

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład IX

- Radiowa detekcja pęków atmosferycznych
- Kosmiczne promieniowanie gamma najwyższych energii
- ⇒ Teleskopy Czerenkowa i ich wyniki
- ⇒ Projekt CTA
- ⇒ Projekt HAWC

Wielkie pęki atmosferyczne

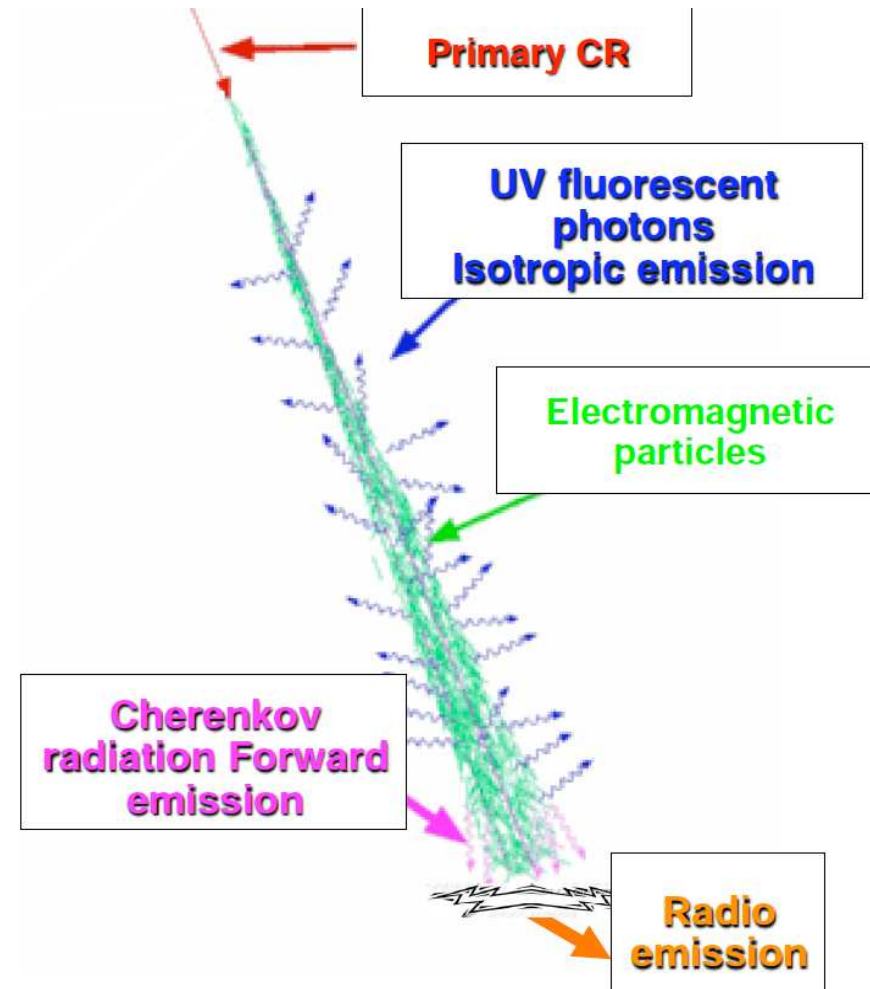
Metody detekcji

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...

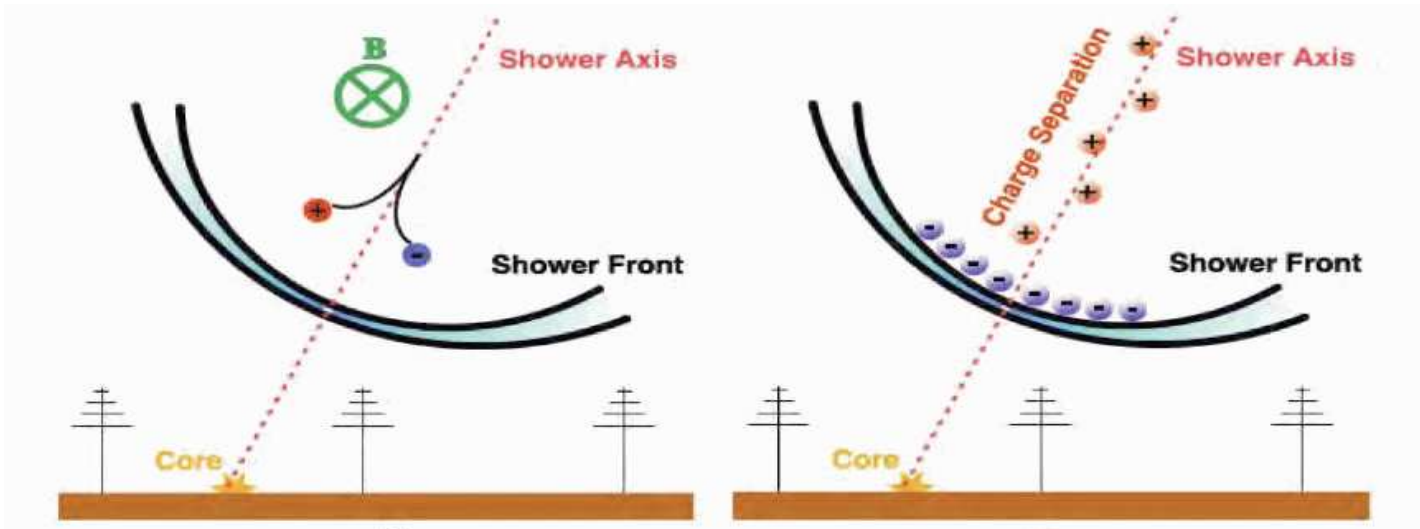
Dla dużych układów detekcyjnych koszt staje się bardzo istotnym czynnikiem...



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

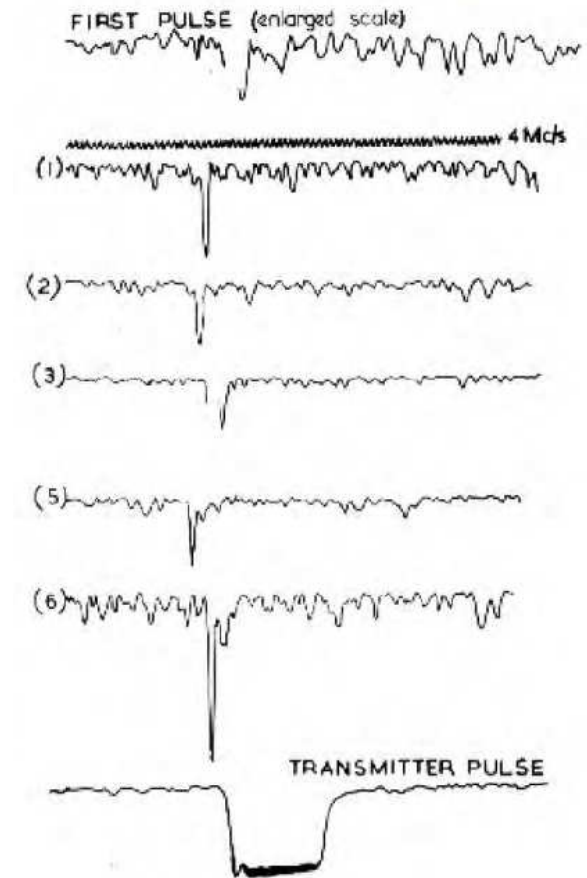
Emisja radiowa

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



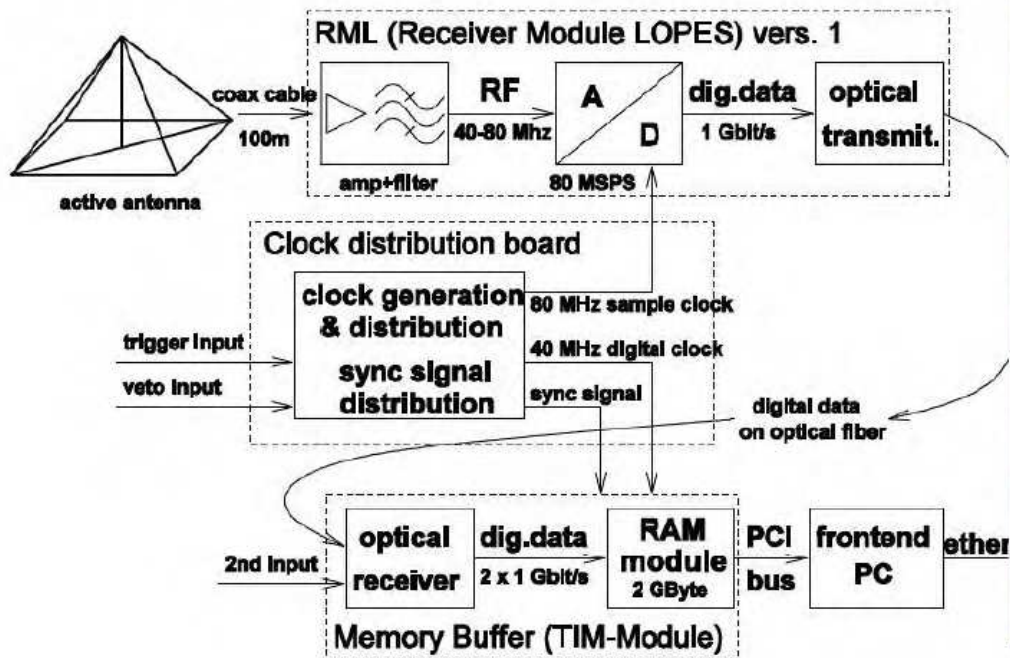
Jelley et al. (1965)

Wielkie pęki atmosferyczne

Detekcja radiowa

Zainteresowanie detekcją radiową ponownie na początku XXI wieku

Detektor LOPES zbudowany przy detektorze KASKADE (2003)



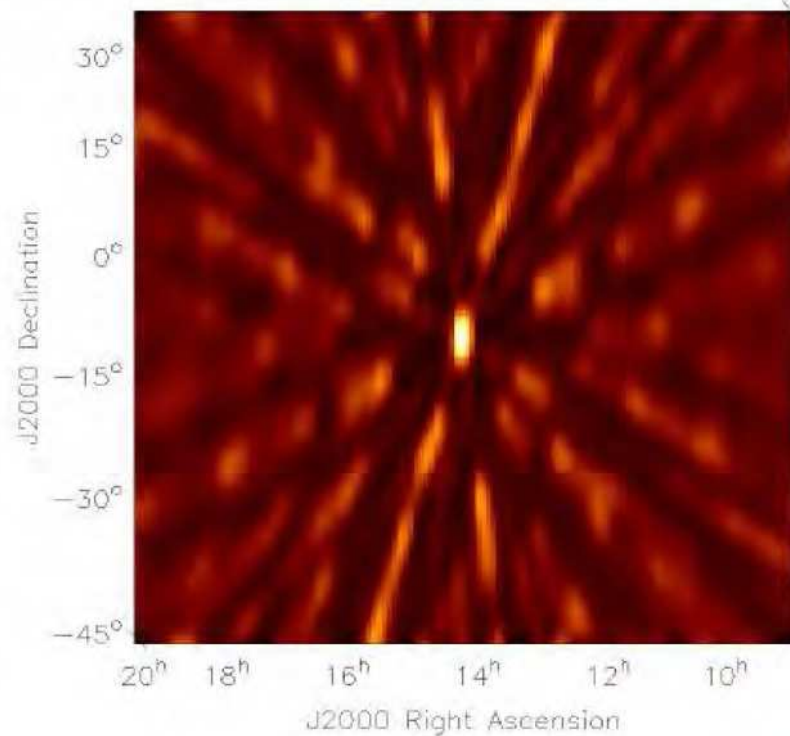
Detekcja radiowa

LOPES

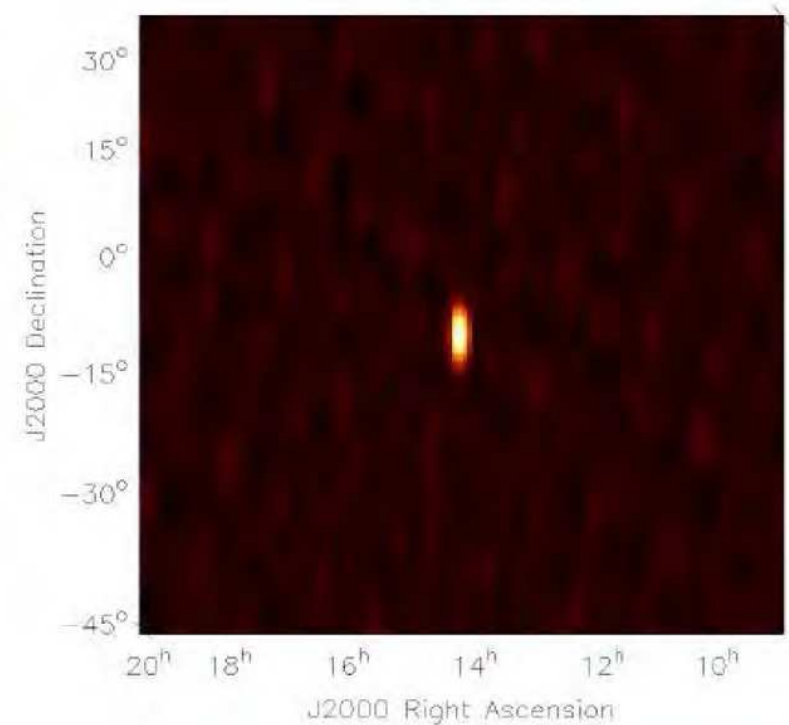
Przypadek wybuchu słonecznego mierzonego 8 antenami w paśmie 45-75 MHz

Rozkład pasujących kierunków:

Przed filtrowaniem



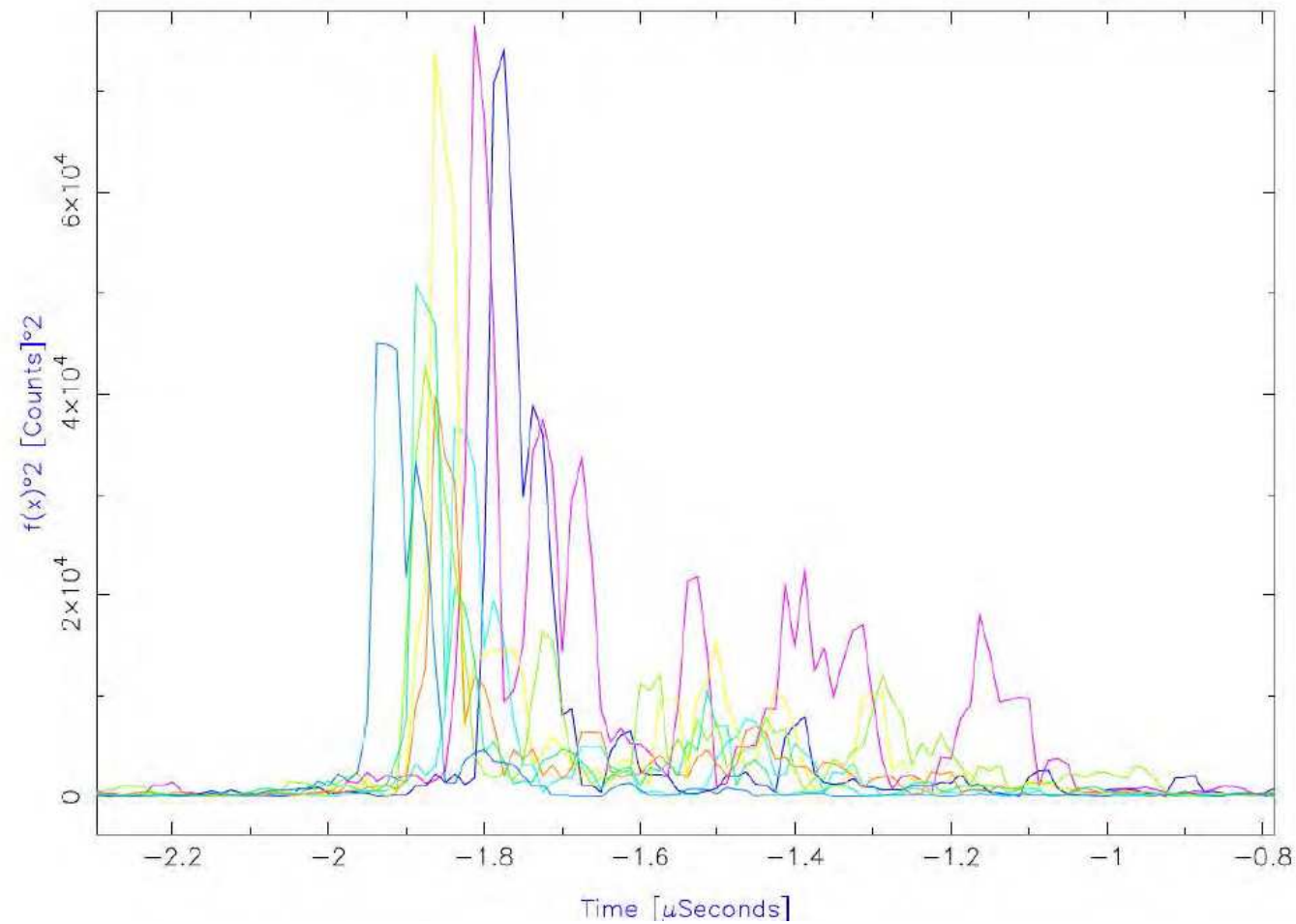
Po filtrowaniu



Detekcja radiowa

LOPES

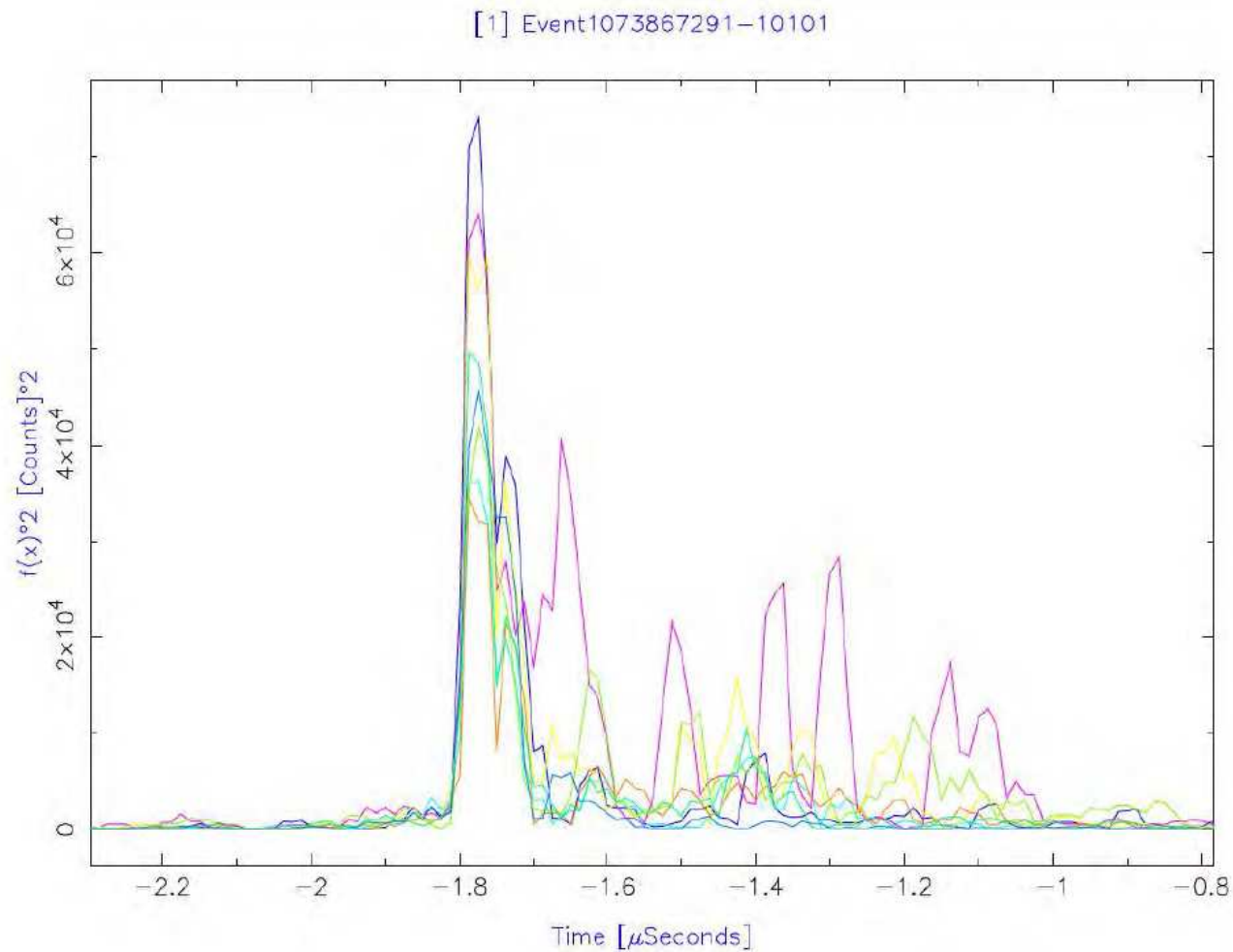
Przypadek mierzonej kaskady, przed dopasowaniem kierunku pęku:



Detekcja radiowa

LOPES

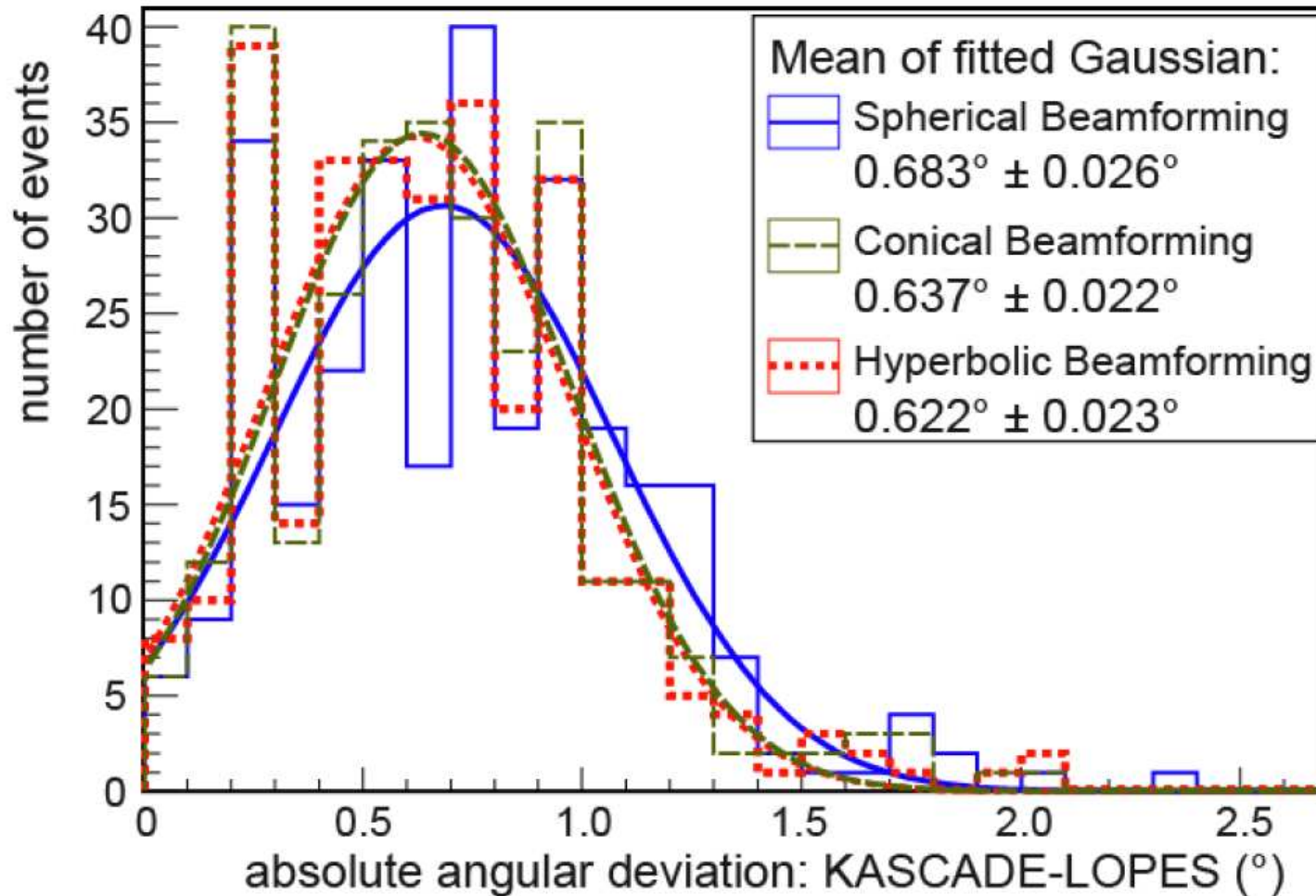
Przypadek mierzonej kaskady, po dopasowaniu kierunku pęku:



Detekcja radiowa

LOPES

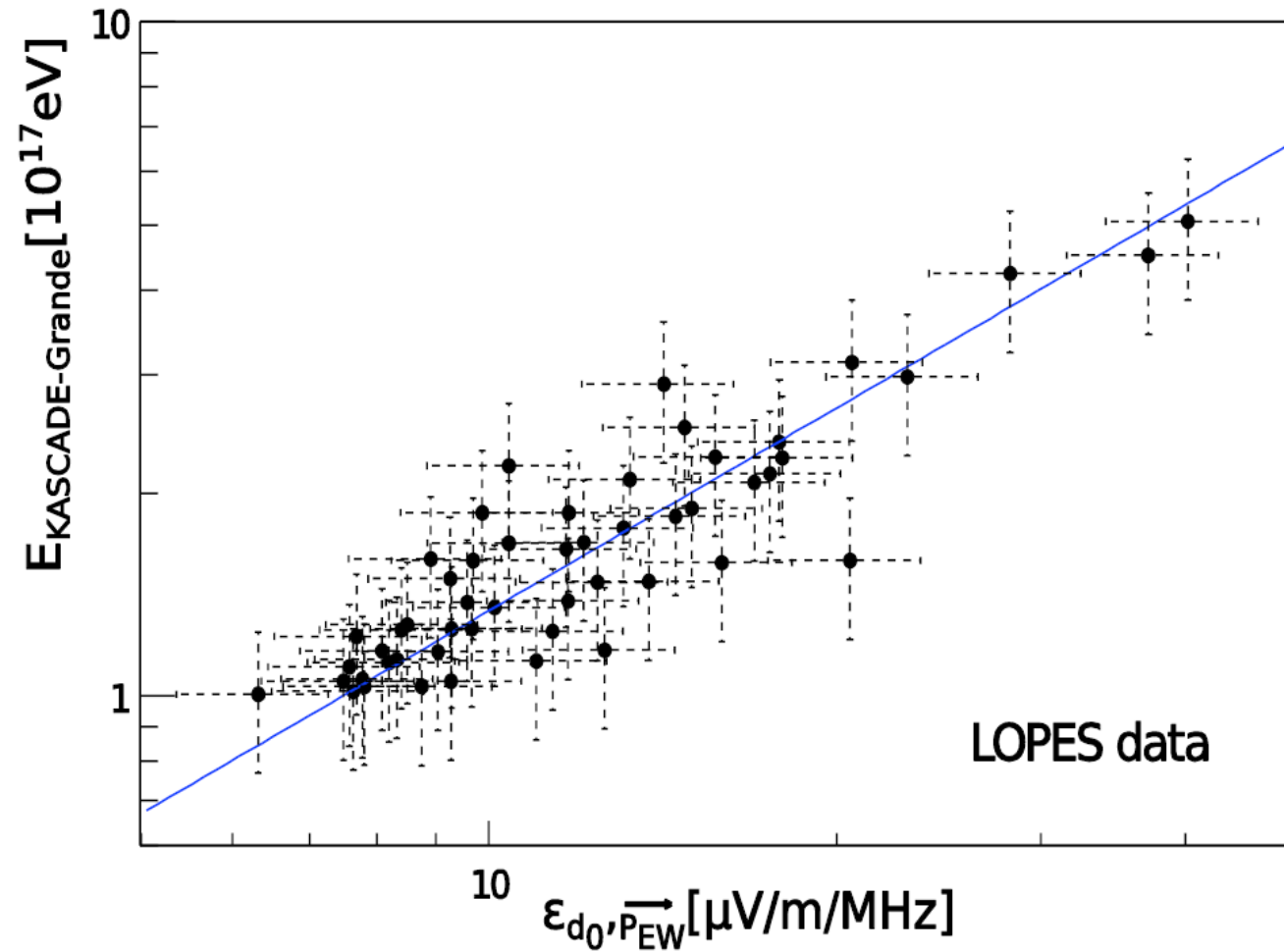
Dokładność wyznaczenia kierunku z porównania z detektorem KASCADE-Grande.



Detekcja radiowa

LOPES

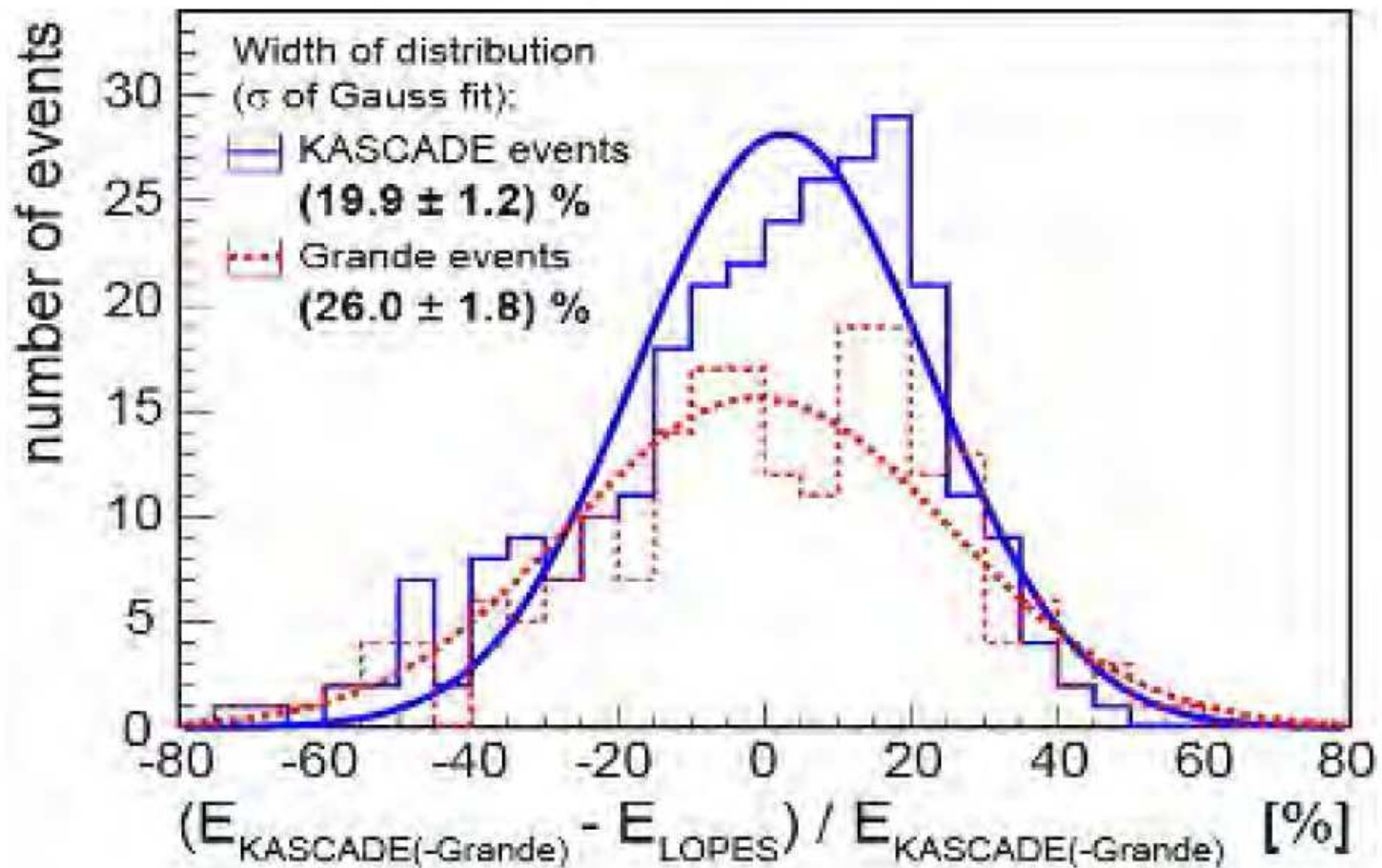
Dokładność wyznaczenia energii z porównania z detektorem KASCADE-Grande.

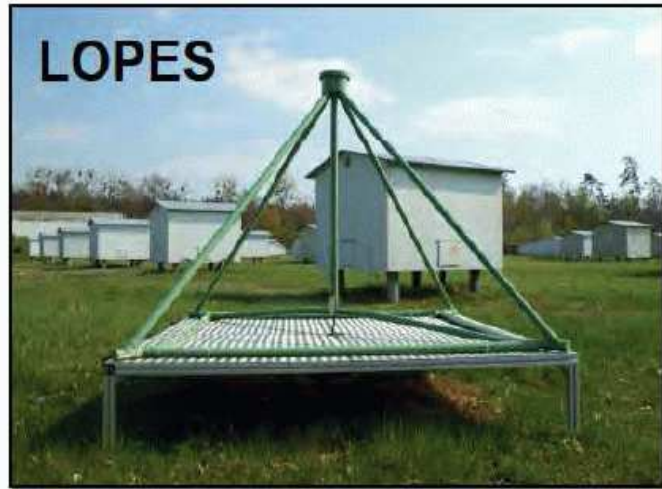


Detekcja radiowa

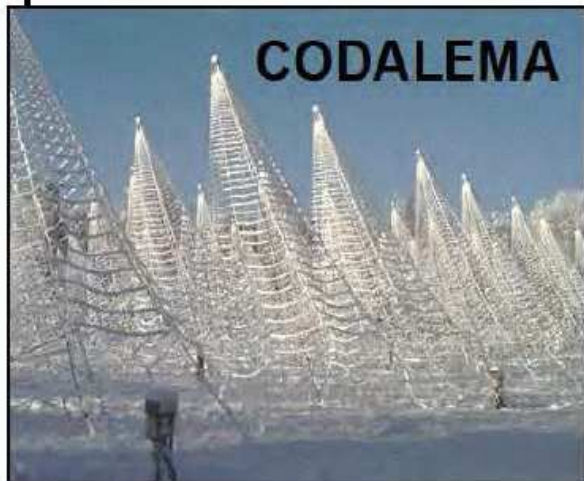
LOPES

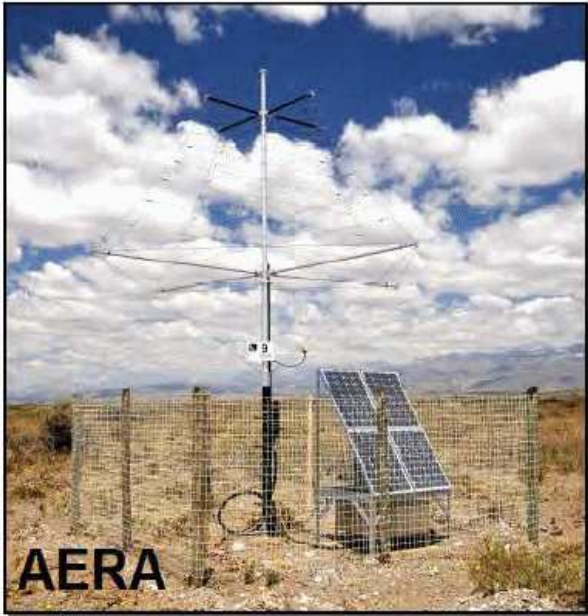
Dokładność wyznaczenia energii z porównania z detektorem KASCADE-Grande.





