

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
- Eksperyment Fermi-LAT

Ciemna materia

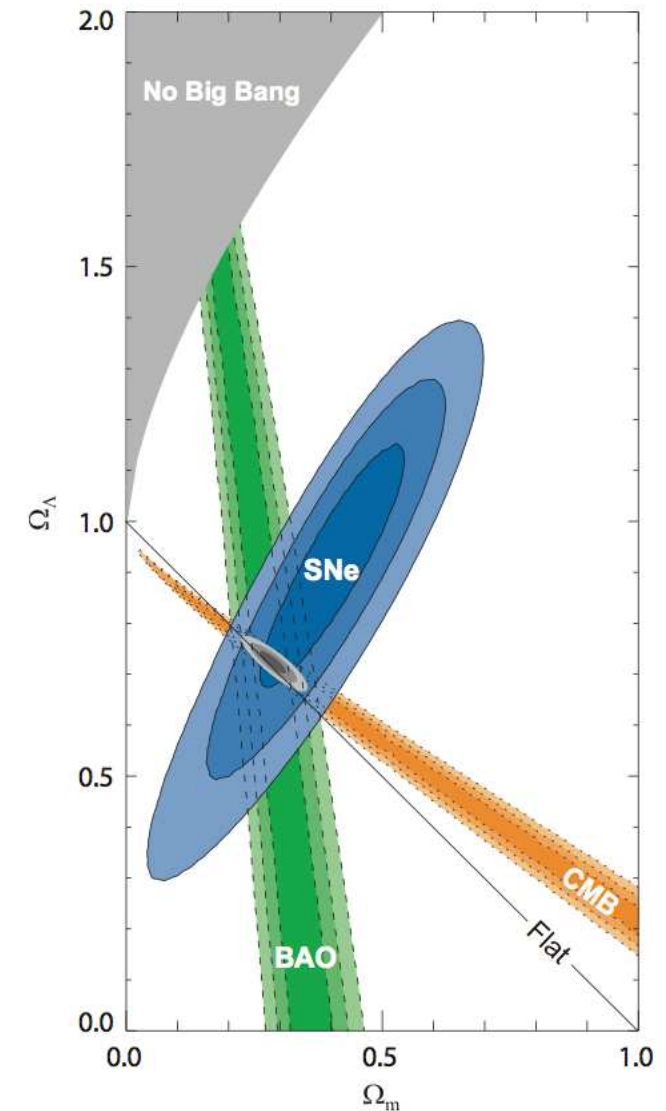
Przesłanki eksperymentalne

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:

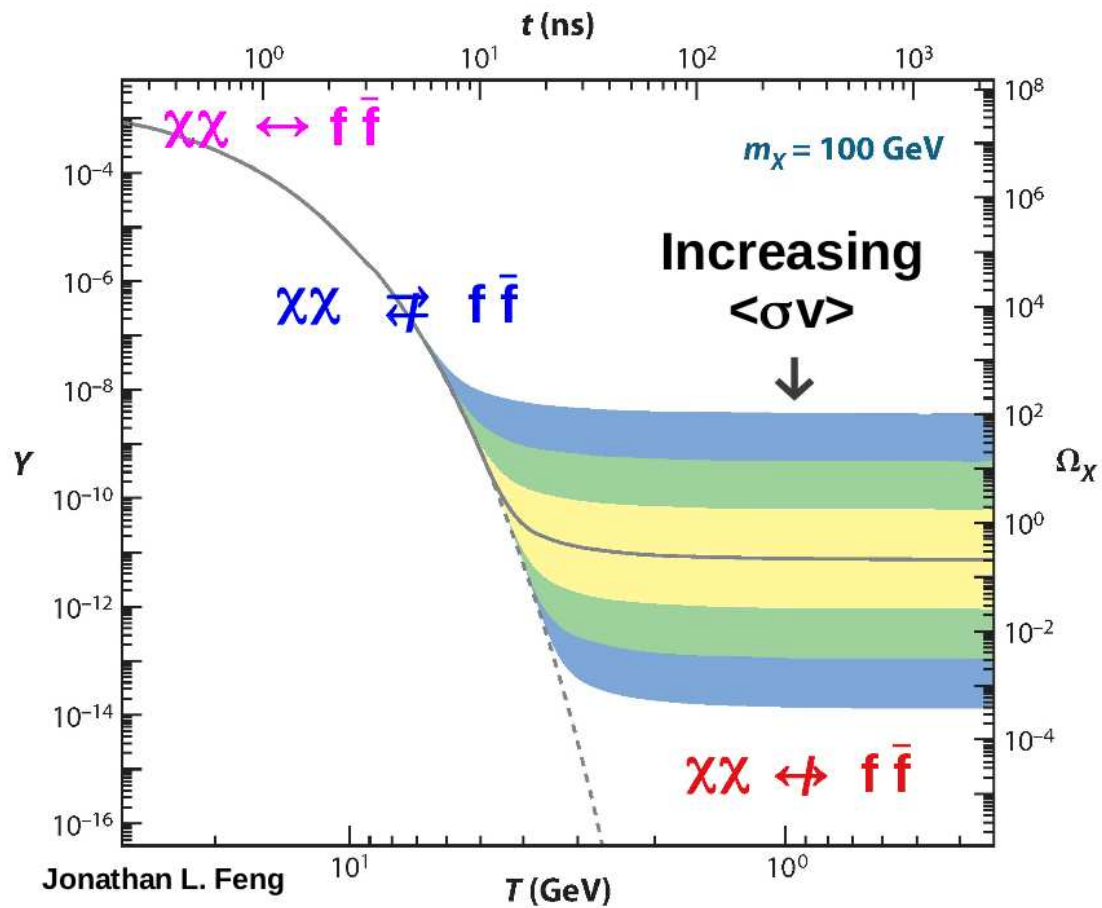
- jest “zimna” (nierelatywistyczna)
- jest niebarionowa
- jest stabilna (nie rozpada się)
- bardzo słabo oddziałuje (tylko grawitacyjnie?)
- daje wkład ok. $1/4$ gęstości krytycznej ($5 \times$ materia barionowa)

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:

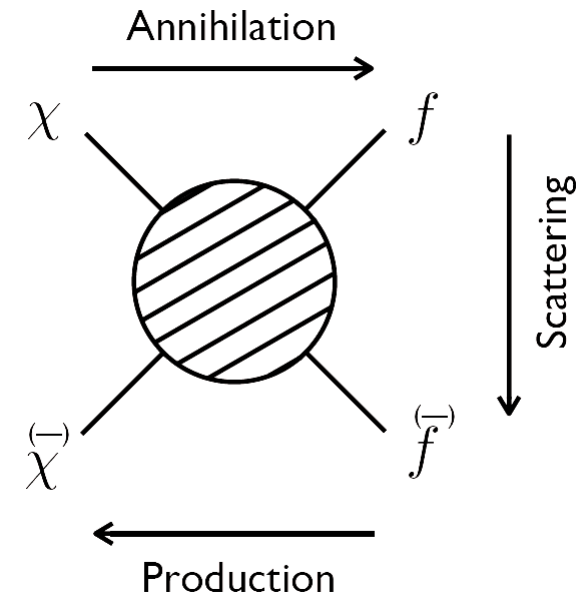
$$\Omega_{\chi} h^2 \approx \frac{3 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^3/\text{s}}{\langle\sigma v\rangle} \sim 0.12$$

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

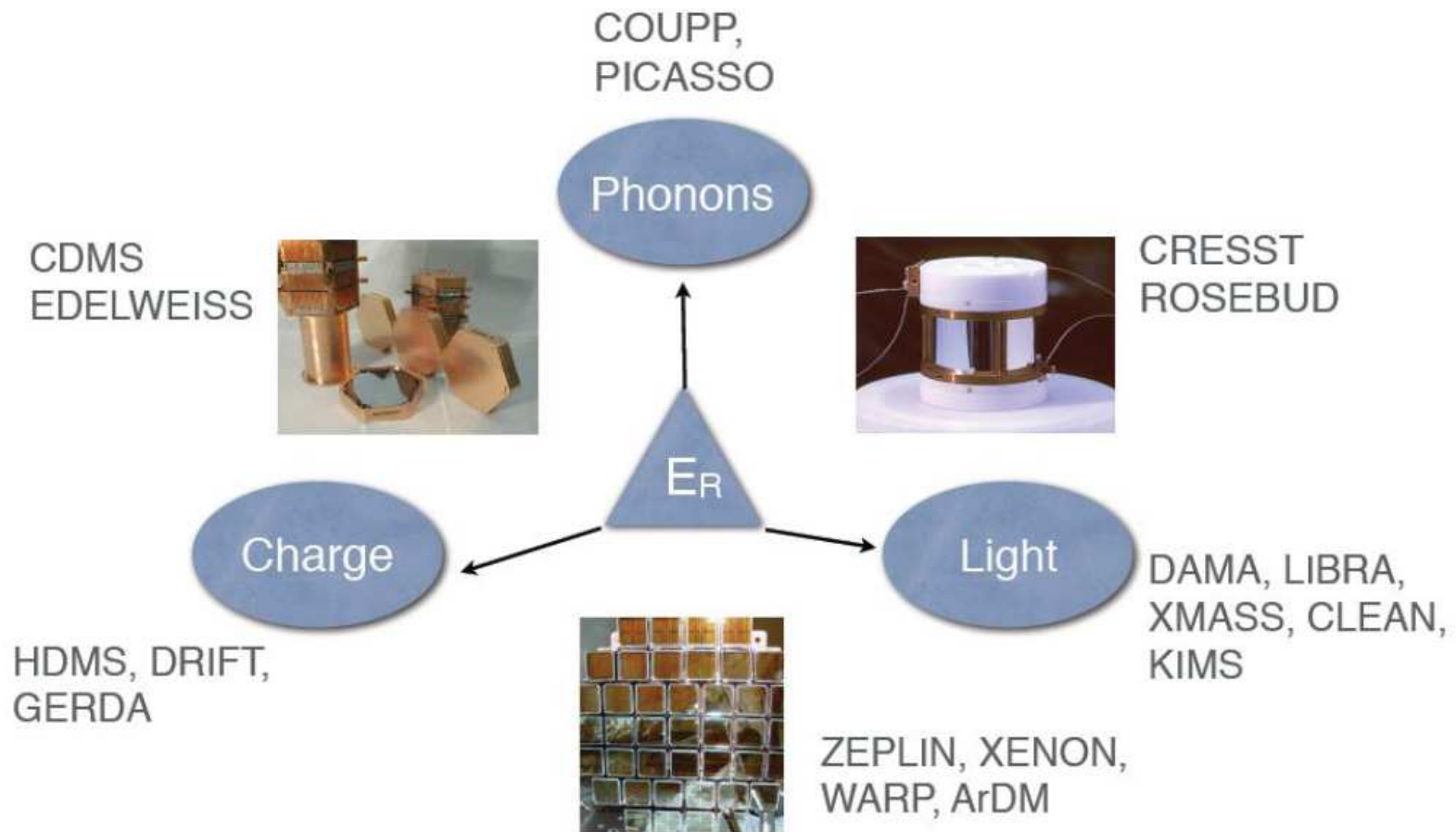


Detekcja bezpośrednia

Kanały detekcji

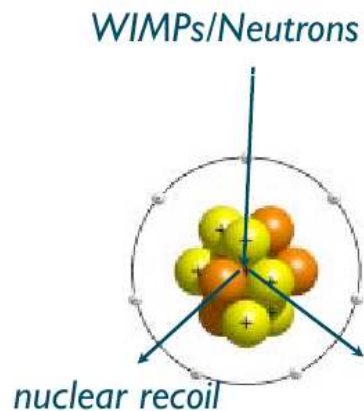
Mierząc niezależnie jonizację, scyntylacje i ciepło \Rightarrow eliminacja tła.

Różne eksperymenty przyjęły różną strategię

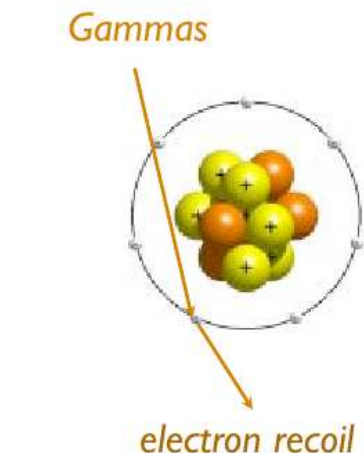


Detekcja bezpośrednia

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.

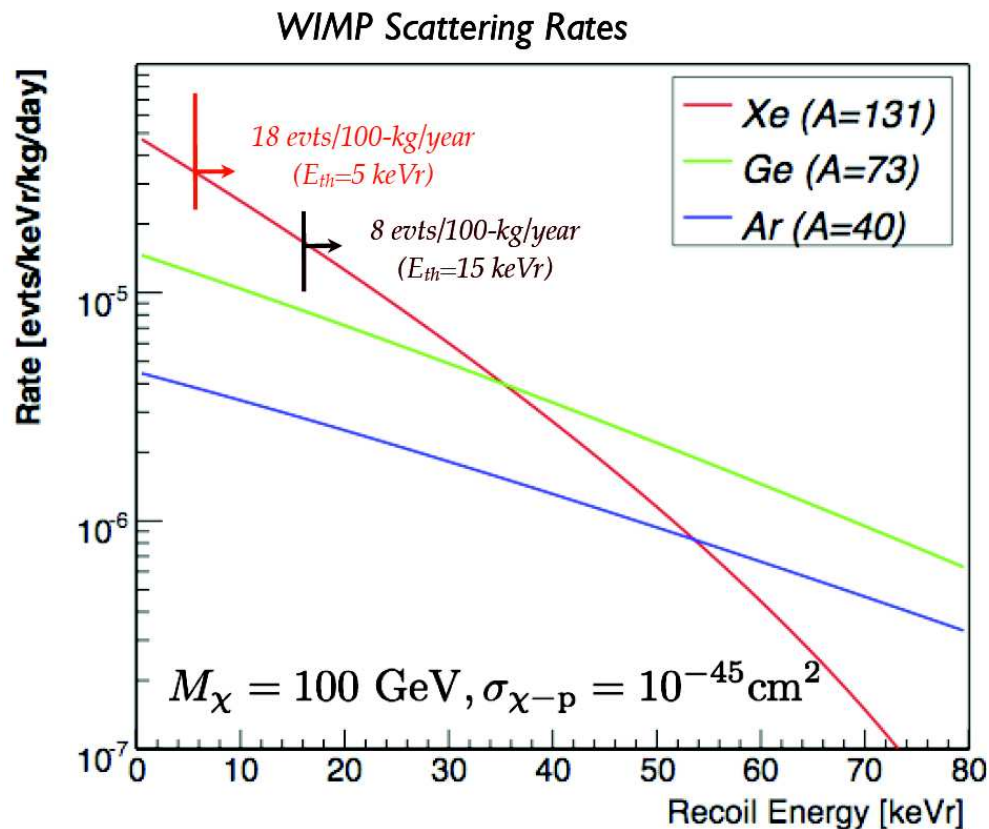
Łatwiej zbudować duży detektor ograniczając się do pomiaru scyntylacji i jonizacji. Jest to możliwe m.in. w ciekłych gazach szlachetnych.

Detekcja bezpośrednia

Ciekłe gazy szlachetne

Zalety:

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

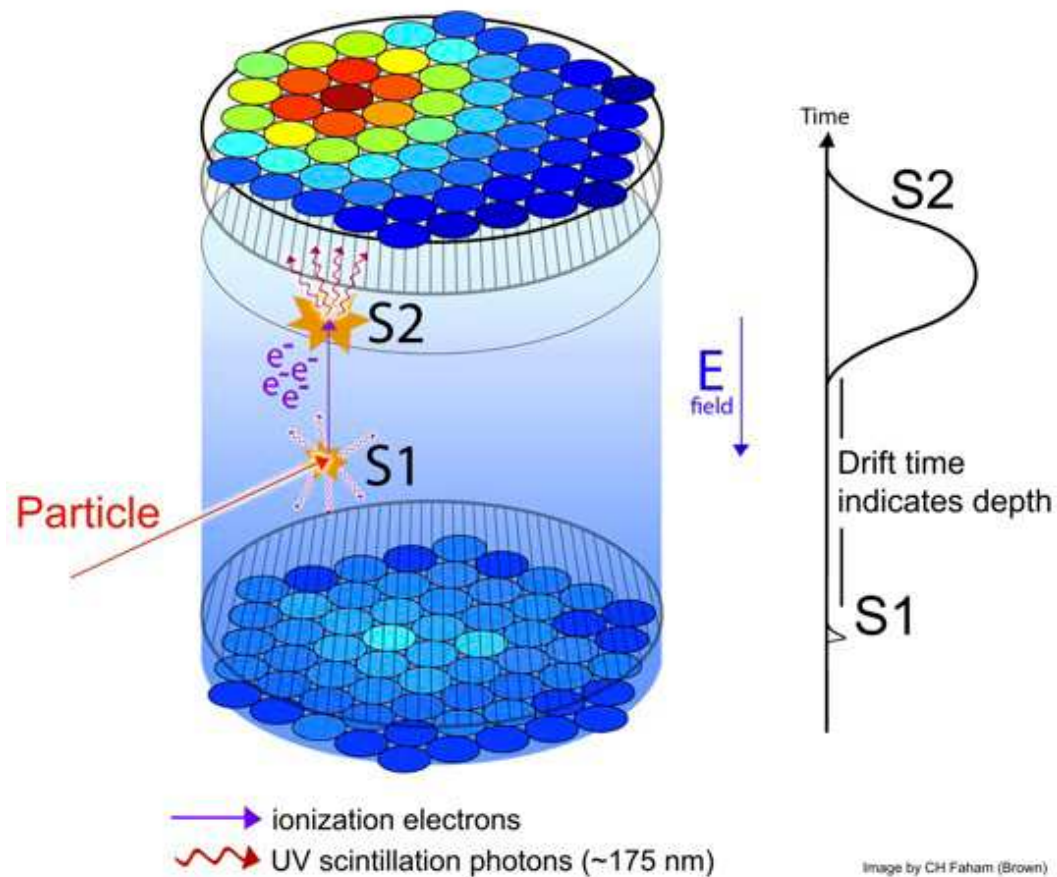


Najczęściej wybierany ksenon:

- najwyższe prawdopodobieństwo detekcji (przy niskim progu)
- niska radioaktywność
- 50% jąder nieparzystych
⇒ 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**.

