

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład VII

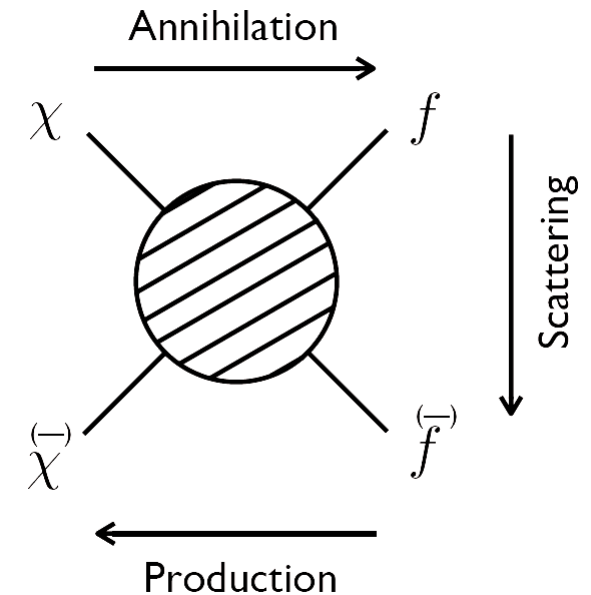
- Pośrednie poszukiwania ciemnej materii
satelitarne pomiary promieniowania kosmicznego
 - FERMI
 - PAMELA
 - AMS-2

Ciemna materia

Poszukiwanie

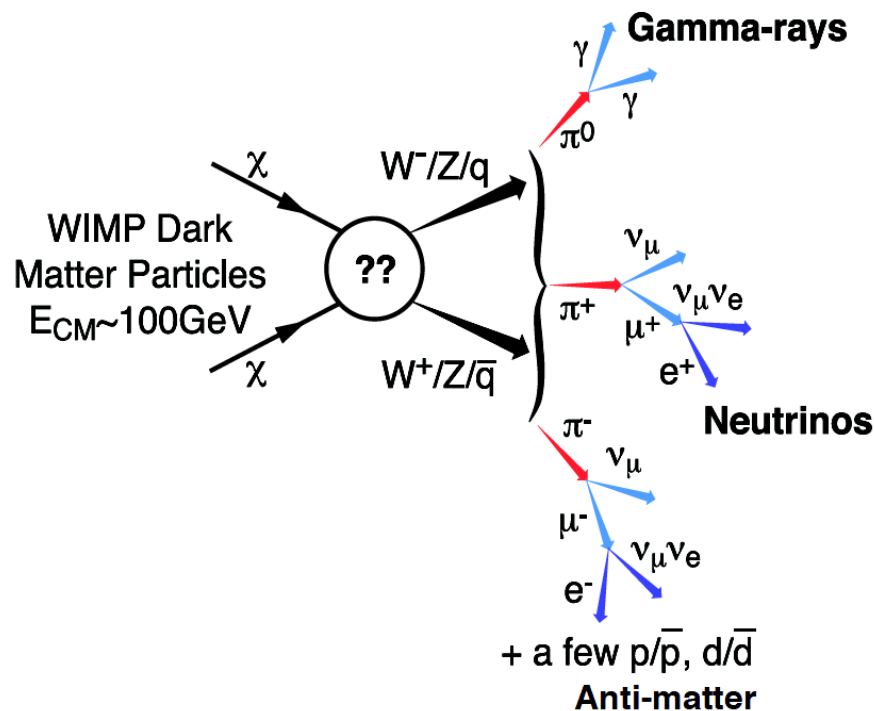
Niezależnie od modelu, możemy poszukiwać cząstek ciemnej materii (DM) na trzy sposoby:

- 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...

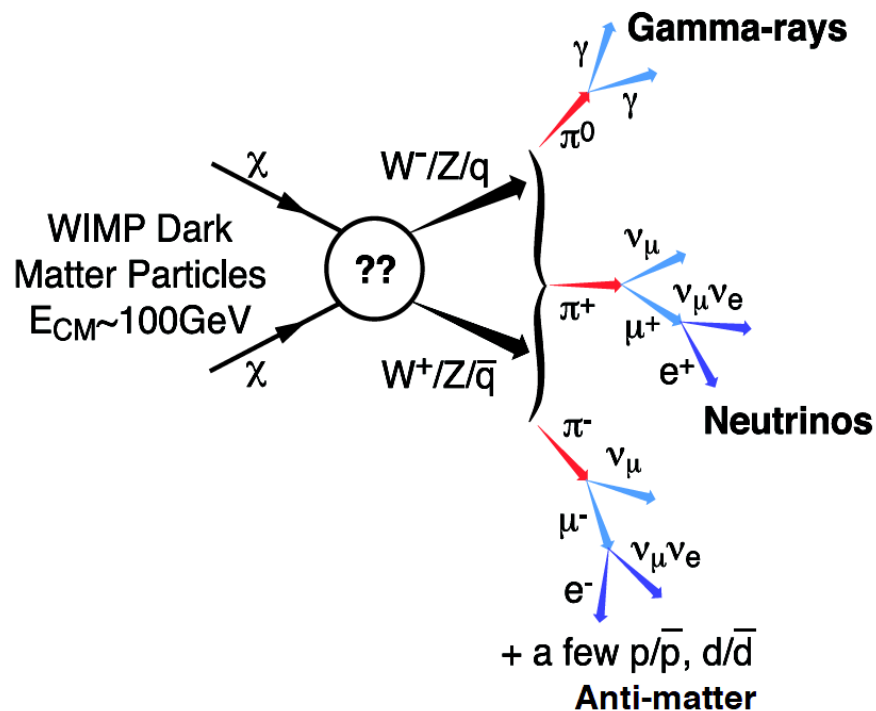
Ale ciemna materia uczestniczy w tworzeniu struktur we Wszechświecie! Więc na małych skalach odległości jej gęstość może być o wiele rzędów wielkości większa niż gęstość średnia (tak jak normalnej materii).

⇒ może znów zachodzić anihilacja

Podobnie jak w gwiazdach znów zachodzi nukleosynteza...

Detekcja pośrednia

Promieniowanie gamma



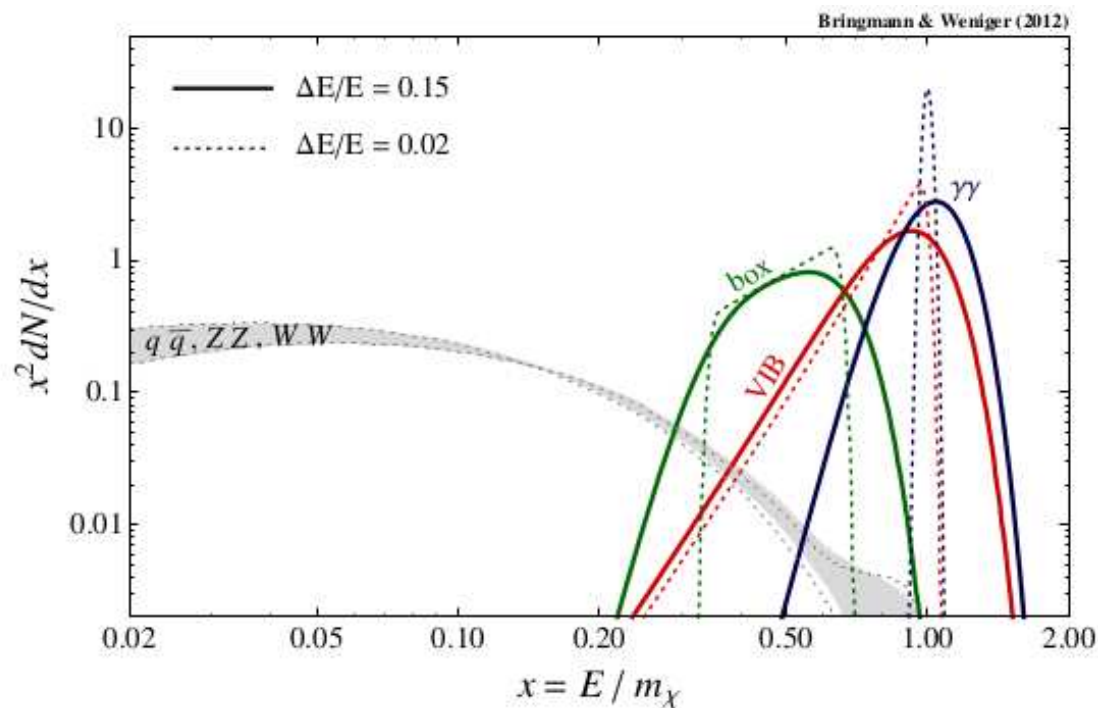
Zalety poszukiwania sygnału anihilacji DM w promieniowaniu gamma:

- oczekujemy dużego sygnału oraz wysokich energii
- brak pochłaniania w halo
- wskazuje na źródło nie odchyła się w polu magnetycznym
- niskie tło w porównaniu z cząstkami naładowanymi
- charakterystyczne widmo

Detekcja pośrednia

Promieniowanie gamma

Oczekiwane widmo promieniowania z anihilacji DM



Pierwotne promieniowanie γ

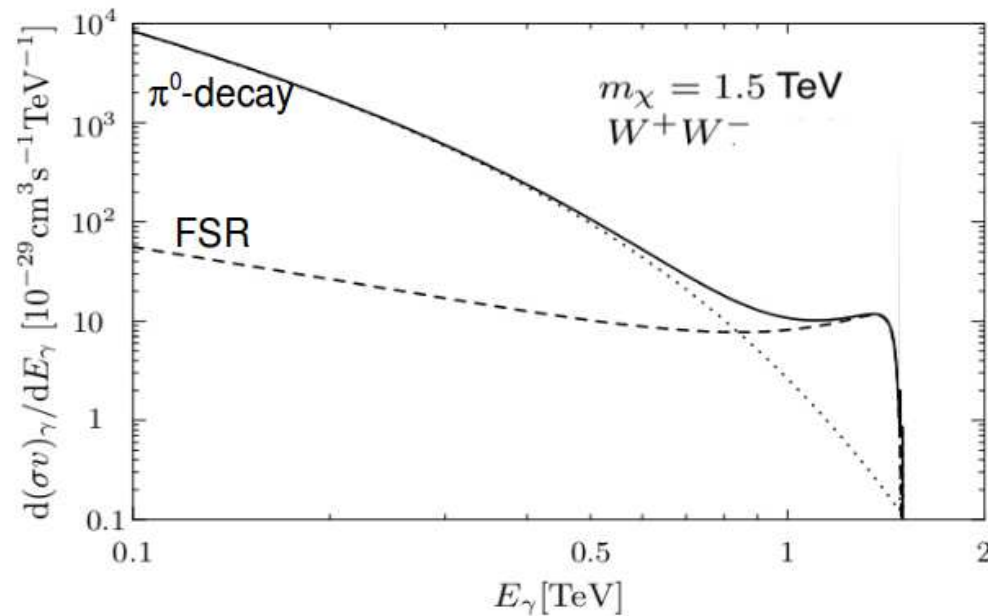
- bezpośrednia anihilacja
 $\chi\chi \rightarrow \gamma\gamma, Z\gamma \dots$
- Virtual Internal Bremsstrahlung
 $\chi\chi \rightarrow f\bar{f}\gamma, W^+W^-\gamma \dots$
- rozpady kaskadowe (Box)

\Rightarrow charakterystyczne maksimum blisko $E = m_\chi$

Detekcja pośrednia

Promieniowanie gamma

Oczekiwane widmo promieniowania z anihilacji DM



Wtórne promieniowanie γ

- rozpad π^0
(w kanałach hadronowych)
- promieniowanie w stanie końcowym
Final State Radiation

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

Detekcja pośrednia

Źródła

Pośrednią detekcję DM stanowiłaby obserwacja nadmiaru promieniowania γ pochodzącego z ustalonego kierunku - źródła.

Kryteria wyboru źródła:

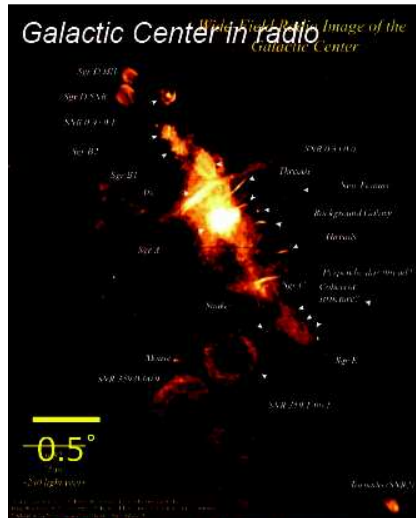
- duża jasność
duża gęstość DM, mała odległość
- małe tło
- dobrze określona pozycja

Kandydaci:

- centrum galaktyki
- galaktyki karłowate
- gromady galaktyk
- halo galaktyki

Detekcja pośrednia

Źródła

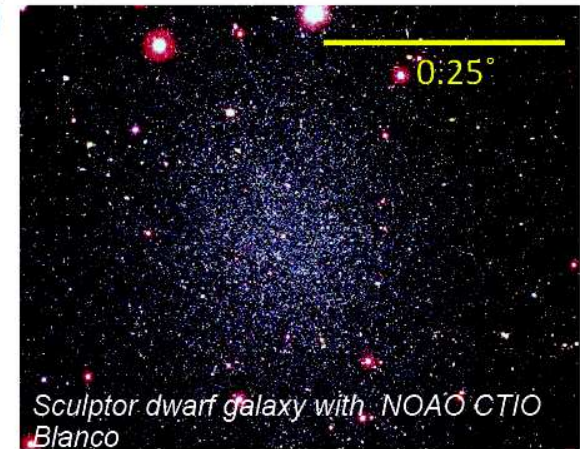


Galactic Centre

- Proximity (~8kpc)
- High (possibly) central DM concentration :
DM profile : core? cusp?
- High astrophysical background at TeV

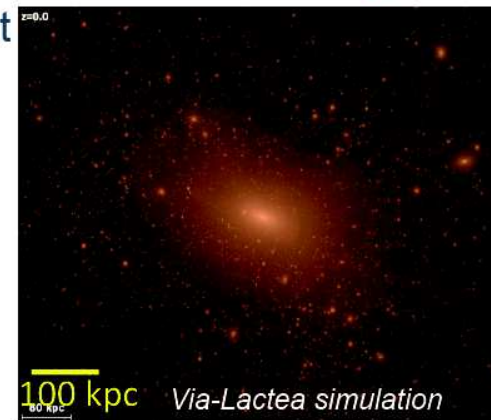
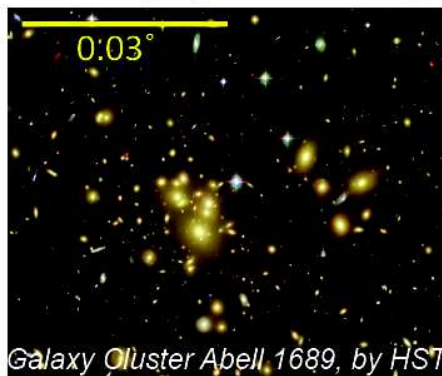
Dwarf galaxies of the Milky Way

- Many of them within the 100 kpc from Sun
- Extremely DM-dominated environment
- Potential low astrophysical background



Galaxy clusters

- High DM annihilation luminosity
- Substructures contribution to the overall DM flux
- Astrophysical background may be important



Substructures in the Galactic halo

- Low but clean signal
- Unknown location

Detekcja pośrednia

Instrumenty

Radio

Interferometers



SKA

Artist's impression
Credit: SPDO/TDP/DRAO/Swinburne
Astronomy Productions.

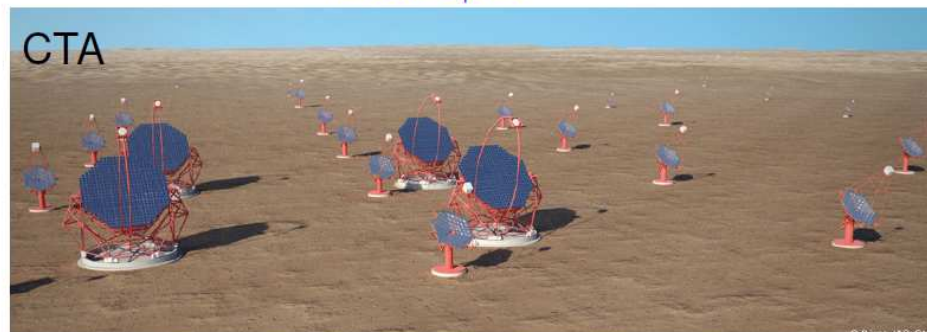
Single-dish



GBT

gamma-rays

Ground based
telescopes



CTA

x-rays
Space satellites



Chandra

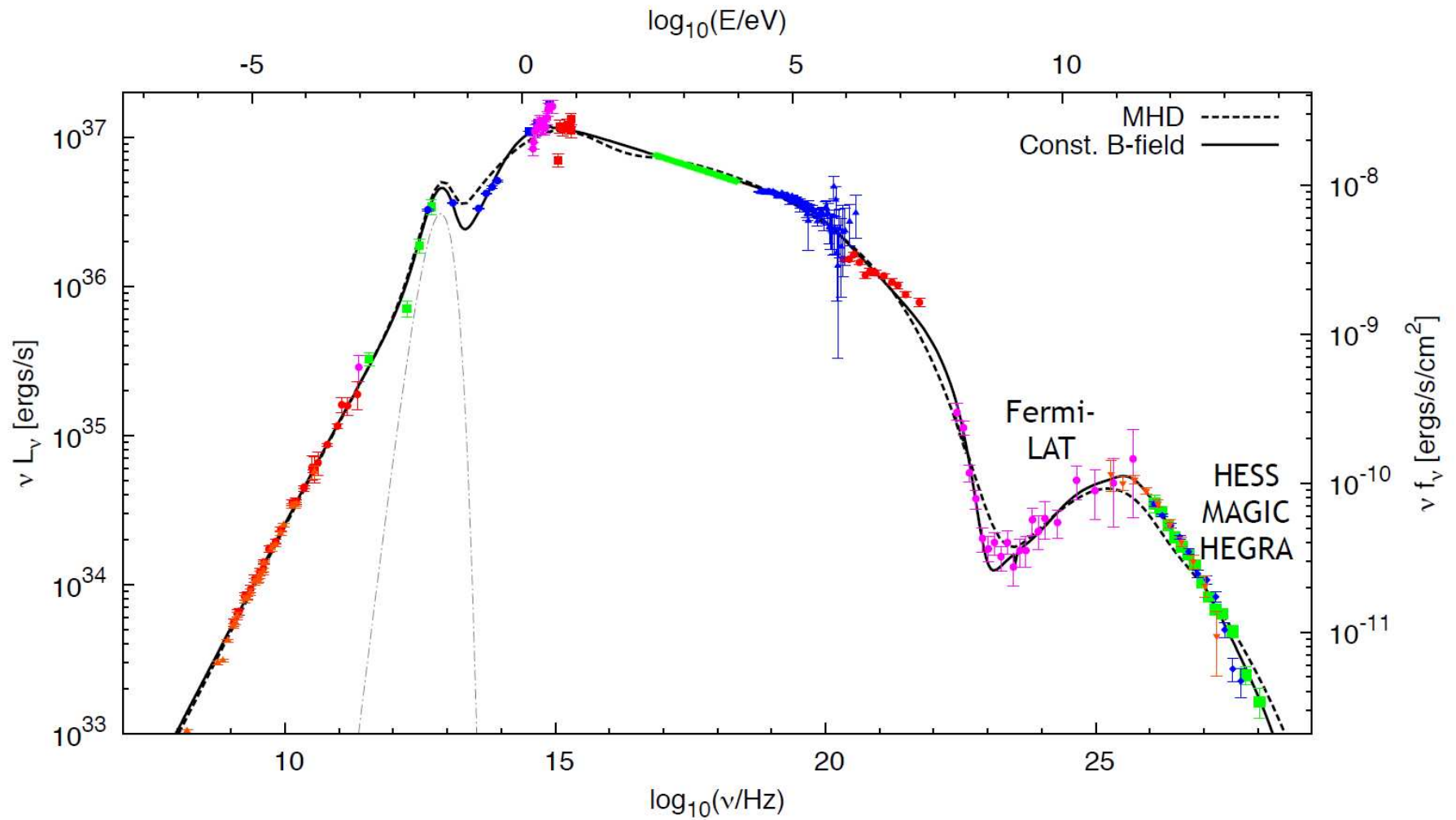
Space
satellites



Fermi-LAT

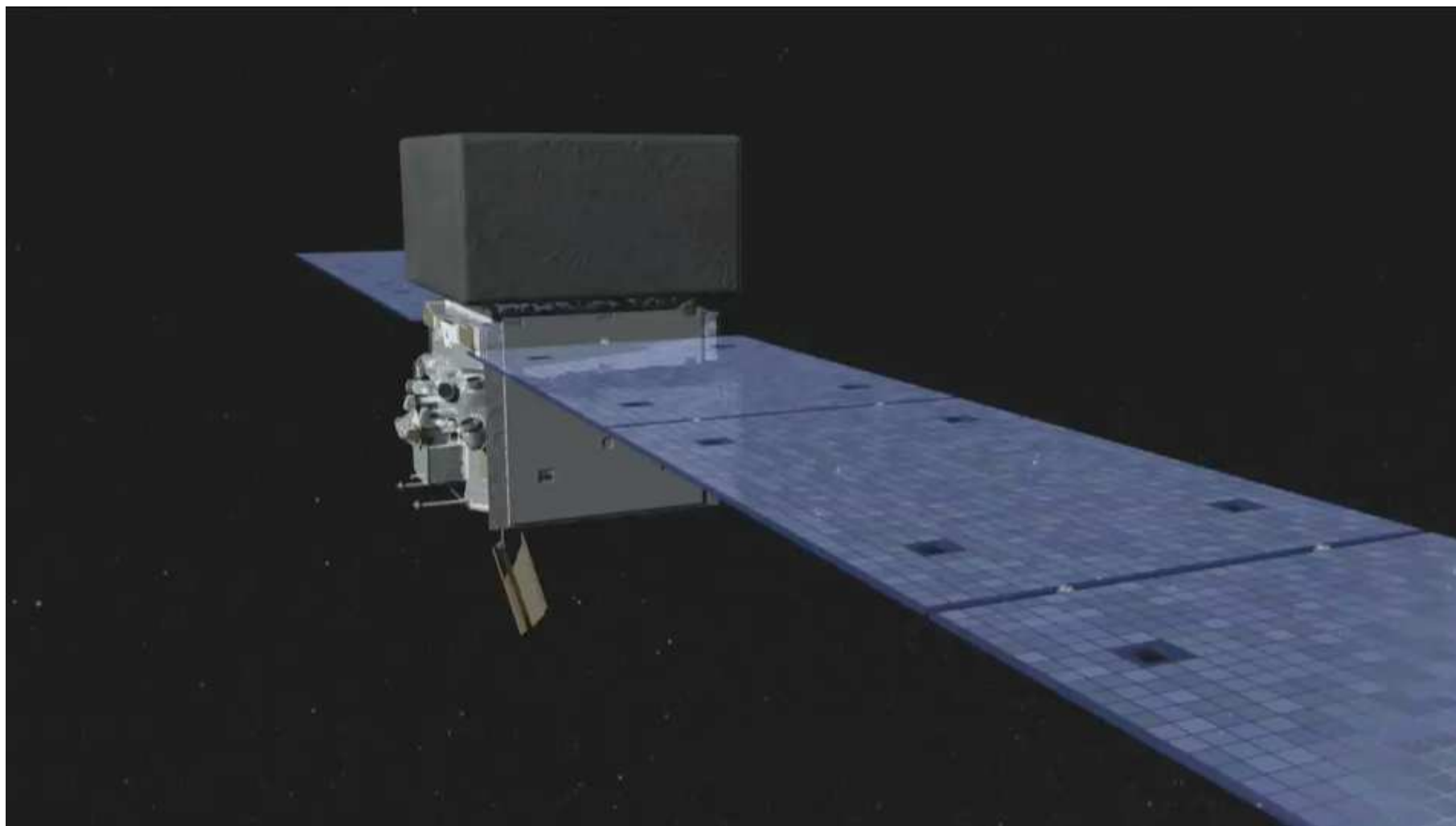
Detekcja pośrednia

Zakres widmowy



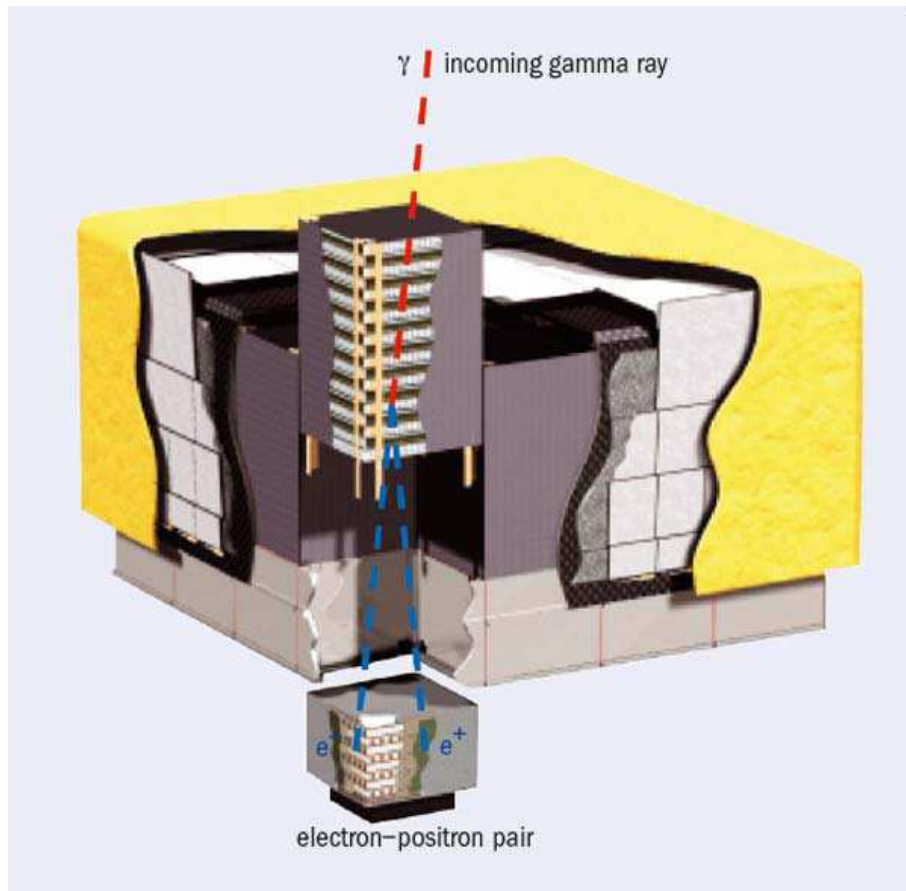
Detekcja pośrednia

Fermi-LAT



Detekcja pośrednia

Large Area Telescope



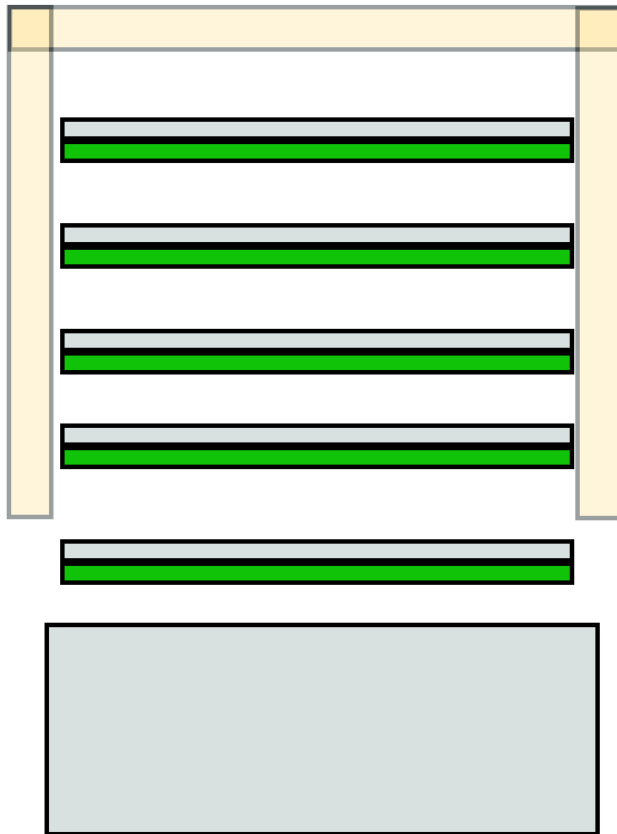
Detektor dedykowany pomiarowi fotonów w zakresie od 20 MeV do 300 GeV.

