

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład VI

- Bezpośrednie poszukiwanie ciemnej materii
eksperymenty LXe TPC
- Pośrednie poszukiwania ciemnej materii
- Eksperyment Fermi-LAT

Ciemna materia

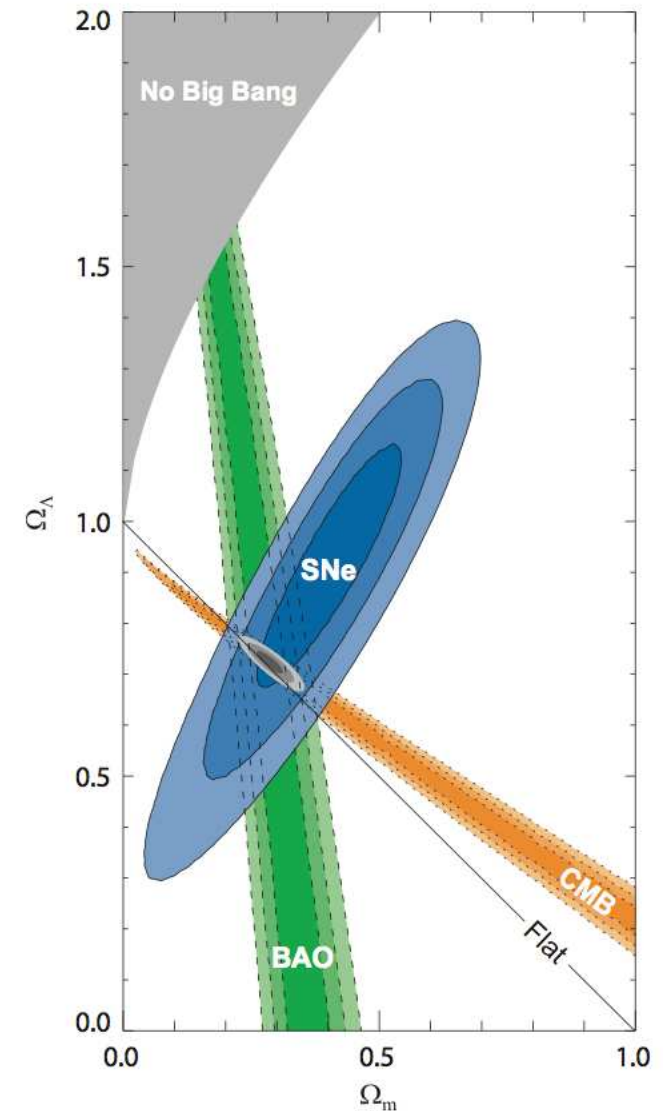
Przesłanki eksperymentalne

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.
- **27%** stanowi **ciemna materia**...
- **68%** to tzw. “**ciemna energia**”, którą możemy opisać poprzez **stałą kosmologiczną** (Λ)



Ciemna materia

Właściwości

Wiemy że ciemna materia:

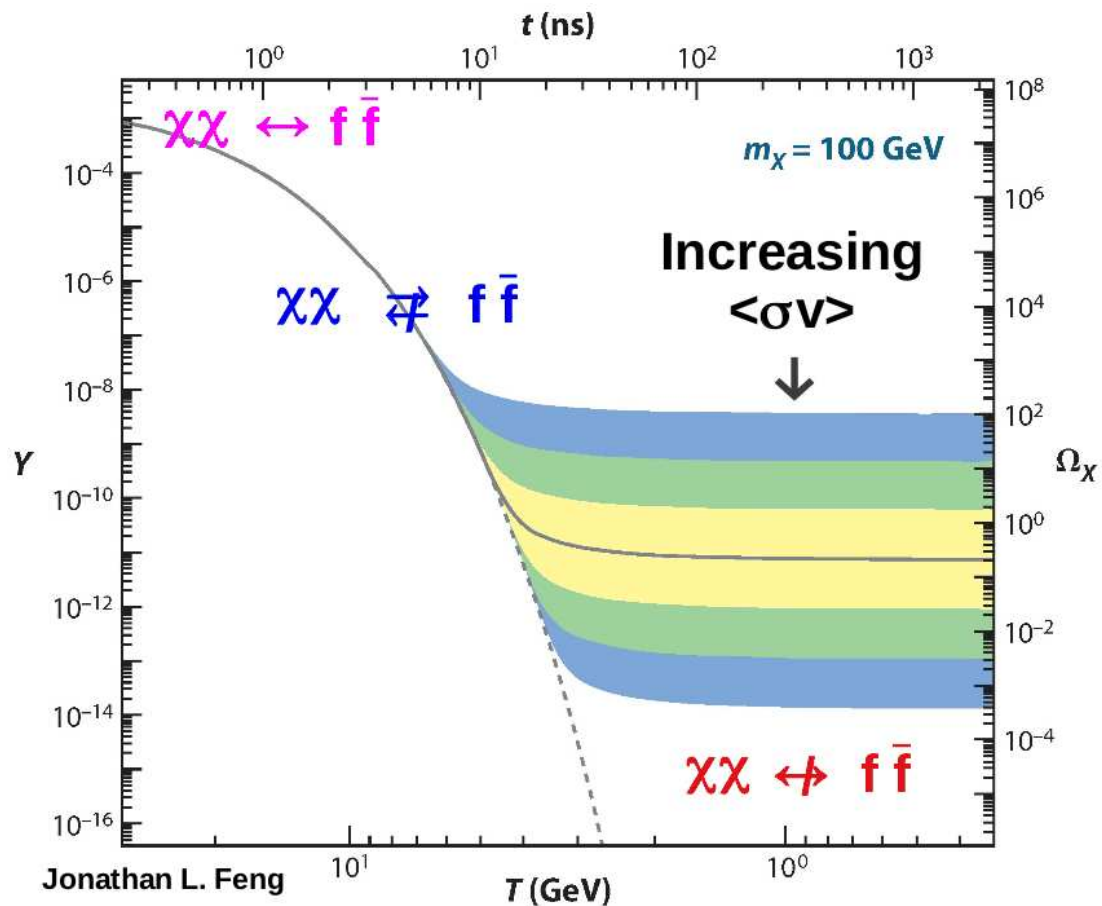
- jest “zimna” (nierelatywistyczna)
- jest niebarionowa
- jest stabilna (nie rozpada się)
- bardzo słabo oddziałuje (tylko grawitacyjnie?)
- daje wkład ok. $1/4$ gęstości krytycznej ($5 \times$ materia barionowa)

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

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:

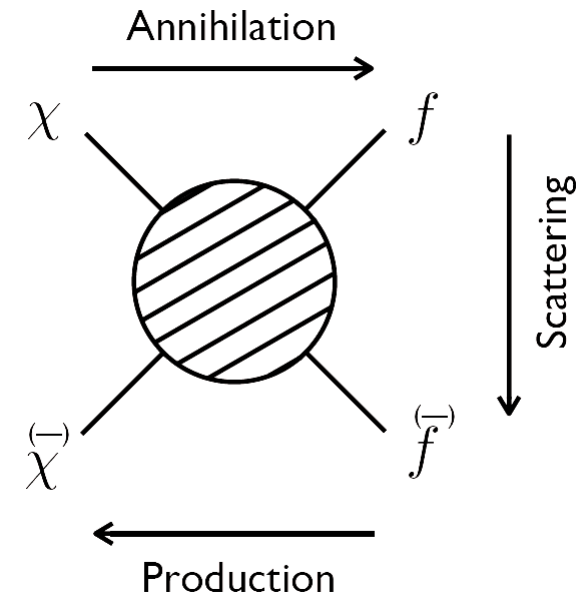
$$\Omega_{\chi} h^2 \approx \frac{3 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^3/\text{s}}{\langle\sigma v\rangle} \sim 0.12$$

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

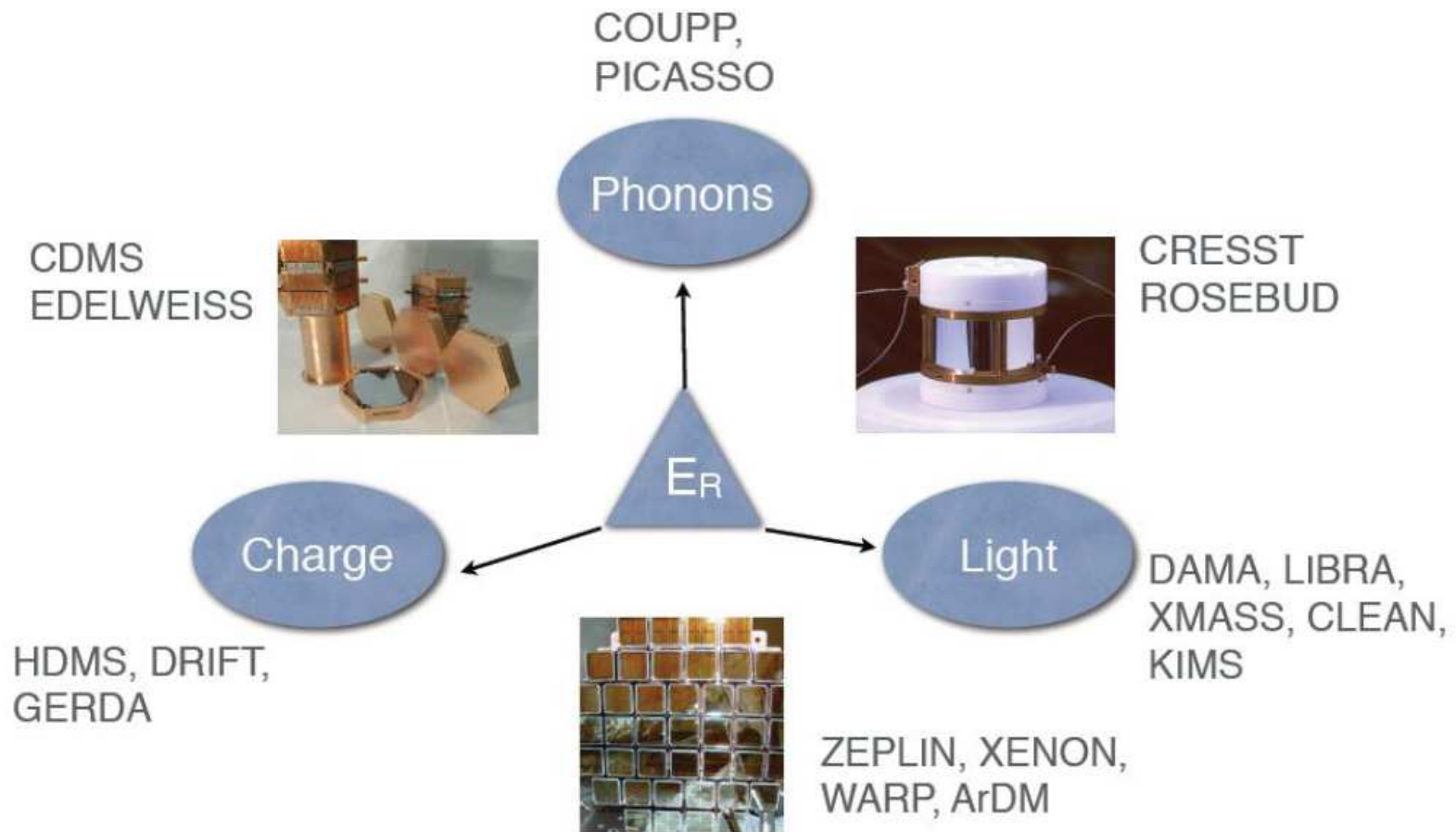


Detekcja bezpośrednia

Kanały detekcji

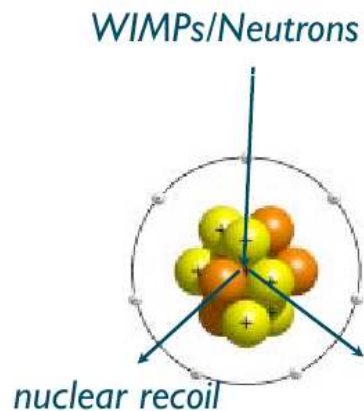
Mierząc niezależnie jonizację, scyntylacje i ciepło \Rightarrow eliminacja tła.

Różne eksperymenty przyjęły różną strategię

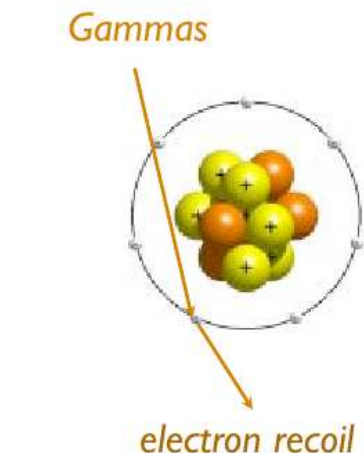


Detekcja bezpośrednia

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

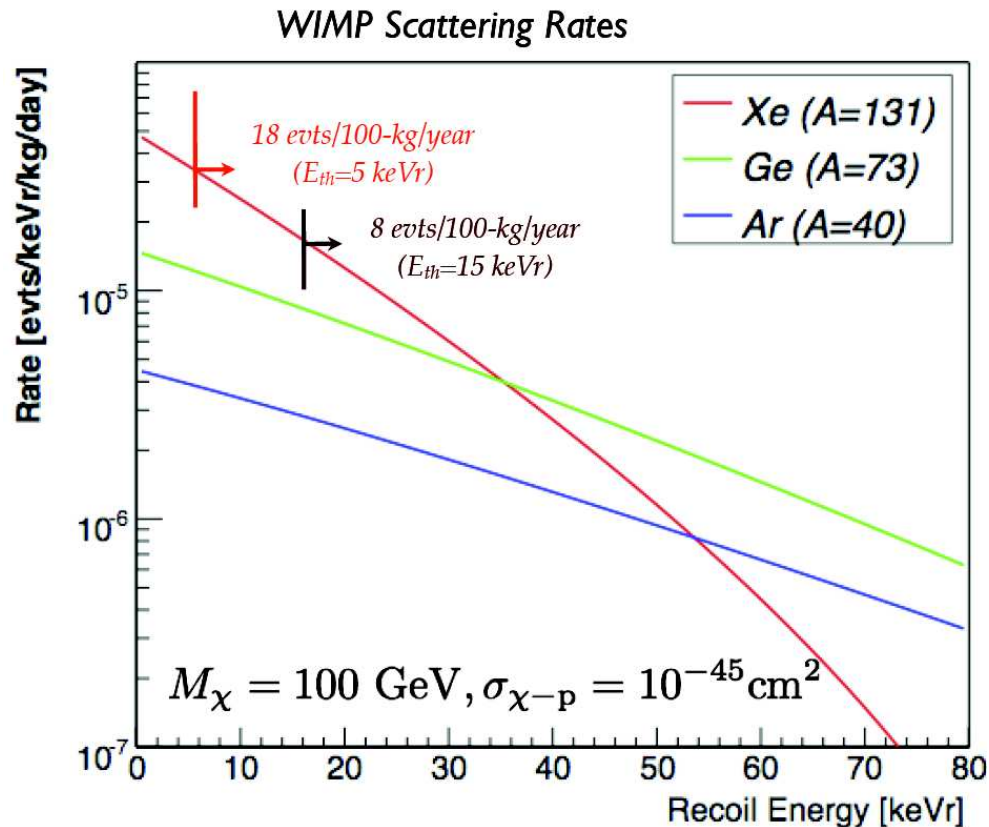
Ciekłe gazy szlachetne

Zalety:

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

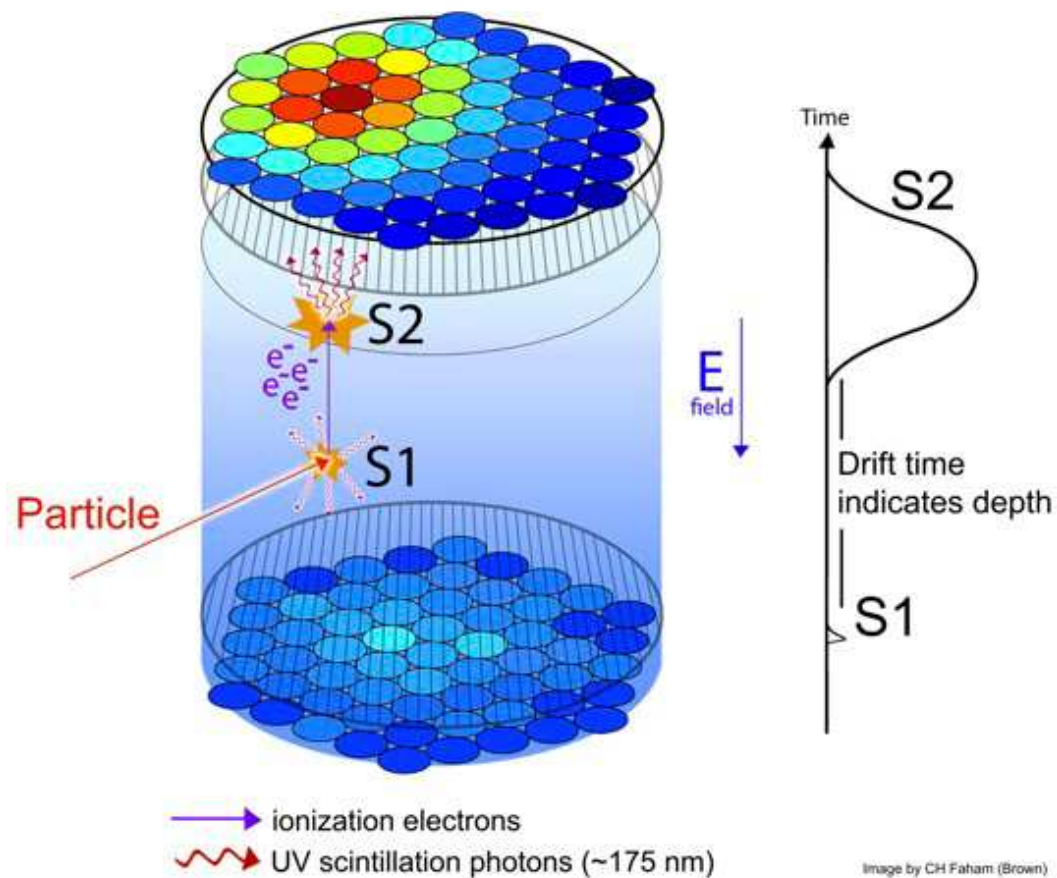
Najczęściej wybierany ksenon:

- najwyższe prawdopodobieństwo detekcji (przy niskim progu)
- niska radioaktywność



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**.

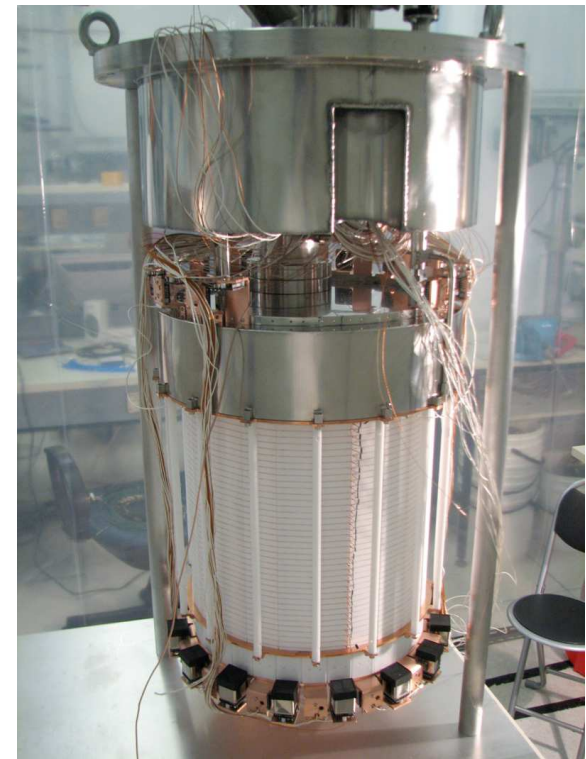
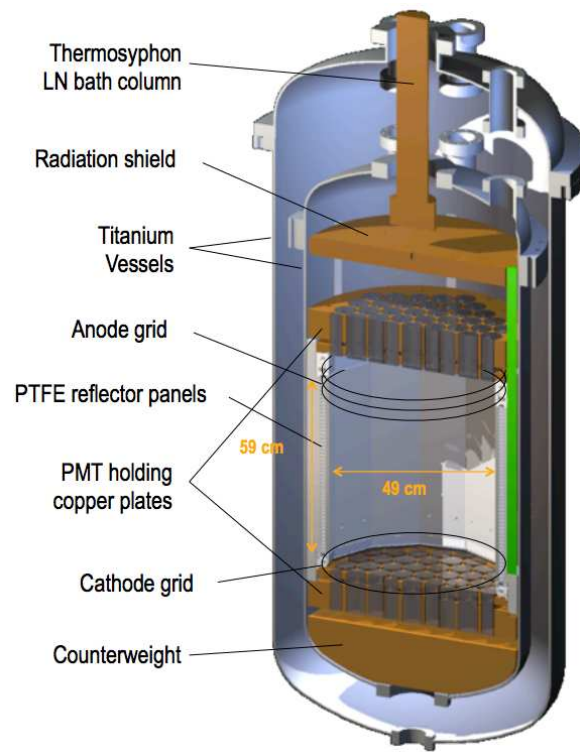
Detekcja bezpośrednia

Dwufazowa komora projekcji czasowej

Dwa największe obecnie eksperymenty

LUX (Large Underground Xenon experiment)

Xenon100



Detekcja bezpośrednia

Dwufazowa komora projekcji czasowej

Dwa największe obecnie eksperymenty

LUX (Large Underground Xenon exp.)

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

Xenon100

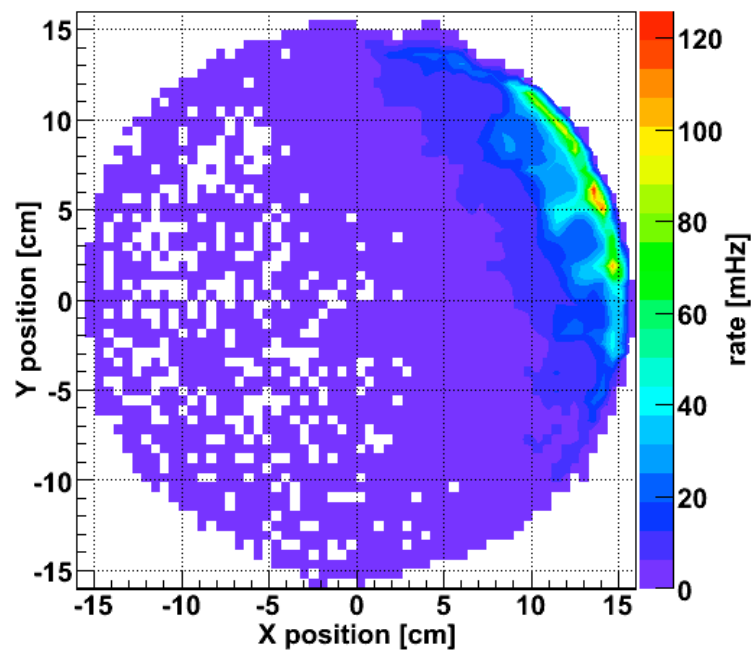
- 161 kg ciekłego Xe
62 kg w obszarze aktywnym
- 242 fotopowielacze
- LNGS (Gran Sasso), Włochy (1400 m)

Detekcja bezpośrednia

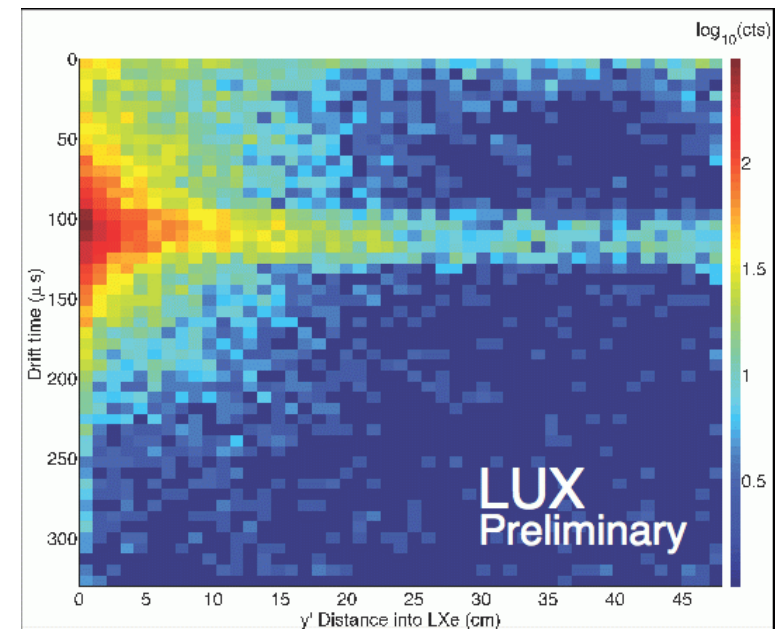
Dwufazowa komora projekcji czasowej

Możliwość rekonstrukcji pozycji punktu zderzenia

Źródło γ przy bocznej ścianie:



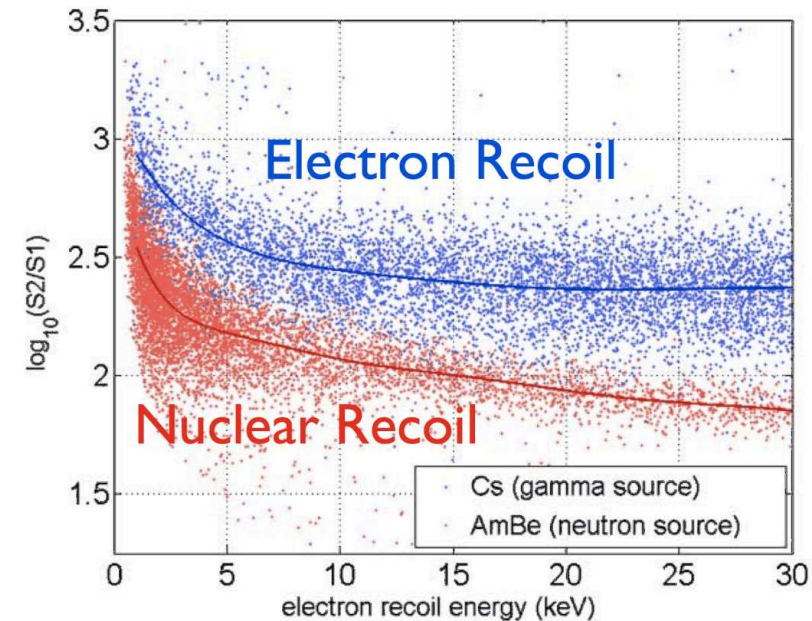
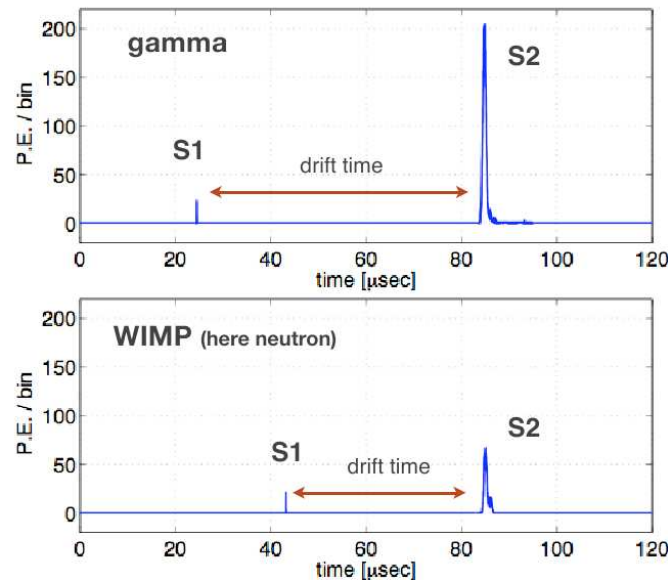
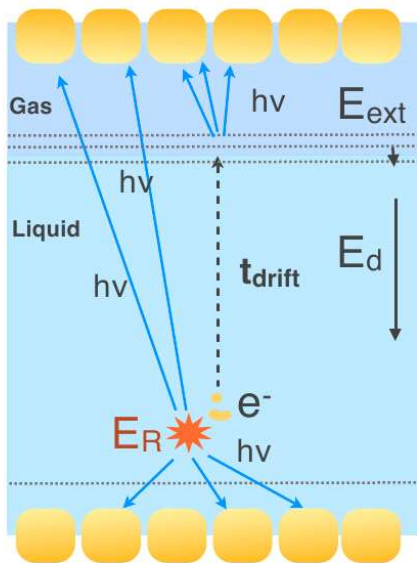
Wiązka neutronów:



Detekcja bezpośrednia

Dwufazowa komora projekcji czasowej

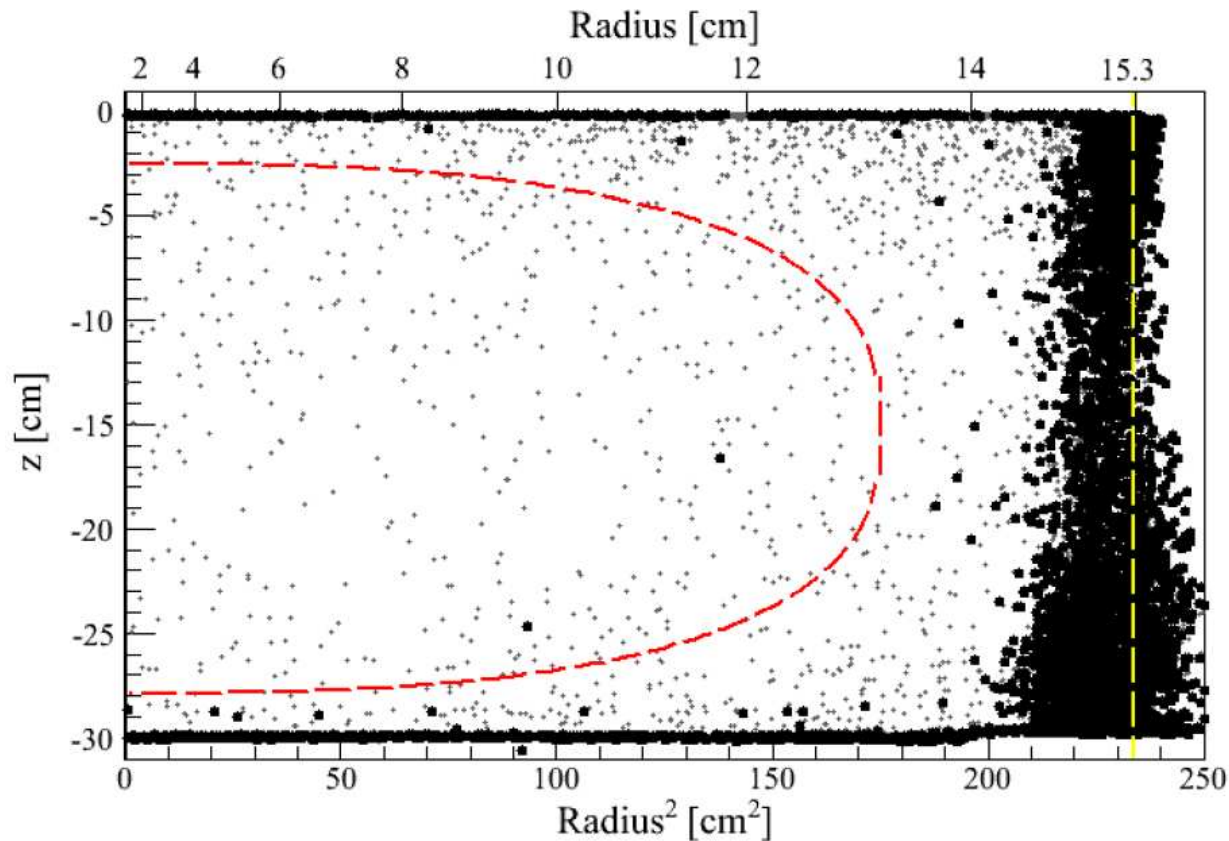
Pomiar scyntylacji i jonizacji daje możliwość odróżnienia oddziaływania na jądrze (WIMP) od rozprożeń na elektronach (γ)



