

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

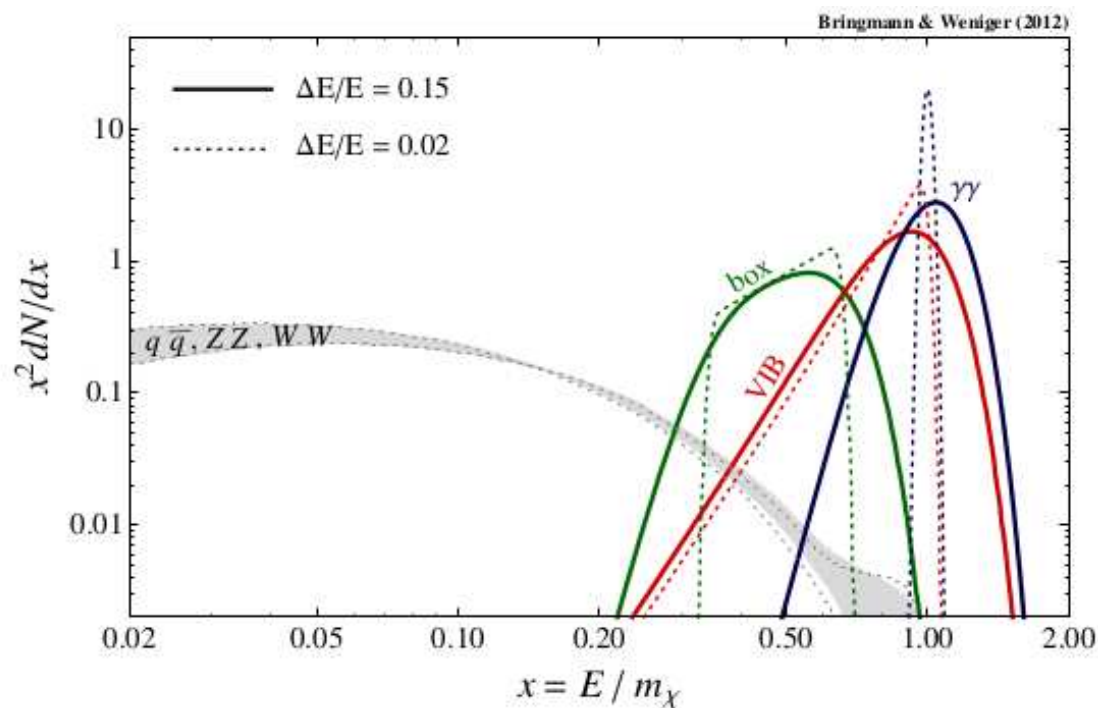
Wykład X

- Kosmiczne promieniowanie gamma najwyższych energii
- ⇒ Teleskopy Czerenkowa i ich wyniki
- ⇒ Projekt CTA
- ⇒ Projekt HAWC

Ciemna materia

Promieniowanie gamma

Oczekiwane widmo promieniowania z anihilacji DM



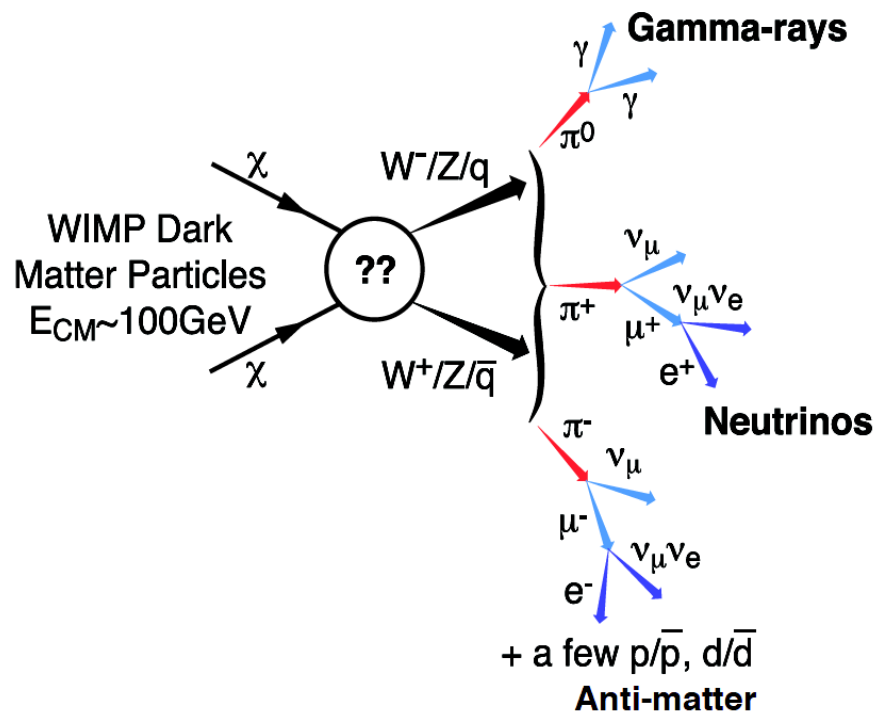
Pierwotne promieniowanie γ

- 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})

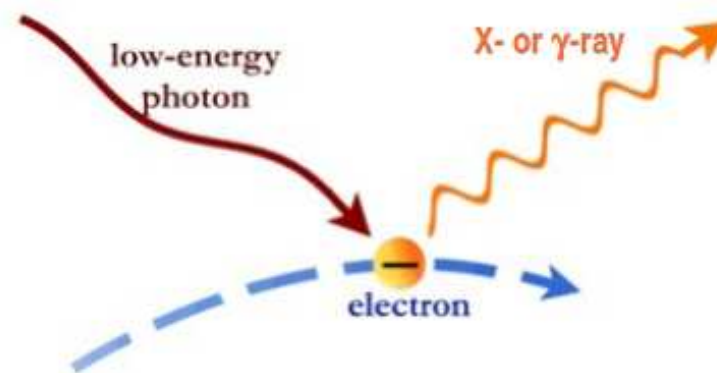
Promieniowanie kosmiczne

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

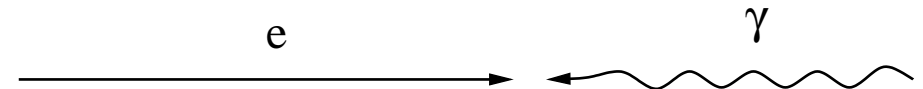
W rozpraszaniu na spoczywającym elektronie **najniższą energię** będzie miał foton rozproszony **“do tyłu”** ($\cos \theta = -1$):

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

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:

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

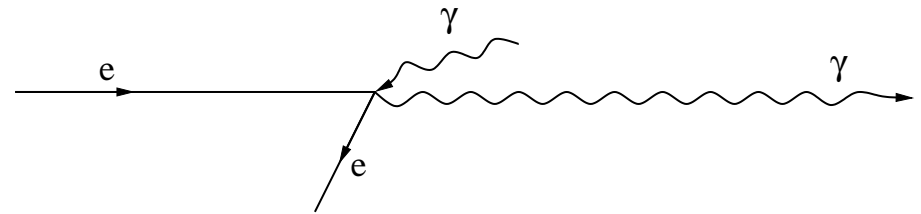
Wracając do układu laboratoryjnego: (transformacja taka sama, bo pęd foton zmienił kierunek)

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

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.



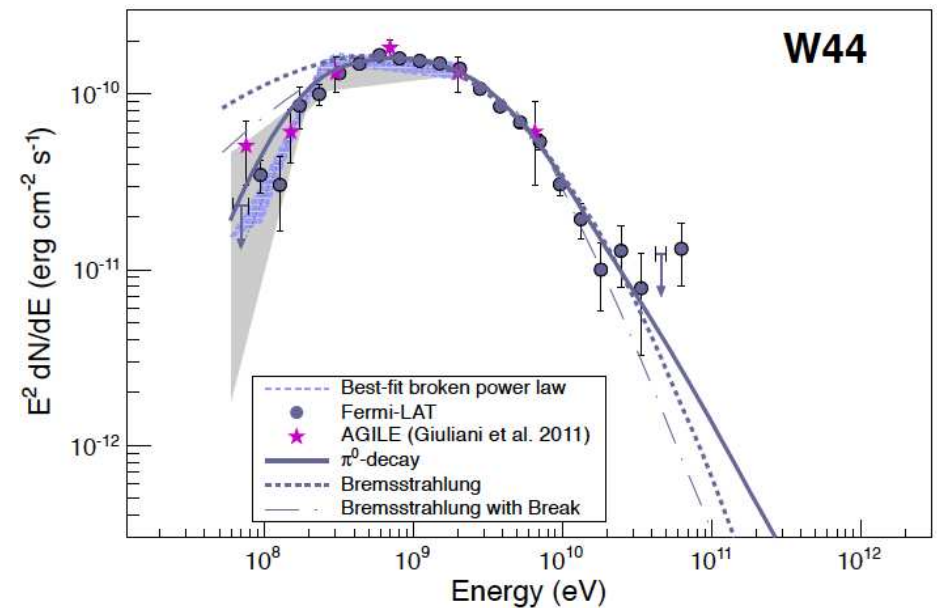
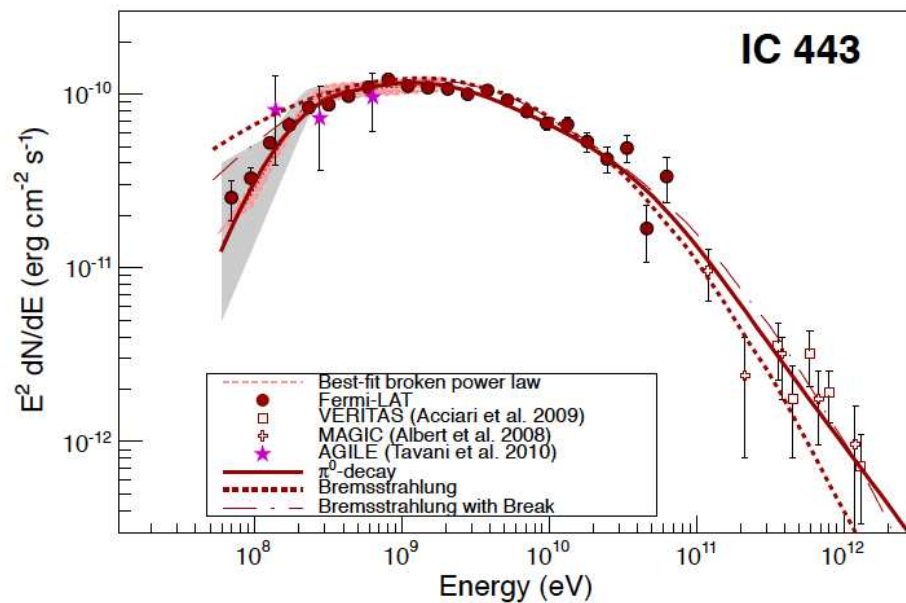
Przykład: dla $E_e = 250\text{GeV}$ i $h\nu = 1\text{eV}$
 $h\nu' \approx 200\text{GeV}$

Promieniowanie kosmiczne

Rozpady π^0

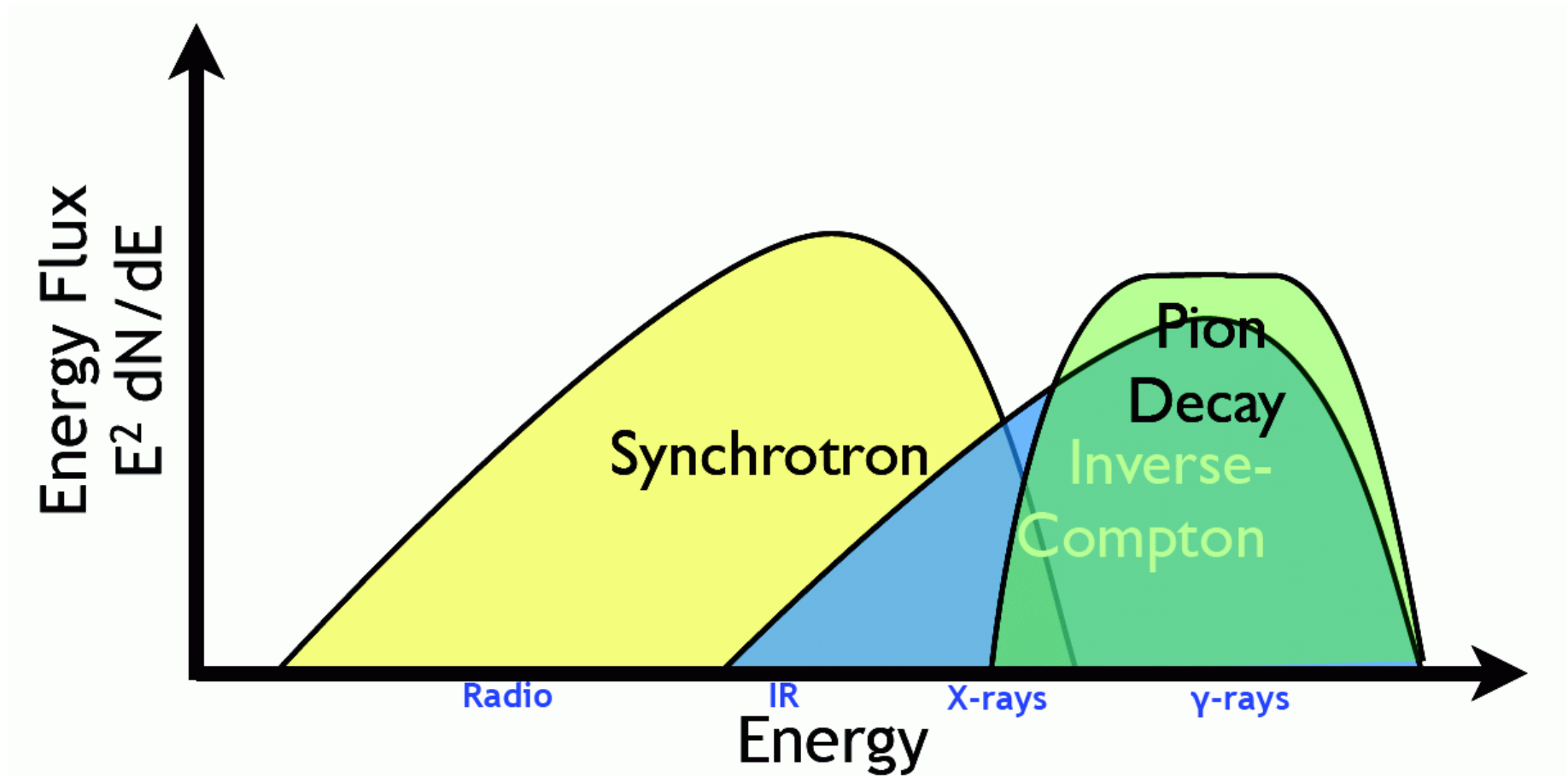
W oddziaływaniach hadronów promieniowania kosmicznego z materią międzygwiazdą (głównie zderzenie pp) produkowane są też licznie π^0

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



Promieniowanie gamma

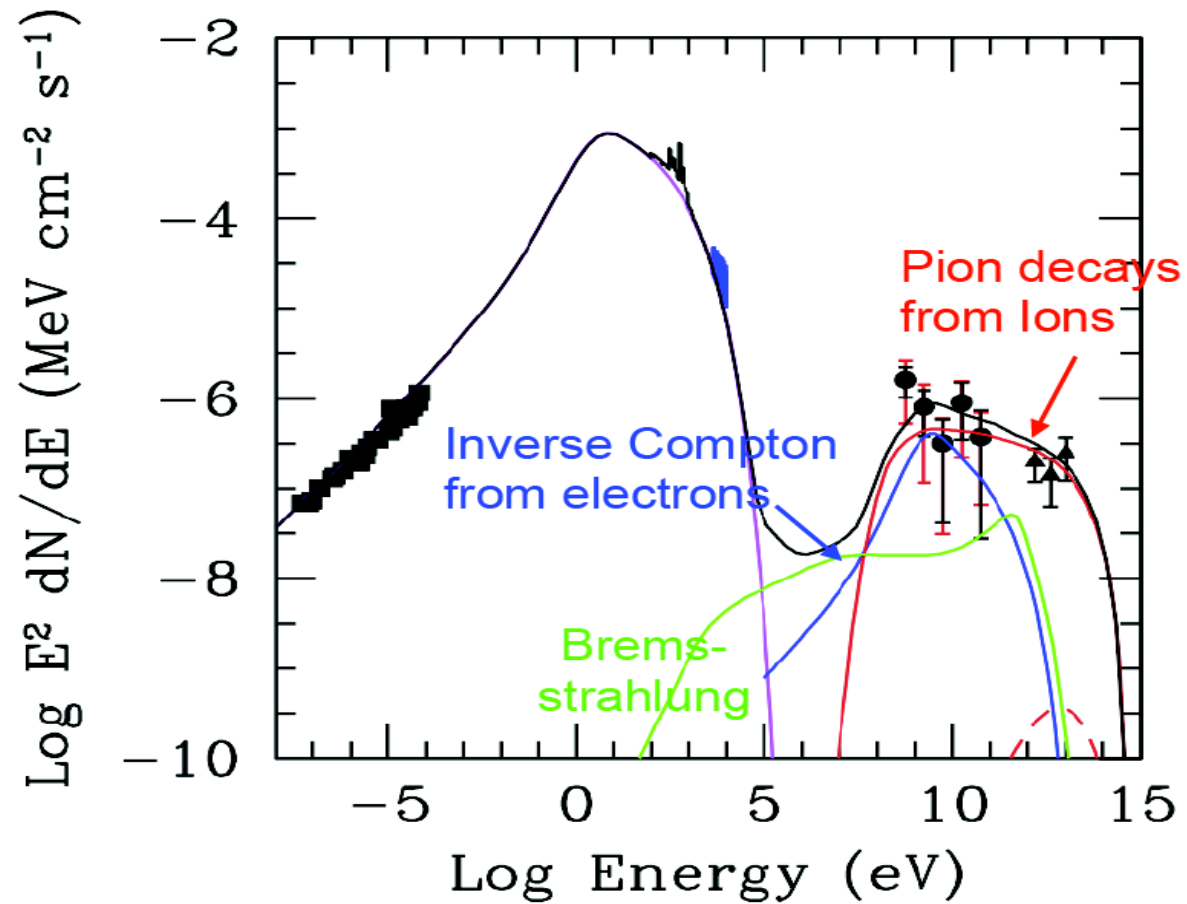
Oczekiwane widmo



Promieniowanie gamma

Tycho SNR

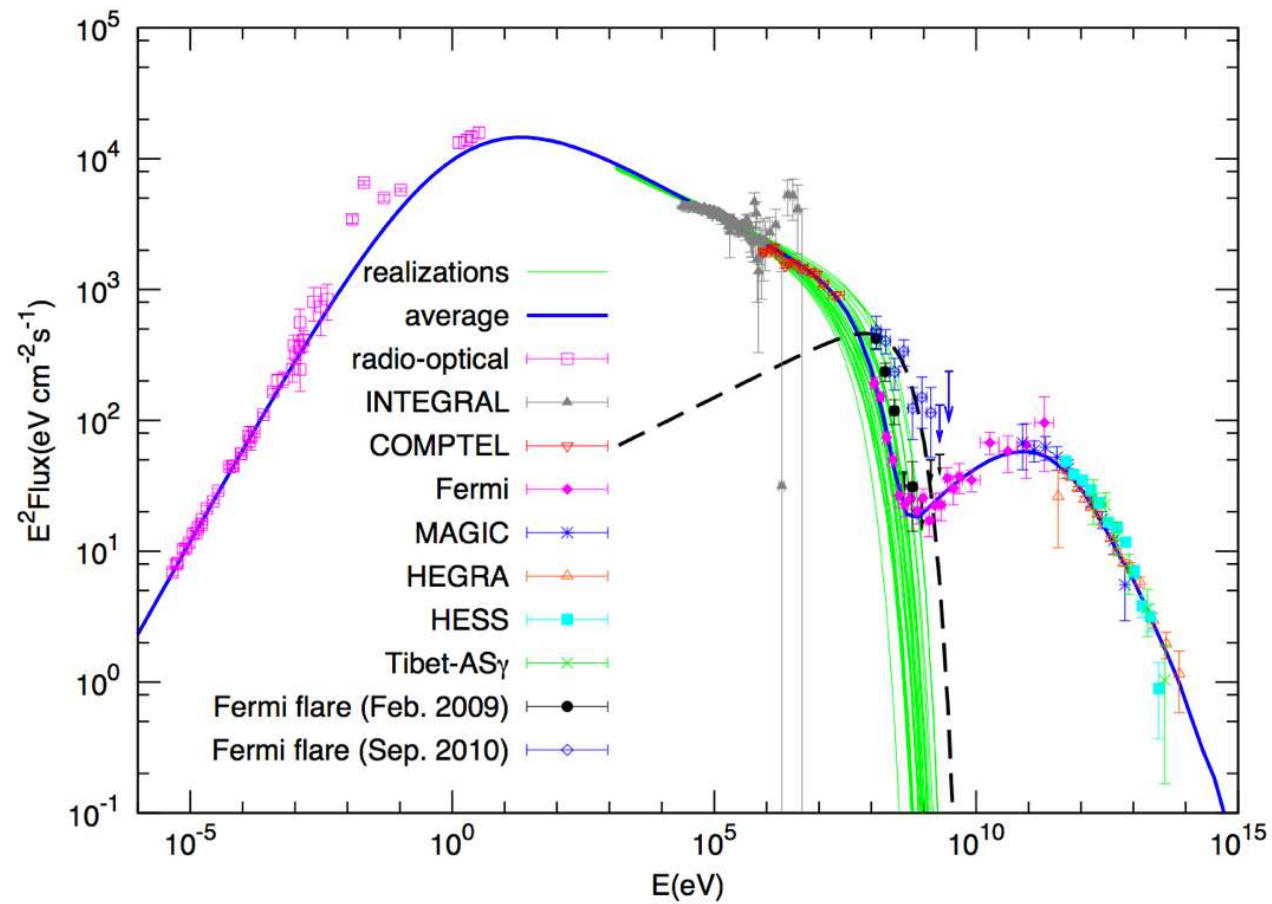
Widmo rejestrowanego promieniowania gamma



Promieniowanie gamma

Mgławica Kraba

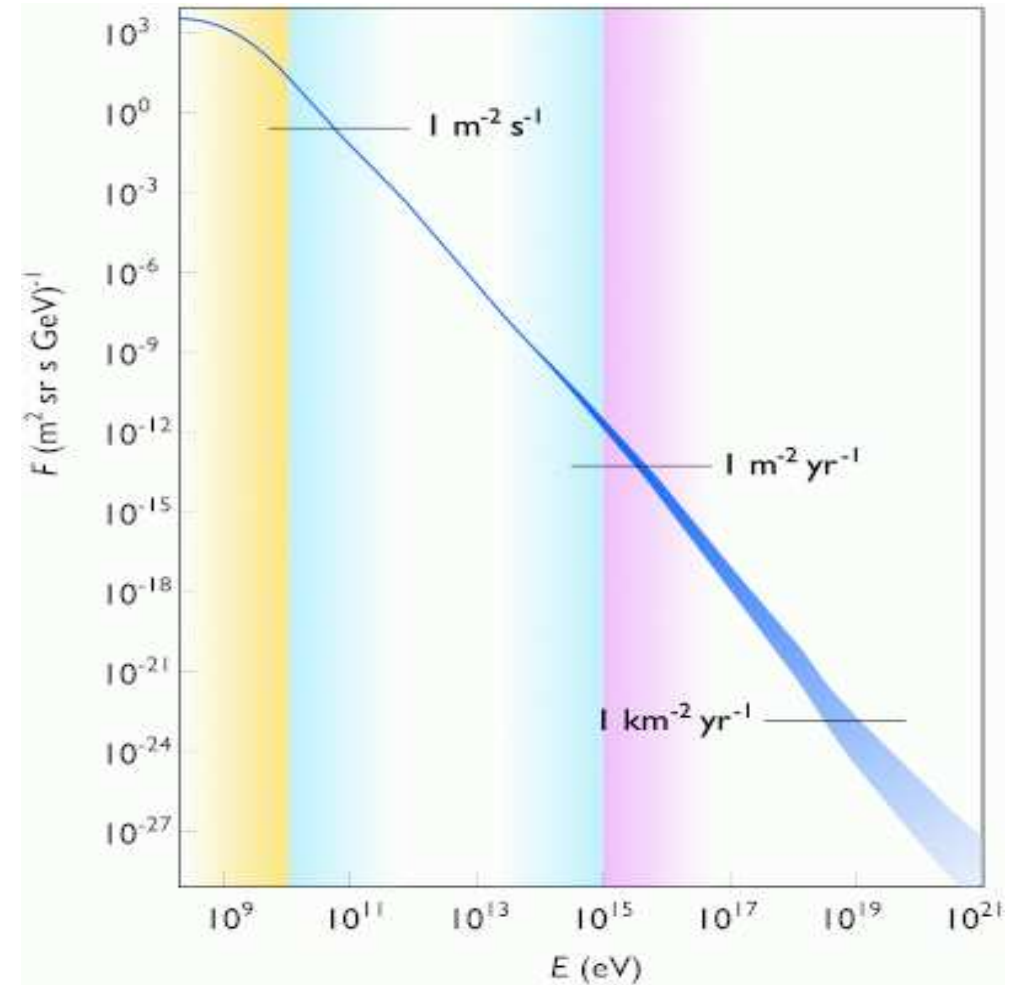
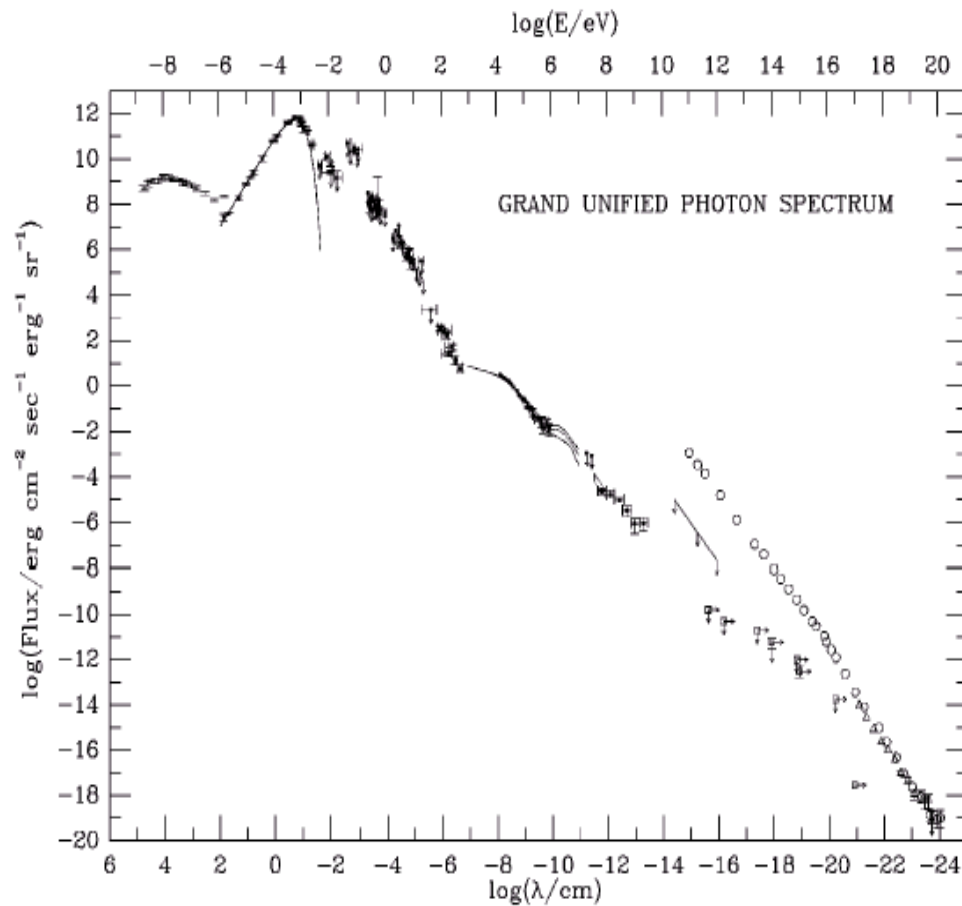
Widmo rejestrowanego promieniowania gamma



