

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład VI

- Bezpośrednie poszukiwanie ciemnej materii
eksperymenty z ciekłymi gazami szlachetnymi (LXe, LAr)
- Pośrednie poszukiwania ciemnej materii
satelitarne pomiary promieniowania kosmicznego
 - FERMI
 - PAMELA

Ciemna materia

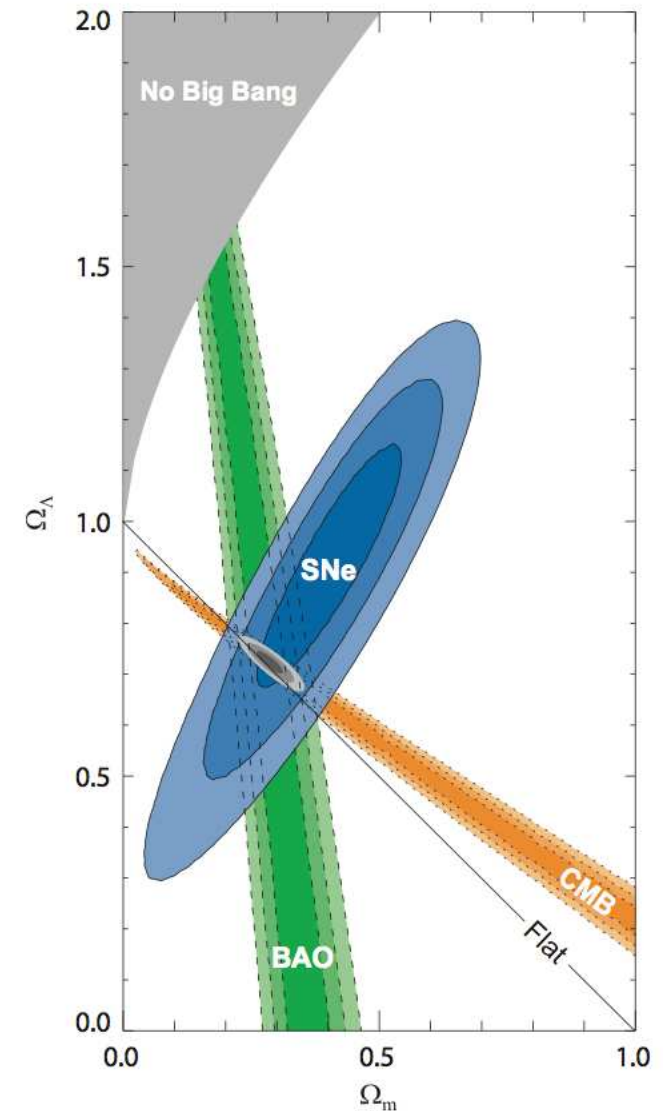
Przesłanki eksperymentalne

Najsilniejsze ograniczenia na parametry kosmologiczne uzyskujemy uwzględniając:

- rozkłady fluktuacji w CMB
- formowanie struktur wielkoskalowych
- pomiary odległych supernowych

Chcąc opisać wszystkie dostępne dane musimy przyjąć, że:

- **atomy** (bariony) wypełniają tylko około **5%** Wszechświata.
- **26%** stanowi **ciemna materia**...
- **69%** to tzw. “**ciemna energia**”, którą możemy opisać poprzez **stałą kosmologiczną** (Λ)



Ciemna materia

Właściwości

Wiemy że ciemna materia:

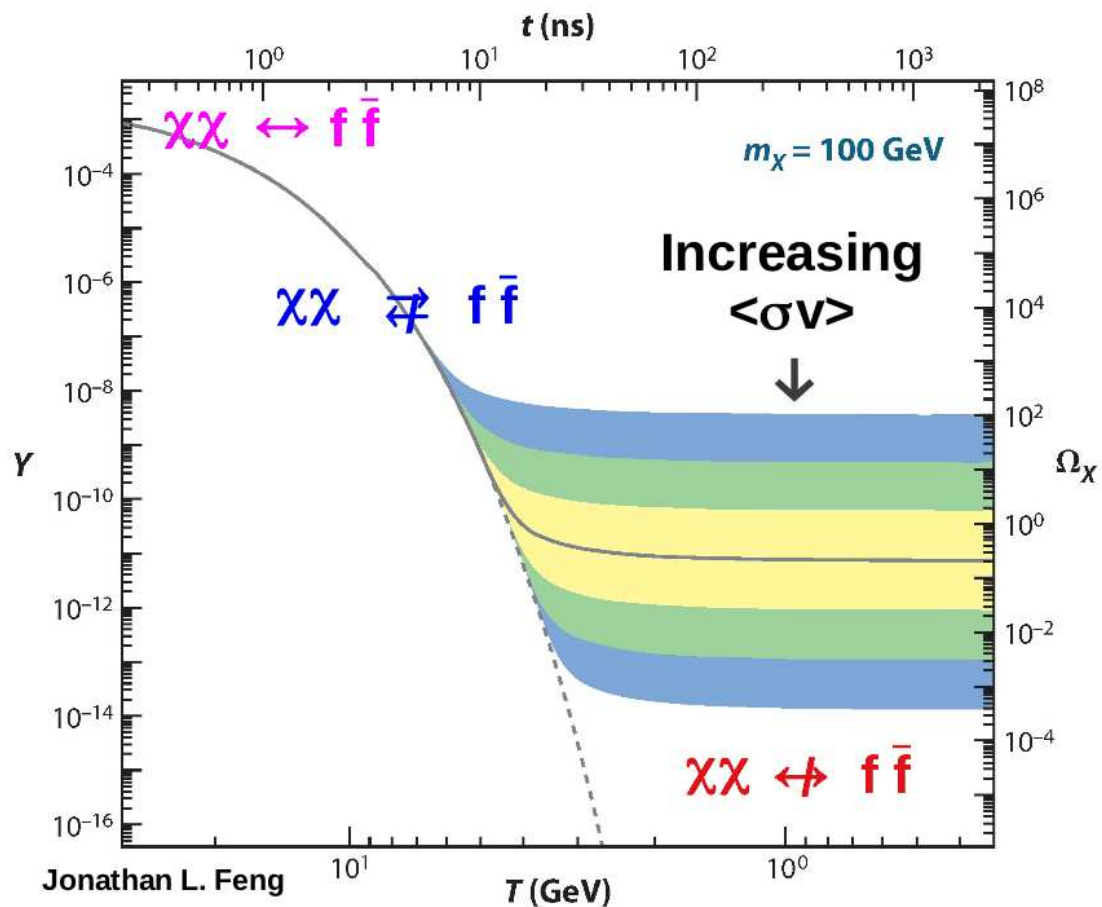
- jest “zimna” (nierelatywistyczna)
- jest niebarionowa
- jest stabilna (nie rozpada się)
- bardzo słabo oddziałuje (tylko grawitacyjnie?)
- daje wkład ok. $1/4$ gęstości krytycznej ($5 \times$ materia barionowa)

Najczęściej przyjmuje się, że na bardzo wczesnym etapie ewolucji Wszechświata cząstki ciemnej materii były w równowadze termodynamicznej ze innymi cząstkami MS.

W miarę rozszerzania się Wszechświata nastąpiło jednak “wymrożenie”

Ciemna materia

Wymrozenie



Obecny wkład cząstek DM do gęstości Wszechświata bardzo silnie zależy od ich masy i $\langle\sigma v\rangle$.

Im większe $\langle\sigma v\rangle$ tym mniejsza gęstość "reliktowa" - więcej cząstek zdoła anihilować..

Można oszacować:

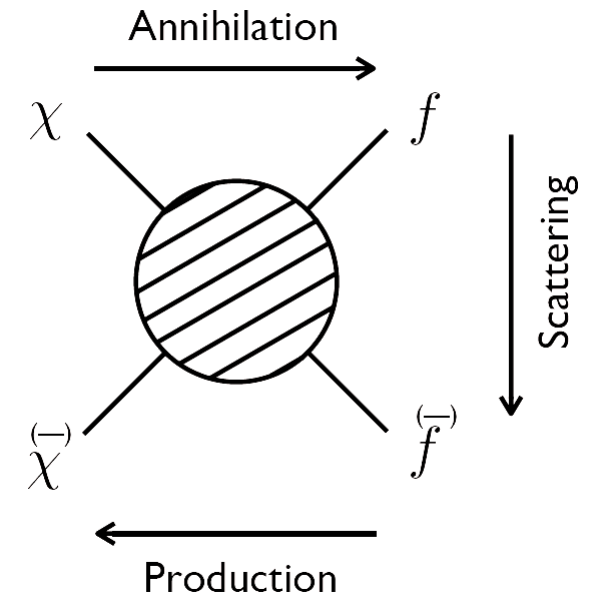
$$\Omega_{\chi} h^2 \approx \frac{3 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^3/\text{s}}{\langle\sigma v\rangle} \sim 0.12$$

Ciemna materia

Poszukiwanie

Niezależnie od modelu, możemy poszukiwać cząstek ciemnej materii (DM) na trzy sposoby:

- produkcja
bezpośrednia produkcja cząstek ciemnej materii
np. w LHC
- detekcja bezpośrednia
poszukiwanie sygnałów oddziaływania DM
(rozpraszania) w detektorach
- detekcja pośrednia
poszukiwanie sygnałów oddziaływania (anihilacji)
DM we Wszechświecie

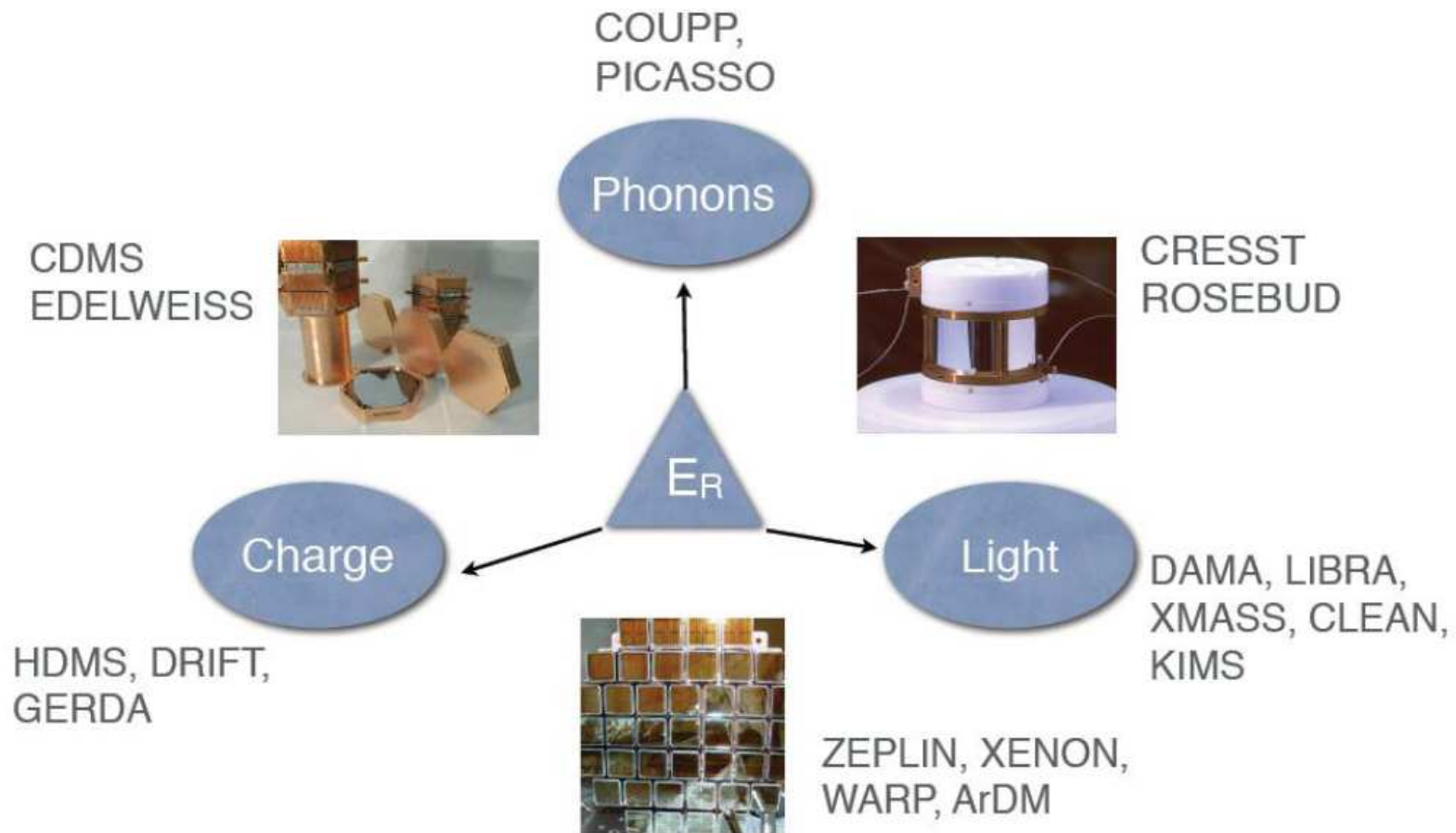


Detekcja bezpośrednia

Kanały detekcji

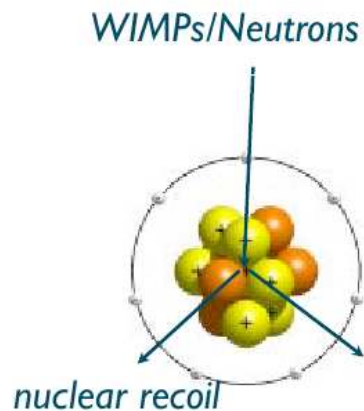
Mierząc niezależnie jonizację, scyntylacje i ciepło \Rightarrow eliminacja tła.

Różne eksperymenty przyjęły różną strategię



Detekcja bezpośrednia

Duże układy detekcyjne

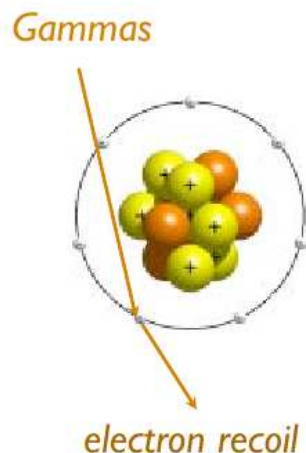


W omówionych dotychczas eksperymentach substancją aktywną były kryształy. Pozwalało to na pomiar wywołanych przez WIMP drgań sieci krystalicznej (\Rightarrow zmian temperatury) i rozróżnienie między rozproszeniem WIMP a fotonami tła.

Aby to było możliwe kryształ musiał być stosunkowo mały

\Rightarrow duża segmentacja detektora

\Rightarrow trudno zbudować duży układ detekcyjny.



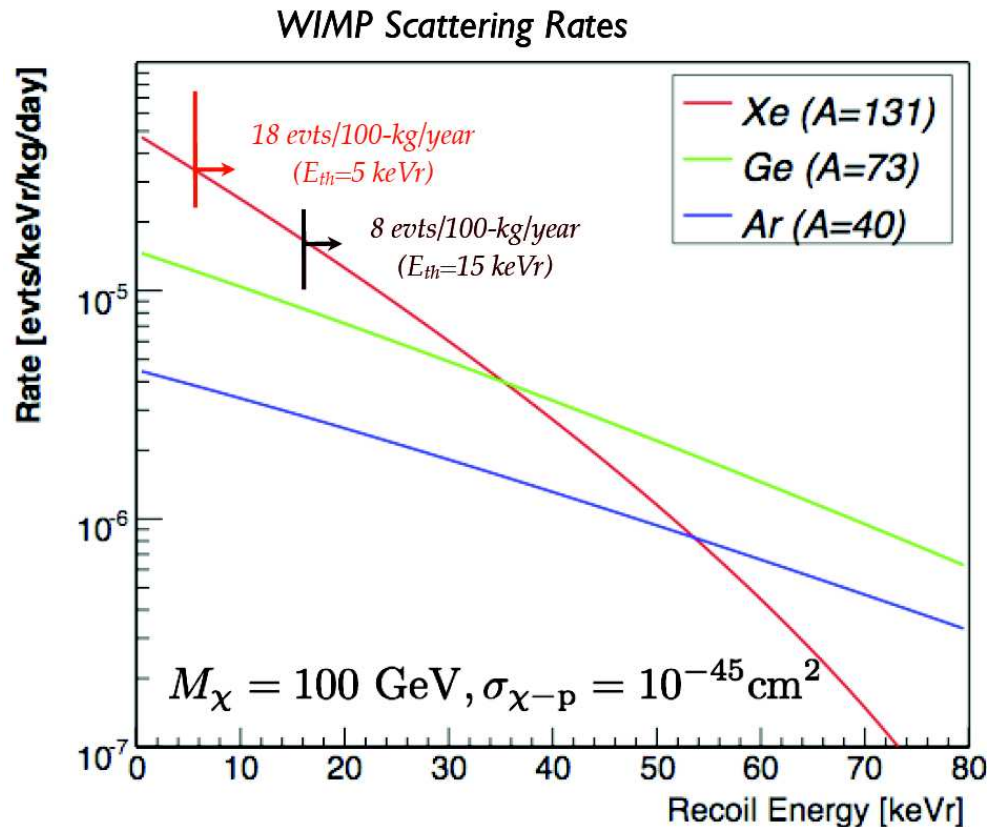
Łatwiej zbudować duży detektor ograniczając się do pomiaru scyntylacji i jonizacji. Jest to możliwe m.in. w ciekłych gazach szlachetnych.

Detekcja bezpośrednia

Ciekłe gazy szlachetne

Zalety:

- możliwa budowa dużych detektorów (nawet rzędu ton)
- niski próg wyzwalania
- łatwe chłodzenie
- dyskryminacja tła γ
- możliwość rekonstrukcji pozycji
 \Rightarrow działa też jako aktywna osłona

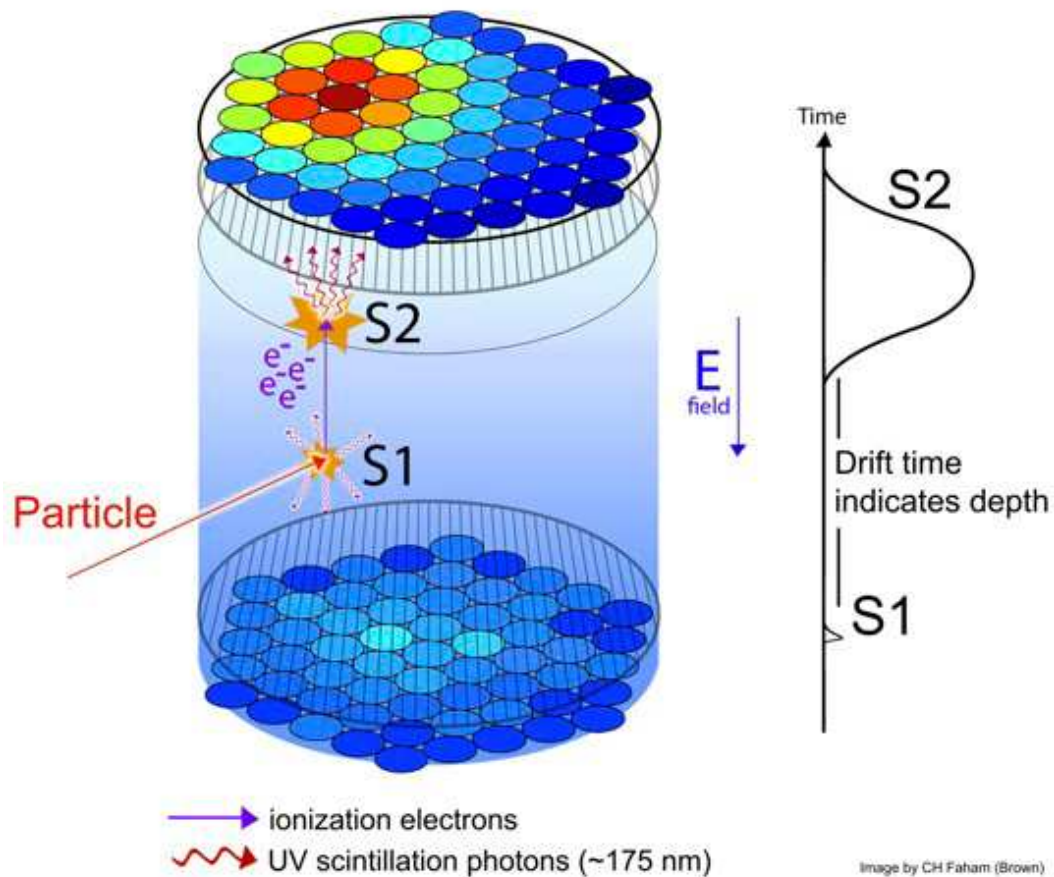


Najczęściej wybierany ksenon:

- najwyższe prawdopodobieństwo detekcji (przy niskim progu)
- niska radioaktywność
- 50% jąder nieparzystych
 \Rightarrow pomiar oddziaływań zależnych od spinu

Detekcja bezpośrednia

Dwufazowa komora projekcji czasowej



W wyniku oddziaływania cząstki w ciekłym ksenonie obserwujemy **pierwotną scyntylację** (S1) oraz jonizację ośrodka.

Elektrony jonizacji dryfują w stałym polu elektrycznym do granicy faz, a następnie są przyspieszane i wywołują wtórną scyntylację (S2).

Pozycja sygnały S2 oraz odstęp czasu pomiędzy S1 i S2 (czas dryfu) pozwalają na rekonstrukcję pozycji pierwotnego oddziaływania w **3 wymiarach**.

Detekcja bezpośrednia

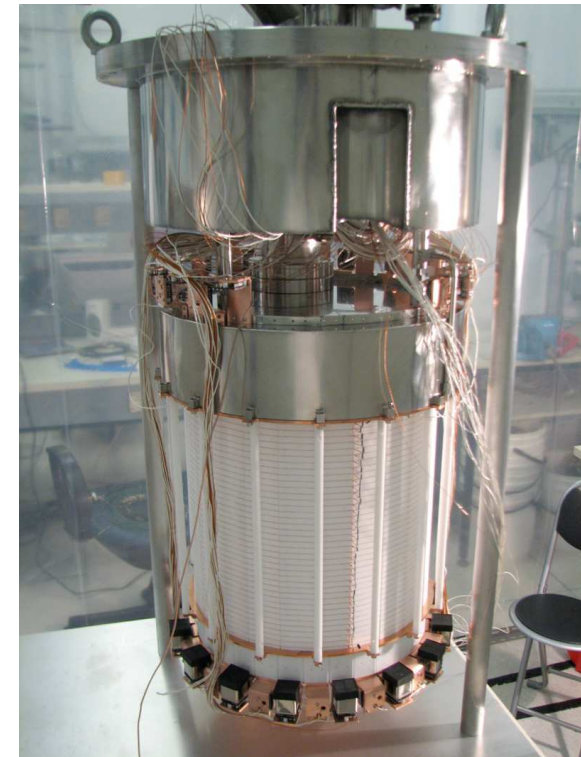
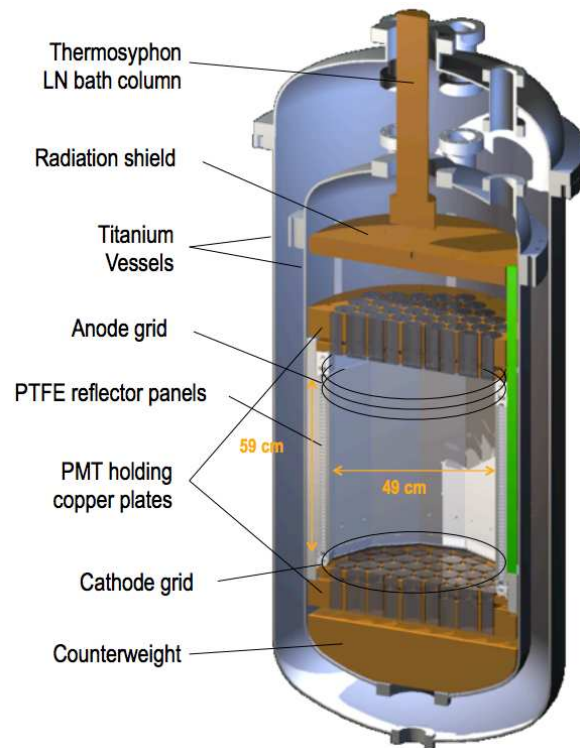
Dwufazowa komora projekcji czasowej

Najsilniejsze ograniczenia na DM pochodzą obecnie z eksperymentów

LUX (Large Underground Xenon experiment)

Xenon

zdj.: Xenon100



Detekcja bezpośrednia

Dwufazowa komora projekcji czasowej

Najsilniejsze ograniczenia na DM pochodzą obecnie z eksperymentów

LUX (Large Underground Xenon exp.)

- 370 kg ciekłego Xe
118 kg w obszarze aktywnym
- 122 fotopowielacze
- kopalnia Homestake, USA (1478 m)

Xenon100

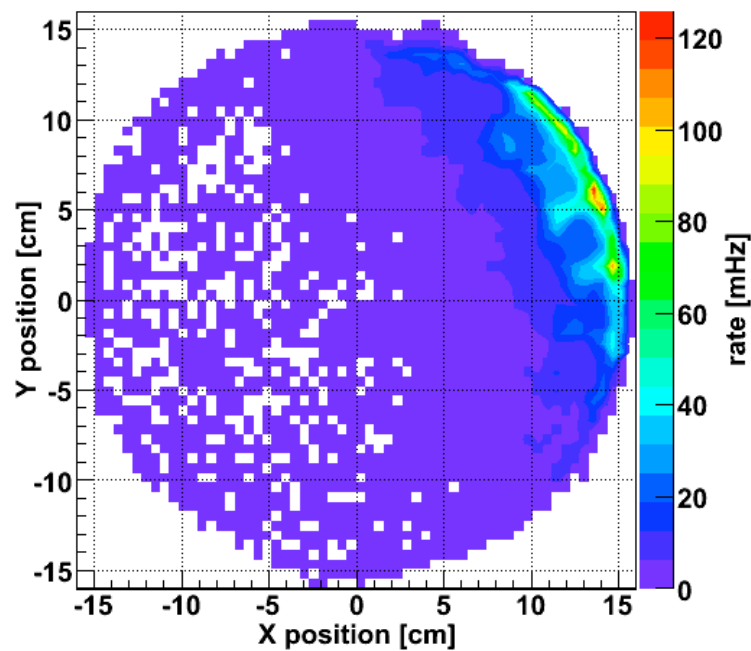
- 161 kg ciekłego Xe
62 kg w obszarze aktywnym
- 242 fotopowielacze
- LNGS (Gran Sasso), Włochy (1400 m)

Detekcja bezpośrednia

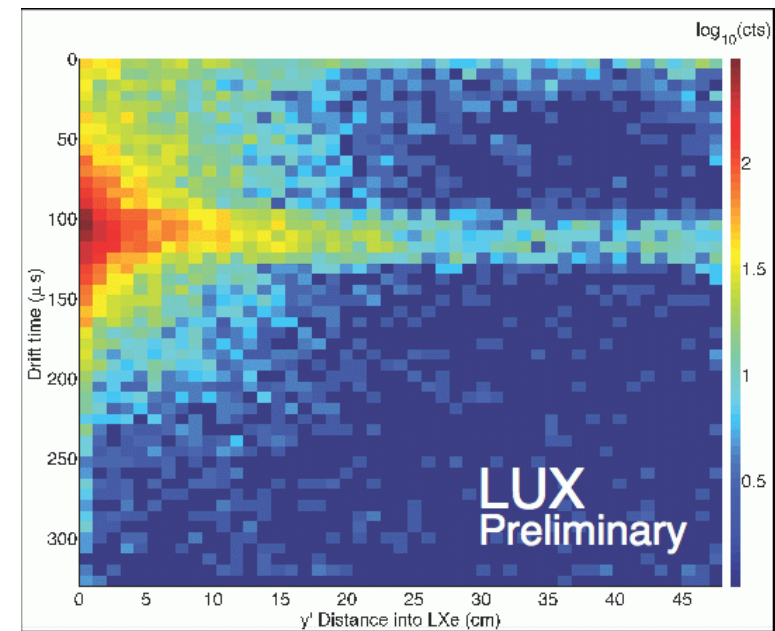
Dwufazowa komora projekcji czasowej

Możliwość rekonstrukcji pozycji punktu zderzenia

Źródło γ przy bocznej ścianie:



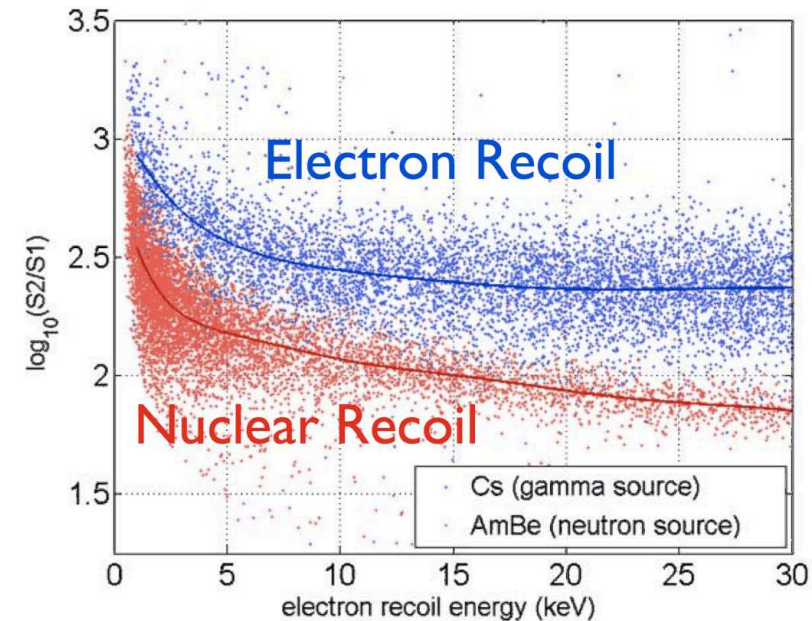
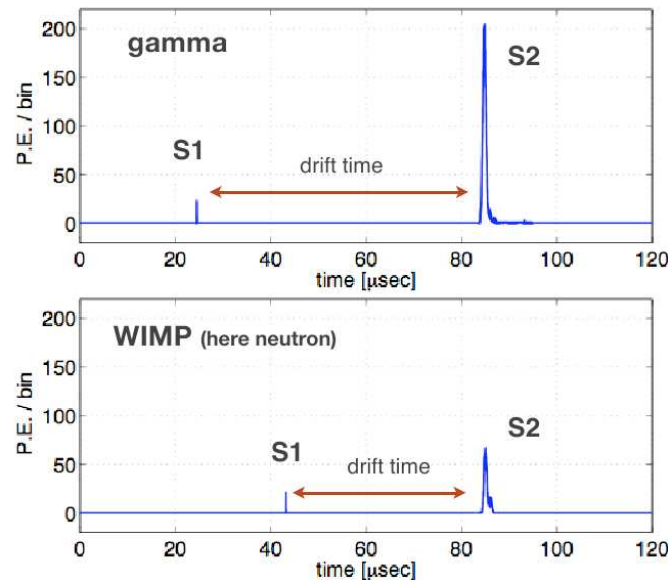
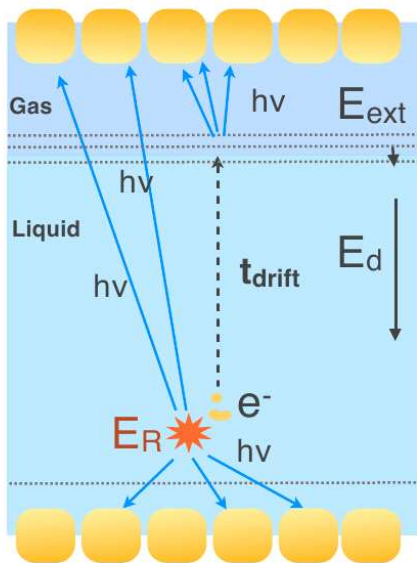
Wiązka neutronów:



Detekcja bezpośrednia

Dwufazowa komora projekcji czasowej

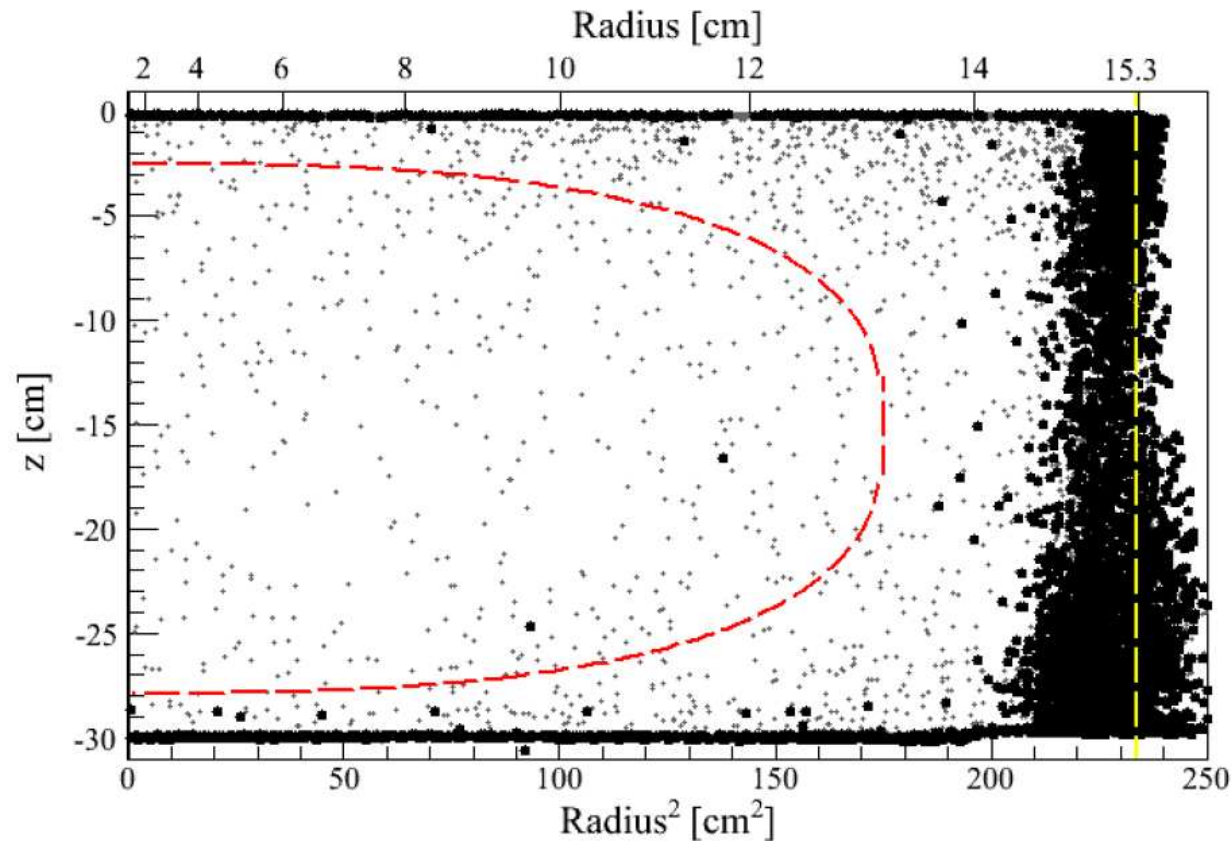
Pomiar scyntylacji i jonizacji daje możliwość odróżnienia oddziaływania na jądrze (WIMP) od rozprożeń na elektronach (γ)



Cięcie na stosunek $S2/S1$ umożliwia odrzucenie ponad 99.5% przypadków tła.

