

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład XI

- Pośrednie poszukiwania ciemnej materii
- Kosmiczne promieniowanie gamma
- Teleskopy promieniowania Czerenkowa
- Wyniki HESS
- Projekt CTA

Promieniowanie kosmiczne

Czastki naładowane

Czastki docierające do Ziemi mają energie aż do $\sim 10^{20}$ eV.

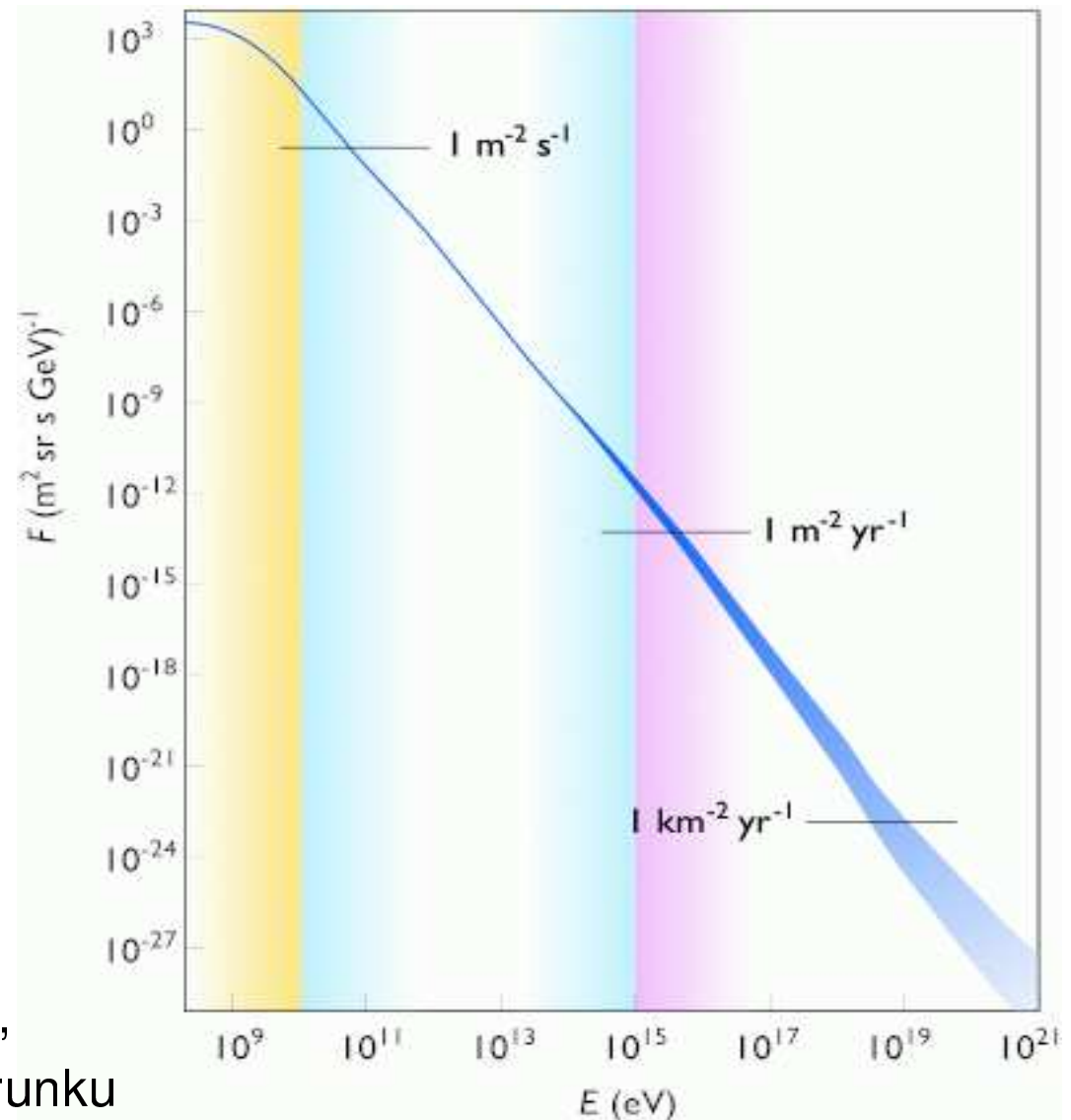
Widmo szybko zanikające z energią

$$\Phi(E) \sim E^{-\gamma} \quad \gamma \sim 2.7 - 3$$

Przyjmuje się, że promieniowanie do ok. 10^{15} eV pochodzi z Super Nova Remnants w **naszej Galaktyce**.

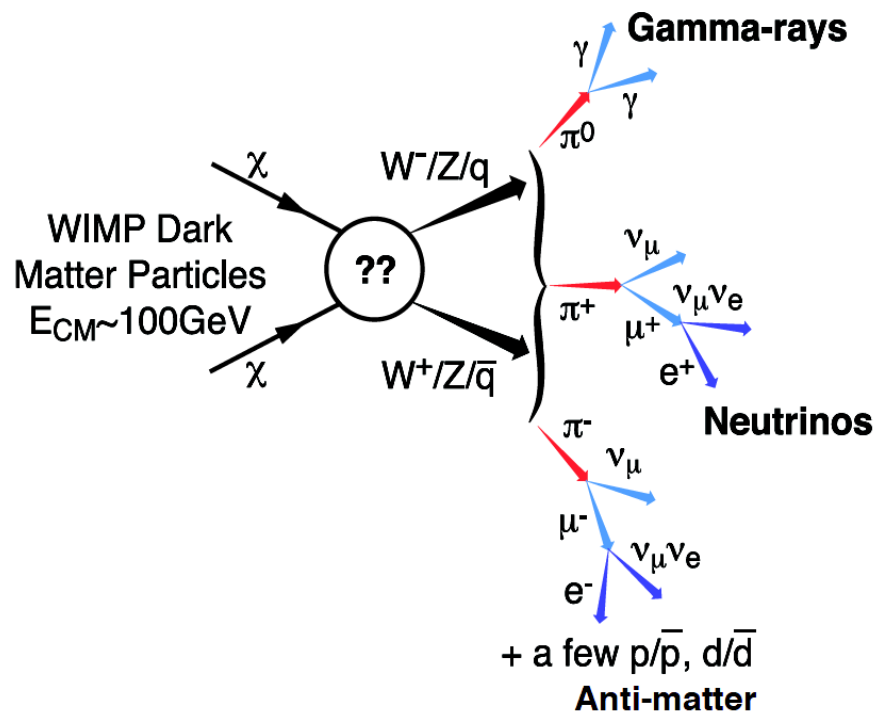
Źródła promieniowania o wyższych energiach wciąż nieznane...

Problem: czastki naładowane odchylane, rozpraszane \Rightarrow tracimy informacje o kierunku



Ciemna materia

Anihilacja DM



Przyjmujemy, że cząstki ciemnej materii uległy “wymrożeniu” wraz z rozszerzaniem się Wszechświata. Ich gęstość była zbyt mała aby mogły efektywnie anihilować...

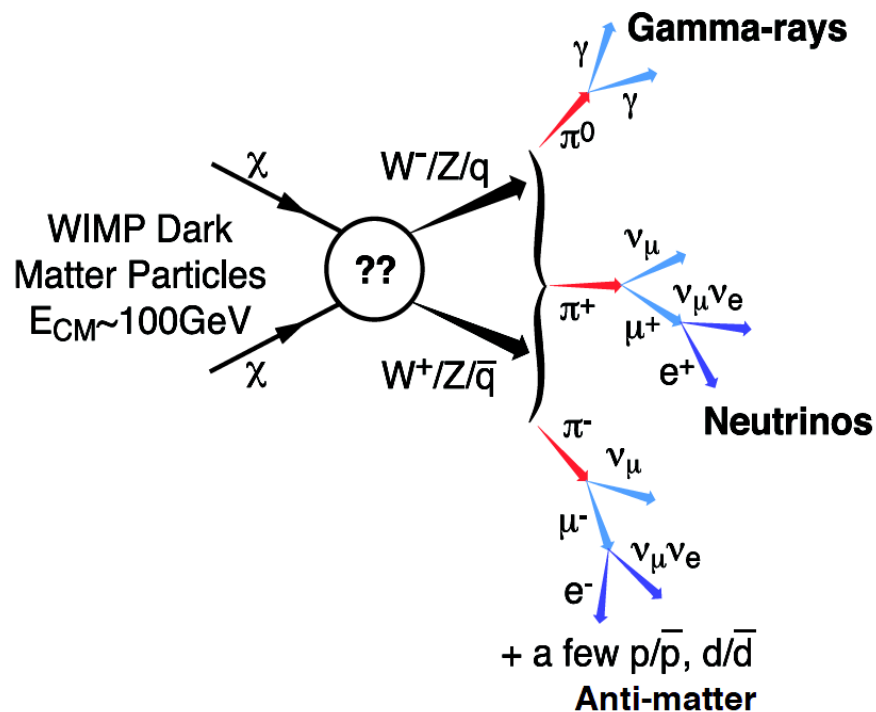
Ale ciemna materia uczestniczy w tworzeniu struktur we Wszechświecie! Więc na małych skalach odległości jej gęstość może być o wiele rzędów wielkości większa niż gęstość średnia (tak jak normalnej materii).

⇒ może znów zachodzić anihilacja

Podobnie jak w gwiazdach znów zachodzi nukleosynteza...

Ciemna materia

Promieniowanie gamma



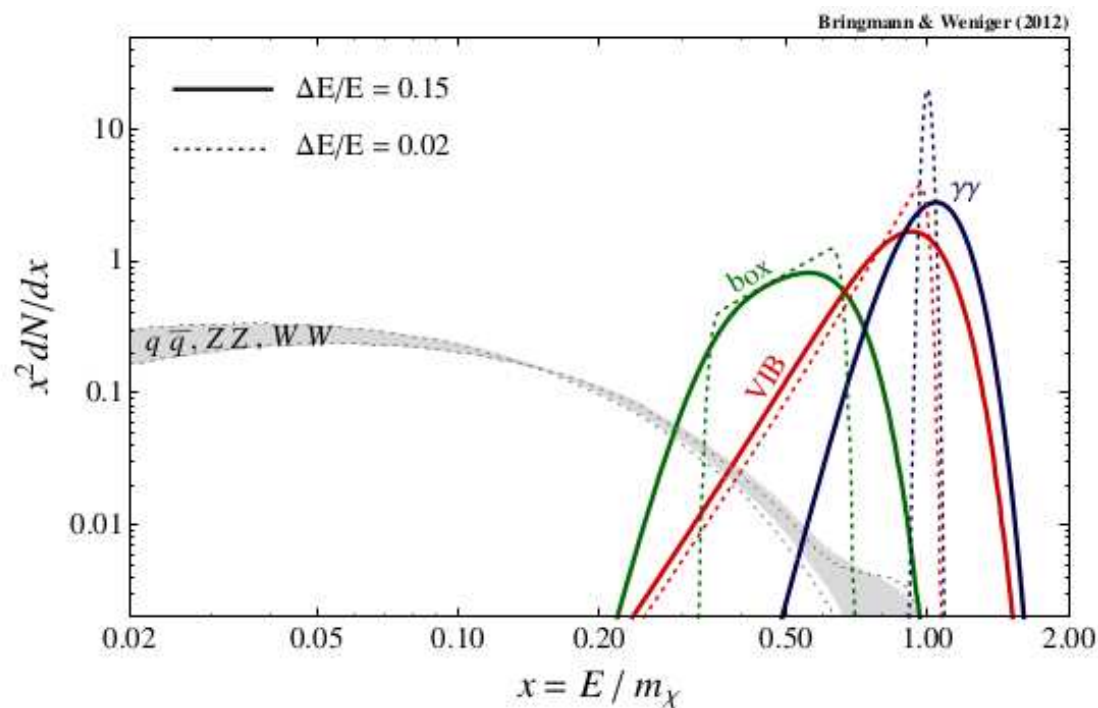
Zalety poszukiwania sygnału anihilacji DM w promieniowaniu gamma:

- 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

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 $E = m_\chi$

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)

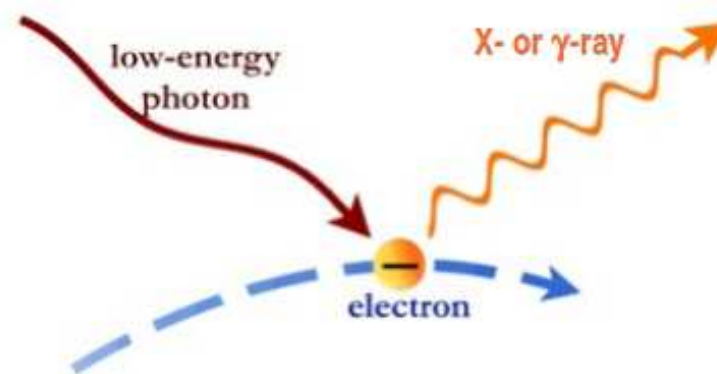
Promieniowanie kosmiczne

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

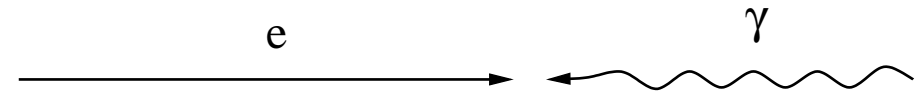
W rozpraszaniu na spoczywającym elektronie **najniższą energię** będzie miał foton rozproszony “do tyłu” ($\cos \theta = -1$):

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

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:

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

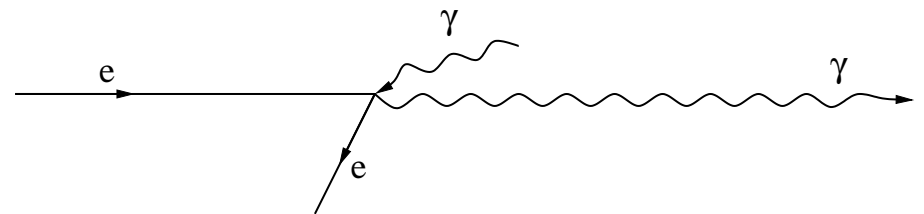
Wracając do układu laboratoryjnego: (transformacja taka sama, bo pęd foton zmienił kierunek)

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

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.



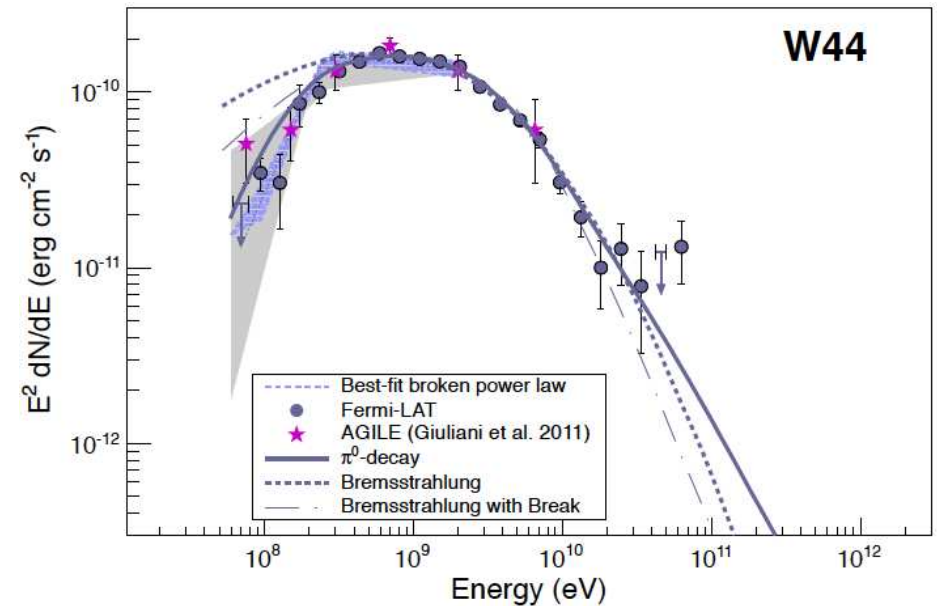
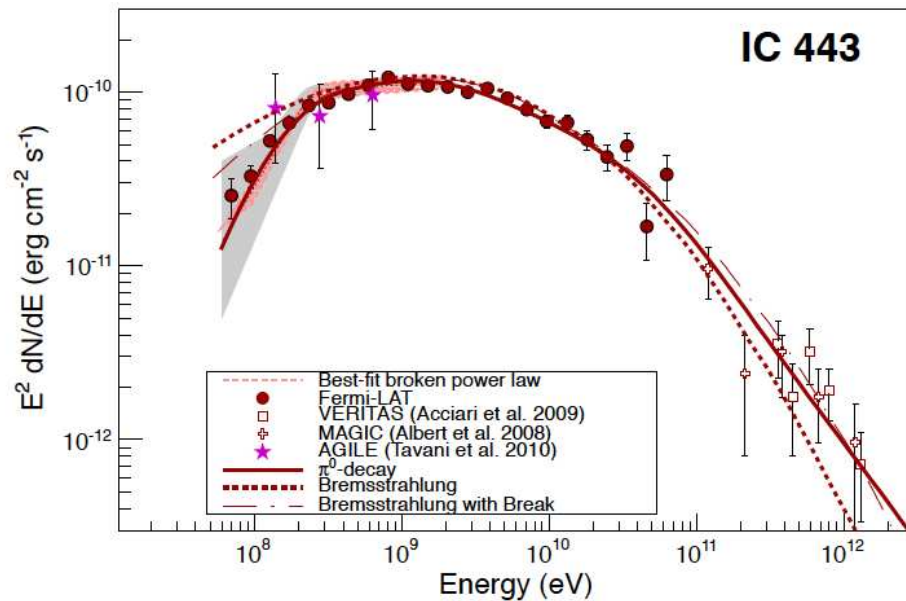
Przykład: dla $E_e = 250\text{GeV}$ i $h\nu = 1\text{eV}$
 $h\nu' \approx 200\text{GeV}$