Promieniowanie gamma

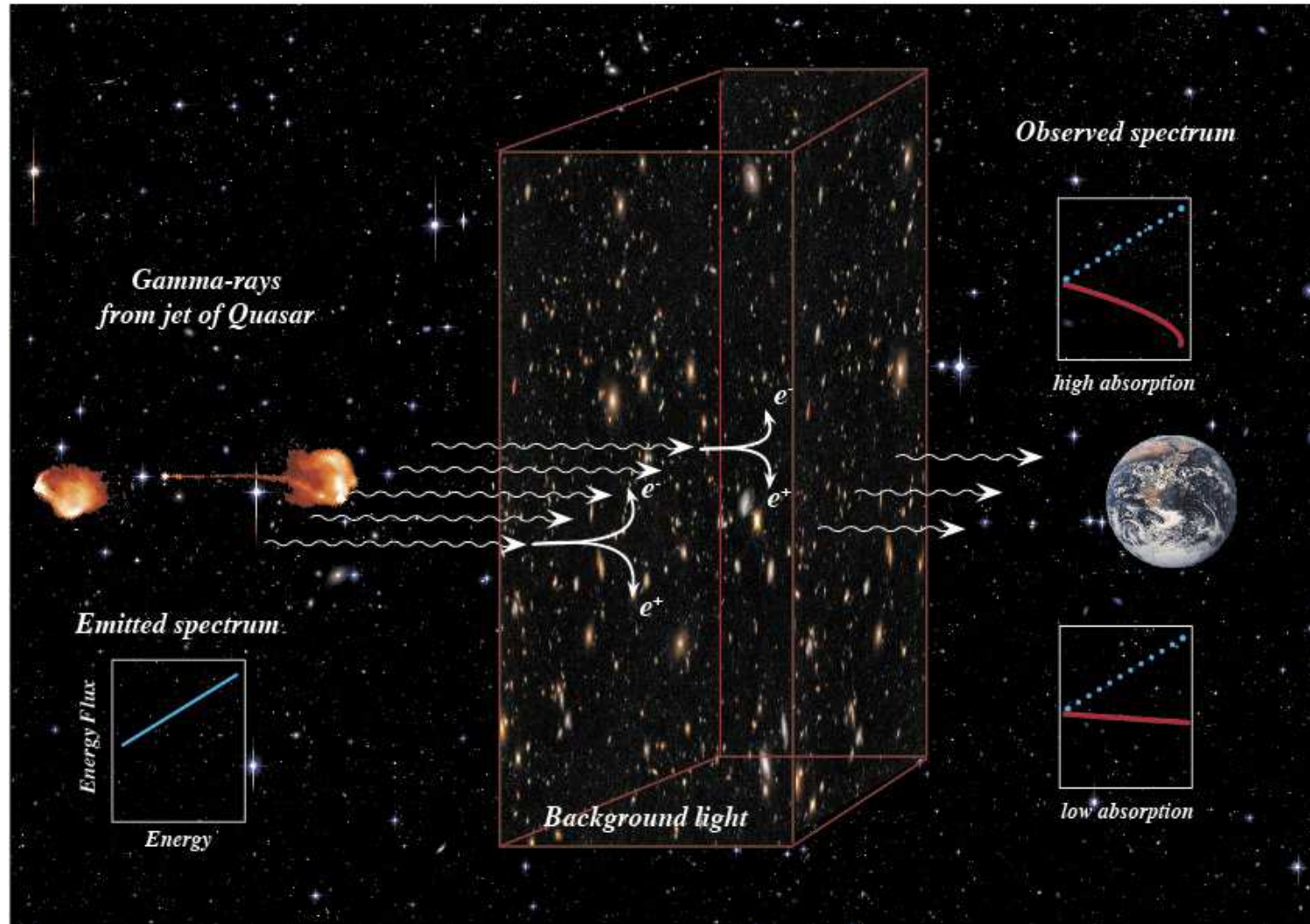
Porównanie

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



Promieniowanie gamma

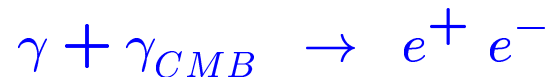
Pochłanianie



Promieniowanie gamma

Pochłanianie

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



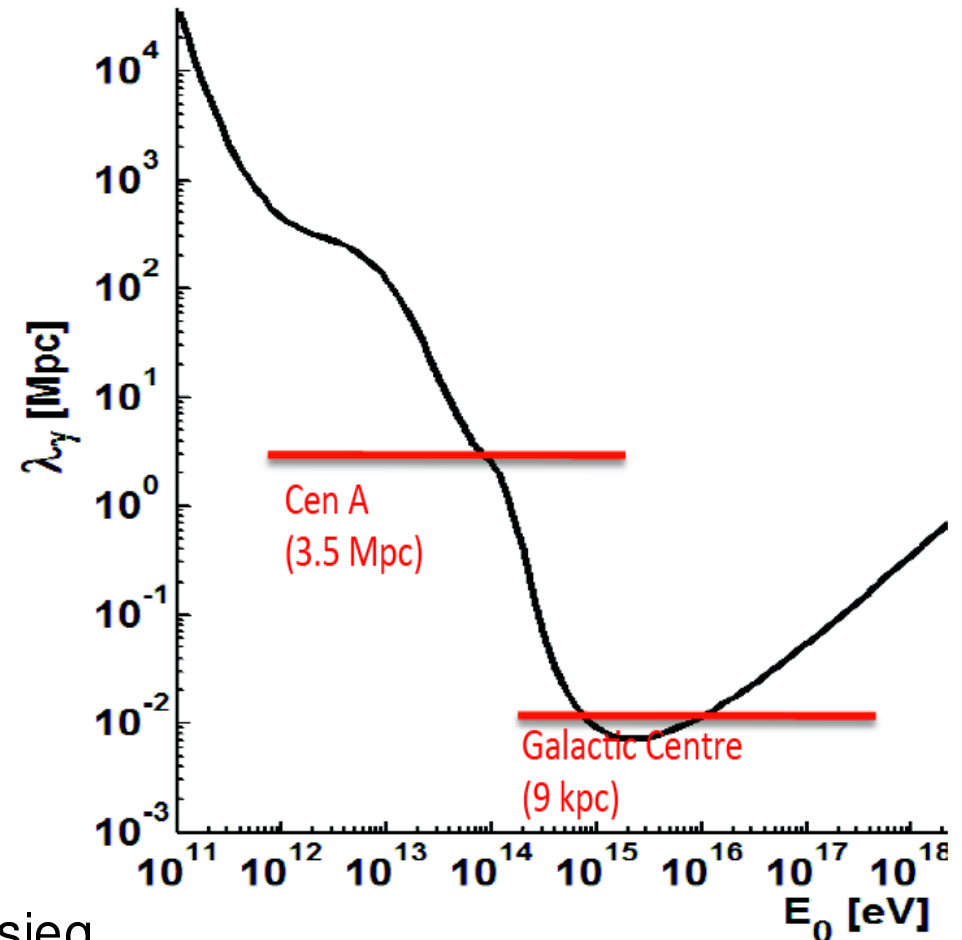
Średnia energia $E_{CMB} \approx 0.0002 \text{ eV}$

\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

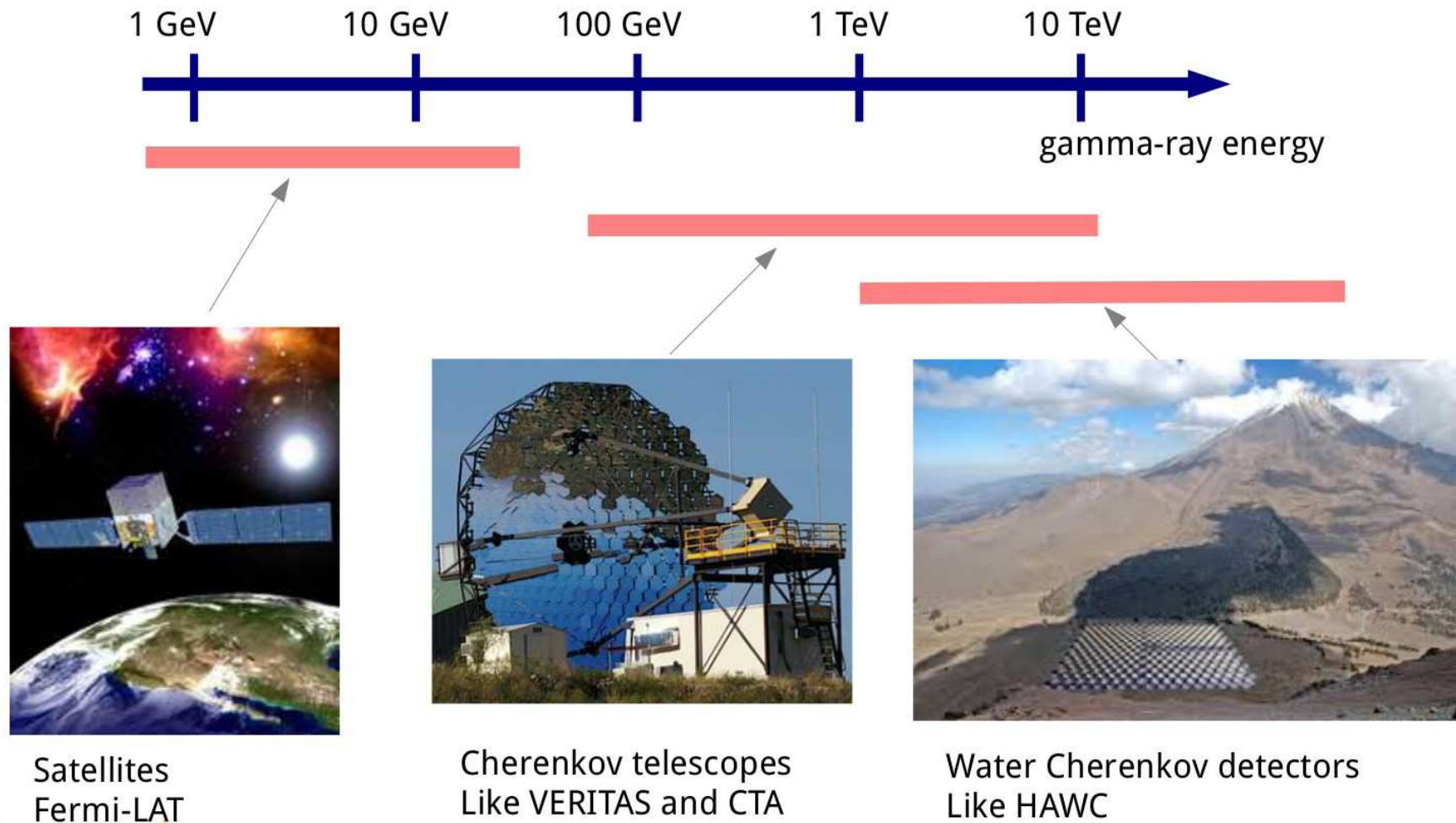
- Jak i gdzie jest produkowane, przyspieszane?
- Jak się rozchodzi?
- Jak oddziałuje z materią międzygwiezdną?

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

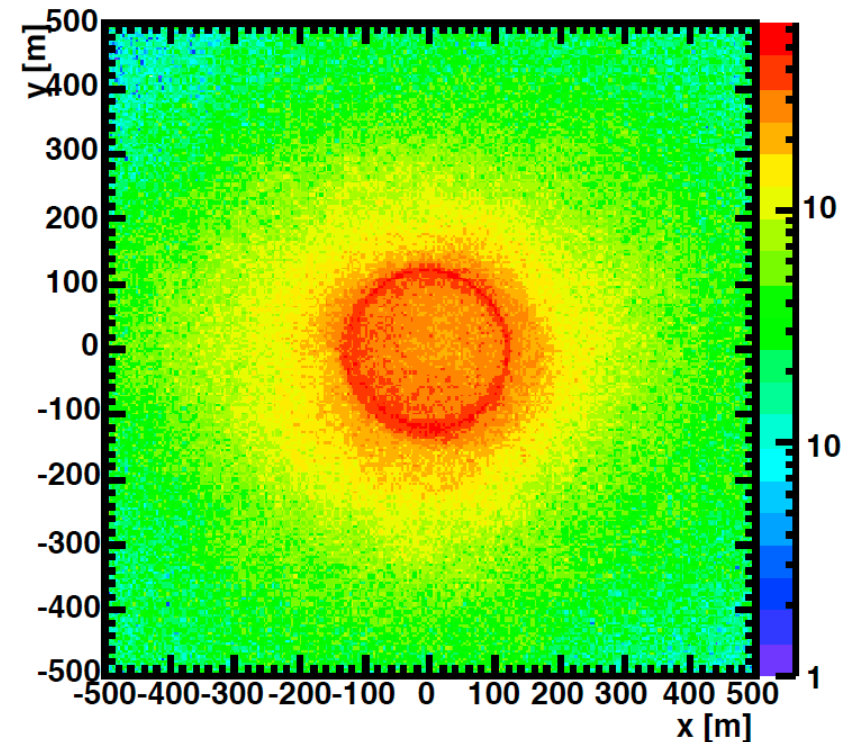
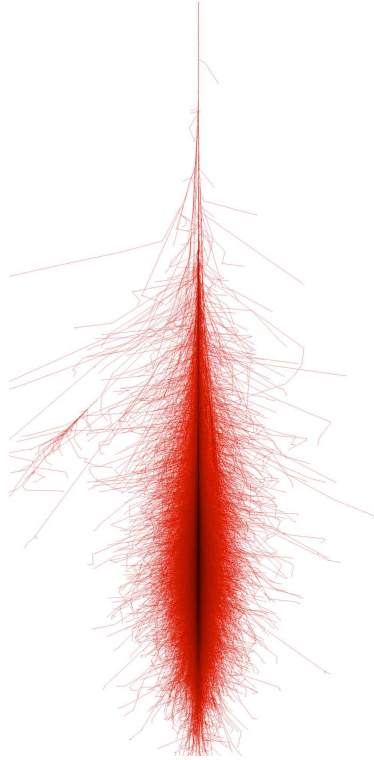
Promieniowanie gamma

Promieniowanie Czerenkowa

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

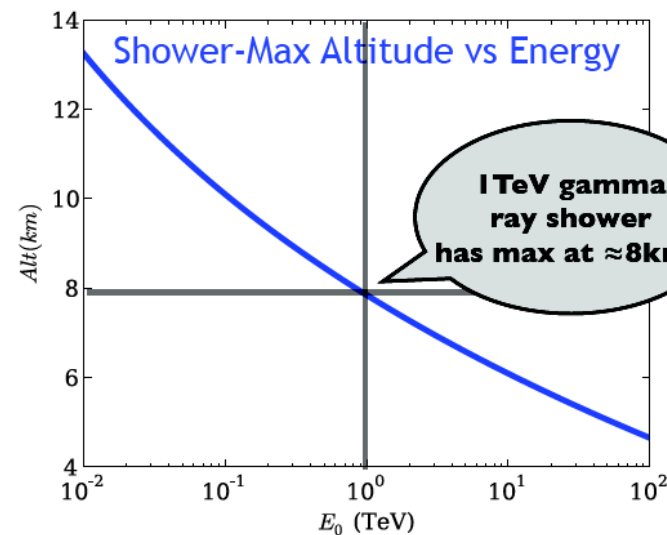
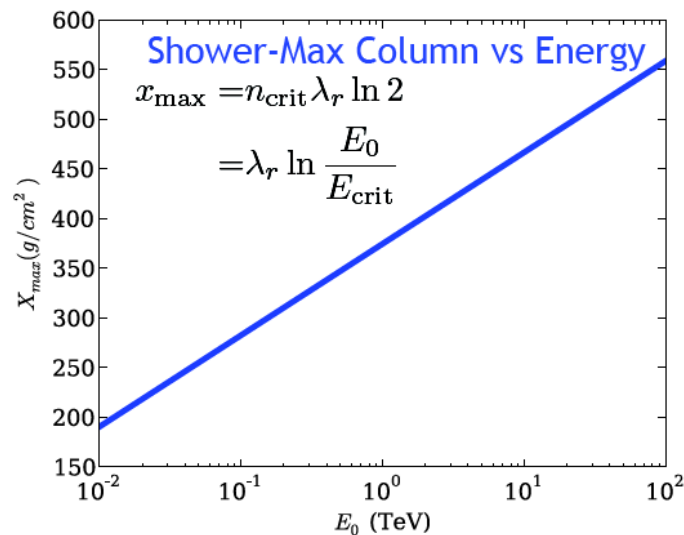
Podobnie jak w przypadku składowej E-M wielkich pęków atmosferycznych

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...

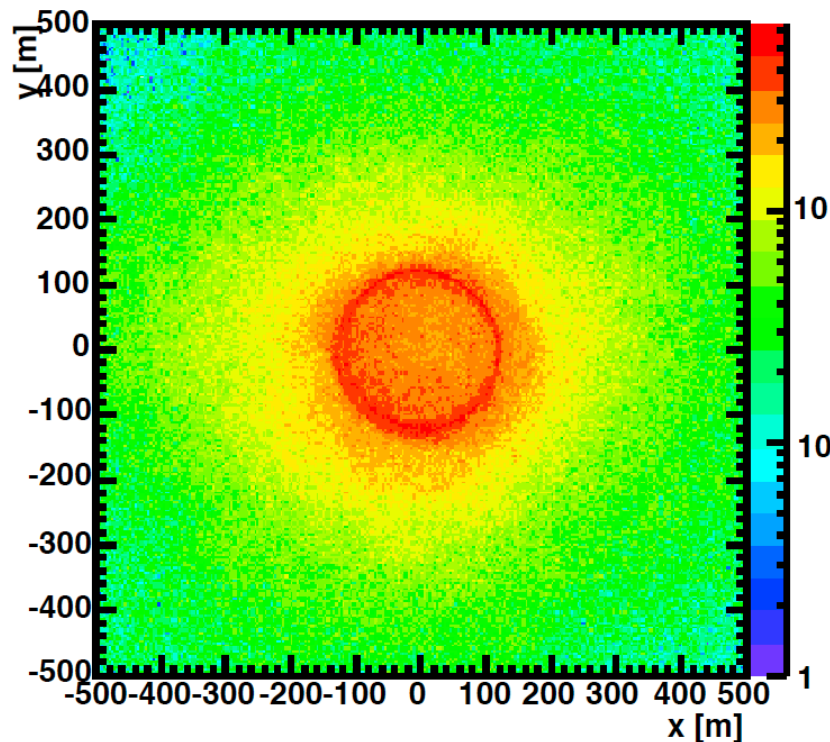
Promieniowanie Czerenkowa emitowane przez taką kaskadę oświetla obszar o promieniu ok. 100 m, gęstość fotonów UV ok. $100/\text{m}^2$

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).

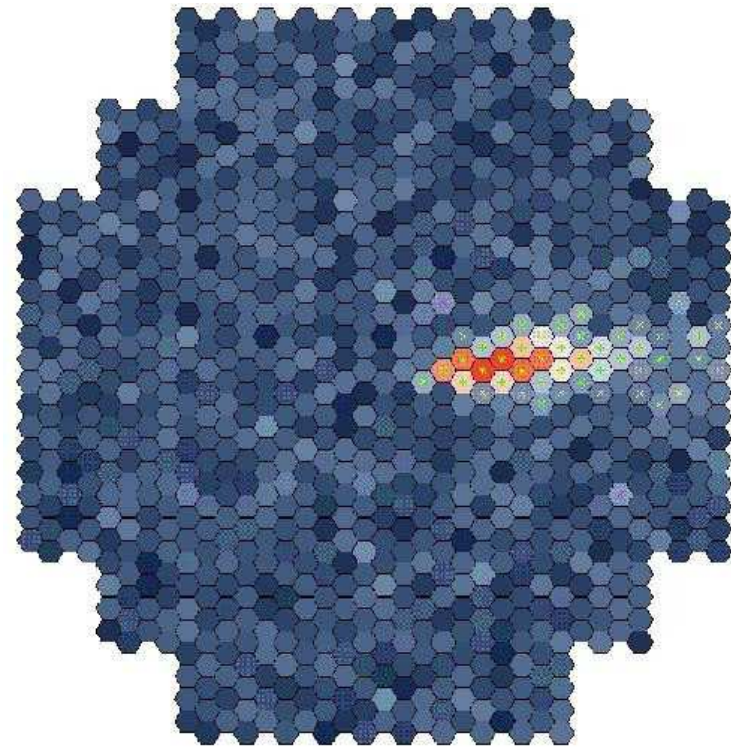
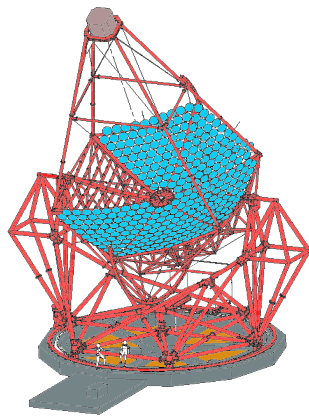
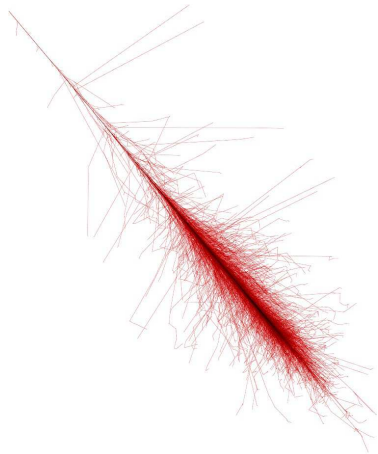
Znacznie większą dokładność pomiaru uzyskujemy ustawiając na Ziemi **teleskop promieniowania Czerenkowa**

Promieniowanie gamma

Detekcja

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

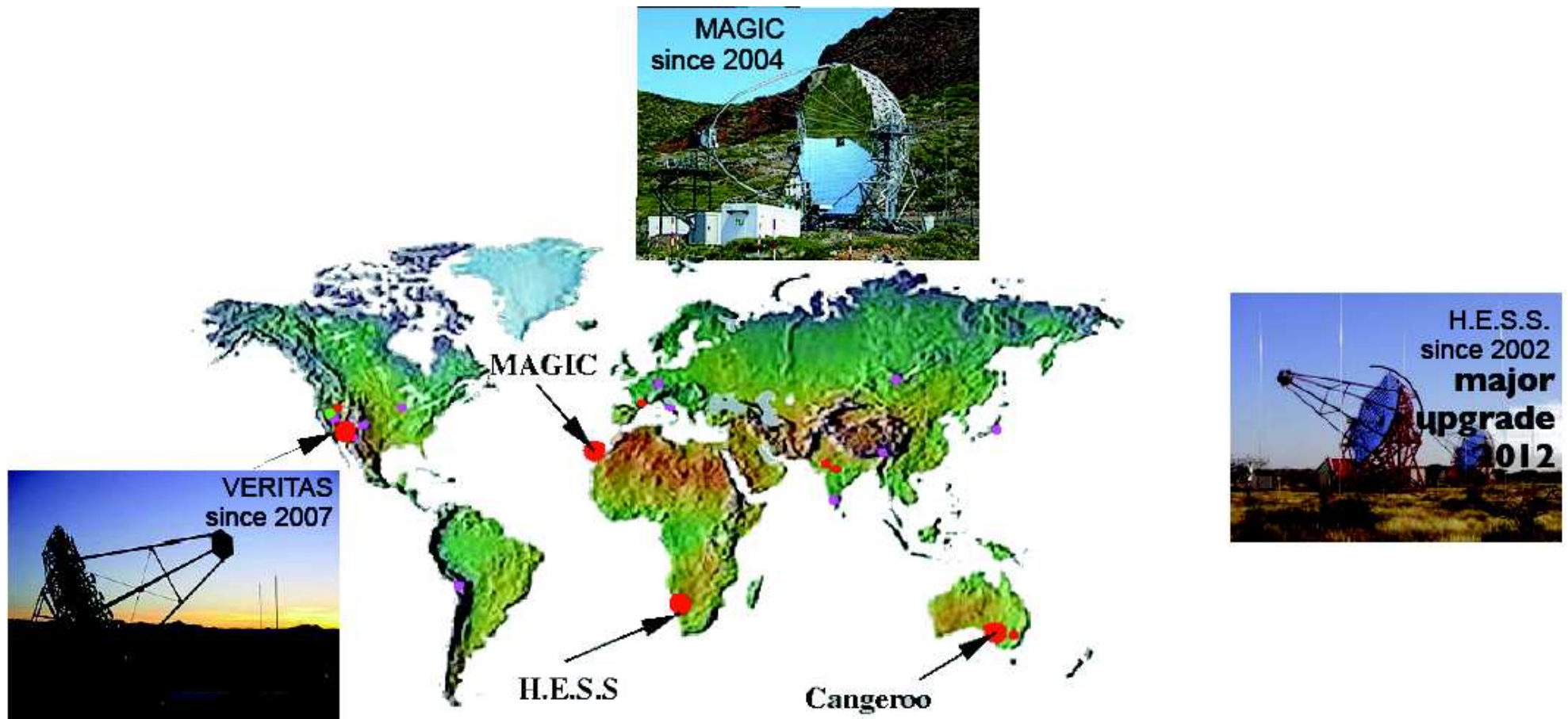
Jeśli teleskop znajdzie się w polu oświetlonym przez kaskadę, zrobi jej “zdjęcie”



Promieniowanie gamma

Instrumenty

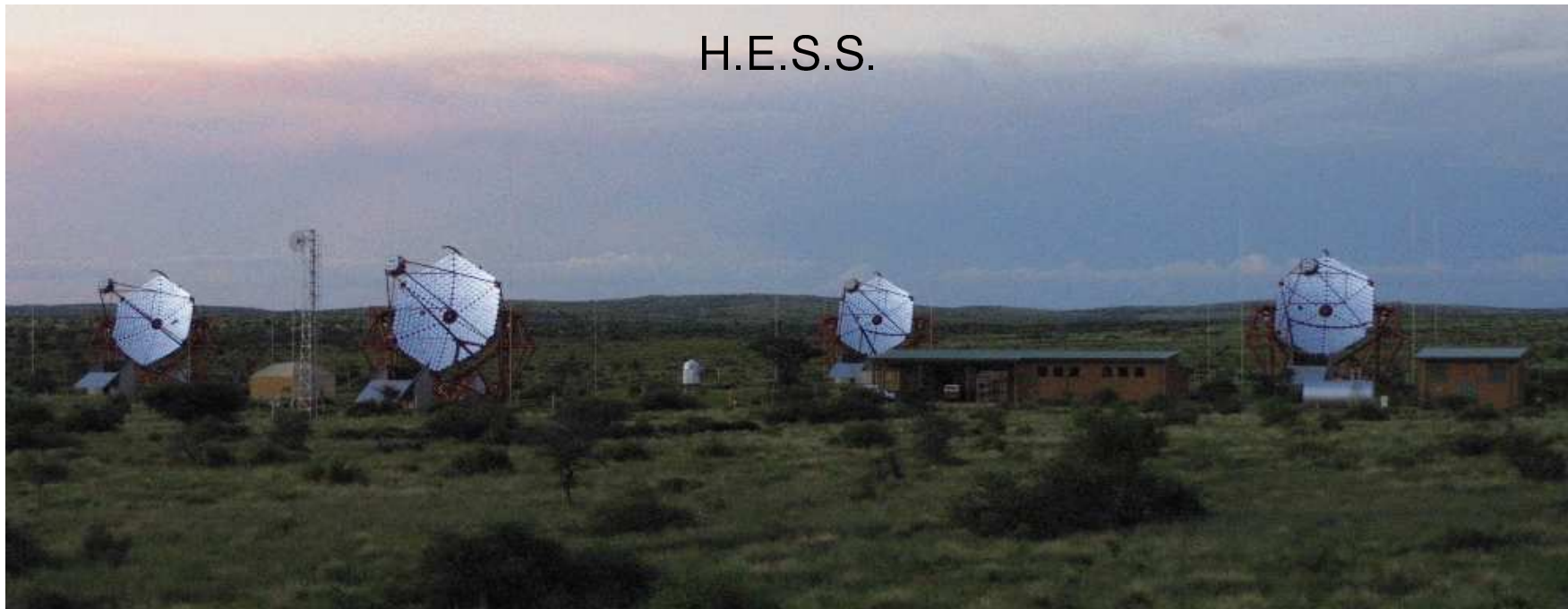
Naziemne detektory promieniowania gamma najwyższych energii



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

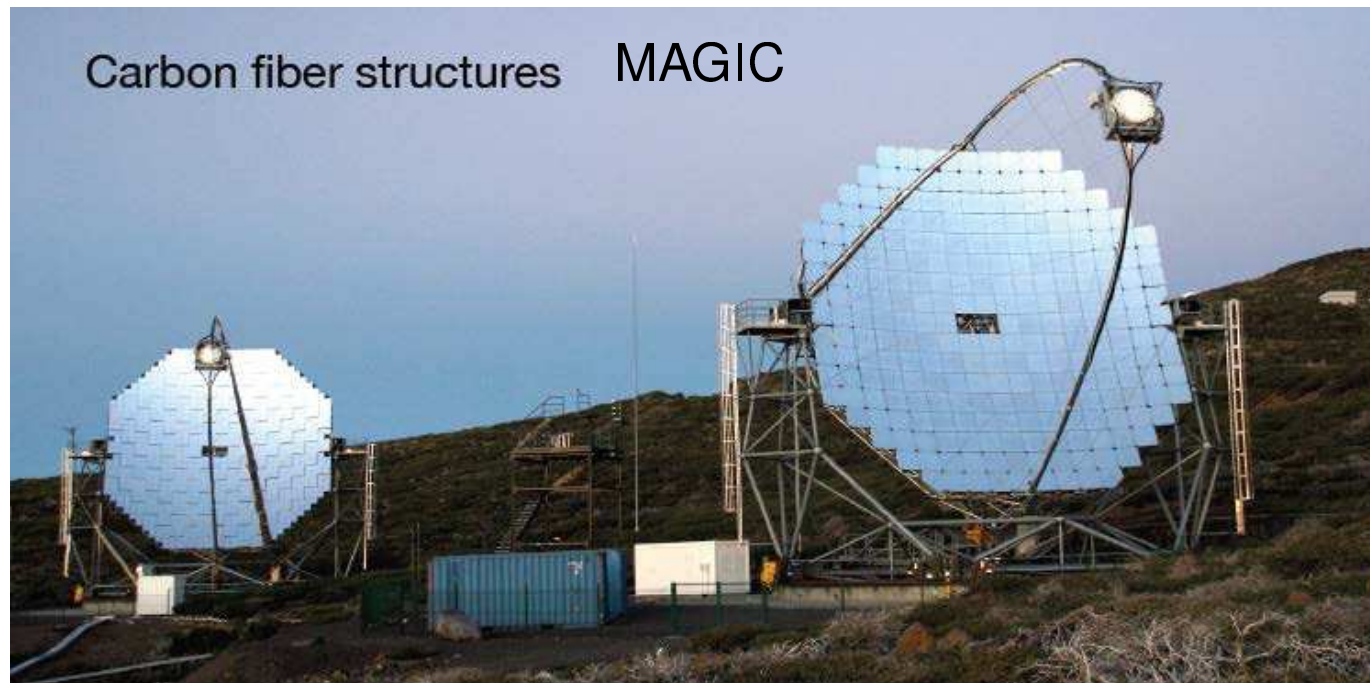
Atmospheric Cherenkov Telescopes (ACT)



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



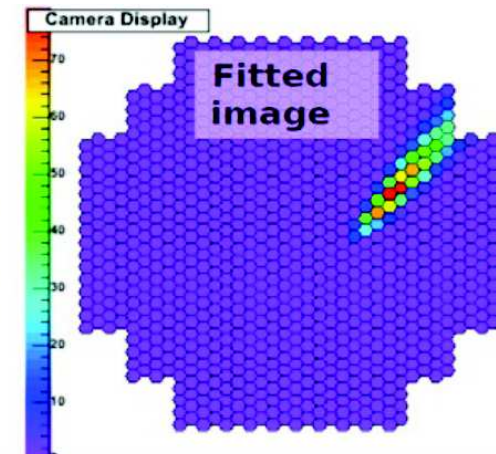
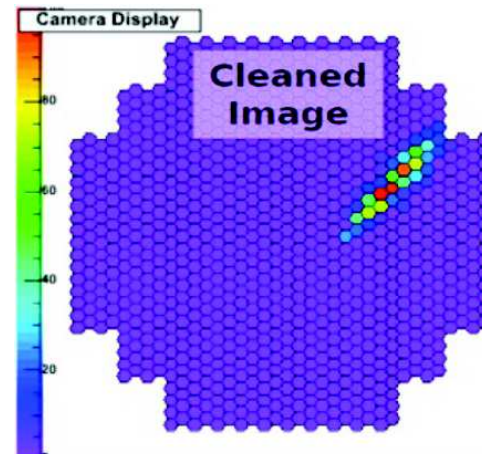
Teleskopy Czerenkowa

Rekonstrukcja

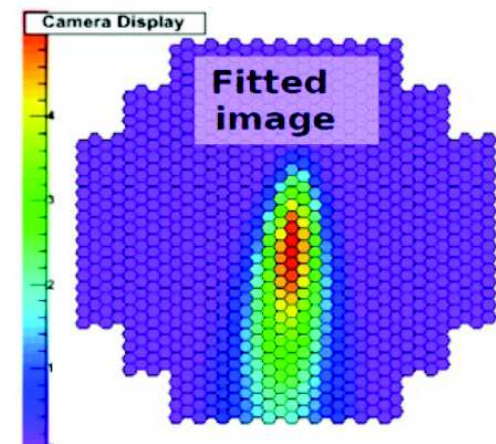
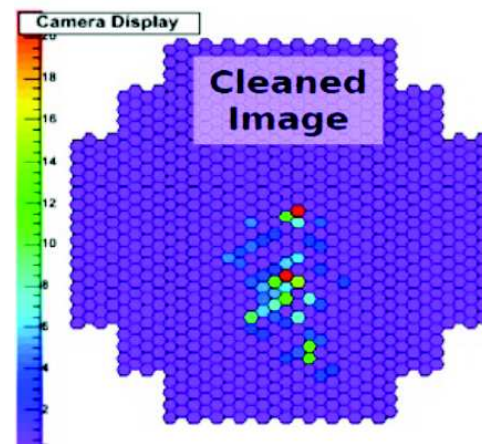
Na podstawie zmierzonego natężenia promieniowania możemy wyznaczyć **energię** początkowego fotonu.

