

# 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)

# Ciemna materia

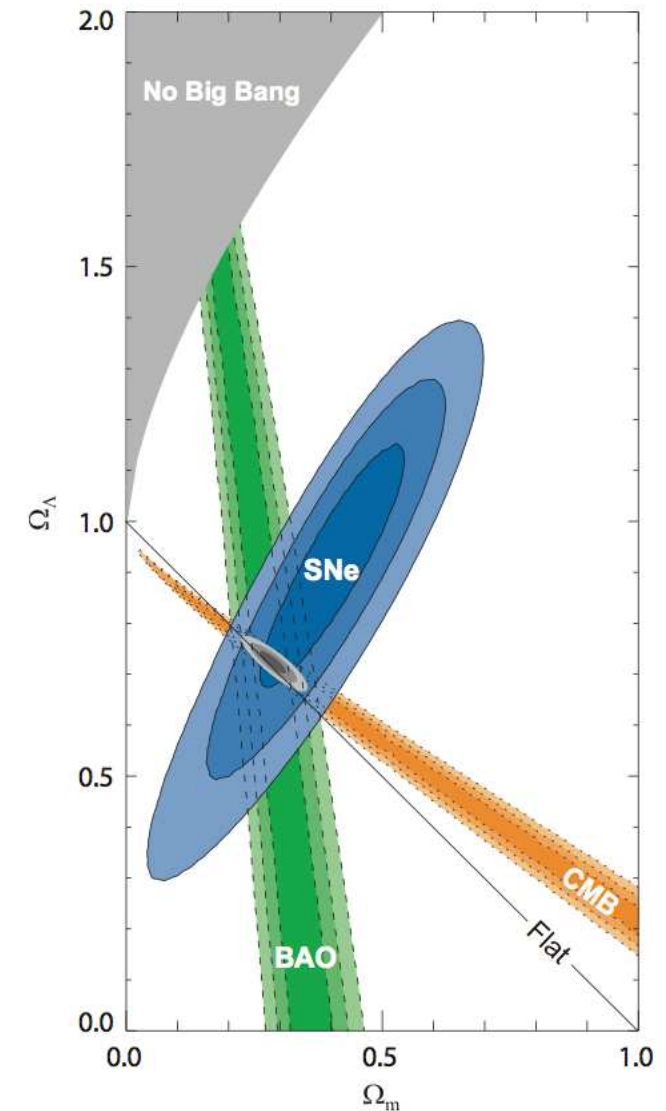
## Przesłanki eksperymentalne

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:

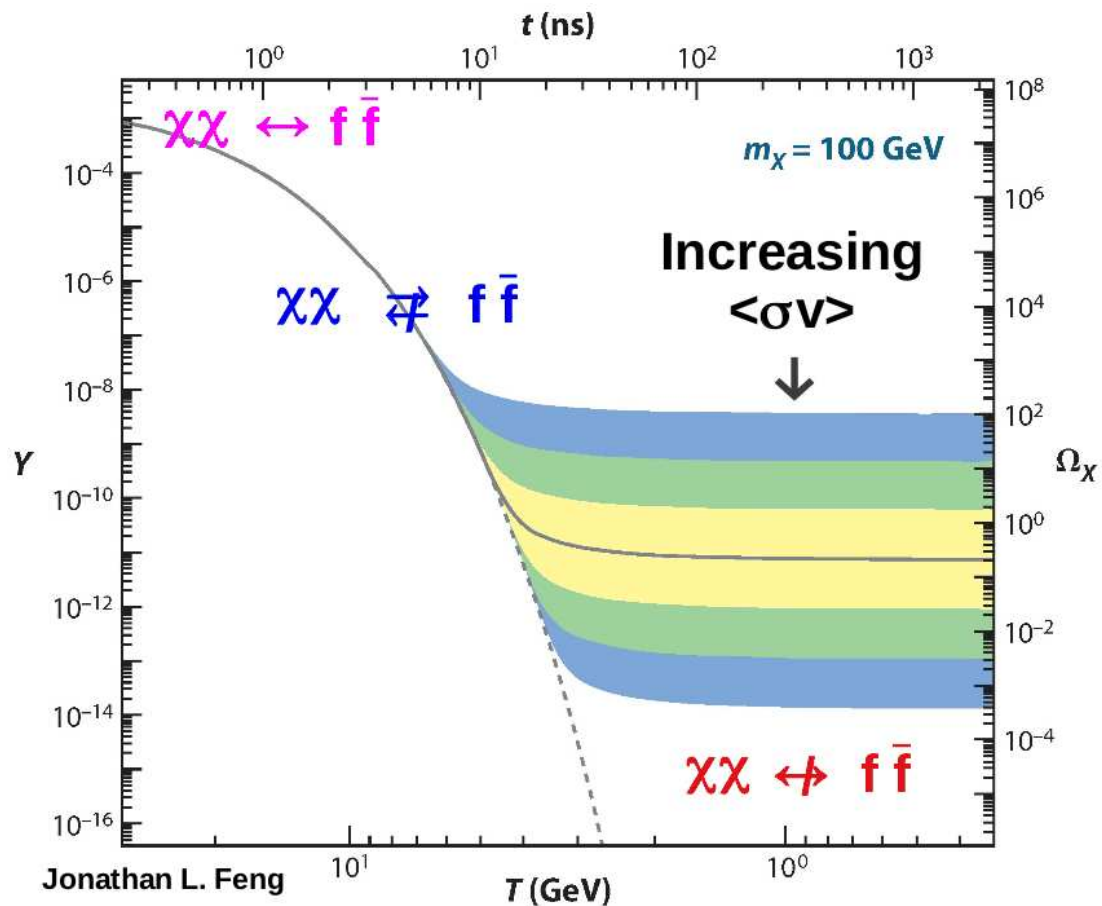
- jest “zimna” (nierelatywistyczna)
- jest niebarionowa
- jest stabilna (nie rozpada się)
- bardzo słabo oddziałuje (tylko grawitacyjnie?)
- daje wkład ok.  $1/4$  gęstości krytycznej ( $5 \times$  materia barionowa)

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:

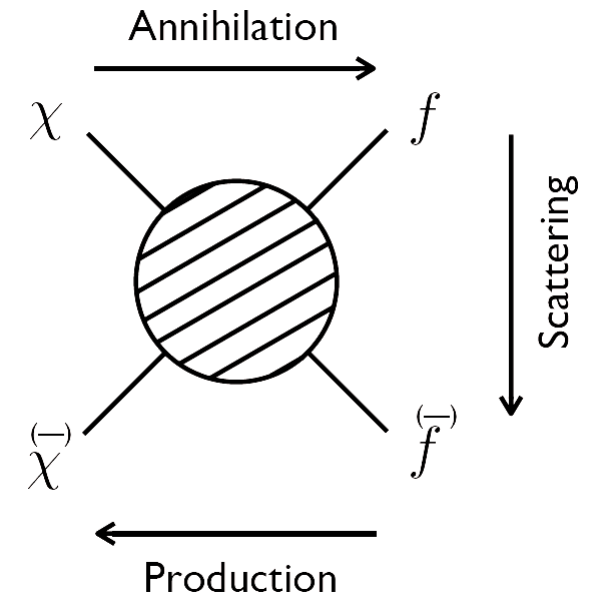
$$\Omega_{\chi} h^2 \approx \frac{3 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^3/\text{s}}{\langle\sigma v\rangle} \sim 0.12$$

# 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

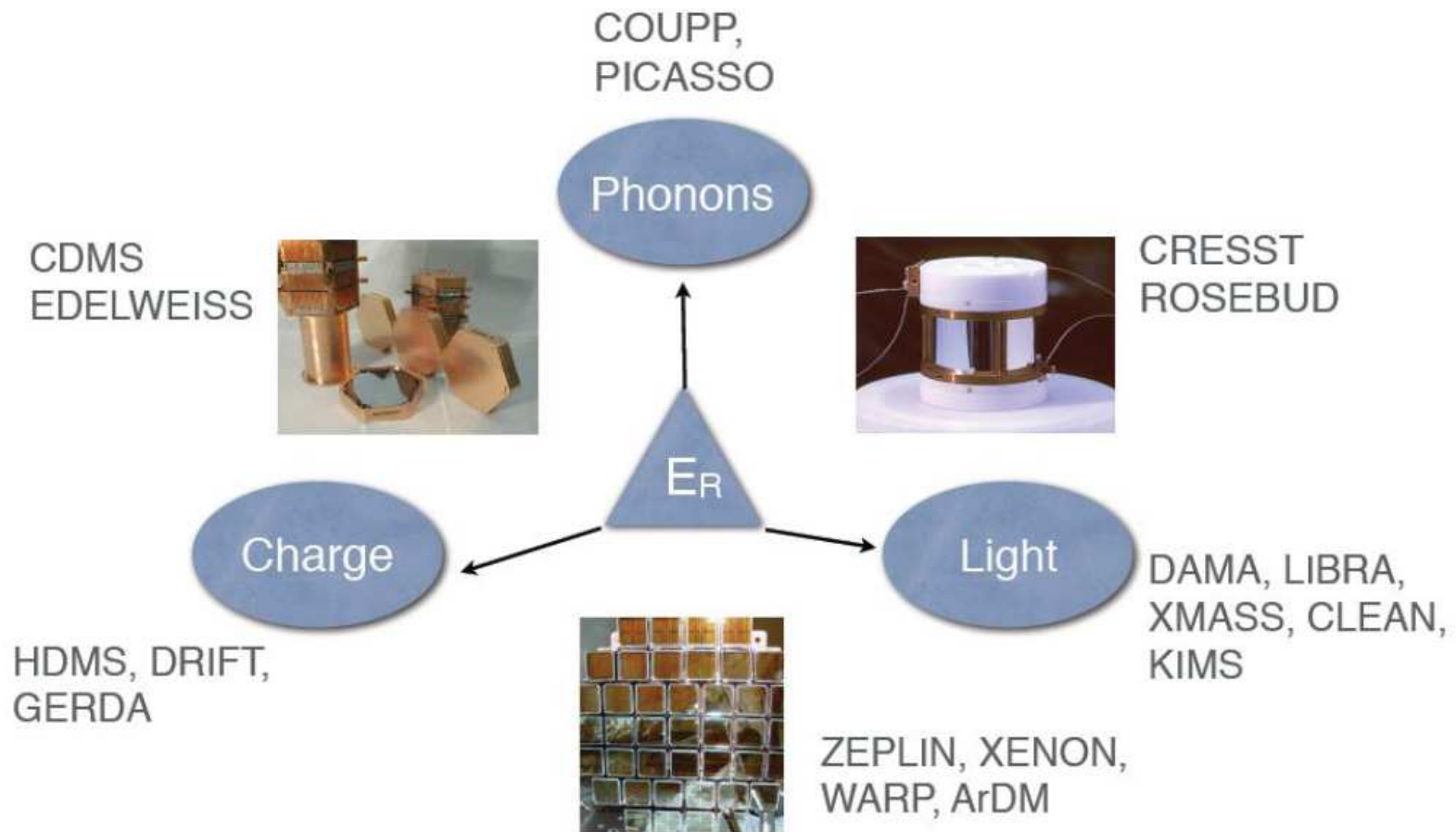


# Detekcja bezpośrednia

## Kanały detekcji

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

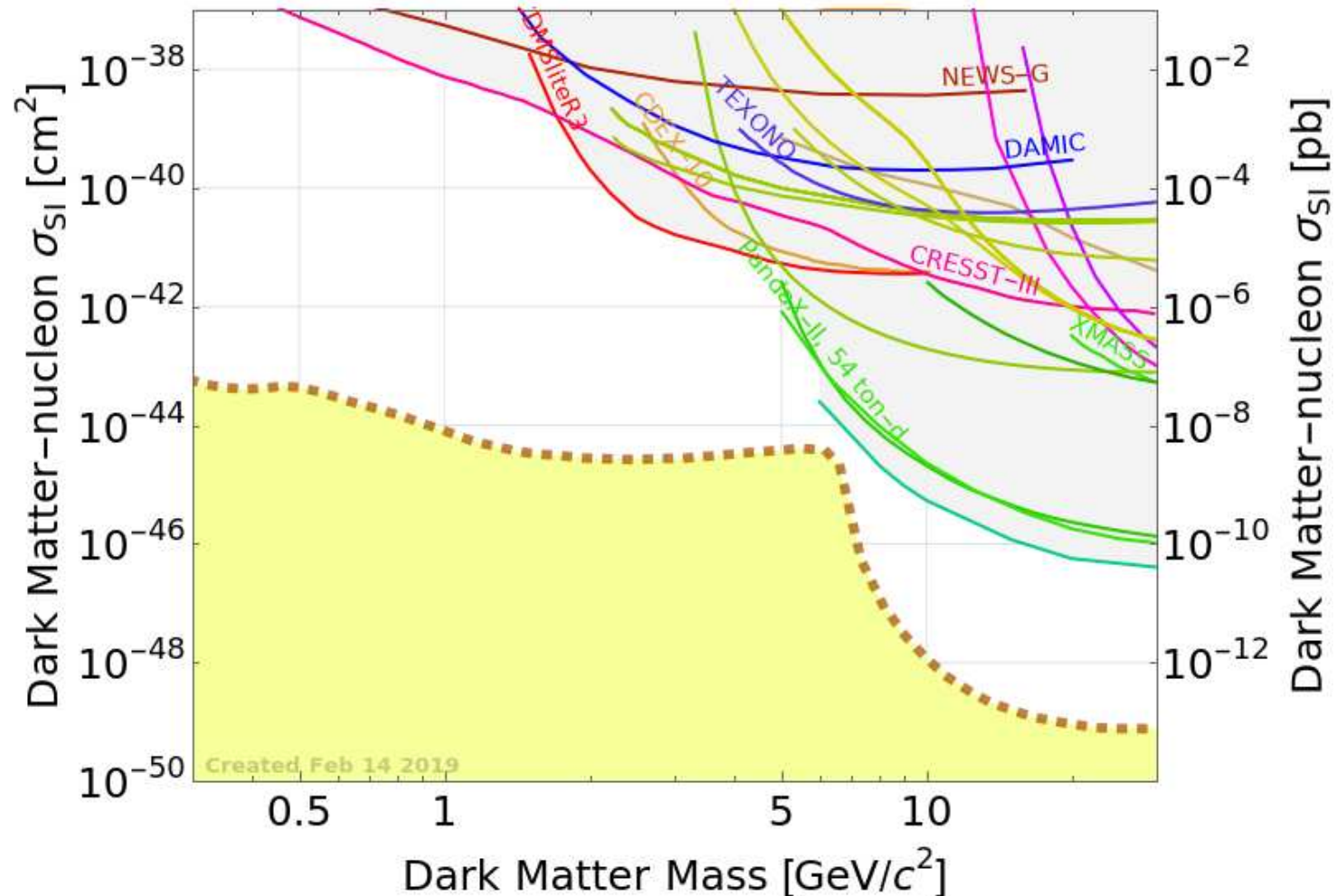
Różne eksperymenty przyjęły różną strategię



# Detekcja bezpośrednia

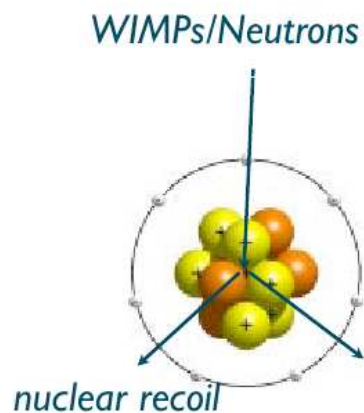
## Obszar niskich mas

Najlepsze ograniczenia z pomiarów w (małych) kryształach



# Detekcja bezpośrednia

## Duże układy detekcyjne

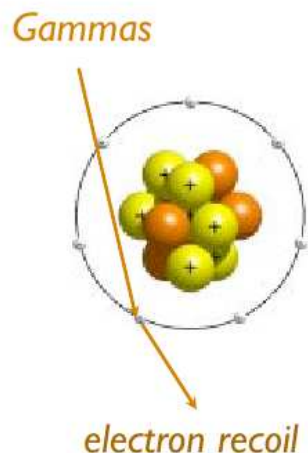


W omówionych dotychczas eksperymentach substancją aktywną były kryształy. Pozwalało to na pomiar wywołanych przez WIMP drgań sieci krystalicznej ( $\Rightarrow$  zmian temperatury) i rozróżnienie między rozproszeniem WIMP a fotonami tła.

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.

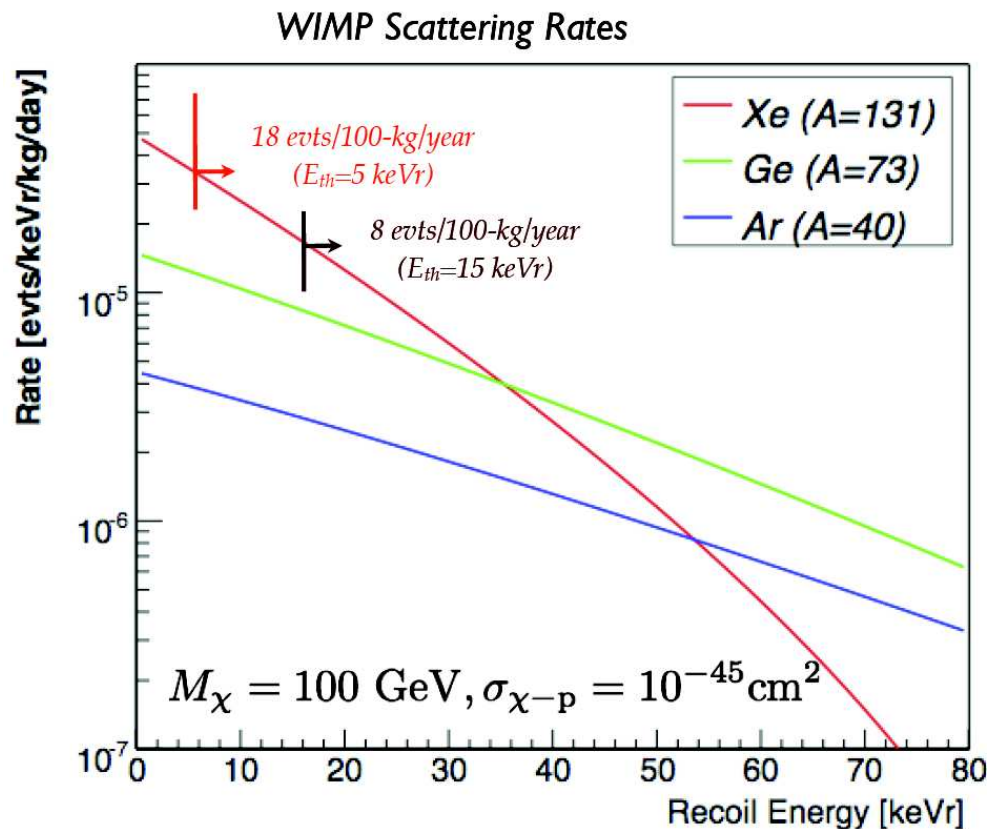


# Detekcja bezpośrednia

## 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

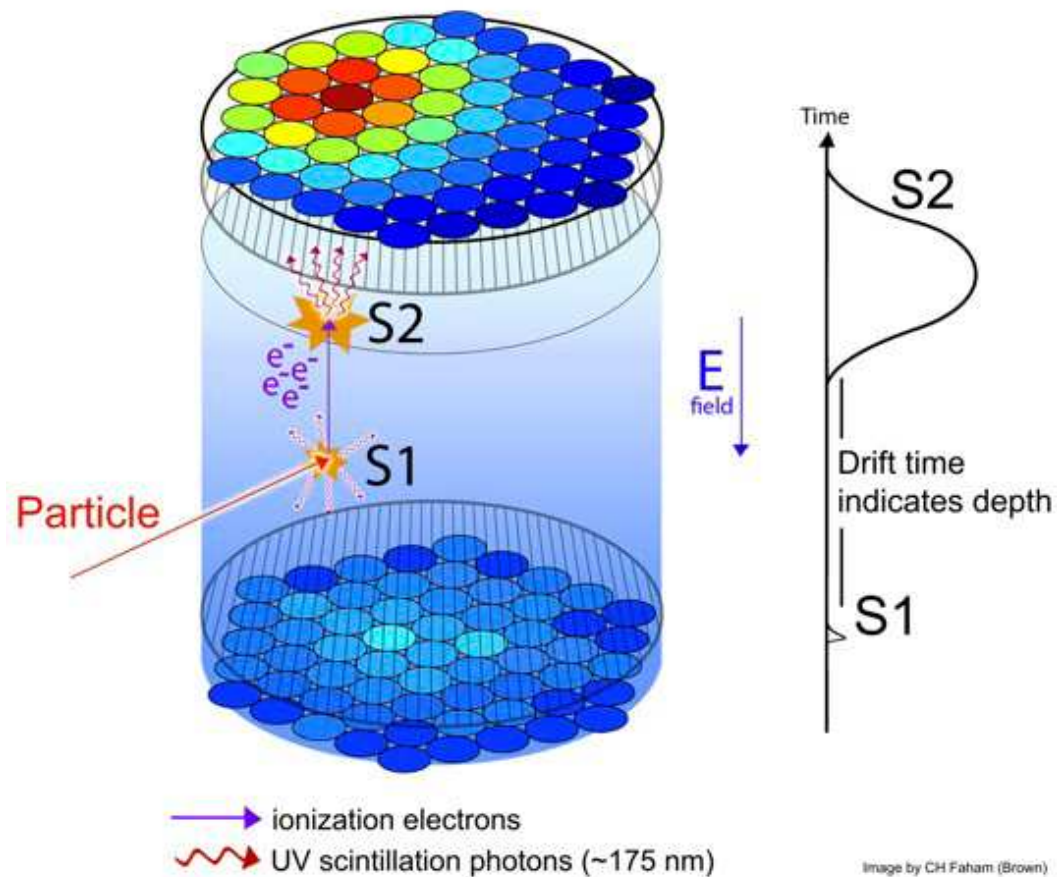


Najczęściej wybierany ksenon:

- 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

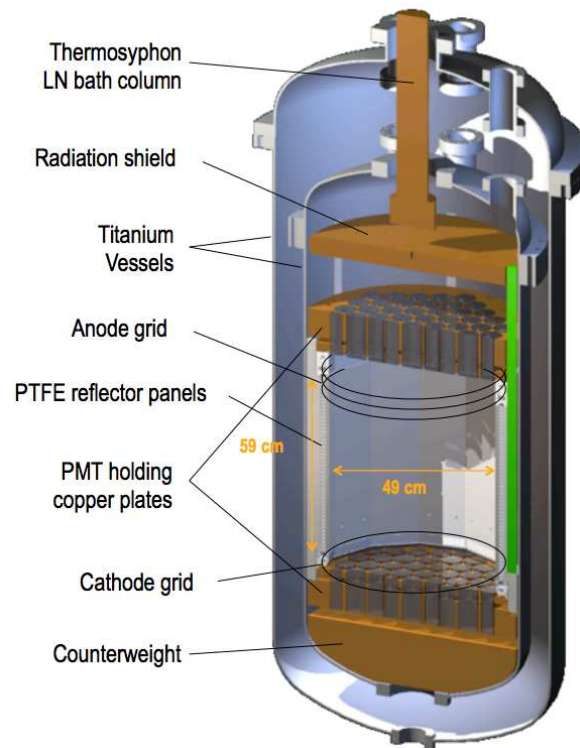
## Dwufazowa komora projekcji czasowej

Najsilniejsze ograniczenia na DM pochodzą obecnie z eksperymentów

LUX (Large Underground Xenon experiment)

Xenon

zdj.: Xenon100



# Detekcja bezpośrednia

## Dwufazowa komora projekcji czasowej

Coraz silniejsze ograniczenia na DM: wyścig dwóch 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

Coraz silniejsze ograniczenia na DM: wyścig dwóch eksperymentów

LUX (Large Underground Xenon exp.)

