

Poszukiwanie neutrin z anihilacji Ciemnej Materii w Super-Kamiokande



Piotr Mijakowski

Narodowe Centrum Badań Jądrowych

PLAN

- » Wstęp - Ciemna Materia
- » Wybrane wyniki eksperymentalne (detekcja bezpośrednia i pośrednia)
 - CRESST **NEW!** 2011/IX arXiv:1109.0702v1
- » Super-Kamiokande
- » Poszukiwanie neutrin z anihilacji Ciemnej Materii w oparciu o dane z Super-Kamiokande
 - Poszukiwanie sygnału ze Słońca **NEW!** 2011/XI arXiv:1108.3384
 - Poszukiwanie sygnału w rozproszonym strumieniu neutrin z całej Galaktyki **NEW!**
- » Podsumowanie

Wstęp – Ciemna Materia

Ciemna Materia we Wszechświecie

Zagadkowy składnik masy Wszechświata. Postulowane słabe oddziaływania z materią. Grawitacyjny wpływ na otaczającą materię. Determinuje ewolucję Wszechświata.

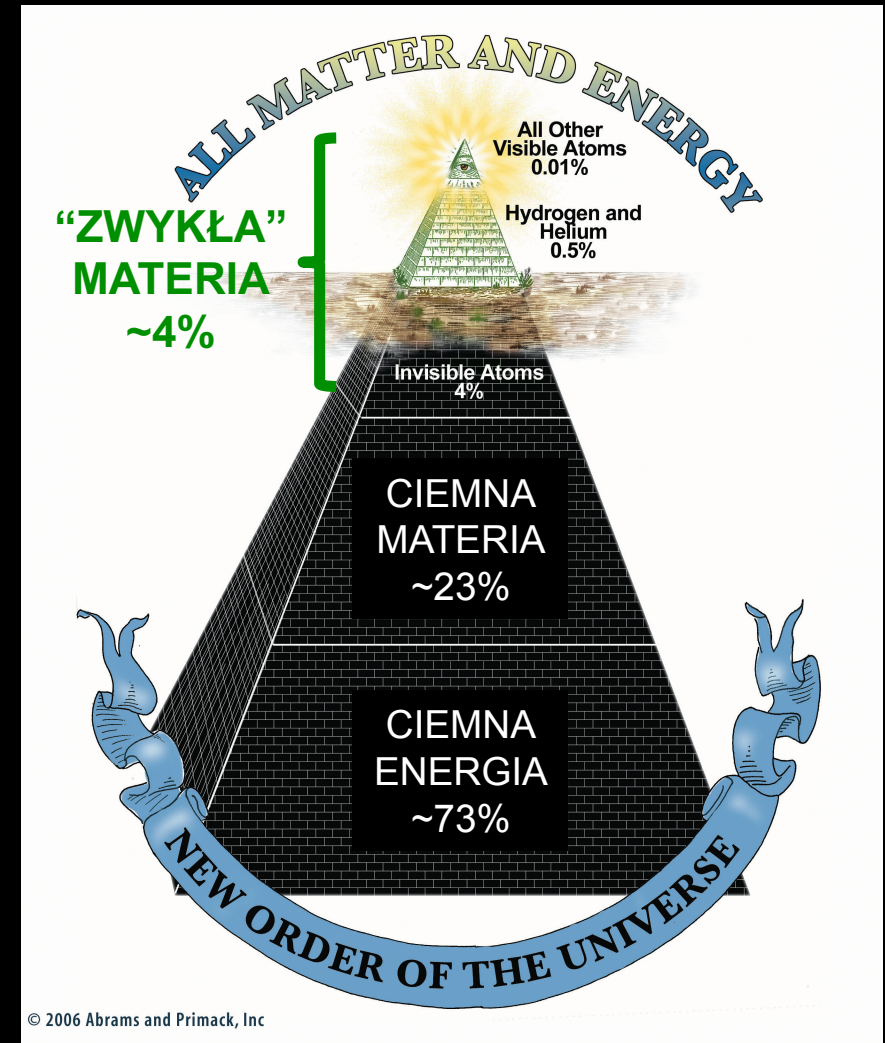
Obserwacje sugerujące istnienie Ciemnej Materii

- » *Kinematyka układów galaktyk*
- » *Rozkład prędkości rotacji galaktyk*

CM stanowi > 90% masy galaktyk



- » *Soczewkowanie grawitacyjne*
- » *Rozkład niejednorodności mikrofalowego promieniowania tła*
- » *Formacja struktur wielkoskalowych*
- » *Pomiar zawartości lekkich pierwiastków i modele nukleosyntezy*