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

Detekcja bezpośrednia

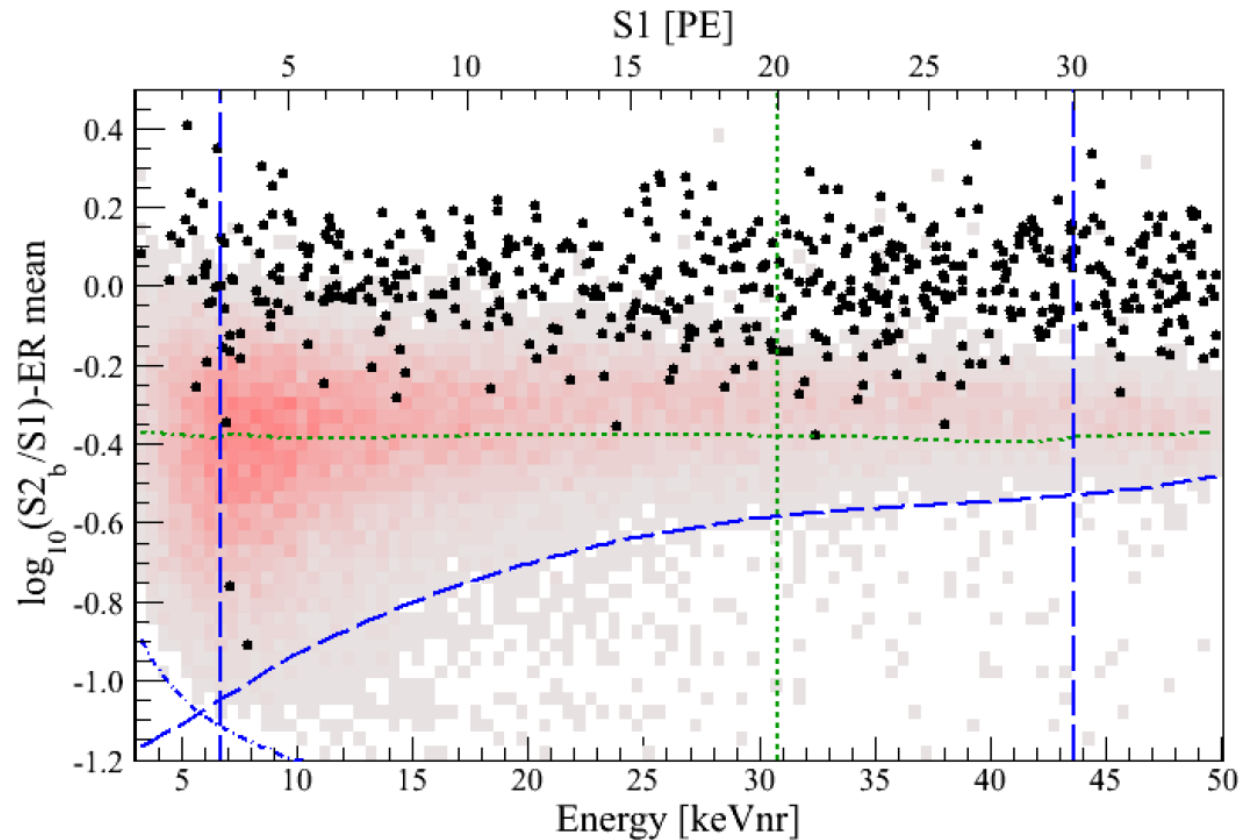
Wyniki Xenon100



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

Detekcja bezpośrednia

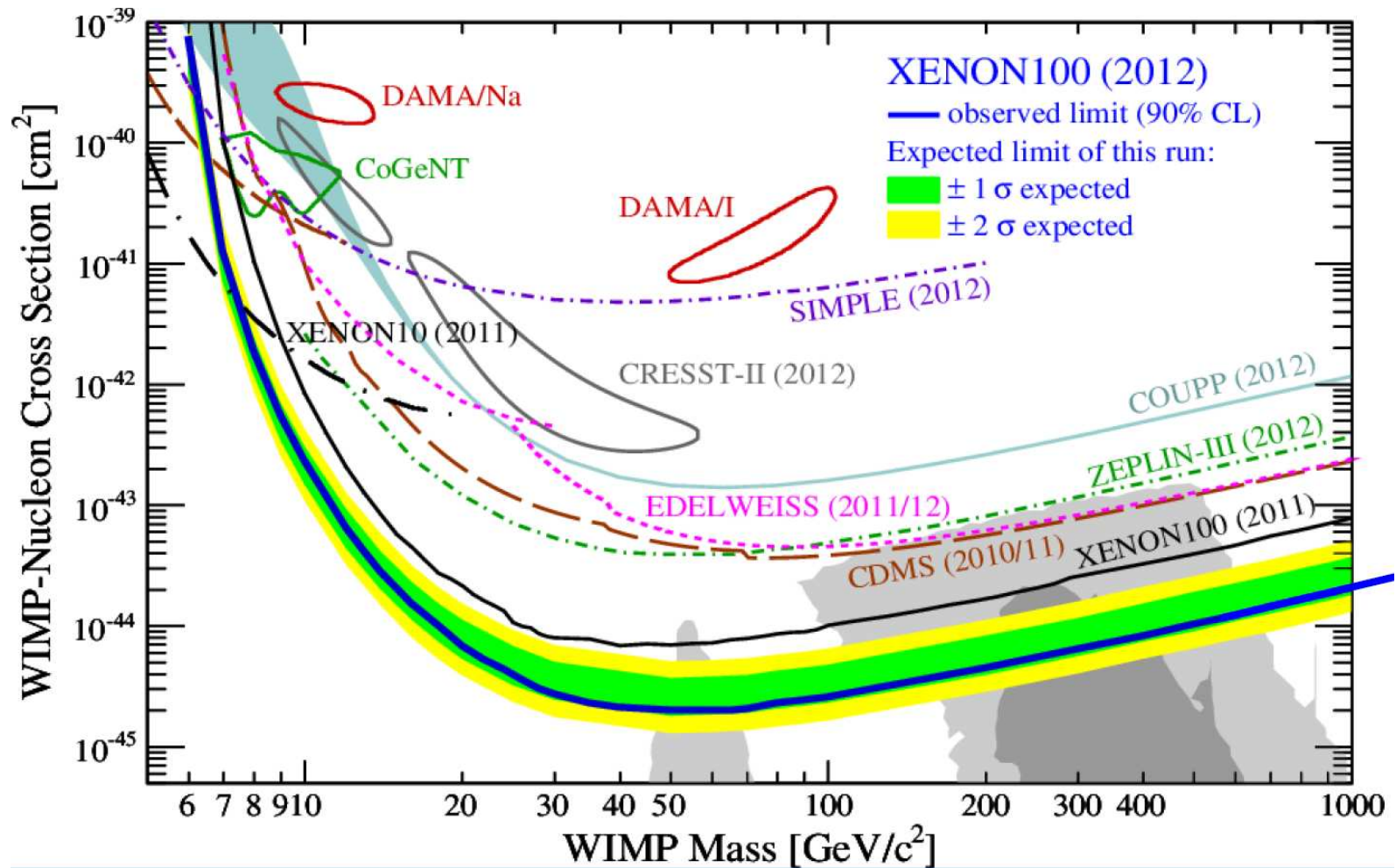
Wyniki Xenon100



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

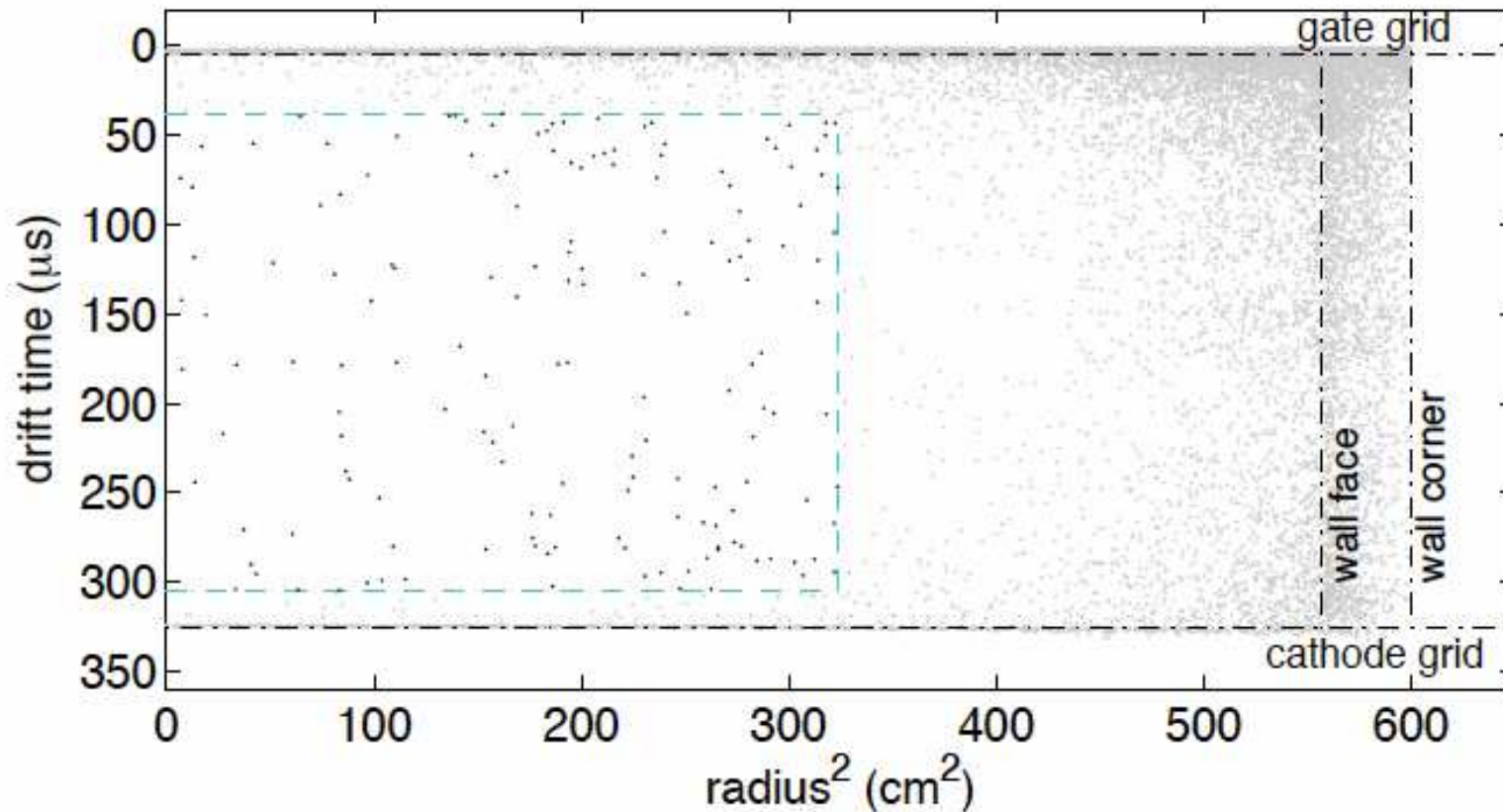
Detekcja bezpośrednia

Wyniki Xenon100



Detekcja bezpośrednia

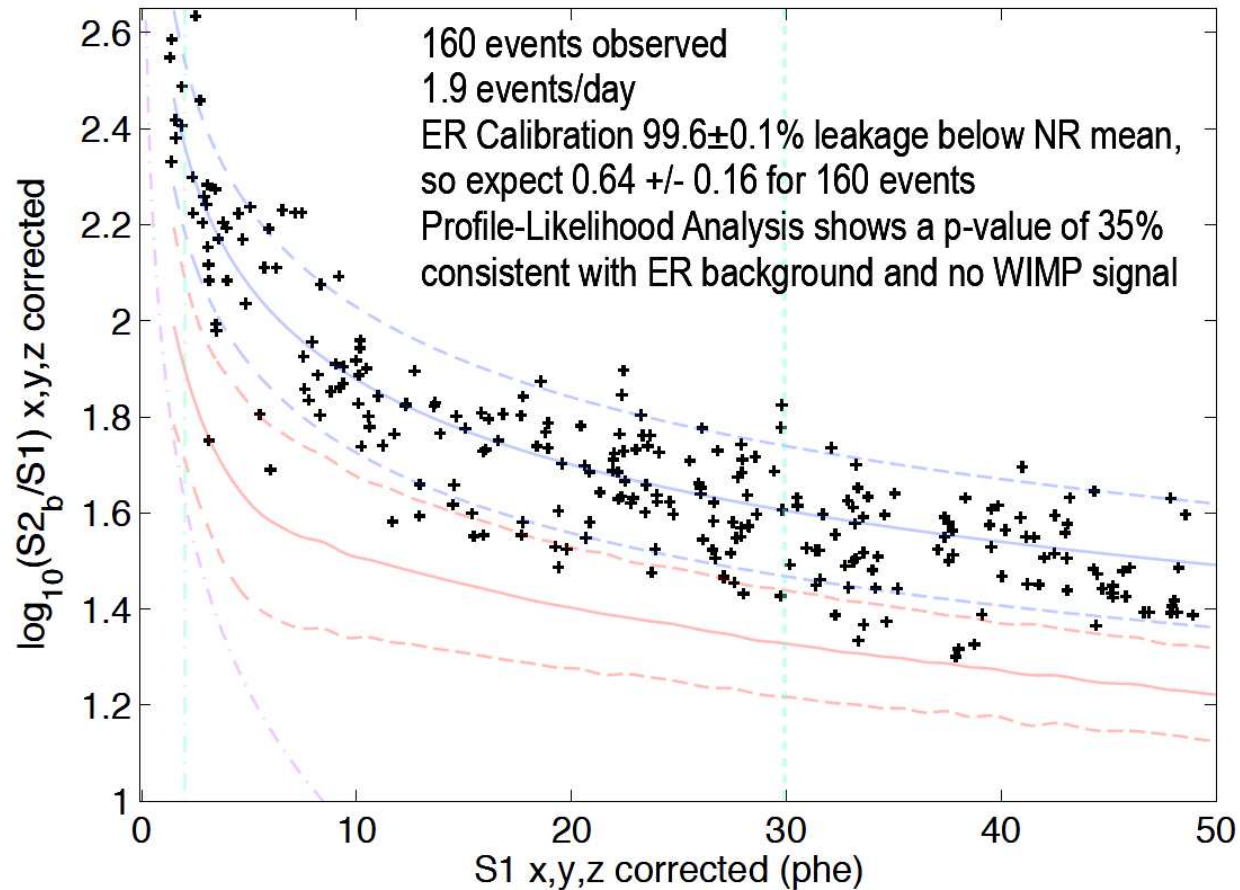
Wyniki LUX



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

Detekcja bezpośrednia

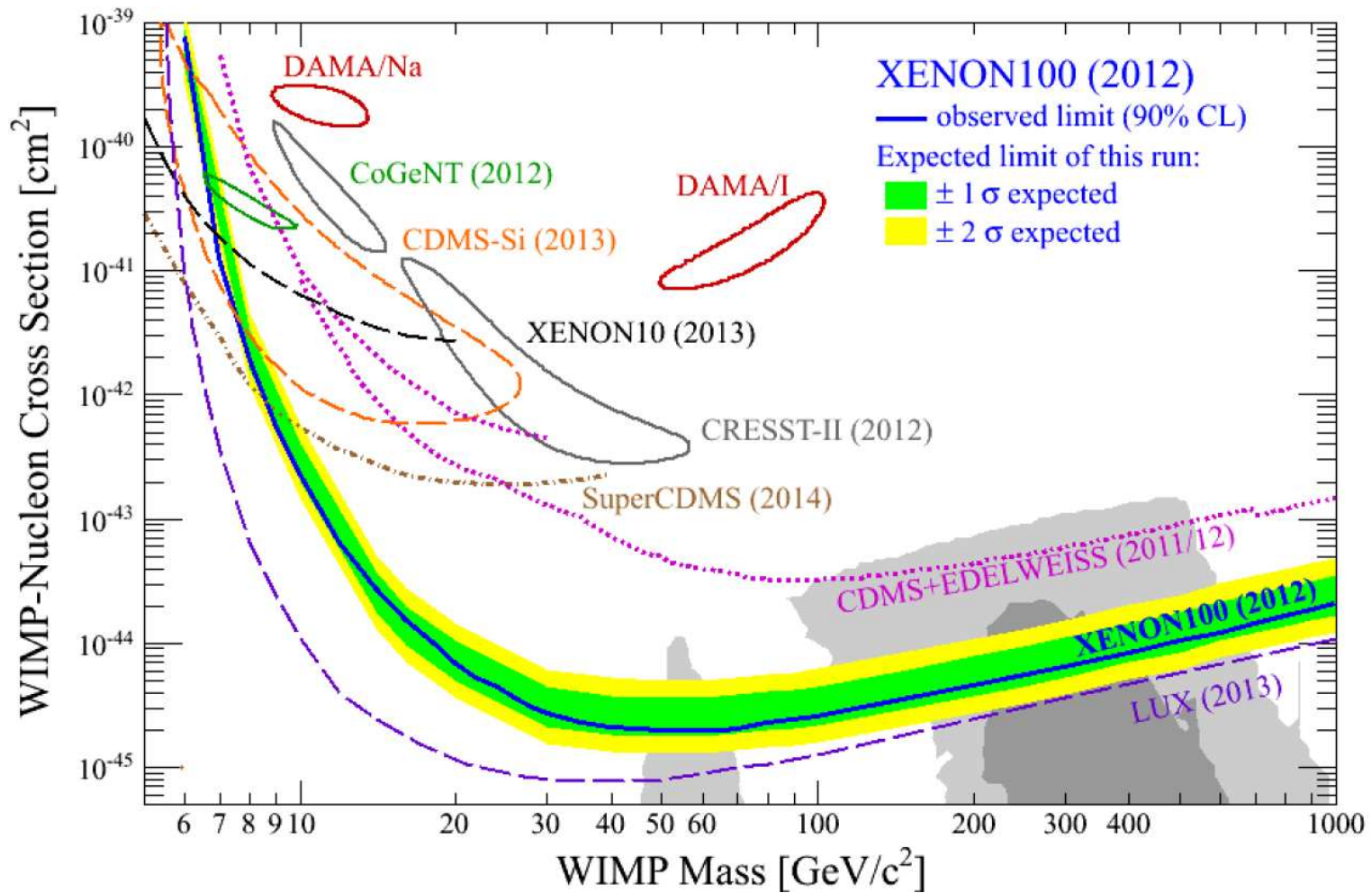
Wyniki LUX



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

Detekcja bezpośrednia

Wyniki LUX



Detekcja bezpośrednia

Przyszłość: Xenon1T

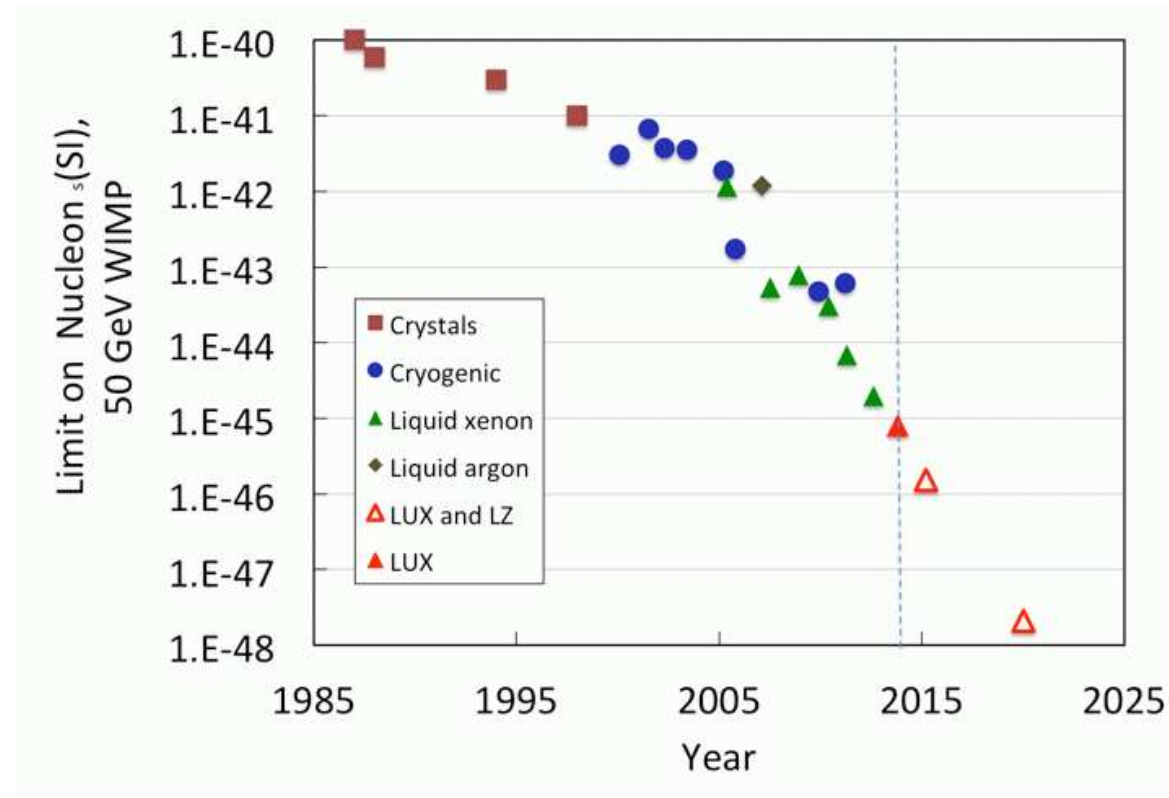
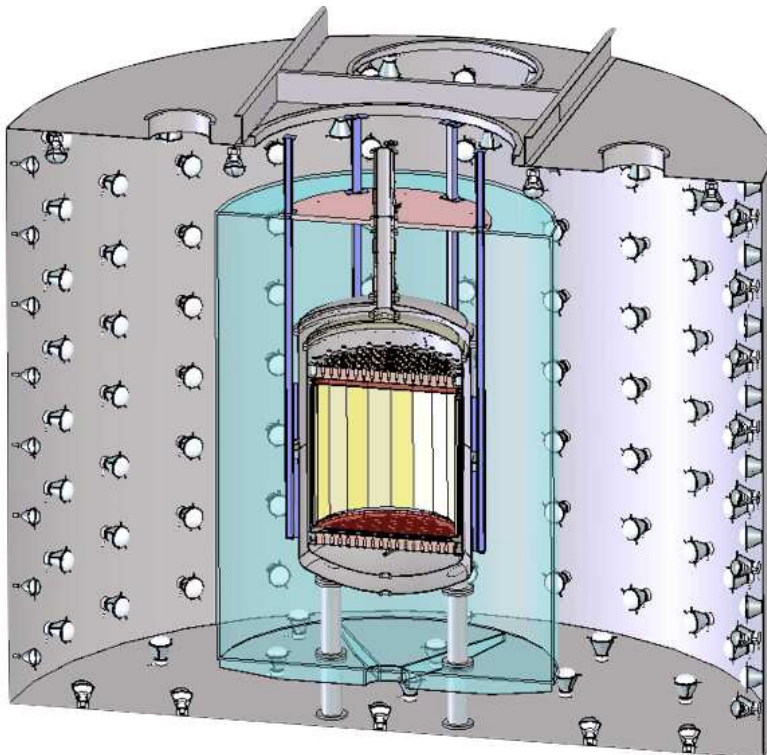
2.4 tony LXe, budowa na ukończeniu



