

# Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

## Wykład X

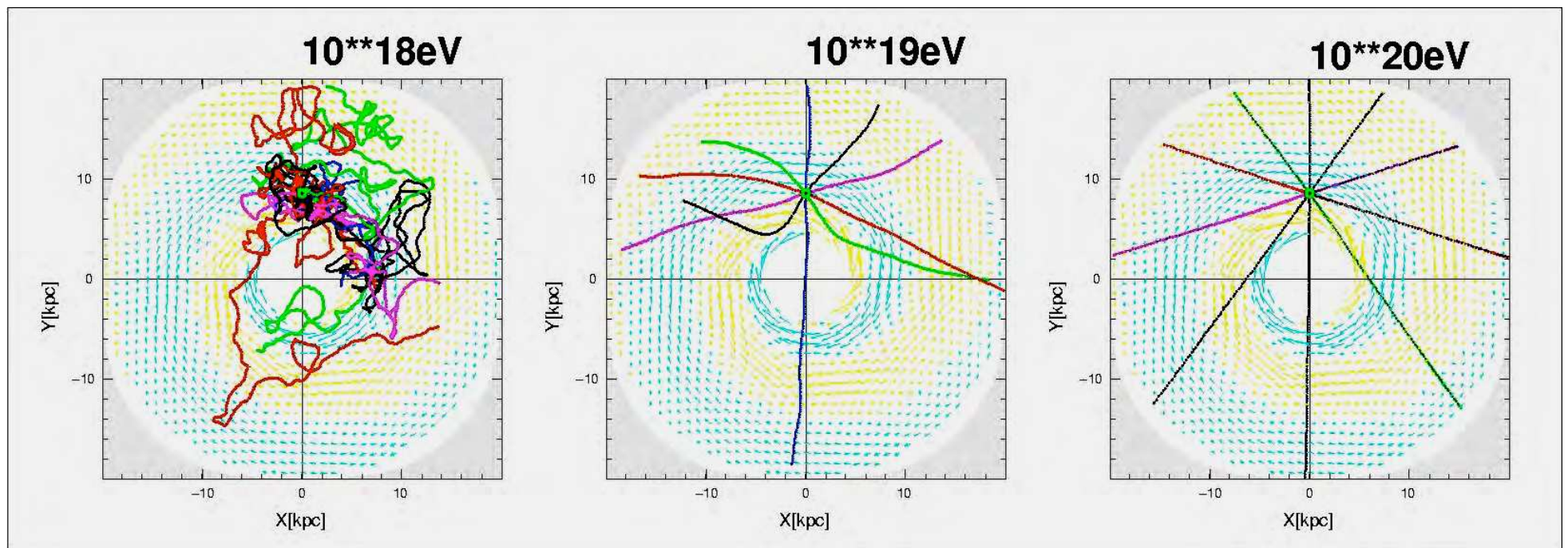
- Poszukiwanie źródeł UHECR: eksperyment AUGER i TA
- Projekt JEM-EUSO
- Radiowa detekcja pęków atmosferycznych
- Kosmiczne promieniowanie gamma
- Teleskopy Czerenkowa

# Promieniowanie kosmiczne

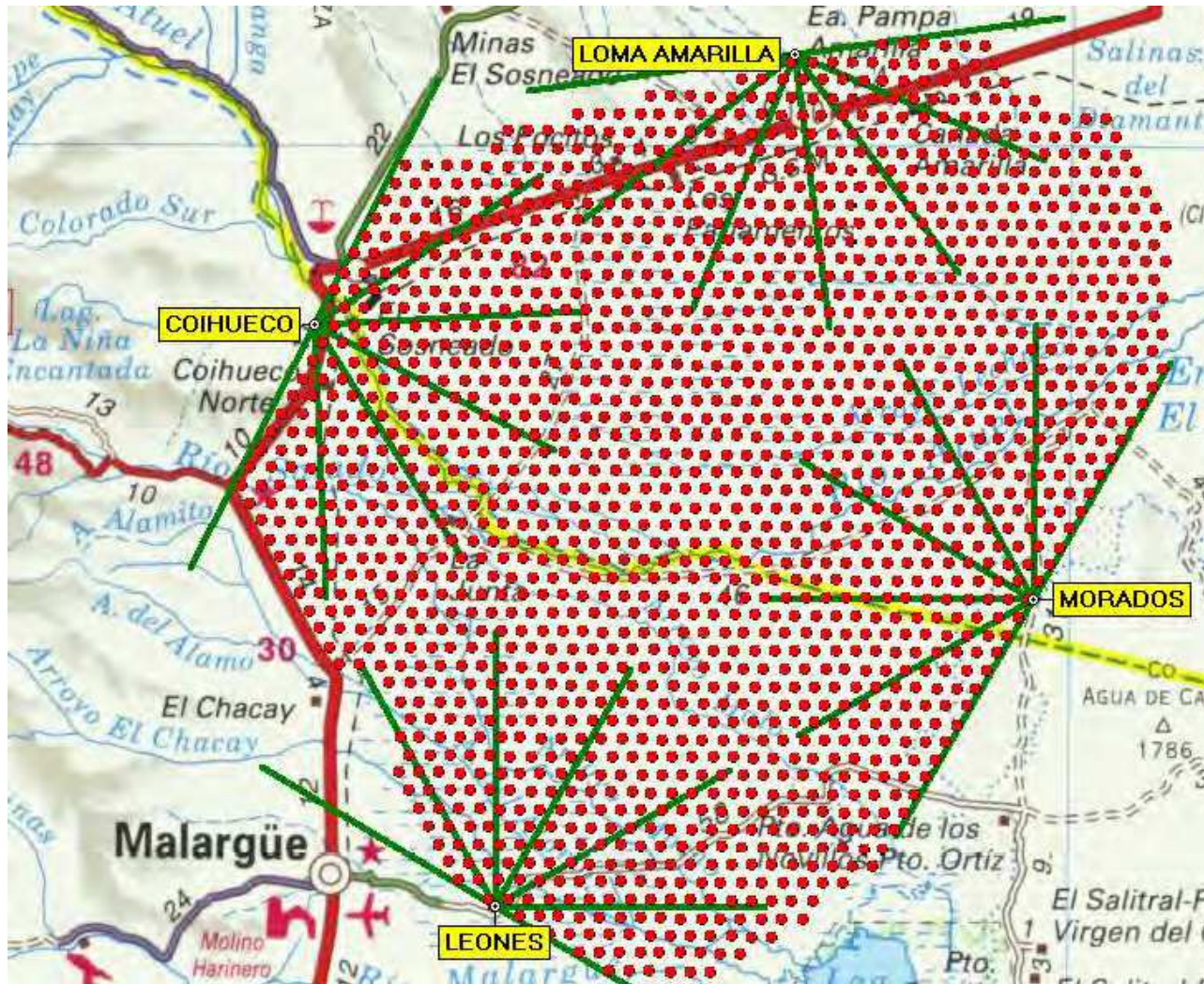
## Poszukiwanie źródeł

Dla energii poniżej  $10^{18}$  eV cząstki naładowane są całkowicie randomizowane przez pola magnetyczne w naszej Galaktyce. Ale dla wyższych energii kierunek z którego obserwujemy cząstkę jest skorelowany z pozycją źródła.

Dla protonów  $E \sim 10^{20}$  eV odchylenia na poziomie  $1 - 2^\circ$

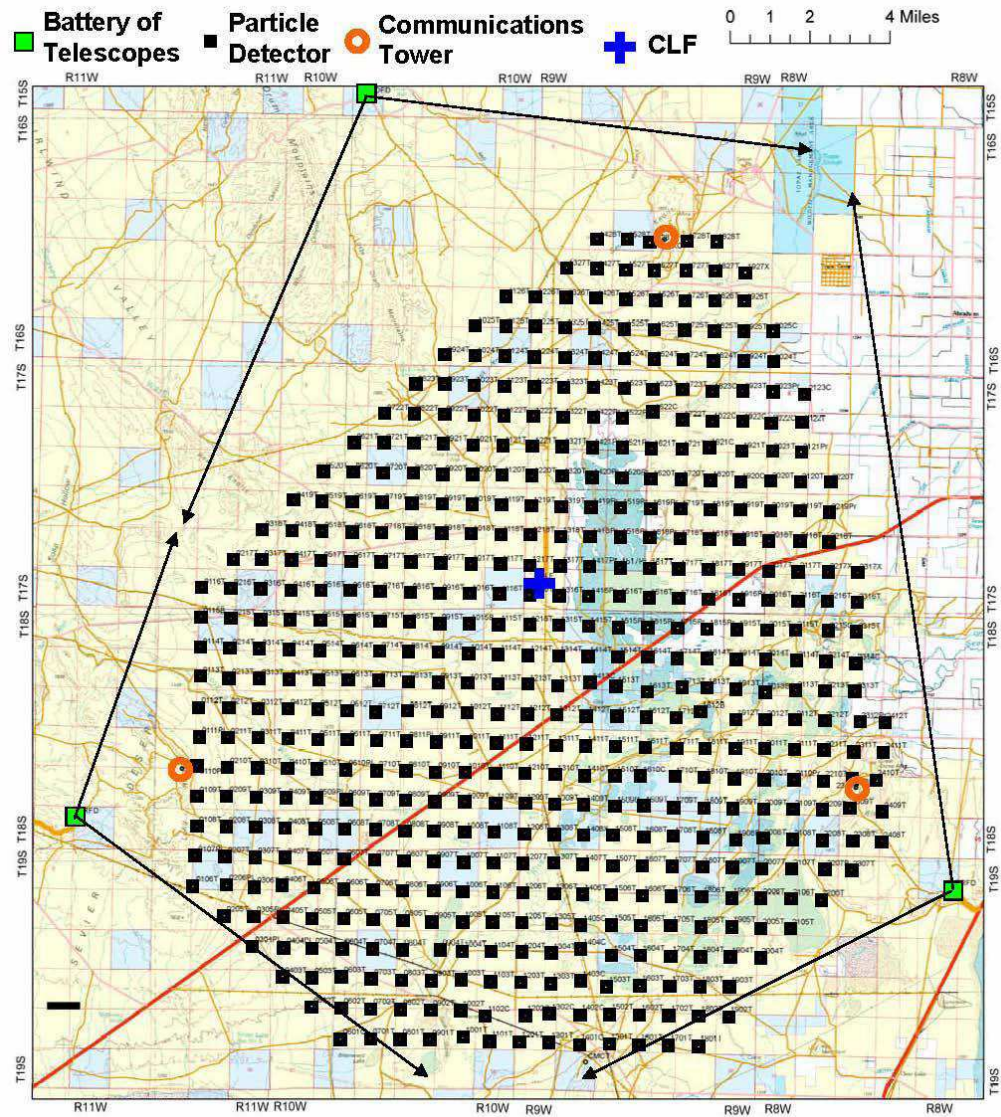


# AUGER



3000 km<sup>2</sup>, Argentyna

# Telescope Array



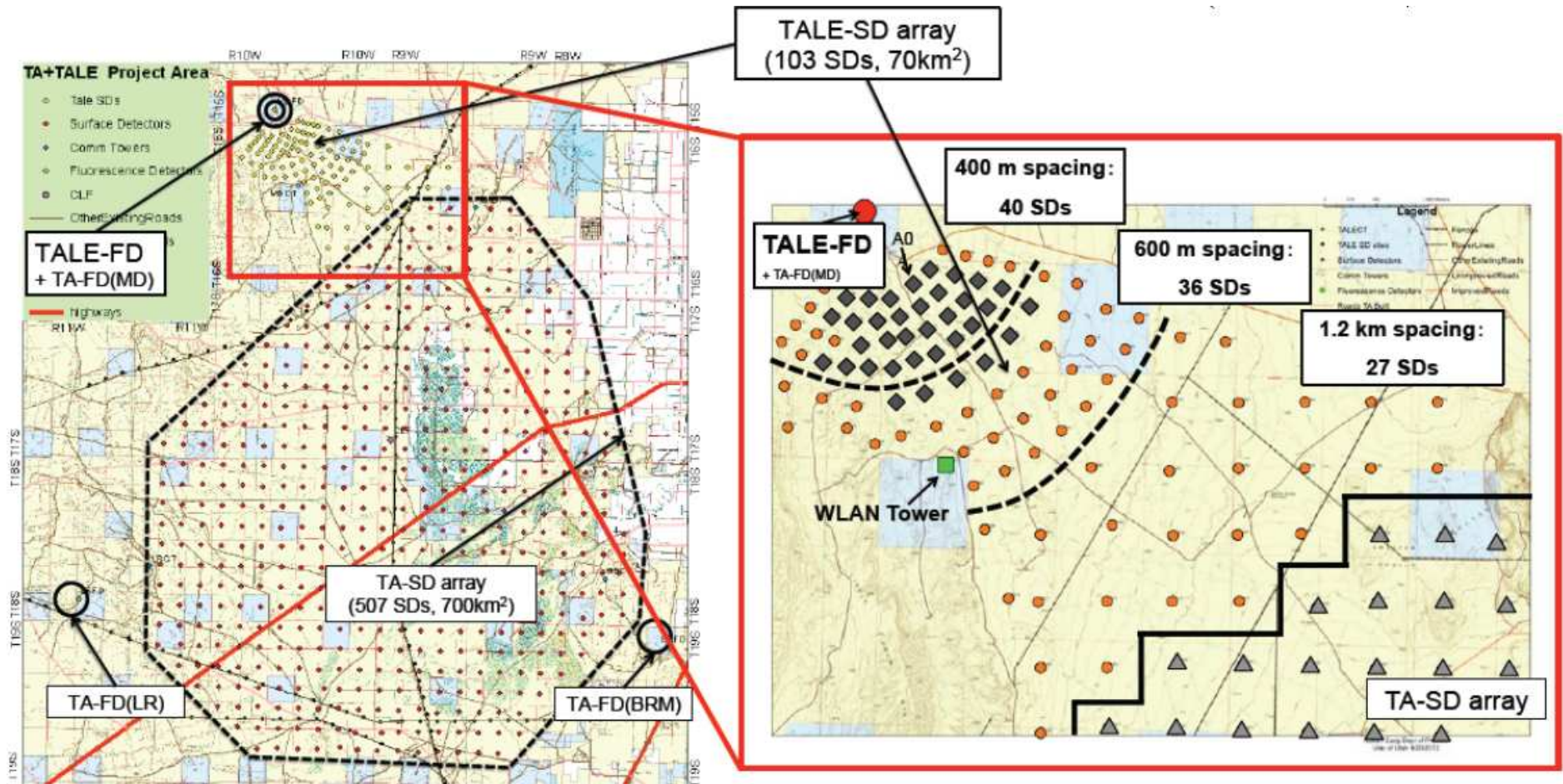
700 km<sup>2</sup>, Utah, USA

A.F. Żarnecki

Wykład X

# Telescope Array

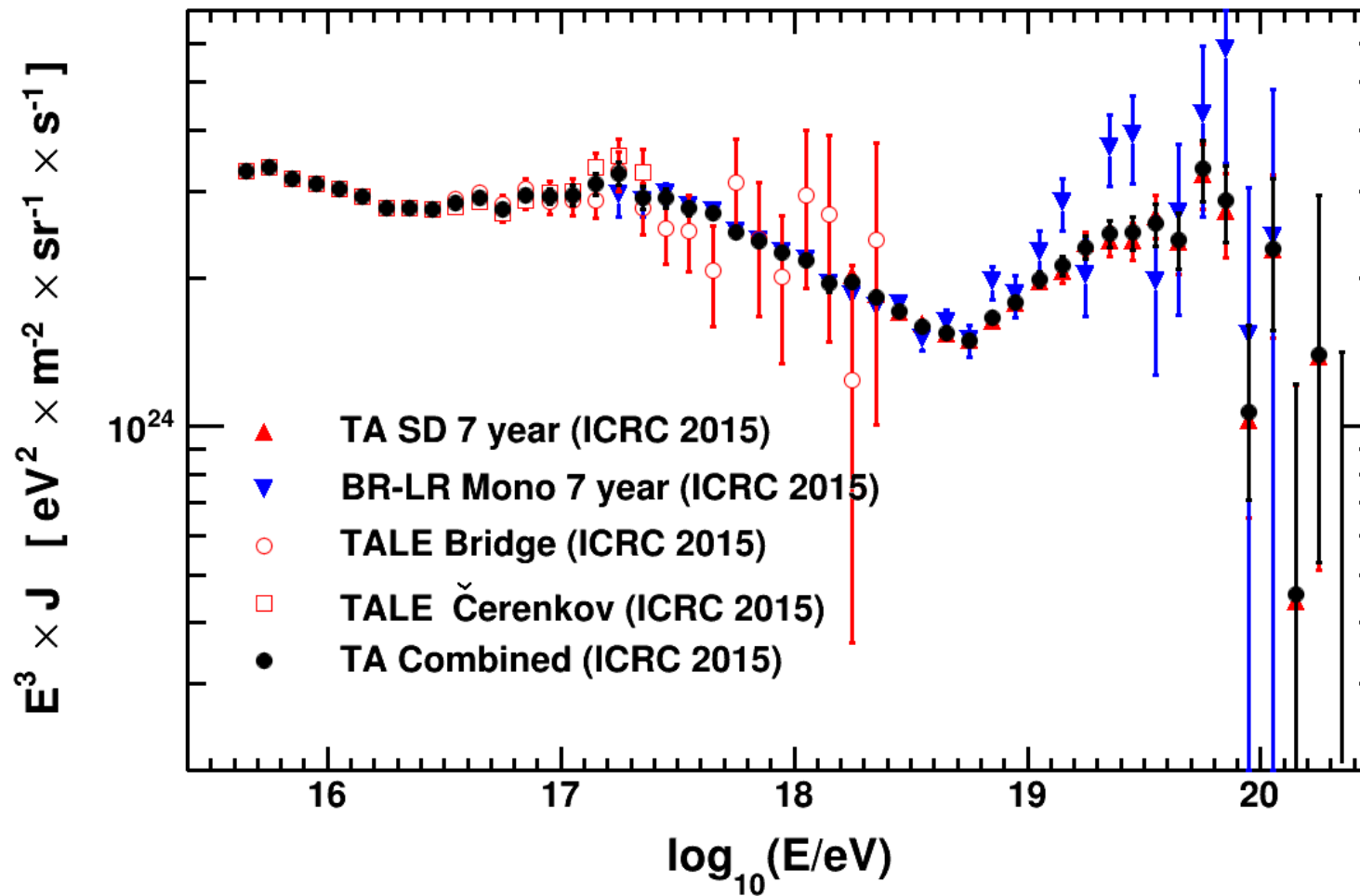
W ostatnich latach detektor rozbudowany o część niskoenergetyczną



Nowe teleskopy UV pozwalają także na bezpośredni pomiar prom. Czerenkowa

# Telescope Array

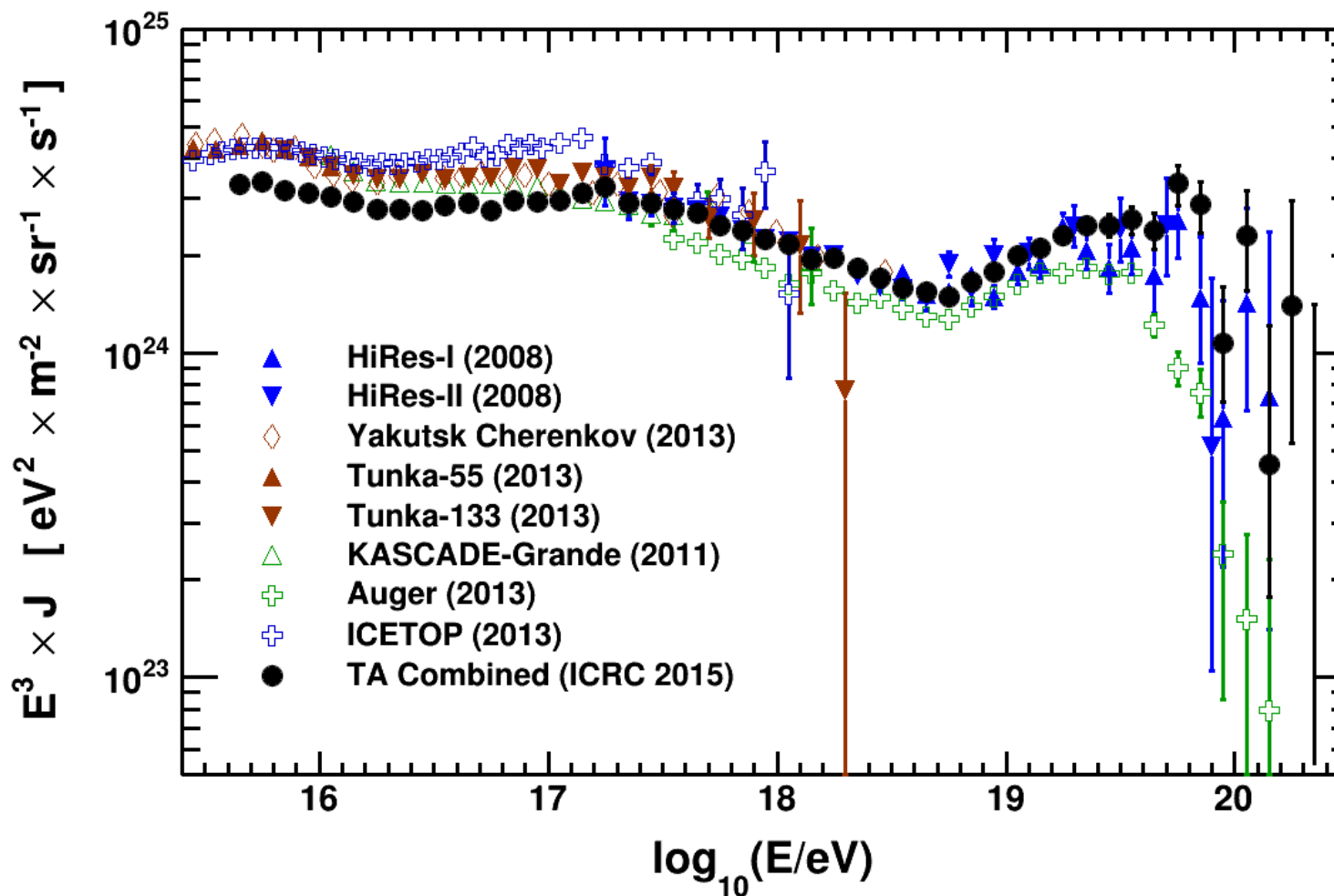
Wyniki 2015



# Telescope Array

Wyniki 2015

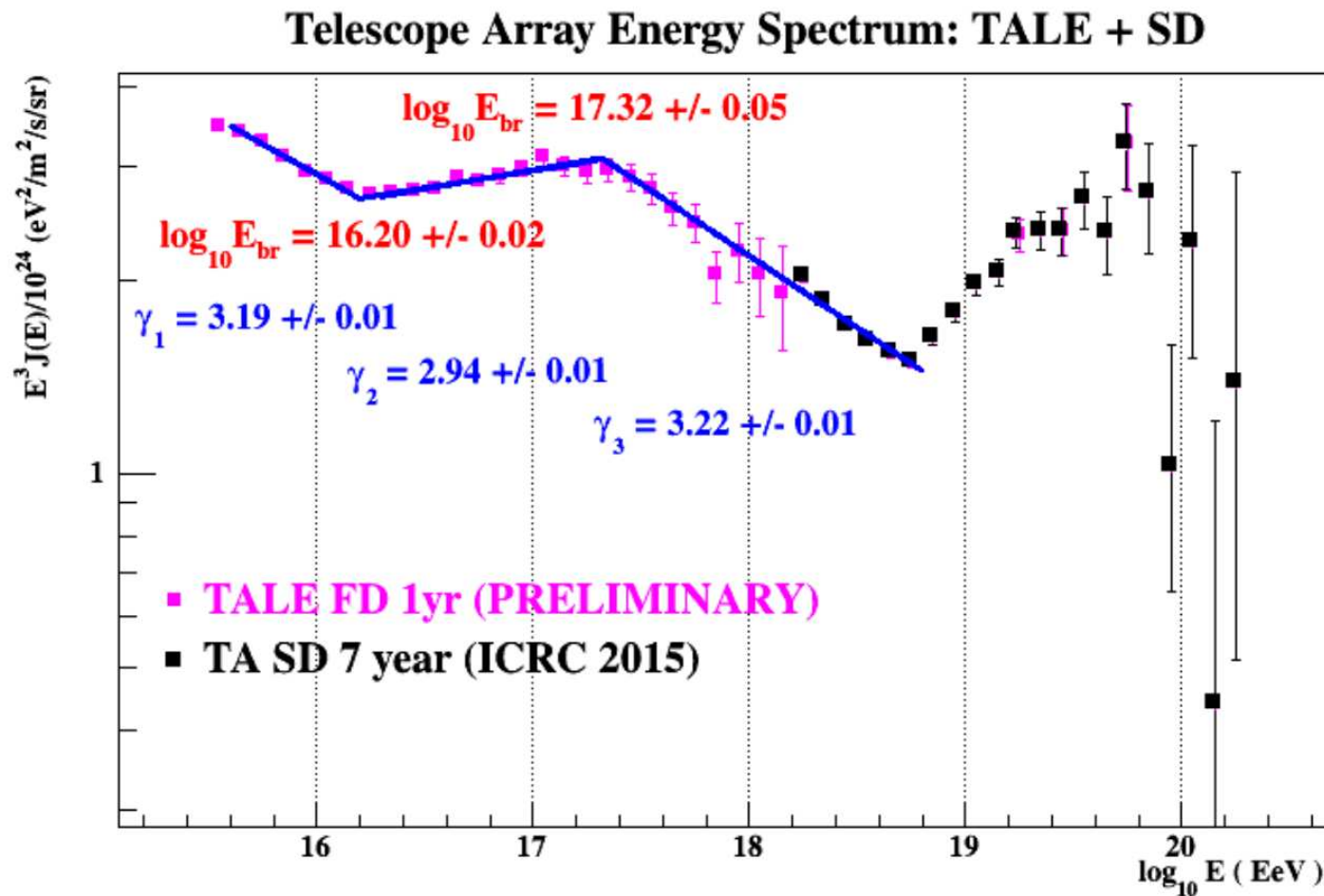
Problem skali energii?