Promieniowanie kosmiczne

Rozpady π^0

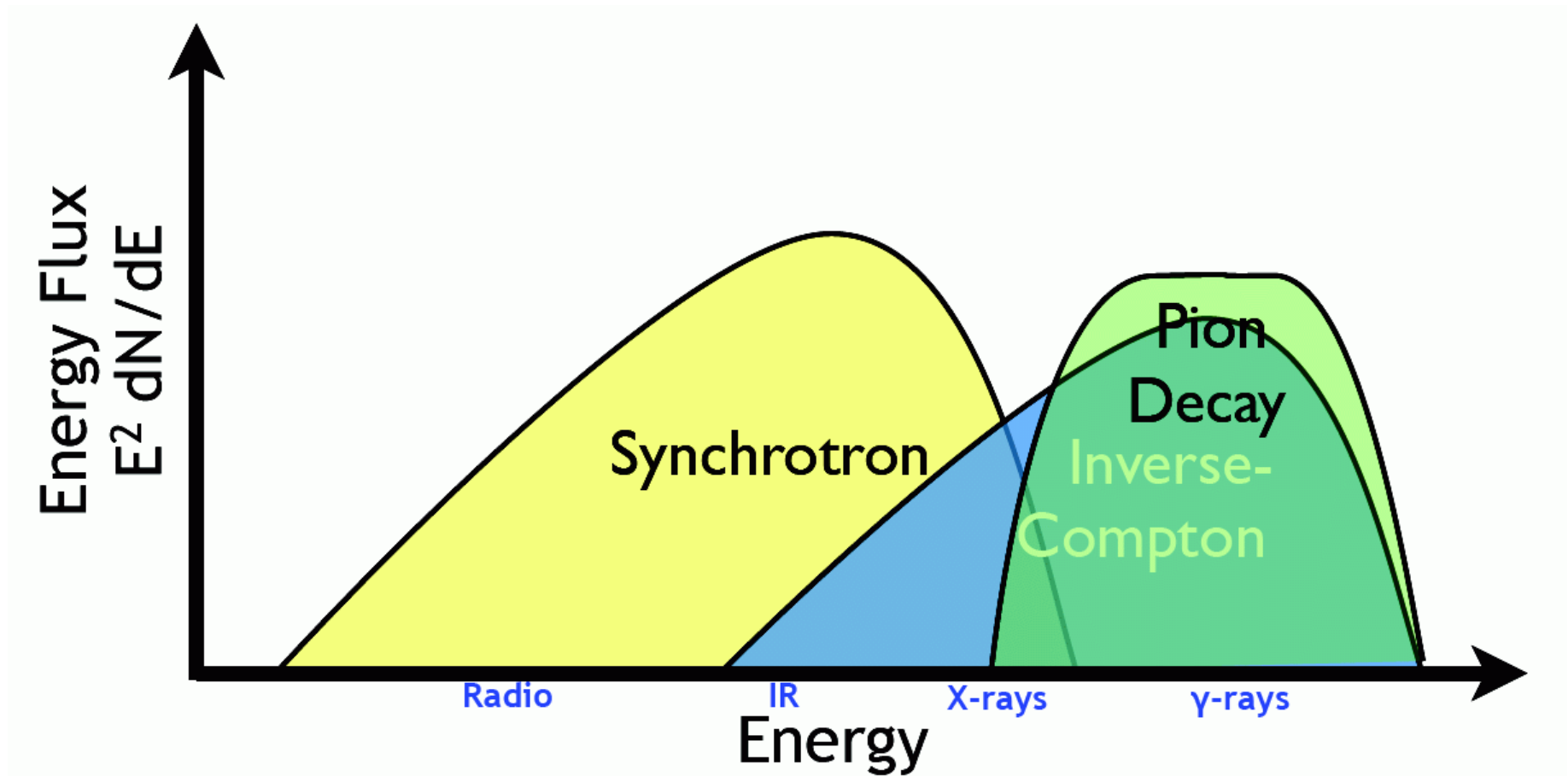
W oddziaływaniach hadronów promieniowania kosmicznego z materią międzygwiazdą (głównie zderzenie pp) produkowane są też licznie π^0

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



Promieniowanie gamma

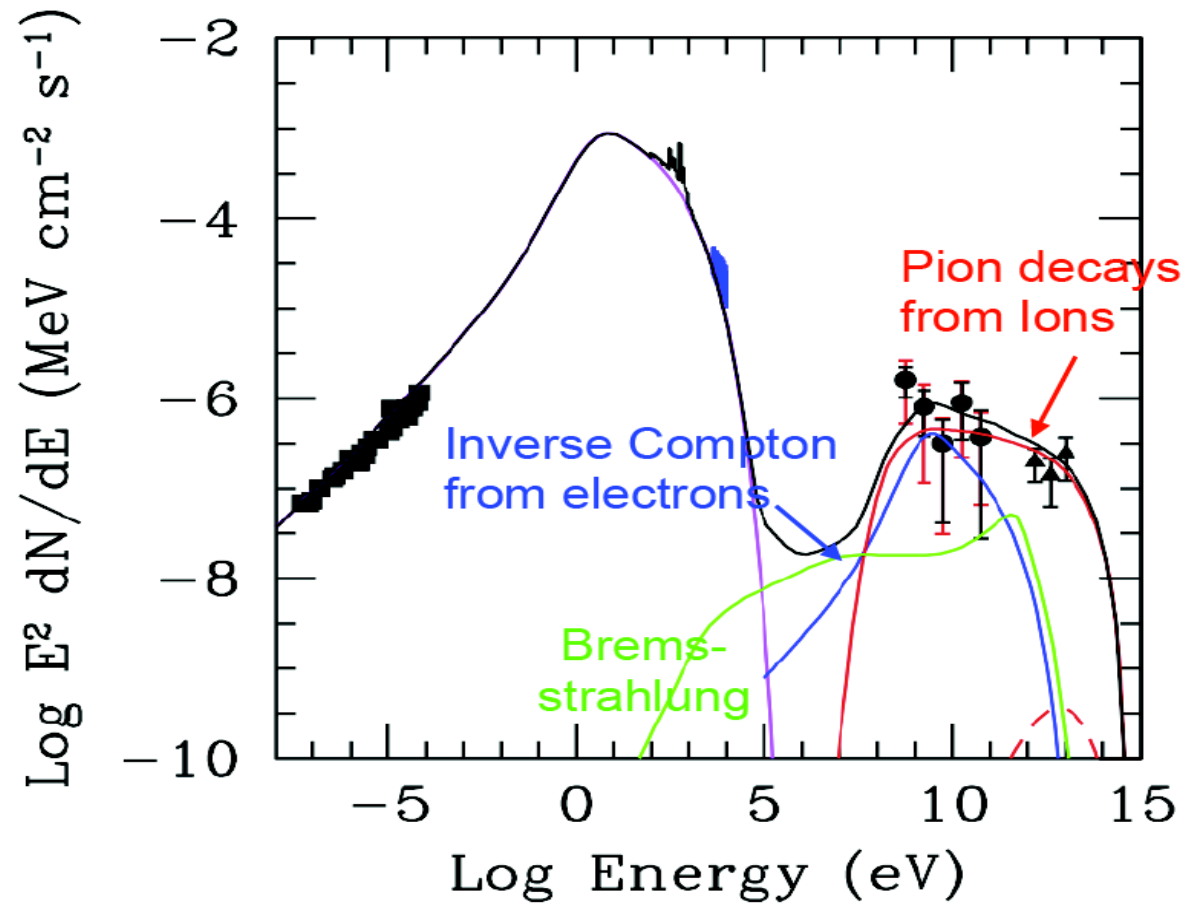
Oczekiwane widmo



Promieniowanie gamma

Tycho SNR

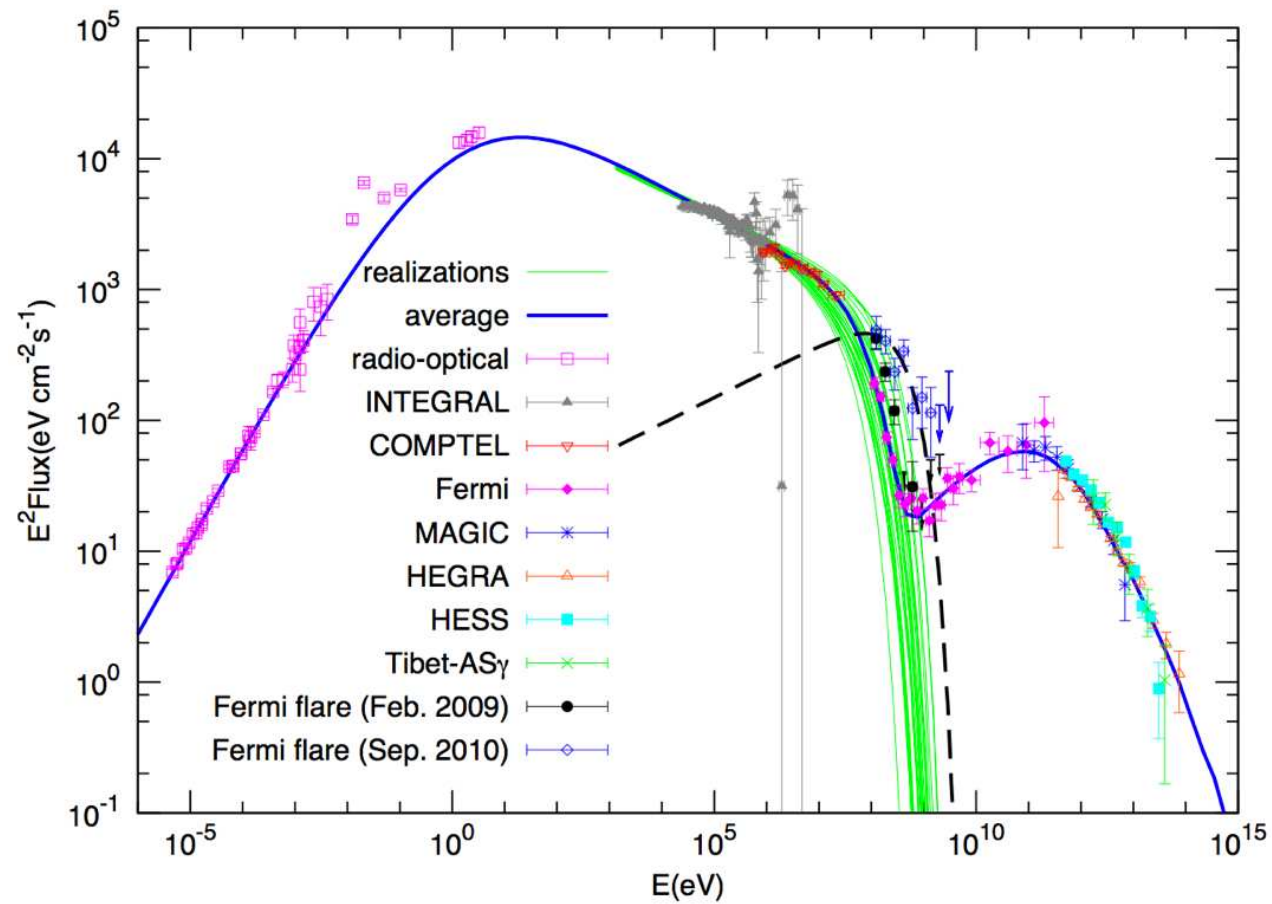
Widmo rejestrowanego promieniowania gamma



Promieniowanie gamma

Mgławica Kraba

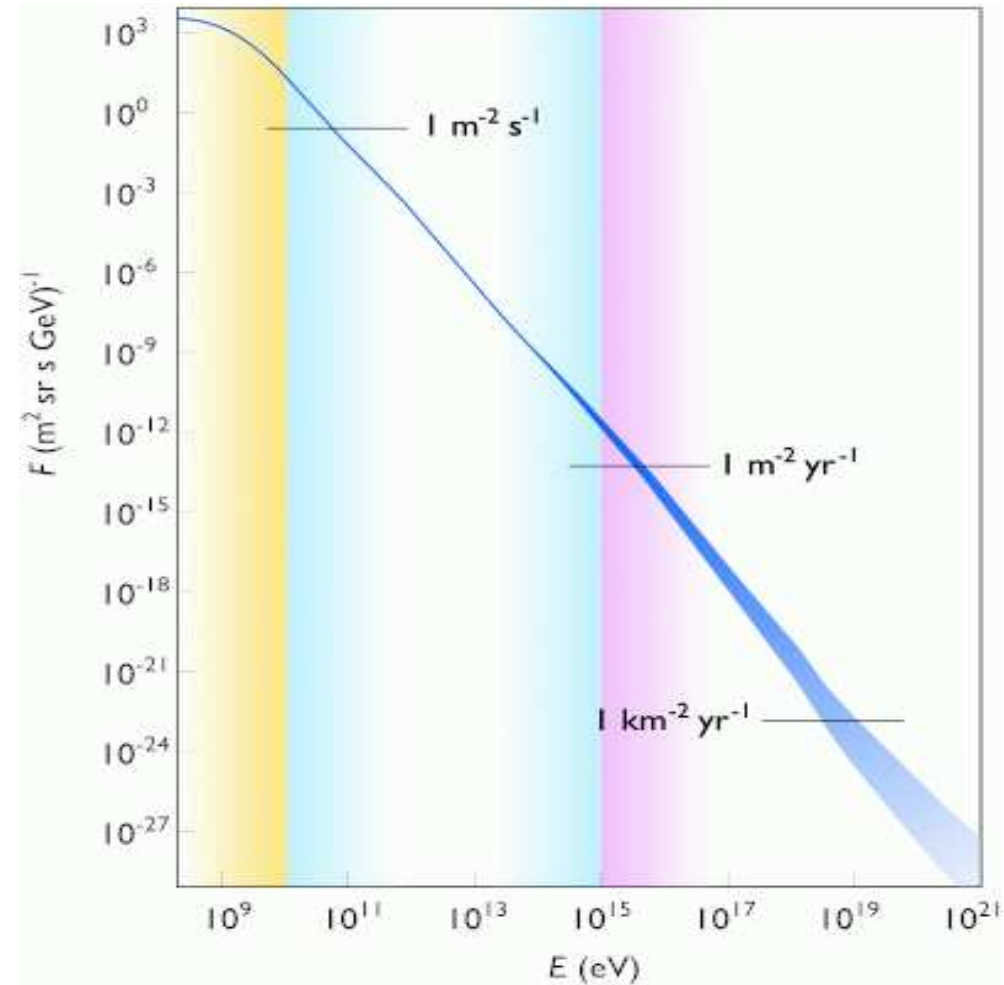
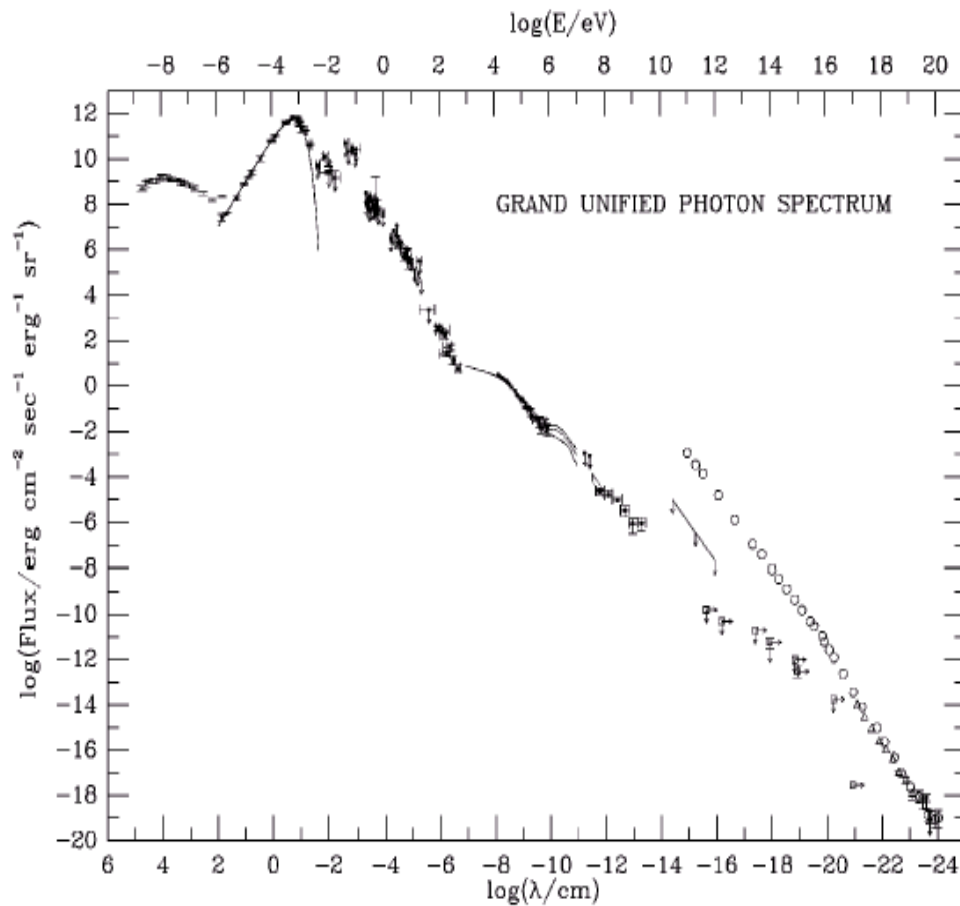
Widmo rejestrowanego promieniowania gamma