Detekcja bezpośrednia

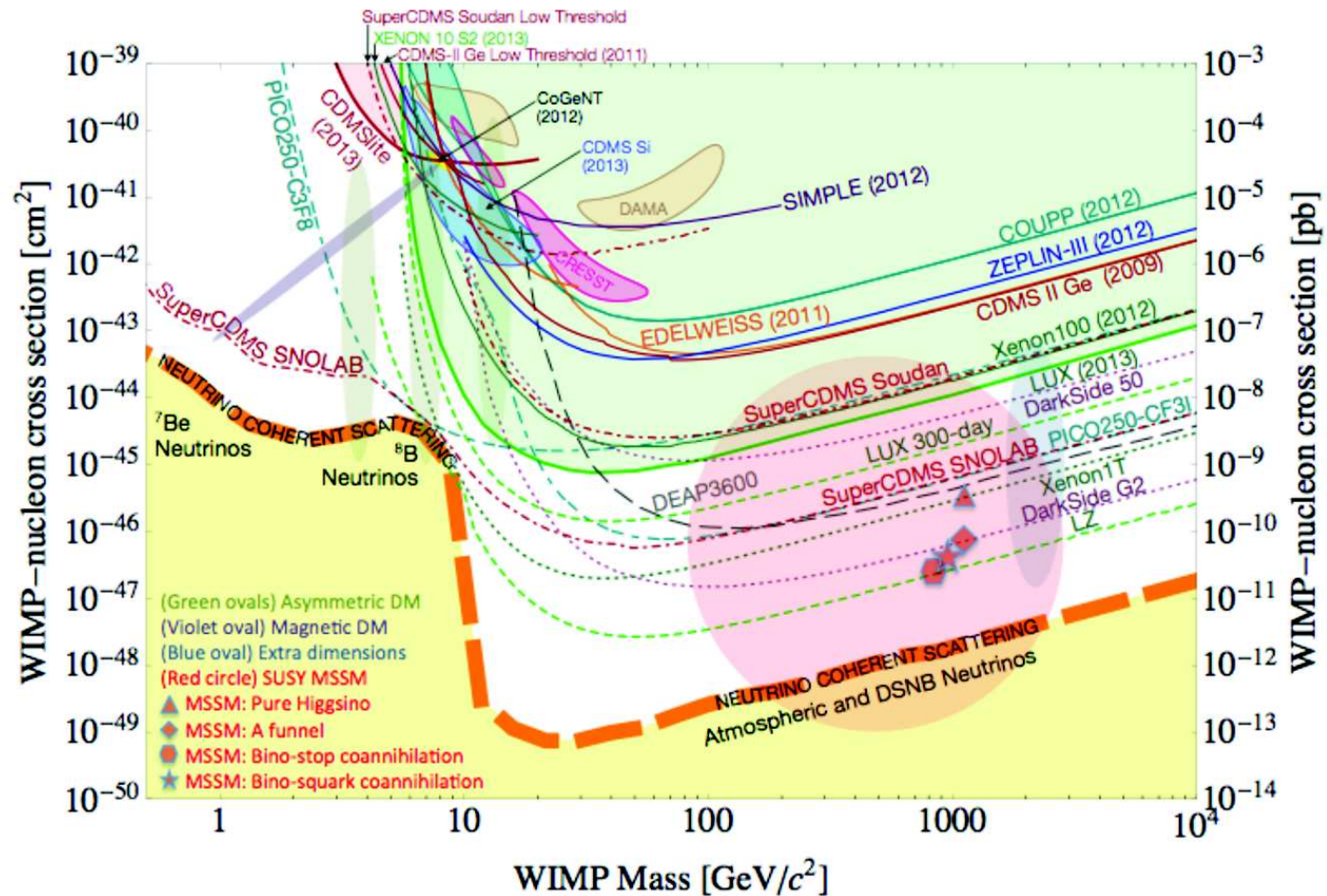
Przyszłość: LUX+Zeplin

Detektor z 7 ton LXe, planowane uruchomienie 2017+



Detekcja bezpośrednia

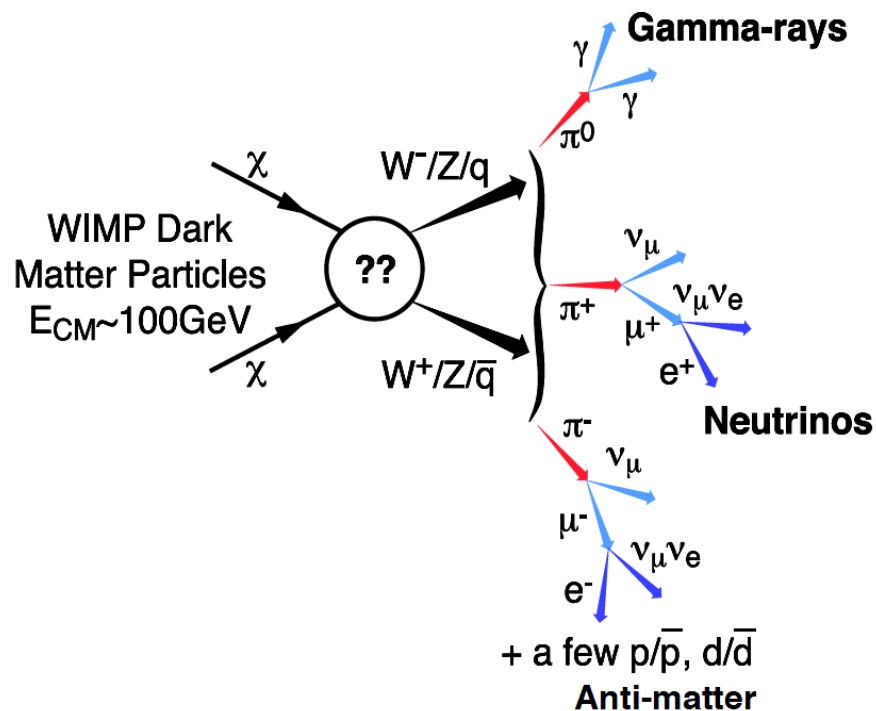
Przyszłość



Precyzja jest tak duża, że niedługo zaczniemy być czuli na tło neutrinowe...

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...

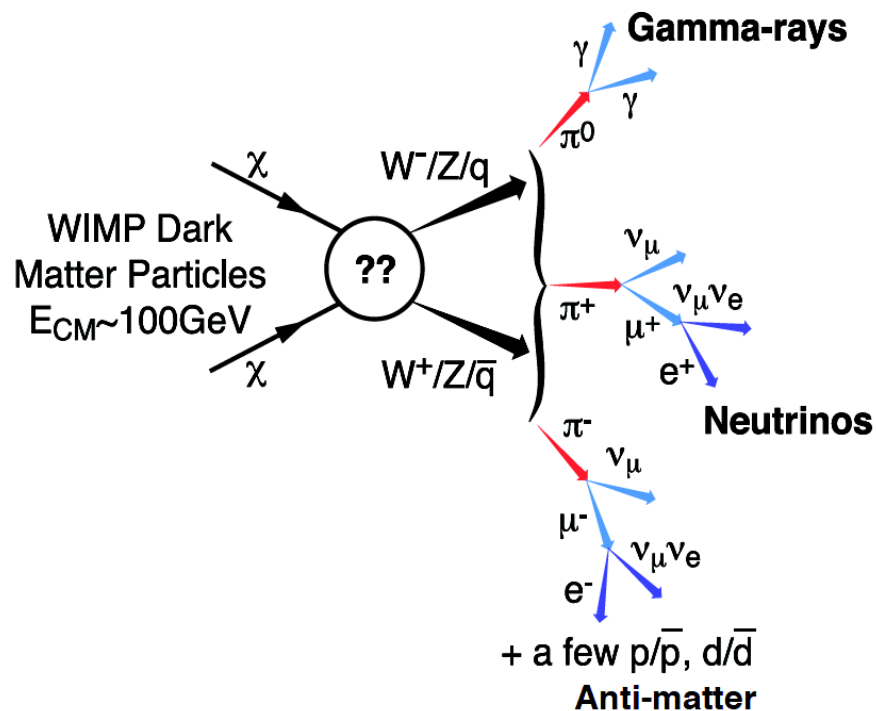
Ale ciemna materia uczestniczy w tworzeniu struktur we Wszechświecie! Więc na małych skalach odległości jej gęstość może być o wiele rzędów wielkości większa niż gęstość średnia (tak jak normalnej materii).

⇒ może znów zachodzić anihilacja

Podobnie jak w gwiazdach znów zachodzi nukleosynteza...

Detekcja pośrednia

Promieniowanie gamma



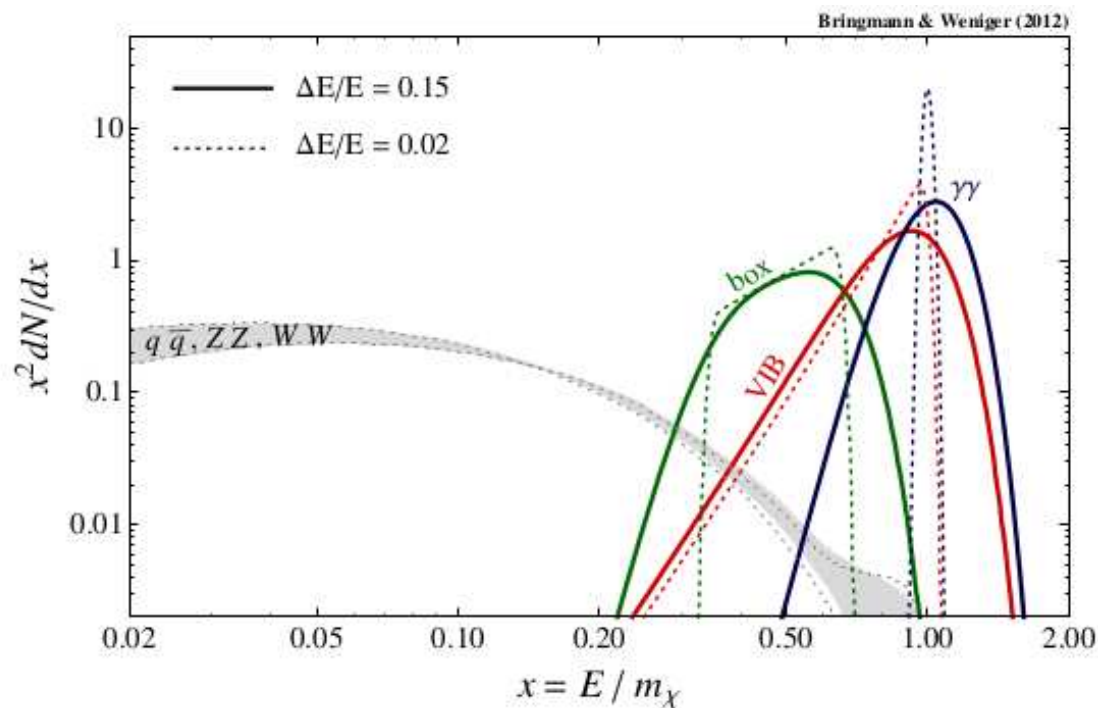
Zalety poszukiwania sygnału anihilacji DM w promieniowaniu gamma:

- 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

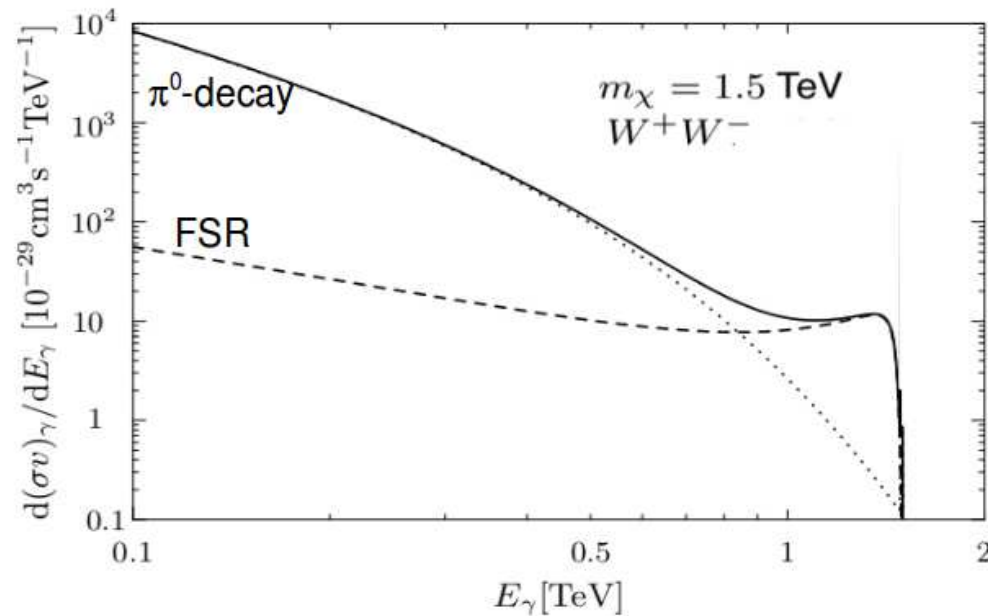
- bezpośrednia anihilacja
 $\chi\chi \rightarrow \gamma\gamma, Z\gamma \dots$
- Virtual Internal Bremsstrahlung
 $\chi\chi \rightarrow f\bar{f}\gamma, W^+W^-\gamma \dots$
- rozpady kaskadowe (Box)

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

Detekcja pośrednia

Promieniowanie gamma

Oczekiwane widmo promieniowania z anihilacji DM



Wtórne promieniowanie γ

- rozpad 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:

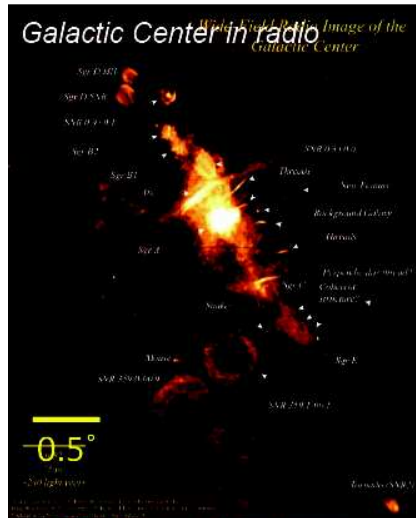
- duża jasność
duża gęstość DM, mała odległość
- małe tło
- dobrze określona pozycja

Kandydaci:

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

Detekcja pośrednia

Źródła

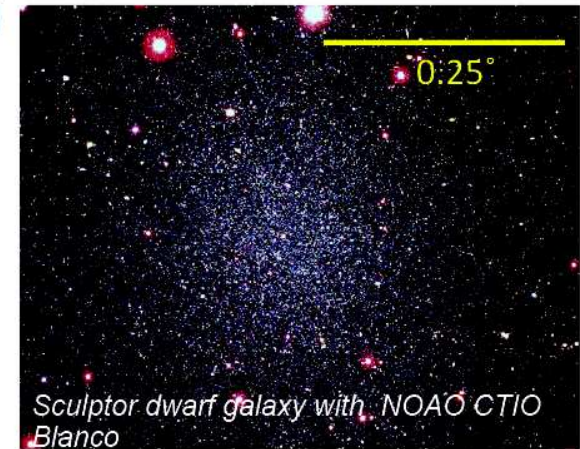


Galactic Centre

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

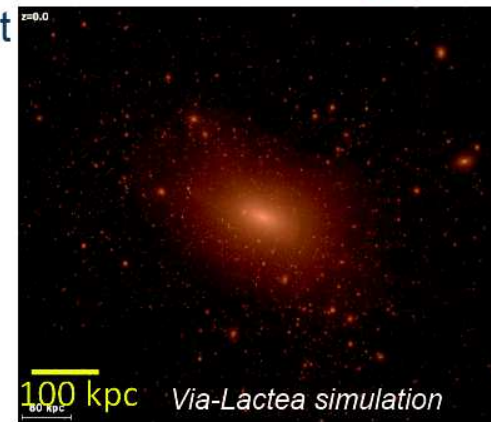
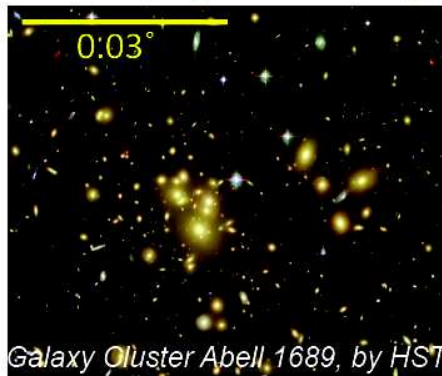
Dwarf galaxies of the Milky Way

- ❑ 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



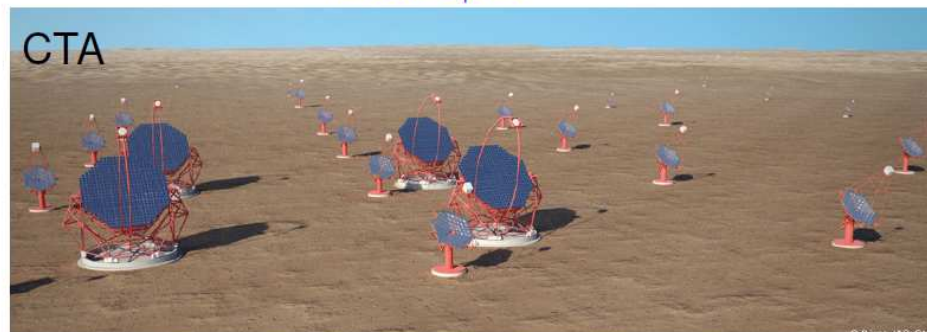
Artist's impression
Credit: SPDO/TDP/DRAO/Swinburne
Astronomy Productions.