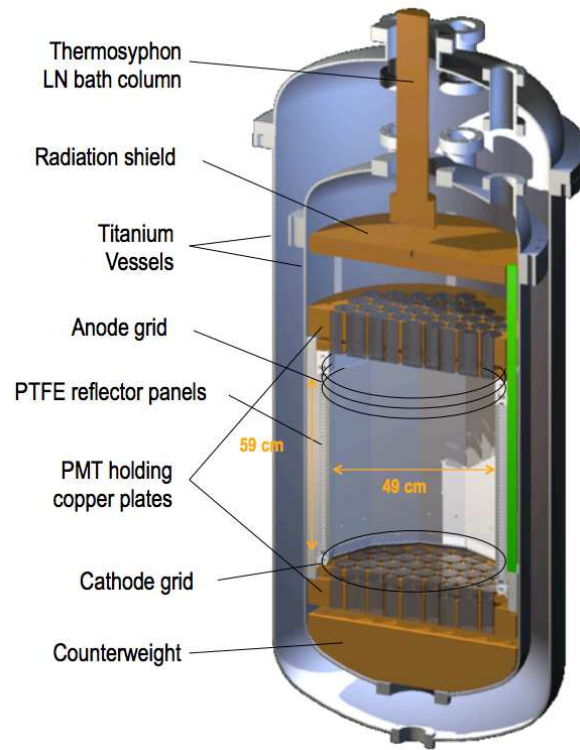
Detekcja bezpośrednia

Dwufazowa komora projekcji czasowej

Najsilniejsze ograniczenia na DM pochodzą obecnie z eksperymentów

LUX (Large Underground Xenon experiment)

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

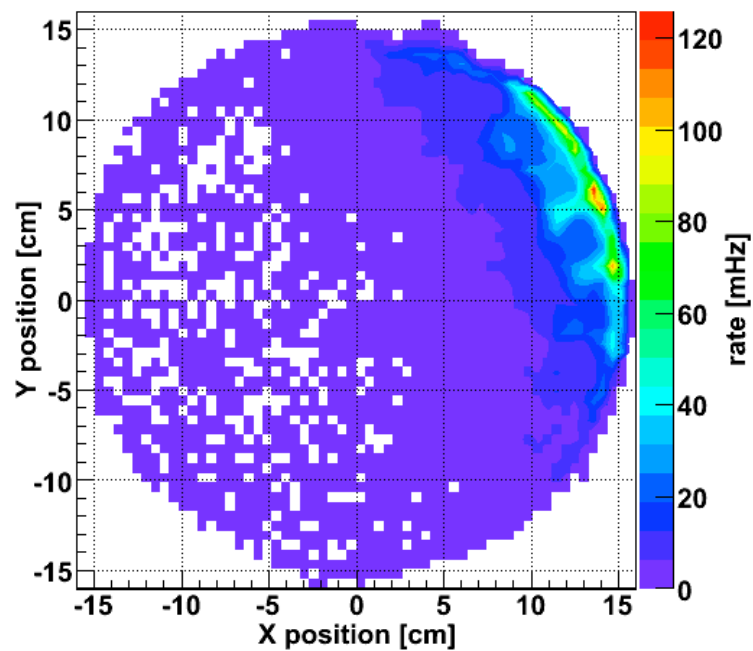
- 161 kg ciekłego Xe
62 kg w obszarze aktywnym
- 242 fotopowielacze
- LNGS (Gran Sasso), Włochy (1400 m)

Detekcja bezpośrednia

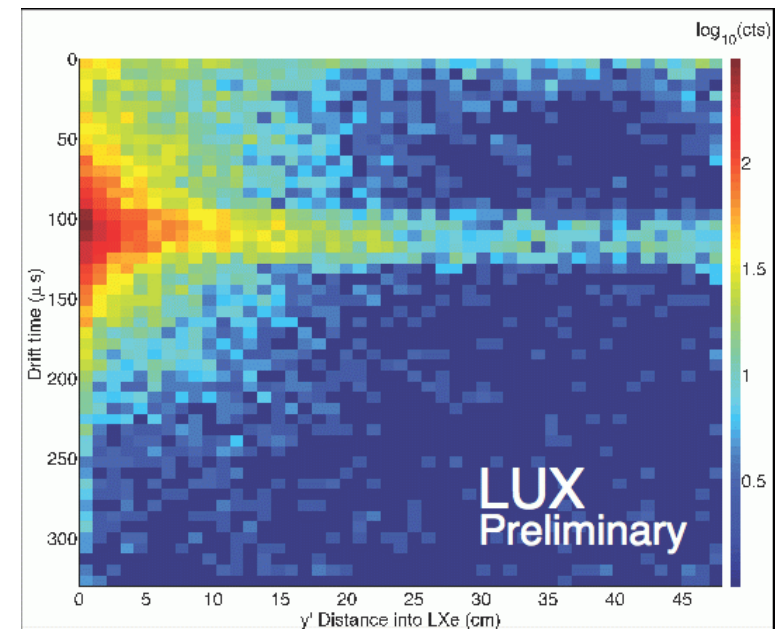
Dwufazowa komora projekcji czasowej

Możliwość rekonstrukcji pozycji punktu zderzenia

Źródło γ przy bocznej ścianie:



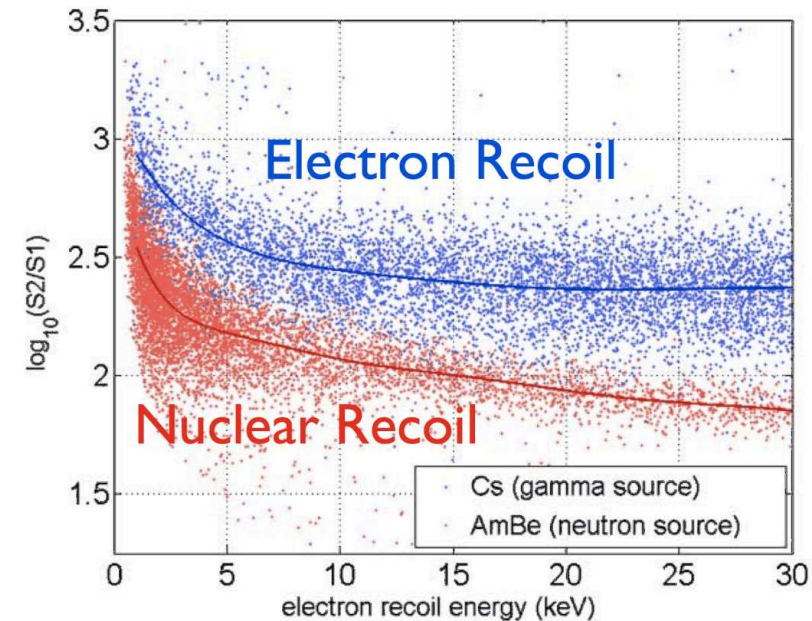
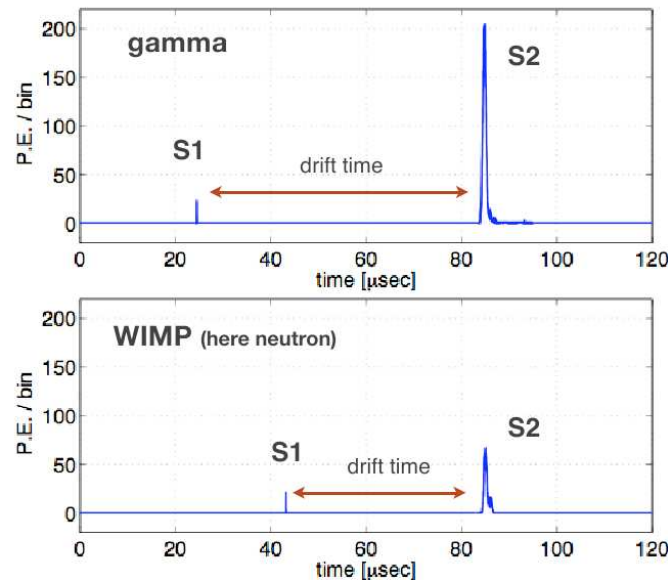
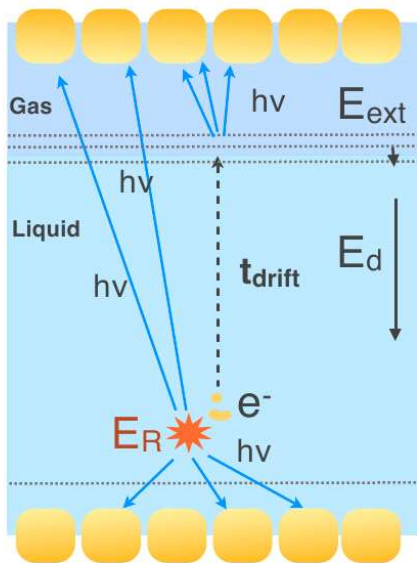
Wiązka neutronów:



Detekcja bezpośrednia

Dwufazowa komora projekcji czasowej

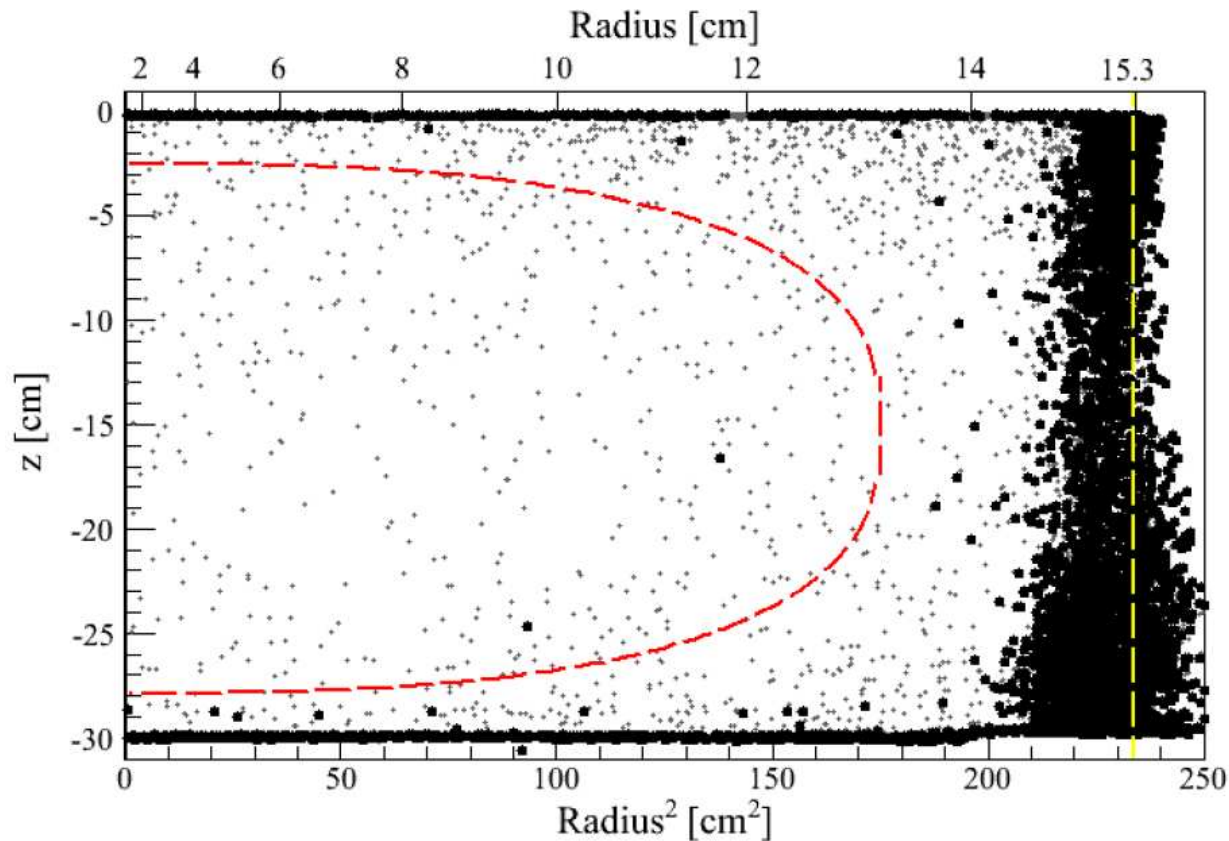
Pomiar scyntytacji i jonizacji daje możliwość odróżnienia oddziaływania na jądrze (WIMP) od rozprożeń na elektronach (γ)