Detekcja bezpośrednia

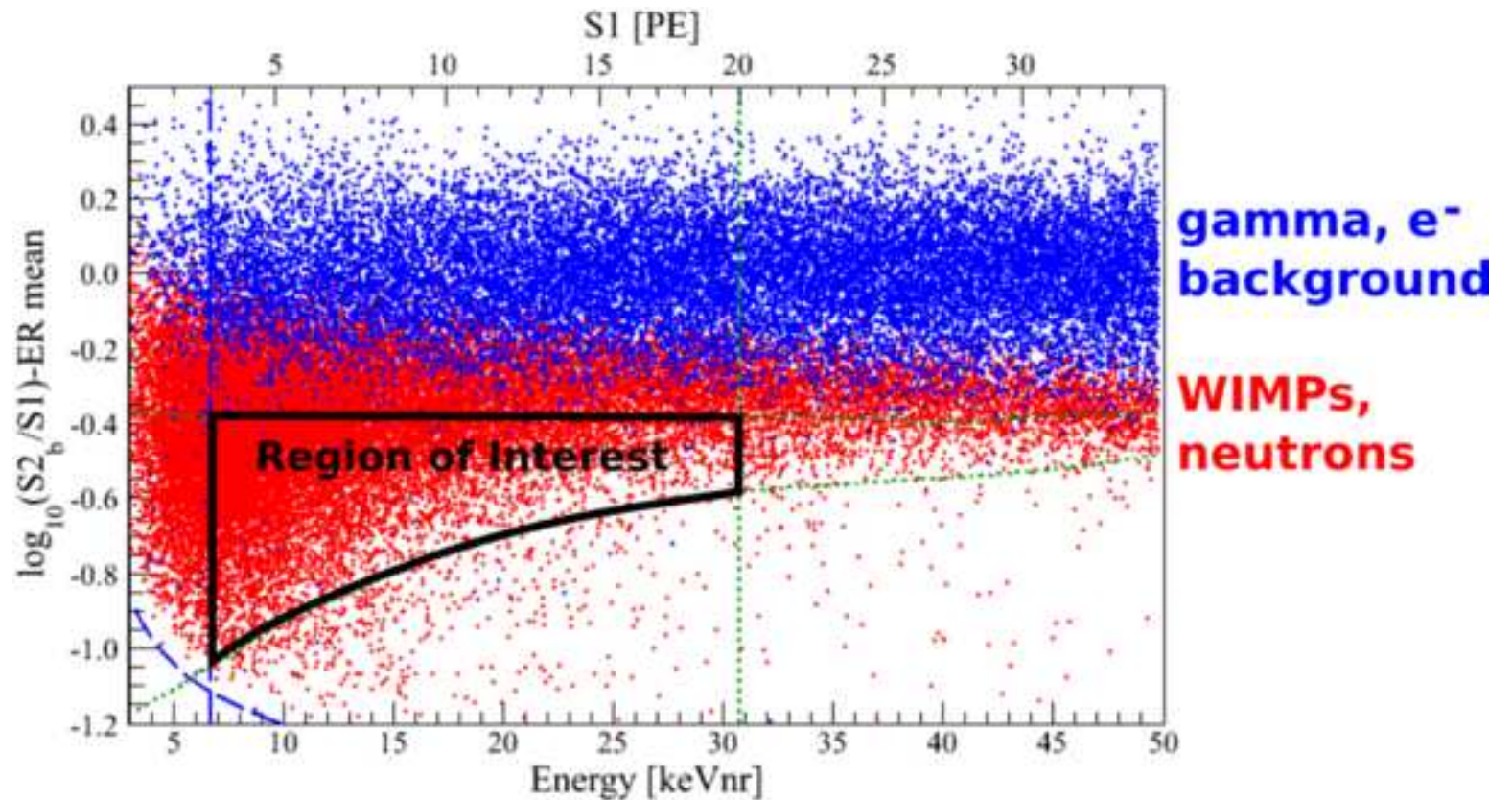
Eksperyment Xenon100



Pomiar pozycji pozwala na efektywne odrzucanie przypadków pochodzących od docierającego z zewnątrz promieniowania - przypadki blisko ścianek naczynia.

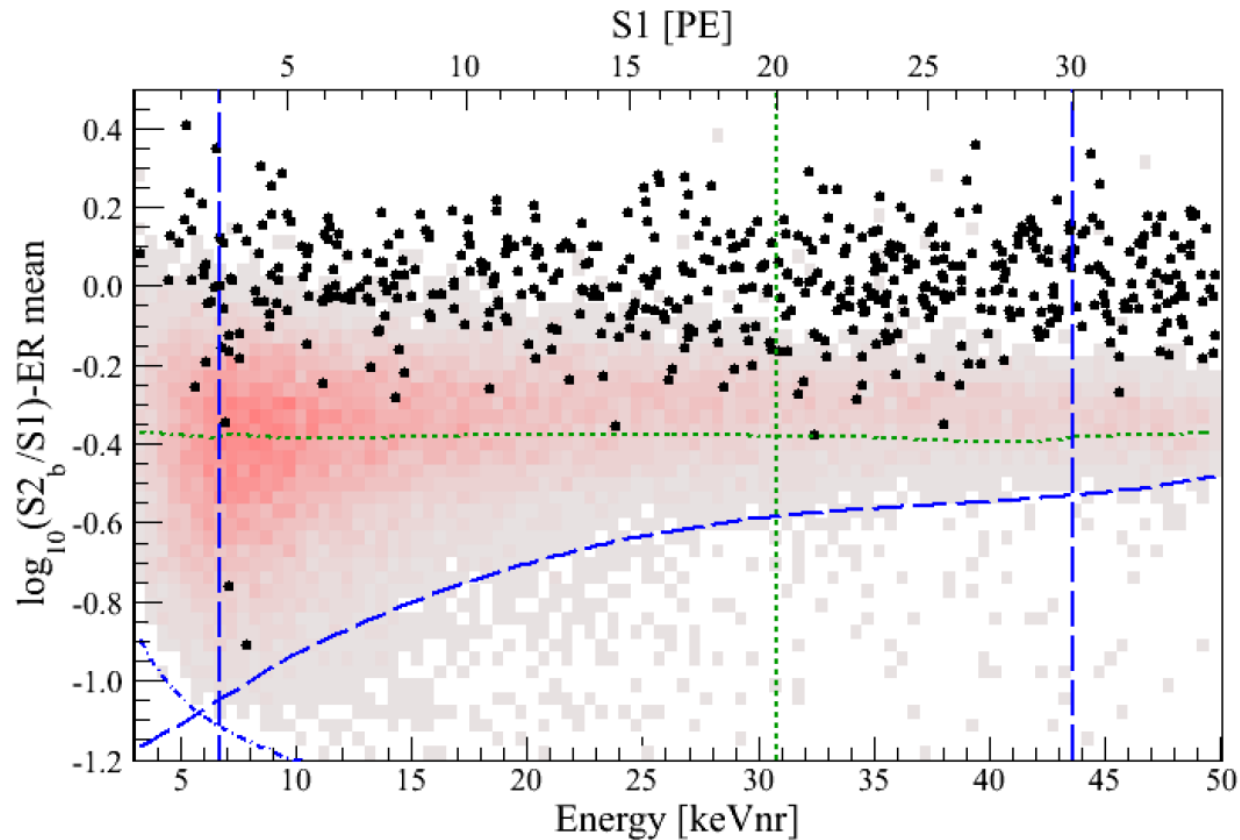
Detekcja bezpośrednia

Eksperyment Xenon100



Detekcja bezpośrednia

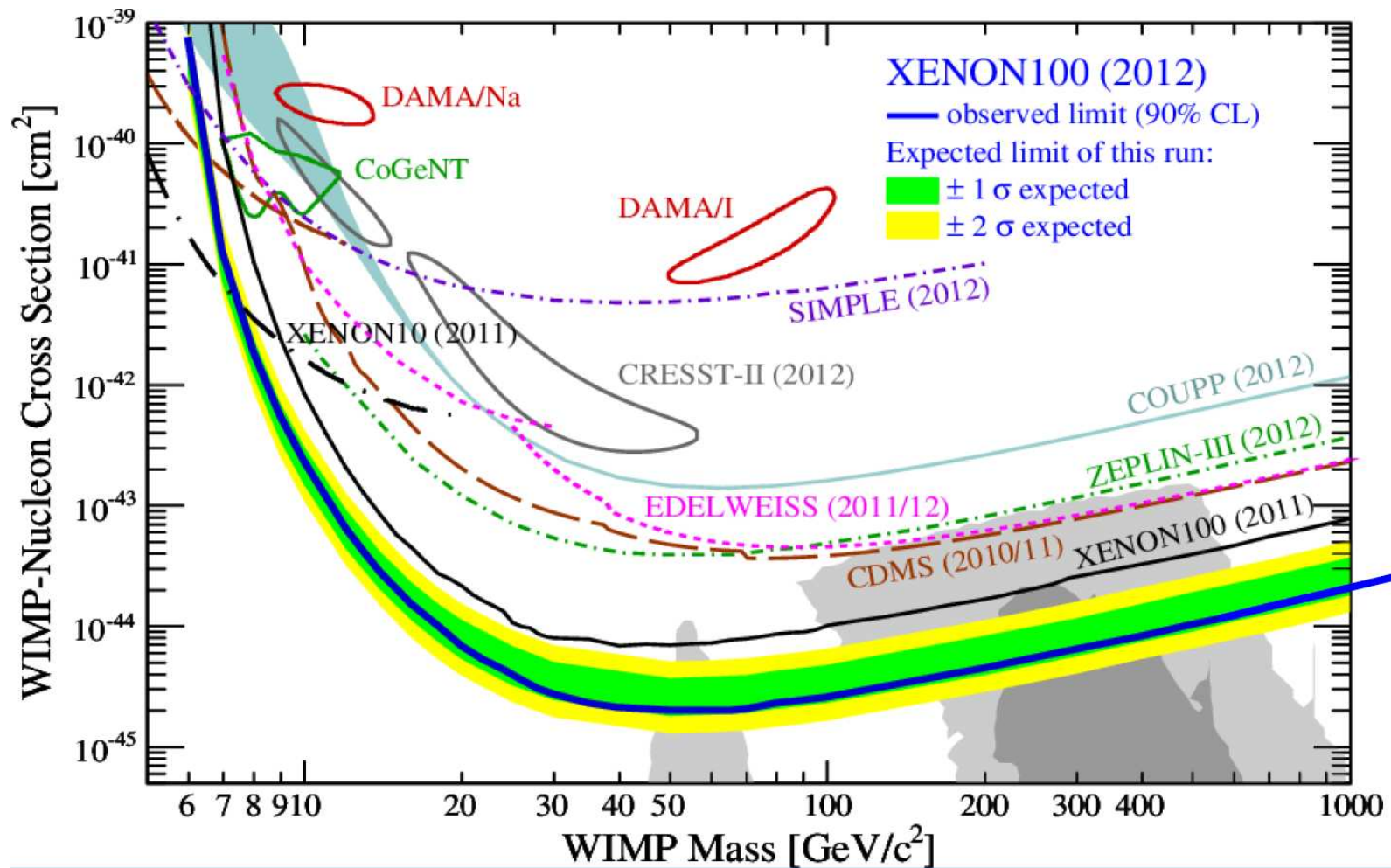
Eksperyment Xenon100



Ostatecznie w danych 2011-2012 (225 dni) zaobserwowano 2 przypadki przy oczekiwanym poziomie tła $1.0 \pm 0.2 \Rightarrow$ brak sygnału WIMP

Detekcja bezpośrednia

Eksperyment Xenon100

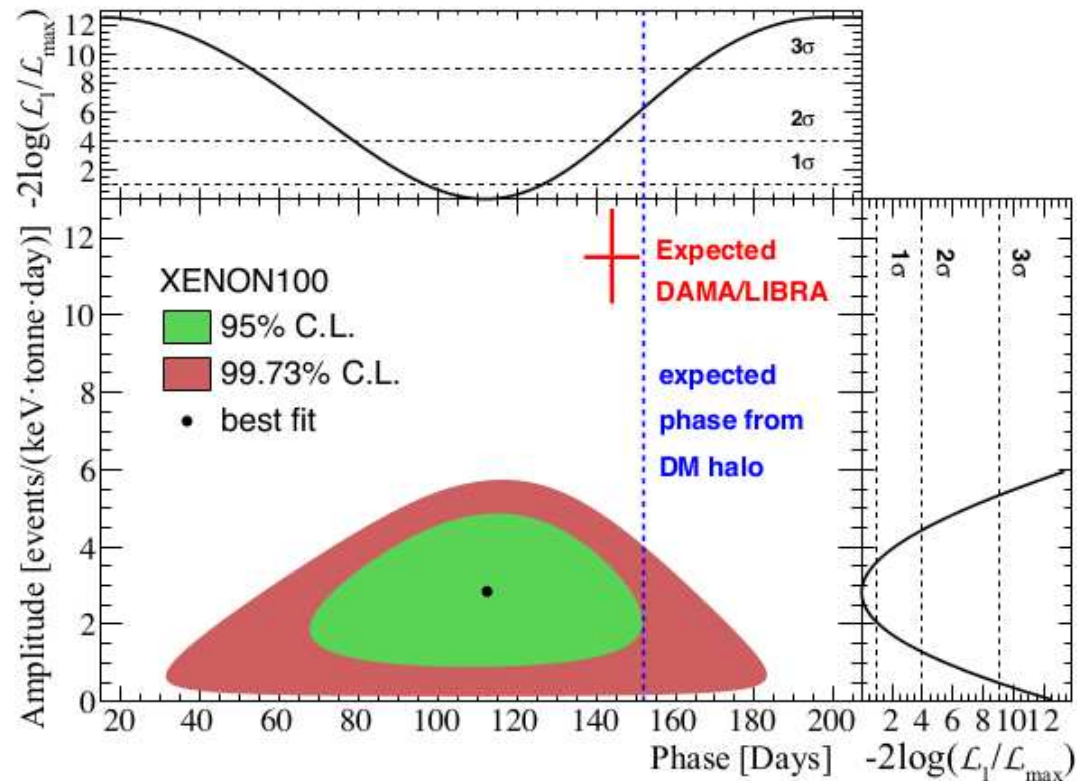


Detekcja bezpośrednia

Eksperyment Xenon100

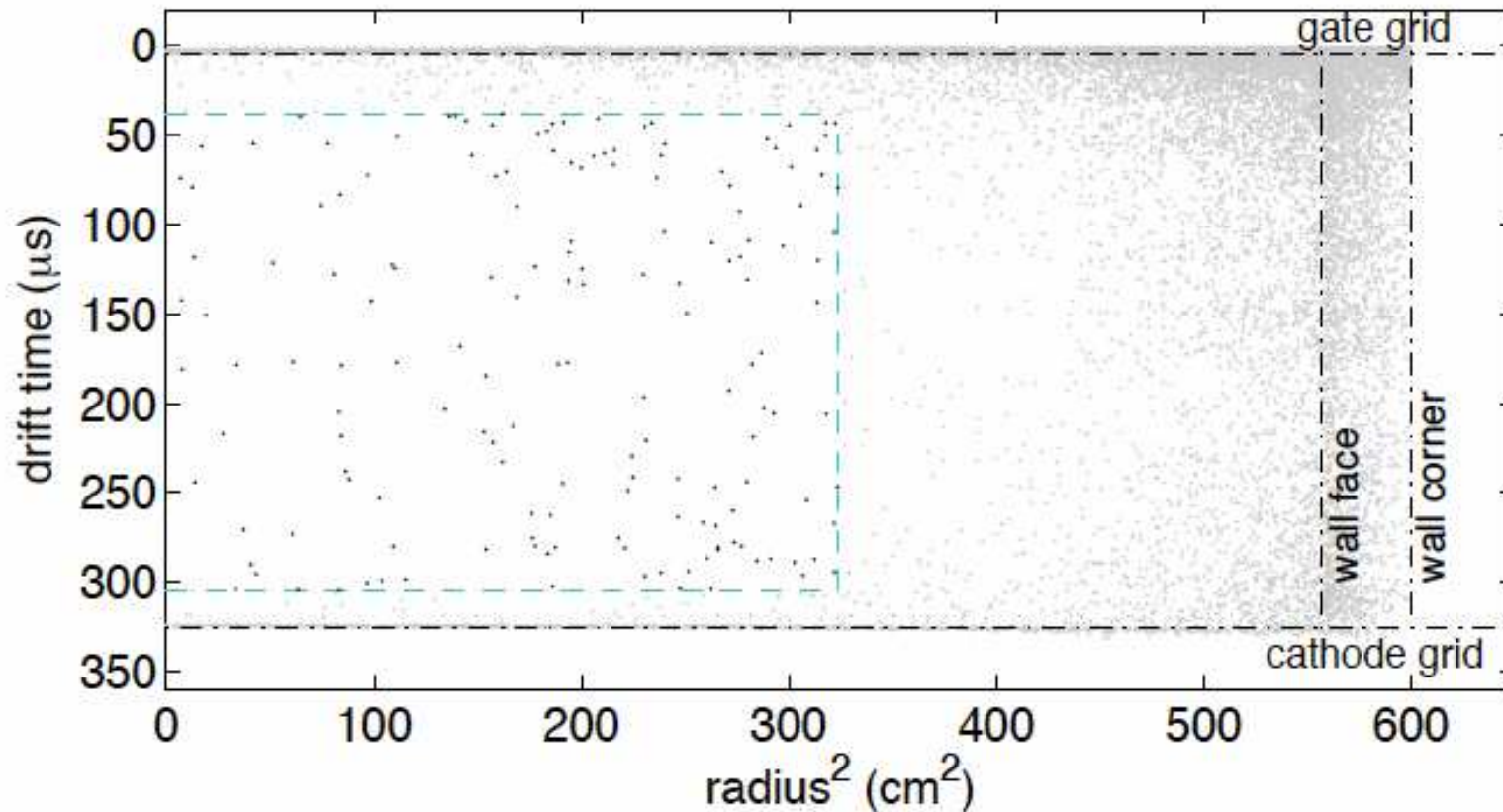
Wyniki wykluczają też istnienie modulacji sezonowych, na które wskazywał eksperyment DAMA/LIBRA.

Dopasowanie dla $T=1$ rok:



Detekcja bezpośrednia

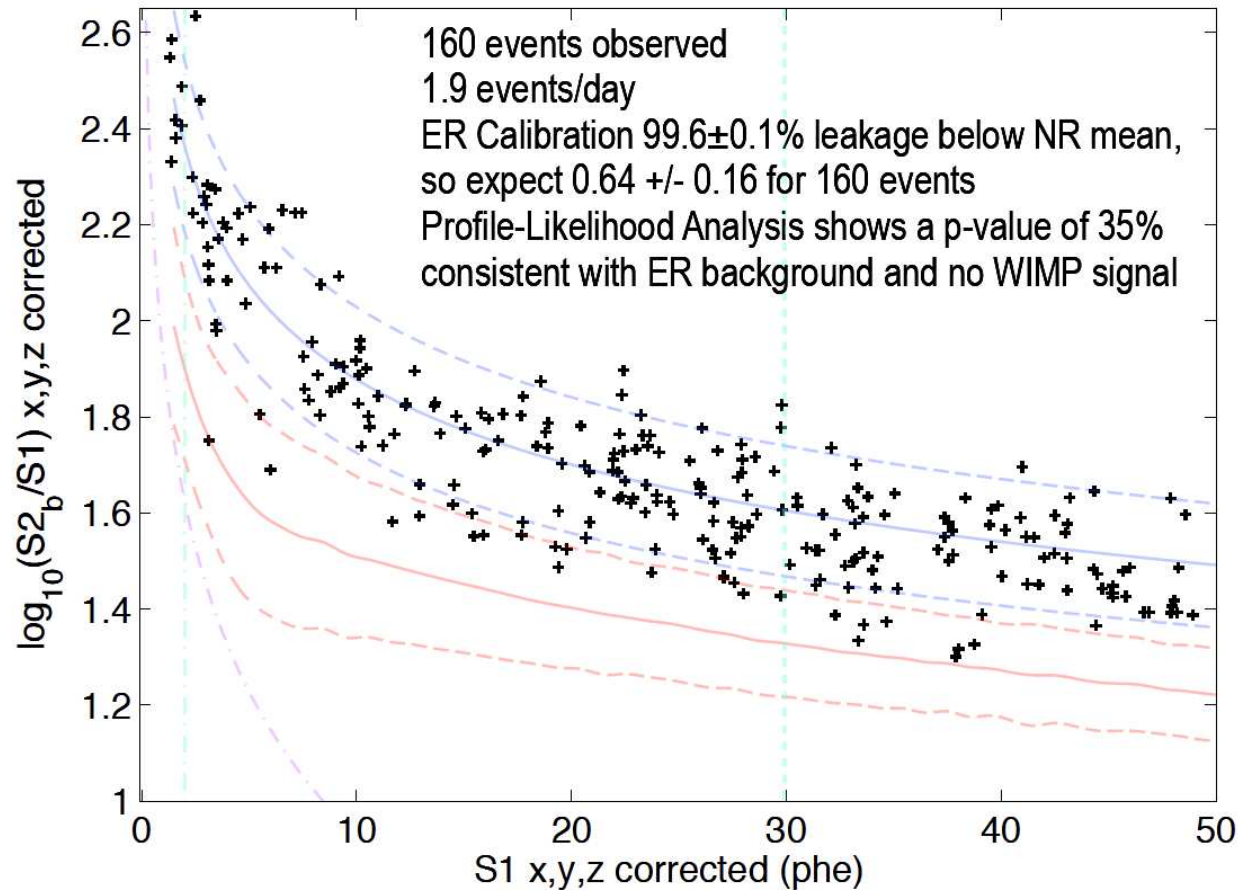
Eksperyment LUX



W danych 2013 (85 dni) zaobserwowano 160 przypadków w obszarze “aktywnym”

Detekcja bezpośrednia

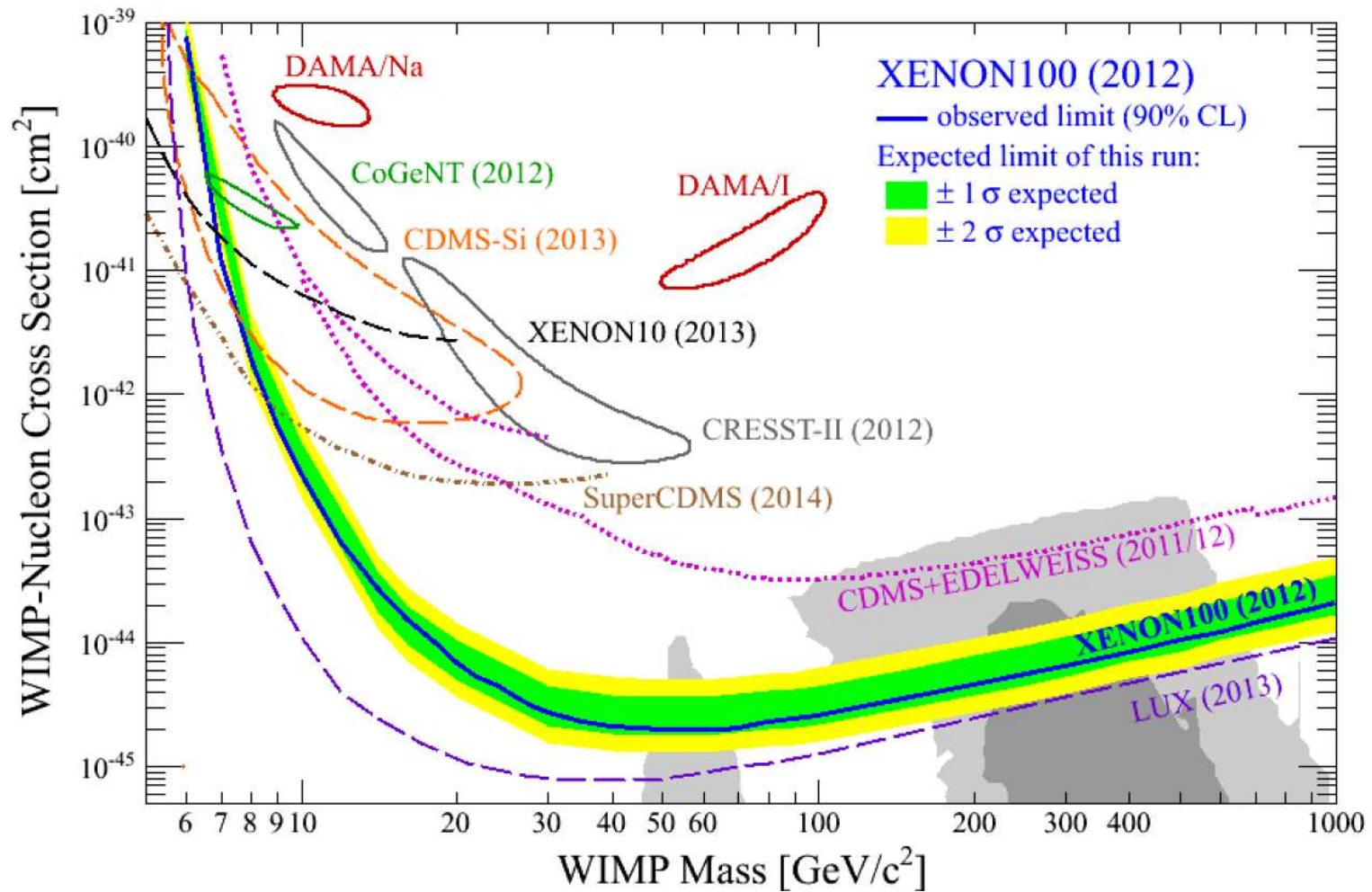
Eksperyment LUX



Jednak ich rozkład jest zgodny z hipotezą tła od promieniowania $\gamma \Rightarrow$ brak sygnału WIMP

Detekcja bezpośrednia

Eksperyment LUX

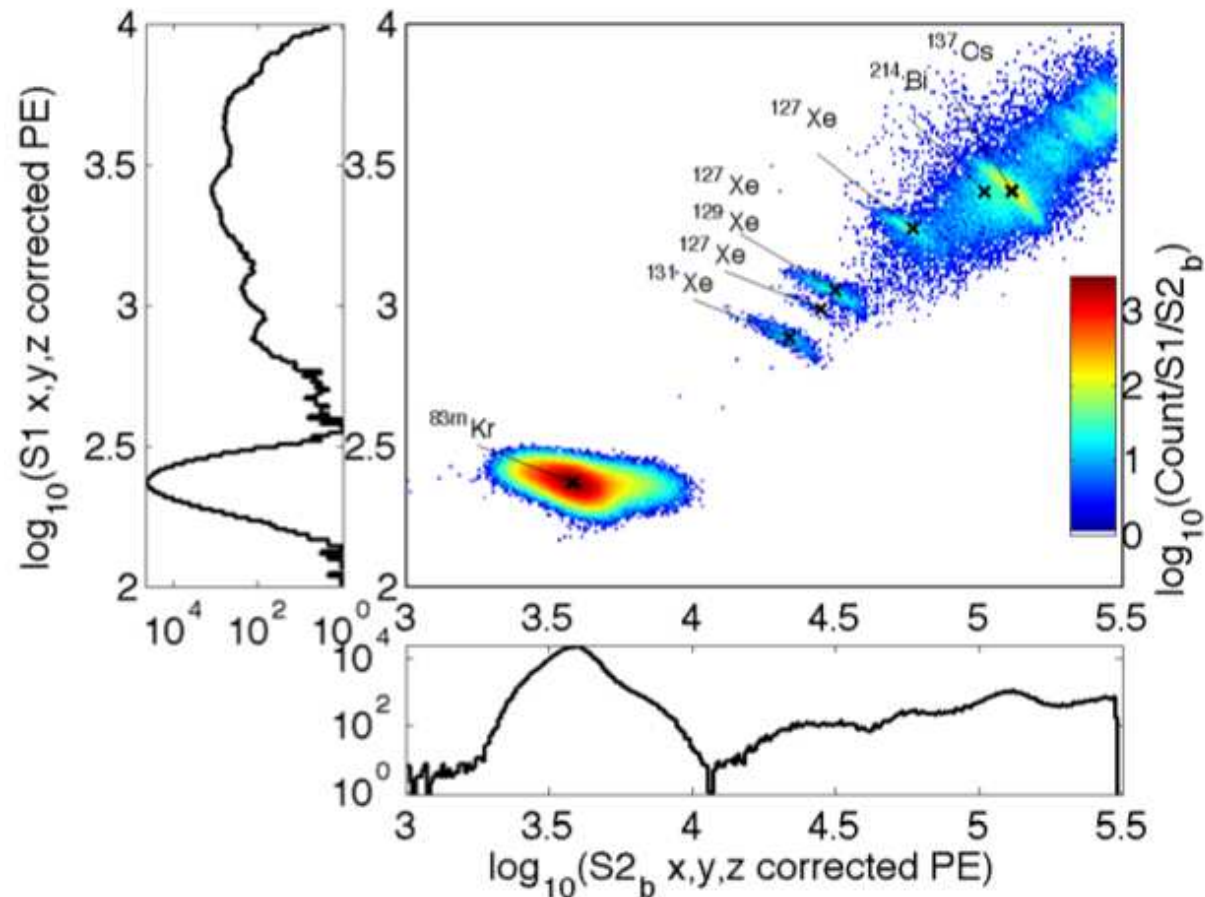


Detekcja bezpośrednia

Eksperyment LUX

Reanaliza danych 2013: nowa kalibracja detektora.

Wyniki kalibracji z wykorzystaniem źródeł γ :

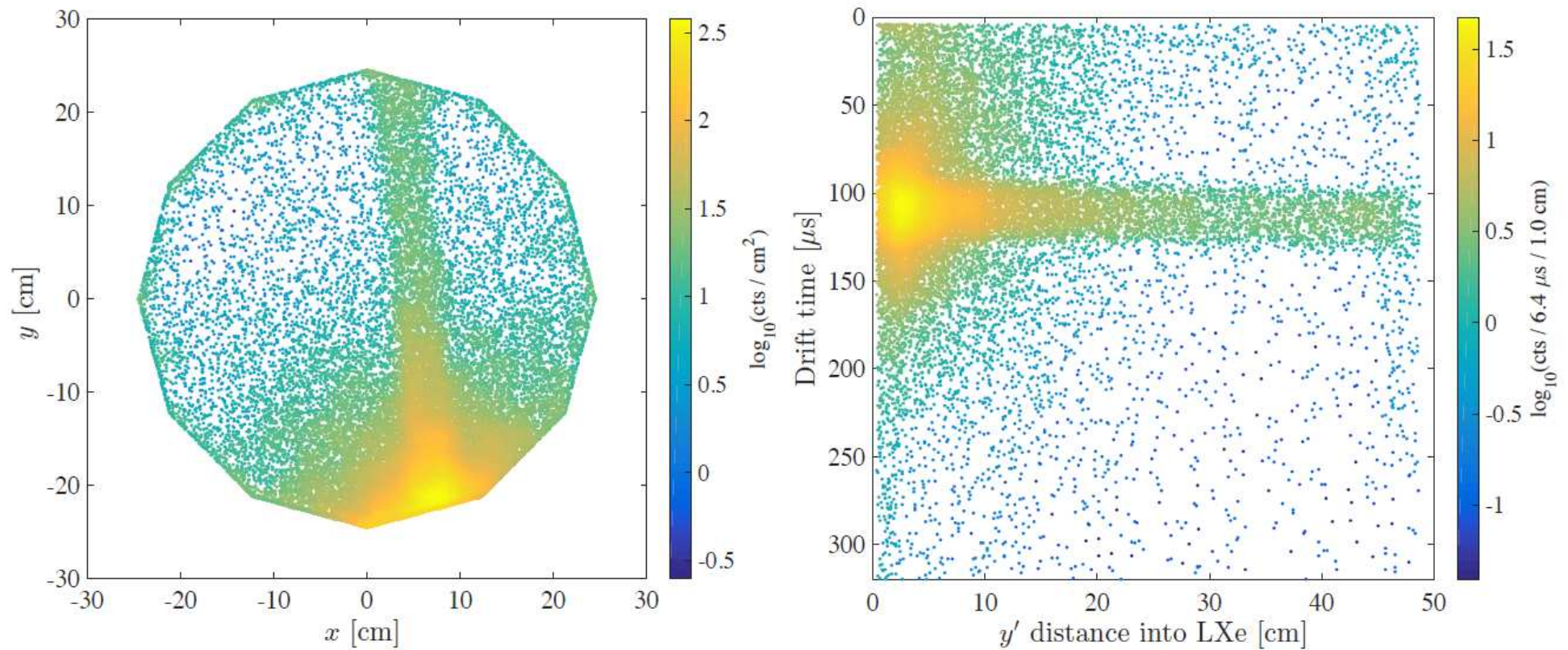


Detekcja bezpośrednia

Eksperyment LUX

Reanaliza danych 2013: nowa kalibracja detektora.

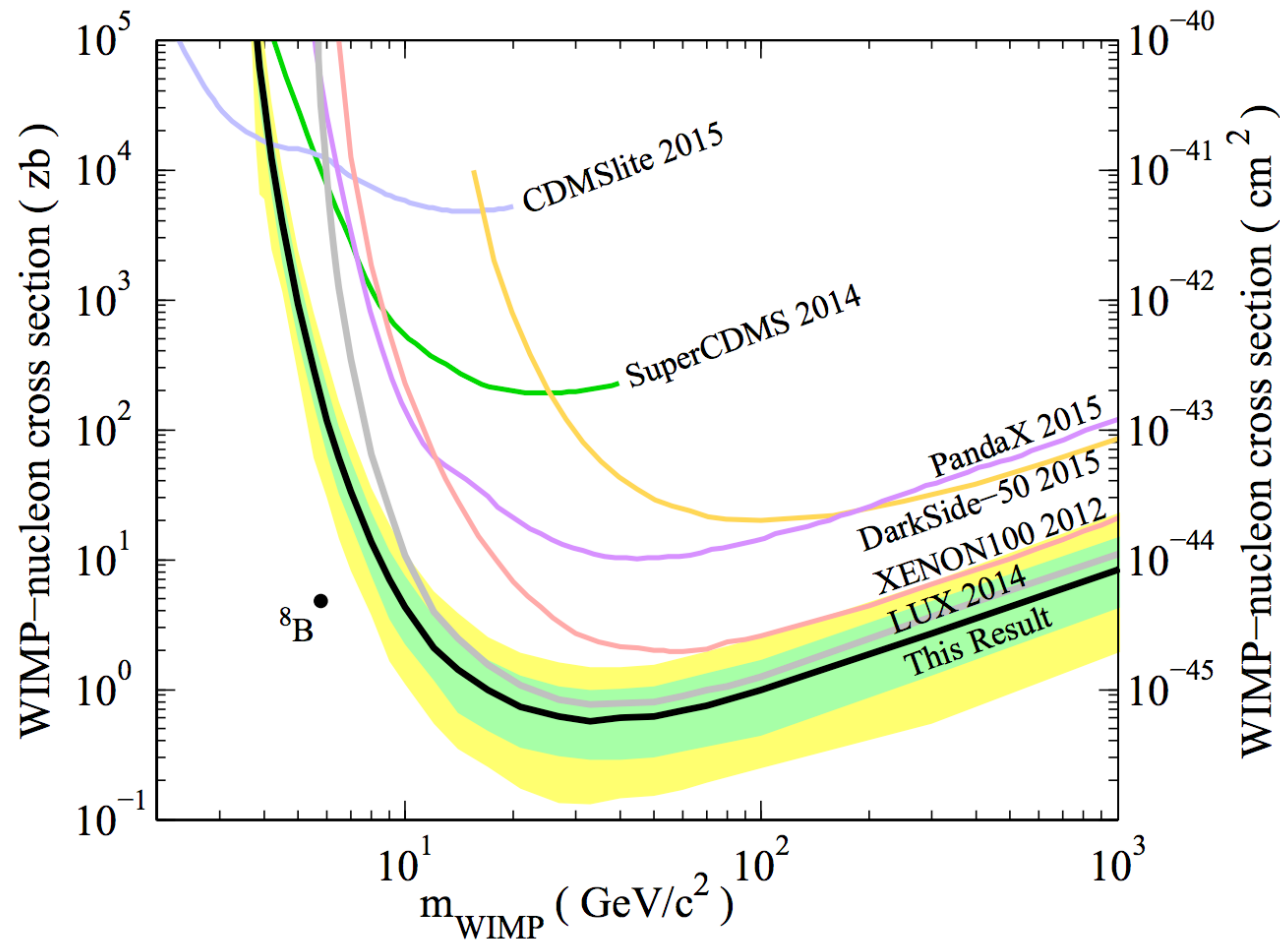
Kalibracja z wykorzystaniem źródła neutronów (generator D-D):