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

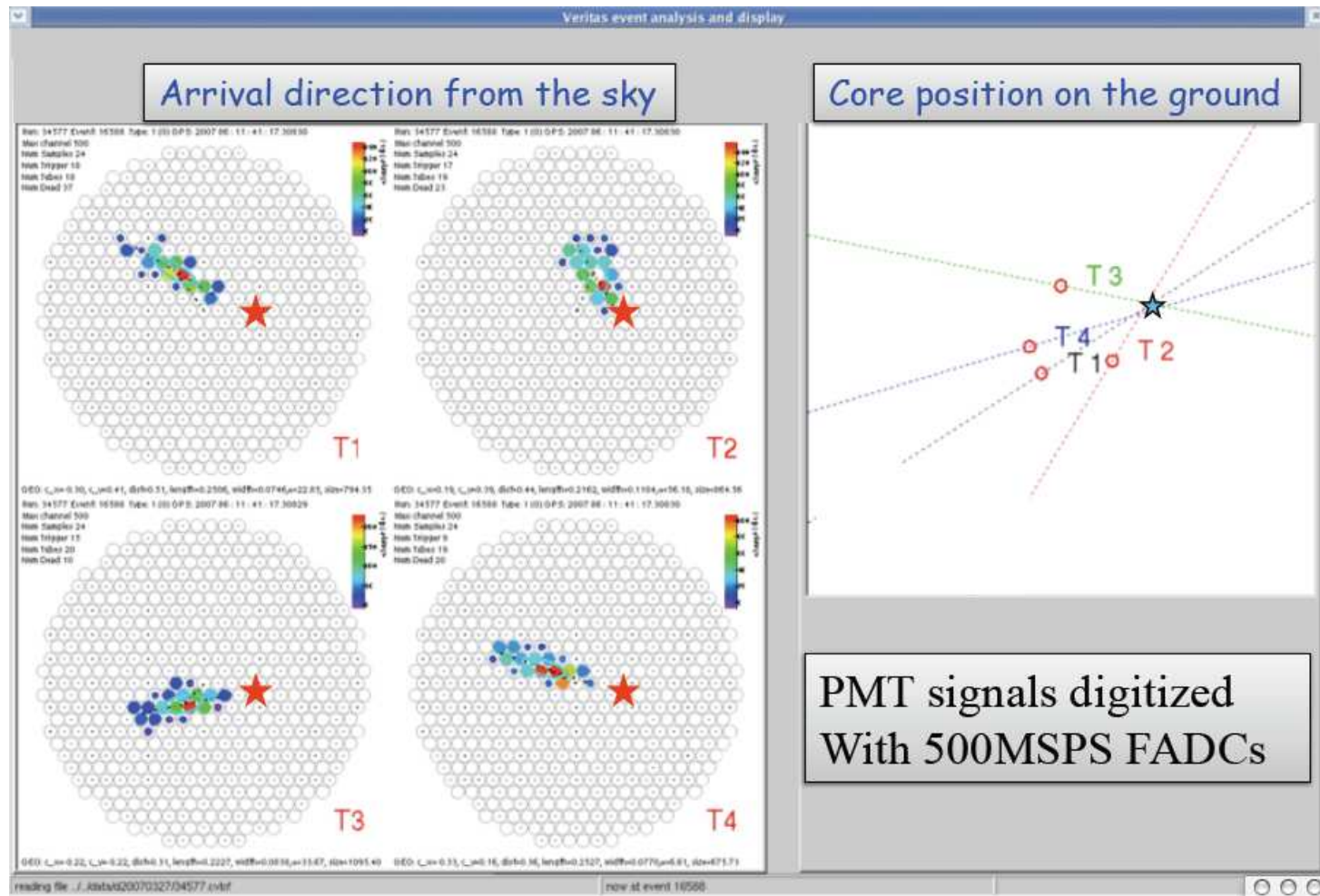


hadron

Teleskopy Czerenkowa

Rekonstrukcja

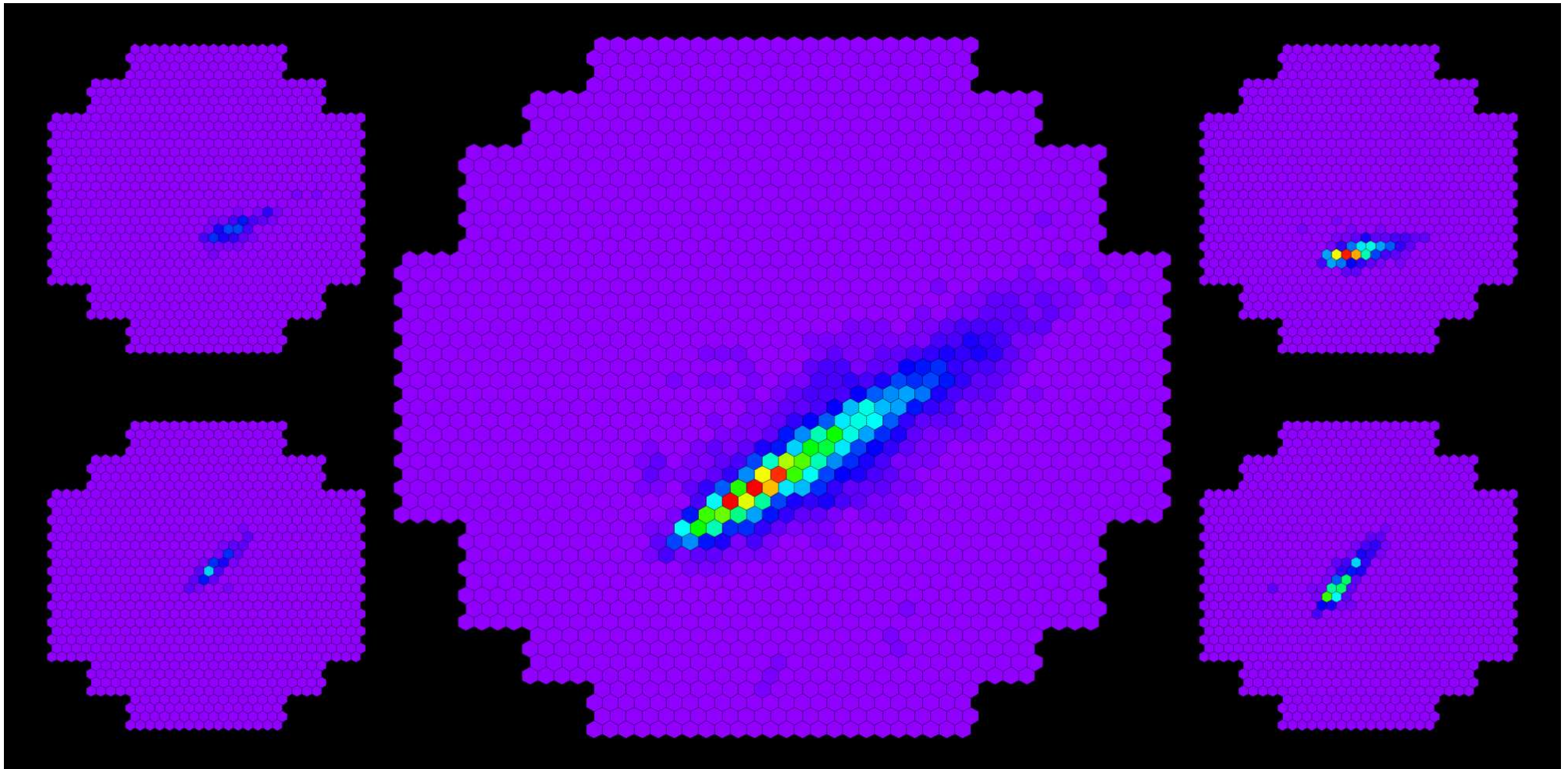
Wyznaczenie kierunku znacznie dokładniejsze dla obserwacji kilkoma teleskopami



HESS

Rekonstrukcja

Wyznaczenie kierunku znacznie dokładniejsze dla obserwacji kilkoma teleskopami

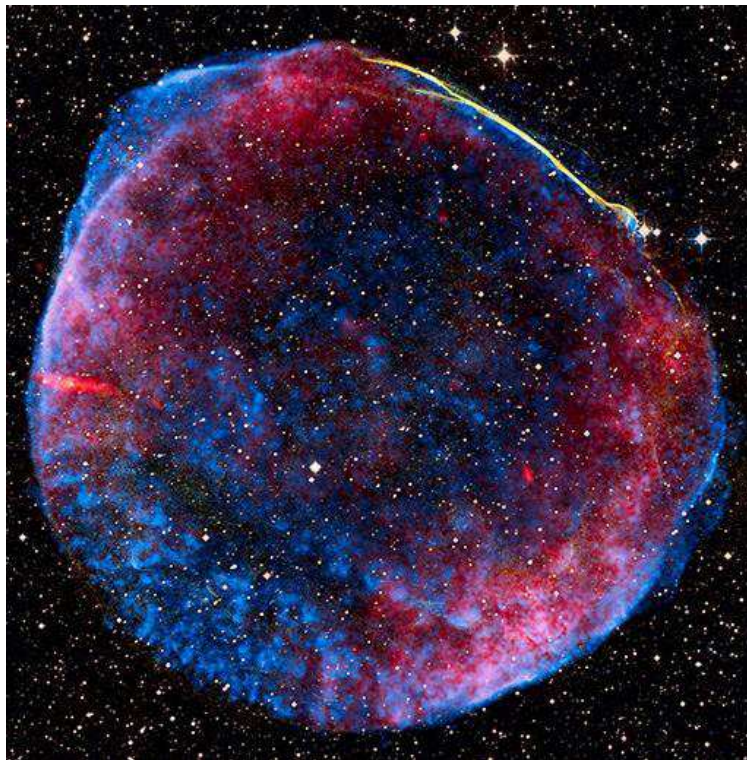


HESS

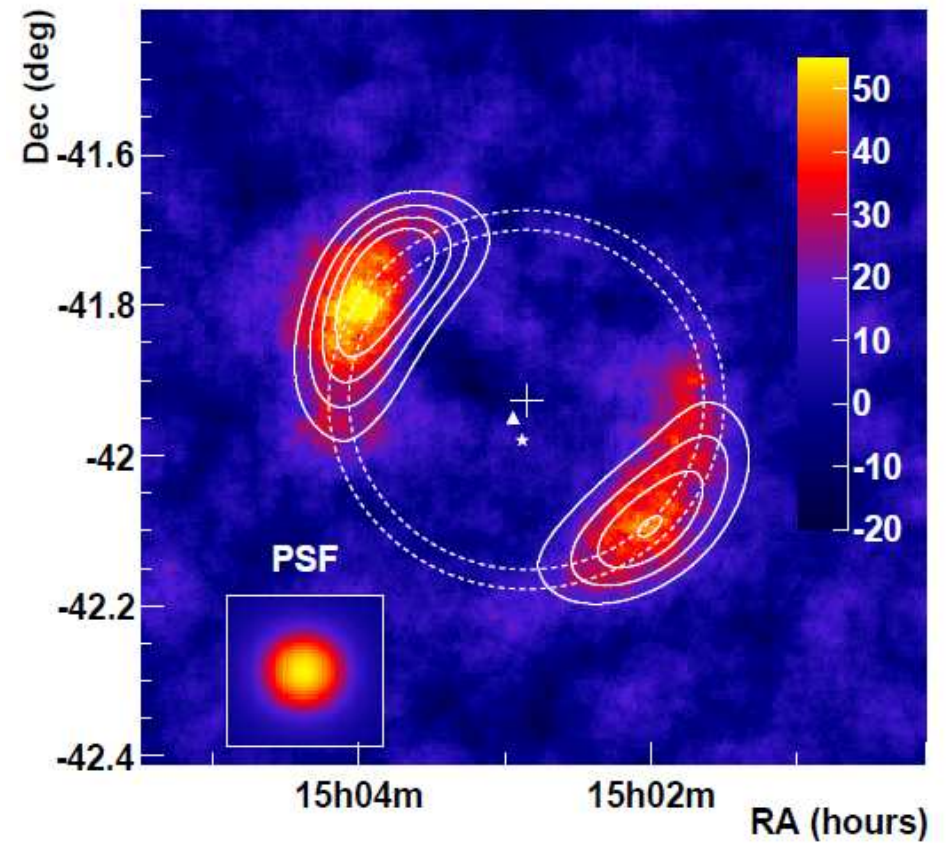
Wyniki

Obserwacja promieniowania TeV z SNR - potwierdzenie przyspieszania CR

SN1006 w prom. radiowym, optycznym, X



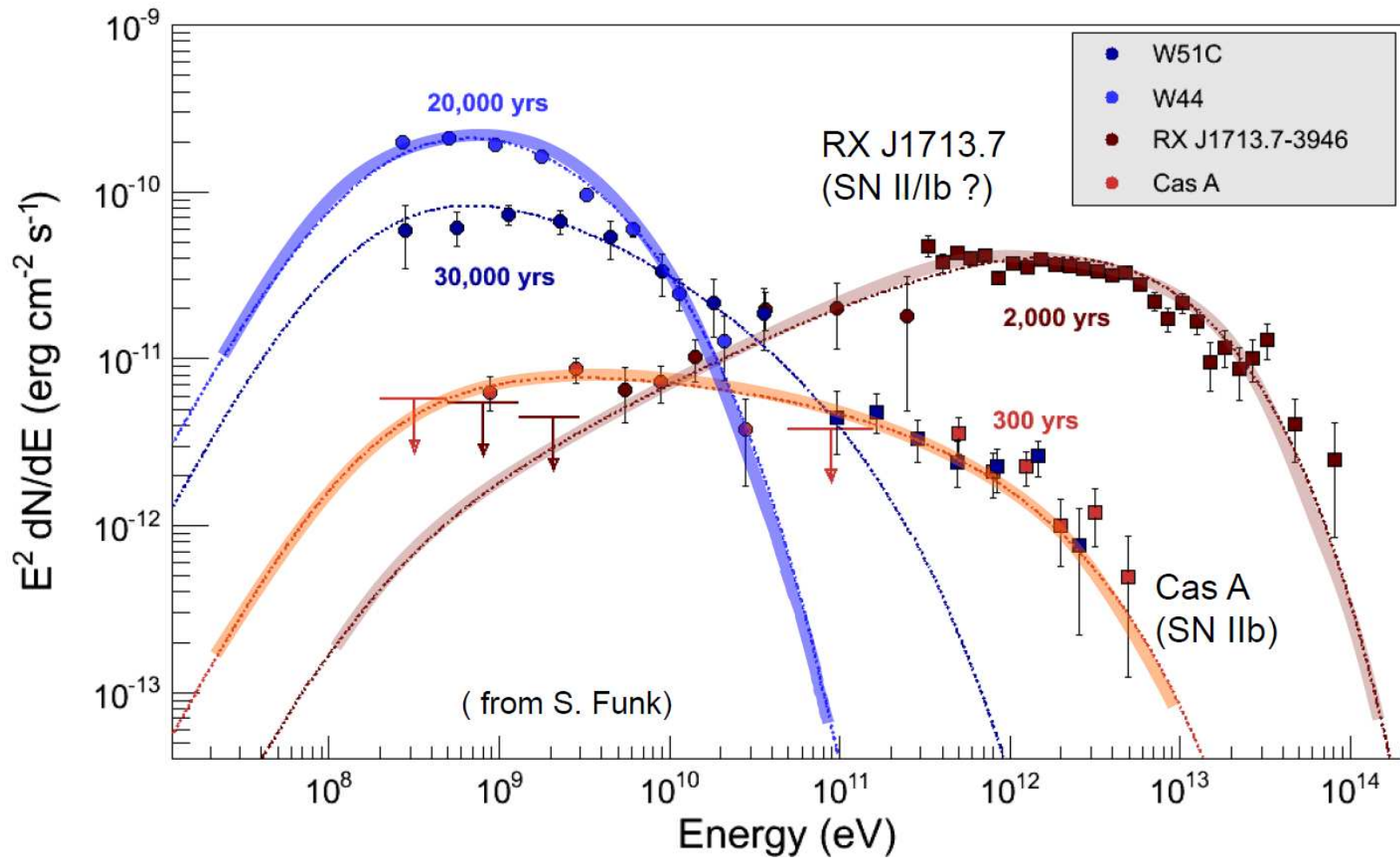
i w promieniowaniu TeV (HESS)



HESS

Wyniki

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



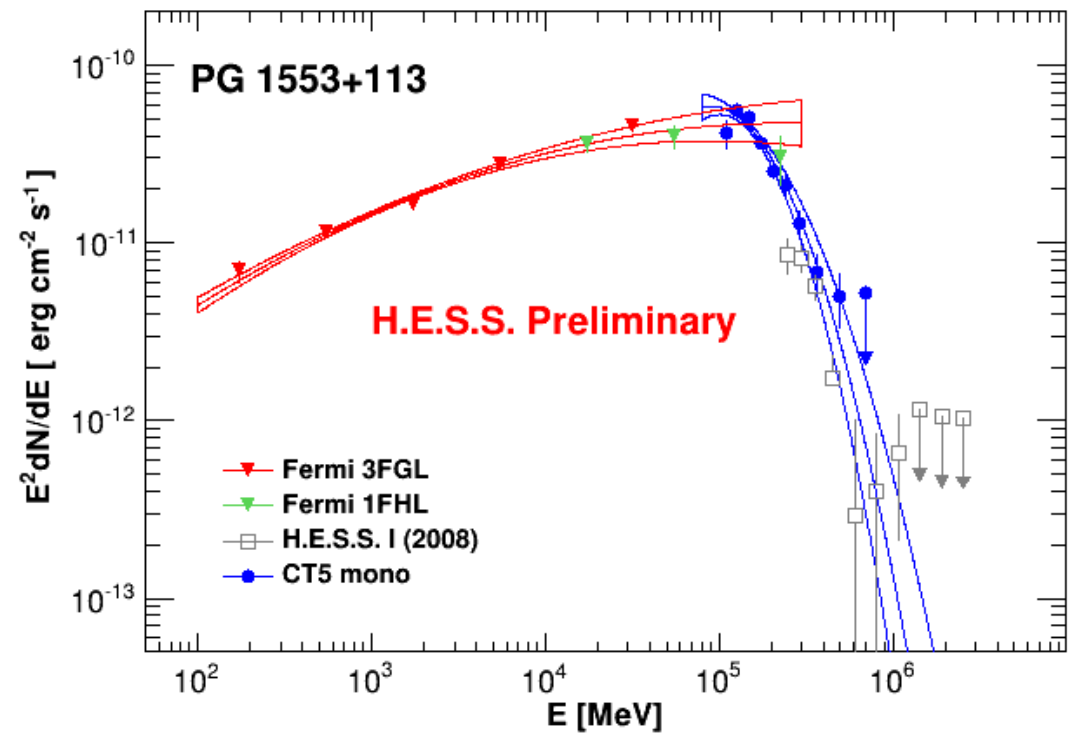
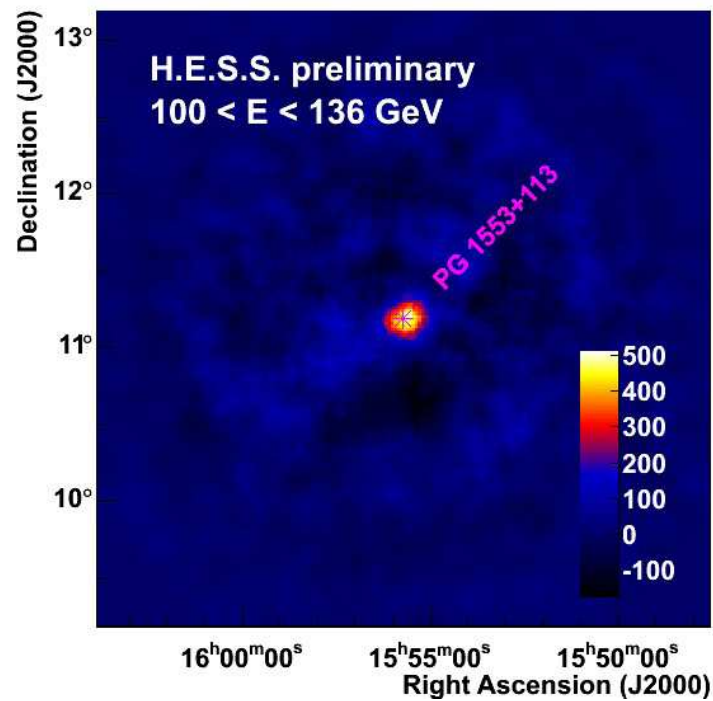
HESS

Wyniki

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

Wysoka precyzja: jednoczesny pomiar rozkładu przestrzennego i spektrum.

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



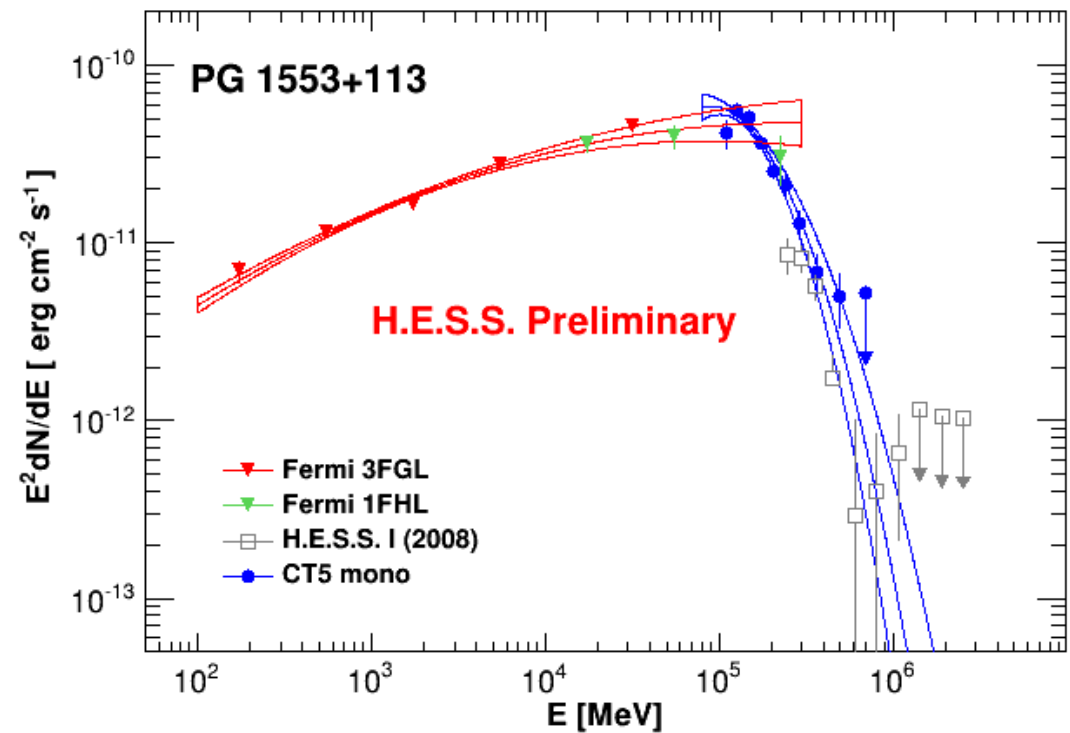
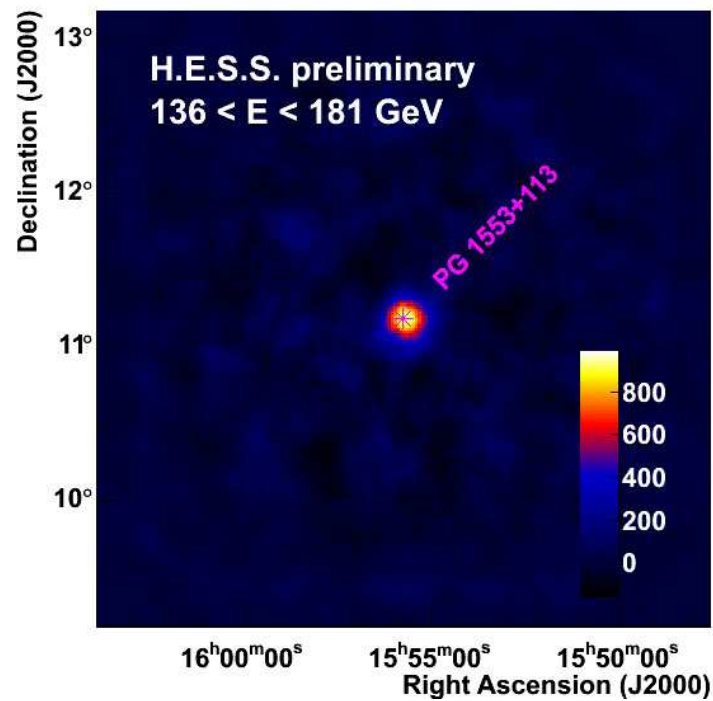
HESS

Wyniki

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

Wysoka precyzja: jednoczesny pomiar rozkładu przestrzennego i spektrum.

