

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład X

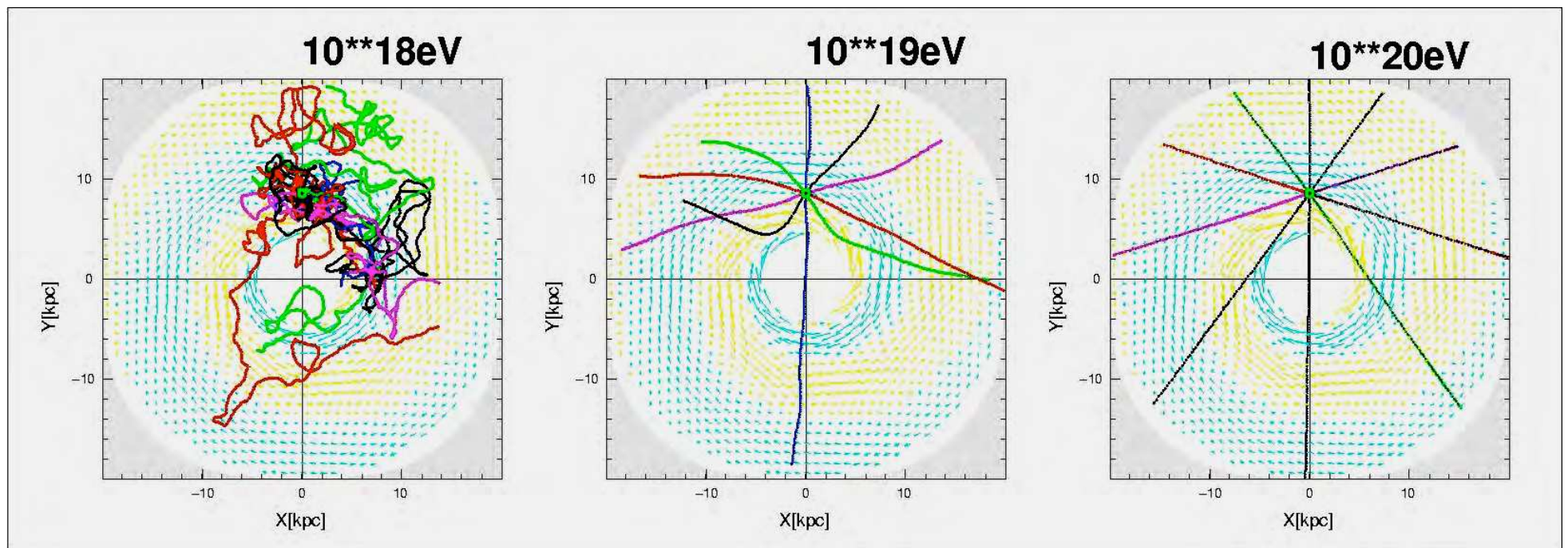
- Poszukiwanie źródeł UHECR: eksperyment AUGER i TA
- Projekt JEM-EUSO
- Radiowa detekcja pęków atmosferycznych
- Kosmiczne promieniowanie gamma
- Teleskopy Czerenkowa

Promieniowanie kosmiczne

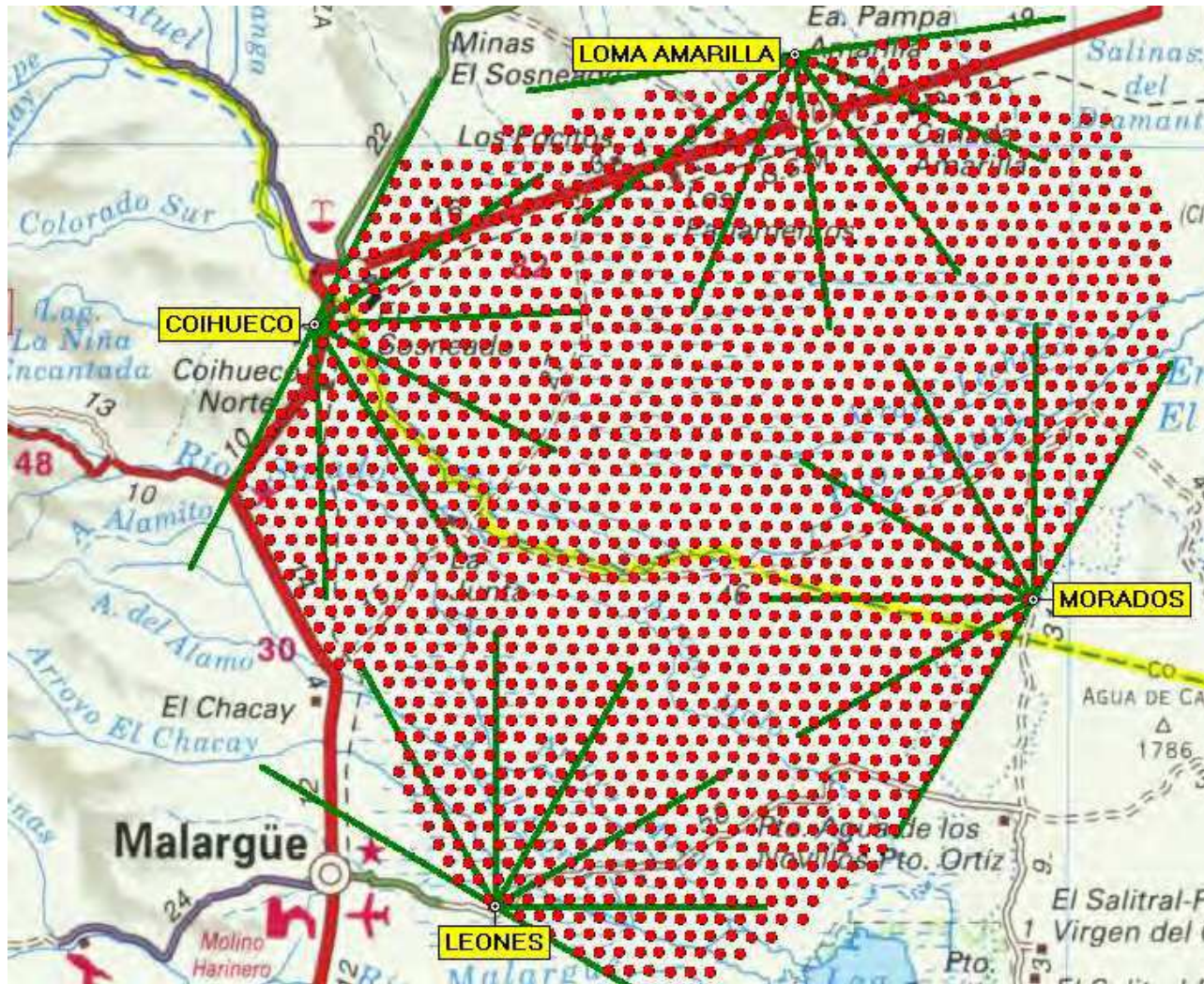
Poszukiwanie źródeł

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 $1 - 2^\circ$

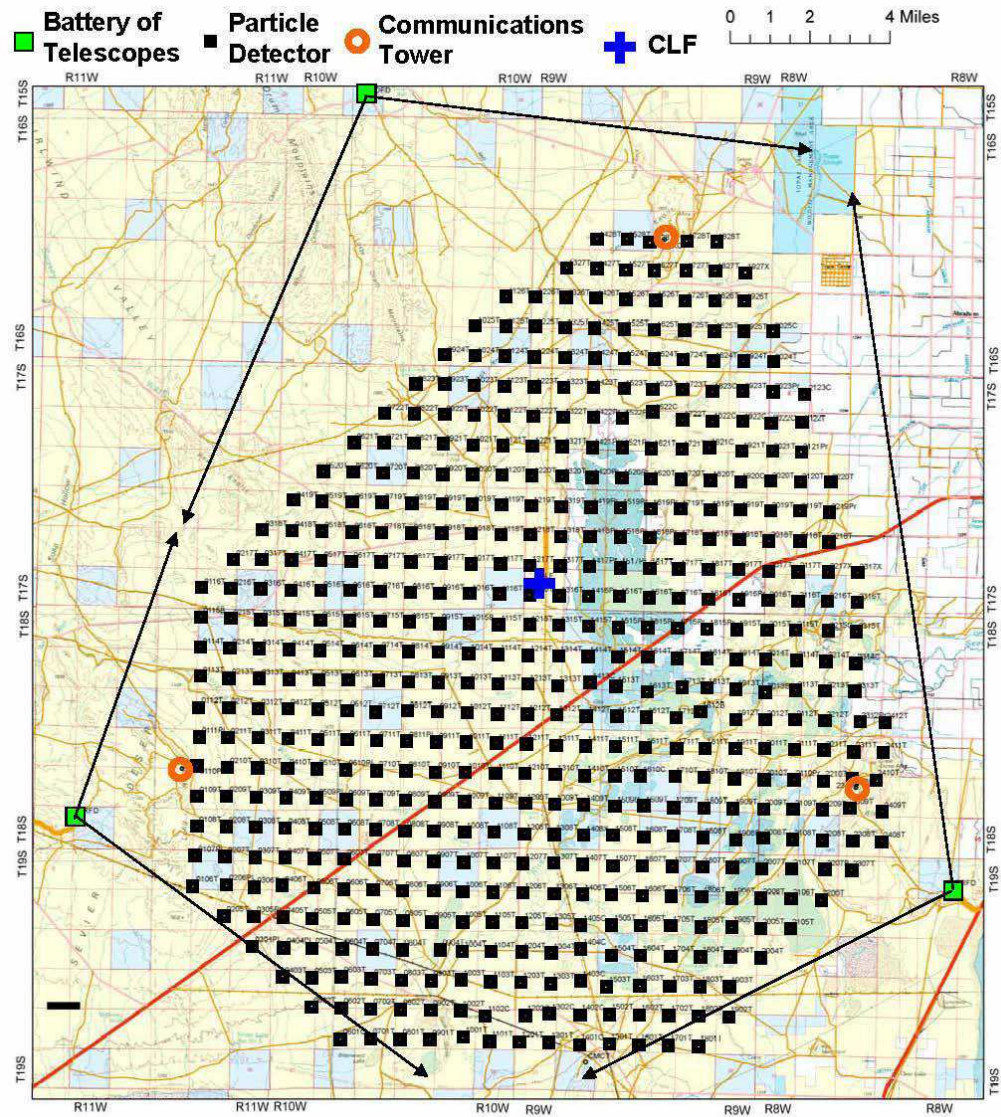


AUGER



3000 km², Argentyna

Telescope Array

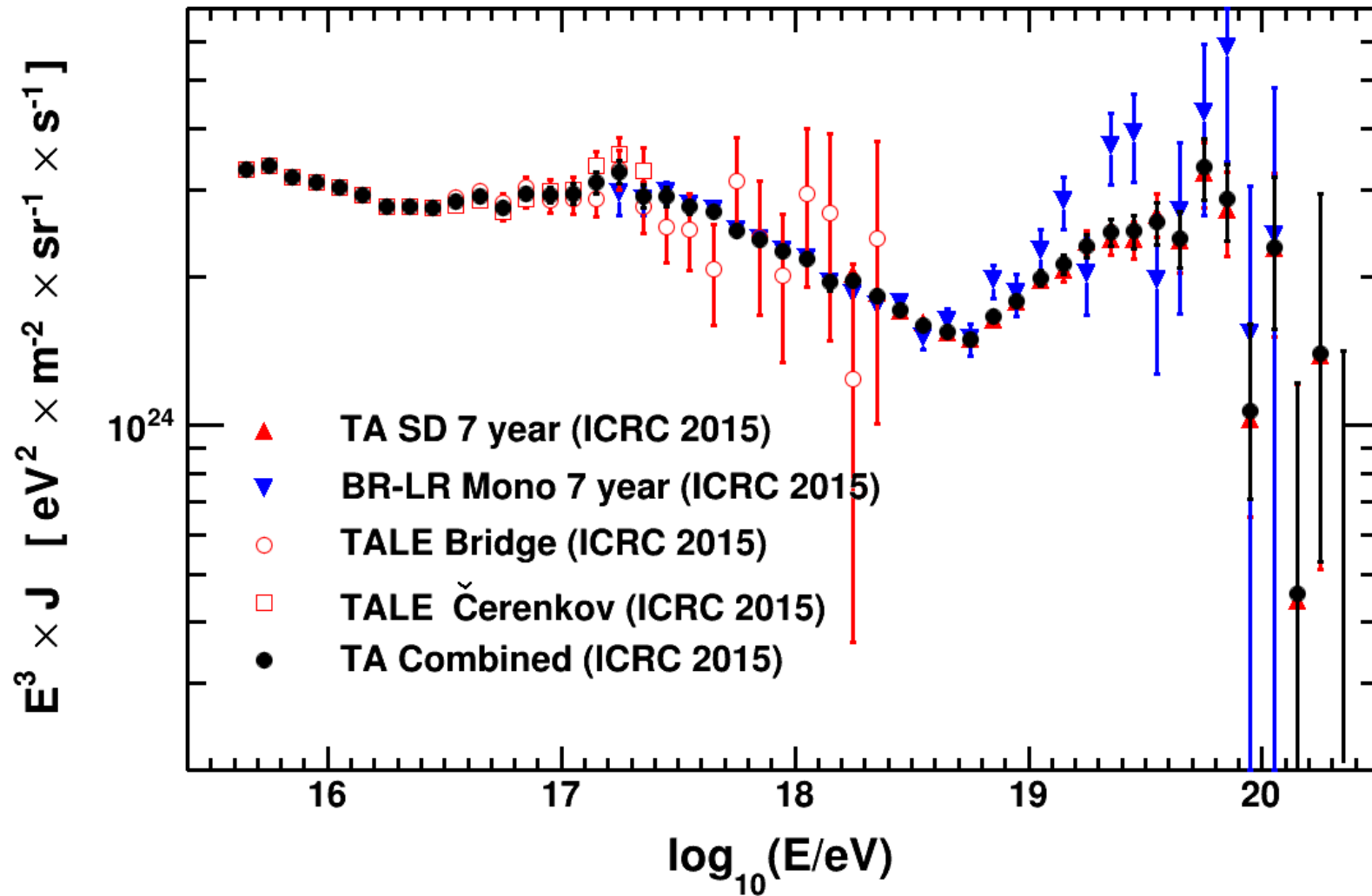


700 km², Utah, USA

A.F. Żarnecki

Wykład X

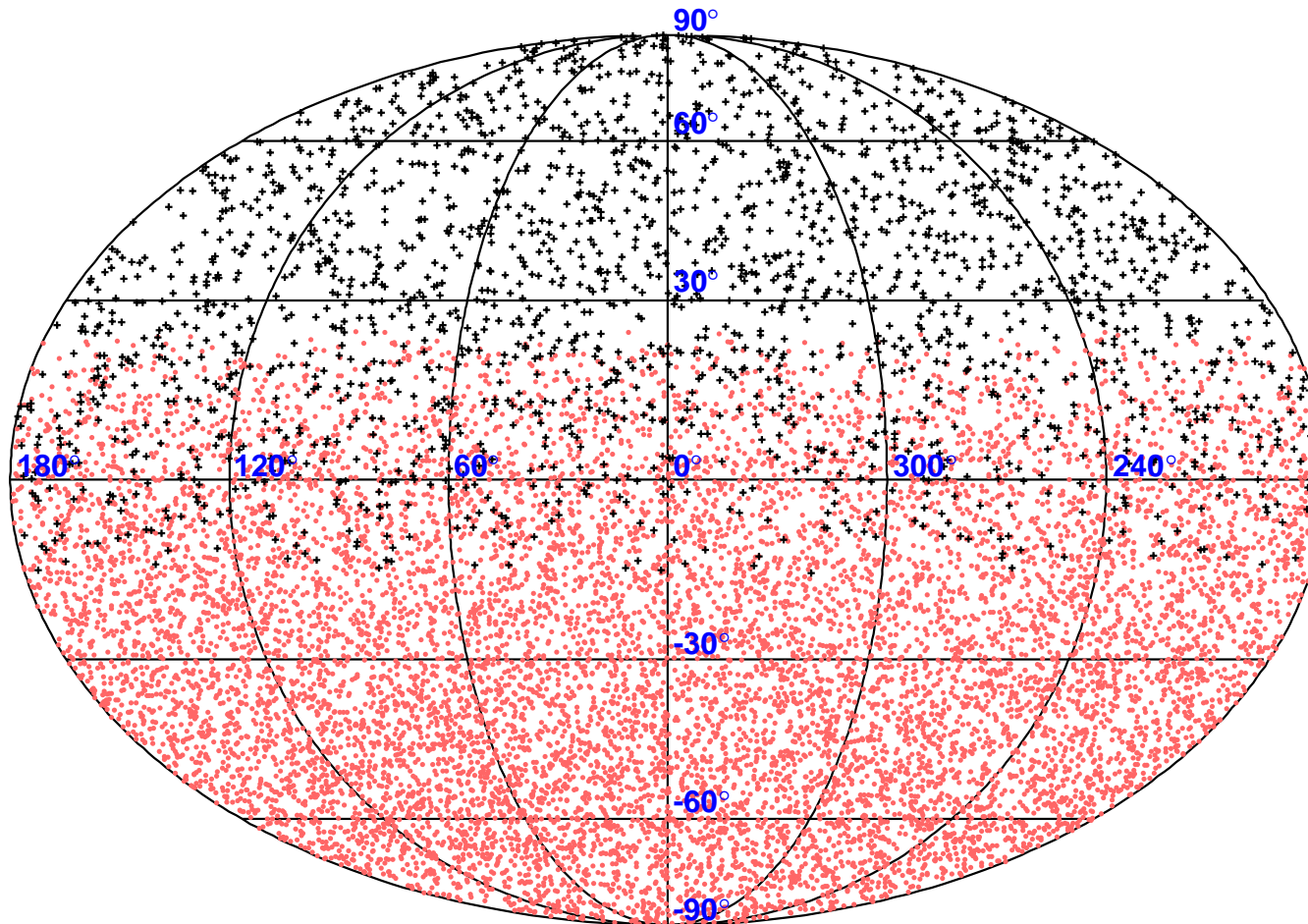
Telescope Array



AUGER + TA

Rozkład przestrzenny

dla przypadków $E > 10^{19}$ eV

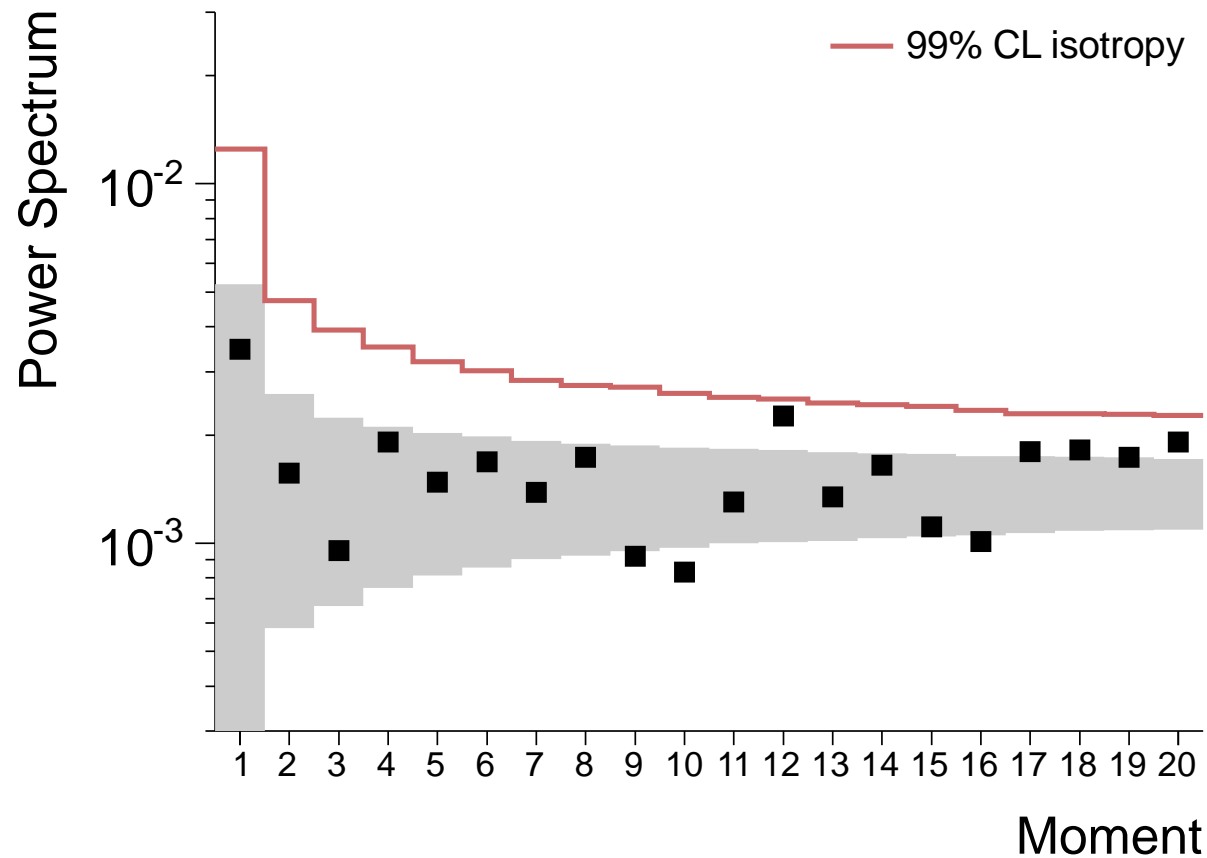


AUGER + TA

Rozkład przestrzenny

dla przypadków $E > 10^{19}$ eV

Zmierzone odstępstwa od rozkładu izotropowego (rozkład na harmoniki sferyczne)

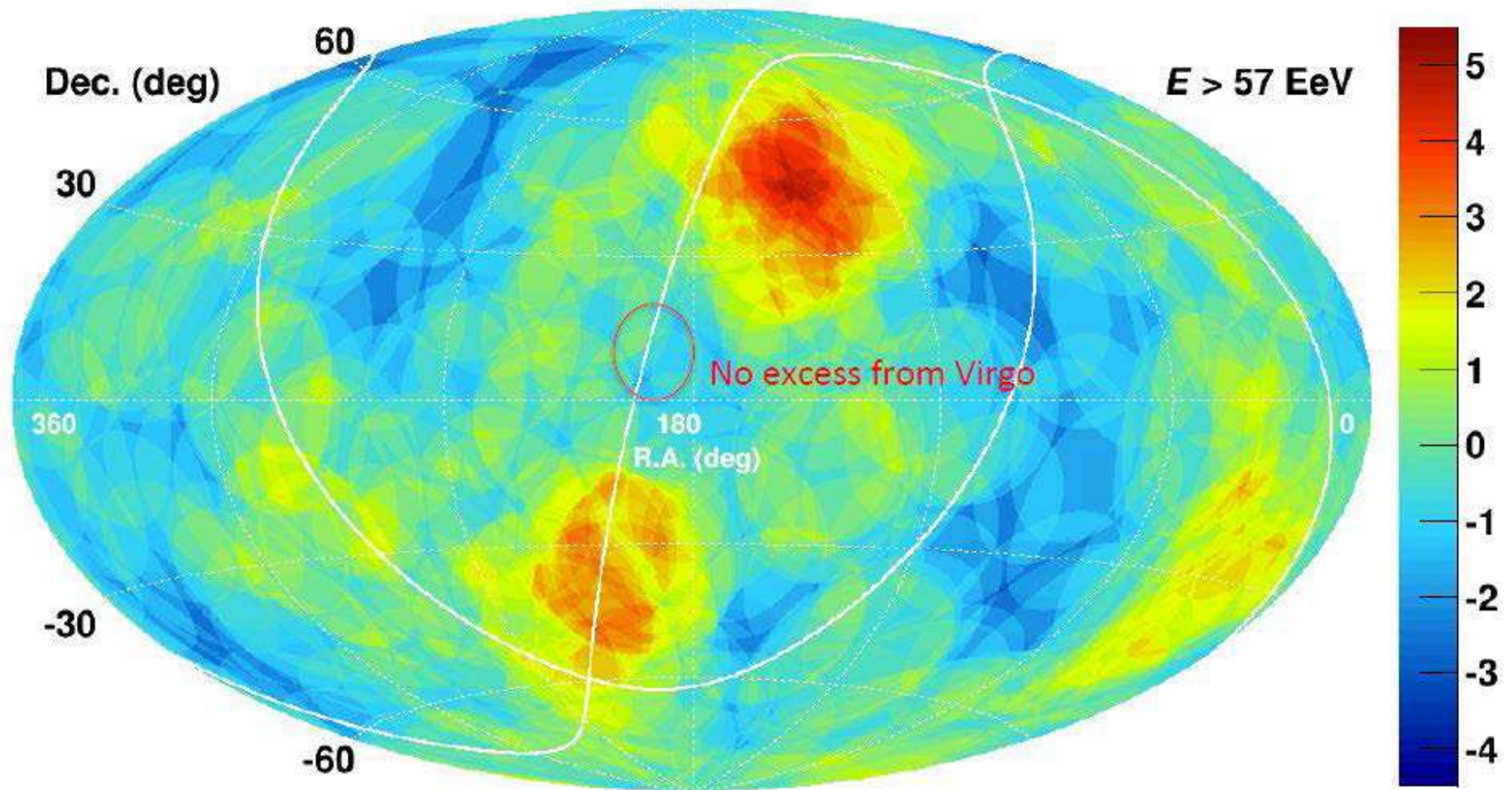


Natężenia składowych zgodne z oczekiwaniami dla rozkładu izotropowego

AUGER + TA

Rozkład przestrzenny

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



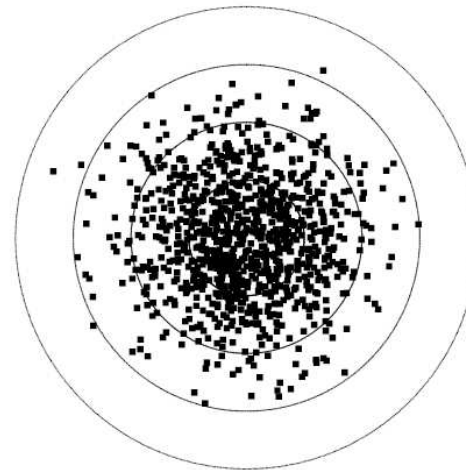
Anizotropia

Rozkład przestrzenny

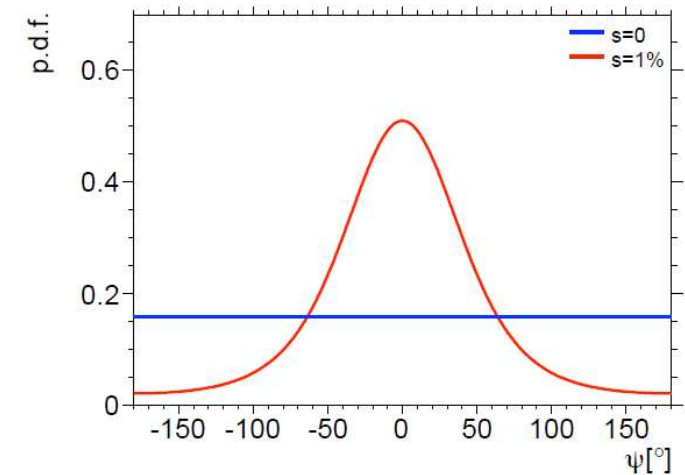
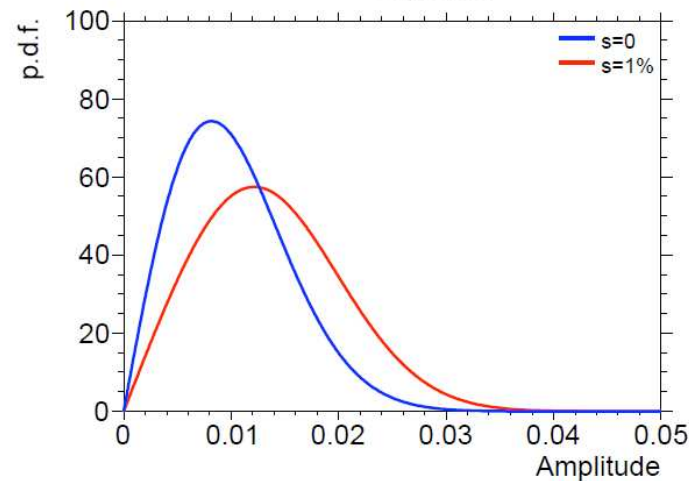
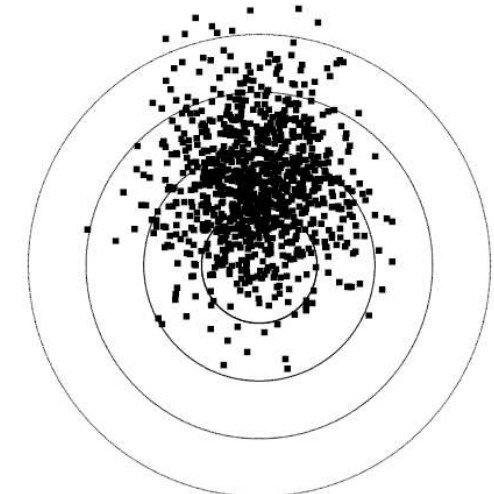
Przy niewielkiej statystyce przypadków, natężenia poszczególnych multipoli są wyznaczane z dużą niepewnością.