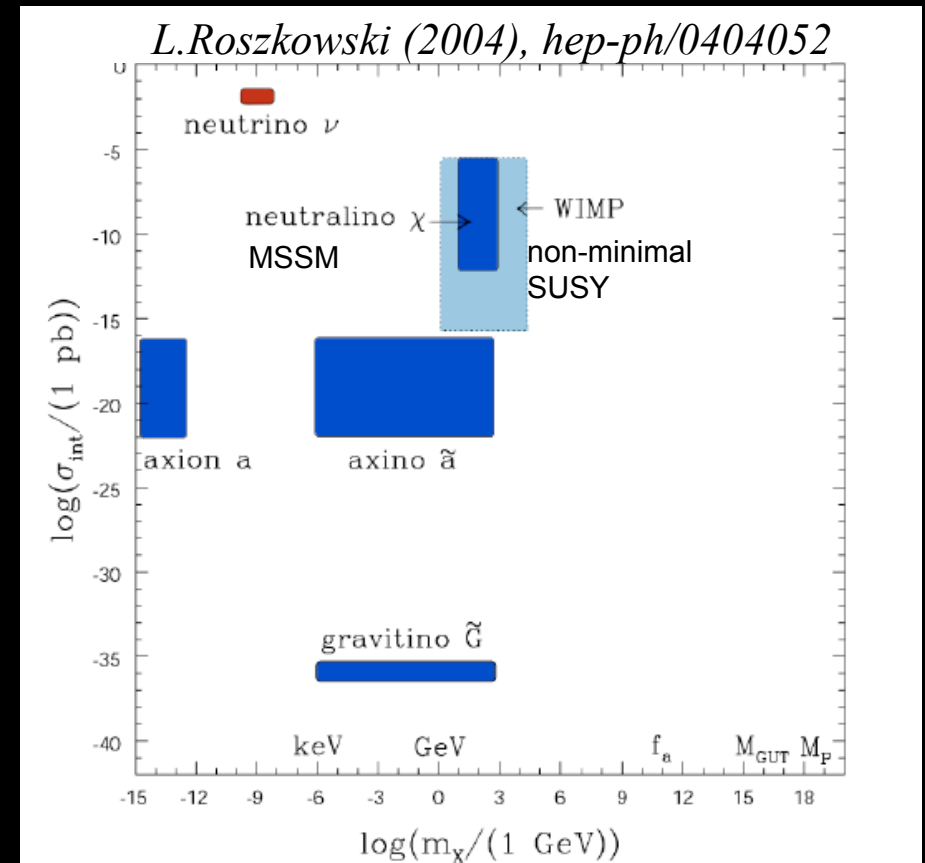


Kandydaci na cząstkę CM

Dobrze uzasadnieni kandydaci:

- » ~~neutrino~~ – ‘gorąca’ CM
- » neutralino χ
- » WIMP
- » aksjon a
- » axino \tilde{a}
- » grawitino \tilde{G}

**GŁÓWNY
KANDYDAT**



Kandydaci na cząstkę CM

Dobrze uzasadnieni kandydaci:

- » ~~neutrino~~ – ‘gorąca’ CM
- » neutralino χ
- » WIMP
- » aksjon a
- » axino \tilde{a}
- » grawitino \tilde{G}

**GŁÓWNY
KANDYDAT**

WIMP (Weakly Interacting Massive Particle)
Najpowszechniej rozważany kandydat

neutralino χ

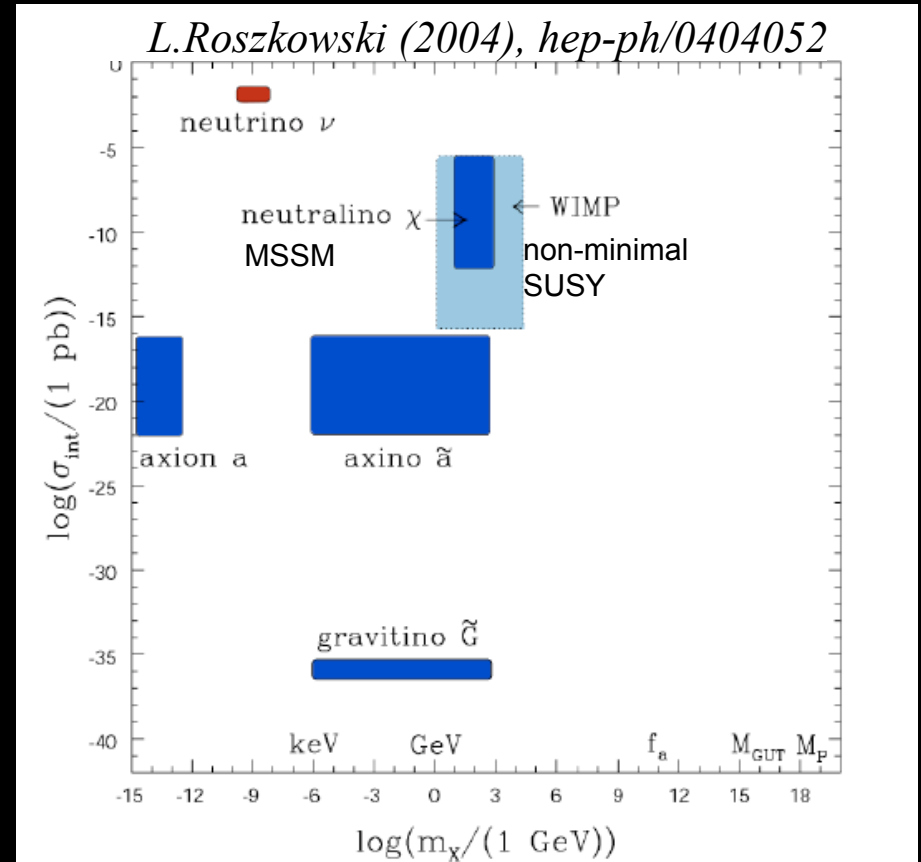
$$\tilde{\chi} = a_1 \tilde{\gamma} + a_2 \tilde{Z} + a_3 \tilde{H}_1 + a_4 \tilde{H}_2$$

kilka GeV < M_χ < kilkanaście TeV

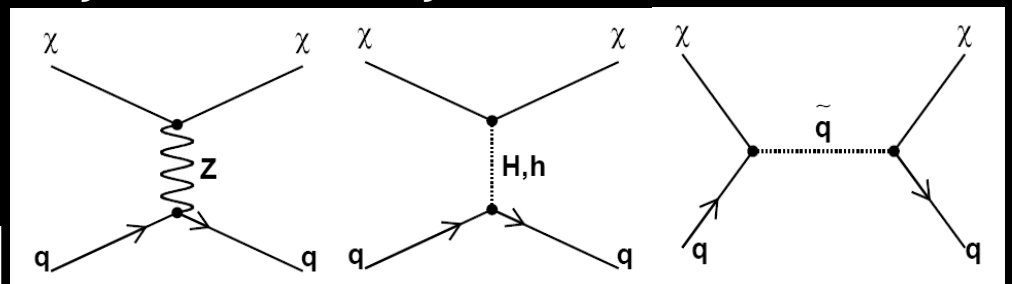
LEP

kosmologia

Bottino et al., Phys.Rev.D69:037302 (2004)



Przykładowe oddziaływania neutralin



Jungman, Kamionkowski, Griest, Phys. Rep., 267, 195 (1996)