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

Xenon1T (od 2017)

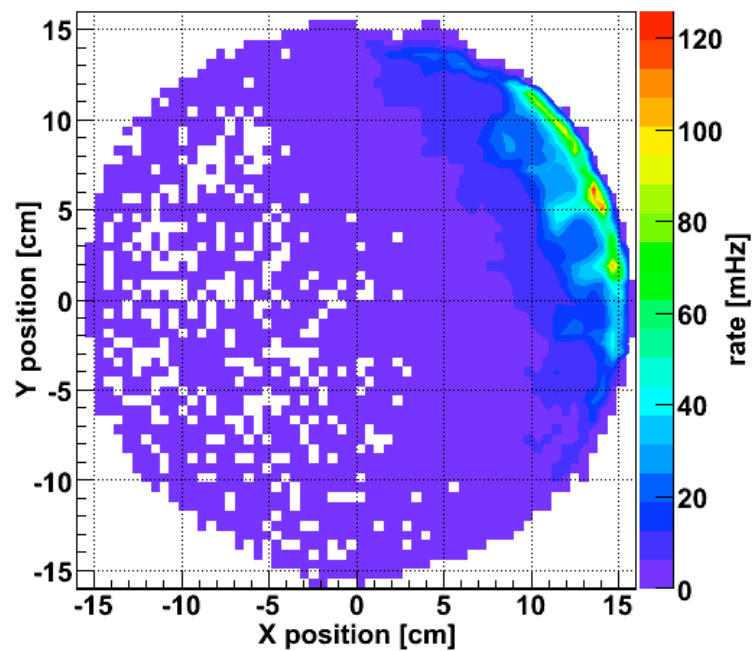
- 3,5 tony ciekłego Xe  
2 t w obszarze aktywnym
- 248 fotopowielaczy  
+ 84 w aktywnym weto
- LNGS (Gran Sasso), Włochy (1400 m)

# Detekcja bezpośrednia

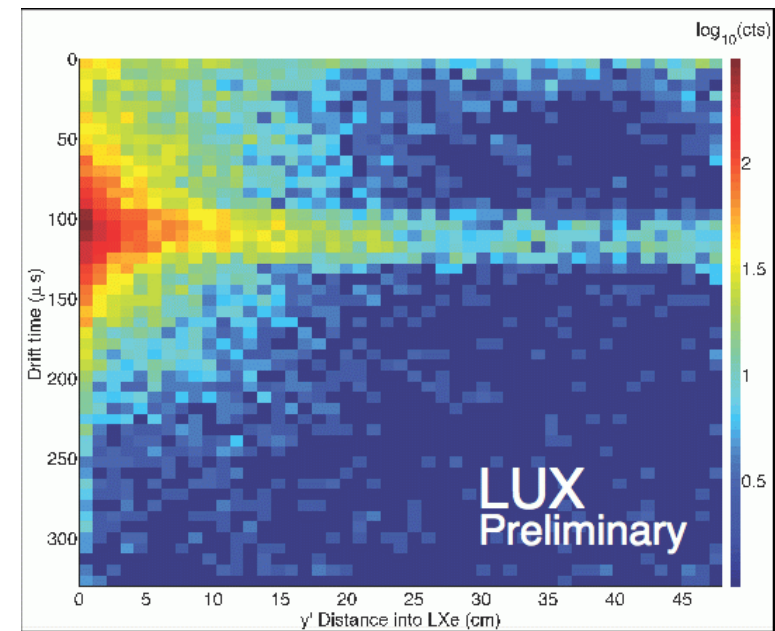
## Dwufazowa komora projekcji czasowej

Możliwość rekonstrukcji pozycji punktu zderzenia

Źródło  $\gamma$  przy bocznej ścianie:



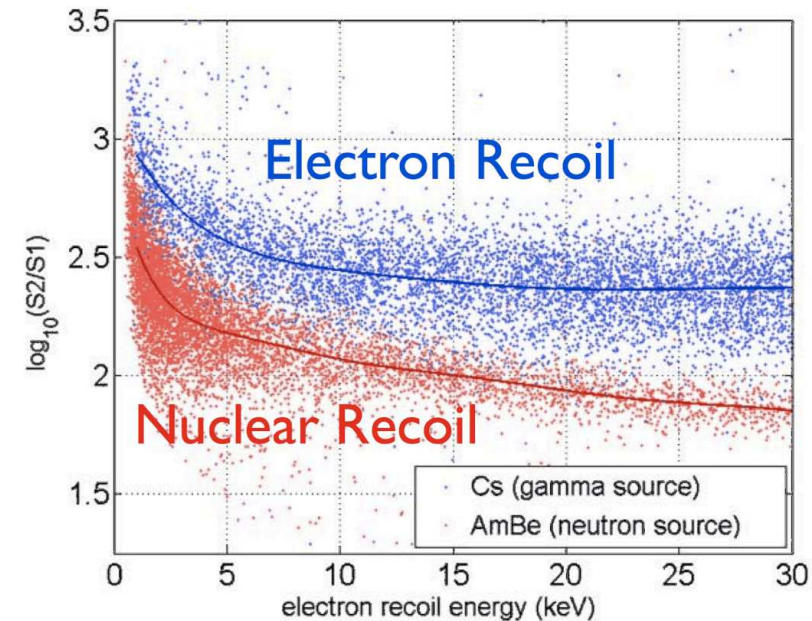
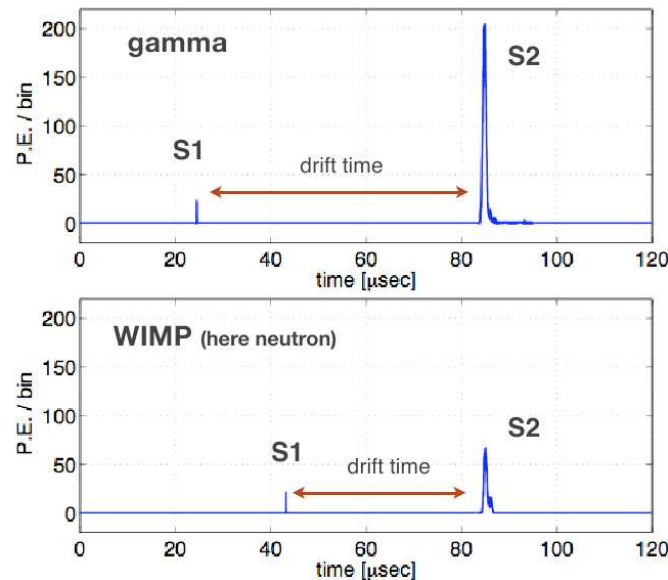
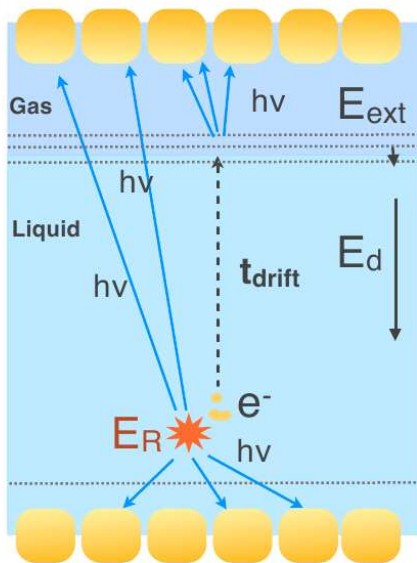
Wiązka neutronów:



# Detekcja bezpośrednia

## Dwufazowa komora projekcji czasowej

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

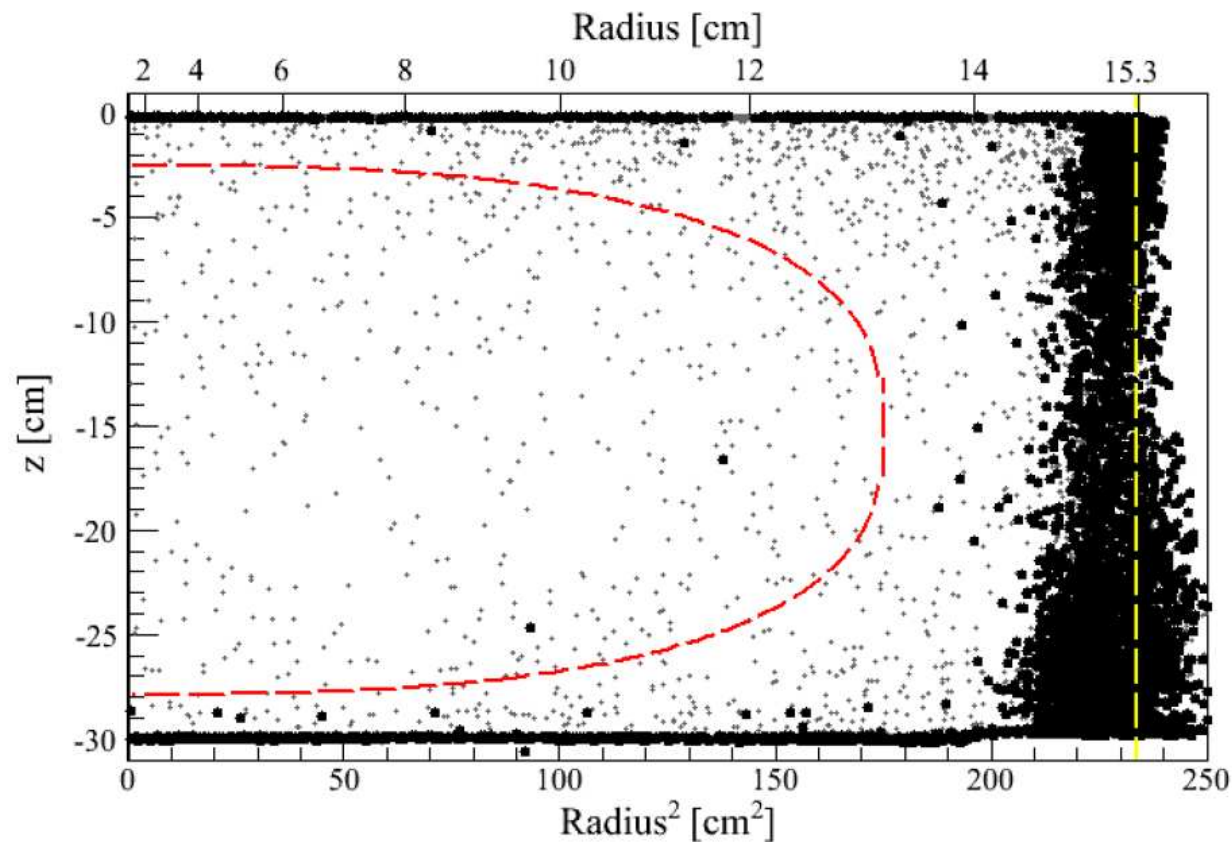


Cięcie na stosunek  $S2/S1$  umożliwia odrzucenie ponad 99.5% przypadków tła.

# Detekcja bezpośrednia

Fiducial volume

Eksperyment Xenon100

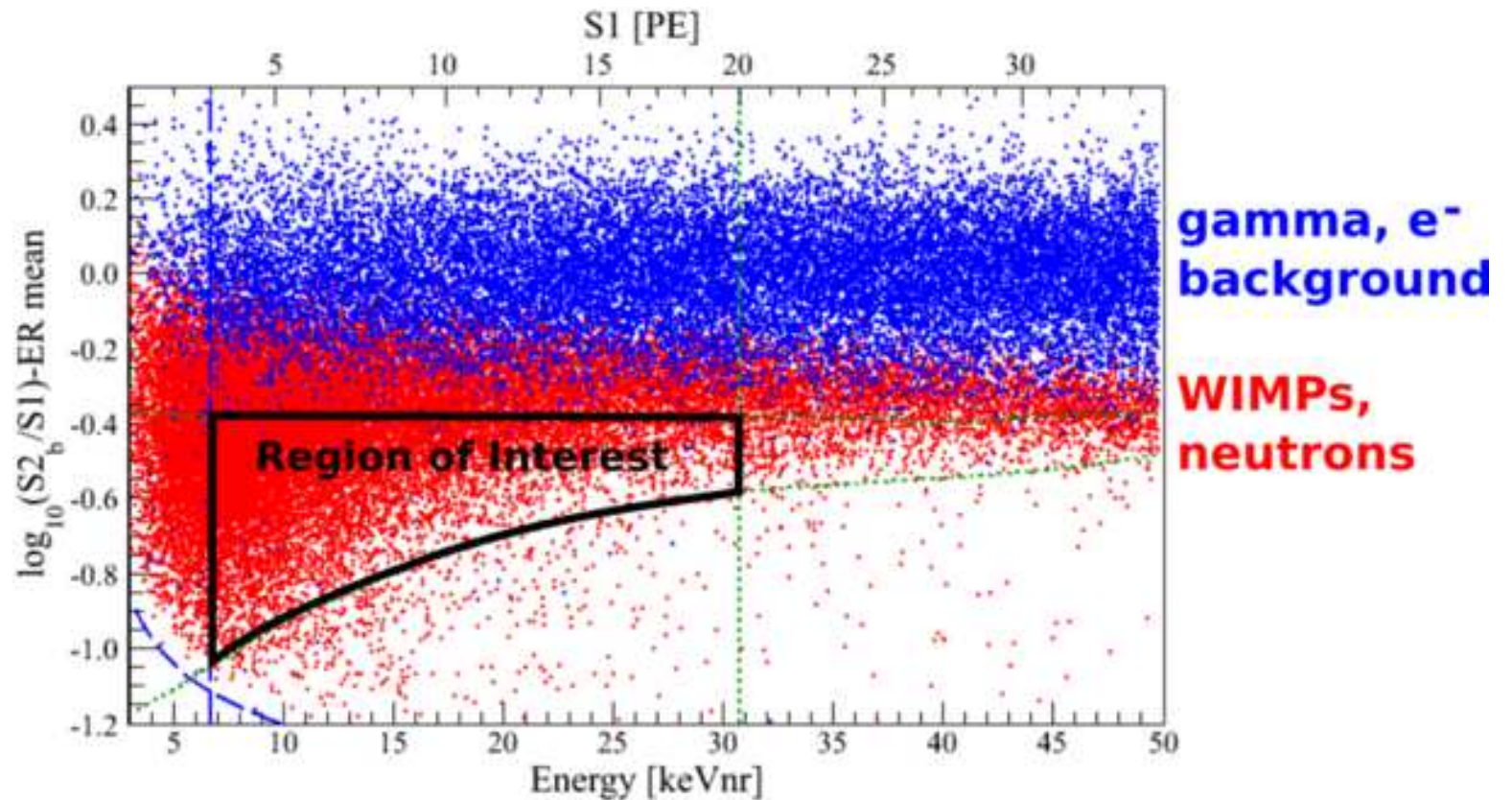


Pomiar pozycji pozwala na efektywne odrzucanie przypadków pochodzących od docierającego z zewnątrz promieniowania - przypadki blisko ścianek naczynia.