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

Detekcja bezpośrednia

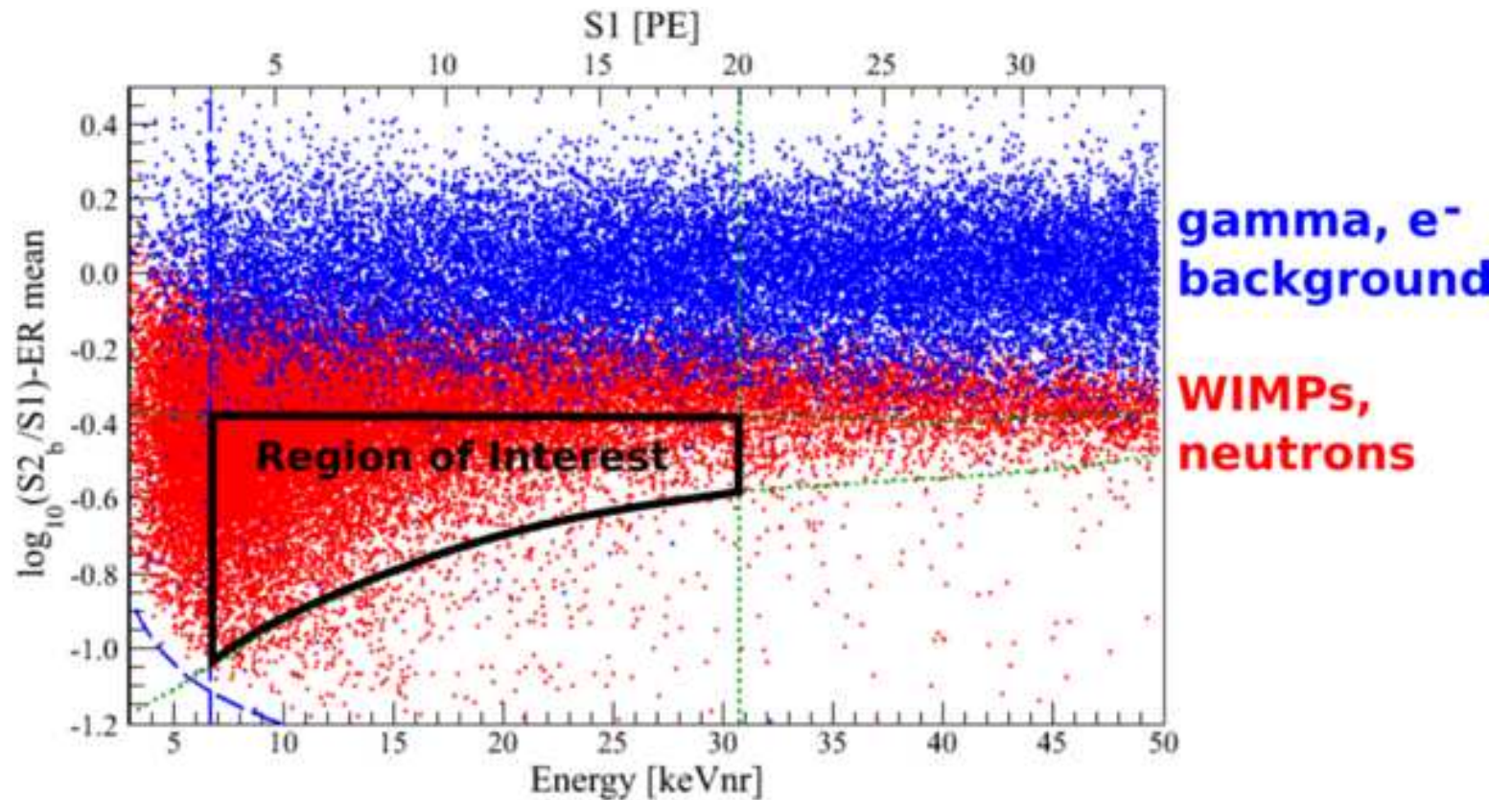
Wyniki Xenon100



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

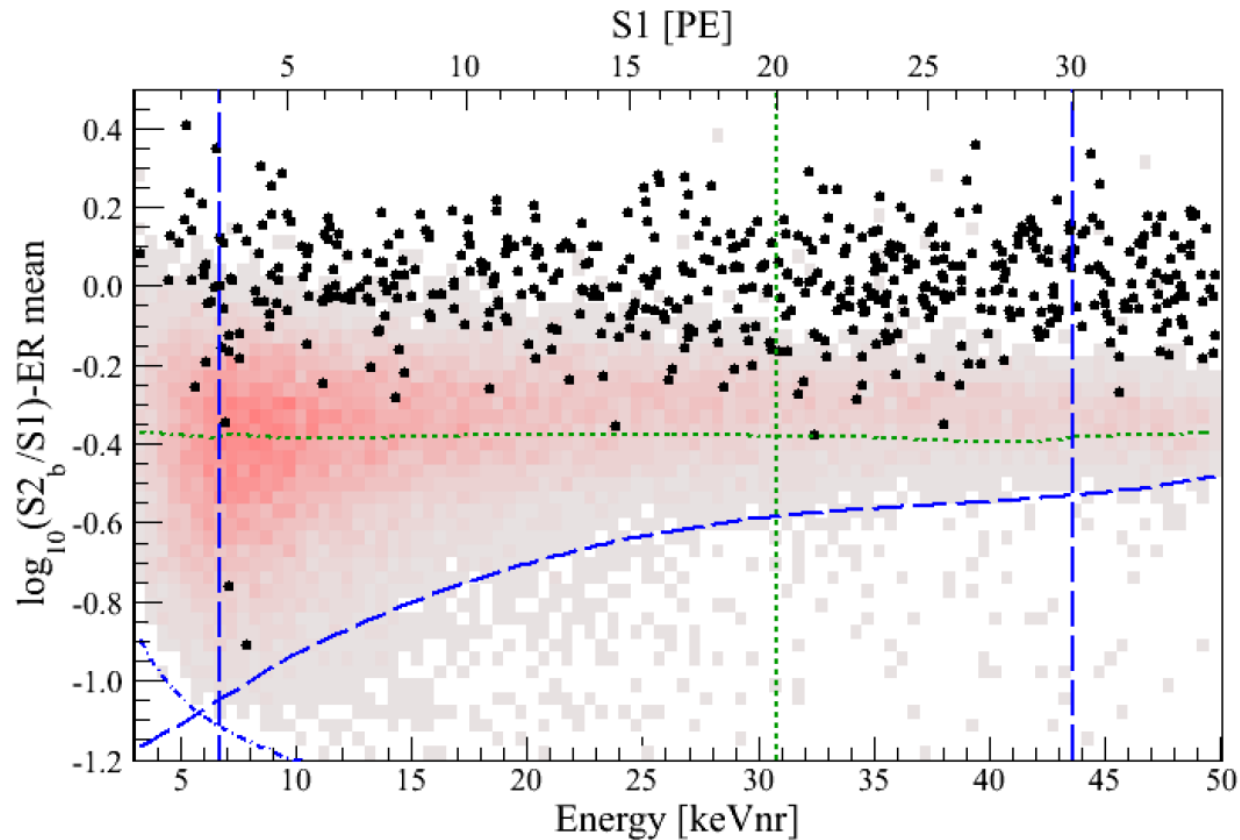
Detekcja bezpośrednia

Wyniki Xenon100



Detekcja bezpośrednia

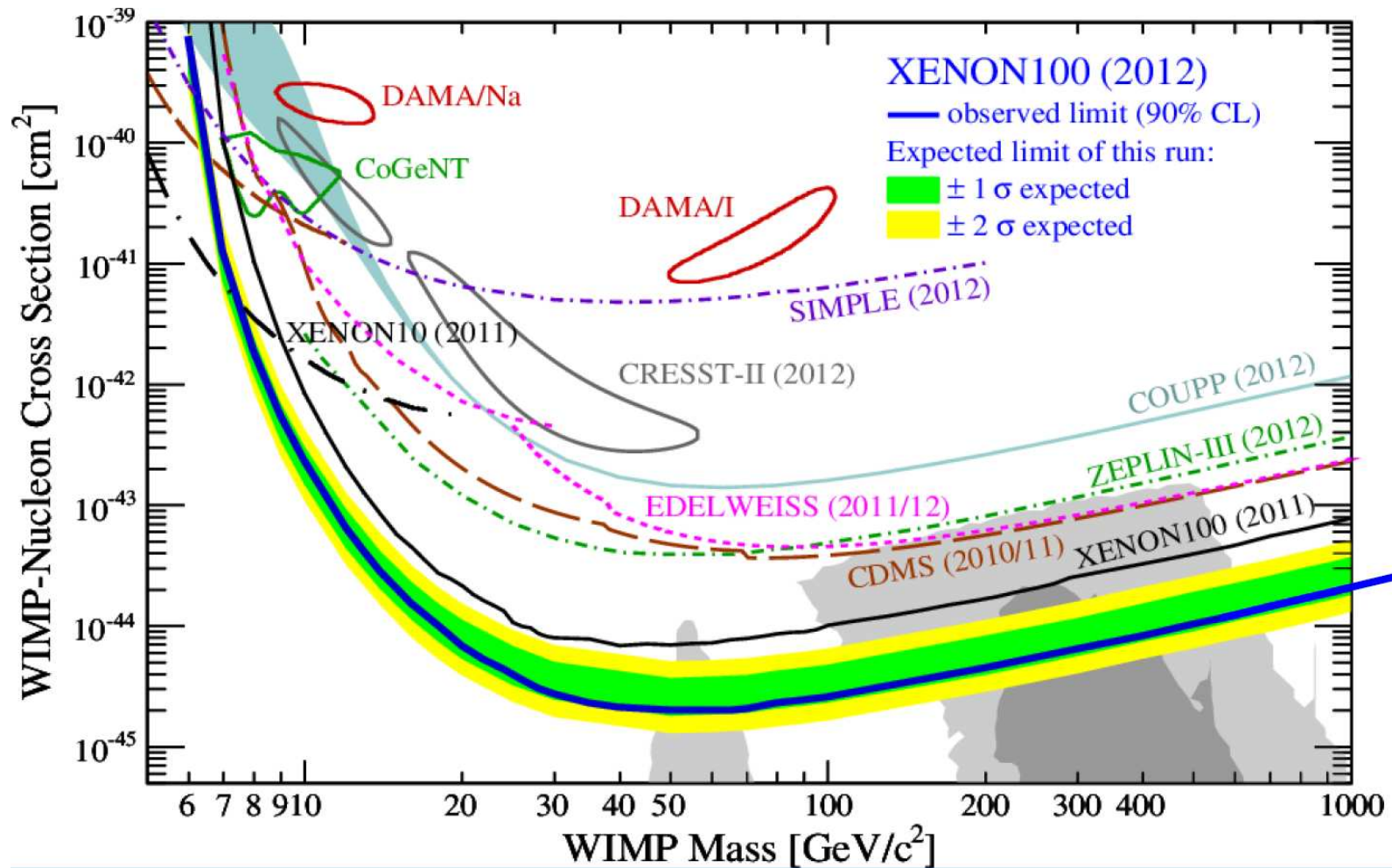
Wyniki Xenon100



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

Wyniki Xenon100

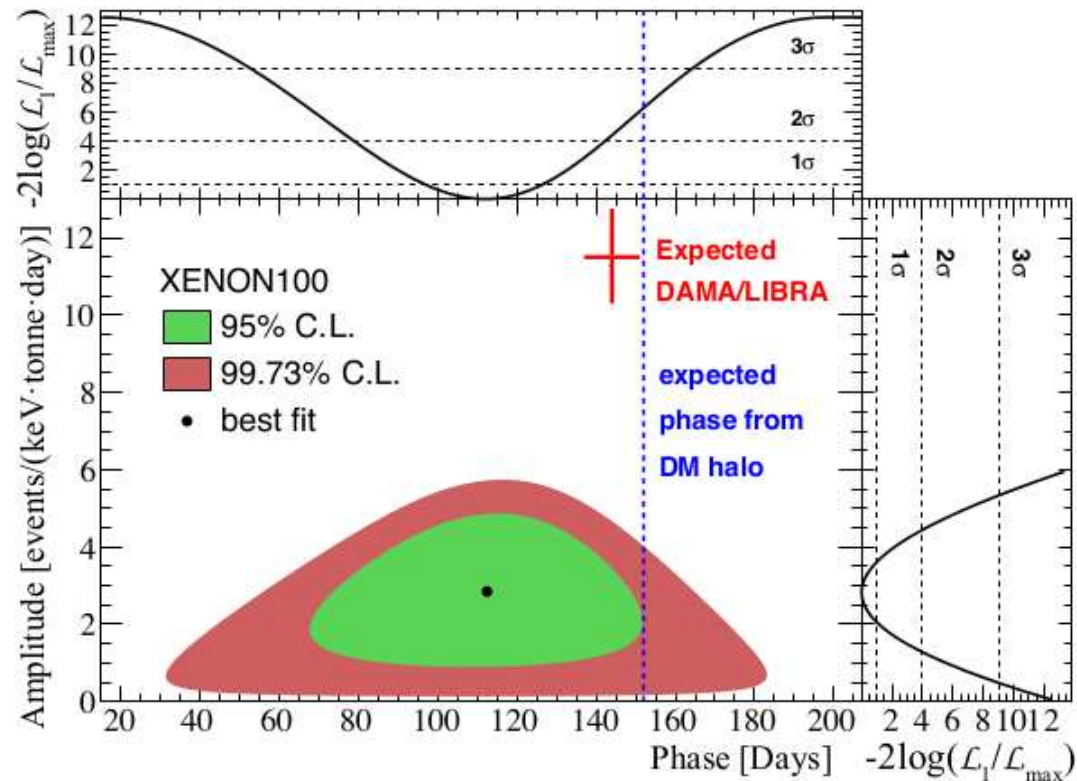


Detekcja bezpośrednia

Wyniki Xenon100

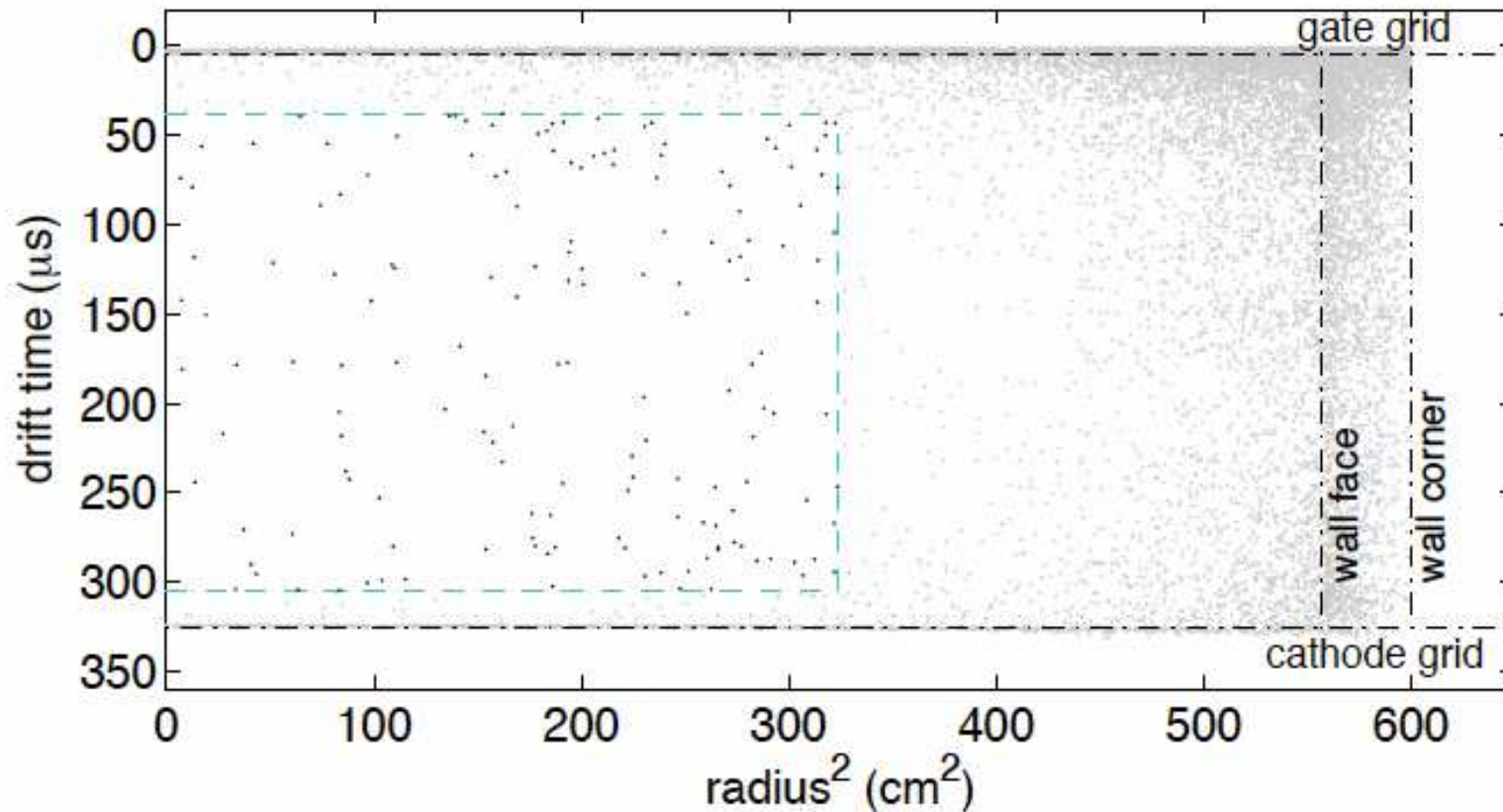
Wyniki wykluczają też istnienie modulacji sezonowych, na które wskazywał eksperyment DAMA/LIBRA.

Dopasowanie dla $T=1$ rok:



Detekcja bezpośrednia

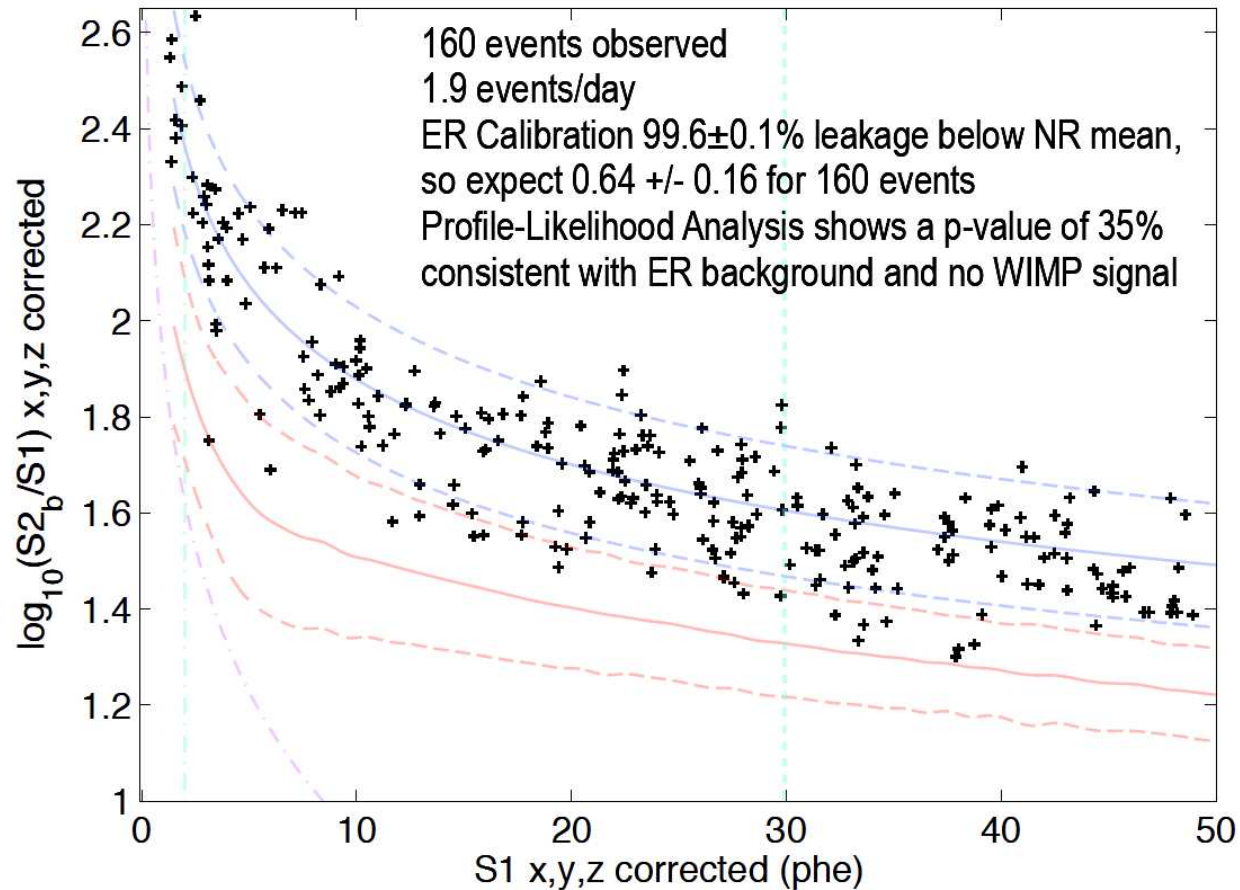
Wyniki LUX



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

Detekcja bezpośrednia

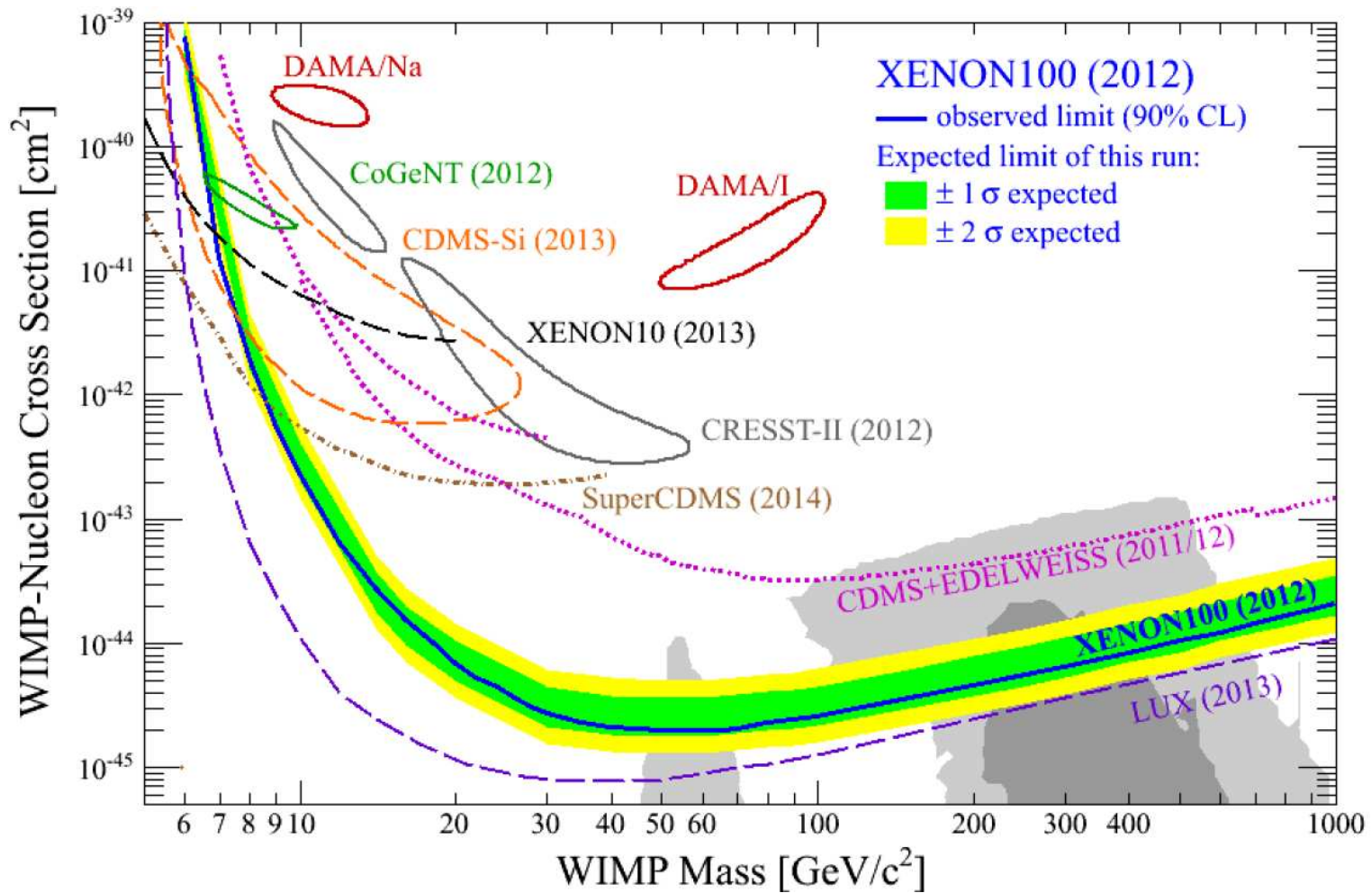
Wyniki LUX



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

Detekcja bezpośrednia

Wyniki LUX

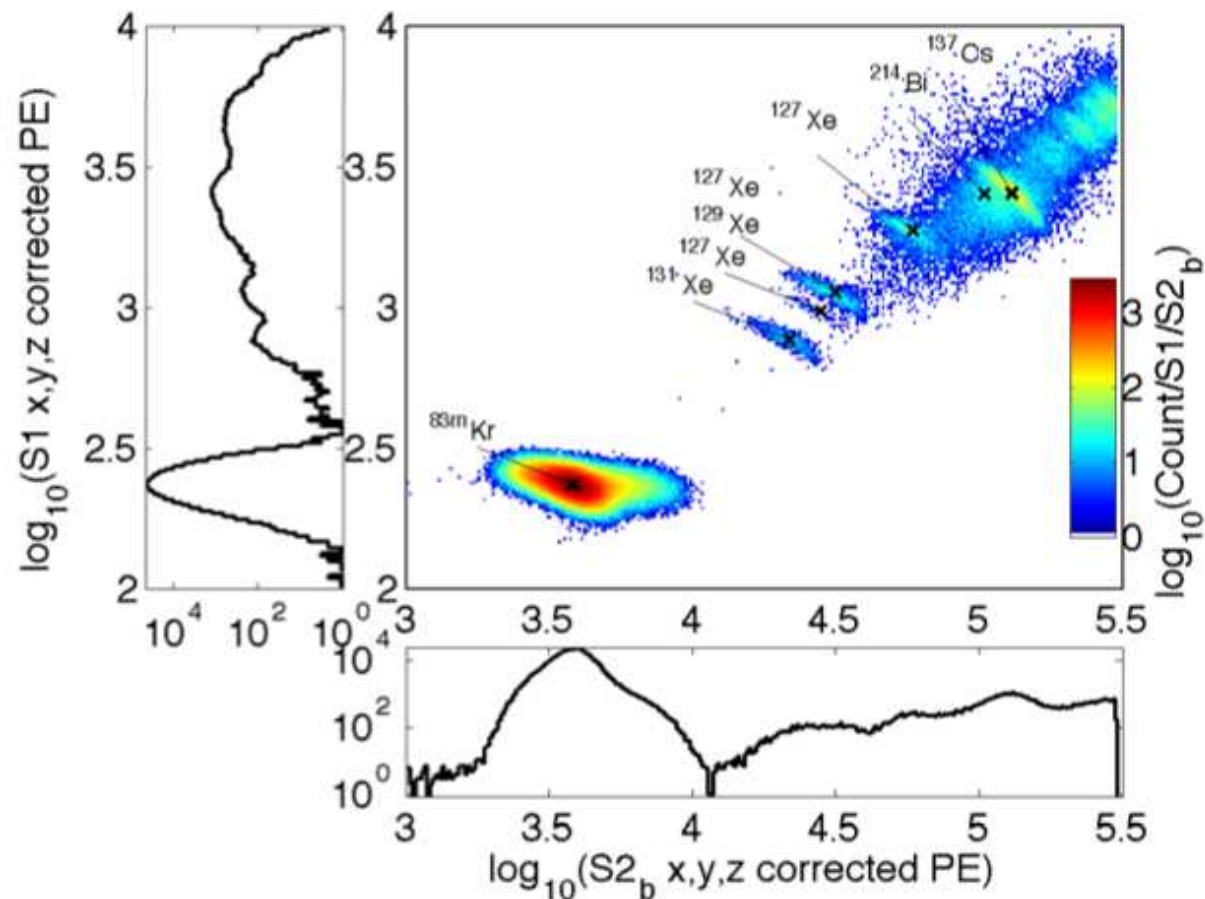


Detekcja bezpośrednia

Wyniki LUX

Reanaliza danych 2013: nowa kalibracja detektora.

Wyniki kalibracji z wykorzystaniem źródeł γ :

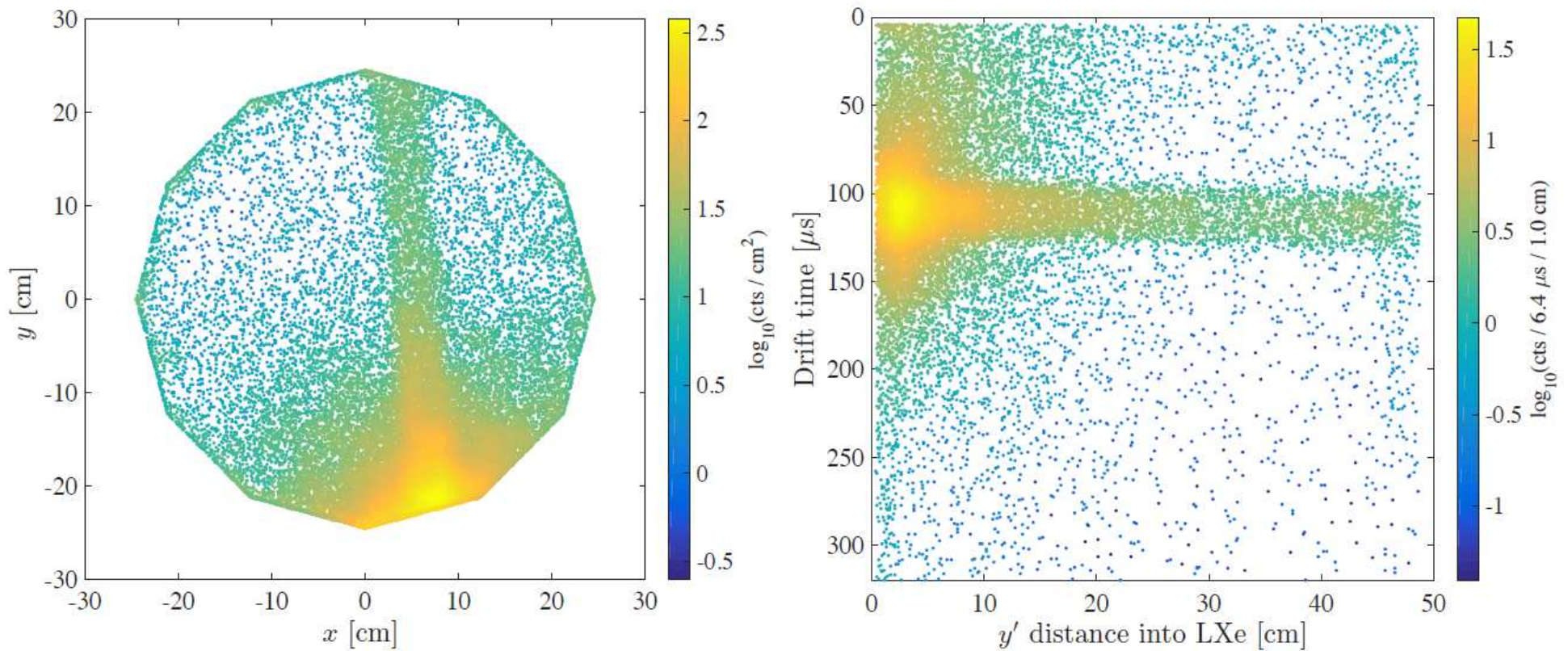


Detekcja bezpośrednia

Wyniki LUX

Reanaliza danych 2013: nowa kalibracja detektora.

