

# Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

## Wykład V

- Modelowanie gęstości ciemnej materii
- Kandydaci i możliwe metody poszukiwania
- Produkcja w LHC
- Poszukiwanie bezpośrednio  
Wybrane eksperymenty

# Ciemna materia

## Przesłanki eksperymentalne

Szereg obserwacji astrofizycznych i rachunków modelowych wskazuje na konieczność istnienia **ciemnej materii**:

- krzywe rotacji galaktyk
- zawartość deuteru i helu we Wszechświecie (Pierwotna Nukleosynteza)
- rozkłady fluktuacji w CMB
- formowanie struktur wielkoskalowych
- rozmiary tych struktur - Barion Acoustic Oscillations (BAO)
- pomiary odległych supernowych
- soczewkowanie grawitacyjne
- Gromada Pocisk (Bullet Cluster)

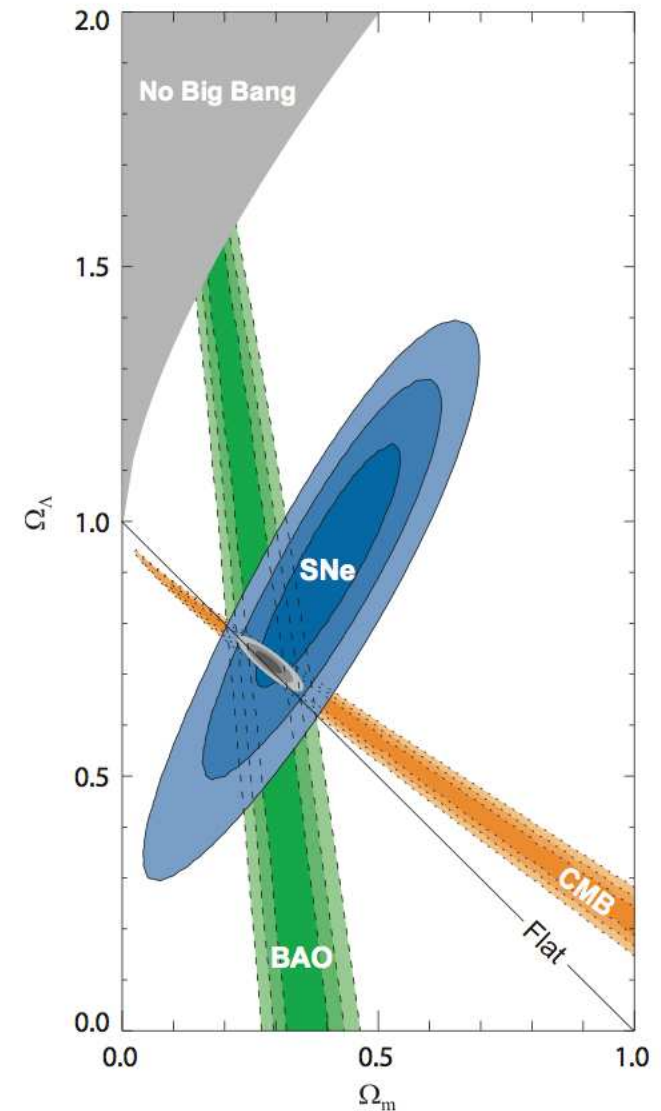
Większość z nich zakłada model ewolucji Wszechświata  $\Lambda$ CDM (!).

# Ciemna materia

## Przesłanki eksperymentalne

Najsilniejsze ograniczenia na parametry kosmologiczne uzyskujemy uwzględniając:

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

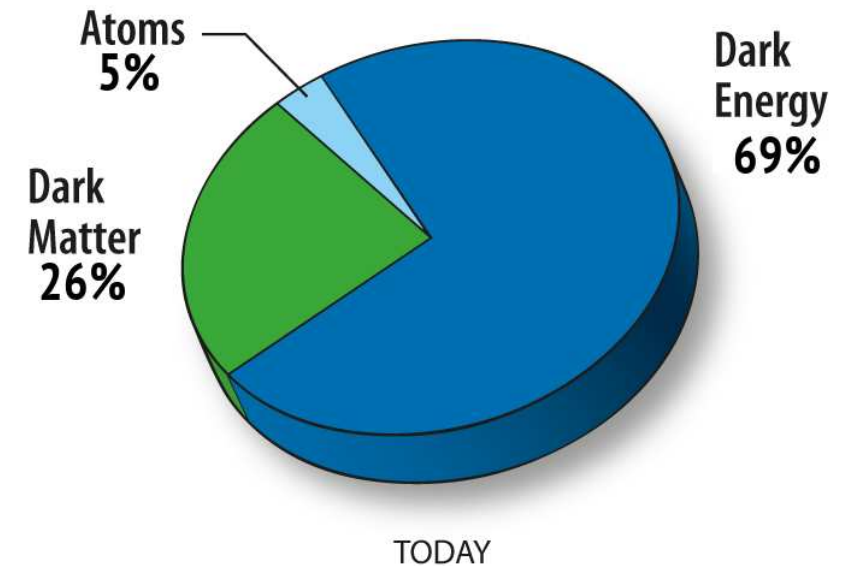


# Ciemna materia

## Wyniki pomiarów

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)

Jak możemy wytłumaczyć obecność ciemnej materii?

W jaki sposób pojawiła się we Wszechświecie?

# Ciemna materia

## Neutrino

Mechanizmu, który może tłumaczyć obecność ciemnej materii we Wszechświecie opisuje też cząstki Modelu Standardowego, w szczególności **neutrino**.

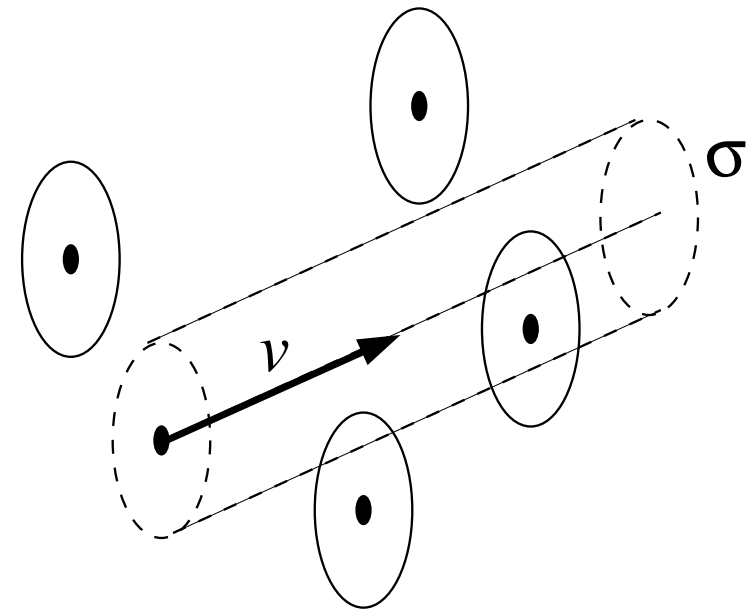
Średnia liczba oddziaływań cząstki poruszającej się w ośrodku o gęstości (liczbę cząstek na jednostkę objętości)  $\rho$  z prędkością  $v$ :

$$N = \rho v \sigma \cdot \Delta t$$

gdzie  $\sigma$  - **przekrój czynny** na oddziaływanie z cząstkami ośrodka.

Średni czas pomiędzy kolejnymi zderzeniami:

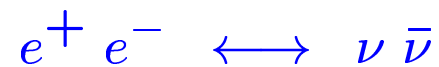
$$\tau = \frac{\Delta t}{N} = \frac{1}{\rho v \sigma}$$



# Ciemna materia

## Neutrino

Gdy Wszechświat był gorący neutrino pozostawały w równowadze z innymi cząstkami. Najdłużej utrzymywała się równowaga z elektronami i pozytonami (bo są najbliższe):



Średni czas “życia” cząstek (między produkcją a anihilacją)

$$\tau = \frac{1}{\rho \langle \sigma v \rangle}$$

gdzie uśrednić należy iloczyn  $v$ , względnej prędkości cząstek i  $\sigma$ , przekroju czynnego na anihilację, który jest rzędu (oddziaływania słabe)

$$\sigma \sim \frac{G_F^2 s}{6\pi}$$

# Ciemna materia

## Neutrino

Wraz z rozszerzaniem się Wszechświata (wciąż dominuje promieniowanie):

$$R \sim t^{1/2} \quad T \sim t^{-1/2}$$

Szybko maleje gęstość cząstek, malej też przekrój czynny (tylko  $v \approx c = \text{const}$ )

$$\frac{1}{\tau} = \langle \rho \sigma v \rangle \sim R^{-3} T^2 \sim T^5 \quad \Rightarrow \quad \tau \sim t^{5/2}$$

Średni czas po którym następuje anihilacja wydłuża się szybko z czasem życia Wszechświata. W pewnym momencie go przekracza  $\Rightarrow$  następuje “wymrożenie”.

Dla neutrin zachodzi to dla  $t \sim 1 \text{ s}$  i  $kT \sim 3 \text{ MeV}$ .

Neutrino przestają anihilować i przestają być produkowane, “odprzegają się” od innych cząstek. Ich (względna) zawartość we Wszechświecie się ustala:

$$N_{\nu_i} : N_{\gamma} \approx 3 : 11 \quad T_{\nu} \sim 2K$$

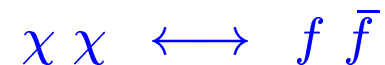
## Neutrinowe Promieniowanie Tła



# Ciemna materia

## Ciężkie neutrino

Podobnie cięższe neutrino (np. 4 generacja) byłyby na początku w równowadze ze “zwykłymi” fermionami:



Zmiana ich gęstości w czasie opisana byłaby równaniem:

$$\frac{d\rho_\chi}{dt} = -3H \rho_\chi - \langle \sigma v \rangle \rho_\chi^2 + \langle \sigma v \rangle \rho_f^2$$

gdzie kolejne człony opisują:

- rozszerzanie się Wszechświata
- anihilacje neutrin
- produkcję neutrin w anihilacji fermionów

# Ciemna materia

## Ciężkie neutrina

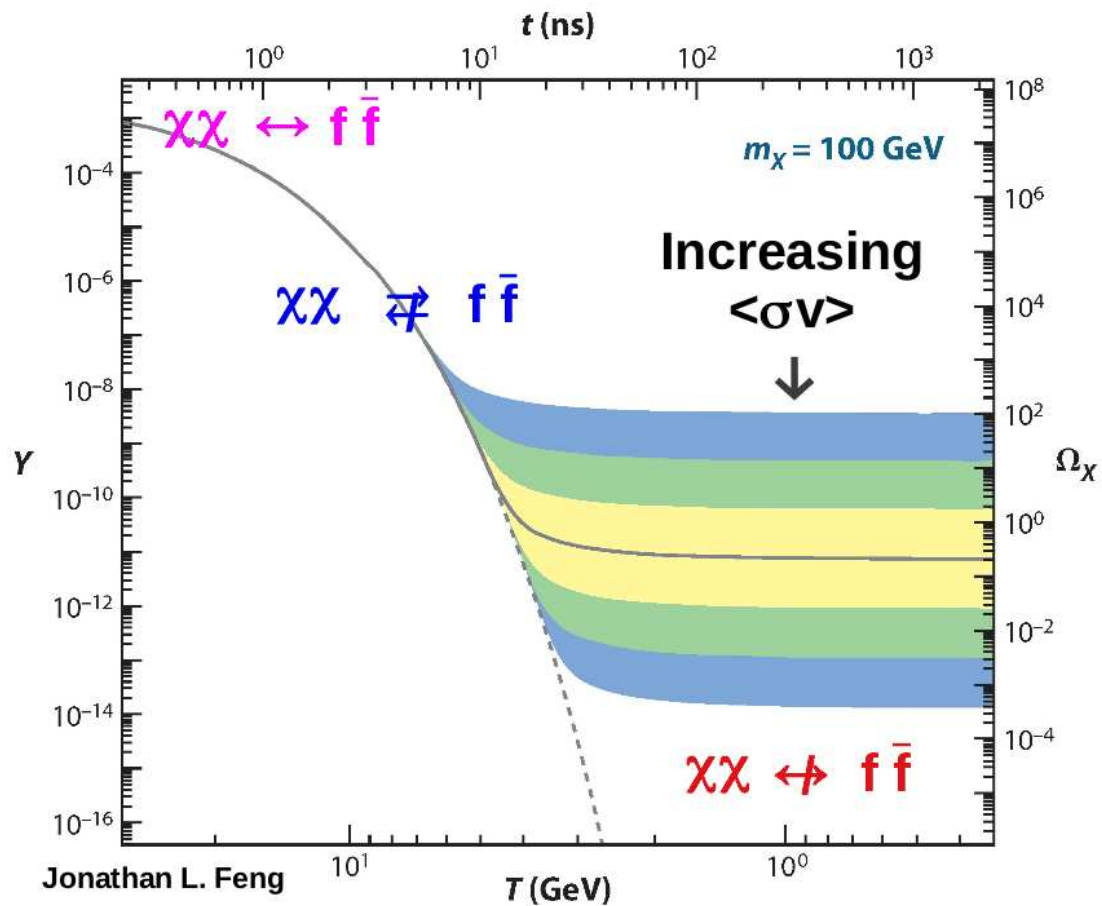
$$\frac{d\rho_\chi}{dt} = -3H \rho_\chi - \langle \sigma_{an} v \rangle \rho_\chi^2 + \langle \sigma_{pr} v \rangle \rho_f^2$$

Można wyróżnić 3 etapy ewolucji gęstości  $\rho_\chi$ :

- równowaga termodynamiczna: dla  $kT \gg m_\chi c^2$   
ustalone proporcje między ciężkimi i lekkimi cząstkami  
drugi i trzeci człon “kasują się”
- anihilacja ciężkich cząstek: przestają być produkowane gdy  $kT \ll m_\chi c^2$   
udział ciężkich cząstek maleje eksponencjalnie  $\sim \exp\left(-\frac{m_\chi c^2}{kT}\right)$   
dominuje drugi człon
- wymrożenie: anihilacja ustaje gdy  $\tau \gg t$   
udział procentowy ciężkich cząstek ulega “zamrożeniu” (freeze-out)  
dominuje pierwszy człon

# Ciemna materia

## Ciężkie neutrino



Wkład cząstek do obecnej 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..

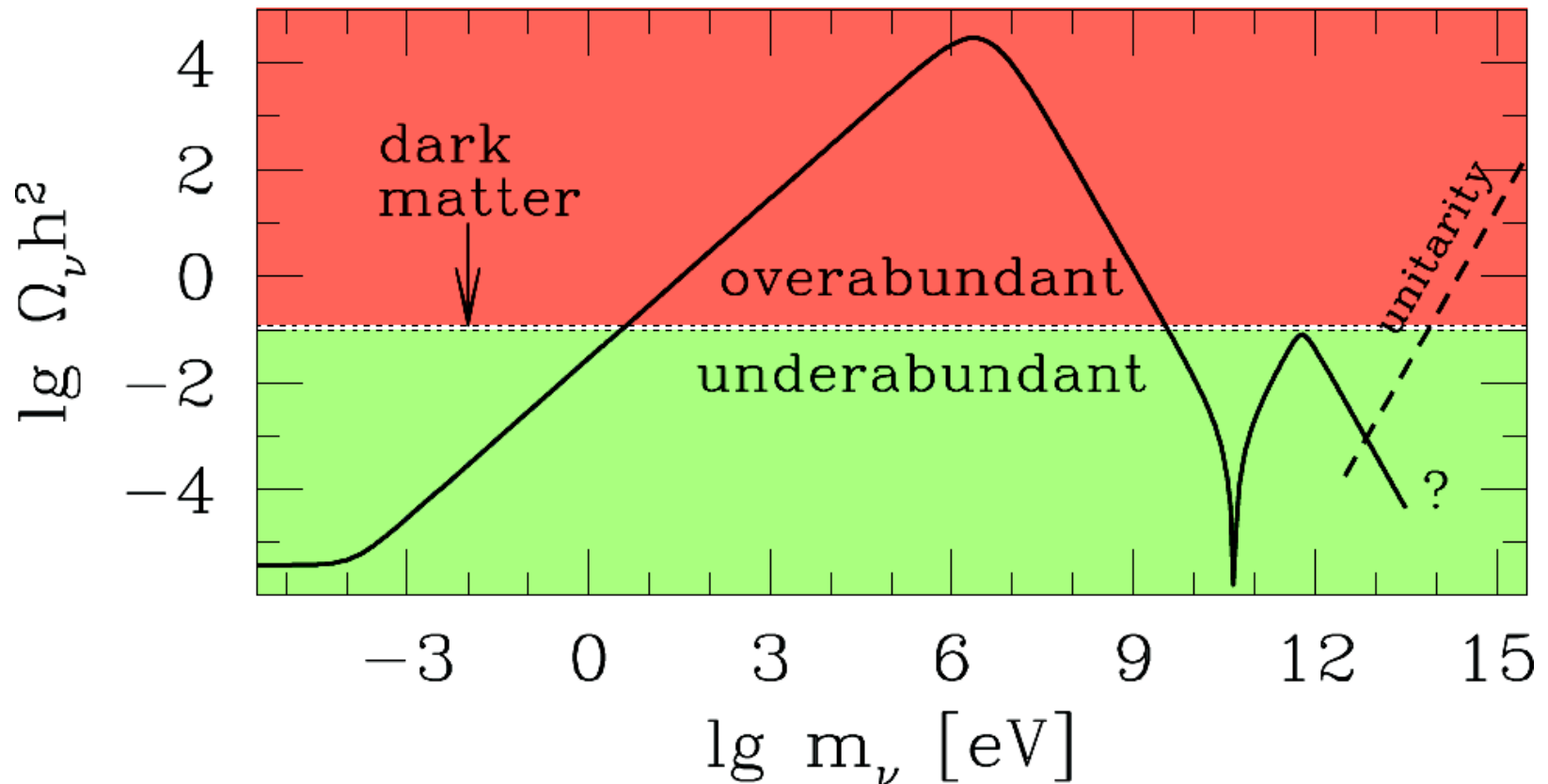
Można oszacować:

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

# Ciemna materia

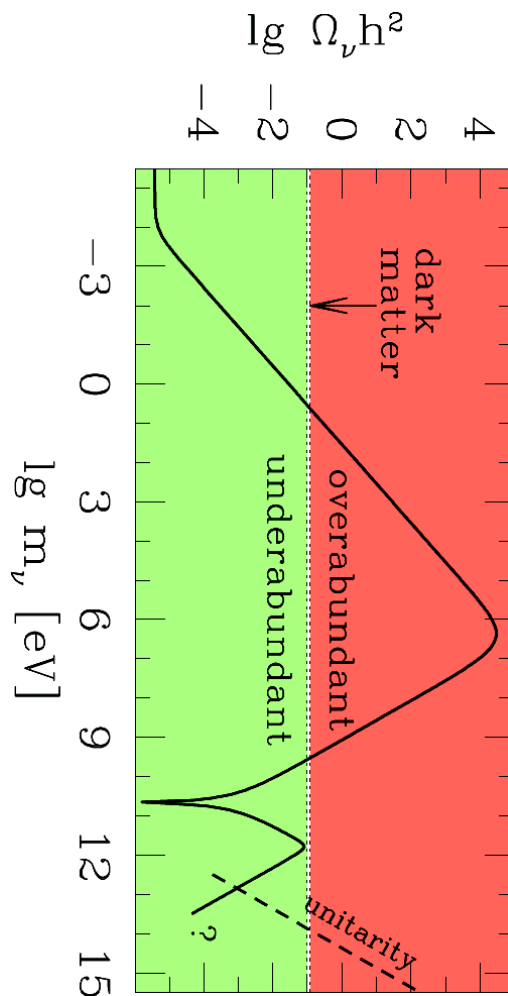
## Ciężkie neutrino

Ciężkie neutrino (4 generacji) są dobrym przykładem, bo wiemy dokładnie jaki powinien być przekrój czynny na ich oddziaływanie. Można policzyć gęstość reliktową w funkcji masy neutrino:



# Ciemna materia

## Ciężkie neutrino



Neutrino mogłyby stanowić ciemną materię jeśli ich masa byłaby rzędu

- kilku eV - neutrino sterylne ?  
ale wtedy byłyby “ciepła” ciemną materią...
- kilku GeV - 4 generacja fermionów ?  
ale wtedy powinny być widoczne w LEP...
- kilku TeV - gorsze dopasowanie, ale też możliwe...

# Ciemna materia

## Kandydaci

Mechanizm opisany dla neutrin może działać także dla innych cząstek, w szczególności ciężkich cząstek stabilnych przewidzianych w różnych modelach “nowej fizyki”

- sterylne neutrina
- cząstki supersymetryczne - LSP (neutralino, gravitino)
- cząstki Kaluza-Klain'a (w modelach z dodatkowymi wymiarami)
- dodatkowe, “niewidoczne” skalary (cząstki typu bozonu Higgsa; Inert Scalars)
- inne WIMP - Weekly Interacting Massive Particle

Wiele poszukiwań można traktować wspólnie, analizować w funkcji  $M$  i  $\langle\sigma v\rangle$ ...

