

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

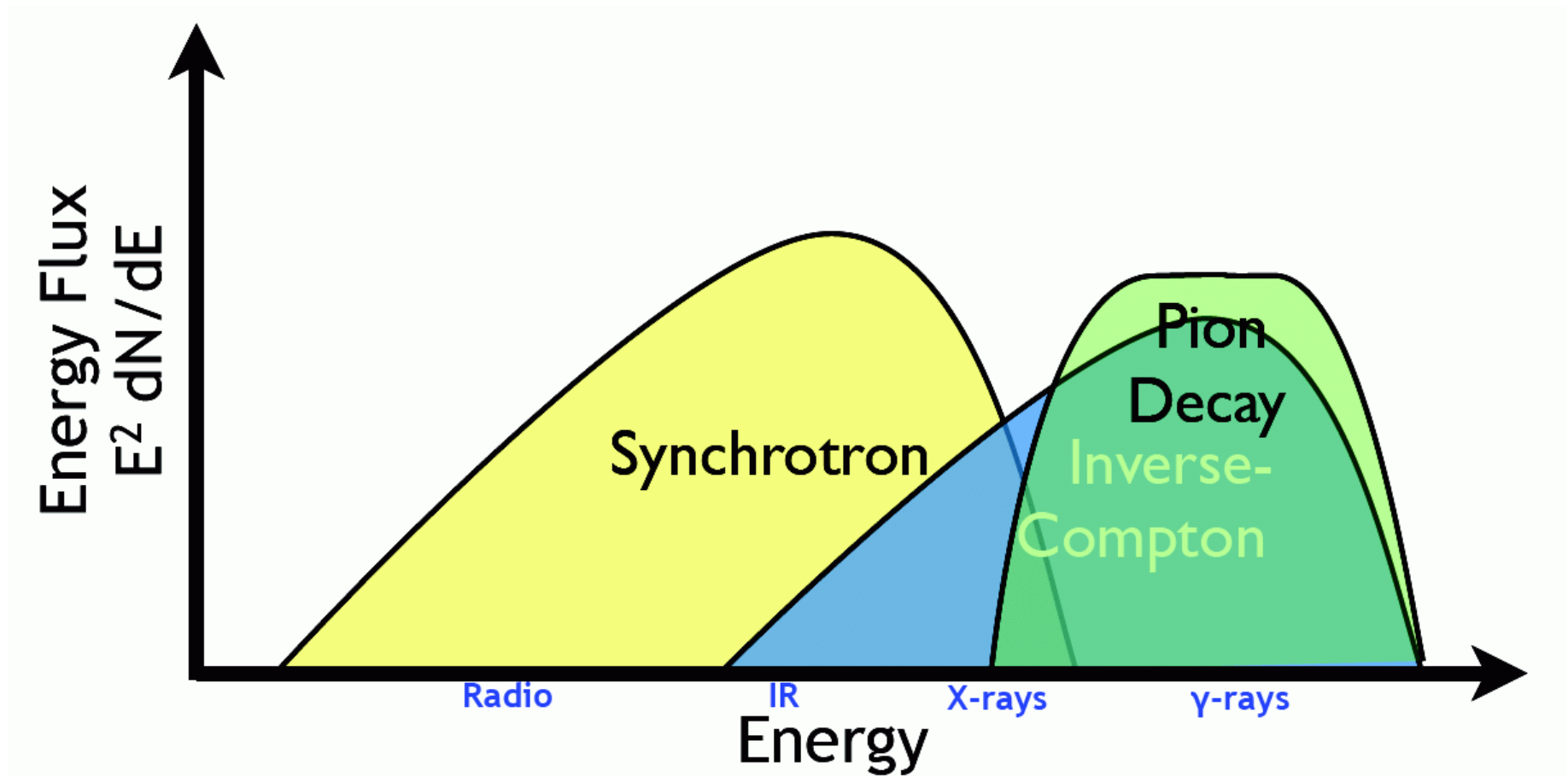
Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład XI

- Kosmiczne promieniowanie gamma najwyższych energii
- ⇒ Wyniki eksperymentu HESS
- ⇒ Projekt CTA
- Astronomia neutrin
- ⇒ Eksperyment Super-Kamiokande

Promieniowanie gamma

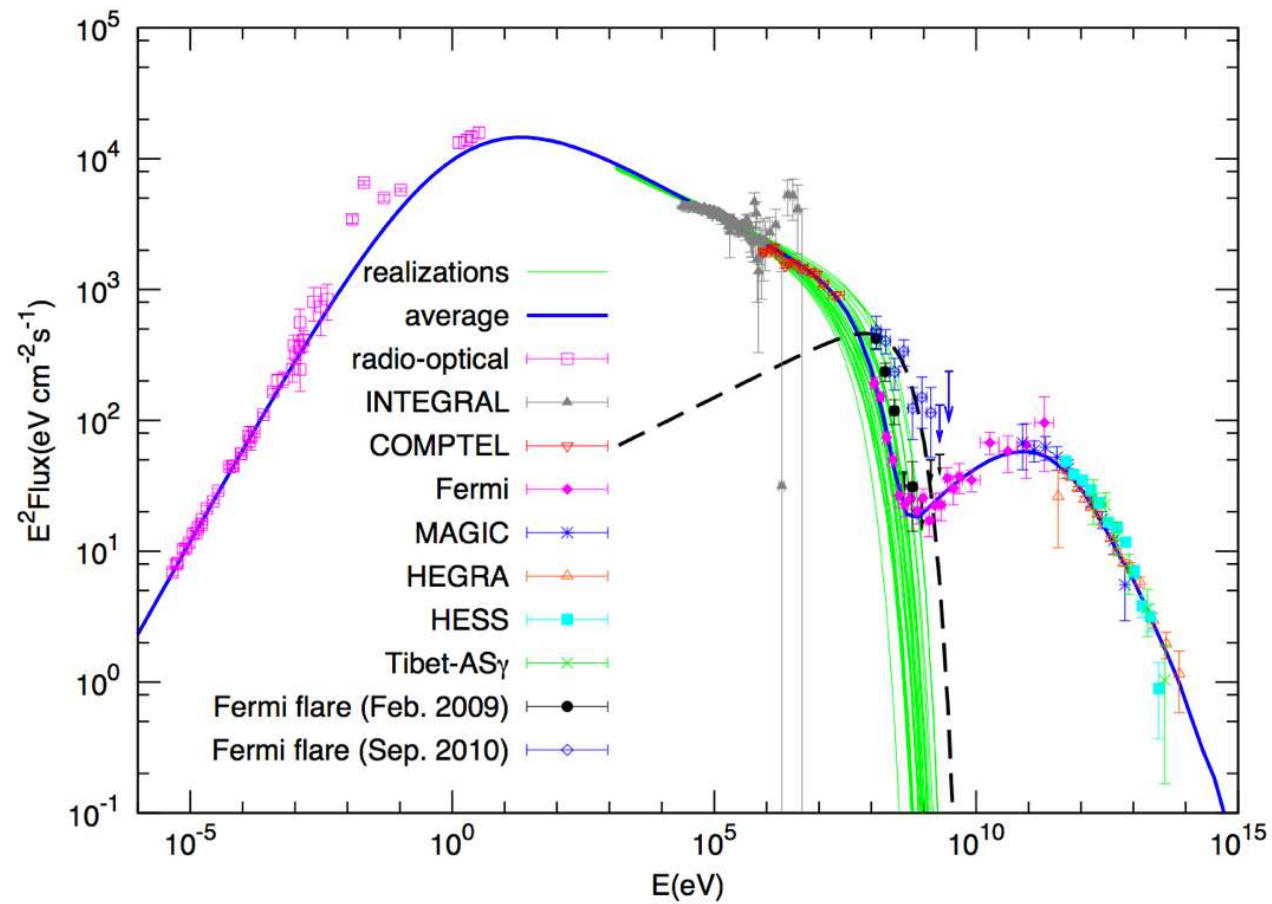
Oczekiwane widmo



Promieniowanie gamma

Mgławica Kraba

Widmo rejestrowanego promieniowania gamma

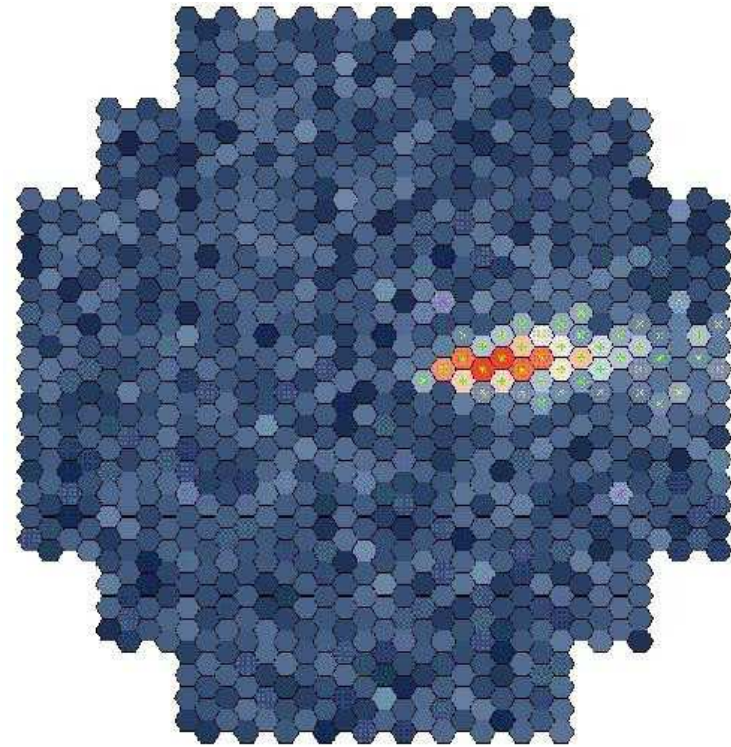
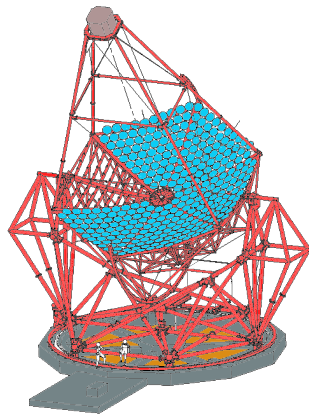
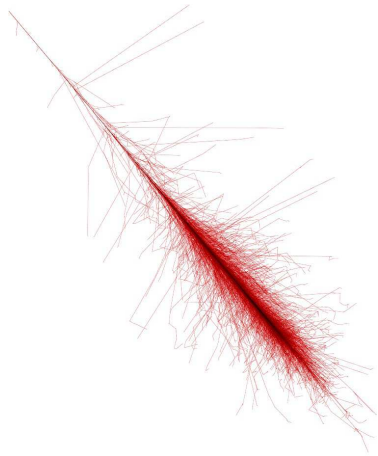


Promieniowanie gamma

Detekcja

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

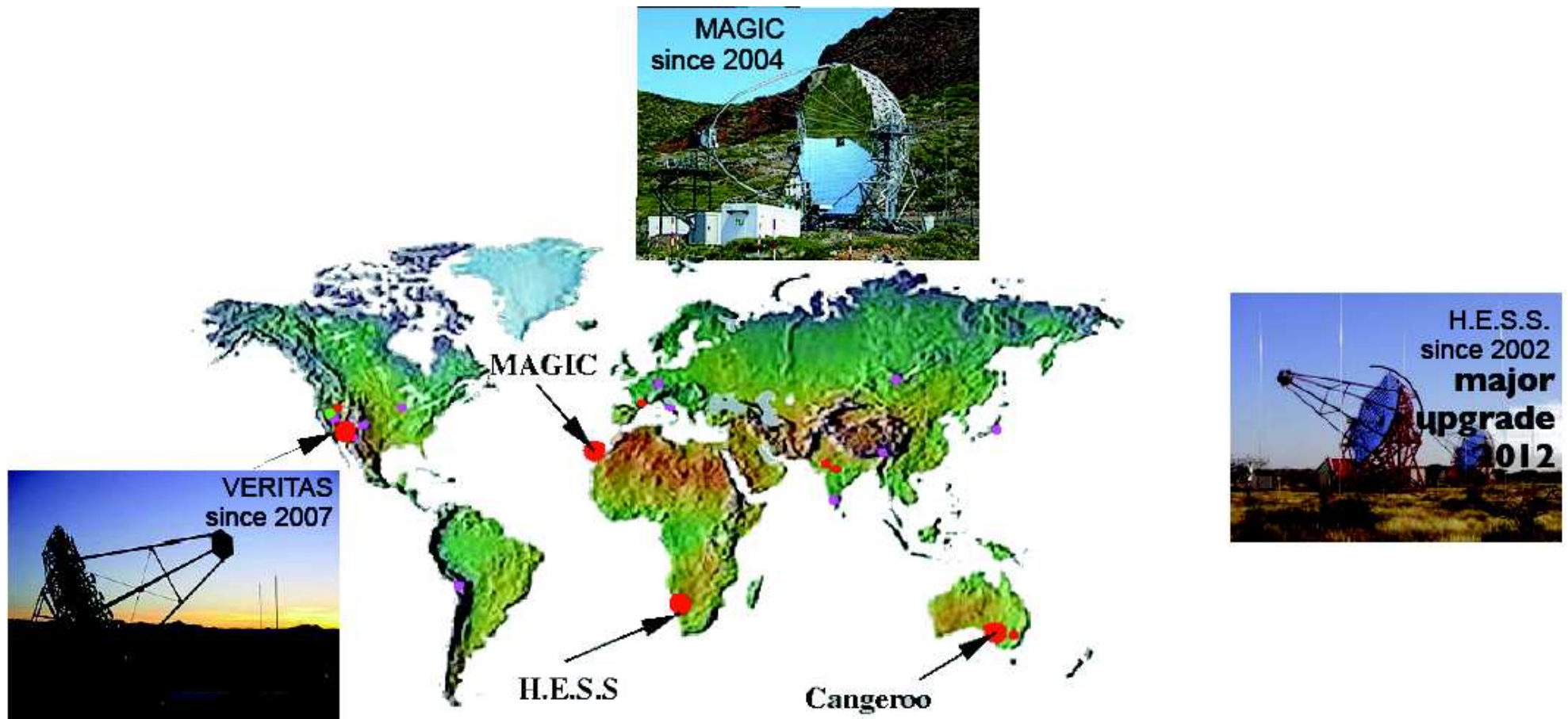
Jeśli teleskop znajdzie się w polu oświetlonym przez kaskadę, zrobi jej “zdjęcie”



Promieniowanie gamma

Instrumenty

Naziemne detektory promieniowania gamma najwyższych energii



Teleskopy Czerenkowa

Atmospheric Cherenkov Telescopes (ACT)



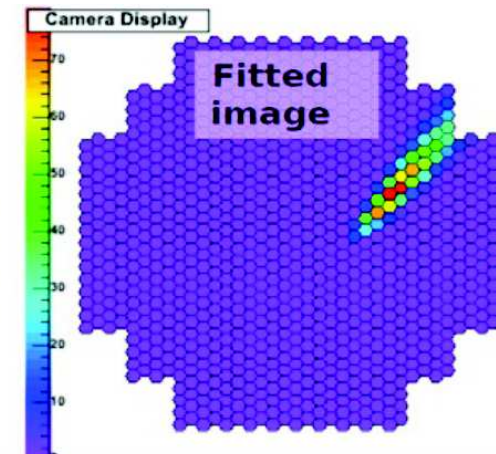
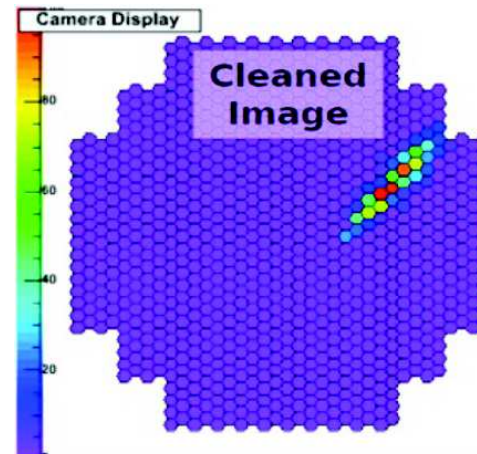
Teleskopy Czerenkowa

Rekonstrukcja

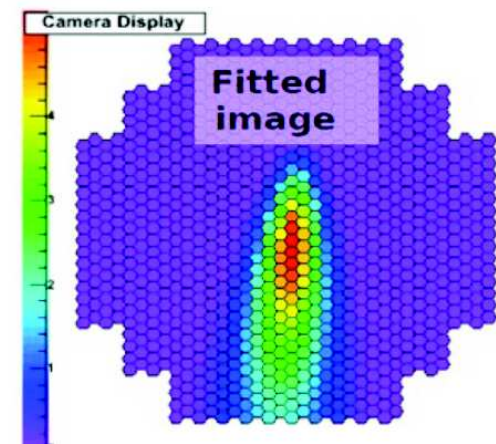
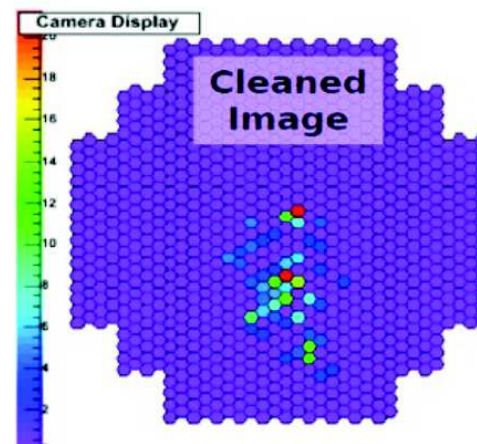
Na podstawie zmierzonego natężenia promieniowania możemy wyznaczyć **energię** początkowego fotonu.

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

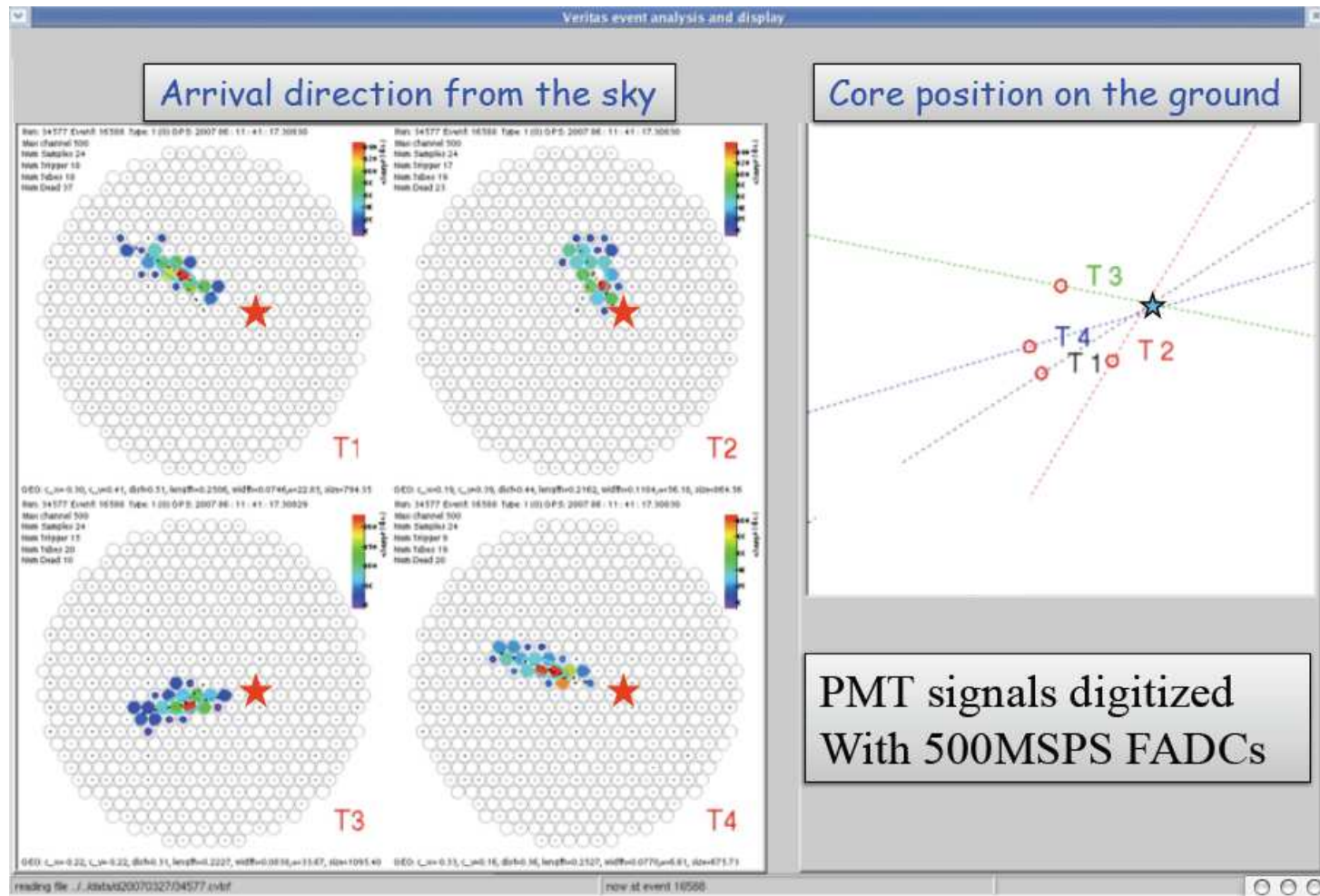


hadron

Teleskopy Czerenkowa

Rekonstrukcja

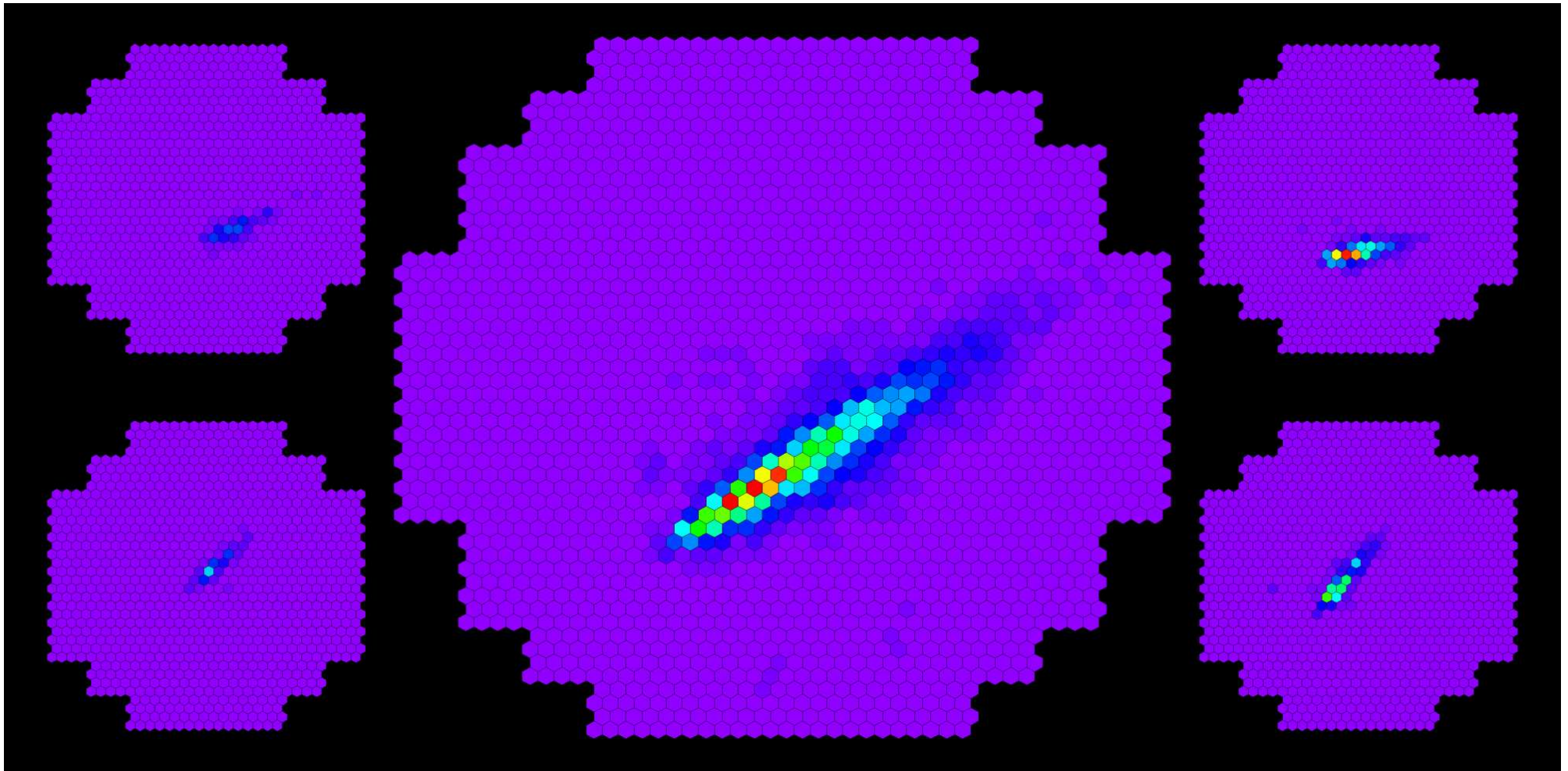
Wyznaczenie kierunku znacznie dokładniejsze dla obserwacji kilkoma teleskopami



