

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
- pomiary odległych supernowych
- soczewkowanie grawitacyjne
- Gromada Pocisk (Bullet Cluster)

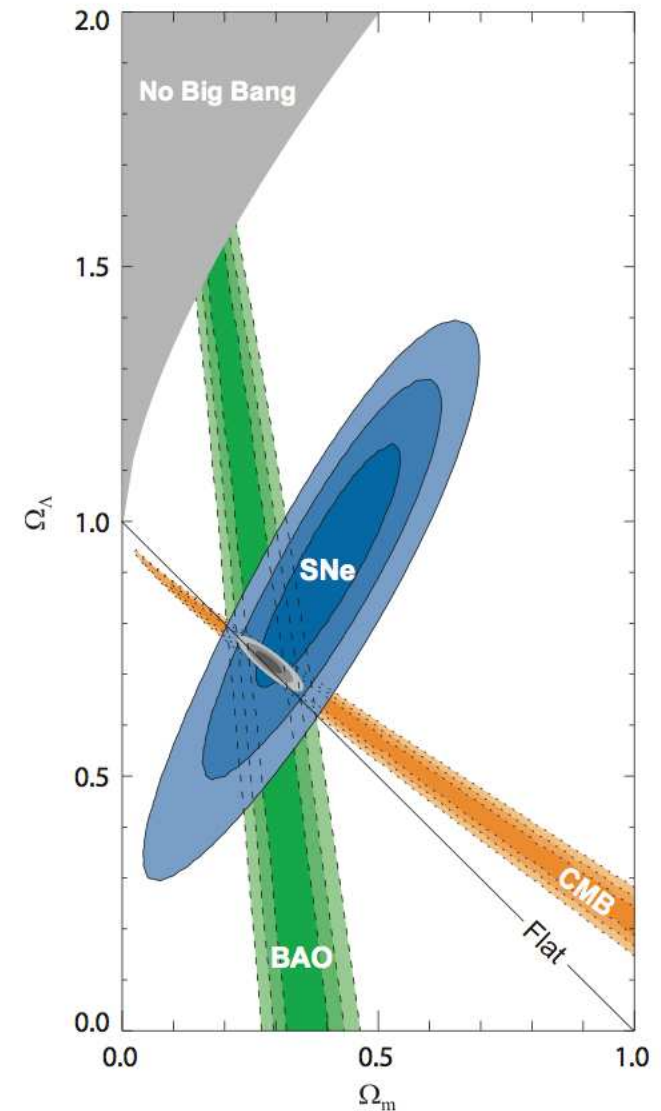
Większość z nich zakłada model ewolucji Wszechświata Λ CDM (!).

Ciemna materia

Przesłanki eksperymentalne

Najsilniejsze ograniczenia na parametry kosmologiczne uzyskujemy uwzględniając:

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

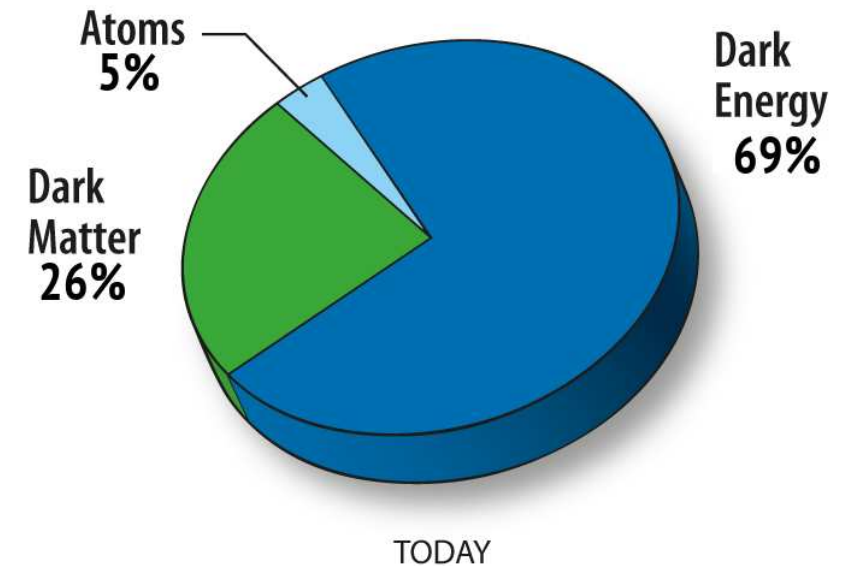


Ciemna materia

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 (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)

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**.

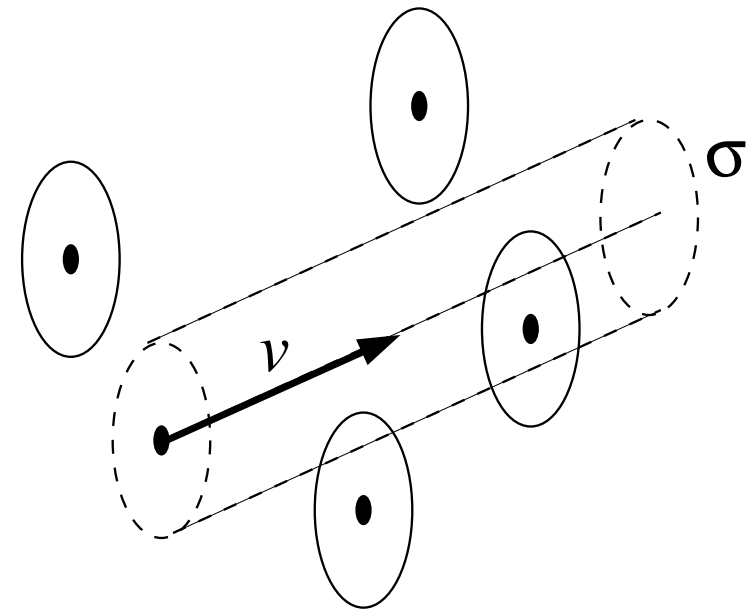
Średnia liczba oddziaływań cząstki poruszającej się w ośrodku o gęstości (liczbę cząstek na jednostkę objętości) ρ z prędkością v :

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

gdzie σ - **przekrój czynny** na oddziaływanie z cząstkami ośrodka.

Średni czas pomiędzy kolejnymi zderzeniami:

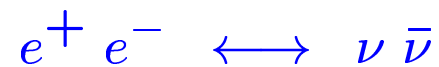
$$\tau = \frac{\Delta t}{N} = \frac{1}{\rho v \sigma}$$



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 σ , 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:

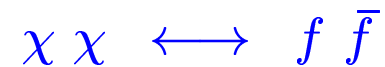
$$N_{\nu_i} : N_{\gamma} \approx 3 : 11 \quad T_{\nu} \sim 2K$$

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

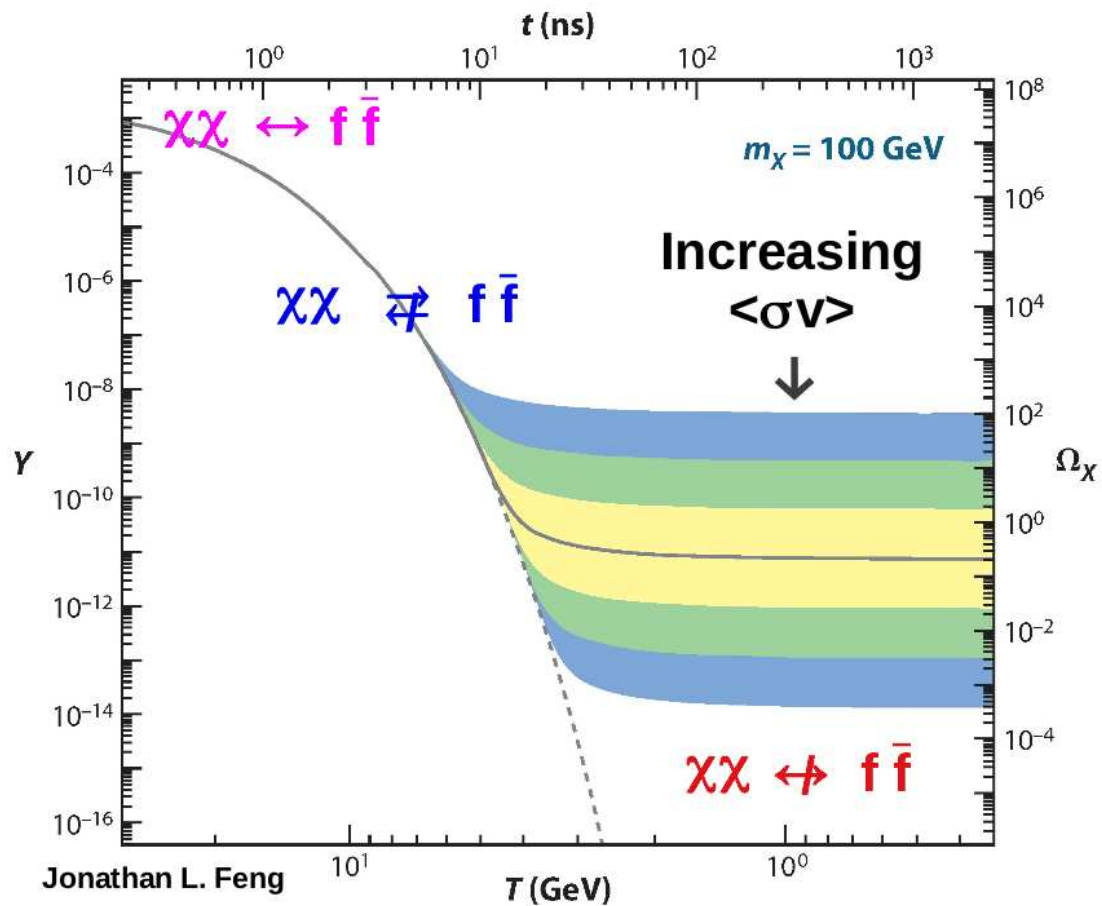
$$\frac{d\rho_\chi}{dt} = -3H \rho_\chi - \langle \sigma_{an} v \rangle \rho_\chi^2 + \langle \sigma_{pr} v \rangle \rho_f^2$$

Można wyróżnić 3 etapy ewolucji gęstości ρ_χ :

- 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..

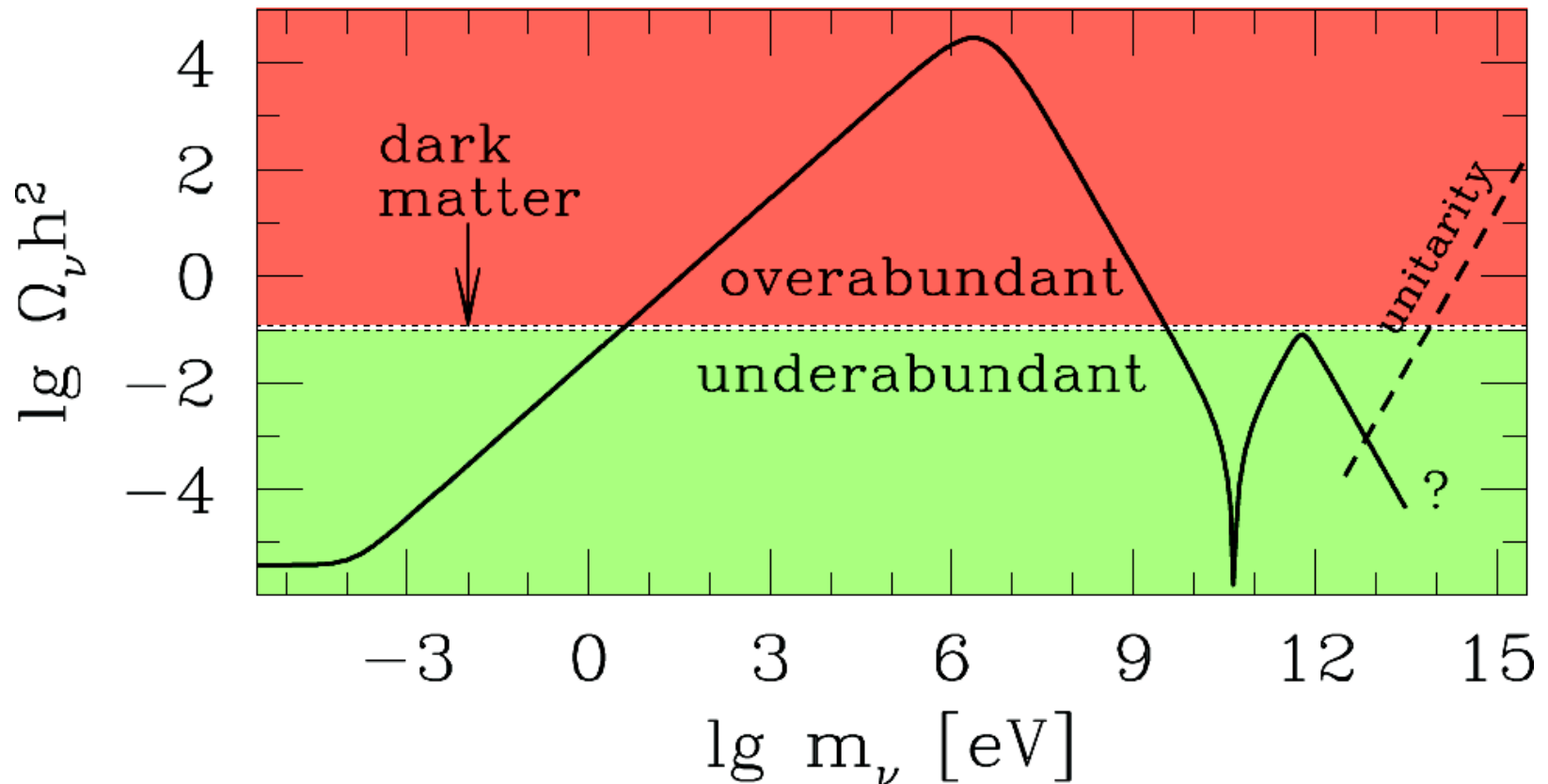
Można oszacować:

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

Ciemna materia

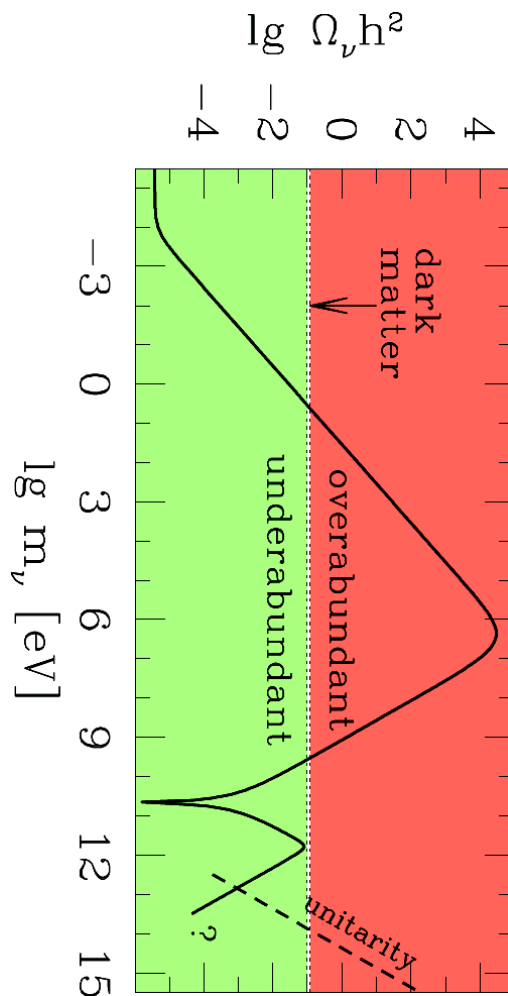
Ciężkie neutrino

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)
- inne WIMP - Weekly Interacting Massive Particle

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

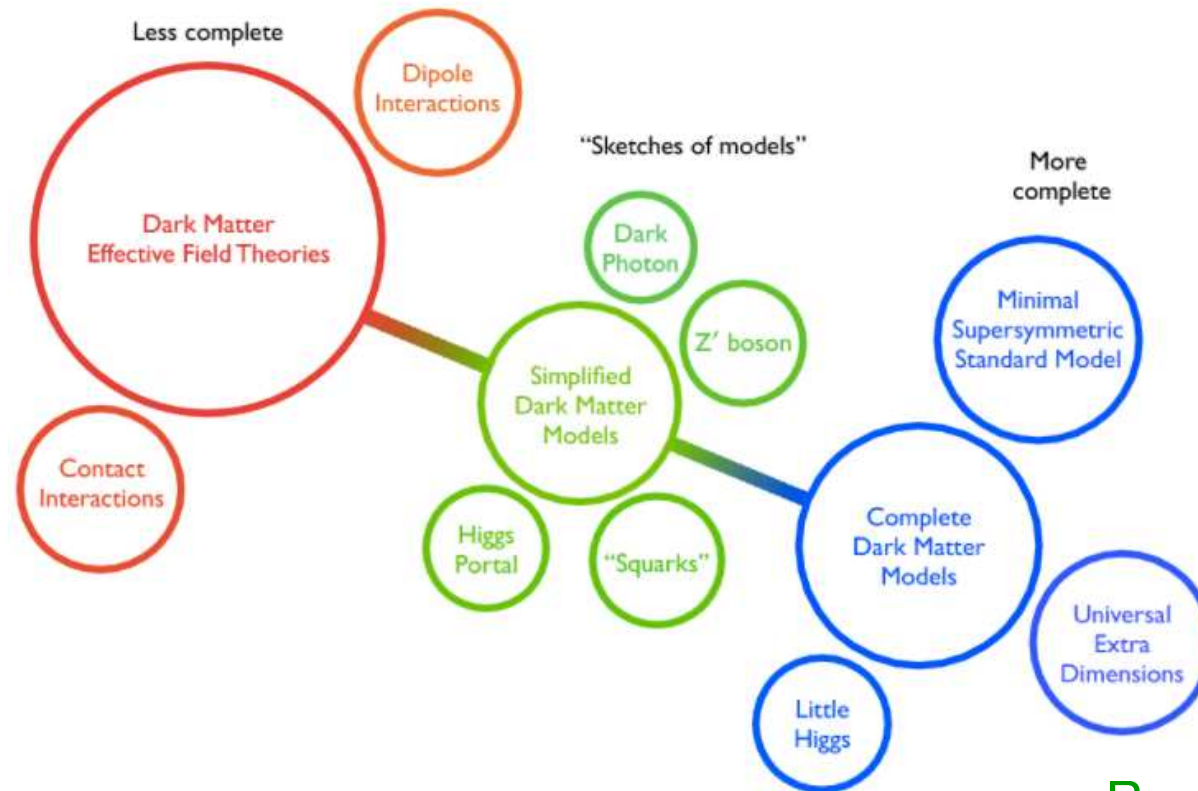
Choć są też modele/kandydaci, których wkład nie wynika z “zamrożenia”:

- axiony, solitony, przewidywania modelu strun...

