

# 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

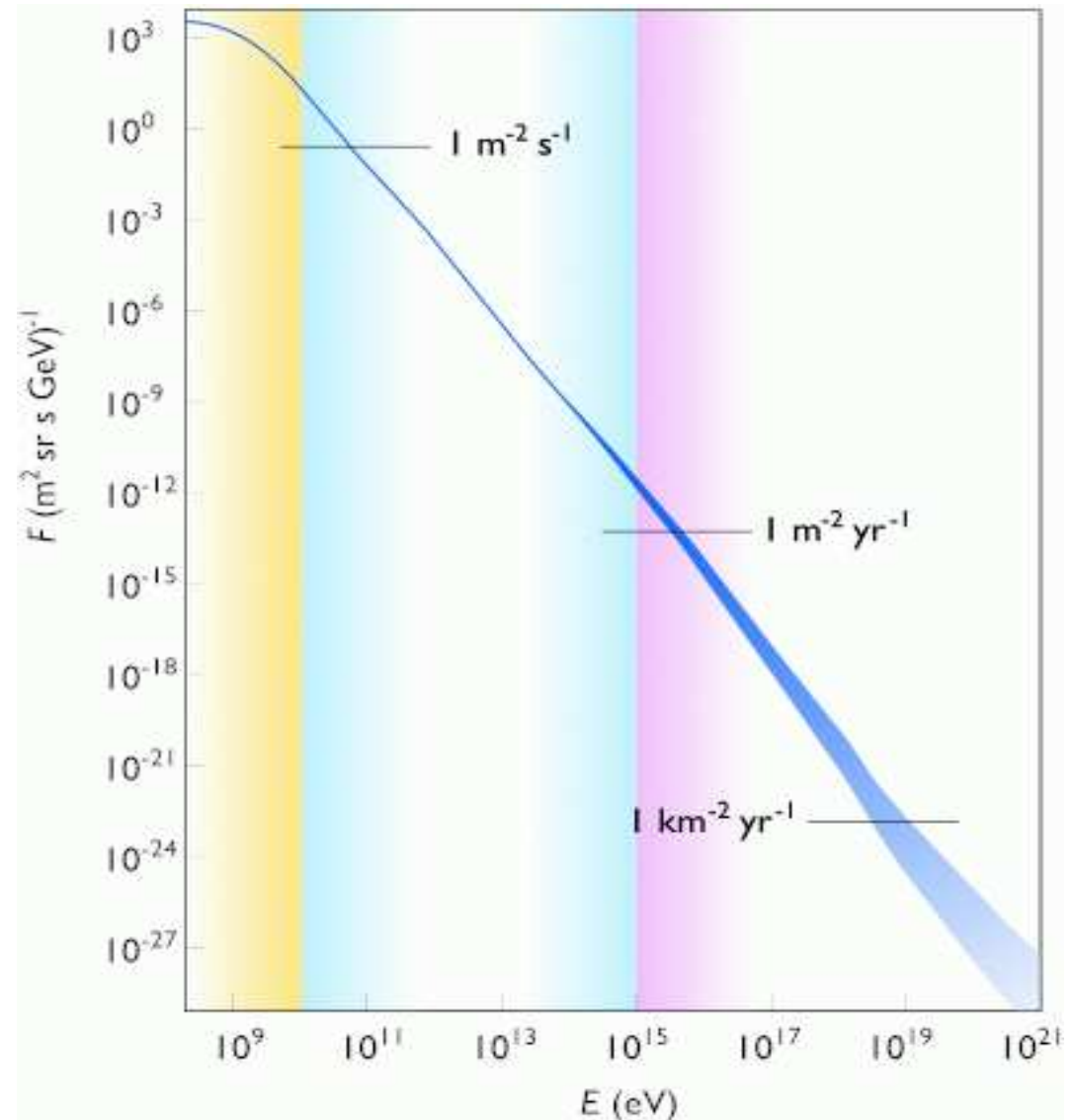
Widmo szybko zanikające z energią

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

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.

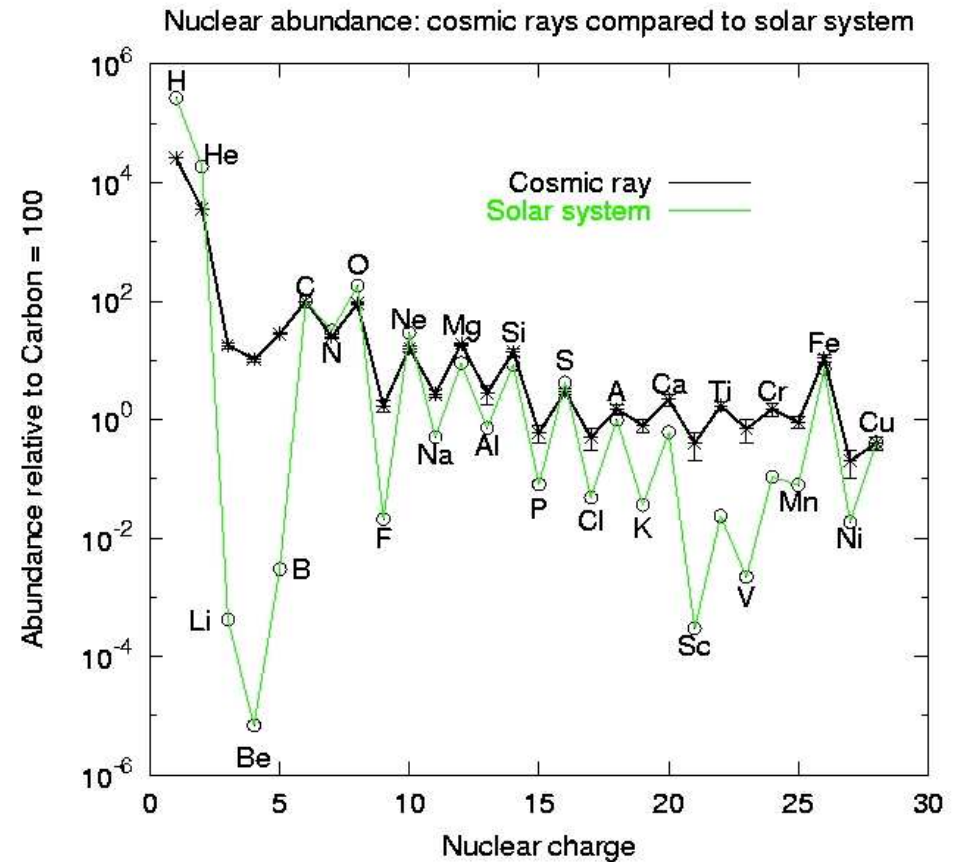


# Promieniowanie kosmiczne

## Skład

Skład podobny do składu Układu Słonecznego.

Przypuszczamy, że odpowiada to też składowi Galaktyki i Wszechświata.

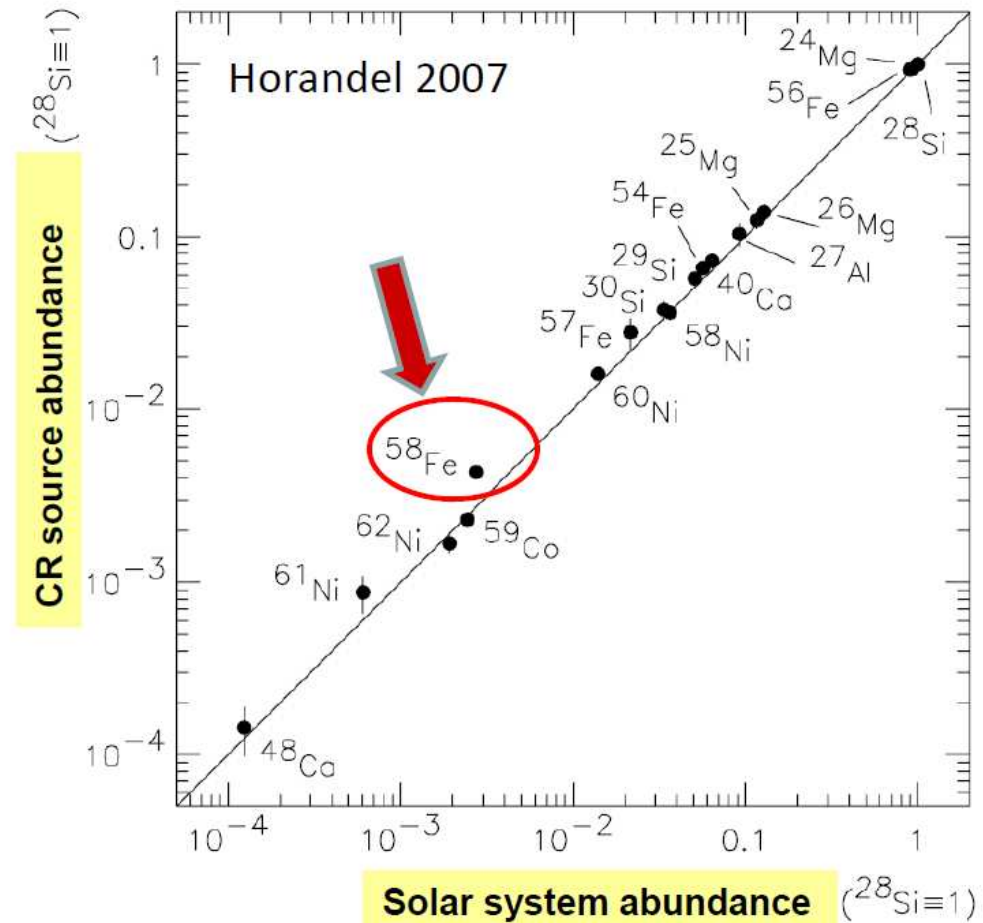


# Promieniowanie kosmiczne

## Skład

Skład podobny do składu Układu Słonecznego.

Przypuszczamy, że odpowiada to też składowi Galaktyki i Wszechświata.



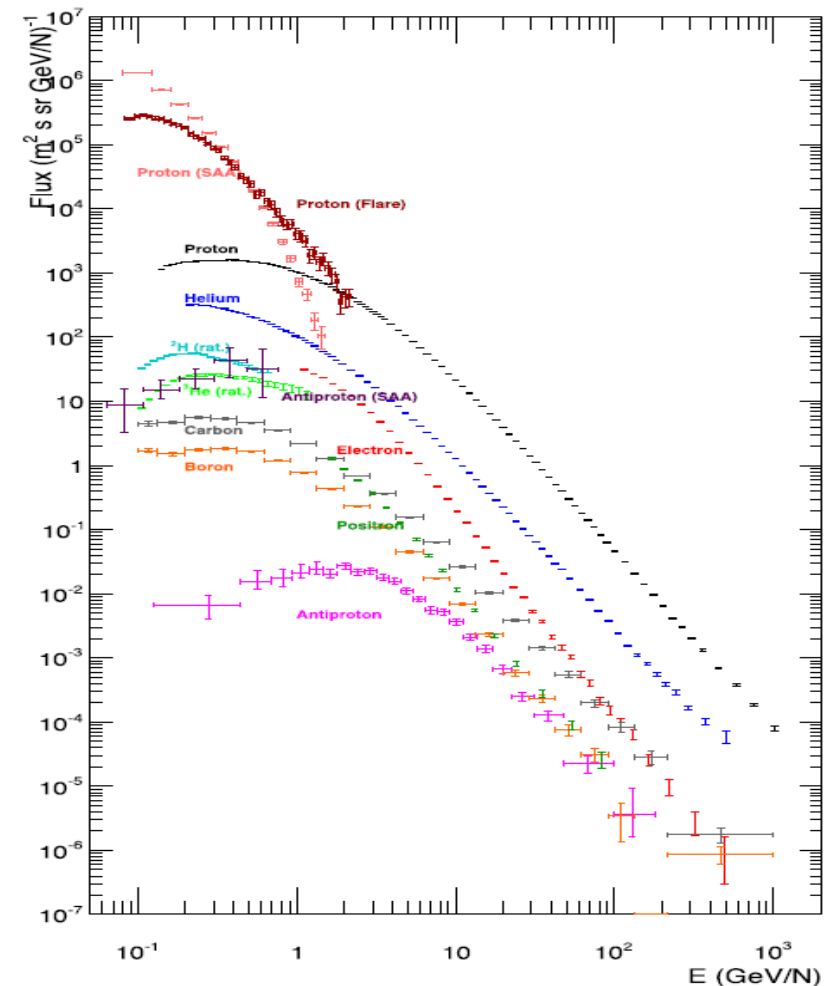
# Promieniowanie kosmiczne

## 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)

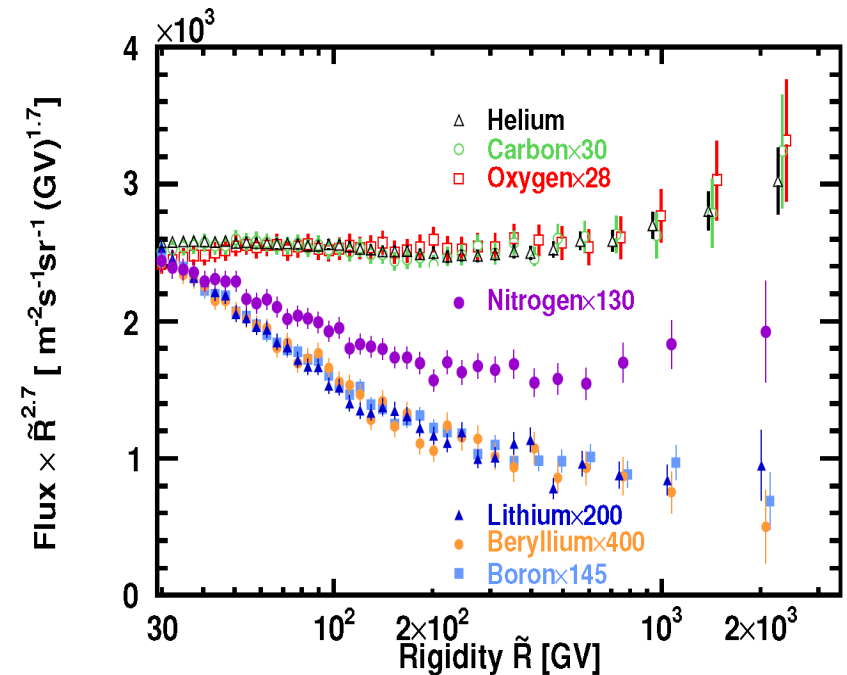


# Promieniowanie kosmiczne

## Widma pierwiastków

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

Pewne rozbieżności obserwowane w obszarze niskich energii dla lekkich pierwiastków są przypisywane obecności wtórnej składowej promieniowania kosmicznego (wynik oddziaływania składowej pierwotnej)



wyniki AMS2 (2018)

# Promieniowanie kosmiczne

## Widma pierwiastków

Niestety eksperymenty satelitarne mają ograniczony (statystyką i dokładnością pomiaru energii/pędów) zakres w energii.

⇒ szukamy innych sposobów

eksperyment balonowy CREAM

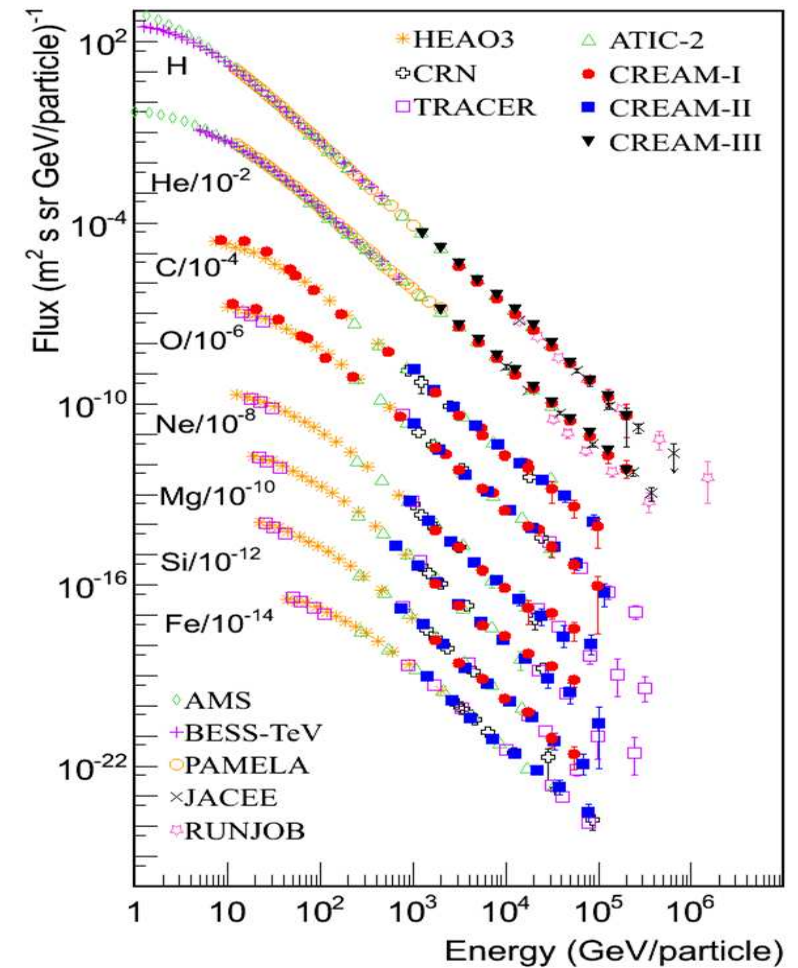


# Promieniowanie kosmiczne

## Widma pierwiastków

Eksperyment CREAM potwierdził bardzo podobną zależność od energii dla widm różnych pierwiastków (jąder)

wyniki eksperymentu (2010)