Sygnatury możemy szukać w wyznaczonej fazie dipola \Rightarrow

Pure isotropy



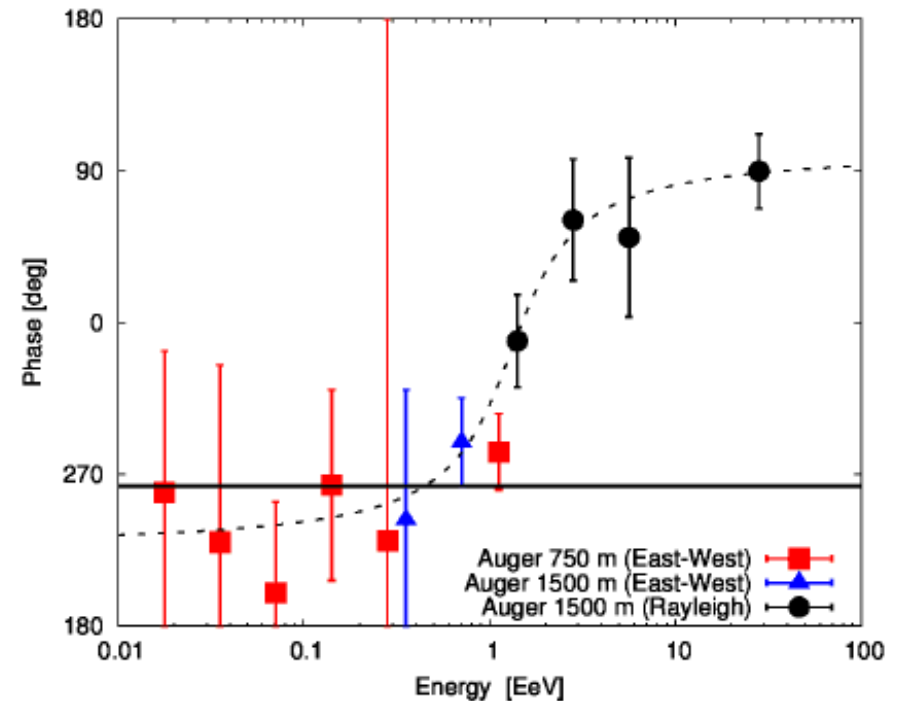
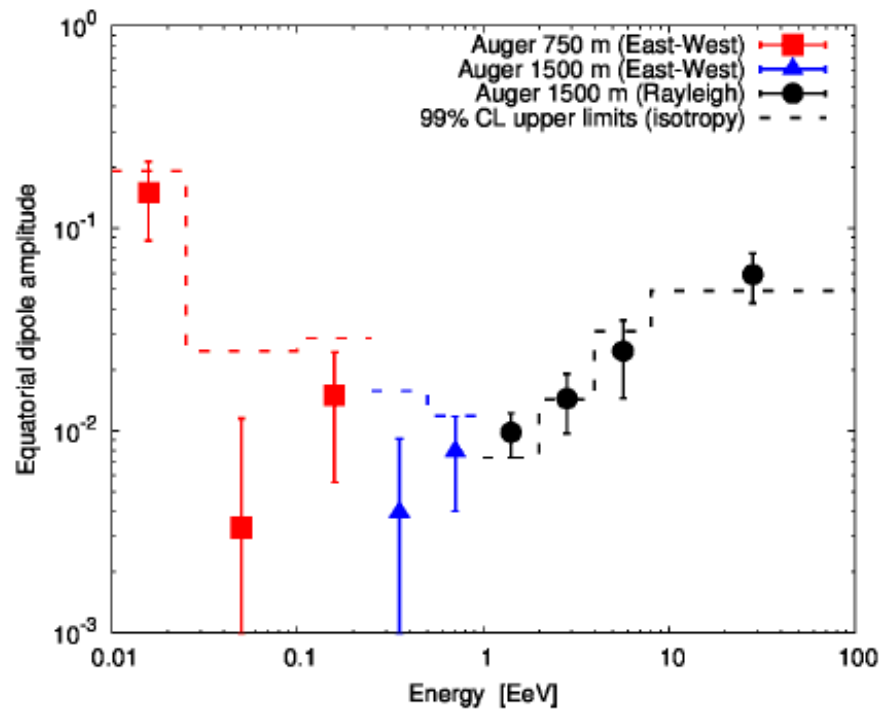
Almost isotropy
(signal size = mean noise)



AUGER + TA

Anizotropia

Wyniki dopasowania amplitudy i fazy składowej dipolowej



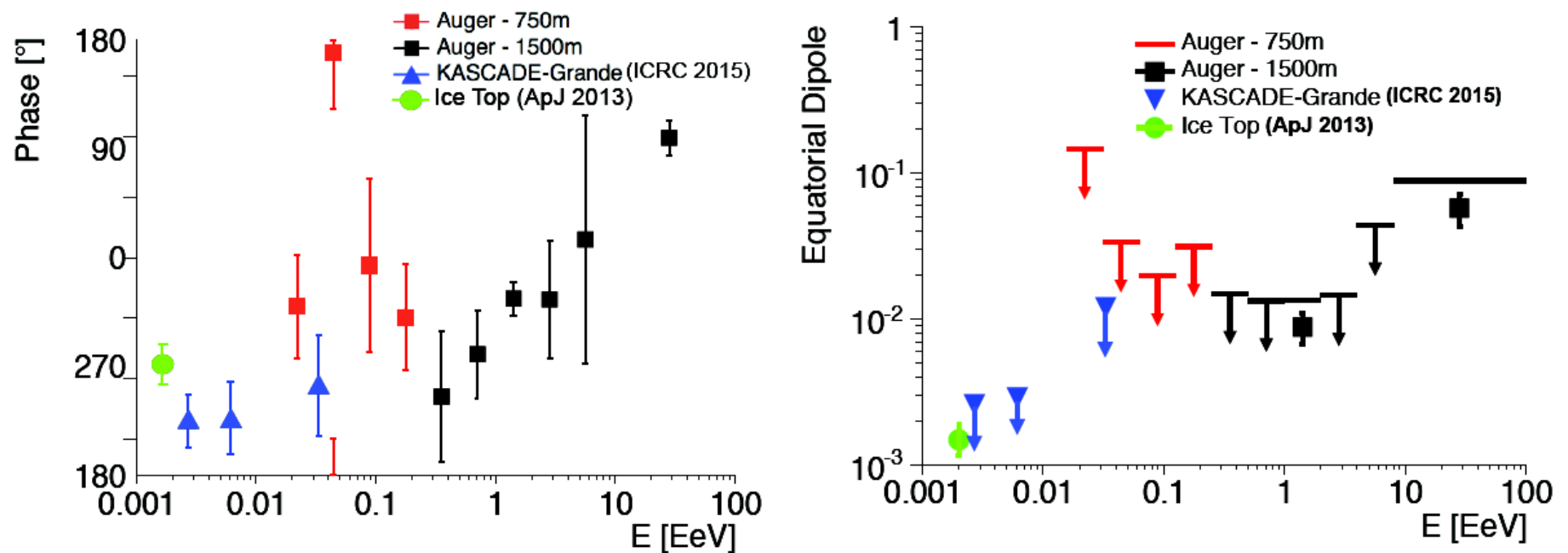
W czterech kolejnych binach prawdopodobieństwo fluktuacji na poziomie 1% ?!

Ale wciąż nie znaleziono korelacji z żadnymi znanymi źródłami/strukturami...

AUGER

Anizotropia

Wyniki dopasowania amplitudy i fazy składowej dipolowej (ICRC'2015)



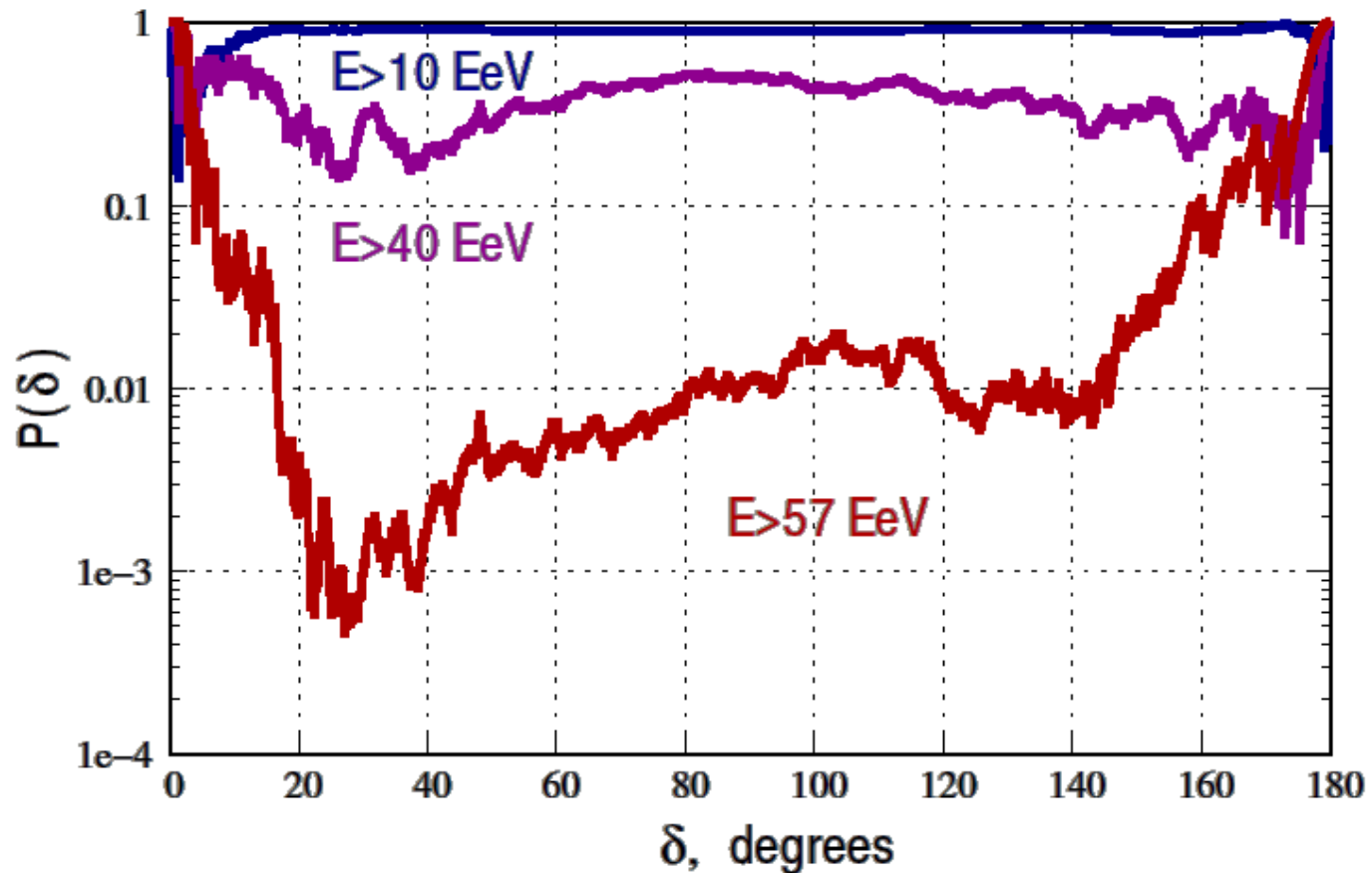
W dwóch binach prawdopodobieństwo fluktuacji na poziomie 10⁻⁴ (!)

W zakresie 1-2 EeV promieniowanie z kierunku Centrum Galaktyki,
w zakresie powyżej 8 EeV z kierunku przeciwnego !...

Telescope Array

Autokorelacja

Zliczanie par przypadków o zadanej różnicy kątowej między kierunkami.

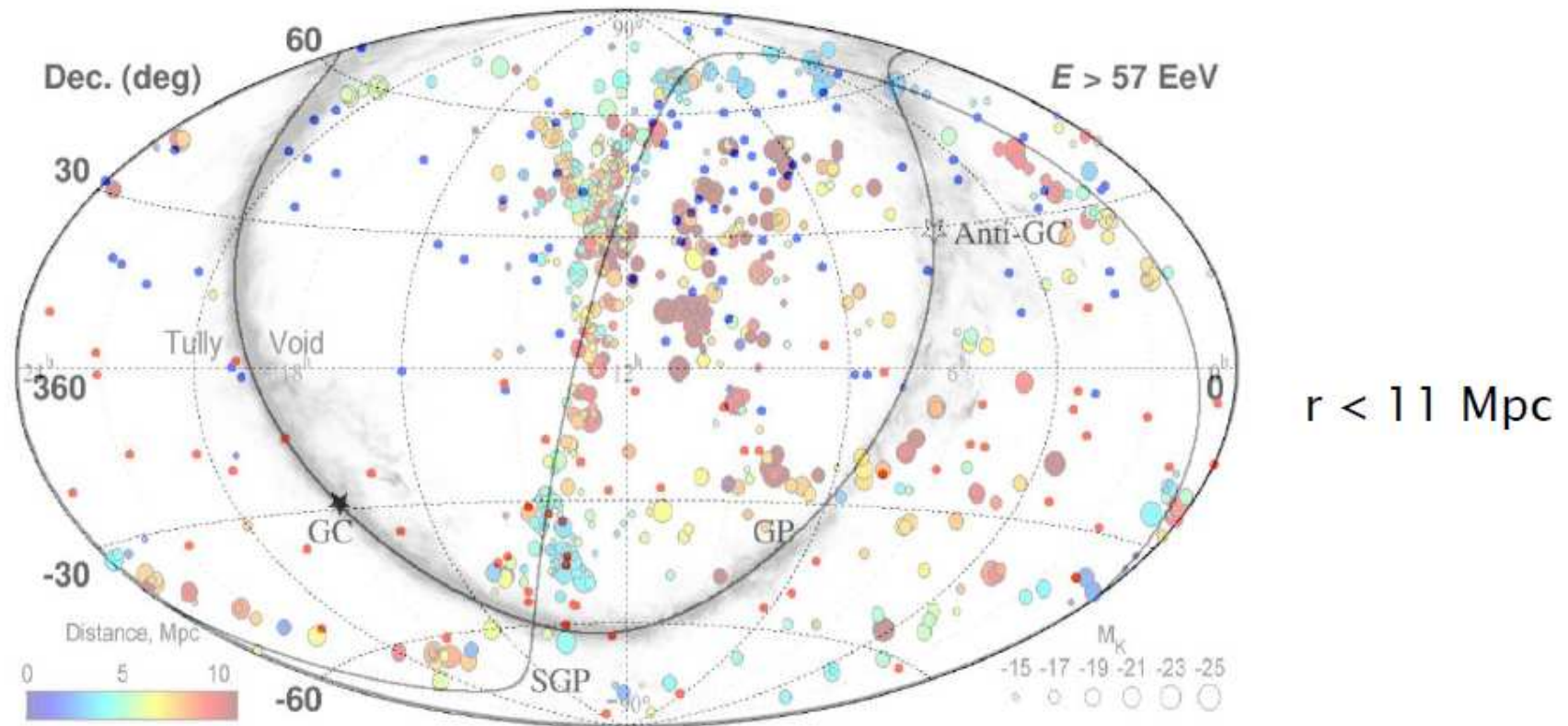


Prawdopodobieństwo, że obserwacja jest zgodna z rozkładem izotropowym.

Telescope Array

Korelacja z lokalnymi strukturami

LSS - Large Scale Structures

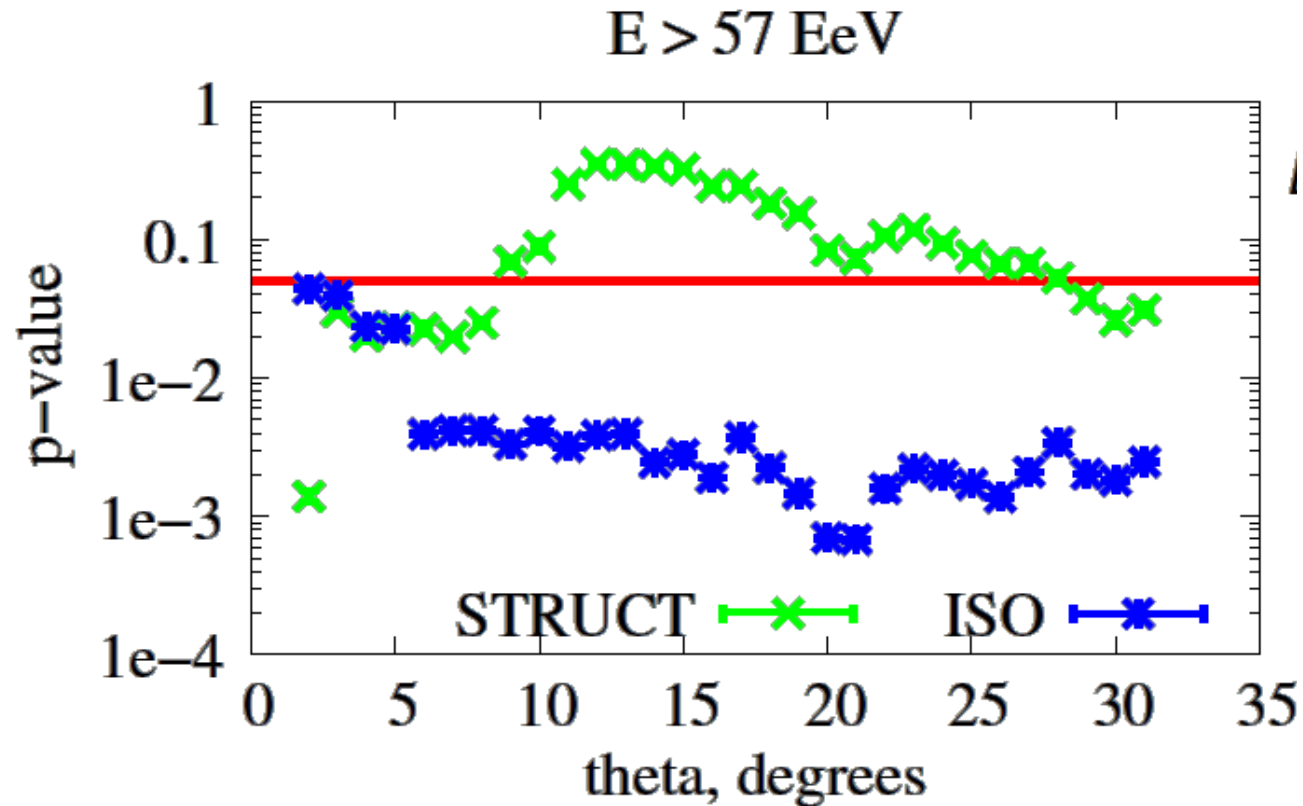


Blue dots: TA events
Red dots: Auger events

Telescope Array

Korelacja z lokalnymi strukturami

LSS - Large Scale Structures



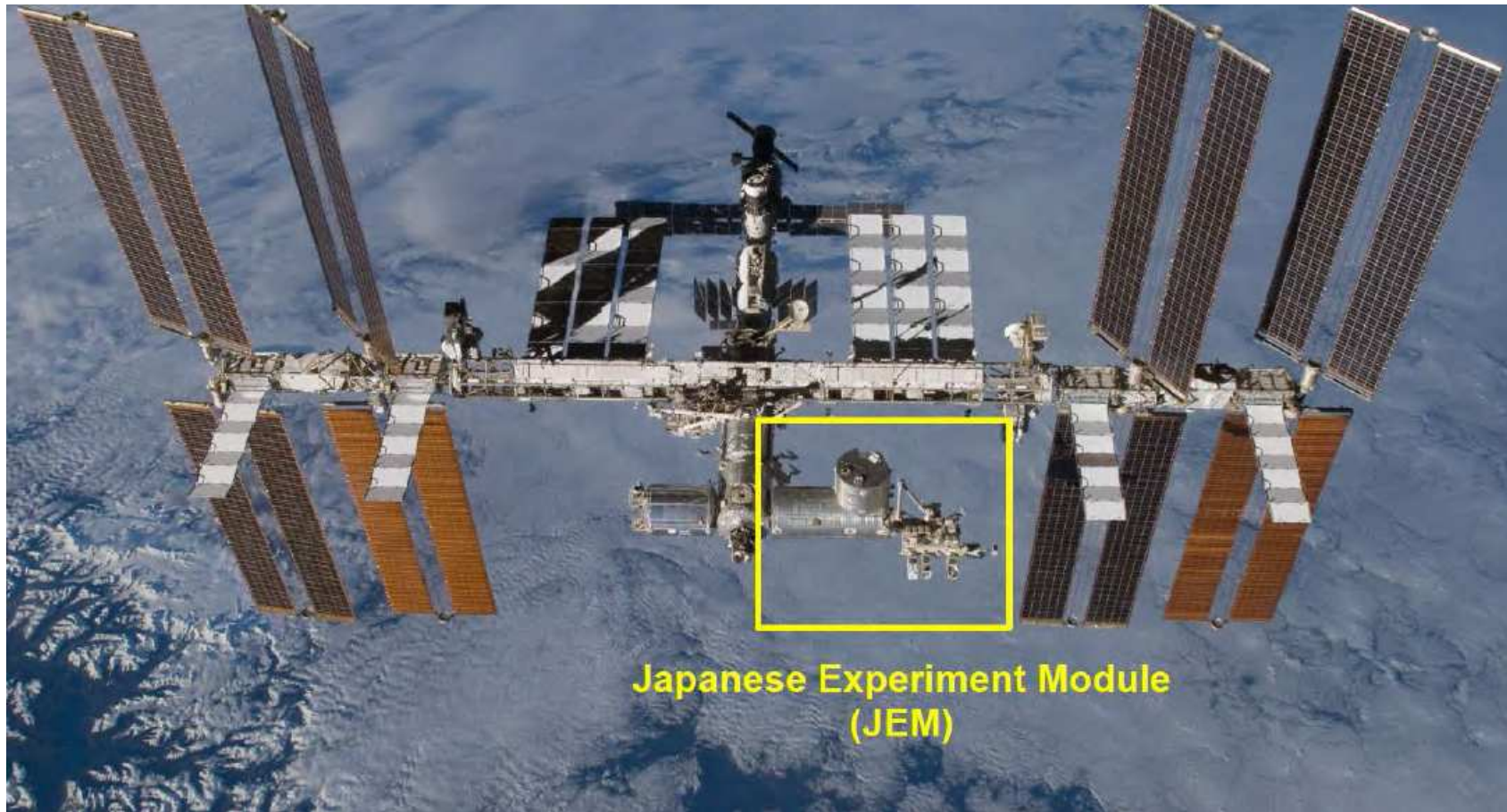
Rozkład wydaje się zgodny z rozkładem potencjalnych źródeł w otoczeniu Galaktyki.

Statystyka wciąż zbyt mała na wyciągnięcie jednoznacznych wniosków...

JEM-EUSO

Dalsze powiększanie układów detekcyjnych na powierzchni Ziemi bardzo kosztowne.