HESS

Rekonstrukcja

Wyznaczenie kierunku znacznie dokładniejsze dla obserwacji kilkoma teleskopami

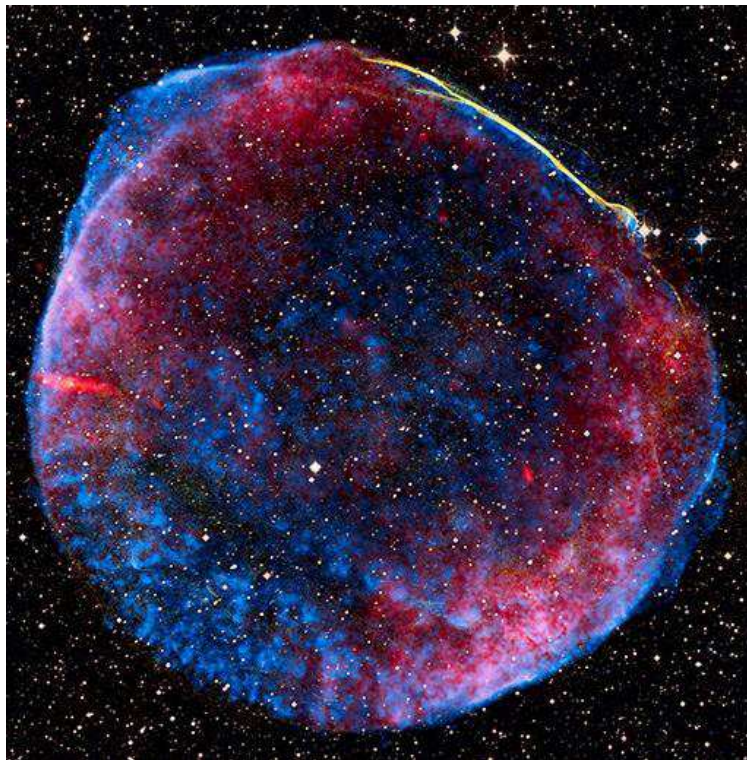


HESS

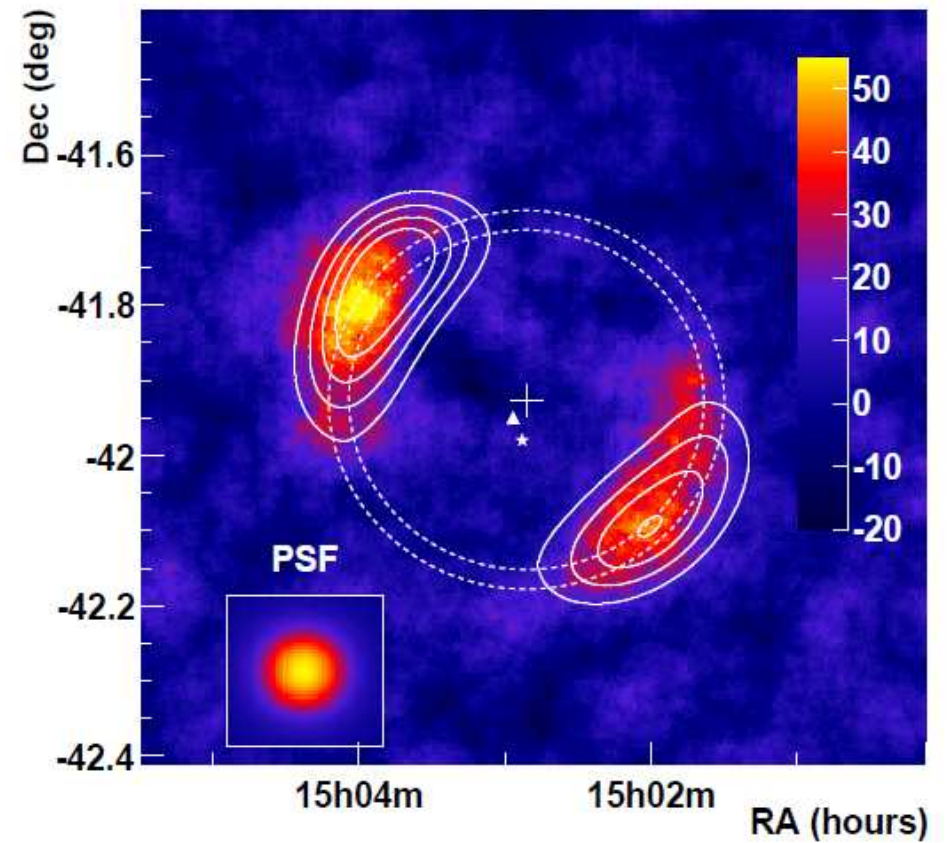
Wyniki

Obserwacja promieniowania TeV z SNR - potwierdzenie przyspieszania CR

SN1006 w prom. radiowym, optycznym, X



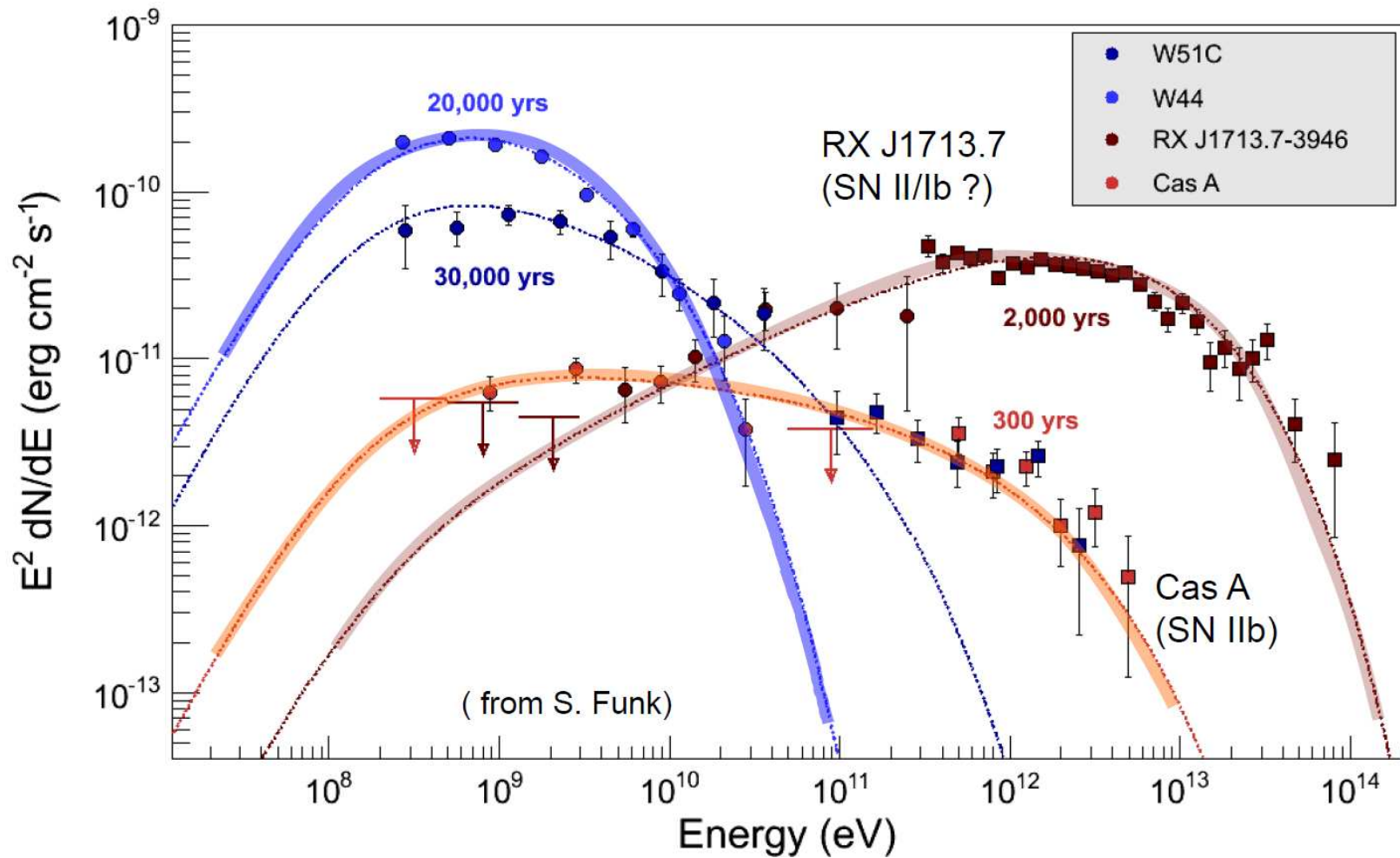
i w promieniowaniu TeV (HESS)



HESS

Wyniki

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



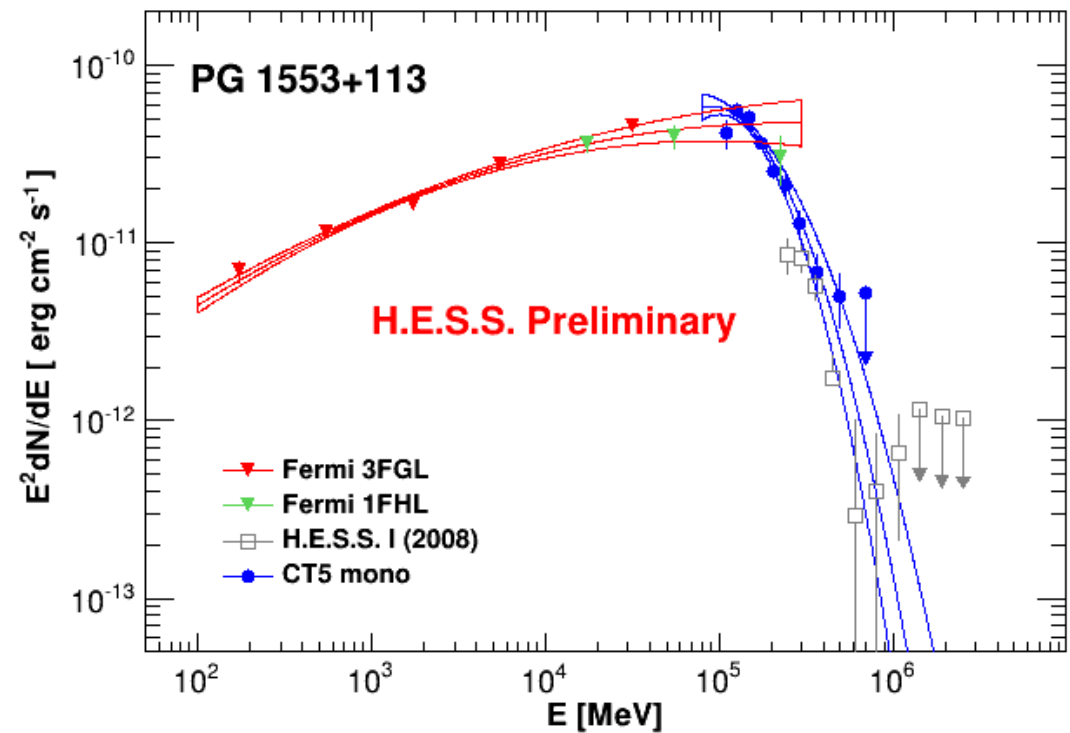
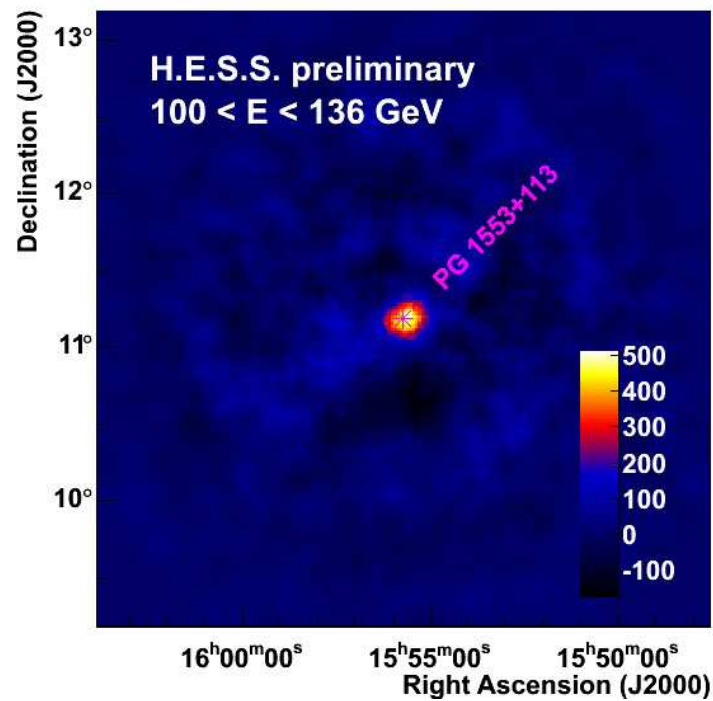
HESS

Wyniki

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

Wysoka precyzja: jednoczesny pomiar rozkładu przestrzennego i spektrum.

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



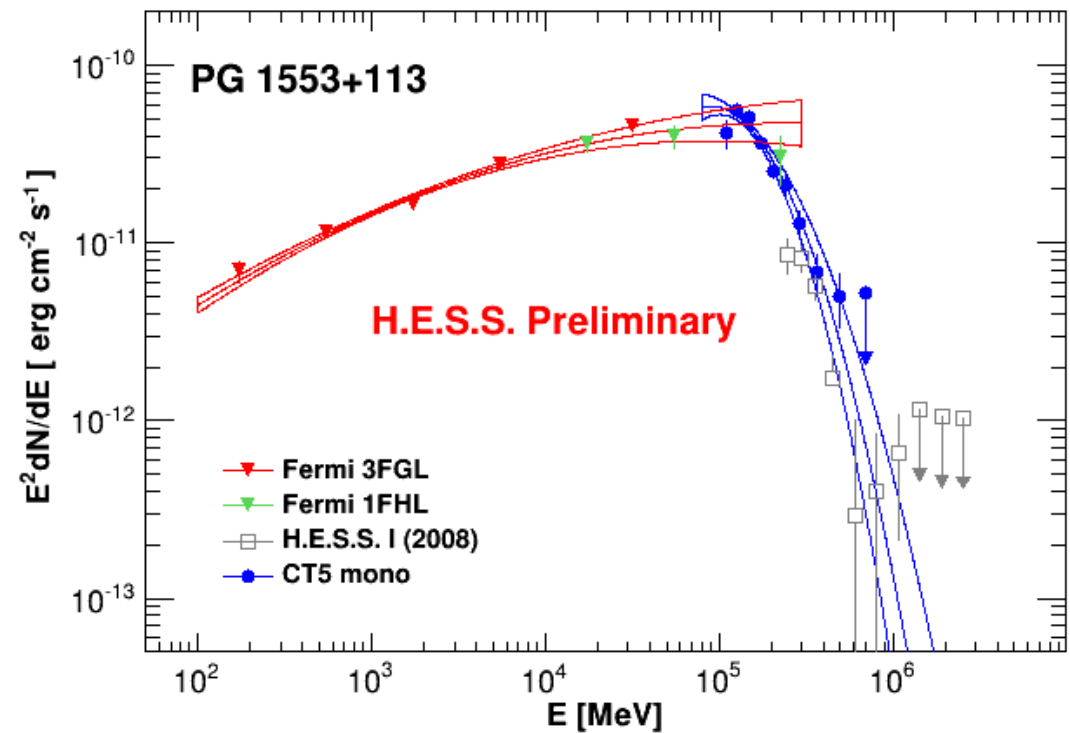
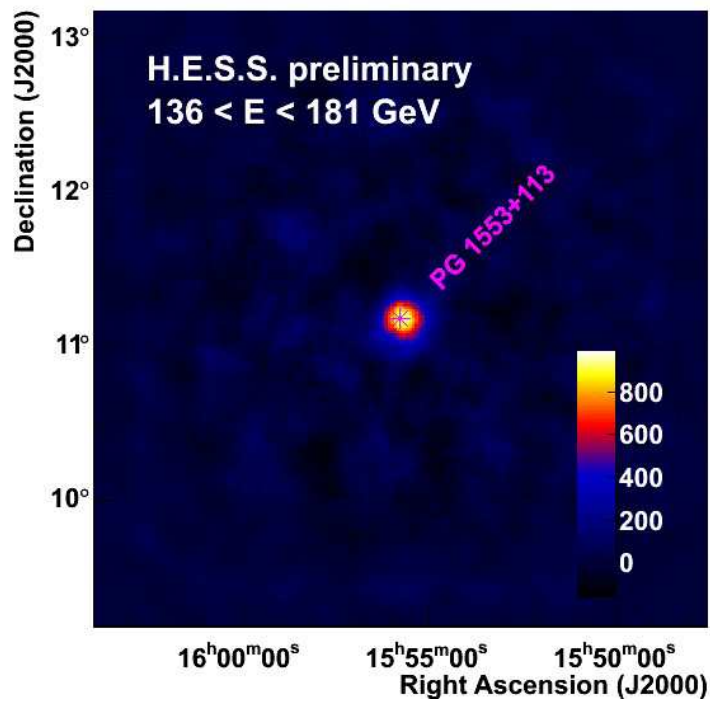
HESS

Wyniki

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

Wysoka precyzja: jednoczesny pomiar rozkładu przestrzennego i spektrum.

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



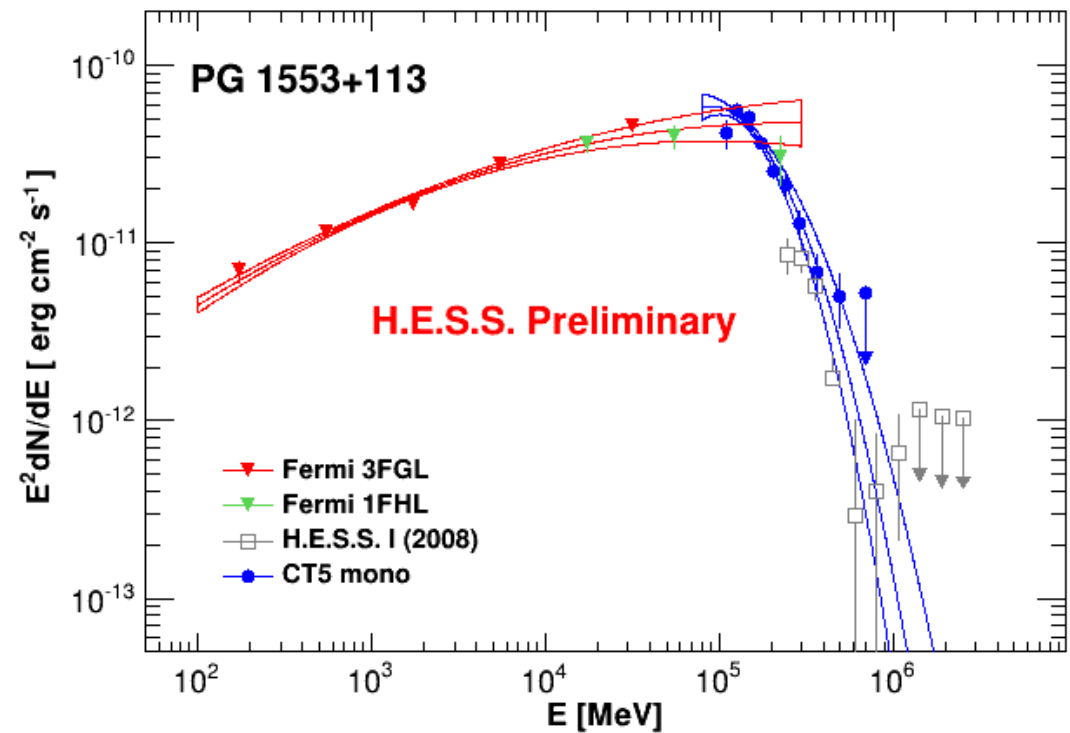
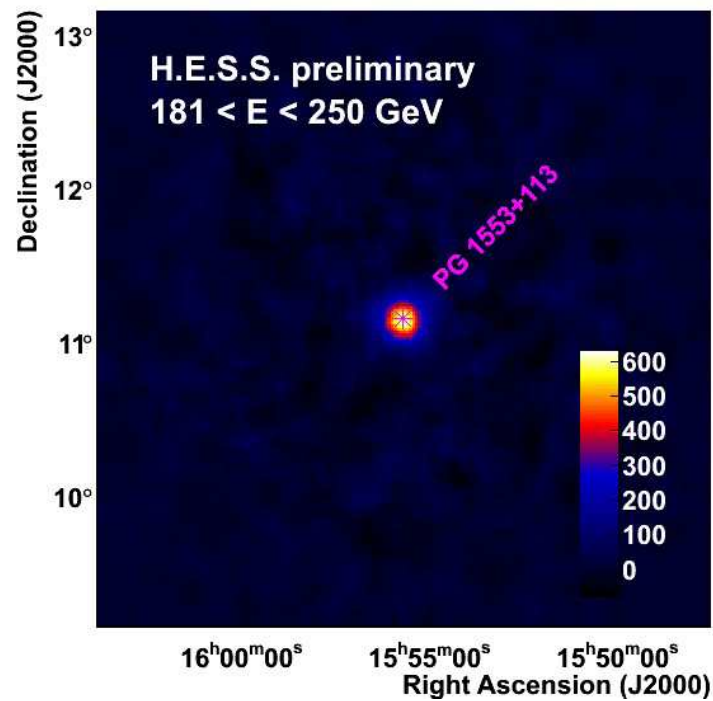
HESS

Wyniki

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

Wysoka precyzja: jednoczesny pomiar rozkładu przestrzennego i spektrum.