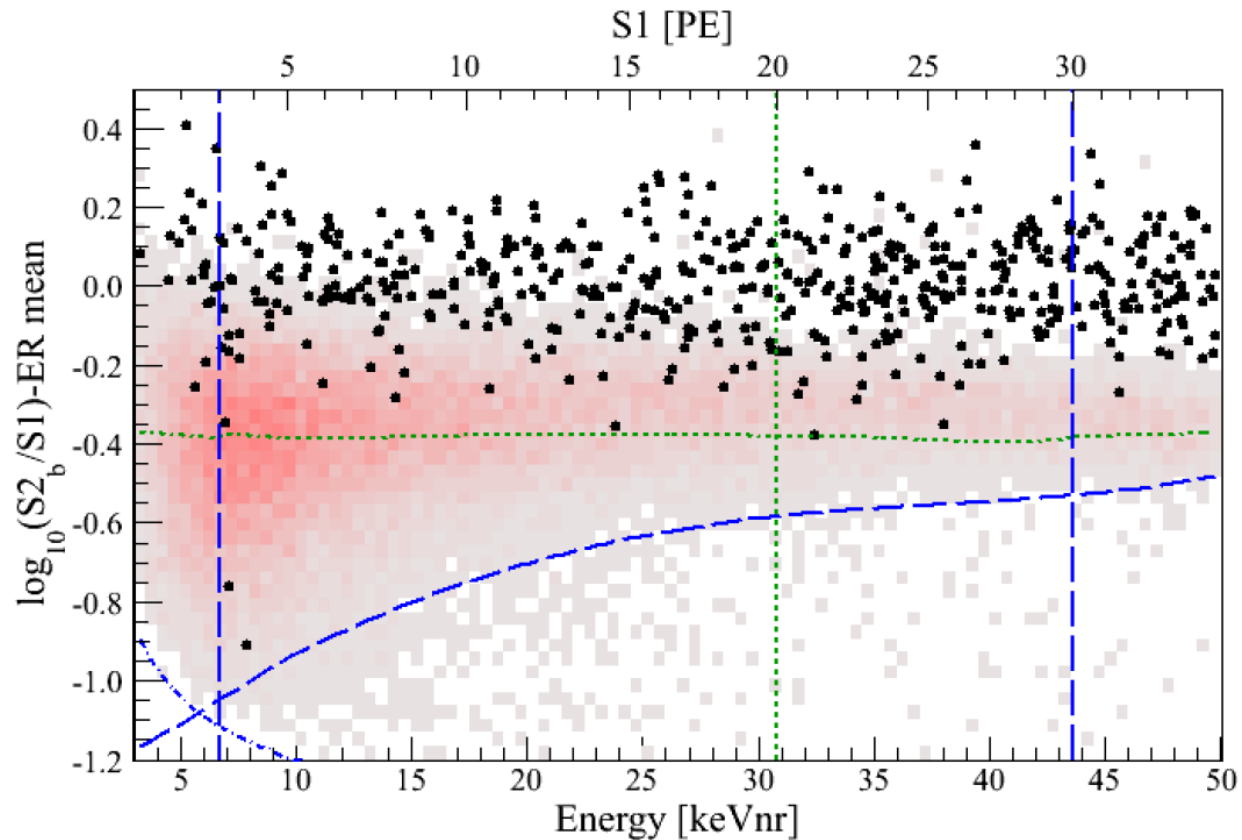
# Detekcja bezpośrednia

## Eksperyment Xenon100



# Detekcja bezpośrednia

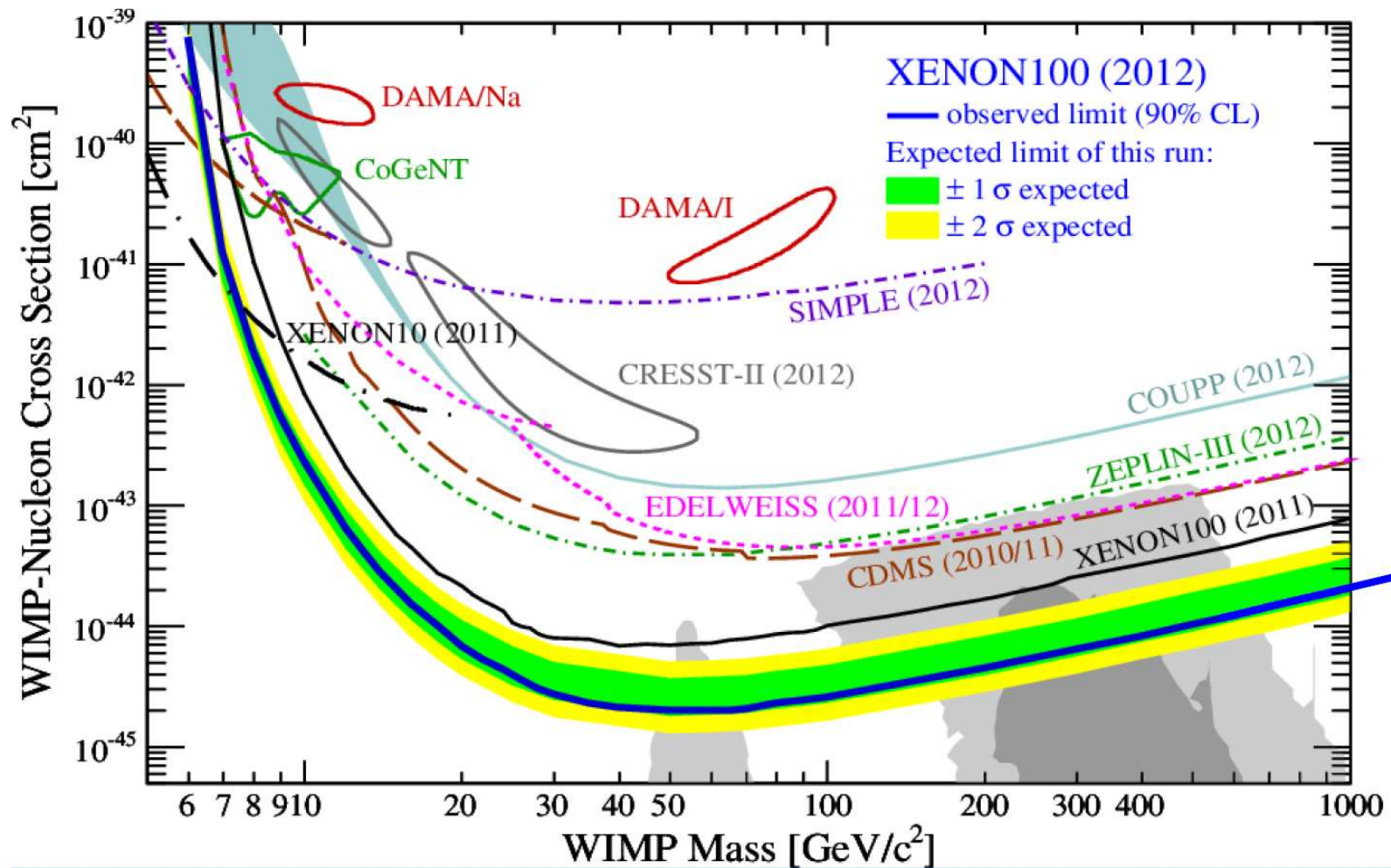
## Eksperyment Xenon100



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

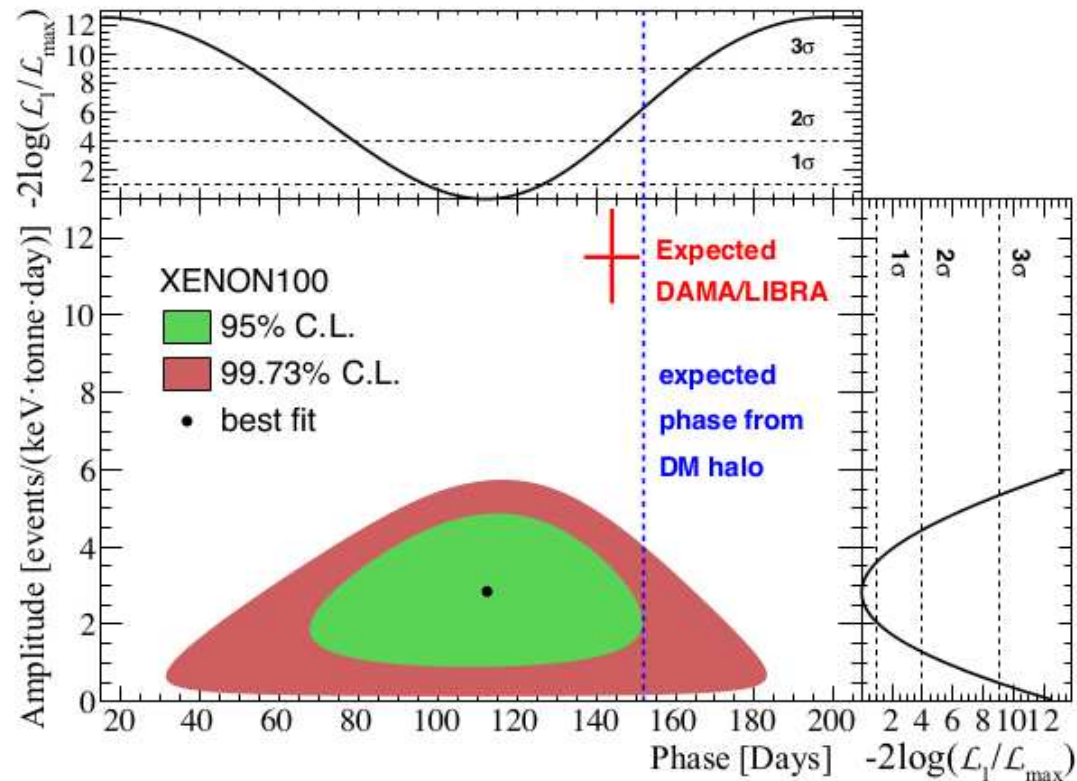


# Detekcja bezpośrednia

## Eksperyment Xenon100

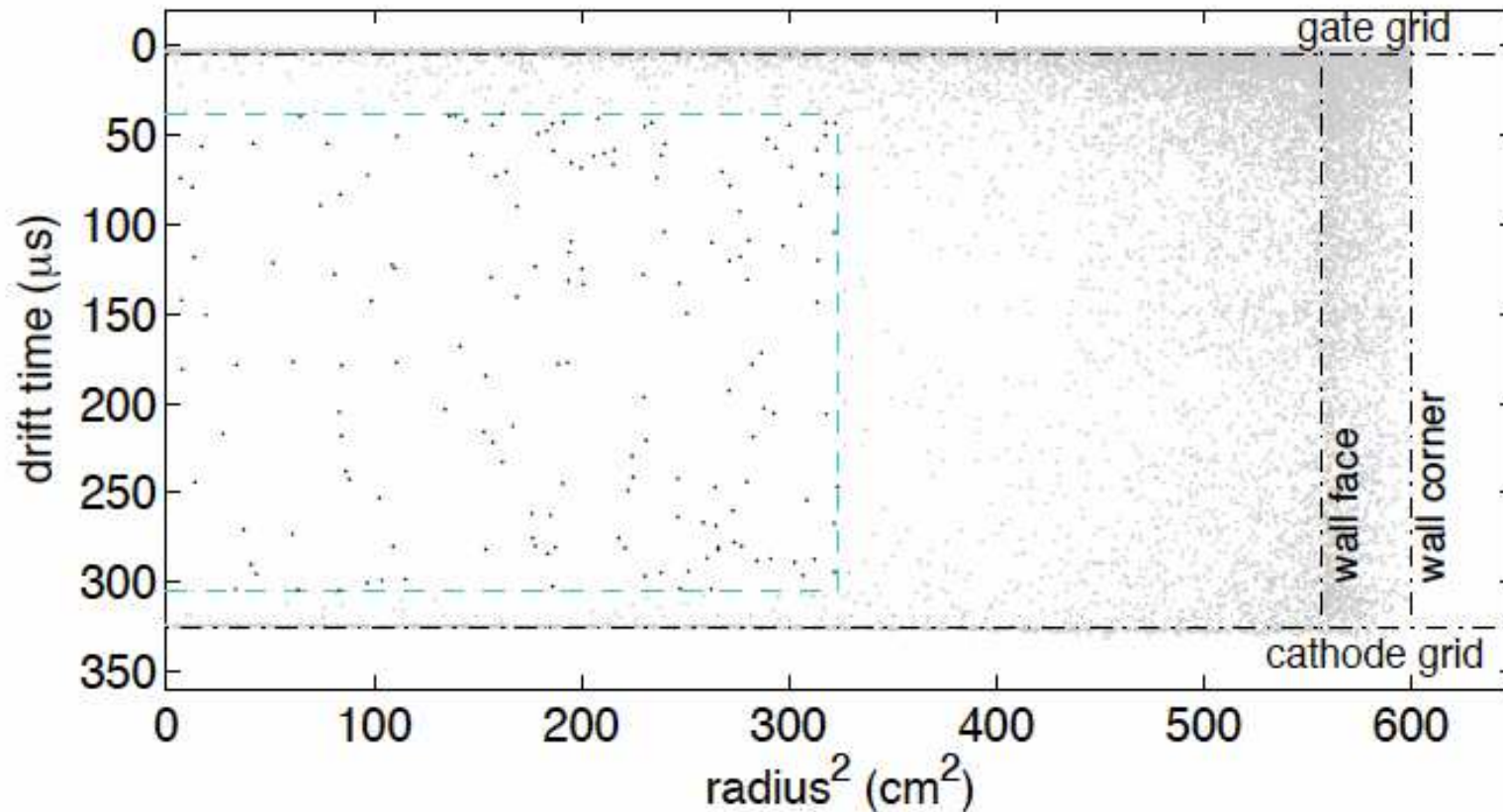
Wyniki wykluczyły też istnienie modulacji sezonowych, na które wskazywał eksperyment DAMA/LIBRA.

Dopasowanie dla  $T=1$  rok:



# Detekcja bezpośrednia

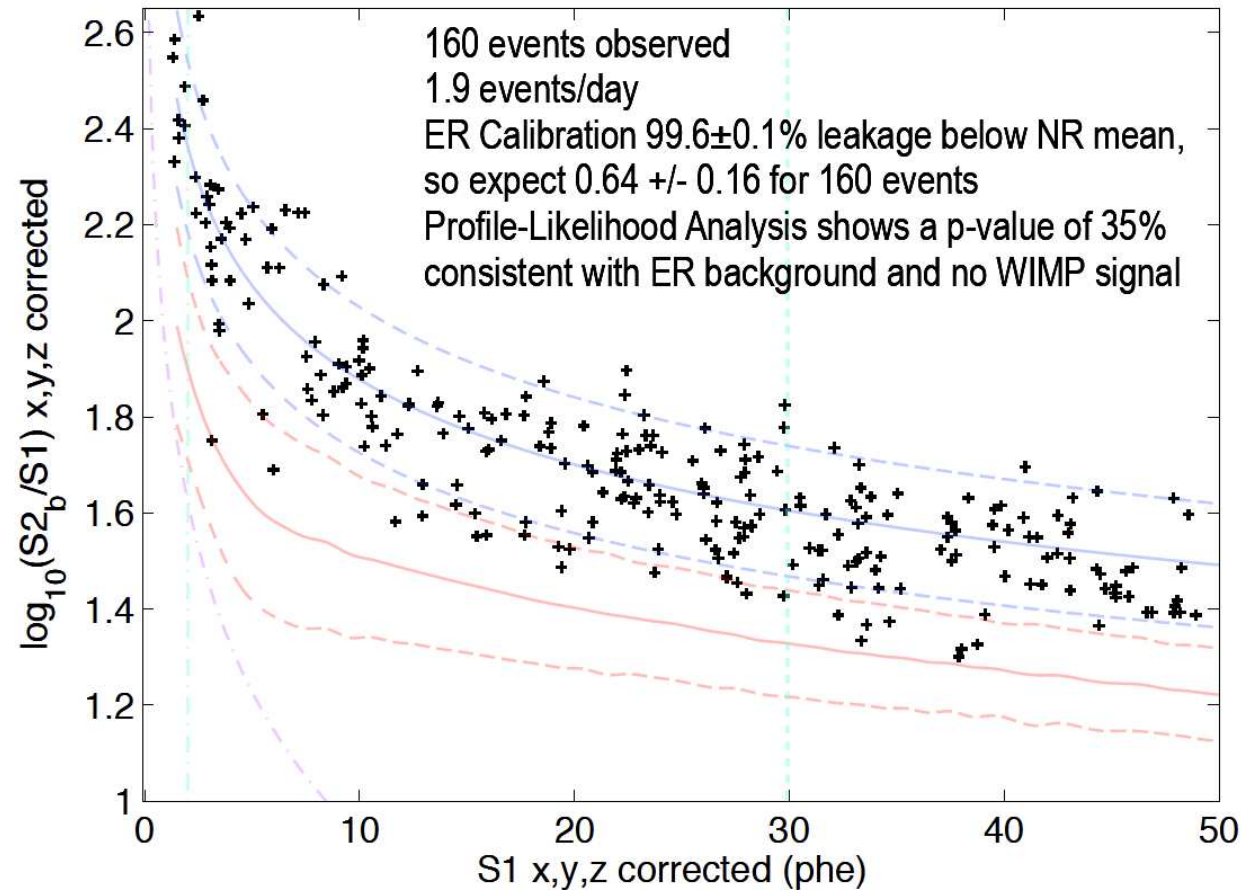
## Eksperyment LUX



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

# Detekcja bezpośrednia

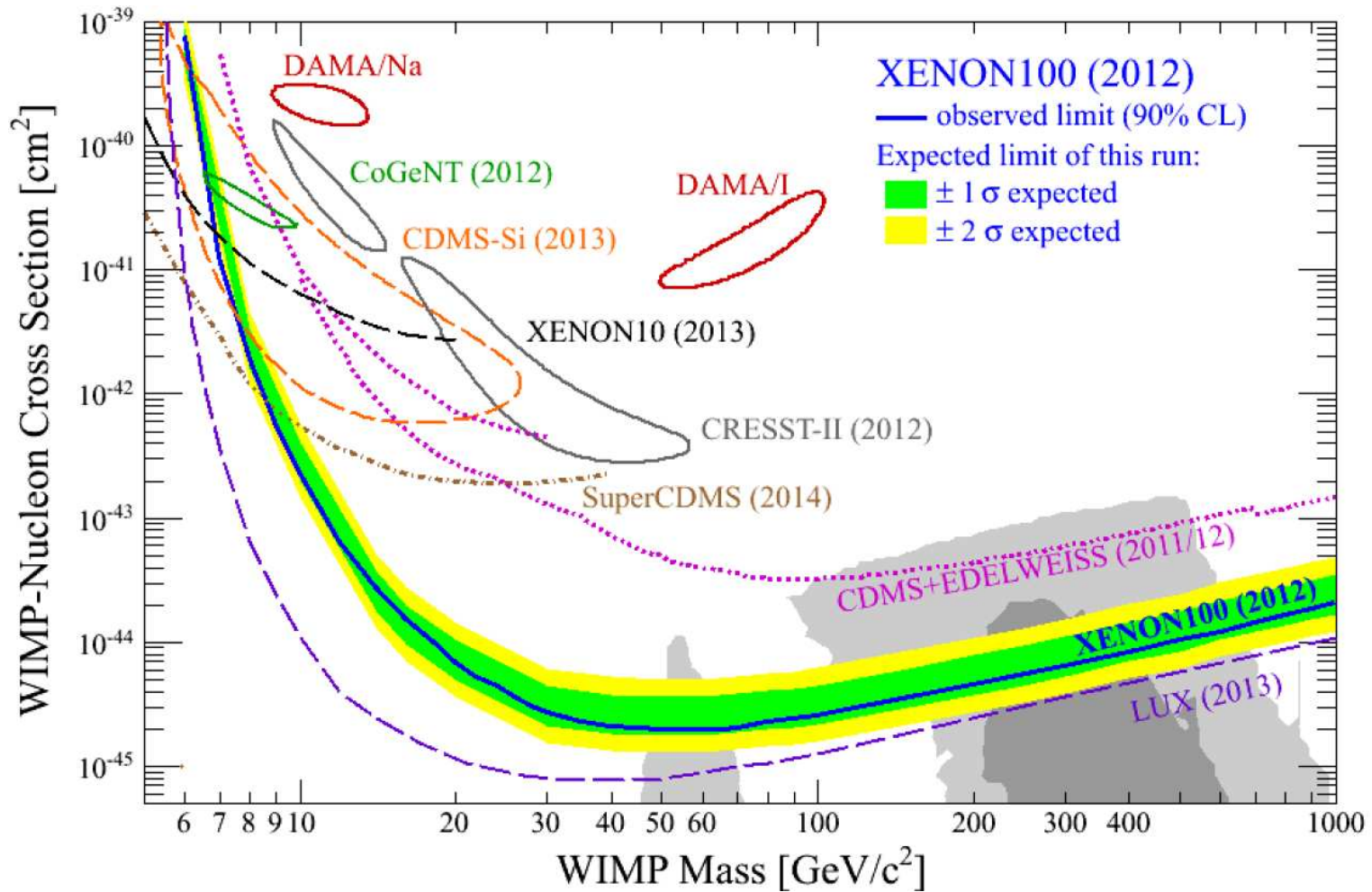
## Eksperyment LUX



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

# Detekcja bezpośrednia

## Eksperyment LUX

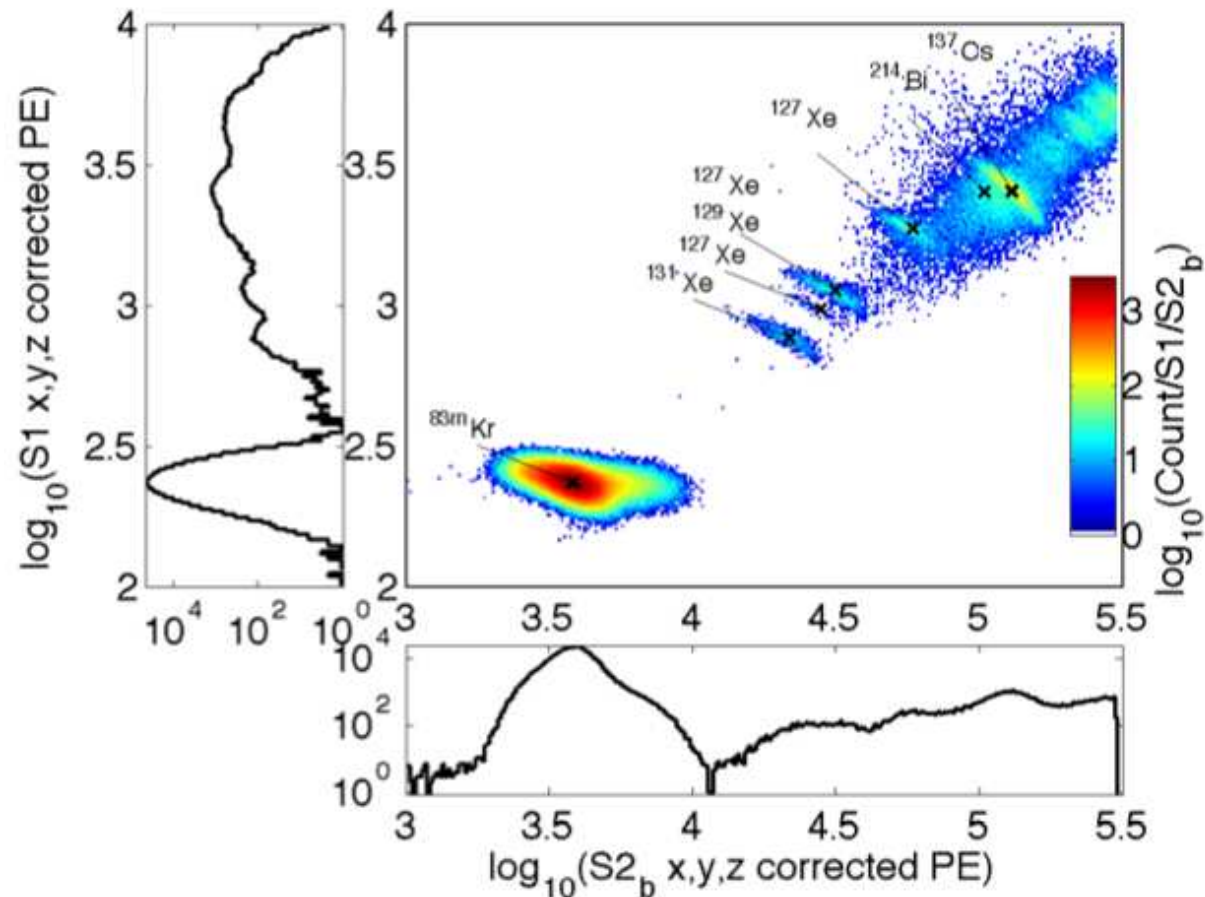


# Detekcja bezpośrednia

## Eksperyment LUX

Reanaliza danych 2013: nowa kalibracja detektora.