Metody poszukiwania Ciemnej Materii

SM: cząstka z Modelu Standardowego

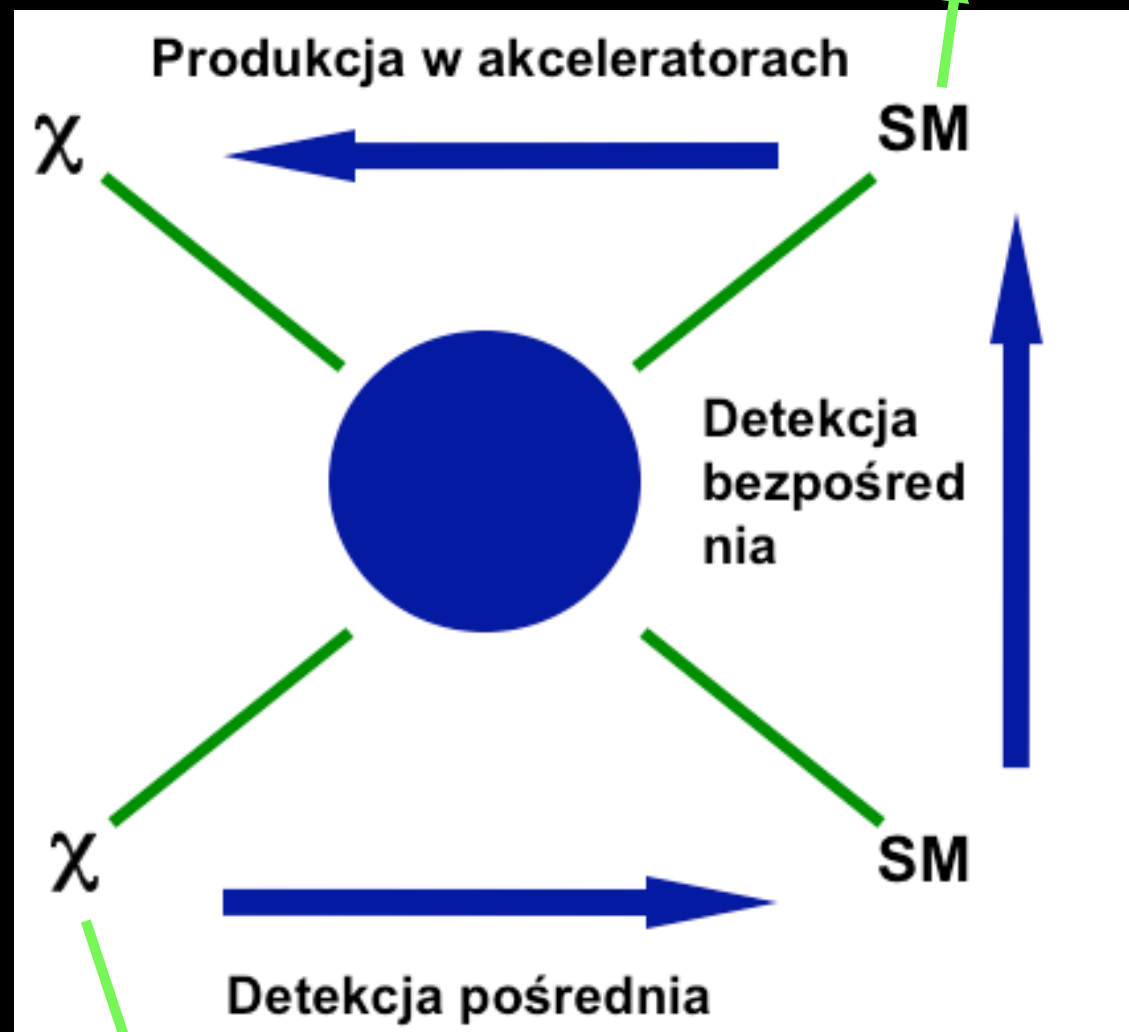
» Detekcja pośrednia:

- Poszukiwanie produktów anihilacji/rozpadu χ (cząstka Majorany) jak np. elektrony/pozytony, hadrony/anty-hadrony, neutrino, fotony

» Detekcja bezpośrednia:

- Elastyczne rozpraszanie χ -jądro

» Akceleratory (LHC)

