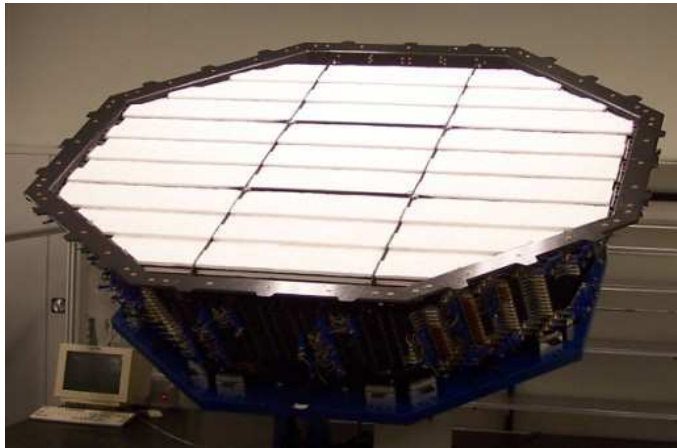
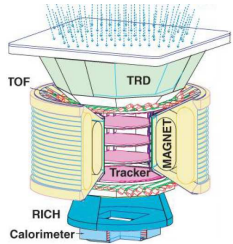
Znacznie większy niż PAMELA: $5 \times 4 \times 3 \text{ m}^3$, 7500 kg.

Różnorodne komponenty \Rightarrow dokładny pomiar i identyfikację cząstek.

AMS-02

TRD

Transition Radiation Detector



20 warstw detekcyjnych, każda złożona z radiatora i komór słomkowych

Prawdopodobieństwo emisji proporcjonalne do czynnika Lorentza (γ) cząstki.

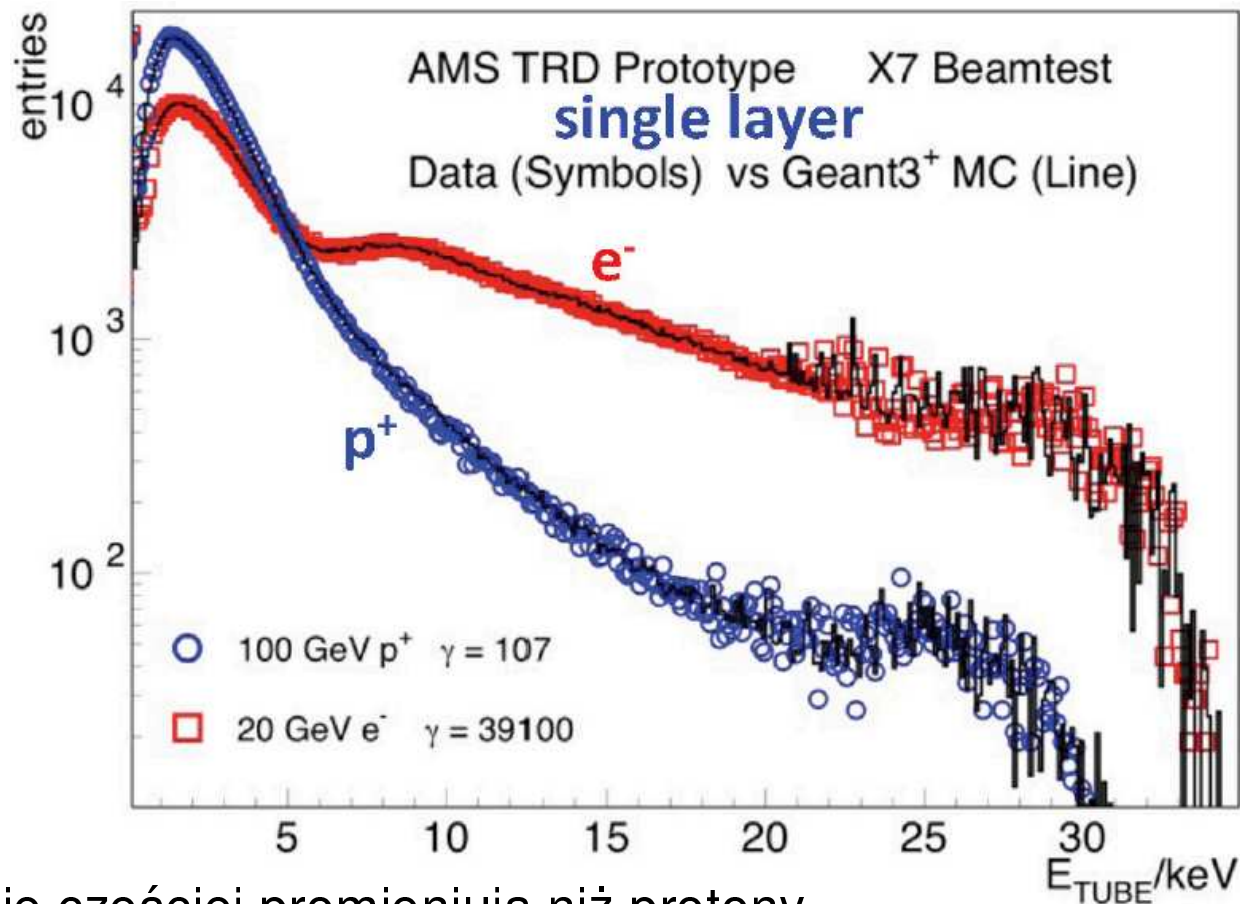
⇒ dla danej energii znacznie większe dla e^\pm niż innych cząstek

⇒ indetyfikacja e^\pm

AMS-02

TRD

Wyniki testów na wiązce SPS w CERN (pojedyncza warstwa):

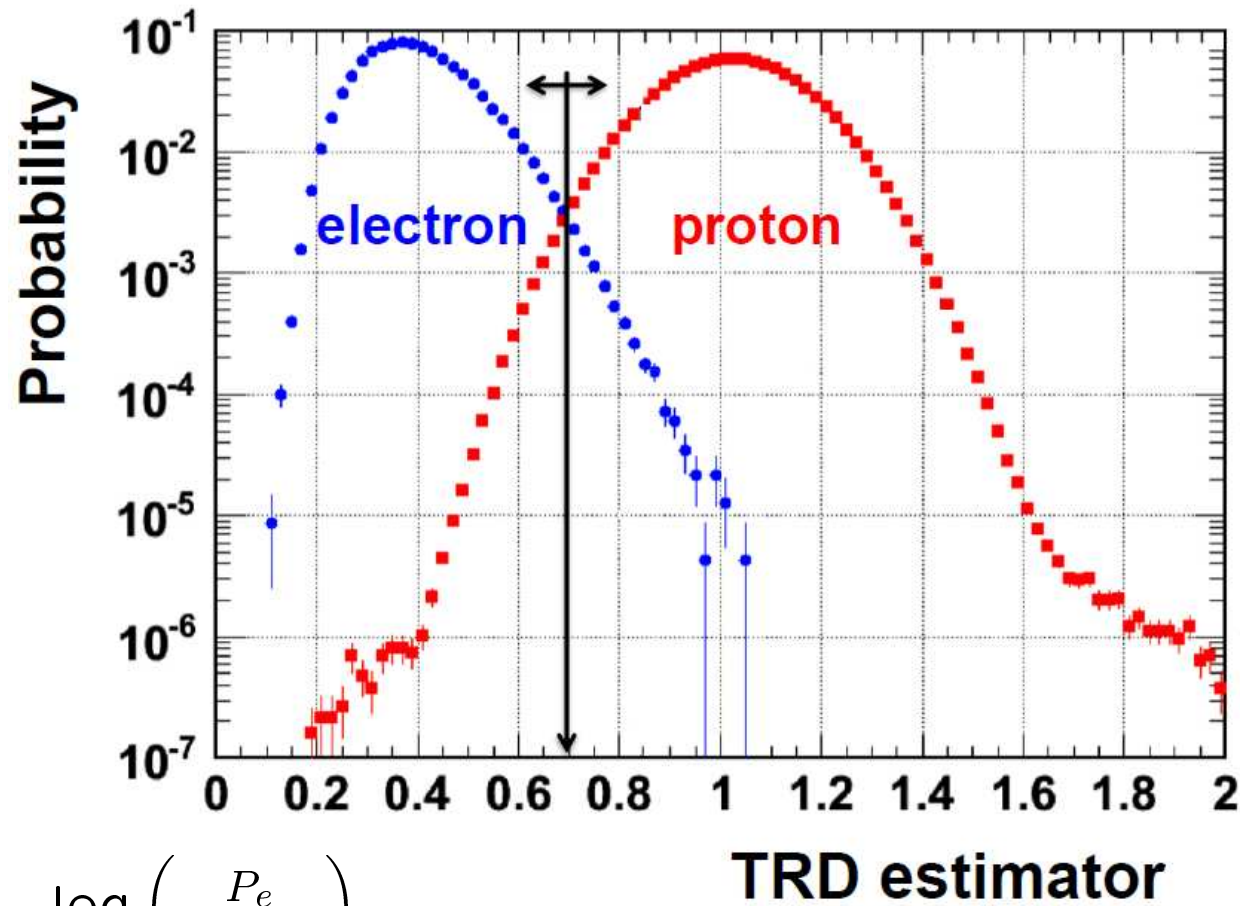


Elektrony znacznie częściej promieniują niż protony.
Choć w jednej warstwie najczęściej brak jest sygnału...

AMS-02

TRD

Wynik analizy sygnałów z 20 warstw (dane zebrane na ISS):

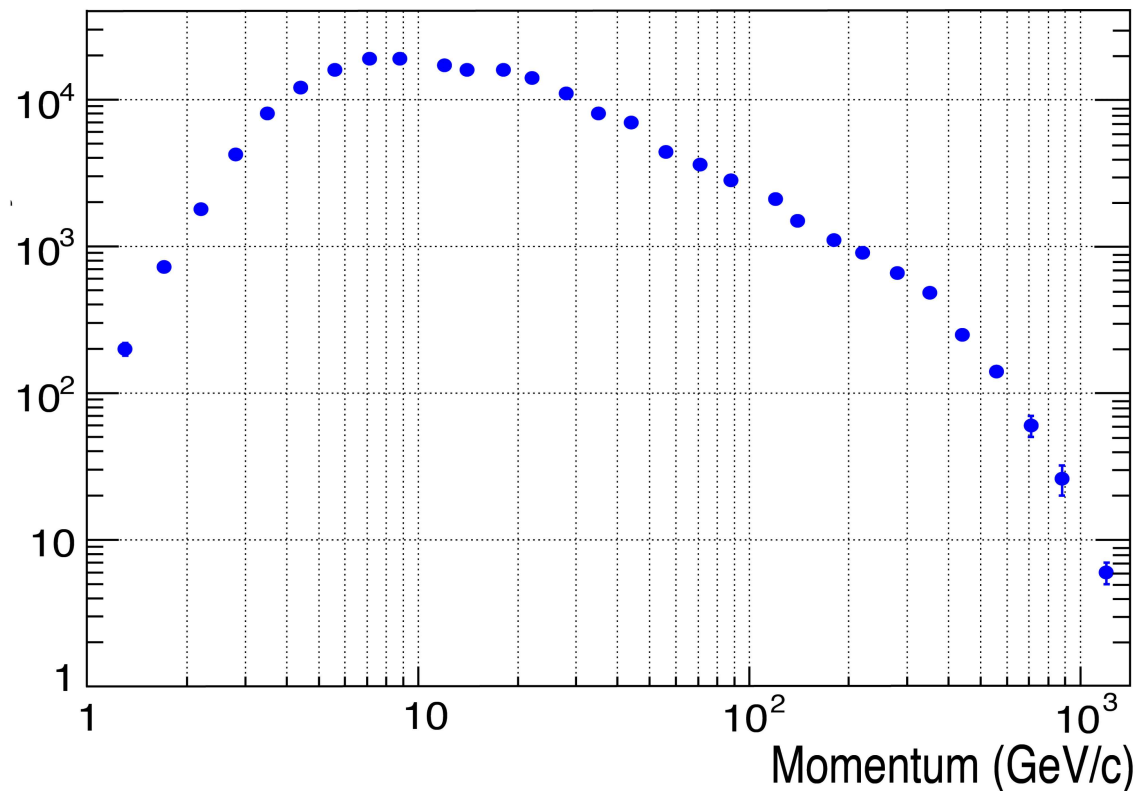


$$\text{TRD estimator} = -\log\left(\frac{P_e}{P_e + P_p}\right)$$

AMS-02

TRD

Wynik analizy sygnałów z 20 warstw (dane zebrane na ISS)
czynnik redukcji tła protonów (przy efektywności selekcji pozytonów 90%):

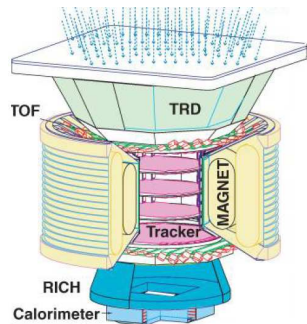


TRD pozwala na redukcję tła protonów (w pomiarze e^+ z eff. = 90%) o czynnik do $\sim 10^4$

AMS-02

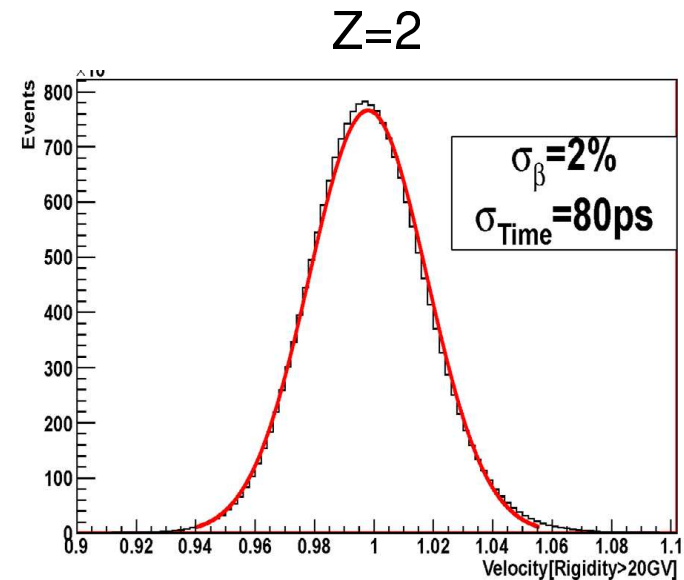
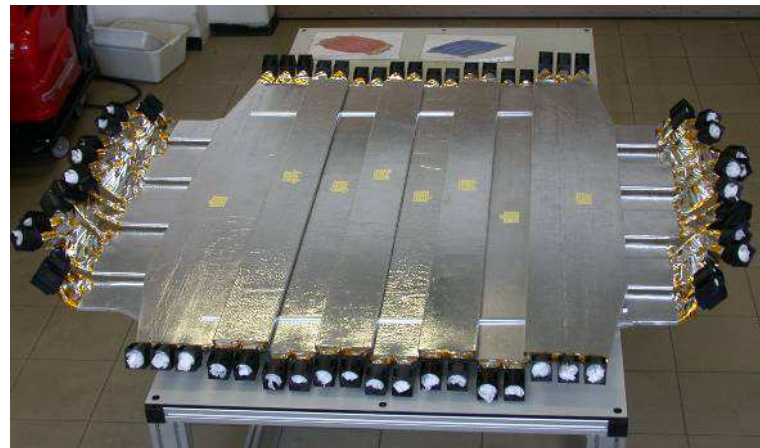
TOF

Time-Of-Flight detector



Pozwalają na pomiar prędkości cząstek, a także ich ładunku (na podstawie $\frac{dE}{dx}$)

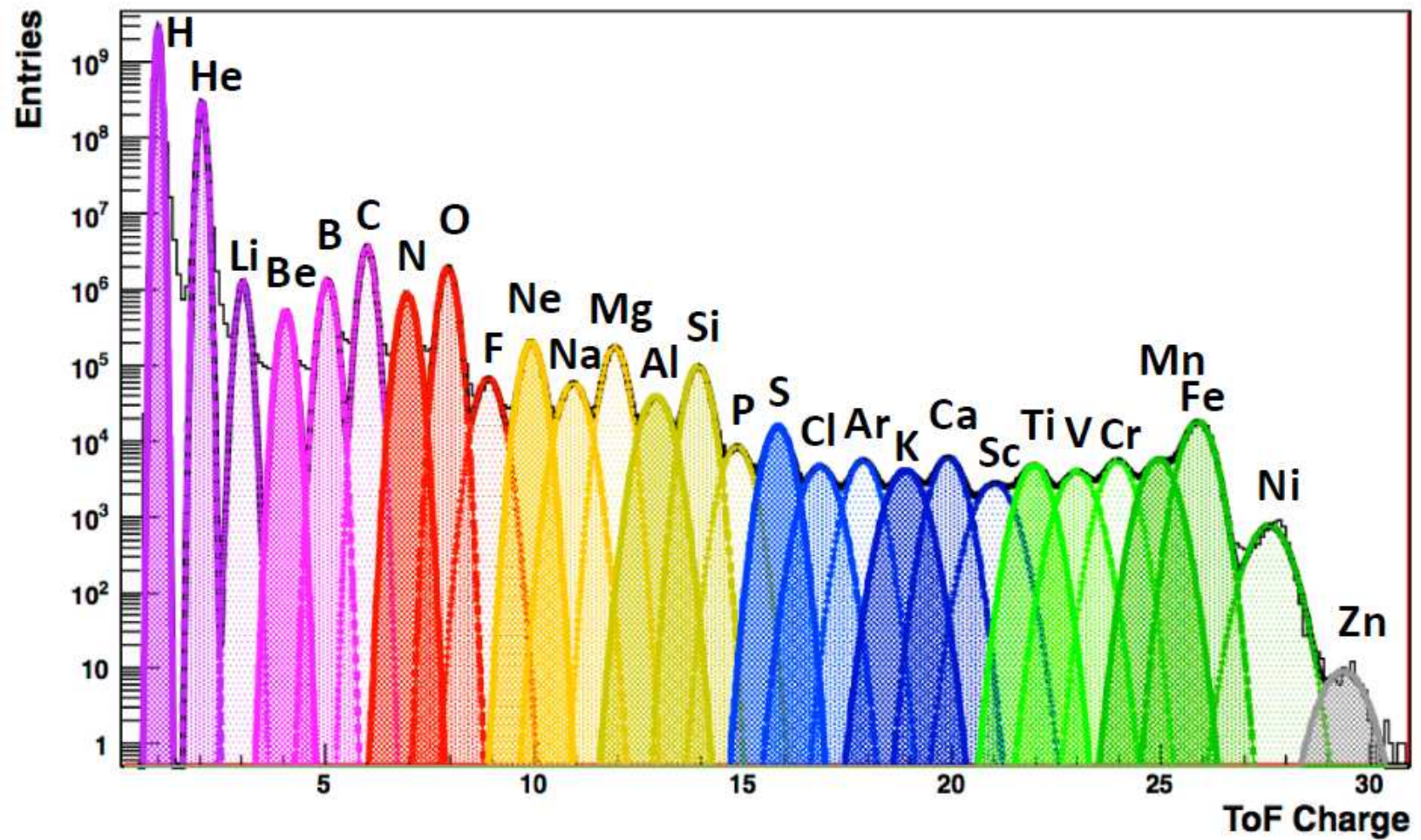
Przykład pomiaru prędkości dla cząstek z $p/q > 20 \text{ GeV}/c$



AMS-02

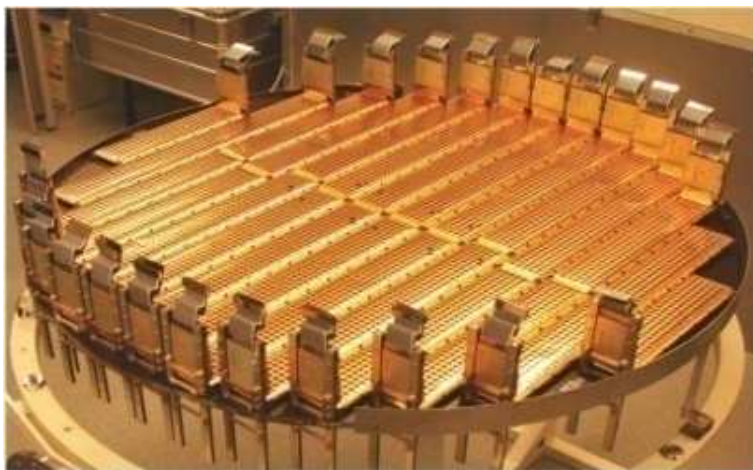
TOF

Rozkład zmierzonego ładunku czastek wraz z dopasowaniem:



AMS-02

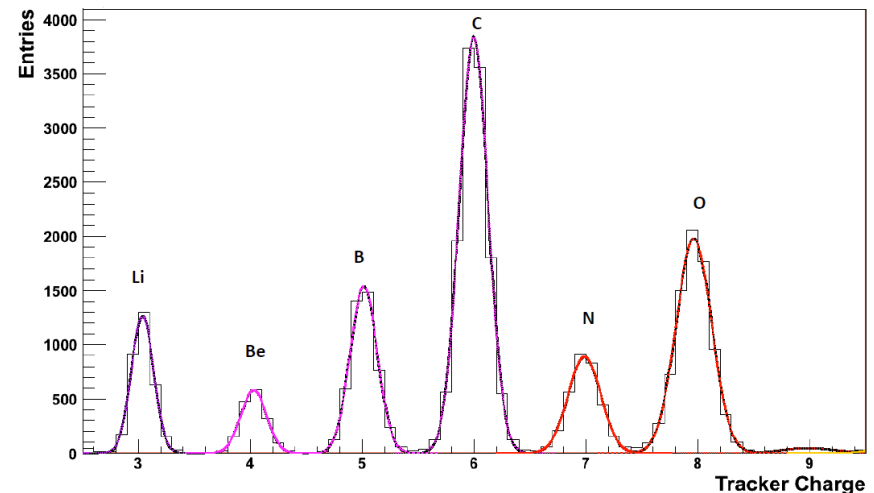
Spektrometr



9 warstw detektrów krzemowych o $\sigma \approx 10 \mu m$
Wykorzystując pole magnetyczne (stały magnes)
pozwalają na pomiar pędu (p/q) cząstek.

Ładunek może być wyznaczony na podstawie $\frac{dE}{dx}$

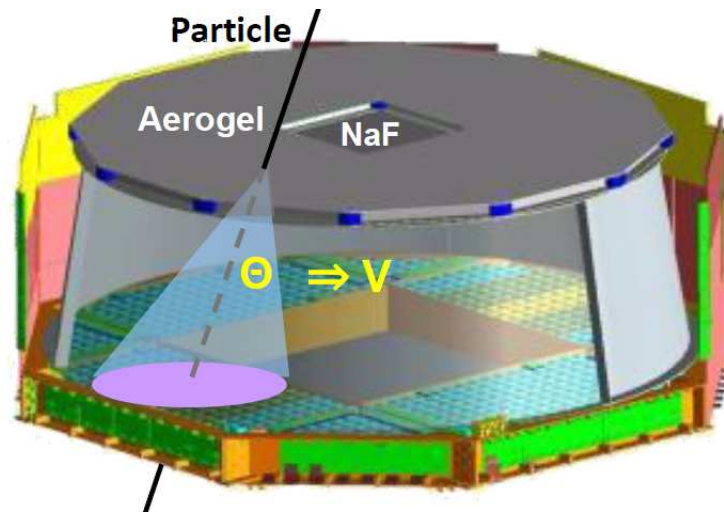
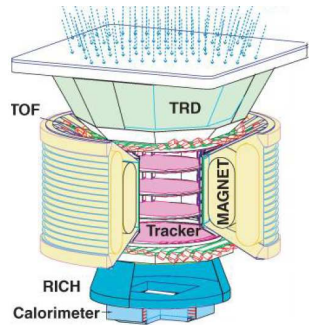
Przykład pomiaru ładunku



AMS-02

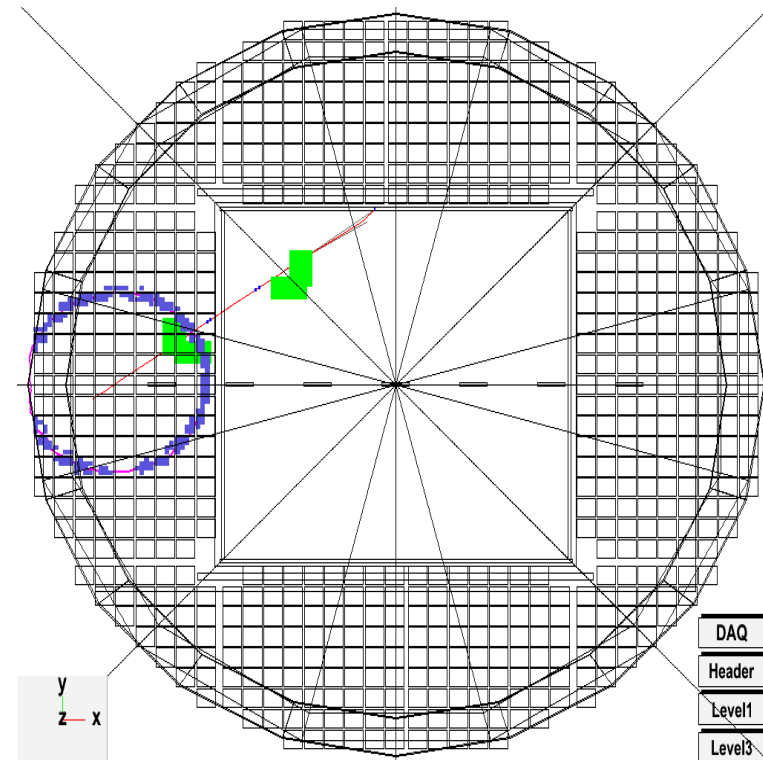
RICH

Ring Imaging CHerenkov counter



Pozwala na pomiar prędkości cząstek.