# Telescope Array

Nowe wyniki

(Moriond 2017)

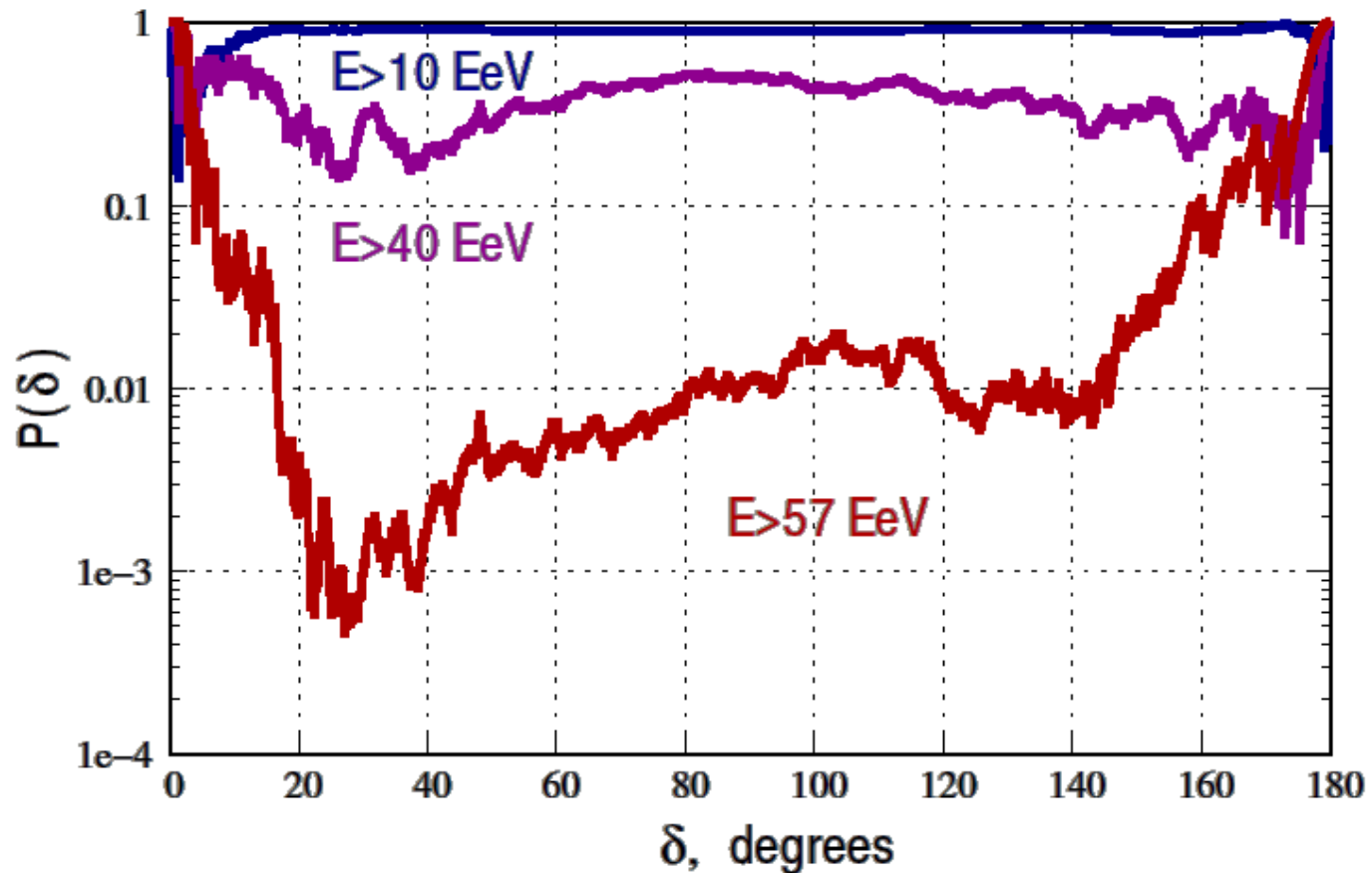




# Telescope Array

## Autokorelacja

Zliczanie par przypadków o zadanej różnicy kątowej między kierunkami.

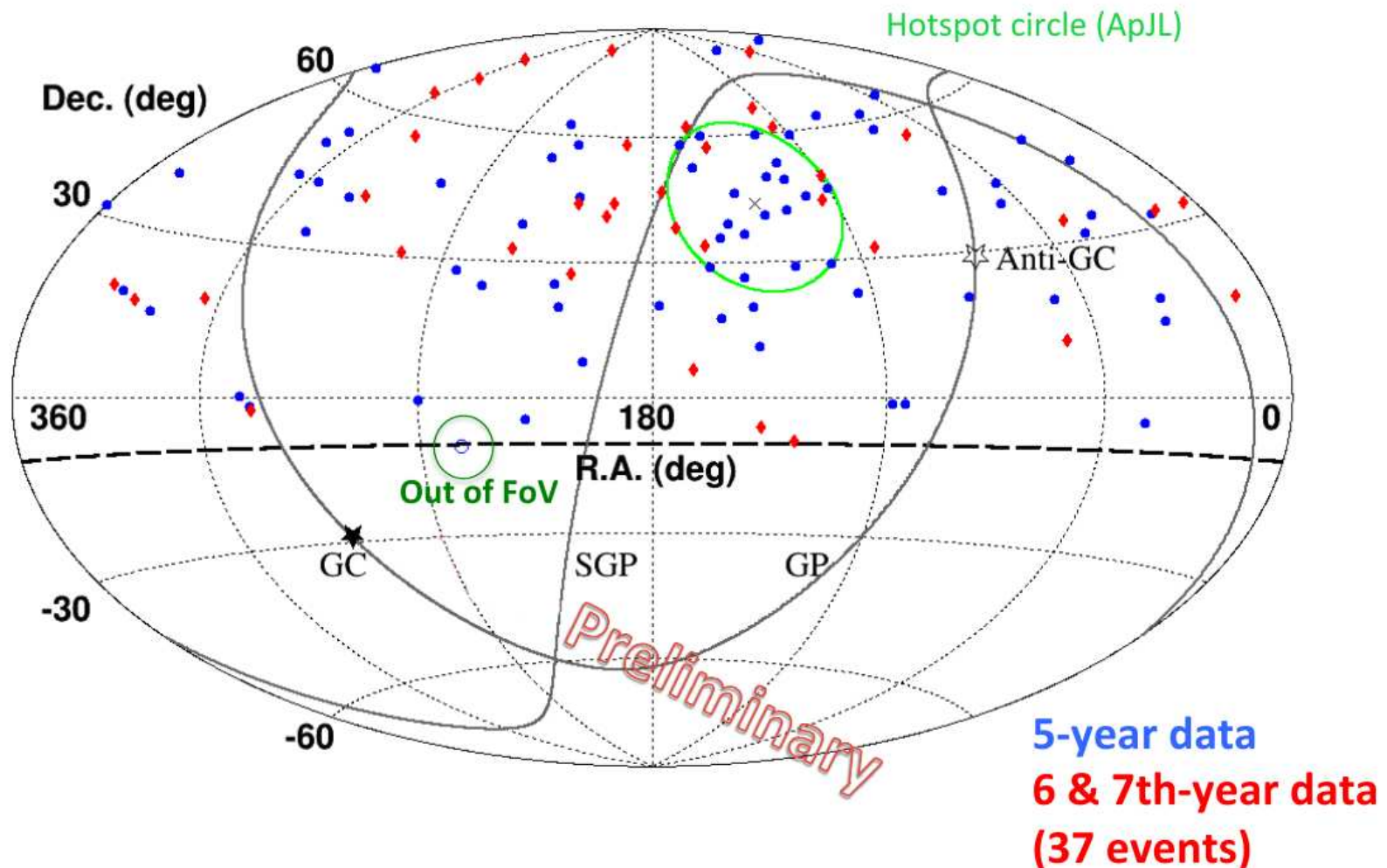


Prawdopodobieństwo, że obserwacja jest zgodna z rozkładem izotropowym.

# Telescope Array

## Rozkład przestrzenny

dla przypadków  $E > 5.7 \cdot 10^{19}$  eV



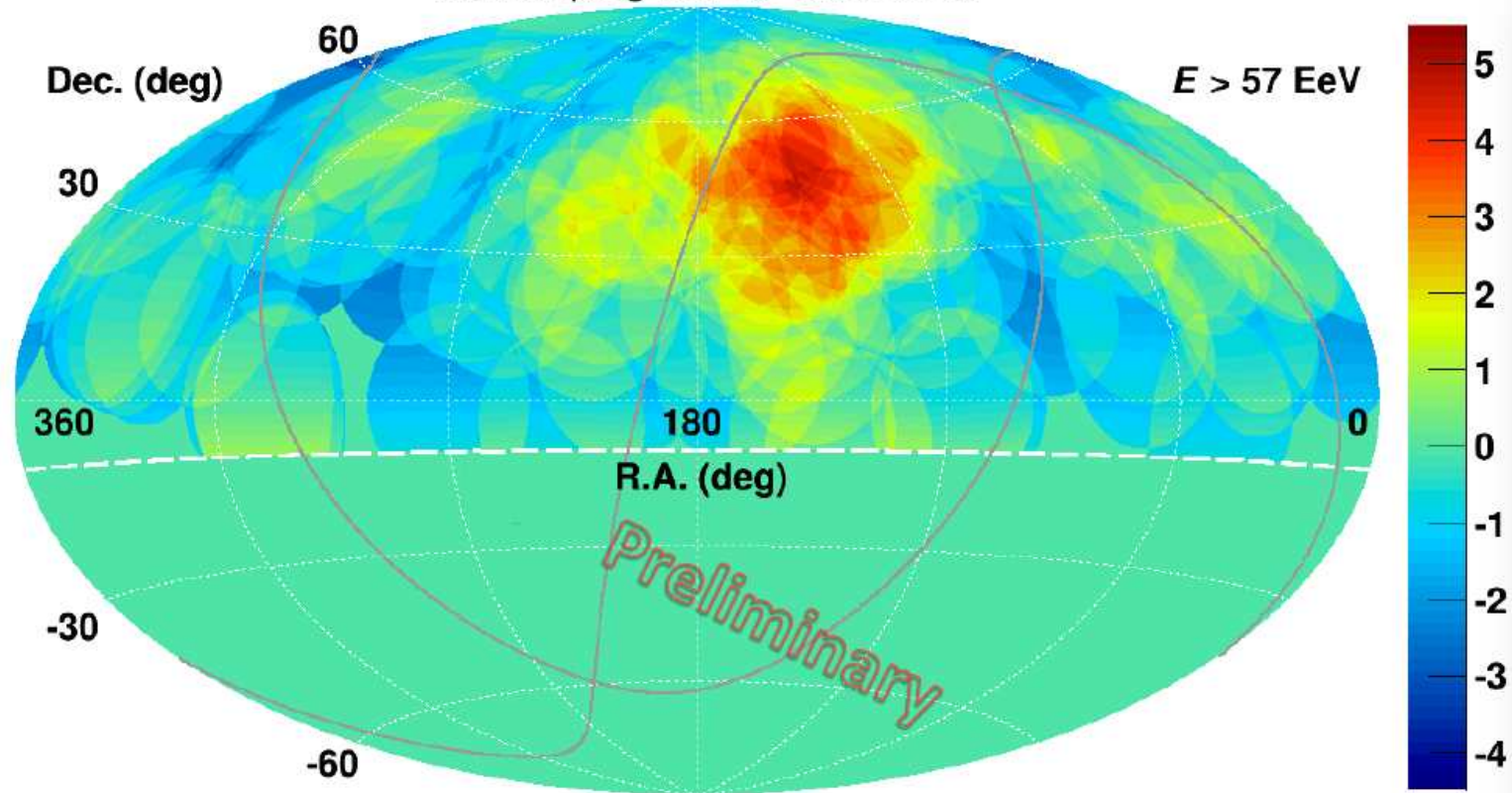
# Telescope Array

Znaczoność anizotropii

dla przypadków  $E > 5.7 \cdot 10^{19}$  eV

## Significance Map (Li-Ma) 7 years

Oversampling with 20°-radius circle

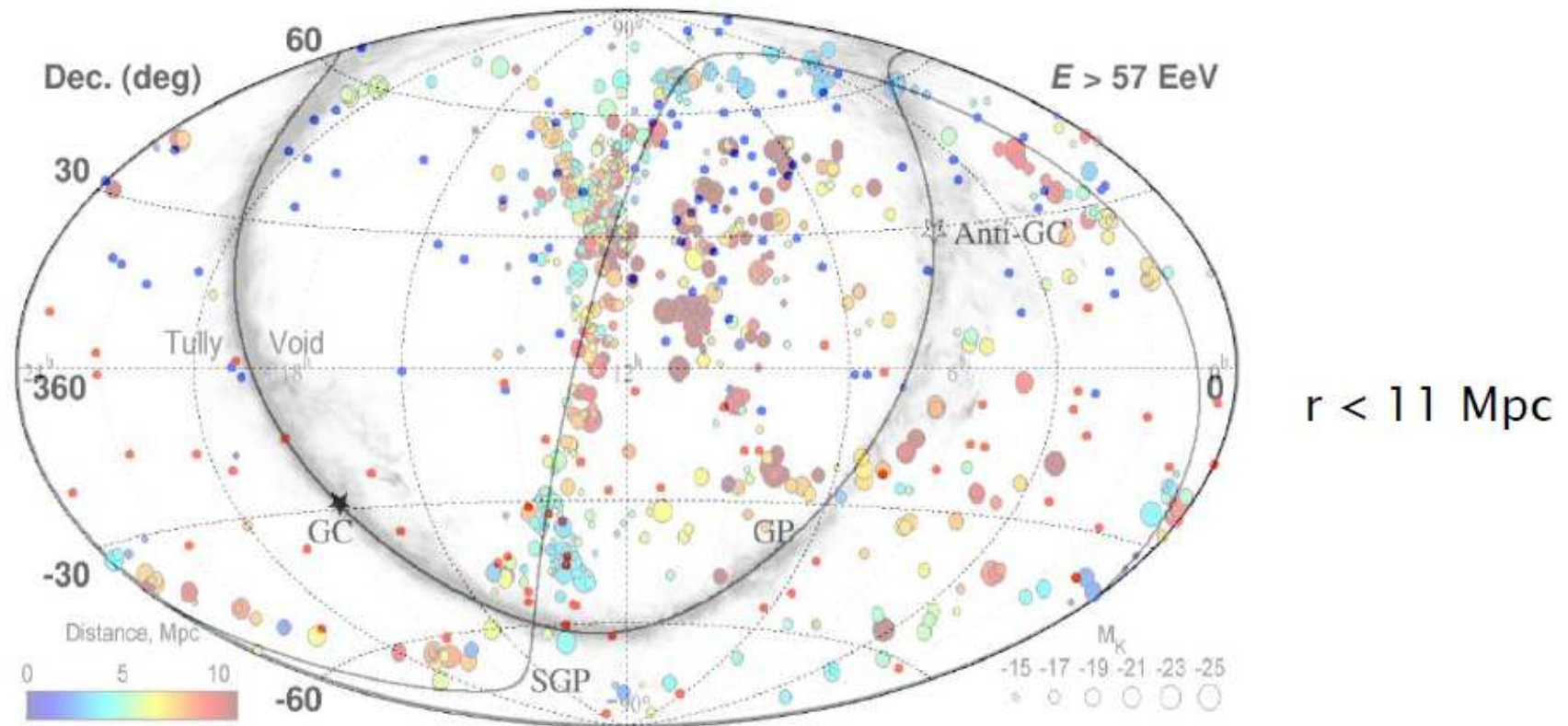


$$N_{obs} = 24, N_{iso} = 6.88 \Rightarrow P = 5.07\sigma \Rightarrow \text{globalne } 3.4\sigma \text{ (} p = 3.7 \cdot 10^{-4} \text{)}$$

# Telescope Array

Korelacja z lokalnymi strukturami

LSS - Large Scale Structures

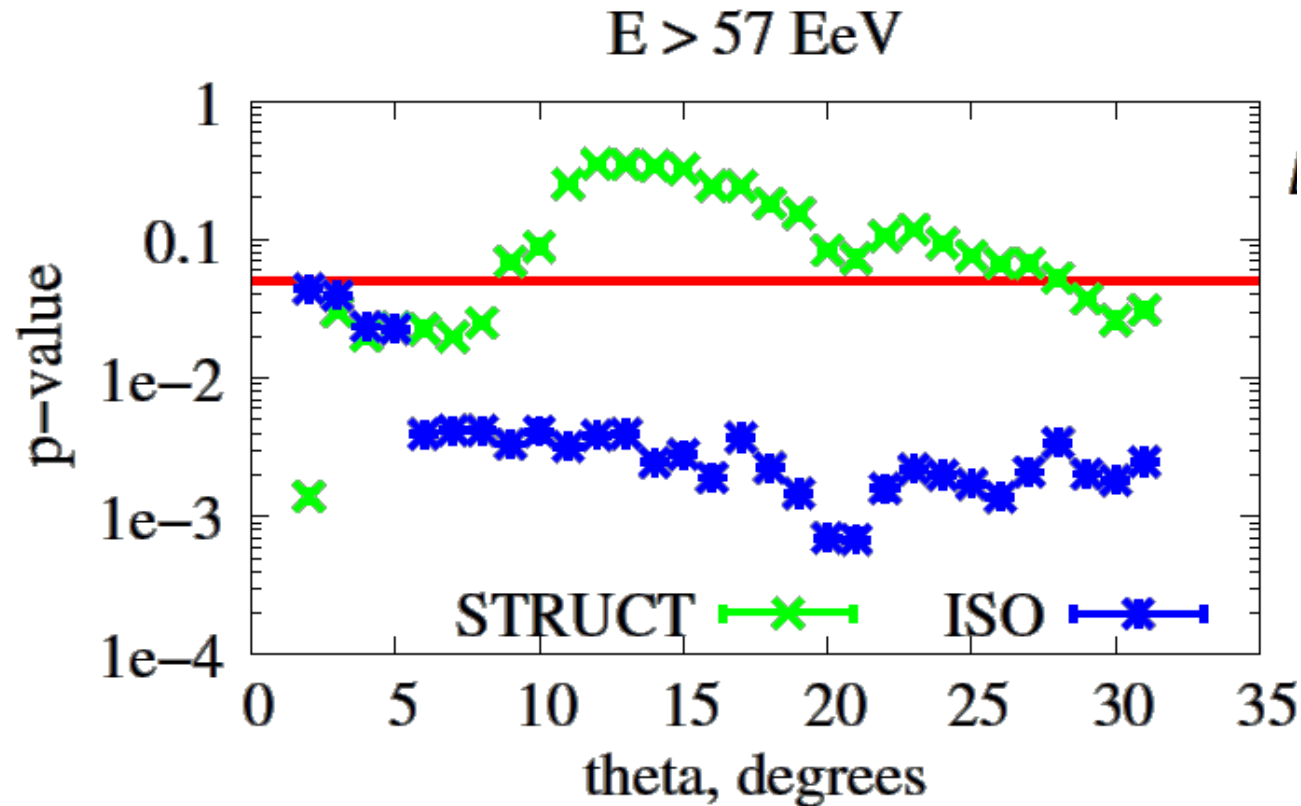


Blue dots: TA events  
Red dots: Auger events

# Telescope Array

## Korelacja z lokalnymi strukturami

LSS - Large Scale Structures



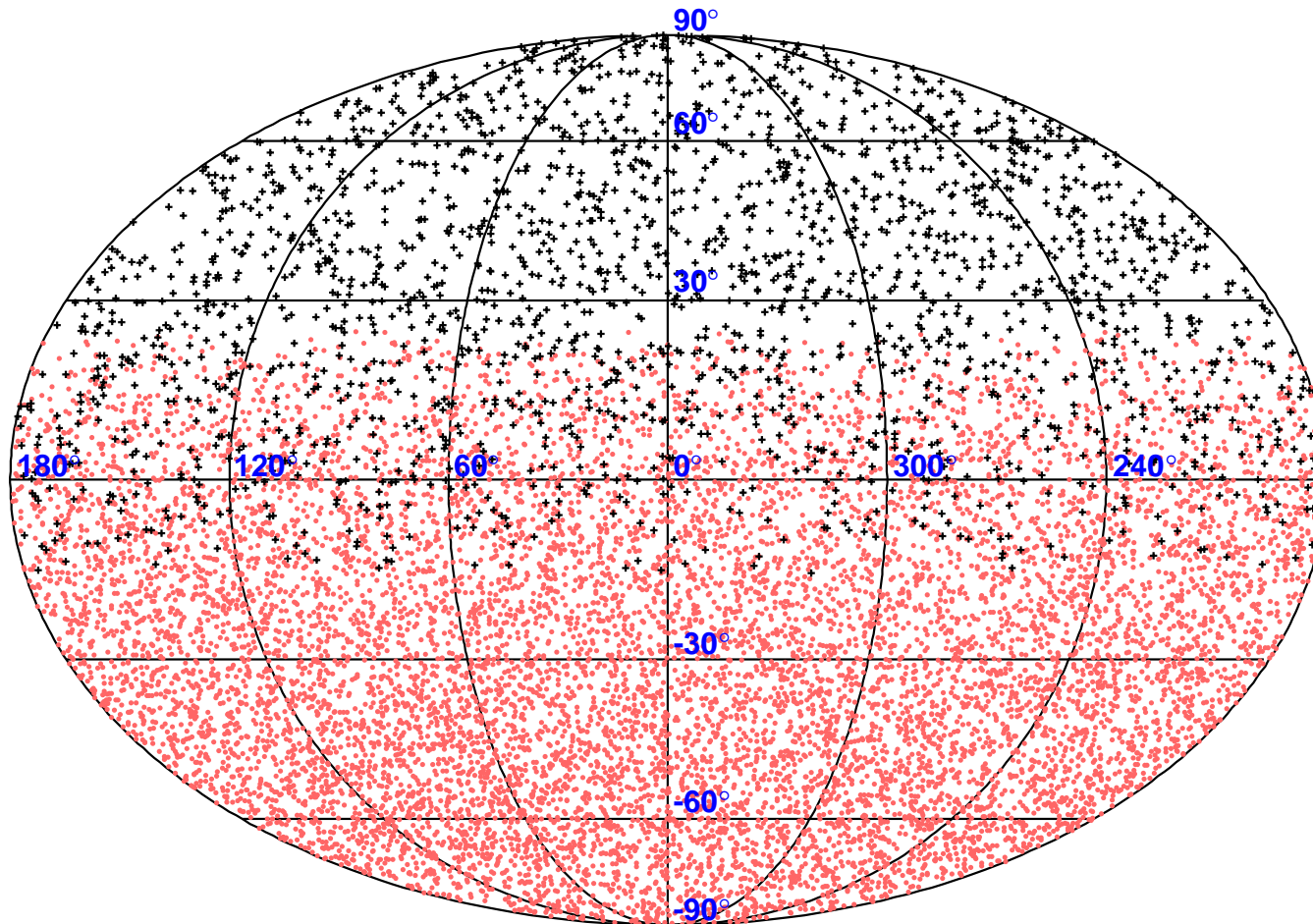
Rozkład wydaje się zgodny z rozkładem potencjalnych źródeł w otoczeniu Galaktyki.

Statystyka wciąż zbyt mała na wyciągnięcie jednoznacznych wniosków...

# AUGER + TA

## Rozkład przestrzenny

dla przypadków  $E > 10^{19}$  eV

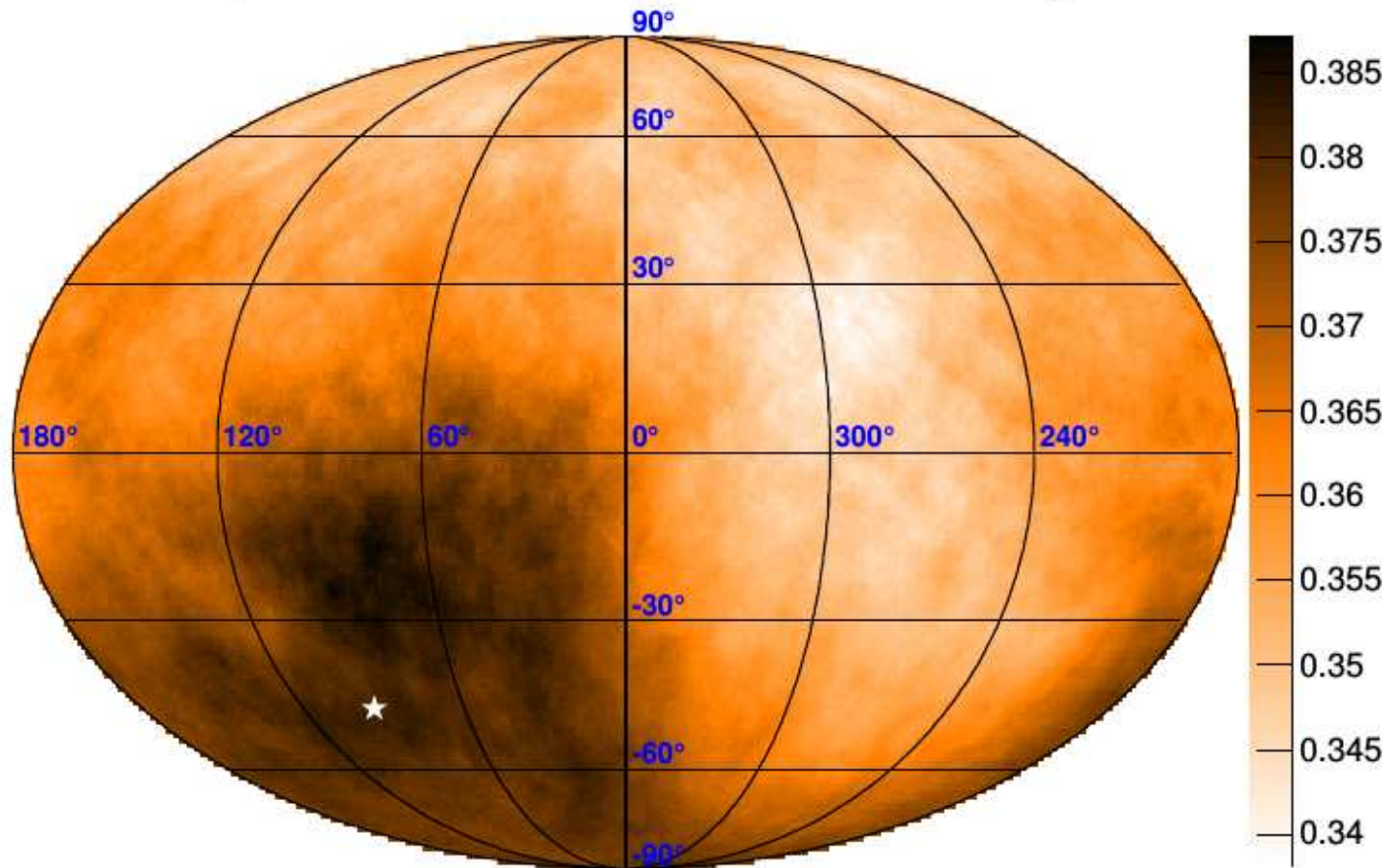


# AUGER + TA

## Rozkład przestrzenny

dla przypadków  $E > 10^{19}$  eV

Equatorial Coordinates -  $60^\circ$  smoothing

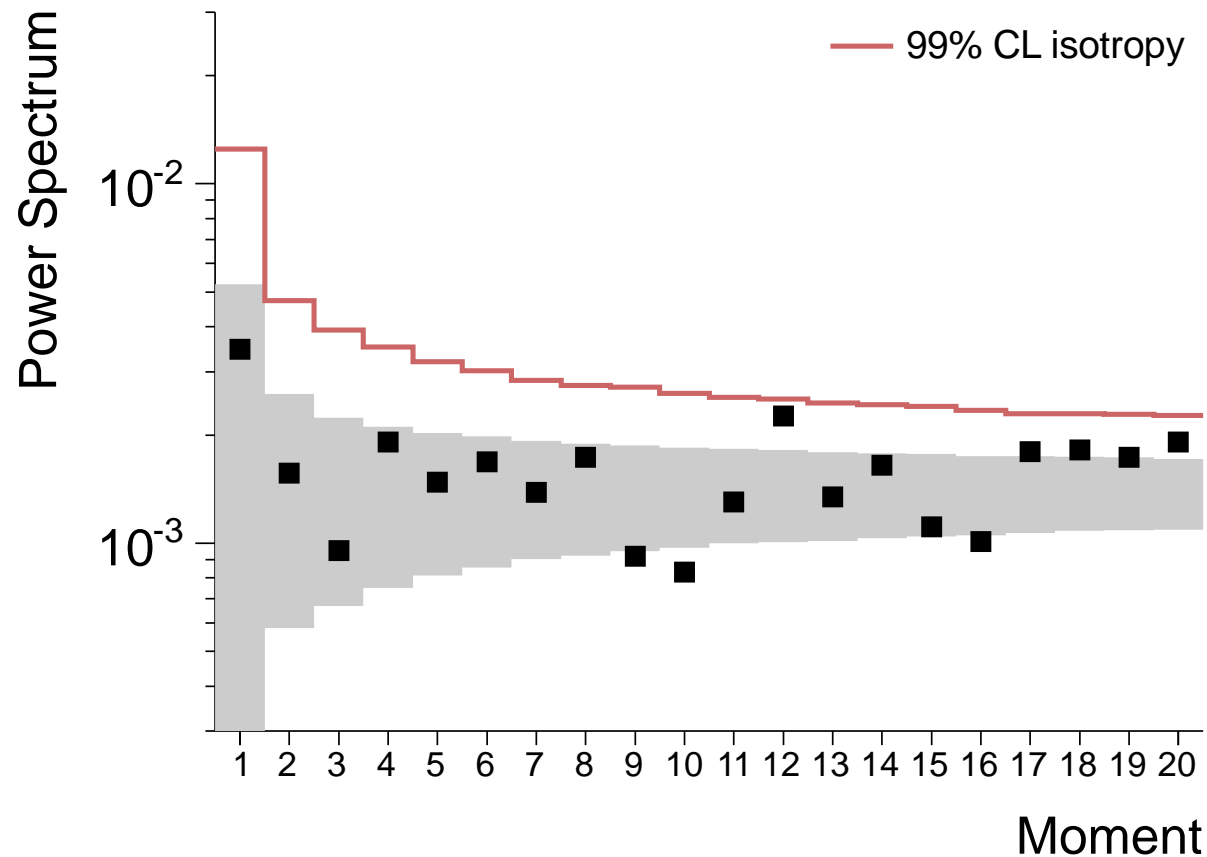


Składowa “dipolowa”: lekka nadwyżka z centrum galaktyki?