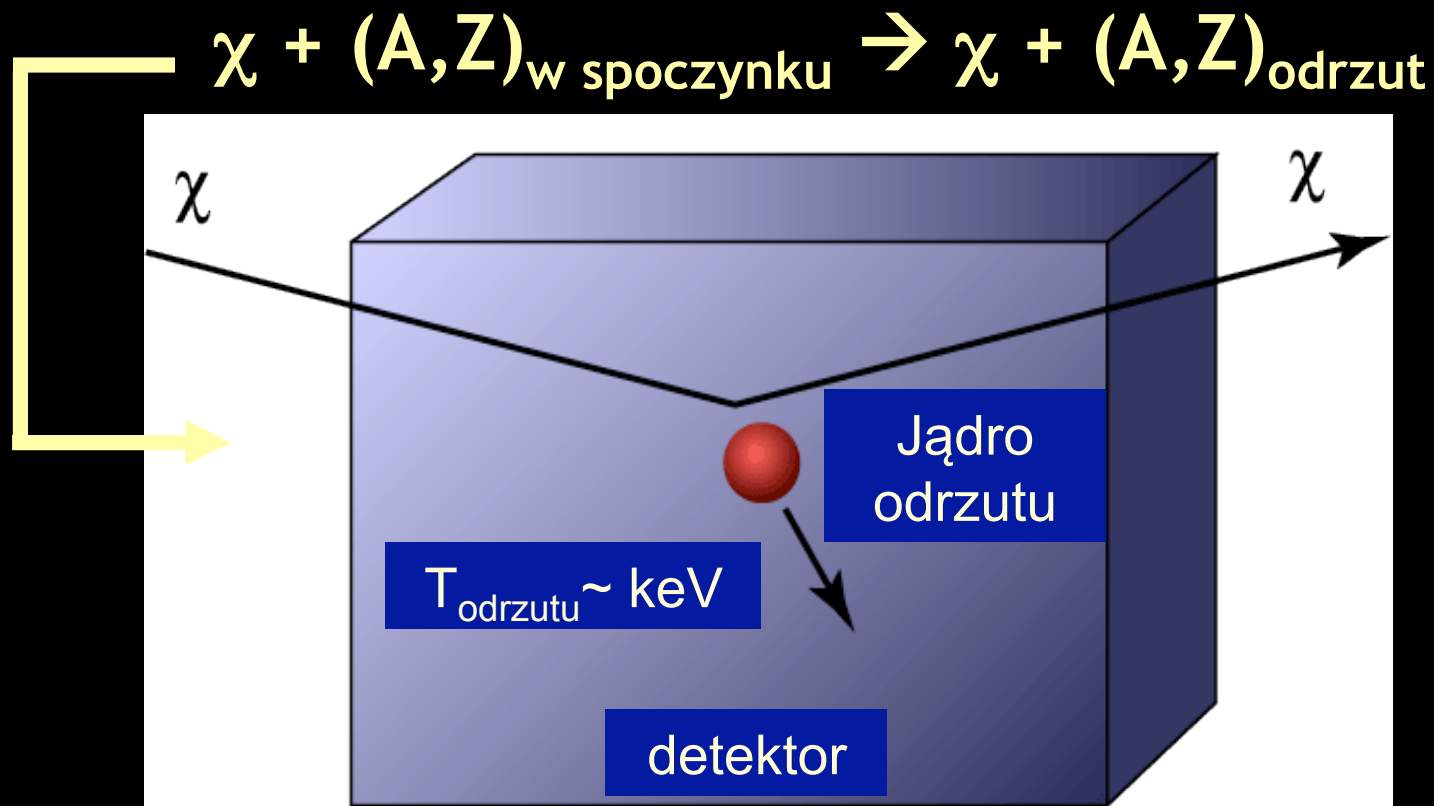


χ : cząstka Ciemnej Materii

Detekcja bezpośrednia

Metoda detekcji bezpośredniej

- » Elastyczne rozpraszanie WIMP-jądro



mierzymy energię jąder odrzutu
z elastycznego rozpraszania
WIMP-ów

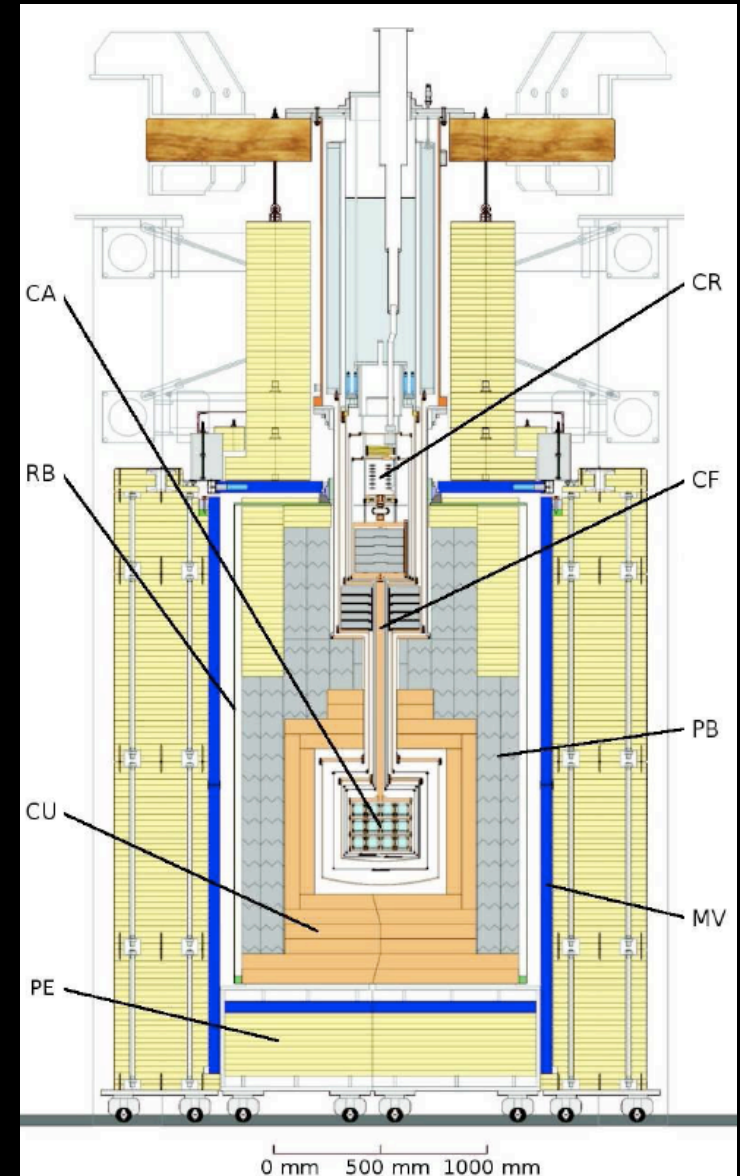
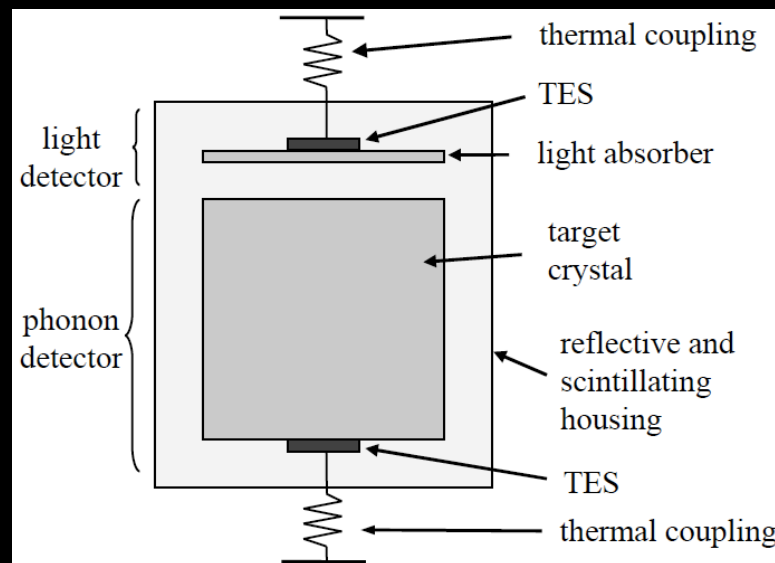
oczekiwana bardzo mała częstość
zdarzeń, mniej niż kilkadziesiąt
przypadków na rok na kg

