

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład VIII

- Promieniowanie kosmiczne
- Mechanizm przyspieszania
- Supernova Remnants
- Promieniowanie UHE

Promieniowanie kosmiczne

Widmo

Promieniowanie kosmiczne (cząstki naładowane) docierające do Ziemi

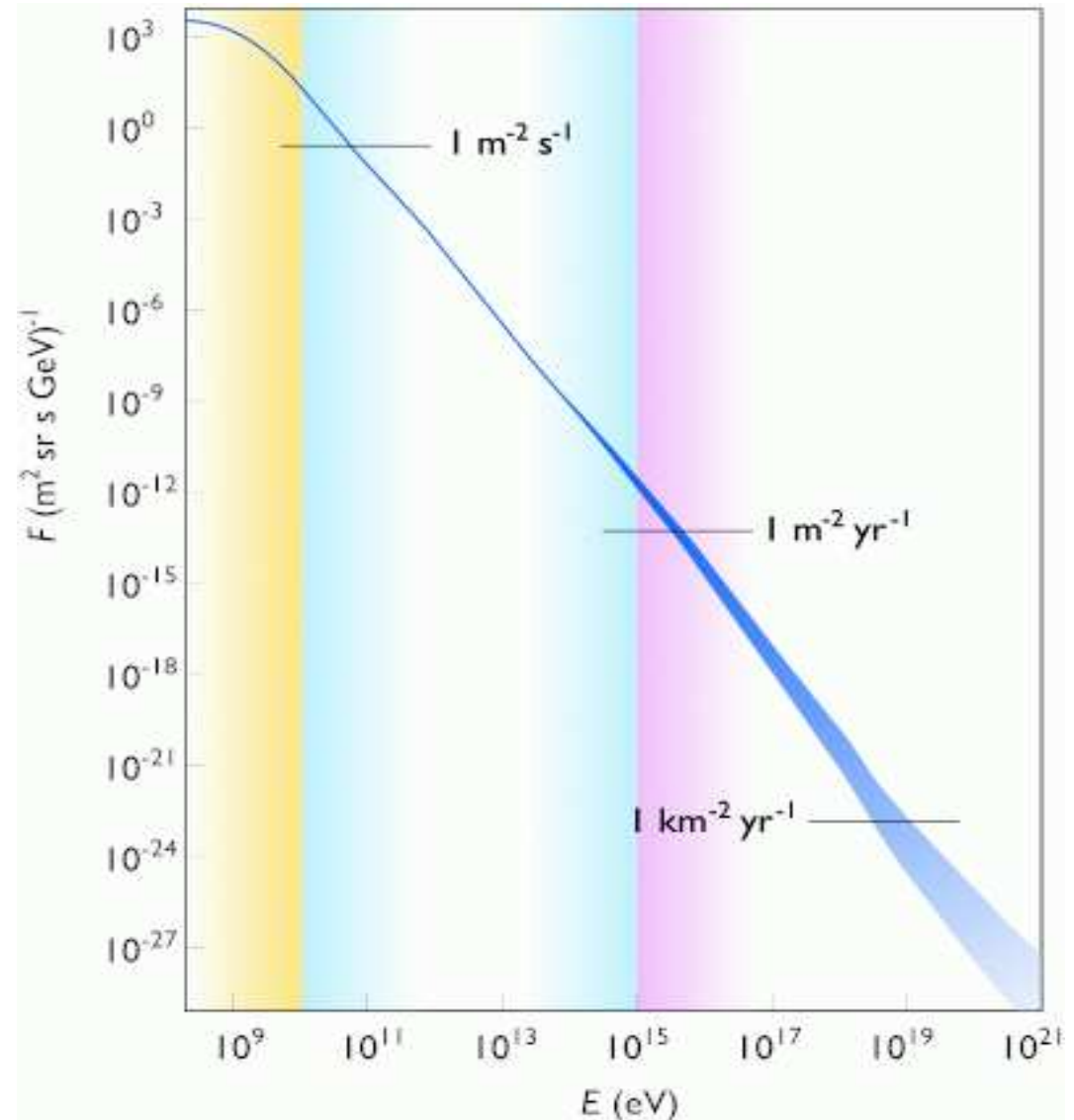
Widmo szybko zanikające z energią

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

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.

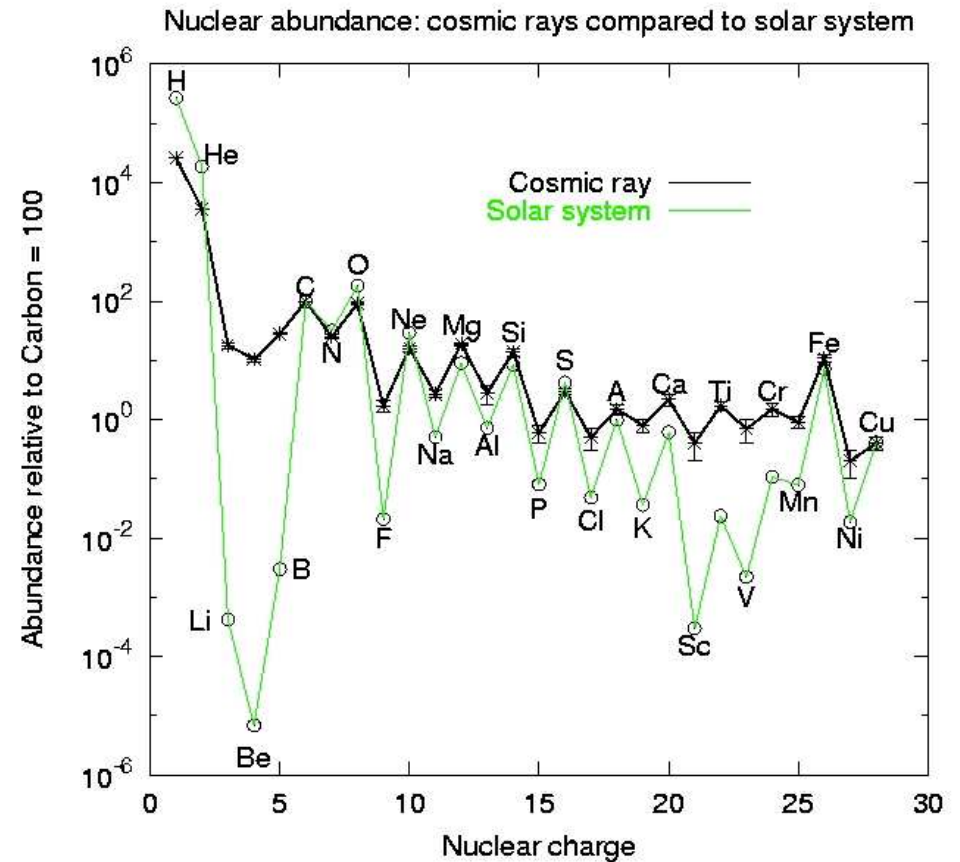


Promieniowanie kosmiczne

Skład

Skład podobny do składu Układu Słonecznego.

Przypuszczamy, że odpowiada to też składowi Galaktyki i Wszechświata.

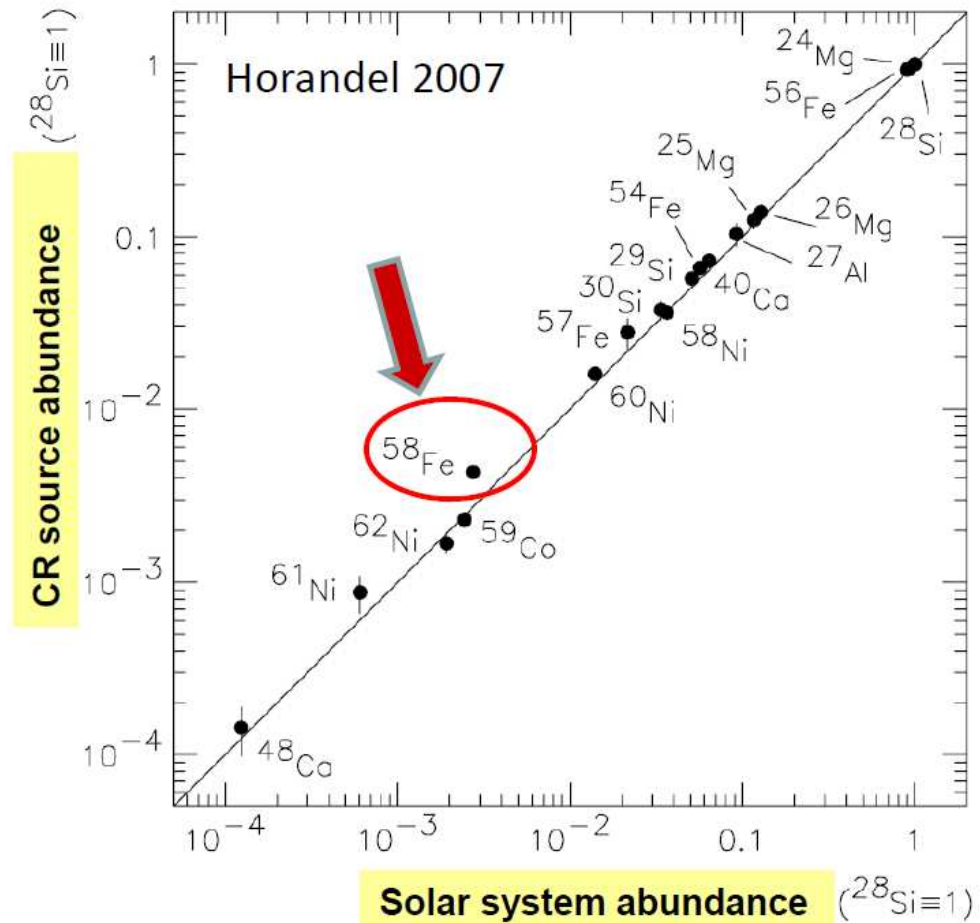


Promieniowanie kosmiczne

Skład

Skład podobny do składu Układu Słonecznego.

Przypuszczamy, że odpowiada to też składowi Galaktyki i Wszechświata.



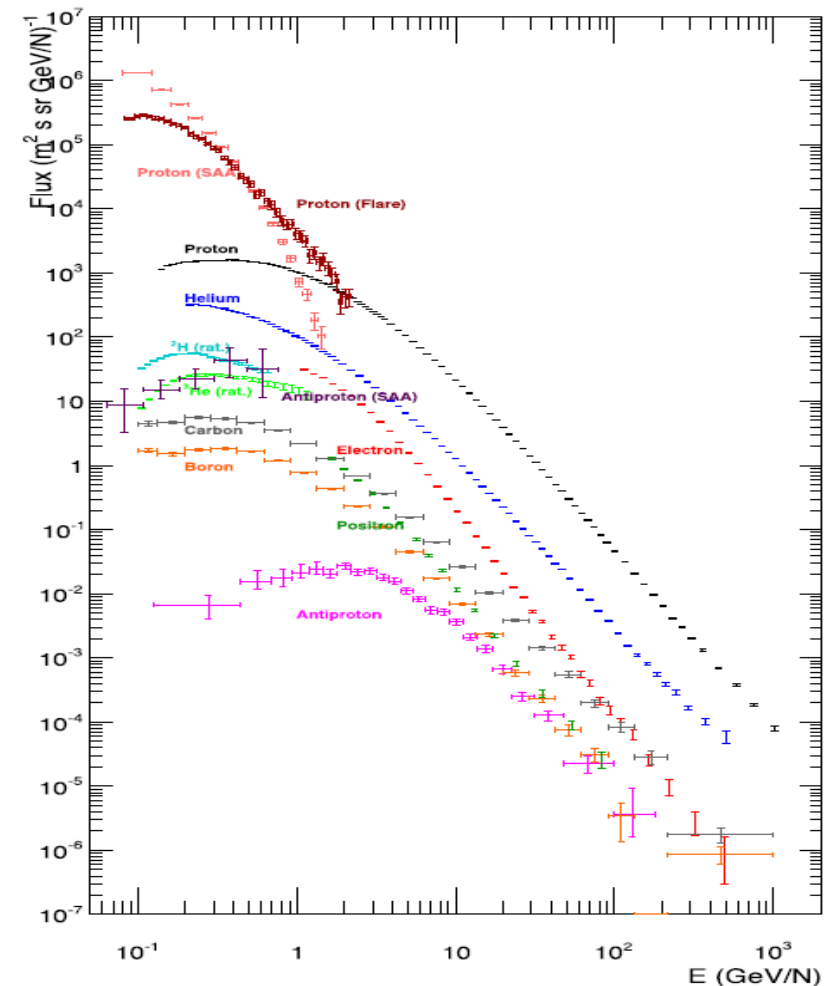
Promieniowanie kosmiczne

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)