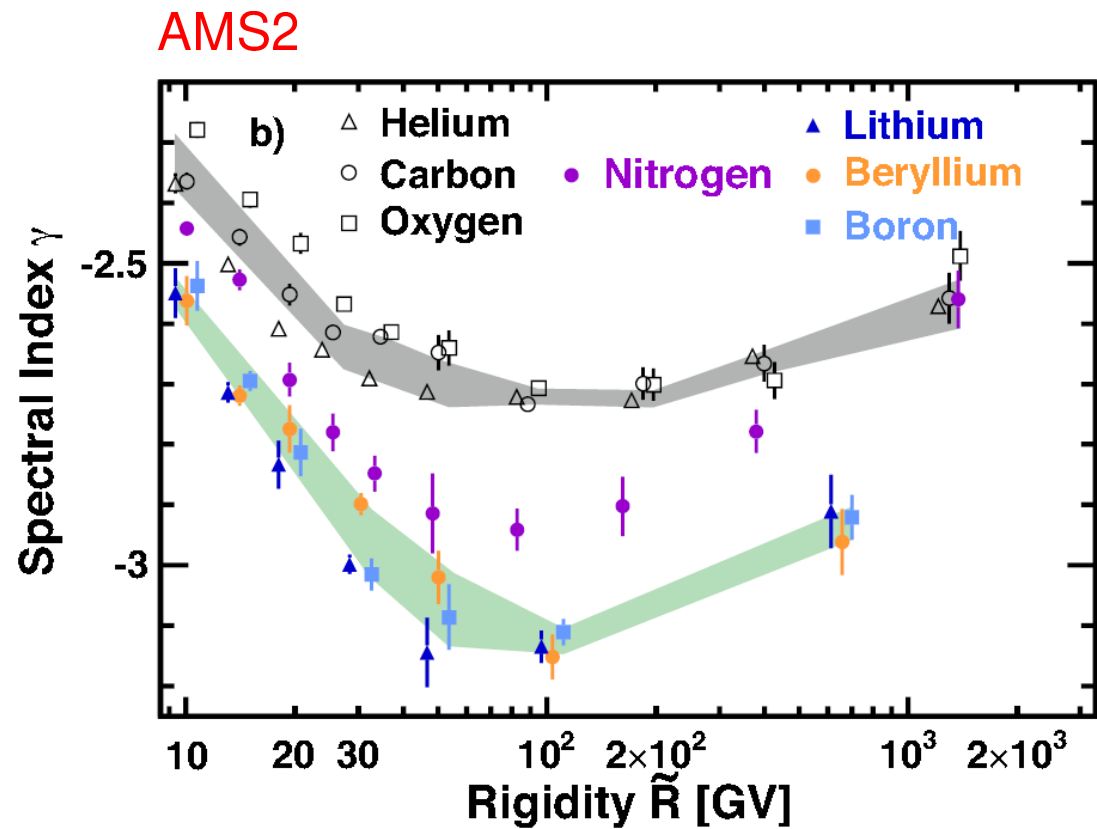
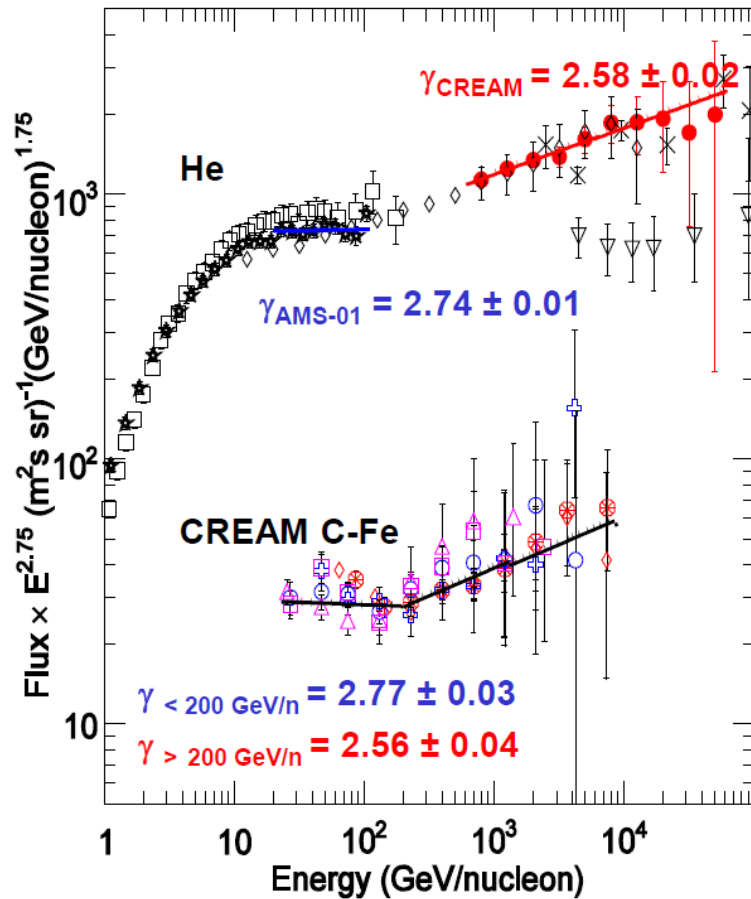




# Promieniowanie kosmiczne

## Widma pierwiastków

Widoczna zmiana charakteru widma przy energiach powyżej ok. 200 GeV

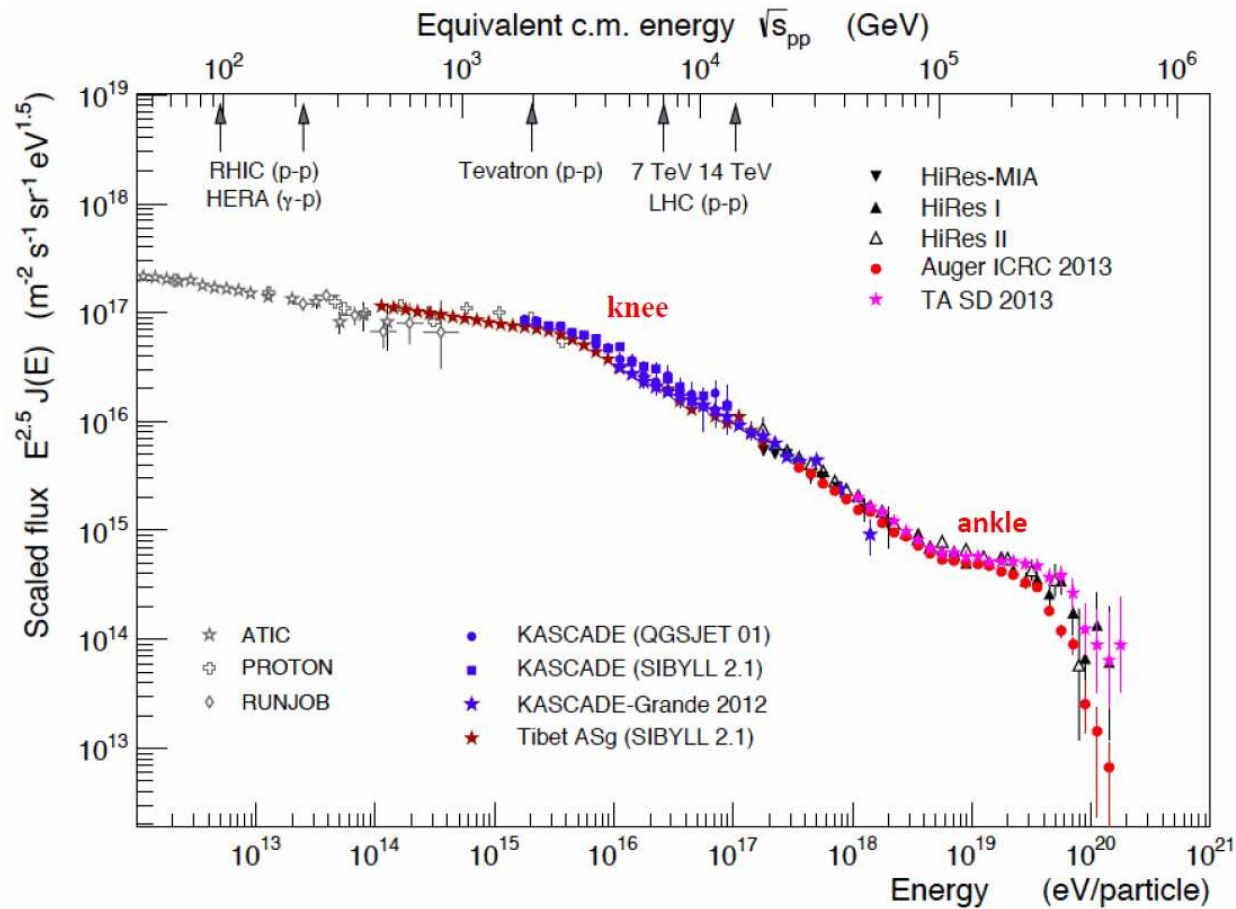


# Promieniowanie kosmiczne

## Pochodzenie

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

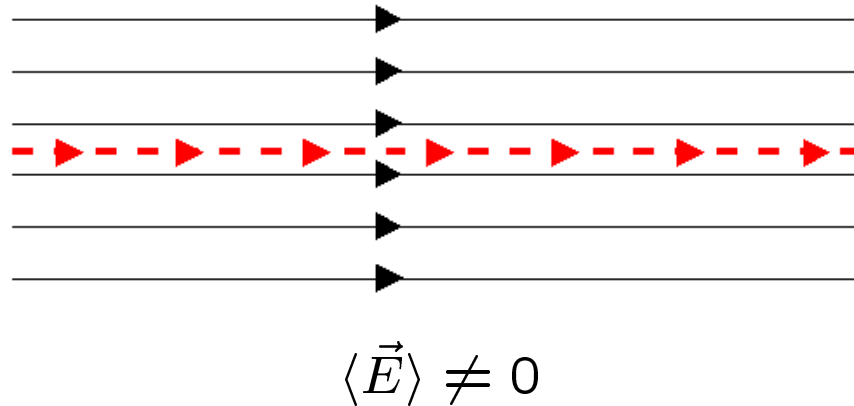
⇒ mogą sugerować różne źródła i/lub mechanizmy produkcji...



# Mechanizm przyspieszania

## Jednoetapowy

Przyspieszanie cząstek w bardzo silnych polach elektrycznych.



Makroskopowe pola mogą powstawać na skutek zmian pól magnetycznych.

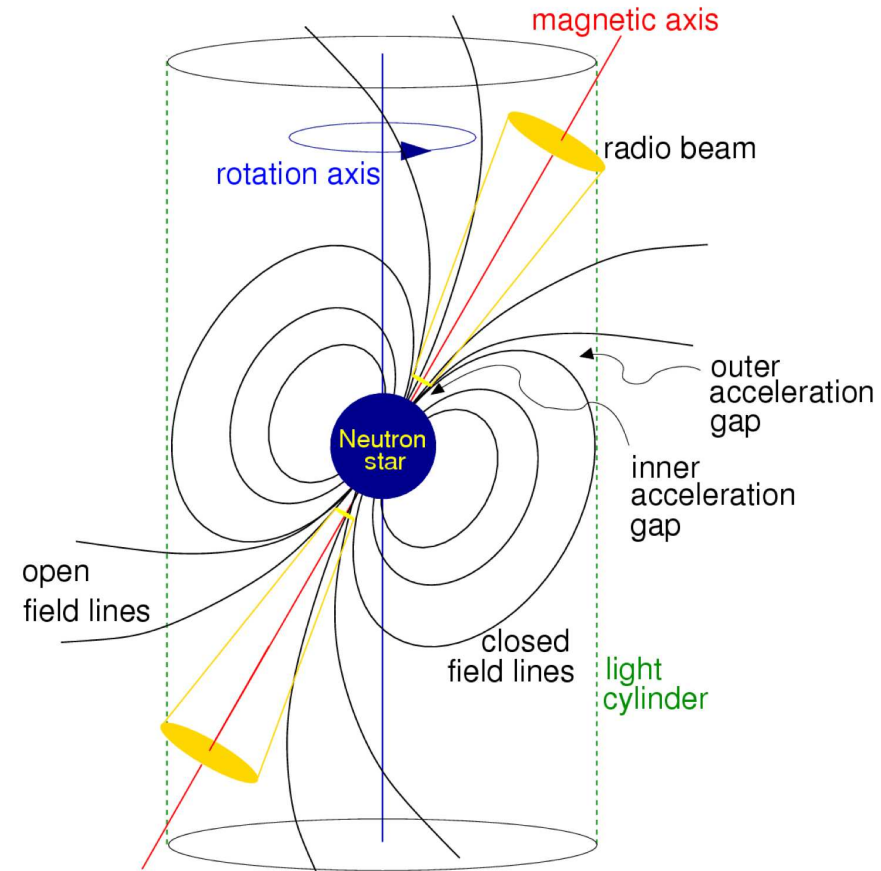
Możliwe źródło: pulsary

# Mechanizm przyspieszania

## Pulsary



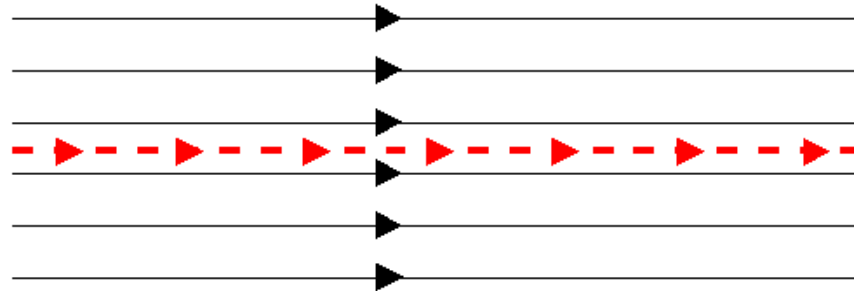
- silne pole magnetyczne szybko wirującej gwiazdy neutronowej  $\Rightarrow$  rozsuniecie ładunków elektrycznych
  - precesja osi magnetycznej  $\Rightarrow$  zmienne pole magnetyczne  $\Rightarrow$  pole elektryczne
- $\Rightarrow$  możliwe przyspieszanie do energii rzędu TeV



# 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  $e^+e^-$

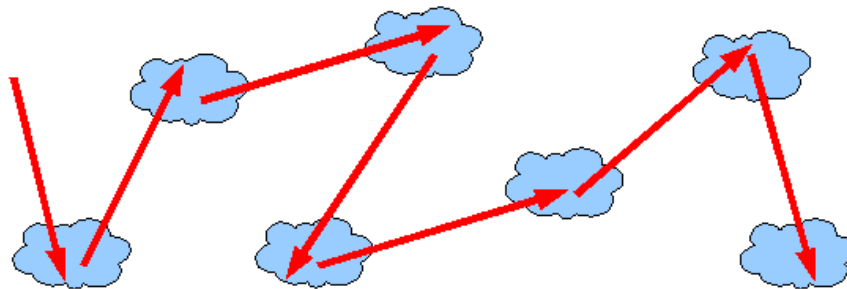
⇒ nie możemy uzyskać skrajnie wysokich energii...

# 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.



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

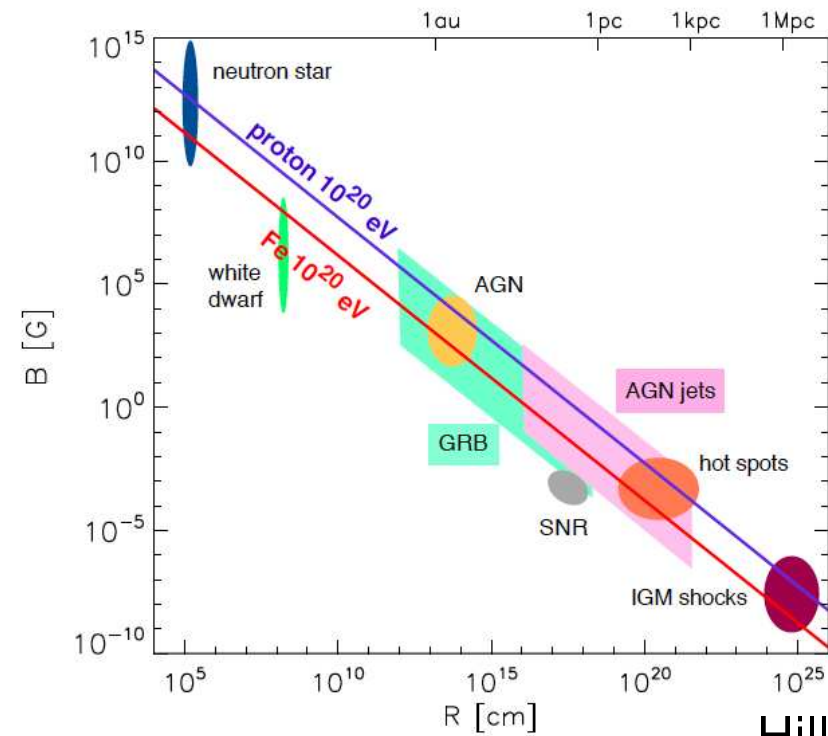
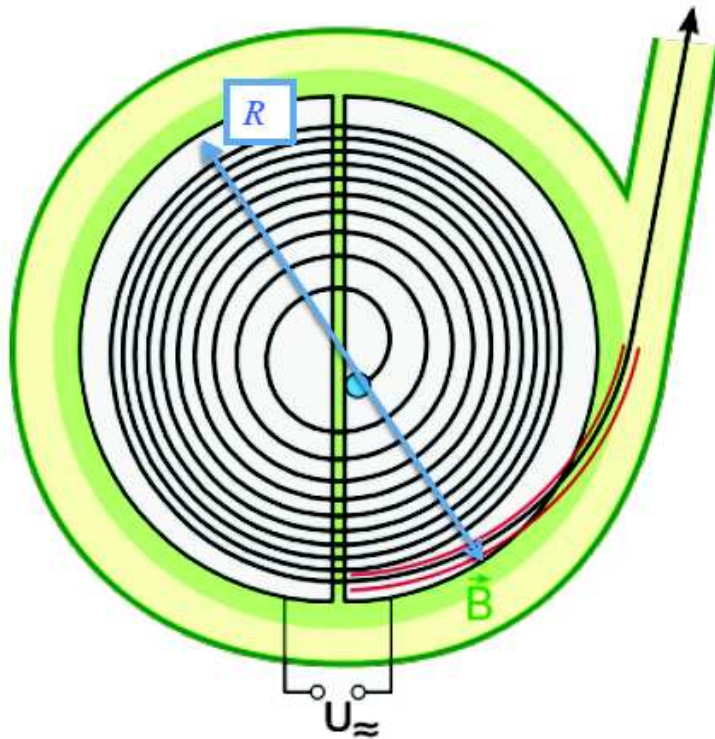
Mimo to możemy uzyskać bardzo wysokie energie...