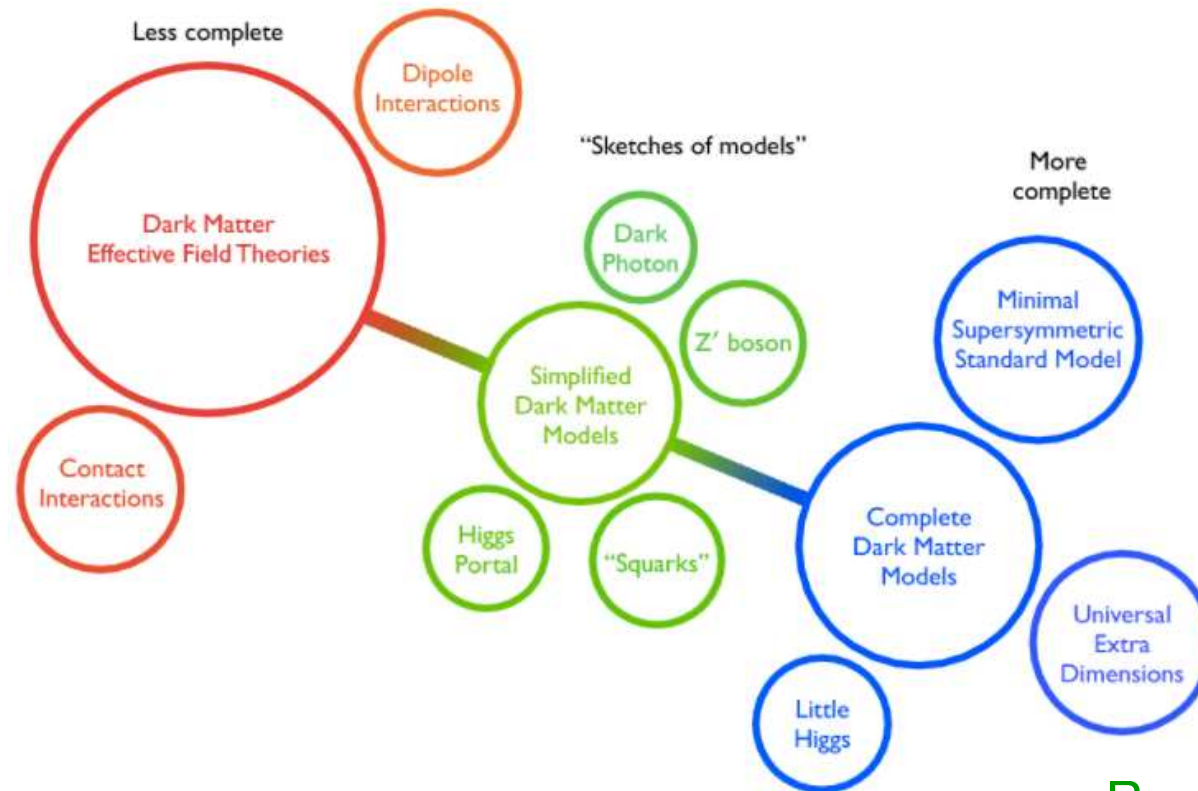
Choć są też modele/kandydaci, których wkład nie wynika z “zamrożenia”:

- axiony, solitony, przewidywania modelu strun...

# Ciemna materia

## Kandydaci

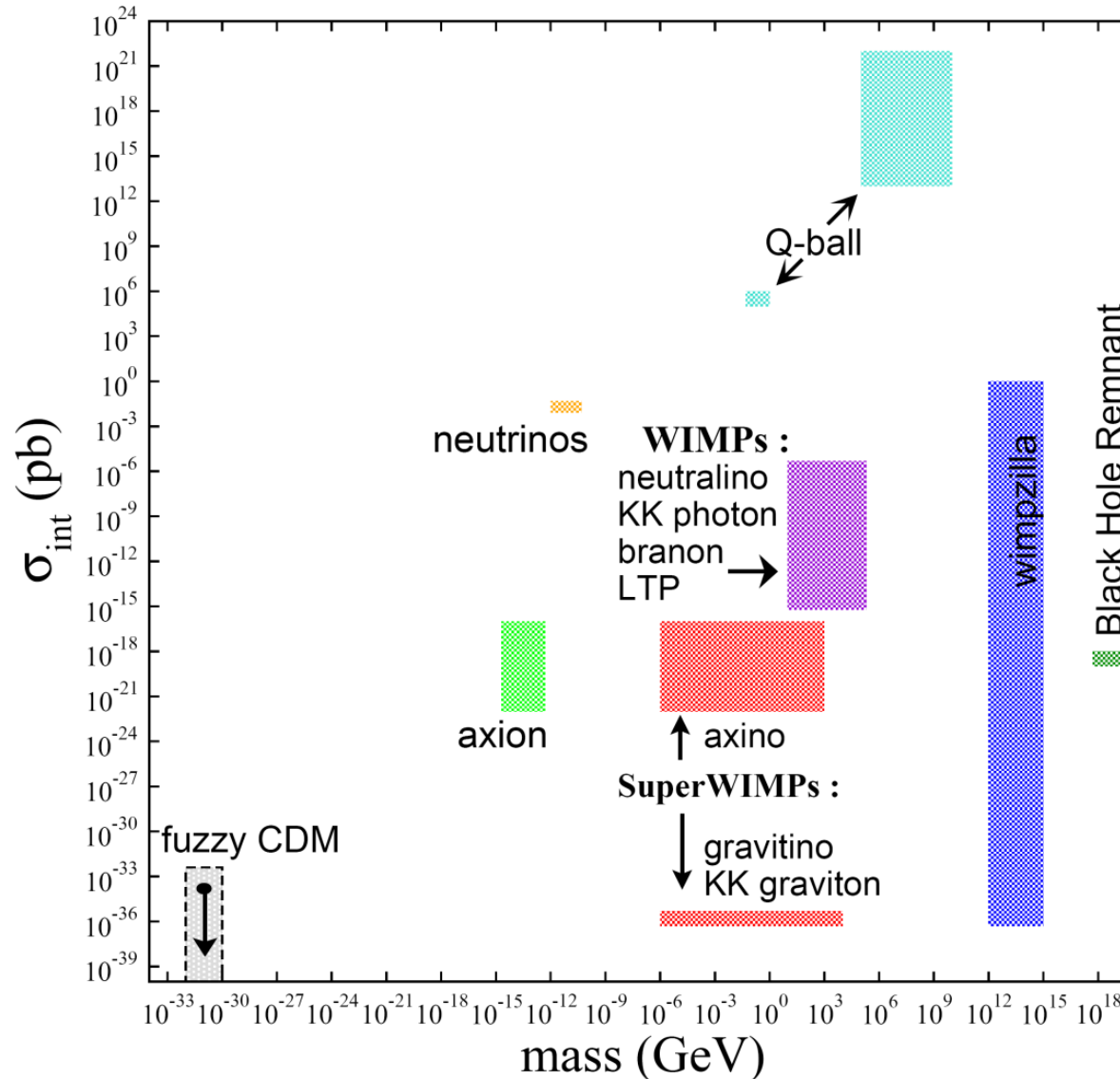
Bardzo wiele różnych scenariuszy o różnym stopniu “dopracowania”.  
Od pełnych, szczegółowych teorii do bardzo ogólnych opisów...



Rysunek: Tim M.P. Tait

# Ciemna materia

## Kandydaci

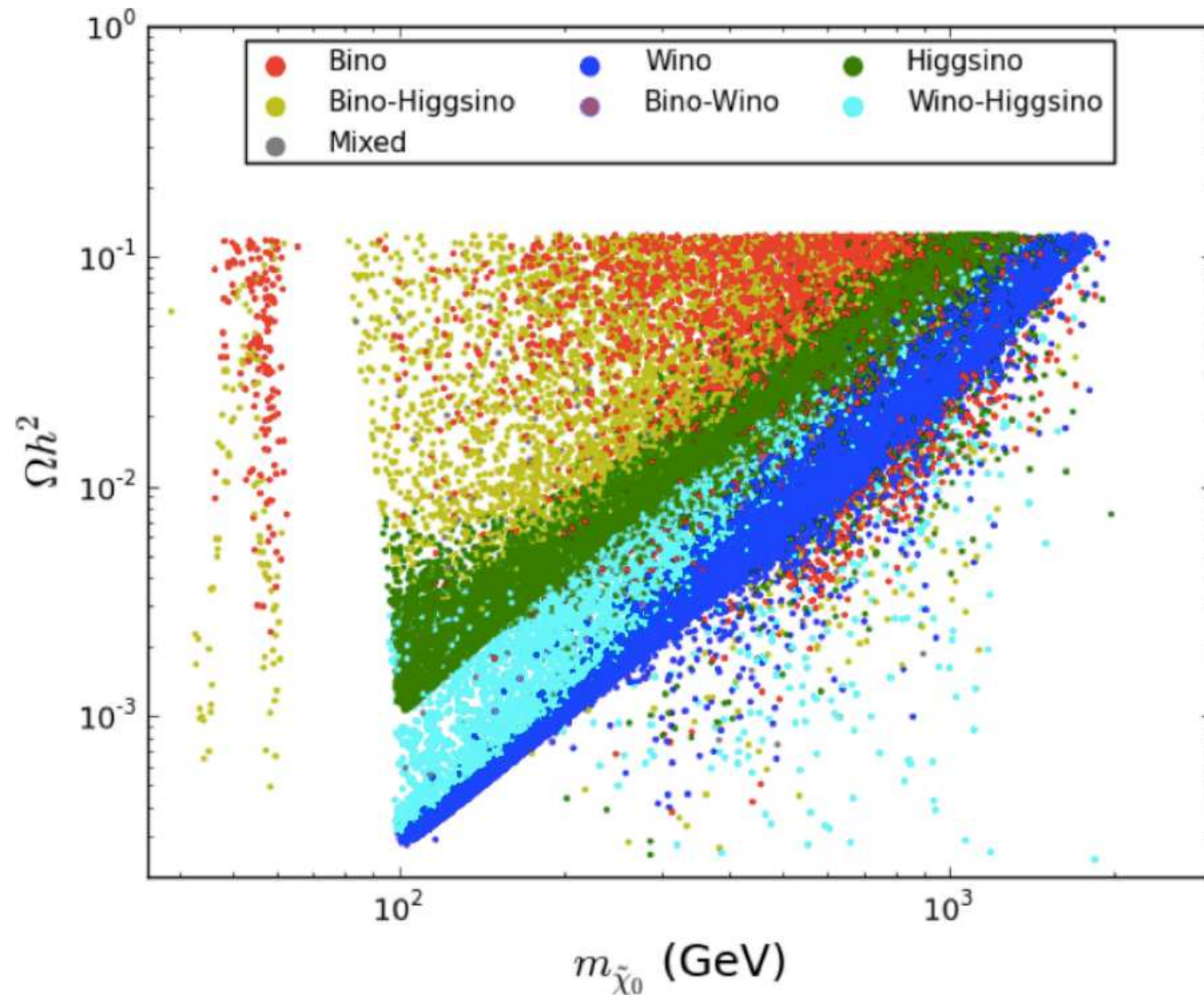




# Ciemna materia

## Kandydaci

SUSY  
models

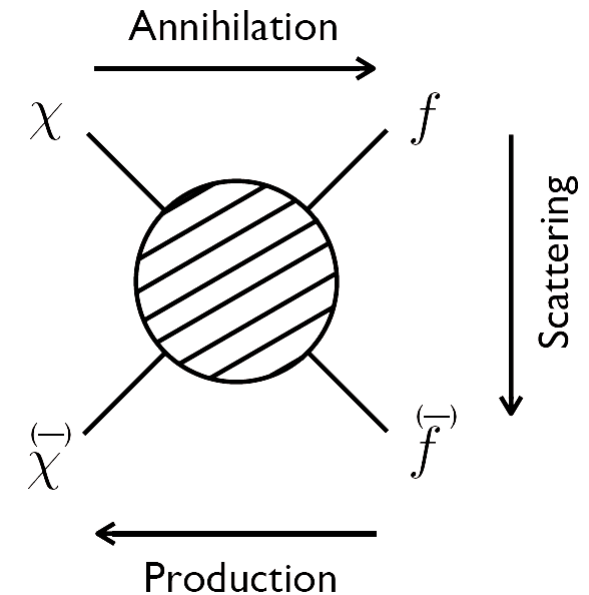


# Ciemna materia

## 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



# Ciemna materia

## Poszukiwanie



WIMP scattering on Earth



WIMP production on Earth



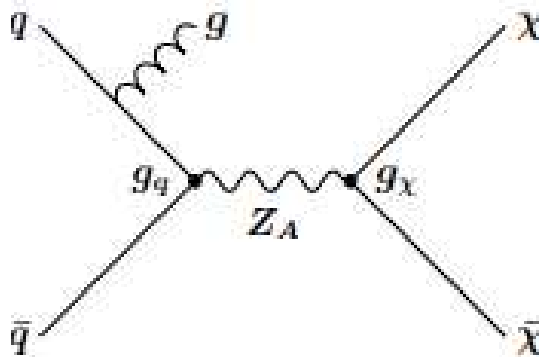
WIMP annihilation in the cosmos

# Ciemna materia

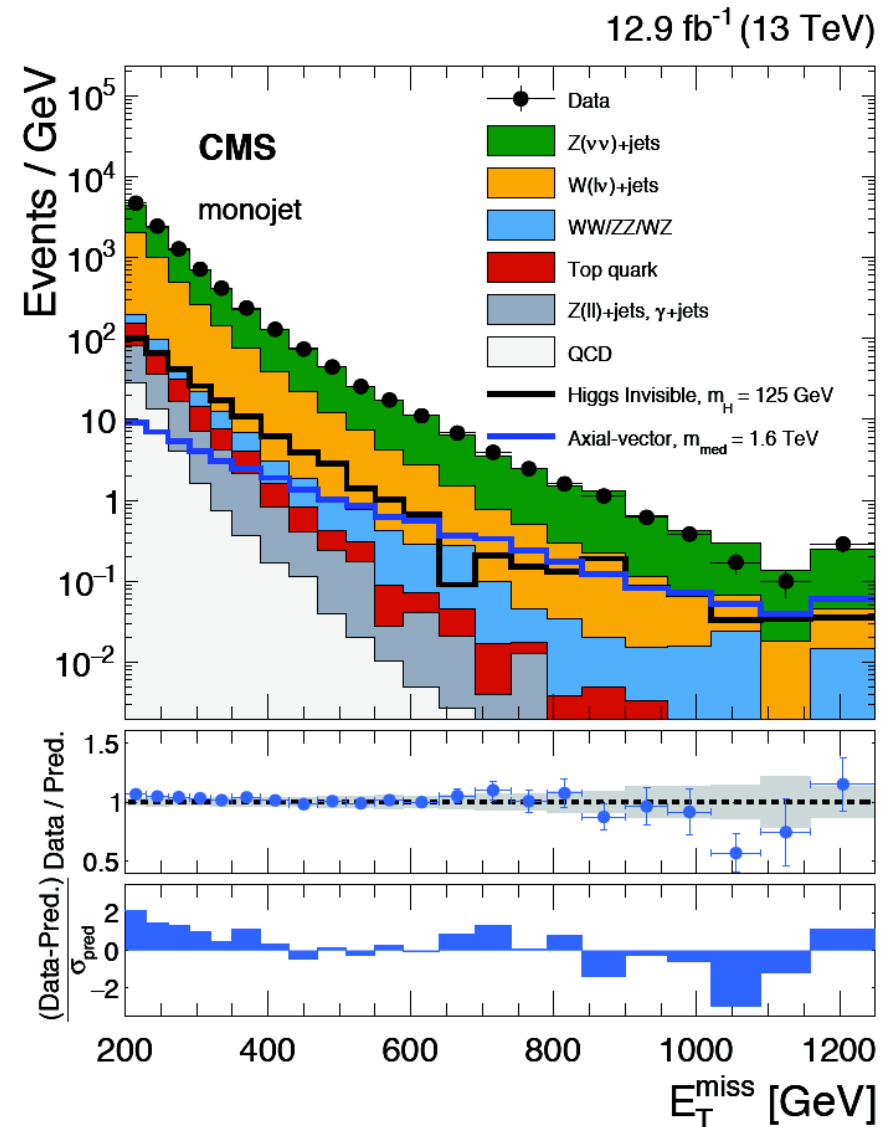
## Produkcja

W LHC poszukiwane są sygnały fizyki wykraczającej poza Model Standardowy (Beyond Standard Model - BSM) w ramach wielu różnych modeli.

Prowadzi się też poszukiwania bardziej ogólne, zakładające produkcję cząstek typu WIMP:



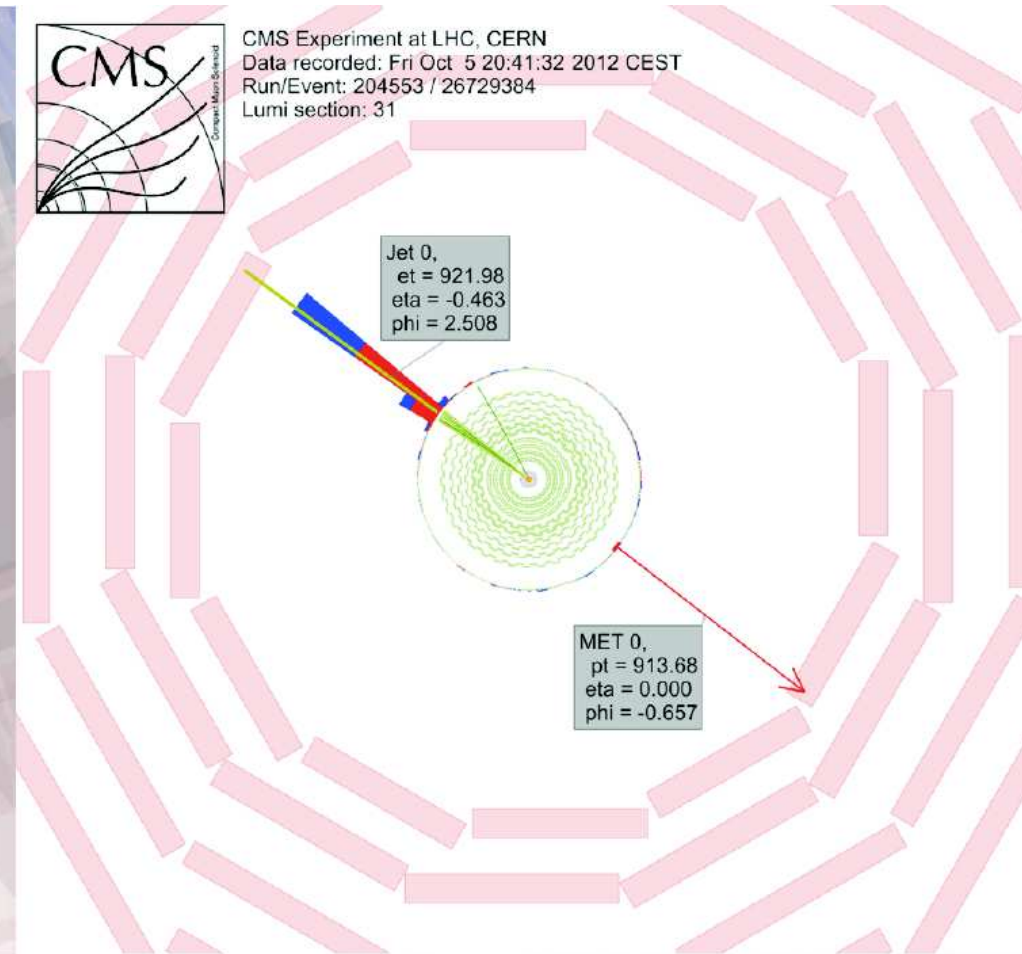
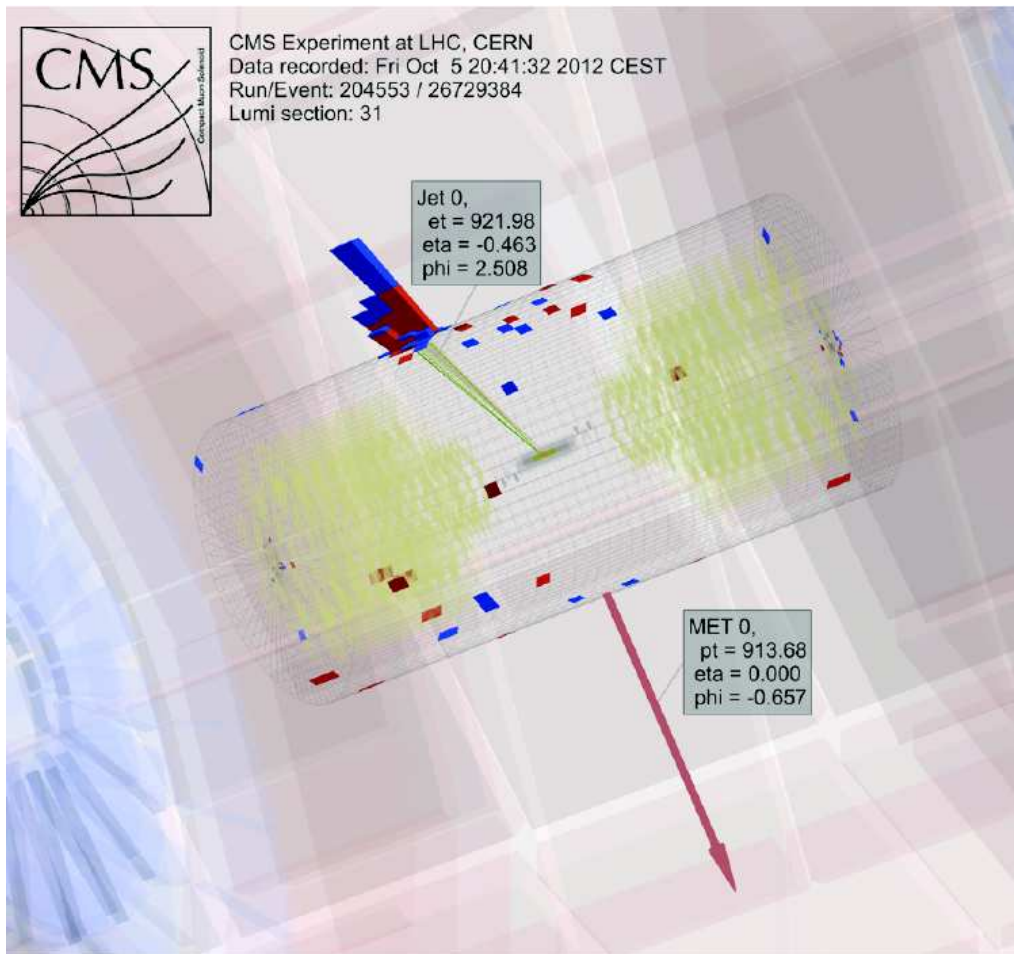
Cząstek tych nie widać w detektorze, ale można wnioskować o ich produkcji z bilansu pędu poprzecznego...



