

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

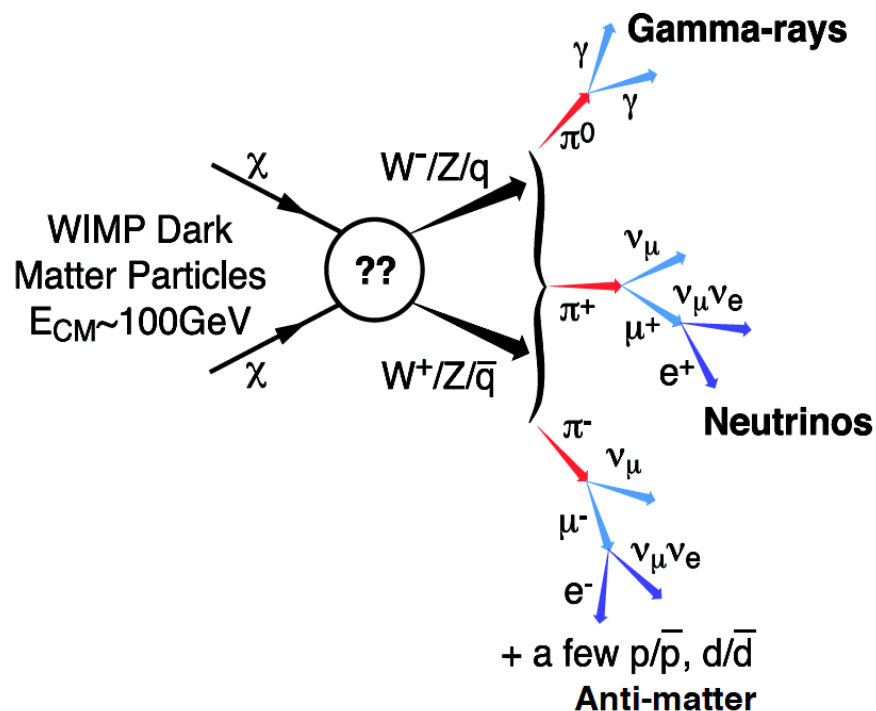
Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład XI

- Kosmiczne promieniowanie gamma najwyższych energii
- ⇒ Teleskopy Czerenkowa i ich wyniki
- ⇒ Projekt CTA
- ⇒ Projekt HAWC
- Astronomia neutrin
- ⇒ Eksperyment Super-Kamiokande

Promieniowanie gamma

Sygnal anihilacji ciemnej materii



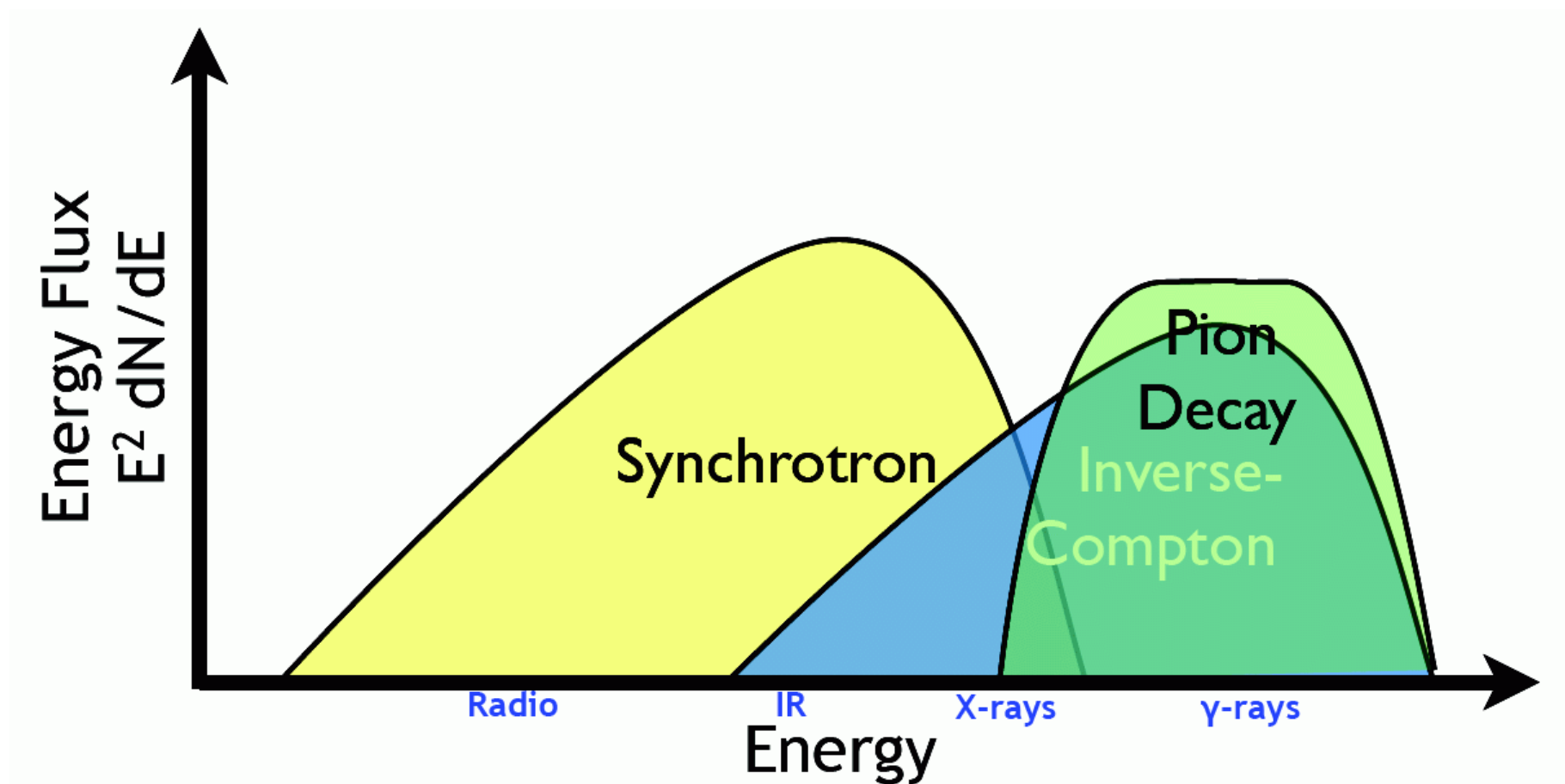
Zalety poszukiwania sygnału anihilacji DM w promieniowaniu gamma:

- 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 gamma

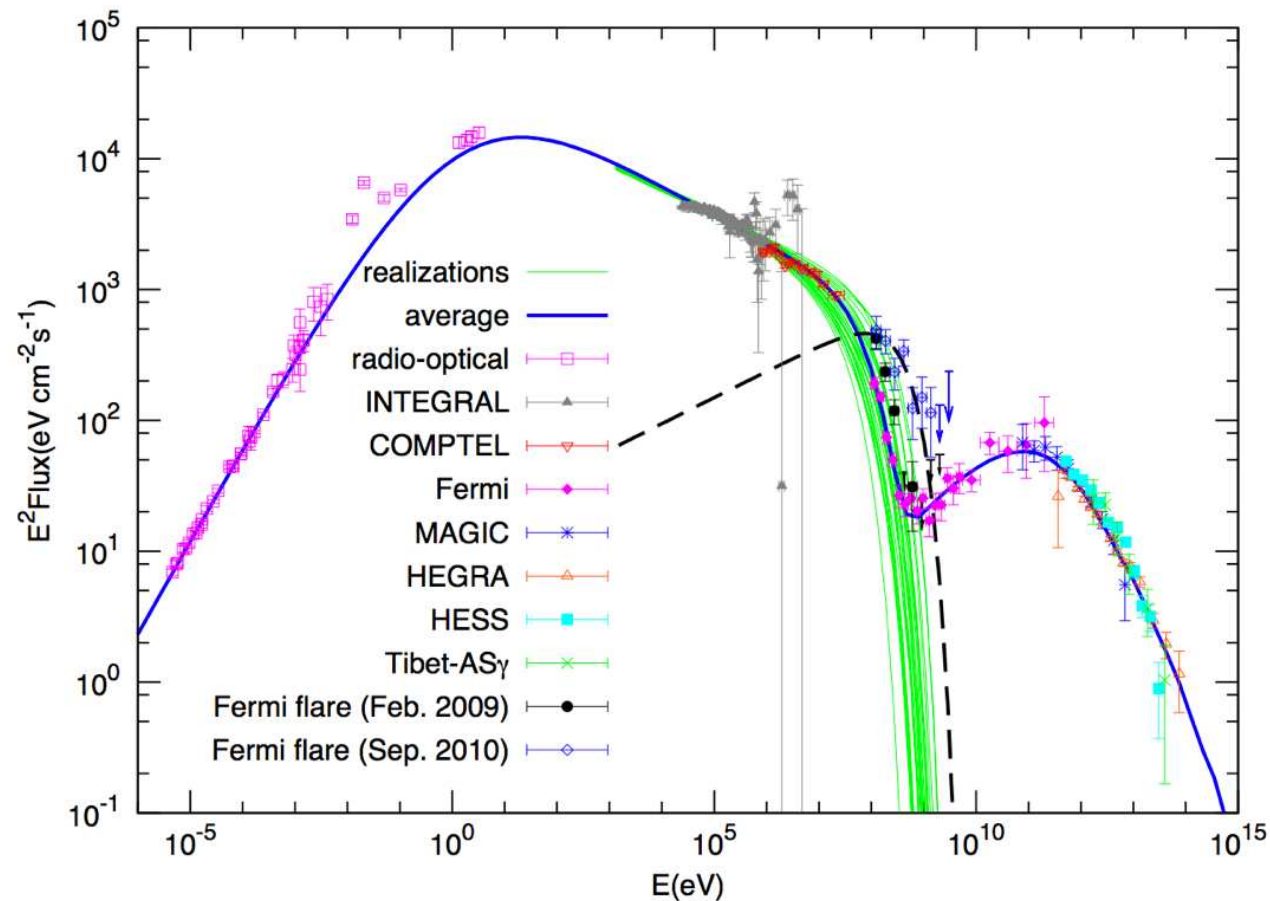
Oczekiwane tło



Promieniowanie gamma

Mgławica Kraba

Widmo rejestrowanego promieniowania gamma



Także rejestracja “tła” mówi nam dużo o procesach zachodzących we Wszechświecie

Promieniowanie gamma

Pochłanianie

Podobnie jak protony, także wysoko-energetyczne fotony mogą oddziaływać z mikrofalowym promieniowaniem tła:

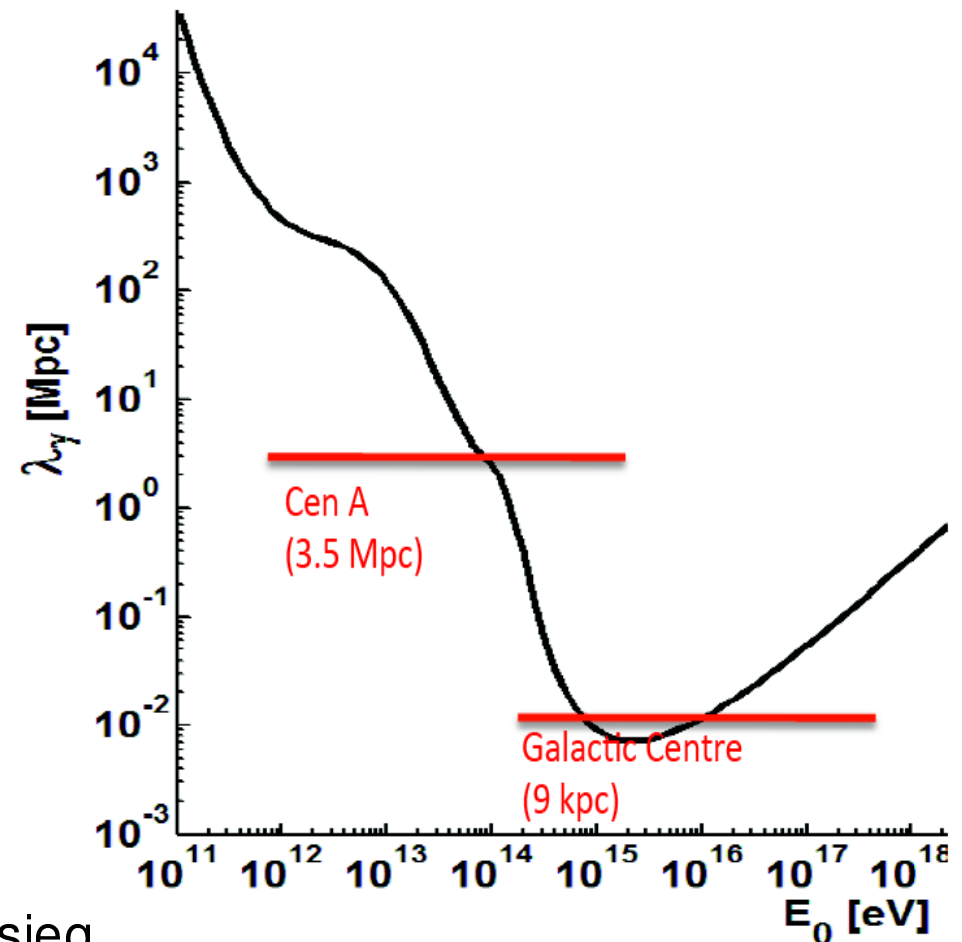
$$\gamma + \gamma_{CMB} \rightarrow e^+ e^-$$

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.

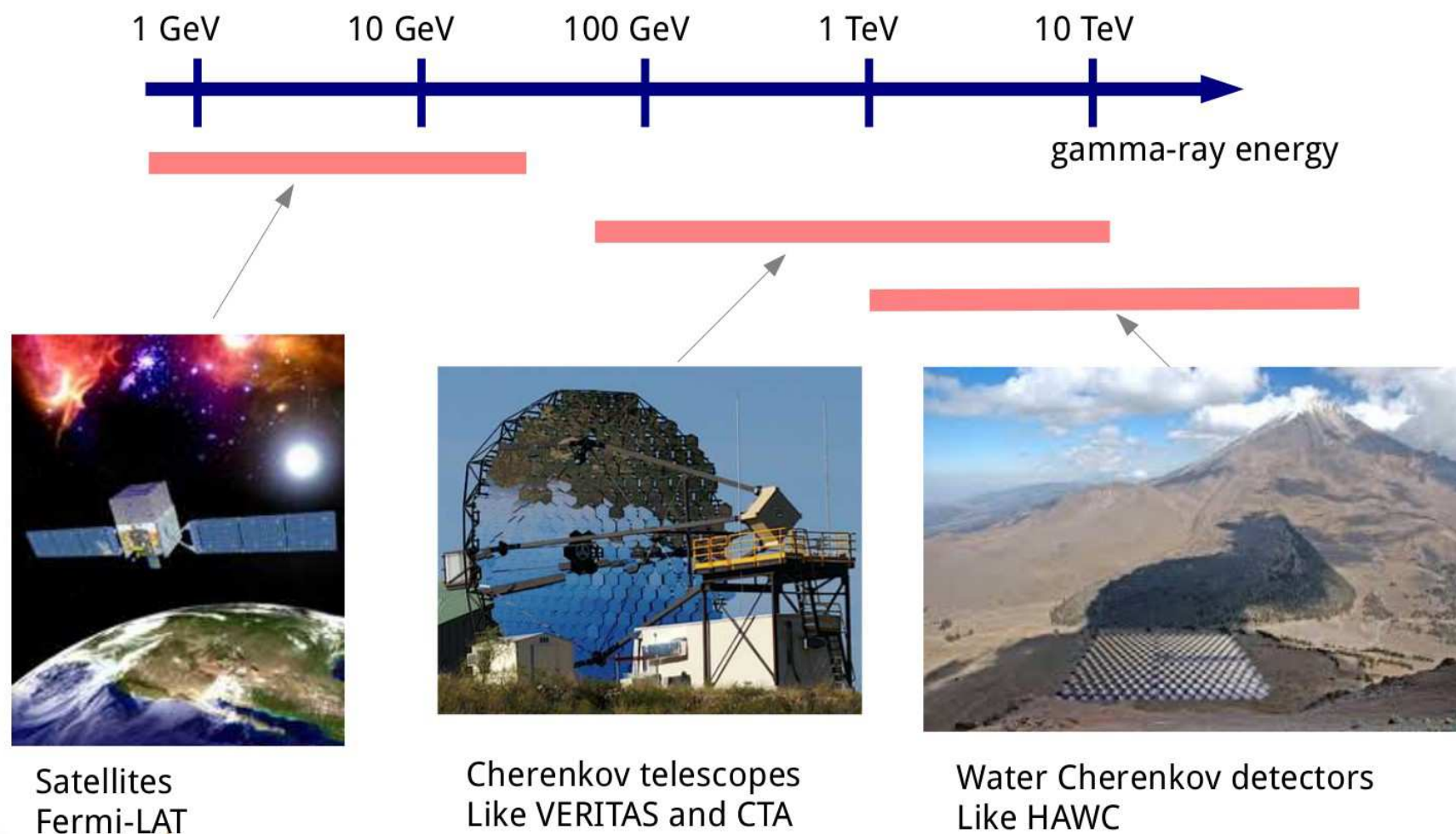
Dla światła widzialnego ok. 100 GeV.

Brak wyraźnego odcięcia, ale ograniczony zasięg...



Promieniowanie gamma

Metody detekcji



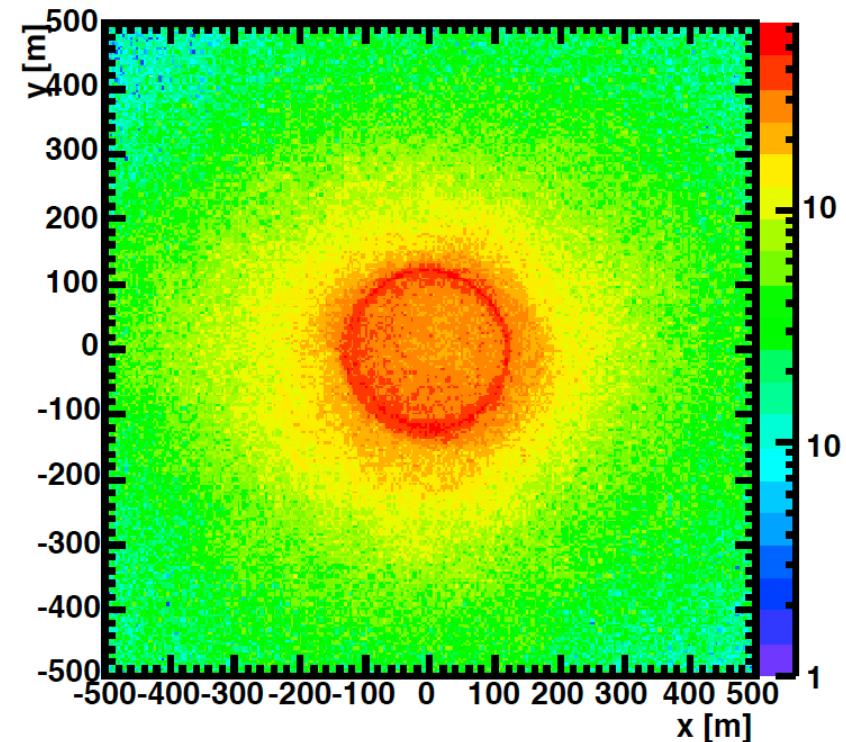
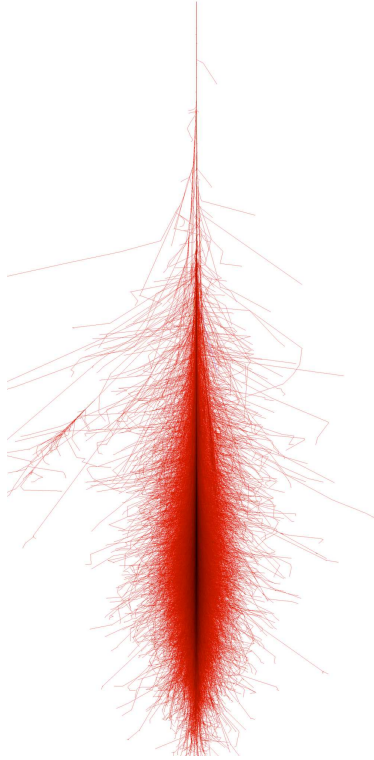
Promieniowanie gamma

Promieniowanie Czerenkowa

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

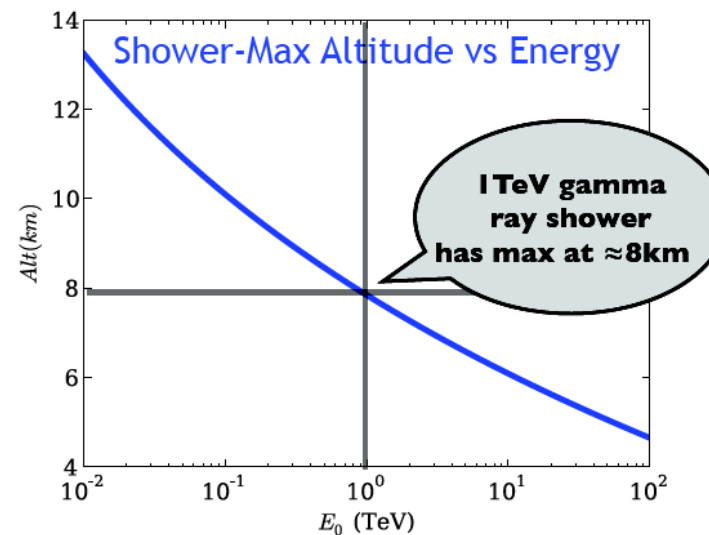
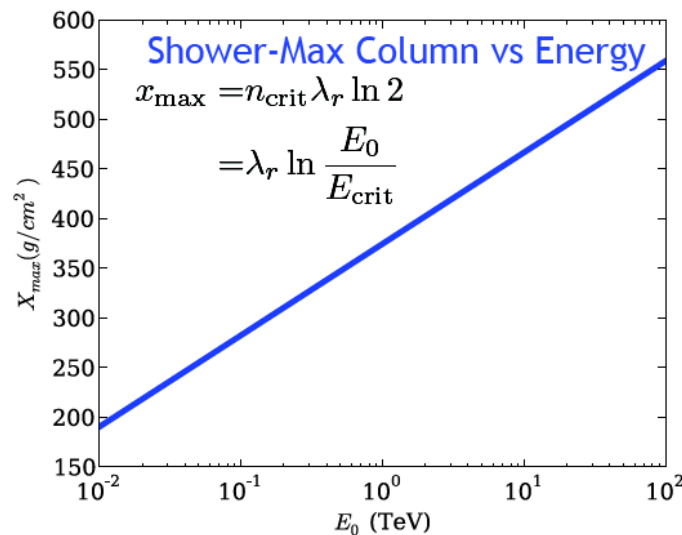
Podobnie jak w przypadku składowej E-M wielkich pęków atmosferycznych

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...

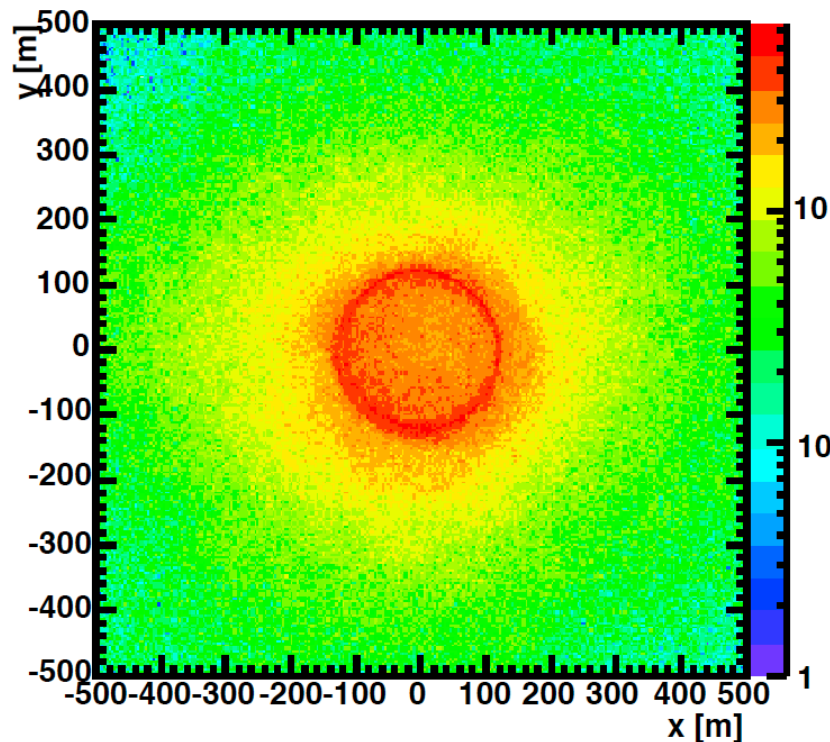
Promieniowanie Czerenkowa emitowane przez taką kaskadę oświetla obszar o promieniu ok. 100 m, gęstość fotonów UV ok. $100/\text{m}^2$

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).

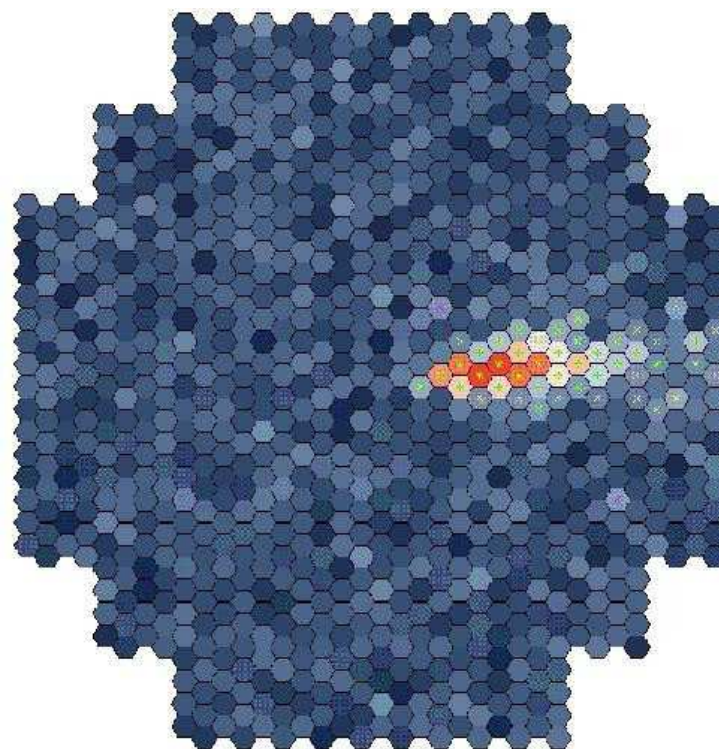
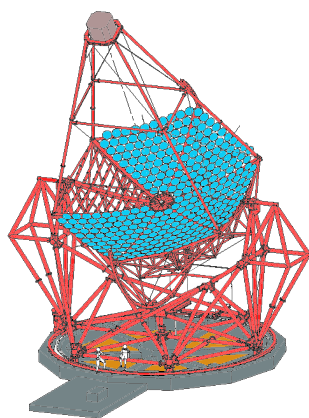
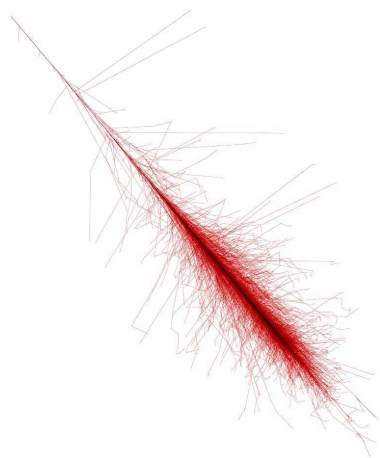
Znacznie większą dokładność pomiaru uzyskujemy ustawiając na Ziemi **teleskop promieniowania Czerenkowa**

Promieniowanie gamma

Detekcja

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

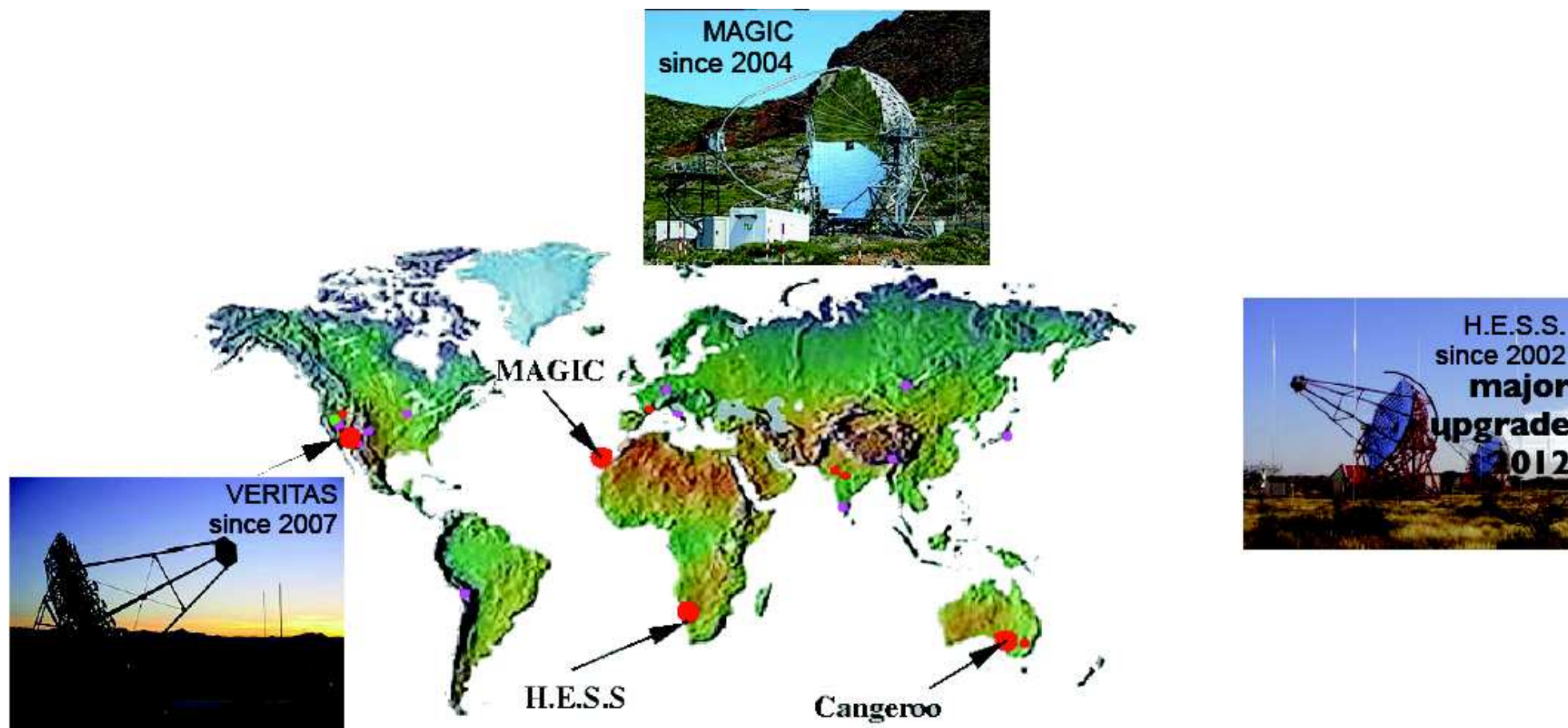
Jeśli teleskop znajdzie się w polu oświetlonym przez kaskadę, zrobi jej “zdjęcie”