Ciemna materia

Kandydaci

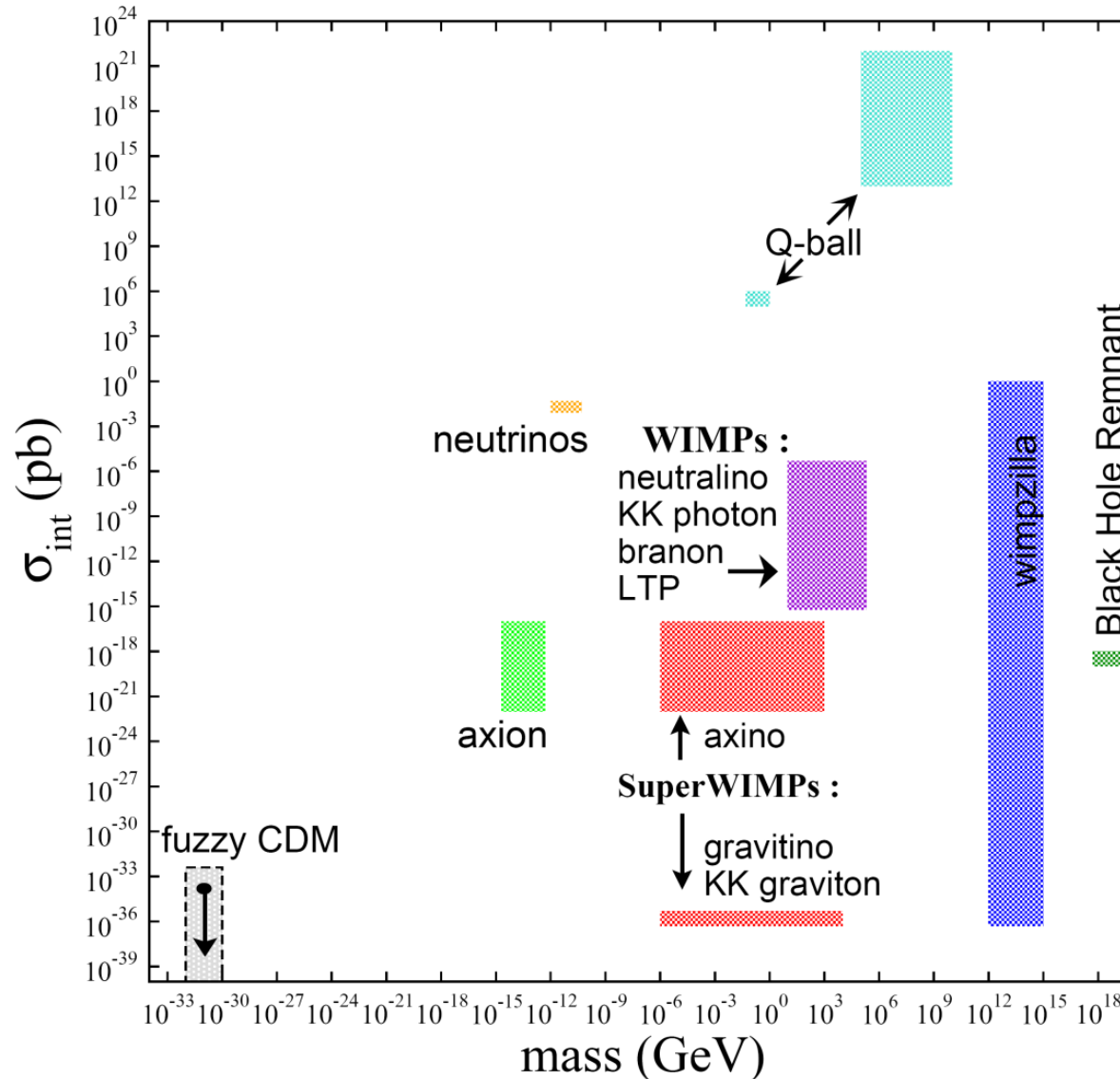
Bardzo wiele różnych scenariuszy o różnym stopniu “dopracowania”.
Od pełnych, szczegółowych teorii do bardzo ogólnych opisów...



Rysunek: Tim M.P. Tait

Ciemna materia

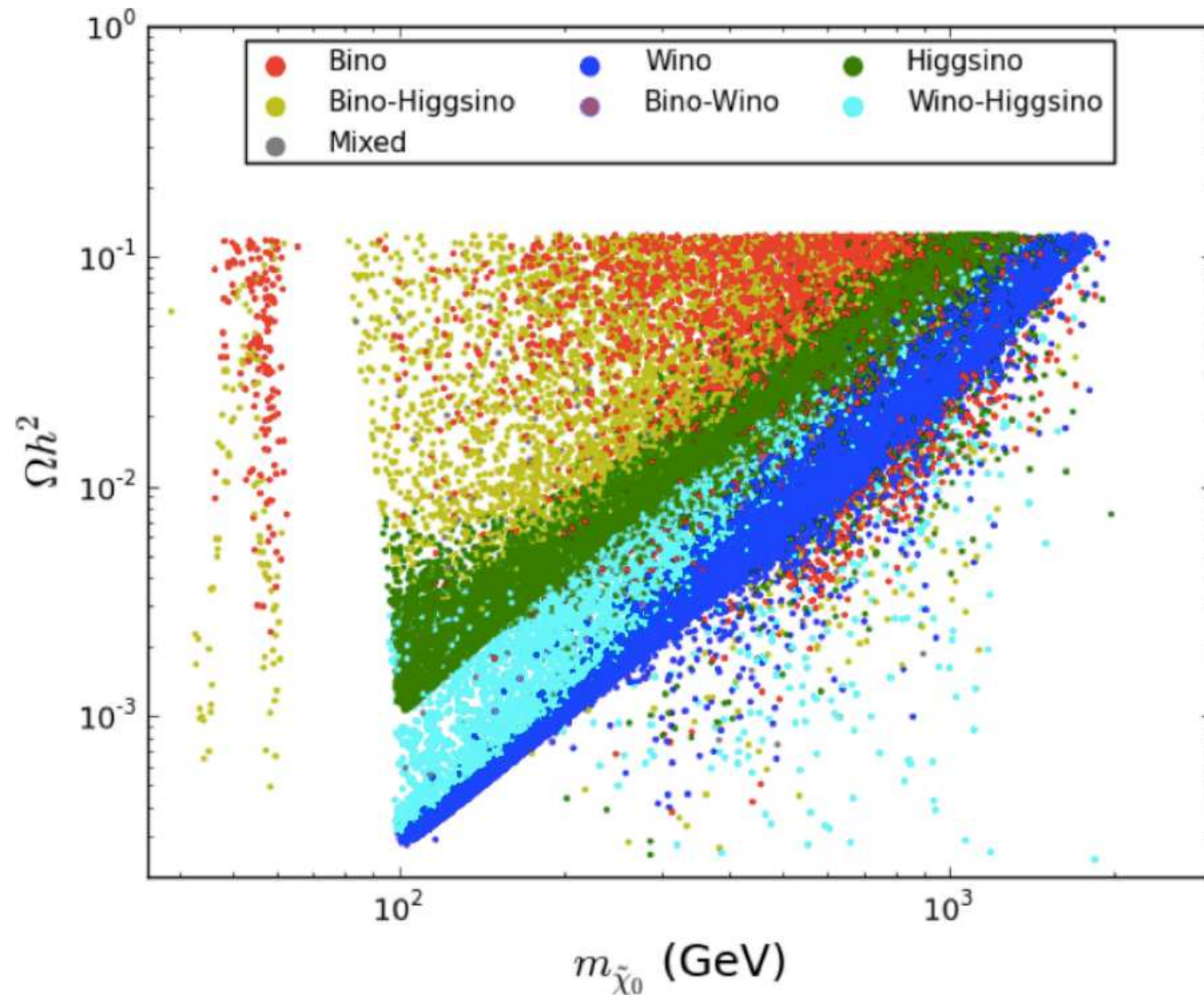
Kandydaci



Ciemna materia

Kandydaci

SUSY
models

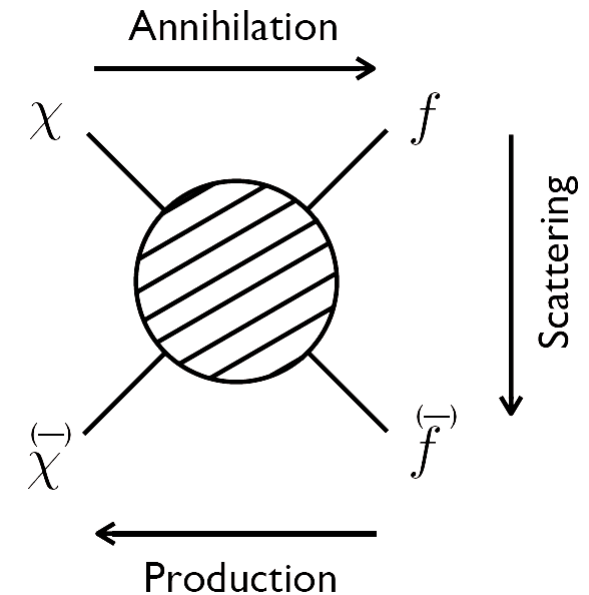


Ciemna materia

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



FERMI-GLAST



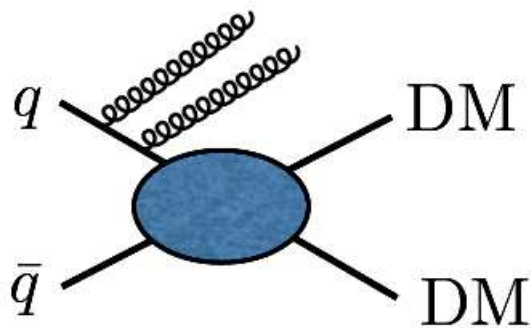
WIMP annihilation in the cosmos

Ciemna materia

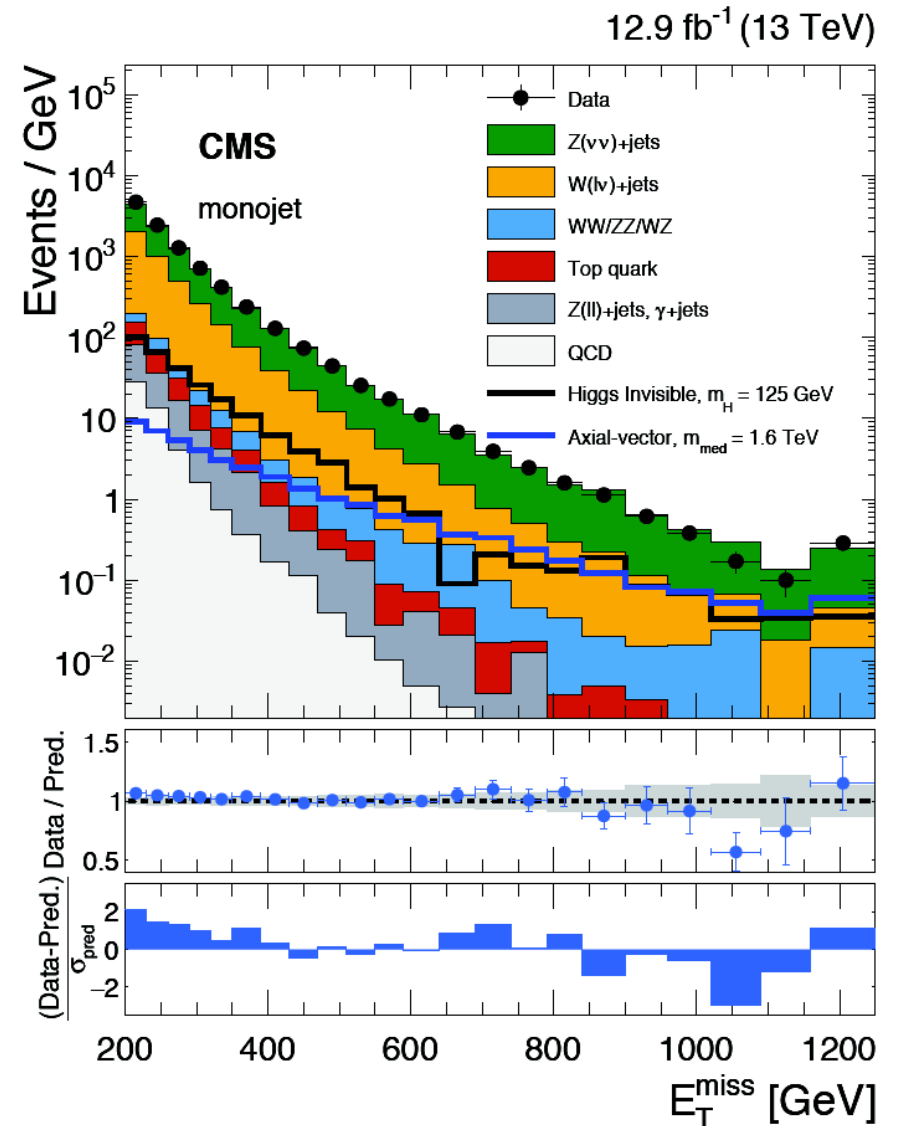
Produkcja

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:



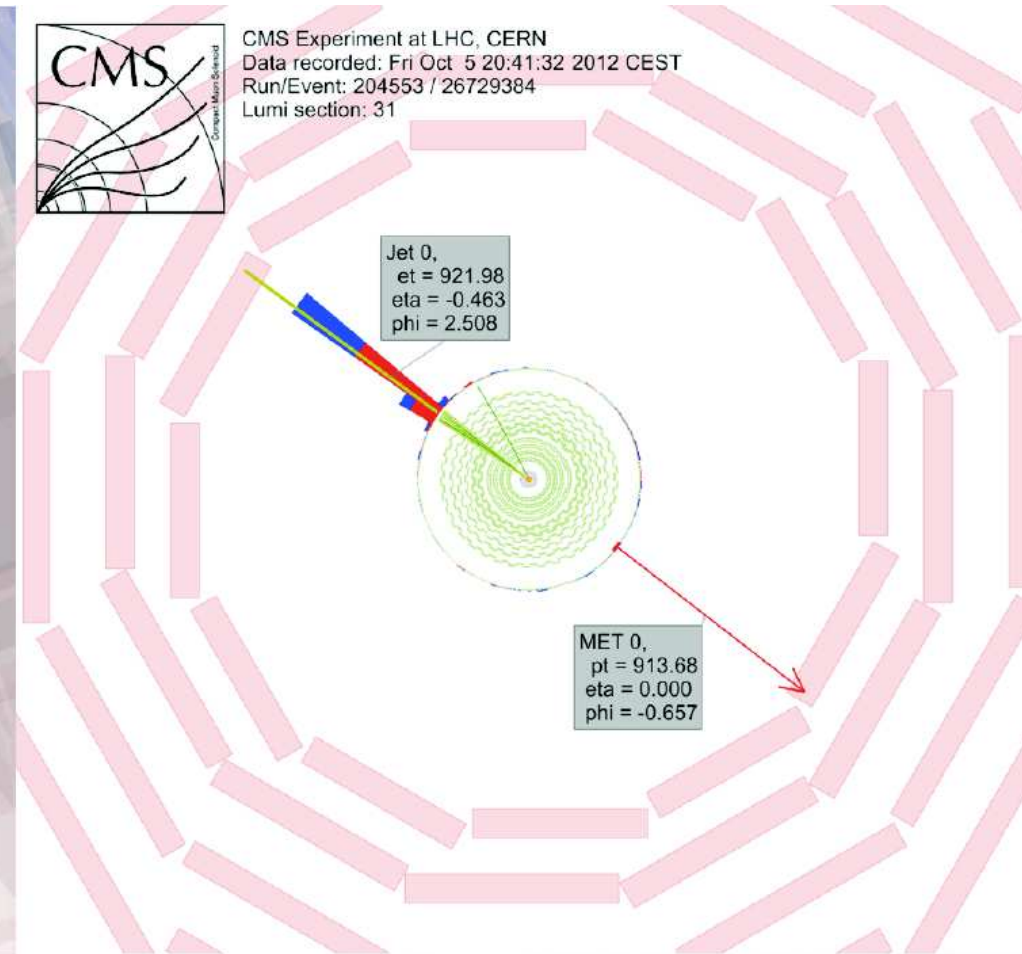
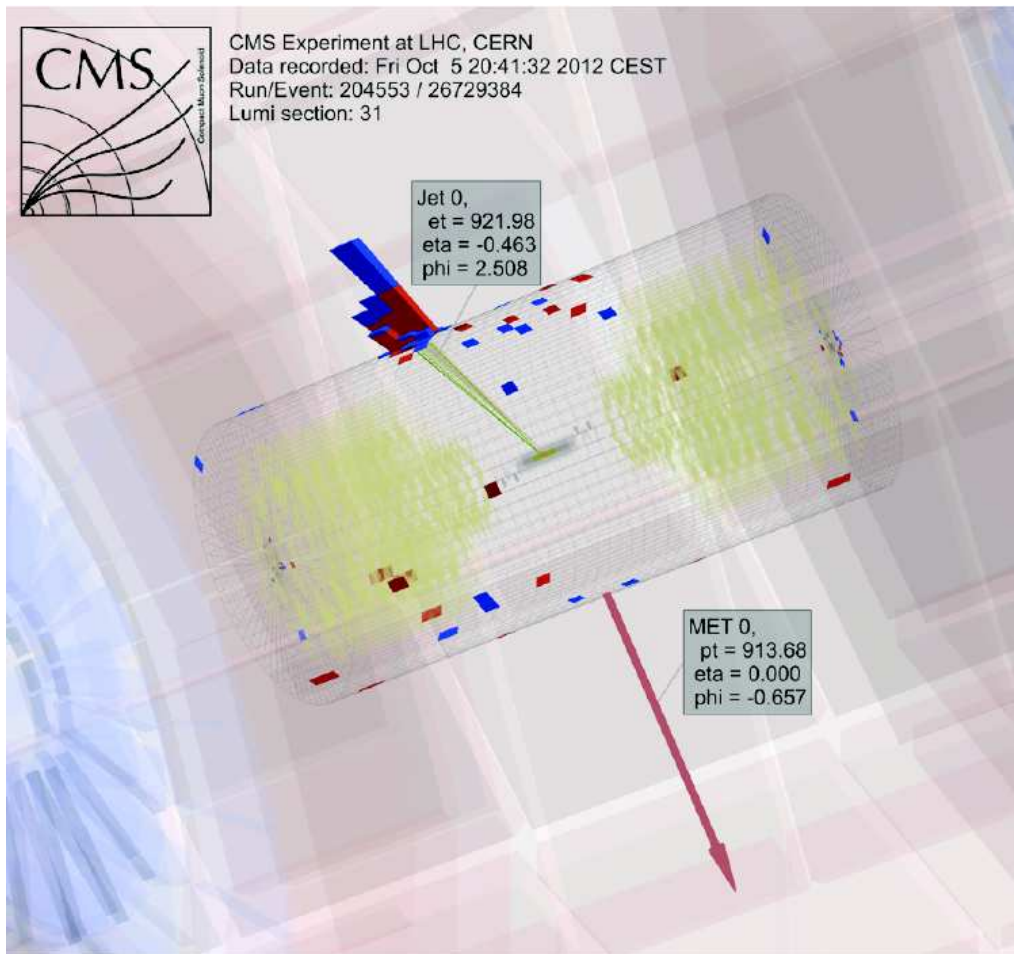
Cząstek tych nie widać w detektorze, ale można wnioskować o ich produkcji z bilansu pędu poprzecznego...