Promieniowanie gamma

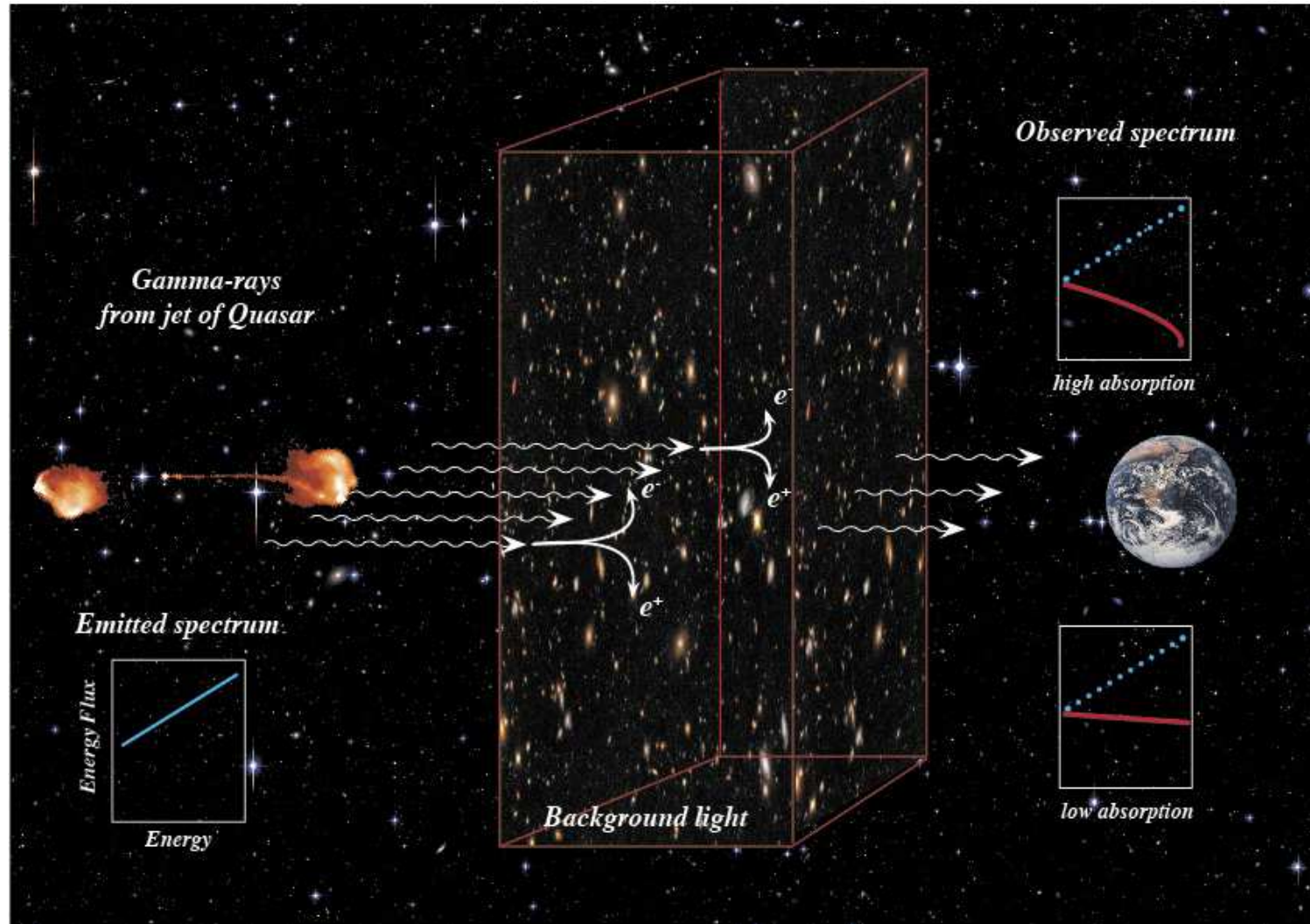
Porównanie

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



Promieniowanie gamma

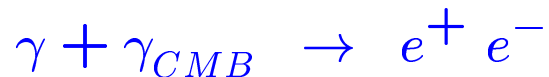
Pochłanianie



Promieniowanie gamma

Pochłanianie

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



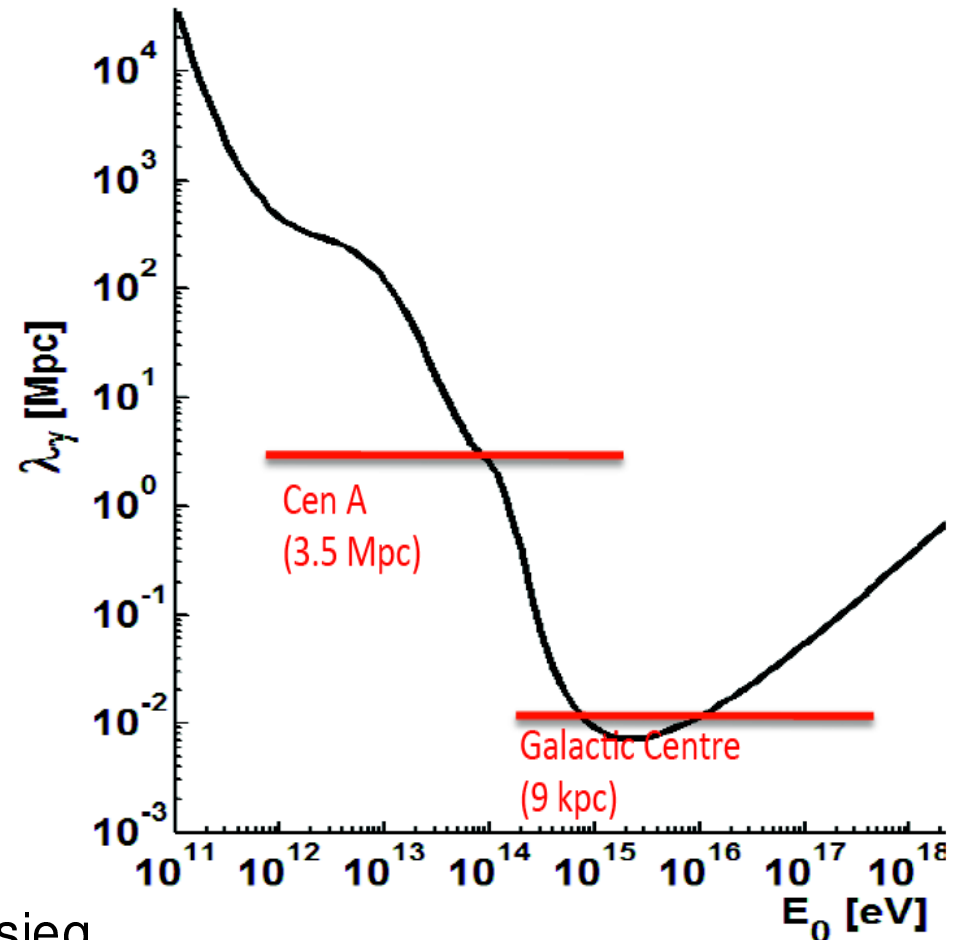
Średnia energia $E_{CMB} \approx 0.0002 \text{ eV}$

\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.

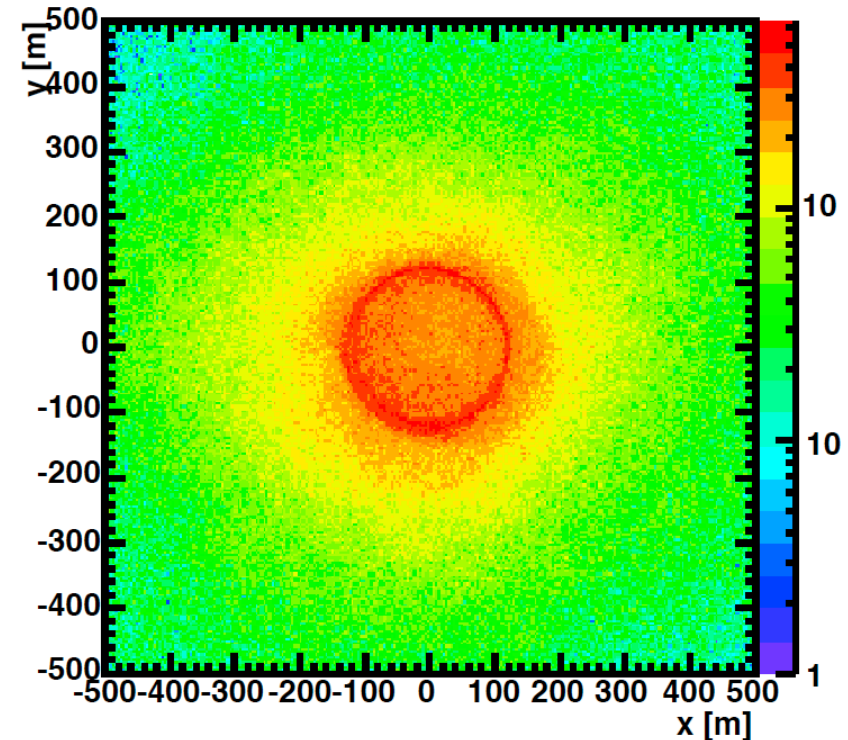
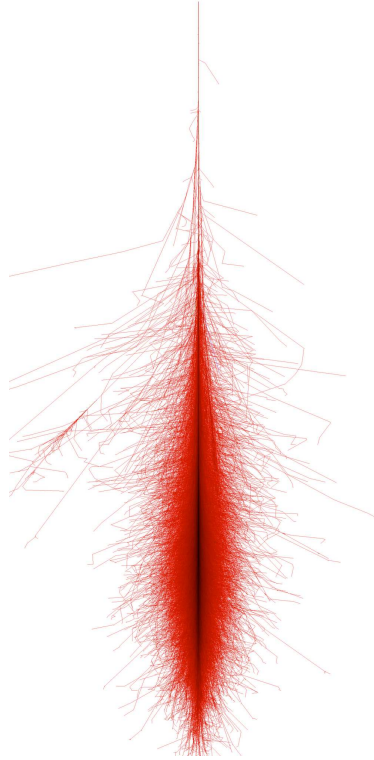
Promieniowanie gamma

Promieniowanie Czerenkowa

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

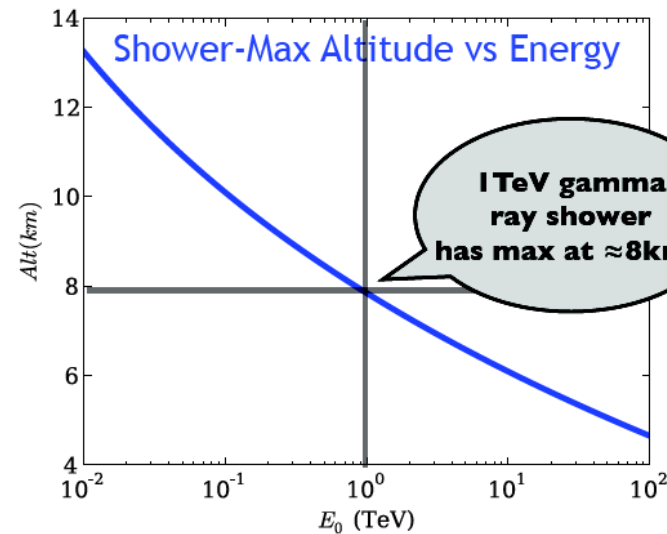
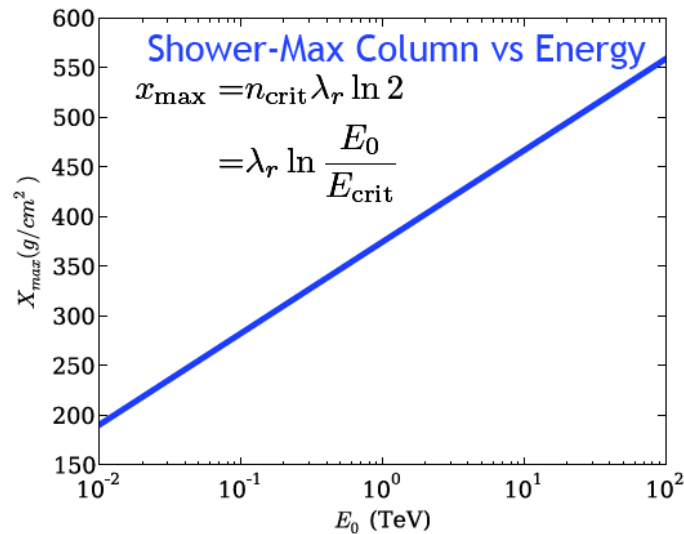
Podobnie jak w przypadku składowej E-M wielkich pęków atmosferycznych

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...

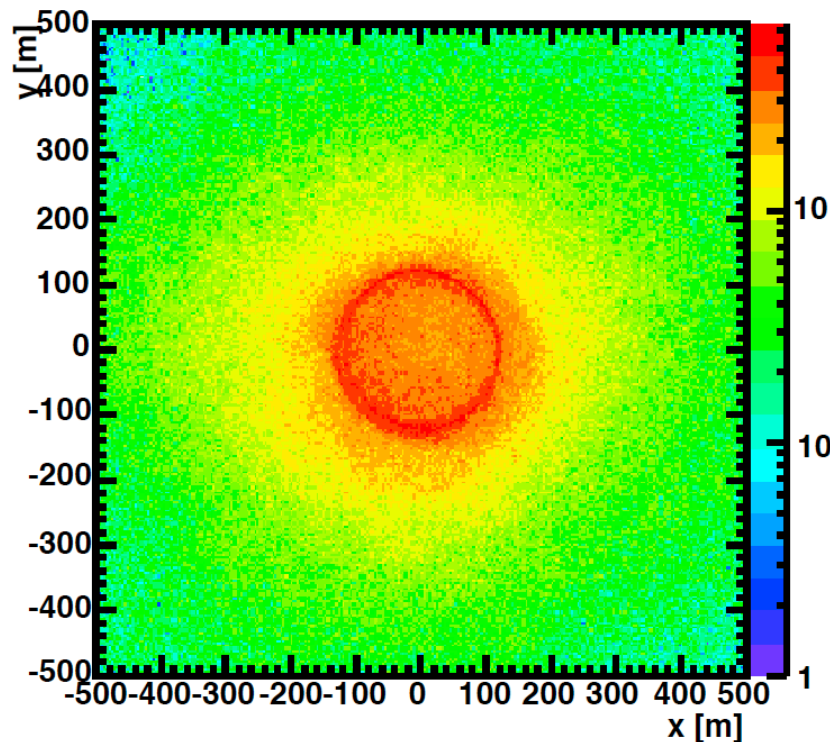
Promieniowanie Czerenkowa emitowane przez taką kaskadę oświetla obszar o promieniu ok. 100 m, gęstość fotonów UV ok. $100/\text{m}^2$

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:

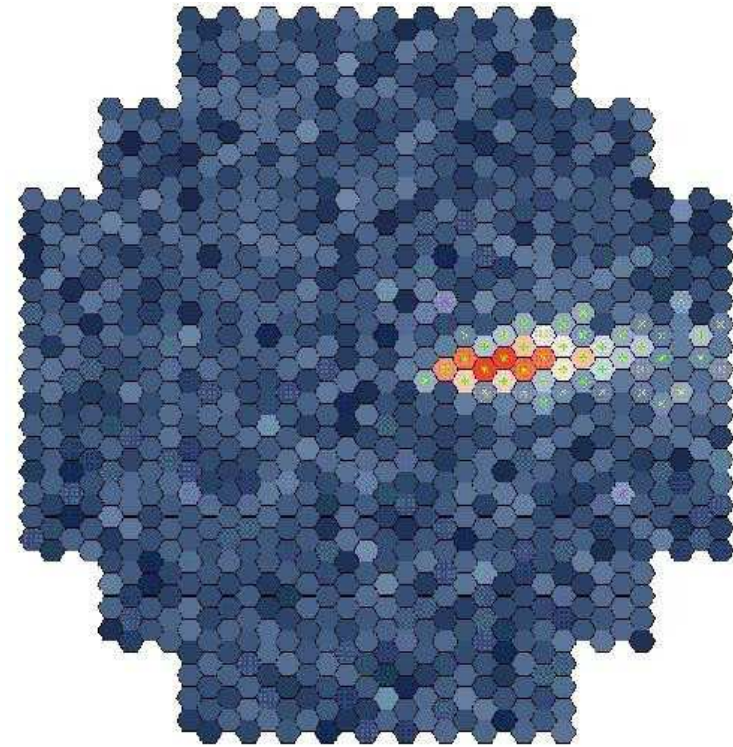
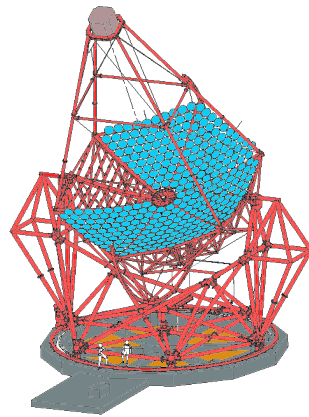
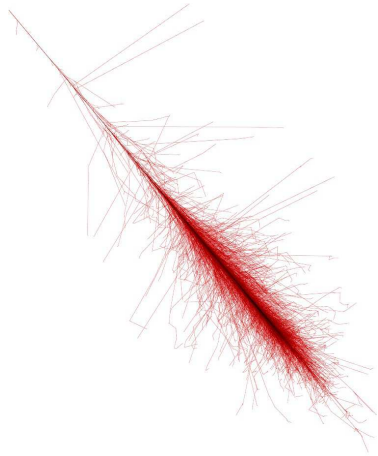
- ograniczoną dokładność pomiaru kierunku
- duże tło od wielkich pęków atmosferycznych (> 1000 razy większy strumień).