Falcke & Gorham propose „geosynchrotron approach“

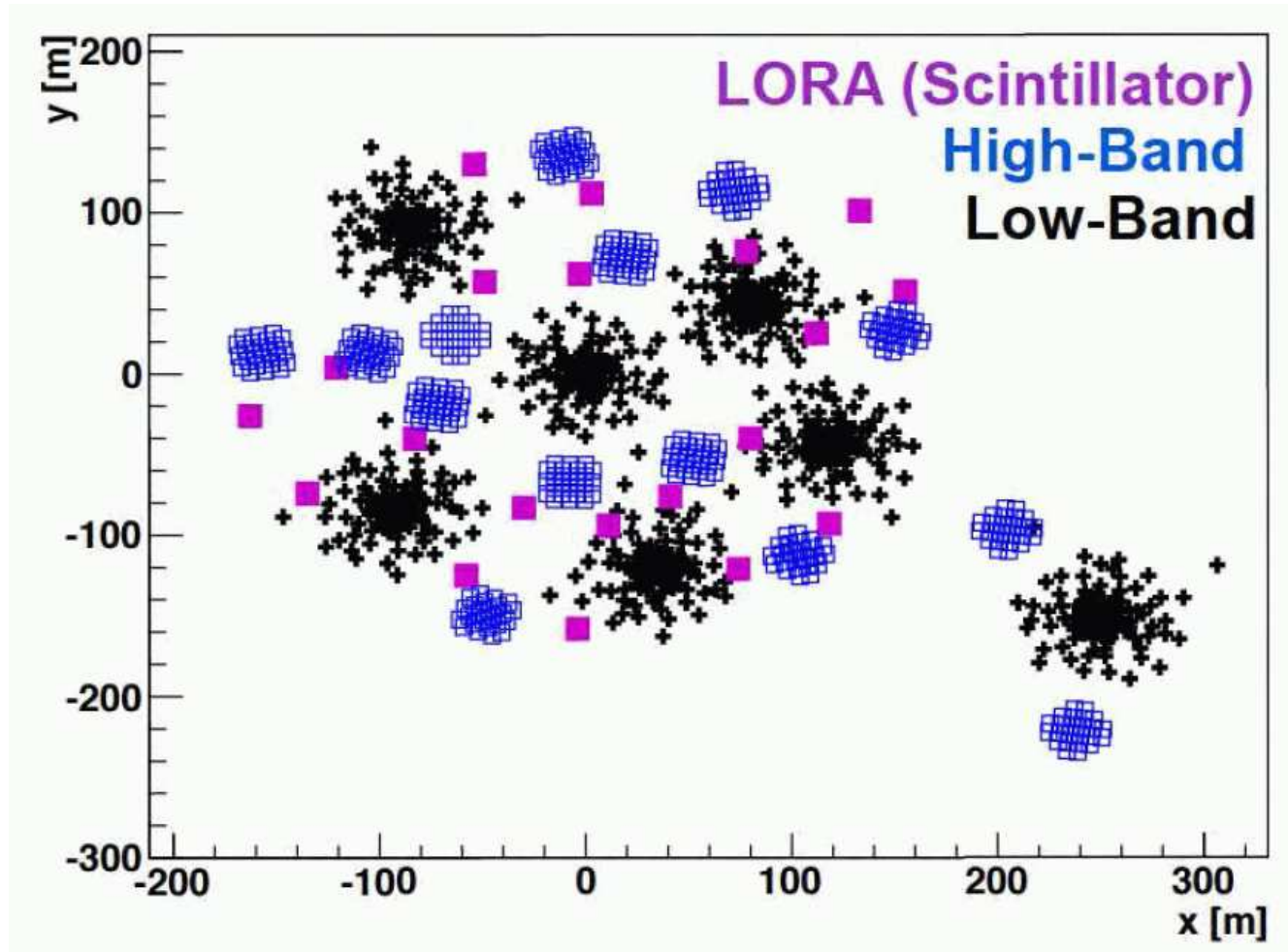




Detekcja radiowa

LOFAR

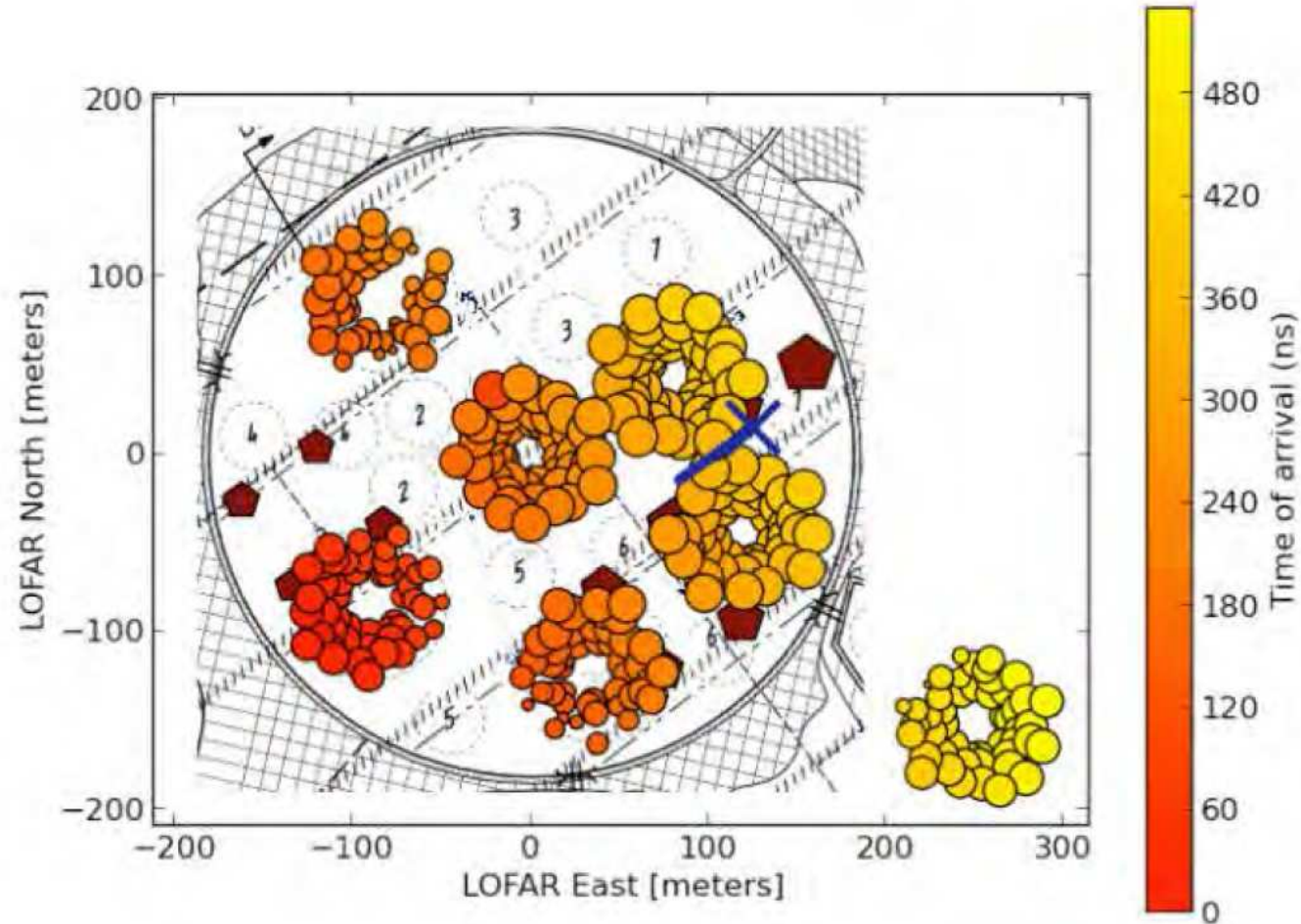
Zestawy anten pracujących w zakresie 30-80 MHz i 120-240 MHz + scyntylatory



Detekcja radiowa

LOFAR

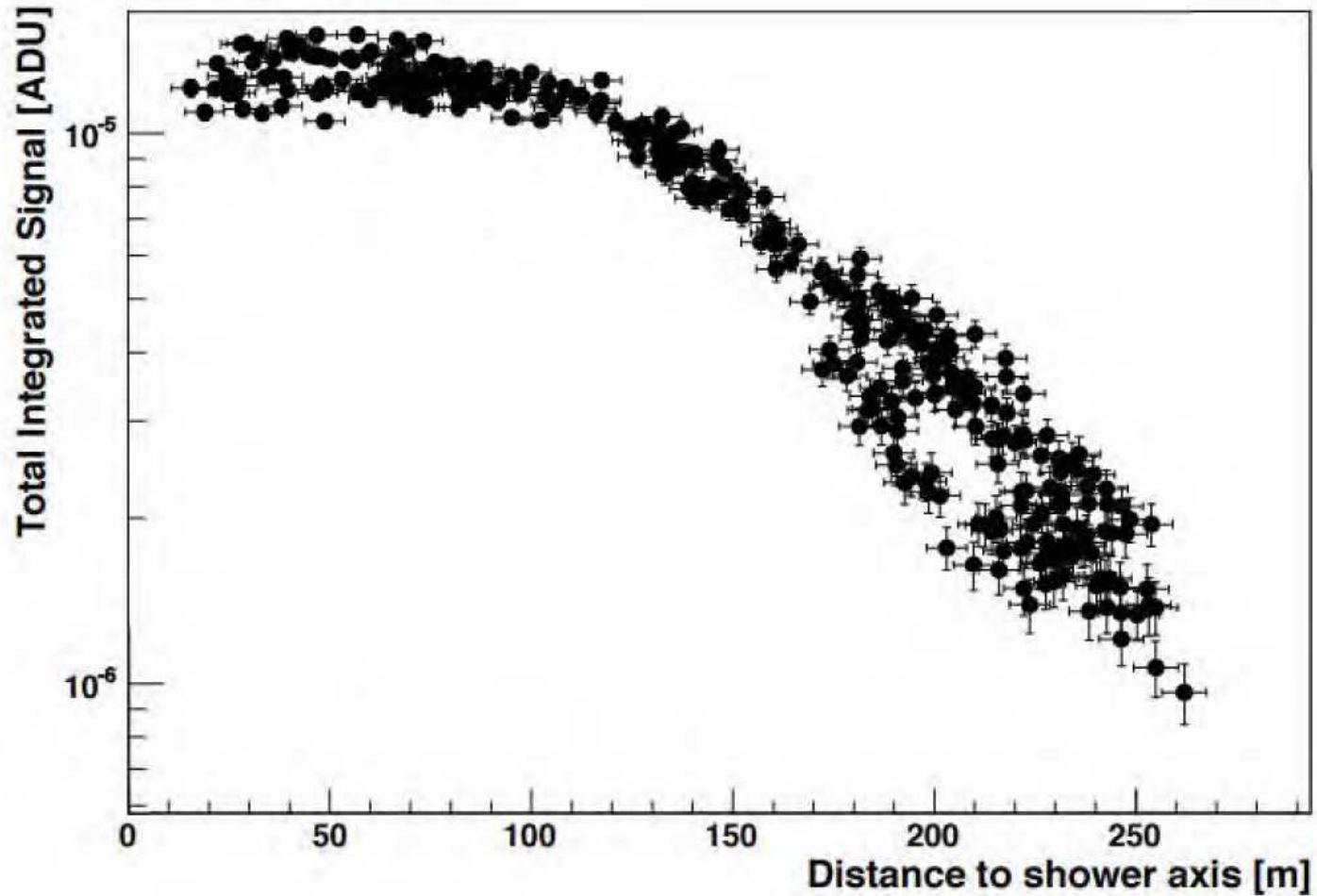
Przykładowy przypadek detekcji pęku (30-80 MHz)



Detekcja radiowa

LOFAR

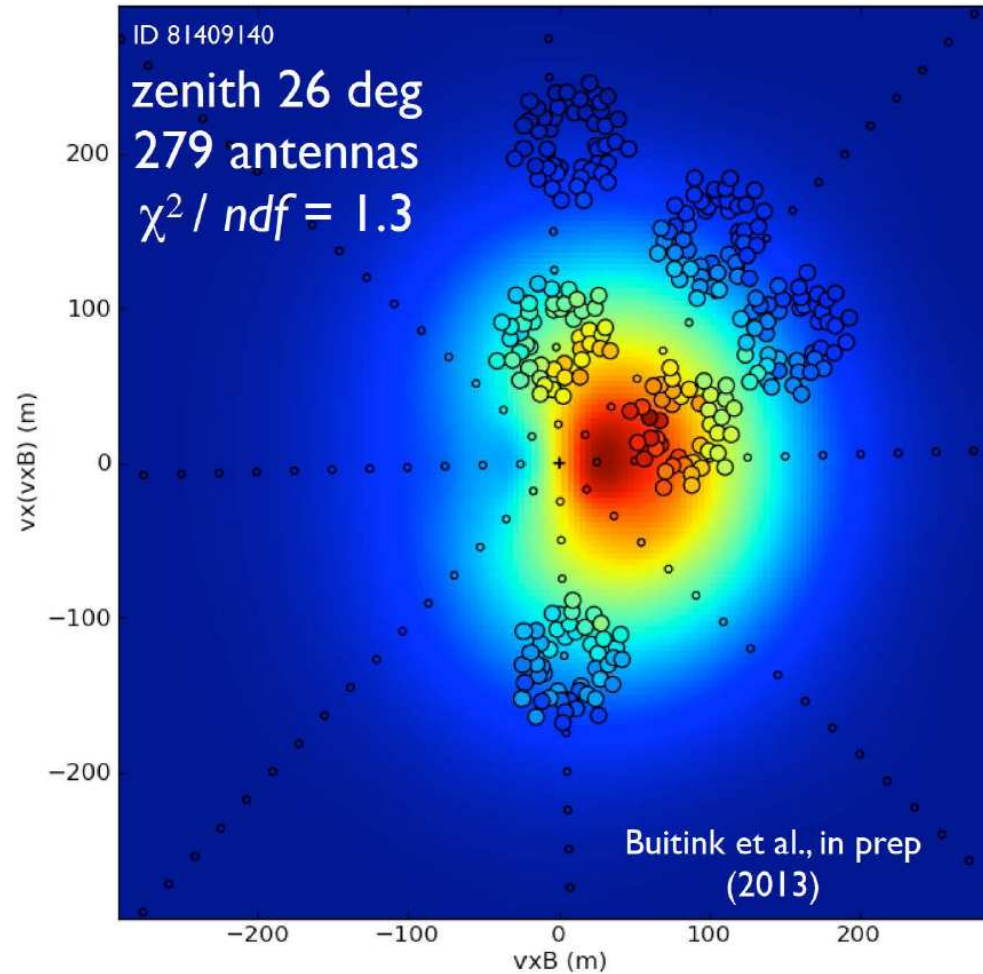
Przykładowy przypadek detekcji pęku (30-80 MHz) \Rightarrow rekonstrukcja profilu



Detekcja radiowa

LOFAR

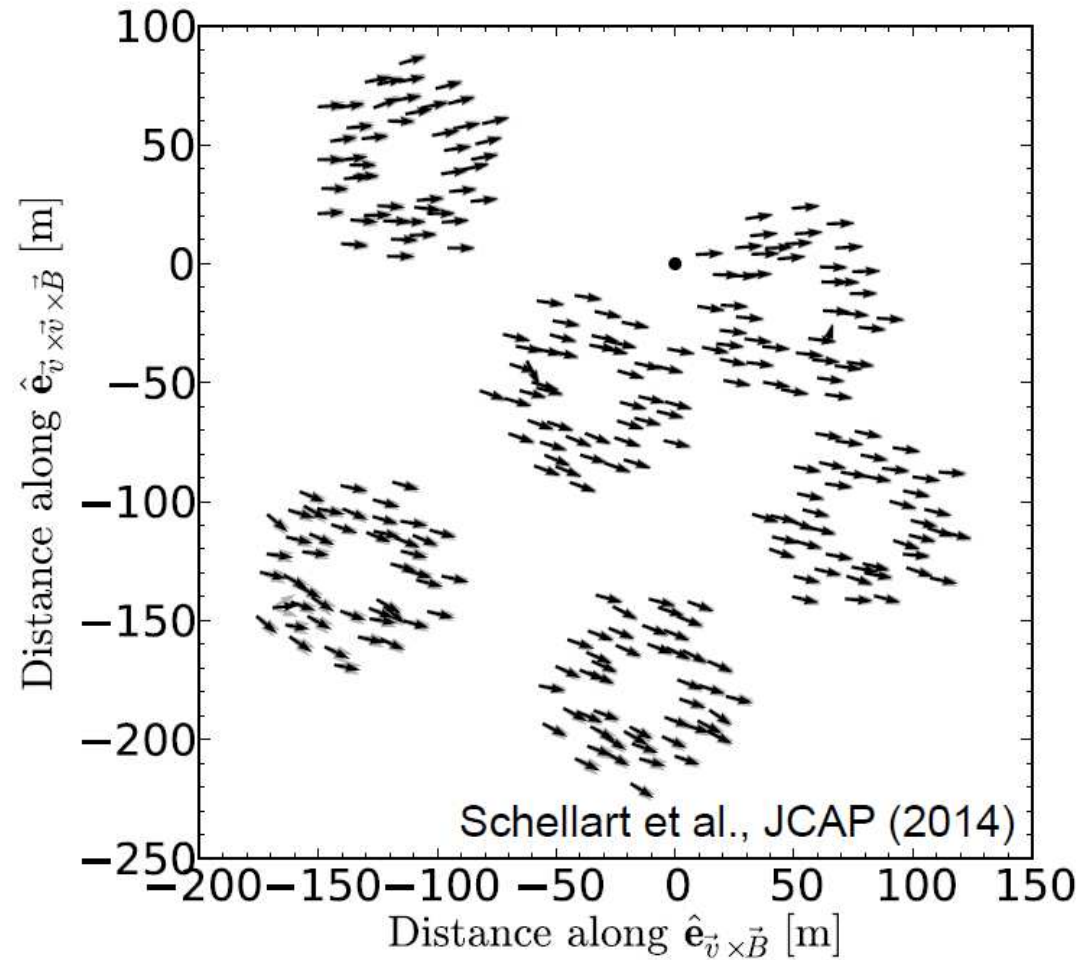
Dopasowanie modelu rozwoju kaskady



Detekcja radiowa

LOFAR

Rekonstrukcja kierunku liniowej polaryzacji fali



Detekcja radiowa

AERA

Auger Engineering Radio Array



Detekcja radiowa

AERA

Auger Engineering Radio Array



Pierwsza instalacja: 24 detektory co 144 m
Kampania pomiarowa: 2011–2013

Logarytmiczno-periodyczne, podwójne
anteny dipolowe.

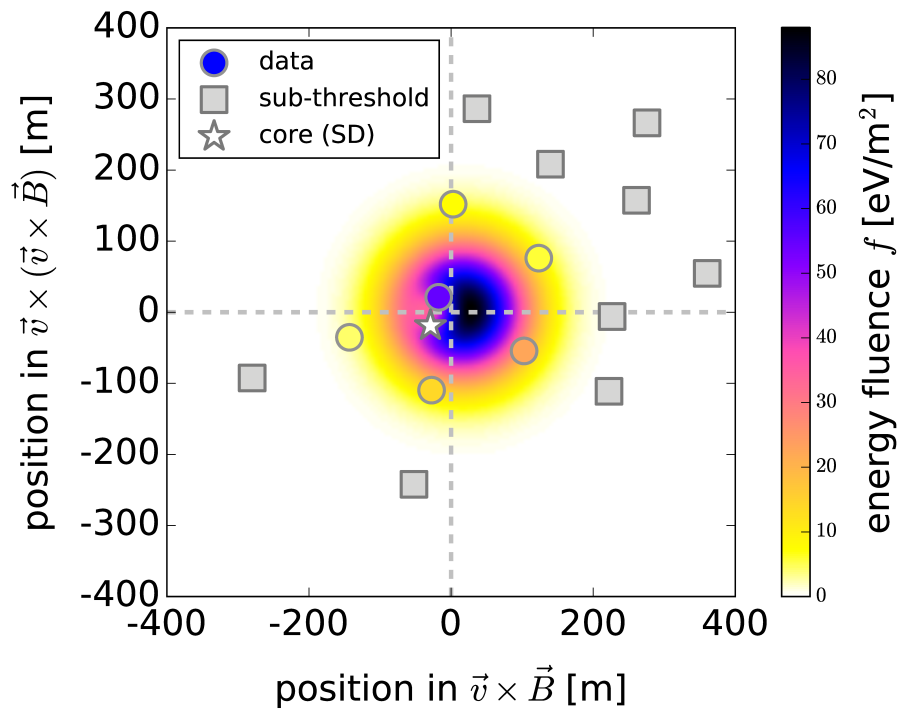
Sygnal próbkowany z częstotliwością 200 MHz.
Mierzona emisja fal elektromagnetycznych
w przedziale 30–80 MHz

Obecnie rozbudowane do 153 stacji

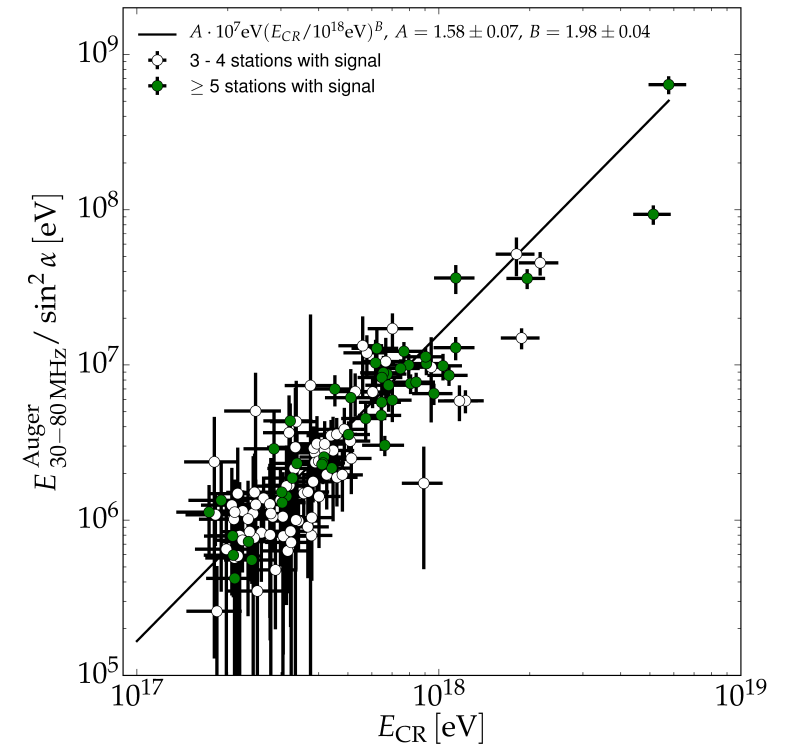
Detekcja radiowa

AERA Auger Engineering Radio Array

Przykładowy przypadek



Kalibracja z detektorami SD750



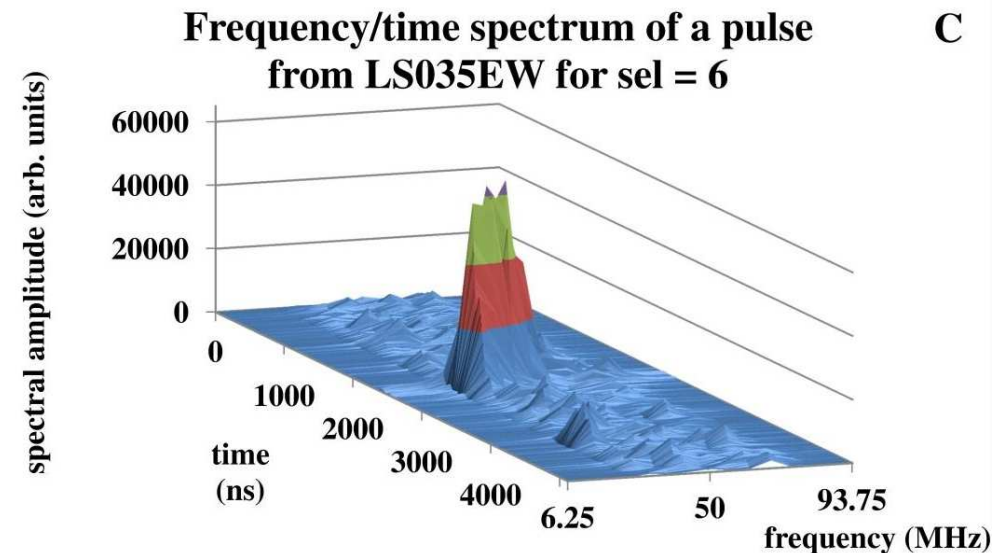
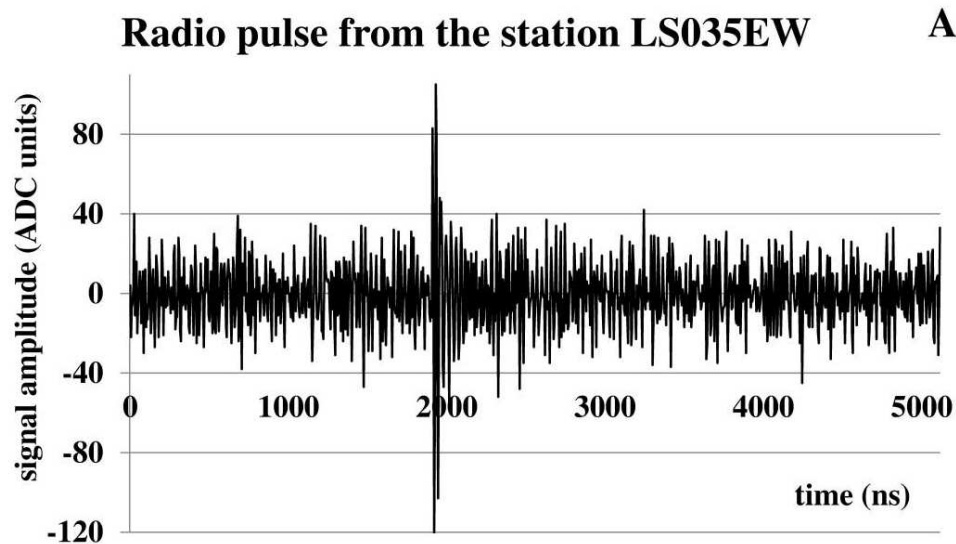
$$E_{\text{radio}} \sim E_{\text{CR}}^2 (!)$$

Detekcja radiowa

AERA Auger Engineering Radio Array

Rozwój szybkich układów programowalnych typu FPGA pozwala na analizę widma sygnału w czasie rzeczywistym

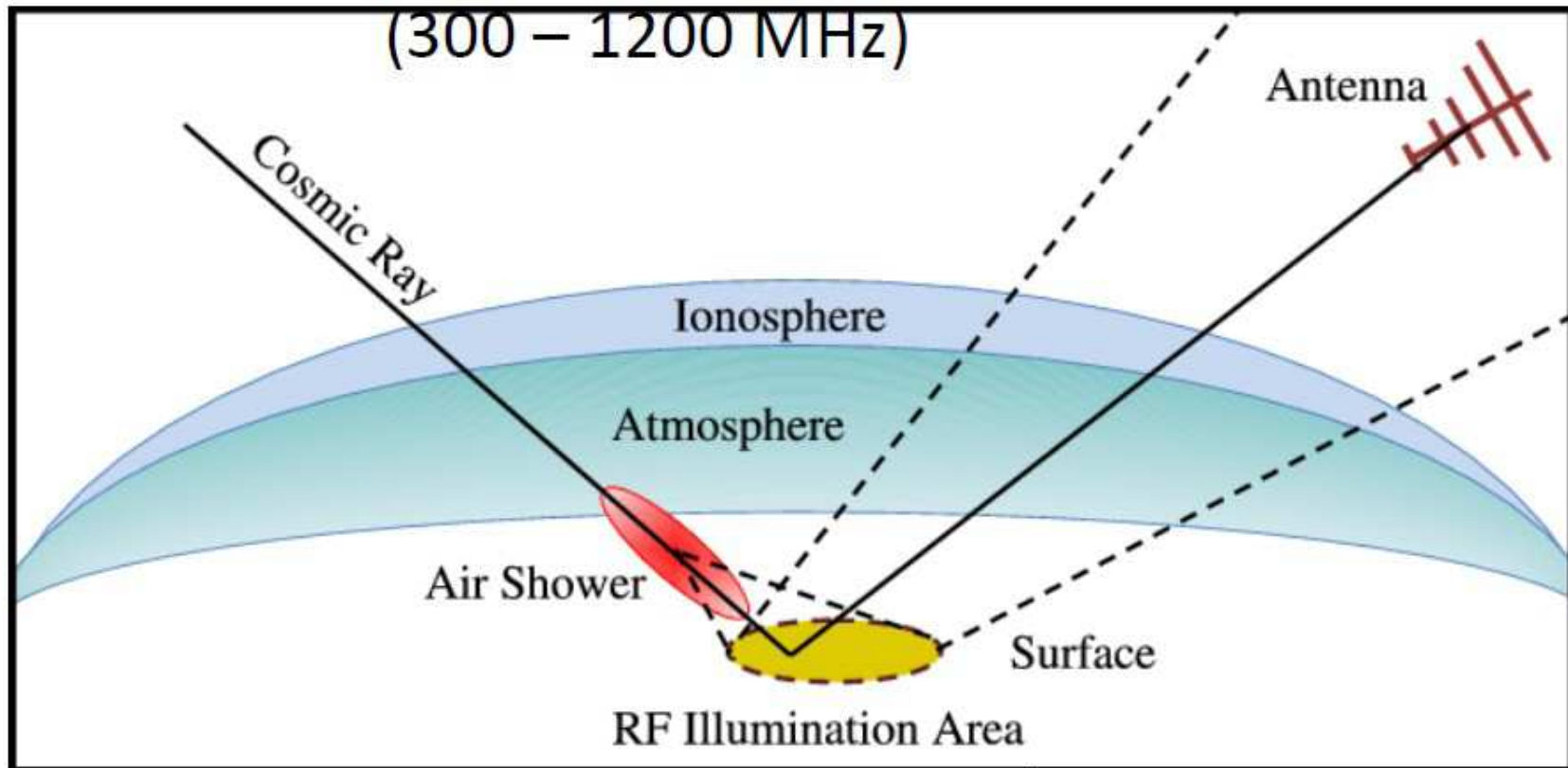
⇒ możliwość autonomicznego wyzwalania zbierania danych



Z. Szadkowski, IEEE Real Time Conference, Padova, June 2016

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

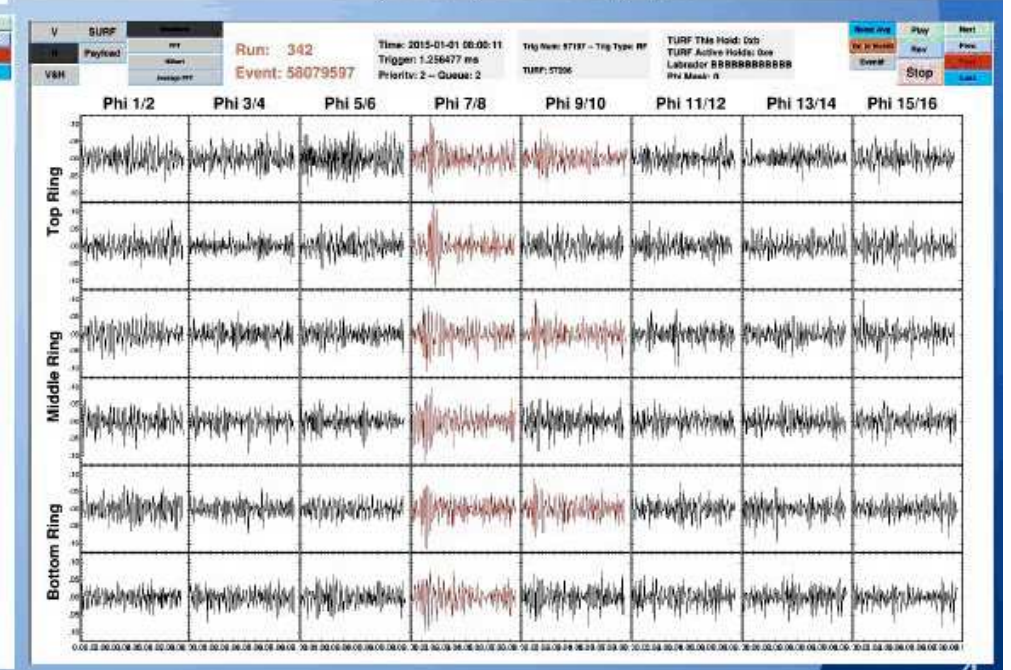
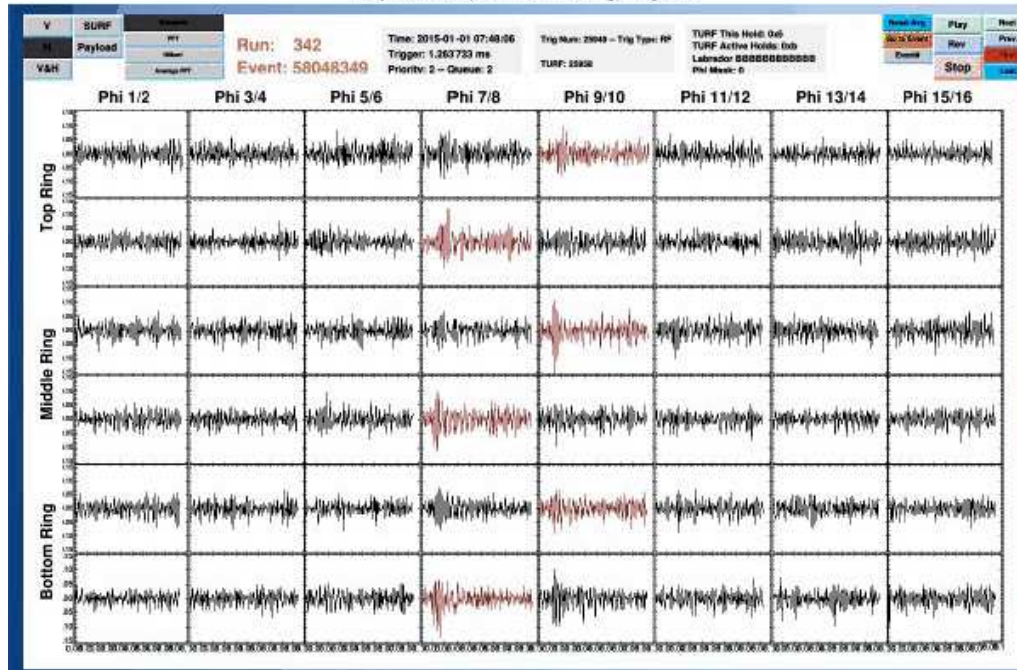
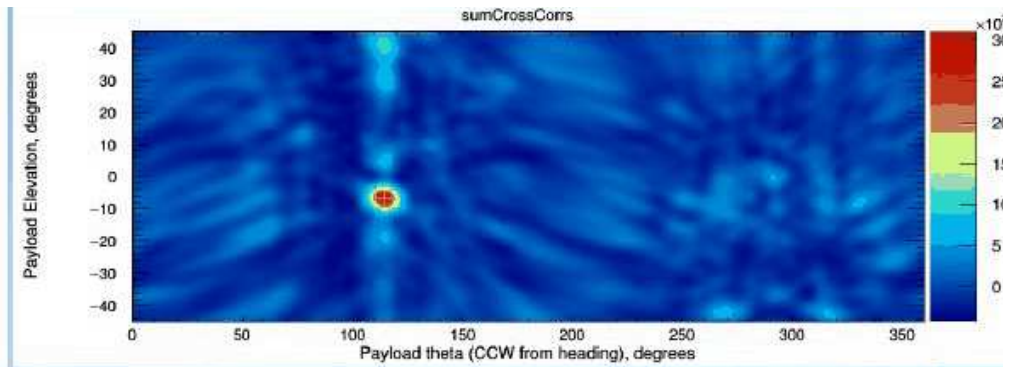
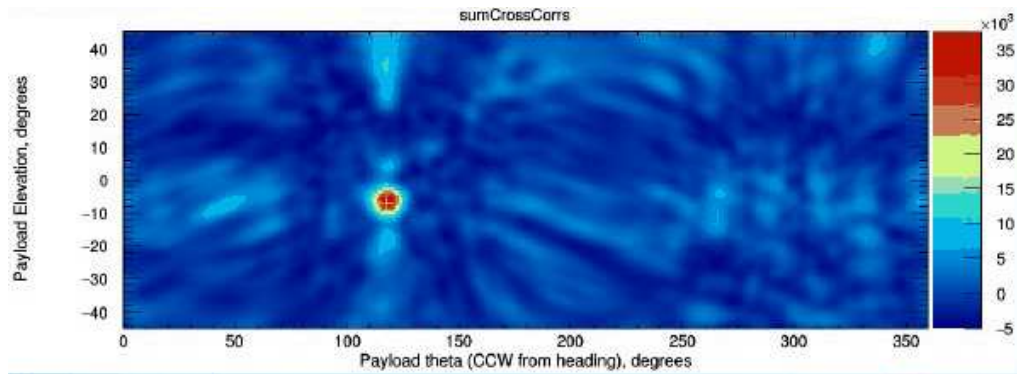
Detektor ANITA-3 wypuszczony na Antarktydzie w grudniu 2014



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

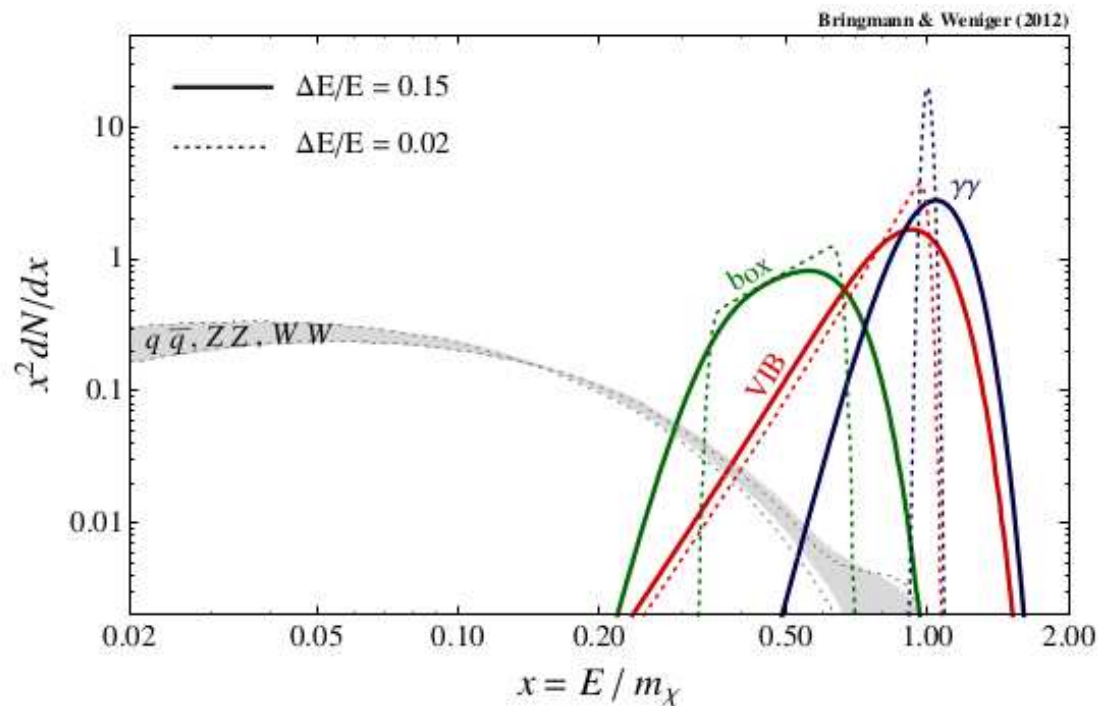
Nowa jakość w badaniach UHECE: detektory są stosunkowo tanie, odporne na warunki, pracują w dzień i w nocy, można budować bardzo duże układy detekcyjne...