Promieniowanie gamma

Instrumenty

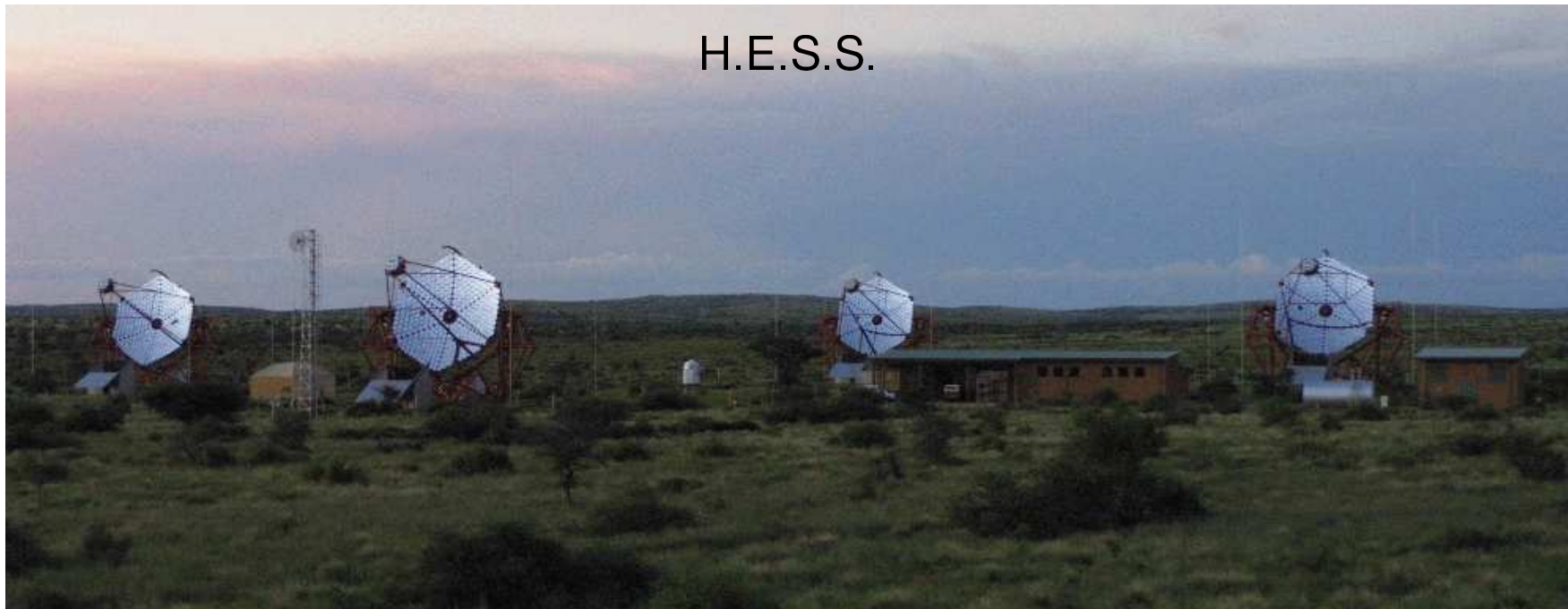
Naziemne detektory promieniowania gamma najwyższych energii



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

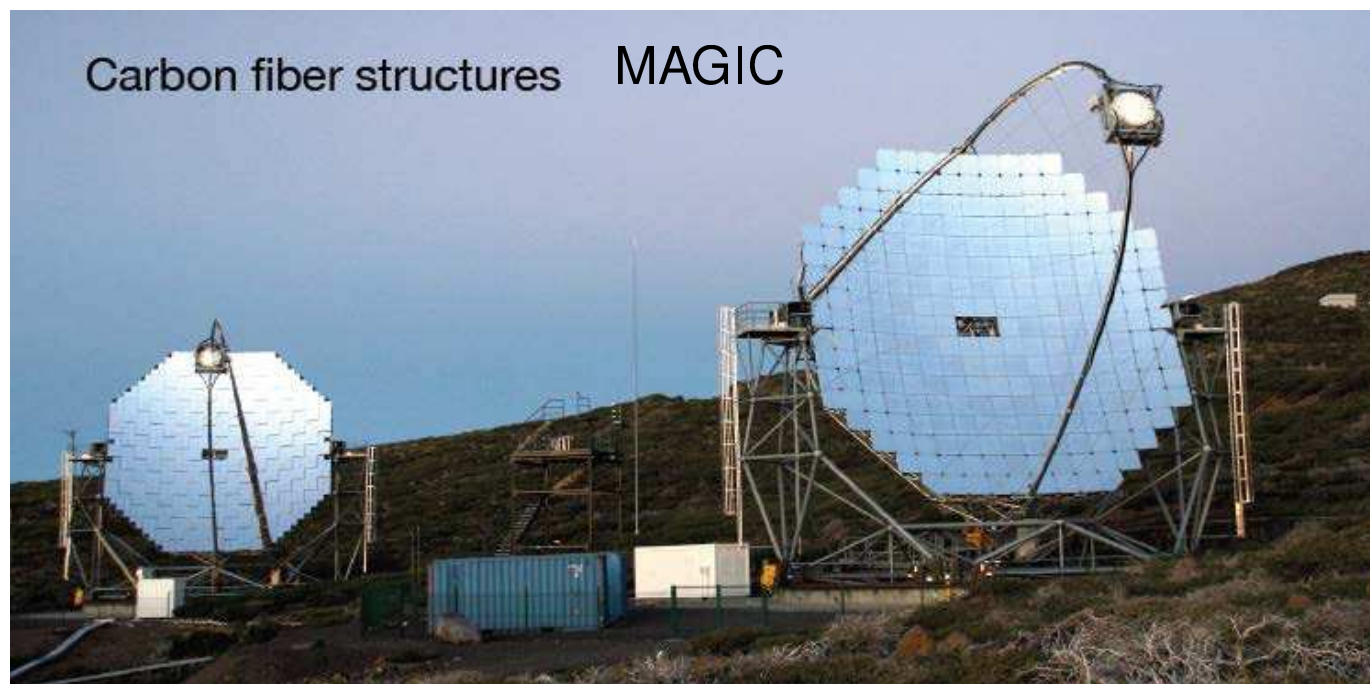
Atmospheric Cherenkov Telescopes (ACT)



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



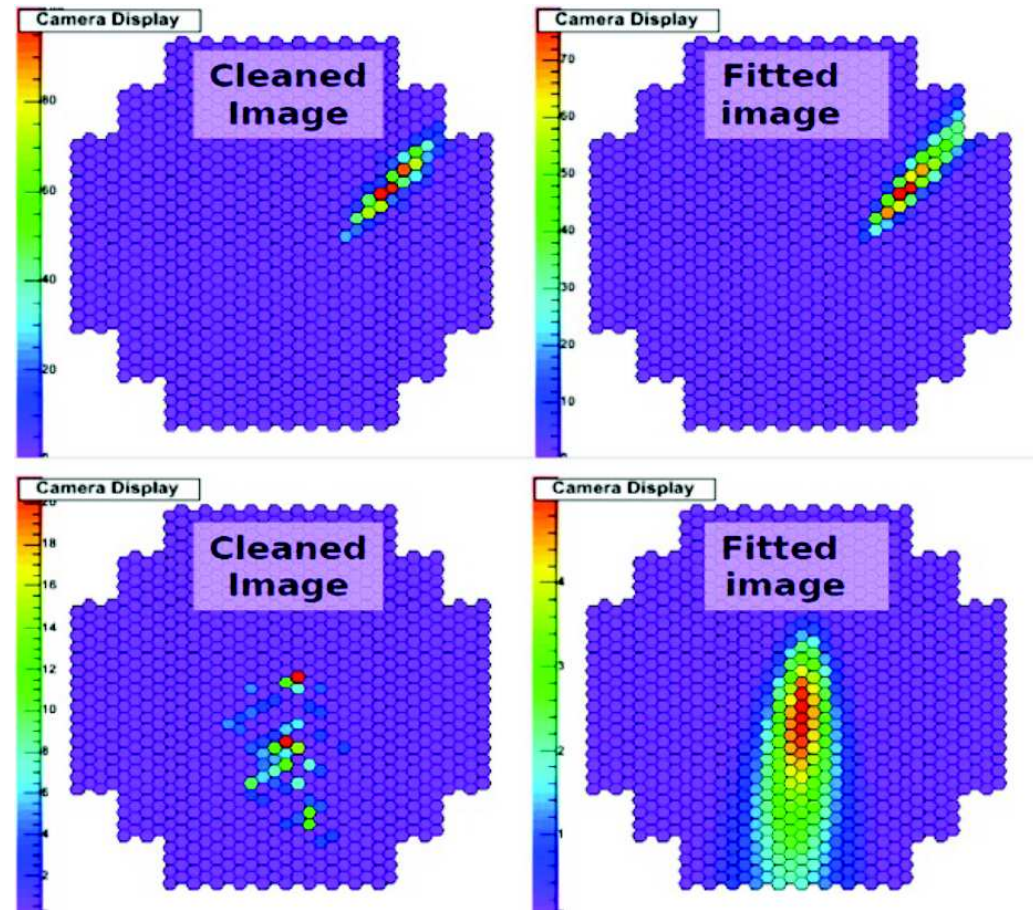
Teleskopy Czerenkowa

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

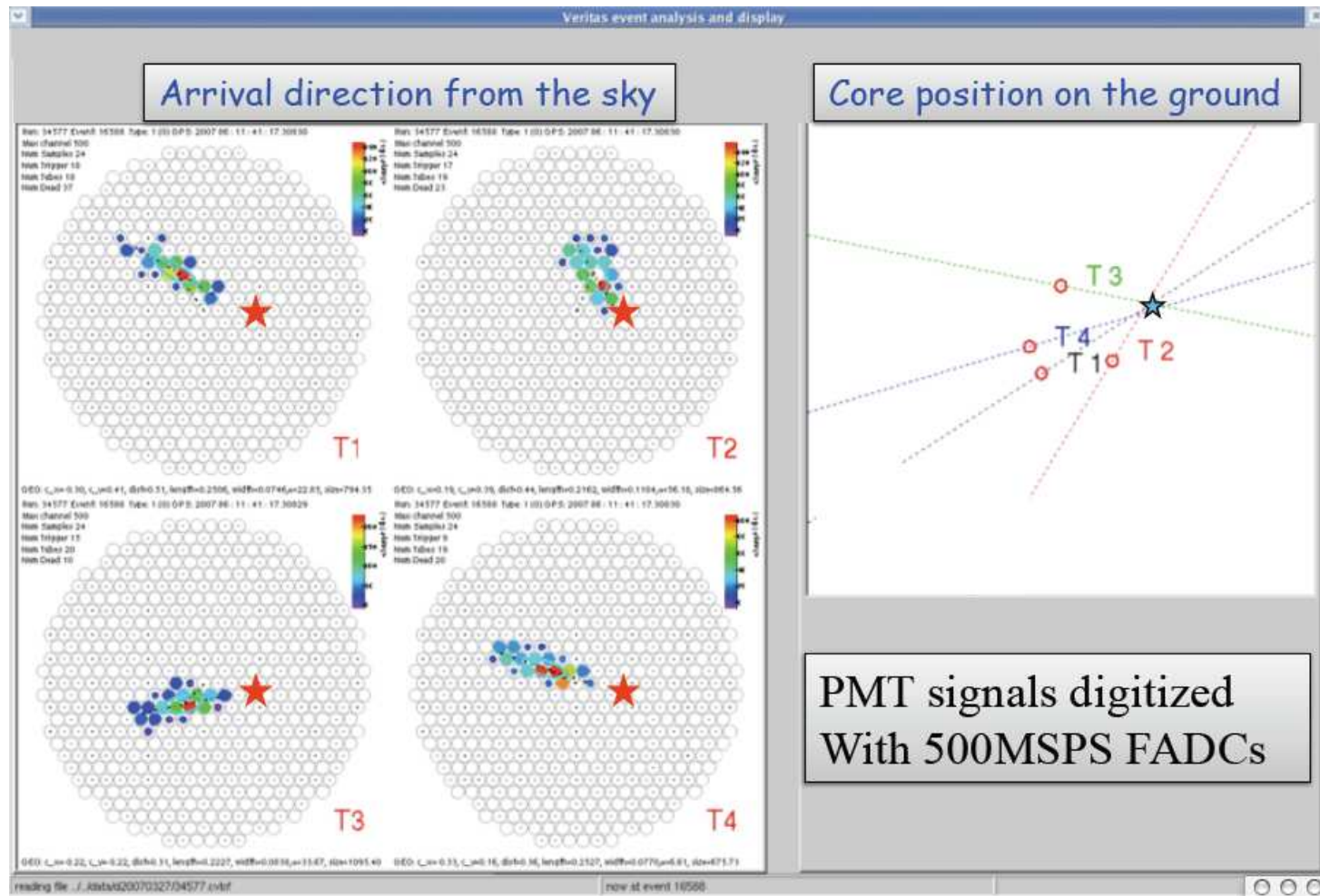
Kształt obrazu pozwala nam także **eliminować tło** od wielkich pęków atmosferycznych



Teleskopy Czerenkowa

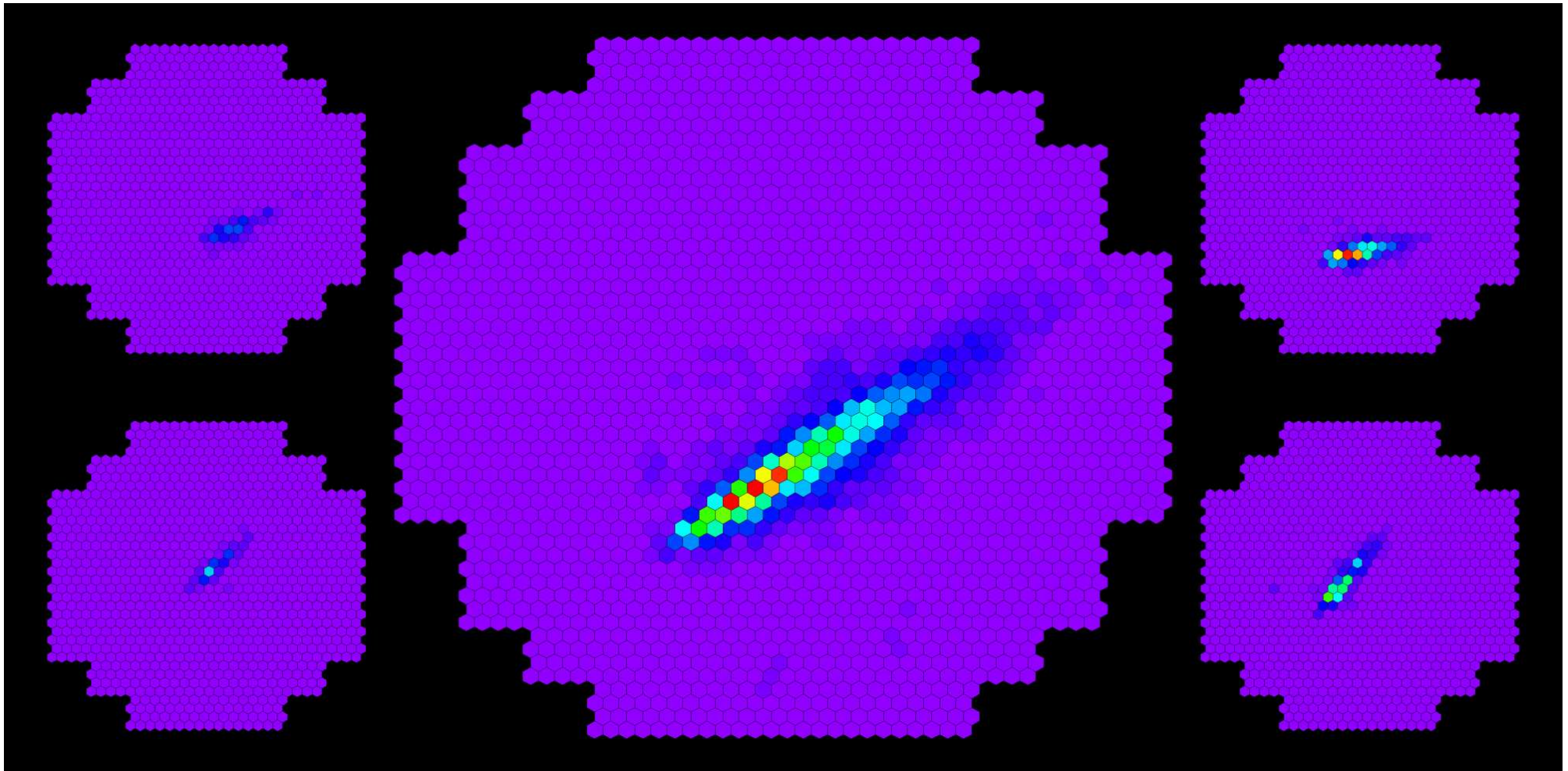
Rekonstrukcja

Wyznaczenie kierunku znacznie dokładniejsze dla obserwacji kilkoma teleskopami



Rekonstrukcja

Wyznaczenie kierunku znacznie dokładniejsze dla obserwacji kilkoma teleskopami

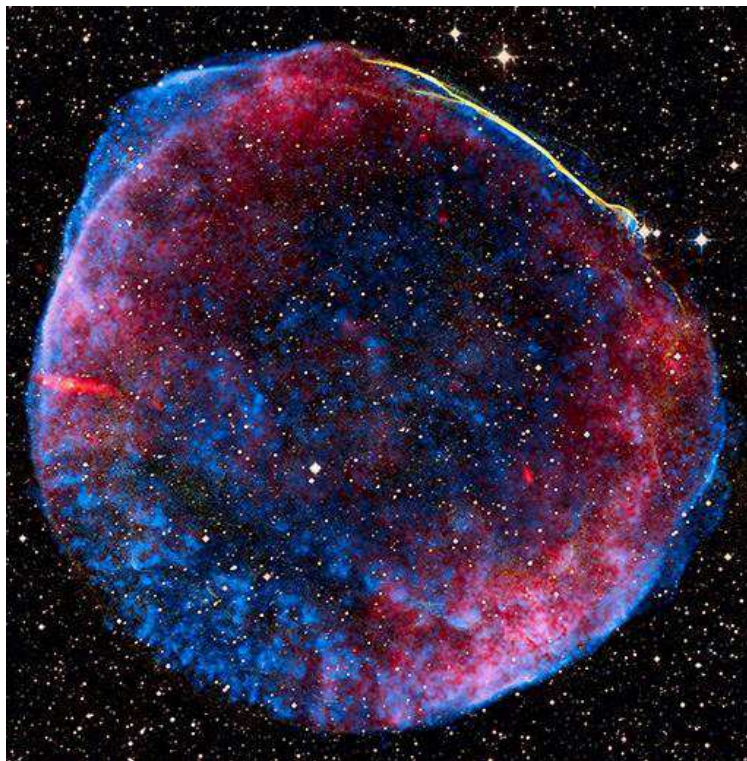


HESS

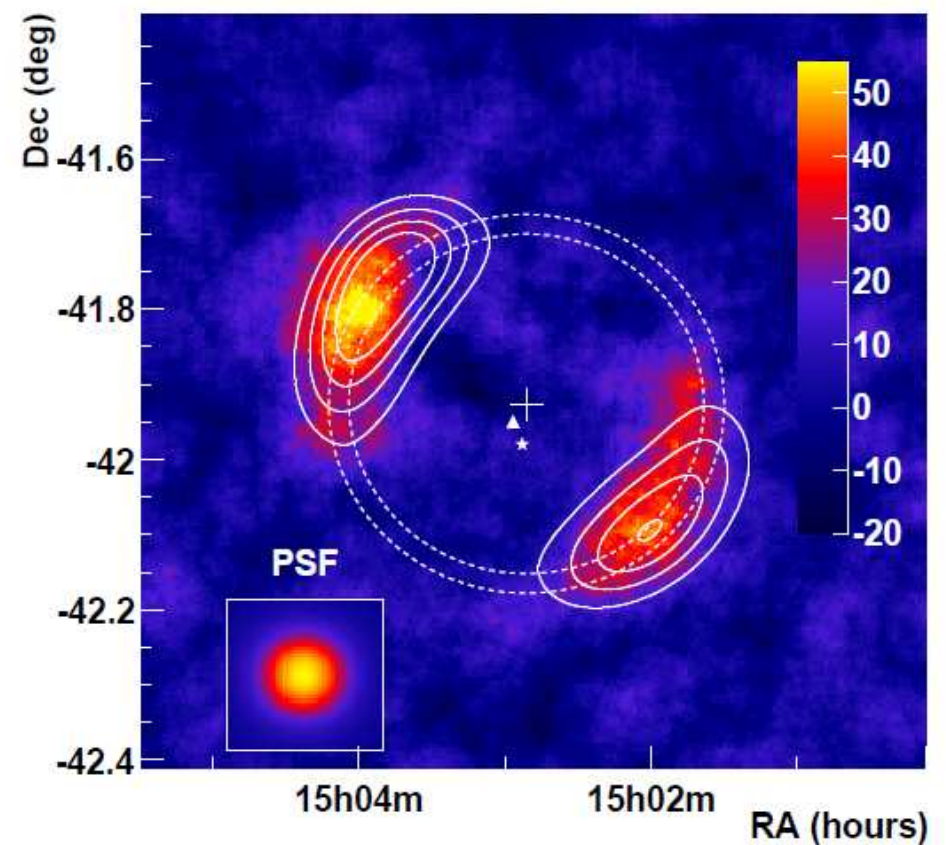
Wyniki

Obserwacja promieniowania TeV z SNR - potwierdzenie przyspieszania CR

SN1006 w prom. radiowym, optycznym, X



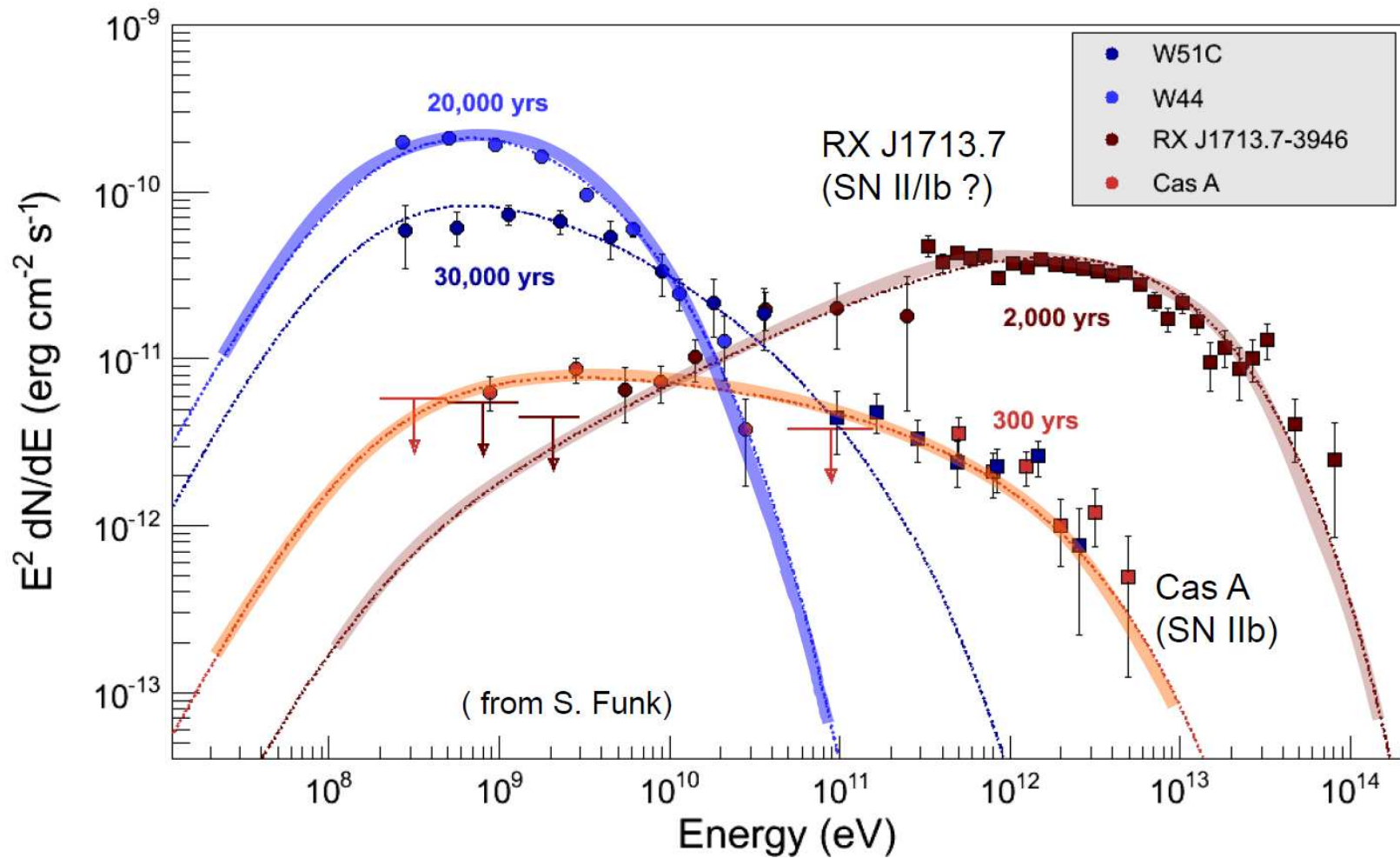
i w promieniowaniu TeV (HESS)



HESS

Wyniki

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

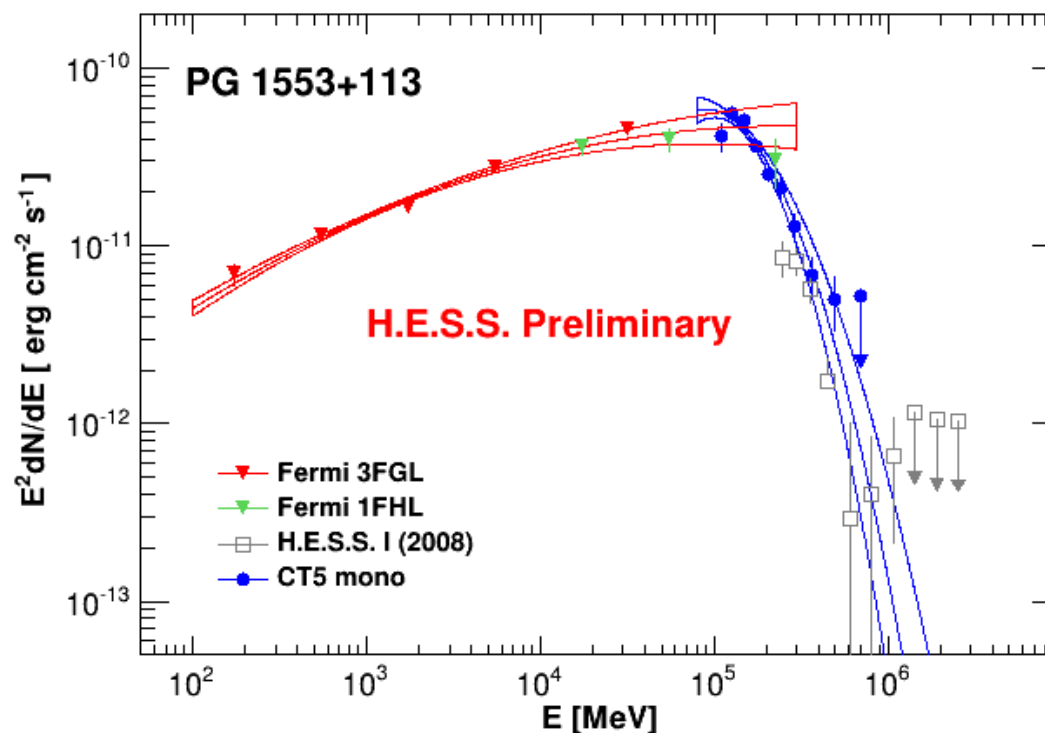
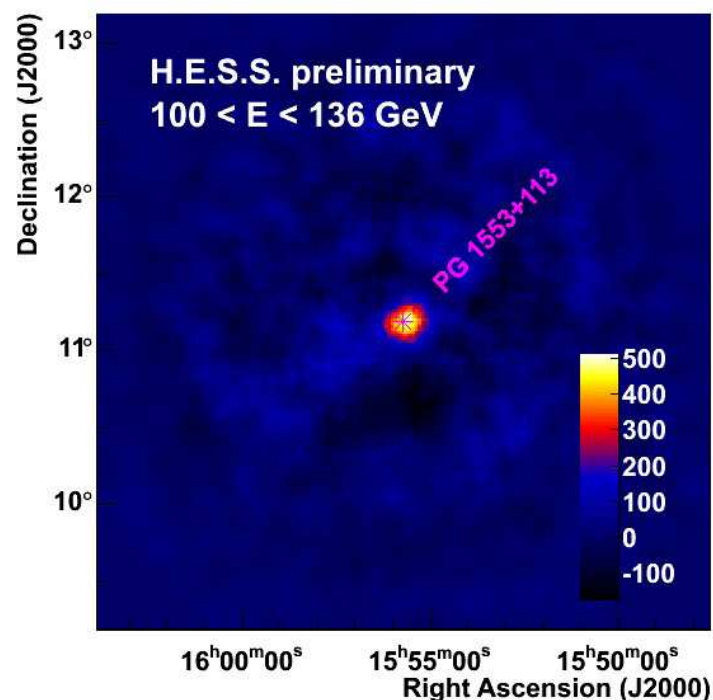


Wyniki

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

Wysoka precyzja: jednoczesny pomiar rozkładu przestrzennego i spektrum.