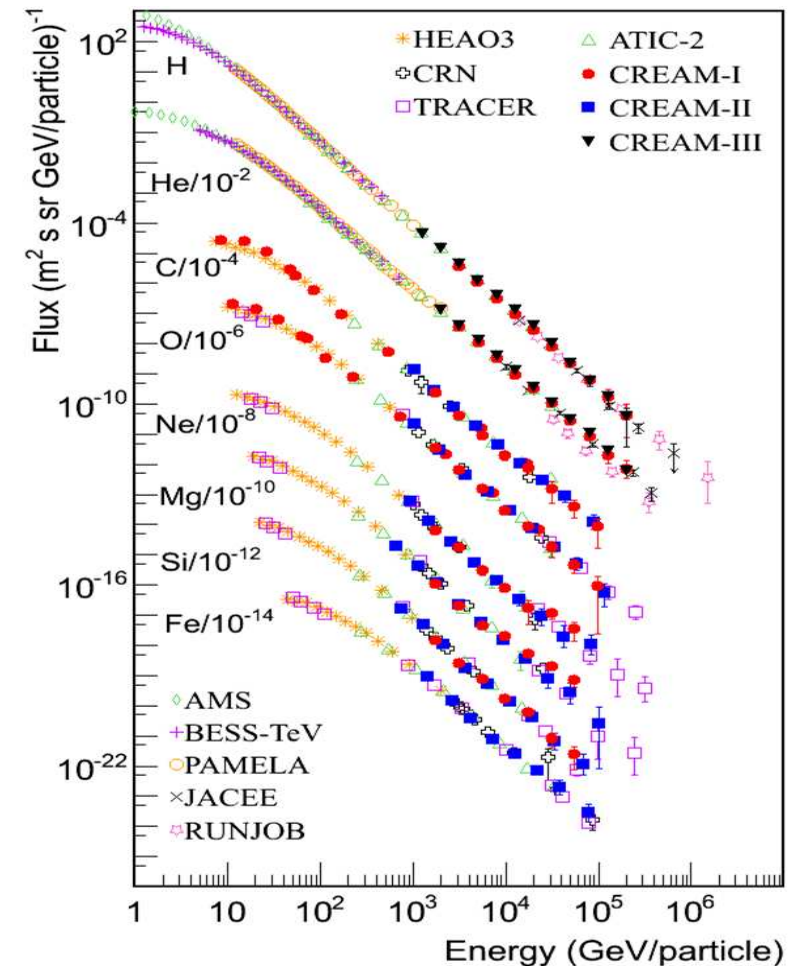
Promieniowanie kosmiczne

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

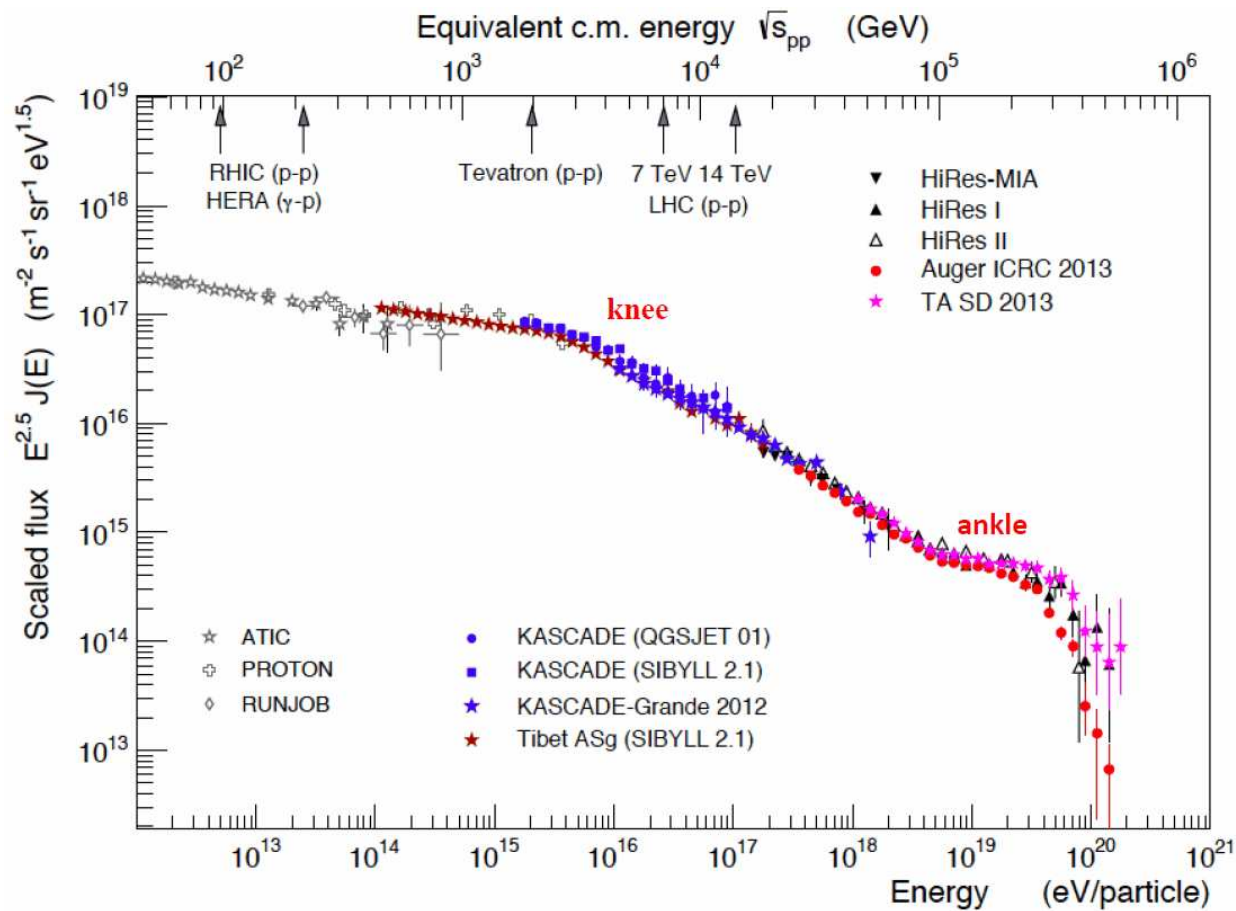


Promieniowanie kosmiczne

Pochodzenie

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

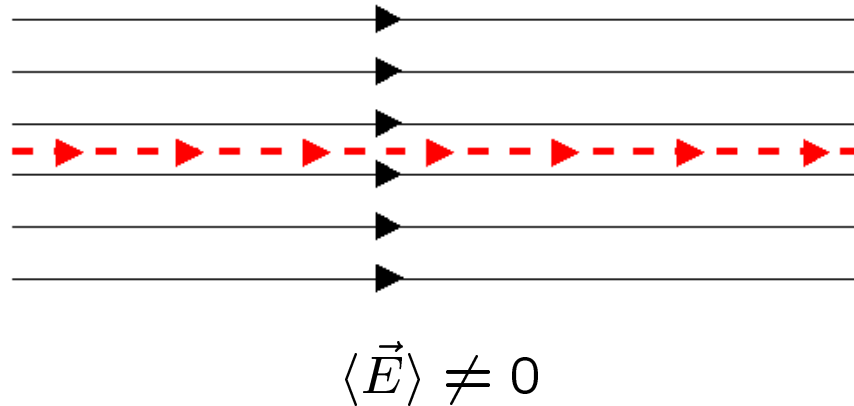
⇒ mogą sugerować różne źródła i/lub mechanizmy produkcji...



Mechanizm przyspieszania

Jednoetapowy

Przyspieszanie cząstek w bardzo silnych polach elektrycznych.



Makroskopowe pola mogą powstawać na skutek zmian pól magnetycznych.

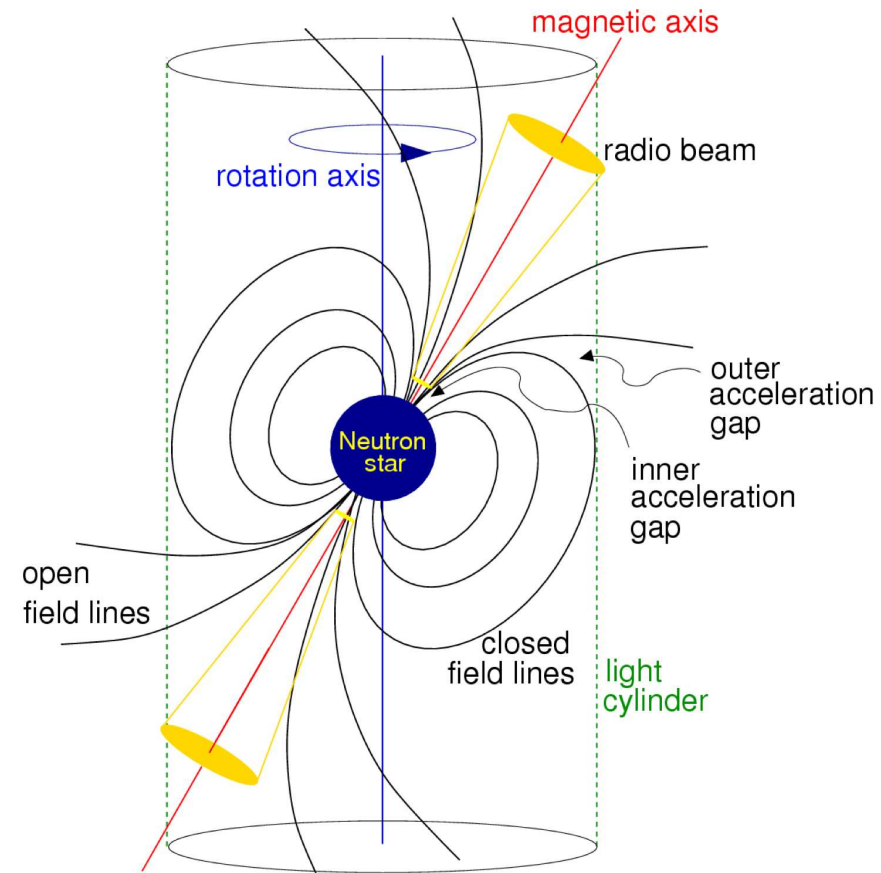
Możliwe źródło: pulsary

Mechanizm przyspieszania

Pulsary



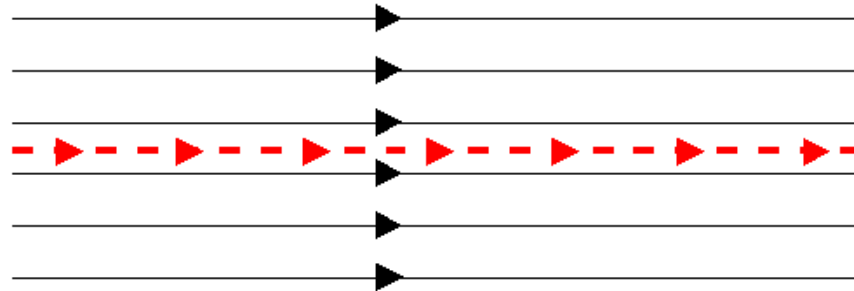
- silne pole magnetyczne szybko wirującej gwiazdy neutronowej \Rightarrow rozsuniecie ładunków elektrycznych
 - precesja osi magnetycznej \Rightarrow zmienne pole magnetyczne \Rightarrow pole elektryczne
- \Rightarrow możliwe przyspieszanie do energii rzędu TeV



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^-

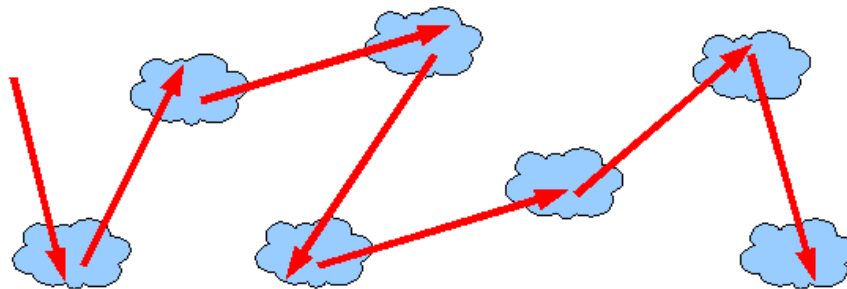
⇒ nie możemy uzyskać skrajnie wysokich energii...

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.



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

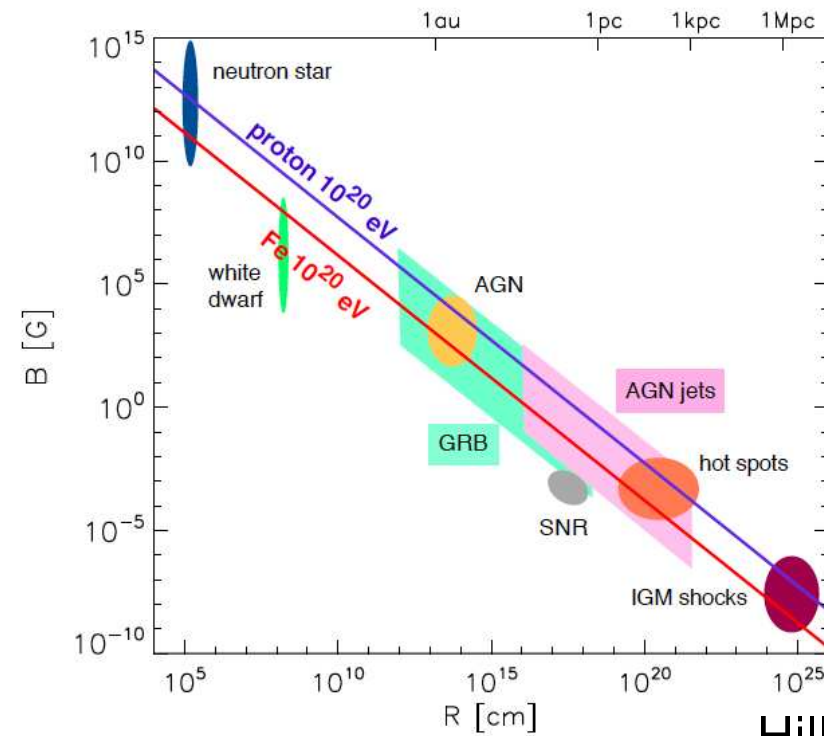
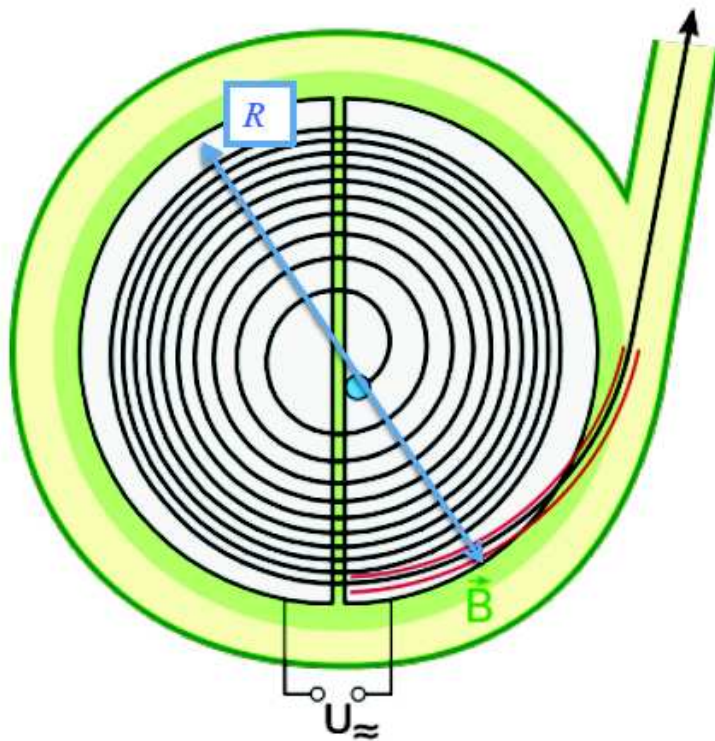
Mimo to możemy uzyskać bardzo wysokie energie...

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

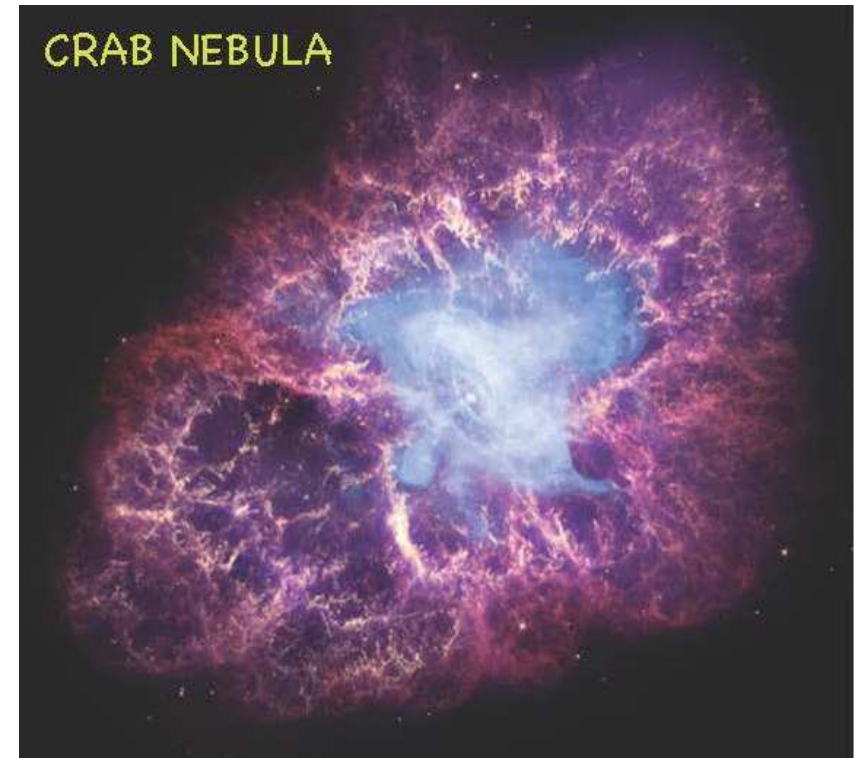
Przyjmuje się, że promieniowanie w zakresie energii do ok. 10^{15} eV pochodzi z **naszej Galaktyki** - uwięzione przez galaktyczne pole magnetyczne.