Wyniki kalibracji z wykorzystaniem źródeł  $\gamma$ :



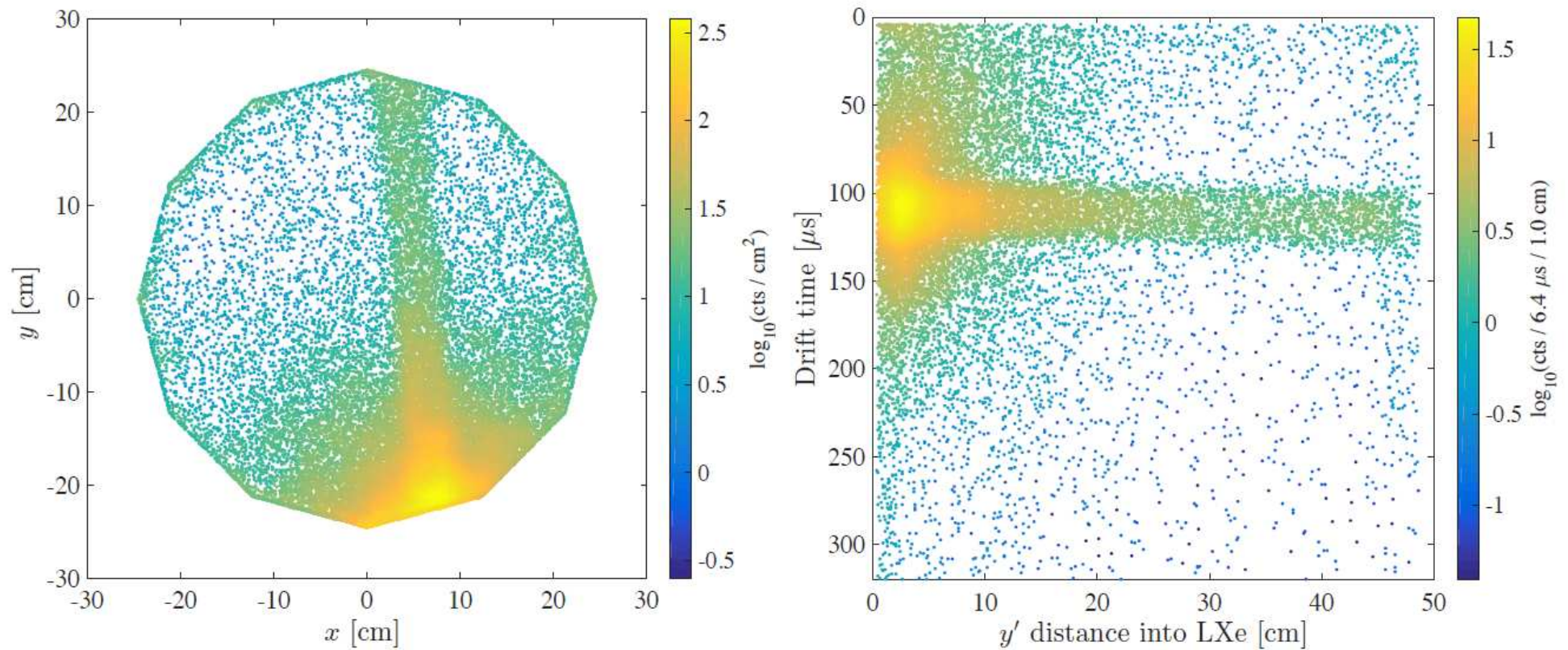


# Detekcja bezpośrednia

## Eksperyment LUX

Reanaliza danych 2013: nowa kalibracja detektora.

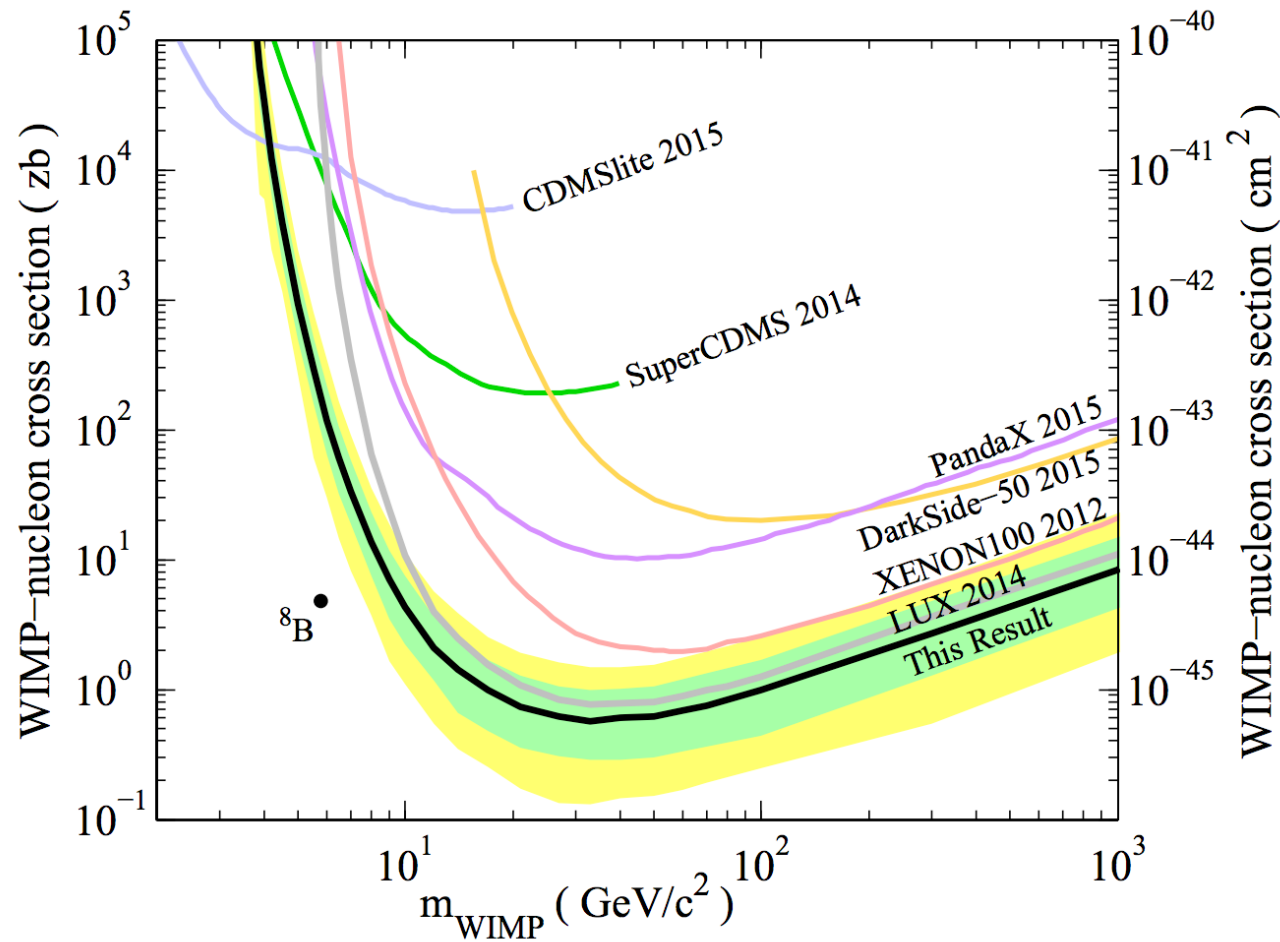
Kalibracja z wykorzystaniem źródła neutronów (generator D-D):



# Detekcja bezpośrednia

## Eksperyment LUX

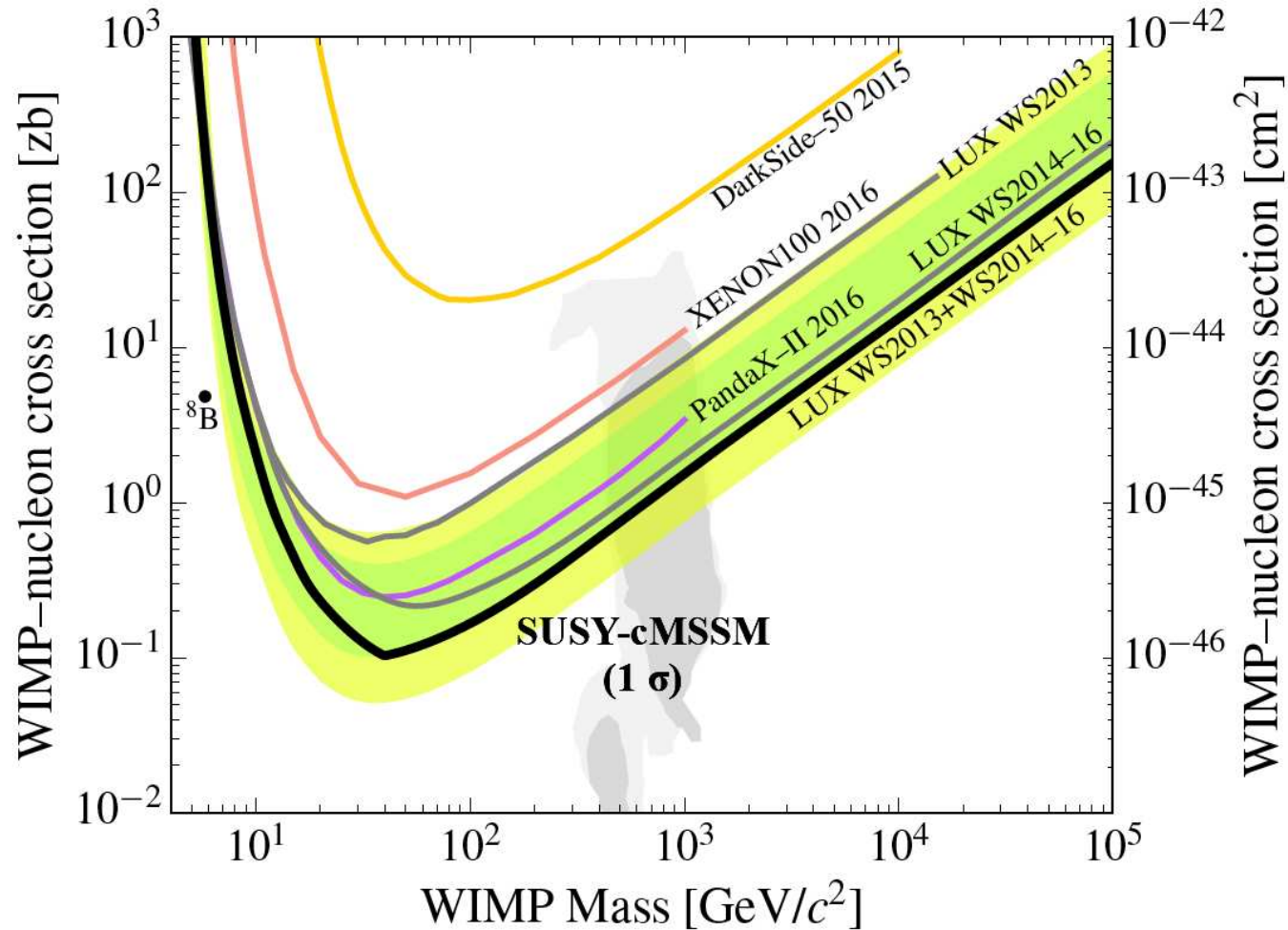
Wyniki reanalizy przedstawione w grudniu 2015 ("This result"):



# Detekcja bezpośrednia

## Eksperyment LUX

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



# Detekcja bezpośrednia

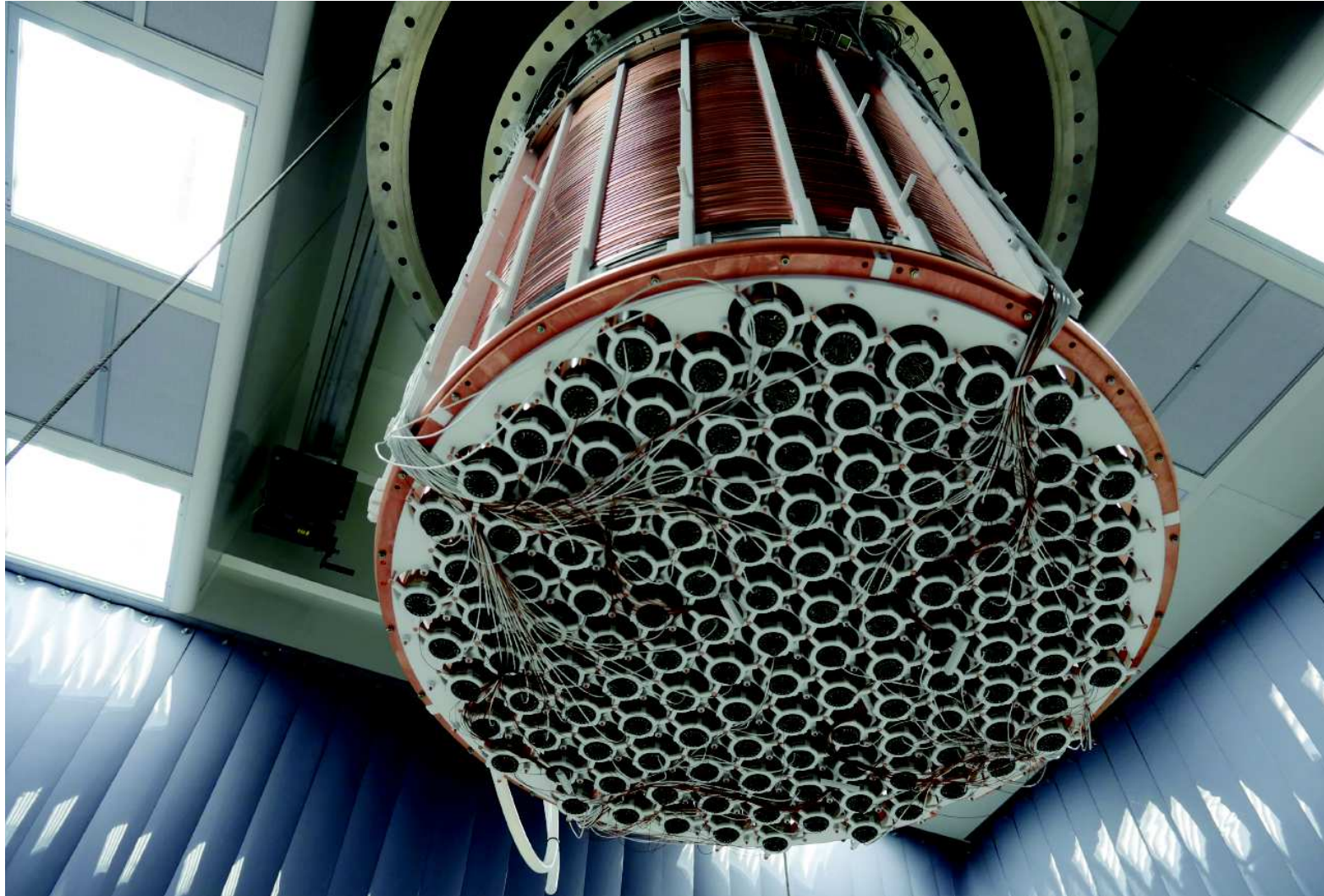
Xenon1T

3.5 tony LXe (2 tony jako “tarcza”)



# Detekcja bezpośrednia

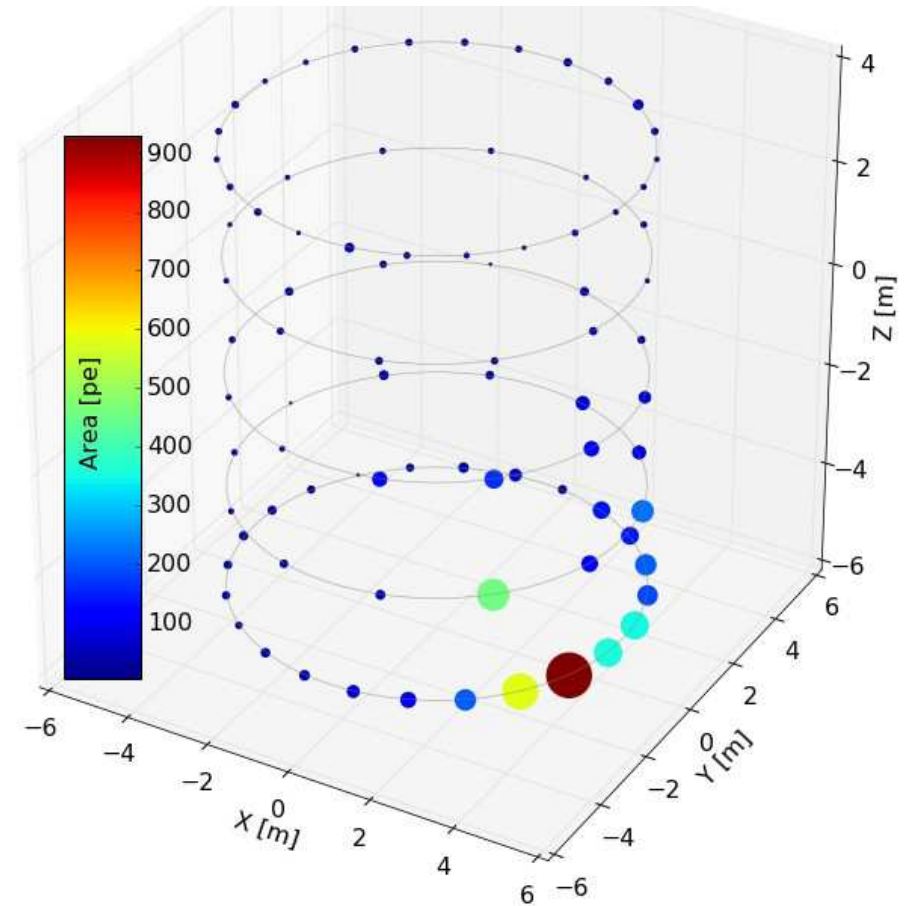
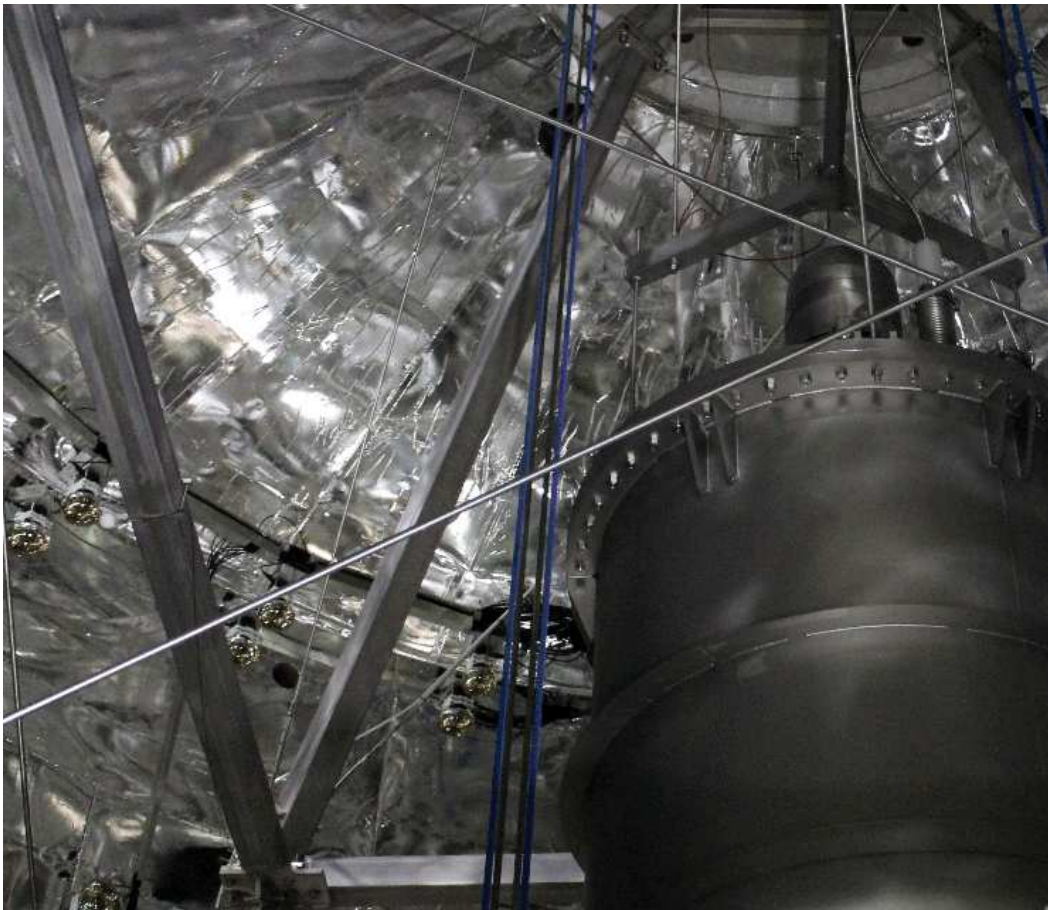
Xenon1T