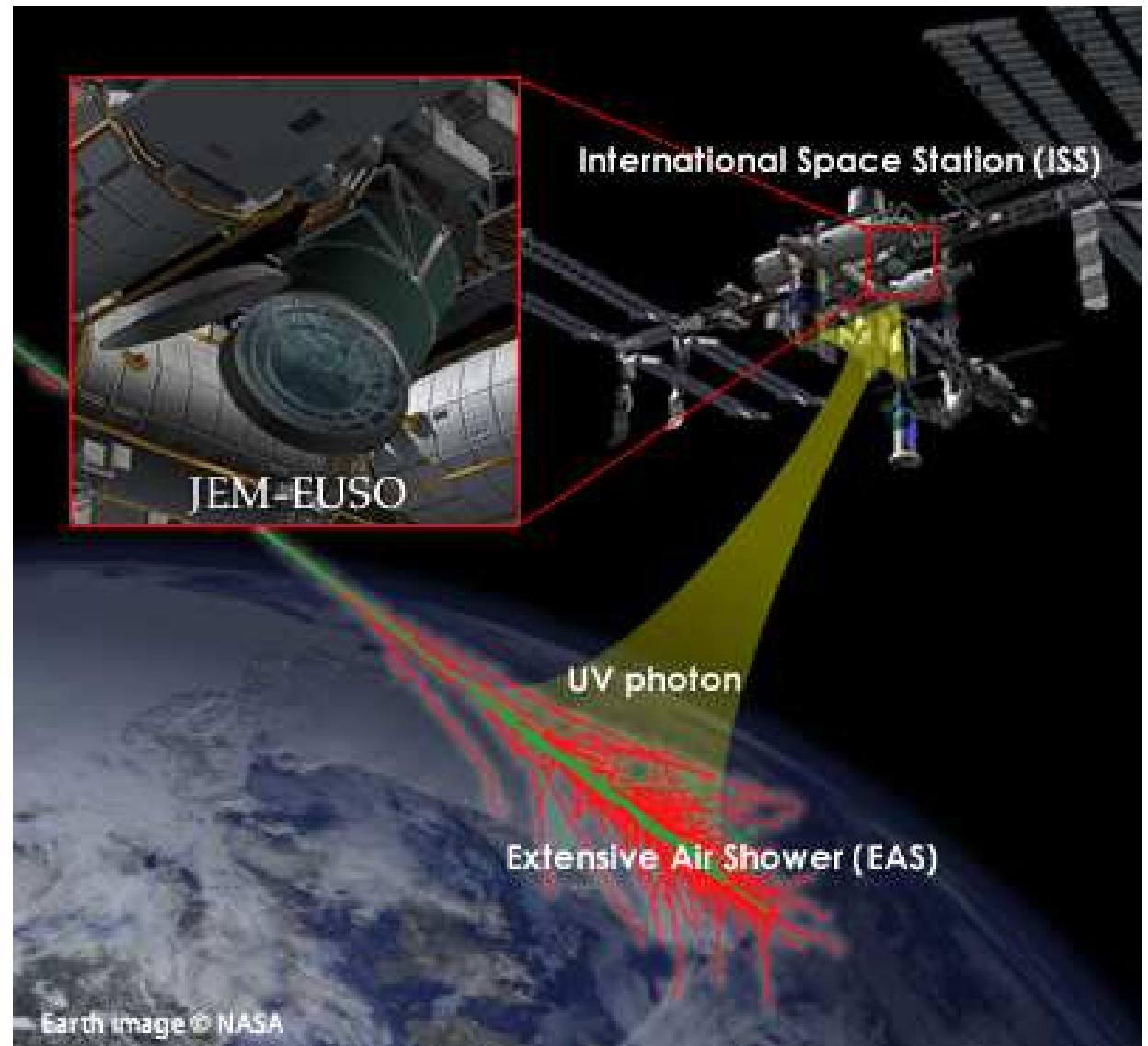
⇒ projekt obserwacji z kosmosu, z Japońskiego Modułu Eksperymentalnego na ISS



JEM-EUSO

Zasada działania

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



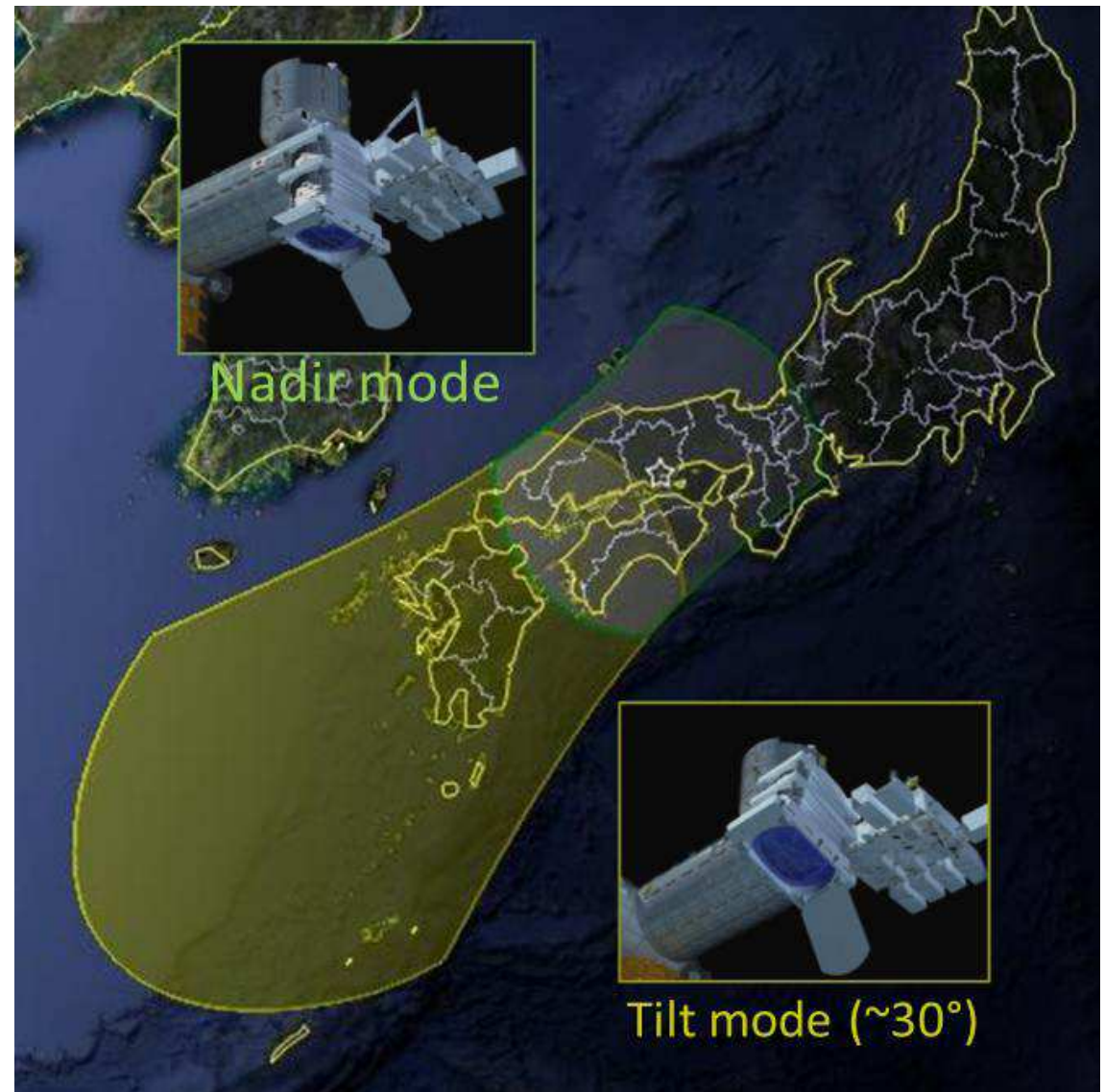
JEM-EUSO

Zasada działania

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

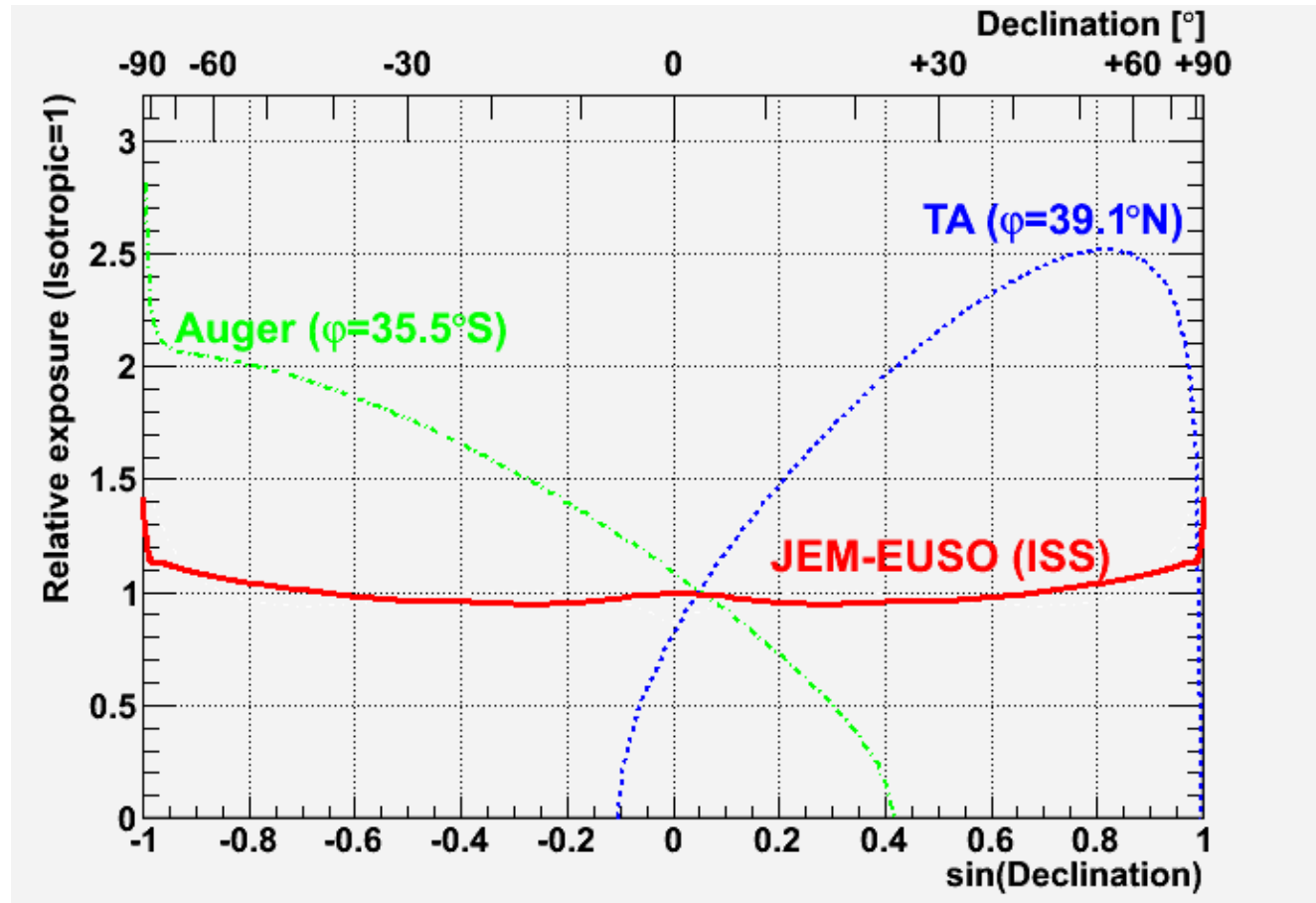
Z wysokości 400 km można obserwować powierzchnię od ok. 140 000 km² (obserwacja pionowo) do ok. 300 000 km² (obserwacja pod kątem 30°)

100× AUGER !!!



JEM-EUSO

Obszar obserwacji



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

JEM-EUSO

Schemat detektora

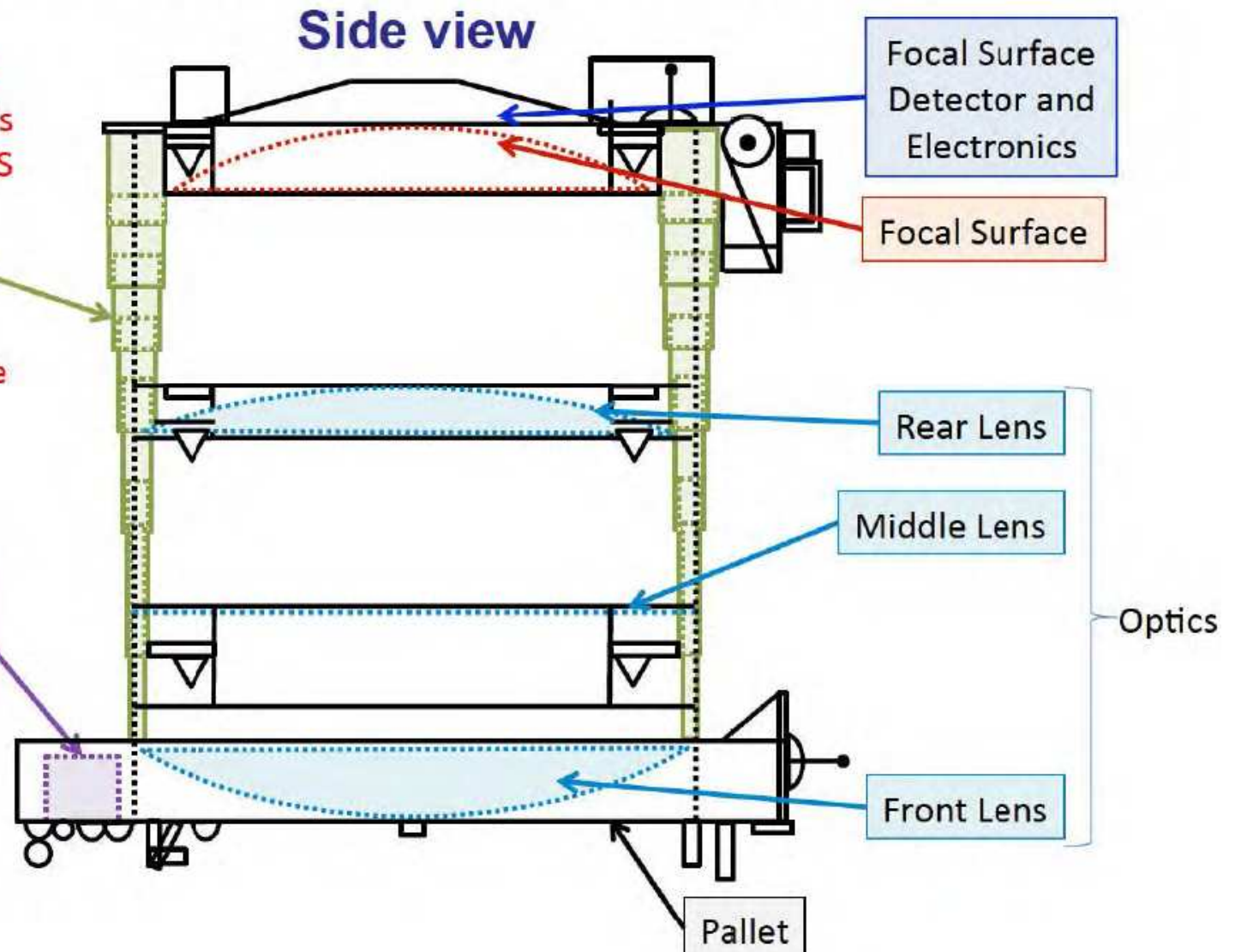
JEM-EUSO

Telescope will be deployed after it is attached at the ISS

Deployment Mechanism

Other options are under study.

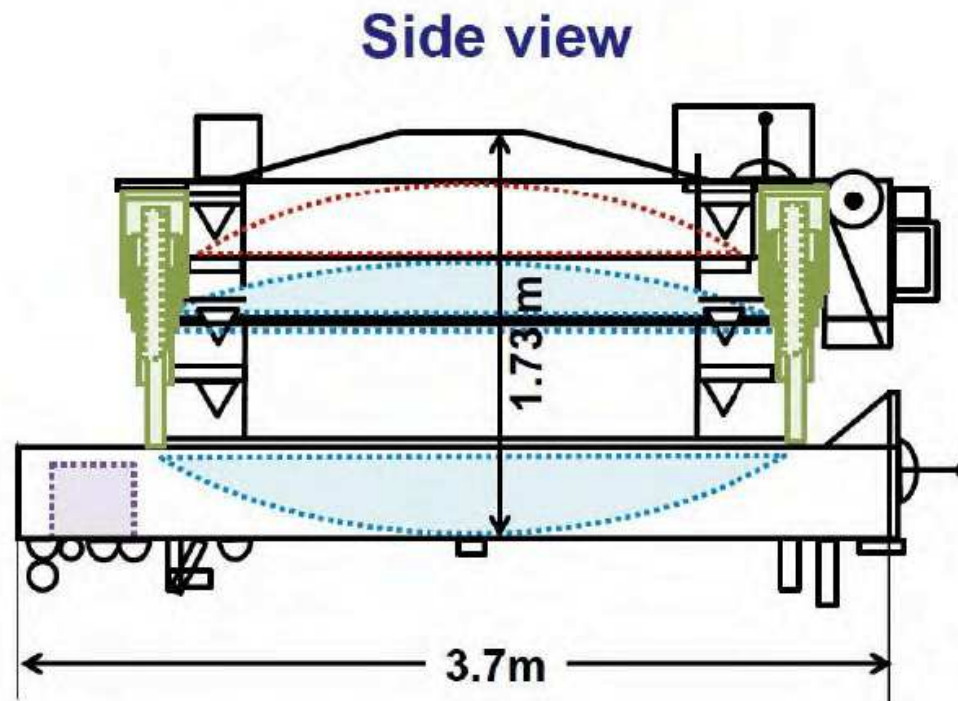
Atmospheric Monitoring System



JEM-EUSO

Schemat detektora

Do wyniesienia na orbitę detektor musi być złożony:



JEM-EUSO

Budowa detektora

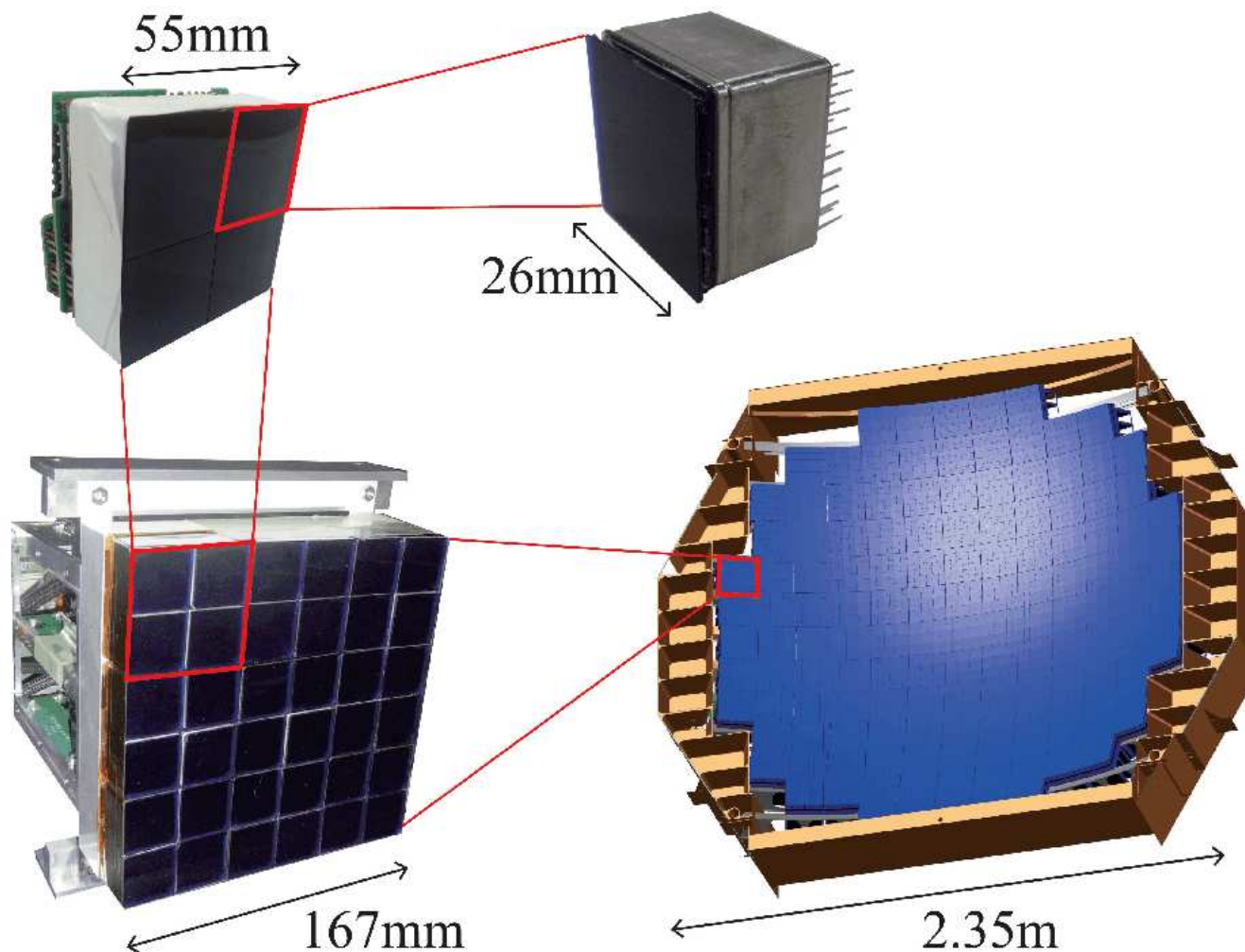
Prototypowe soczewki frenalowskie - kluczowy element detektora



JEM-EUSO

Budowa detektora

Powierzchnia ogniskowa: 4.5 m^2 , 320 000 pixeli, wieloanodowe fotopowielacze - MAPMTs

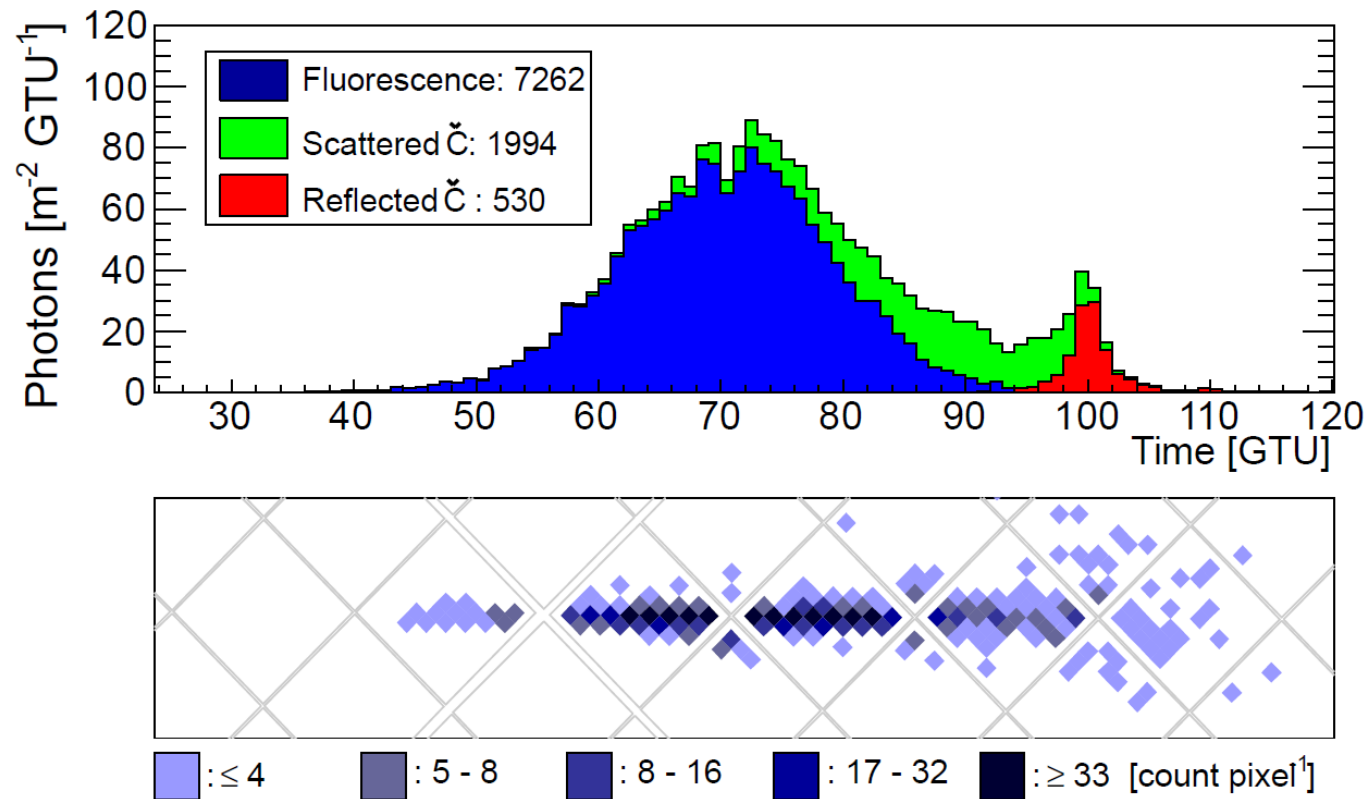


JEM-EUSO

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



JEM-EUSO

Testy prototypów



JEM-EUSO

Testy prototypów



JEM-EUSO

Status projektu

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

Przeprowadzono pierwszy próbny stratosferyczny (~ 40 km) lot balonowy

Przygotowywany długi lot (~ 20 dni) balonem NASA - planowany na 2017

Super Pressure Balloon (SPB)

Przygotowywany detektor Mini-EUSO - obserwacje z wnętrza ISS.