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

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

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

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

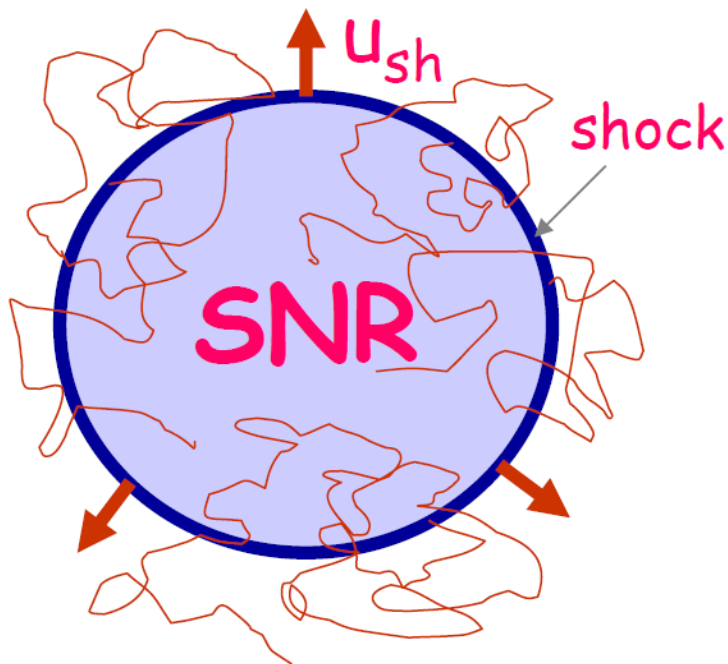


Wystarczy, że 10% energii może zostać przekształcone na energię kinetyczną cząstek.
Ale jak?

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”

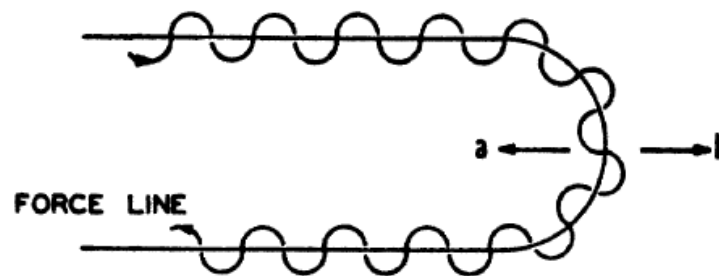
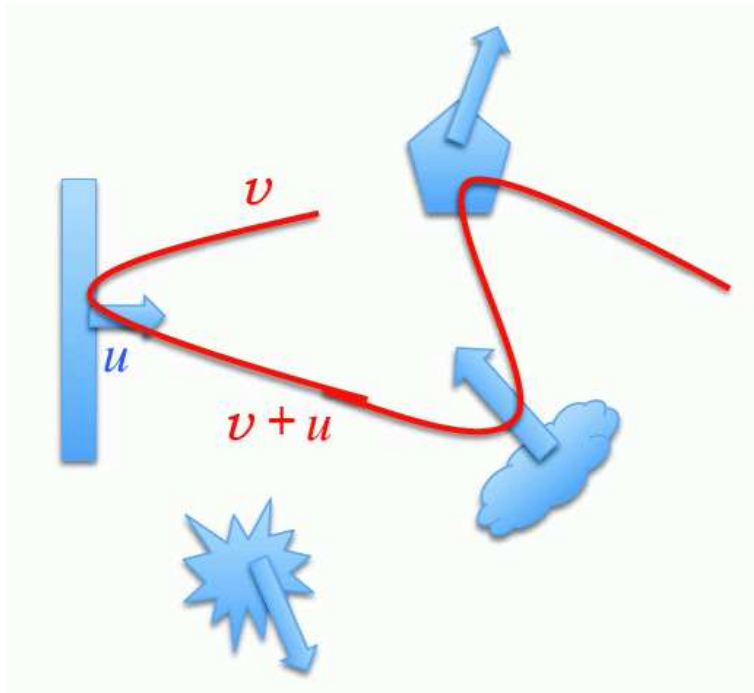


FIG. 1. Type *B* reflection of a cosmic-ray particle.

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 :

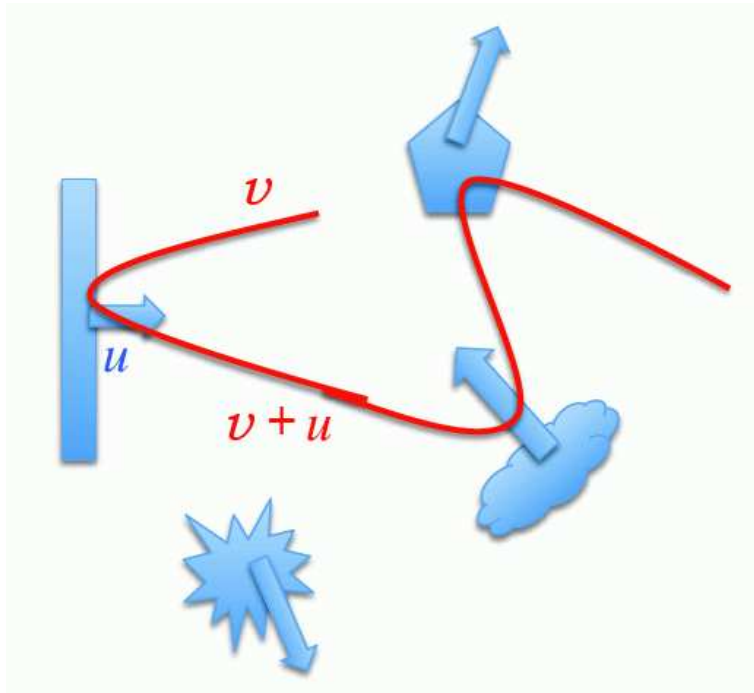
$$E' = \gamma^2 E \left(1 + \beta^2 + 2\beta \frac{v}{c} \cos \theta \right)$$

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

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

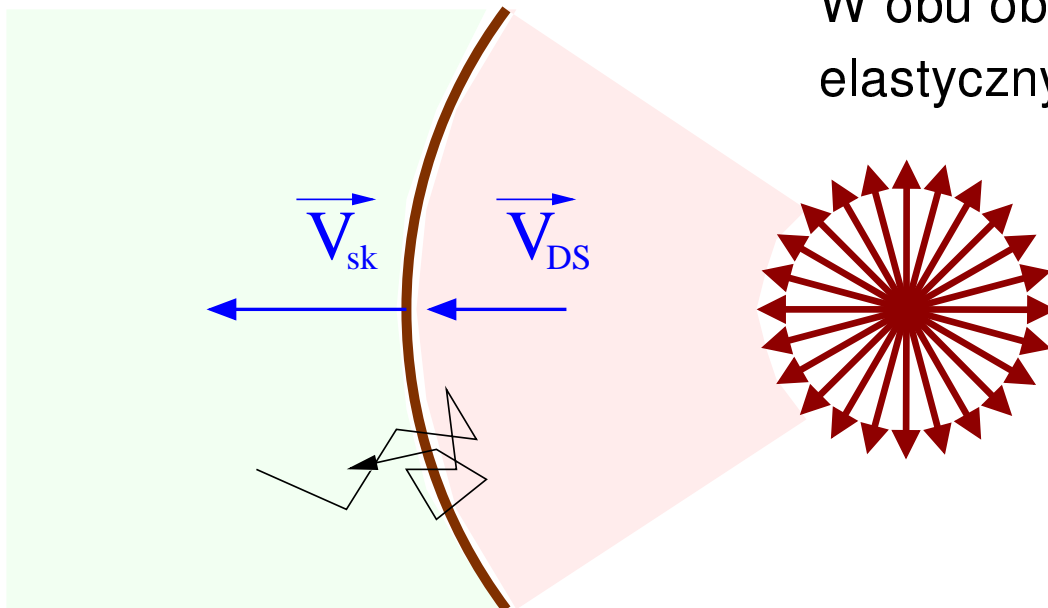
Mechanizm Fermiego pierwszego rzędu

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!**).



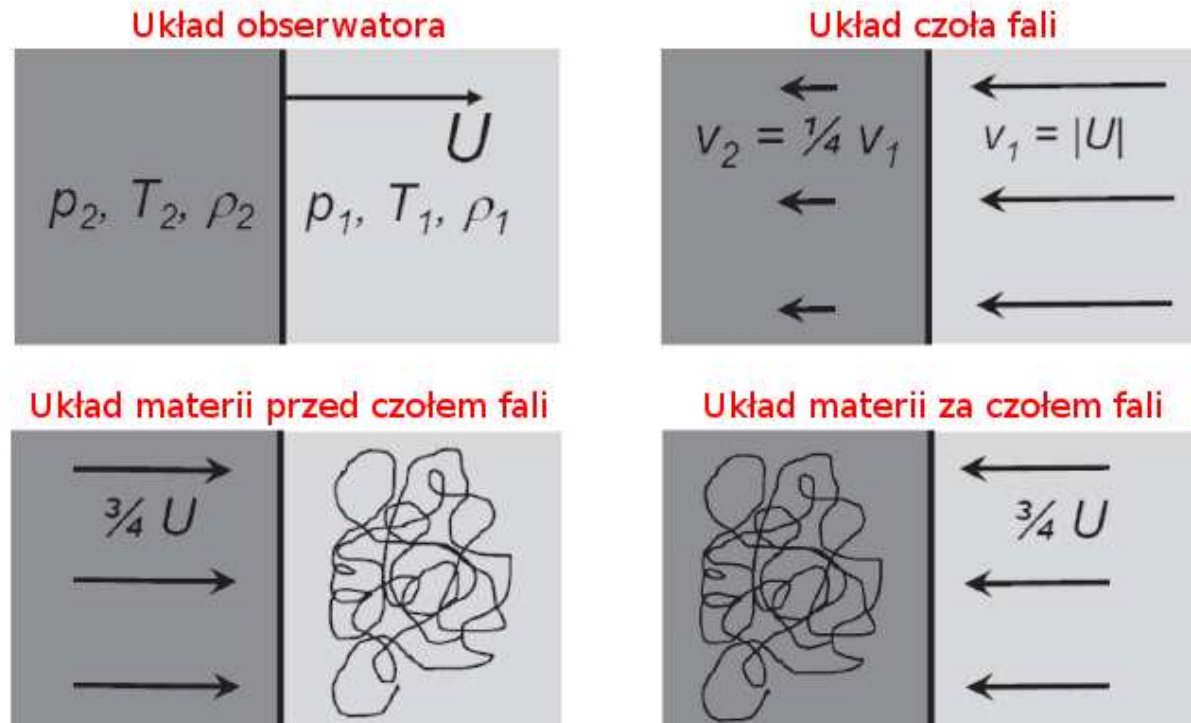
Mechanizm przyspieszania

Mechanizm Fermiego pierwszego rzędu

first-order Fermi acceleration

Rozkład prędkości na czole fali w różnych układach odniesienia:

Nick Murphy
Plasma Astrophysics

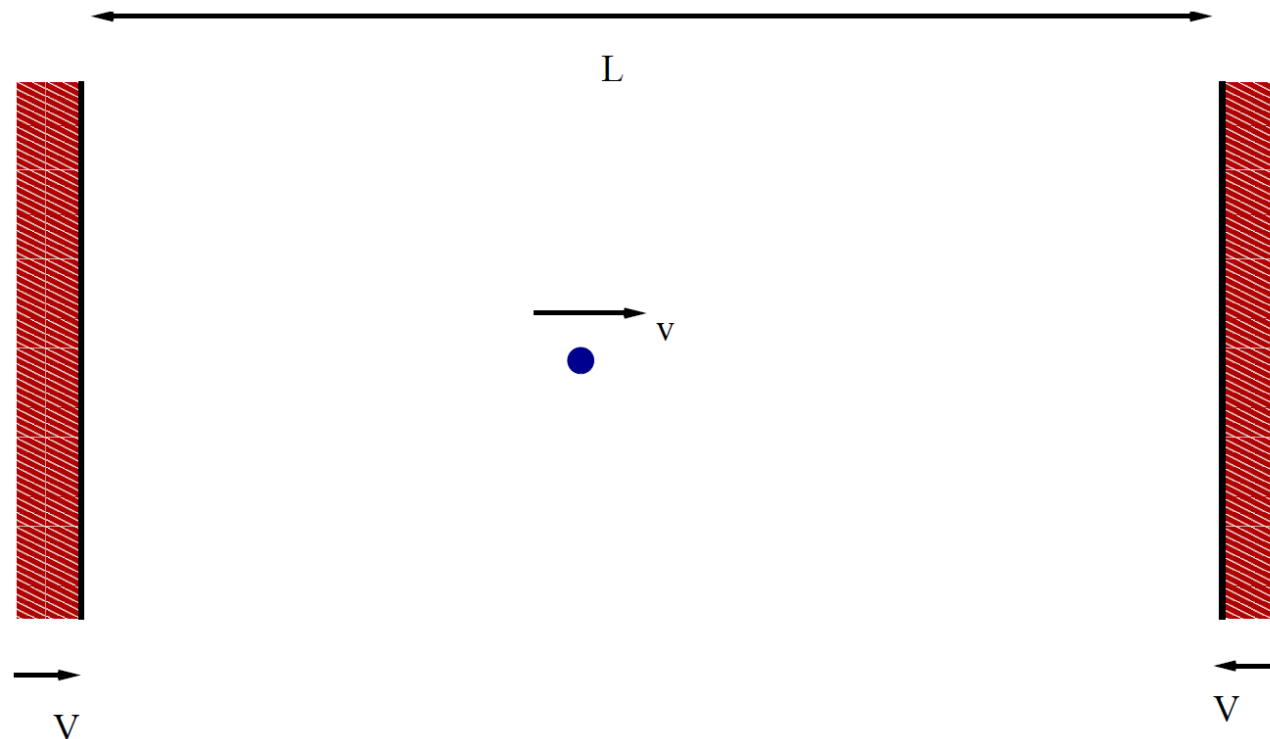


Przechodząc wielokrotnie przez **czoło fali** cząstka napotyka za każdym razem na materię/pola poruszające się w przeciwnym kierunku...