# Ciemna materia

## Produkcja

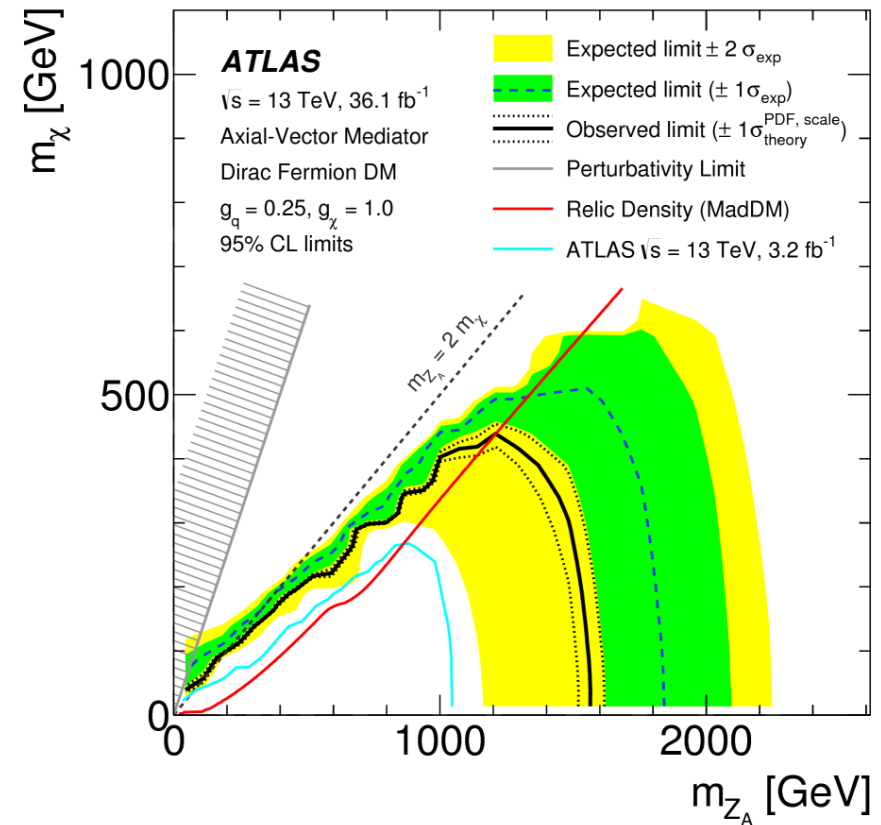
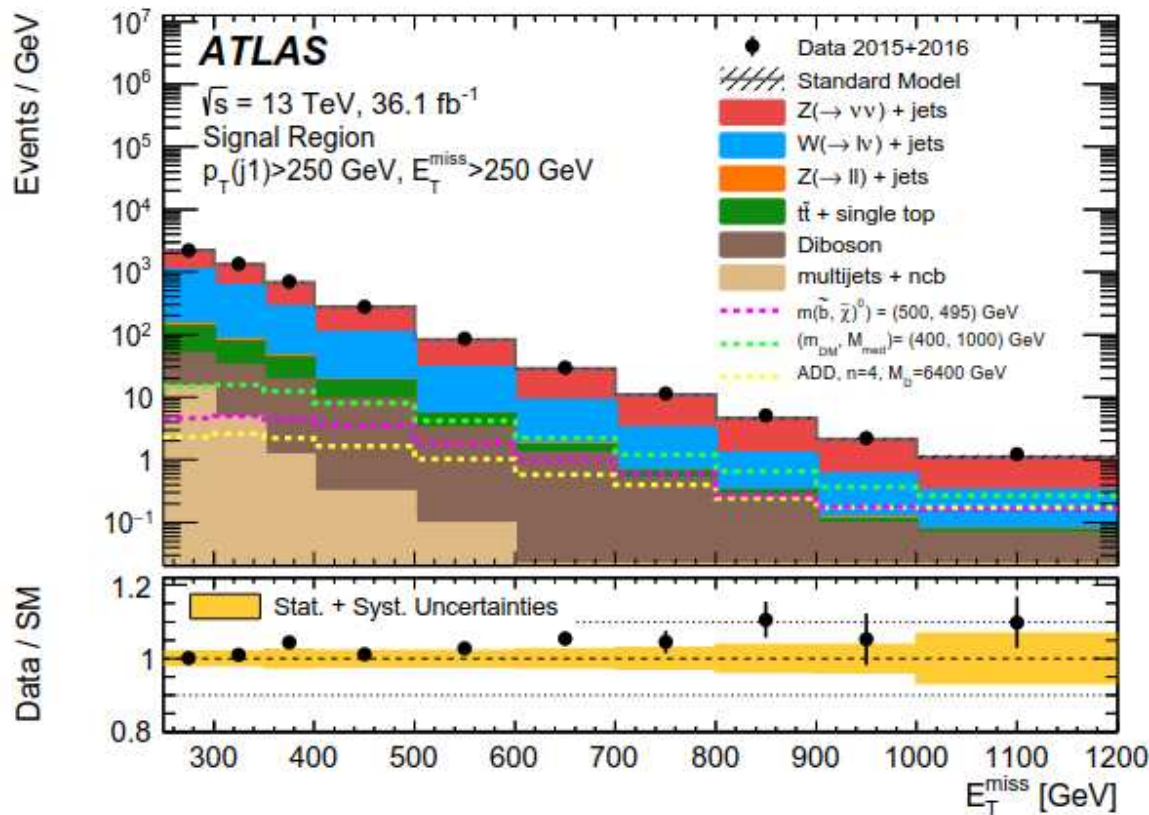
Przypadek typu “mono-jet”: kandydat na produkcję cząstek DM (CMS Run I)



# Ciemna materia

## Produkcja

Wyniki eksperymentu ATLAS (mono-jet, dane zebrane przy energii 13 TeV)

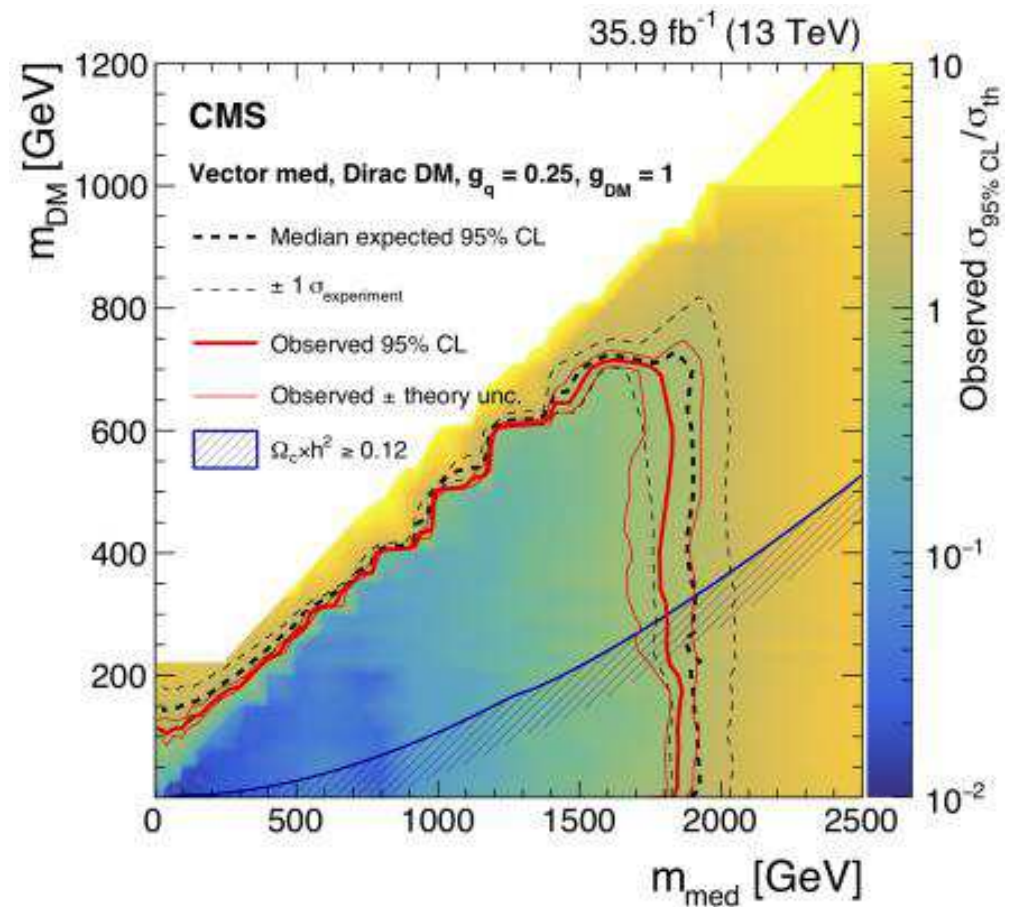
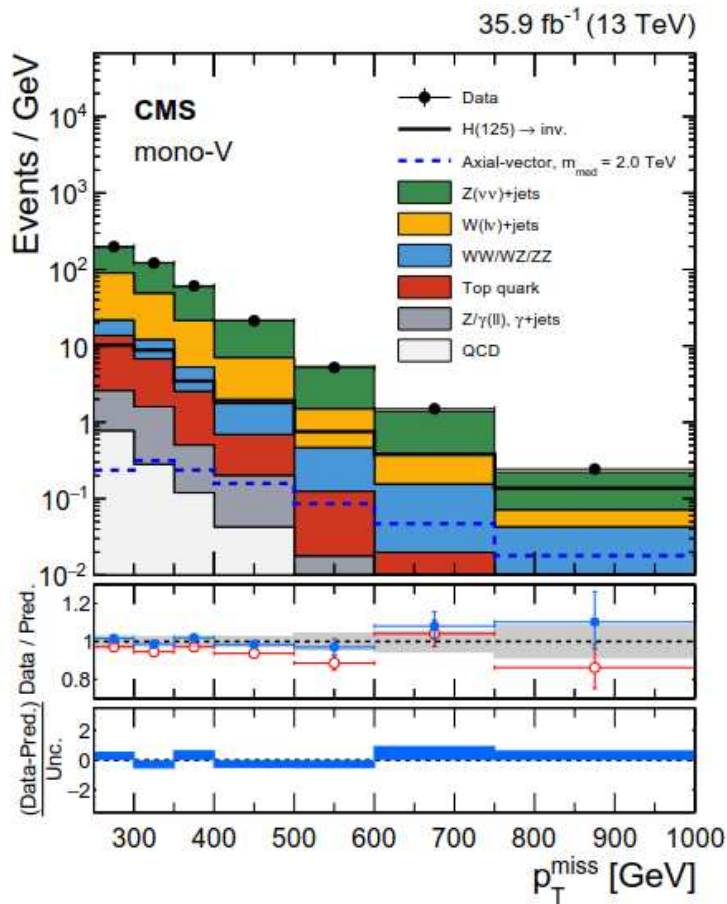


⇒ ograniczenia na masy cząstek DM i masy nowych cząstek pośredniczących...

# Ciemna materia

## Produkcja

Wyniki eksperymentu CMS (mono-jet + mono-V, dane 13 TeV)

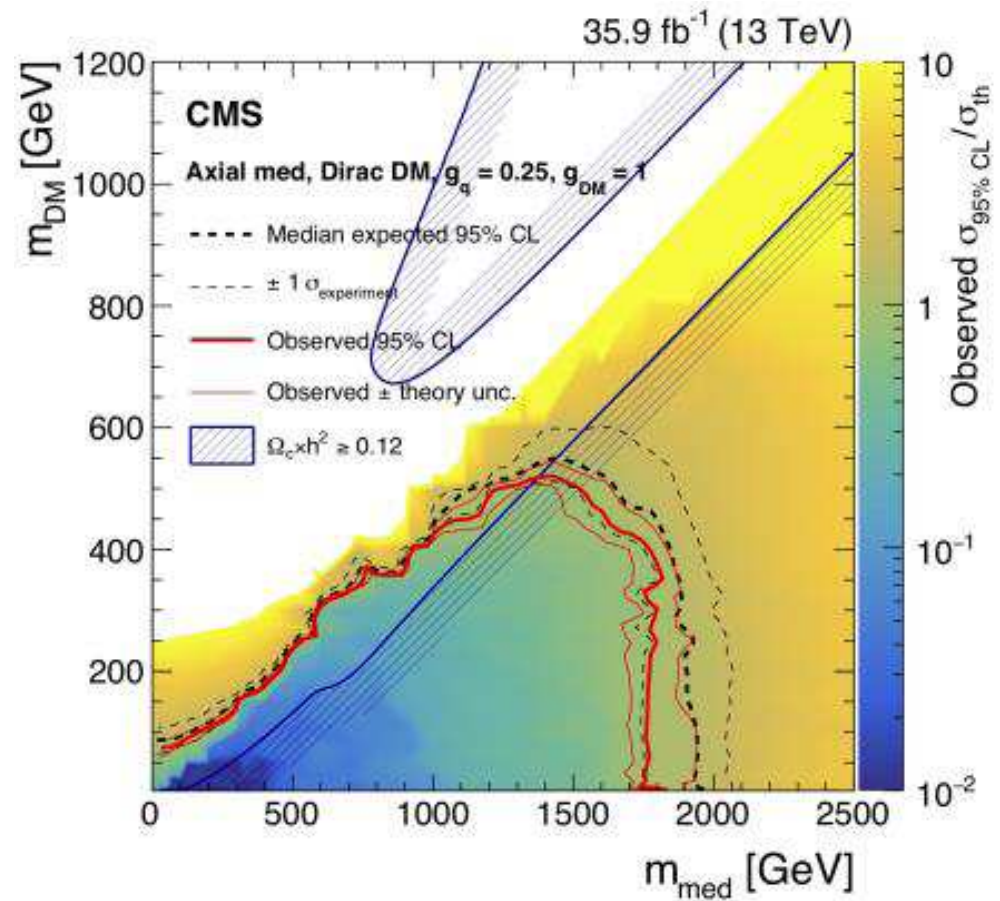
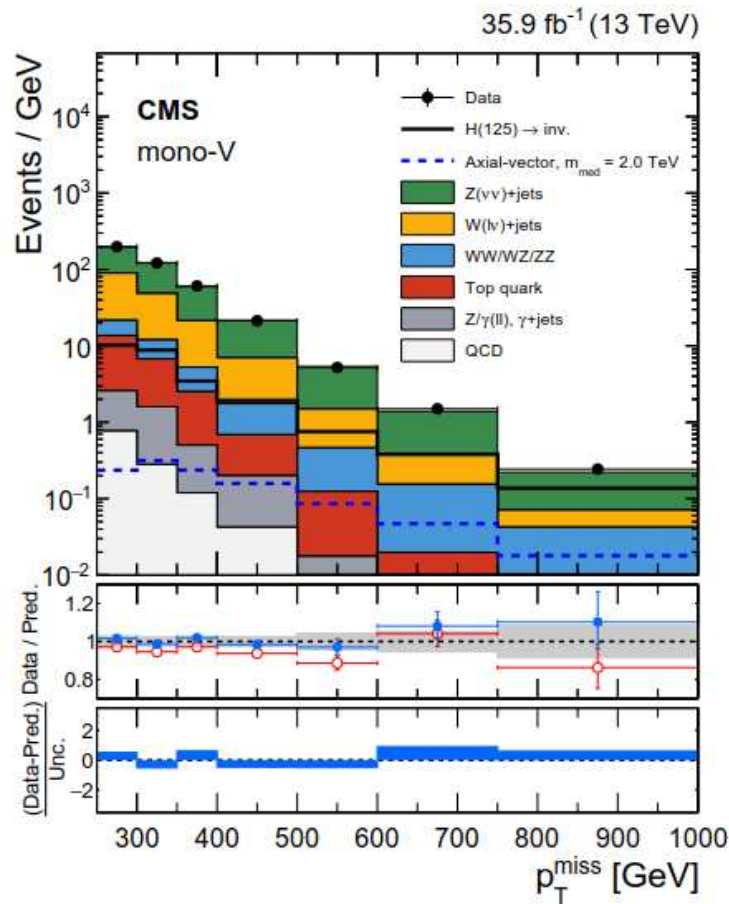


⇒ ograniczenia na masy cząstek DM i masy nowych cząstek pośredniczących...

# Ciemna materia

## Produkcja

Wyniki eksperymentu CMS (mono-jet + mono-V, dane 13 TeV)



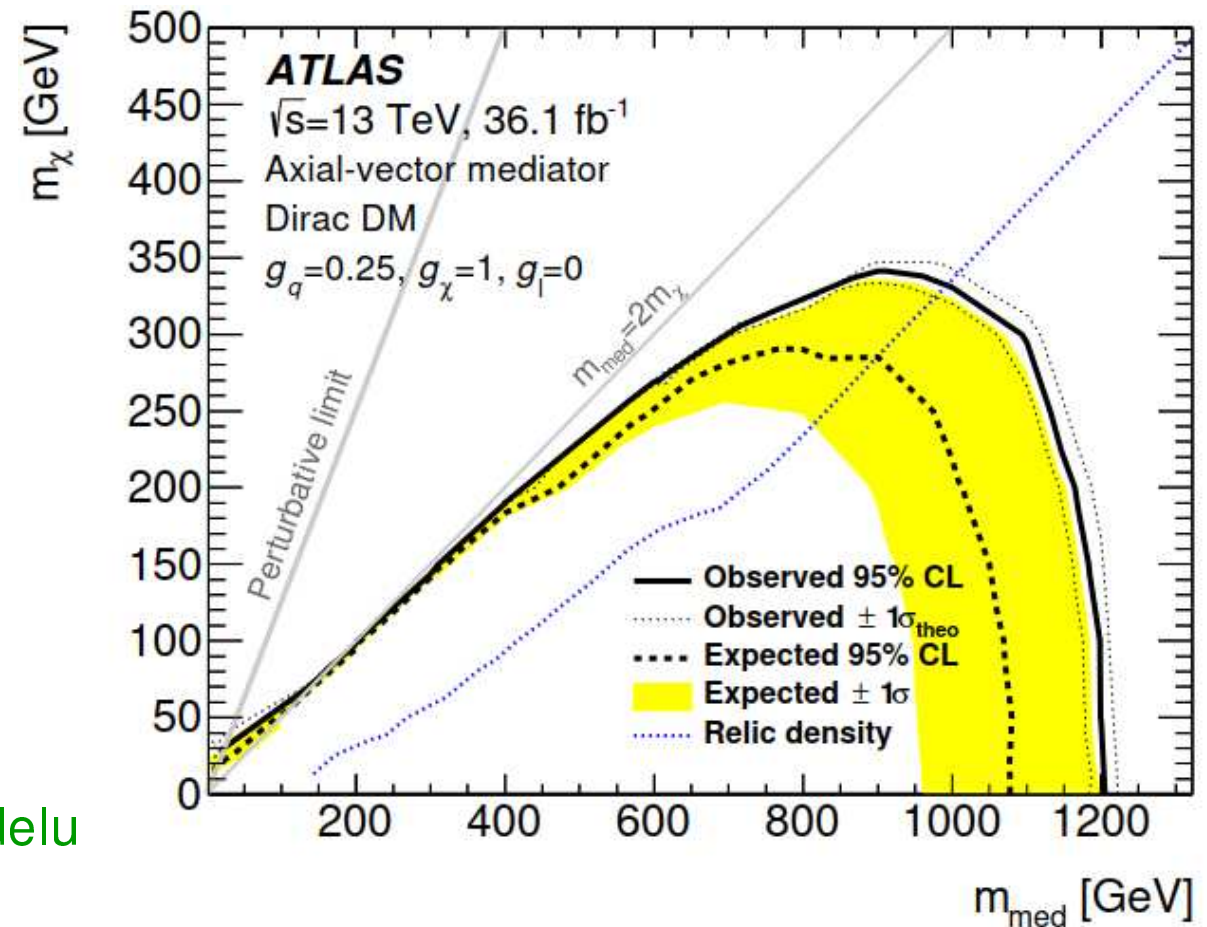
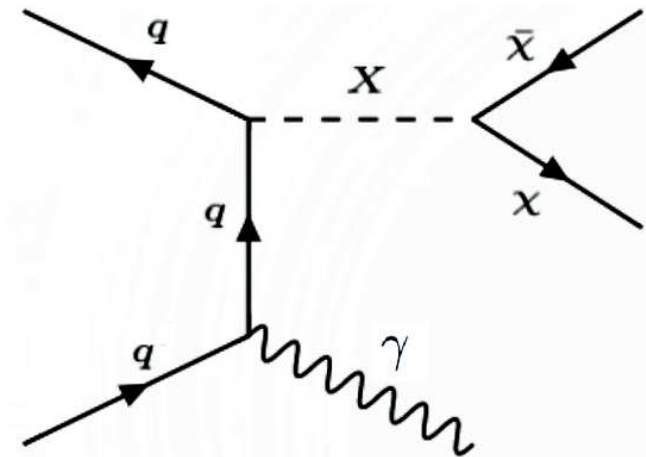
⇒ ograniczenia silnie zależą od przyjętego modelu...