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

Ciemna materia

Promieniowanie gamma

Oczekiwane widmo promieniowania z anihilacji DM



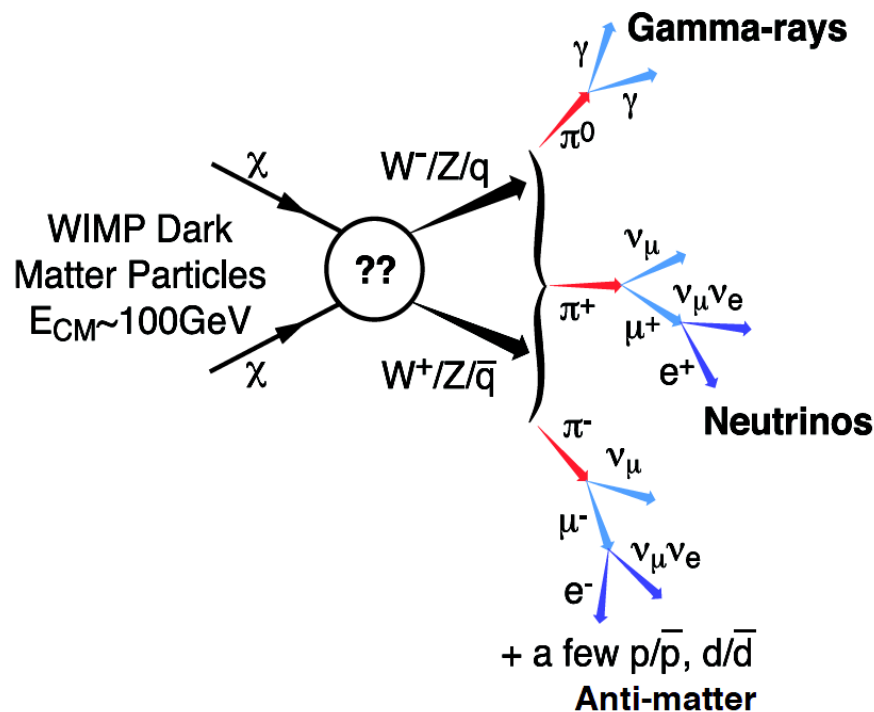
Pierwotne promieniowanie γ

- 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)

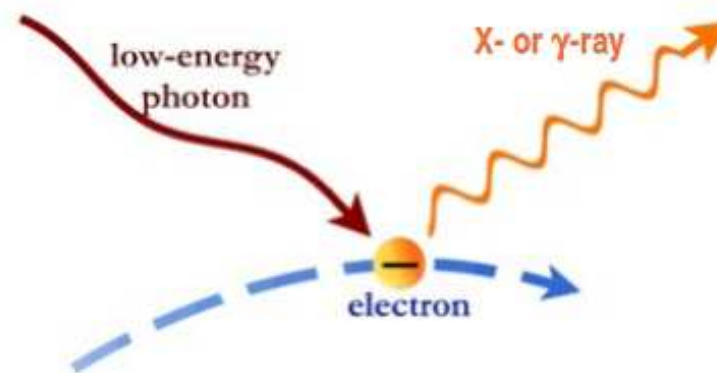
Promieniowanie kosmiczne

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

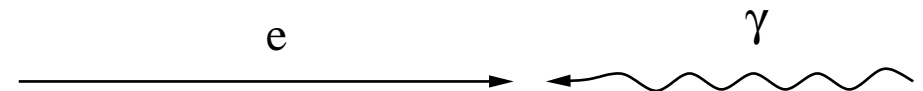
W rozpraszaniu na spoczywającym elektronie **najniższą energię** będzie miał foton rozproszony **“do tyłu”** ($\cos \theta = -1$):

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

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:

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

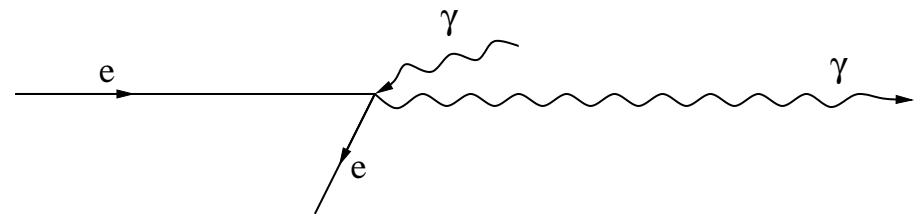
Wracając do układu laboratoryjnego: (transformacja taka sama, bo pęd foton zmienił kierunek)

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

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.



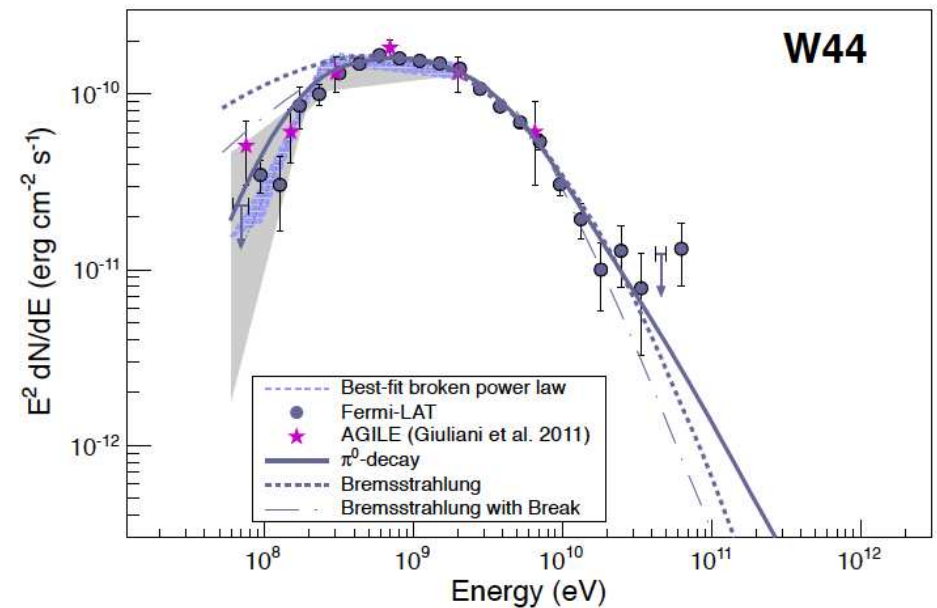
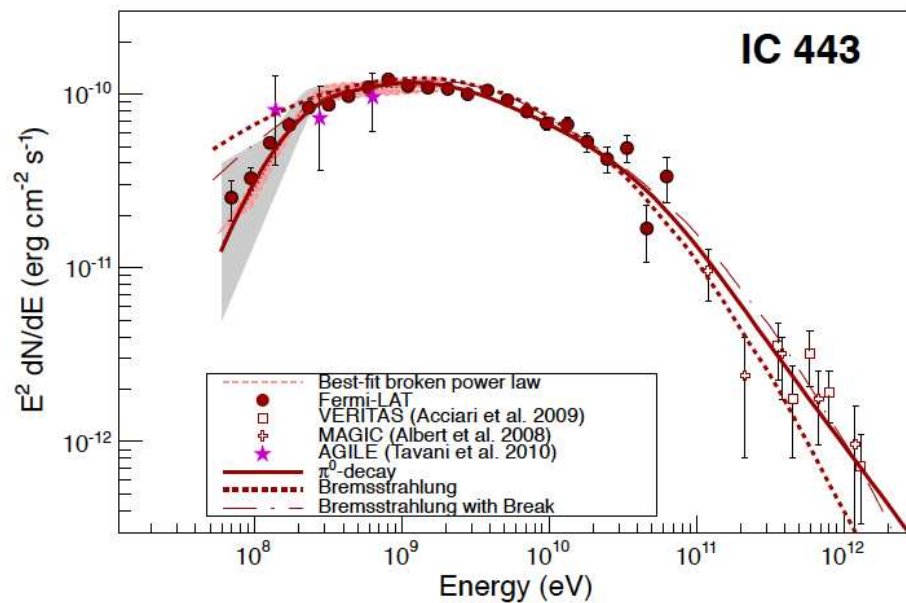
Przykład: dla $E_e = 250\text{GeV}$ i $h\nu = 1\text{eV}$
 $h\nu' \approx 200\text{GeV}$

Promieniowanie kosmiczne

Rozpady π^0

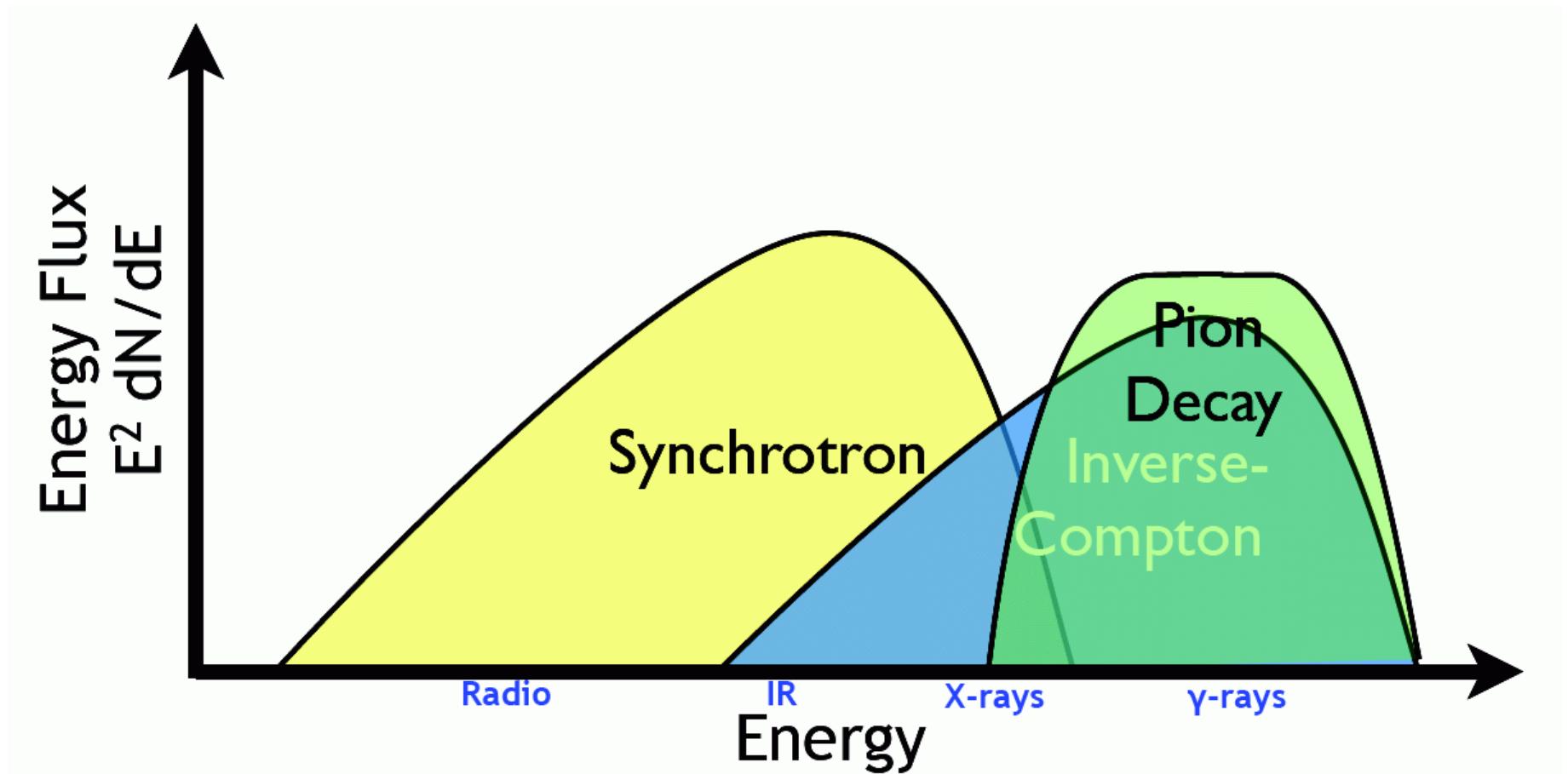
W oddziaływaniach hadronów promieniowania kosmicznego z materią międzygwiazdą (głównie zderzenie pp) produkowane są też licznie π^0

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



Promieniowanie gamma

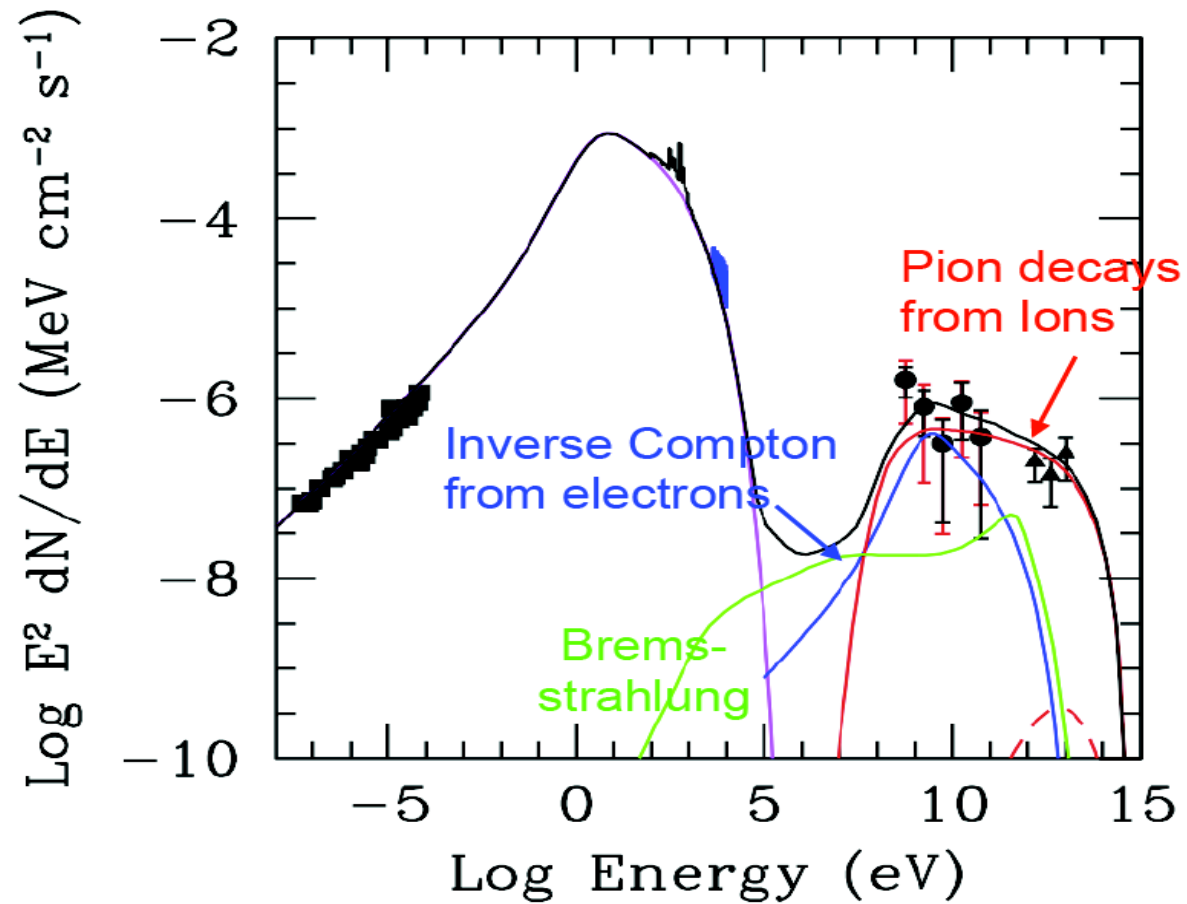
Oczekiwane widmo



Promieniowanie gamma

Tycho SNR

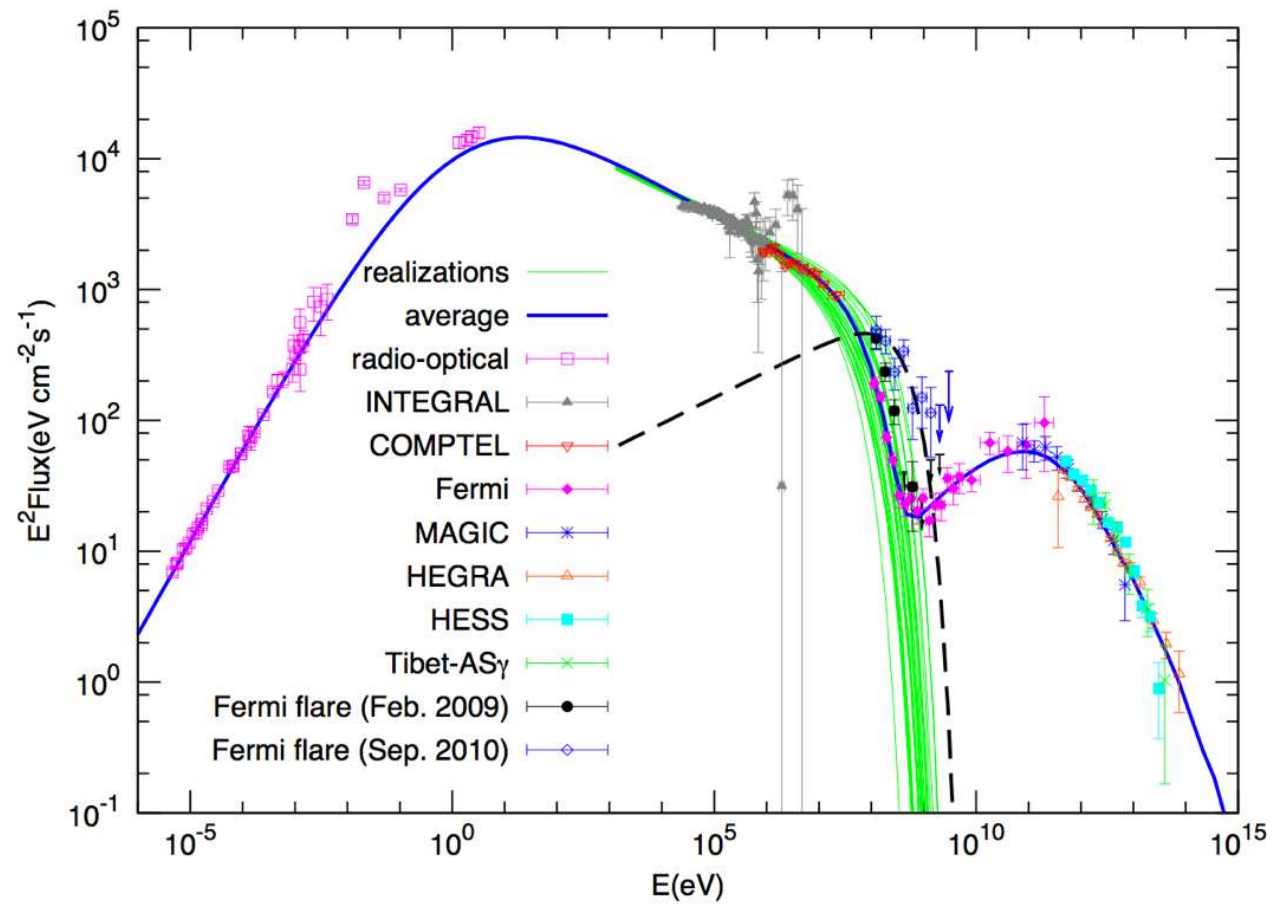
Widmo rejestrowanego promieniowania gamma



Promieniowanie gamma

Mgławica Kraba

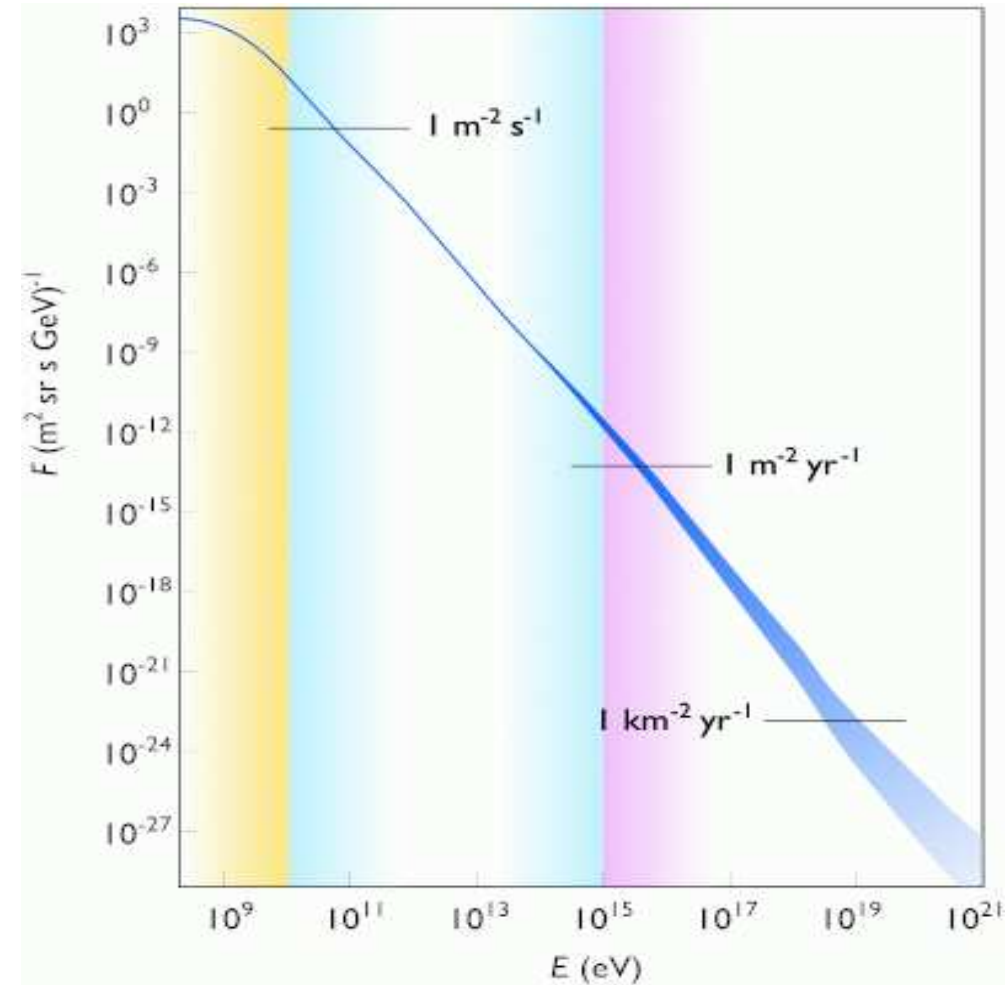
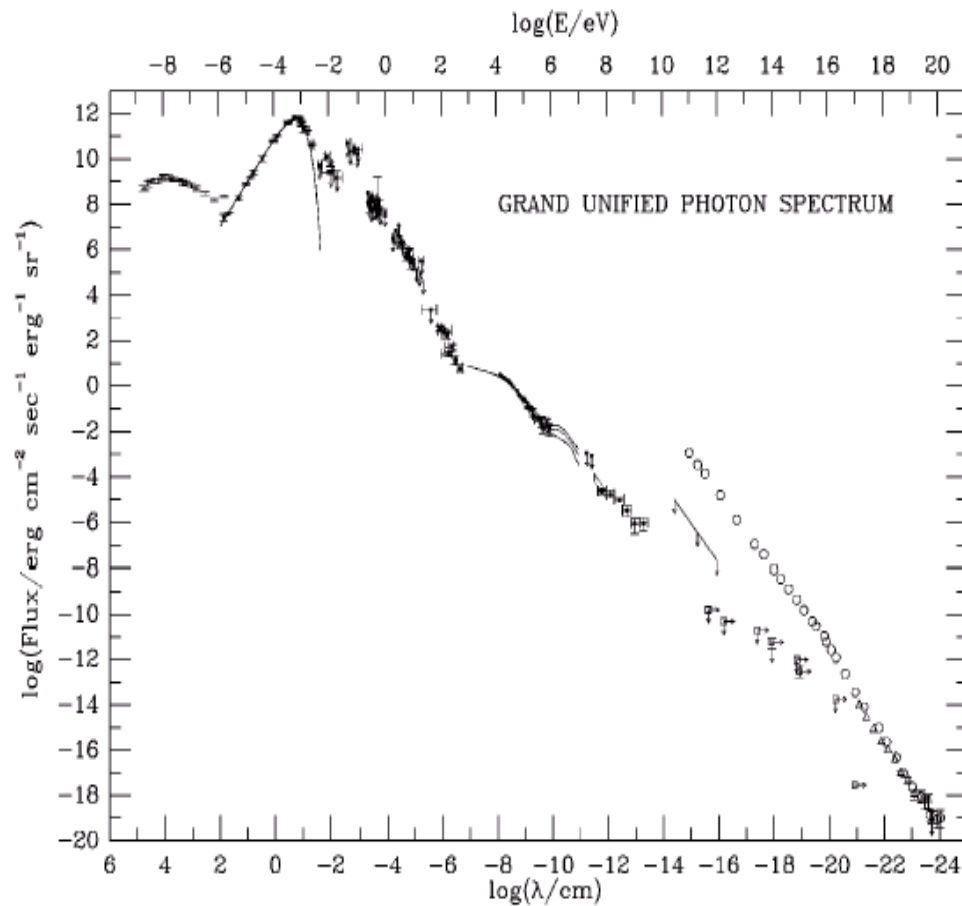
Widmo rejestrowanego promieniowania gamma



Promieniowanie gamma

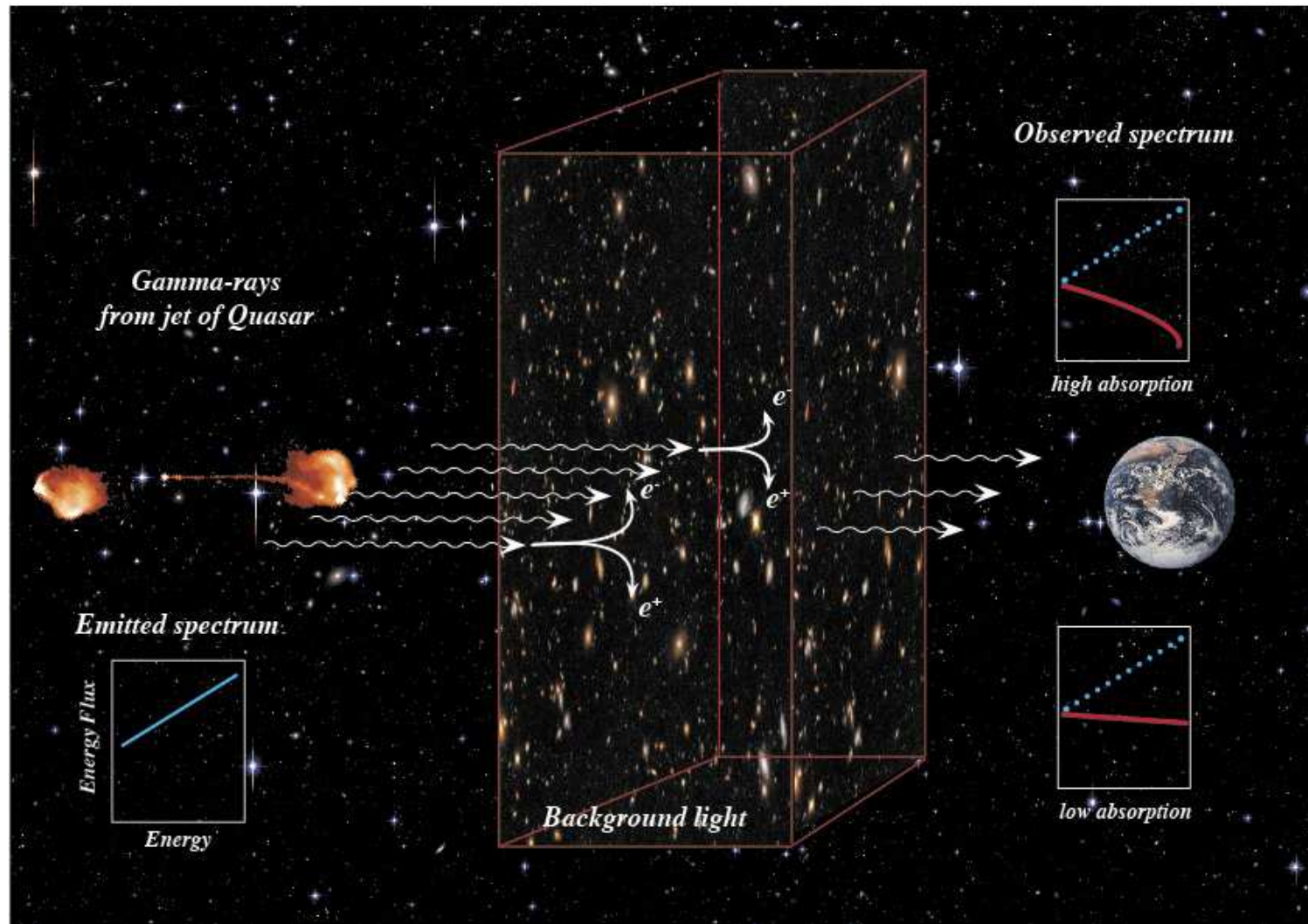
Porównanie

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



Promieniowanie gamma

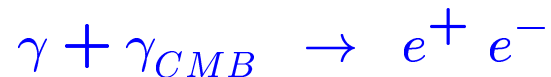
Pochłanianie



Promieniowanie gamma

Pochłanianie

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



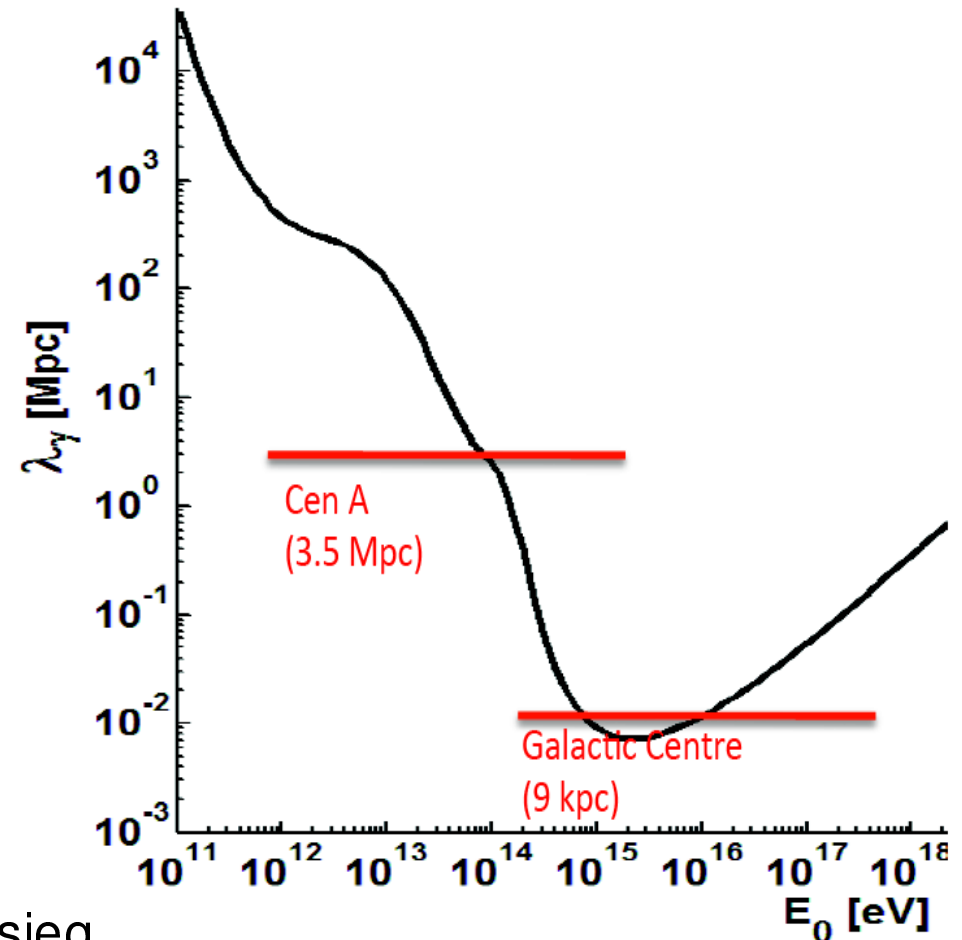
Średnia energia $E_{CMB} \approx 0.0002 \text{ eV}$

\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

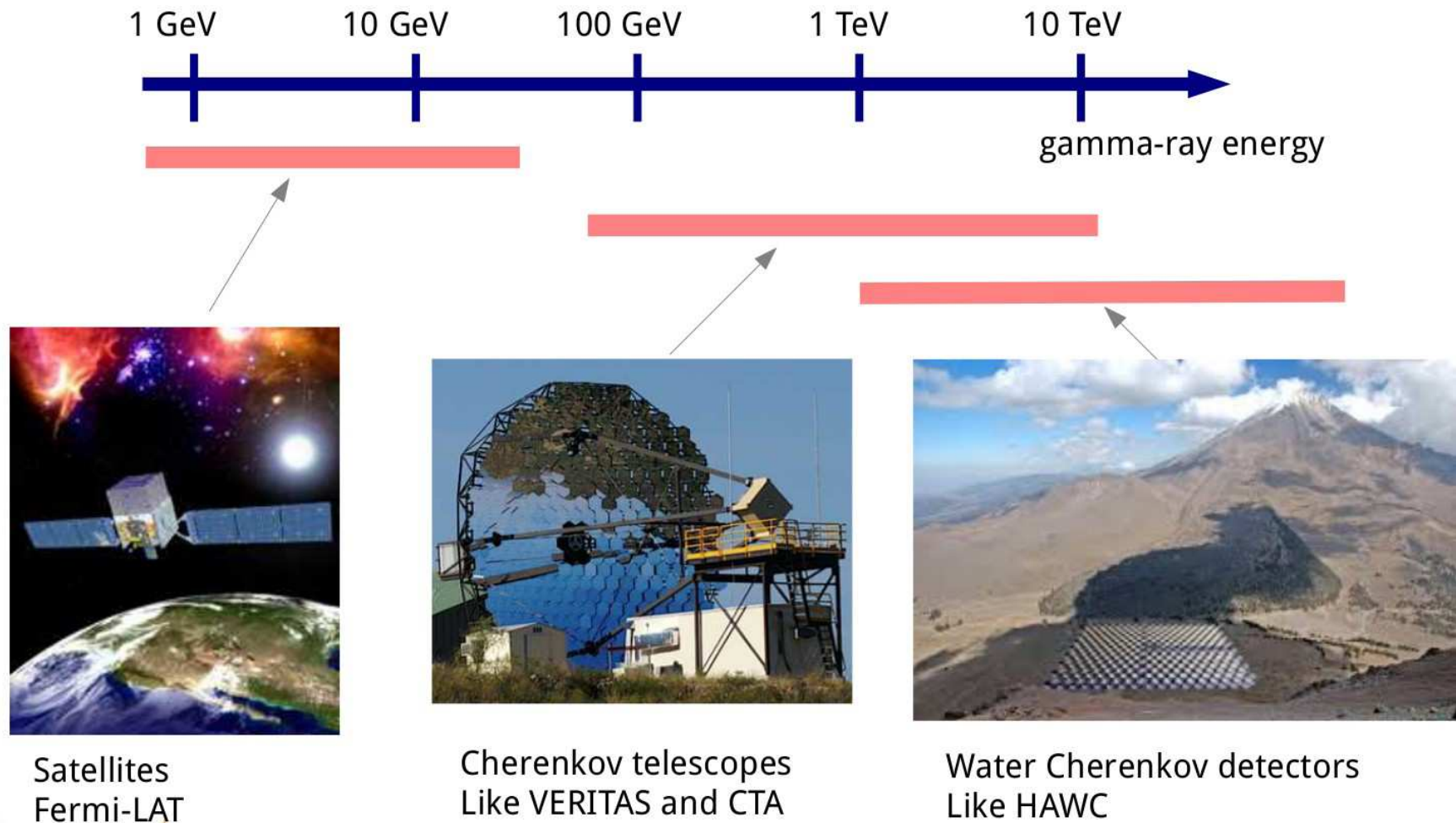
- Jak i gdzie jest produkowane, przyspieszane?
- Jak się rozchodzi?
- Jak oddziałuje z materią międzygwiezdną?