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



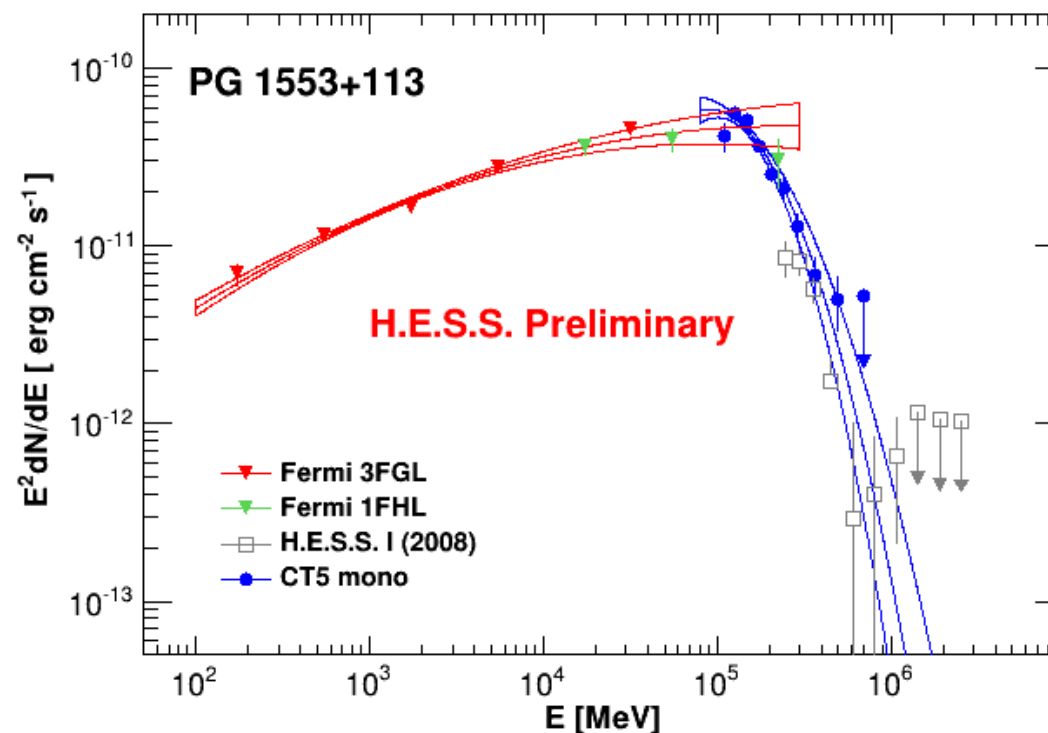
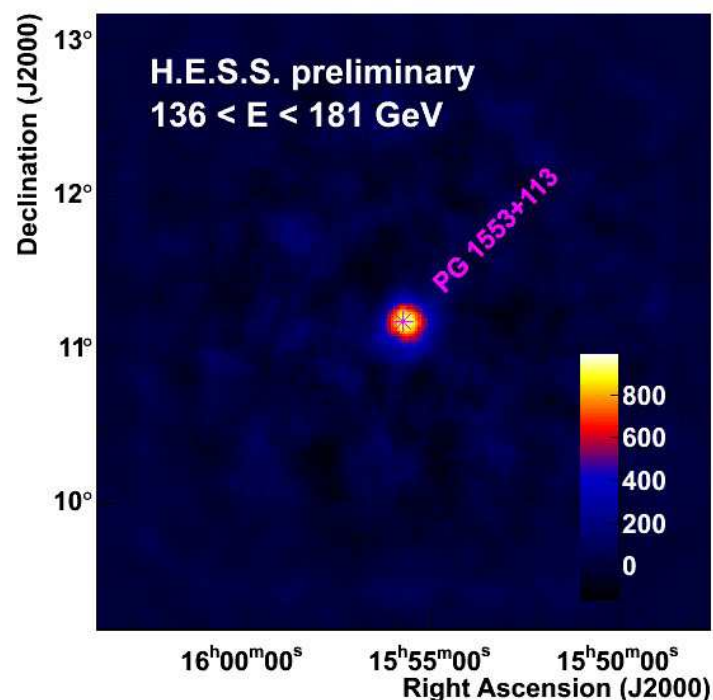
HESS

Wyniki

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

Wysoka precyzja: jednoczesny pomiar rozkładu przestrzennego i spektrum.

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

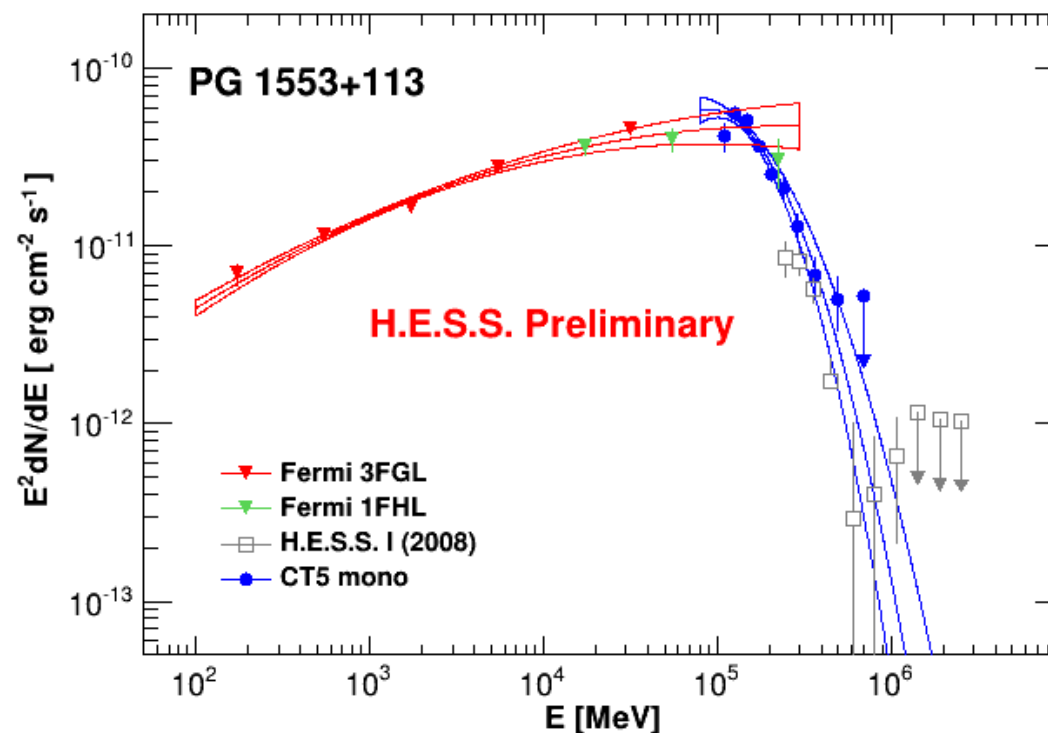
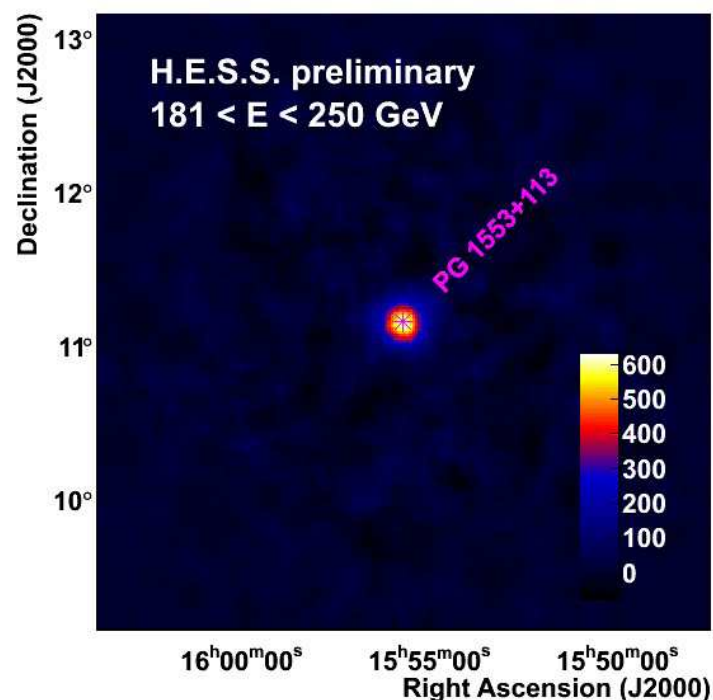


Wyniki

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

Wysoka precyzja: jednoczesny pomiar rozkładu przestrzennego i spektrum.

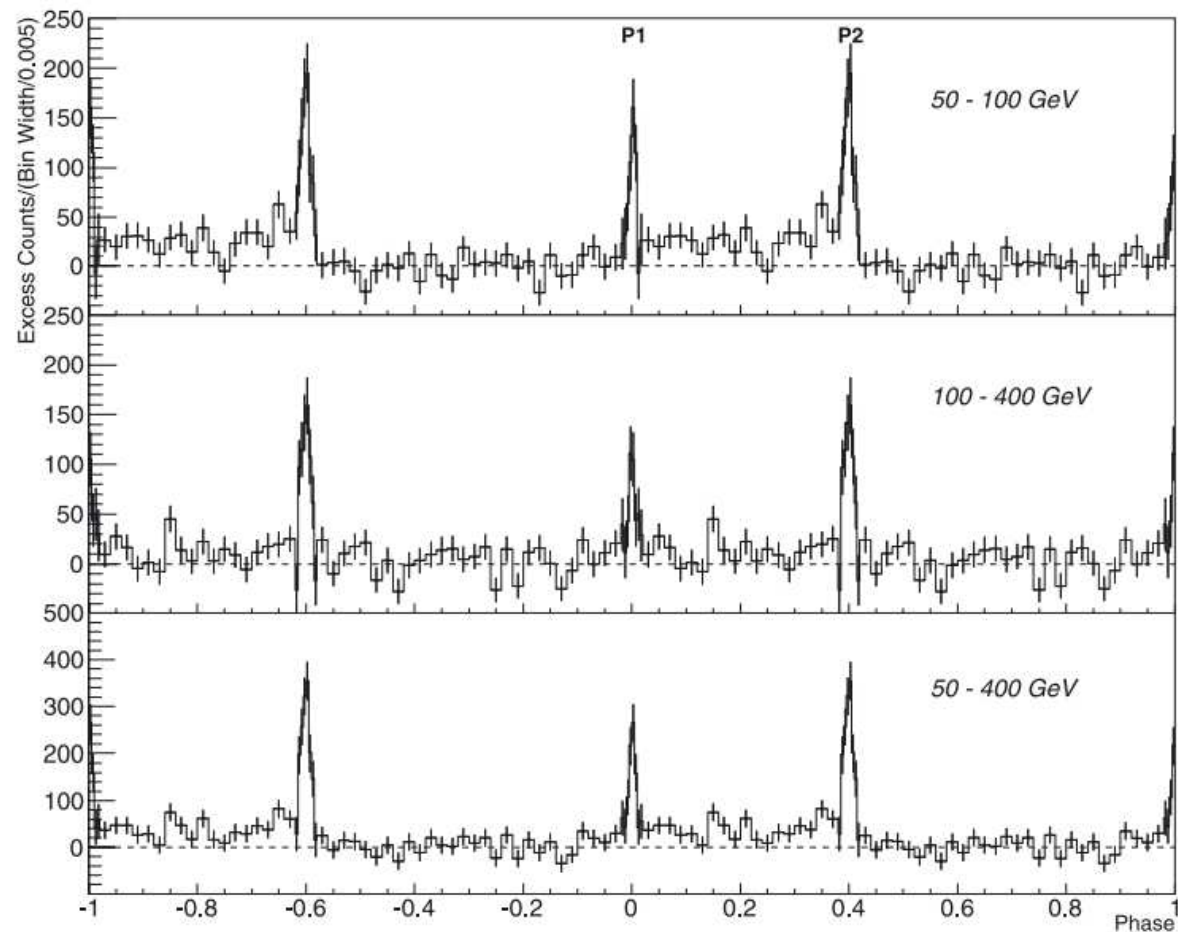
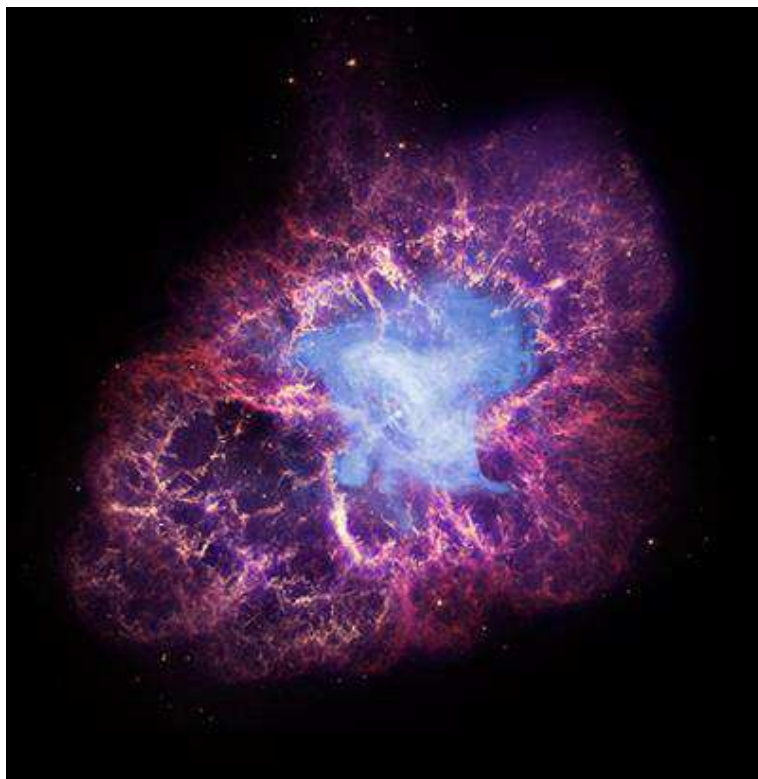
Blazar PG1553+113 ($z \sim 0.5$)



MAGIC

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

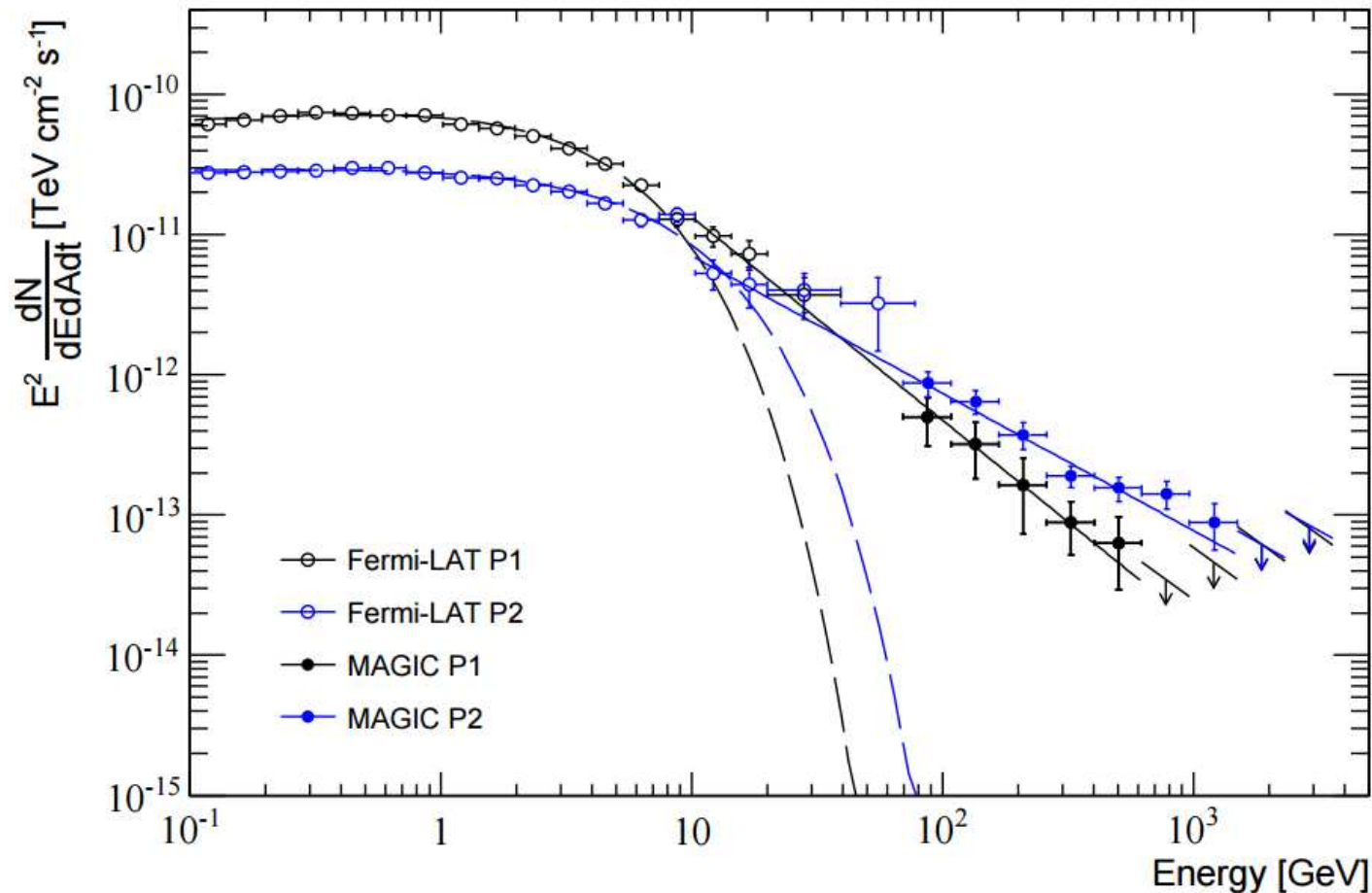
Bardzo dobra rozdzielczość czasowa: natężenie sygnału z Mgławicy Kraba ($T=33\text{ms}$)



MAGIC

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

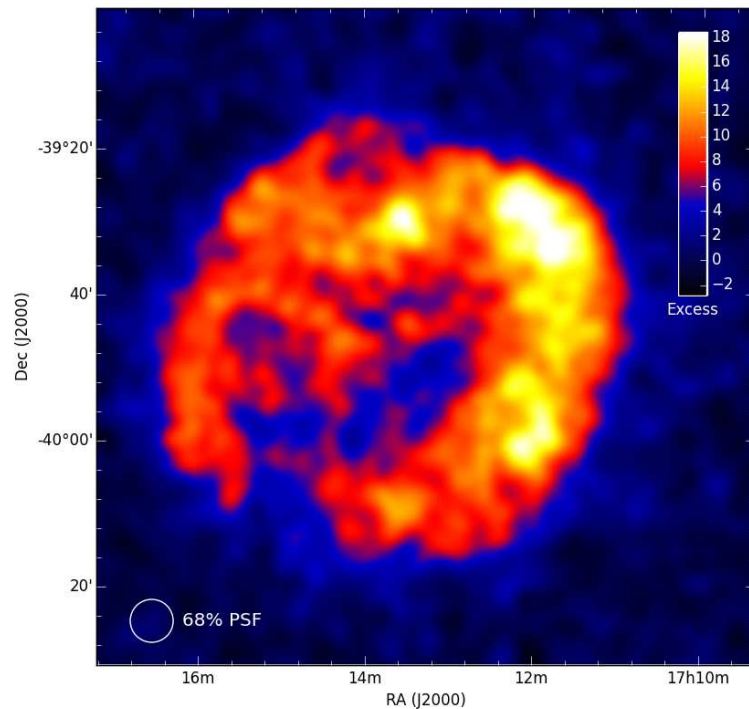
Bardzo dobra rozdzielczość czasowa: porównanie widma dwóch pulsów



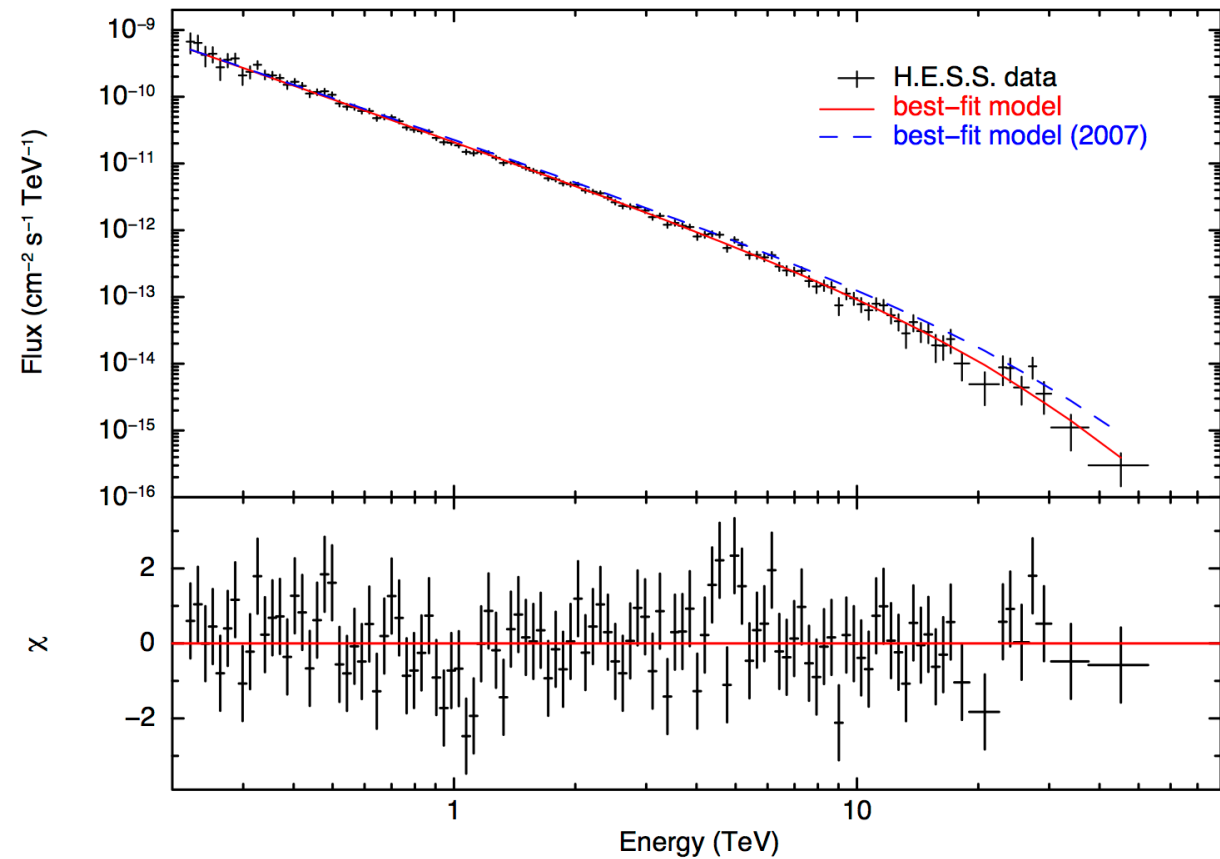
Wyniki

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

RX J1713.7-3946 (SNR)



$E > 250 \text{ GeV}$

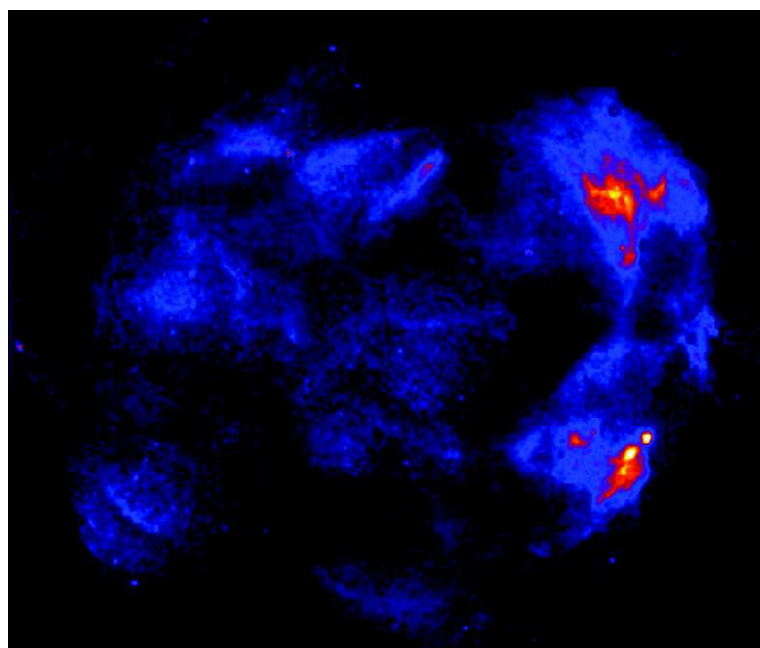


Emisja promieniowania w zakresie TeV związana z przyspieszaniem cząstek

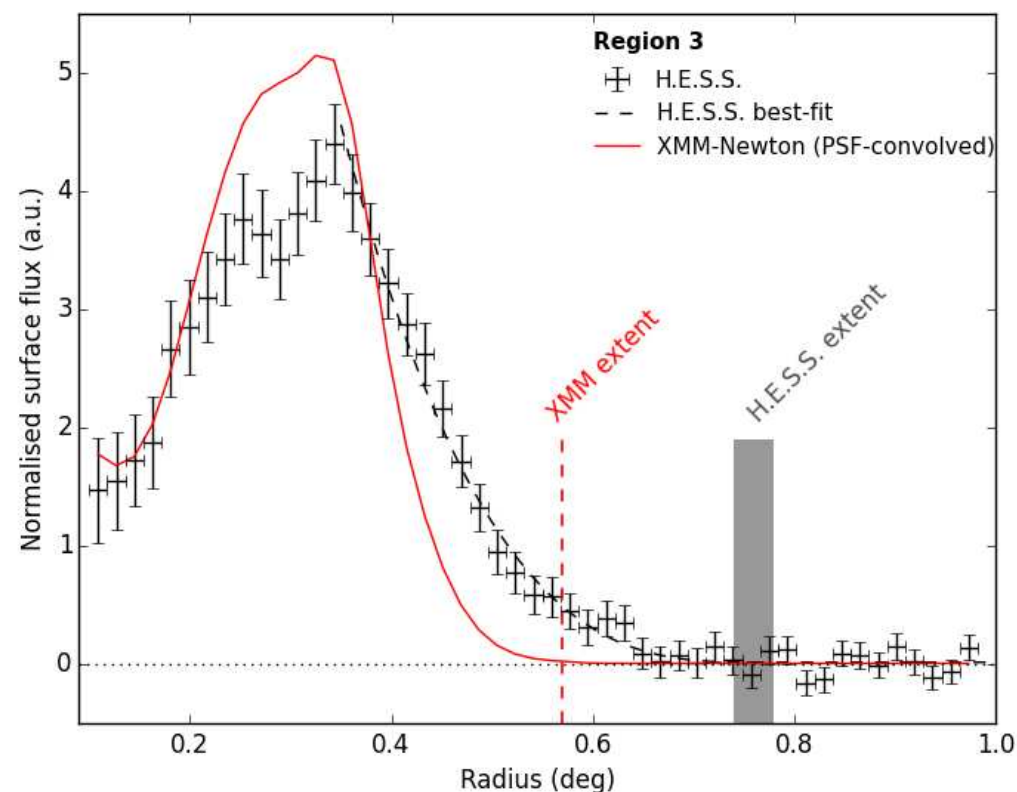
Wyniki

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

RX J1713.7-3946 (SNR)



X-ray

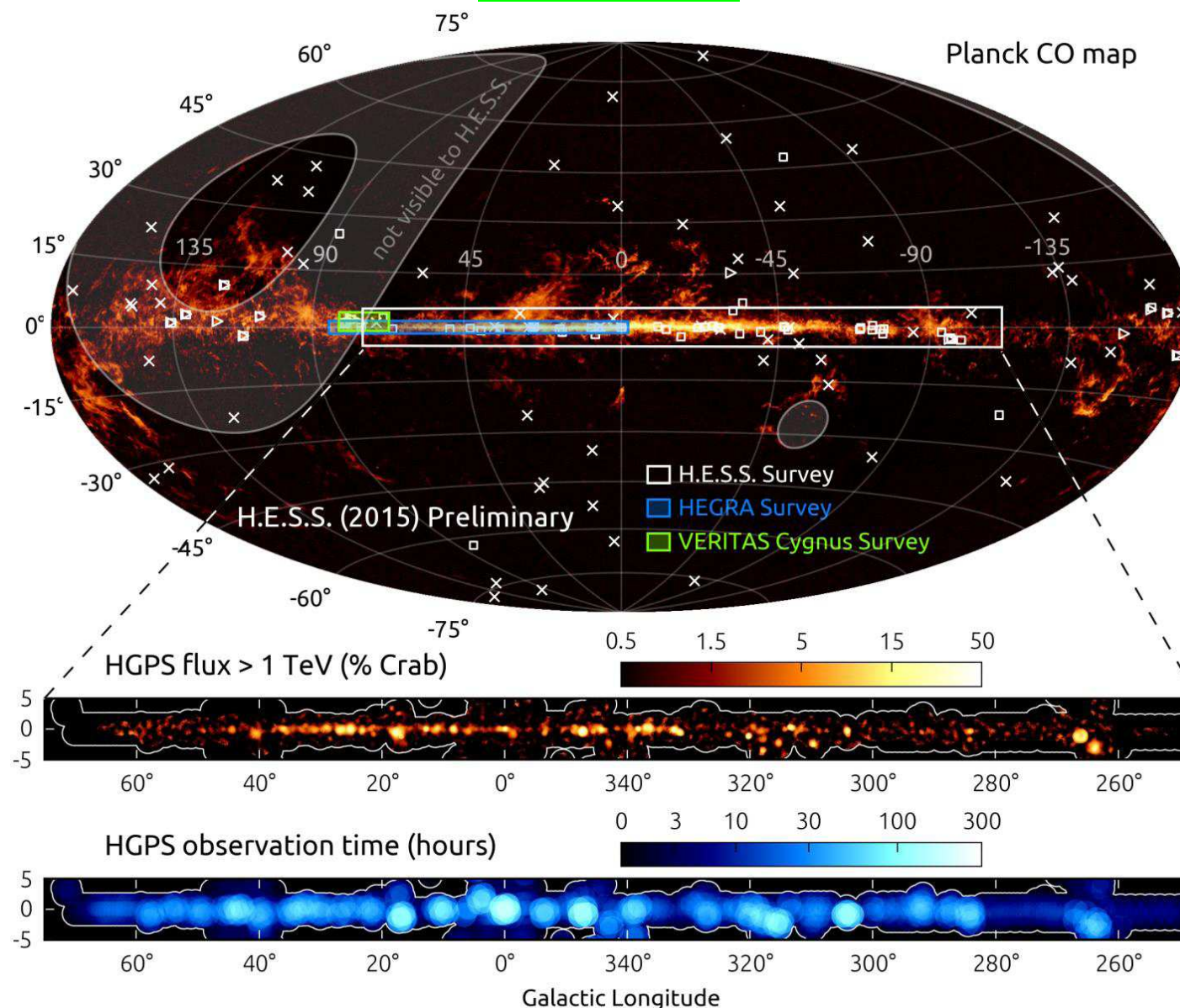


Oddziaływanie przyspieszonych cząstek z otaczającą materia (rozpady π^0)

Wyniki

Skan płaszczyzny Galaktyki.