Ciemna materia

Produkcja

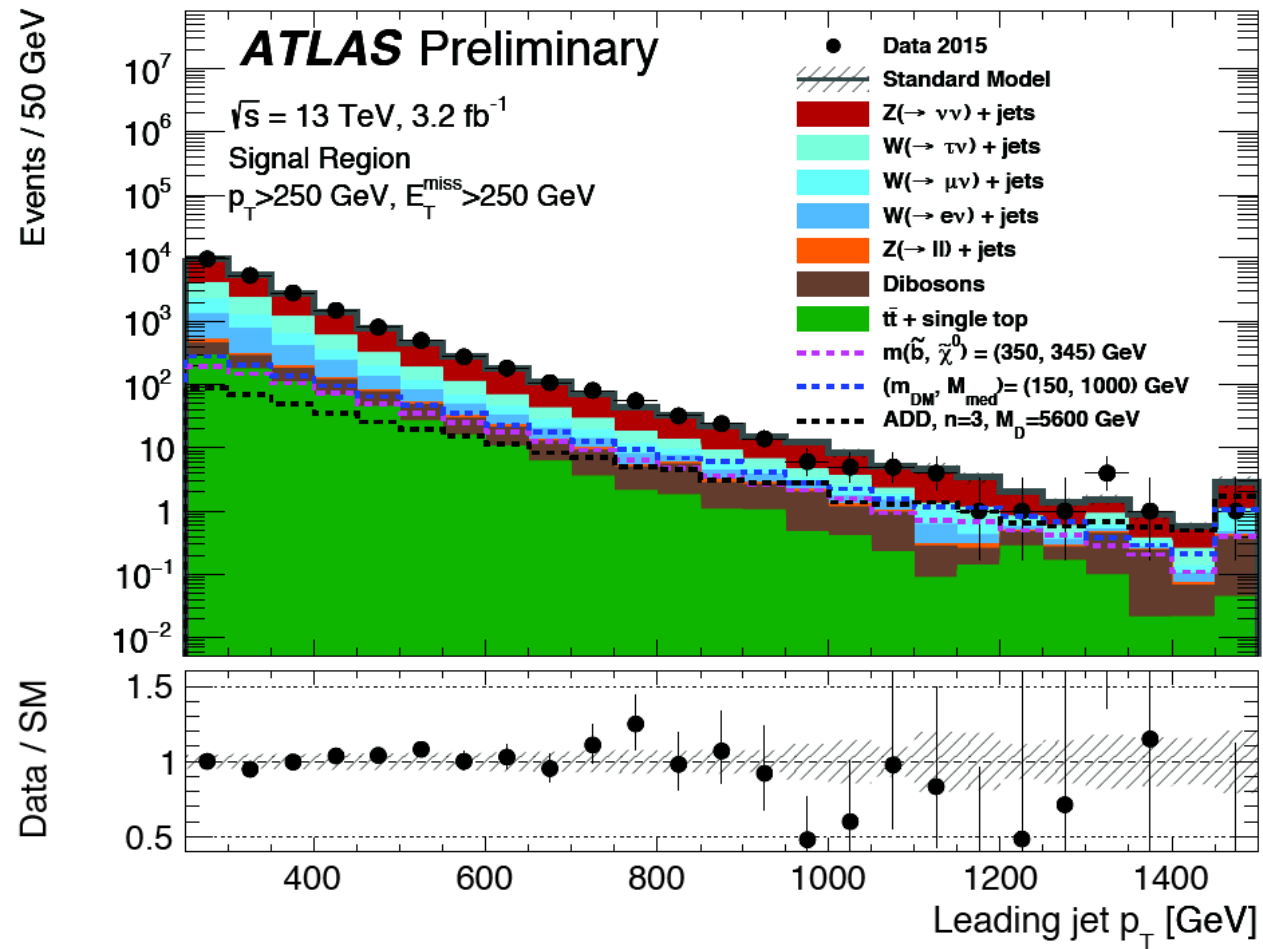
Przypadek typu “mono-jet”: kandydat na produkcję cząstek DM (CMS Run I)



Ciemna materia

Produkcja

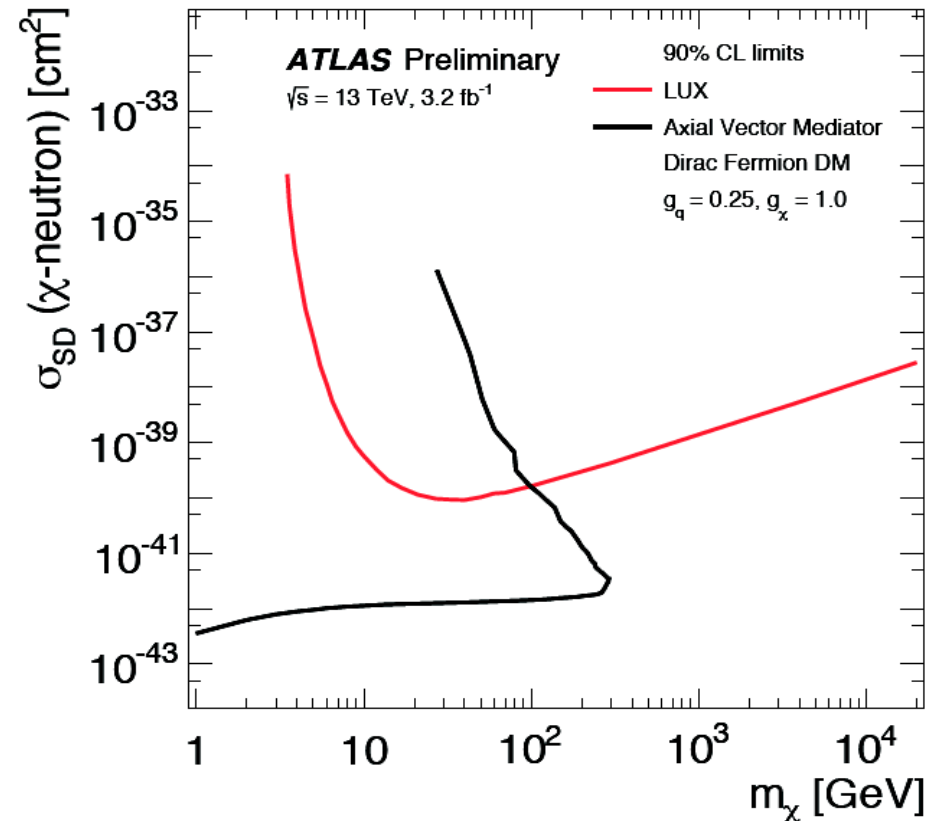
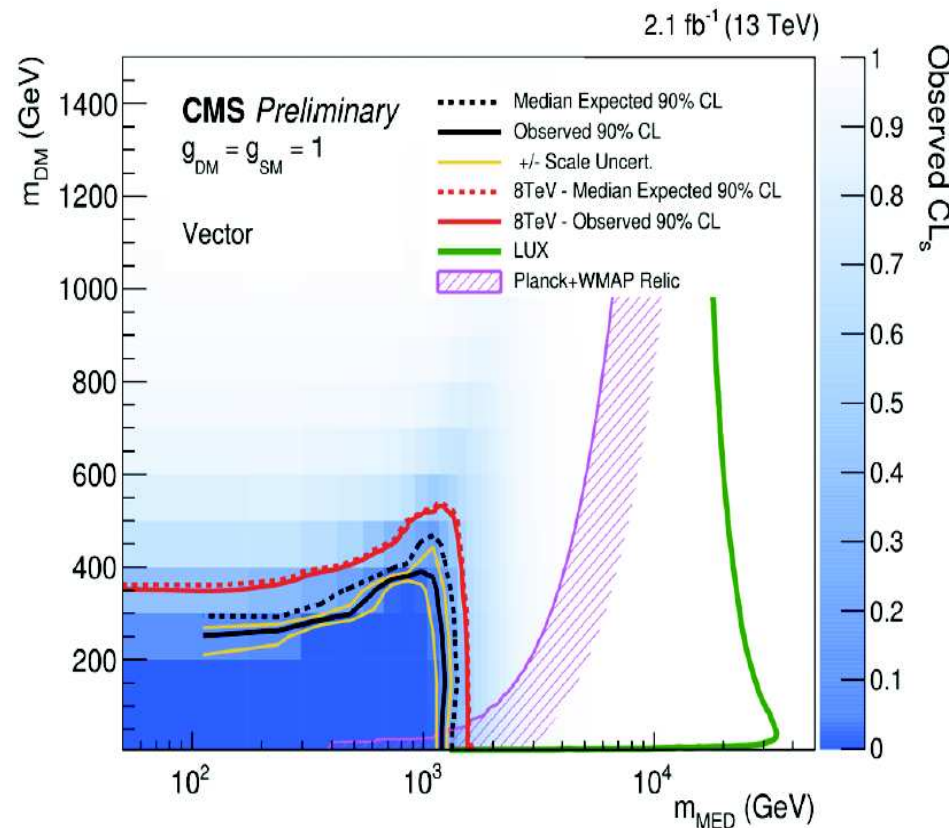
Wyniki eksperymentu ATLAS (mono-jet, dane zebrane przy energii 13 TeV)



Ciemna materia

Produkcja

Ograniczenia na masy cząstek DM: mono-jety w LHC @ 13 TeV (Moriond 2016)

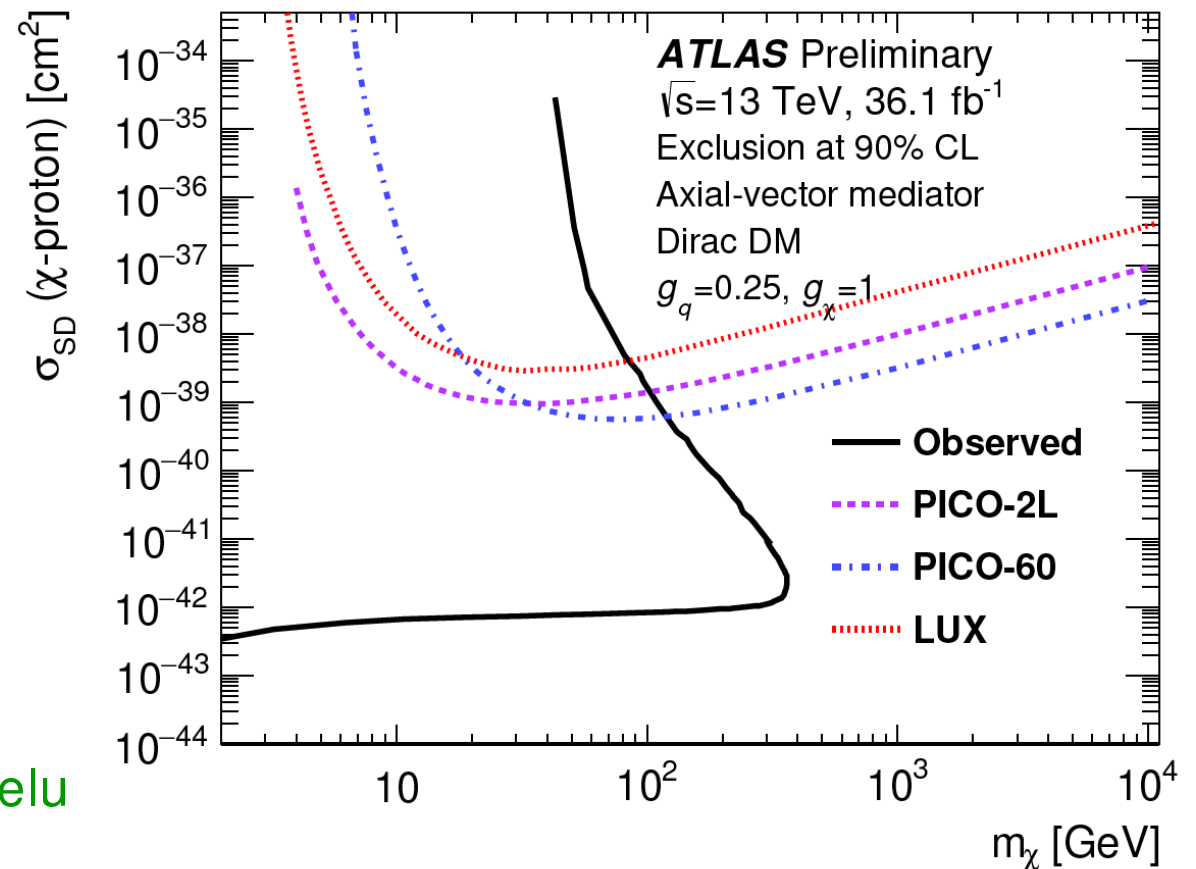
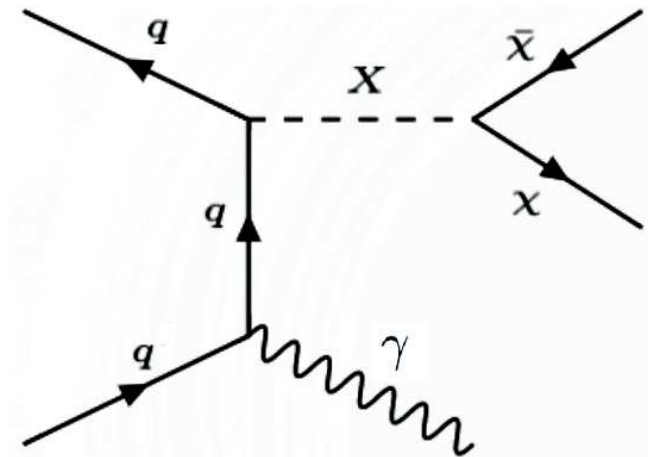


m_{MED} - masa nowej cząstki pośredniczącej
w oddziaływaniu DM z cząstkami SM

Ciemna materia

Produkcja

Ograniczenia na masy cząstek DM: mono-fotony w LHC @ 13 TeV (Moriond 2017)



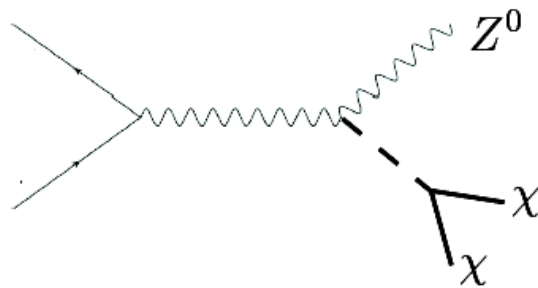
Ograniczenia silnie zależne od modelu

Ciemna materia

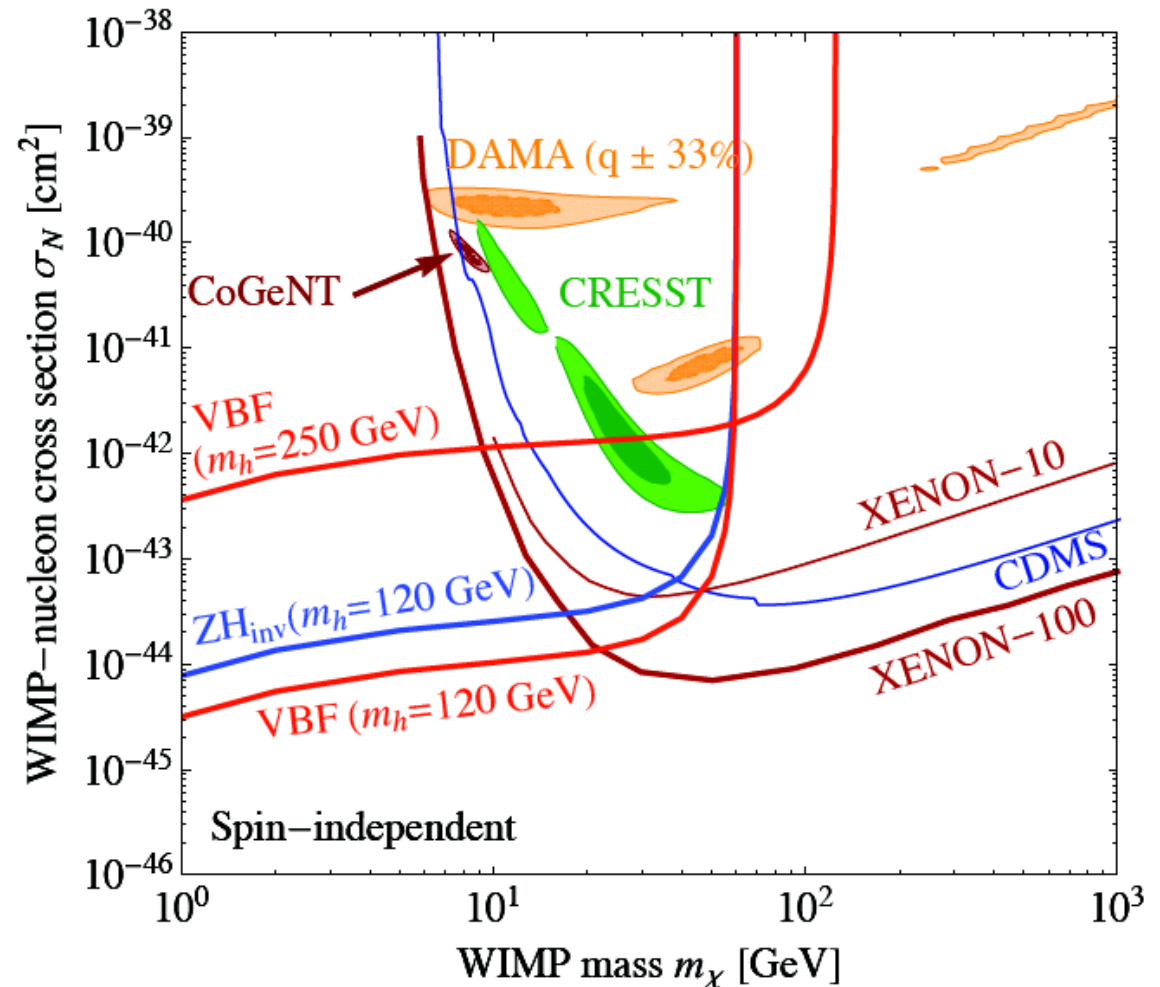
Produkcja

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

Powodowałyby one pojawienie się “niewidocznych” kanałów rozpadu.