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

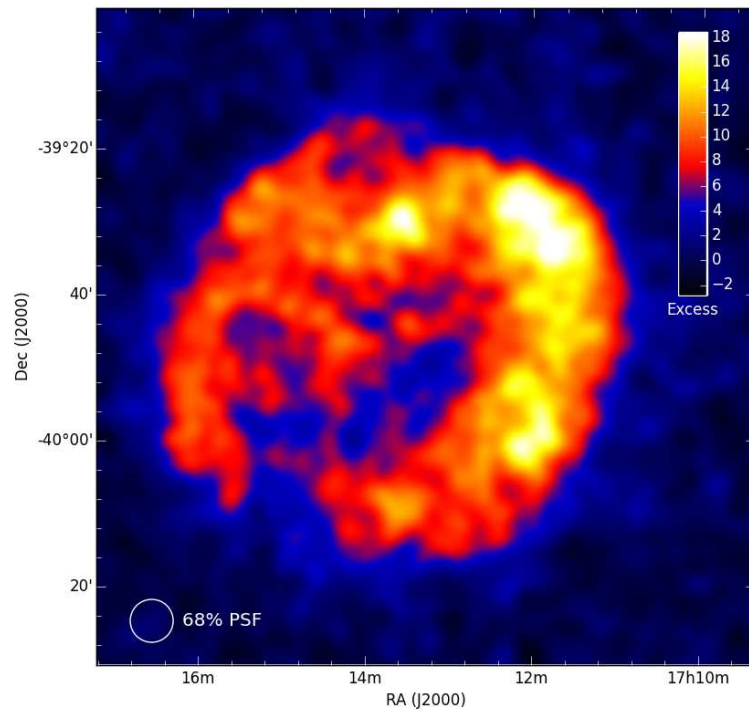


HESS

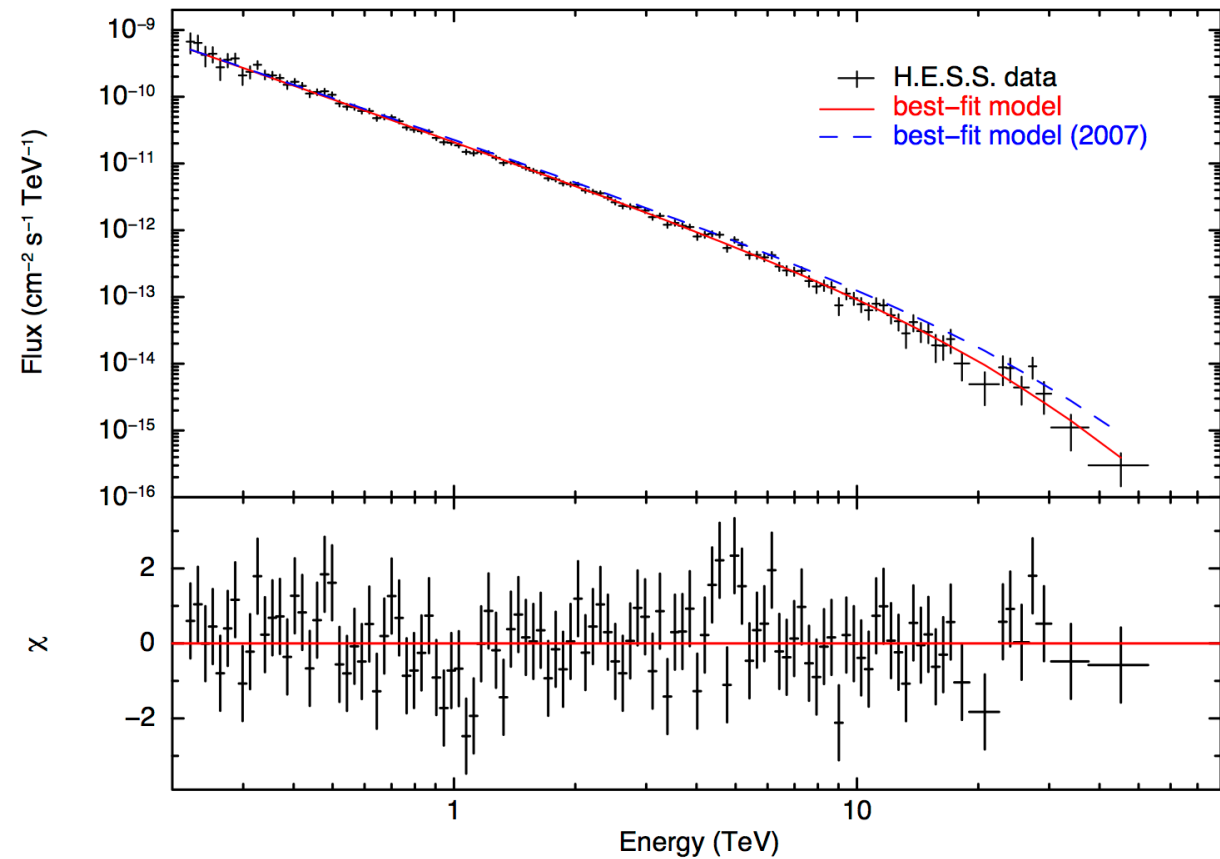
Wyniki

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

RX J1713.7-3946 (SNR)



$E > 250 GeV$



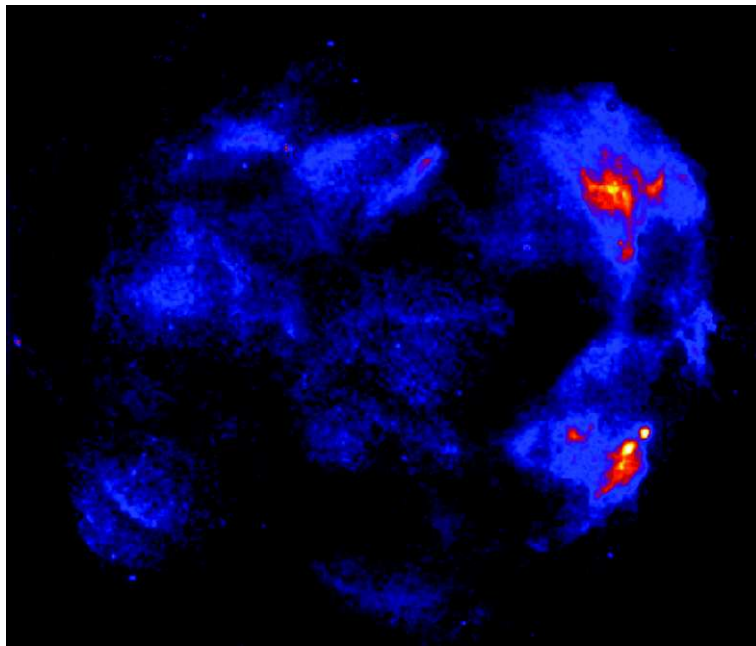
Emisja promieniowania w zakresie TeV związana z przyspieszaniem cząstek

HESS

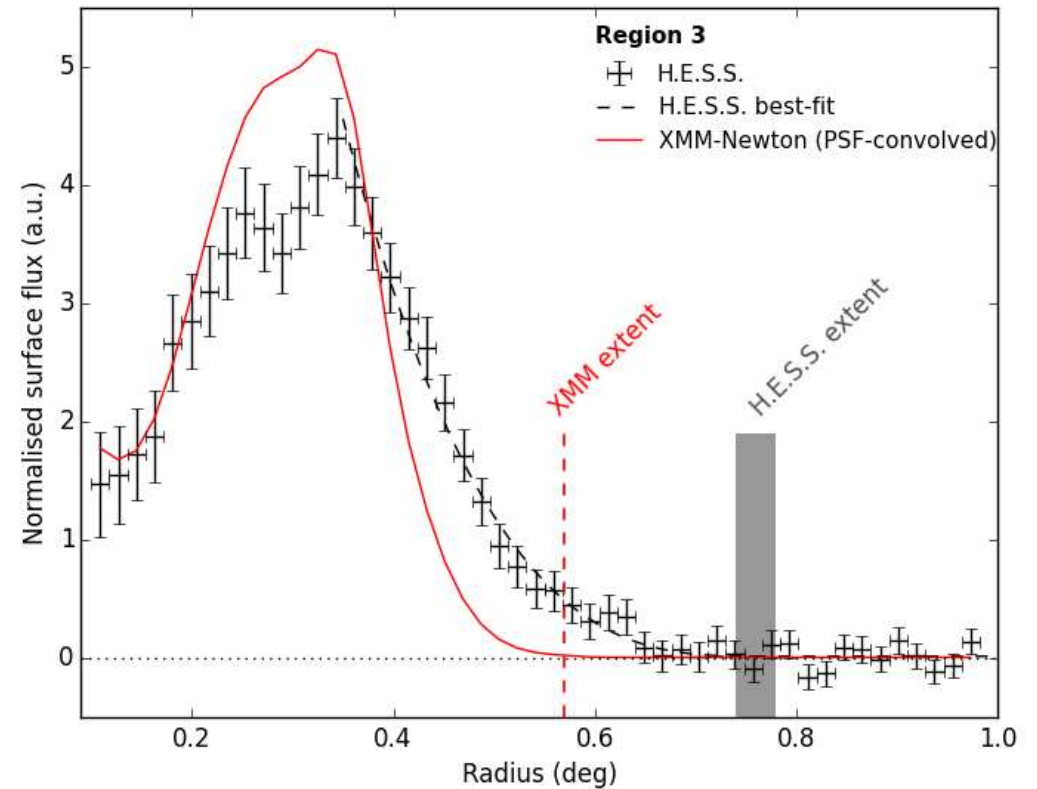
Wyniki

Dedykowane pomiary różnych znanych źródeł pozagalaktycznych.

RX J1713.7-3946 (SNR)



X-ray

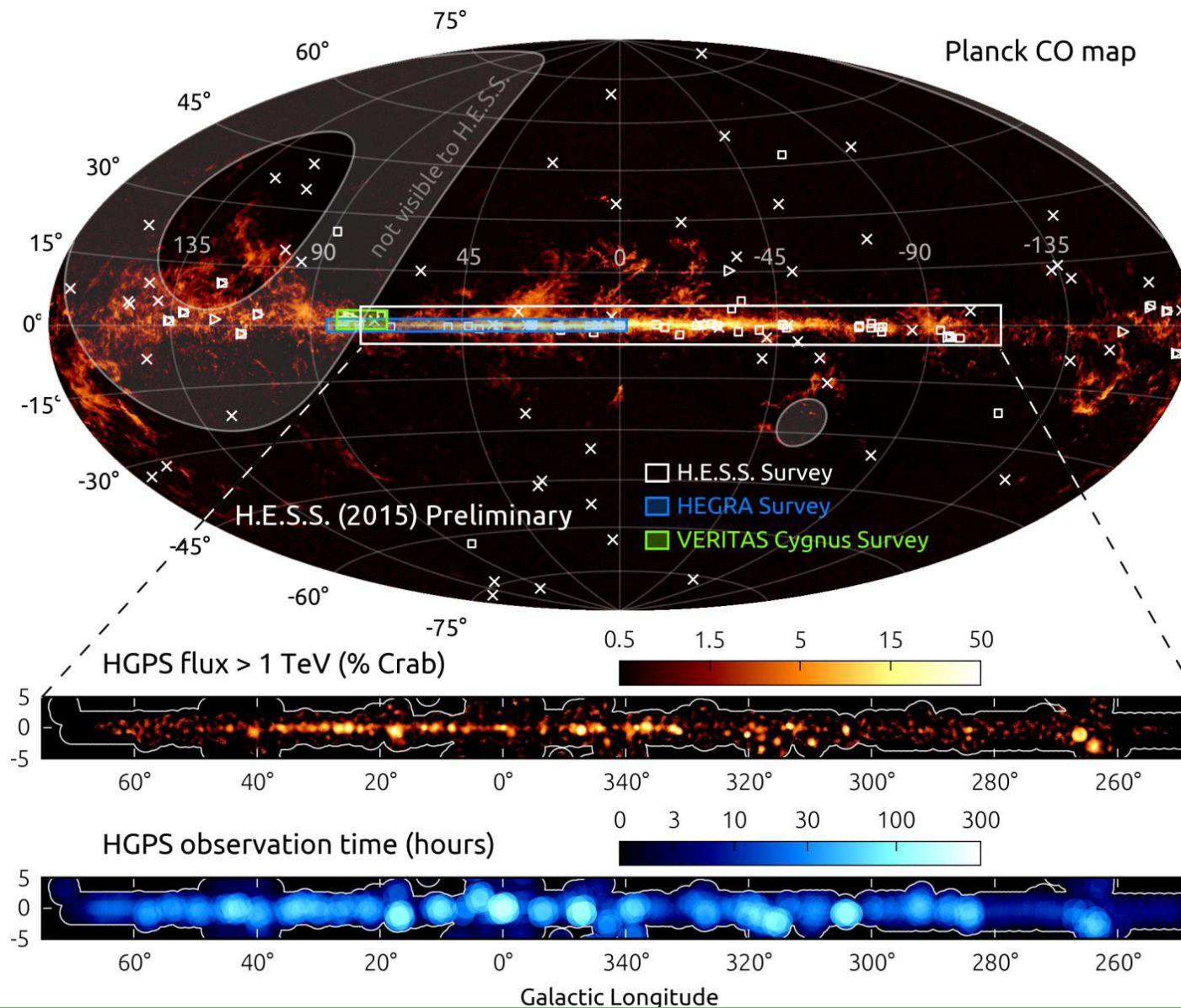


Oddziaływanie przyspieszonych cząstek z otaczającą materia (rozpady π^0)

Wyniki

Skany płaszczyzny Galaktyki.

HESS



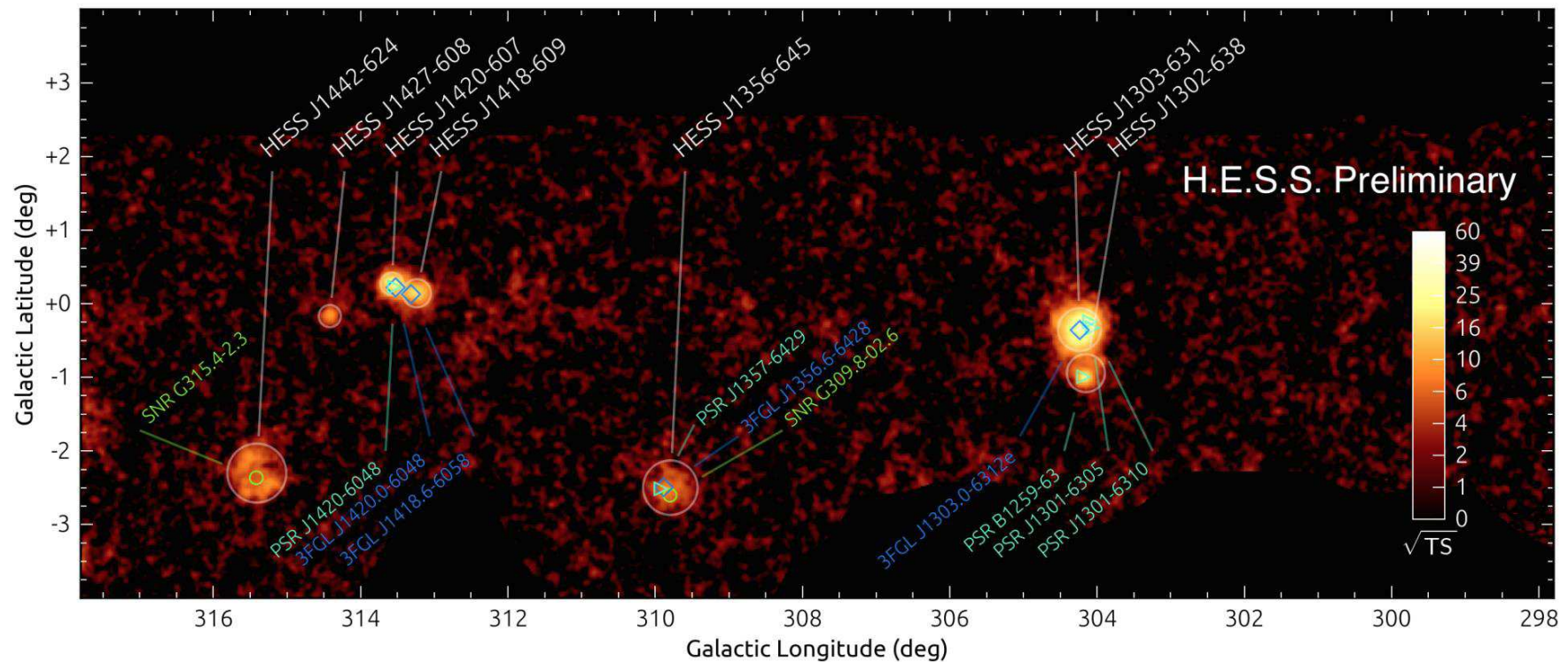
HESS

Wyniki

Skan płaszczyzny Galaktyki.

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

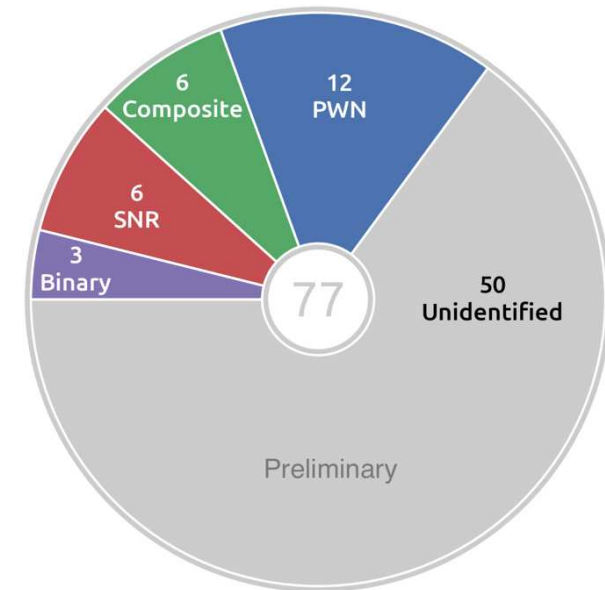
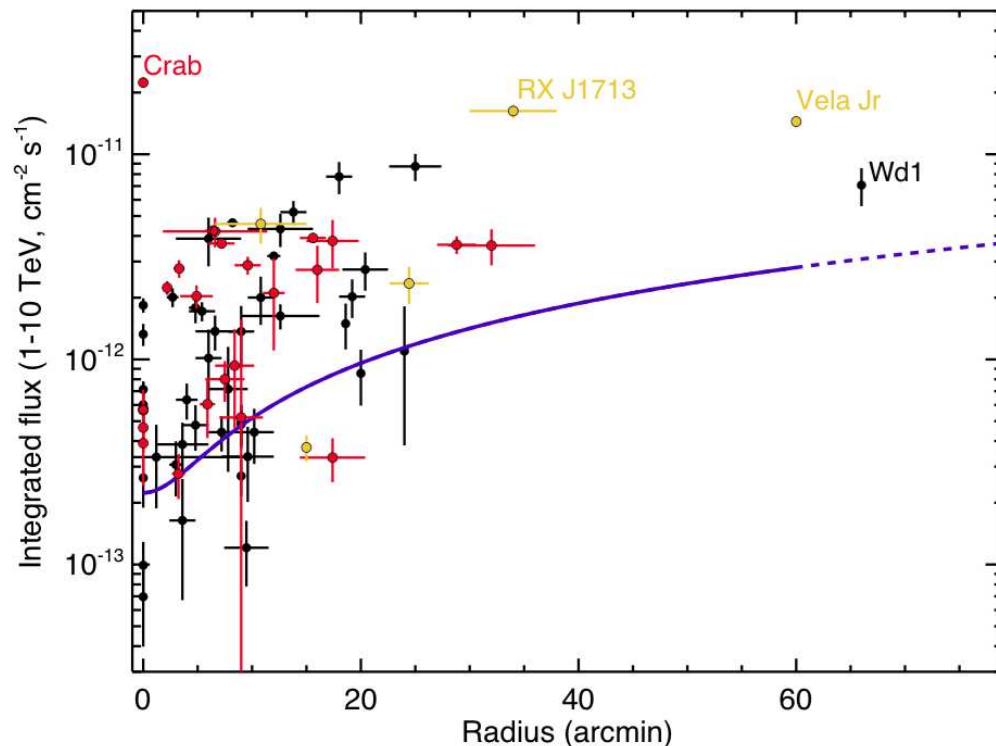
Zidentyfikowano 77 źródeł promieniowania gamma w zakresie TeV



HESS

Wyniki

Zmierzone natężenie, rozmiary i typ źródeł znalezionych w płaszczyźnie Galaktyki



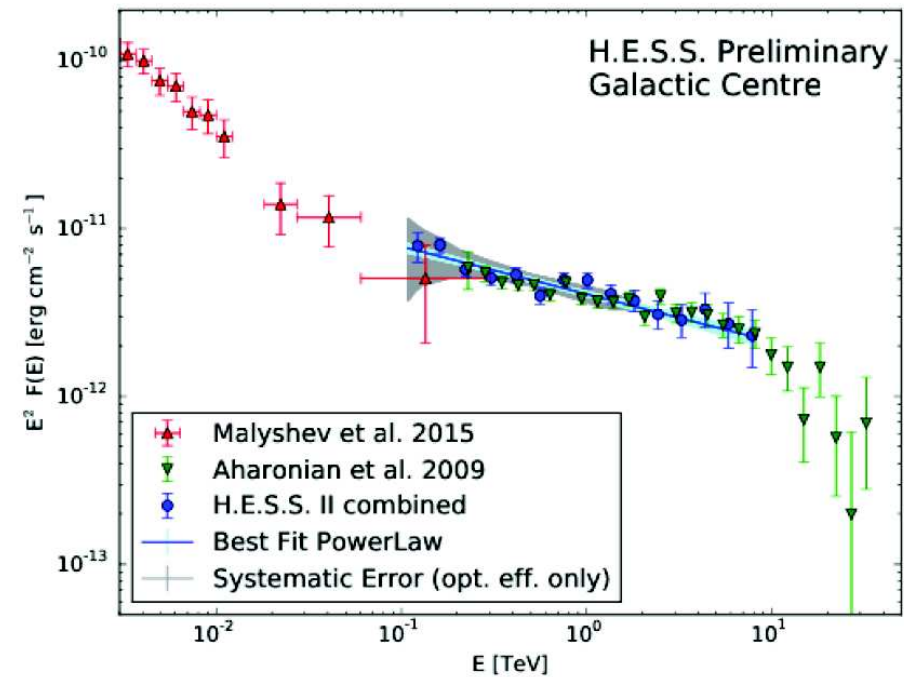
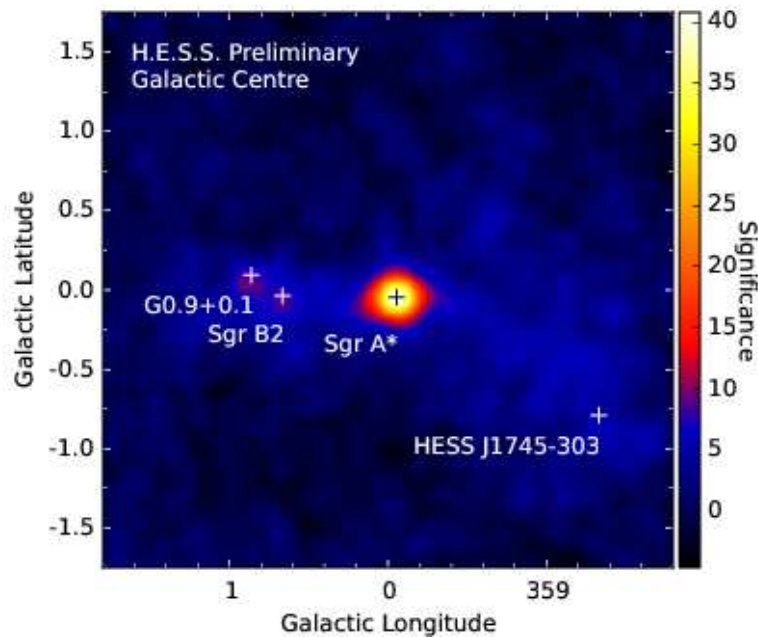
“Unidentified” - w większości przypadków identyfikacja nie jest jednoznaczna.