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



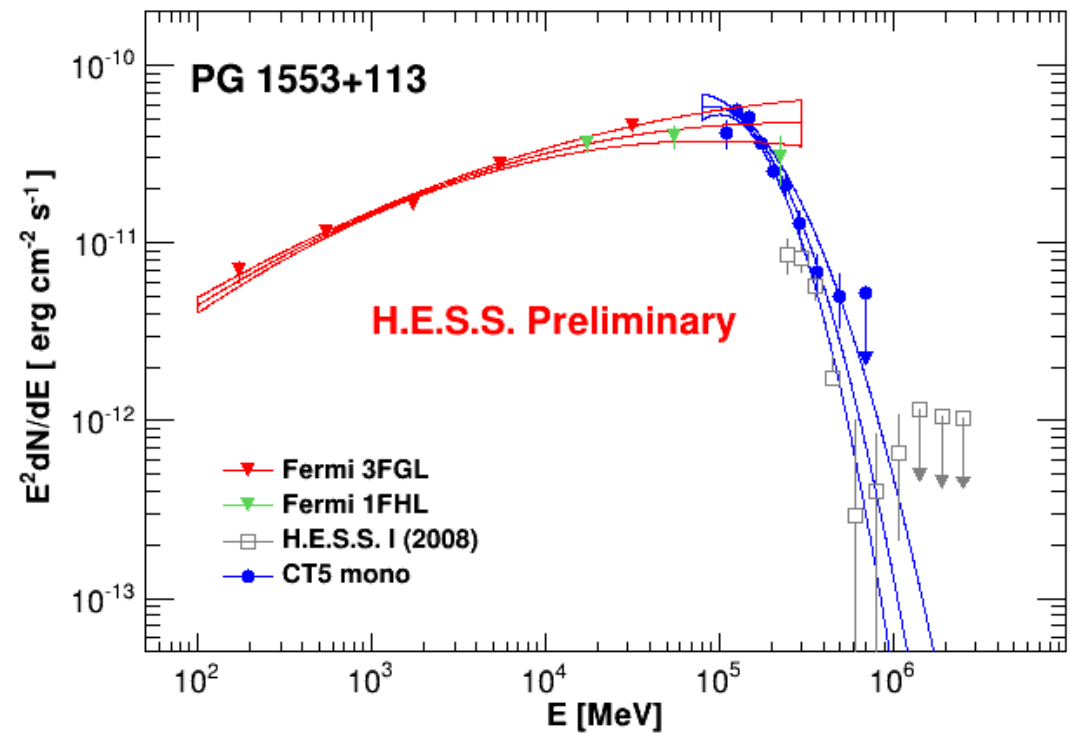
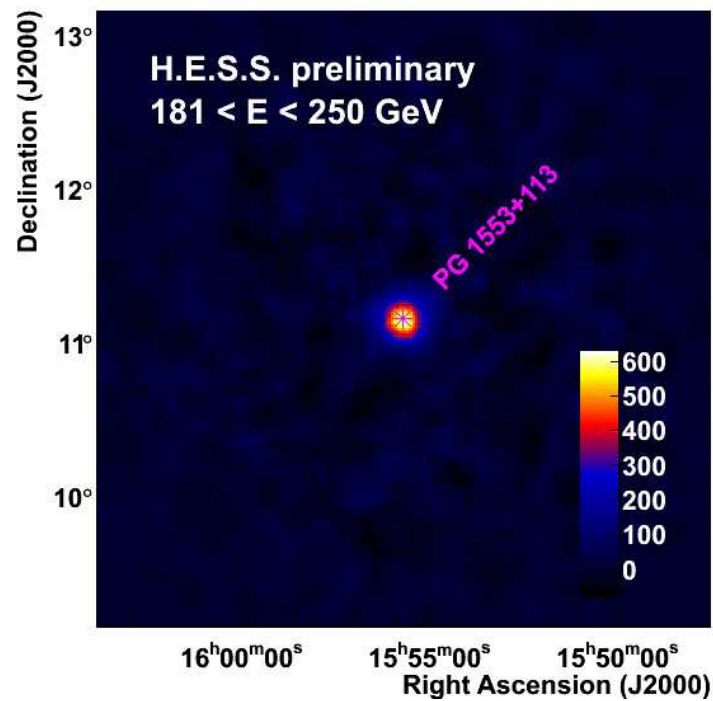
HESS

Wyniki

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

Wysoka precyzja: jednoczesny pomiar rozkładu przestrzennego i spektrum.

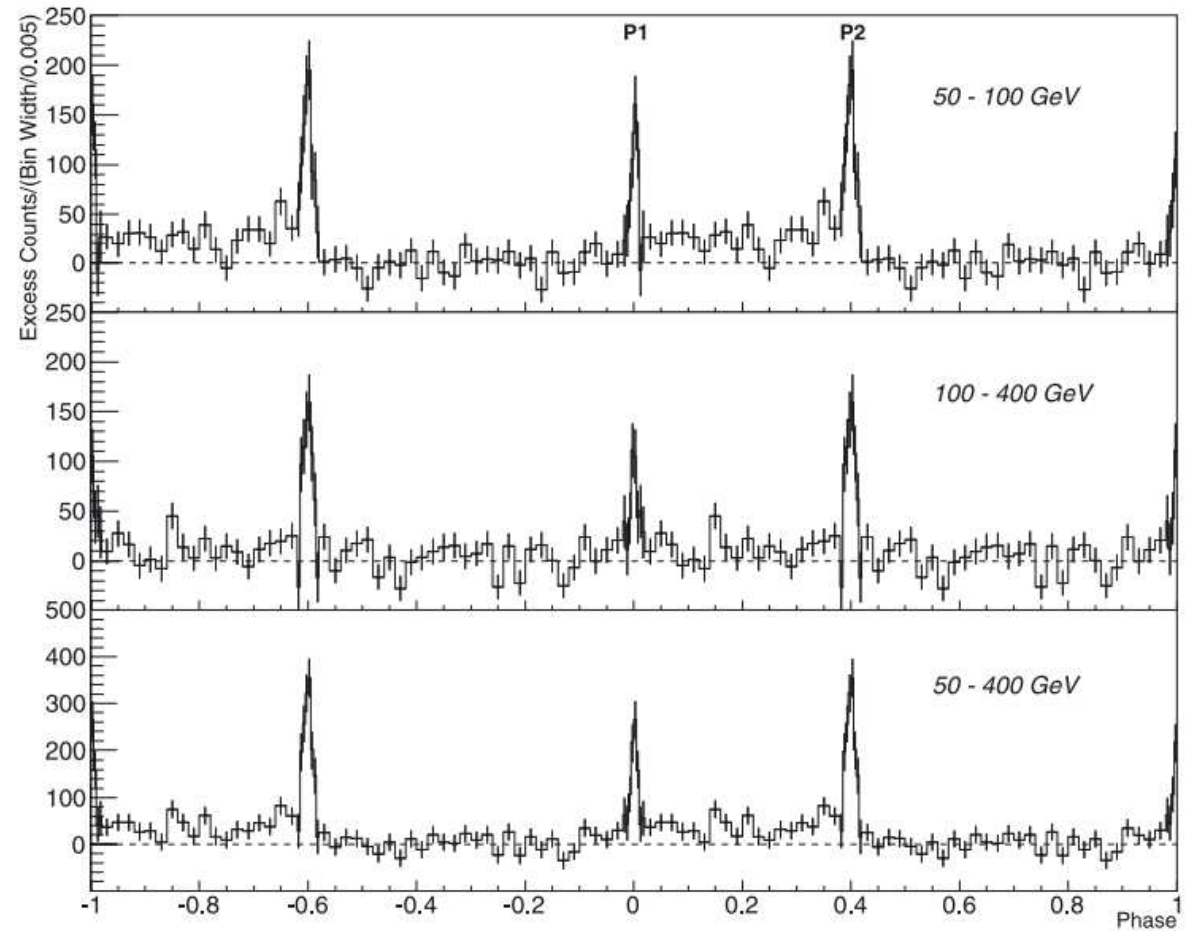
Blazar PG1553+113 ($z \sim 0.5$)



MAGIC

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

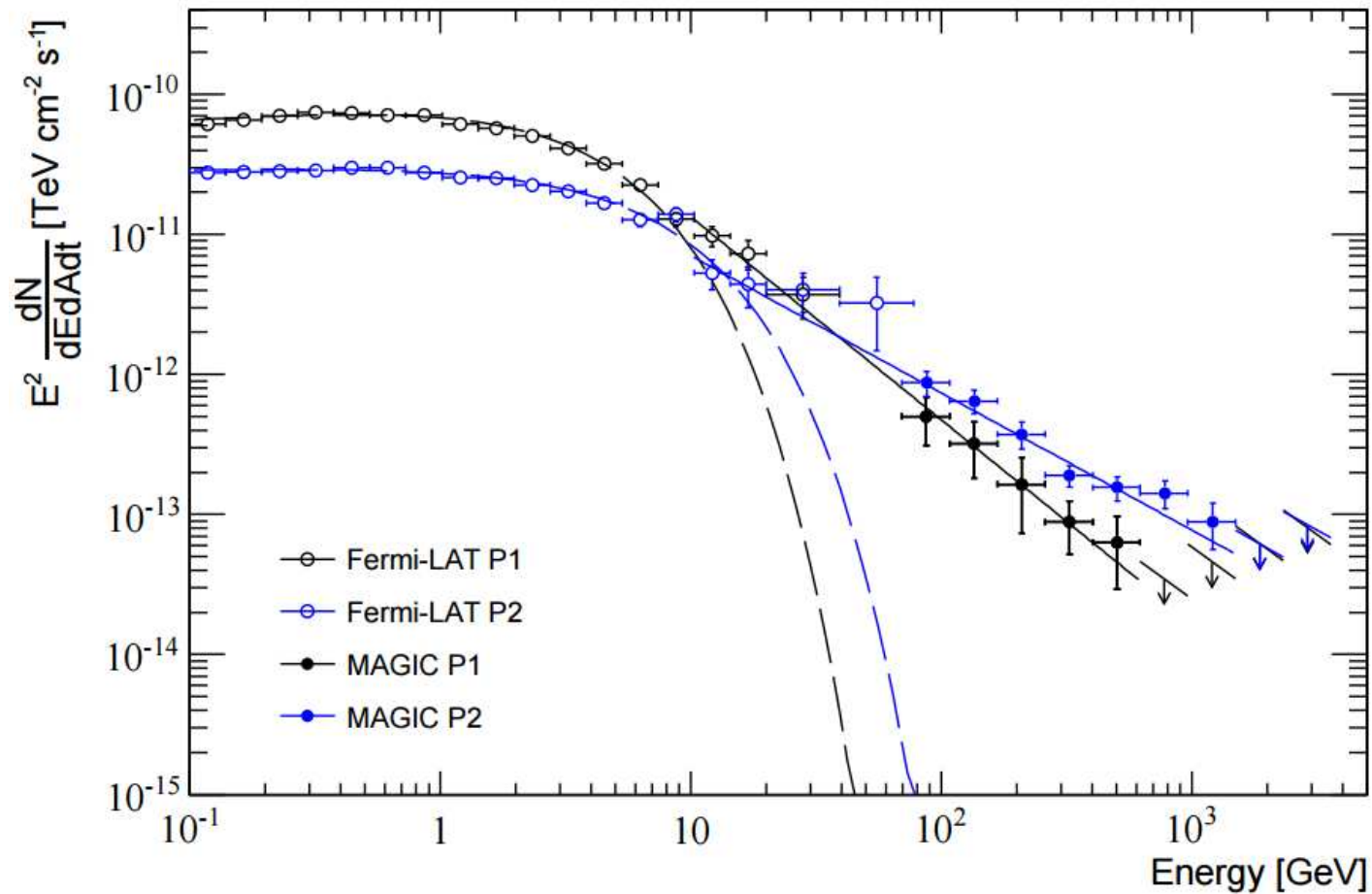
Bardzo dobra rozdzielczość czasowa: natężenie sygnału z Mgławicy Kraba ($T=33\text{ms}$)



MAGIC

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

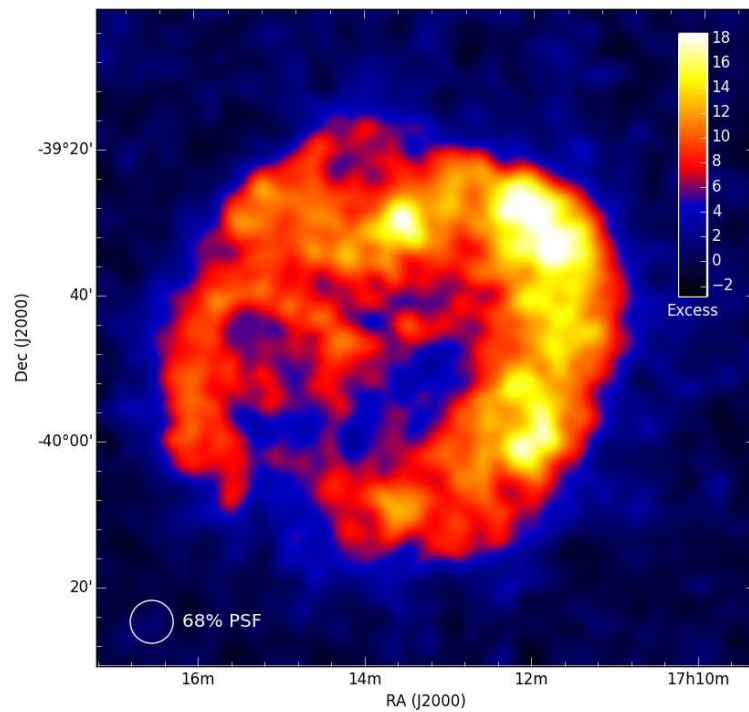
Bardzo dobra rozdzielczość czasowa: porównanie widma dwóch pulsów



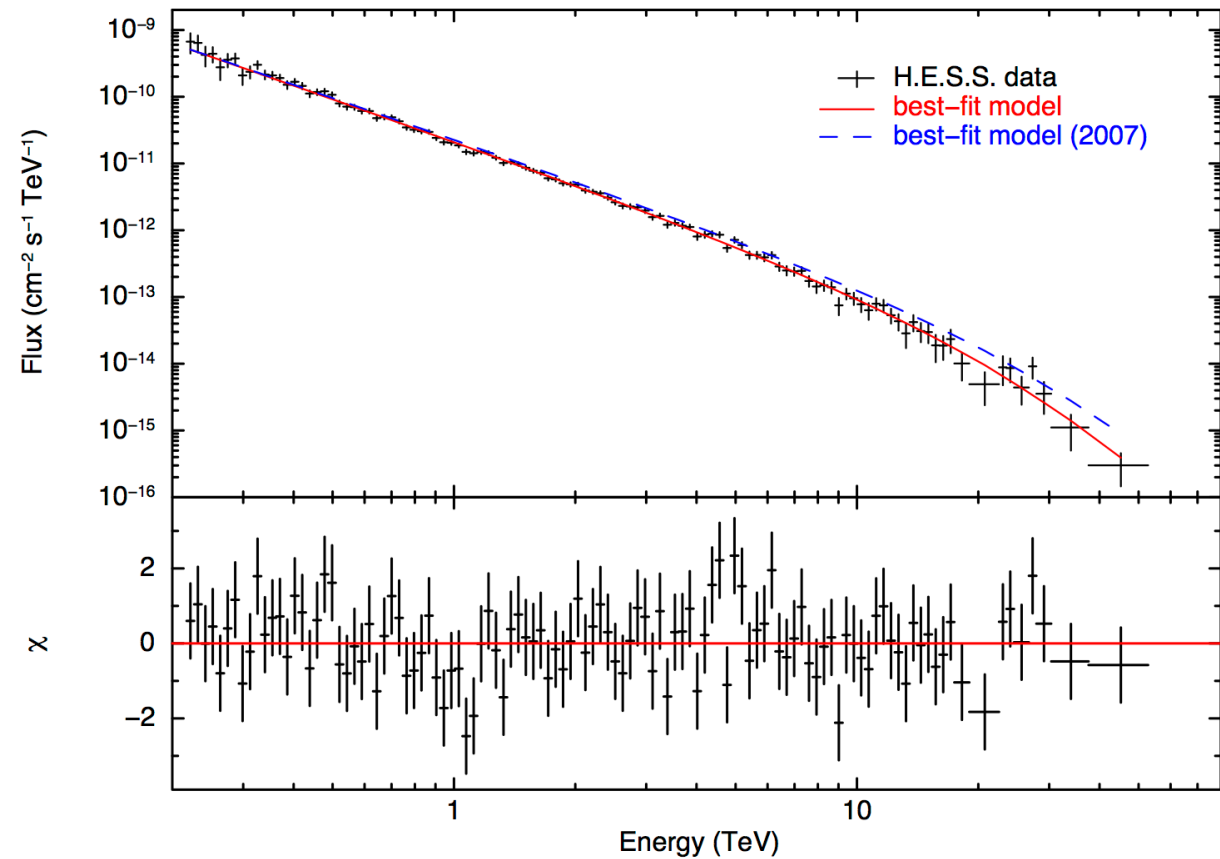
Wyniki

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

RX J1713.7-3946 (SNR)



$E > 250 \text{ GeV}$



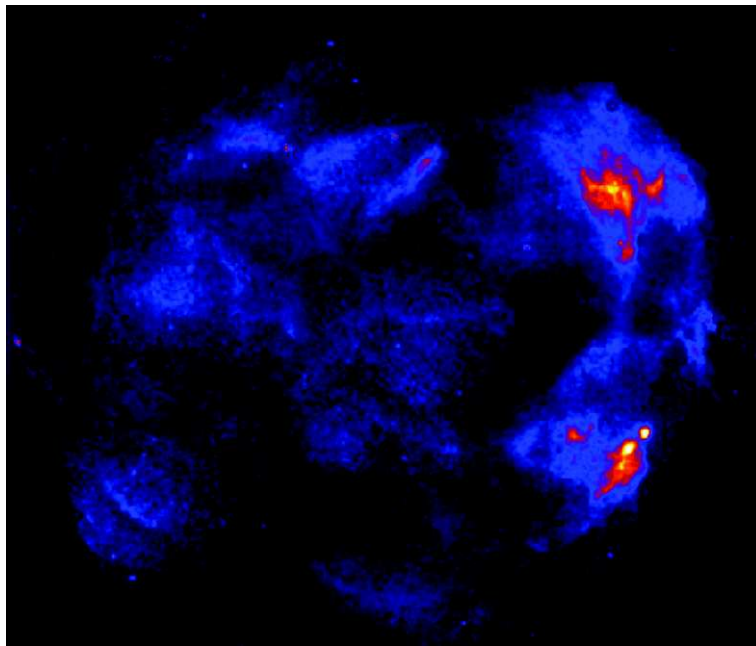
Emisja promieniowania w zakresie TeV związana z przyspieszaniem cząstek

HESS

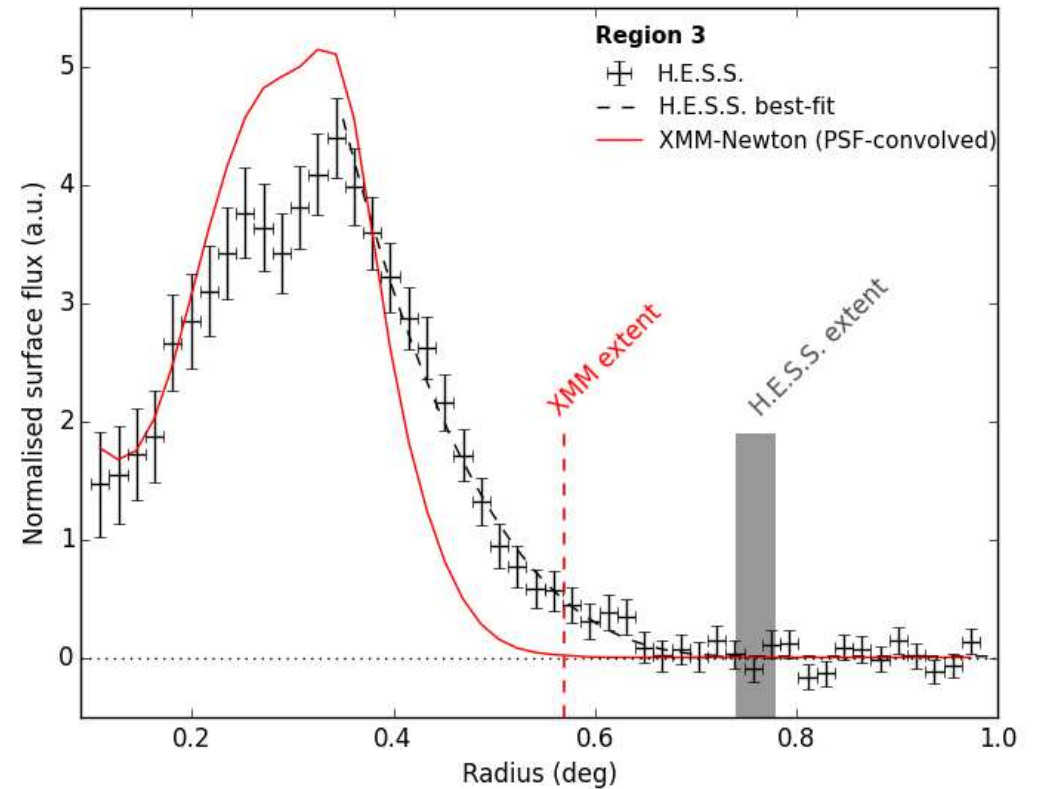
Wyniki

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

RX J1713.7-3946 (SNR)



X-ray

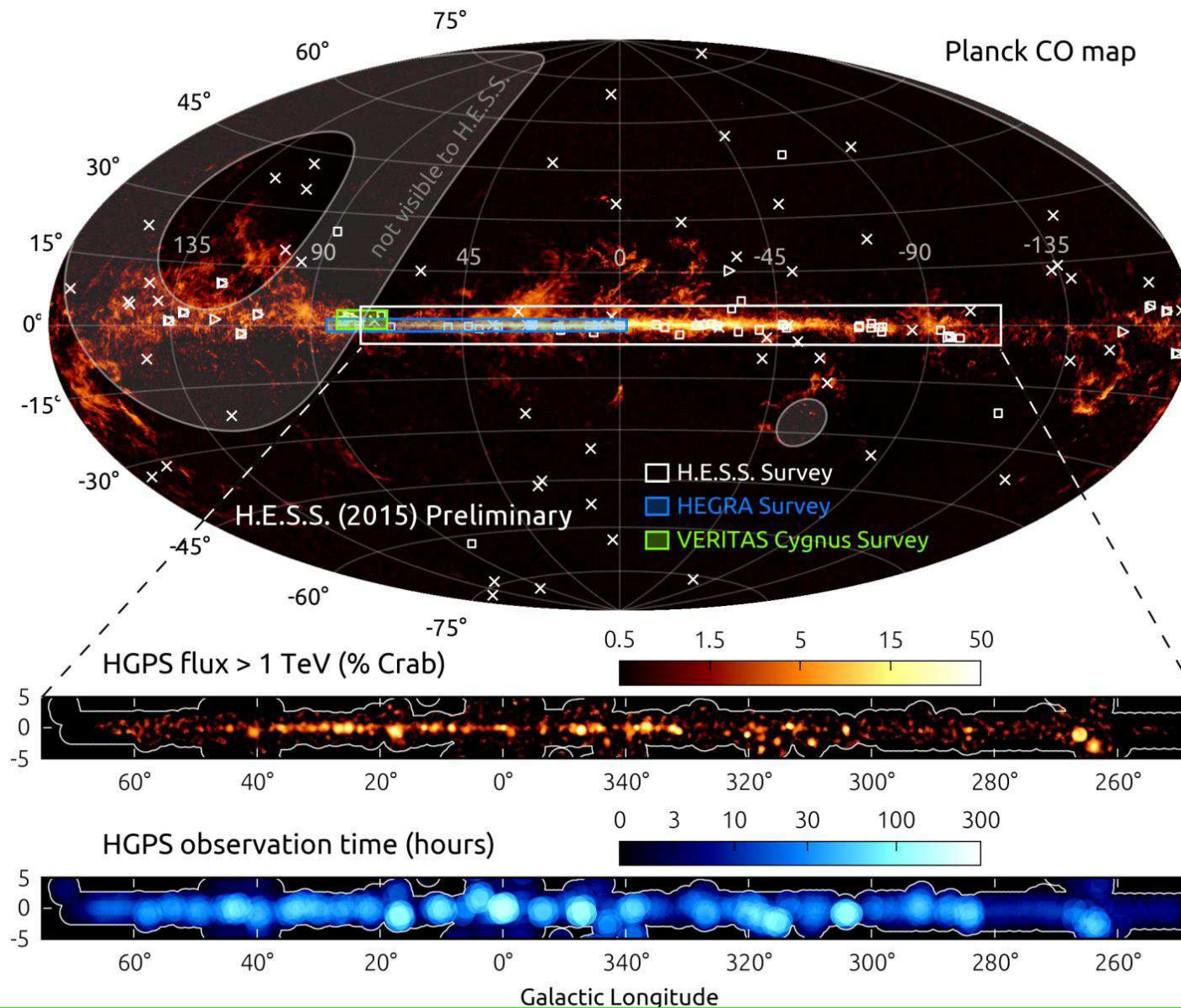


Oddziaływanie przyspieszonych cząstek z otaczającą materia (rozpady π^0)

Wyniki

Skany płaszczyzny Galaktyki.

HESS



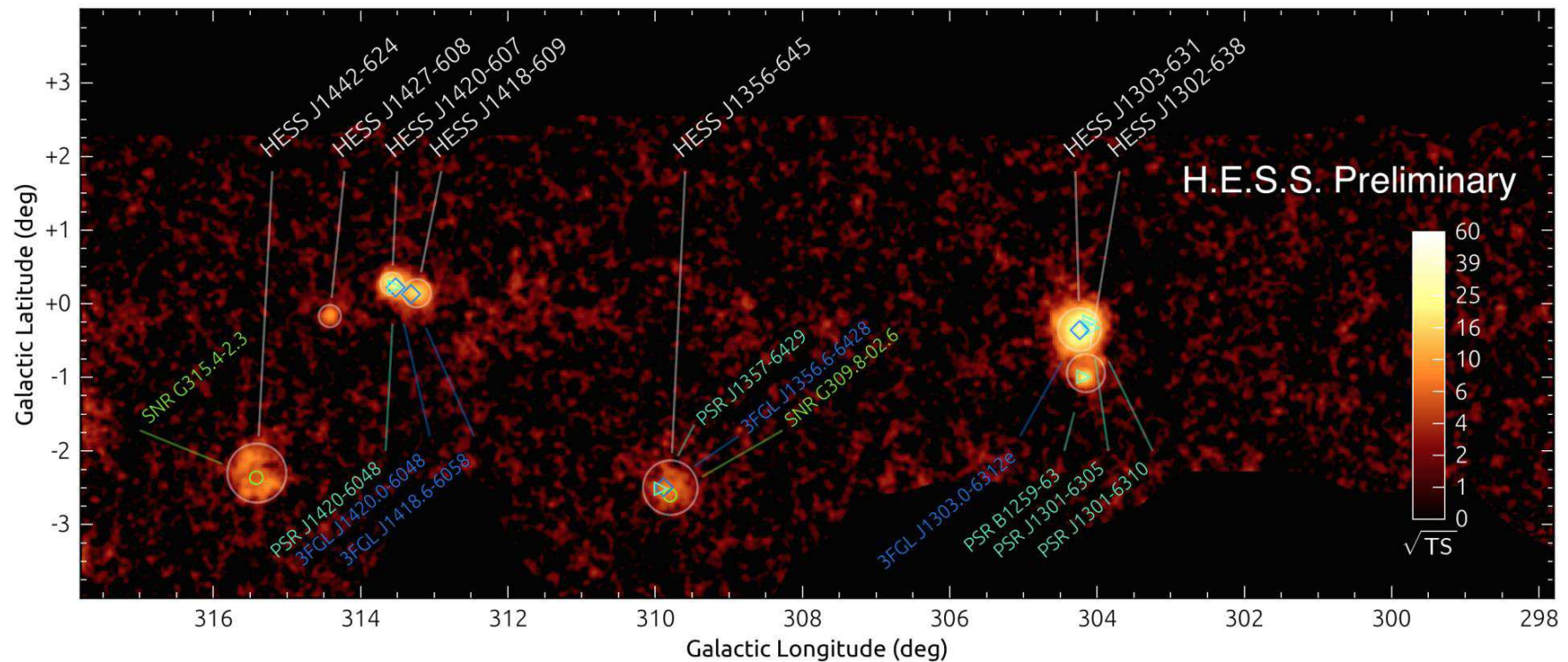
HESS

Wyniki

Skany płaszczyzny Galaktyki.