$1.8 \times 1.8 \times 1.0 \text{ m}^3$, 3000 kg, 650 W

Pomiar kierunku i energii fotonu na podstawie konwersji $\gamma \rightarrow e^+e^-$

Detekcja pośrednia

Large Area Telescope



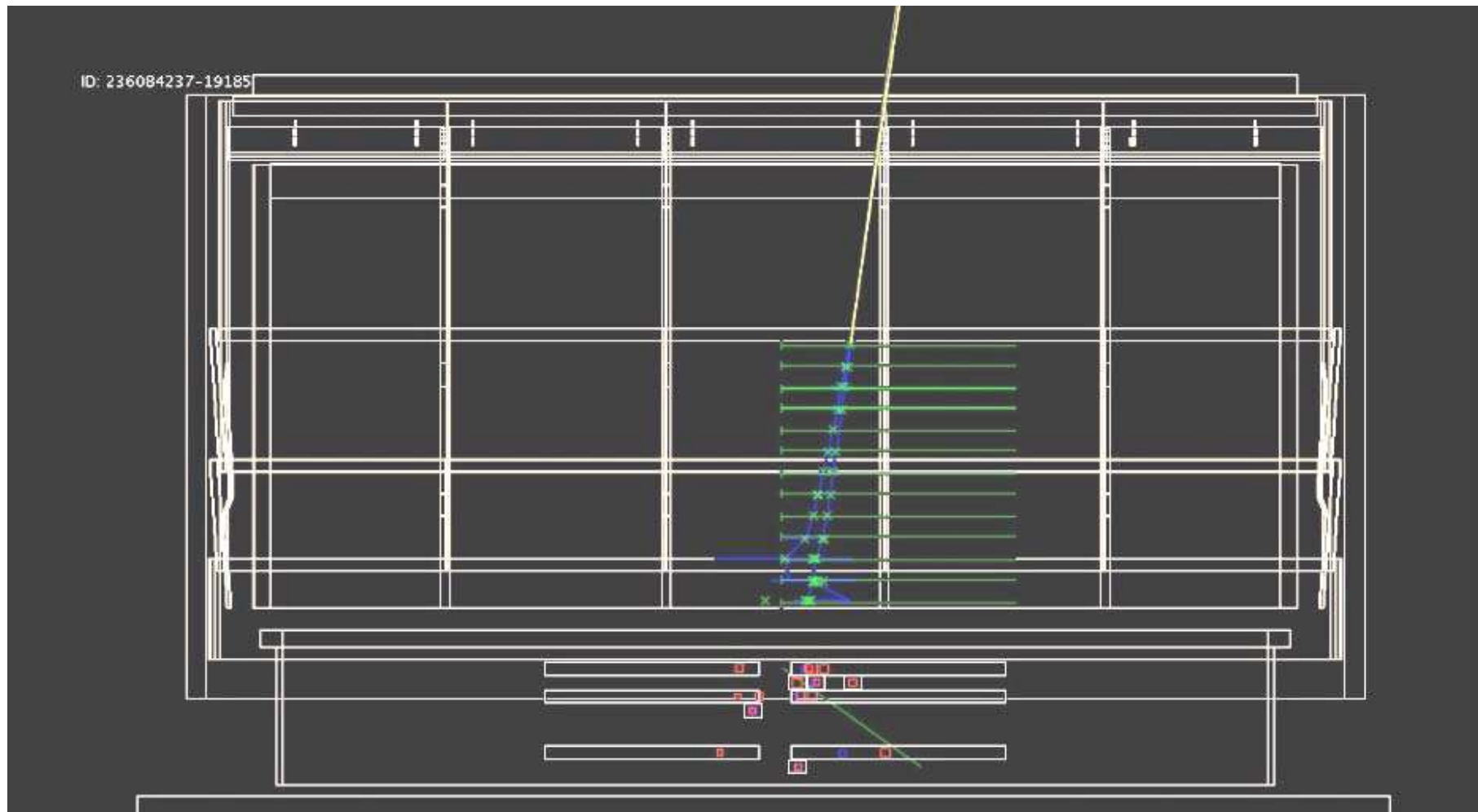
Główne elementy:

- osłona ze scyntylatorów - eliminacja tła
- płyty wolframowe, na których zachodzi konwersja
- warstwy krzemowych detektorów paskowych - pomiar toru $e^+ e^-$ z konwersji skrzyżowane paski \Rightarrow pomiar 2D
- kalorymetr elektromagnetyczny
8 warstw po 12 kryształów CsI
ułożone na przemian w kierunku X i Y
 \Rightarrow rekonstrukcja kaskady w 3D
powyżej 3 GeV część energii “wycieka”...

Detekcja pośrednia

Large Area Telescope

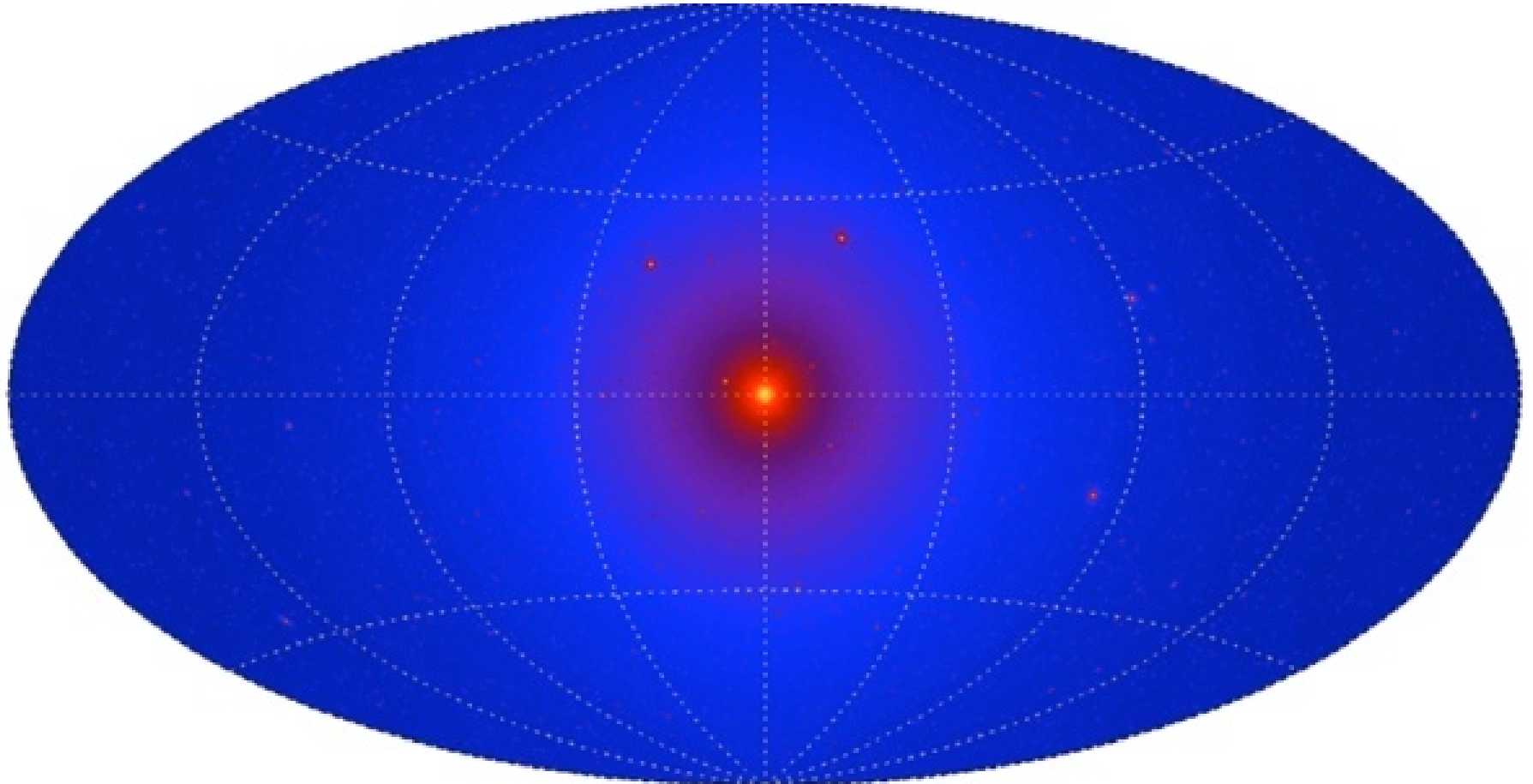
przykładowy przypadek $\gamma \rightarrow e^+e^-$



Detekcja pośrednia

Oczekiwany sygnał

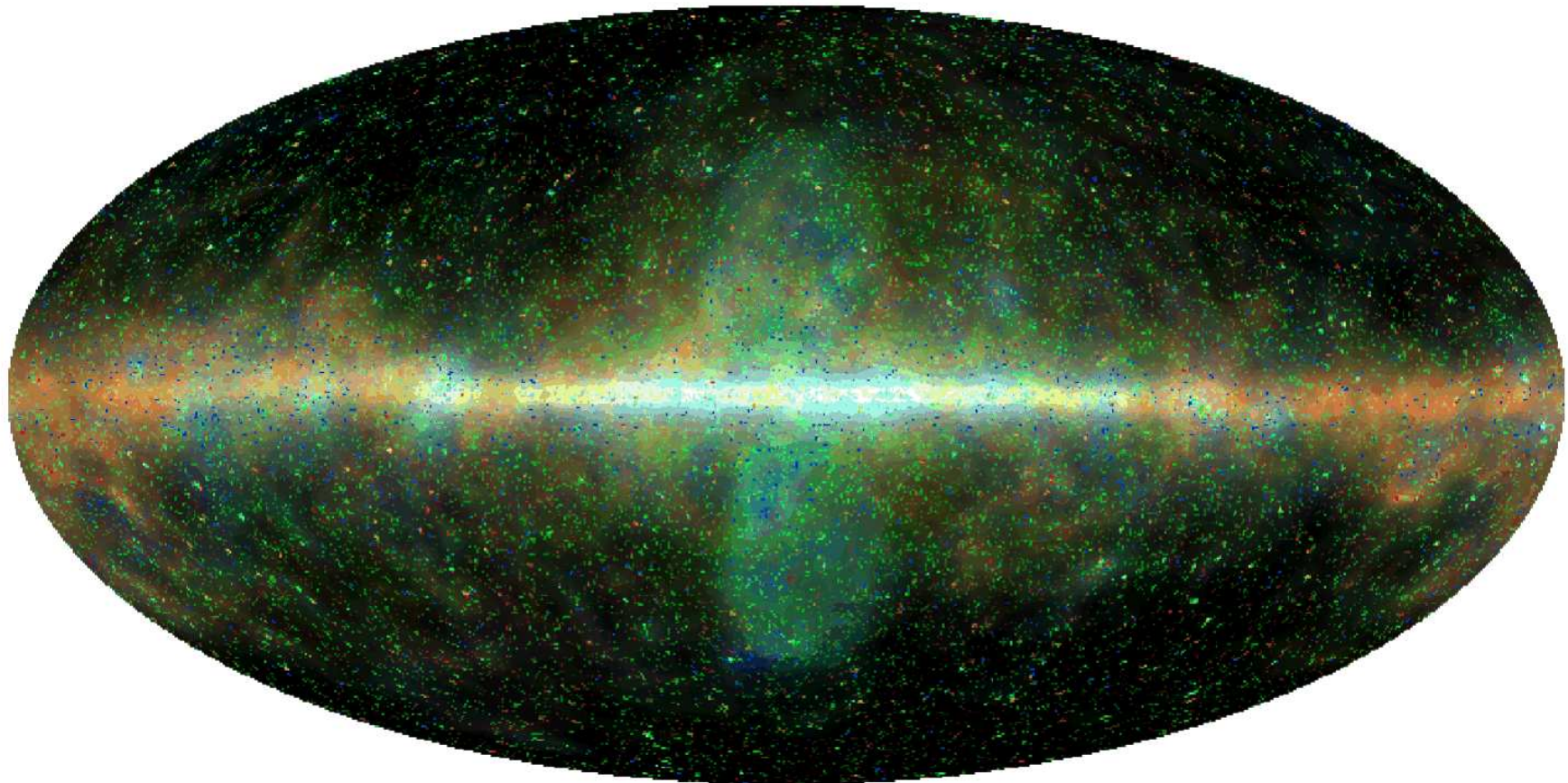
Symulowany obraz nieba dla sygnału pochodzącego z centrum Galaktyki, halo Galaktyki i galaktyk karłowatych



Detekcja pośrednia

Wyniki Fermi-LAT

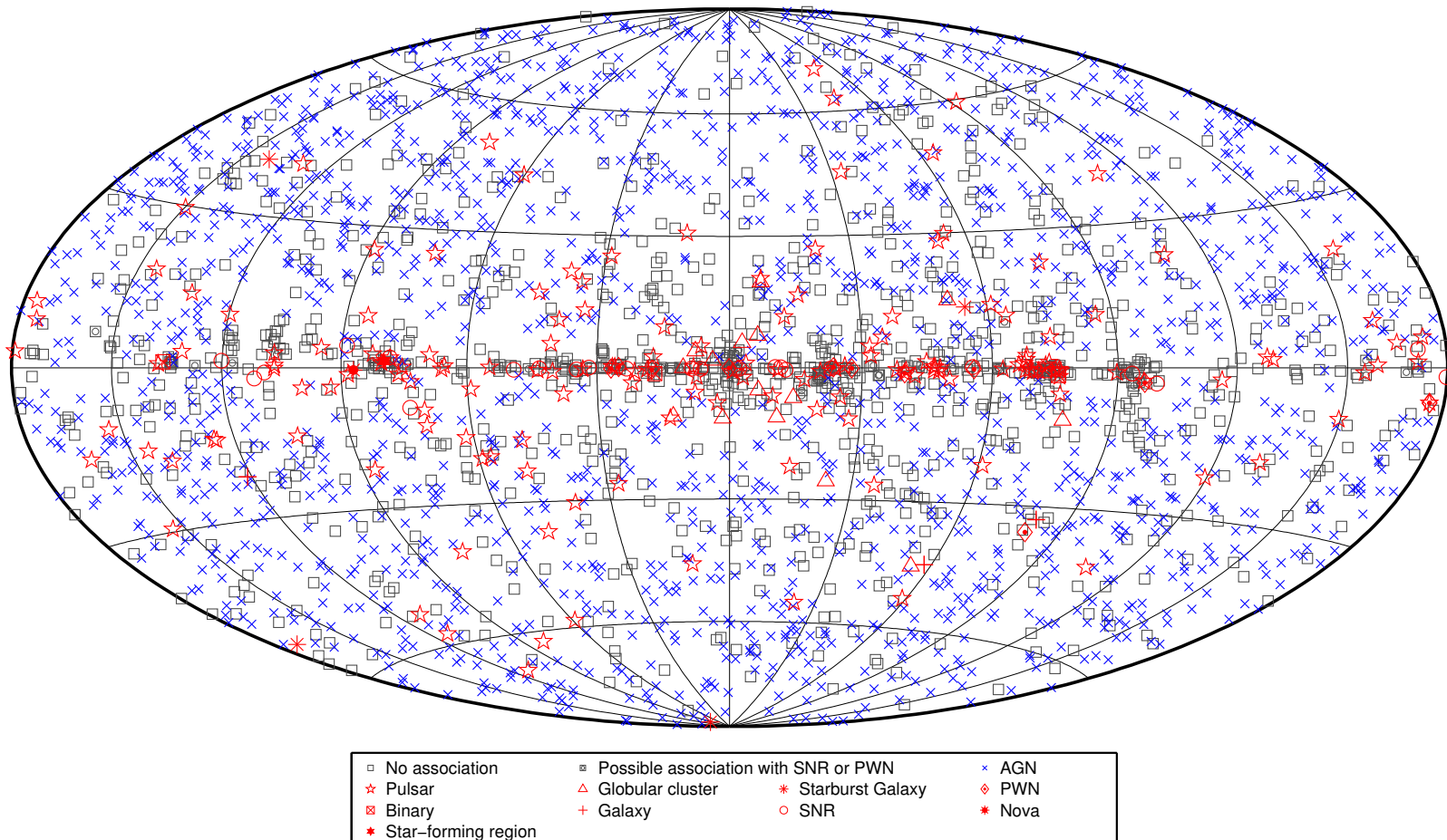
Mapa nieba w fotonach 1 - 300 GeV (skala logarytmiczna)



Detekcja pośrednia

Wyniki Fermi-LAT

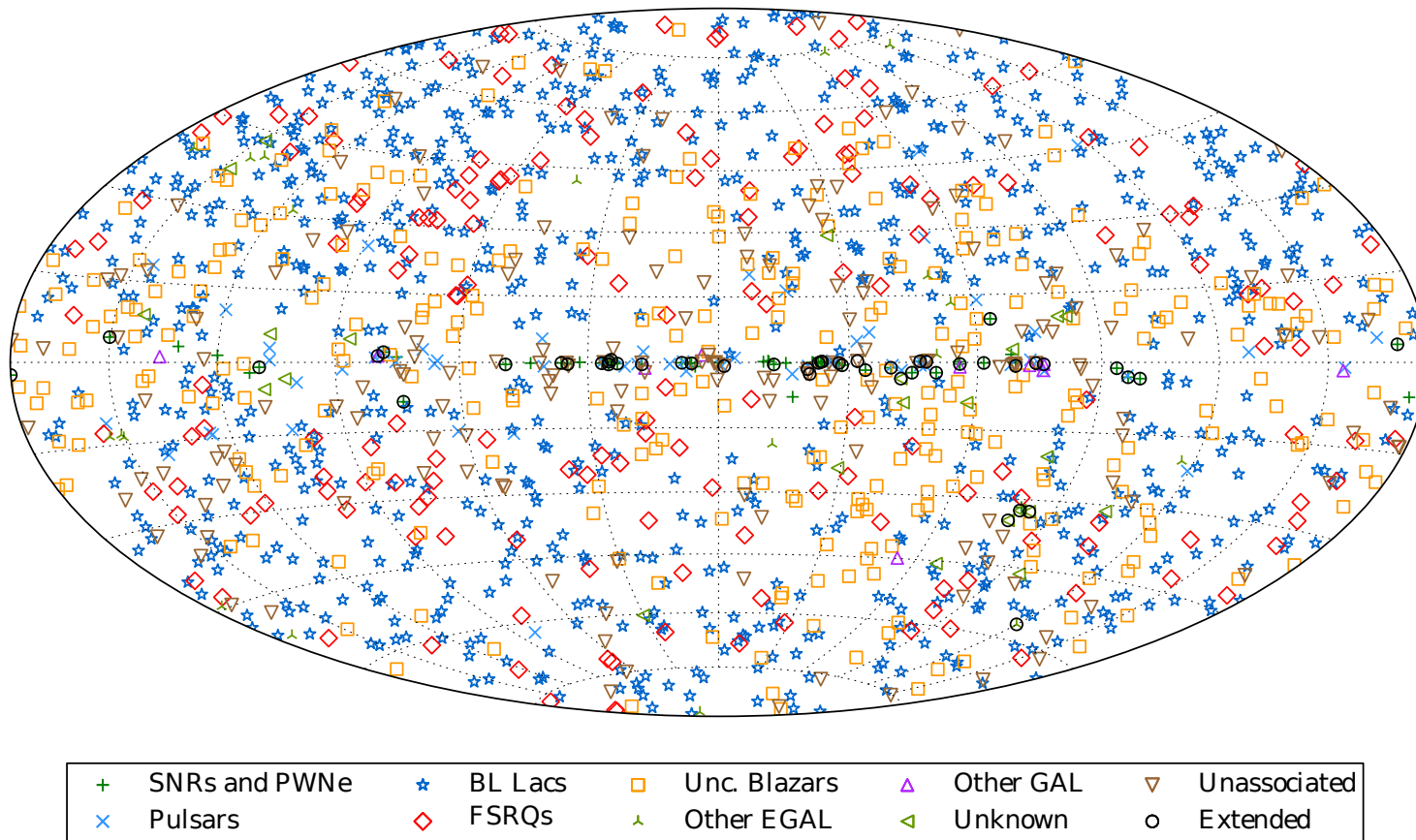
Zidentyfikowano około 3000 źródeł punktowych powyżej 100 MeV
Ponad połowa to aktywne jądra galaktyk (AGN), głównie blazary



Detekcja pośrednia

Wyniki Fermi-LAT

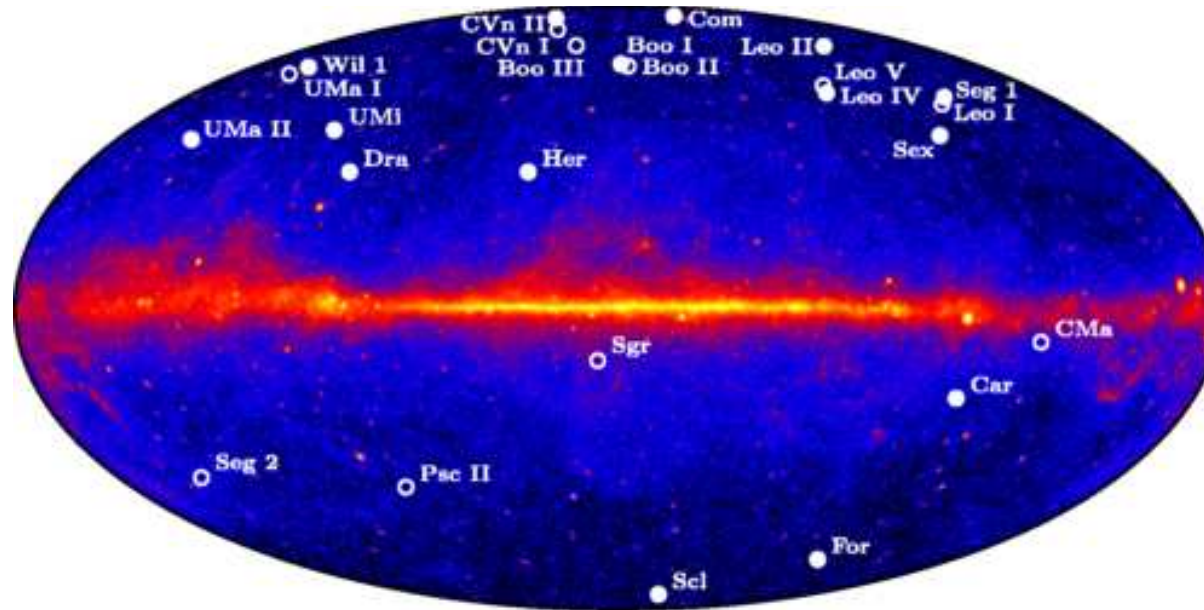
Zidentyfikowano 1556 źródeł punktowych powyżej 10 GeV



Detekcja pośrednia

Wyniki Fermi-LAT

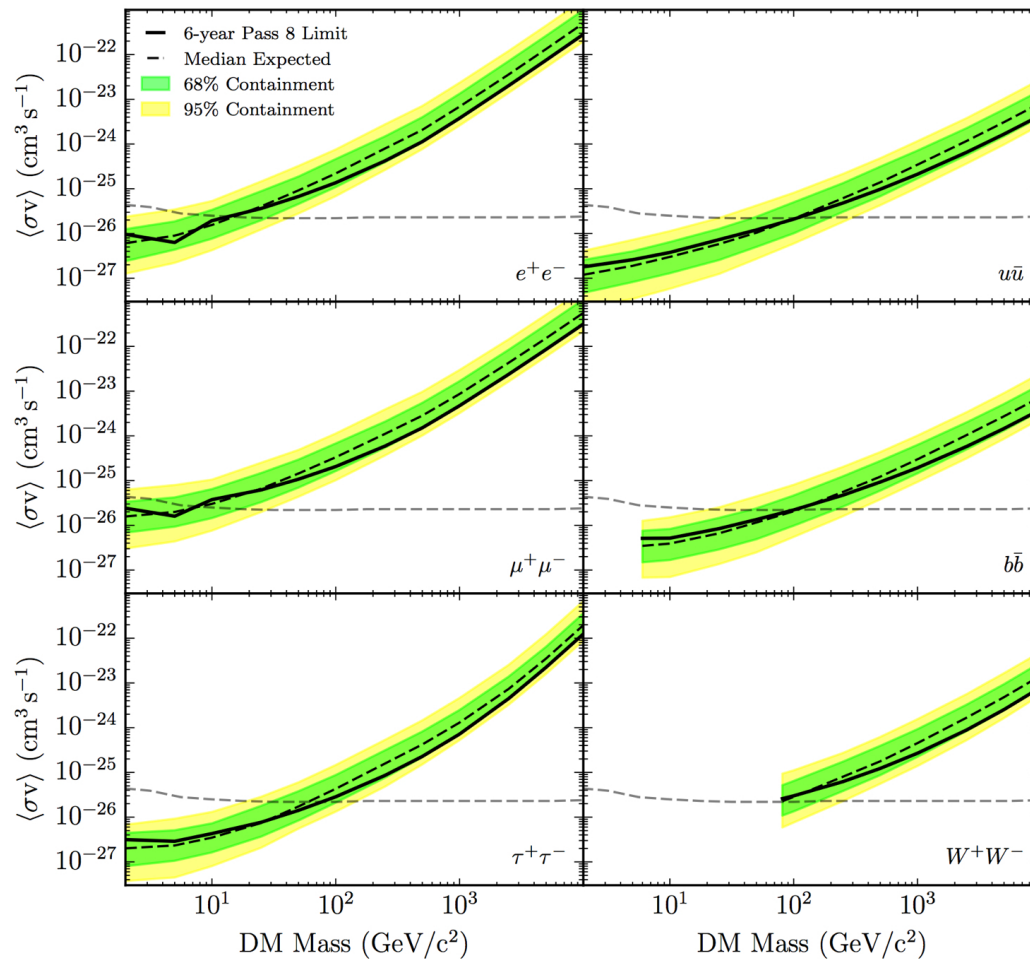
Rozważane galaktyki karłowate



- zdominowane przez materię nie świecącą
- nie powinny być źródłem promieniowania γ
- znane w bezpośrednim sąsiedztwie

Detekcja pośrednia

Wyniki Fermi-LAT



Galaktyki karłowate

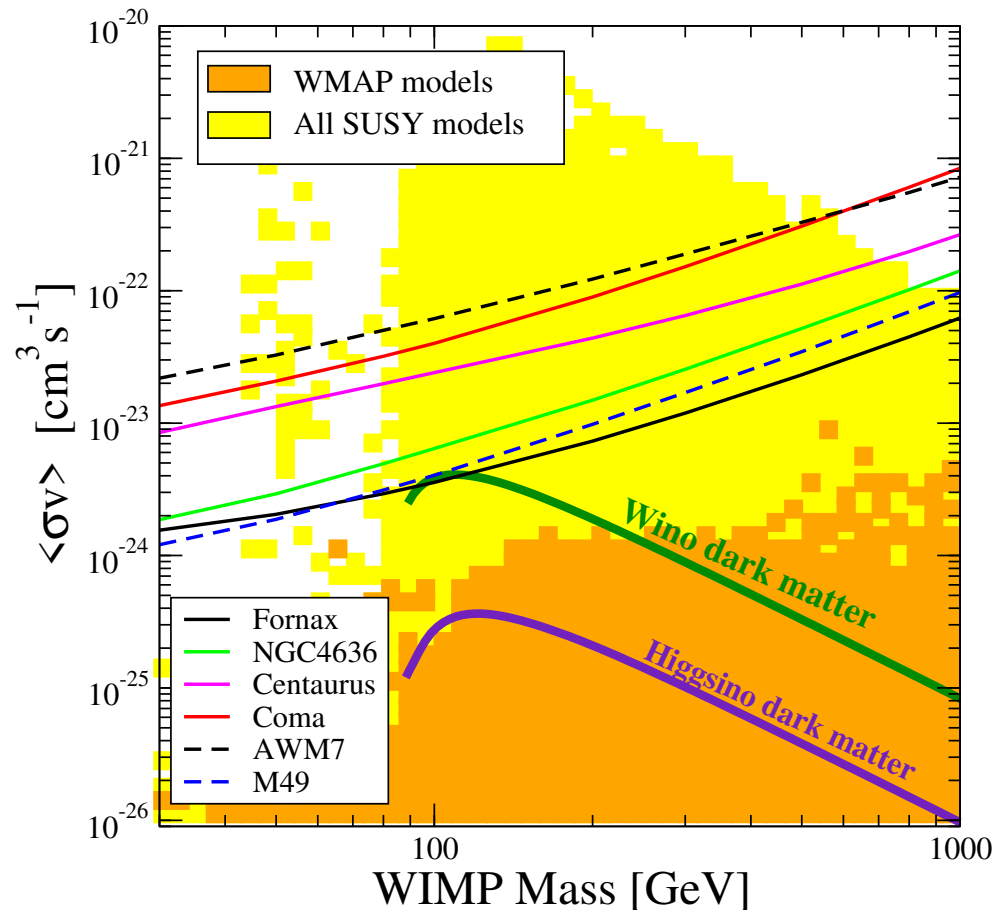
Wyniki FERMI oparte na analizie widma 15 bliskich galaktyk karłowatych.