CRESST

Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers

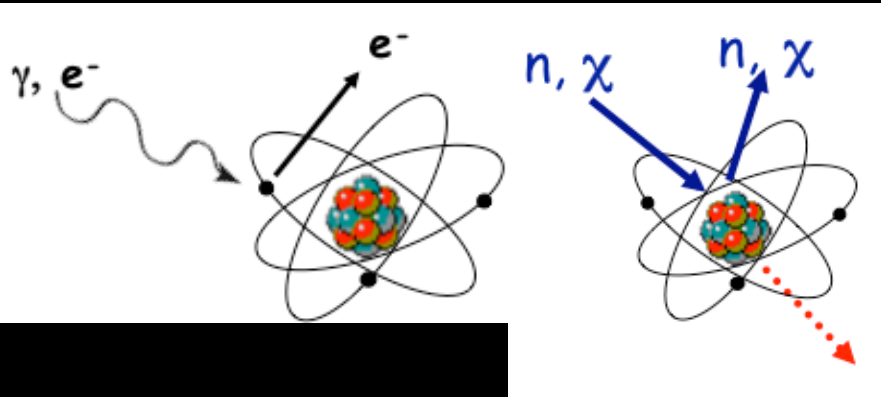
- » Gran Sasso, Włochy (4000 m w.e.)
- » Detektory CaWO_4 – drgania sieci krystalicznej (ΔT), scyntylacje
- » 1 moduł 300 g, działanie w temp. 10mK
- » 2011/IX publikacja danych z 8 modułów, 730 kg·dni (2009/VII – 2011/III)

- » Oddział. WIMPów przewid. w zakresie 12-40 keV (rozprasza nie na O,Ca,W)



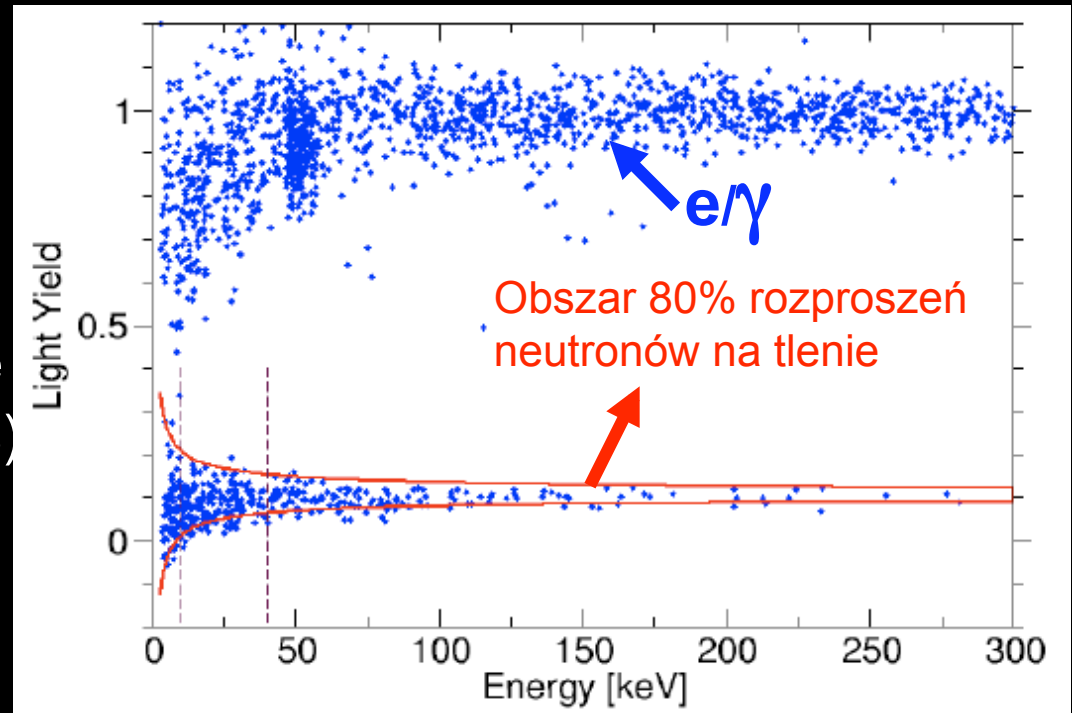
CRESST

Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers



- Dominujące w doświadczeniu cząstki tła (e/γ) rozpraszają się na elektronach (electron recoils)
- WIMPy, neutrony i α rozpraszają się na jądrach (nuclear recoils)
- “Light yield” zależy od typu rozpraszania