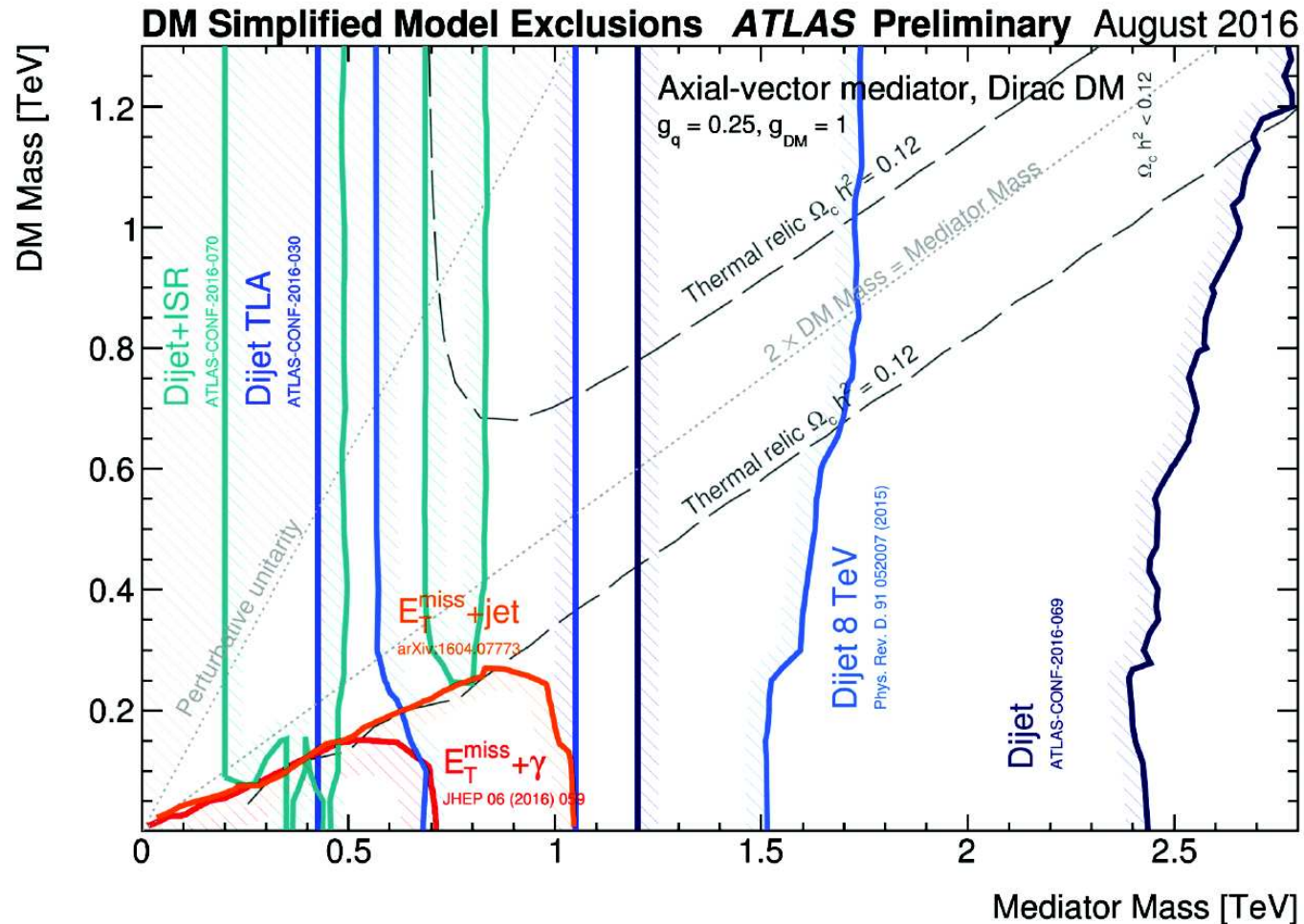
ATLAS 30 fb⁻¹ upper bound (projected)



Ciemna materia

Produkcja

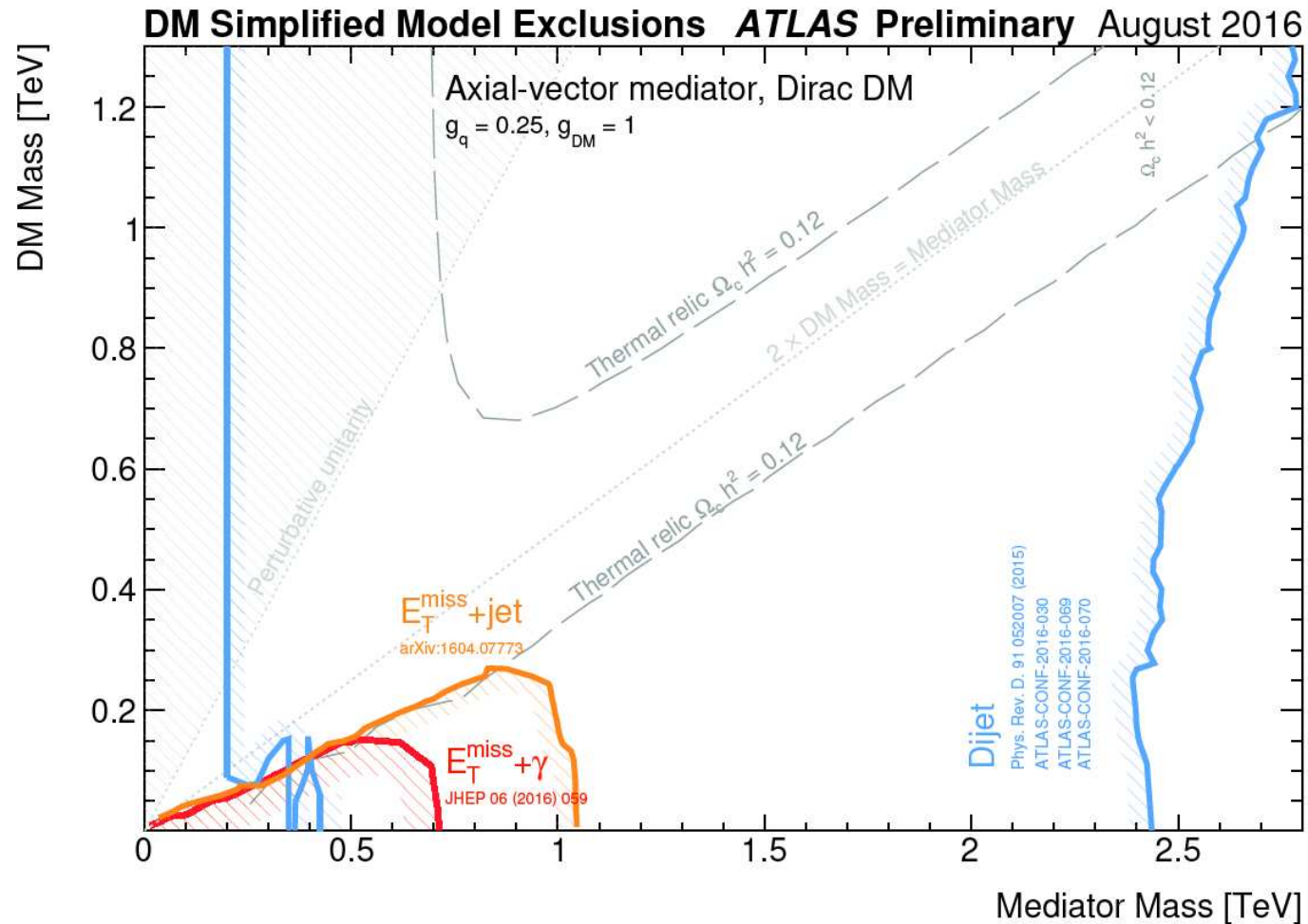
Zestawienie ograniczeń z różnych kanałów produkcji



Ciemna materia

Produkcja

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



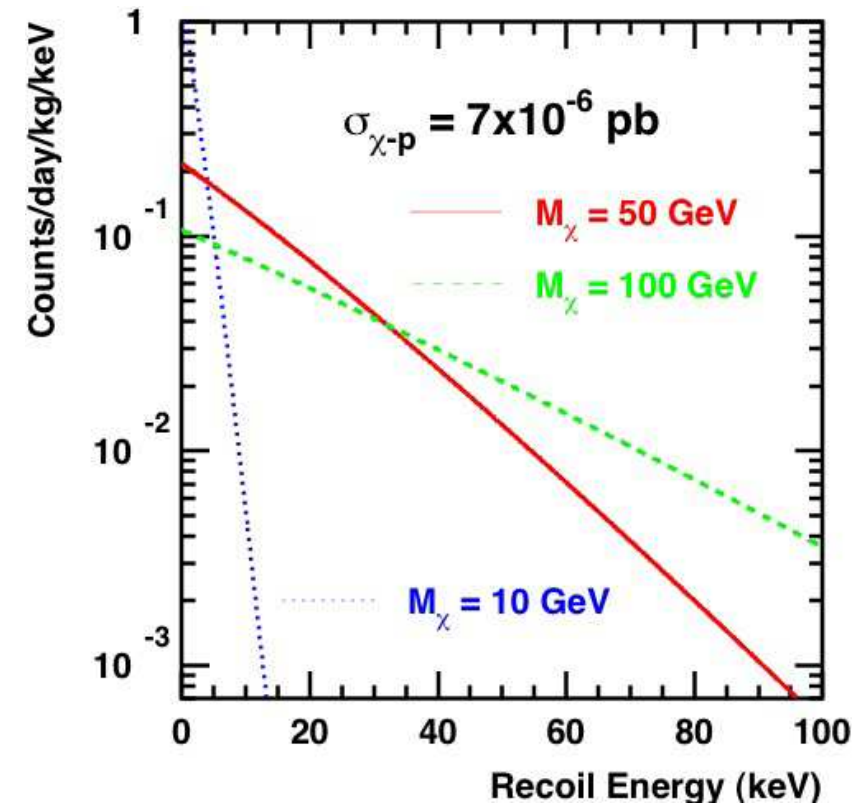
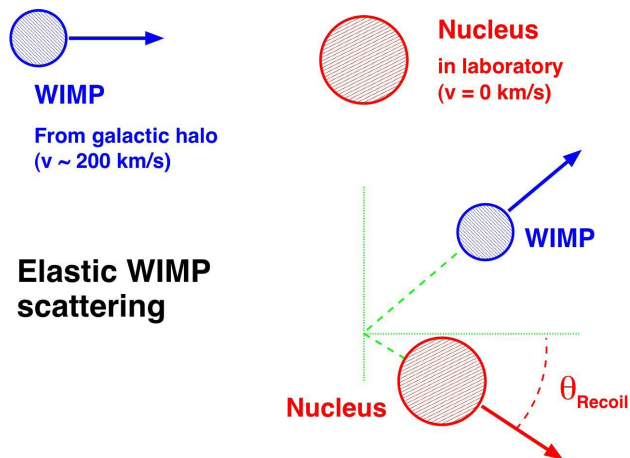
Ciemna materia

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.

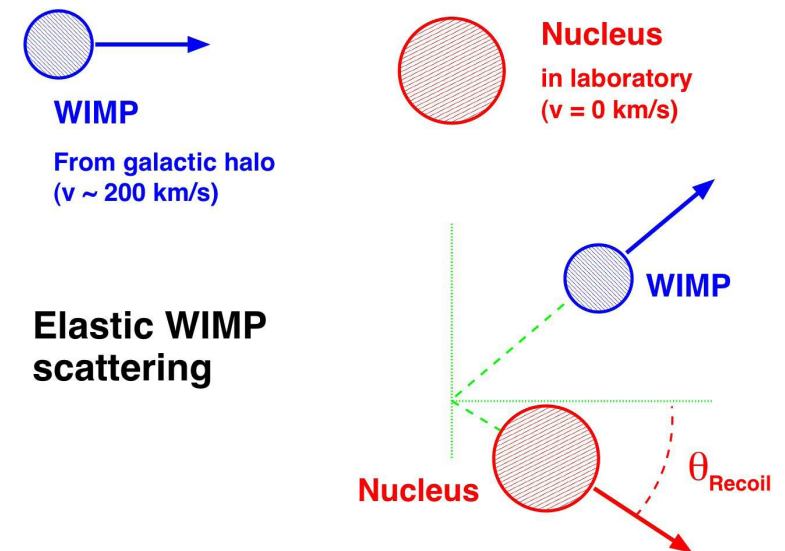
Problemem jest liczba przypadków:

- 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



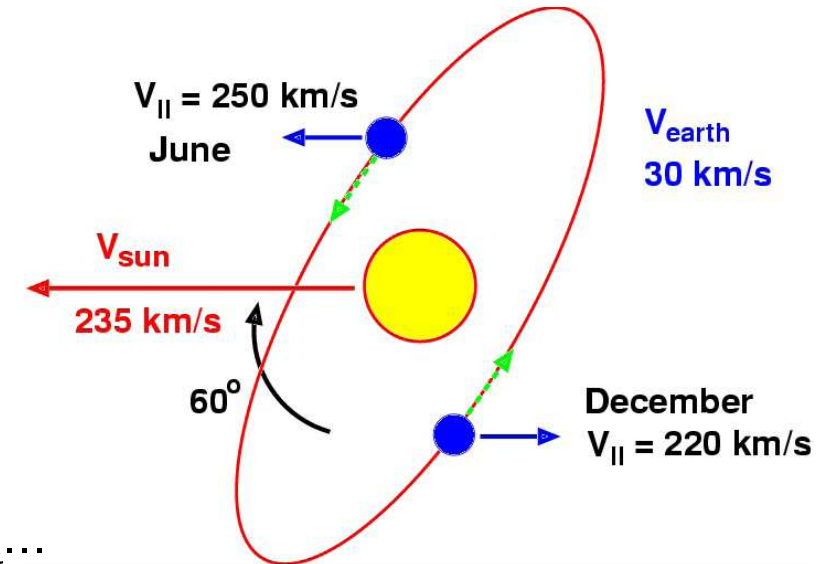
Ciemna materia

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.



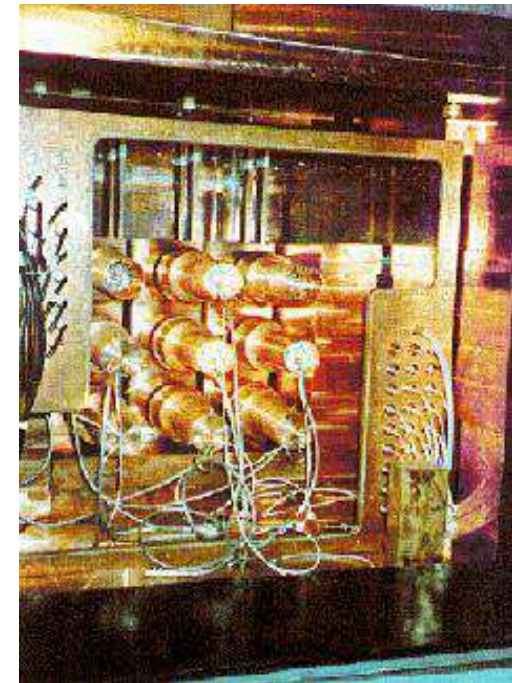
Ciemna materia

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 ~ 0.01 Hz/kg

Tło zdominowane przez radioaktywność skał: ~ 1 Hz/kg

Ciemna materia

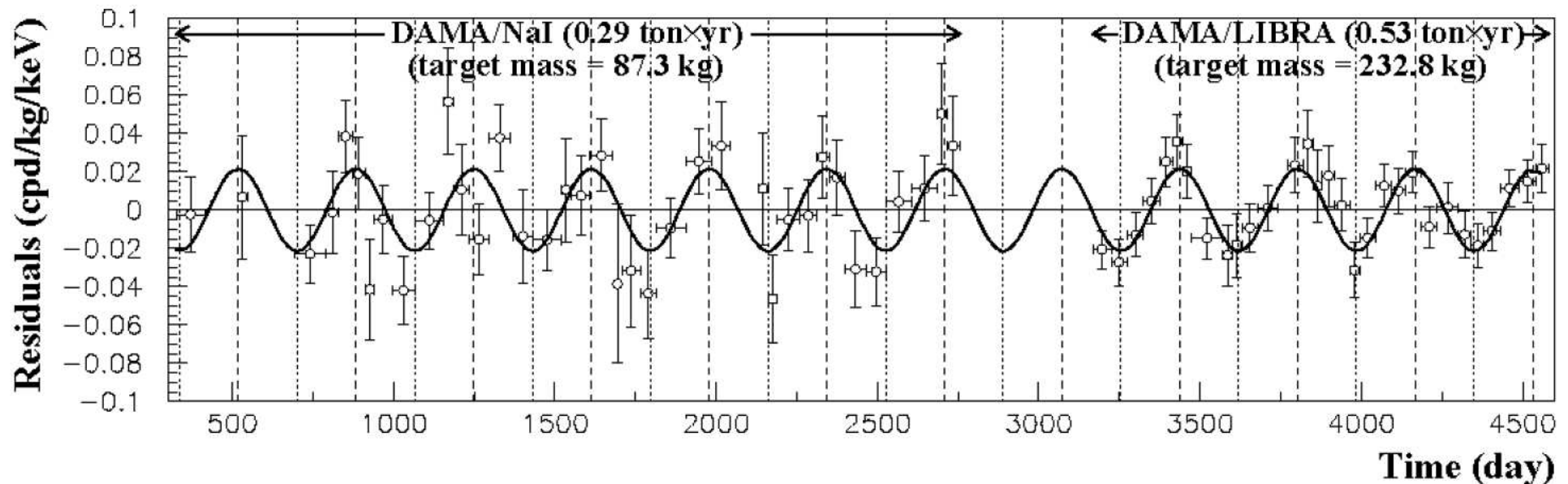
DAMA/LIBRA

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

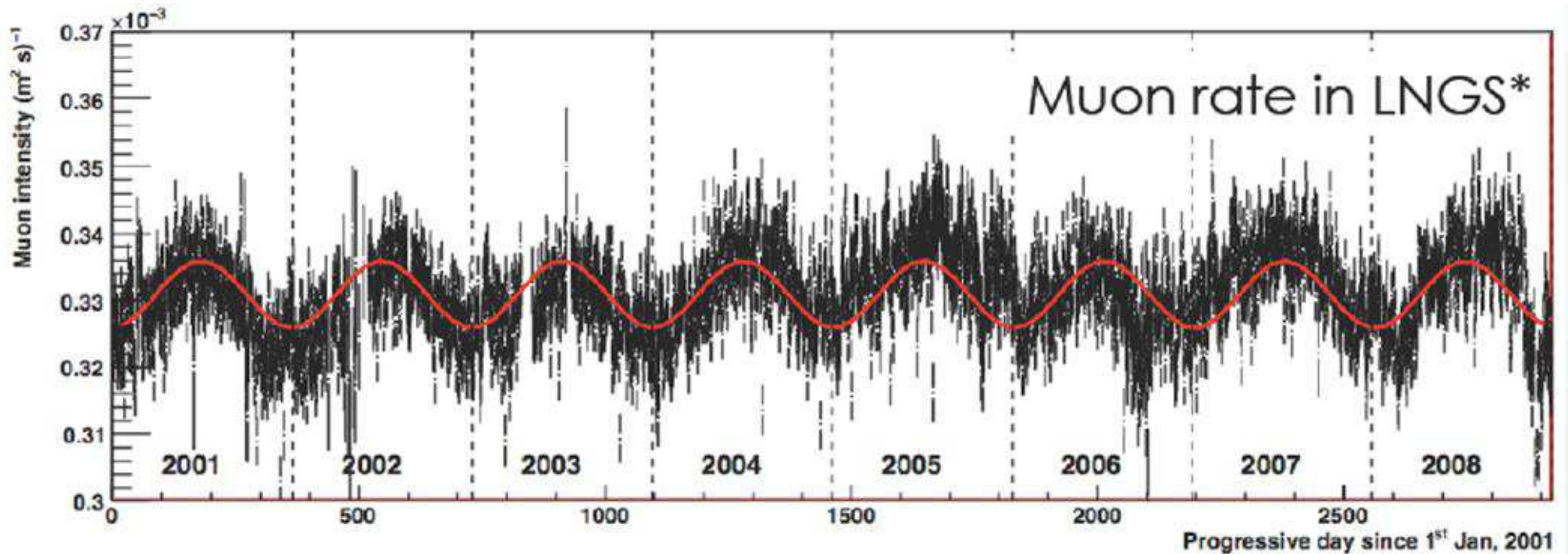


Niestety, nie potwierdzone przez inne eksperymenty...

