

# 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

# Ciemna materia

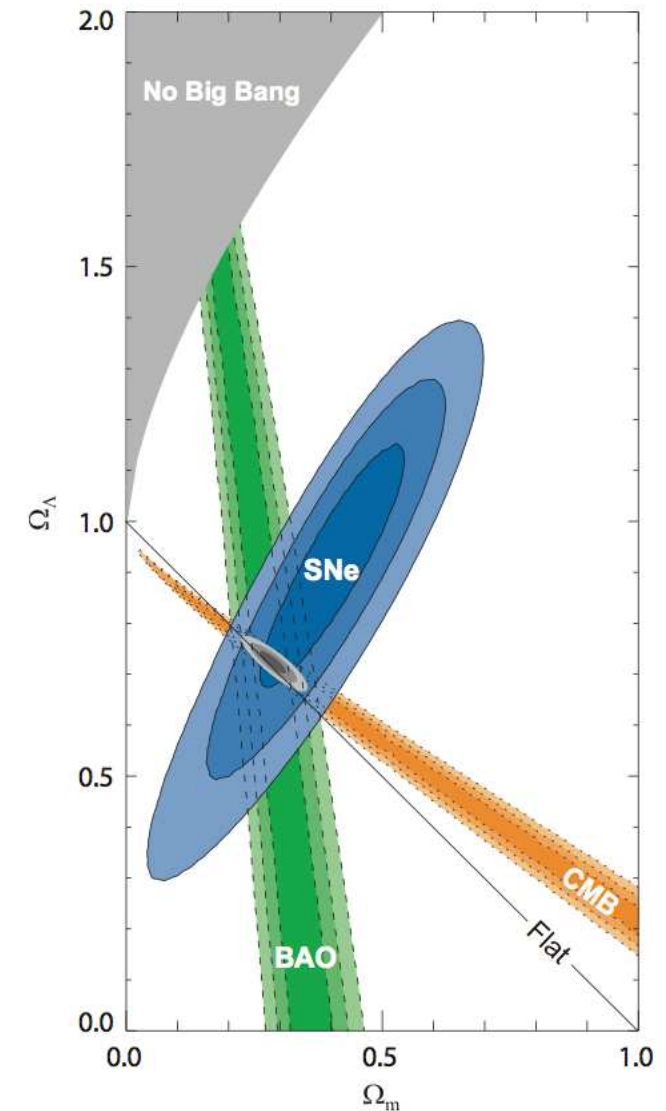
## Przesłanki eksperymentalne

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** ( $\Lambda$ )



# Ciemna materia

## Właściwości

Wiemy że ciemna materia:

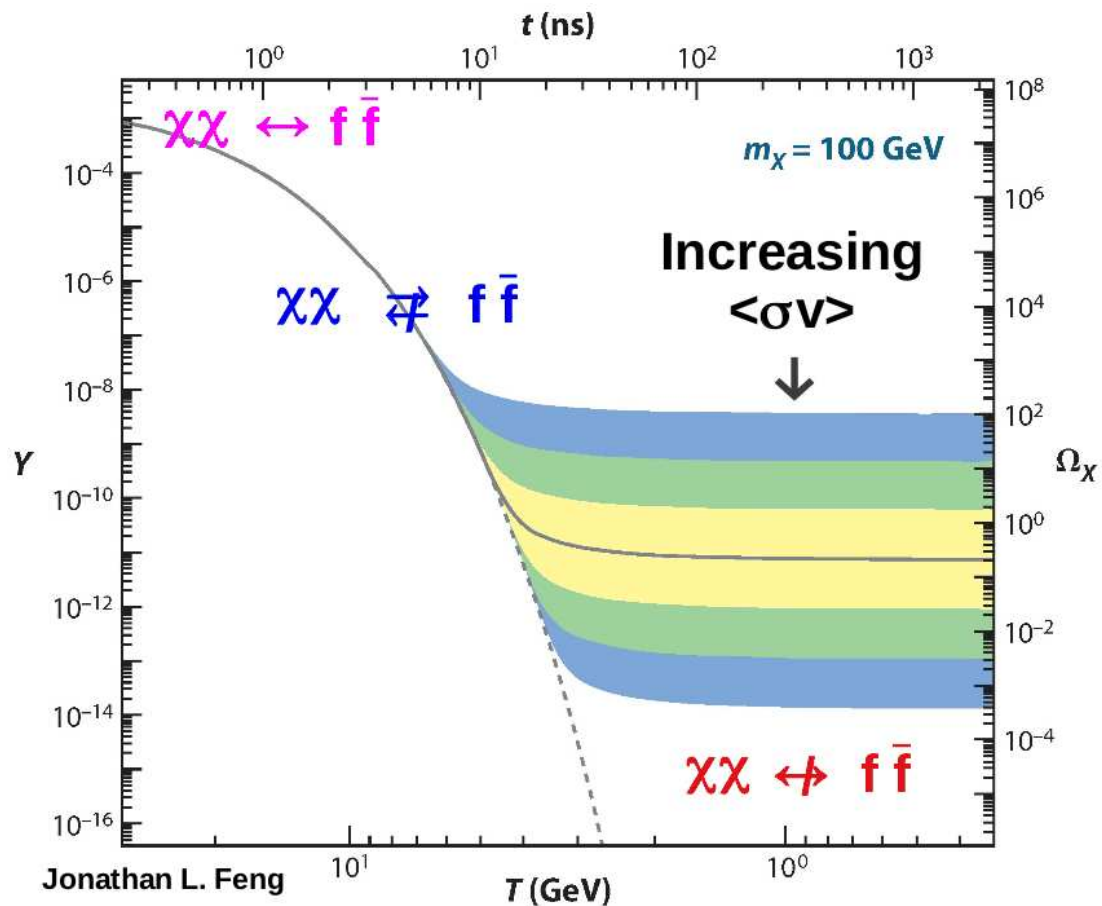
- jest “zimna” (nierelatywistyczna)
- jest niebarionowa
- jest stabilna (nie rozpada się)
- bardzo słabo oddziałuje (tylko grawitacyjnie?)
- daje wkład ok.  $1/4$  gęstości krytycznej ( $5 \times$  materia barionowa)

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:

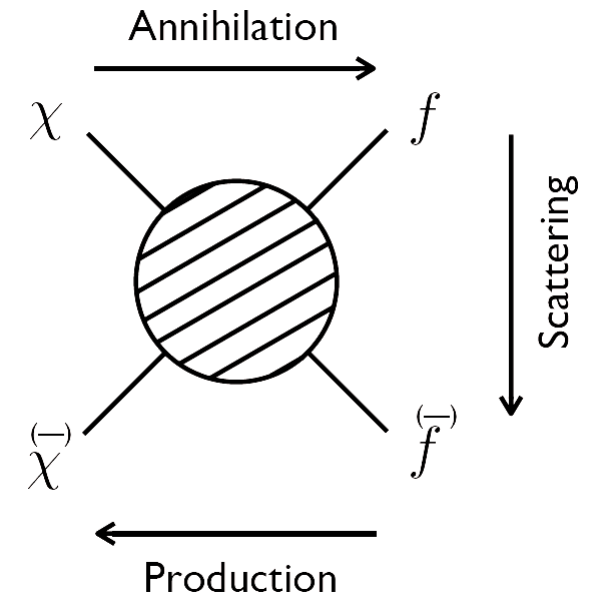
$$\Omega_{\chi} h^2 \approx \frac{3 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^3/\text{s}}{\langle\sigma v\rangle} \sim 0.12$$

# 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

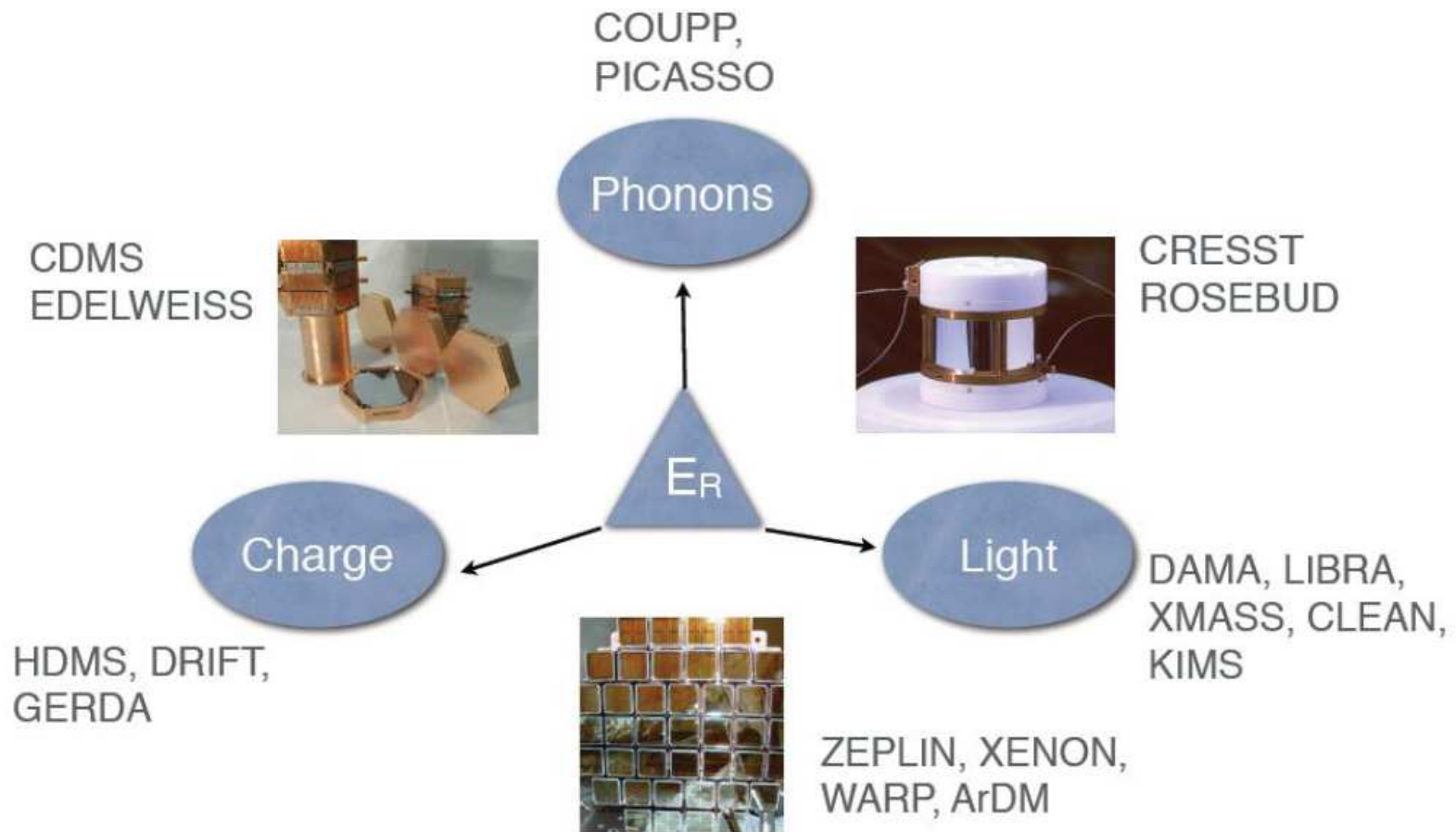


# Detekcja bezpośrednia

## Kanały detekcji

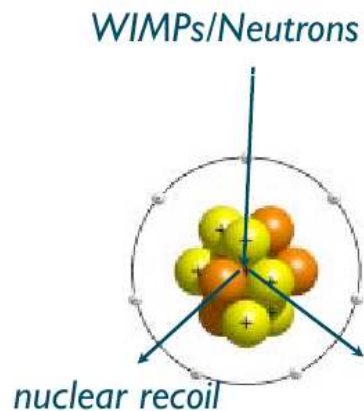
Mierząc niezależnie jonizację, scyntyllacje i ciepło  $\Rightarrow$  eliminacja tła.

Różne eksperymenty przyjęły różną strategię

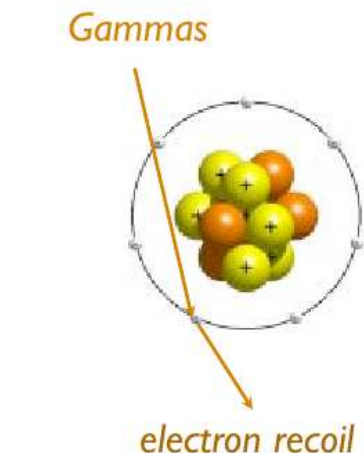


# Detekcja bezpośrednia

## 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.

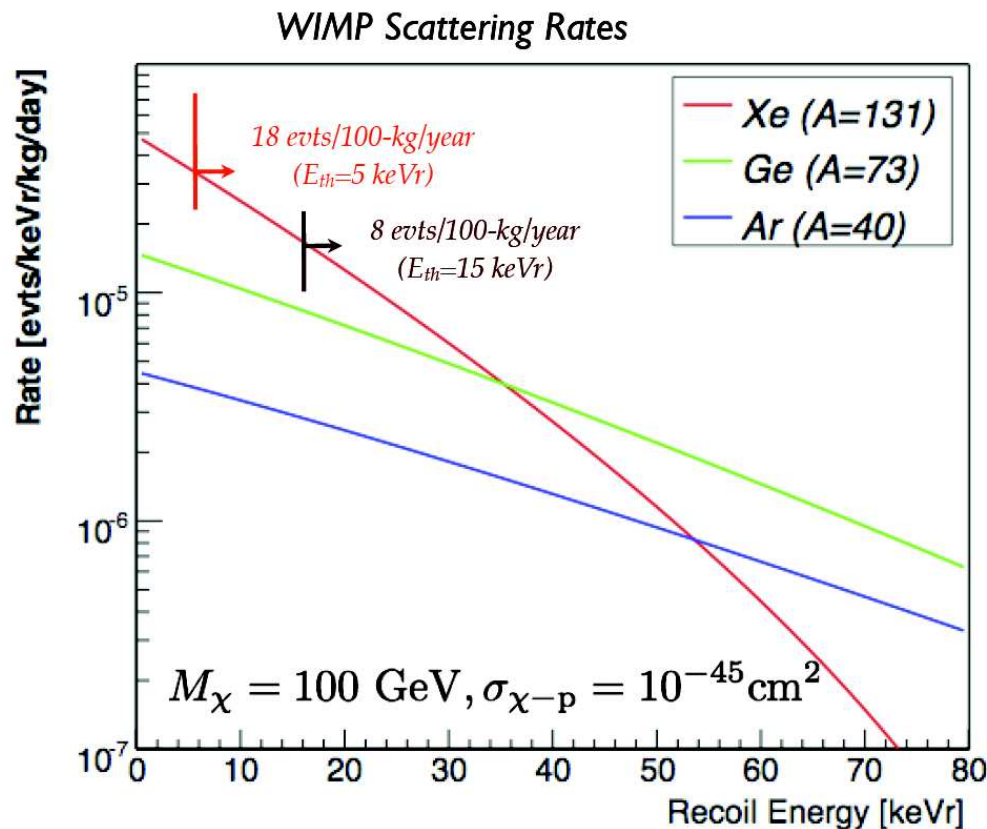
Łatwiej zbudować duży detektor ograniczając się do pomiaru scyntylacji i jonizacji. Jest to możliwe m.in. w ciekłych gazach szlachetnych.

# Detekcja bezpośrednia

## Ciekłe gazy szlachetne

Zalety:

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



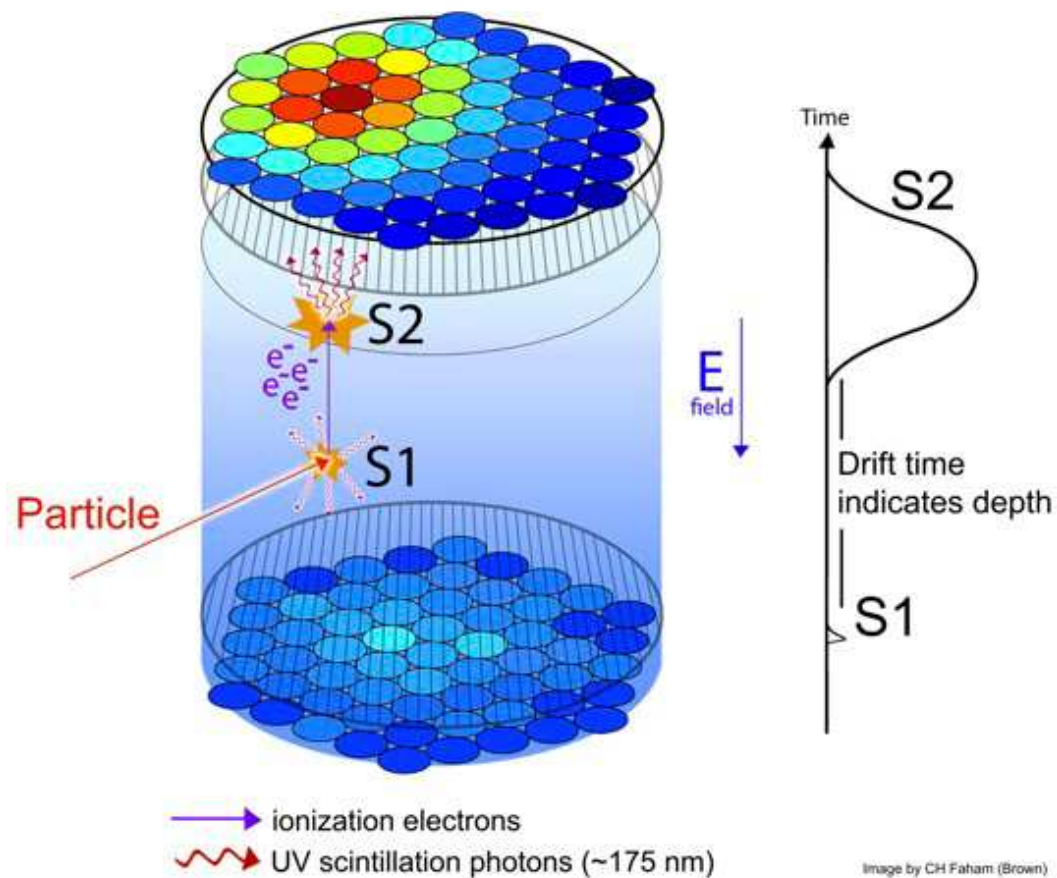
Najczęściej wybierany ksenon:

- 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**.