# Ciemna materia

## Produkcja

Ograniczenia na masy cząstek DM: mono-fotony w LHC @ 13 TeV



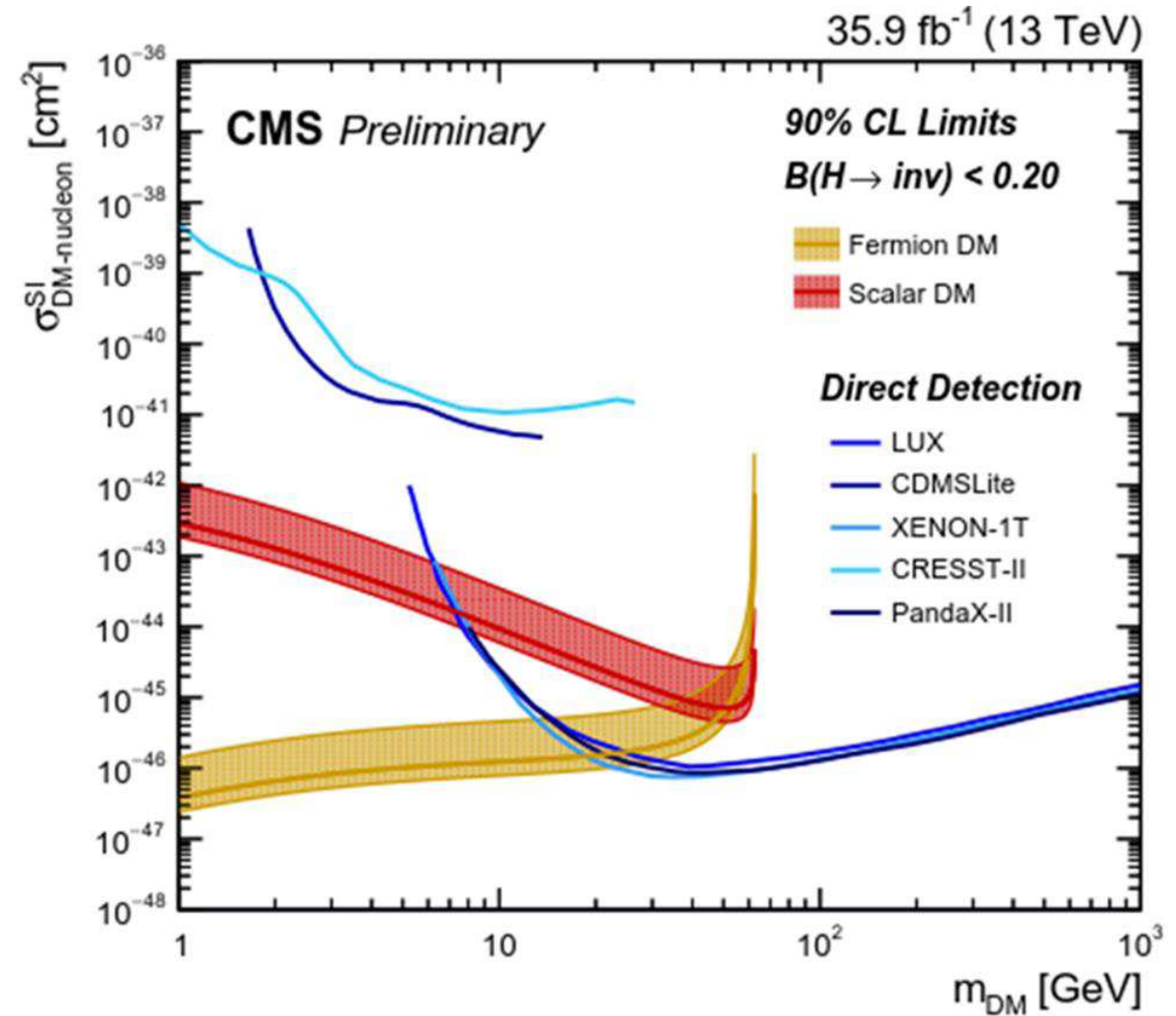
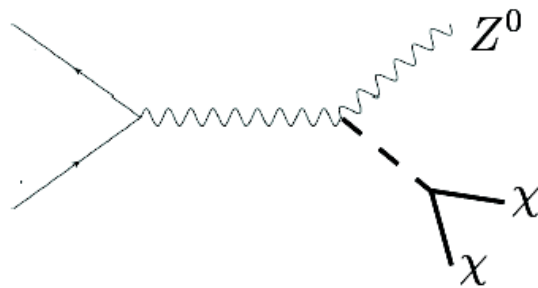
Ograniczenia silnie zależne od modelu

# Ciemna materia

## Produkcja

Dla lekkich cząstek DM możemy też uzyskać ograniczenia na podstawie (braku) ich sprzężeń do bozonu Higgsa.

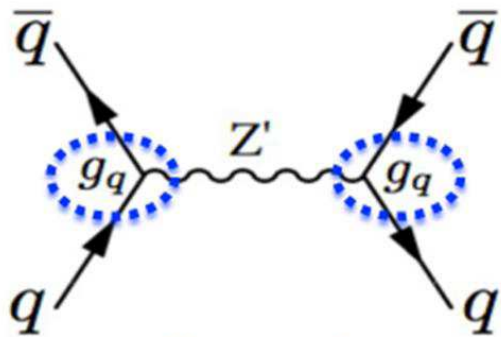
Powodowałyby one pojawienie się “niewidocznych” kanałów rozpadu.



# Ciemna materia

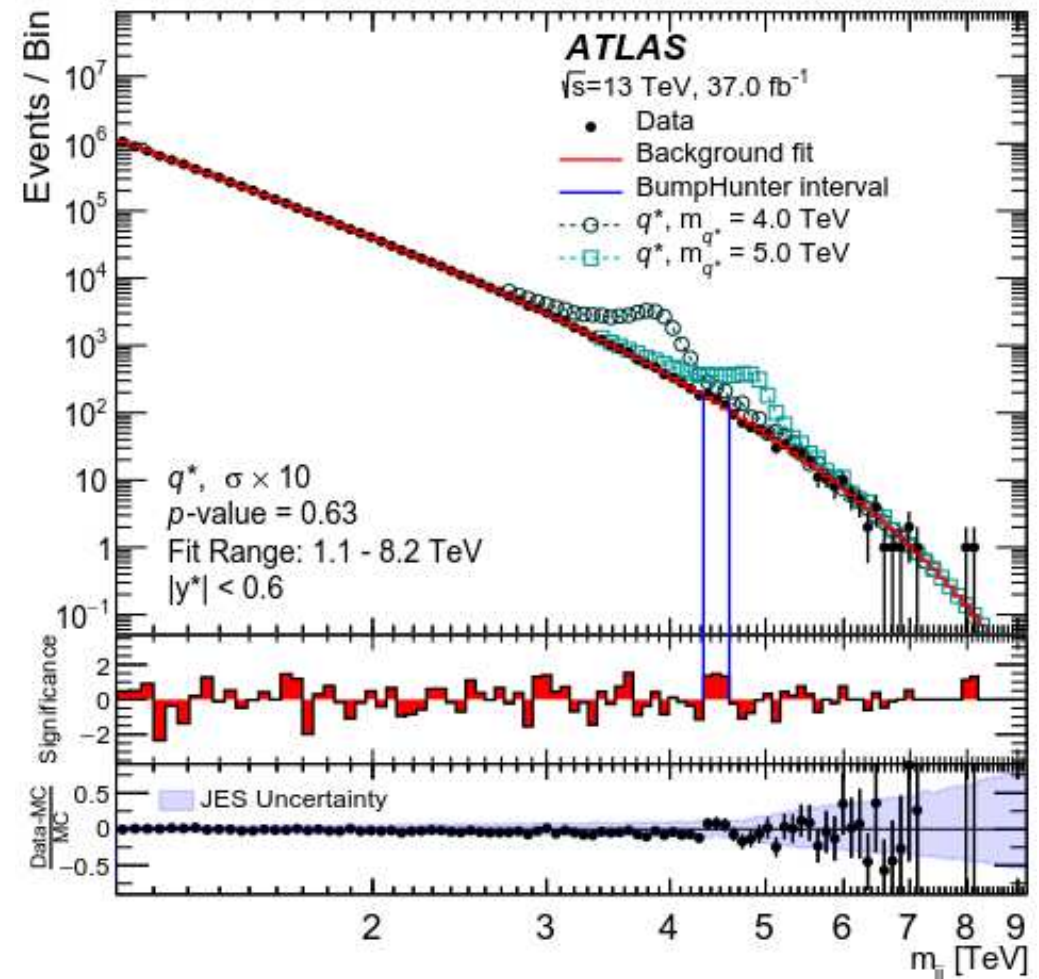
## Nowi “mediatorzy”

Jeśli produkcja par cząstek ciemnej materii zachodzi poprzez wymianę nowego nośnika oddziaływań



Powinien on także dawać wkład do produkcji standardowych cząstek (kwarków, leptonów...)

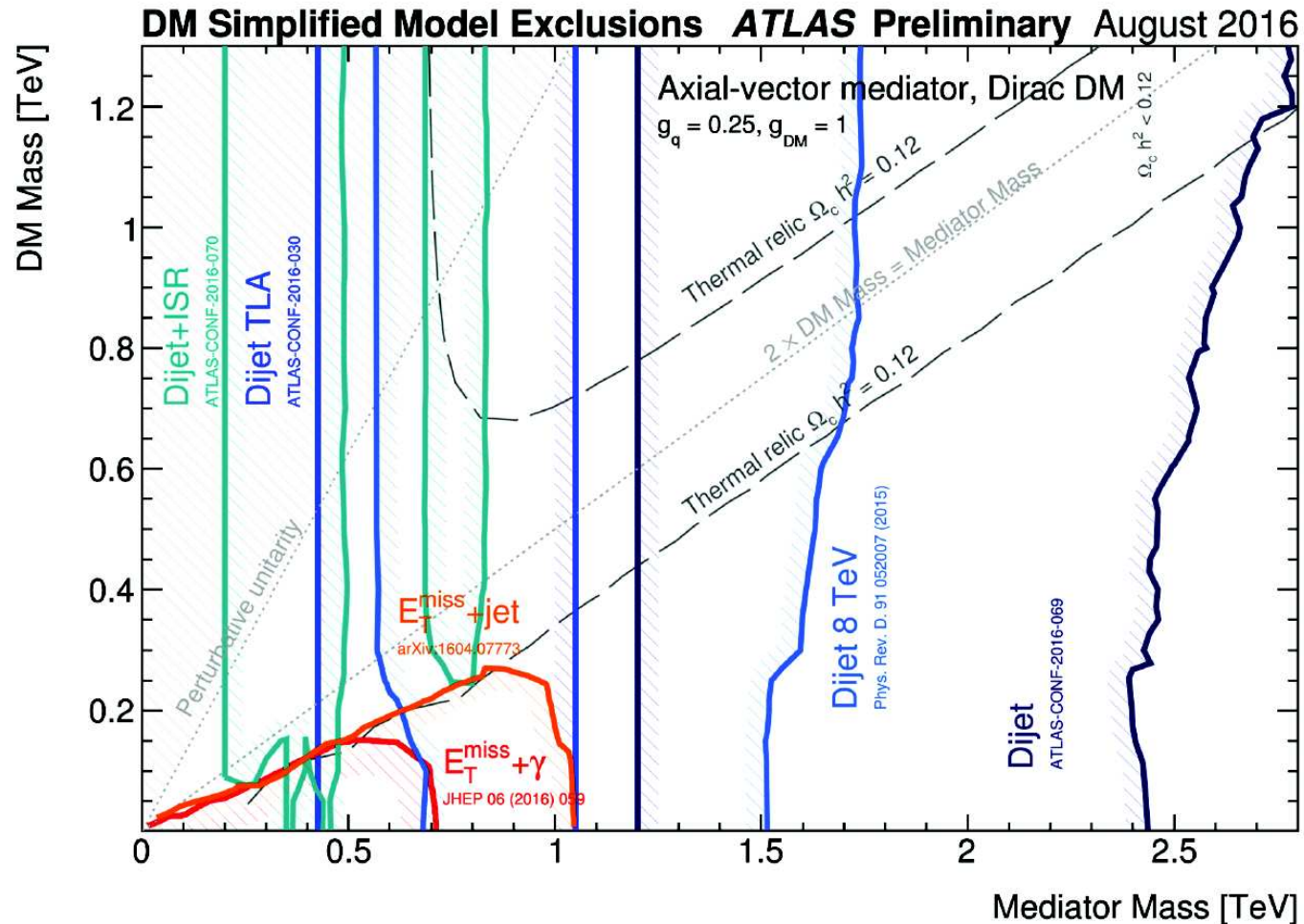
⇒ dodatkowe ograniczenia na masy mediatorów...



# Ciemna materia

## Produkcja

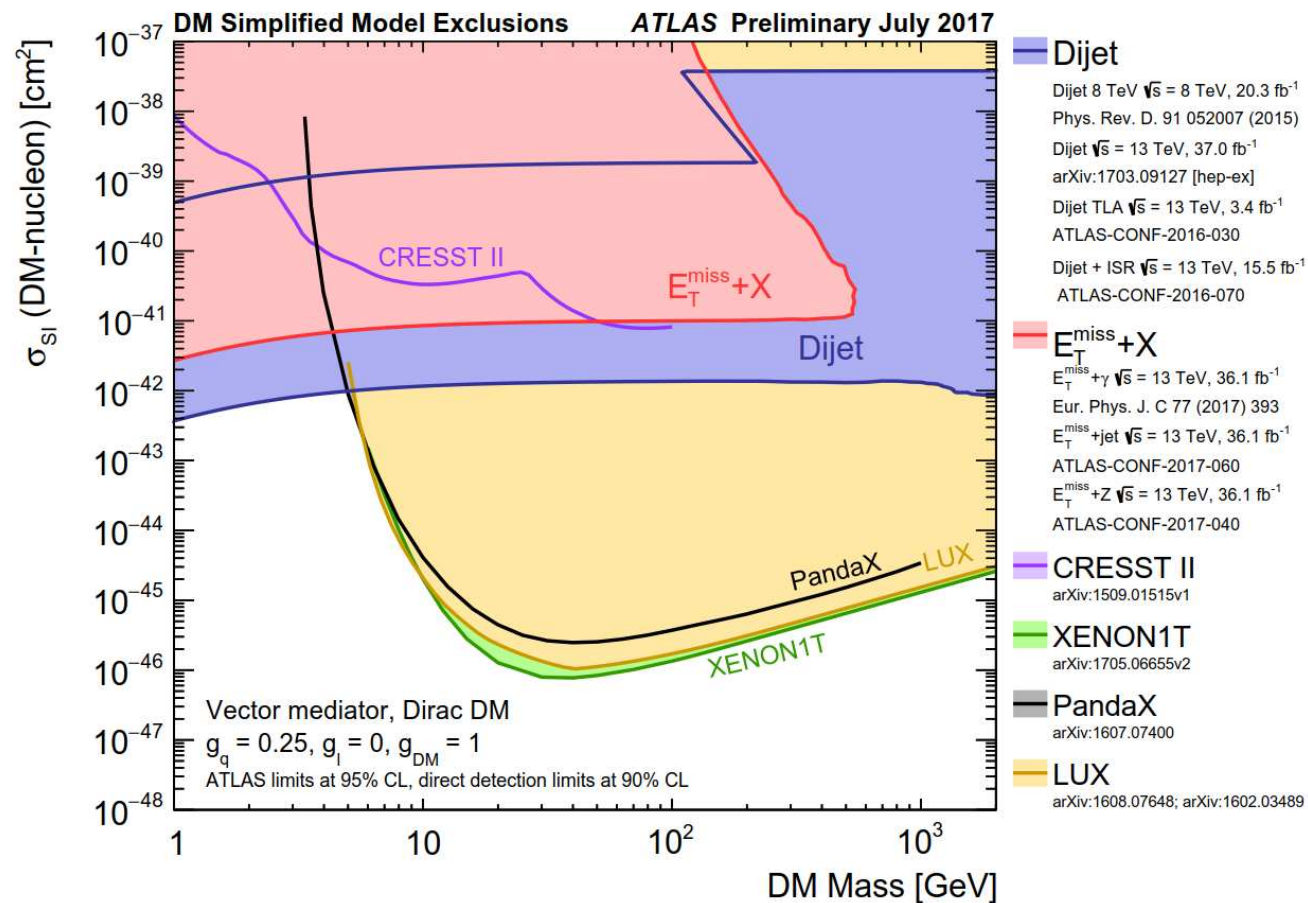
Zestawienie ograniczeń z różnych kanałów produkcji



# Ciemna materia

## Produkcja

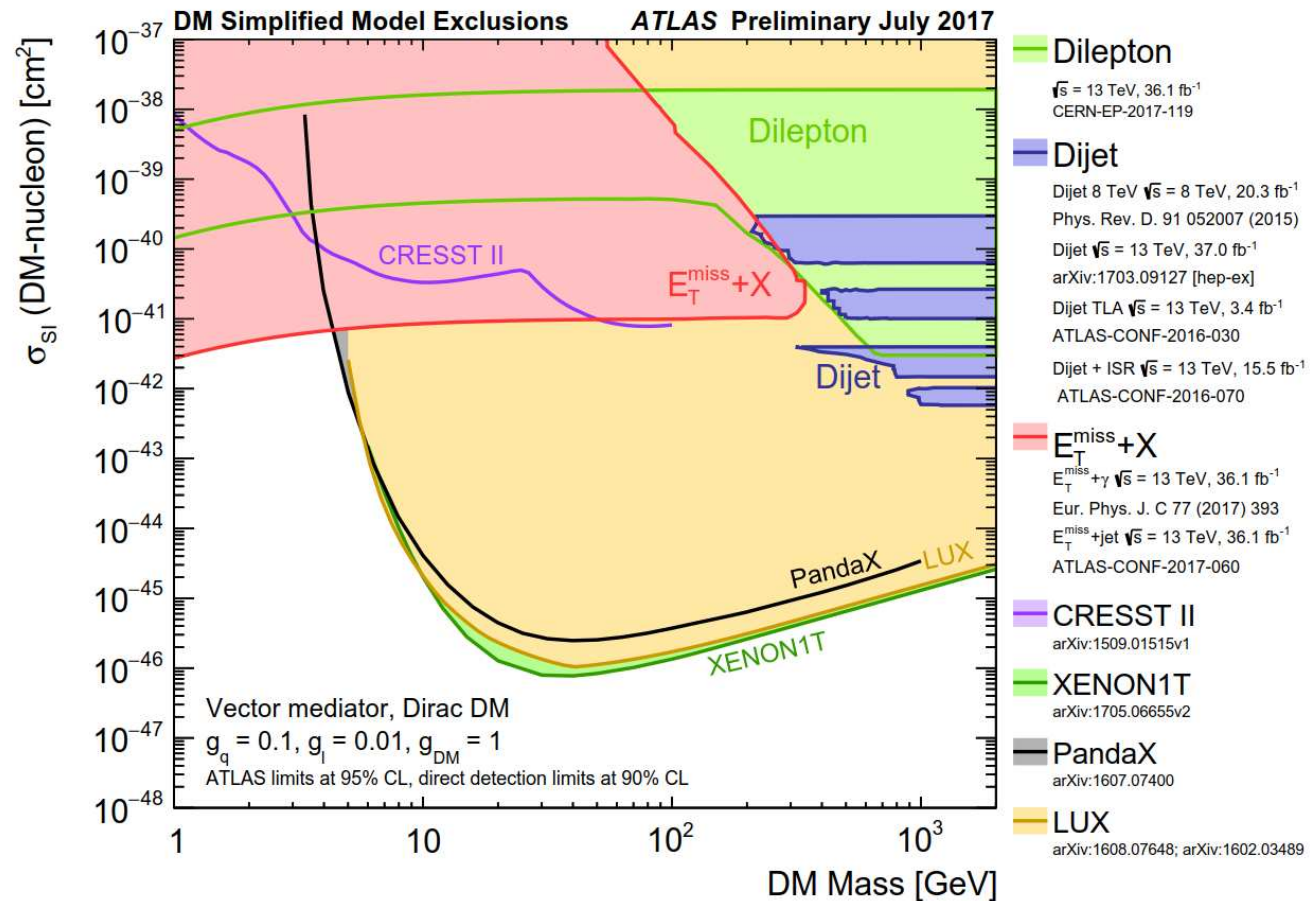
Zestawienie ograniczeń z różnych kanałów produkcji



# Ciemna materia

## Produkcja

Złożenie ograniczeń z różnych kanałów produkcji (silnie zależy od modelu)



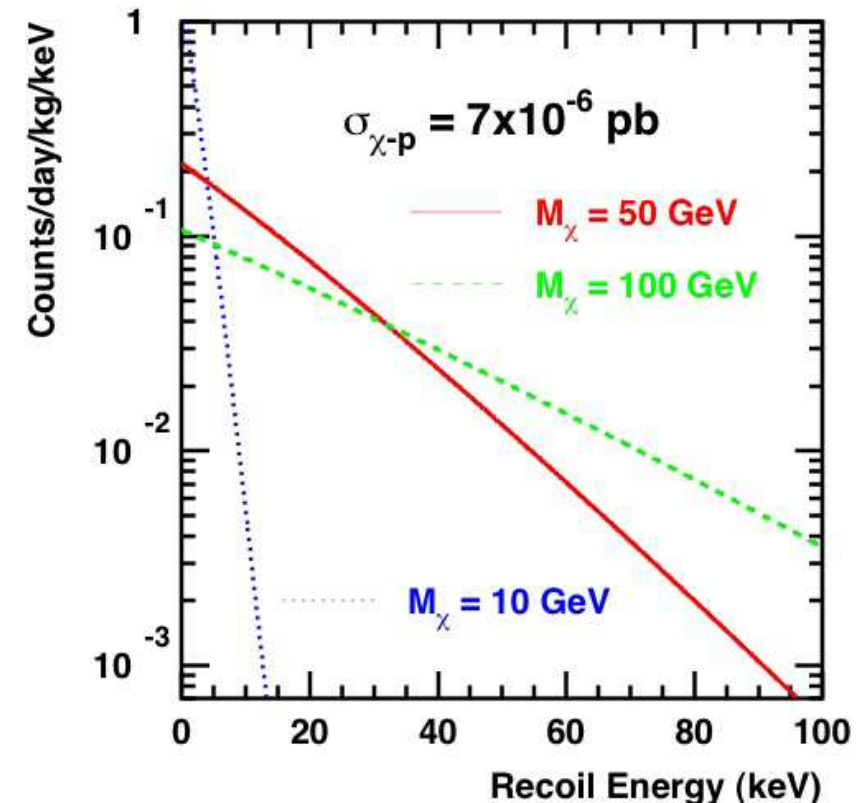
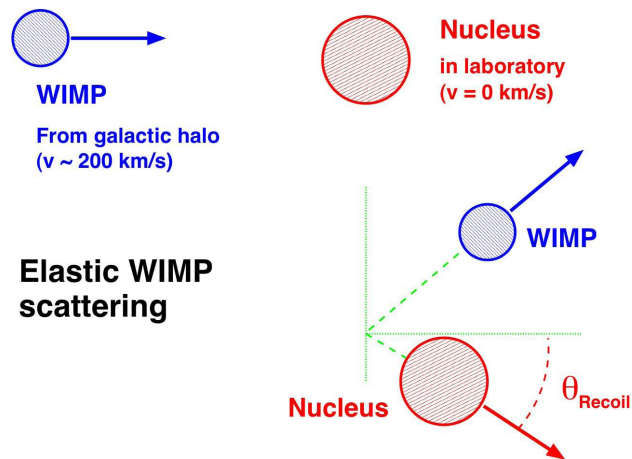
# Ciemna materia

## Detekcja bezpośrednia

Poszukujemy sygnału bezpośredniego oddziaływania cząstek DM w dedykowanych detektorach.