Detekcja bezpośrednia

Eksperyment LUX

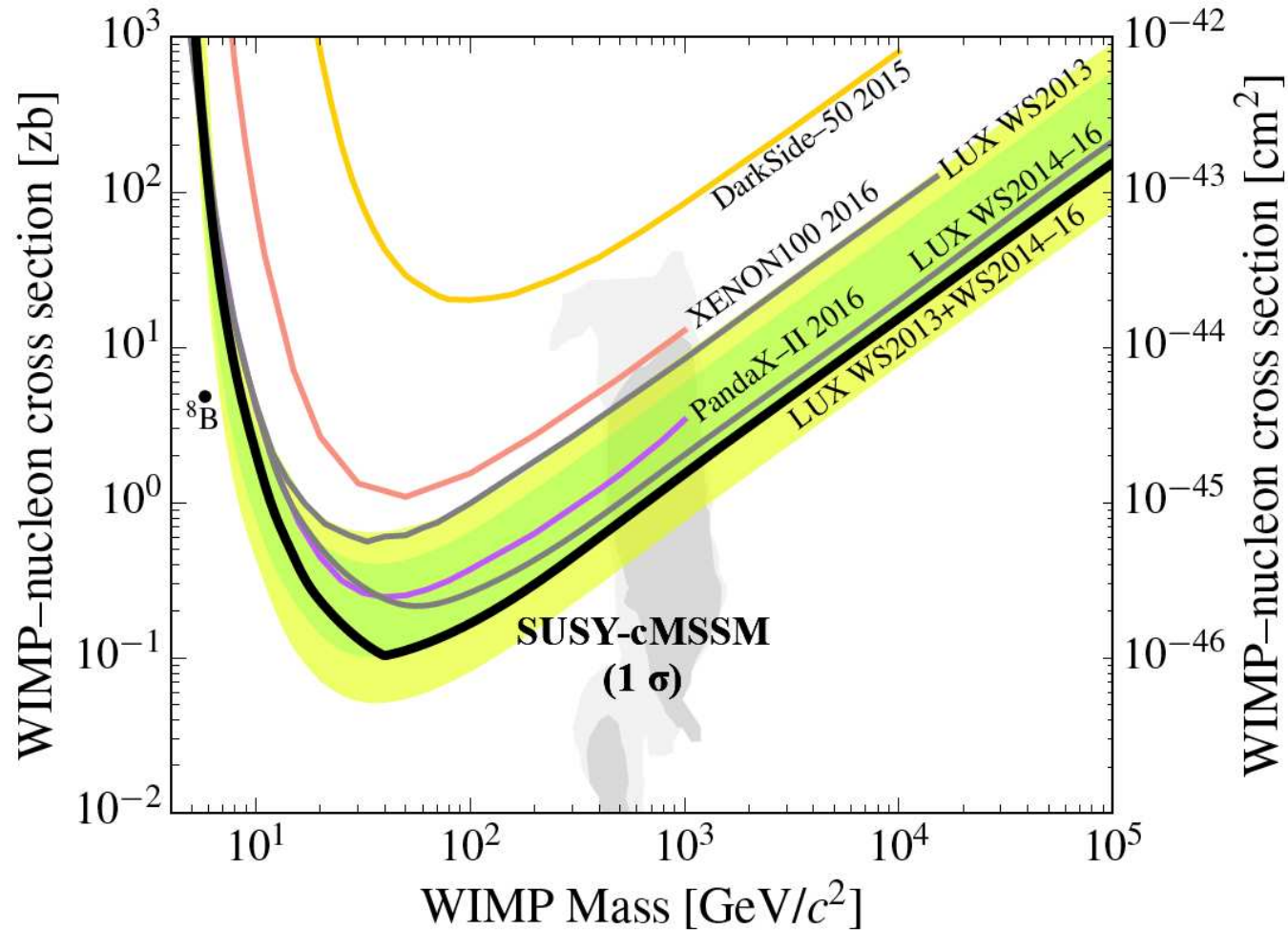
Wyniki reanalizy przedstawione w grudniu 2015 (“This result”):



Detekcja bezpośrednia

Eksperyment LUX

Końcowe wyniki (95 dni + drugi "run" 332 dni) przedstawione w marcu 2017:



Detekcja bezpośrednia

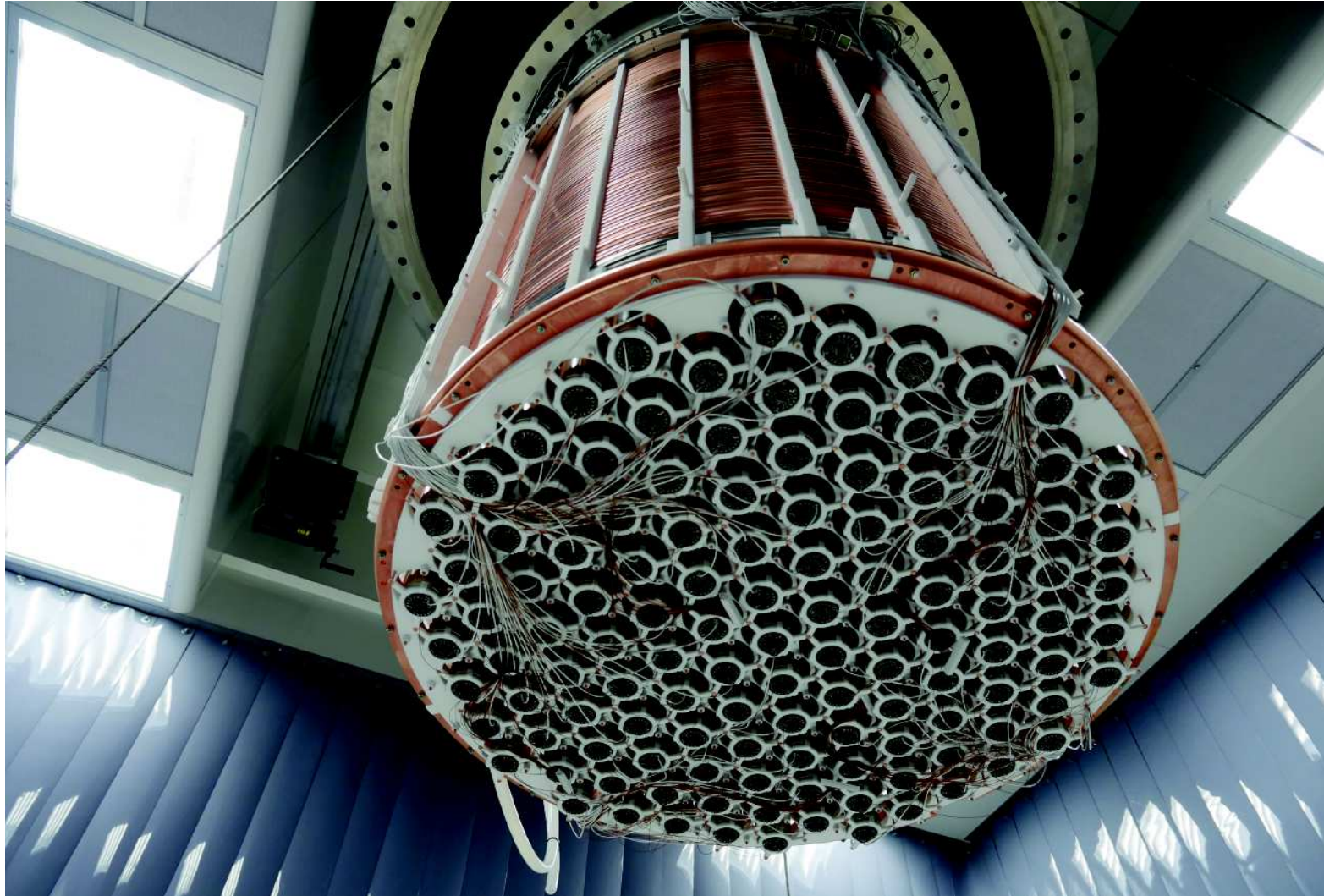
Xenon1T

3.5 tony LXe (2 tony jako "tarcza")



Detekcja bezpośrednia

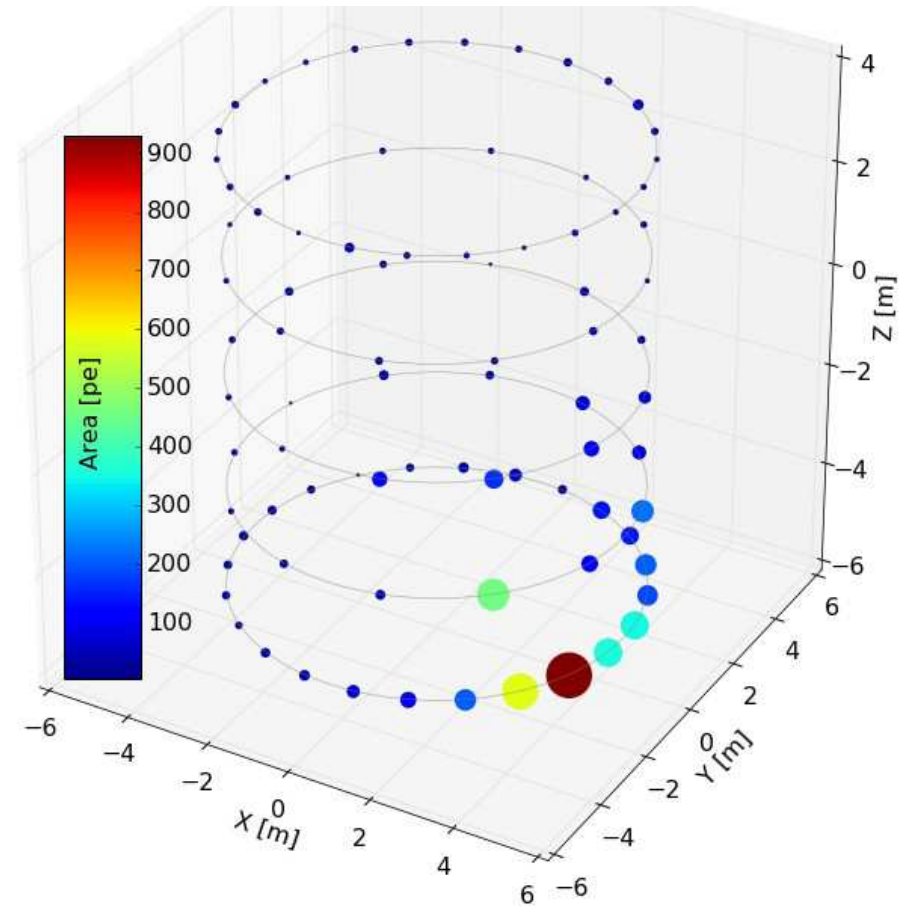
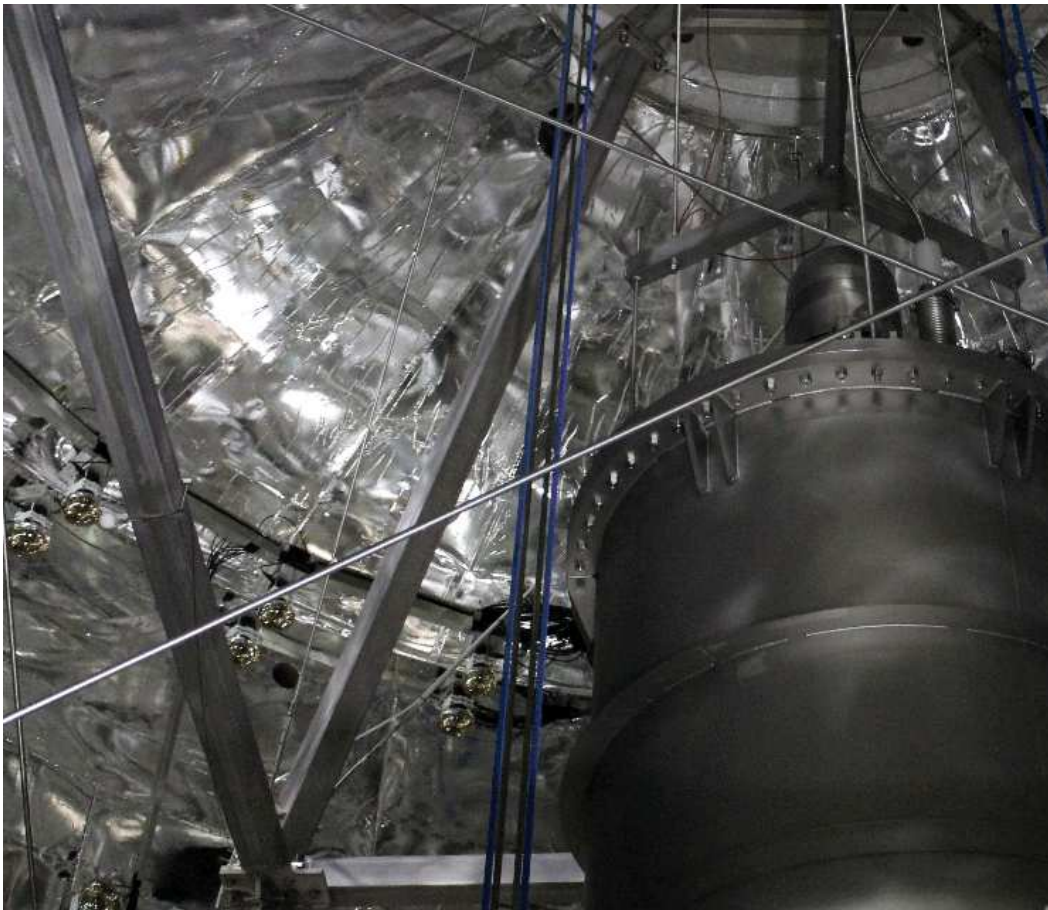
Xenon1T



Detekcja bezpośrednia

Xenon1T

Detektor umieszczony w zbiorniku wypełnionym 700 tonami ultraczystej wody promieniowanie Czerenkowa rejestrowane przez 84 PMT \Rightarrow aktywne weto

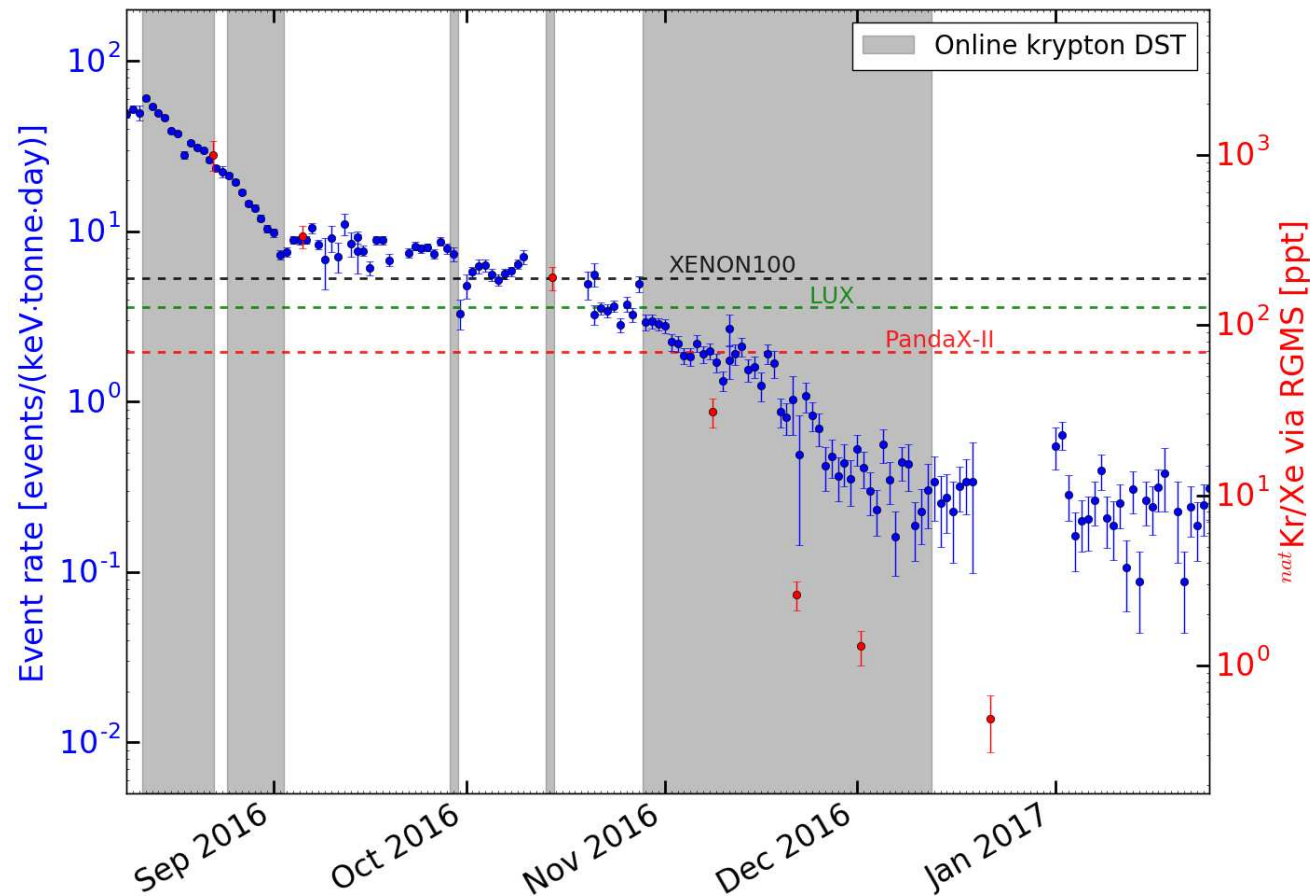


Detekcja bezpośrednia

Xenon1T

Ksenon podlega ciąglemu oczyszczaniu \Rightarrow osiągnięto najniższy poziom tła

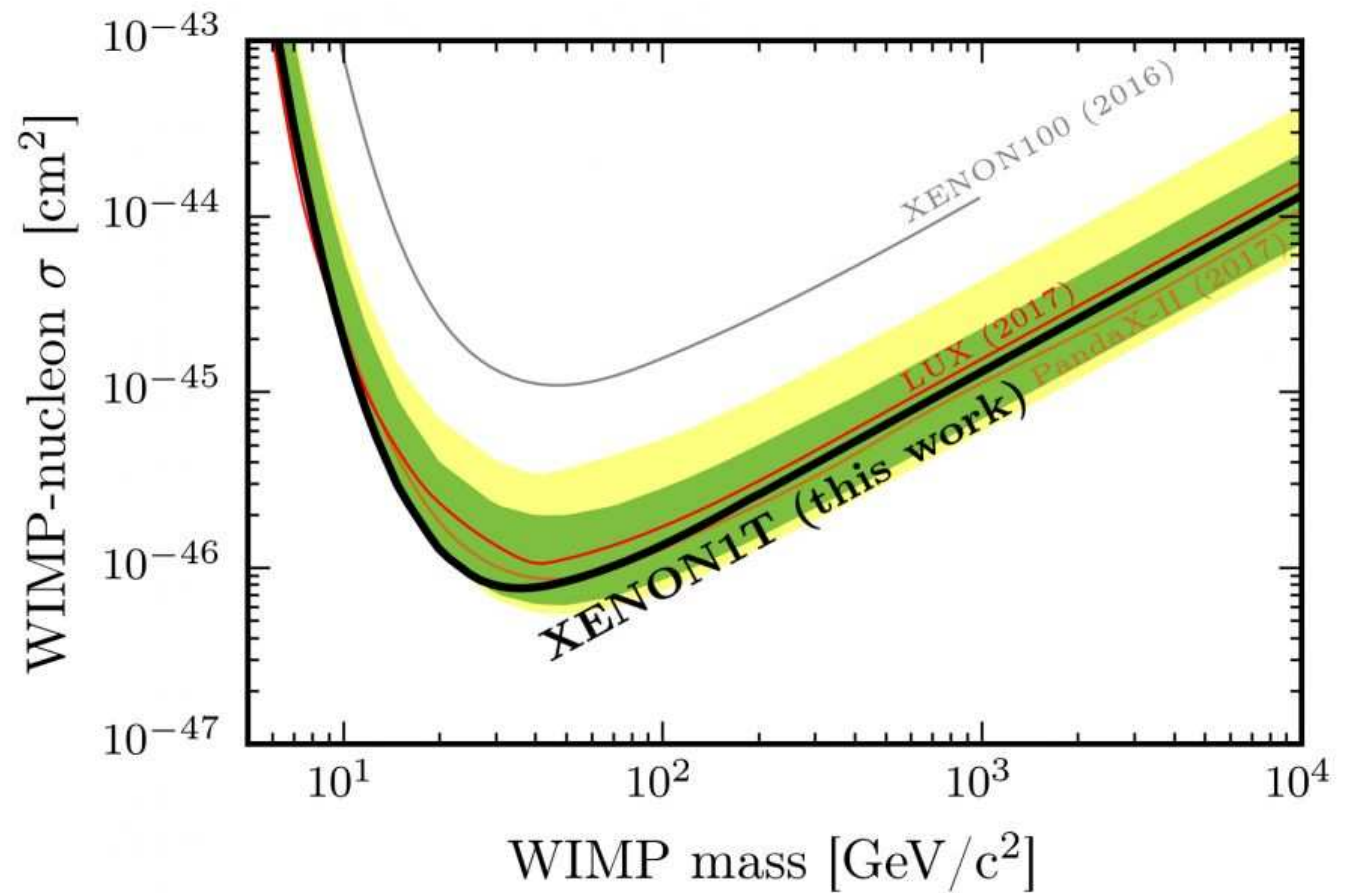
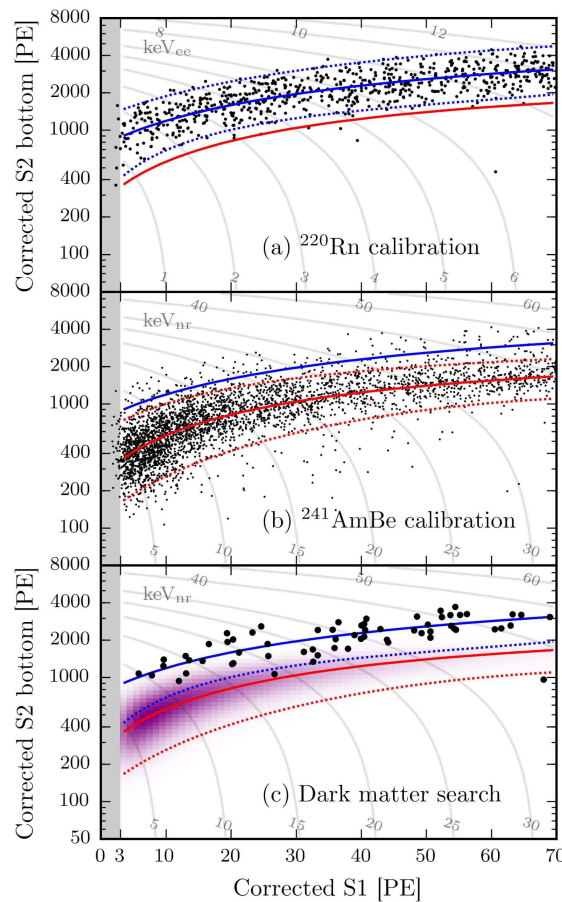
Detektor rozpoczął już zbieranie danych, niestety przerwane przez... trzęsienie ziemi



Detekcja bezpośrednia

Xenon1T

Dane zebrane w ciągu zaledwie miesiąca przed przerwą spowodowaną przez trzęsienie ziemi pozwoliły już na poprawienie ograniczeń LUX

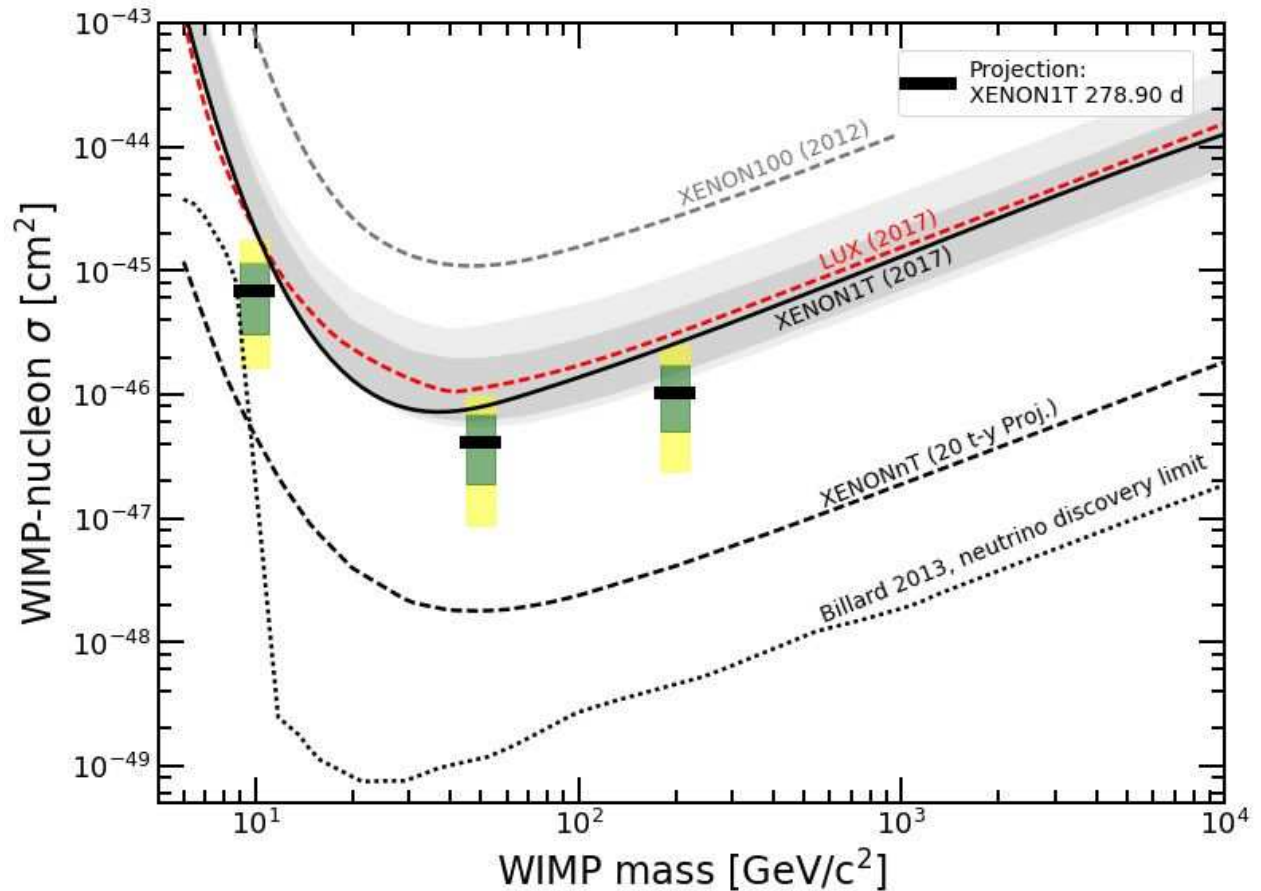
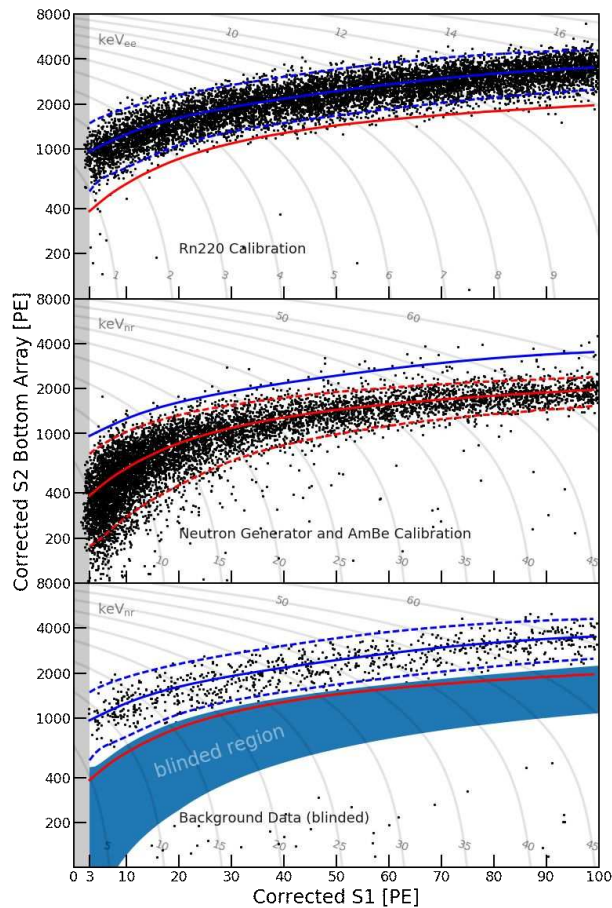


Detekcja bezpośrednia

Xenon1T

Od tego czasu zebrano prawie ośmiokrotną statystykę danych (247 dni).

W najbliższym czasie powinny zostać przedstawione poprawione limity

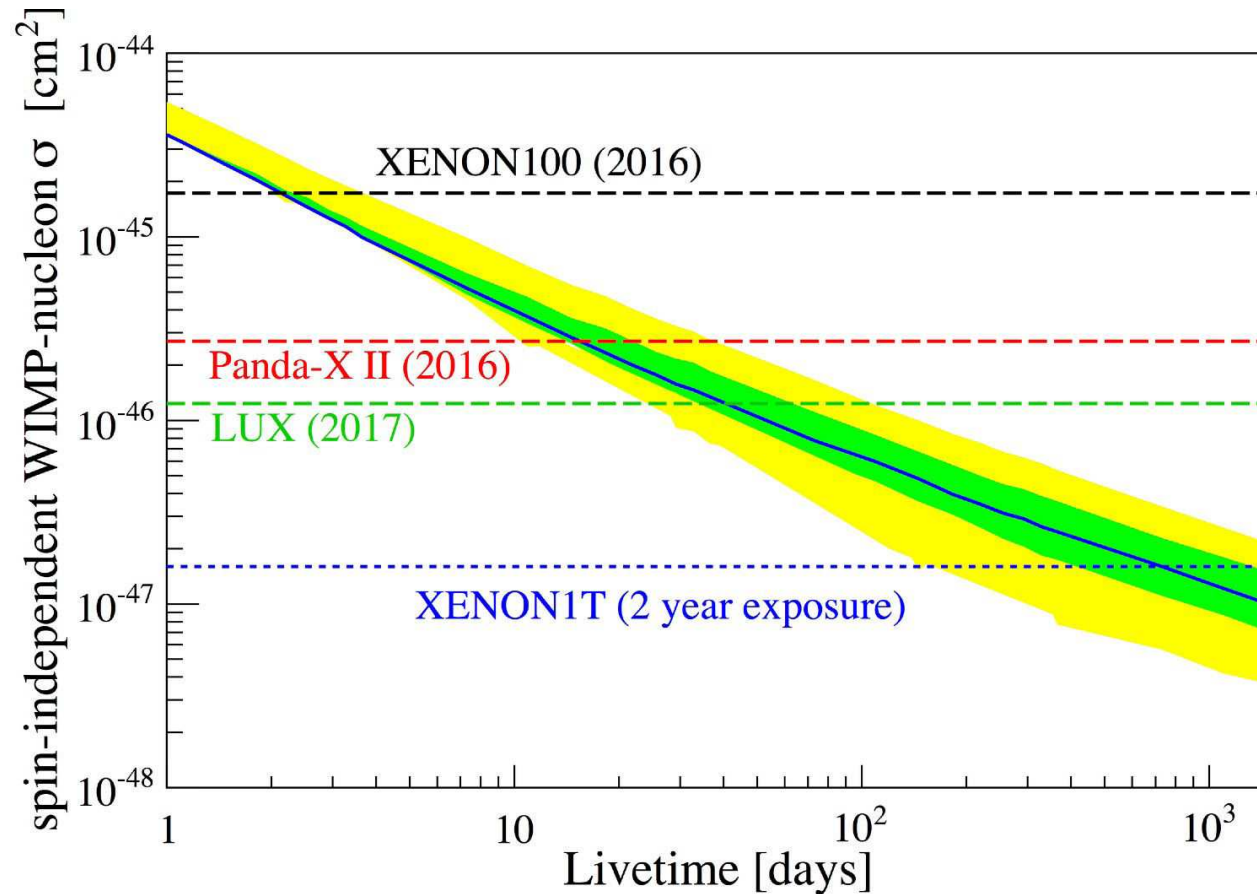


Czułość detektora staje się na tyle duża, że powinniśmy zobaczyć... neutrina słoneczne.

Detekcja bezpośrednia

Xenon1T

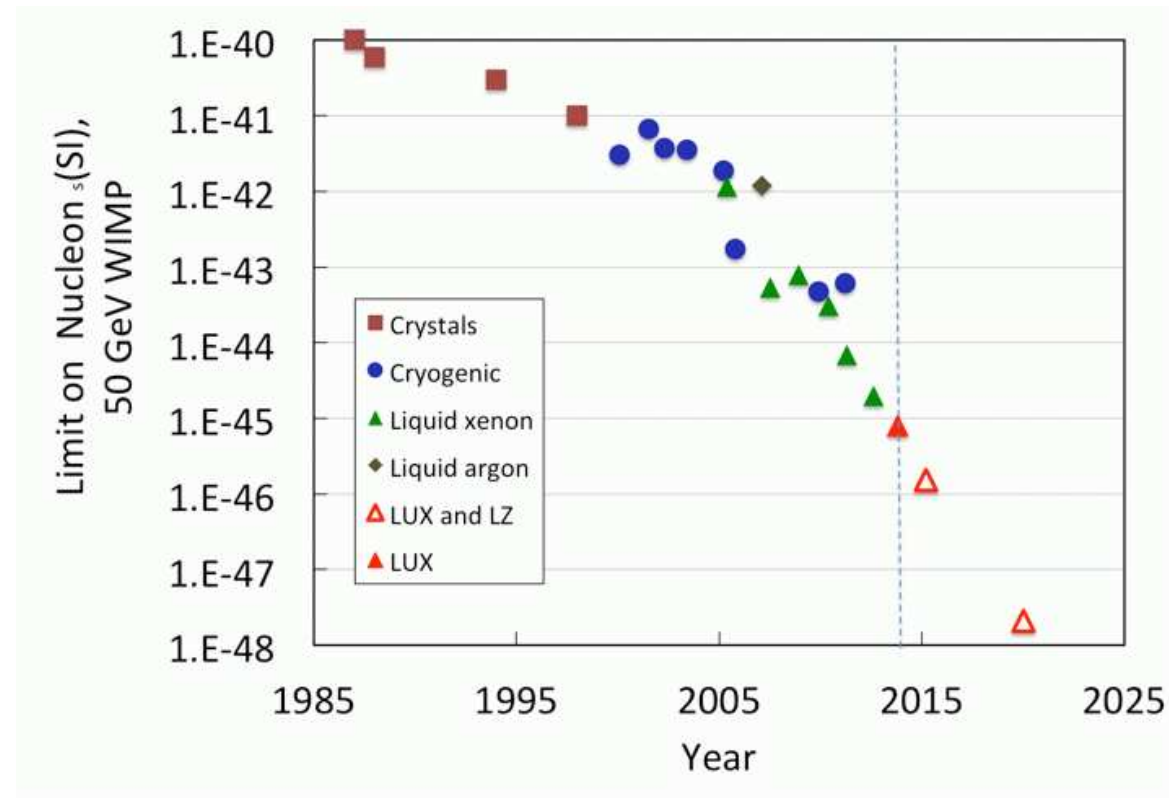
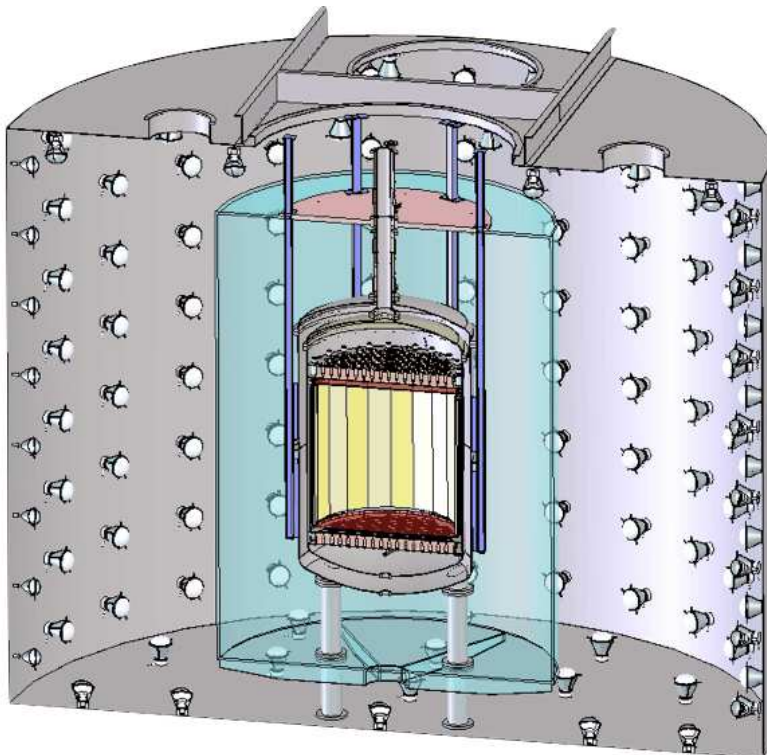
Dzięki ok. 30-krotnie większej masie LXe oraz istotnej redukcji tła powinien bardzo szybko poprawiać istniejące ograniczenia:



Detekcja bezpośrednia

Przyszłość: LZ (LUX+Zeplin)

Detektor z 7 tonami LXe (5.6 tony jako "tarcza"), planowane uruchomienie 2020 (?)