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

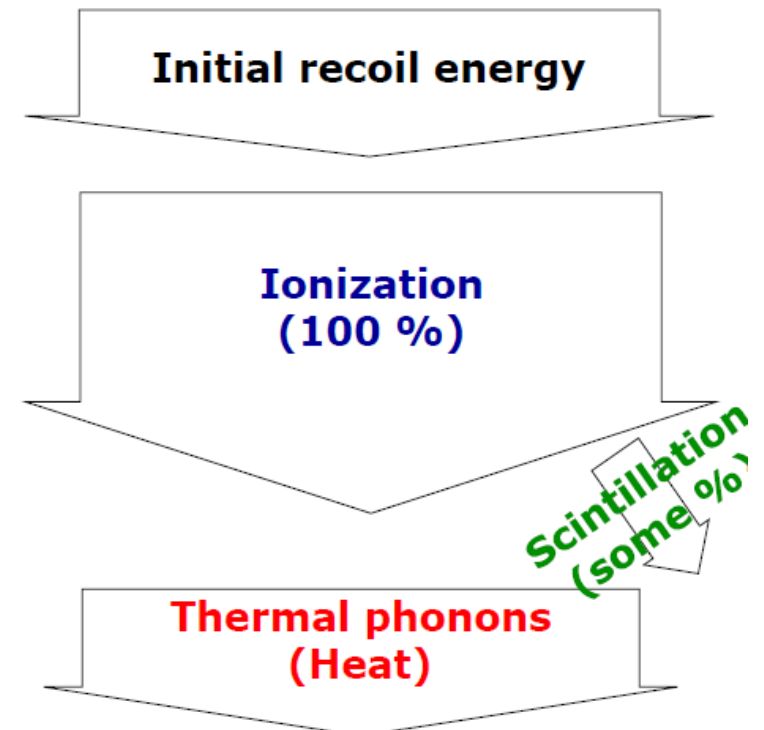
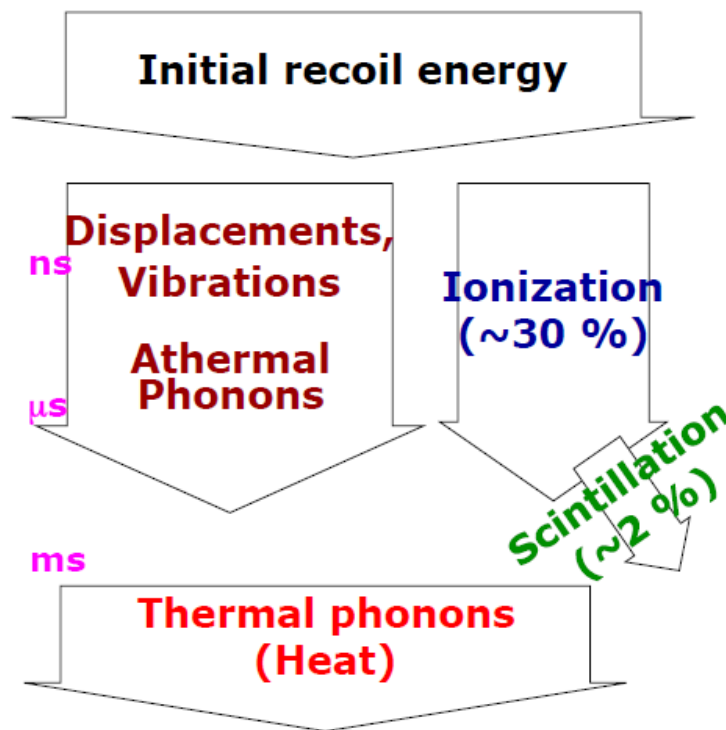
Kanały detekcji

Główne tło w bezpośredniej detekcji DM: promieniowanie γ

⇒ w wyniku oddziaływania energia całkowicie zamieniana na jonizację

Oddziaływanie DM z jądrem

Absorbpcja γ



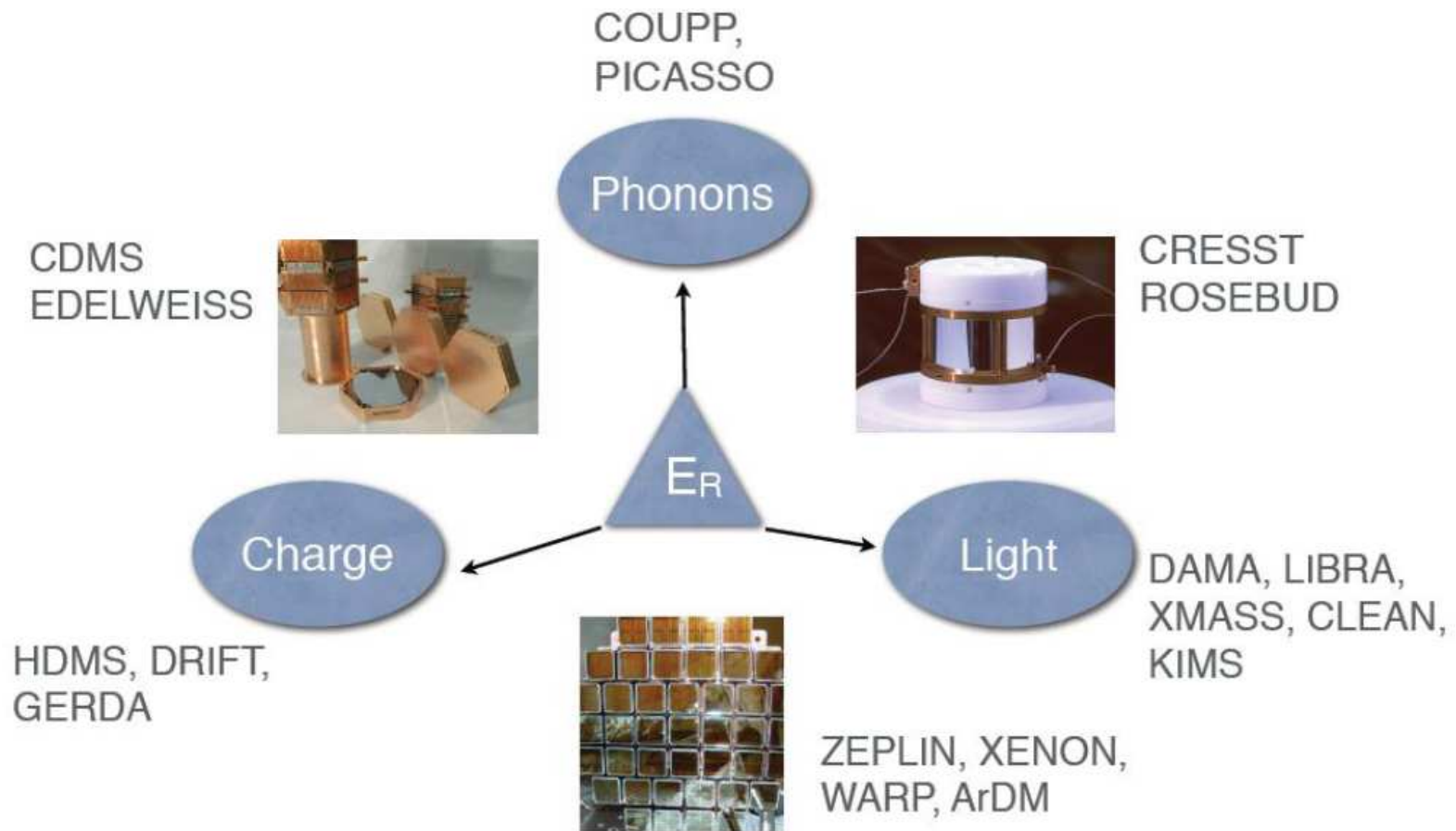
Różny stosunek jonizacji do scyntylacji i wzbudzenia sieci krystalicznej...

Ciemna materia

Kanały detekcji

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

Różne eksperymenty przyjęły różną strategię



Ciemna materia

Eksperyment CRESST

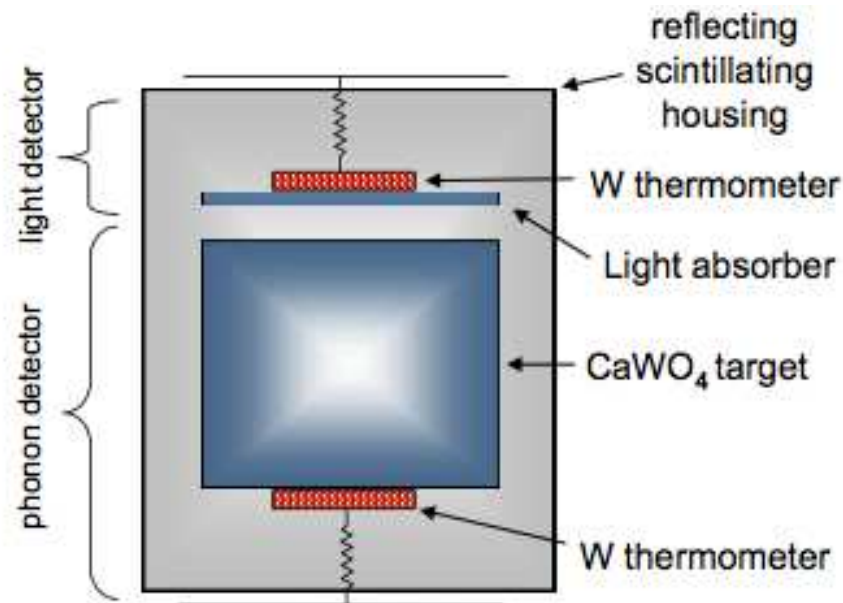
Eksperyment w LNGS (Gran Sasso)

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

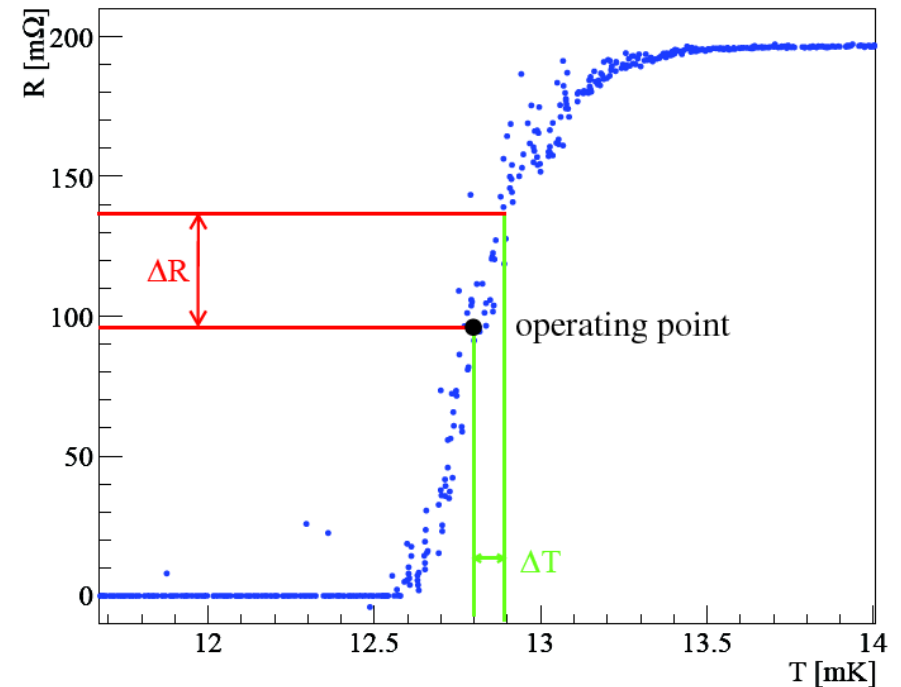
Eksperyment CRESST

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 $\frac{dR}{dT}$

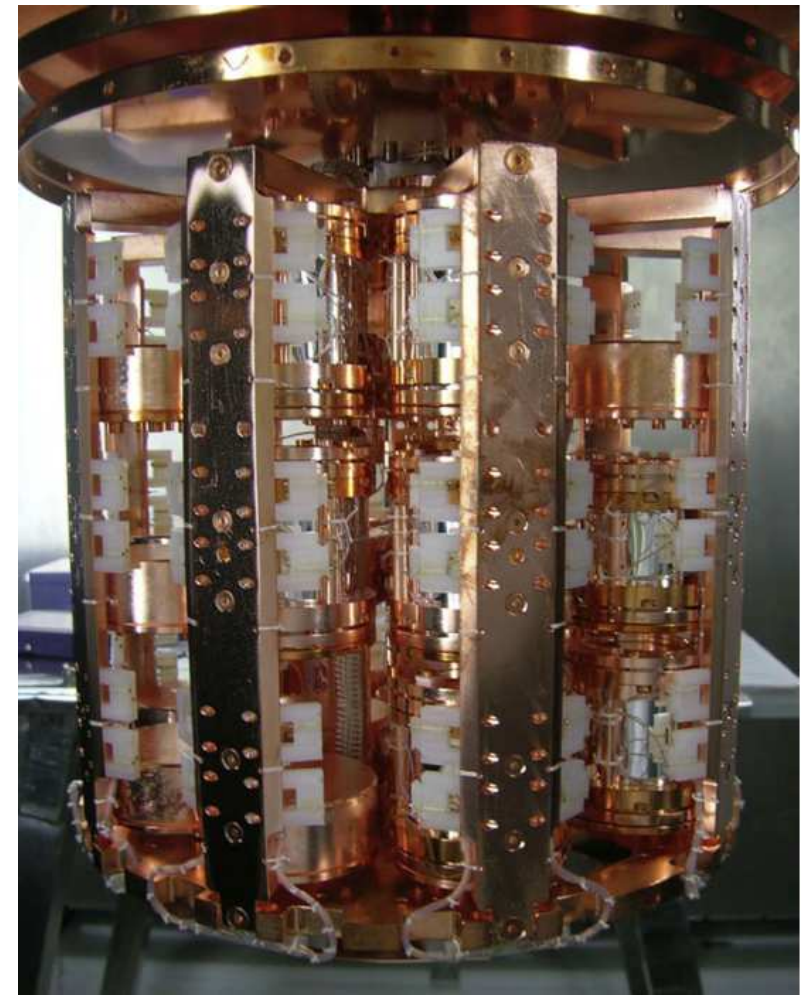
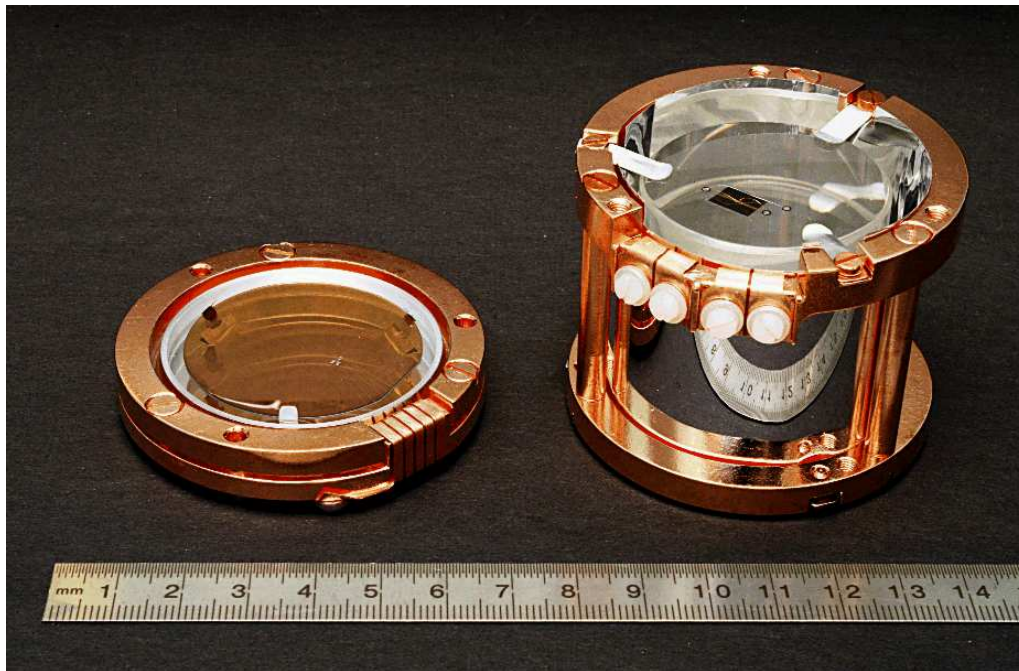
Depozyt energii \Rightarrow zmiana temperatury \Rightarrow zmiany oporu \Rightarrow zmiany natężenia prądu

Uzyskany próg czułości: ok. 600 eV (!)