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

Promieniowanie gamma

Detekcja

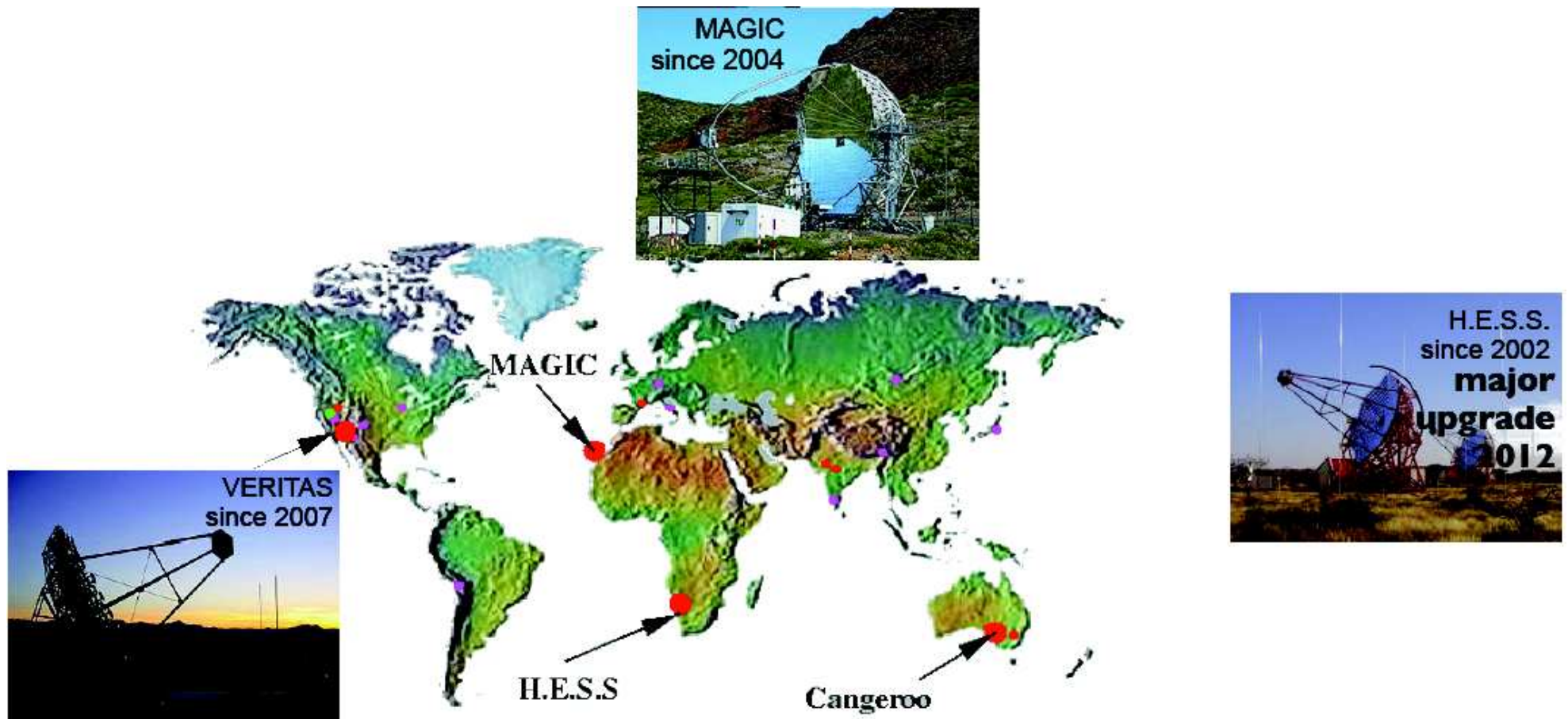
Jeśli teleskop znajdzie się w polu oświetlonym przez kaskadę, zrobi jej “zdjęcie”



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

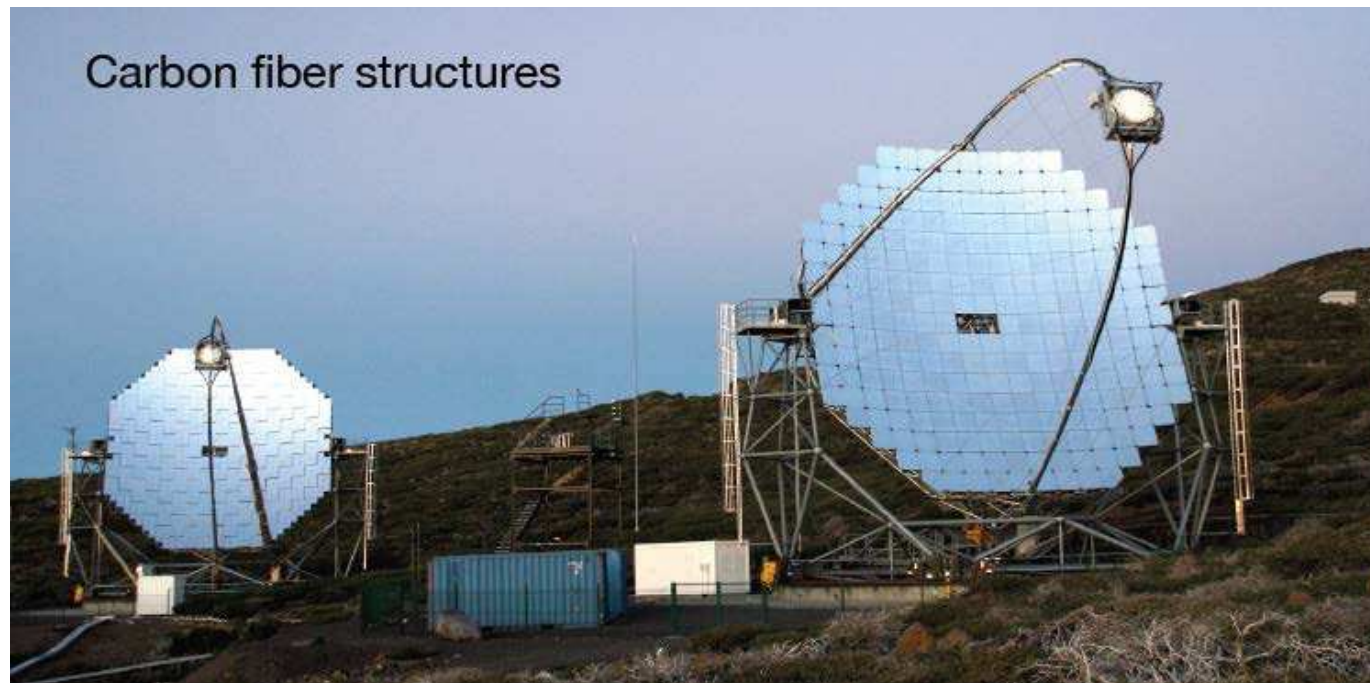
Atmospheric Cherenkov Telescopes (ACT)



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)

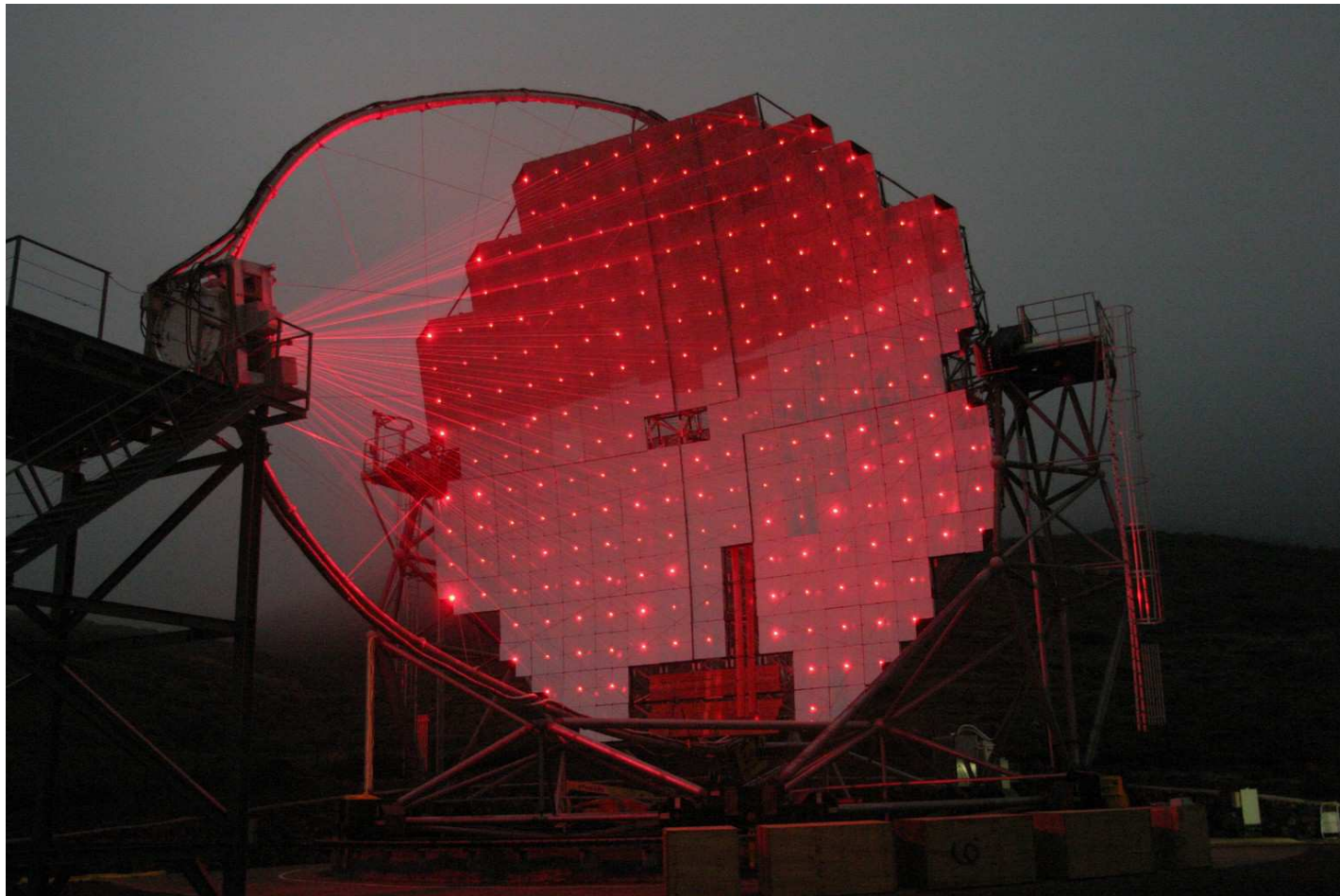
Instr.	Tels. #	Tel. A (m ²)	FoV (°)	Tot A (m ²)	Thresh. (TeV)	PSF (°)	Sens. (%Crab)
H.E.S.S.	4	107	5	428	0.1	0.06	0.7
MAGIC	2	236	3.5	472	0.05(0.03)	0.06	0.8
VERITAS	4	106	4	424	0.1	0.07	0.7



Teleskopy Czerenkowa

MAGIC

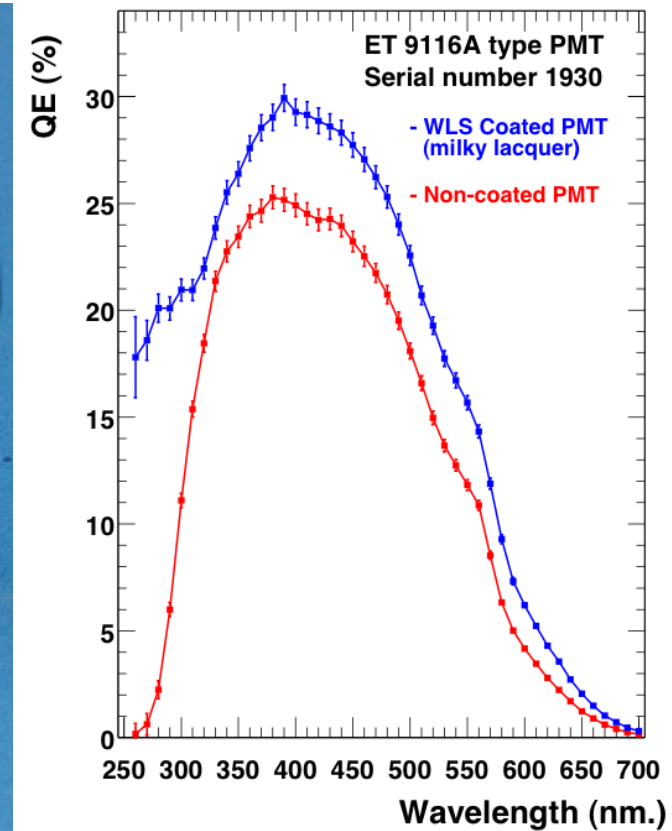
Laserowa kalibracja systemu pozycjonowania “aktywnych” luster teleskopu



Teleskopy Czerenkowa

MAGIC

Płaszczyzna ogniskowa teleskopu MAGIC, fotopowielacze i ich efektywność



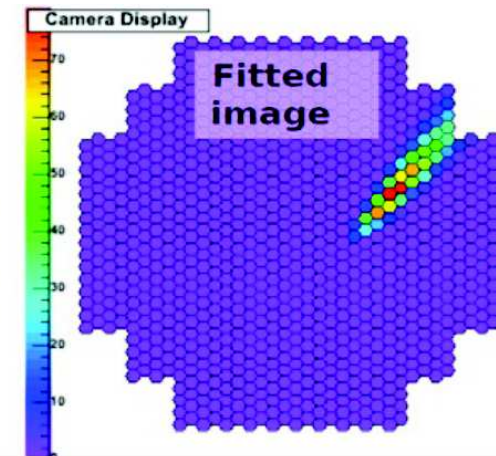
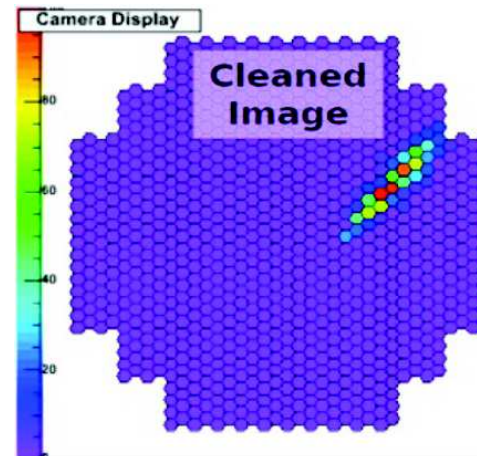
Teleskopy Czerenkowa

Rekonstrukcja

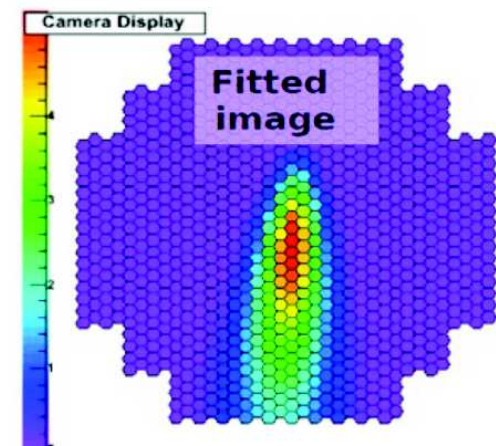
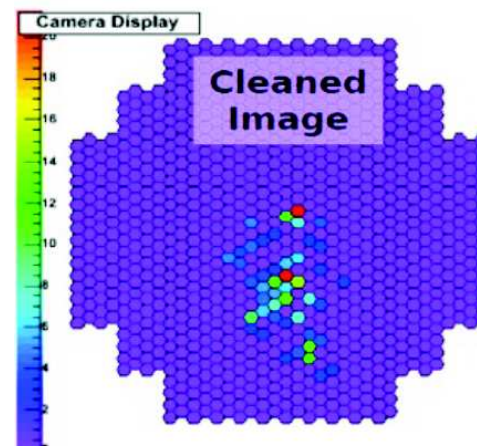
Na podstawie zmierzonego natężenia promieniowania możemy wyznaczyć **energię** początkowego fotonu.