HESS



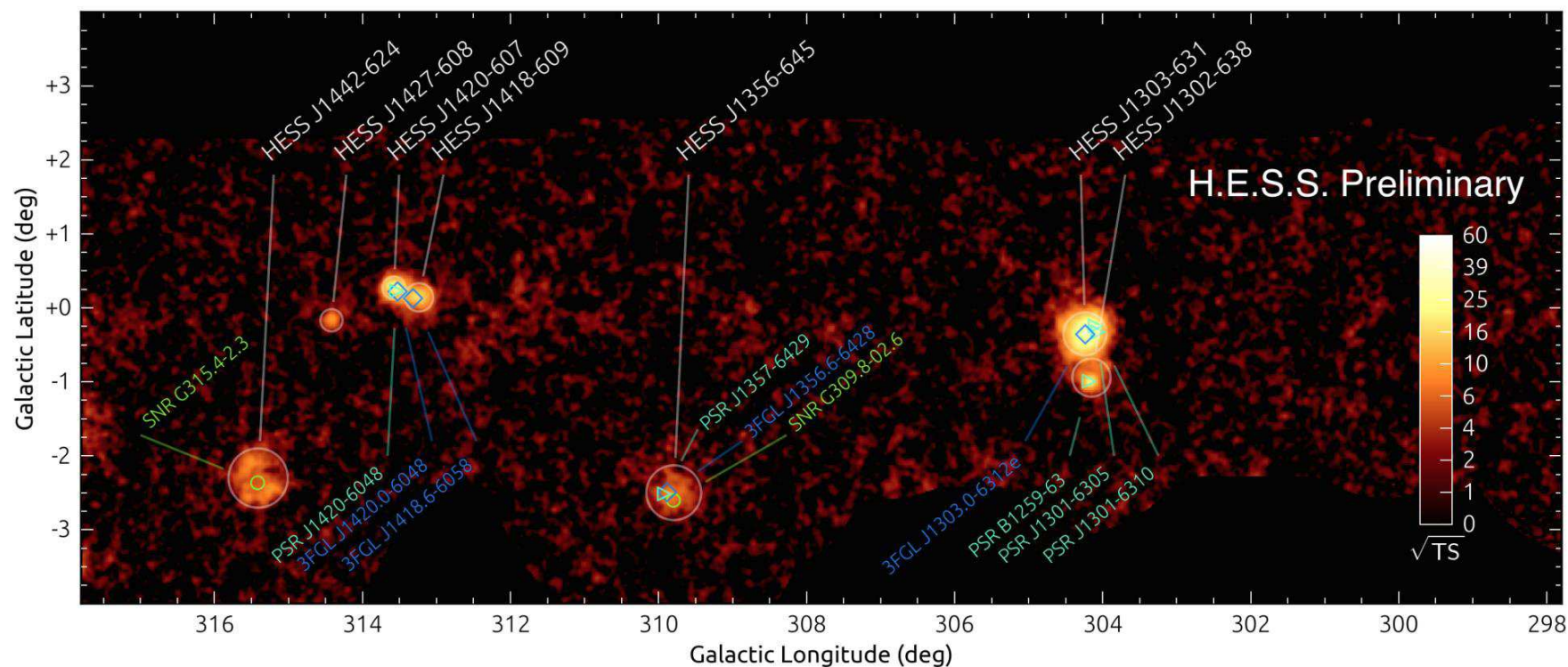
HESS

Wyniki

Skan płaszczyzny Galaktyki.

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

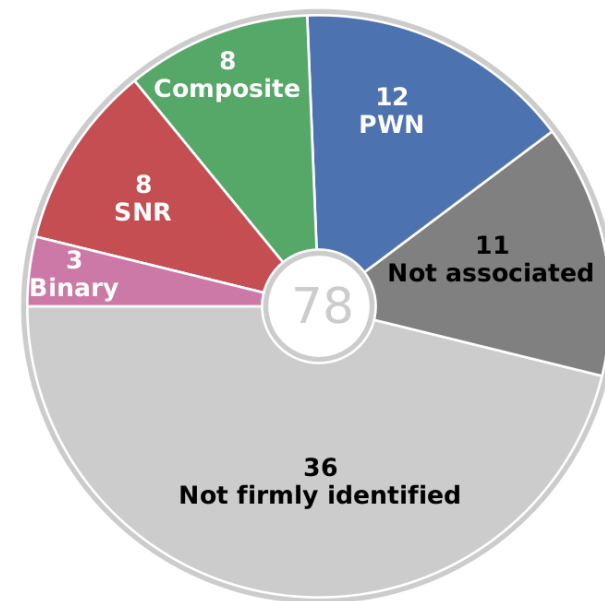
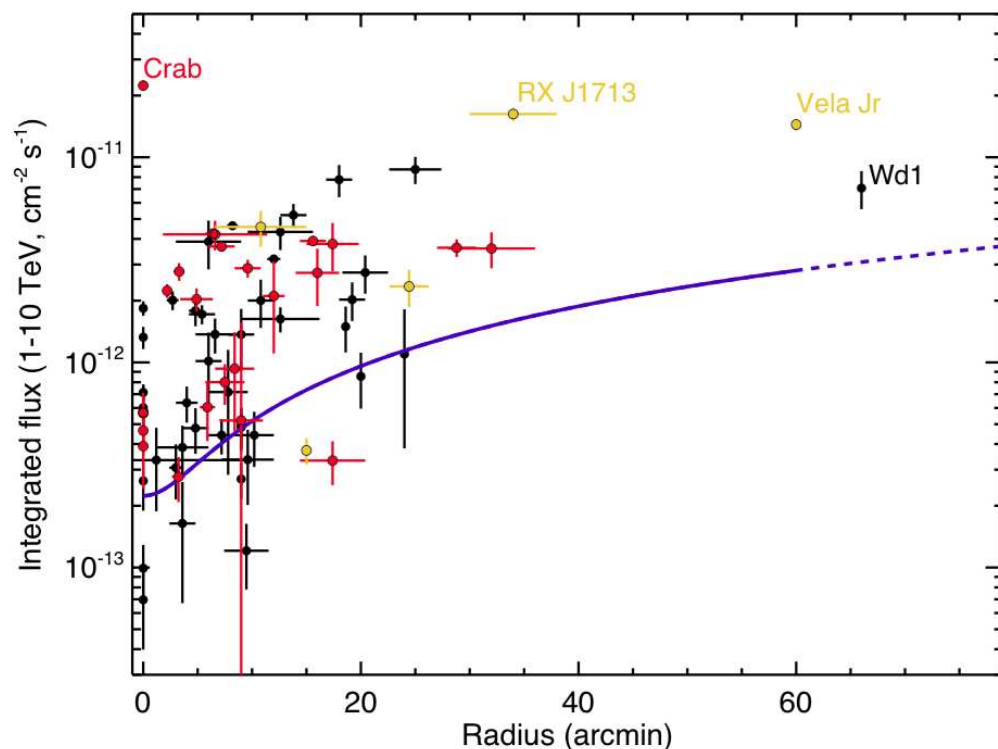
Zidentyfikowano 78 źródeł promieniowania gamma w zakresie TeV



HESS

Wyniki

Zmierzone natężenie, rozmiary i typ źródeł znalezionych w płaszczyźnie Galaktyki

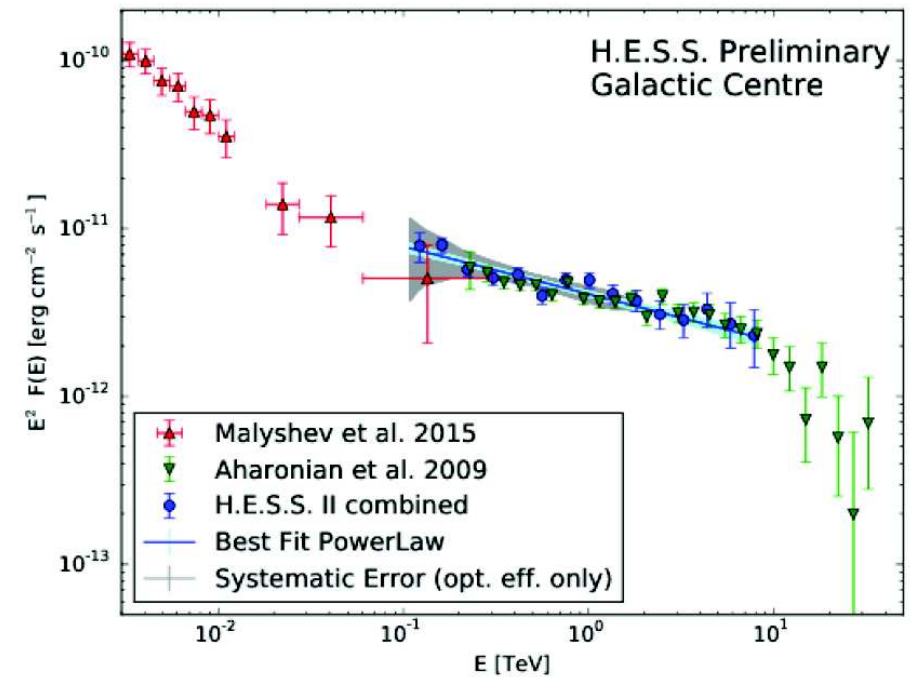
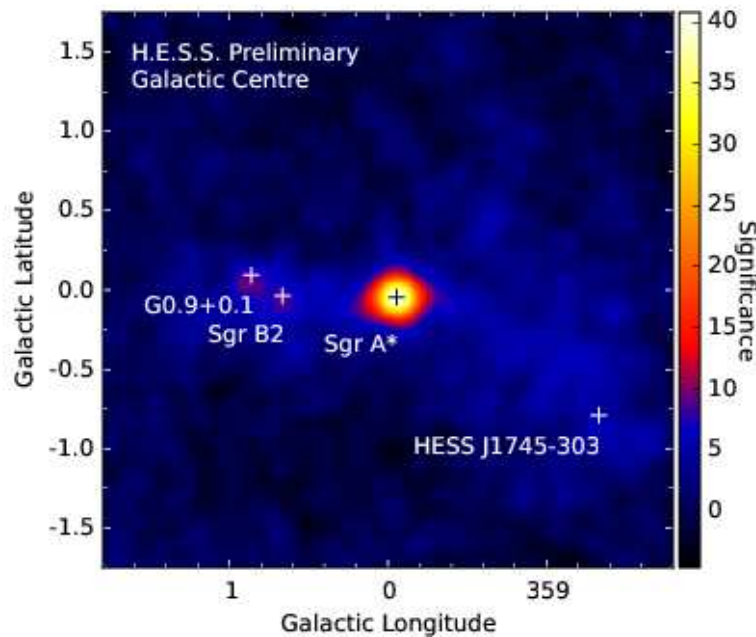


W większości przypadków identyfikacja nie jest jednoznaczna...

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

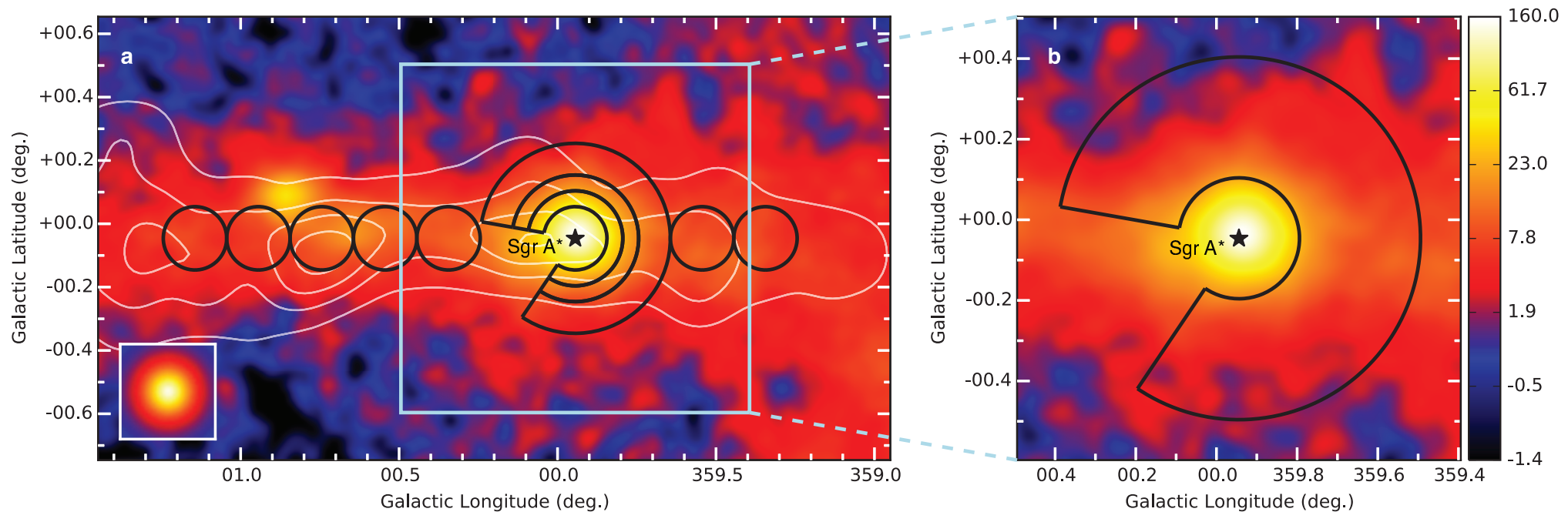
Centrum Galaktyki

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



Centrum Galaktyki

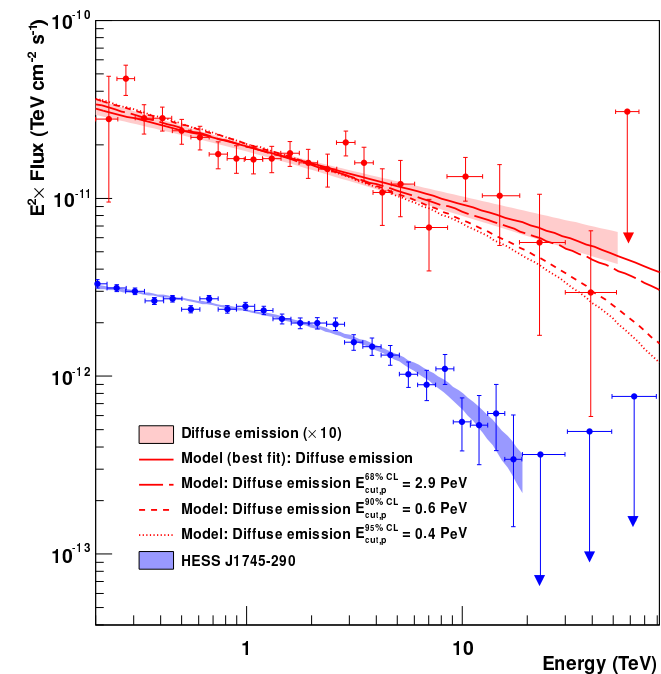
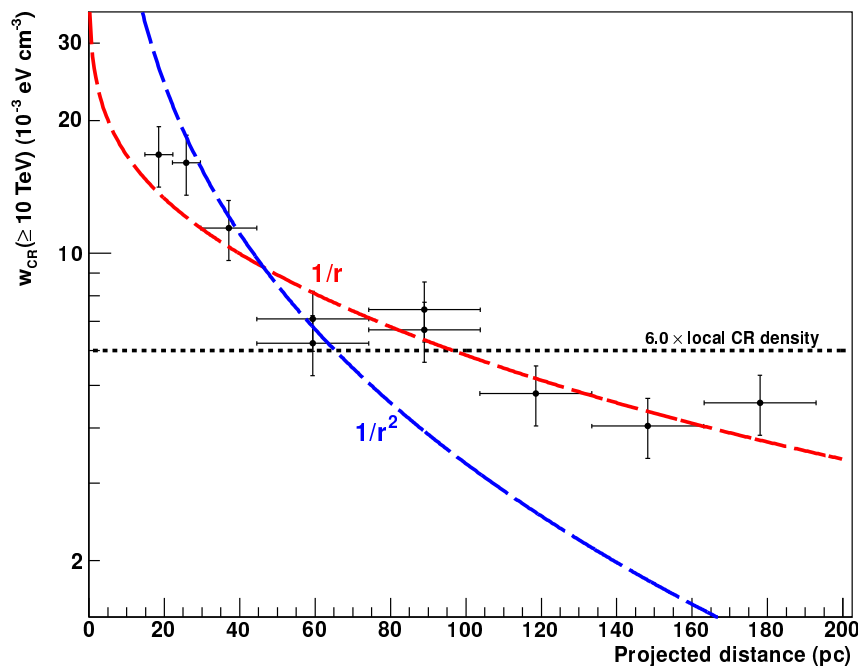
Przy dokładniejszej analizie widać, że źródłem promieniowania jest nie tylko Sag A*, ale także otaczający go obszar zimnej materii międzygwiazdnej.



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.

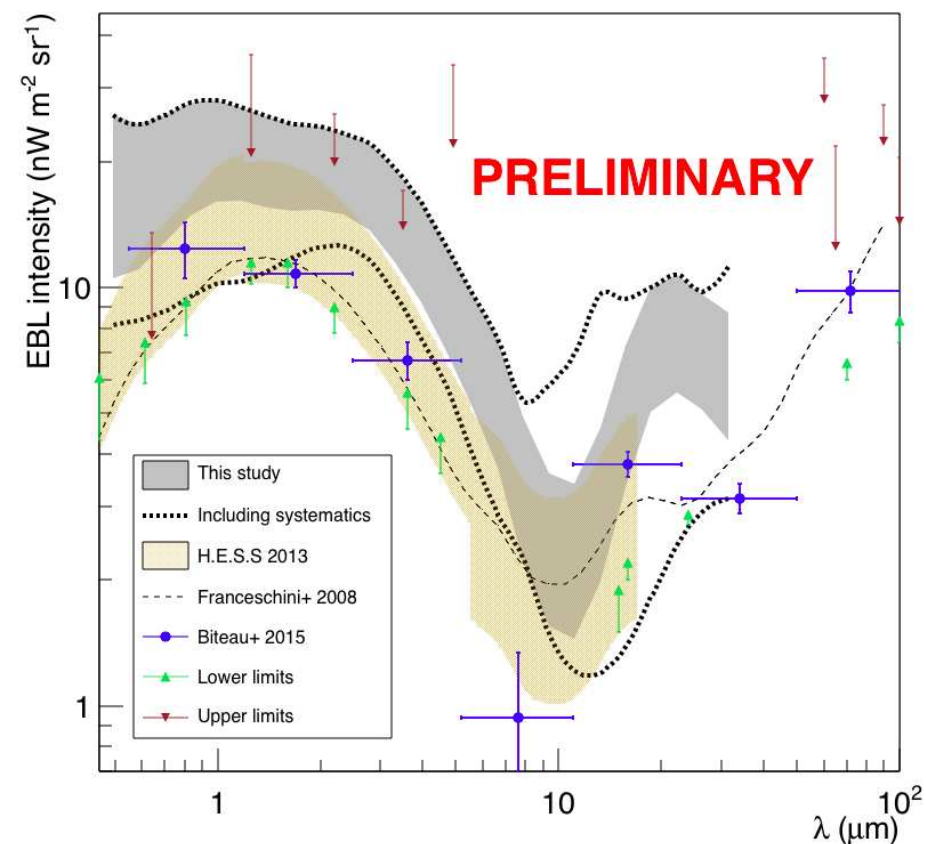


Źródło w centrum galaktyki musi w sposób ciągły emitować promieniowanie (w skalach czasowych > 1000 lat) $\Rightarrow$ rozkład $\sim 1/r$

Wyniki

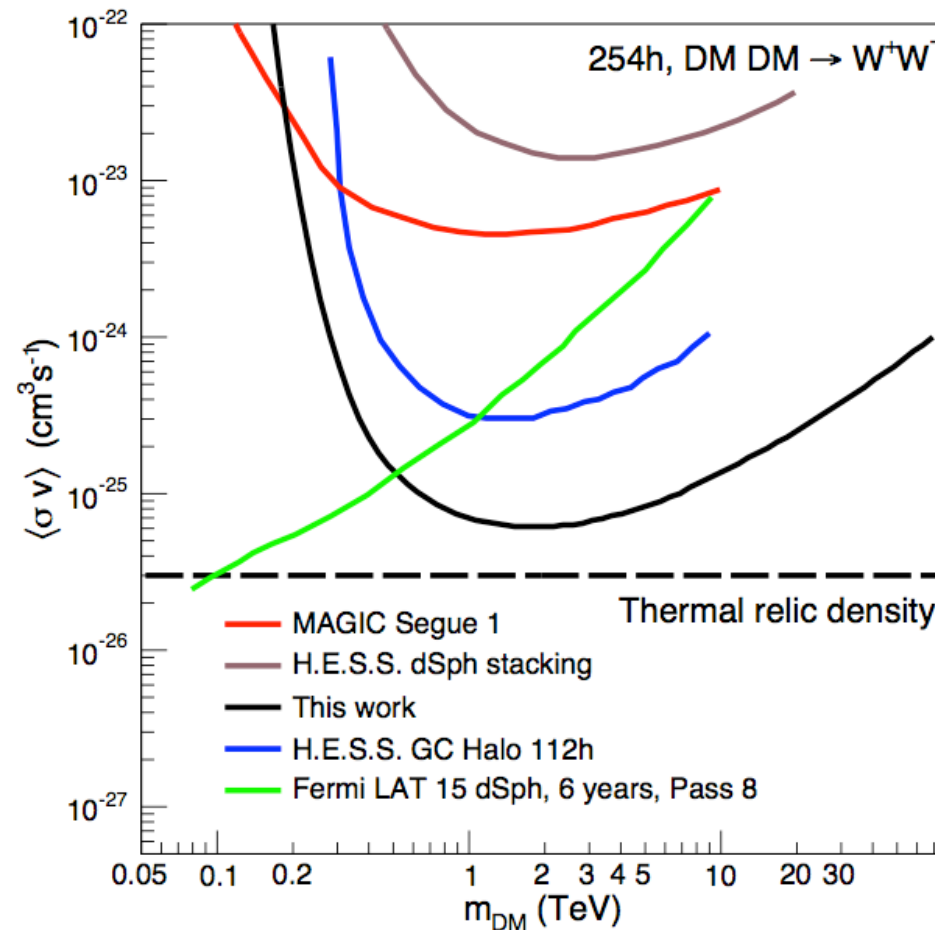
Rozkład natężenia tła międzygalaktycznego (Extragalactic Background Light) wyznaczone na podstawie widma odległych blazarów

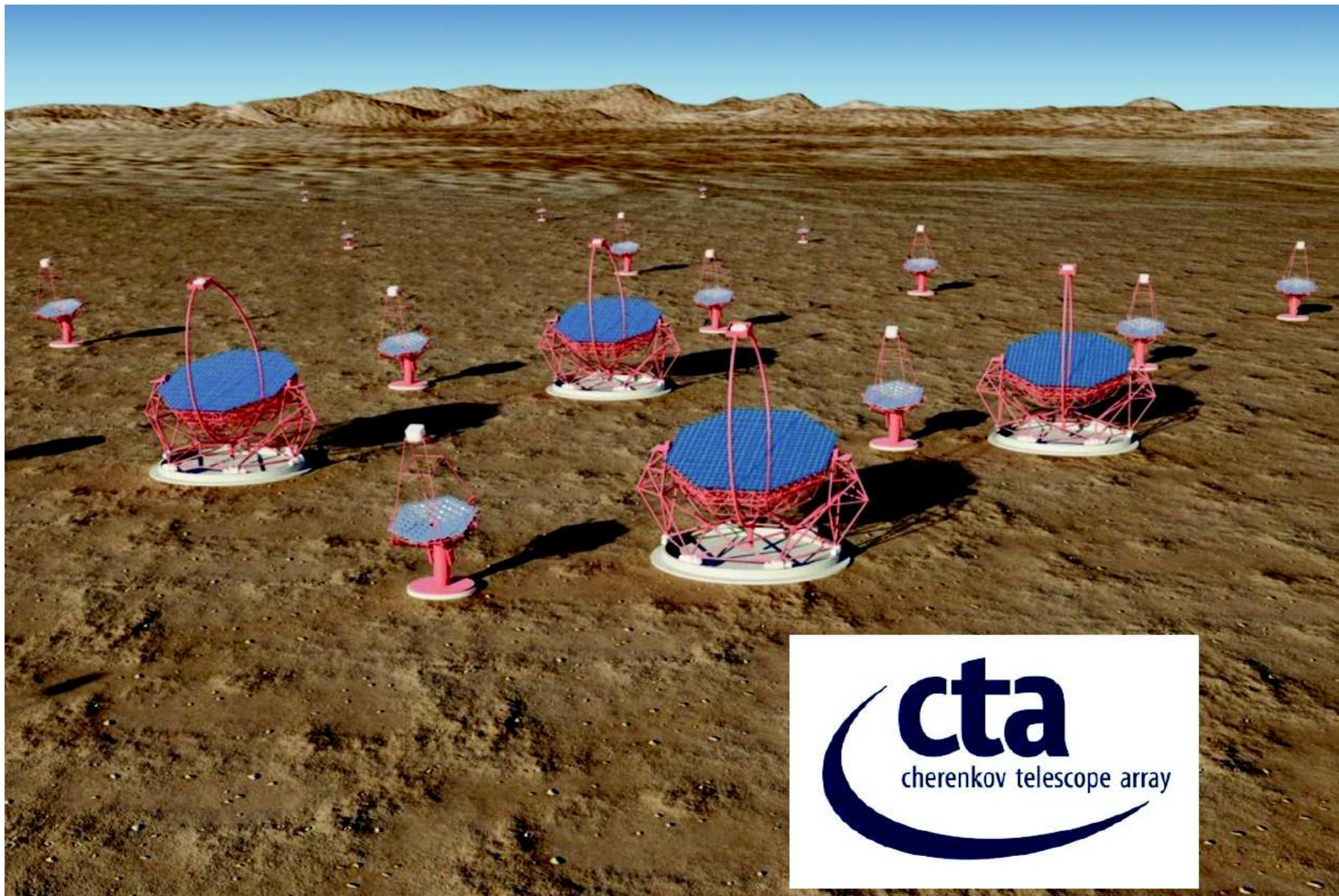
Całkowite promieniowanie w zakresie od 0.1 do 1000 μm odpowiada ok. 5% CMB



Poszukiwanie Ciemnej Materii

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



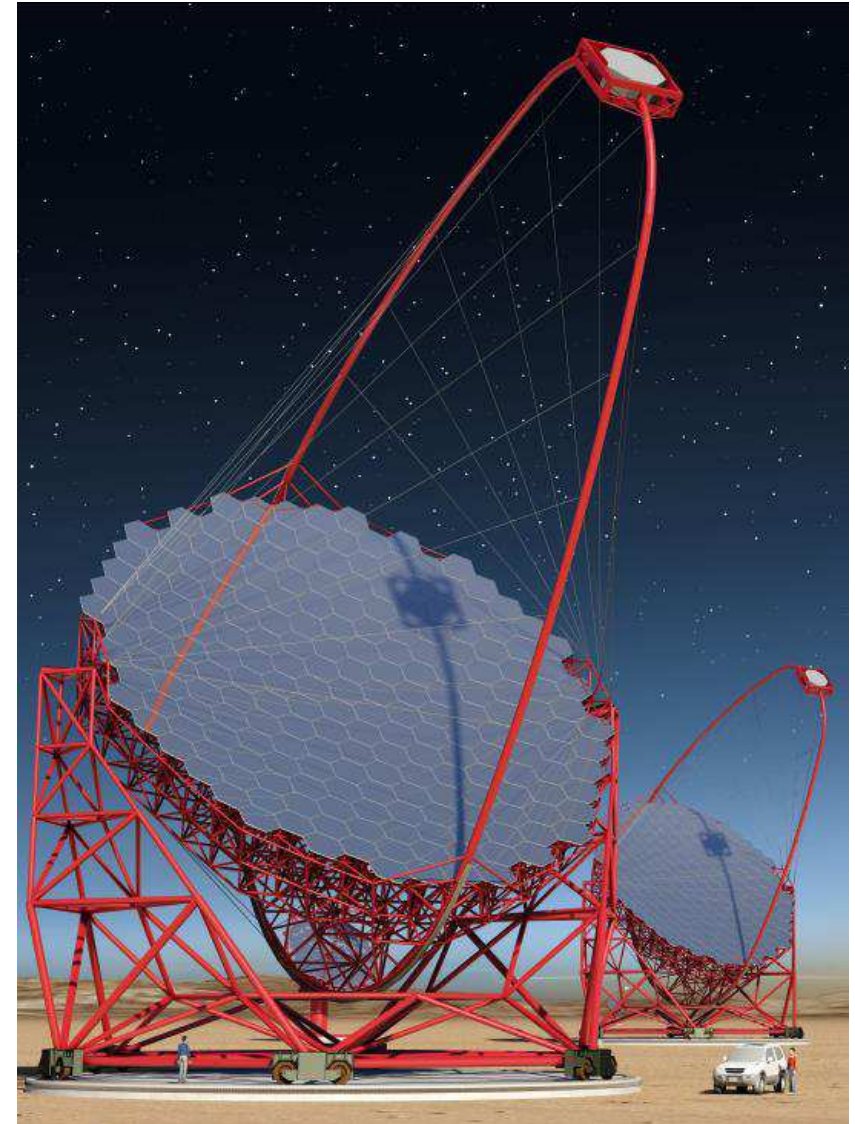


Projekt

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



Projekt

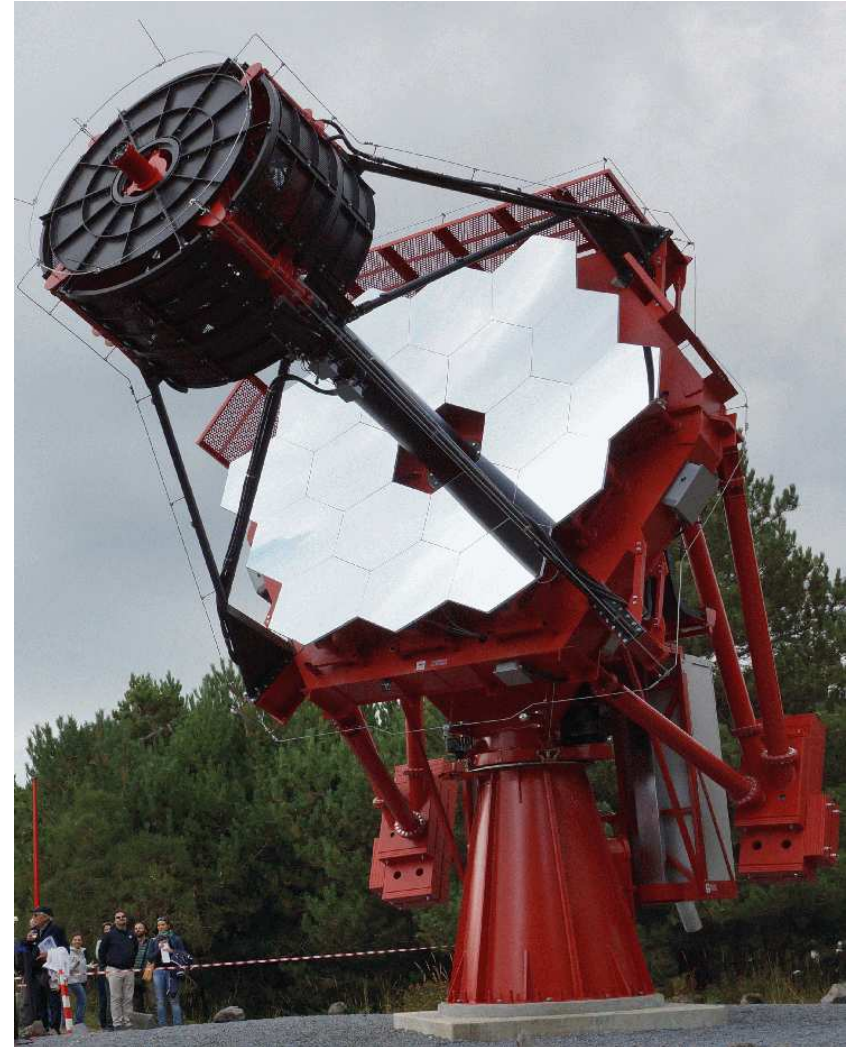
Fotony o energiach rzędu 1 TeV można już rejestrować mniejszymi teleskopami.