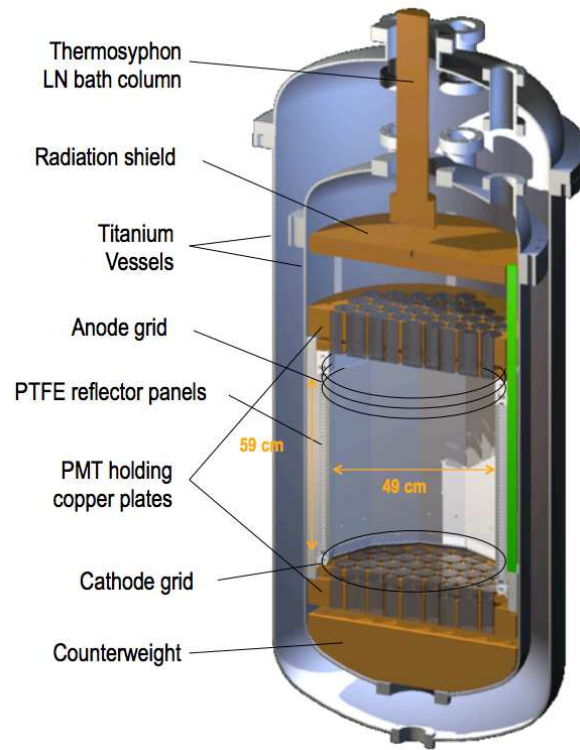
# Detekcja bezpośrednia

## Dwufazowa komora projekcji czasowej

Najsilniejsze ograniczenia na DM pochodzą obecnie z eksperymentów

LUX (Large Underground Xenon experiment)

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

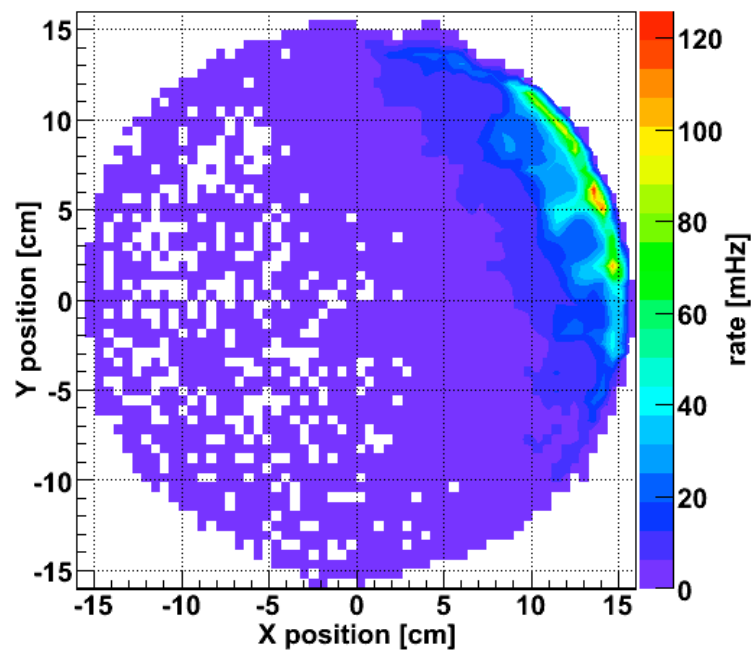
- 161 kg ciekłego Xe  
62 kg w obszarze aktywnym
- 242 fotopowielacze
- LNGS (Gran Sasso), Włochy (1400 m)

# Detekcja bezpośrednia

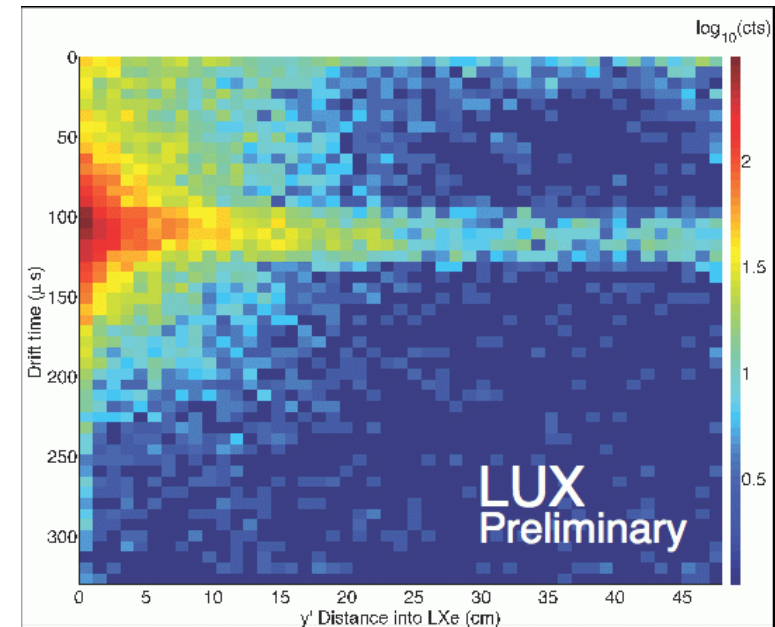
## Dwufazowa komora projekcji czasowej

Możliwość rekonstrukcji pozycji punktu zderzenia

Źródło  $\gamma$  przy bocznej ścianie:



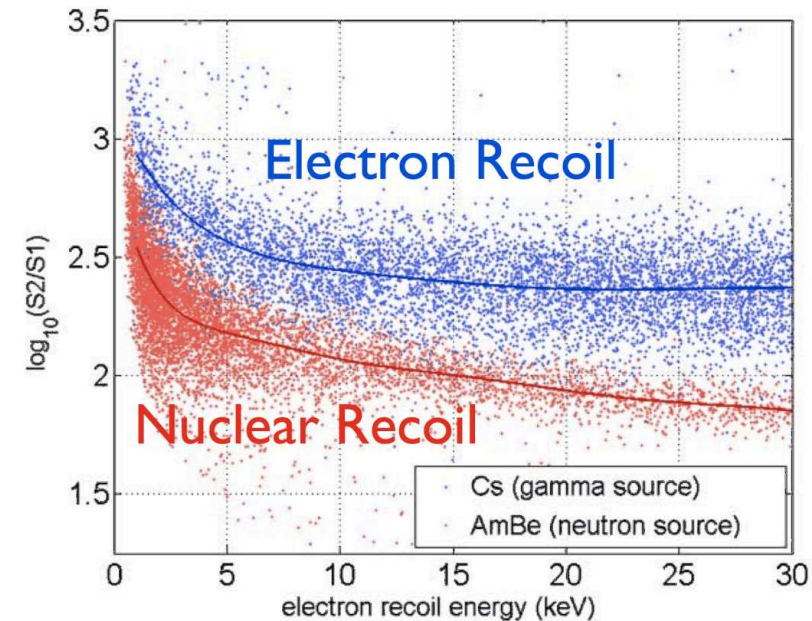
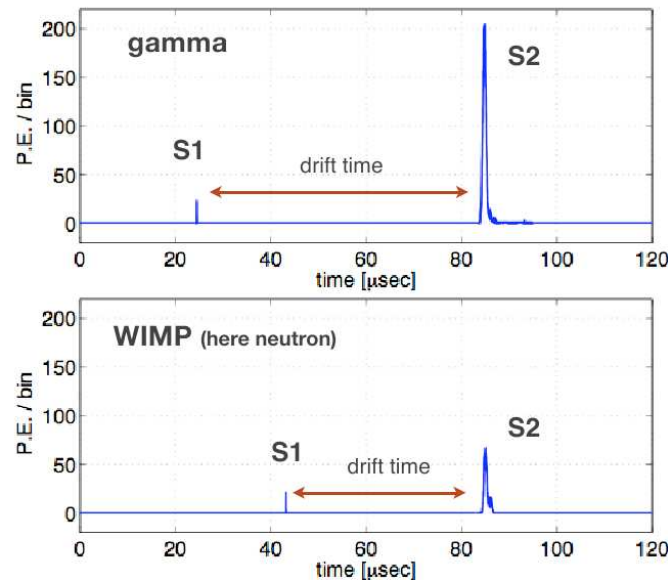
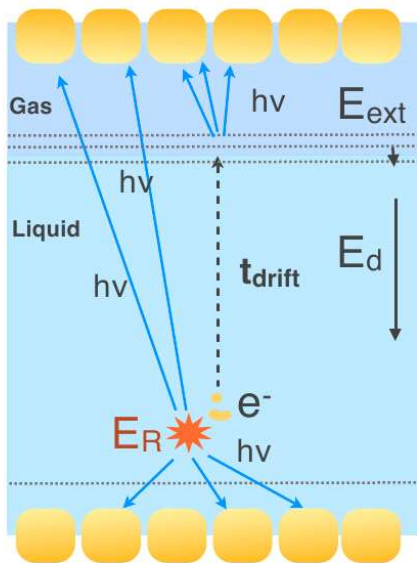
Wiązka neutronów:



# Detekcja bezpośrednia

## Dwufazowa komora projekcji czasowej

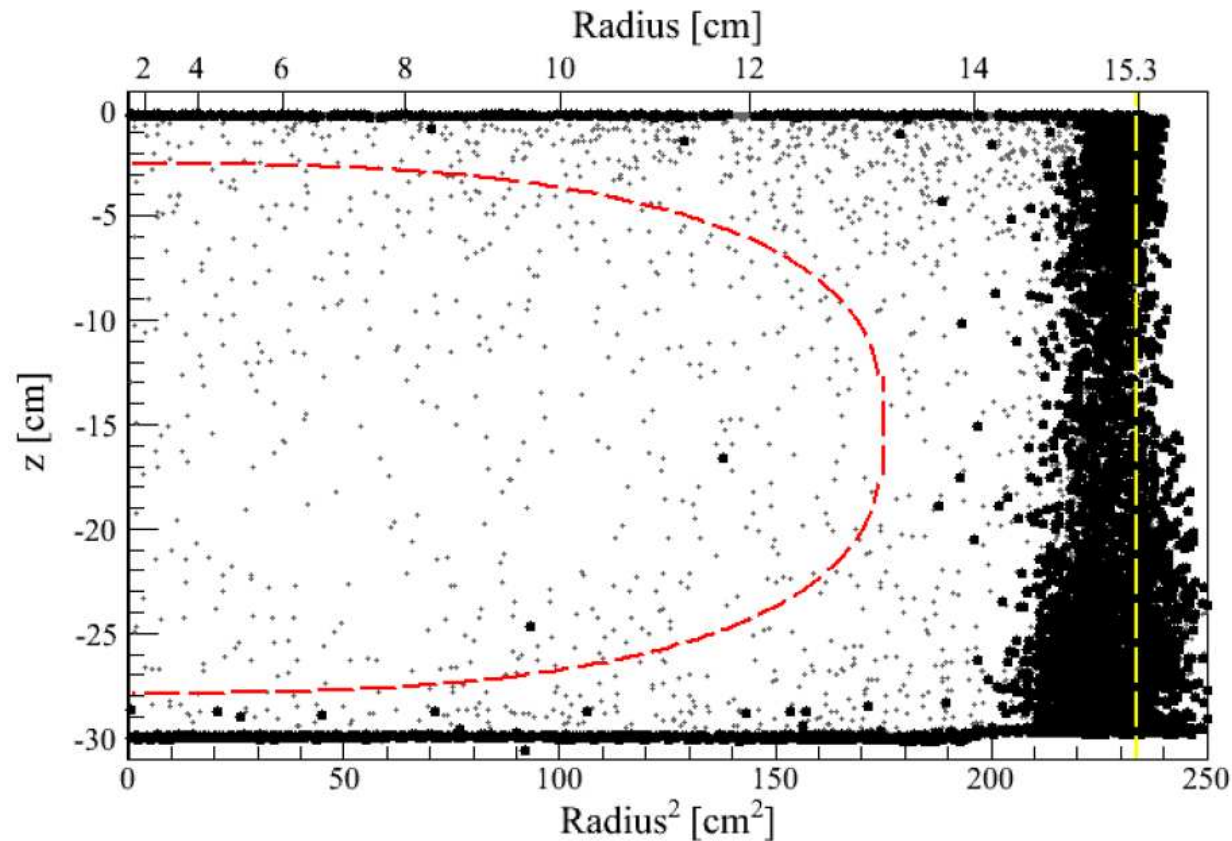
Pomiar scyntylacji i jonizacji daje możliwość odróżnienia oddziaływania na jądrze (WIMP) od rozprożeń na elektronach ( $\gamma$ )



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

# Detekcja bezpośrednia

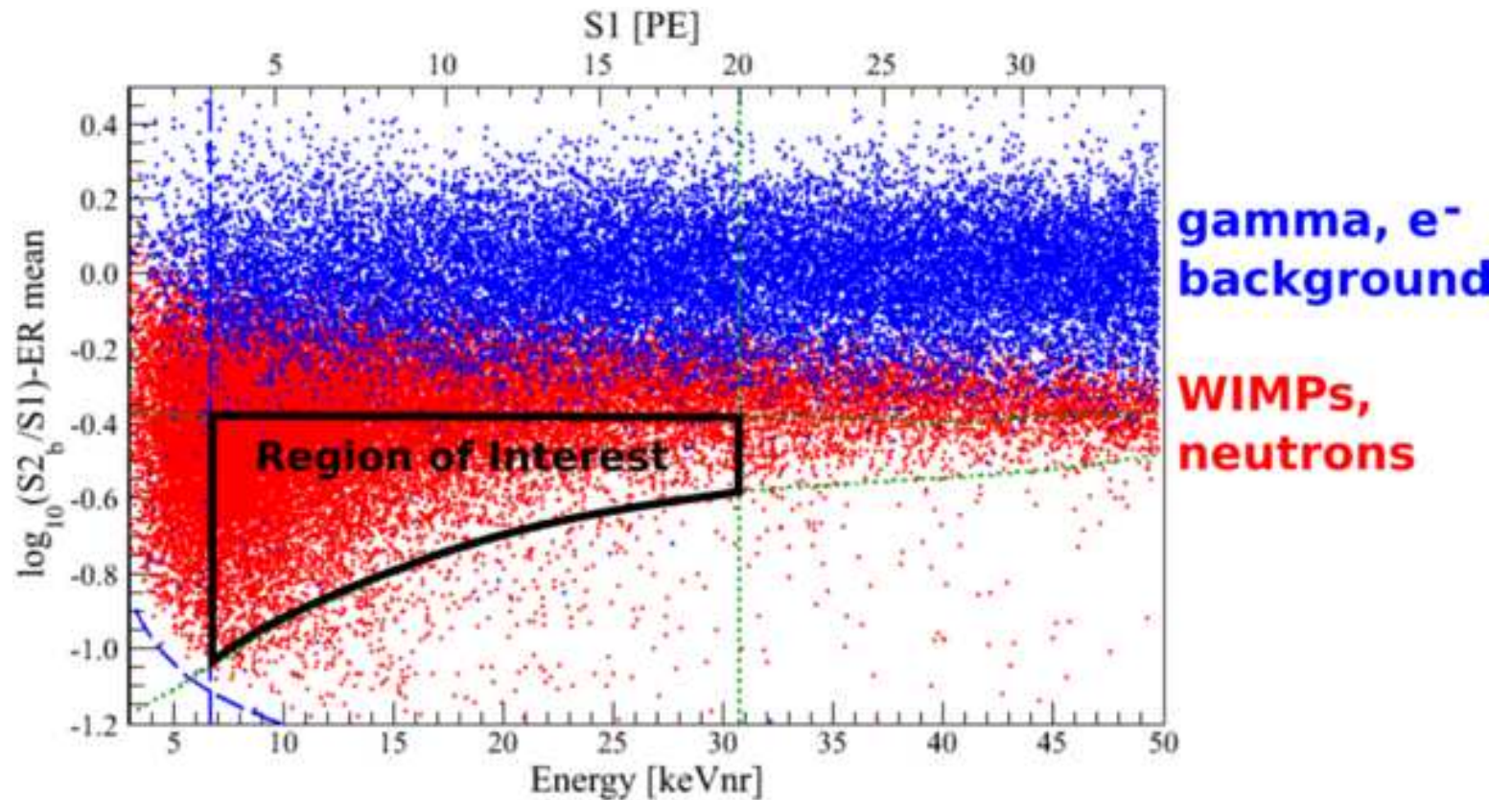
## Eksperyment Xenon100



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

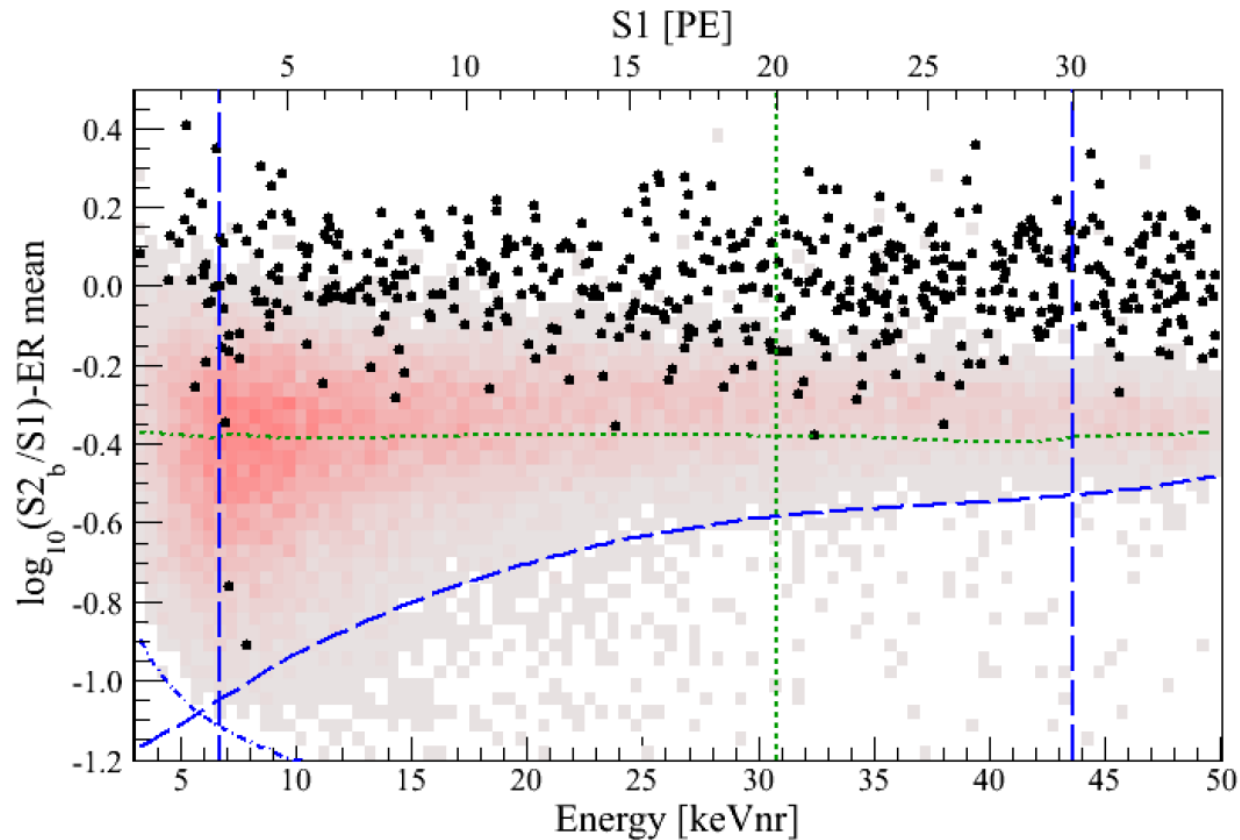
# Detekcja bezpośrednia

## Eksperyment Xenon100



# Detekcja bezpośrednia

## Eksperyment Xenon100

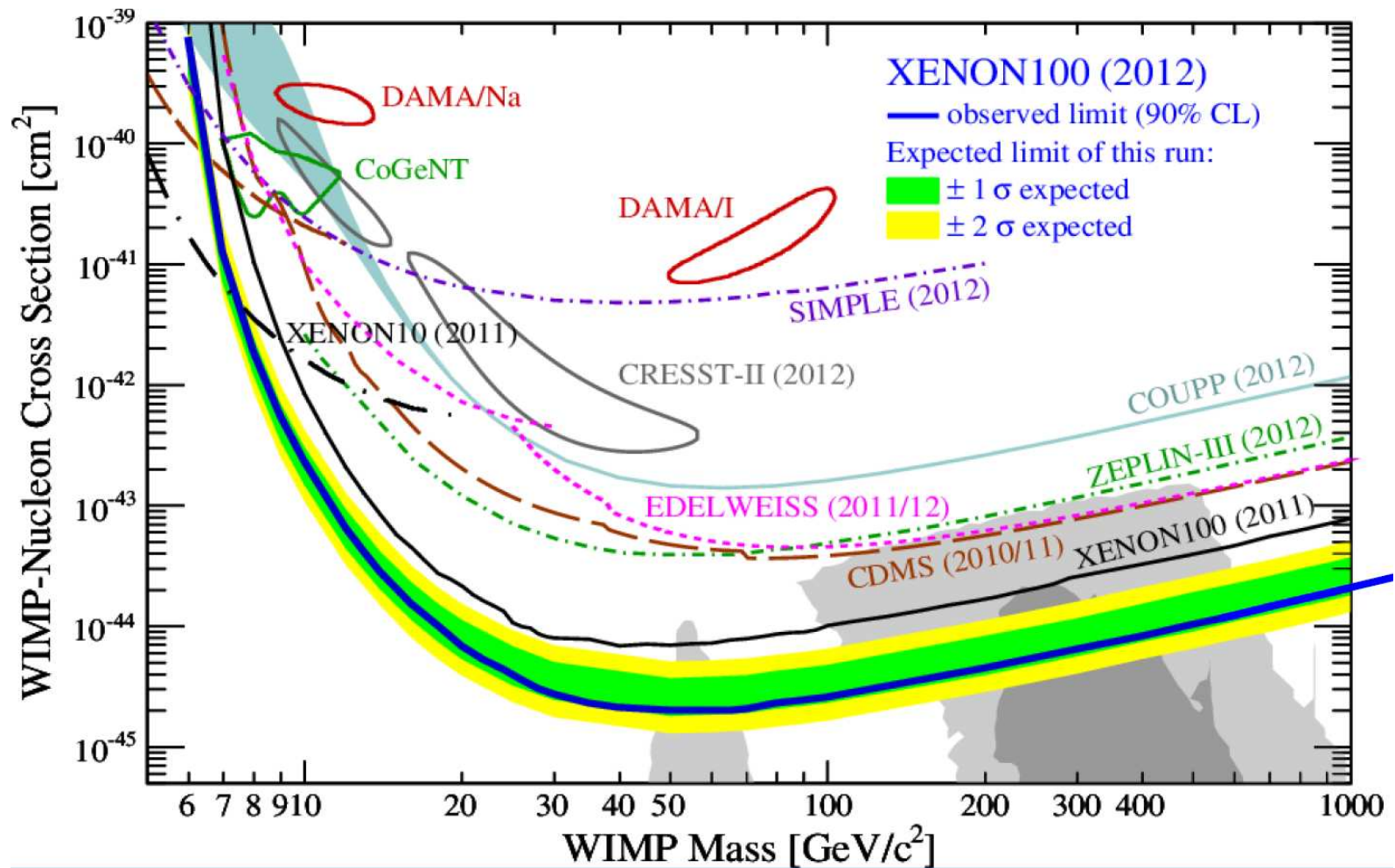


Ostatecznie w danych 2011-2012 (225 dni) zaobserwowano 2 przypadki przy oczekiwanym poziomie tła  $1.0 \pm 0.2 \Rightarrow$  brak sygnału WIMP