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

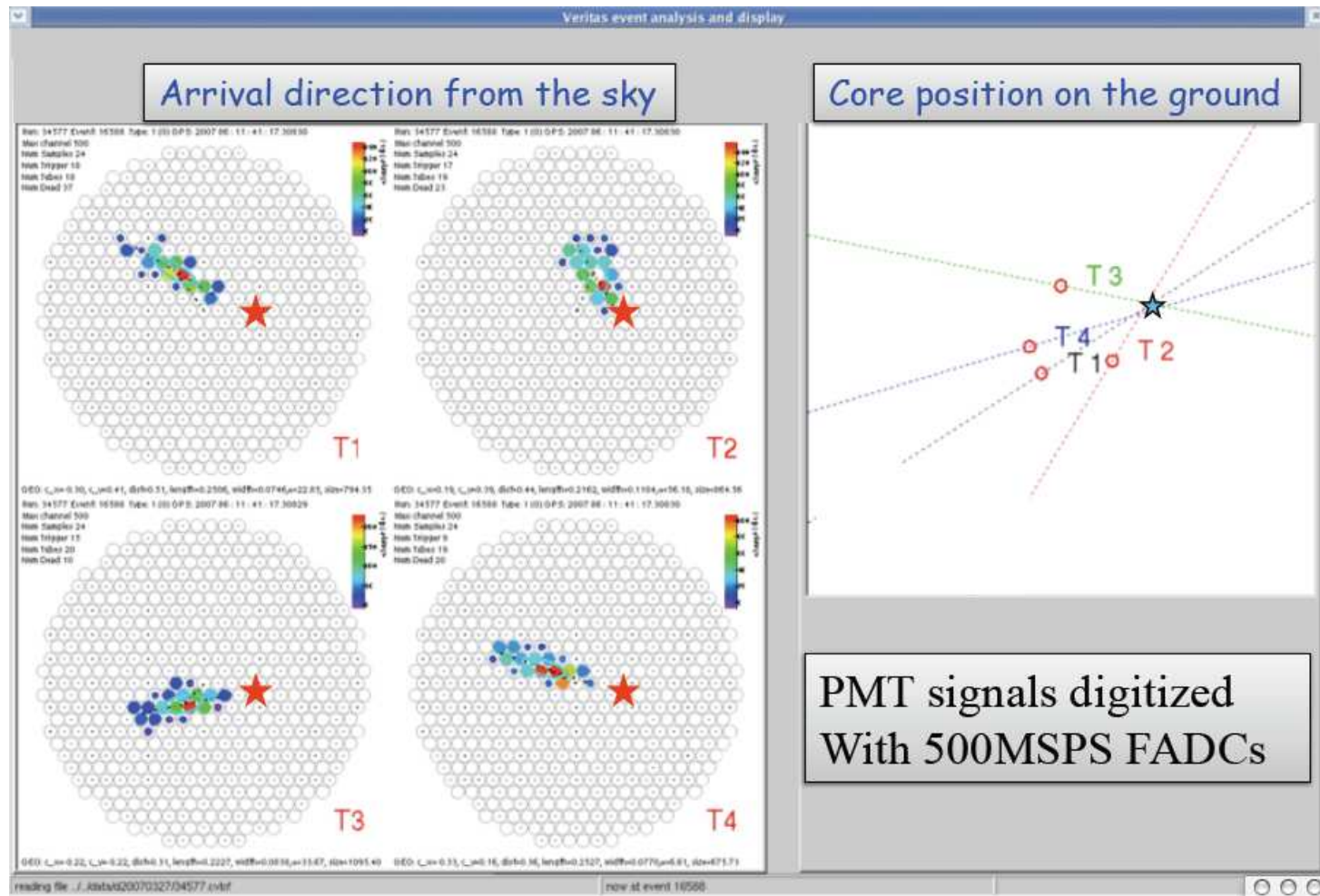


hadron

Teleskopy Czerenkowa

Rekonstrukcja

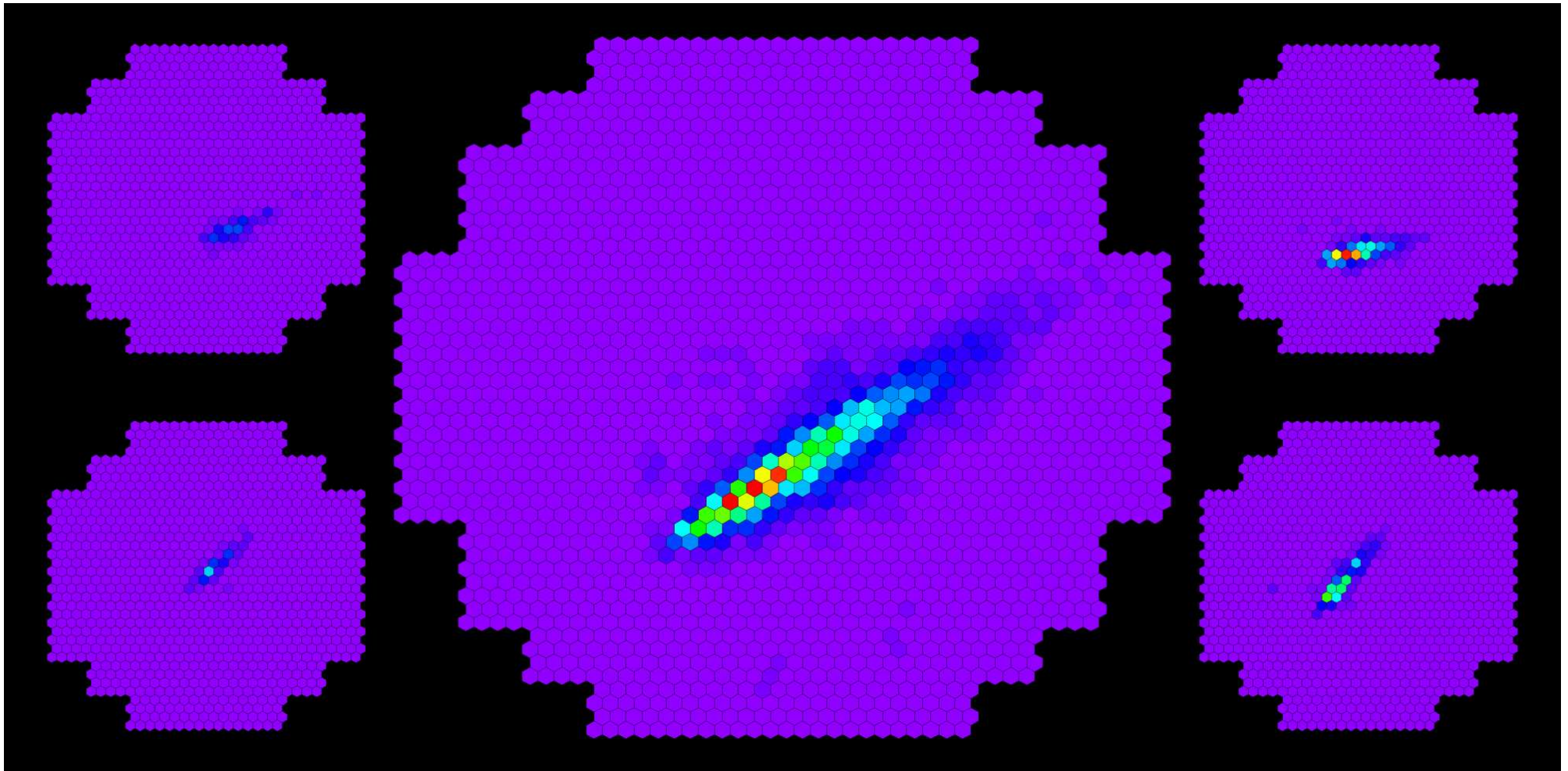
Wyznaczenie kierunku znacznie dokładniejsze dla obserwacji kilkoma teleskopami



HESS

Rekonstrukcja

Wyznaczenie kierunku znacznie dokładniejsze dla obserwacji kilkoma teleskopami

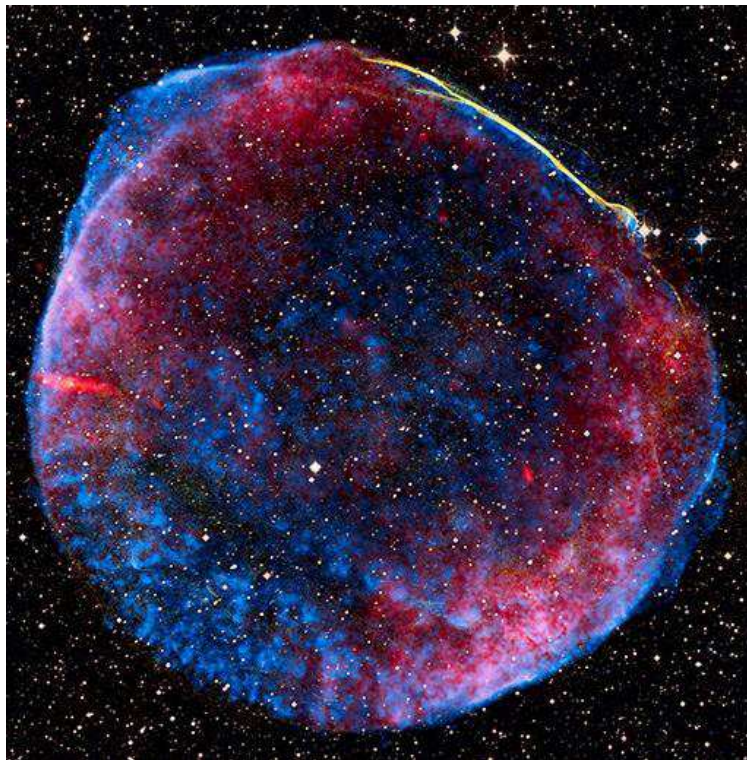


HESS

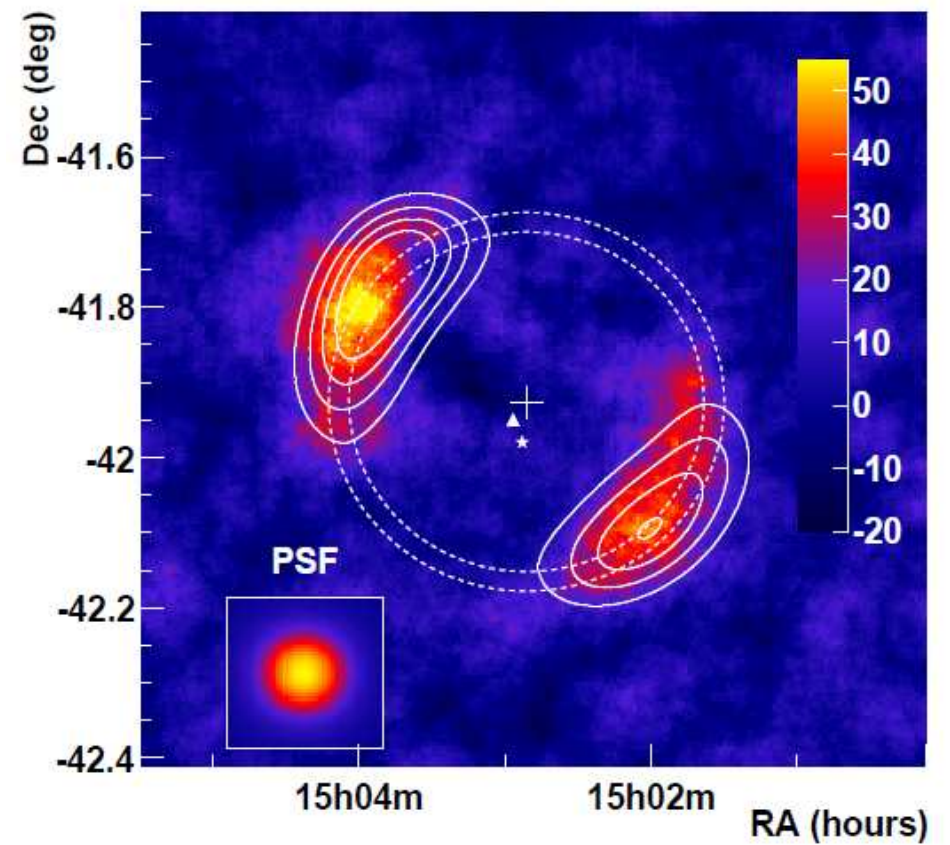
Wyniki

Obserwacja promieniowania TeV z SNR - potwierdzenie przyspieszania CR

SN1006 w prom. radiowym, optycznym, X



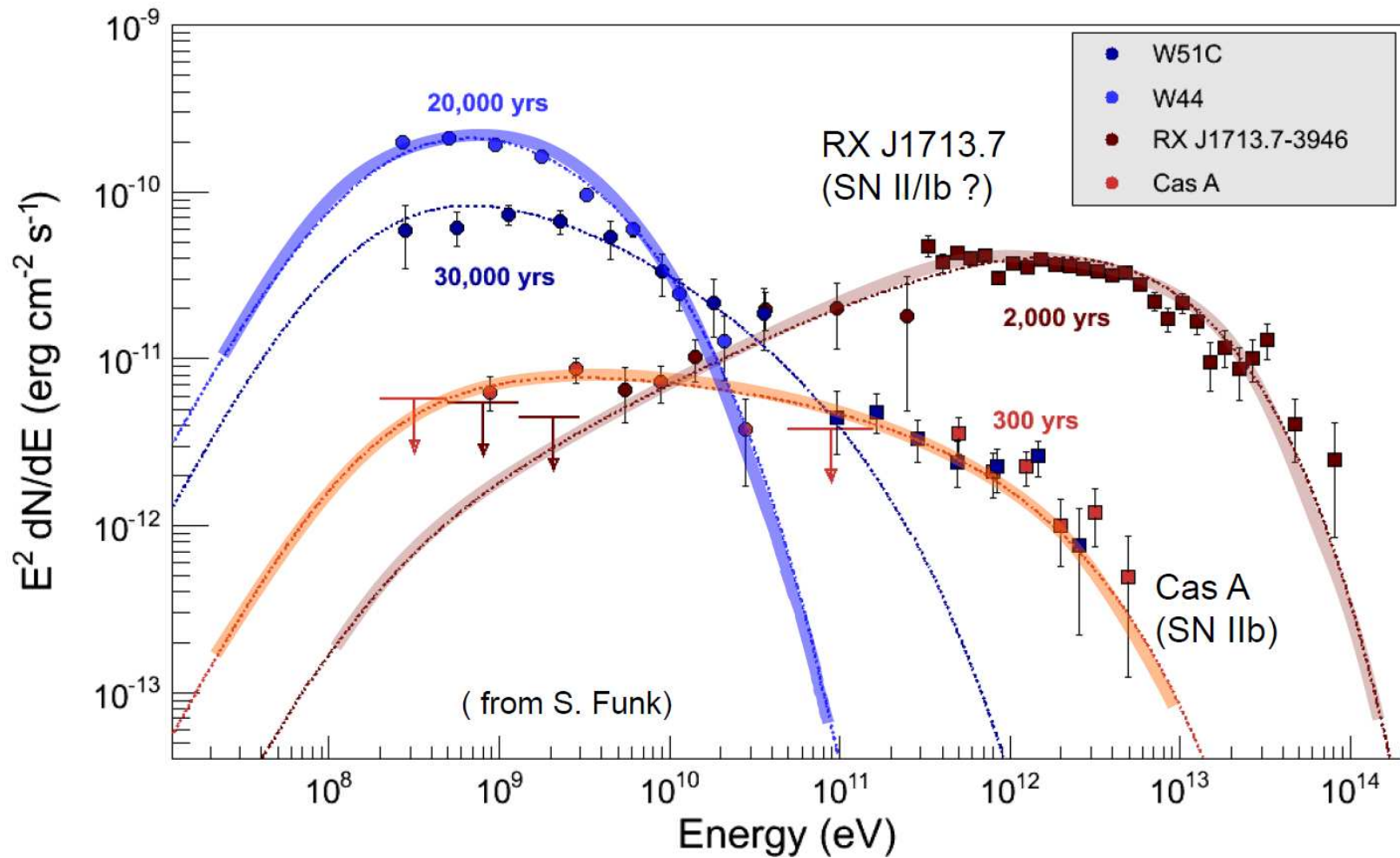
i w promieniowaniu TeV (HESS)