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

HESS

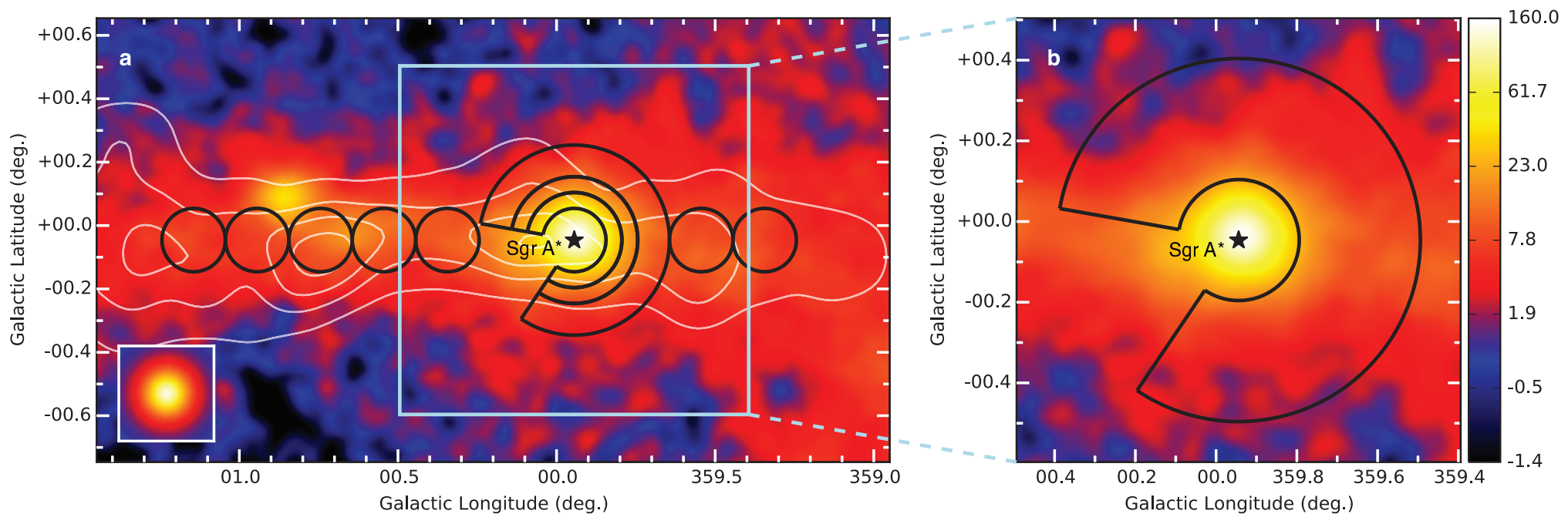
Centrum Galaktyki

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



Centrum Galaktyki

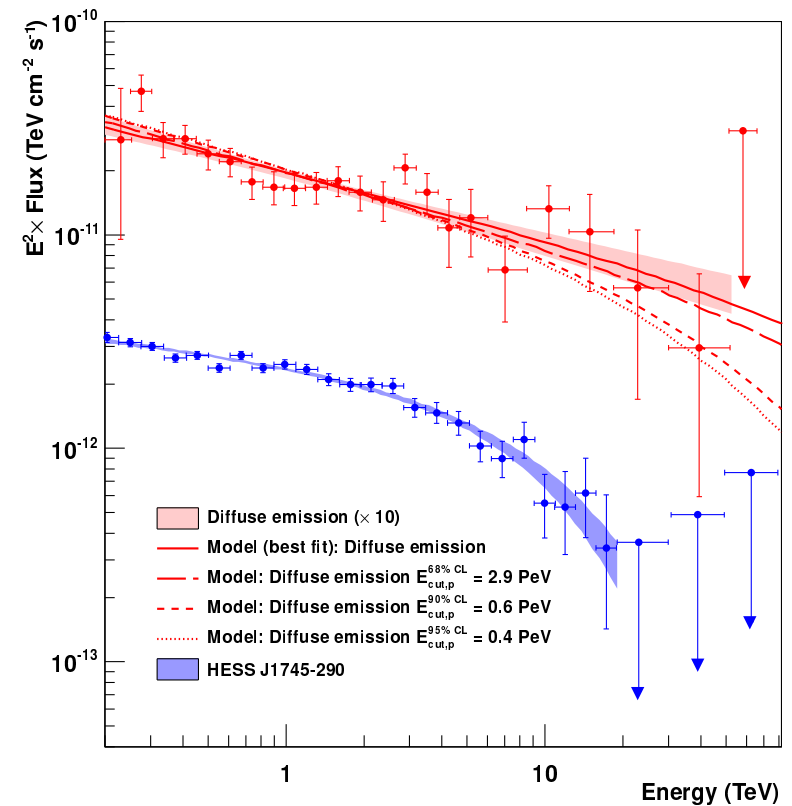
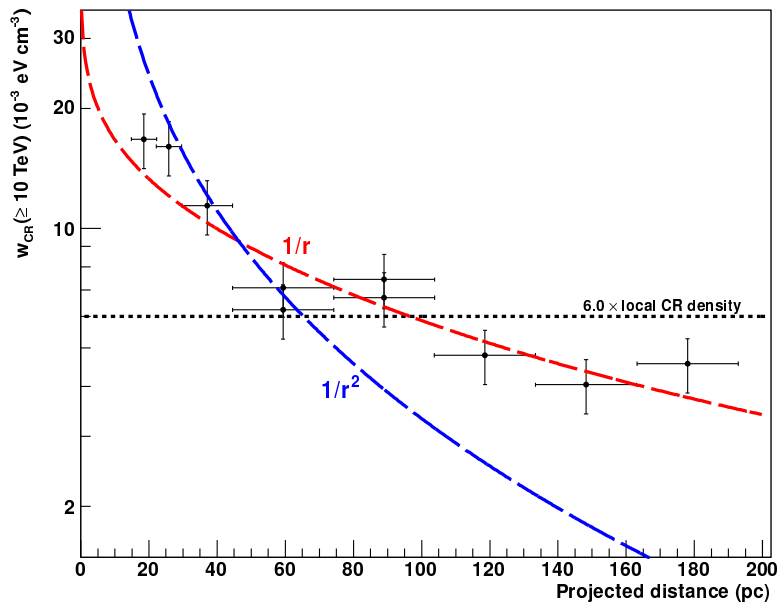
Przy dokładniejszej analizie widać, że źródłem promieniowania jest nie tylko Sag A*, ale także otaczający go obszar zimnej materii międzygwiazdnej.



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.

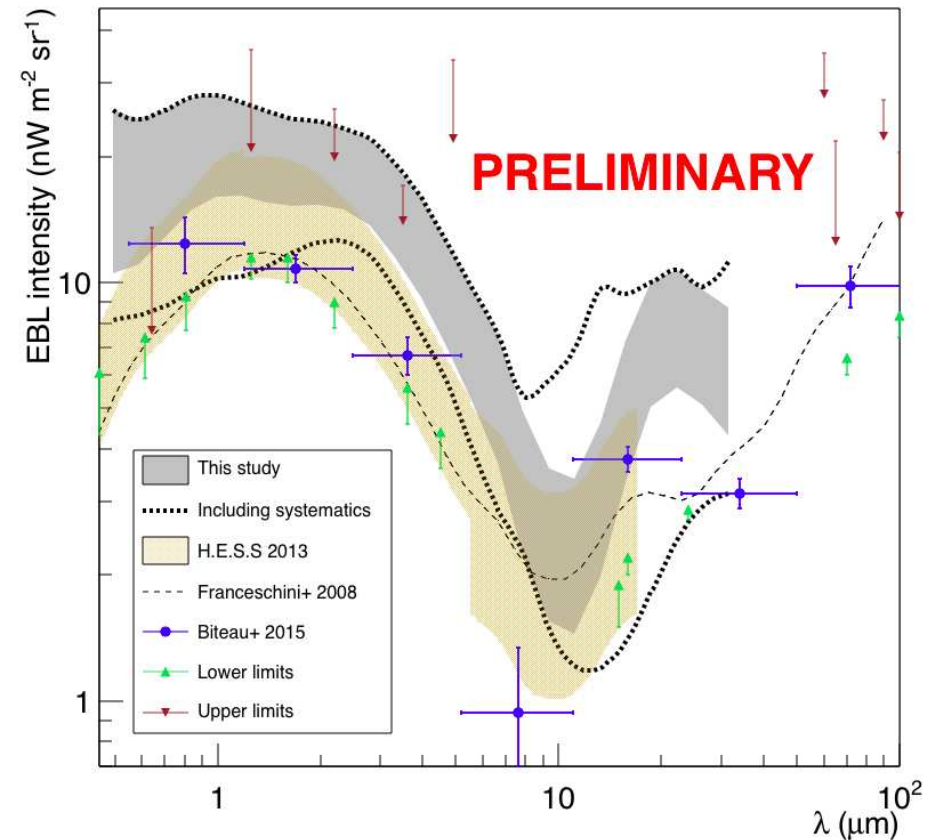


HESS

Wyniki

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

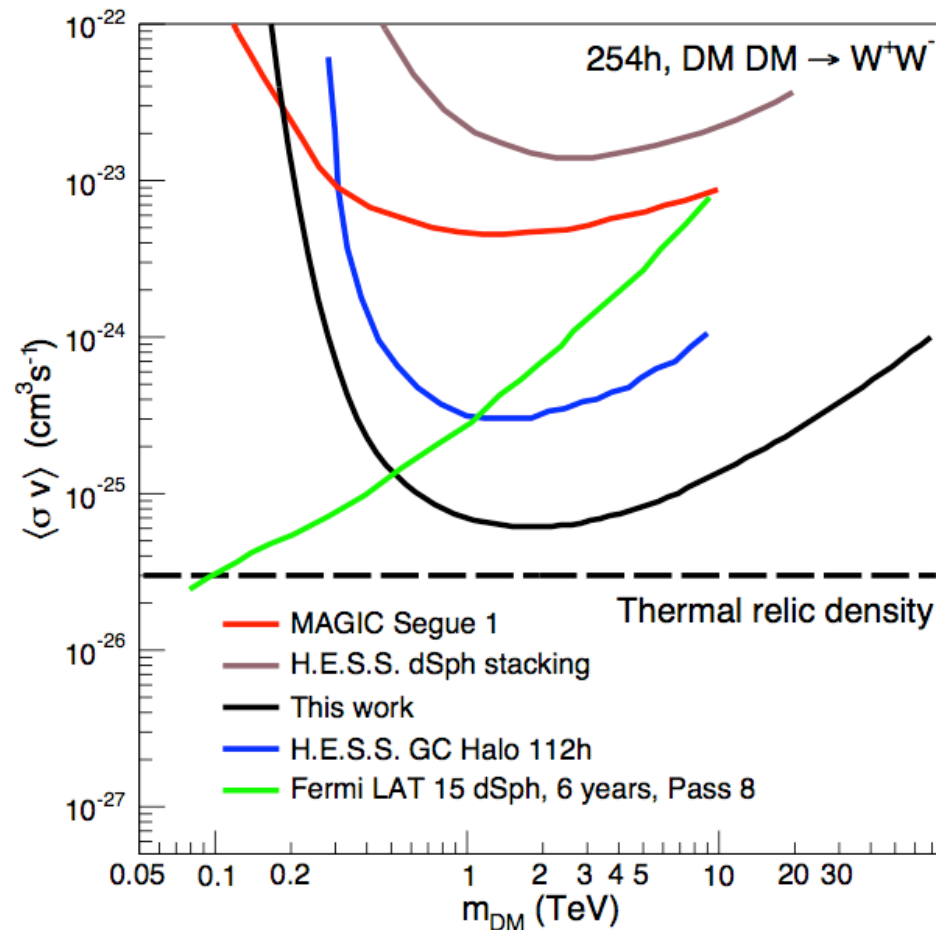
Całkowite promieniowanie w zakresie od 0.1 do 1000 μm odpowiada ok. 5% CMB

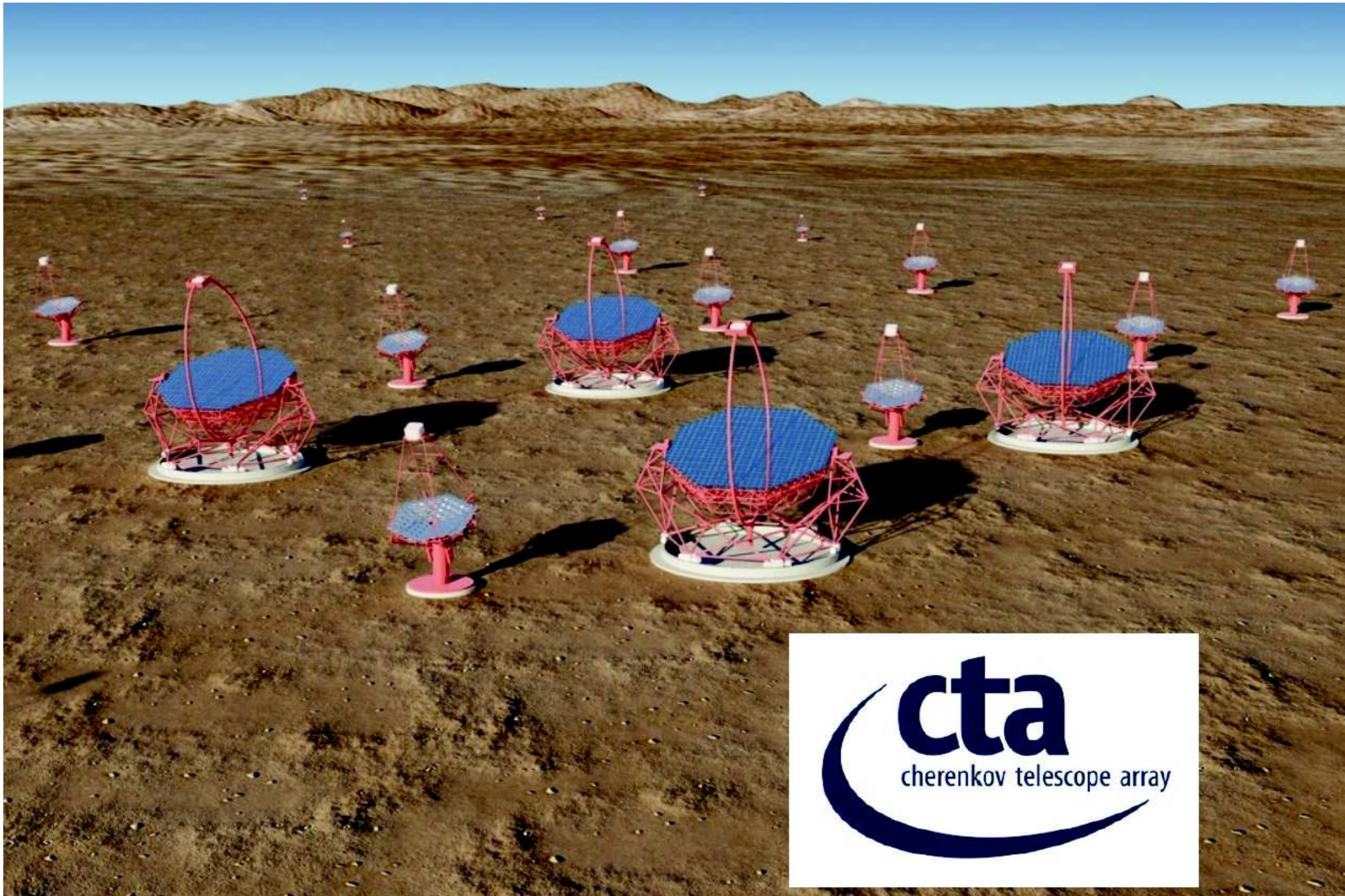


HESS

Poszukiwanie Ciemnej Materii

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





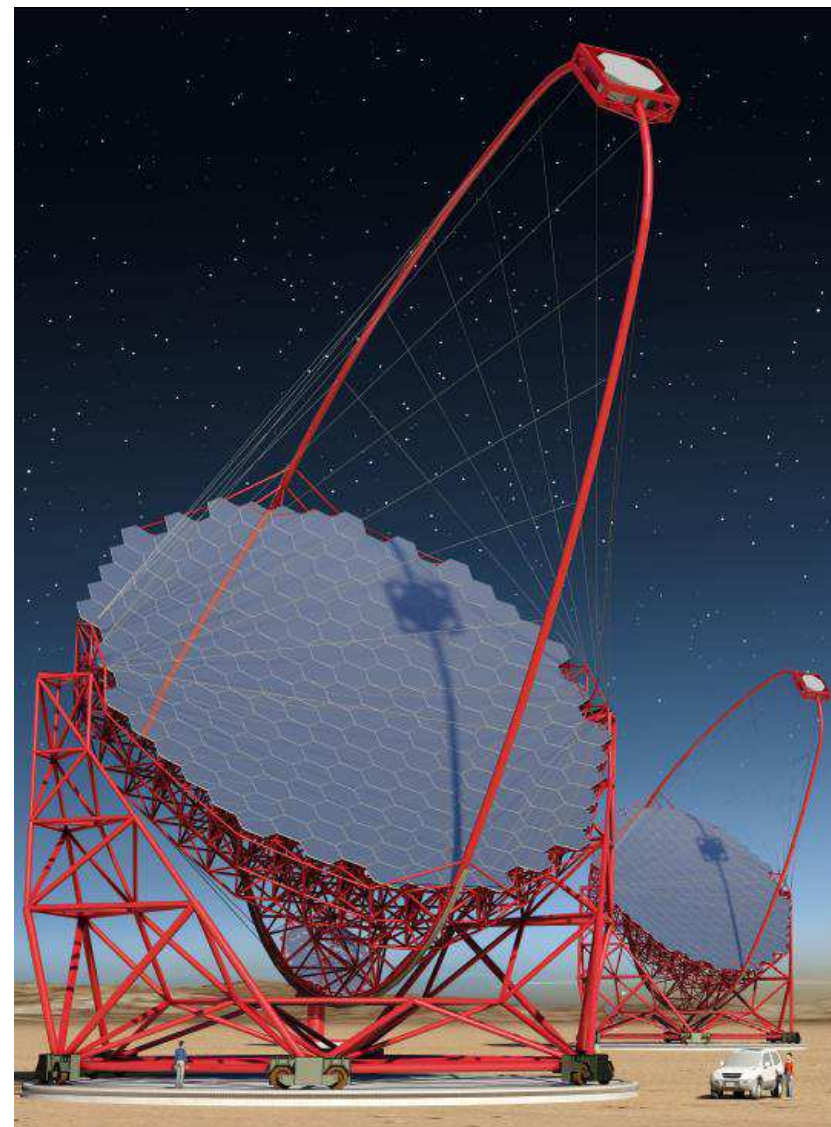
CTA

Projekt

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

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

Pole widzenia ok. 4.5°



CTA

Projekt

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

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

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

Pole widzenia ok. 8°

Prototyp w Berlin-Zeuthen



CTA

Projekt

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

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

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

Pole widzenia ok. 8°

Aletrantyczna konstrukcja włoska



CTA

Projekt

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

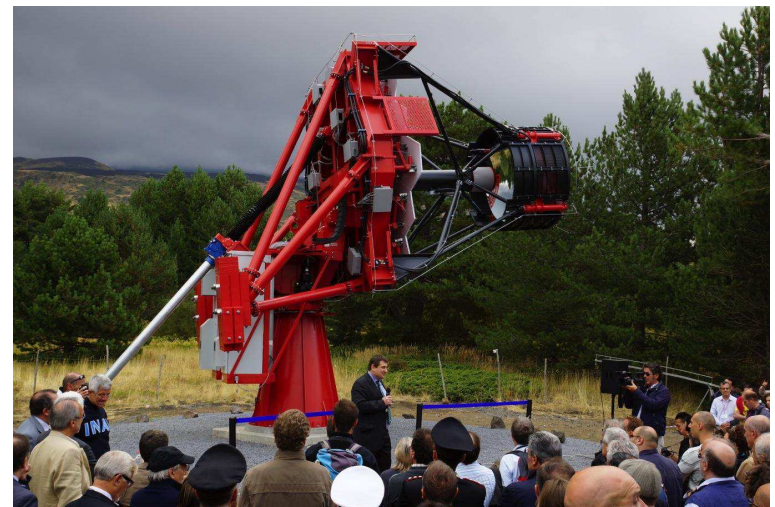
W projekcie CTA przewiduje się budowę ok. 70 małych teleskopów (SST), o średnicy ok. 4 m, co pozwoli na pomiar fotonów powyżej kilku TeV.

Pole widzenia ok. 10°

IFJ PAN, Kraków



Włochy



CTA

Projekt

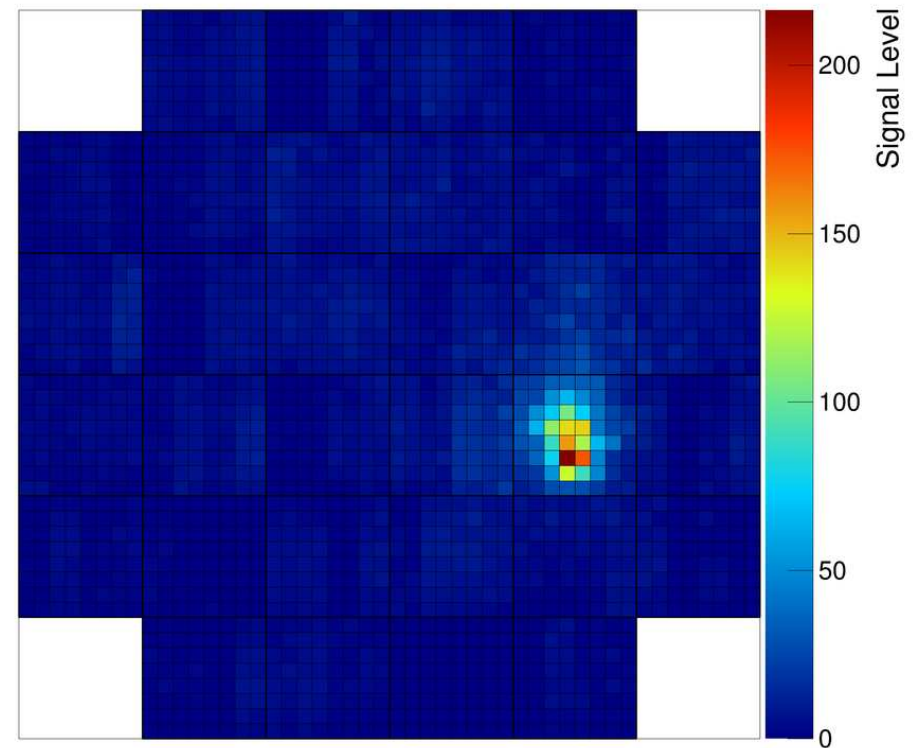
W grudniu 2015 uruchomiono prototyp SST z dwoma zwierciadłami (Francja).