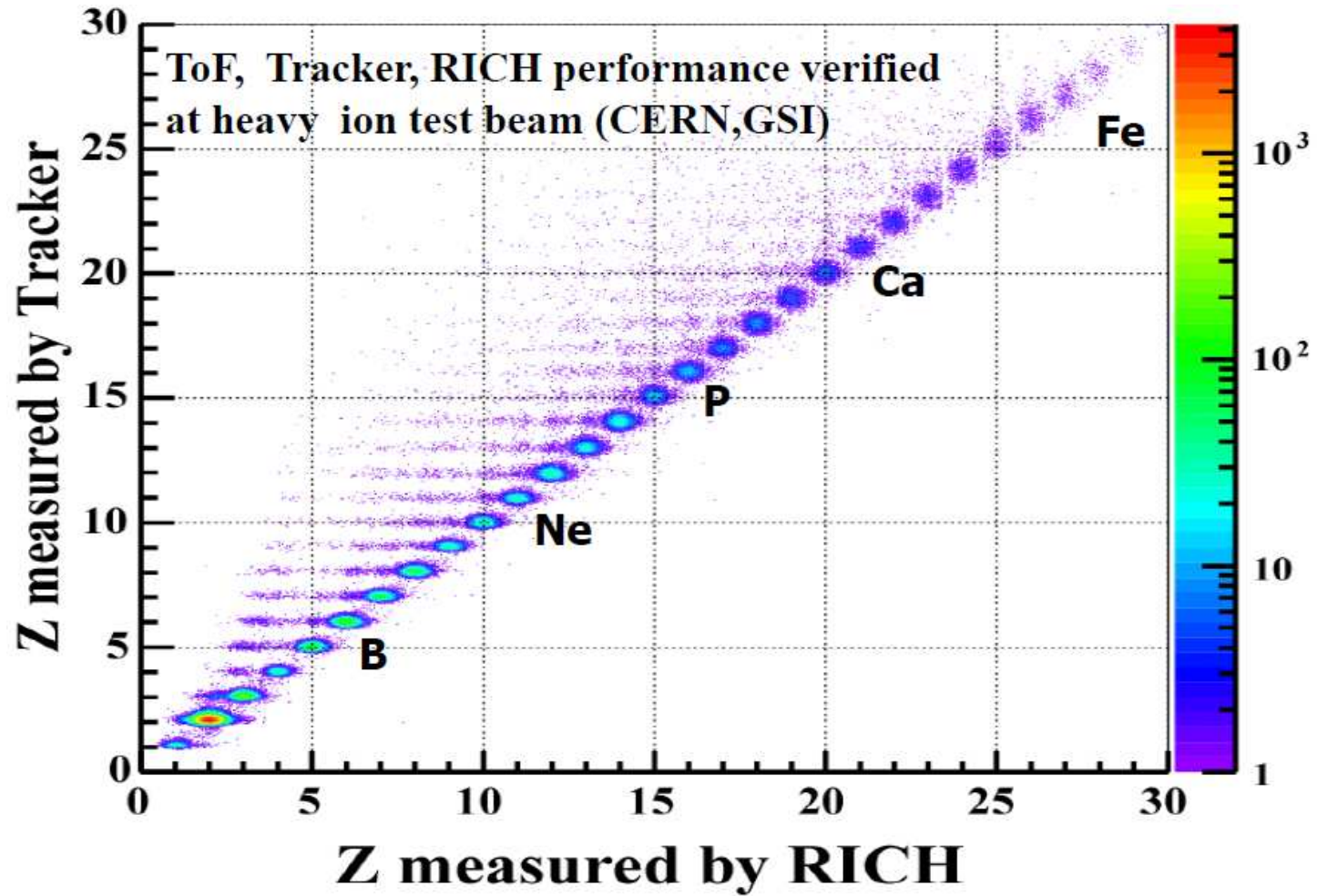
Przykładowy przypadek rejestracji jądra Al:



AMS-02

RICH

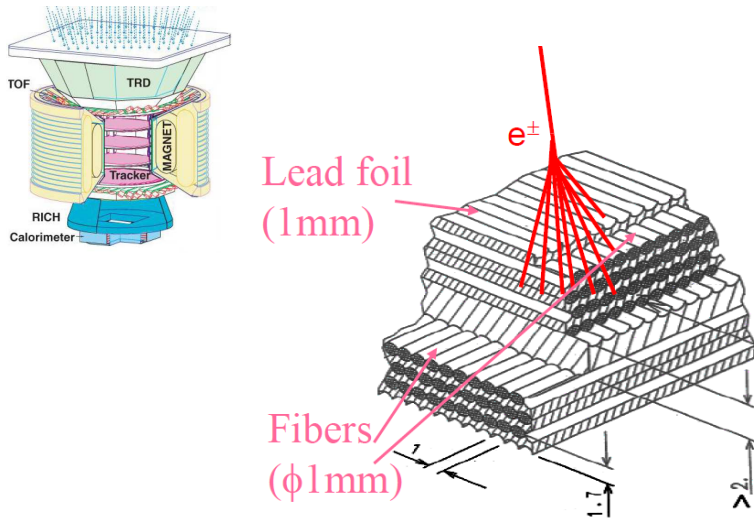
Pozwala także na pomiar ładunku przechodzącej cząsteczki (jonu):



AMS-02

ECAL

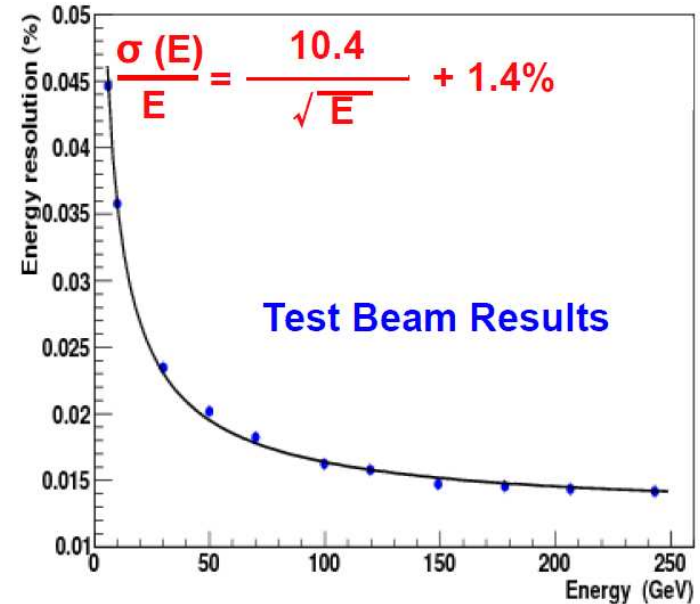
Kalorymtr elektromagnetyczny



600 kg ołowiu ($17 X_0$)

poprzetykane włóknami scyntylującymi $\phi = 1 \text{ mm}$

⇒ dokładny pomiar energii,
kierunku oraz **profilu** kaskady w 3-D

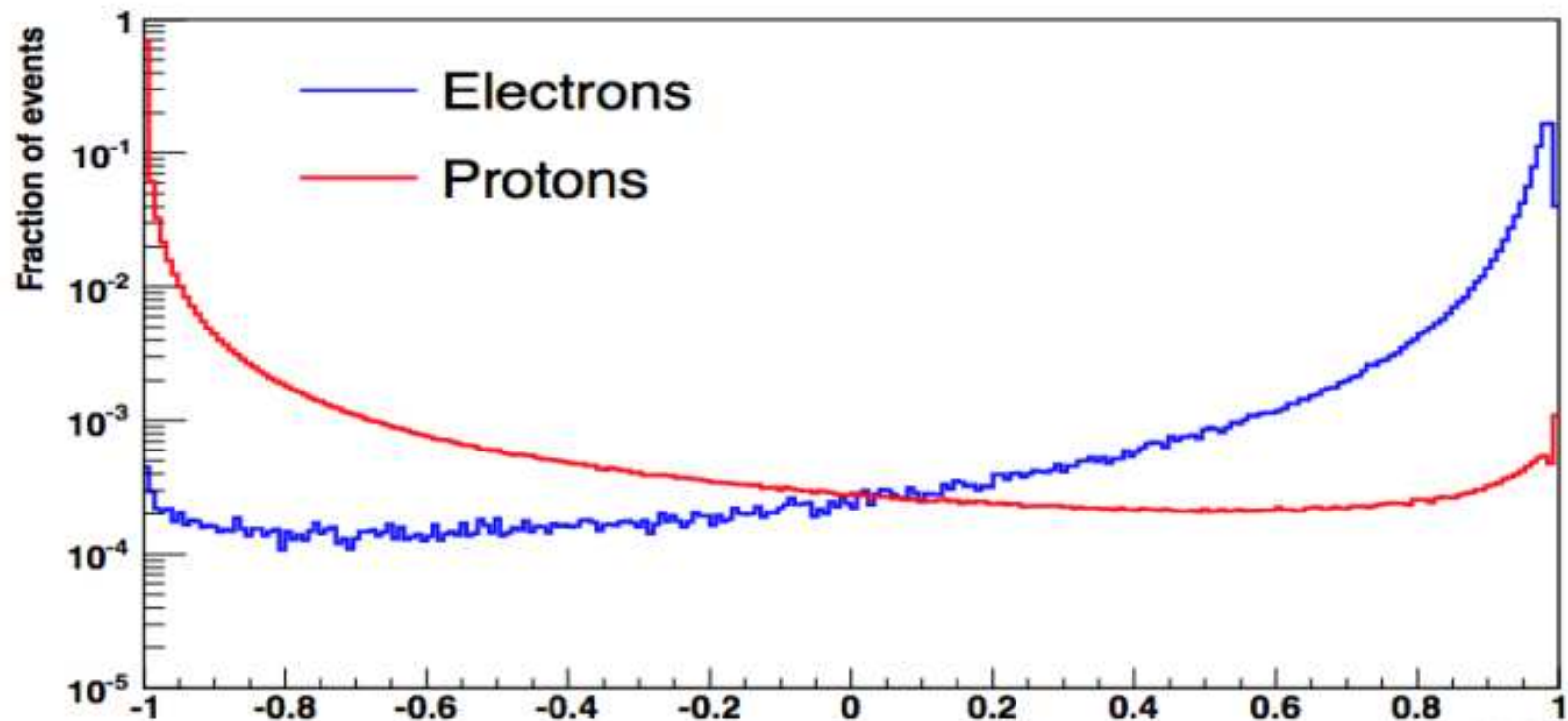


AMS-02

ECAL

Dyskryminacja między elektronami i protonami, dane 83-100 GeV

Analiza kształtu kaskady w kalorymetrze: wynik działania Boosted Decision Tree (BDT)



Kształt kaskady zapewnia bardzo dobrą separację e^{\pm} od tła hadronowego (skala log!)

AMS-02

Detektor orbitalny

Detektor AMS-02 zapewnia bardzo dokładny pomiar i identyfikację cząstek.

Wiele wielkości może być mierzonych na różne sposoby:

- ładunek: TOF, spektrometr, RICH
- prędkość: TOF, RICH
- pęd/energia: spektrometr, kalorymetr
- identyfikacja e^{\pm} : TRD, spektrometr, kalorymetr

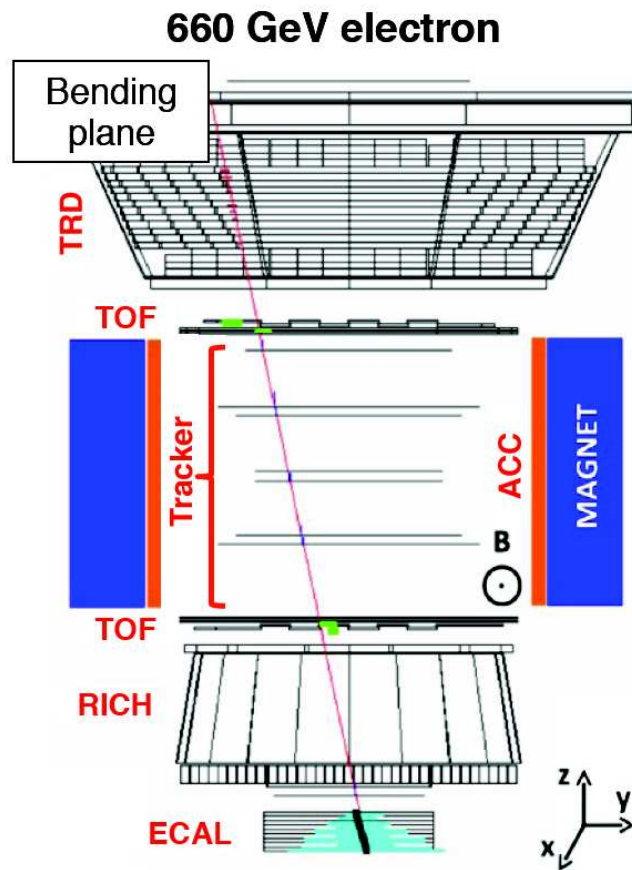
Wykorzystanie różnorodnych i komplementarnych technik pomiarowych znacząco redukuje tło i błędy systematyczne

⇒ po raz pierwszy promieniowanie kosmiczne zmierzone z niepewnością 1%

AMS-02

Identyfikacja cząstek

Korzystając z licznych detektorów można bardzo dobrze indentyfikować cząstki

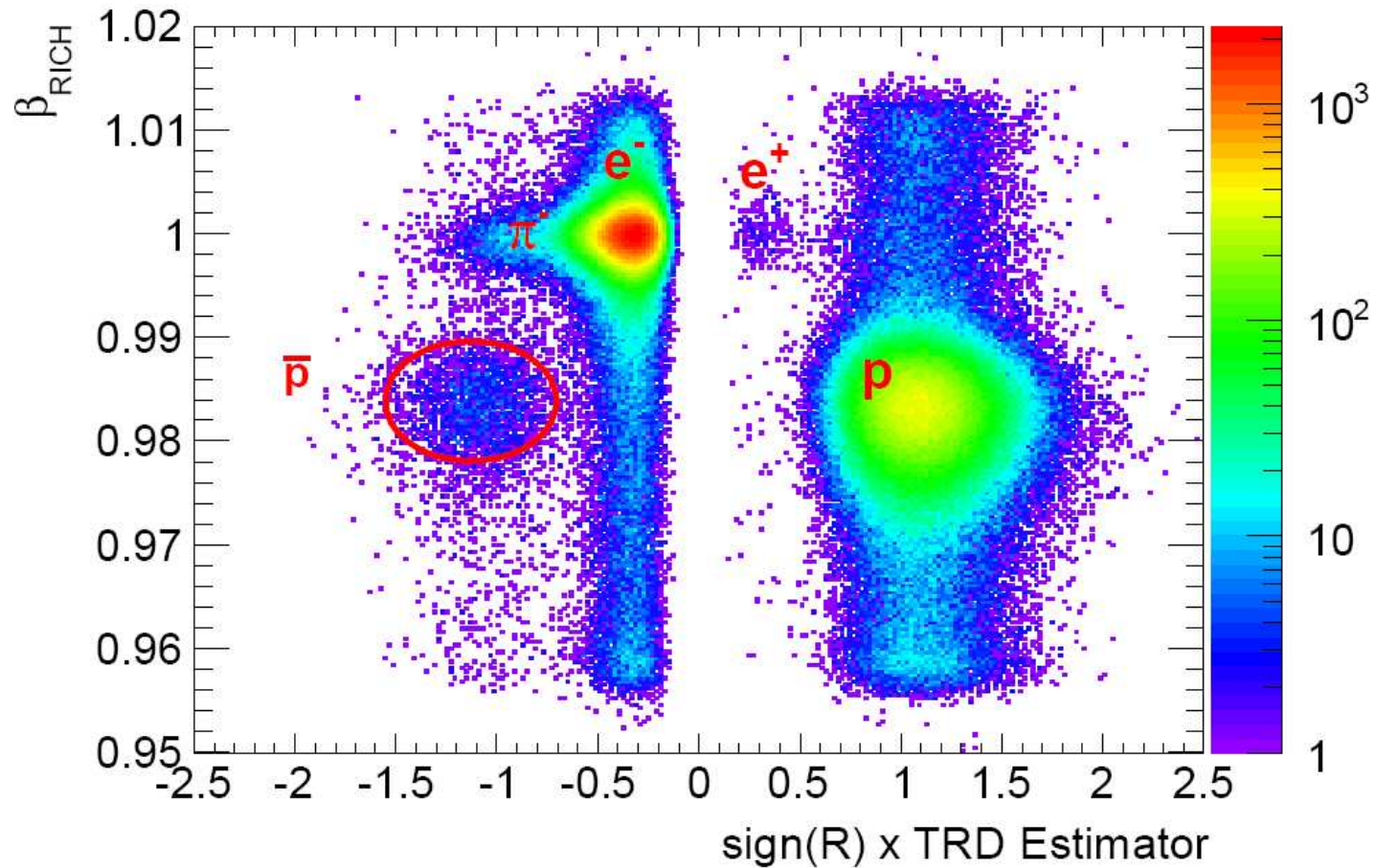


	e^+	e^-	p	\bar{p}	He	\bar{He}
TRD 20 layers						
TOF 4 layers						
TRK 9 layers						
RICH						
ECAL 18 layers						

AMS-02

Identyfikacja e^\pm

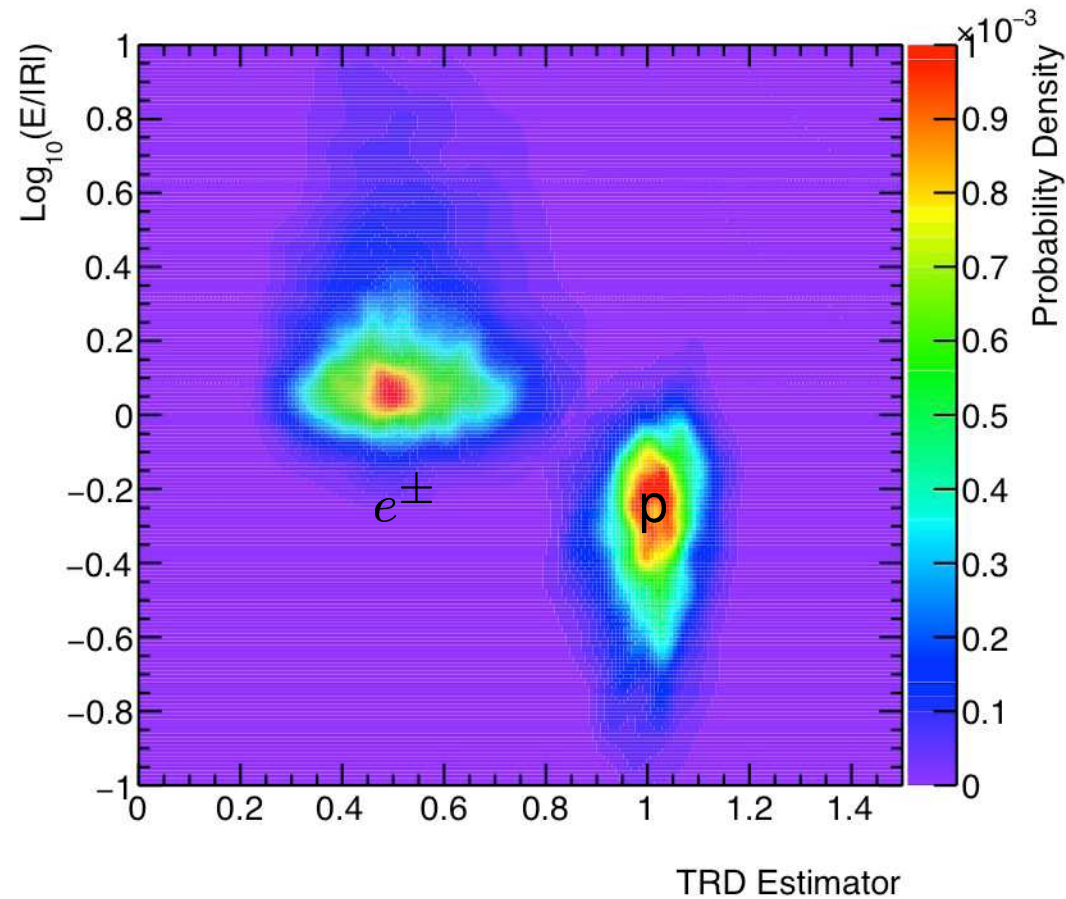
Korelacja prędkości z RICH i sygnału promieniowania przejścia



AMS-02

Identyfikacja e^\pm

Stosunek energii do pędu cząstki w funkcji sygnału promieniowania przejścia

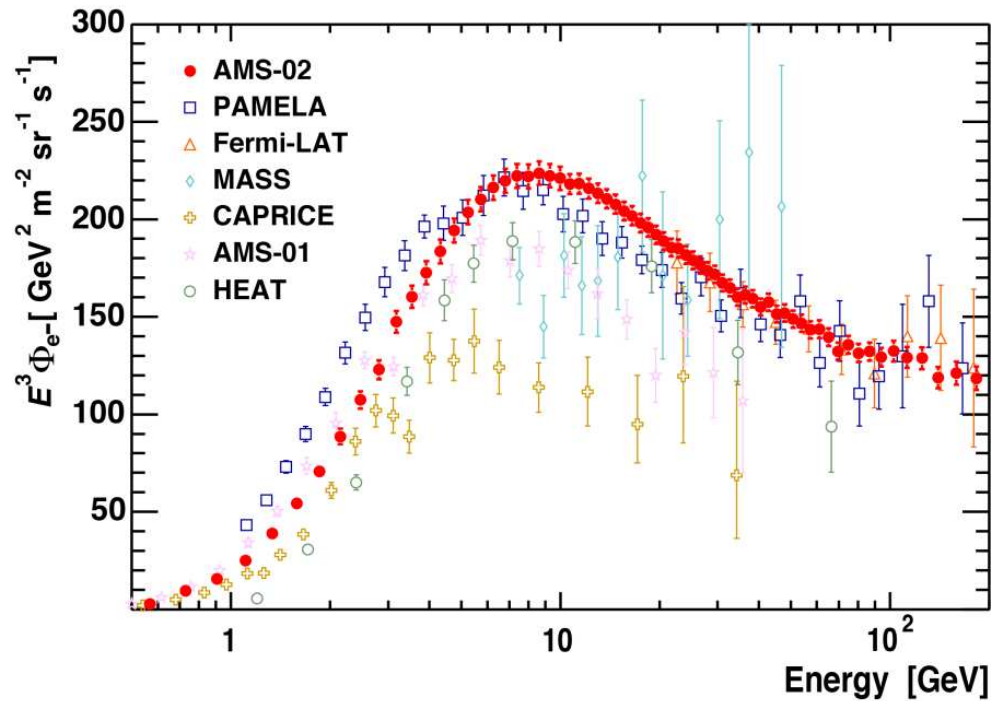


AMS-02

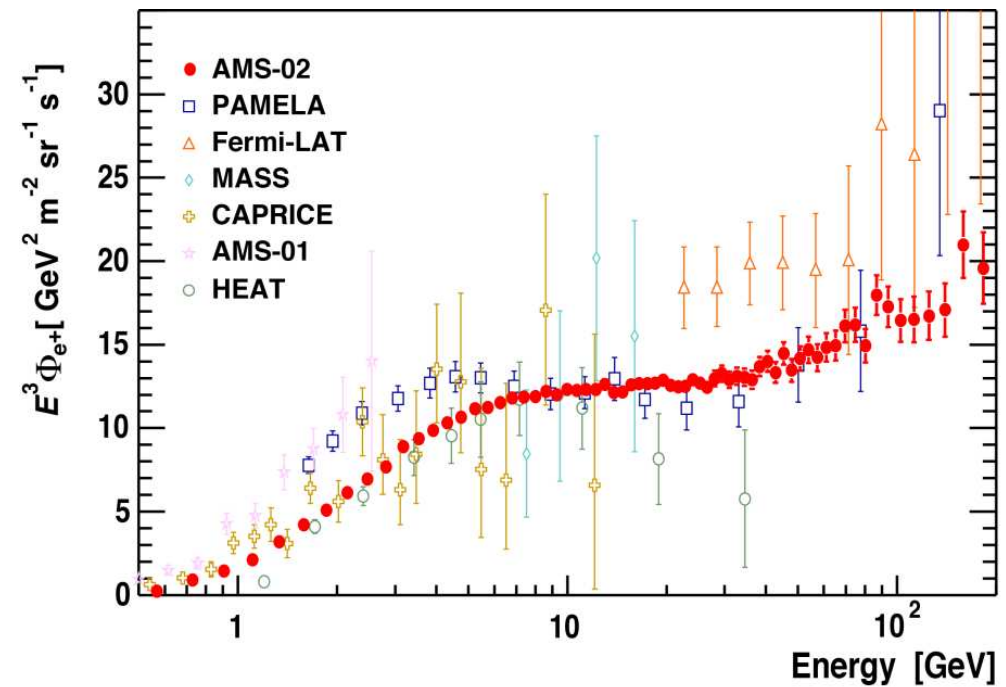
Wyniki e^\pm

Strumień promieniowania kosmicznego wyznaczone z dużo większą dokładnością niż było to poprzeczo możliwe - nowa jakość w badaniach.

Strumień elektronów



Strumień pozytonów

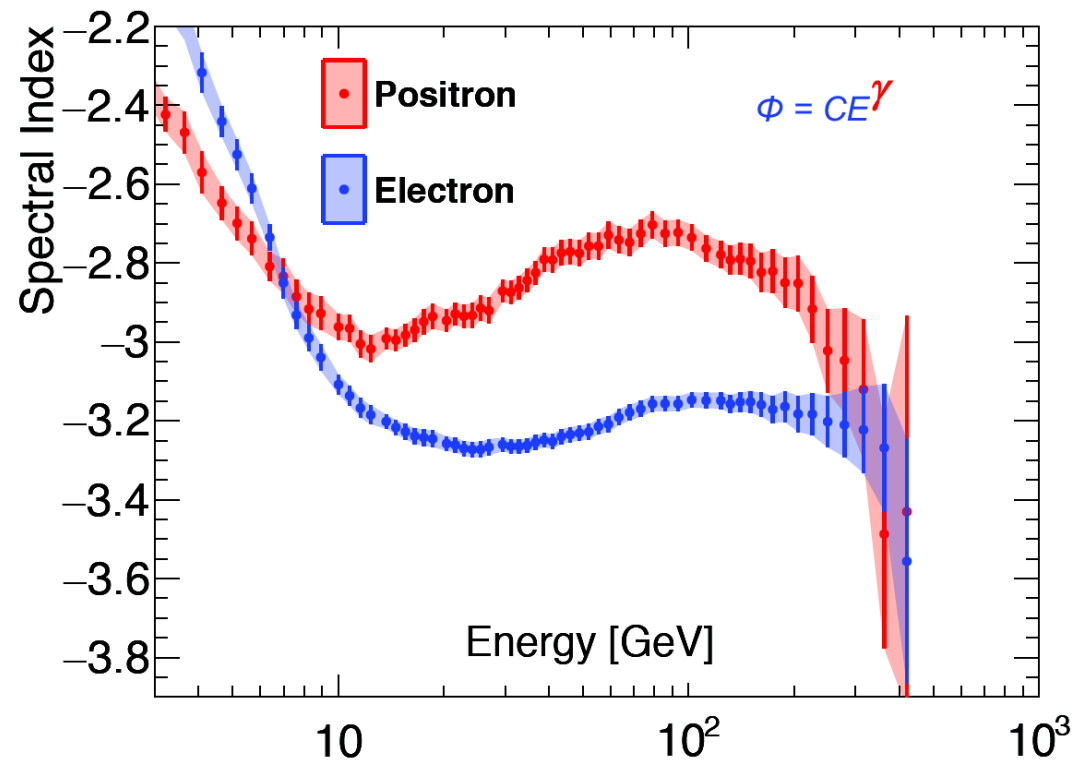


AMS-02

Wyniki e^\pm

Strumienie pozytonów i elektronów inaczej zależą od energii

$$\text{Spectral index} = \frac{d \log \Phi}{d \log E}$$



W zakresie od ok. 7 do 300 GeV strumień pozytonów maleje wolniej niż elektronów...