# AUGER + TA

Rozkład przestrzenny dla przypadków  $E > 10^{19}$  eV

Zmierzone odstępstwa od rozkładu izotropowego (rozkład na harmoniki sferyczne)



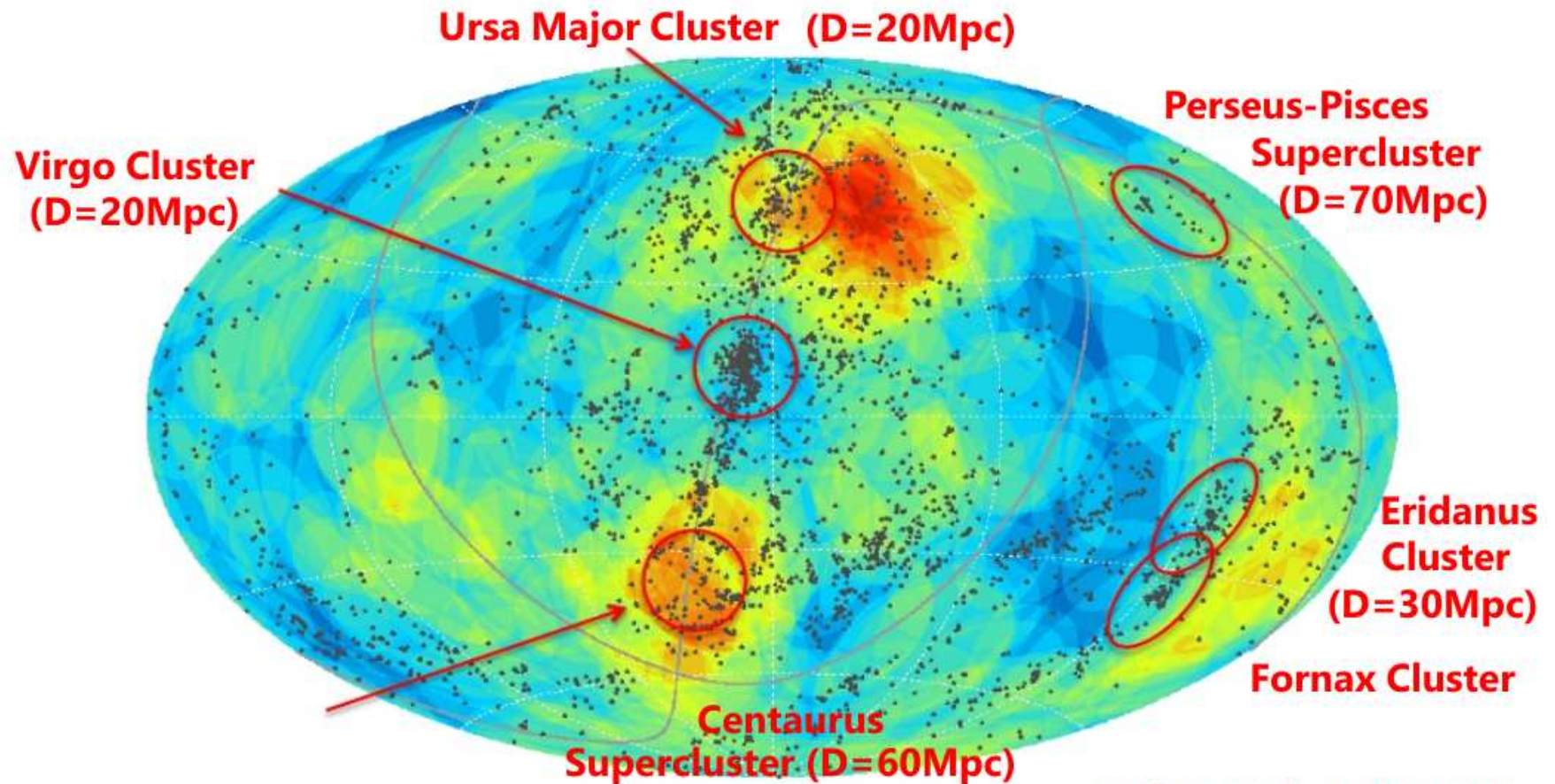
Natężenia składowych zgodne z oczekiwaniami dla rozkładu izotropowego



# AUGER + TA

## Rozkład przestrzenny

dla przypadków  $E > 5.7 \cdot 10^{19}$  eV



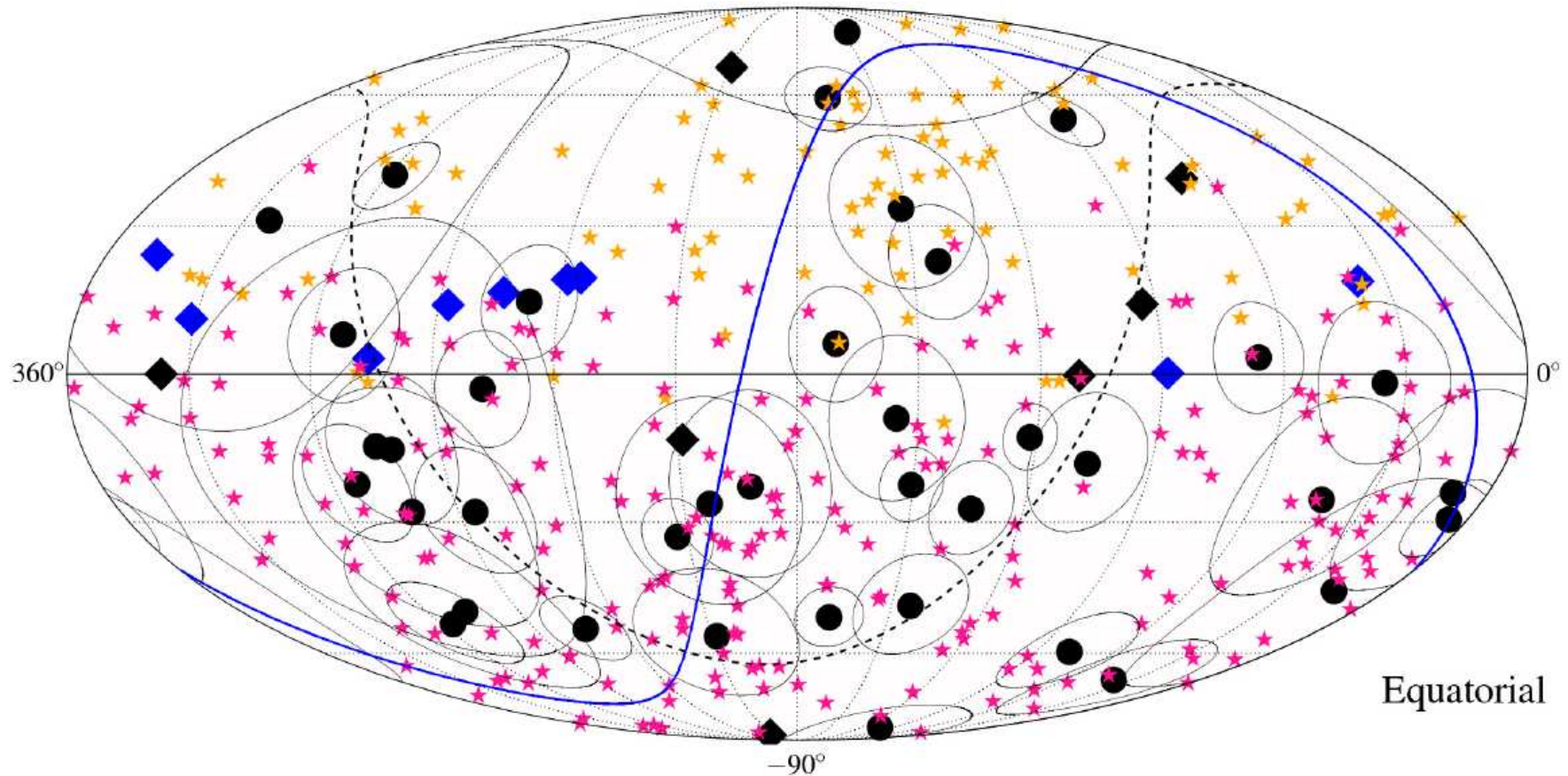
Dots : 2MASS catalog Heliocentric velocity  $< 3000$  km/s (D  $\sim$  45Mpc)

*Huchra, et al, ApJ, (2012)*

# AUGER + TA

## Korelacja z IceCube

przypadki najwyższych energii: neutrino TeV - PeV

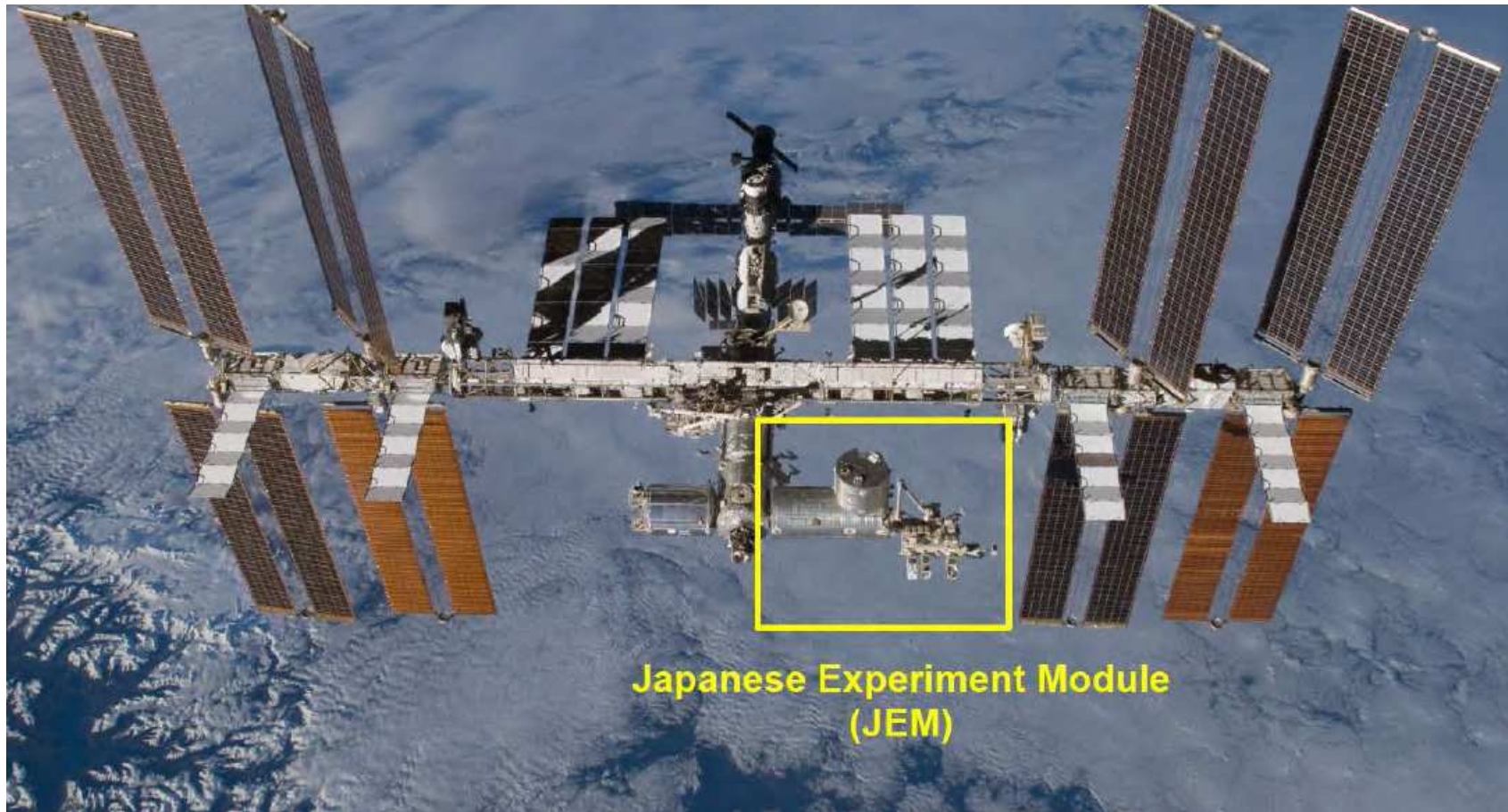


Widoczna korelacja kaskad neutronowych (●) z UHECR dla rozdzielczości ok.  $20^\circ$   
(na poziomie znaczości  $\sim 3\sigma$ )  $\Rightarrow$  potrzebna większa statystyka...

# JEM-EUSO

Dalsze powiększanie układów detekcyjnych na powierzchni Ziemi bardzo kosztowne.

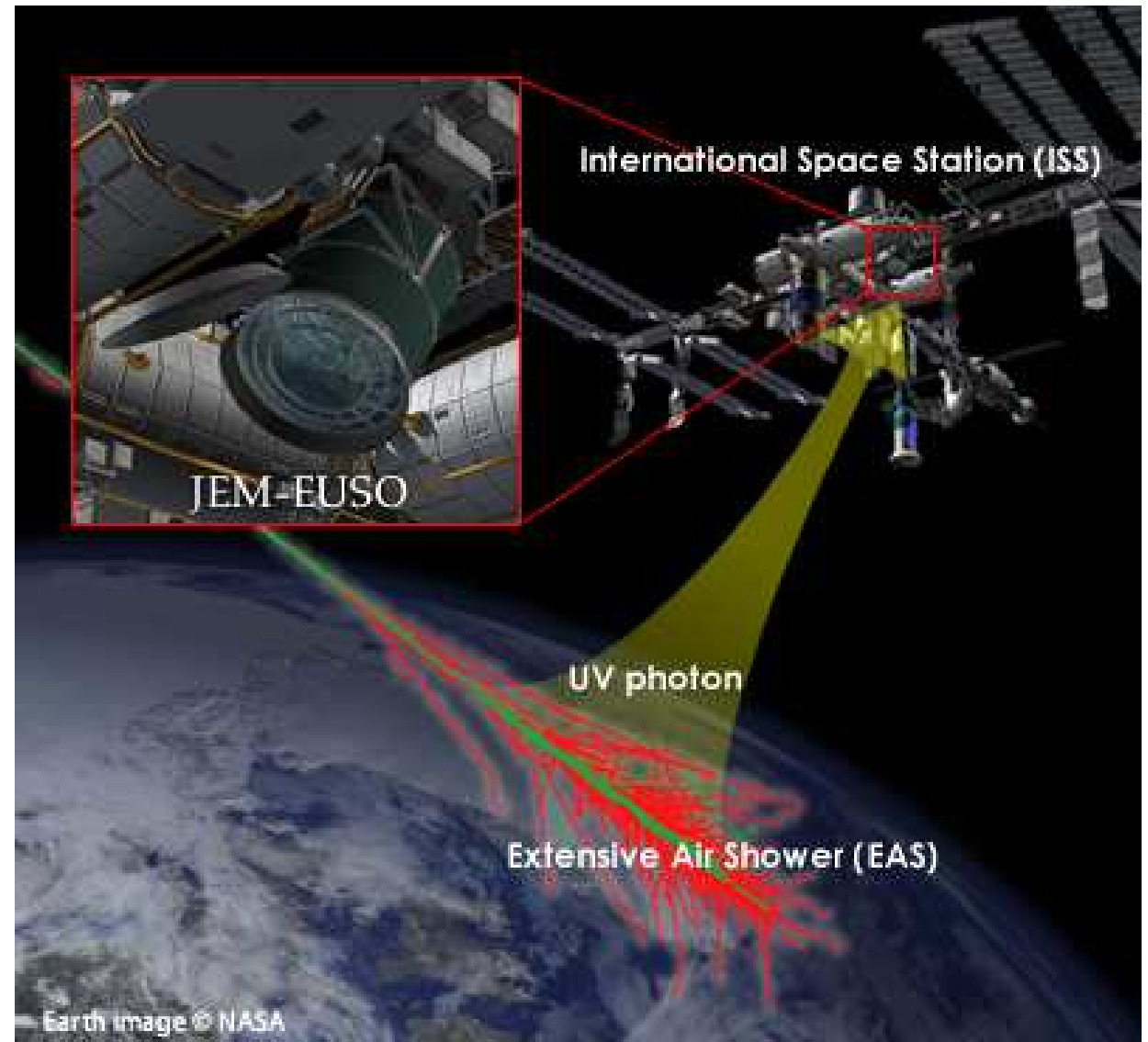
⇒ projekt obserwacji z kosmosu, z Japońskiego Modułu Eksperymentalnego na ISS



# JEM-EUSO

## Zasada działania

Detekcja promieniowania UV wytwarzanego przy przejściu pęków atmosferycznych: fluorescencja i promieniowanie Czerenkowa



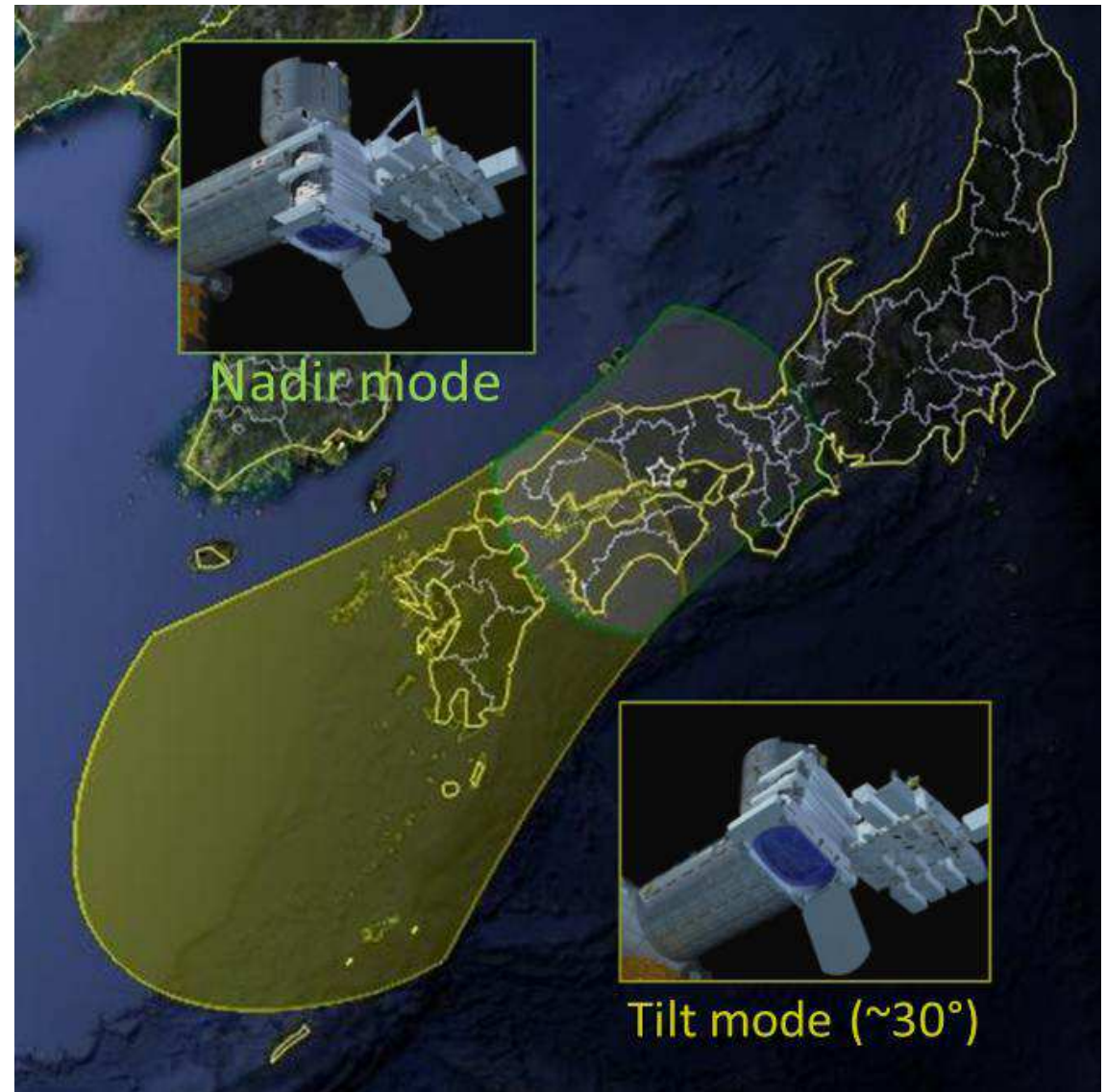
# JEM-EUSO

## Zasada działania

Detekcja promieniowania UV wytwarzanego przy przejściu pęków atmosferycznych: fluorescencja i promieniowanie Czerenkowa

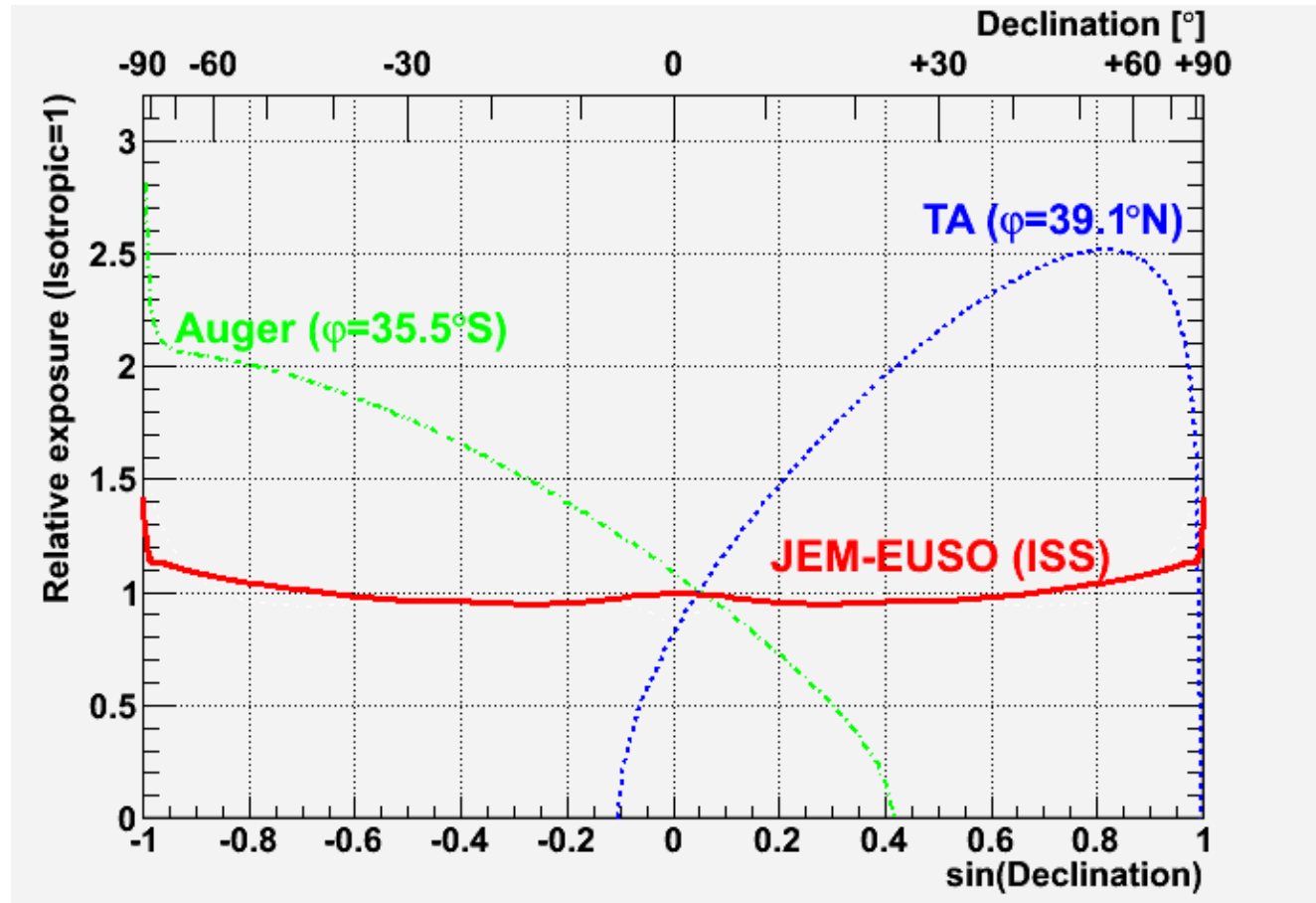
Z wysokości 400 km można obserwować powierzchnię od ok. 140 000 km<sup>2</sup> (obserwacja pionowo) do ok. 300 000 km<sup>2</sup> (obserwacja pod kątem 30°)