# Detekcja bezpośrednia

## Xenon1T

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

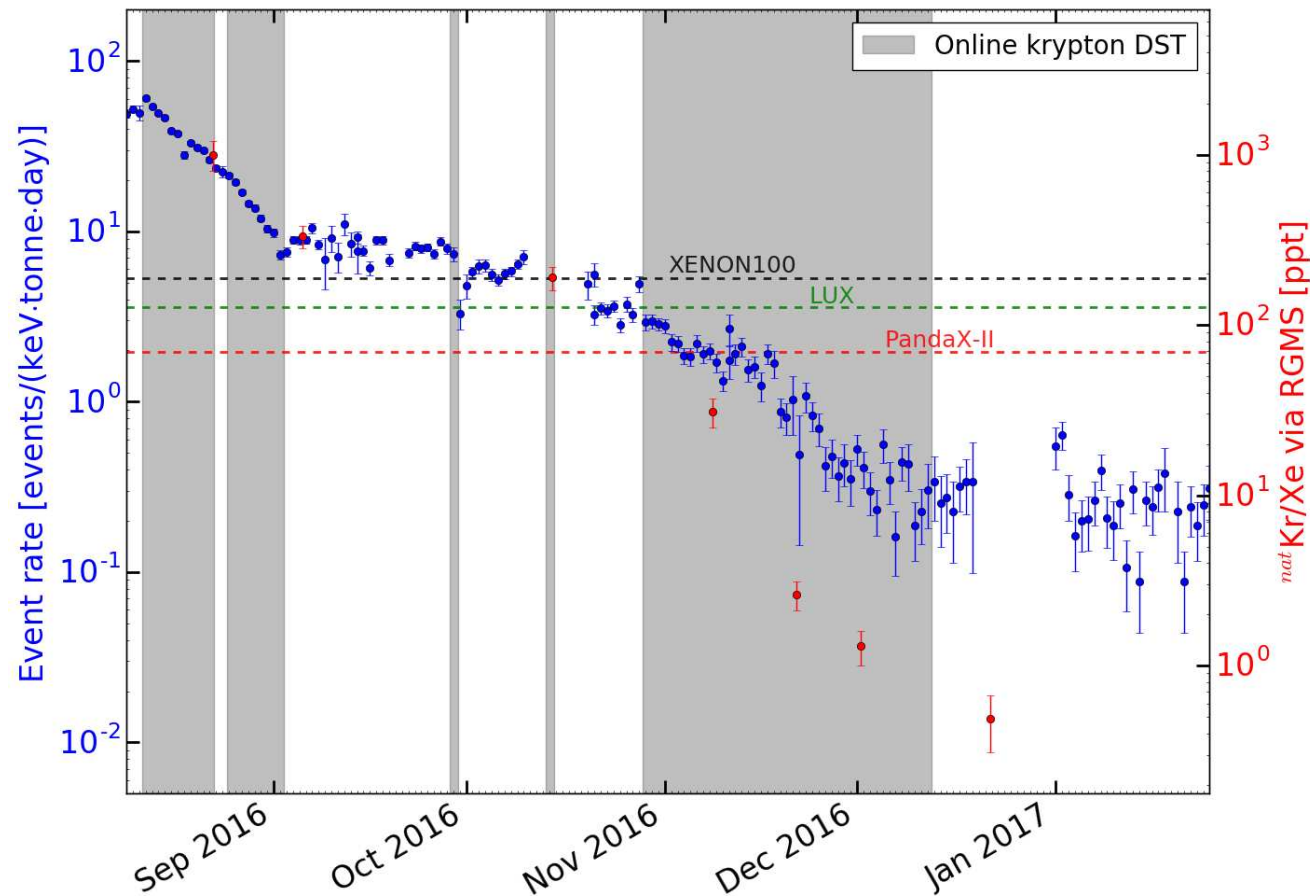


# Detekcja bezpośrednia

## Xenon1T

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

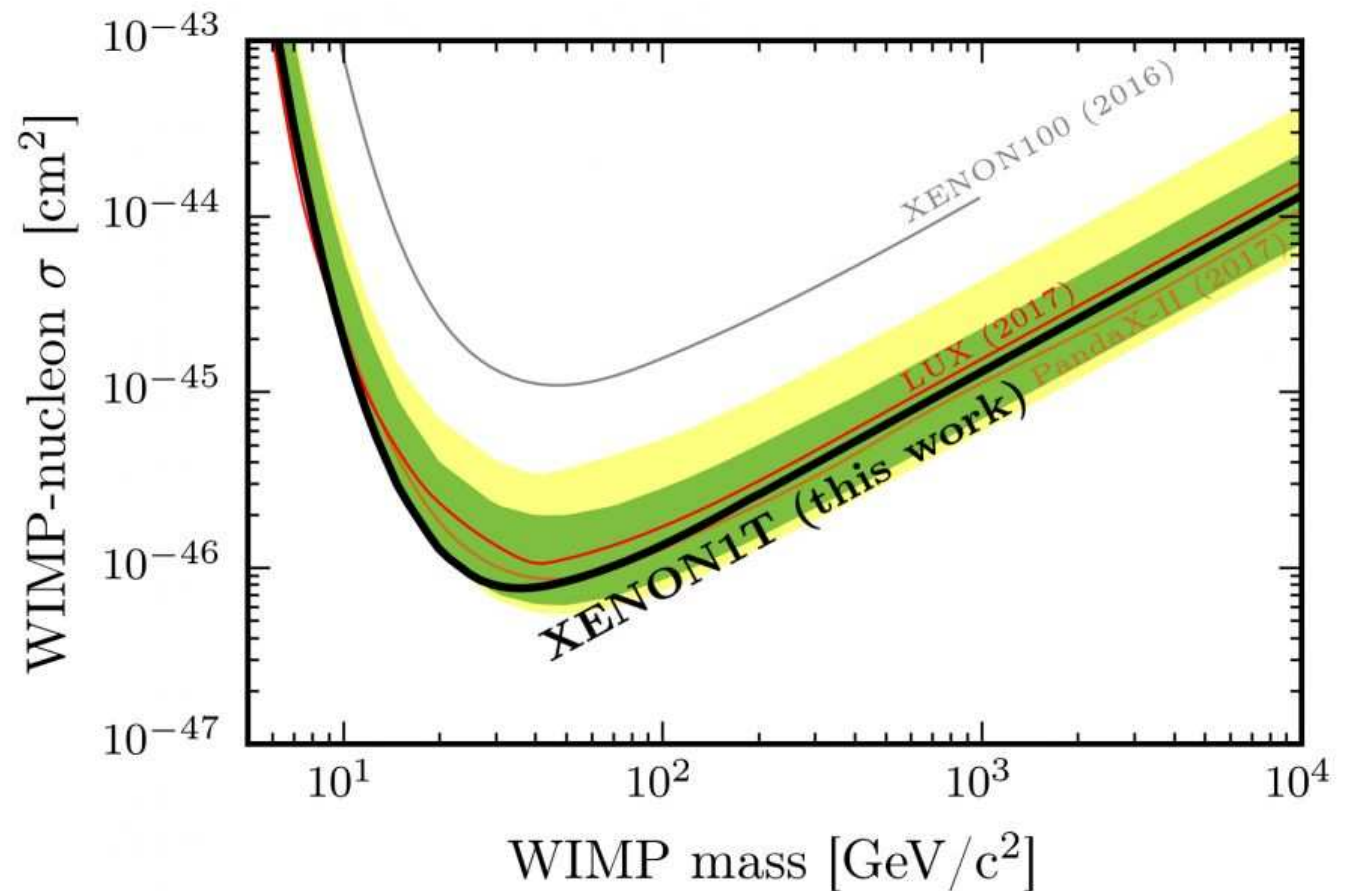
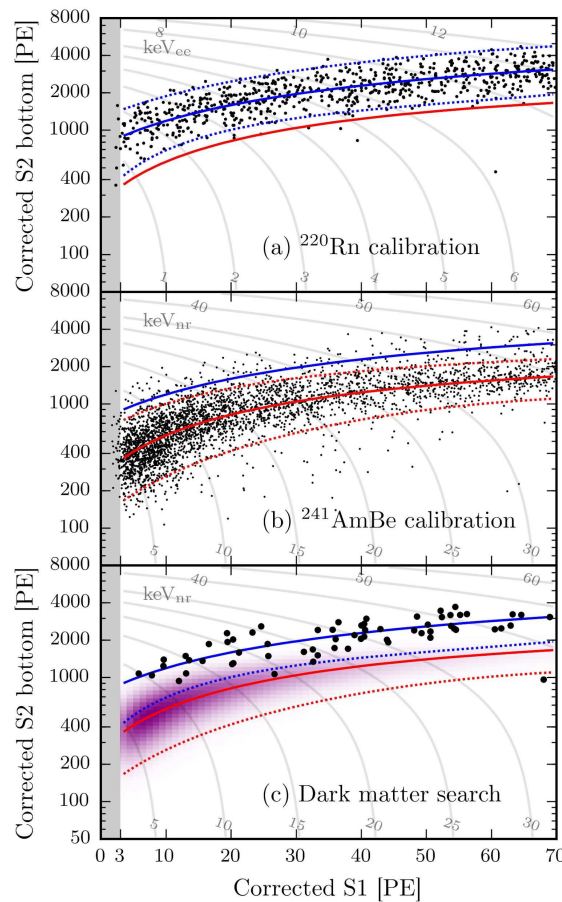
Detektor rozpoczął już zbieranie danych, niestety przerwane przez... trzęsienie ziemi



# Detekcja bezpośrednia

## Xenon1T

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



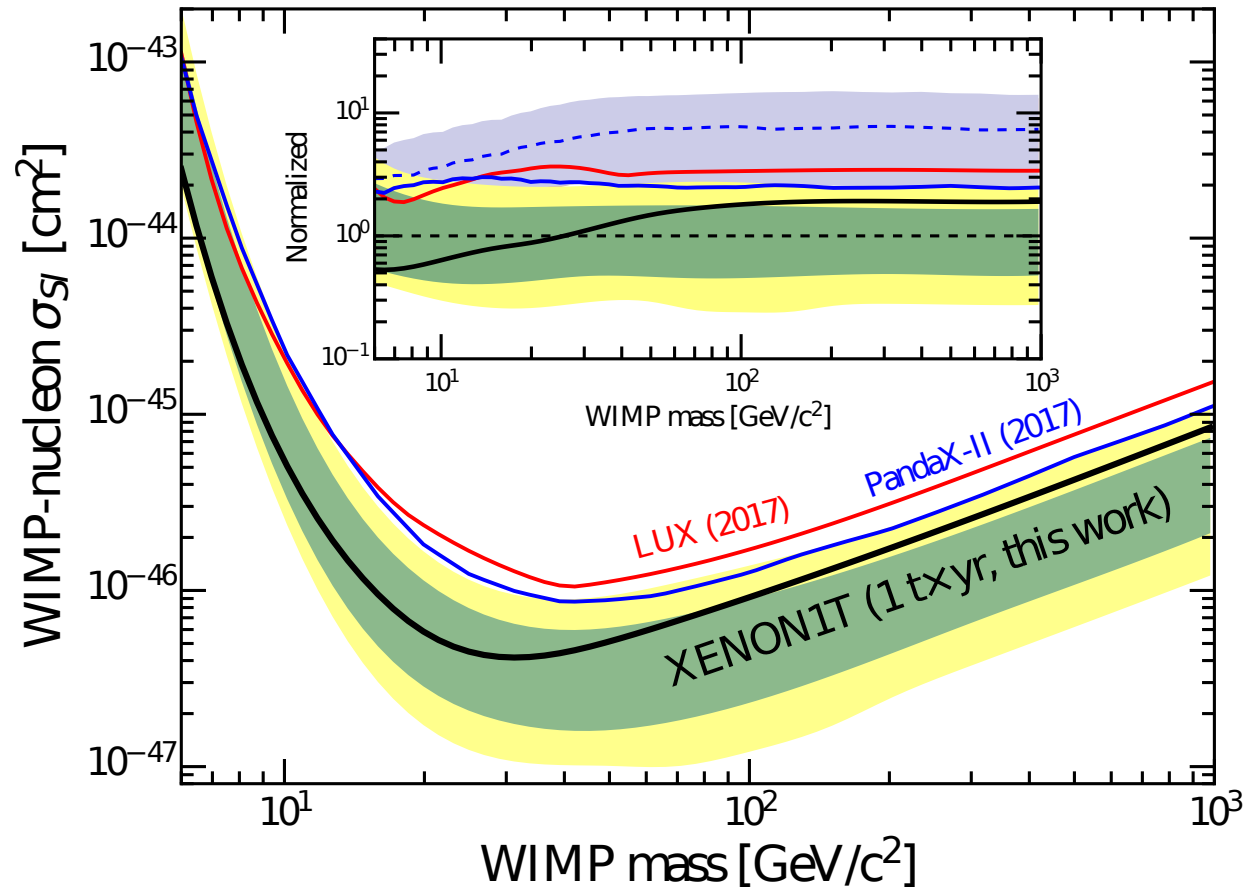


# Detekcja bezpośrednia

## Xenon1T

Nowe ograniczenia z wykorzystaniem danych z 279 dni (1 t × rok)

1805.12562

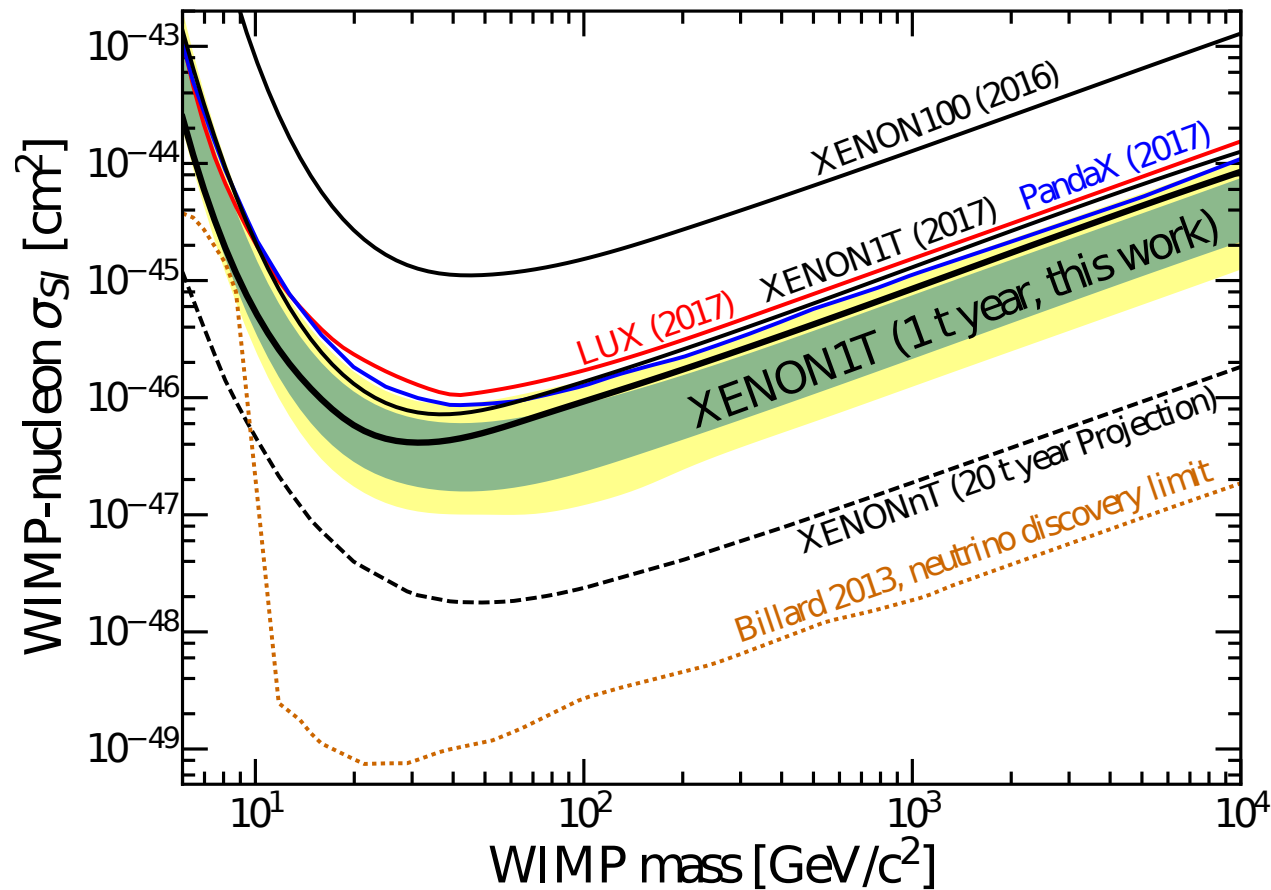


Oczekiwane  $735 \pm 20$  przypadków tła. Zaobserwowano 739 przypadków.

# Detekcja bezpośrednia

## Przyszłość: XenonNT

Powiększony obszar aktywny (fiducial volume) z 1.3 do 4 ton + dalsza redukcja tła

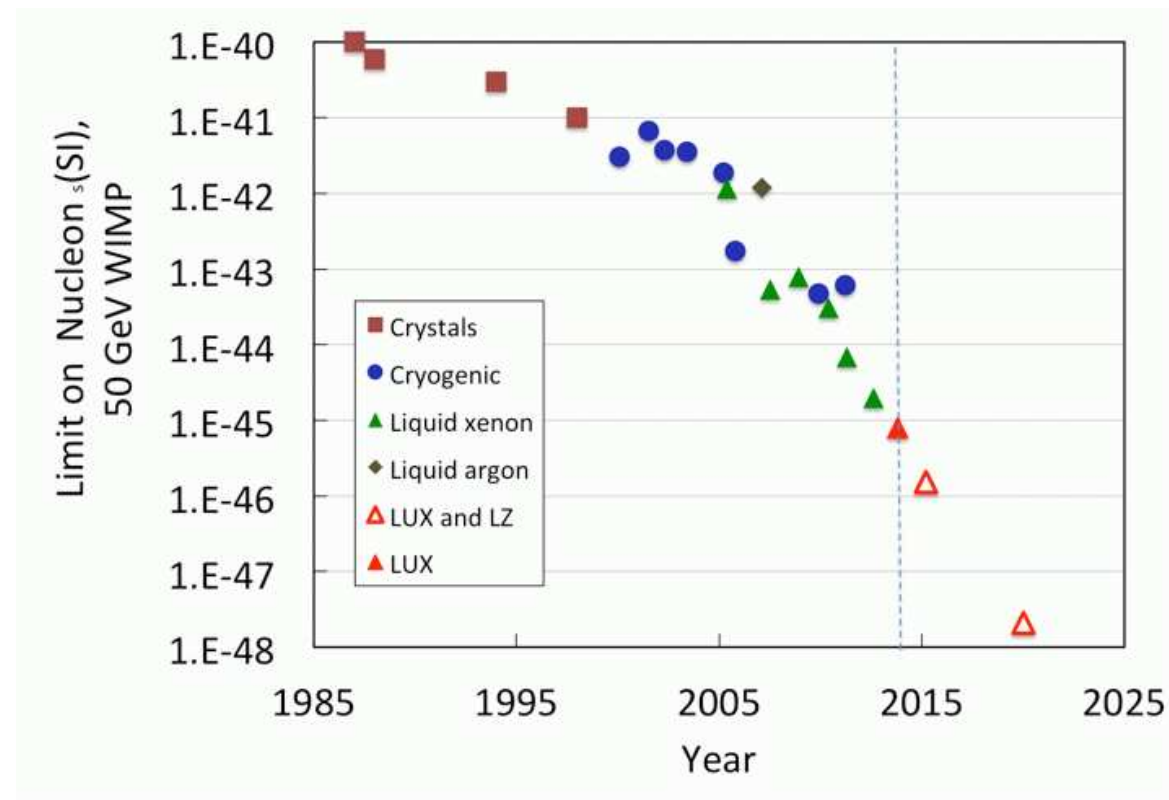
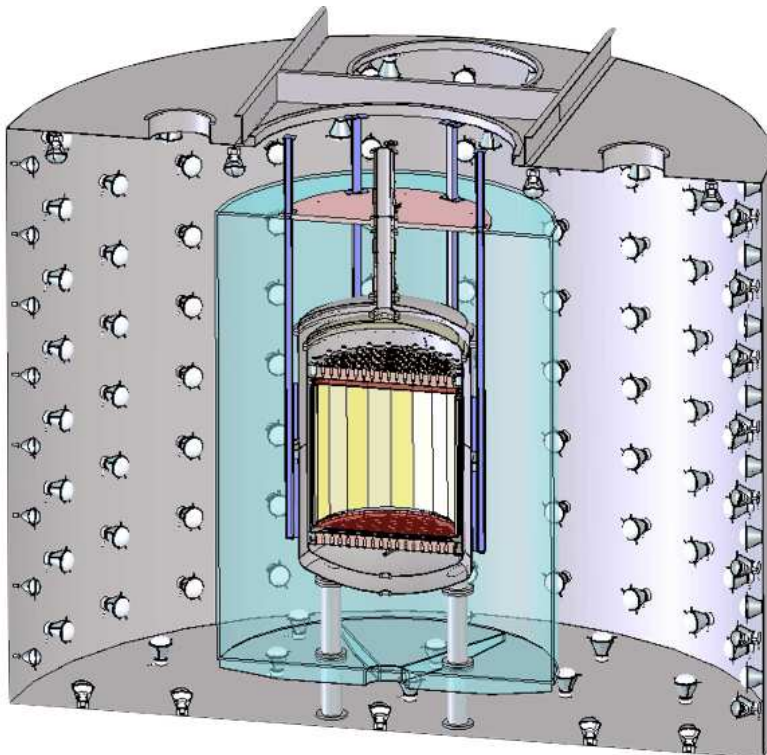


Rozbudowa detektora powinna zakończyć się w roku 2019...