AMS-02

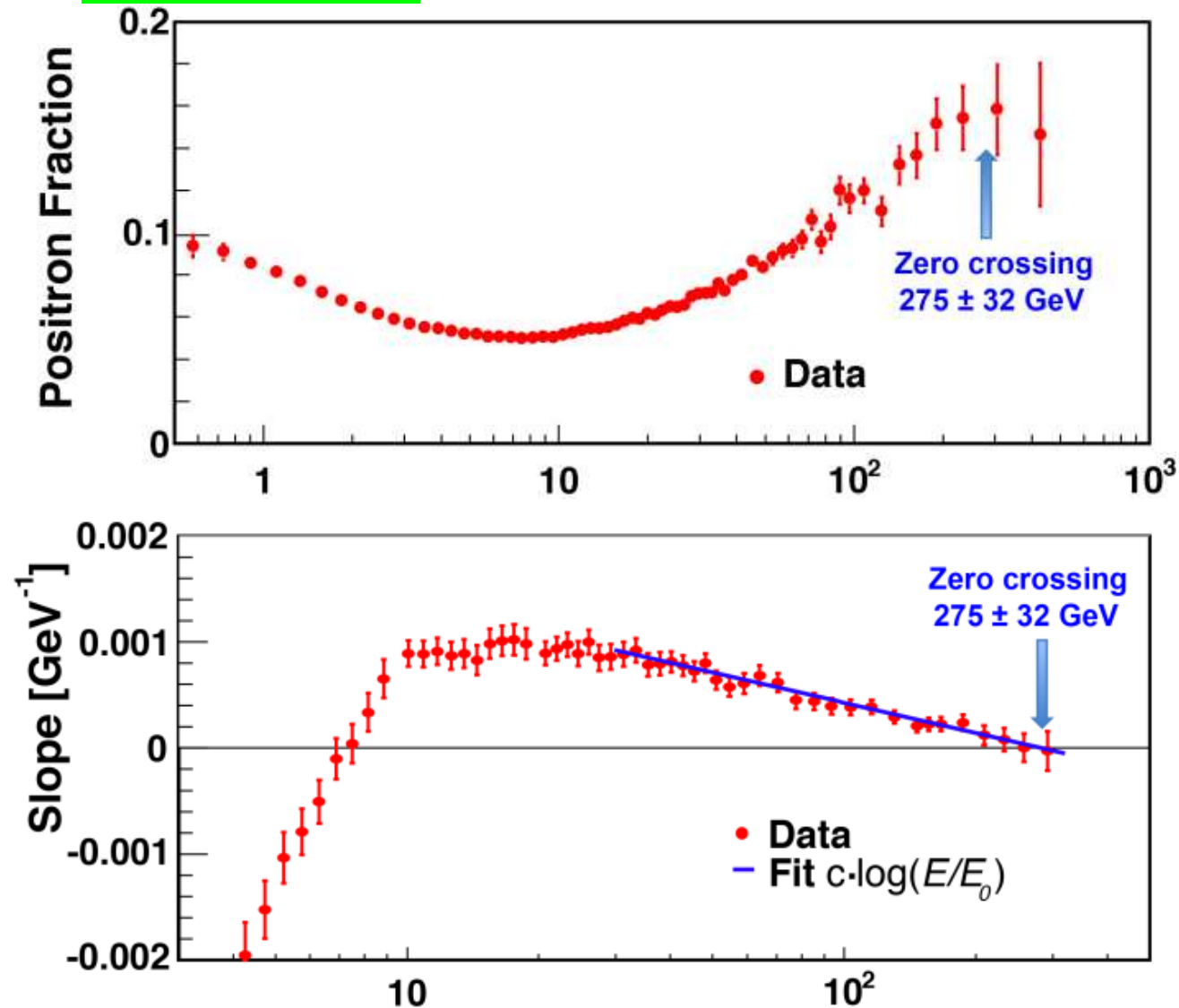
Wyniki e^\pm

Przy zmianie energii od ok. 7 do ok. 300 GeV stosunek pozytonów do elektronów rośnie ok. 3 razy!

Dane 2014:

Nie widać “odcięcia”!...

Nie widać struktur...



AMS-02

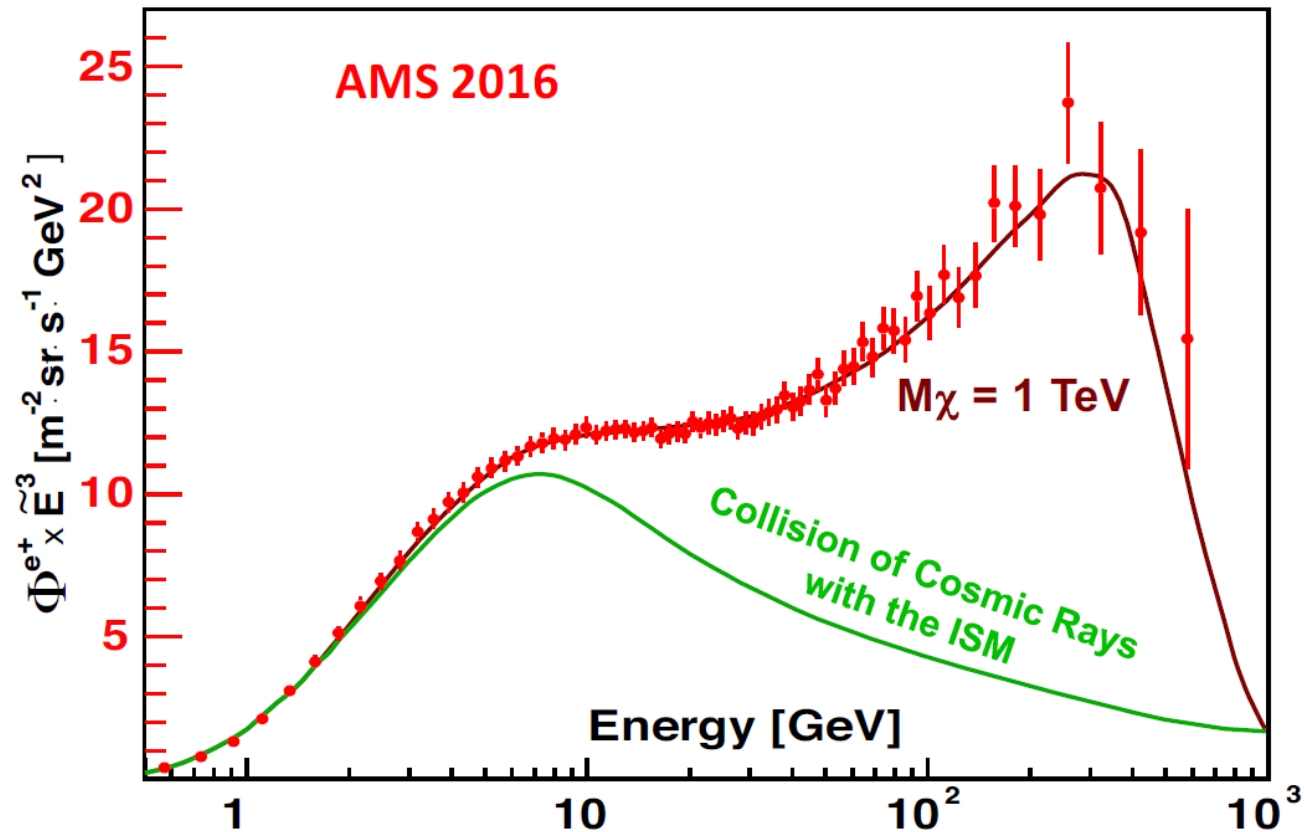
Wyniki e^\pm

Przy zmianie energii od ok. 7 do ok. 300 GeV stosunek pozytonów do elektronów rośnie ok. 3 razy!

Nowe dane (XII 2016)

Dane sugerują “odcięcie” odpowiadające anihilacji cząstek DM o masię rzędu 1 TeV...

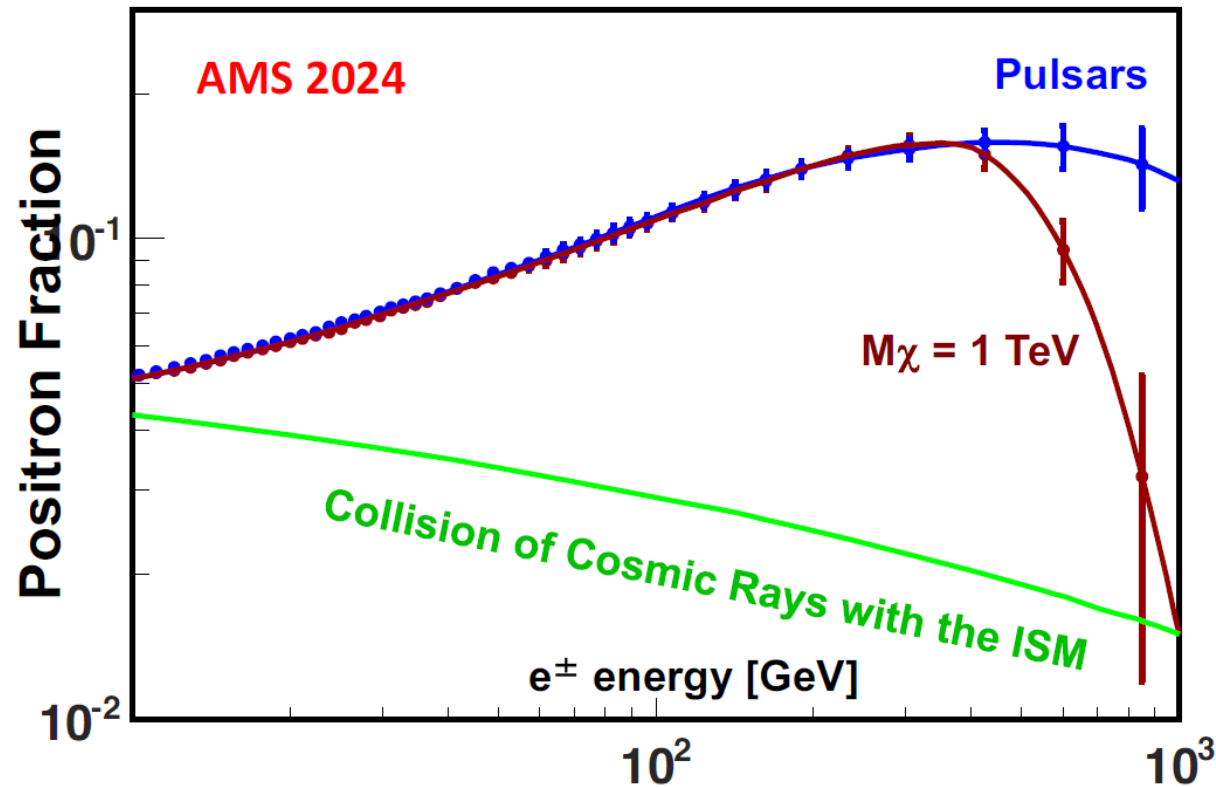
Strumień pozytonów



AMS-02

Wyniki e^\pm

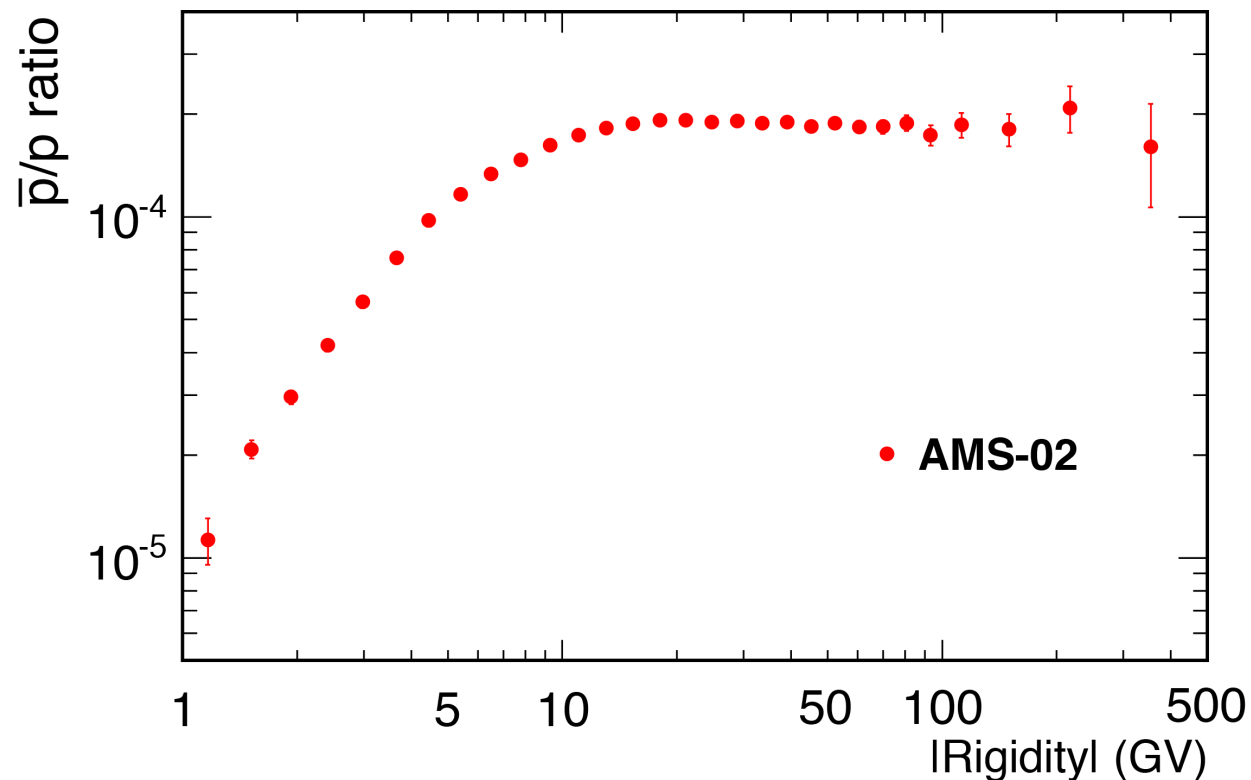
Obserwowany wzrost stosunku pozytonów do elektronów zgodny jest z hipotezą **anihilacji cząstek ciemnej materii**. **Ale nie tylko**. Potrzeba więcej danych...



AMS-02

Antyprotony

Uzyskano także bardzo dokładne wyniki dotyczące widma antyprotonów (antywodoru). Dla energii powyżej ok. 10 GeV obserwujemy stały stosunek \bar{p}/p .



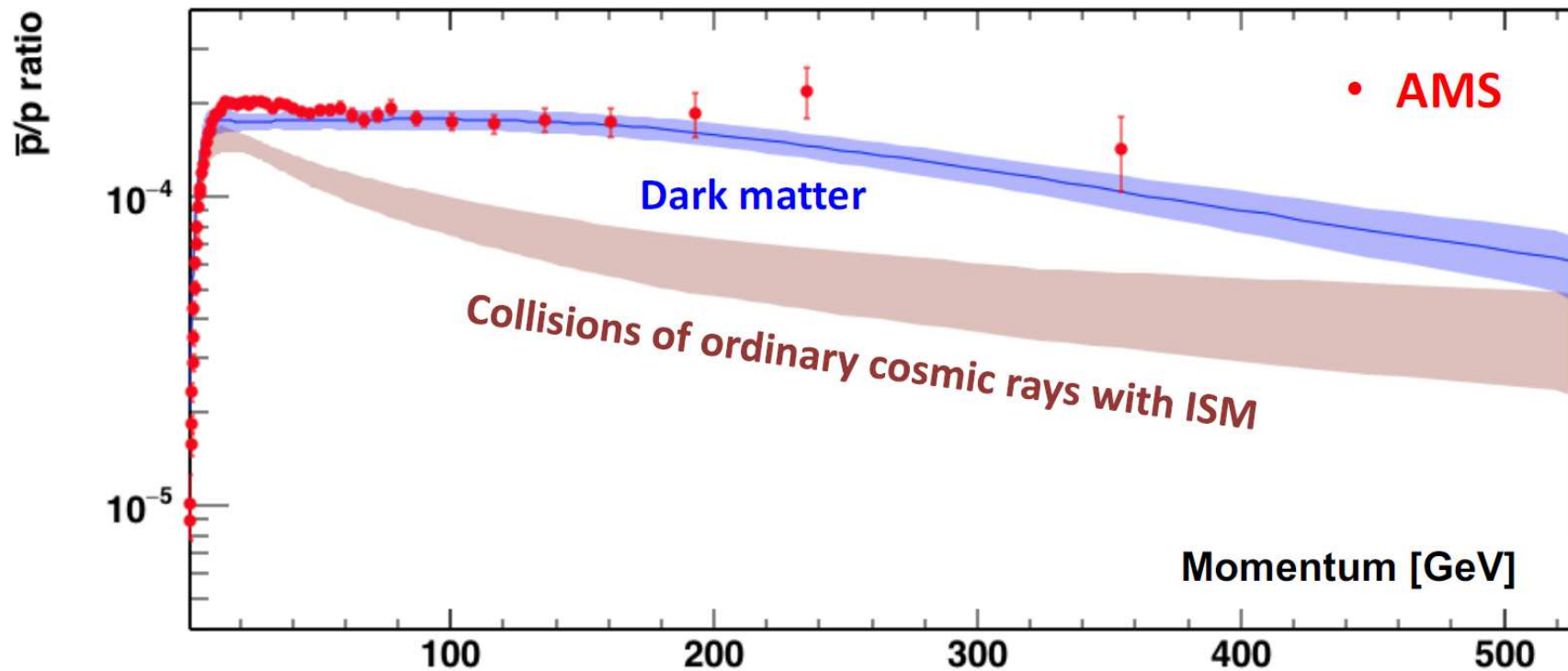
AMS-02

Antyprotony

Uzyskano także bardzo dokładne wyniki dotyczące widma antyprotonów (antywodoru).

Dla energii powyżej ok. 10 GeV obserwujemy stały stosunek \bar{p}/p .

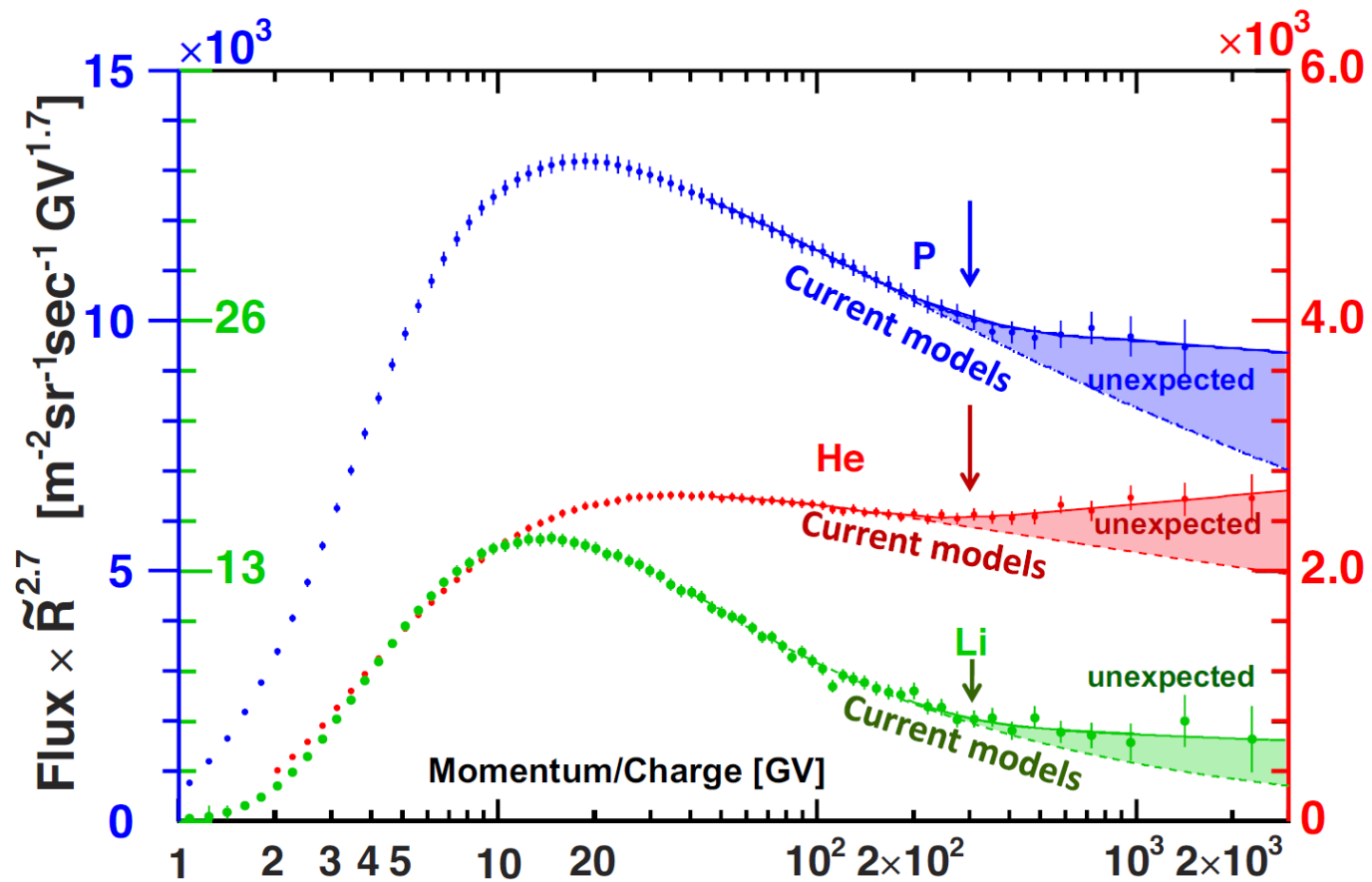
Jest to również zgodne z hipotezą [anihilacji cząstek ciemnej materii...](#)



AMS-02

Lekkie jądra

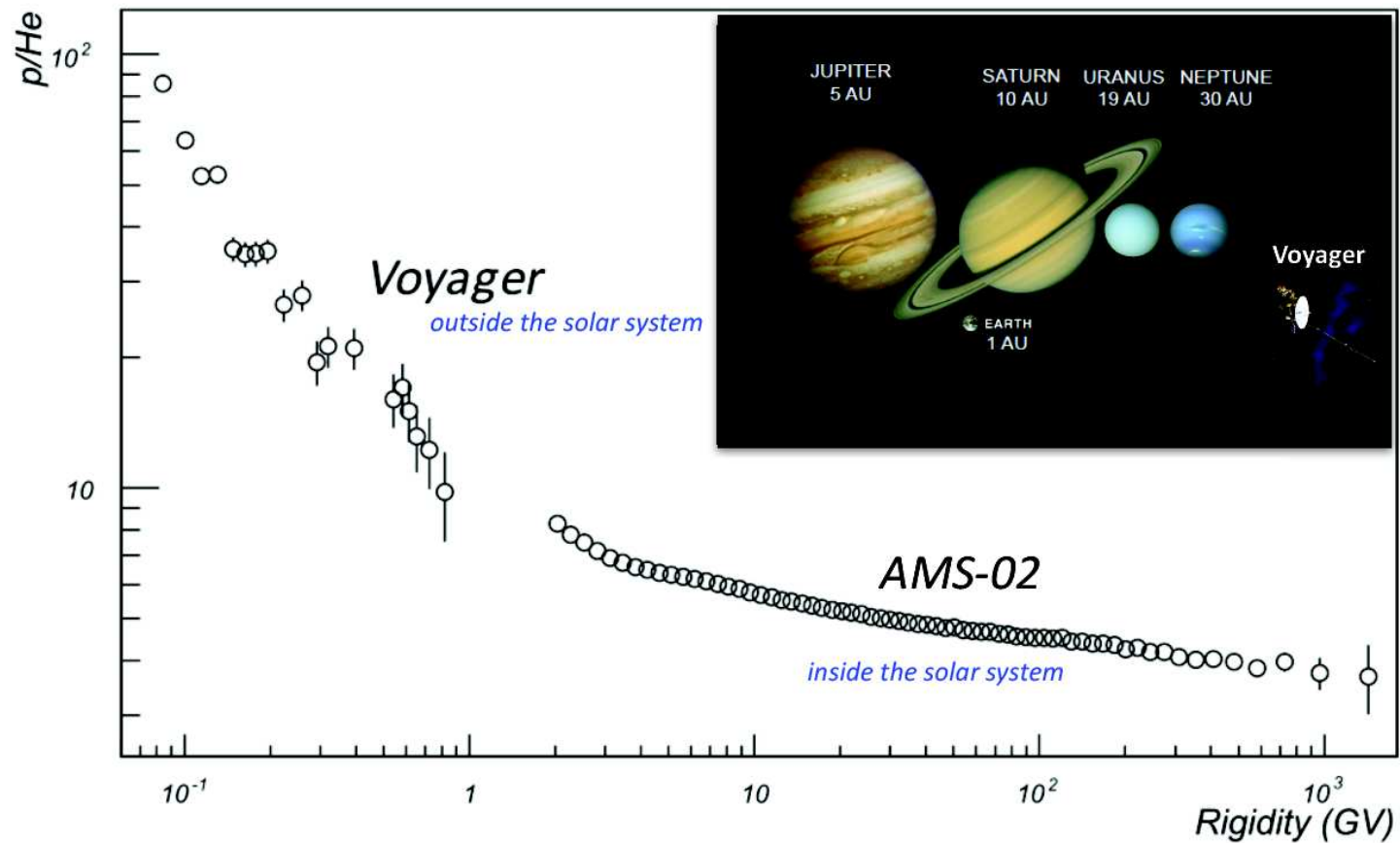
Dla energii powyżej 100 GeV obserwujemy także zmiany w kształcie widma dla protonów (wodoru), helu i litu \Rightarrow innych mechanizm produkcji ?!...



AMS-02

Lekkie jądra

Dla energii powyżej 100 GeV oczekivalibyśmy, że stosunek wodoru (protonów) do helu będzie stały. Tymczasem stosunek ten dalej maleje z energią...



Podsumowanie pośrednich poszukiwań DM

Współpraca AMS dostarcza bardzo precyzyjnych wyników dotyczących pomiarów promieniowania kosmicznego.

Zaobserwowano szereg efektów, które mogą być sygnaturami anihilacji cząstek ciemnej materii

- “nadwyżka” pozytonów
- “zagięcie” stosunku pozytonów do elektronów przy ok. 300 GeV
- “nadwyżka” antyprotonów i lekkich jąder

Jednak wciąż dane te można wytłumaczyć w oparciu o inne hipotezy.