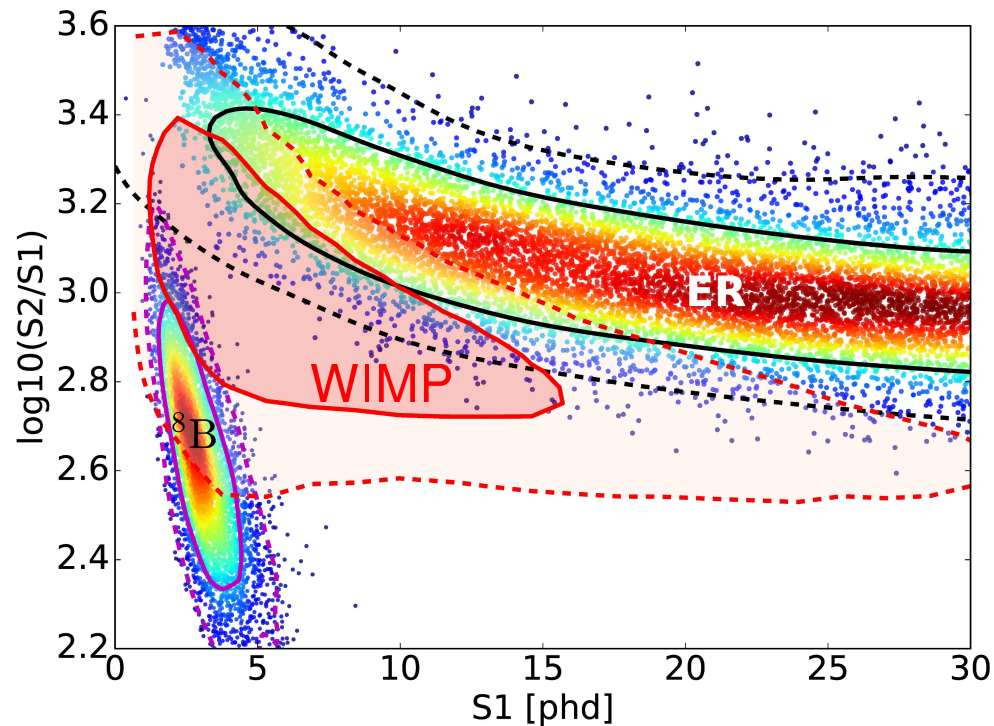


Detekcja bezpośrednia

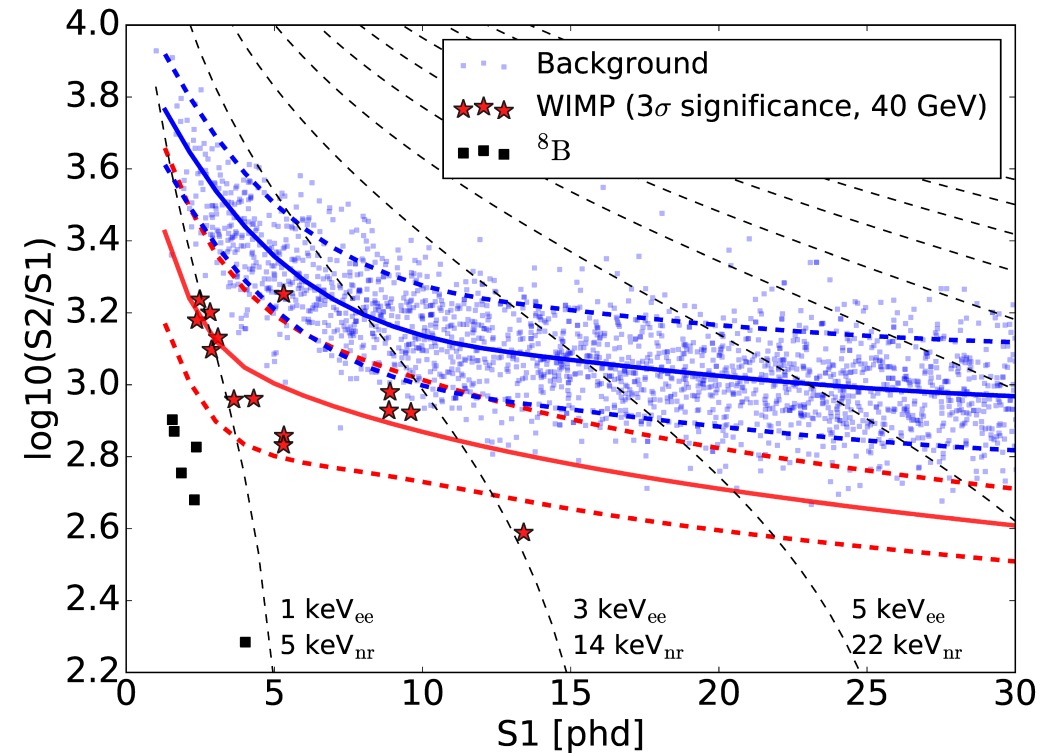
Przyszłość: LZ (LUX+Zeplin)

Wyniki modelowania eksperymentu

tło (ER), sygnał (WIMP) i neutrina (^8B)



Symulacja (1000 dni, $\sigma = 6 \cdot 10^{-48} \text{ cm}^2$)

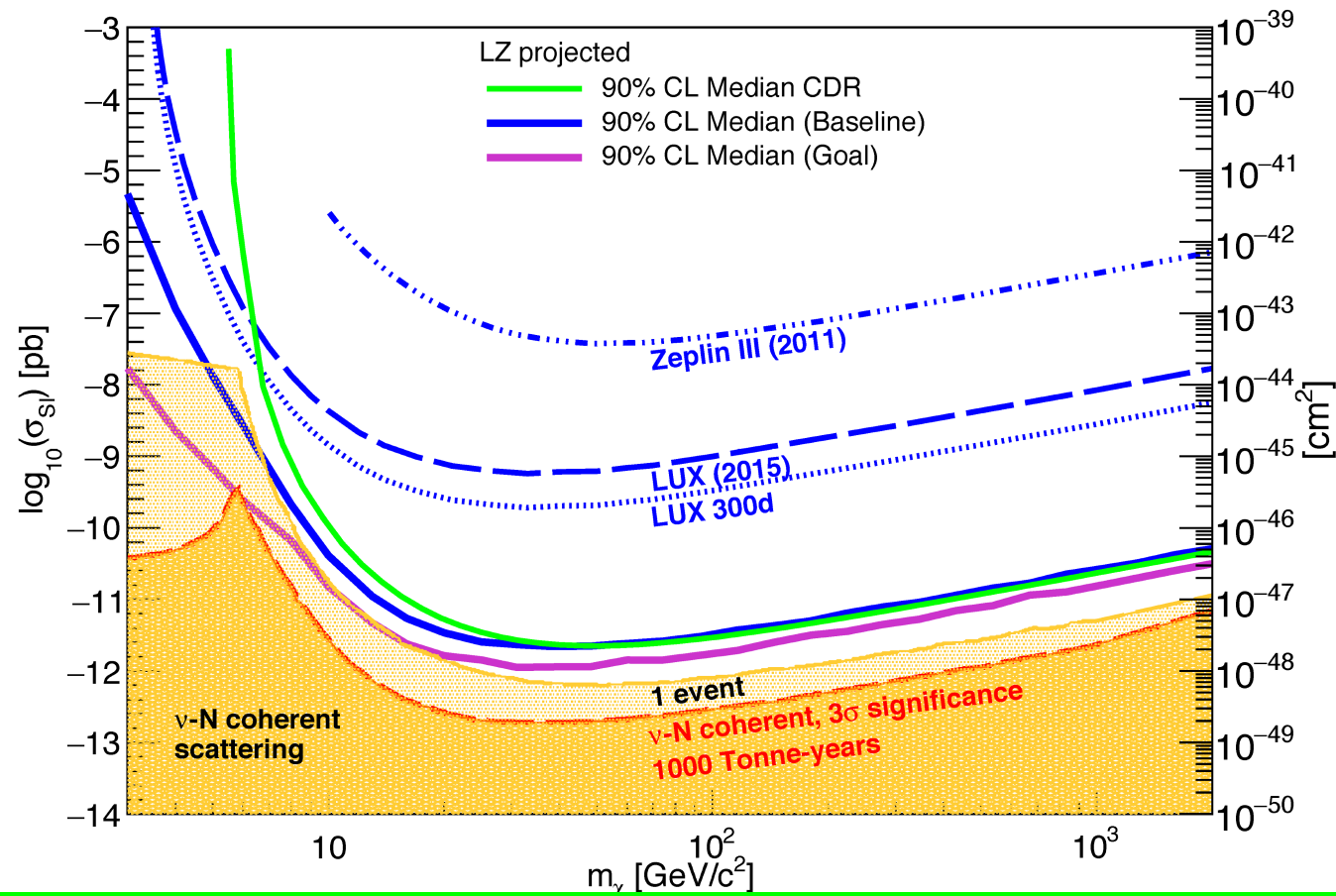


Detekcja bezpośrednia

Przyszłość: LZ (LUX+Zeplin)

Oczekiwane wyniki (1000 dni)

Dochodzimy do granicy tła neutrin słonecznych i atmosferycznych



Detekcja bezpośrednia

Eksperymenty

Eksperymenty **Xenon100/Xenon1T** i **LUX** nie są jedynymi eksperymentami opartymi na technologii dwufazowej komory projekcji czasowej (dual phase TPC).

Podobnym eksperyment **PandaX** (obecnie faza II) zbudowany został w Chinach.

Zawiera 500 kg LXe (400 kg “fiducial volume”), uruchomiony latem 2016.

Planowane są kolejne eksperymenty

- **XENONnT** - dalsza rozbudowa Xenon1T w LNGS, do 6 ton aktywnego LXe modernizacja powinna się rozpocząć w 2018 roku (?)
- **LZ** - rozbudowa LUX+Zeplin do 7 ton aktywnego LXe, uruchomienie w 2020(?)
- **DarkSide-20t** - koncepcja detektora LAr o znacznie obniżonym poziomie tła (więcej za chwilę)
- **DARWIN** - nowy projekt detektora z 50 tonami LXe (40 ton “aktywnych”) ⇒ zamknięcie obszaru parametrów do tła neutrinowego

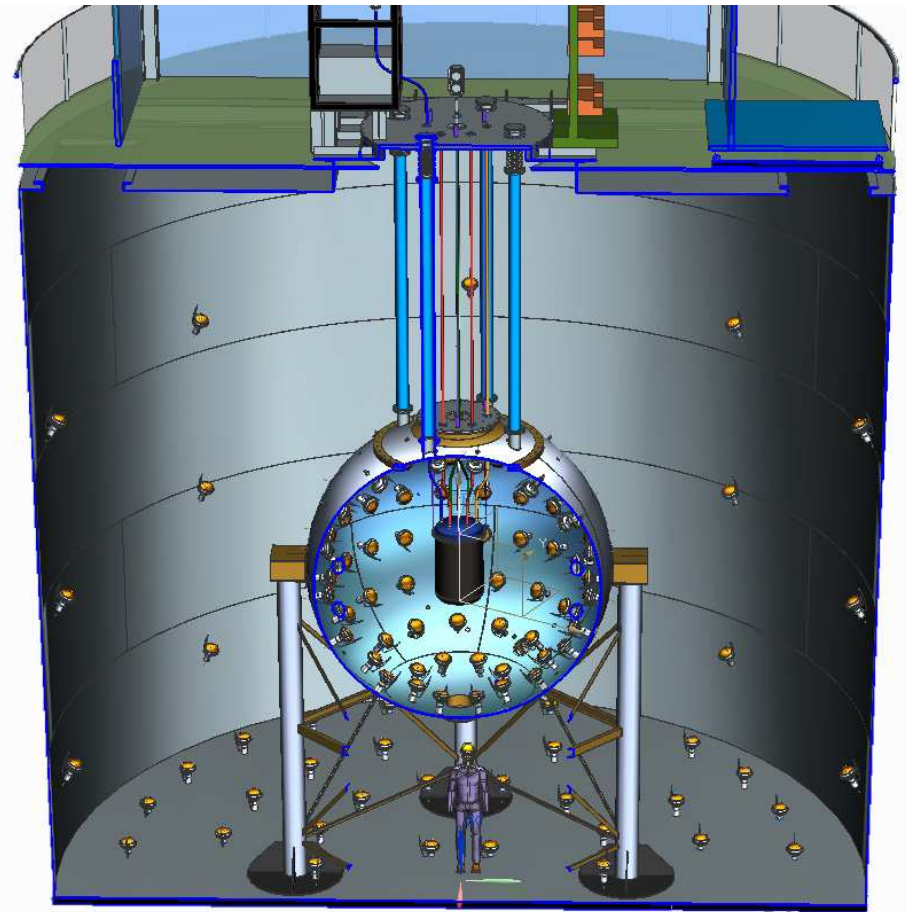
Detekcja bezpośrednia

DarkSide-50 @LNGS - prototyp dla DarkSide-20t

Nowa koncepcja detektora “bez tła”

- centralna “tarcza” - ciekły argon
argon “kopalniany” (podziemny)
⇒ znacznie niższy poziom tła
- wewnętrzny zbiornik - scyntylator
⇒ detekcja neutronów
- zewnętrzny zbiornik - woda
⇒ detekcja mionów
- umieszczony w kopalni (LNGS)
⇒ redukcja tła

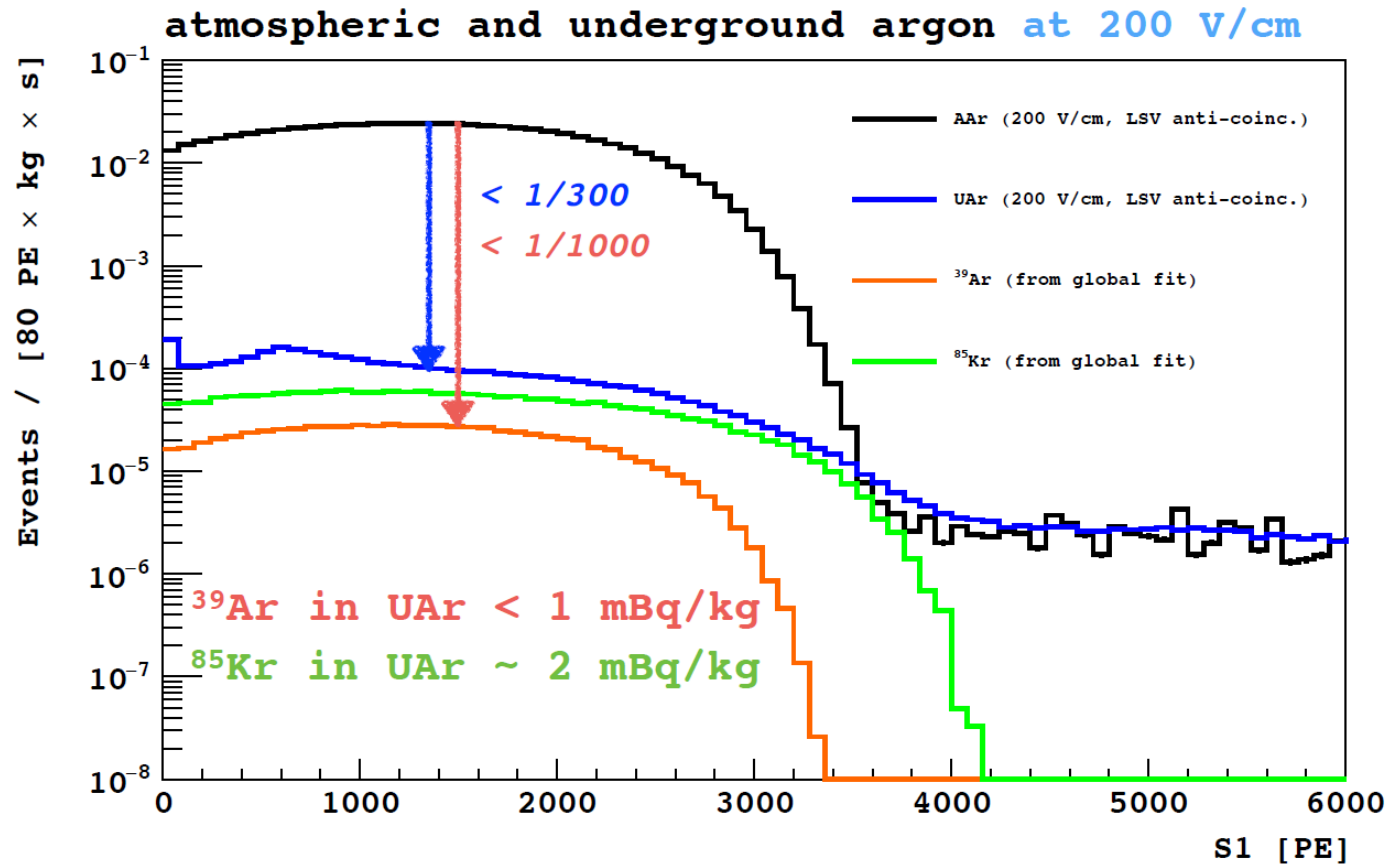
Niestety tylko 153 kg argonu
(46 kg objętości aktywnej)...



Detekcja bezpośrednia

DarkSide-50

Różnica między argonem “kopalnianym” (Underground Argon) i atmosferycznym:

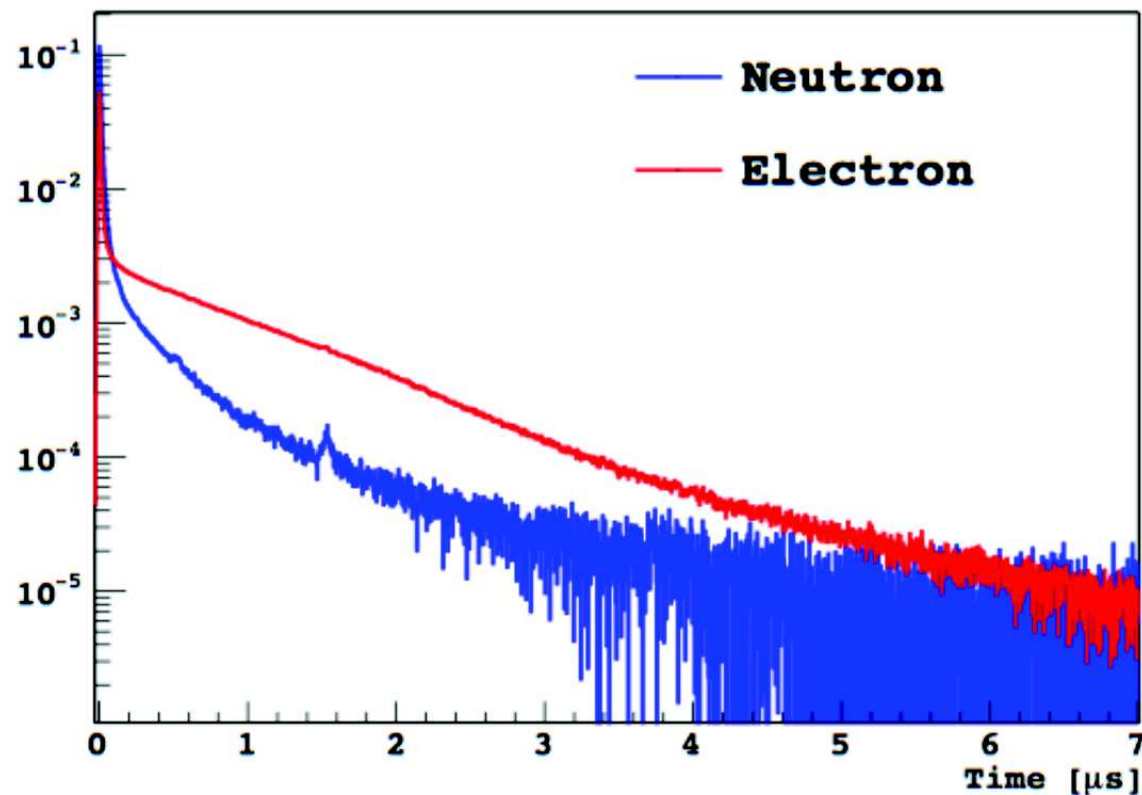


Detekcja bezpośrednia

DarkSide-50

Dodatkowa możliwość odróżnienia sygnału od tła na podstawie kształtu impulsu.

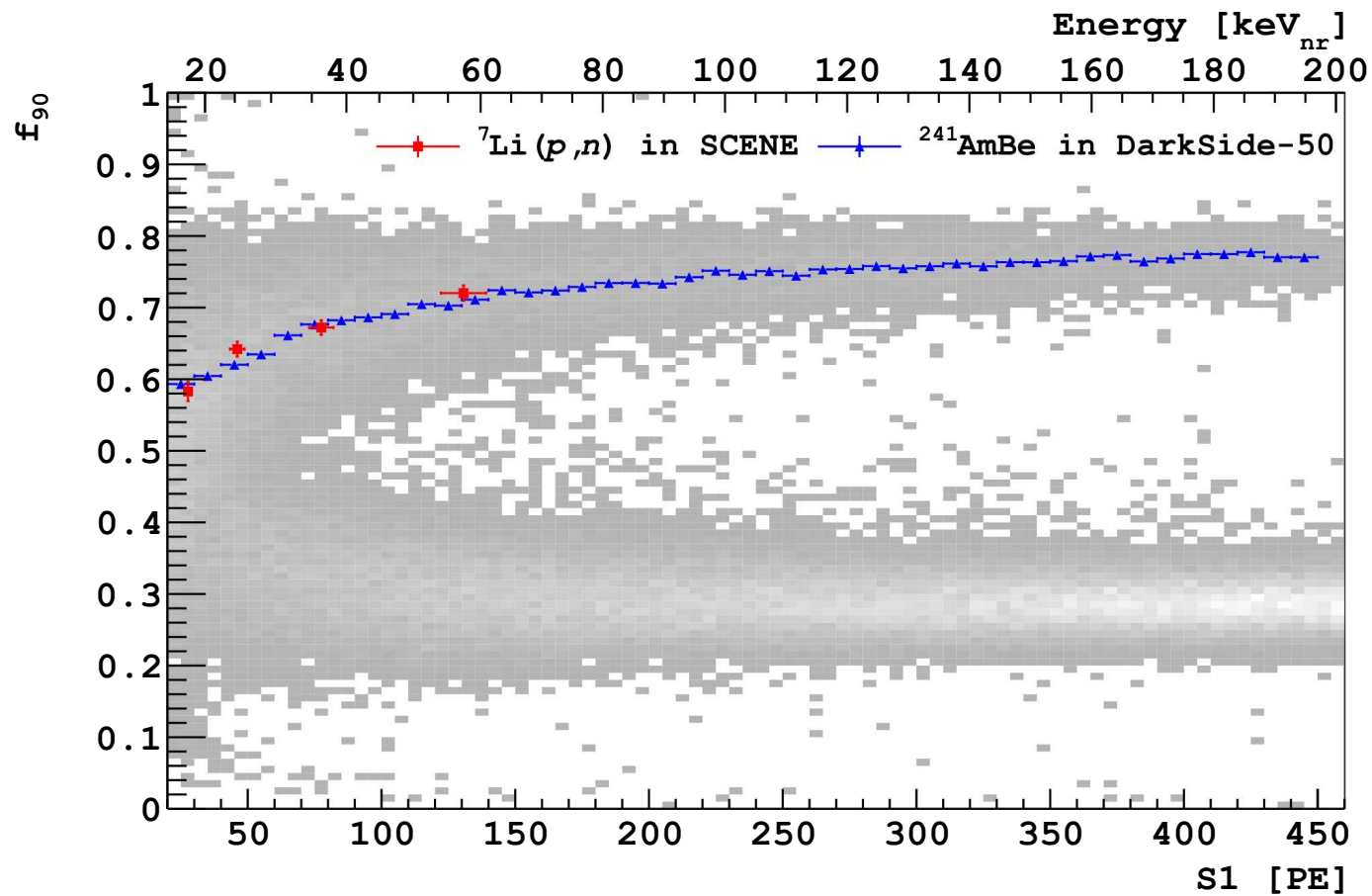
Ułamek sygnału w pierwszych 90 ns (f_{90}) \Rightarrow separacja na poziomie $1.5 \cdot 10^{-7}$



Detekcja bezpośrednia

DarkSide-50

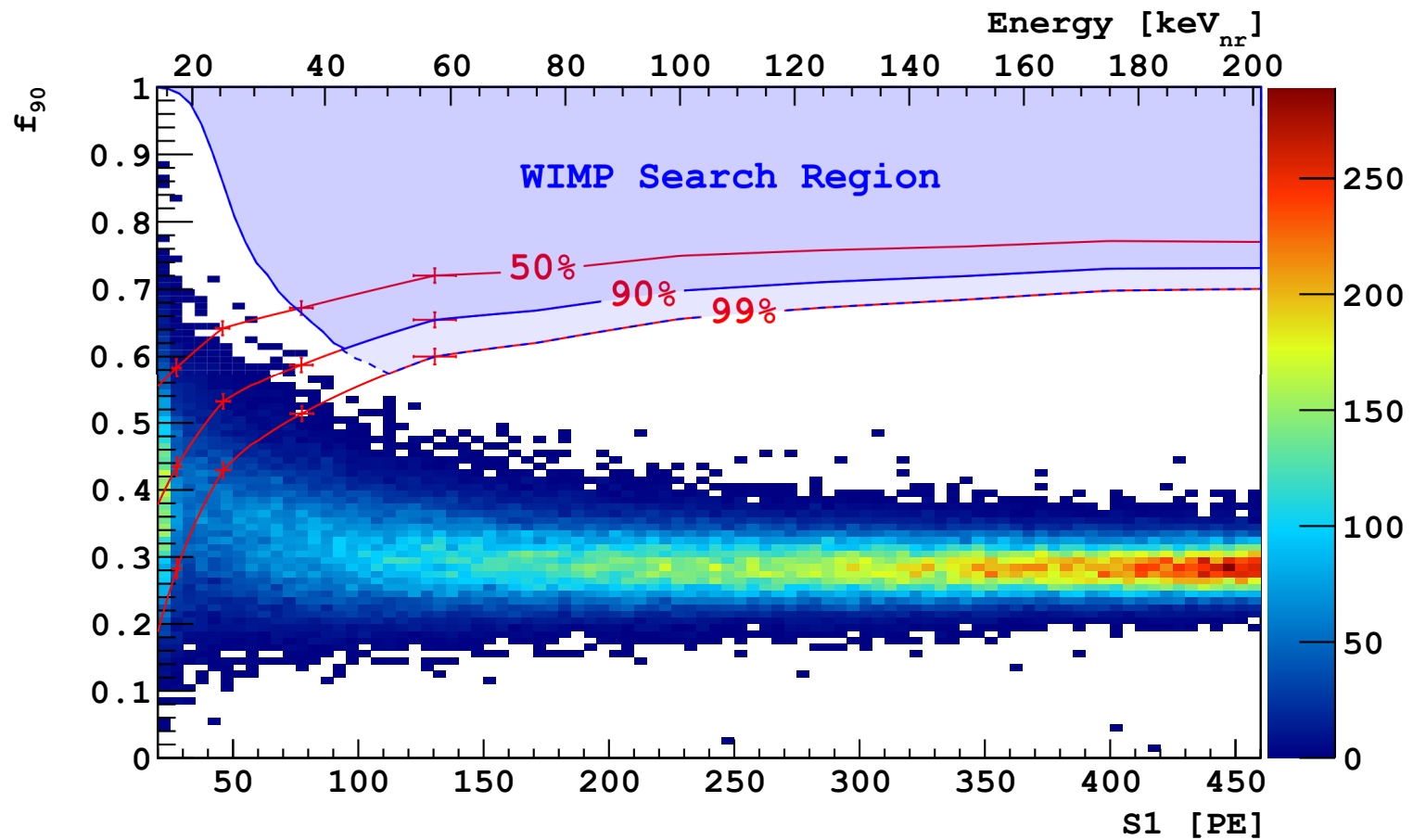
Wyniki kalibracji detektora:



Detekcja bezpośrednia

DarkSide-50

Przypadki zebrane w trakcie 71 dni “naświetlania”

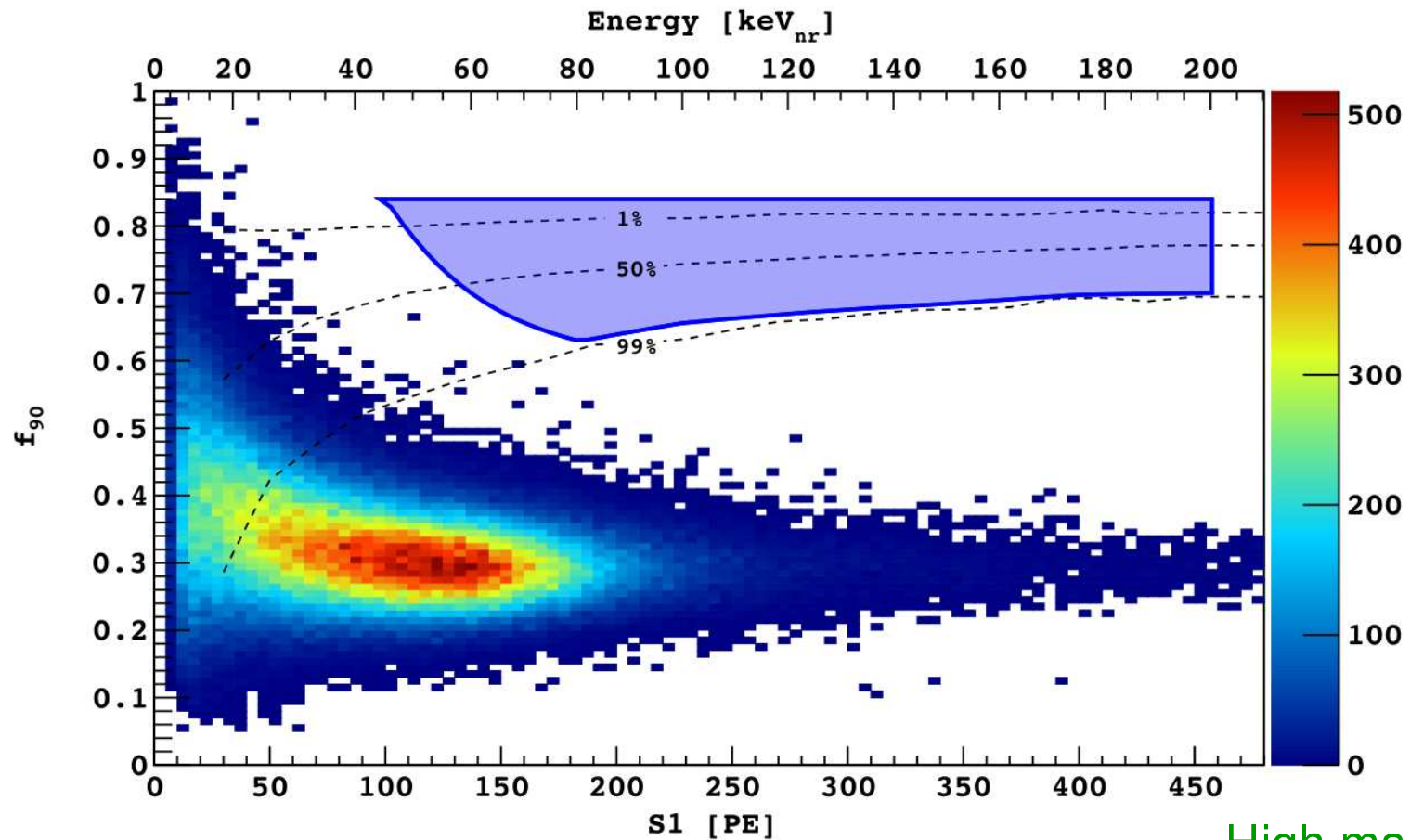


Detekcja bezpośrednia

DarkSide-50

Nowe wyniki: 534 dni naświetlania.

Bez zmiany kryteriów (ślepa analiza)!



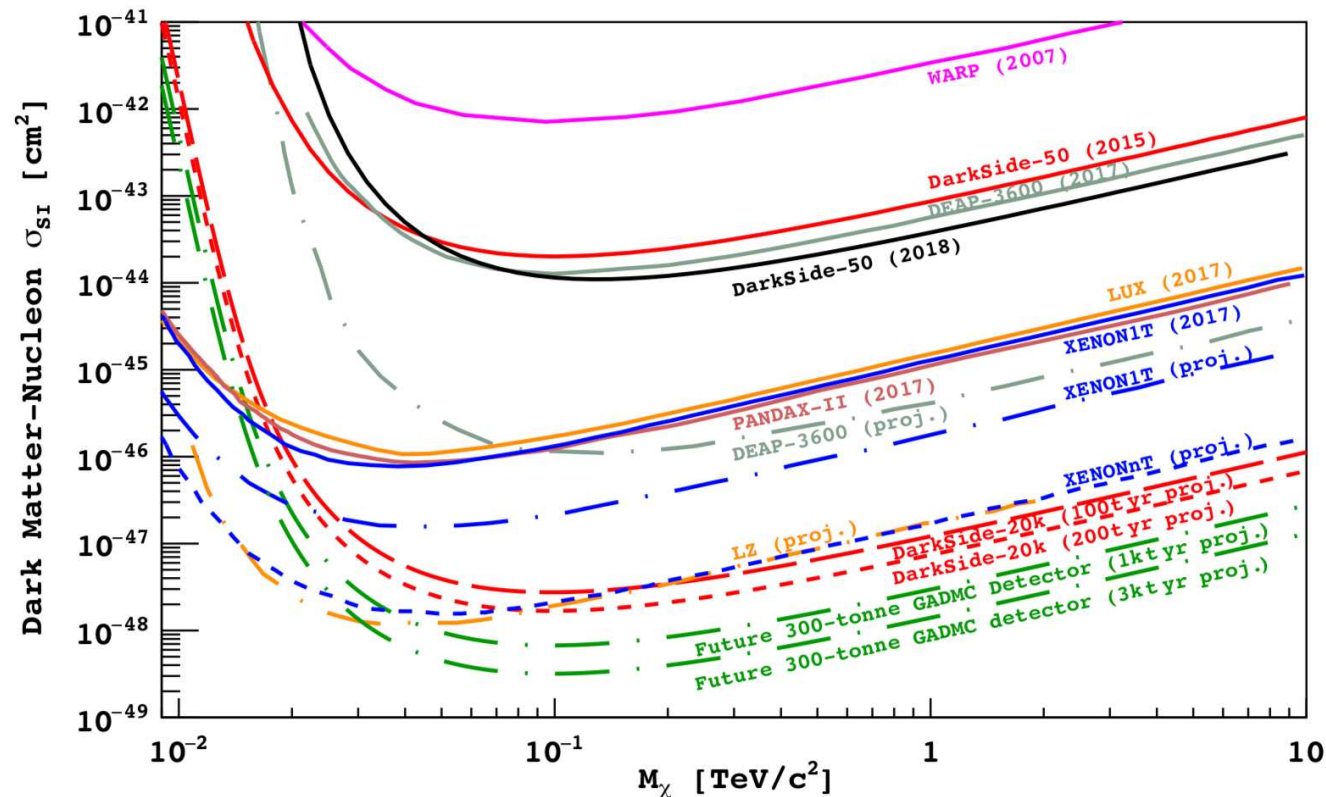
High mass selection

Detekcja bezpośrednia

DarkSide-50

Nowe wyniki przedstawione w roku 2018:

High mass selection



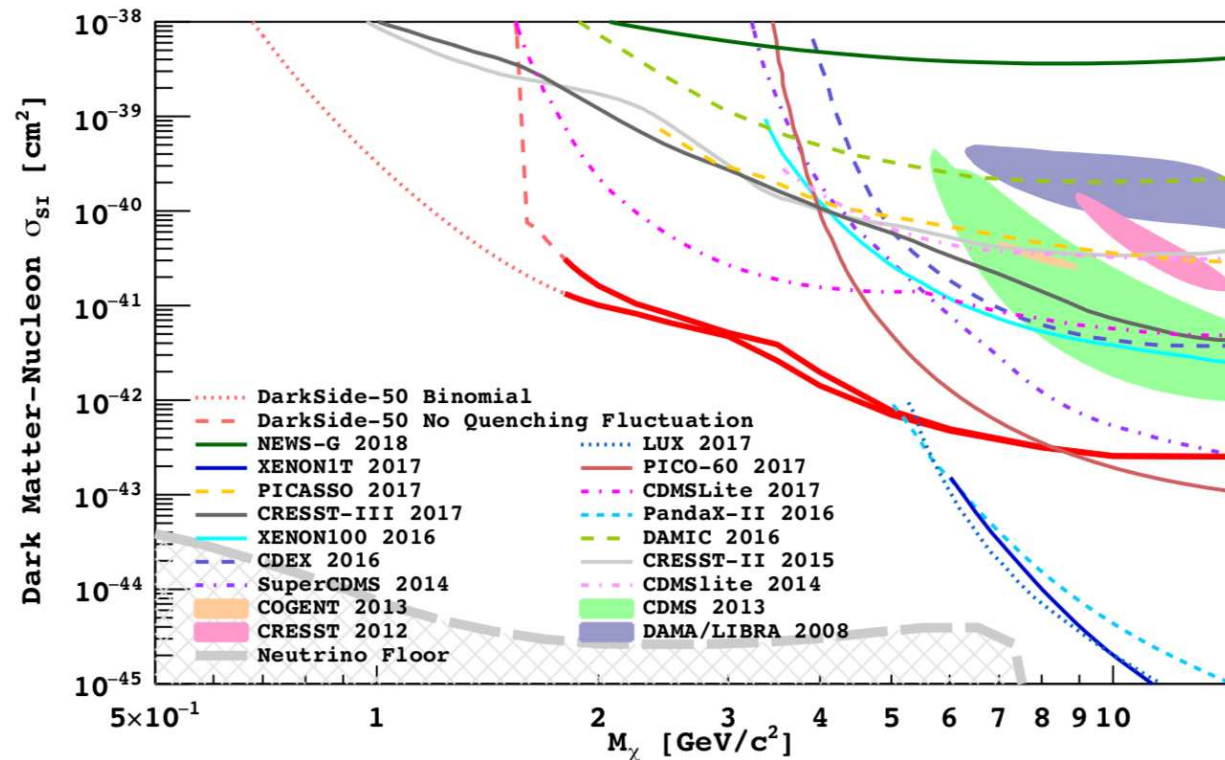
⇒ mało konkurencyjne w stosunku do większych detektorów

Detekcja bezpośrednia

DarkSide-50

Nowe wyniki przedstawione w roku 2018:

Low mass selection

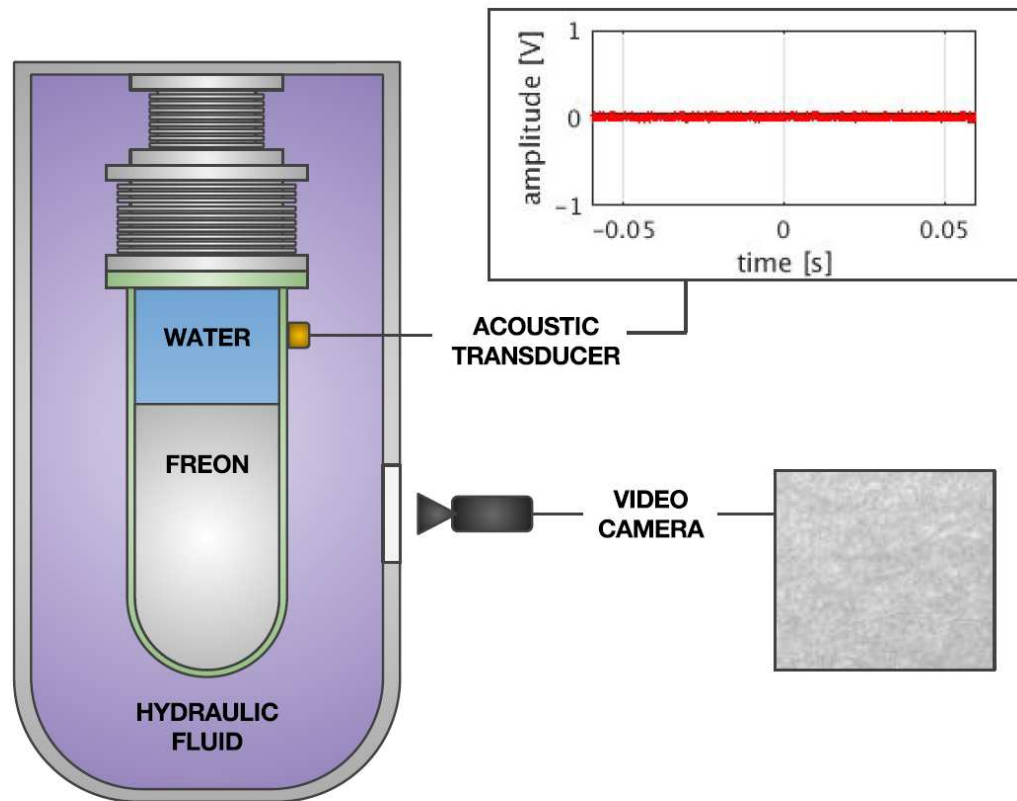


⇒ niskie tło umożliwiło uzyskanie bardzo silnych ograniczeń

Detekcja bezpośrednia

Pico-60

Nowatorska koncepcja wykorzystania... komory pęcherzykowej.