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

Metody detekcji



Satellites
Fermi-LAT



Cherenkov telescopes
Like VERITAS and CTA



Water Cherenkov detectors
Like HAWC

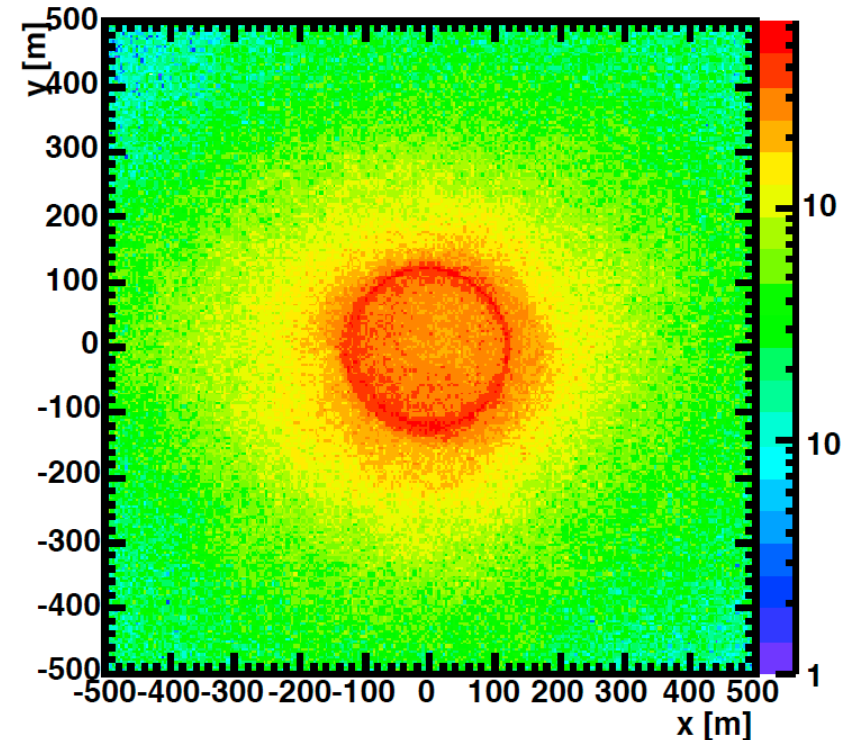
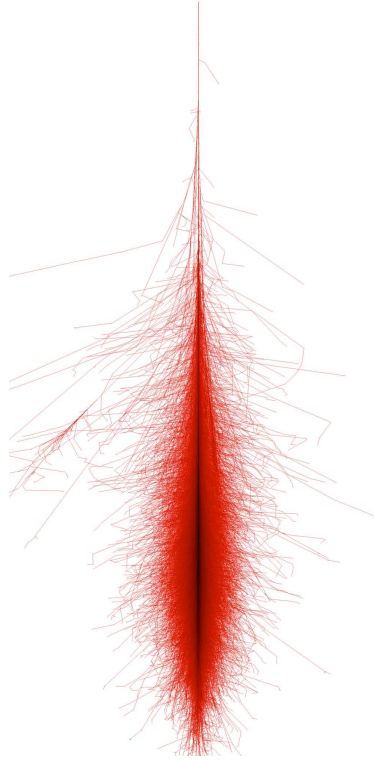
Promieniowanie gamma

Promieniowanie Czerenkowa

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

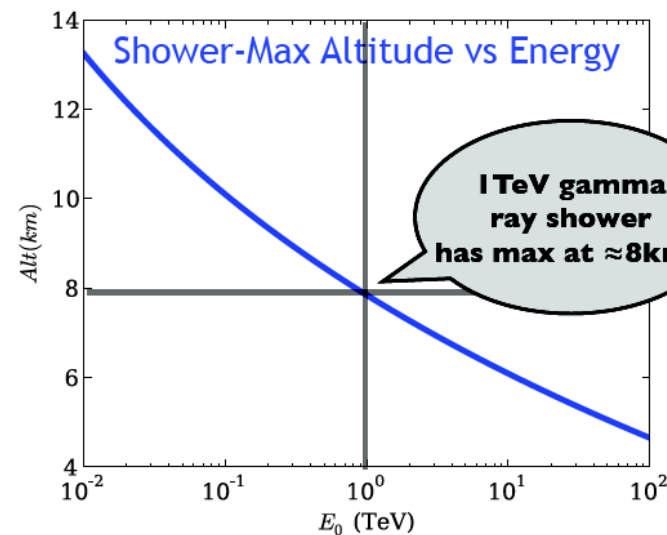
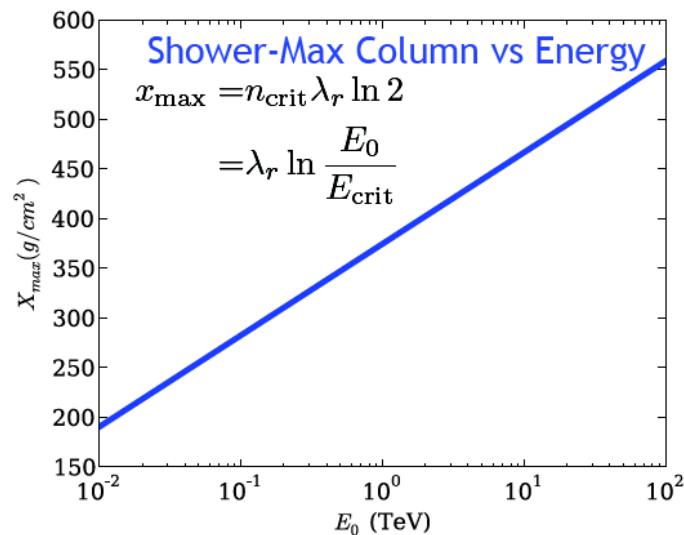
Podobnie jak w przypadku składowej E-M wielkich pęków atmosferycznych

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...

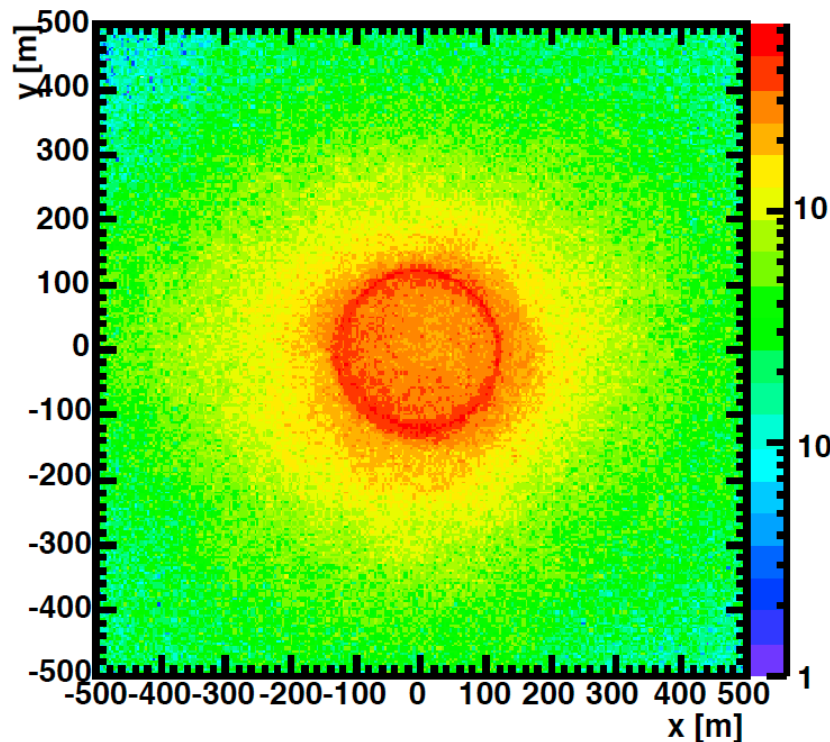
Promieniowanie Czerenkowa emitowane przez taką kaskadę oświetla obszar o promieniu ok. 100 m, gęstość fotonów UV ok. $100/\text{m}^2$

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).

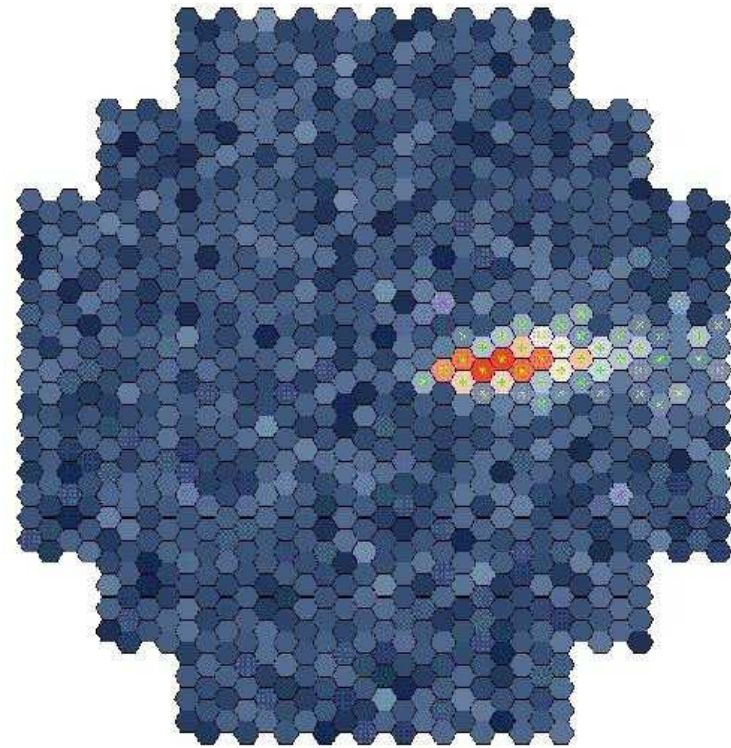
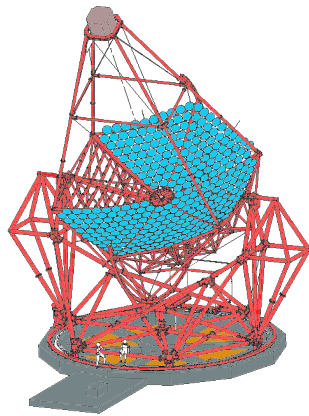
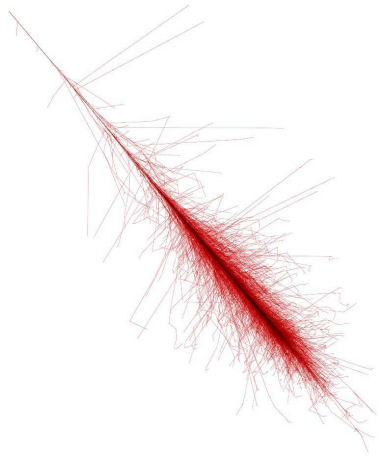
Znacznie większą dokładność pomiaru uzyskujemy ustawiając na Ziemi **teleskop promieniowania Czerenkowa**

Promieniowanie gamma

Detekcja

Wysokoenergetyczne fotony inicjują kaskady EM, które są źródłem promieniowania Czerenkowa.

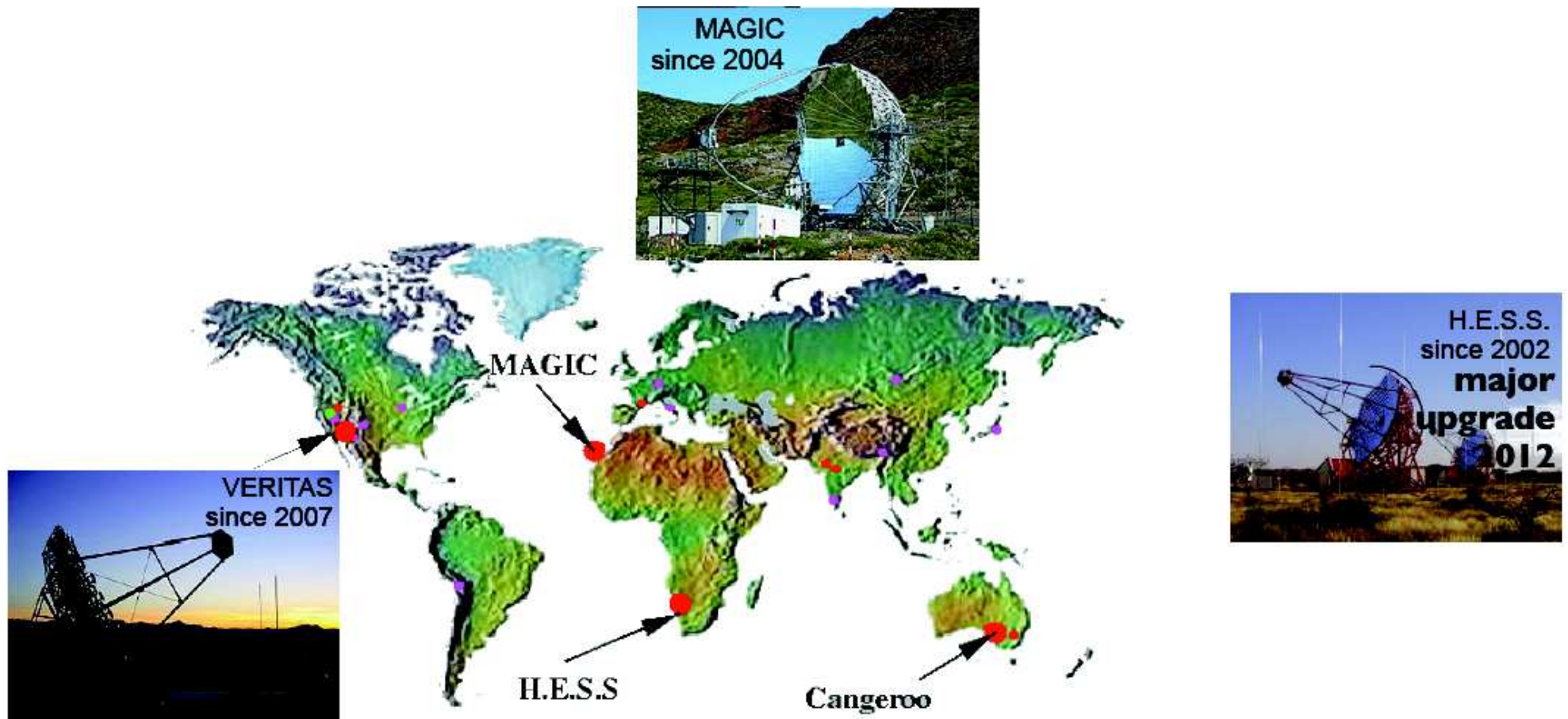
Jeśli teleskop znajdzie się w polu oświetlonym przez kaskadę, zrobi jej “zdjęcie”



Promieniowanie gamma

Instrumenty

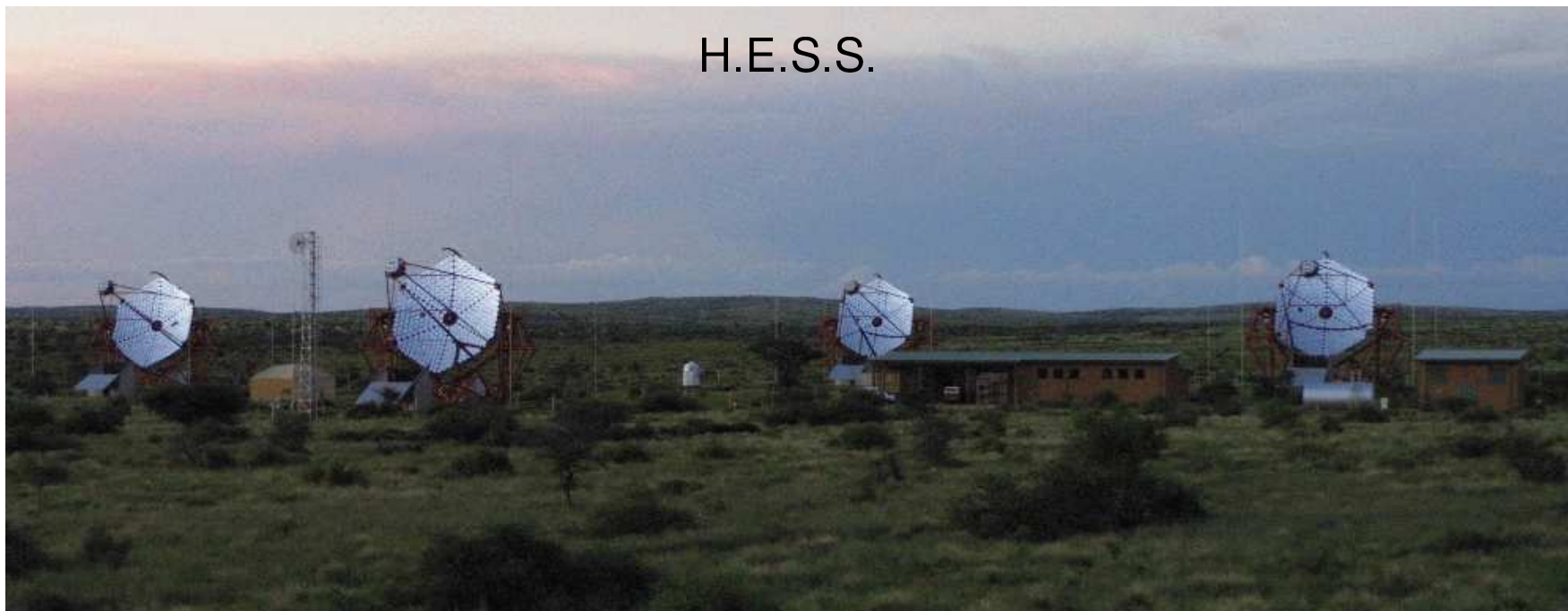
Naziemne detektory promieniowania gamma najwyższych energii



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

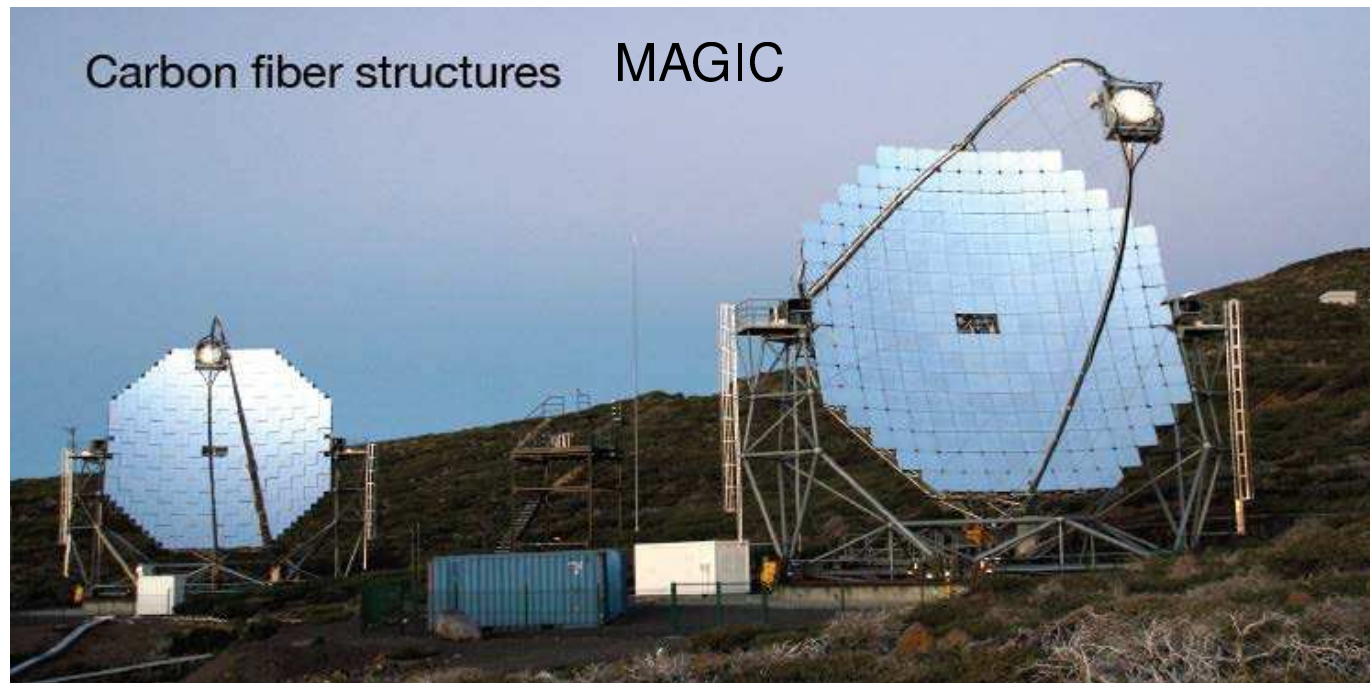
Atmospheric Cherenkov Telescopes (ACT)



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



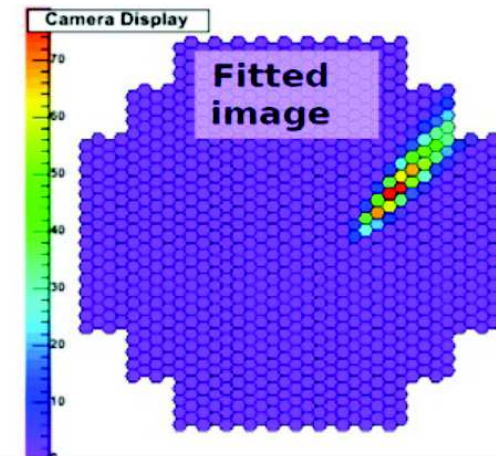
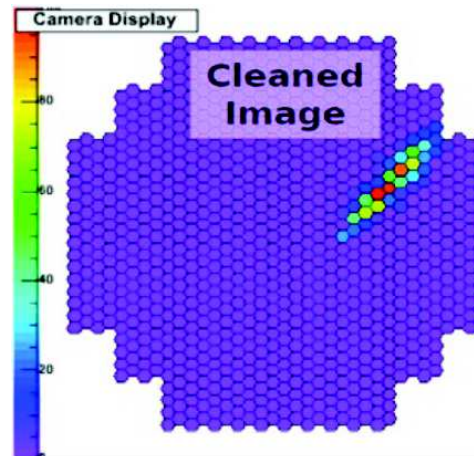
Teleskopy Czerenkowa

Rekonstrukcja

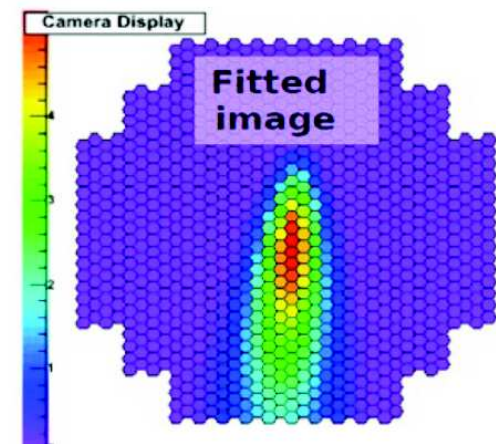
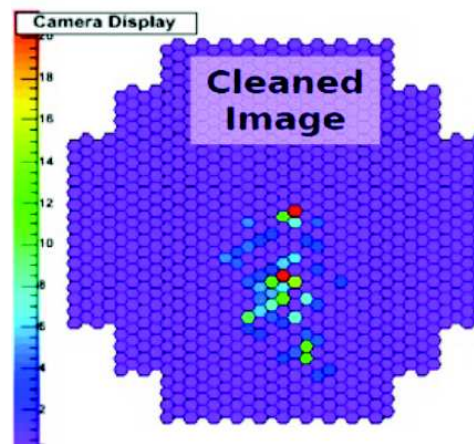
Na podstawie zmierzonego natężenia promieniowania możemy wyznaczyć **energię** początkowego fotonu.

Kształt obrazu mówi nam o nachyleniu osi kaskady do **kierunku** patrzenia teleskopu
⇒ kierunek kaskady

Kształt obrazu pozwala nam także **eliminować tło** od wielkich pęków atmosferycznych



foton

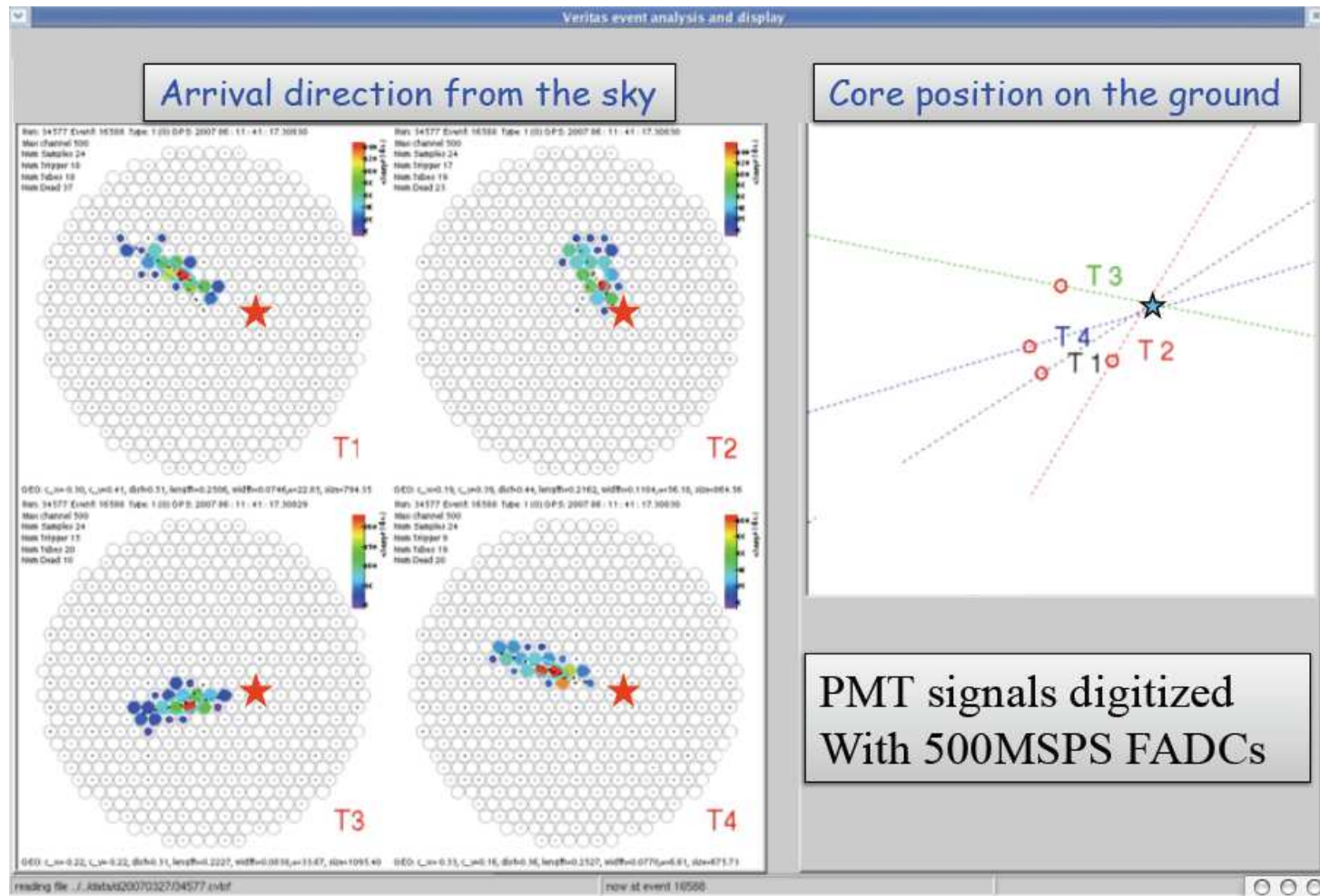


hadron

Teleskopy Czerenkowa

Rekonstrukcja

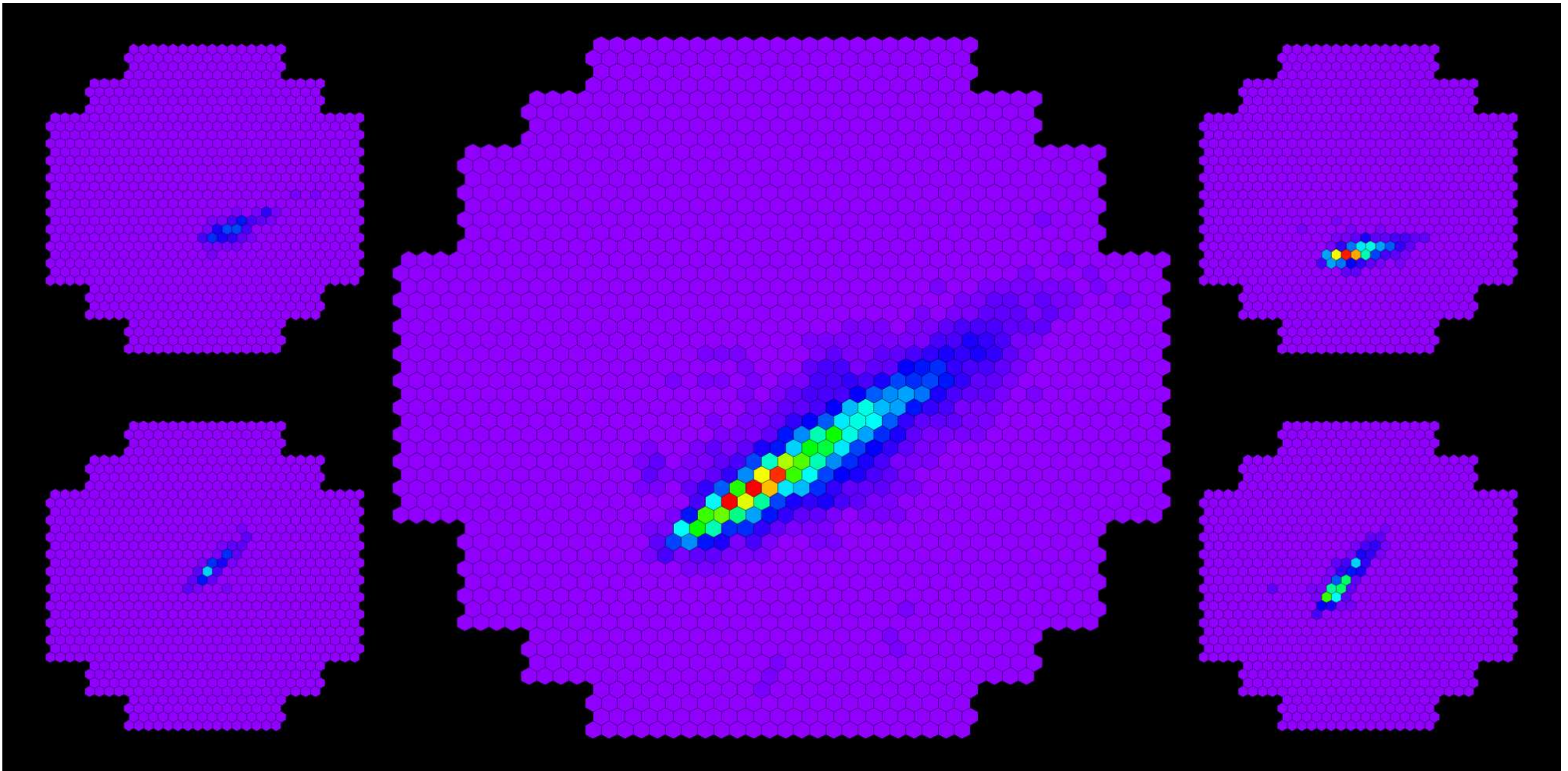
Wyznaczenie kierunku znacznie dokładniejsze dla obserwacji kilkoma teleskopami