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

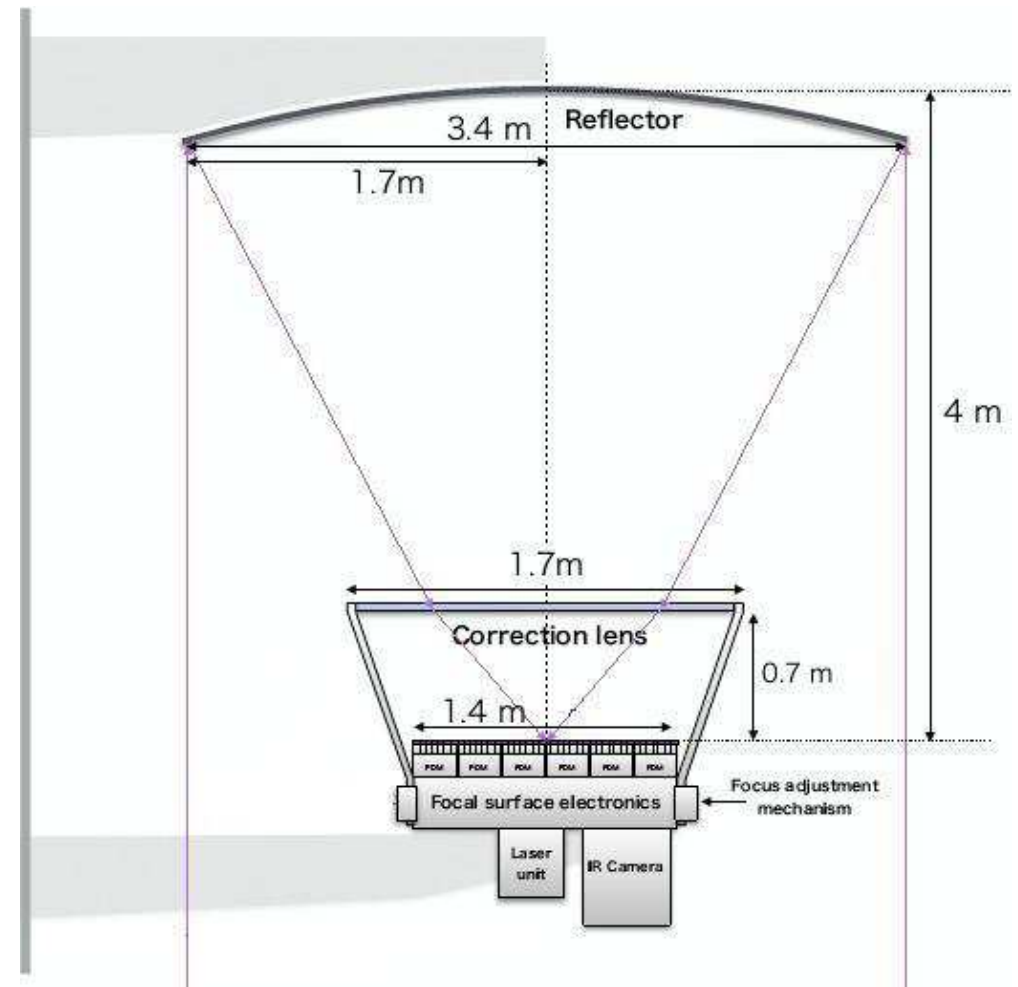
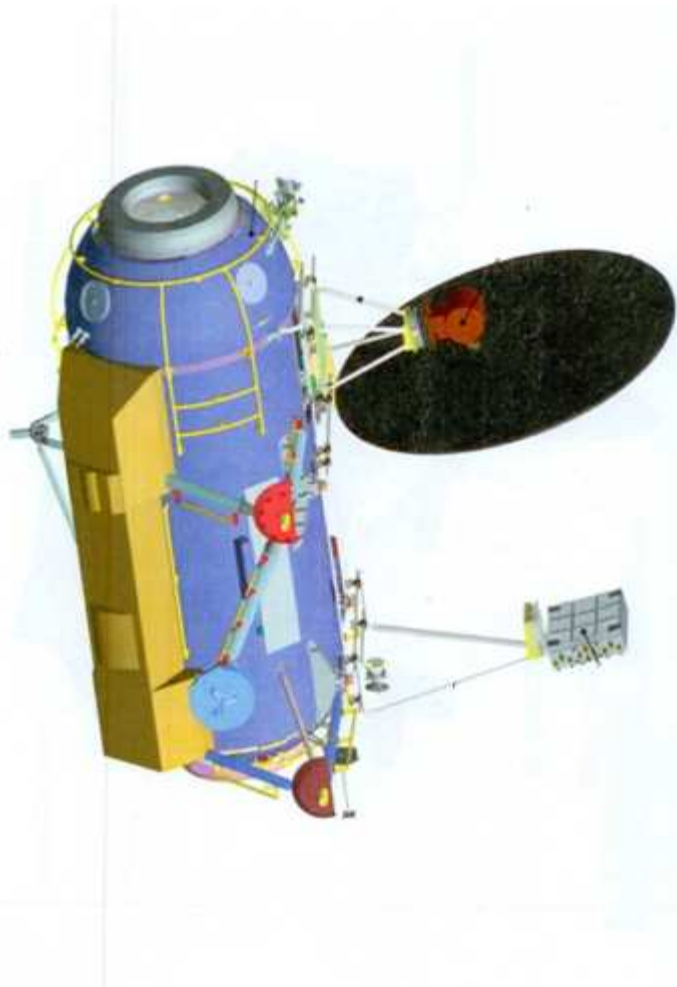
Możliwe wystrzelenie w 2017 (?).

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



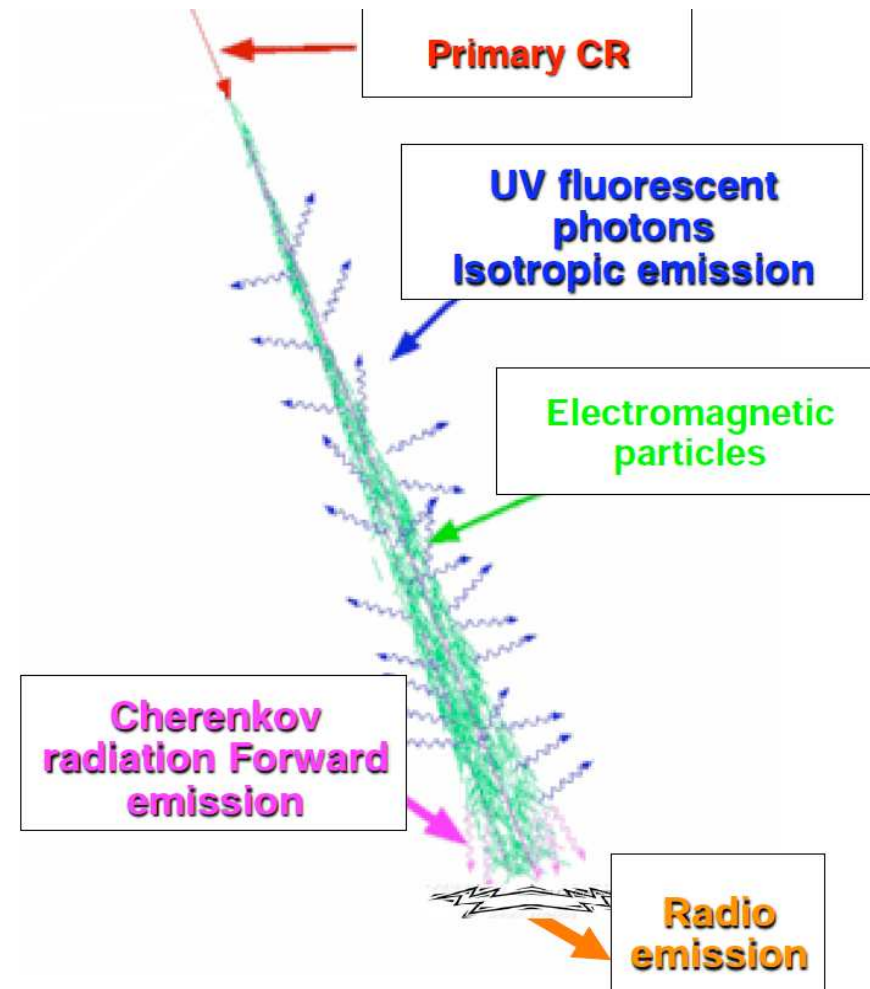
Wielkie pęki atmosferyczne

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 (!)

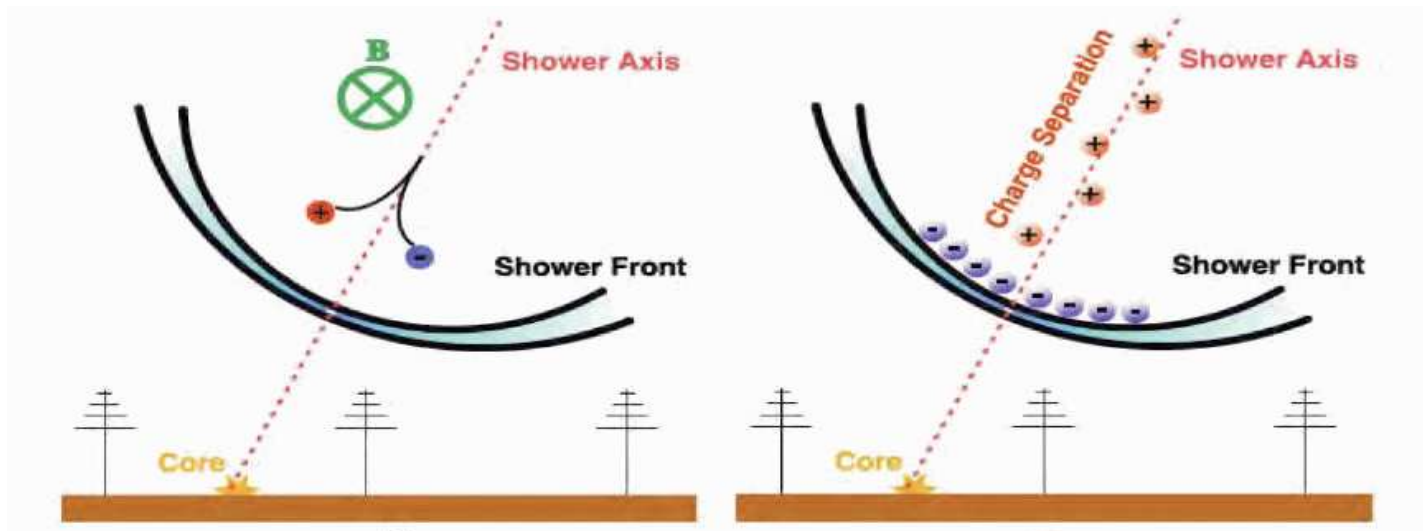
Różne eksperymenty stosują różne podejścia...



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

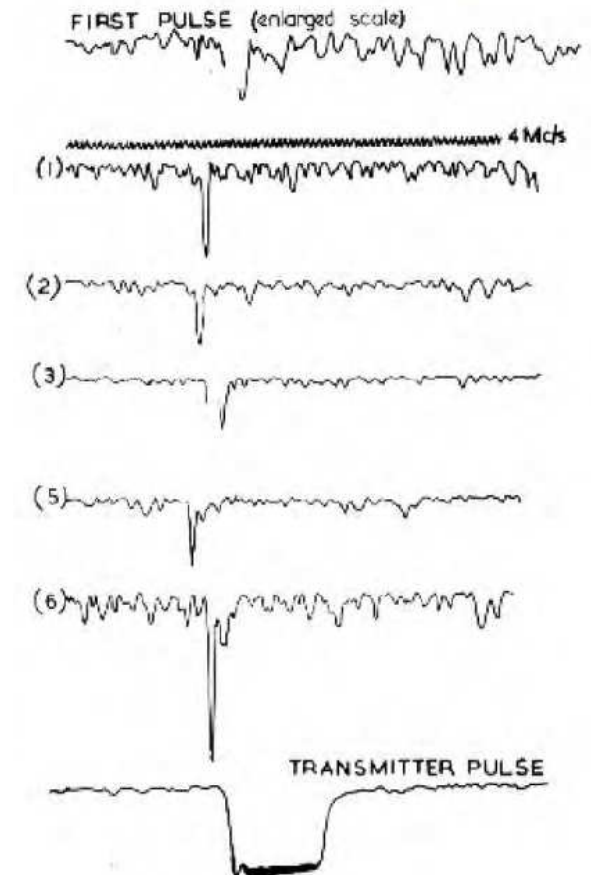
Emisja radiowa

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



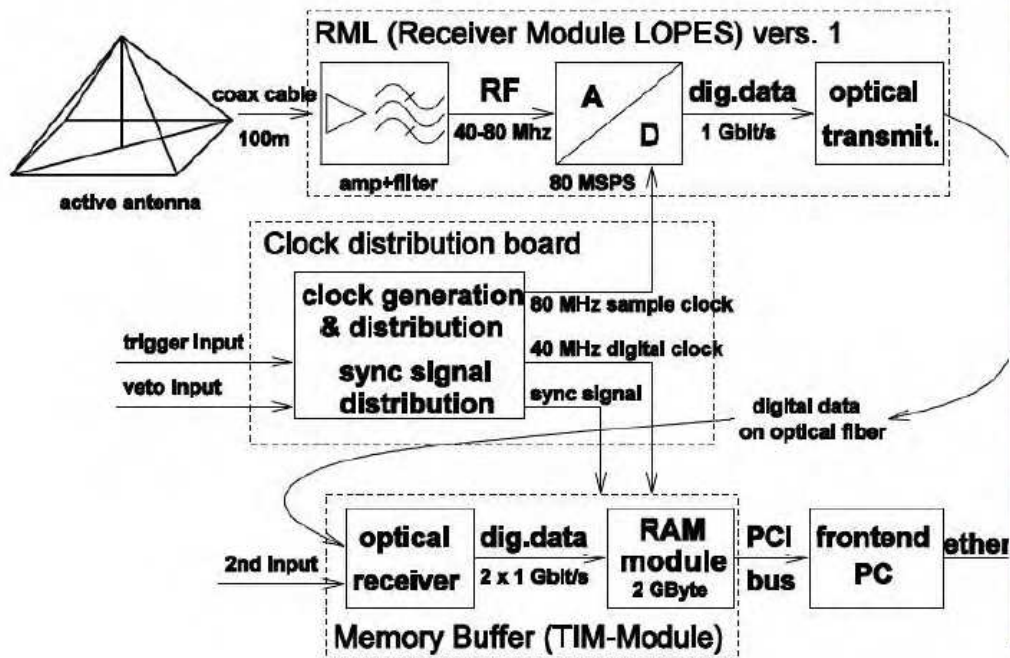
Jelley et al. (1965)

Wielkie pęki atmosferyczne

Detekcja radiowa

Zainteresowanie detekcją radiową ponownie na początku XXI wieku

Detektor LOPES zbudowany przy detektorze KASKADE (2003)



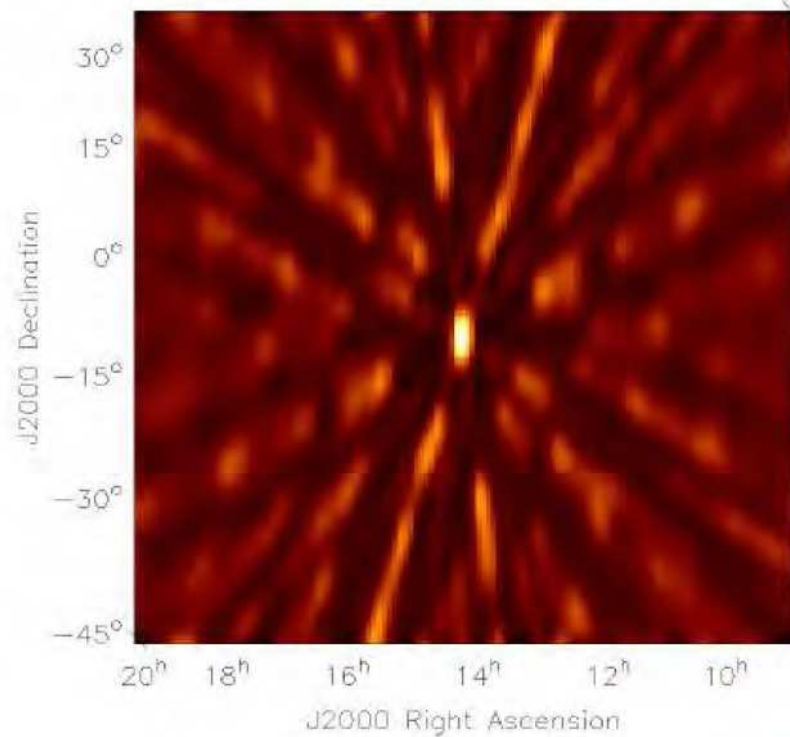
Detekcja radiowa

LOPES

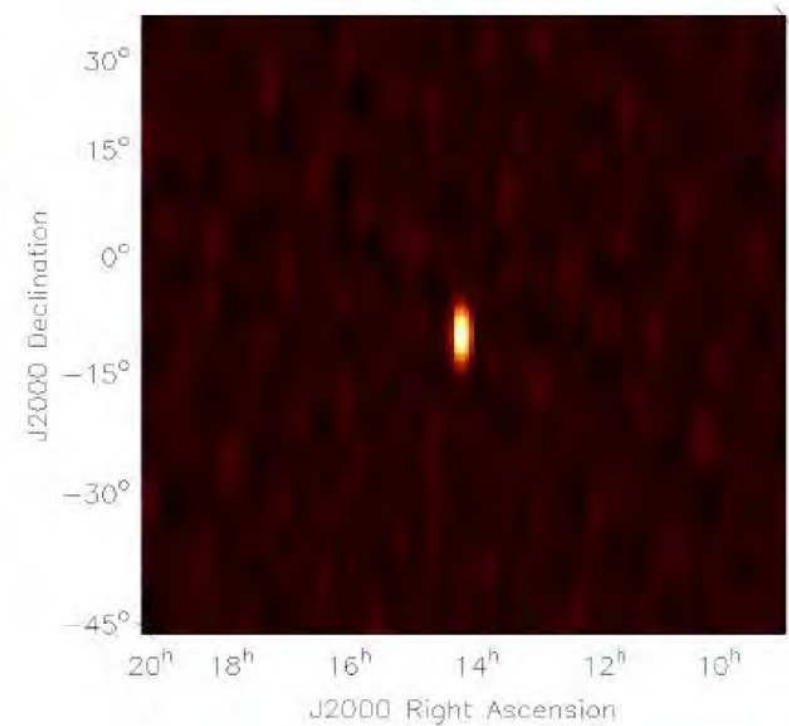
Przypadek wybuchu słonecznego mierzonego 8 antenami w paśmie 45-75 MHz

Rozkład pasujących kierunków:

Przed filtrowaniem



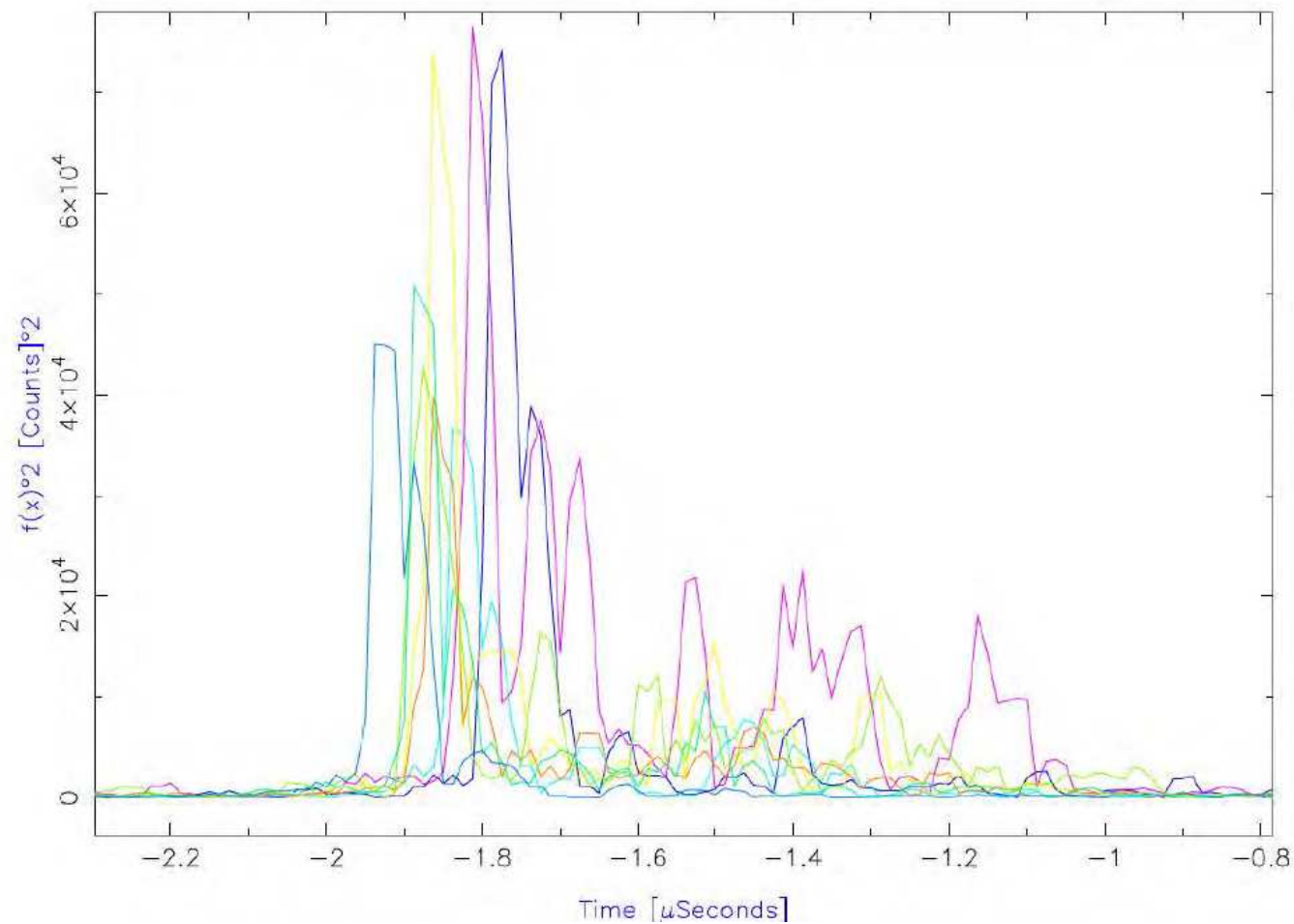
Po filtrowaniu



Detekcja radiowa

LOPES

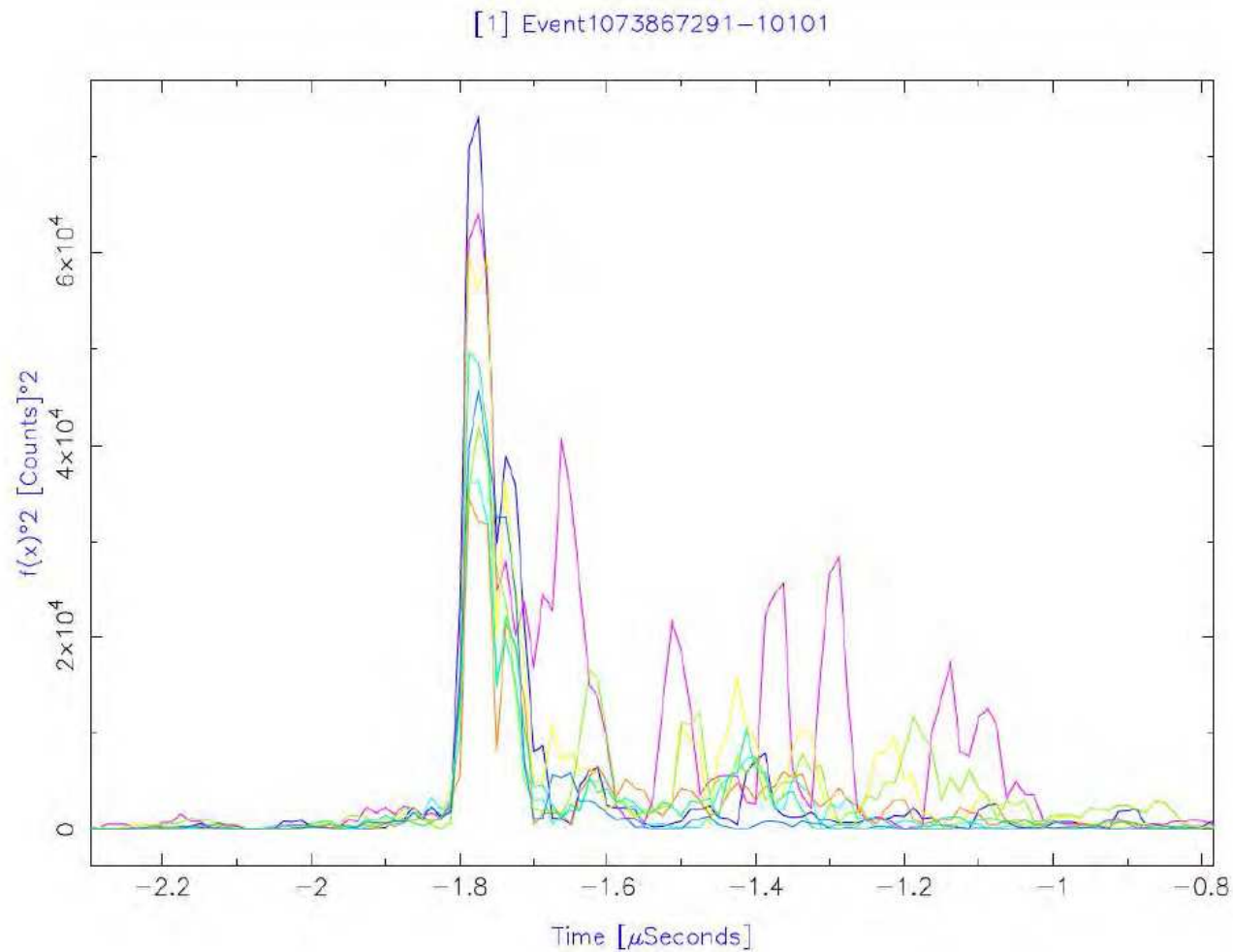
Przypadek mierzonej kaskady, przed dopasowaniem kierunku pęku:



Detekcja radiowa

LOPES

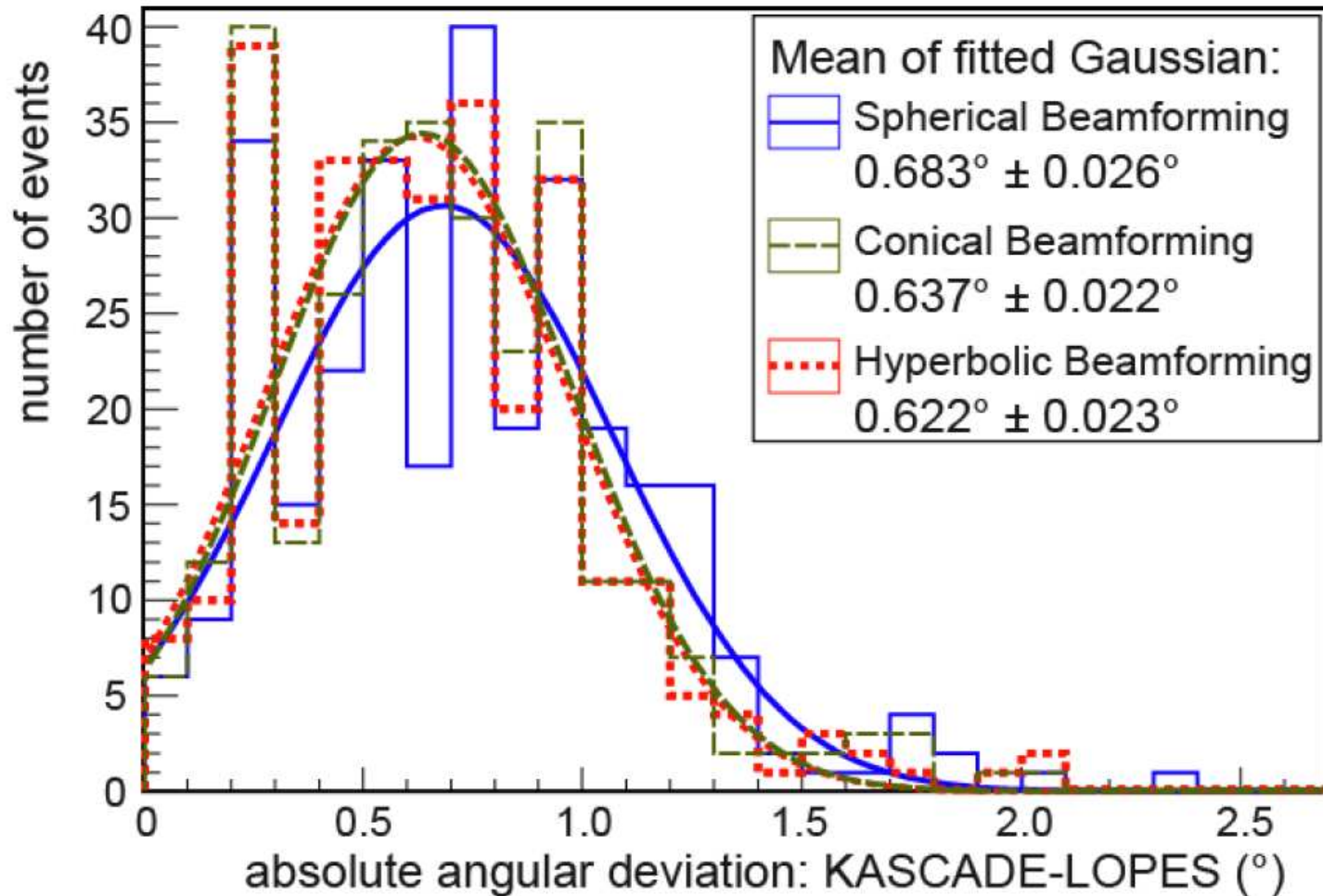
Przypadek mierzonej kaskady, po dopasowaniu kierunku pęku:



Detekcja radiowa

LOPES

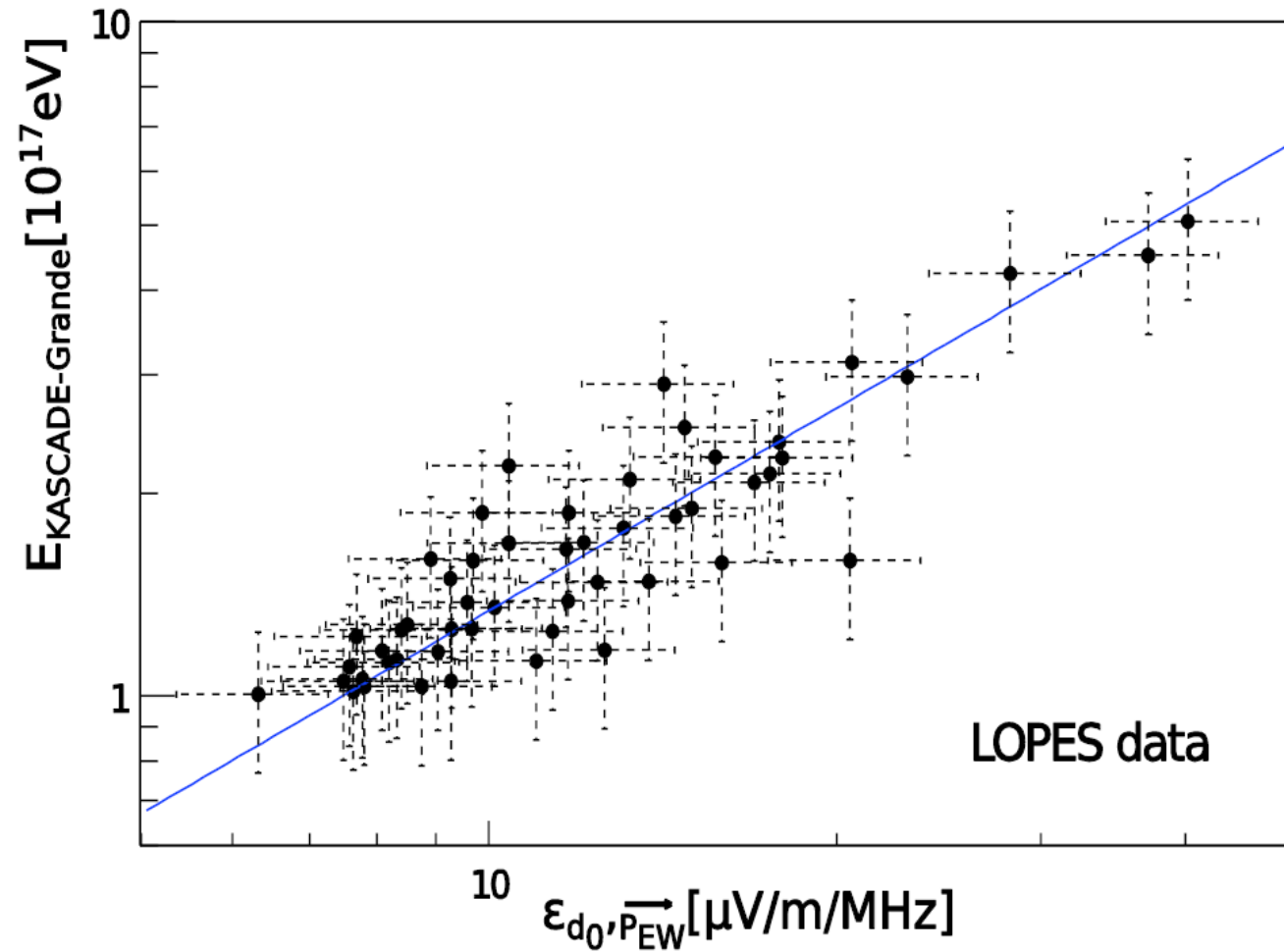
Dokładność wyznaczenia kierunku z porównania z detektorem KASCADE-Grande.



Detekcja radiowa

LOPES

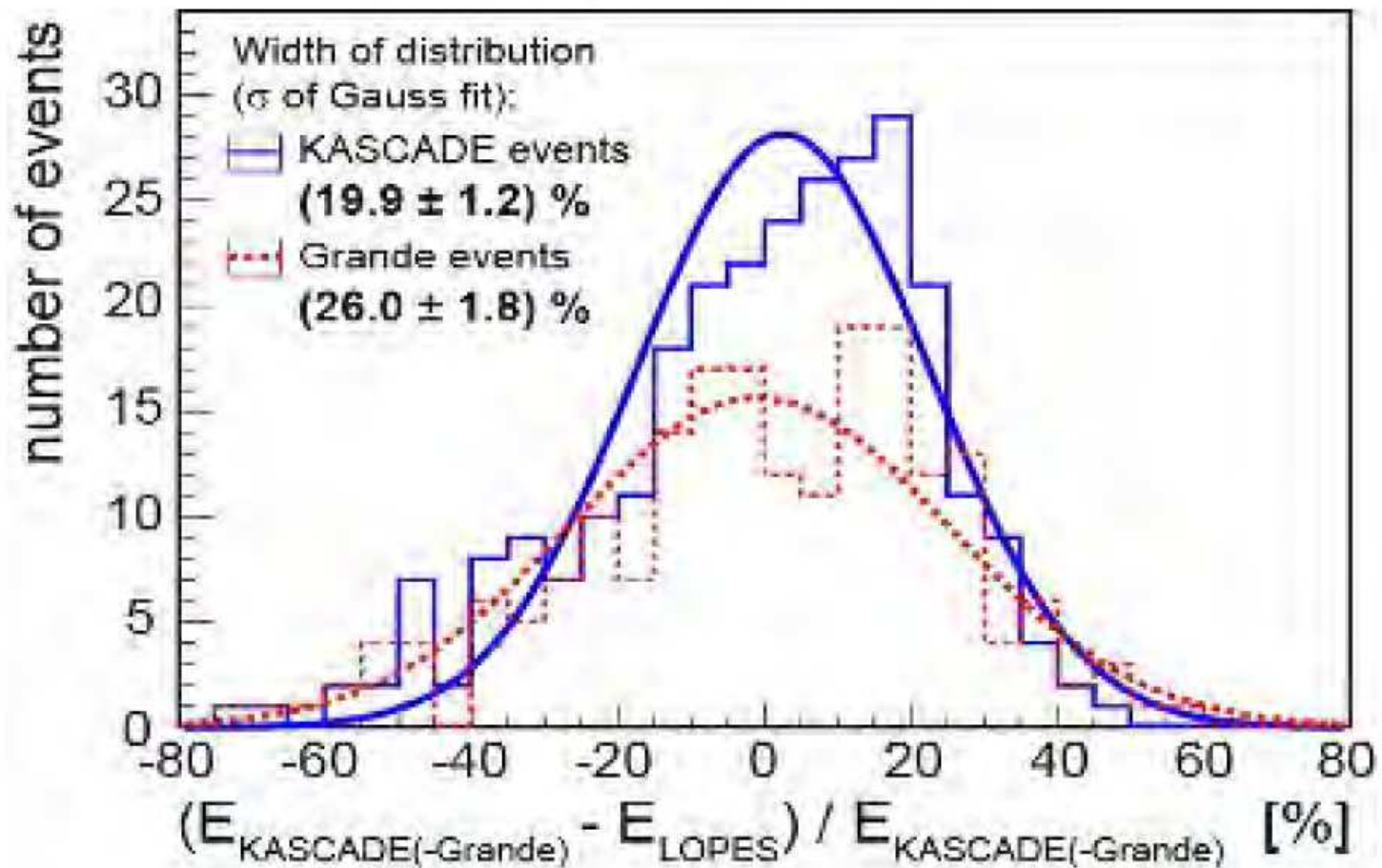
Dokładność wyznaczenia energii z porównania z detektorem KASCADE-Grande.

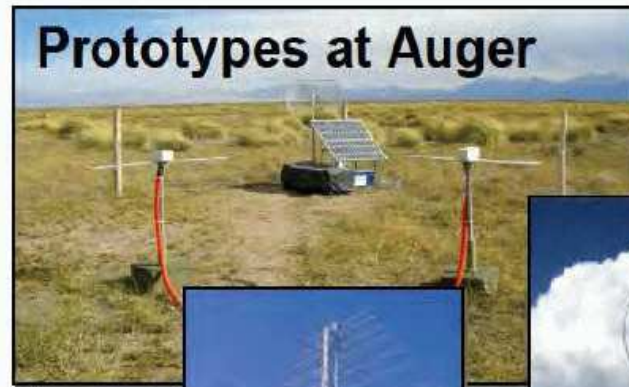


Detekcja radiowa

LOPES

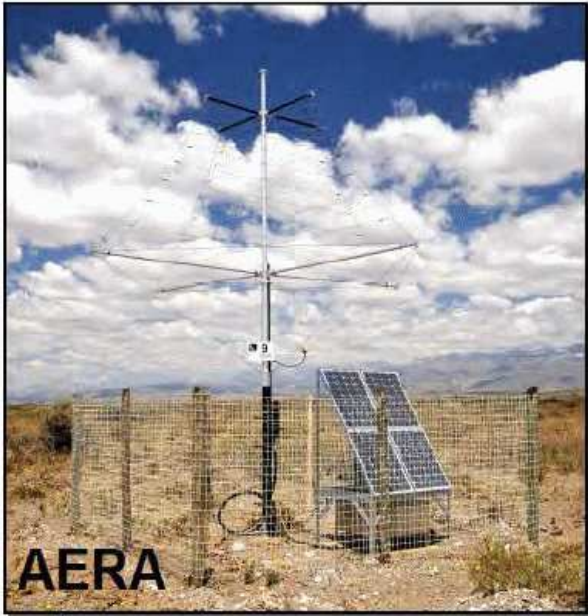
Dokładność wyznaczenia energii z porównania z detektorem KASCADE-Grande.





Falcke & Gorham propose „geosynchrotron approach“

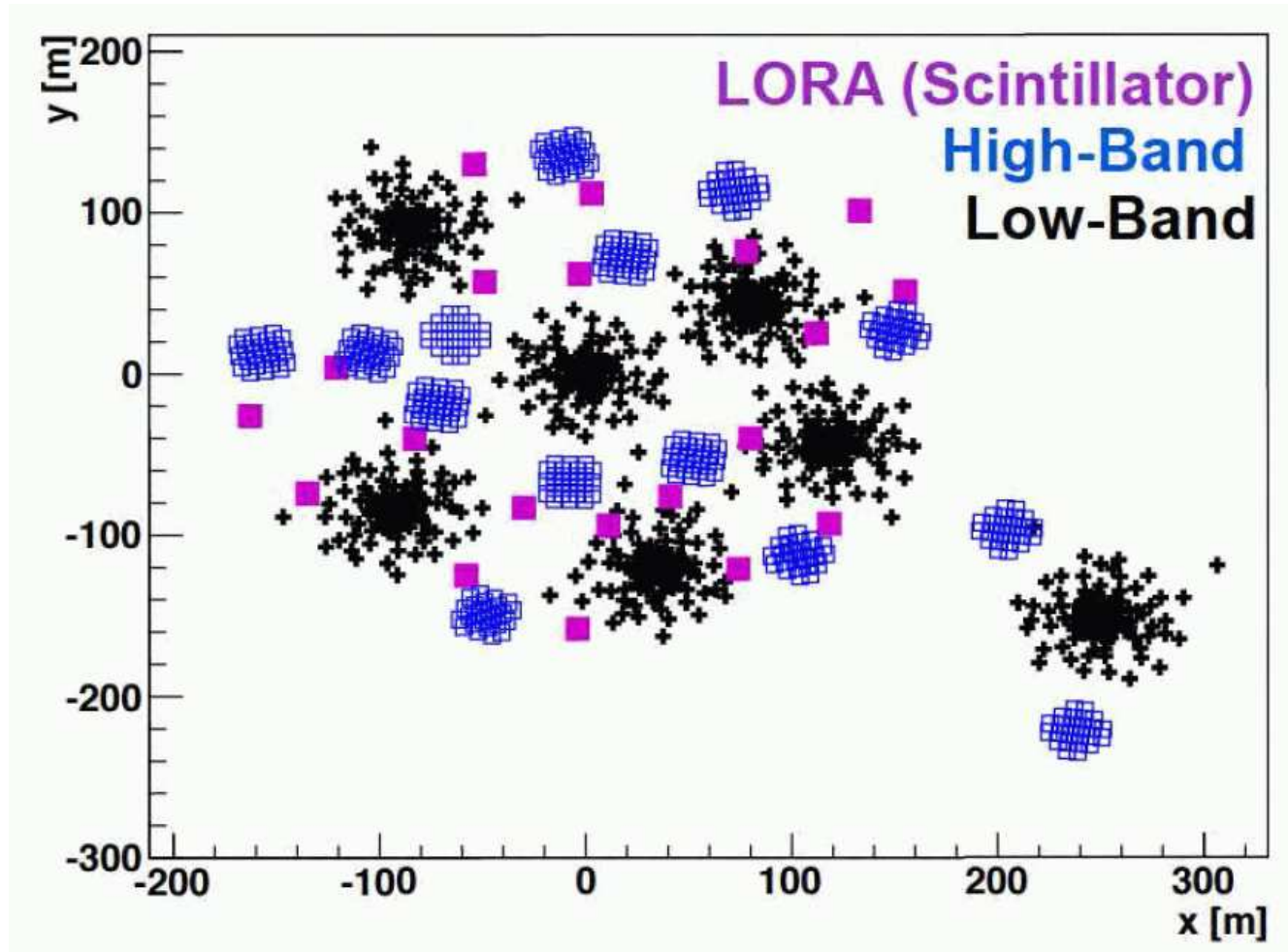




Detekcja radiowa

LOFAR

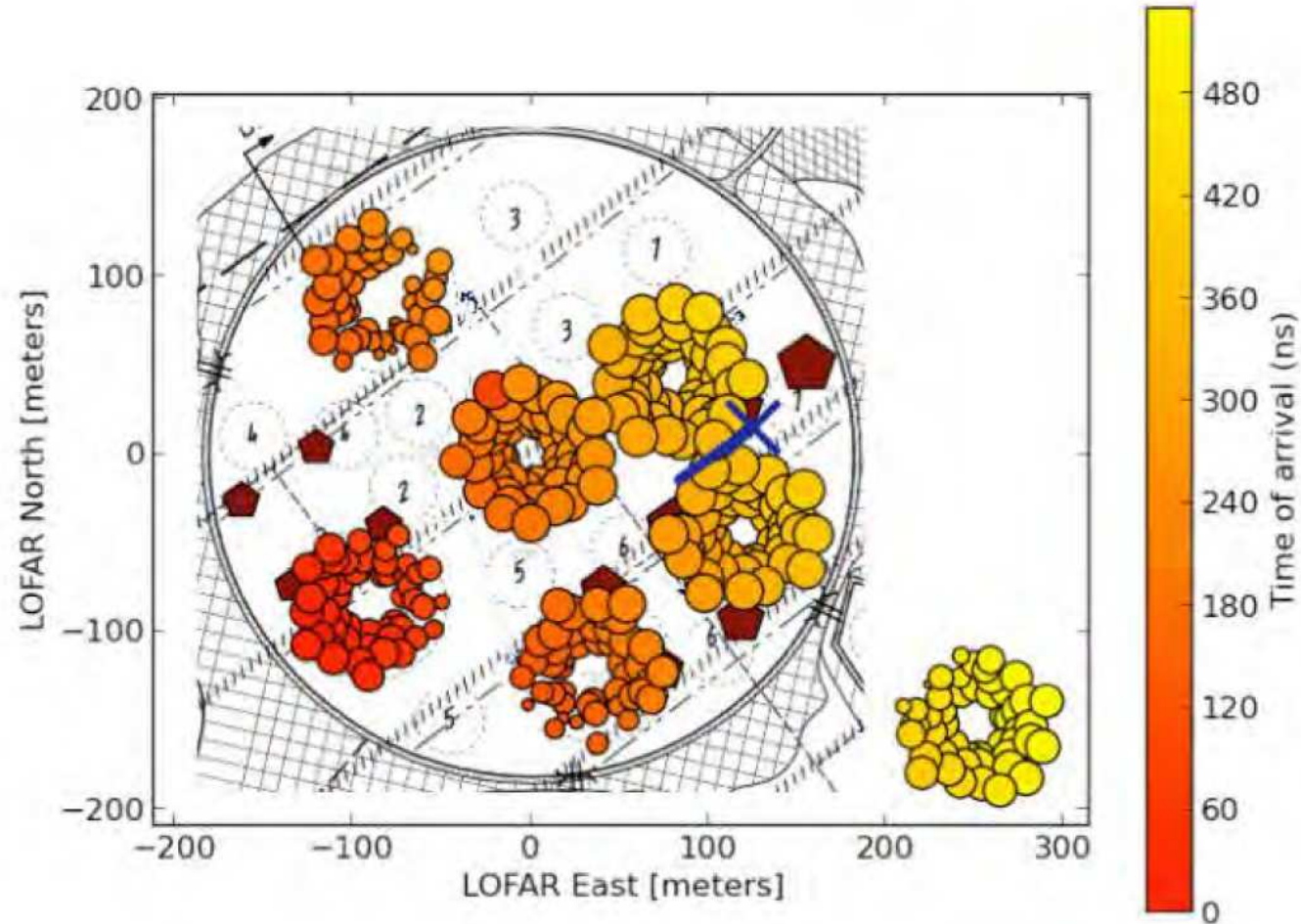
Zestawy anten pracujących w zakresie 30-80 MHz i 120-240 MHz + scyntylatory



Detekcja radiowa

LOFAR

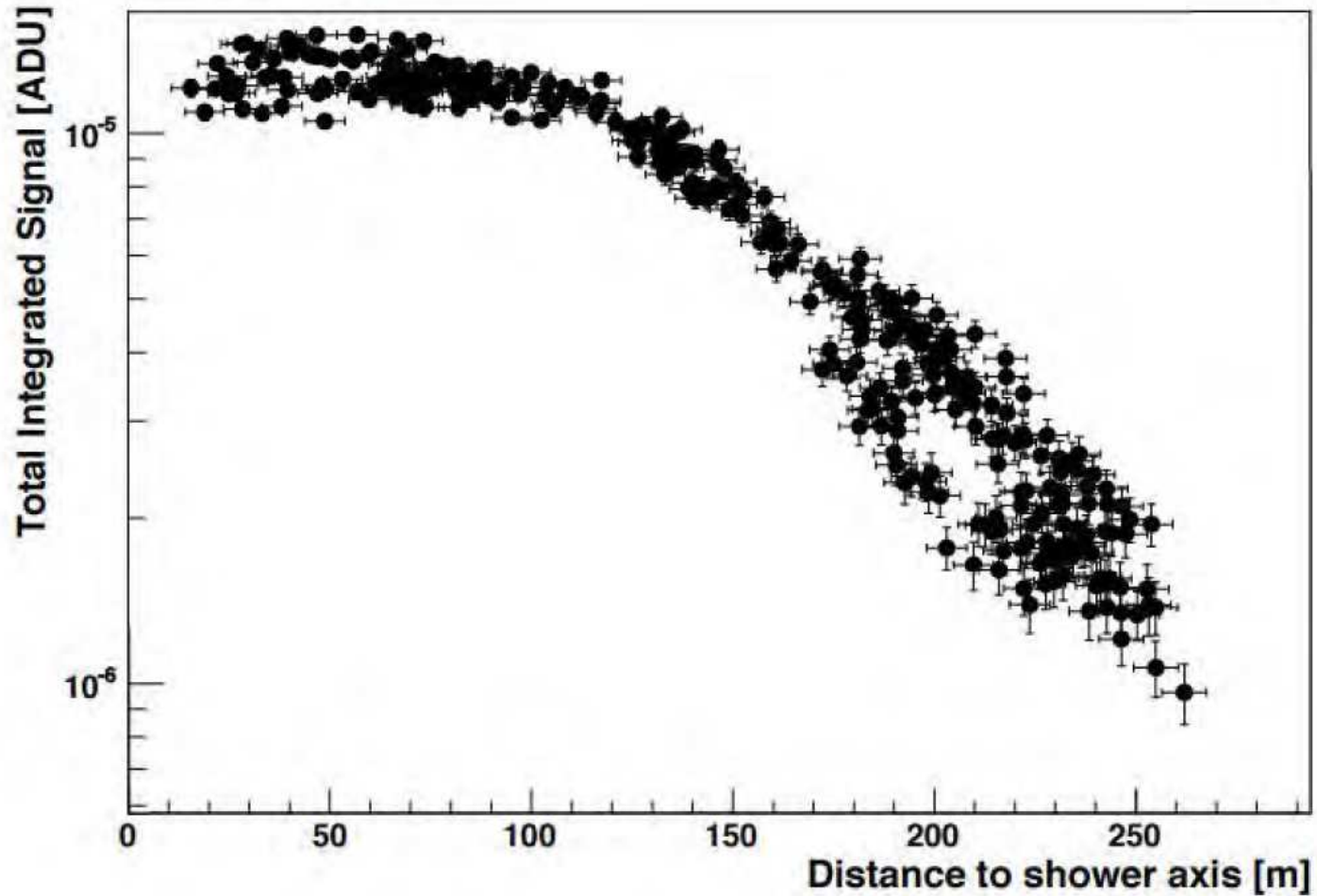
Przykładowy przypadek detekcji pęku (30-80 MHz)



Detekcja radiowa

LOFAR

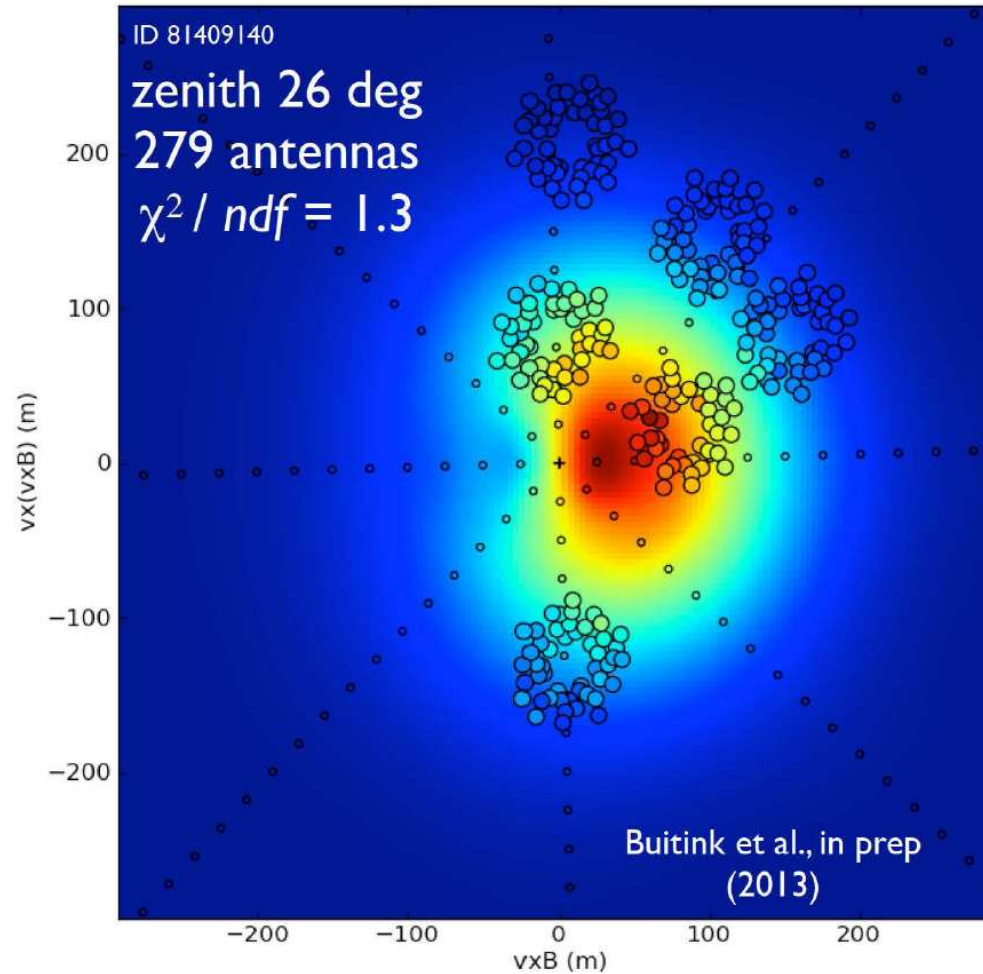
Przykładowy przypadek detekcji pęku (30-80 MHz) \Rightarrow rekonstrukcja profilu