Przebadane różne możliwe sygnatury

⇒ brak sygnału, limity pozwalają na wykluczenie części scenariuszy MSSM

Detekcja pośrednia

Wyniki Fermi-LAT



Gromady galaktyk:

- największe struktury we Wszechświecie
- pomiary soczewkowania i promieniowania X sugerują dużą gęstość DM

Wyniki FERMI oparte na analizie danych w zakresie energii od 100 MeV do 100 GeV.

⇒ brak sygnału, tylko limity

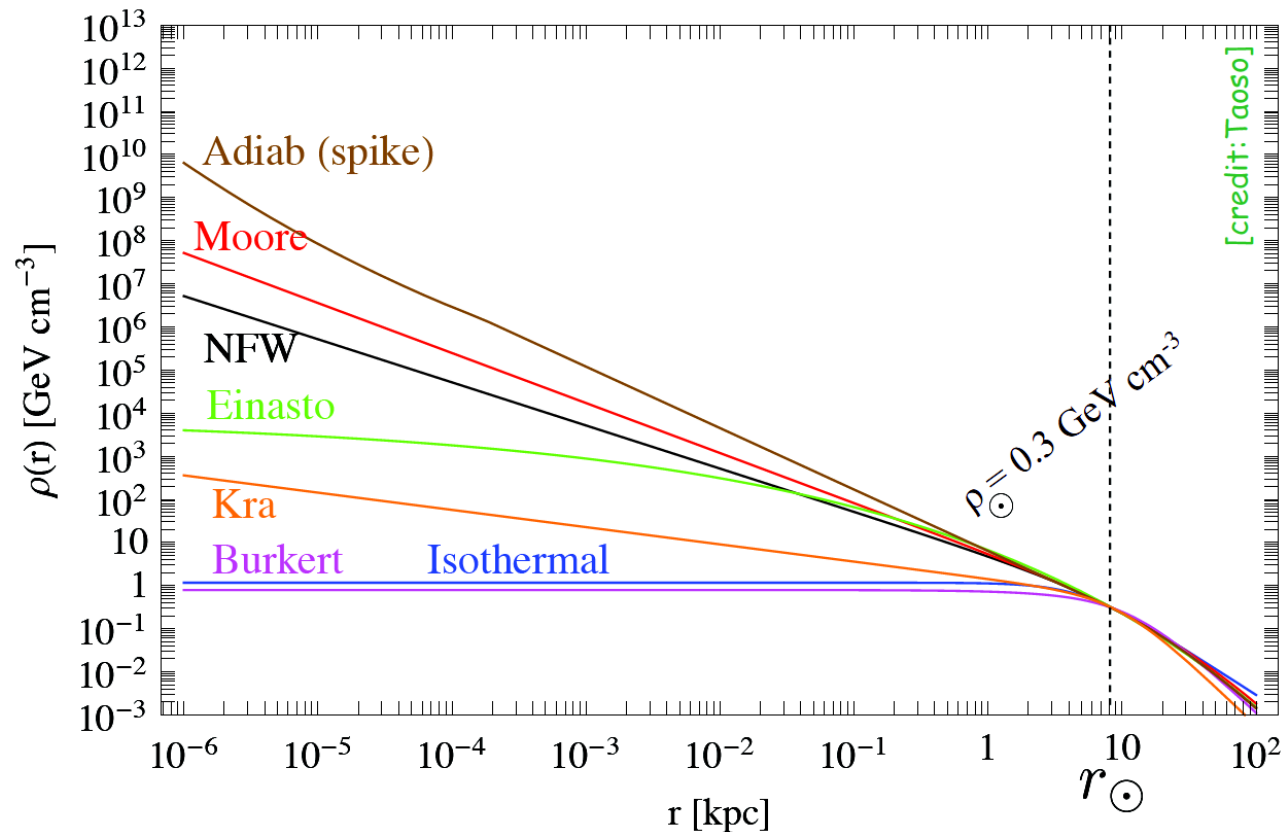
założony kanał anihilacji $\chi\chi \rightarrow b\bar{b}$

Detekcja pośrednia

Halo galaktyki

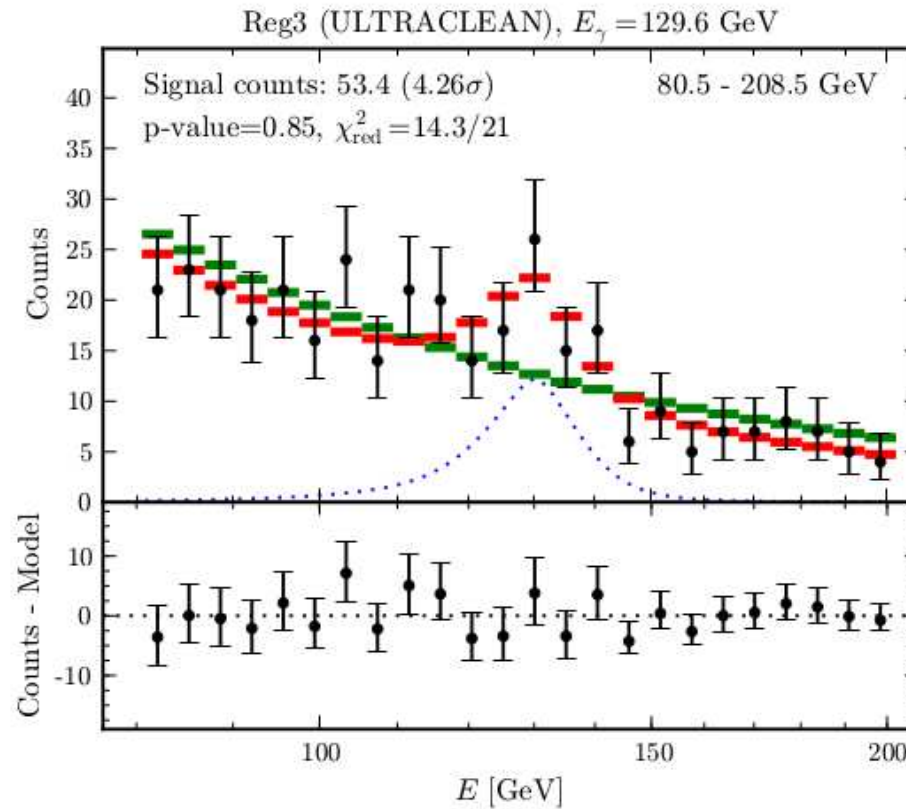
Również nie zidentyfikowano żadnych źródeł promieniowania, które mogłyby świadczyć o anihilacji w zagęszczeniach ciemnej materii.

Wyznaczanie limitów utrudnione przez duże niepewności w modelowaniu halo.



Detekcja pośrednia

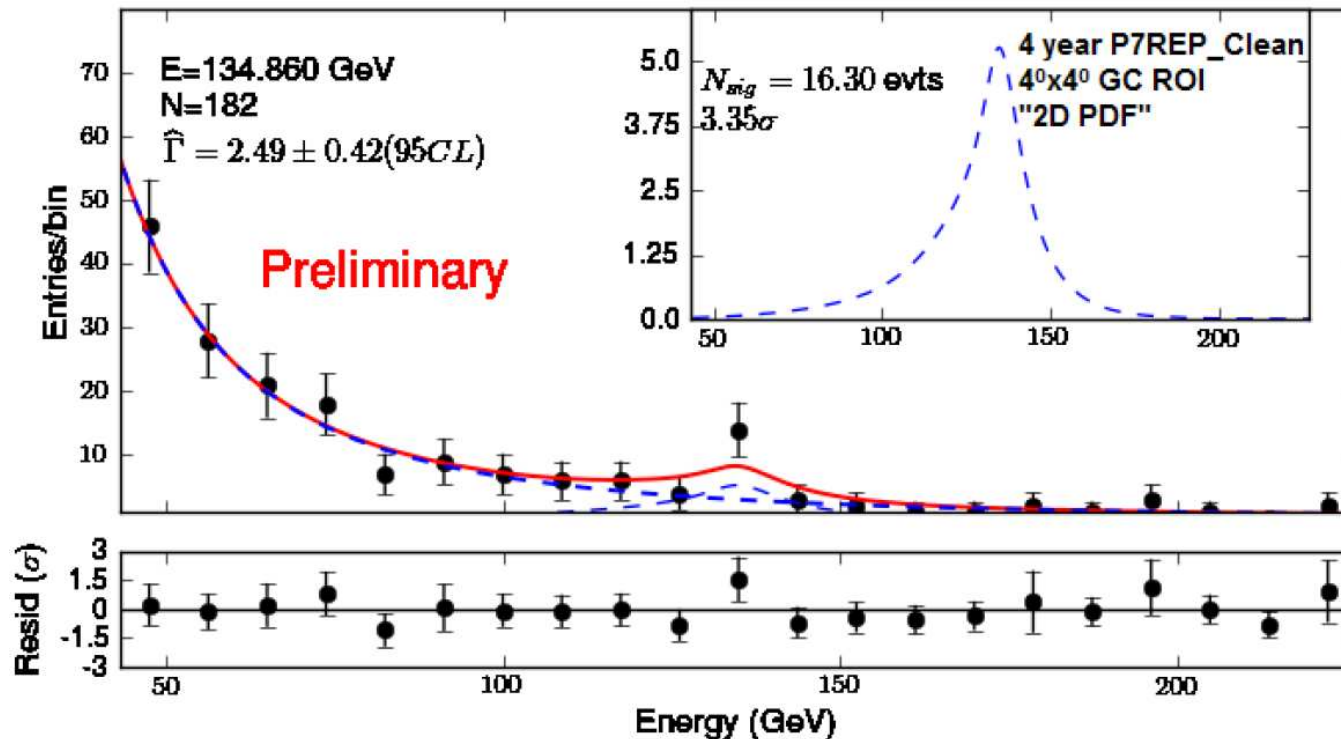
Wyniki Fermi-LAT



Badając widmo promieniowania dochodzącego z centrum naszej galaktyki zauważono nadmiar przypadków dla $E_\gamma \sim 130\text{GeV}$. Efekt na poziomie 4.26σ

Detekcja pośrednia

Wyniki Fermi-LAT



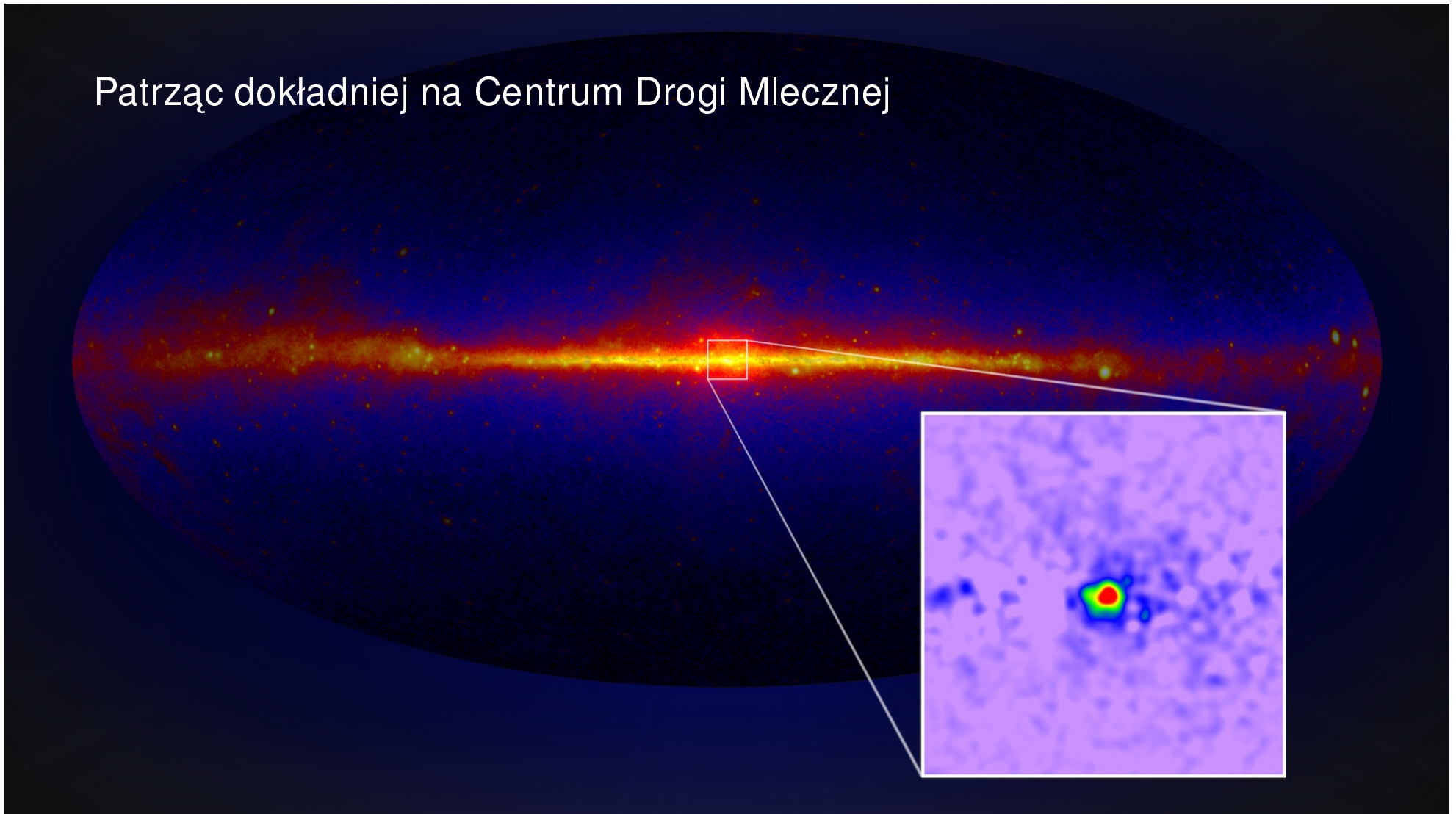
Po rekaliibracji danych efekt zmalał do ok. 3.3σ .

Biorąc pod uwagę, że obserwujemy bardzo duży zakres energii, prawdopodobieństwo, że gdziekolwiek w tym zakresie nastąpi taka fluktuacja jest ok. 10%...

Detekcja pośrednia

Wyniki FERMI

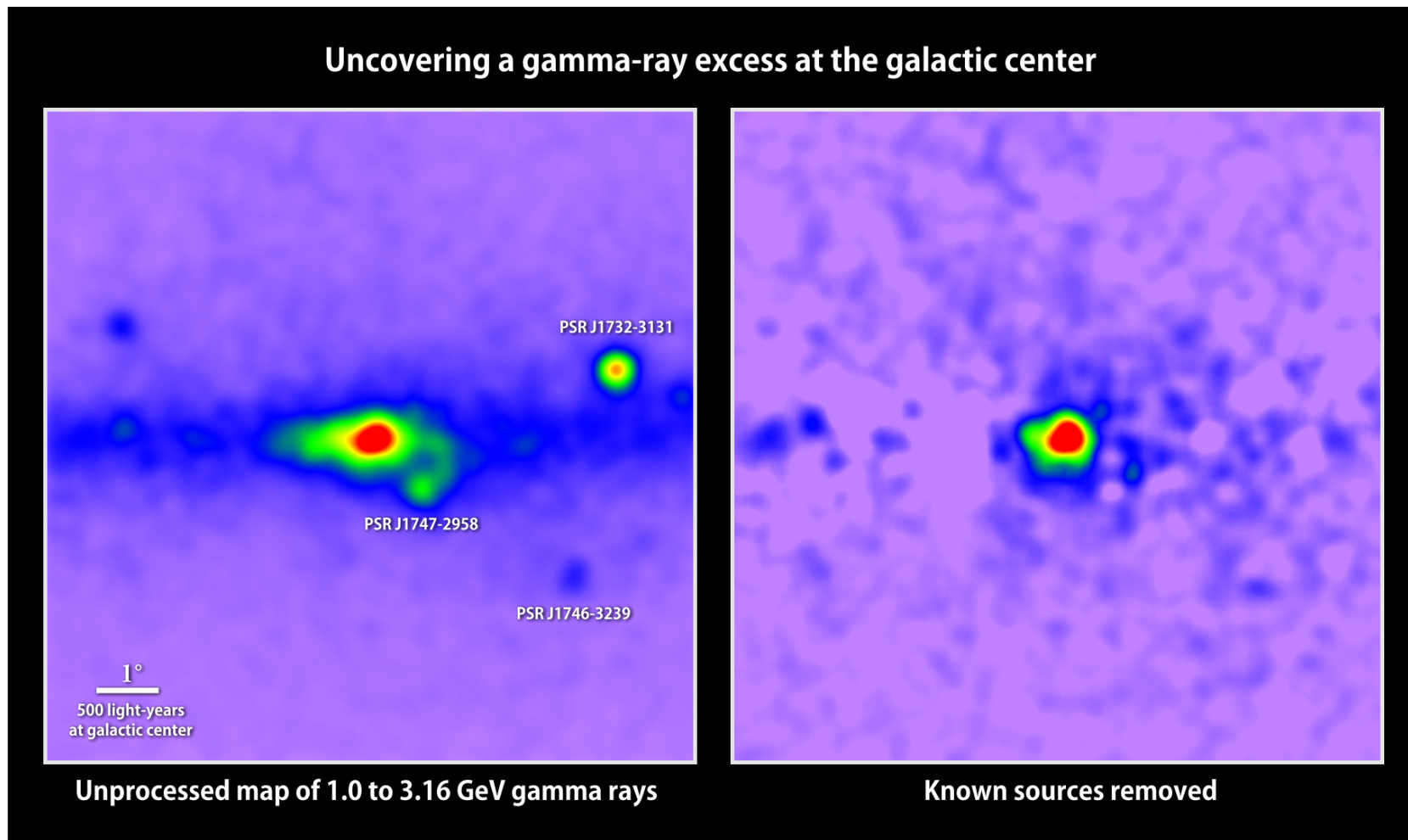
Patrząc dokładniej na Centrum Drogi Mlecznej



Detekcja pośrednia

Wyniki FERMI

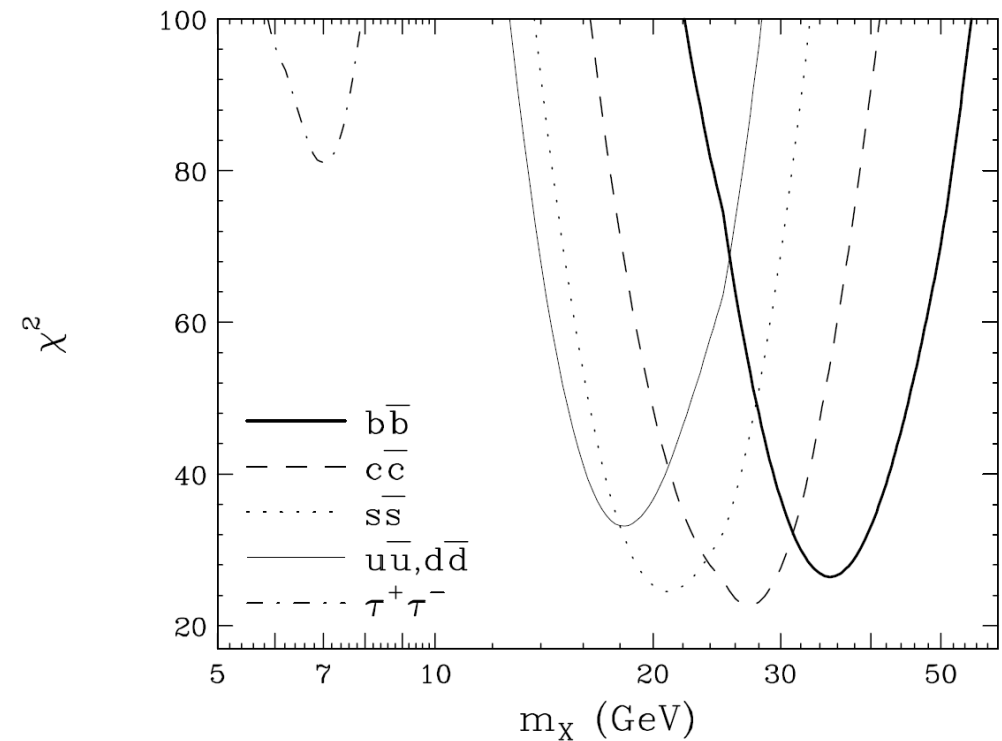
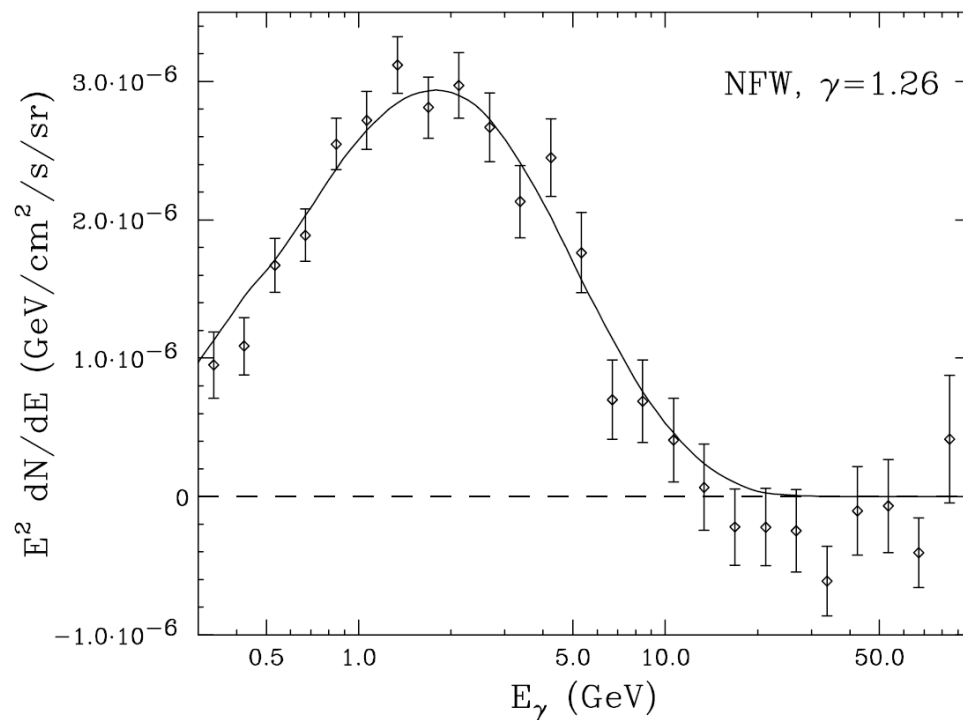
Odejmując promieniowanie znanych źródeł i modelowane promieniowanie pochodzące od znanych procesów wciąż zostaje niewielki nadmiar w zakresie energii rzędu GeV.



Detekcja pośrednia

Wyniki FERMI

Nadmiar ten można próbować modelować jako anihilację cząstek DM

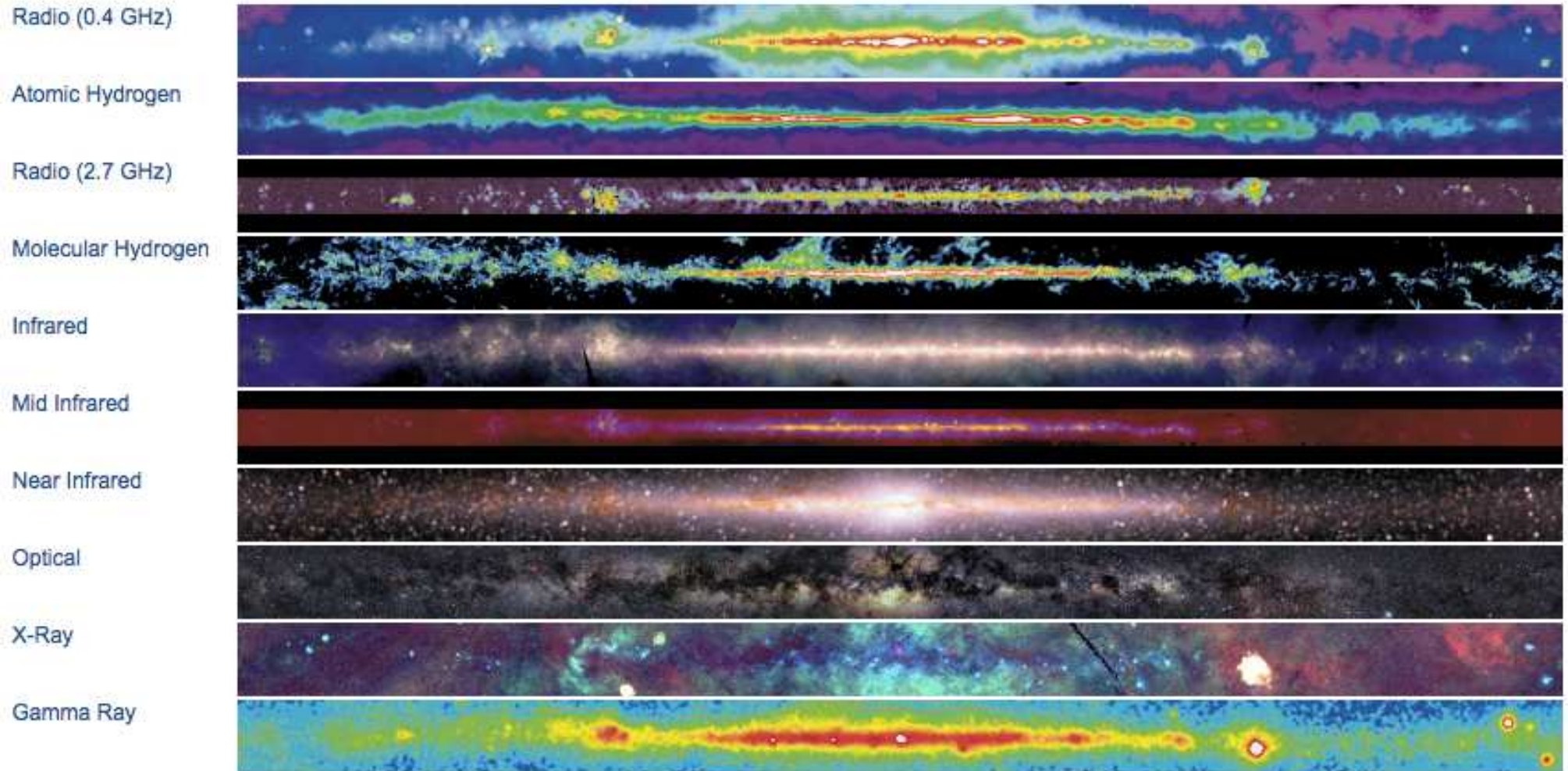


Wyniki bardzo zależą od modelowania tła galaktycznego, mogą też być opisane przez dodatkowe "znane" źródła...