HESS

Rekonstrukcja

Wyznaczenie kierunku znacznie dokładniejsze dla obserwacji kilkoma teleskopami

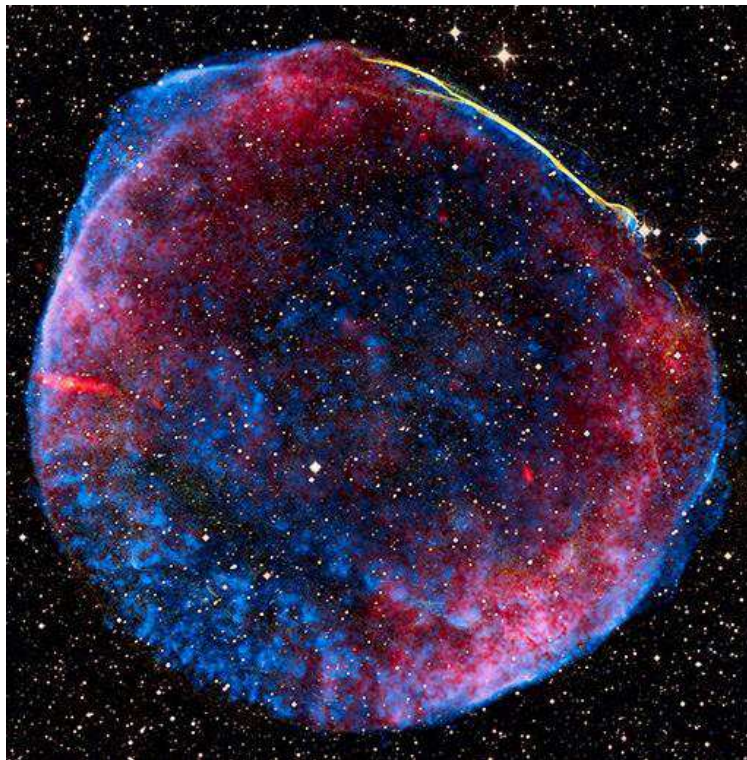


HESS

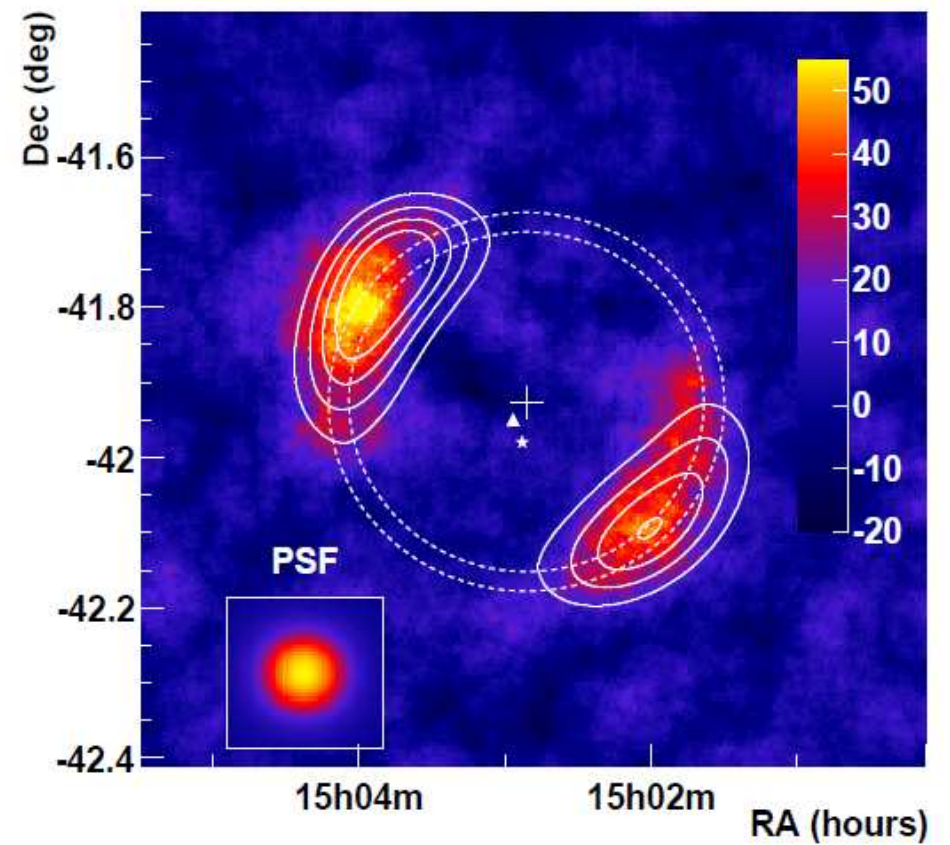
Wyniki

Obserwacja promieniowania TeV z SNR - potwierdzenie przyspieszania CR

SN1006 w prom. radiowym, optycznym, X



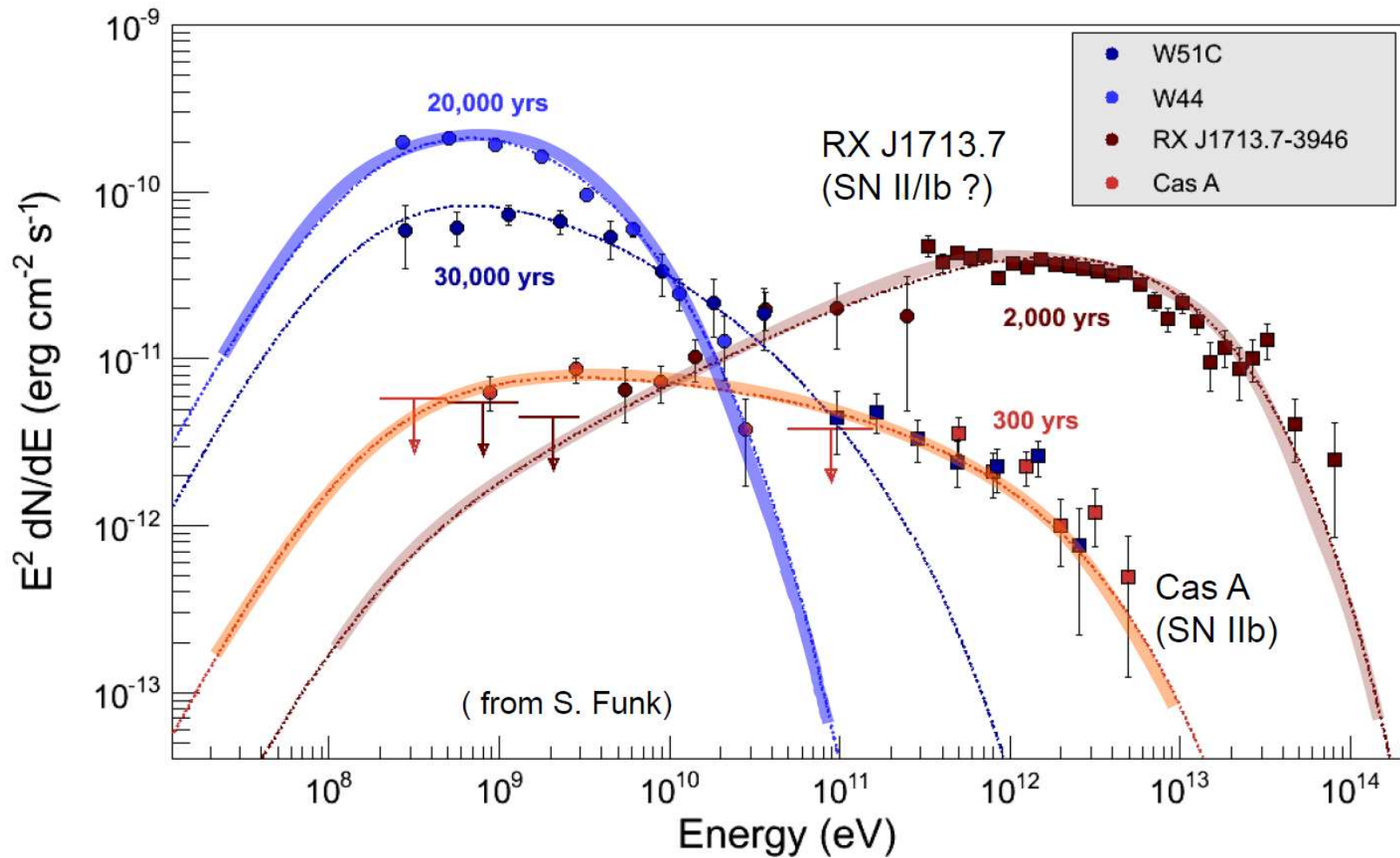
i w promieniowaniu TeV (HESS)



HESS

Wyniki

Widma energii fotonów rejestrowanych z różnych SNR (na różnych etapach ewolucji)



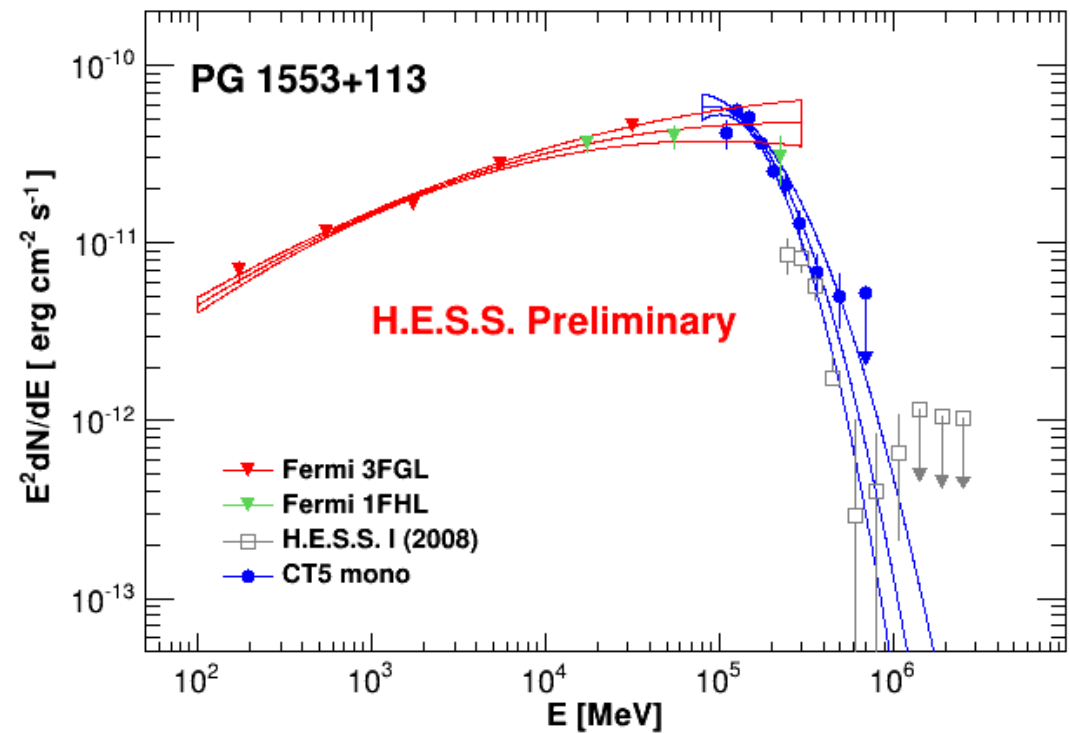
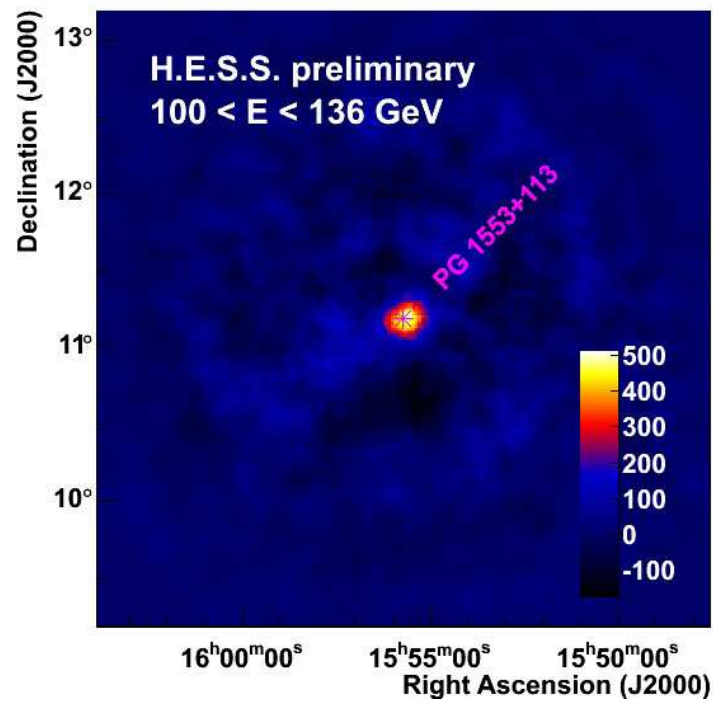
HESS

Wyniki

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

Wysoka precyzja: jednoczesny pomiar rozkładu przestrzennego i spektrum.

Blazar PG1553+113 ($z \sim 0.5$)



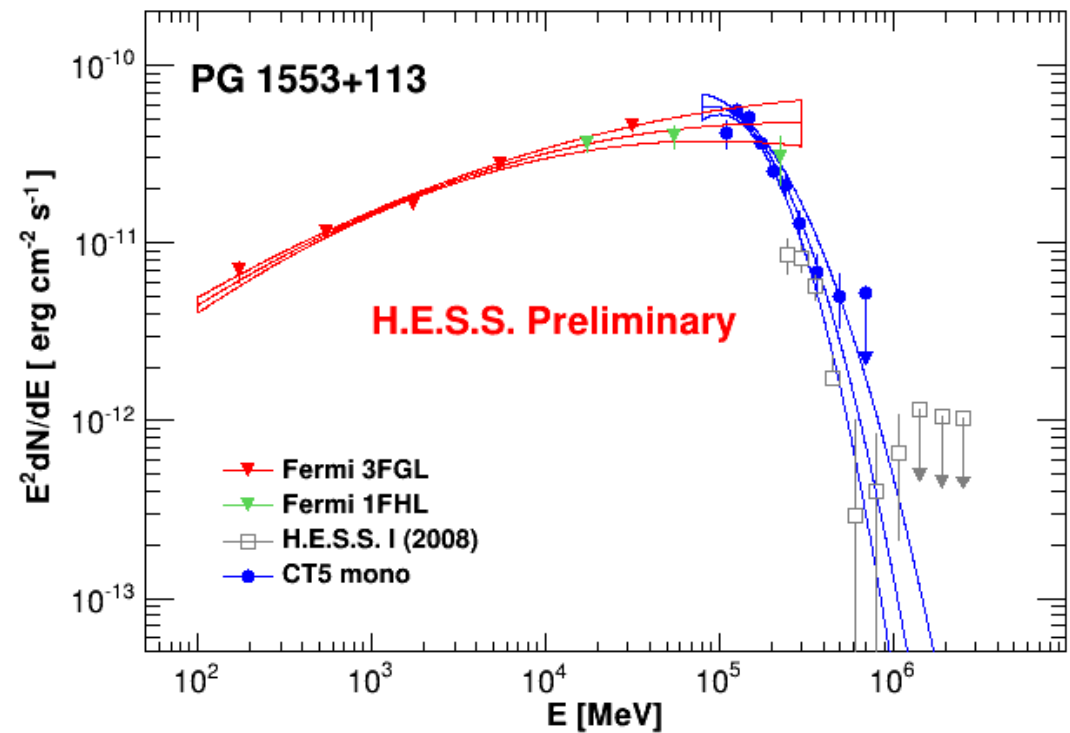
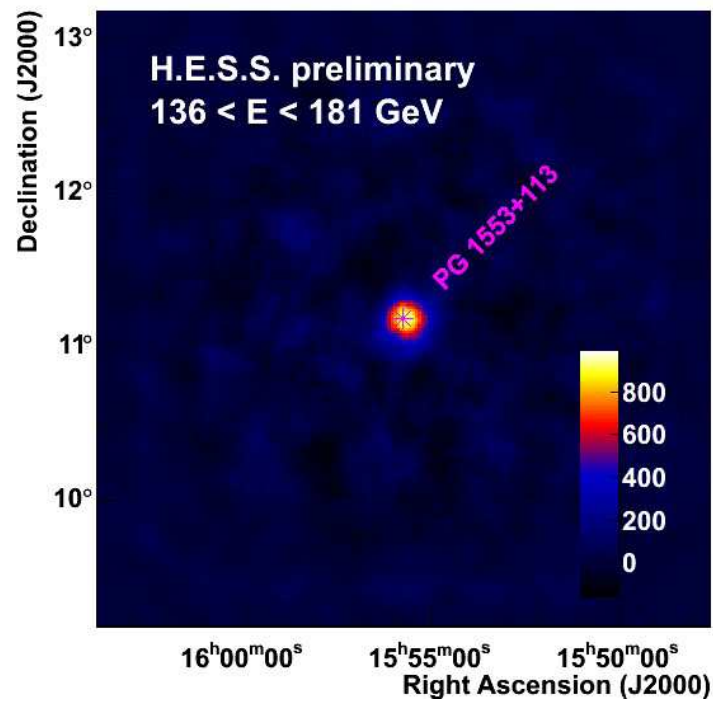
HESS

Wyniki

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

Wysoka precyzja: jednoczesny pomiar rozkładu przestrzennego i spektrum.

Blazar PG1553+113 ($z \sim 0.5$)



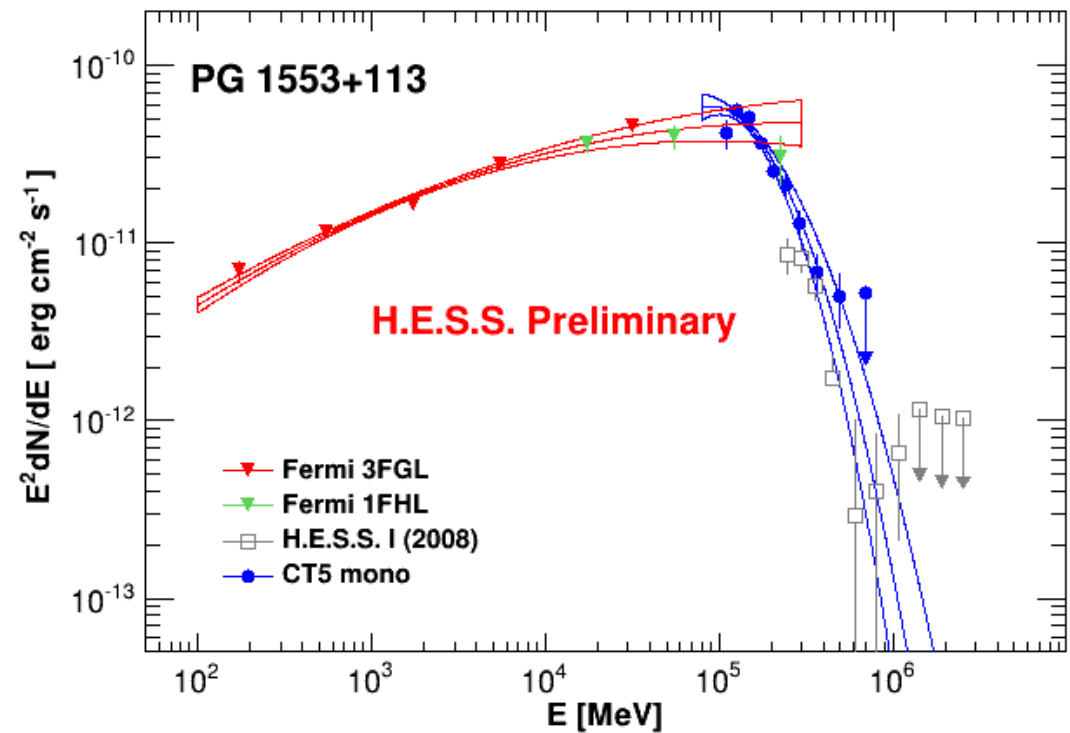
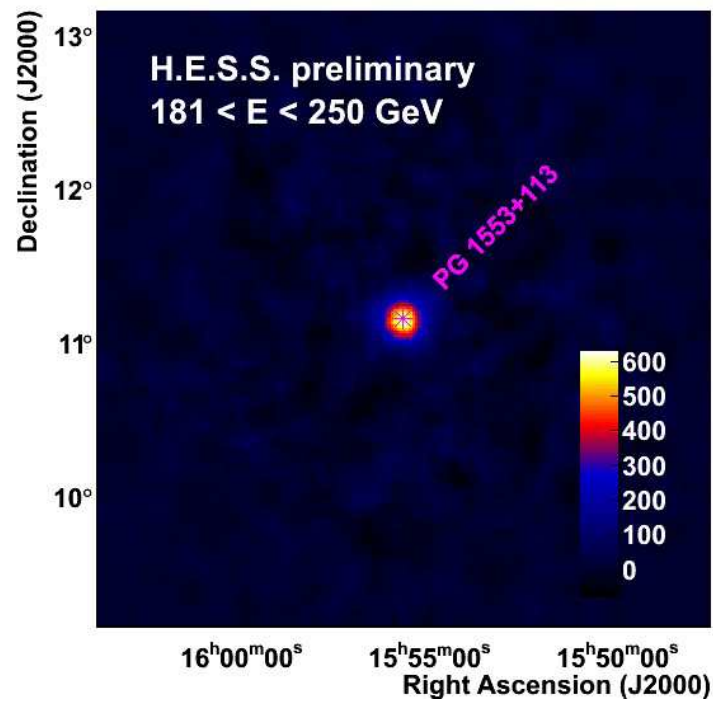
HESS

Wyniki

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

Wysoka precyzja: jednoczesny pomiar rozkładu przestrzennego i spektrum.

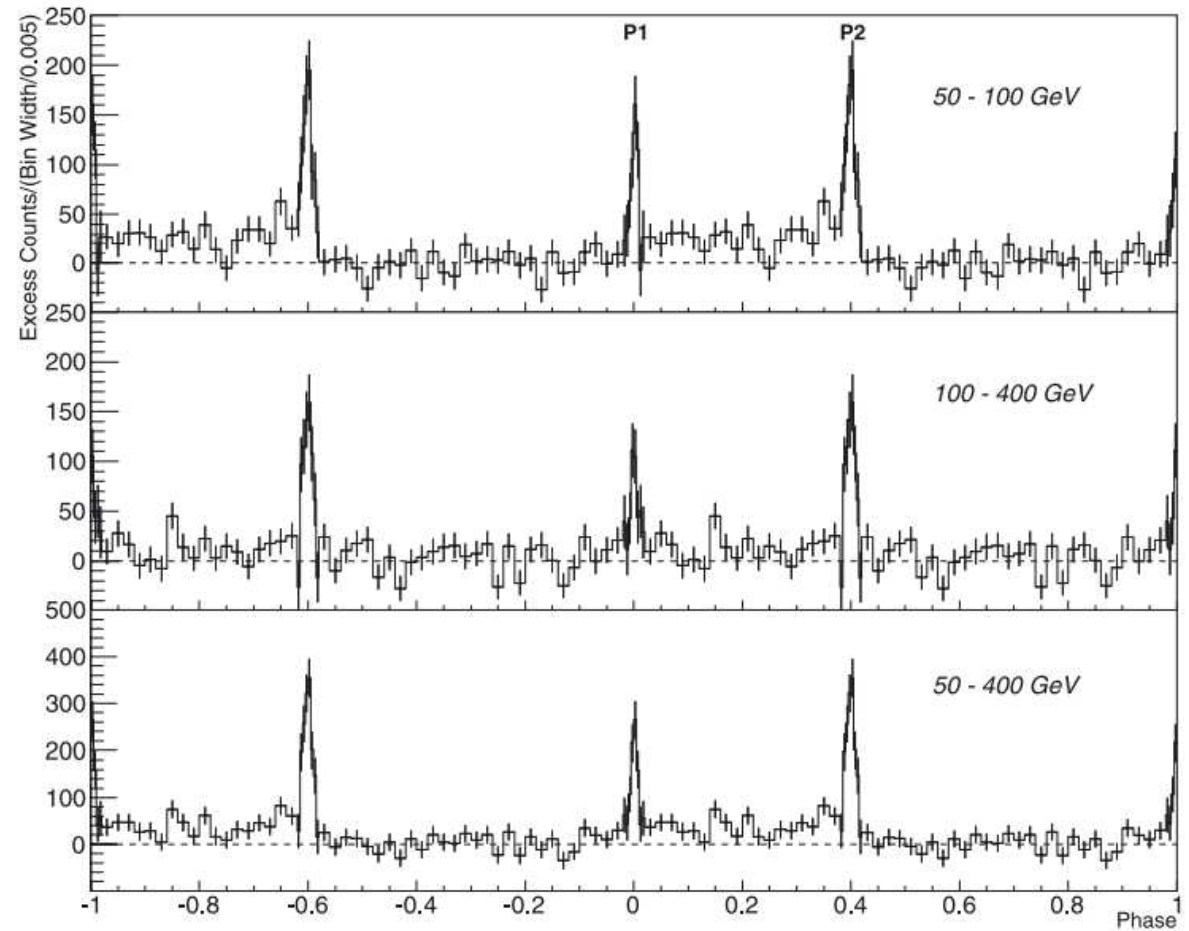
Blazar PG1553+113 ($z \sim 0.5$)



MAGIC

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

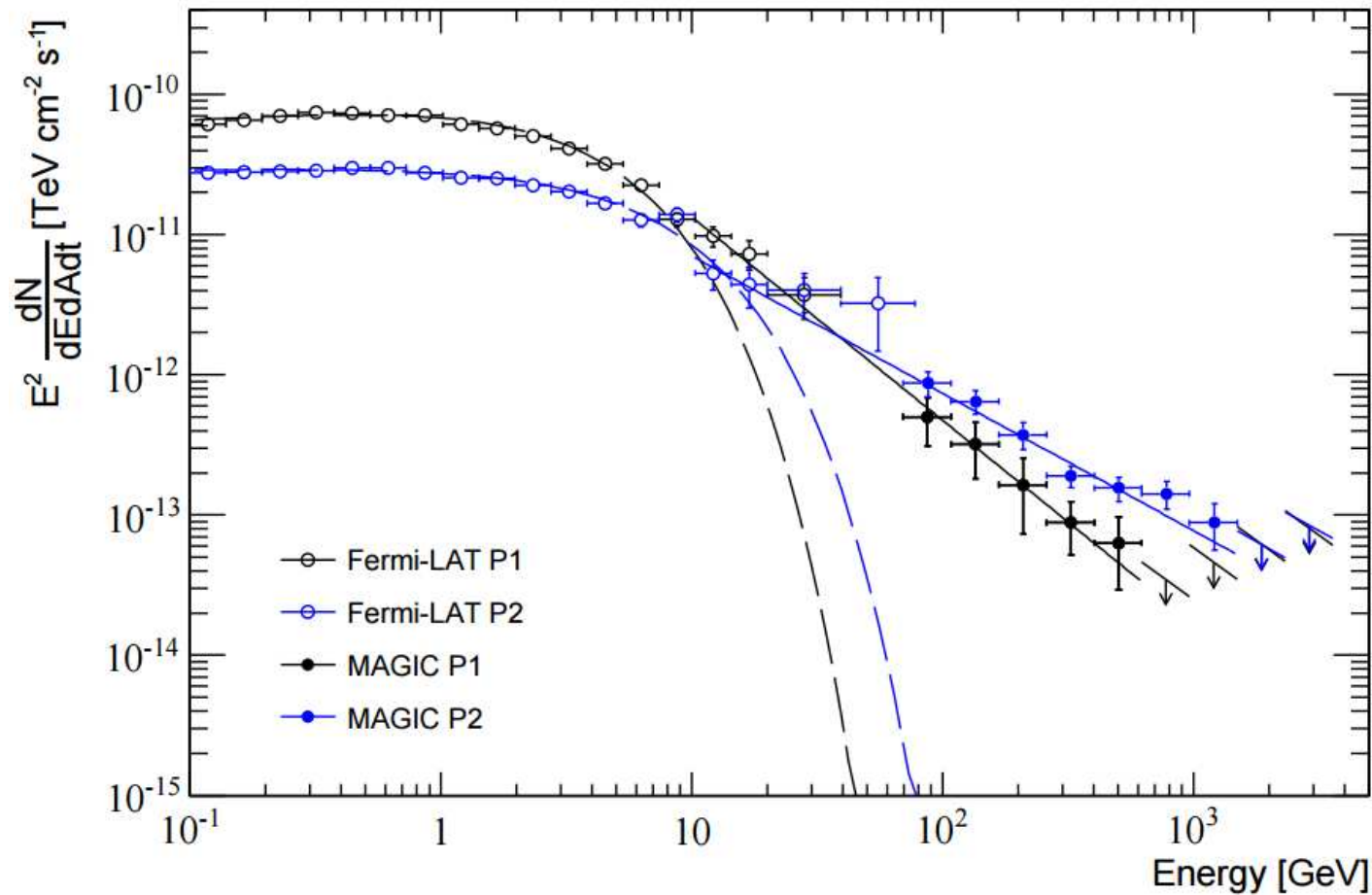
Bardzo dobra rozdzielczość czasowa: natężenie sygnału z Mgławicy Kraba ($T=33\text{ms}$)



MAGIC

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

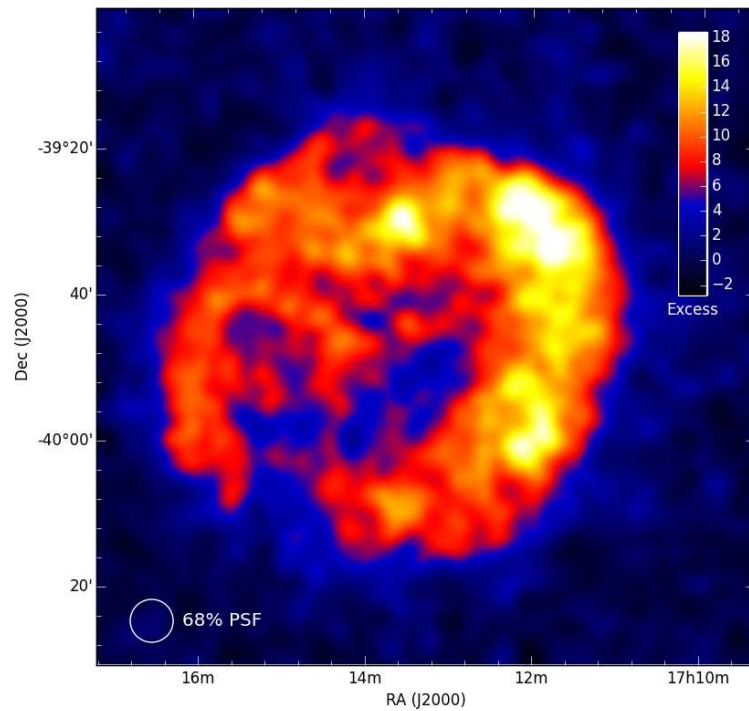
Bardzo dobra rozdzielczość czasowa: porównanie widma dwóch pulsów



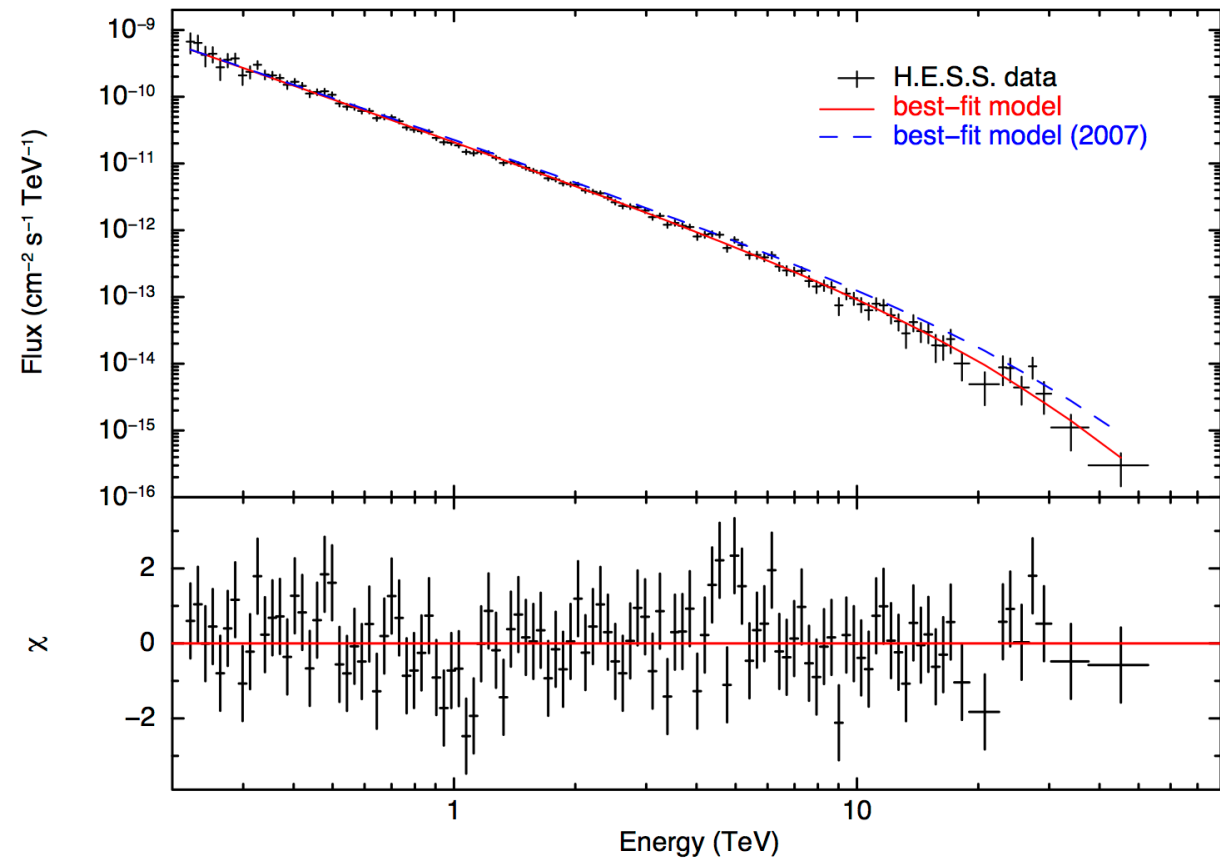
Wyniki

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

RX J1713.7-3946 (SNR)



$$E > 250 \text{ GeV}$$



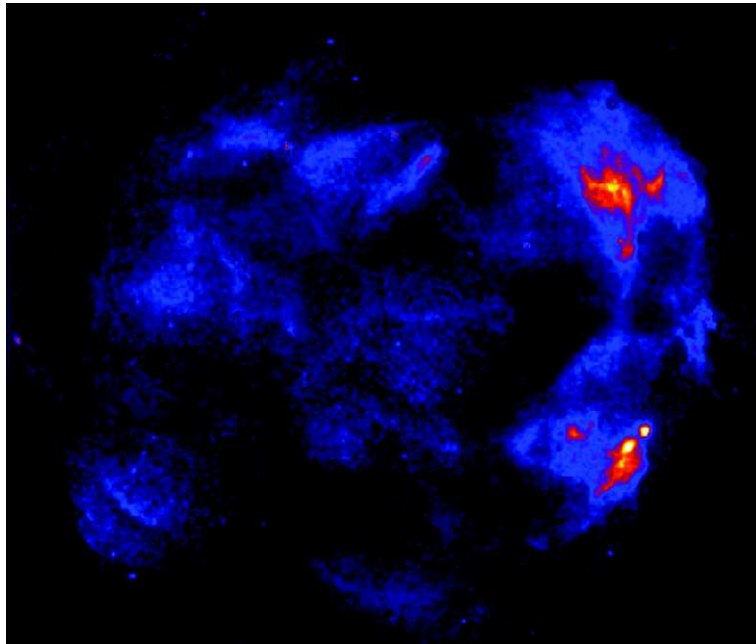
Emisja promieniowania w zakresie TeV związana z przyspieszaniem cząstek

HESS

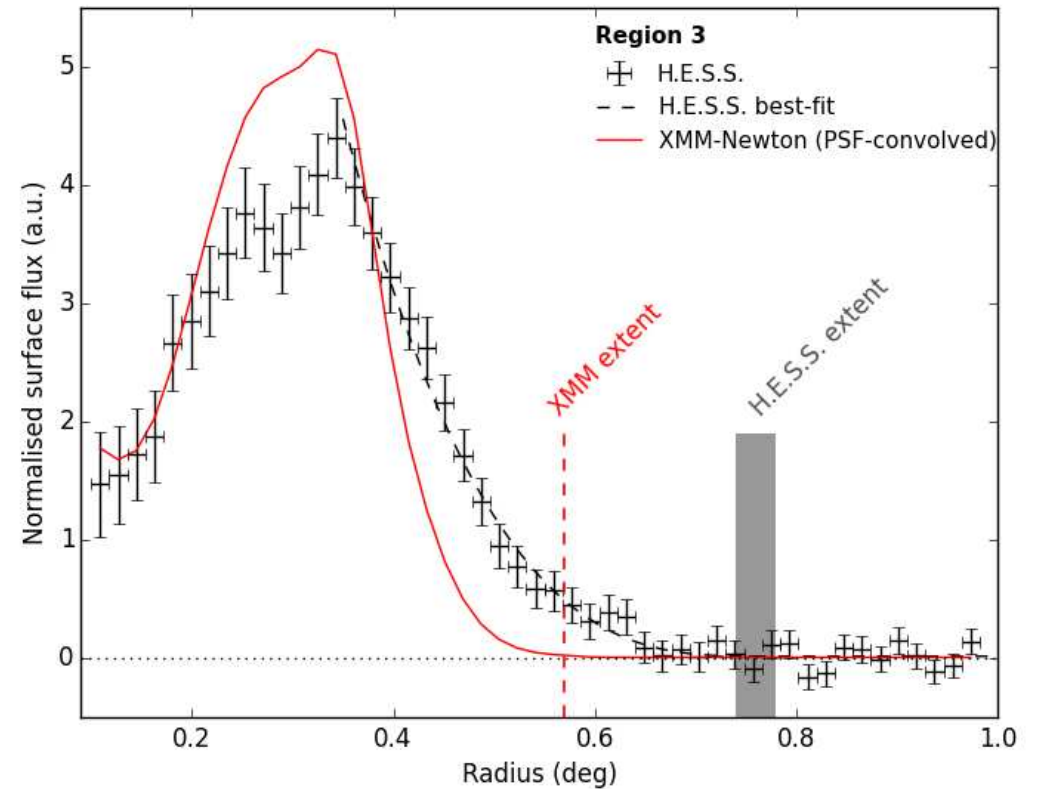
Wyniki

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

RX J1713.7-3946 (SNR)



X-ray

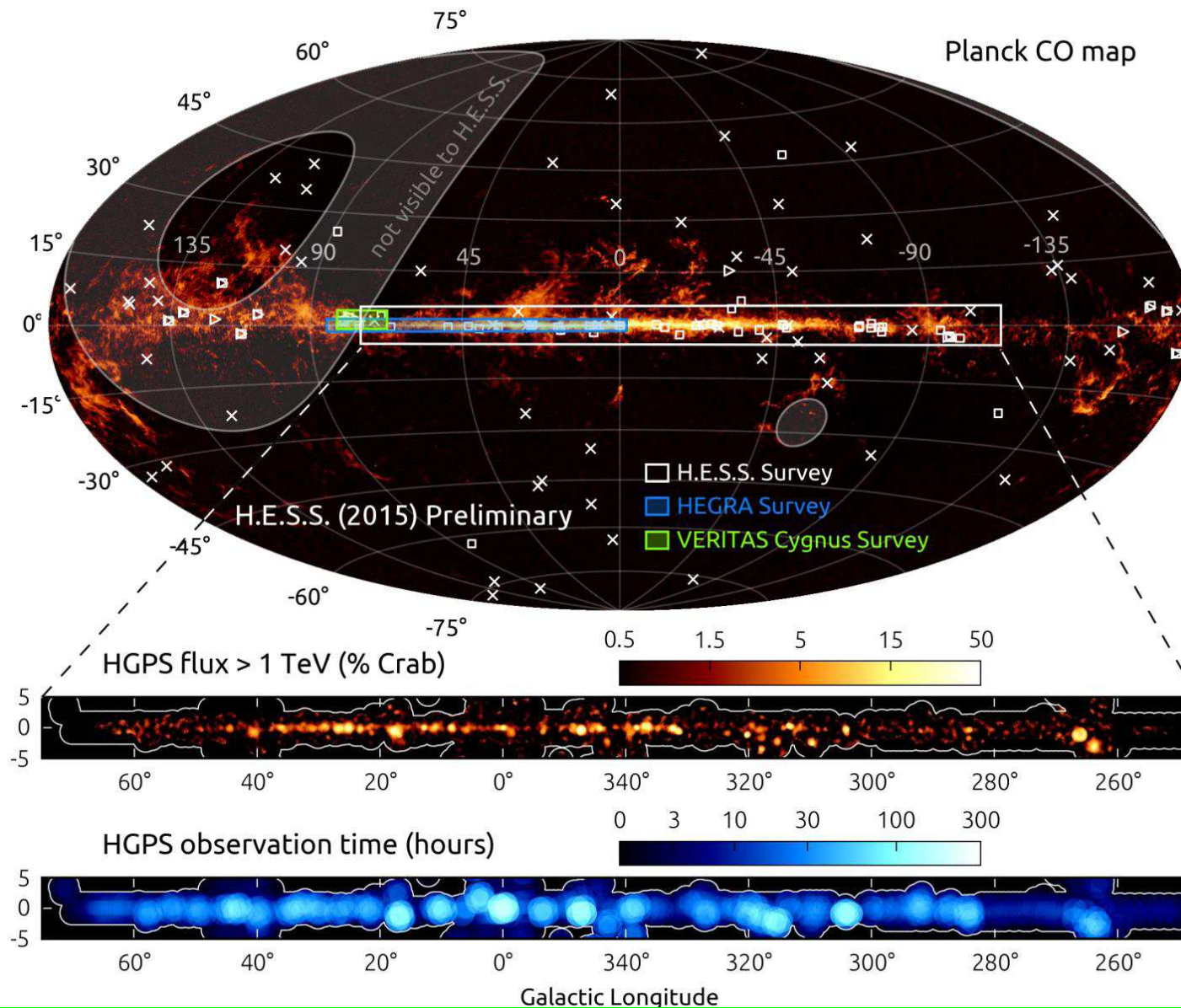


Oddziaływanie przyspieszonych cząstek z otaczającą materia (rozpady π^0)

Wyniki

Skany płaszczyzny Galaktyki.