Mechanizm przyspieszania

Mechanizm Fermiego pierwszego rzędu first-order Fermi acceleration

Najbardziej uproszczony schemat ideowy akceleracji

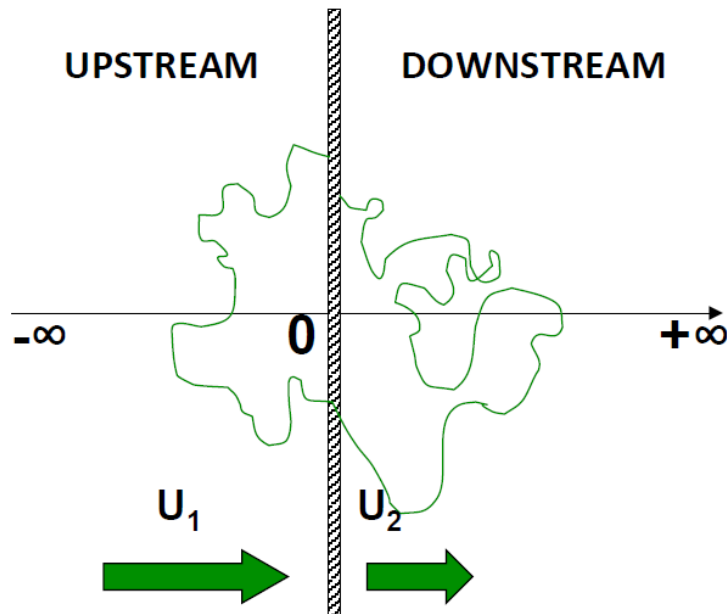


Garret Cotter, wykład High-Energy Astrophysics (U.Oxford)

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

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

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

$$\cos \theta' < 0$$

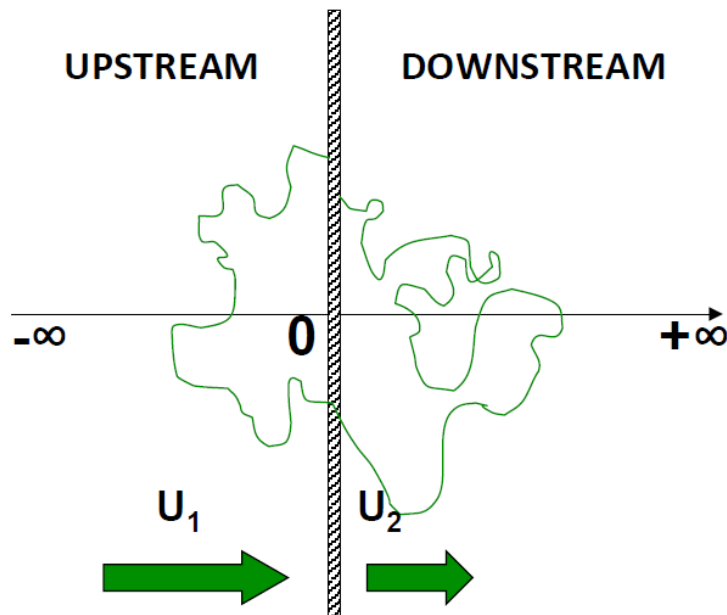
Pasquale Blasi, NASA school 2012

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:

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

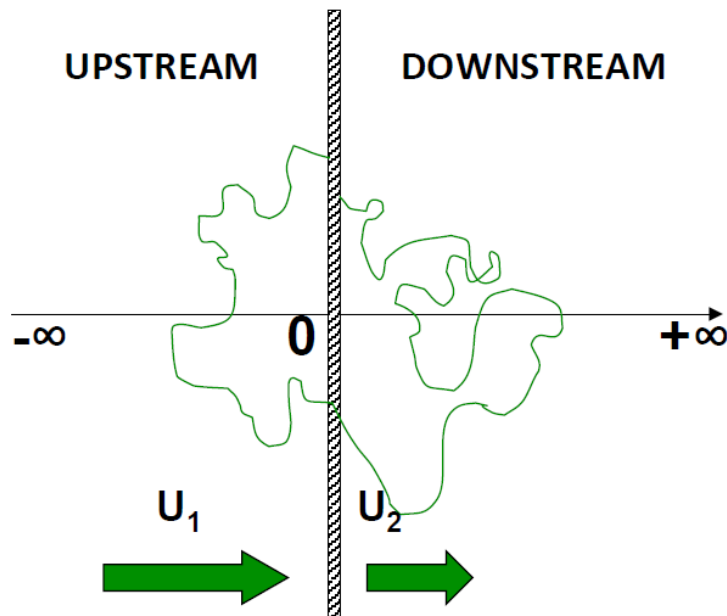
Wielokrotne przejście przez czoło fali może zapewnić uzyskanie bardzo wysokich energii...

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

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

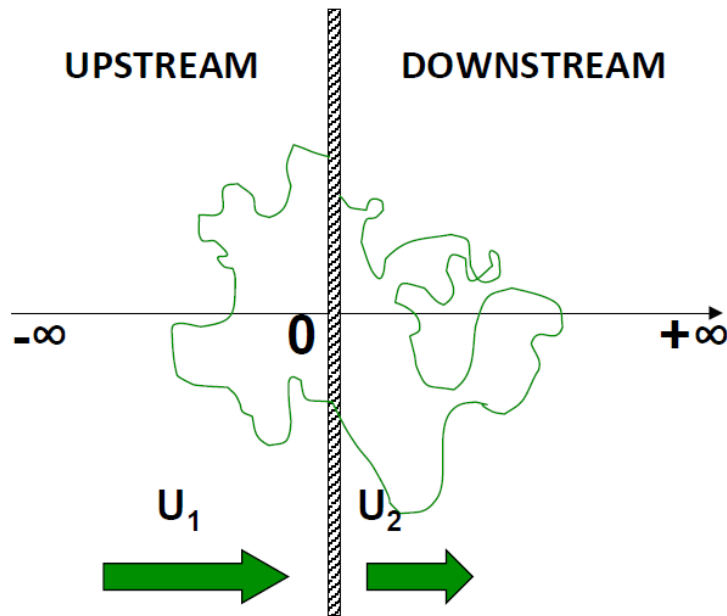
Mechanizm przyspieszania

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.

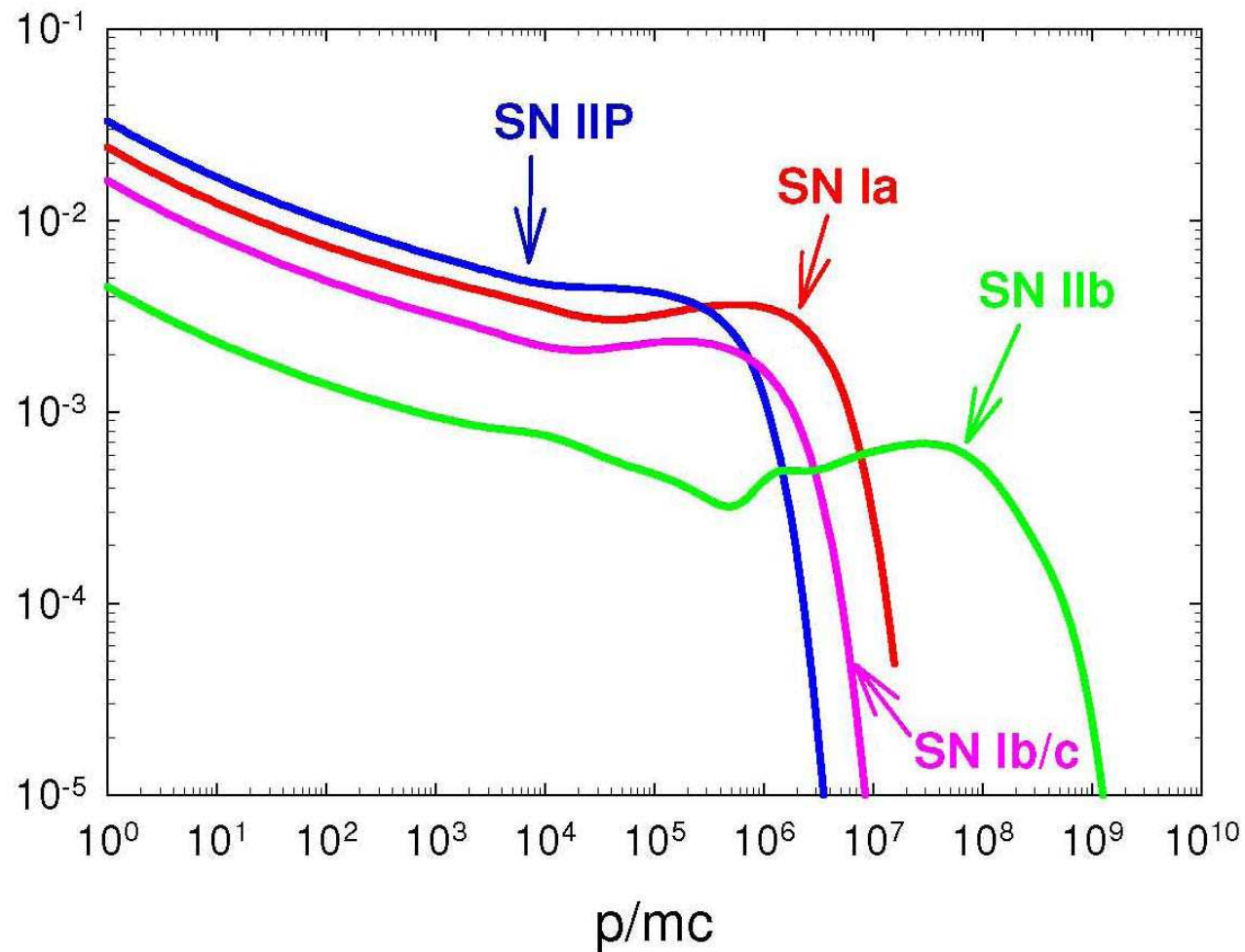
Okolo 200 lat po wybuchu SN najszybsze cząstki uwalniają się z fali...

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)

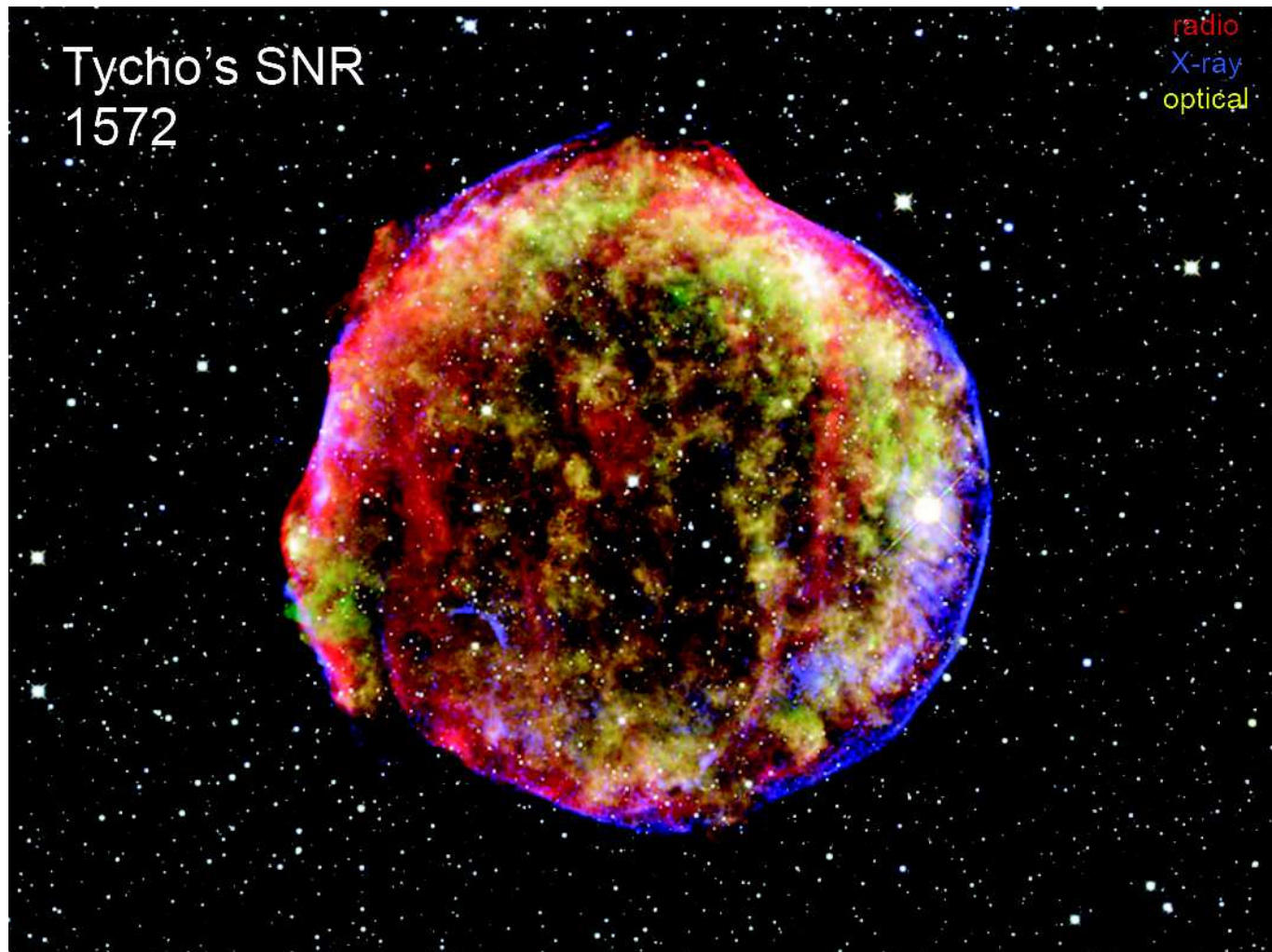
Symulacje numeryczne



Supernova Remnant (SNR)

Obserwacja Tycho SNR

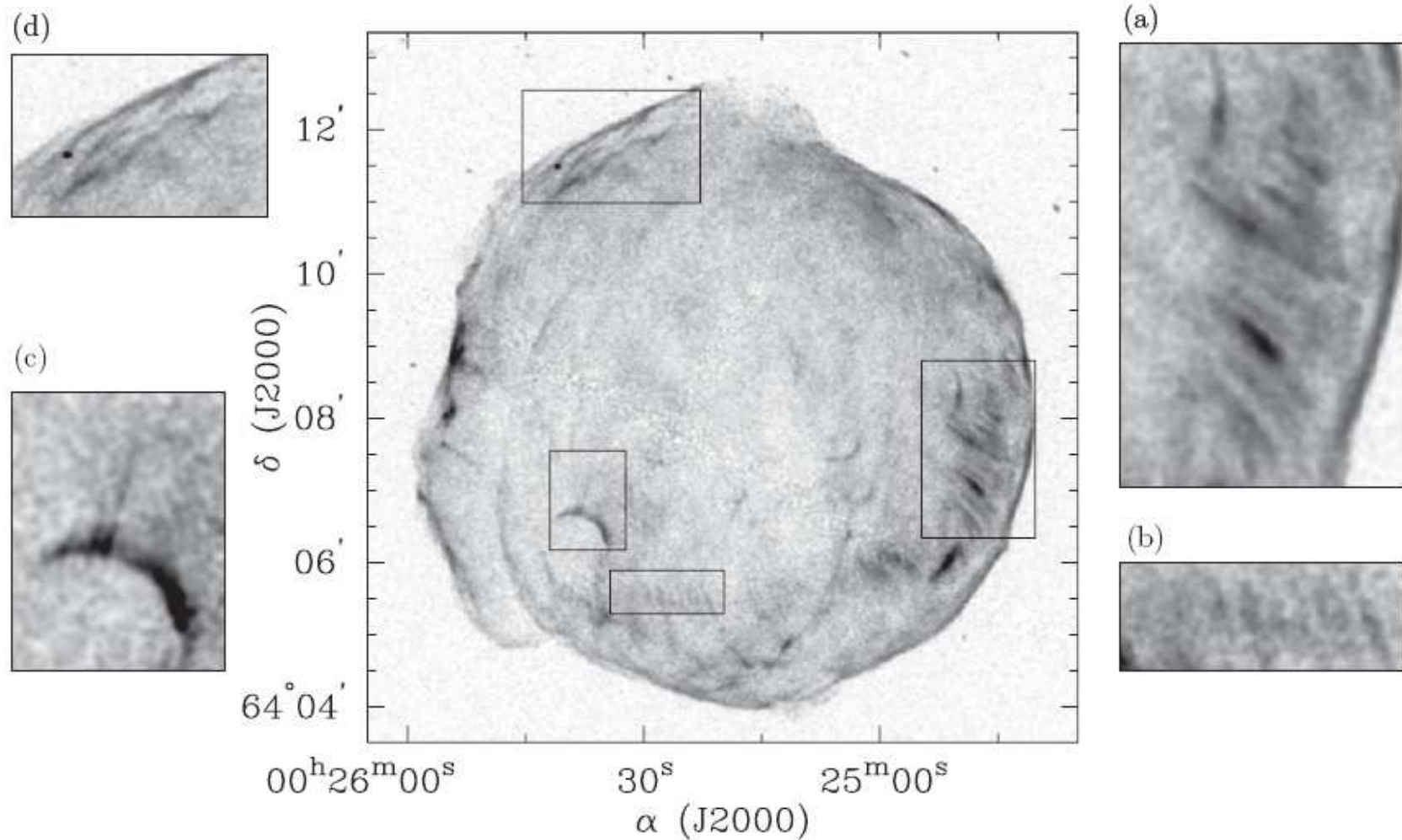
SN 1572 w gwiazdozbiorze Kasjopei



Supernova Remnant (SNR)