# Detekcja bezpośrednia

## Eksperyment Xenon100

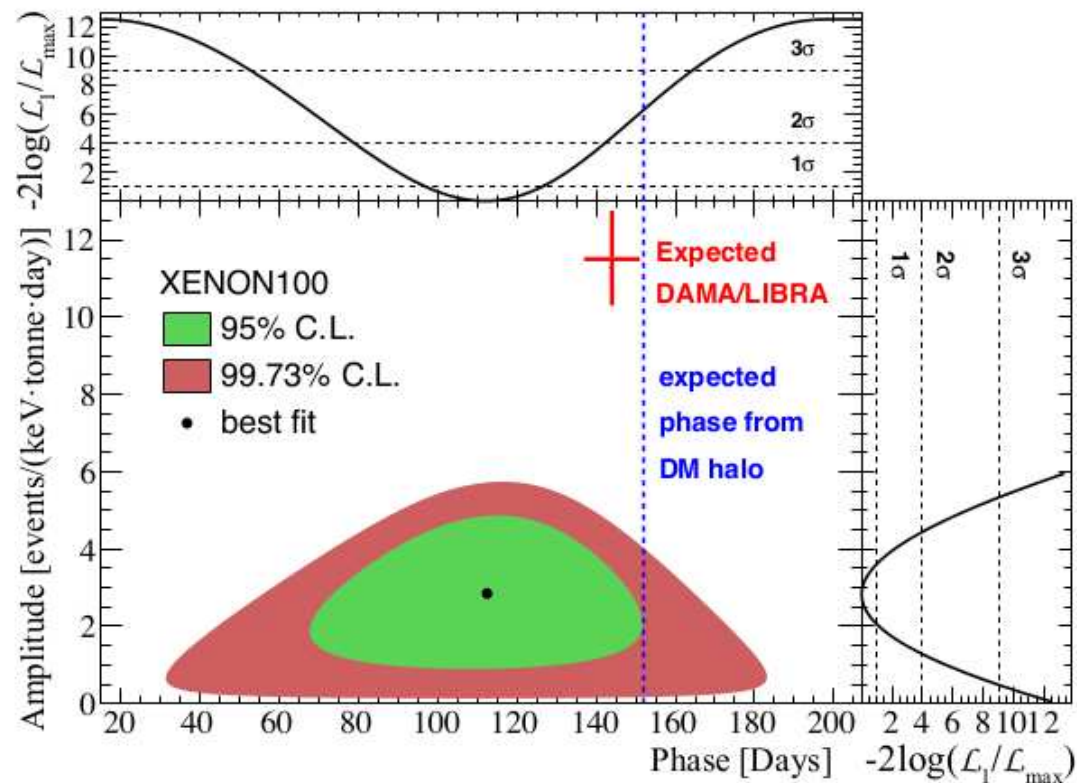


# Detekcja bezpośrednia

## Eksperyment Xenon100

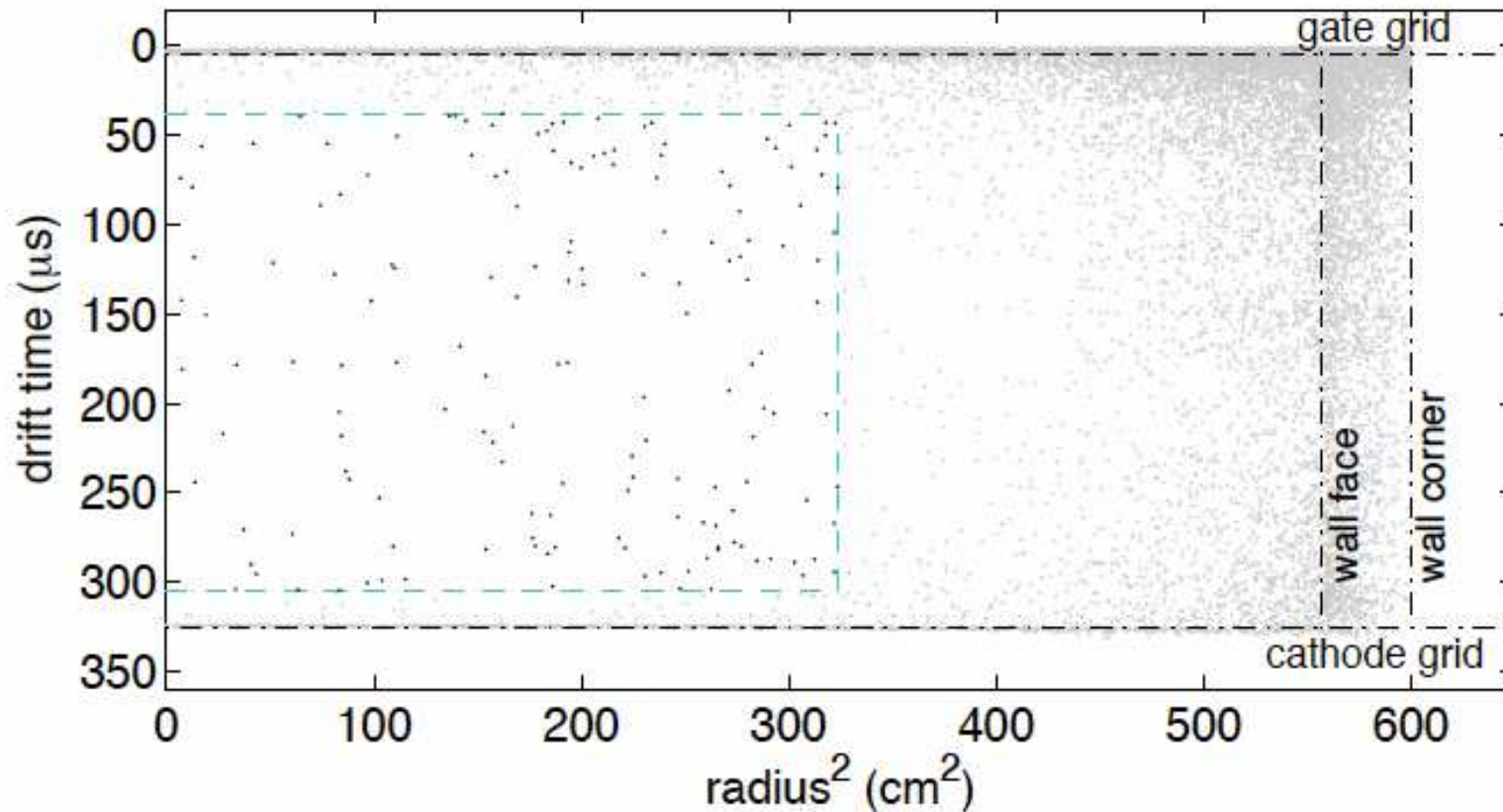
Wyniki wykluczają też istnienie modulacji sezonowych, na które wskazywał eksperyment DAMA/LIBRA.

Dopasowanie dla  $T=1$  rok:



# Detekcja bezpośrednia

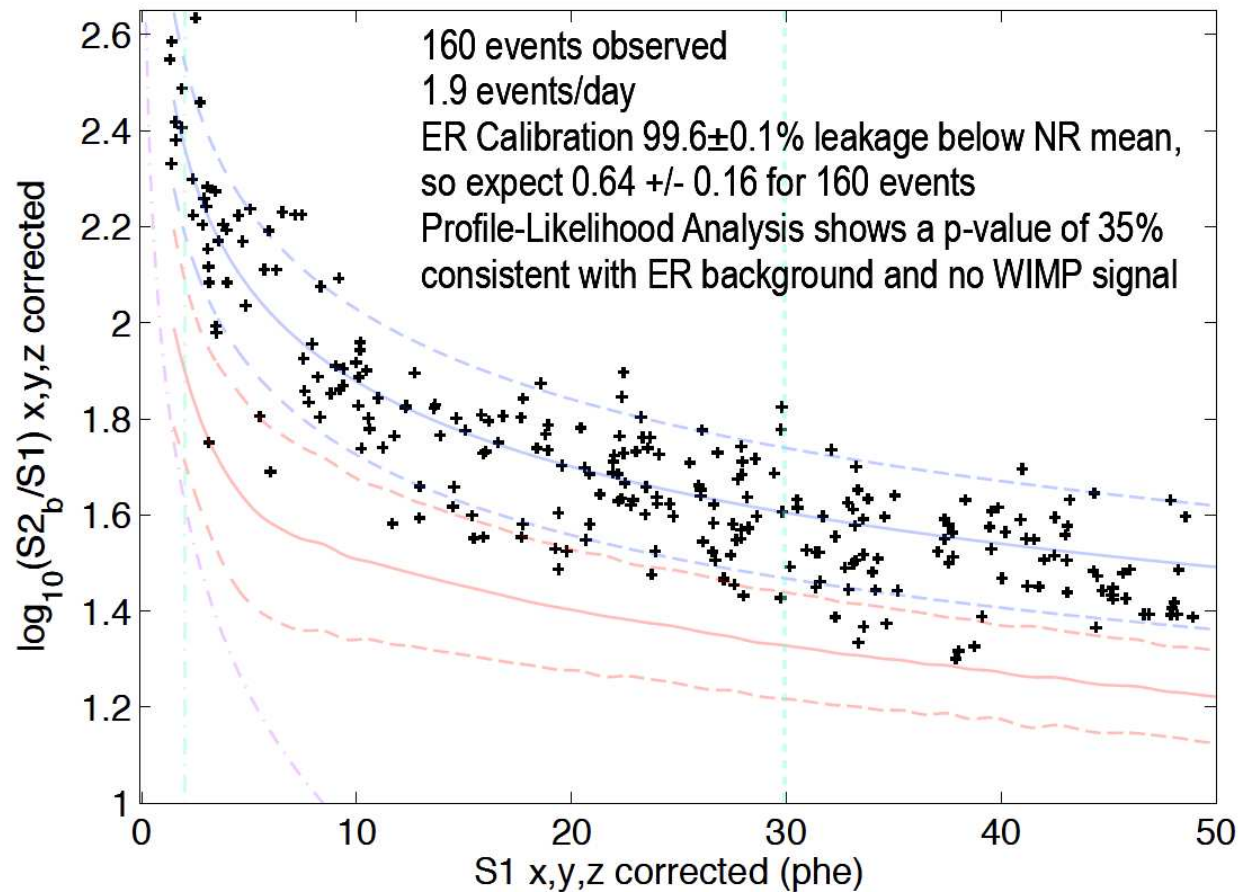
## Eksperyment LUX



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

# Detekcja bezpośrednia

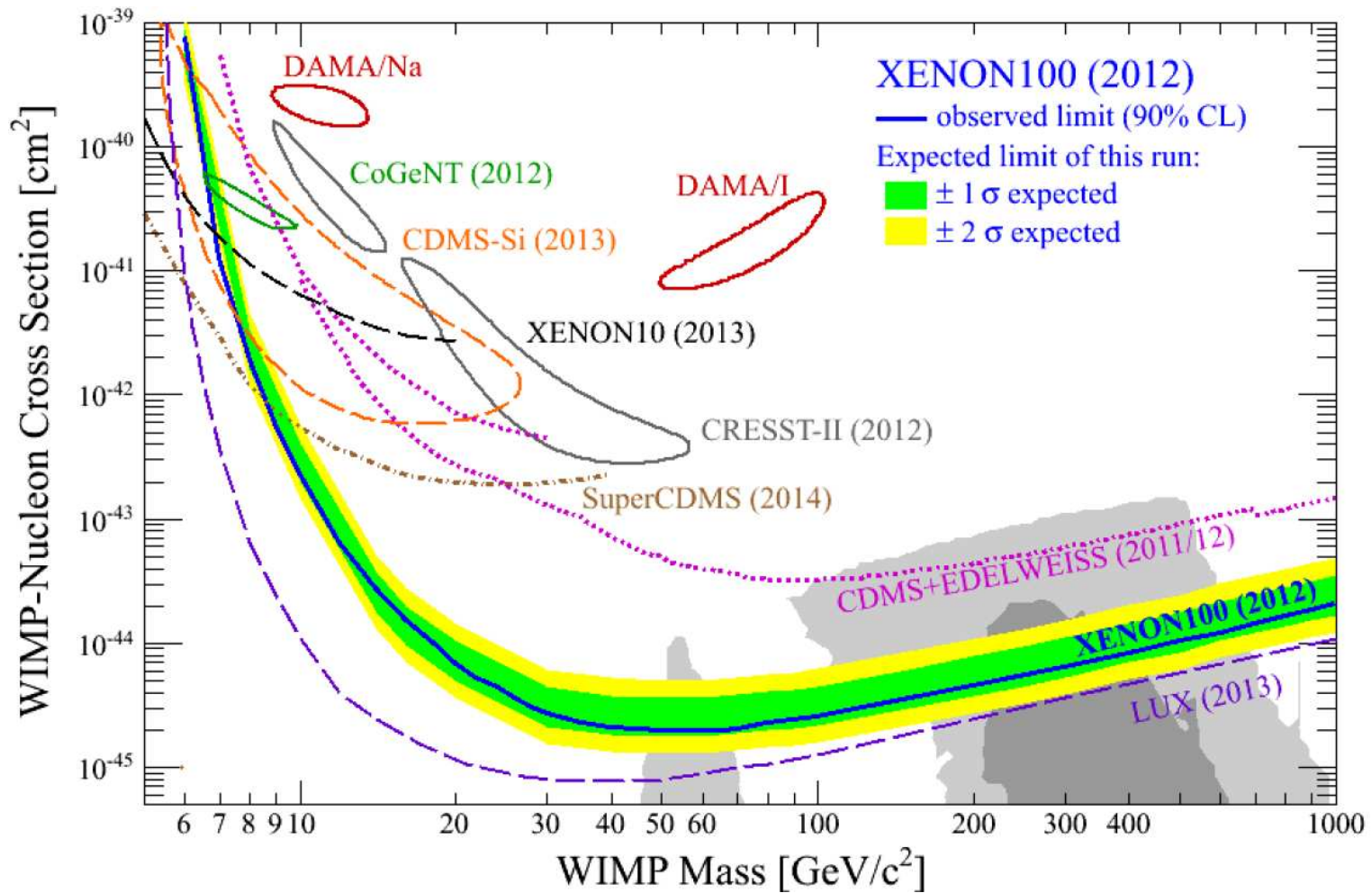
## Eksperyment LUX



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

# Detekcja bezpośrednia

## Eksperyment LUX

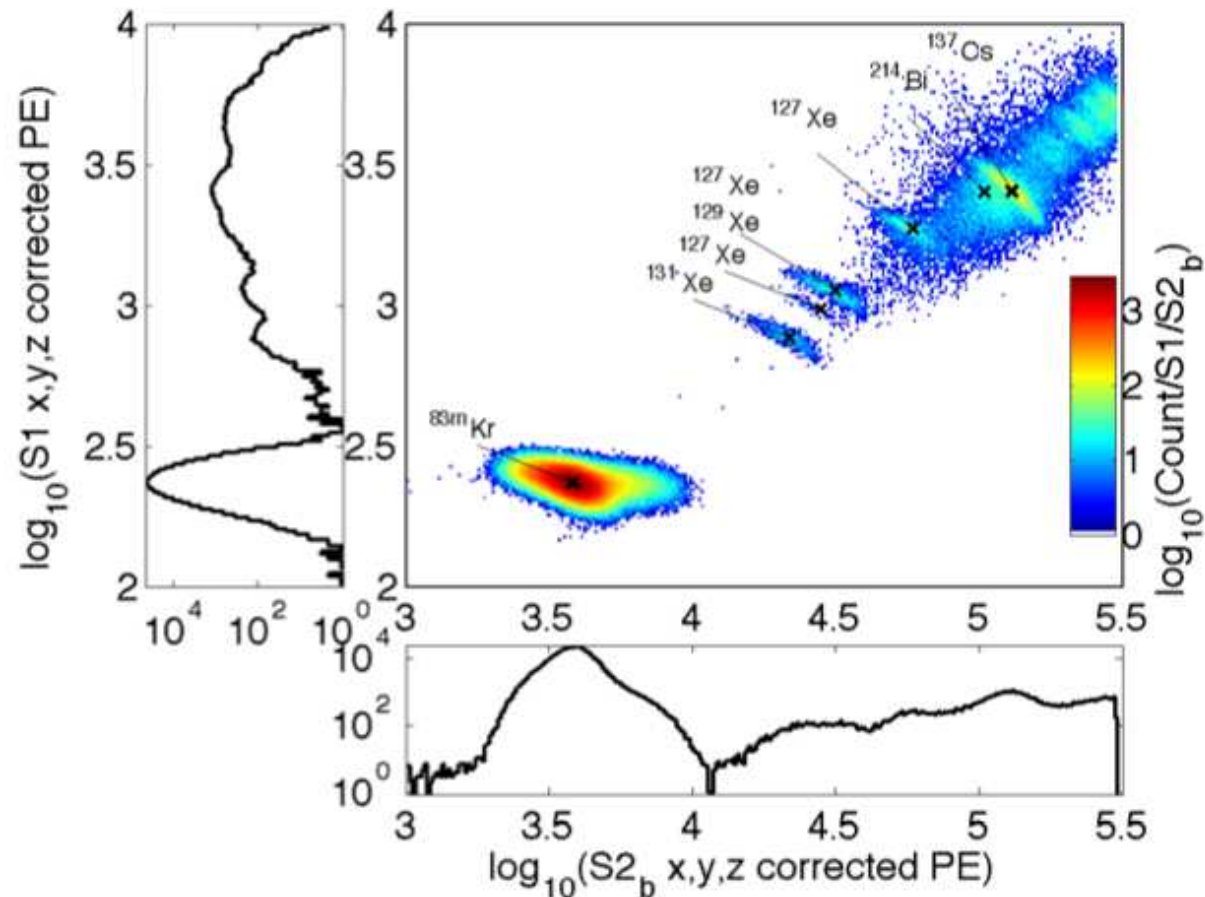


# Detekcja bezpośrednia

## Eksperyment LUX

Reanaliza danych 2013: nowa kalibracja detektora.