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



Projekt

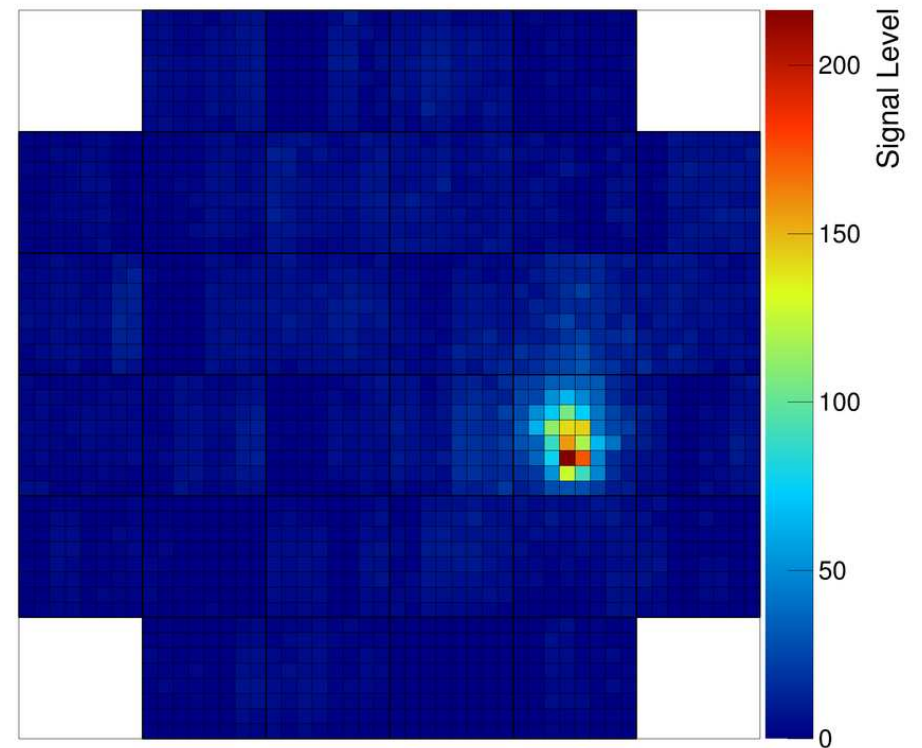
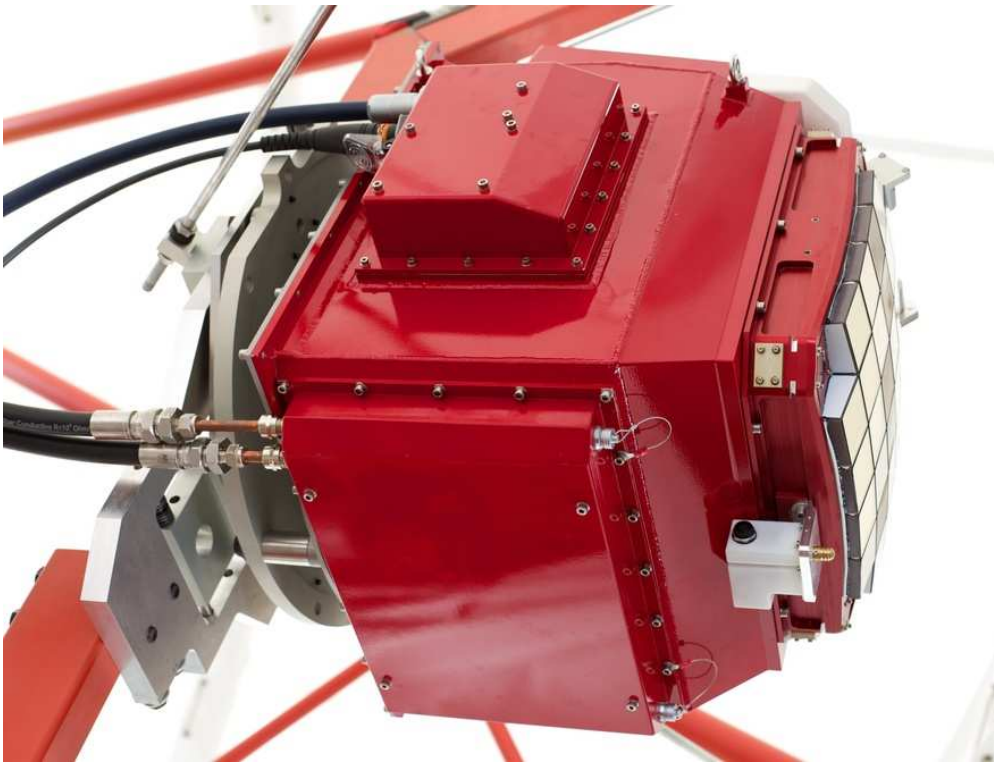
W grudniu 2015 uruchomiono prototyp SST z dwoma zwierciadłami (Francja).



CTA

Projekt

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

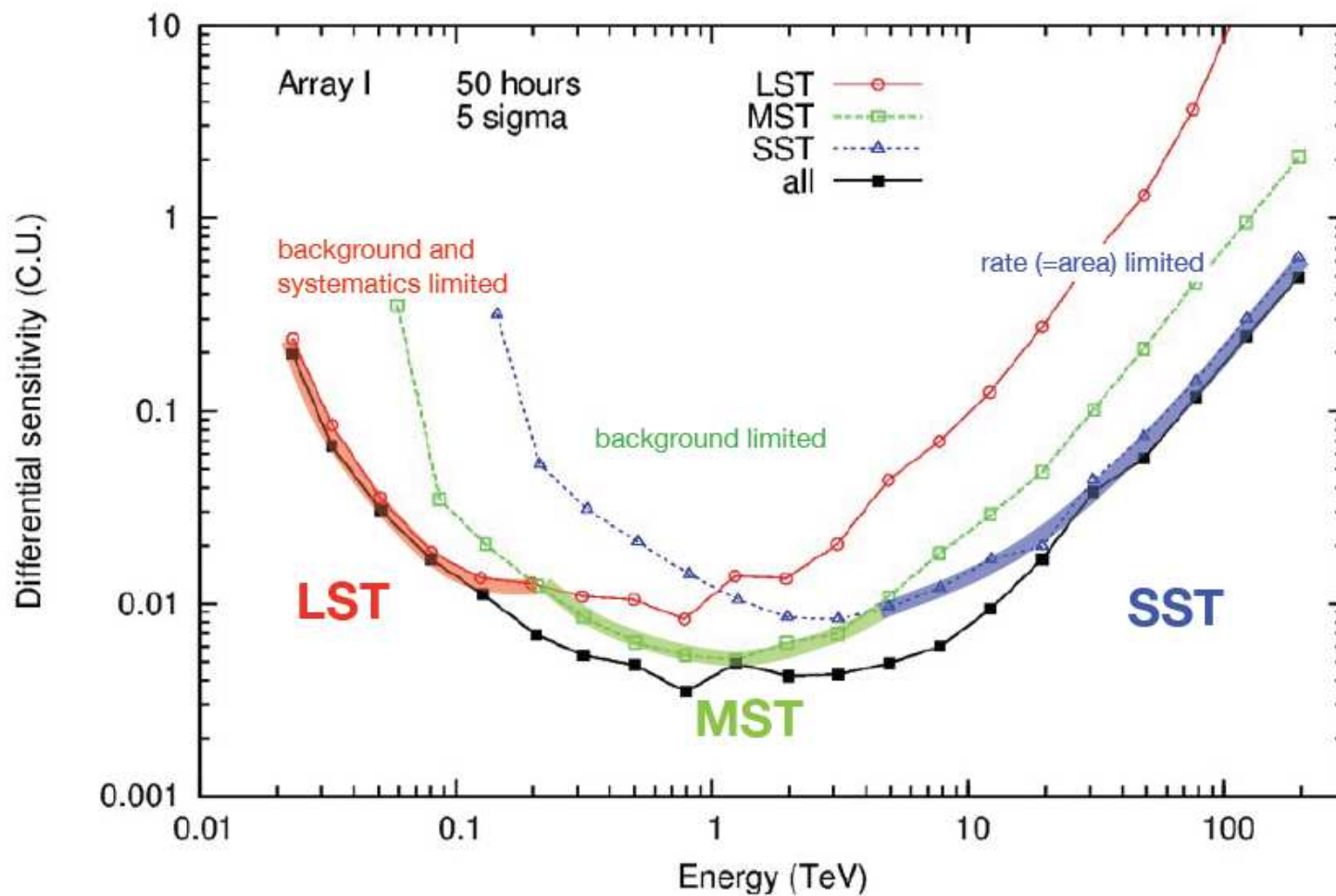


Wciąż rozważane dwie wersje kamery: MAPM (fotopowielacze) i SiPM (krzem)

CTA

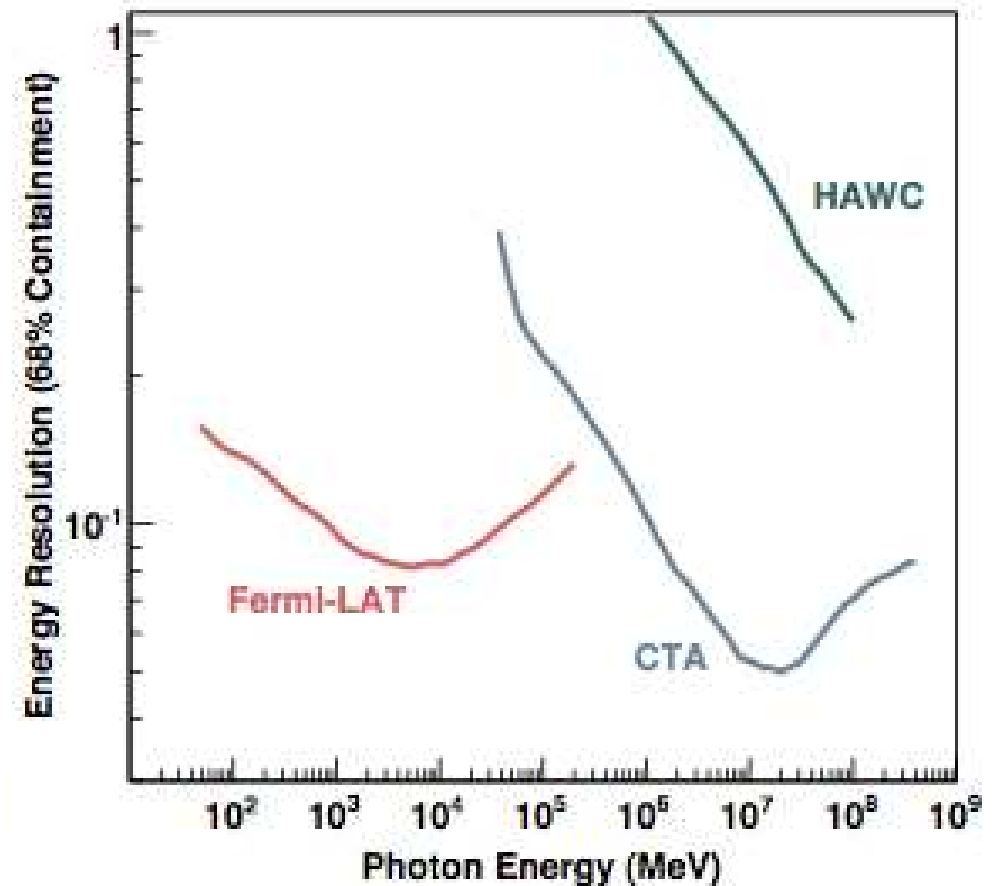
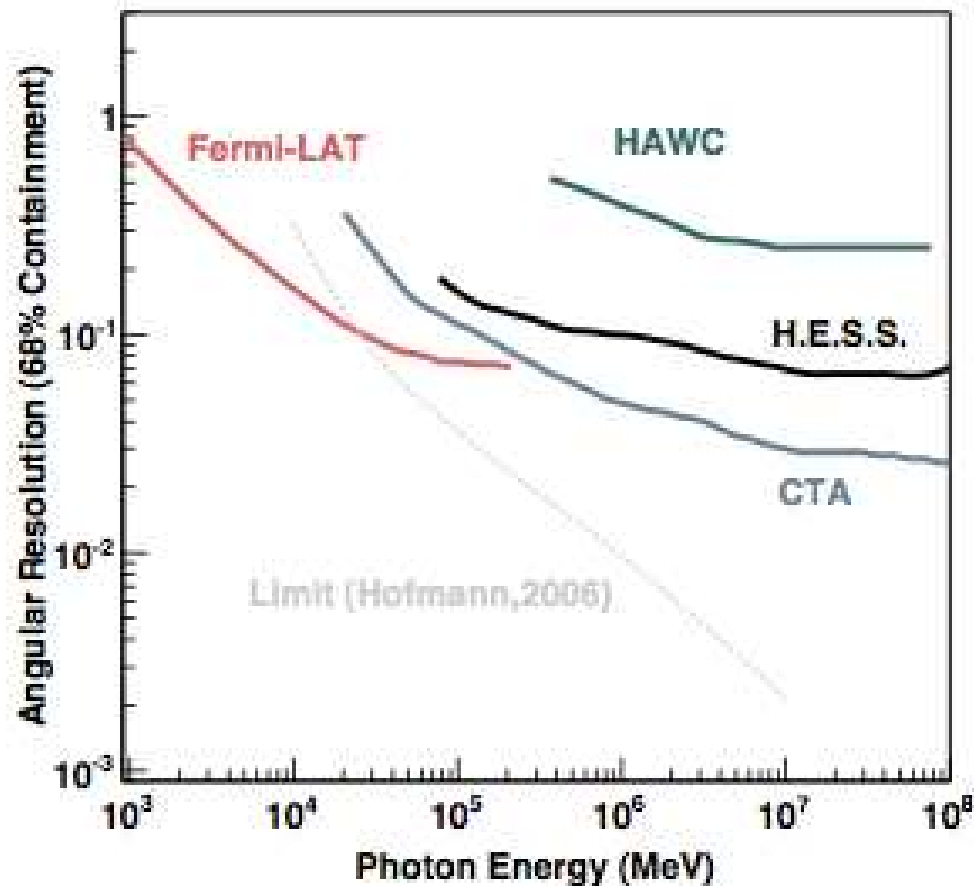
Czułość

Połączenie trzech rodzajów teleskopów pozwoli na pomiar w szerokim zakresie energii



Dokładność

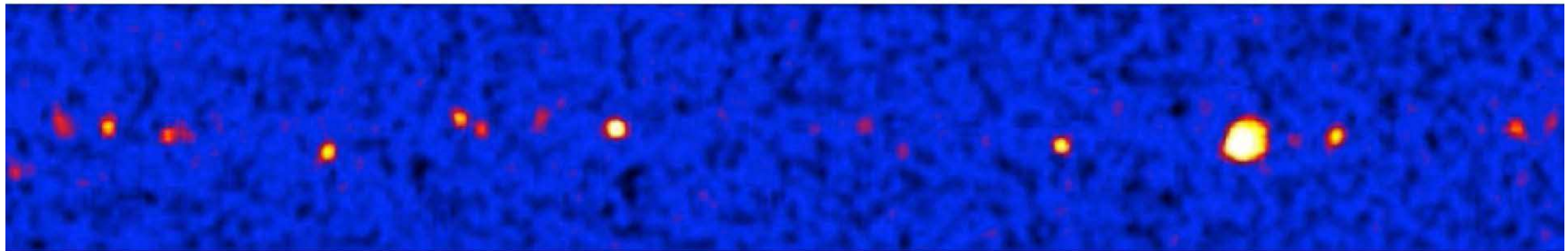
Uzyskiwane dokładności pomiaru energii i pozycji źródła bezkonkurencyjne dla energii powyżej 1 TeV



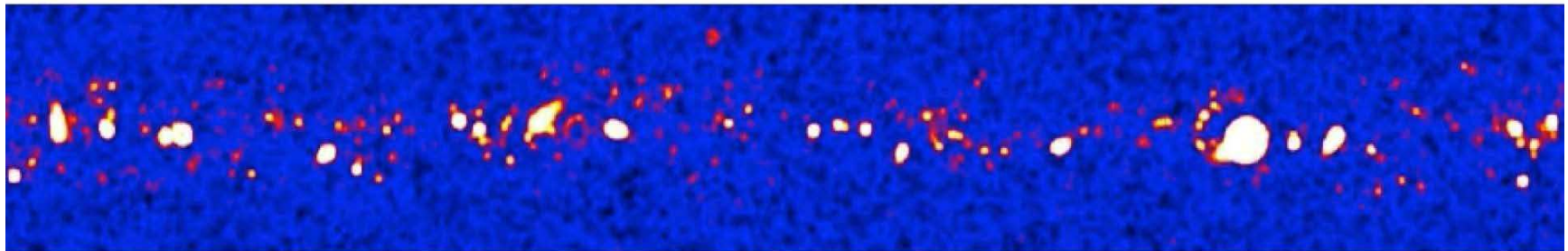
Dokładność

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

H.E.S.S.



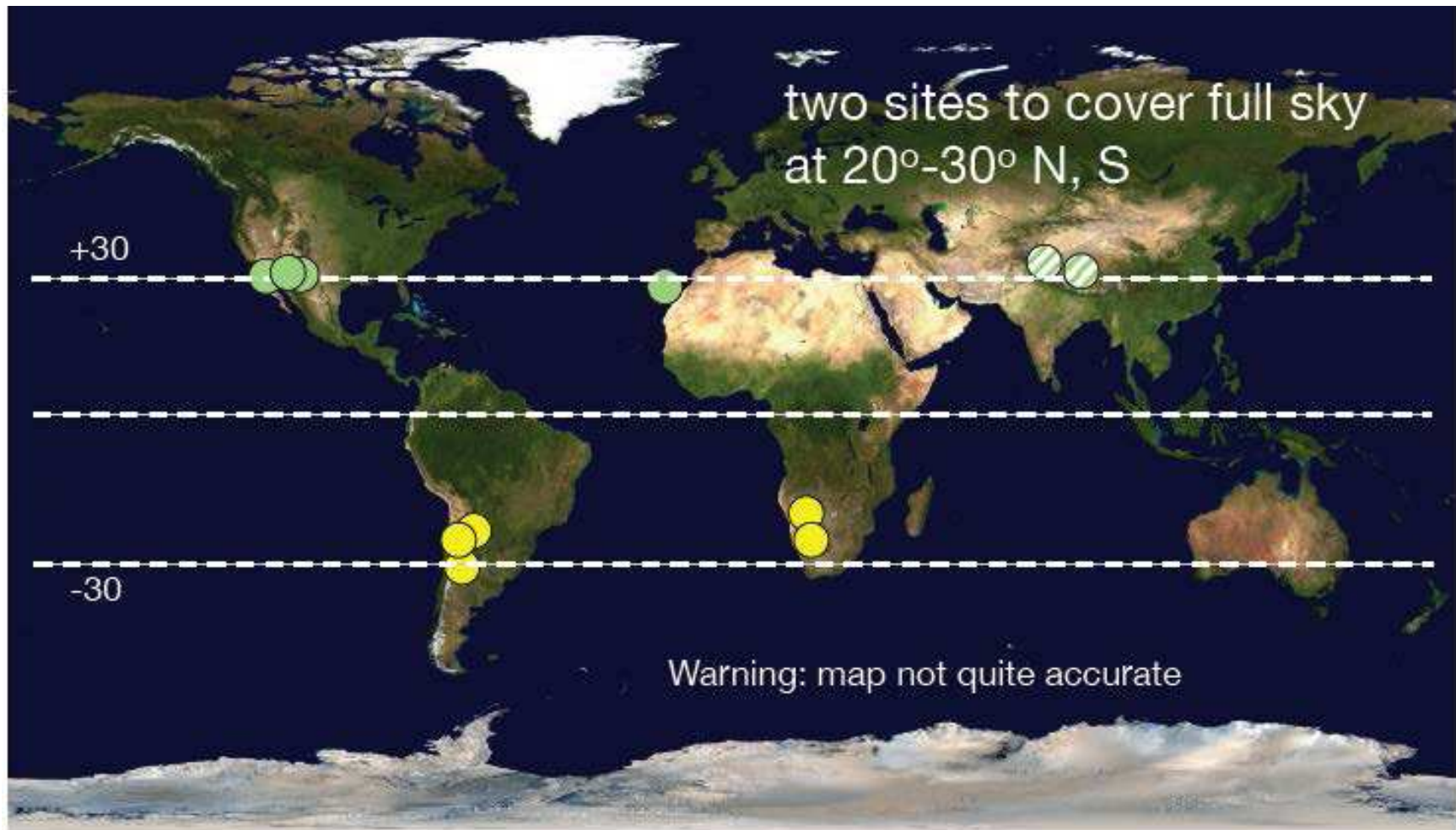
CTA, for same exposure



expect ~1000 detected sources

Lokalizacja

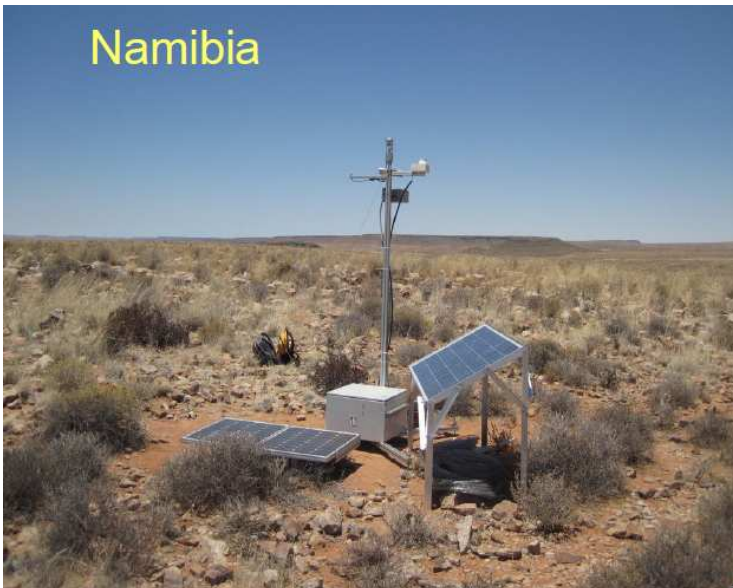
Zaplanowano budowę dwóch zestawów teleskopów, na północnej i południowej półkuli.



CTA

Rozważane lokalizacje

Namibia



Argentyna



Chile

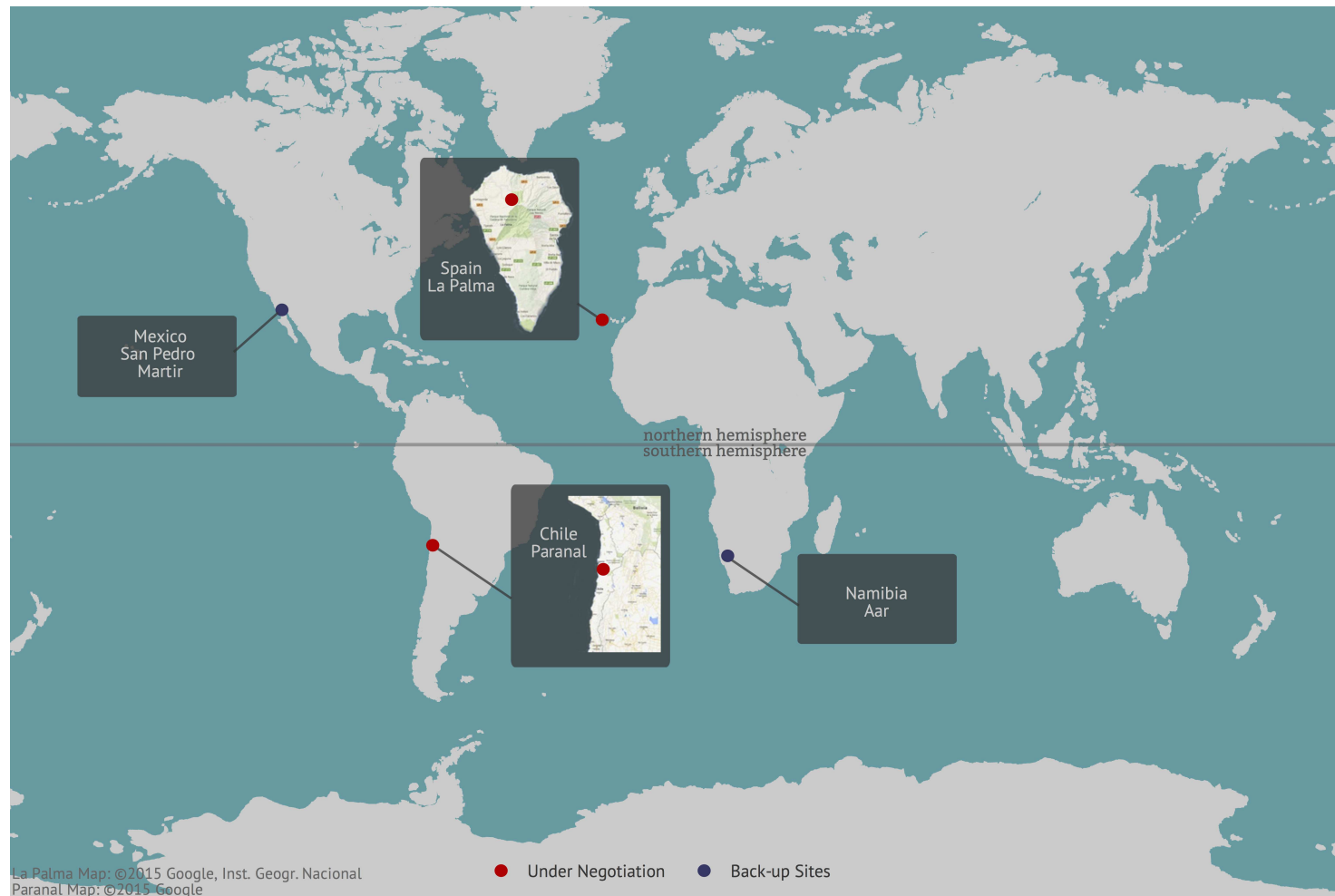


Mexico



Wybrane lokalizacje

Decyzja podjęta latem 2015: Chile i Wyspy Kanaryjskie.

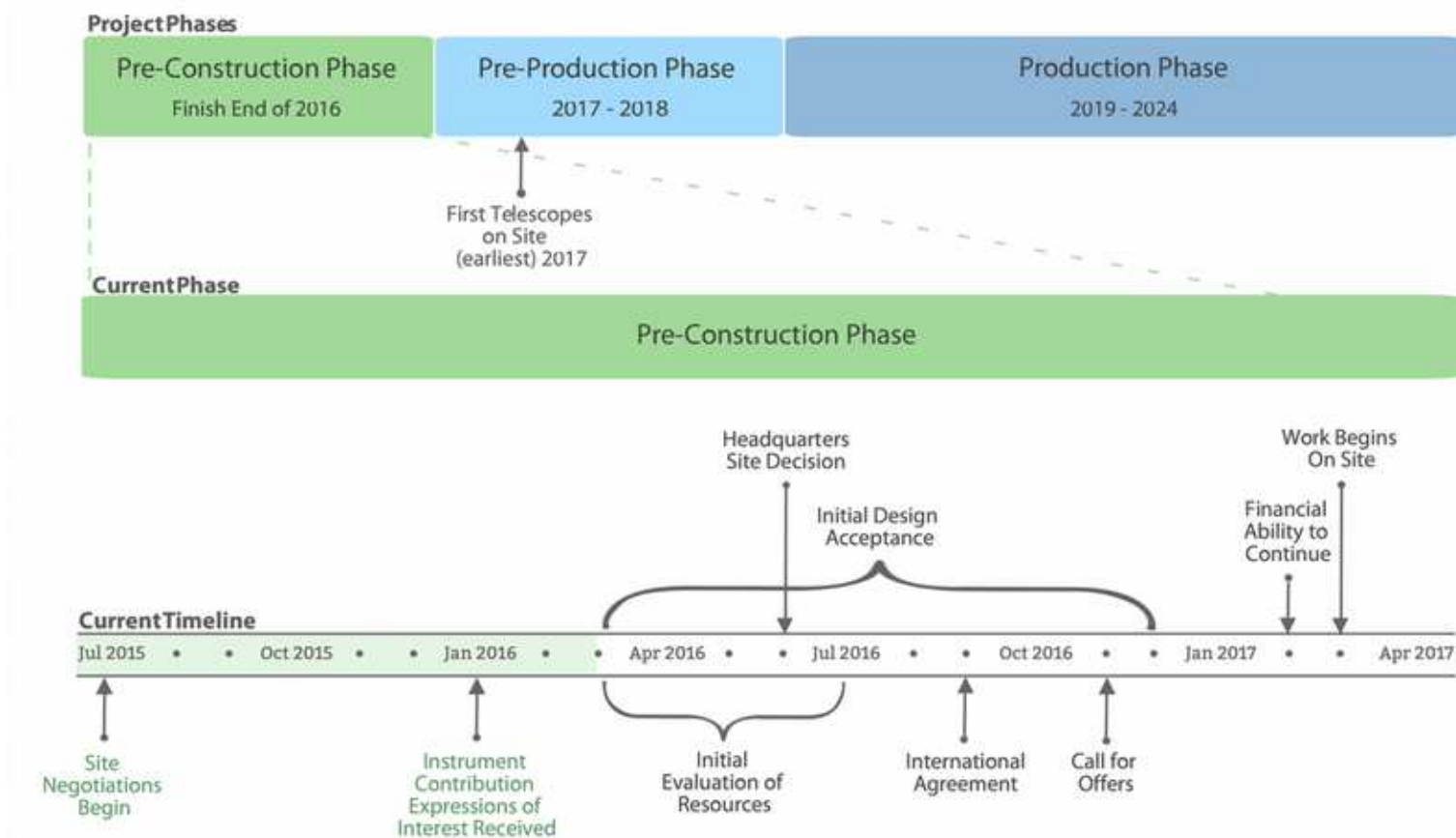


CTA

Harmonogram

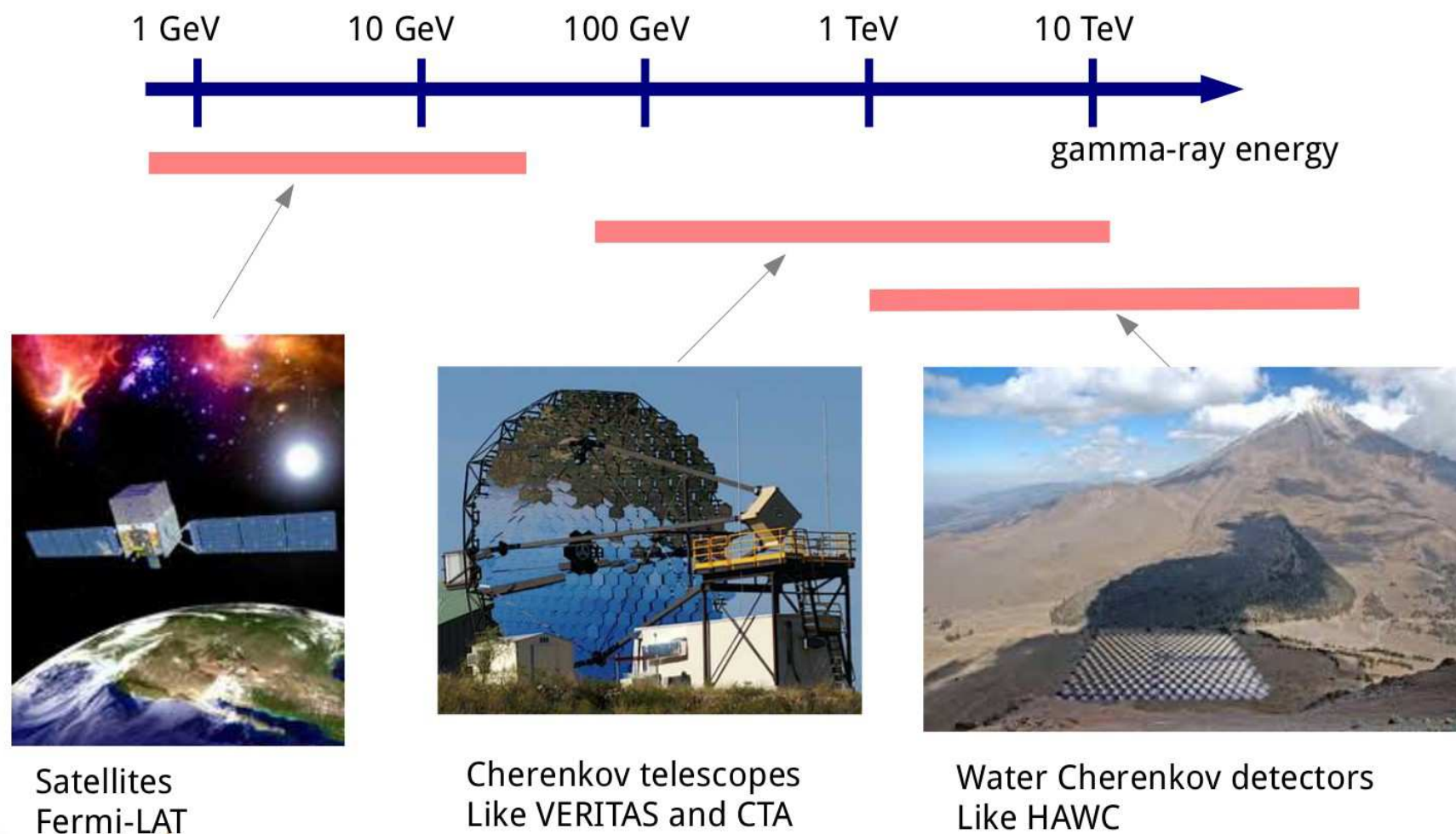
CTA znajduje się na europejskiej (i polskiej) liście priorytetowej infrastruktury badawczej

Budowa obserwatorium na La Palma właśnie się rozpoczęła...