Obserwacja Tycho SNR

Chandra X-ray 4.0–6.0 keV image



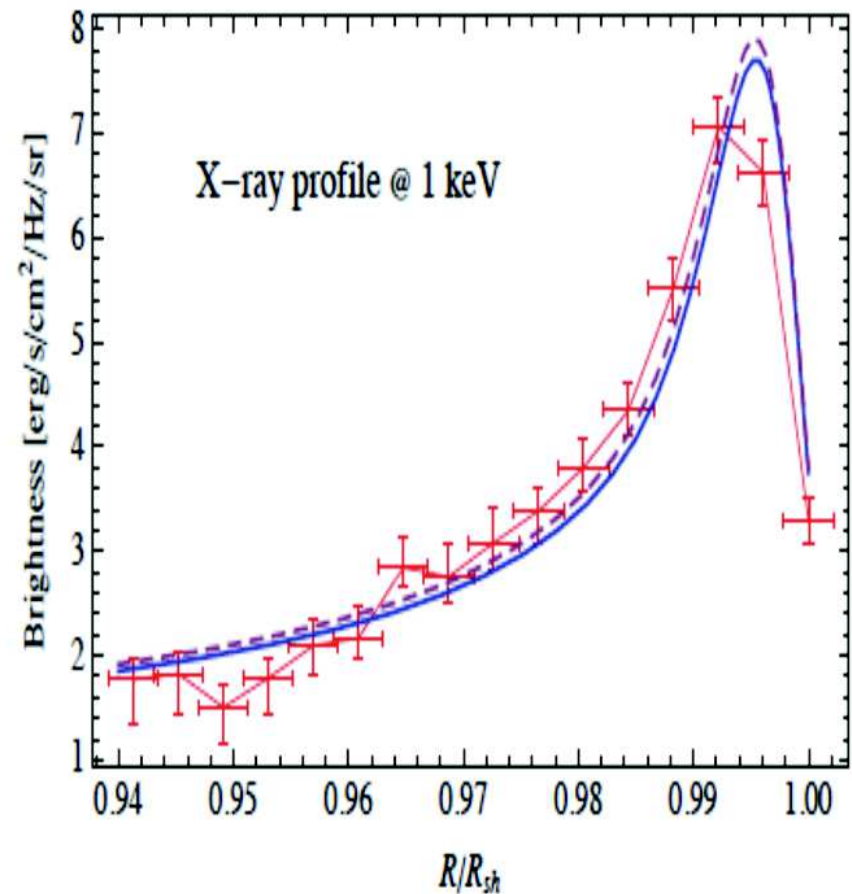
Supernova Remnant (SNR)

Obserwacja Tycho SNR

SN 1572 w gwiazdozborze Kasjopei

Morlino&Caprioli 2011

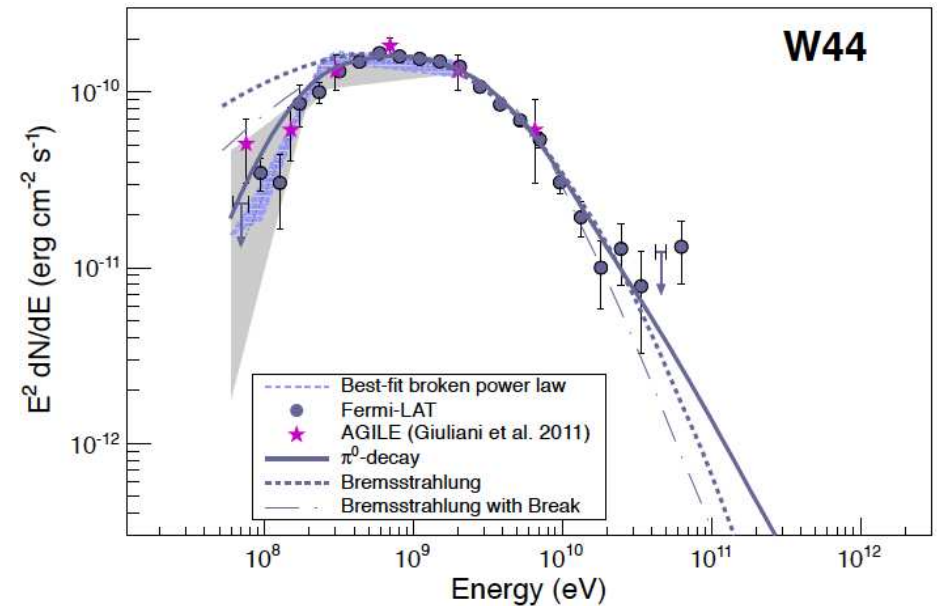
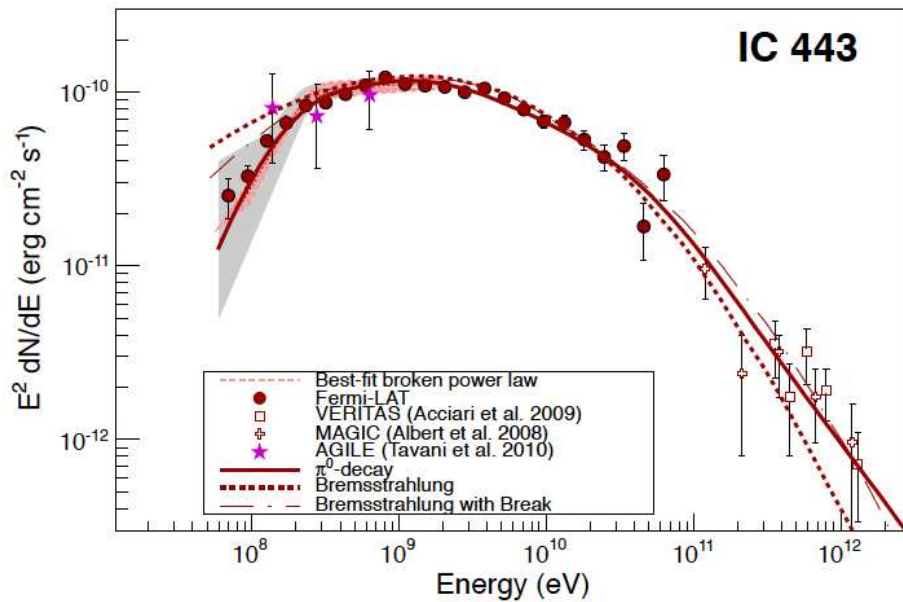
Obserwowany rozkład przestrzenny źródeł emisji promieniowania X zgadza się bardzo dobrze z modelowaniem rozchodzenia się fali uderzeniowej.



Supernova Remnant (SNR)

Obserwacje

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

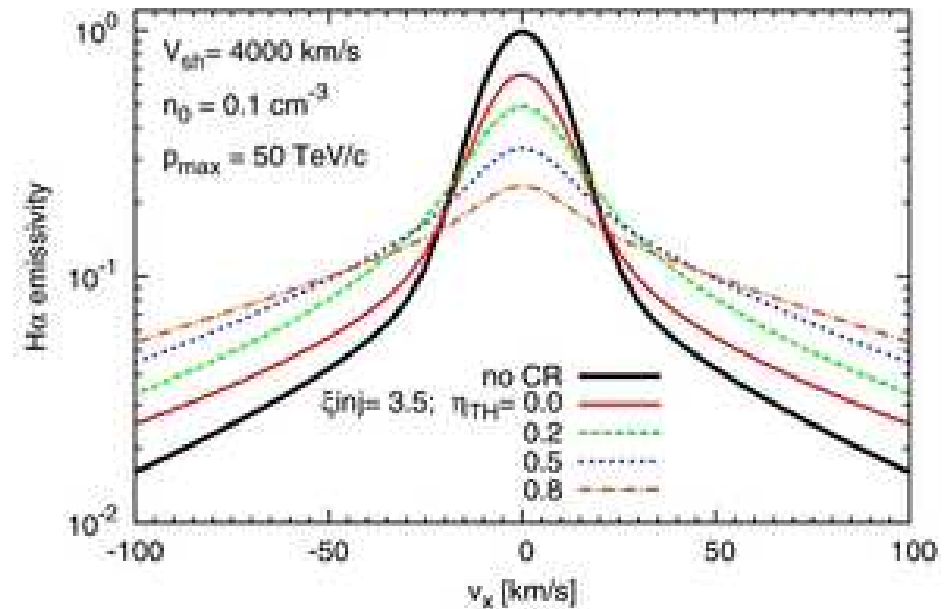
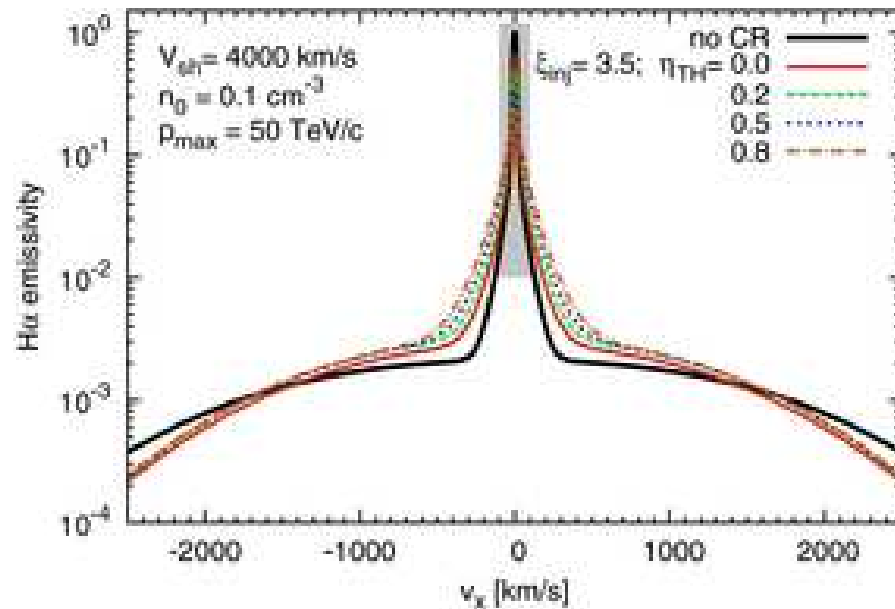


Kształtu tej części widma nie potrafimy w inny sposób wymodelować...

Supernova Remnant (SNR)

Obserwacje

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



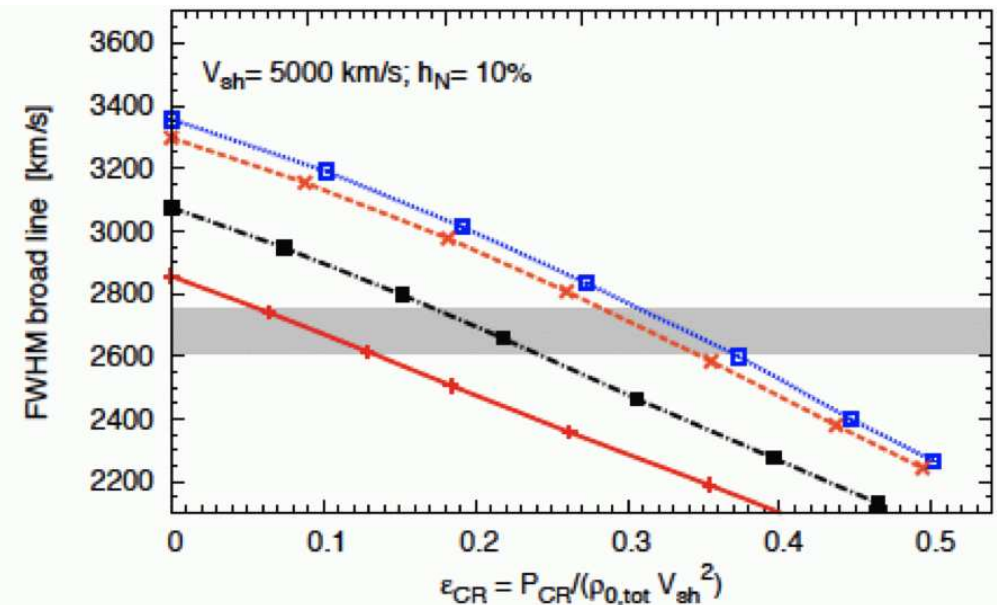
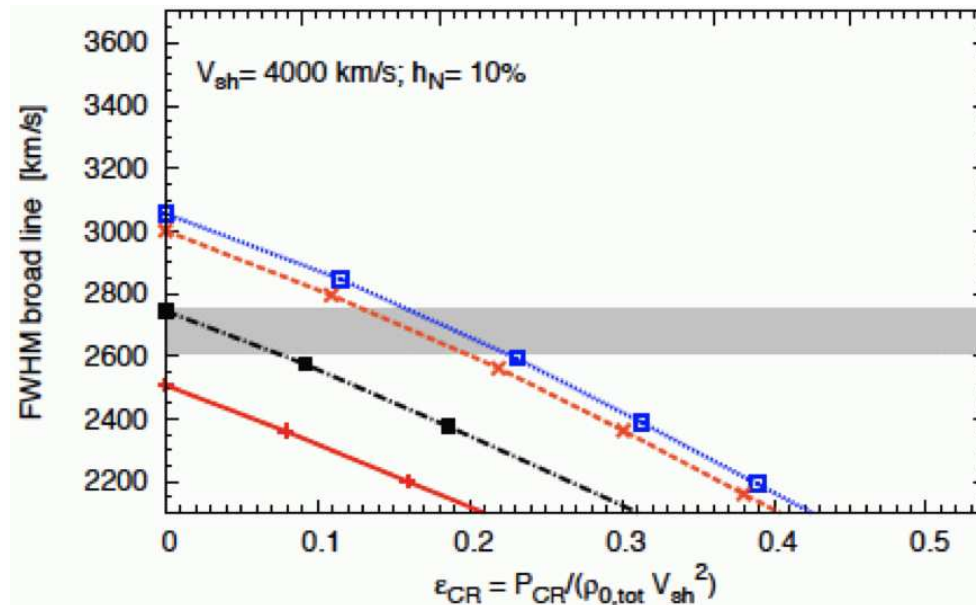
Przewidywane poszerzenie zależy m.in. od założonej wydajności przyspieszania