CTA

Projekt

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

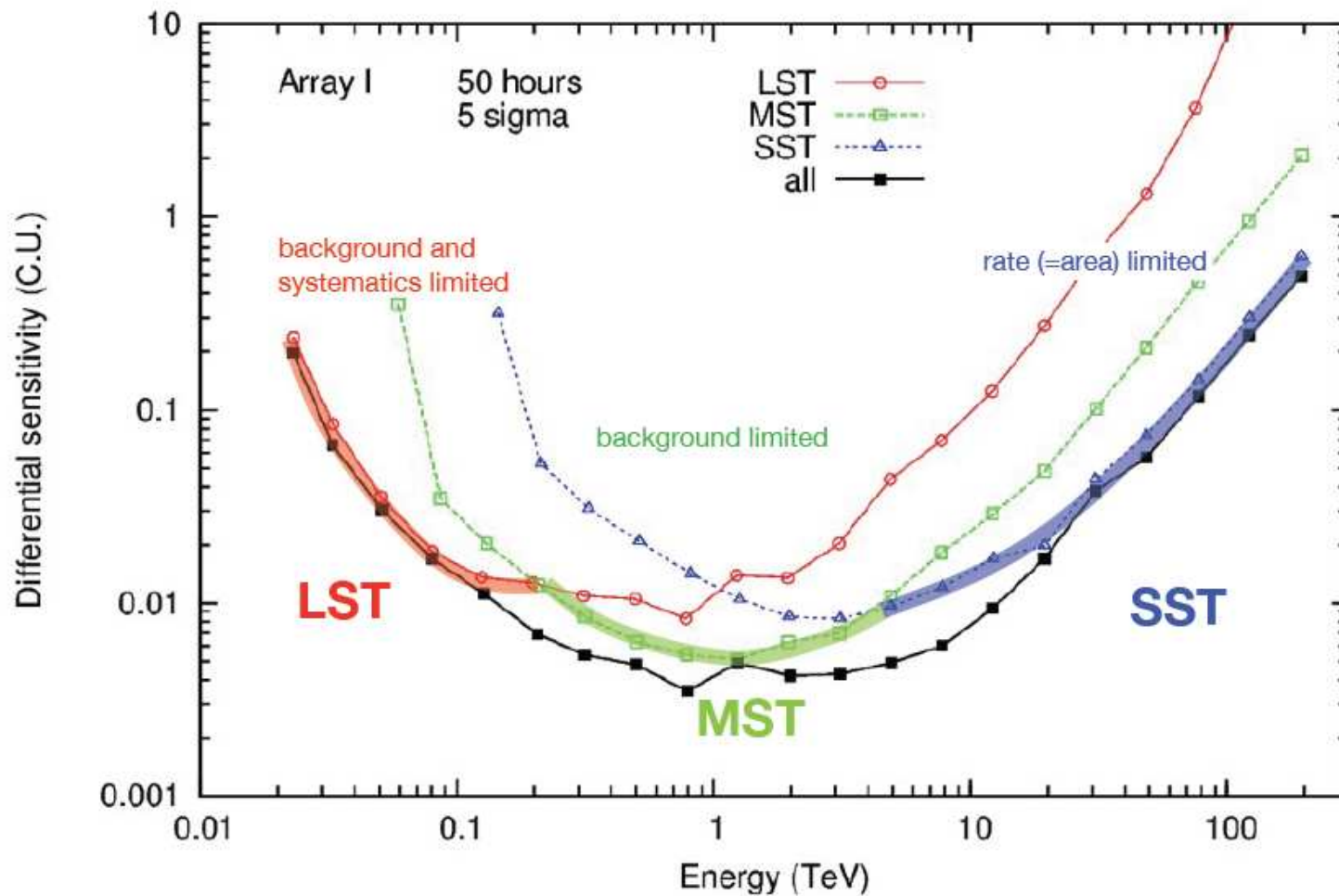


Wciąż rozważane dwie wersje kamery: MAPM (fotopowielacze) i SiPM (krzem)

CTA

Czułość

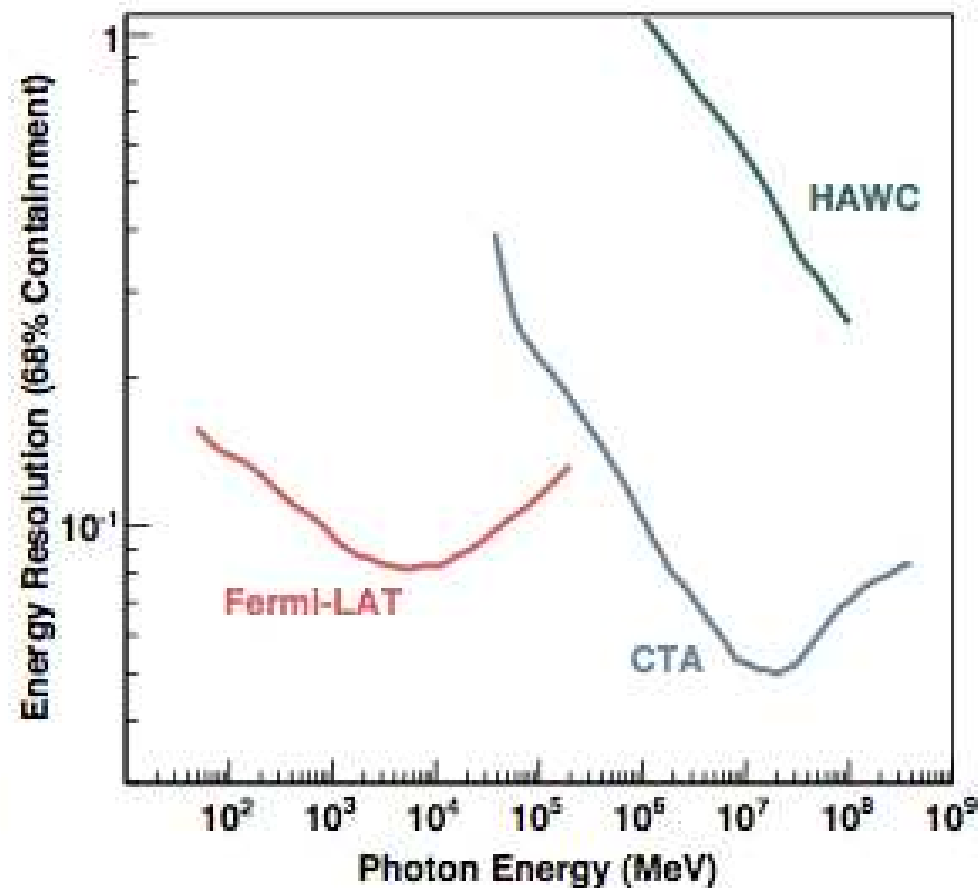
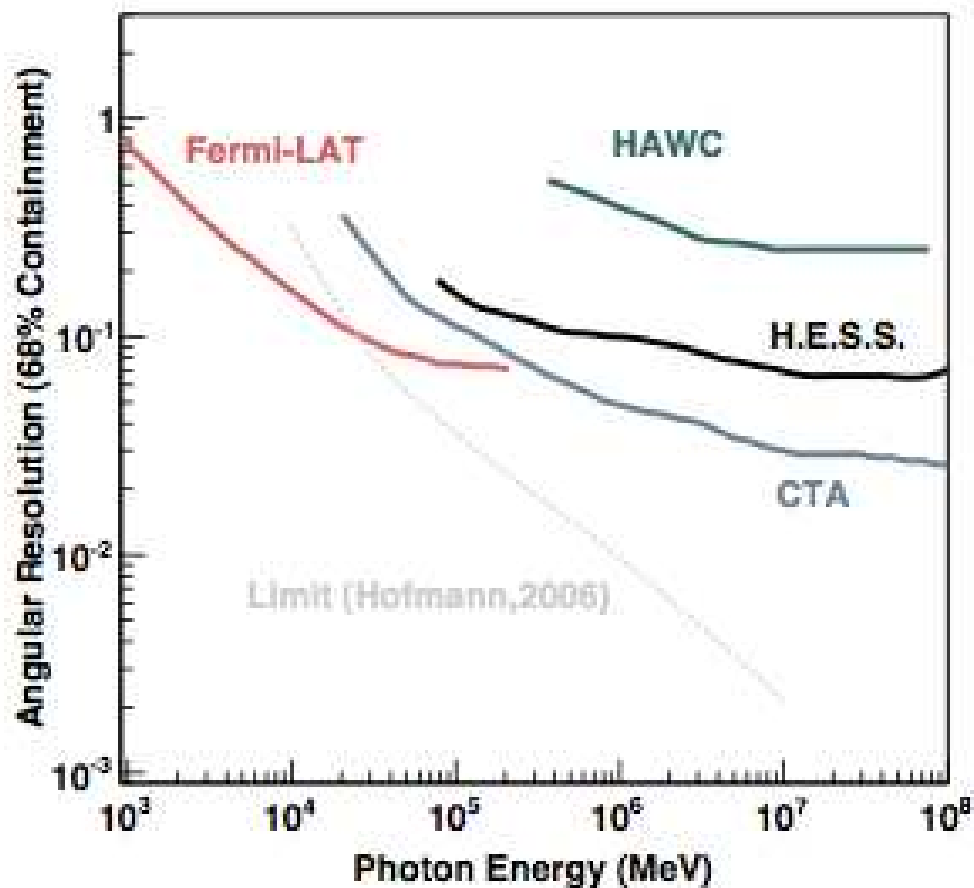
Połączenie trzech rodzajów teleskopów pozwoli na pomiar w szerokim zakresie energii



CTA

Dokładność

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

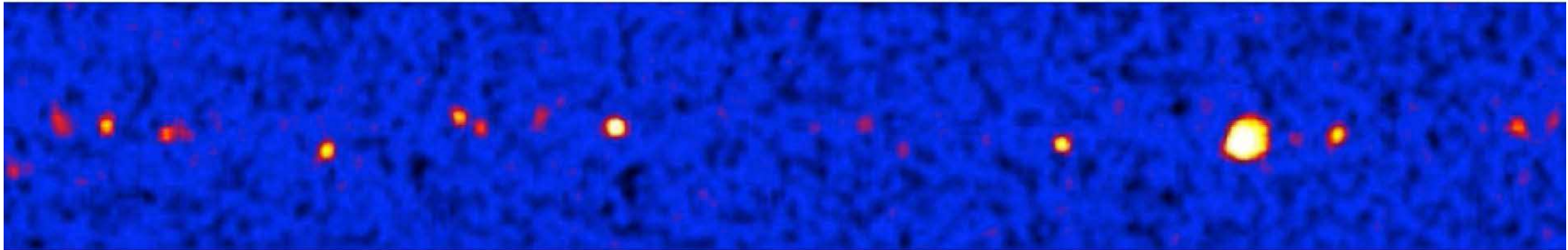


CTA

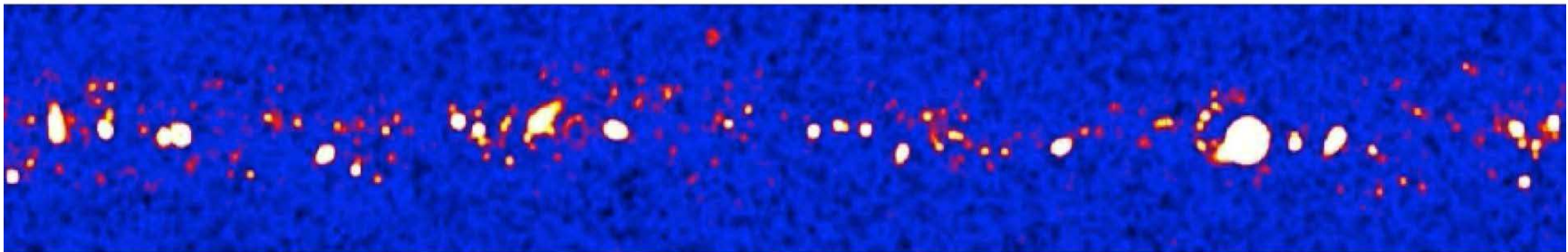
Dokładność

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

H.E.S.S.



CTA, for same exposure

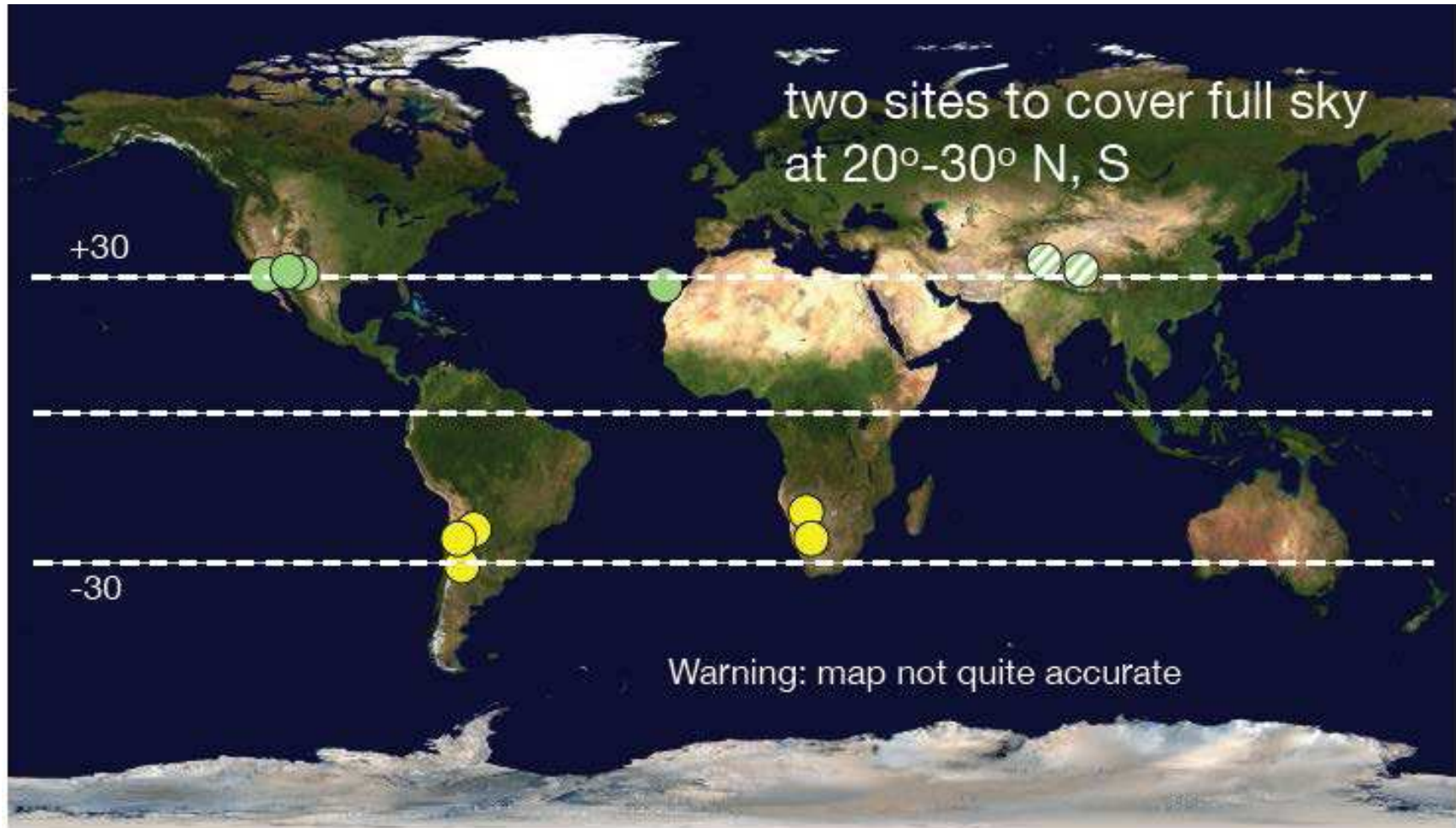


expect ~1000 detected sources

CTA

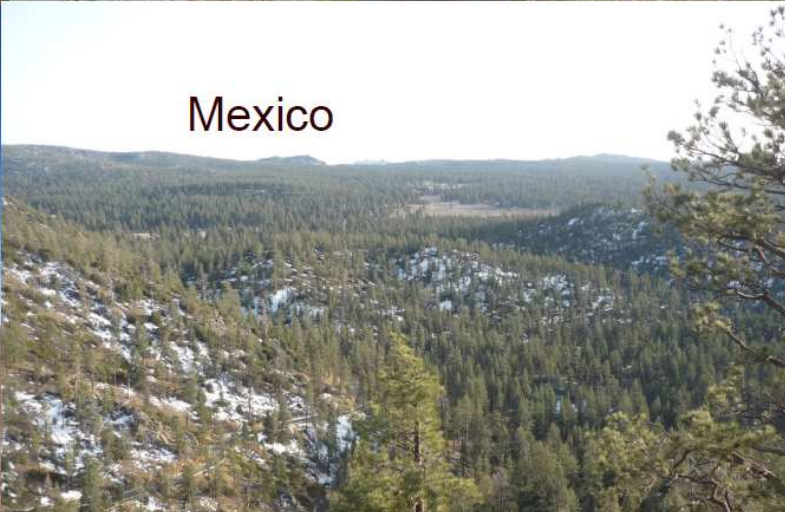
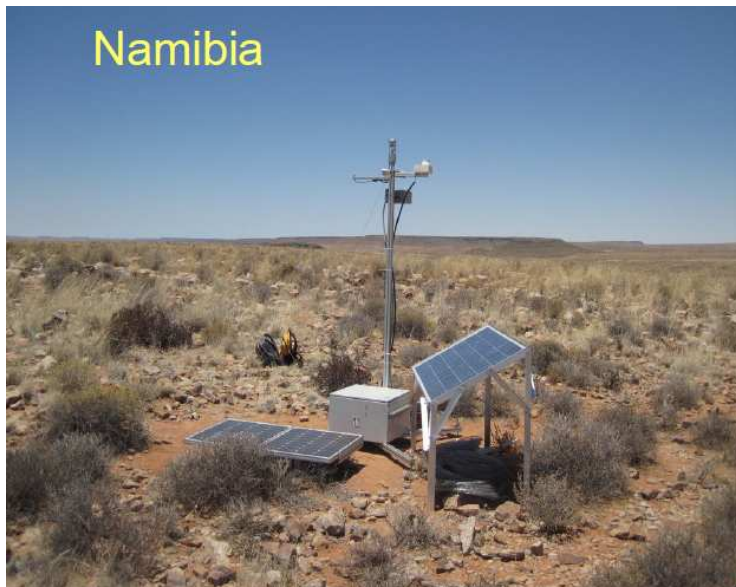
Lokalizacja

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



CTA

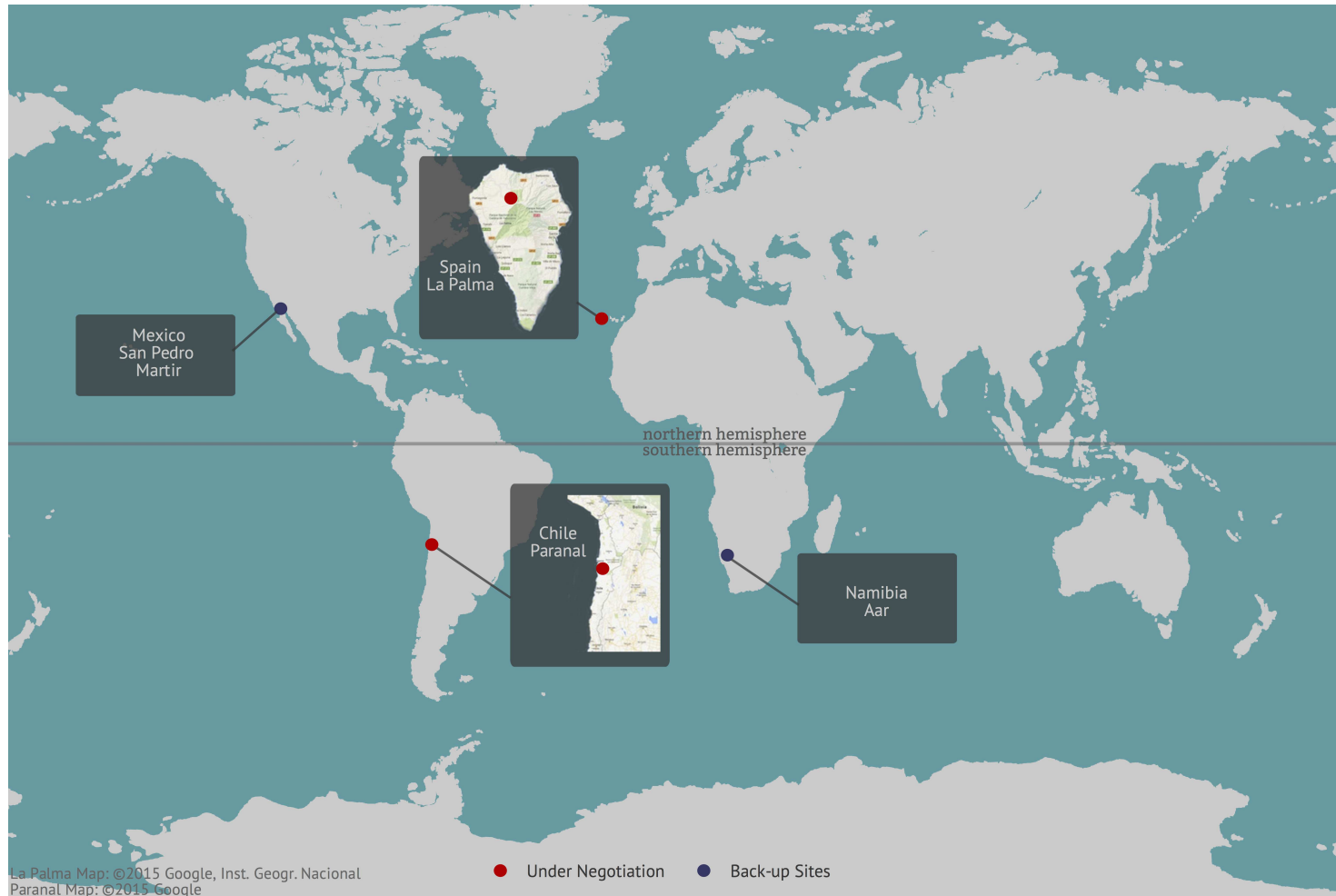
Lokalizacja



CTA

Lokalizacja

Decyzja podjęta latem 2015: Chile i Wyspy Kanaryjskie.