Detekcja pośrednia

Centrum Galaktyki

Brak potwierdzenia w innym zakresie widma

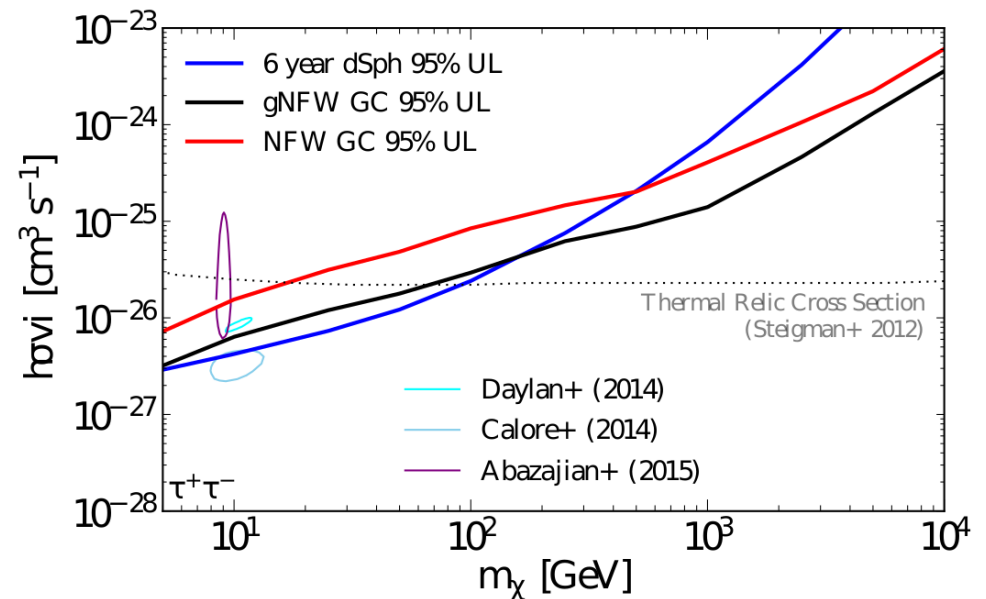
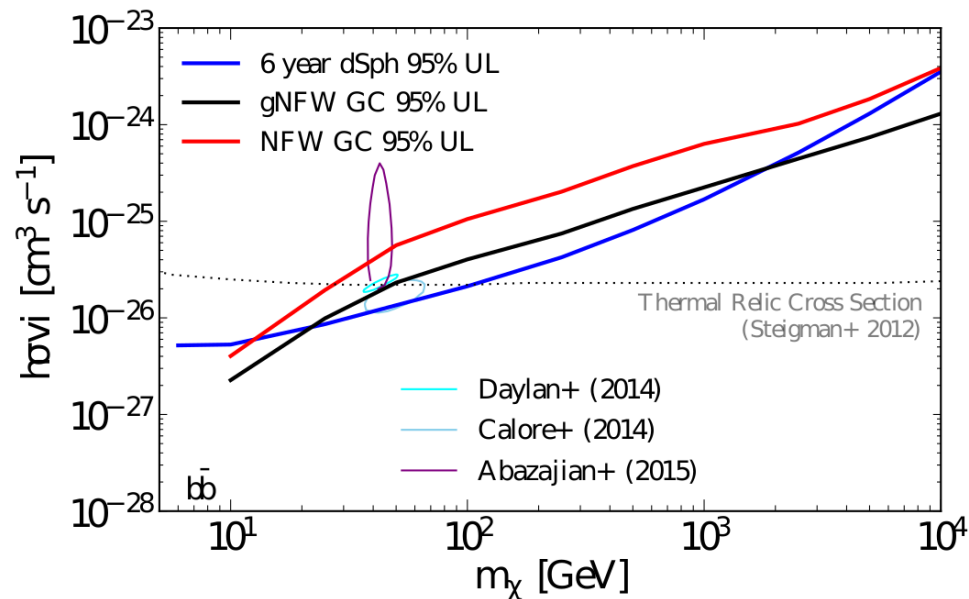


Detekcja pośrednia

Wyniki FERMI

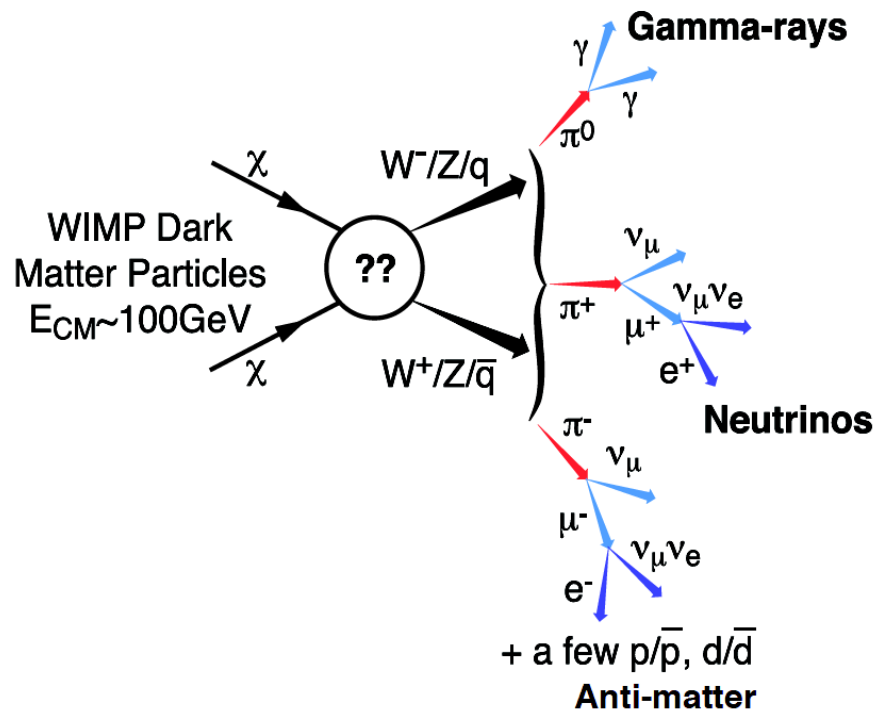
Ostatecznie w pracy z 2017 roku współpraca FERMI uznała, że choć nadmiar promieniowania w tym zakresie jest istotny to nie jest zgodny z hipotezą anihilacji DM

⇒ ograniczenia na cząstki DM w centrum galaktyki:

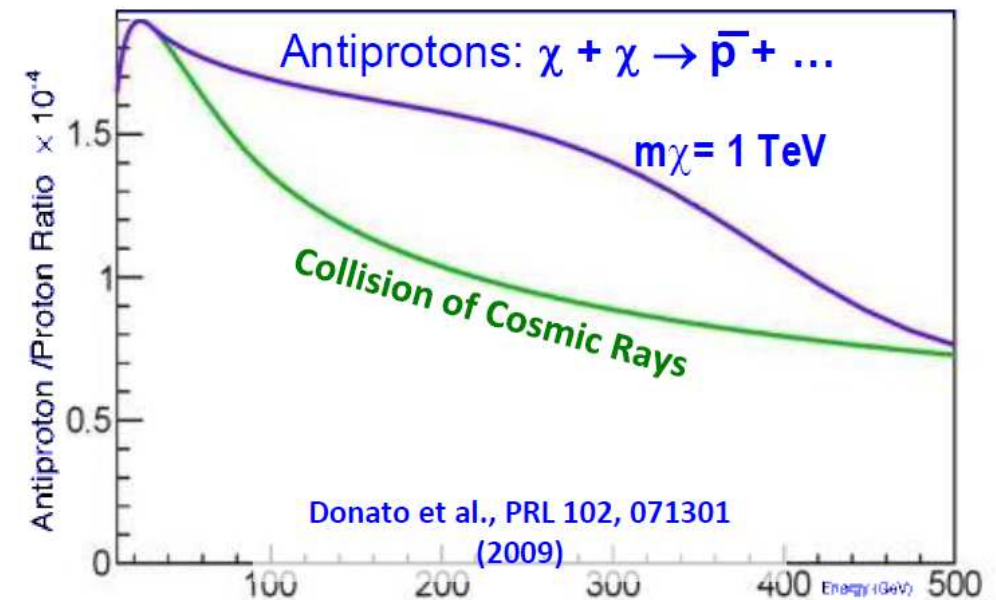


Detekcja pośrednia

Anihilacja DM



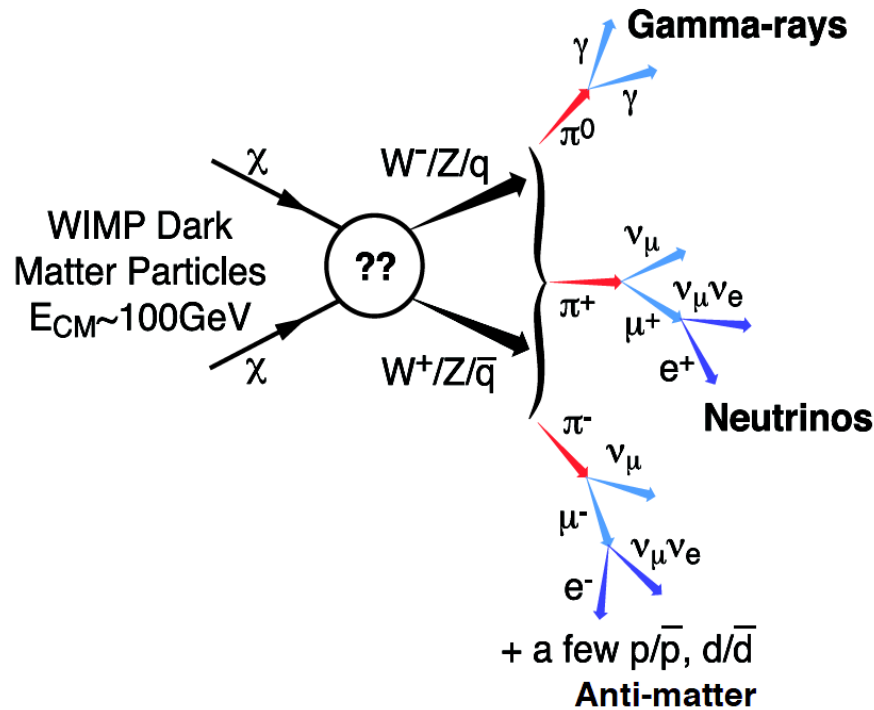
Oczekiwane widmo antyprotonów:



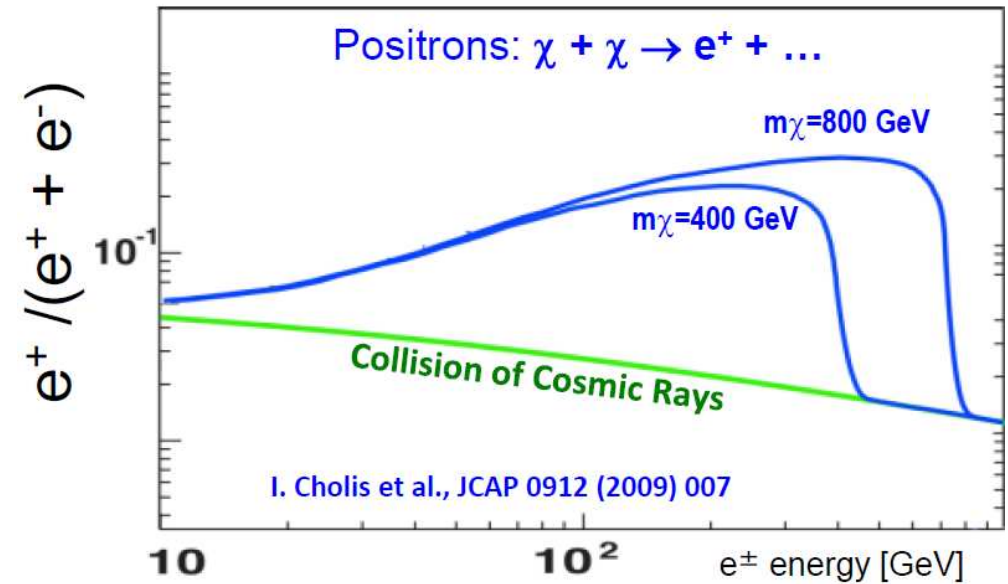
\Rightarrow wyraźna nadwyżka (ponad tło wynikające z oddziaływania promieniowania kosmicznego) oczekiwana dla $E \leq m_\chi$

Detekcja pośrednia

Anihilacja DM



Oczekiwane widmo pozytonów:

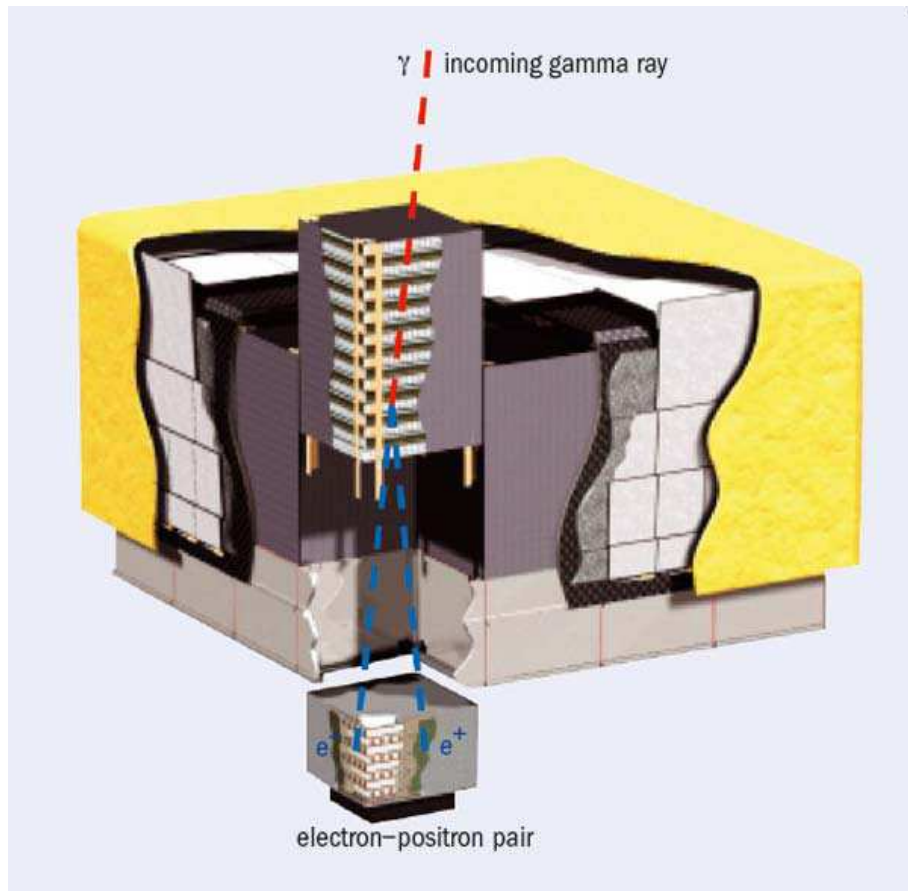


\Rightarrow wyraźna nadwyżka (ponad tło wynikające z oddziaływania promieniowania kosmicznego) oczekiwana dla $E \leq m_\chi$

\Rightarrow próg przy $E \sim m_\chi$

Detekcja pośrednia

Fermi-LAT



Detektor dedykowany pomiarowi fotonów w zakresie od 20 MeV do 300 GeV.

$1.8 \times 1.8 \times 1.0 \text{ m}^3$, 3000 kg, 650 W

Pomiar kierunku i energii fotonu na podstawie konwersji $\gamma \rightarrow e^+ e^-$

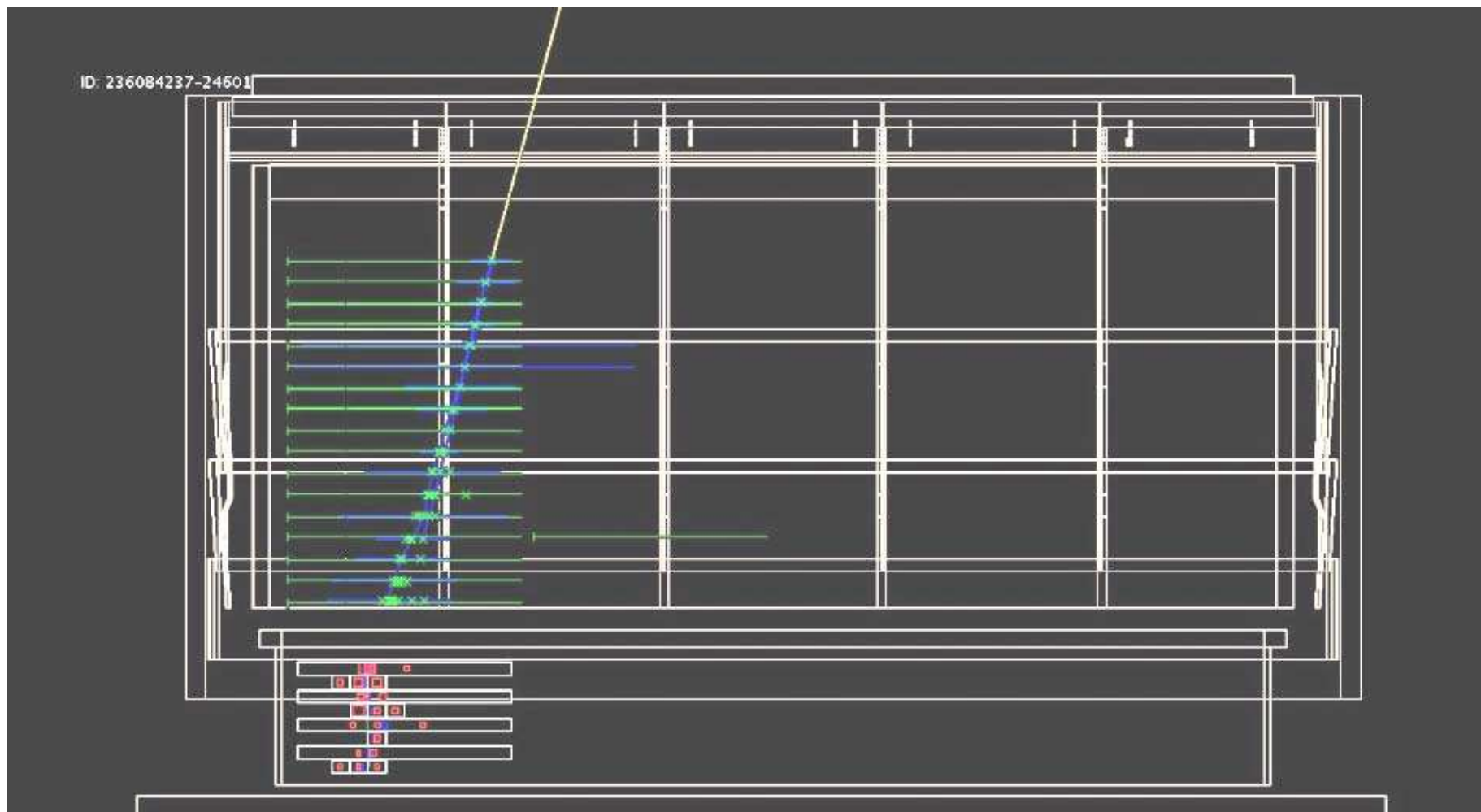
Detektor mierzy też dokładnie kierunek oraz energię elektronów i pozytonów.

Sam nie potrafi ich jednak odróżnić - brak pola magnetycznego.

Fermi-LAT

Large Area Telescope

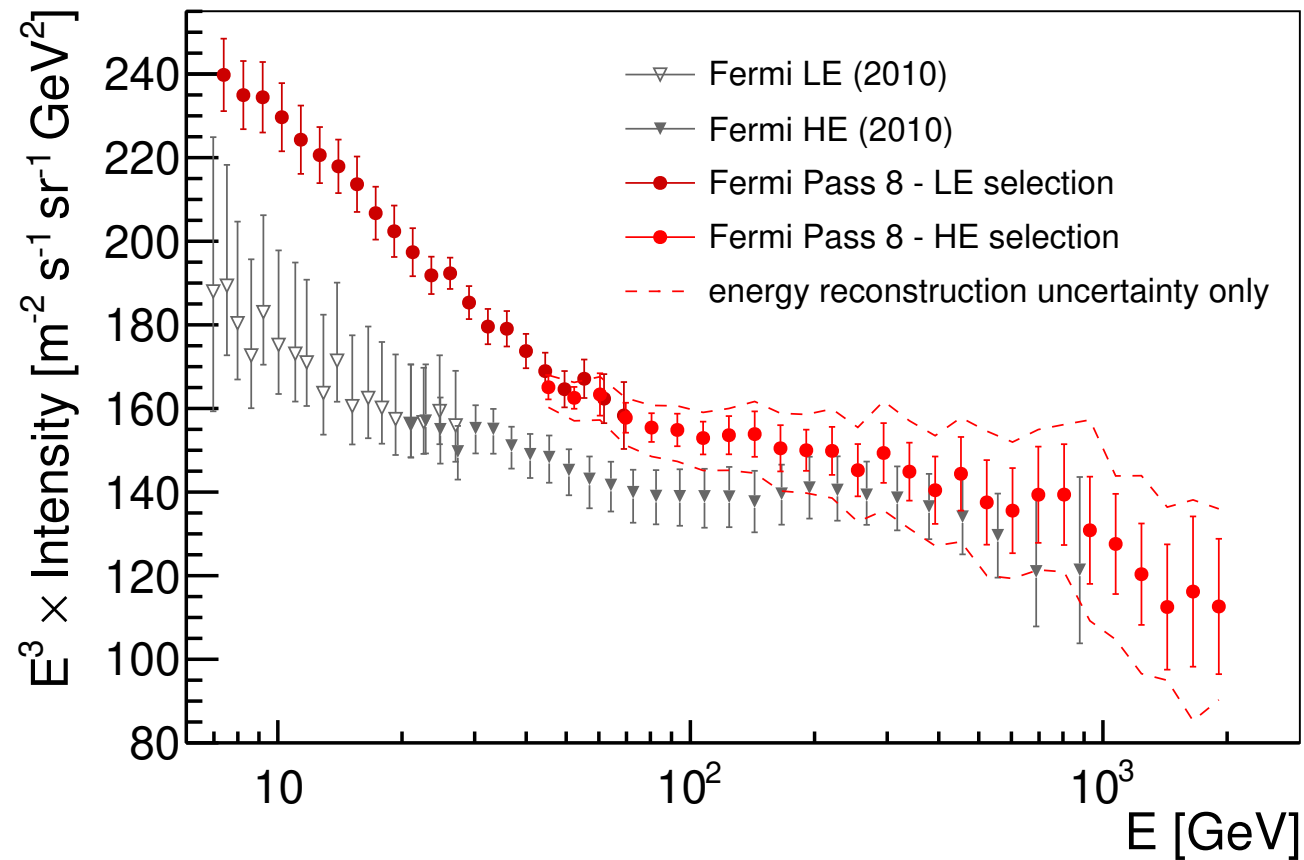
przykładowy przypadek e^\pm



Fermi-LAT

Widmo elektronów

Łączny pomiar strumienia e^+ i e^- (2017)

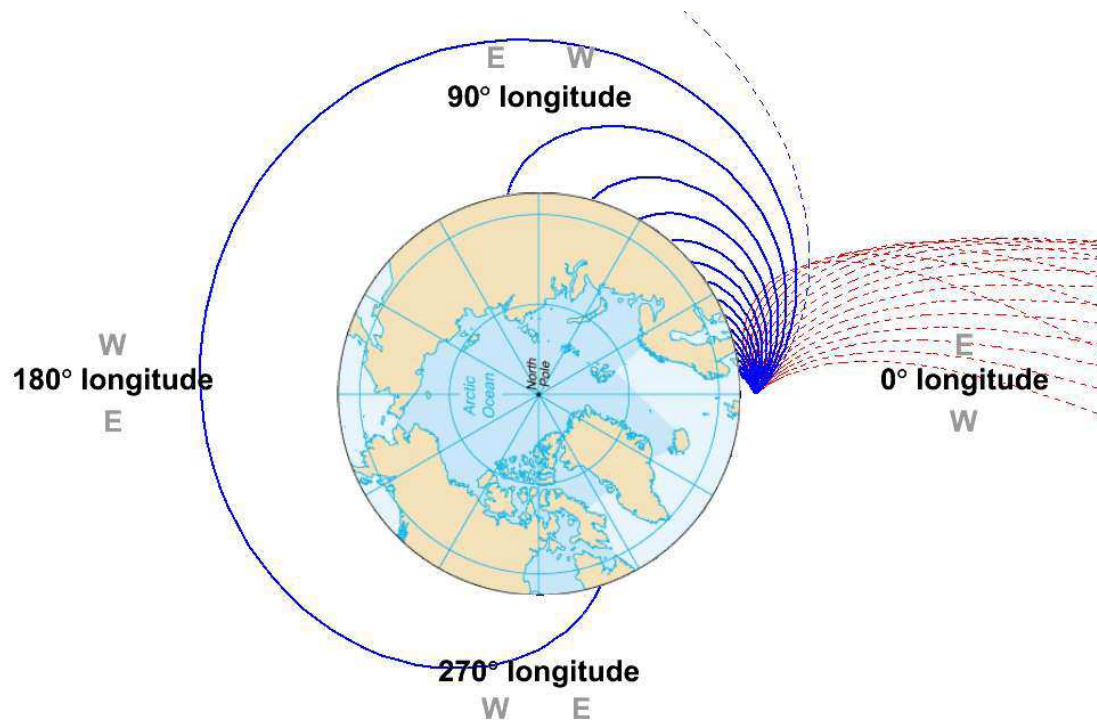


Wyraźna zmiana nachylenia widma dla $E_\gamma > 50$ GeV \Rightarrow nowa składowa ?

Fermi-LAT

Rozróżnienie e^\pm

Przy określonym ustawieniu satelity można jednak wykorzystać pole magnetyczne Ziemi. Zależnie od ustawienia satelity Ziemia może zasłaniać pole widzenia LAT.

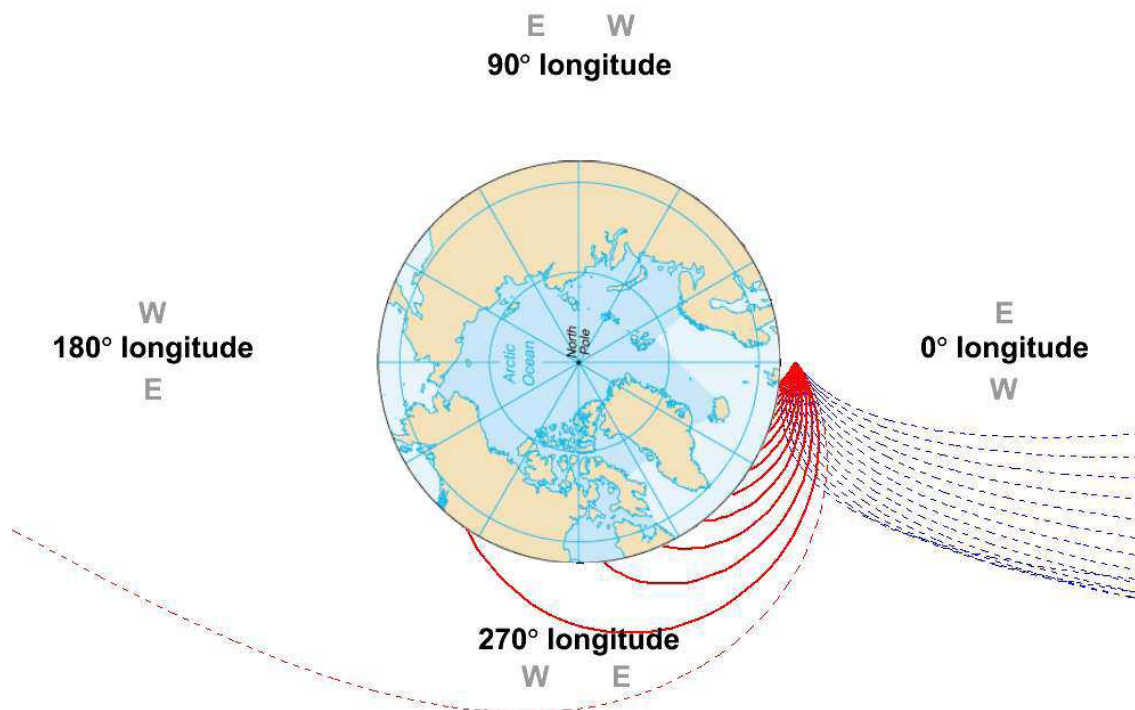


Jak satelita patrzy “na wschód” Ziemia ogranicza pole widzenia LAT dla [pozytonów](#).

Fermi-LAT

Rozróżnienie e^\pm

Przy określonym ustawieniu satelity można jednak wykorzystać pole magnetyczne Ziemi. Zależnie od ustawienia satelity Ziemia może zasłaniać pole widzenia LAT.



Jak satelita patrzy “na wschód” Ziemia ogranicza pole widzenia LAT dla **pozytonów**.

Jak satelita patrzy “na zachód” Ziemia ogranicza pole widzenia LAT dla **elektronów**.