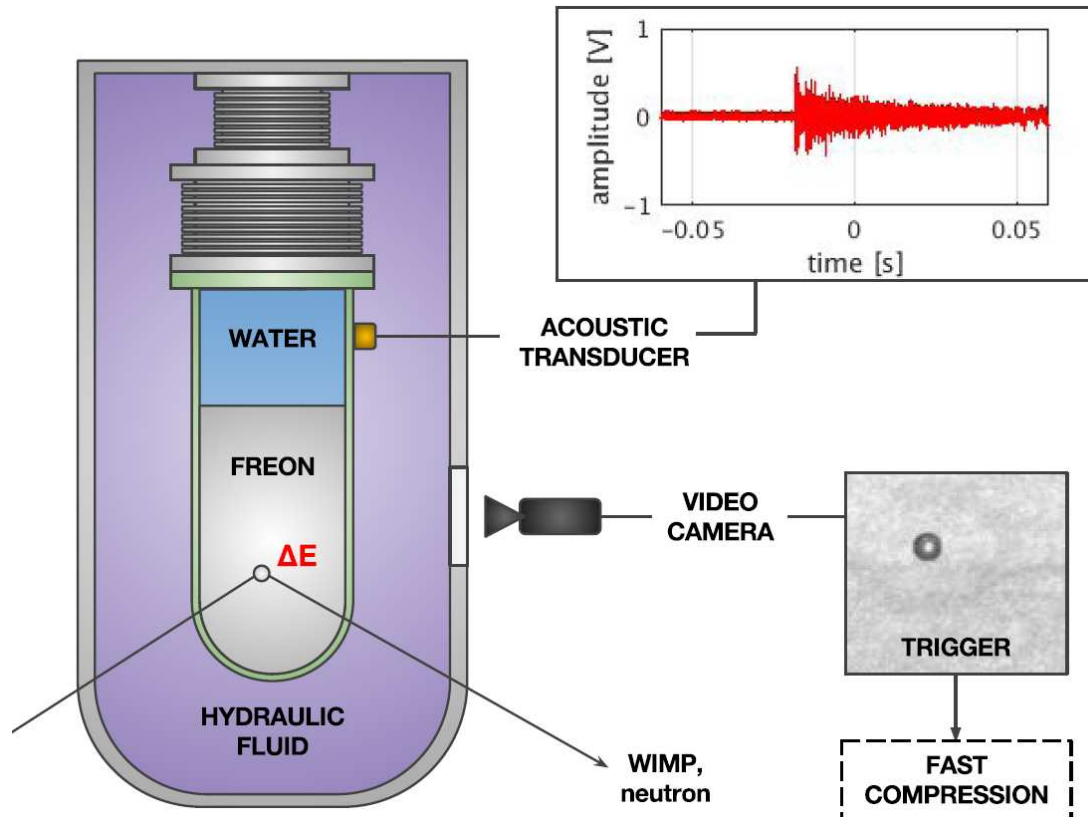


Aktywnym ośrodkiem jest freon, który utrzymywany jest w stanie przegrzanej cieczy.

Detekcja bezpośrednia

Pico-60

Nowatorska koncepcja wykorzystania... komory pęcherzykowej.



Aktywnym ośrodkiem jest freon, który utrzymywany jest w stanie przegrzanej cieczy.

Przekaz energii przez WIMP może zainicjować przejście fazowe i powstanie pęcherzyka pary

Towarzyszy temu też “trzask” (sygnał akustyczny)

Detekcja bezpośrednia

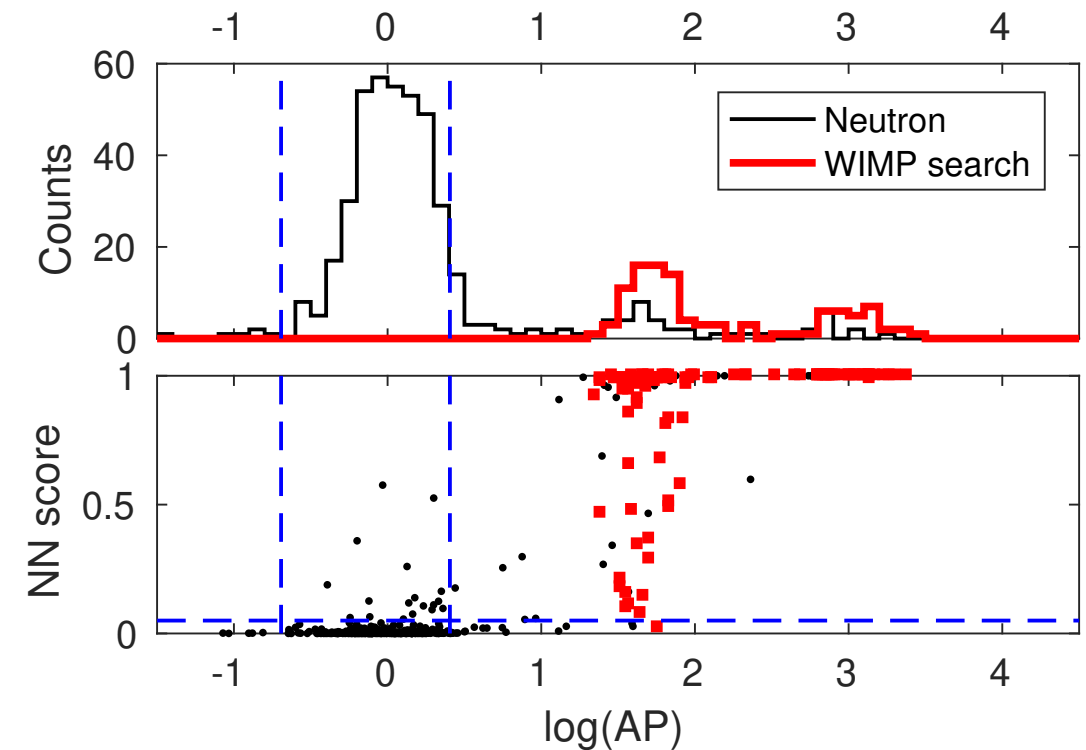
Pico-60

Proces fizyczny będący podstawą działania detektora zapewnia bardzo dobre odrzucanie tła:

- oddziaływanie elektronów i promieniowania gamma daje zbyt niskie przekazy energii (w pojedynczym oddziaływaniu), żeby powstał pęcherzyk
- neutrony w ogromnej większości przypadków prowadzą do powstania wielu pęcherzyków

Dalsza dyskryminacja na podstawie sygnału akustycznego (AP) i decyzji algorytmu opartego na sieciach neuralnych (NN)...

Sygnały kalibracyjne w detektorze:



Detekcja bezpośrednia

Pico-60

Detektor wypełniony 52 kg freonu (C_3F_8) zbierał dane latem 2016.

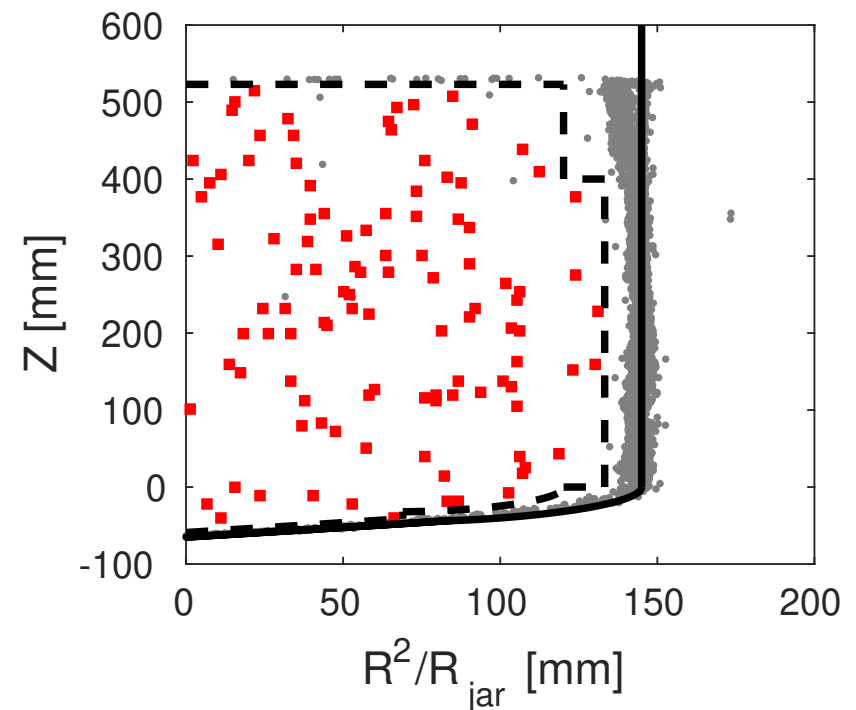
Odczyt optyczny: 4 kamery (300 fps)

Odczyt akustyczny: 8 czujników piezoelektrycznych

Zaobserwowano 106 pojedynczych pęcherzyków

Na rozkładzie NN vs AP żaden nie pasował do hipotezy WIMP

Rozkład przestrzenny przypadków:



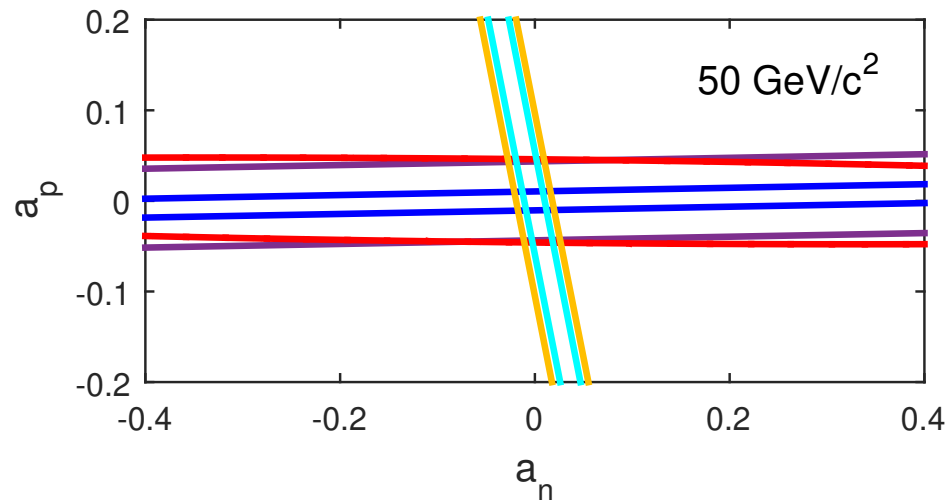
Detekcja bezpośrednia

Pico-60

Ograniczenia na niezależne od spinu (Spin Independent, SI) oddziaływania WIMP w materii, jakie uzyskano z eksperymentu są dużo słabsze od tych z LUX itp.

Ale ograniczenia zależą od modelu. Jeśli przeanalizować tę zależność dokładniej to okazuje się, że różne detektory są czułe na różne kombinacje sprzężeń.

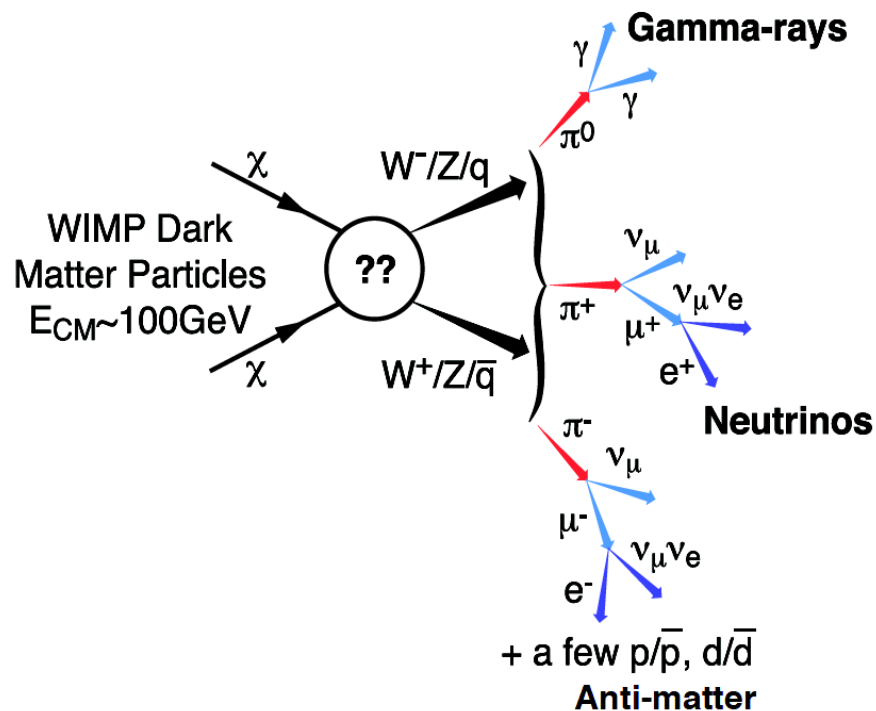
Zależne od spinu sprzężenia protonu i neutronu:



PICO-60 (blue), PICO-2L (purple), PICO-60 C3FI (red) vs PANDAX-II (cyan), LUX (yellow)

Detekcja pośrednia

Anihilacja DM



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

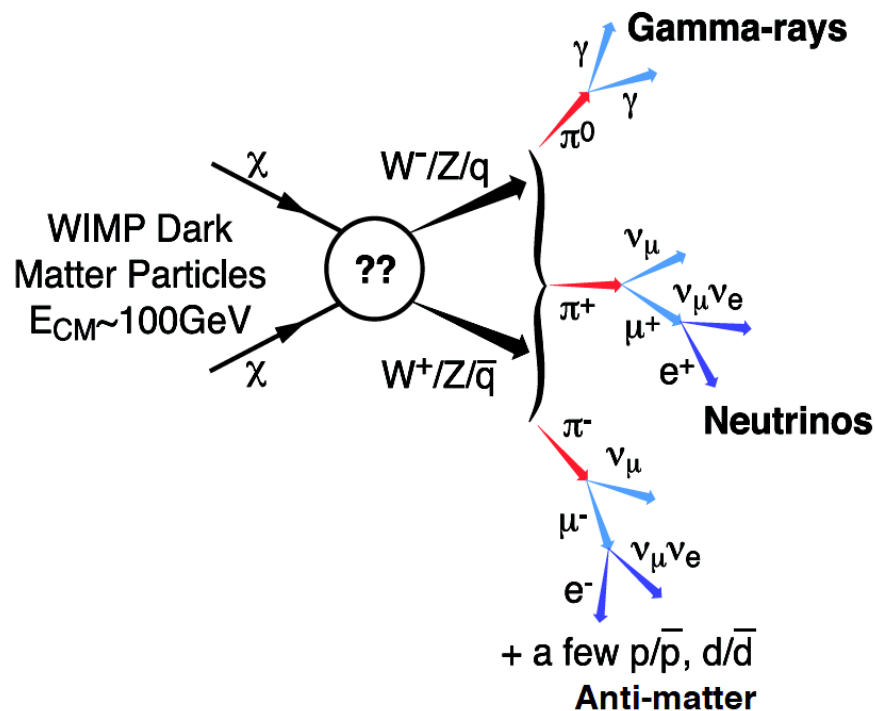
Ale ciemna materia uczestniczy w tworzeniu struktur we Wszechświecie! Więc na małych skalach odległości jej gęstość może być o wiele rzędów wielkości większa niż gęstość średnia (tak jak normalnej materii).

⇒ może znów zachodzić anihilacja

Podobnie jak w gwiazdach znów zachodzi nukleosynteza...

Detekcja pośrednia

Promieniowanie gamma



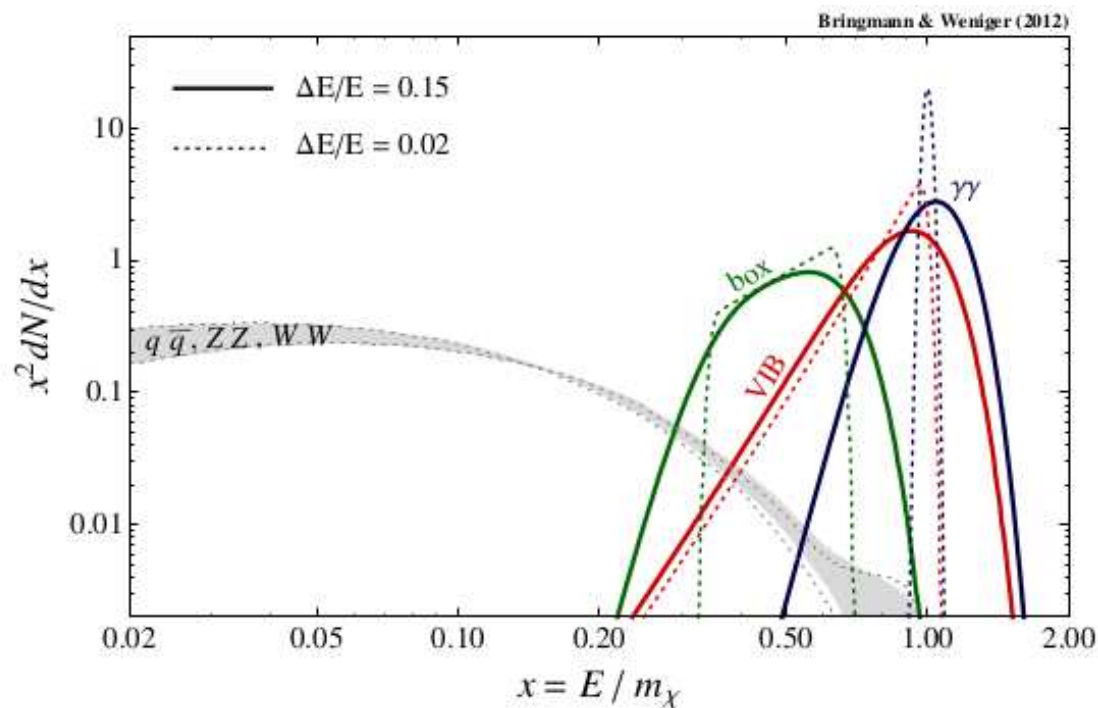
Zalety poszukiwania sygnału anihilacji DM w promieniowaniu gamma:

- 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

Detekcja pośrednia

Promieniowanie gamma

Oczekiwane widmo promieniowania z anihilacji DM



Pierwotne promieniowanie γ

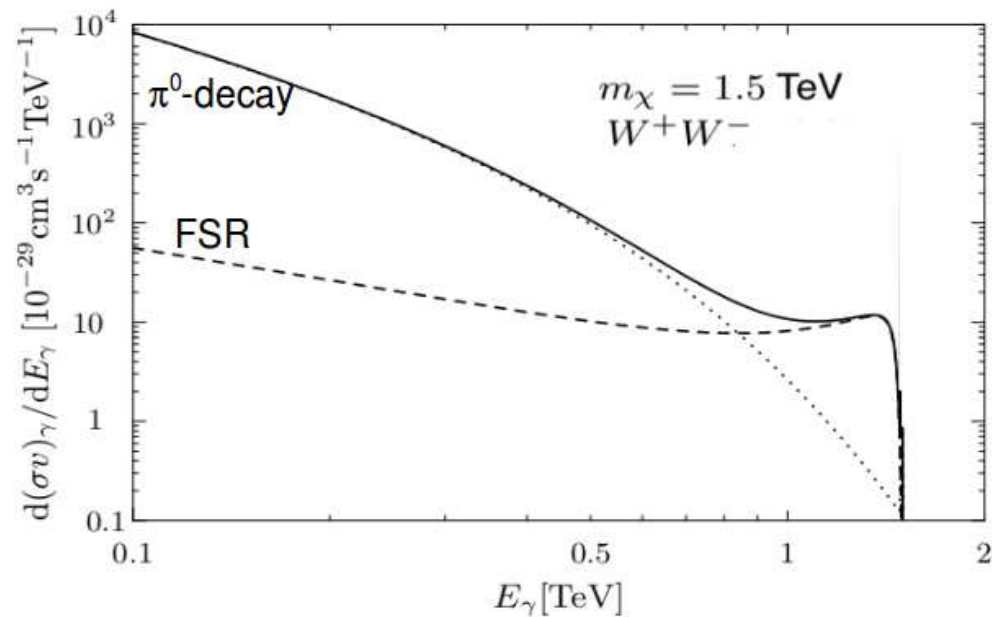
- bezpośrednia anihilacja
 $\chi\chi \rightarrow \gamma\gamma, Z\gamma \dots$
- Virtual Internal Bremsstrahlung
 $\chi\chi \rightarrow f\bar{f}\gamma, W^+W^-\gamma \dots$
- rozpady kaskadowe (Box)

\Rightarrow charakterystyczne maksimum blisko $E = m_\chi$

Detekcja pośrednia

Promieniowanie gamma

Oczekiwane widmo promieniowania z anihilacji DM



Wtórne promieniowanie γ

- rozpady π^0
(w kanałach hadronowych)
- promieniowanie w stanie końcowym
Final State Radiation

⇒ obcięcie widma dla $E \sim m_\chi$

Detekcja pośrednia

Źródła

Pośrednią detekcję DM stanowiłaby obserwacja nadmiaru promieniowania γ pochodzącego z ustalonego kierunku - źródła.

Kryteria wyboru źródła:

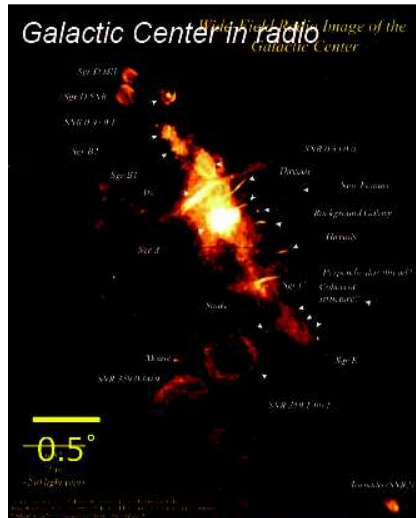
- duża jasność
duża gęstość DM, mała odległość
- małe tło
- dobrze określona pozycja

Kandydaci:

- centrum galaktyki
- galaktyki karłowate
- gromady galaktyk
- halo galaktyki

Detekcja pośrednia

Źródła

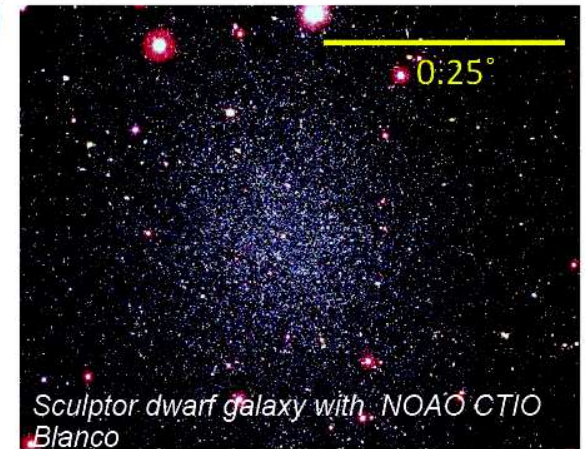


Galactic Centre

- Proximity (~ 8 kpc)
- High (possibly) central DM concentration :
DM profile : core? cusp?
- High astrophysical background at TeV

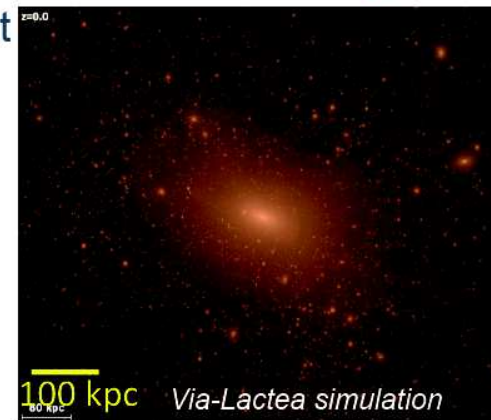
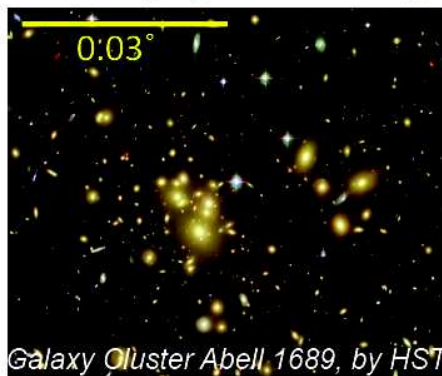
Dwarf galaxies of the Milky Way

- Many of them within the 100 kpc from Sun
- Extremely DM-dominated environment
- Potential low astrophysical background



Galaxy clusters

- High DM annihilation luminosity
- Substructures contribution to the overall DM flux
- Astrophysical background may be important



Substructures in the Galactic halo

- Low but clean signal
- Unknown location

Detekcja pośrednia

Instrumenty

Radio

Interferometers



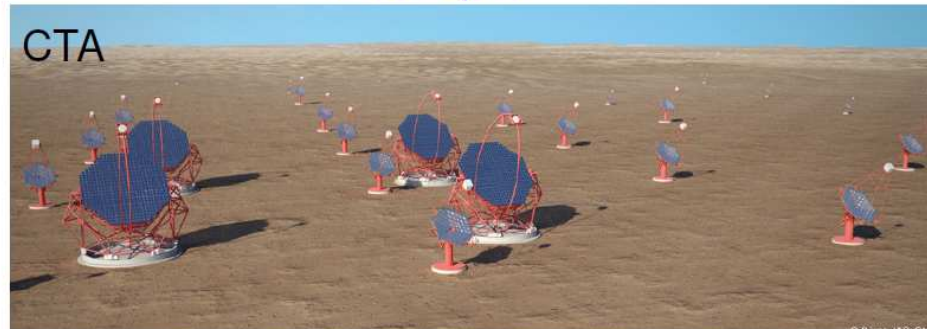
Artist's impression
Credit: SPDO/TDP/DRAO/Swinburne
Astronomy Productions.

Single-dish



gamma-rays

Ground based
telescopes



x-rays
Space satellites

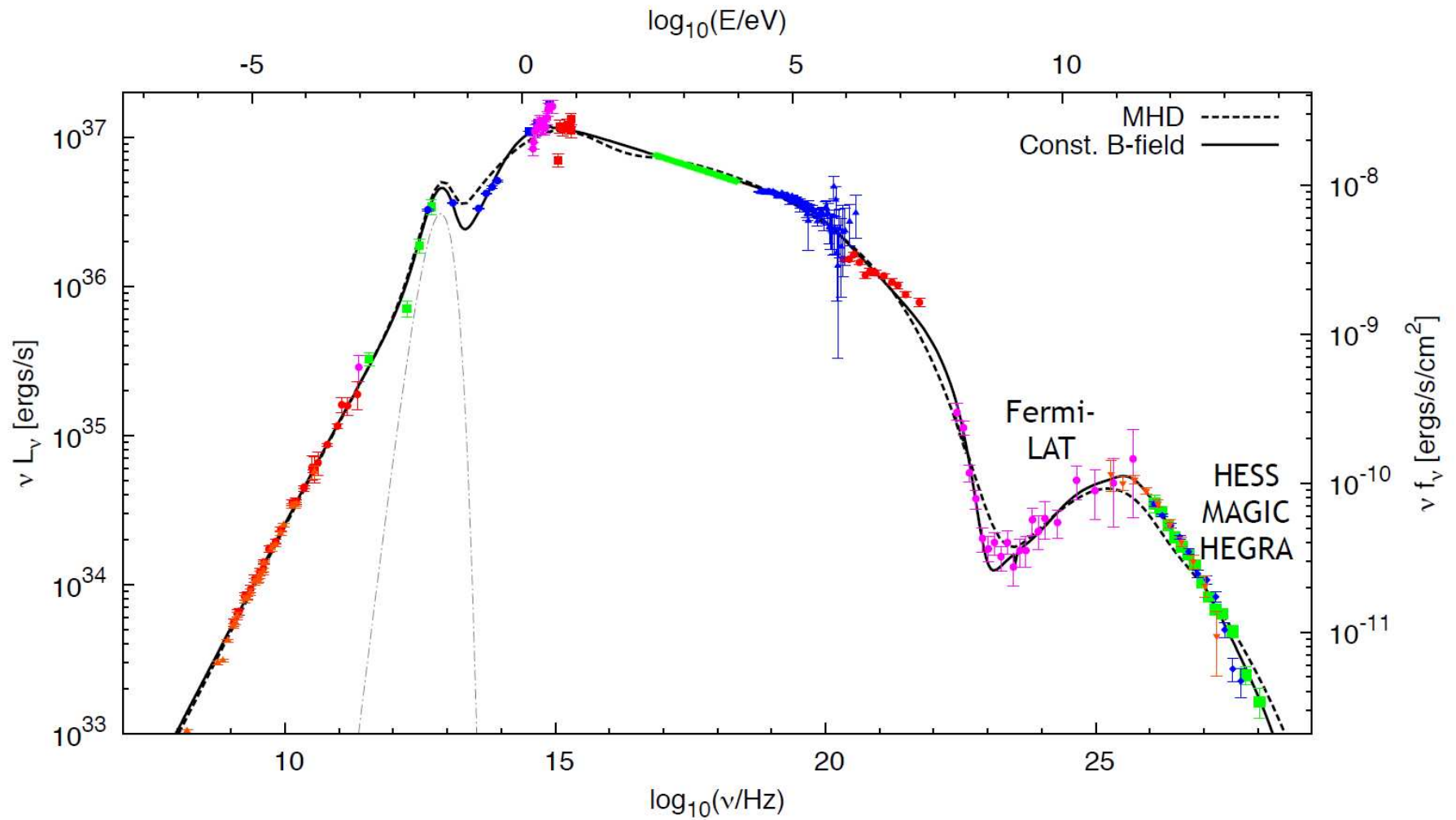


Space
satellites



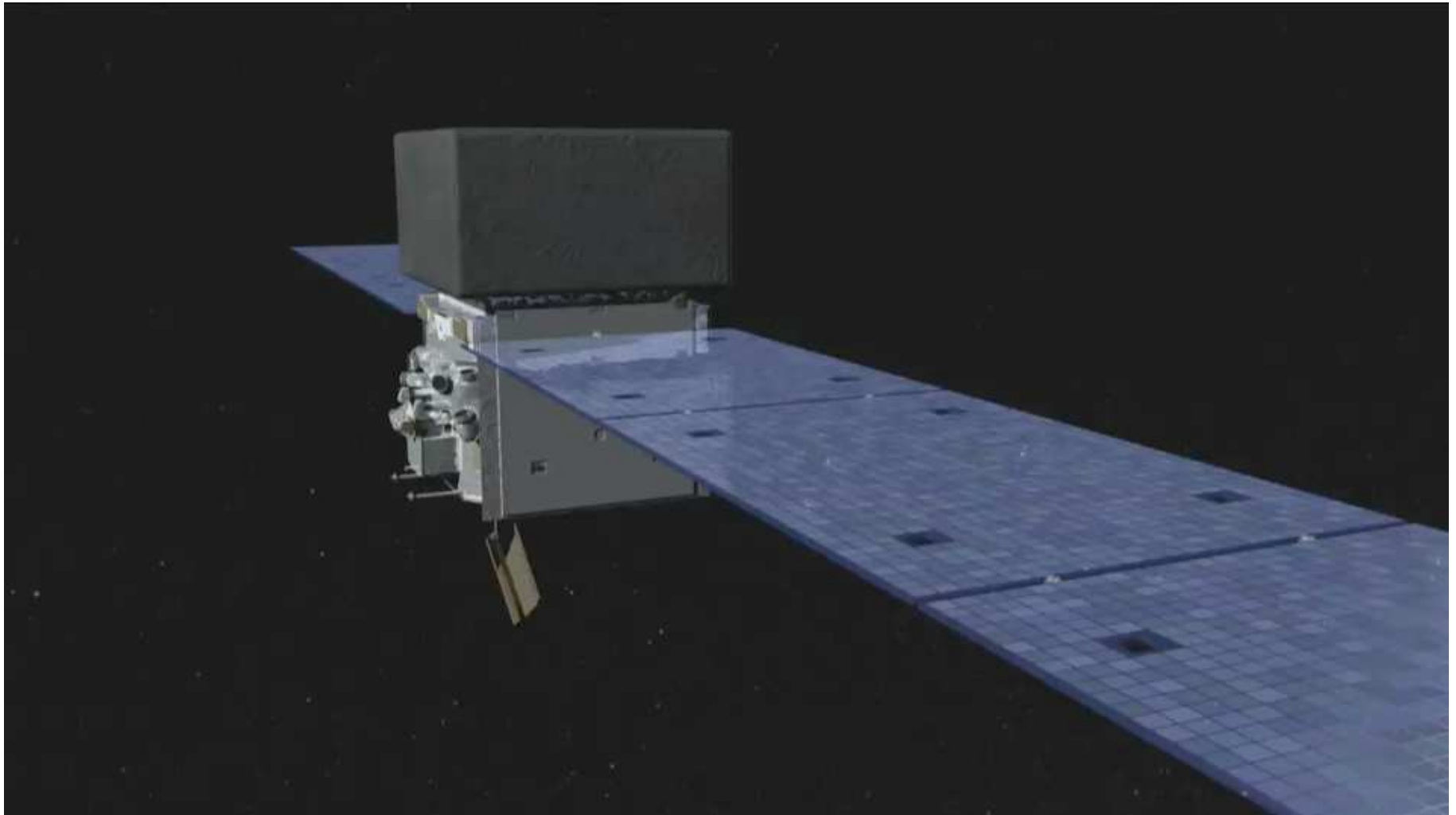
Detekcja pośrednia

Zakres widmowy



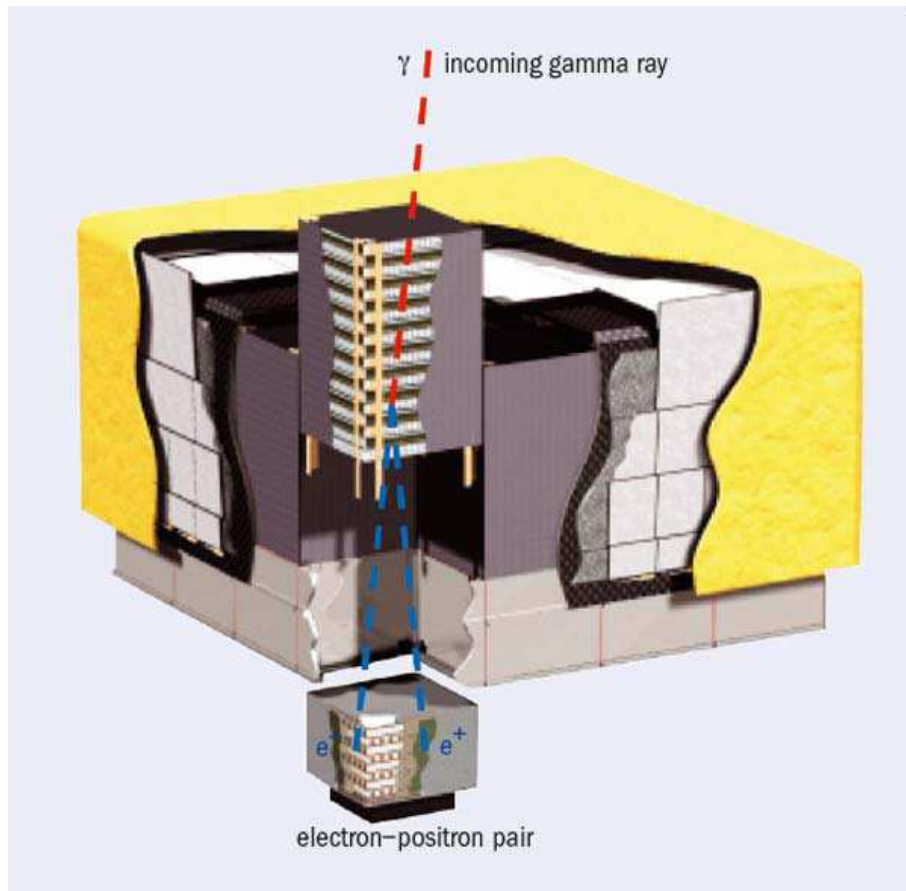
Detekcja pośrednia

Fermi-LAT



Detekcja pośrednia

Large Area Telescope



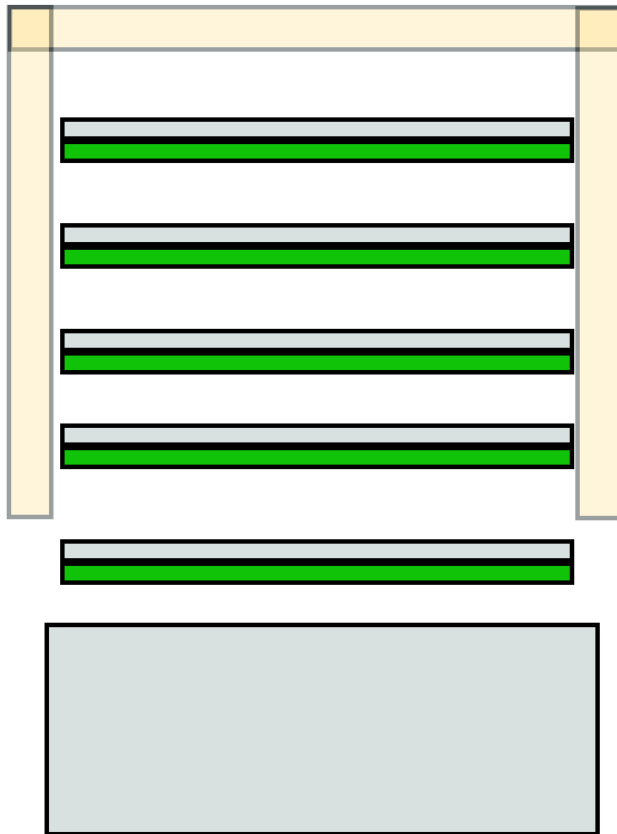
Detektor dedykowany pomiarowi fotonów w zakresie od 20 MeV do 300 GeV.