# Detekcja bezpośrednia

## Przyszłość: LZ (LUX+Zeplin)

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

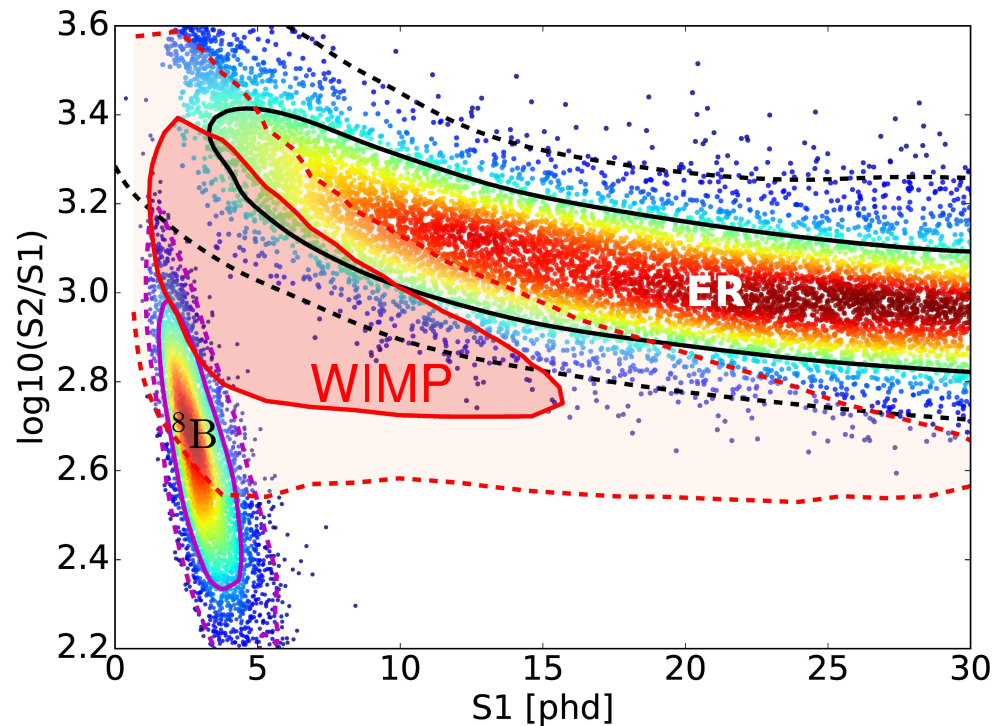


# Detekcja bezpośrednia

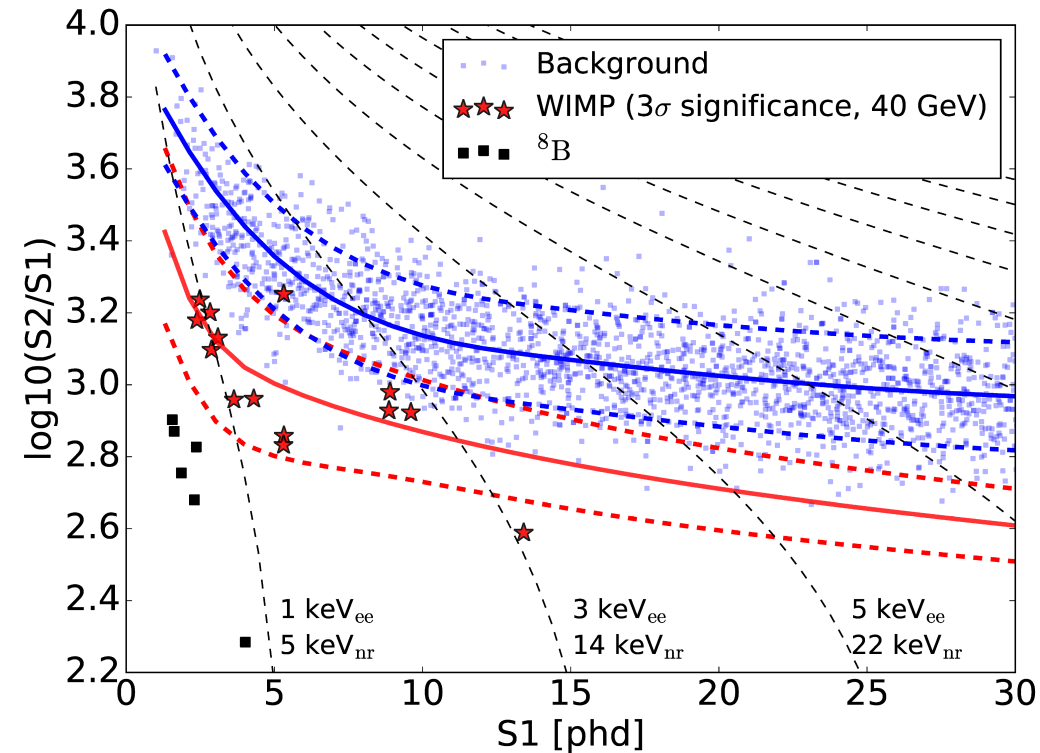
## Przyszłość: LZ (LUX+Zeplin)

Wyniki modelowania eksperymentu

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



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

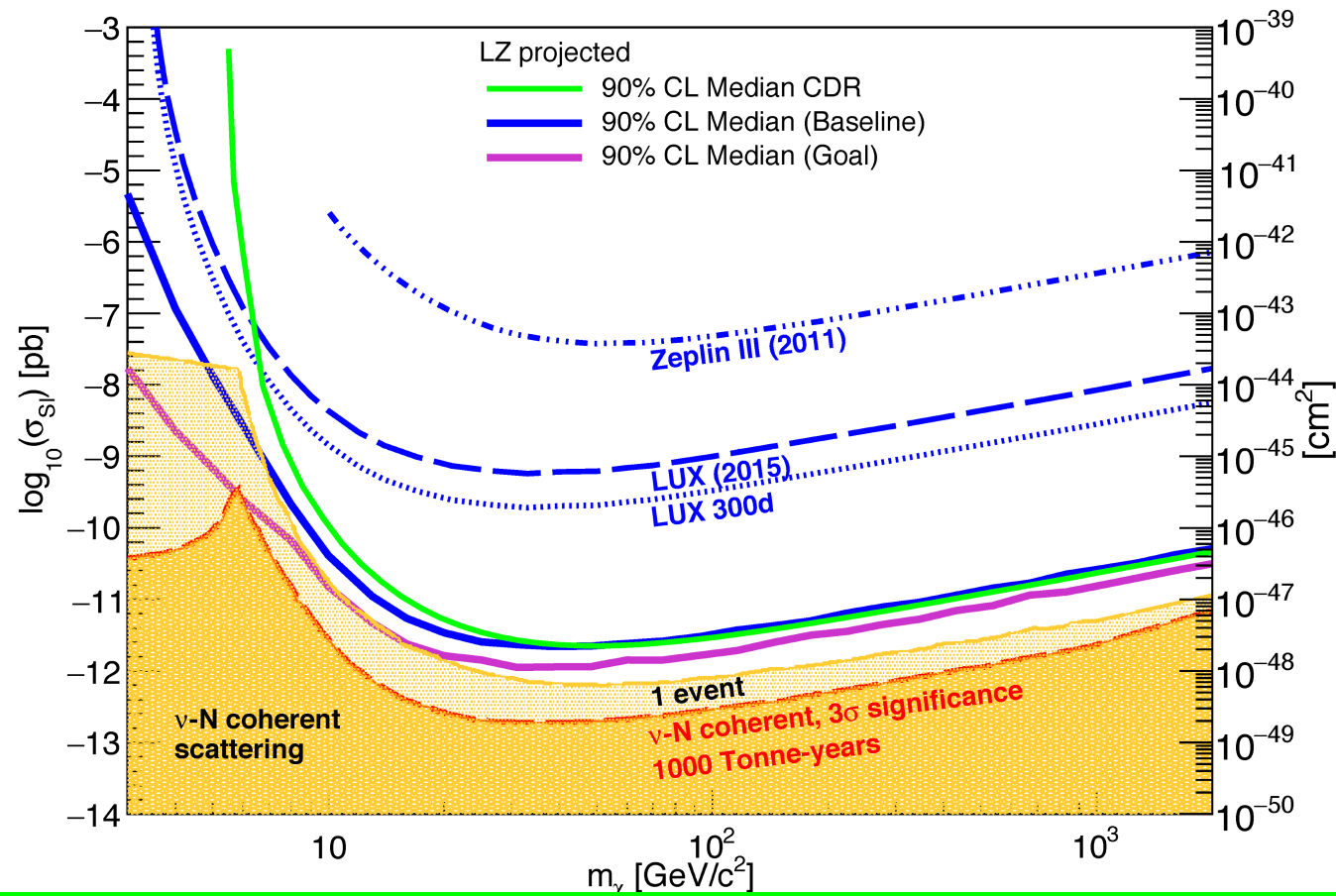


# Detekcja bezpośrednia

## 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 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

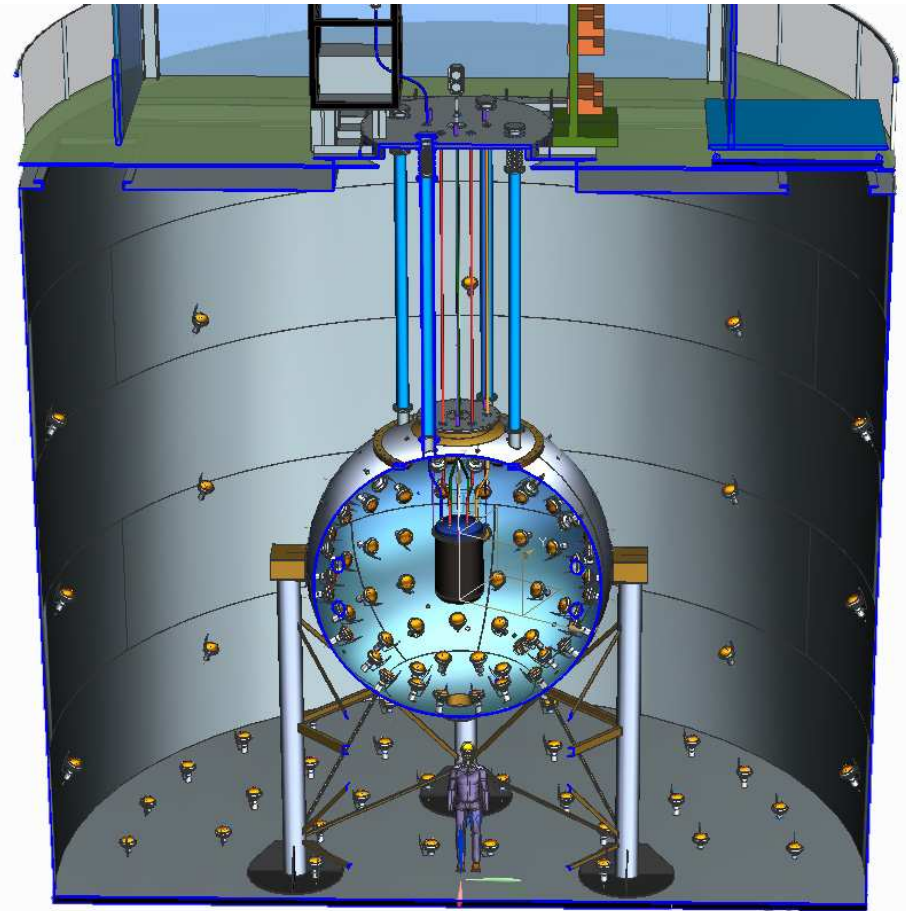
# Detekcja bezpośrednia

## 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

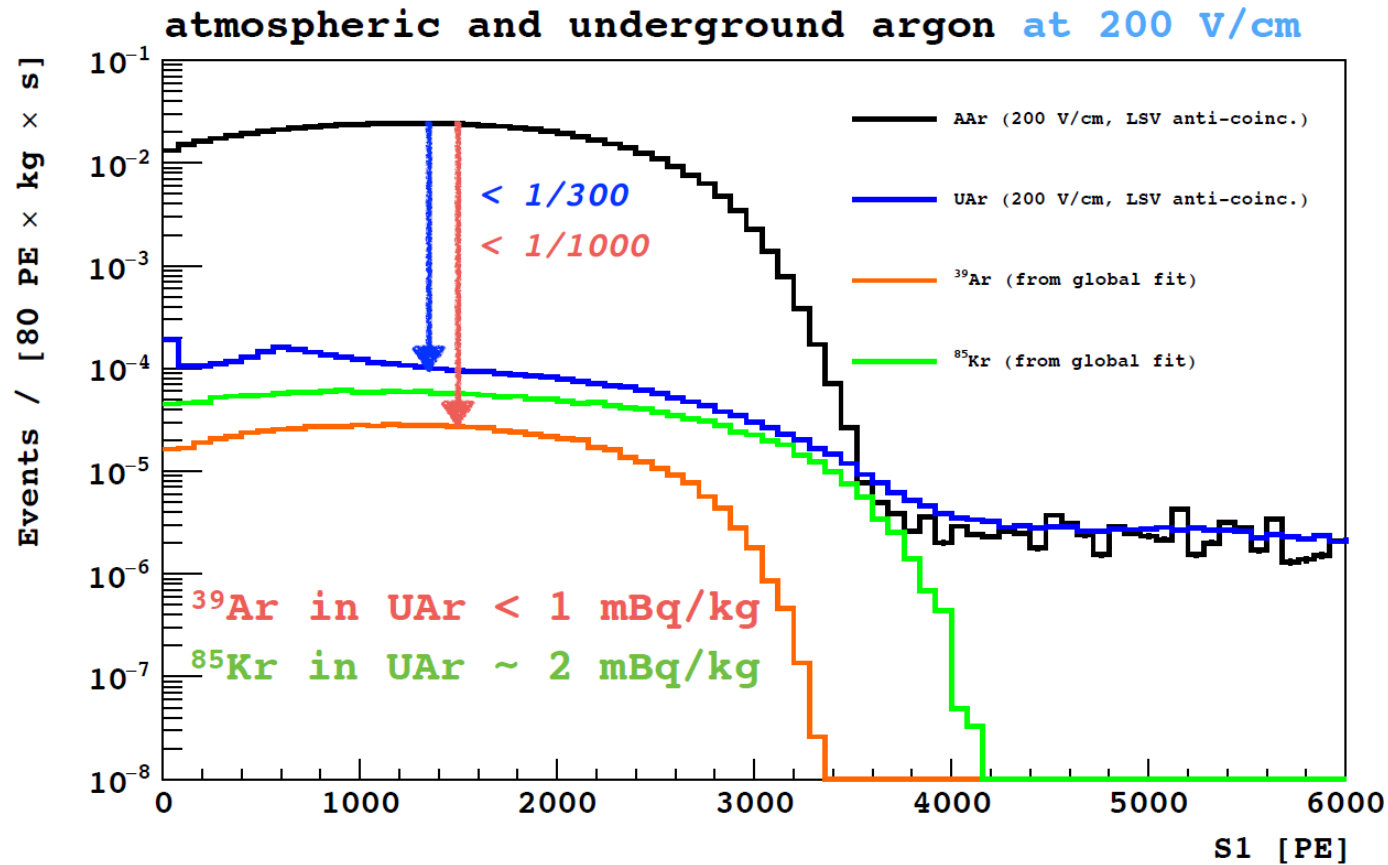
Niestety tylko 153 kg argonu  
(46 kg objętości aktywnej)...



# Detekcja bezpośrednia

## DarkSide-50

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



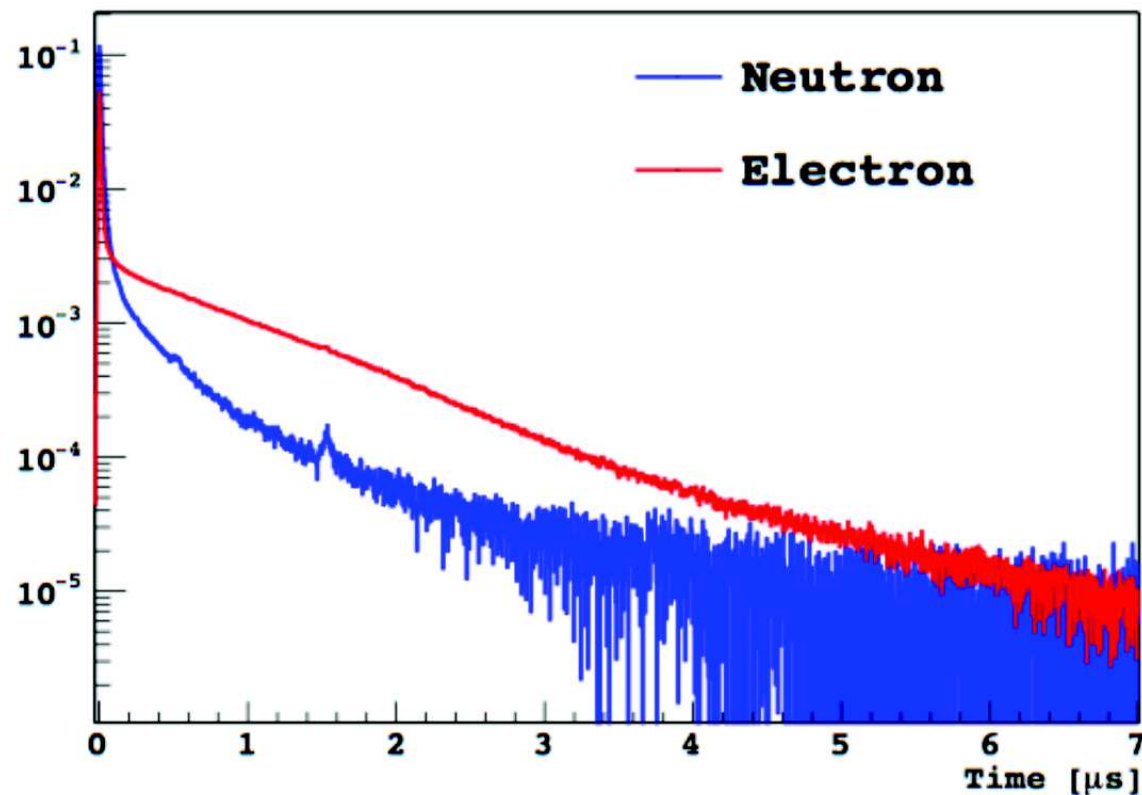


# Detekcja bezpośrednia

## DarkSide-50

Dodatkowa możliwość odróżnienia sygnału od tła na podstawie kształtu impulsu.