⇒ potrzeba jeszcze dokładniejszych pomiarów,
a zwłaszcza rozszerzenia badanego zakresu do wyższych energii

Promieniowanie kosmiczne

Widmo

Promieniowanie kosmiczne (cząstki naładowane) docierające do Ziemi

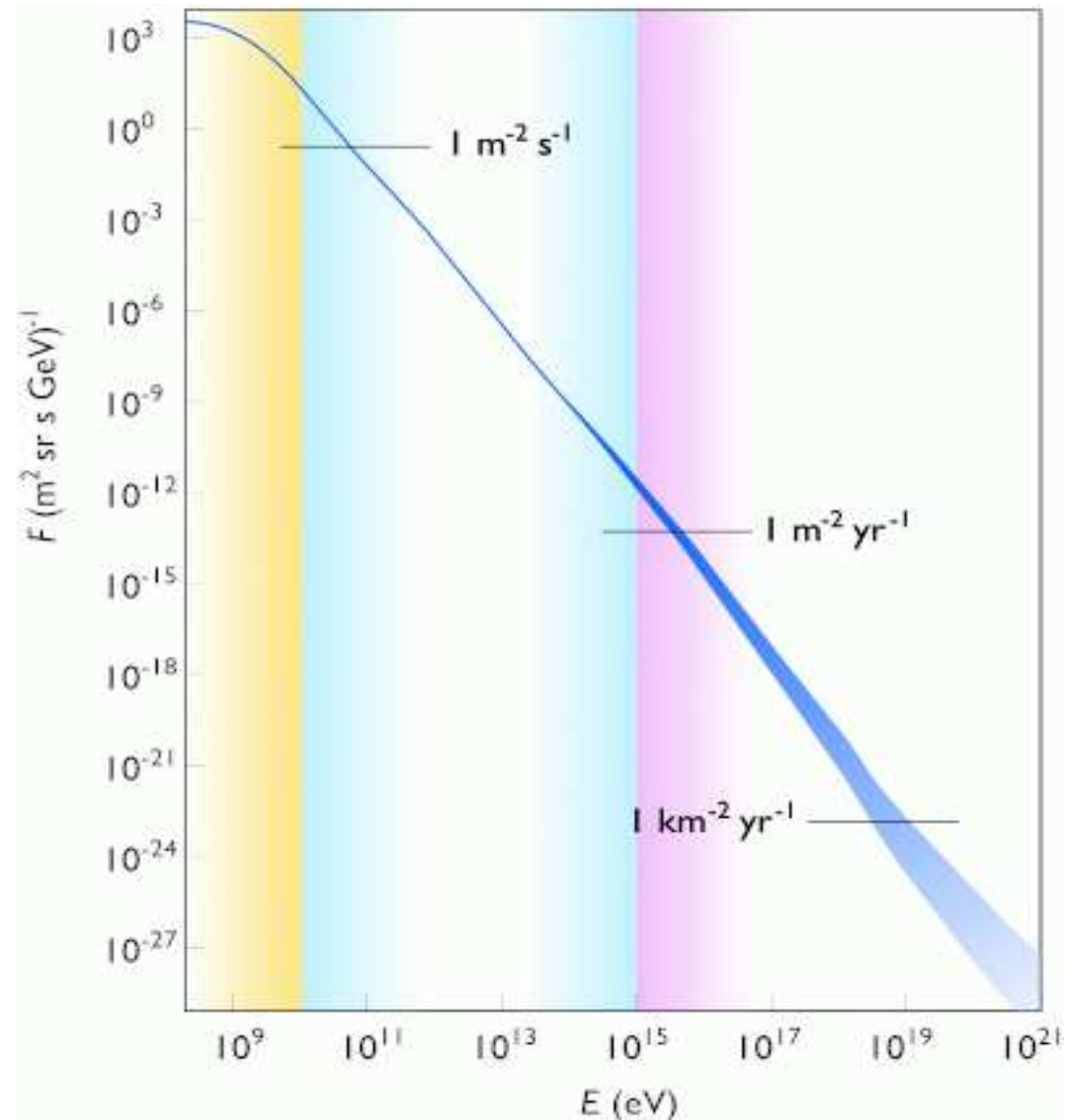
Widmo szybko zanikające z energią

$$\Phi(E) \sim E^{-\gamma} \quad \gamma \sim 2.7 - 3$$

Mimo to energie aż do $\sim 10^{20}$ eV

Czy potrafimy wytłumaczyć jak jest produkowane/przyspieszane?

Przyjmuje się, że promieniowanie w zakresie energii do ok. 10^{15} eV pochodzi z **naszej Galaktyki** - uwięzione przez galaktyczne pole magnetyczne.

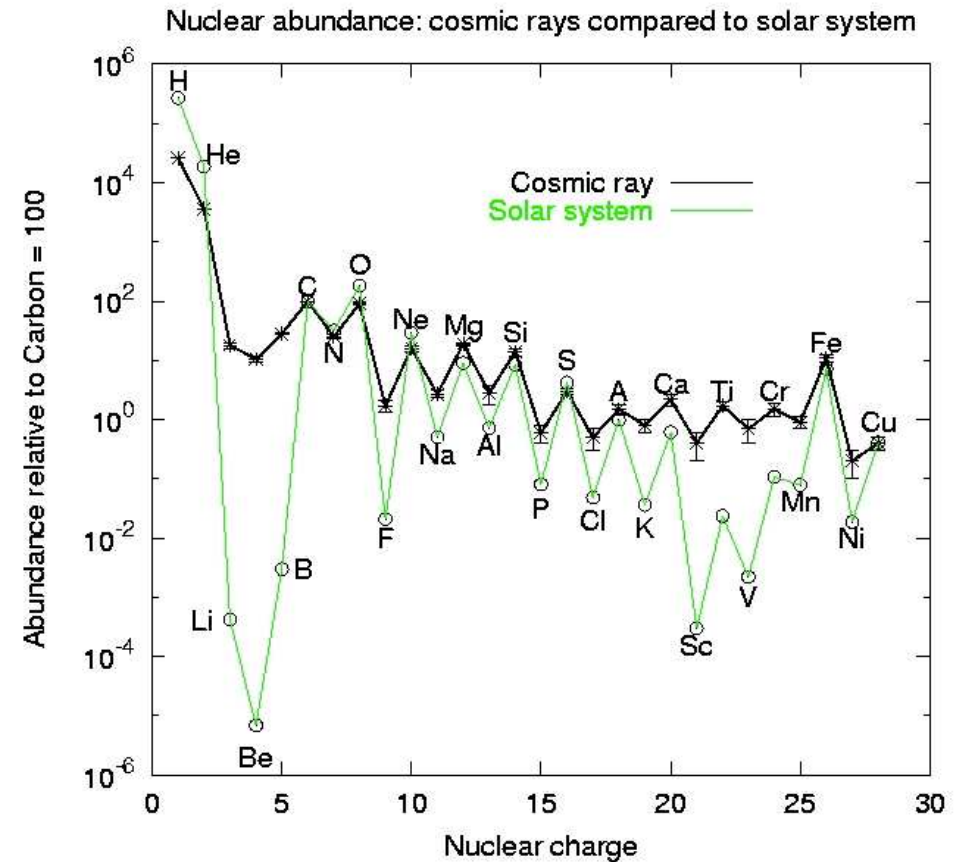


Promieniowanie kosmiczne

Skład

Skład podobny do składu Układu Słonecznego.

Przypuszczamy, że odpowiada to też składowi Galaktyki i Wszechświata.

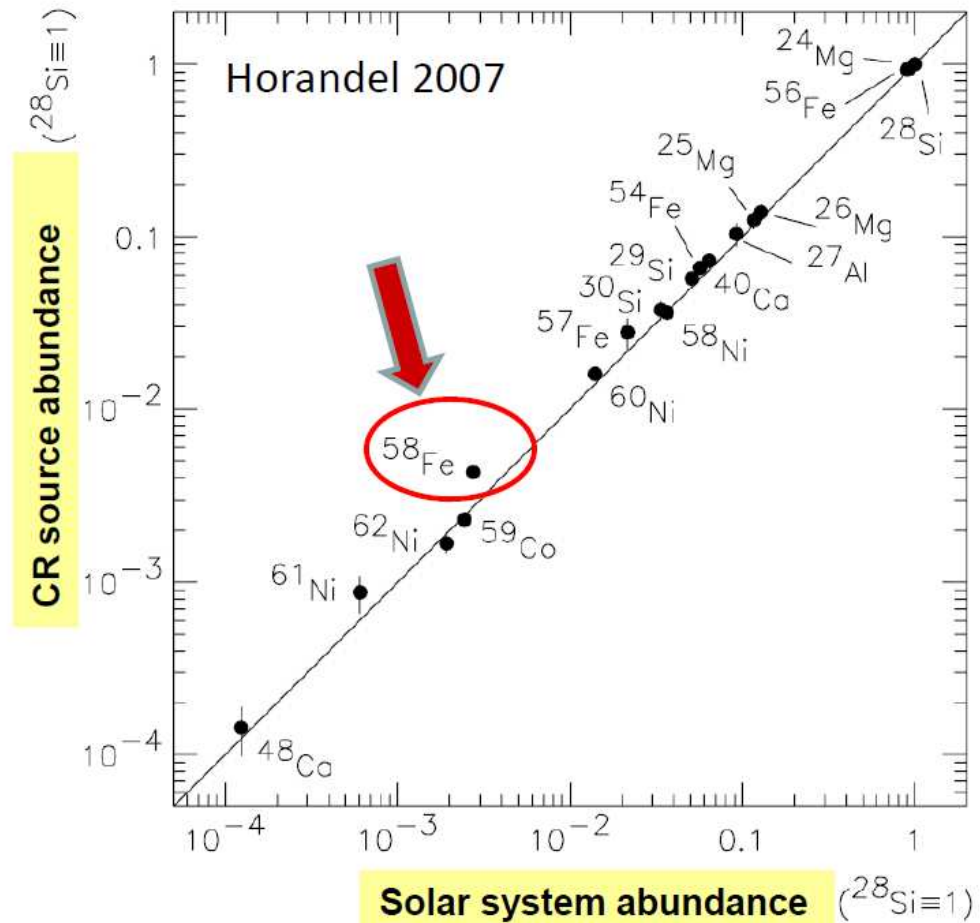


Promieniowanie kosmiczne

Skład

Skład podobny do składu Układu Słonecznego.

Przypuszczamy, że odpowiada to też składowi Galaktyki i Wszechświata.



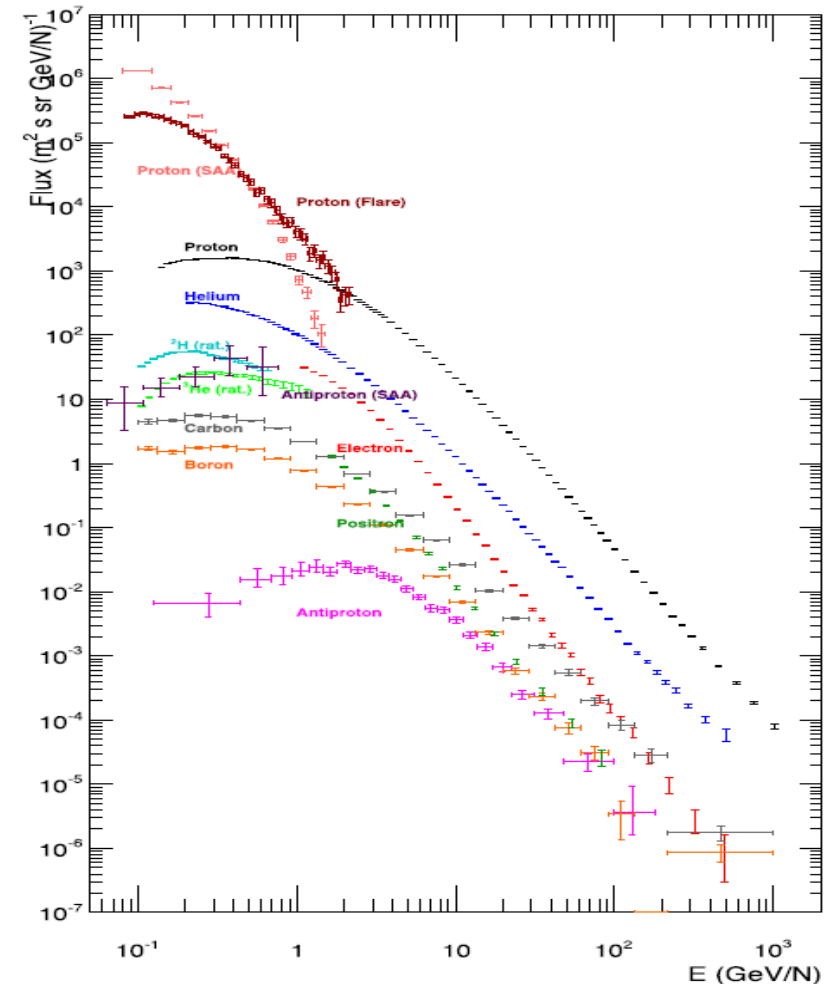
Promieniowanie kosmiczne

Widma pierwiastków

Bardzo podobną zależność od energii przedstawiają widma różnych pierwiastków (jąder) identyfikowanych w promieniowaniu kosmicznym.

- ⇒ wspólny mechanizm produkcji
- ⇒ szukamy mechanizmu, który nie zależy od rodzaju cząstki

wyniki PAMELA (2012)



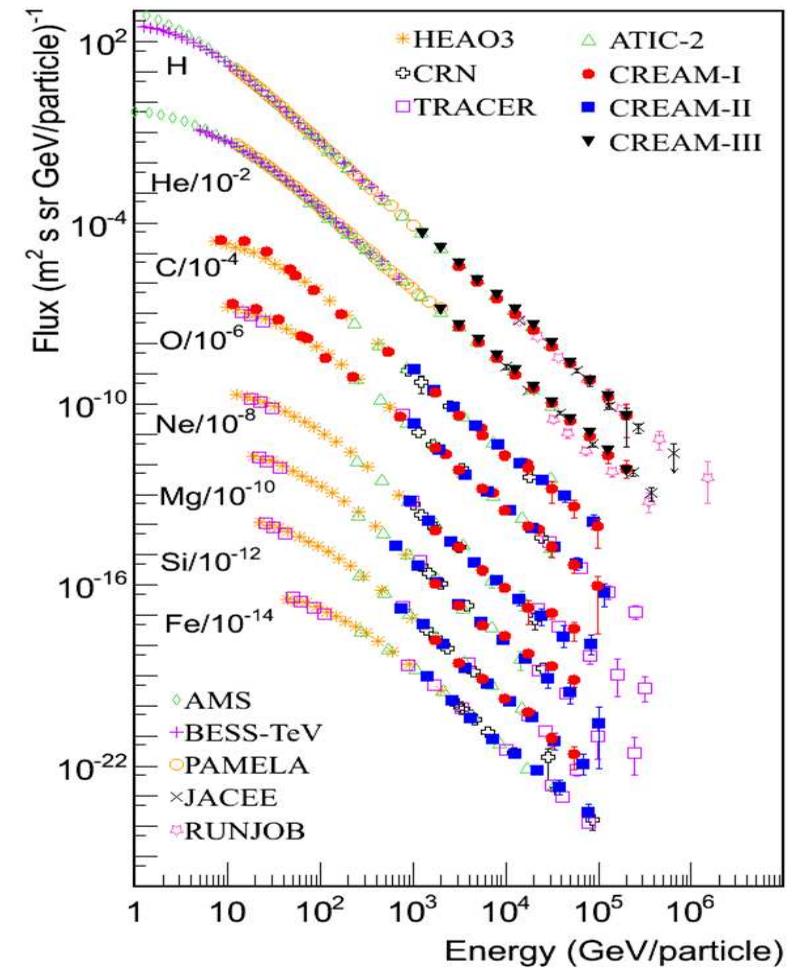
Promieniowanie kosmiczne

Widma pierwiastków

Bardzo podobną zależność od energii przedstawiają widma różnych pierwiastków (jąder) identyfikowanych w promieniowaniu kosmicznym.

- ⇒ wspólny mechanizm produkcji
- ⇒ szukamy mechanizmu, który nie zależy od rodzaju cząstki

wyniki eksperymentów balonowych

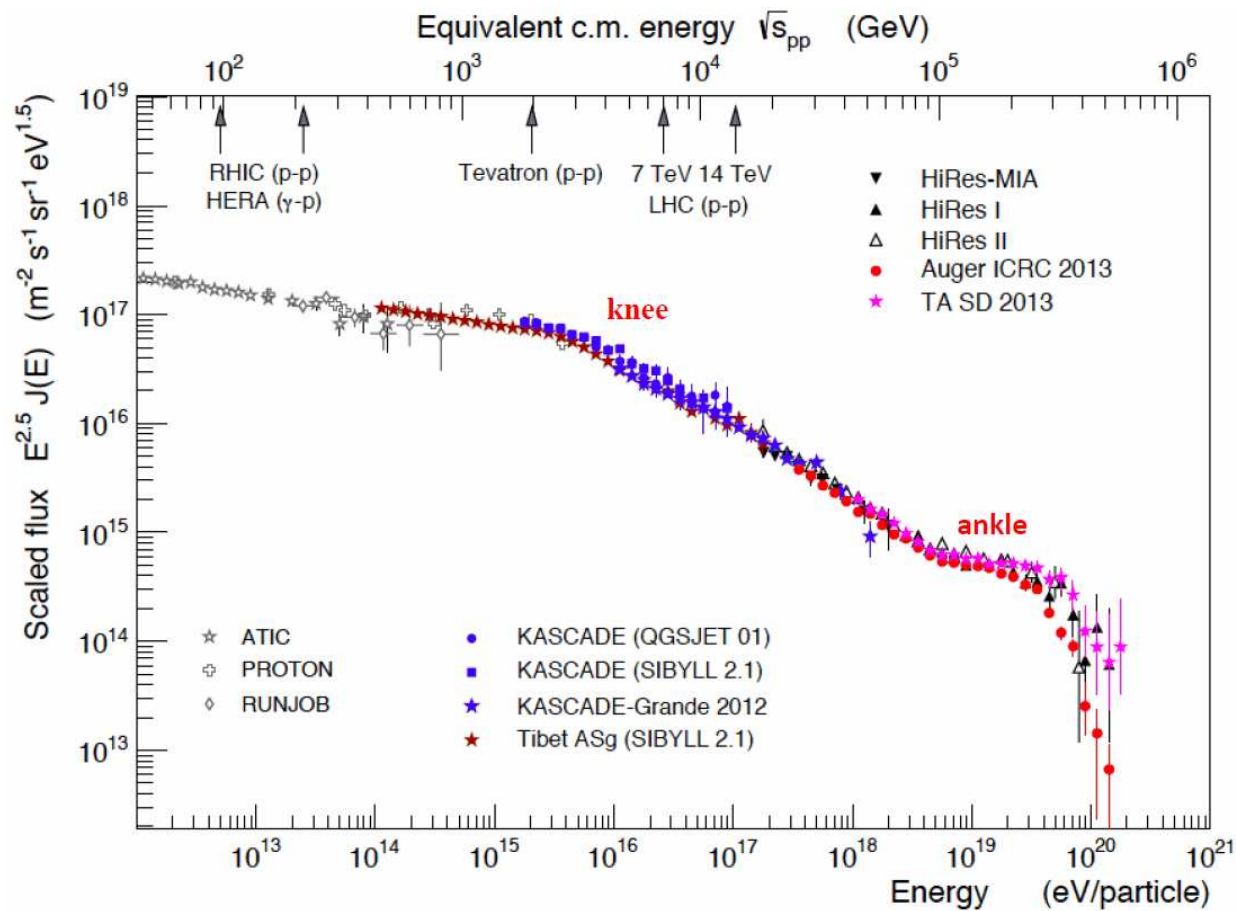


Promieniowanie kosmiczne

Pochodzenie

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

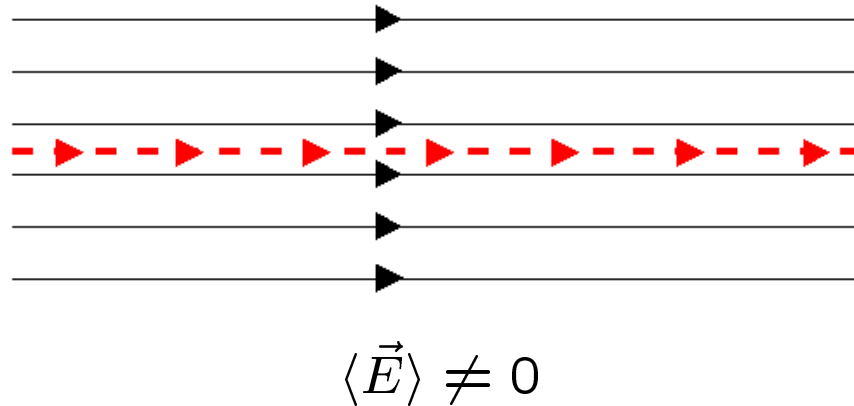
⇒ mogą sugerować różne źródła i/lub mechanizmy produkcji...



Mechanizm przyspieszania

Jednoetapowy

Przyspieszanie cząstek w bardzo silnych polach elektrycznych.



Makroskopowe pola mogą powstawać na skutek zmian pól magnetycznych.

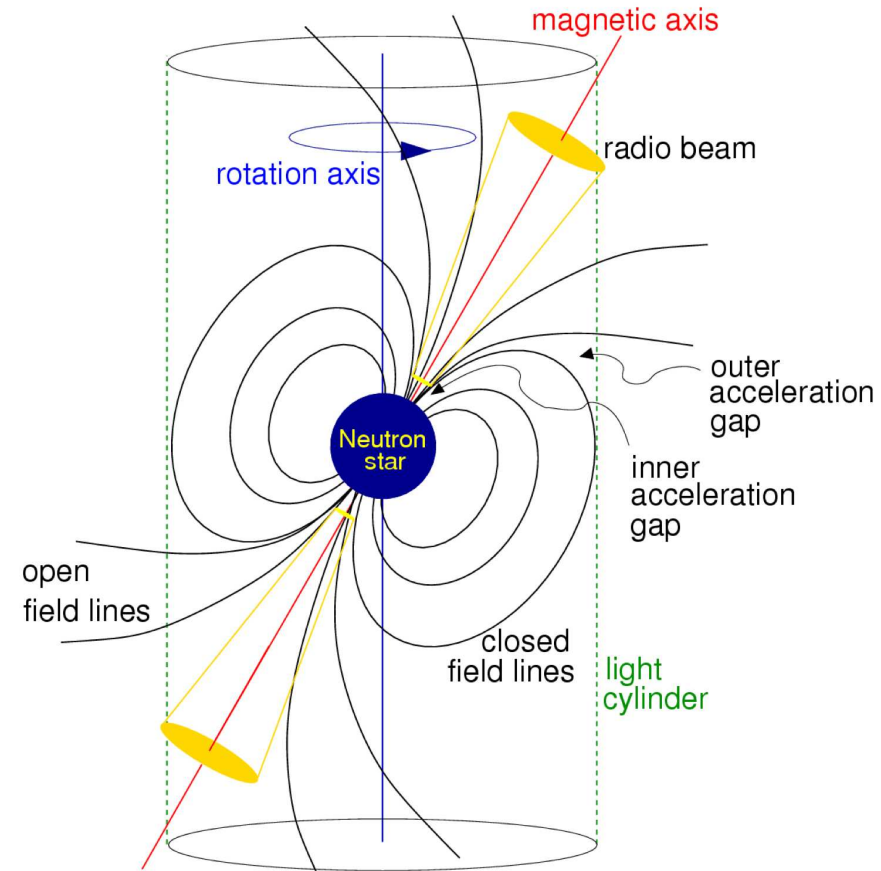
Możliwe źródło: pulsary

Mechanizm przyspieszania

Pulsary



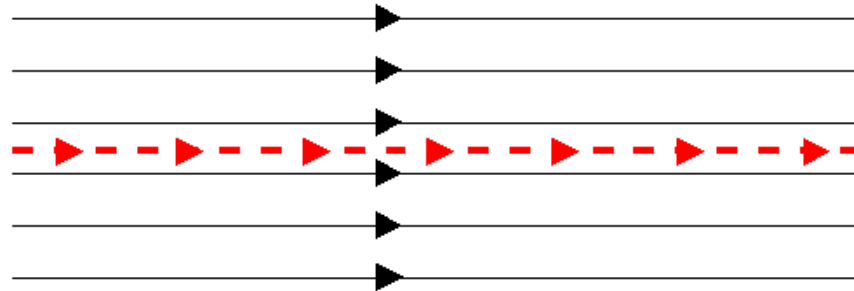
- silne pole magnetyczne szybko wirującej gwiazdy neutronowej \Rightarrow rozsuniecie ładunków elektrycznych
 - precesja osi magnetycznej \Rightarrow zmienne pole magnetyczne \Rightarrow pole elektryczne
- \Rightarrow możliwe przyspieszanie do energii rzędu TeV



Mechanizm przyspieszania

Jednoetapowy

Przyspieszanie cząstek w bardzo silnych polach elektrycznych.



$$\langle \vec{E} \rangle \neq 0$$

Efektywność akceleracji maleje w obecności materii:

- rozpraszanie w ośrodku “blokuje” rozpoczęcie efektywnego przyspieszania
- jonizacja ośrodka powoduje “ekranowanie” pola przyspieszającego

“Magnetosfera” otaczająca pulsar wypełniona jest plazmą e^+e^-

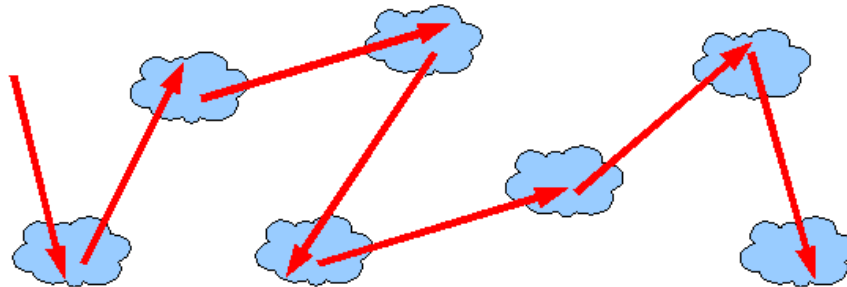
⇒ nie możemy uzyskać skrajnie wysokich energii...

Mechanizm przyspieszania

Wieloetapowy

Cząstki mogą też zyskiwać wysokie energie w wyniku wielu kolejnych oddziaływań, elementarnych aktów przyspieszania.