**100× AUGER !!!**



# JEM-EUSO

## Obszar obserwacji



Ponieważ ISS krąży po orbicie nachylonej ok.  $52^\circ$  do równika cała sfera niebieska dostępna jest obserwacjom  $\Rightarrow$  kluczowe dla poszukiwania źródeł

# JEM-EUSO

## Schemat detektora

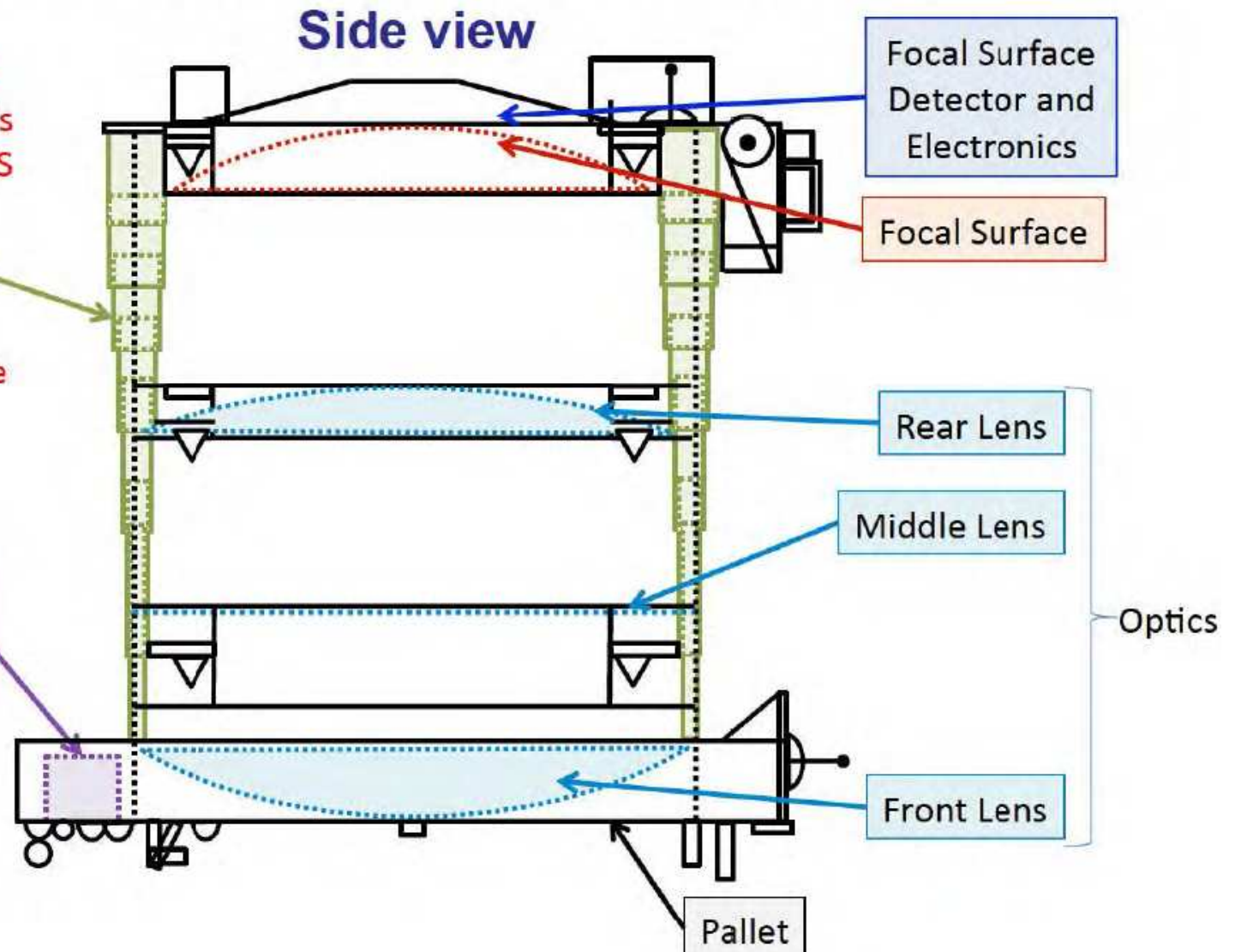
### JEM-EUSO

Telescope will be deployed after it is attached at the ISS

Deployment Mechanism

Other options are under study.

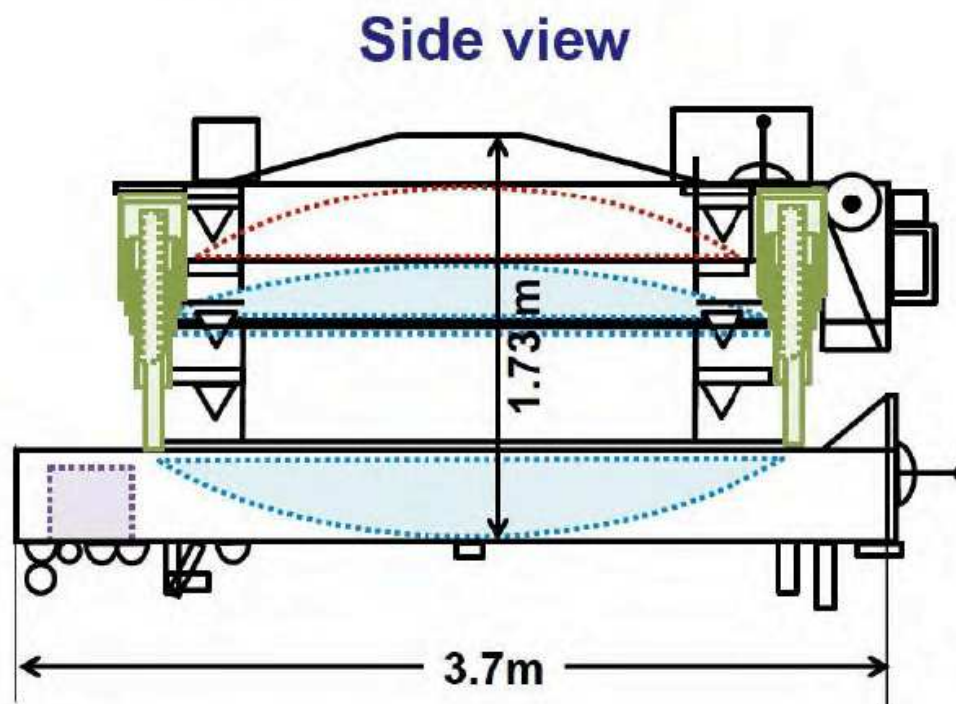
Atmospheric Monitoring System



# JEM-EUSO

## Schemat detektora

Do wyniesienia na orbitę detektor musi być złożony:





# JEM-EUSO

## Budowa detektora

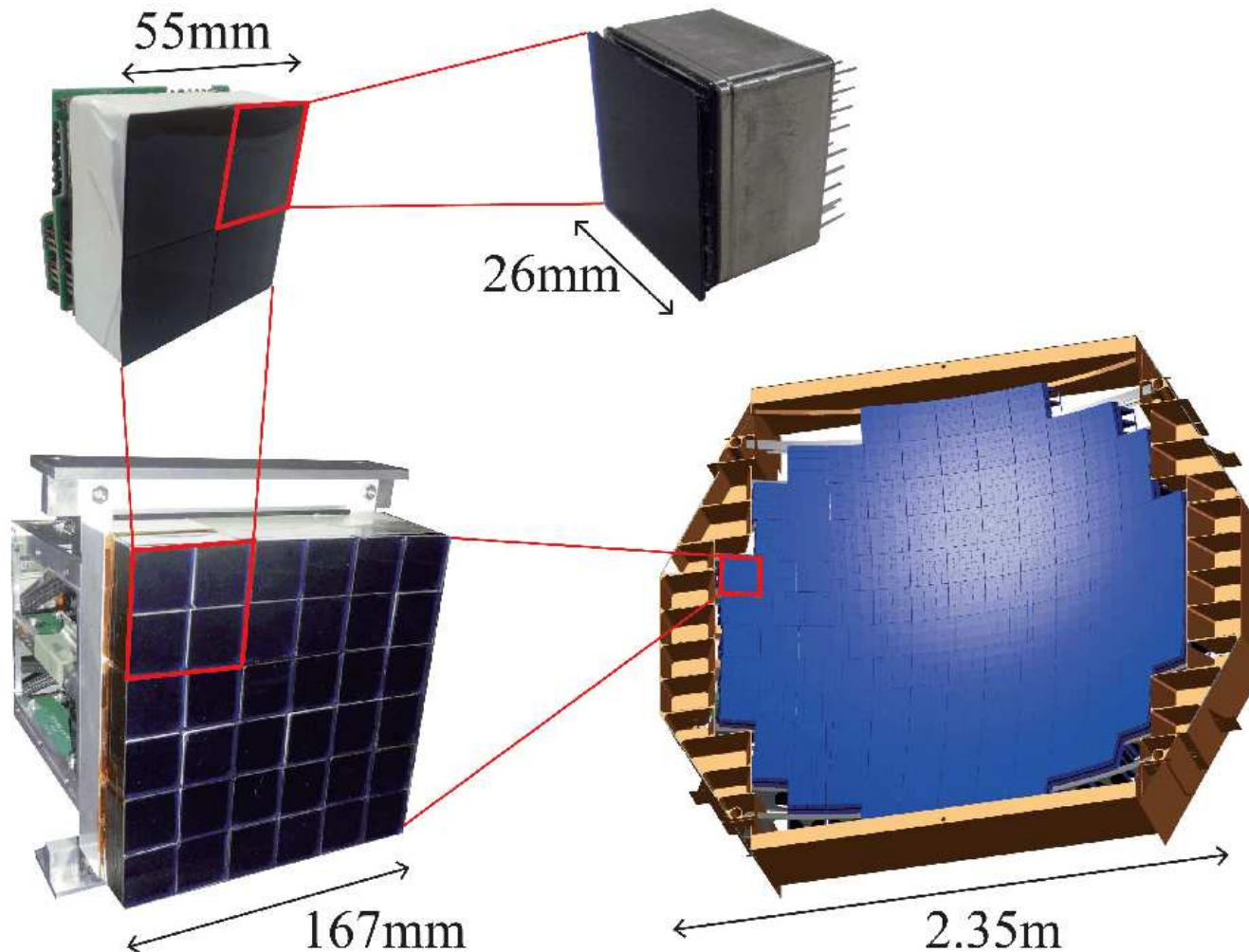
Prototypowe soczewki frenalowskie - kluczowy element detektora



# JEM-EUSO

## Budowa detektora

Powierzchnia ogniskowa:  $4.5 \text{ m}^2$ , 320 000 pixeli, wieloanodowe fotopowielacze - MAPMTs

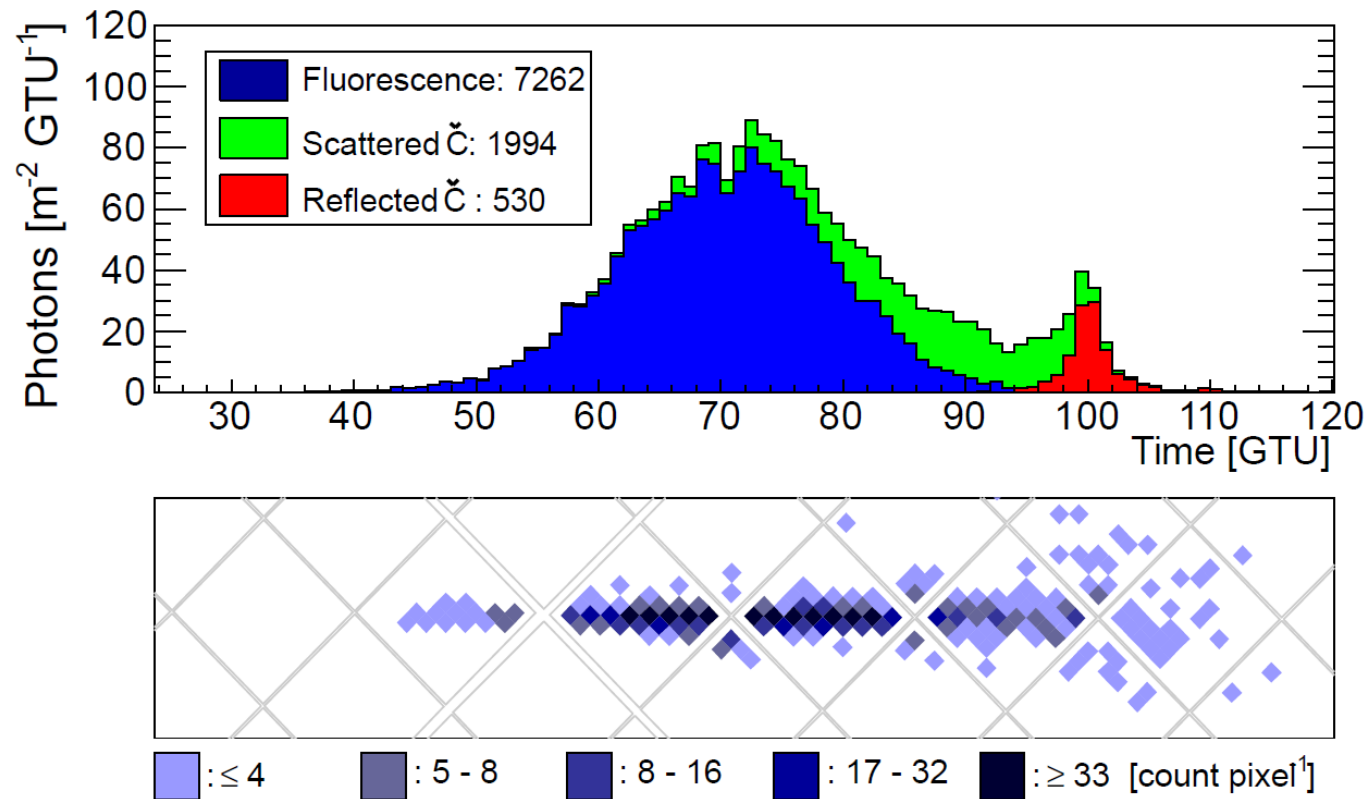


# JEM-EUSO

## Zasada działania

Pomiar promieniowania 300-430 nm, z czasem ekspozycji  $2.5 \mu s$  (GTU).

Wyraźnie widoczny wkład od promieniowania Czerenkowa (rozproszonego i odbitego od Ziemi)  $\Rightarrow$  możliwość rekonstrukcji wysokości pęku w atmosferze



# EUSO-TA

## Testy prototypów

Stanowisko testowe przy Telescope Array



# EUSO-SPB

## Super Pressure Balloon (SPB)

testy z balonem stratosferycznym



# EUSO-SPB

## Super Pressure Balloon (SPB)

start 24 kwietnia 2017



# EUSO-SPB

## Super Pressure Balloon (SPB)

Lot 24 kwietnia - 7 maja 2017



# JEM-EUSO

## Status projektu

Przeprowadzono testy z prototypem naziemnym (we współpracy z Telescope Array)

Pierwszy próbny lot balonowy ( $\sim 40$  km) w 2014

Właśnie odbył się 14 dniowy lot (24 kwietnia - 7 maja 2017) balonem NASA

Super Pressure Balloon (SPB)  $\Rightarrow$  czekamy na wyniki !

Przygotowywany detektor Mini-EUSO - obserwacje z wnętrza ISS.

Dwie soczewki o średnicy 35 cm, 1 moduł detekcyjny z 36 MAPMTs.

Czekamy na zatwierdzenie specyfikacji...

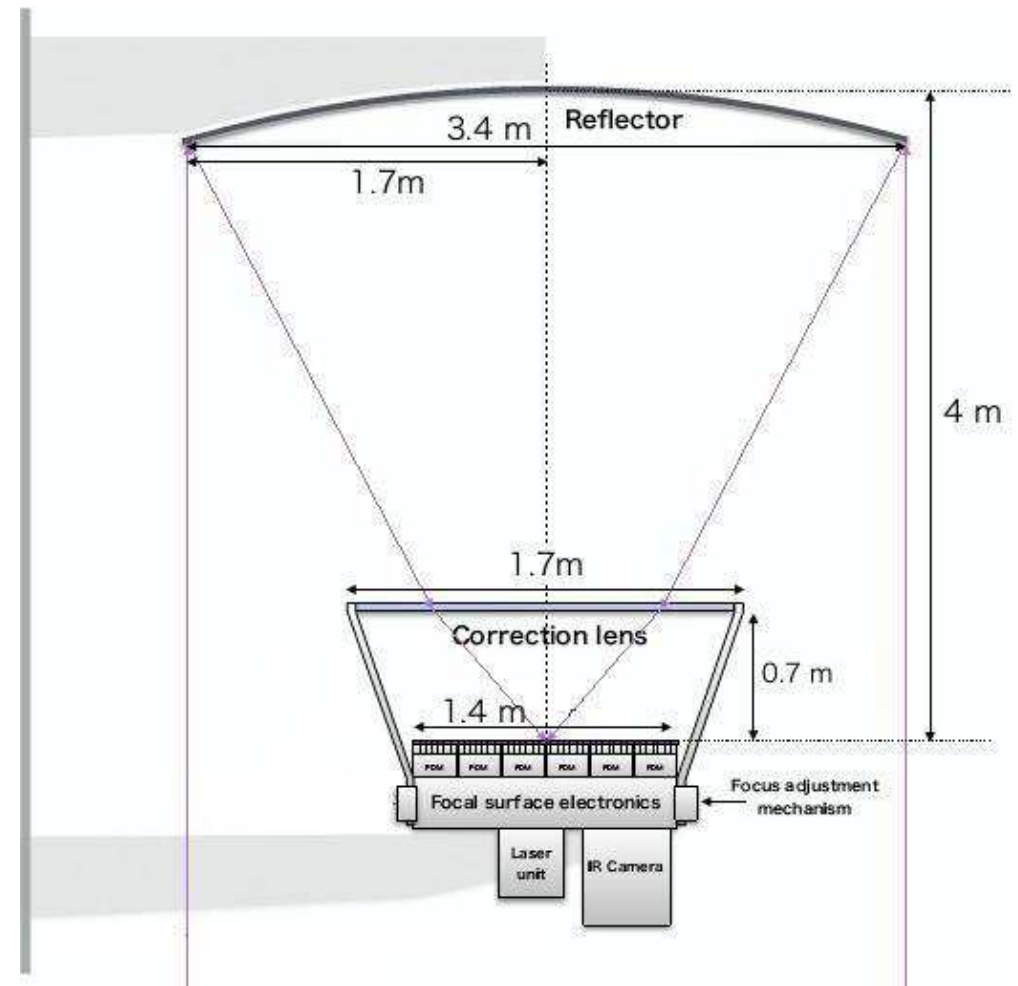
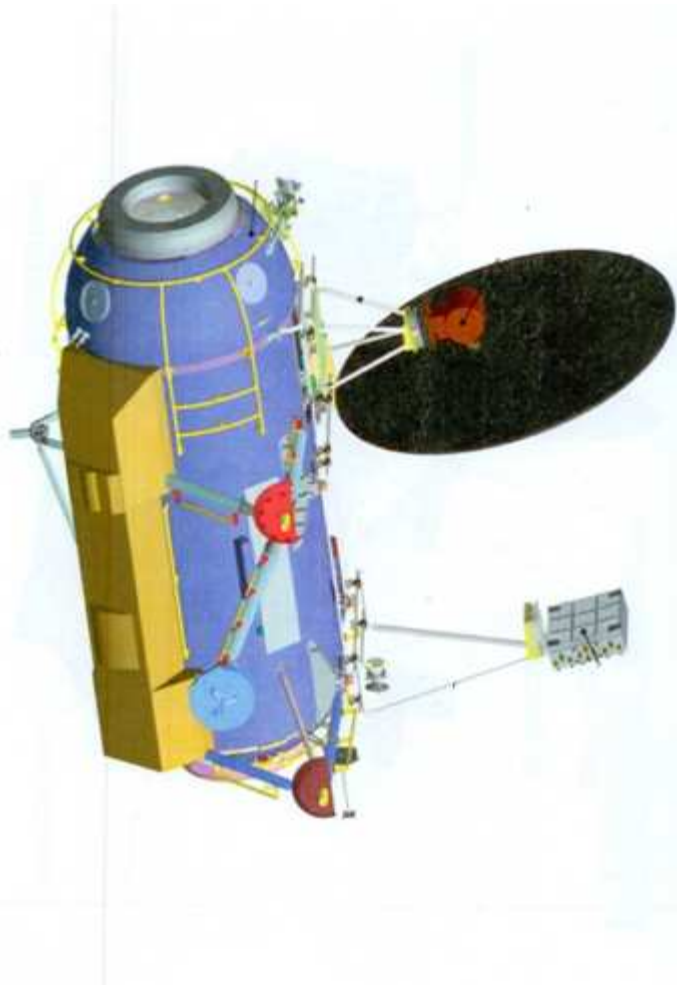
Start głównej misji, pierwotnie planowany na 2017, został odsunięty w czasie ( $> 2020$ ).

Rozważana też mniejsza, uproszczona wersja, oparta na wykorzystaniu zwierciadła i jednej soczewki korekcyjnej: K-EUSO.



# K-EUSO

Możliwa instalacja w rosyjskim module badawczym ISS



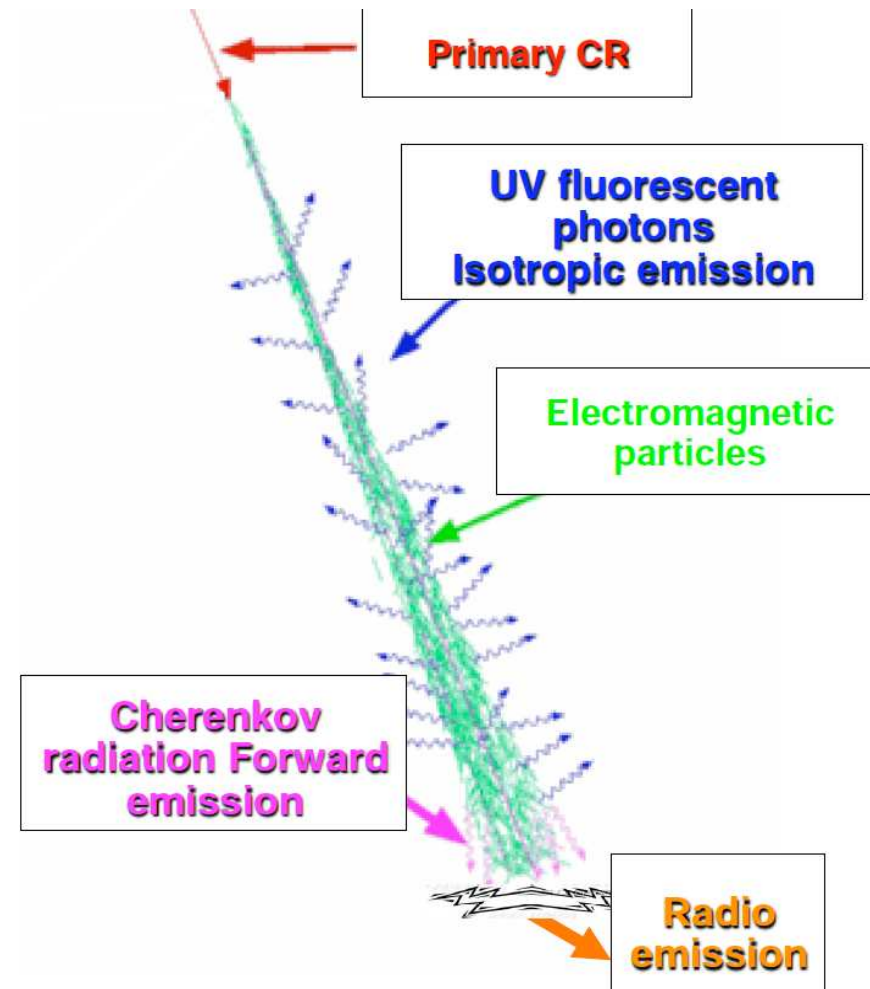
# Wielkie pęki atmosferyczne

## Metody detekcji

Pęki atmosferyczne możemy badać mierząc:

- cząstki naładowane na powierzchni Ziemi głównie elektrony i miony
- promieniowanie Czerenkowa produkowane przez elektrony w rdzeniu
- fluorescencje cząsteczek atmosfery wzbudzanych przez rozwój kaskady
- emisję radiową (!)

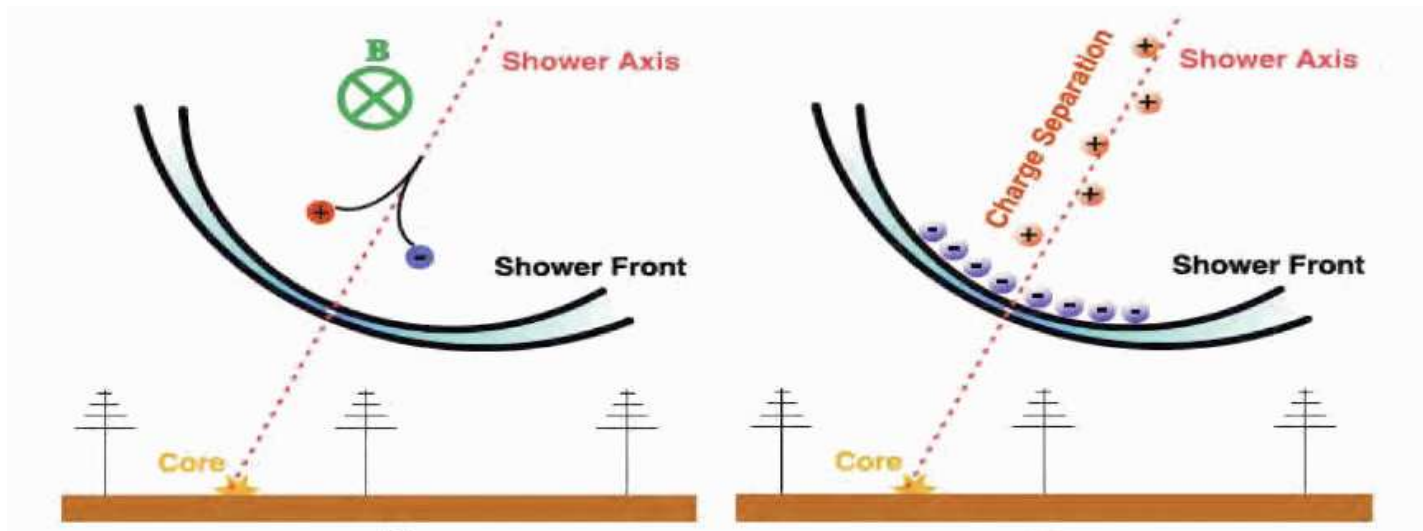
Różne eksperymenty stosują różne podejścia...