HESS



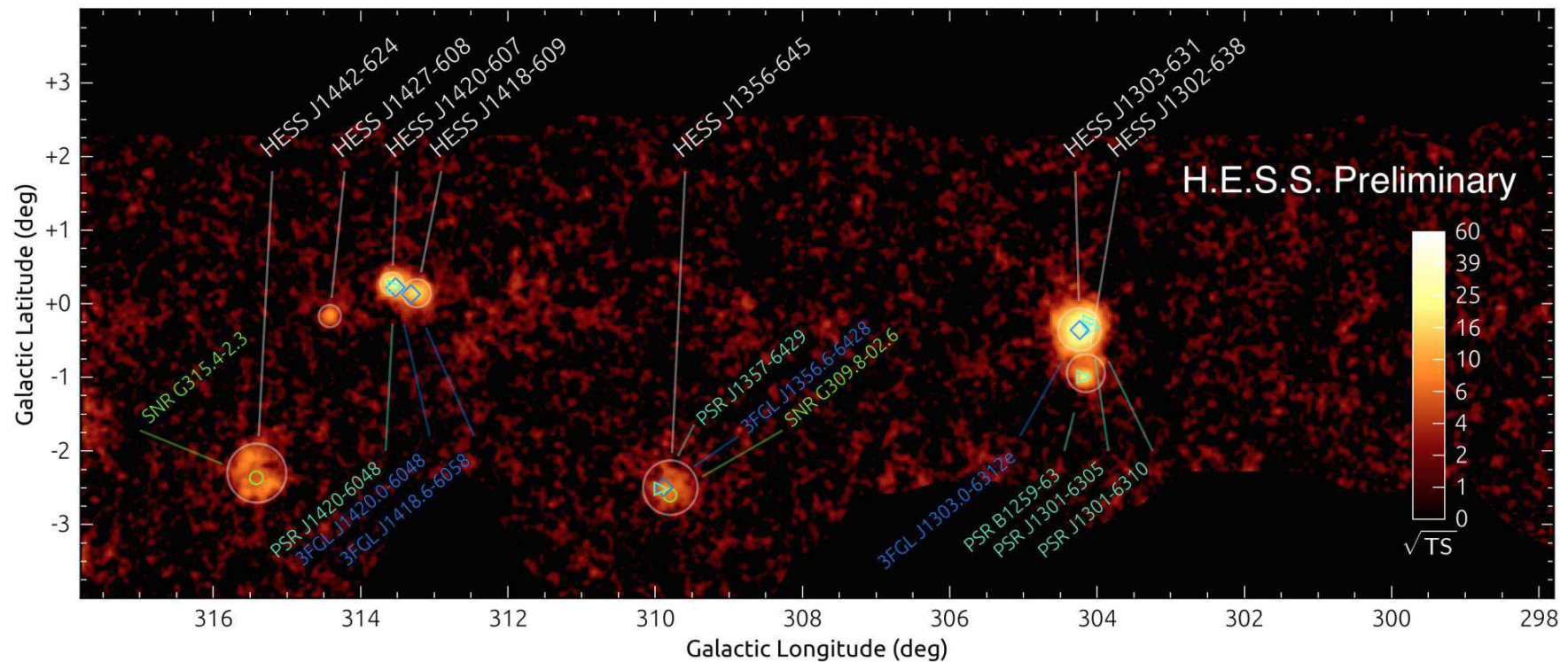
HESS

Wyniki

Skany płaszczyzny Galaktyki.

Dane zbierane przez 10 lat, 3000 “dobrych” godzin obserwacji.

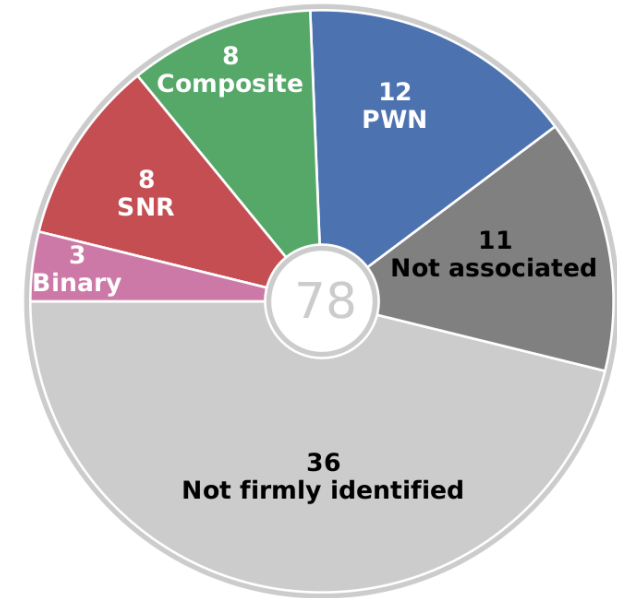
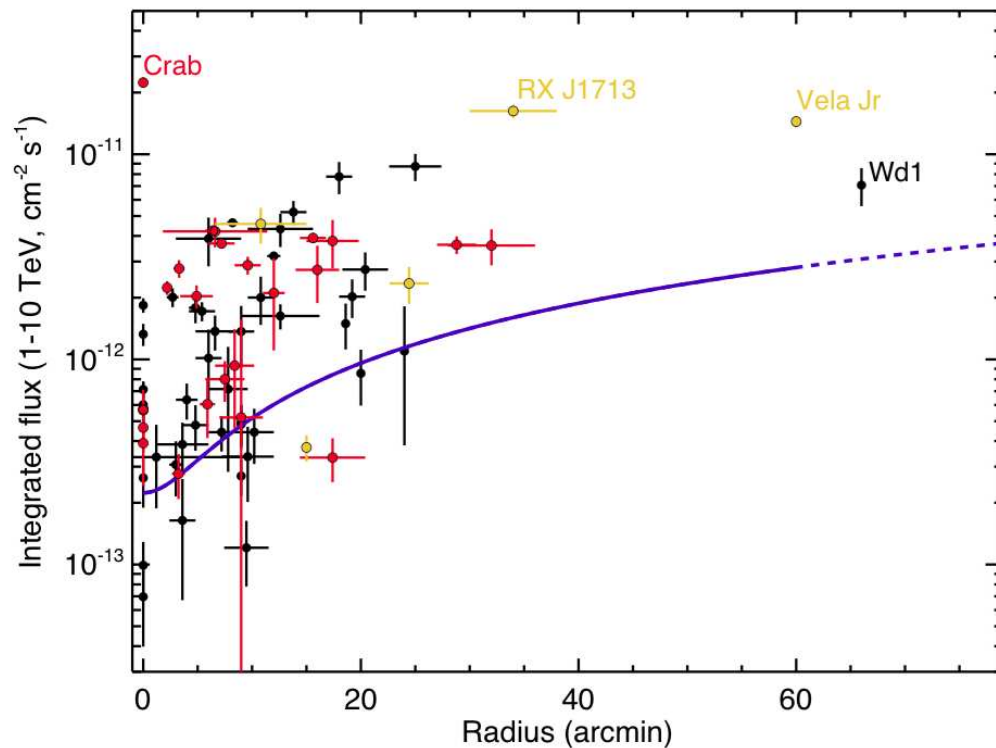
Zidentyfikowano 78 źródeł promieniowania gamma w zakresie TeV



HESS

Wyniki

Zmierzone natężenie, rozmiary i typ źródeł znalezionych w płaszczyźnie Galaktyki



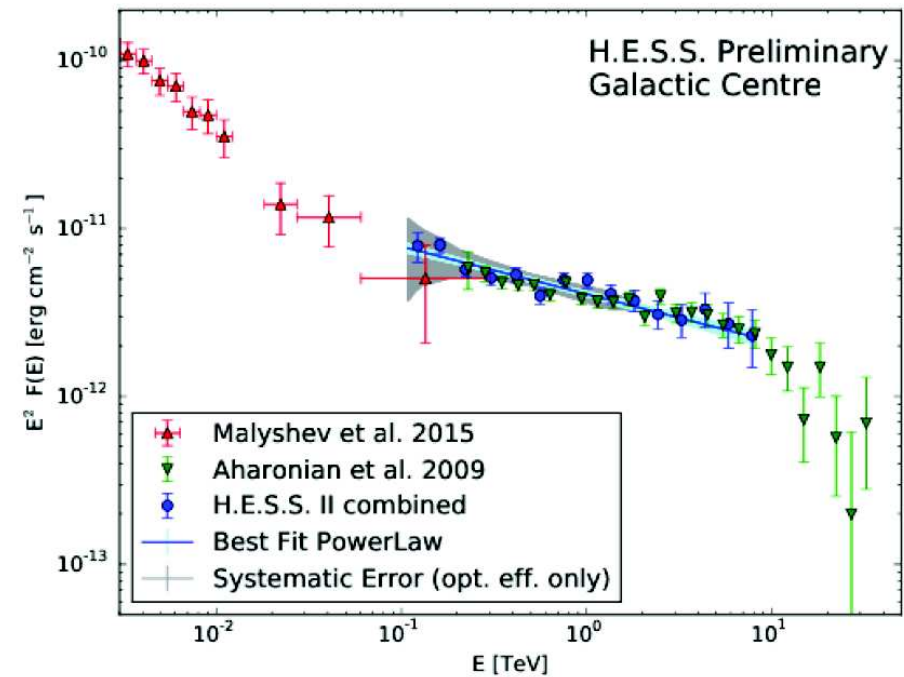
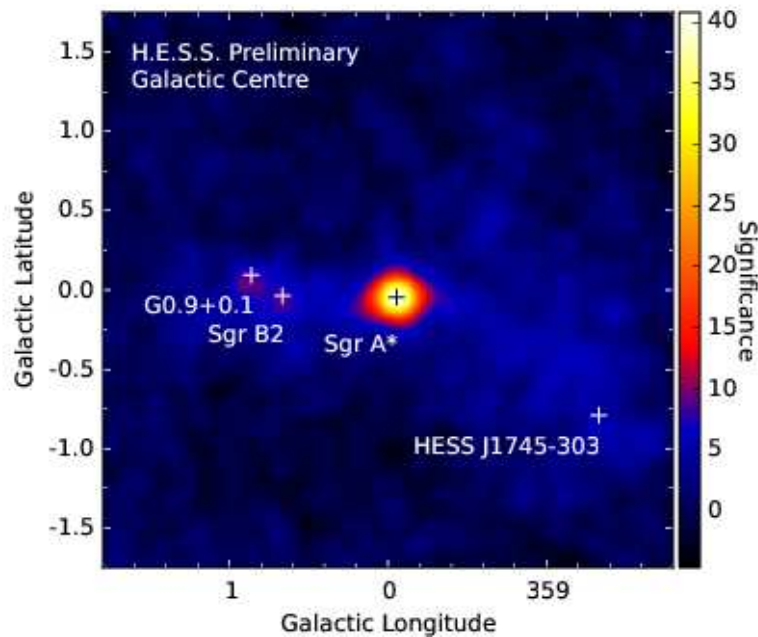
W większości przypadków identyfikacja nie jest jednoznaczna...

PWN - Pulsar Wind Nebula: mgławica pulsarowa, **Plerion**. Mgławica zasilana przez energię pulsara, często związane z SNR. Jednym z takich obiektów jest Mgławica Kraba.

HESS

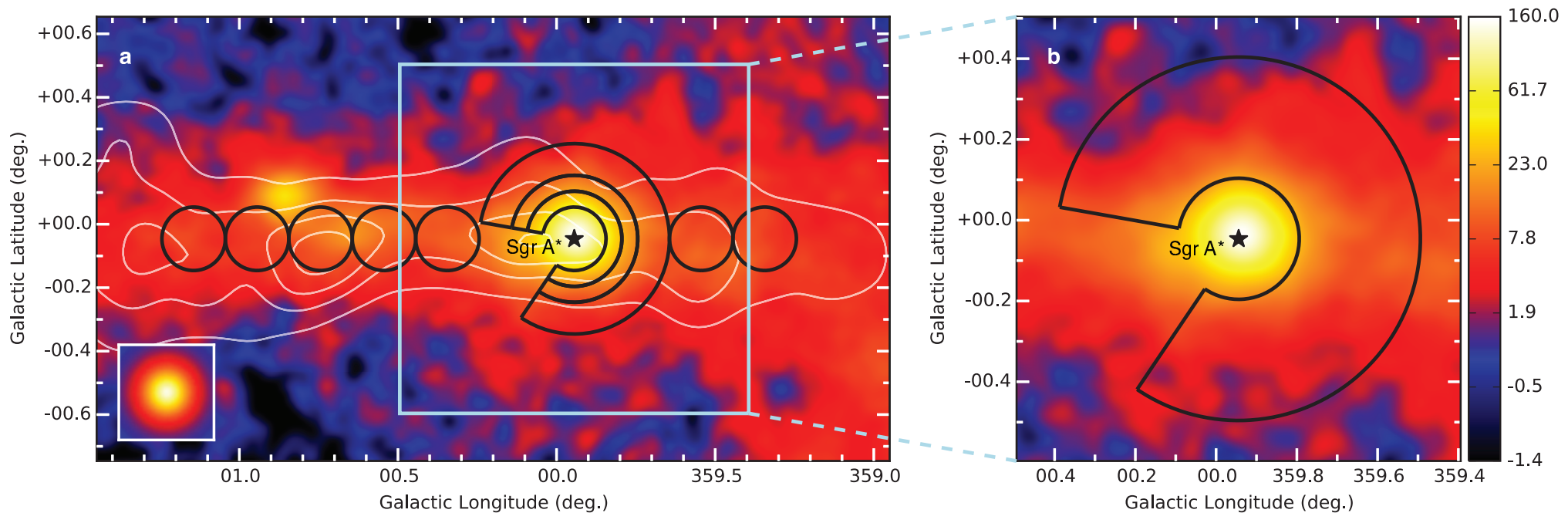
Centrum Galaktyki

Centrum naszej Galaktyki (Sagittarius A* - prawdopodobnie masywna czarna dziura) jest także silnym źródłem promieniowania gamma najwyższej energii.



Centrum Galaktyki

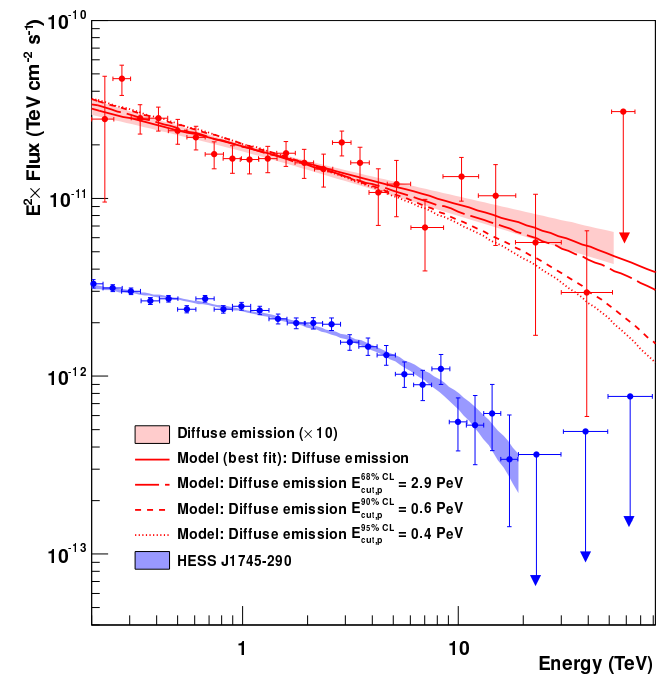
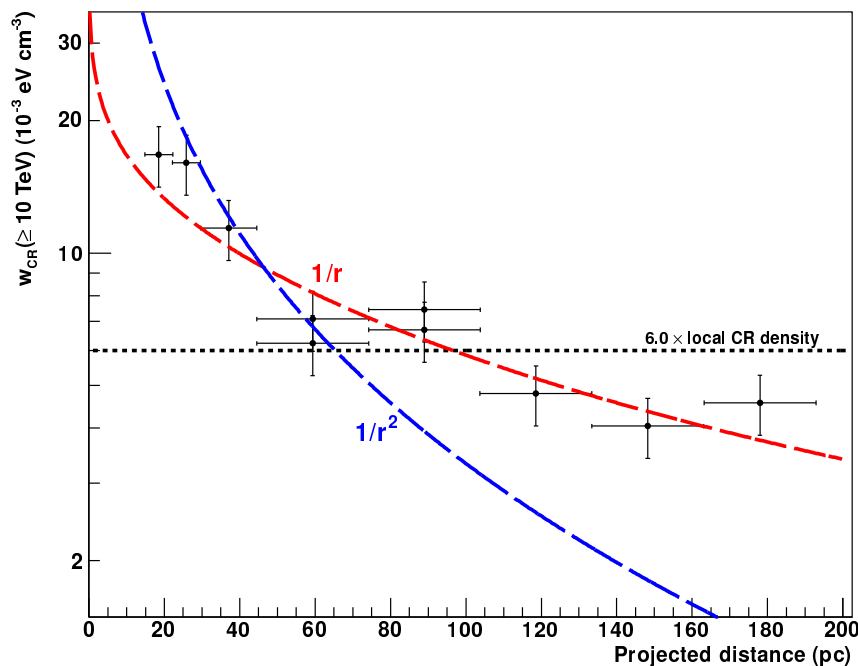
Przy dokładniejszej analizie widać, że źródłem promieniowania jest nie tylko Sag A*, ale także otaczający go obszar zimnej materii międzygwiazdnej.



Rozkład kątowy i energetyczny fotonów z zaznaczonego konturu poddany został szczegółowej analizie.

Centrum Galaktyki

Rozkład przestrzenny i energetyczny promieniowania dochodzącego z okolic centrum galaktyki sugeruje, że jego źródłem są protony o energii rzędu PeV oddziałujące z cząsteczkami gazu.



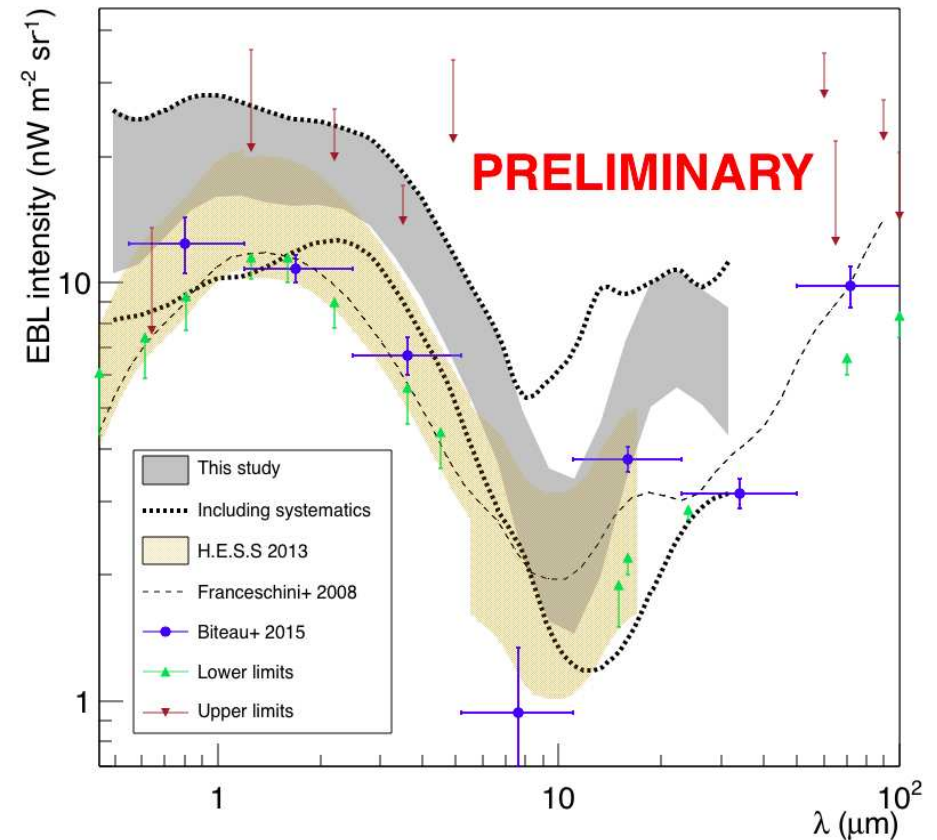
Źródło w centrum galaktyki musi w sposób ciągły emitować promieniowanie (w skalach czasowych > 1000 lat) \Rightarrow rozkład $\sim 1/r$

HESS

Wyniki

Rozkład natężenia tła międzygalaktycznego (Extragalactic Background Light) wyznaczone na podstawie widma odległych blazarów

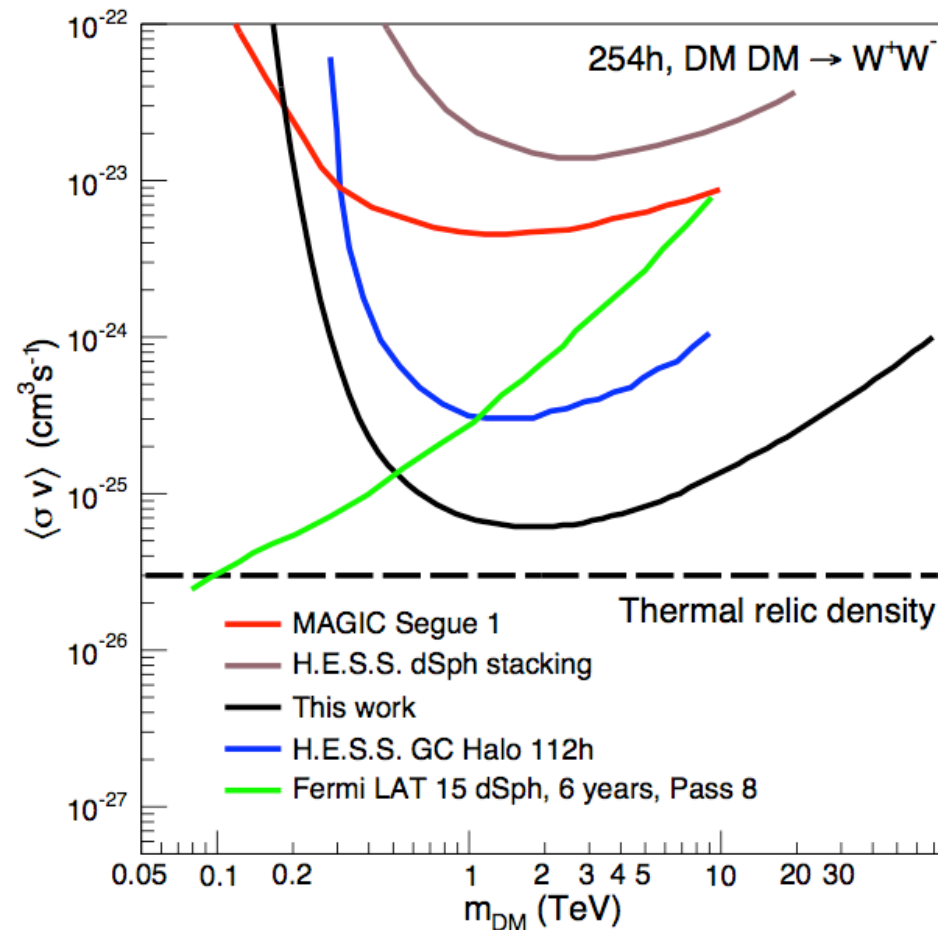
Całkowite promieniowanie w zakresie od 0.1 do 1000 μm odpowiada ok. 5% CMB

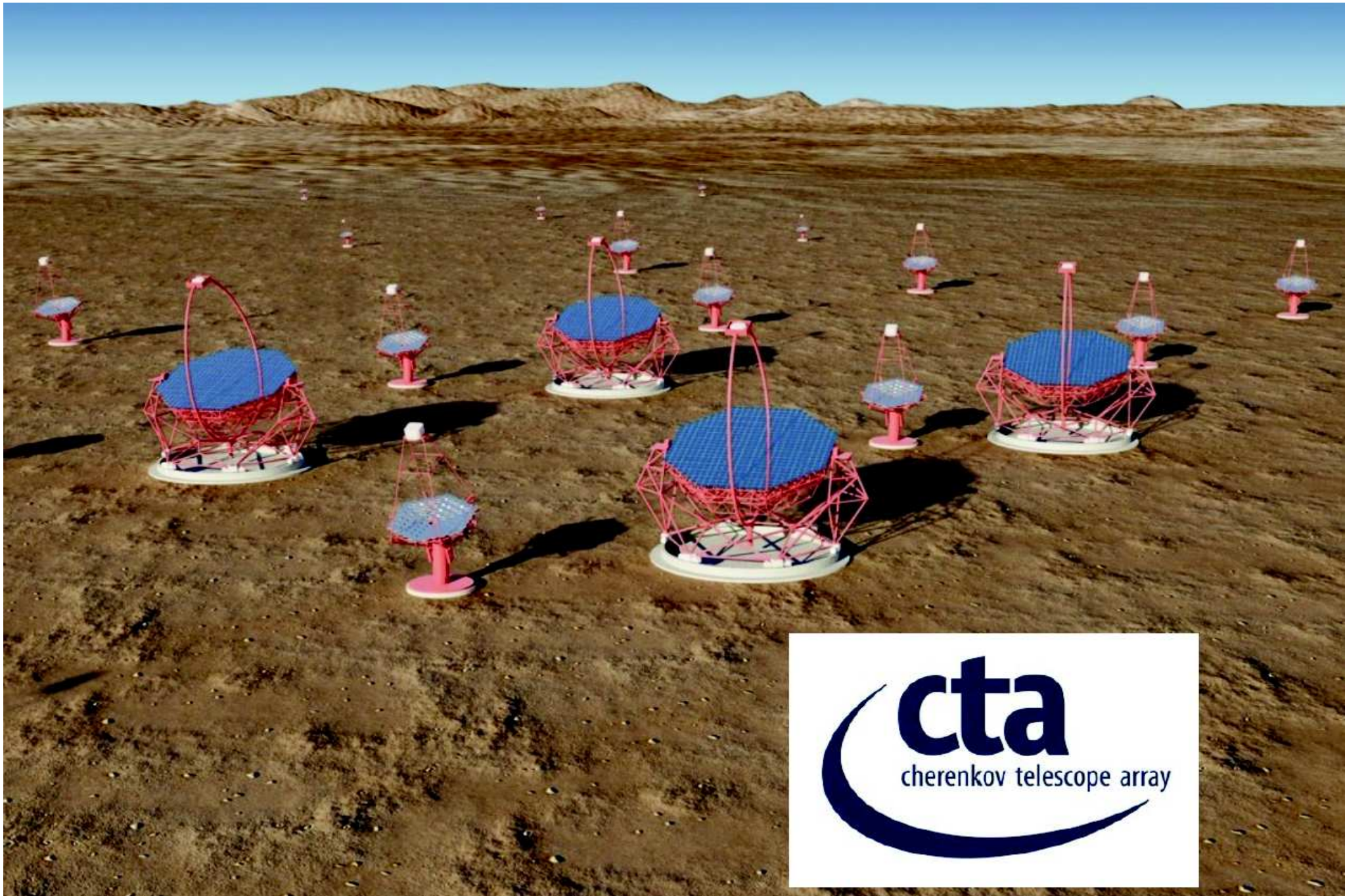


HESS

Poszukiwanie Ciemnej Materii

Podobnie jak w eksperymentach satelitarnych, poszukiwane były struktury w rozkładzie energii fotonów pochodzących z różnych źródeł (np. centrum lub [halo galaktyki](#)).





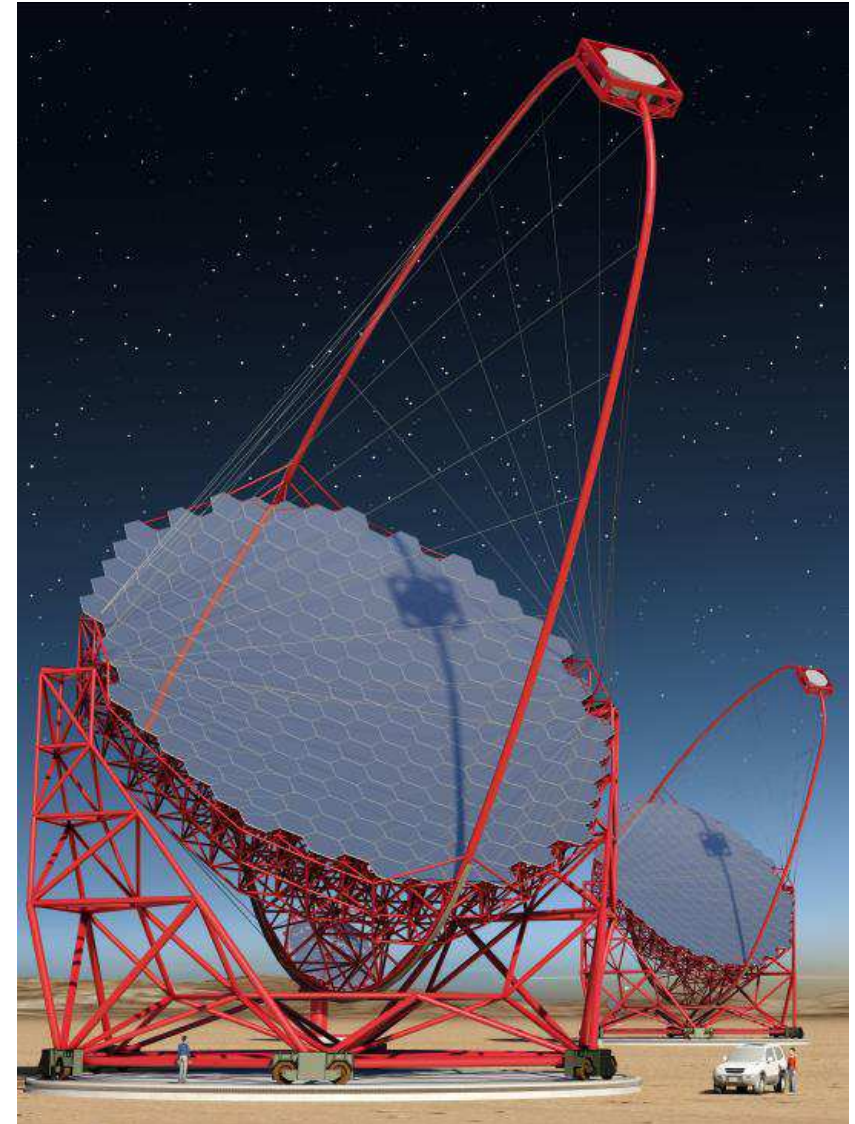
CTA

Projekt

Aby rejestrować niskoenergetyczne kaskady, potrzebne są teleskopy o bardzo dużych zwierciadłach, żeby zebrać wystarczająco silny sygnał.

W projekcie CTA przewiduje się budowę 4 dużych teleskopów (LST), o średnicy 23 m, co pozwoli na pomiar energii fotonów w zakresie 20 - 200 GeV.

Pole widzenia ok. 4.5°



CTA

Projekt

Fotony o energiach rzędu 1 TeV można już rejestrować mniejszymi teleskopami.

Ale ich strumień jest na tyle mały, że potrzebujemy większej liczby detektorów, żeby go dokładnie zmierzyć.

W projekcie CTA przewiduje się budowę 15-25 średnich teleskopów (MST), o średnicy 12 m, co pozwoli na pomiar energii fotonów w zakresie 0.1 - 10 TeV.

Pole widzenia ok. 8°

Prototyp w Berlin-Zeuthen



CTA

Projekt

Fotony o energiach rzędu 1 TeV można już rejestrować mniejszymi teleskopami.

Ale ich strumień jest na tyle mały, że potrzebujemy większej liczby detektorów, żeby go dokładnie zmierzyć.

W projekcie CTA przewiduje się budowę 15-25 średnich teleskopów (MST), o średnicy 12 m, co pozwoli na pomiar energii fotonów w zakresie 0.1 - 10 TeV.

Pole widzenia ok. 8°

Aletrantyczna konstrukcja włoska



CTA

Projekt

Fotony o najwyższych energiach można rejestrować małymi teleskopami, ale musimy ustawić je na możliwie dużej powierzchni, żeby zwiększyć akceptację.

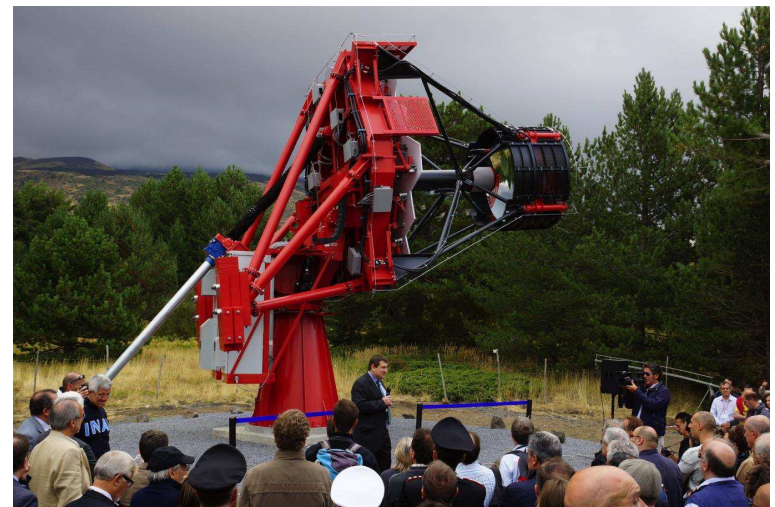
W projekcie CTA przewiduje się budowę ok. 70 małych teleskopów (SST), o średnicy ok. 4 m, co pozwoli na pomiar fotonów powyżej kilku TeV.