Detekcja radiowa

LOFAR

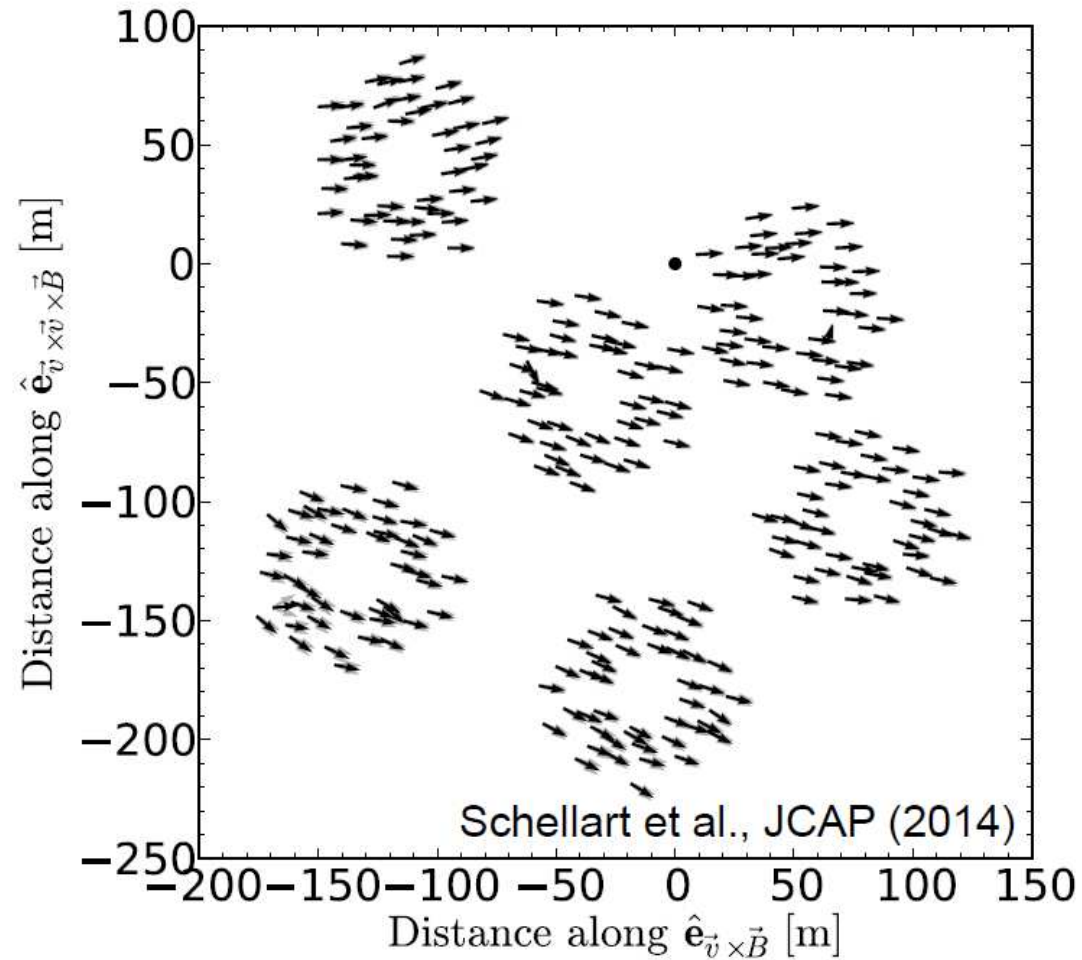
Dopasowanie modelu rozwoju kaskady



Detekcja radiowa

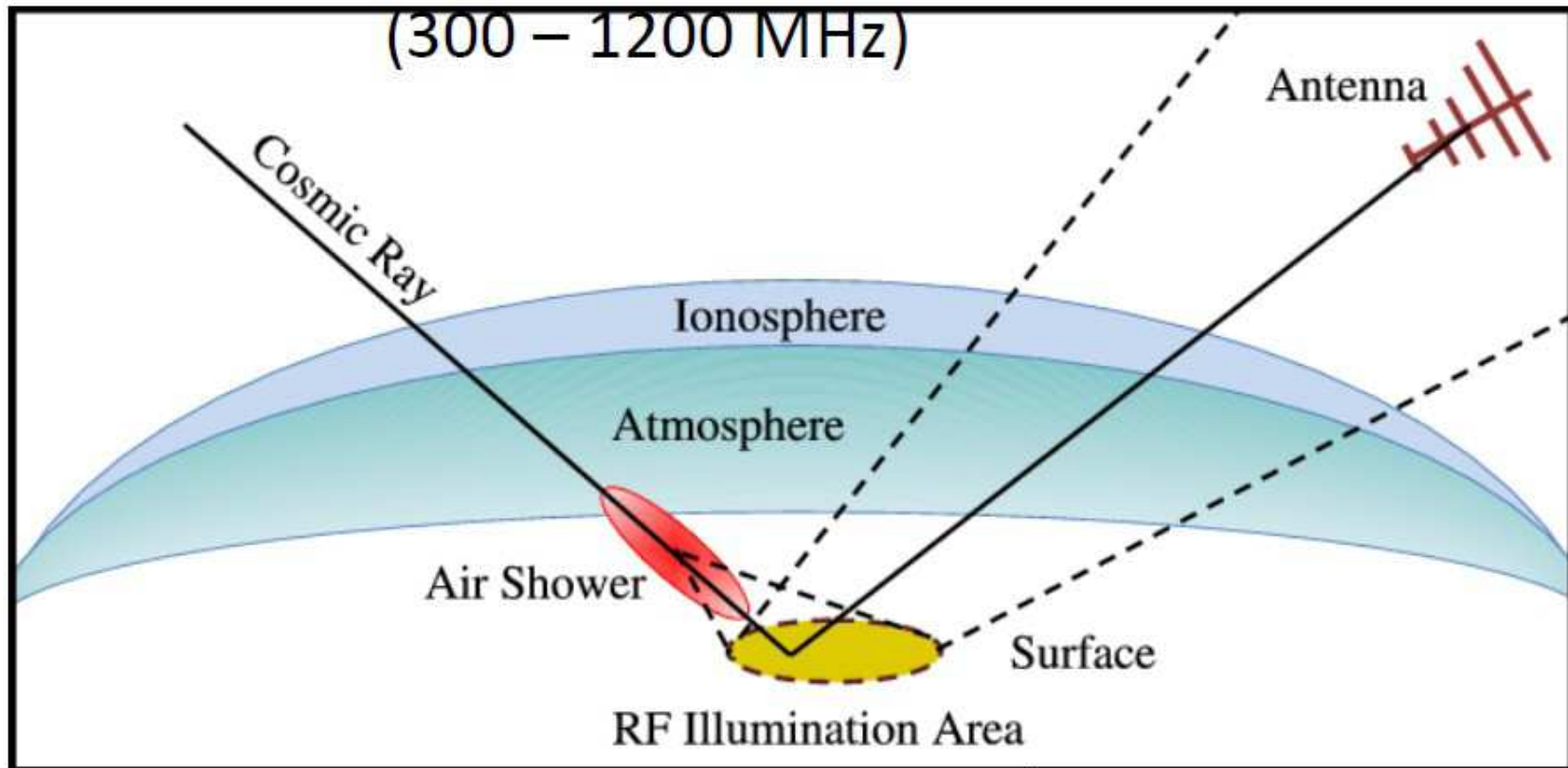
LOFAR

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

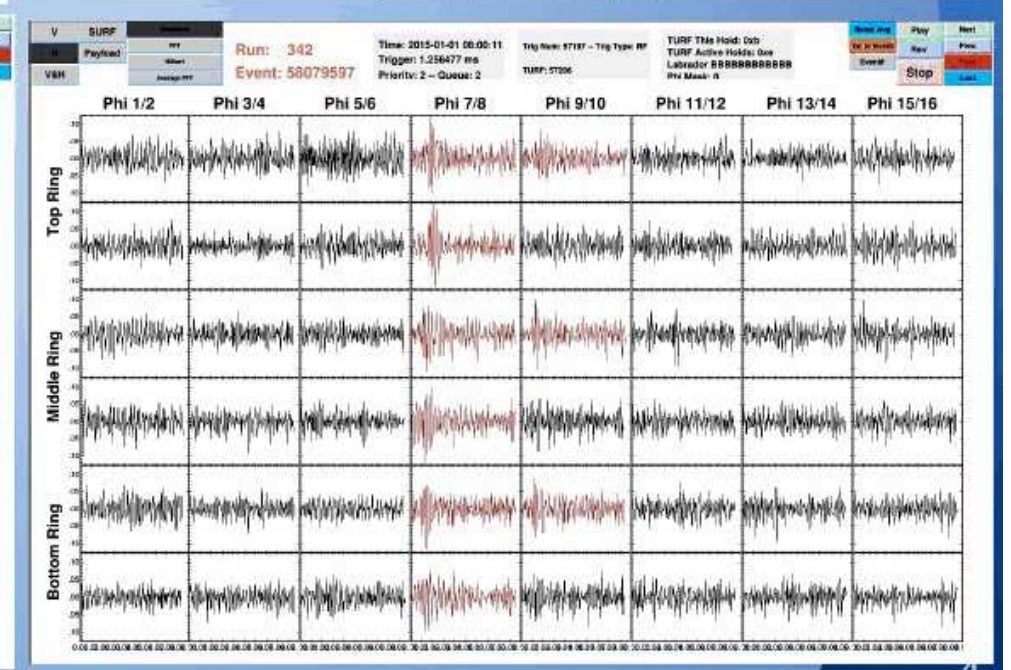
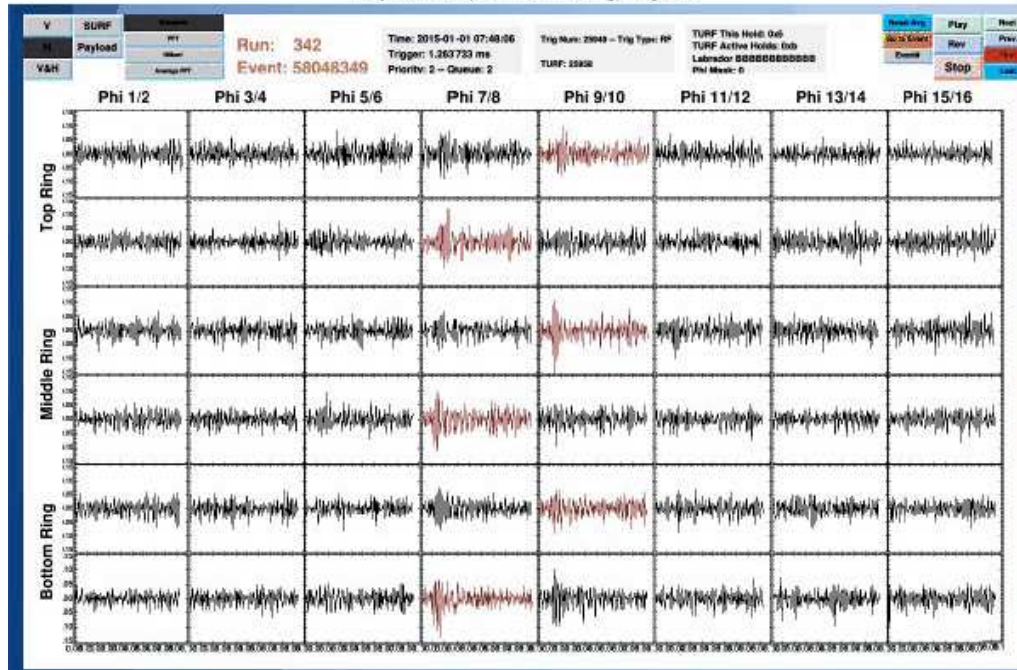
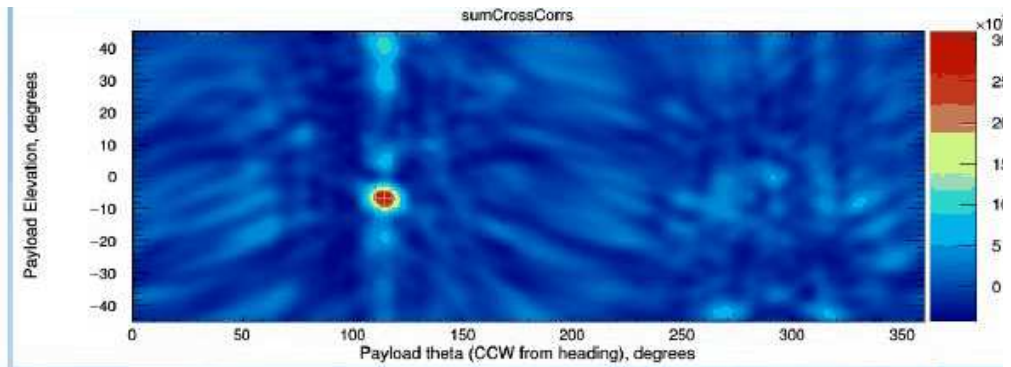
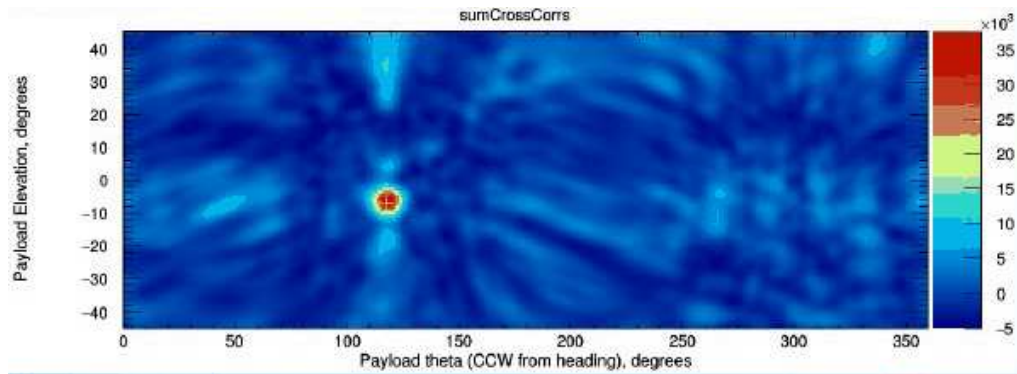
Detektor ANITA-3 wypuszczony na Antarktydzie w grudniu 2014



Detekcja radiowa

ANITA

Przykłady detekcji



Detekcja radiowa

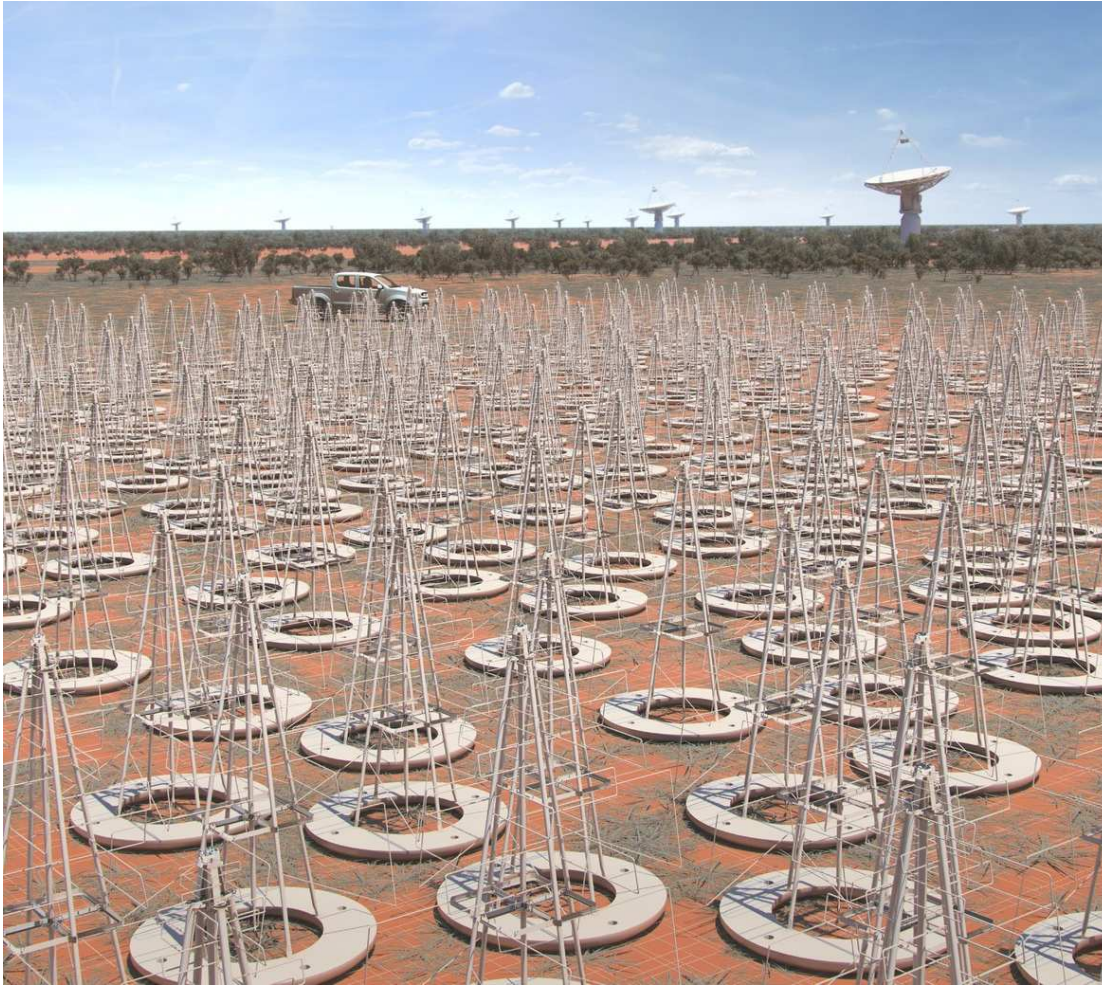
Szerokopasmowe anteny

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

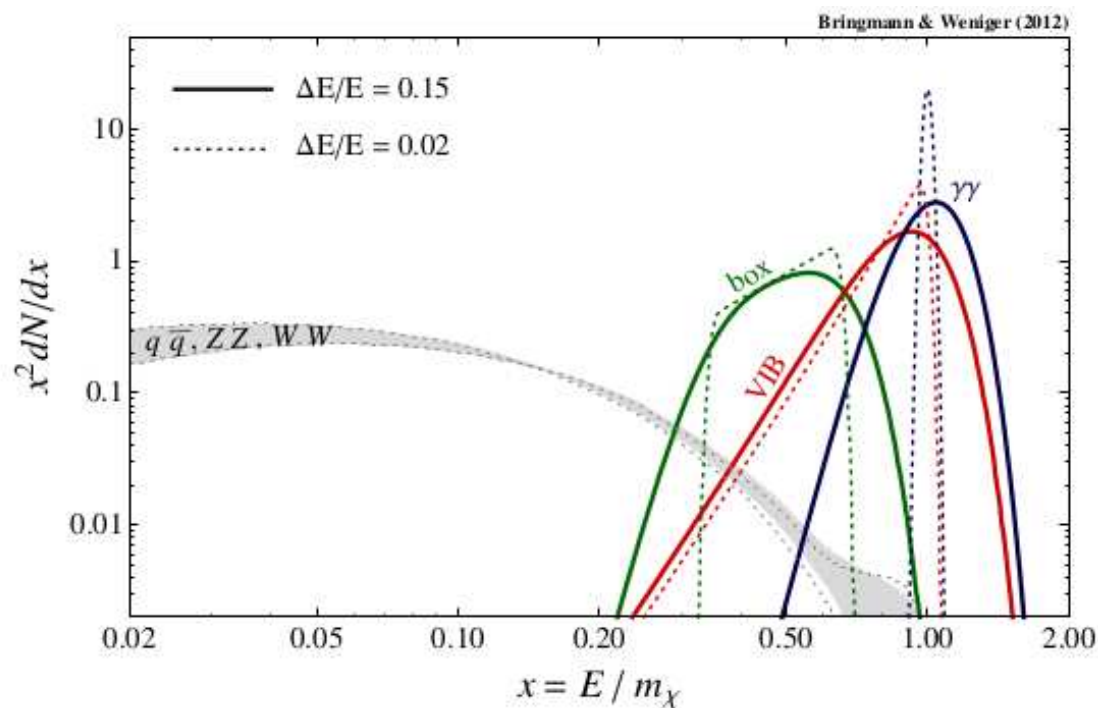
Nowa jakość w badaniach UHECE: detektory są stosunkowo tanie, odporne na warunki, pracują w dzień i w nocy, można budować bardzo duże układy detekcyjne...

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



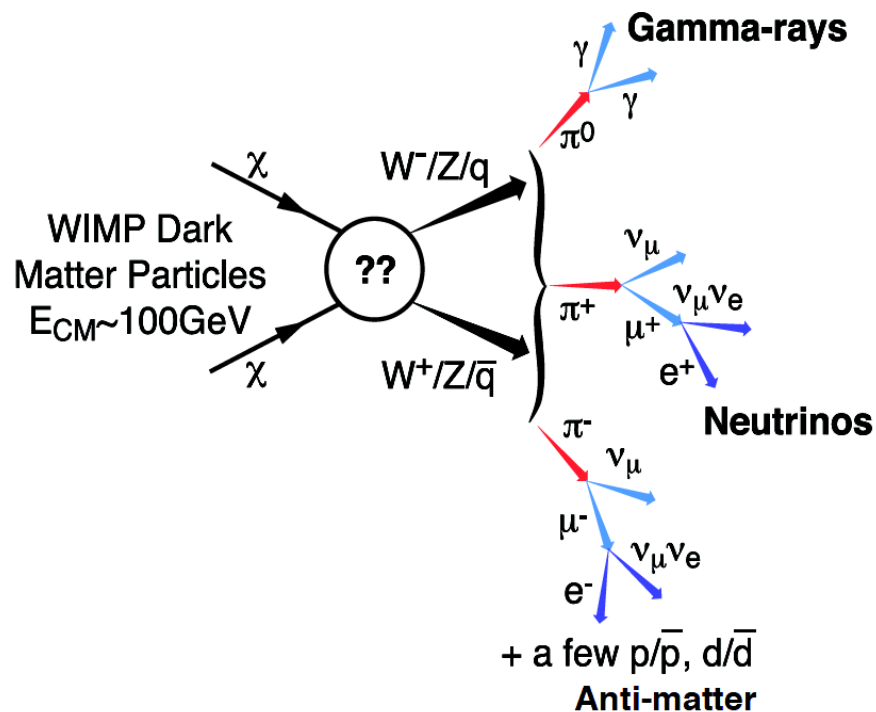
Pierwotne promieniowanie γ

- 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 $E = m_\chi$

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 π^\pm)

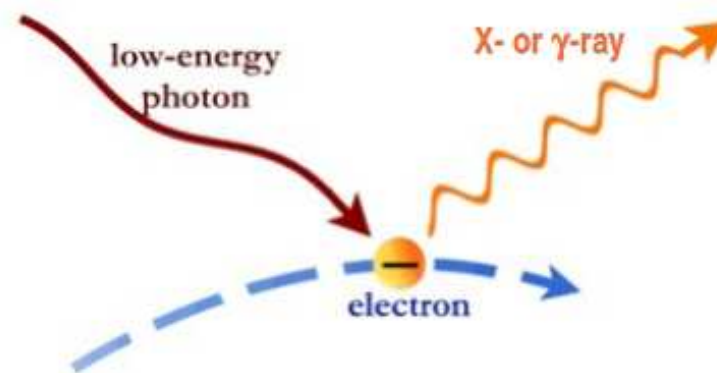
Promieniowanie kosmiczne

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

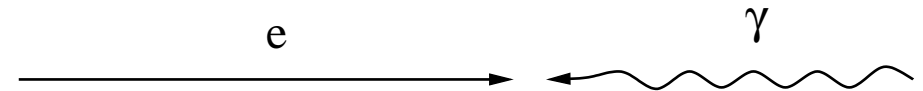
W rozpraszaniu na spoczywającym elektronie **najniższą energię** będzie miał foton rozproszony **“do tyłu”** ($\cos \theta = -1$):

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

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**:

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

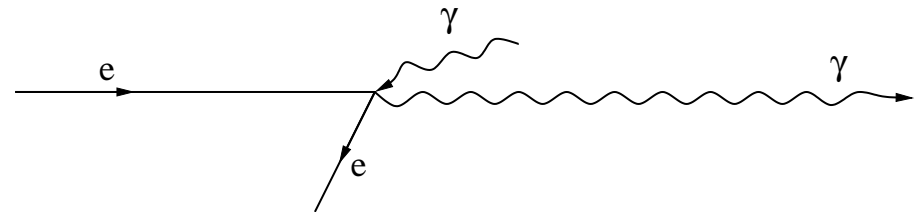
Wracając do **układu laboratoryjnego**:
(transformacja taka sama, bo pęd foton
zmienił kierunek)

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

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.