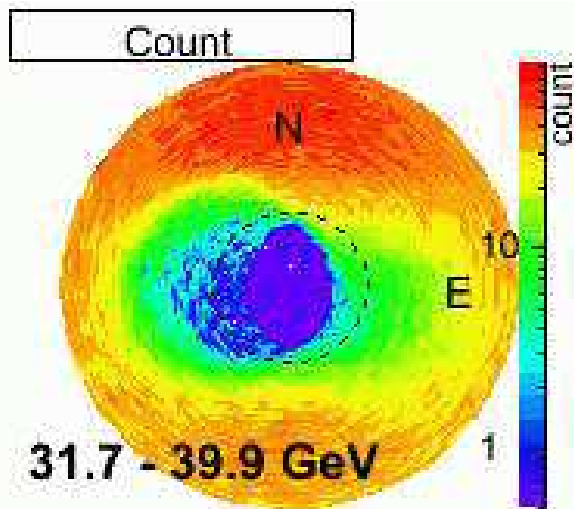
Porównując pomiary widma e^\pm dla różnych pozycji możemy wyznaczyć stosunek e^+/e^-

Fermi-LAT

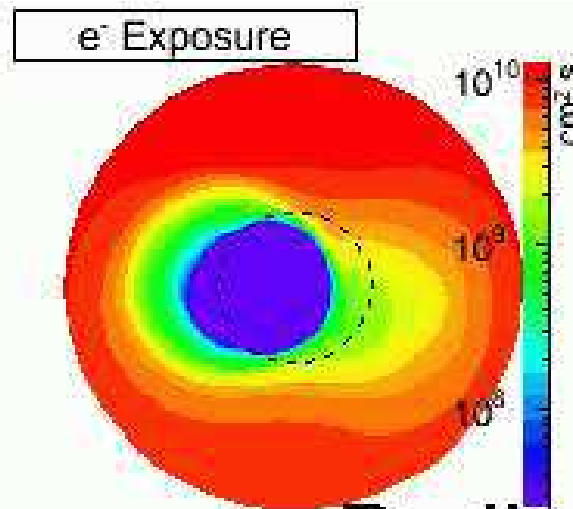
Rozróżnienie e^\pm

Wyniki detektora LAT

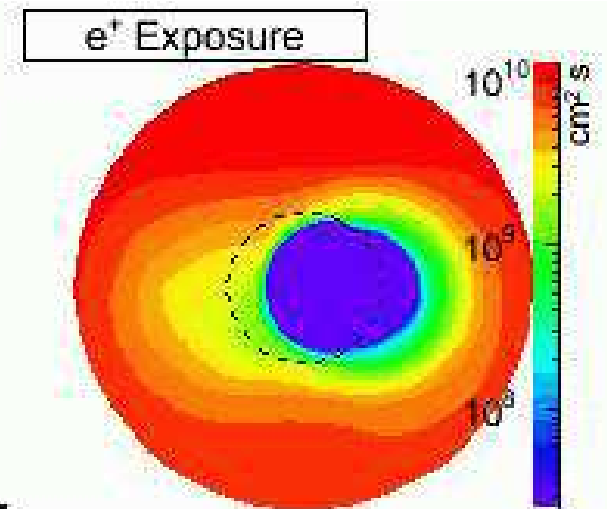
Rejestrowana częstość
cząstek naładowanych



Oczekiwany rozkład
dla elektronów



Oczekiwany rozkład
dla pozytonów



Preliminary

Linia przerywana odpowiada geometrycznemu cieniowi Ziemi.

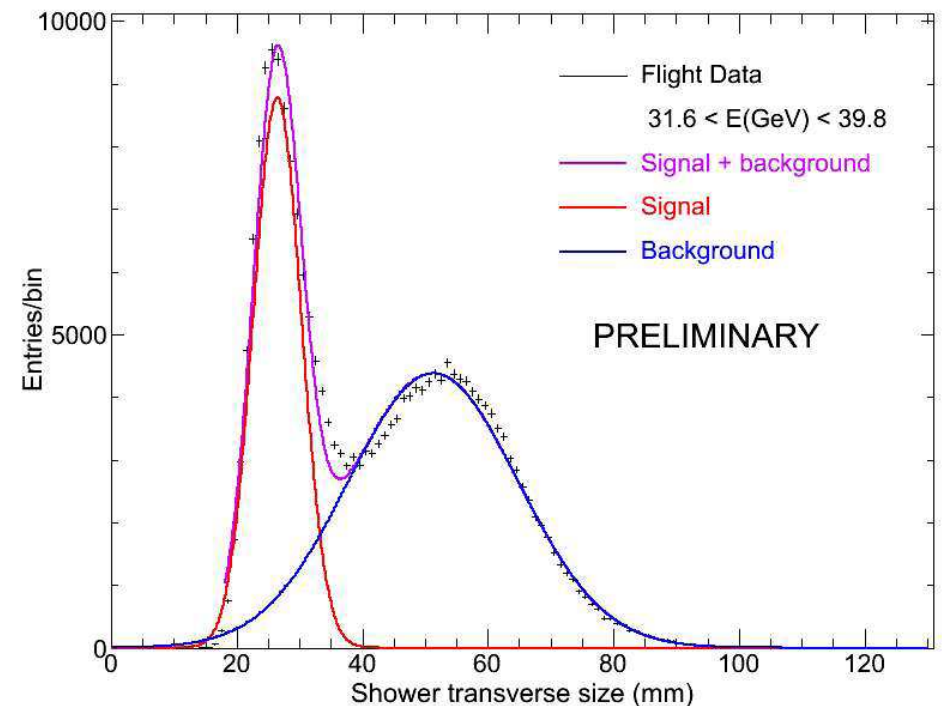
Pole magnetyczne przesuwą "cień" na zachód dla e^- , a na wschód dla e^+ .

Eliminacja tła protonów

Elektrony i pozytony nie są jedynymi rejestrowanymi cząstkami naładowanymi.

Dużą część stanowią protony, które można odróżnić od pozytonów na podstawie kształtu kaskady w kalorymetrze.

Rozkład szerokości kaskady dla przypadków bez selekcji ładunku



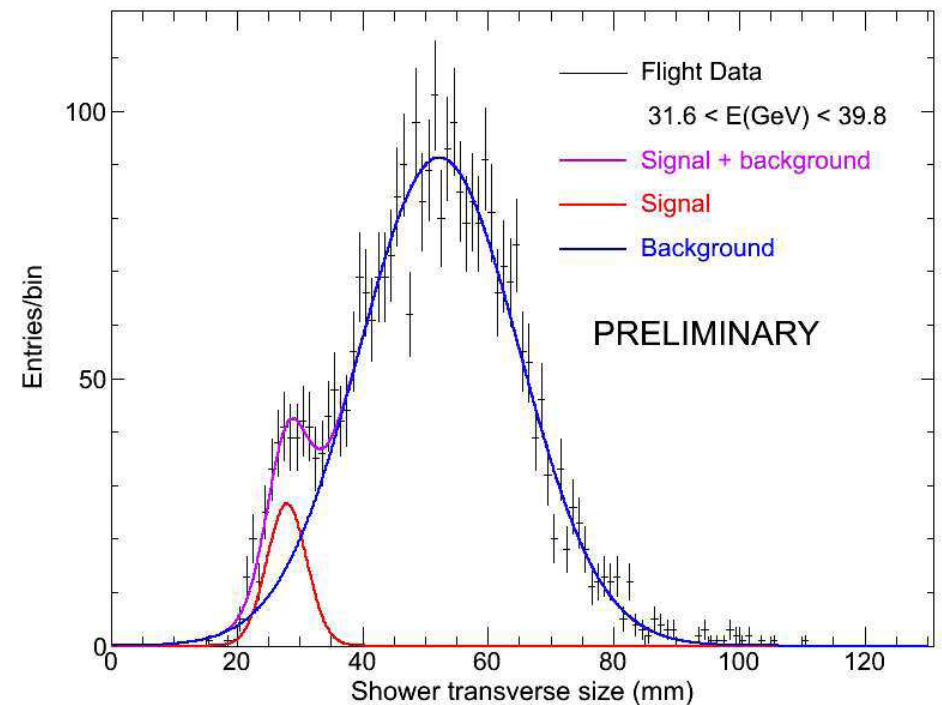
Eliminacja tła protonów

Elektrony i pozytony nie są jedynymi rejestrowanymi cząstkami naładowanymi.

Dużą część stanowią protony, które można odróżnić od pozytonów na podstawie kształtu kaskady w kalorymetrze.

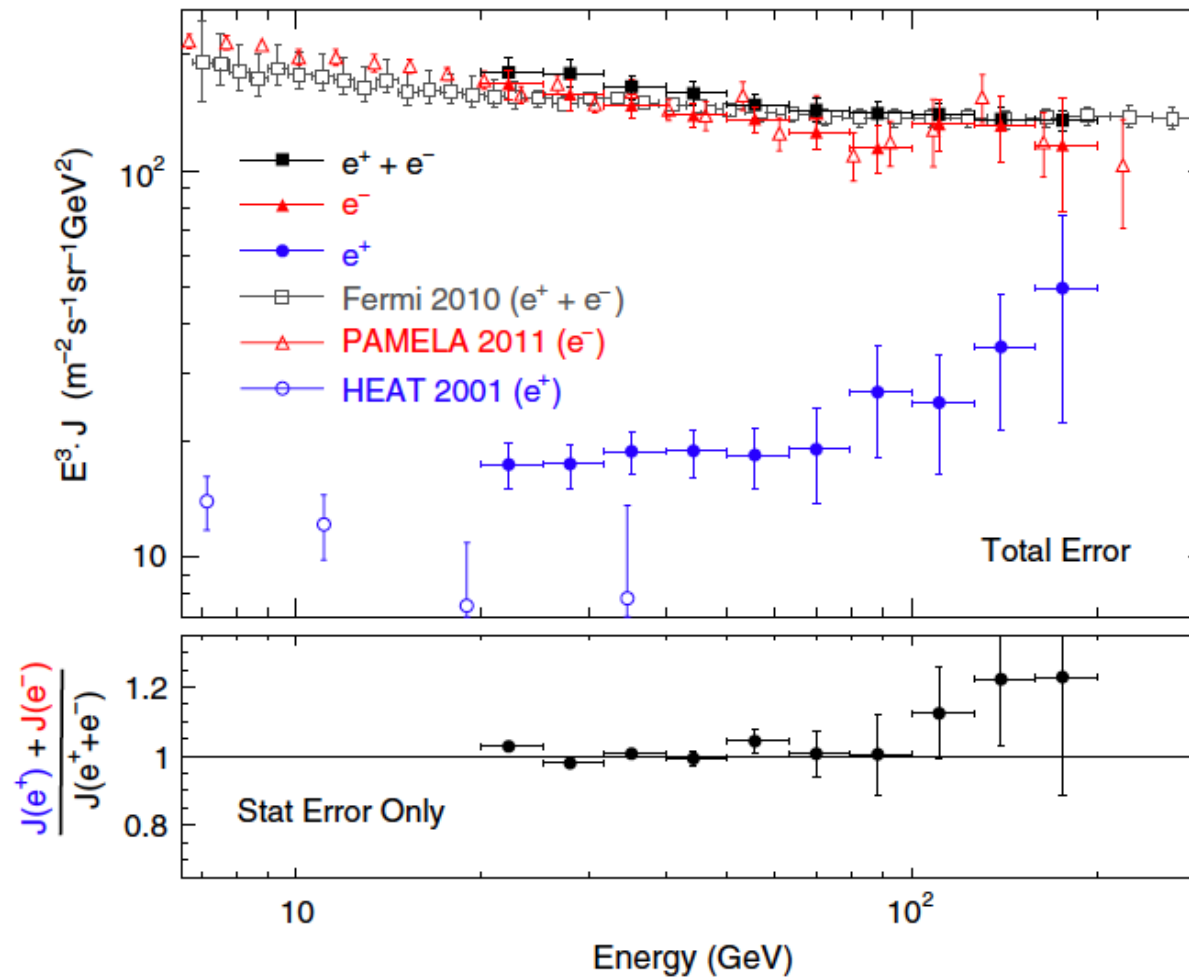
Udział pozytonów można wyznaczyć statystycznie na podstawie dopasowania

Rozkład szerokości kaskady dla przypadków uznanych za cząstki dodatnie



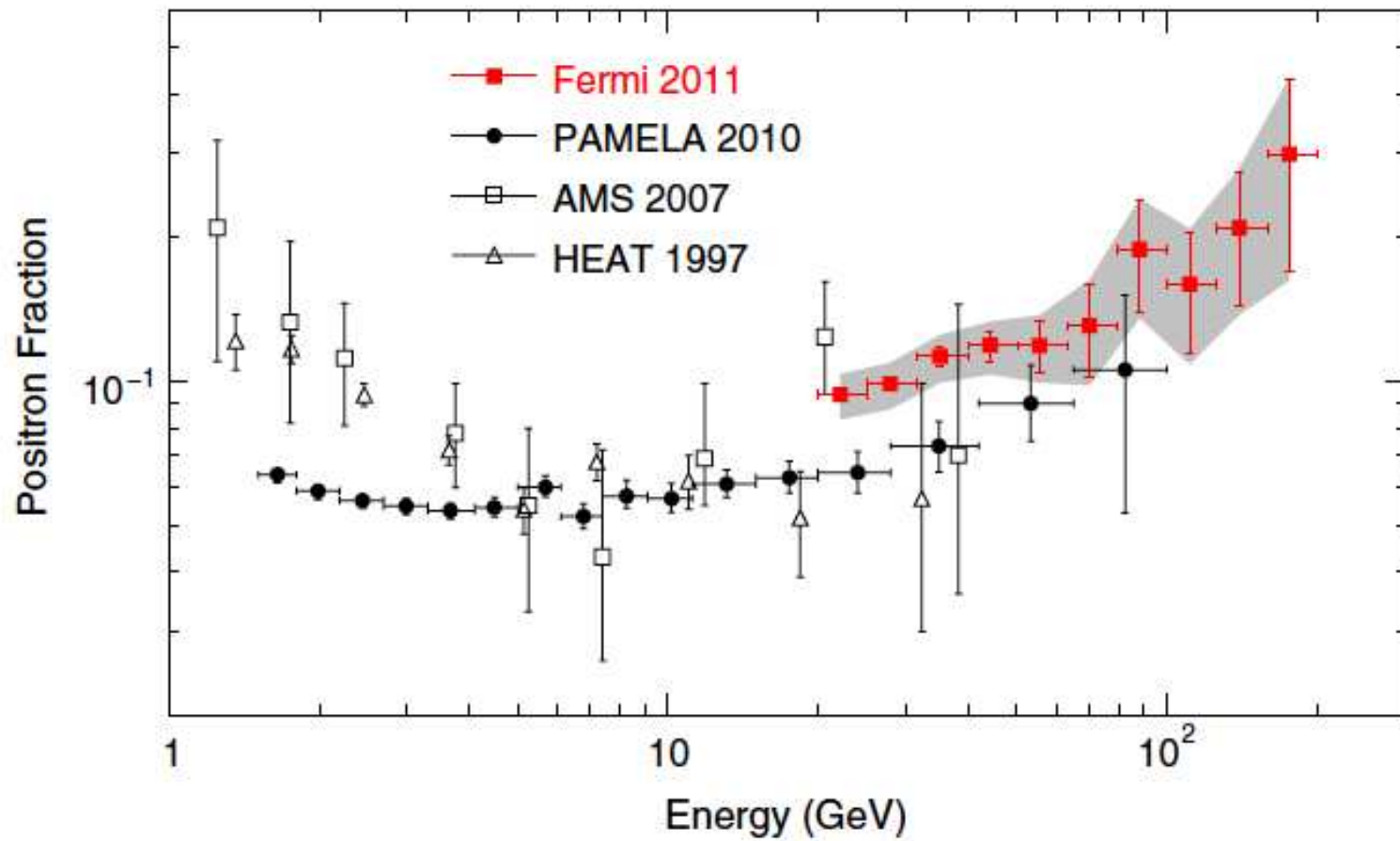
Fermi-LAT

Wyniki pomiaru e^\pm



Fermi-LAT

Wyniki pomiaru e^\pm

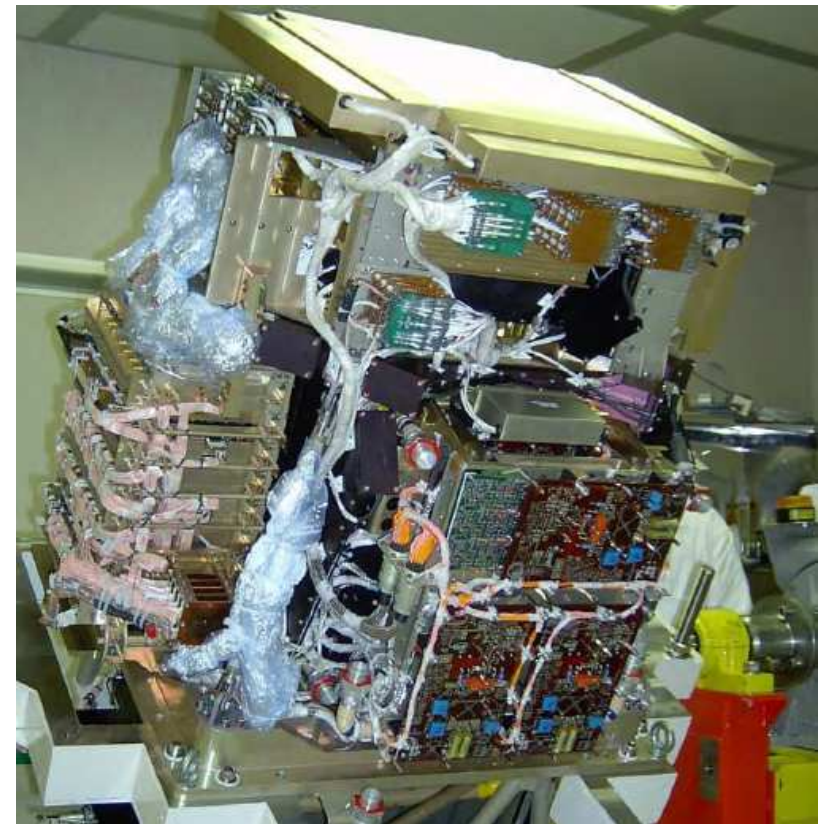


Detekcja pośrednia

PAMELA

Eksperyment na satelicie Resurs-DK1. Wystrzelony w 2006.

Główny cel: dokładny pomiar widma i składu promieniowania kosmicznego.



PAMELA

Detektor satelitalny

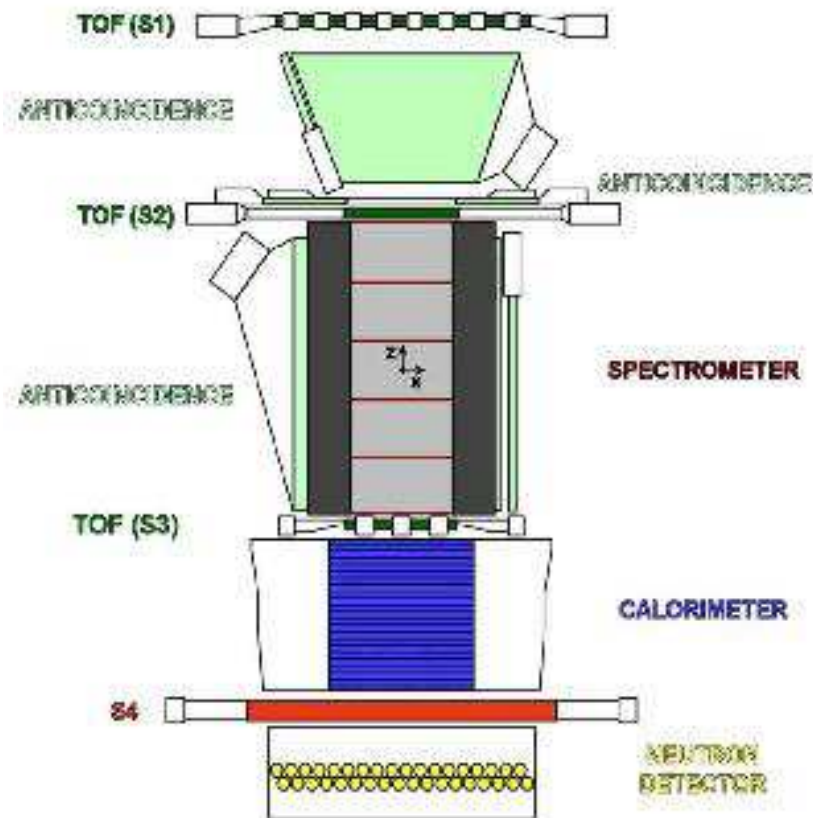


Zakładany zakres pomiarów:

- elektrony do 400 GeV
elektrony/pozytony do 2 TeV (bez ładunku)
- protony do 700 GeV
- antyprotony 80 MeV – 150 GeV
- pozytony 50 MeV – 270 GeV
- lekkie jądra do 200 GeV/n

PAMELA

Detektor satelitarny



Pomiar i identyfikacja wpadających cząstek podobnie jak w eksperymentach HEP.

Główne elementy detektora:

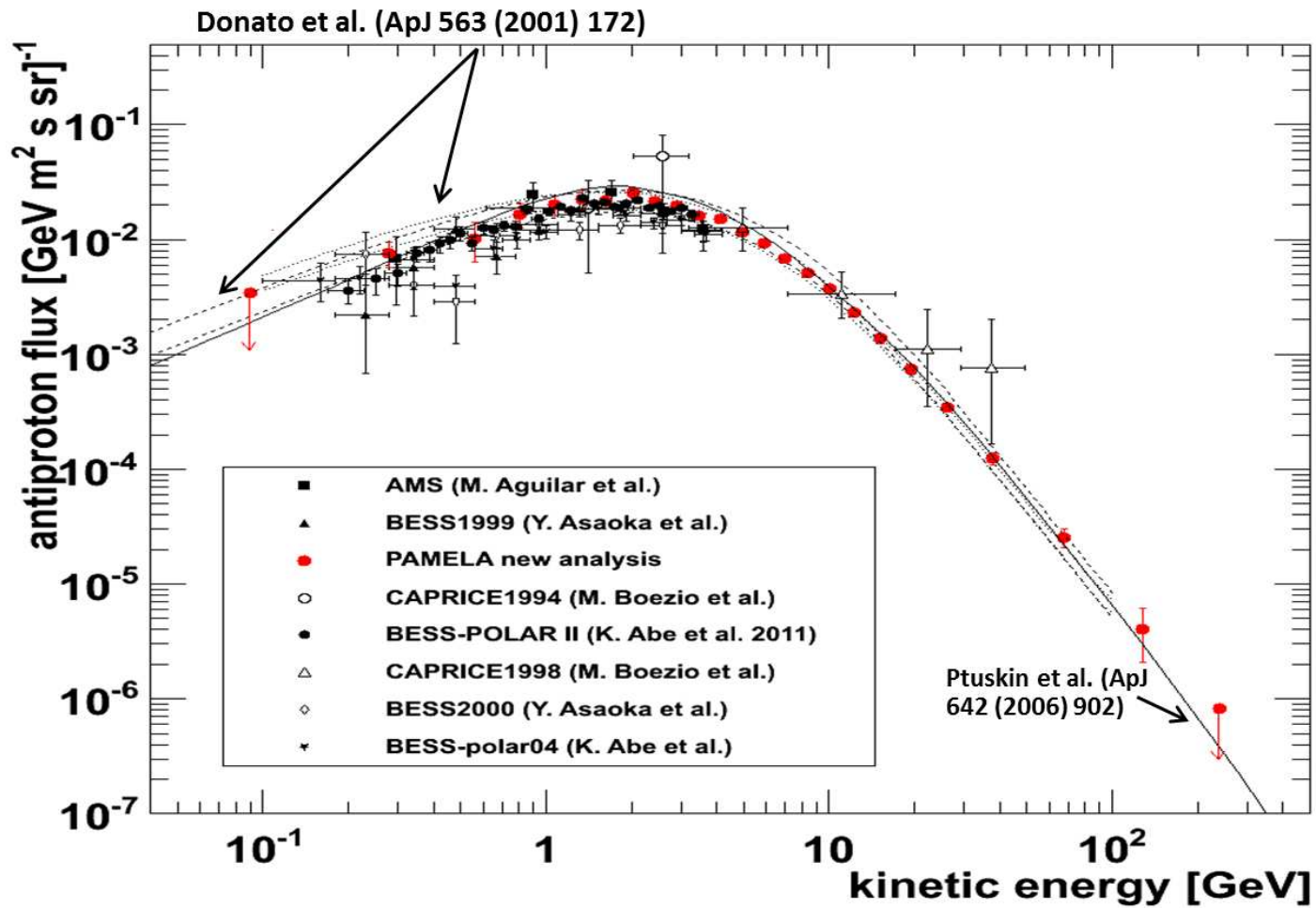
- Liczniki czasu przelotu (TOF) scyntylator + PMT
- spektrometr stały magnes i paskowe detektory krzemowe
- kalorymetr elektromagnetyczny wolfram i detektory krzemowe
- detektor neutronów

Rozmiar: $130 \times 70 \times 70 \text{ cm}^3$, 470 kg.

Zasilanie: 360 W.