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

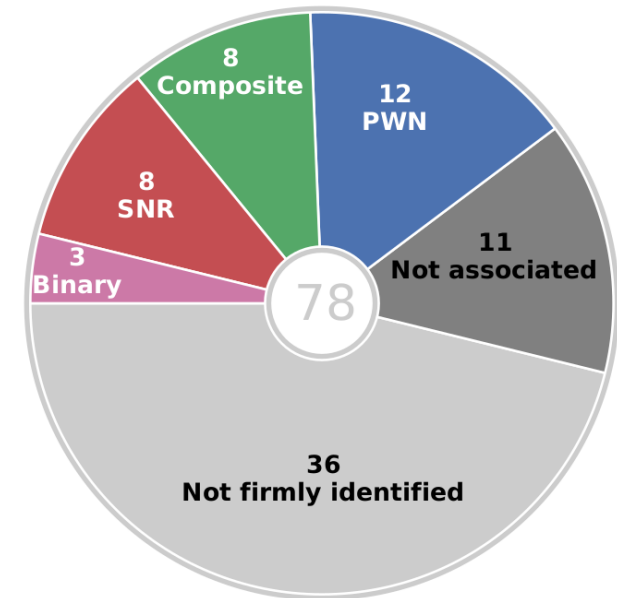
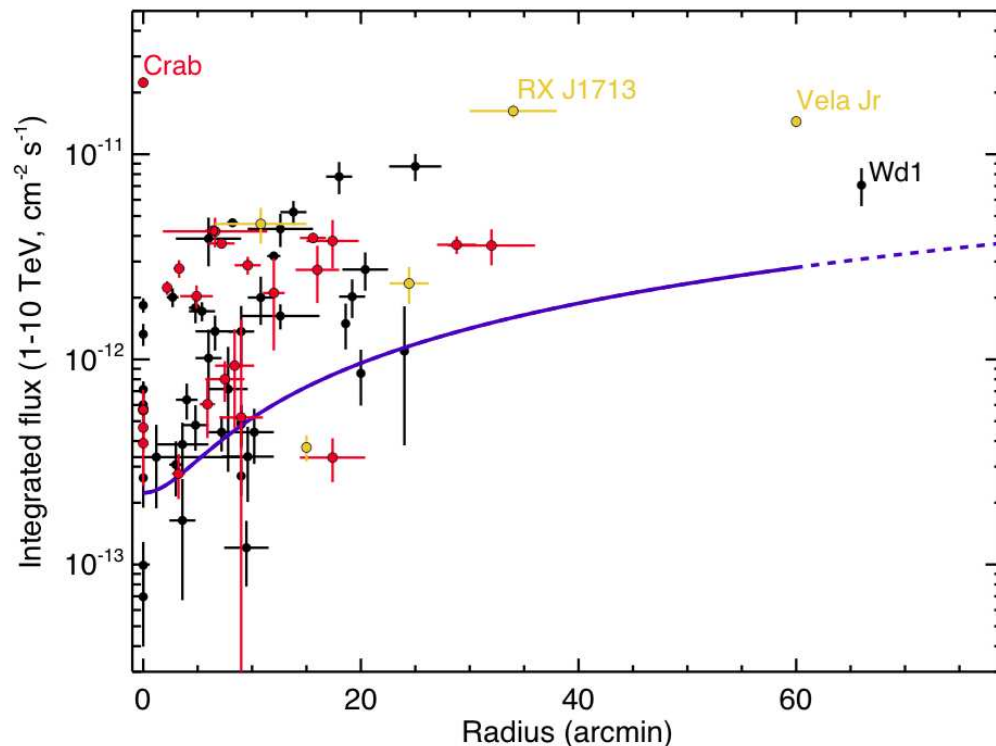
Zidentyfikowano 78 źródeł promieniowania gamma w zakresie TeV



HESS

Wyniki

Zmierzone natężenie, rozmiary i typ źródeł znalezionych w płaszczyźnie Galaktyki



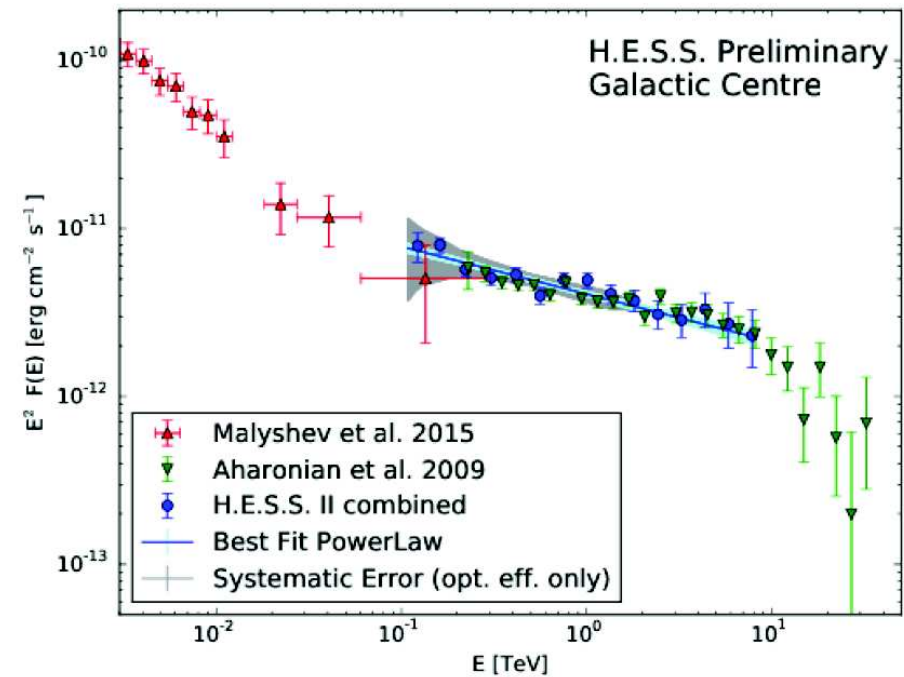
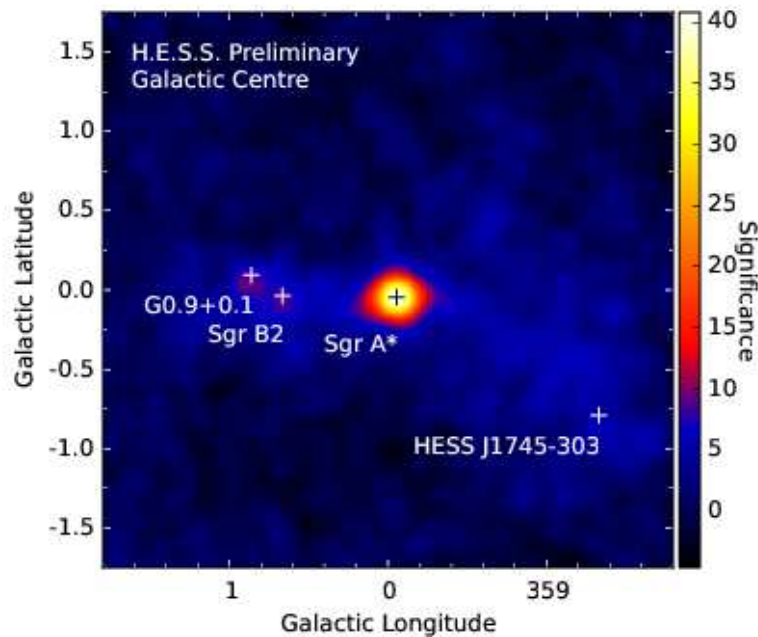
W większości przypadków identyfikacja nie jest jednoznaczna...

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

HESS

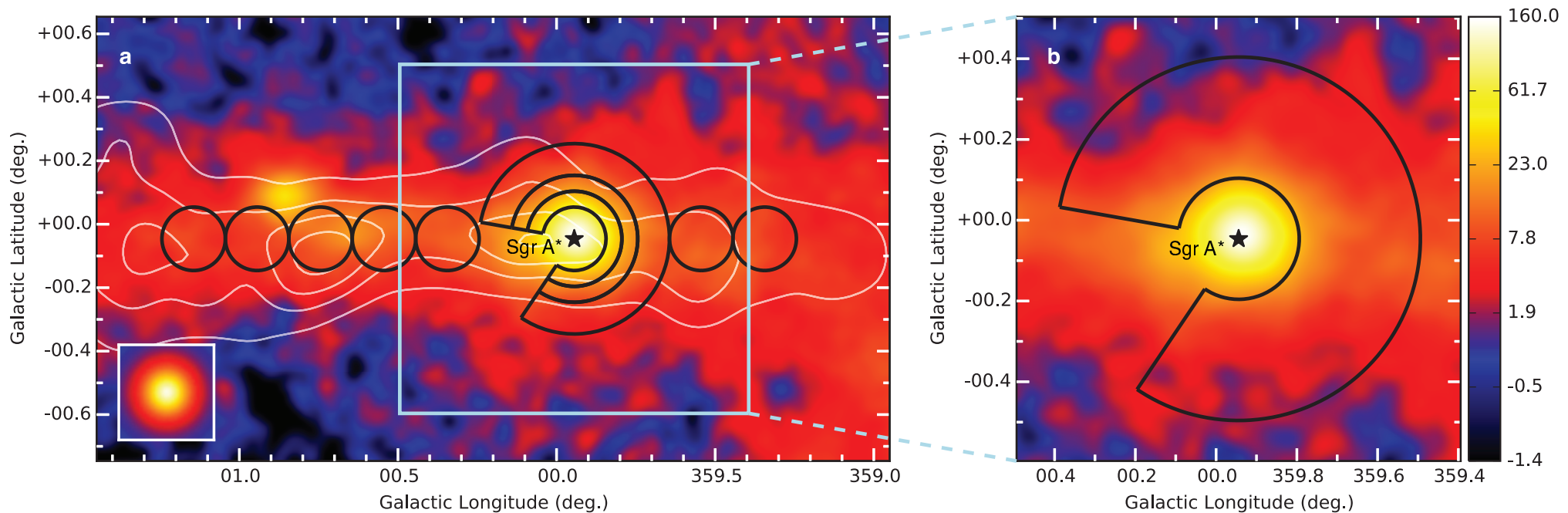
Centrum Galaktyki

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



Centrum Galaktyki

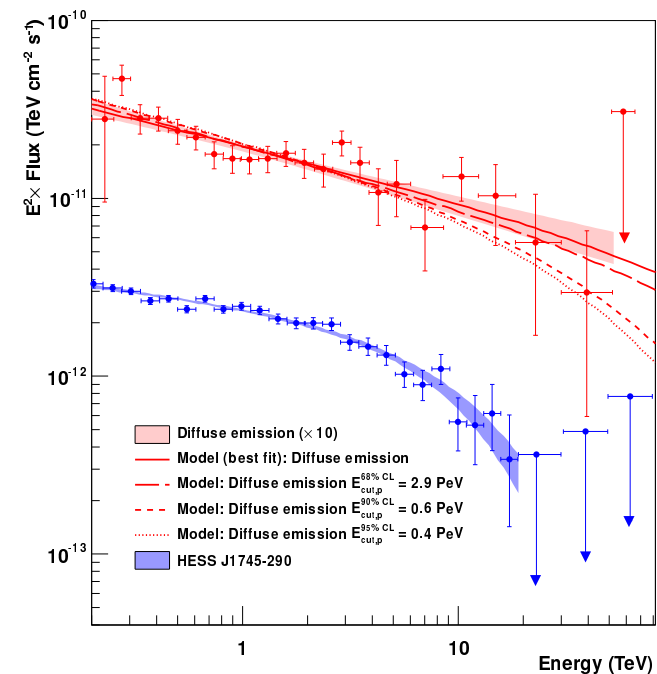
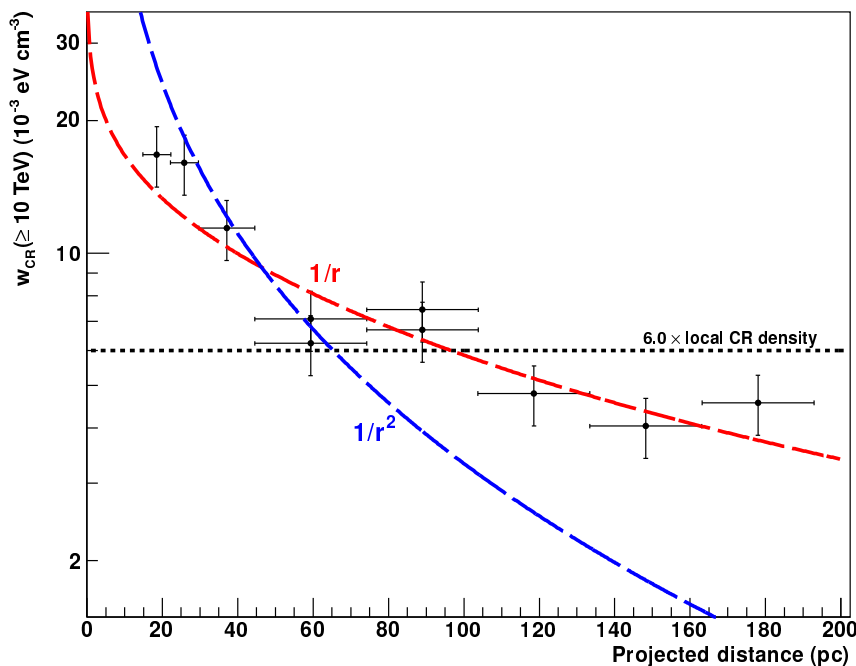
Przy dokładniejszej analizie widać, że źródłem promieniowania jest nie tylko Sag A*, ale także otaczający go obszar zimnej materii międzygwiazdnej.



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.



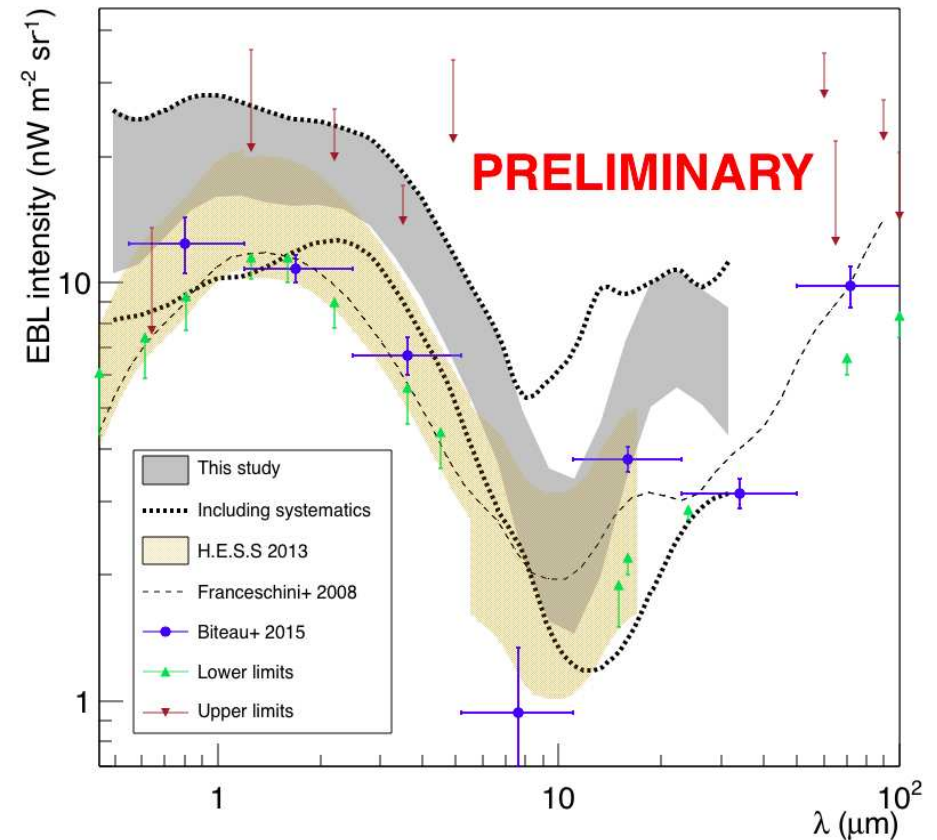
Źródło w centrum galaktyki musi w sposób ciągły emitować promieniowanie (w skalach czasowych > 1000 lat) \Rightarrow rozkład $\sim 1/r$

HESS

Wyniki

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

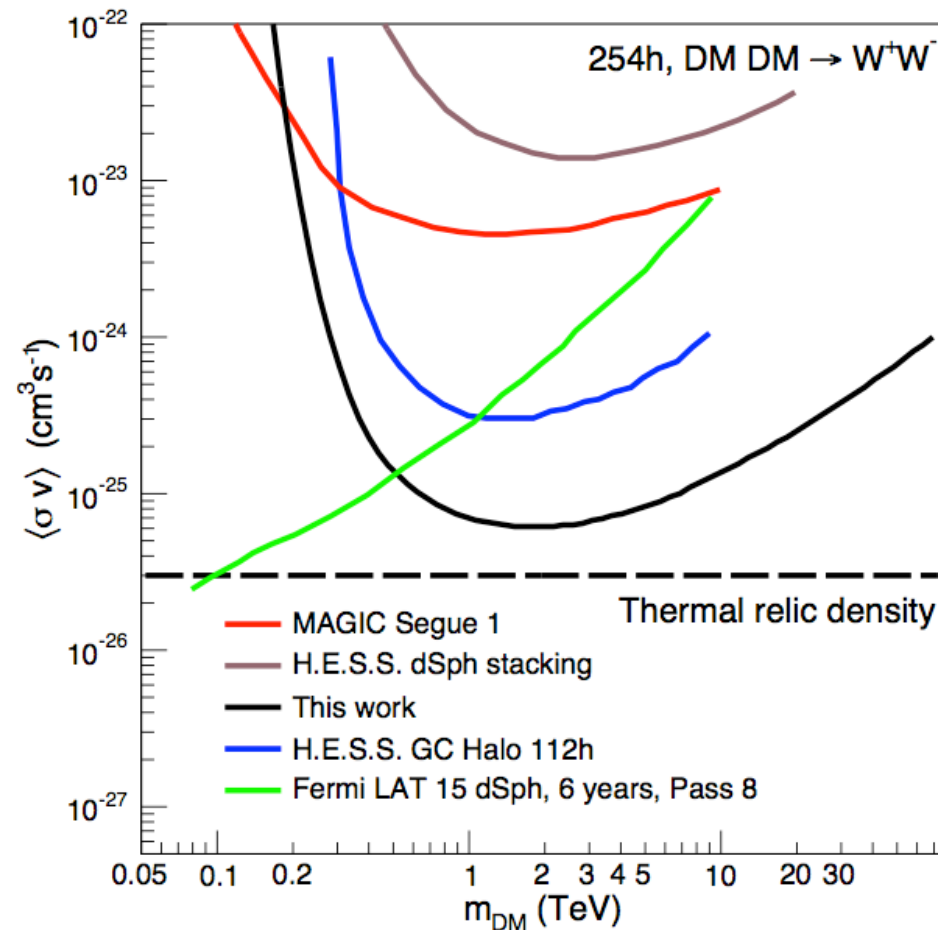
Całkowite promieniowanie w zakresie od 0.1 do 1000 μm odpowiada ok. 5% CMB

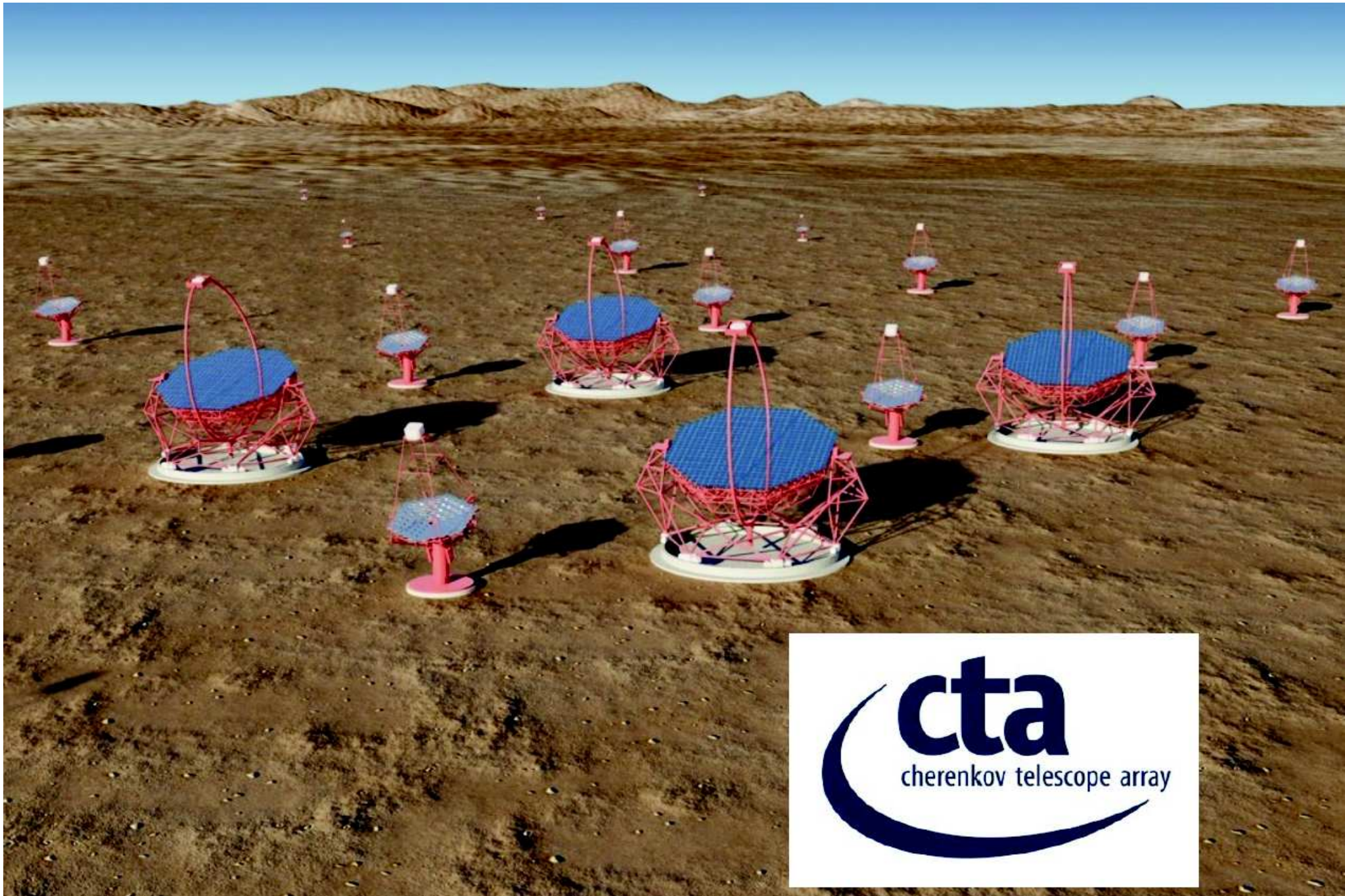


HESS

Poszukiwanie Ciemnej Materii

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





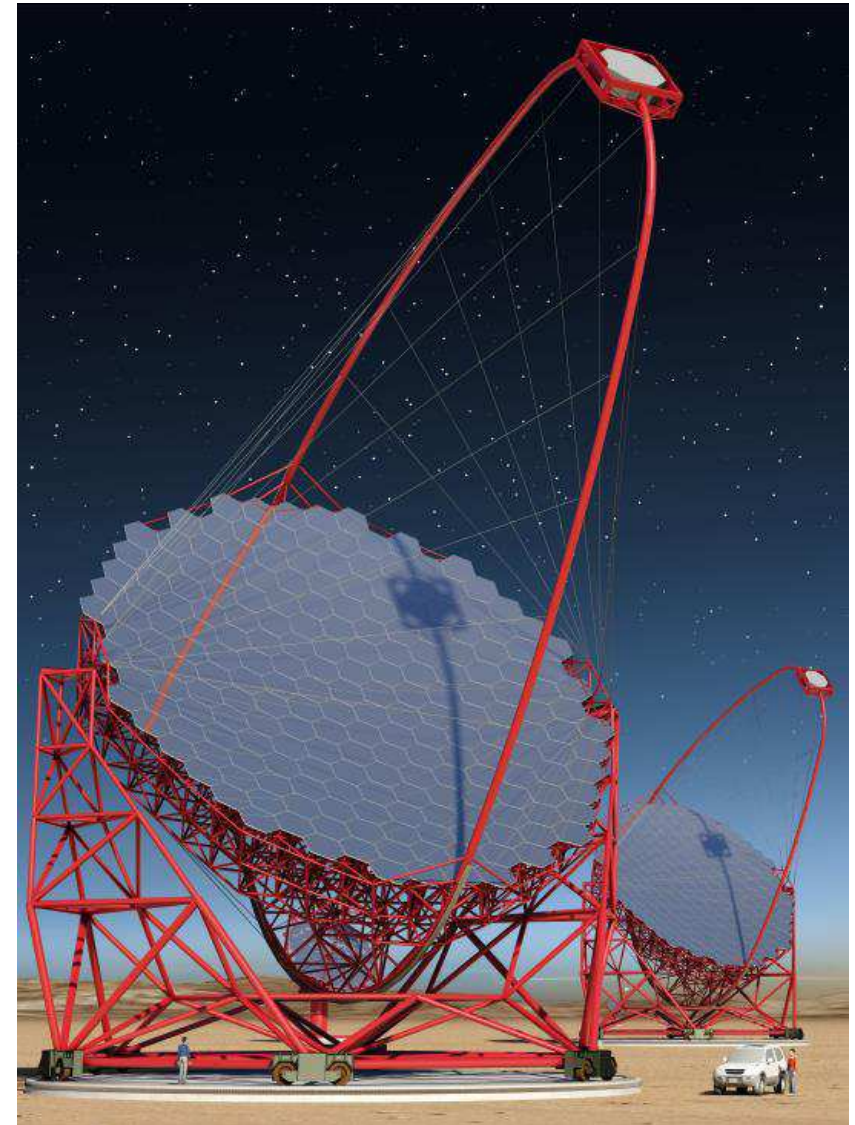
CTA

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 - 150 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 0.15 - 5 TeV.

Pole widzenia ok. 7.5°

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 0.15 - 5 TeV.

Pole widzenia ok. 7.5°

Alternatywna konstrukcja włoska



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 0.15 - 5 TeV.

Pole widzenia ok. 7.5°

Najnowsza propozycja amerykańska



CTA

Projekt

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

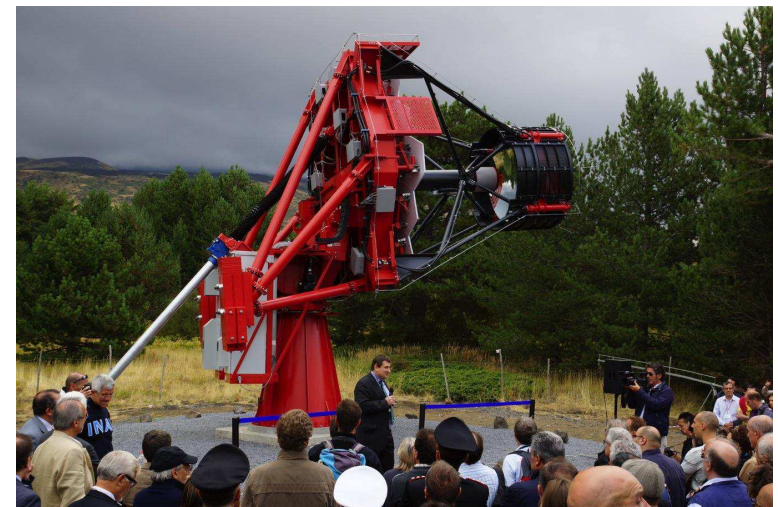
W projekcie CTA zakładano budowę ok. 70 małych teleskopów (SST), o średnicy ok. 4 m, co pozwoli na pomiar fotonów od 5 do 300 TeV.

Pole widzenia ok. 8-10°

IFJ PAN, Kraków



Włochy



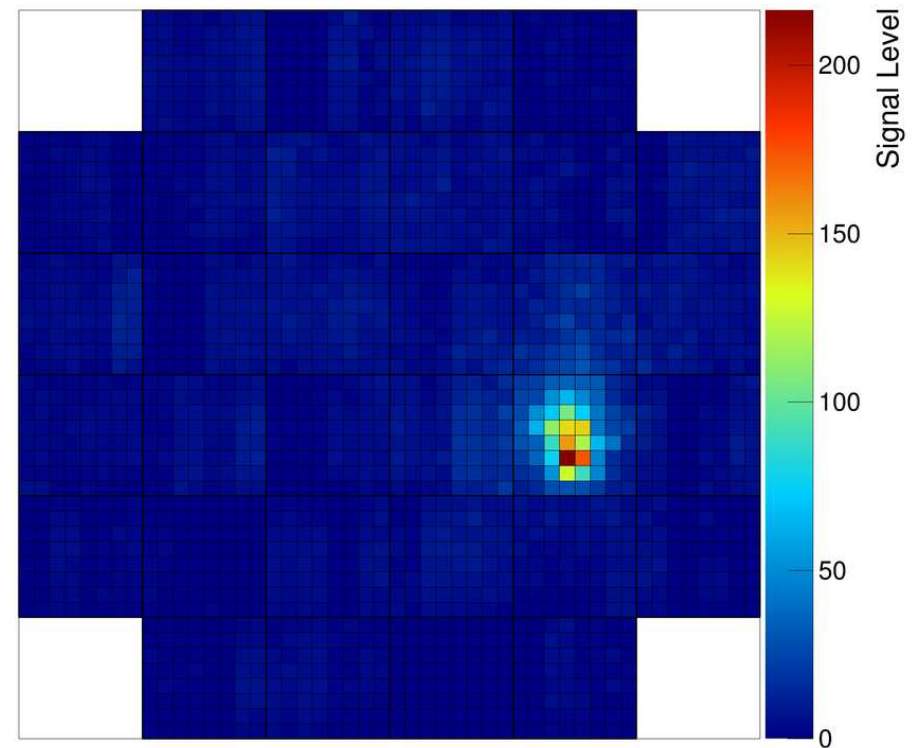
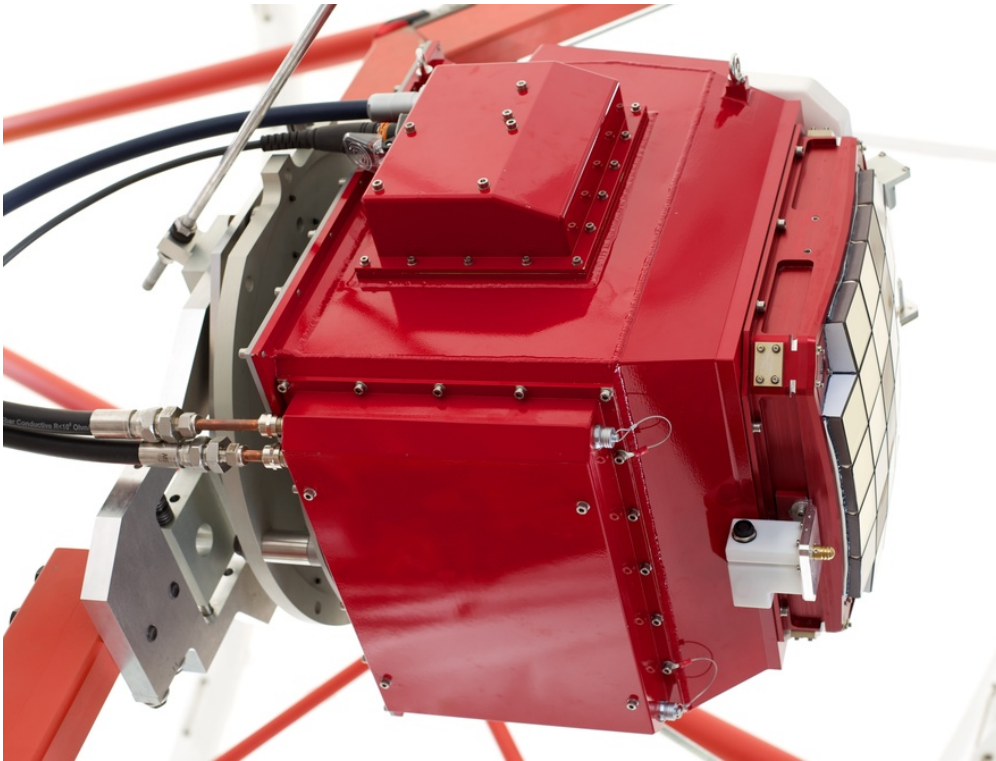
Projekt