# Wielkie pęki atmosferyczne

## Emisja radiowa

Powstaje w wyniku pojawienia się separacji przestrzennej ładunków ujemnych i dodatnich w kaskadzie. Dwa mechanizmy separacji:



Wpływ ziemskiego pola magnetycznego (efekt geomagnetyczny)

Efekt Askariana:

- w wyniku anihilacji  $e^+$  na froncie kaskady przeważają elektrony
- ⇒ emitują koherentne promieniowanie w zakresie radiowym

# Wielkie pęki atmosferyczne

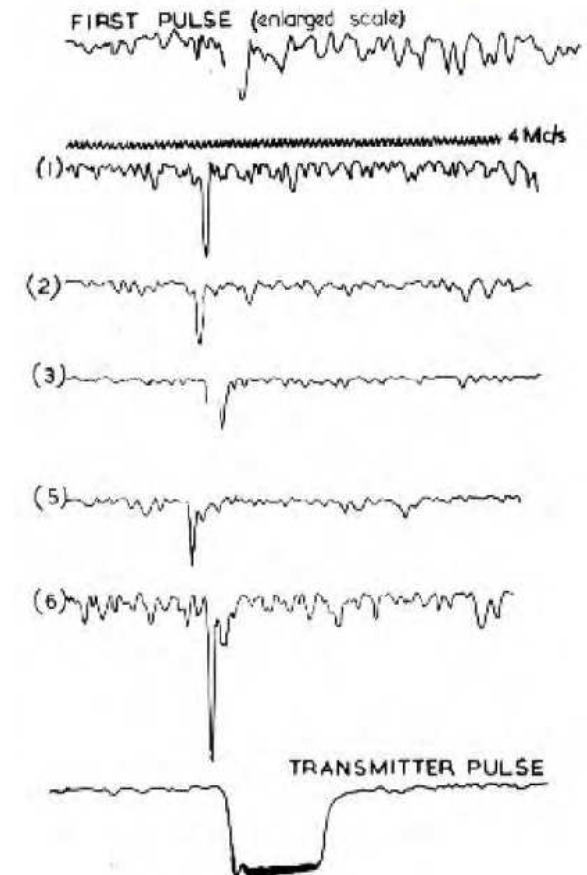
## Emisja radiowa

Odkryta już w 1965 roku (pasmo 44 MHz)

Szereg prac teoretycznych i doświadczalnych na przełomie lat 60 i 70.

Pod koniec lat 70 badania w dziedzinie radioastronomii skierowały się w kierunku wyższych częstotliwości

⇒ zanik zainteresowania detekcją pęków



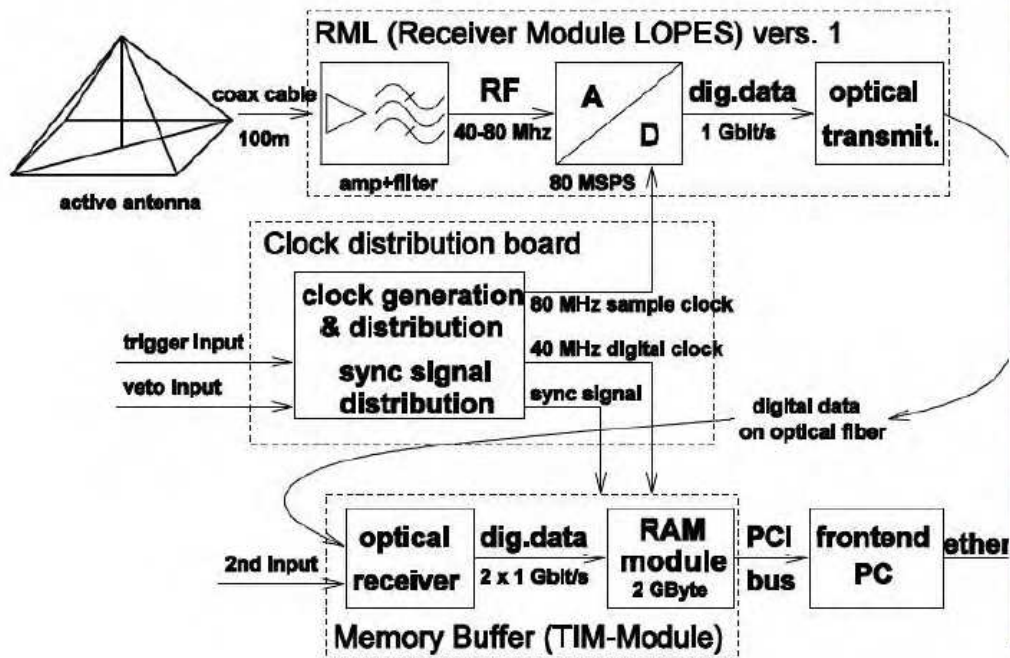
Jelley et al. (1965)

# Wielkie pęki atmosferyczne

## Detekcja radiowa

Zainteresowanie detekcją radiową ponownie na początku XXI wieku

Detektor LOPES zbudowany przy detektorze KASKADE (2003)



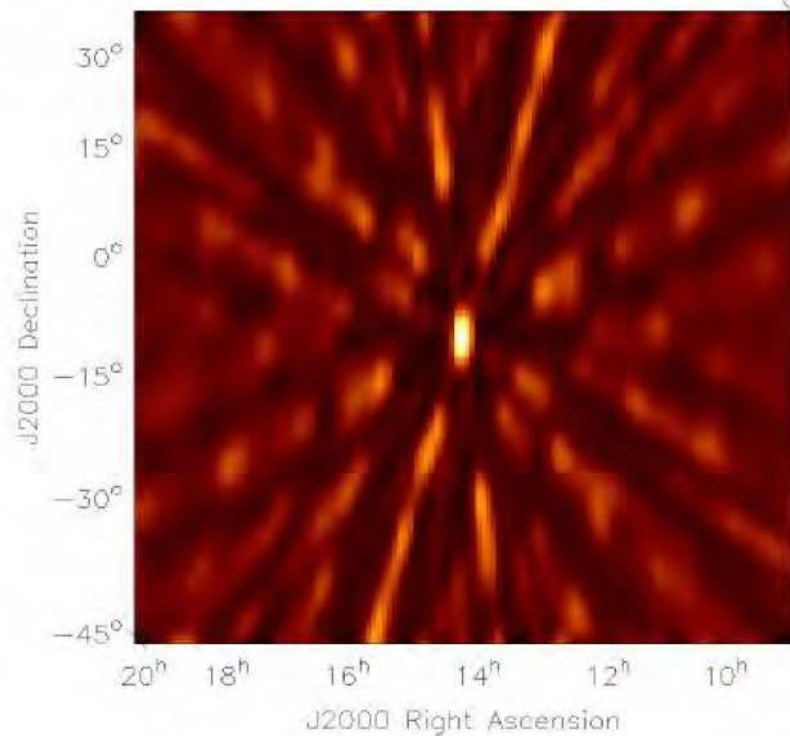
# Detekcja radiowa

## LOPES

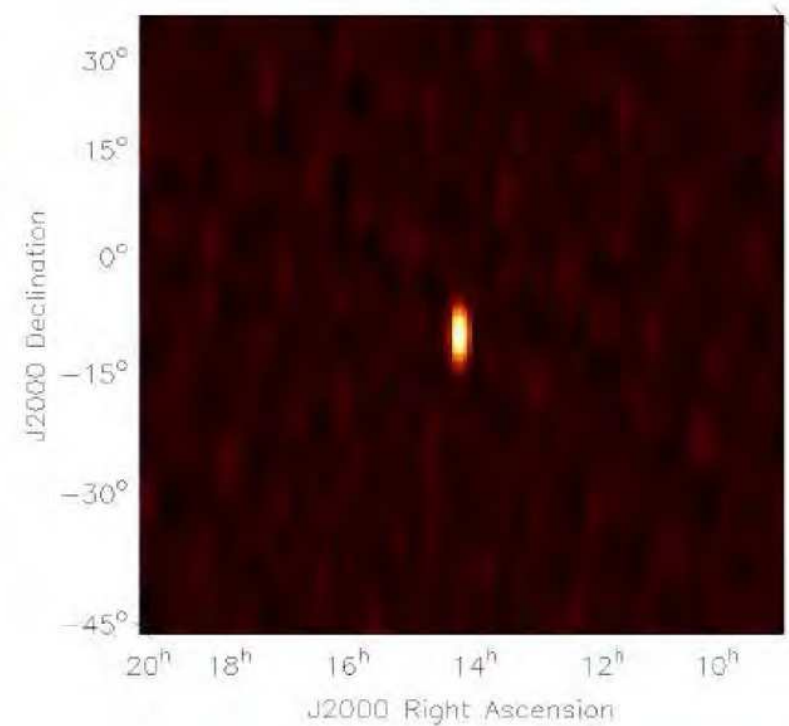
Przypadek wybuchu słonecznego mierzonego 8 antenami w paśmie 45-75 MHz

Rozkład pasujących kierunków:

Przed filtrowaniem



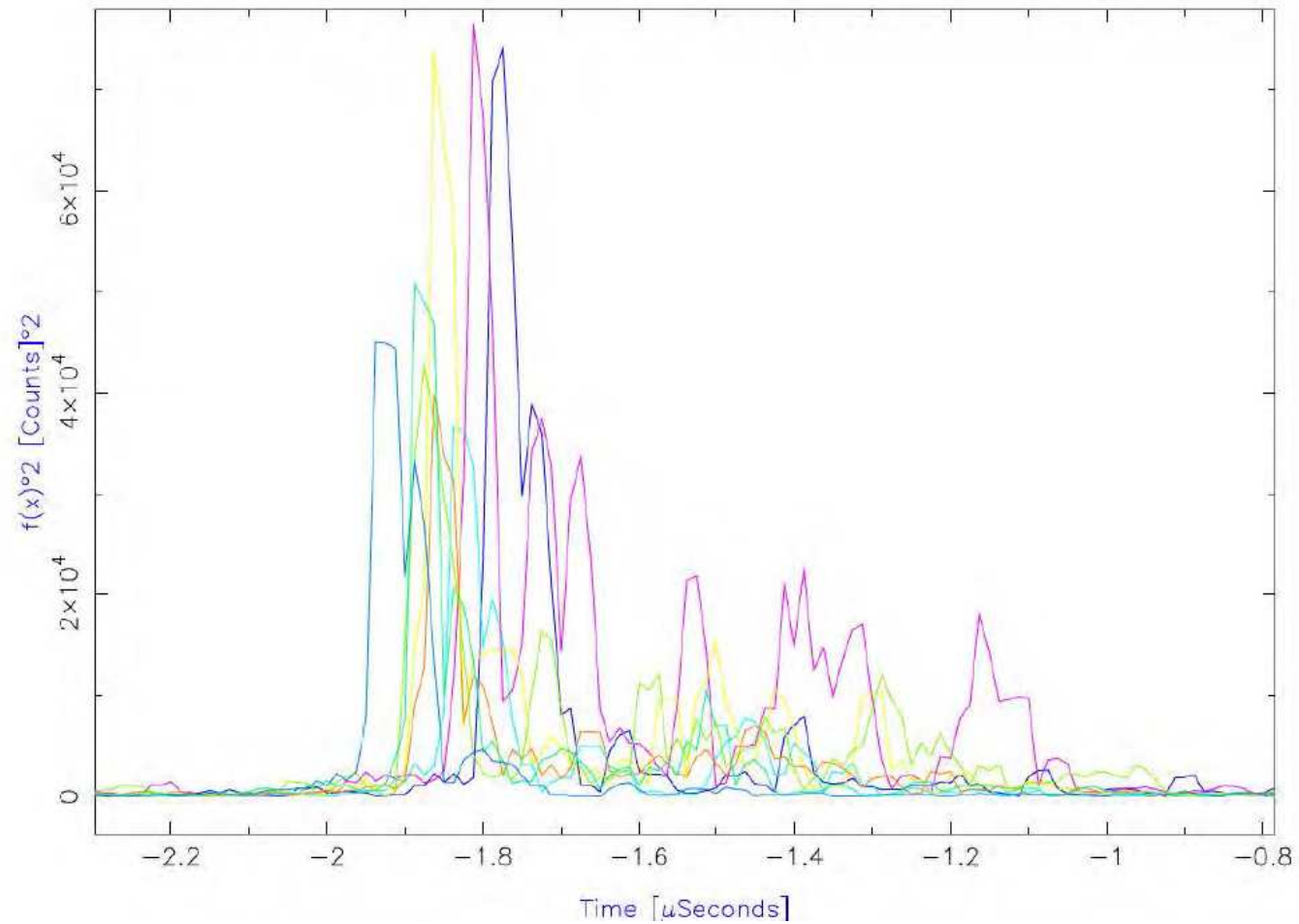
Po filtrowaniu



# Detekcja radiowa

## LOPES

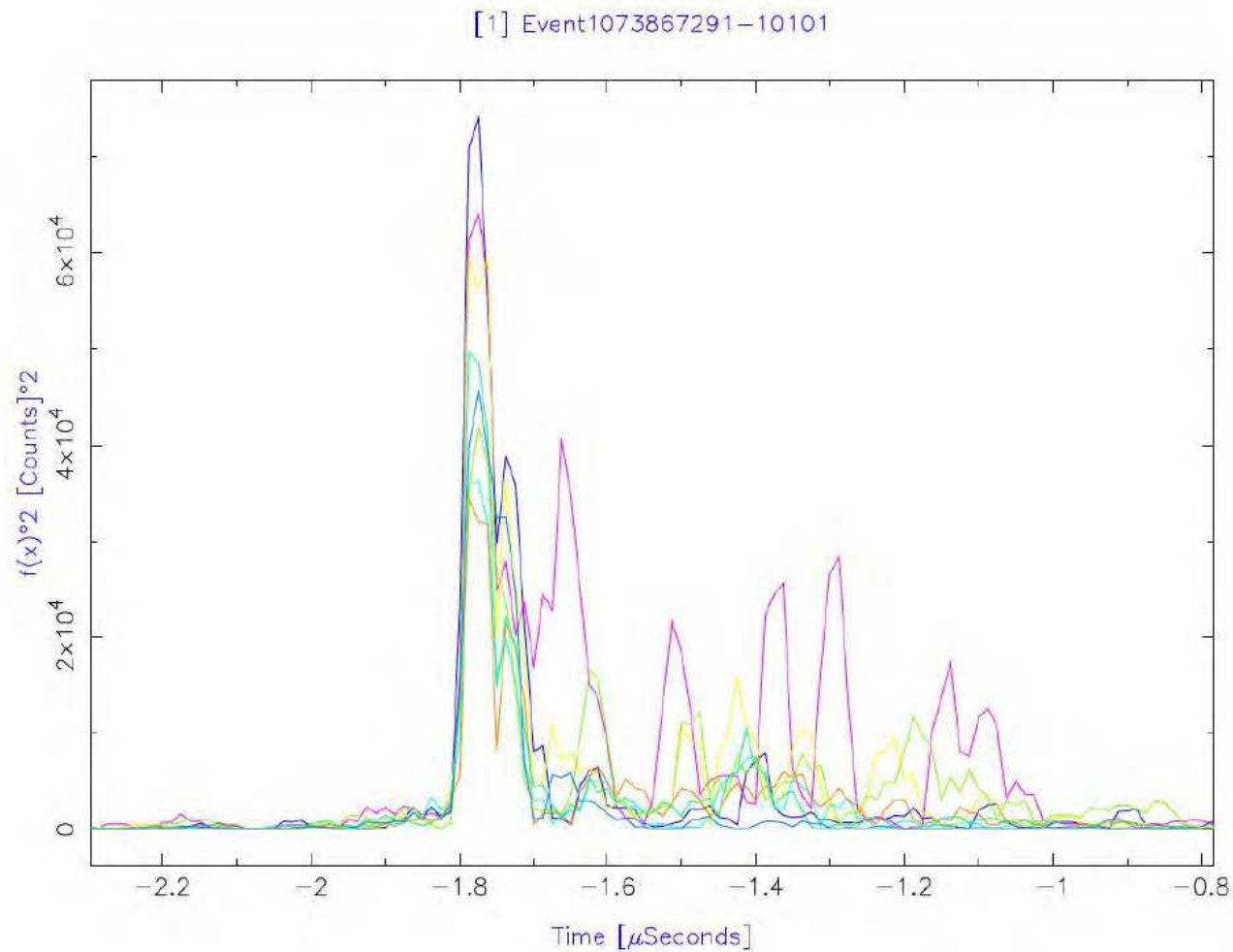
Przypadek mierzonej kaskady, przed dopasowaniem kierunku pęku:



# Detekcja radiowa

## LOPES

Przypadek mierzonej kaskady, po dopasowaniu kierunku pęku:

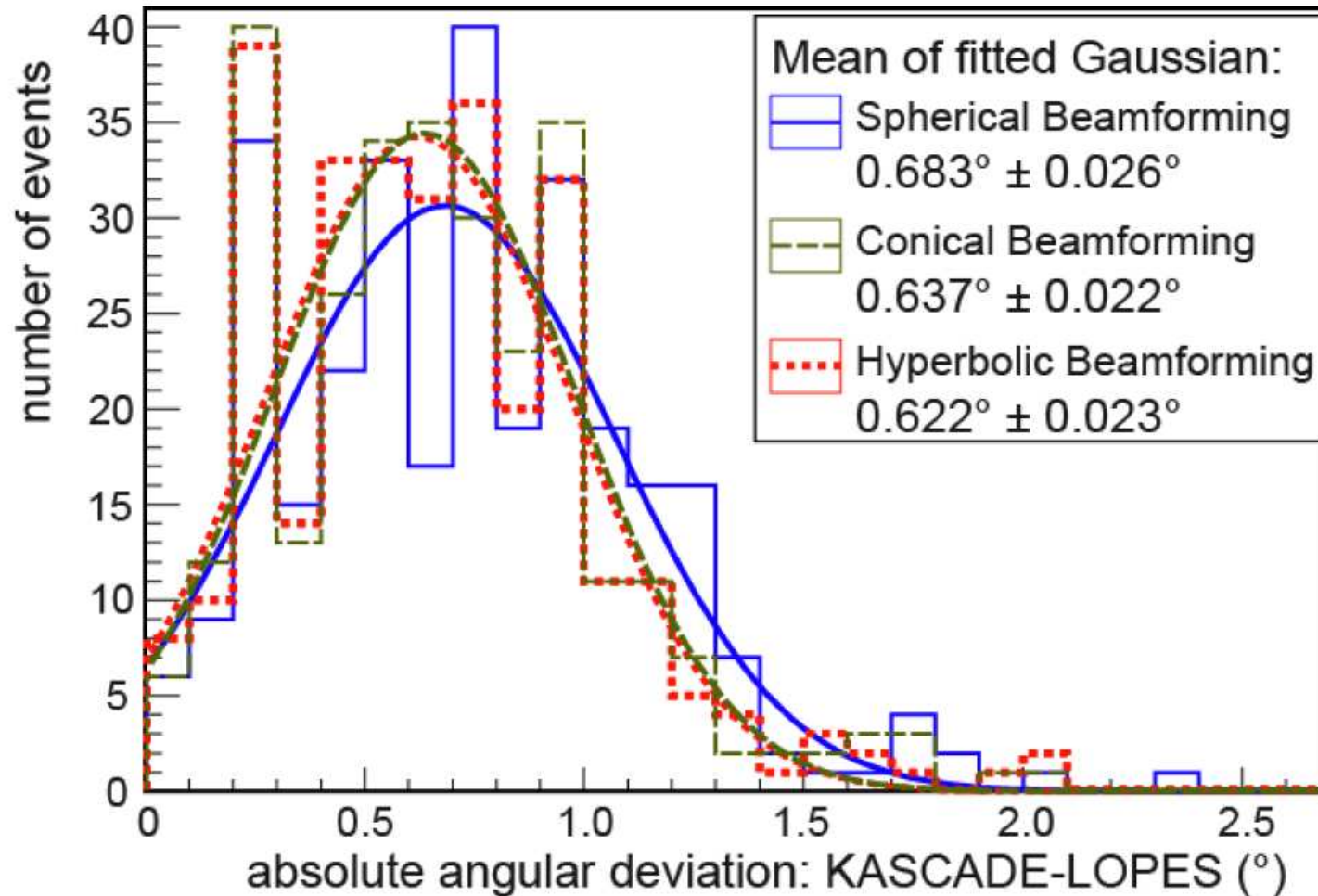




# Detekcja radiowa

## LOPES

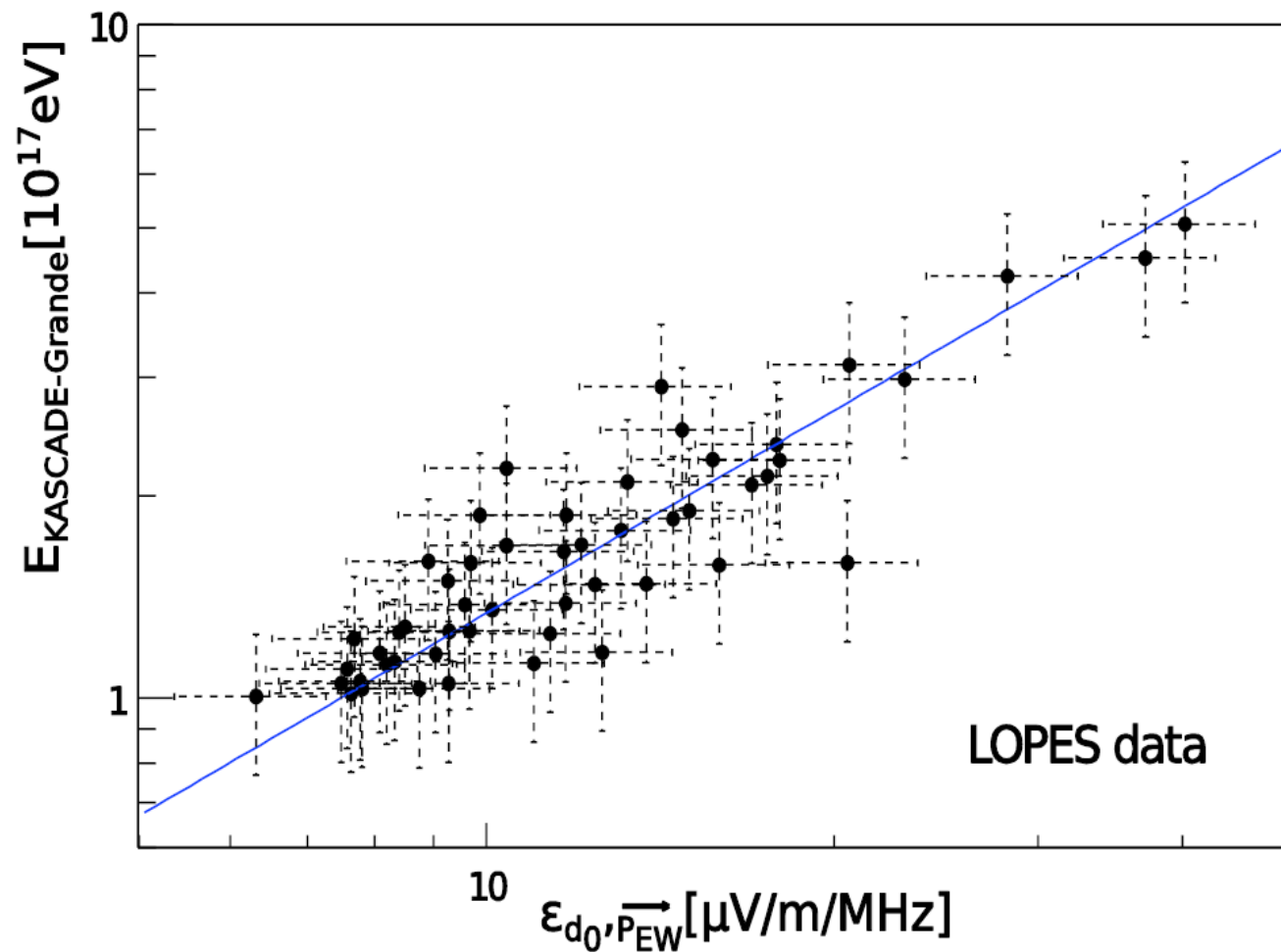
Dokładność wyznaczenia kierunku z porównania z detektorem KASCADE-Grande.