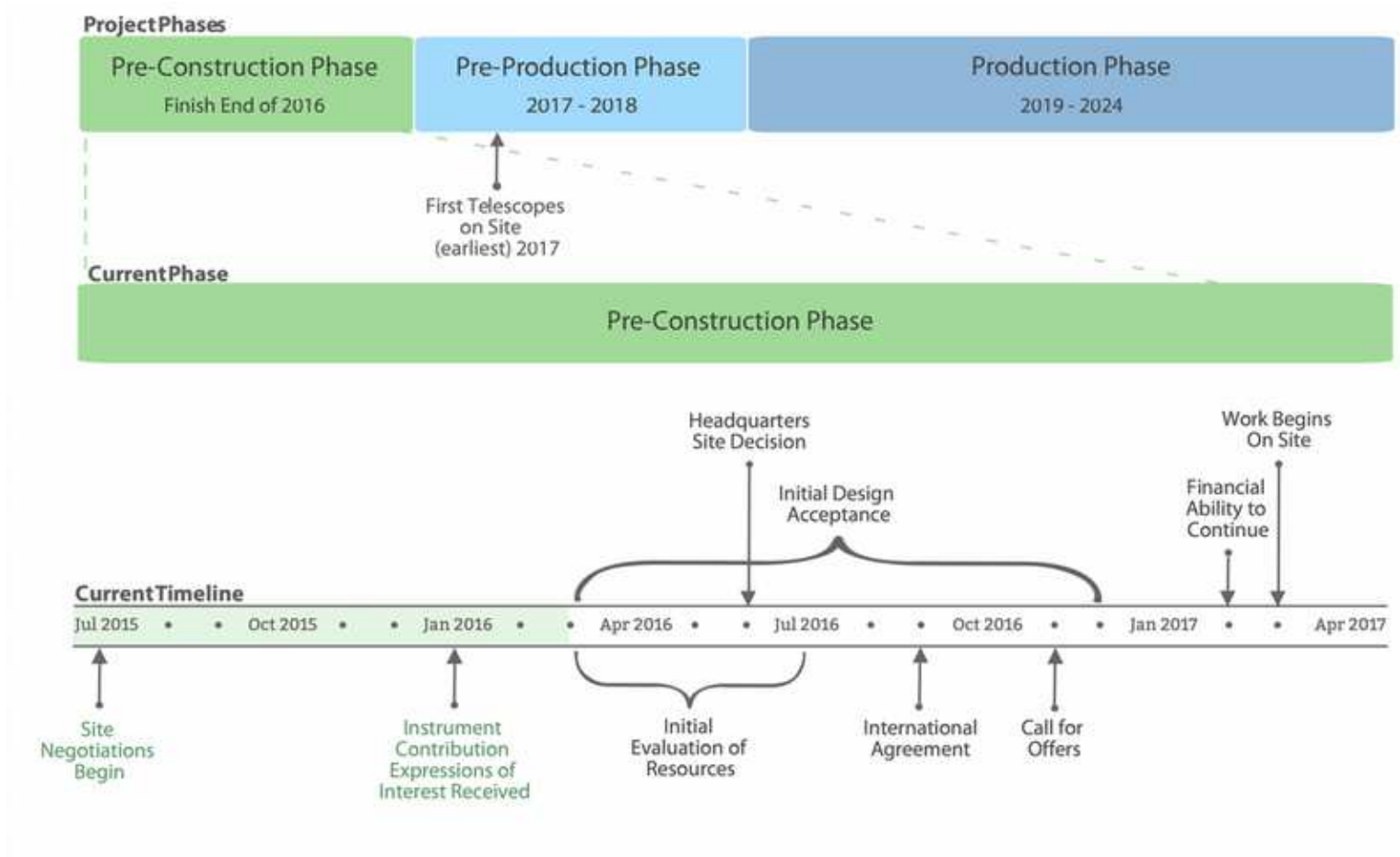


CTA

Harmonogram

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

Budowa obserwatoriów powinna rozpocząć się w przyszłym roku!



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”:

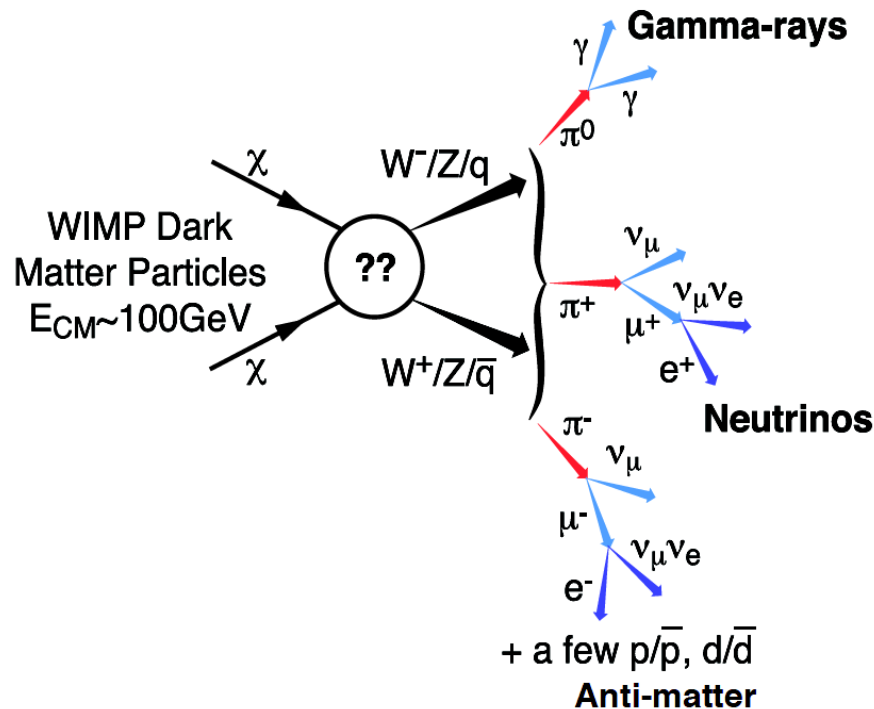
- wydostają się bez przeszkód ze źródeł
- nie odchylane w polach magnetycznych
- nie oddziałują z materią międzygwiazdową

nieograniczony zasięg

\Rightarrow możliwa identyfikacja źródeł

- niosą informację o procesie produkcji (zapach leptonu)

Niestety, bardzo trudno je zmierzyć!...



Neutrino

Źródła astrofizyczne

Neutrino 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**”:

$$p + p \rightarrow D + e^+ + \nu_e \quad (E_\nu \leq 0.42 \text{ MeV}),$$

trochę wyższe energie w procesie “**pep**”:

$$p + e^- + p \rightarrow D + \nu_e \quad (E_\nu \approx 1.44 \text{ MeV}).$$

Najwyższe energie dostępne w rozpadzie 8B :

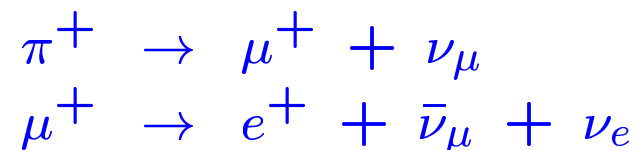
$${}^8_5B \rightarrow {}^8_4Be + e^+ + \nu_e$$

⇒ energia neutrina do **15 MeV** ⇒ obserwowalne detektorami fizyki cząstek...

Neutrina atmosferyczne

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

Neutrina powstają w łańcuchu rozpadów:



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

Neutrino

Neutrino reaktorowe

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

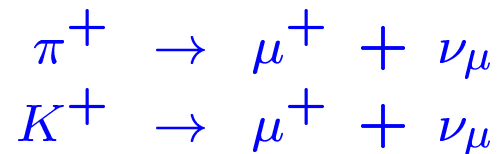
Średnio produkowane jest przy tym sześć **entyneutrino elektronowych**,
głównie w rozpadach neutronów: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

Reaktor o mocy 1GW $\Rightarrow \sim 10^{20}$ 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 neutrin lub antyneutrino...

Neutrina

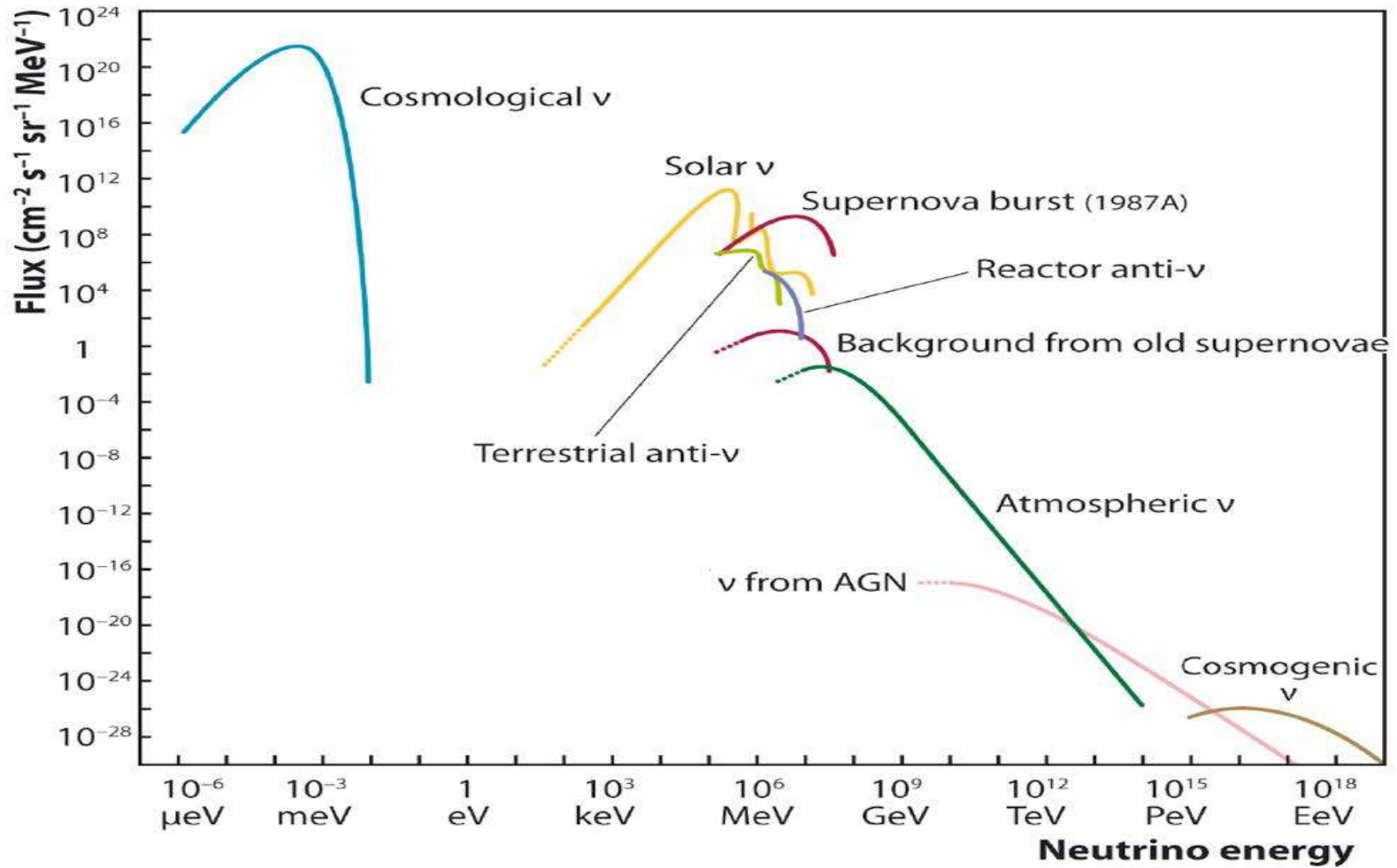
Źródła

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

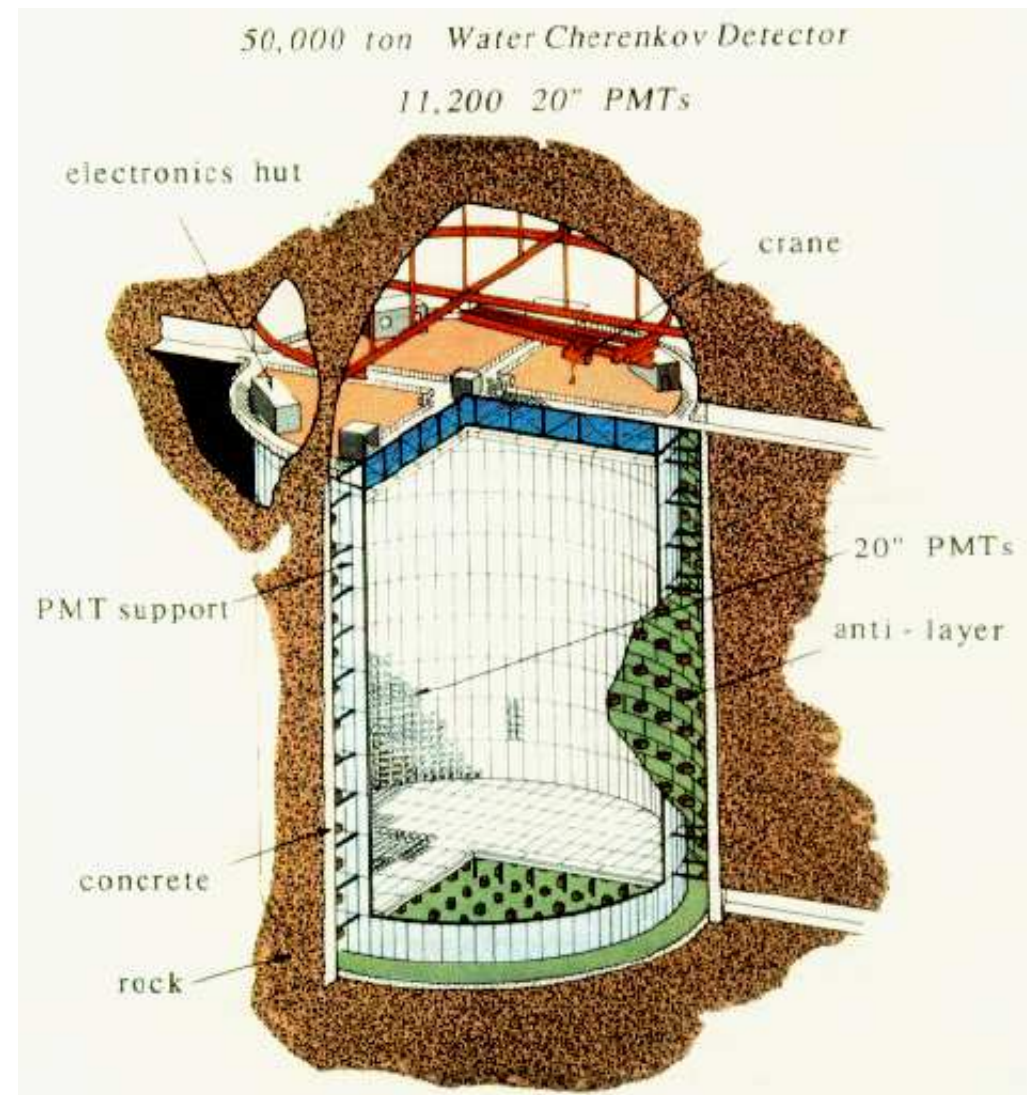
Eksperyment

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

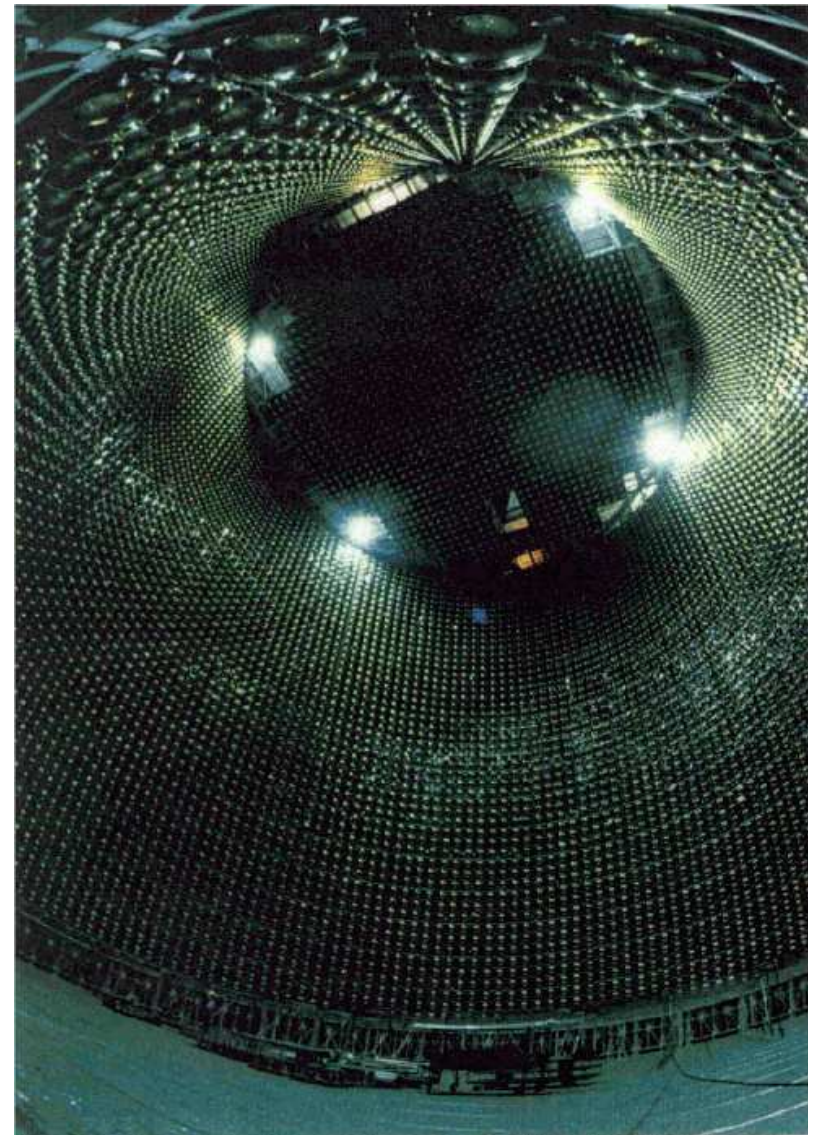
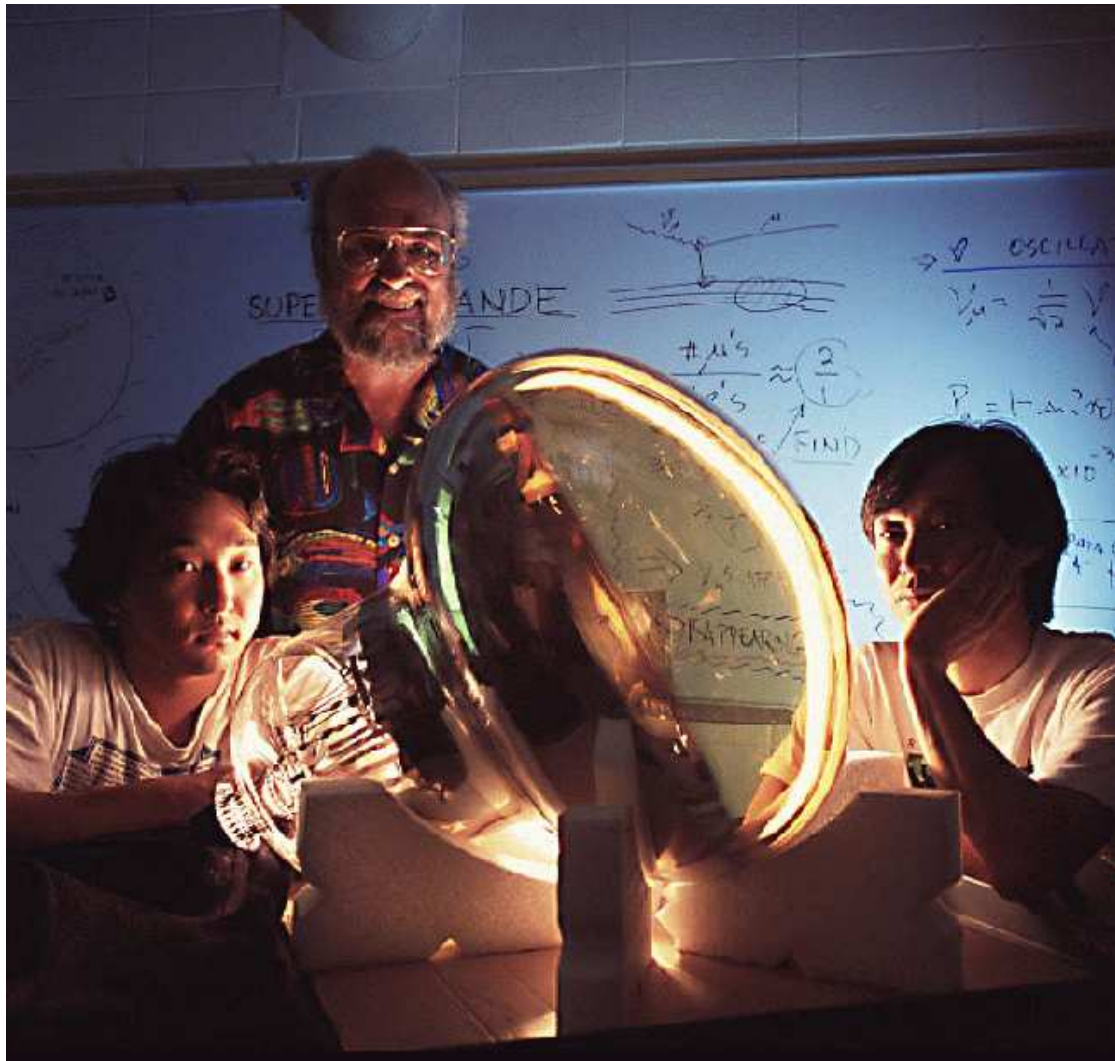
11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy!) rejestruje przechodzące cząstki

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

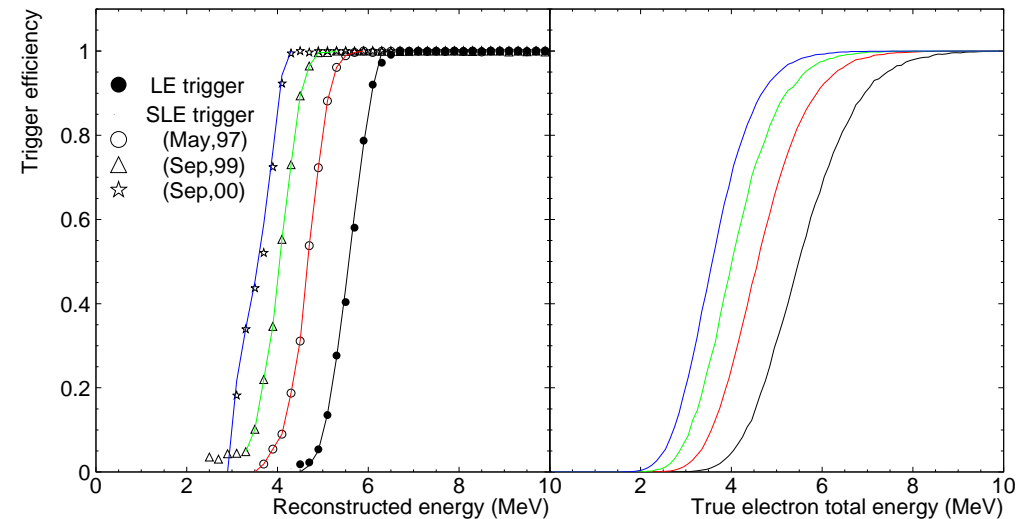
Średni poziom sygnału z pojedynczego fotopowielacza: 3.5 kHz.

Układ wyzwalania wymagał przyjęcia 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.

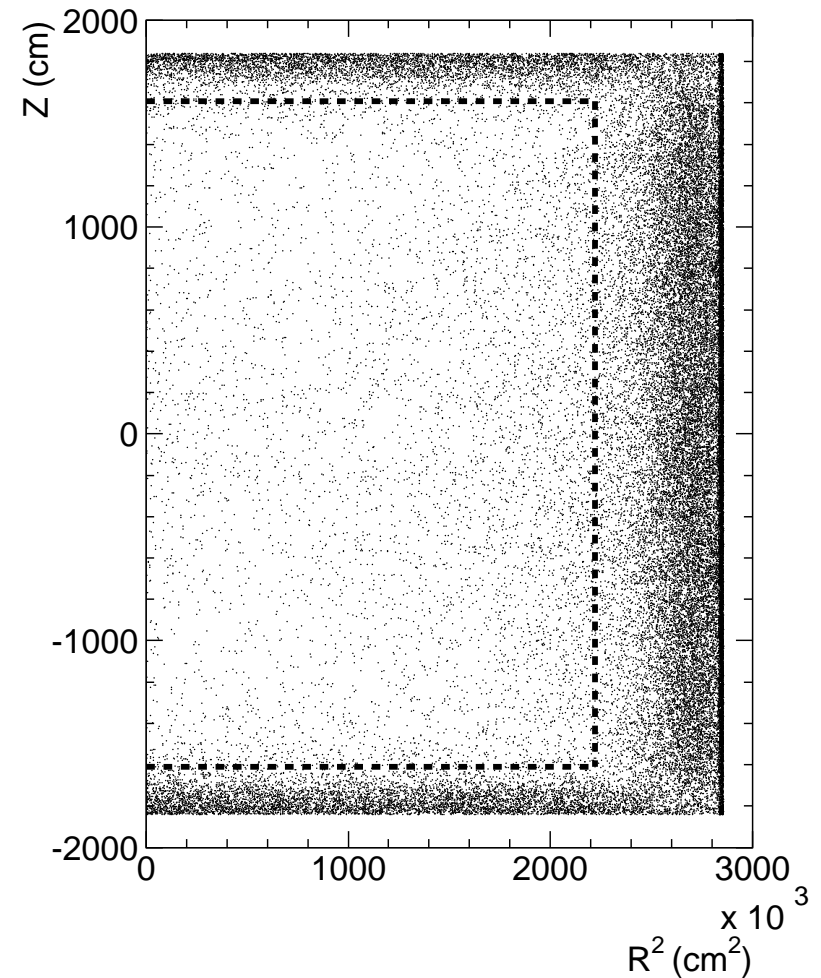
Super-Kamiokande

Wyzwalanie

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

Wyraźny wkład **naturalnej promieniotwórczości** ścian komory.