Wyniki kalibracji z wykorzystaniem źródeł  $\gamma$ :

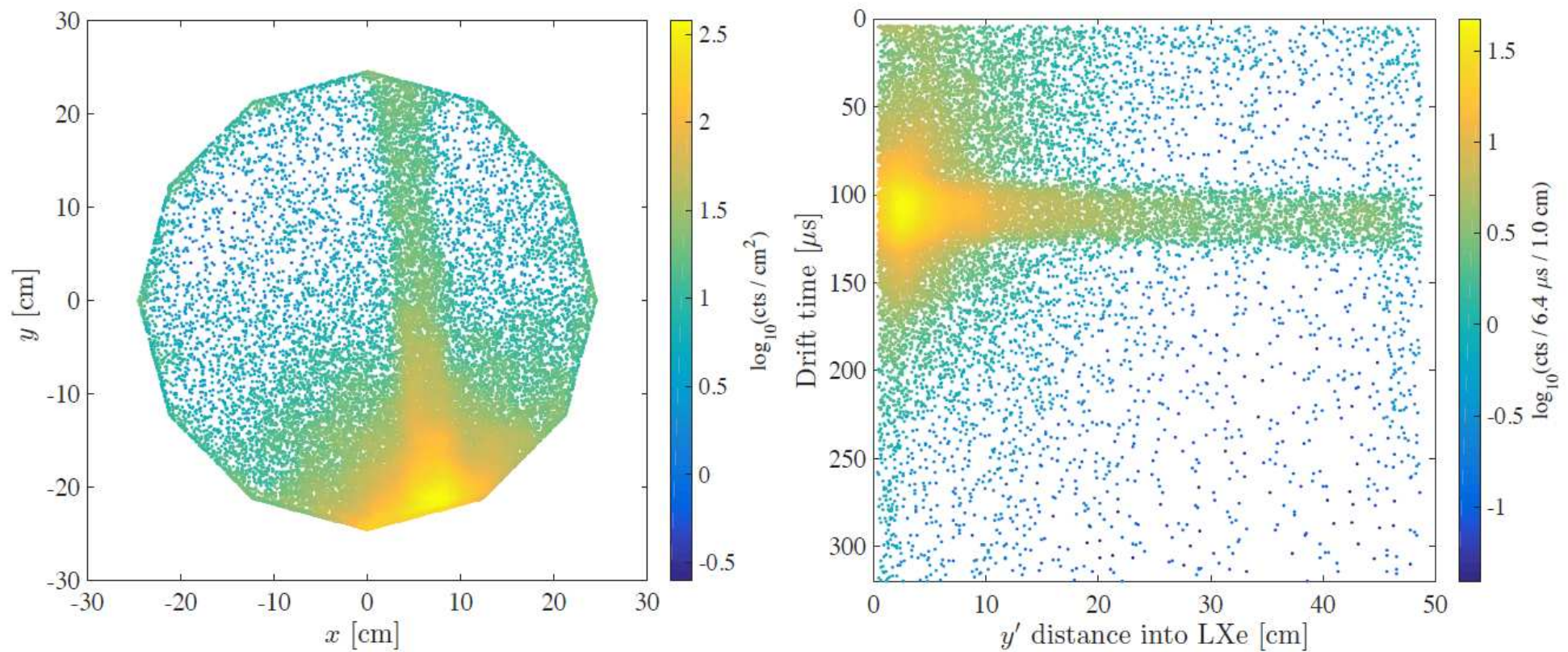


# Detekcja bezpośrednia

## Eksperyment LUX

Reanaliza danych 2013: nowa kalibracja detektora.

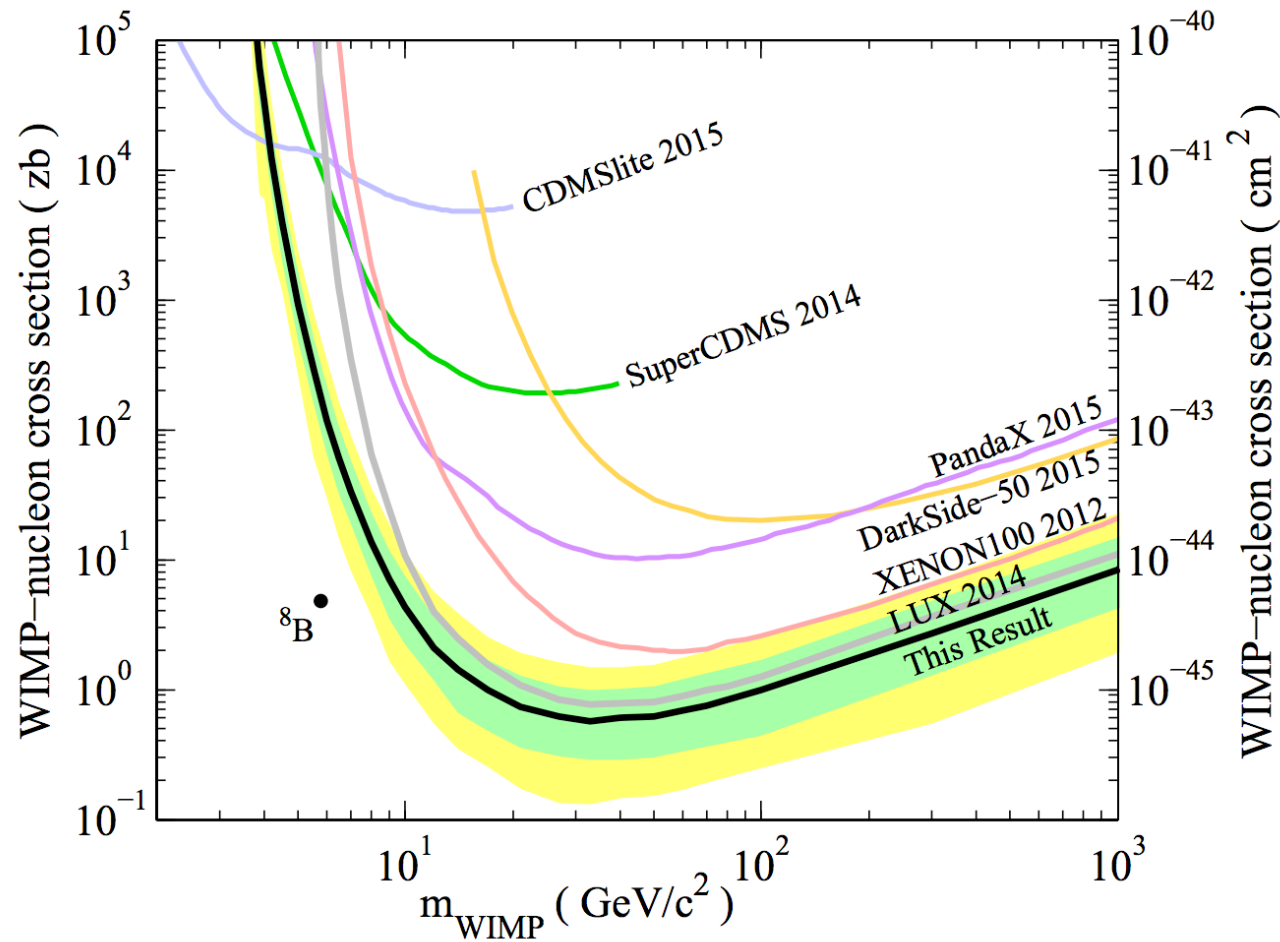
Kalibracja z wykorzystaniem źródła neutronów (generator D-D):



# Detekcja bezpośrednia

## Eksperyment LUX

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

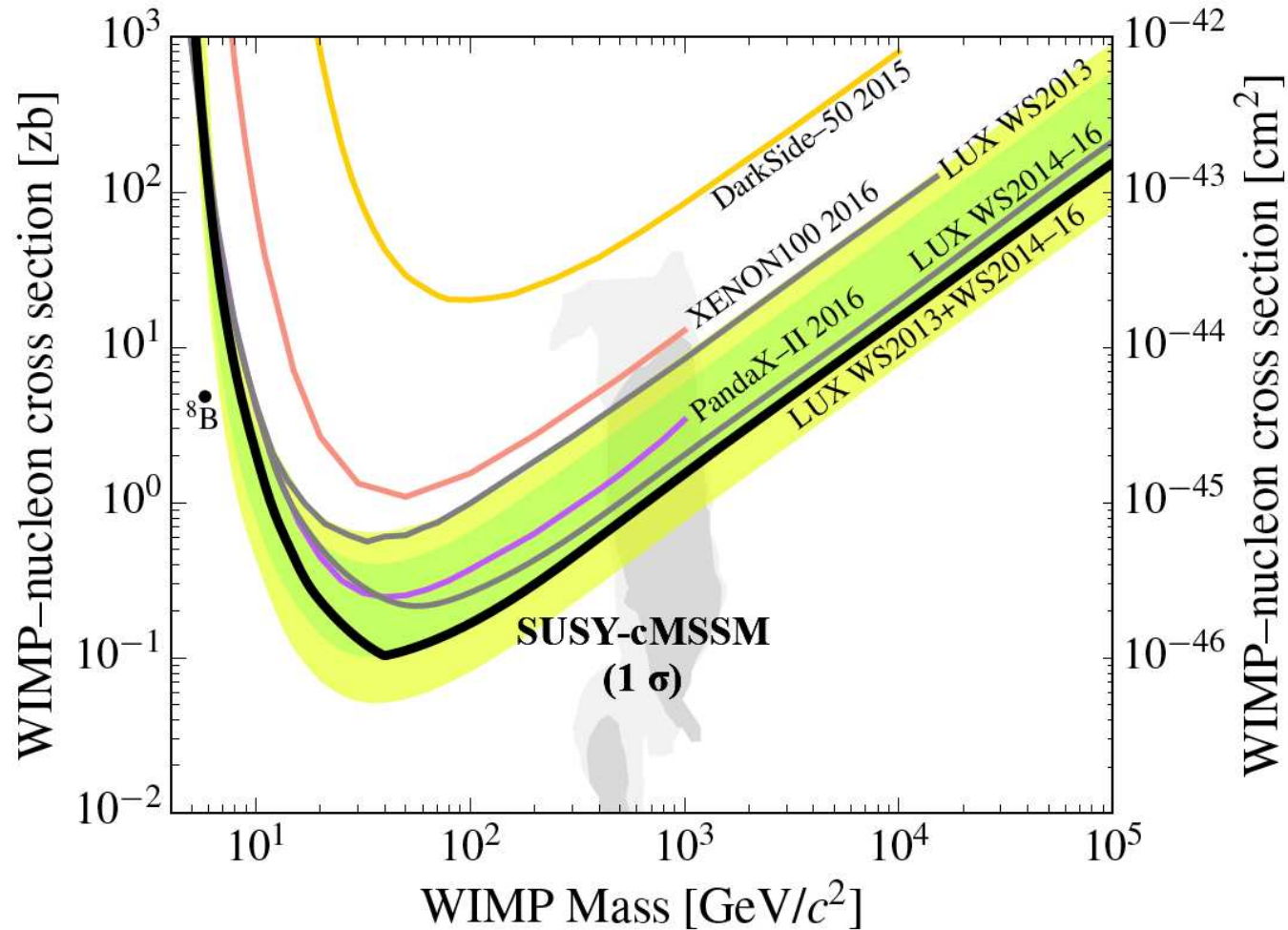




# Detekcja bezpośrednia

## Eksperyment LUX

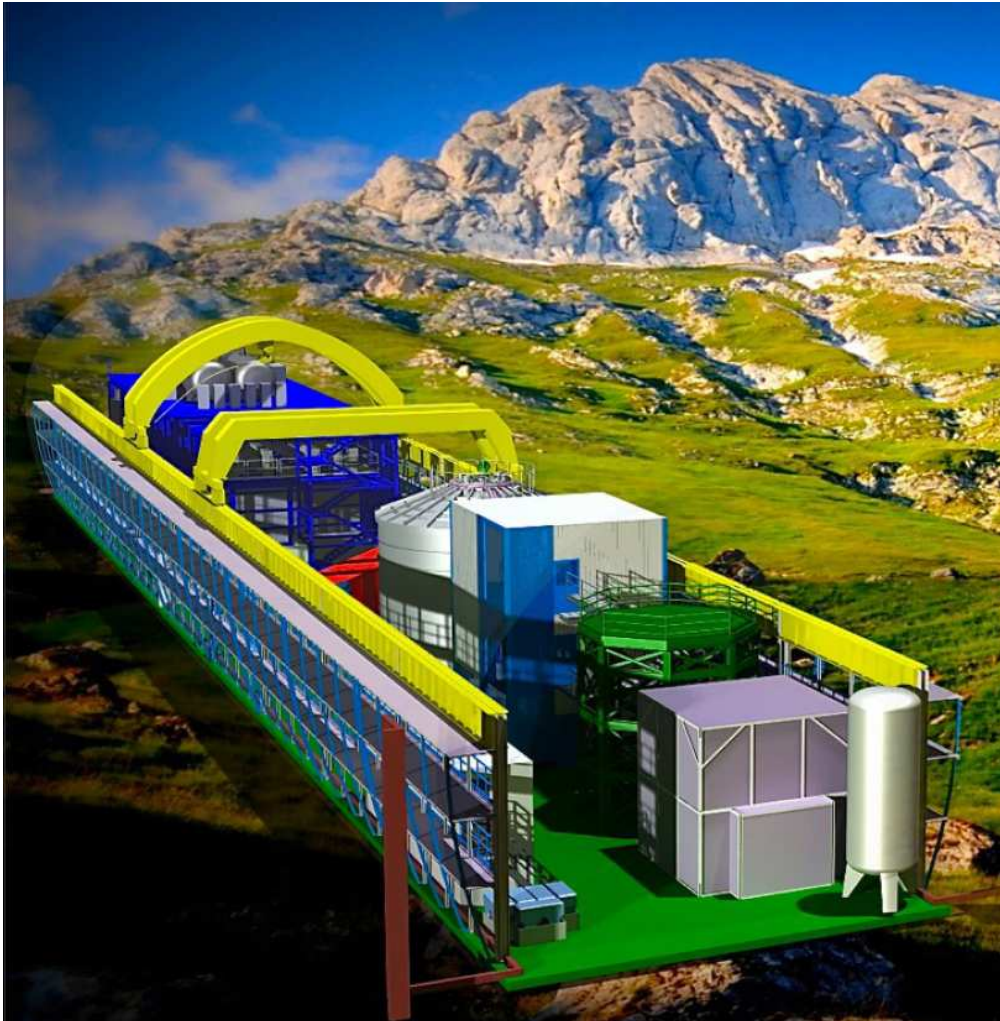
Końcowe wyniki (95 dni + drugi "run" 332 dni) przedstawione w marcu 2017:



# Detekcja bezpośrednia

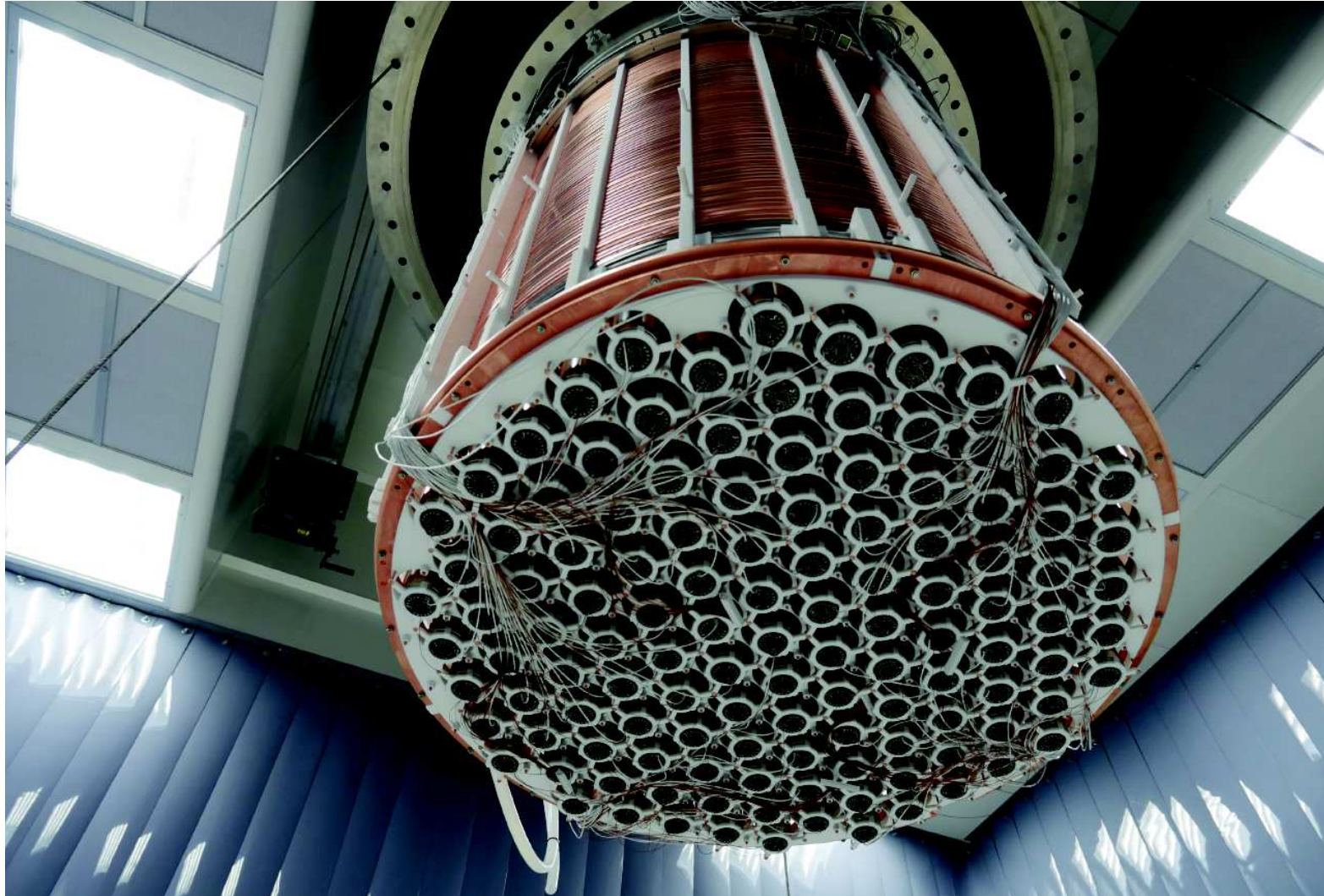
Xenon1T

3.5 tony LXe (2 tony jako “tarcza”)