# Detekcja radiowa

## LOPES

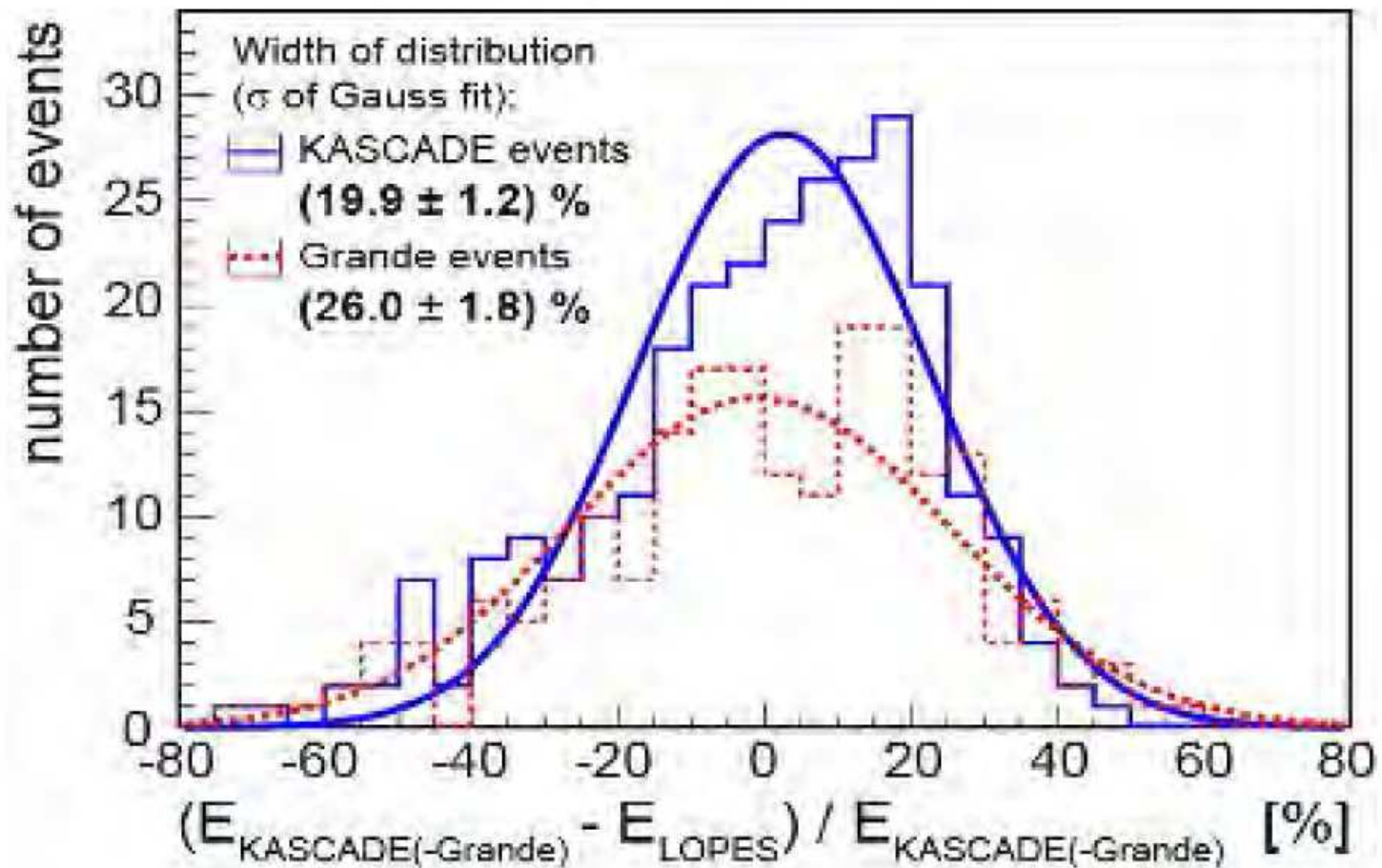
Dokładność wyznaczenia energii z porównania z detektorem KASCADE-Grande.

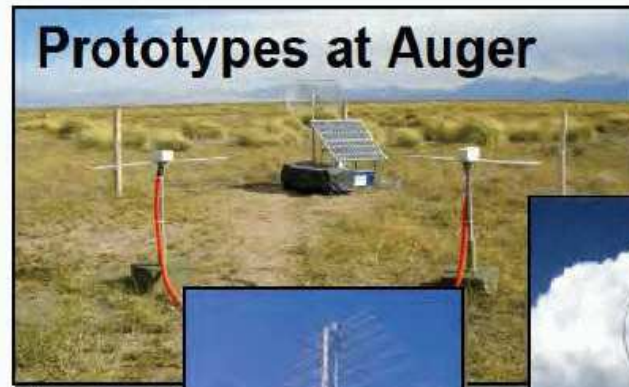


# Detekcja radiowa

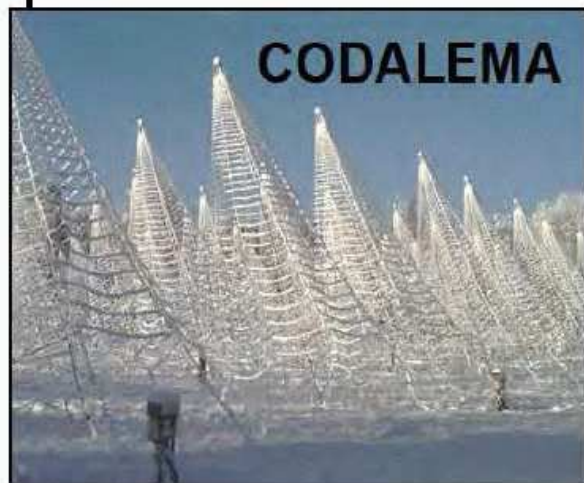
## LOPES

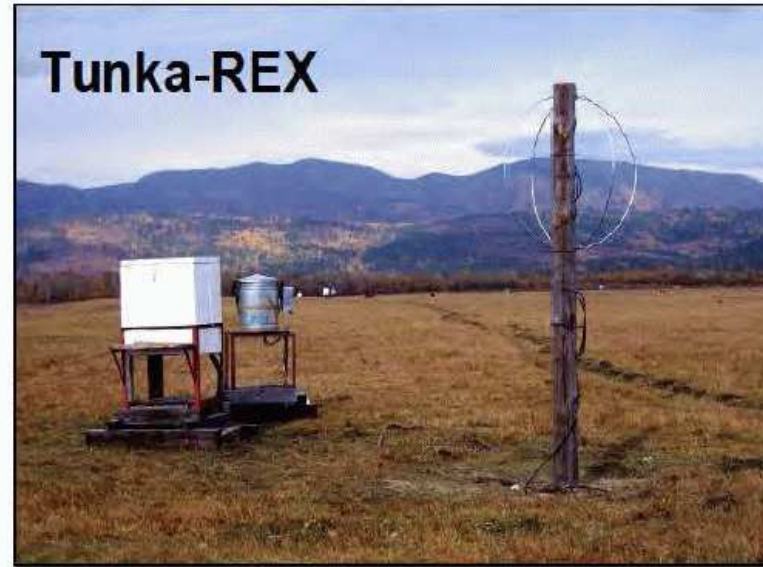
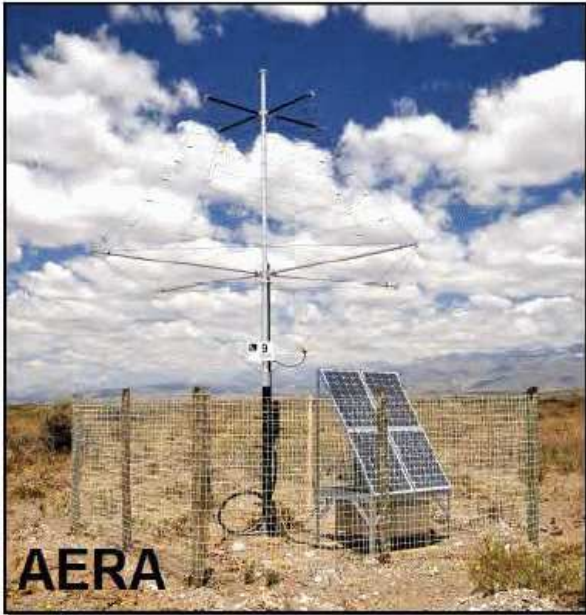
Dokładność wyznaczenia energii z porównania z detektorem KASCADE-Grande.





Falcke & Gorham propose „geosynchrotron approach“

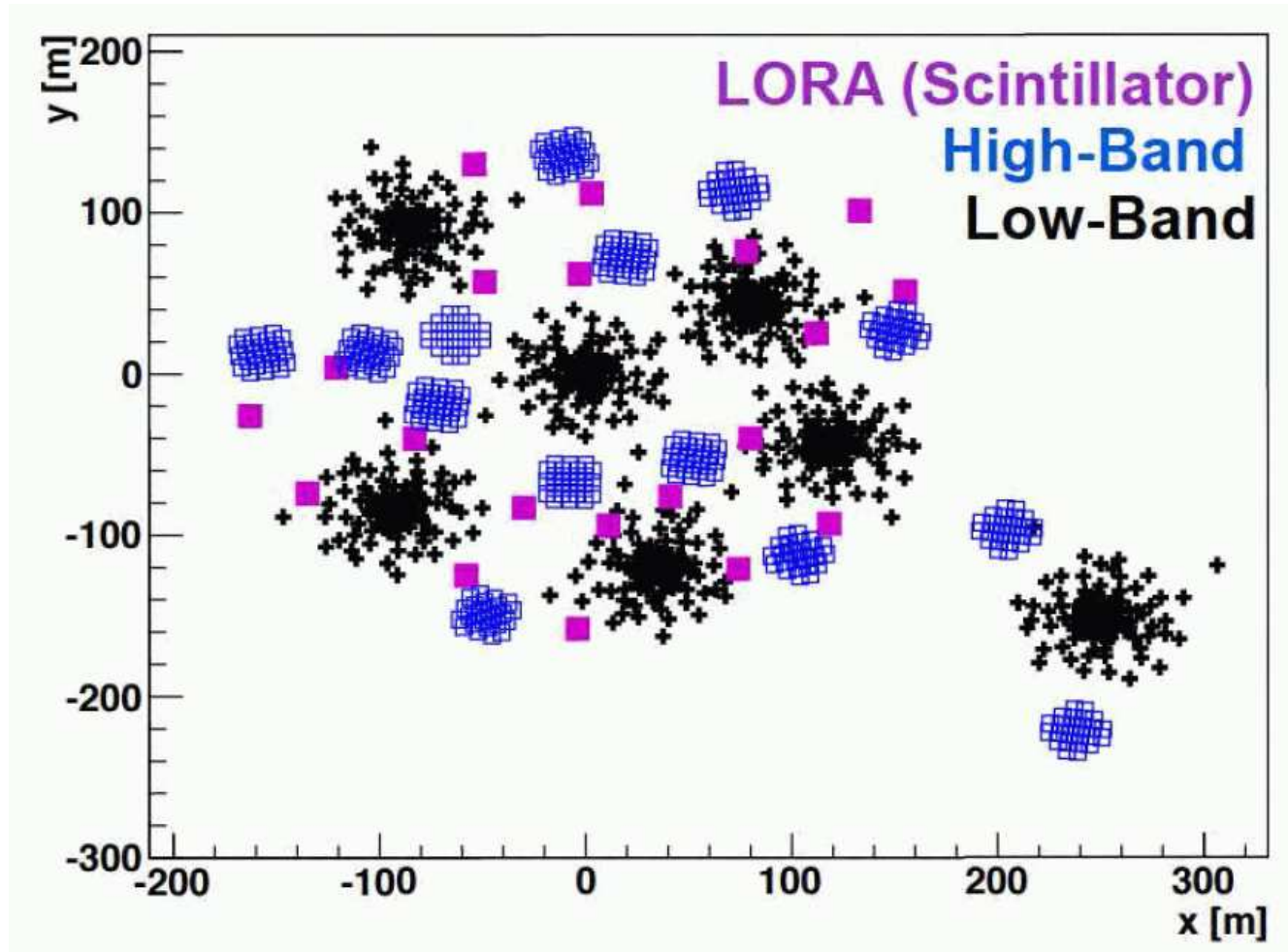




# Detekcja radiowa

## LOFAR

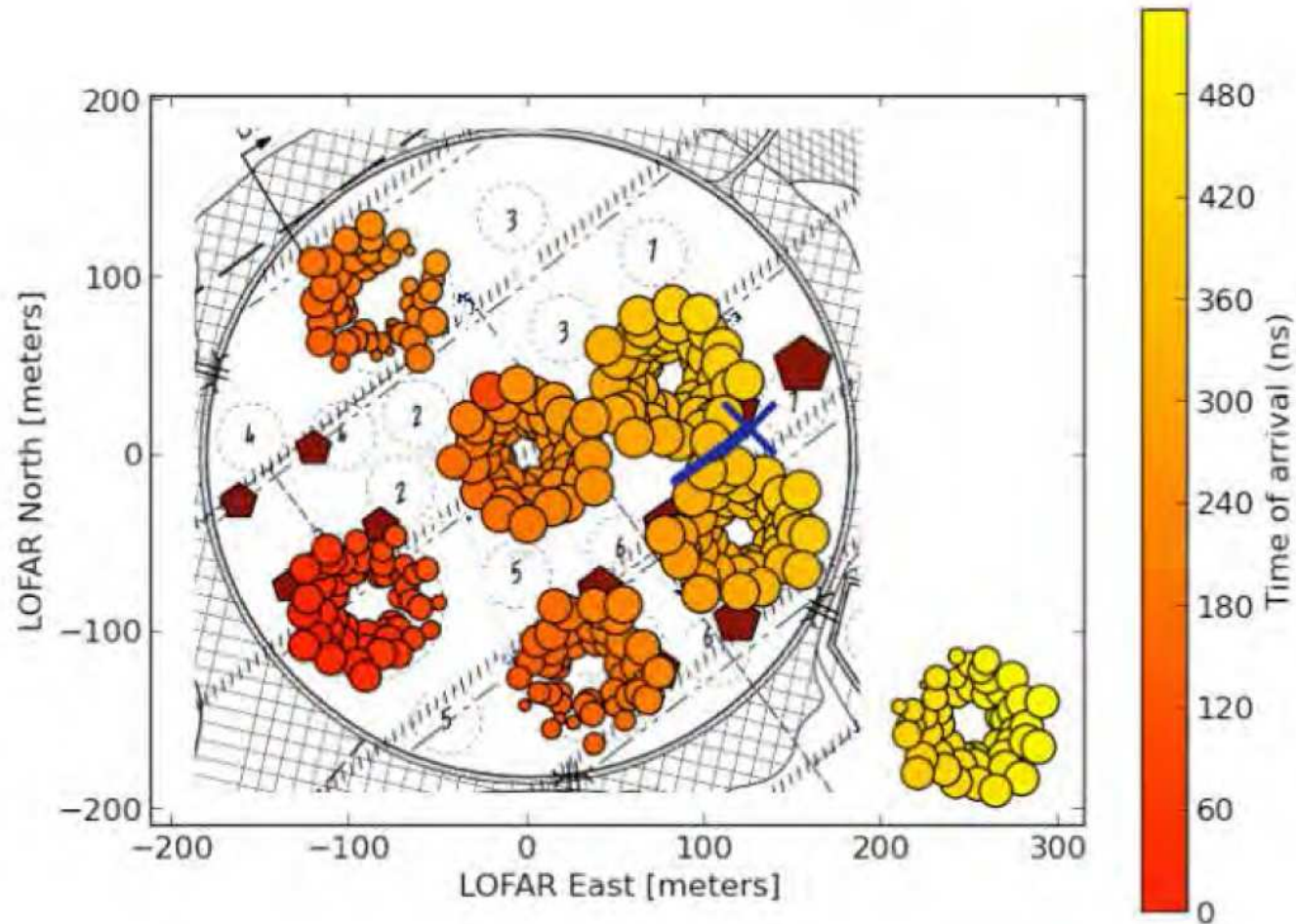
Zestawy anten pracujących w zakresie 30-80 MHz i 120-240 MHz + scyntylatory



# Detekcja radiowa

## LOFAR

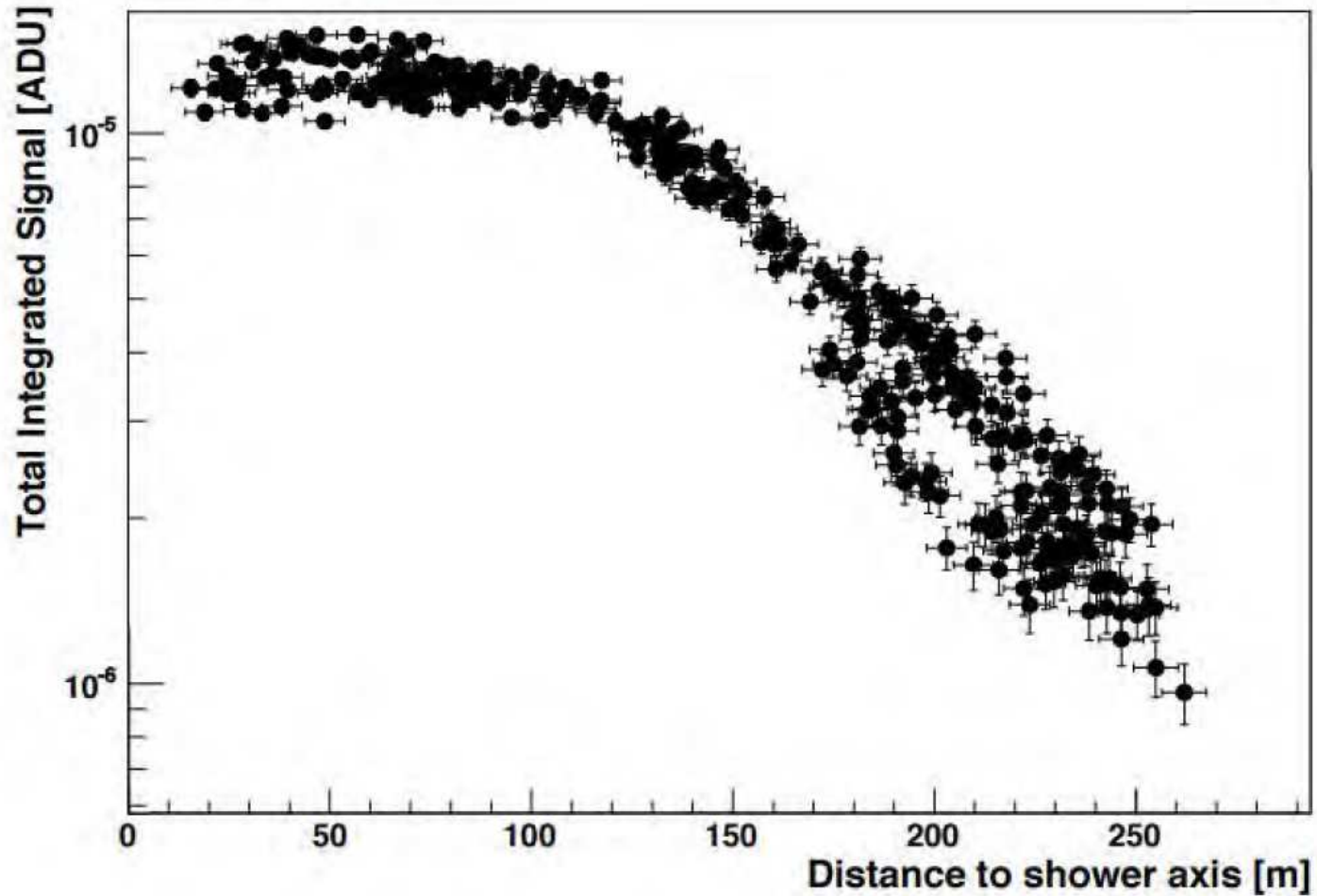
Przykładowy przypadek detekcji pęku (30-80 MHz)



# Detekcja radiowa

## LOFAR

Przykładowy przypadek detekcji pęku (30-80 MHz)  $\Rightarrow$  rekonstrukcja profilu

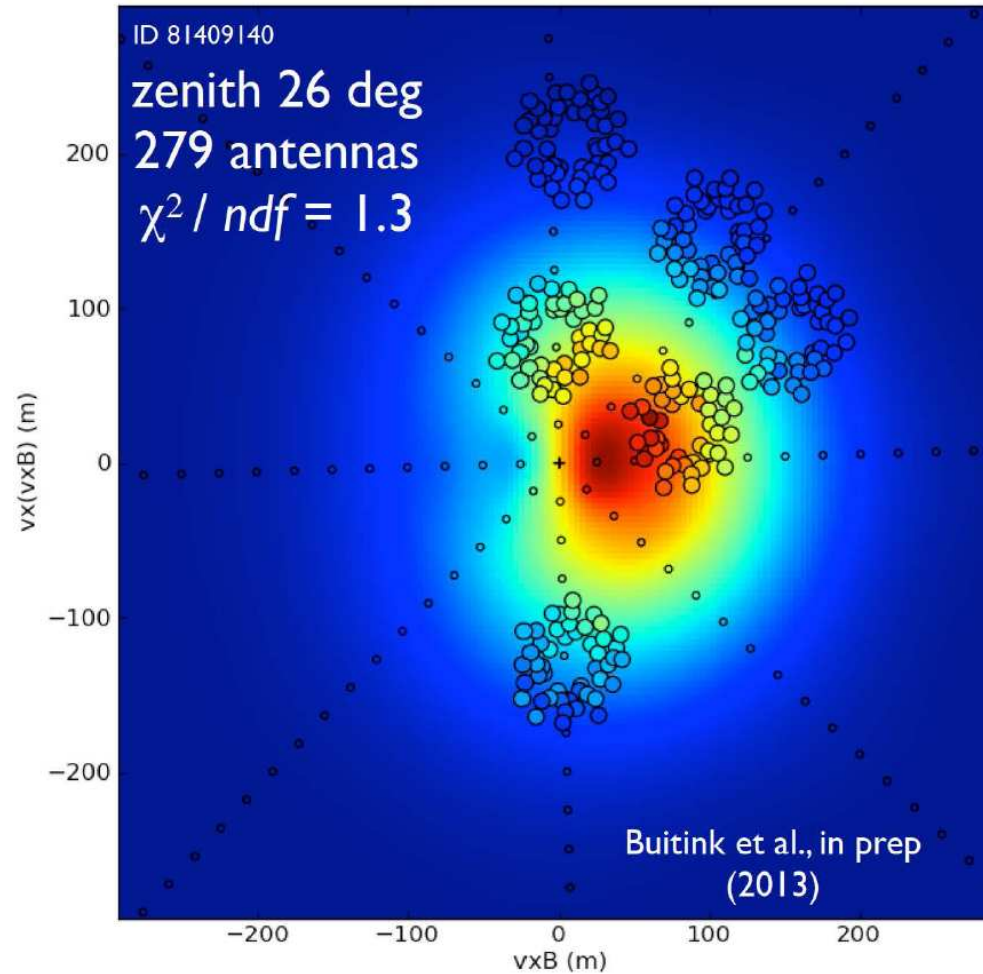




# Detekcja radiowa

## LOFAR

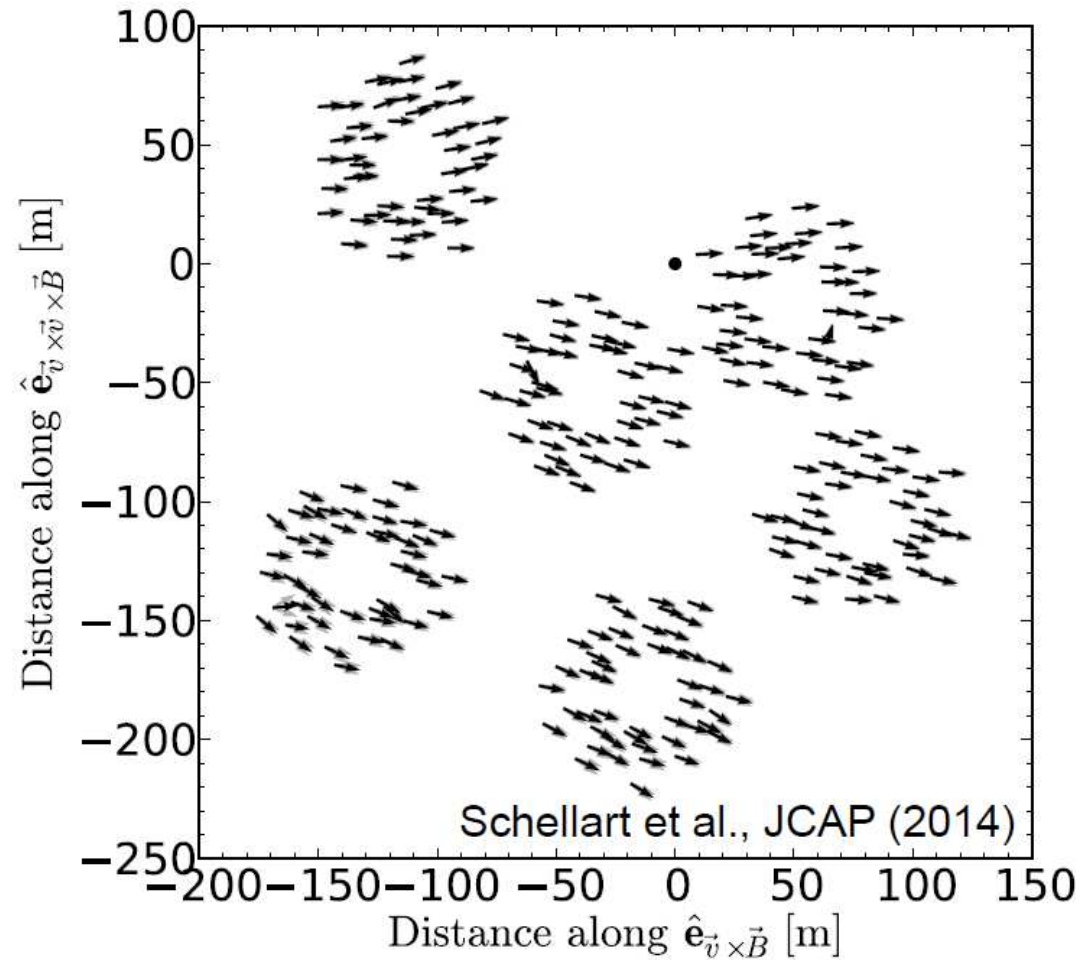
Dopasowanie modelu rozwoju kaskady



# Detekcja radiowa

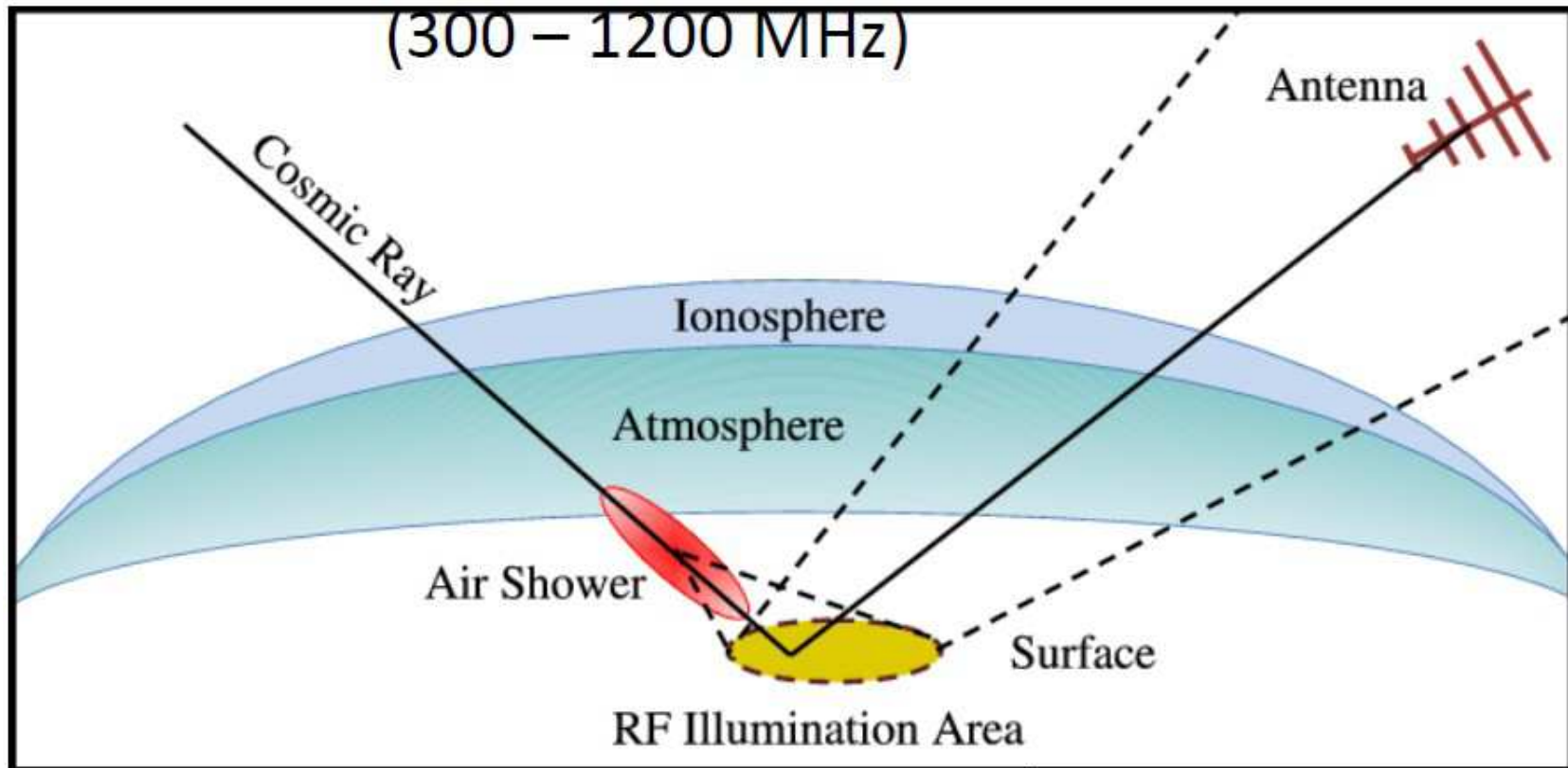
## LOFAR

Rekonstrukcja kierunku liniowej polaryzacji fali



# Detekcja radiowa

ANITA



Zamiast rozmieszczać anteny na dużym obszarze możemy obserwować promieniowanie odbite od powierzchni ziemi np. przy pomocy anten umieszczonych na balonie...