Prototyp SST z dwoma zwierciadłami (Francja)



Projekt

Prototyp SST z dwoma zwierciadłami (Francja)

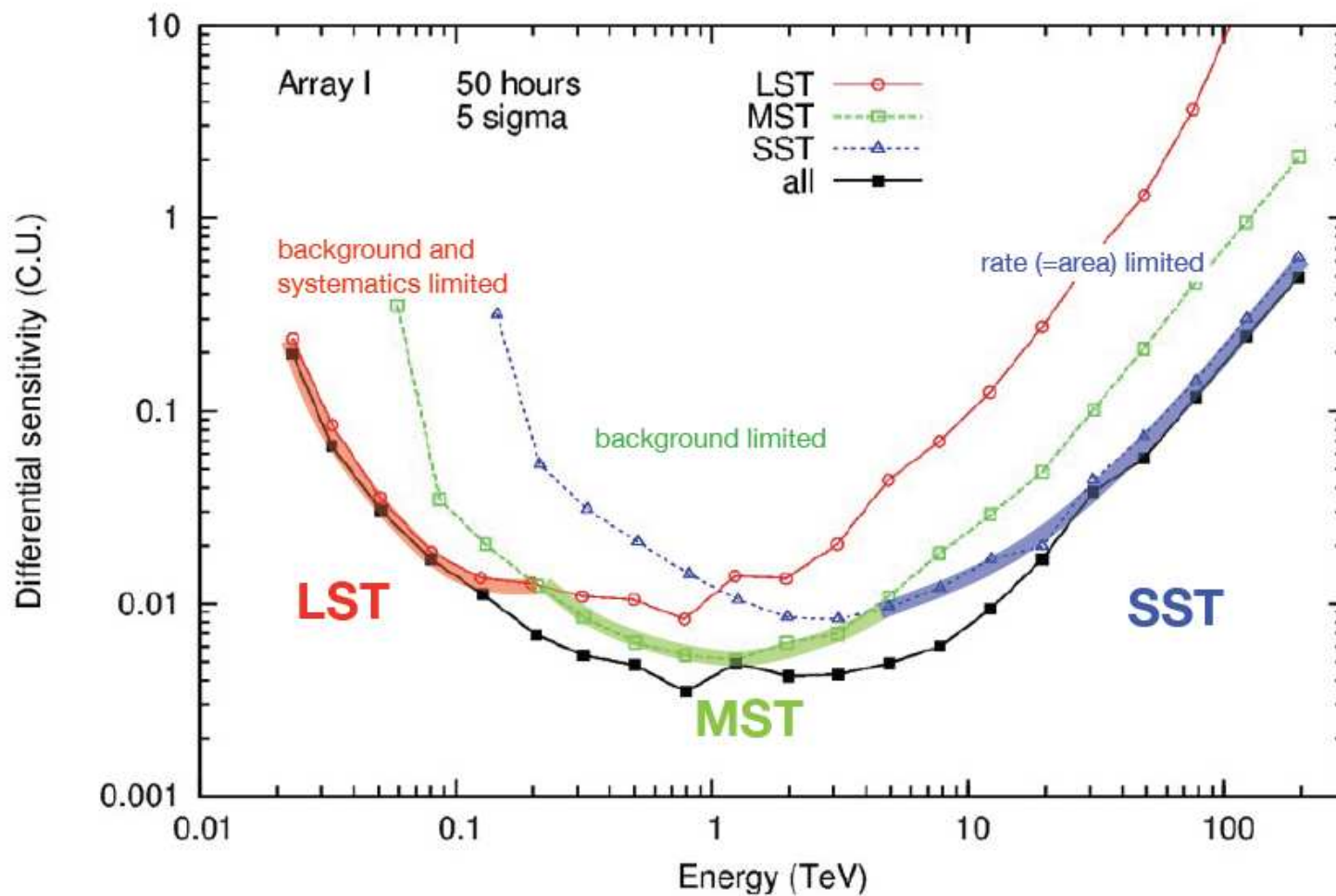


Rozważane dwie wersje kamery: MAPM (fotopowielacze) i SiPM (krzem)

CTA

Czułość

Połączenie trzech rodzajów teleskopów pozwoli na pomiar w szerokim zakresie energii

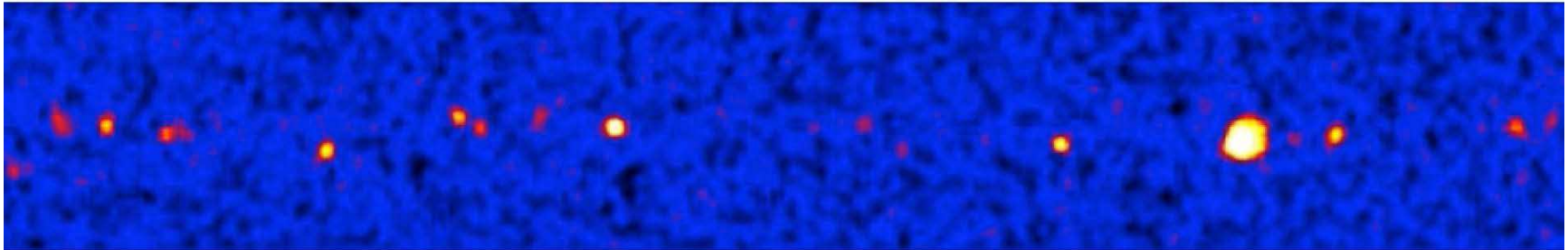


CTA

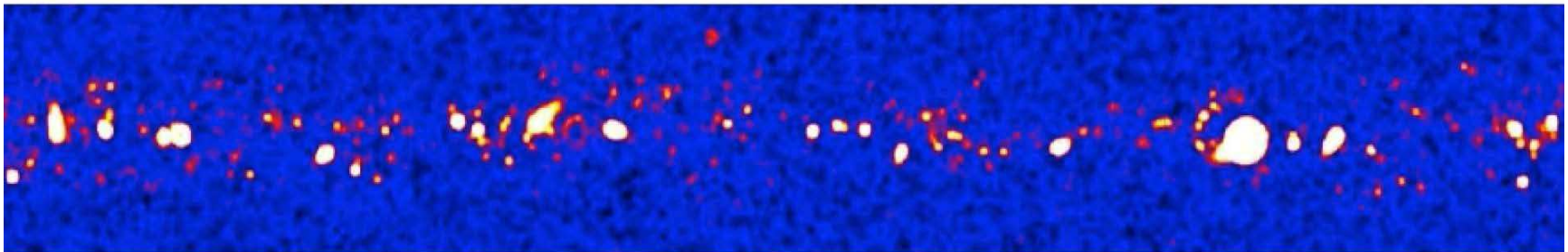
Dokładność

Jakościowy wzrost dokładności pomiaru energii i pozycji źródeł dla energii powyżej 1 TeV

H.E.S.S.



CTA, for same exposure

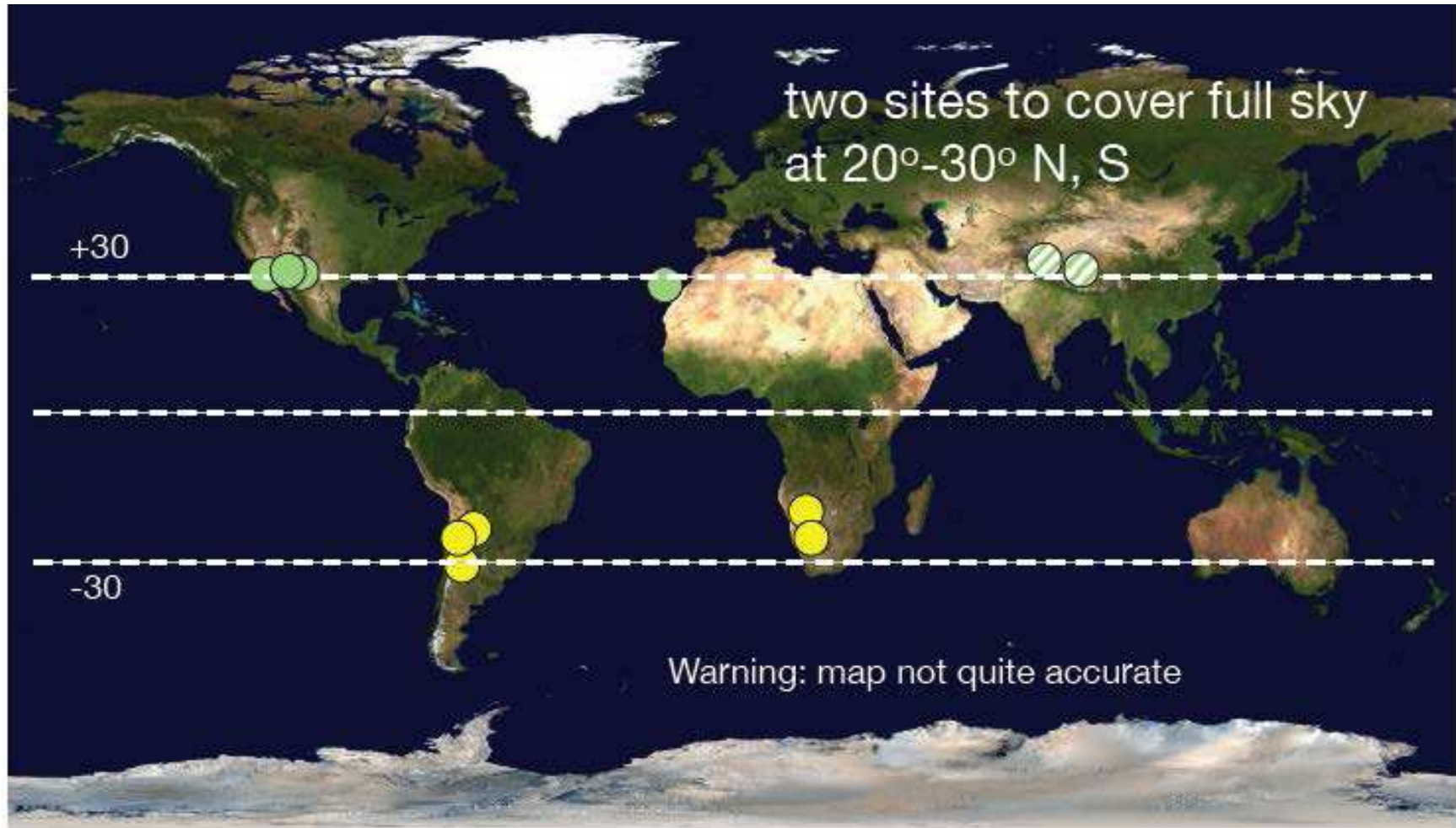


expect ~1000 detected sources

CTA

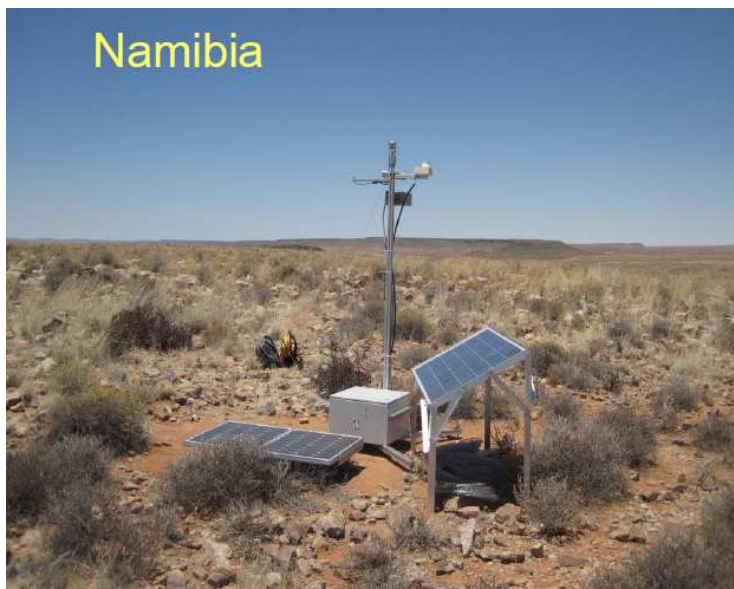
Lokalizacja

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



CTA

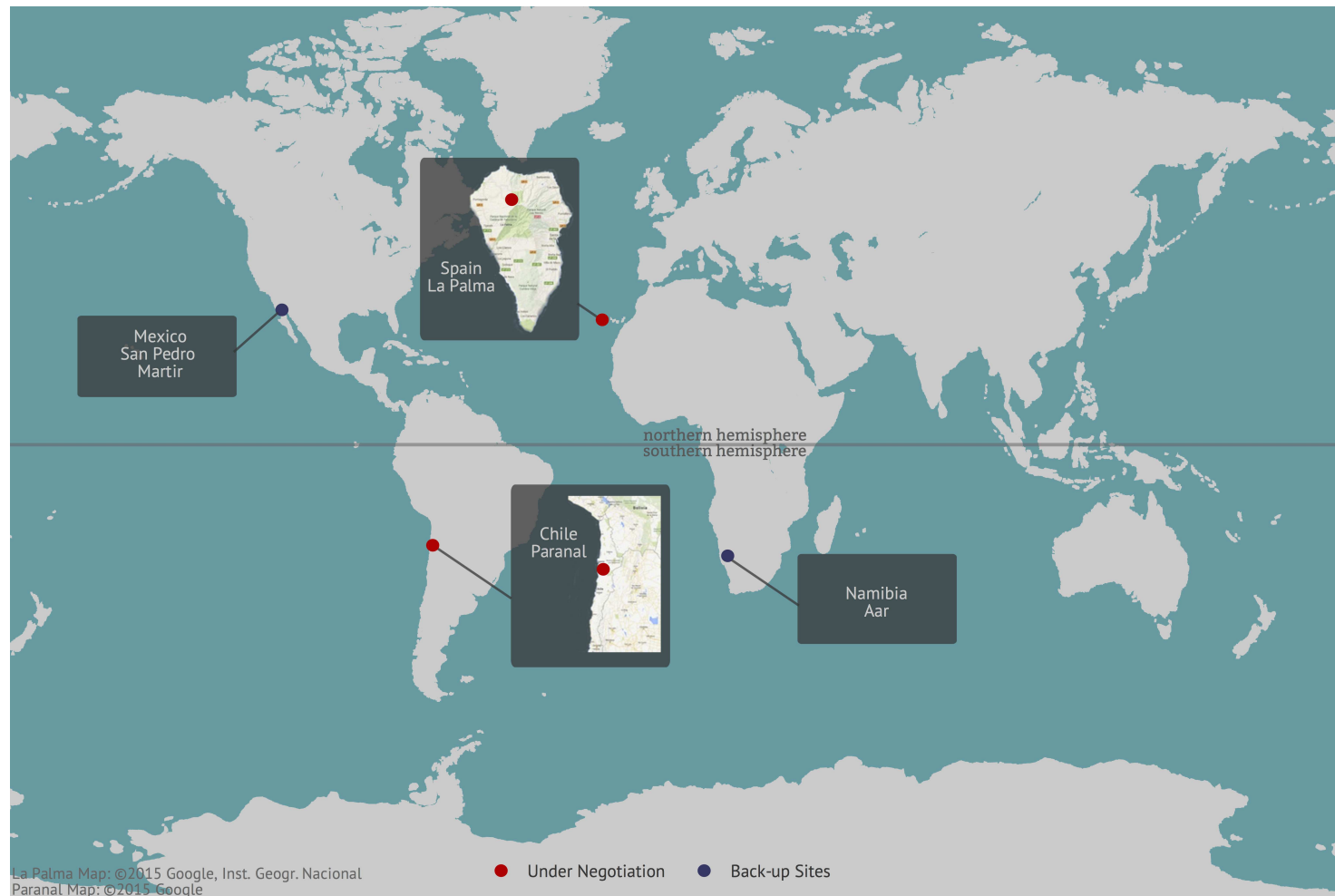
Rozważane lokalizacje



CTA

Wybrane lokalizacje

Decyzja podjęta latem 2015: Chile i Wyspy Kanaryjskie.



CTA

Chile

pustynia Atacama



CTA

Chile

pustynia Atacama

umowa podpisana ostatecznie w grudniu 2018

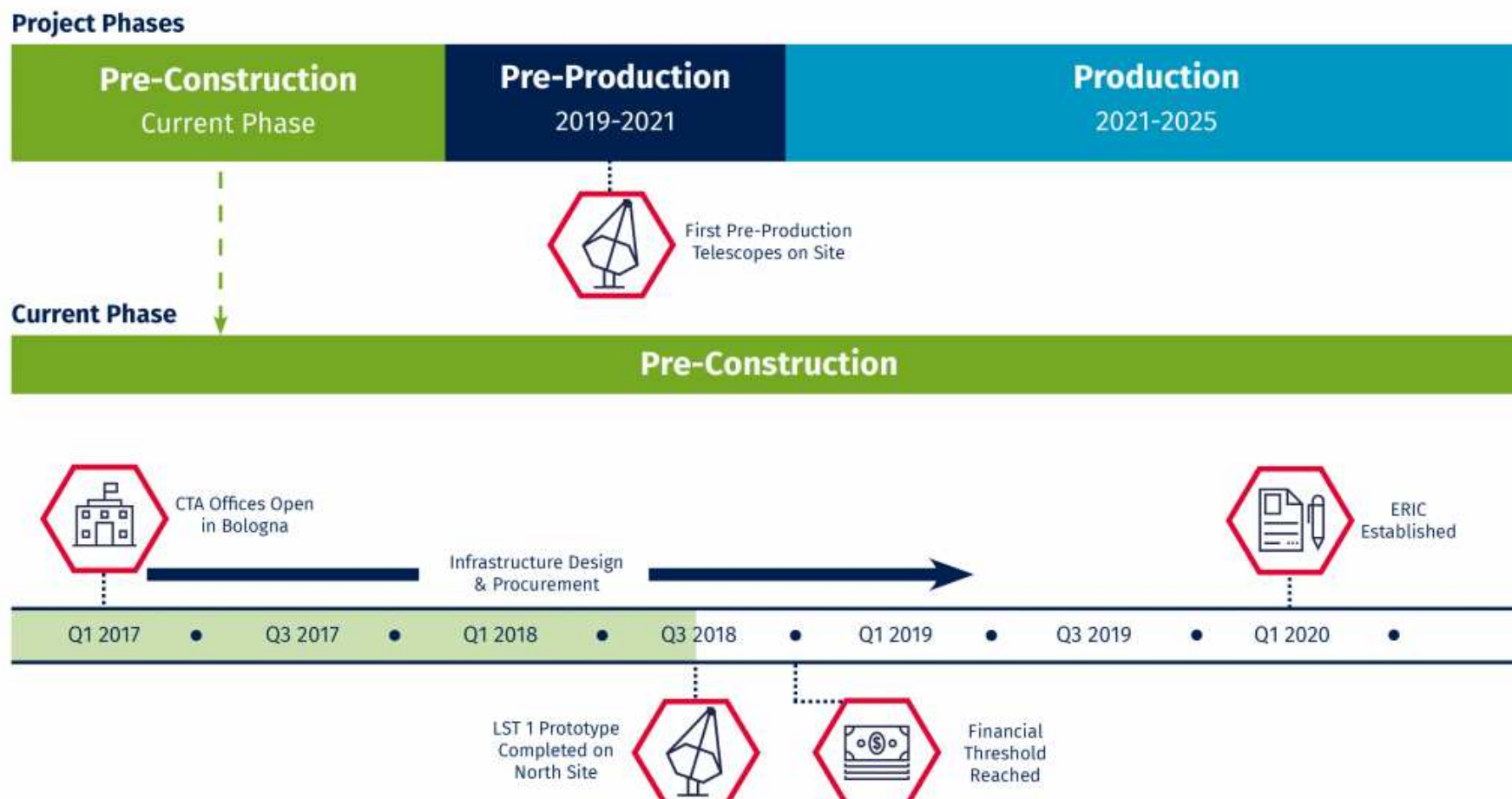


CTA

Harmonogram listopad 2018

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

Budowa obserwatorium północnego na La Palma rozpoczęto w 2017



CTA

La Palma

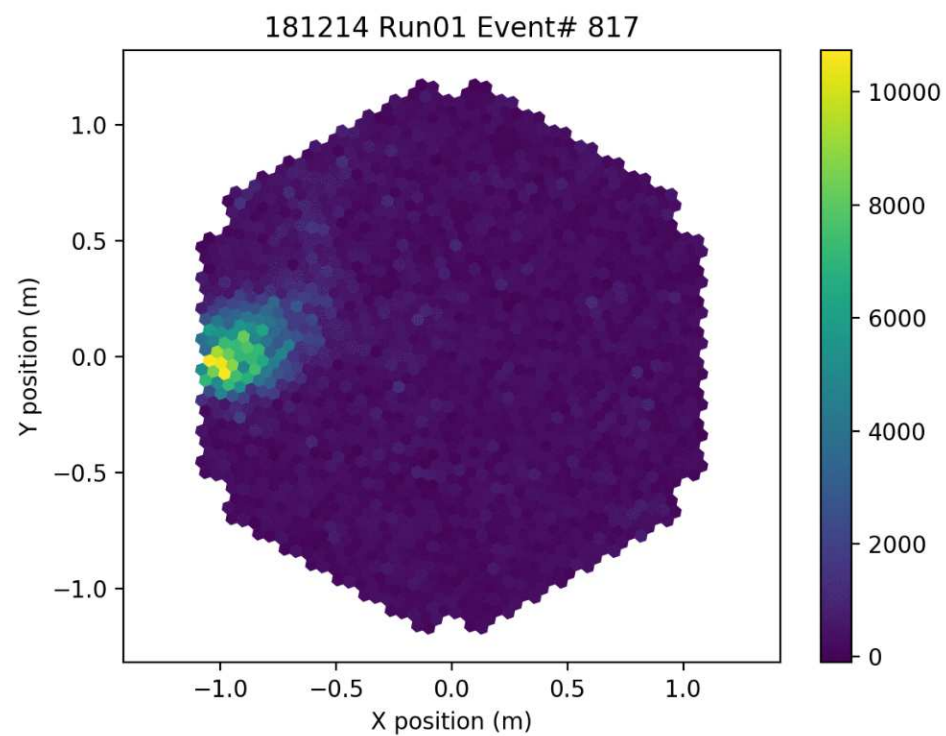
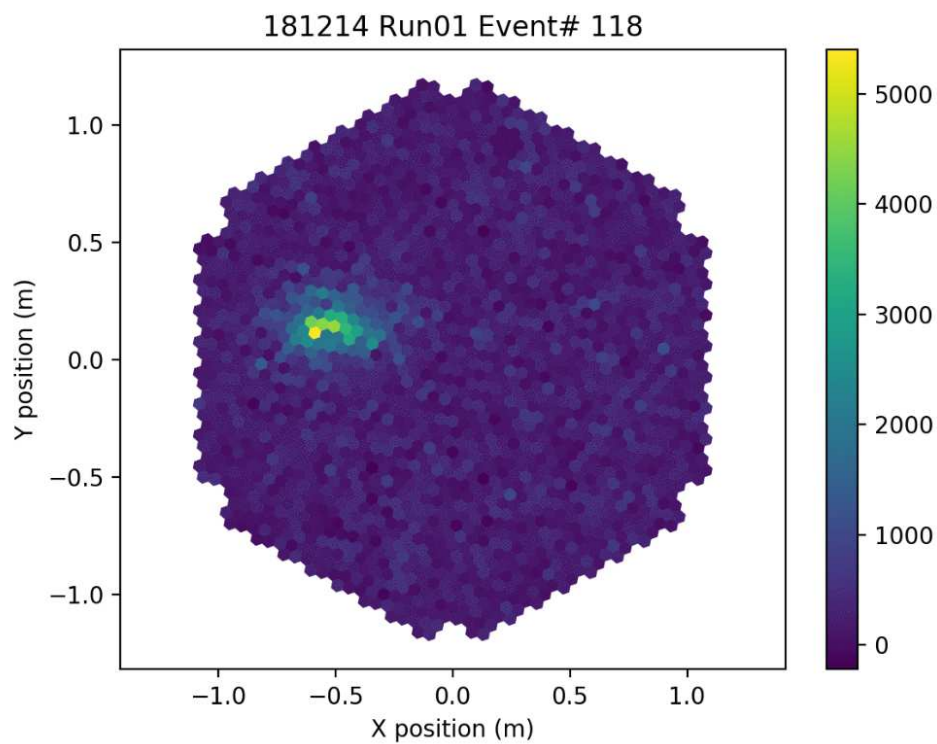
uroczyste otwarcie w październiku 2018



CTA

La Palma

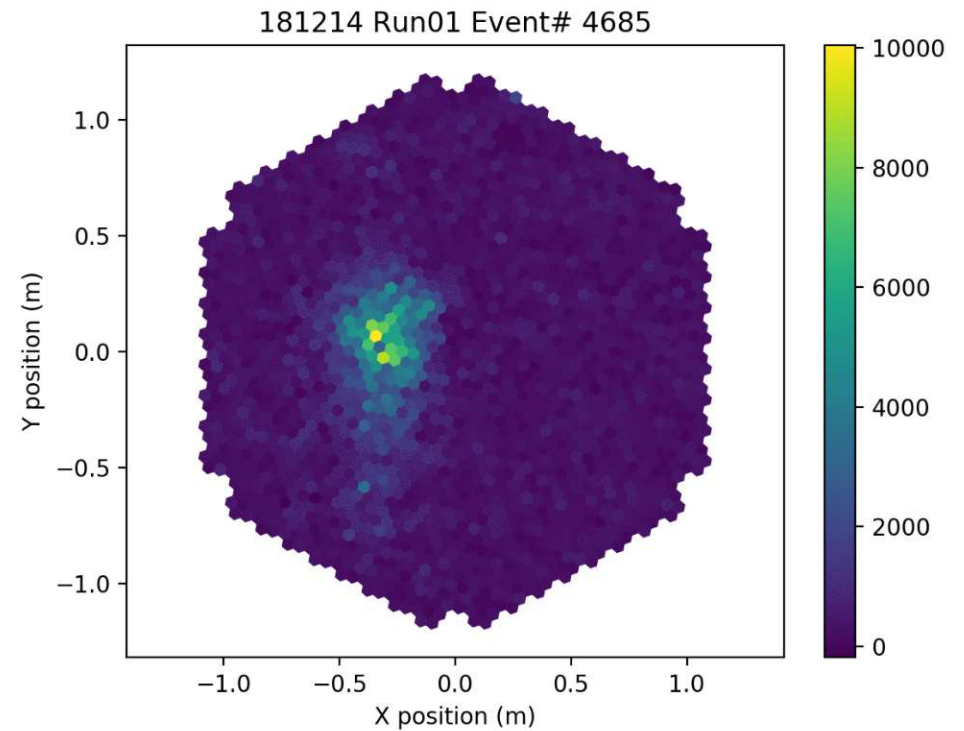
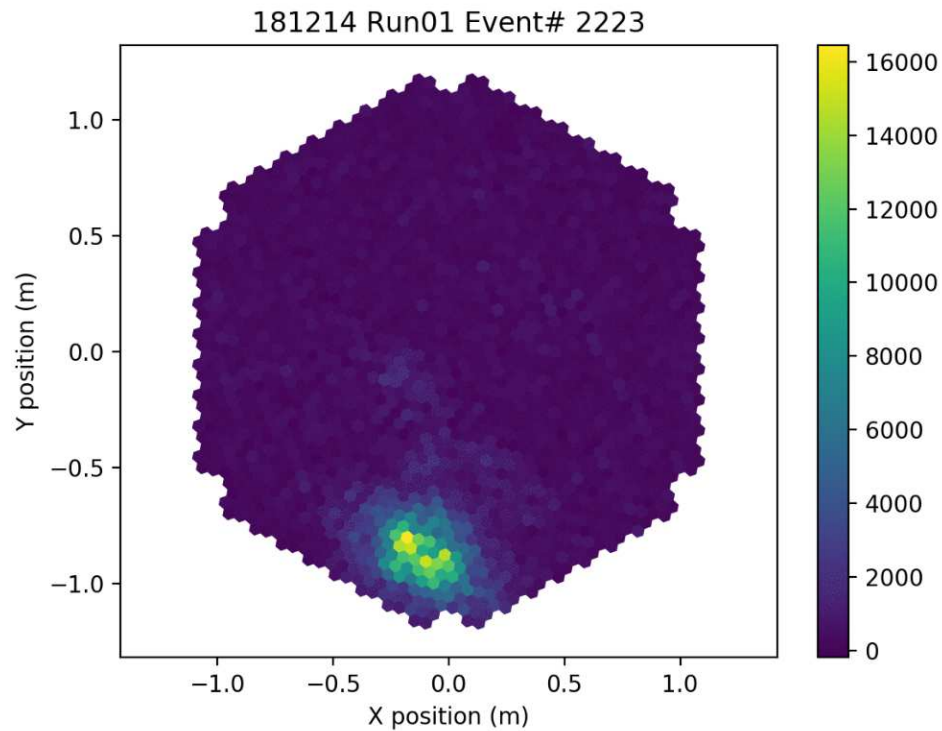
Pierwsze obserwacje LST-1