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

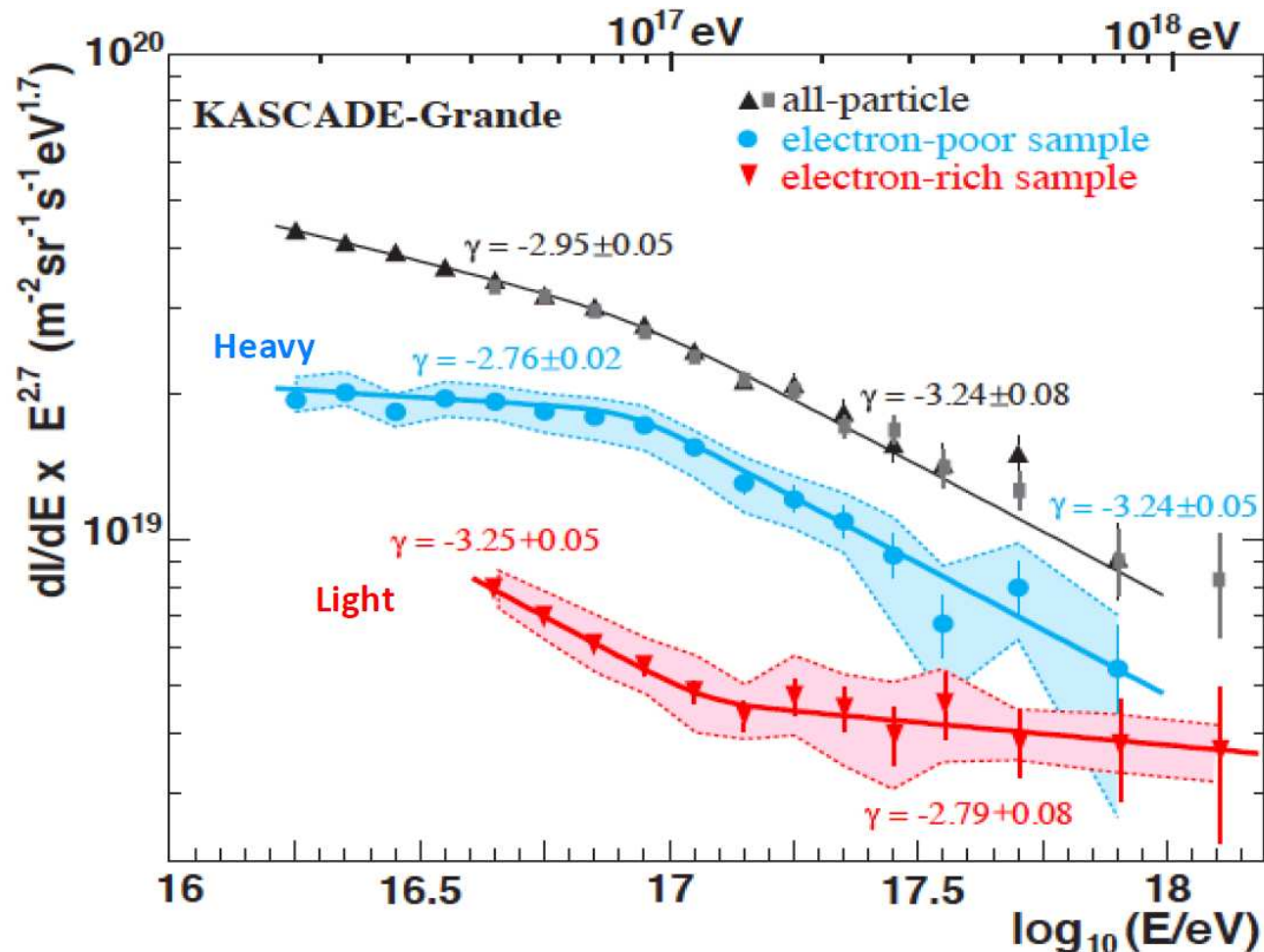
Choć szczegółowe mechanizmy wciąż dalekie od pełnego zrozumienia

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

Promieniowanie kosmiczne

Widmo

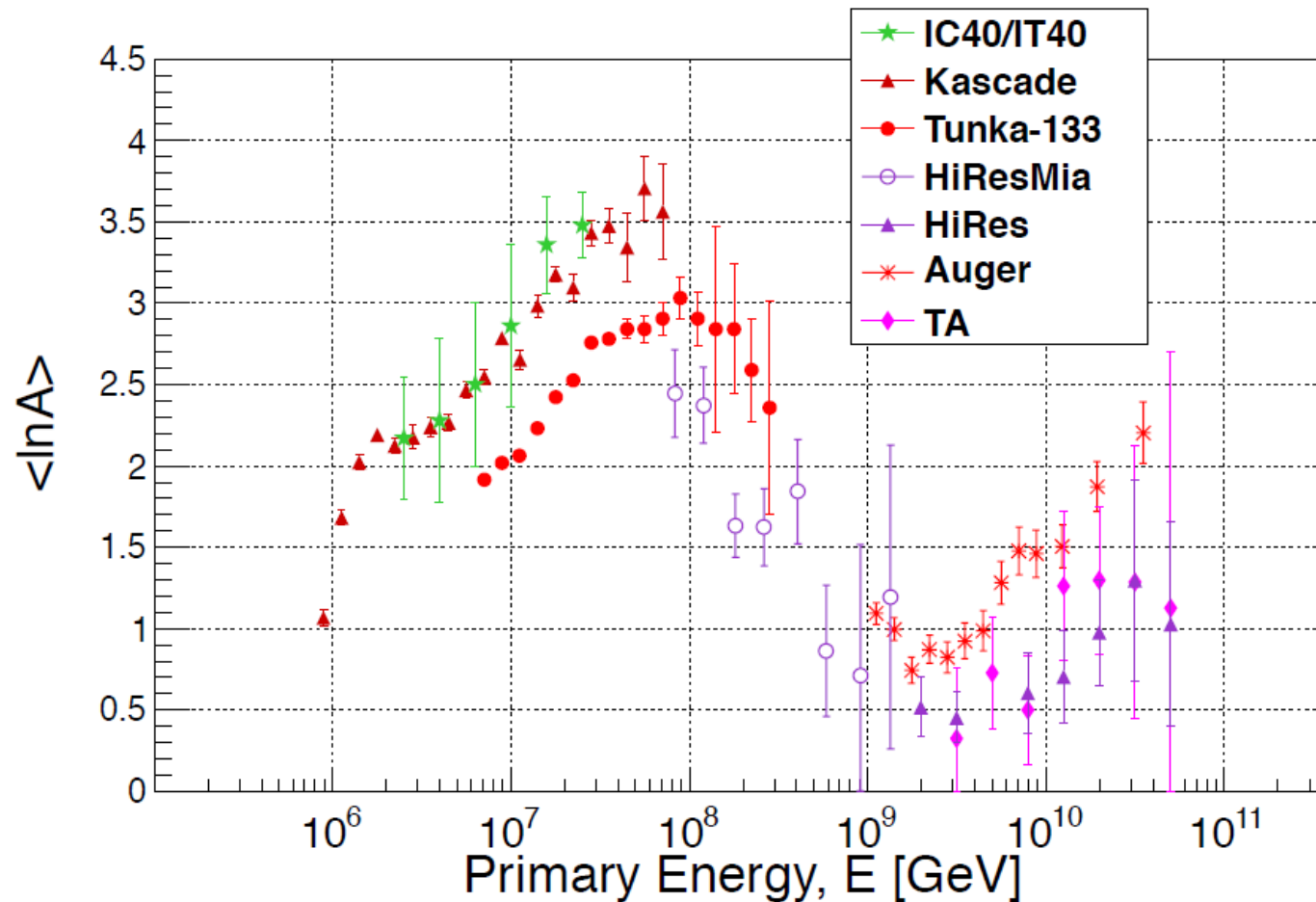
Dla energii powyżej 10^{17} eV obserwujemy zmiany w nachyleniu widma różne dla lekkich i ciężkich pierwiastków \Rightarrow zmiana w składzie promieniowania?



Promieniowanie kosmiczne

Widmo

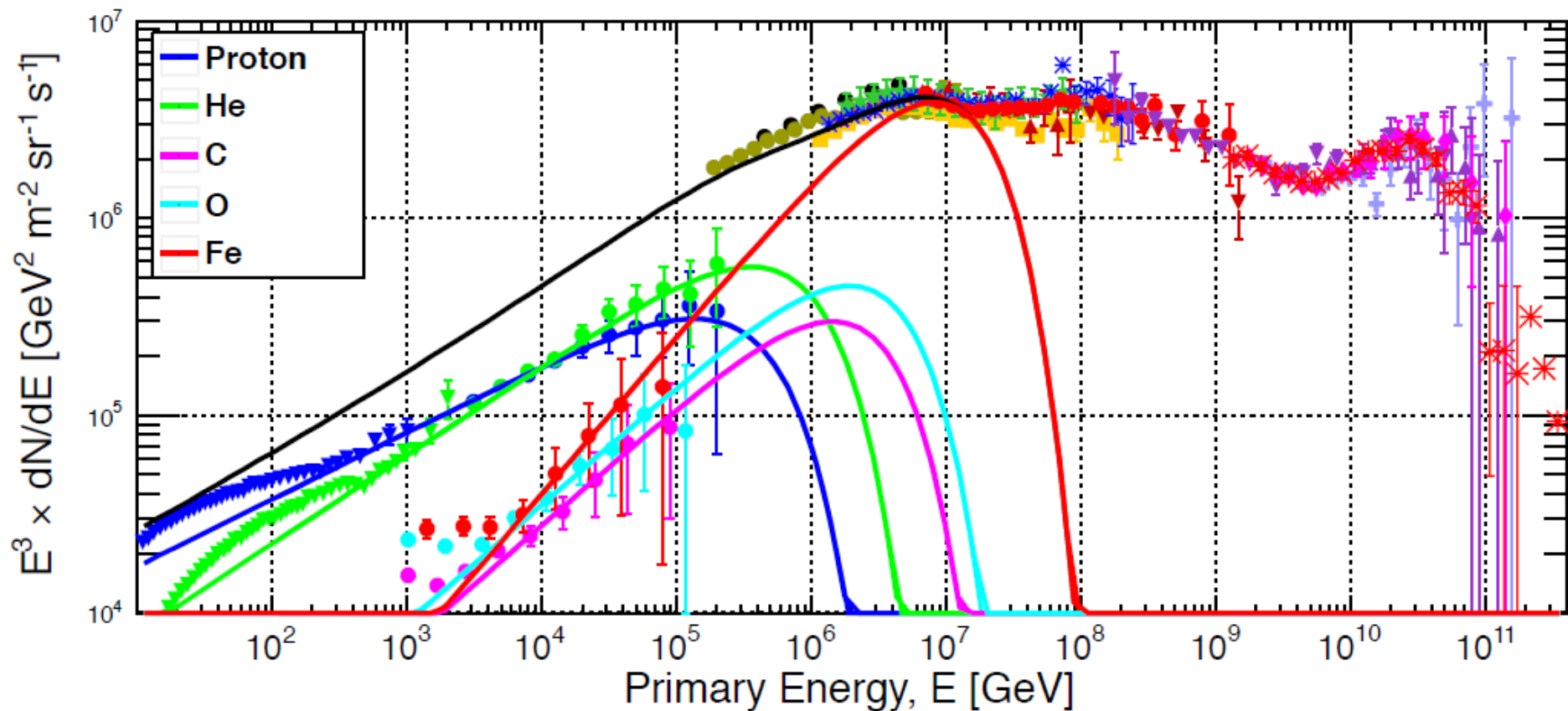
Zmiany w składzie promieniowania dobrze widoczne po zestawieniu danych różnych eksperymentów



Promieniowanie kosmiczne

Widmo analiza współpracy CREAM

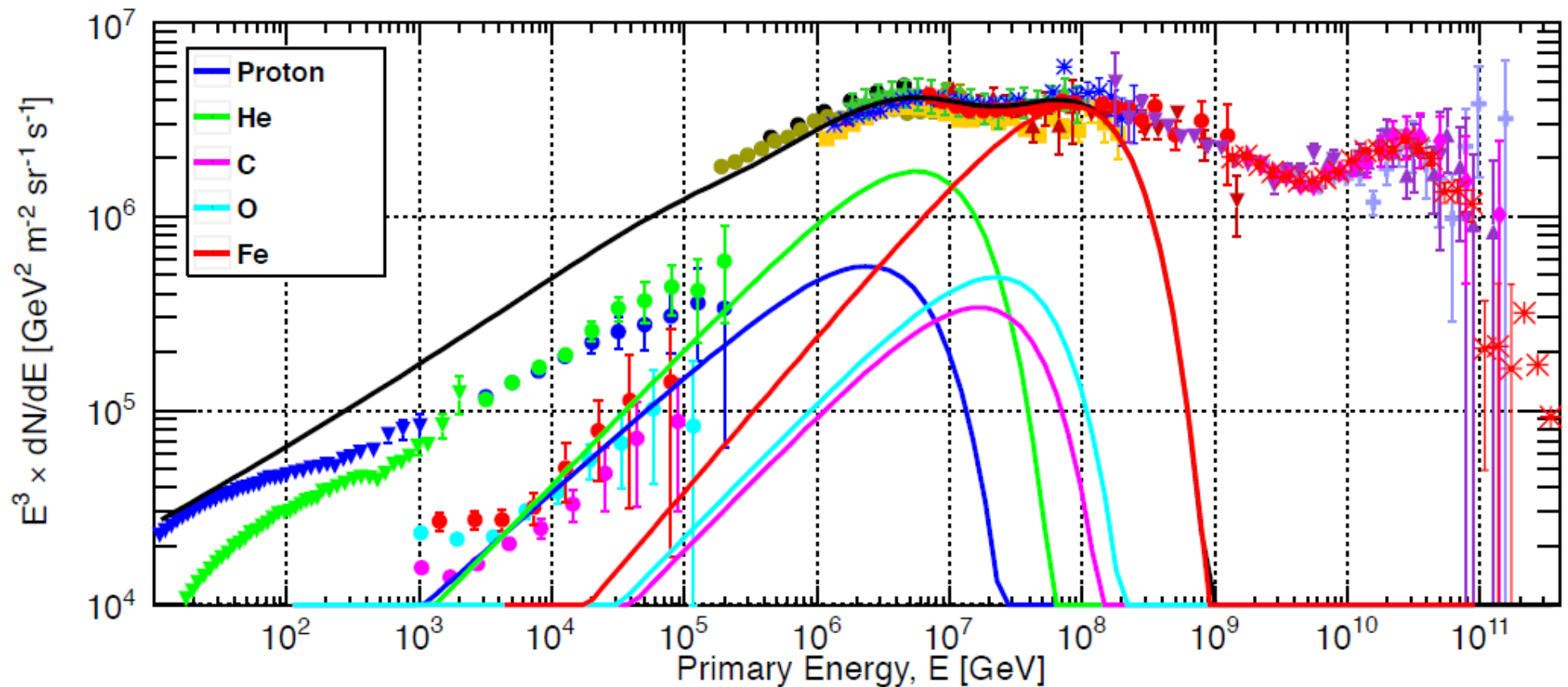
Dopasowanie modelu do danych przy niskiej energii tłumaczy widmo do ok. 10^{16} eV