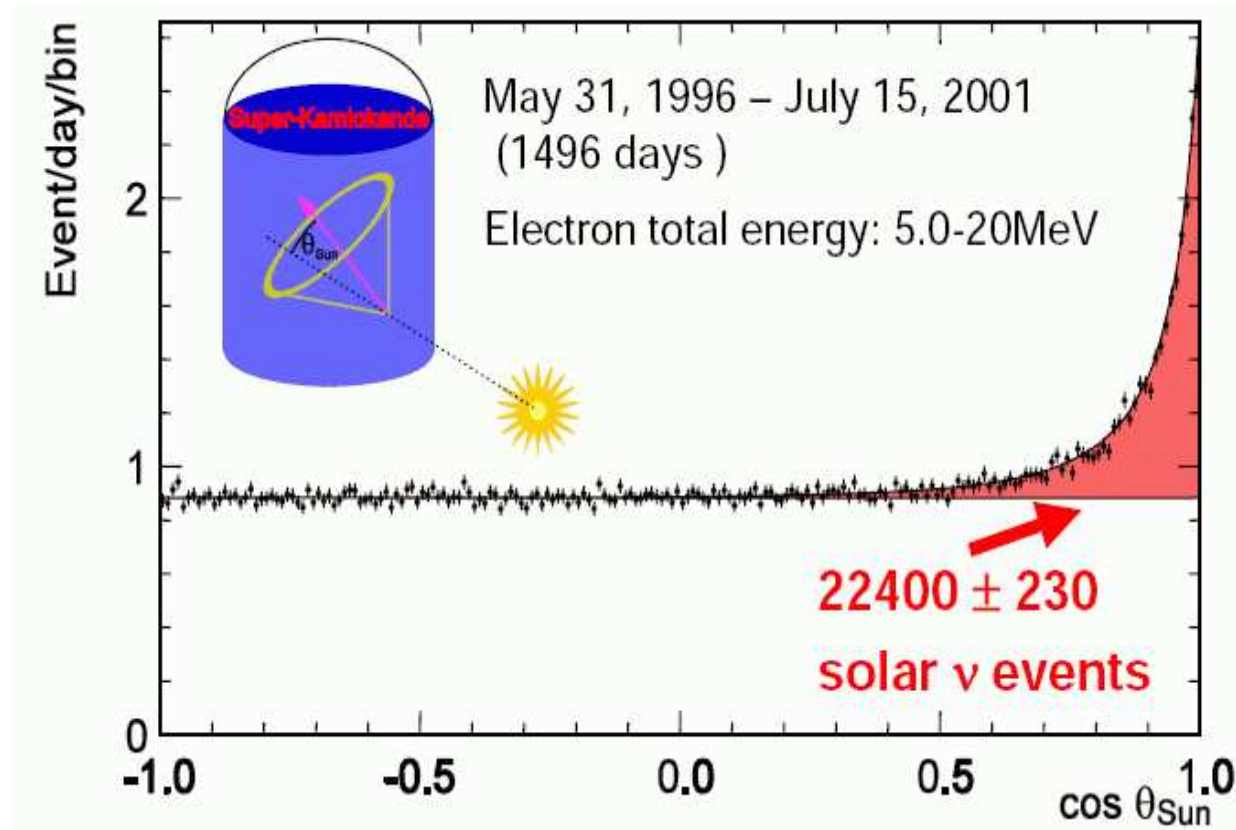
Przerywana linia: “fiducial volume”
obszar z którego wybieramy przypadki do dalszej analizy.



Super-Kamiokande

Obserwacja neutrin słonecznych

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



Zmierzono:

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

Przewidywania:

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

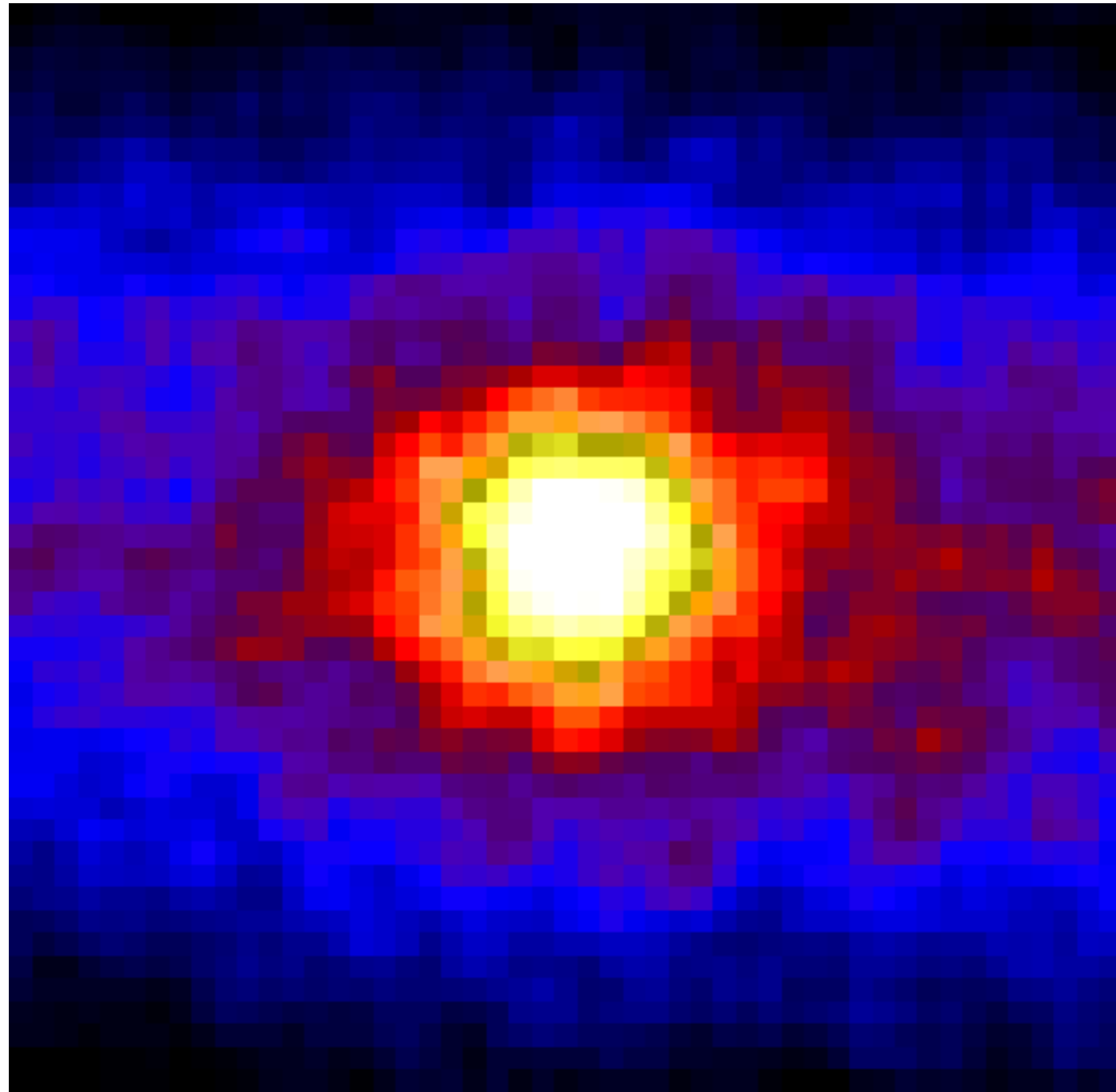
Deficyt neutrin słonecznych był już mierzony w latach '60 XX w. !

Ale zrozumieliśmy to dopiero w wieku XXI.

Super-Kamiokande

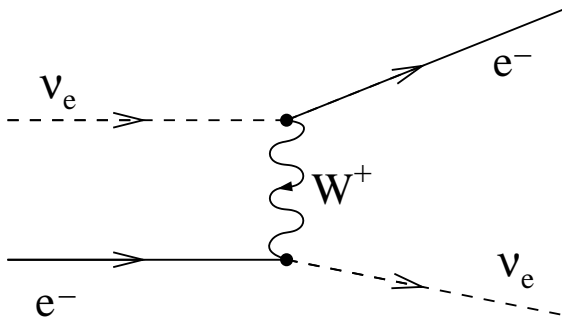
“Zdjęcie” Słońca
w “świele” neutrin

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

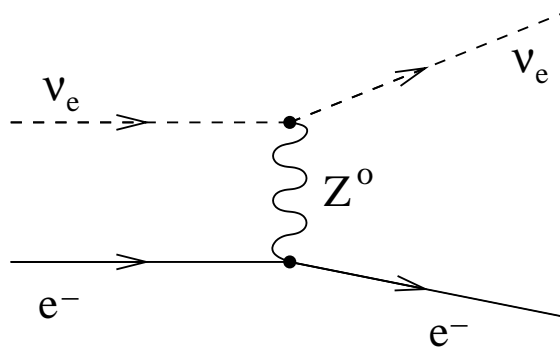
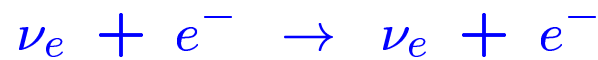


Super-Kamiokande

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

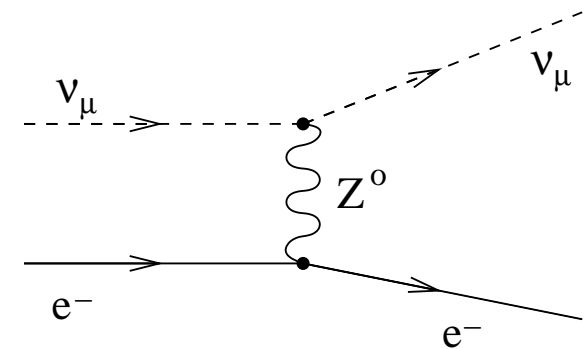


Możliwa jest też detekcja ν_e poprzez proces typu **NC**:



przekrój czynny ~ 5 razy mniejszy...

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



(także dla ν_τ)

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

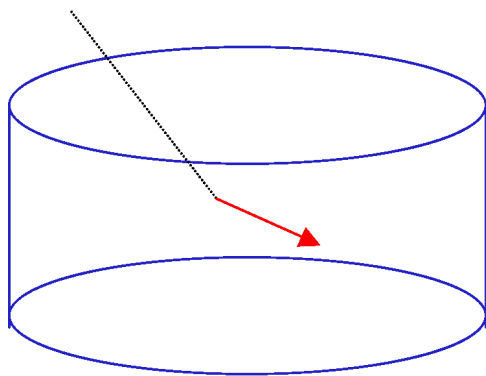
Super-Kamiokande

Klasyfikacja przypadków

Przypadki które rozpoznajemy jako **oddziaływania neutrin**:

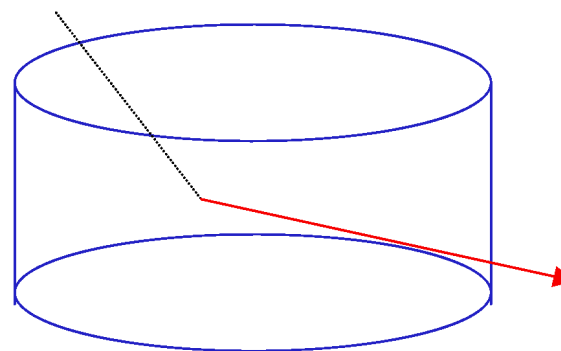
FC: Fully Contained

Elektron lub niskoenergetyczny mion **wyprodukowany** w detektorze **zatrzymuje się** w nim



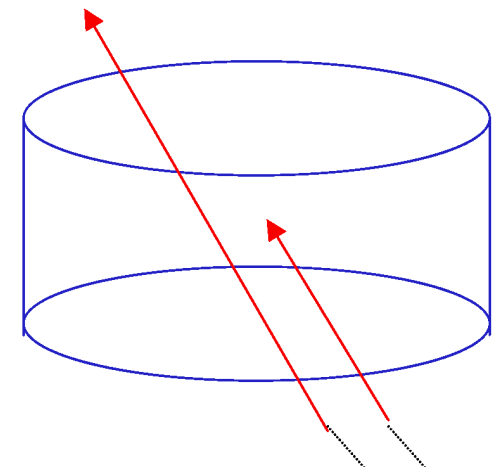
PC: Partially Contained

Wysokoenergetyczny mion **wyprodukowany** w środku **ucieka** z detektora



Upward

Miony **wpadające** do detektora **od dołu**

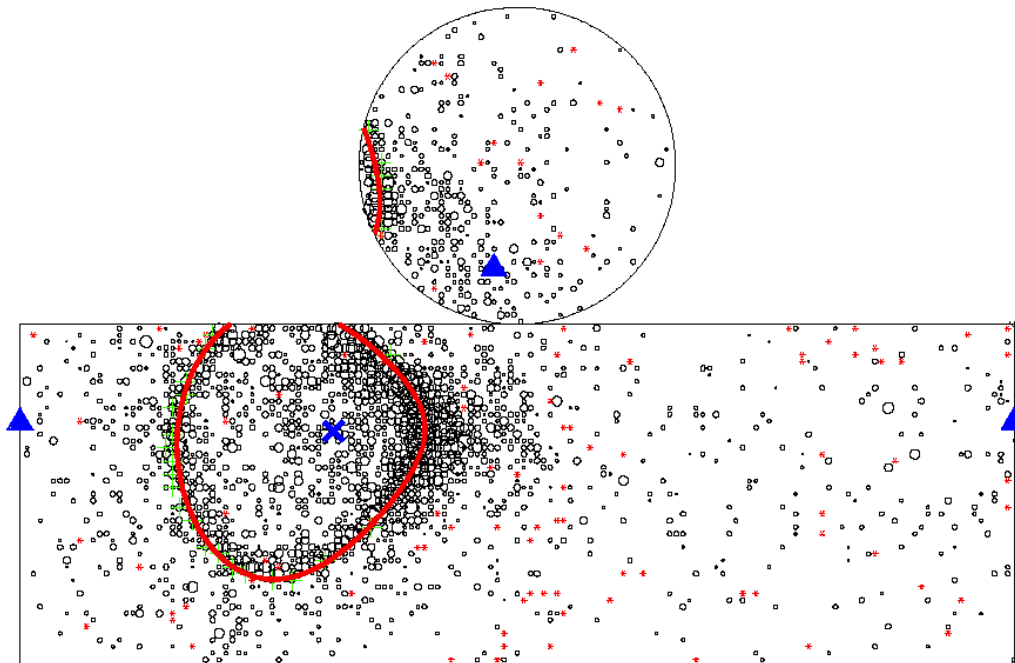


Super-Kamiokande

Neutrino elektronowe

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

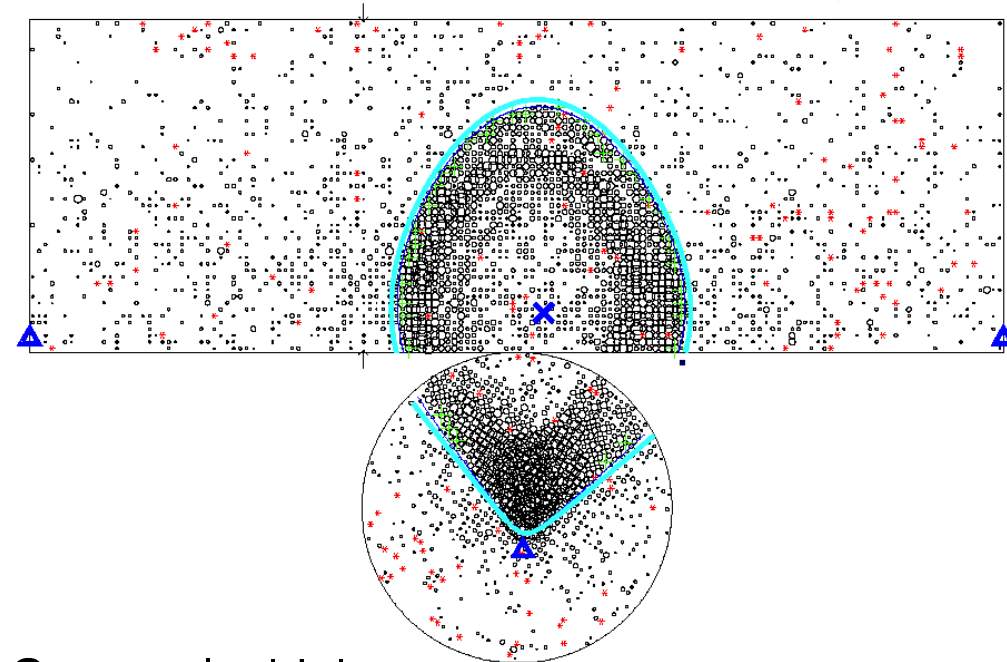
Krótki zasięg elektronu - “cienki” pierścień



Neutrino mionowe

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

Długa droga w wodzie - “gruby” pierścień.



Gzasi widzimy
też opóźniony sygnał e^- z rozpadu μ^- .

Super-Kamiokande

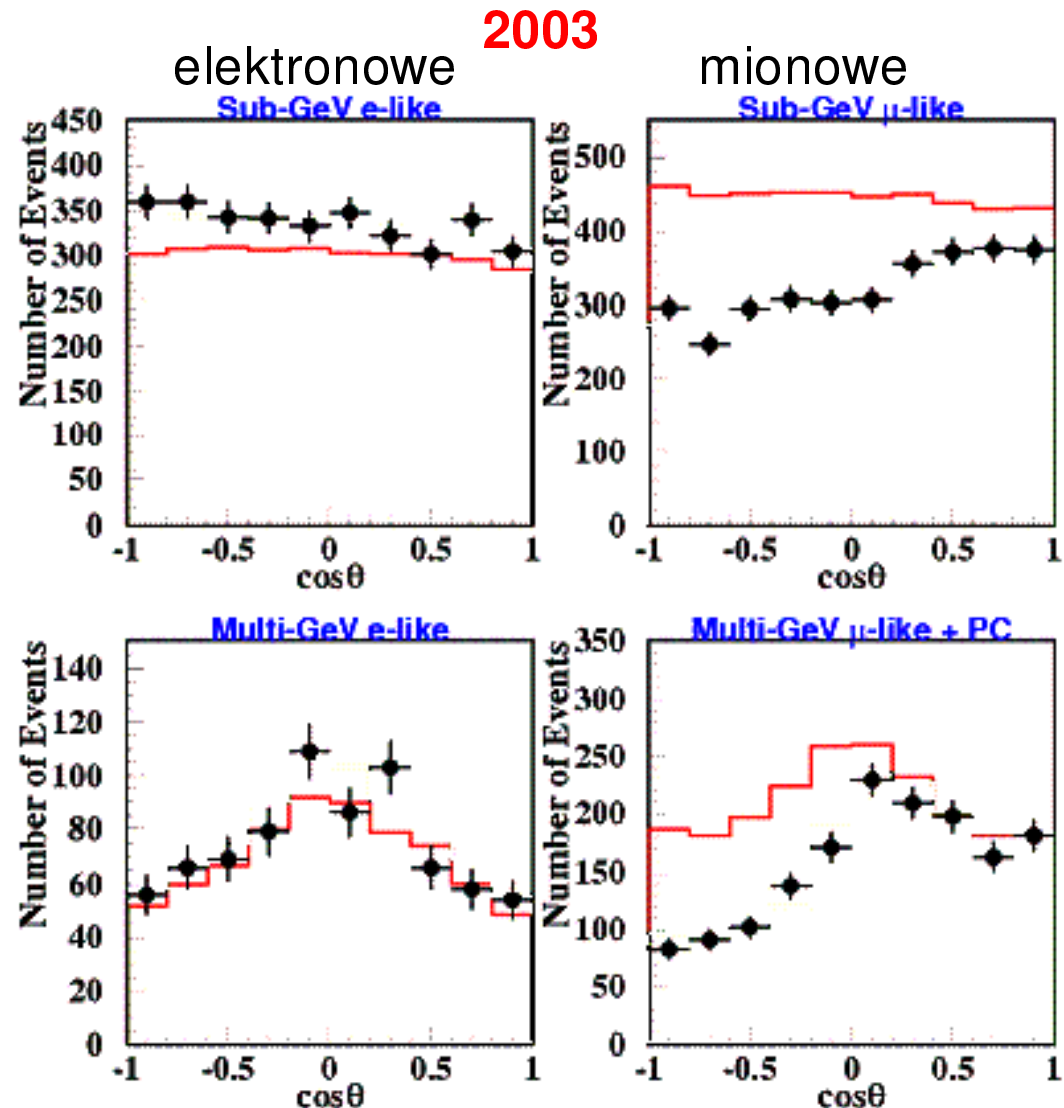
Neutrina atmosferyczne

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

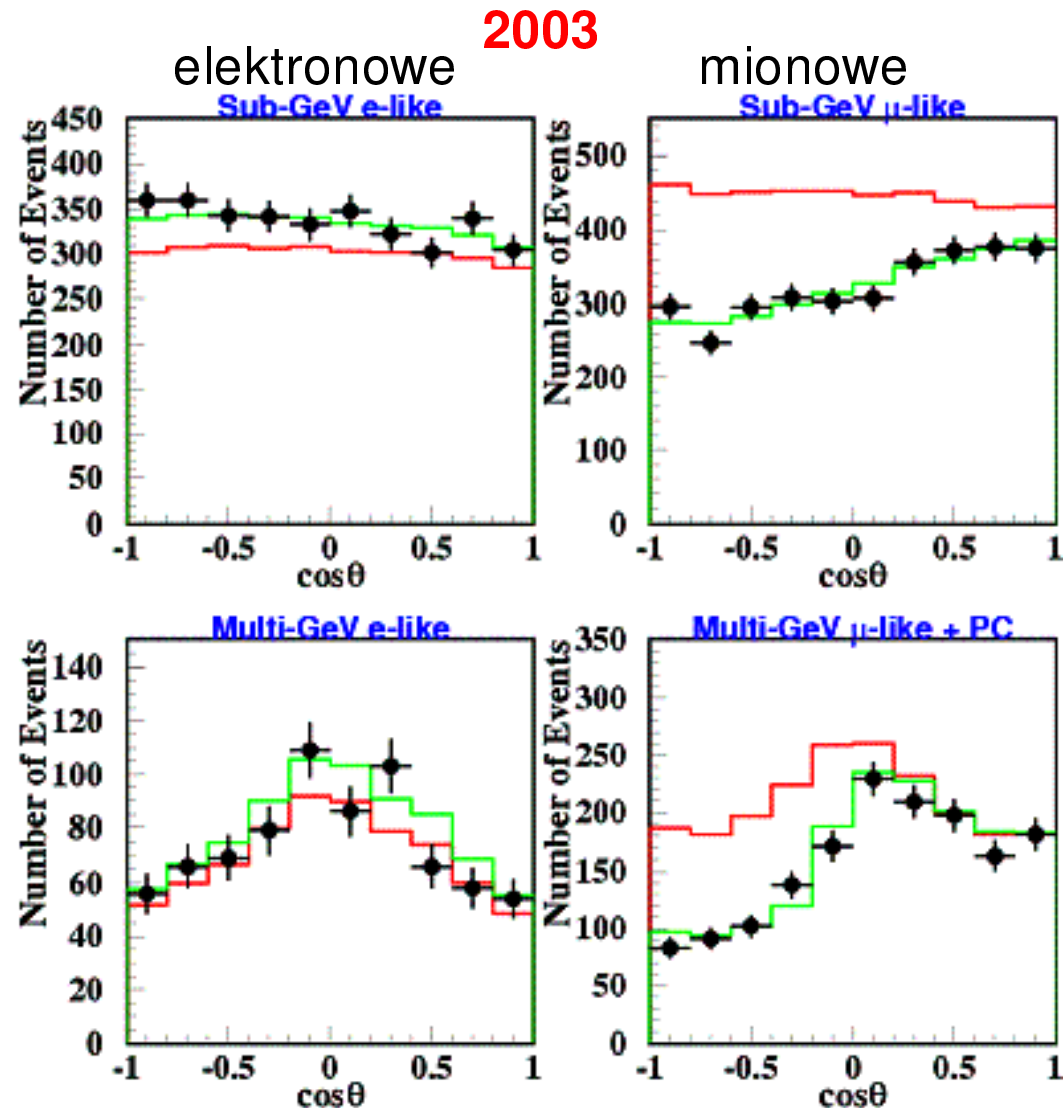
Zależność liczby neutrin **elektronowych** i **mionowych** od kierunku ($\cos \theta = 1$ gdy lecą do dołu, -1 gdy do góry) \Rightarrow

Zgodnie z oczekiwaniami **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 ?