Single-dish



gamma-rays

Ground based
telescopes



x-rays
Space satellites

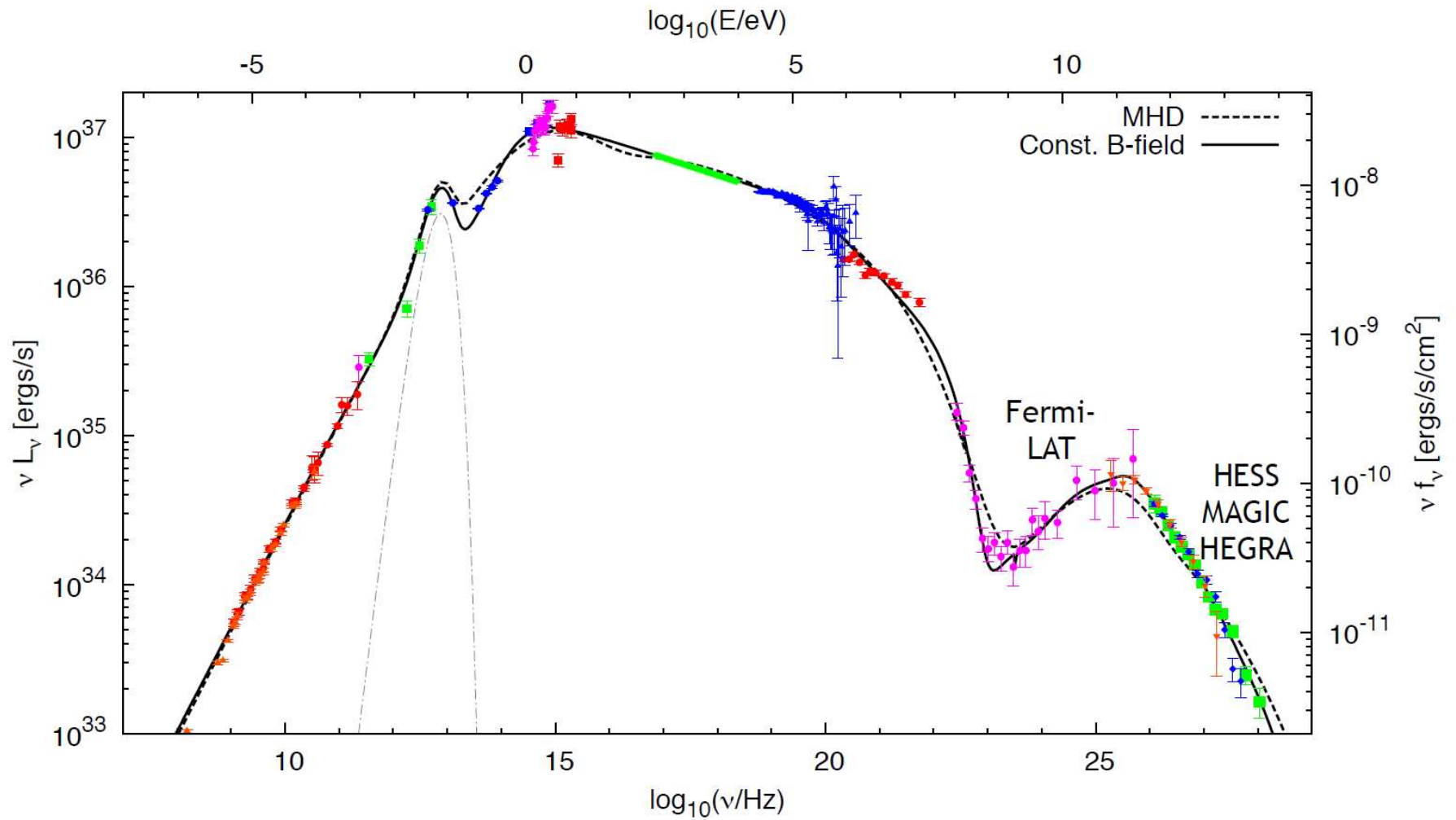


Space
satellites



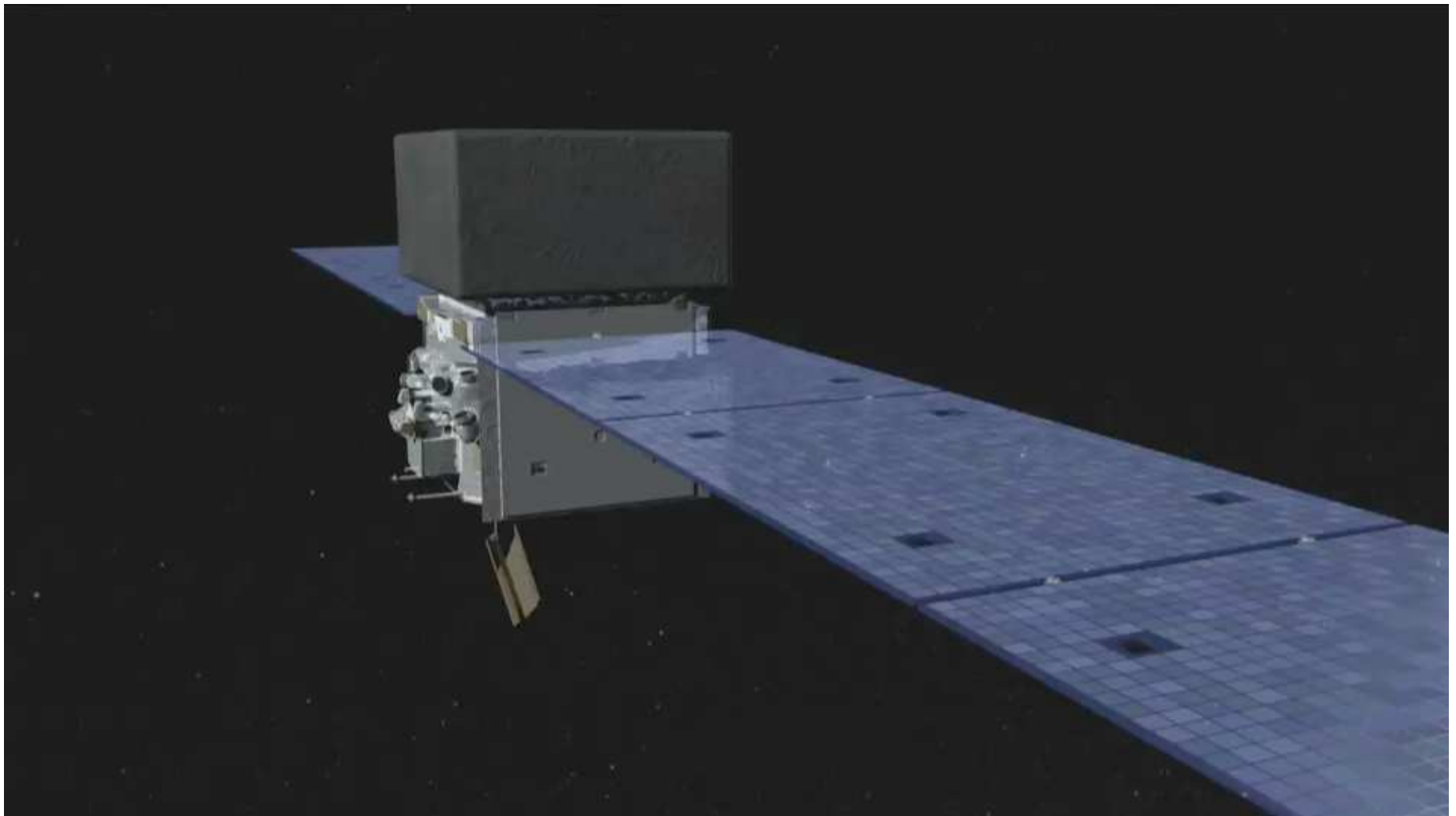
Detekcja pośrednia

Zakres widmowy



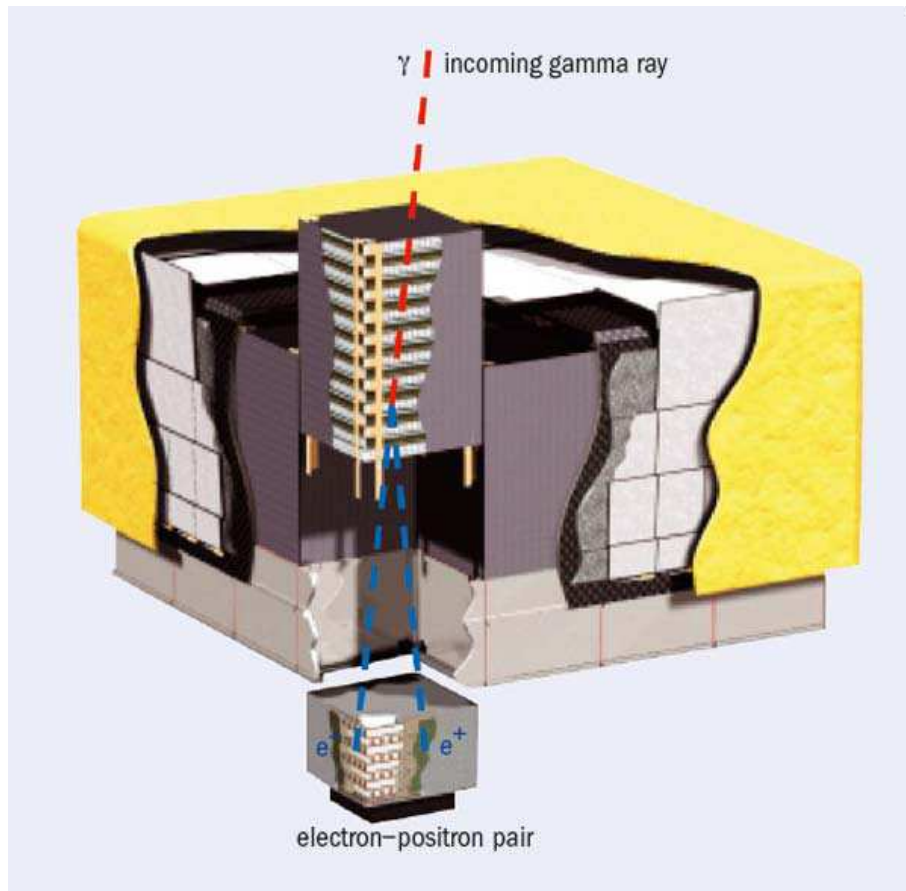
Detekcja pośrednia

Fermi-LAT



Detekcja pośrednia

Large Area Telescope



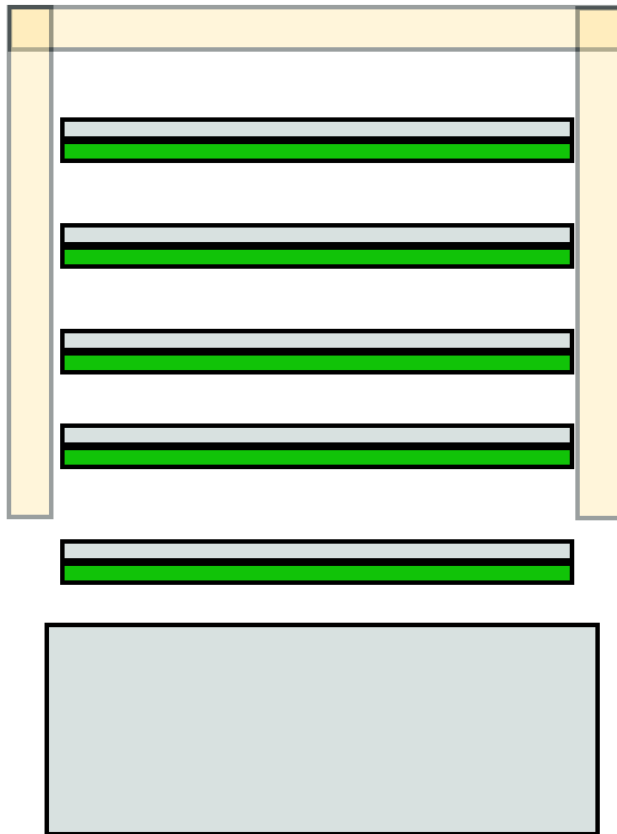
Detektor dedykowany pomiarowi fotonów w zakresie od 20 MeV do 300 GeV.

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

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

Detekcja pośrednia

Large Area Telescope



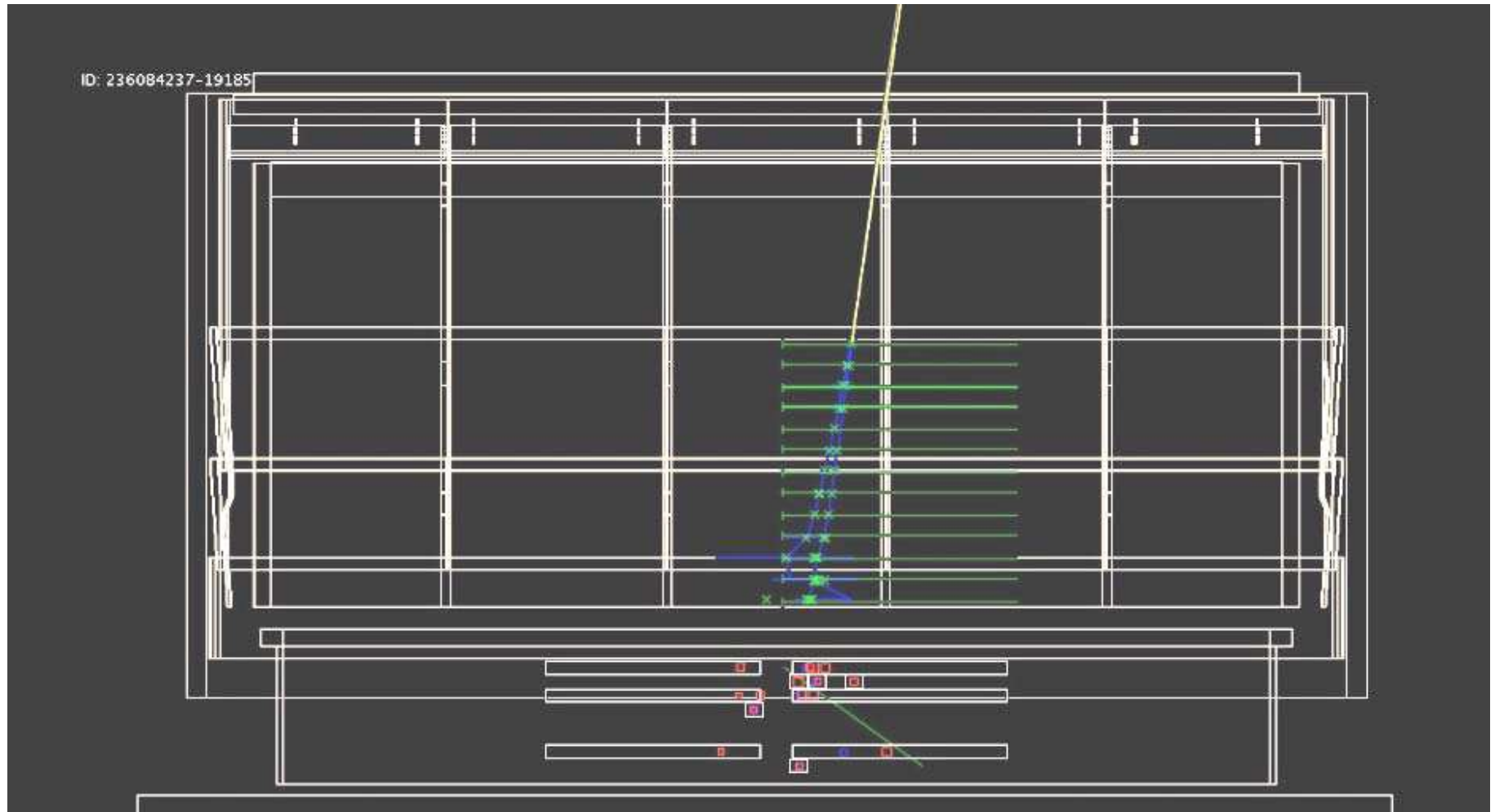
Główne elementy:

- 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

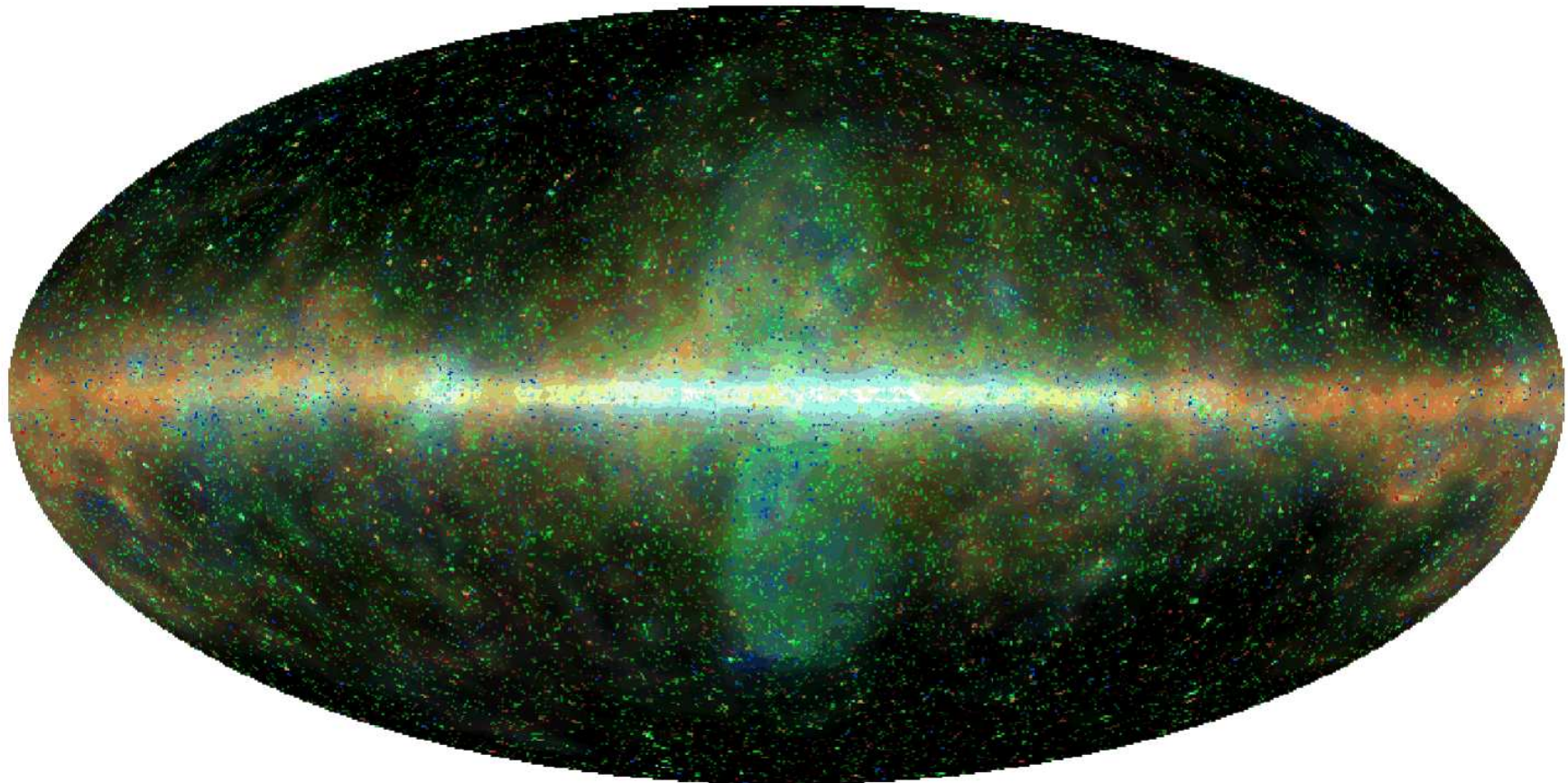
przykładowy przypadek



Detekcja pośrednia

Wyniki Fermi-LAT

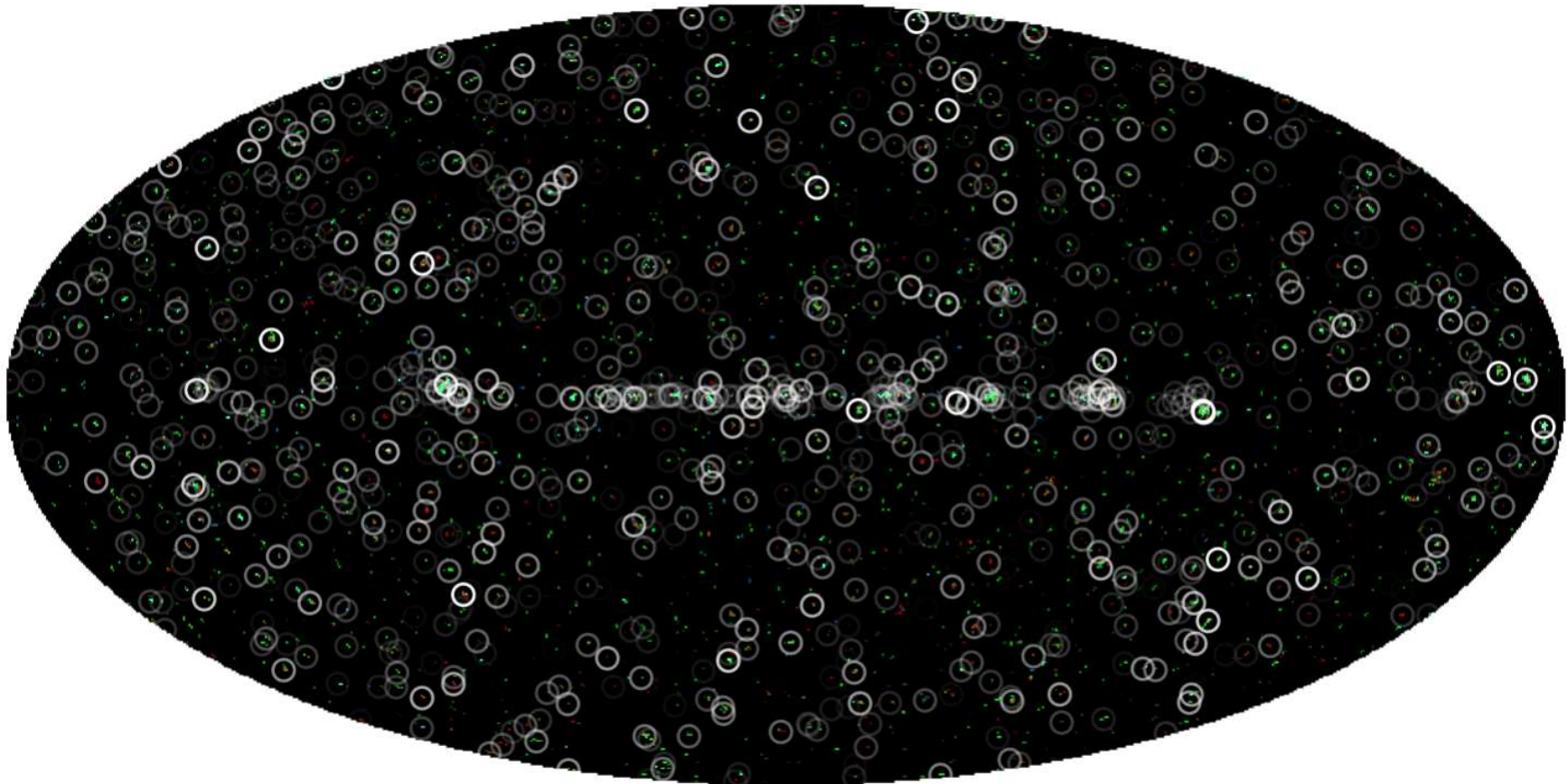
Mapa nieba w fotonach 1 - 300 GeV (skala logarytmiczna)



Detekcja pośrednia

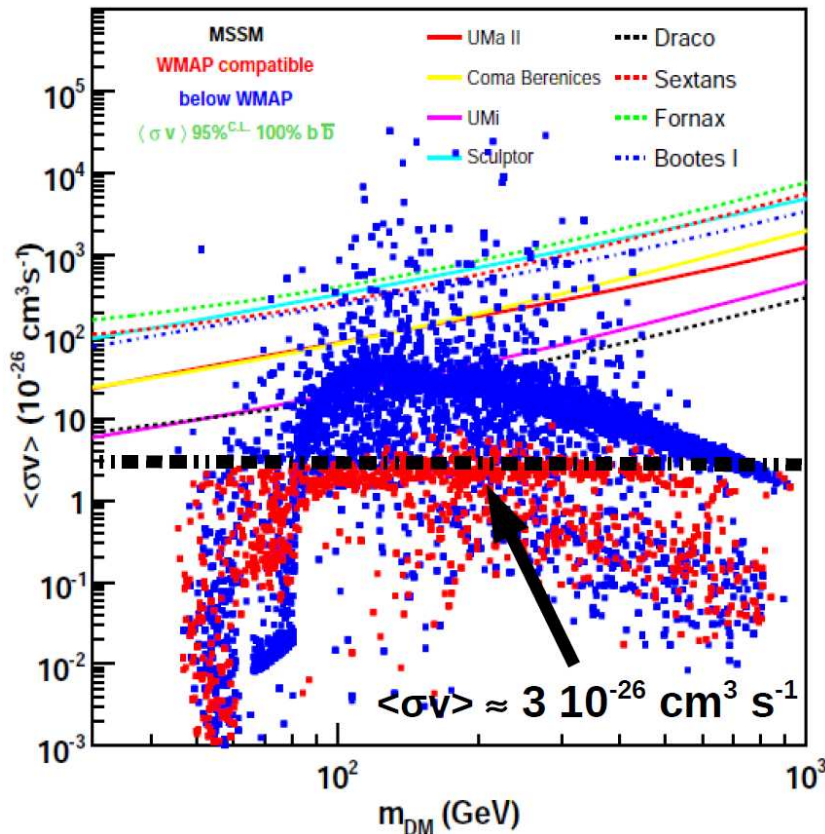
Wyniki Fermi-LAT

Zidentyfikowano 2552 źródła punktowe...



Detekcja pośrednia

Wyniki Fermi-LAT



Galaktyki karłowate:

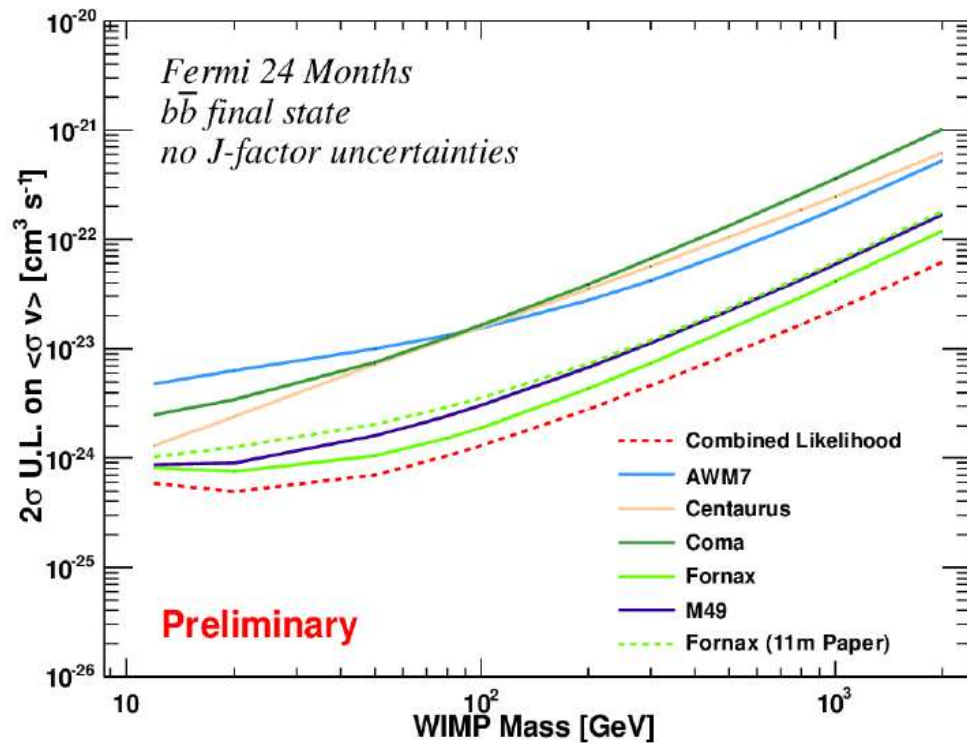
- zdominowane przez materię nie świecąca
- nie powinny być źródłem promieniowania γ
- znane w bezpośrednim sąsiedztwie