# Detekcja radiowa

ANITA

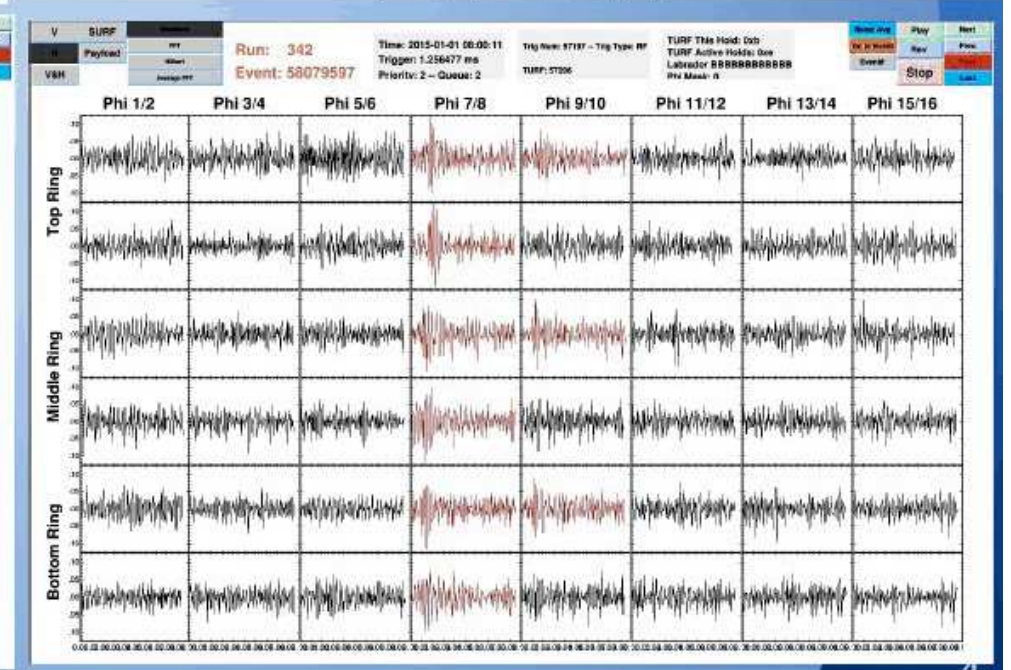
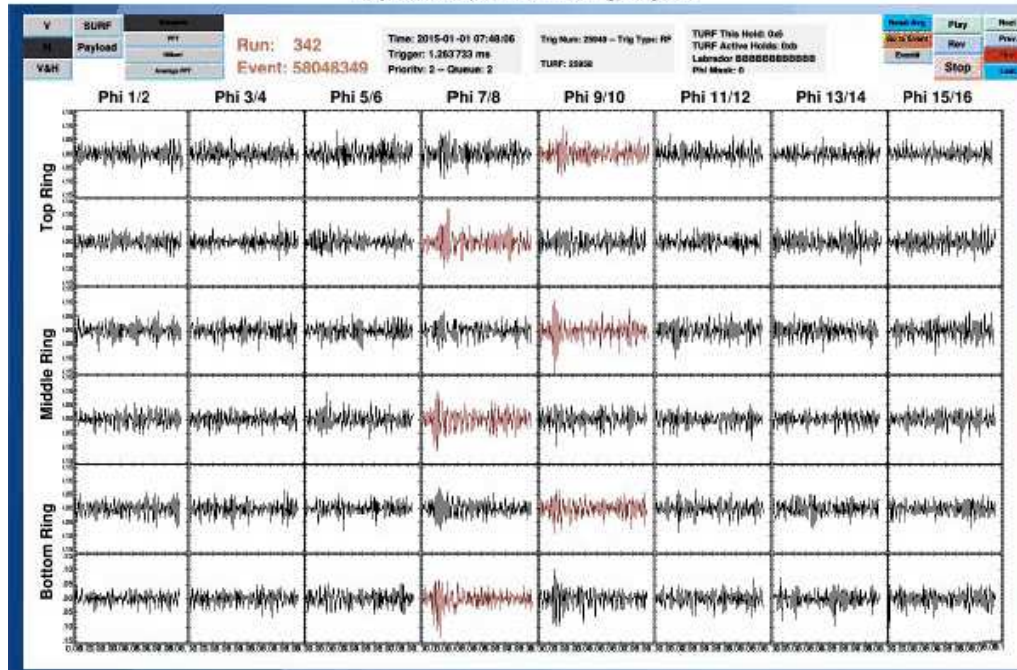
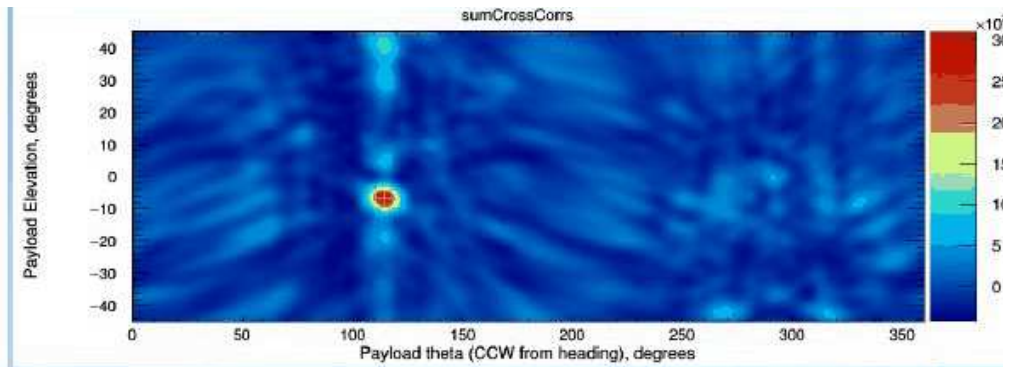
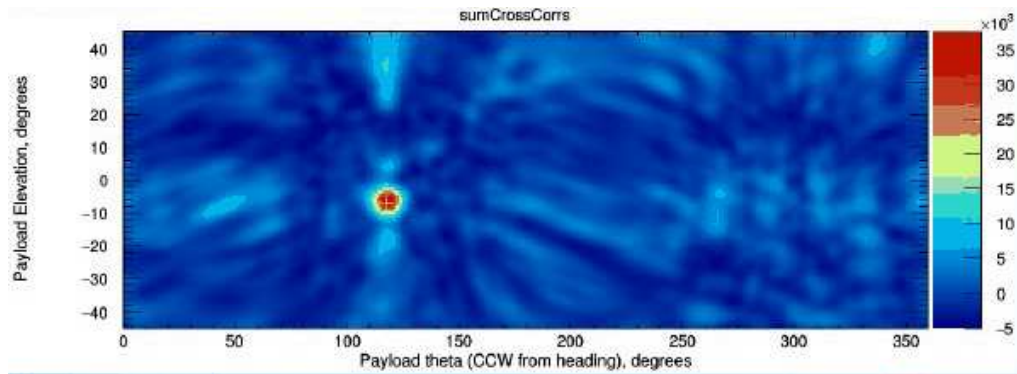
Detektor ANITA-3 wypuszczony na Antarktydzie w grudniu 2014



# Detekcja radiowa

ANITA

Przykłady detekcji



# Detekcja radiowa

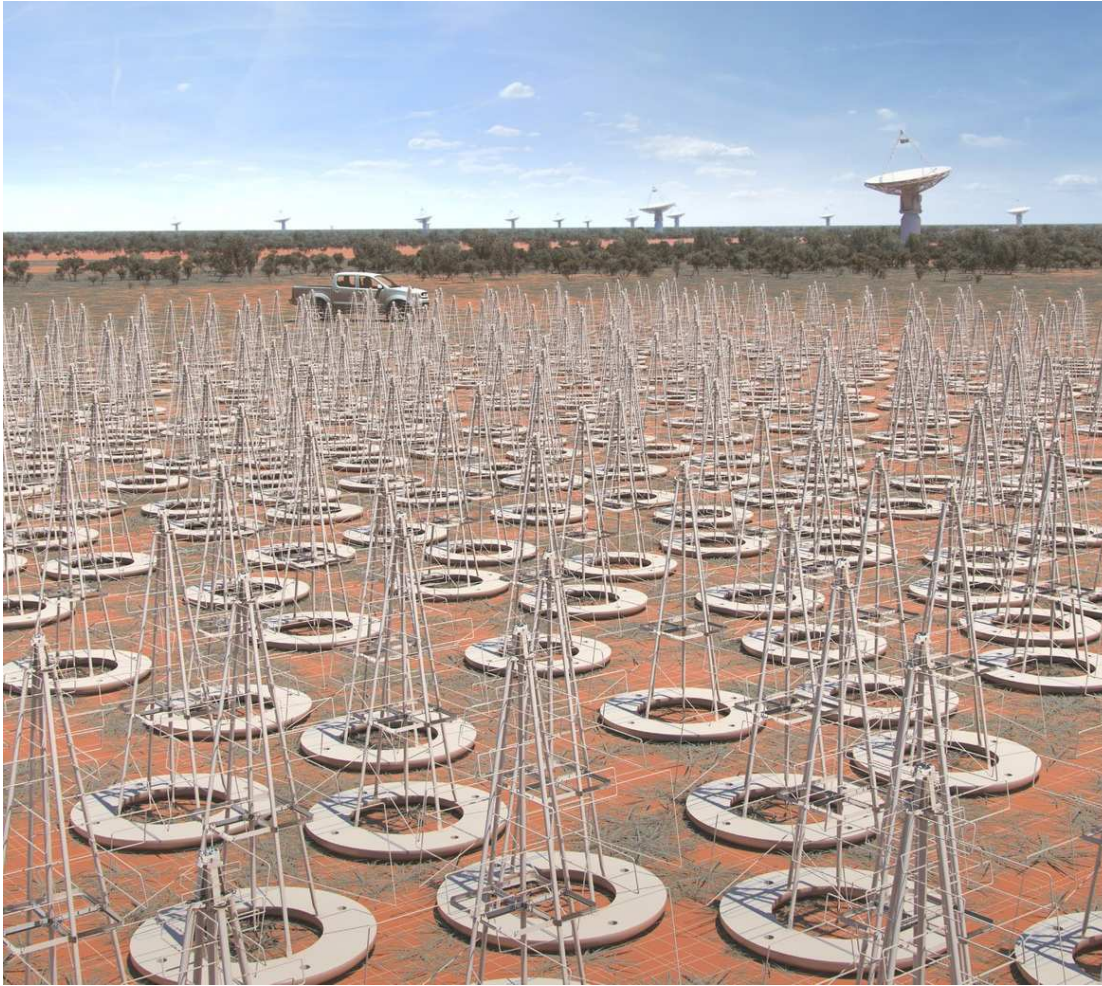
## Szerokopasmowe anteny

Obiecujący kierunek - szerokopasmowe anteny z bardzo szybkim przetwarzaniem danych.



# Detekcja radiowa

## SKA Square Kilometre Array, Australia



Planowana instalacja ok. 130'000 anten w 500 grupach odległych o nie więcej niż 65 km.

Zbierane ok. 160 TB/s danych!

Kluczowa anliaza w czasie rzeczywistym...

# Detekcja radiowa

## Perspektywy

Możliwość pomiaru pęków atmosferycznych w zakresie fal radiowych przetestowana przez wiele eksperymentów: możliwa dokładna rekonstrukcja kierunku i energii.

Główny problem: bardzo silne tło

- ⇒ dotychczasowe pomiary naogół wyzwalane innego typu detektorem
- ⇒ czysto radiową detekcja możliwa w dużych układach

Nowa jakość w badaniach UHECE: detektory są stosunkowo tanie, odporne na warunki, pracują w dzień i w nocy, można budować bardzo duże układy detekcyjne...

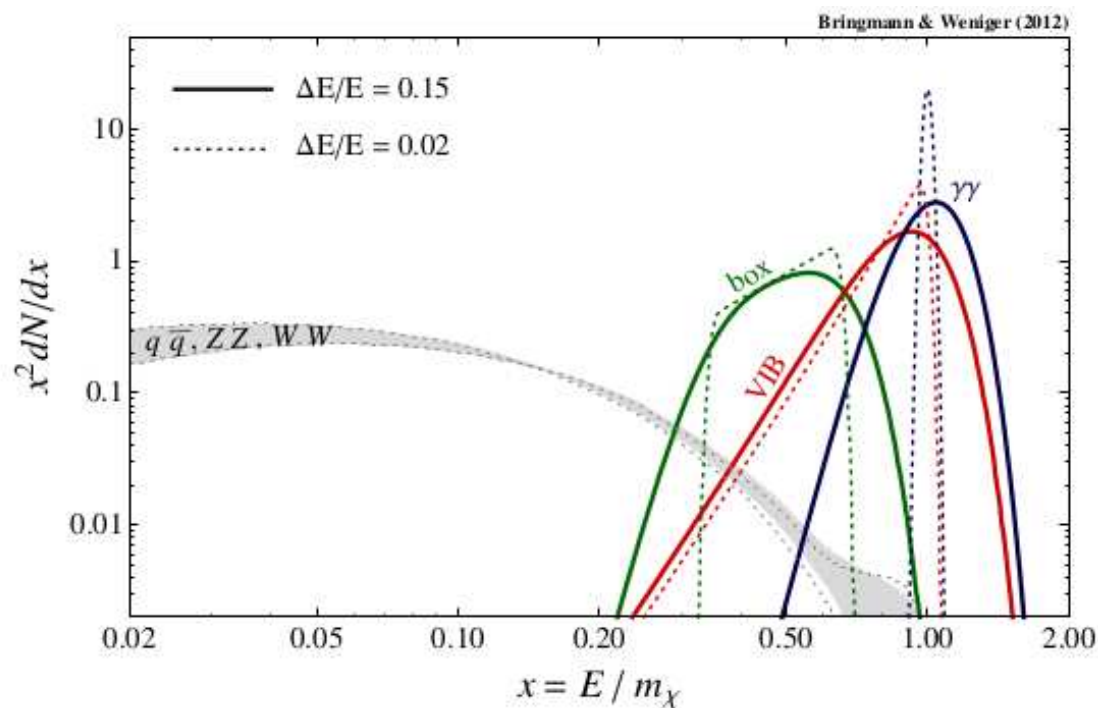
Technologia możliwa do zastosowania także w pomiarach wysokoenergetycznego promi. gamma (promieniowanie w atmosferze) i neutrin (promieniowanie w wodzie lub lodzie).



# Ciemna materia

## Promieniowanie gamma

Oczekiwane widmo promieniowania z anihilacji DM



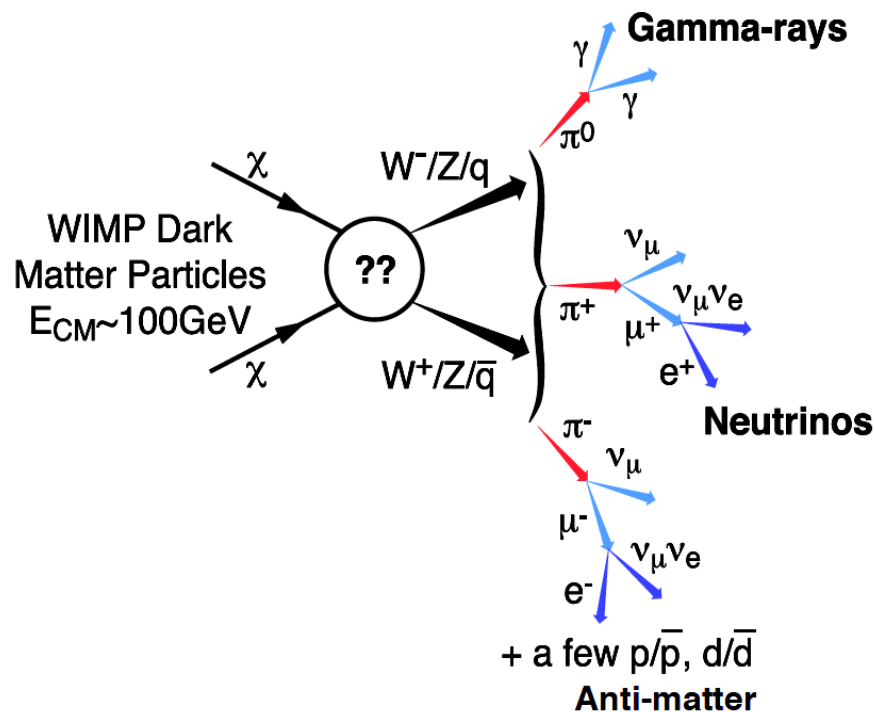
Pierwotne promieniowanie  $\gamma$

- 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  $E = m_\chi$

# Ciemna materia

## 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

Promieniowanie w zakresie do ok. 300 GeV możemy mierzyć z satelitów...

# Promieniowanie kosmiczne

## Promieniowanie synchrotronowe

Cząstki naładowane poruszające się z przyspieszeniem emitują promieniowanie synchrotronowe (w polu magnetycznym) lub promieniowanie hamowania (zderzenia).

Dotyczy to zarówno etapu rozpędzania cząstek jak i późniejszego ich oddziaływania z materią międzygwiazdową

W praktyce dominuje promieniowanie pochodzące od elektronów i pozytonów.



Elektrony produkowane też wtórnie w oddziaływaniach hadronów (rozpady  $\pi^\pm$ )

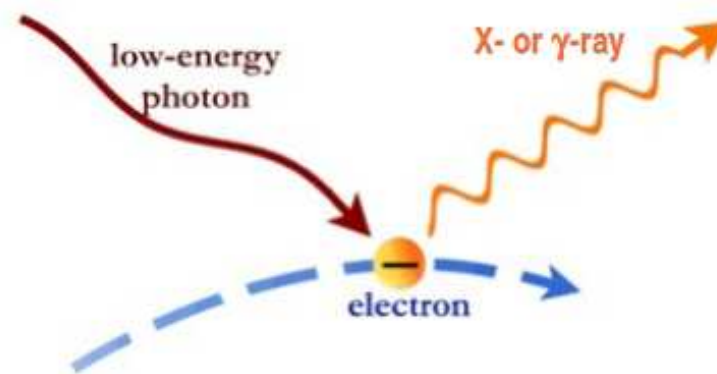
# Promieniowanie kosmiczne

## Odwrotne rozpraszanie Comptona

W promieniowaniu synchrotronowym emitowane są fotony o energiach znacznie niższych niż energie elektronów i pozytonów.

Jednak przestrzeń kosmiczna wypełniona jest niskoenergetycznymi fotonami, od promieniowania mikrofalowego do widzialnego.

Rozpraszanie tego promieniowania na wysokoenergetycznych elektronach prowadzi do produkcji fotonów o bardzo wysokiej energii



# Rozpraszanie Comptona

## Rozpraszanie do tyłu

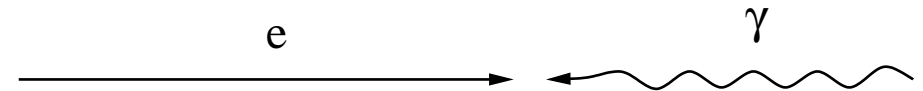
W rozpraszaniu na spoczywającym elektronie **najniższą energię** będzie miał foton rozproszony **“do tyłu”** ( $\cos \theta = -1$ ):

$$h\nu' = \frac{h\nu \cdot m}{h\nu(1 - \cos \theta) + m} < h\nu$$

To, że foton zawsze traci energię związane jest jednak z wyborem układu odniesienia!  
(układ związany z elektronem)

## Rozpraszanie na wiązce elektronów

Możemy jednak rozważyć rozpraszanie fotonów o energii  $h\nu$  na wysokoenergetycznym elektronie o energii  $E_e \gg m$ .



Transformacja Lorentza do układu elektronu:

$$\gamma = \frac{E_e}{m}$$
$$\beta \approx 1$$

Energia fotonu w układzie elektronu:

$$h\nu^* = \gamma(1 + \beta)h\nu$$
$$\approx \frac{2E_e}{m} \cdot h\nu \gg h\nu$$

# Odwrotne Rozpraszanie Comptona

## Rozpraszanie na wiązce elektronów

Przyjmijmy, że foton rozprasza się “do tyłu” ( $\cos \theta = -1$ ). Energia rozproszonego fotonu w układzie elektronu:

$$h\nu^{*'} = \frac{h\nu^* \cdot m}{2h\nu^* + m} \\ \approx \frac{2E_e h\nu \cdot m}{4E_e h\nu + m^2}$$

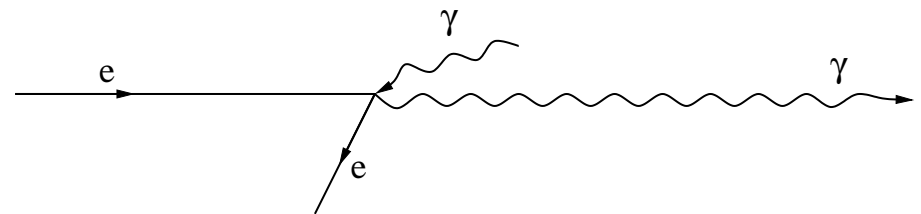
Wracając do układu laboratoryjnego: (transformacja taka sama, bo pęd foton zmienił kierunek)

$$h\nu' \approx \frac{2E_e}{m} \cdot h\nu^{*'}$$

Otrzymujemy:

$$h\nu' \approx E_e \cdot \frac{4E_e h\nu}{4E_e h\nu + m^2}$$

Wysoka energia elektronu,  $4E_e h\nu \gg m^2$   
 $\Rightarrow$  elektron może przekazać fotonowi prawie całą swoją energię.