$1.8 \times 1.8 \times 1.0 \text{ m}^3$, 3000 kg, 650 W

Pomiar kierunku i energii fotonu na podstawie konwersji $\gamma \rightarrow e^+ e^-$

Detekcja pośrednia

Large Area Telescope



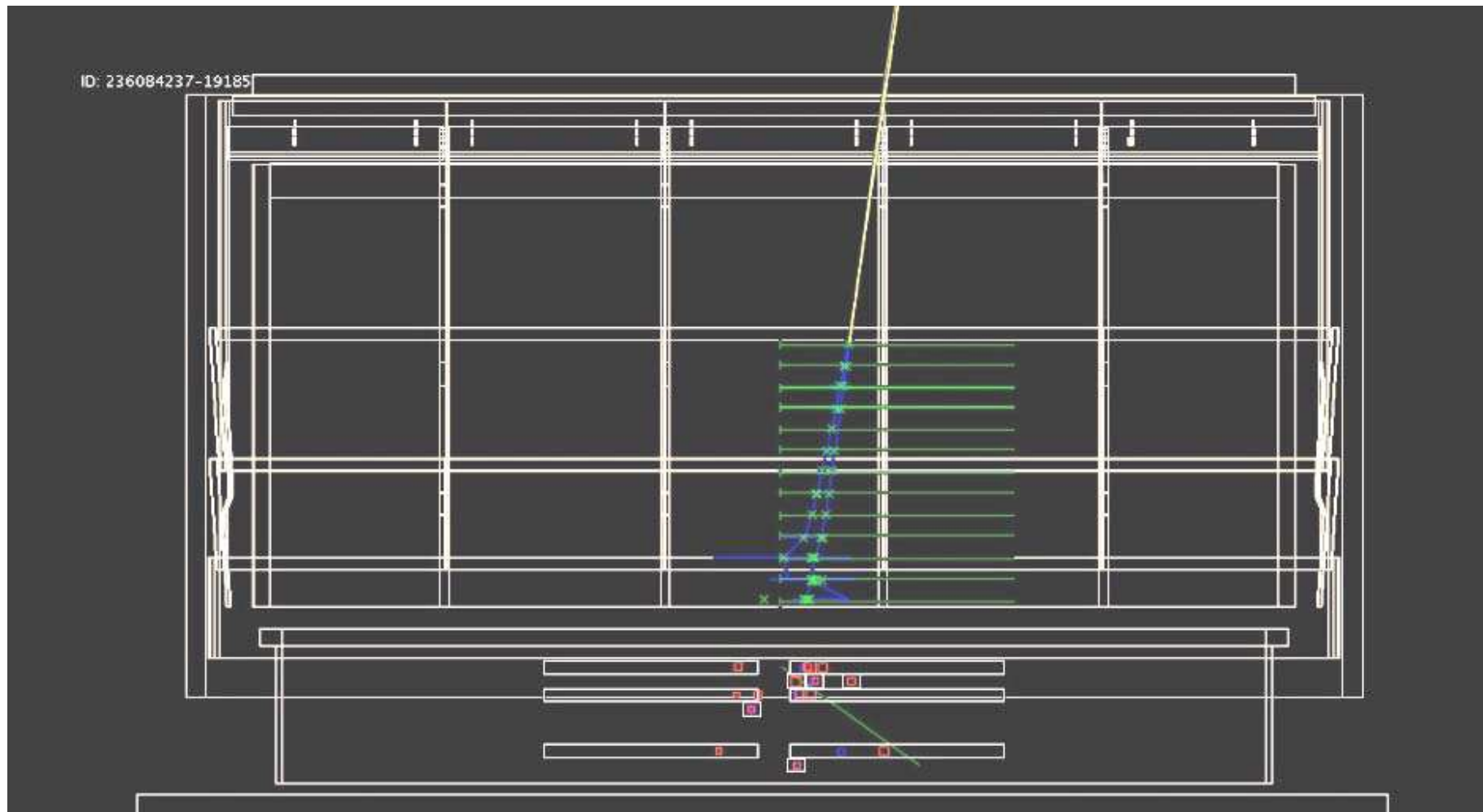
Główne elementy:

- osłona ze scyntylatorów - eliminacja tła
- płyty wolframowe, na których zachodzi konwersja
- warstwy krzemowych detektorów paskowych - pomiar toru $e^+ e^-$ z konwersji skrzyżowane paski \Rightarrow pomiar 2D
- kalorymetr elektromagnetyczny
8 warstw po 12 kryształów CsI
ułożone na przemian w kierunku X i Y
 \Rightarrow rekonstrukcja kaskady w 3D
powyżej 3 GeV część energii "wycieka"...

Detekcja pośrednia

Large Area Telescope

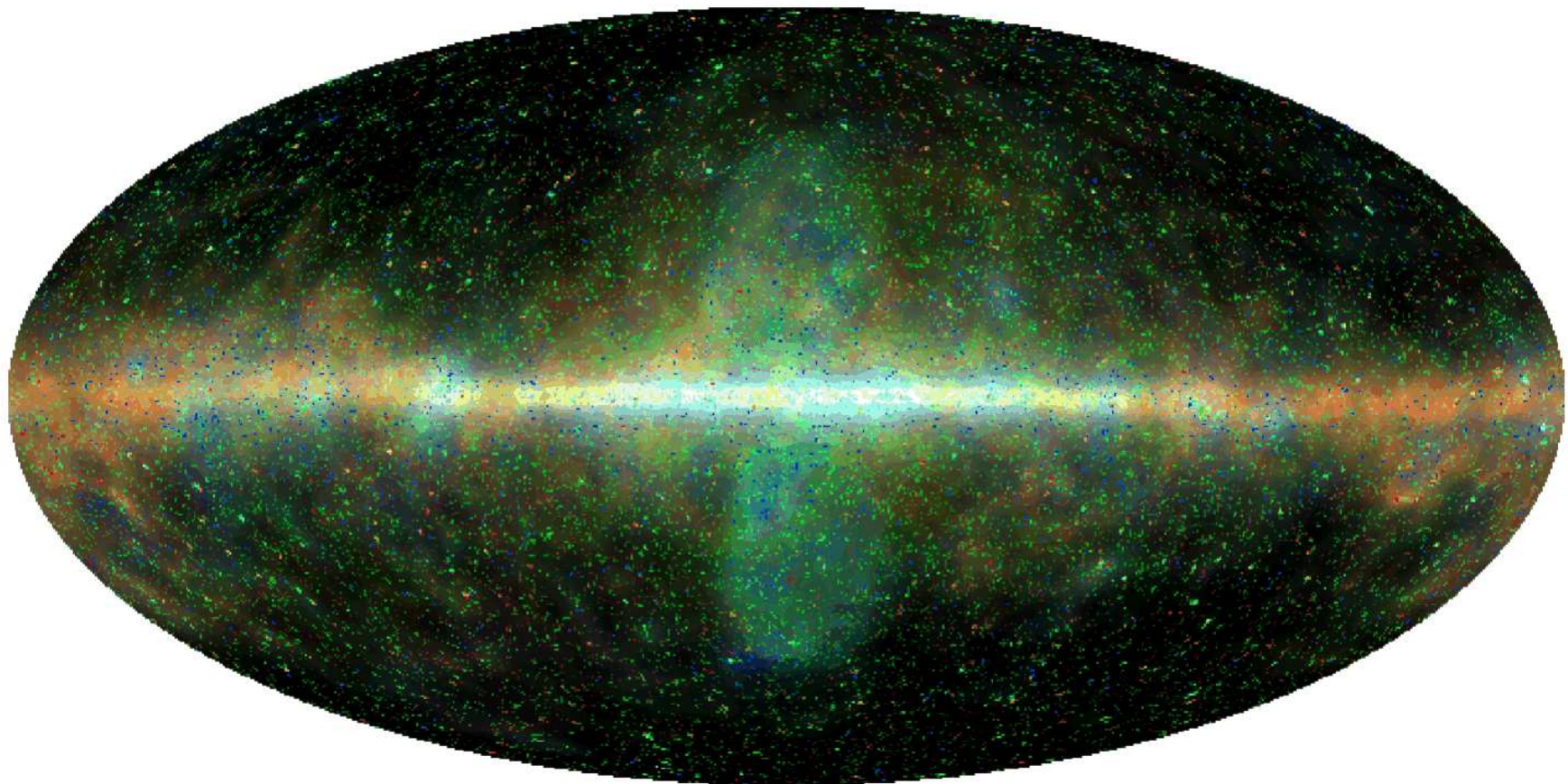
przykładowy przypadek $\gamma \rightarrow e^+e^-$



Detekcja pośrednia

Wyniki Fermi-LAT

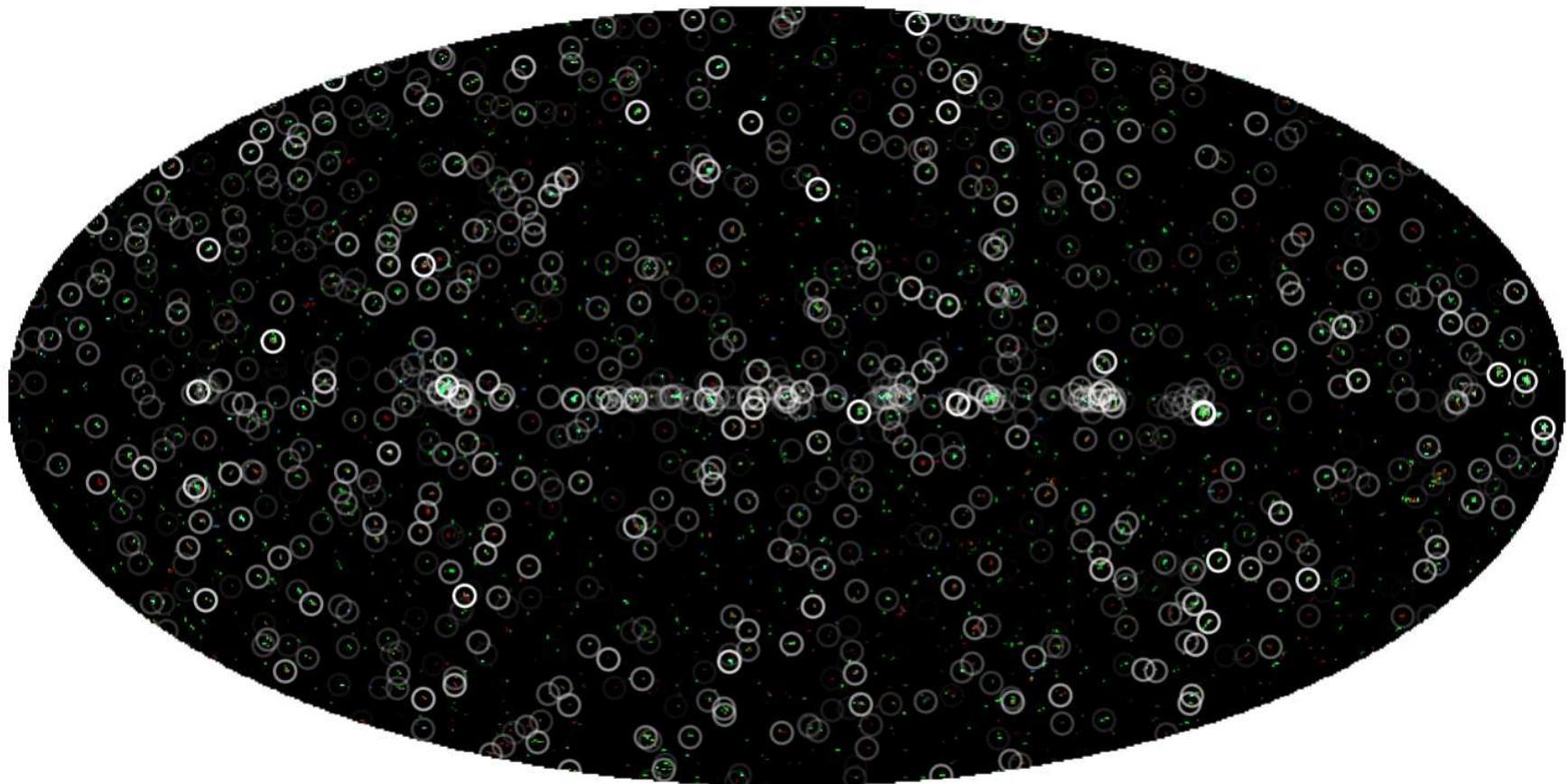
Mapa nieba w fotonach 1 - 300 GeV (skala logarytmiczna)



Detekcja pośrednia

Wyniki Fermi-LAT

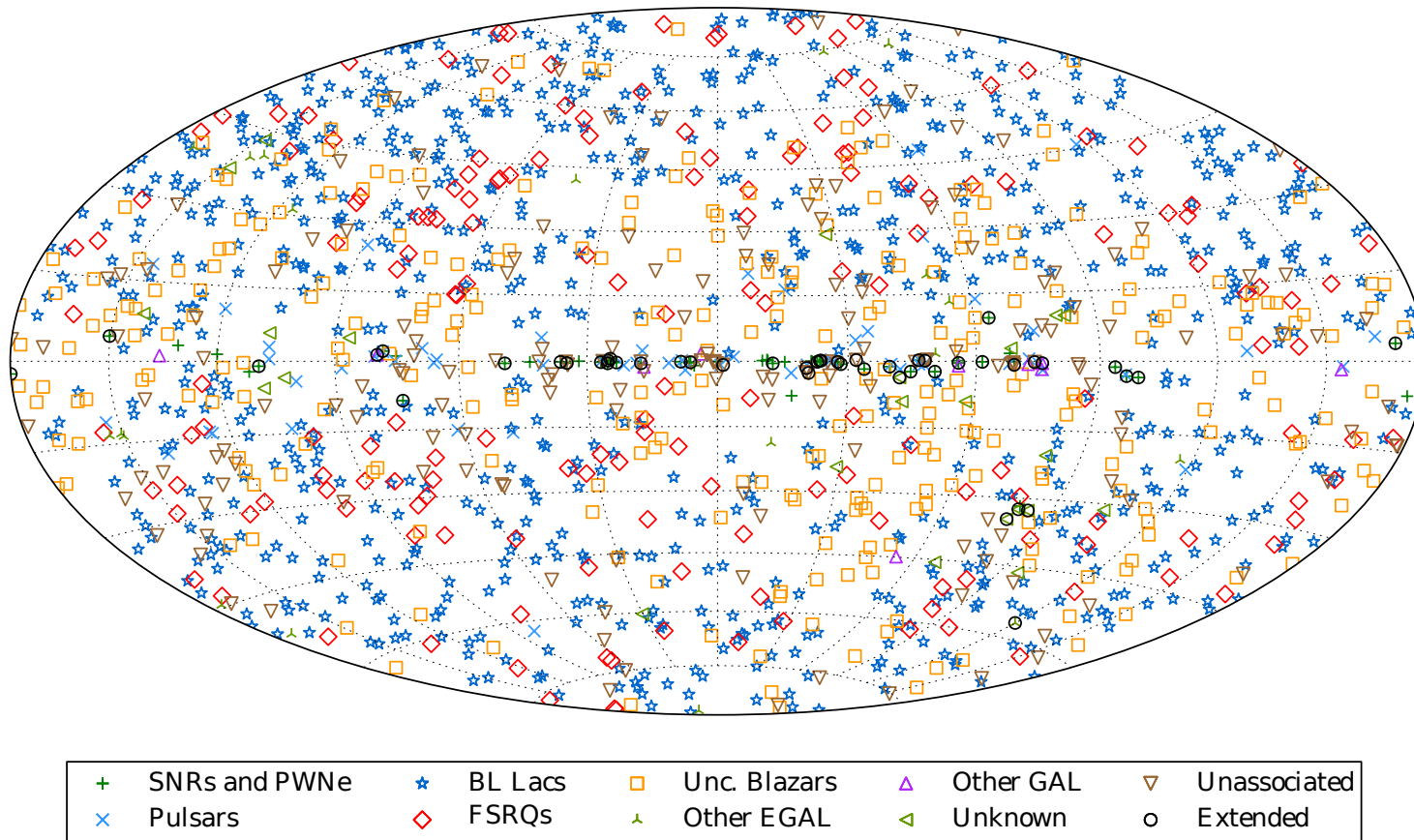
Zidentyfikowano około 3000 źródeł punktowych...



Detekcja pośrednia

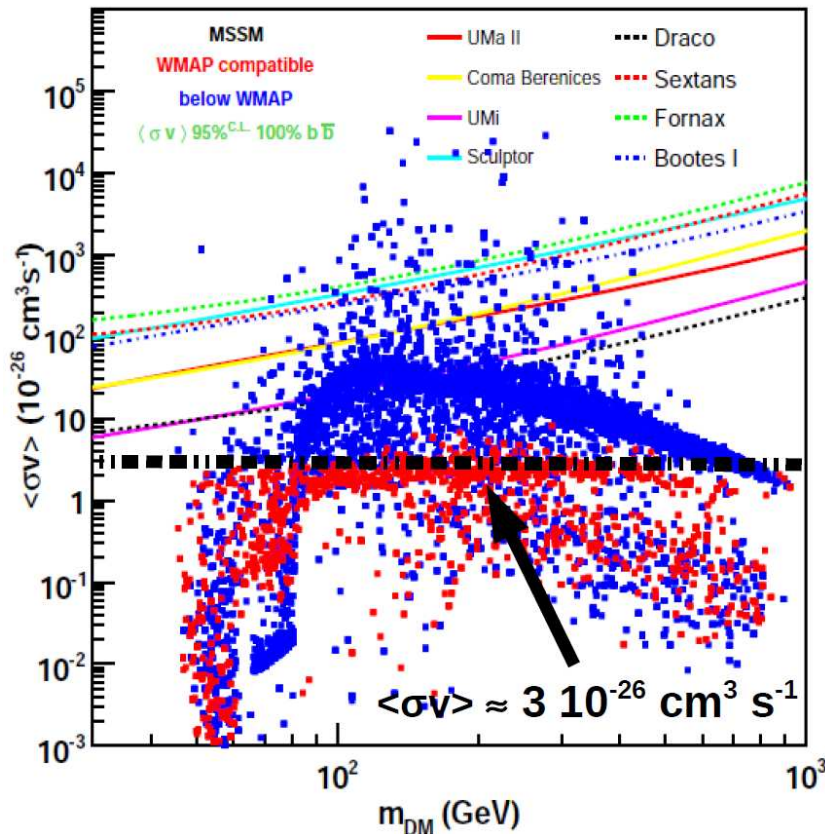
Wyniki Fermi-LAT

Zidentyfikowano 1556 źródeł punktowych powyżej 10 GeV (3 wersja katalogu, 2017)



Detekcja pośrednia

Wyniki Fermi-LAT



Galaktyki karłowate:

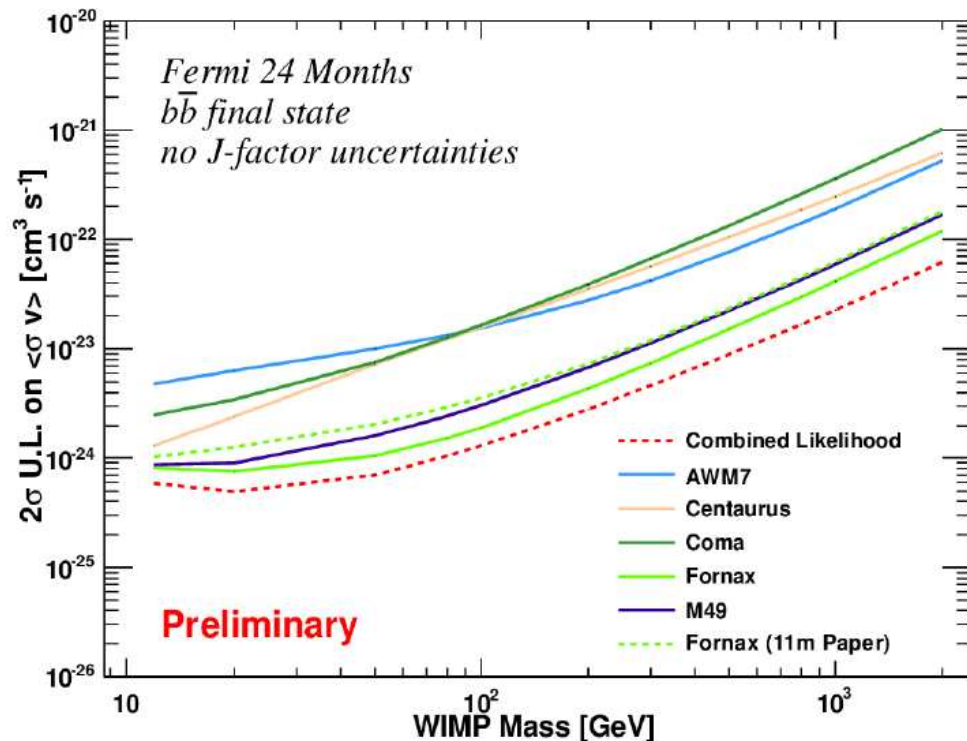
- zdominowane przez materię nie świecącą
- nie powinny być źródłem promieniowania γ
- znane w bezpośrednim sąsiedztwie

Wyniki FERMI oparte na analizie widma 8 bliskich galaktyk karłowatych.

⇒ brak sygnału, limity pozwalają na wykluczenie części scenariuszy MSSM

Detekcja pośrednia

Wyniki Fermi-LAT



Gromady galaktyk:

- największe struktury we Wszechświecie
- pomiary soczewkowania i promieniowania X sugerują dużą gęstość DM

Wyniki FERMI oparte na analizie 24 miesięcy danych od 200 MeV do 100 GeV.

⇒ brak sygnału, tylko limity

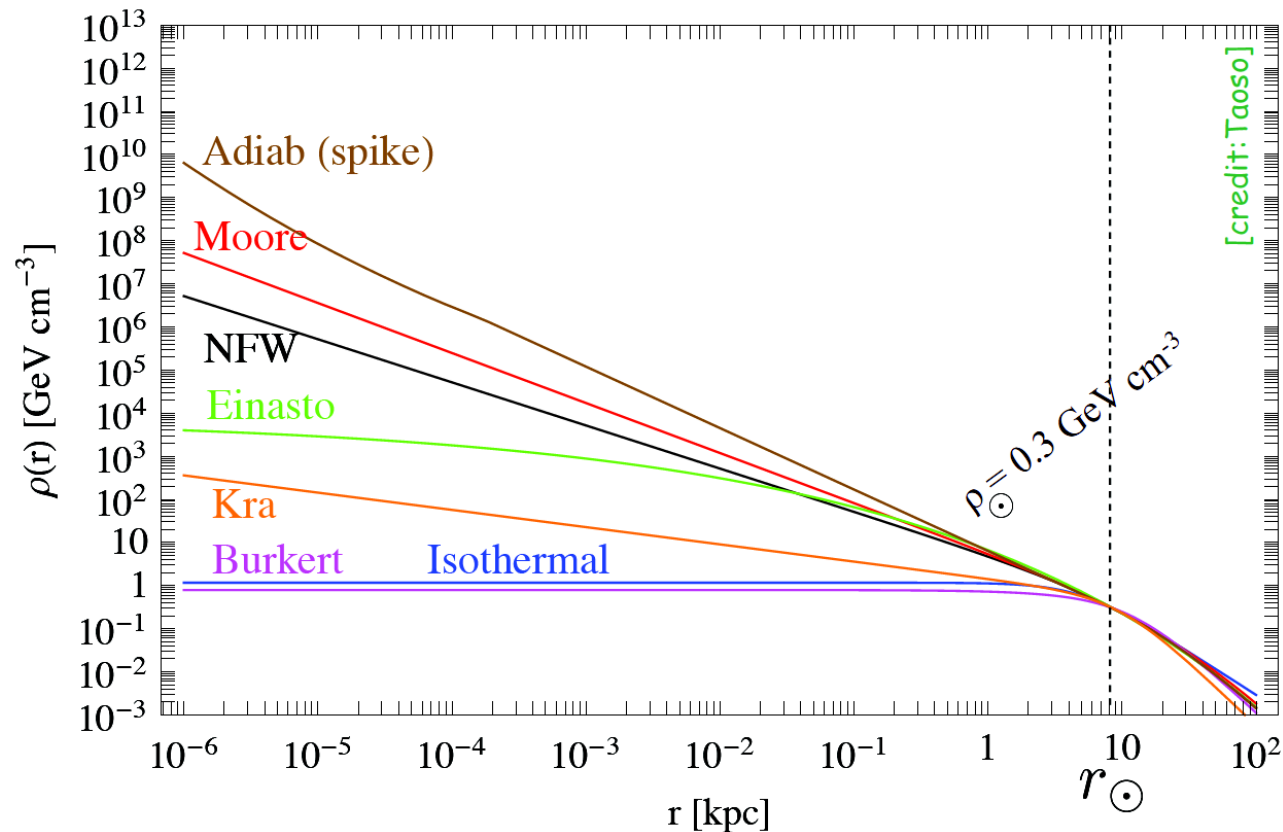
założony kanał anihilacji $\chi\chi \rightarrow b\bar{b}$

Detekcja pośrednia

Halo galaktyki

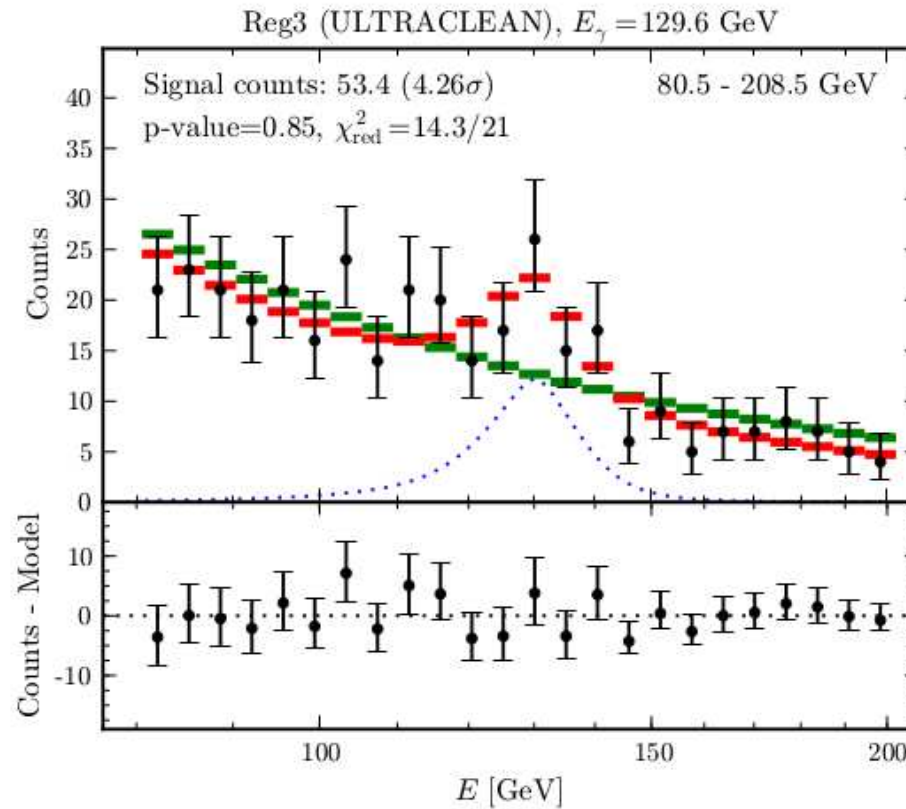
Również nie zidentyfikowano żadnych źródeł promieniowania, które mogłyby świadczyć o anihilacji w zagęszczeniach ciemnej materii.

Wyznaczanie limitów utrudnione przez duże niepewności w modelowaniu halo.



Detekcja pośrednia

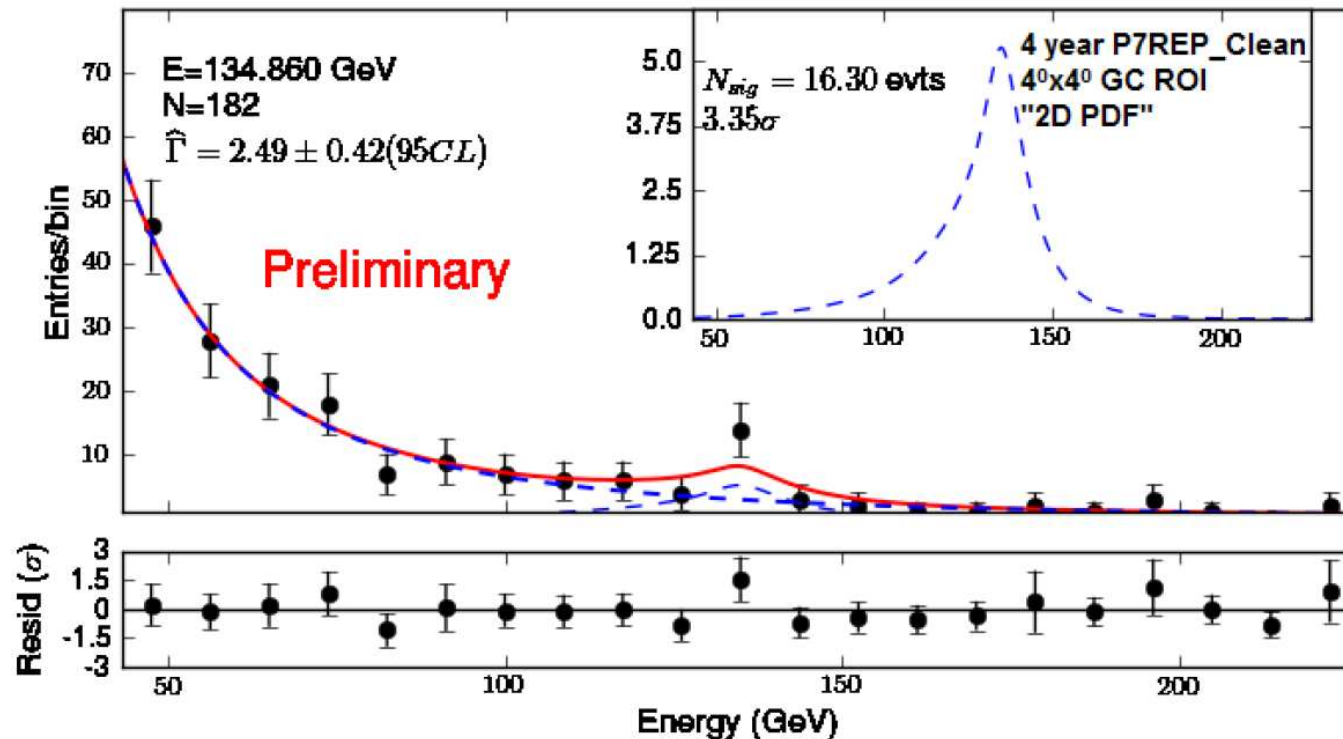
Wyniki Fermi-LAT



Badając widmo promieniowania dochodzącego z centrum naszej galaktyki zauważono nadmiar przypadków dla $E_\gamma \sim 130\text{GeV}$. Efekt na poziomie 4.26σ

Detekcja pośrednia

Wyniki Fermi-LAT



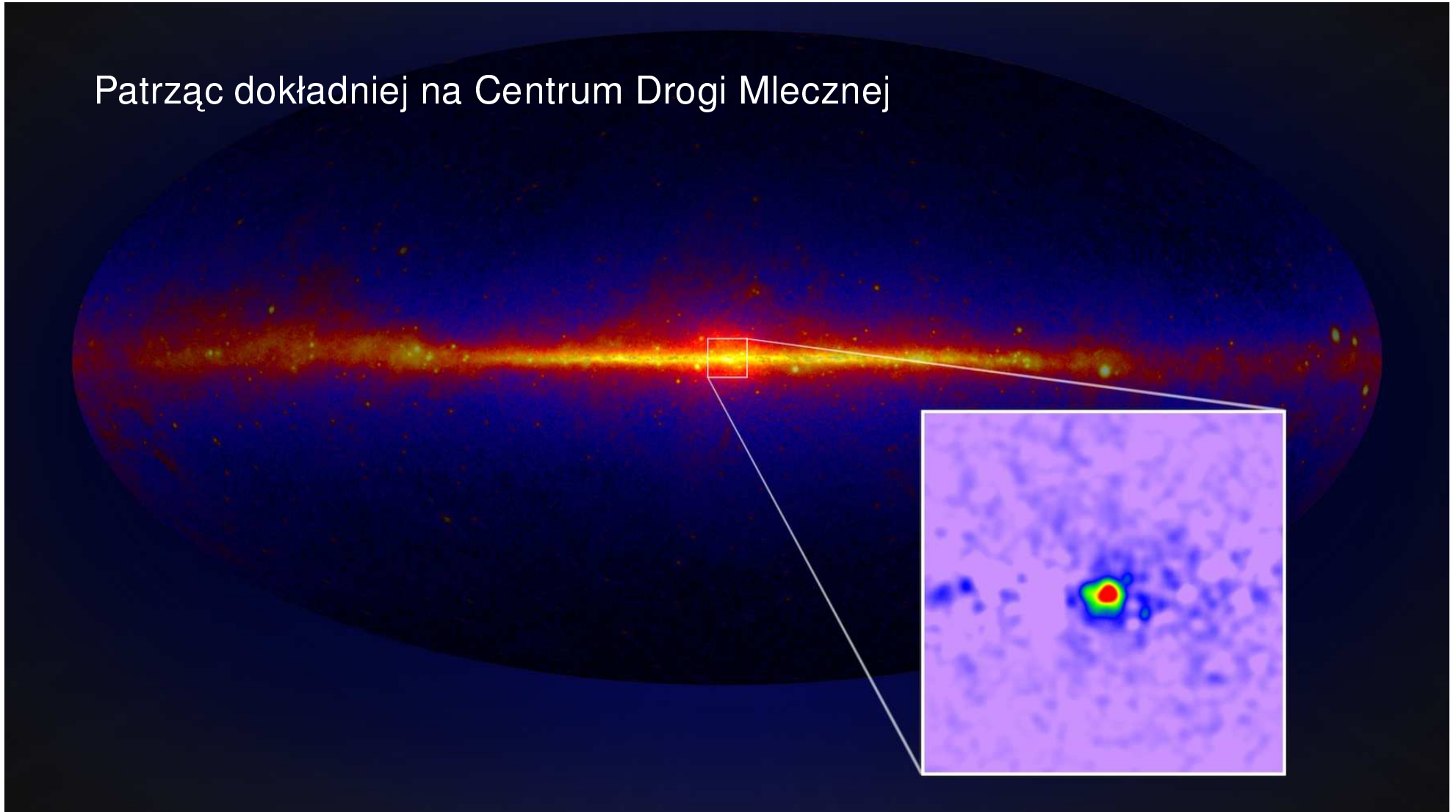
Po rekaliibracji danych efekt zmalal do ok. 3.3σ .