Możliwe to jest nawet w sytuacji, w której kolejne oddziaływania zachodzą całkowicie losowo.



$$\langle \vec{E} \rangle = 0$$

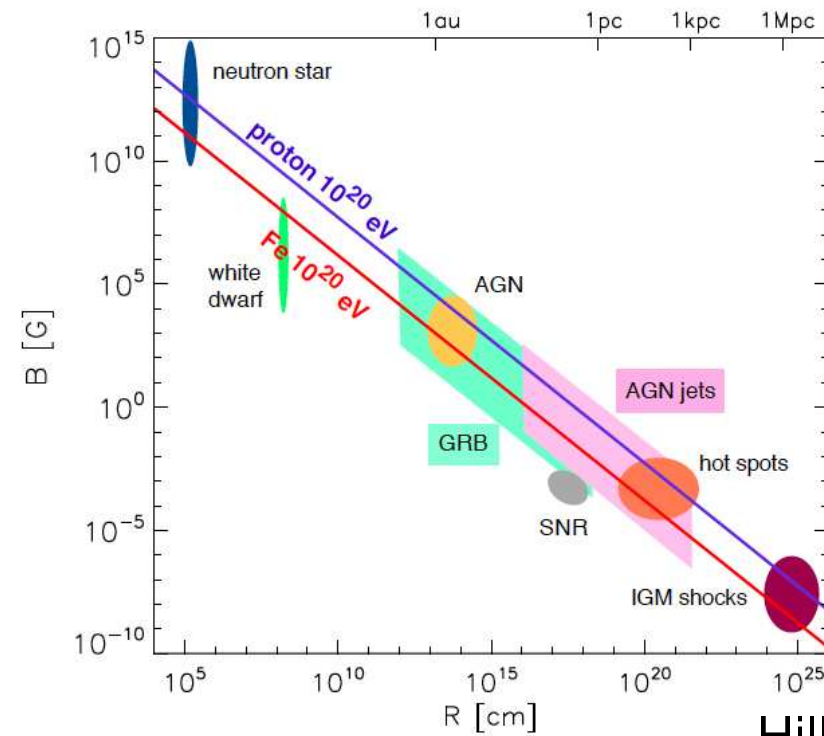
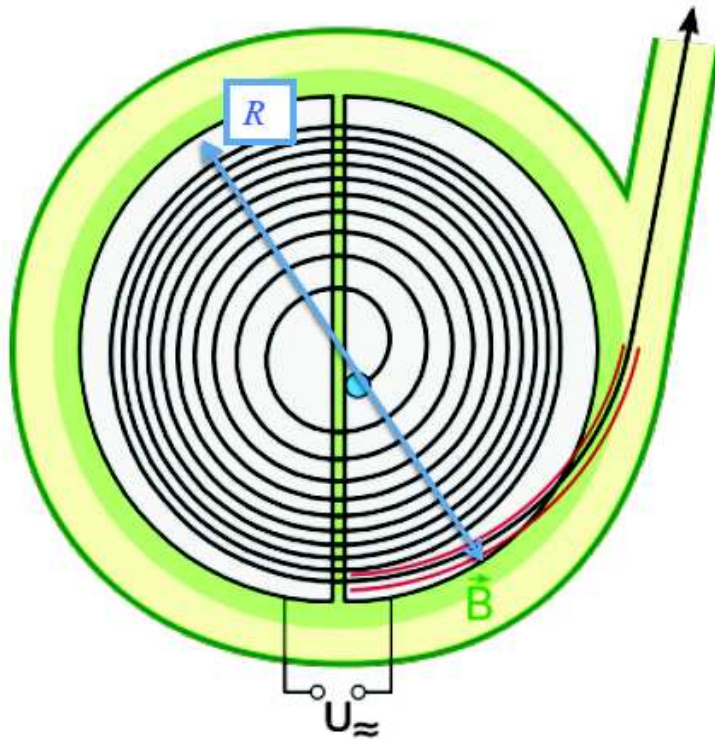
Mimo to możemy uzyskać bardzo wysokie energie...

Mechanizm przyspieszania

Możliwe źródła

Przyspieszanie wieloetapowe przypomina przyspieszanie w akceleratorach. Aby ulegać kolejnym przyspieszeniom cząstka musi być uwięziona.

Wiele obiektów astrofizycznych mogłoby być źródłem promieniowania wysokich energii...



Hillas plot

Promieniowanie kosmiczne

Pochodzenie

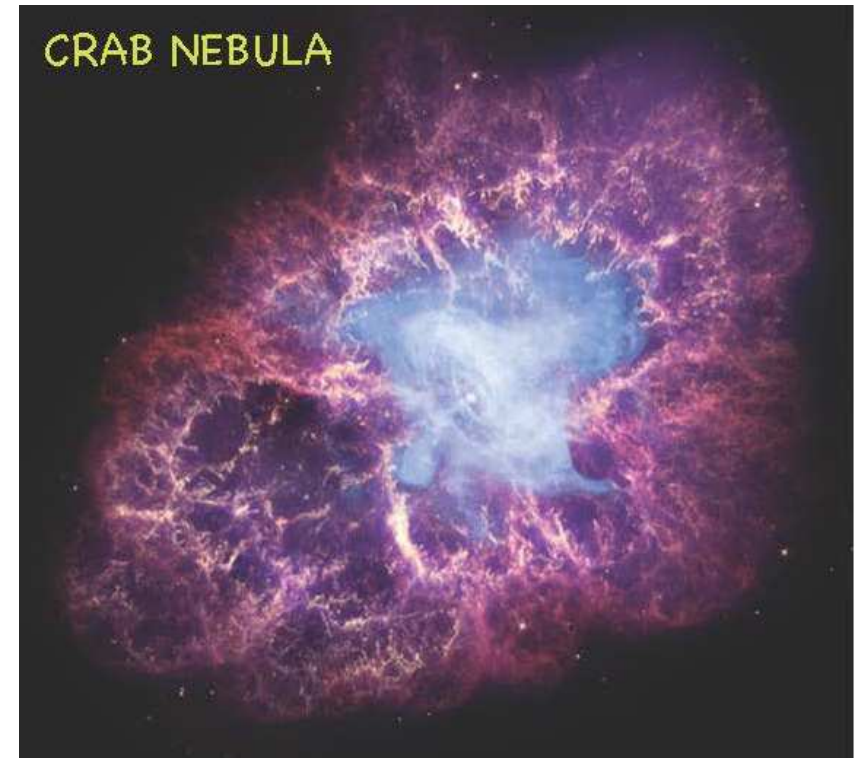
Przyjmuje się, że promieniowanie w zakresie energii do ok. 10^{15} eV pochodzi z **naszej Galaktyki** - uwięzione przez galaktyczne pole magnetyczne.

Produkowane jest prawdopodobnie w wyniku **eksplozji supernowych**.

$$E_{SN} = 10^{44} \text{ J} \quad (10^{51} \text{ erg})$$

$$f_{SN} \sim 1/30 - 1/100 \text{ yr}^{-1}$$

$$\Rightarrow P_{SN} \sim 3 \cdot 10^{34} \text{ W}$$

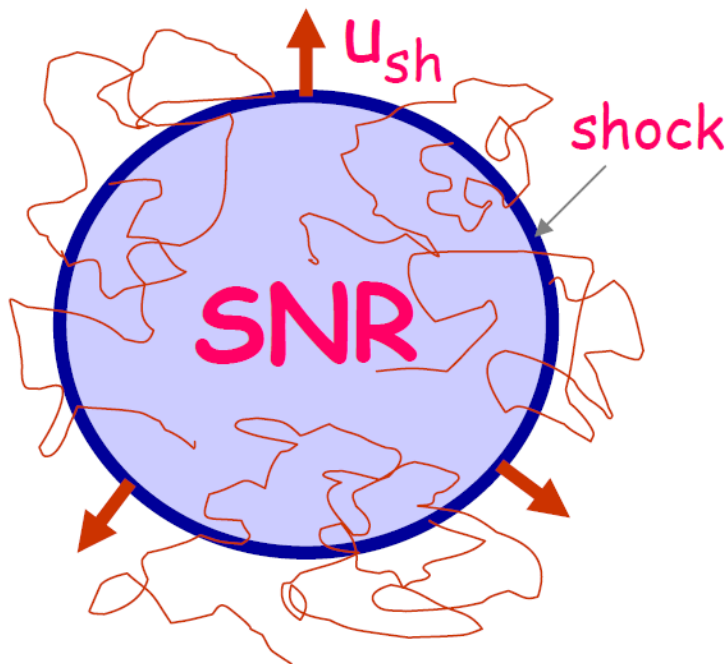


Wystarczy, że 10% energii może zostać przekształcone na energię kinetyczną cząstek.
Ale jak?

Mechanizm przyspieszania

Supernova Remnant (SNR)

W eksplozji supernowej następuje wyrzut materii, która zderza się z materią międzygwiazdową. Fala uderzeniowa może poruszać się z bardzo dużą prędkością, wielokrotnie przewyższającą prędkość dźwięku...



Mechanizm przyspieszania

Mechanizm Fermiego

Wyjasnienie mechanizmu przyspieszania cząstek w fali uderzeniowej zaproponował w 1949 Enrico Fermi

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 75, NUMBER 8

APRIL 15, 1949

On the Origin of the Cosmic Radiation

ENRICO FERMI

Institute for Nuclear Studies, University of Chicago, Chicago, Illinois

(Received January 3, 1949)

A theory of the origin of cosmic radiation is proposed according to which cosmic rays are originated and accelerated primarily in the interstellar space of the galaxy by collisions against moving magnetic fields. One of the features of the theory is that it yields naturally an inverse power law for the spectral distribution of the cosmic rays. The chief difficulty is that it fails to explain in a straightforward way the heavy nuclei observed in the primary radiation.

Mechanizm przyspieszania

Mechanizm Fermiego

Przyjmujemy, że bezpośrednie oddziaływania między cząstkami są zanedbywalne (“collisionless shock”). Ruch cząstek jest determinowany przez pola magnetyczne pojawiające się w fali uderzeniowej.

W silnym polu cząstki poruszają się wzdłuż linii pola - mogą ulec “odbiciu”

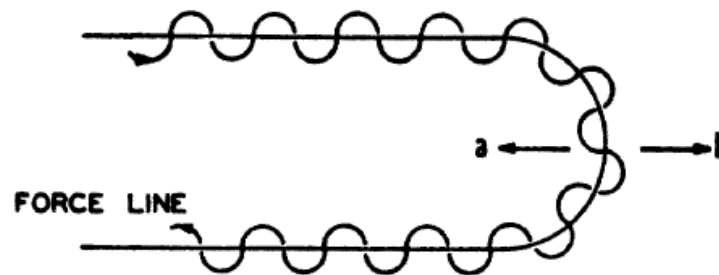
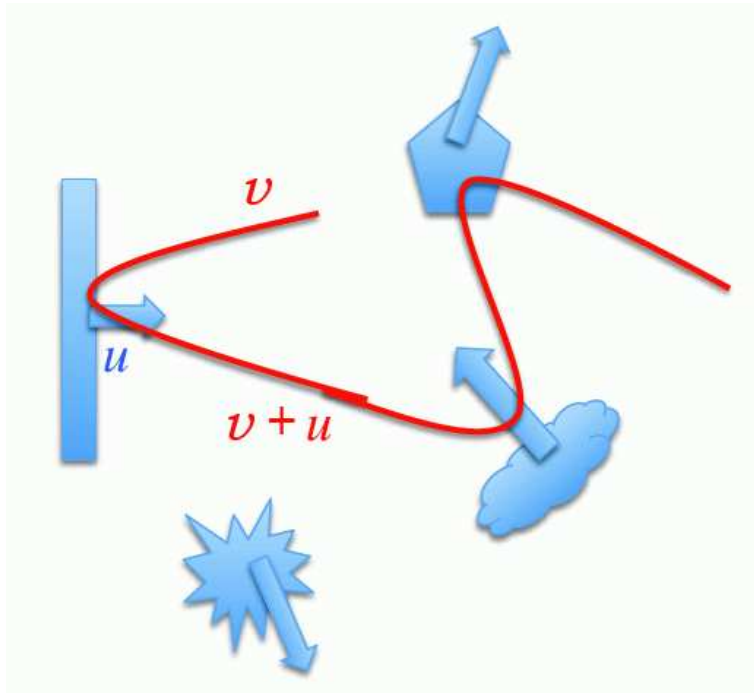


FIG. 1. Type *B* reflection of a cosmic-ray particle.

Mechanizm przyspieszania

Mechanizm Fermiego drugiego rzędu

second-order stochastic acceleration



Cząstki rozpraszają się (“odbijają”) od losowo poruszających się w czole fali perturbacji (“luster magnetycznych”)

Zmiana energii cząstki poruszającej się z prędkością v po odbiciu od lustra poruszającego się z prędkością u pod kątem θ :

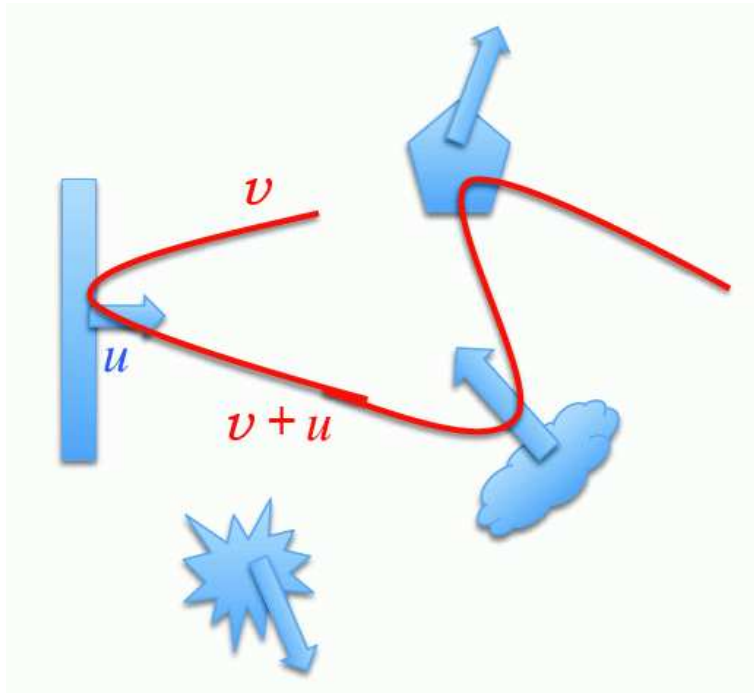
$$E' = \gamma^2 E \left(1 + \beta^2 + 2\beta \frac{v}{c} \cos \theta \right)$$

$$\beta = \frac{u}{c}$$

Mechanizm przyspieszania

Mechanizm Fermiego drugiego rzędu

second-order stochastic acceleration



Cząstki rozpraszają się (“odbijają”) od losowo poruszających się w czole fali perturbacji (“luster magnetycznych”)

Bardziej prawdopodobne zderzenie “head-on”
⇒ netto zysk energii

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle \approx \frac{4}{3} \beta^2$$

Zbyt mało, żeby wytłumaczyć widmo...

Mechanizm przyspieszania

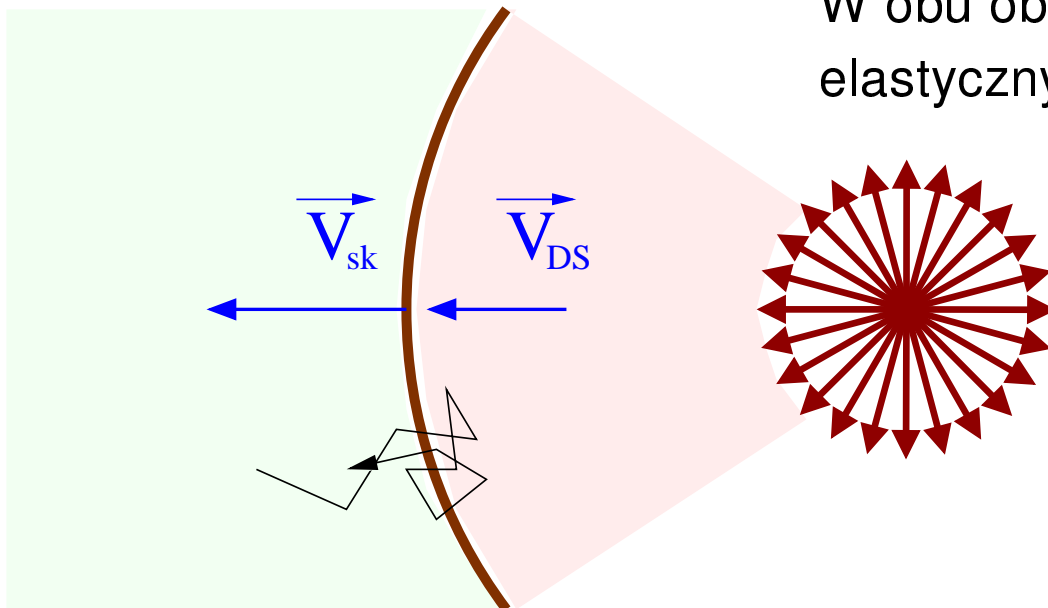
Mechanizm Fermiego pierwszego rzędu

first-order Fermi acceleration

układ związany z SN

Cząstka przechodzi wielokrotnie przez **czoło fali**.

W obu obszarach ulega wielokrotnym rozproszeniom elastycznym (brak strat energii **w układzie ośrodka!**).



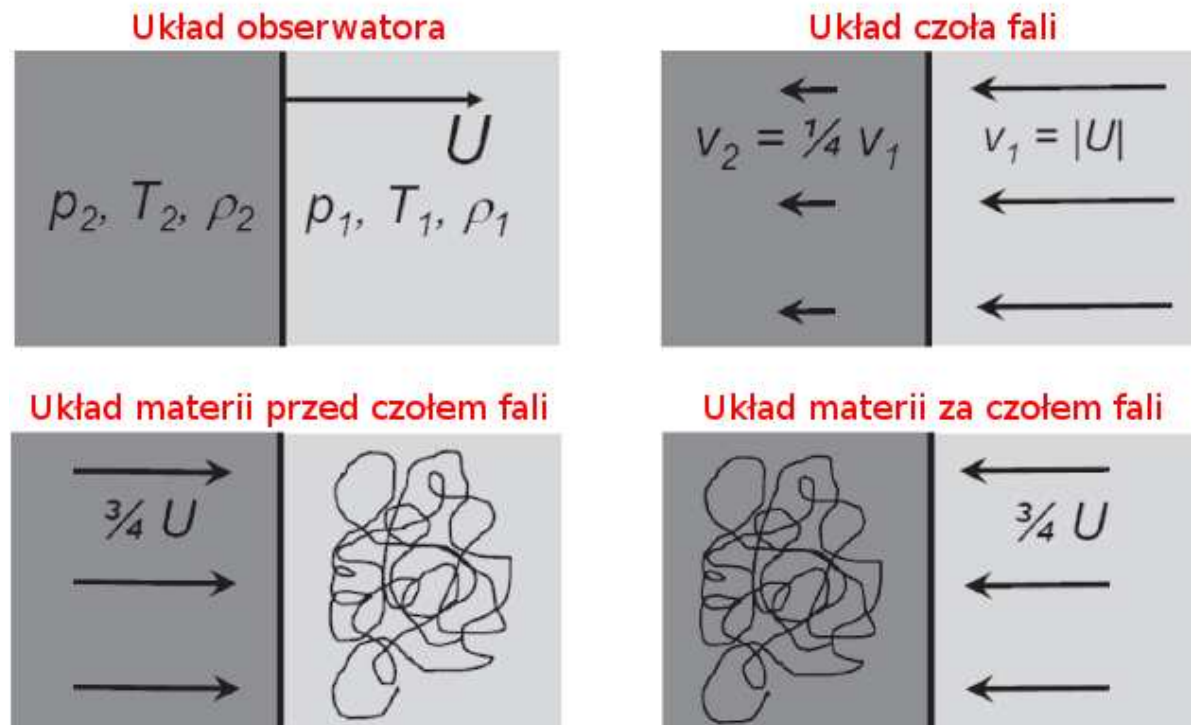
Mechanizm przyspieszania

Mechanizm Fermiego pierwszego rzędu

first-order Fermi acceleration

Rozkład prędkości na czole fali w różnych układach odniesienia:

Nick Murphy
Plasma Astrophysics

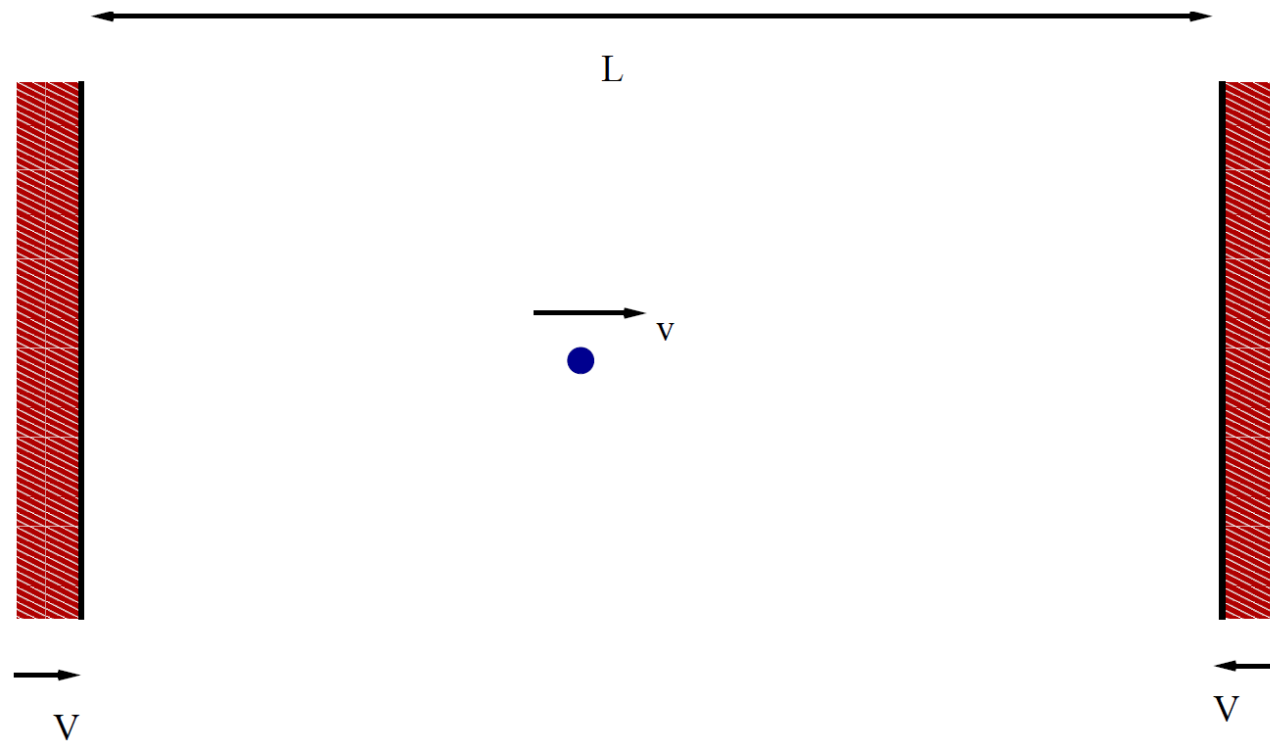


Przechodząc wielokrotnie przez **czoło fali** cząstka napotyka za każdym razem na materię/pola poruszające się w przeciwnym kierunku...

Mechanizm przyspieszania

Mechanizm Fermiego pierwszego rzędu first-order Fermi acceleration

Najbardziej uproszczony schemat ideowy akceleracji

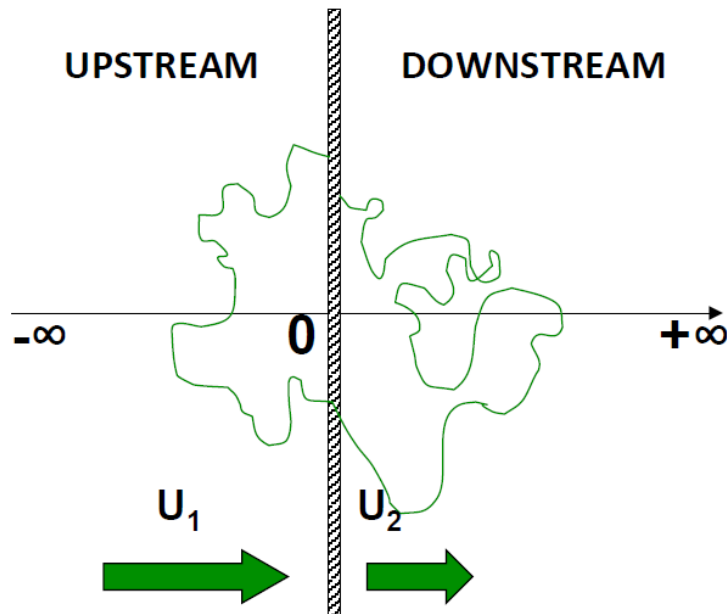


Garret Cotter, wykład High-Energy Astrophysics (U.Oxford)

Mechanizm przyspieszania

Mechanizm Fermiego pierwszego rzędu first-order Fermi acceleration

układ związany z czołem fali



Cząstka przechodzi wielokrotnie przez czoło fali.

W obu obszarach ulega wielokrotnym rozproszeniom elastycznym (brak strat energii **w układzie ośrodka!**).

Po drukrotnym przejściu czoła fali

$$E' = \gamma^2 E (1 + \beta \cos \theta) (1 - \beta \cos \theta')$$

$$\beta = \frac{u_1 - u_2}{c}$$

$$\cos \theta' < 0$$

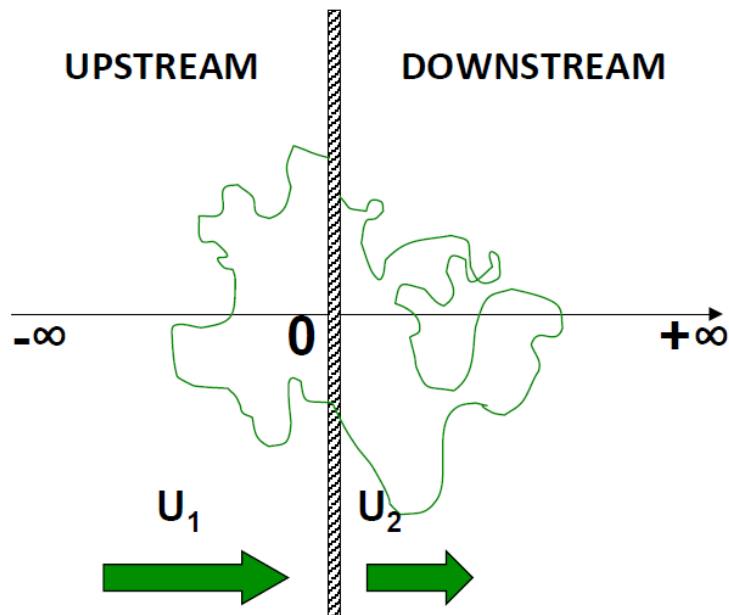
Pasquale Blasi, NASA school 2012

Mechanizm przyspieszania

Mechanizm Fermiego pierwszego rzędu

first-order Fermi acceleration

układ związany z czołem fali



Cząstka przechodzi wielokrotnie przez czoło fali.