### Jakiego sygnału się spodziewamy?

Ziemia porusza się z prędkością ok. 200 km/s względem halo galaktyki.



WIMP o masie rzędu 100 GeV poruszający się z taką prędkością może zdeponować w materii (w wyniku rozpraszania elastycznego na jądrze) energię rzędu 100 keV.

# Ciemna materia

## Detekcja bezpośrednia

Sygnału jest bardzo słaby, ale mierzalny.

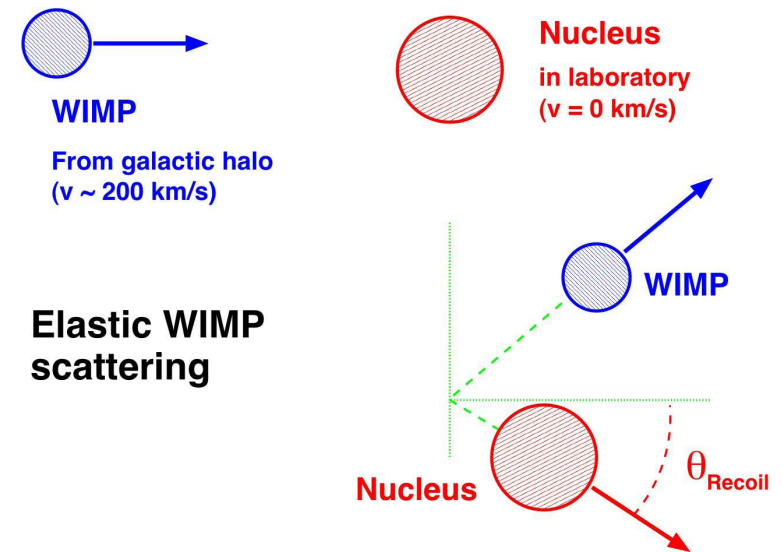
Problemem jest liczba przypadków:

- liczba atomów (np. Ge)  $n \sim 8 \cdot 10^{24}/kg$
- gęstość WIMP w halo  $\rho \sim 0.3 GeV/cm^3$
- prędkość WIMP  $v \sim 250 km/s$
- przekrój czynny  $\sigma < 10^{-4} pb = 10^{-40} cm^2$

⇒ Oczekujemy  $< 0.1$  oddziaływania dziennie w 1 kg detektora

Kluczowym problemem jest redukcja tła:

- zabezpieczenie detektora przed różnego rodzaju tłem
- efektywne rozróżnianie sygnału i tła





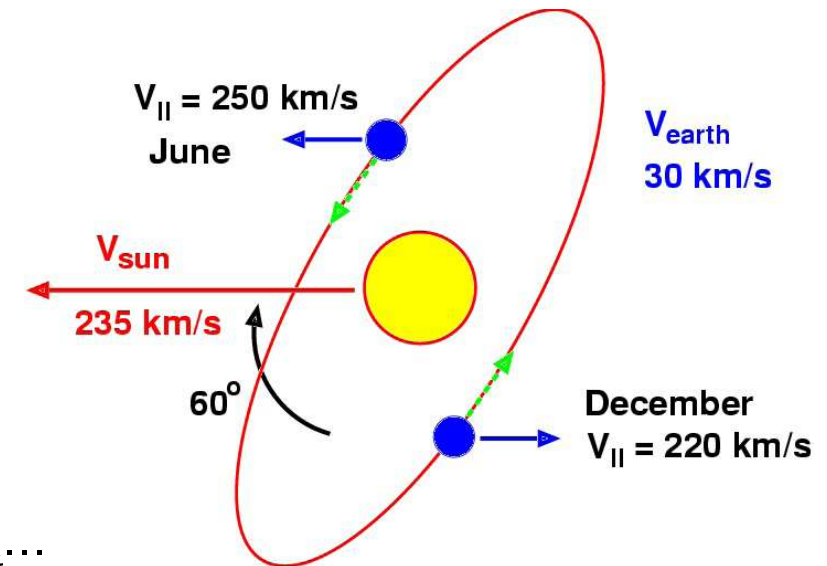
# Ciemna materia

## Detekcja bezpośrednia

Jednym ze sposobów wyodrębnienia sygnału może być poszukiwanie rocznych modulacji jego natężenia, związanych z ruchem Ziemi dookoła Słońca.

Oczekujemy 14% różnic między latem i zimą...

Mimo to, obserwacja małej modulacji bardzo małego sygnału pozostaje wyzwaniem.



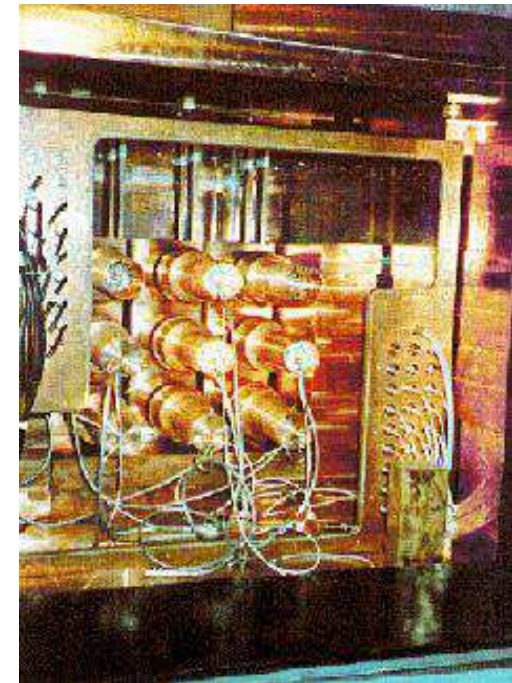
# Ciemna materia

## DAMA/LIBRA

Eksperyment w Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LGS) we Włoszech.

Część aktywna: detektor scyntylacyjny o masie 87kg (faza I) i 233 kg (faza II)

Dodatkowe osłony i liczniki identyfikujące cząstki tła.



Podziemne laboratorium (1.5 km skał)  $\Rightarrow$  tło mionów kosmicznych  $\sim 0.01$  Hz/kg

Tło zdominowane przez radioaktywność skał:  $\sim 1$  Hz/kg

# Ciemna materia

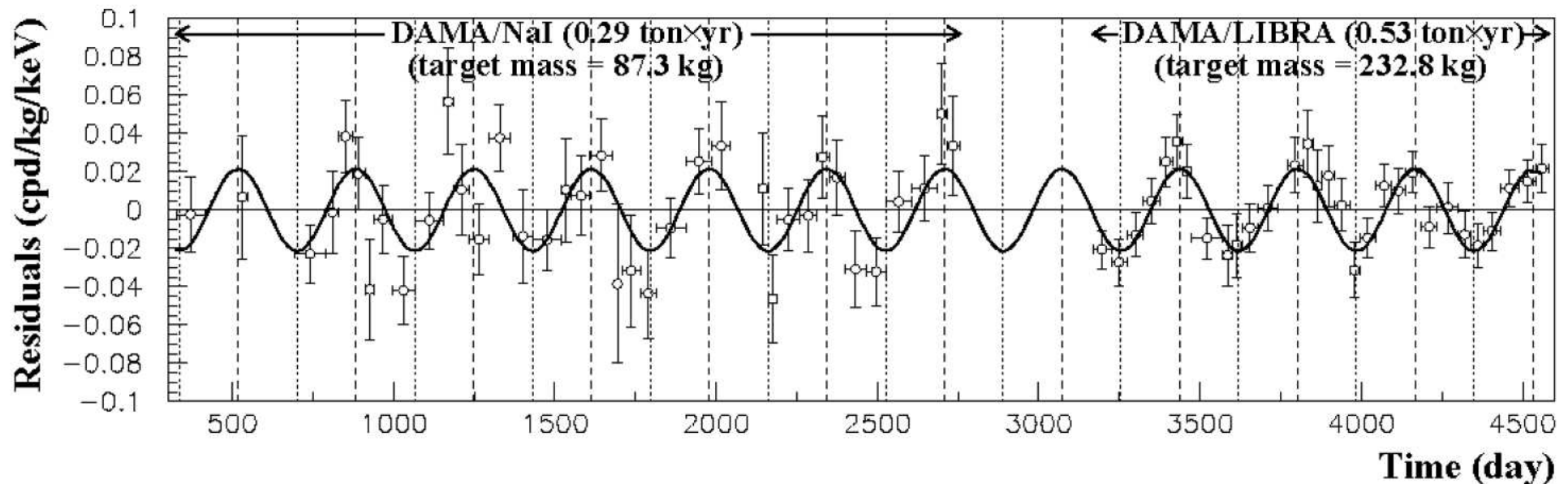
## DAMA/LIBRA

Wyraźny sygnał modulacji rocznej opublikowany po raz pierwszy w 1998.

Potwierdzony po zebraniu większej liczby przypadków i rozbudowie detektora

arXiv:0804.2741v1

2-4 keV

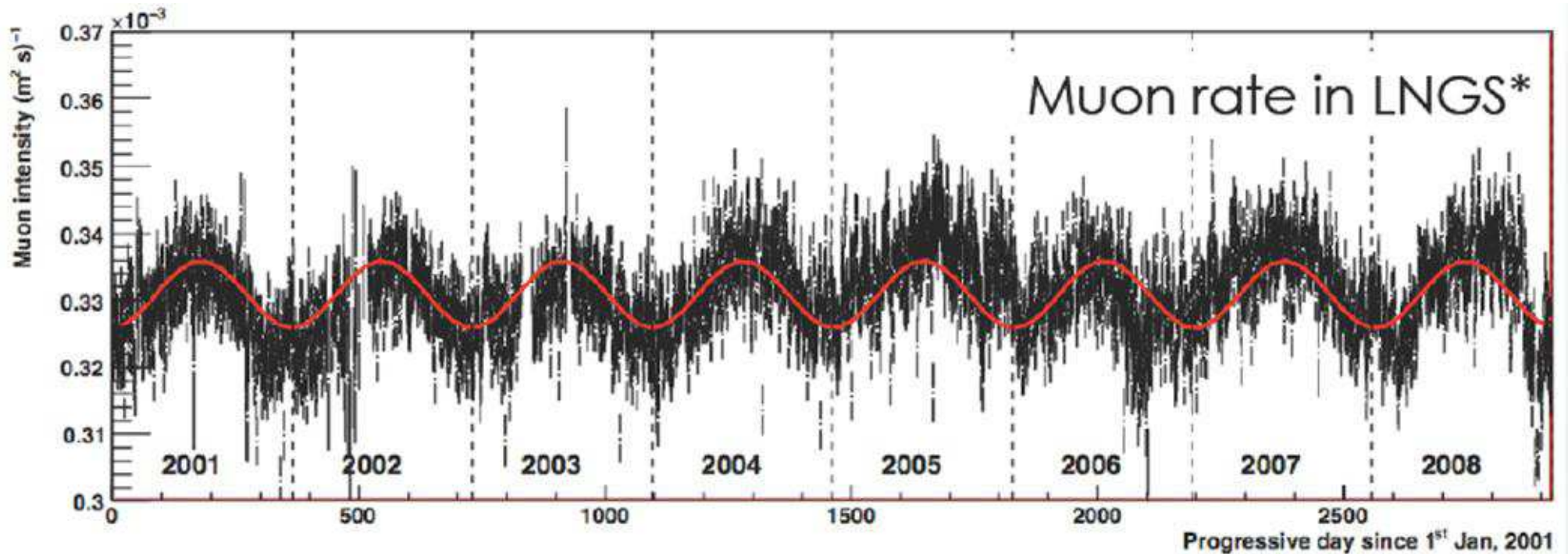


Niestety, nie potwierdzone przez inne eksperymenty...

# Ciemna materia

## DAMA/LIBRA

Co gorsza, podobna modulację obserwujemy w mierzonym strumieniu mionów.



⇒ same modulacje to za mało, żeby potwierdzić sygnał cząstek DM

# Ciemna materia

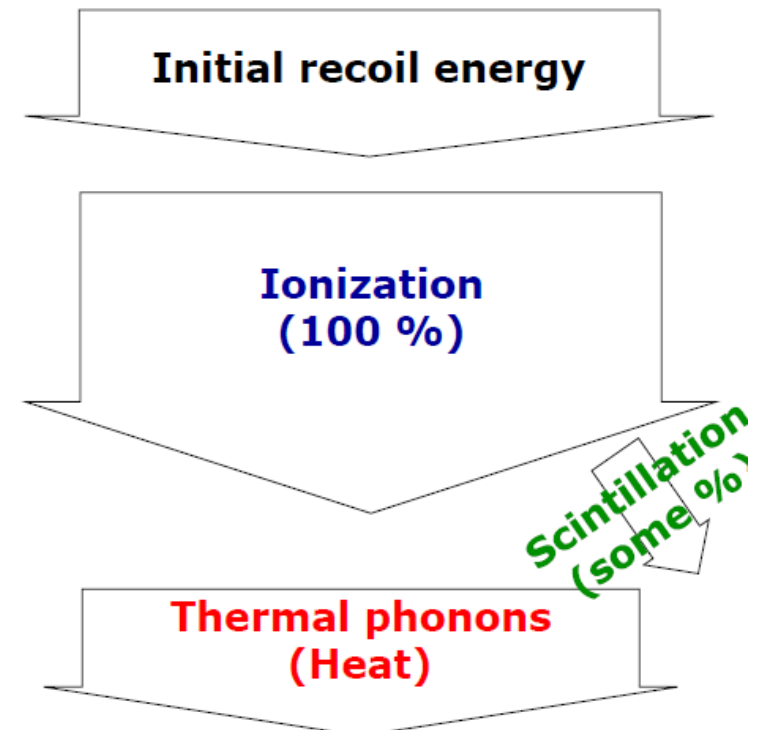
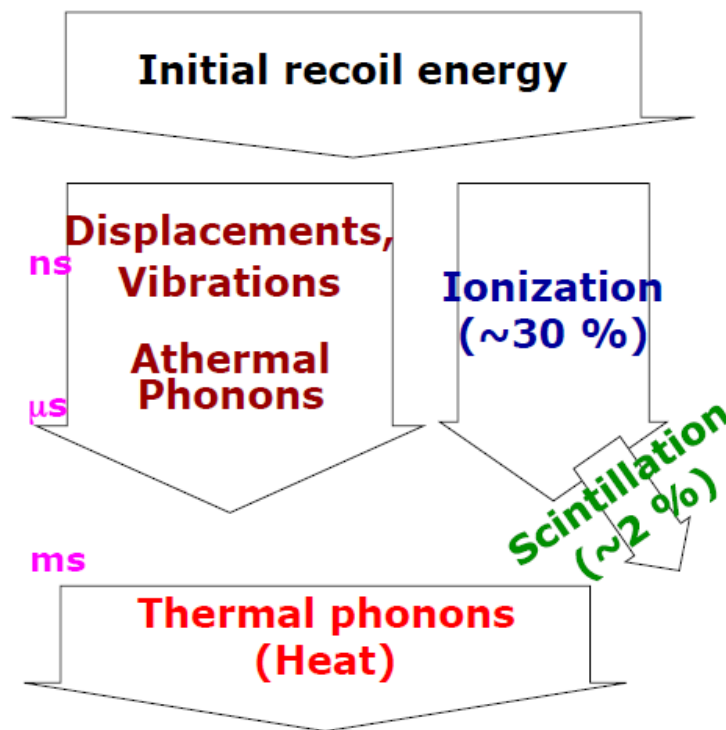
## Kanały detekcji

Główne tło w bezpośredniej detekcji DM: promieniowanie  $\gamma$

⇒ w wyniku oddziaływania energia całkowicie zamieniana na jonizację

Oddziaływanie DM z jądrem

Absorbpcja  $\gamma$



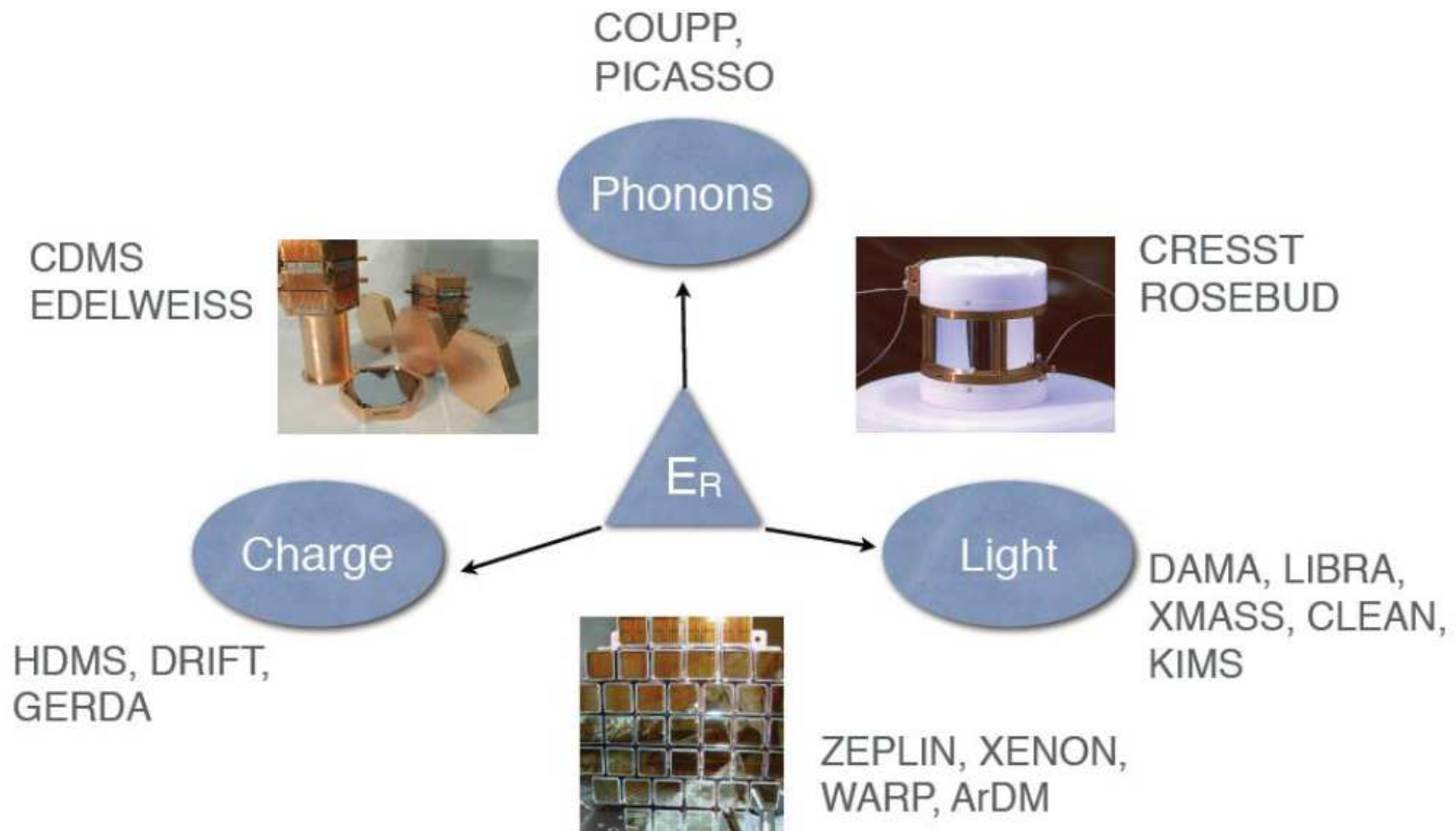
Różny stosunek jonizacji do scyntylacji i wzbudzenia sieci krystalicznej...