Pole widzenia ok. 10°

IFJ PAN, Kraków



Włochy



CTA

Projekt

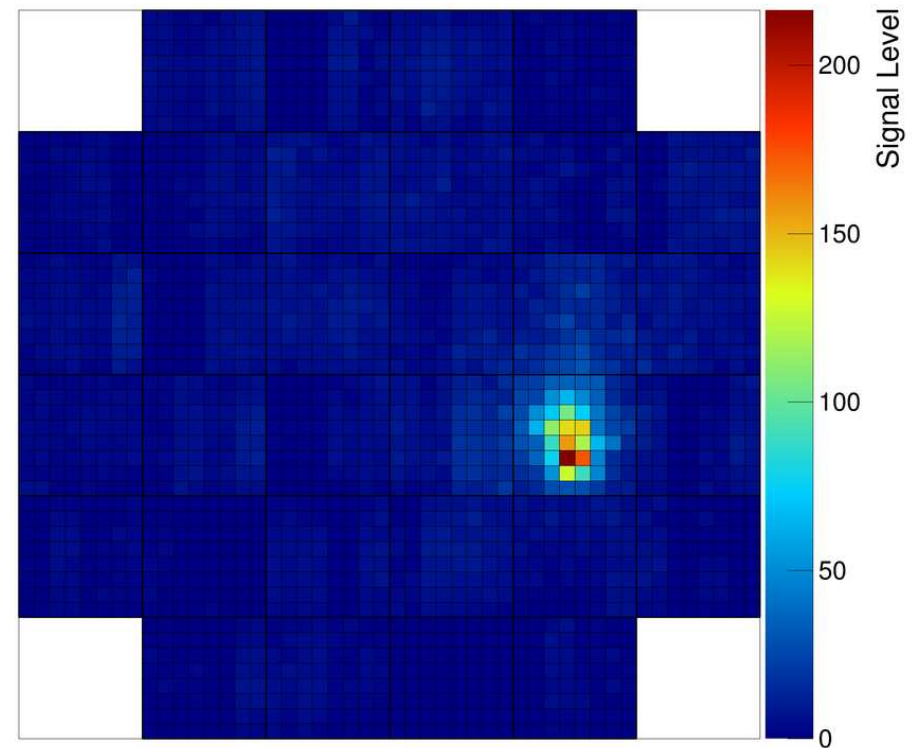
W grudniu 2015 uruchomiono prototyp SST z dwoma zwierciadłami (Francja).



CTA

Projekt

W grudniu 2015 uruchomiono prototyp SST z dwoma zwierciadłami (Francja).

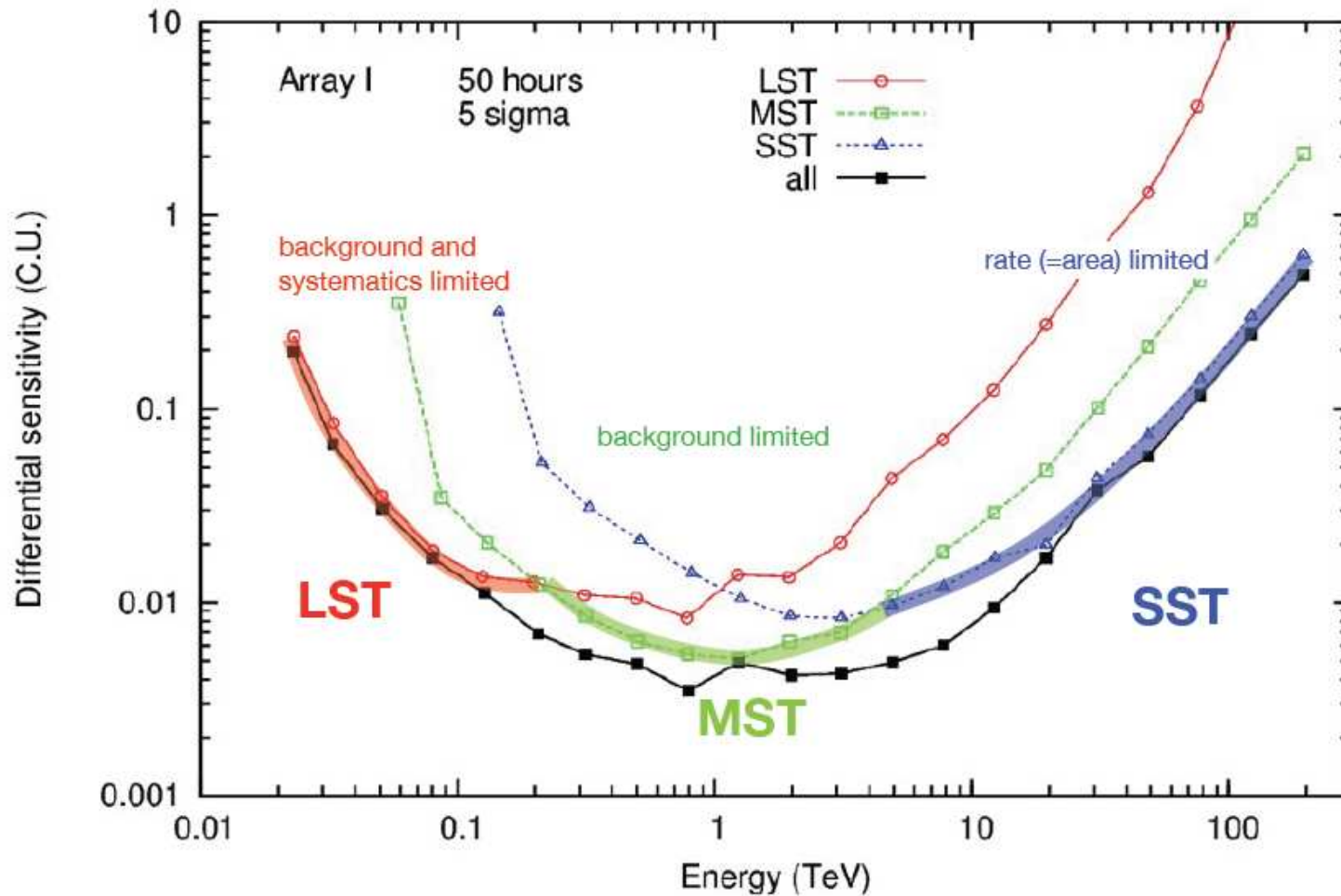


Wciąż rozważane dwie wersje kamery: MAPM (fotopowielacze) i SiPM (krzem)

CTA

Czułość

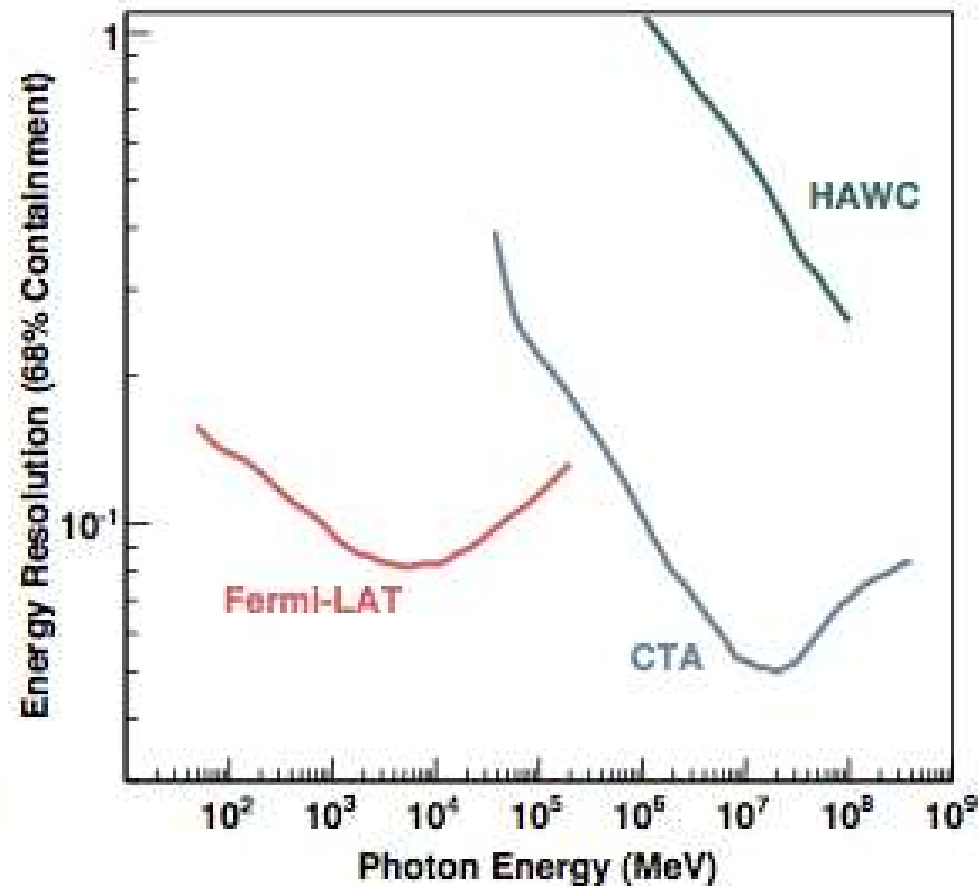
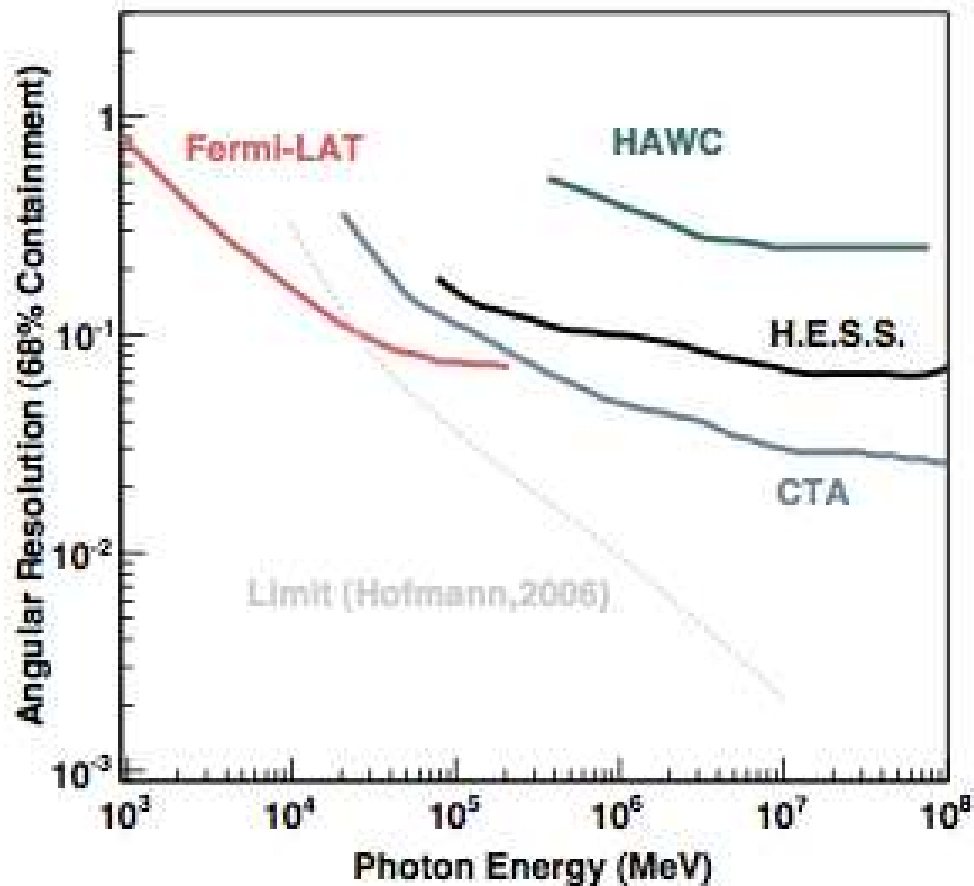
Połączenie trzech rodzajów teleskopów pozwoli na pomiar w szerokim zakresie energii



CTA

Dokładność

Uzyskiwane dokładności pomiaru energii i pozycji źródła bezkonkurencyjne dla energii powyżej 1 TeV

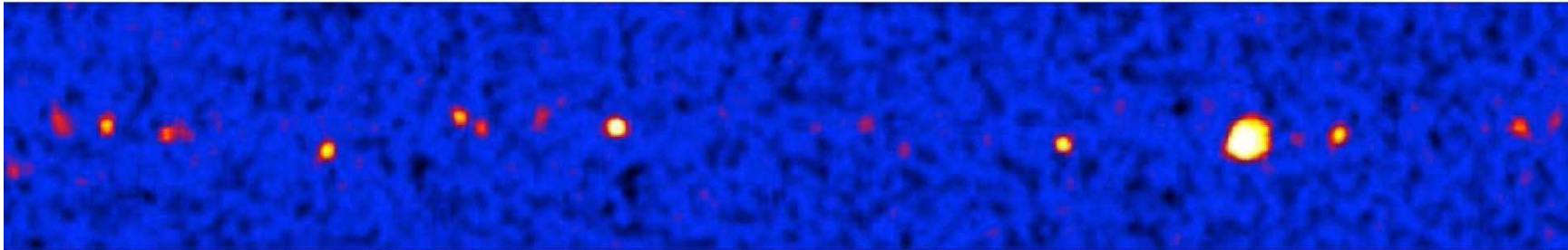


CTA

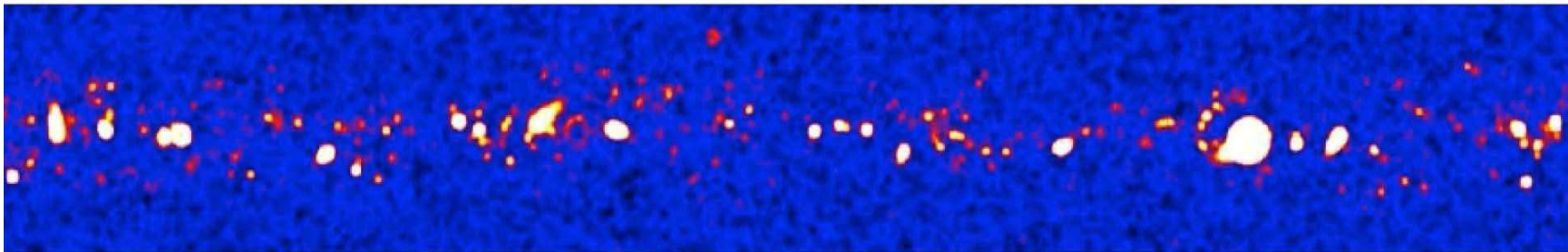
Dokładność

Uzyskiwane dokładności pomiaru energii i pozycji źródła bezkonkurencyjne dla energii powyżej 1 TeV

H.E.S.S.



CTA, for same exposure

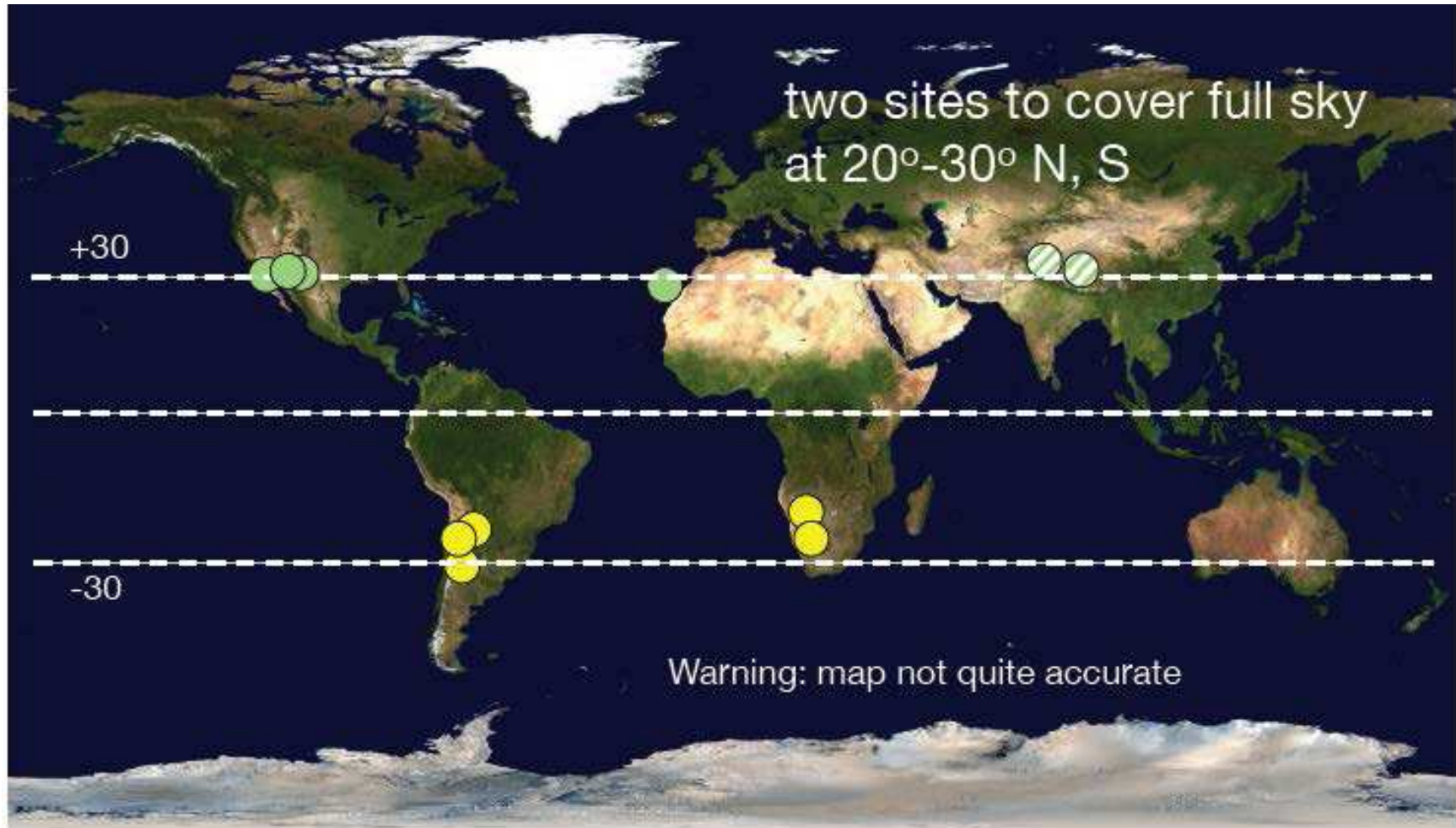


expect ~1000 detected sources

CTA

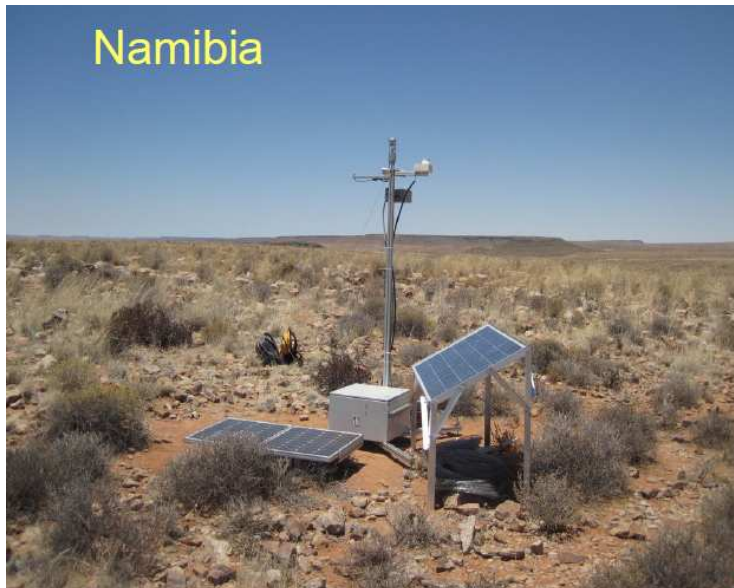
Lokalizacja

Zaplanowano budowę dwóch zestawów teleskopów, na północnej i południowej półkuli.



CTA

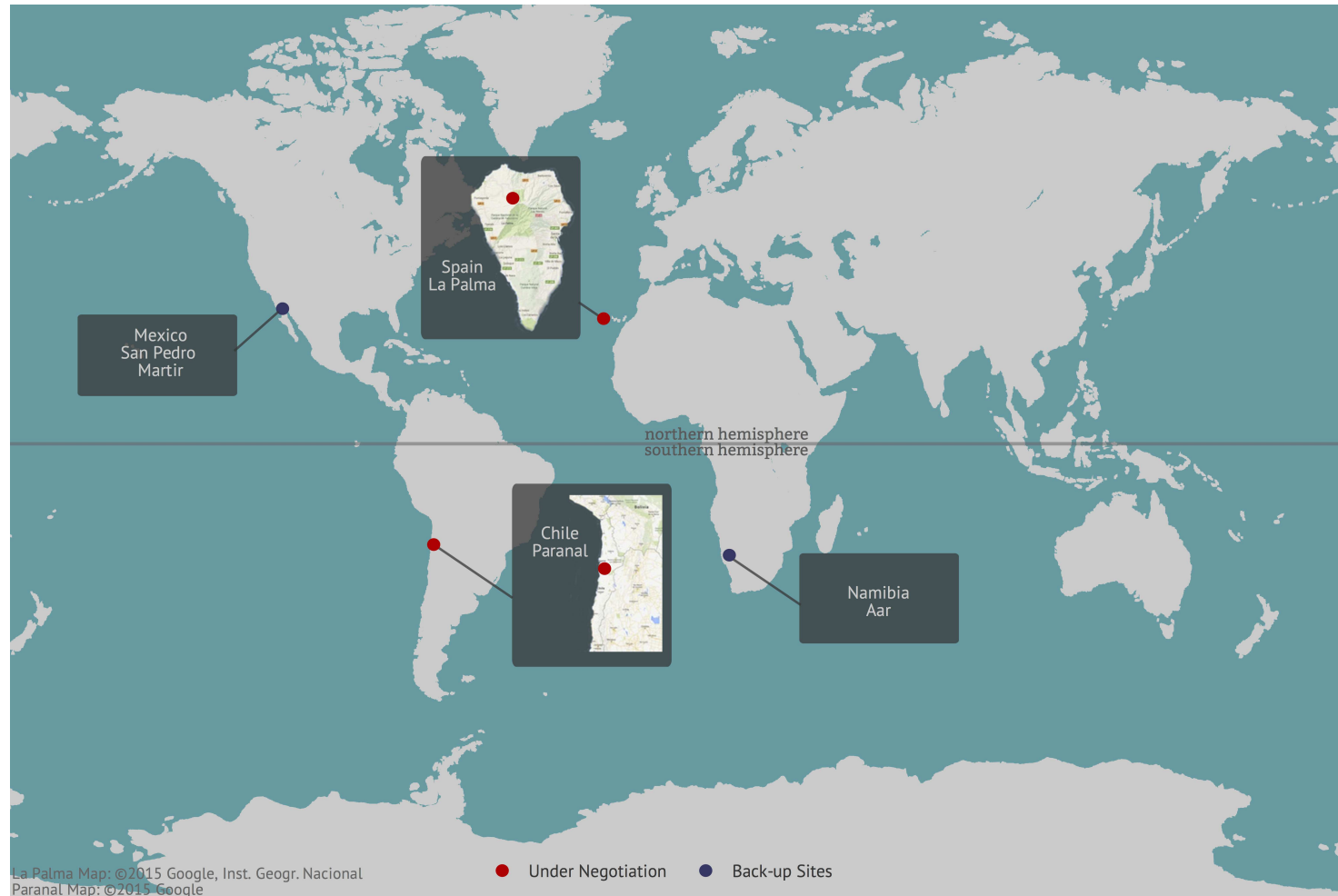
Rozważane lokalizacje



CTA

Wybrane lokalizacje

Decyzja podjęta latem 2015: Chile i Wyspy Kanaryjskie.



CTA

Chile

pustynia Atacama



CTA

Chile

pustynia Atacama

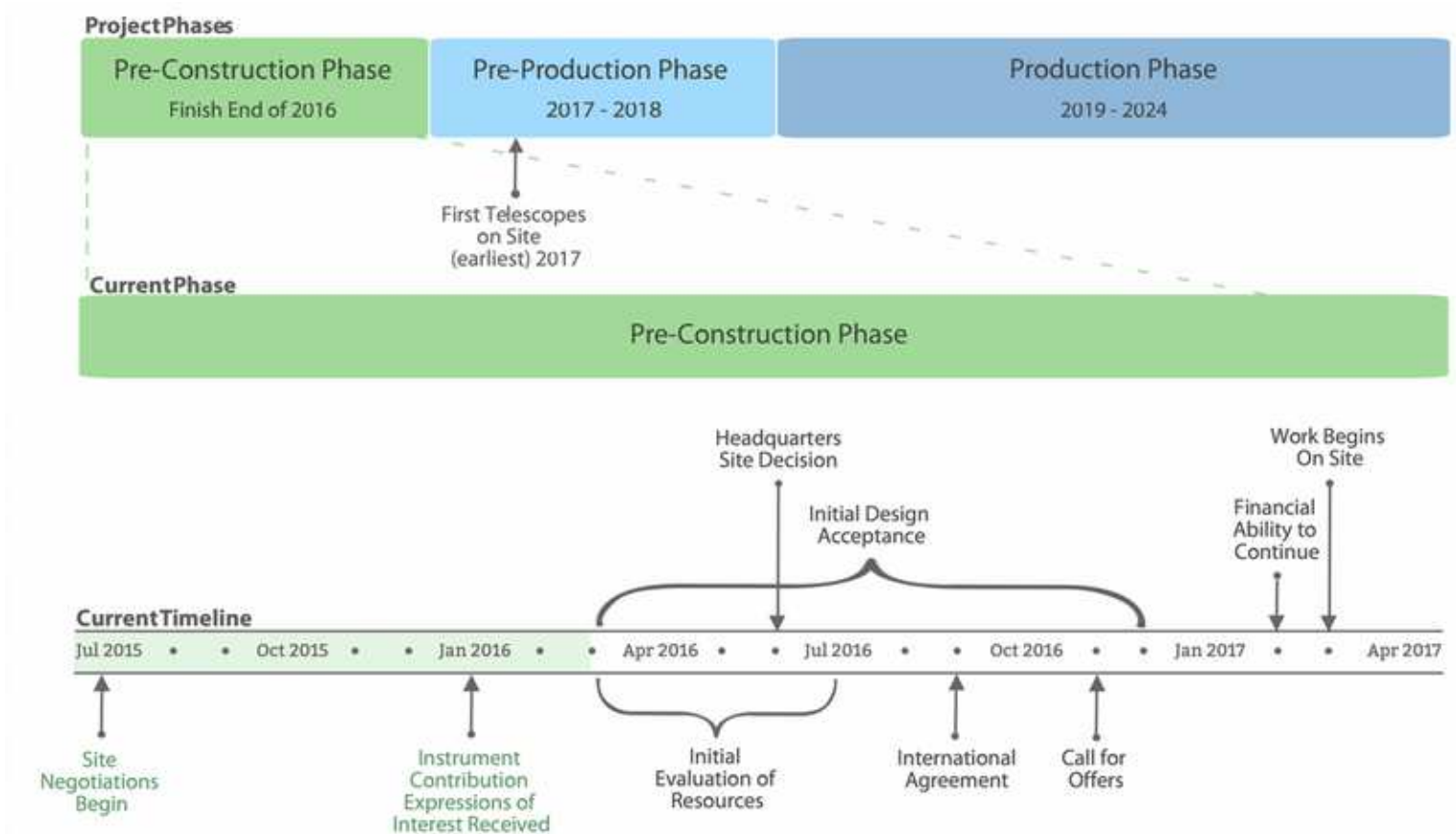


CTA

Harmonogram 2016

CTA znajduje się na europejskiej (i polskiej) liście priorytetowej infrastruktury badawczej

Budowa obserwatorium północnego na La Palma rozpoczęła się w 2017



CTA

La Palma

gotowy szkielet teleskopu LST

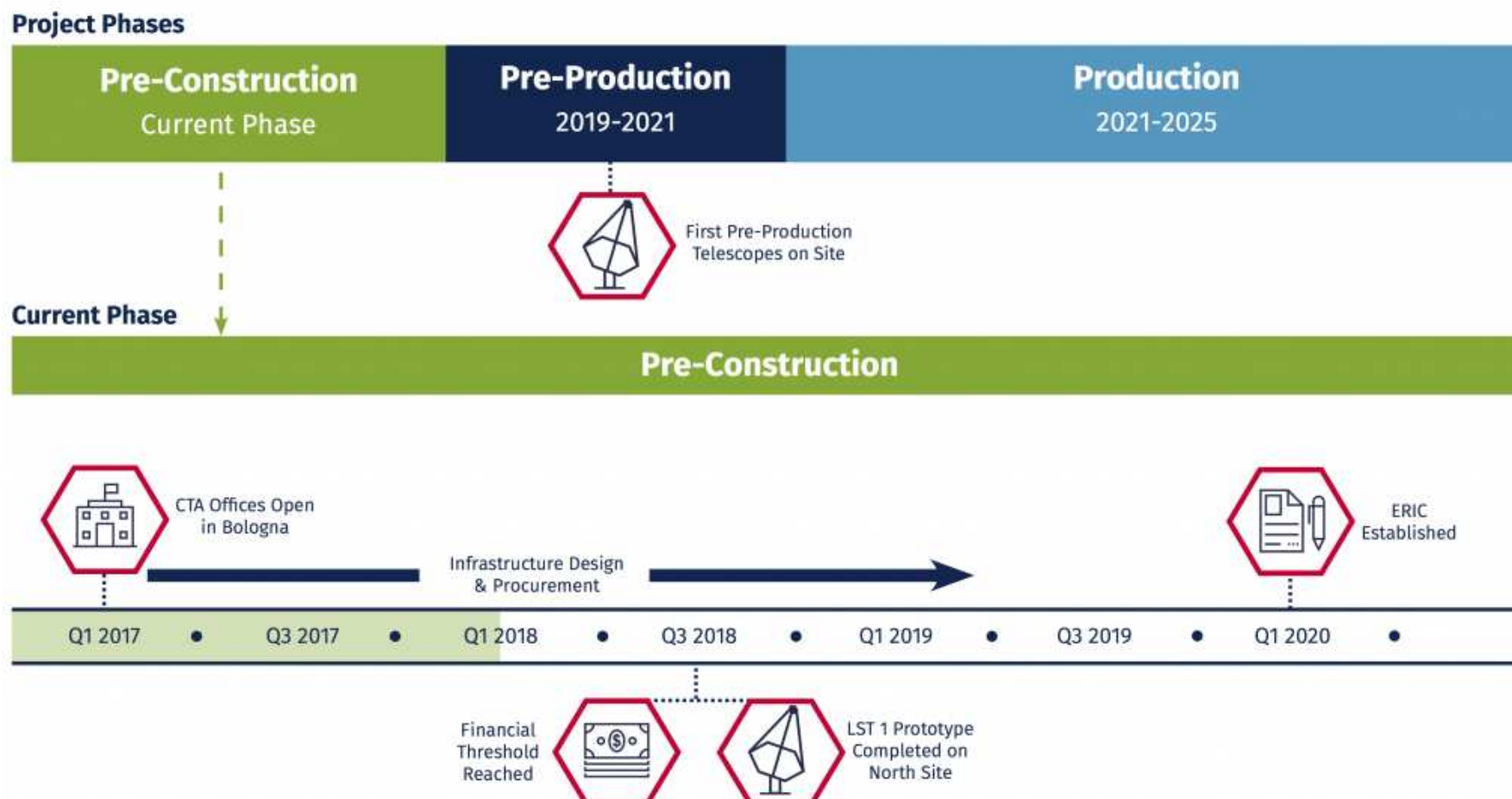


CTA

Harmonogram 2018

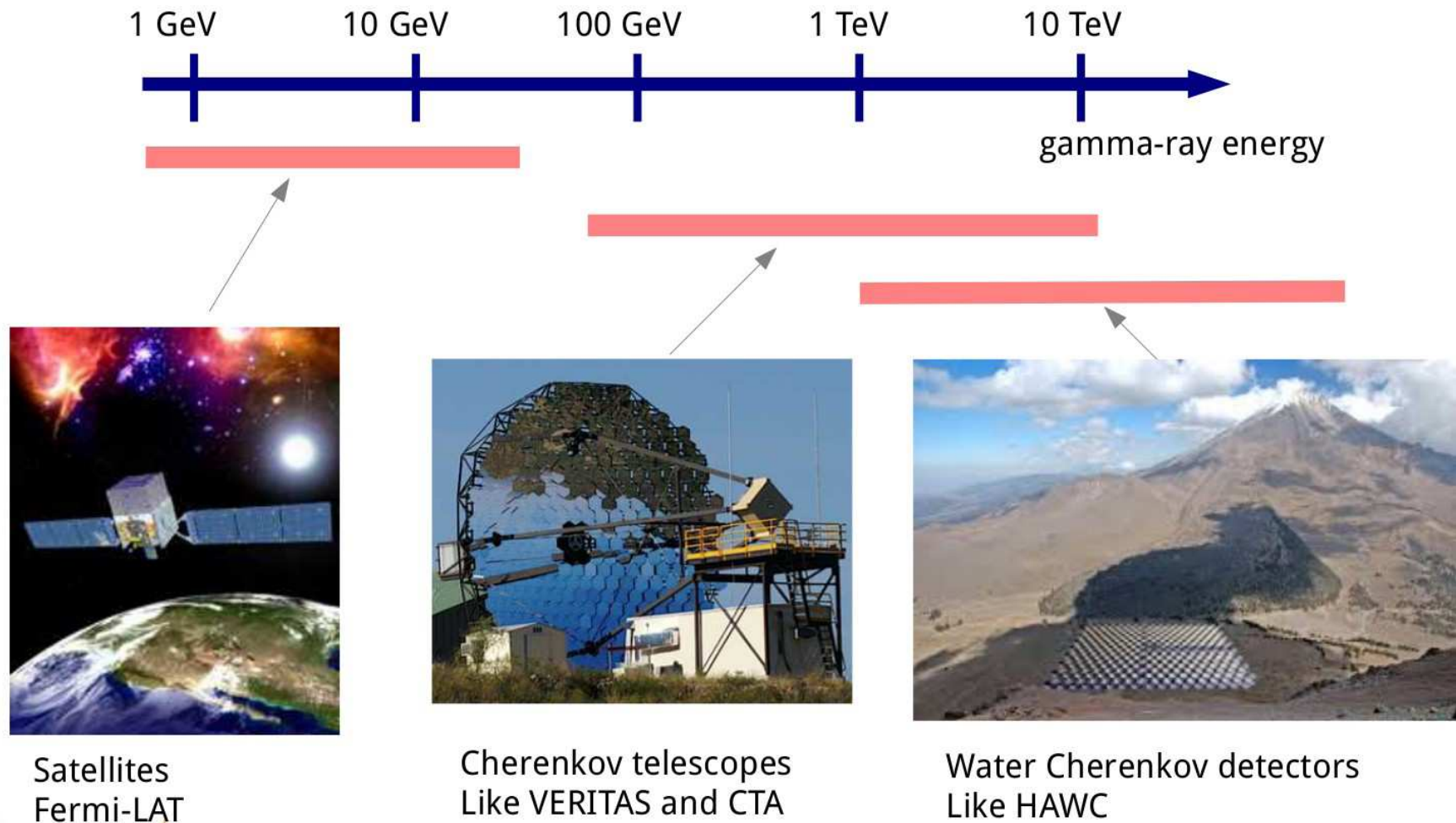
CTA znajduje się na europejskiej (i polskiej) liście priorytetowej infrastruktury badawczej

Trwają wciąż negocjacje umowy lokalizacji obserwatorium południowego...