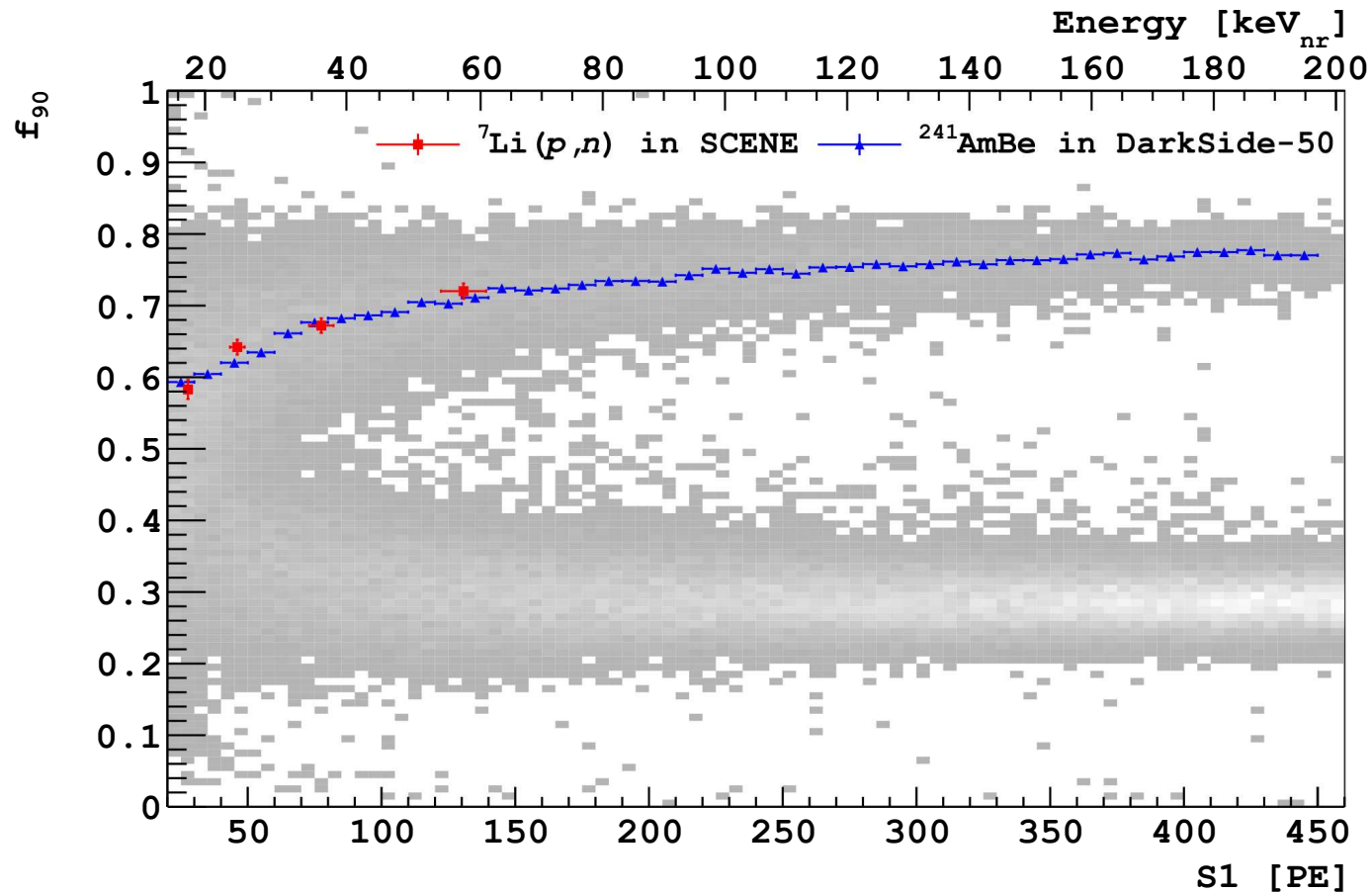
Ułamek sygnału w pierwszych 90 ns ( $f_{90}$ )  $\Rightarrow$  separacja na poziomie  $1.5 \cdot 10^{-7}$



# Detekcja bezpośrednia

## DarkSide-50

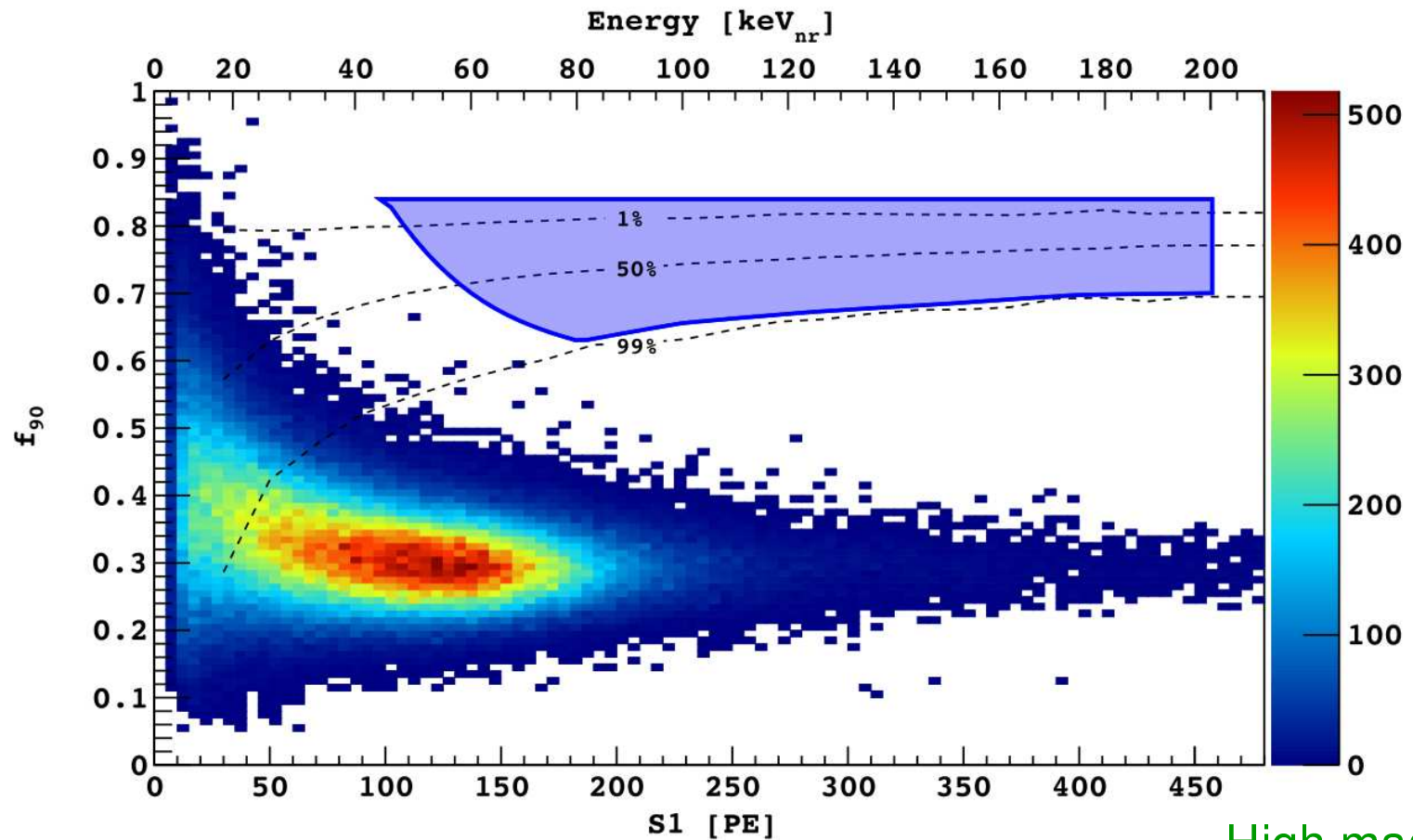
Wyniki kalibracji detektora:



# Detekcja bezpośrednia

## DarkSide-50

Przypadki zebrane w trakcie 534 dni “naświetlania”



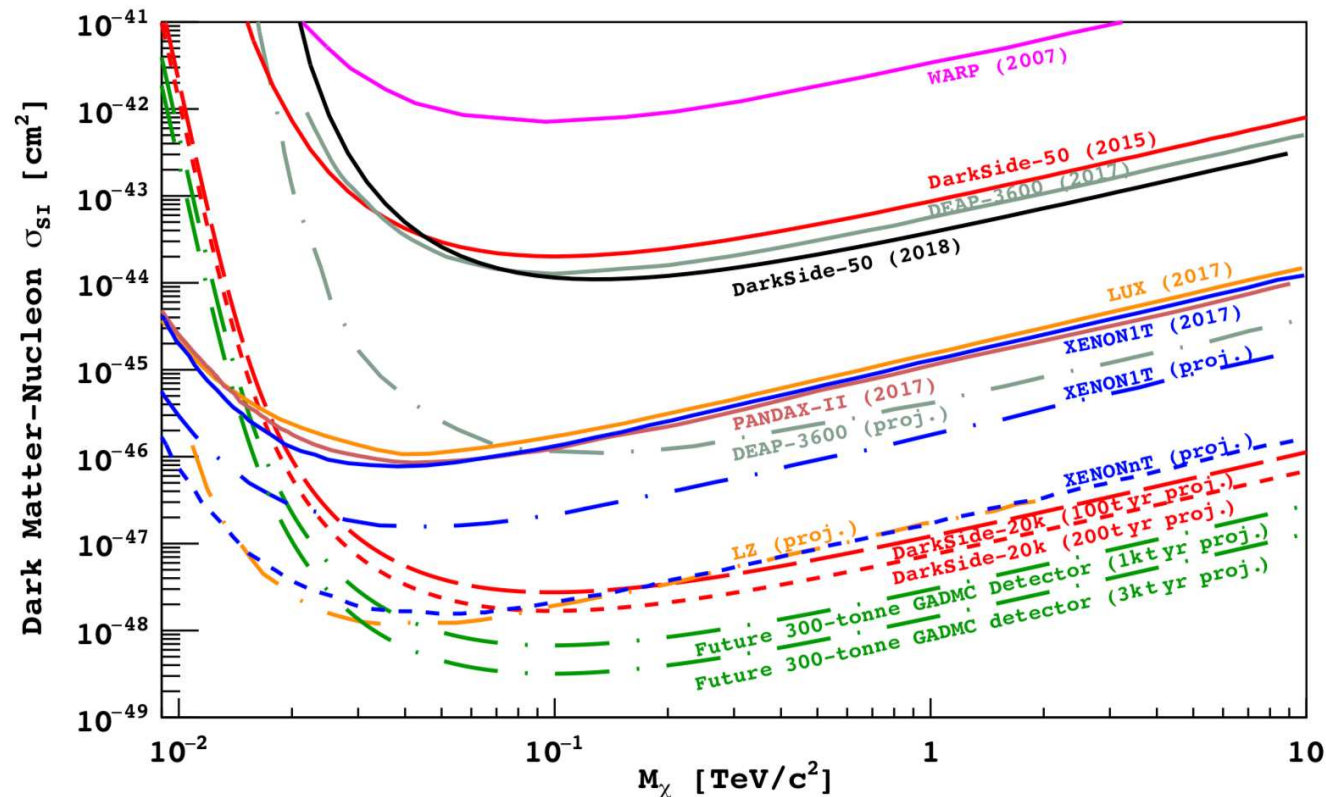
High mass selection

# Detekcja bezpośrednia

## DarkSide-50

Ograniczenia przedstawione w roku 2018:

High mass selection



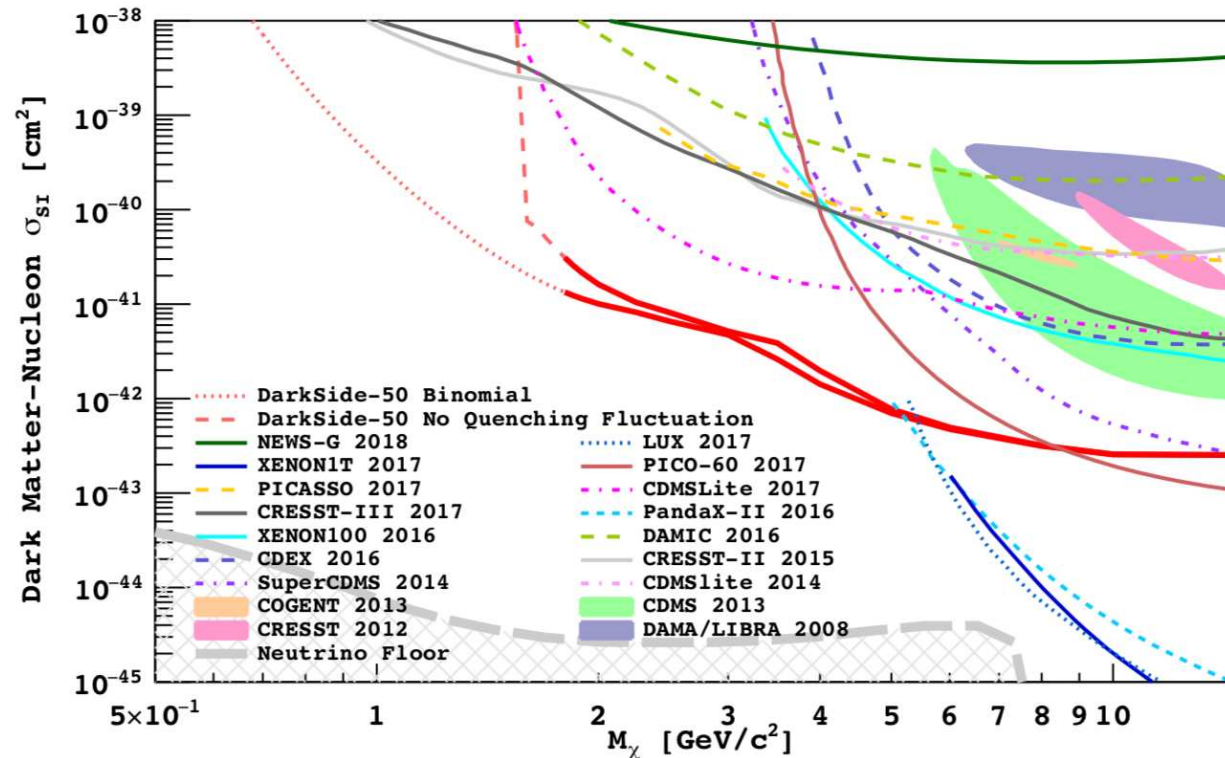
⇒ mało konkurencyjne, ale DarkSide-20t już tak...

# Detekcja bezpośrednia

## DarkSide-50

Ograniczenia przedstawione w roku 2018:

Low mass selection

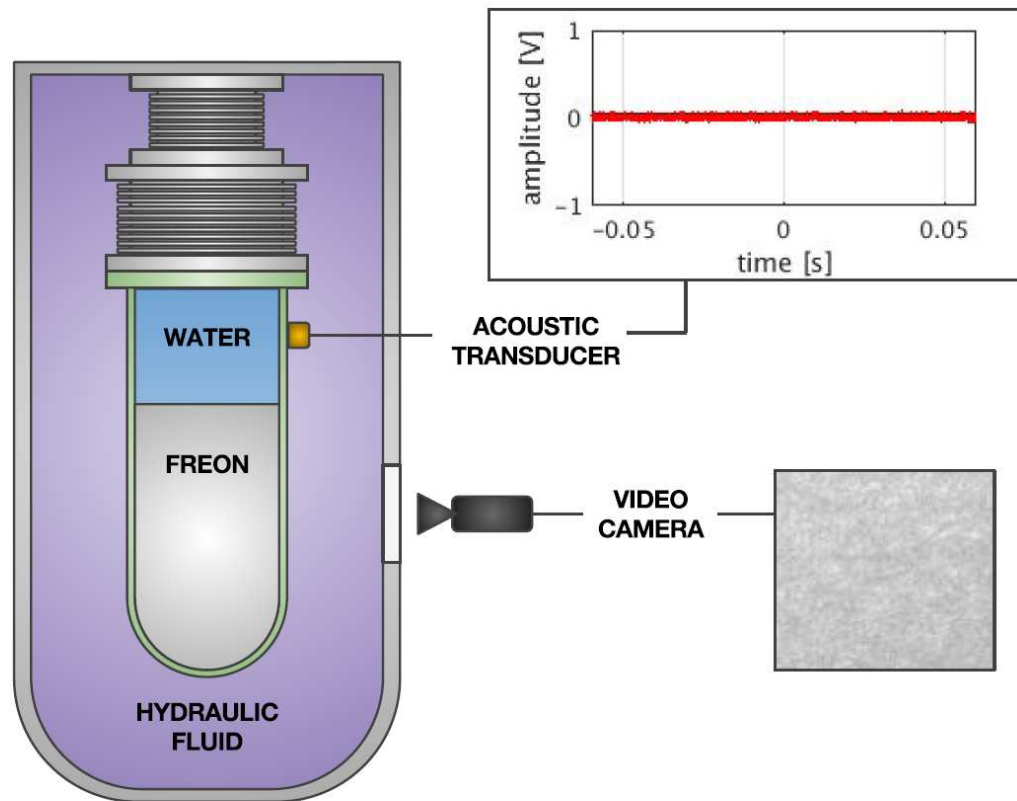


⇒ niskie tło umożliwiło uzyskanie bardzo silnych ograniczeń

# Detekcja bezpośrednia

## Pico-60

Nowatorska koncepcja wykorzystania... komory pęcherzykowej.

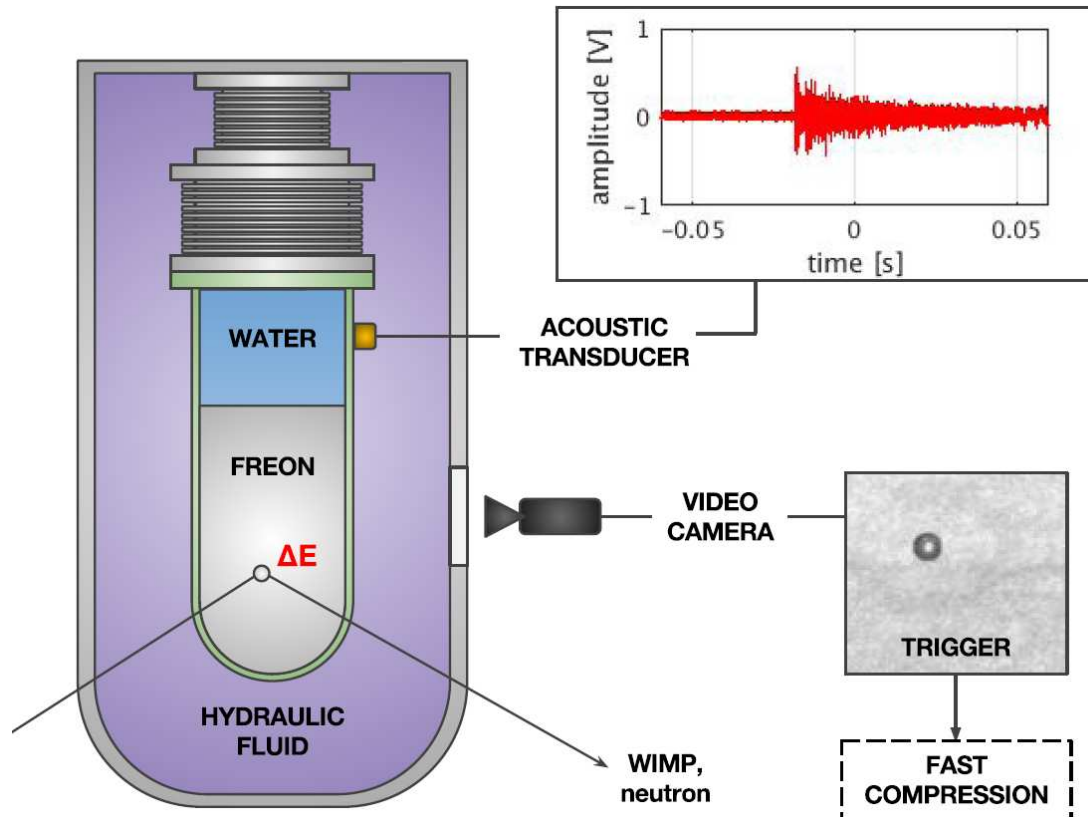


Aktywnym ośrodkiem jest freon, który utrzymywany jest w stanie przegrzanej cieczy.

# 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

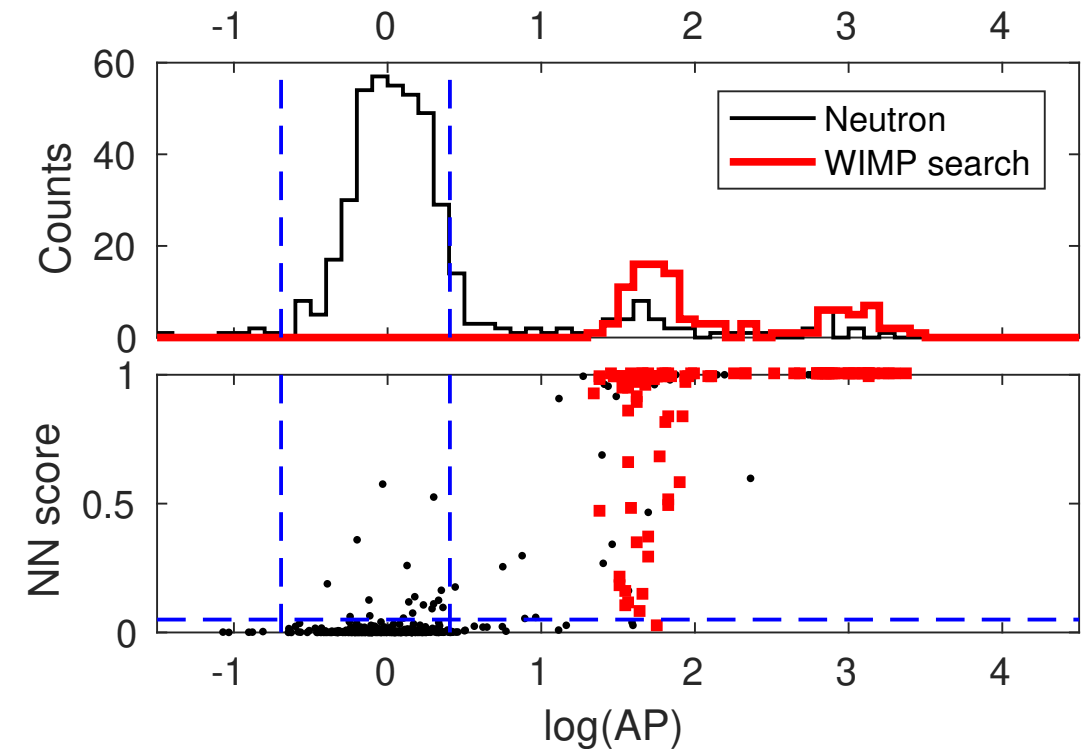
## Pico-60

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.