Kalibracja źródłem neutronów AmBe Dane dla 1 modułu



Normalizacja: ‘light yield’ = 1 dla $E_\gamma = 122$ keV

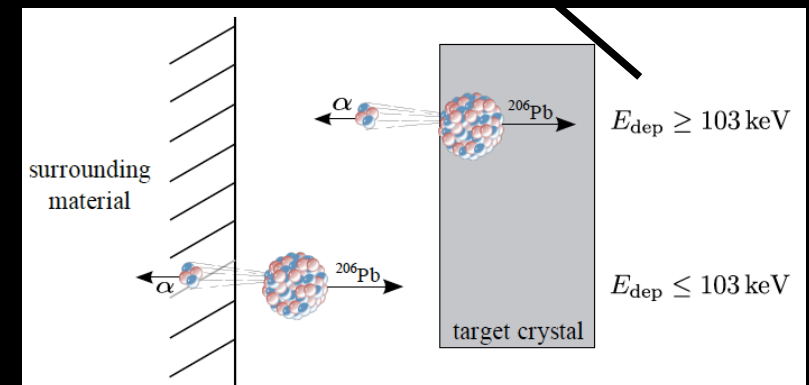
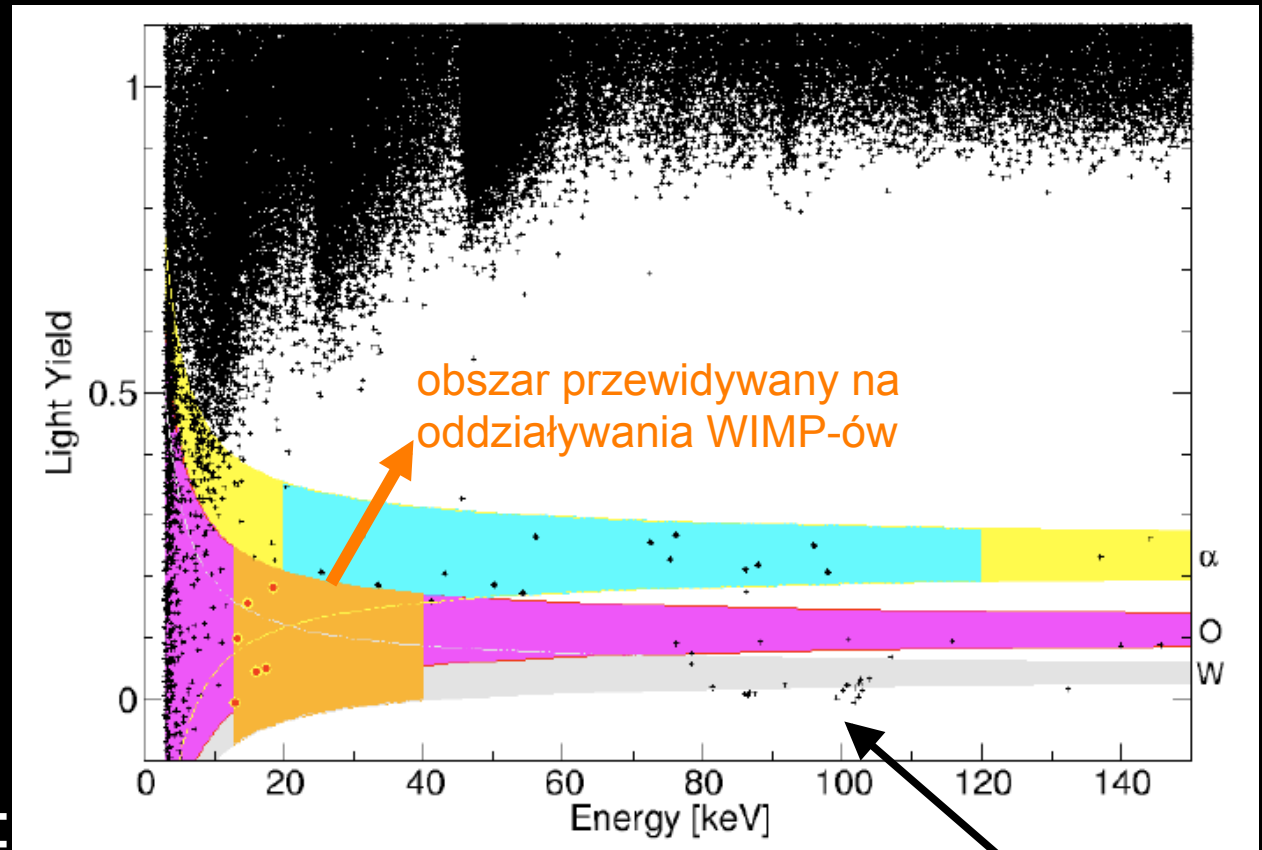
CRESST – wyniki

Wyniki z jednego modułu →

W obszarze sygnału
zaobserwowano łącznie **69**
przypadków w 8 modułach

ŹRÓDŁA TŁA

1. e/ γ o niskich energiach
2. cząstki α
3. neutrony (pojedn. rozpr.):
 - radioaktywność: spontaniczne rozszczepienie ^{238}U , (α, n)
 - produkcja przez miony kosmiczne
4. ^{206}Pb : $^{210}\text{Po} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + \alpha$
zanieczyszczenia w klamarach
podtrzymujących detektory

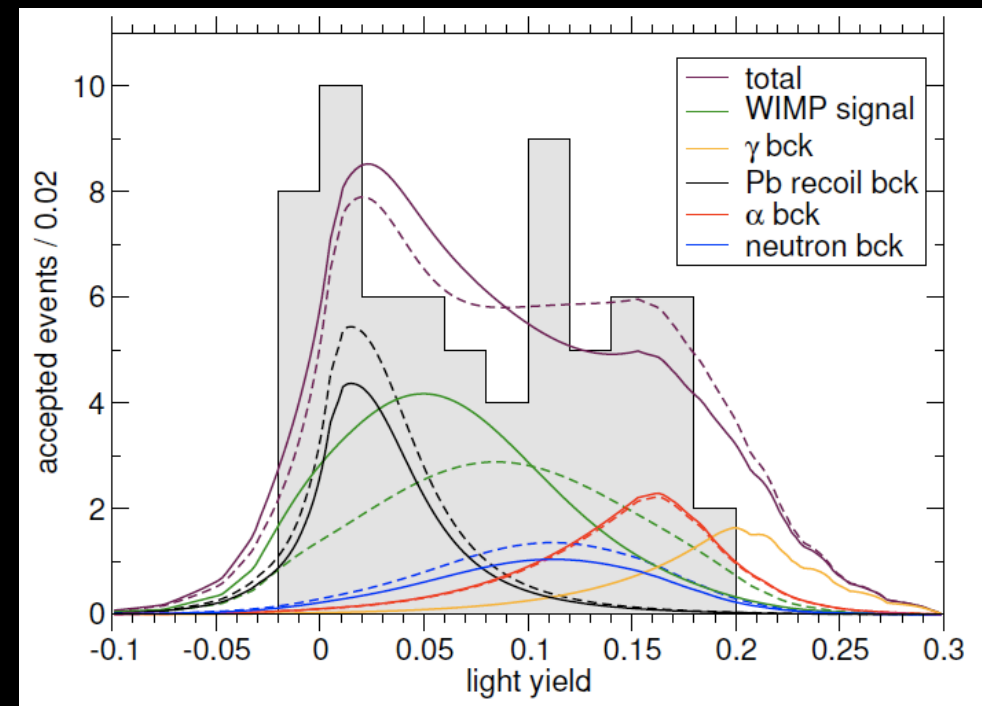
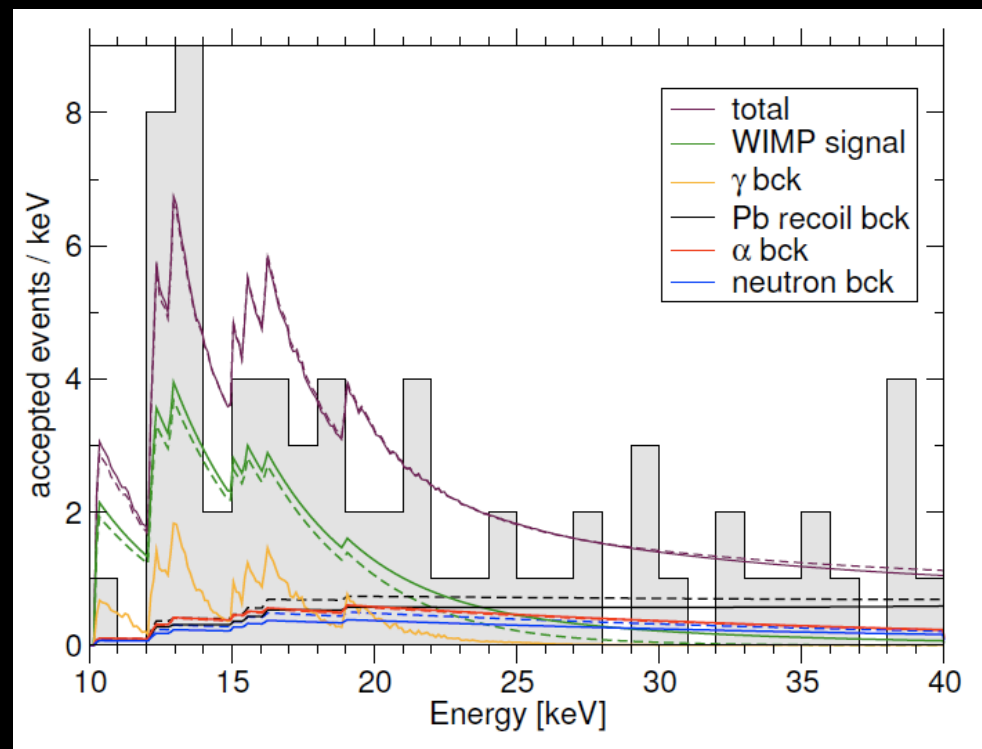