Promieniowanie gamma

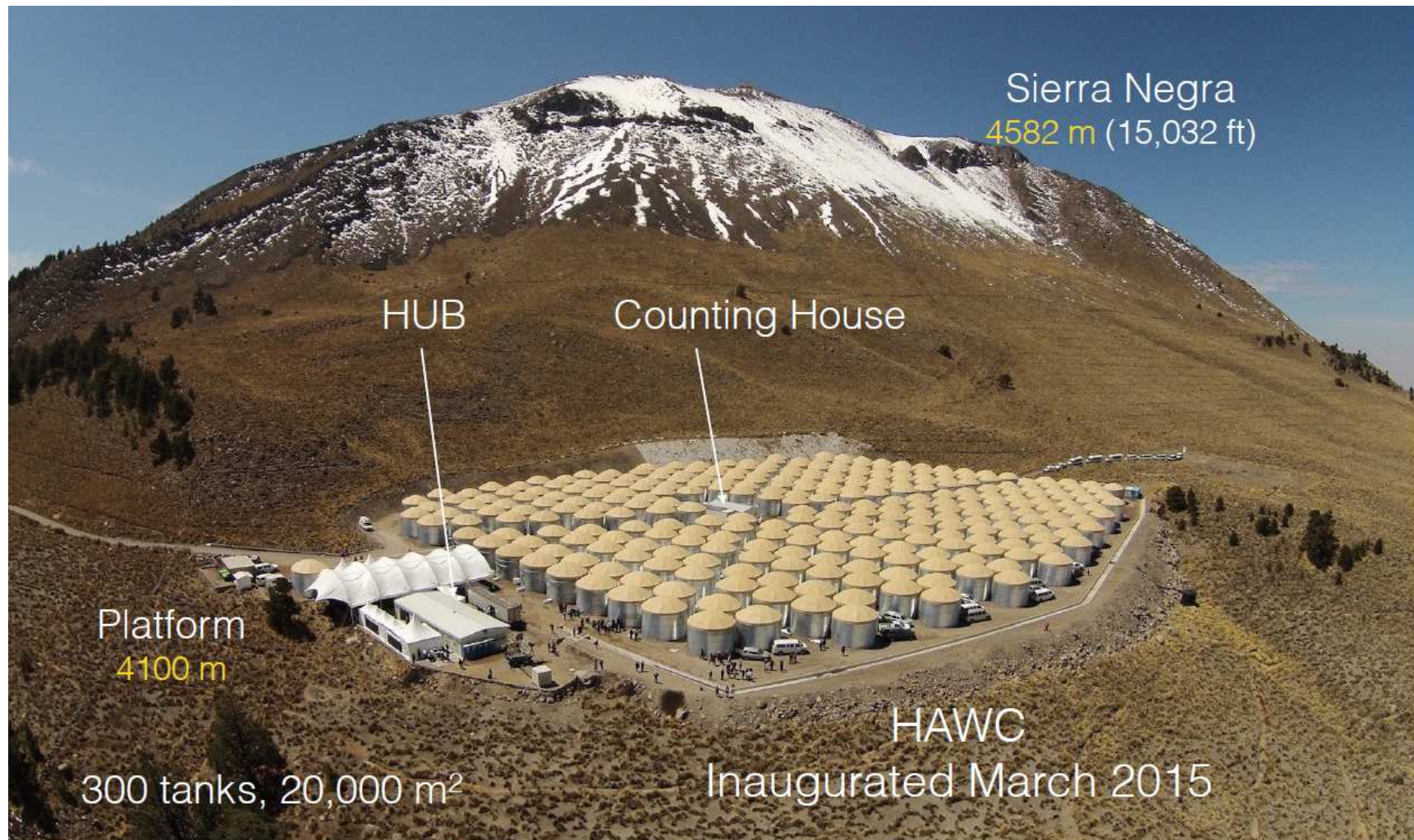
Metody detekcji



HAWC

Wodny detektor promieniowania Czerenkowa

Meksyk

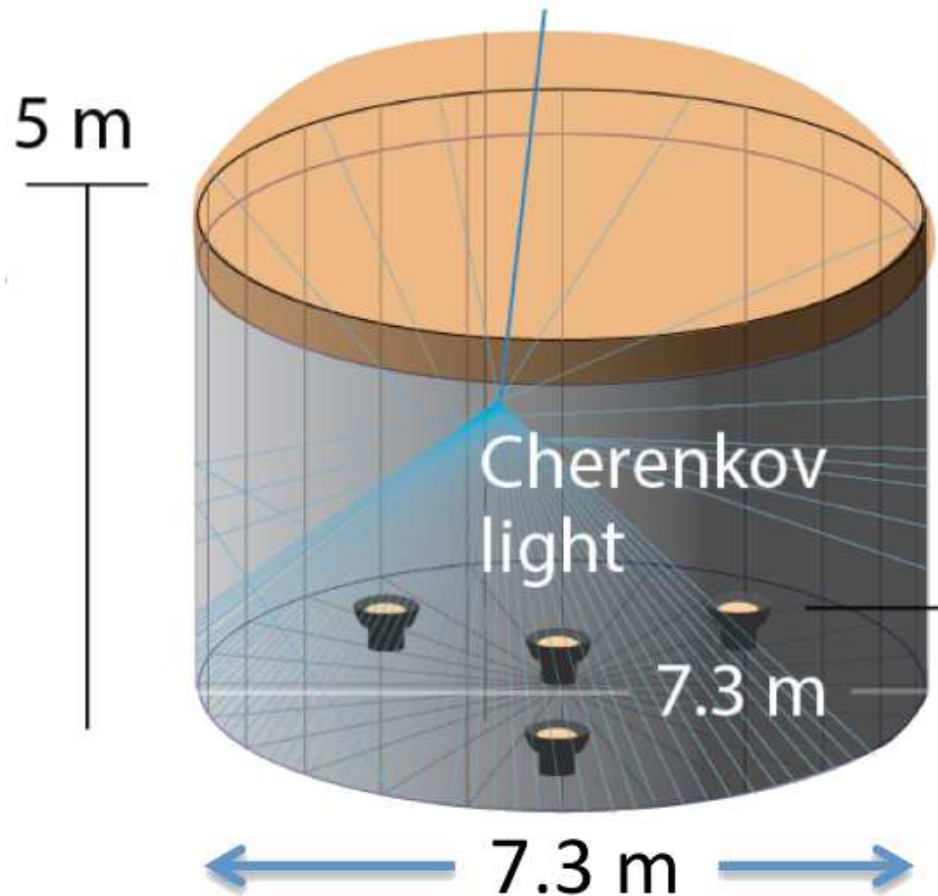


HAWC

Wodny detektor promieniowania Czerenkowa

Meksyk

Detekcja promieniowania cząstek naładowanych (e^+ / e^-) docierających do Ziemi



Działanie podobne do detektorów powierzchniowych AUGER...

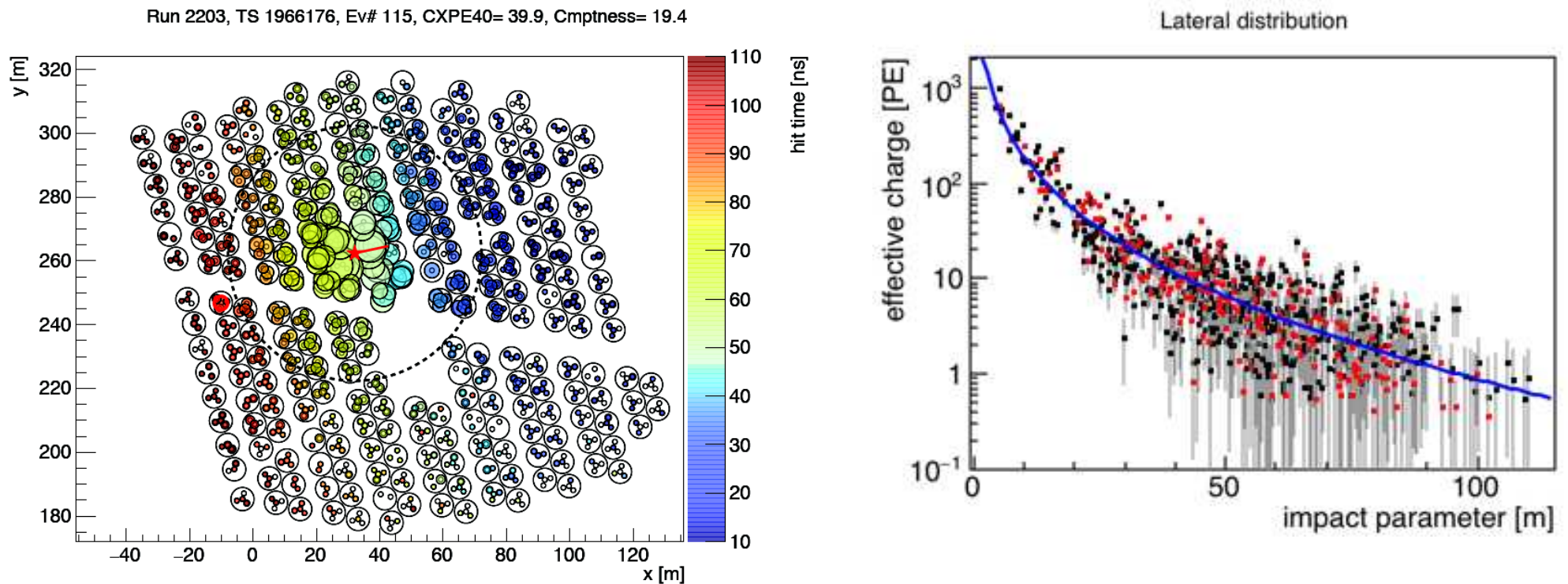
HAWC

Rekonstrukcja kwantów gamma

Detektory HAWC są jednak gęsto ustawione na małej powierzchni

⇒ odpowiada to oczekiwanej topologii przypadków kaskad fotonowych

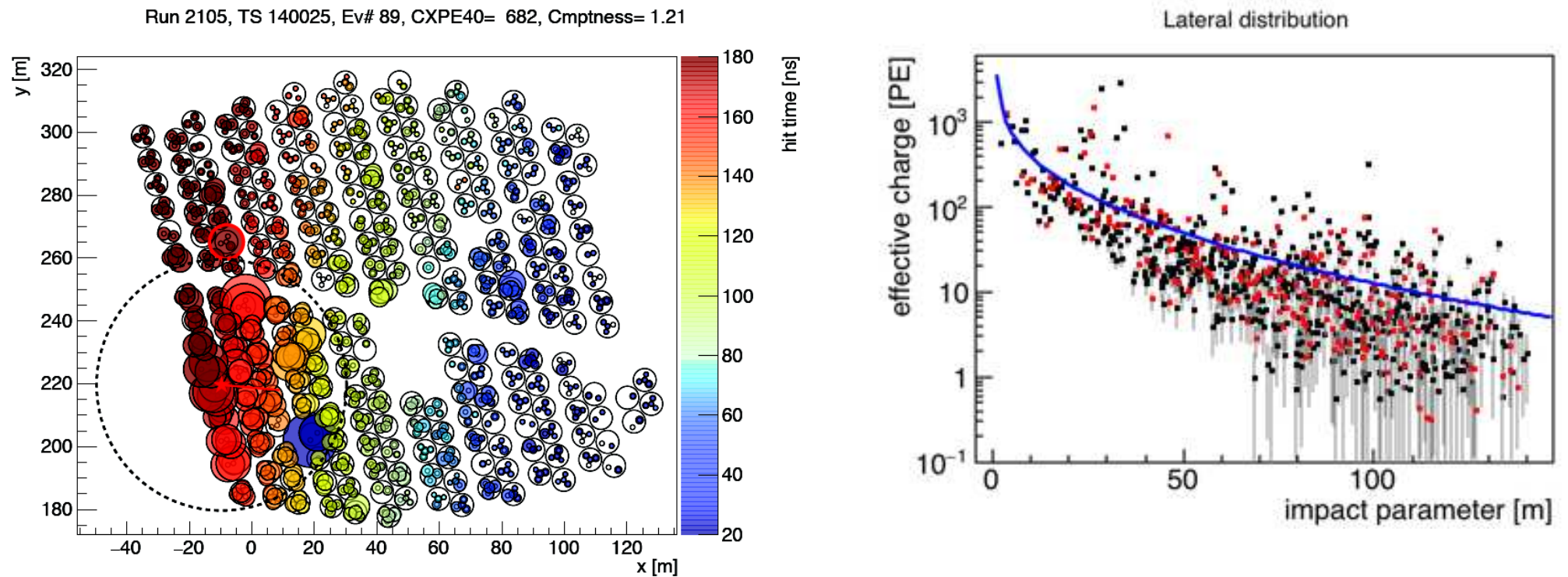
Przykładowy przypadek zarejestrowanej kaskady fotonowej



HAWC

Rekonstrukcja kwantów gamma

Przykładowy przypadek zarejestrowanej kaskady hadronowej (tła)

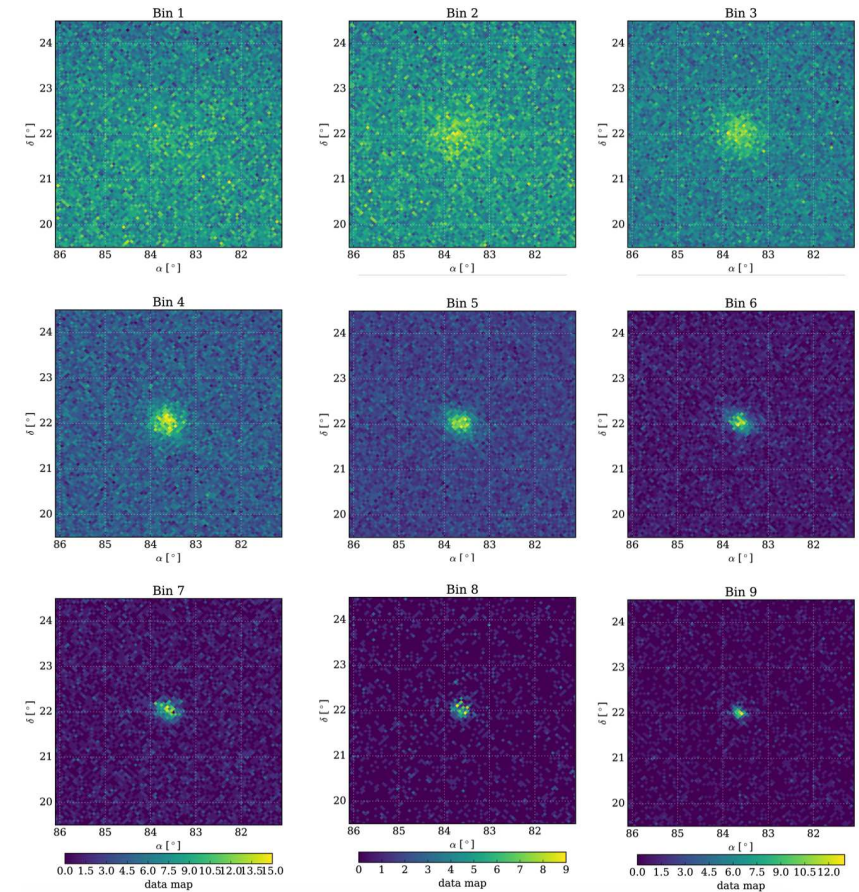
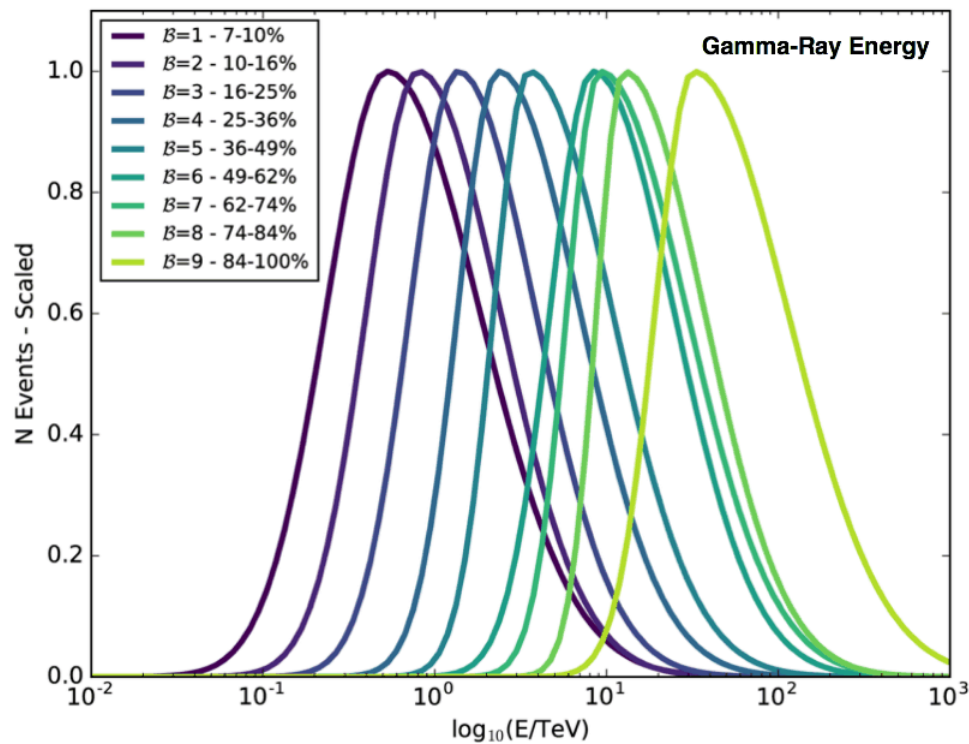


Przypadki tła znacznie szersze i “postrzępione”

⇒ efektywność odrzucania $\sim 99.8\%$ (przy 10 TeV)

Rekonstrukcja przypadku

Przypadki dzielone są na 9 binów, zależnie od wielkości sygnału



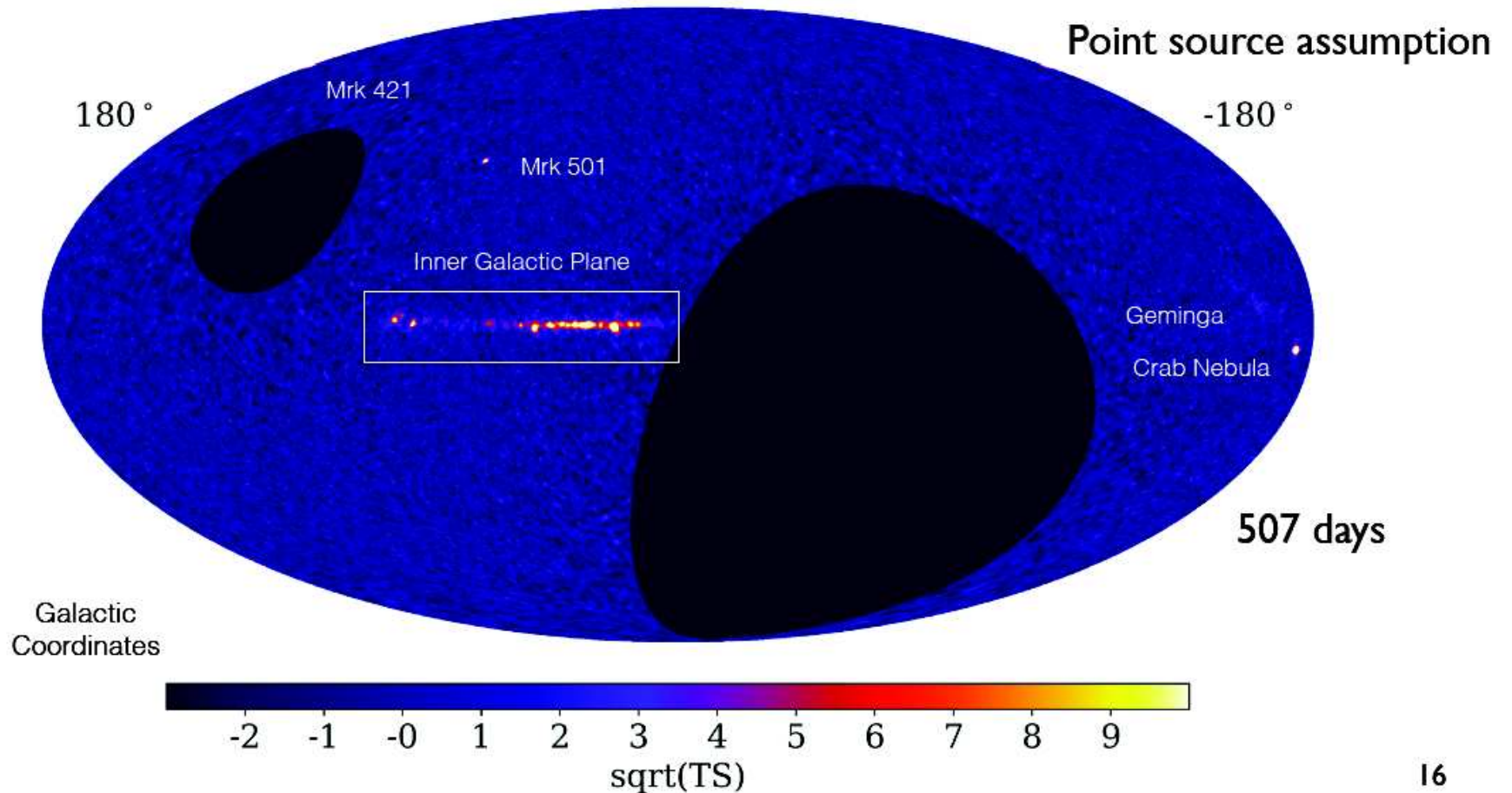
Dla najwyższych energii (~ 100 TeV) osiągamy dokładność pozycji rzędu 0.2°

HAWC

Obserwowane niebo

C.Riviere, Moriond 2017

TeV γ -Ray Observations with HAWC



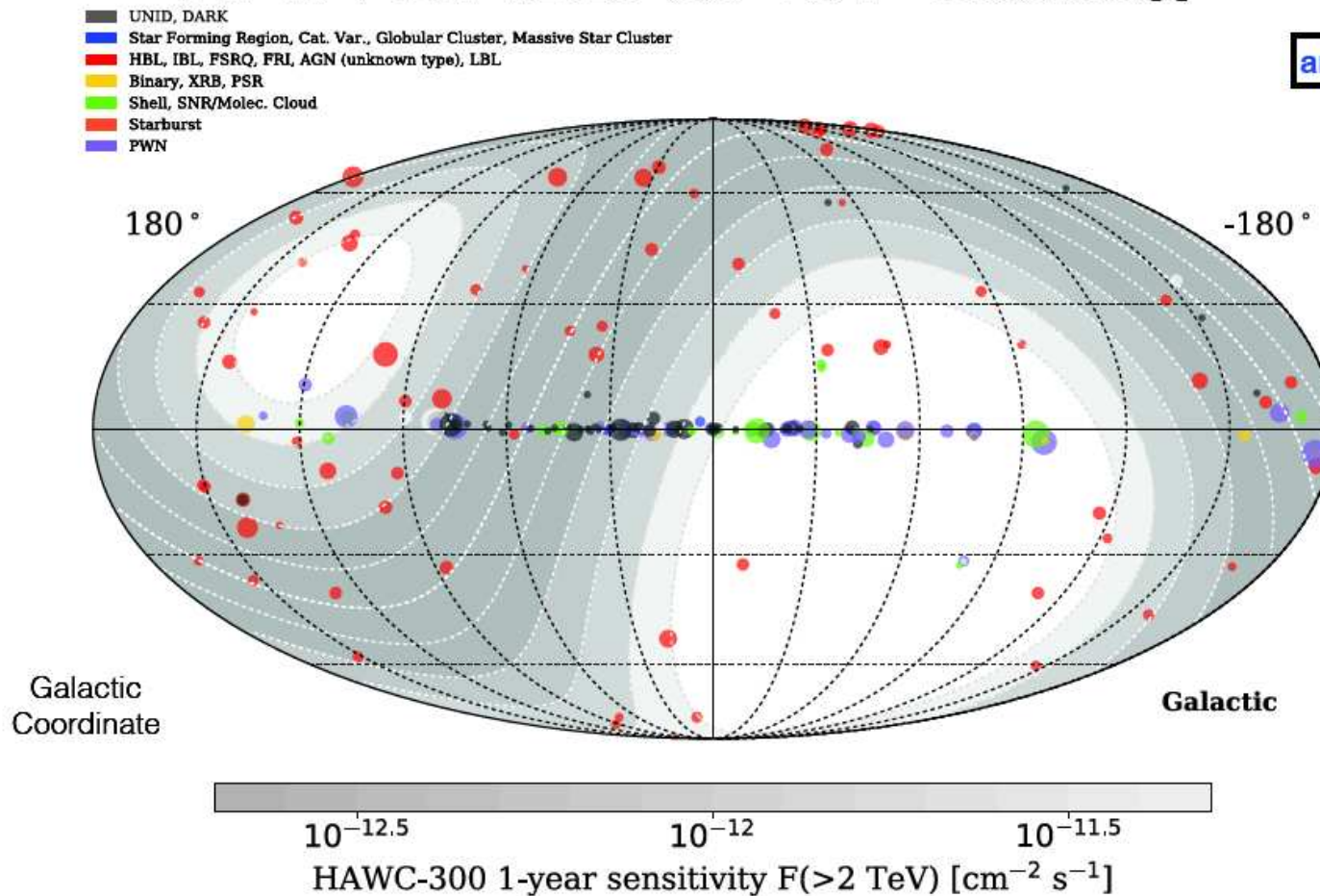
16

HAWC

Wykryte źródła

C.Riviere, Moriond 2017

HAWC Adds to TeV Catalog

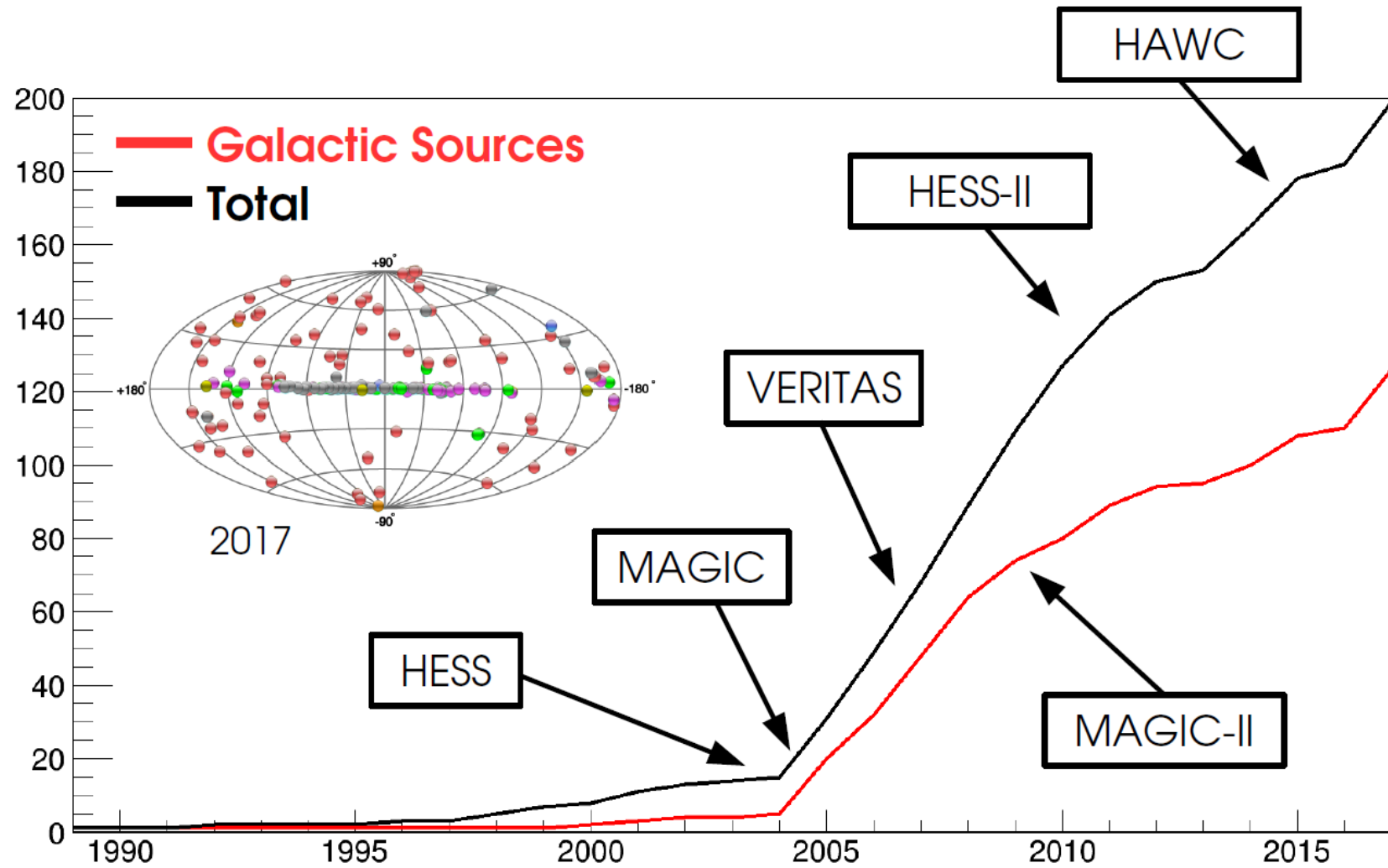


C. Rivière, UMD

[arXiv:1702.02992](https://arxiv.org/abs/1702.02992)

Promieniowanie gamma

Źródła TeV



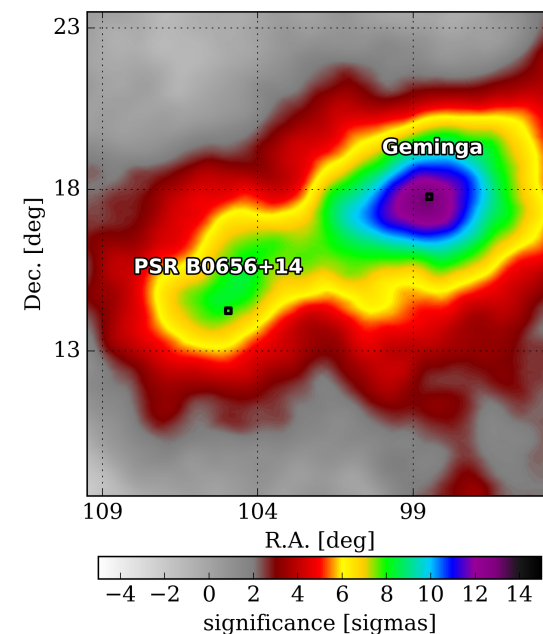
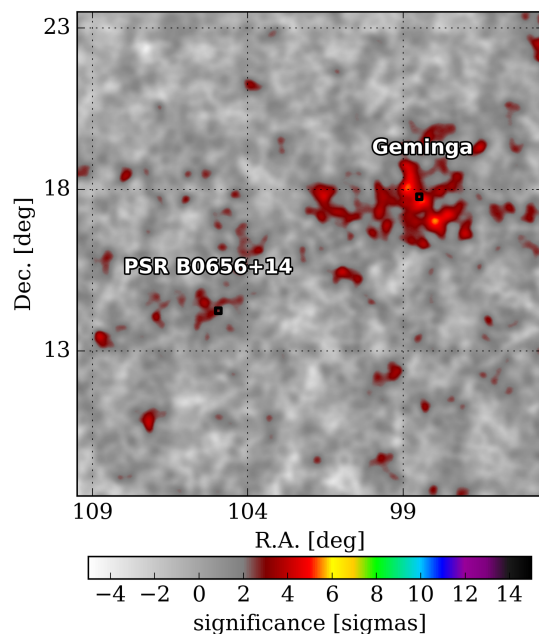
HAWC

Źródła TeV

Obserwacja pulsarów w zakresie wskazuje na dużo większą niż oczekiwano emisję promieniowania gamma w zakresie TeV

Rekonstrukcja źródeł punktowych

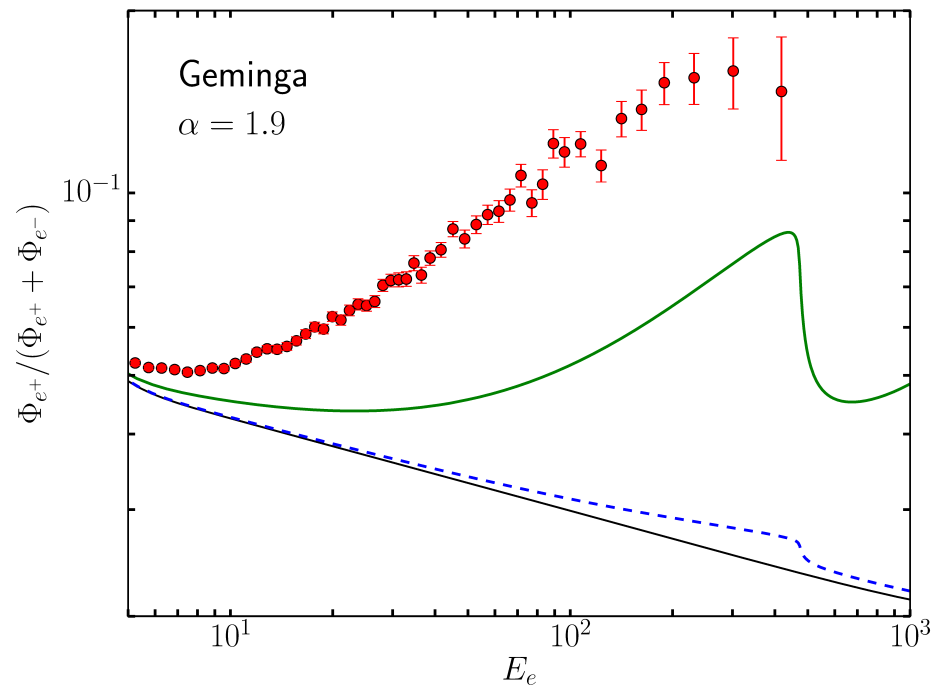
Rekonstrukcja źródeł rozmytych



HAWC

Źródła TeV

Obserwacja pulsarów w zakresie wskazuje na dużo większą niż oczekiwano emisję promieniowania gamma w zakresie TeV



⇒ pulsary mogą potencjalnie tłumaczyć nadwyżkę pozytonów obserwowaną w danych PAMELA i AMS-2

HAWC

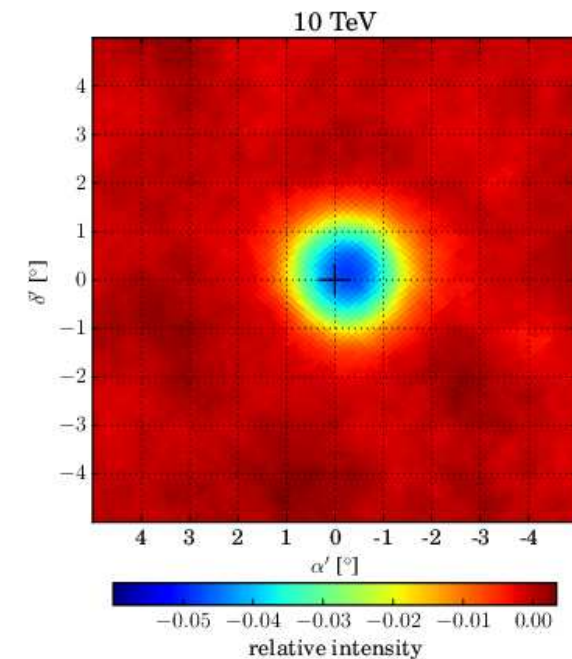
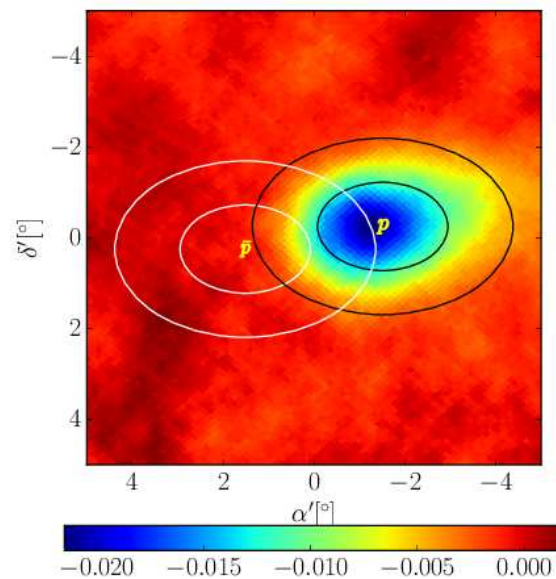
Inne pomiary

Choć budowany był z myślą o pomiarze promieniowania gamma, mierzy także wielkie pęki atmosferyczne wywołane przez cząstki promieniowania kosmicznego.

Wykorzystując Księżyc jako absorber można próbować powiedzieć coś o ładunku...

Przypadki protonowe 1.6 TeV

Przypadki protonowe 10 TeV



Rozkład kierunku względem położenia Księżyca \Rightarrow brak śladu antyprotonów...