# Detekcja bezpośrednia

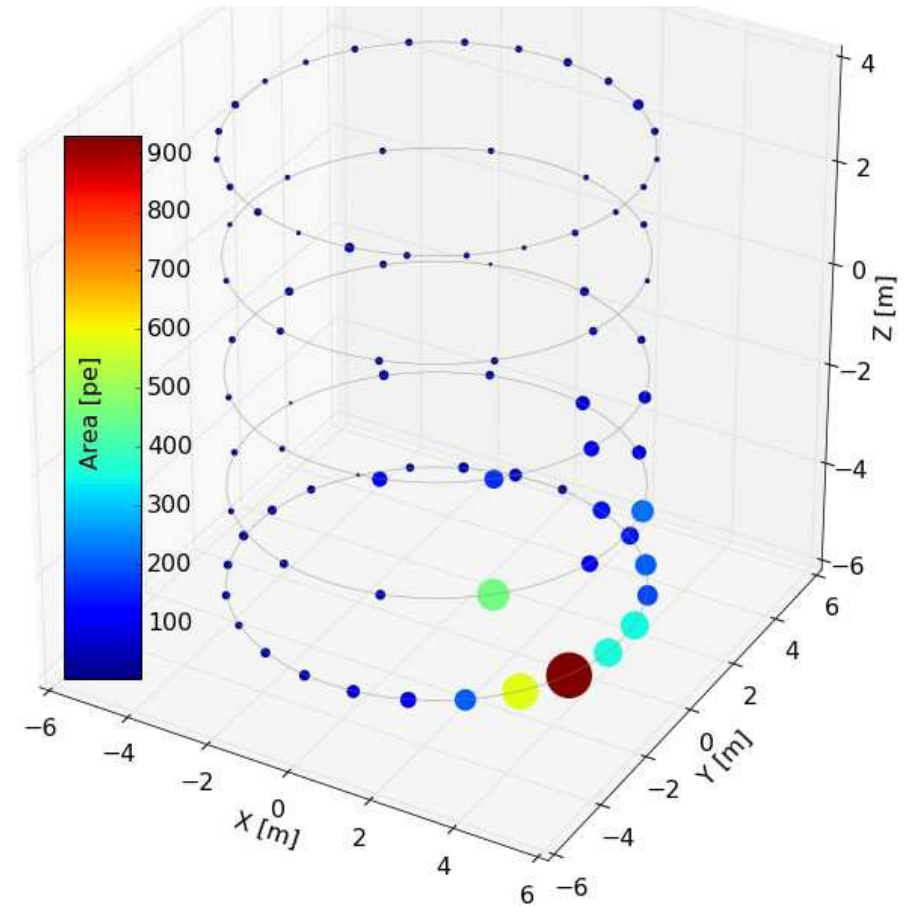
Xenon1T



# Detekcja bezpośrednia

## Xenon1T

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

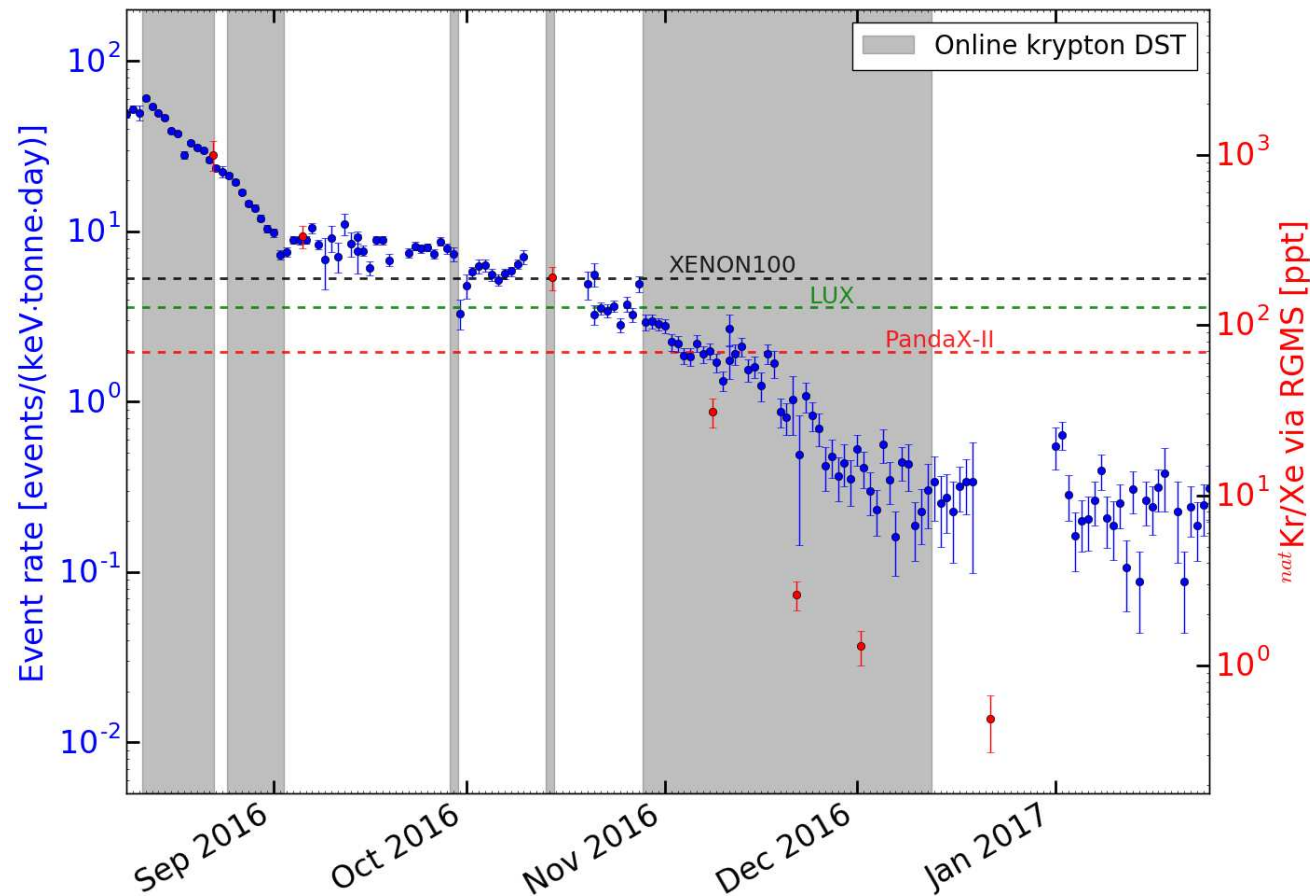


# Detekcja bezpośrednia

## Xenon1T

Ksenon podlega ciąglemu oczyszczaniu  $\Rightarrow$  osiągnięto najniższy poziom tła

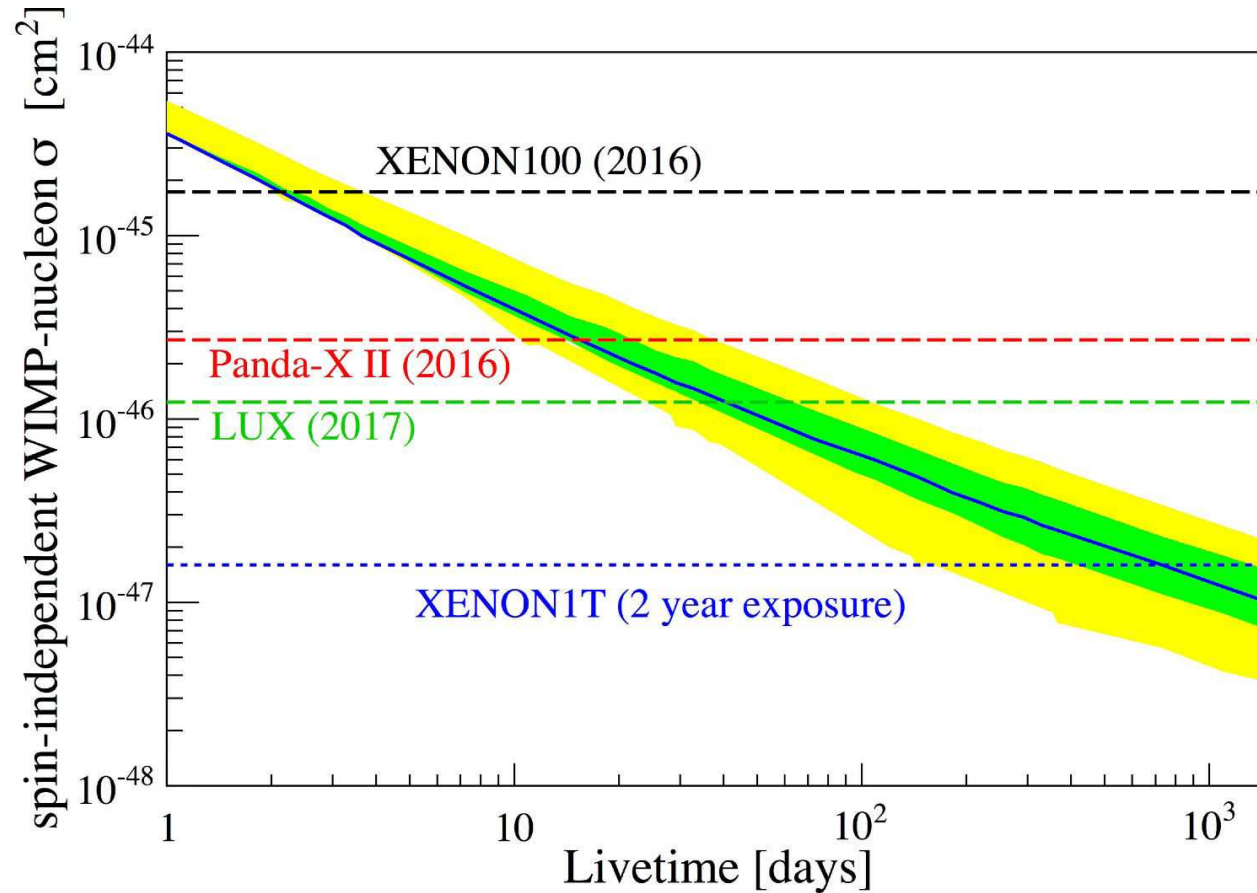
Detektor rozpoczął już zbieranie danych, niestety przerwane przez... trzęsienie ziemi



# Detekcja bezpośrednia

## Xenon1T

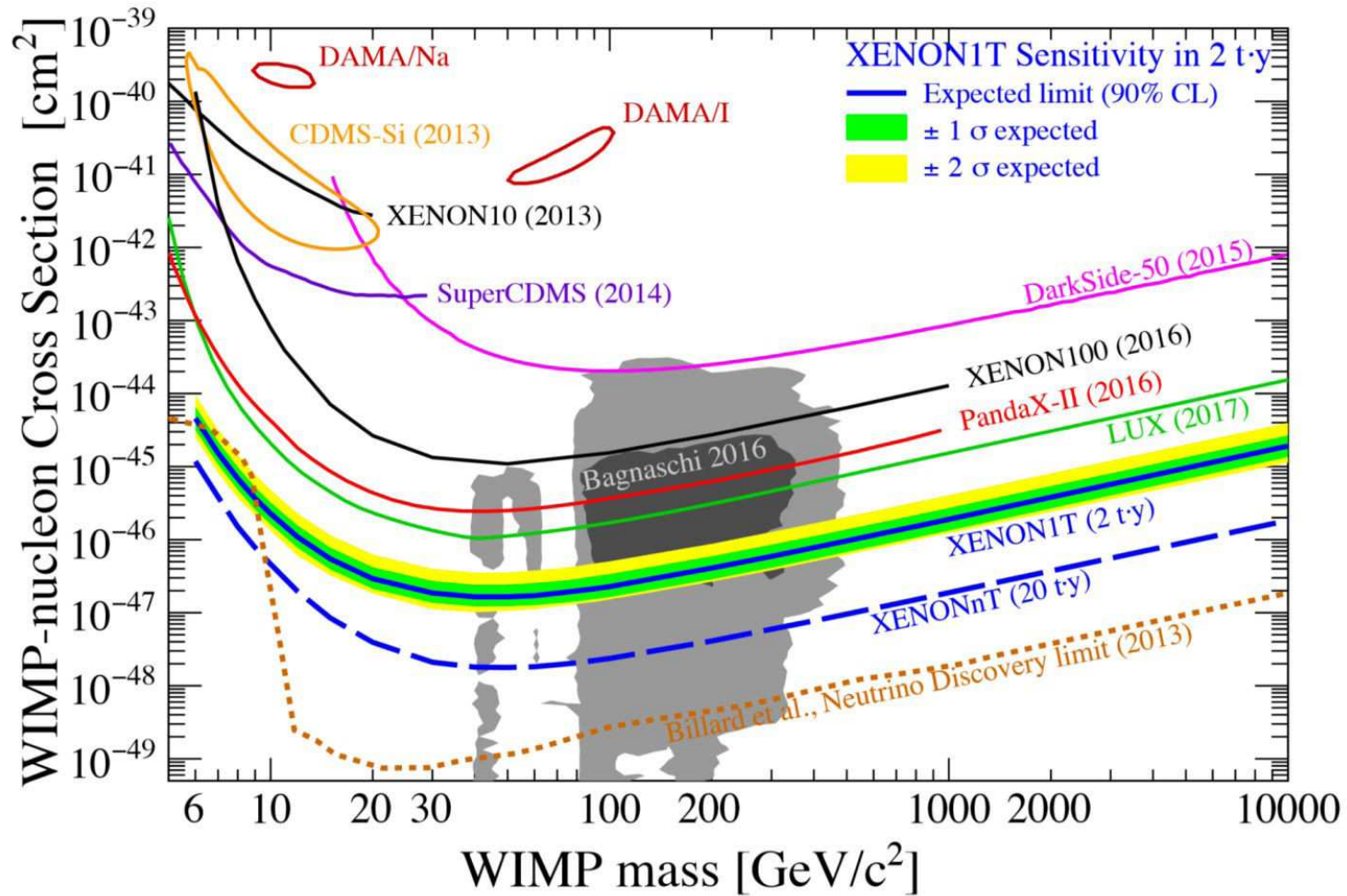
Dzięki ok. 30-krotnie większej masie LXe oraz istotnej redukcji tła powinien bardzo szybko poprawić dotychczasowe limity:



# Detekcja bezpośrednia

## Xenon1T

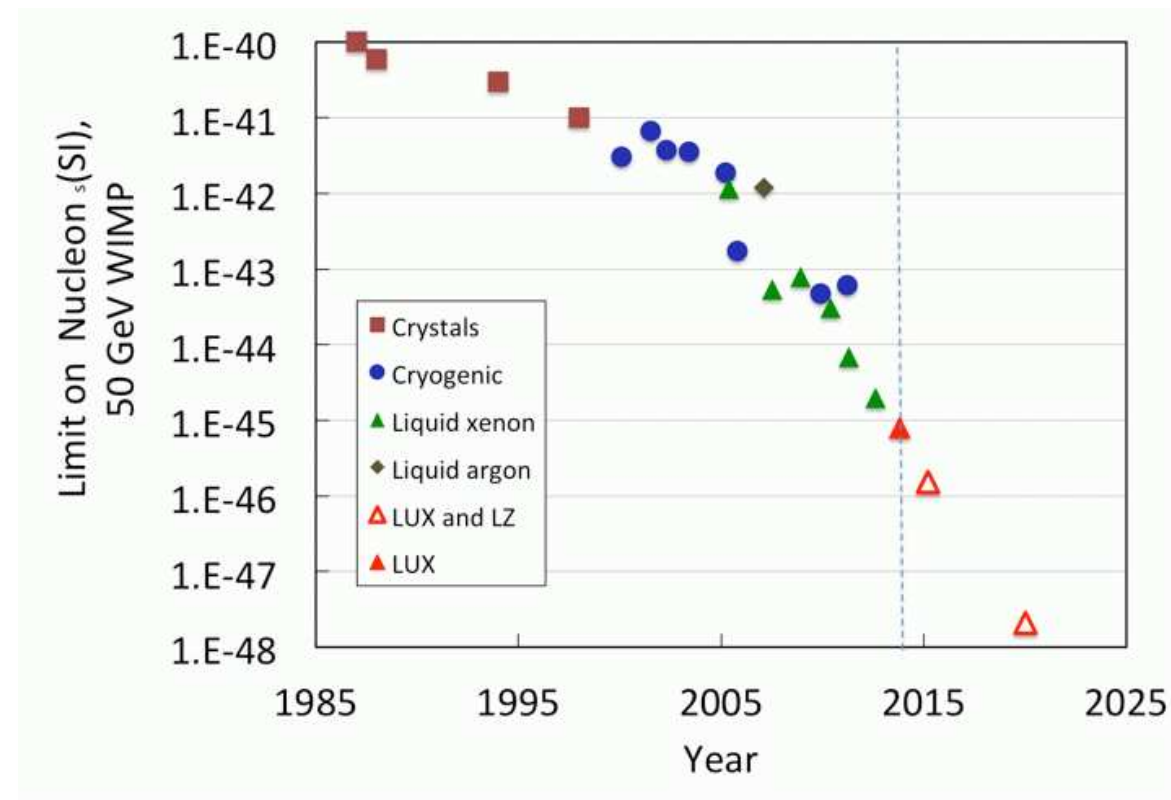
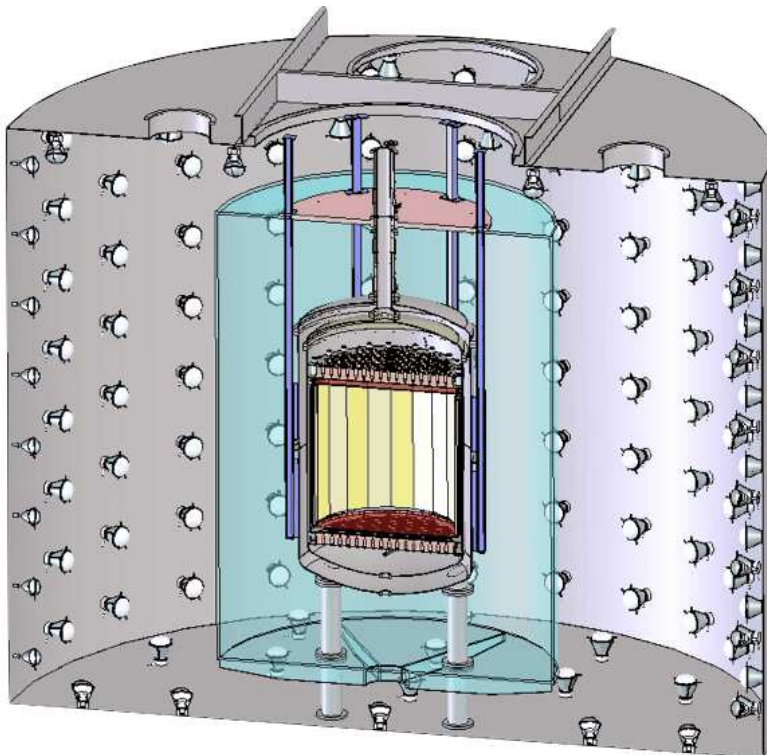
Czułość detektora staje się na tyle duża, że powinniśmy zobaczyć... neutrina słoneczne.



# Detekcja bezpośrednia

## Przyszłość: LZ (LUX+Zeplin)

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



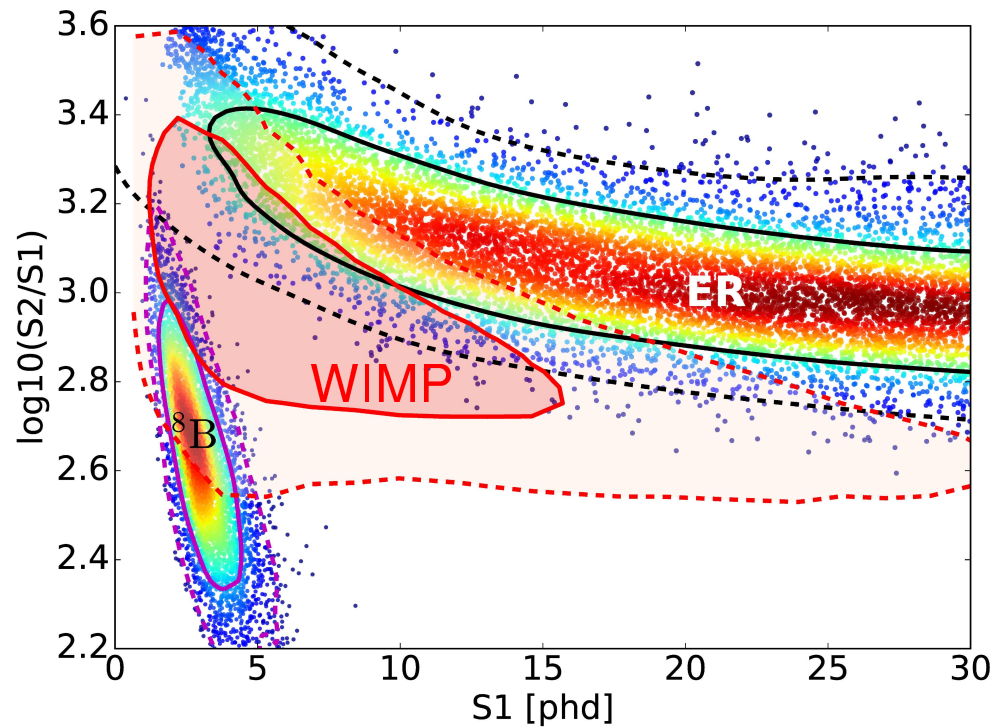


# Detekcja bezpośrednia

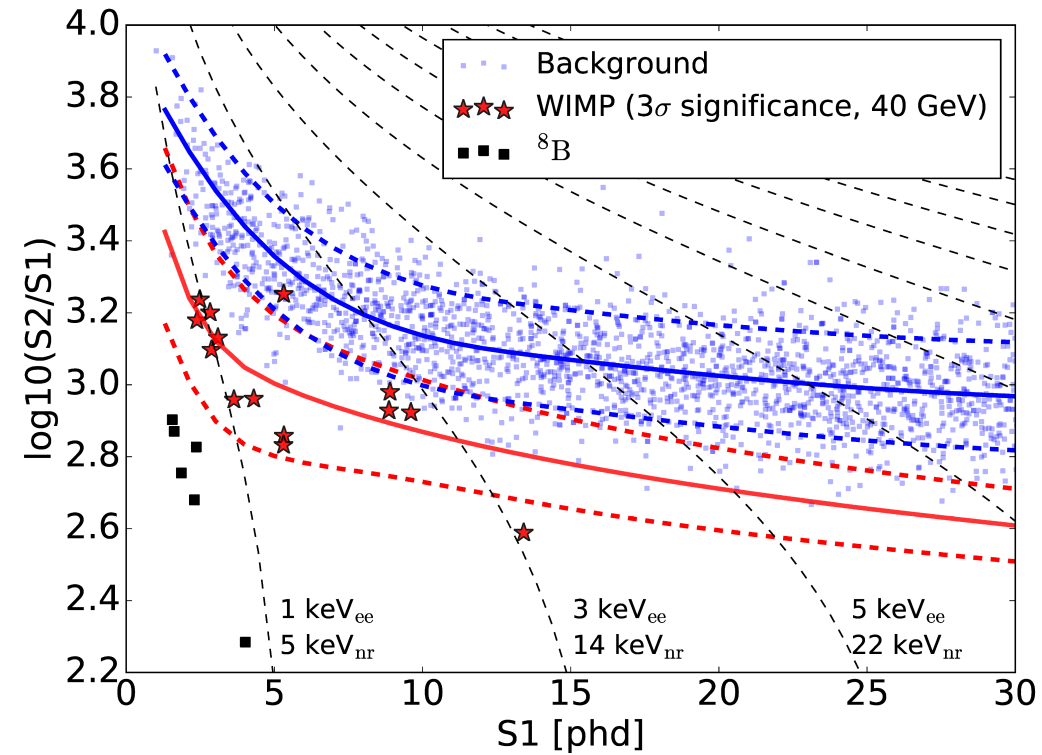
## Przyszłość: LZ (LUX+Zeplin)