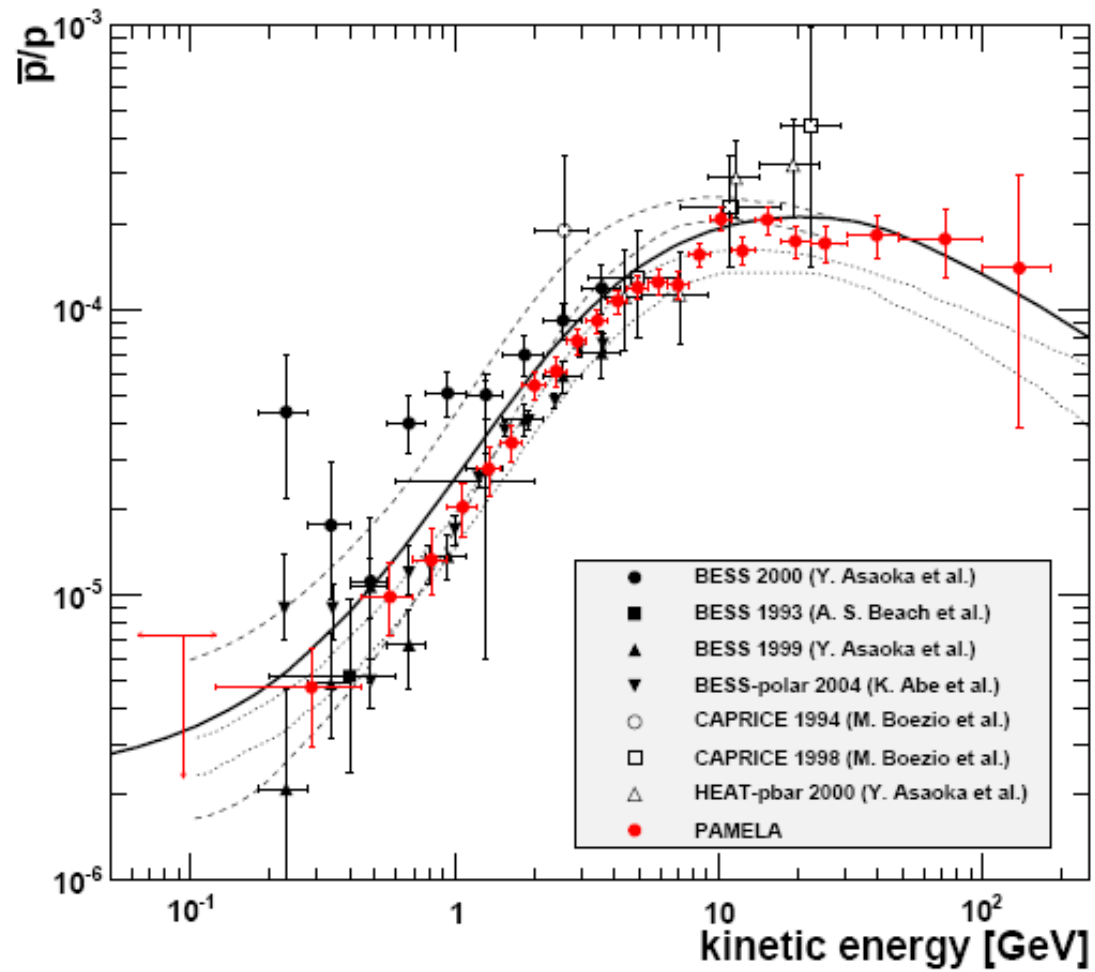
PAMELA

Wyniki pomiaru \bar{p}



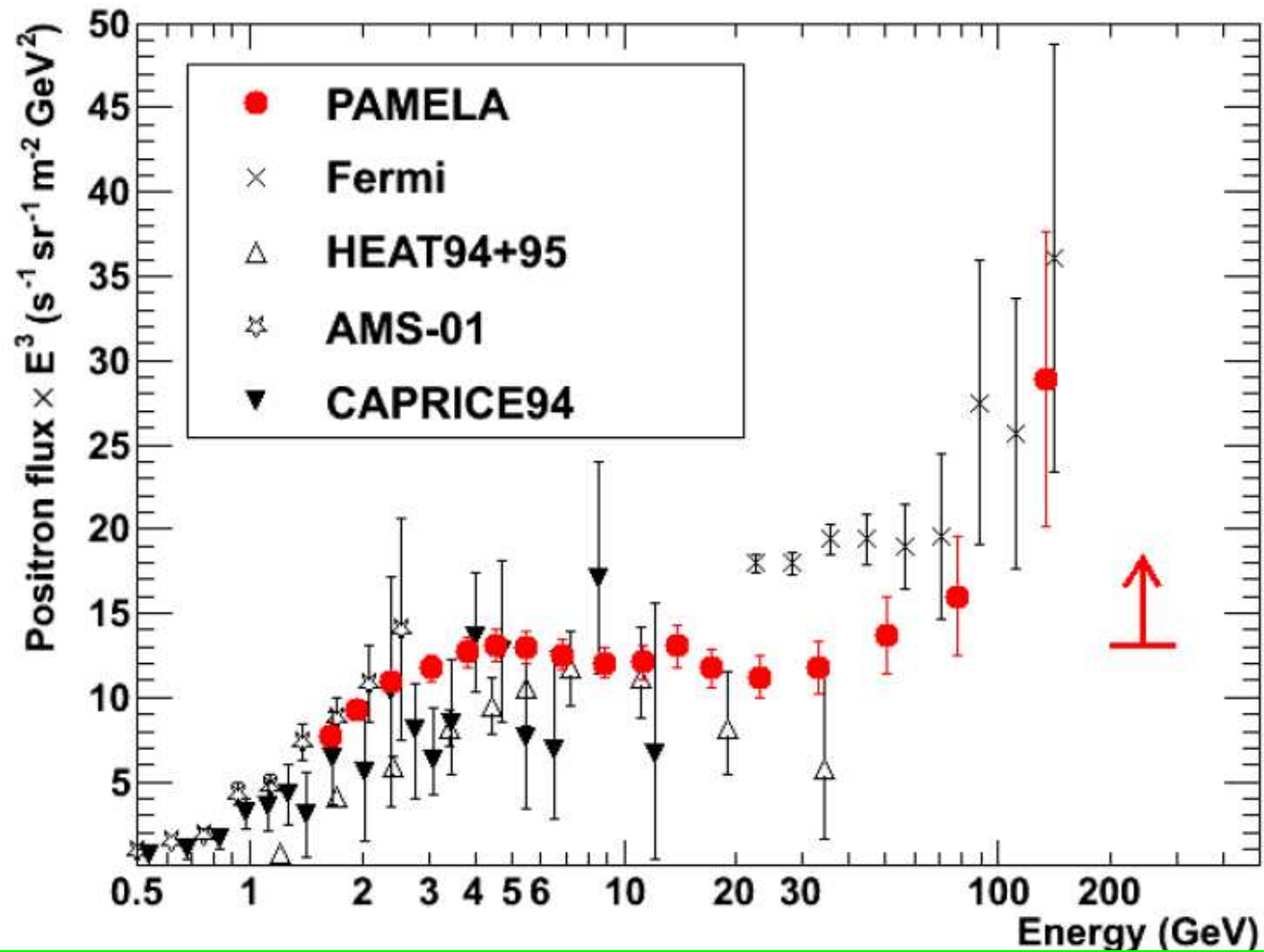
PAMELA

Wyniki pomiaru \bar{p}



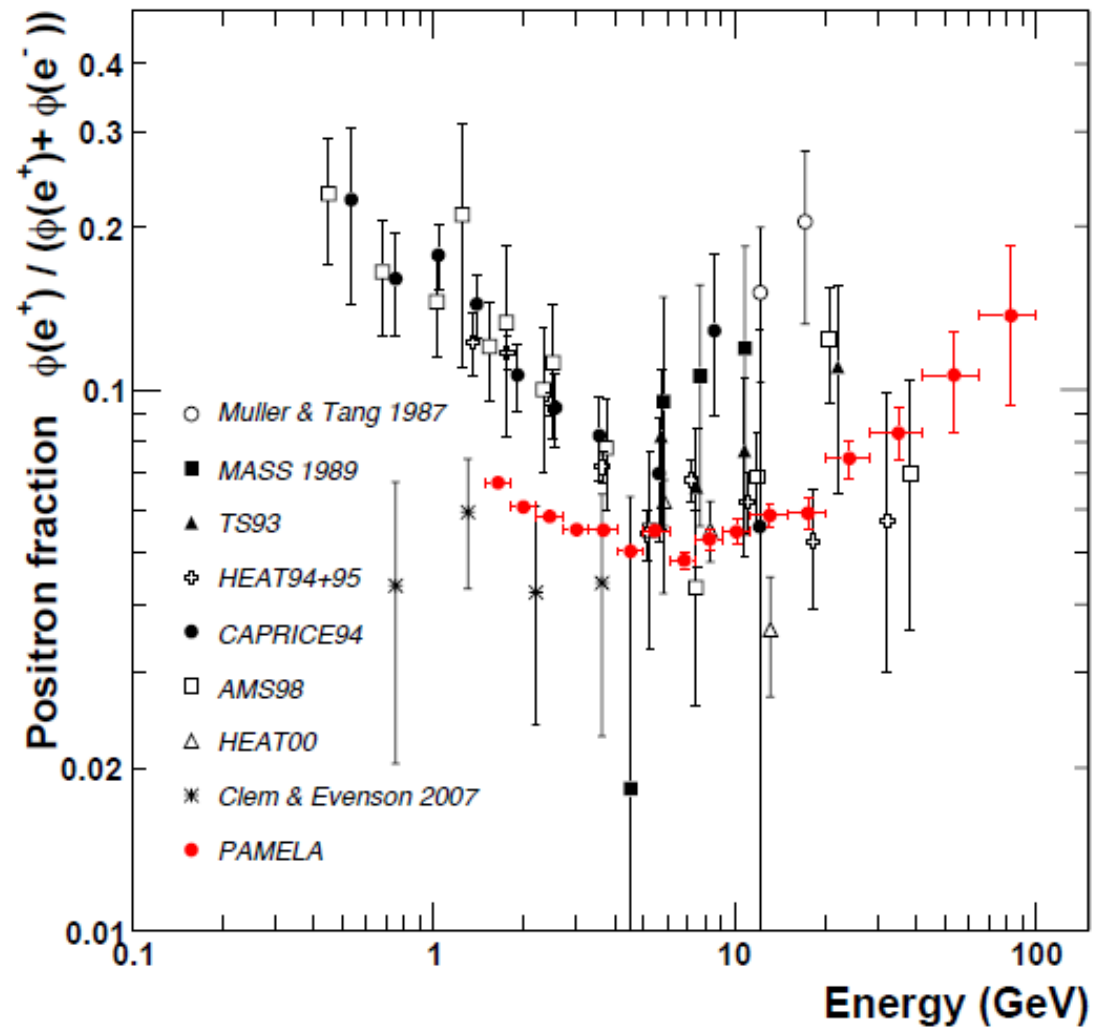
PAMELA

Wyniki pomiaru e^+



PAMELA

Wyniki pomiaru e^+



Detekcja pośrednia

AMS-02

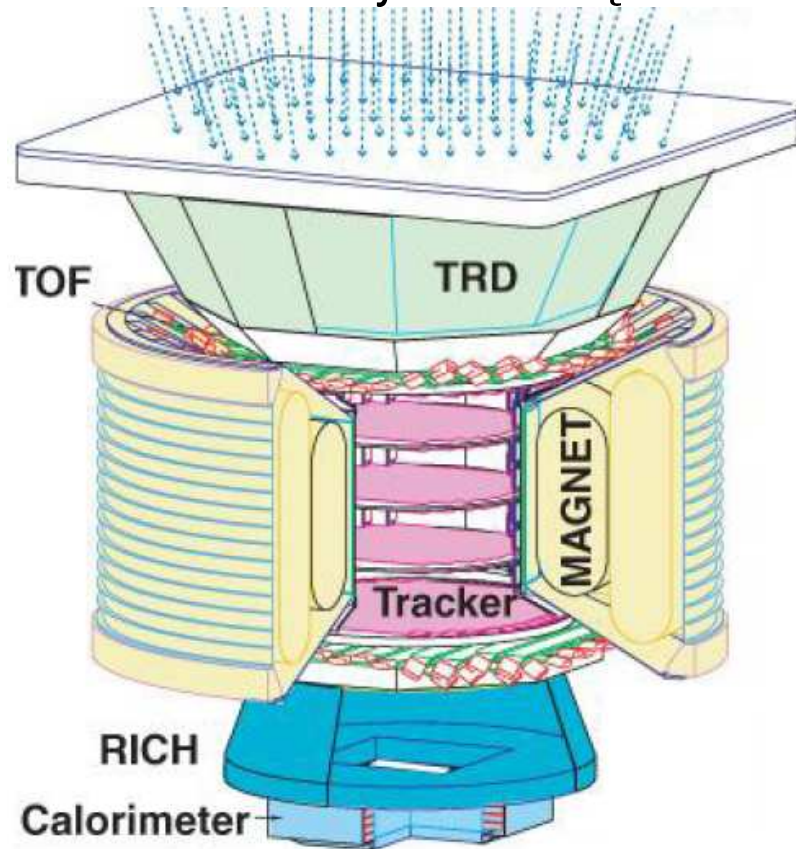
Eksperyment na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS), uruchomiony w 2011.



AMS-02

Detektor orbitalny

Detektor uniwersalny strukturą bardzo podobny do eksperymentów HEP.



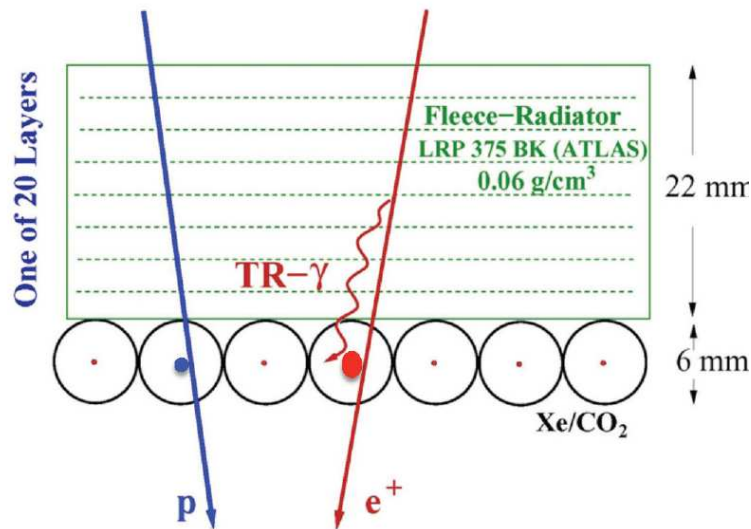
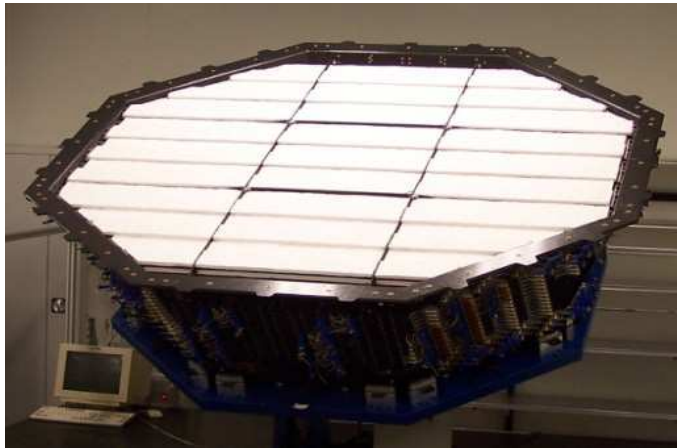
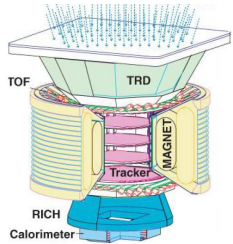
Znacznie większy niż PAMELA: $5 \times 4 \times 3 \text{ m}^3$, 7500 kg.

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.

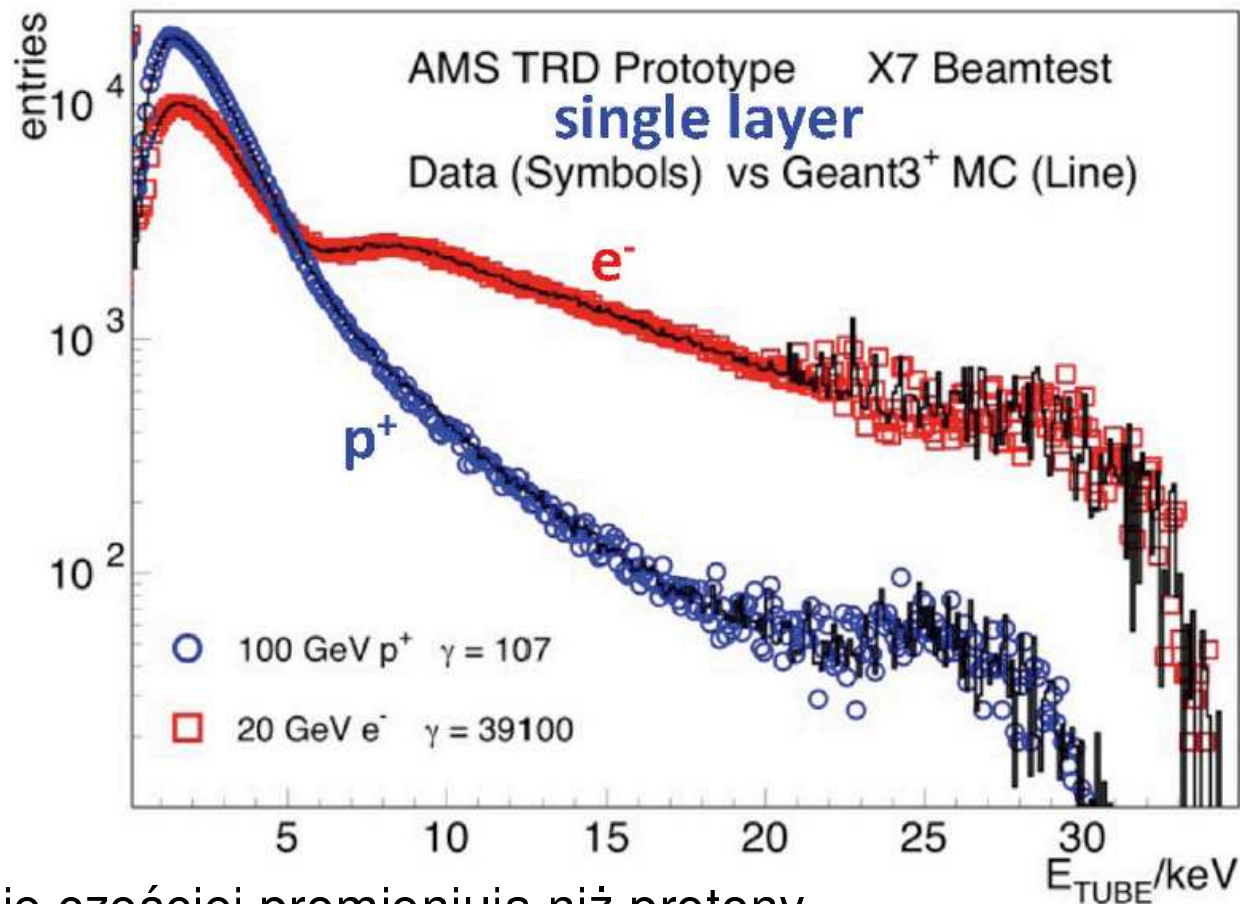
⇒ dla danej energii znacznie większe dla e^\pm niż innych cząstek

⇒ indetyfikacja e^\pm

AMS-02

TRD

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

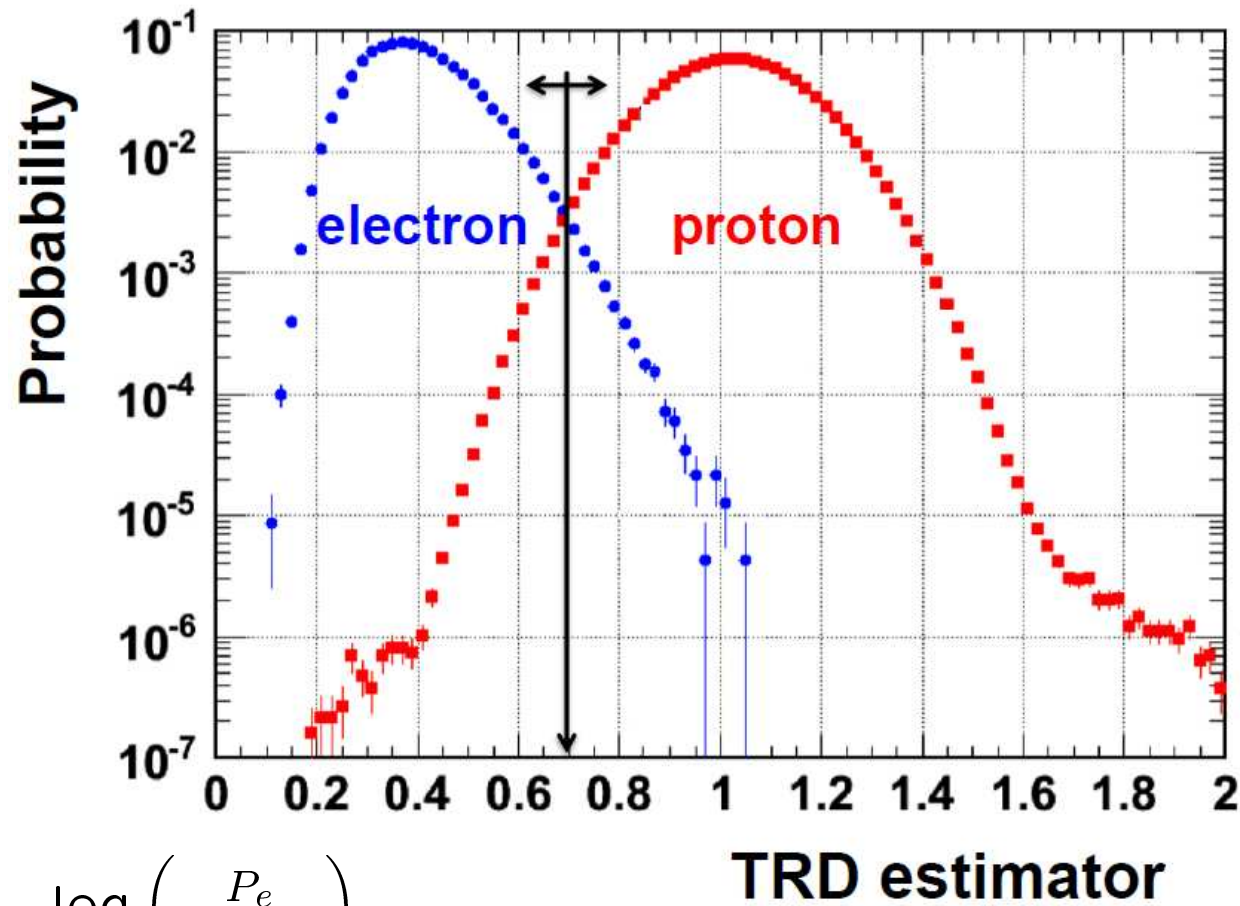


Elektrony znacznie częściej promieniują niż protony.
Choć w jednej warstwie najczęściej brak jest sygnału...

AMS-02

TRD

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

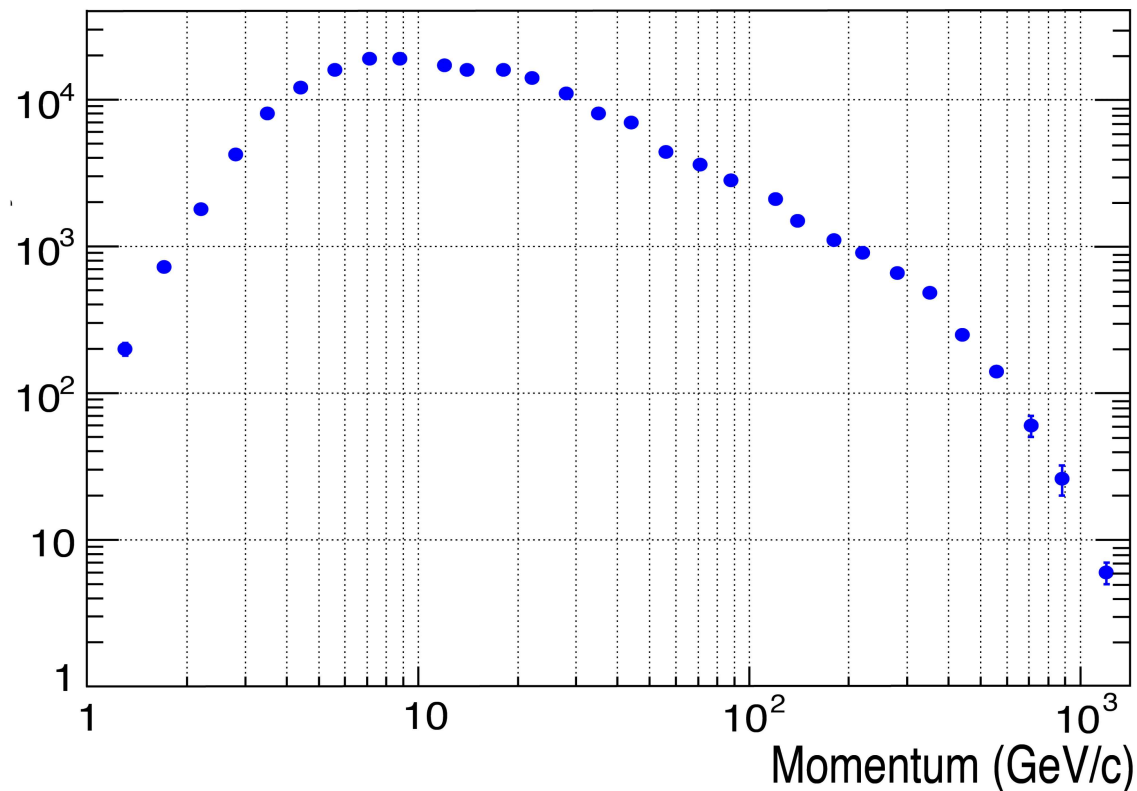


$$\text{TRD estimator} = -\log\left(\frac{P_e}{P_e + P_p}\right)$$

AMS-02

TRD

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

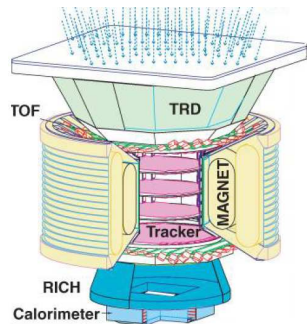


TRD pozwala na redukcję tła protonów (w pomiarze e^+ z eff. = 90%) o czynnik do $\sim 10^4$

AMS-02

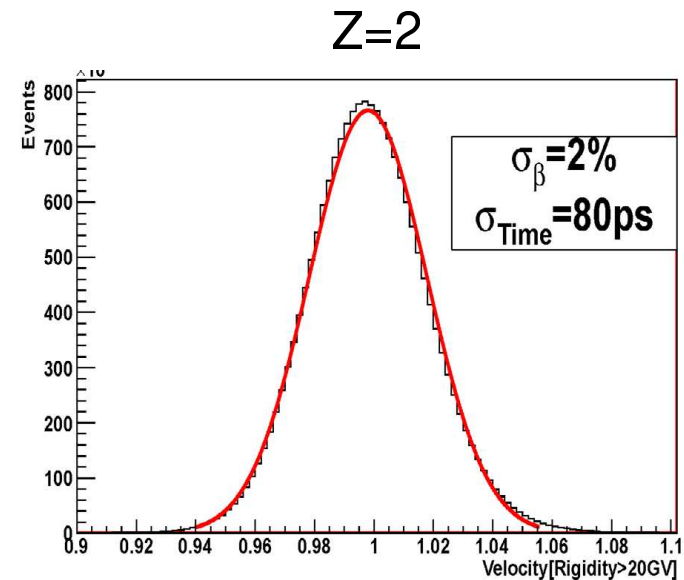
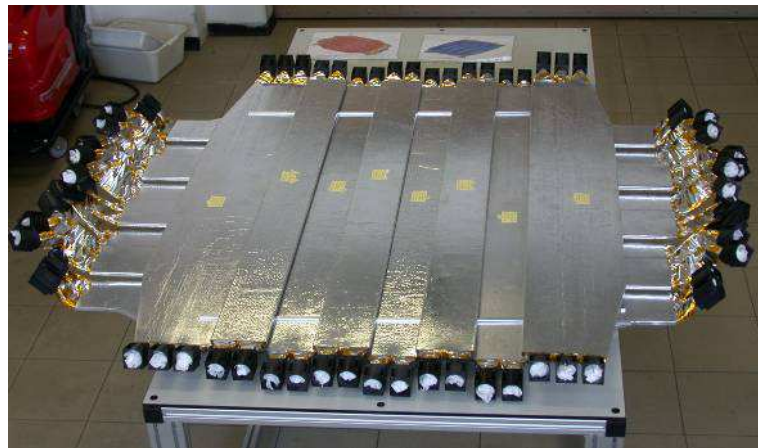
TOF

Time-Of-Flight detector



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

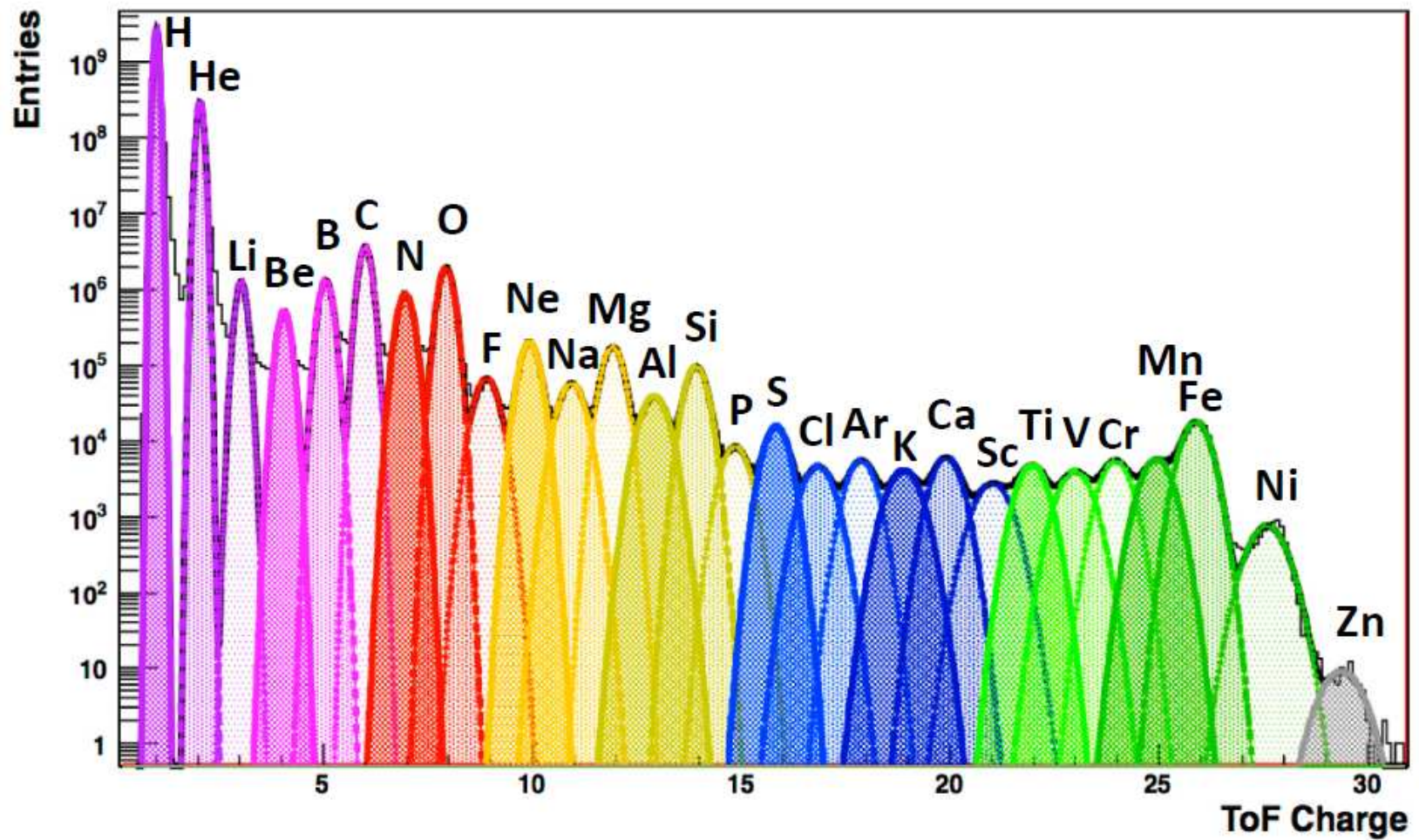
Przykład pomiaru prędkości dla cząstek z $p/q > 20 \text{ GeV}/c$