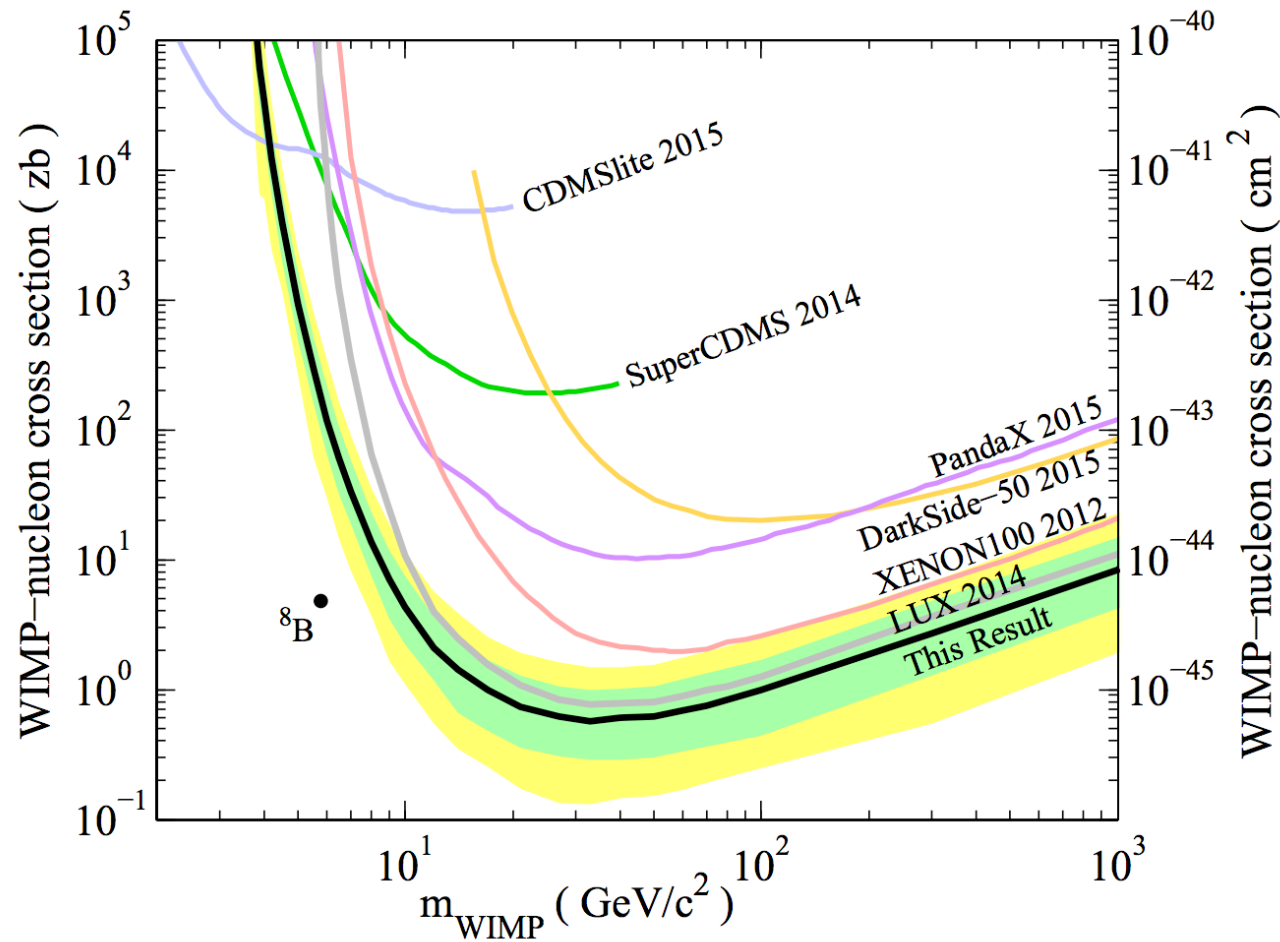
Kalibracja z wykorzystaniem źródła neutronów (generator D-D):



Detekcja bezpośrednia

Wyniki LUX

Wyniki przedstawione w grudniu 2015 (“This analysis”):



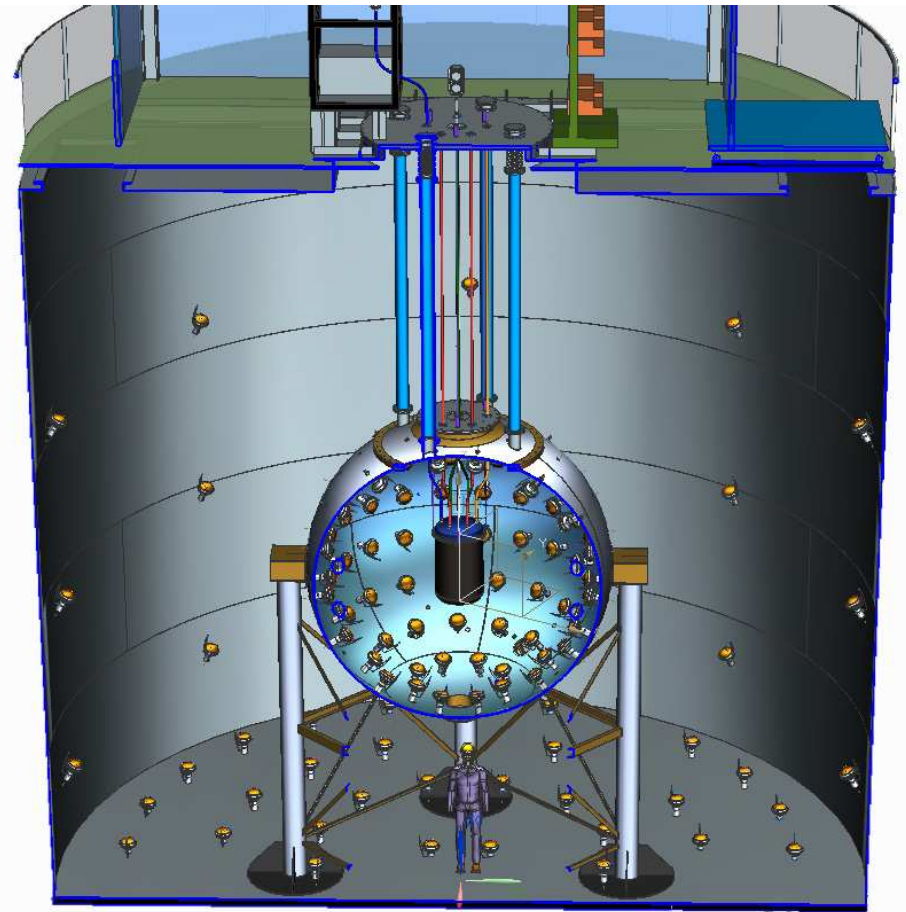
Detekcja bezpośrednia

DarkSide-50 @LNGS

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

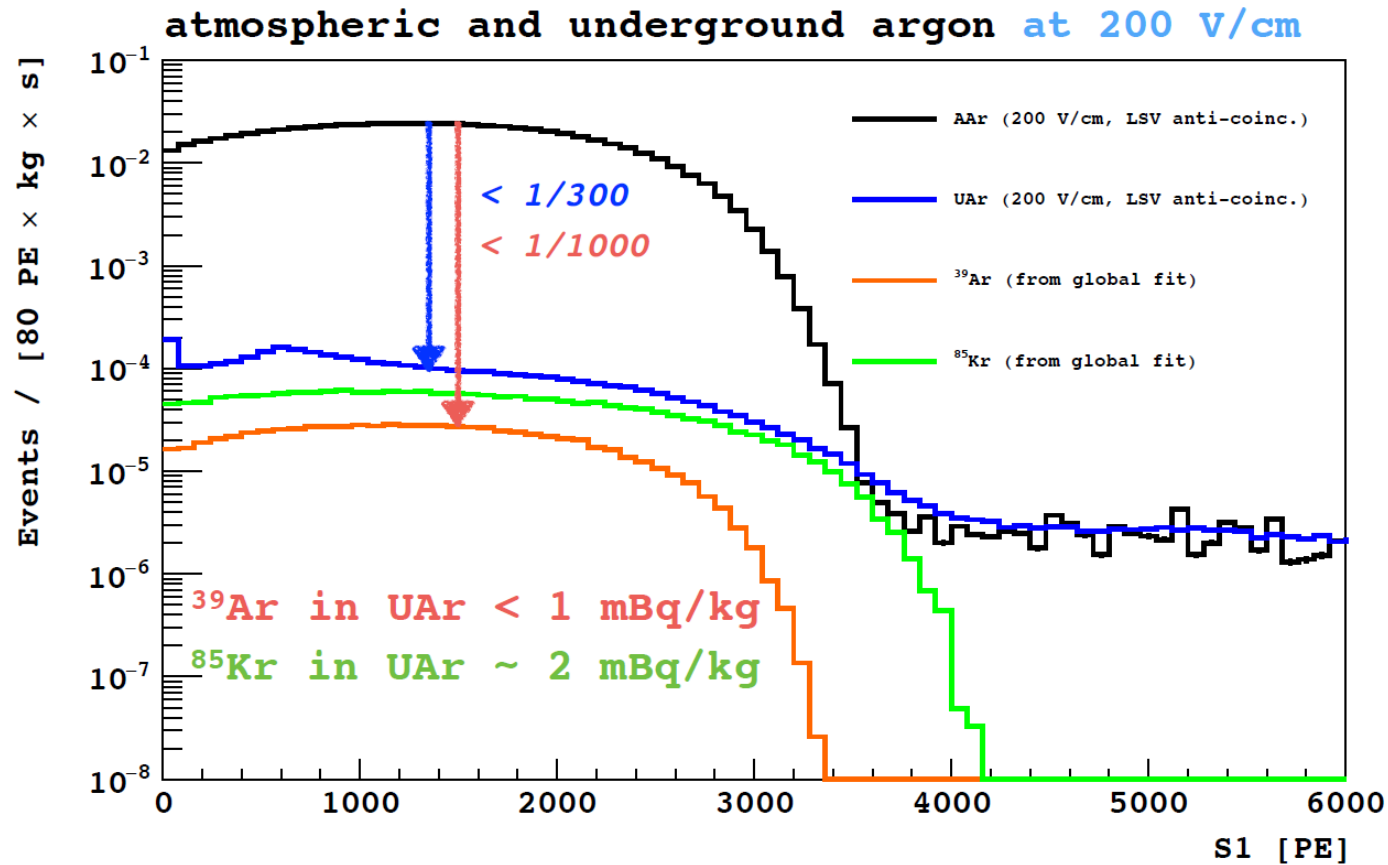
Niestety tylko 153 kg argonu
(46 kg objętości aktywnej)...



Detekcja bezpośrednia

DarkSide-50

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

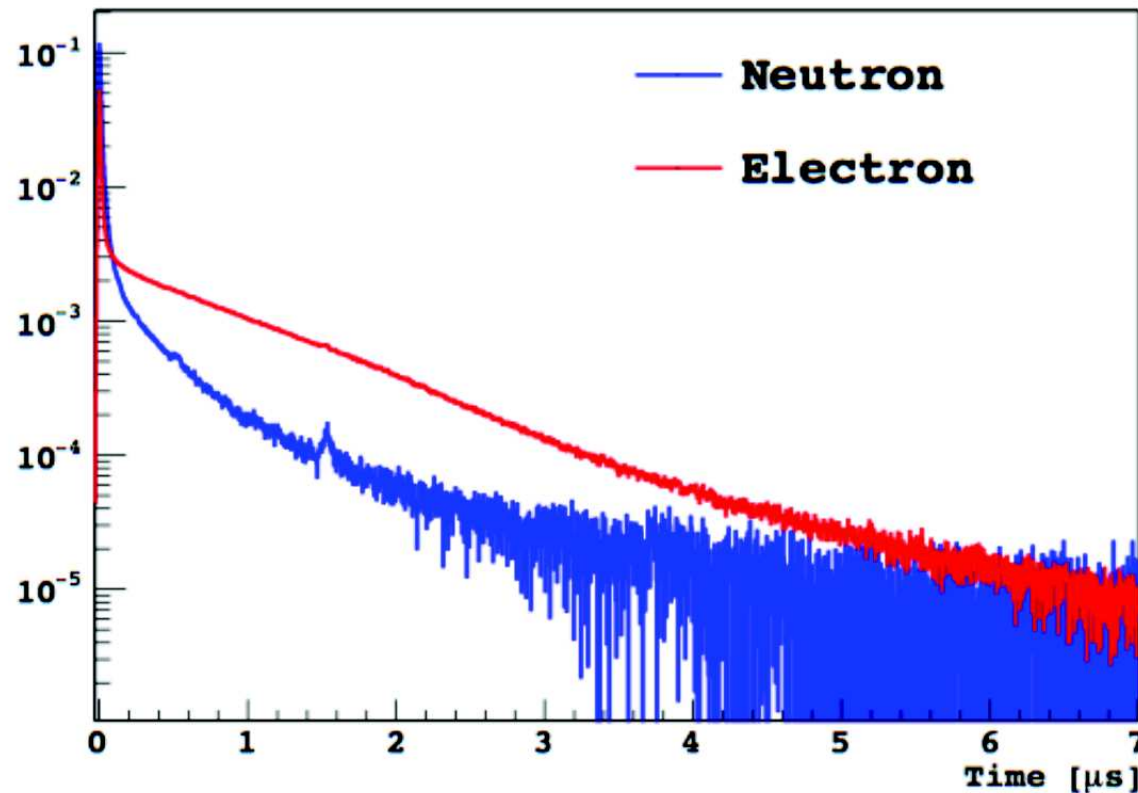


Detekcja bezpośrednia

DarkSide-50

Dodatkowa możliwość odróżnienia sygnału od tła na podstawie kształtu impulsu.

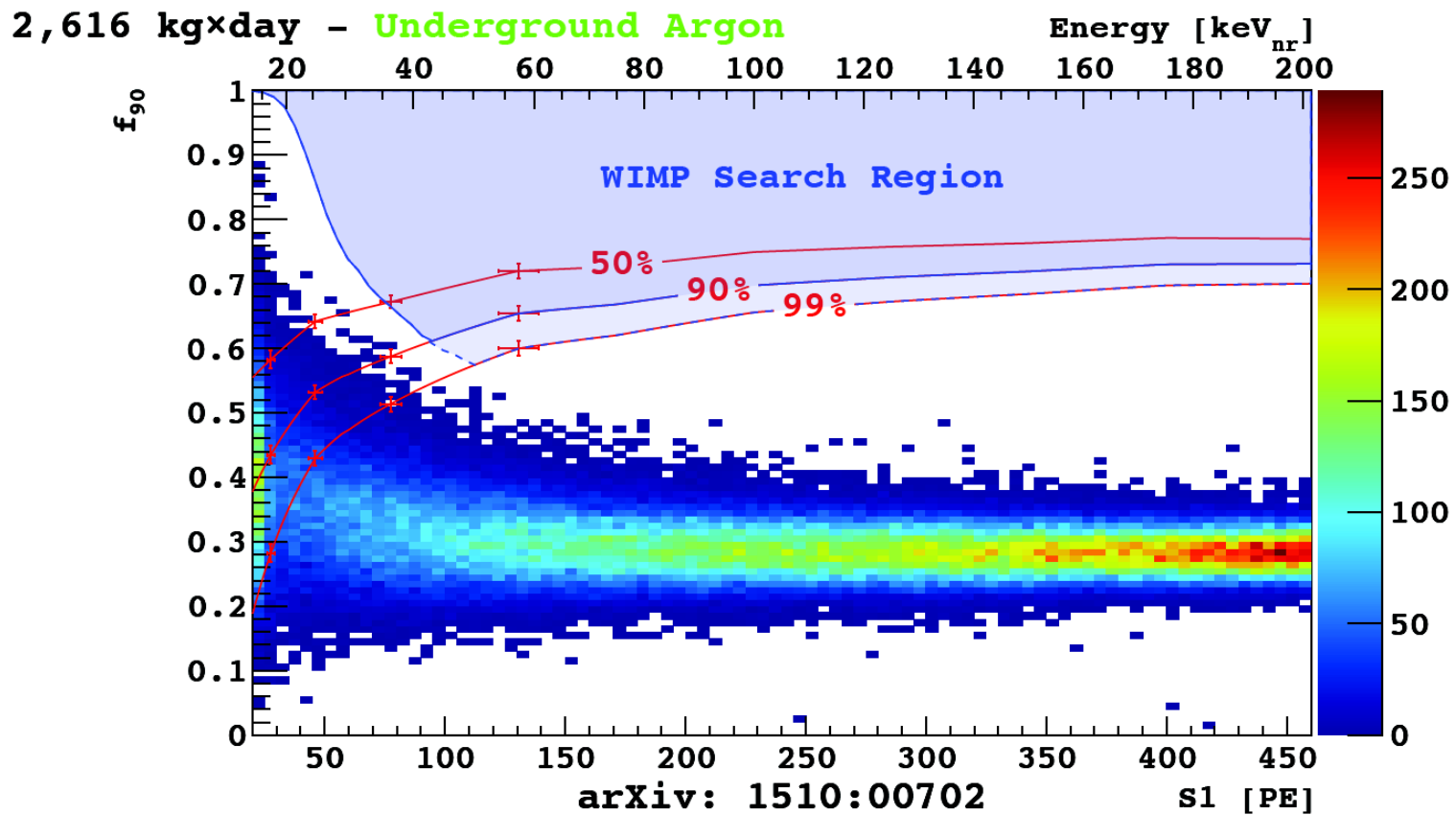
Ułamek sygnału w pierwszych 90 ns (f_{90}) \Rightarrow separacja na poziomie $1.5 \cdot 10^{-7}$



Detekcja bezpośrednia

DarkSide-50

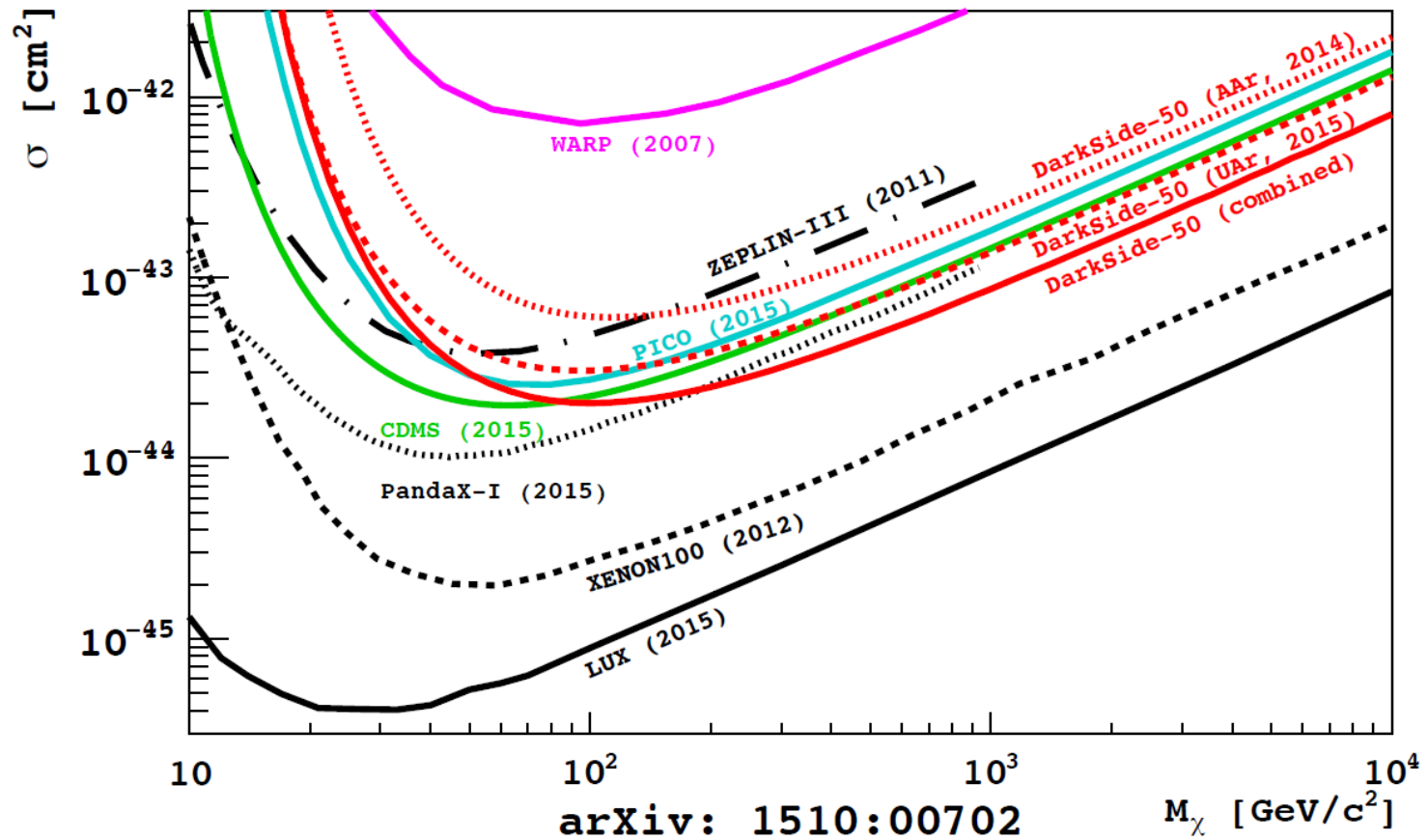
Wyniki przedstawione pod koniec 2015:



Detekcja bezpośrednia

DarkSide-50

Wyniki przedstawione pod koniec 2015:



Detekcja bezpośrednia

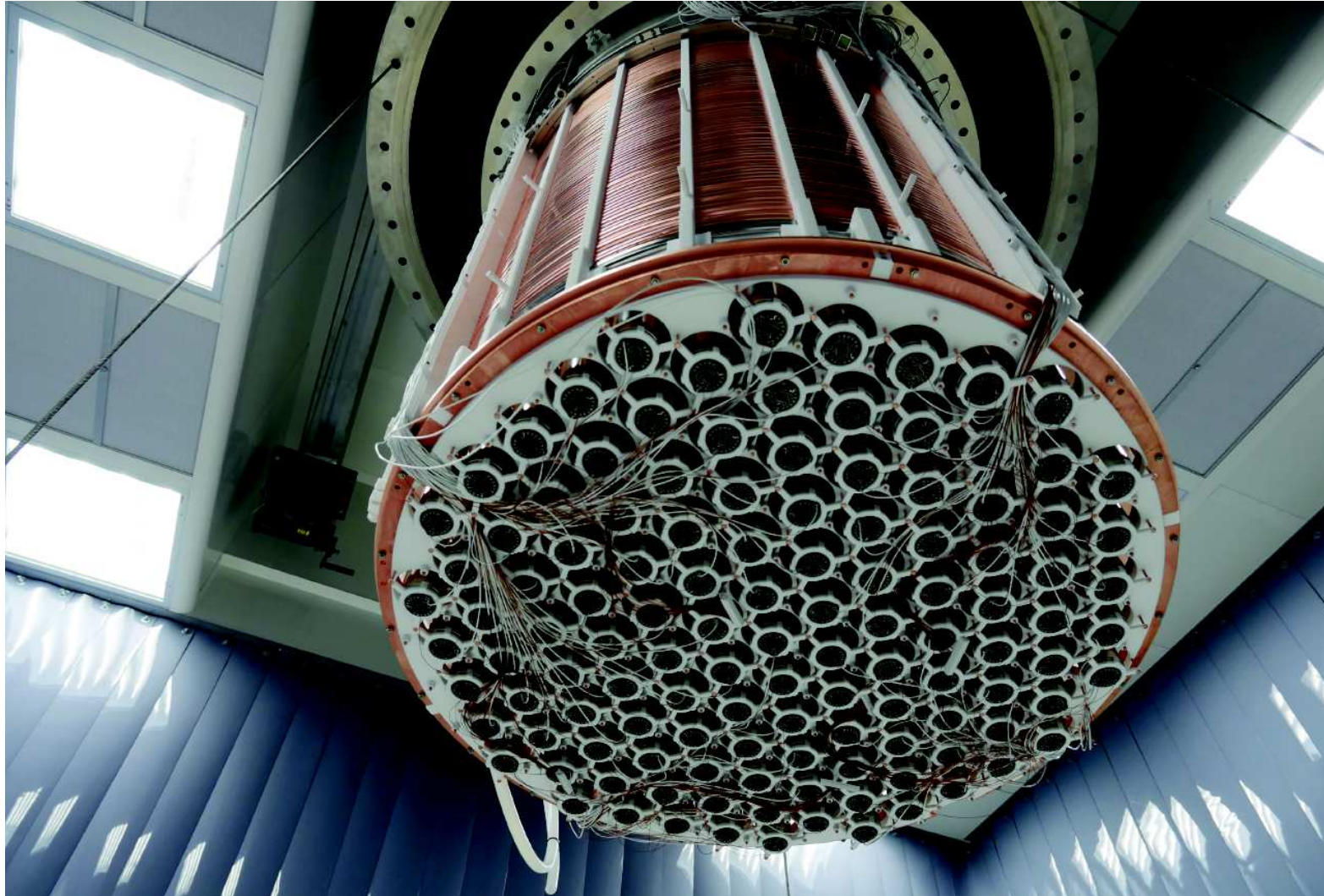
Xenon1T

3.5 tony LXe (2 tony jako “tarcza”)



Detekcja bezpośrednia

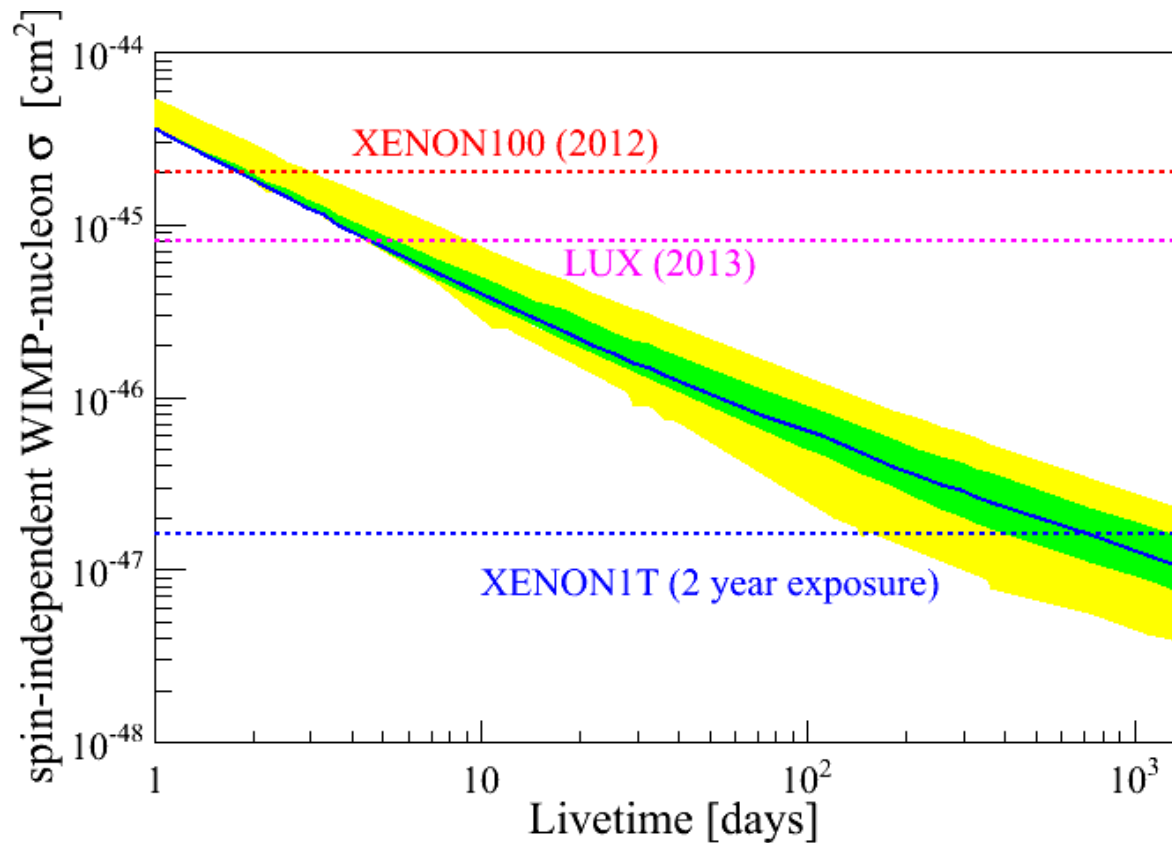
Xenon1T



Detekcja bezpośrednia

Xenon1T

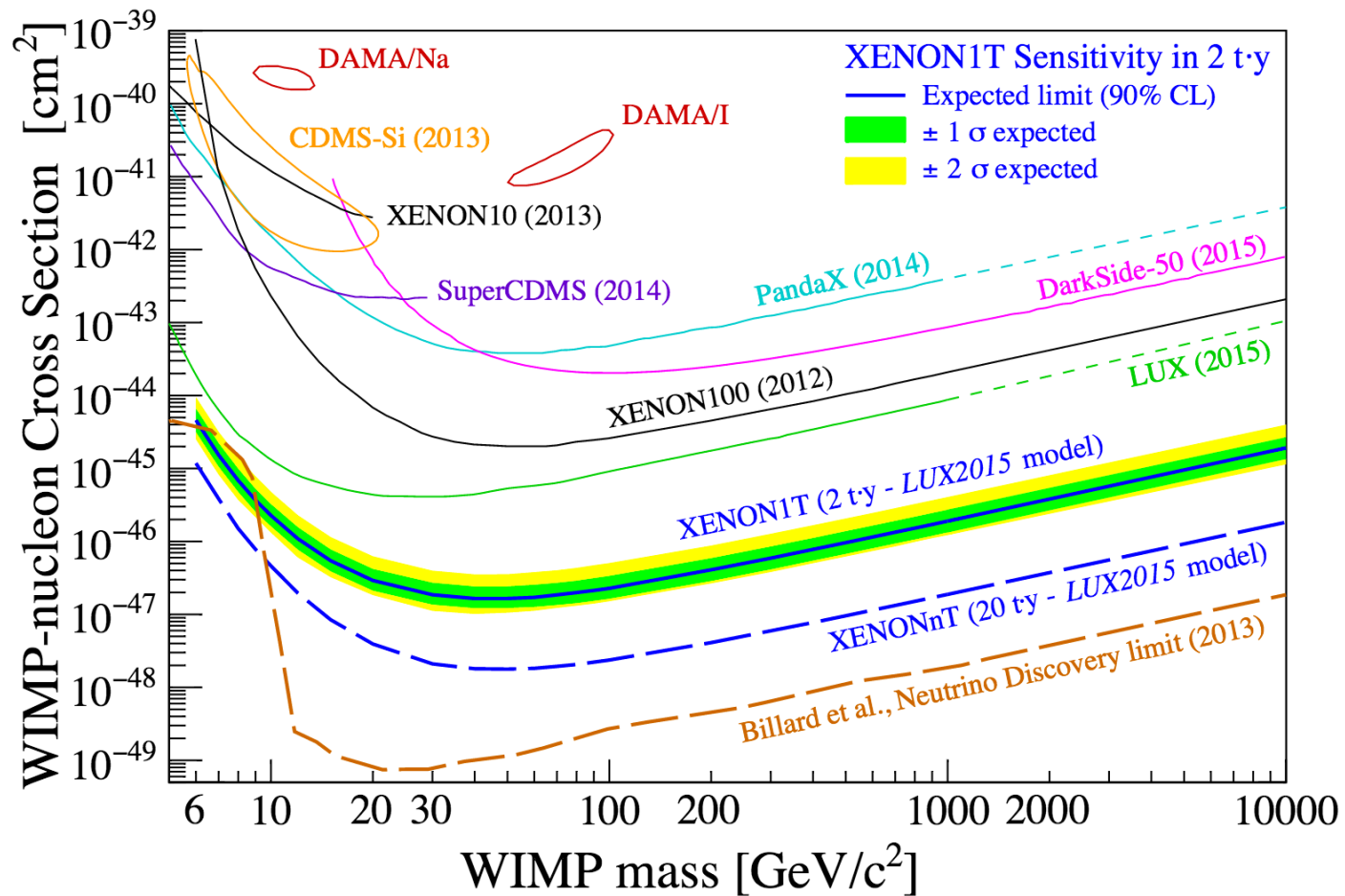
Detektor Xenon1T jest powinien niedługo rozpocząć zbieranie danych. Dzięki ok. 30-krotnie większej masie LXe oraz istotnej redukcji tła powinien bardzo szybko (po 10 dniach) poprawić dotychczasowe limity:



Detekcja bezpośrednia

Xenon1T

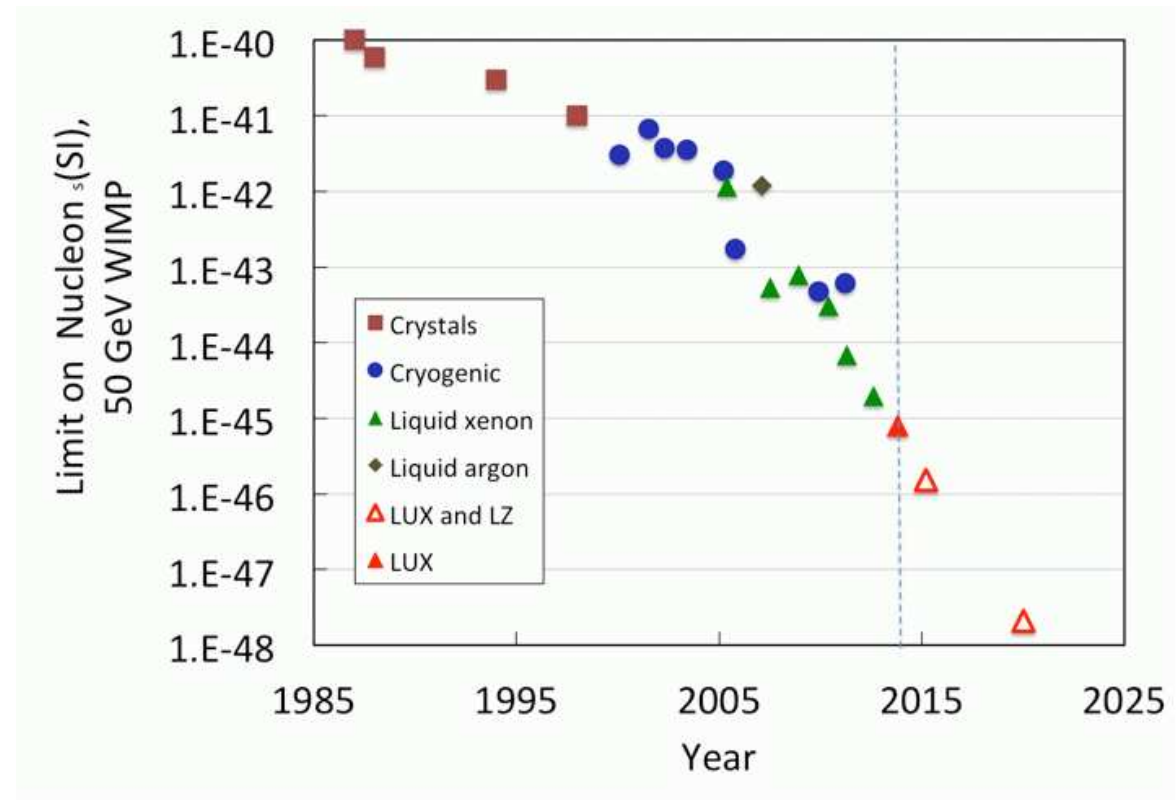
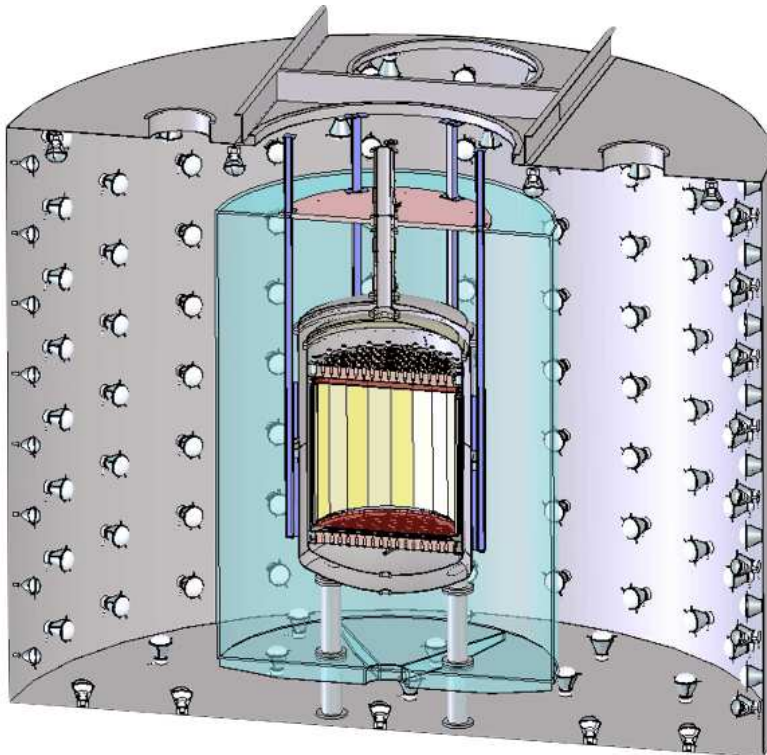
Czułość detektora staje się na tyle duża, że powinniśmy zobaczyć... neutrina słoneczne.



Detekcja bezpośrednia

Przyszłość: LZ (LUX+Zeplin)

Detektor z 7 tonami LXe (5.6 tony jako "tarcza"), planowane uruchomienie 2017+

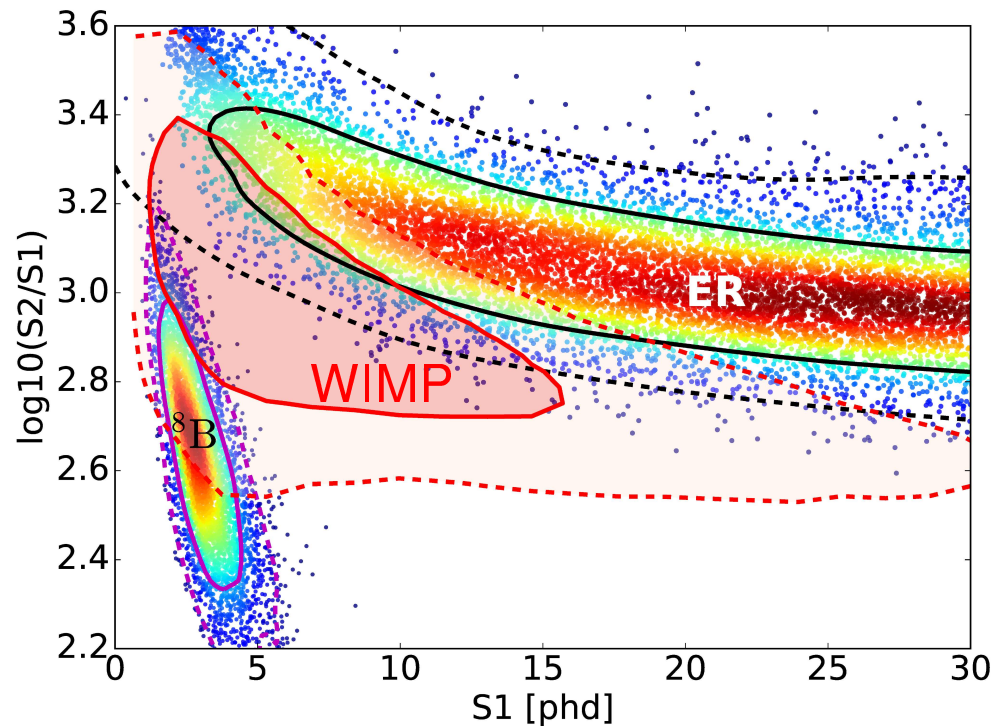


Detekcja bezpośrednia

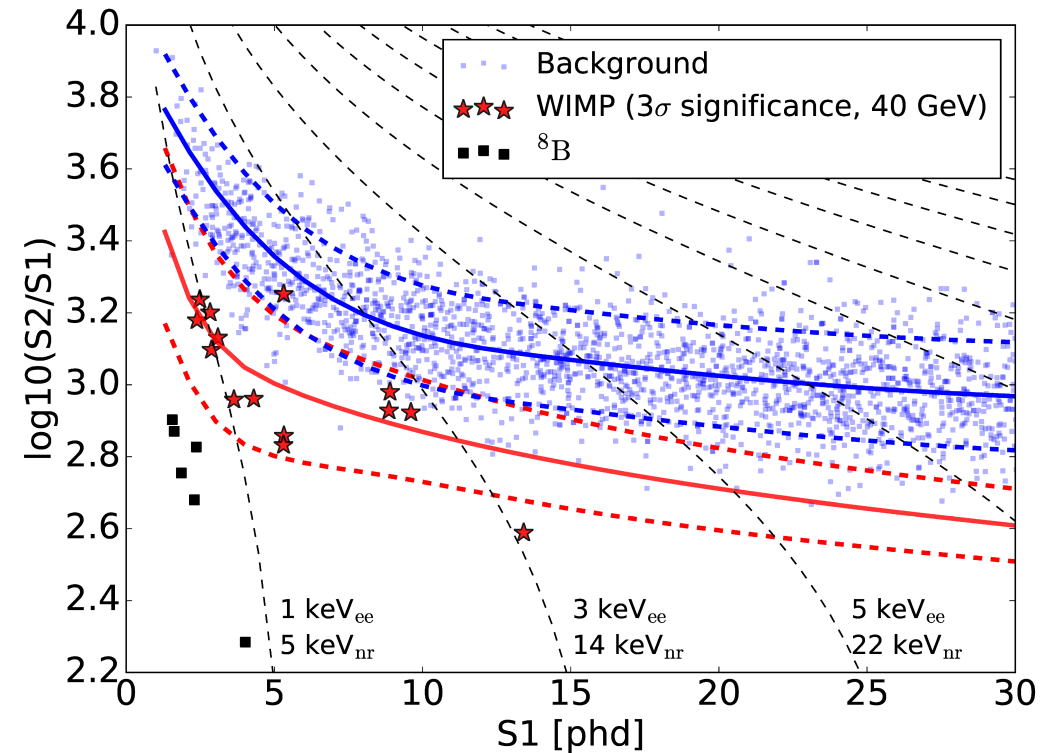
Przyszłość: LZ (LUX+Zeplin)