# 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

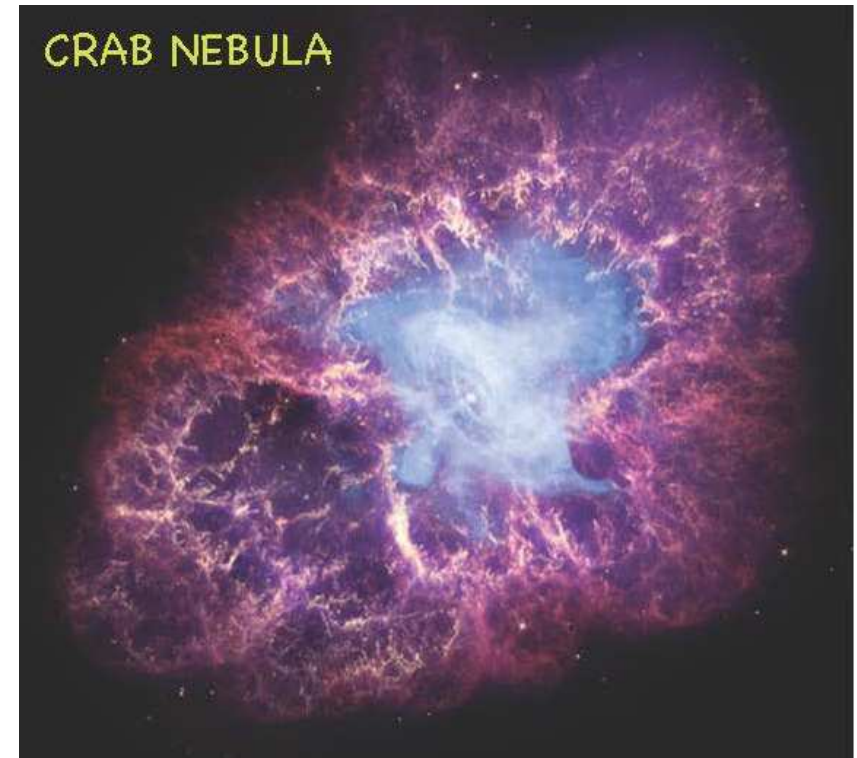
Przyjmuje się, że promieniowanie w zakresie energii do ok.  $10^{15}$  eV pochodzi z **naszej Galaktyki** - uwięzione przez galaktyczne pole magnetyczne.

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

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

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

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



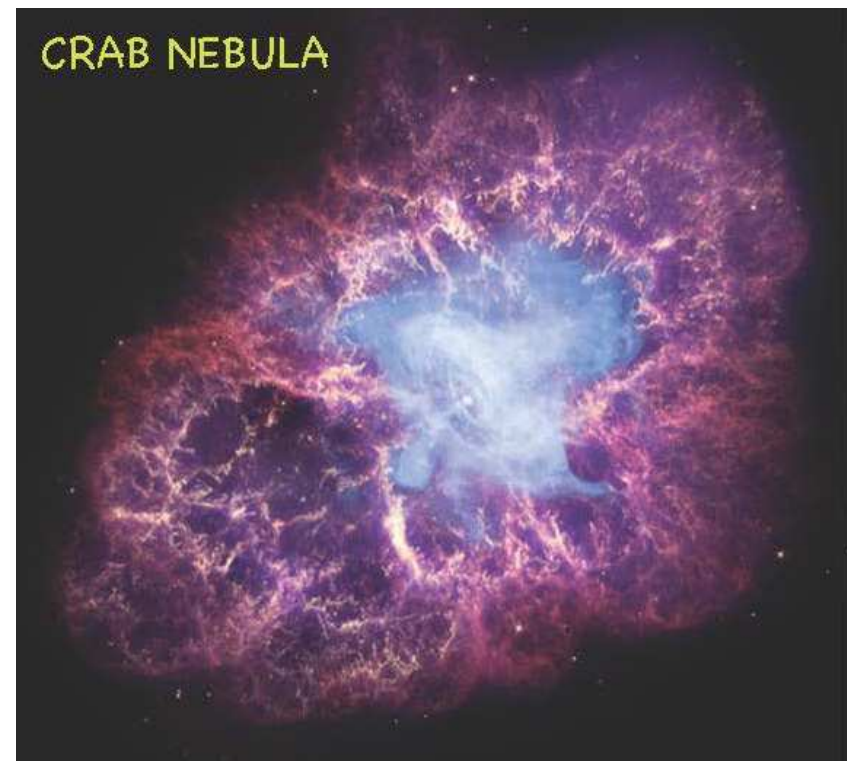
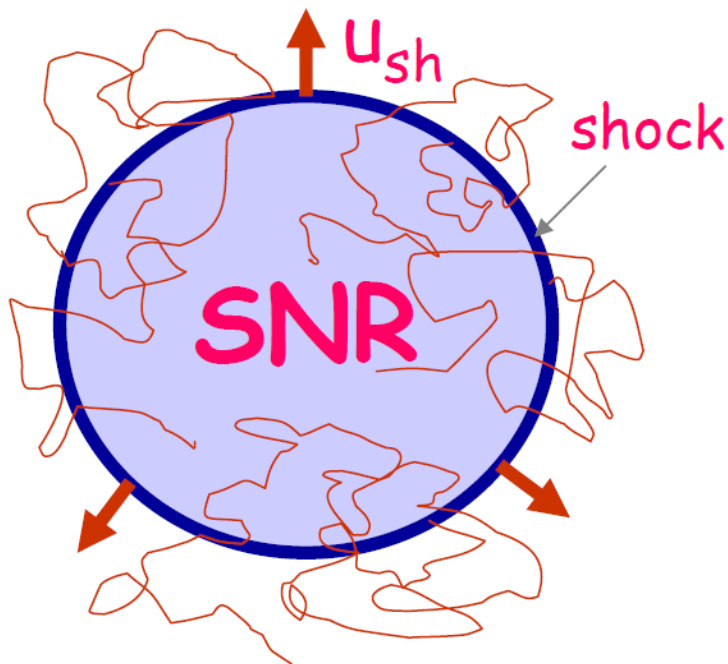
Wystarczy, że 10% energii może zostać przekształcone na energię kinetyczną cząstek.  
Ale jak?



# 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”

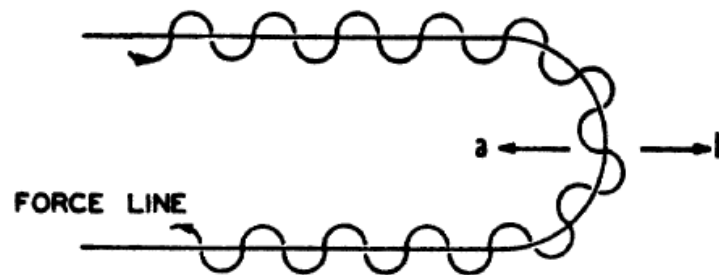
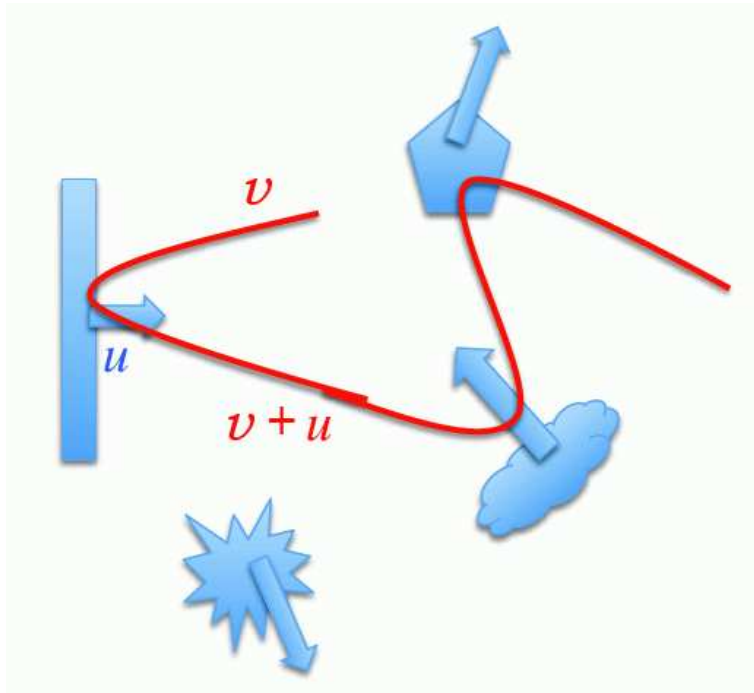


FIG. 1. Type *B* reflection of a cosmic-ray particle.

# 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  $\theta$ :

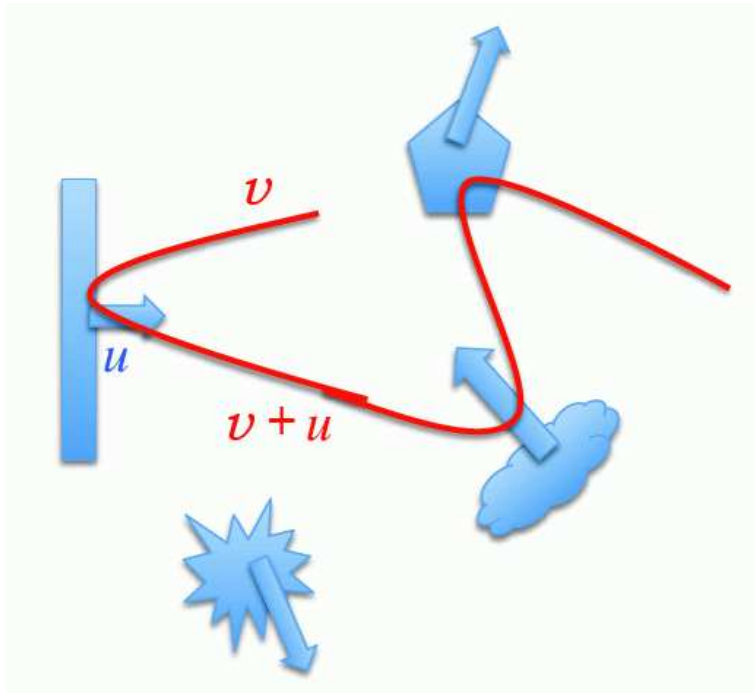
$$E' = \gamma^2 E \left( 1 + \beta^2 + 2\beta \frac{v}{c} \cos \theta \right)$$

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

# 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

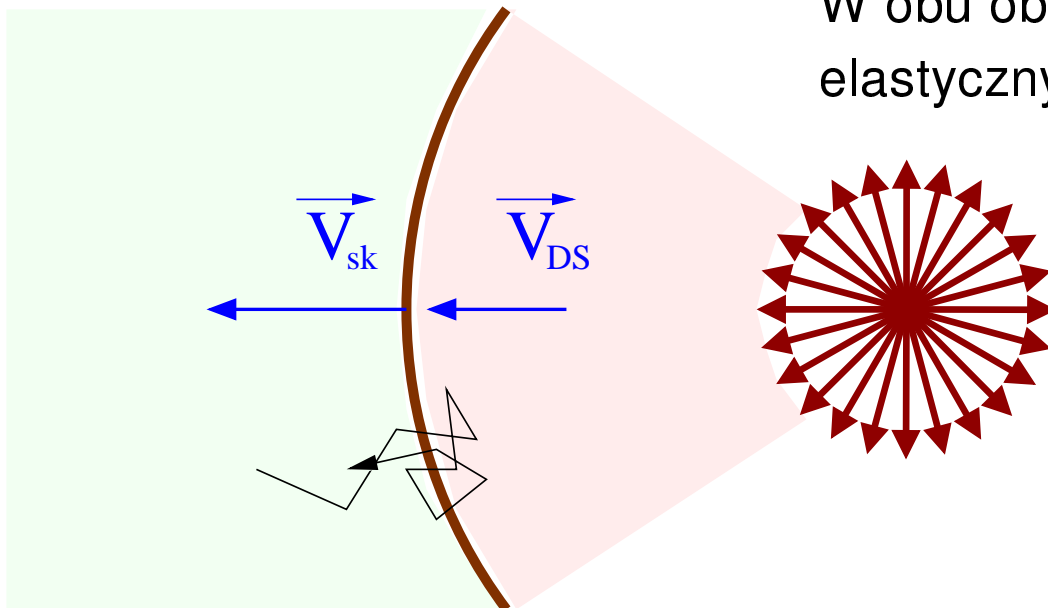
## Mechanizm Fermiego pierwszego rzędu

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!**).



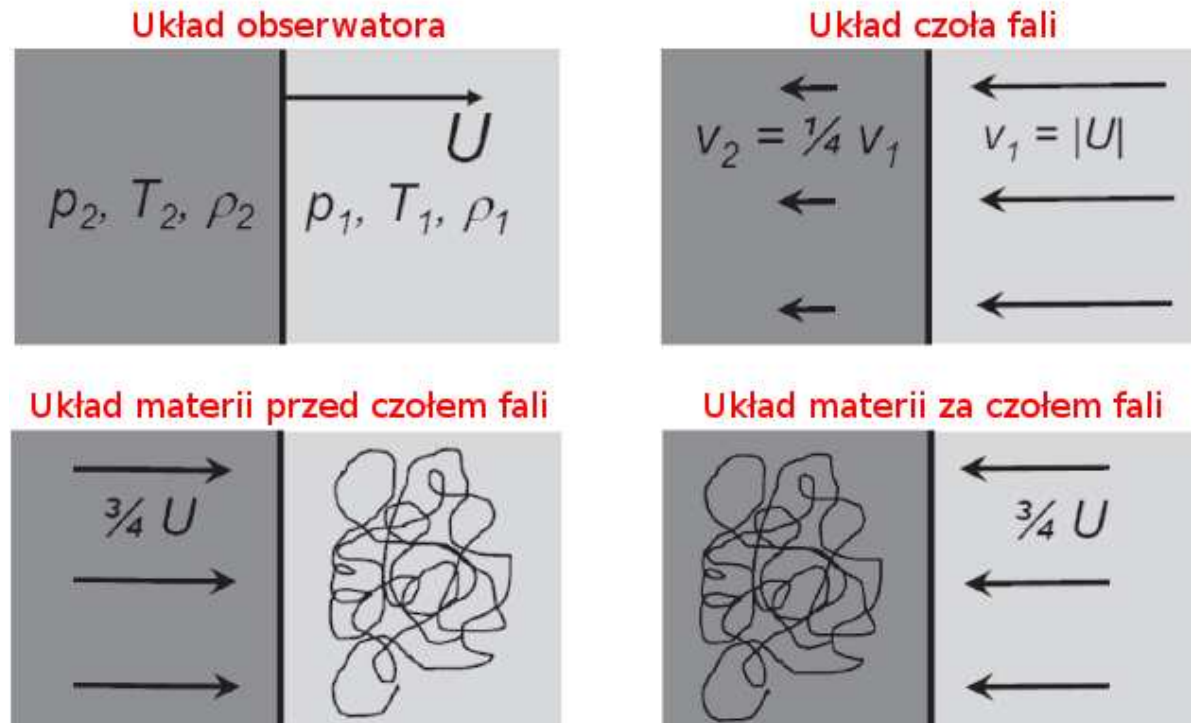
# Mechanizm przyspieszania

## Mechanizm Fermiego pierwszego rzędu

first-order Fermi acceleration

Rozkład prędkości na czole fali w różnych układach odniesienia:

Nick Murphy  
Plasma Astrophysics

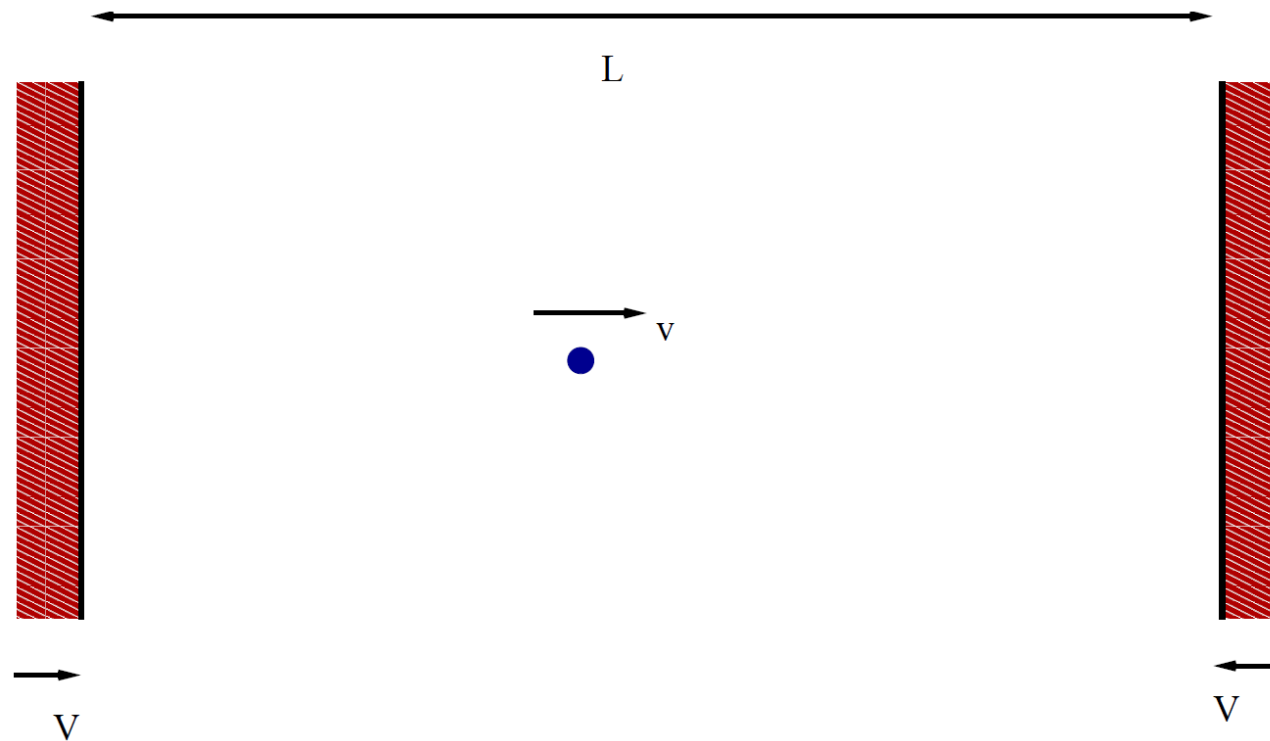


Przechodząc wielokrotnie przez **czoło fali** cząstka napotyka za każdym razem na materię/pola poruszające się w przeciwnym kierunku...