AMS-02

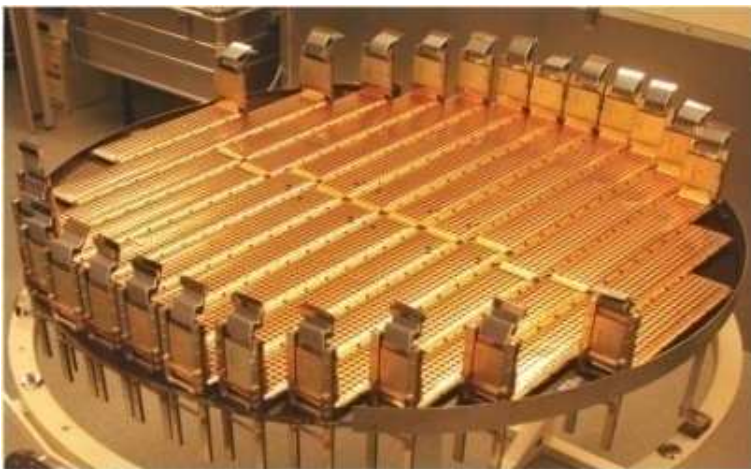
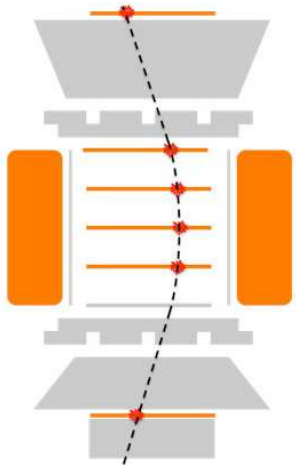
TOF

Rozkład zmierzonego ładunku czastek wraz z dopasowaniem:



AMS-02

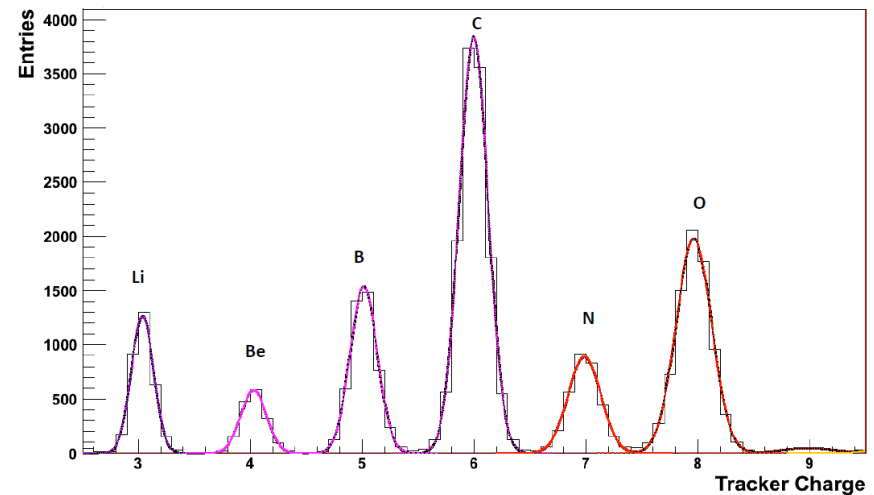
Spektrometr



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 $\frac{dE}{dx}$

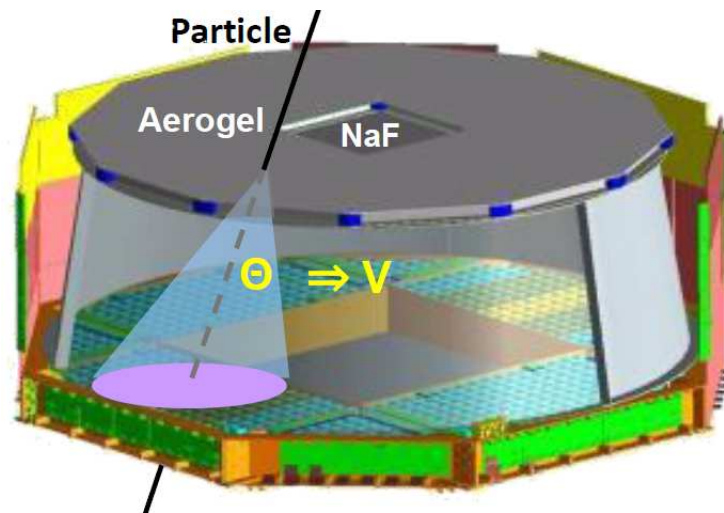
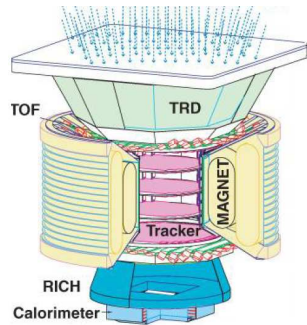
Przykład pomiaru ładunku



AMS-02

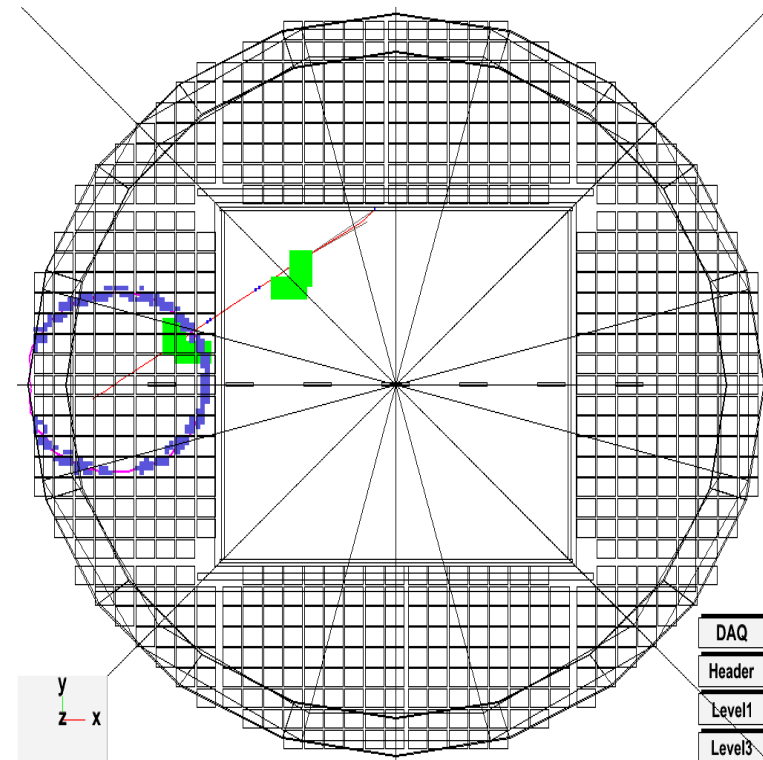
RICH

Ring Imaging Cherenkov counter



Pozwala na pomiar prędkości cząstek.

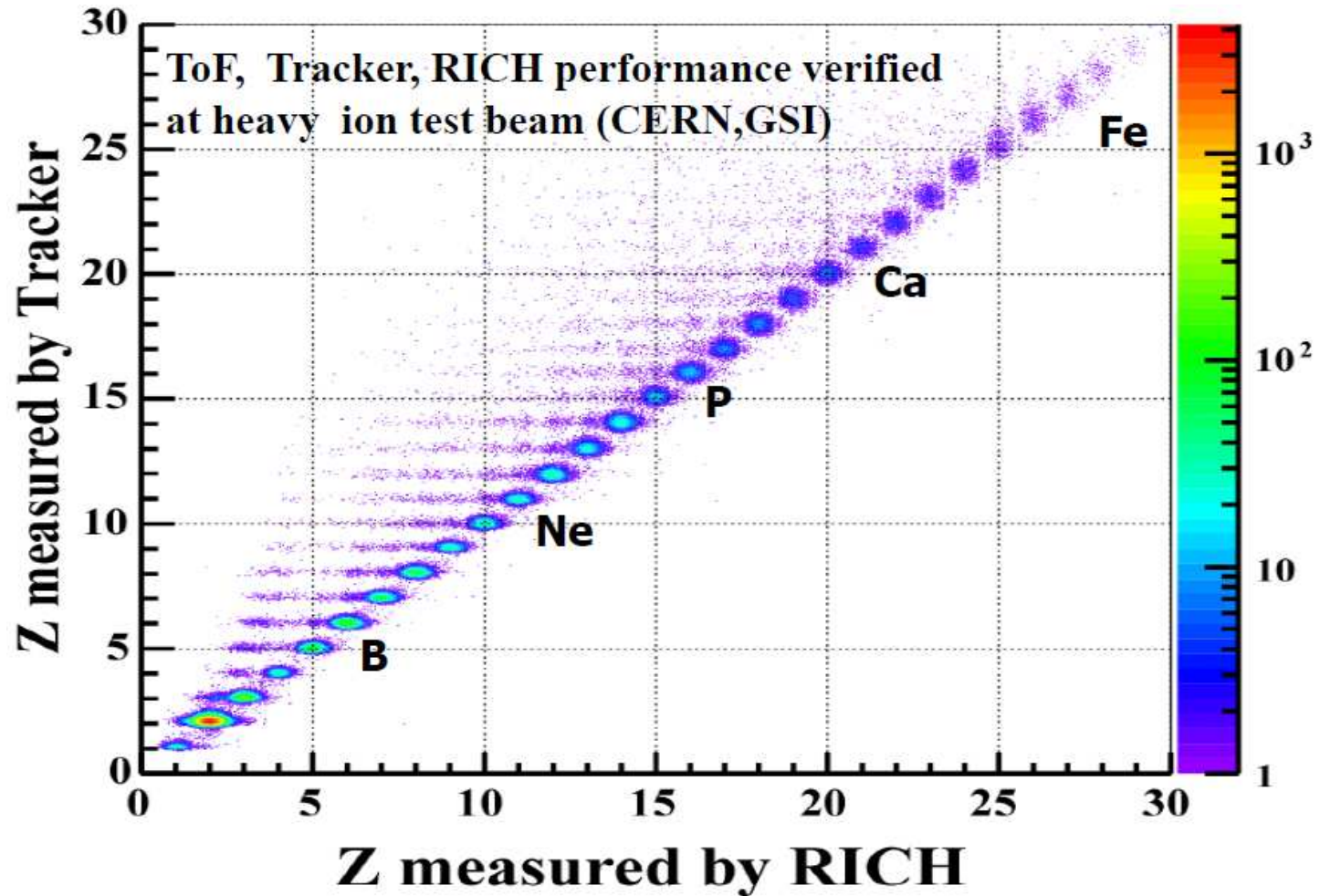
Przykładowy przypadek rejestracji jądra Al:



AMS-02

RICH

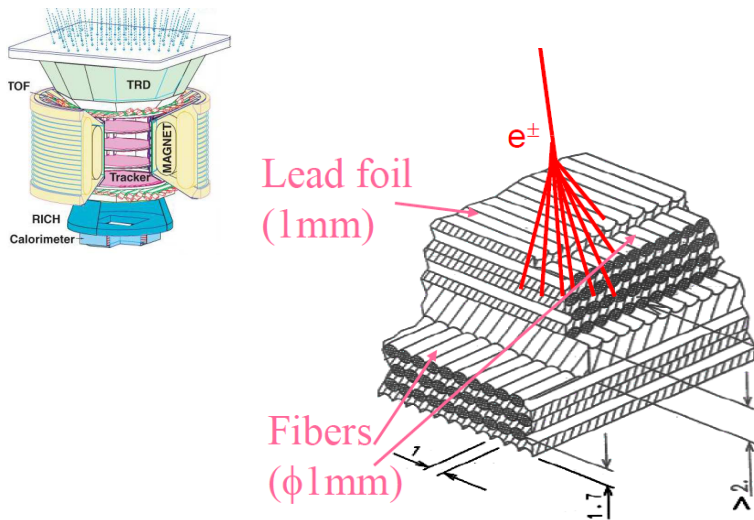
Pozwala także na pomiar ładunku przechodzącej cząsteczki (jonu):



AMS-02

ECAL

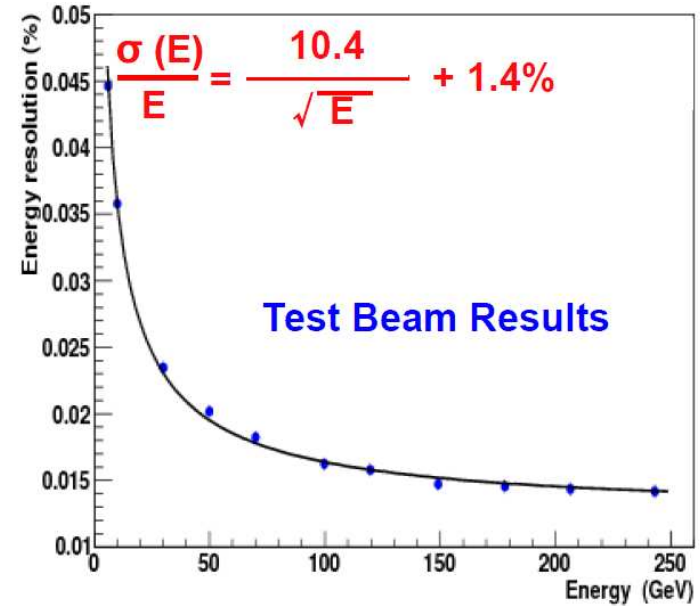
Kalorymetr elektromagnetyczny



600 kg ołowiu ($17 X_0$)

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

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

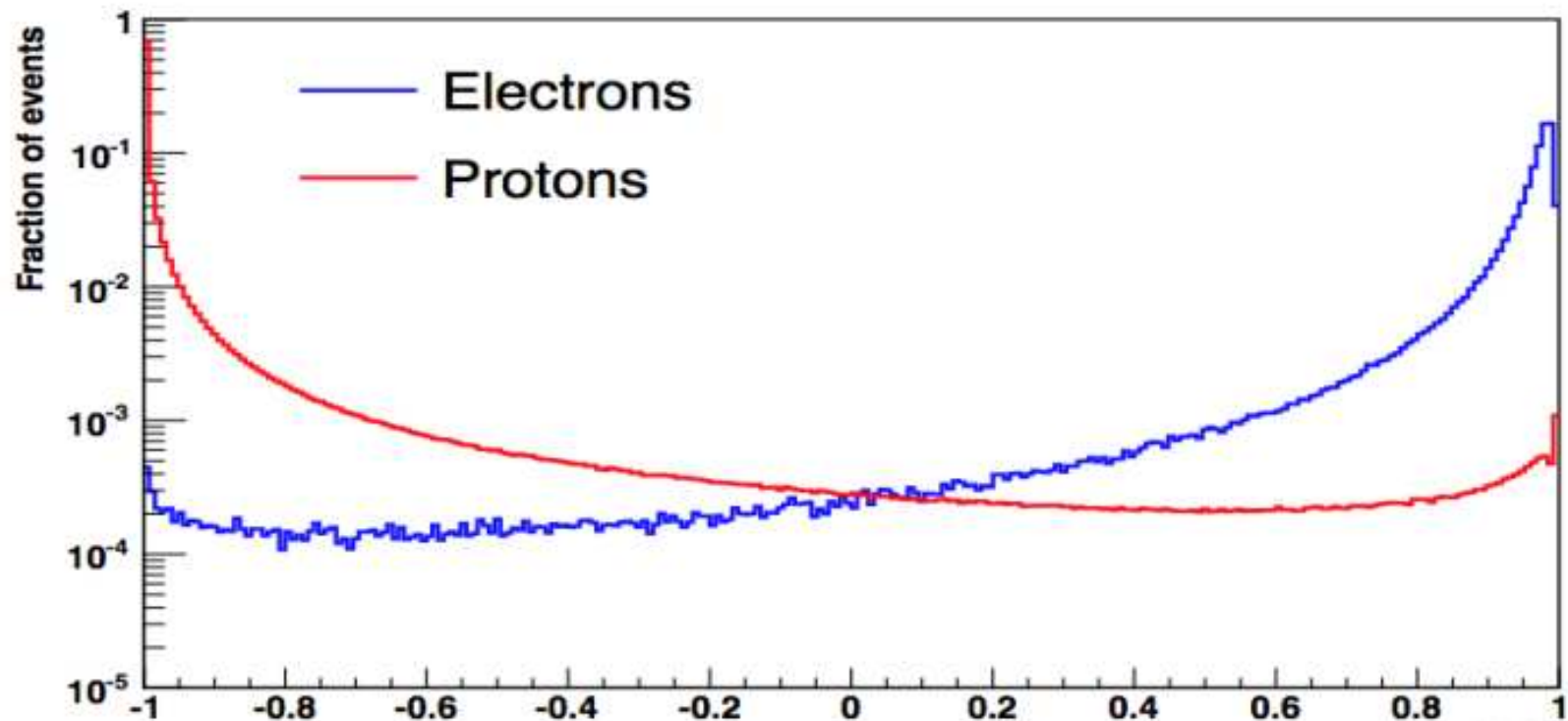


AMS-02

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

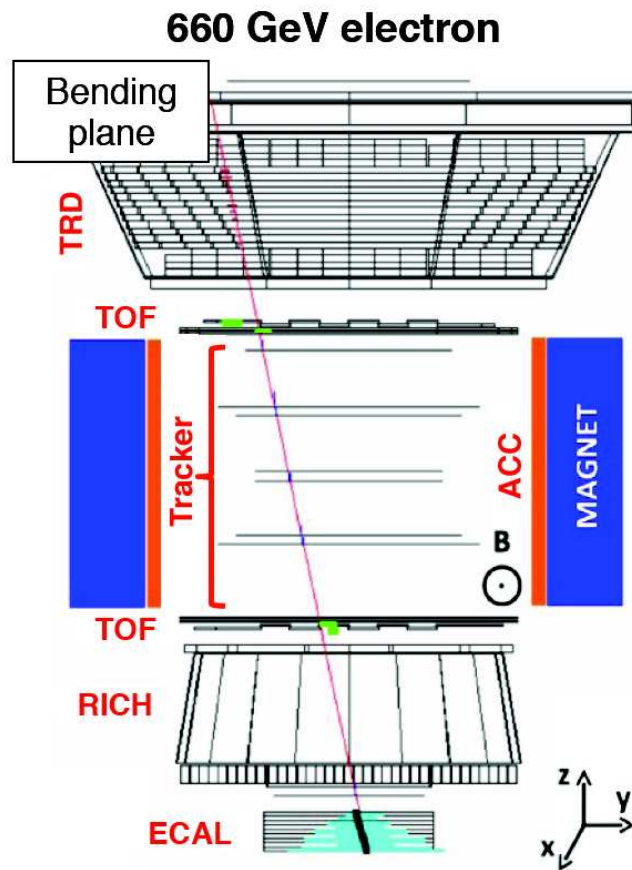
Wykorzystanie różnorodnych i komplementarnych technik pomiarowych znacząco redukuje tło i błędy systematyczne

⇒ po raz pierwszy promieniowanie kosmiczne zmierzone z niepewnością 1%

AMS-02

Identyfikacja cząstek

Korzystając z licznych detektorów można bardzo dobrze indentyfikować cząstki

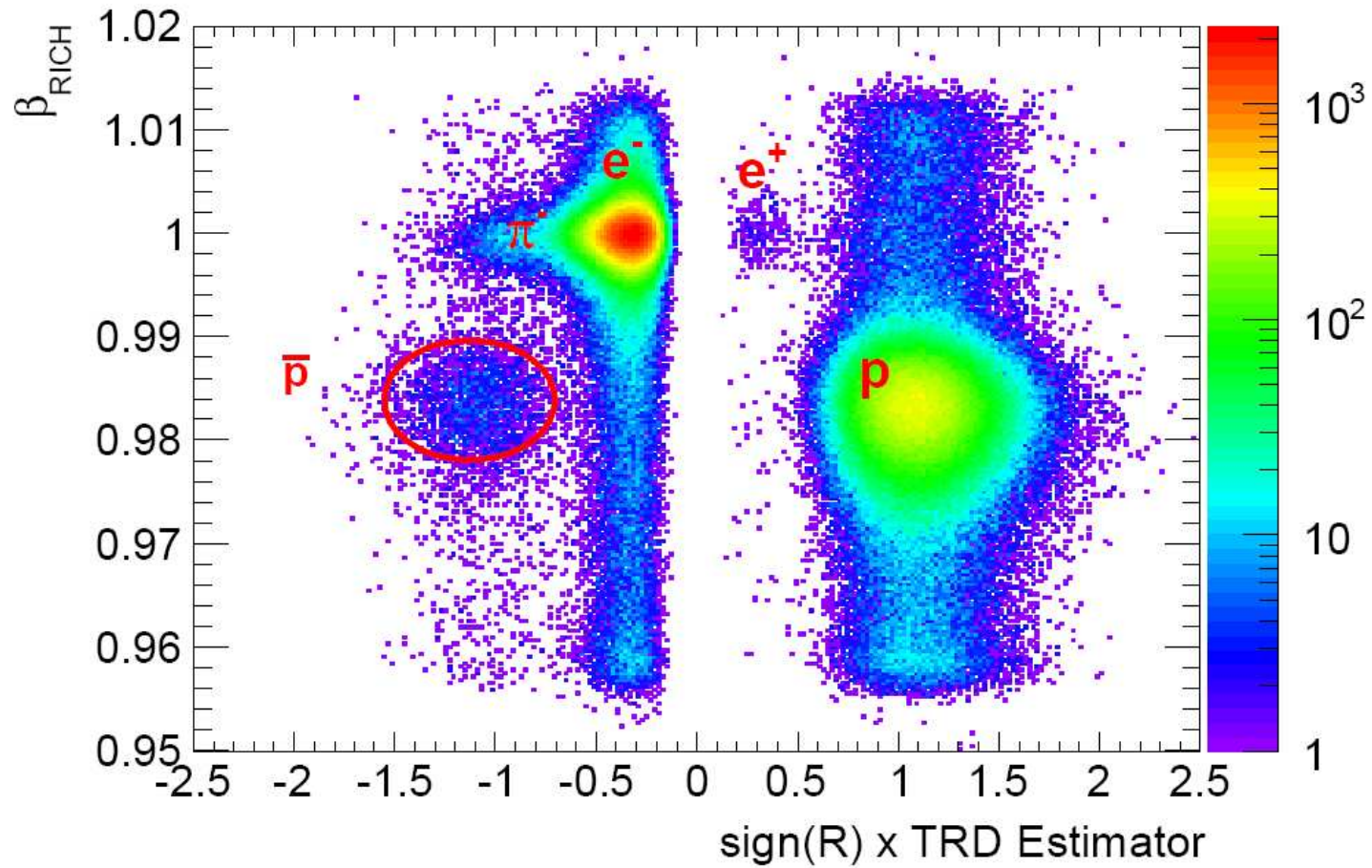


	e^+	e^-	p	\bar{p}	He	\bar{He}
TRD 20 layers						
TOF 4 layers						
TRK 9 layers						
RICH						
ECAL 18 layers						

AMS-02

Identyfikacja e^\pm

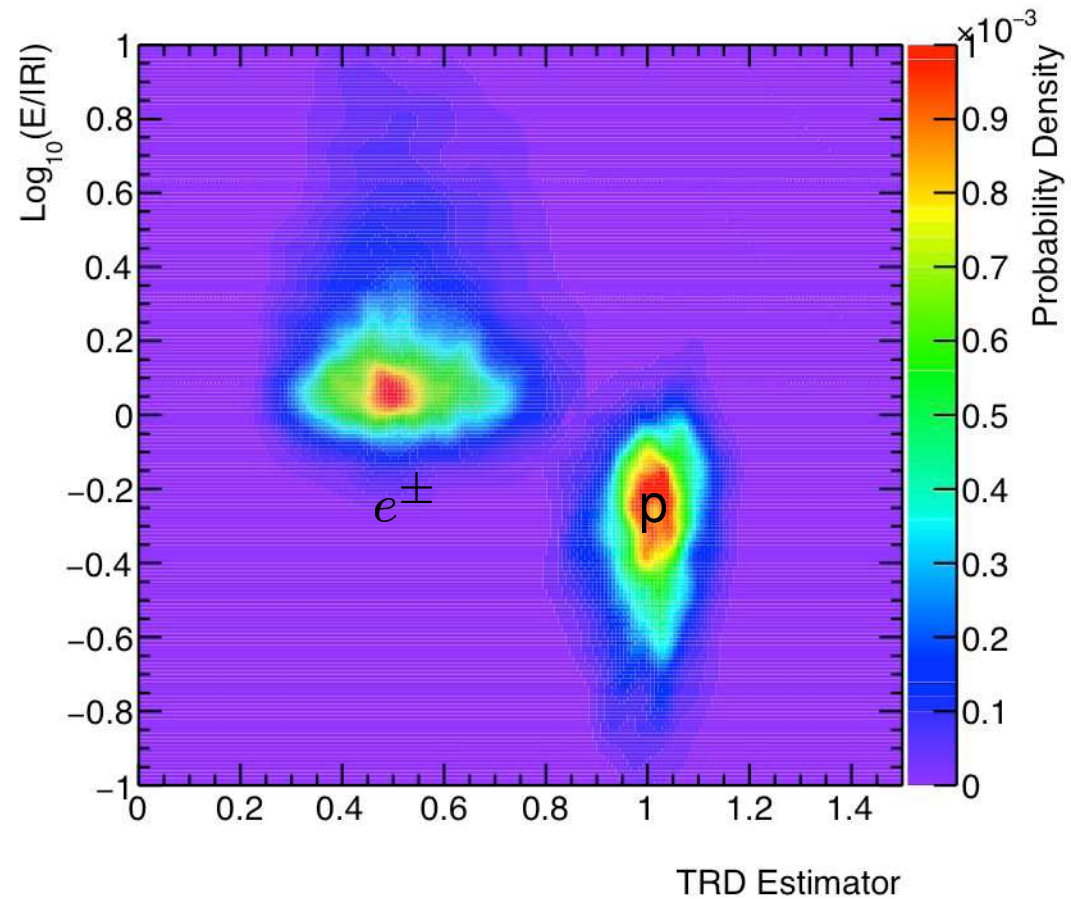
Korelacja prędkości z RICH i sygnału promieniowania przejścia