CTA

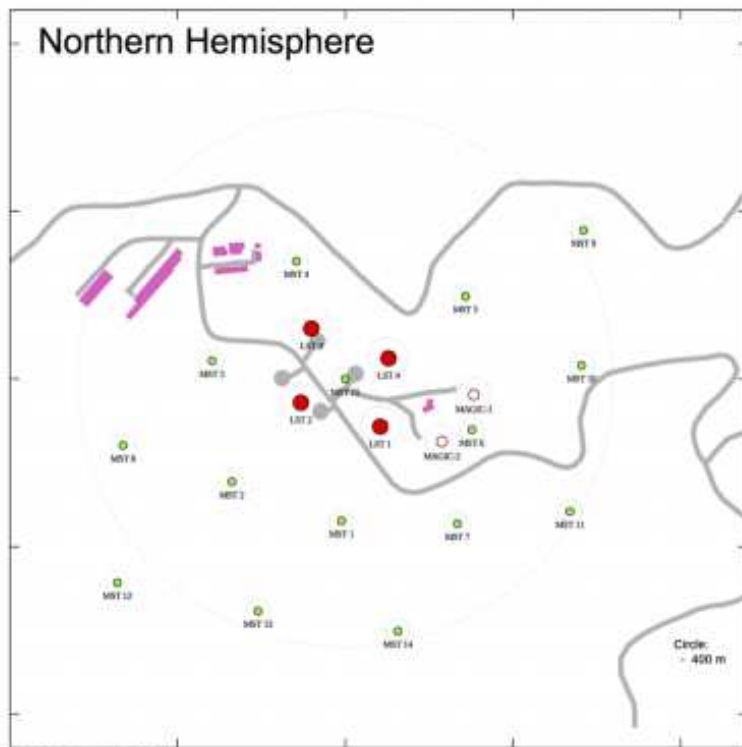
La Palma

Pierwsze obserwacje LST-1



CTA

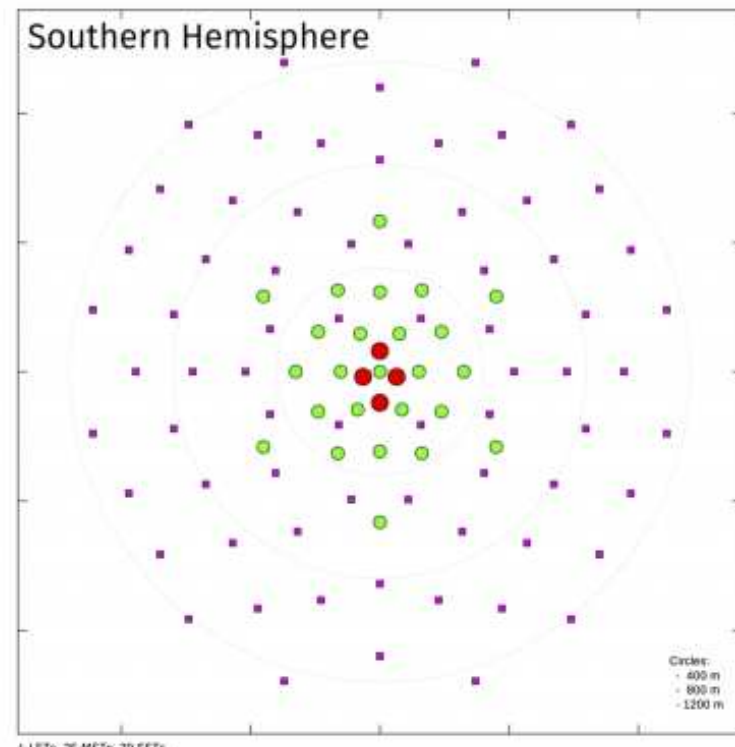
Ostateczna konfiguracja 2017



4 LS4 LSTs, 15 MSTs



250 m



4 LSTs, 25 MSTs, 70 SSTs

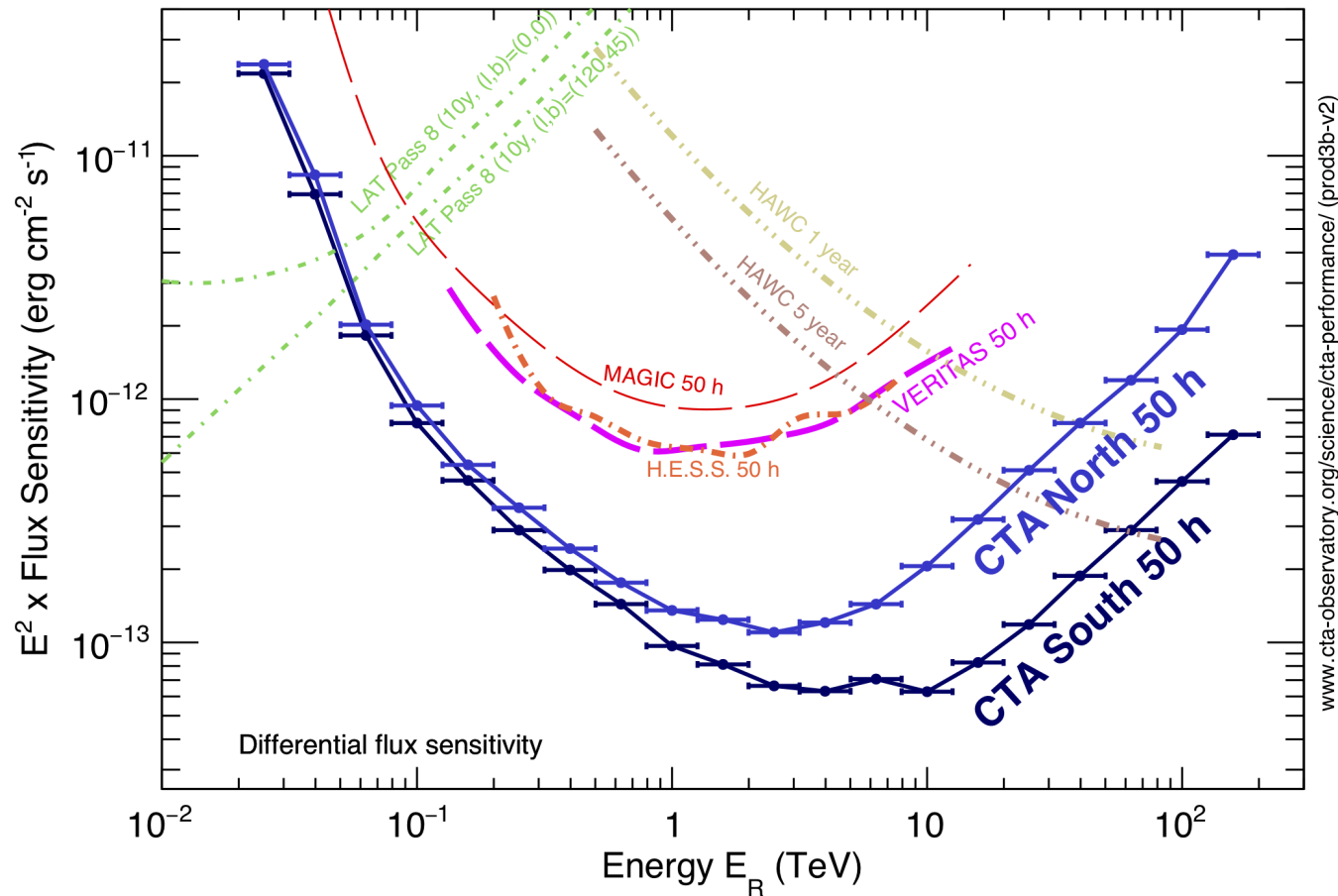


1000 m

CTA North będzie miało mniejszą czułość przy wysokich energiach...

CTA

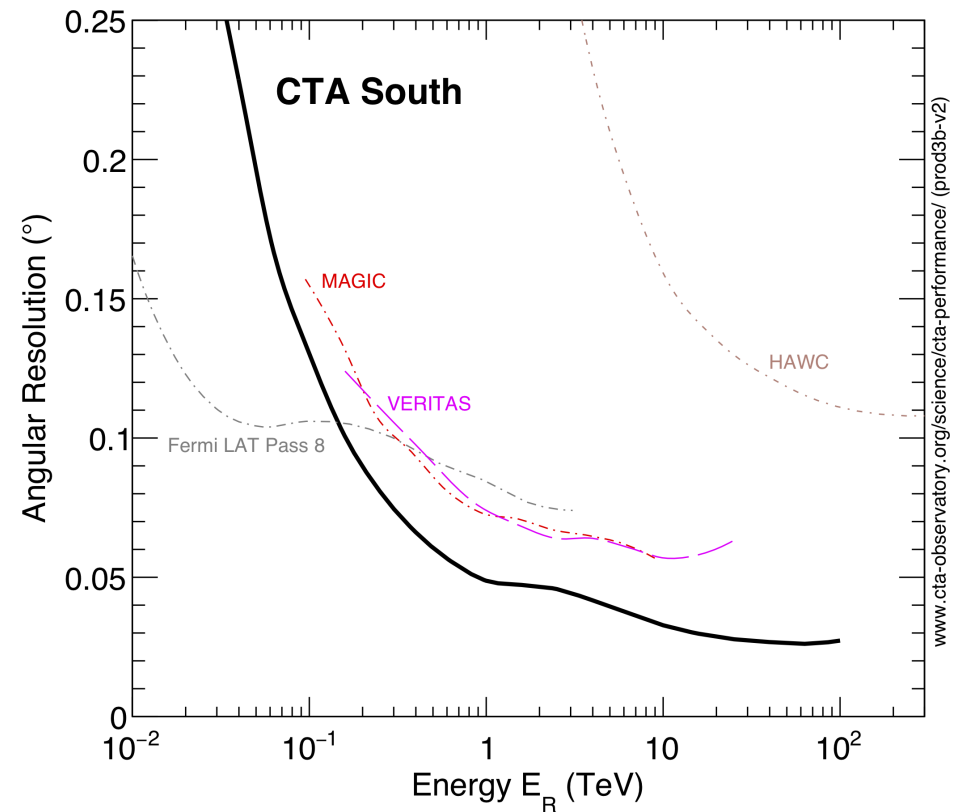
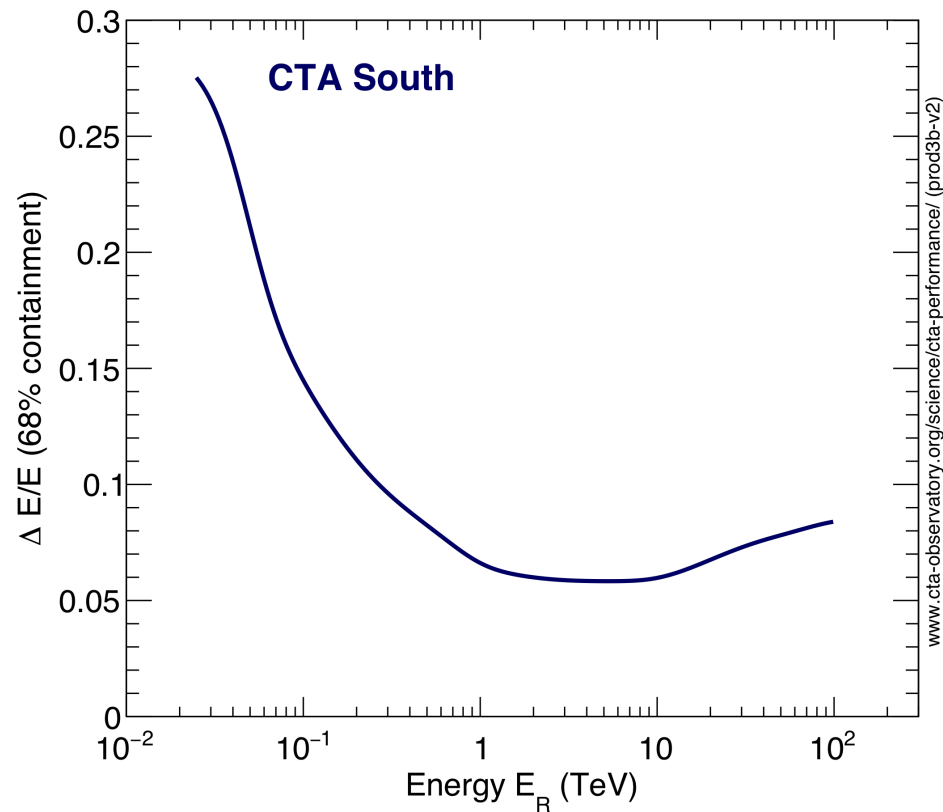
Oczekiwana czułość



Czułość zwiększona o rząd wielkości w obrzercze 1-10 TeV...

Dokładność

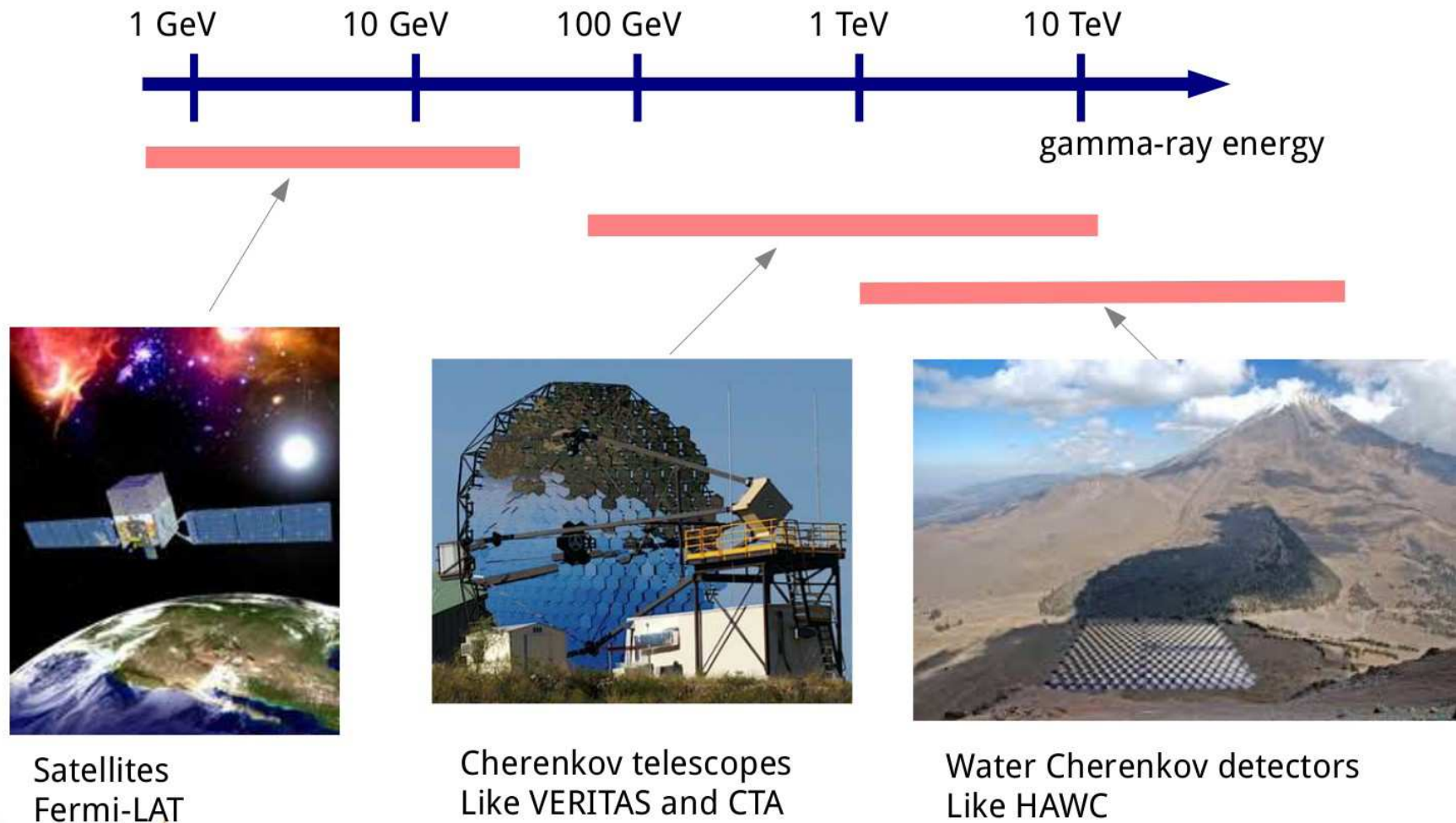
Oczekiwane dokładności pomiaru energii i pozycji źródeł



Jakościowa poprawa dokładności w obszarze TeV

Promieniowanie gamma

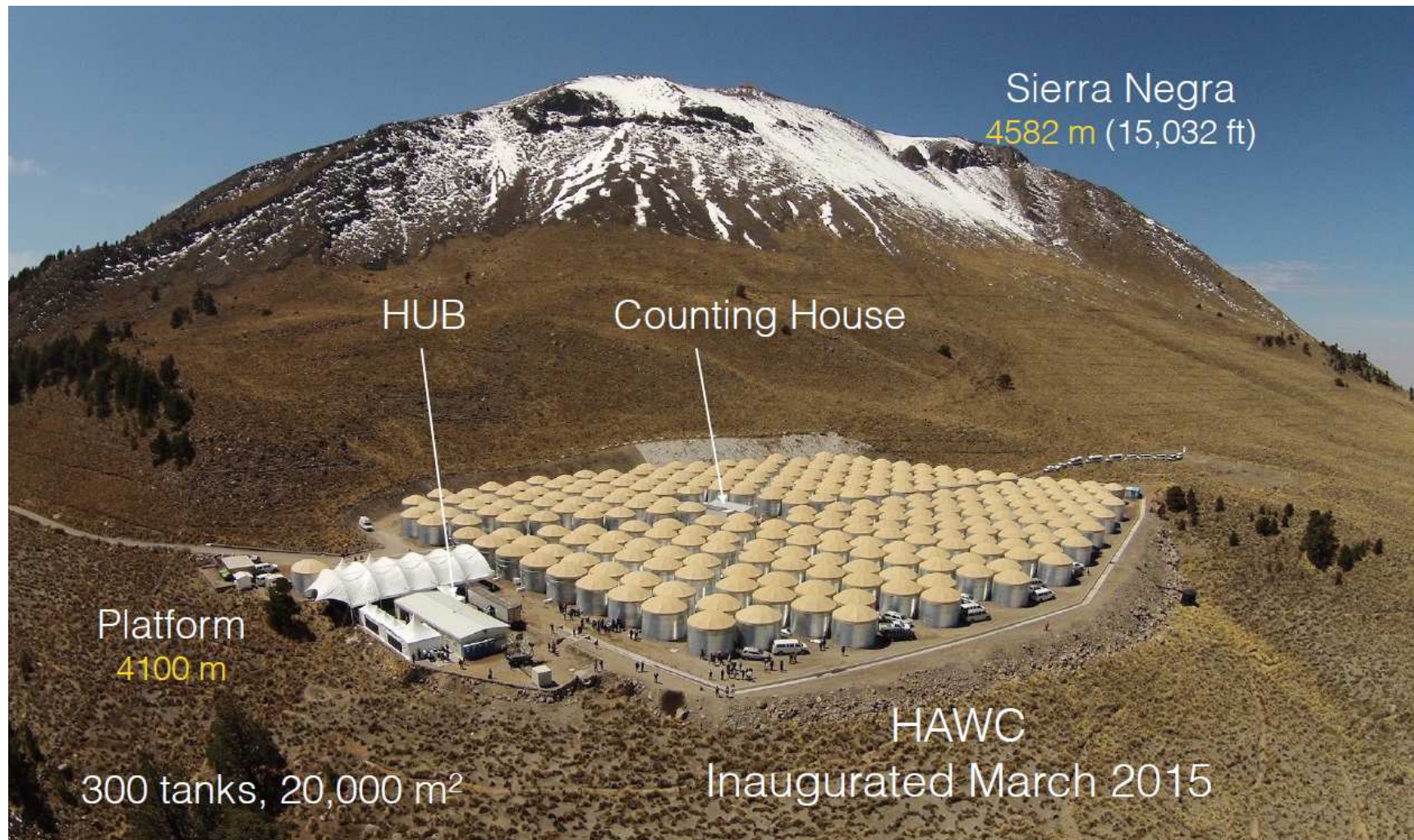
Metody detekcji



HAWC

Wodny detektor promieniowania Czerenkowa

Meksyk

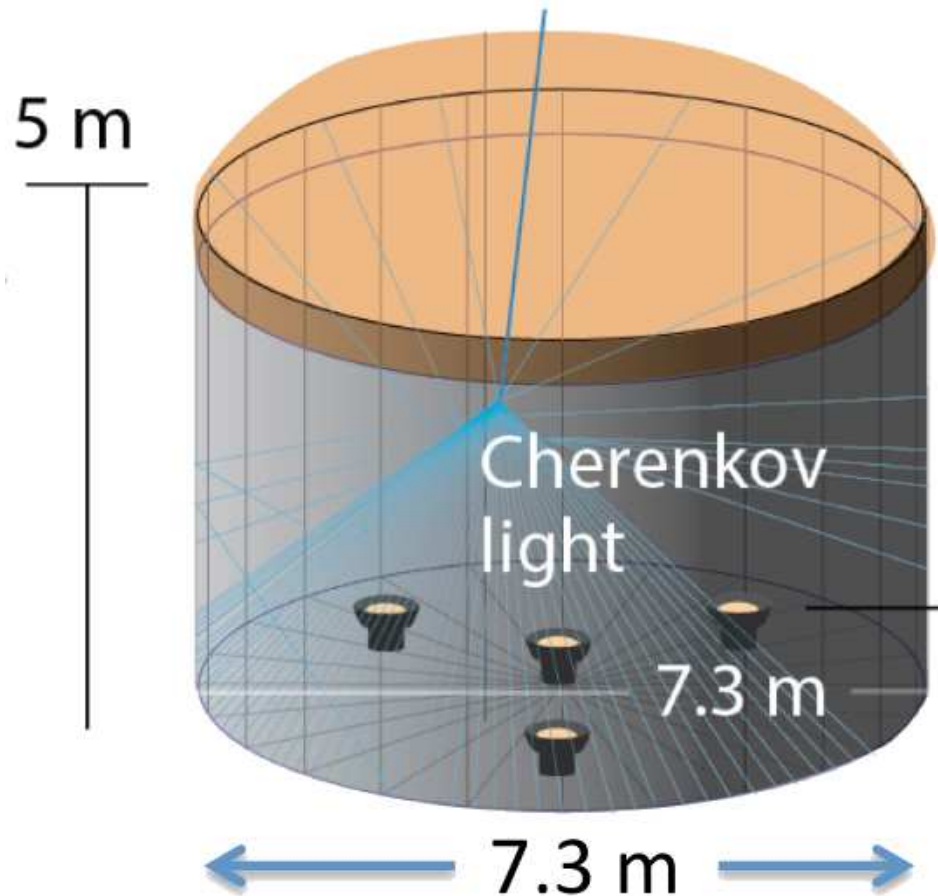


HAWC

Wodny detektor promieniowania Czerenkowa

Meksyk

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



Działanie podobne do detektorów powierzchniowych AUGER...

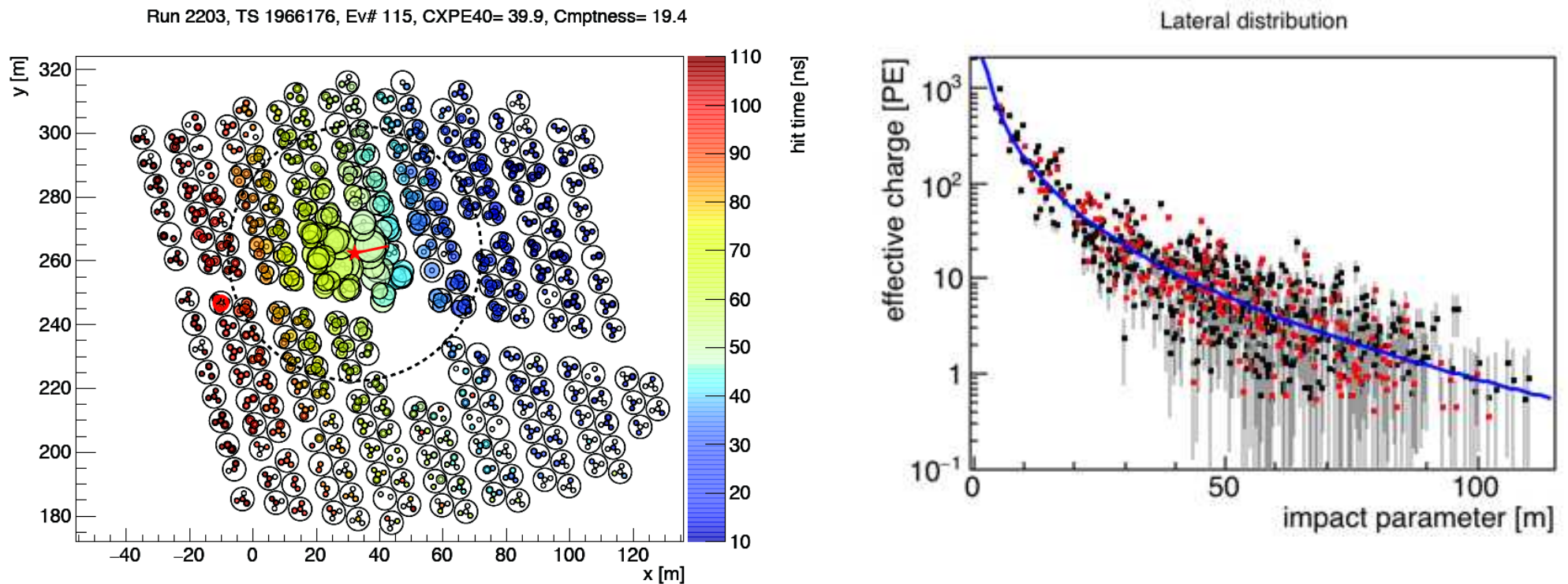
HAWC

Rekonstrukcja kwantów gamma

Detektory HAWC są jednak gęsto ustawione na małej powierzchni

⇒ odpowiada to oczekiwanej topologii przypadków kaskad fotonowych

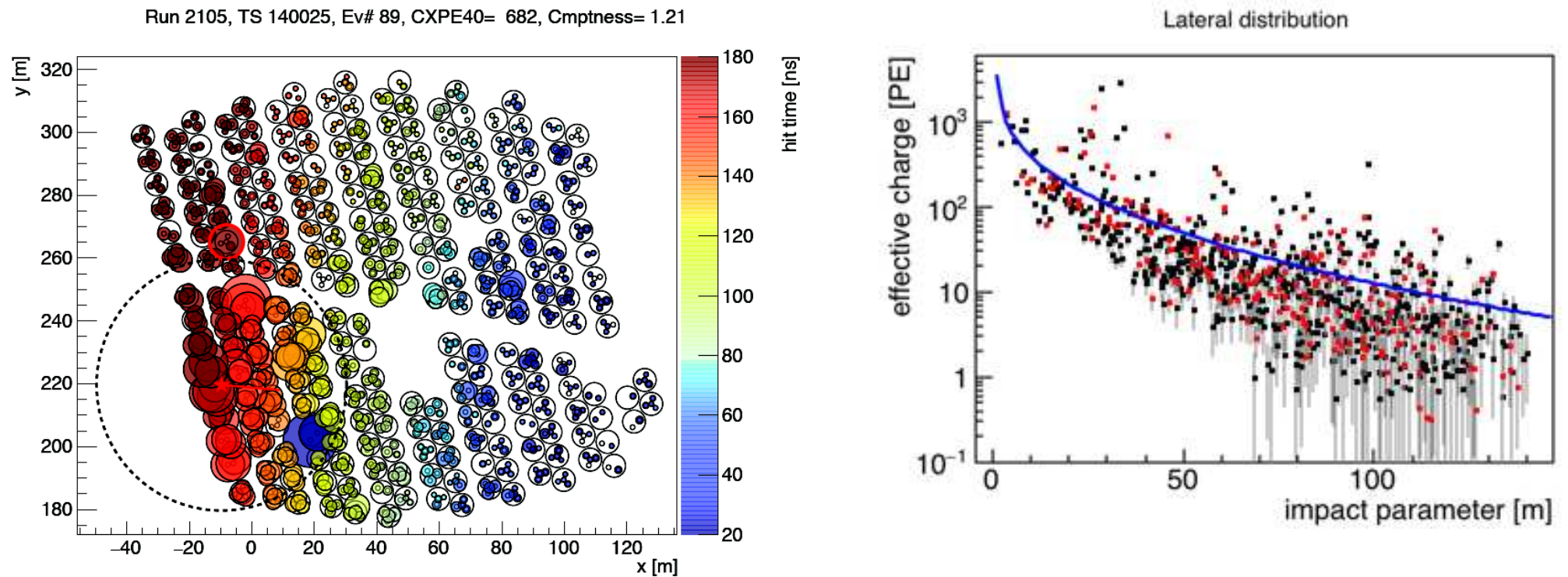
Przykładowy przypadek zarejestrowanej kaskady fotonowej



HAWC

Rekonstrukcja kwantów gamma

Przykładowy przypadek zarejestrowanej **kaskady hadronowej** (tła)