W obu obszarach ulega wielokrotnym rozproszeniom elastycznym (brak strat energii w układzie ośrodka!).

Po uśrednieniu po obu kątach:

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle \approx \frac{4}{3} \beta$$

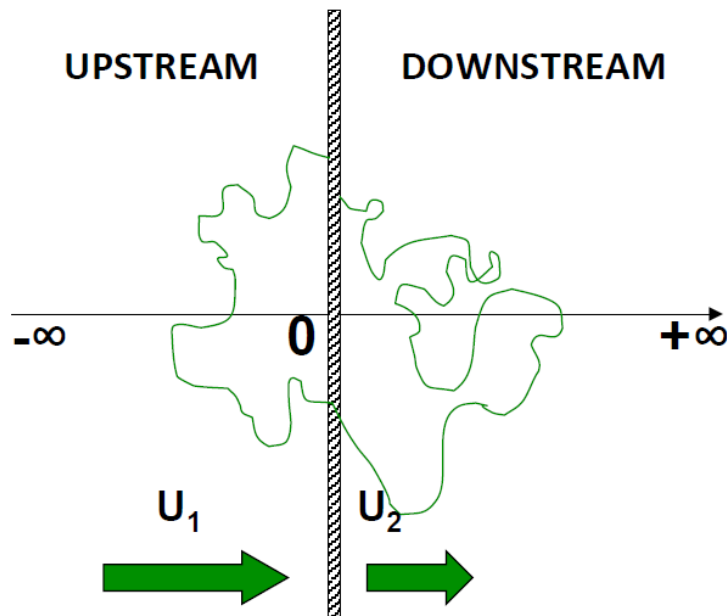
Wielokrotne przejście przez czoło fali może zapewnić uzyskanie bardzo wysokich energii...

Mechanizm przyspieszania

Mechanizm Fermiego pierwszego rzędu

first-order Fermi acceleration

układ związany z czołem fali



Aby uzyskać wysoką energię cząstka musi pozostać “uwięziona” w czołe fali.

Prawdopodobieństwo “przetrwania” jednego “cyklu”

$$p \approx 1 - \frac{4u_2}{c}$$

Po k “okrążeniach” cząstka zyska energię

$$E_k = \left(1 + \frac{4}{3} \cdot \frac{u_1 - u_2}{c}\right)^k E_0$$

Liczba cząstek

$$N_k = \left(1 - \frac{4u_2}{c}\right)^k N_0$$

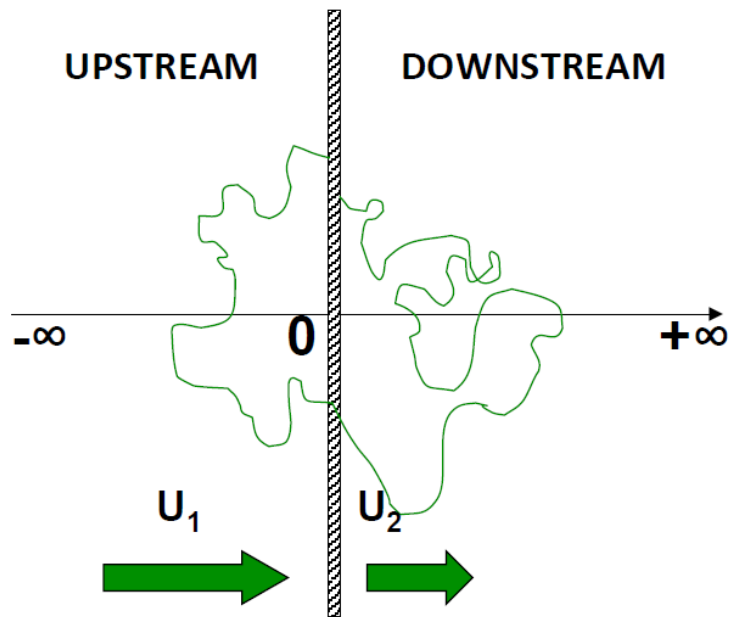
Mechanizm przyspieszania

Mechanizm Fermiego pierwszego rzędu

first-order Fermi acceleration

układ związany z czołem fali

Zakładając, że $u_1, u_2 \ll 1$, widmo zcałkowane:



$$N(E > E_k) = N_0 \left(\frac{E_k}{E_0} \right)^{-\gamma}$$

gdzie:

$$\gamma = \frac{3}{r-1} \quad r = \frac{u_1}{u_2}$$

Nachylenie widma:

$$\frac{dN}{dE} \sim \left(\frac{E_k}{E_0} \right)^{-(\gamma+1)}$$

Dla silnych fal oczekujemy $r \rightarrow 4 \Rightarrow$ nachylenie $\gamma + 1 \rightarrow 2$

Mechanizm przyspieszania

Mechanizm Fermiego

Model Fermiego tłumaczy wykładniczy rozkład energii promieniowania kosmicznego

⇒ nachylenie zależy wyłącznie od parametru kompresji r

⇒ formalnie pozwala uzyskać dowolnie wysokie energie.

Jednak zakłada, że czoło fali porusza się ze stałą prędkością...

Energie cząstek rosną z czasem, na skutek przyspieszania.

Maksymalna energia możliwa do uzyskania spada wraz ze spowalnianiem czoła fali.

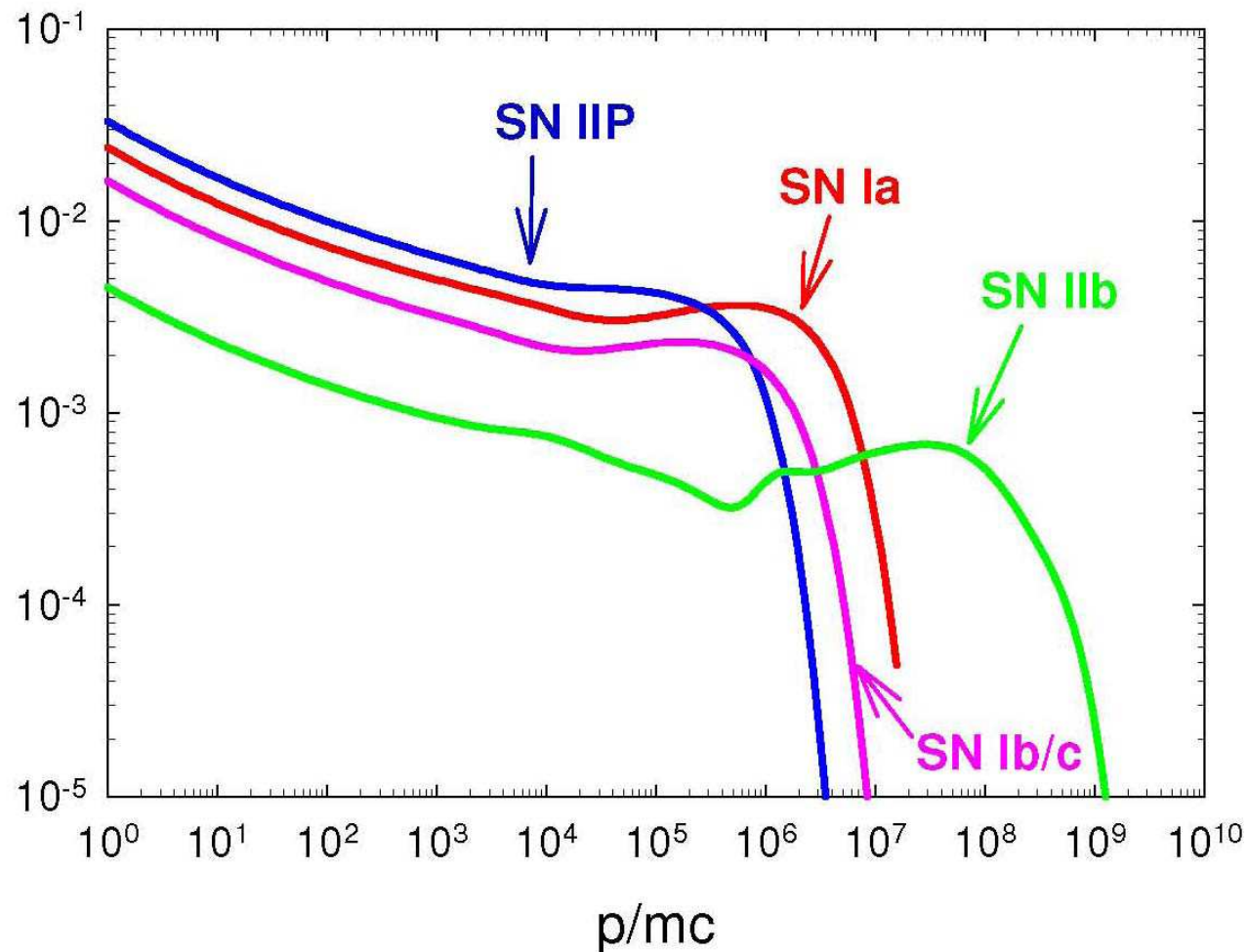
Okolo 200 lat po wybuchu SN najszybsze cząstki uwalniają się z fali...

W dalszej kolejności, wraz ze spowalnianiem fali, uwalniają się cząstki o niższej energii

Aby porównać model z wynikami pomiarów trzeba jeszcze uwzględnić propagację promieniowania w galaktyce...

Supernova Remnant (SNR)

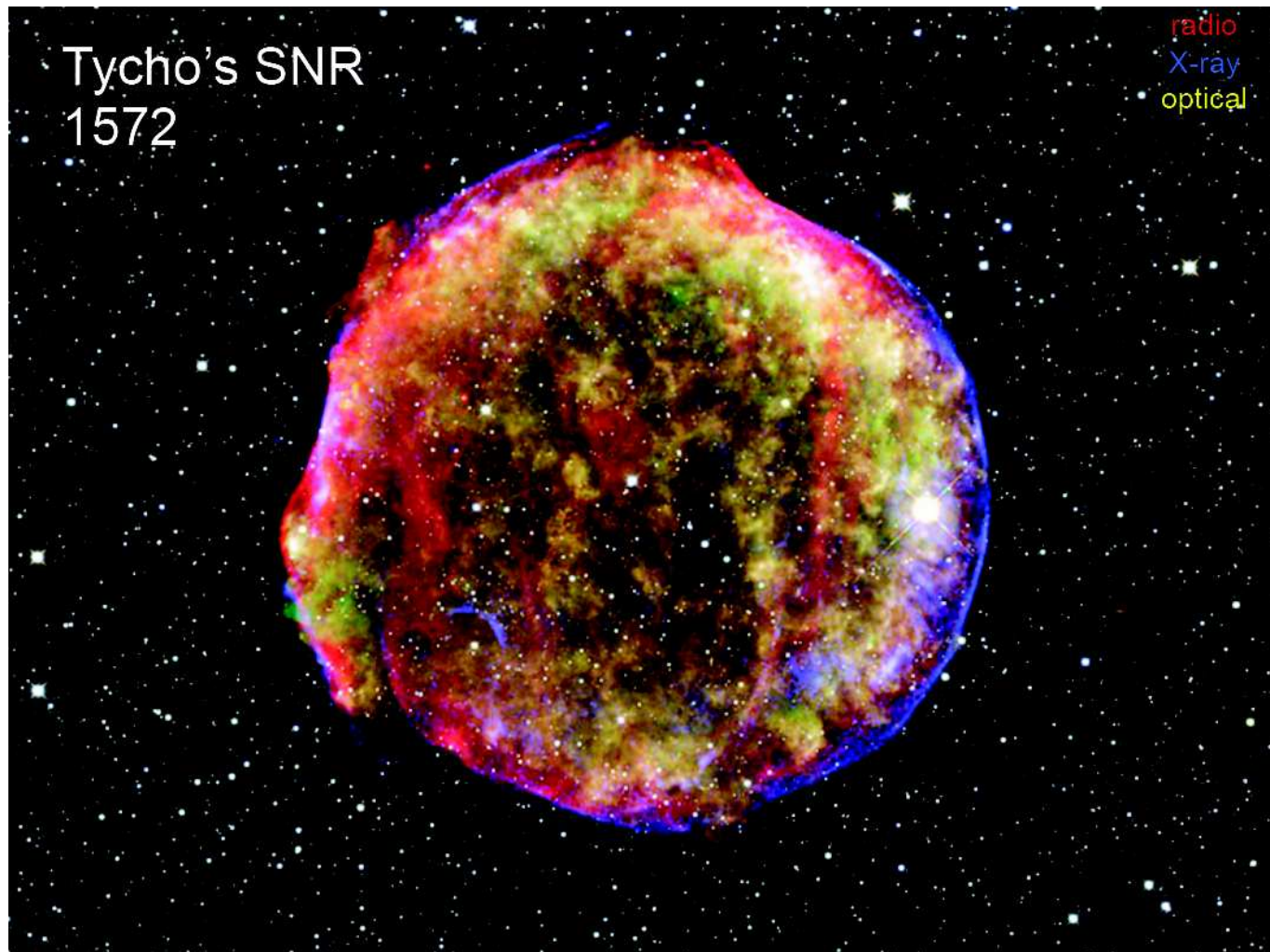
Symulacje numeryczne



Supernova Remnant (SNR)

Obserwacja Tycho SNR

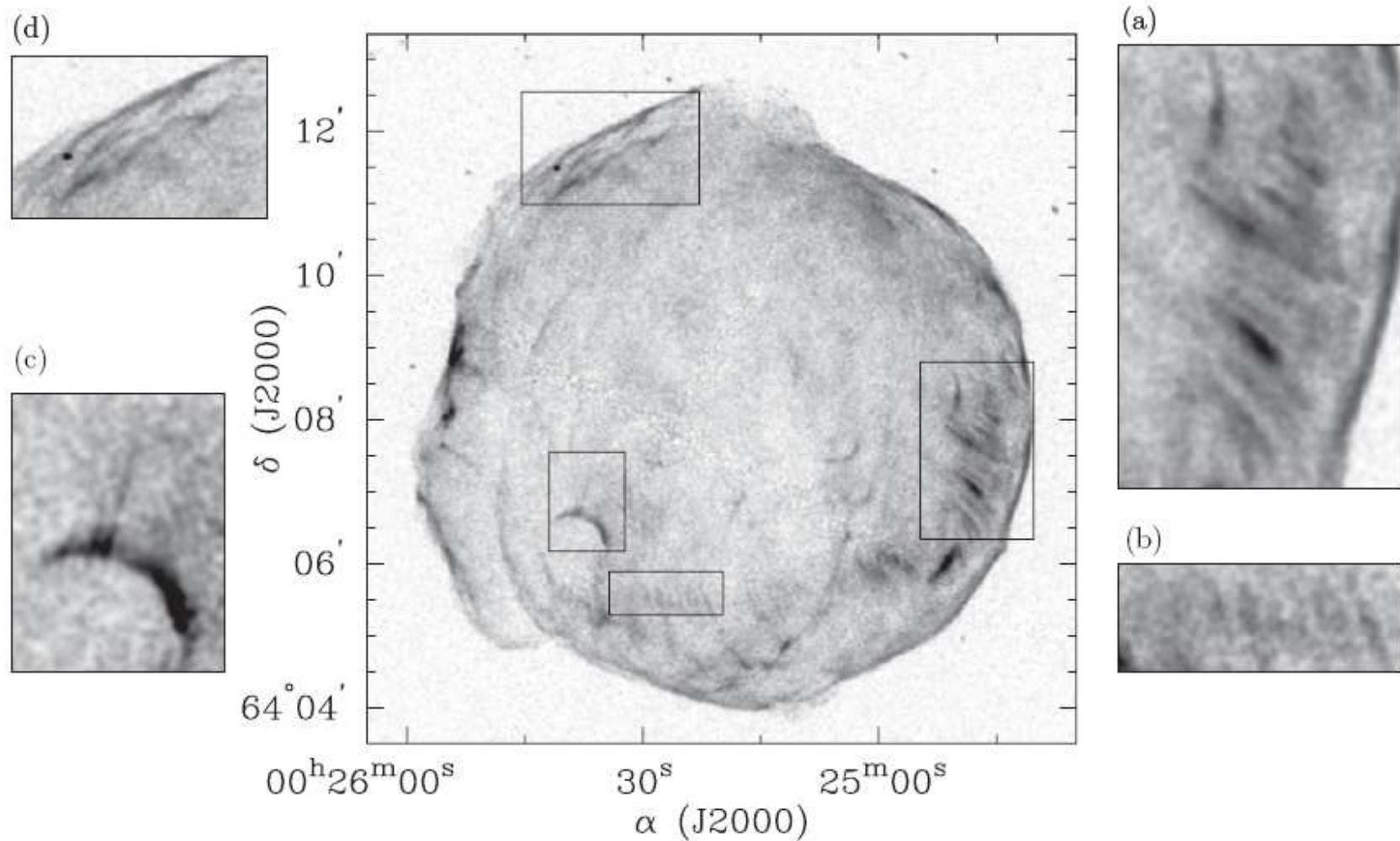
SN 1572 w gwiazdozbiorze Kasjopei



Supernova Remnant (SNR)

Obserwacja Tycho SNR

Chandra X-ray 4.0–6.0 keV image



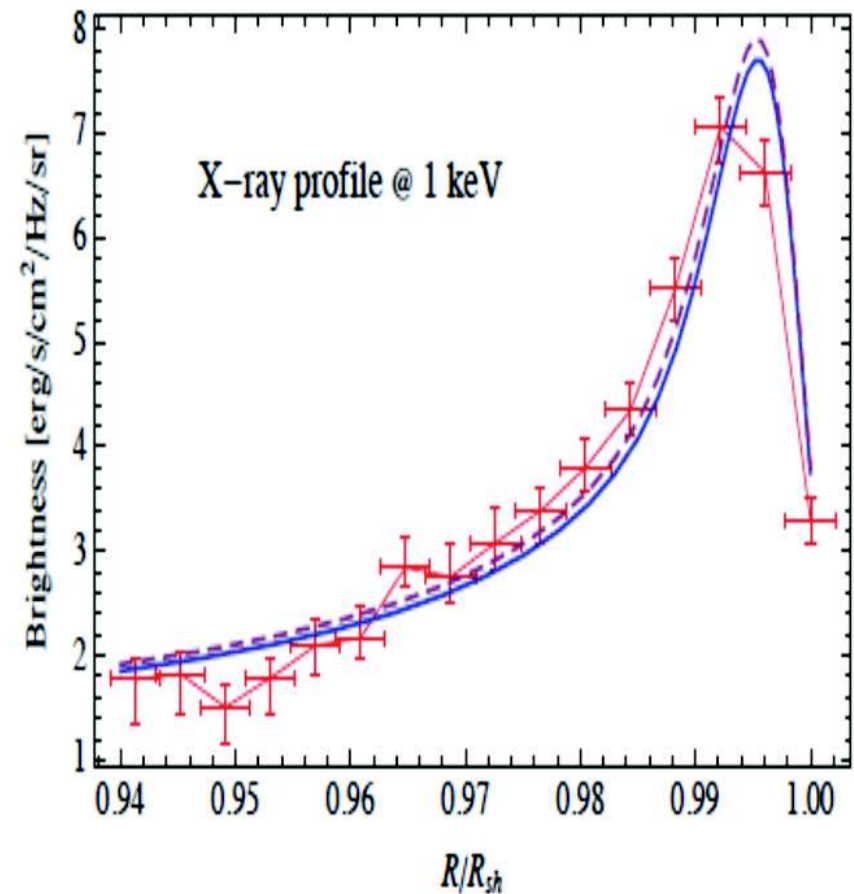
Supernova Remnant (SNR)

Obserwacja Tycho SNR

SN 1572 w gwiazdozborze Kasjopei

Morlino&Caprioli 2011

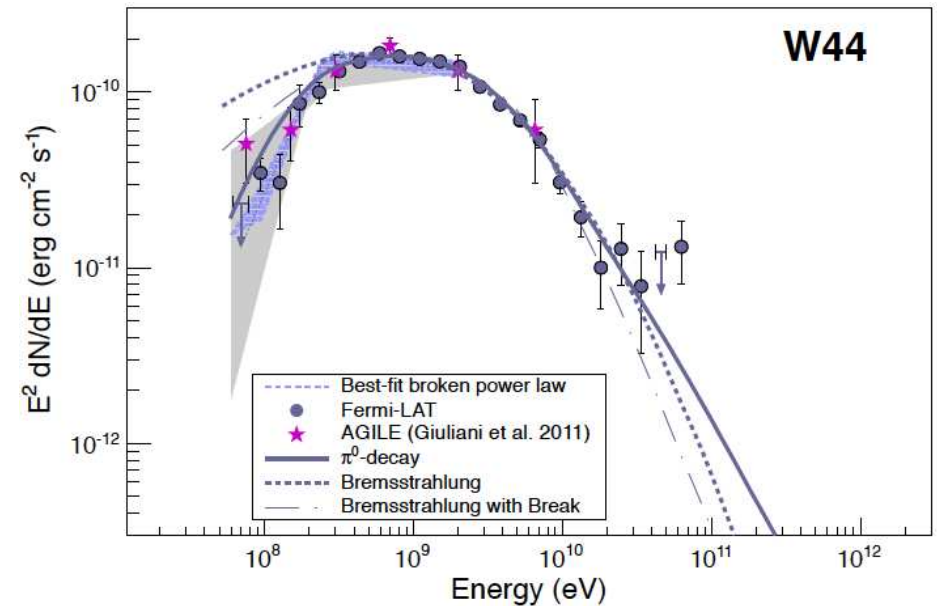
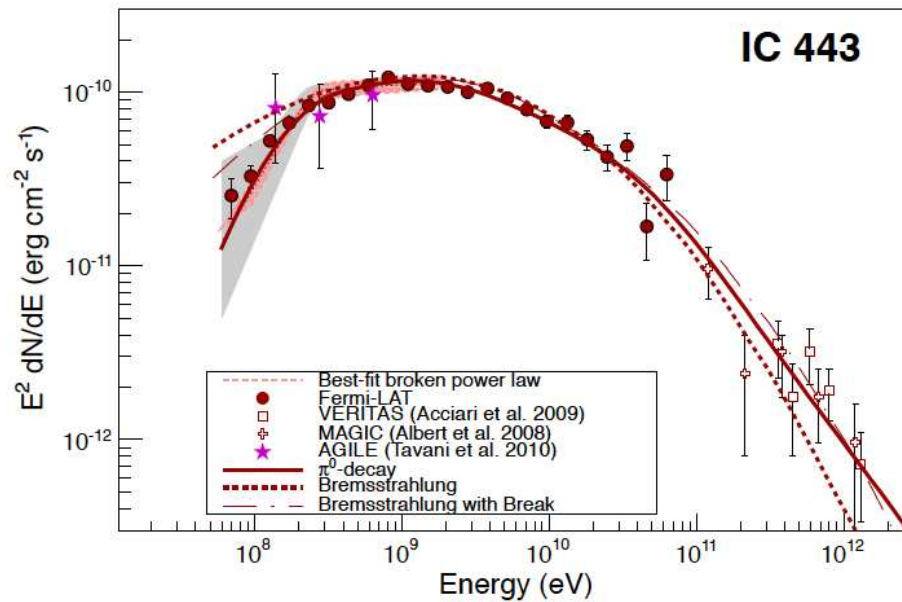
Obserwowany rozkład przestrzenny źródeł emisji promieniowania X zgadza się bardzo dobrze z modelowaniem rozchodzenia się fali uderzeniowej.



Supernova Remnant (SNR)

Obserwacje

W widmie promieniowania γ z SNR zaobserwowano szerokie maksimum pochodzące z rozpadu π^0 produkowanych w zderzeniach pp

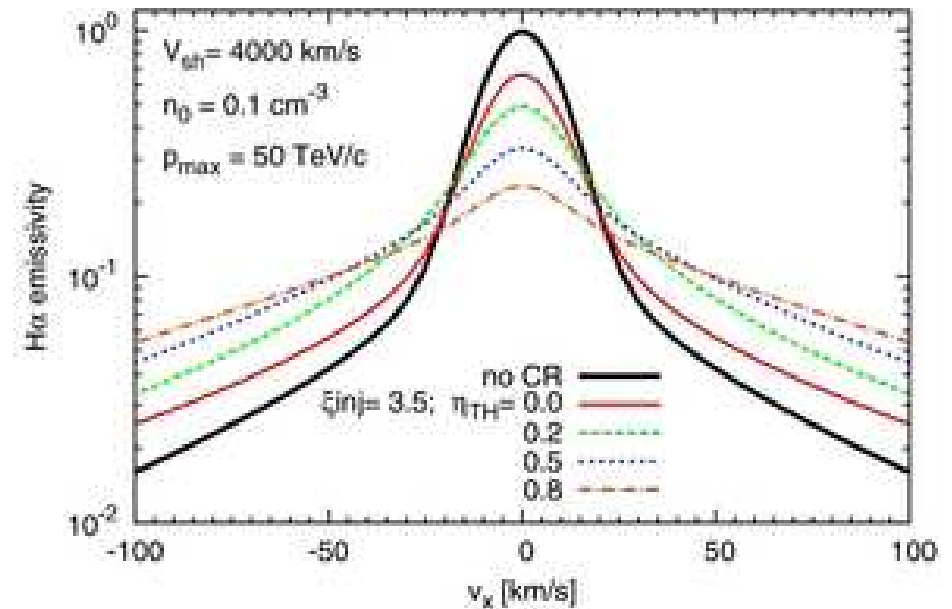
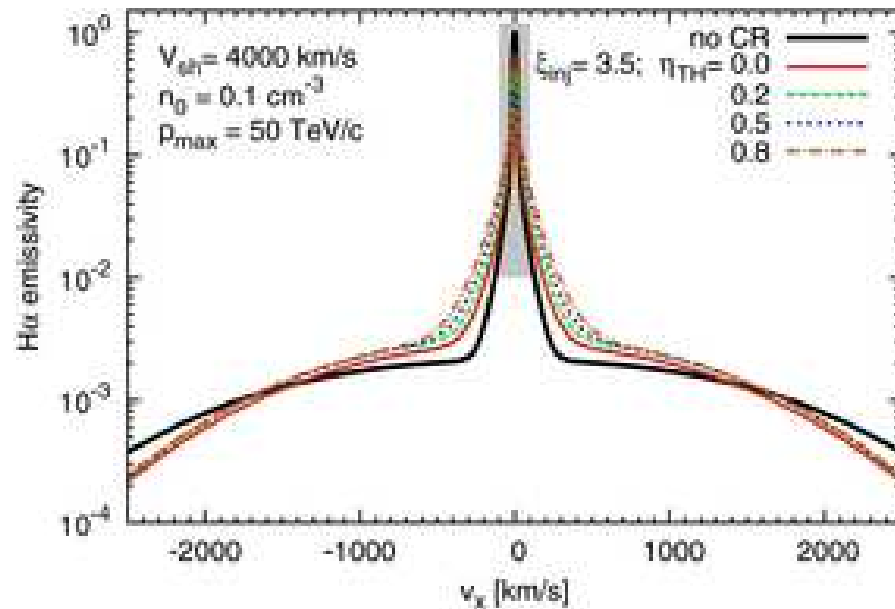


Kształtu tej części widma nie potrafimy w inny sposób wymodelować...