Musimy przyjąć, że neutrina oscylują...

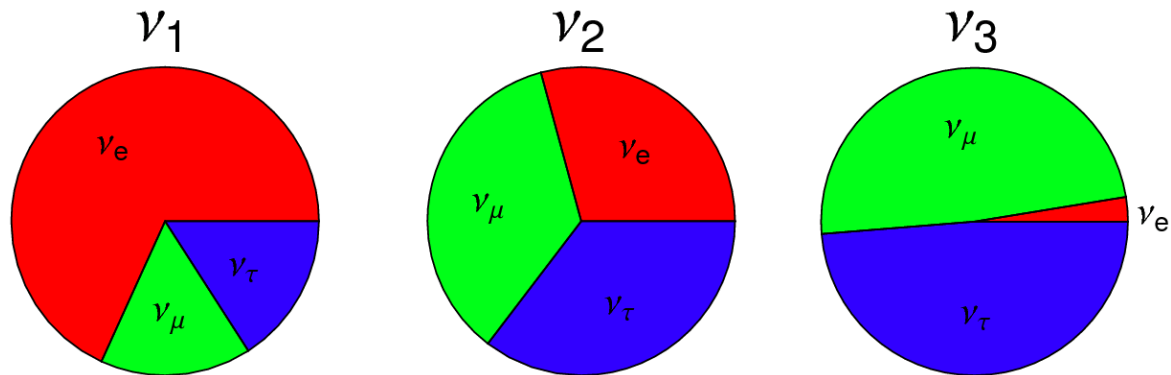


Neutrino

Oscylacje

W oddziaływaniach słabych produkowane są zawsze neutrino o określonym zapachu.

Jednak stany fizyczne (stany własne masy) neutrin 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 dwóch generacji

Produkowane stany zapachowe są mieszanką stanów własnych masy:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

Zakładając, że w chwili $t = 0$ produkowane jest ν_e , stan neutrino opisać możemy jako:

$$|\nu\rangle_0 = \cos \theta_{12} |\nu_1\rangle_0 + \sin \theta_{12} |\nu_2\rangle_0 = |\nu_e\rangle$$

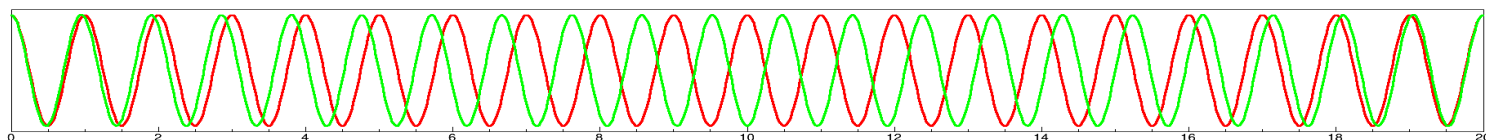
Propagacja swobodnego stanu $|\nu_i\rangle$:

$$|\nu_i\rangle(t, \vec{x}) = |\nu_i\rangle_0 \cdot \exp\left(-\frac{i}{\hbar}(Et - \vec{p} \cdot \vec{x})\right)$$

\Rightarrow **Jeśli** $m_1 \neq m_2$ to względna **faza** wkładów $|\nu_1\rangle$ i $|\nu_2\rangle$ zmienia się

$$|\nu\rangle(t, \vec{x}) = a(t) |\nu_1\rangle + b(t) |\nu_2\rangle \neq |\nu_e\rangle(t, \vec{x})$$

$$|\nu\rangle(t, \vec{x}) = A(t) |\nu_e\rangle + B(t) |\nu_\mu\rangle$$



Neutrina

Oscylacje dla dwóch generacji

Prawdopodobieństwo, że ν_e wyprodukowane w $t_0 = 0$ oddziała jak ν_e po czasie t

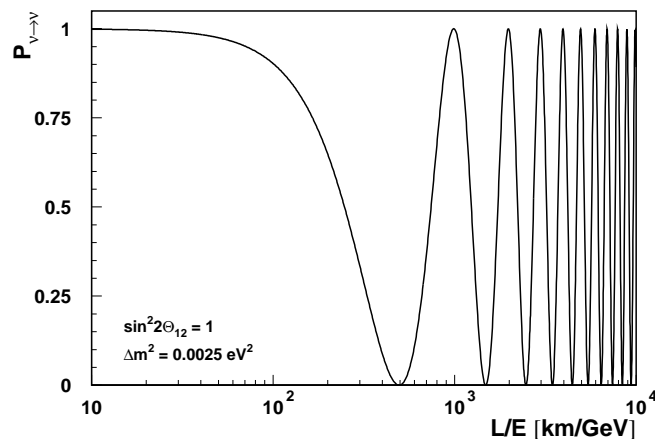
$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(t) = |A(t)|^2$$

Przyjmując, że różnice mas są bardzo małe, $|m_1 - m_2| \ll m_1 \sim m_2 \ll E_\nu$

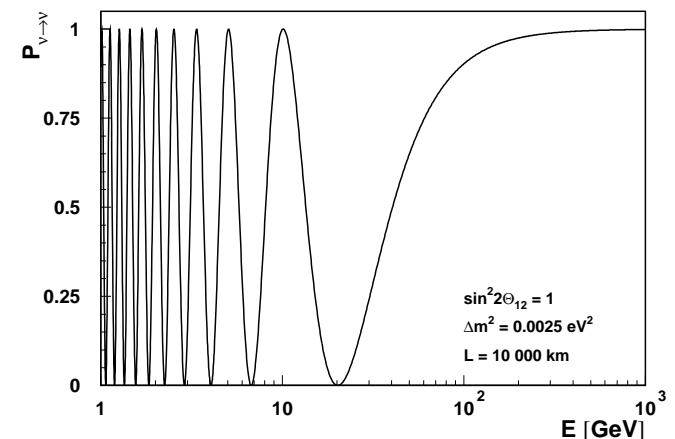
$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(t) = 1 - \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2\left(1.27 \cdot \Delta m^2 \frac{L}{E}\right)$$

$L = ct$ [km], Δm^2 [eV²] i E [GeV].

W funkcji odległości:



W funkcji energii: ($L \sim 2R_Z$)



Dla bardzo dużych **large** L/E ($E/L \ll \Delta m^2$) dostajemy: $P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} \approx 0.5$

Neutrino

Oscylacje dla trzech generacji

Stany zapachowe są superpozycją stanów masowych:

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

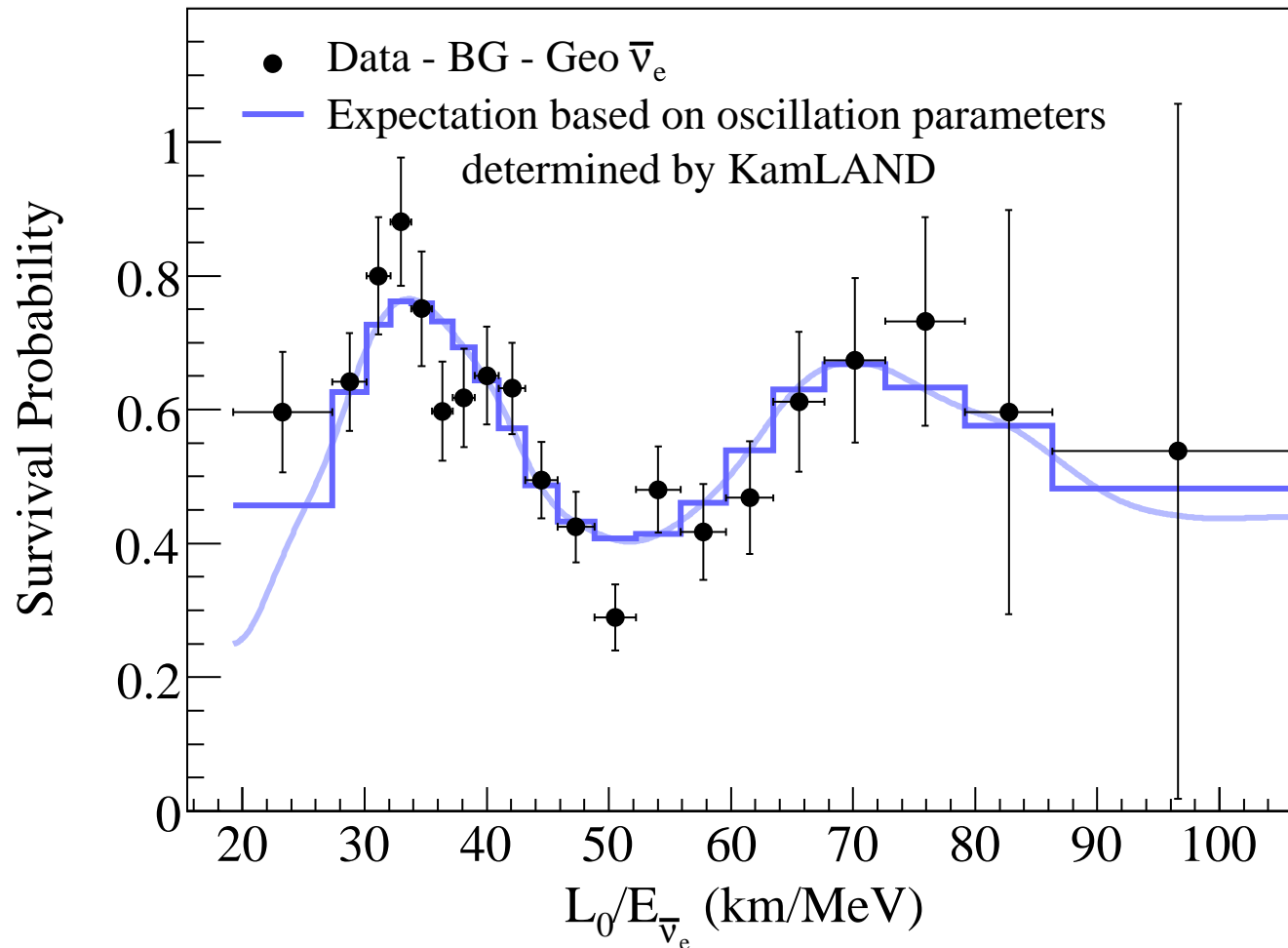
PMNS - macieź Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata
odpowiada macieży CKM mieszania kwarków

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

Neutrina

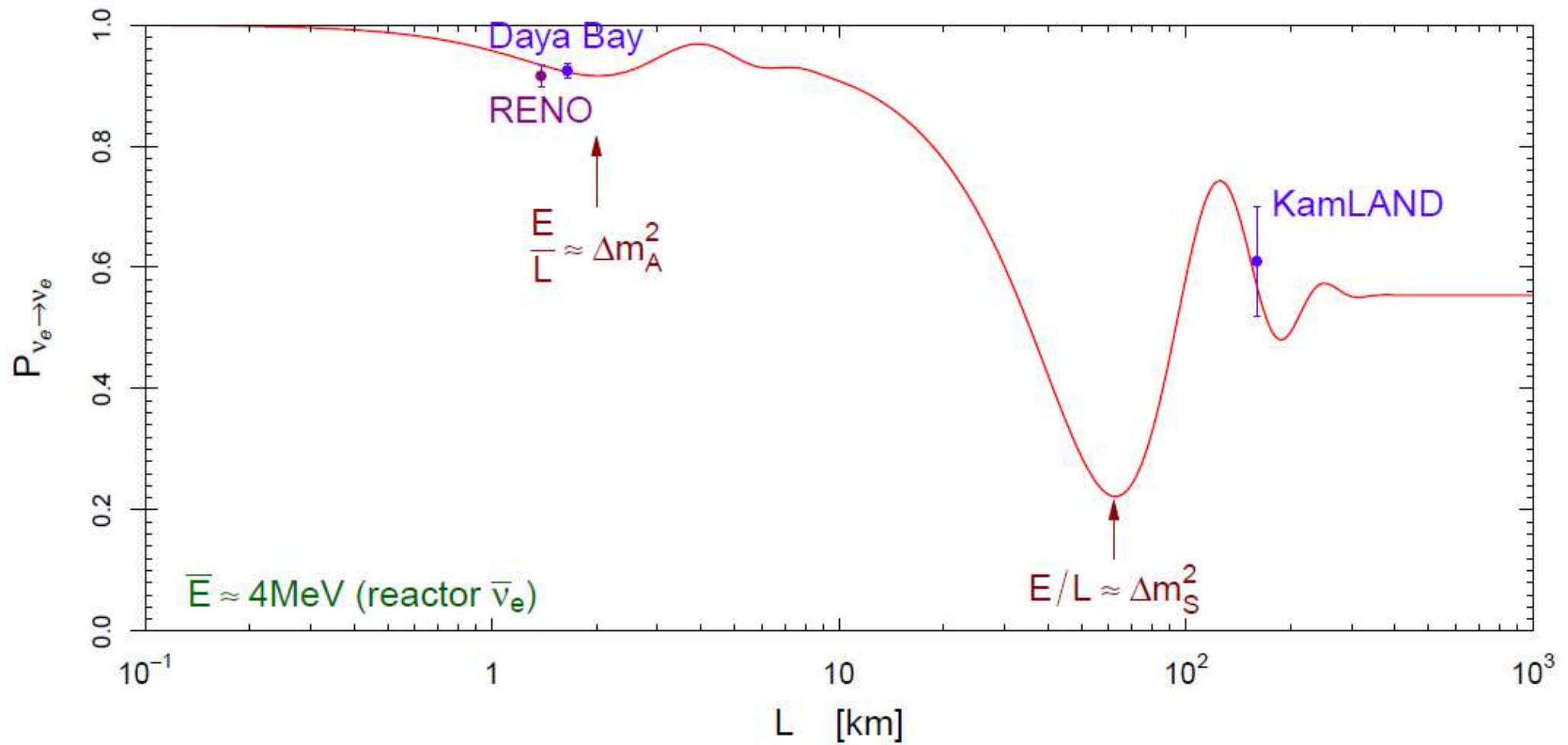
Wyniki KamLAND

neutrina reaktorowe



Neutrino

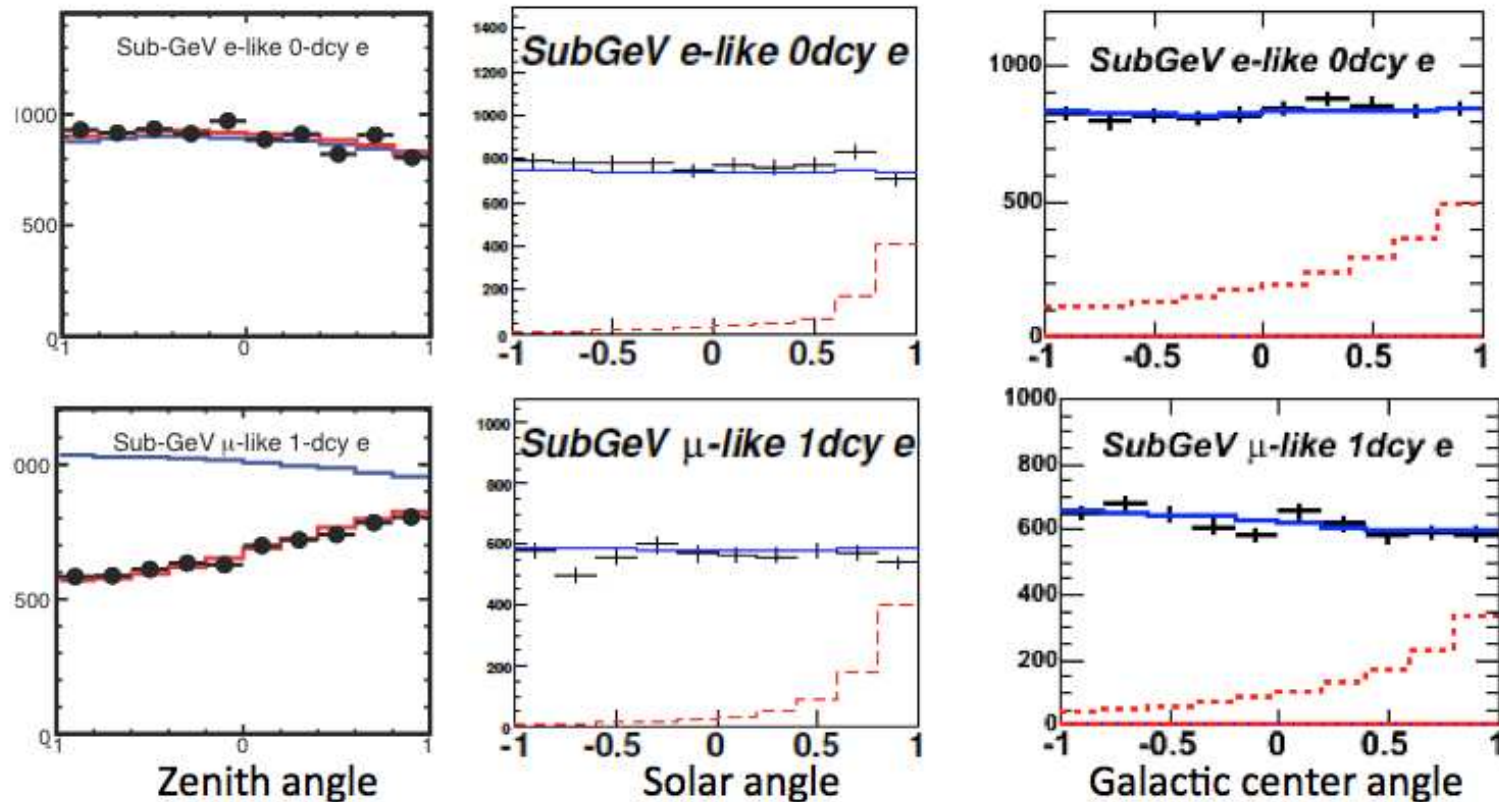
Neutrino reaktorowe



Super-Kamiokande

Ciemna materia

Słońce produkuje neutrino do 15 MeV. Wyżej energetyczne neutrino nie powinny być skorelowane z pozycją Słońca, ani tym bardziej centrum naszej Galaktyki.

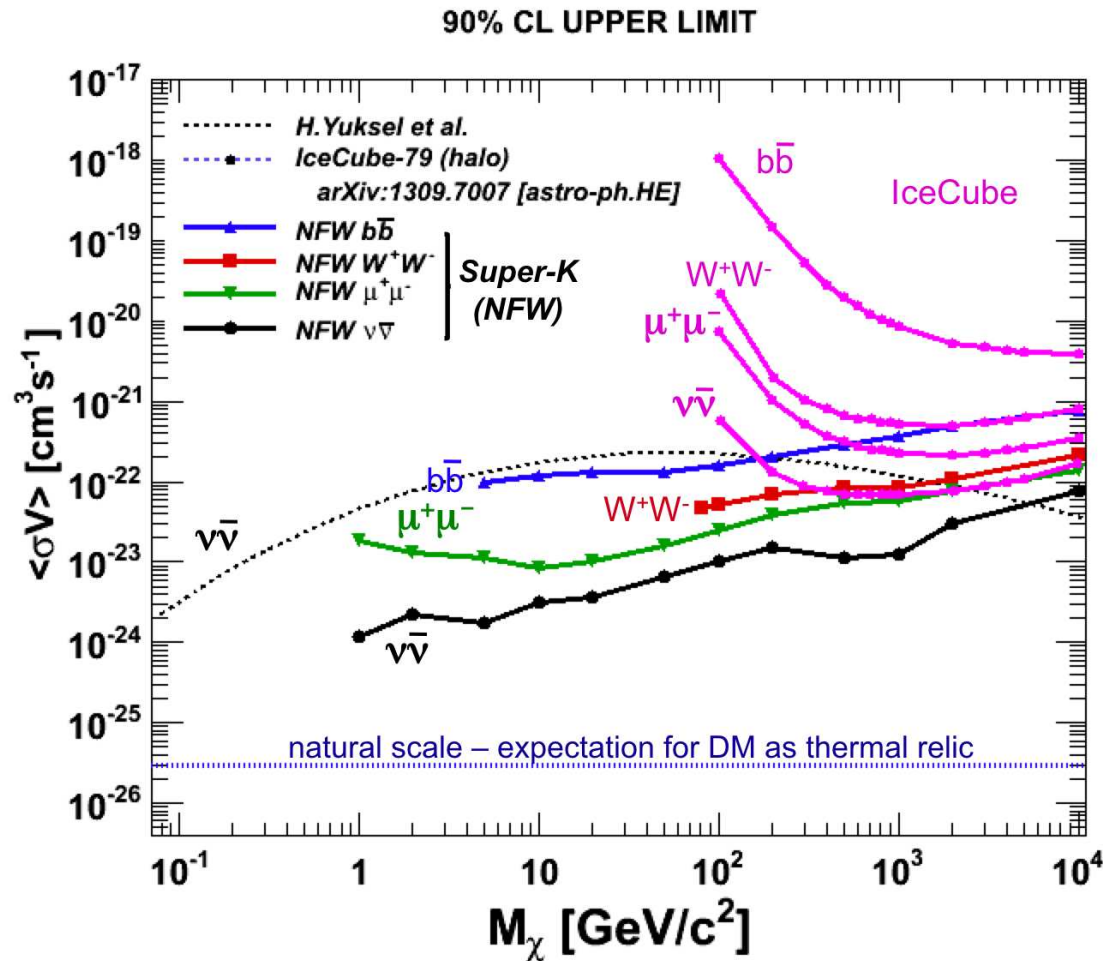


Porównanie rozkładów kątowych z **symulacją tła** oraz **anihilacją DM** w $b\bar{b}$ ($M=5$ GeV)

Super-Kamiokande

Wyniki

Ograniczenia z poszukiwania anihilacji DM w centrum Galaktyki



Super-Kamiokande

Wyniki

Ograniczenia z poszukiwania anihilacji DM w Słońcu