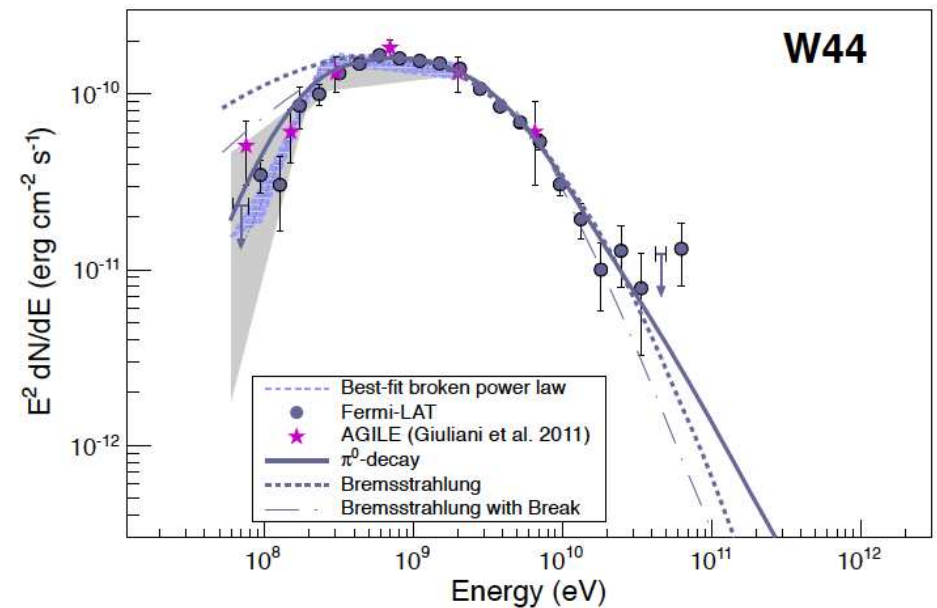
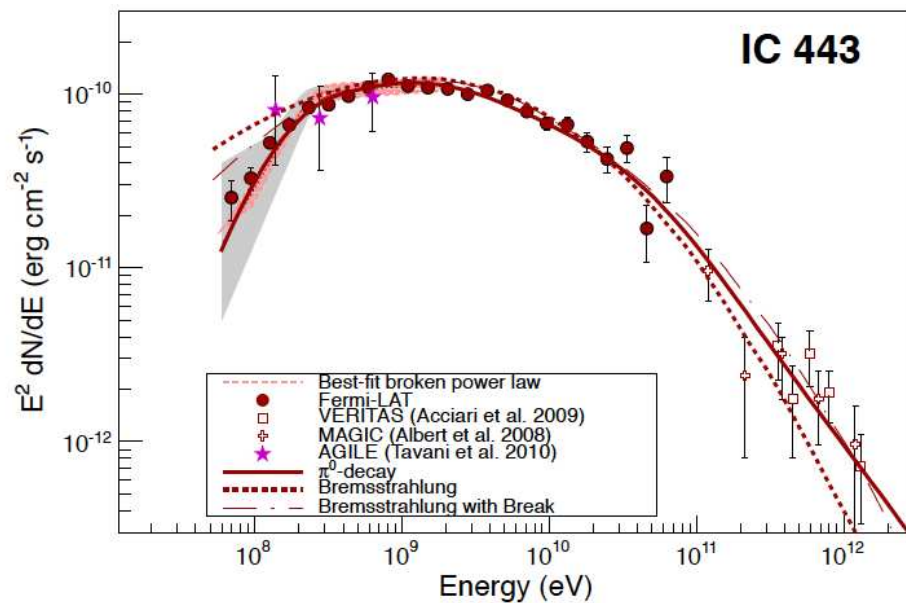
Przykład: dla  $E_e = 250\text{GeV}$  i  $h\nu = 1\text{eV}$   
 $h\nu' \approx 200\text{GeV}$

# Promieniowanie kosmiczne

## Rozpady $\pi^0$

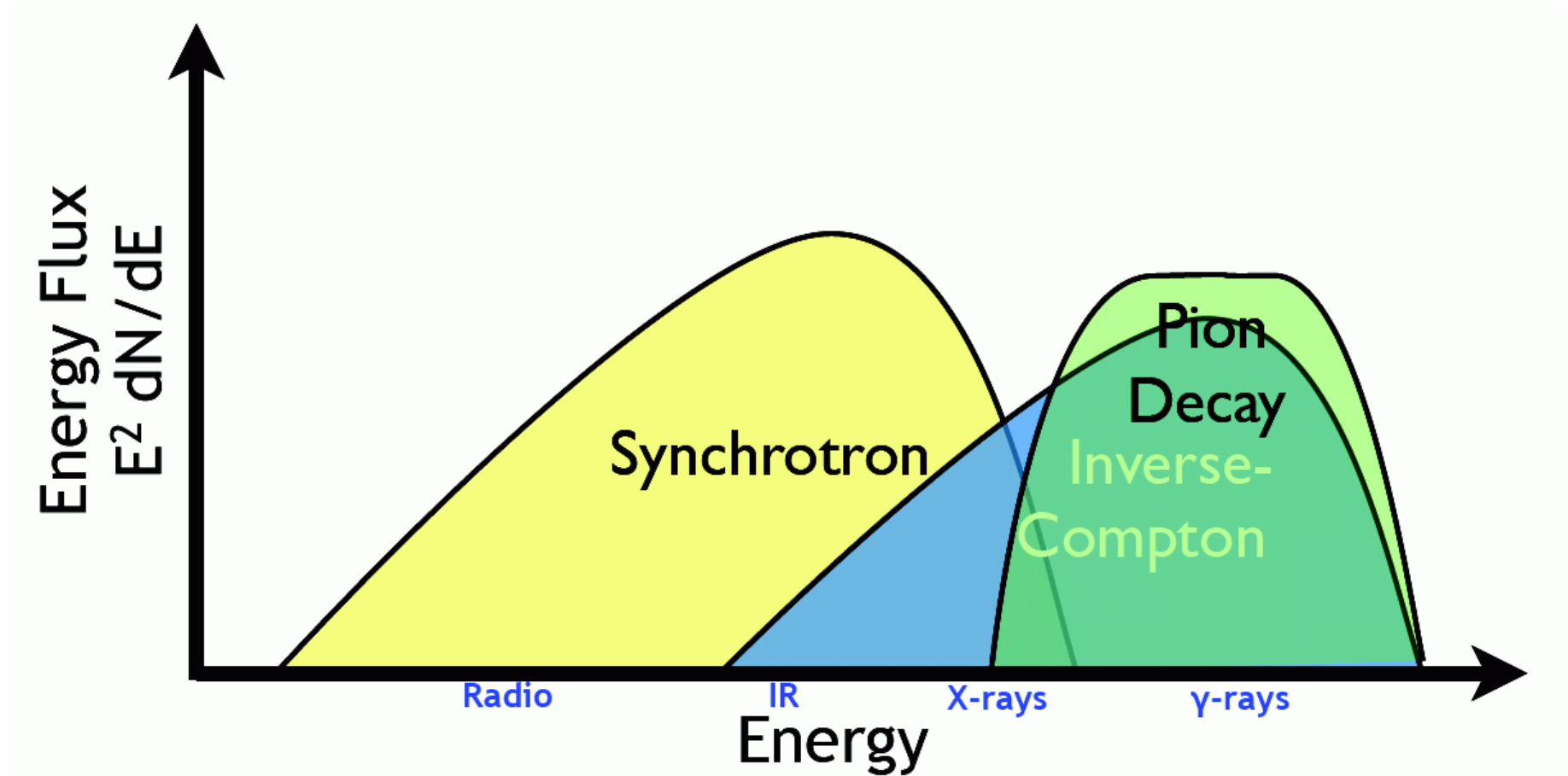
W oddziaływaniach hadronów promieniowania kosmicznego z materią międzygwiazdą (głównie zderzenie  $pp$ ) produkowane są też licznie  $\pi^0$

Ich rozpady dają charakterystyczne widmo energii wysokoenergetycznych fotonów, które zostało zaobserwowane w wybranych SNR



# Promieniowanie gamma

## Oczekiwane widmo

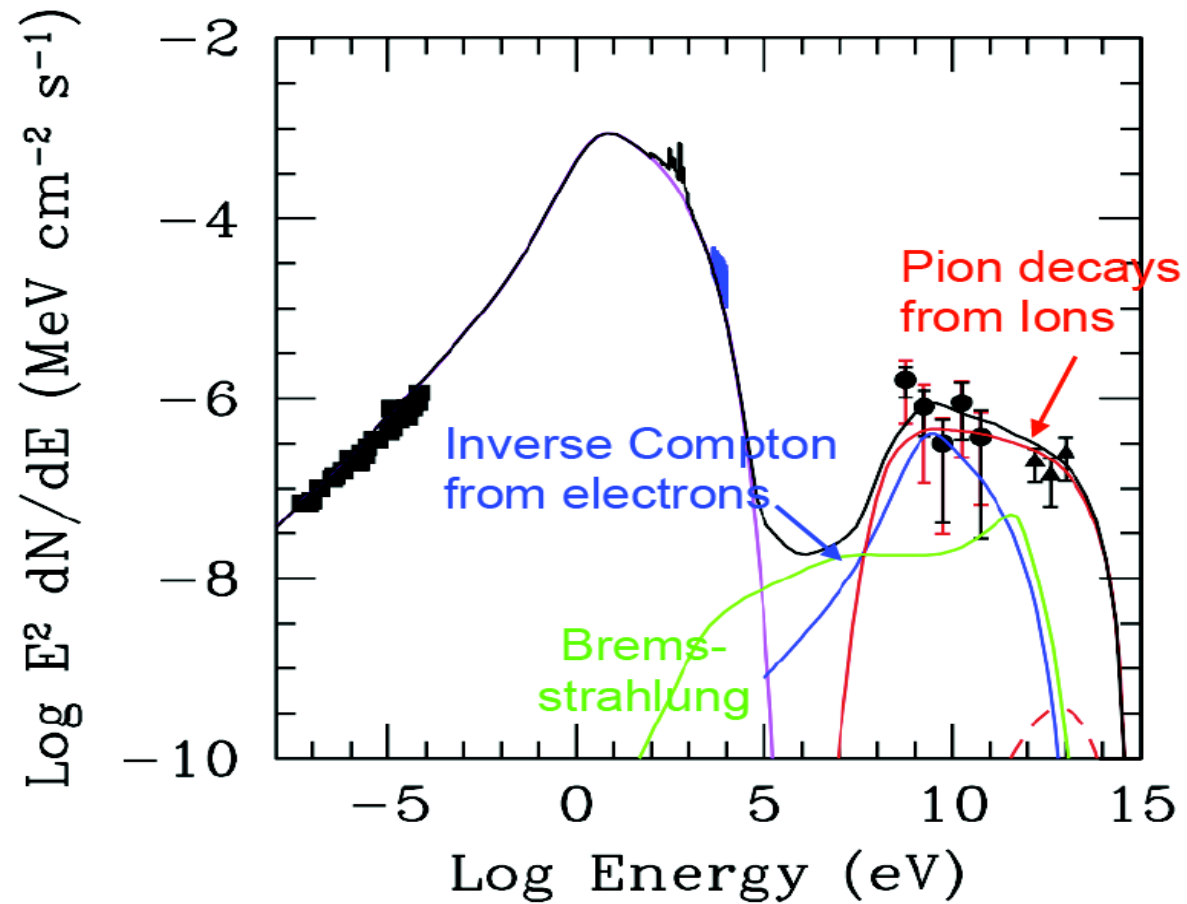




# Promieniowanie gamma

## Tycho SNR

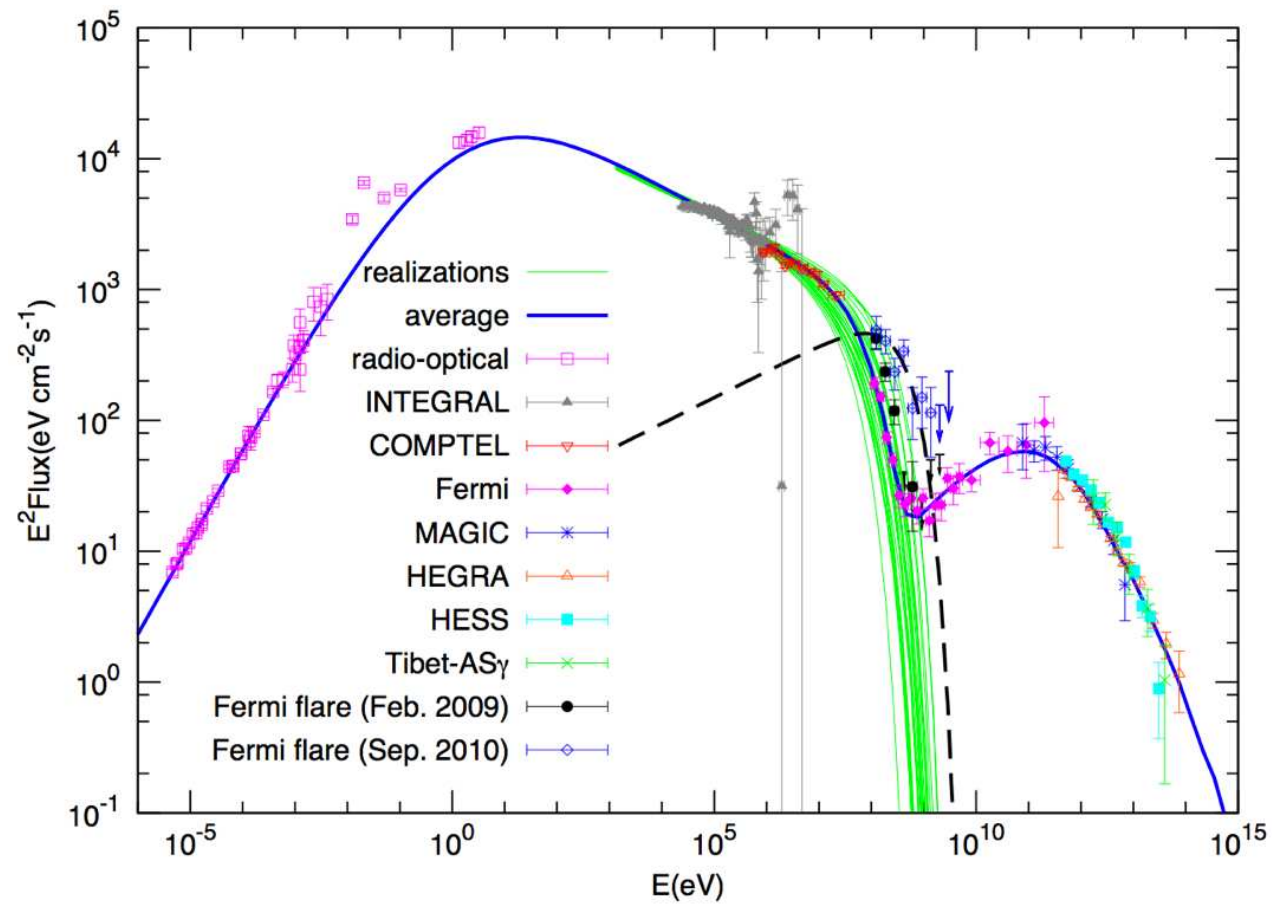
Widmo rejestrowanego promieniowania gamma



# Promieniowanie gamma

## Mgławica Kraba

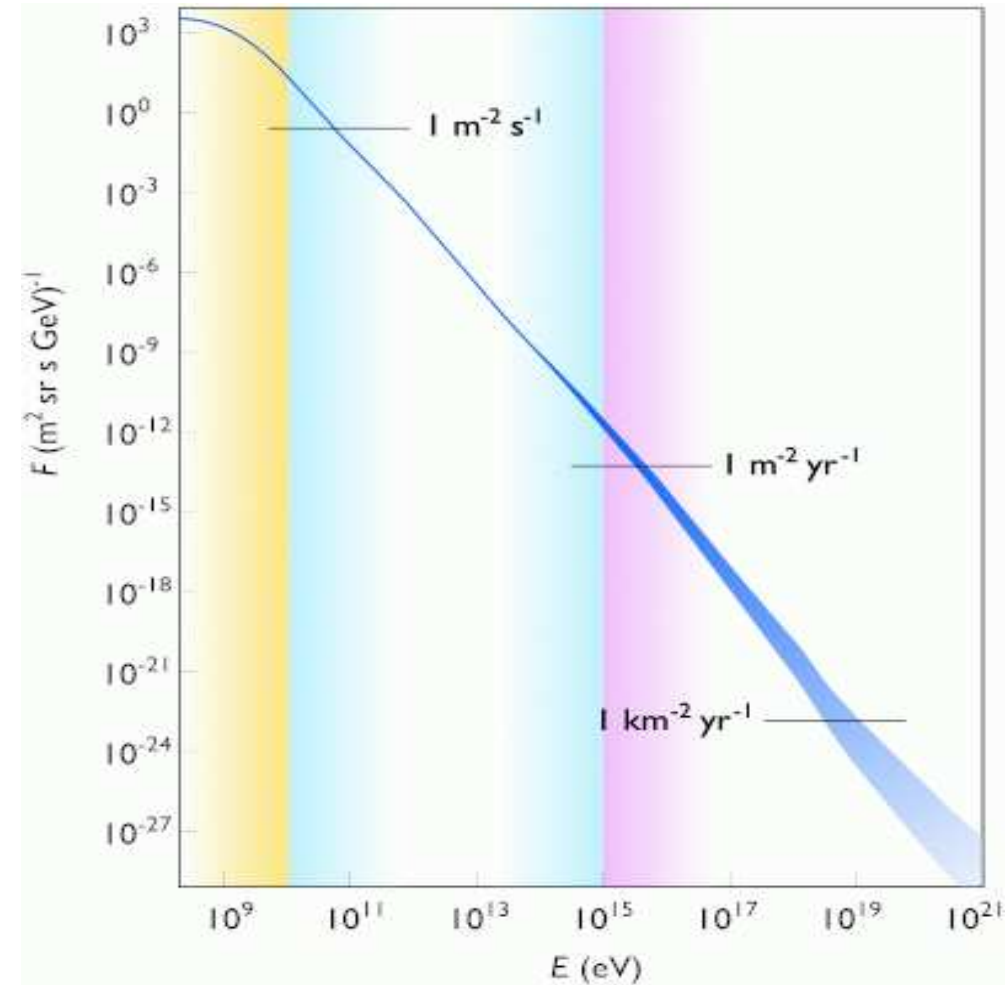
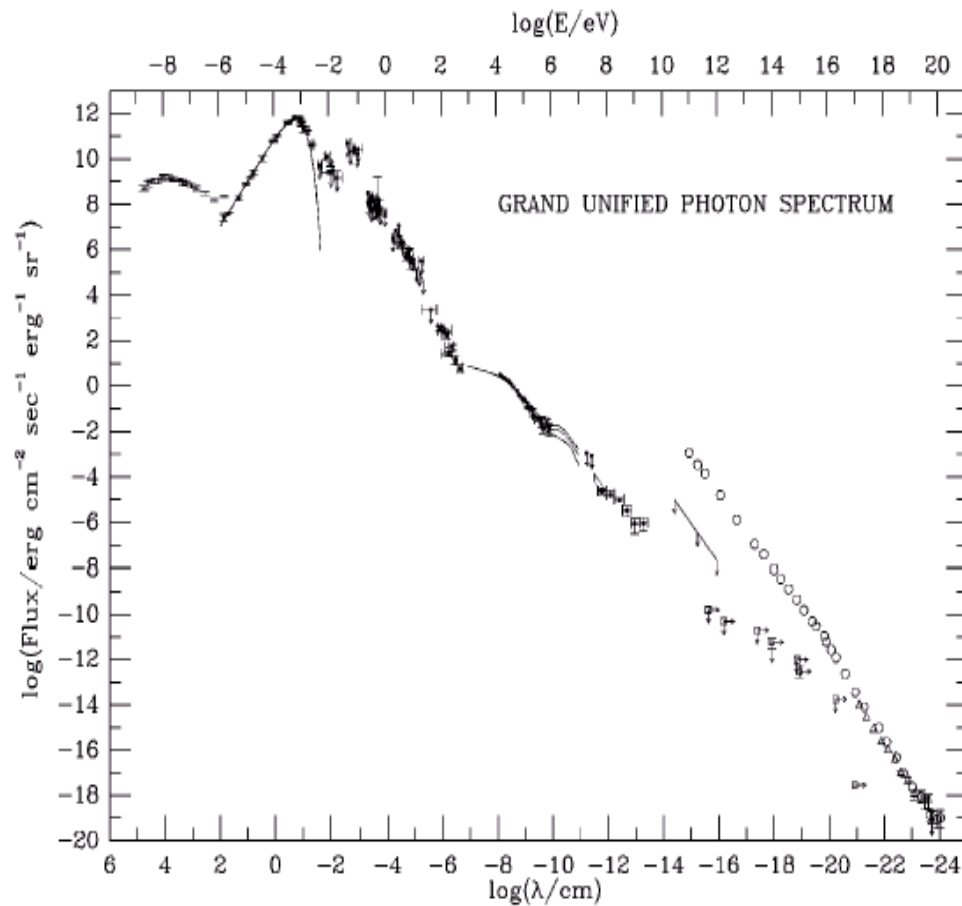
### Widmo rejestrowanego promieniowania gamma



# Promieniowanie gamma

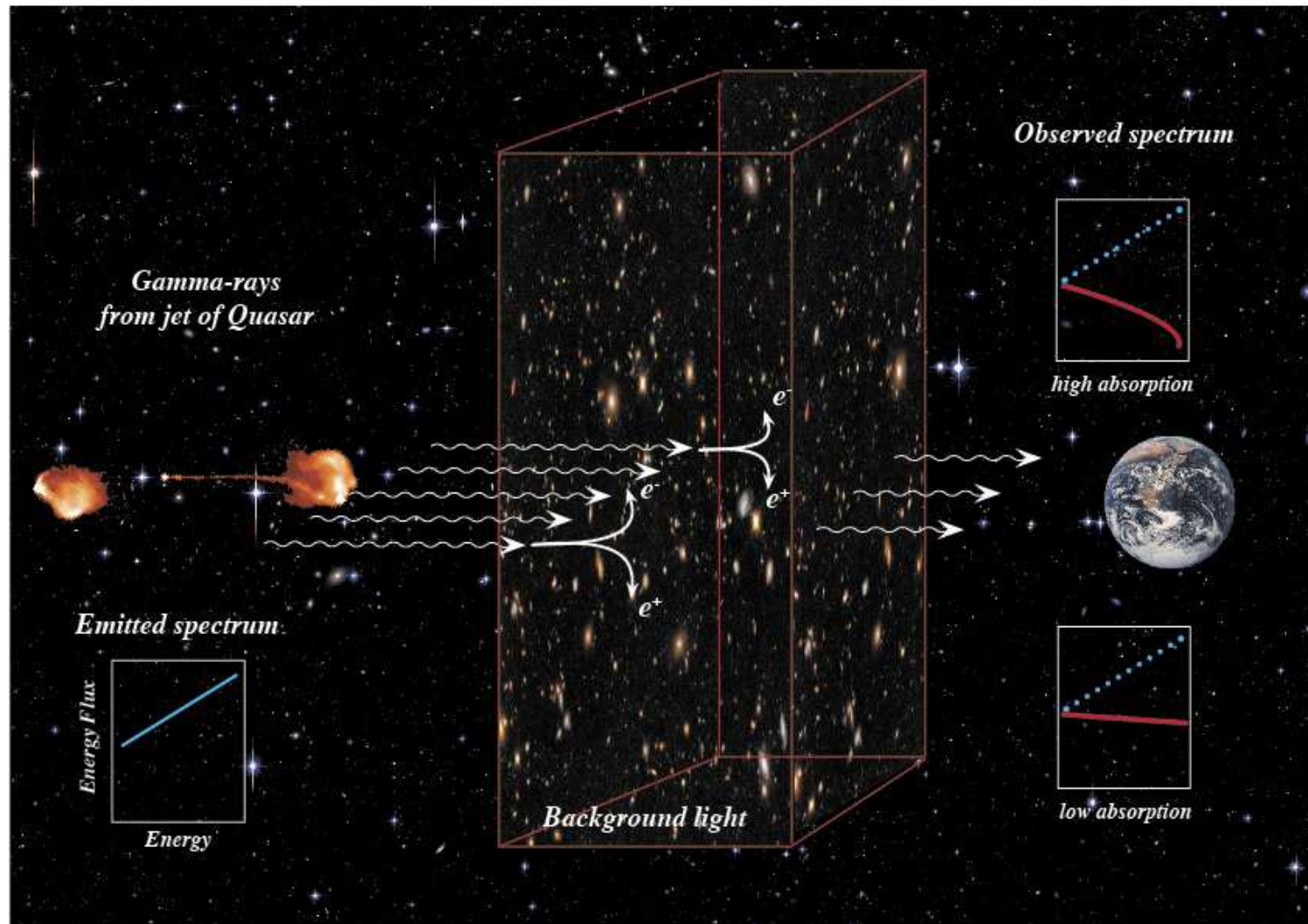
## Porównanie

Promieniowanie gamma  $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$  naładowane



# Promieniowanie gamma

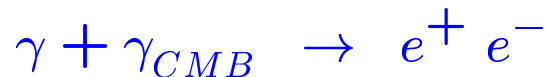
## Pochłanianie



# Promieniowanie gamma

## Pochłanianie

Podobnie jak protony, także wysokoenergetyczne fotony mogą oddziaływać z mikrofalowym promieniowaniem tła:



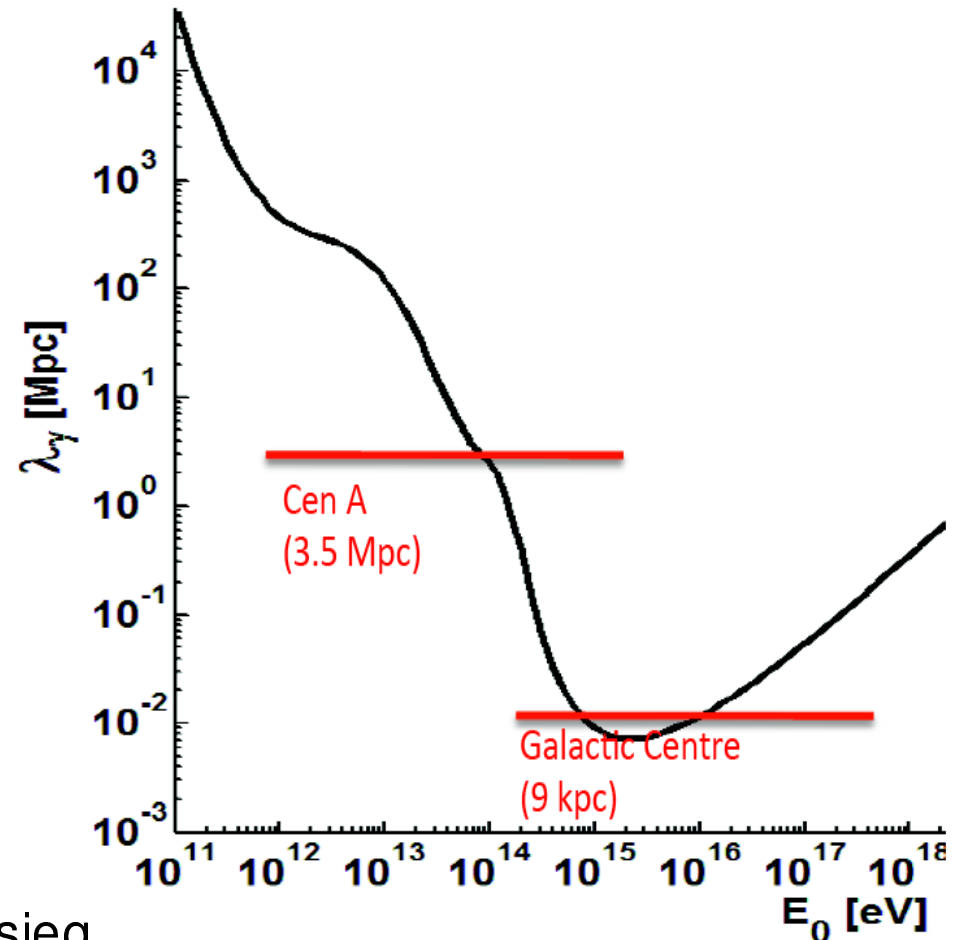
Średnia energia  $E_{CMB} \approx 0.0002 \text{ eV}$

$\Rightarrow$  próg  $E_{\gamma}^{thr} \sim 10^{15} \text{ eV} \dots$

Ale przestrzeń wypełniona jest szerokim widmem promieniowania (radiowe, IR, widzialne...)  $\Rightarrow$  niższe energie progowe.

Dla światła widzialnego ok. 100 GeV.

Brak wyraźnego odcięcia, ale ograniczony zasięg...



# Promieniowanie gamma

## Motywacja

Dlaczego chcemy badać promieniowanie gamma w zakresie najwyższych energii:

Zrozumienie mechanizmów produkcji promieniowania kosmicznego

- Jak i gdzie jest produkowane, przyspieszane?
- Jak się rozchodzi?
- Jak oddziałuje z materią międzygwiazdą?

Ale także

- Badanie procesów w otoczeniu czarnych dziur i innych ciekawych obiektów
- Badanie krótko-skalowych zjawisk jak błyski gamma (GRB) itp.
- Poszukiwanie Ciemnej Materii, axionów, łamania niezmienniczości Lorentza itp.