Ciemna materia

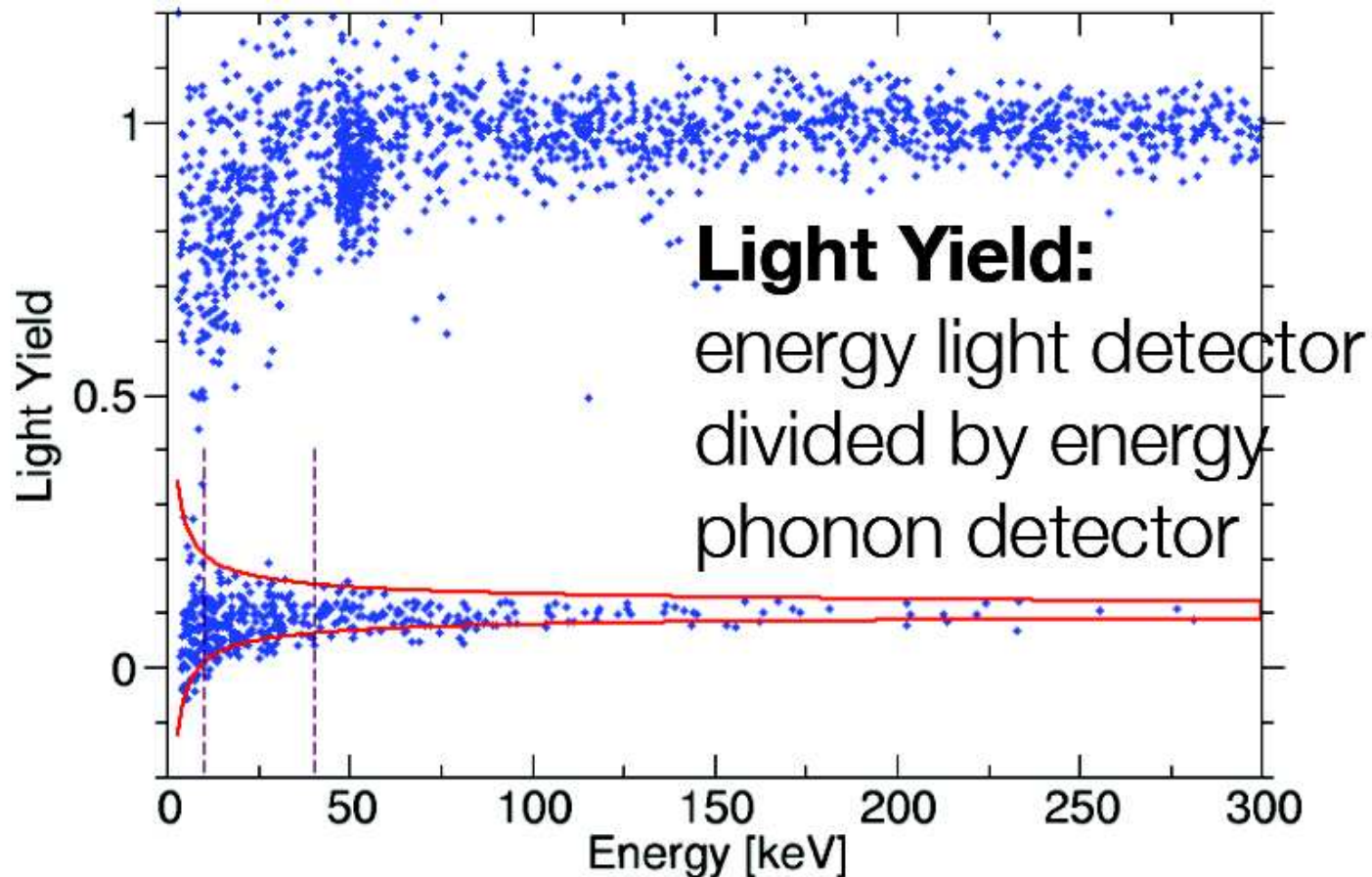
Eksperyment CRESST



Ciemna materia

Eksperyment CRESST

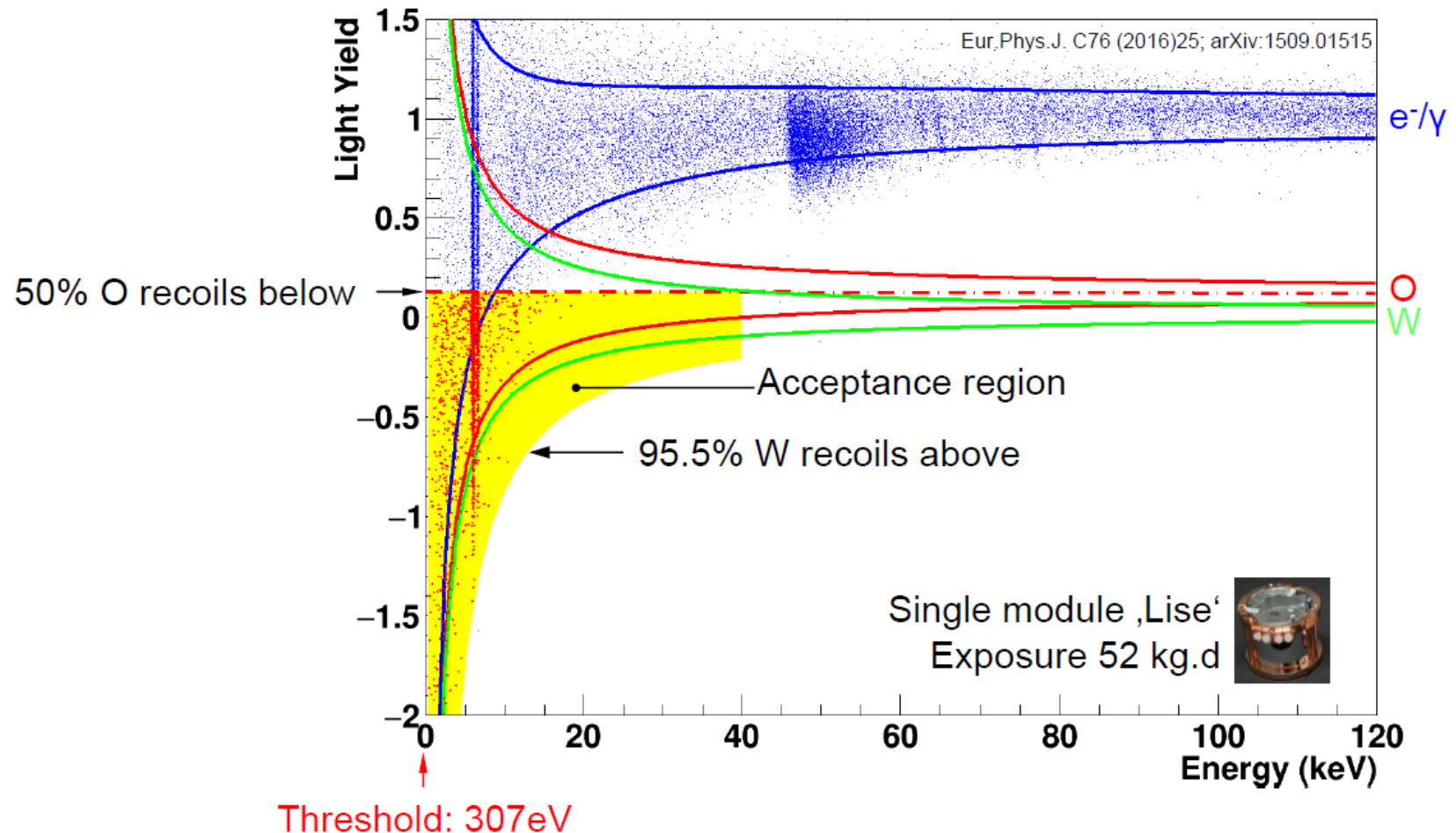
Stosunek scyntylacji do depozytu energii (zmiany temperatury) pozwala rozróżnić mechanizmy strat energii. **Kalibracja** przy użyciu źródła neutronów:



Ciemna materia

Eksperyment CRESST

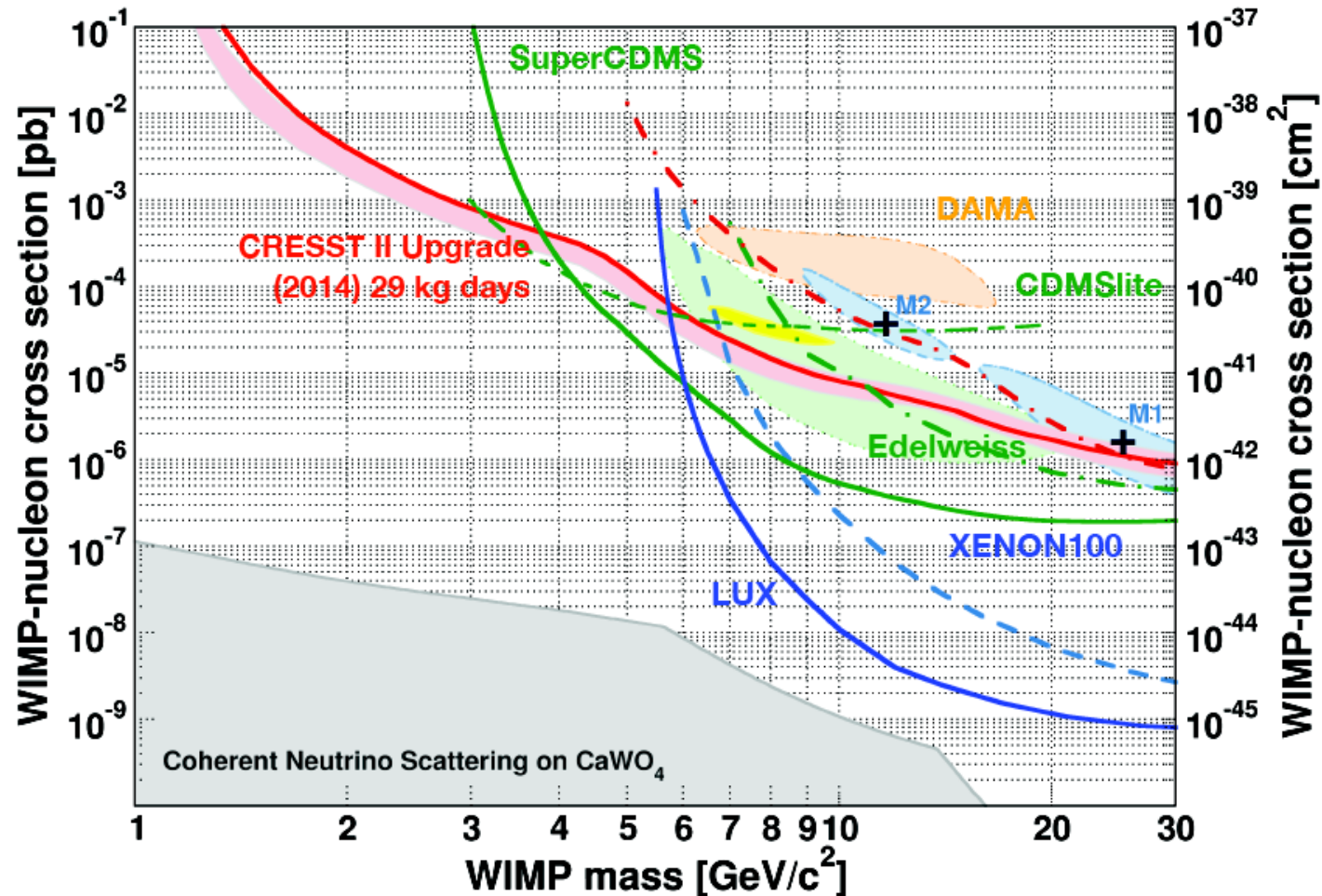
Wyniki pomiarów 2013-2015 nie potwierdziły nadmiaru przypadków obserwowanego w pierwszych danych (2009-2011)



Ciemna materia

Eksperyment CRESST

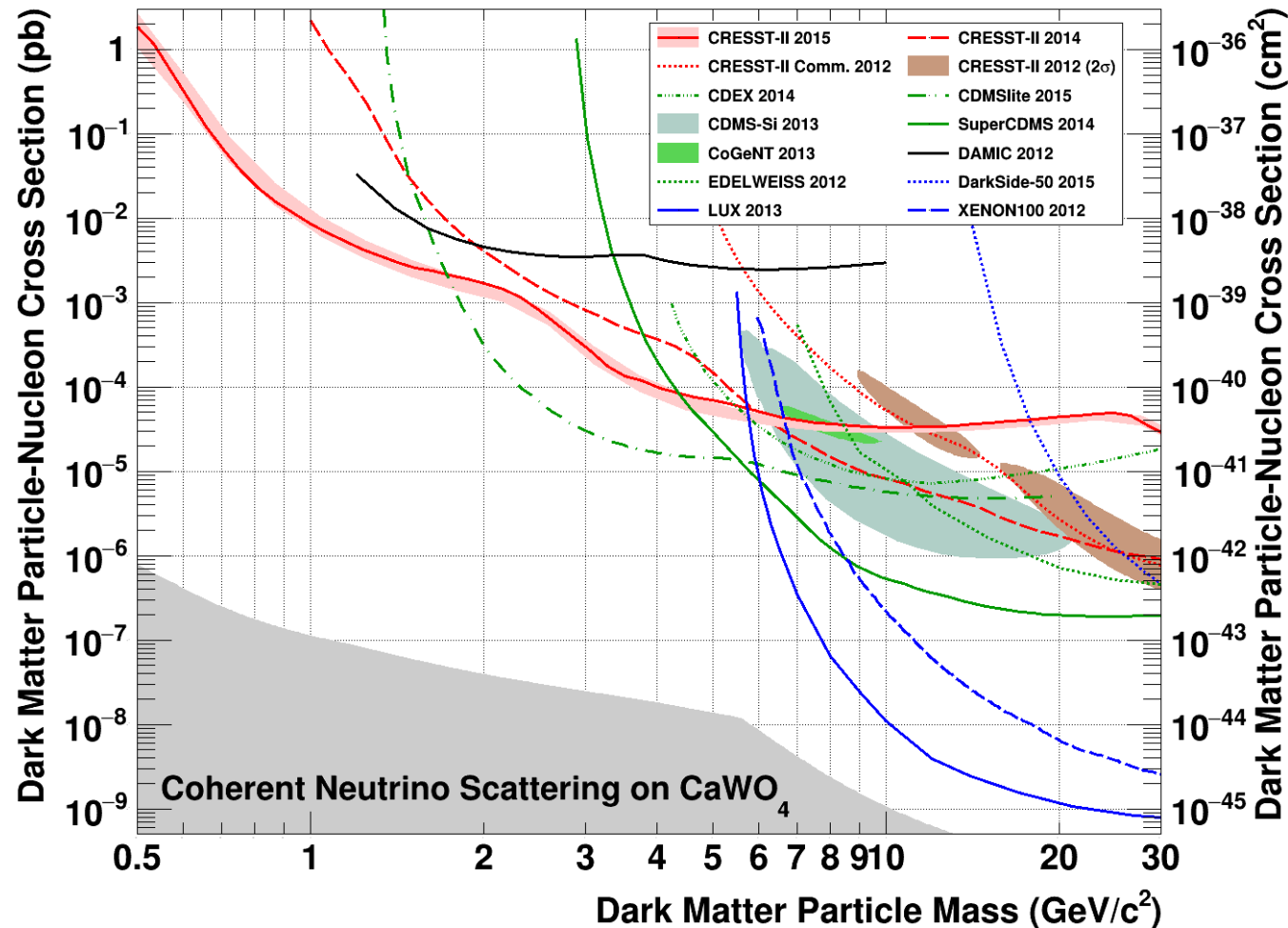
Uzyskane ograniczenia na przekrój czynny w funkcji masy cząstek DM



Ciemna materia

Eksperyment CRESST

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

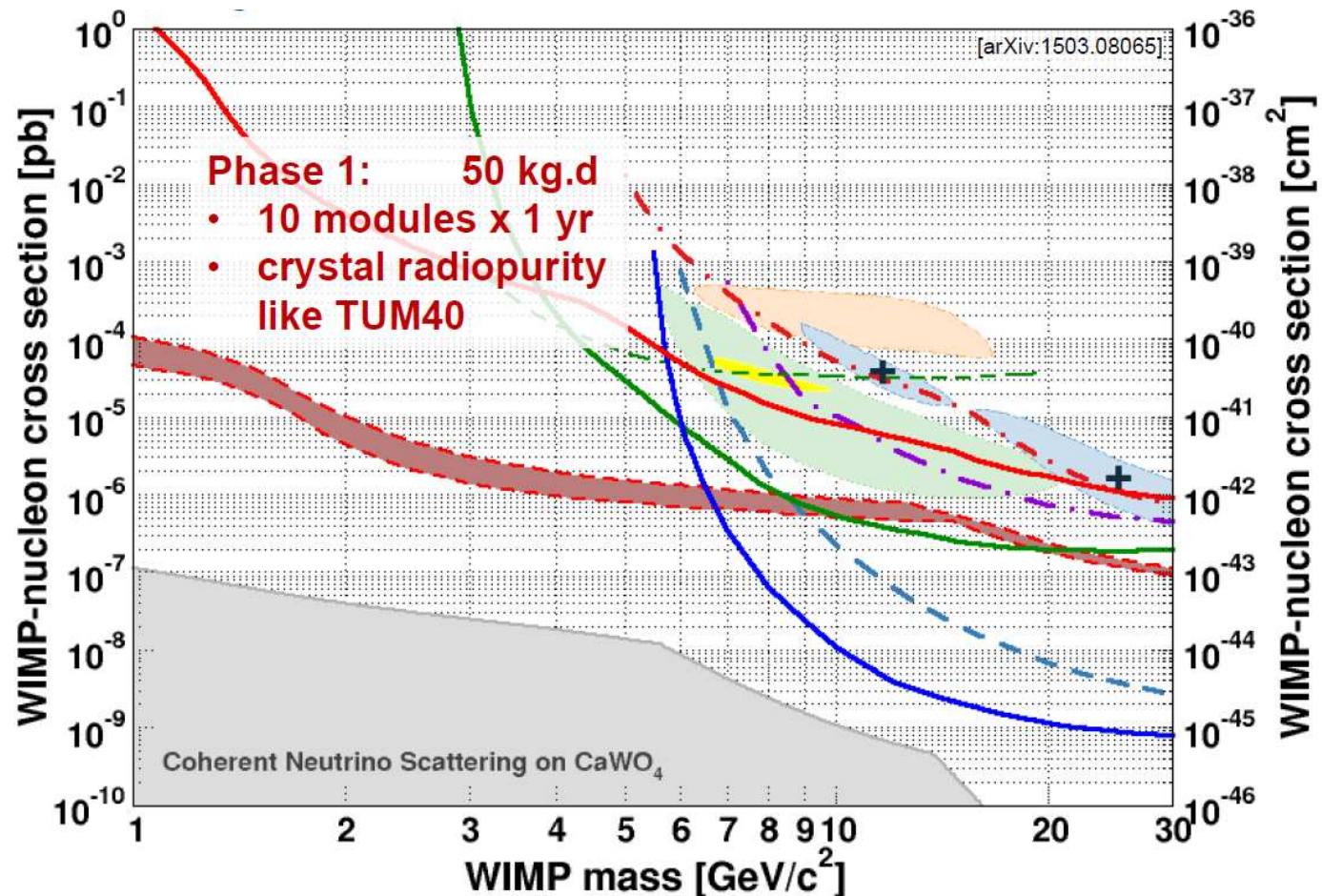


Ciemna materia

Eksperyment CRESST

Obecnie trwa przebudowa układu doświadczalnego:

zmniejszenie rozmiaru krzysztalów \Rightarrow zmniejszenie poziomu tła

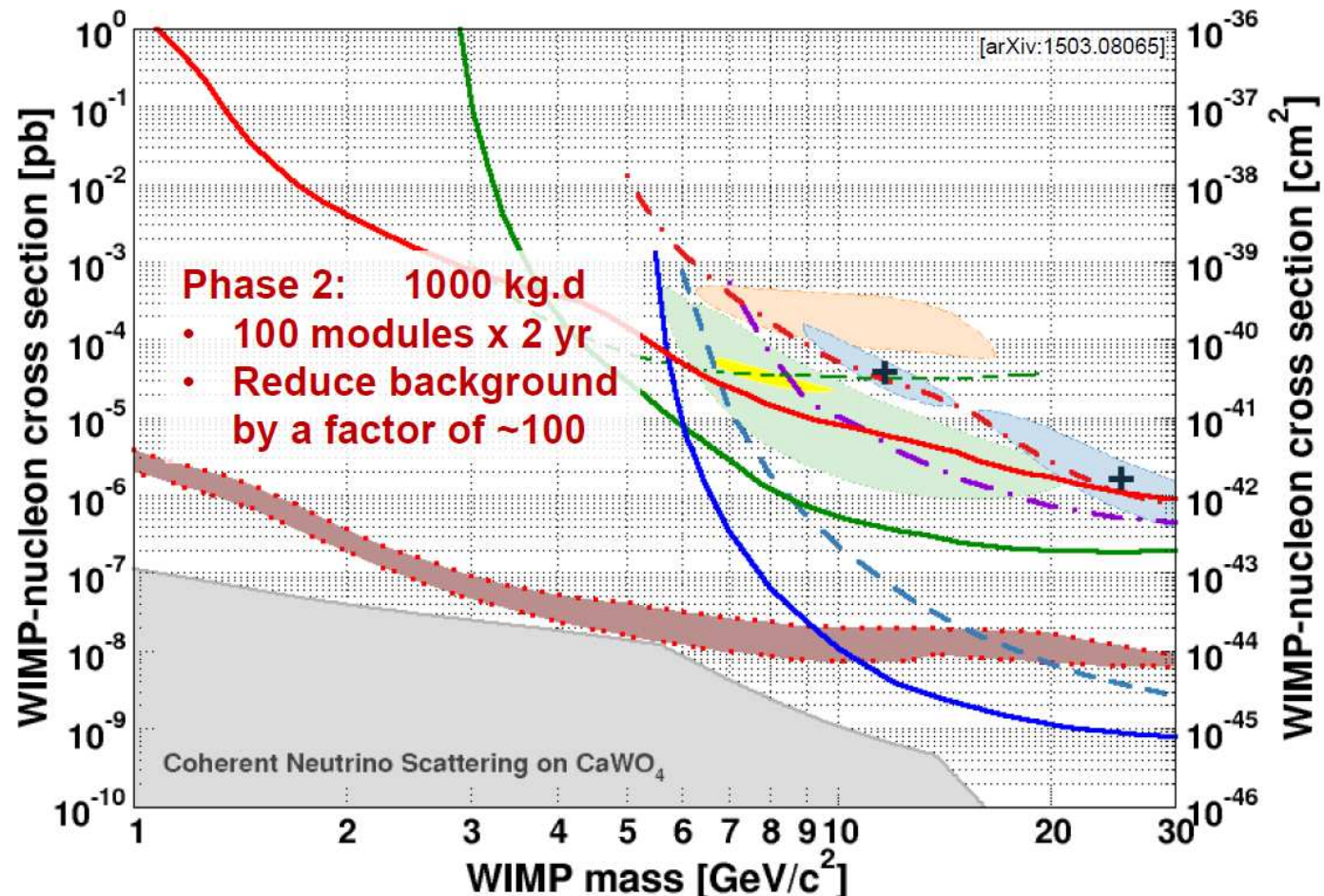


Ciemna materia

Eksperyment CRESST

Obecnie trwa przebudowa układu doświadczalnego:

zmniejszenie rozmiaru krzysztalów \Rightarrow zmniejszenie poziomu tła



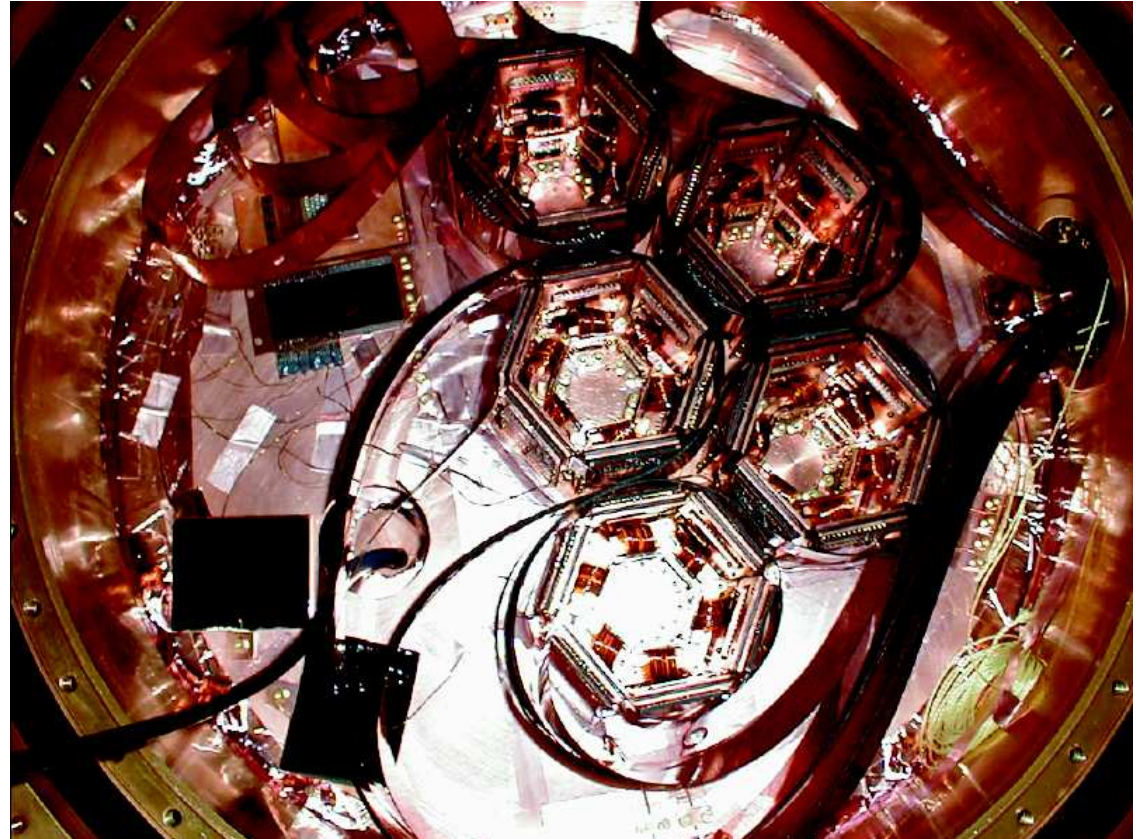
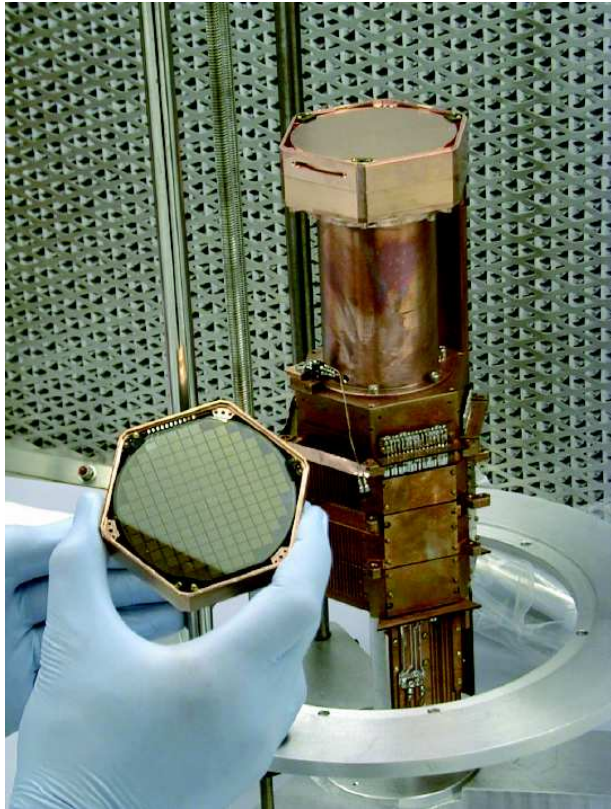
Ciemna materia

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

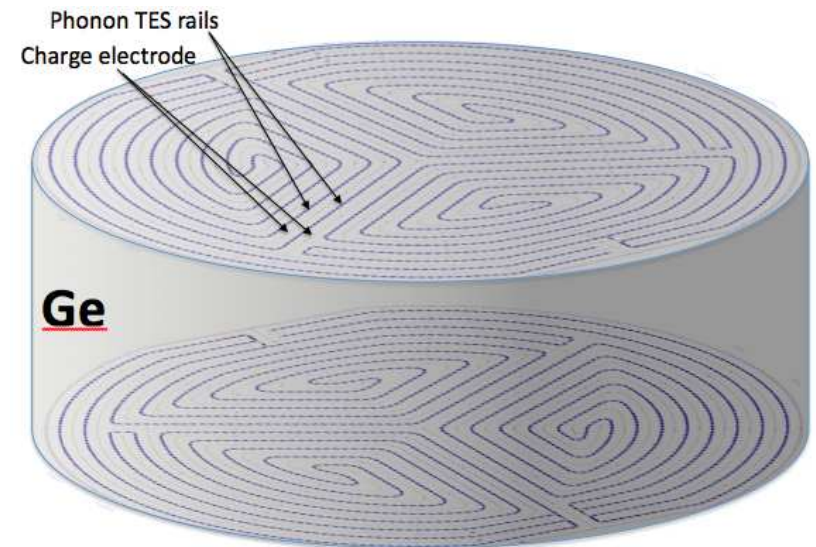


Ciemna materia

Eksperyment SuperCDMS

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

Pomiar jonizacji: elektrody. Odczyt z obu stron kryształu !



Ciemna materia

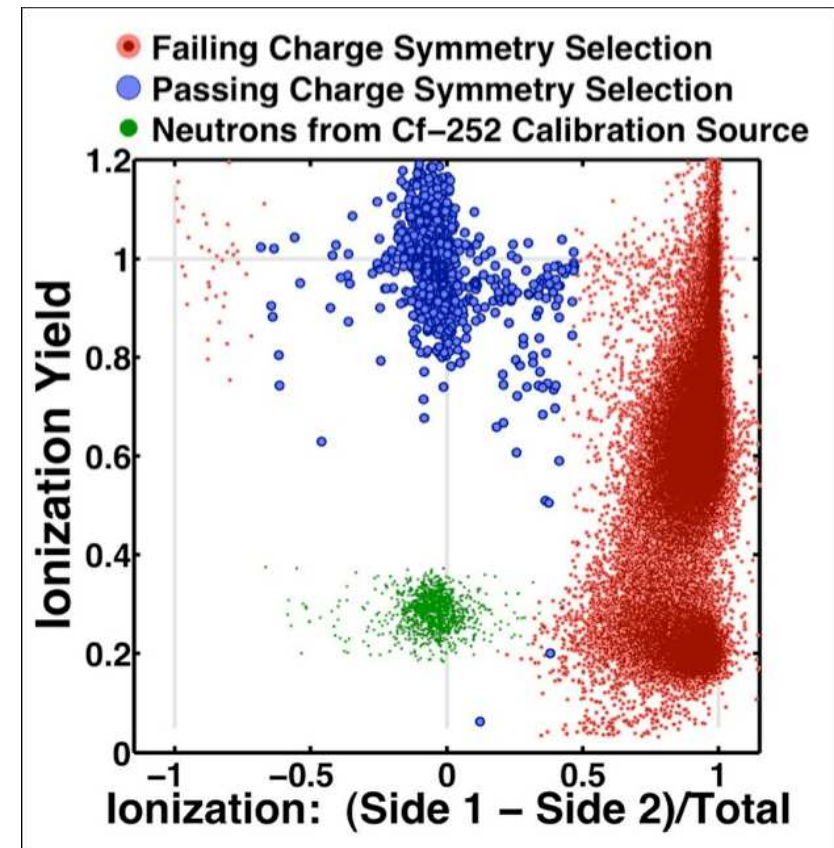
Eksperyment SuperCDMS

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 γ i źródła neutronów

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

Porównanie sygnału na obu stronach skutecznie eliminuje to tło.



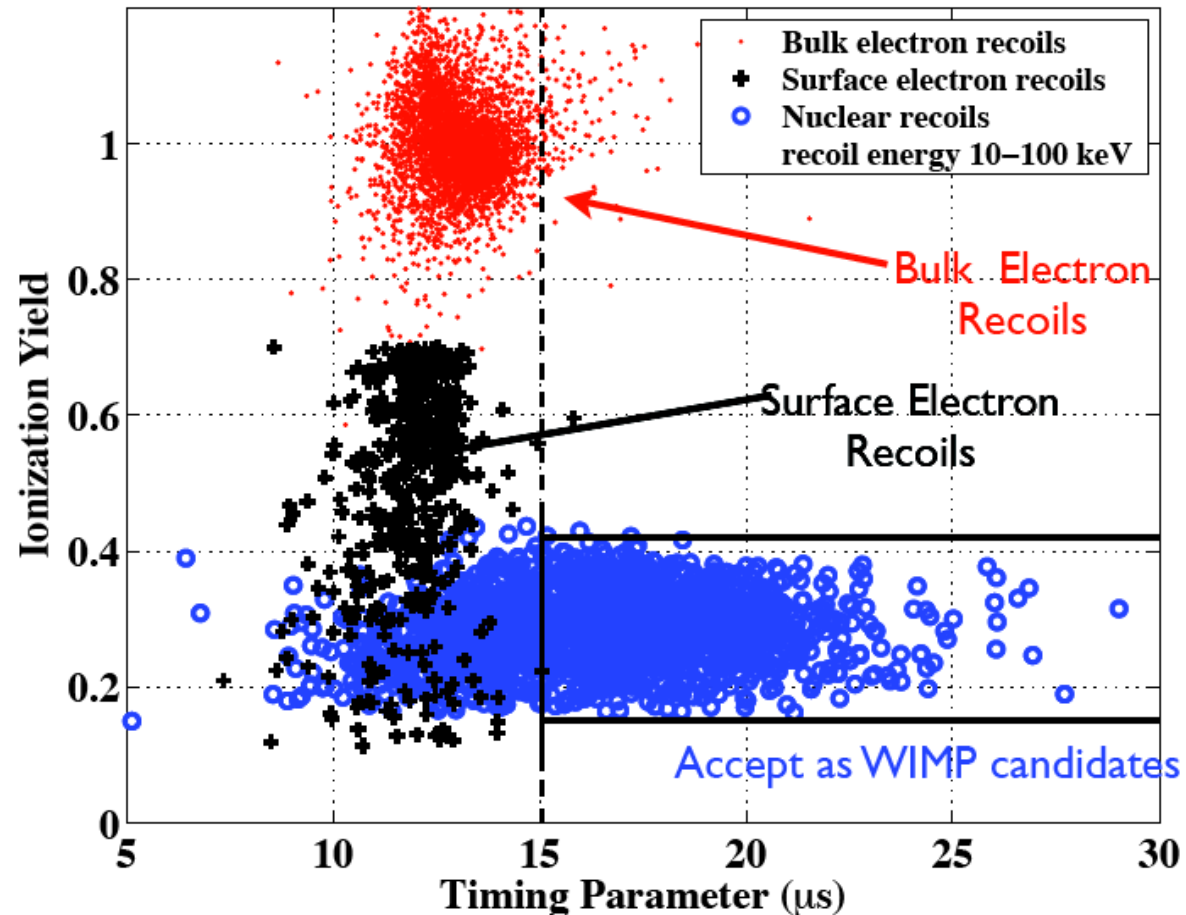
Ciemna materia

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 γ i źródła neutronów

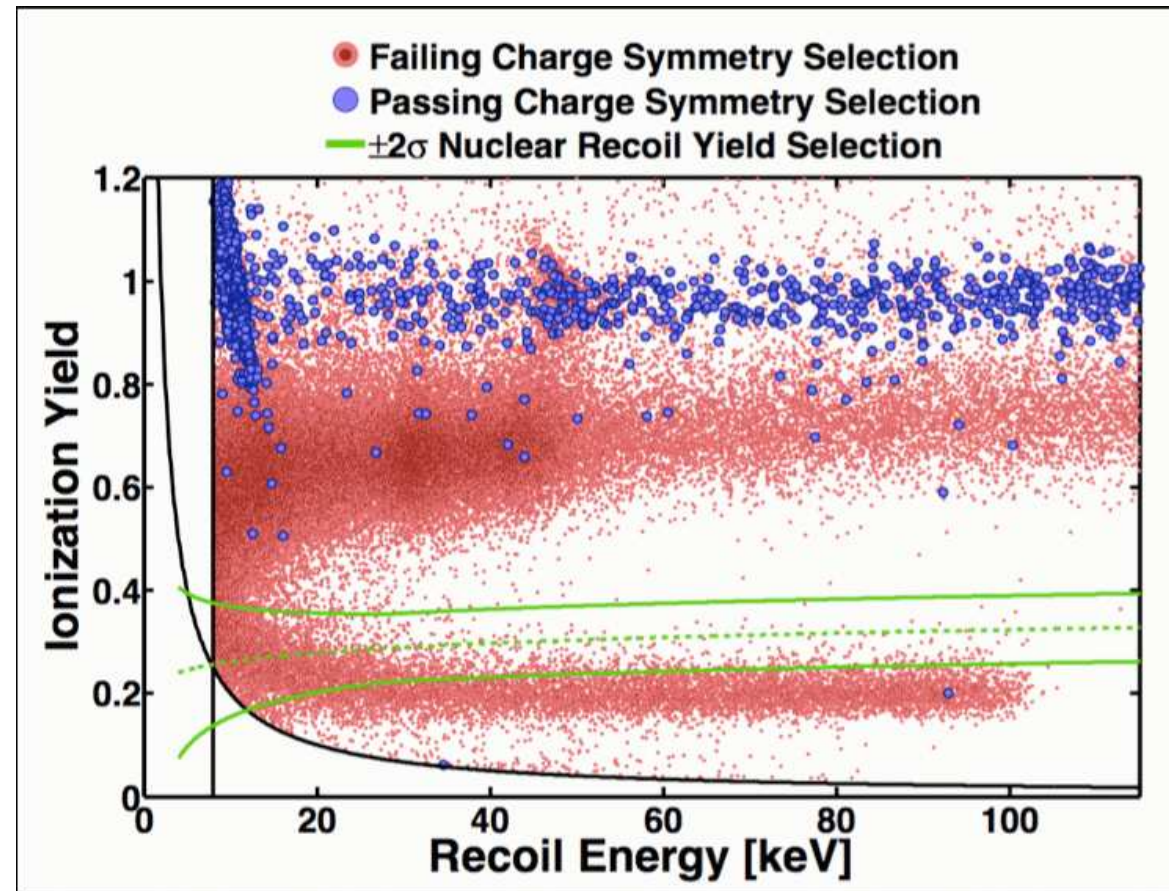
Cięcie na czasie wykorzystywane w pierwszej fazie eksperymentu do eliminacji przypadków powierzchniowych.