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

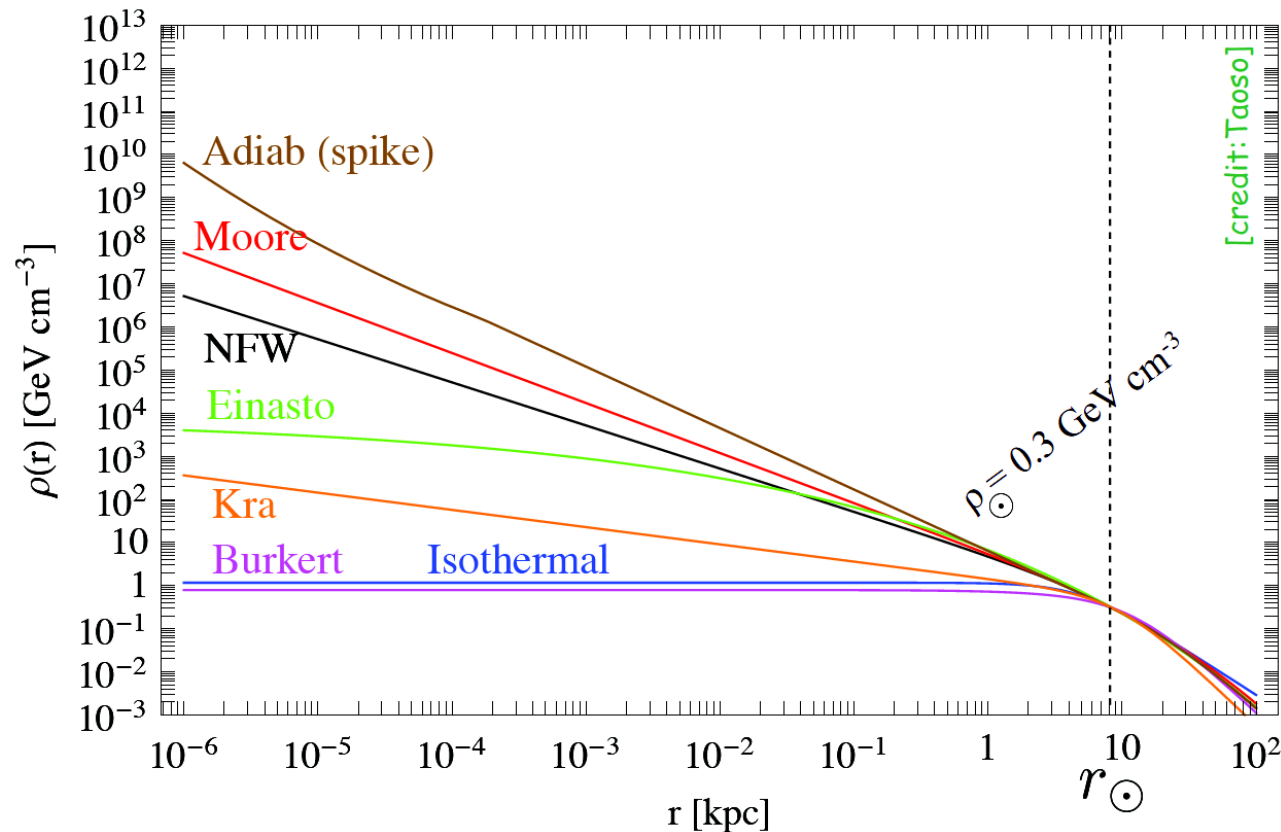
założony kanał anihilacji $\chi\chi \rightarrow b\bar{b}$

Detekcja pośrednia

Halo galaktyki

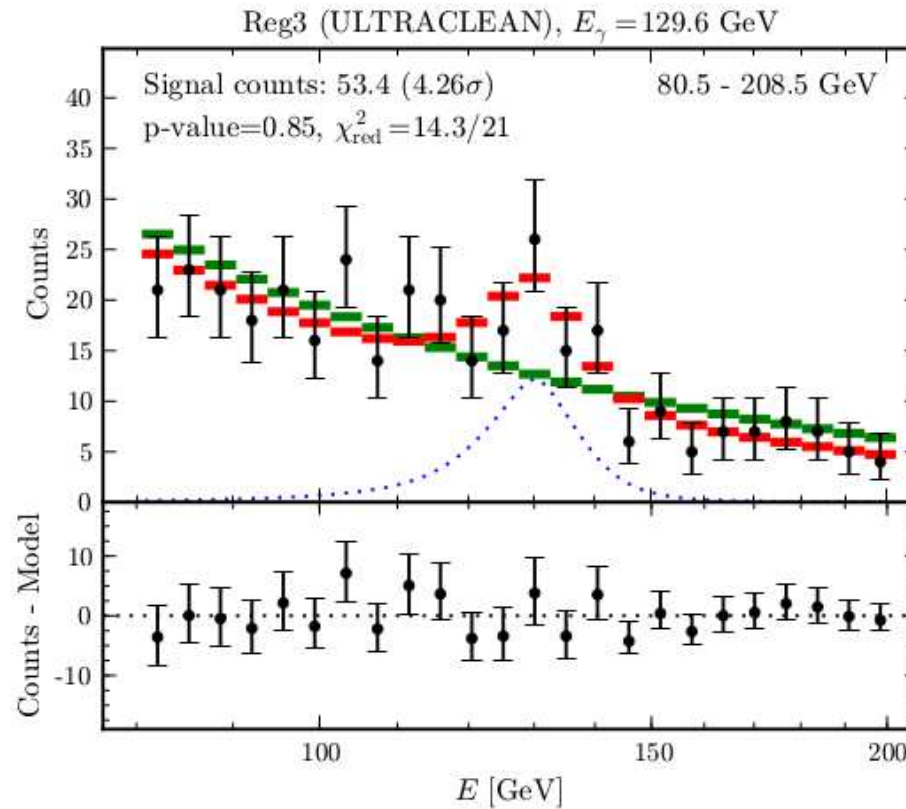
Również nie zidentyfikowano żadnych źródeł promieniowania, które mogłyby świadczyć o anihilacji w zagęszczeniach ciemnej materii.

Wyznaczanie limitów utrudnione przez duże niepewności w modelowaniu halo.



Detekcja pośrednia

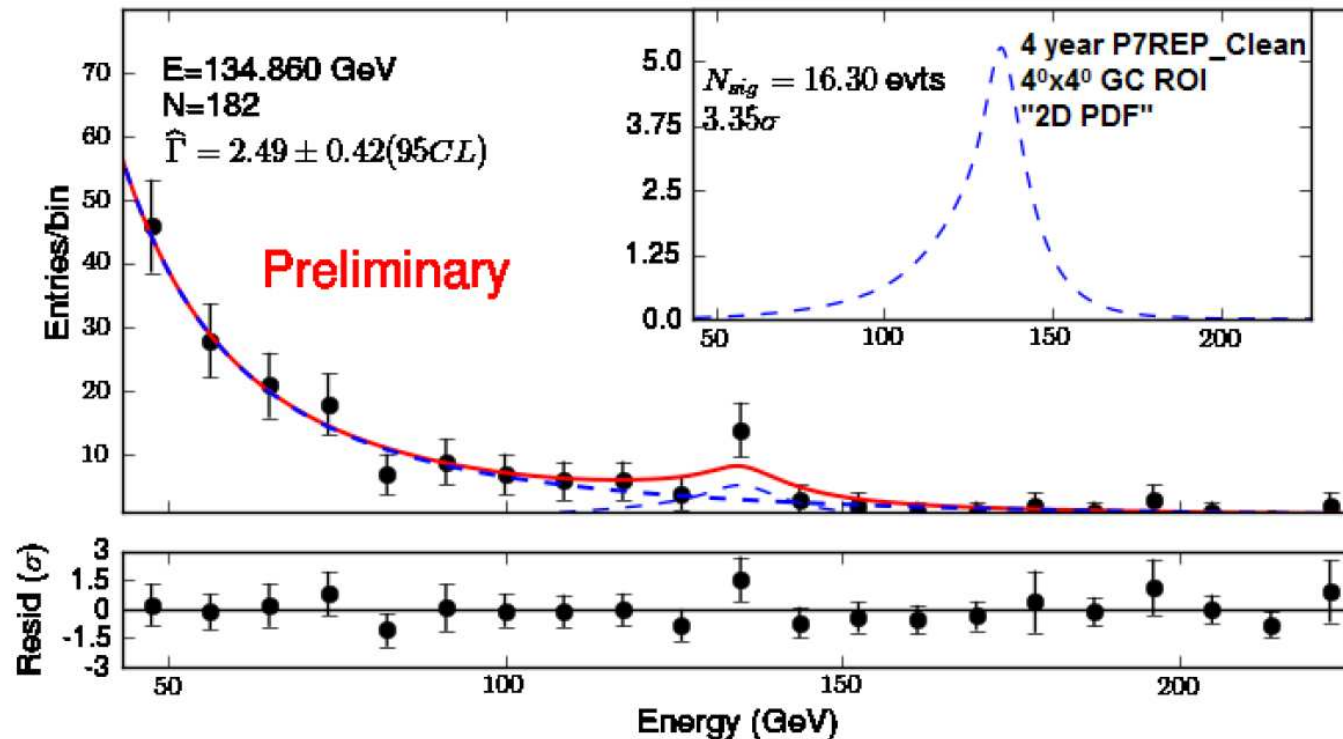
Wyniki Fermi-LAT



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

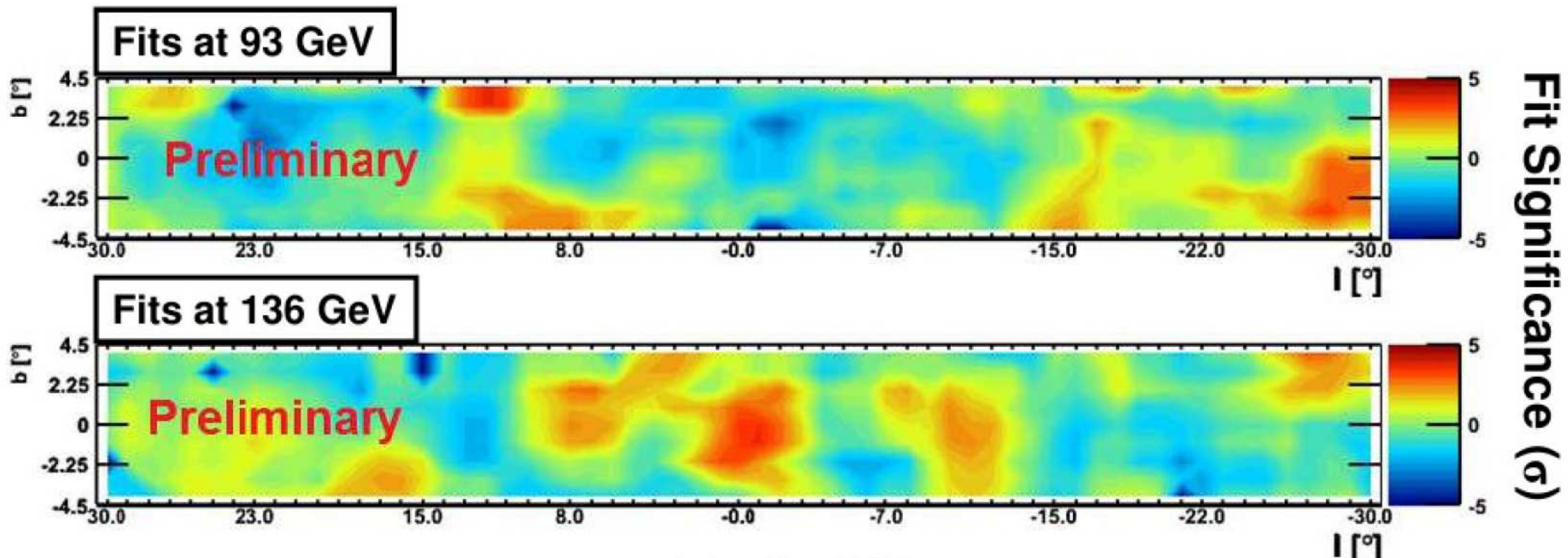


Po rekaliibracji danych efekt zmalał do ok. 3.3σ .

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

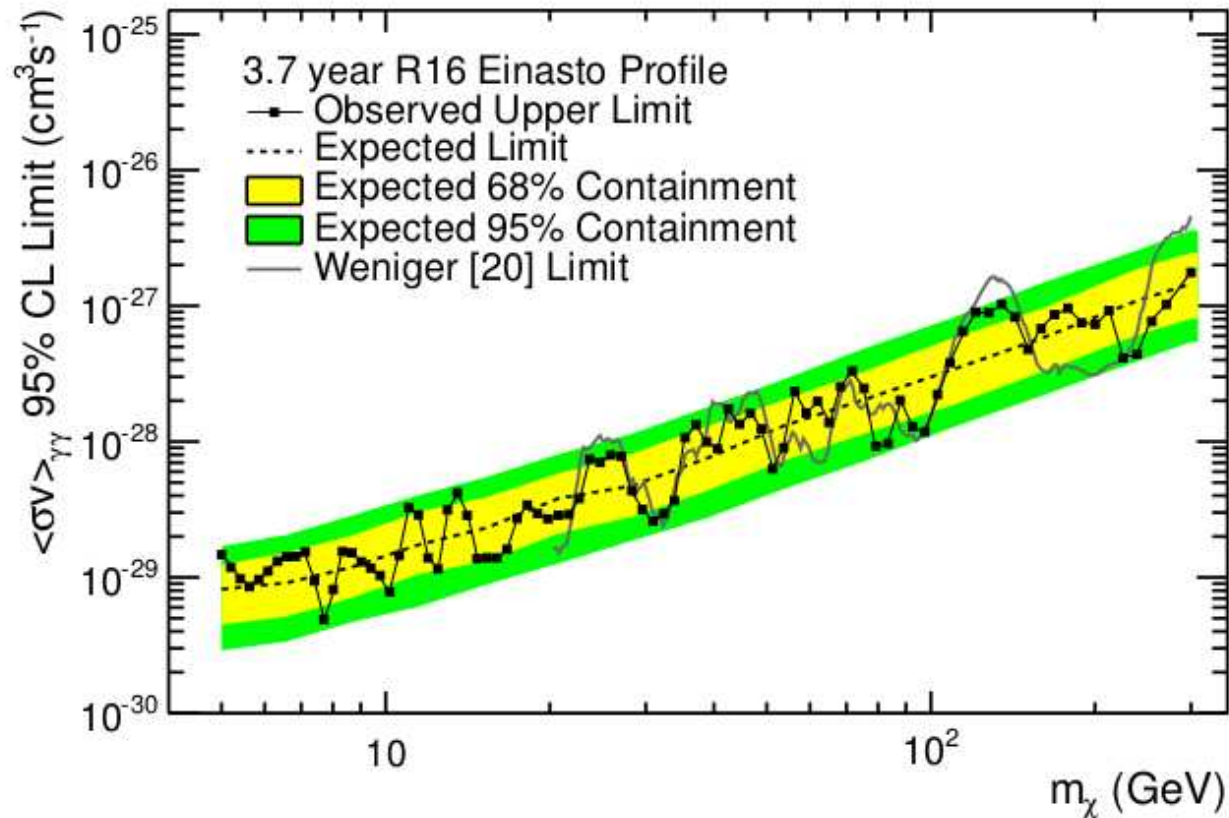


Porównanie rozkładu promieniowania w płaszczyźnie Galaktyki, w pasmach 93 i 136 GeV.

⇒ 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.