Supernova Remnant (SNR)

Obserwacje

Symulacje wskazują, że przyspieszanie cząstek w fali uderzeniowej powinno również prowadzić do poszerzenia obserwowanych linii wodoru $H\alpha$



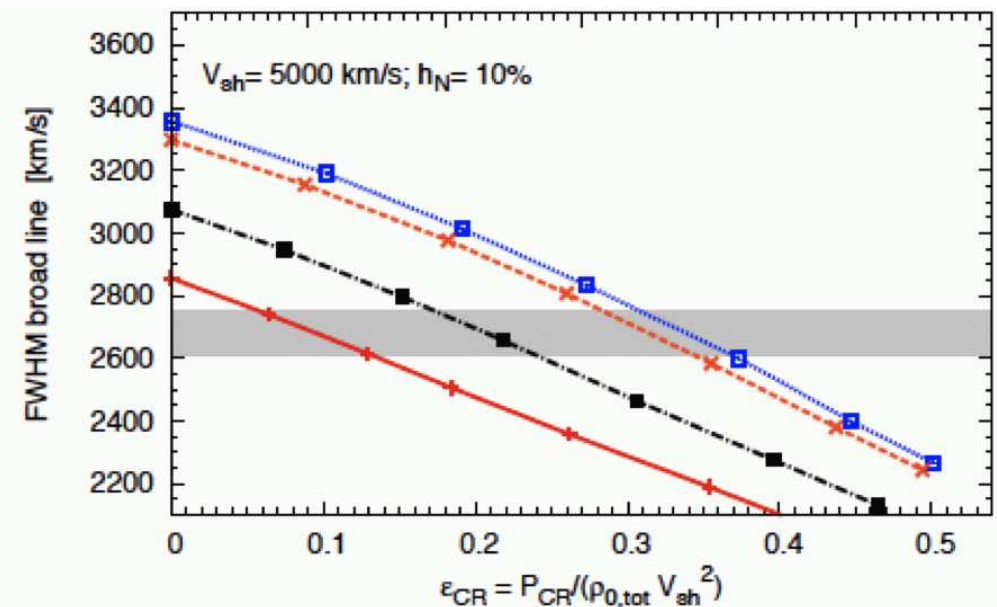
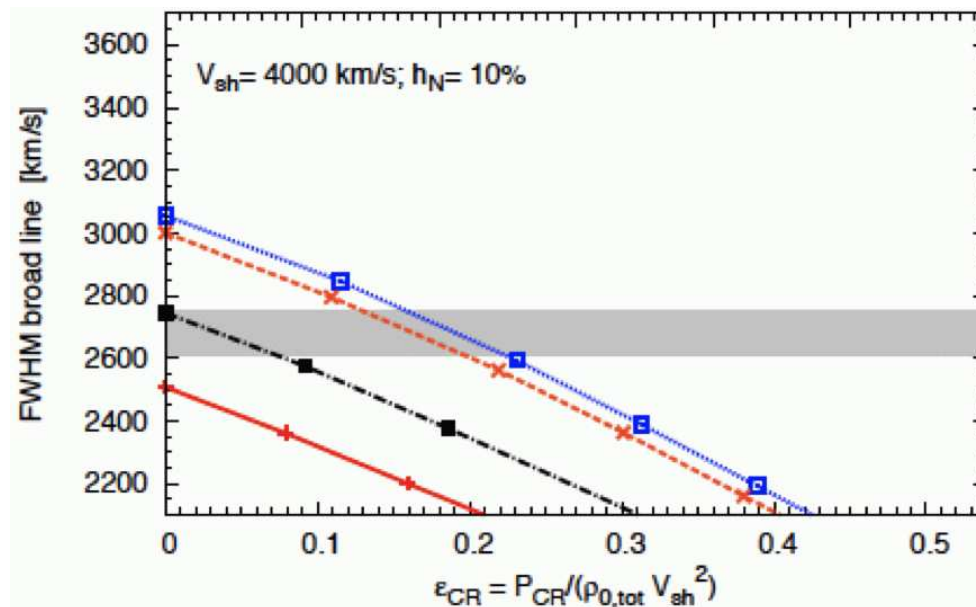
Przewidywane poszerzenie zależy m.in. od założonej wydajności przyspieszania

Supernova Remnant (SNR)

Obserwacje

Symulacje wskazują, że przyspieszanie cząstek w fali uderzeniowej powinno również prowadzić do poszerzenia obserwowanych linii wodoru $H\alpha$

Porównanie symulacji z pomiarami dla SNR 0509-67.5 (Large Magellanic Cloud)



Różne linie odpowiadają różnym stosunkom T_e/T_p

Supernova Remnant (SNR)

Podsumowanie Pasquale Blasi, arXiv:1311.7346v2

Mamy wiele obserwacji, które wskazują na SNR jako źródło większości promieniowania kosmicznego obserwowanego w naszej Galaktyce.

- SNR mogą rozpędzać cząstki do energii rzędu 50 – 500 TeV (Fe nawet do 10^{18} eV)
Wskazują na to m.in. obserwacje składowej π^0 w widmie γ
- Obserwacje struktur w promieniowaniu X sugerują, że przyspieszaniu towarzyszą niestabilności w plazmie wzmacniające pole magnetyczne
- Poszerzenie linii Balmerowskich wskazuje na wysoką efektywność przyspieszania

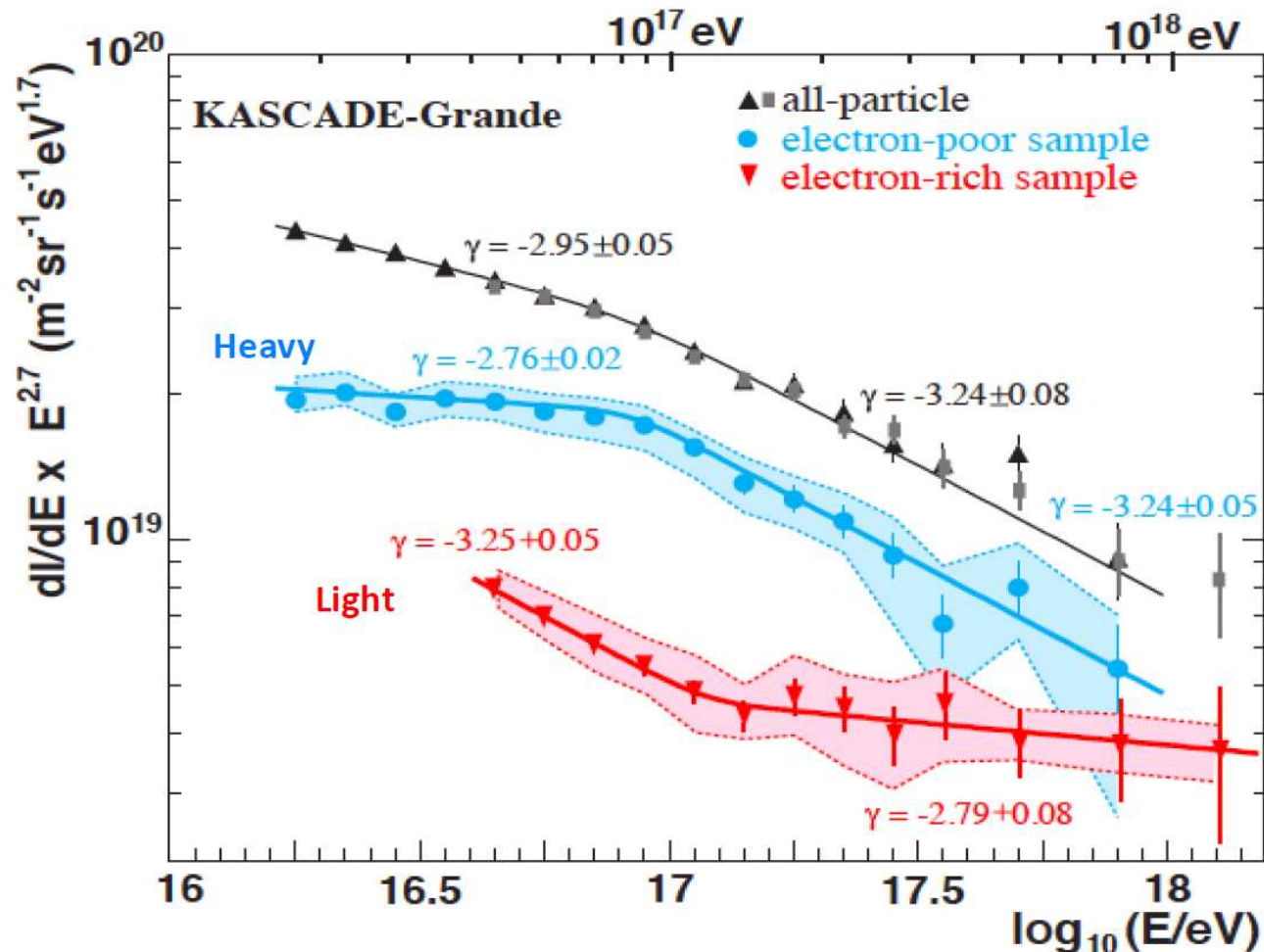
Choć szczegółowe mechanizmy wciąż dalekie od pełnego zrozumienia

⇒ A co z promieniowaniem powyżej 10^{17} GeV (UHECR) ?...

Promieniowanie kosmiczne

Widmo

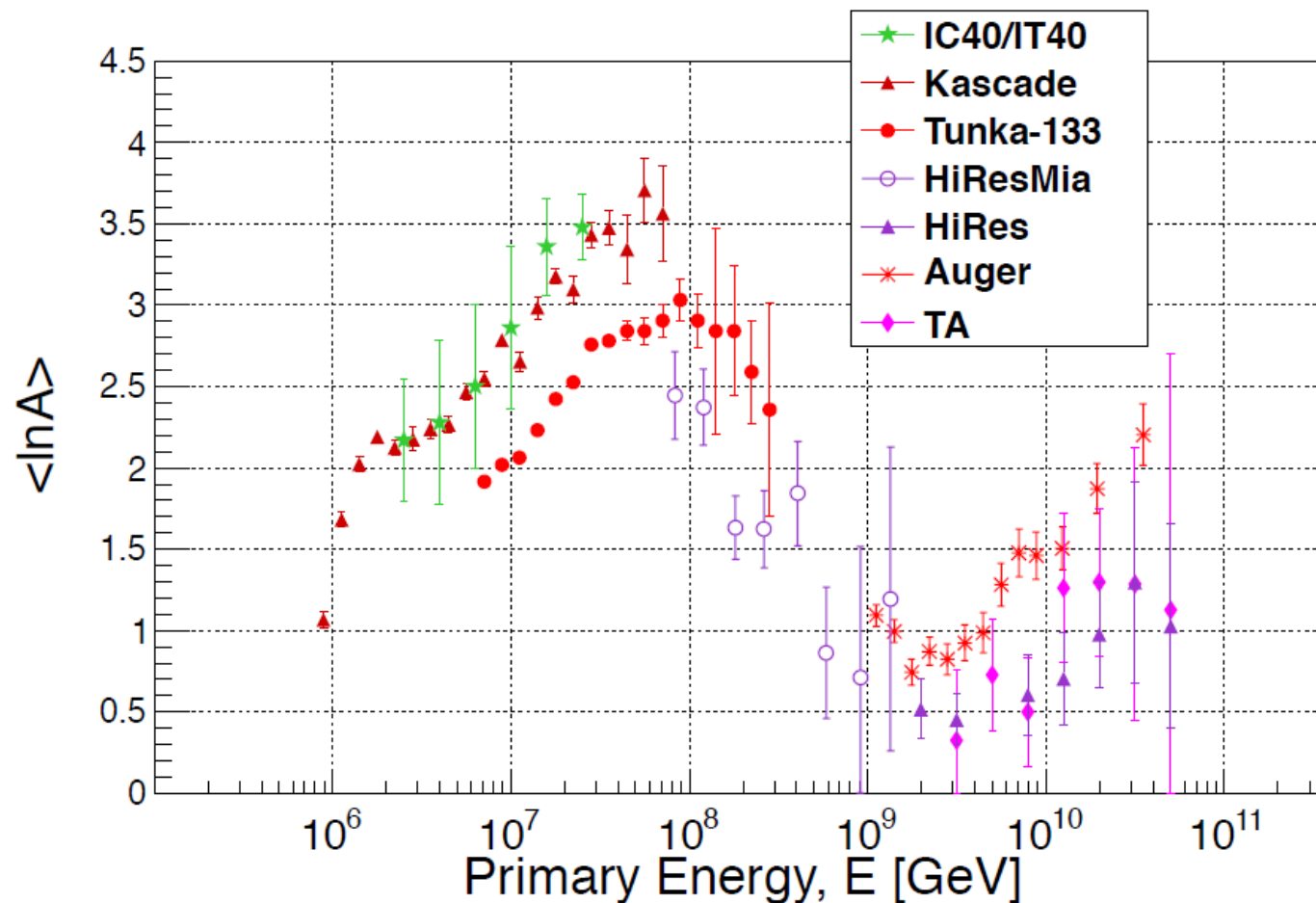
Dla energii powyżej 10^{17} eV obserwujemy zmiany w nachyleniu widma różne dla lekkich i ciężkich pierwiastków \Rightarrow zmiana w składzie promieniowania?



Promieniowanie kosmiczne

Widmo

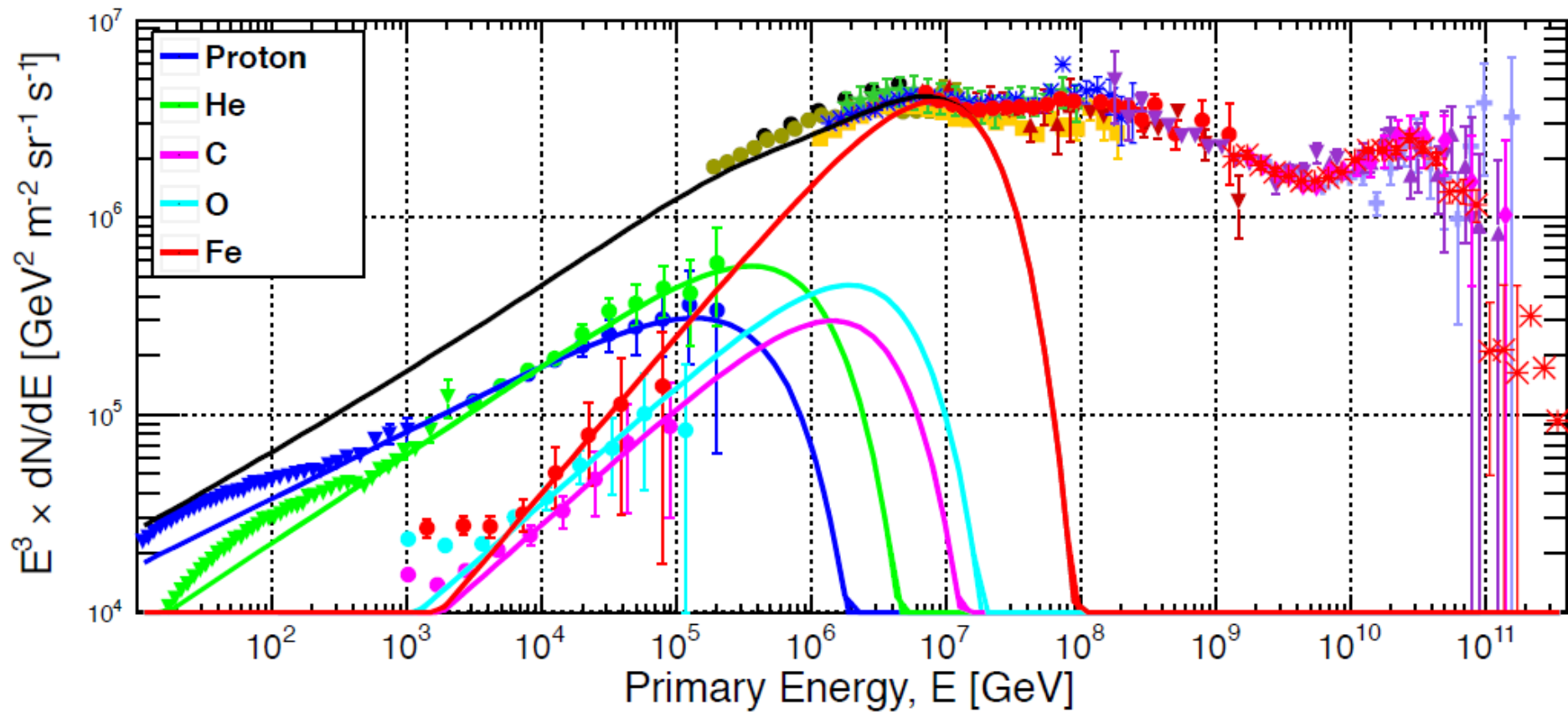
Zmiany w składzie promieniowania dobrze widoczne po zestawieniu danych różnych eksperymentów



Promieniowanie kosmiczne

Widmo analiza współpracy CREAM

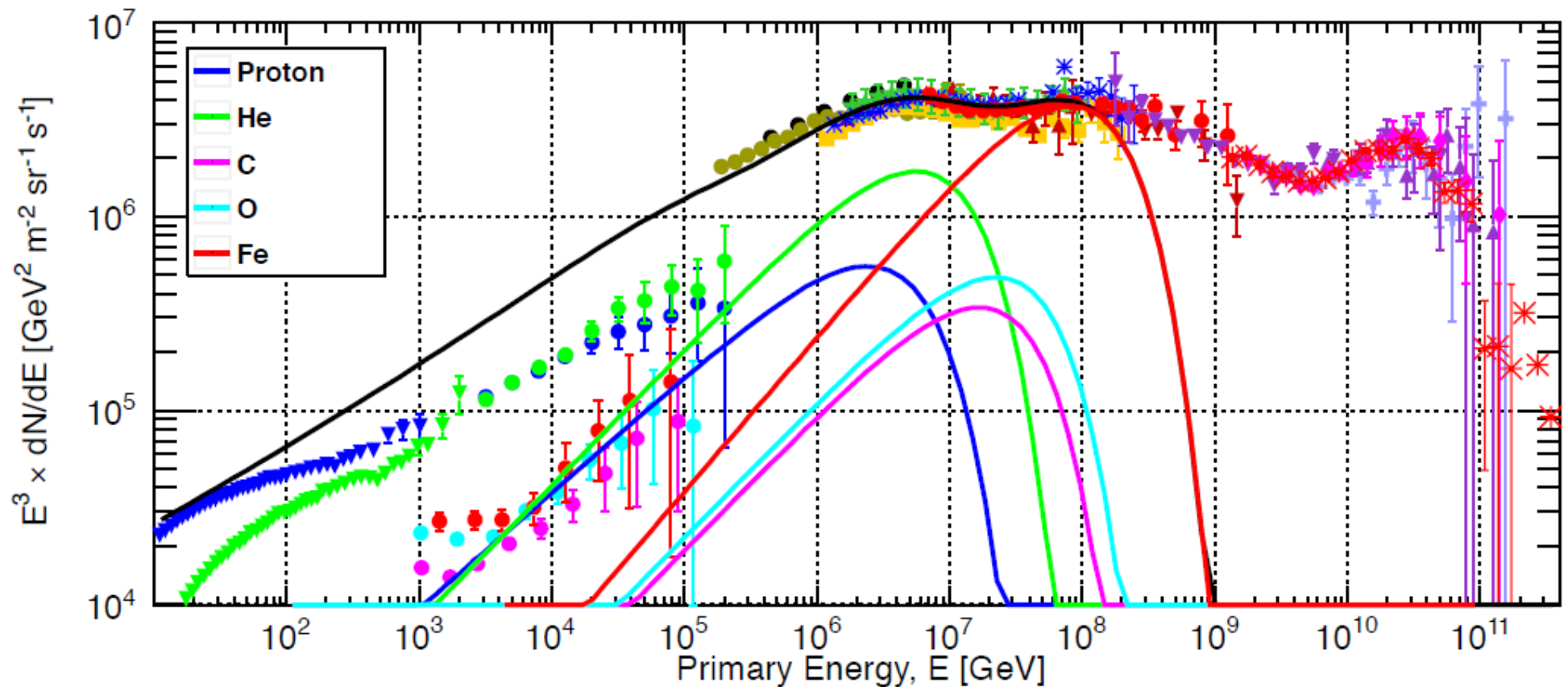
Dopasowanie modelu do danych przy niskiej energii tłumaczy widmo do ok. 10^{16} eV



Promieniowanie kosmiczne

Widmo analiza współpracy CREAM

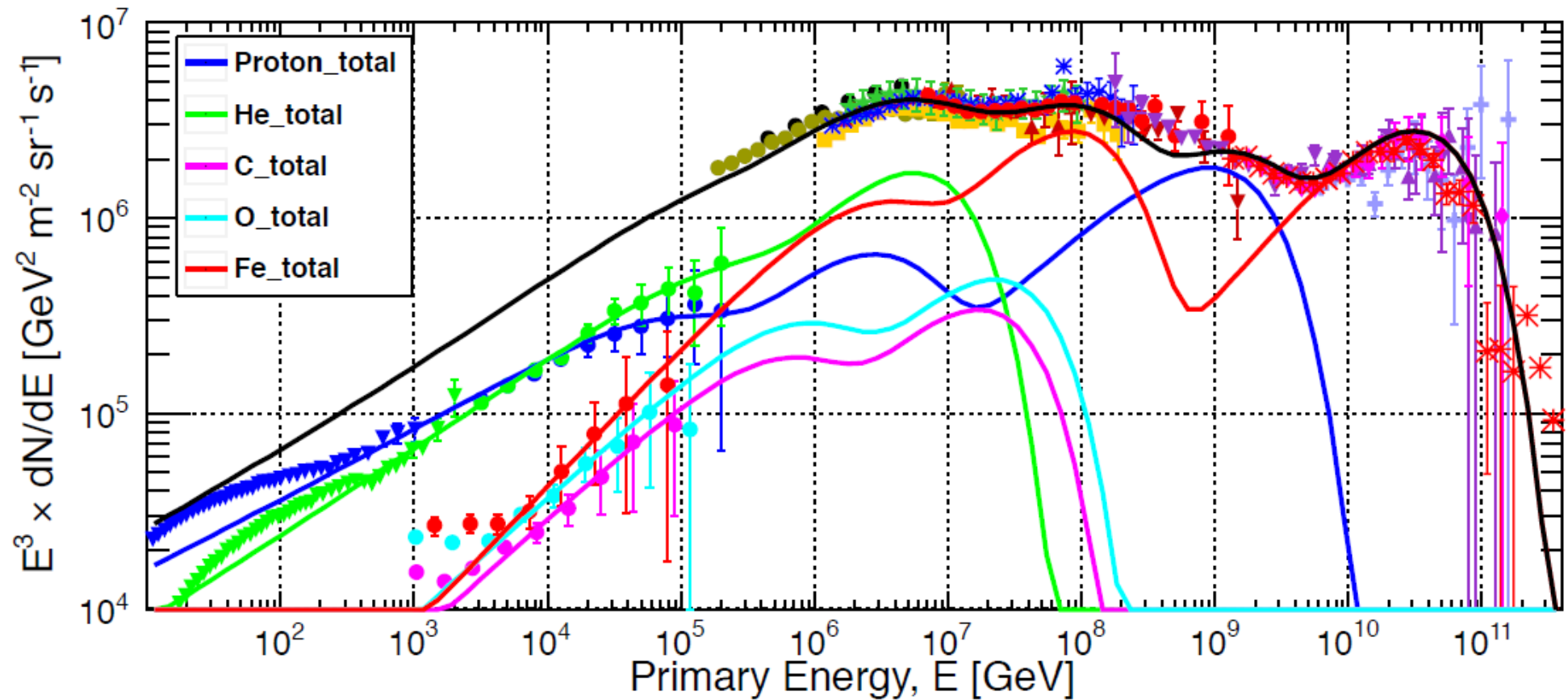
Dodanie drugiej składowej typu SNR, ale o maksymalnej energii rzędu 4 PeV (p)



Promieniowanie kosmiczne

Widmo analiza współpracy CREAM

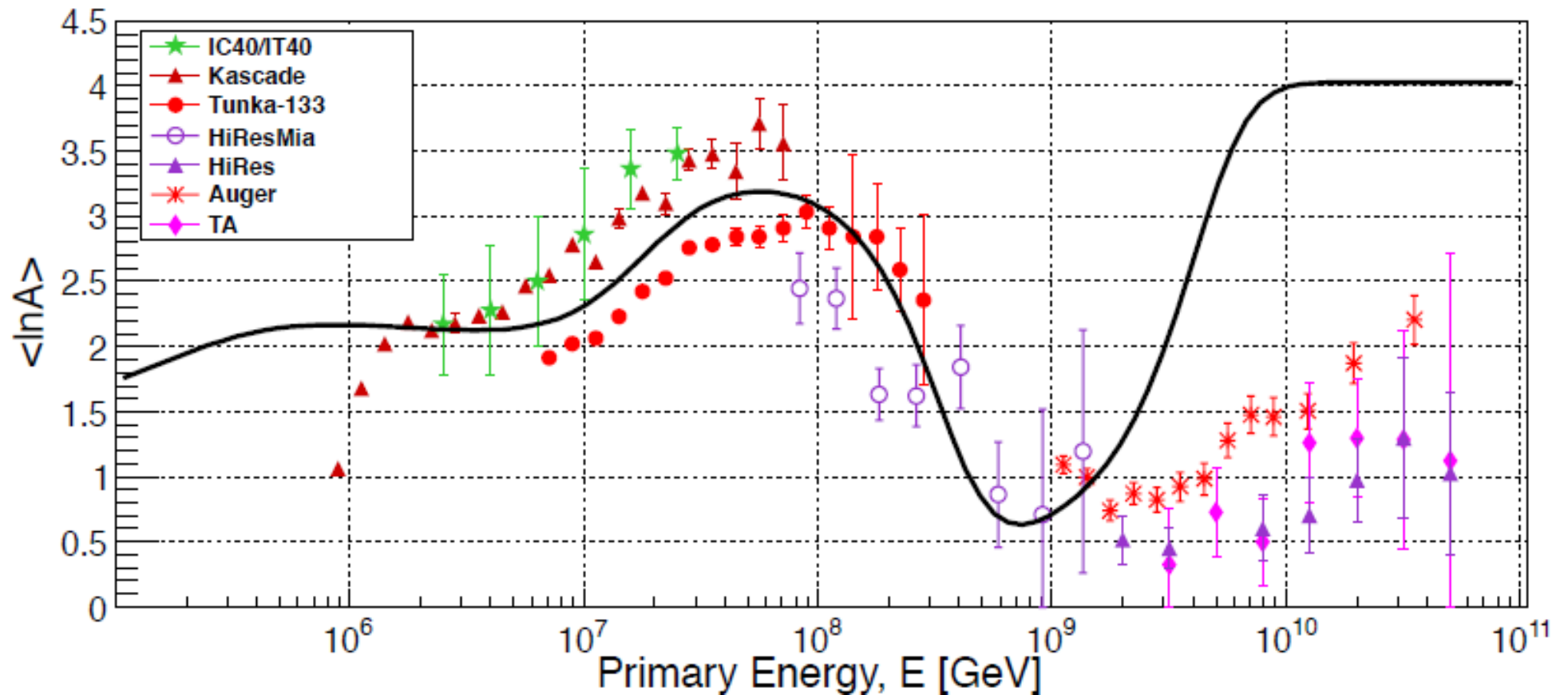
Dodanie trzeciej składowej niezbędne, żeby opisać pełen zakres energii