Ciemna materia

Eksperyment SuperCDMS

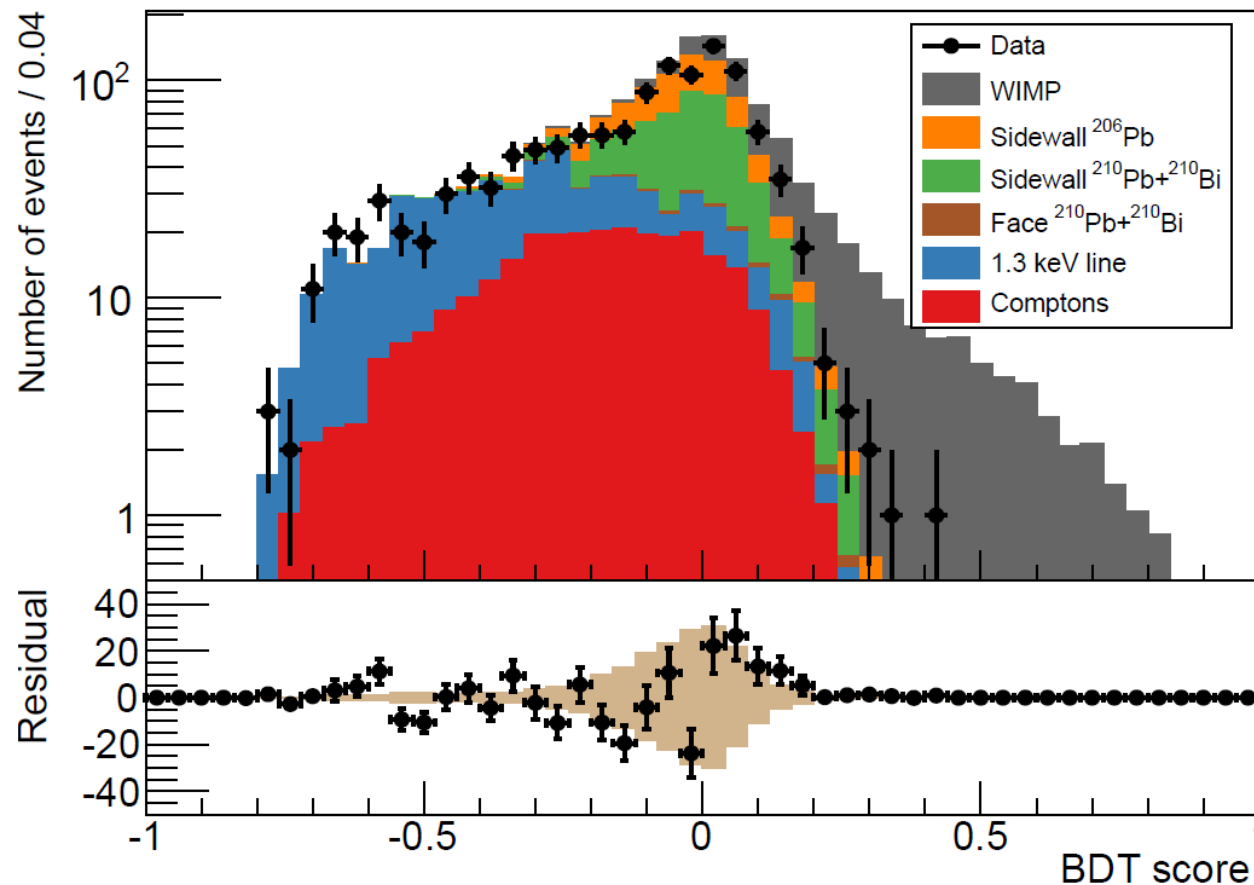
Korelacja różnych sygnałów pozwala na redukcję tła o czynnik $\sim 3 \cdot 10^{-5}$



Ciemna materia

Eksperyment SuperCDMS

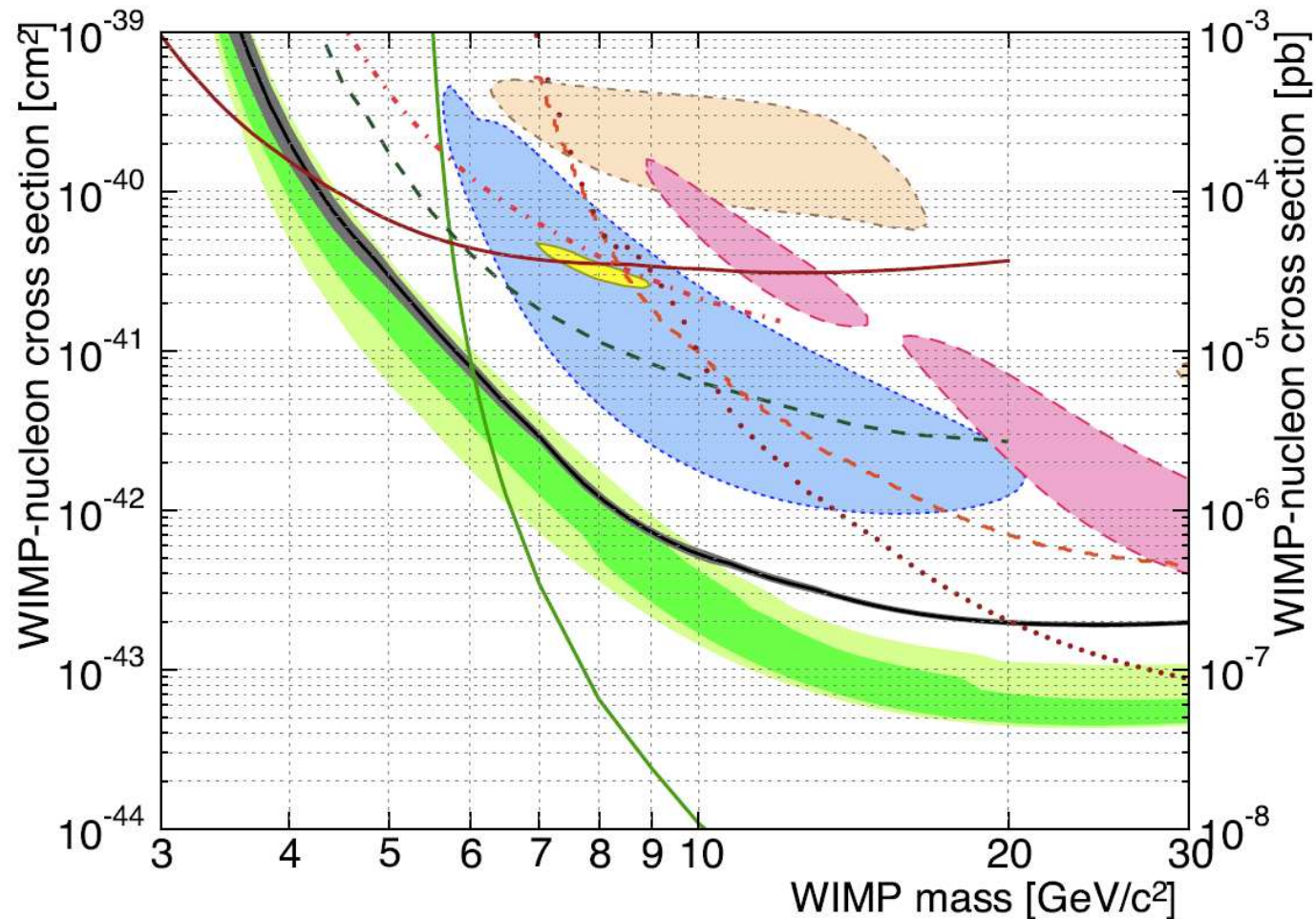
Ostateczna identyfikacja przypadków odbywa się z wykorzystaniem metod analizy wielu zmiennych (BDT - Boosted Decision Tree). Wyniki z marca 2014 (9 miesięcy danych):



Ciemna materia

Eksperyment SuperCDMS

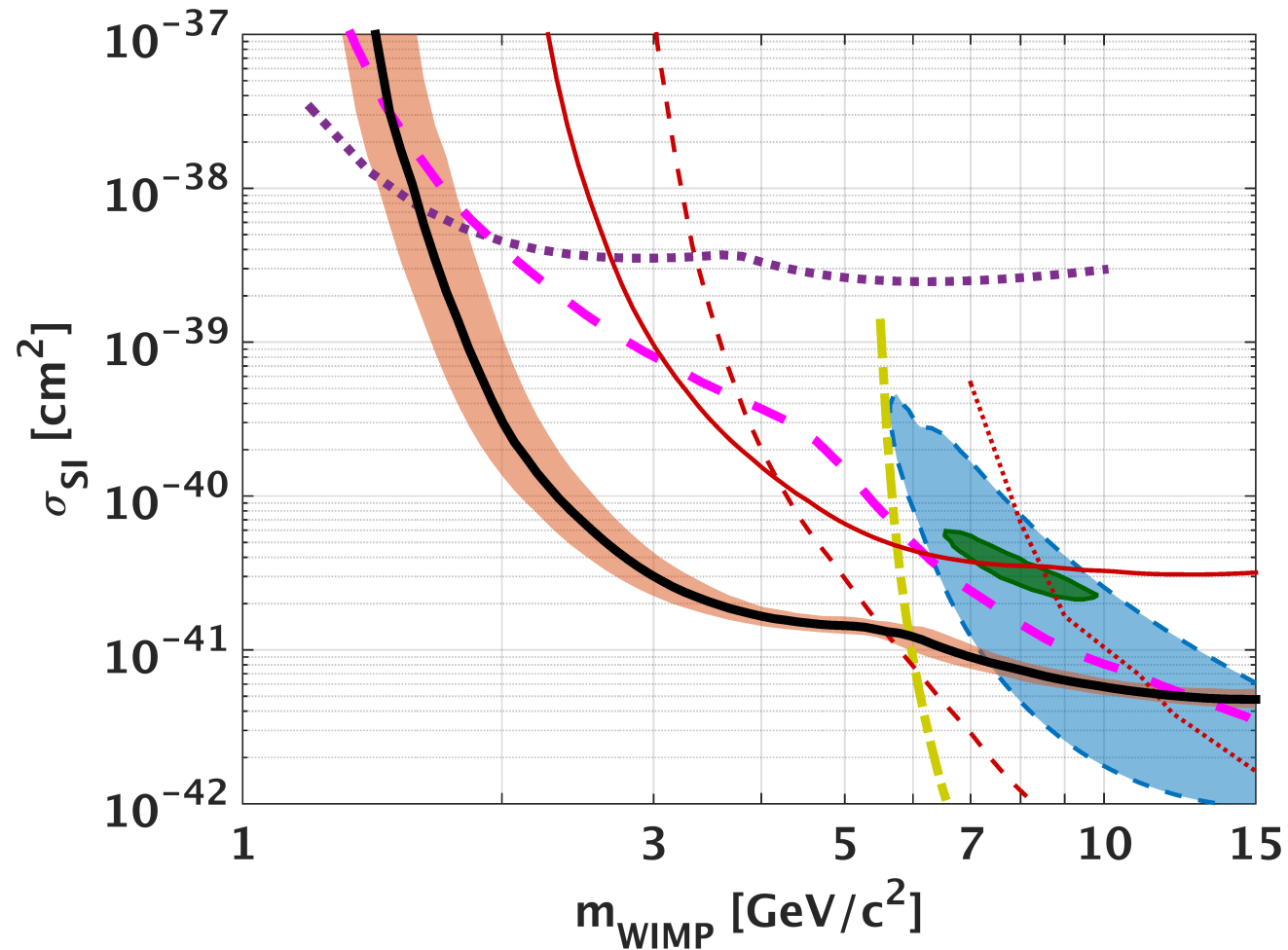
Uzyskane ograniczenia na przekrój czynny w funkcji masy cząstek DM



Ciemna materia

Eksperyment CDMSlite

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



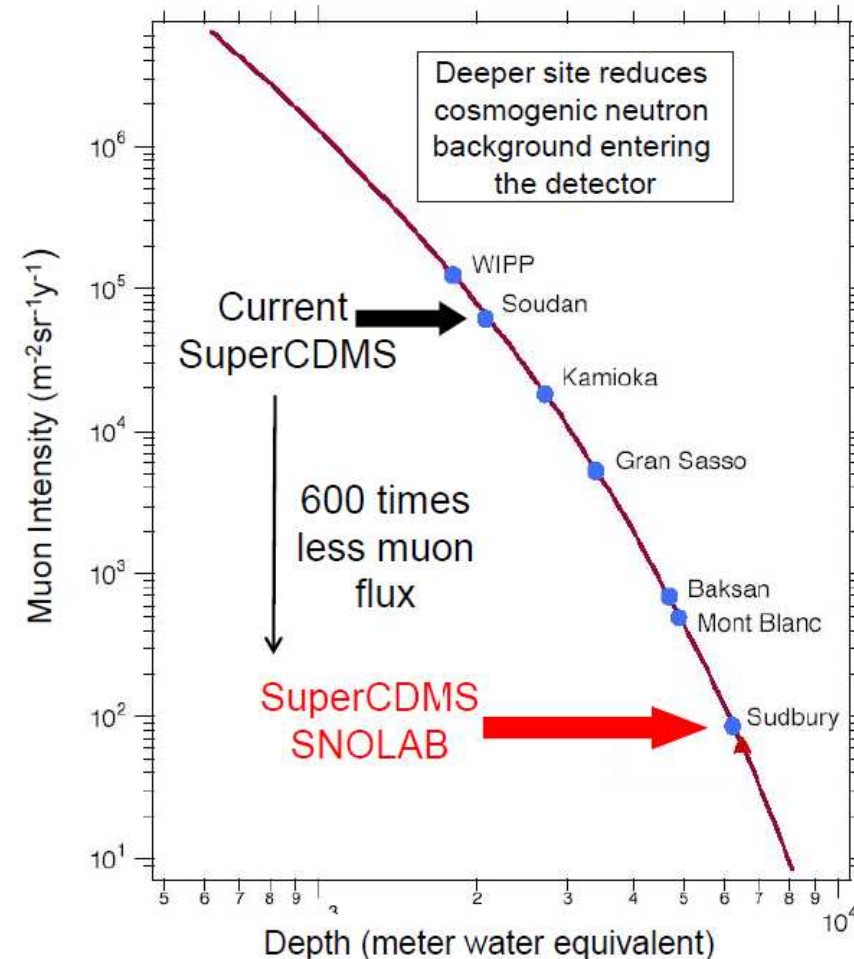
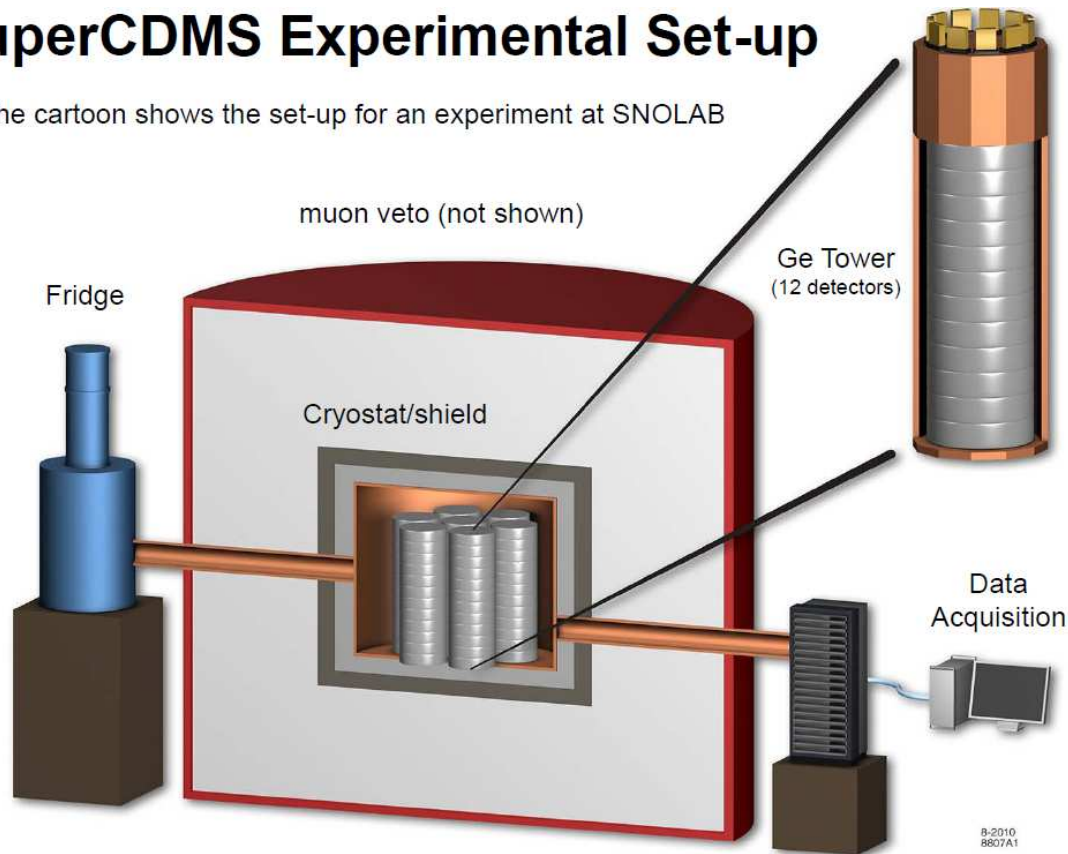
Ciemna materia

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