Wyniki modelowania eksperymentu

tło (ER), sygnał (WIMP) i neutrina ( $^8\text{B}$ )



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

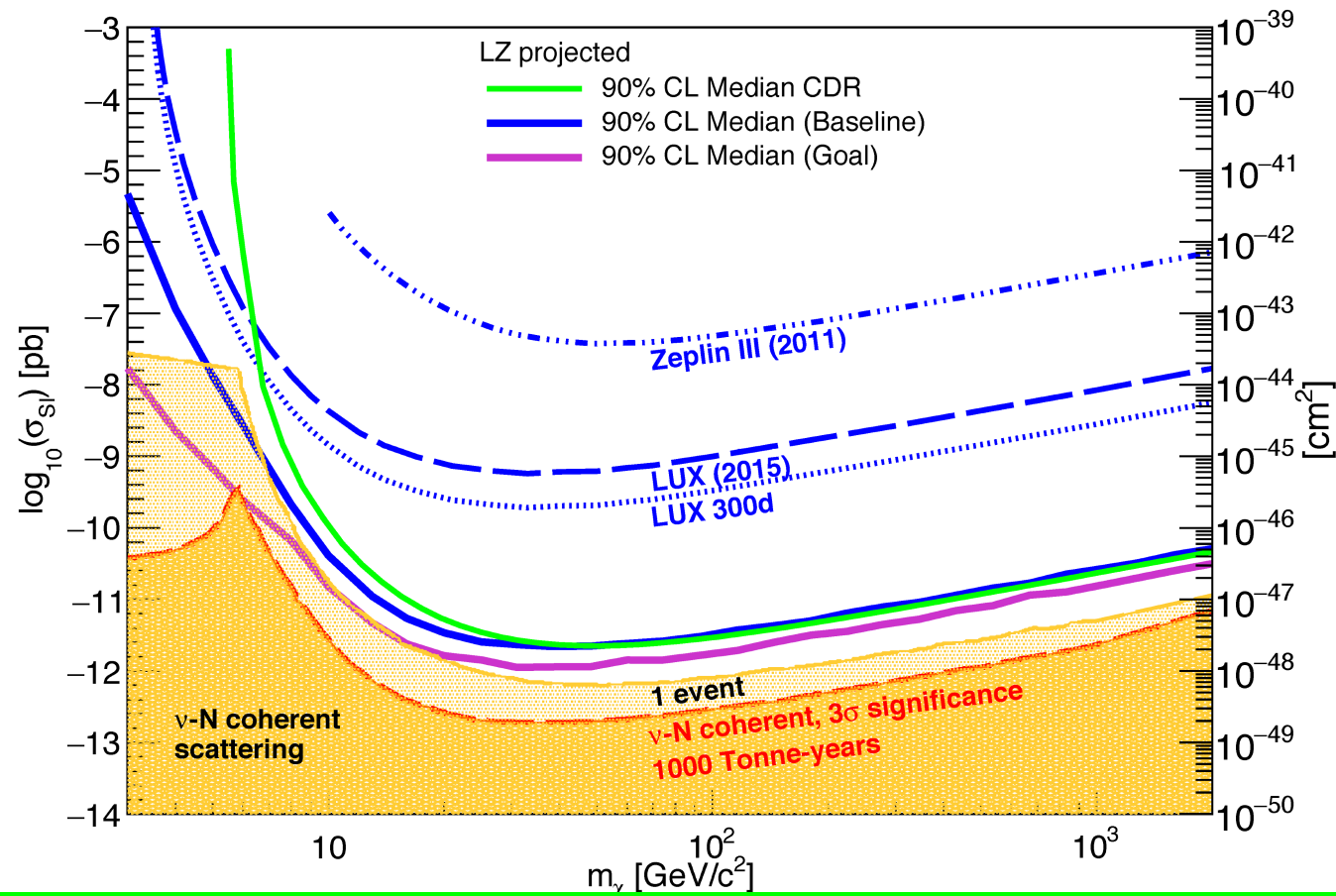


# Detekcja bezpośrednia

## 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 rozbiec 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

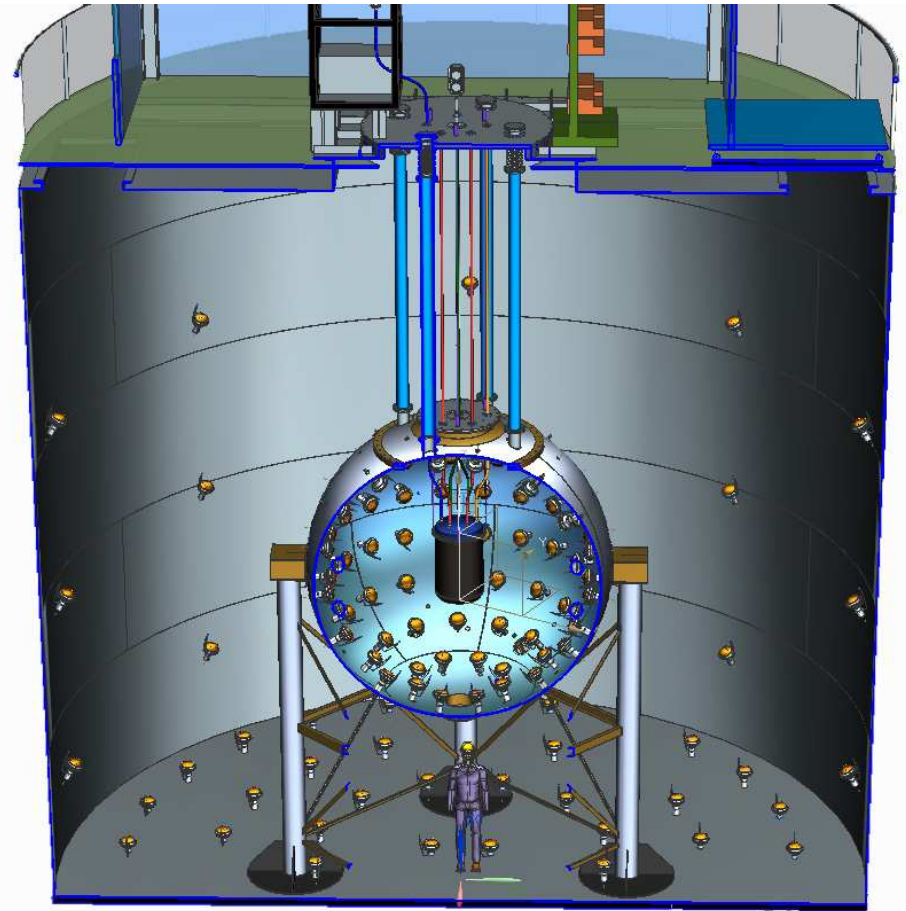
# Detekcja bezpośrednia

## 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

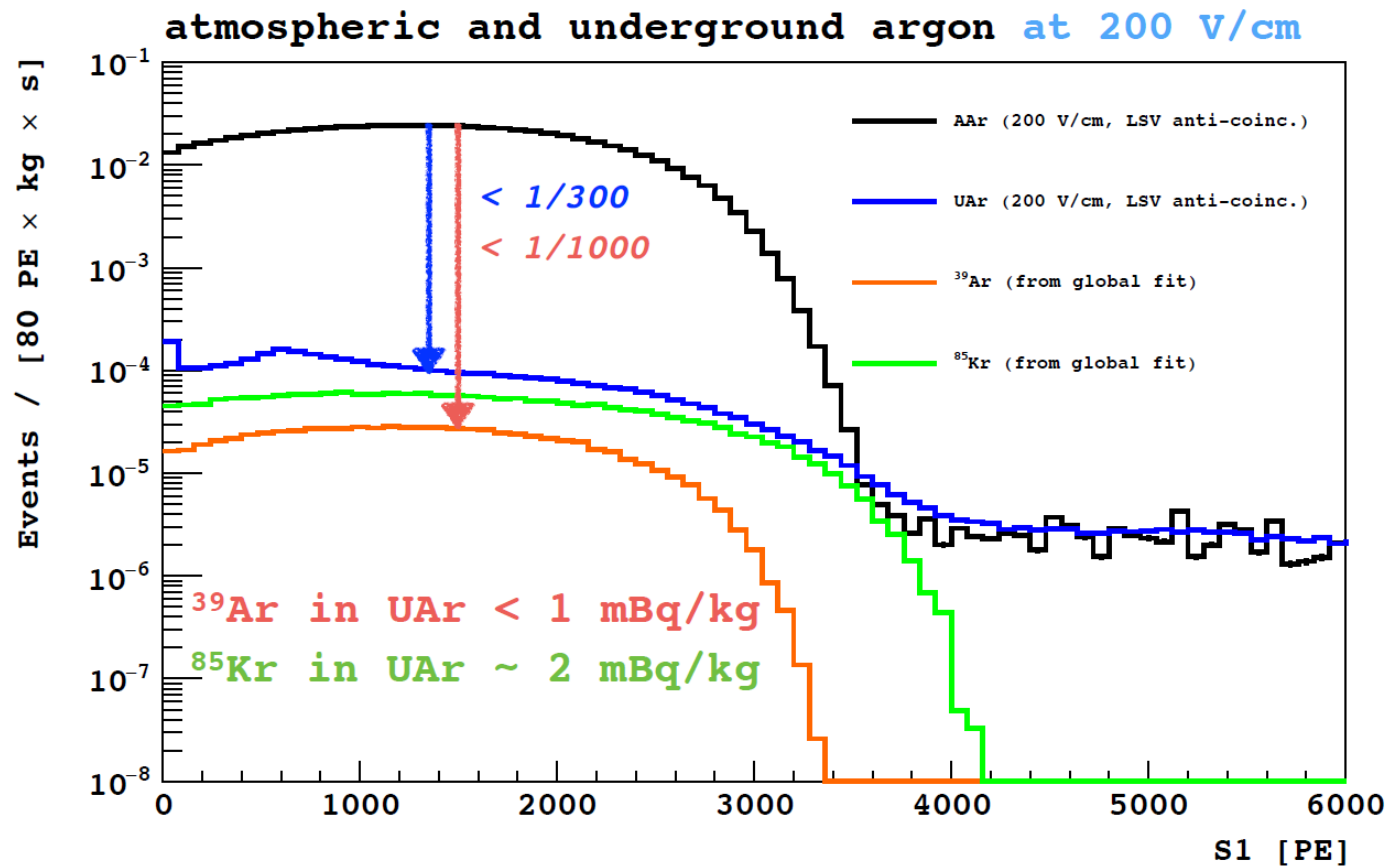
Niestety tylko 153 kg argonu  
(46 kg objętości aktywnej)...



# Detekcja bezpośrednia

## DarkSide-50

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

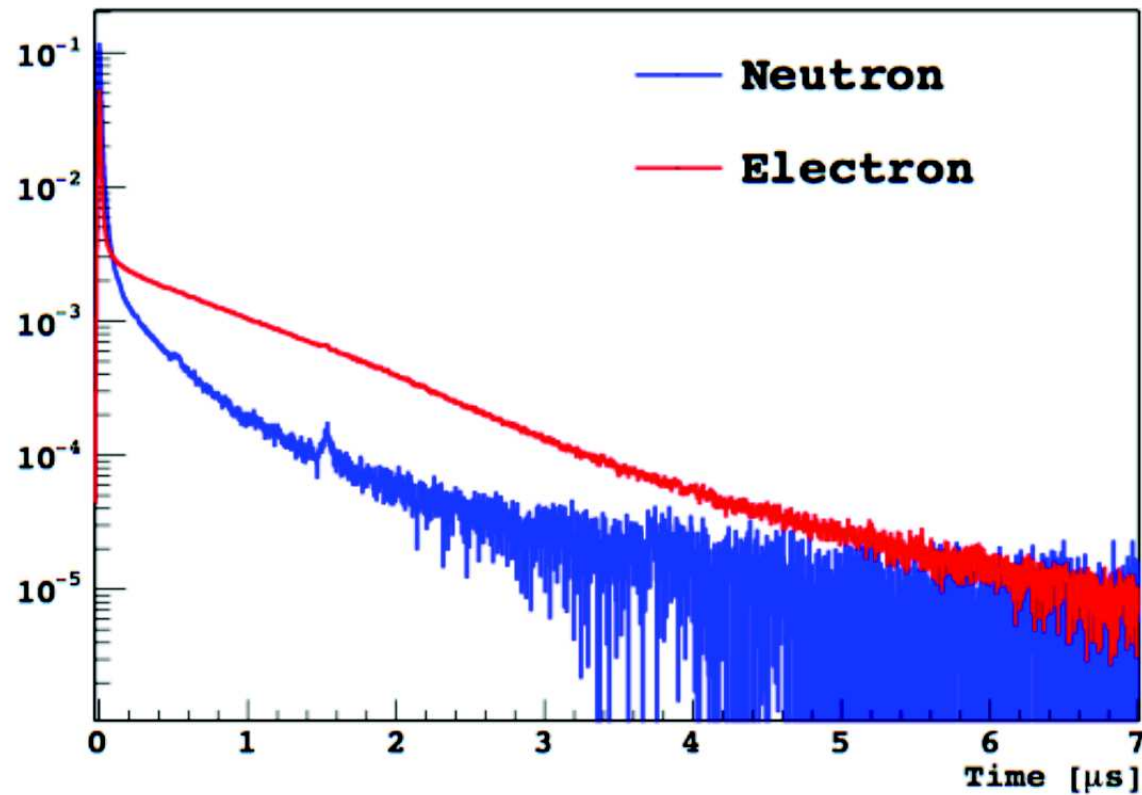


# Detekcja bezpośrednia

## DarkSide-50

Dodatkowa możliwość odróżnienia sygnału od tła na podstawie kształtu impulsu.

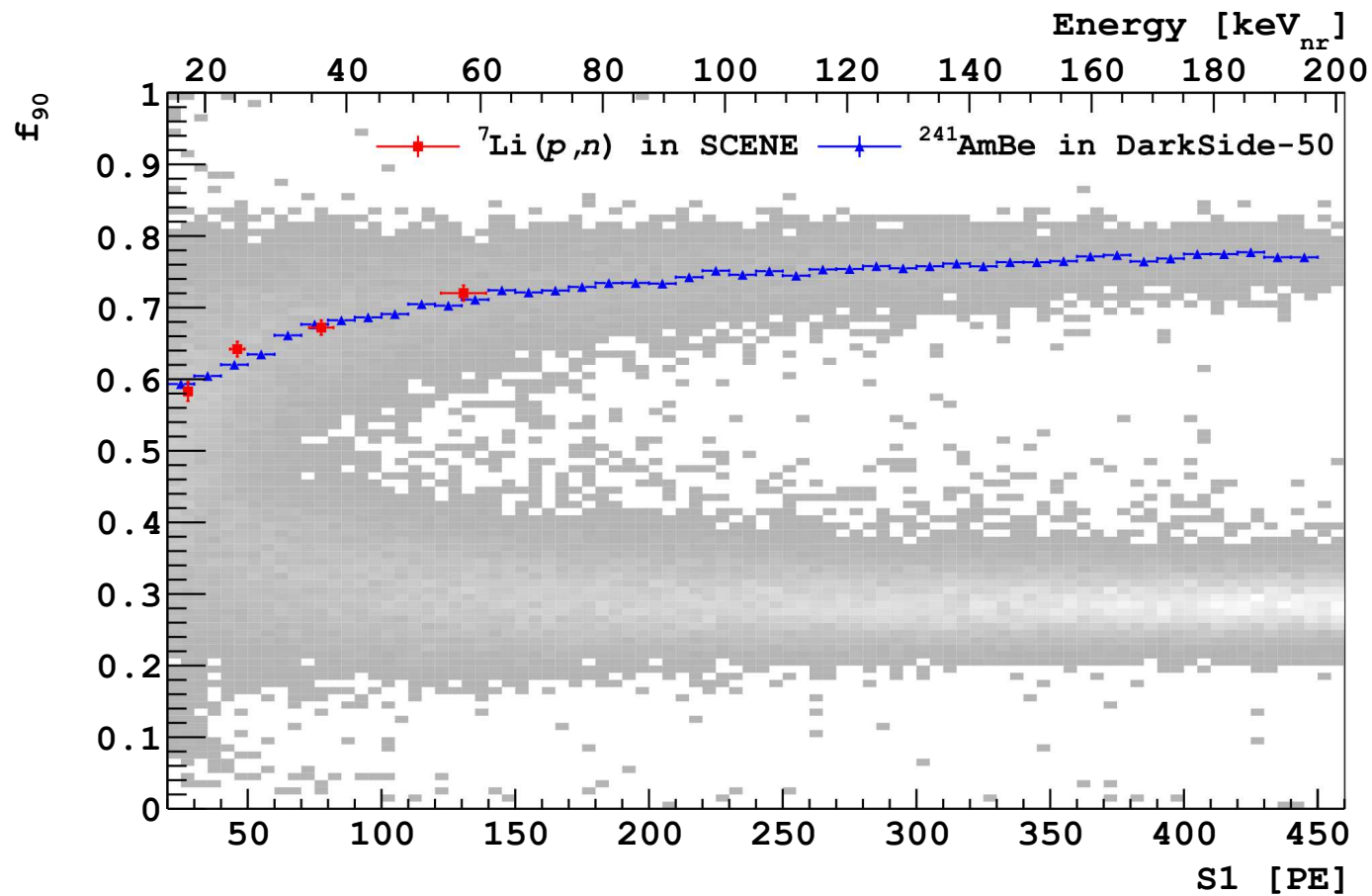
Ułamek sygnału w pierwszych 90 ns ( $f_{90}$ )  $\Rightarrow$  separacja na poziomie  $1.5 \cdot 10^{-7}$