# Ciemna materia

## Kanały detekcji

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

Różne eksperymenty przyjęły różną strategię



# Ciemna materia

## Eksperyment CRESST

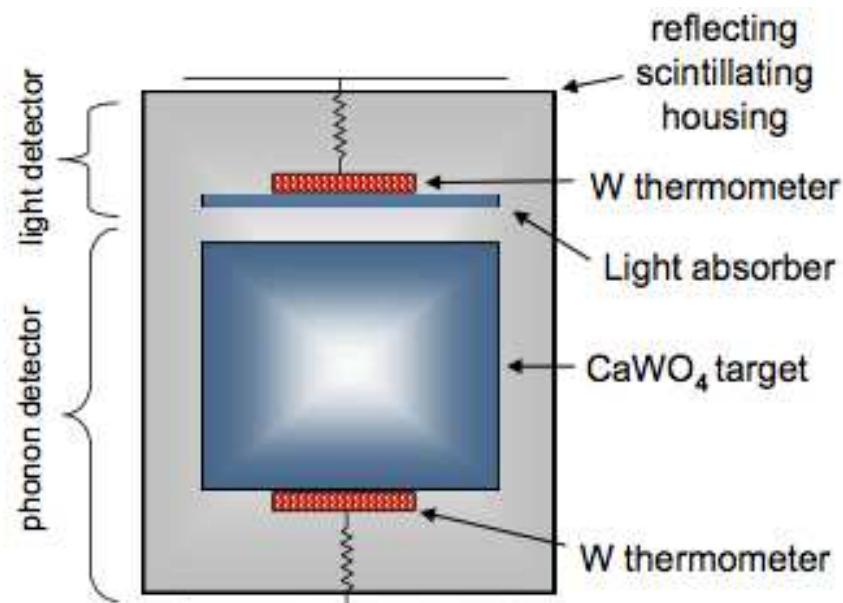
Eksperyment w LNGS (Gran Sasso)

Identyfikacja sygnału przez pomiar scyntylacji i drgań sieci (ciepła)

Materiał aktywny: kryształy 300g  $CaWO_4$  w temperaturze  $\sim 15\text{ mK}$

Zdeponowana energia  $\sim 10\text{ keV}$  oznacza podniesienie temperatury o  $\sim 10\text{ }\mu\text{K}$

Pomiar scyntylacji: także przez zmianę temperatury absorbera



# Ciemna materia

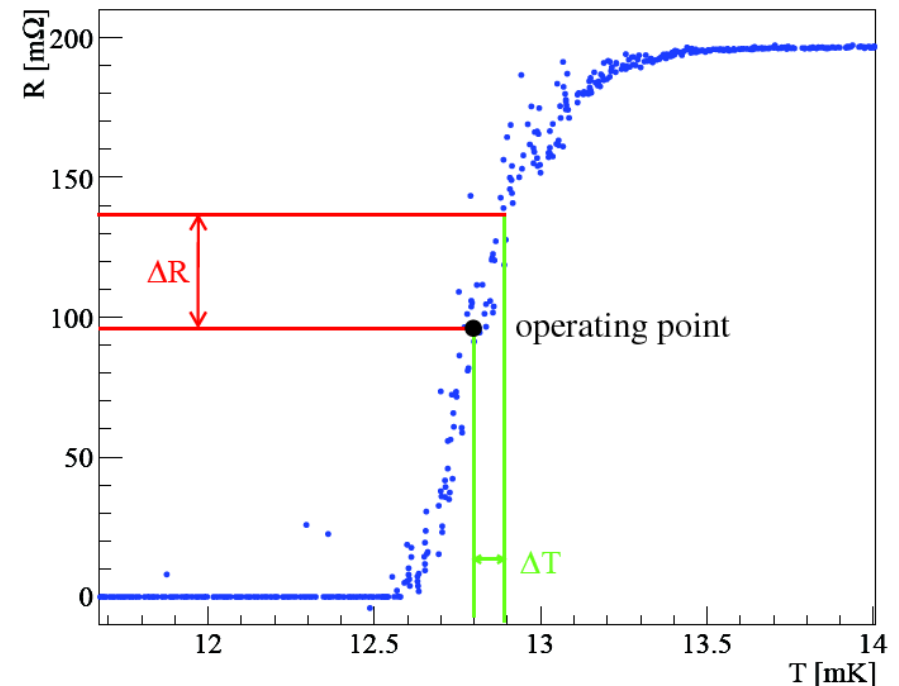
## Eksperyment CRESST

Bardzo dokładny pomiar temperatury możliwy dzięki wykorzystaniu “sensorów progowych” wykonanych z wolframu (Transition Edge Sensor - TES).

Sensor o bardzo małej pojemności cieplnej utrzymywany jest w temperaturze odpowiadającej granicy między nadprzewodnikiem i przewodnikiem, w punkcie o największym  $\frac{dR}{dT}$

Depozyt energii  $\Rightarrow$  zmiana temperatury  $\Rightarrow$  zmiany oporu  $\Rightarrow$  zmiany natężenia prądu

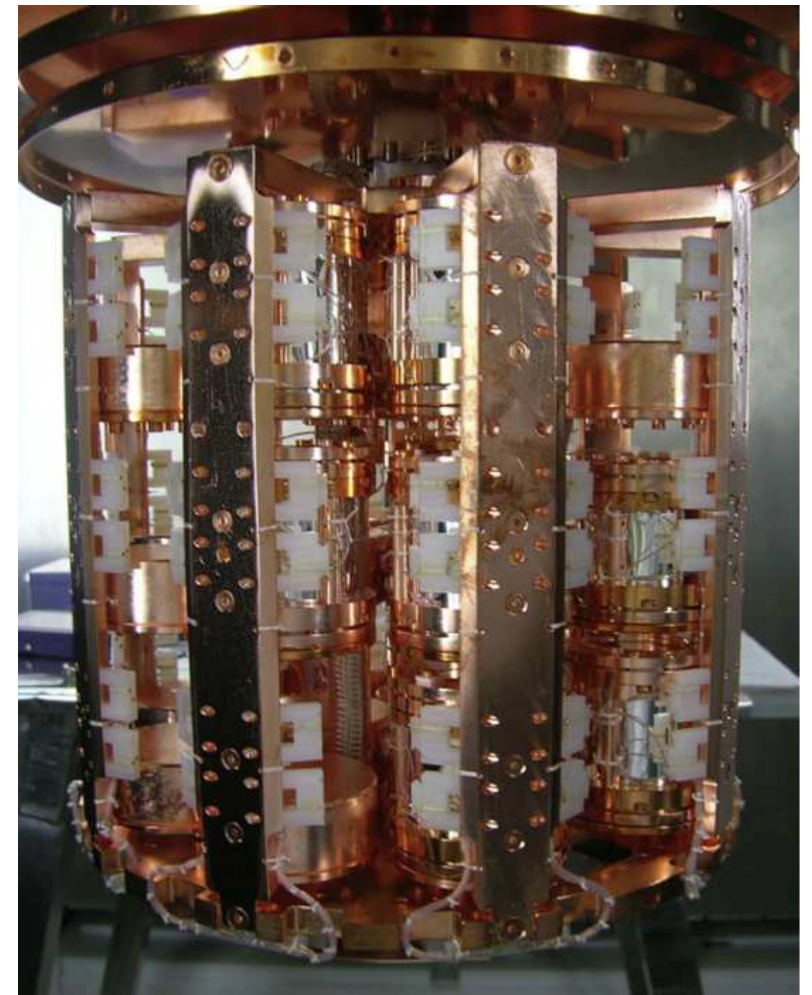
Uzyskany próg czułości: ok. 600 eV (!)





# Ciemna materia

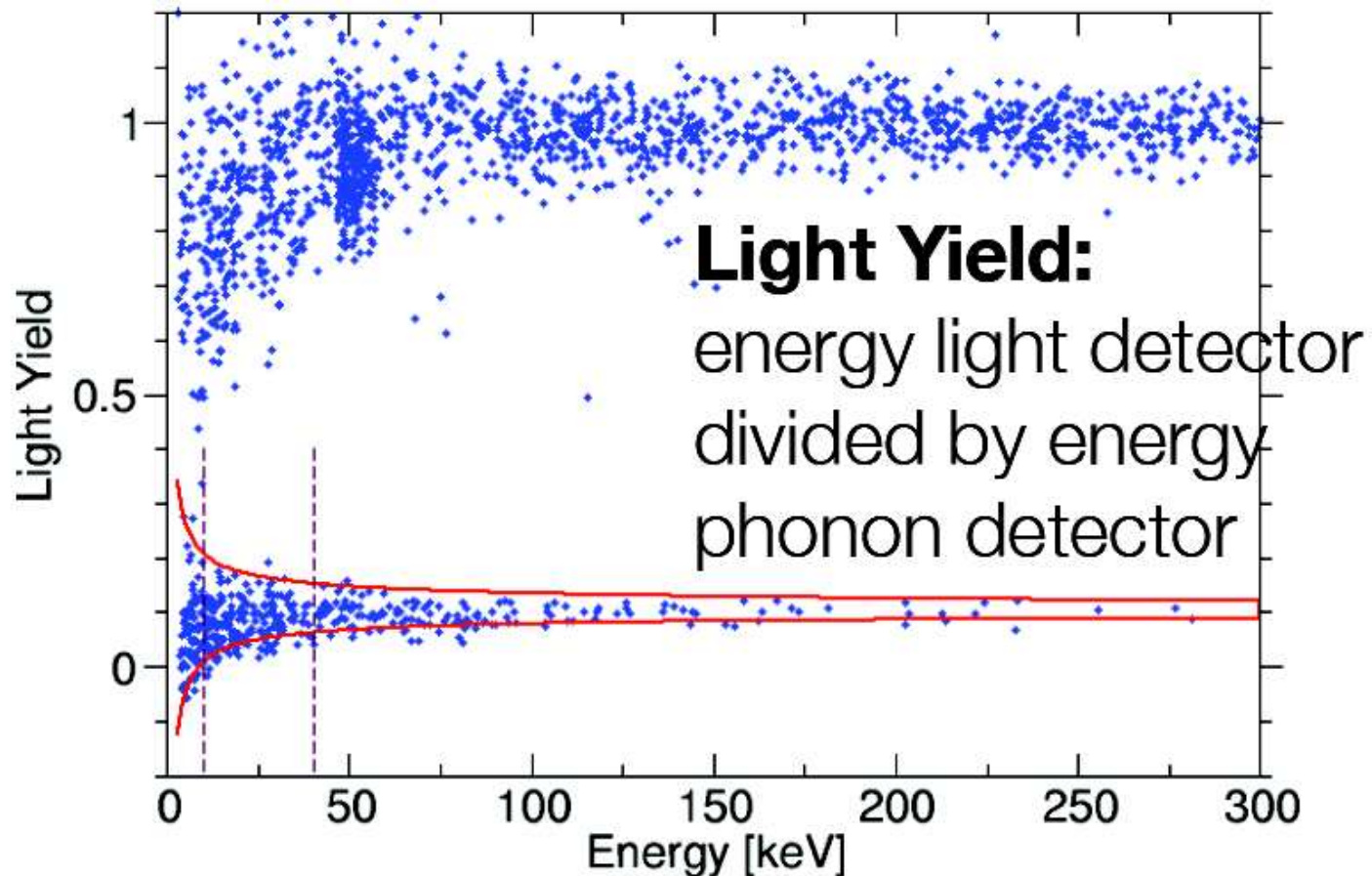
## Eksperyment CRESST



# Ciemna materia

## Eksperyment CRESST

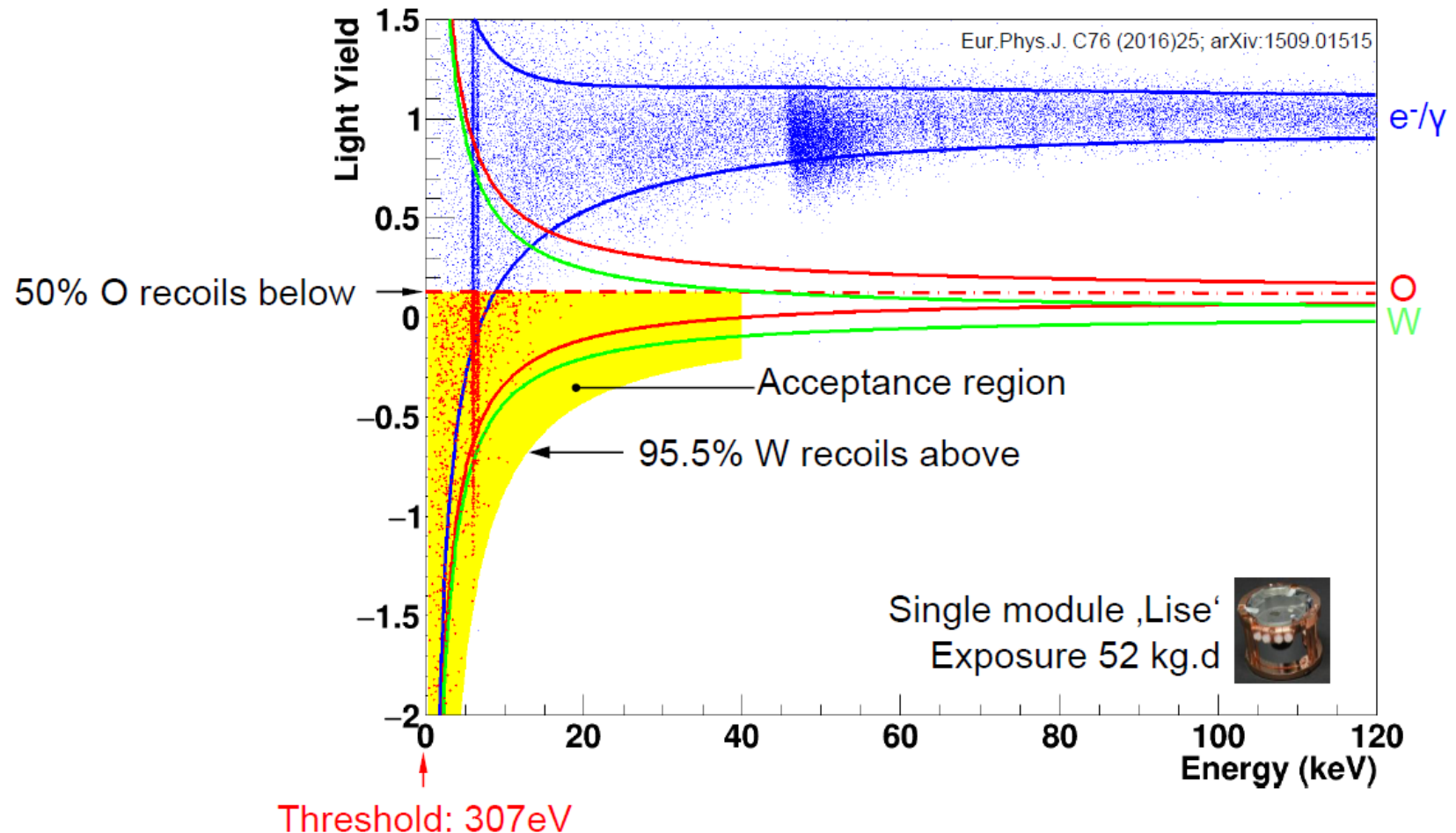
Stosunek scyntylacji do depozytu energii (zmiany temperatury) pozwala rozróżnić mechanizmy strat energii. [Kalibracja](#) przy użyciu źródła neutronów:



# Ciemna materia

## Eksperyment CRESST

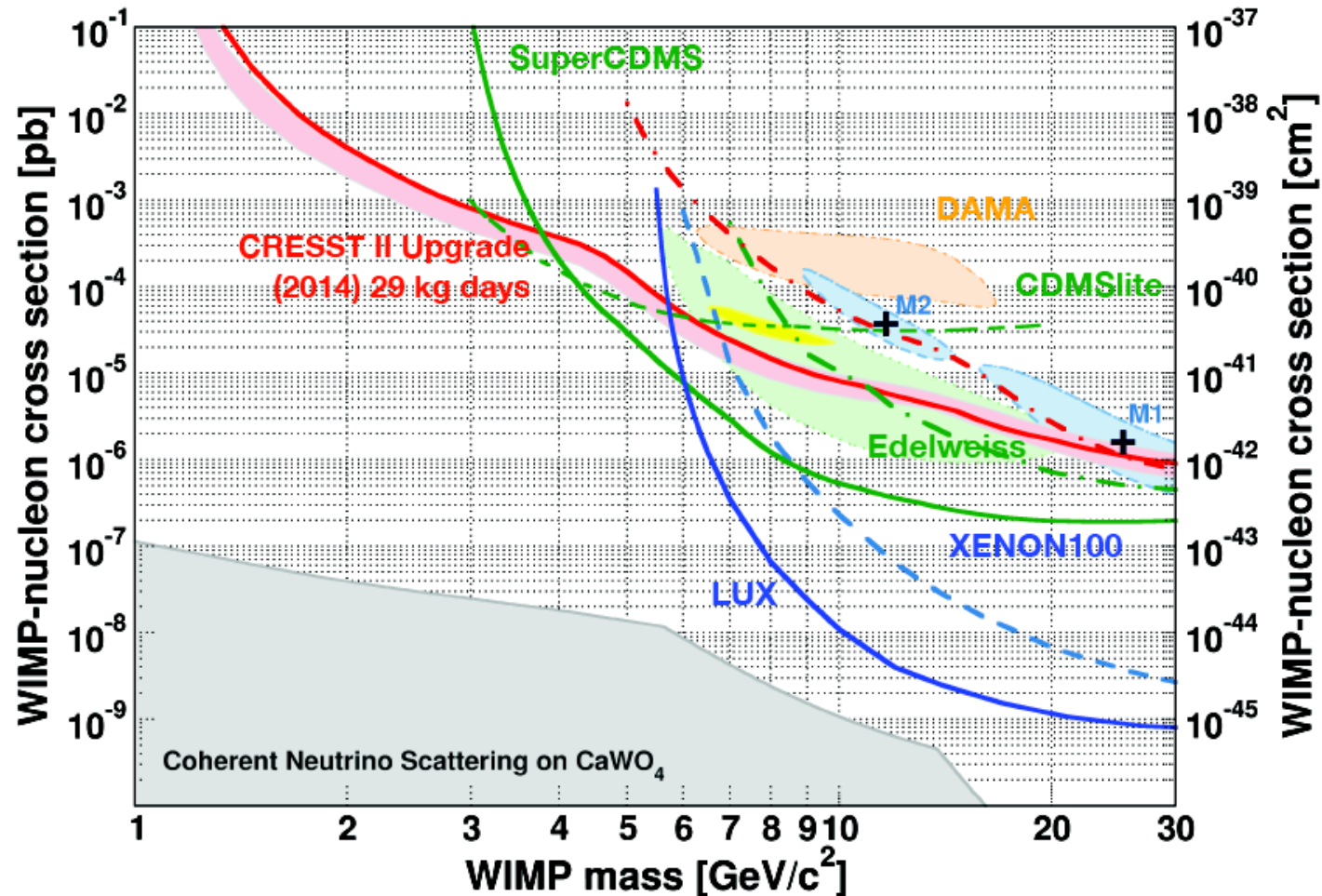
Wyniki pomiarów 2013-2015 nie potwierdziły nadmiaru przypadków obserwowanego w pierwszych danych (2009-2011)