Promieniowanie gamma

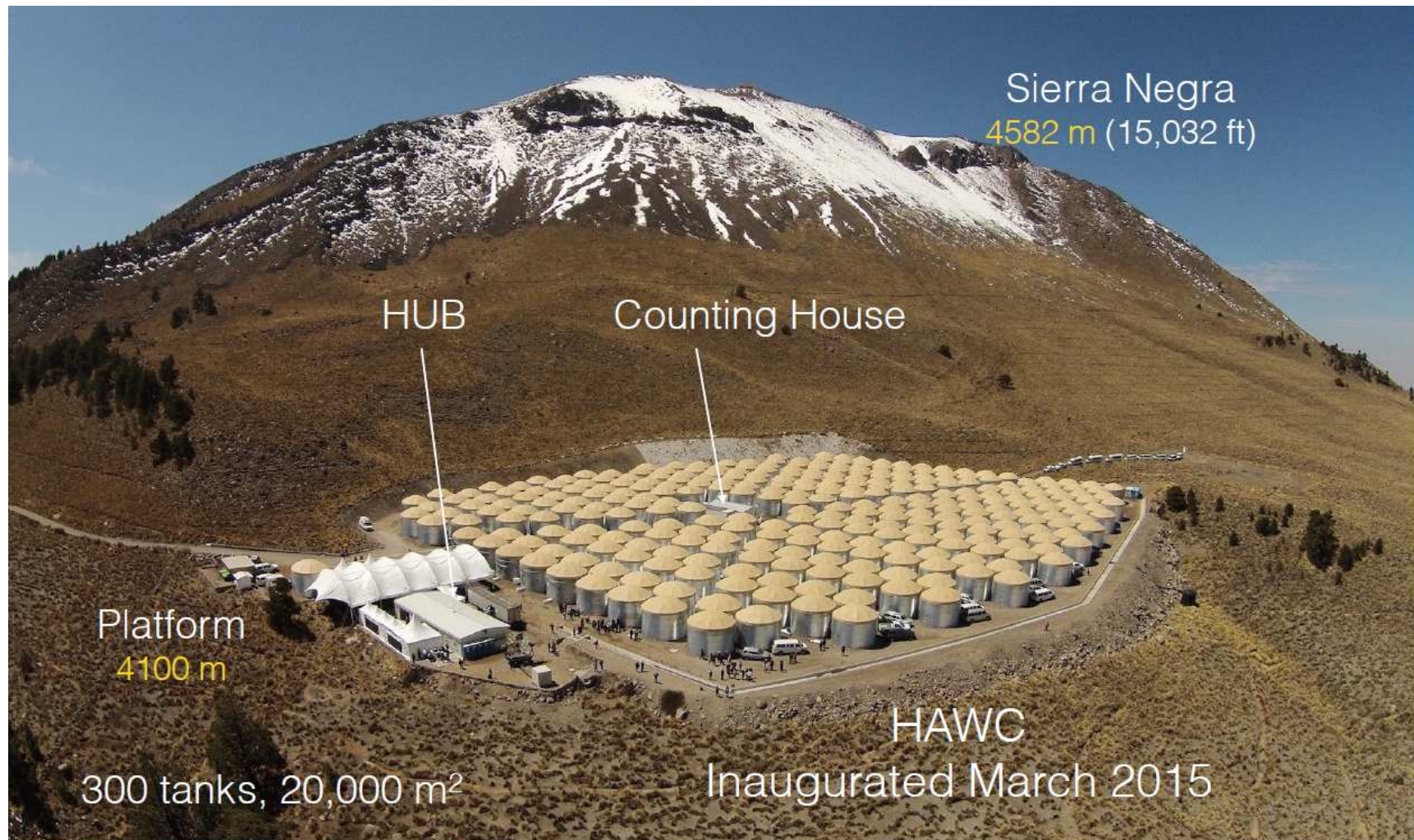
Metody detekcji



HAWC

Wodny detektor promieniowania Czerenkowa

Meksyk

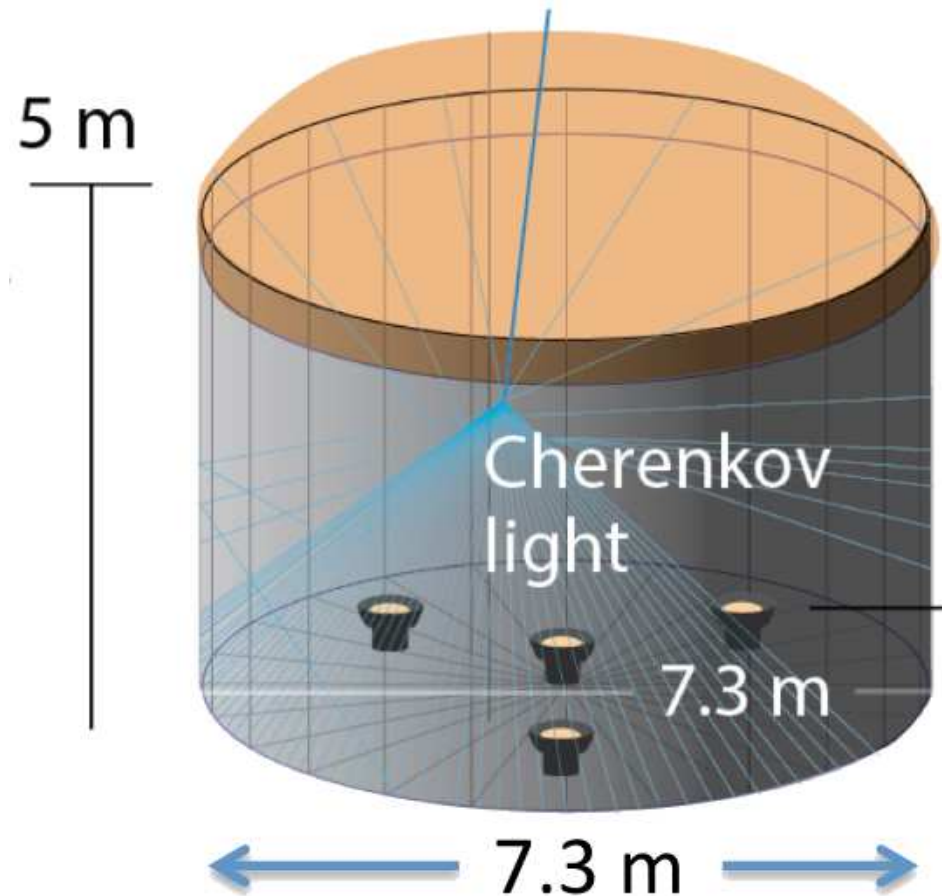


HAWC

Wodny detektor promieniowania Czerenkowa

Meksyk

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



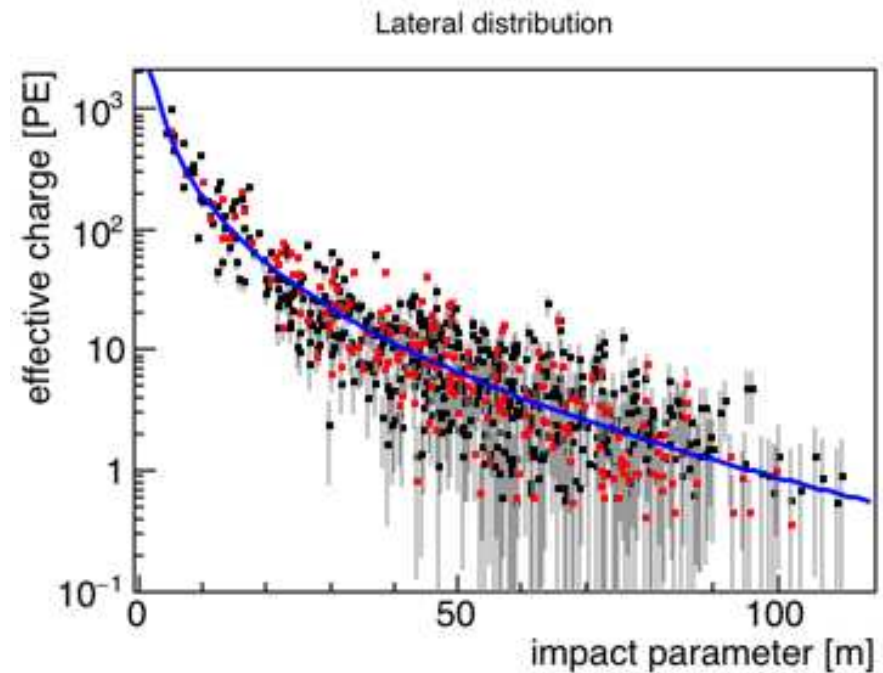
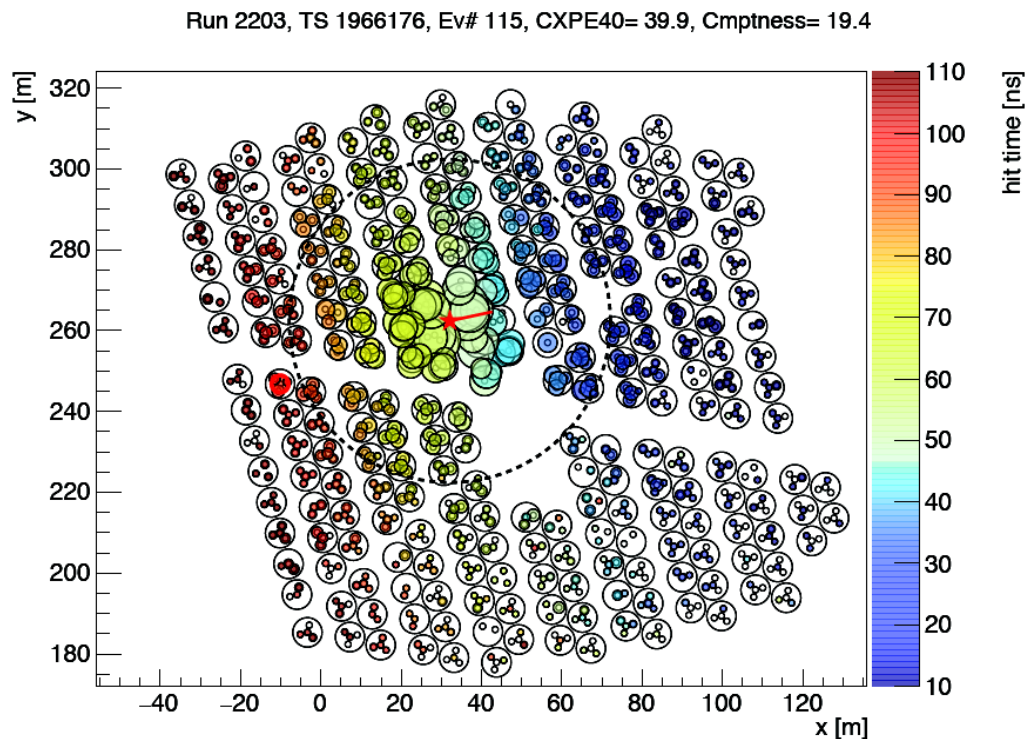
Działanie podobne do detektorów powierzchniowych AUGER...

HAWC

Rekonstrukcja kwantów gamma

Detektory HAWC są jednak gęsto ustawione na małej powierzchni
⇒ odpowiada to oczekiwanej topologii przypadków kaskad fotonowych

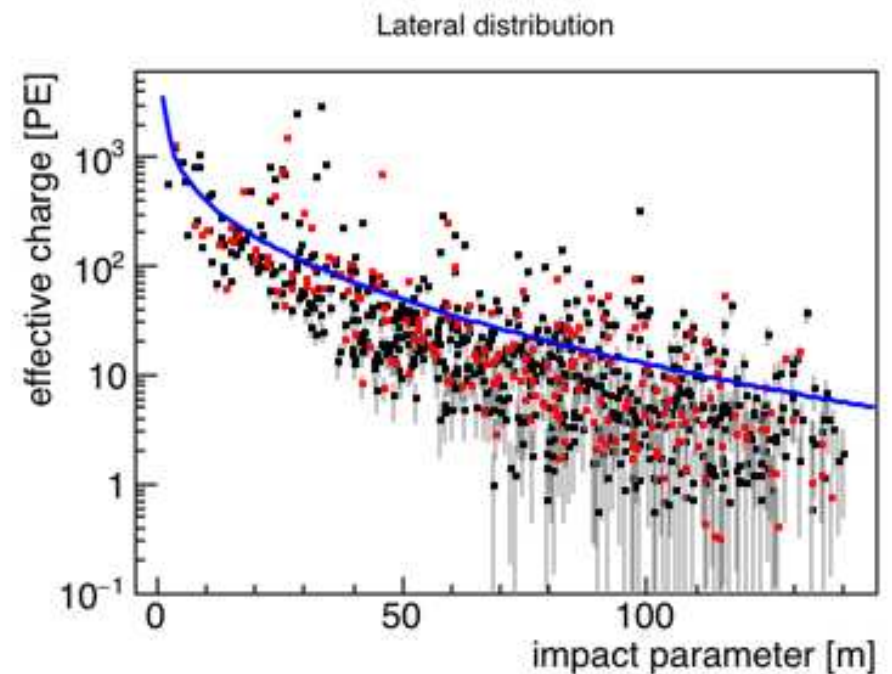
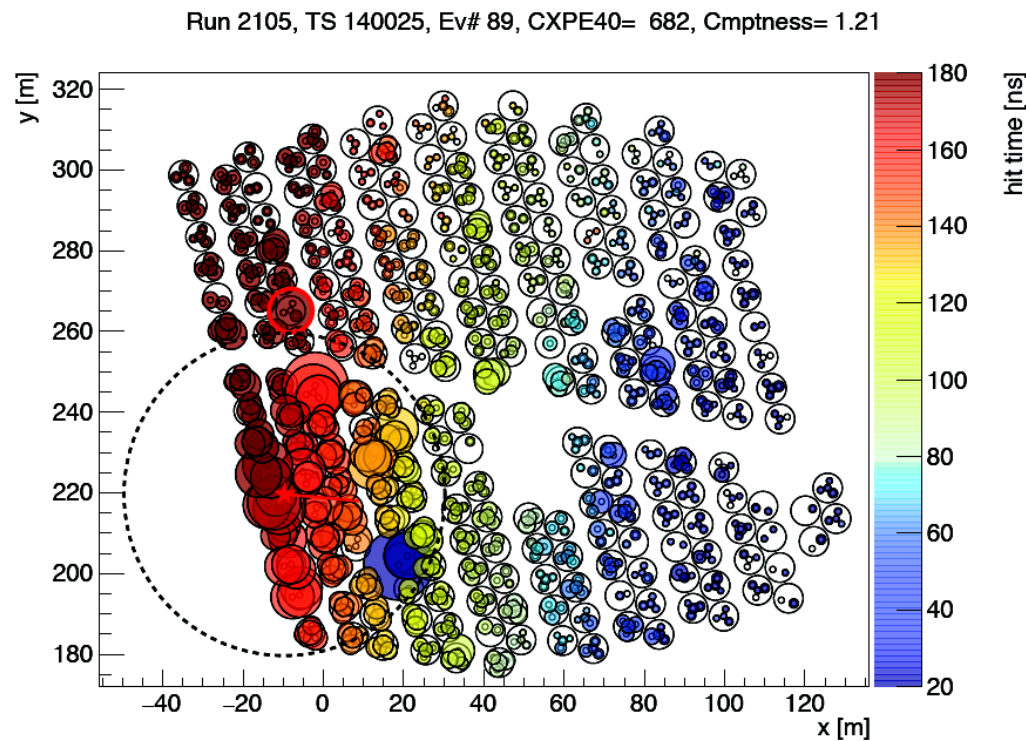
Przykładowy przypadek zarejestrowanej kaskady fotonowej



HAWC

Rekonstrukcja kwantów gamma

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

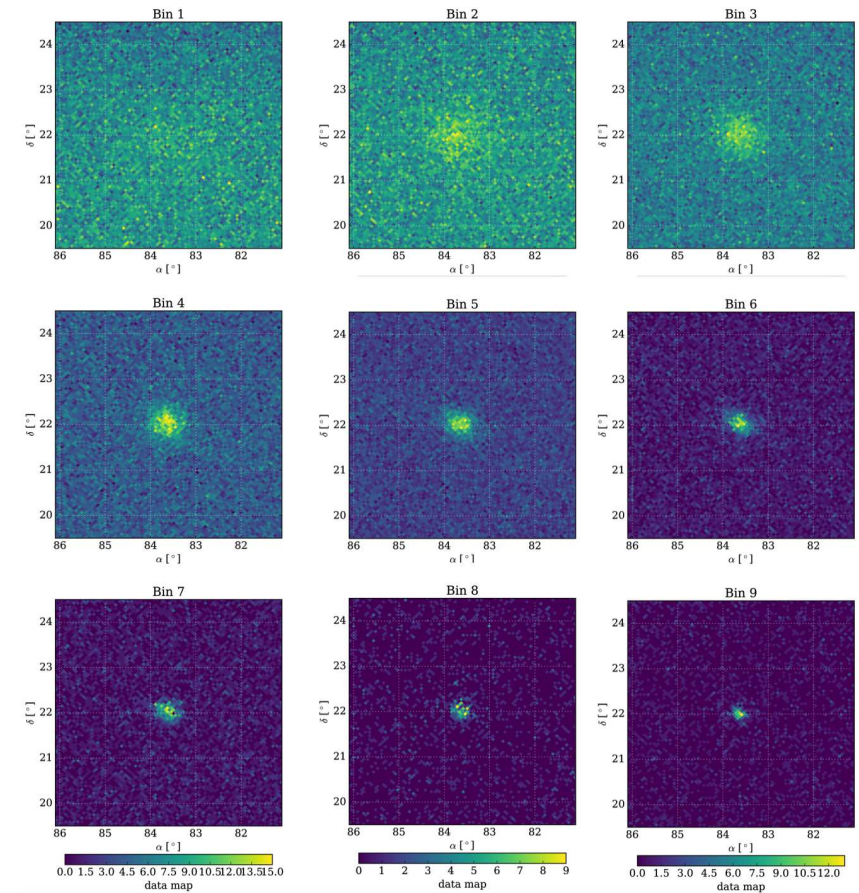
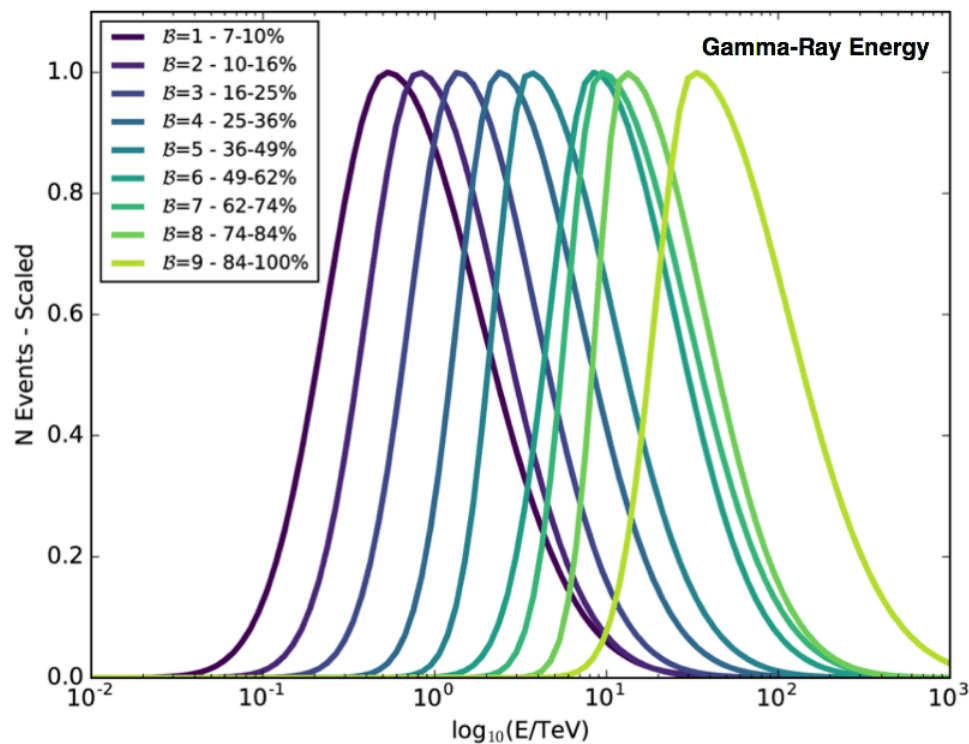


Przypadki tła znacznie szersze i “postrzępione”

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

Rekonstrukcja przypadku

Przypadki dzielone są na 9 binów, zależnie od wielkości sygnału



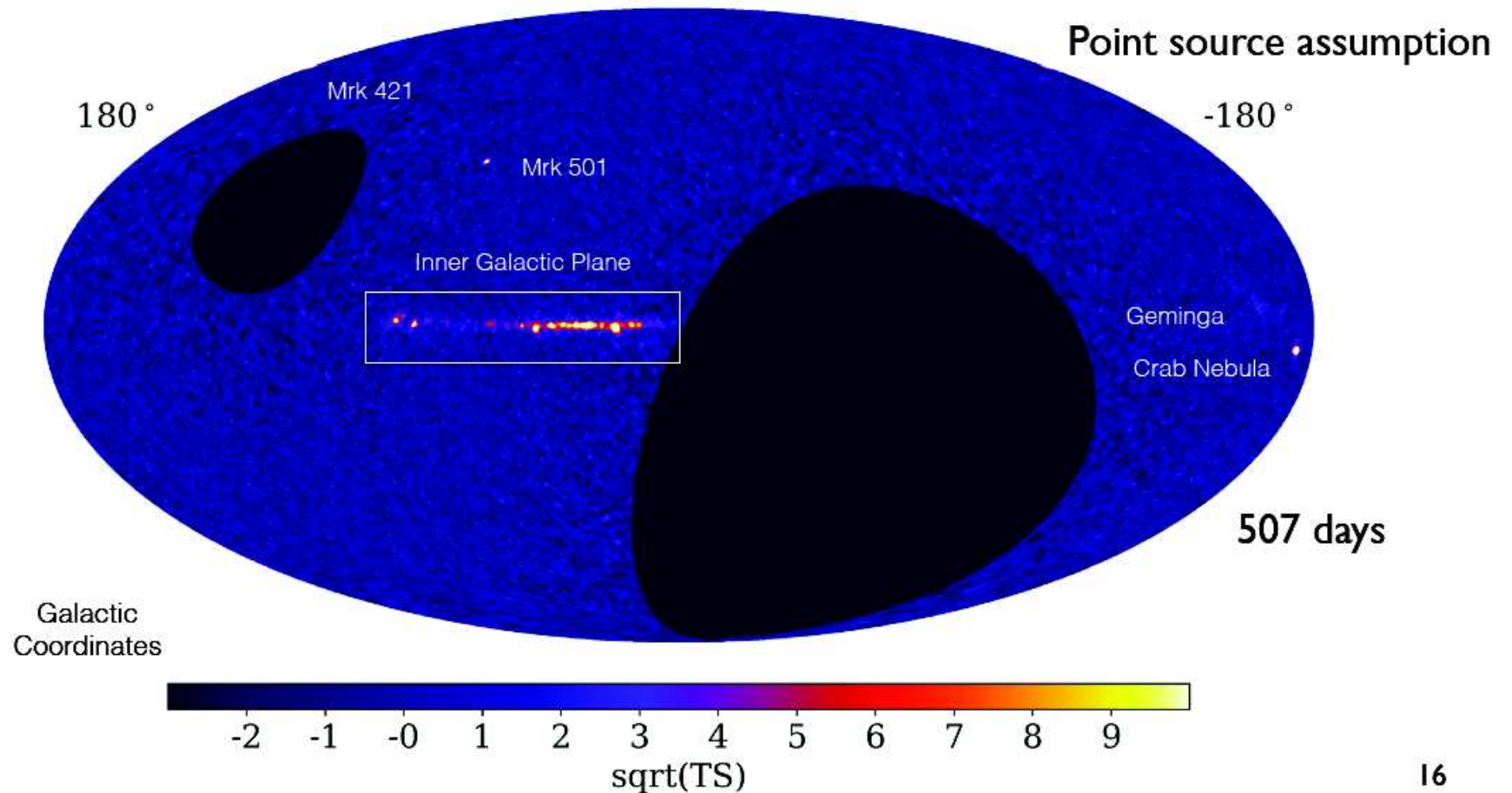
Dla najwyższych energii (~ 100 TeV) osiągamy dokładność pozycji rzędu 0.2°