# Detekcja bezpośrednia

## DarkSide-50

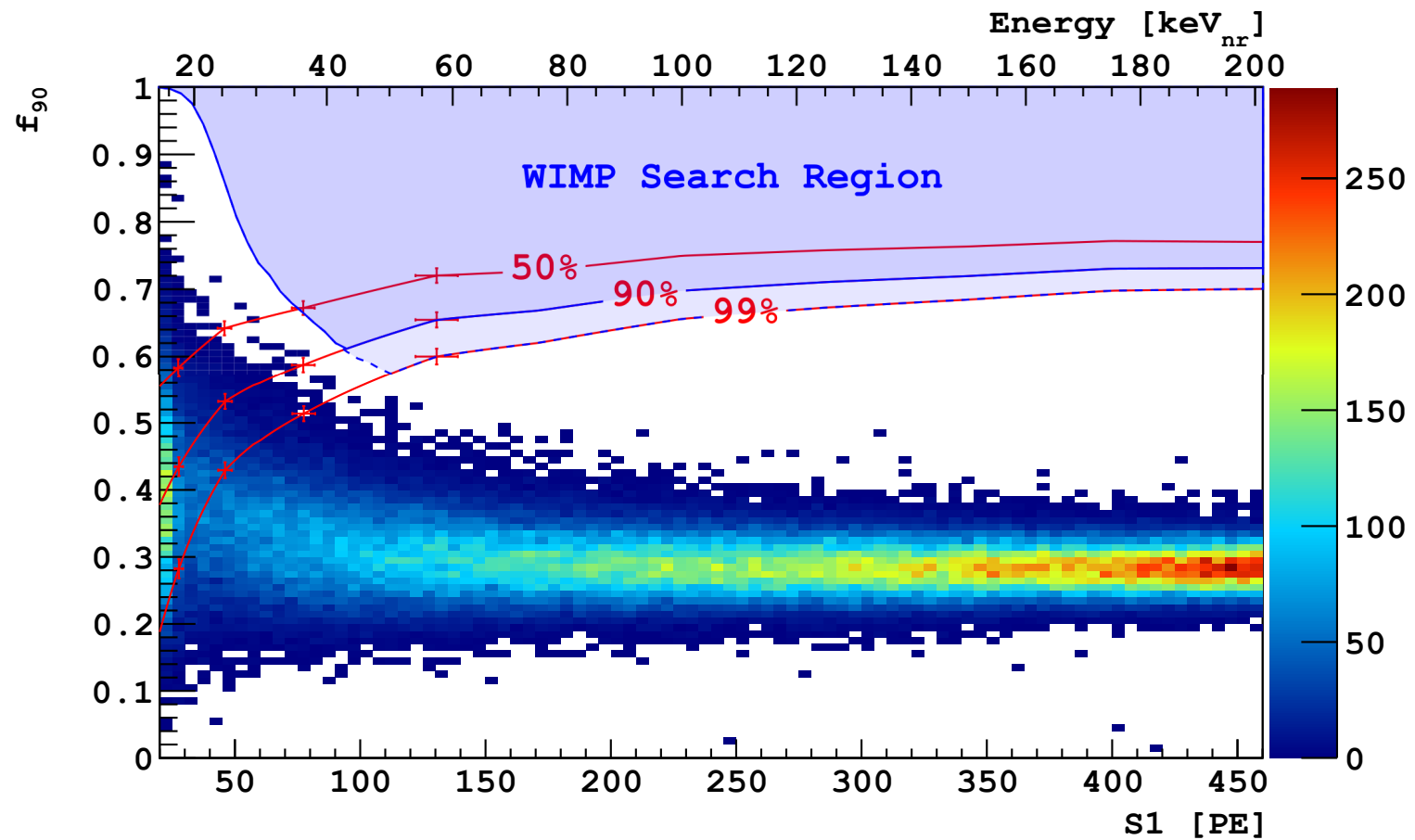
Wyniki kalibracji detektora:



# Detekcja bezpośrednia

## DarkSide-50

Przypadki zebrane w trakcie 71 dni “naświetlania”

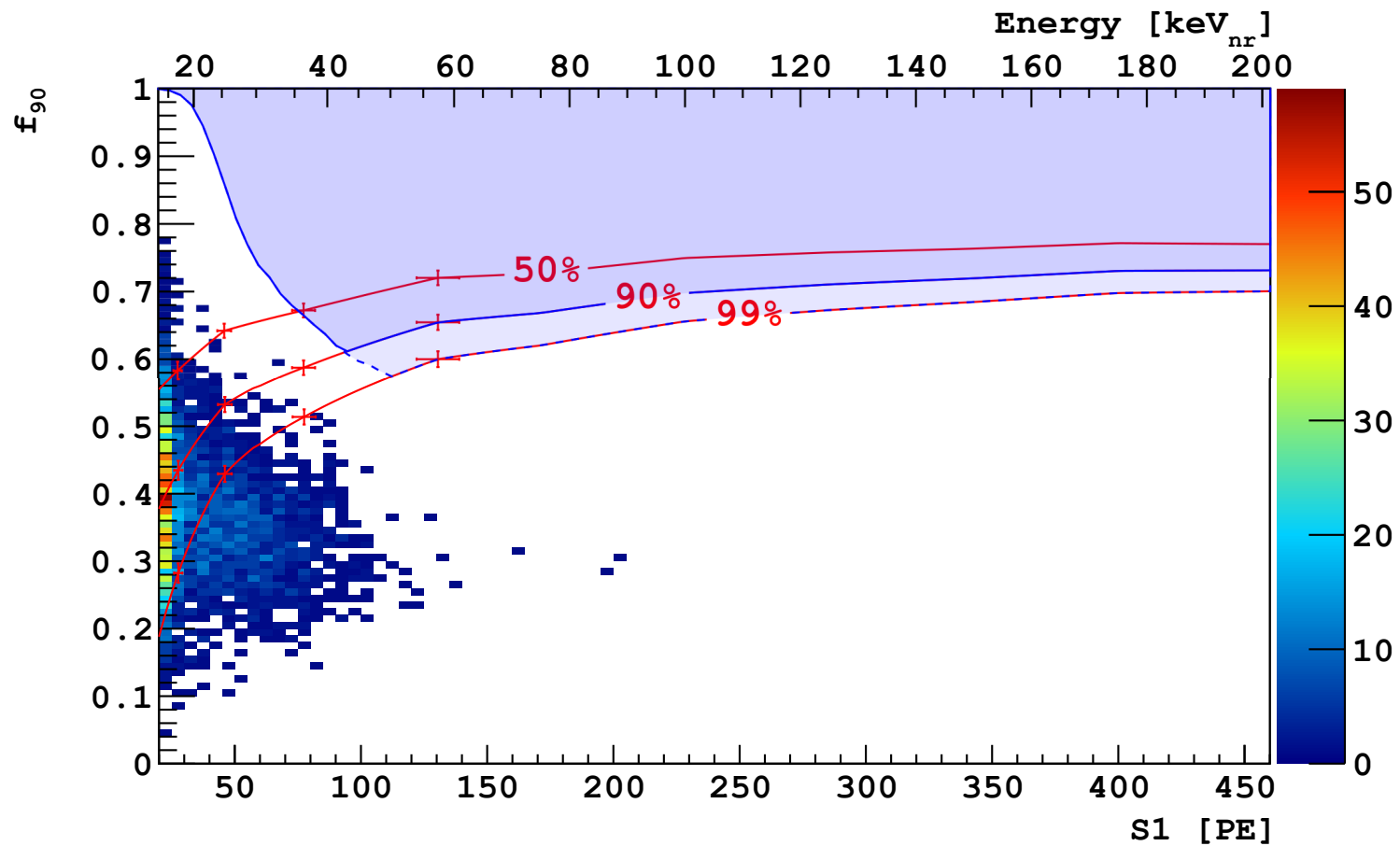




# Detekcja bezpośrednia

## DarkSide-50

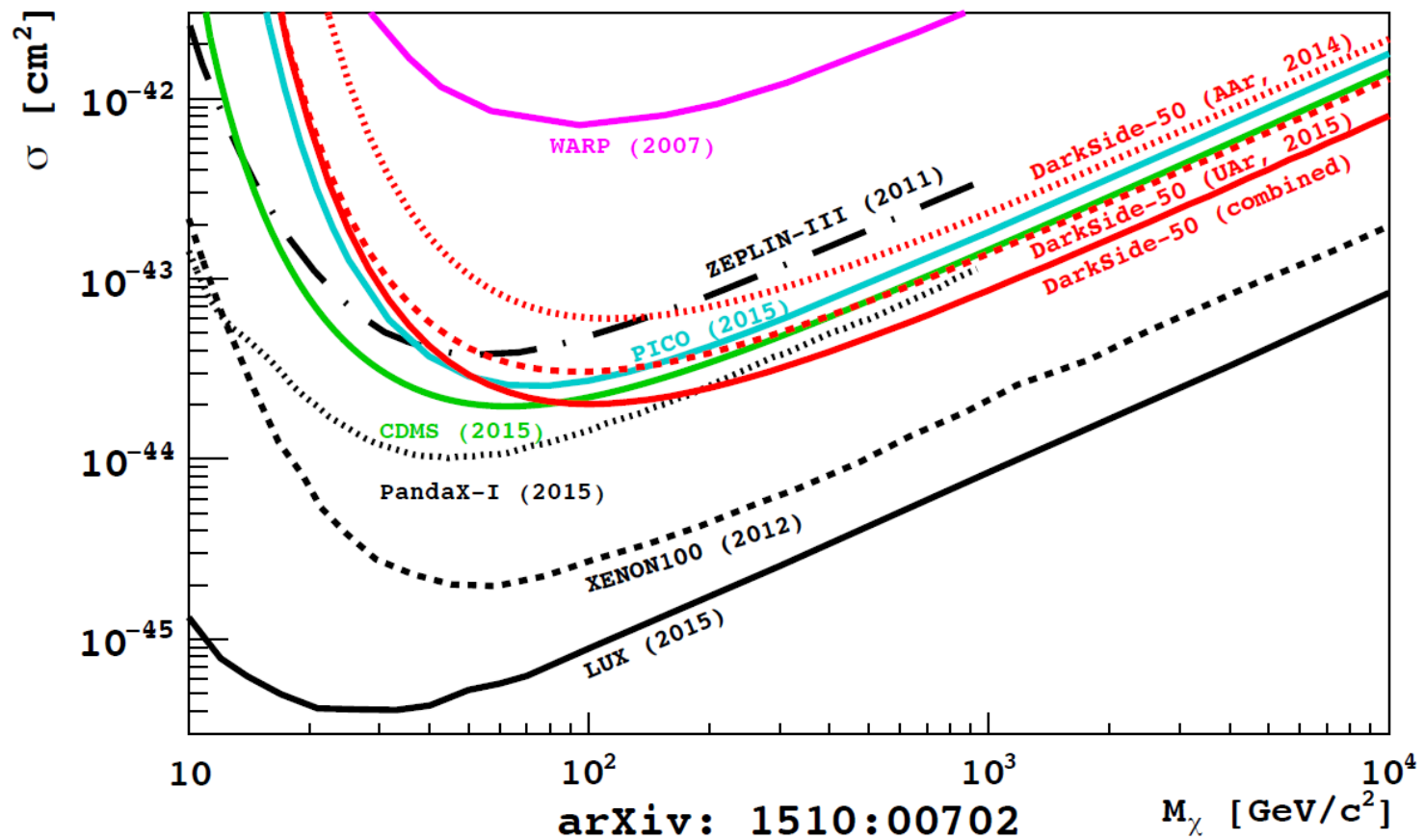
Zebrane przypadki (71 dni) po dodatkowych cięciach na jakość danych



# Detekcja bezpośrednia

## DarkSide-50

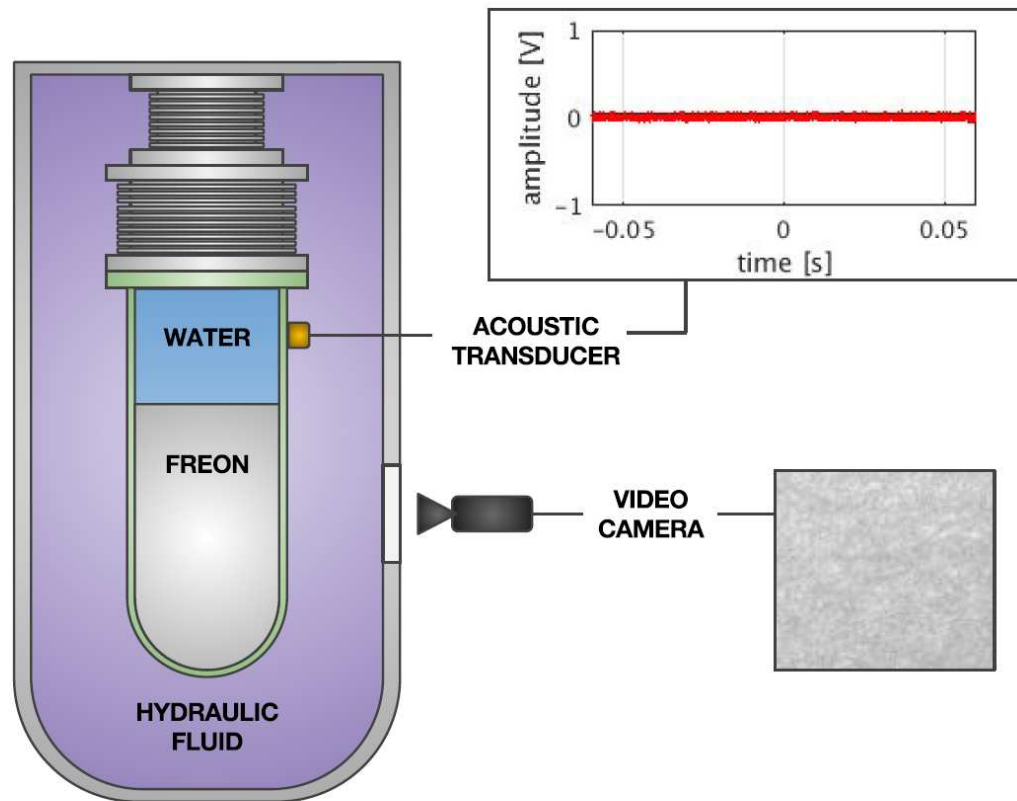
Wyniki przedstawione pod koniec 2015:



# Detekcja bezpośrednia

## Pico-60

Nowatorska koncepcja wykorzystania... komory pęcherzykowej.

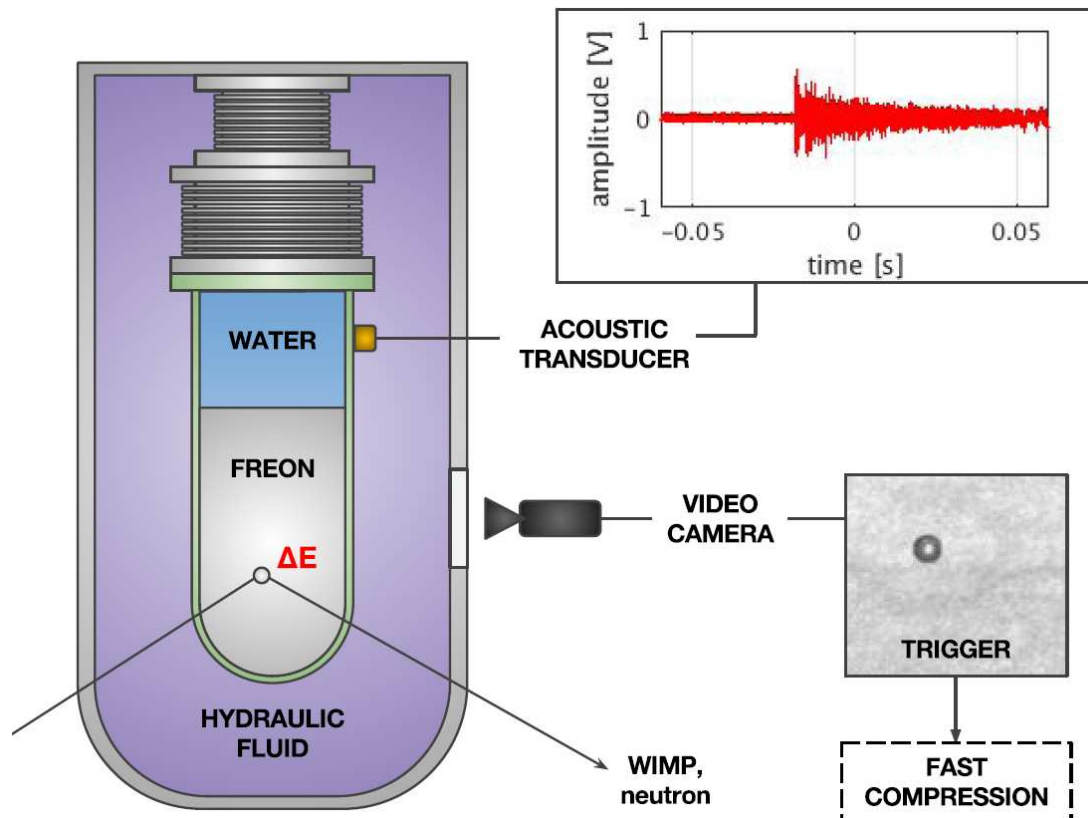


Aktywnym ośrodkiem jest freon, który utrzymywany jest w stanie przegrzanej cieczy.

# 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

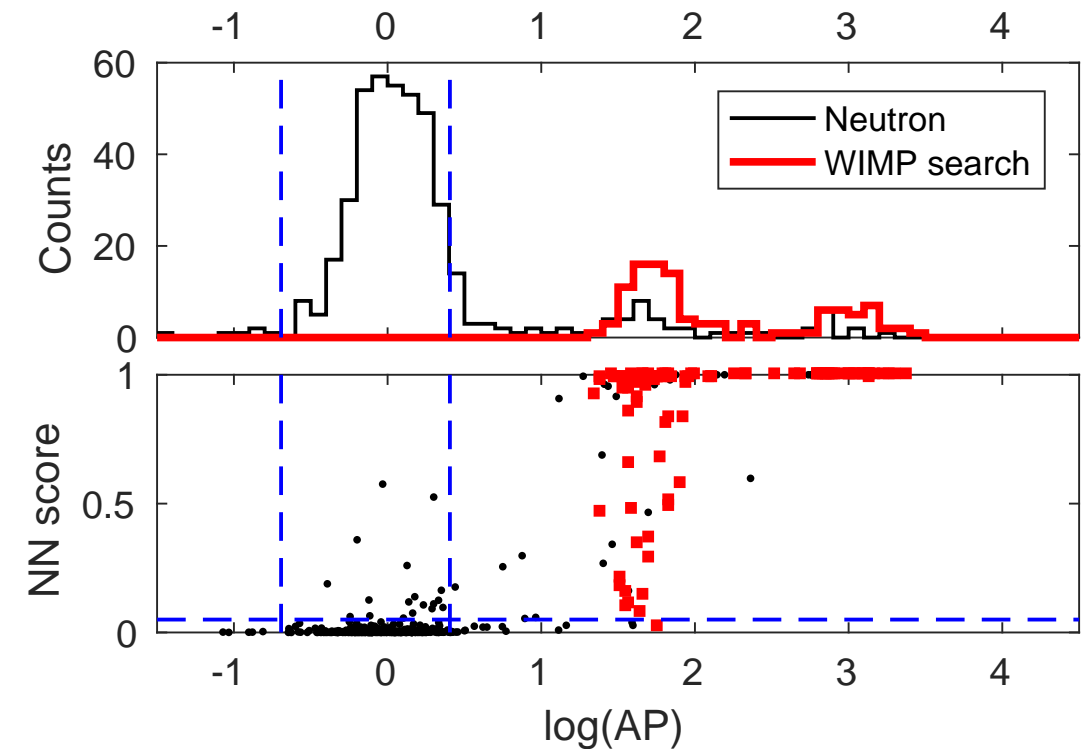
## Pico-60

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.