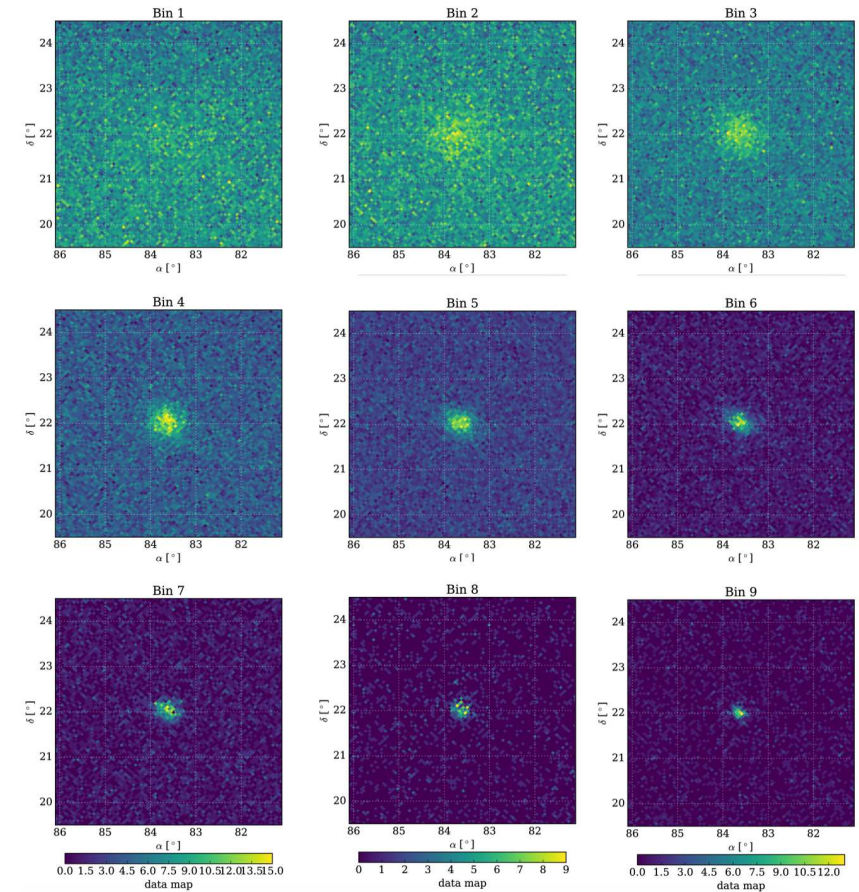
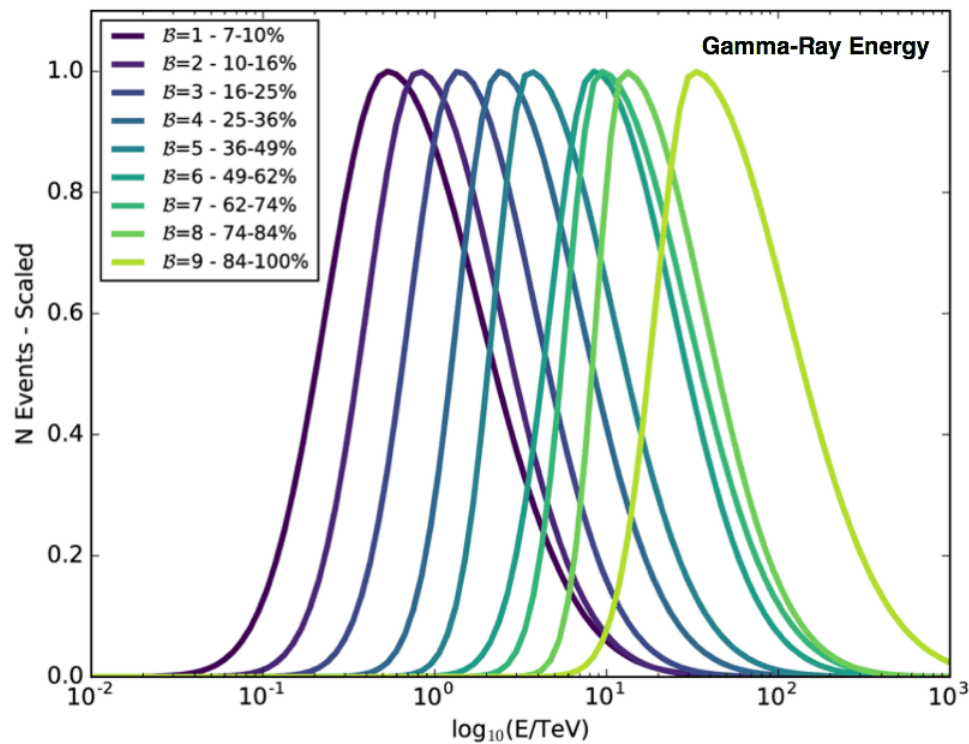
Przypadki tła znacznie szersze i “postrzępione”

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

HAWC

Rekonstrukcja przypadku

Przypadki dzielone są na 9 binów, zależnie od wielkości sygnału



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

HAWC

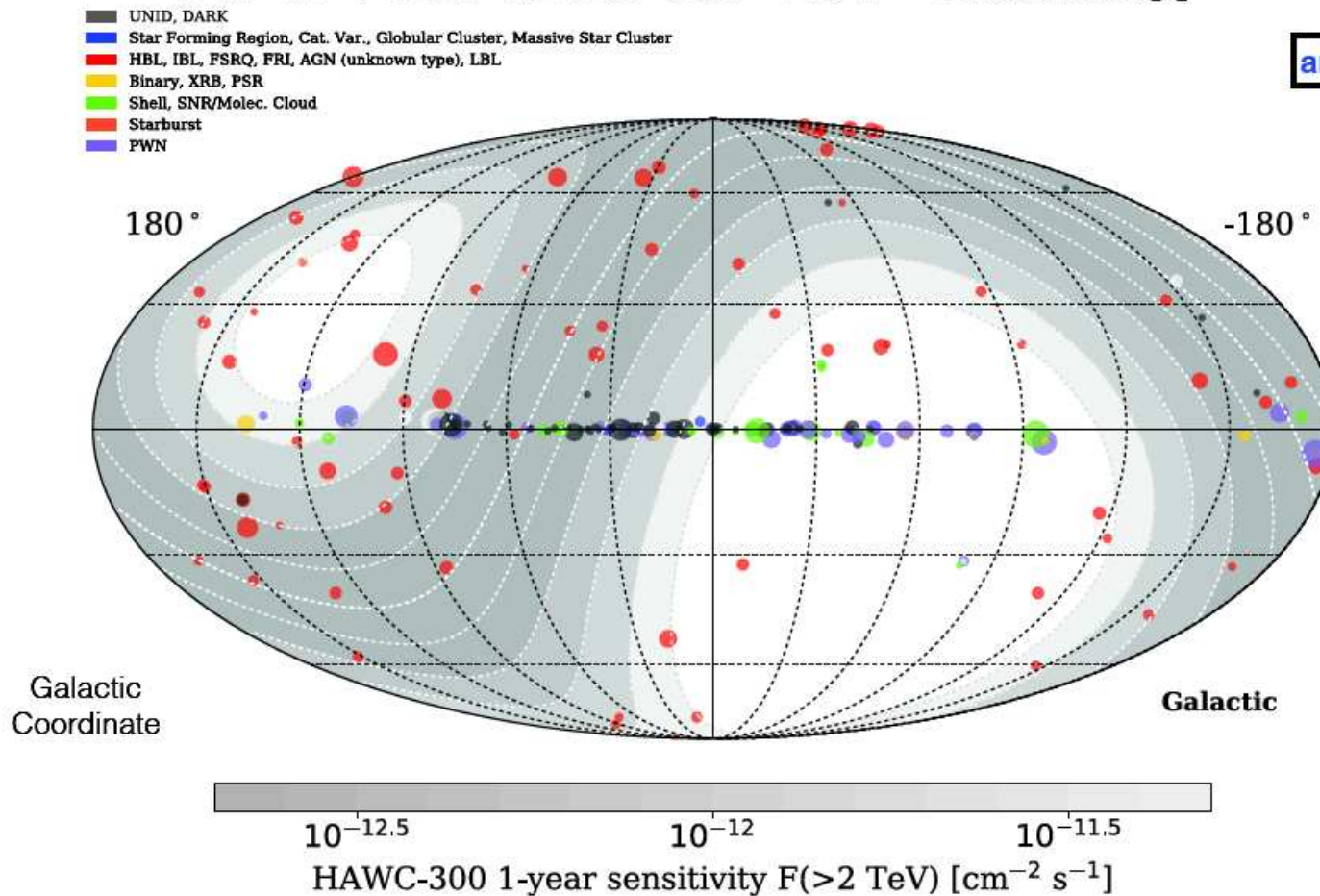
Wykryte źródła

C.Riviere, Moriond 2017

HAWC Adds to TeV Catalog

C. Riviere, UMD

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

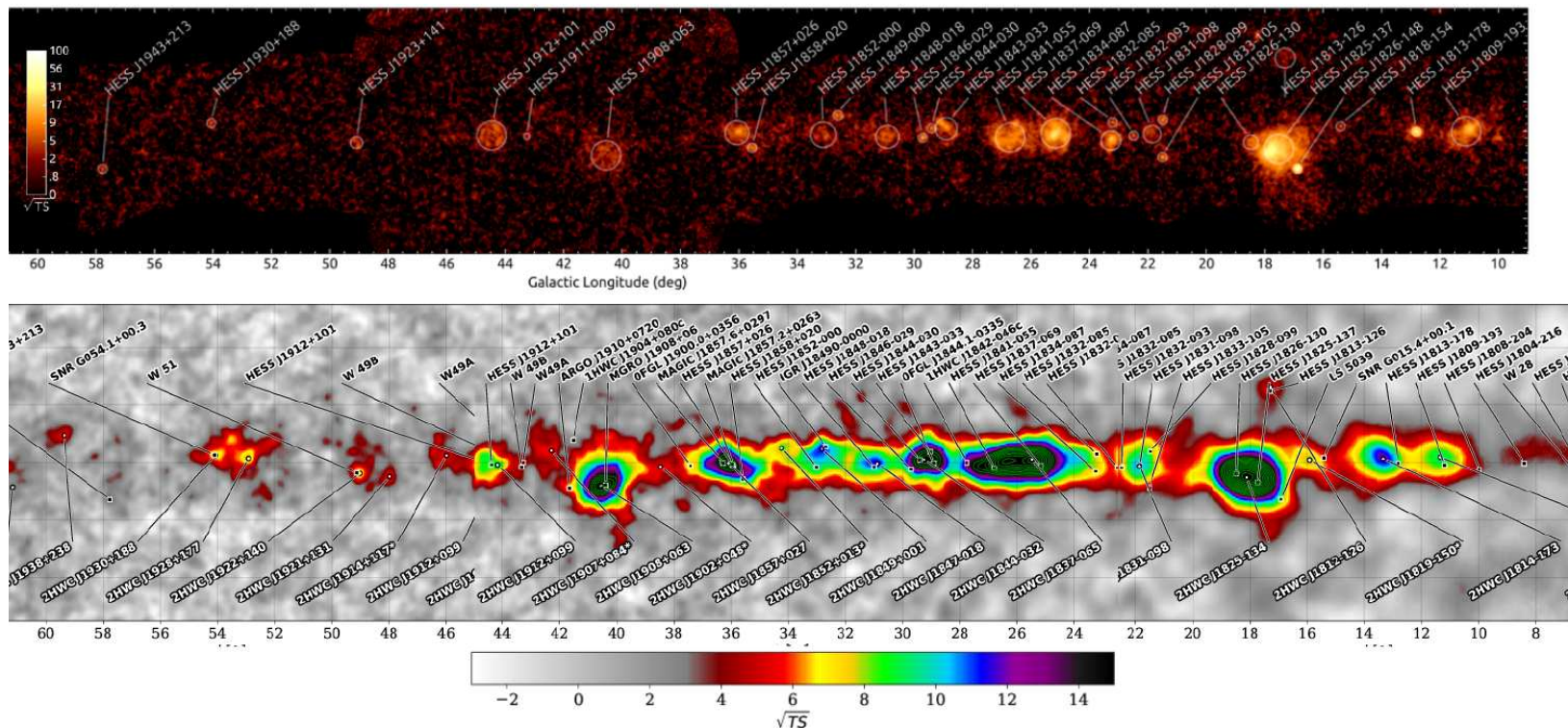


HAWC

Wykryte źródła

Pola obserwacji HAWC i HESS tylko częściowo się pokrywają (różne półkule!)

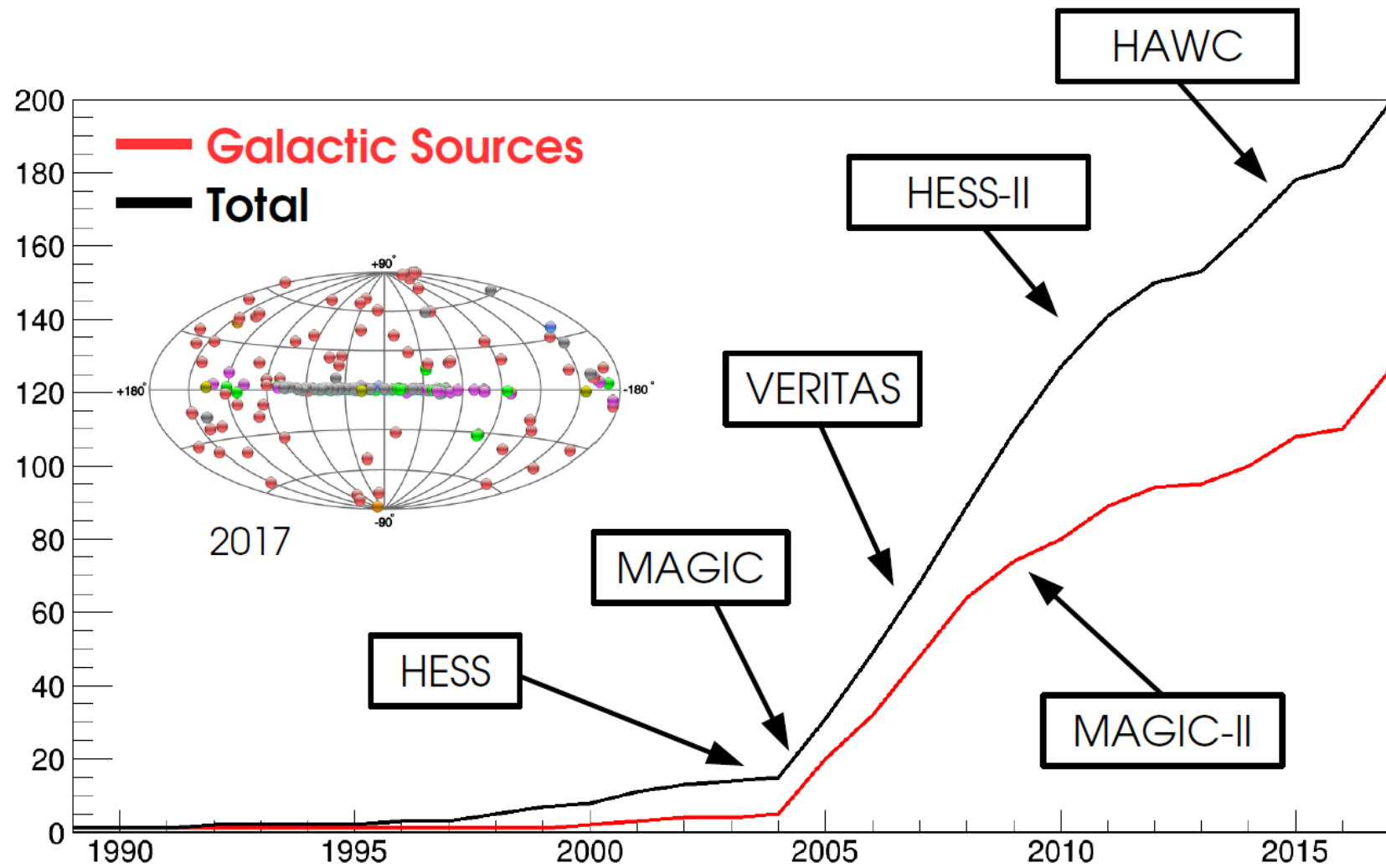
⇒ komplementarne obserwacje, także ze względu na różne metody detekcji



We wspólnym obszarze środka Galaktyki: 29 źródeł wykrytych przez HESS, 22 źródła widoczne przez HAWC, w tym 7 nowych (!)

Promieniowanie gamma

Źródła TeV



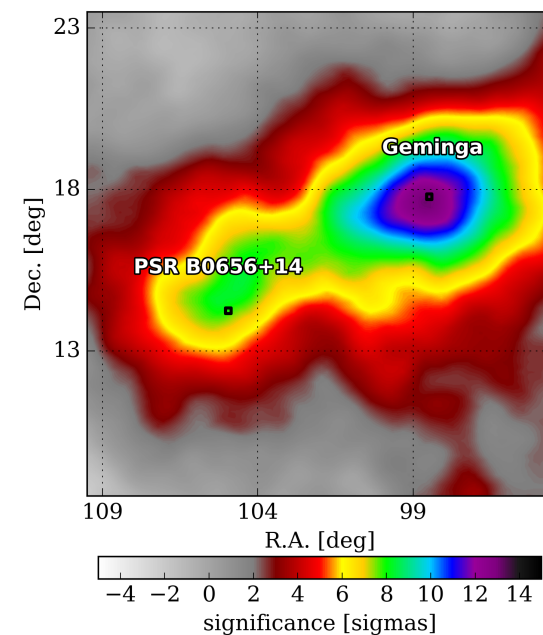
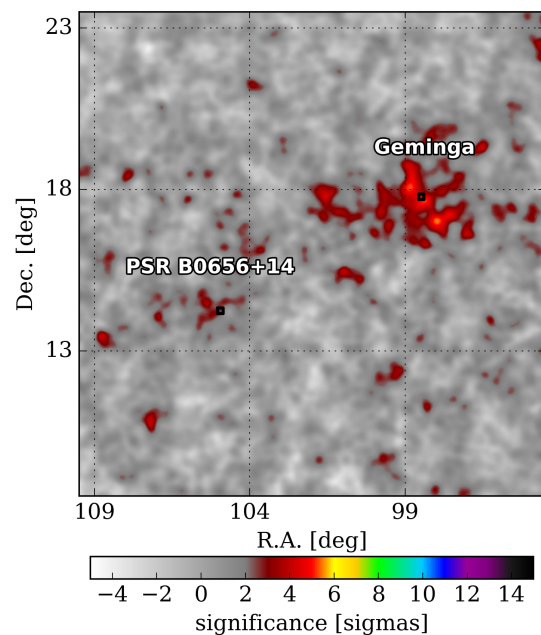
HAWC

Źródła TeV

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

Rekonstrukcja źródeł punktowych

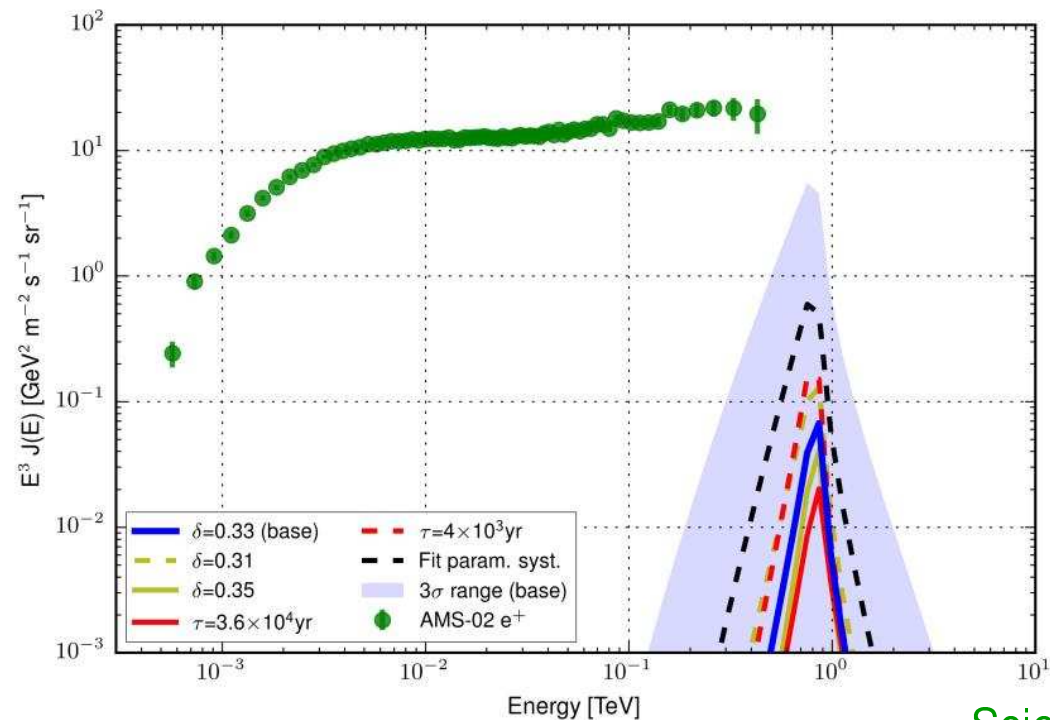
Rekonstrukcja źródeł rozmytych



HAWC

Źródła TeV

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



Science 6365 (2017), 911-914

Ale wciąż za małą, żeby wytłumaczyć nadwyżkę pozytonów obserwowaną przez AMS-2

HAWC

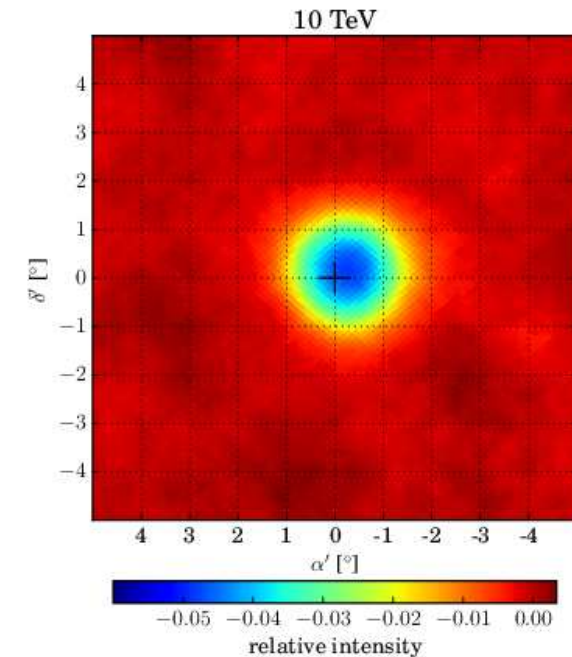
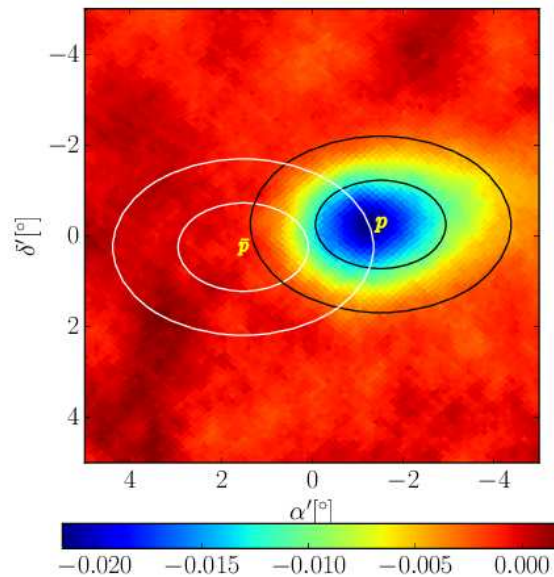
Antyprotony

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...

HAWC

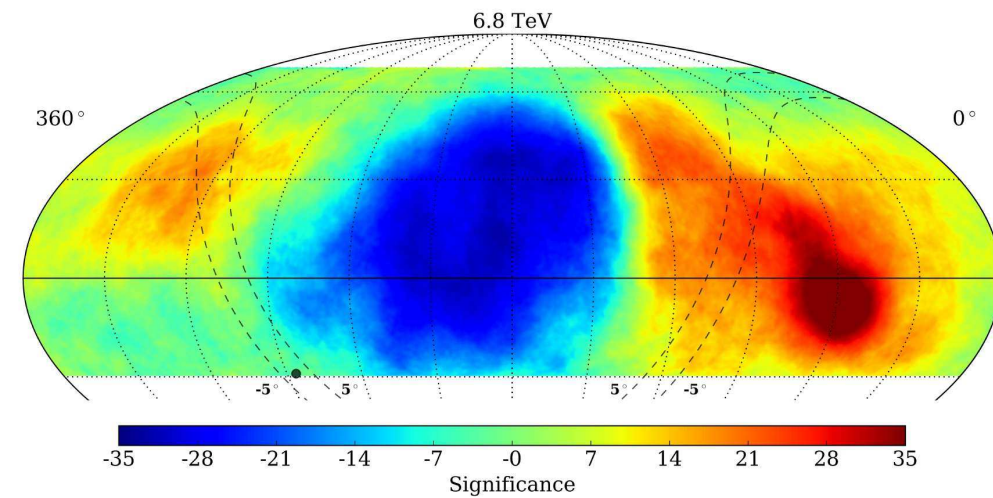
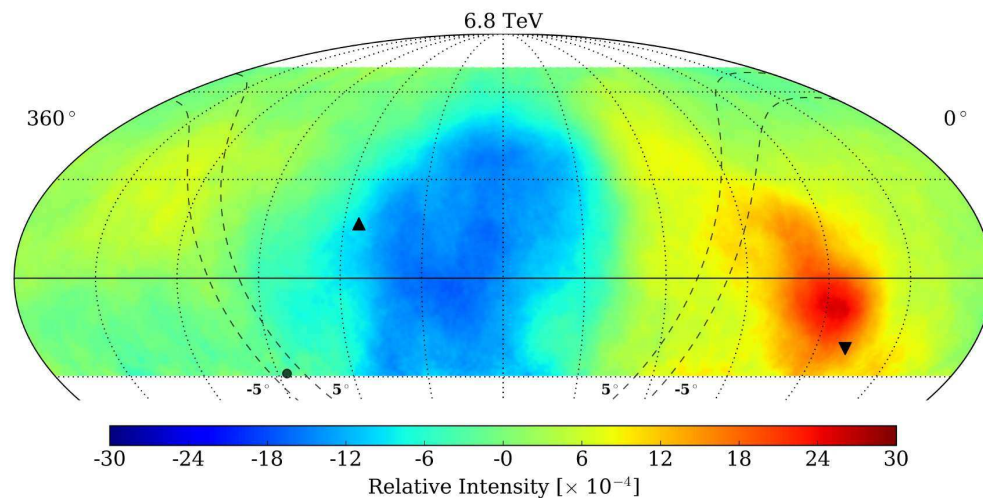
Anizotropia promieniowania kosmicznego

Rozkład przestrzenny analizowany w binach energii

Dla promieniowania o energiach 1 - 100 TeV widać wyraźną anizotropię

Amplituda

Znaczoność



Główny wkład od składowej dipolowej (rzędu 10^{-3}) kolejne momenty maleją...

HAWC

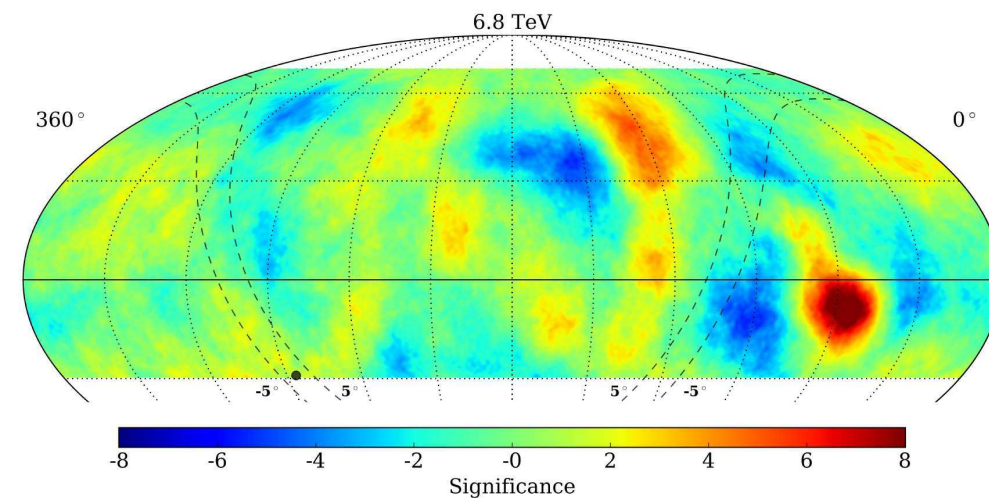
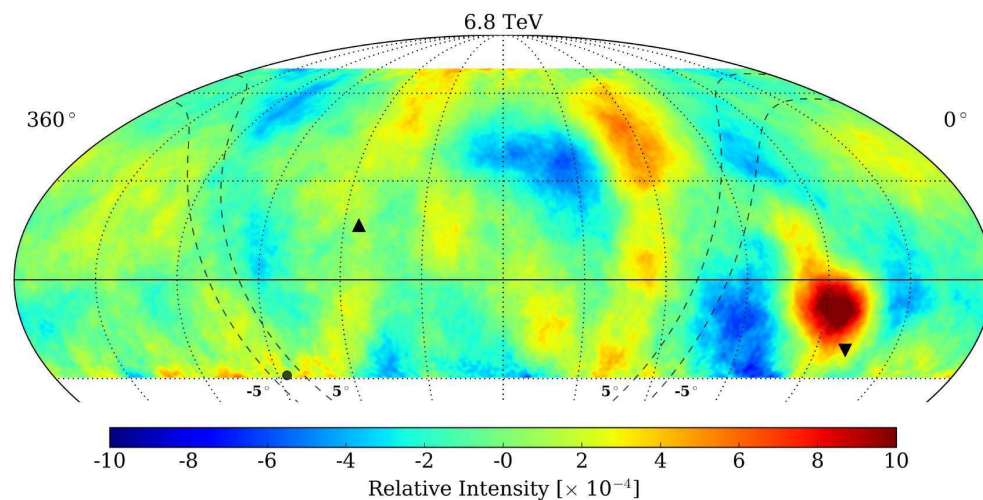
Anizotropia promieniowania kosmicznego

Rozkład przestrzenny analizowany w binach energii

Dla promieniowania o energiach 1 - 100 TeV widać wyraźną anizotropię

Amplituda

Znaczoność



Po odjęciu składowej dipolowej, kwadrupolowej i oktopolowej...

Łącznie ponad 10^{11} kaskad w zakresie TeV !

HAWC

Ograniczenia na ciemną materię

Z poszukiwania sygnału anihilacji cząstek DM w Słońcu