Wyniki modelowania eksperymentu

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



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

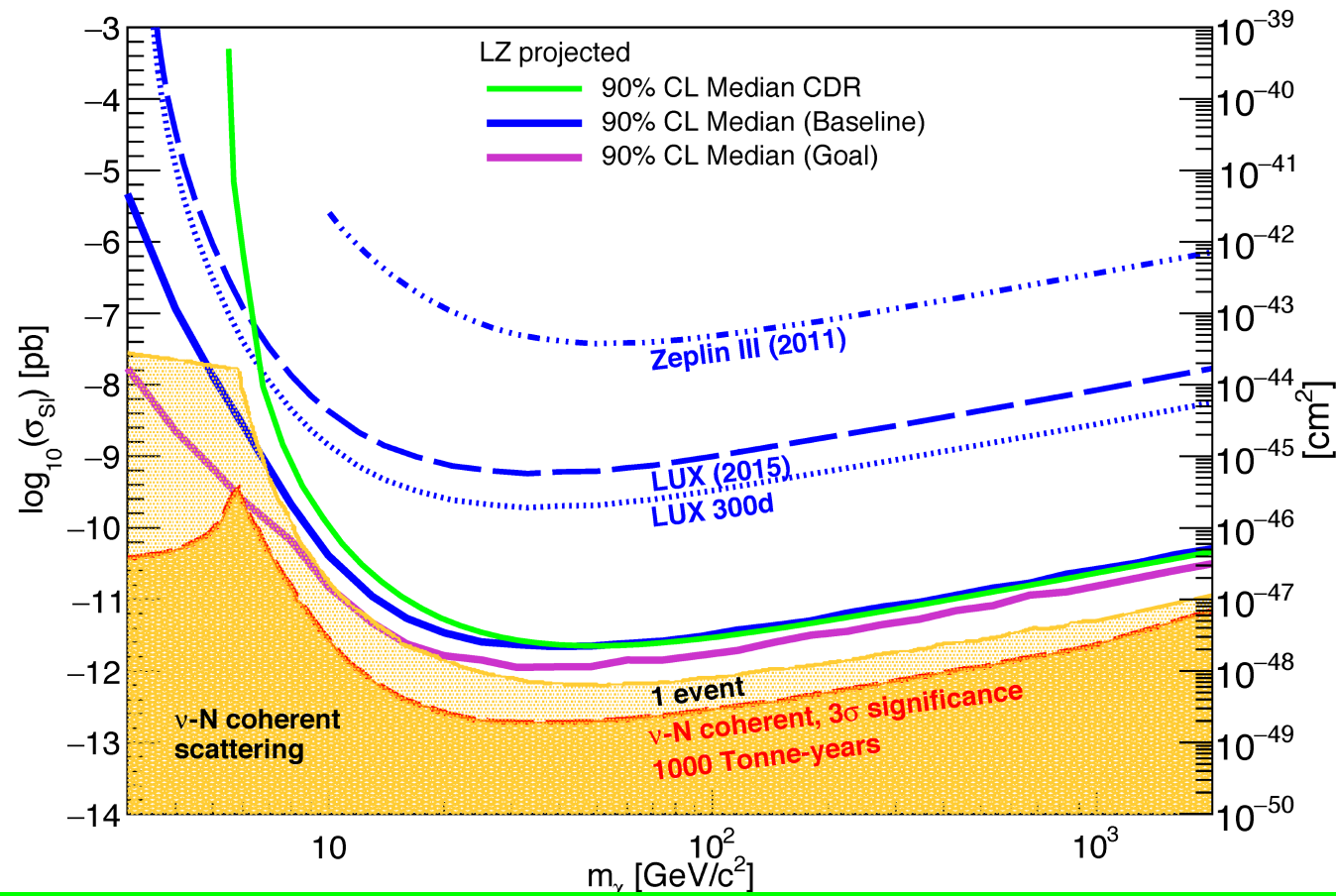


Detekcja bezpośrednia

Przyszłość: LZ (LUX+Zeplin)

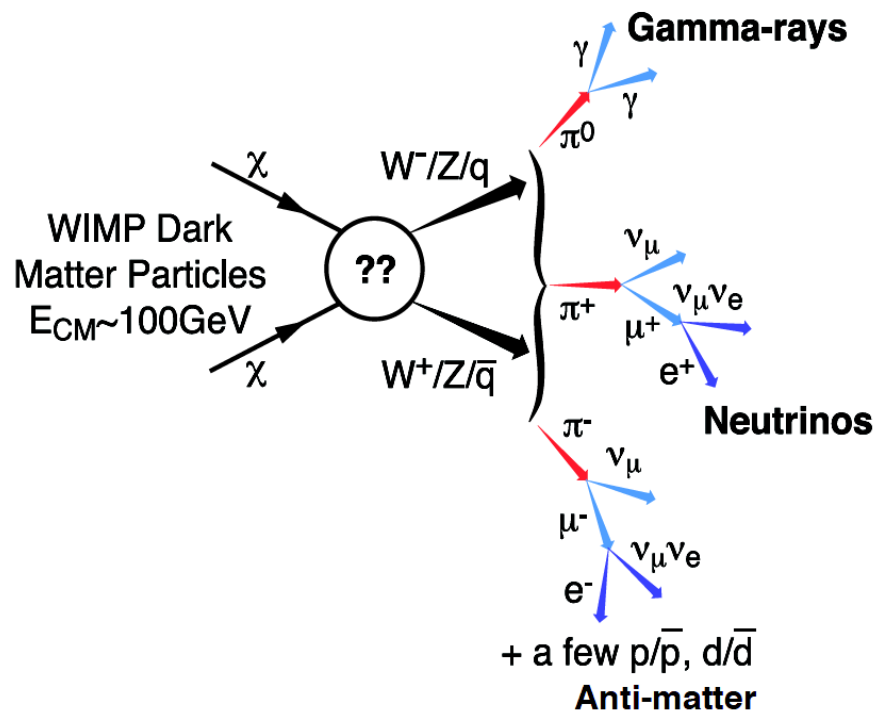
Oczekiwane wyniki (1000 dni)

Dochodzimy do granicy tła neutrin słonecznych i atmosferycznych



Detekcja pośrednia

Anihilacja DM



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

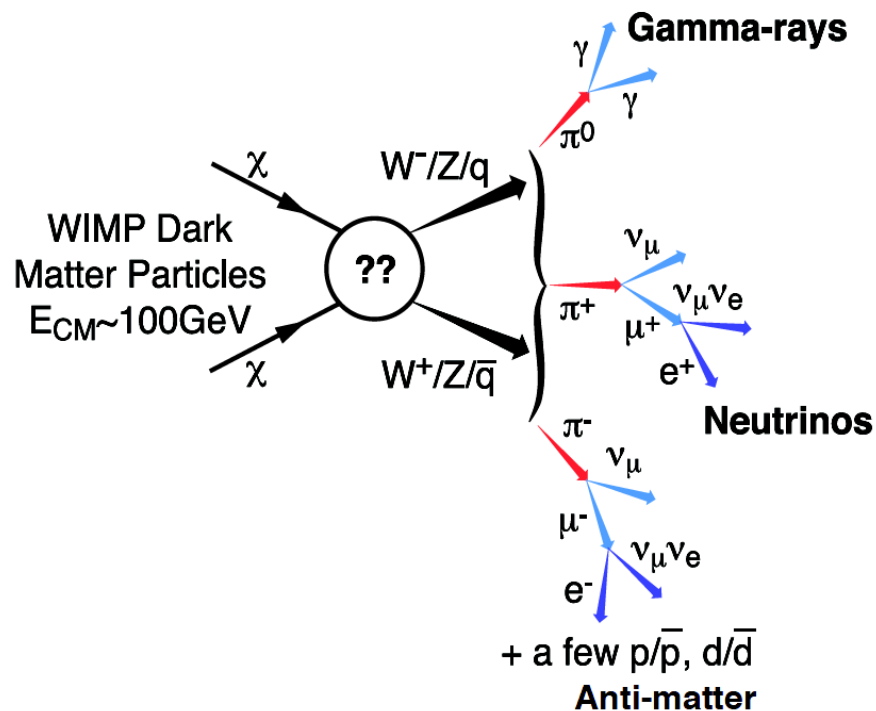
Ale ciemna materia uczestniczy w tworzeniu struktur we Wszechświecie! Więc na małych skalach odległości jej gęstość może być o wiele rzędów wielkości większa niż gęstość średnia (tak jak normalnej materii).

⇒ może znów zachodzić anihilacja

Podobnie jak w gwiazdach znów zachodzi nukleosynteza...

Detekcja pośrednia

Promieniowanie gamma



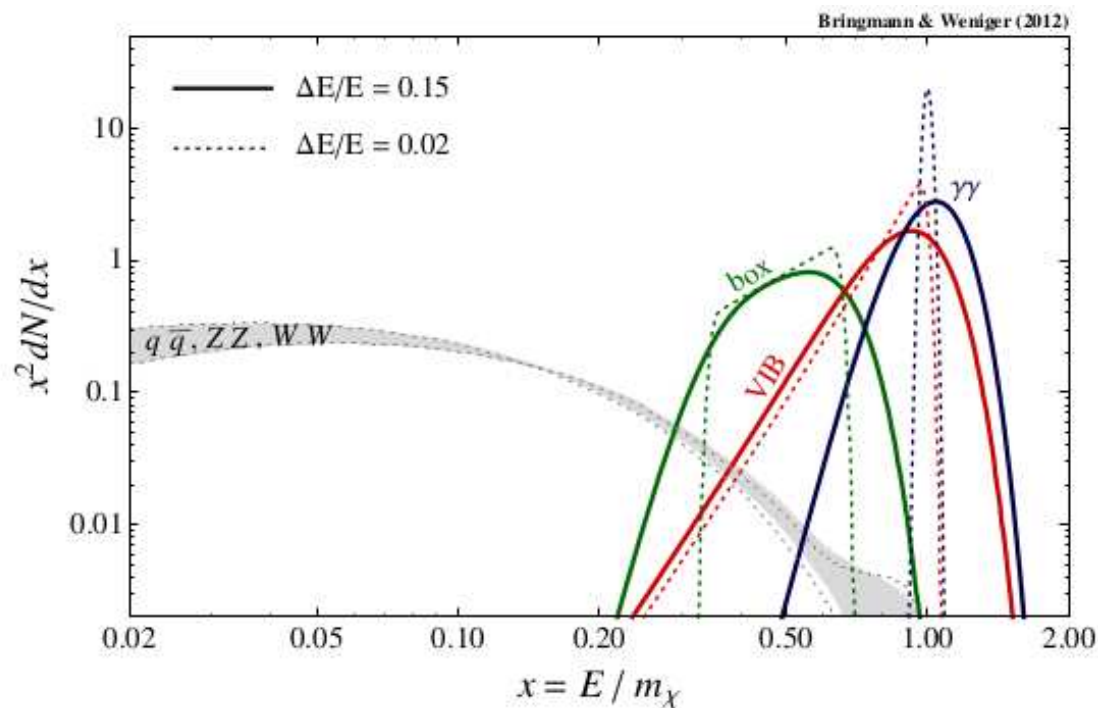
Zalety poszukiwania sygnału anihilacji DM w promieniowaniu gamma:

- 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

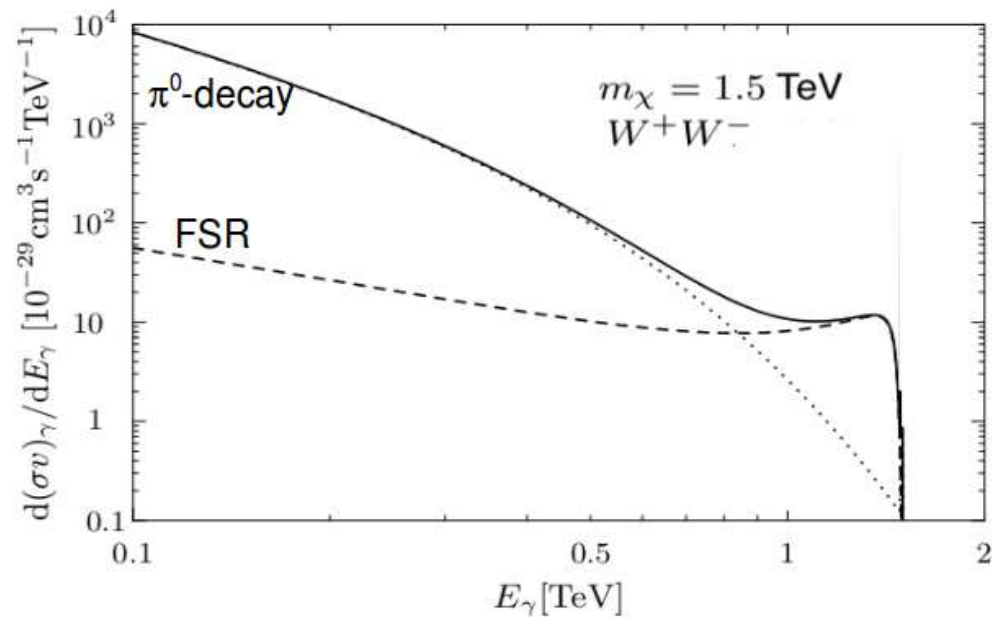
- bezpośrednia anihilacja
 $\chi\chi \rightarrow \gamma\gamma, Z\gamma \dots$
- Virtual Internal Bremsstrahlung
 $\chi\chi \rightarrow f\bar{f}\gamma, W^+W^-\gamma \dots$
- rozpady kaskadowe (Box)

\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:

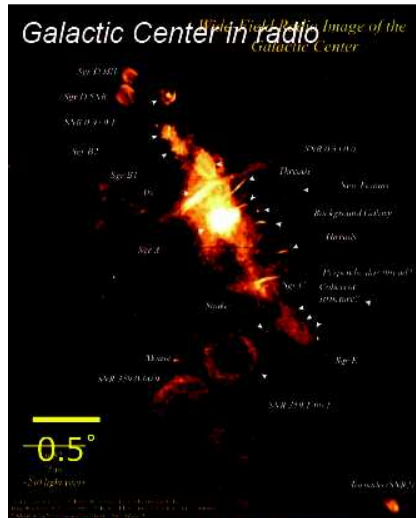
- duża jasność
duża gęstość DM, mała odległość
- małe tło
- dobrze określona pozycja

Kandydaci:

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

Detekcja pośrednia

Źródła

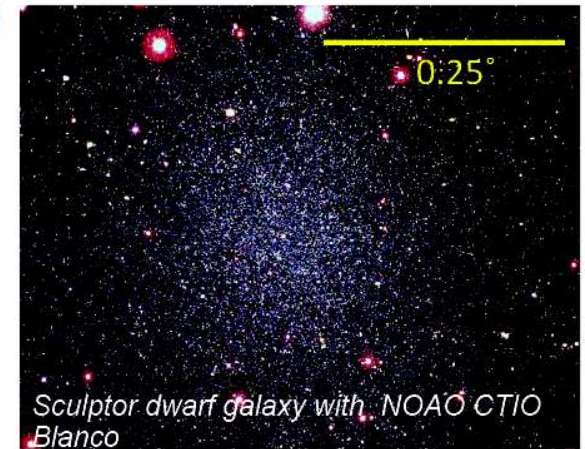


Galactic Centre

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

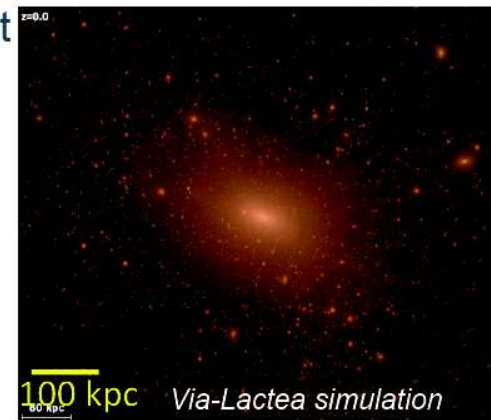
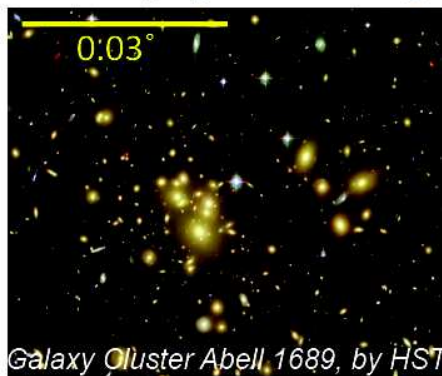
Dwarf galaxies of the Milky Way

- 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



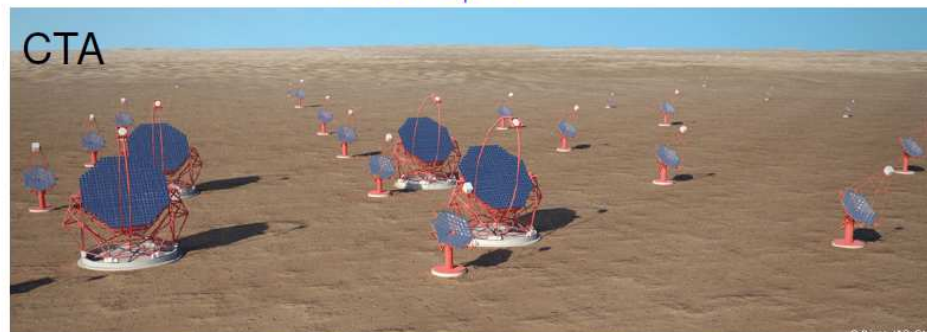
Artist's impression
Credit: SPDO/TDP/DRAO/Swinburne
Astronomy Productions.