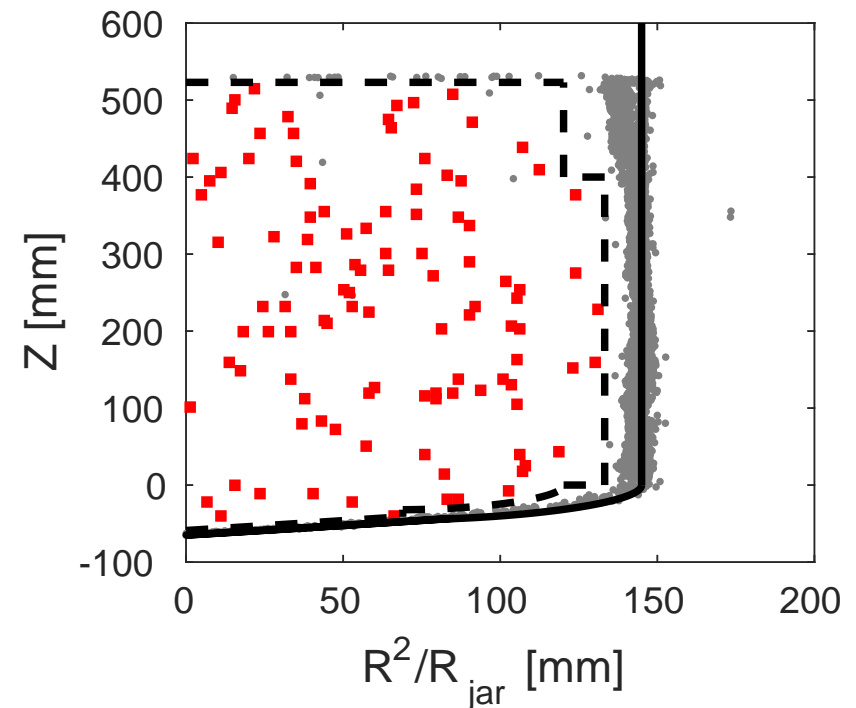
Odczyt optyczny: 4 kamery (300 fps)

Odczyt akustyczny: 8 czujników piezoelektrycznych

Zaobserwowano 106 pojedynczych pęcherzyków

Na rozkładzie NN vs AP żaden nie pasował do hipotezy WIMP

Rozkład przestrzenny przypadków:



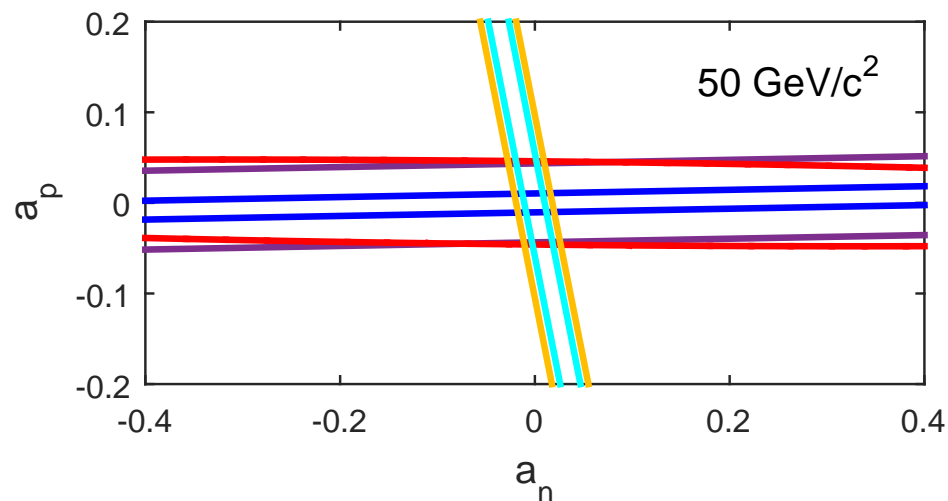
# Detekcja bezpośrednia

## 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:

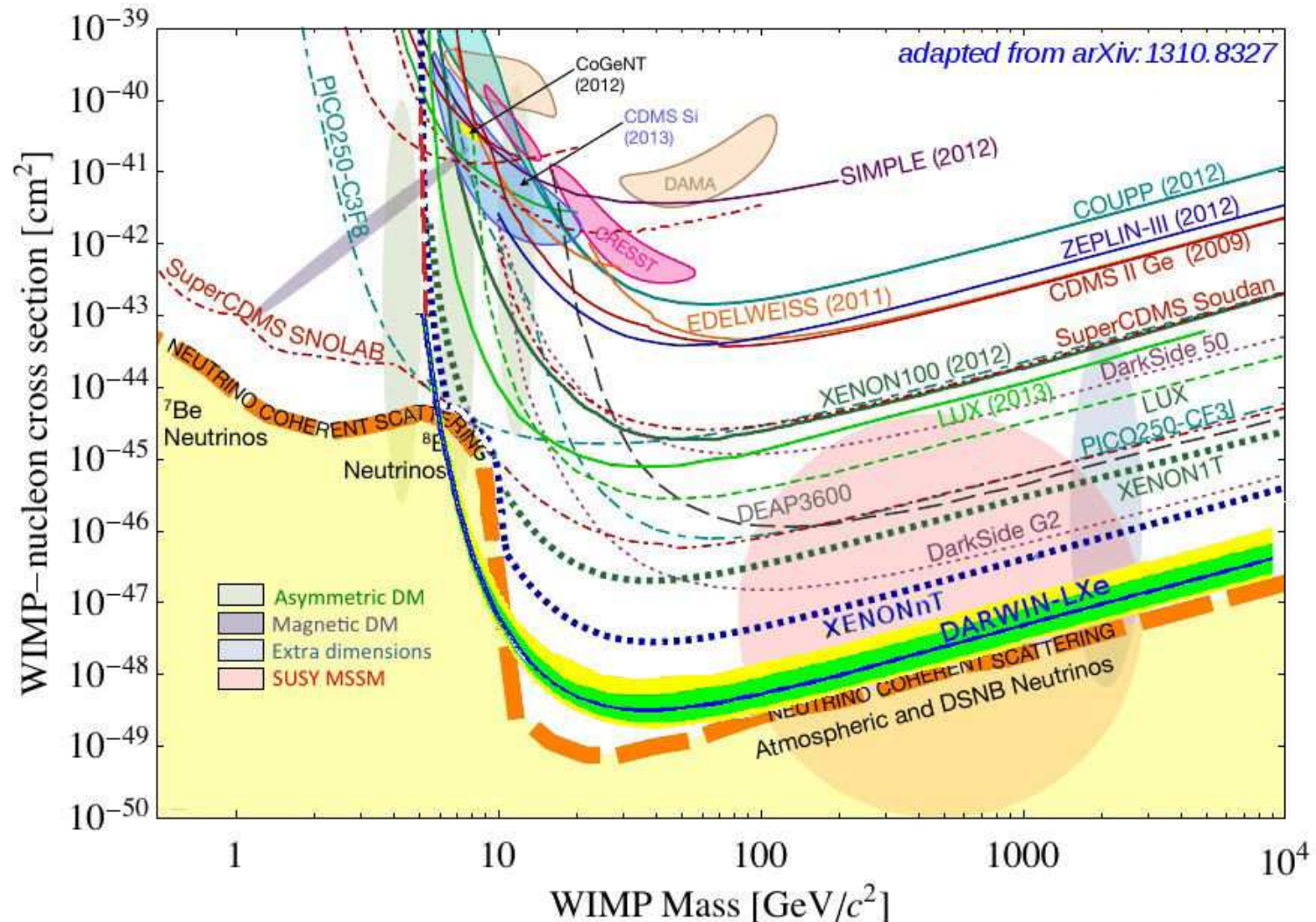


PICO-60 (blue), PICO-2L (purple), PICO-60 C3FI (red) vs PANDAX-II (cyan), LUX (yellow)

# Detekcja bezpośrednia

## Perspektywy

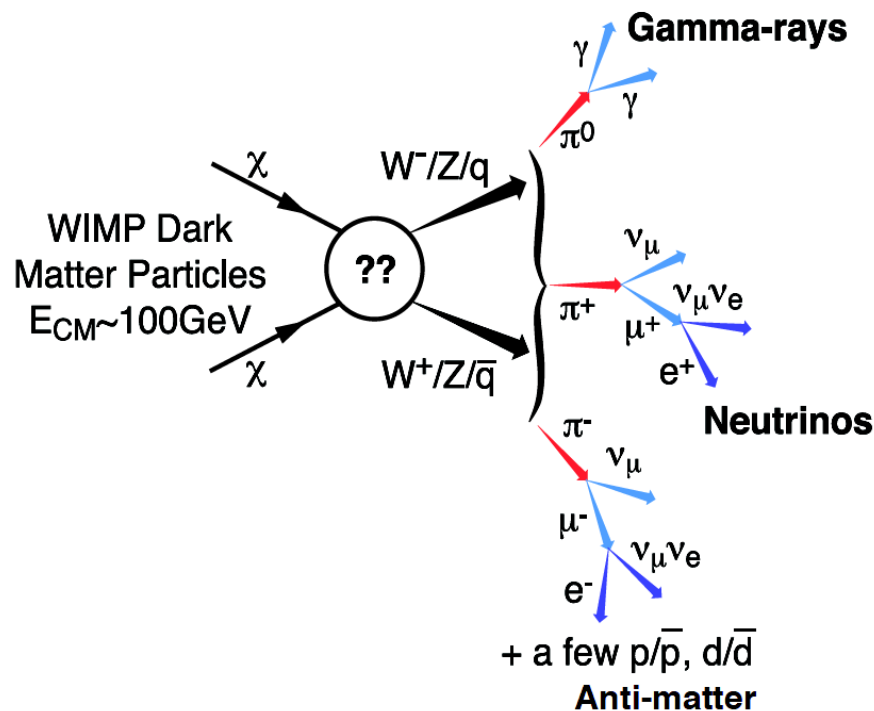
Julien Masbou, Moriond EW 2017





# 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...

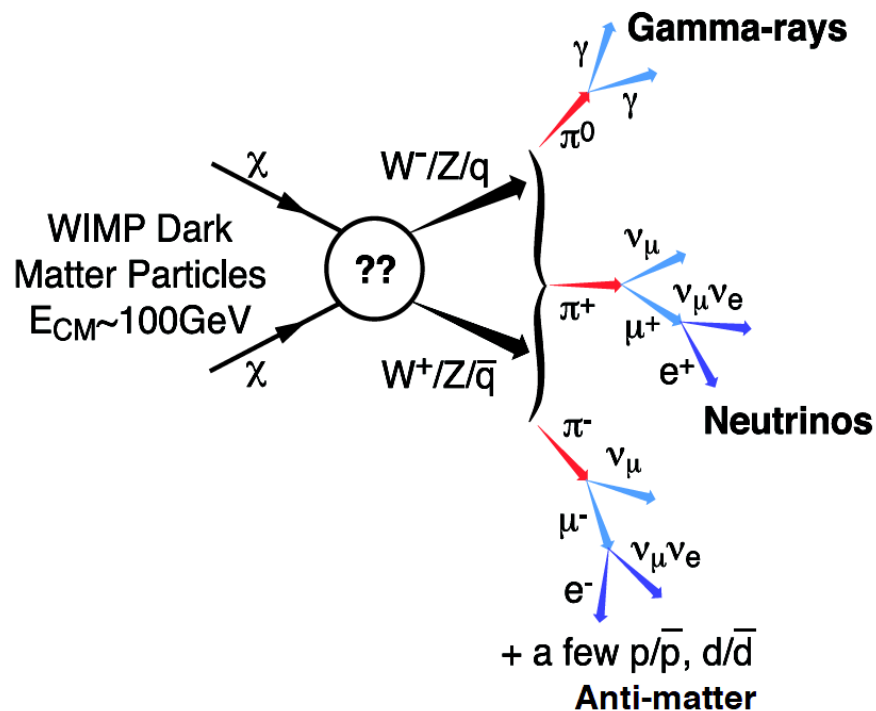
Ale ciemna materia uczestniczy w tworzeniu struktur we Wszechświecie! Więc na małych skalach odległości jej gęstość może być o wiele rzędów wielkości większa niż gęstość średnia (tak jak normalnej materii).

⇒ może znów zachodzić anihilacja

Podobnie jak w gwiazdach znów zachodzi nukleosynteza...

# Detekcja pośrednia

## Promieniowanie gamma



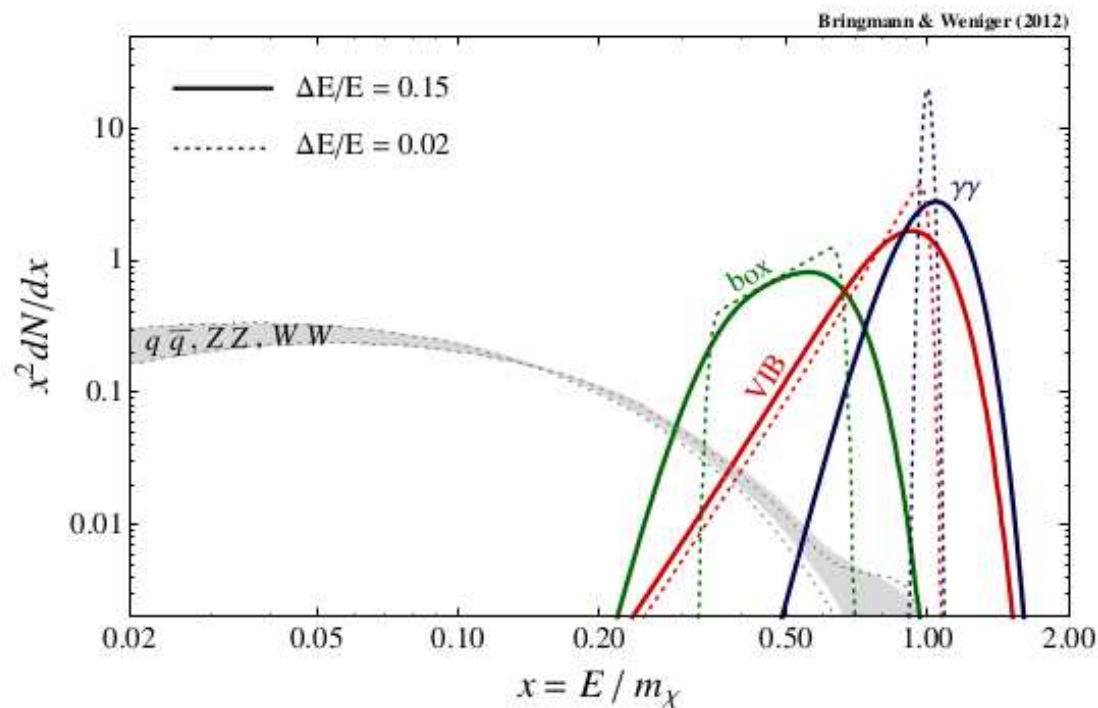
Zalety poszukiwania sygnału anihilacji DM w promieniowaniu gamma:

- 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  $\gamma$

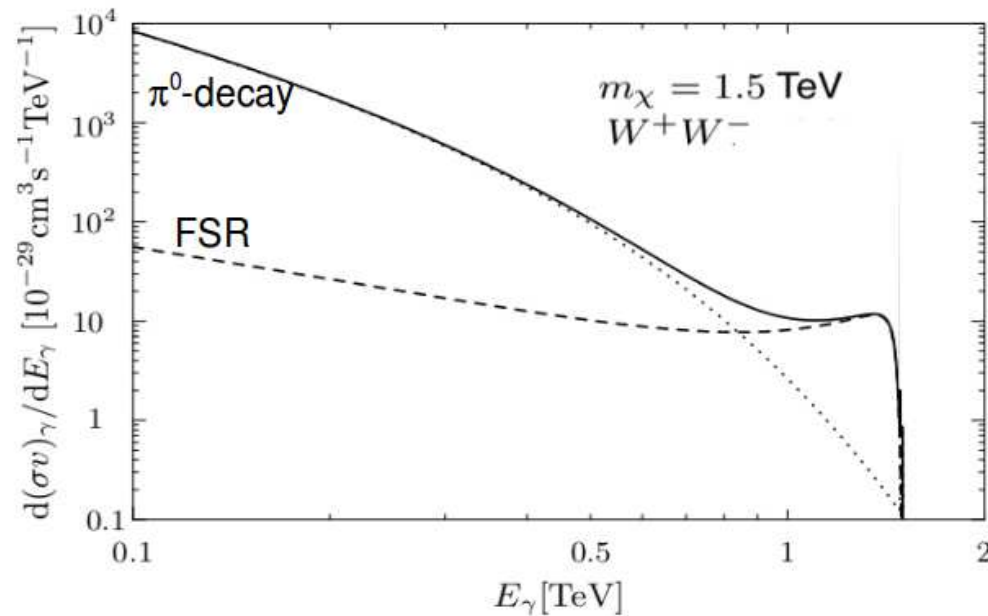
- bezpośrednia anihilacja  
 $\chi\chi \rightarrow \gamma\gamma, Z\gamma \dots$
- Virtual Internal Bremsstrahlung  
 $\chi\chi \rightarrow f\bar{f}\gamma, W^+W^-\gamma \dots$
- rozpady kaskadowe (Box)

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

# Detekcja pośrednia

## Promieniowanie gamma

Oczekiwane widmo promieniowania z anihilacji DM



Wtórne promieniowanie  $\gamma$

- rozpady  $\pi^0$   
(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  $\gamma$  pochodzącego z ustalonego kierunku - źródła.

Kryteria wyboru źródła:

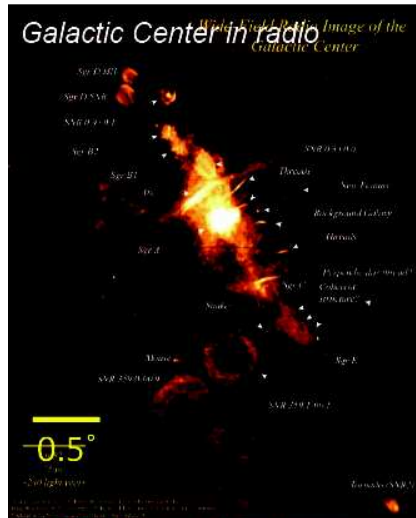
- duża jasność  
duża gęstość DM, mała odległość
- małe tło
- dobrze określona pozycja

Kandydaci:

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

# Detekcja pośrednia

## Źródła

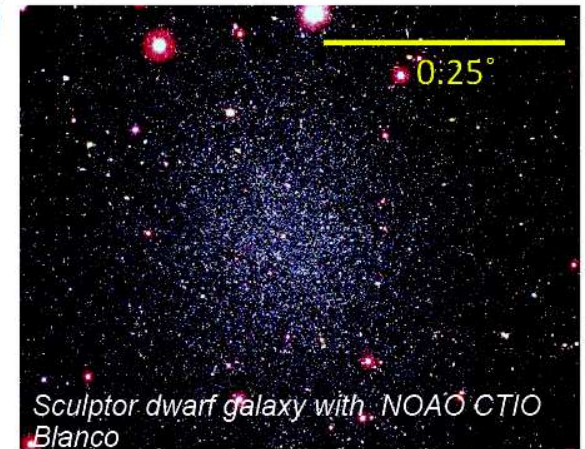


### Galactic Centre

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

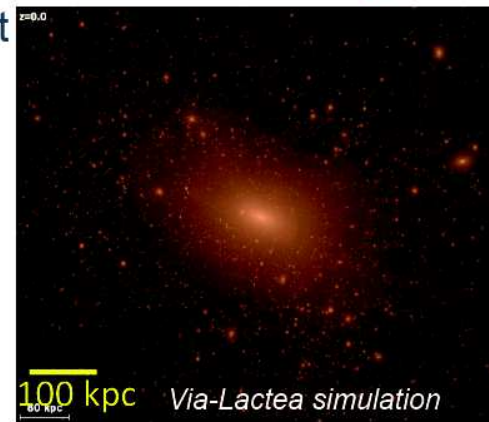
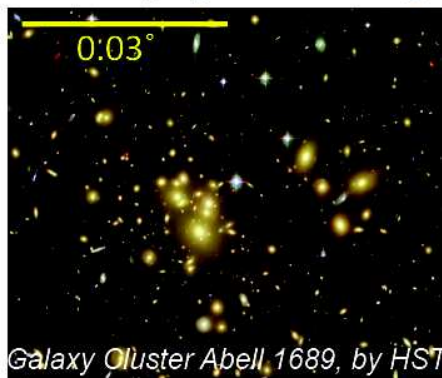
### Dwarf galaxies of the Milky Way

- 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



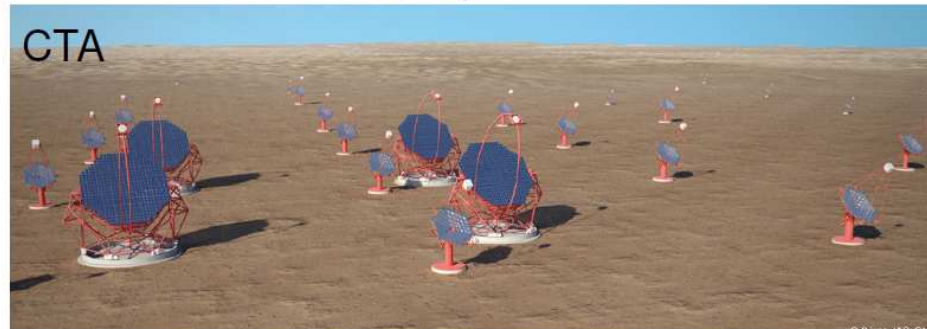
Artist's impression  
Credit: SPDO/TDP/DRAO/Swinburne  
Astronomy Productions.

Single-dish



*gamma-rays*

Ground based  
telescopes



*x-rays*  
Space satellites



Space  
satellites



# Detekcja pośrednia

## Zakres widmowy