# Ciemna materia

## Eksperyment CRESST

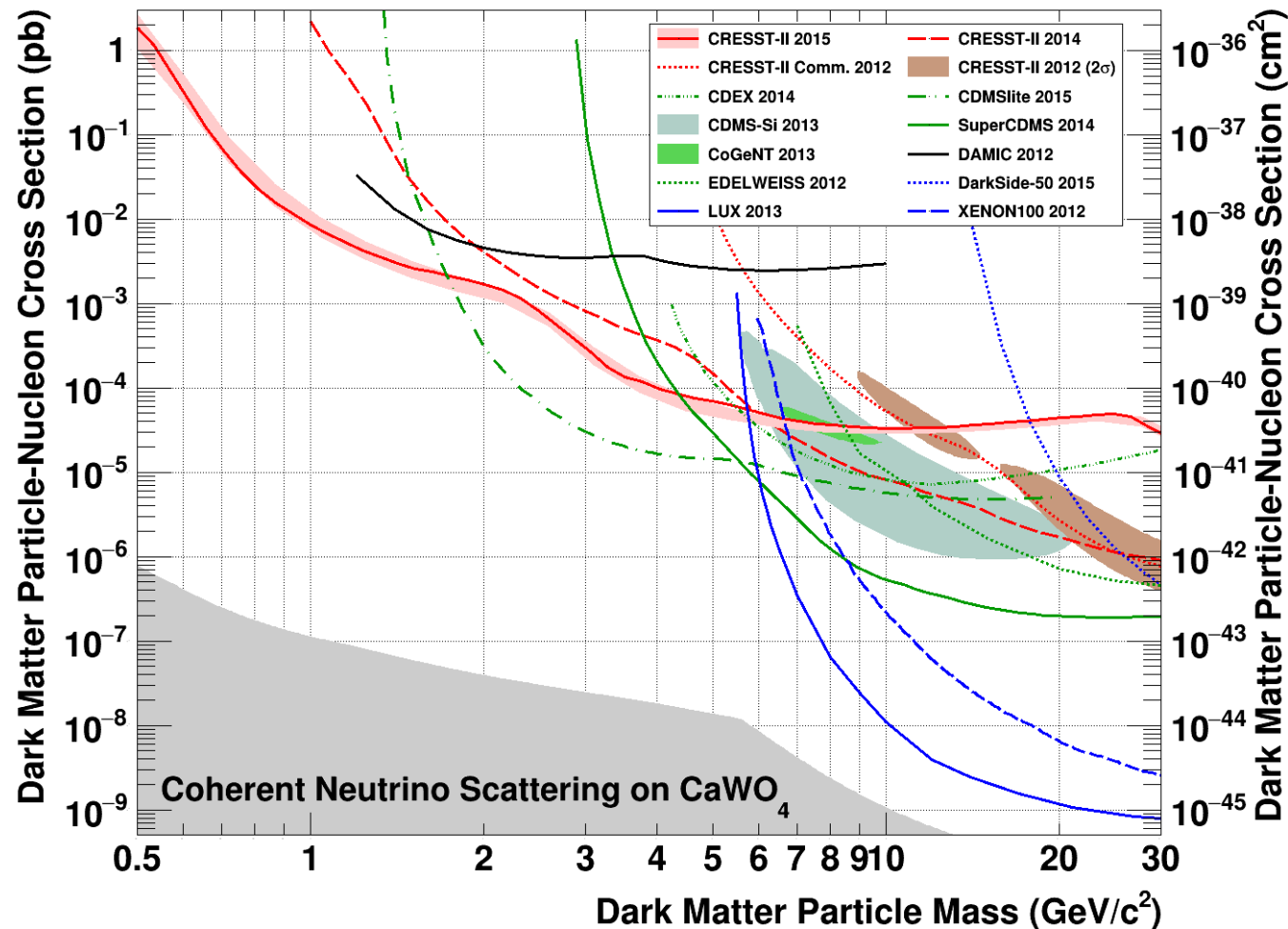
Uzyskane ograniczenia na przekrój czynny w funkcji masy cząstek DM



# Ciemna materia

## Eksperyment CRESST

2015: poprawione ograniczenia w obszarze niskich mas dzięki lepszemu zrozumieniu tła

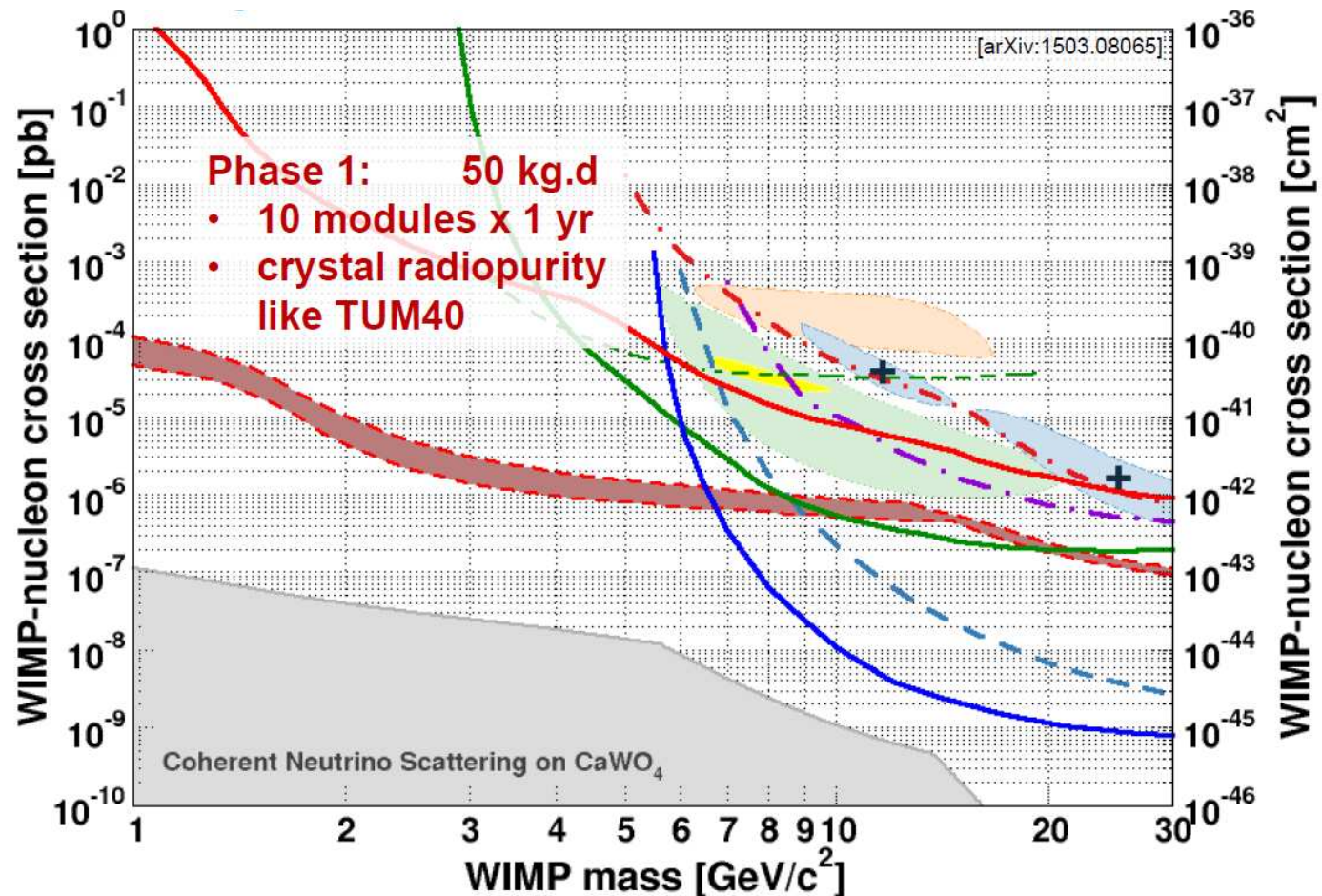


# Ciemna materia

## Eksperyment CRESST

Obecnie trwa przebudowa układu doświadczalnego:

zmniejszenie rozmiaru krzysztalów  $\Rightarrow$  zmniejszenie poziomu tła

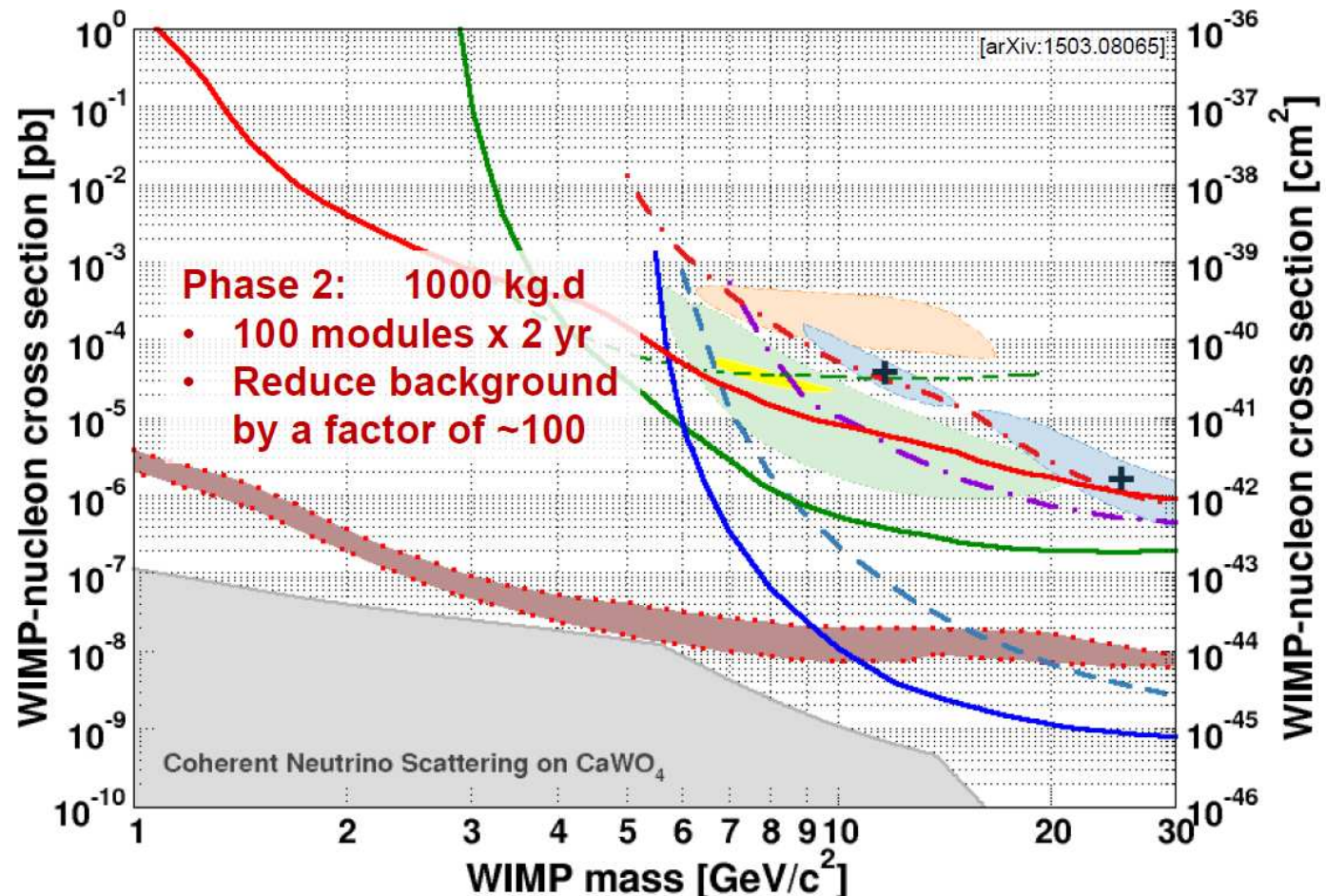


# Ciemna materia

## Eksperyment CRESST

Obecnie trwa przebudowa układu doświadczalnego:

zmniejszenie rozmiaru krzysztalów  $\Rightarrow$  zmniejszenie poziomu tła



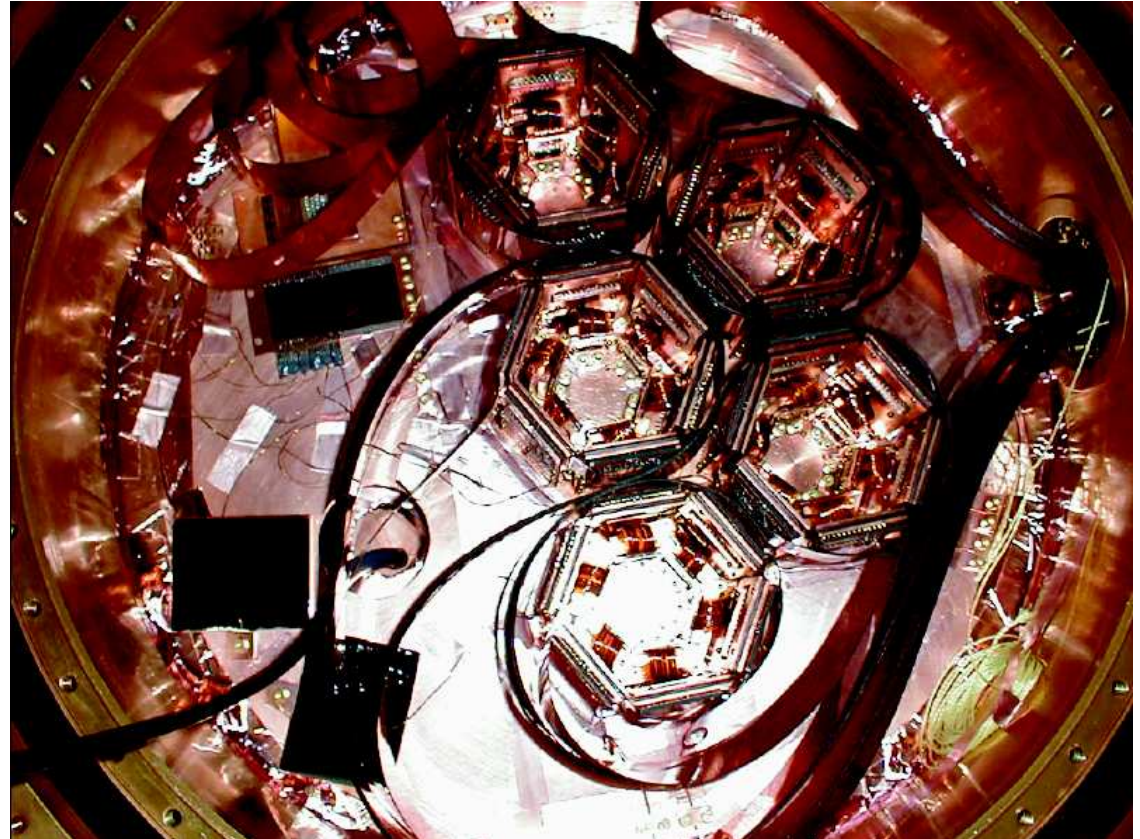
# Ciemna materia

## Eksperyment SuperCDMS

Eksperyment w podziemnym laboratorium Soudan (USA)

Identyfikacja sygnału przez pomiar jonizacji i drgań sieci (ciepła)

Materiał aktywny: kryształy germanu, 15 kryształów, łącznie 9 kg



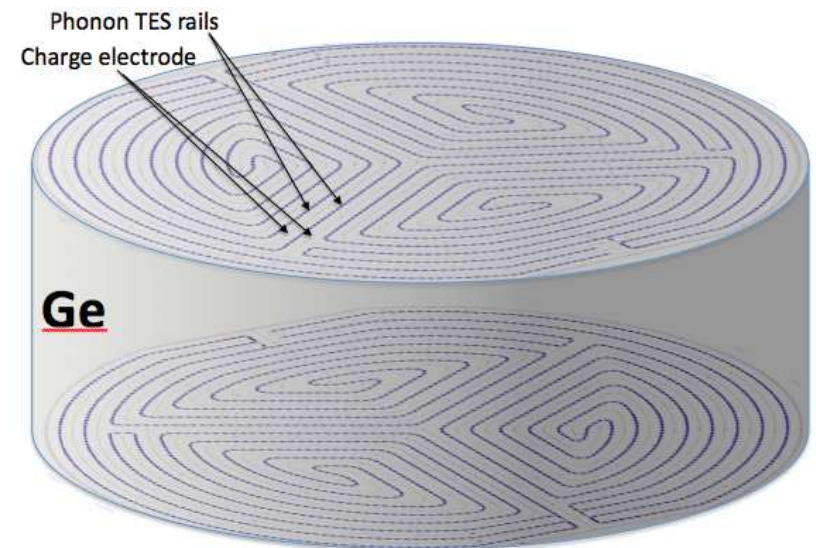


# Ciemna materia

## Eksperyment SuperCDMS

Pomiar zmian temperatury: sensory progowe TES (podobnie jak w CRESST)

Pomiar jonizacji: elektrody. Odczyt z obu stron kryształu !



# Ciemna materia

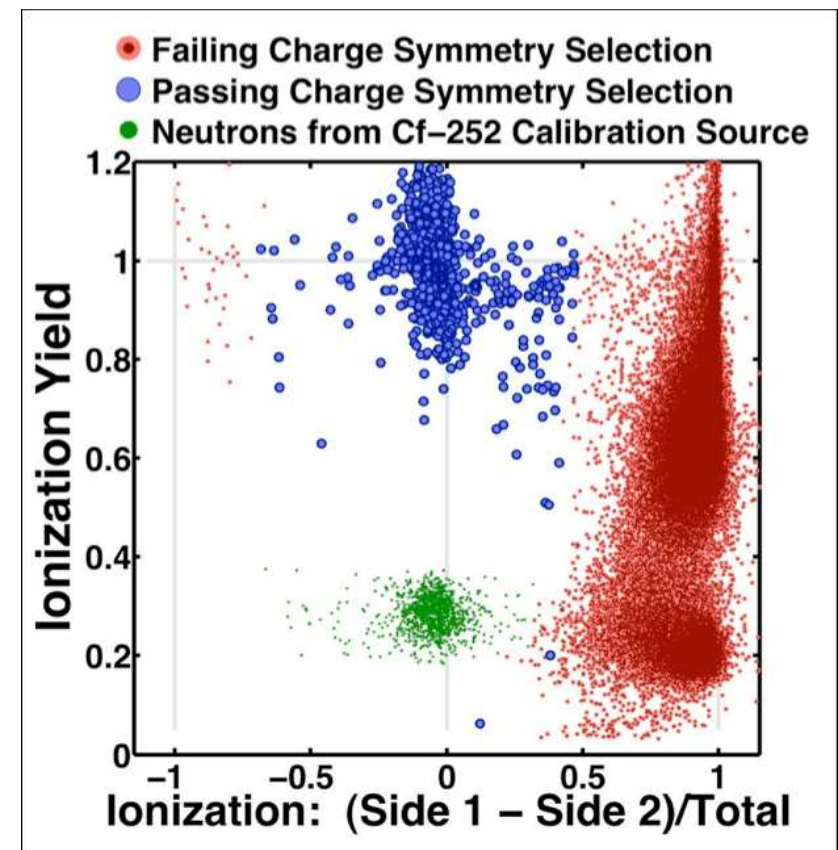
## Eksperyment SuperCDMS

Wewnątrz kryształu wytwarzane jest pole elektryczne o takiej konfiguracji, że z sygnały blisko powierzchni kryształu dają sygnał głównie z jednej strony.

Wyniki testów kalibracyjnych z wykorzystaniem źródła  $\gamma$  i źródła neutronów

Przypadki “powierzchniowe” mogą dawać mniejszą jonizację z powodu “ucieczki” cząstki z kryształu.

Porównanie sygnału na obu stronach skutecznie eliminuje to tło.



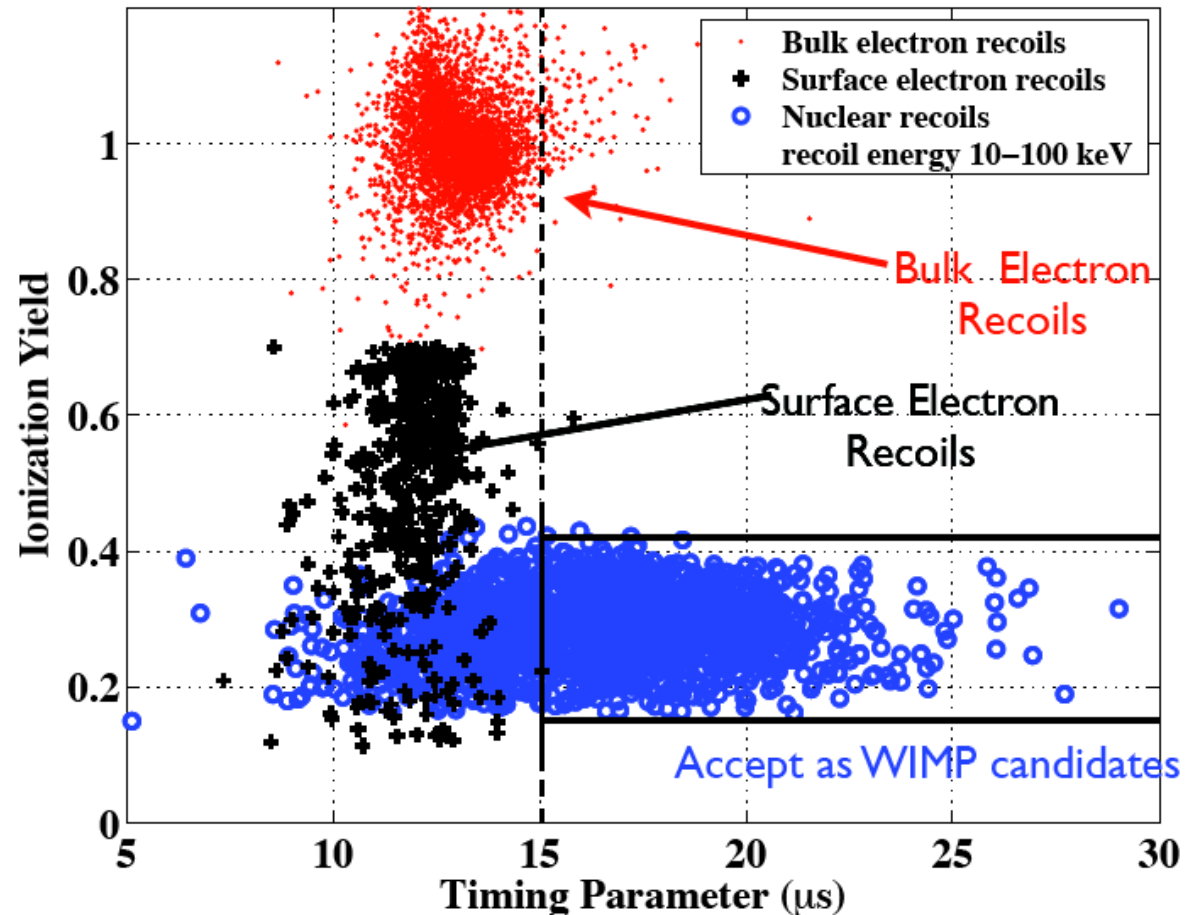
# Ciemna materia

## Eksperyment SuperCDMS

Przypadki rozproszenia na jądrze prowadzą też do innego rozkładu sygnału temperaturowego w czasie niż dla oddziaływania fotonów tła z elektronami.