Promieniowanie kosmiczne

Widmo analiza współpracy CREAM

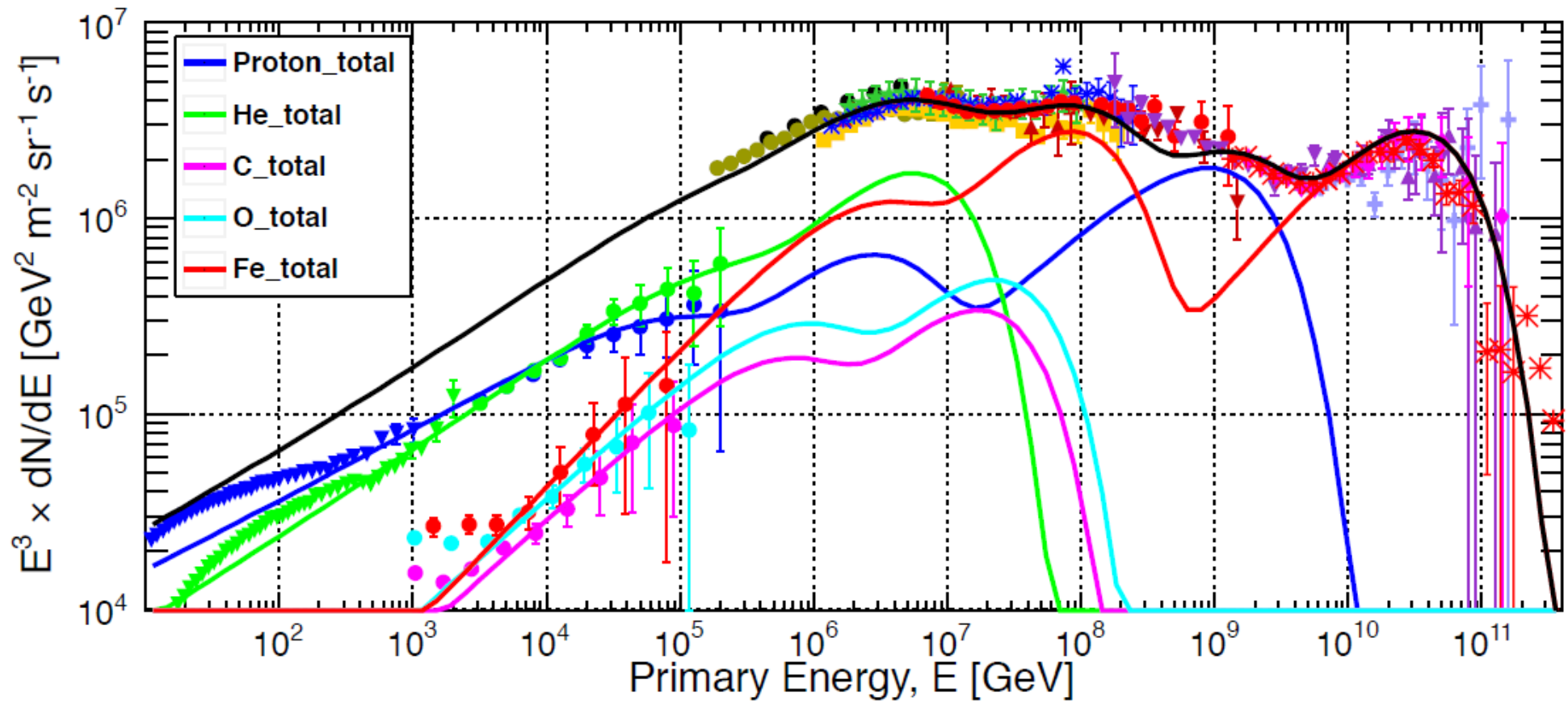
Dodanie drugiej składowej typu SNR, ale o maksymalnej energii rzędu 4 PeV (p)



Promieniowanie kosmiczne

Widmo analiza współpracy CREAM

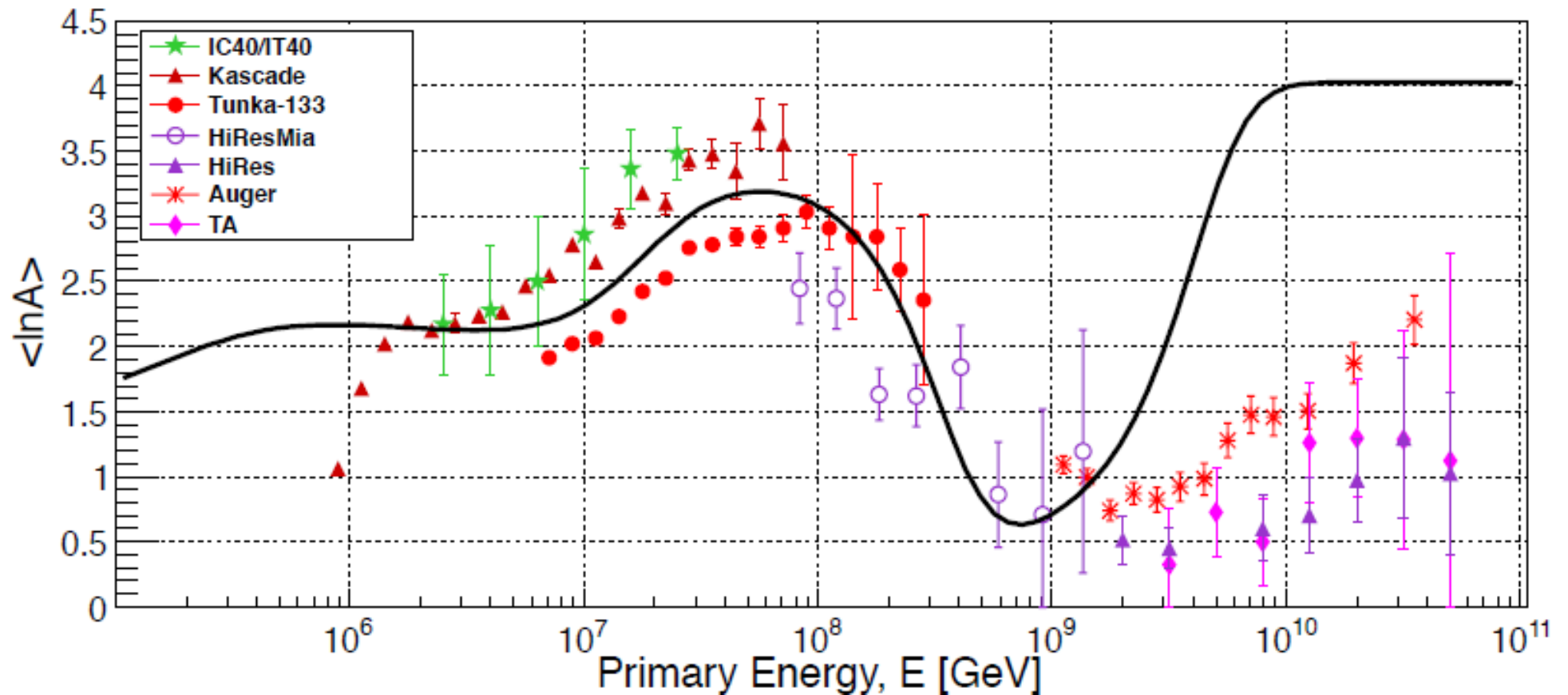
Dodanie trzeciej składowej niezbędne, żeby opisać pełen zakres energii



Promieniowanie kosmiczne

Widmo analiza współpracy CREAM

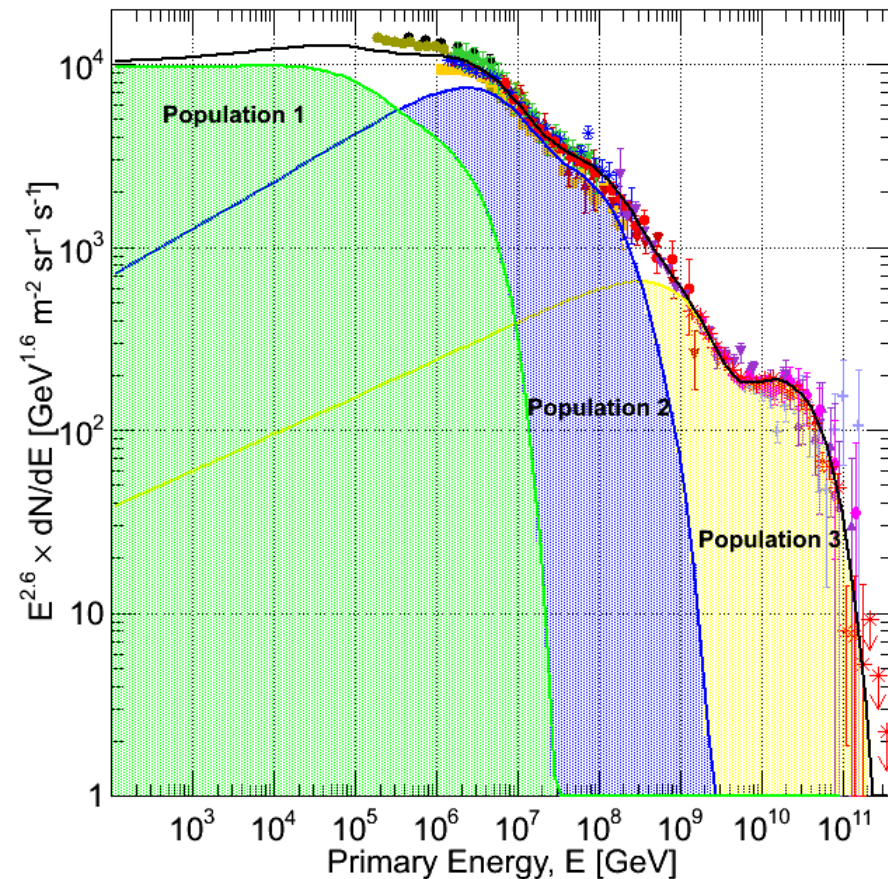
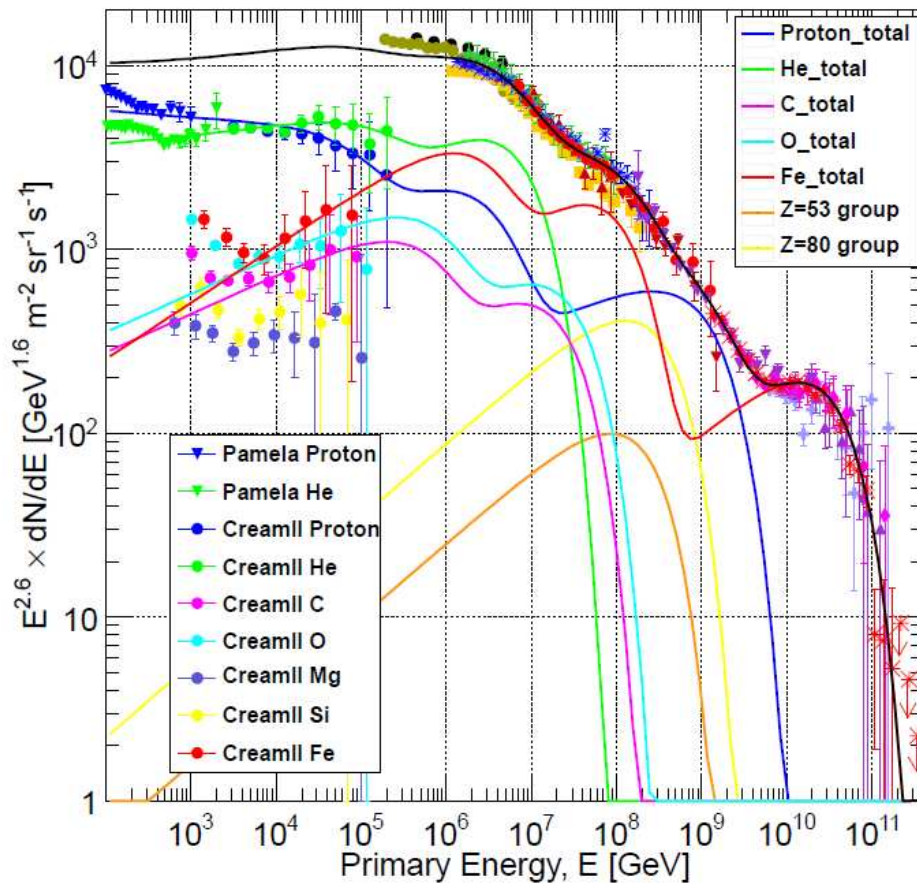
Dodanie trzeciej składowej niezbędne, żeby opisać pełen zakres energii



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

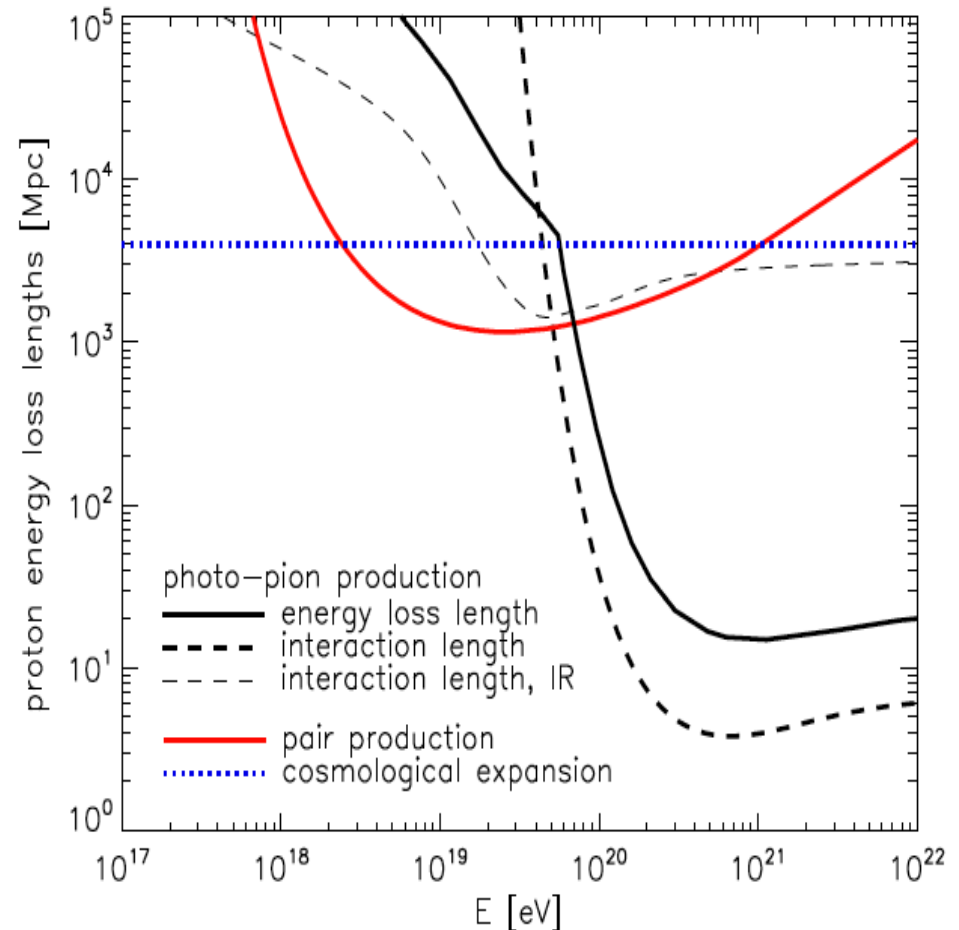


⇒ tracą szybko energię...