# Mechanizm przyspieszania

Mechanizm Fermiego pierwszego rzędu first-order Fermi acceleration

Najbardziej uproszczony schemat ideowy akceleracji



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

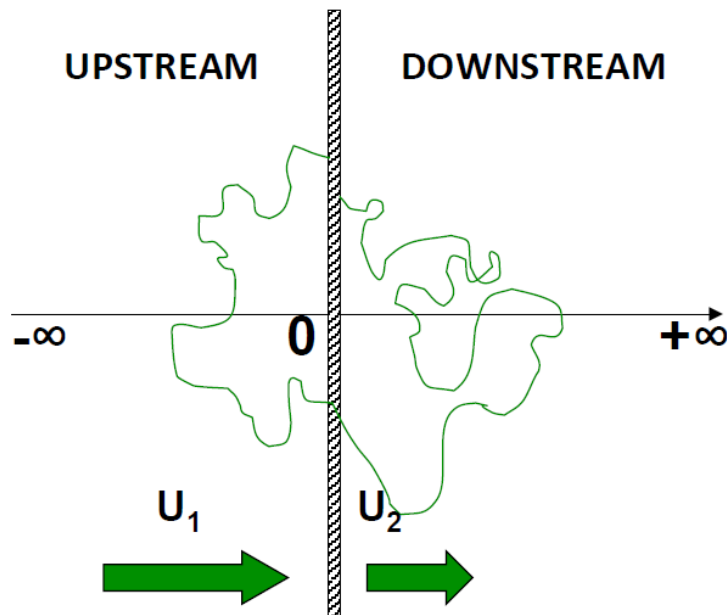


# Mechanizm przyspieszania

## 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

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

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

$$\cos \theta' < 0$$

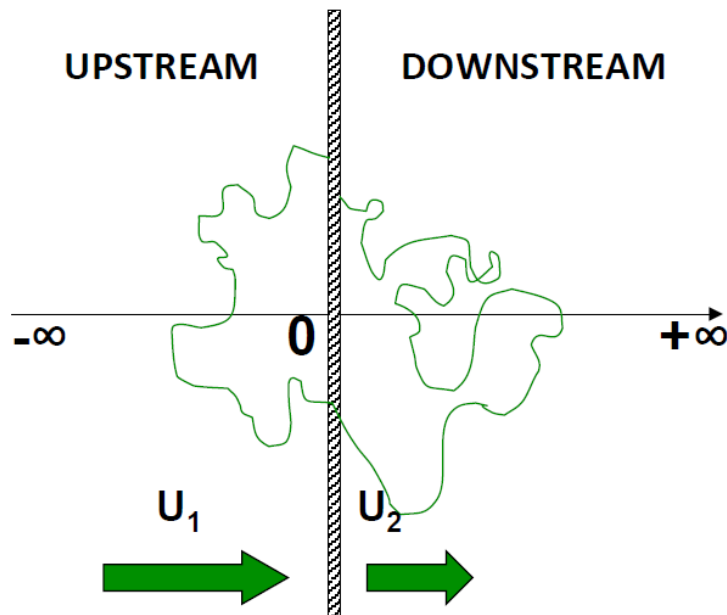
Pasquale Blasi, NASA school 2012

# 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:

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

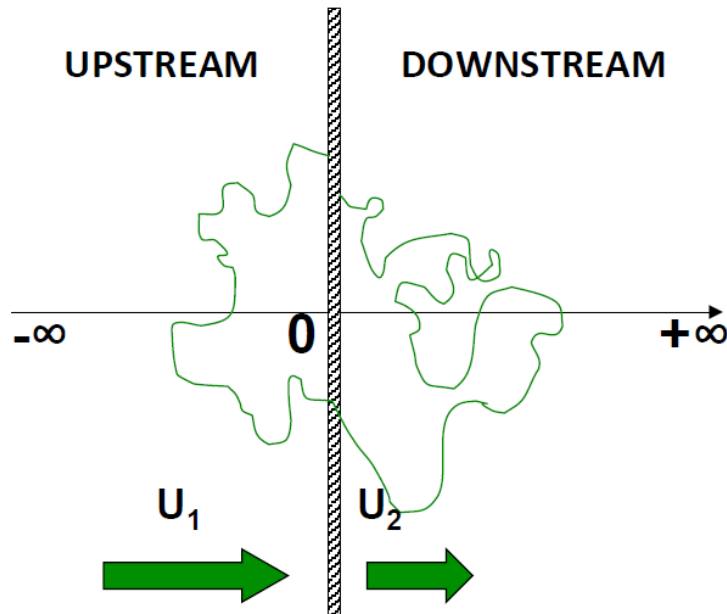
Wielokrotne przejście przez czoło fali może zapewnić uzyskanie bardzo wysokich energii...

# 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

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

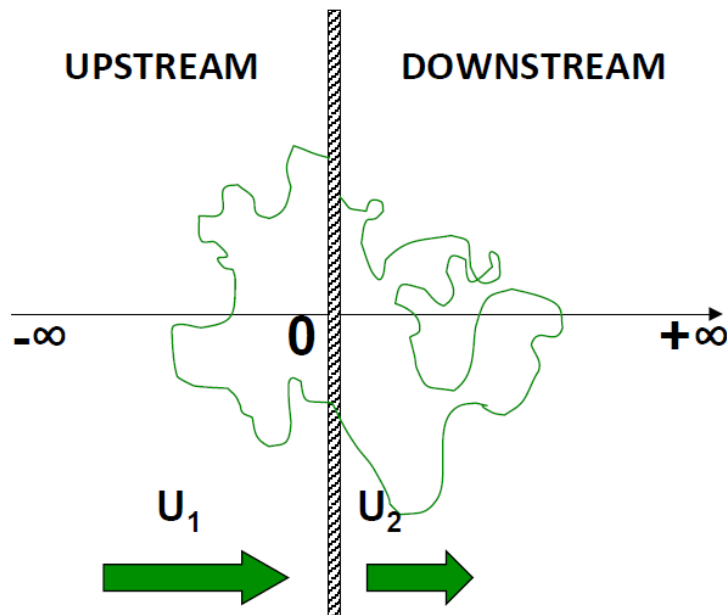
# Mechanizm przyspieszania

## 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.

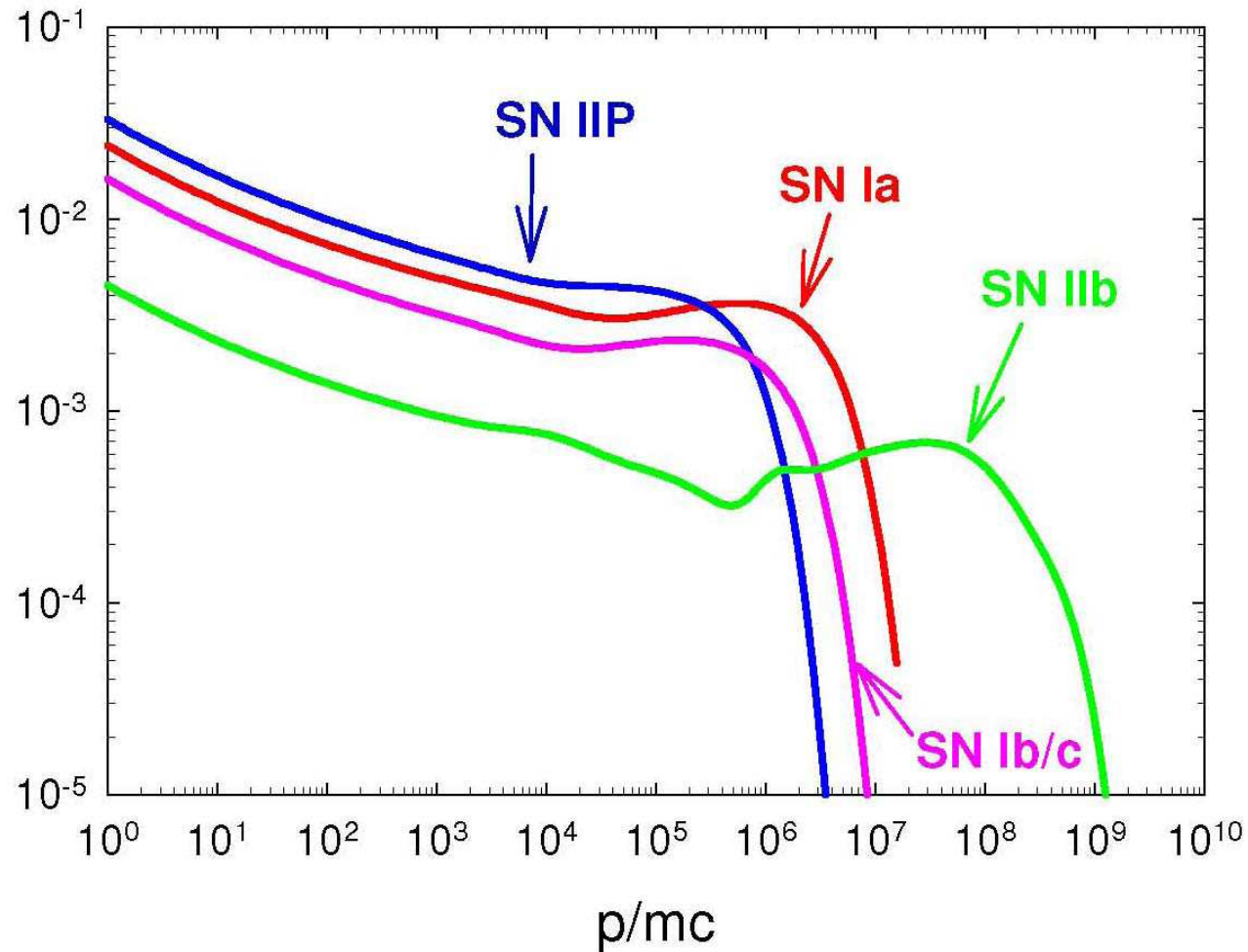
Okolo 200 lat po wybuchu SN najszybsze cząstki uwalniają się z fali...

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)