AMS-02

Identyfikacja e^\pm

Stosunek energii do pędu cząstki w funkcji sygnału promieniowania przejścia

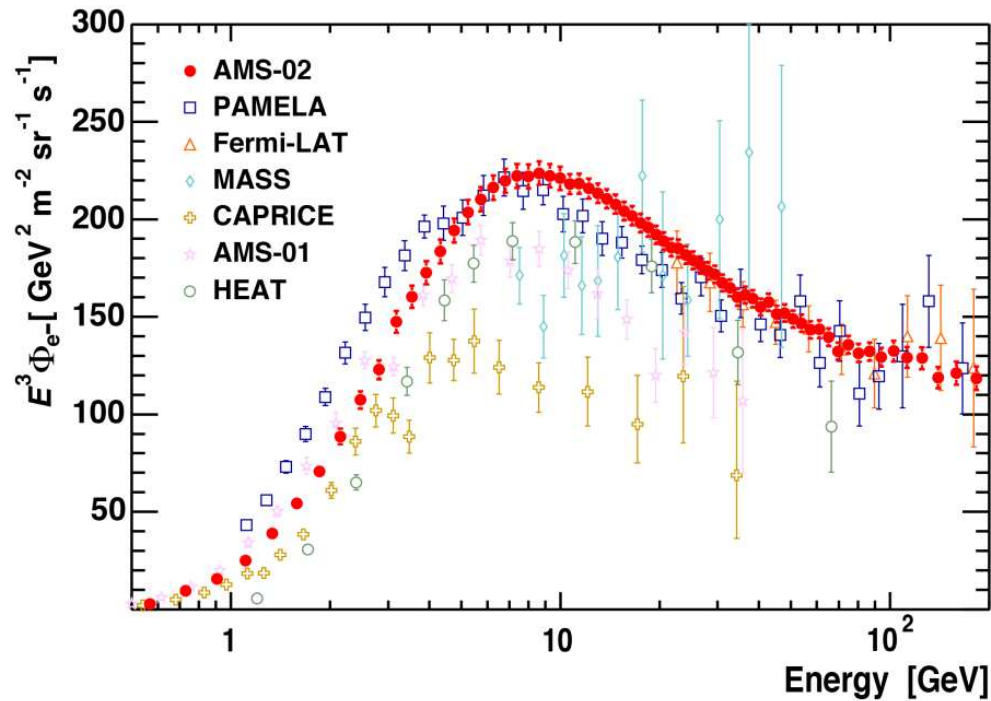


AMS-02

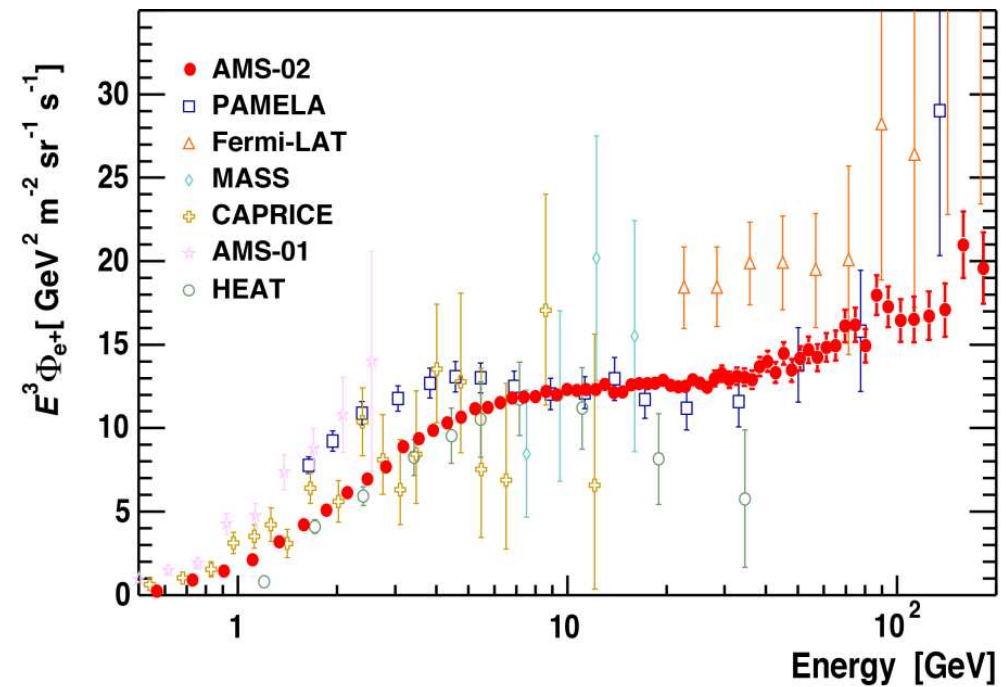
Wyniki e^\pm

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

Strumień elektronów



Strumień pozytonów

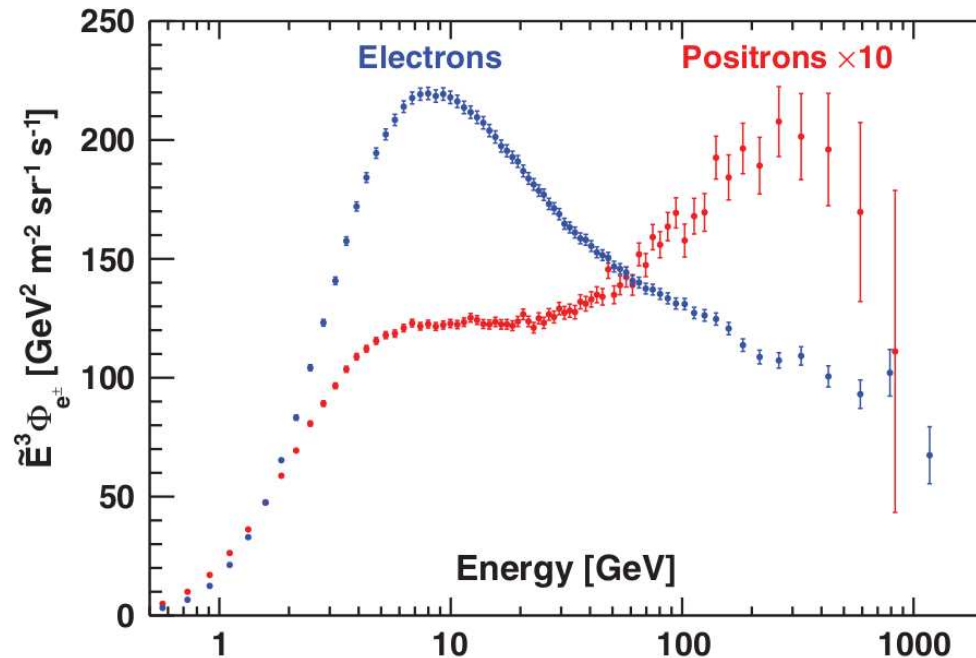


AMS-02

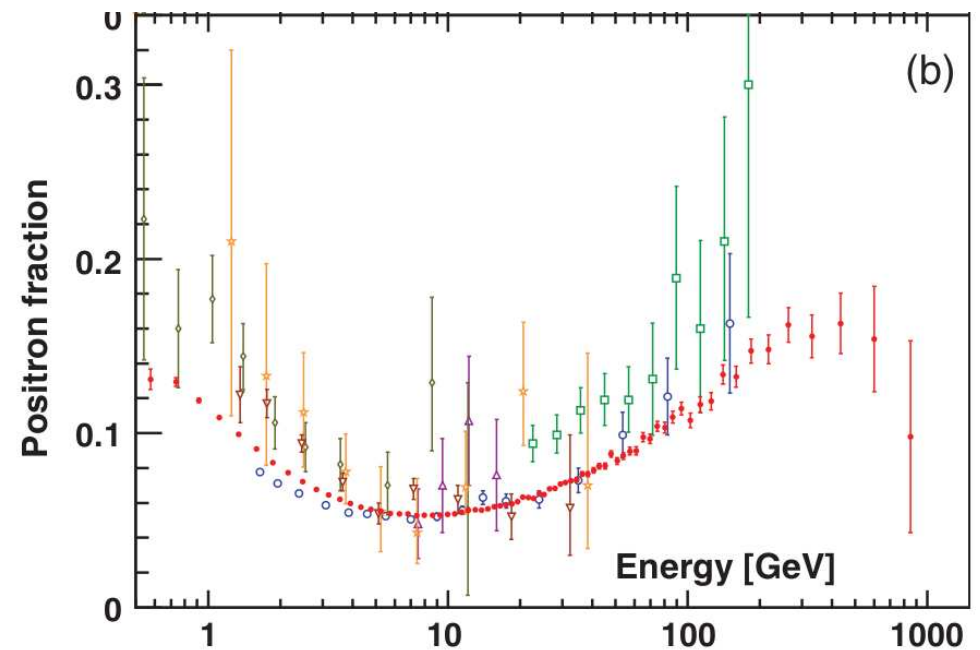
Wyniki e^\pm

Najnowsze wyniki AMS-02 dotyczące strumienia elektronów i pozytonów

Strumienie



Ułamek pozytonów

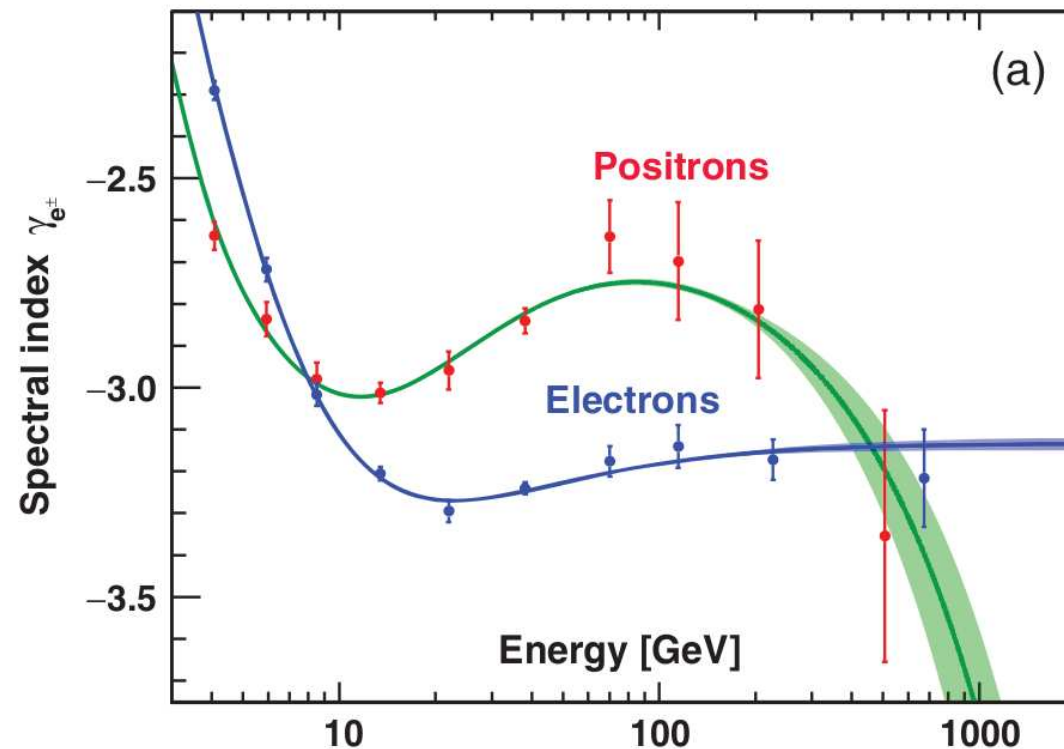


AMS-02

Wyniki e^\pm

Strumienie pozytonów i elektronów inaczej zależą od energii

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

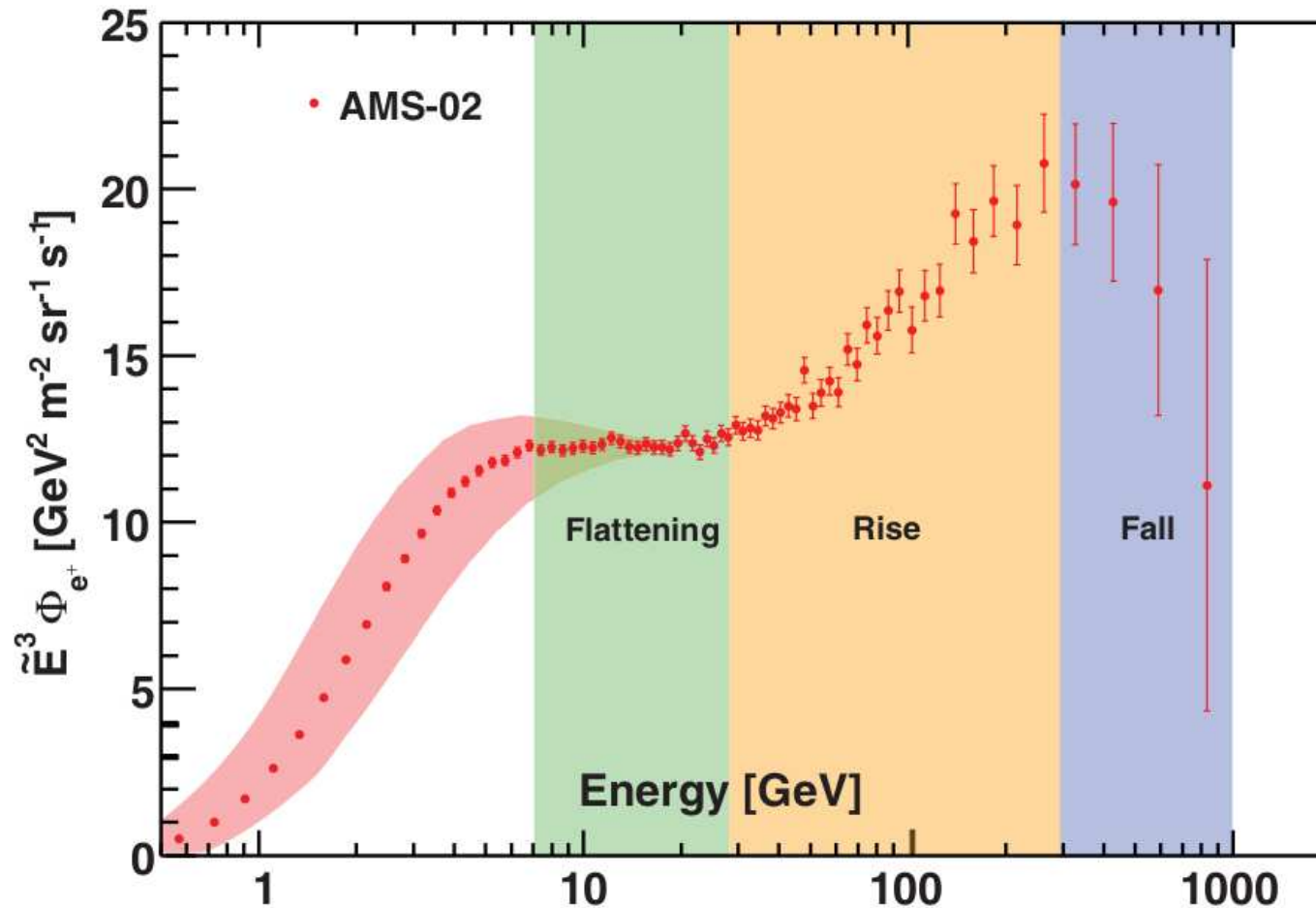


W zakresie od ok. 7 do 300 GeV strumień pozytonów maleje wolniej niż elektronów...

AMS-02

Strumień pozytonów

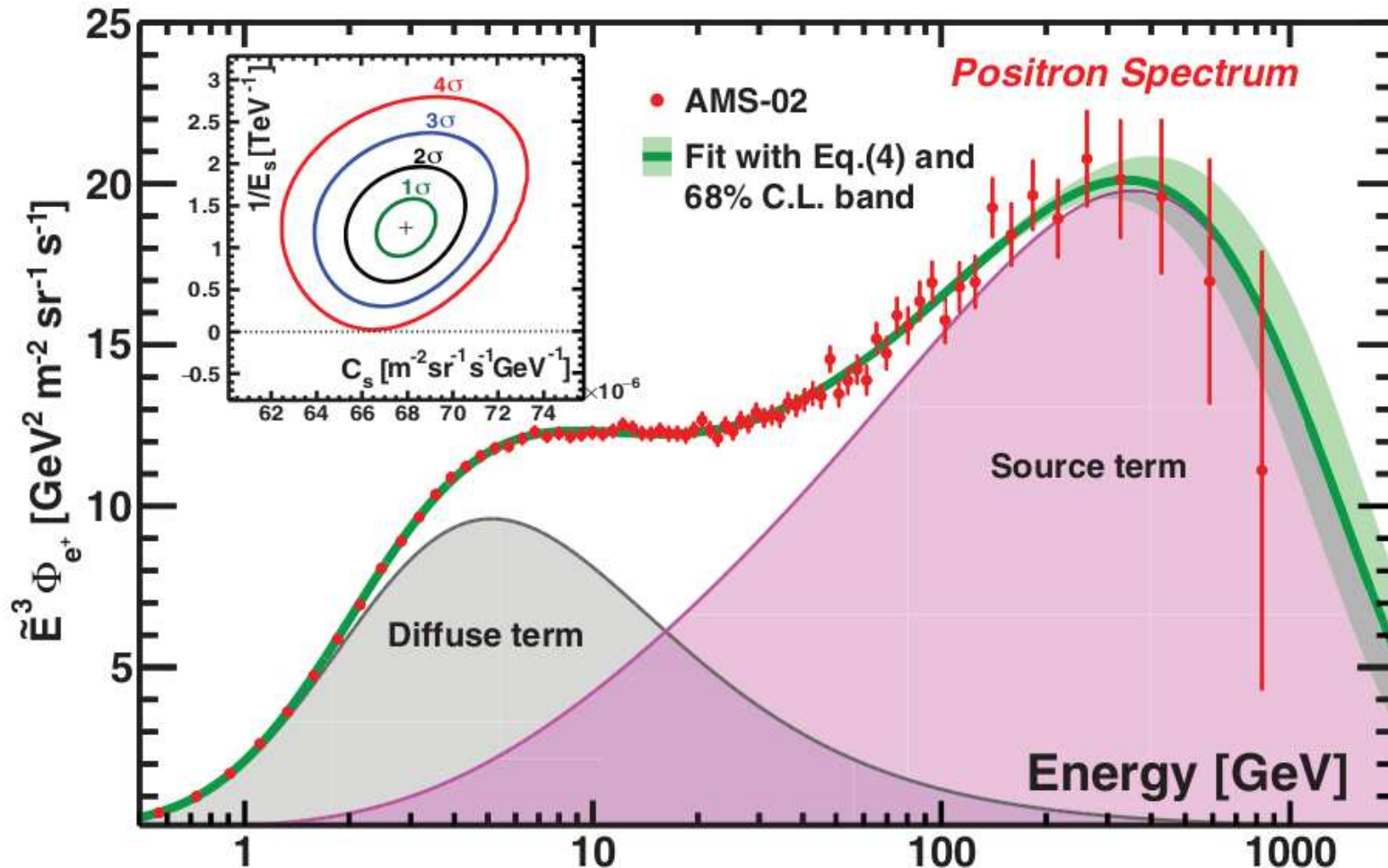
Wyraźnie widać trzy obszary energii o różnej “dynamice” widma



AMS-02

Strumień pozytonów

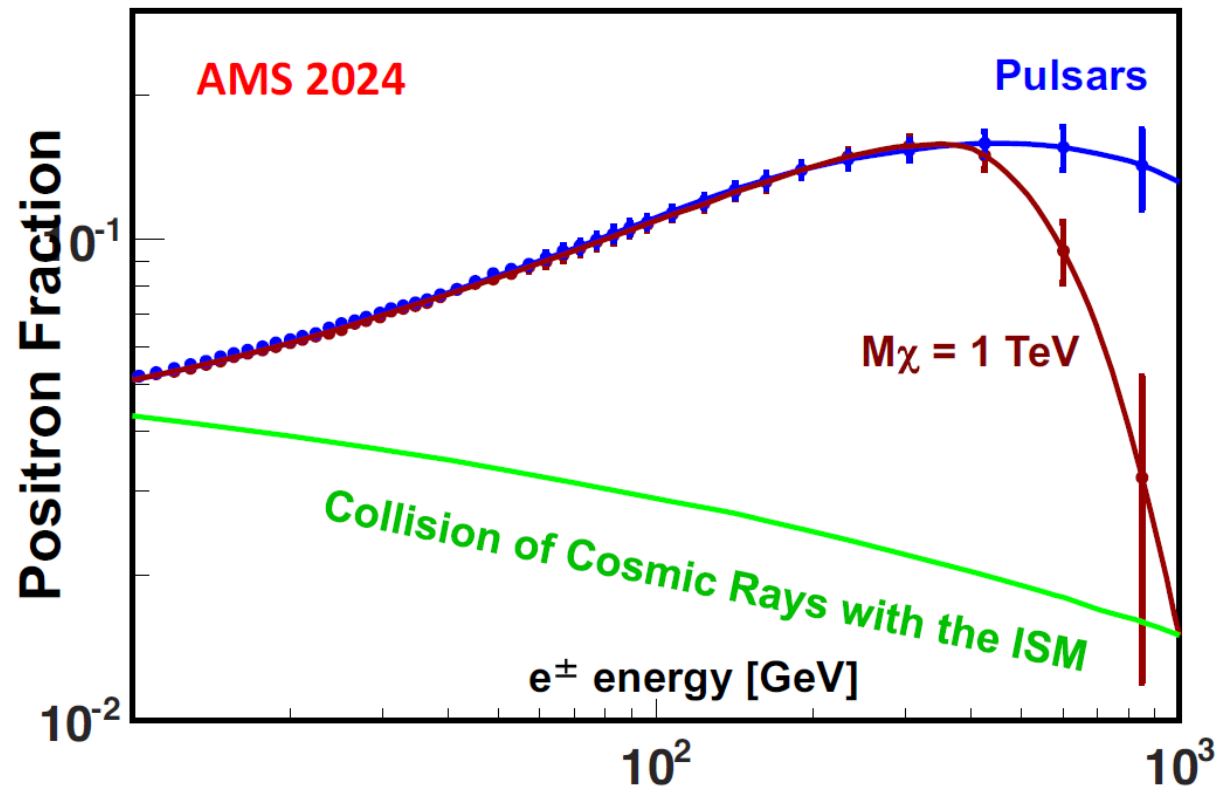
Dopasowany model zakładający istnienie dodatkowego źródła z “obcięciem” energii



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...



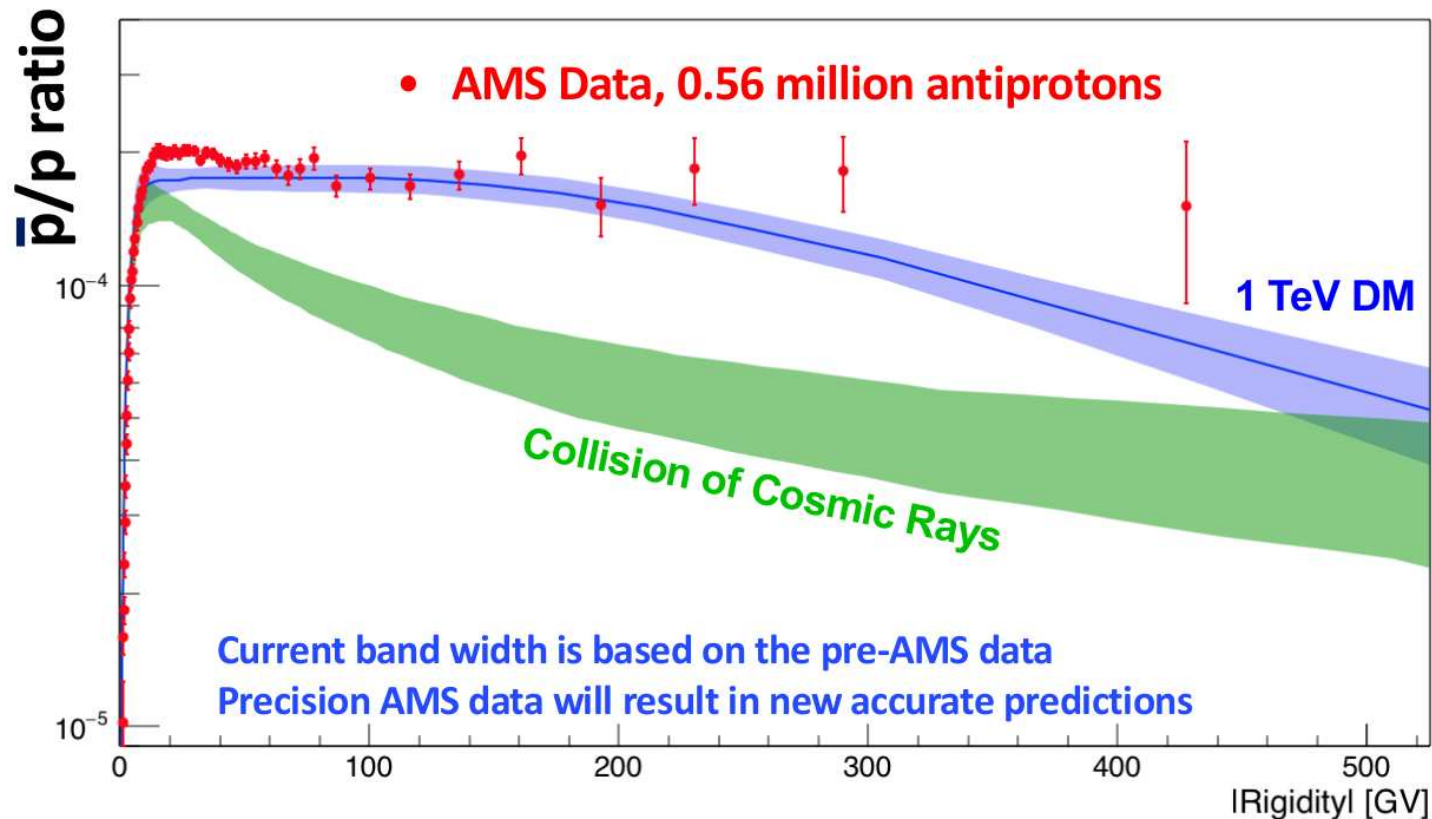
AMS-02

Antyprotony

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

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

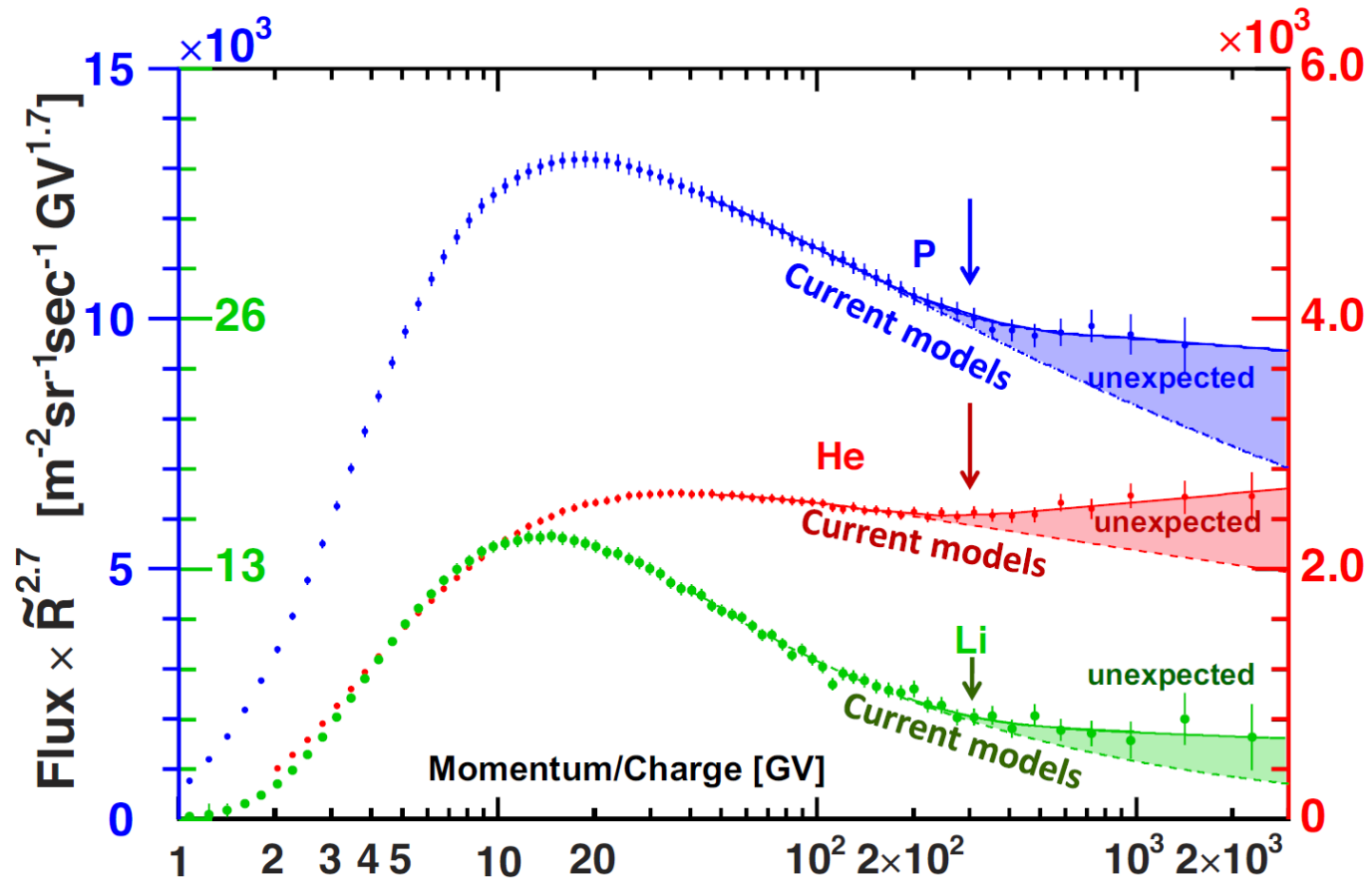
Jest to również zgodne z hipotezą [anihilacji cząstek ciemnej materii...](#)



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?!...



Podsumowanie

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
- “obcięcie” dodatkowej składowej widma pozytonów przy ok. 800 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