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

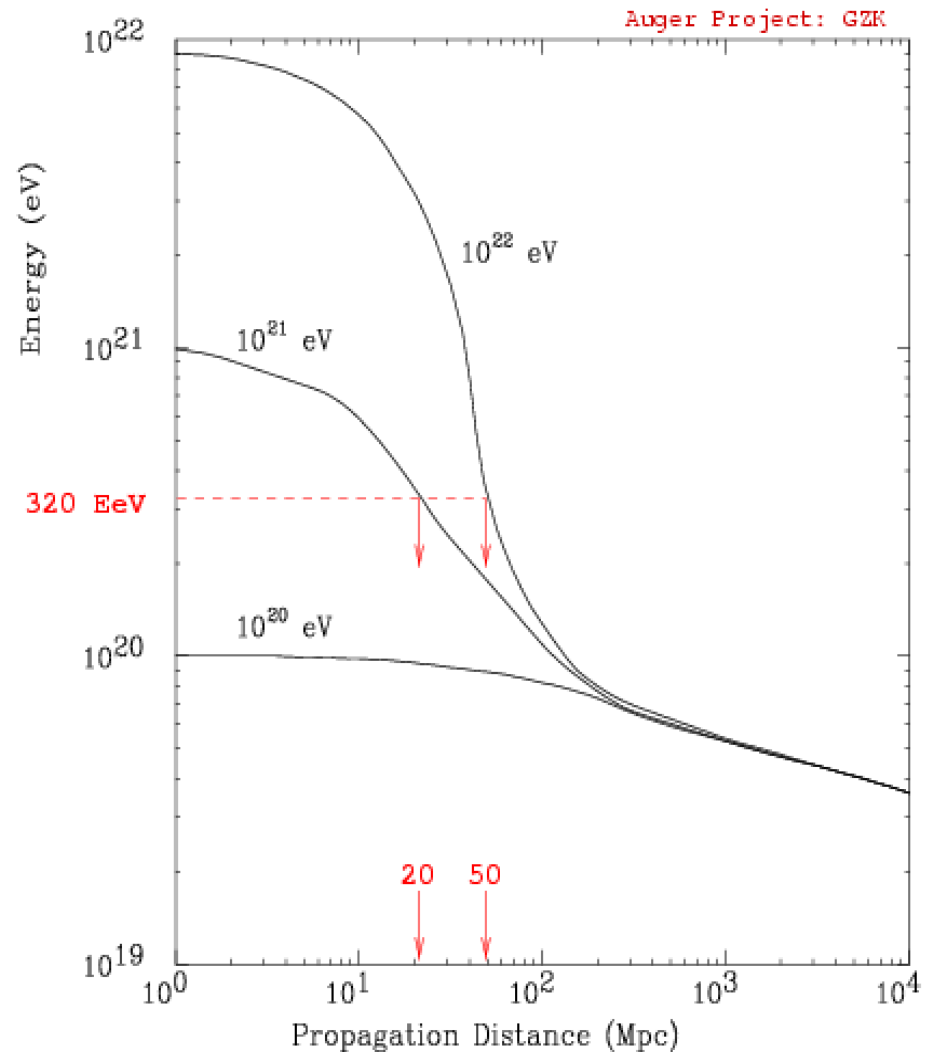


⇒ tracą szybko energię...

Greisen, Zatsepin, Kuzmin, 1966

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

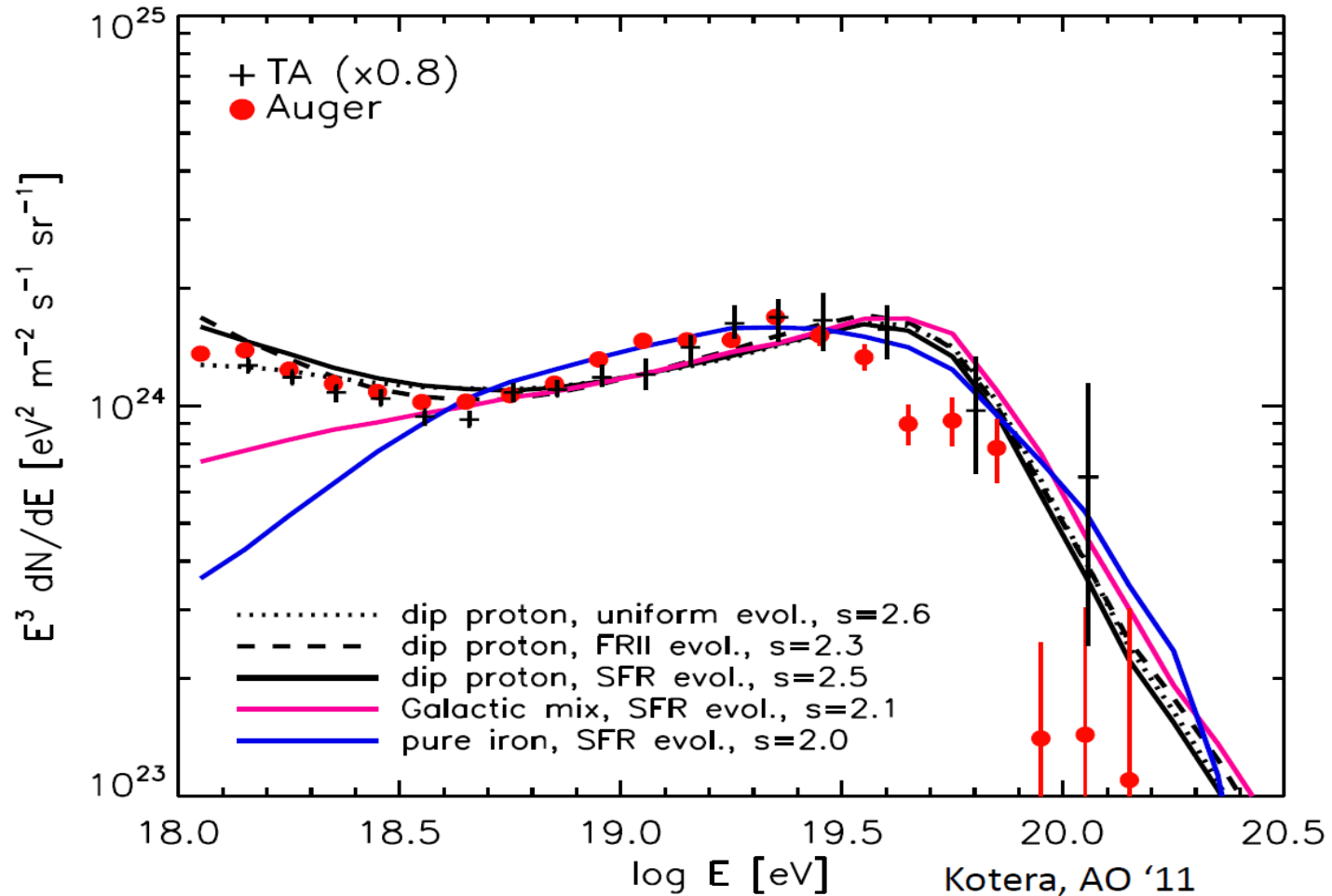
Albo zbyt małej liczby źródeł...



Promieniowanie kosmiczne

Obcięcie GZK

Dopasowanie modeli do danych najwyższych energii: źródła pozagalaktyczne + GZK

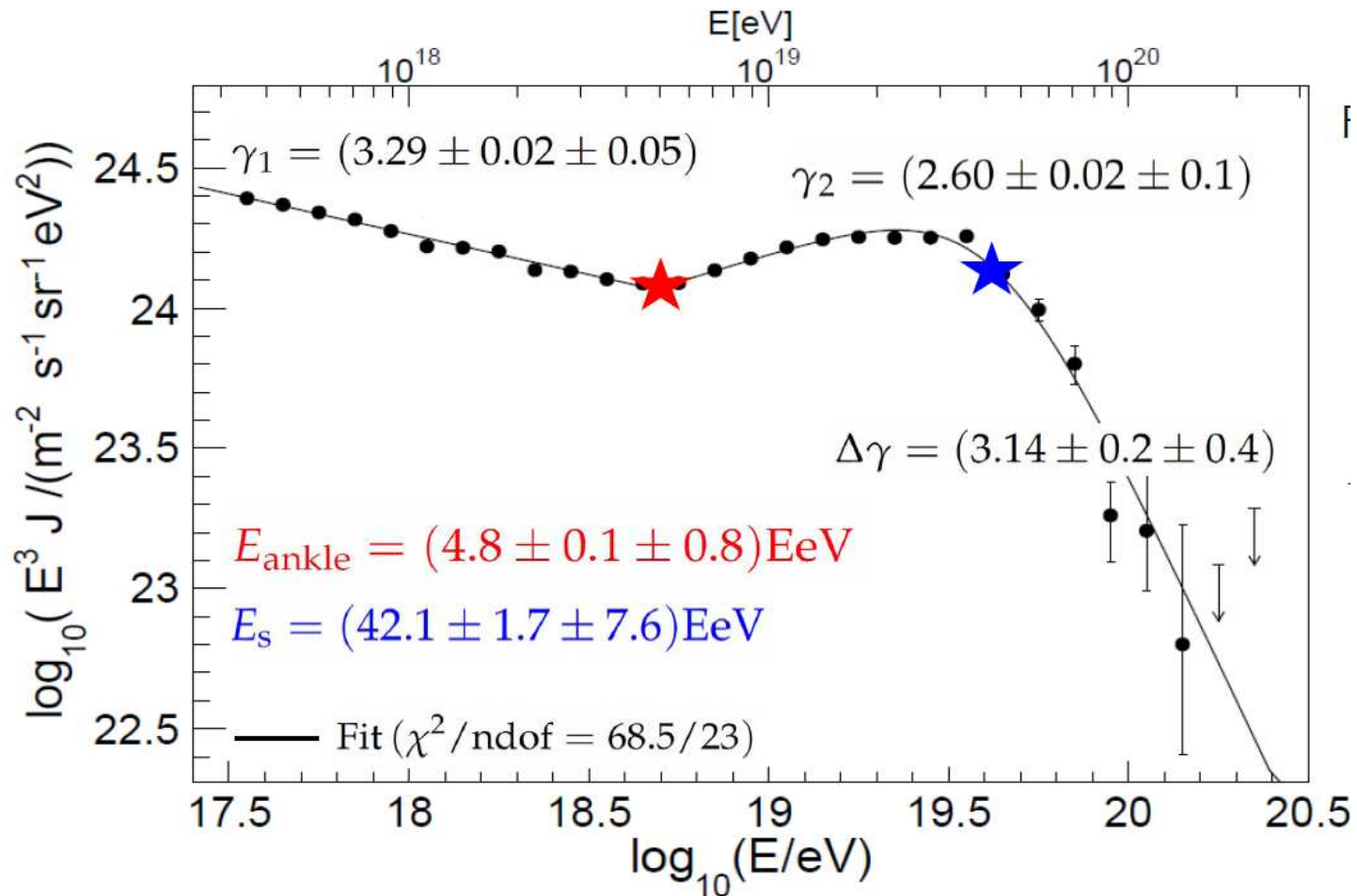


Promieniowanie kosmiczne

Obcięcie GZK

Dopasowanie parametryzacji do danych AUGER (ICRC'2015):

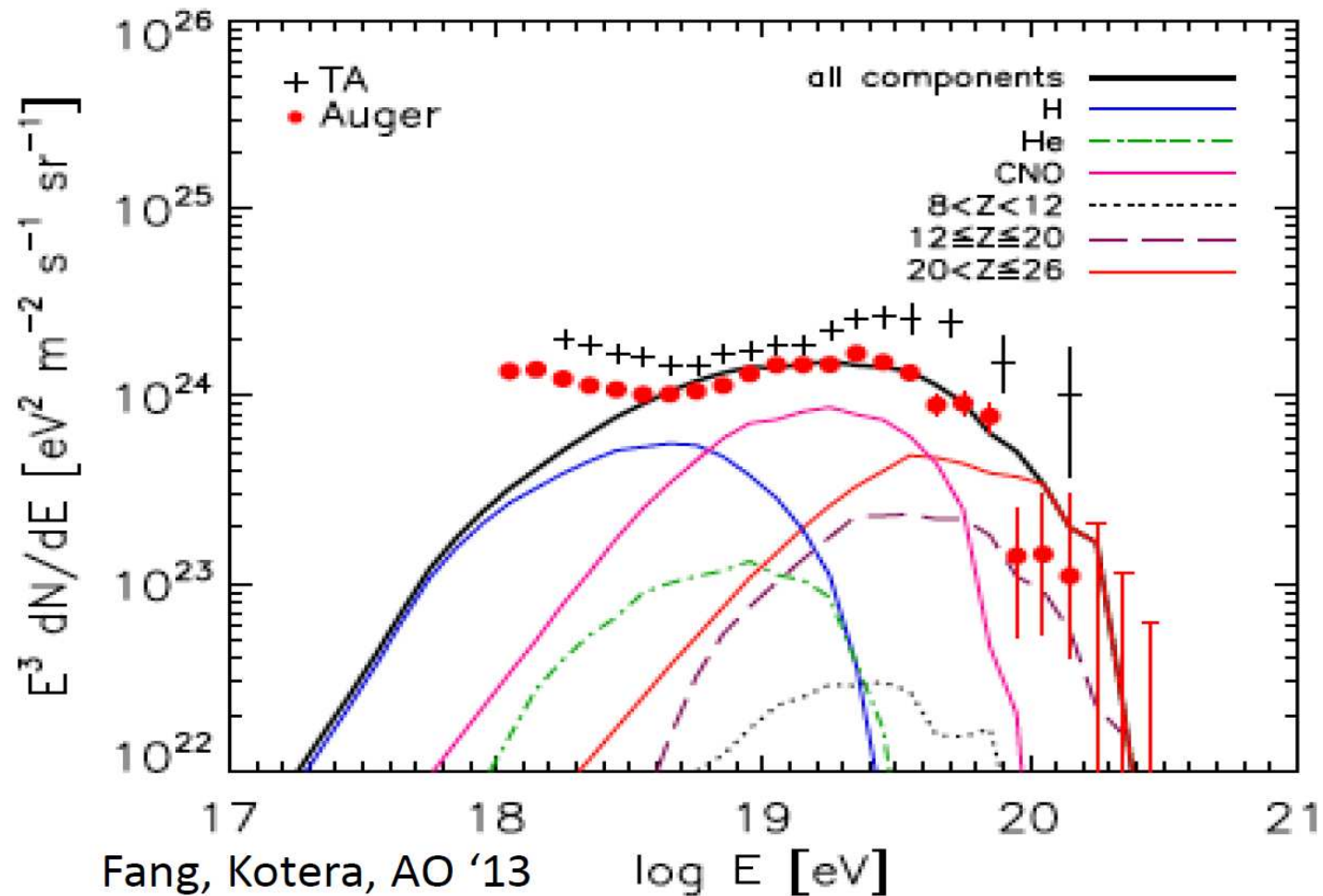
(E_s - próg tłumienia)



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...