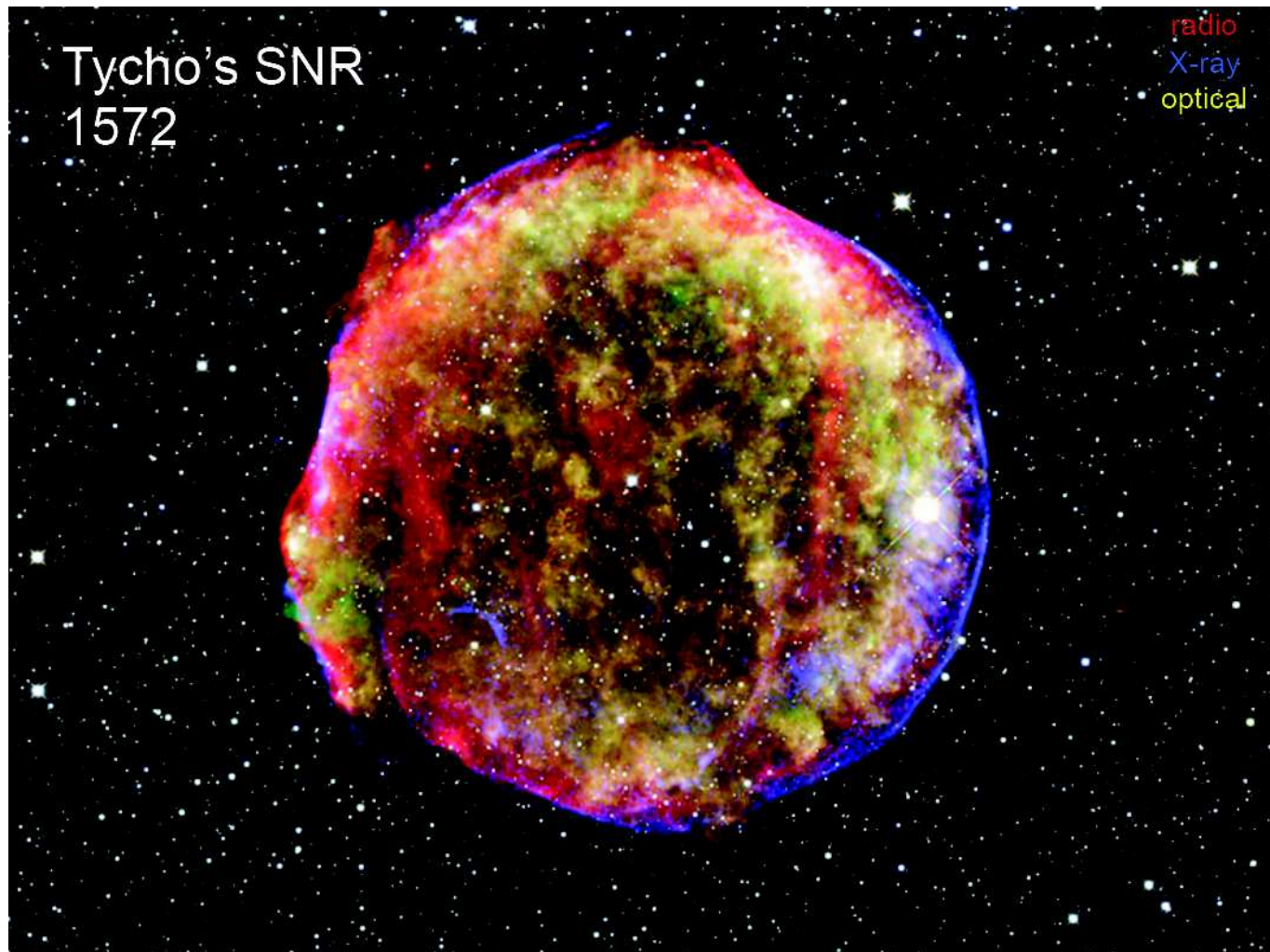
## Symulacje numeryczne



# Supernova Remnant (SNR)

Obserwacja Tycho SNR

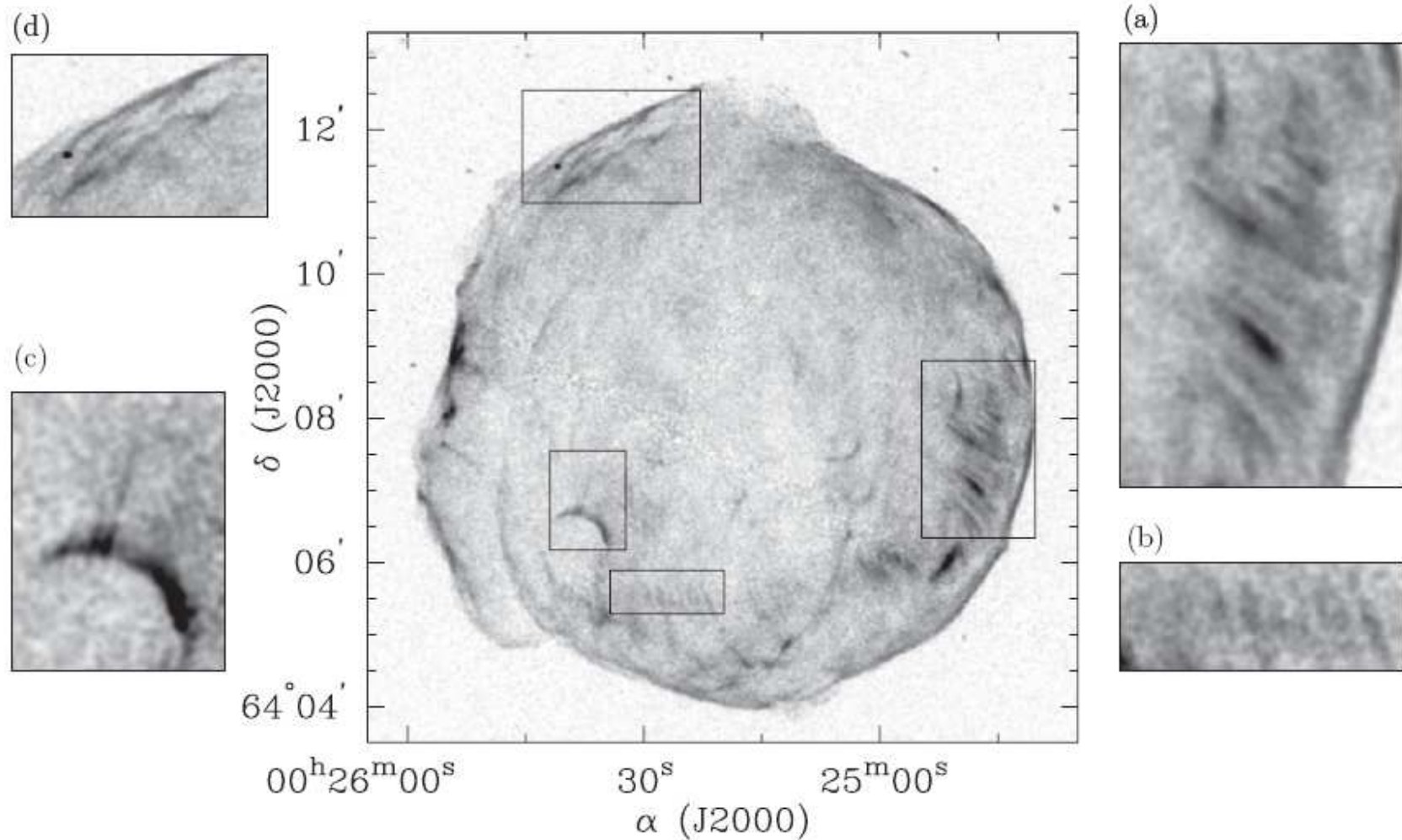
SN 1572 w gwiazdozbiorze Kasjopei



# Supernova Remnant (SNR)

Obserwacja Tycho SNR

Chandra X-ray 4.0–6.0 keV image





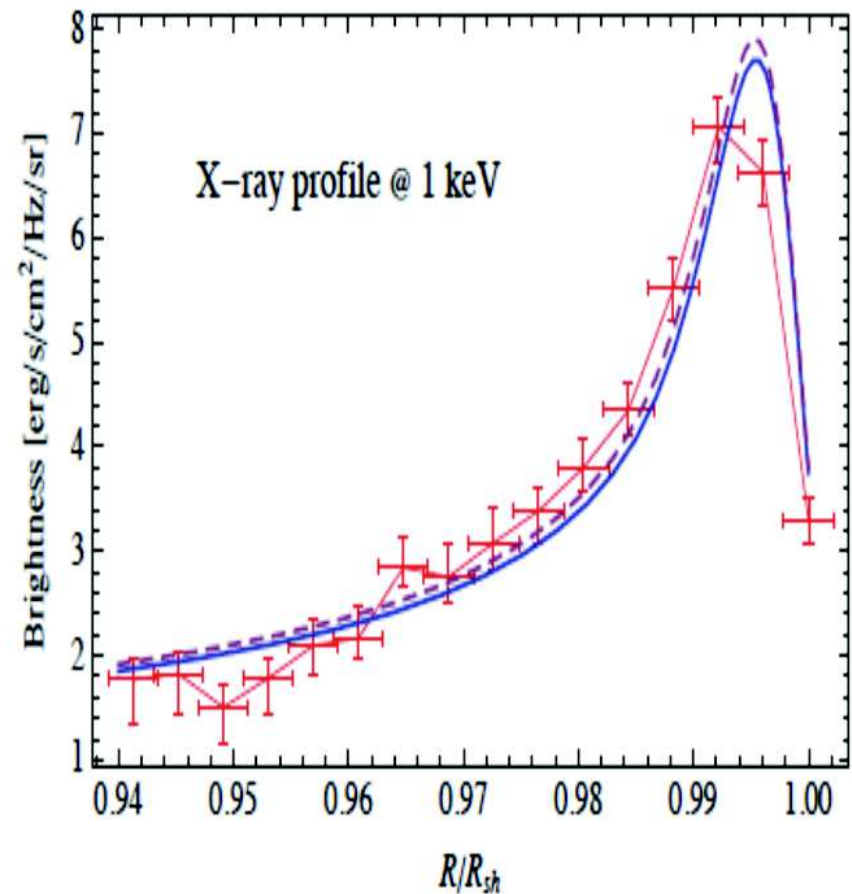
# Supernova Remnant (SNR)

## Obserwacja Tycho SNR

SN 1572 w gwiazdozborze Kasjopei

Morlino&Caprioli 2011

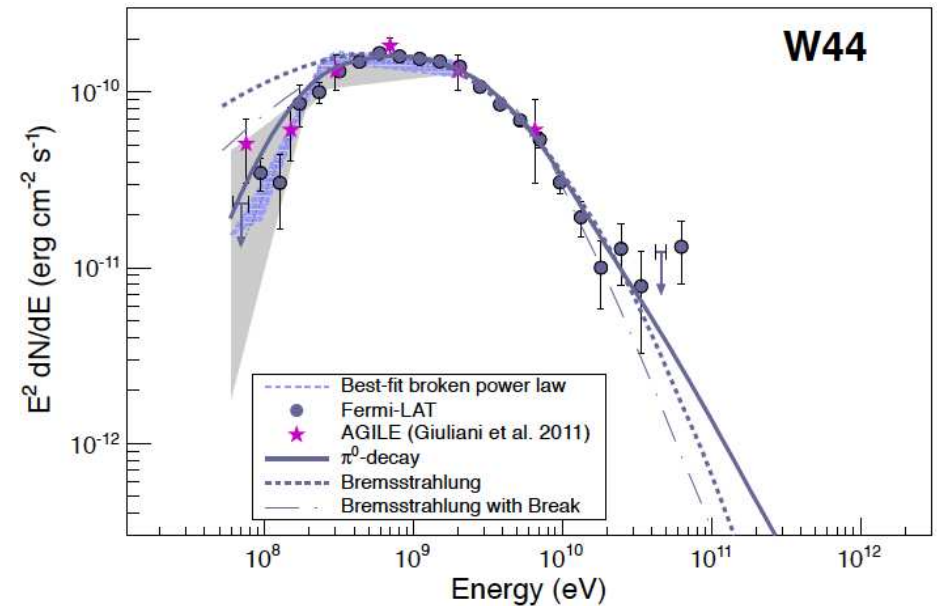
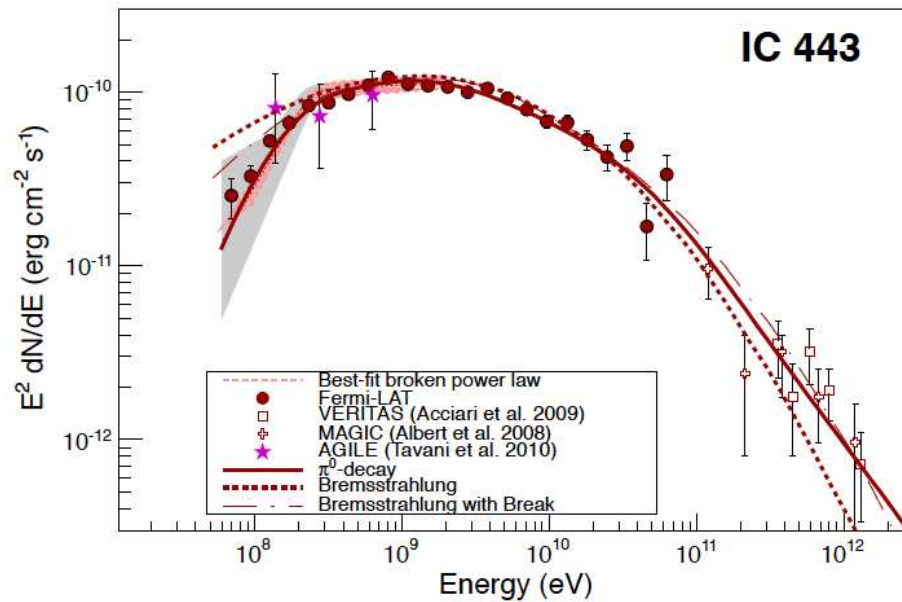
Obserwowany rozkład przestrzenny źródeł emisji promieniowania X zgadza się bardzo dobrze z modelowaniem rozchodzenia się fali uderzeniowej.



# Supernova Remnant (SNR)

## Obserwacje

W widmie promieniowania  $\gamma$  z SNR zaobserwowano szerokie maksimum pochodzące z rozpadu  $\pi^0$  produkowanych w zderzeniach  $pp$

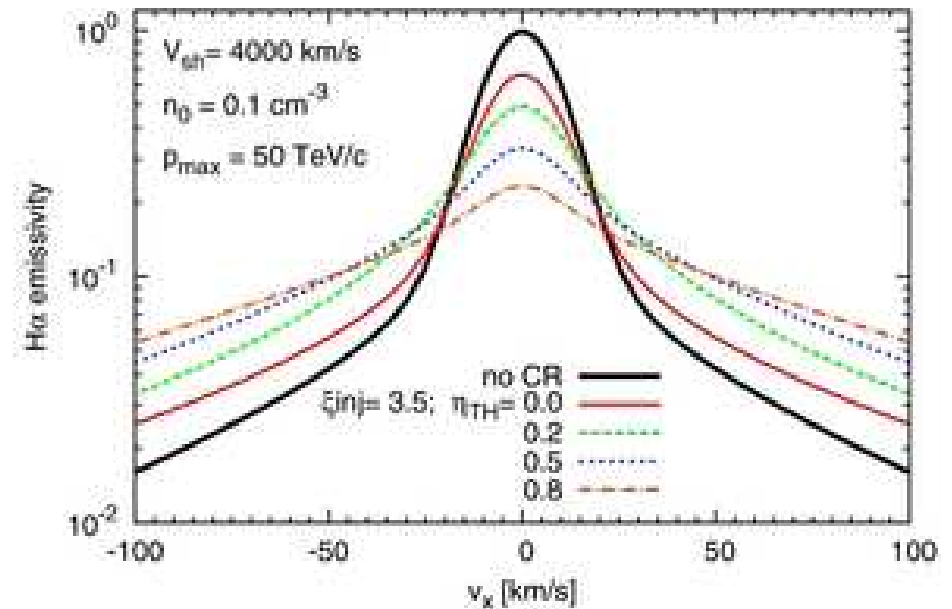
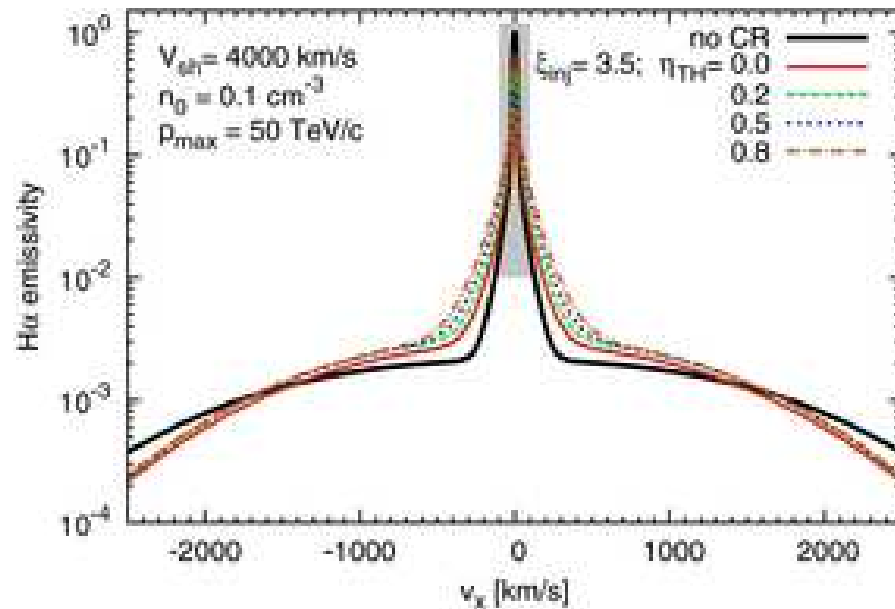


Kształtu tej części widma nie potrafimy w inny sposób wymodelować...

# Supernova Remnant (SNR)

## Obserwacje

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



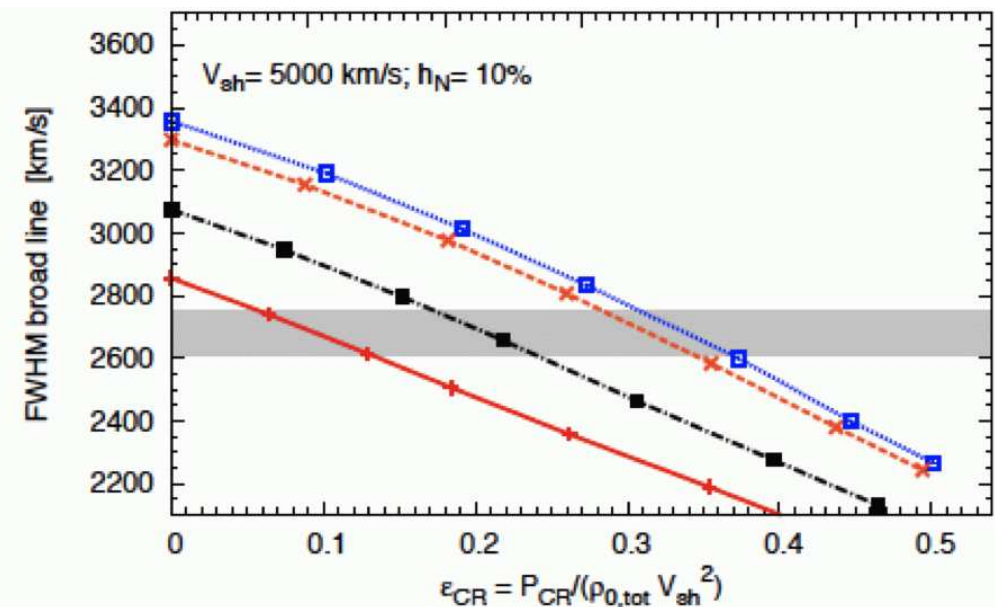
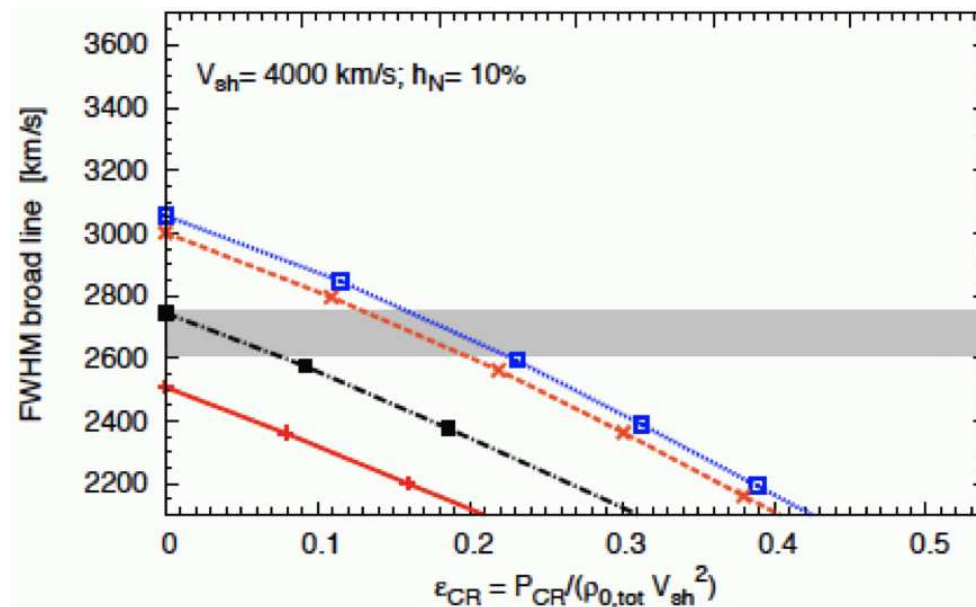
Przewidywane poszerzenie zależy m.in. od założonej wydajności przyspieszania

# 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  $\pi^0$  w widmie  $\gamma$
- Obserwacje struktur w promieniowaniu X sugerują, że przyspieszaniu towarzyszą niestabilności w plazmie wzmacniające pole magnetyczne
- Poszerzenie linii Balmerowskich wskazuje na wysoką efektywność przyspieszania