Single-dish



gamma-rays

Ground based
telescopes



x-rays
Space satellites

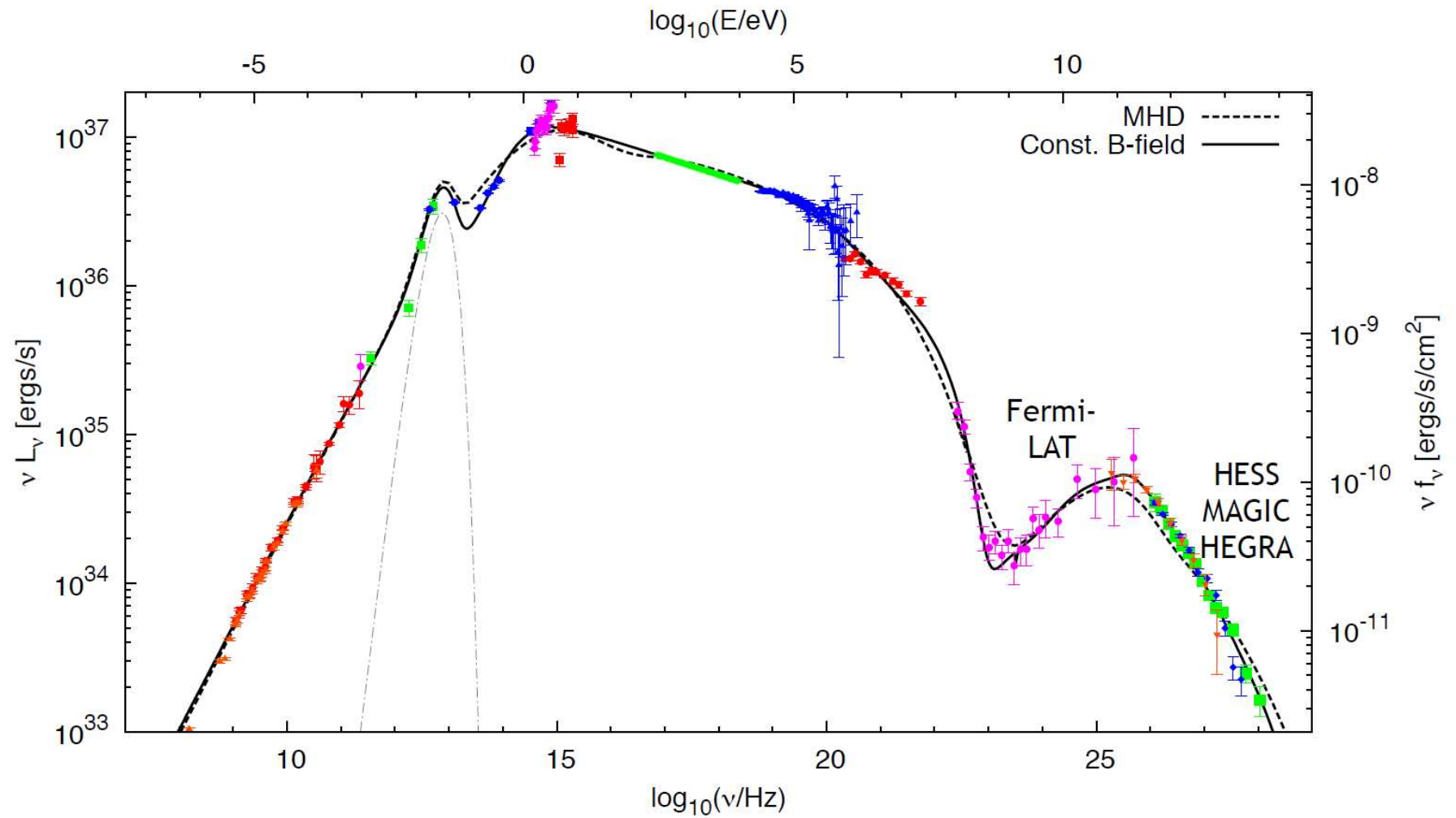


Space
satellites



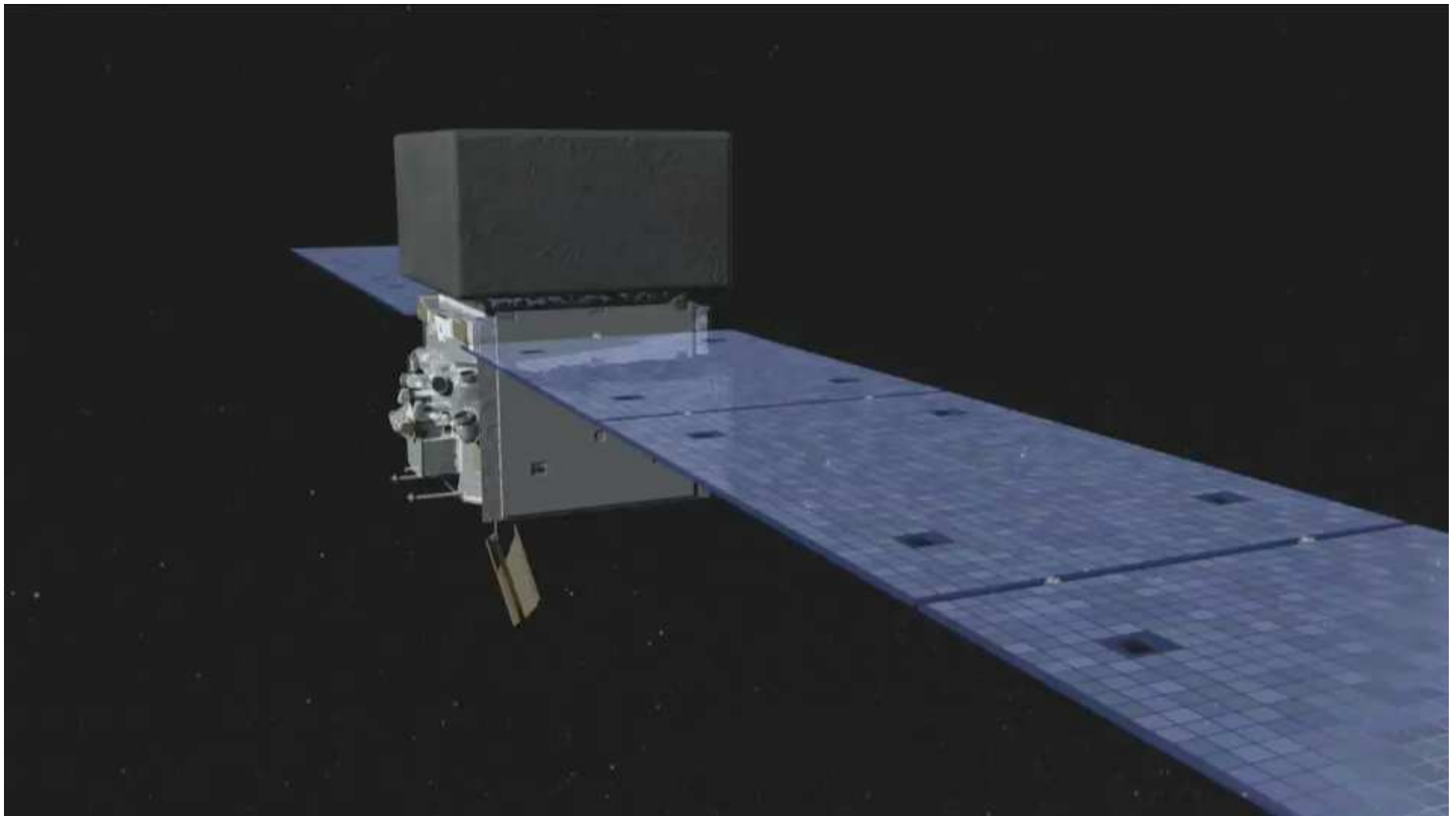
Detekcja pośrednia

Zakres widmowy



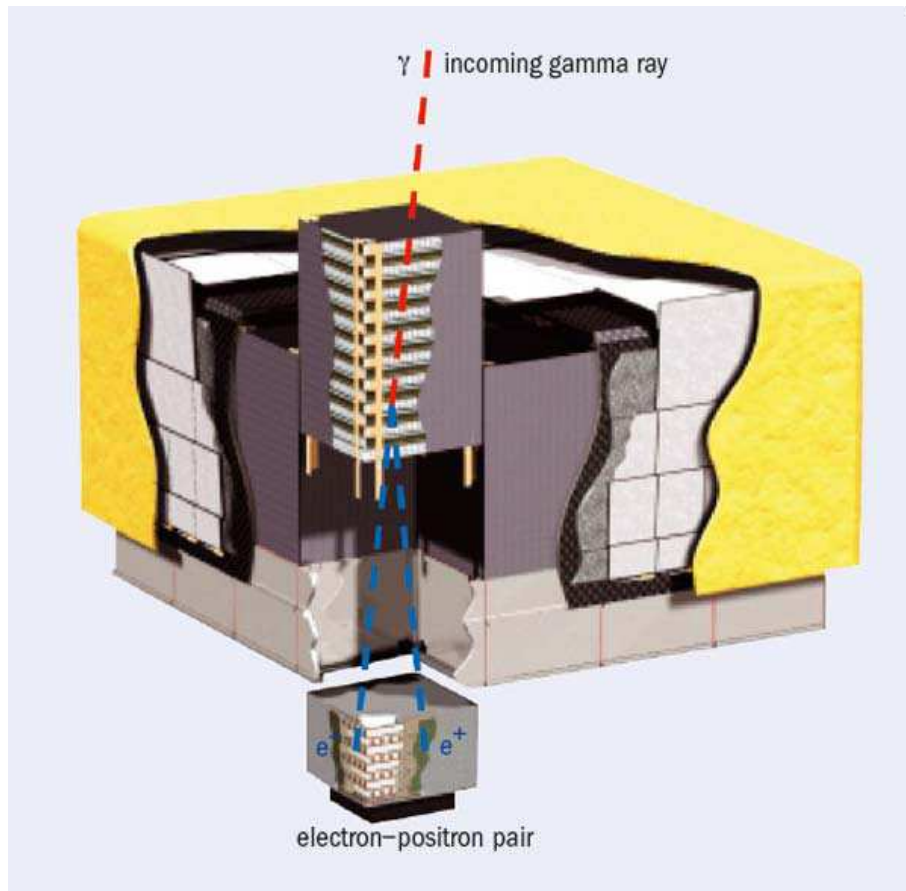
Detekcja pośrednia

Fermi-LAT



Detekcja pośrednia

Large Area Telescope



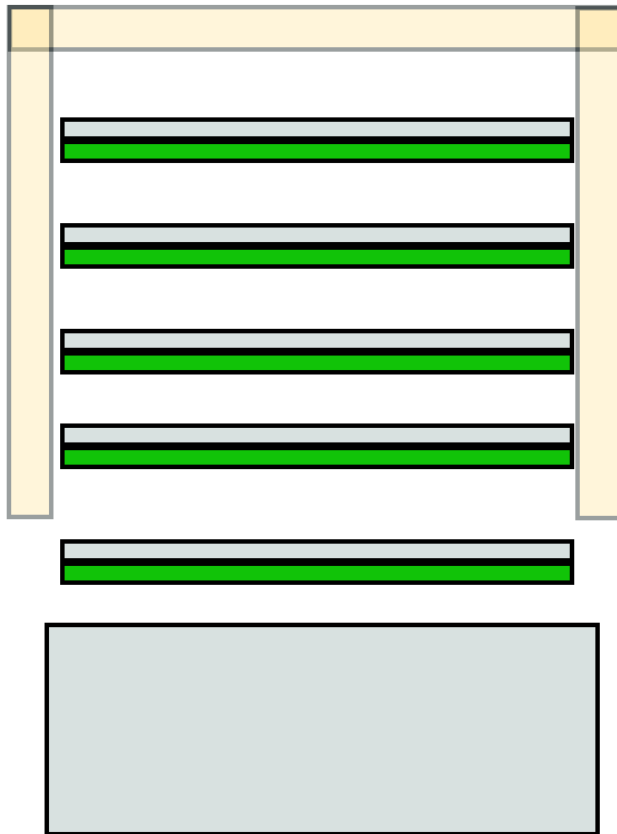
Detektor dedykowany pomiarowi fotonów w zakresie od 20 MeV do 300 GeV.

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

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

Detekcja pośrednia

Large Area Telescope



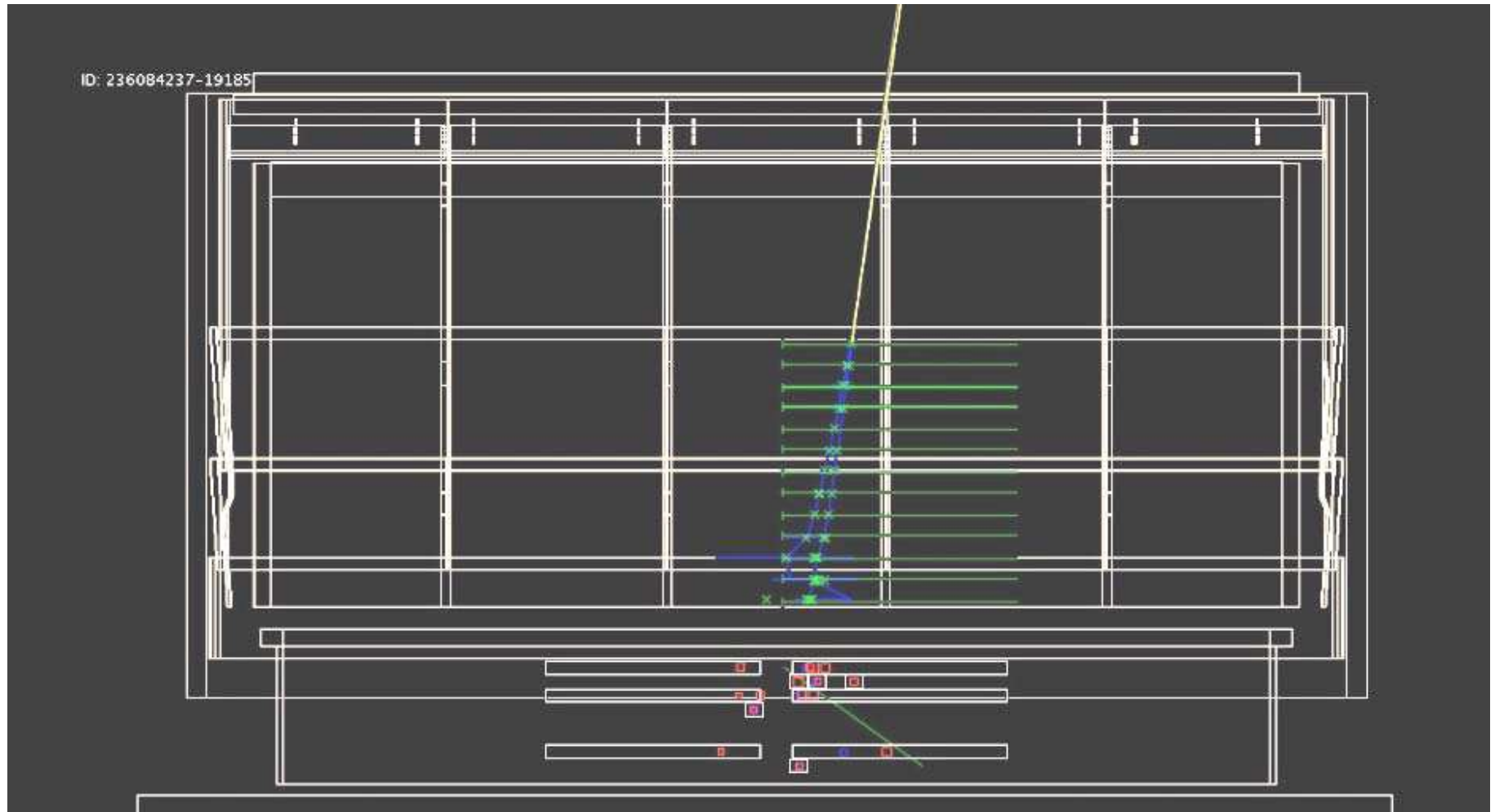
Główne elementy:

- 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

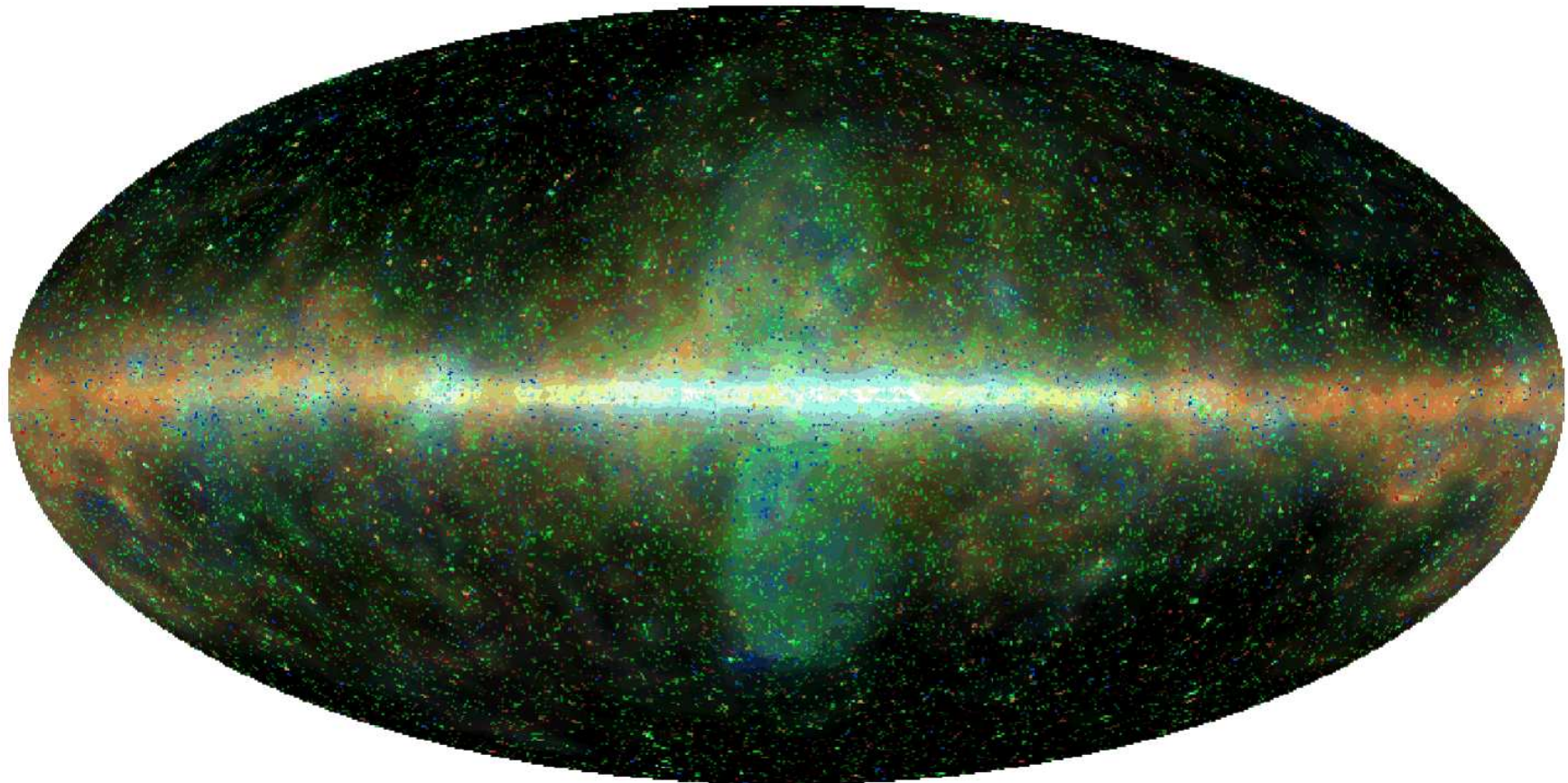
przykładowy przypadek



Detekcja pośrednia

Wyniki Fermi-LAT

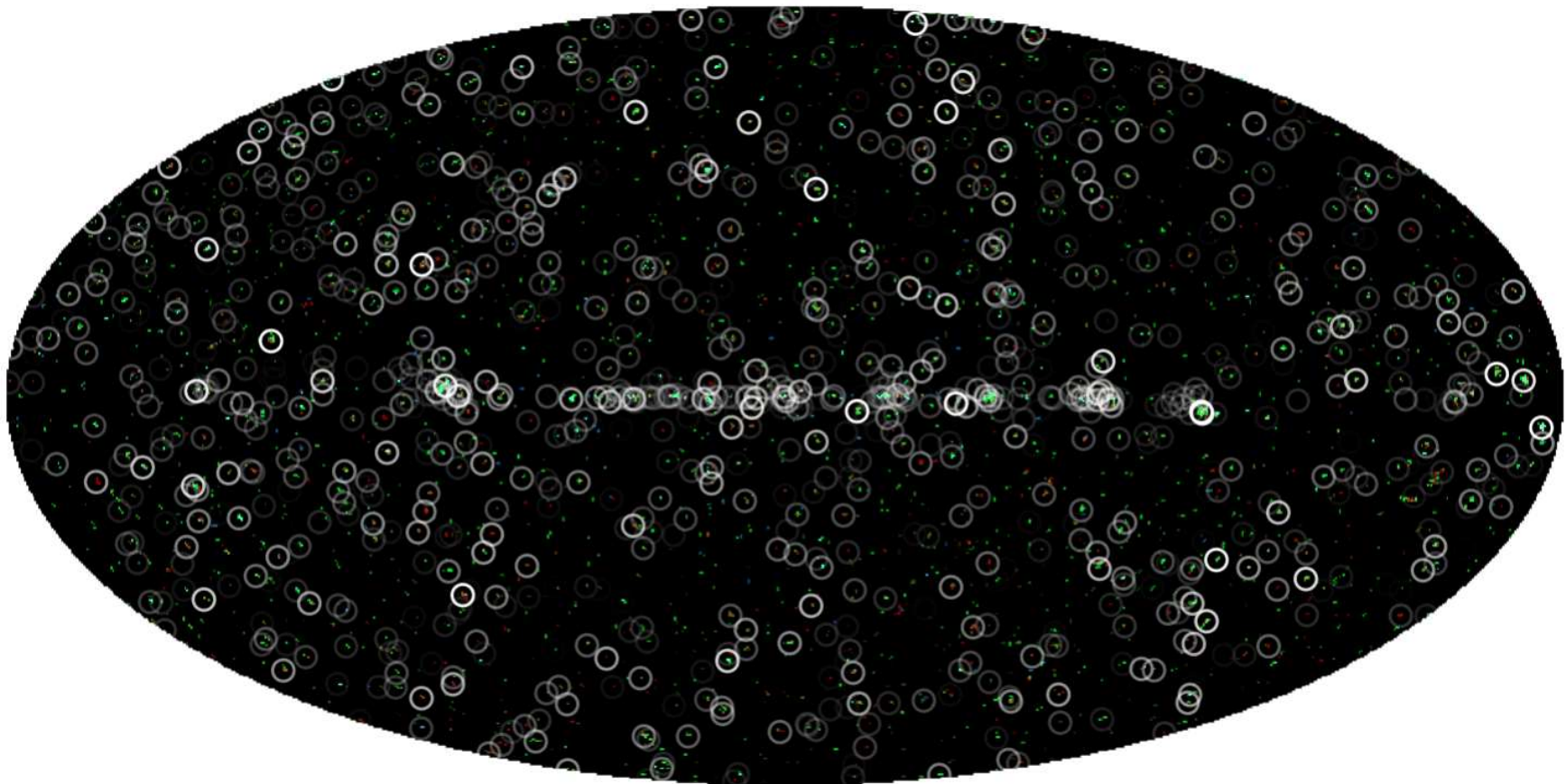
Mapa nieba w fotonach 1 - 300 GeV (skala logarytmiczna)



Detekcja pośrednia

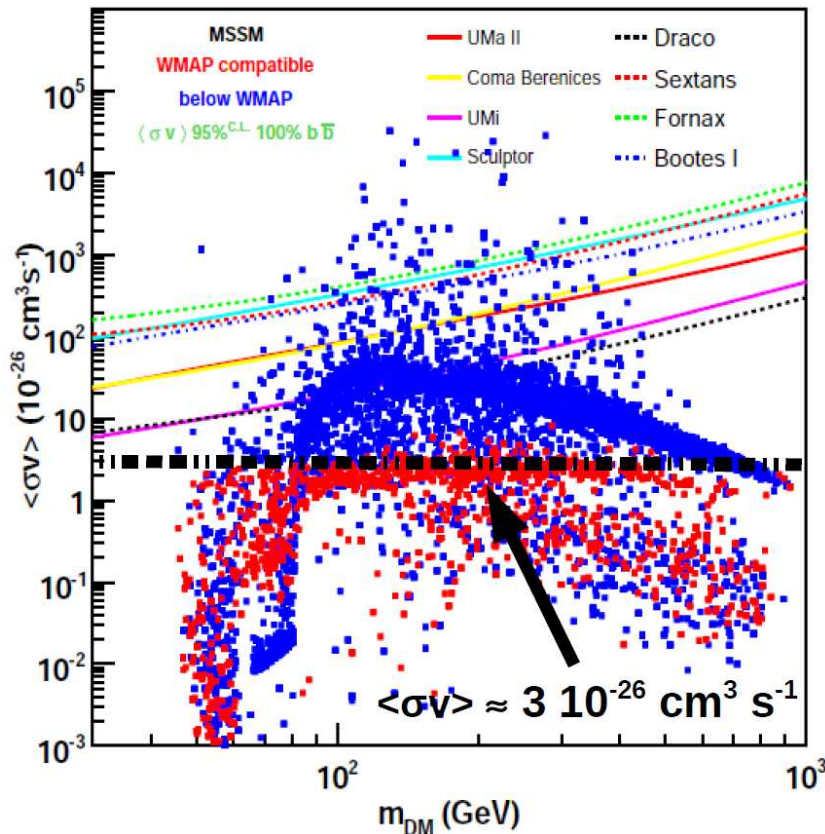
Wyniki Fermi-LAT

Zidentyfikowano 2552 źródła punktowe...