HESS

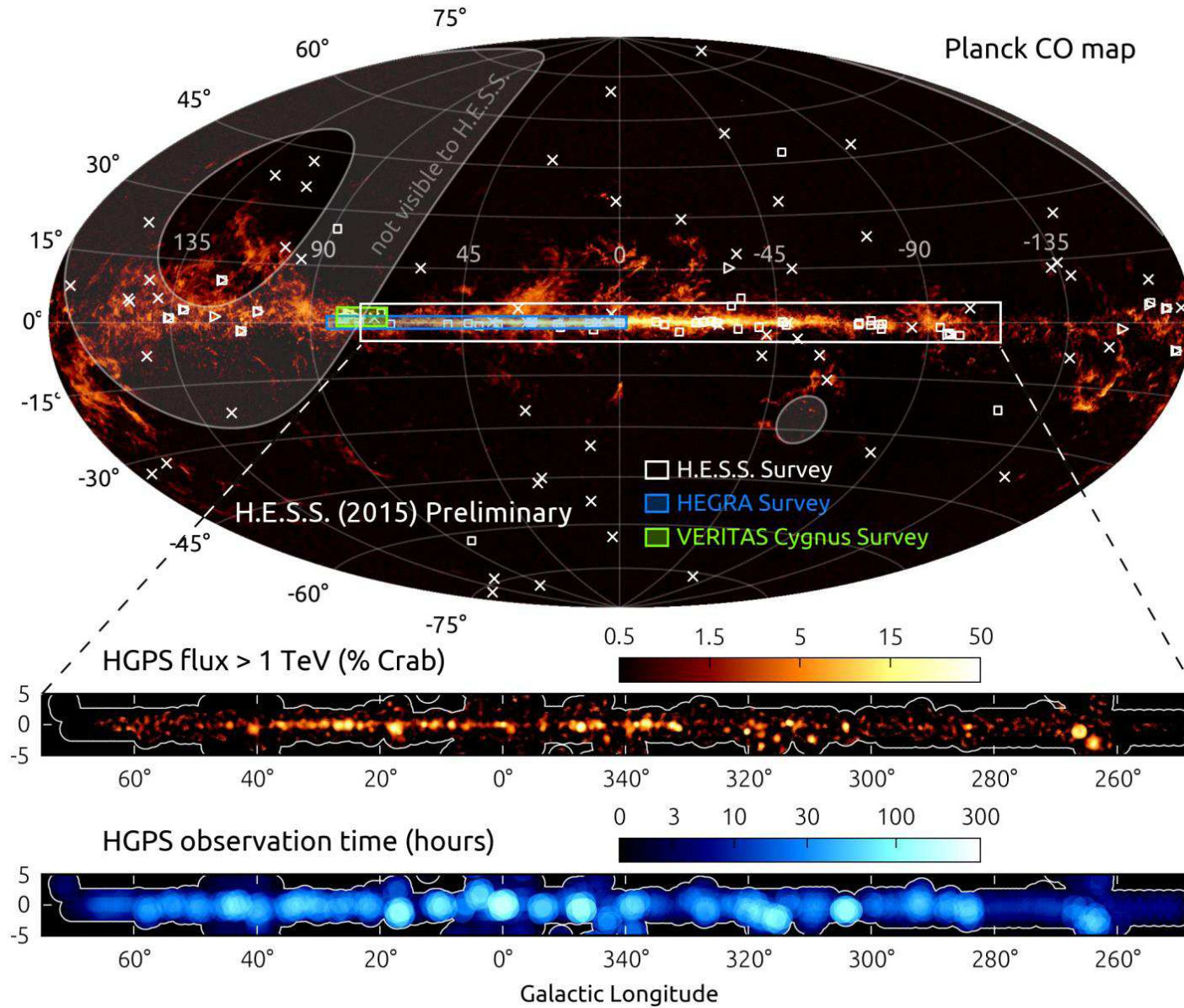
Wyniki

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



HESS

Wyniki



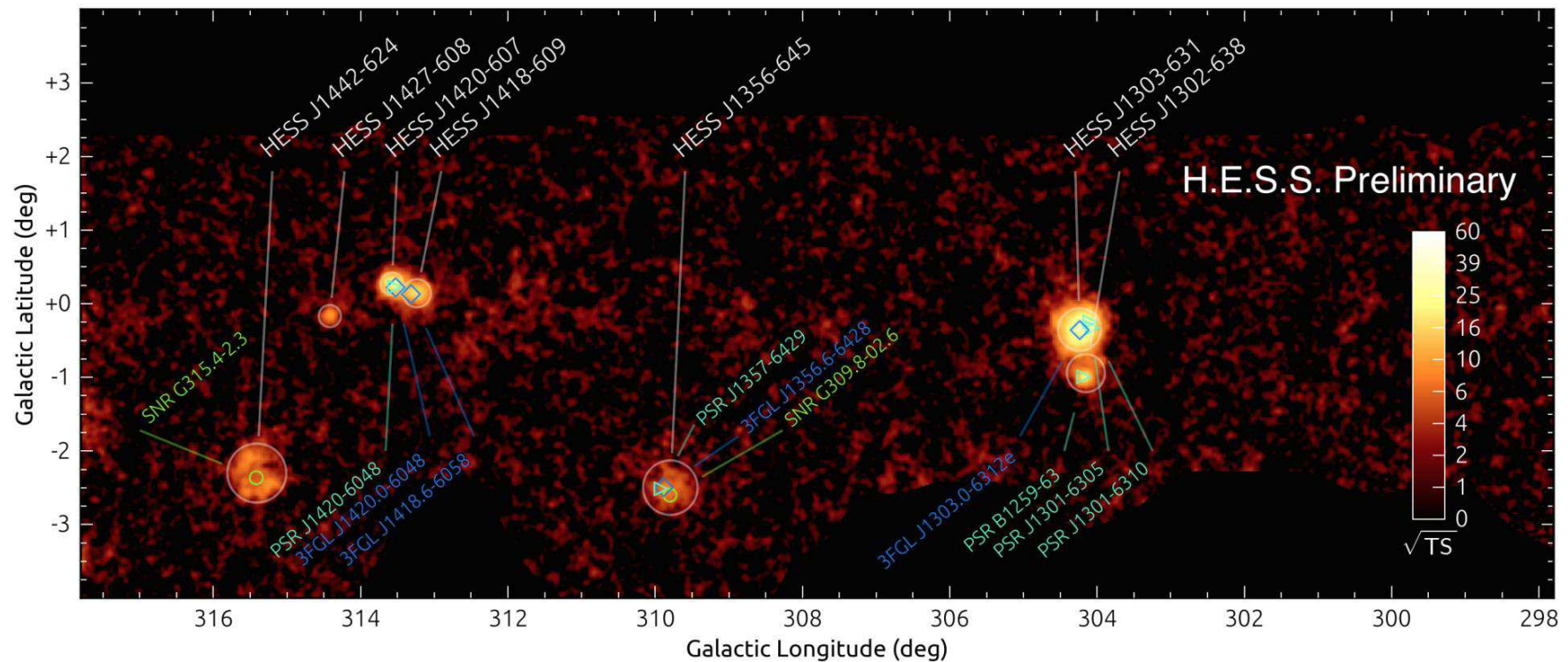
HESS

Wyniki

Skan płaszczyzny Galaktyki.

Dane zbierane przez 10 lat, prawie 2700 “dobrych” godzin obserwacji.

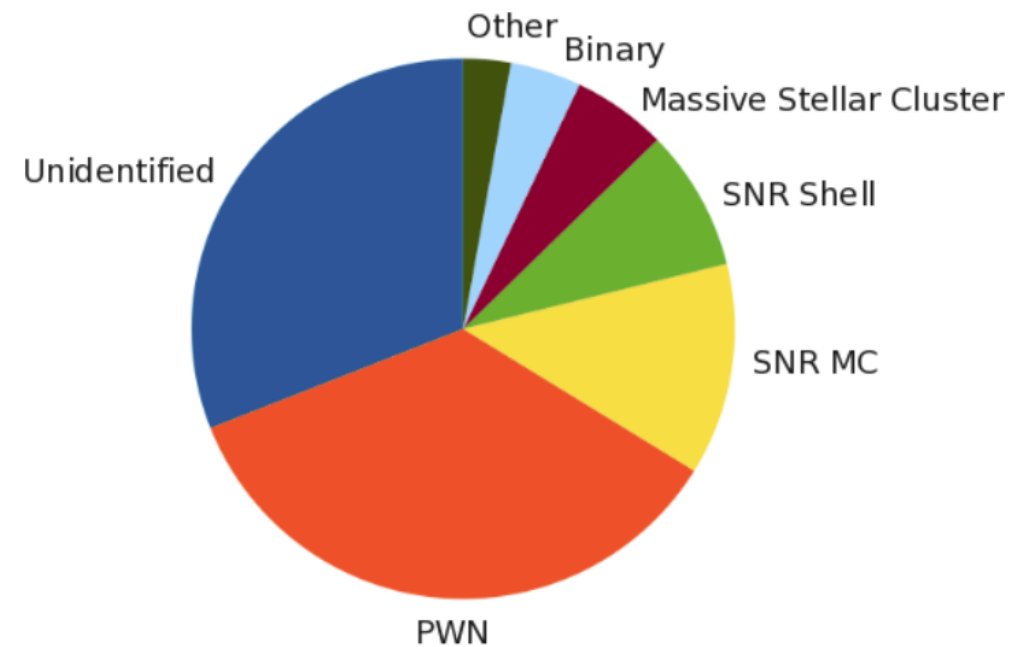
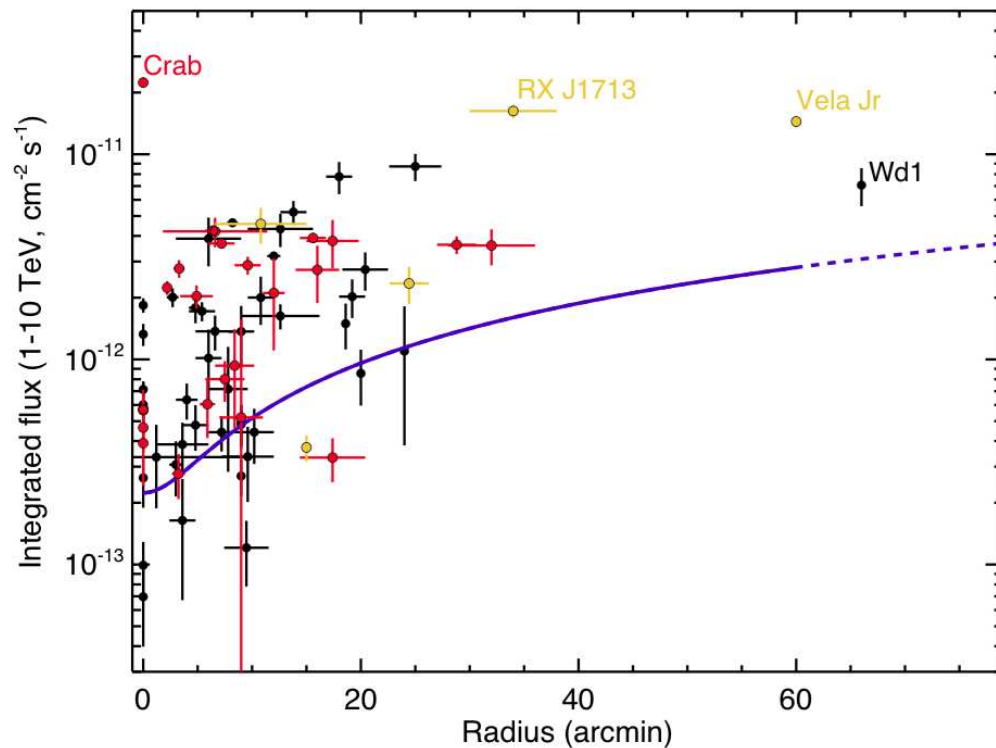
Zidentyfikowano 77 źródeł promieniowania gamma w zakresie TeV



HESS

Wyniki

Zmierzone natężenie, rozmiary i typ źródeł znalezionych w płaszczyźnie Galaktyki



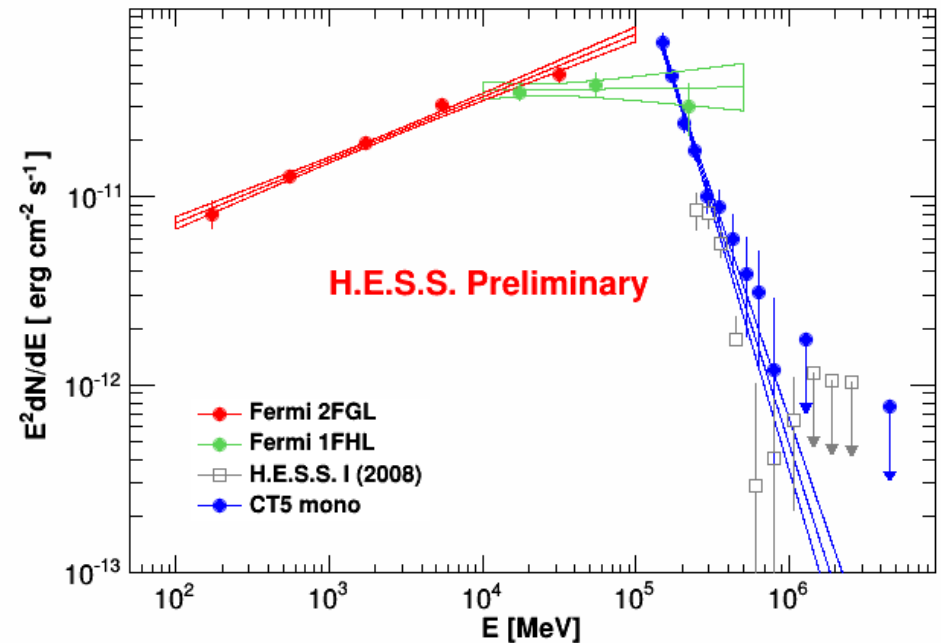
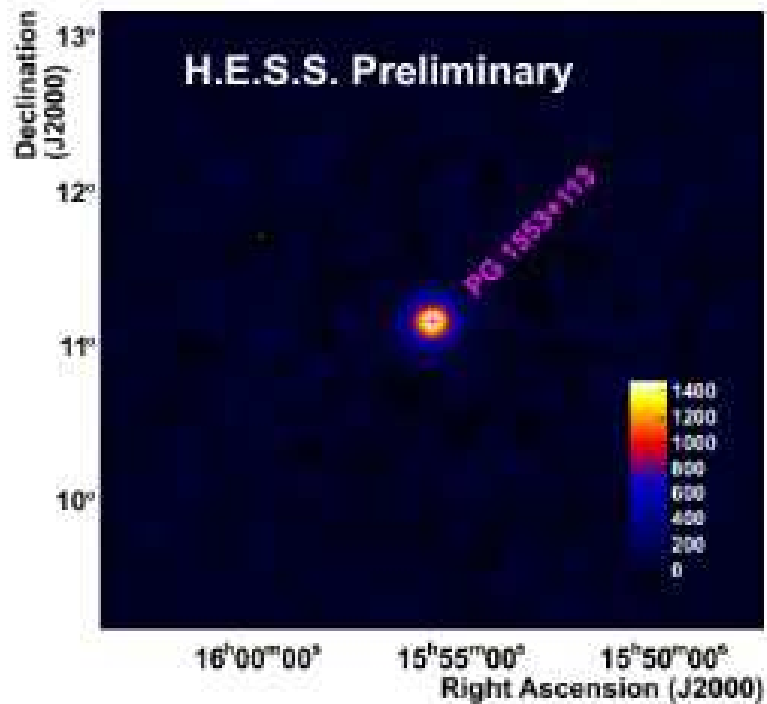
PWN - Pulsar Wind Nebula: mgławica pulsarowa, **Plerion**. Mgławica zasilana przez energię pulsara, często związane z SNR. Jednym z takich obiektów jest Mgławica Kraba.