Promieniowanie kosmiczne

Widmo analiza współpracy CREAM

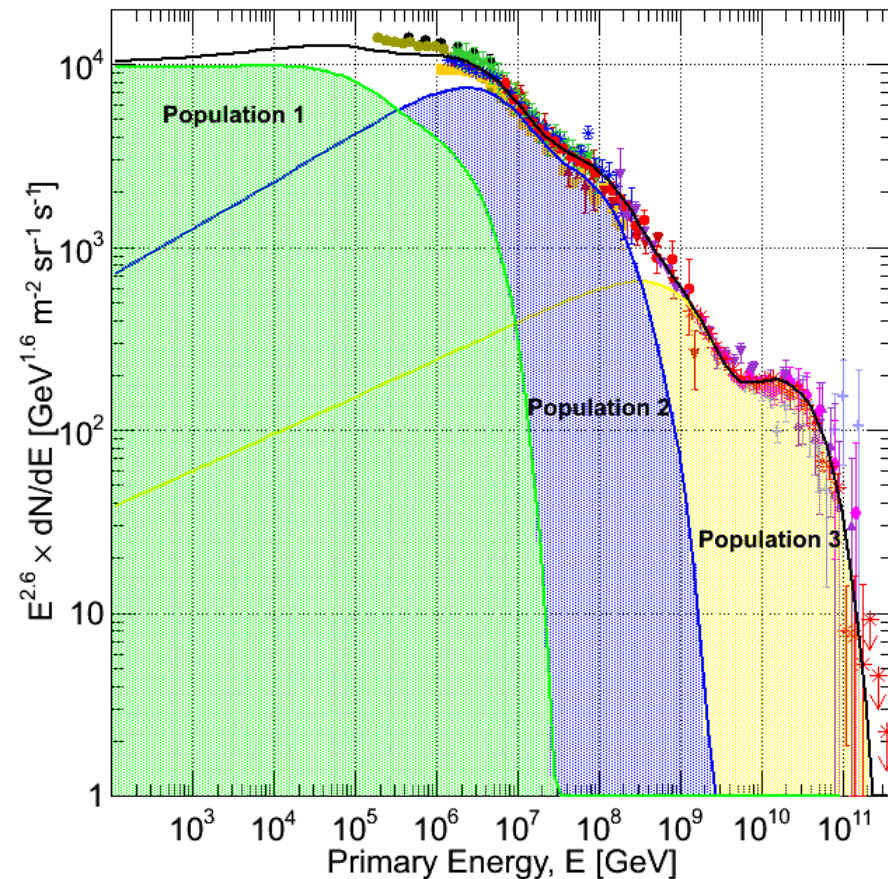
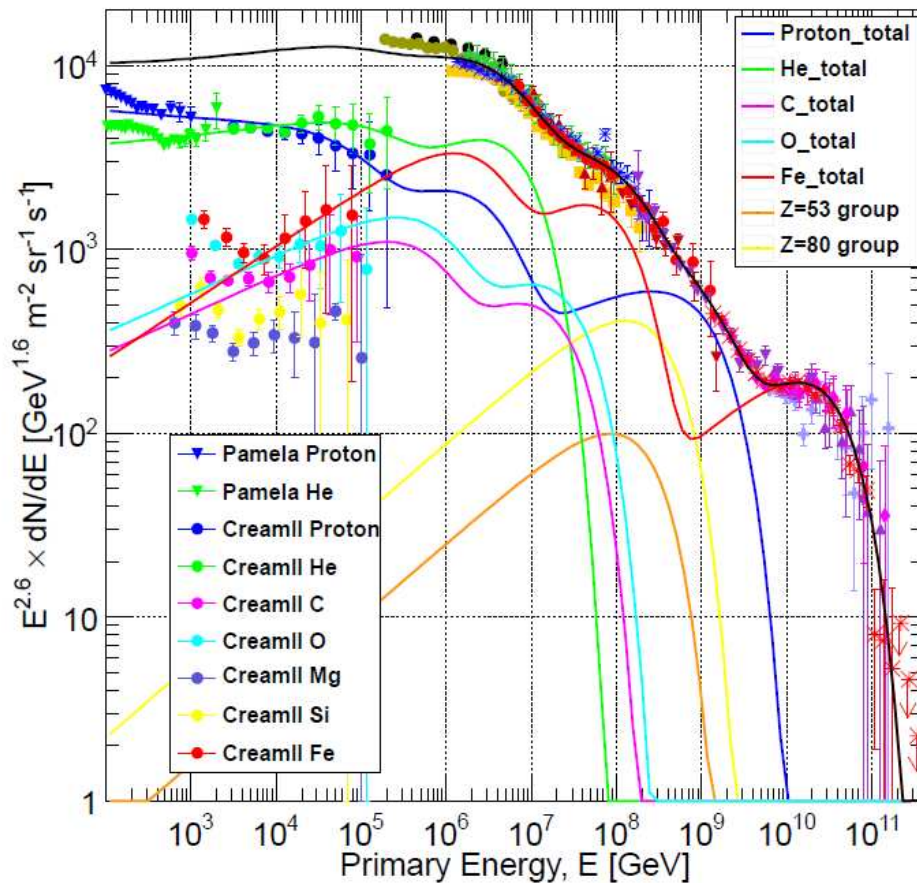
Dodanie trzeciej składowej niezbędne, żeby opisać pełen zakres energii



Promieniowanie kosmiczne

Widmo analiza współpracy CREAM

Jednocześnie wyjaśnia widmo energii i skład ($\langle \ln A \rangle$) promieniowania kosmicznego



Promieniowanie kosmiczne

Obcięcie GZK

Nie obserwujemy w promieniowaniu kosmicznym cząstek o energiach powyżej ok. 10^{20} eV

Przy tej energii protony oddziałują z mikrofalowym promieniowaniem tła

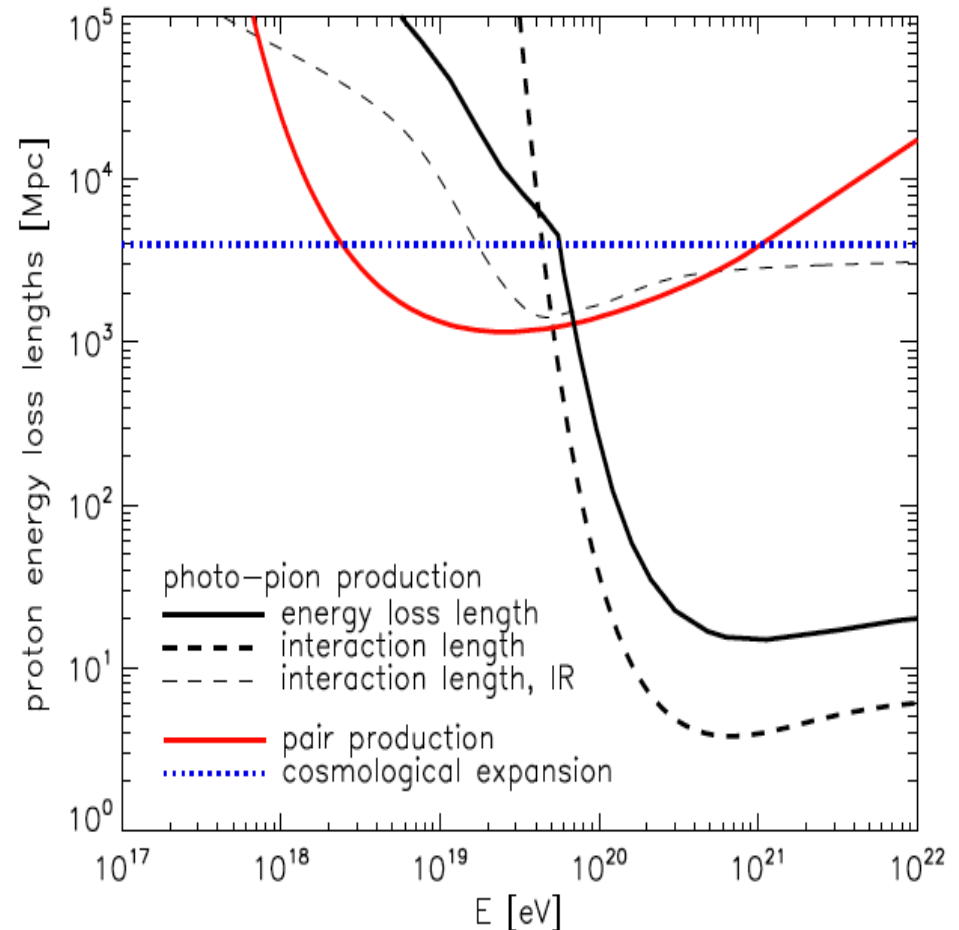


⇒ tracą szybko energię...

Greisen, Zatsepin, Kuzmin, 1966

Ale może to też być obcięcie wynikające z mechanizmu przyspieszania...

Albo zbyt małej liczby źródeł...



Zasięg ograniczony do 50-100 Mpc
(Wszechświat ~ 5000 Mpc)

Promieniowanie kosmiczne

Obcięcie GZK

Nie obserwujemy w promieniowaniu kosmicznym cząstek o energiach powyżej ok. 10^{20} eV

Przy tej energii protony oddziałują z mikrofalowym promieniowaniem tła

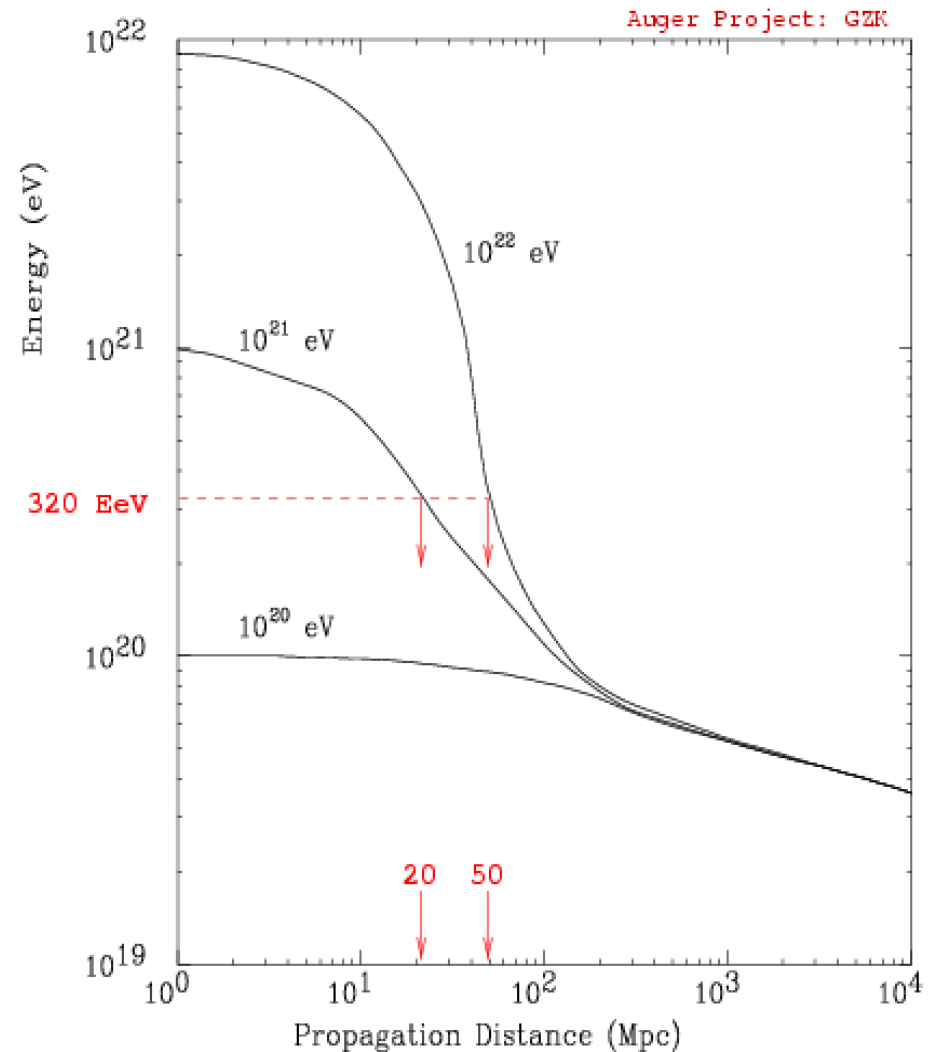


⇒ tracą szybko energię...

Greisen, Zatsepin, Kuzmin, 1966

Ale może to też być obcięcie wynikające z mechanizmu przyspieszania...

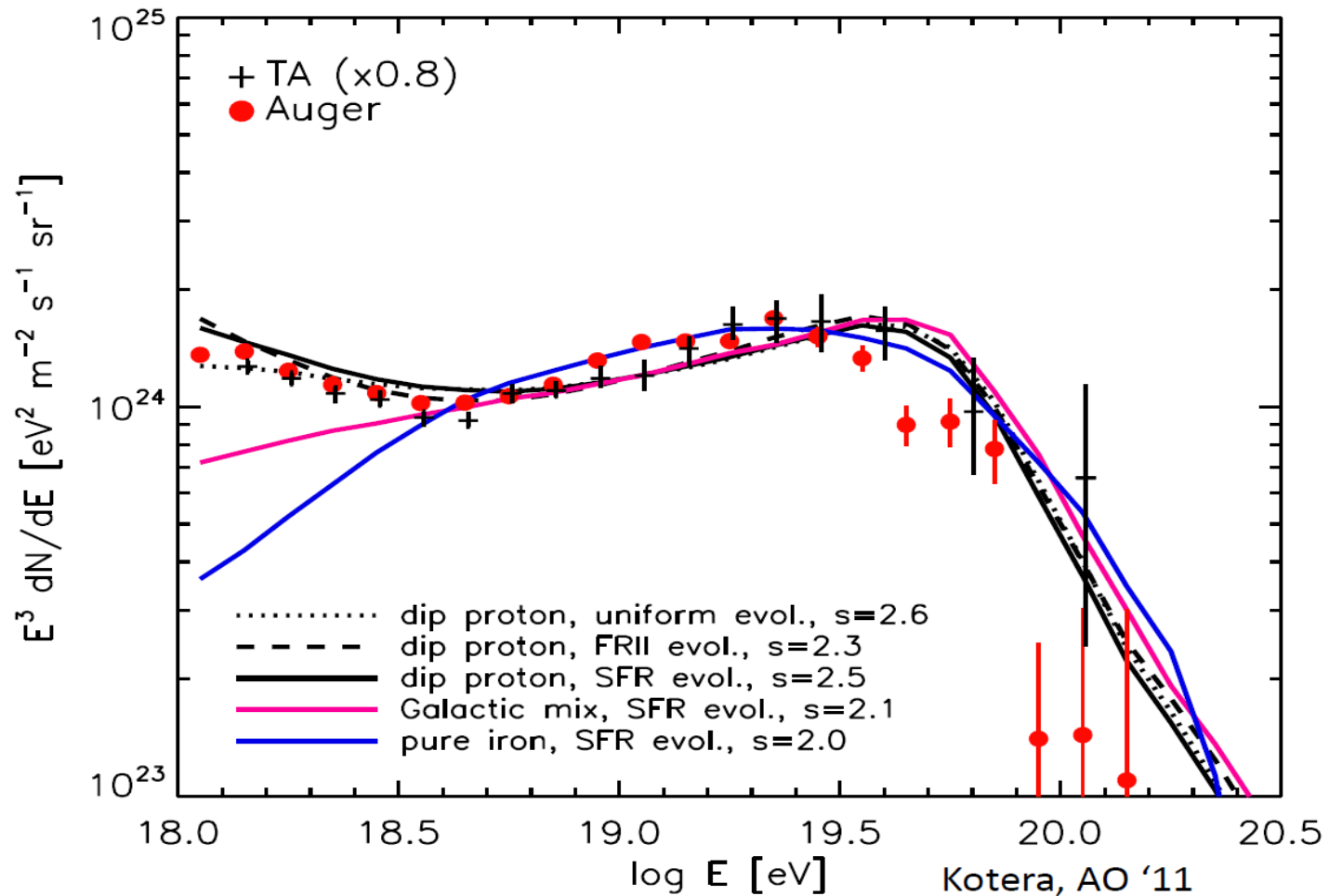
Albo zbyt małej liczby źródeł...



Promieniowanie kosmiczne

Obcięcie GZK

Dopasowanie modeli do danych najwyższych energii: źródła pozagalaktyczne + GZK

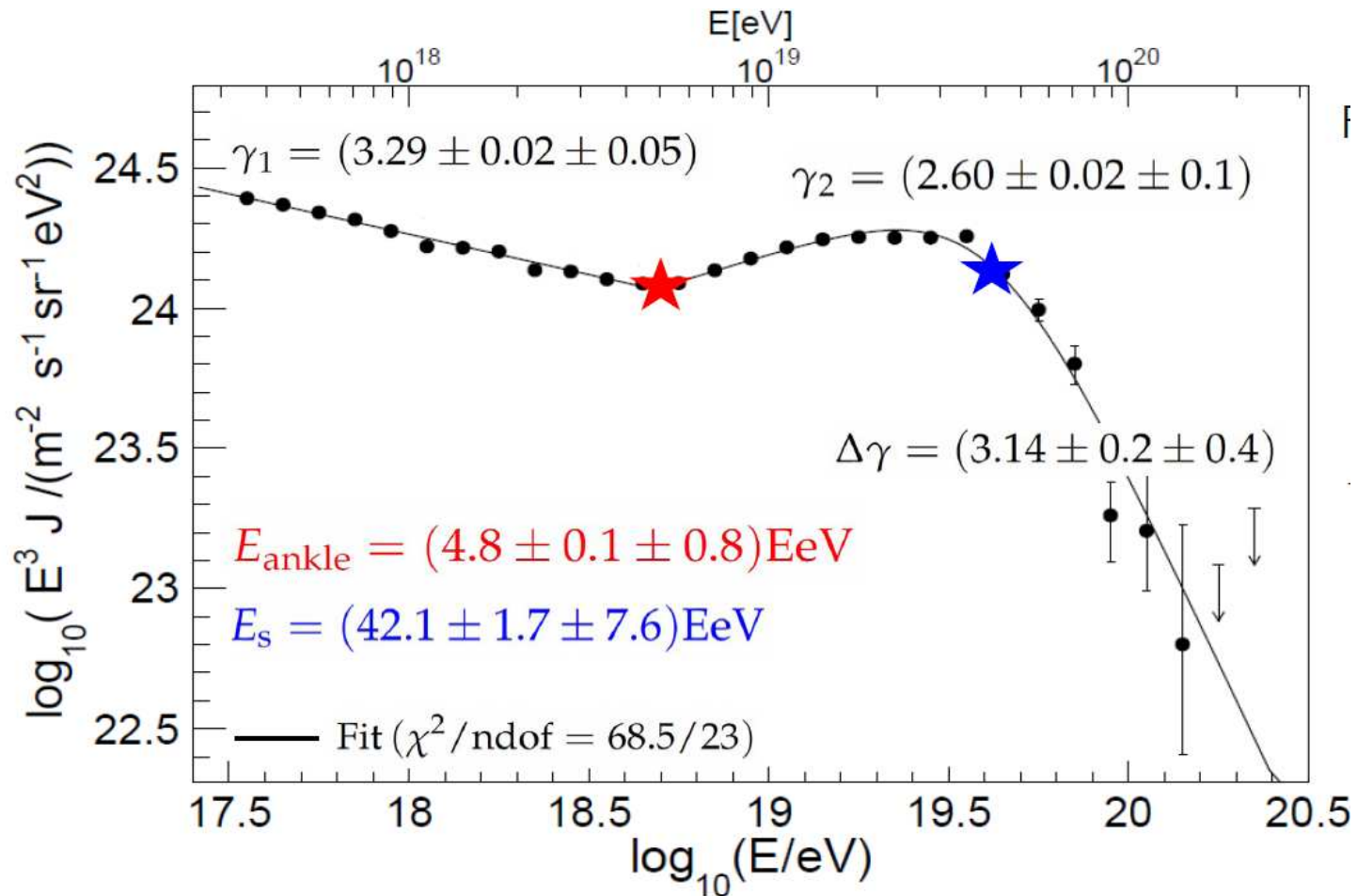


Promieniowanie kosmiczne

Obcięcie GZK

Dopasowanie parametryzacji do danych AUGER (ICRC'2015):

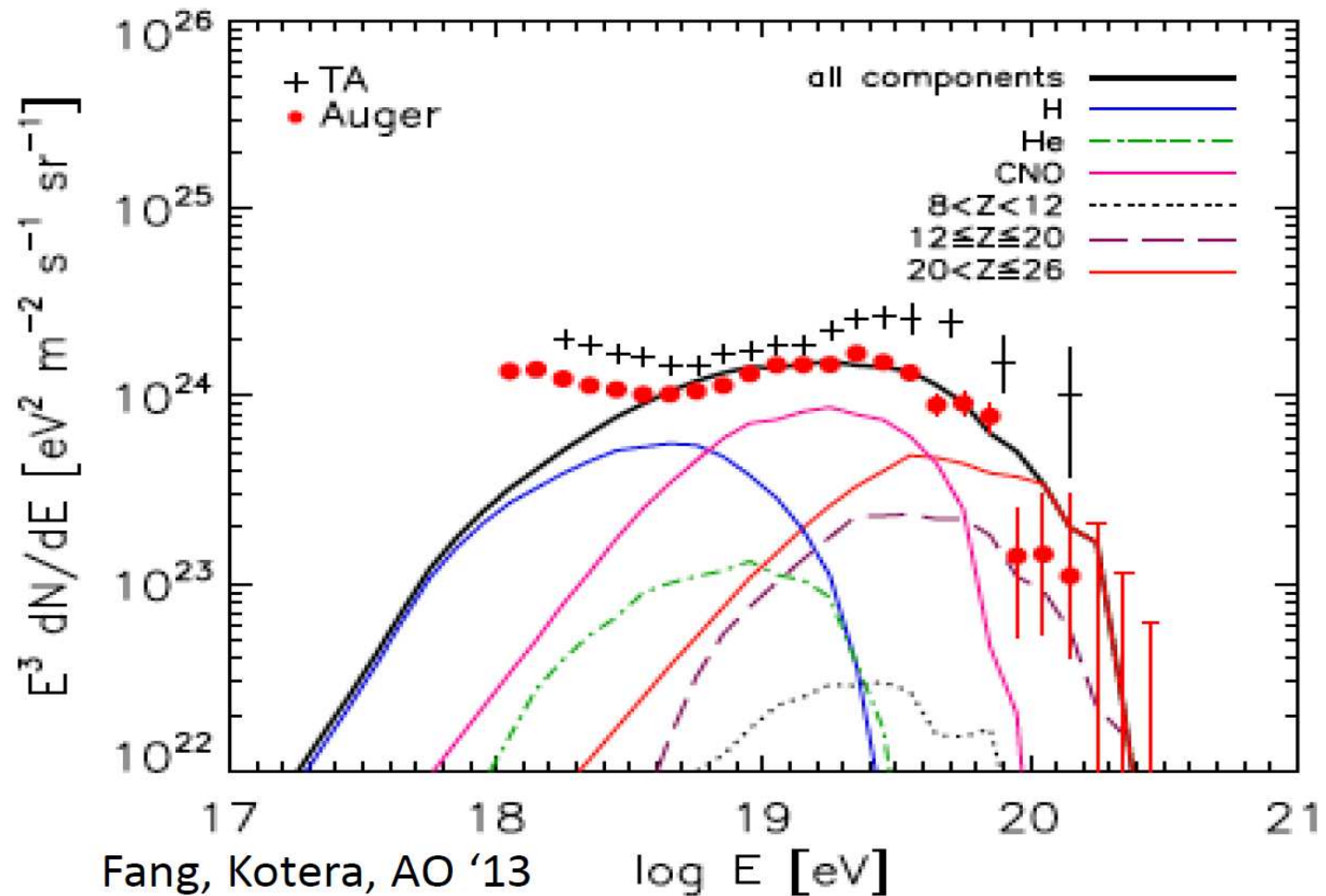
(E_s - próg tłumienia)



Promieniowanie kosmiczne

Obcięcie GZK

Dopasowanie modeli do danych najwyższych energii: źródła galaktyczne



Promieniowanie kosmiczne

Podsumowanie/Pytania

Stefano Gabici, Astroparticle Physics: a joint TeVPA/IDM conference, Amsterdam 2014

Wciąż wiele wątpliwości w opisie produkcji promieniowania kosmicznego (CR)

- czy supernowe wystarczają do opisu widma galaktycznego?
- czy mechanizm Fermiego opisuje wszystkie cechy widma?
- jaki mechanizm opisuje “ucieczkę” promieniowania z SNR?
- jak produkowane są pozytony obserwowane w widmie CR?
- czy rozumiemy propagację promieniowania w Galaktyce?
- czy wiemy od jakich energii dominuje promieniowanie z poza Galaktyki?
- czy powinniśmy uwzględnić dodatkowe mechanizmy/typy źródeł?

Wciąż wiele pytań czekających na precyzyjniejsze dane doświadczalne...