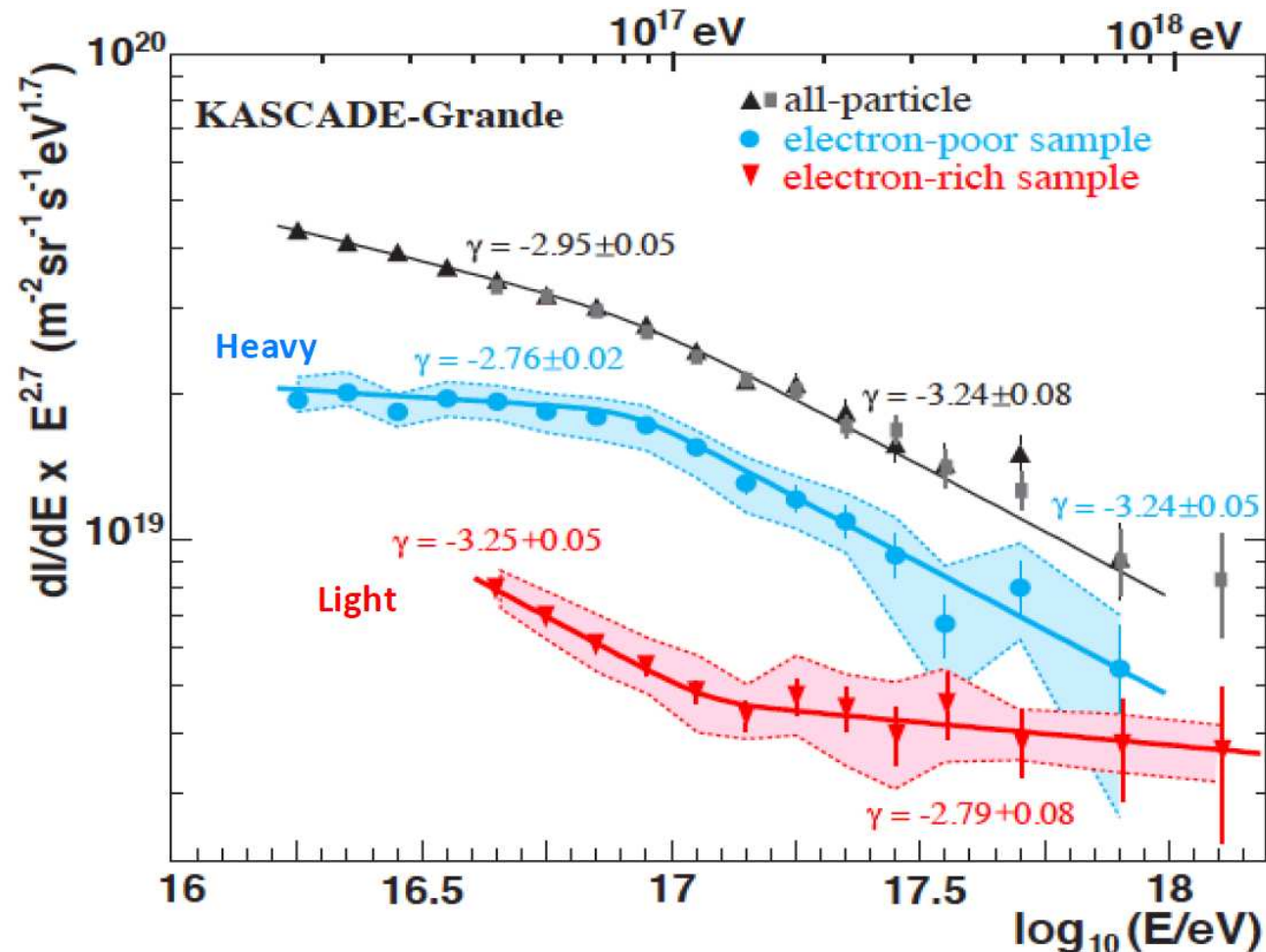
Choć szczegółowe mechanizmy wciąż dalekie od pełnego zrozumienia

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

# Promieniowanie kosmiczne

## Widmo

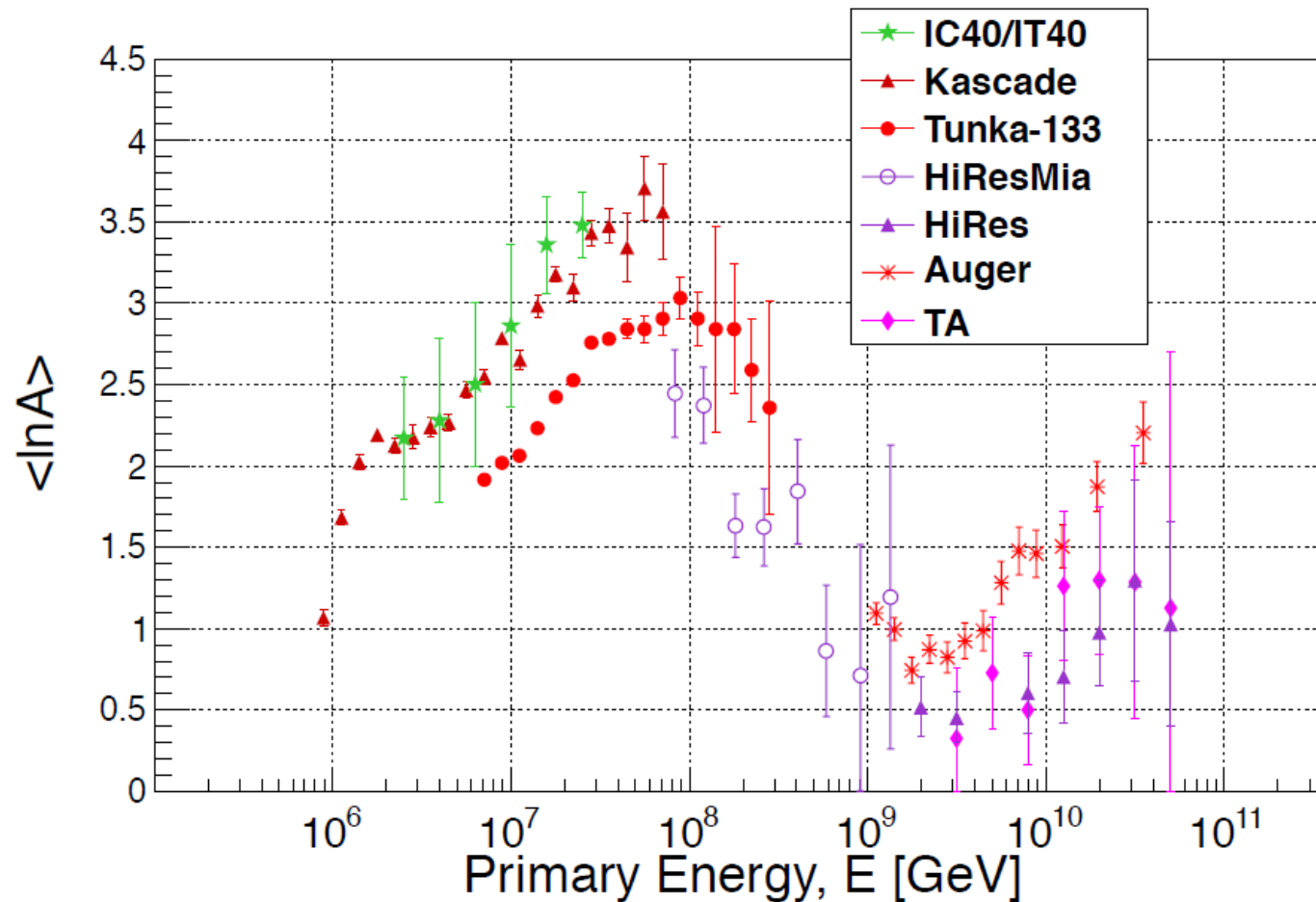
Dla energii powyżej  $10^{17}$  eV obserwujemy zmiany w nachyleniu widma różne dla lekkich i ciężkich pierwiastków  $\Rightarrow$  zmiana w składzie promieniowania?



# Promieniowanie kosmiczne

## Widmo

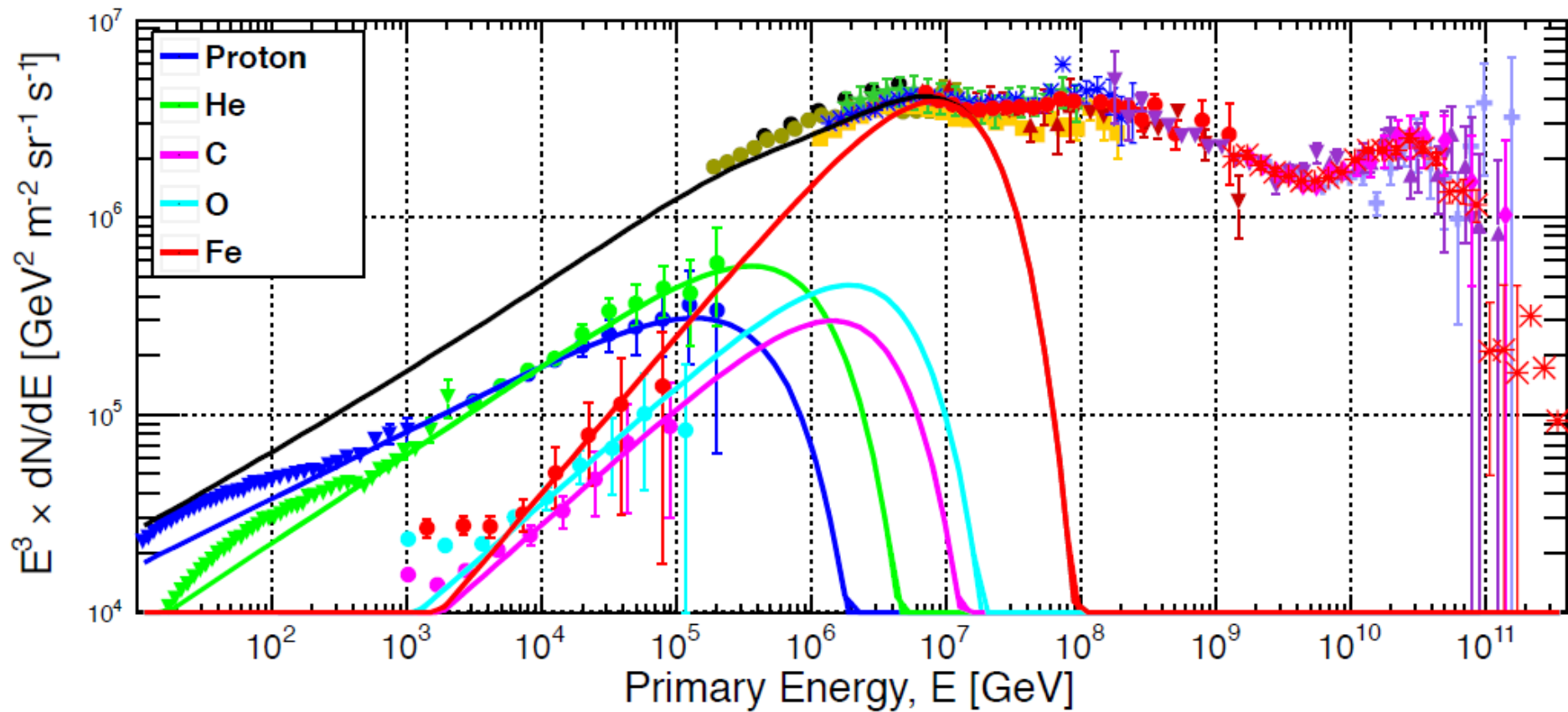
Zmiany w składzie promieniowania dobrze widoczne po zestawieniu danych różnych eksperymentów



# Promieniowanie kosmiczne

Widmo analiza współpracy CREAM

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

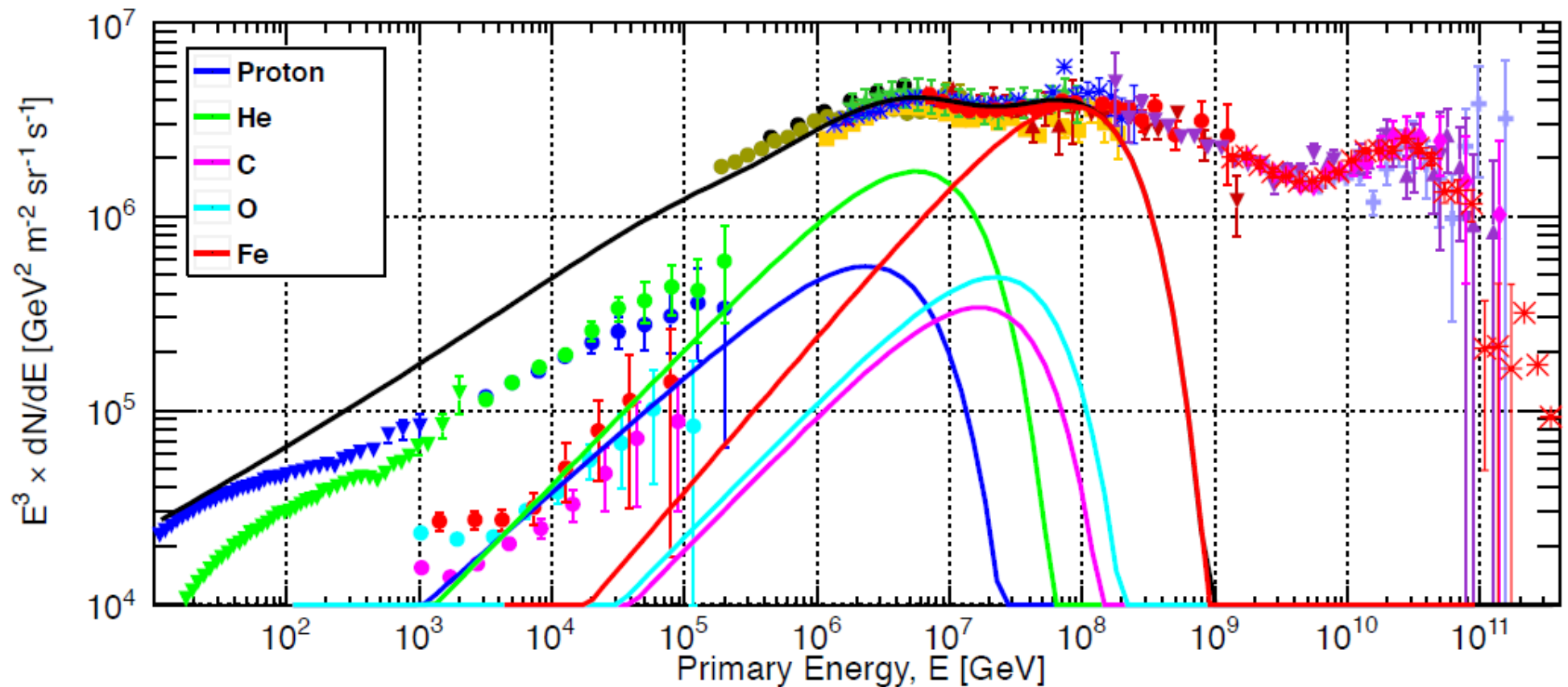




# Promieniowanie kosmiczne

## Widmo analiza współpracy CREAM

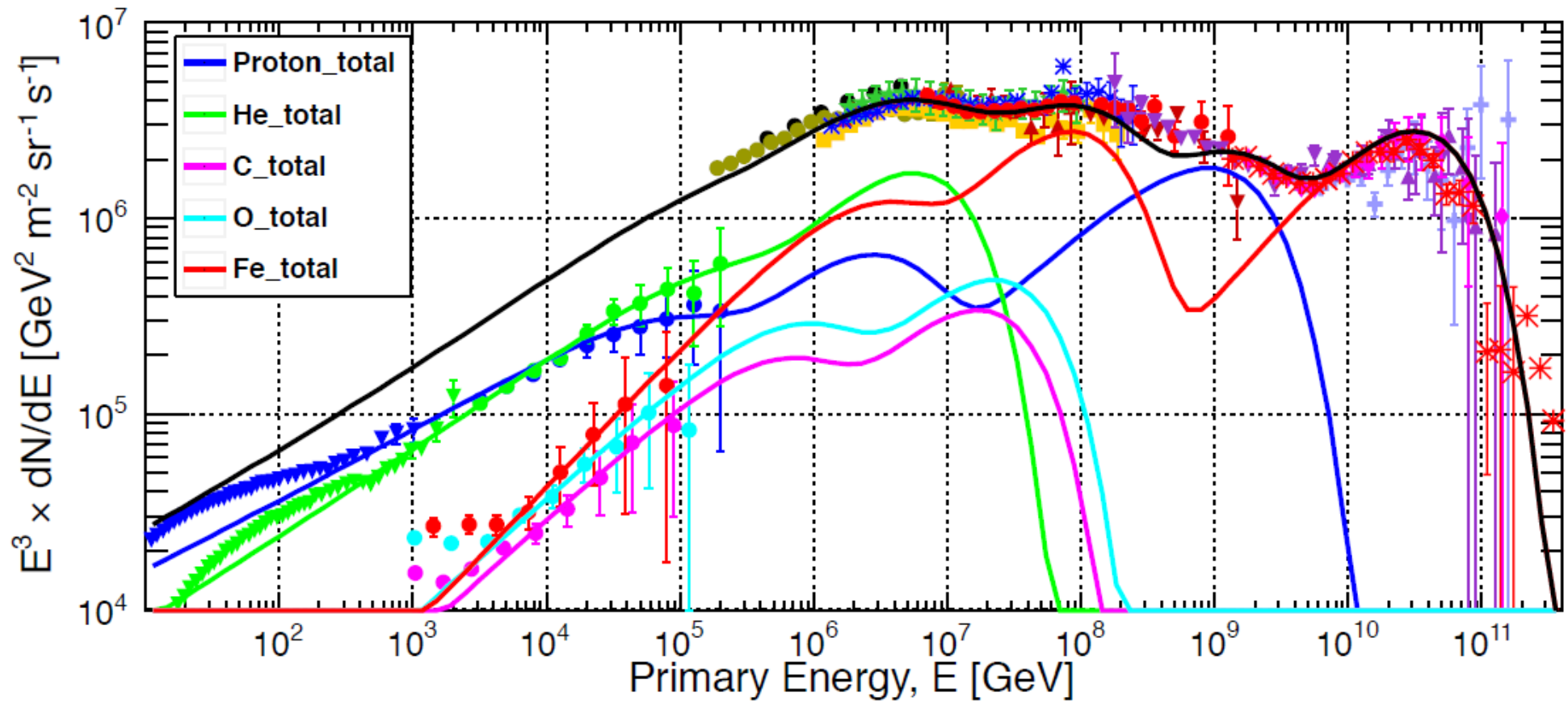
Dodanie drugiej składowej typu SNR, ale o maksymalnej energii rzędu 4 PeV (p)