HAWC

Obserwowane niebo

C.Riviere, Moriond 2017

TeV γ -Ray Observations with HAWC

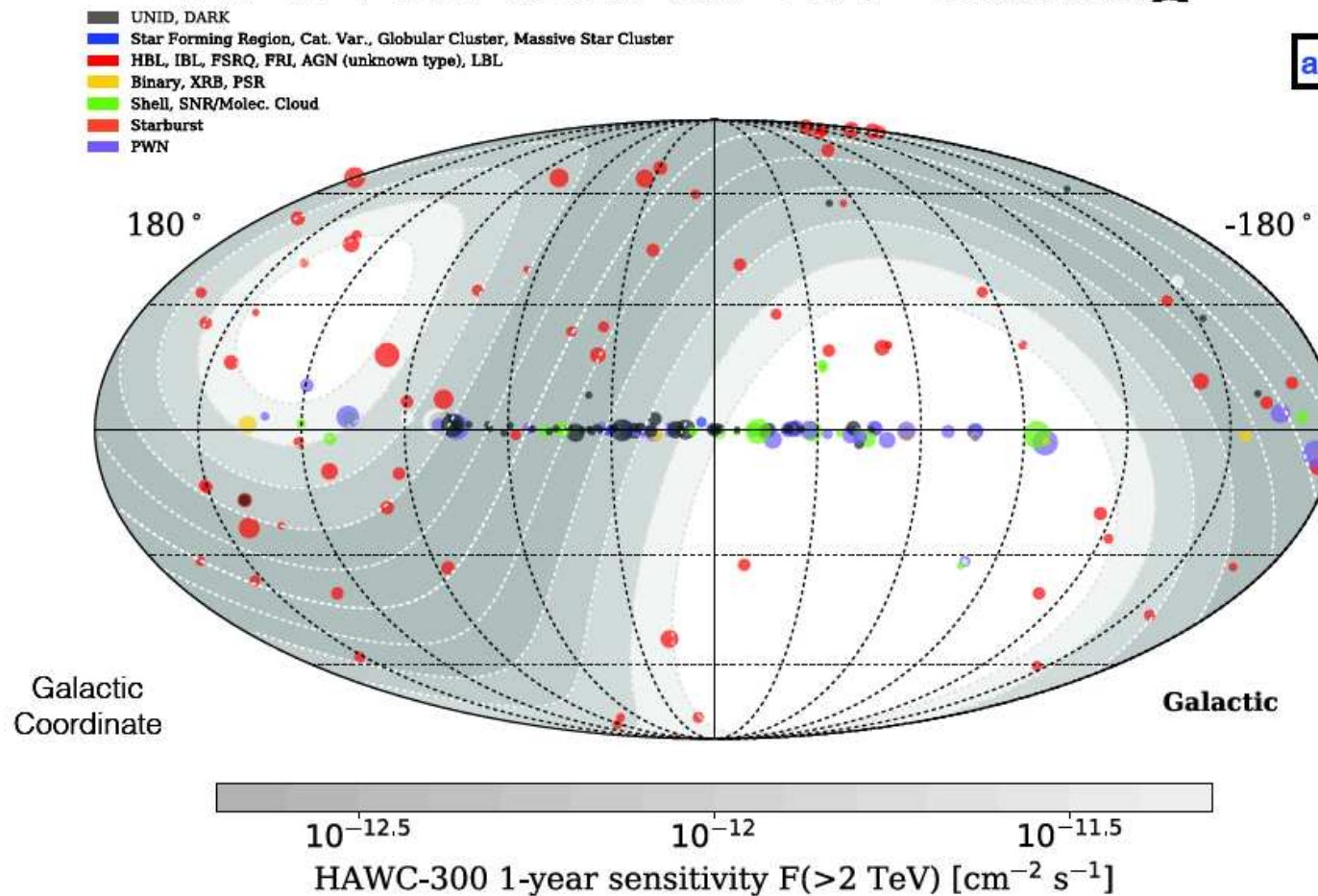


16

HAWC Adds to TeV Catalog

C. Rivière, UMD

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

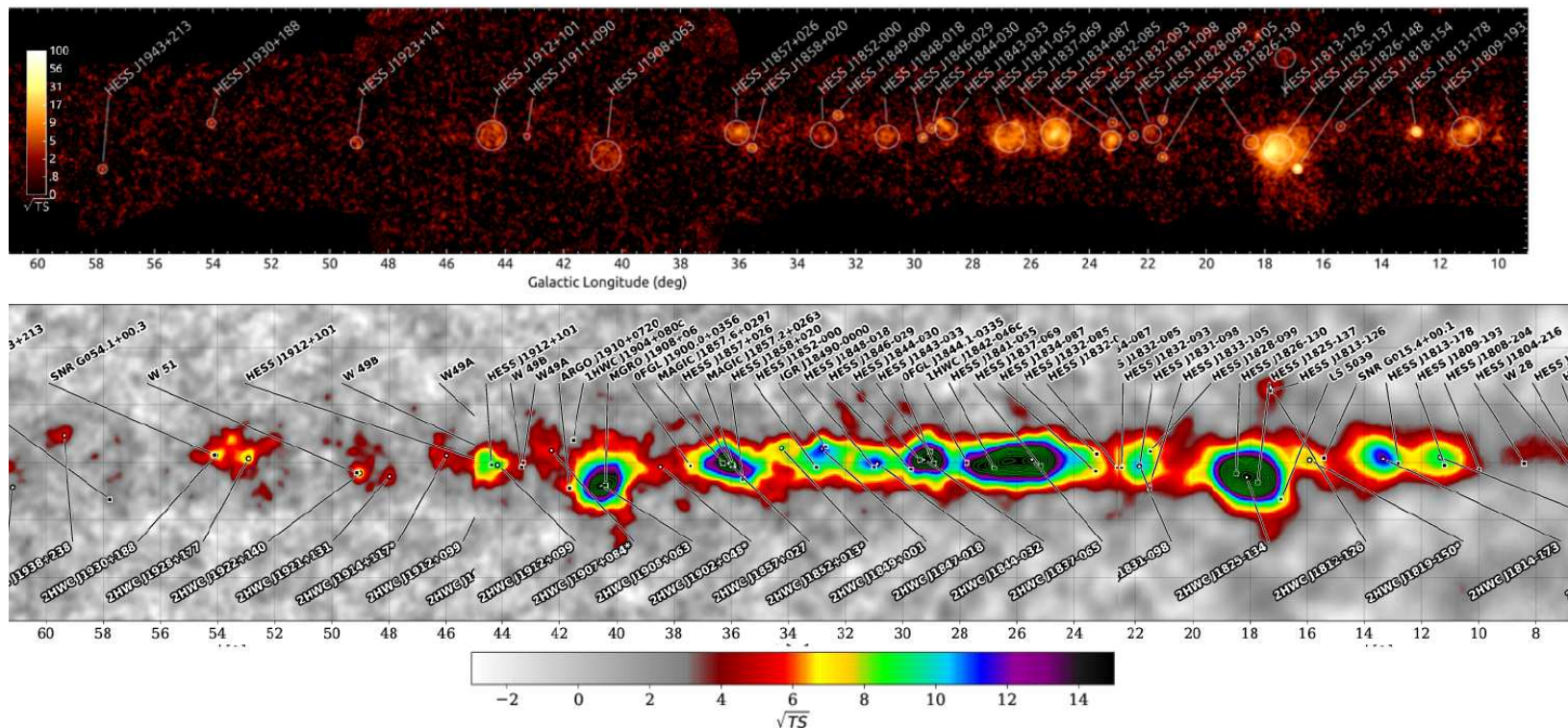


HAWC

Wykryte źródła

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

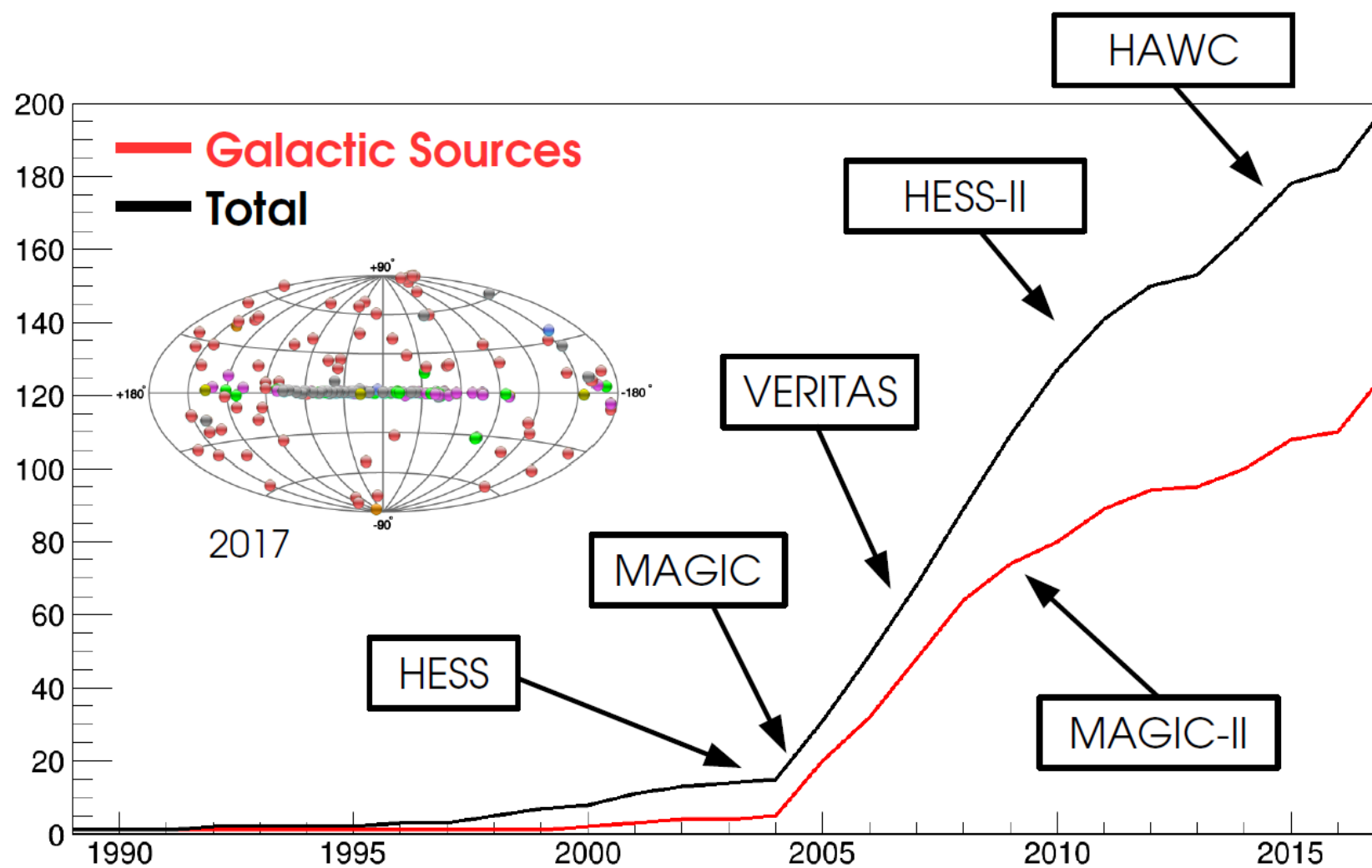
⇒ komplementarne obserwacje, także ze względu na różne metody detekcji



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

Promieniowanie gamma

Źródła TeV



Astronomia neutrin

Motywacja

Poszukiwania sygnałów anihilacji DM $\Rightarrow$ możemy też szukać neutrin!

Neutrino są też ciekawą sygnaturą wielu innych procesów (np. supernowe)

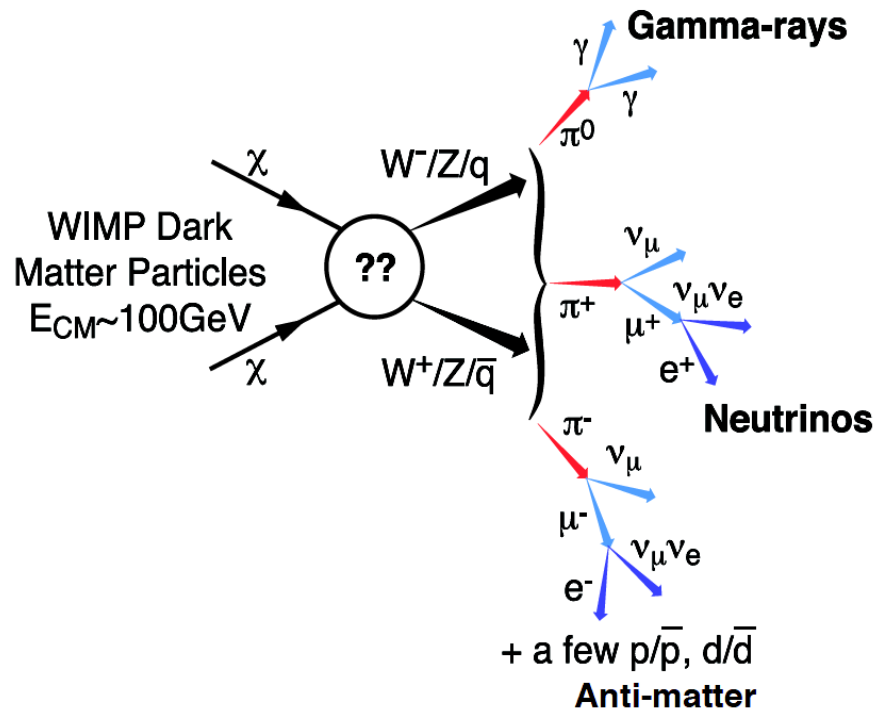
Zalety “**astronomii neutrin**”:

- wydostają się bez przeszkód ze źródeł
- nie odchylane w polach magnetycznych
- nie oddziałują z materią międzygwiazdową
nieograniczony zasięg

$\Rightarrow$ **możliwa identyfikacja źródeł**

- niosą informację o procesie produkcji
(zapach leptonu)

Niestety, bardzo trudno je zmierzyć!...



Neutrina

Źródła astrofizyczne

Neutrina powinny też powstawać w procesach związanych z produkcją i oddziaływaniem **promieniowania kosmicznego**, w aktywnych jądrach galaktyk (AGN), błyskach gamma (GRB) itp.

Główne reakcje produkcji

- rozpad pionu: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
- rozpad mionu: $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$
- rozpad neutronu: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

Produkcja pionów związana w szczególności z obcięciem GZK:



⇒ oczekujemy produkcji powiązanej ze **źródłami UHECR**

W zależności od źródła i mechanizmu produkcji, skład zapachowy może być różny...

Neutrina

Neutrina słoneczne

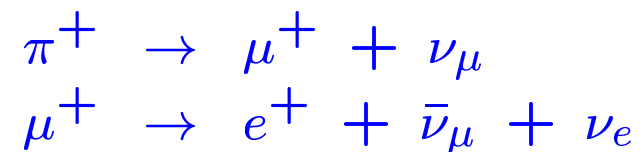
Słońce jest niezwykle intensywnym źródłem neutrin elektronowych, głównie pochodzących z procesu “**p-p**”: $p + p \rightarrow D + e^+ + \nu_e$ ($E_\nu \leq 0.42 \text{ MeV}$), trochę wyższe energie w procesie “**pep**”: $p + e^- + p \rightarrow D + \nu_e$ ($E_\nu \approx 1.44 \text{ MeV}$).

Najwyższe energie dostępne w rozpadzie 8B : ${}^8_5B \rightarrow {}^8_4Be + e^+ + \nu_e$
 $\Rightarrow$ energia neutrina do **15 MeV** $\Rightarrow$ obserwowalne detektorami fizyki cząstek...

Neutrina atmosferyczne

Pierwotne promieniowanie kosmiczne (o energiach do $\sim 10^{20} \text{ eV}$) oddziałuje z jądrami O i N w atmosferze wywołując kaskady **cząstek wtórnych**, głównie pionów $\pi^\pm$.

Neutrina powstają w łańcuchu rozpadów:



Ponieważ pierwotne promieniowanie kosmiczne jest izotropowe, oczekujemy, że także strumień **neutrino atmosferycznych** będzie izotropowy!

Neutrino

Neutrino reaktorowe

Rozszczepienie jednego jądra ^{238}U wyzwala energię ok. 200 MeV

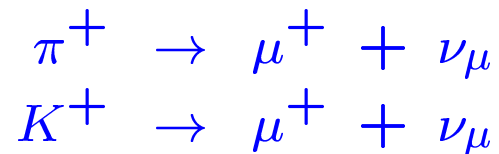
Średnio produkowane jest przy tym sześć **entyneutrino elektronowych**,
głównie w rozpadach neutronów: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

Reaktor o mocy 1 GW $\Rightarrow \sim 10^{20}$ rozszczepień na sekundę $\Rightarrow \sim 6 \cdot 10^{20} \nu/s$

Neutrino akceleratorowe

Potrafimy wytwarzać wiązki protonów o **wysokiej energii**, **bardzo dużym natężeniu**.

Oddziałując z gęstą tarczą, protony produkują liczne cząstki wtórne, głównie piony i kaony (jak w kaskadzie atmosferycznej). **Neutrino mionowe** powstają z rozpadów:



Poprzez ogniskowanie wiązek pionów i kaonów przed ich rozpadami, możemy uzyskać wysokiej energii wiązki neutrino lub antyneutrino...

Neutrina

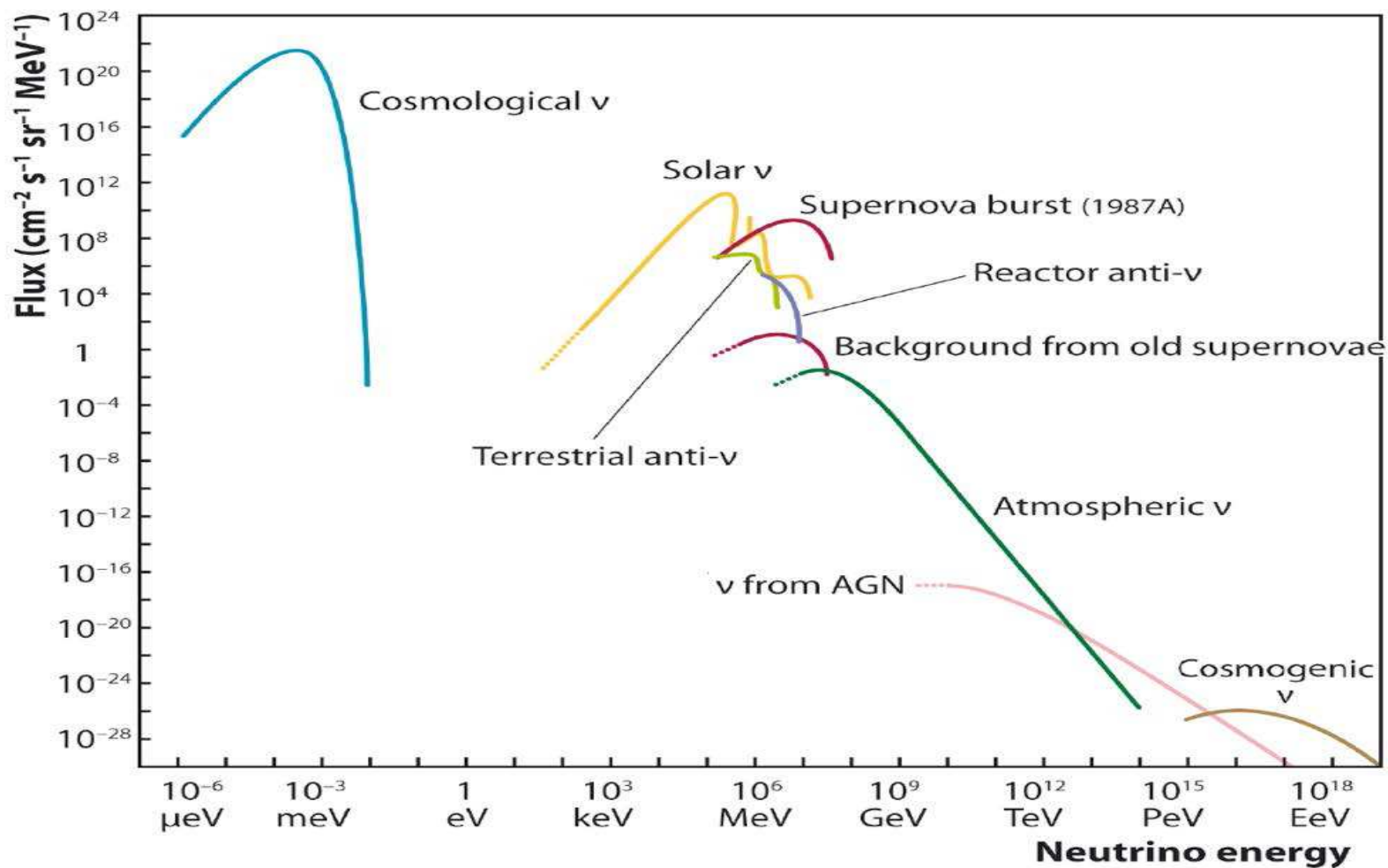
Źródła

Typ	Zapach	Energie	Strumień
Słoneczne	ν_e	$\leq 15 \text{ MeV}$	$6 \cdot 10^{10} \frac{1}{s \text{ cm}^2}$ (na Ziemi)
Atmosferyczne	$\nu_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu$	100 MeV - TeV	$3 \cdot 10^7 \frac{1}{s \text{ cm}^2}$ (powyżej 10 MeV)
Reaktorowe	$\bar{\nu}_e$	rzędu MeV	$5 \cdot 10^9 \frac{1}{s \text{ cm}^2}$ (1 GW z odl. 1 km)
Akceleratorowe	$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	rzędu GeV	10^{20} (całkowita statystyka)

Wszystkie te źródła są obecnie wykorzystywane w badaniu własności neutrin

Neutrino

Źródła



Super-Kamiokande

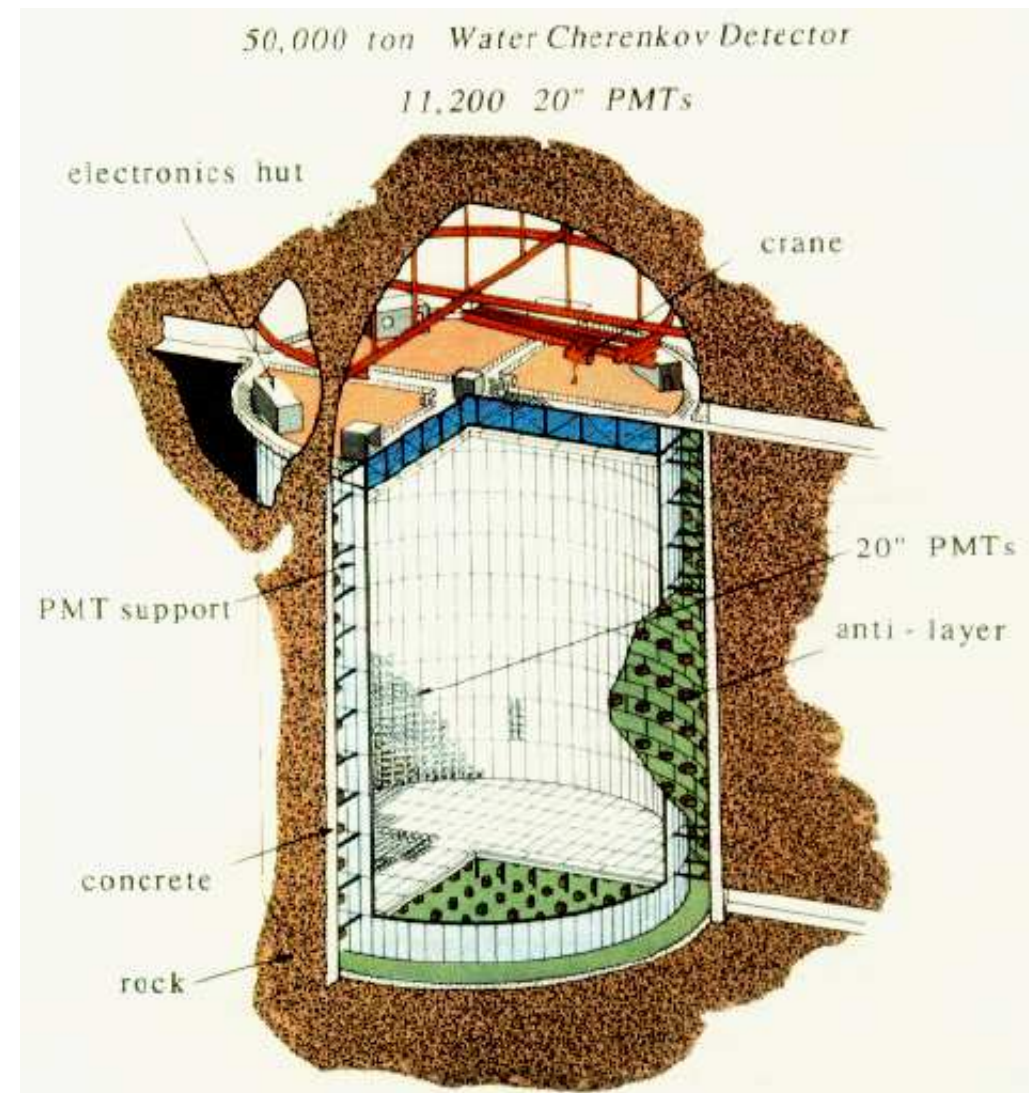
Eksperyment

Japonia, w starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona **wodą**

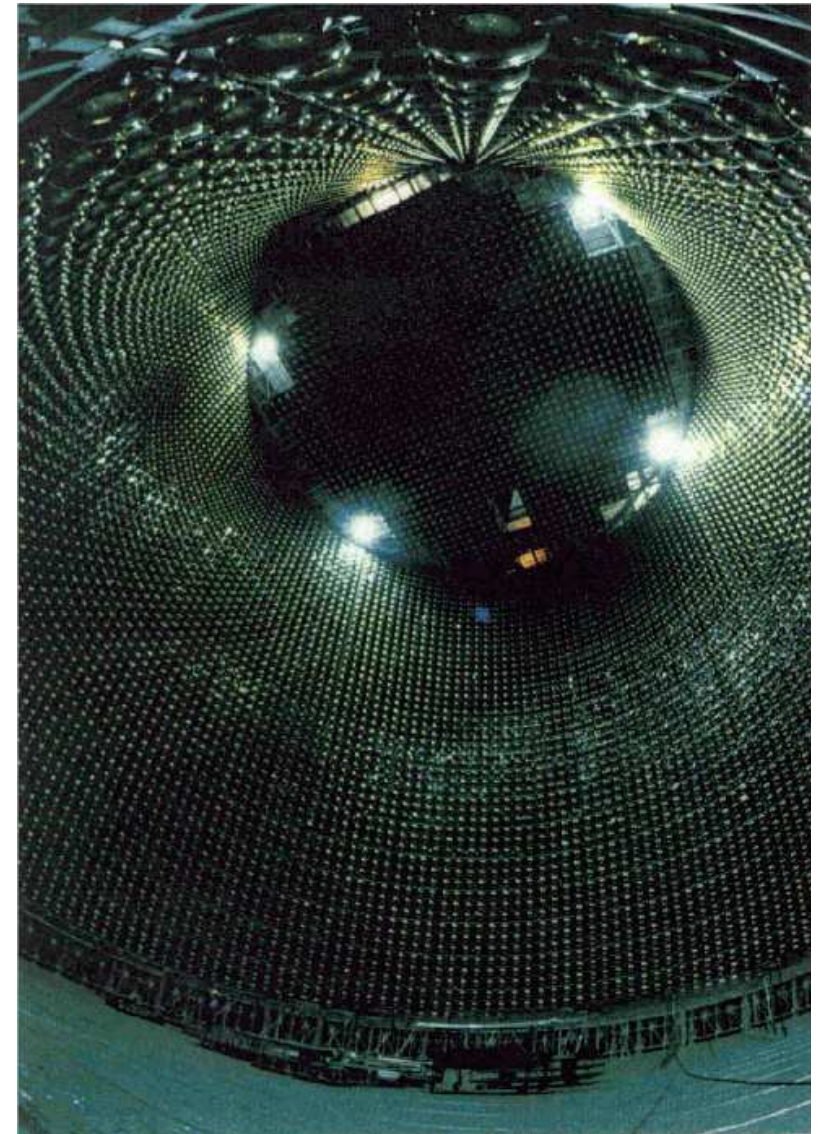
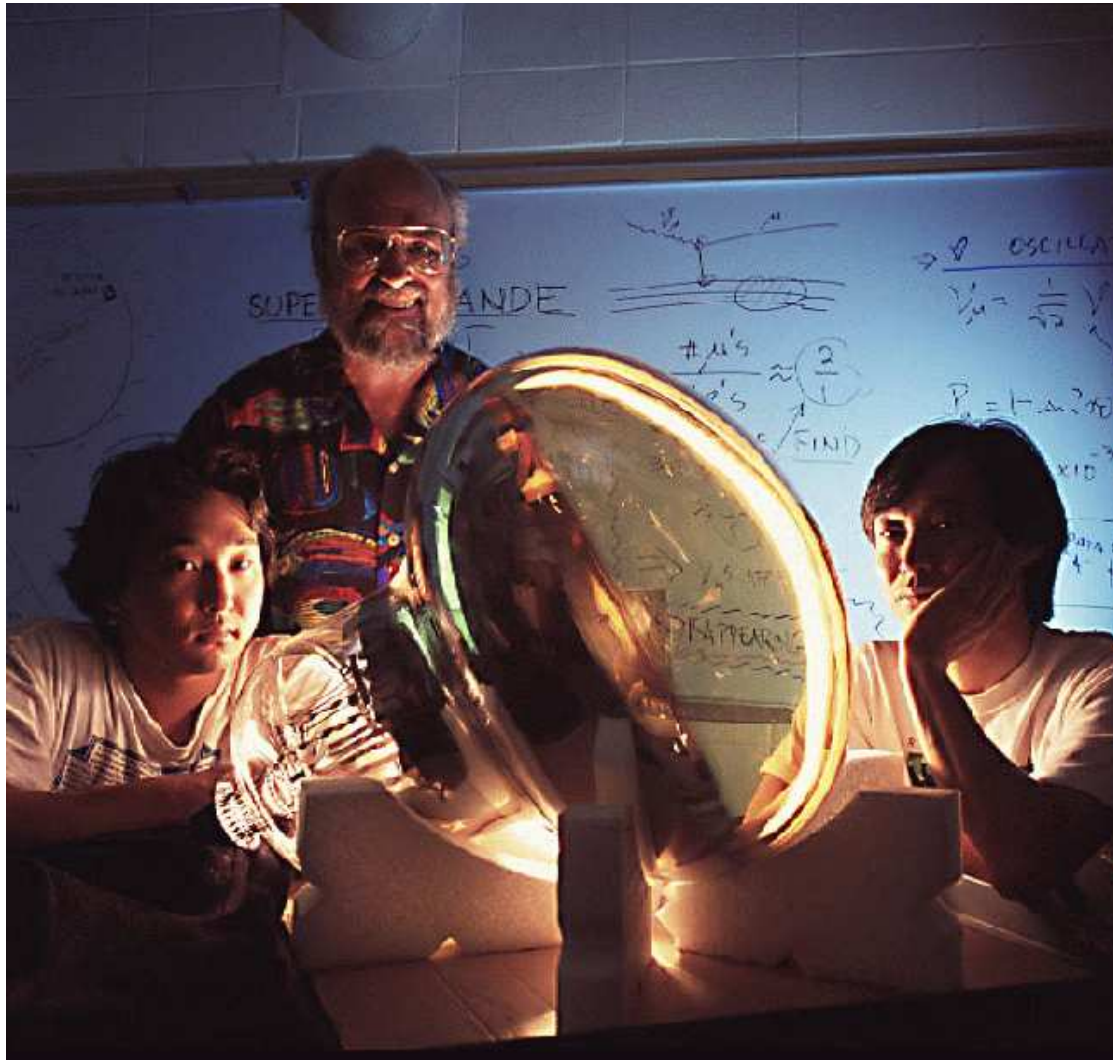
11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy!) rejestruje przechodzące cząstki

rejestrowane jest
promieniowanie Czerenkowa

Jak można mierzyć tak małe sygnały ($\sim 5MeV$) w tak ogromnym detektorze?



Super-Kamiokande



Napełnianie



Super-Kamiokande

Tło

Oczekiwane około 30 przypadków oddziaływań neutrin słonecznych na dobę.

Przypadki skrajnie niskich energii (rzędu 10 MeV) - konieczność redukcji tła.

Główne tło: naturalna promieniotwórczość.

Stężenie radonu w powietrzu w kopalni $\sim 3000 Bq/m^3$

- ⇒ hermetyczne drzwi, intensywna wentylacja powietrzem zewnętrznym
- ⇒ cała komora wyłożona specjalną plastikową osłoną zabezpieczającą przed przenikaniem radonu ze skał
- ⇒ hermetyczny zbiornik, dopełniony specjalnie oczyszczonym powietrzem ($3mBq/m^3$) pod ciśnieniem wyższym od atmosferycznego
- ⇒ intensywne filtrowanie wody (ok. 35 t/h, czyli cały detektor w ok. 2 miesiące)

Precyzyjna kalibracja detektora: rozpady zatrzymujących się mionów, własny akcelerator e^- 5-16 MeV, generator DT (źródło neutronów).