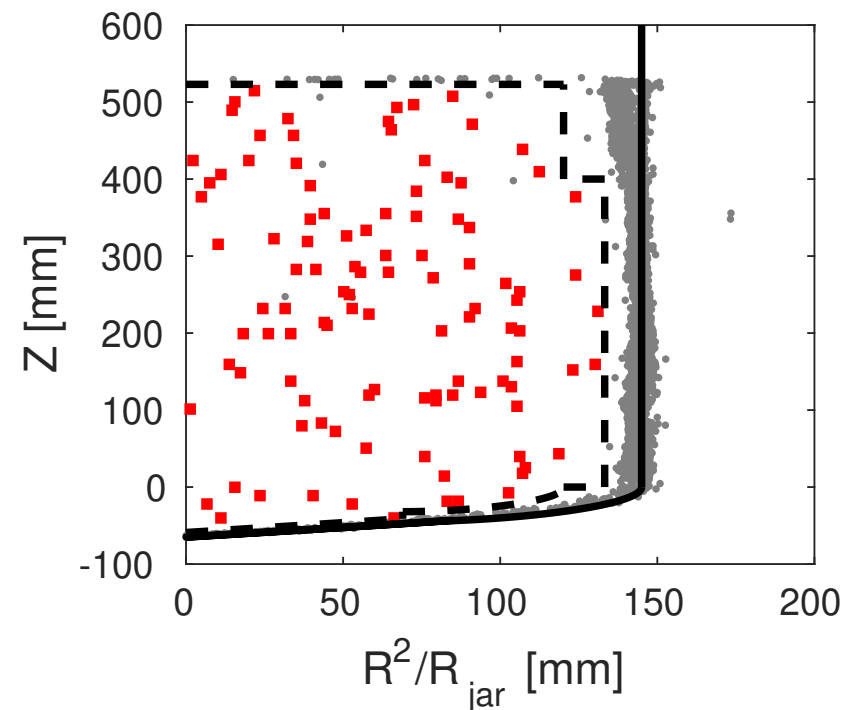
Odczyt optyczny: 4 kamery (300 fps)

Odczyt akustyczny: 8 czujników piezoelektrycznych

Zaobserwowano 106 pojedynczych pęcherzyków

Na rozkładzie NN vs AP żaden nie pasował do hipotezy WIMP

Rozkład przestrzenny przypadków:



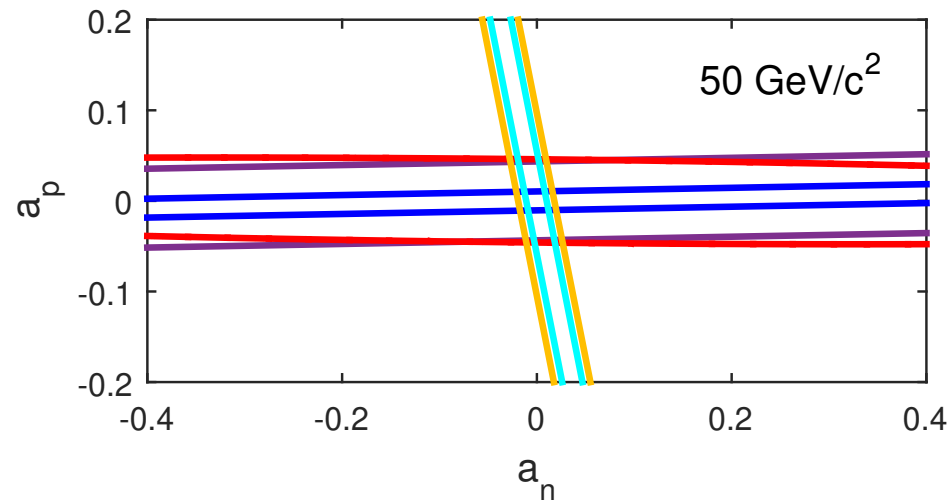
# Detekcja bezpośrednia

## 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:



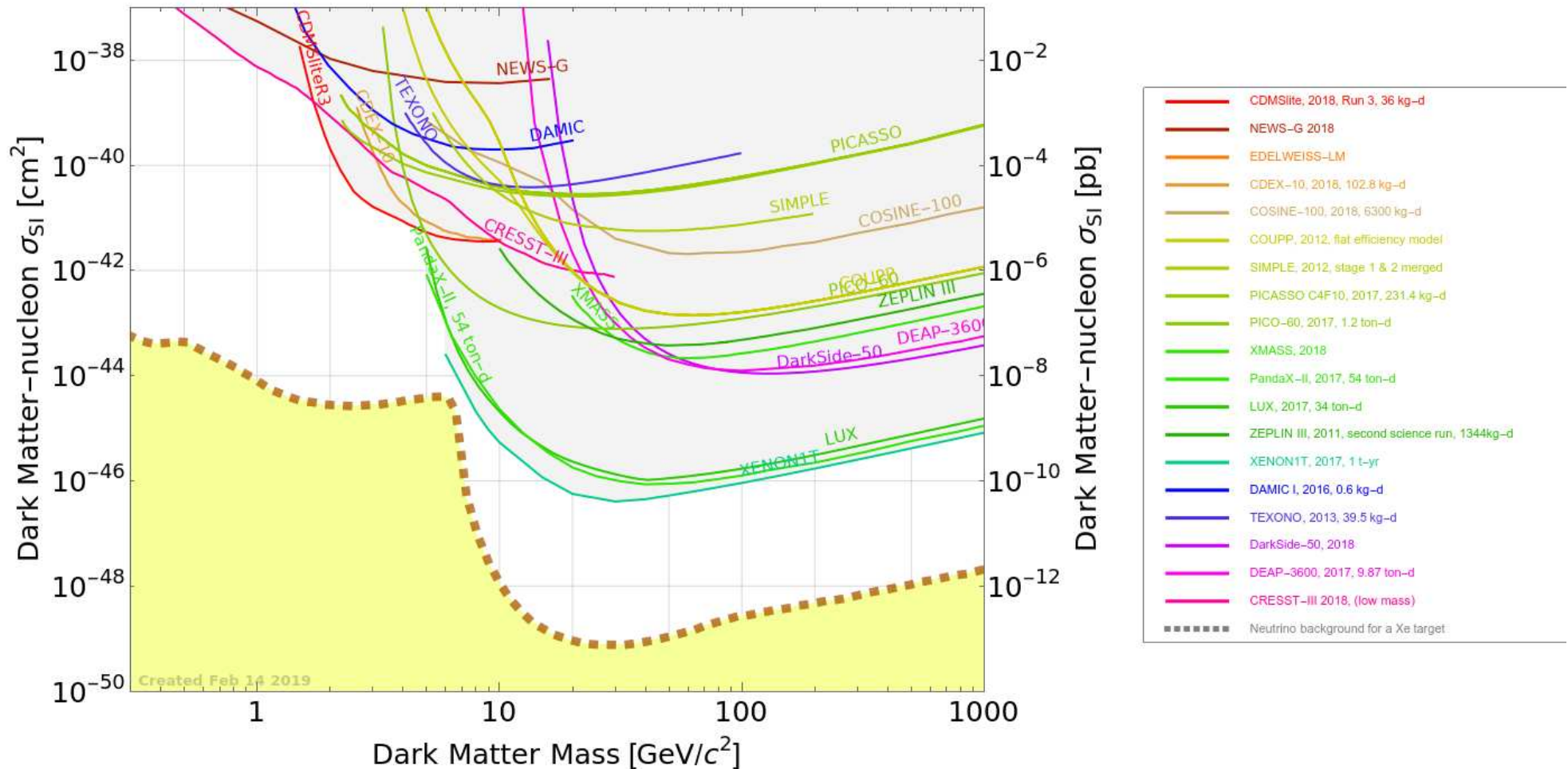
PICO-60 (blue), PICO-2L (purple), PICO-60 C3FI (red) vs PANDAX-II (cyan), LUX (yellow)

# Detekcja bezpośrednia

## Podsumowanie

stan na dzień 14 lutego 2019

Ograniczenia na rozpraszanie niezależne od spinu (Spin Independent: SI)

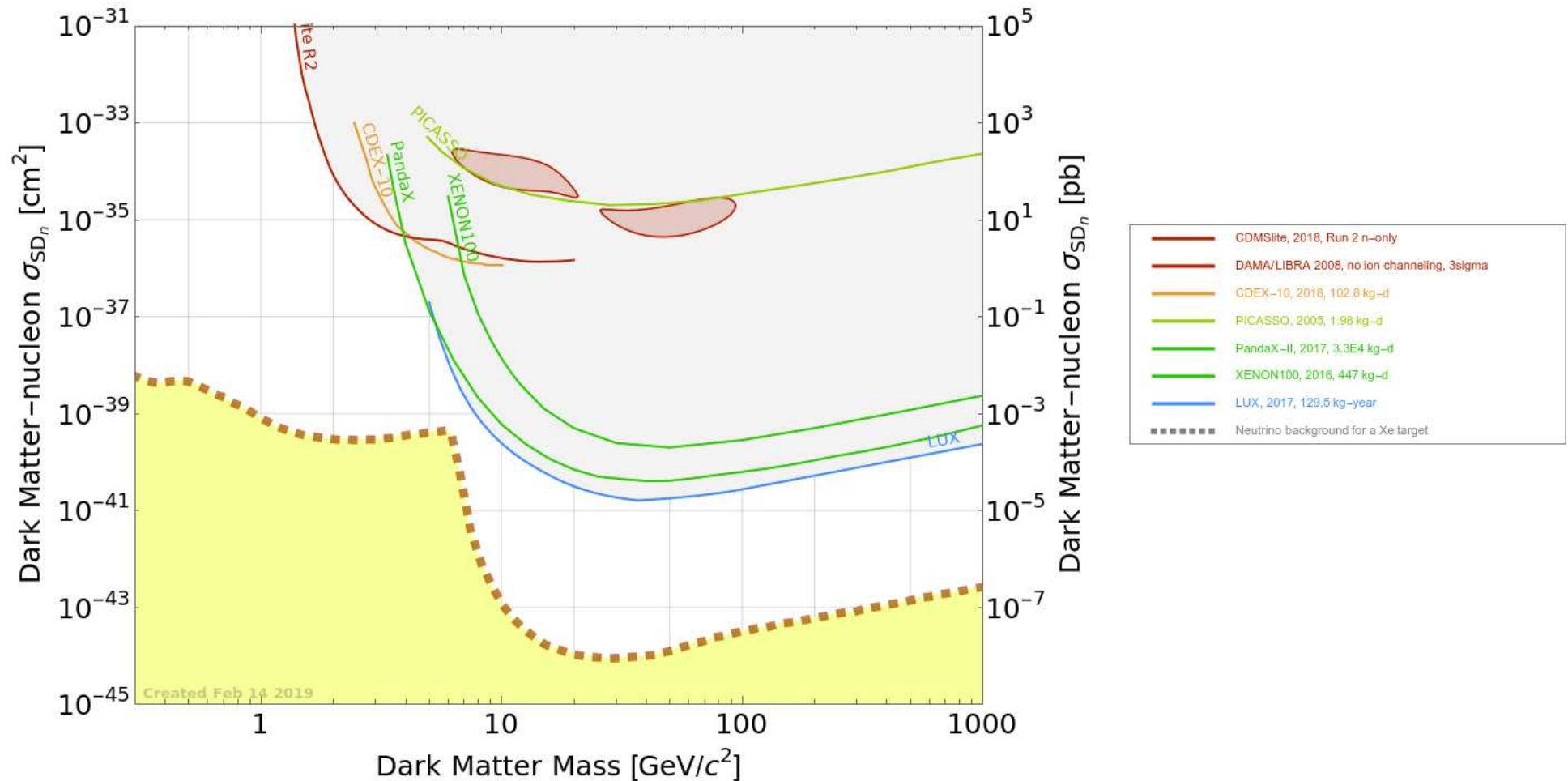


# Detekcja bezpośrednia

## Podsumowanie

stan na dzień 14 lutego 2019

Ograniczenia na rozpraszanie zależne od spinu na neutronach

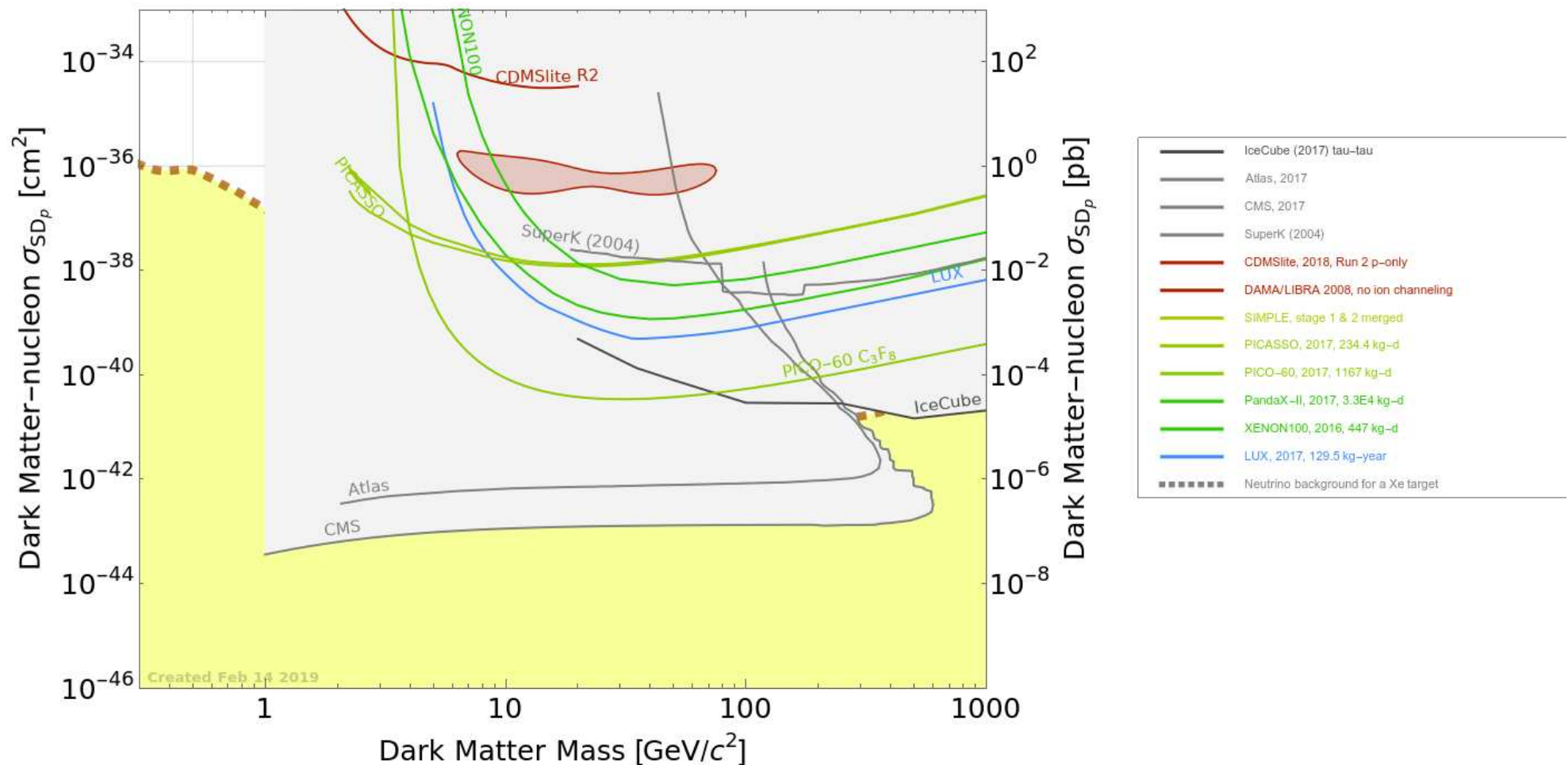


# Detekcja bezpośrednia

## Podsumowanie

stan na dzień 14 lutego 2019

Ograniczenia na rozpraszanie zależne od spinu na protonach

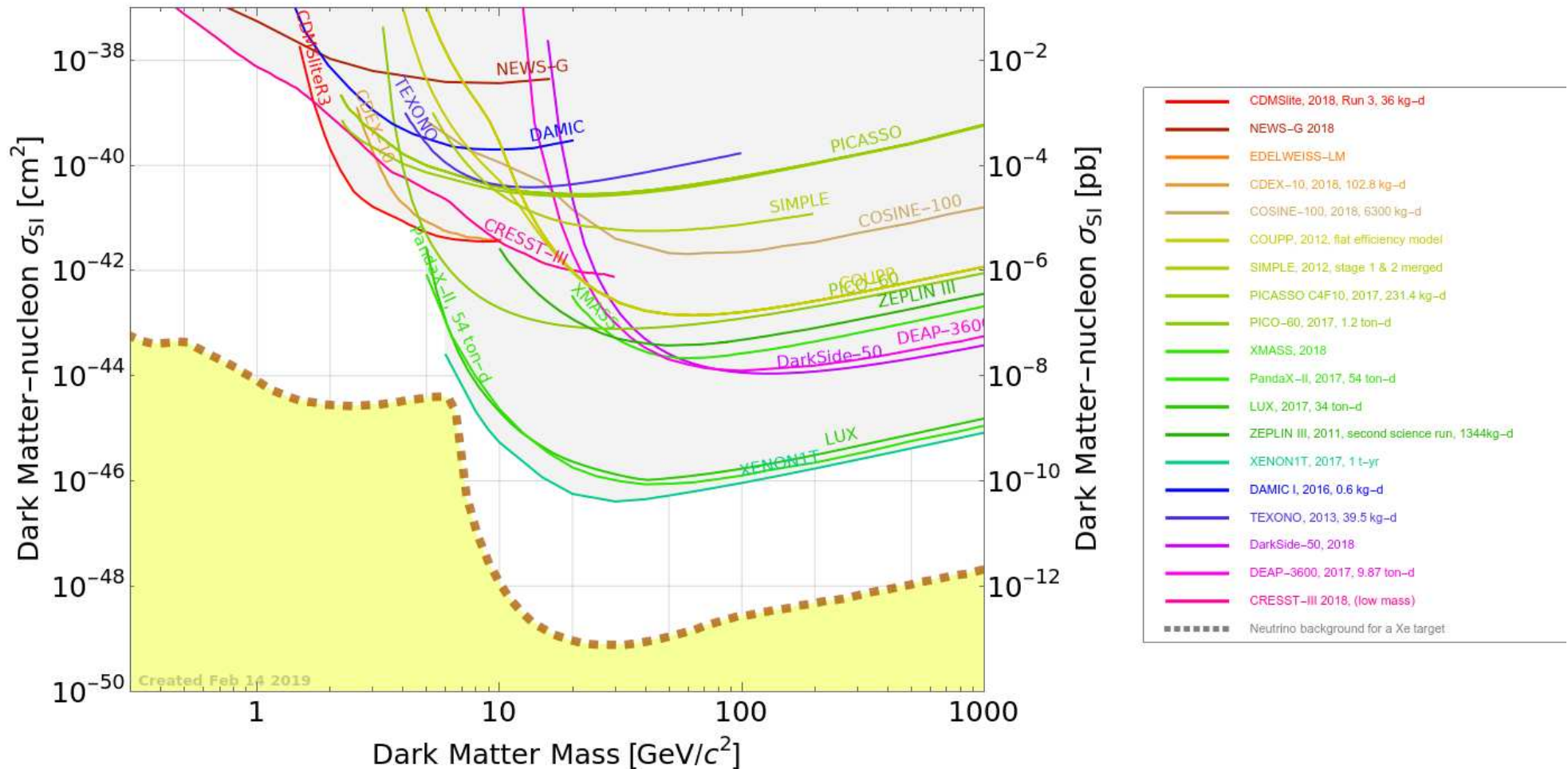


# Detekcja bezpośrednia

## Podsumowanie

stan na dzień 14 lutego 2019

Ograniczenia na rozpraszanie niezależne od spinu (Spin Independent: SI)



# Detekcja bezpośrednia

## Perspektywy

Jacques Pienaar, Moriond EW 2019