# Promieniowanie kosmiczne

## Widmo analiza współpracy CREAM

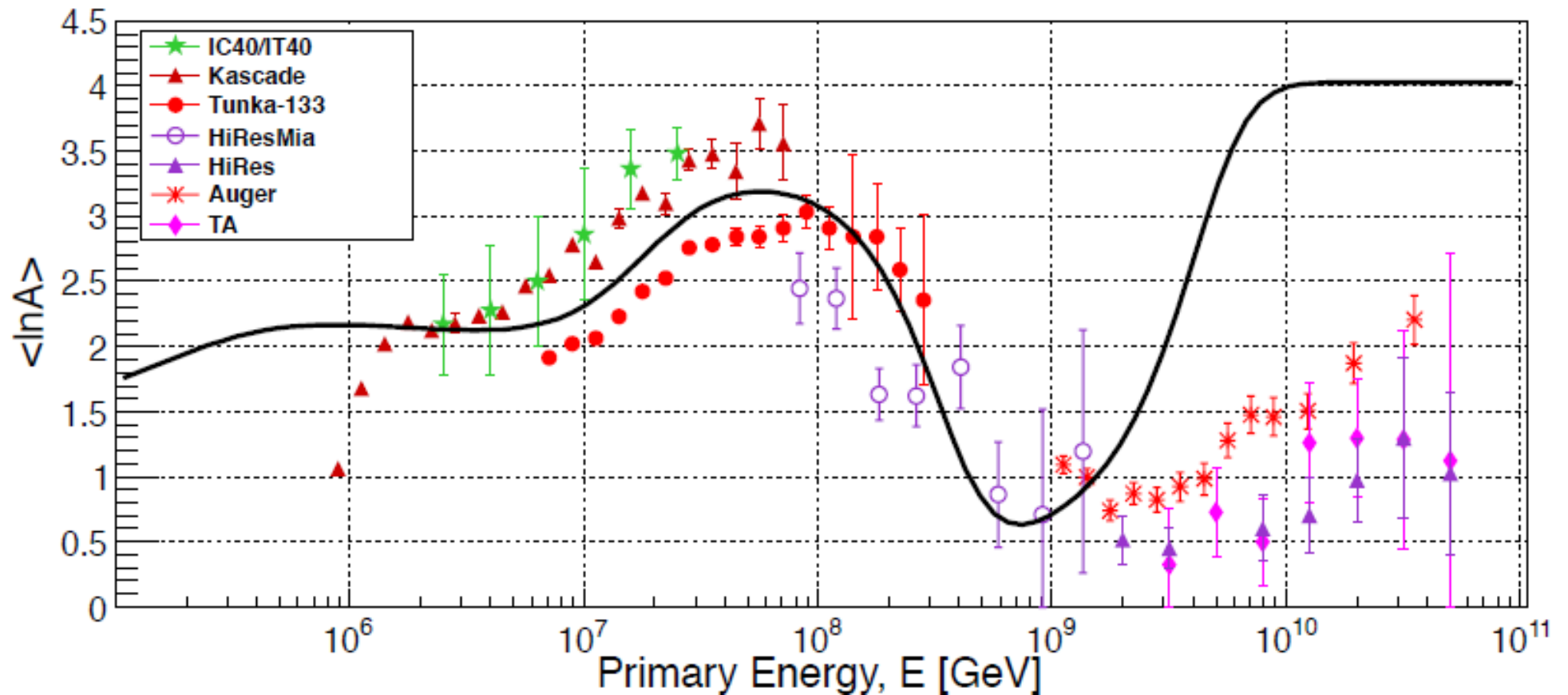
Dodanie trzeciej składowej niezbędne, żeby opisać pełen zakres energii



# Promieniowanie kosmiczne

## Widmo analiza współpracy CREAM

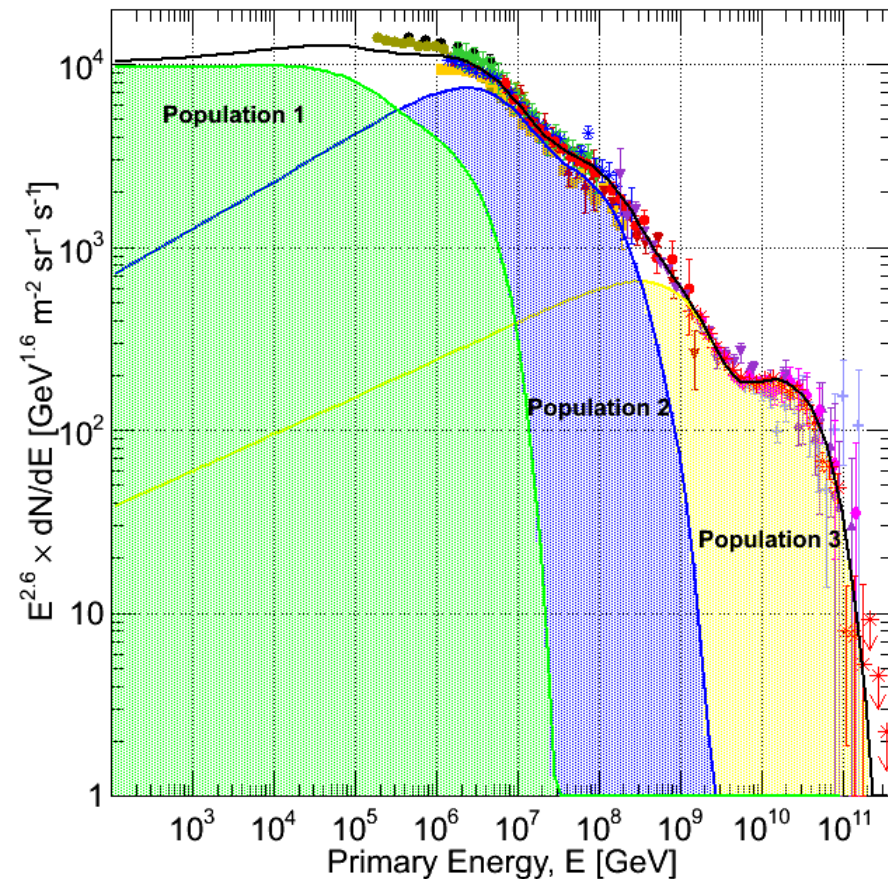
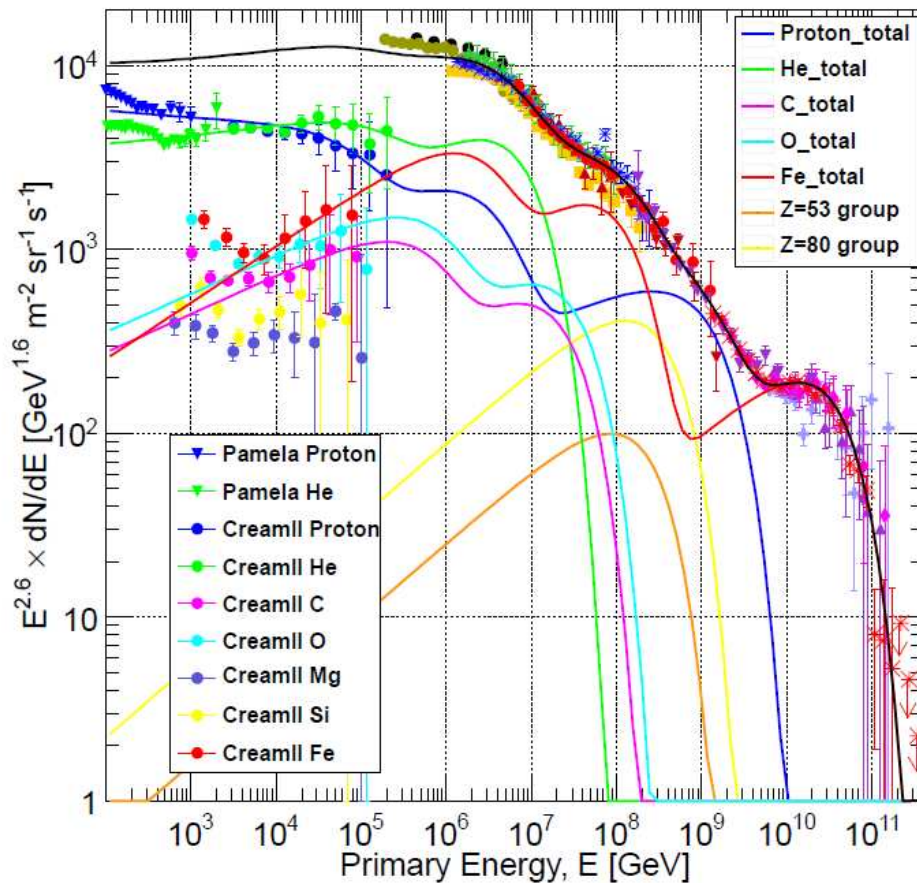
Dodanie trzeciej składowej niezbędne, żeby opisać pełen zakres energii



# 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

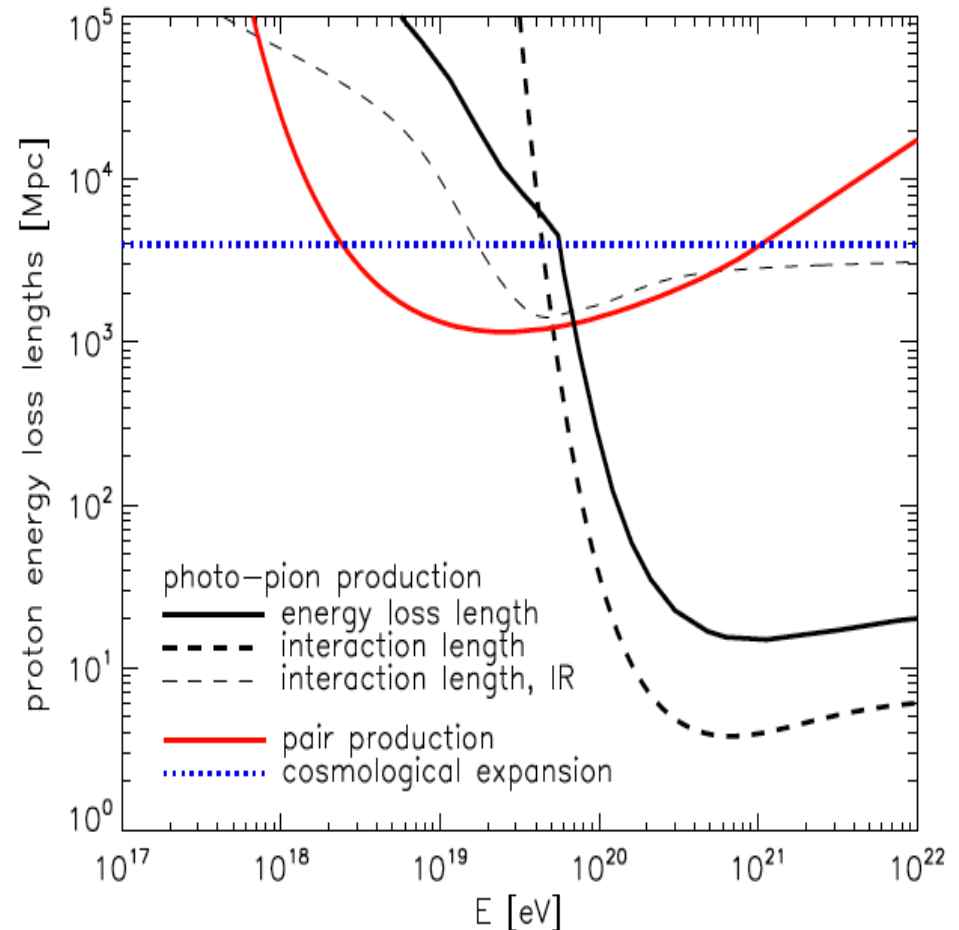


⇒ tracą szybko energię...

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  $\sim 5000$  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

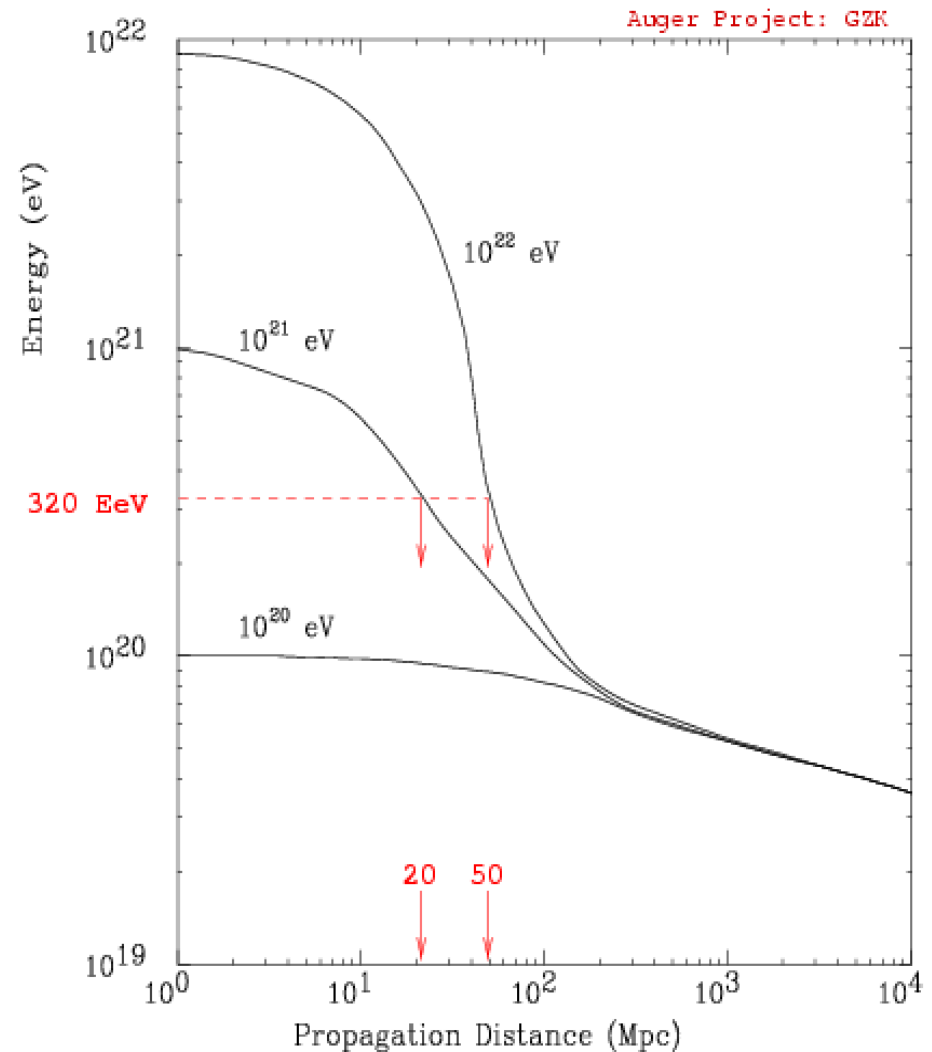


⇒ tracą szybko energię...

Greisen, Zatsepin, Kuzmin, 1966

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

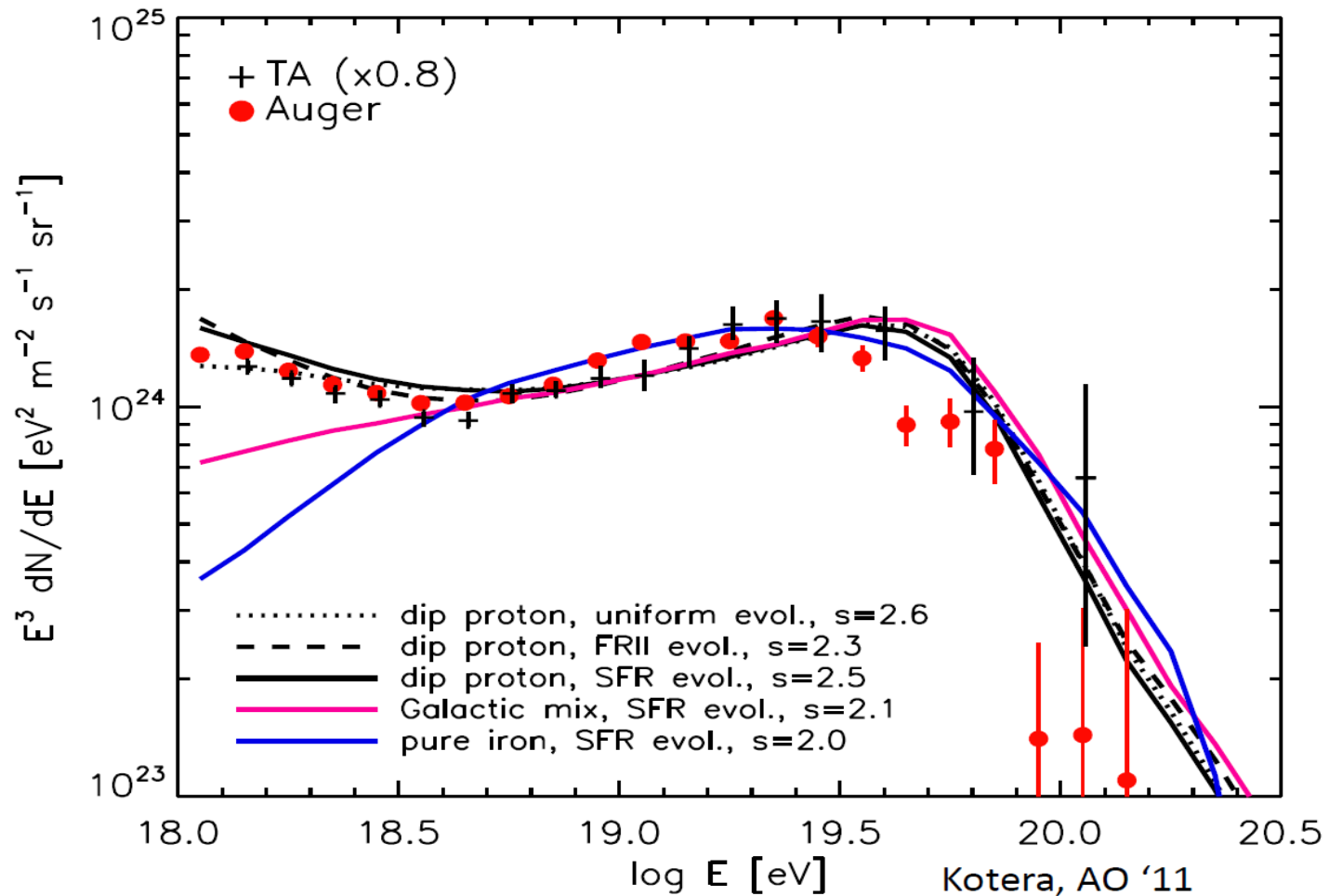
Albo zbyt małej liczby źródeł...