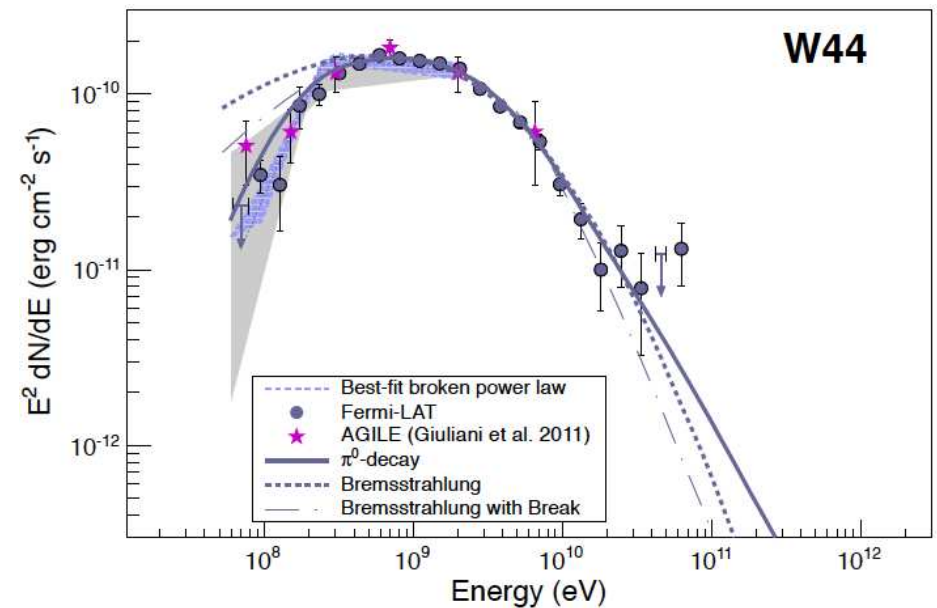
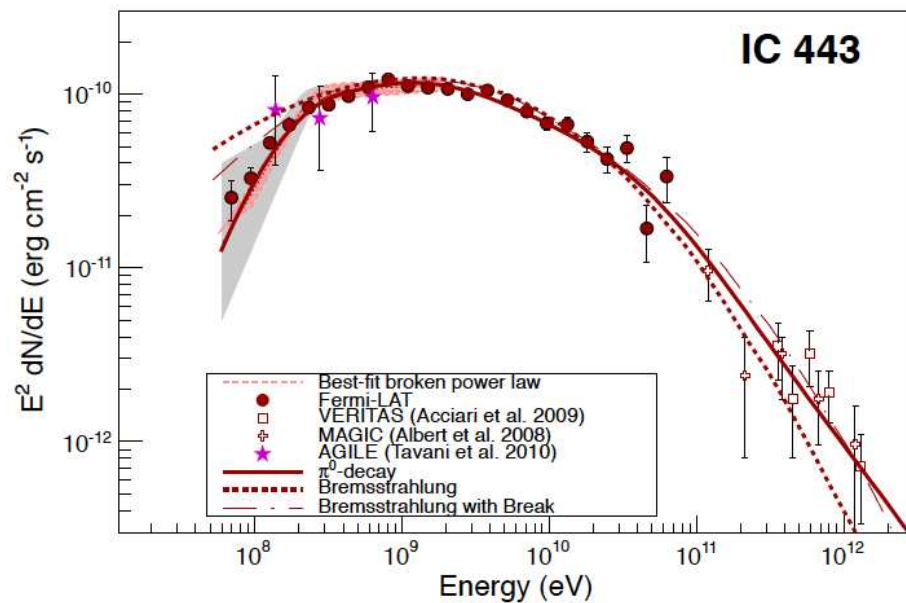
Przykład: dla $E_e = 250\text{GeV}$ i $h\nu = 1\text{eV}$
 $h\nu' \approx 200\text{GeV}$

Promieniowanie kosmiczne

Rozpady π^0

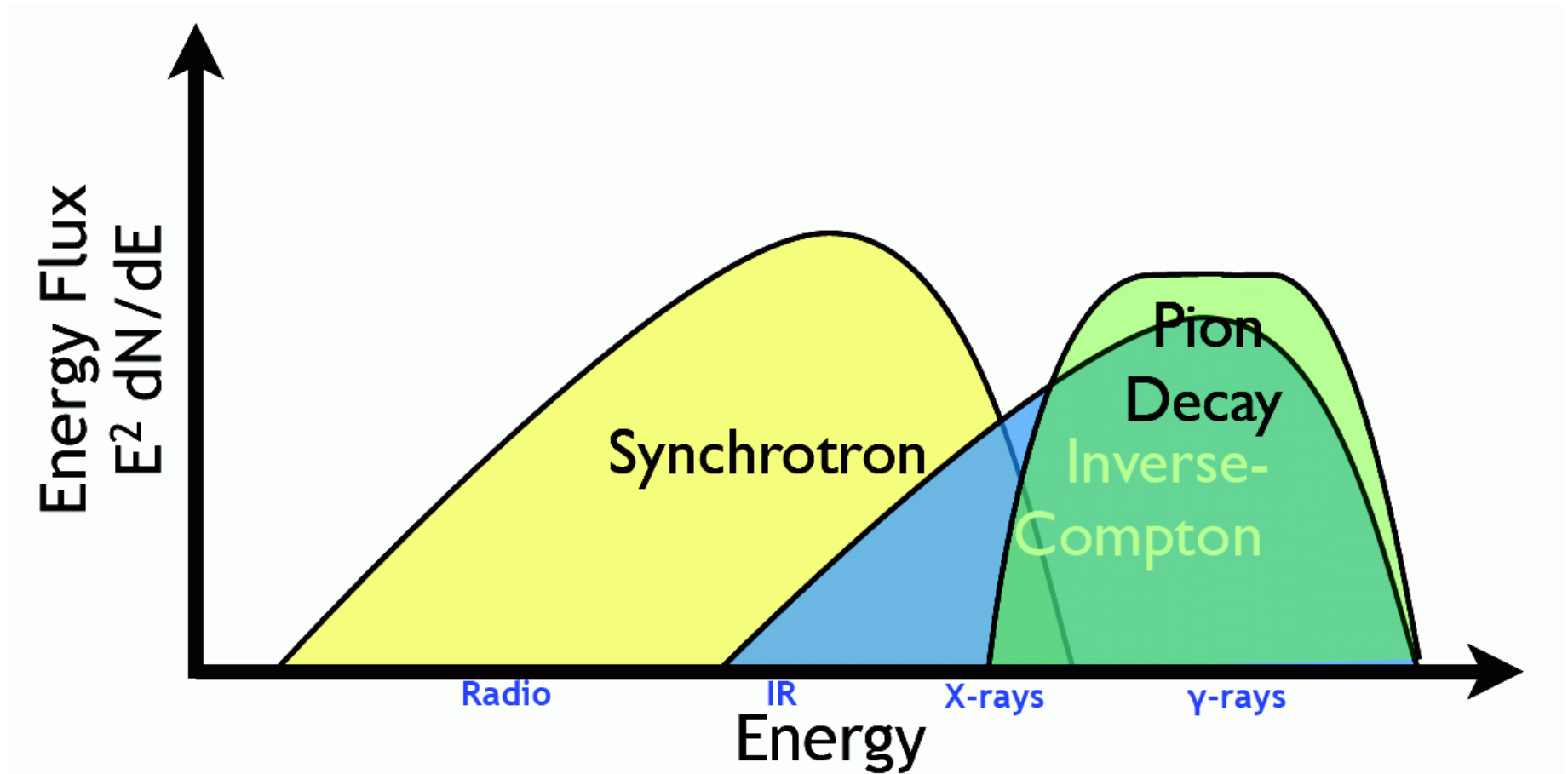
W oddziaływaniach hadronów promieniowania kosmicznego z materią międzygwiazdą (głównie zderzenie pp) produkowane są też licznie π^0

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



Promieniowanie gamma

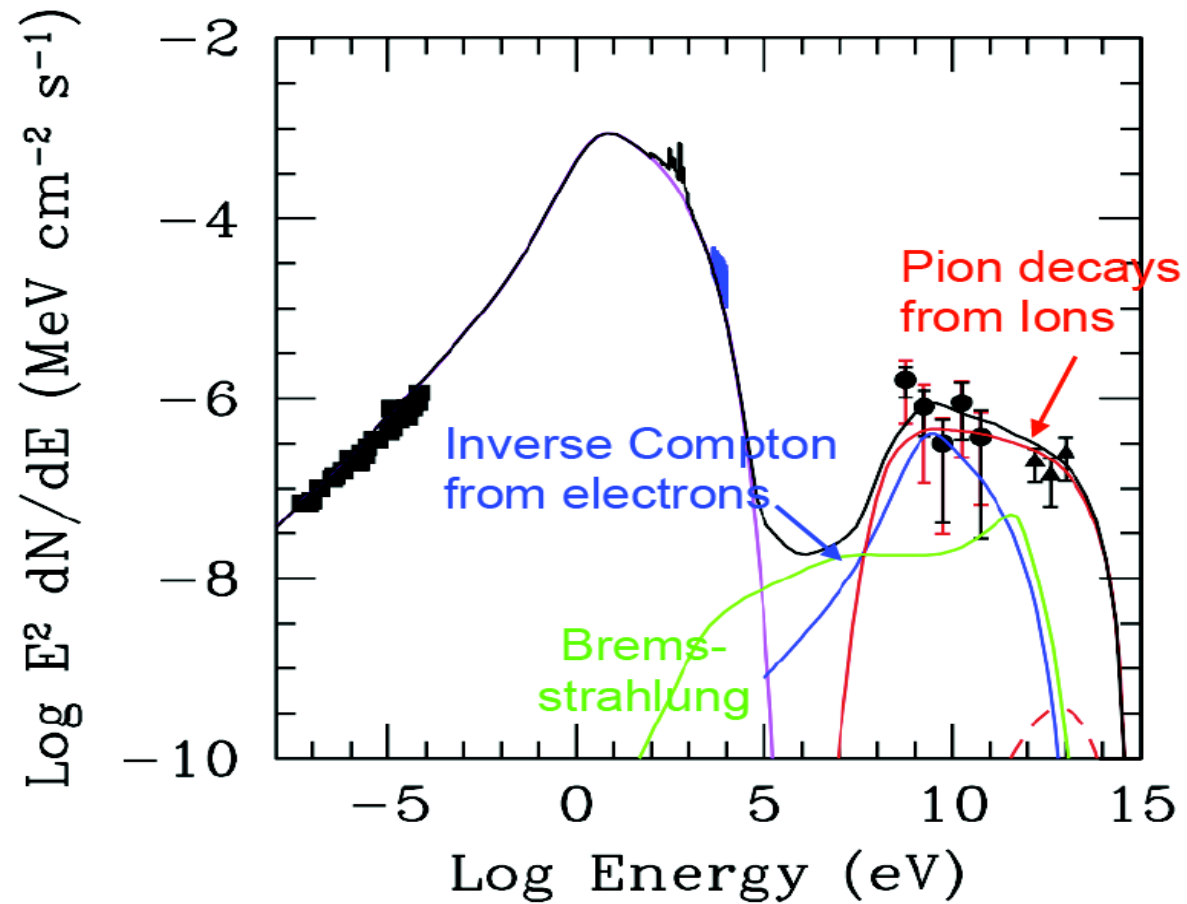
Oczekiwane widmo



Promieniowanie gamma

Tycho SNR

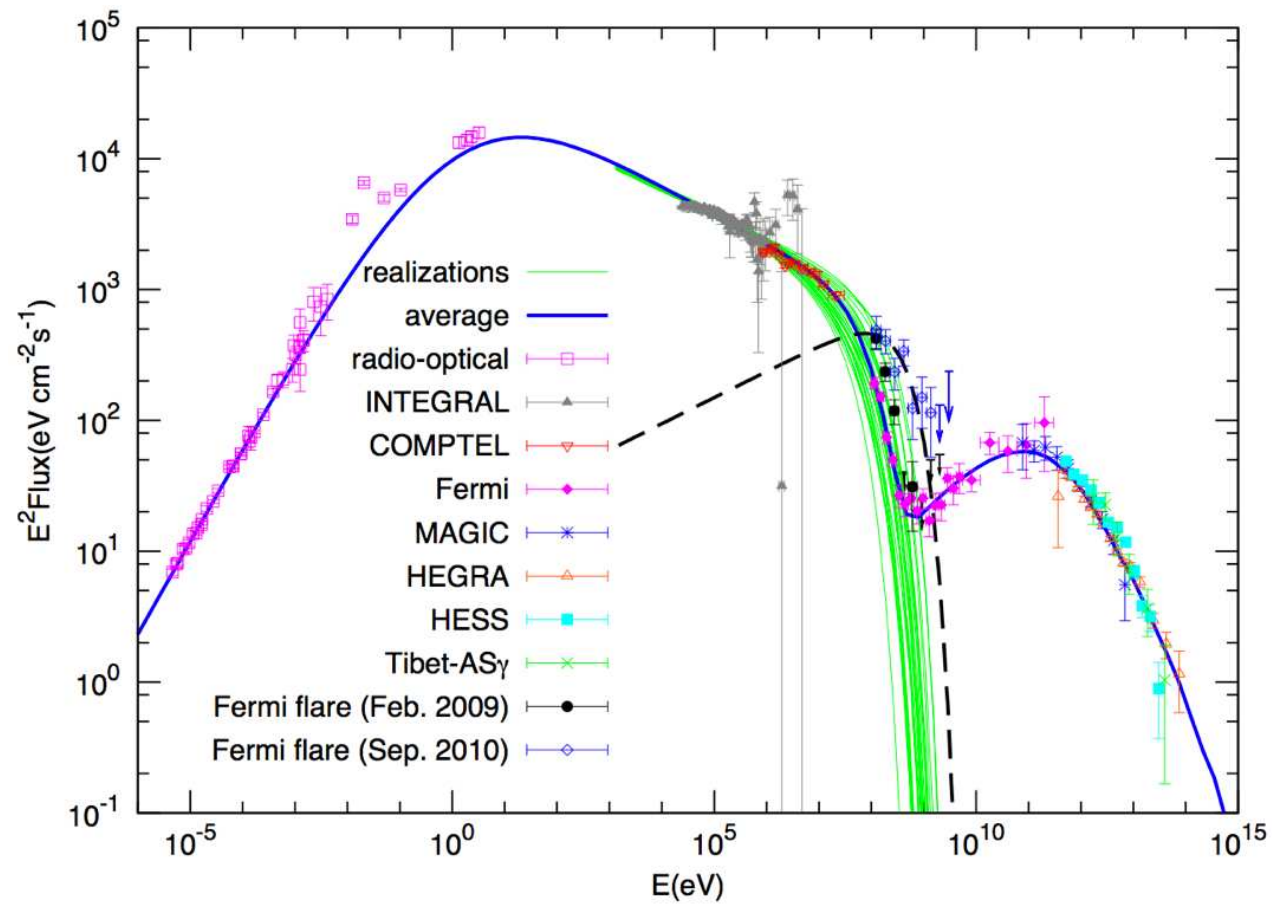
Widmo rejestrowanego promieniowania gamma



Promieniowanie gamma

Mgławica Kraba

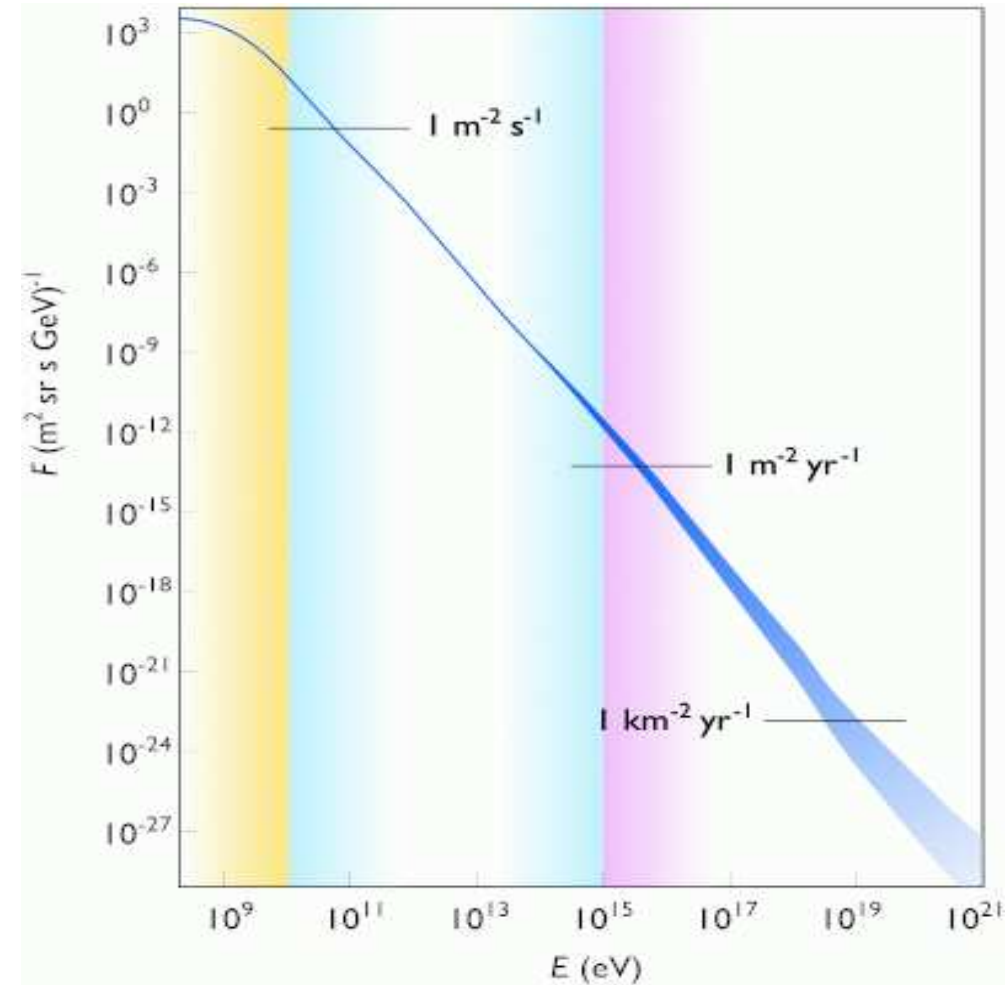
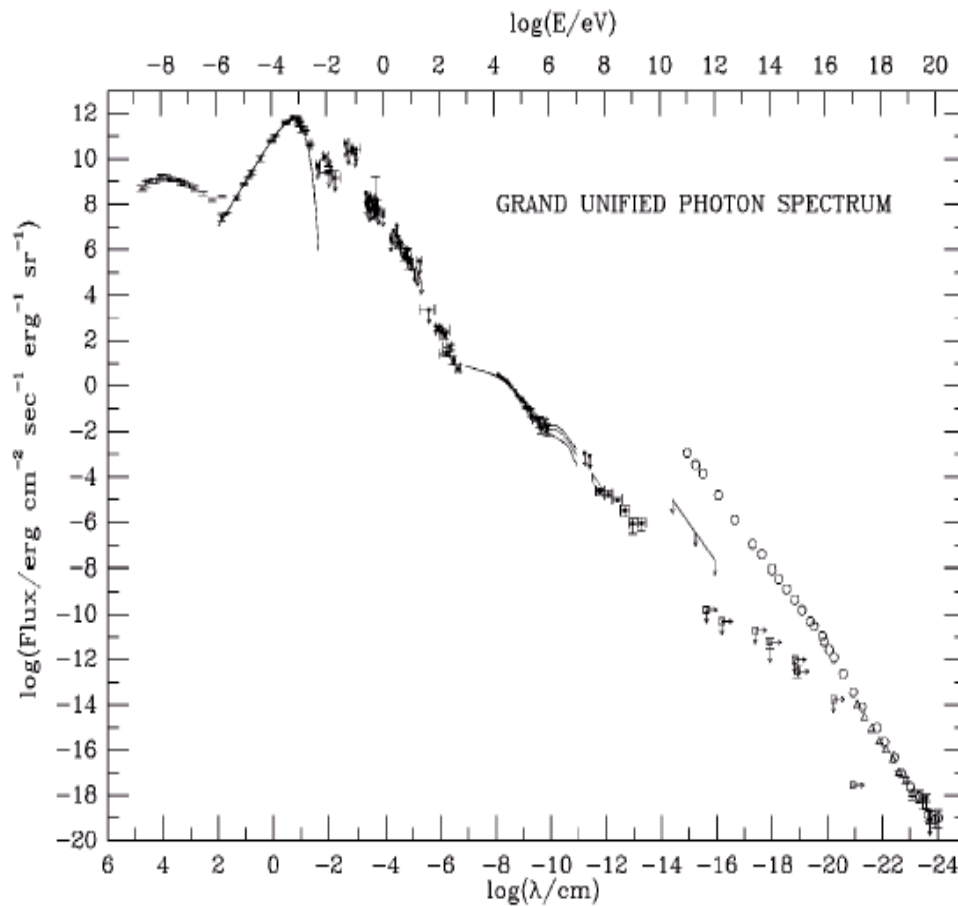
Widmo rejestrowanego promieniowania gamma



Promieniowanie gamma

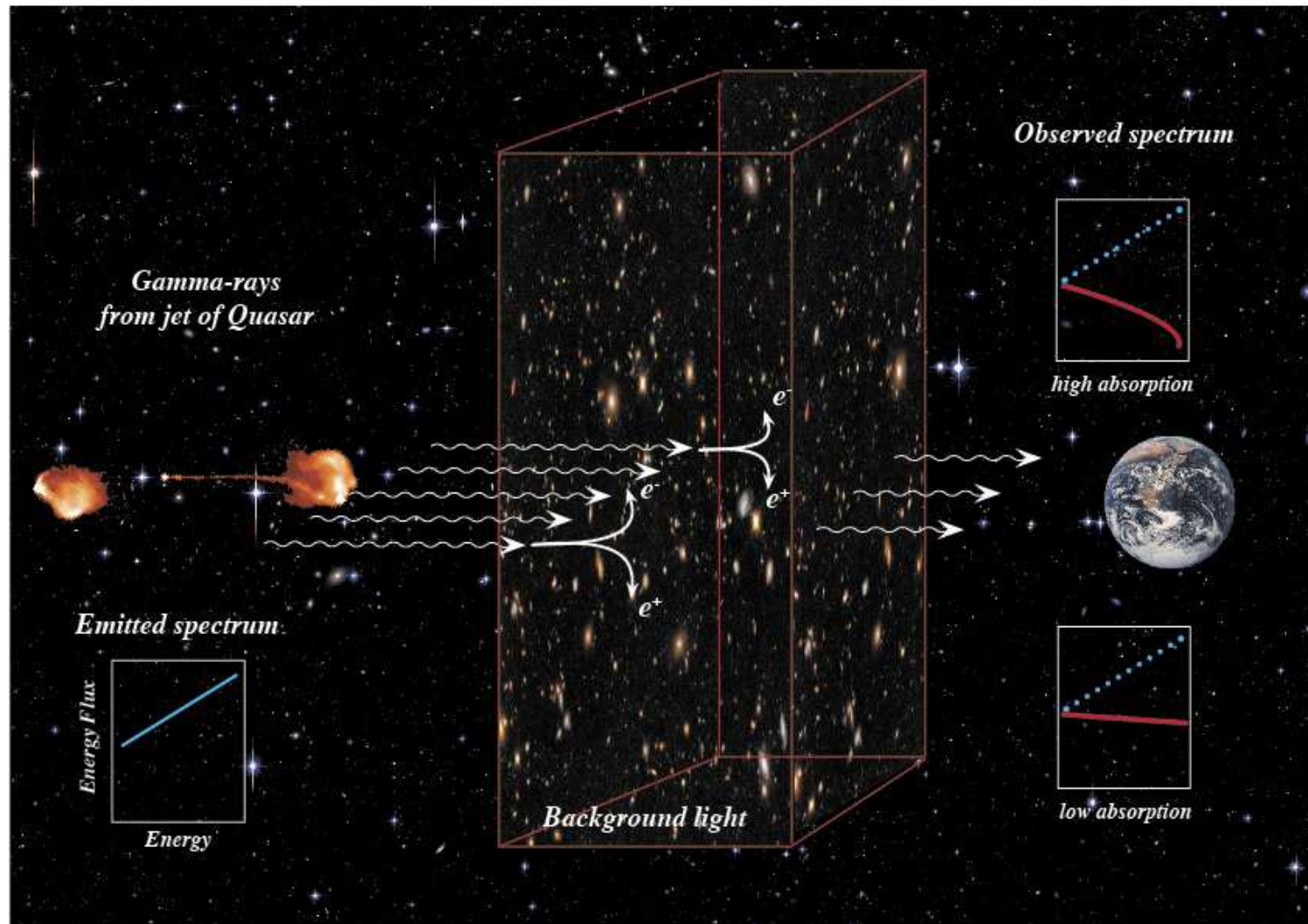
Porównanie

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



Promieniowanie gamma

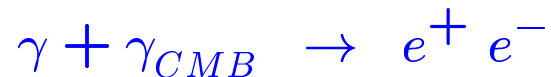
Pochłanianie



Promieniowanie gamma

Pochłanianie

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



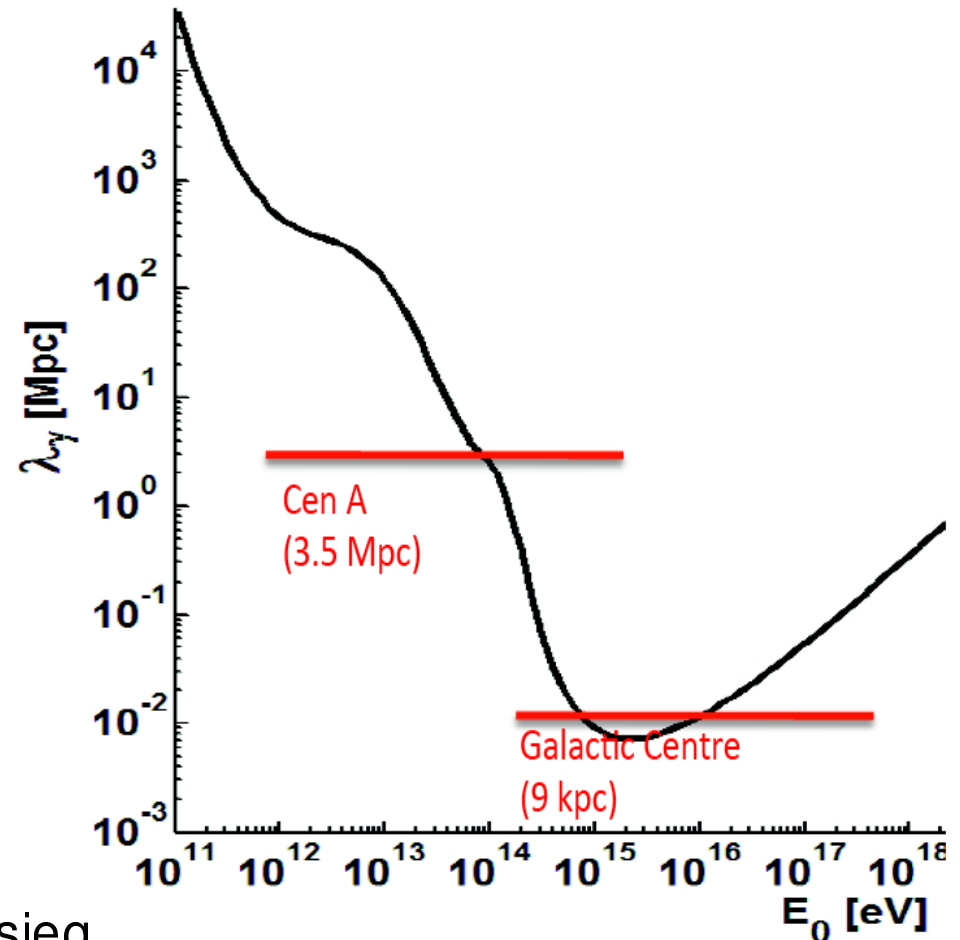
Średnia energia $E_{CMB} \approx 0.0002 \text{ eV}$

\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.