Biorac pod uwage, ze obserwujemy bardzo duzy zakres energii, prawdopodobienstwo, ze gdziekolwiek w tym zakresie nastapi taka fluktuacja jest ok. 10%...

Detekcja pośrednia

Wyniki FERMI

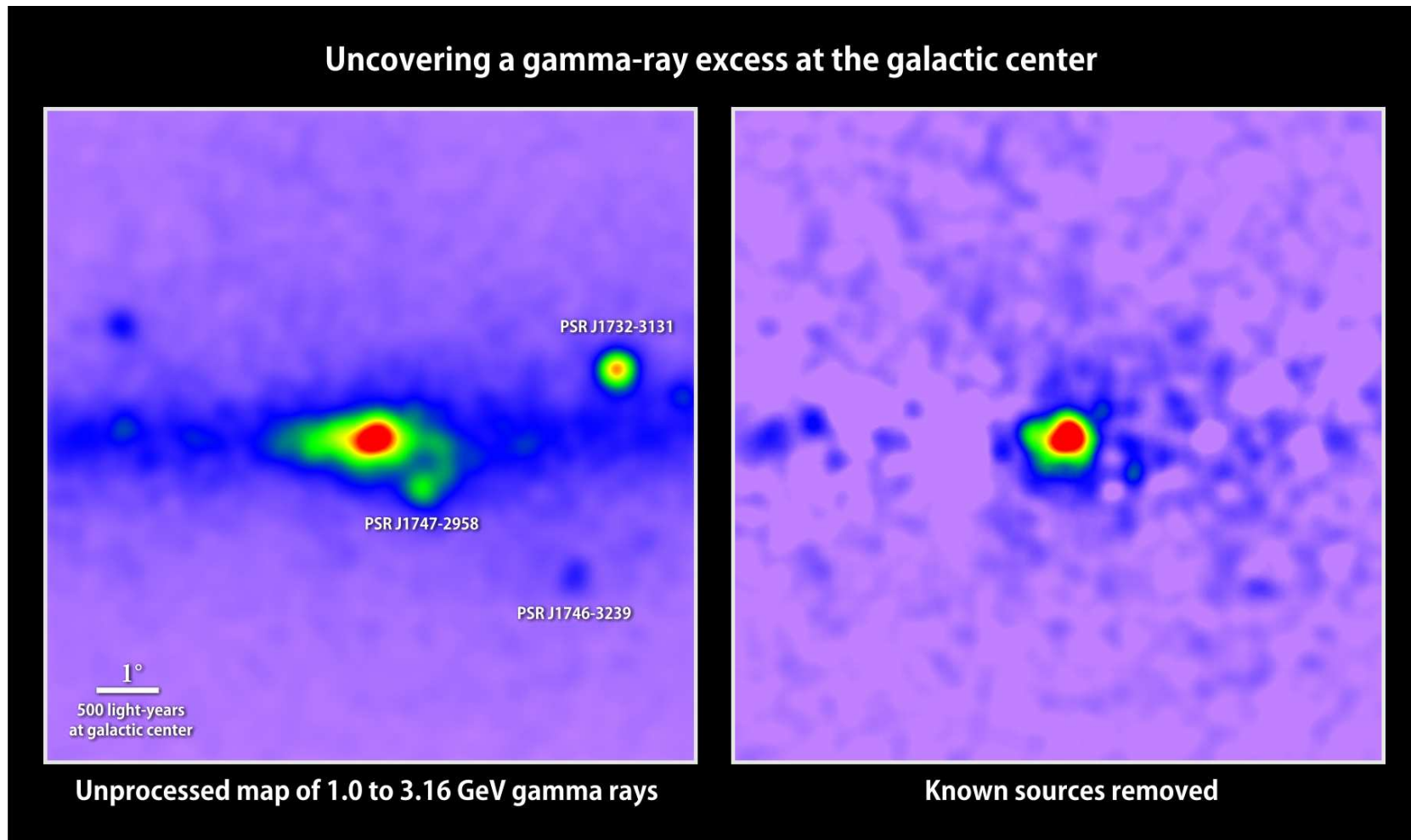
Patrząc dokładnie na Centrum Drogi Mlecznej



Detekcja pośrednia

Wyniki FERMI

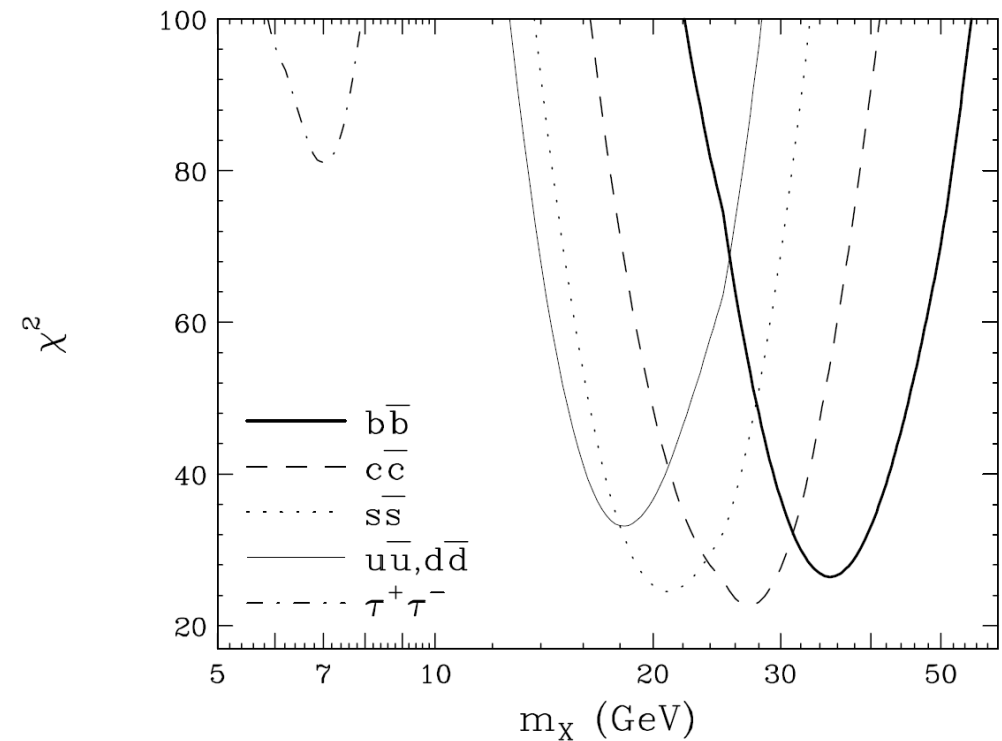
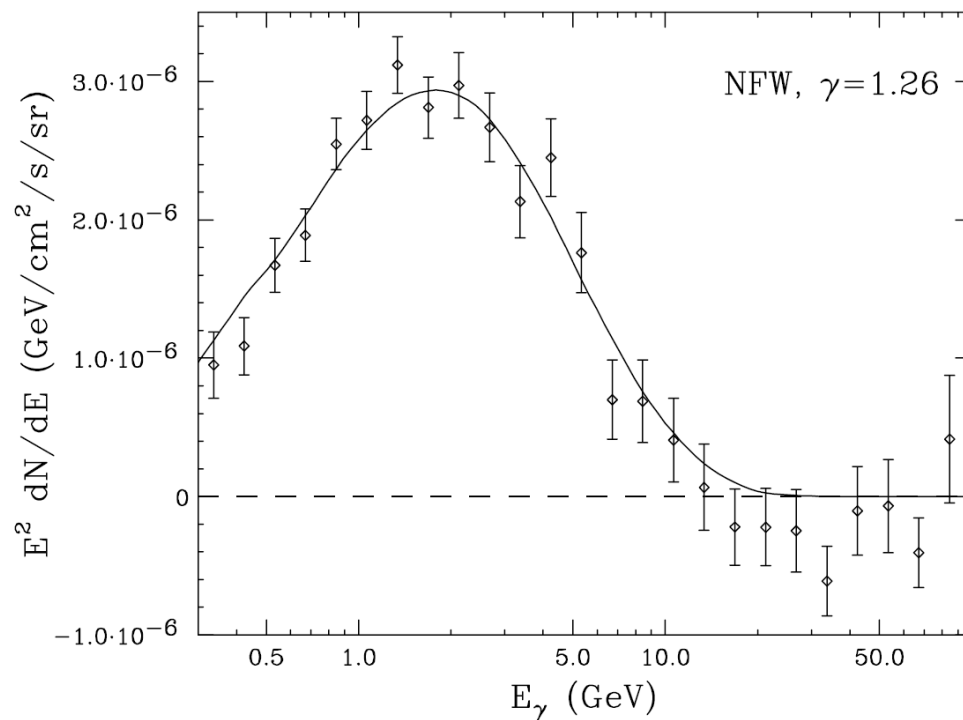
Odejmując promieniowanie znanych źródeł i modelowane promieniowanie pochodzące od znanych procesów wciąż zostaje niewielki nadmiar w zakresie energii rzędu GeV.



Detekcja pośrednia

Wyniki FERMI

Nadmiar ten można próbować modelować jako anihilację cząstek DM

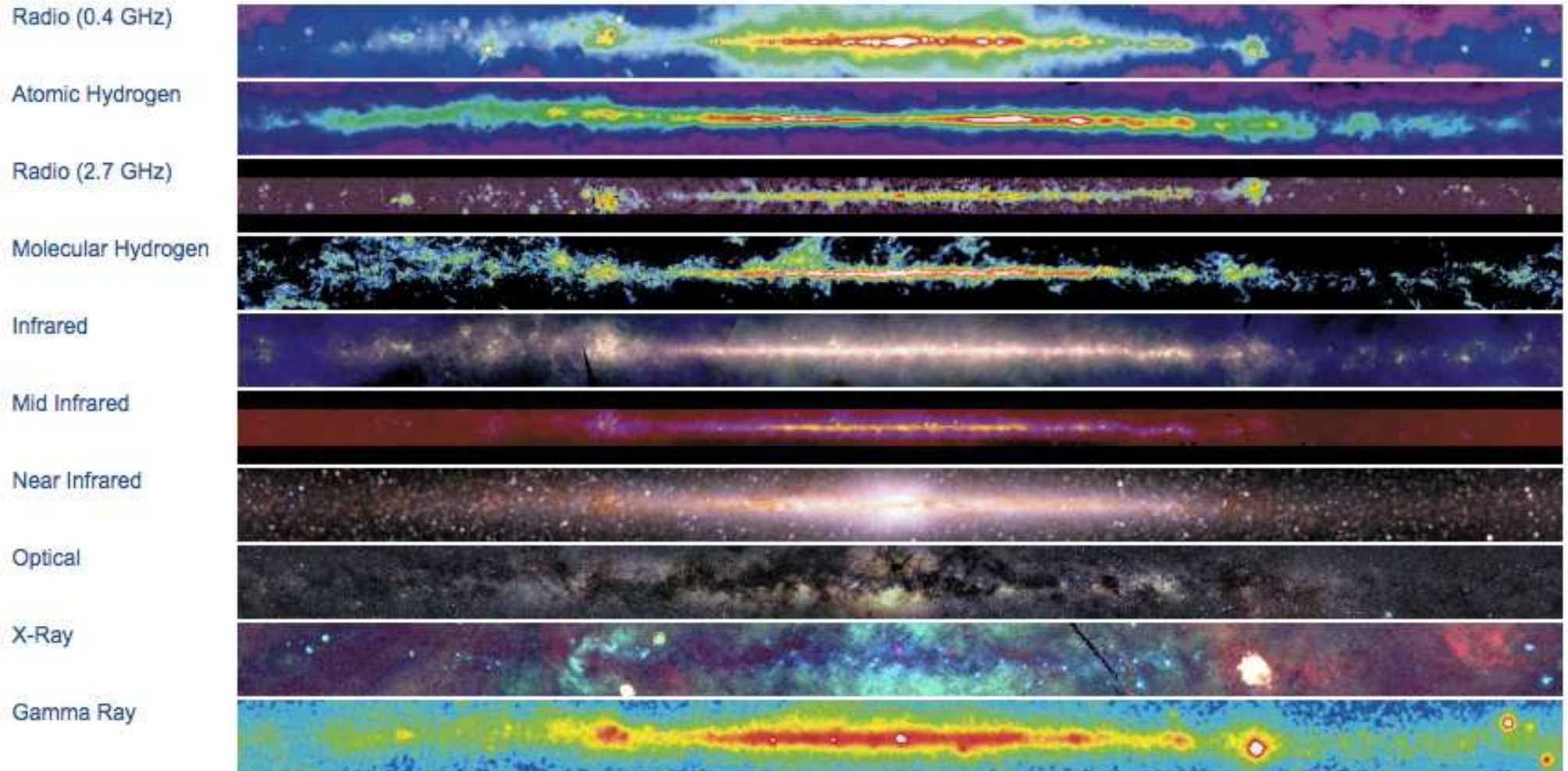


Wyniki bardzo zależą od modelowania tła galaktycznego, mogą też być opisane przez dodatkowe "znane" źródła...

Detekcja pośrednia

Centrum Galaktyki

Brak potwierdzenia w innym zakresie widma

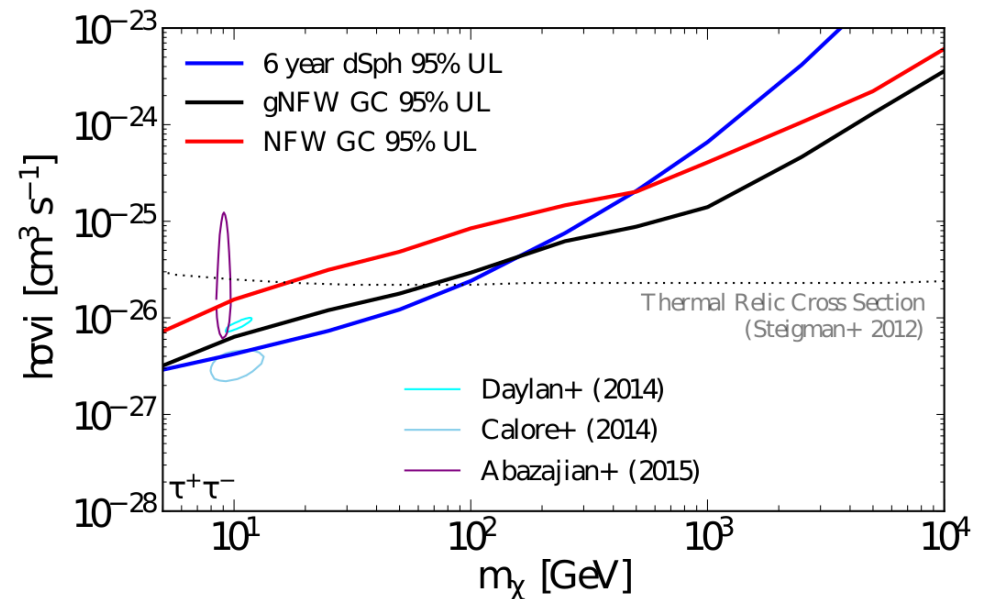
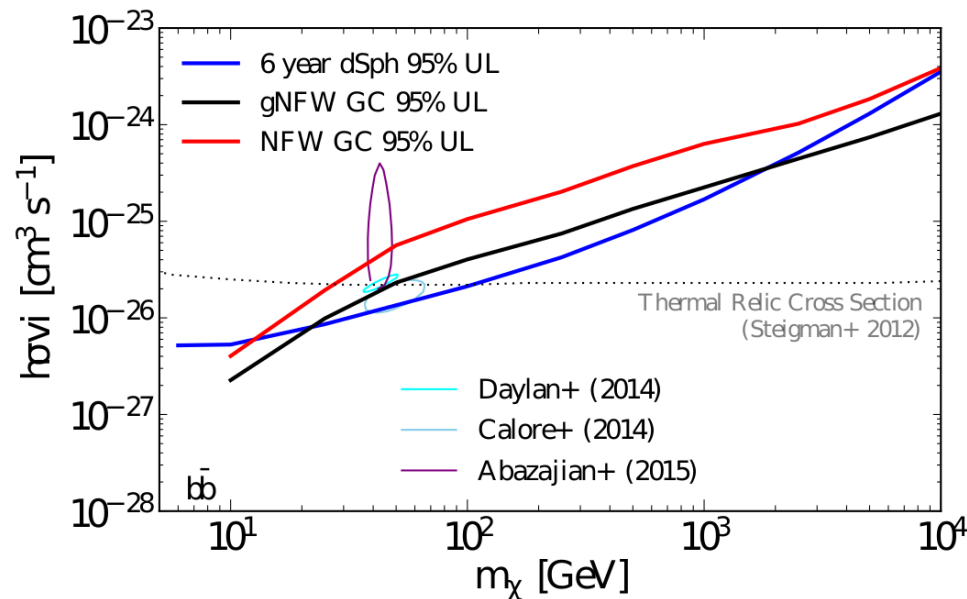


Detekcja pośrednia

Wyniki FERMI

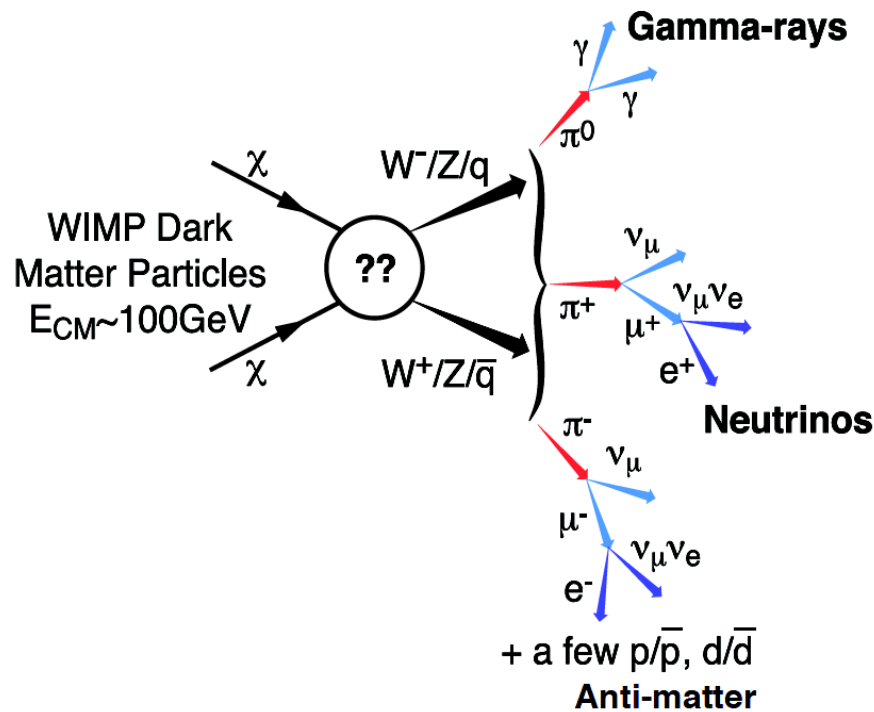
Ostatecznie w pracy z 2017 roku współpraca FERMI uznała, że choć nadmiar promieniowania w tym zakresie jest istotny to nie jest zgodny z hipotezą anihilacji DM

⇒ ograniczenia na cząstki DM w centrum galaktyki:

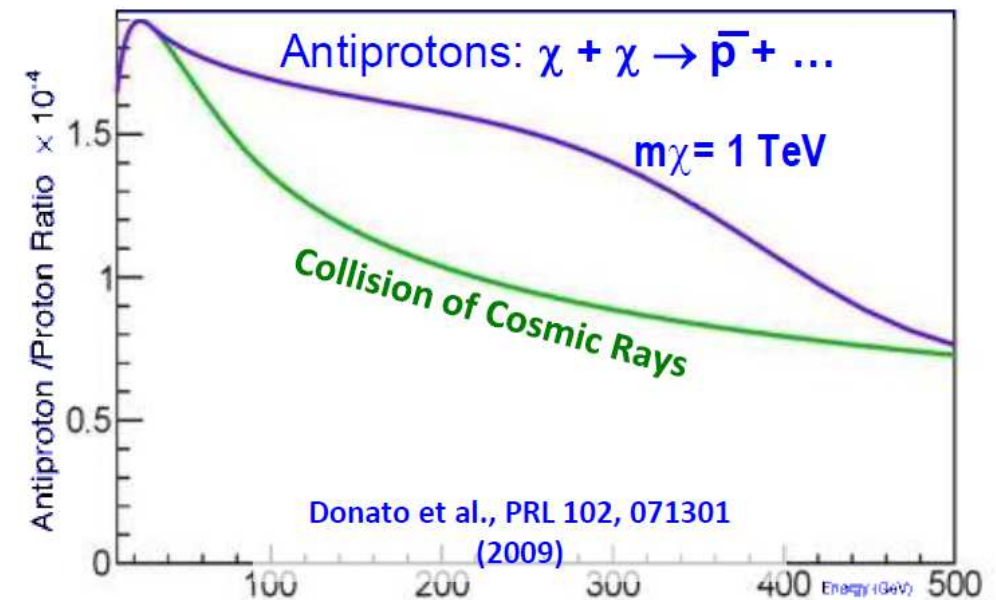


Detekcja pośrednia

Anihilacja DM



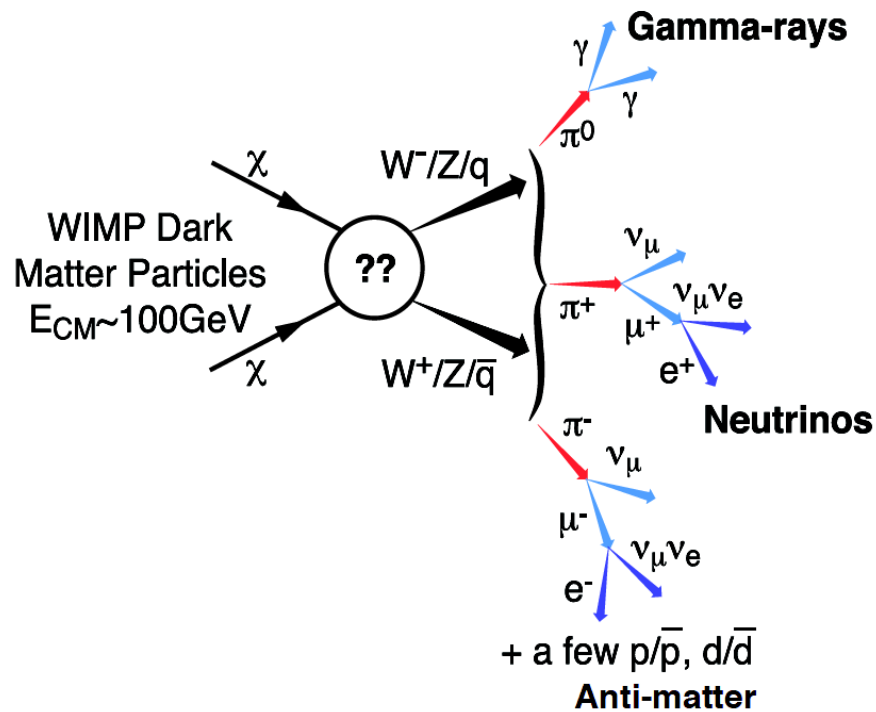
Oczekiwane widmo antyprotonów:



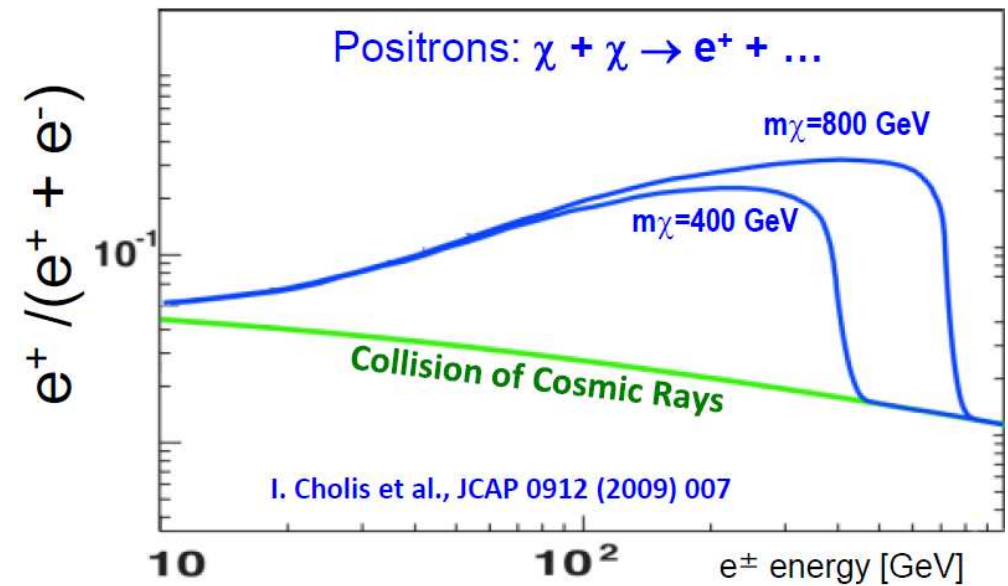
\Rightarrow wyraźna nadwyżka (ponad tło wynikające z oddziaływania promieniowania kosmicznego) oczekiwana dla $E \leq m_\chi$

Detekcja pośrednia

Anihilacja DM



Oczekiwane widmo pozytonów:

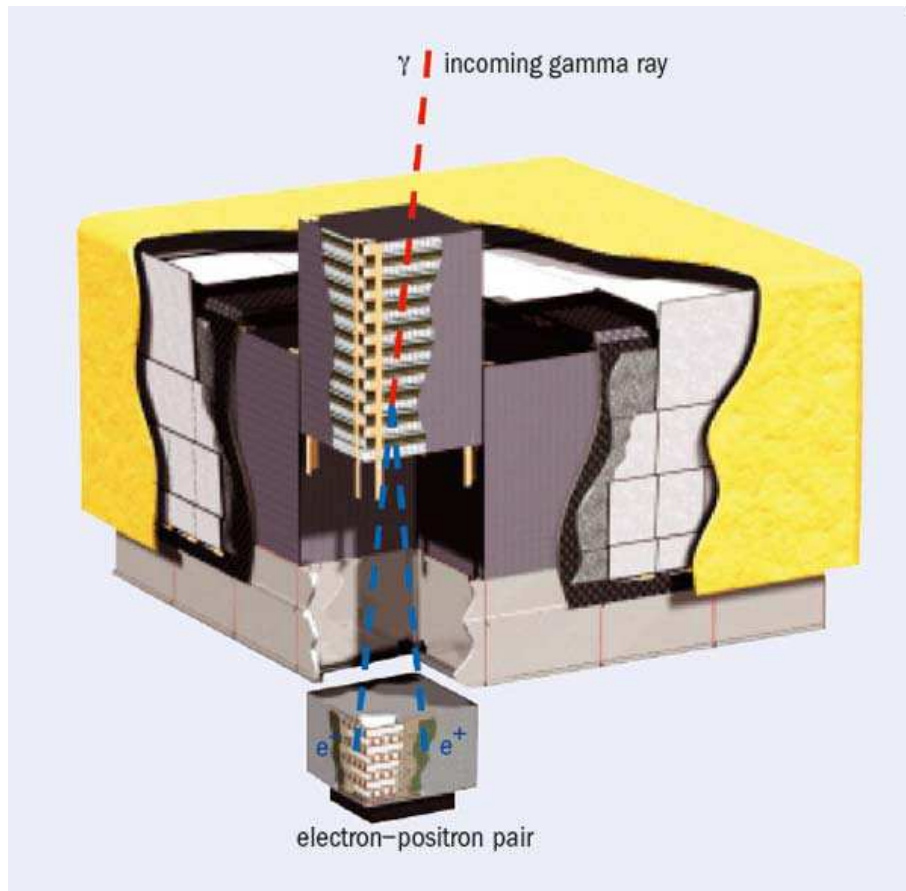


\Rightarrow wyraźna nadwyżka (ponad tło wynikające z oddziaływania promieniowania kosmicznego) oczekiwana dla $E \leq m_\chi$

\Rightarrow próg przy $E \sim m_\chi$

Detekcja pośrednia

Fermi-LAT



Detektor dedykowany pomiarowi fotonów w zakresie od 20 MeV do 300 GeV.

$1.8 \times 1.8 \times 1.0 \text{ m}^3$, 3000 kg, 650 W

Pomiar kierunku i energii fotonu na podstawie konwersji $\gamma \rightarrow e^+ e^-$

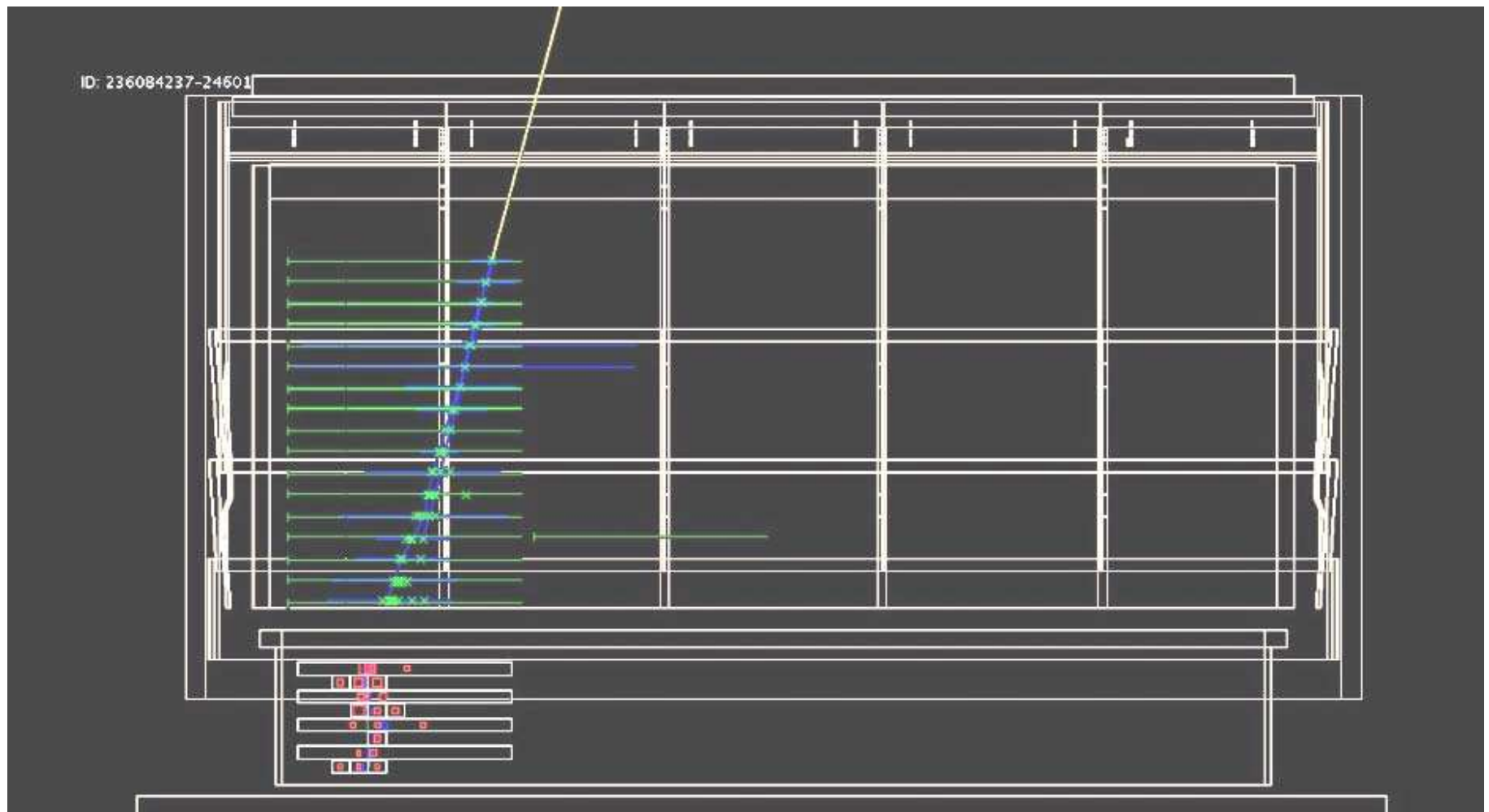
Detektor mierzy też dokładnie kierunek oraz energię elektronów i pozytonów.

Sam nie potrafi ich jednak odróżnić - brak pola magnetycznego.