# Promieniowanie kosmiczne

## Obcięcie GZK

Dopasowanie modeli do danych najwyższych energii: źródła pozagalaktyczne + GZK

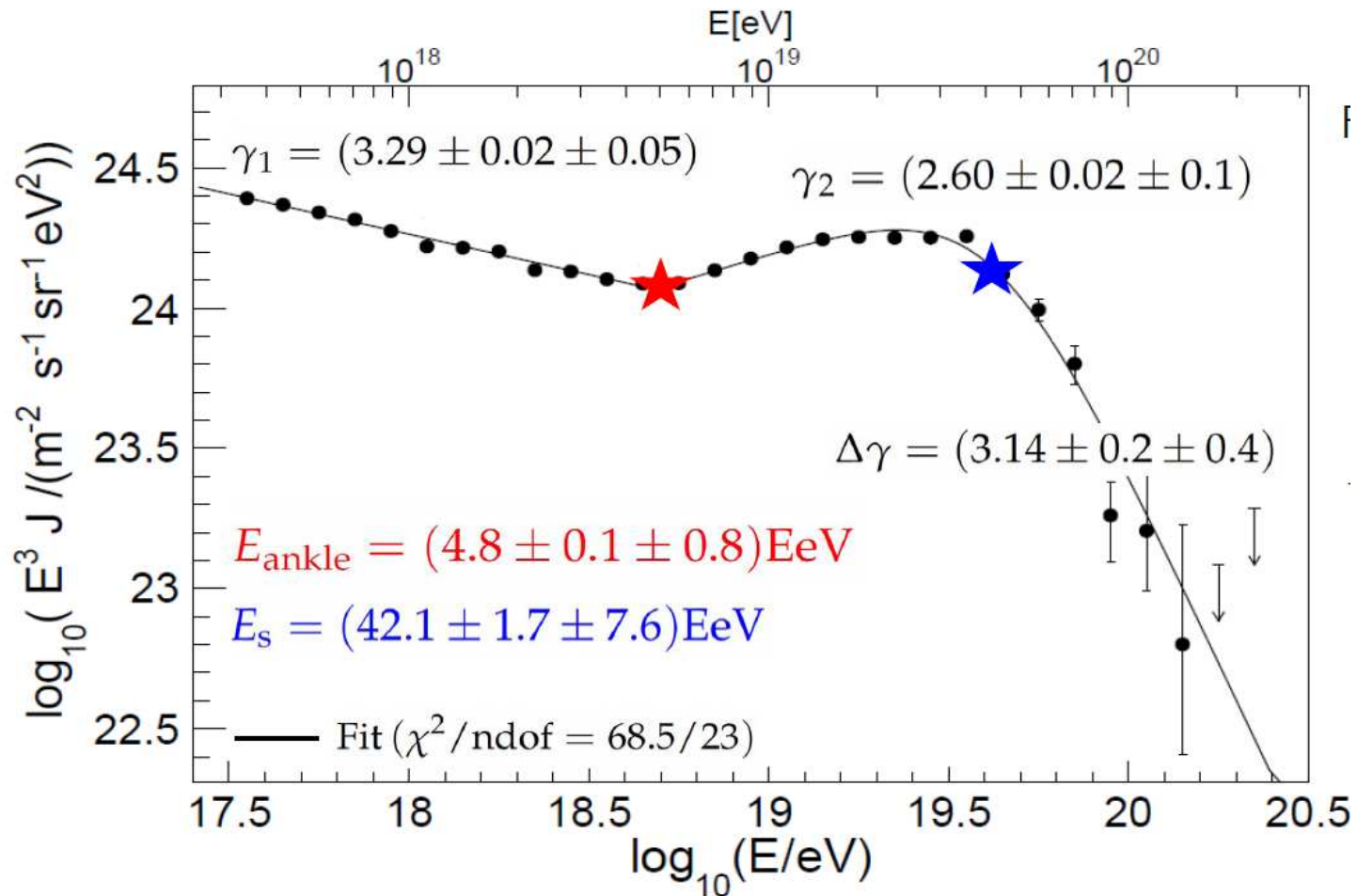


# Promieniowanie kosmiczne

## Obcięcie GZK

Dopasowanie parametryzacji do danych AUGER (ICRC'2015):

( $E_s$  - próg tłumienia)



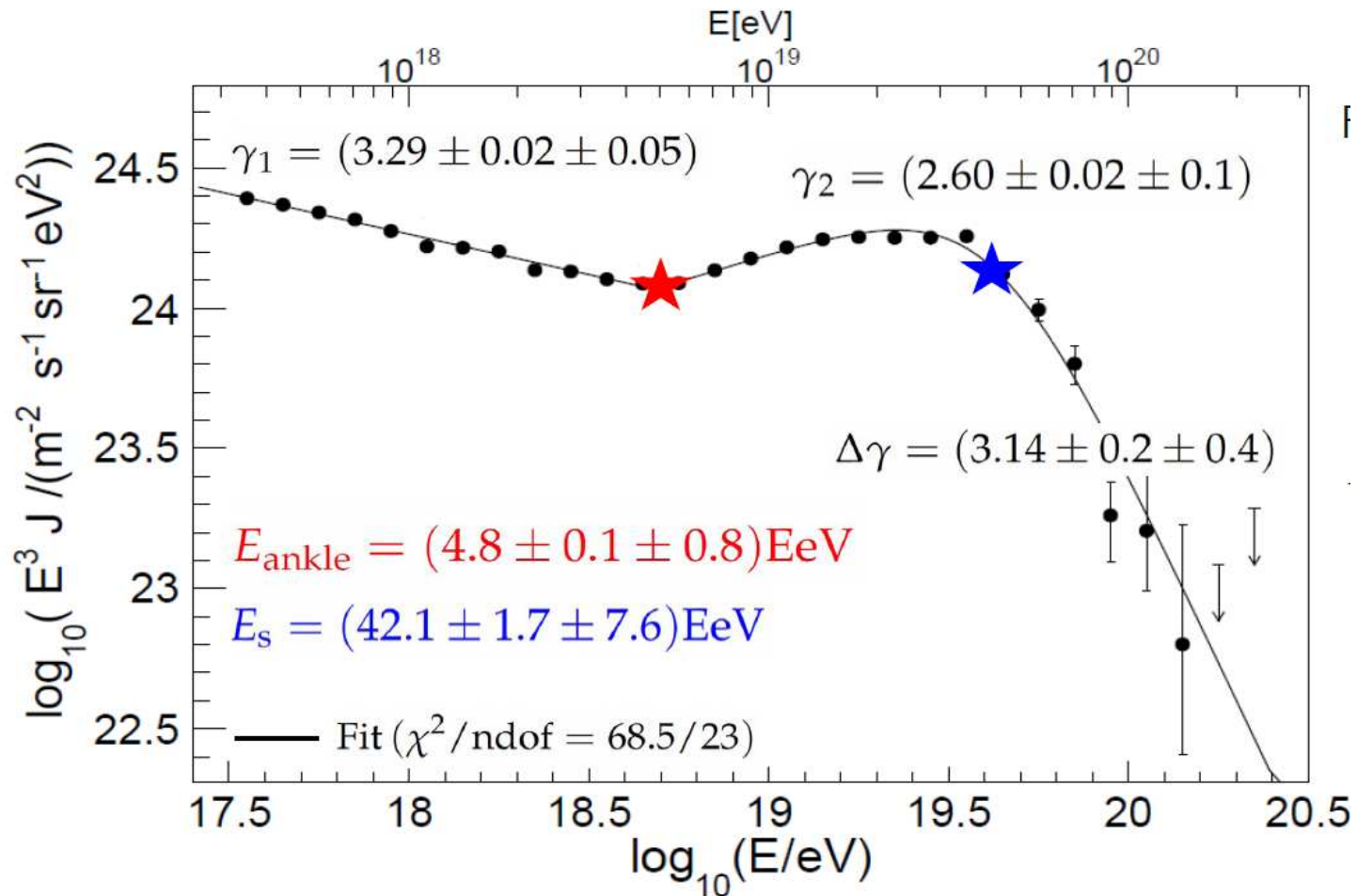


# Promieniowanie kosmiczne

## Obcięcie GZK

Dopasowanie parametryzacji do danych AUGER (ICRC'2015):

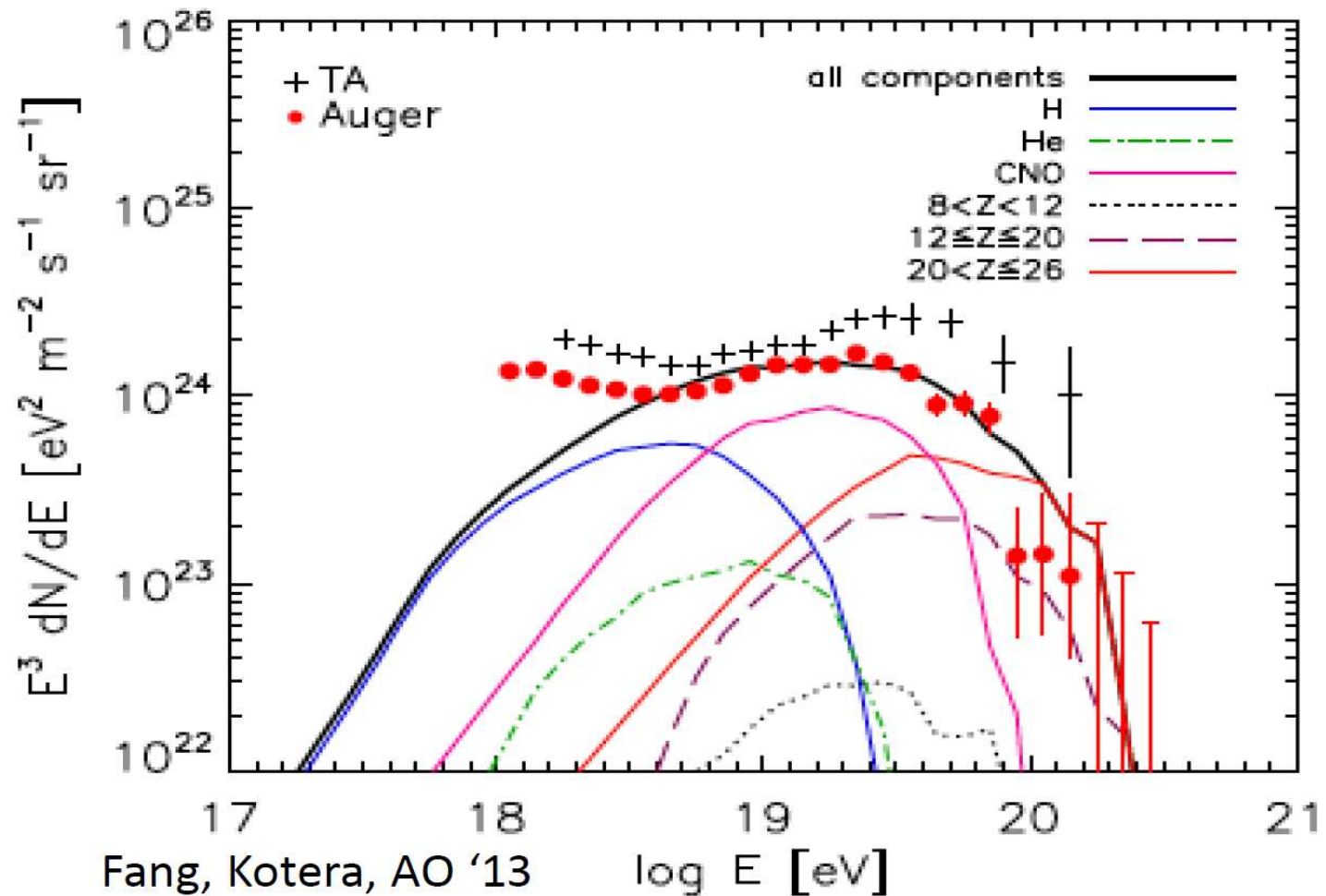
( $E_s$  - próg tłumienia)



# Promieniowanie kosmiczne

## Obcięcie GZK

Dopasowanie modeli do danych najwyższych energii: źródła galaktyczne

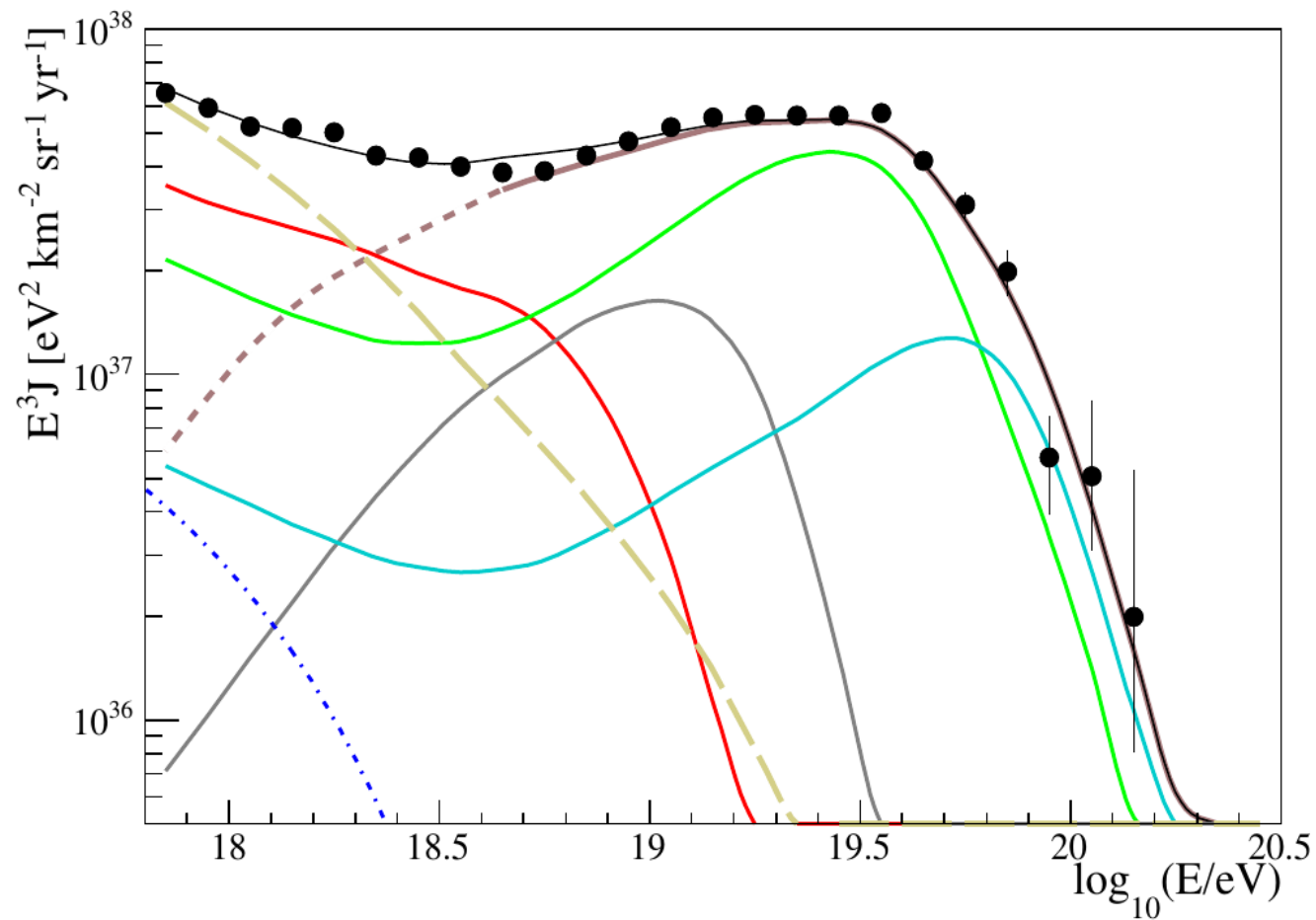


# Promieniowanie kosmiczne

## Obcięcie GZK

Dopasowanie modeli do danych najwyższych energii:

AUGER, Moriond 2019



# Promieniowanie kosmiczne

## Podsumowanie/Pytania

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...