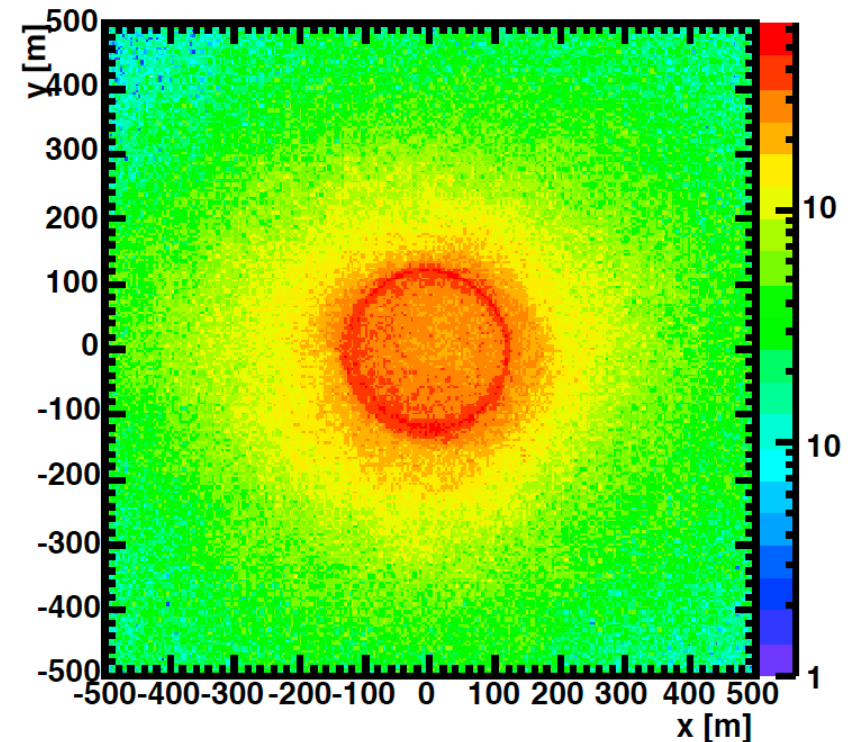
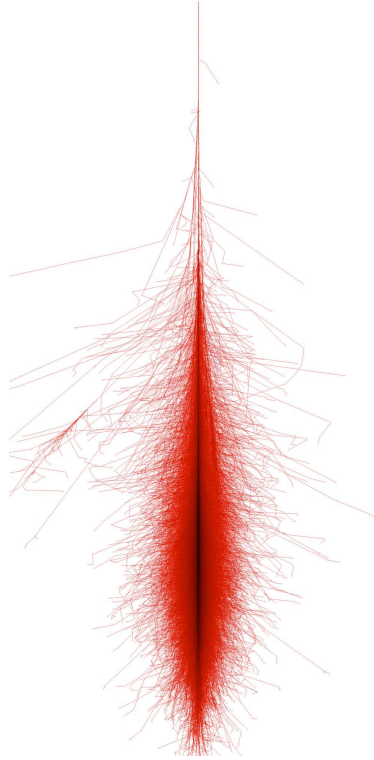
Promieniowanie gamma

Promieniowanie Czerenkowa

Fotony wywołują w atmosferze kaskadę elektromagnetyczną. Elektrony i pozytony kaskady są źródłem promieniowania Czerenkowa w ultrafiolecie (300–550 nm)

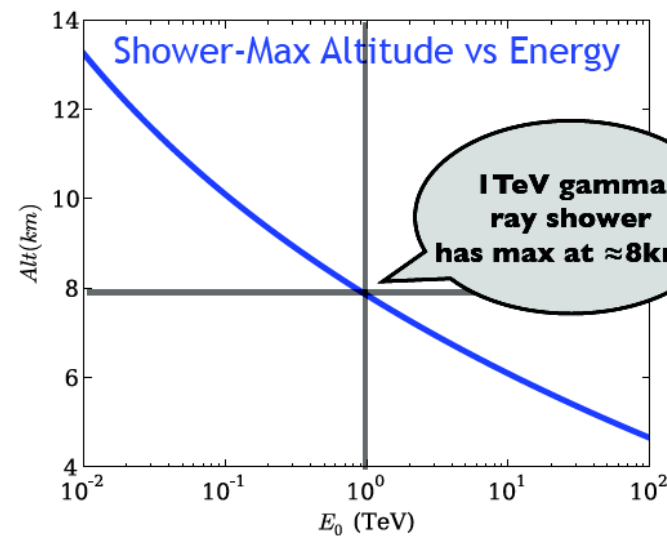
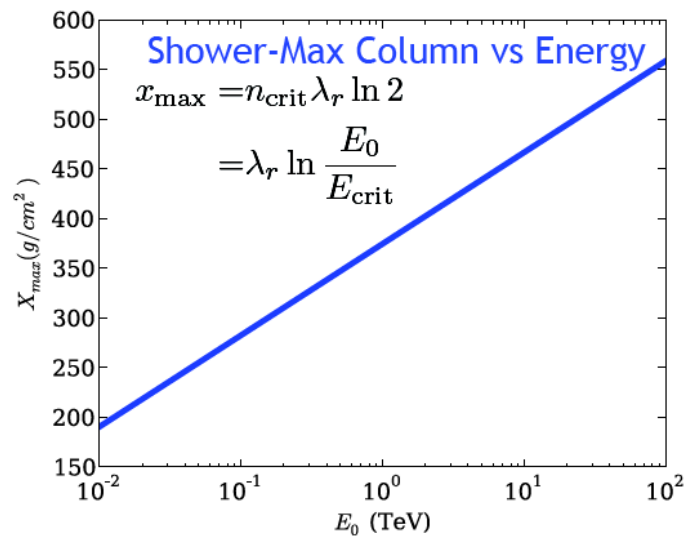
Podobnie jak w przypadku składowej E-M wielkich pęków atmosferycznych

Oświetlenie powierzchni Ziemi



Promieniowanie gamma

Detekcja



Foton o energii 1 TeV inicjuje kaskadę około 10^5 par e^+e^- , maksimum na wysokości około 8-10 km...

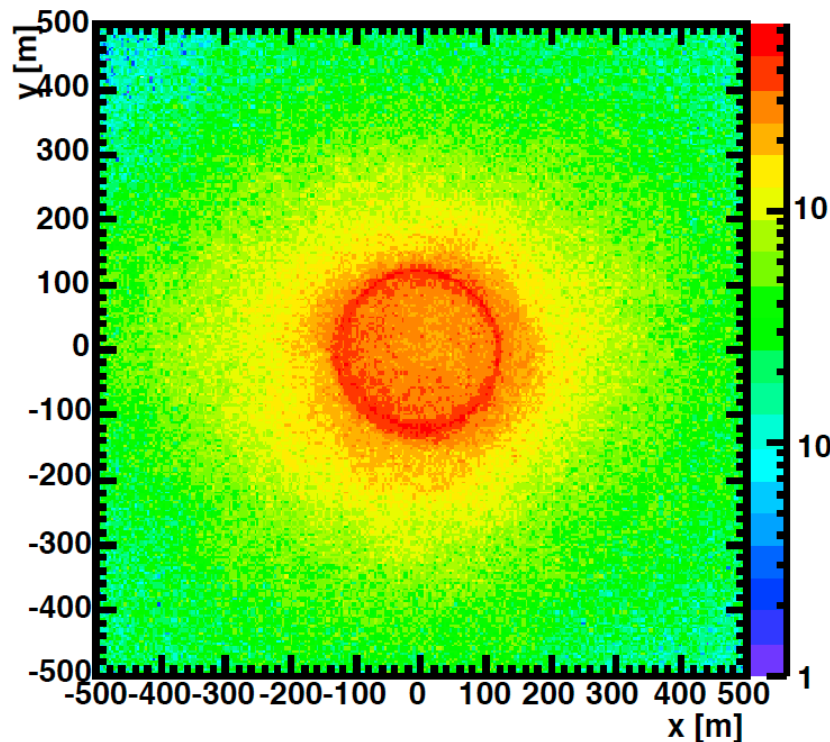
Promieniowanie Czerenkowa emitowane przez taką kaskadę oświetla obszar o promieniu ok. 100 m, gęstość fotonów UV ok. $100/\text{m}^2$

Impuls promieniowania UV trwa kilka nanosekund!

Promieniowanie gamma

Detekcja

Oświetlenie powierzchni Ziemi



Promieniowanie Czerenkowa można mierzyć rozmieszczając na powierzchni Ziemi fotopowielacze (np. eksperyment TUNKA).

Jednak wtedy mamy:

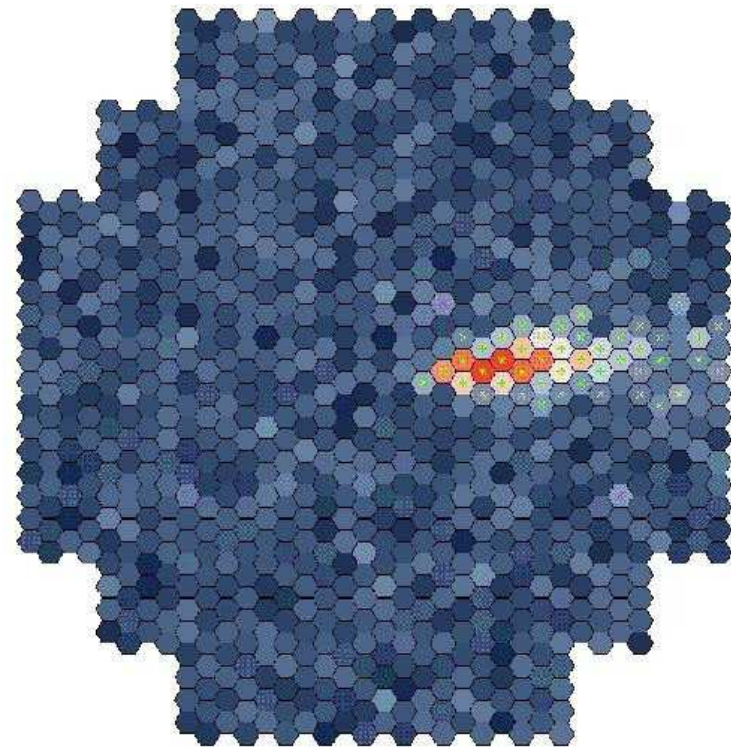
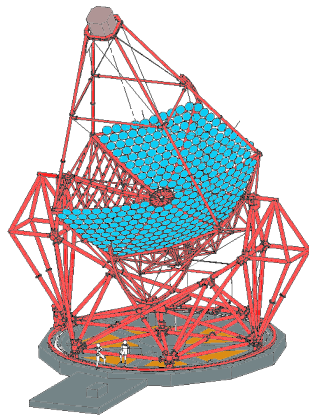
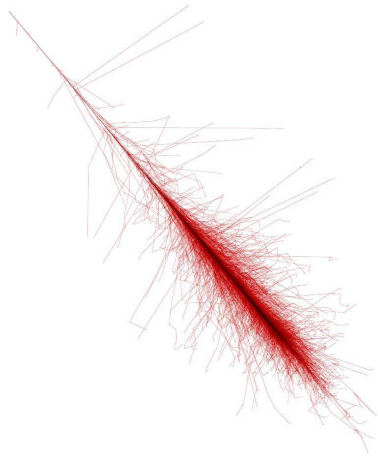
- ograniczoną dokładność pomiaru kierunku
- duże tło od wielkich pęków atmosferycznych (> 1000 razy większy strumień).

Znacznie większą dokładność pomiaru uzyskujemy ustawiając na Ziemi **teleskop promieniowania Czerenkowa**

Promieniowanie gamma

Detekcja

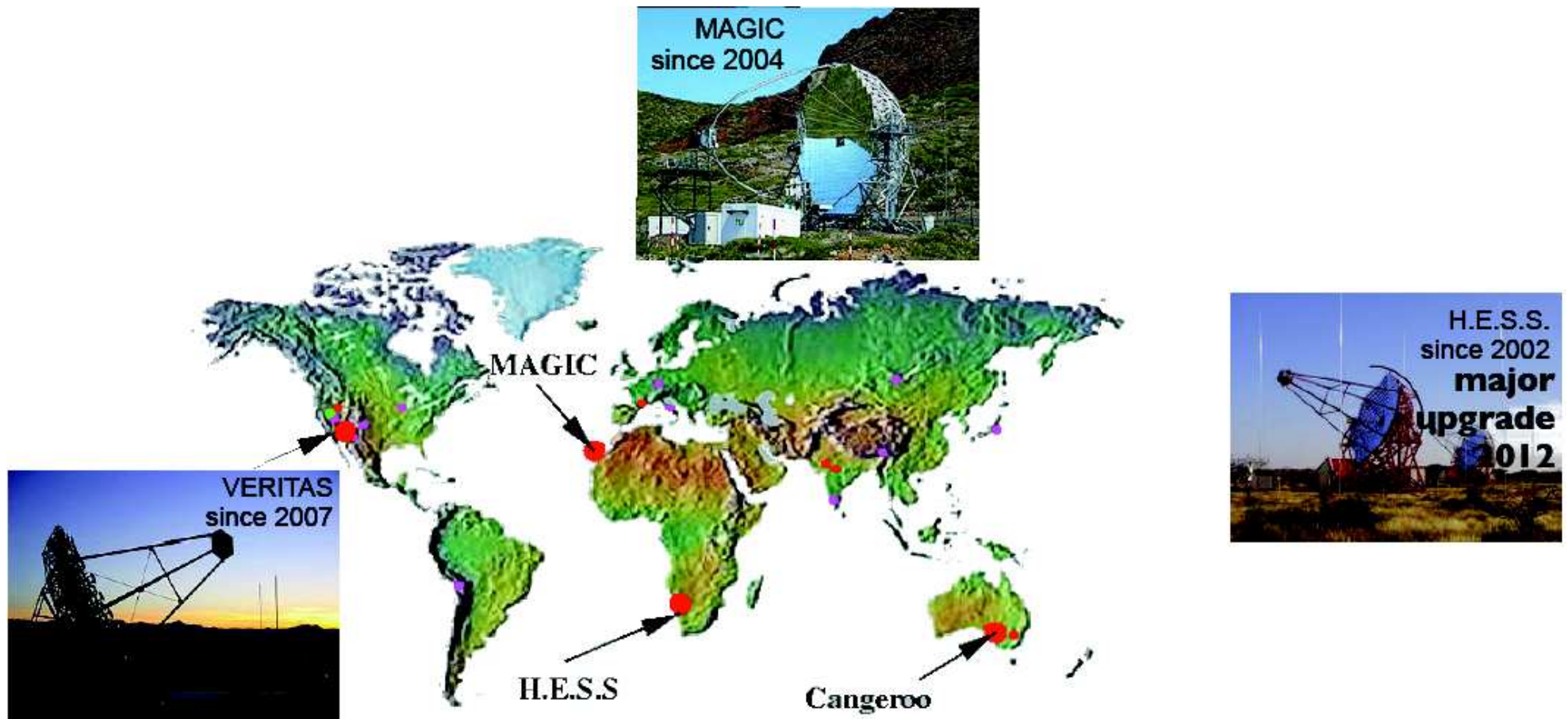
Jeśli teleskop znajdzie się w polu oświetlonym przez kaskadę, zrobi jej “zdjęcie”



Promieniowanie gamma

Instrumenty

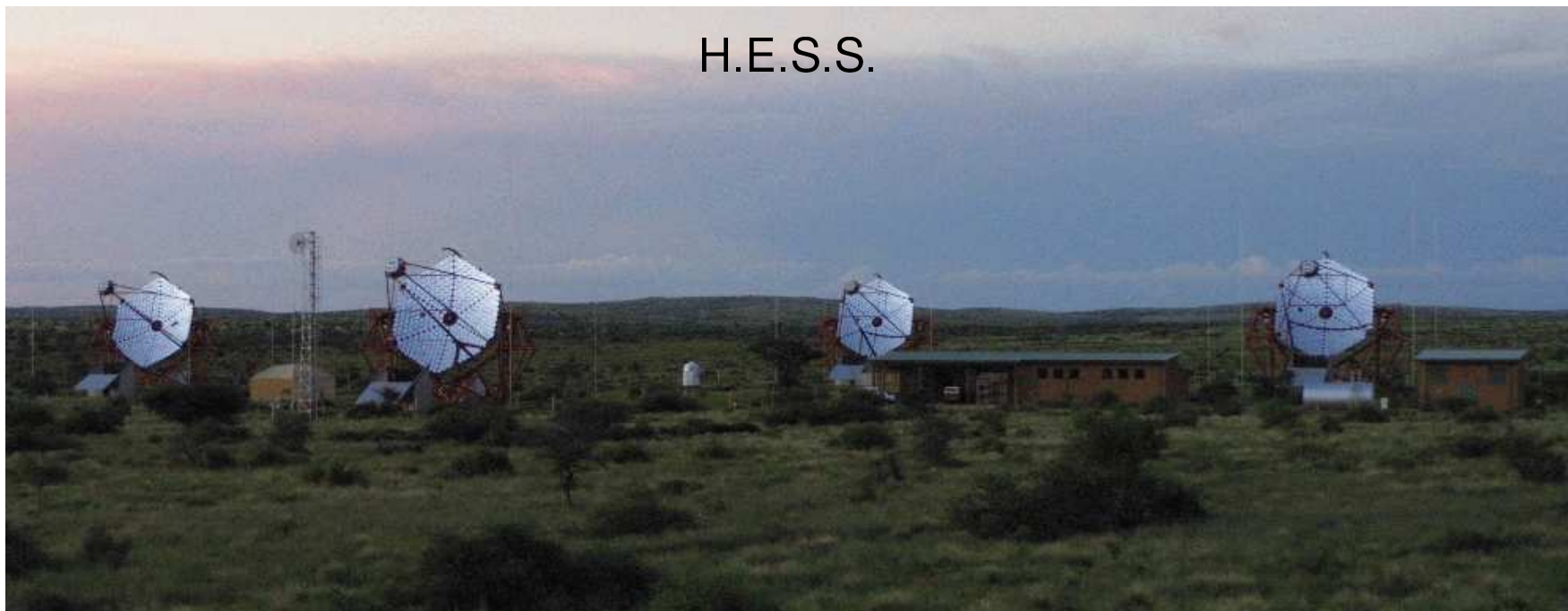
Naziemne detektory promieniowania gamma najwyższych energii



Teleskopy Czerenkowa

Atmospheric Cherenkov Telescopes (ACT)

Instr.	Tels. #	Tel. A (m ²)	FoV (°)	Tot A (m ²)	Thresh. (TeV)	PSF (°)	Sens. (%Crab)
H.E.S.S.	4	107	5	428	0.1	0.06	0.7
MAGIC	2	236	3.5	472	0.05(0.03)	0.06	0.8
VERITAS	4	106	4	424	0.1	0.07	0.7



Teleskopy Czerenkowa

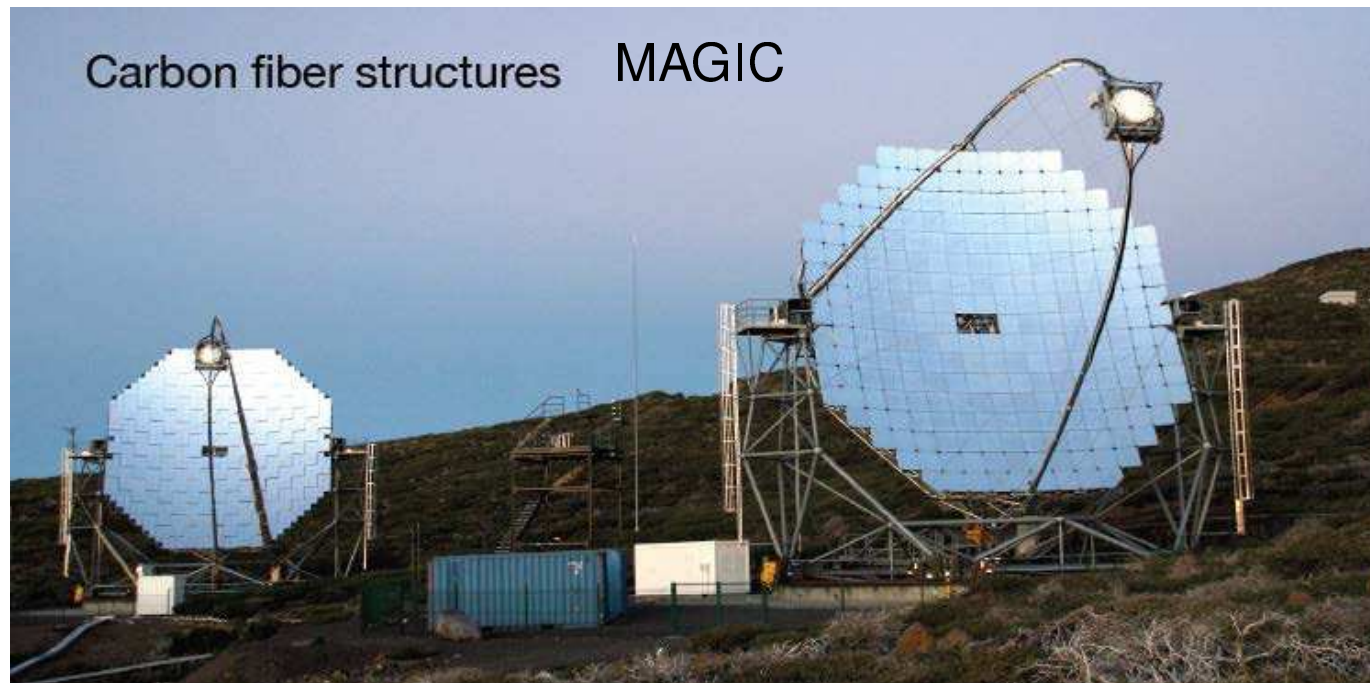
Atmospheric Cherenkov Telescopes (ACT)



Teleskopy Czerenkowa

Atmospheric Cherenkov Telescopes (ACT)

Instr.	Tels. #	Tel. A (m ²)	FoV (°)	Tot A (m ²)	Thresh. (TeV)	PSF (°)	Sens. (%Crab)
H.E.S.S.	4	107	5	428	0.1	0.06	0.7
MAGIC	2	236	3.5	472	0.05(0.03)	0.06	0.8
VERITAS	4	106	4	424	0.1	0.07	0.7



Teleskopy Czerenkowa

Atmospheric Cherenkov Telescopes (ACT)

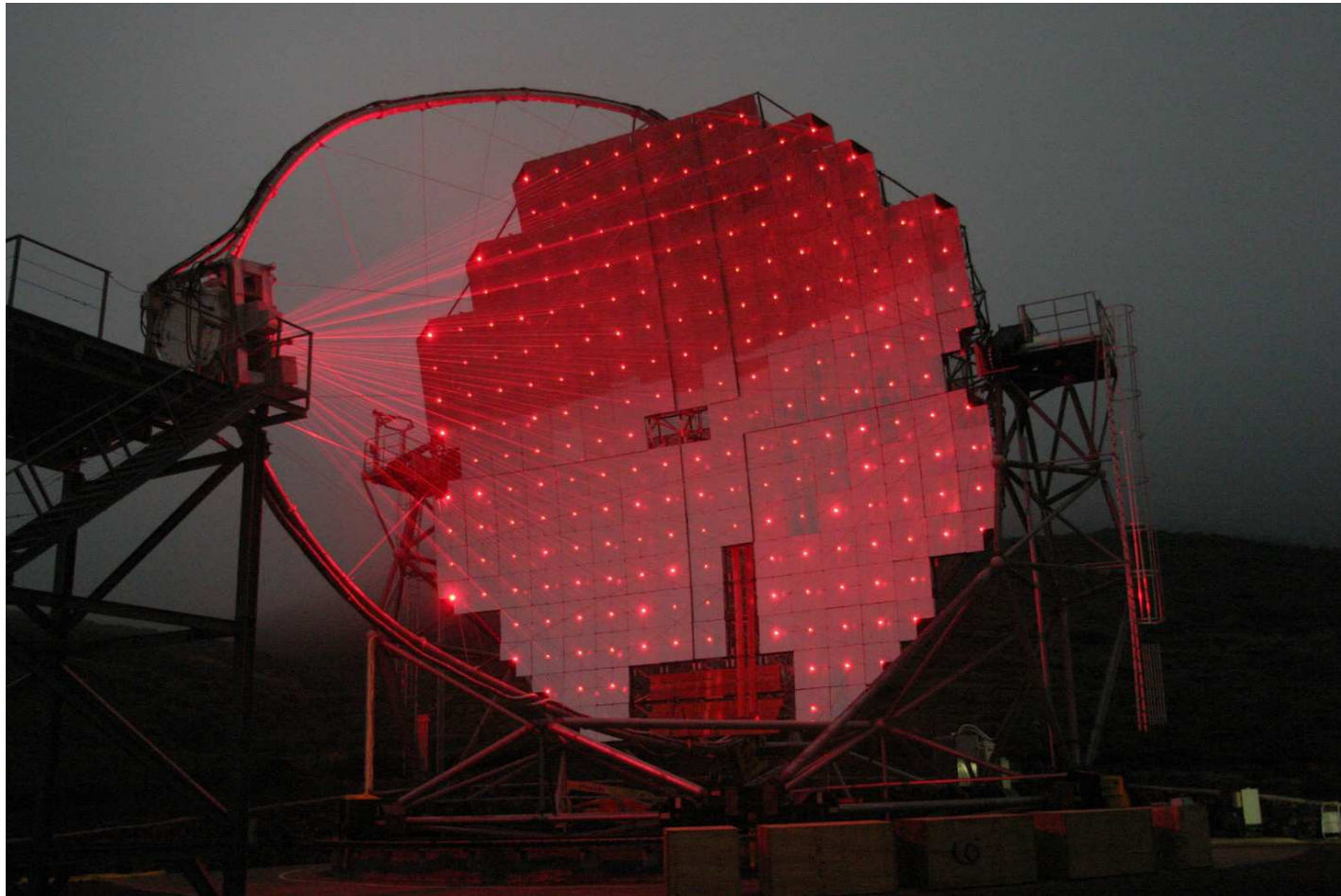
Instr.	Tels. #	Tel. A (m ²)	FoV (°)	Tot A (m ²)	Thresh. (TeV)	PSF (°)	Sens. (%Crab)
H.E.S.S.	4	107	5	428	0.1	0.06	0.7
MAGIC	2	236	3.5	472	0.05(0.03)	0.06	0.8
VERITAS	4	106	4	424	0.1	0.07	0.7



Teleskopy Czerenkowa

MAGIC

Laserowa kalibracja systemu pozycjonowania “aktywnych” luster teleskopu



Teleskopy Czerenkowa

MAGIC

Płaszczyzna ogniskowa teleskopu MAGIC, fotopowielacze i ich efektywność