Wyniki testów kalibracyjnych z wykorzystaniem źródła  $\gamma$  i źródła neutronów

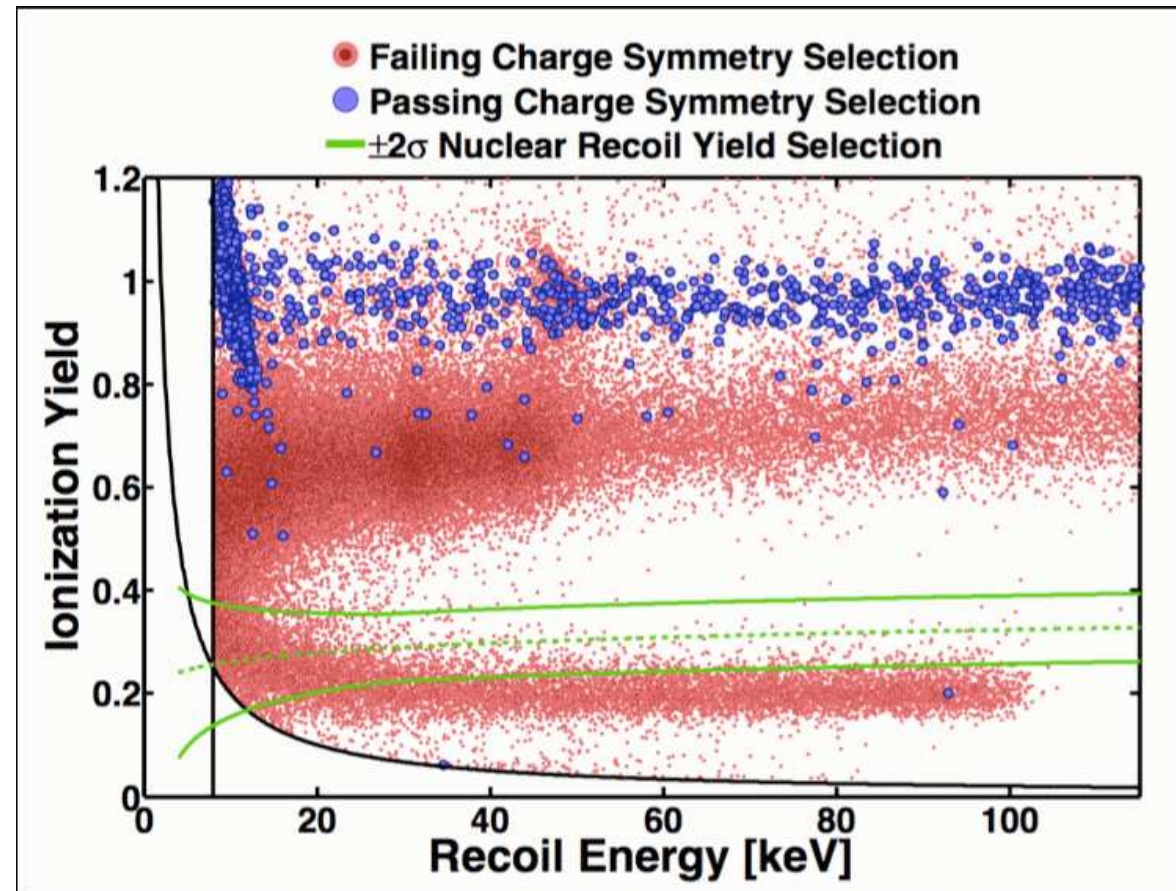
Cięcie na czasie wykorzystywane w pierwszej fazie eksperymentu do eliminacji przypadków powierzchniowych.



# Ciemna materia

## Eksperyment SuperCDMS

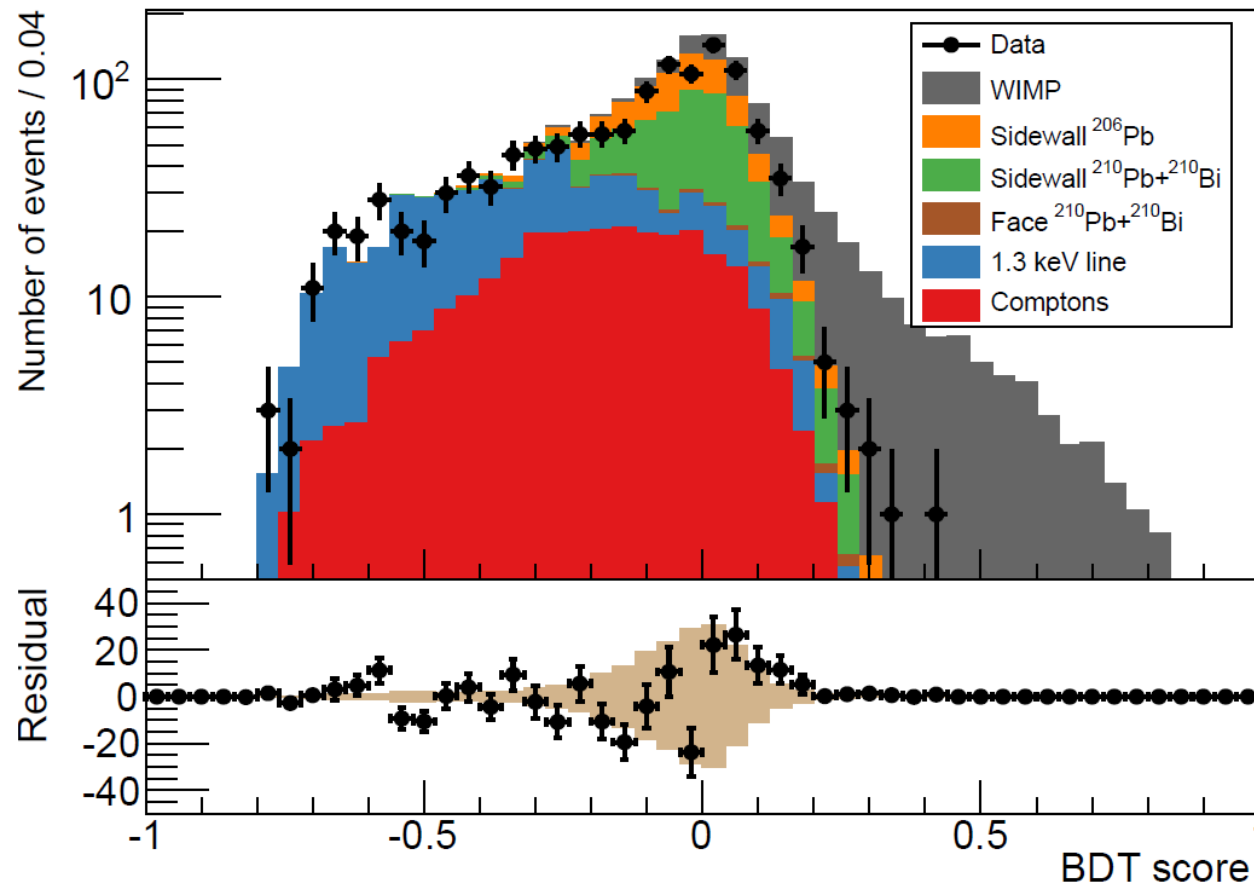
Korelacja różnych sygnałów pozwala na redukcję tła o czynnik  $\sim 3 \cdot 10^{-5}$



# Ciemna materia

## Eksperyment SuperCDMS

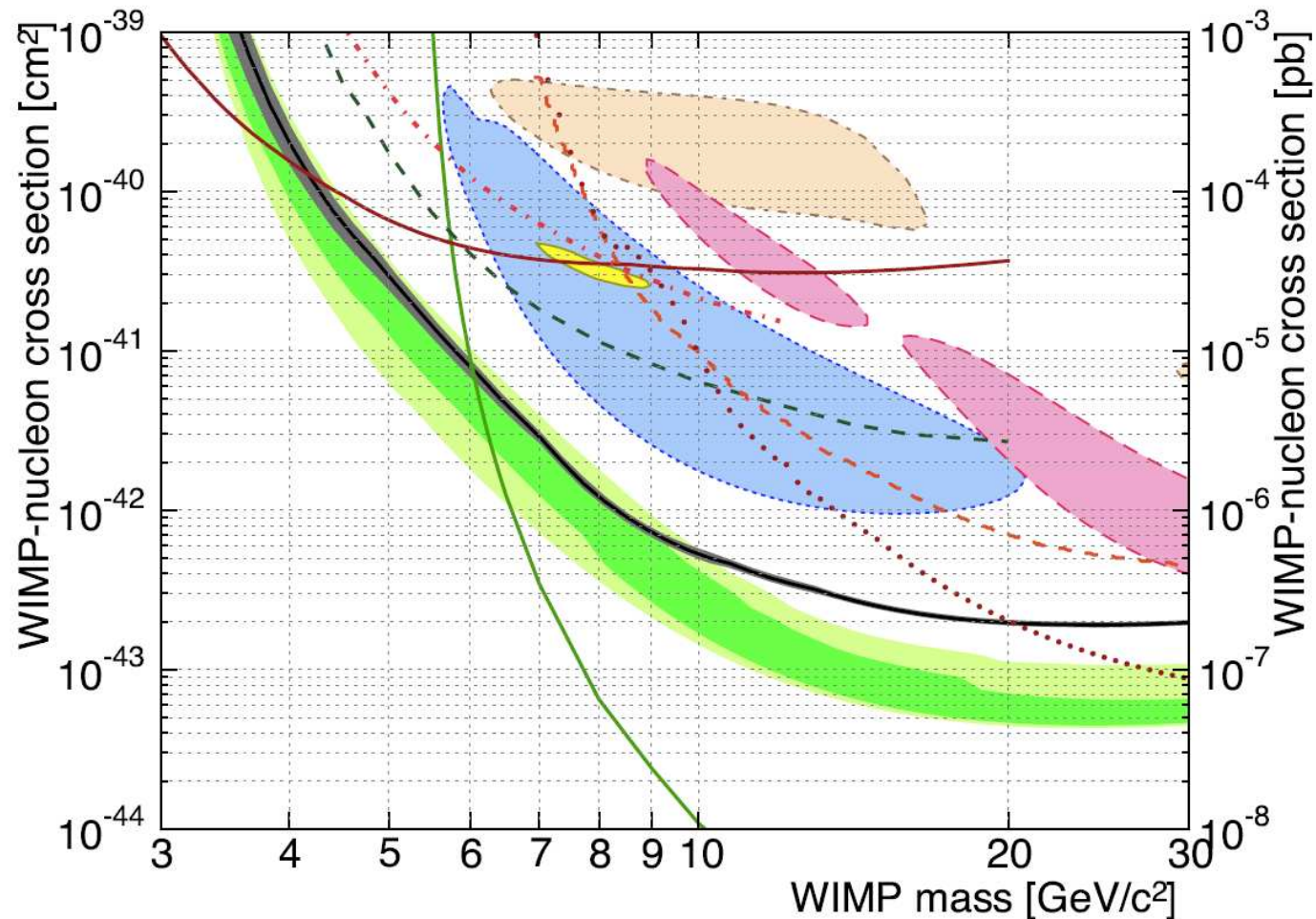
Ostateczna identyfikacja przypadków odbywa się z wykorzystaniem metod analizy wielu zmiennych (BDT - Boosted Decision Tree). Wyniki z marca 2014 (9 miesięcy danych):



# Ciemna materia

## Eksperyment SuperCDMS

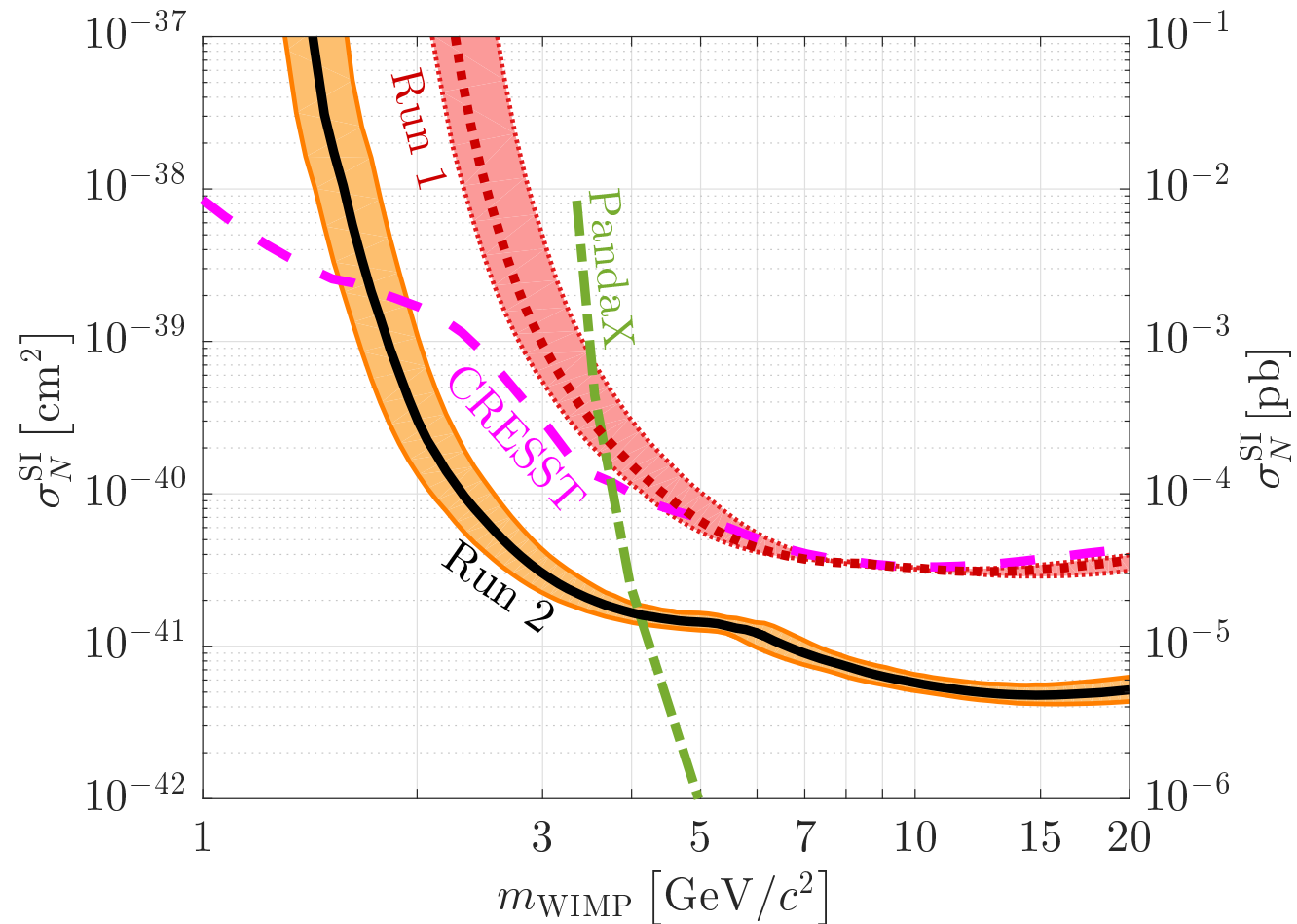
Uzyskane ograniczenia na przekrój czynny w funkcji masy cząstek DM



# Ciemna materia

## Eksperyment CDMSlite

Nowe ograniczenia w obszarze niskich mas (dane zebrane przy wyższym wzmacnieniu)



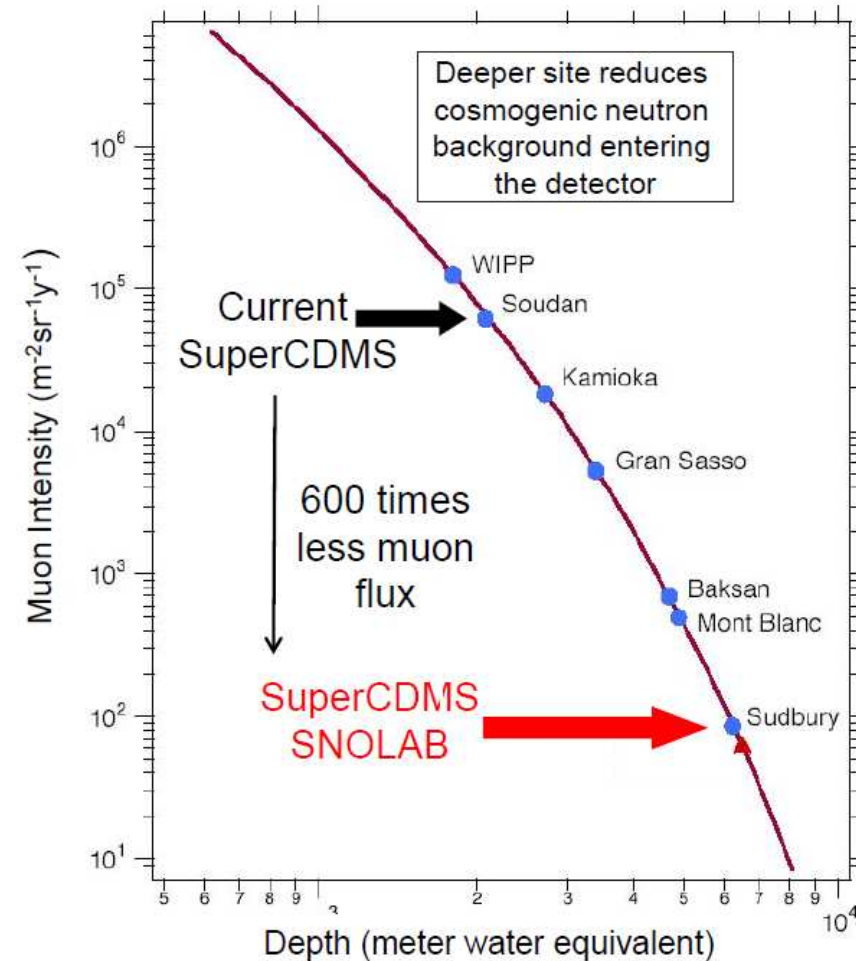
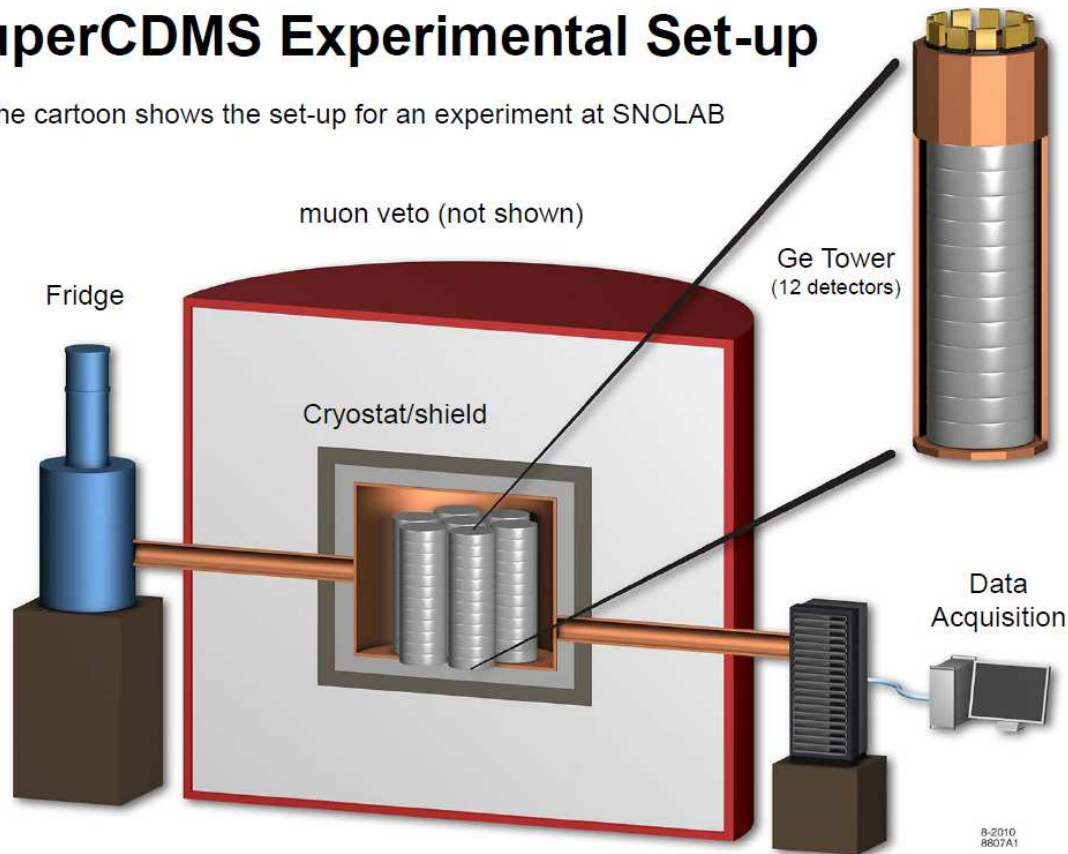
# Ciemna materia

## Eksperyment SuperCDMS

Plany modernizacji i przeniesienia do głębszej kopalni - redukcja tła

### SuperCDMS Experimental Set-up

the cartoon shows the set-up for an experiment at SNOLAB





# Ciemna materia

## Eksperyment SuperCDMS

Dzięki redukcji tła możliwe będzie znaczące poprawienie ograniczeń