HESS

Wyniki

Mierzone także źródła pozagalaktyczne

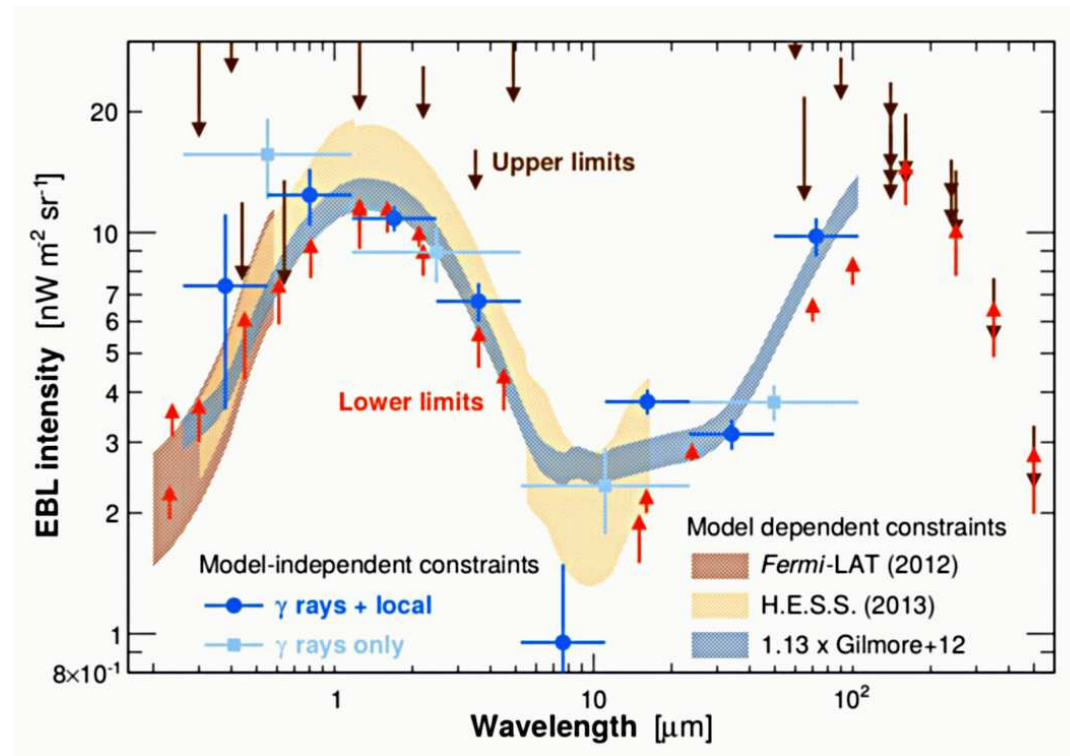
Blazar PG1553+113 ($z \sim 0.5$)



HESS

Wyniki

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



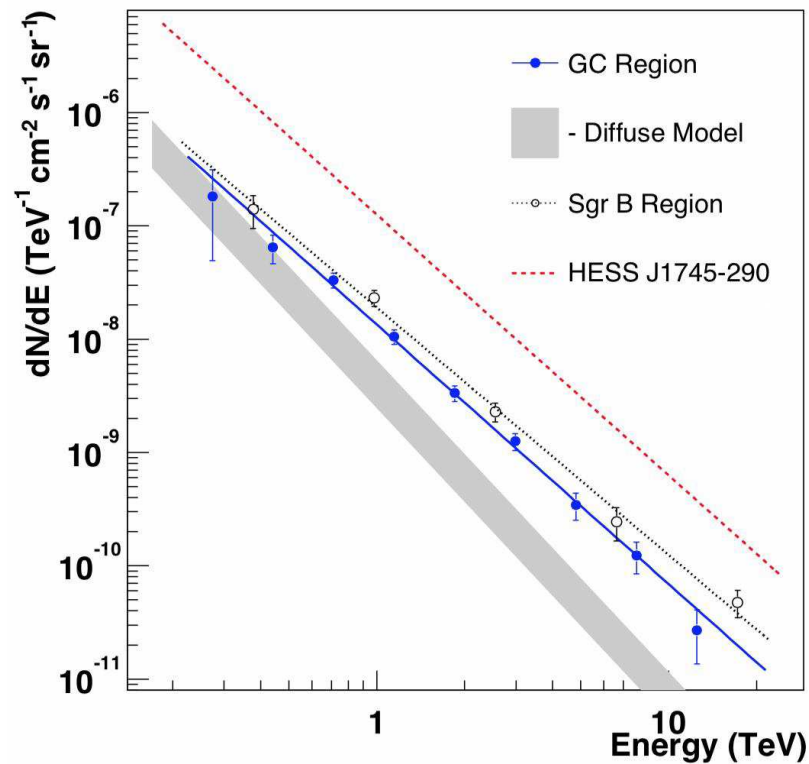
Całkowite promieniowanie w zakresie od 0.1 do 1000 μm odpowiada ok. 6.5% CMB

HESS

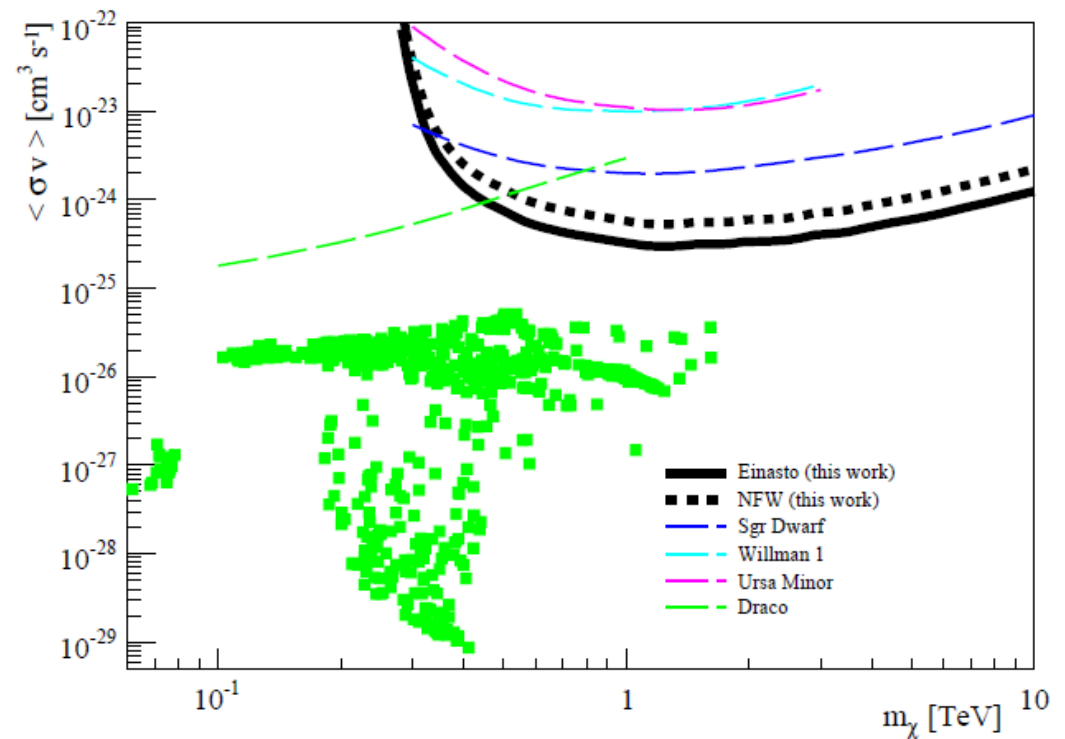
Poszukiwanie Ciemnej Materii

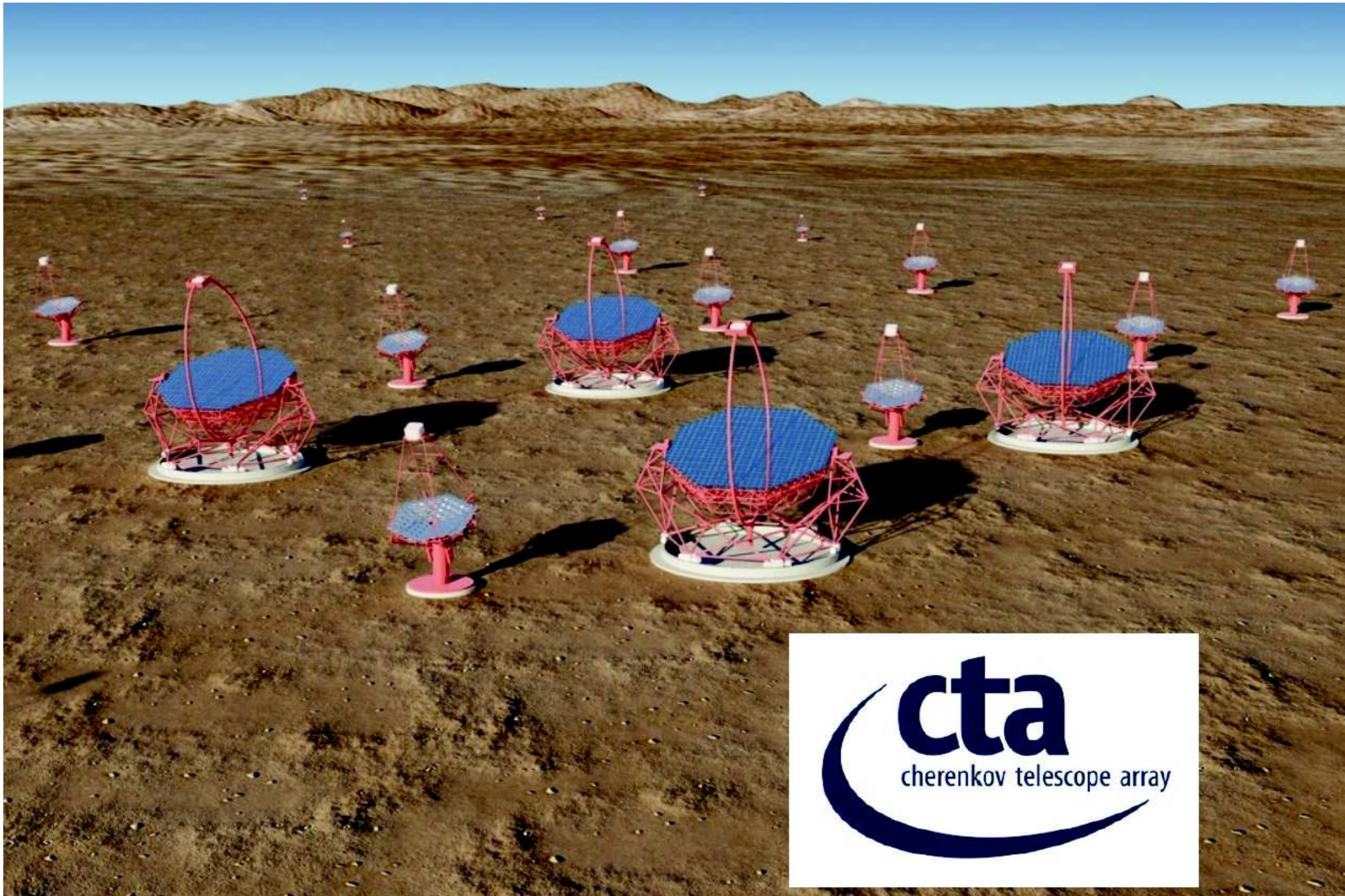
Podobnie jak w eksperymentach satelitarnych, poszukiwane były struktury w rozkładzie energii fotonów pochodzących z różnych źródeł (np. centrum galaktyki).

Widmo



Ograniczenia na przekrój czynny





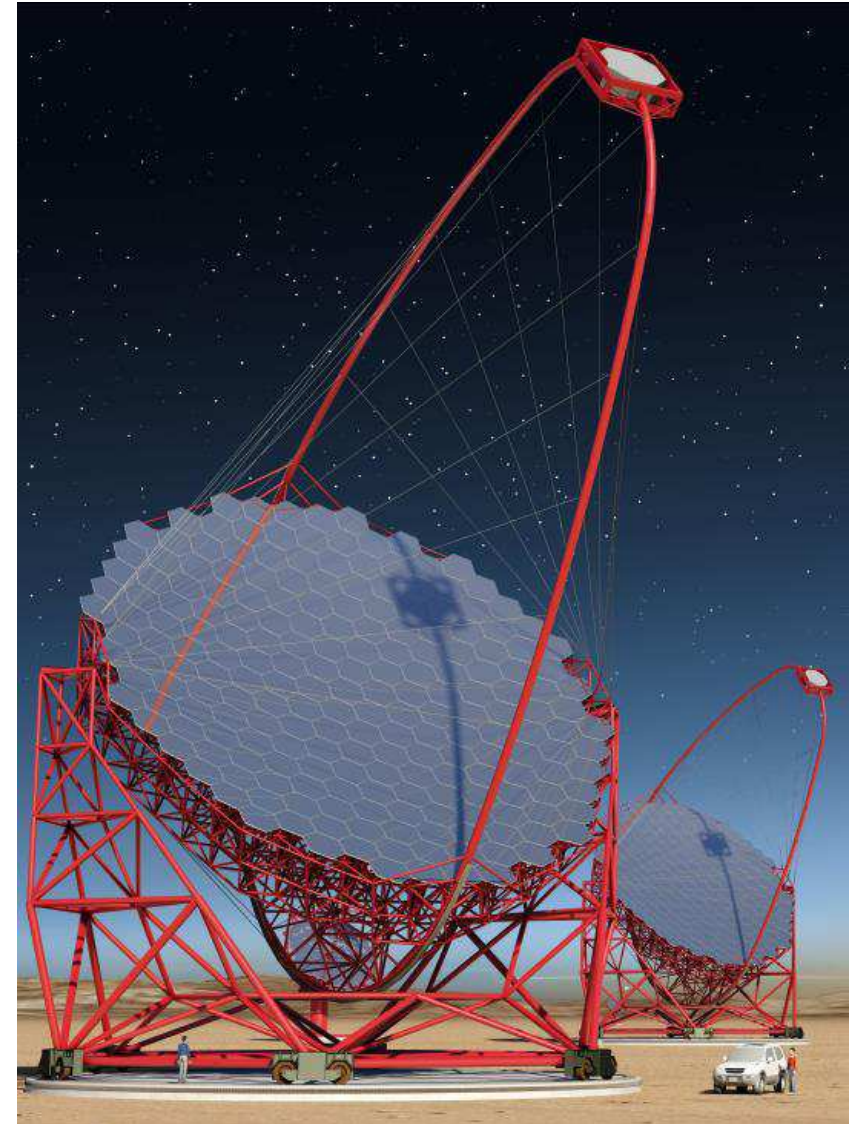
CTA

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.

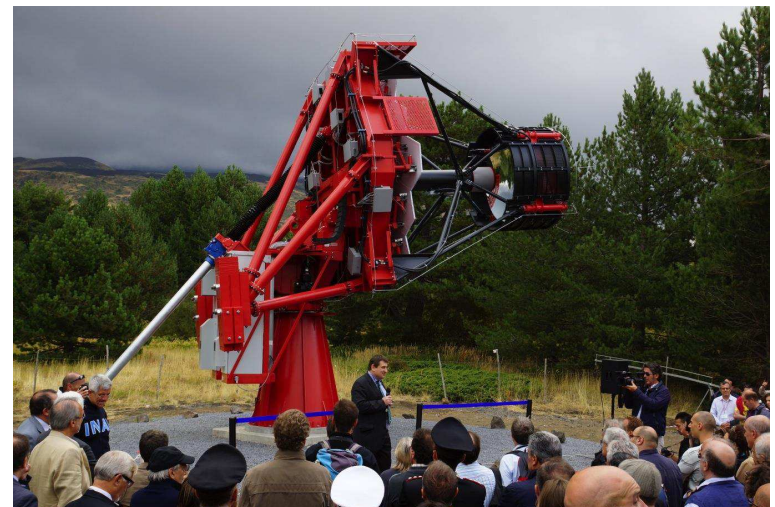
W projekcie CTA przewiduje się budowę ok. 70 małych teleskopów (SST), o średnicy ok. 4 m, co pozwoli na pomiar fotonów powyżej kilku TeV.