CRESST – wyniki

- » Parametryzacja wpływu źródeł tła oraz sygnału
- » FIT: ‘maximum likelihood’
- » Wynik – dwa rozwiązania M1, M2
- » Rozwiązania bez WIMP-ów odrzucone: M1 4.7σ , M2 4.2σ

	M1	M2
e/γ -events	8.00 ± 0.05	8.00 ± 0.05
α -events	$11.5^{+2.6}_{-2.3}$	$11.2^{+2.5}_{-2.3}$
neutron events	$7.5^{+6.3}_{-5.5}$	$9.7^{+6.1}_{-5.1}$
Pb recoils	$15.0^{+5.2}_{-5.1}$	$18.7^{+4.9}_{-4.7}$
signal events	$29.4^{+8.6}_{-7.7}$	$24.2^{+8.1}_{-7.2}$
m_χ [GeV]	25.3	11.6
σ_{WN} [pb]	$1.6 \cdot 10^{-6}$	$3.7 \cdot 10^{-5}$

referencja: arXiv:1109.0702v1



Detekcja bezpośrednia – stan badań

Parzysta liczba nukleonów
→ oddziaływania niezależne od spinu (SI); nieparzysta
→ zależne od spinu (SD)

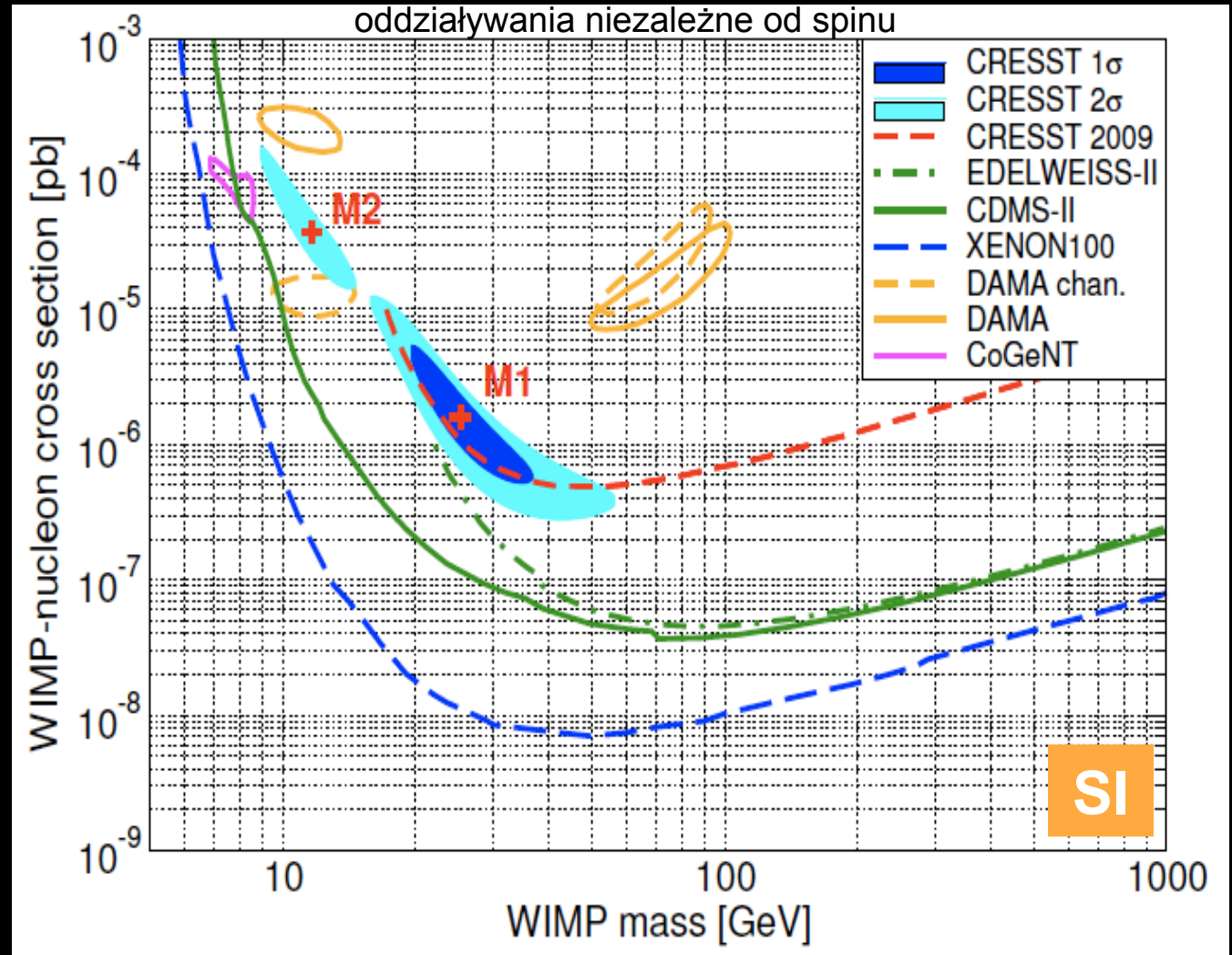
SYGNAŁ

- » DAMA/LIBRA (250 kg NaI, $0.82 \cdot 10^3$ kg·lat)
- » CoGeNT (Ge, 8.4 kg·dni)
- » CRESST (CaWO₄, 730 kg·dni)