Detekcja pośrednia

Wyniki Fermi-LAT



Galaktyki karłowate:

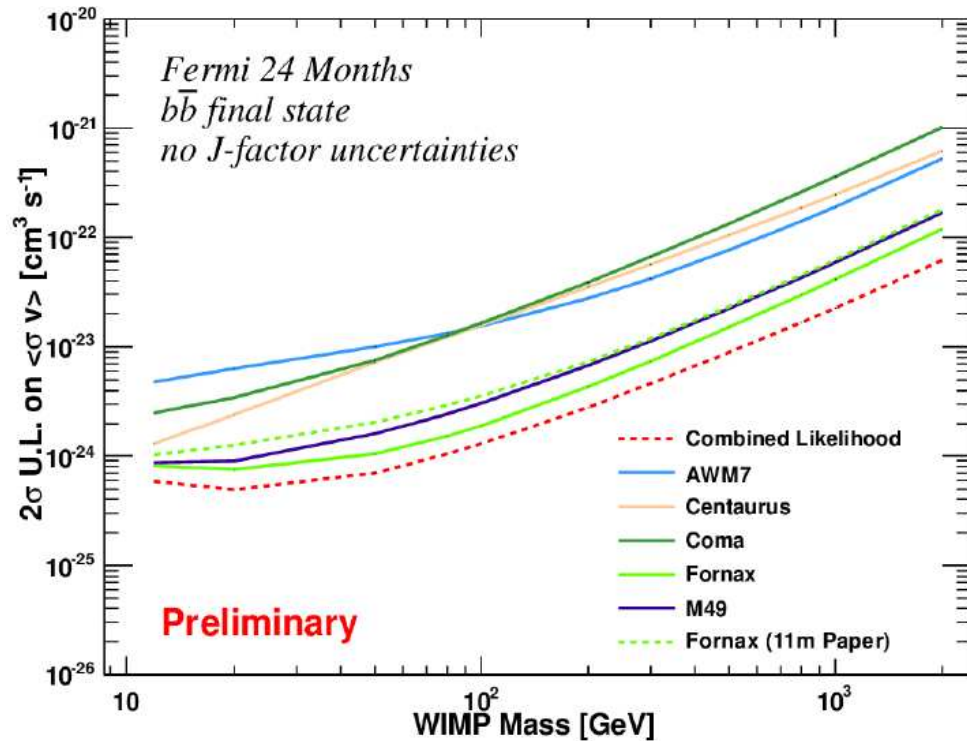
- zdominowane przez materię nie świecąca
- nie powinny być źródłem promieniowania γ
- znane w bezpośrednim sąsiedztwie

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

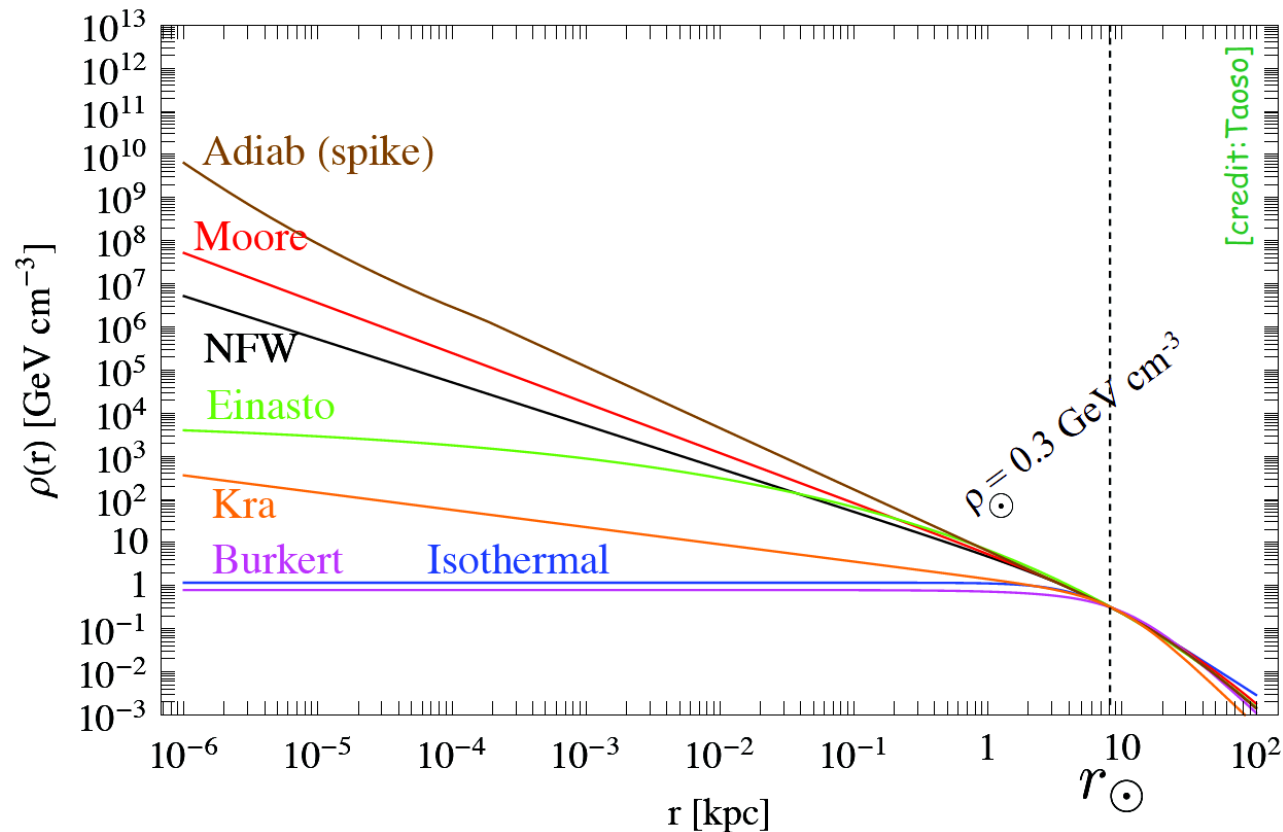
założony kanał anihilacji $\chi\chi \rightarrow b\bar{b}$

Detekcja pośrednia

Halo galaktyki

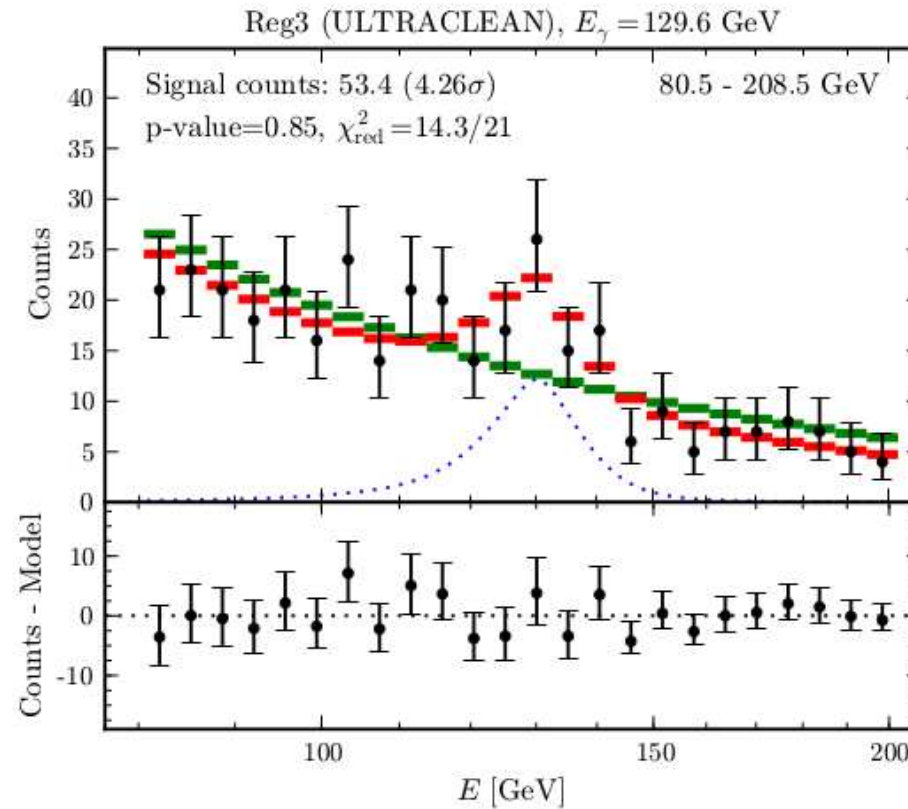
Również nie zidentyfikowano żadnych źródeł promieniowania, które mogłyby świadczyć o anihilacji w zagęszczeniach ciemnej materii.

Wyznaczanie limitów utrudnione przez duże niepewności w modelowaniu halo.



Detekcja pośrednia

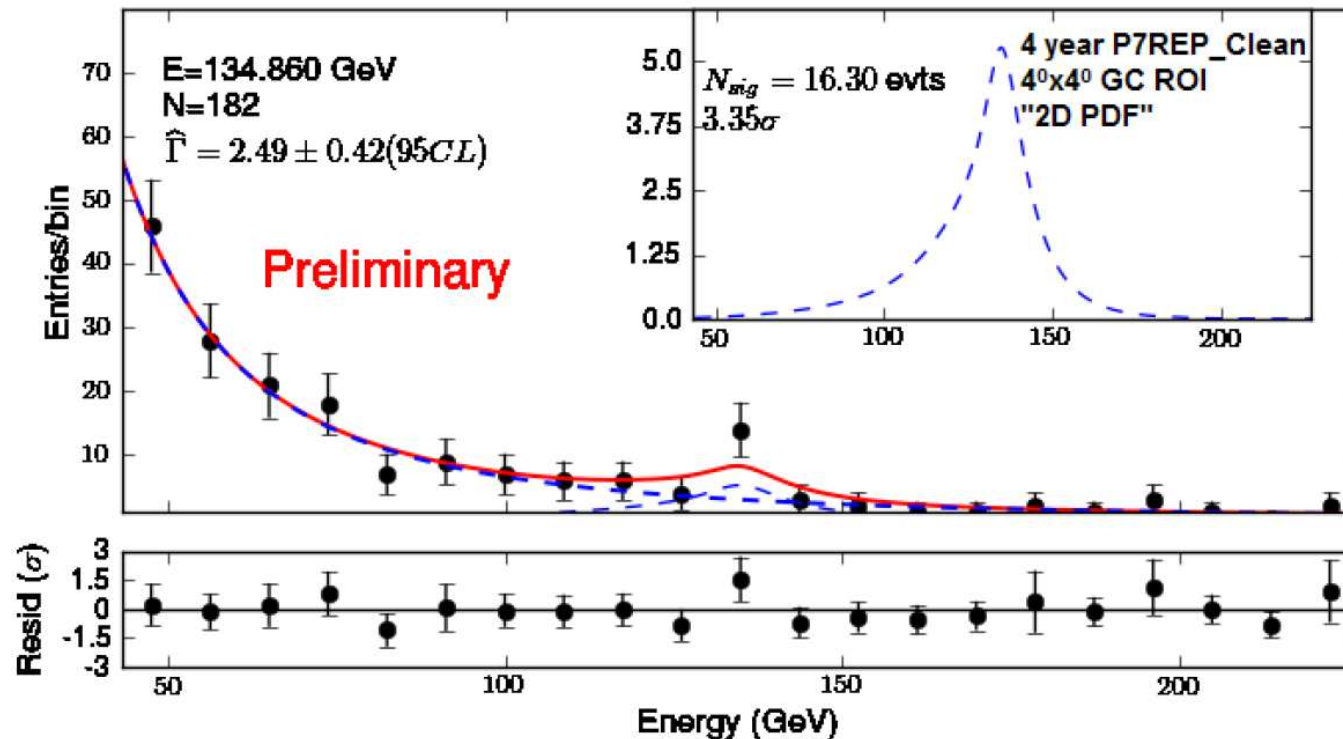
Wyniki Fermi-LAT



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

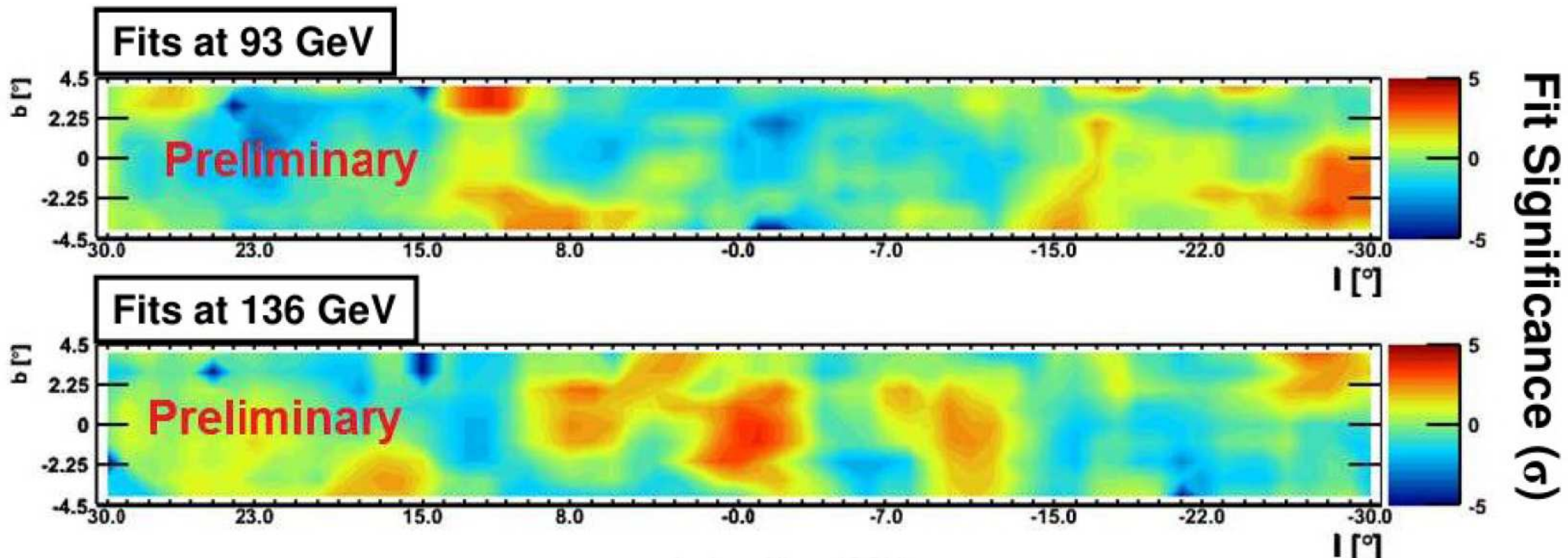


Po rekaliibracji danych efekt zmalał do ok. 3.3σ .

Biorąc pod uwagę, że obserwujemy bardzo duży zakres energii, prawdopodobieństwo, że gdziekolwiek w tym zakresie nastąpi taka fluktuacja jest ok. 10%...

Detekcja pośrednia

Wyniki Fermi-LAT

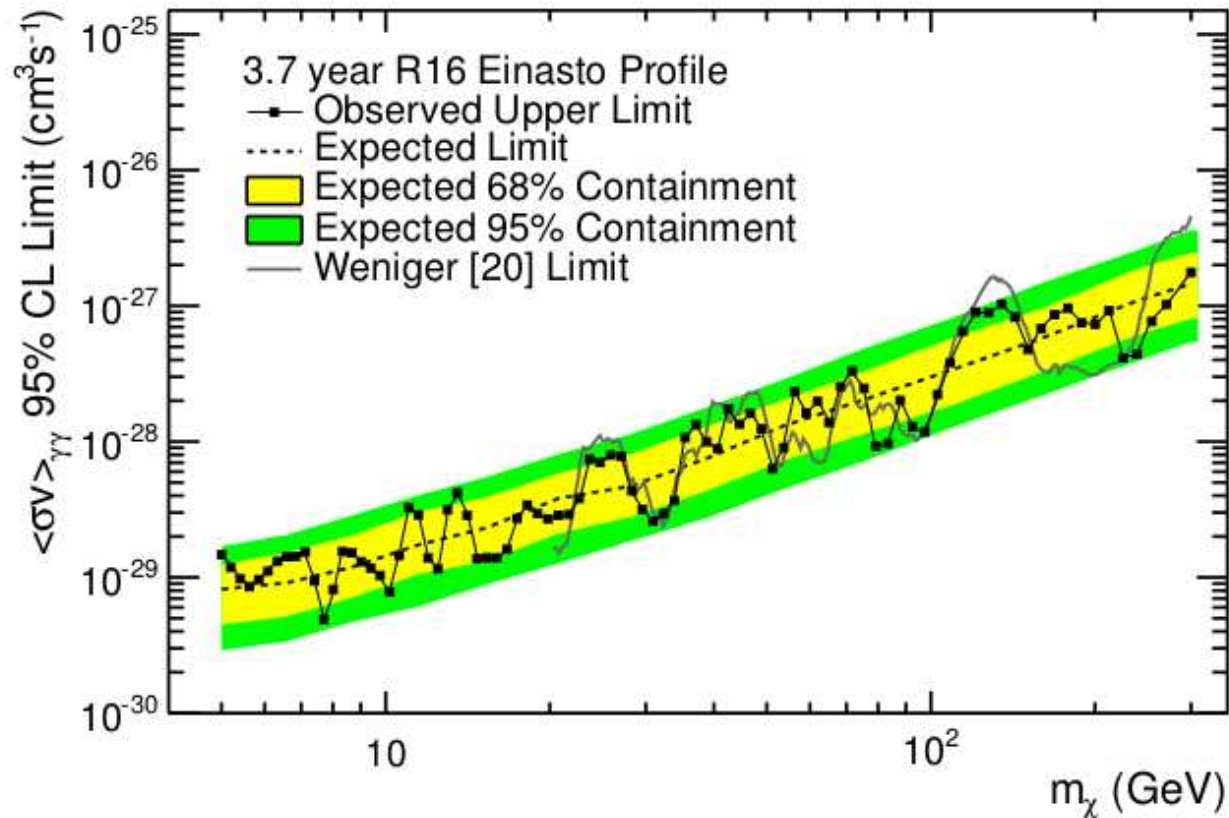


Porównanie rozkładu promieniowania w płaszczyźnie Galaktyki, w pasmach 93 i 136 GeV.

⇒ nadwyżka w pobliżu centrum galaktyki przy 136 GeV może być fluktuacją

Detekcja pośrednia

Wyniki Fermi-LAT



Ostatecznie FERMI przedstawił ograniczenia na przekrój czynny na anihilację DM. Ograniczenia generalnie zgodne z oczekiwaniami, choć widoczne są silne fluktuacje.