Fermi-LAT

Large Area Telescope

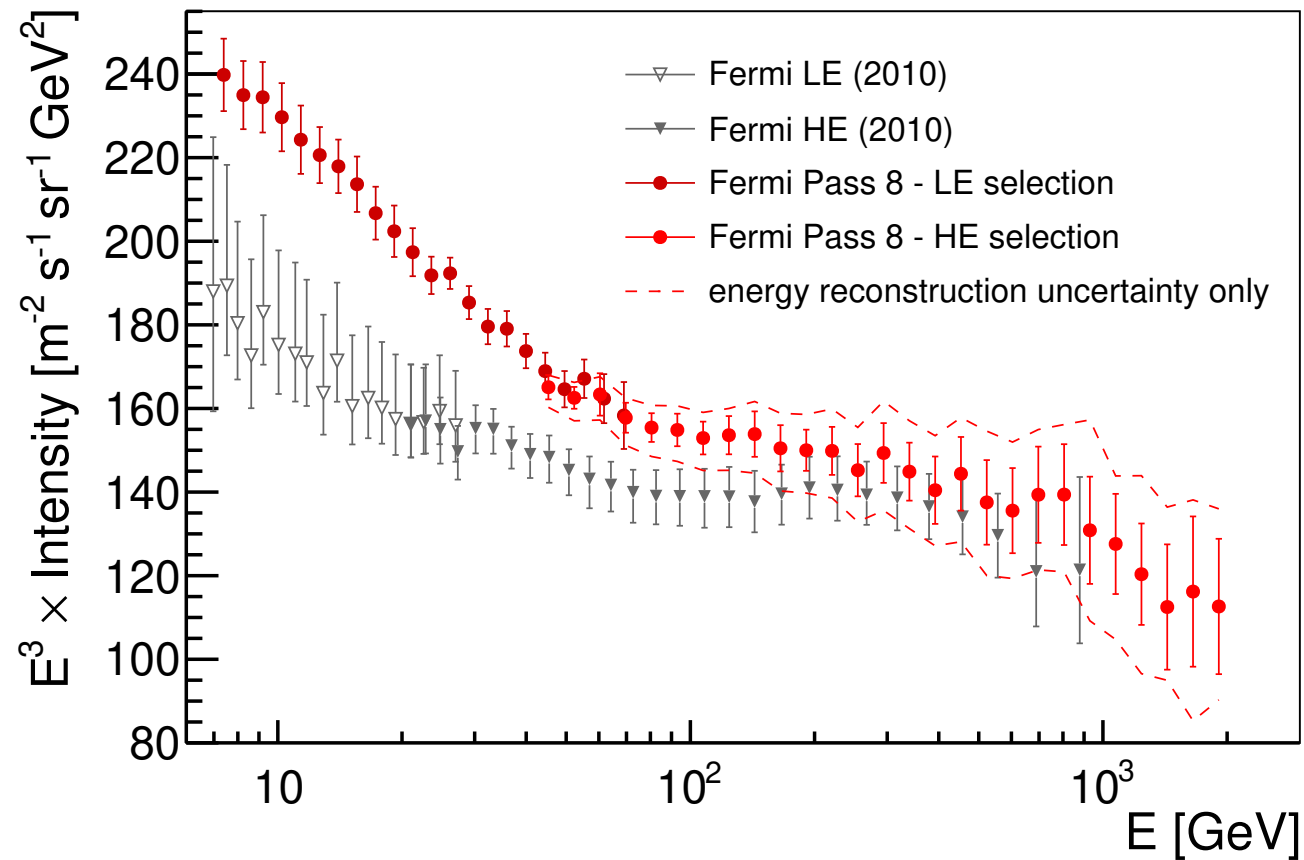
przykładowy przypadek e^\pm



Fermi-LAT

Widmo elektronów

Łączny pomiar strumienia e^+ i e^- (2017)

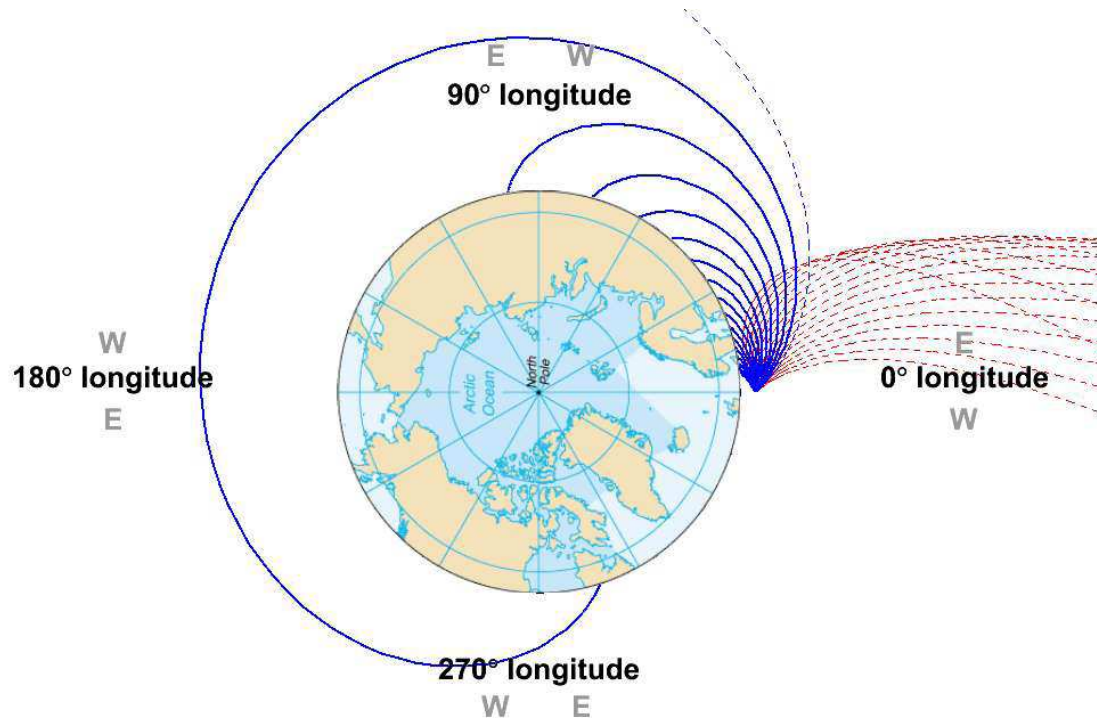


Wyraźna zmiana nachylenia widma dla $E_\gamma > 50 \text{ GeV} \Rightarrow$ nowa składowa ?

Fermi-LAT

Rozróżnienie e^\pm

Przy określonym ustawieniu satelity można jednak wykorzystać pole magnetyczne Ziemi. Zależnie od ustawienia satelity Ziemia może zasłaniać pole widzenia LAT.

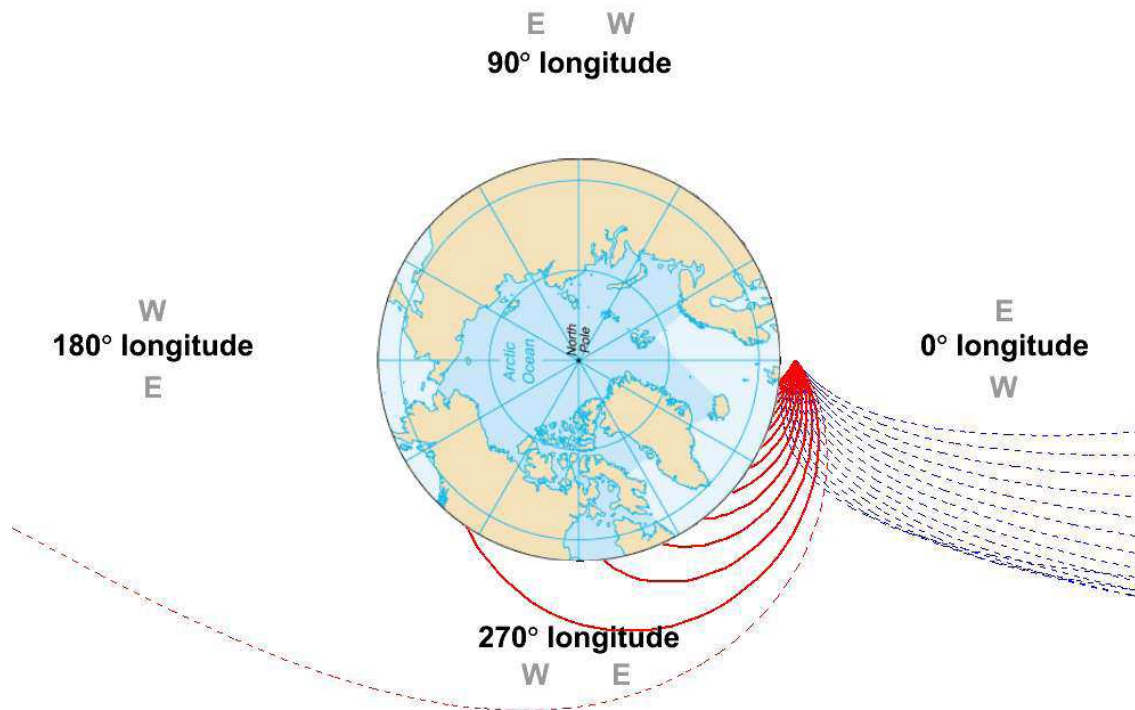


Jak satelita patrzy “na wschód” Ziemia ogranicza pole widzenia LAT dla **pozytonów**.

Fermi-LAT

Rozróżnienie e^\pm

Przy określonym ustawieniu satelity można jednak wykorzystać pole magnetyczne Ziemi. Zależnie od ustawienia satelity Ziemia może zasłaniać pole widzenia LAT.



Jak satelita patrzy “na wschód” Ziemia ogranicza pole widzenia LAT dla **pozytonów**.

Jak satelita patrzy “na zachód” Ziemia ogranicza pole widzenia LAT dla **elektronów**.

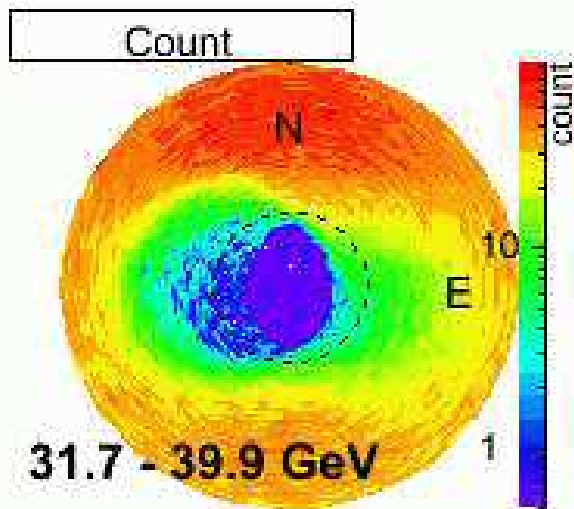
Porównując pomiary widma e^\pm dla różnych pozycji możemy wyznaczyć stosunek e^+/e^-

Fermi-LAT

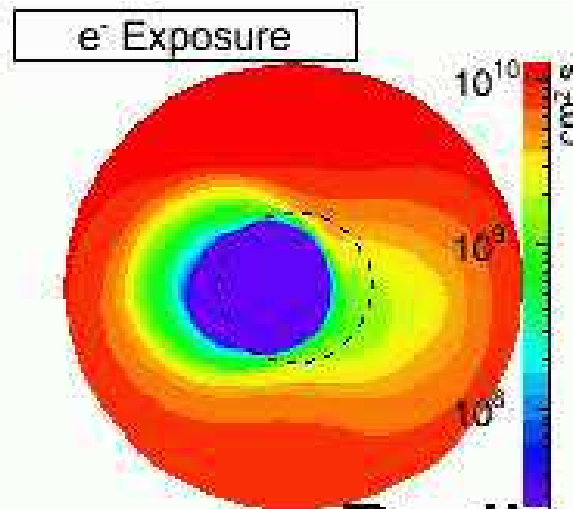
Rozróżnienie e^\pm

Wyniki detektora LAT

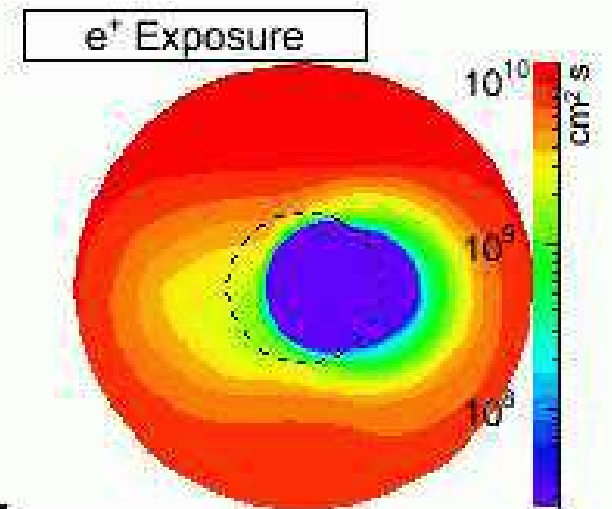
Rejestrowana częstość
cząstek naładowanych



Oczekiwany rozkład
dla elektronów



Oczekiwany rozkład
dla pozytonów



Preliminary

Linia przerywana odpowiada geometrycznemu cieniowi Ziemi.

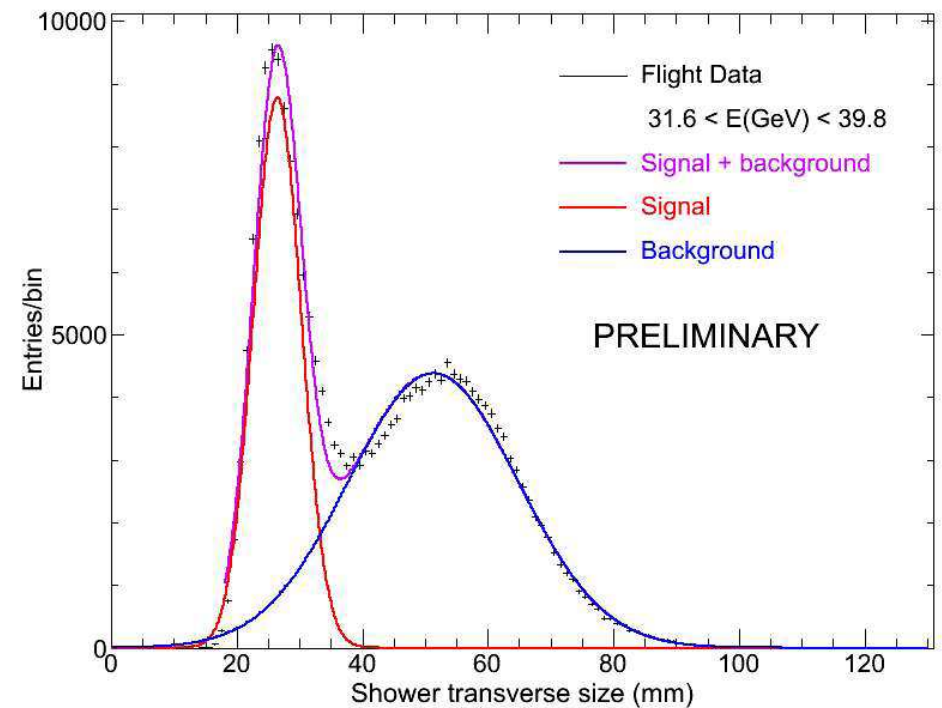
Pole magnetyczne przesuwia "cień" na zachód dla e^- , a na wschód dla e^+ .

Eliminacja tła protonów

Elektrony i pozytony nie są jedynymi rejestrowanymi cząstkami naładowanymi.

Dużą część stanowią protony, które można odróżnić od pozytonów na podstawie kształtu kaskady w kalorymetrze.

Rozkład szerokości kaskady dla przypadków bez selekcji ładunku



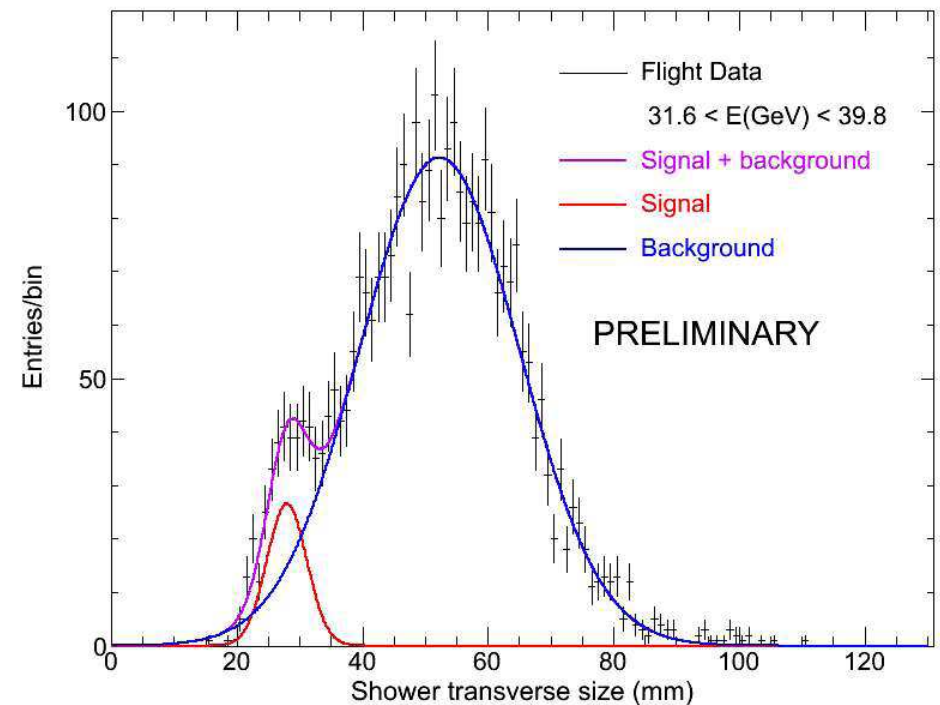
Eliminacja tła protonów

Elektrony i pozytony nie są jedynymi rejestrowanymi cząstkami naładowanymi.

Dużą część stanowią protony, które można odróżnić od pozytonów na podstawie kształtu kaskady w kalorymetrze.

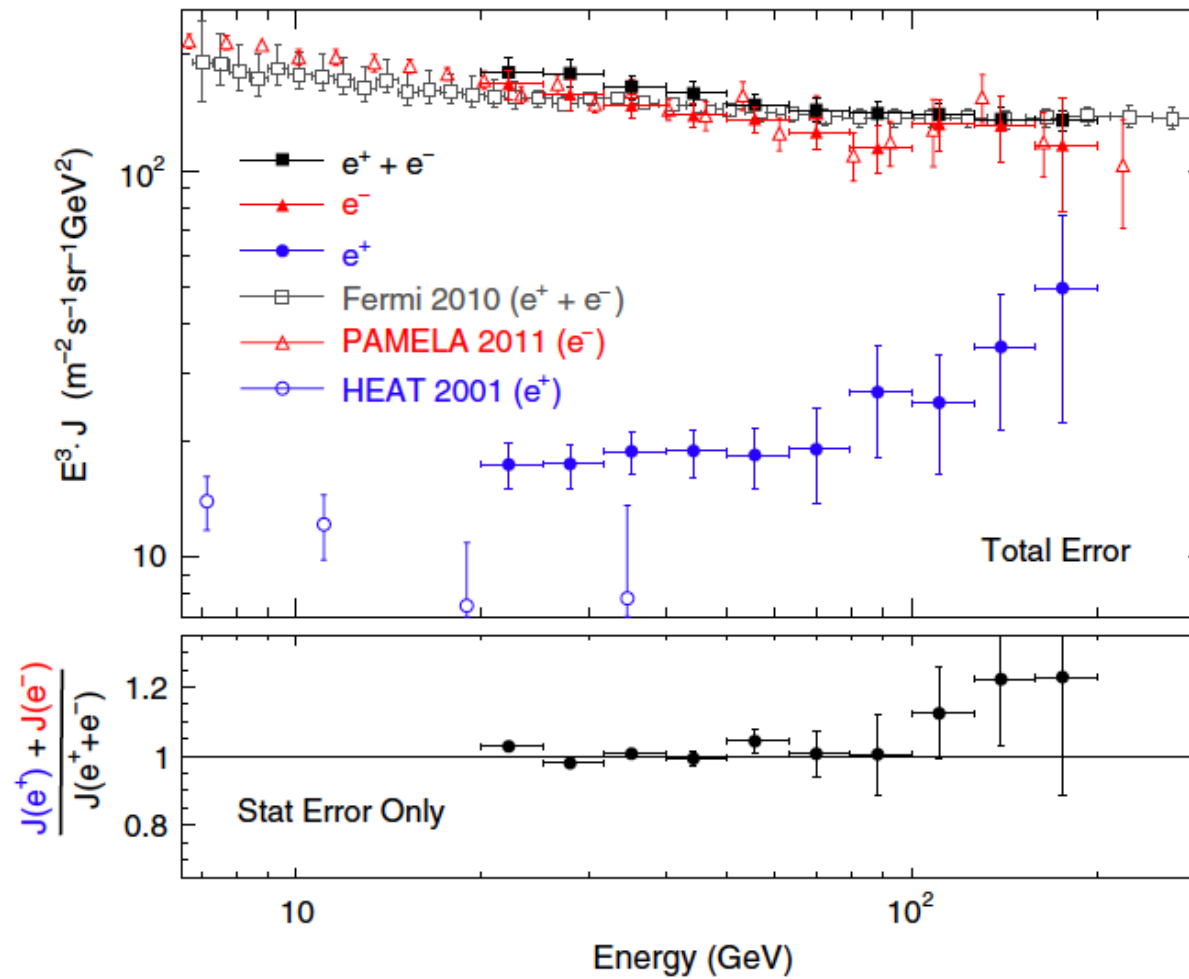
Udział pozytonów można wyznaczyć statystycznie na podstawie dopasowania

Rozkład szerokości kaskady dla przypadków uznanych za cząstki dodatnie



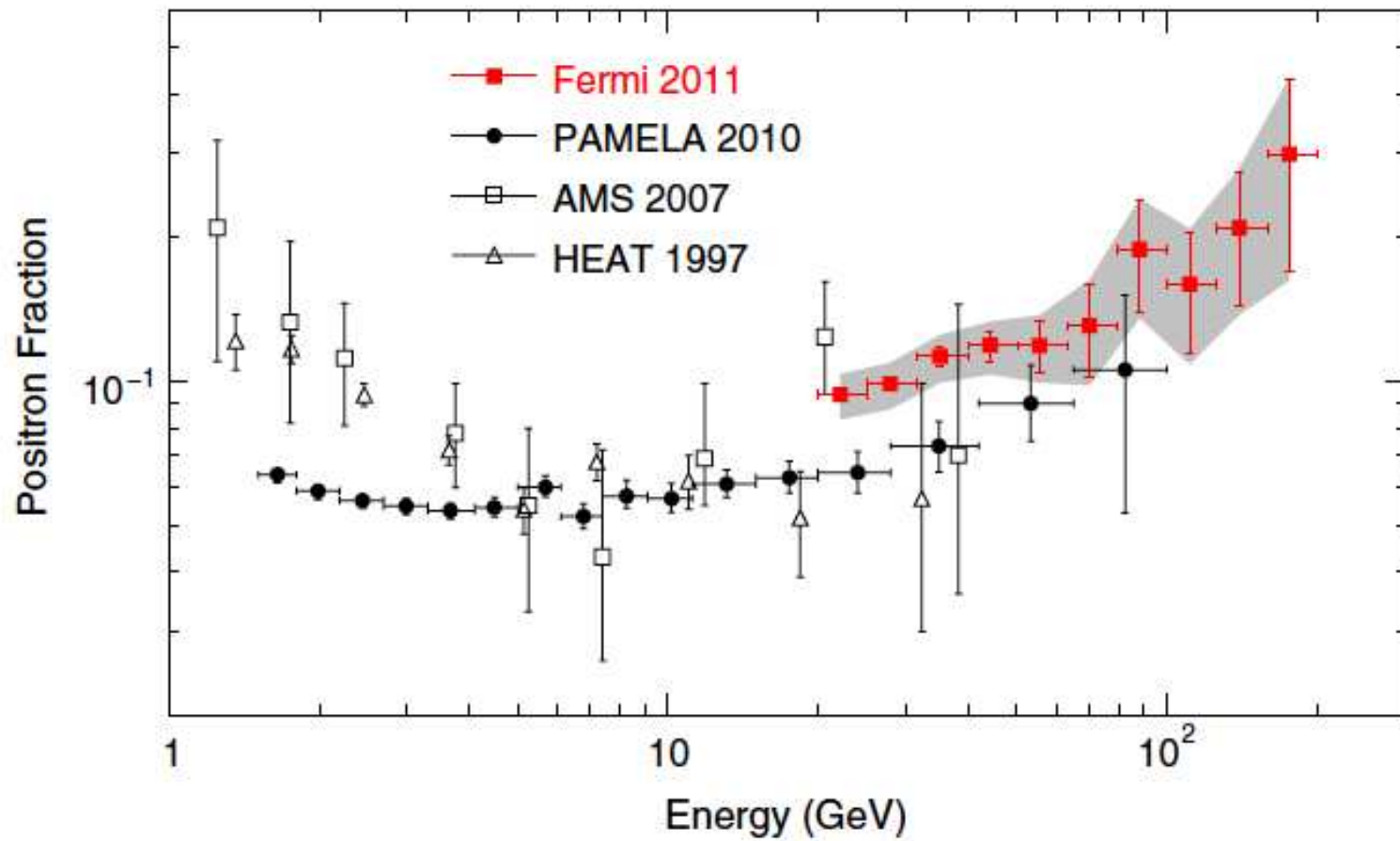
Fermi-LAT

Wyniki pomiaru e^\pm



Fermi-LAT

Wyniki pomiaru e^\pm



Detekcja pośrednia

PAMELA

Eksperyment na satelicie Resurs-DK1. Wystrzelony w 2006.

Główny cel: dokładny pomiar widma i składu promieniowania kosmicznego.



PAMELA

Detektor satelitalny

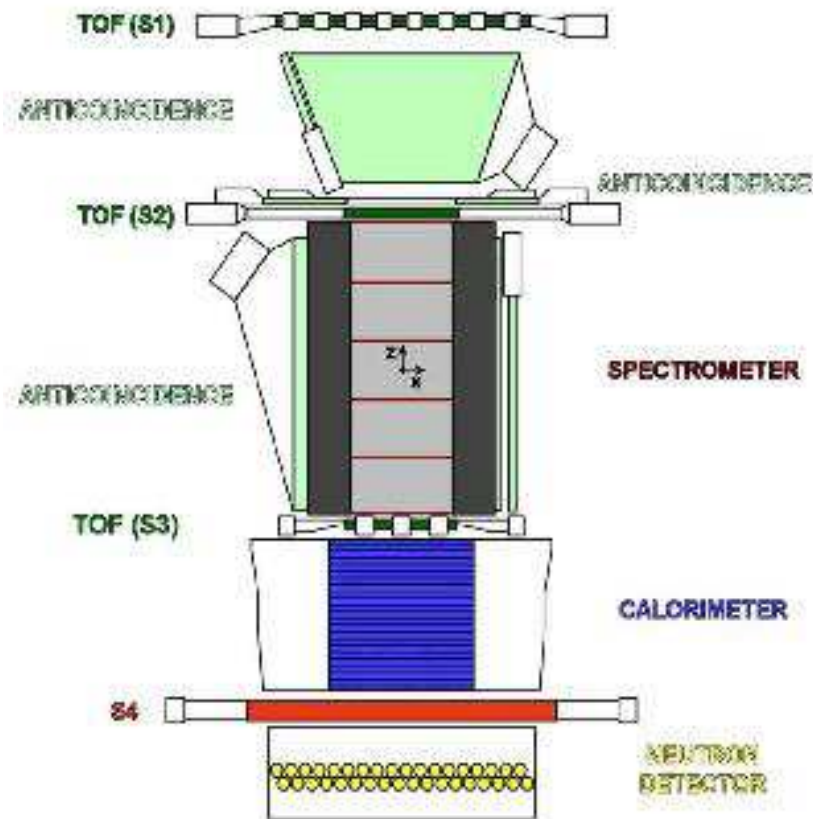


Zakładany zakres pomiarów:

- elektrony do 400 GeV
elektrony/pozytony do 2 TeV (bez ładunku)
- protony do 700 GeV
- antyprotony 80 MeV – 150 GeV
- pozytony 50 MeV – 270 GeV
- lekkie jądra do 200 GeV/n

PAMELA

Detektor satelitalny



Pomiar i identyfikacja wpadających cząstek podobnie jak w eksperymentach HEP.

Główne elementy detektora:

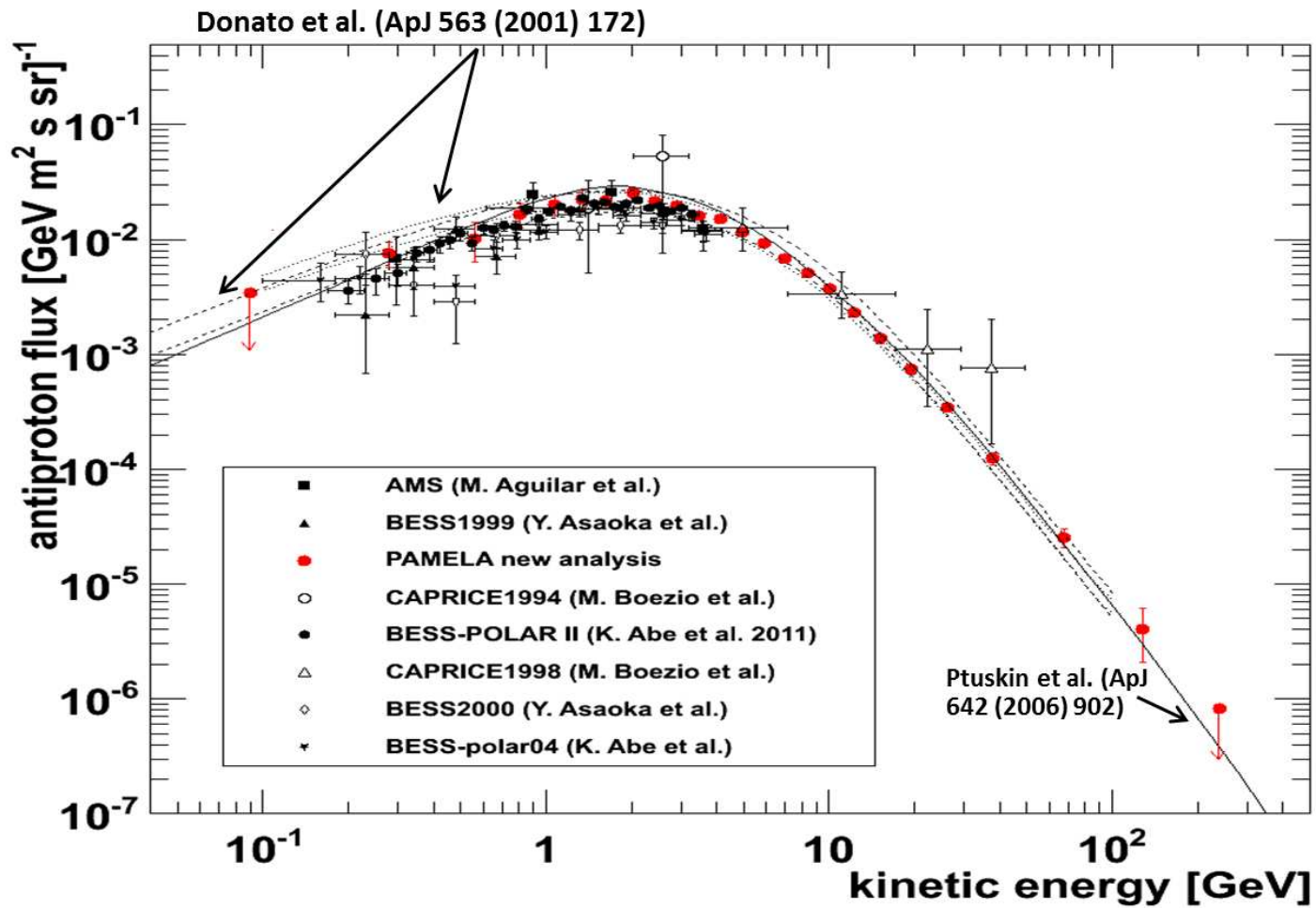
- Liczniki czasu przelotu (TOF) scyntylator + PMT
- spektrometr stały magnes i paskowe detektory krzemowe
- kalorymetr elektromagnetyczny wolfram i detektory krzemowe
- detektor neutronów

Rozmiar: $130 \times 70 \times 70 \text{ cm}^3$, 470 kg.

Zasilanie: 360 W.

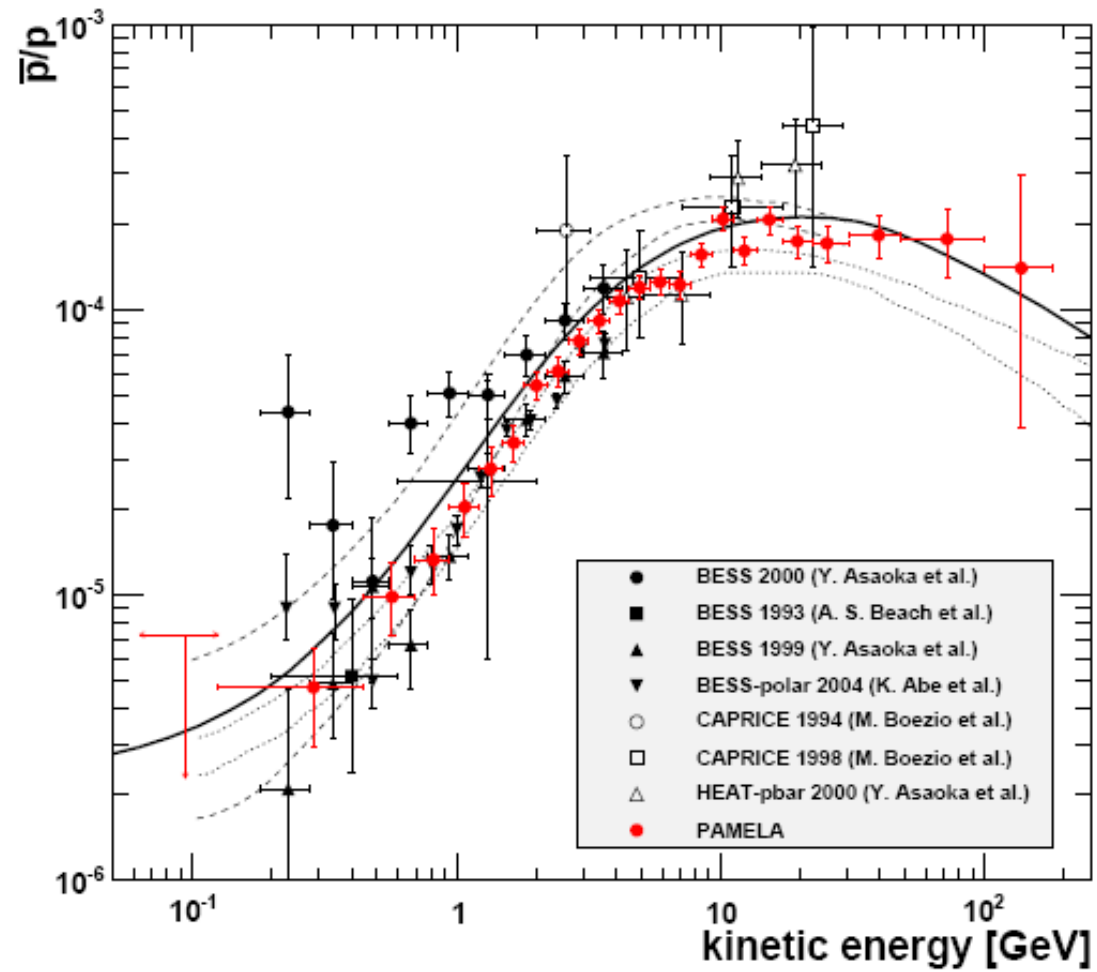
PAMELA

Wyniki pomiaru \bar{p}



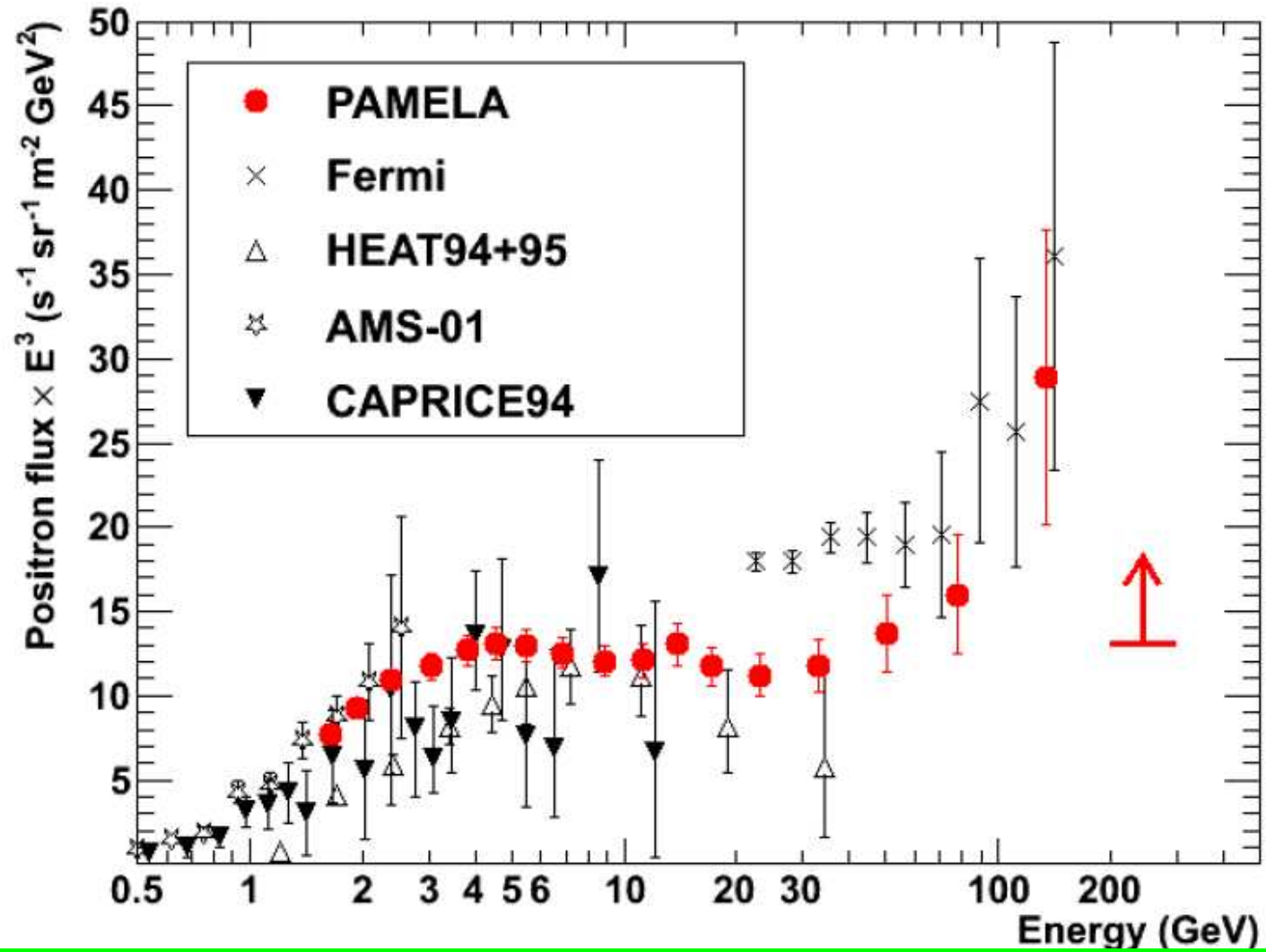
PAMELA

Wyniki pomiaru \bar{p}



PAMELA

Wyniki pomiaru e^+



PAMELA

Wyniki pomiaru e^+