Super-Kamiokande

Wyzwalanie

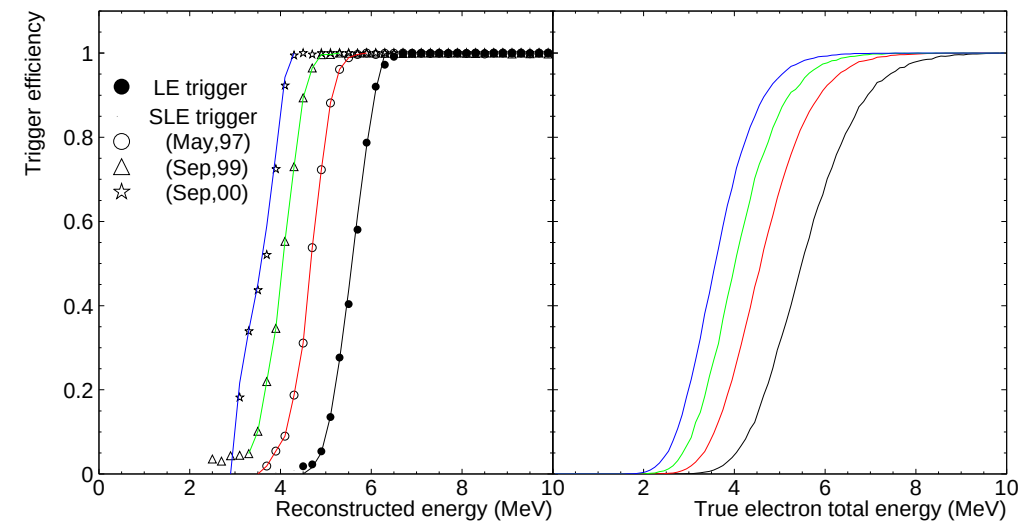
Średni poziom sygnału z pojedynczego fotopowielacza: 3.5 kHz.

Układ wyzwalania wymagał przyścia sygnału z wielu PMT w oknie czasowym 200 ns.

Średnia oczekiwana liczba zliczeń: ok. 8.

Różne progi wyzwalania:

- High Energy (HE) - 33 PMT
- Low Energy (LE) - 29 PMT
- Super Low Energy (SLE) - 24 PMT



Próg wyzwalania mógł być obniżany w miarę oczyszczania detektora.

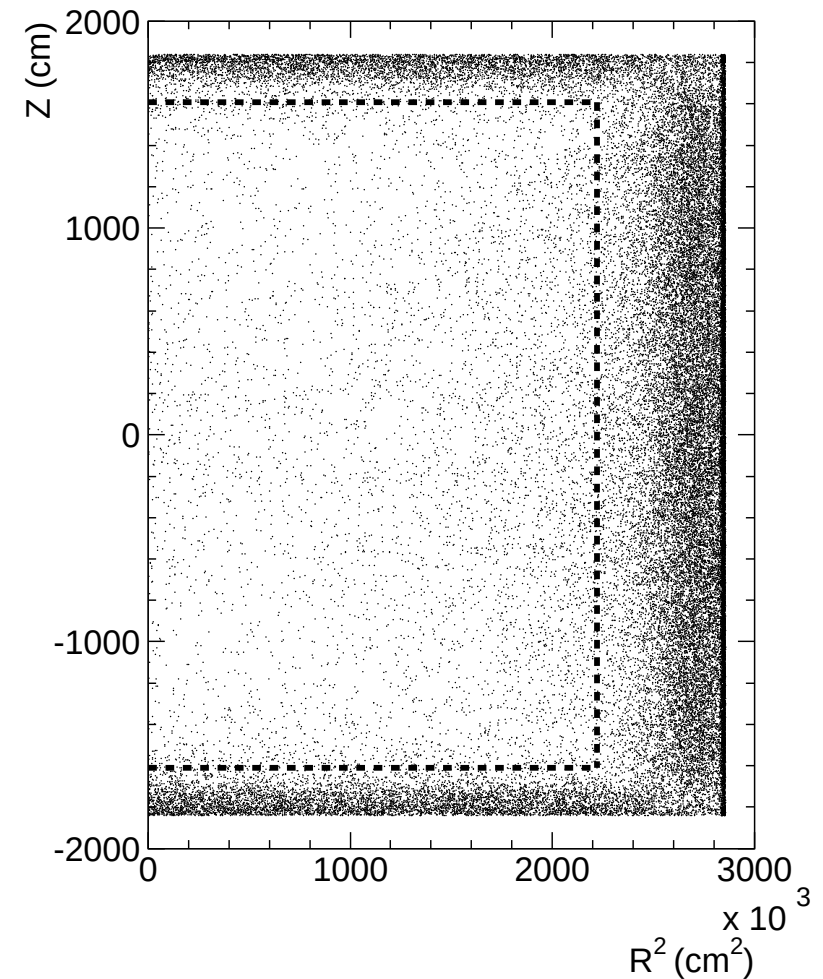
Super-Kamiokande

Wyzwalanie

Typowy rozkład rekonstruowanych wierzchołków po wstępnej selekcji przypadków niskiej energii (próg 5 MeV).

Wyraźny wkład **naturalnej promieniotwórczości** ścian komory.

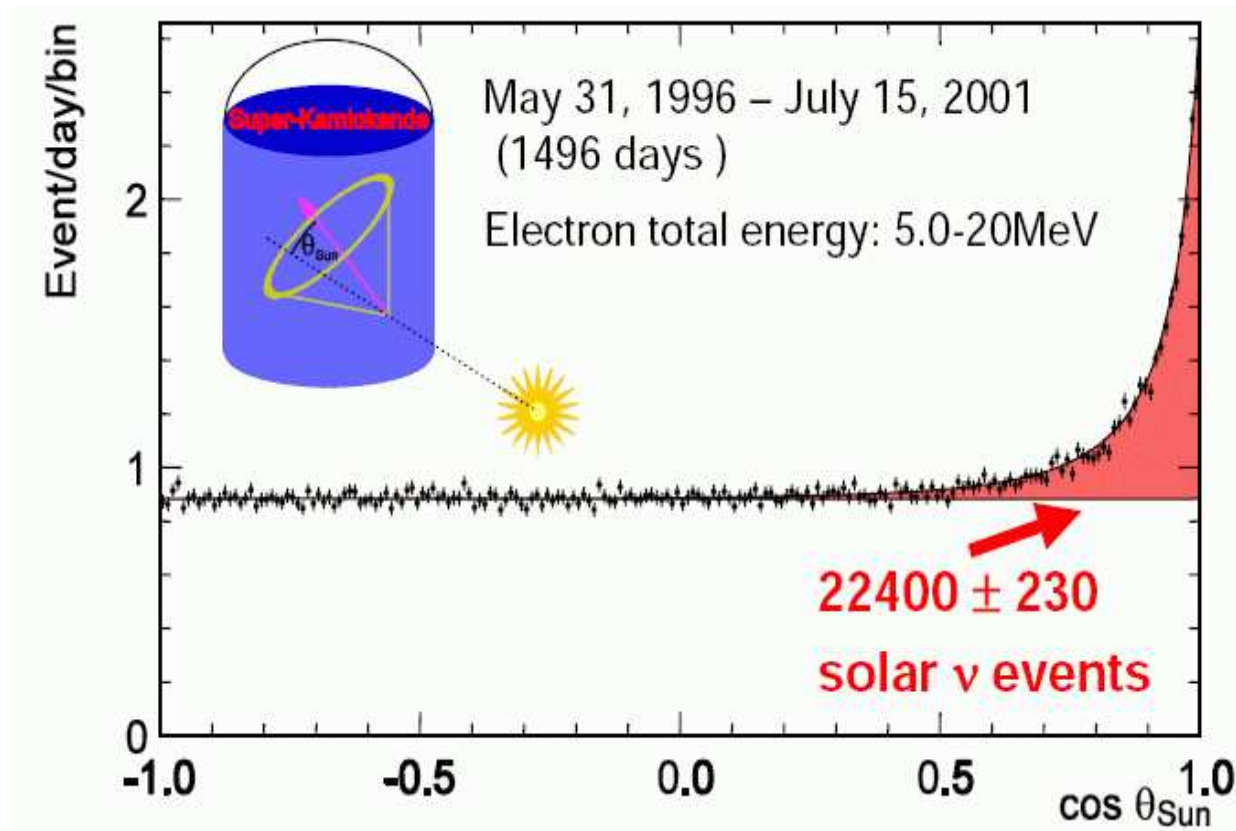
Przerywana linia: “fiducial volume”
obszar z którego wybieramy przypadki do dalszej analizy.



Super-Kamiokande

Obserwacja neutrin słonecznych

Oddziaływania **neutrín słonecznych** możemy odróżnić od oddziaływań innych neutrin mierząc **kąt emisji** elektronu względem **kierunku od słońca**



Zmierzono:

$$\Phi_S^{(B)} = 2.4 \pm 0.1 \cdot 10^6 \frac{1}{s \cdot cm^2}$$

Przewidywania:

$$\Phi_S^{(B)} = 5.3 \pm 0.6 \cdot 10^6 \frac{1}{s \cdot cm^2}$$

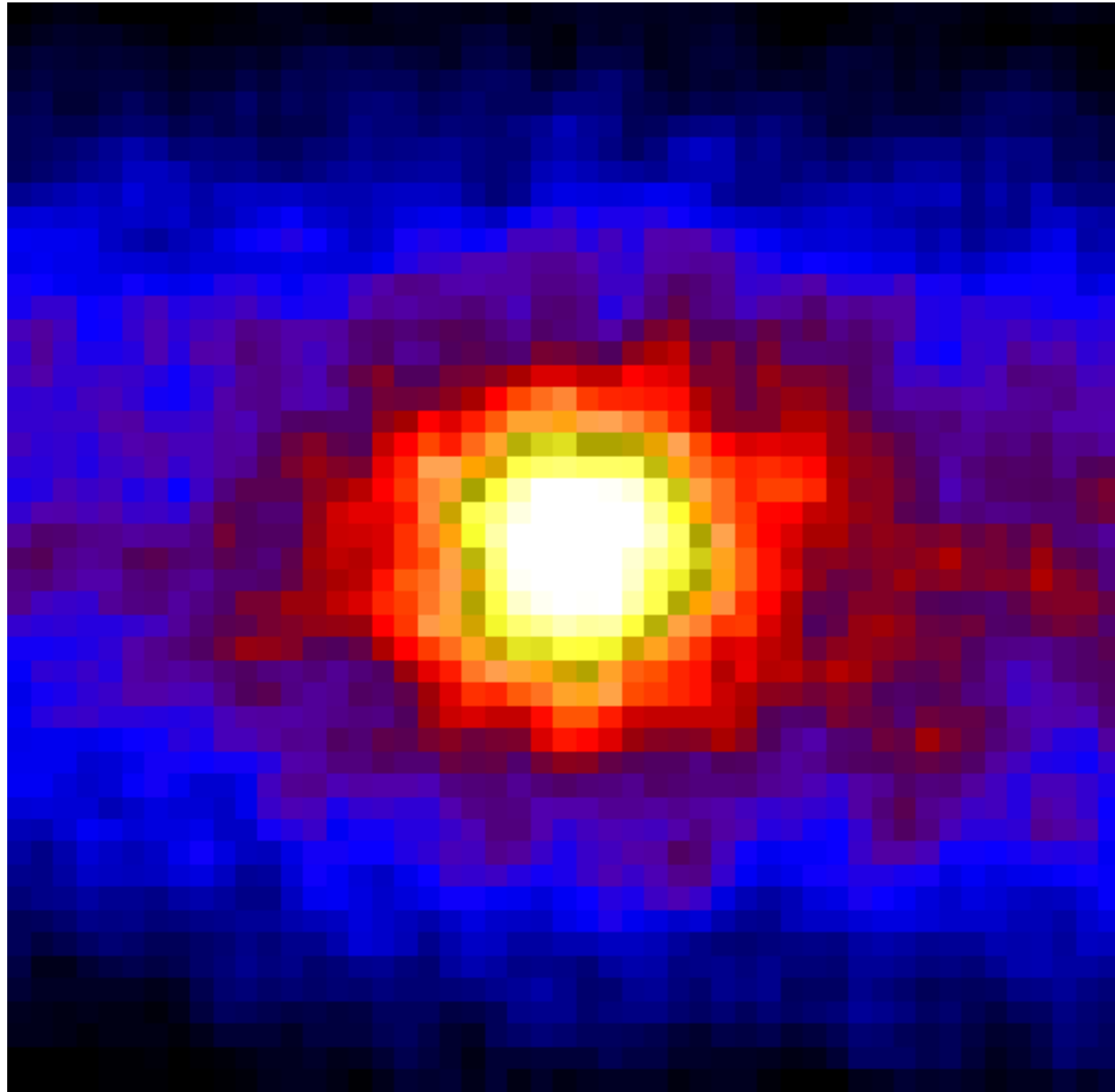
Deficyt neutrin słonecznych był już mierzony w latach '60 XX w. !

Ale zrozumieliśmy to dopiero w wieku XXI.

Super-Kamiokande

“Zdjęcie” Słońca
w “świecie” neutrin

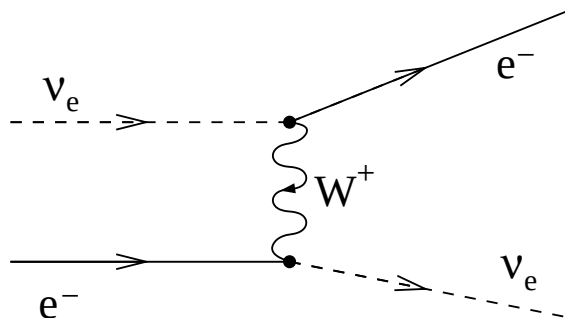
rzeczywisty rozmiar
Słońca $\sim \frac{1}{2}$ pixla



Super-Kamiokande

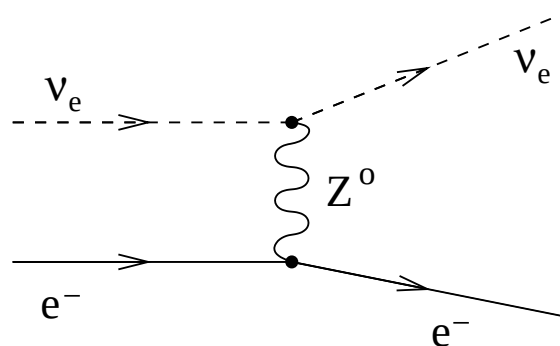
Neutrina słoneczne obserwowane w SK pochodzą głównie z reakcji typu **CC**

$$\nu_e + e^- \rightarrow e^- + \nu_e$$



Możliwa jest też detekcja ν_e poprzez proces typu **NC**:

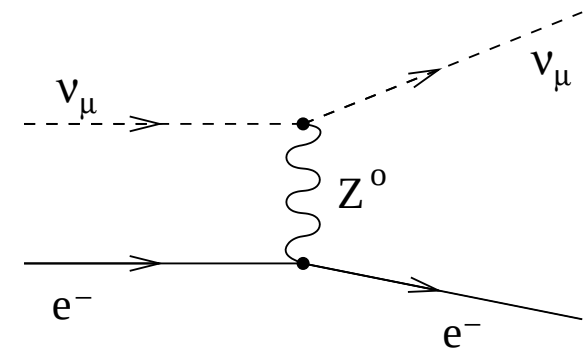
$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$$



przekrój czynny ~ 5 razy mniejszy...

Ale proces typu **NC** możliwy jest też dla innych neutrin, np:

$$\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$$



(także dla ν_τ)

Pomiar Super-Kamiokande:
$$\Phi^{SK} \approx \Phi_{\nu_e} + 0.154 \cdot (\Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau})$$

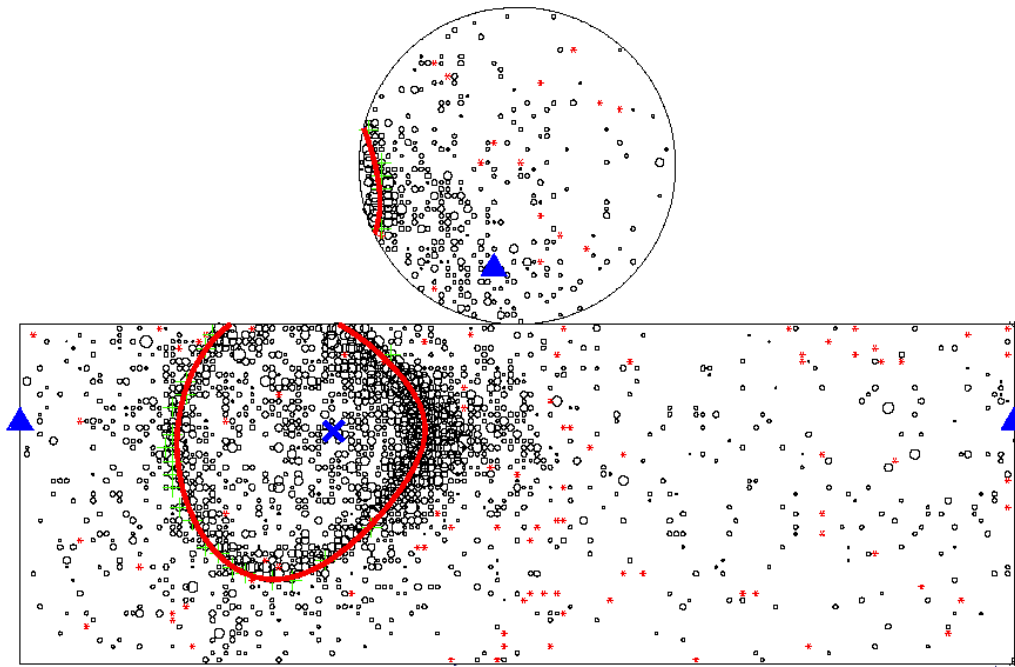
Super-Kamiokande

Dla wyższych energii potrafimy odróżnić neutrino:

Neutrino elektronowe

Przypadek $\nu_e n \rightarrow e^- p$

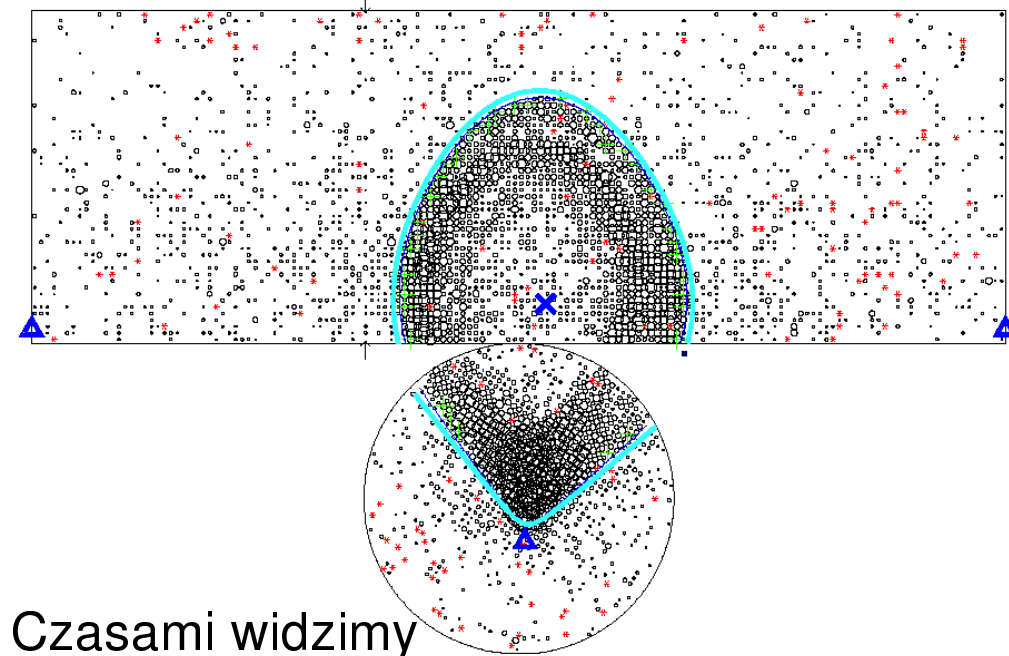
Krótki zasięg elektronu - “cienki” pierścień



Neutrino mionowe

Przypadek $\nu_\mu n \rightarrow \mu^- p$

Długa droga w wodzie - “gruby” pierścień.



Czasami widzimy
też opóźniony **sygnał** e^- z rozpadu μ^- .

Super-Kamiokande

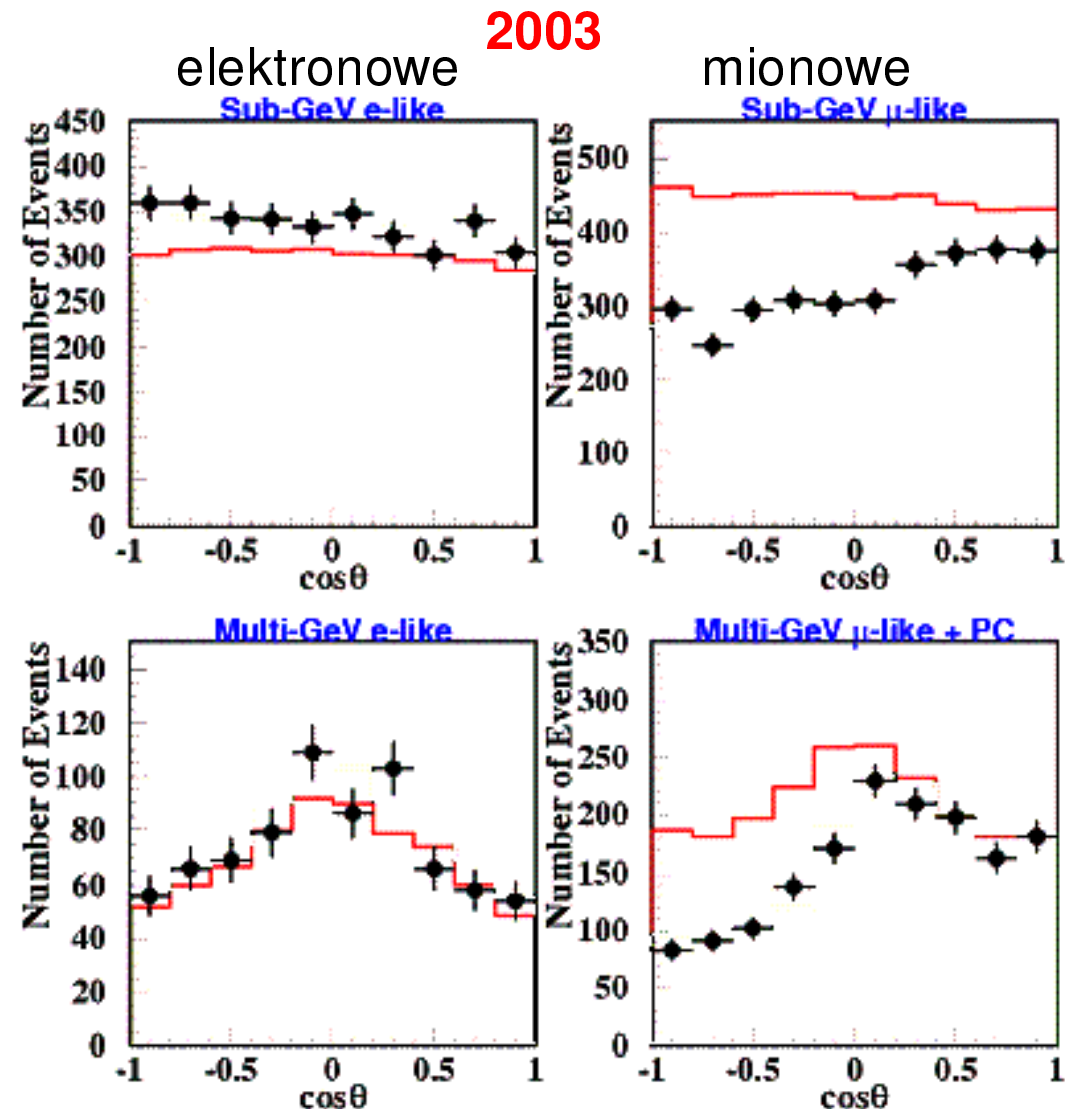
Neutrina atmosferyczne

Zależność liczby neutrin **elektronowych** i **mionowych** od kierunku ($\cos \theta = 1$ gdy lecą do dołu, -1 gdy do góry) $\Rightarrow$

Zgodnie z oczekiwaniami **tylko** neutrin **elektronowych** leci **do dołu** ($\cos \theta > 0$) i **do góry** ($\cos \theta < 0$).

Wyraźnie **mniej** ν_μ lecących **od dołu** niż z góry !

Czy neutrina mionowe mogą “znikać” przechodząc przez Ziemię ?



Super-Kamiokande

Neutrina atmosferyczne

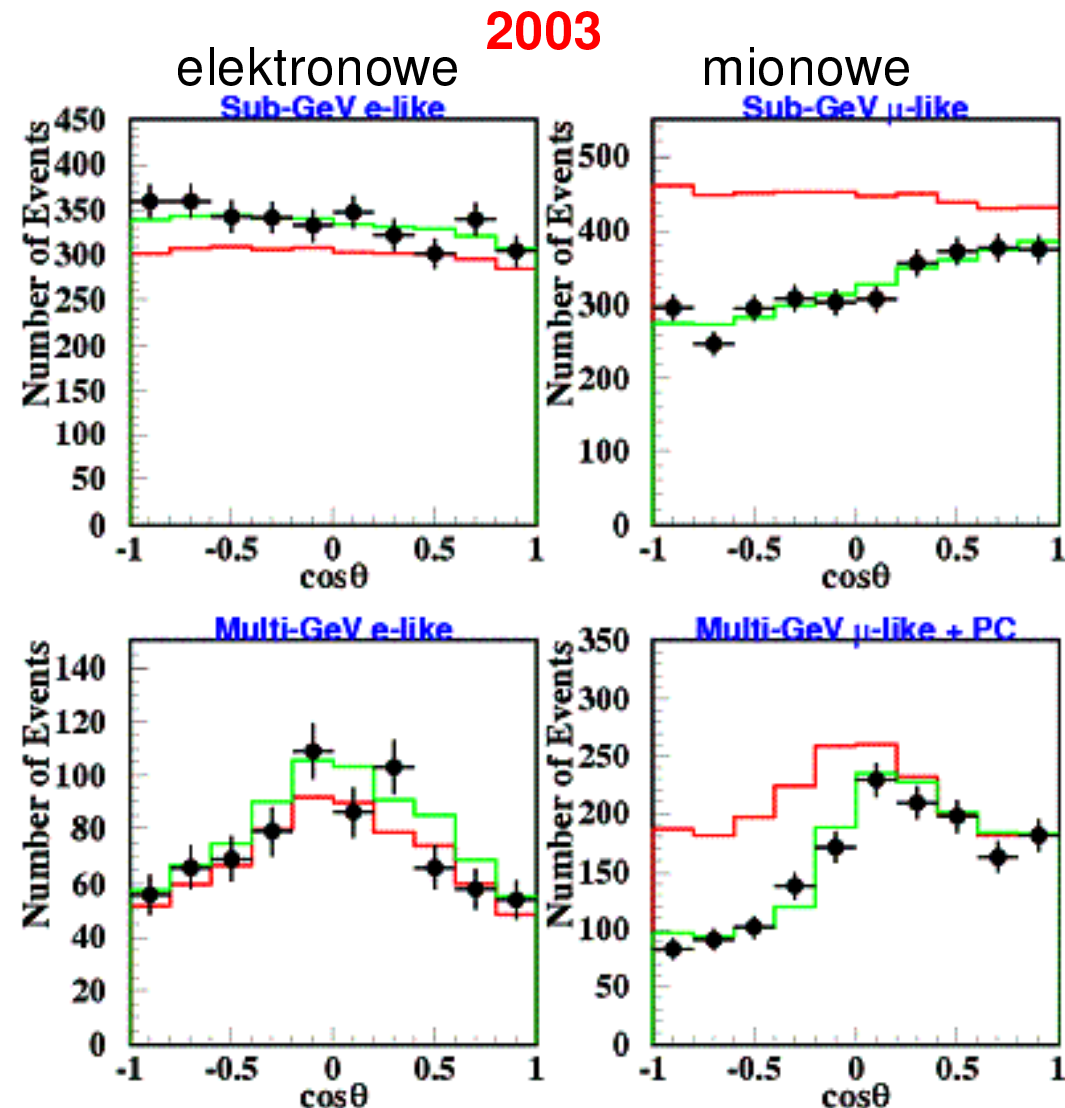
Zależność liczby neutrin **elektronowych** i **mionowych** od kierunku ($\cos \theta = 1$ gdy lecą do dołu, -1 gdy do góry) $\Rightarrow$

Zgodnie z oczekiwaniami **tyle samo** neutrin **elektronowych** leci **do dołu** ($\cos \theta > 0$) i **do góry** ($\cos \theta < 0$).

Wyraźnie **mniej** ν_μ lecących **od dołu** niż z góry !

Czy neutrina mionowe mogą “znikać” przechodząc przez Ziemię ?

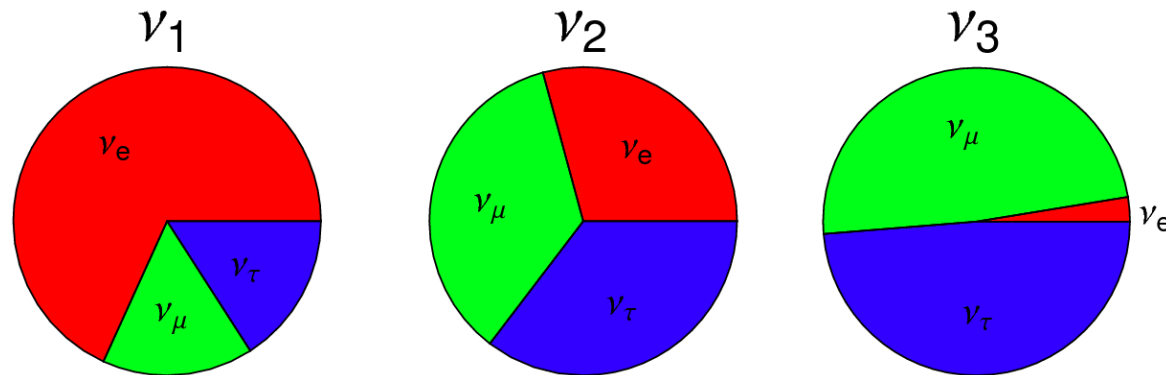
Musimy przyjąć, że neutrina oscylują...



Neutrino

Oscylacje

W oddziaływaniach słabych produkowane są zawsze neutrino o określonym zapachu. Jednak stany fizyczne (stany własne masy) neutrino są mieszankami tych stanów:



⇒ produkcja neutrino o określonym zapachu oznacza produkcję mieszanki ν_1 , ν_2 i ν_3

Gdyby neutrino nie miały masy to produkowana kombinacja (superpozycja) stanów nie zmieniałaby się w czasie ⇒ zachowanie liczby leptonowej.

Jeśli przyjmiemy, że neutrino mają masę to każdy stan porusza się z inną prędkością.

⇒ własności kombinacji zależą od przebytej odległości, zmieniają się w czasie...

Neutrino

Oscylacje dla trzech generacji

Stany zapachowe są superpozycją stanów masowych:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

PMNS - macieź Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata
odpowiada macieży CKM mieszania kwarków

$$U = \underbrace{\begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\substack{\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu \\ \text{słoneczne} \\ \theta_{12} \approx 35^\circ}} \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}}_{\substack{\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau \\ \text{atmosferyczne} \\ \theta_{23} \approx 45^\circ}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\substack{\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau \\ \text{reaktorowe, } \theta_{13} \sim 8^\circ \\ \text{potwierdzone w 2012!}}}$$