Pole widzenia ok. 10°

IFJ PAN, Kraków



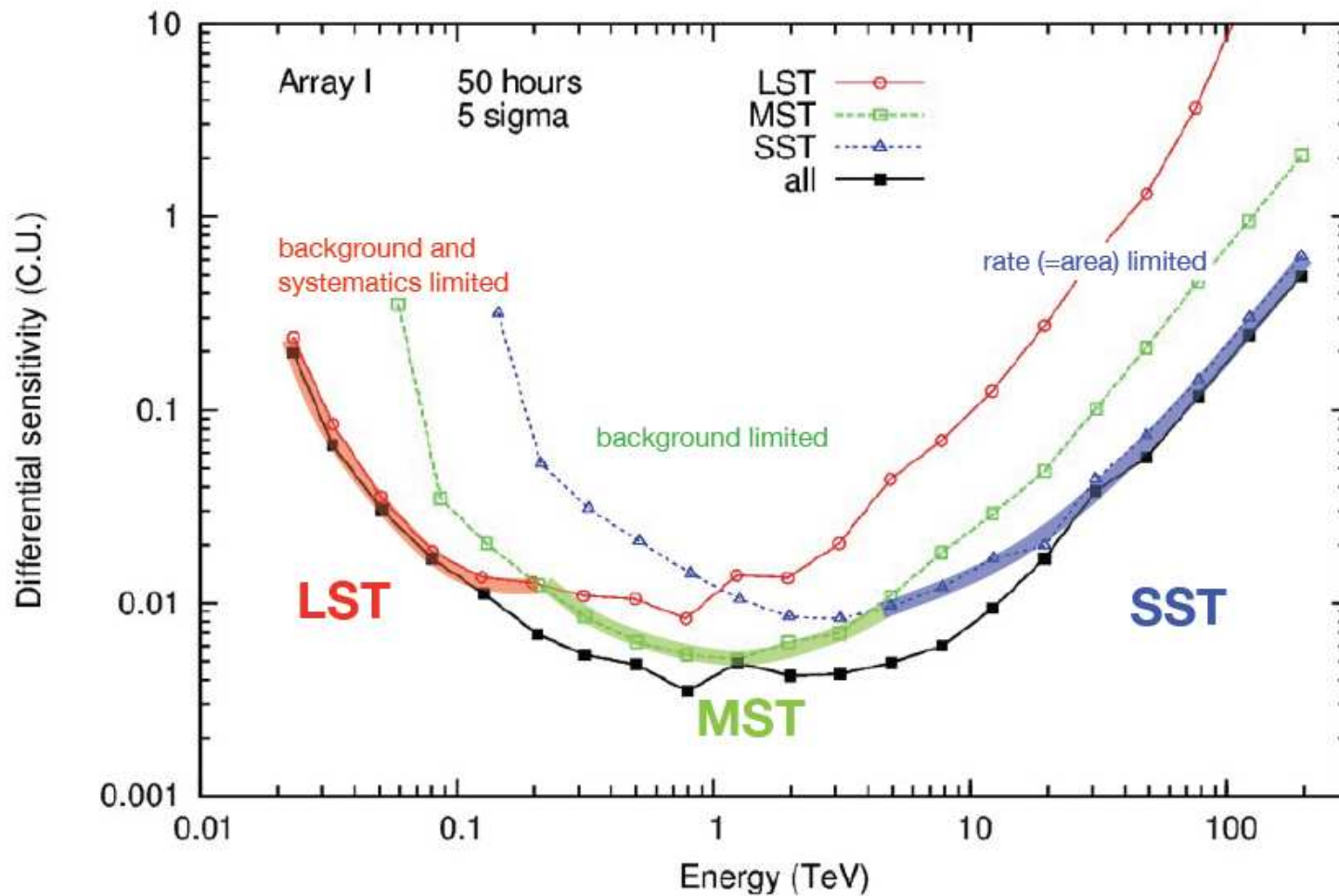
Włochy



CTA

Czułość

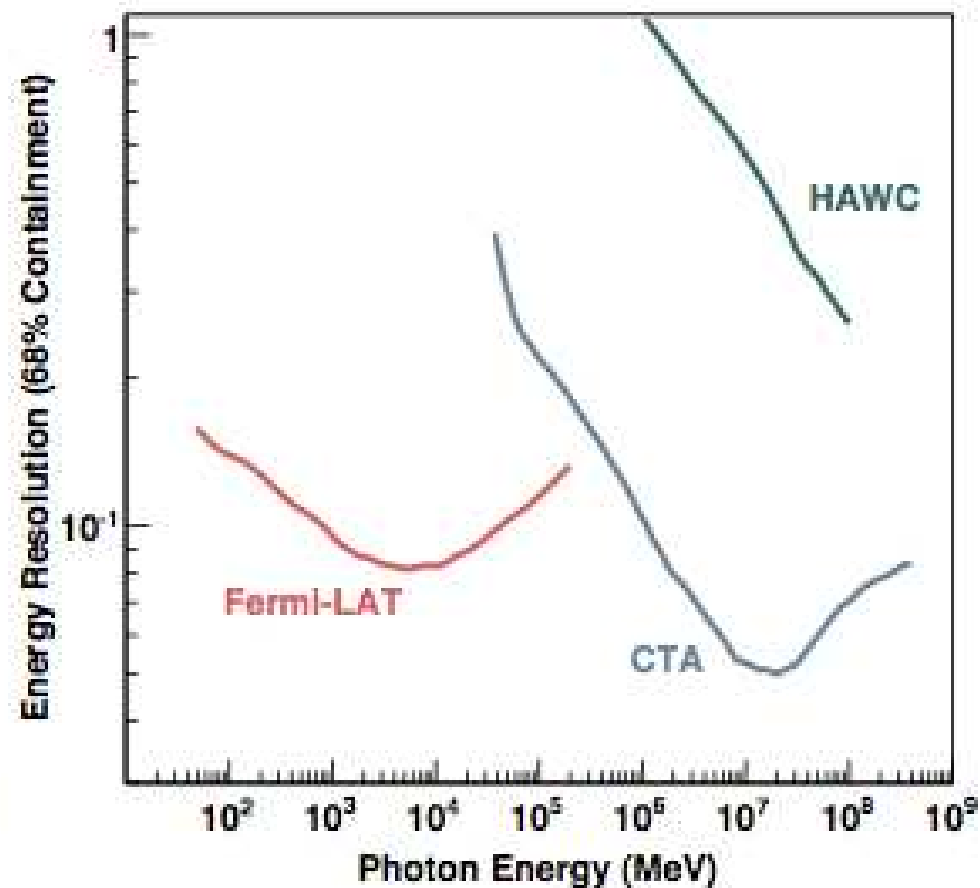
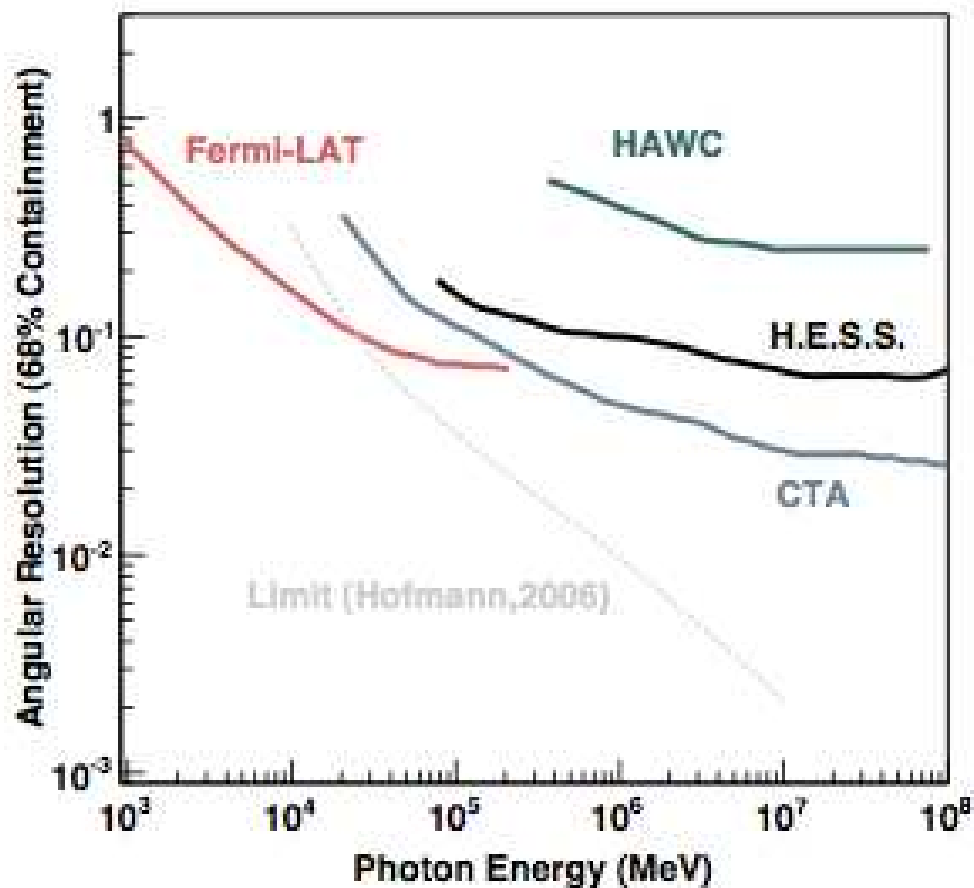
Połączenie trzech rodzajów teleskopów pozwoli na pomiar w szerokim zakresie energii



CTA

Dokładność

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

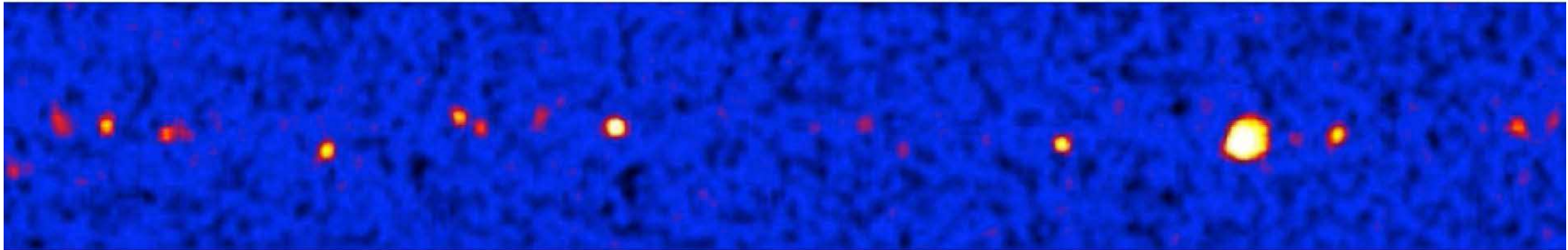


CTA

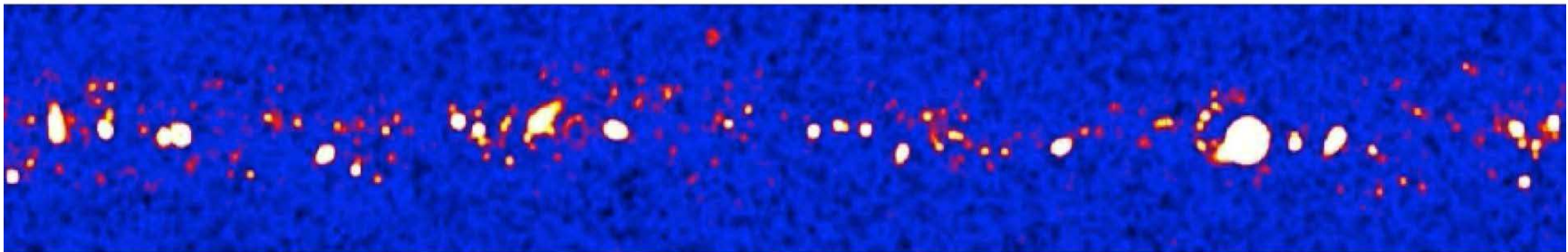
Dokładność

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

H.E.S.S.



CTA, for same exposure

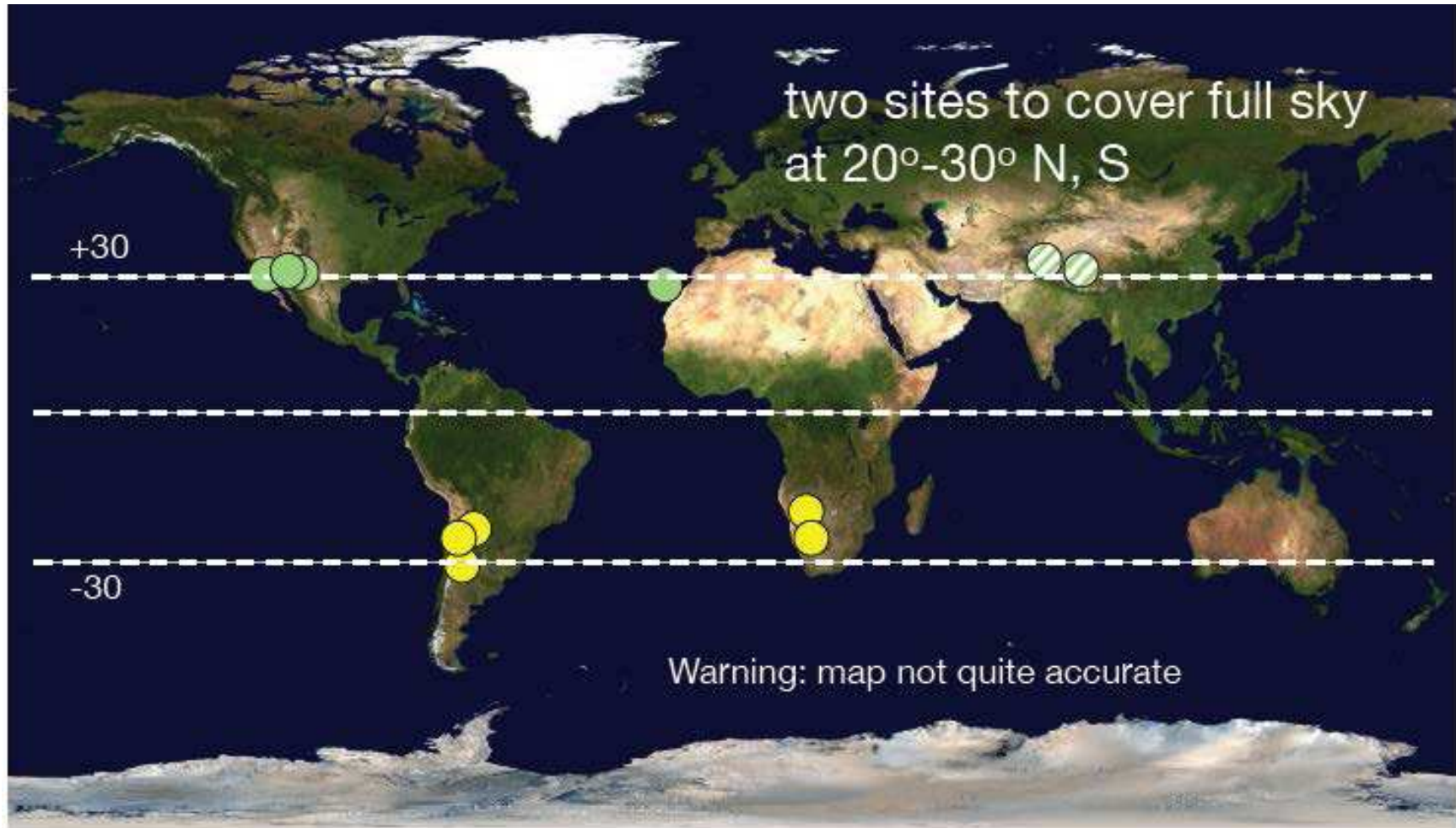


expect ~1000 detected sources

CTA

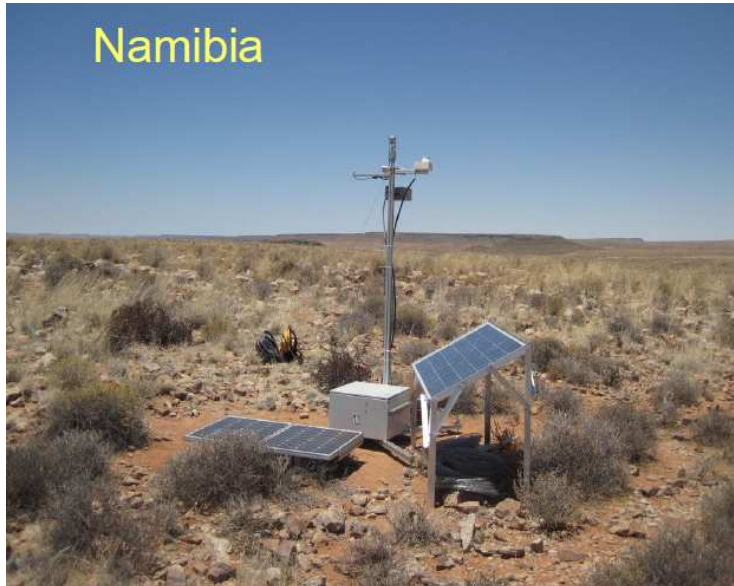
Lokalizacja

Przewiduje się budowę dwóch zestawów teleskopów, na północnej i południowej półkuli.



CTA

Lokalizacja



CTA

Harmonogram

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

Kluczowe decyzje będą podejmowane w najbliższym czasie!