BRAK SYGNAŁU

- » Wszystkie pozostałe eksperymenty

Stan badań w zakresie oddziaływań zależnych od spinu → W DALSZEJ CZĘŚCI



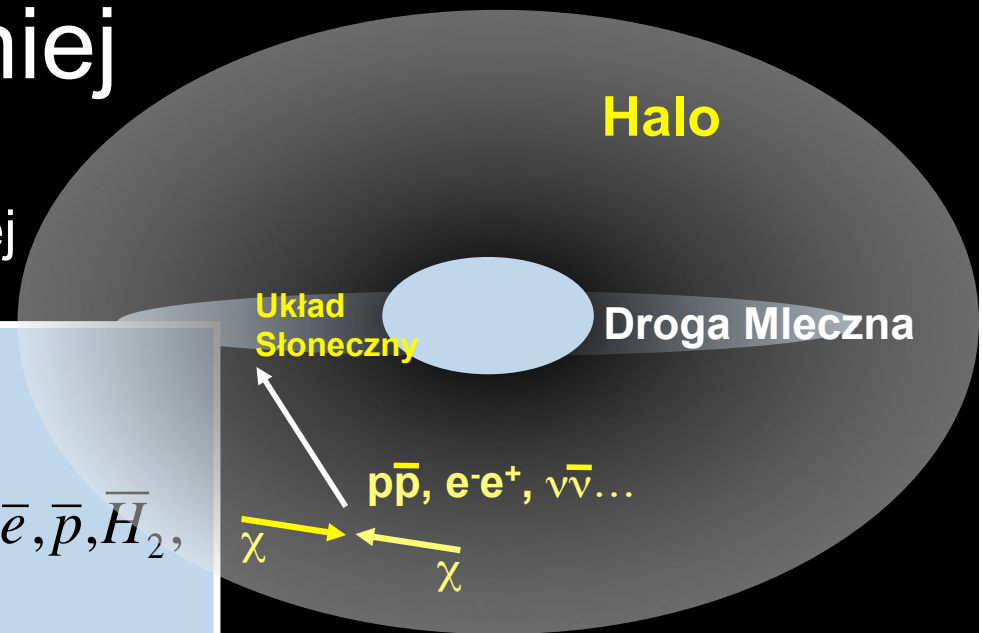
- » linie – obszary wykluczone powyżej na poziomie ufności 90%
- » kontury – jest sygnał, dopasowanie do wyników eksperymentów

Detekcja pośrednia

Idea detekcji pośredniej

- » Detekcja pośrednia = poszukiwanie produktów/rozpadu anihilacji Ciemnej Materii

$$\chi\chi \rightarrow \begin{cases} q\bar{q} (c\bar{c}, b\bar{b}, t\bar{t}, \dots) \\ \bar{l}l \\ W^\pm, Z^0, H \end{cases} \rightarrow \dots \rightarrow \nu, \gamma, e^-, \bar{p}, \bar{H}_2,$$



- **fotony**

produkowane w wielu kanałach anihilacji w rozpadach π^0 ,
dobra informacja nt. kierunku i widma energii (w skali galaktyki)

- **antymateria: pozytywny, anty-deuteron, antyproton**

docierają z odległości kilku kpc, eksperymenty na satelitach lub balonowe

- **neutrino**

bardzo dobra informacja nt. źródła (kierunek, energia)
docierają z gęstych obszarów (Słońce, jądro Ziemi, Centrum Galaktyki)

Detekcja pośrednia – stan badań

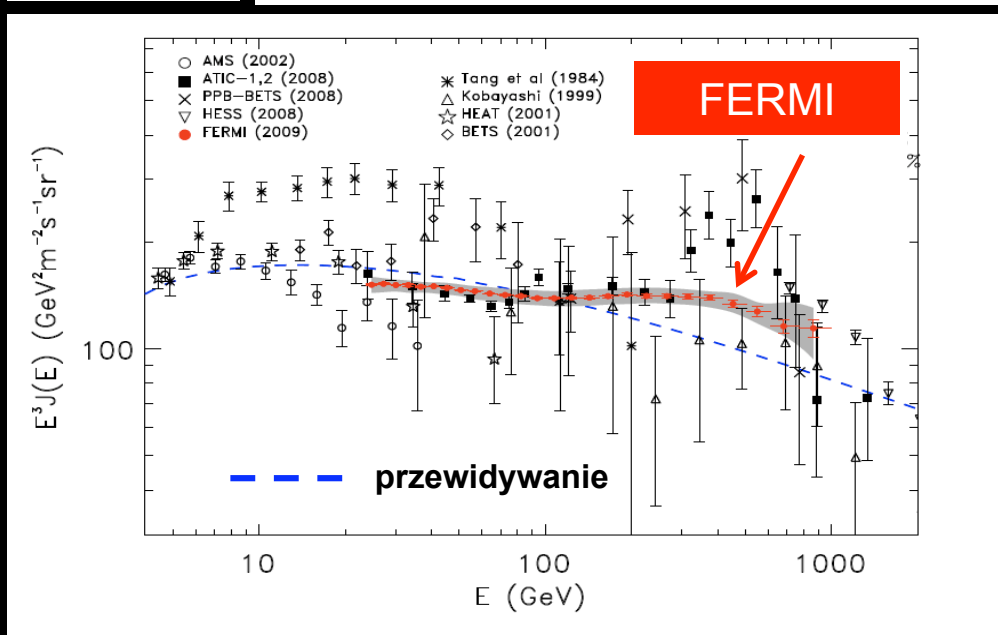
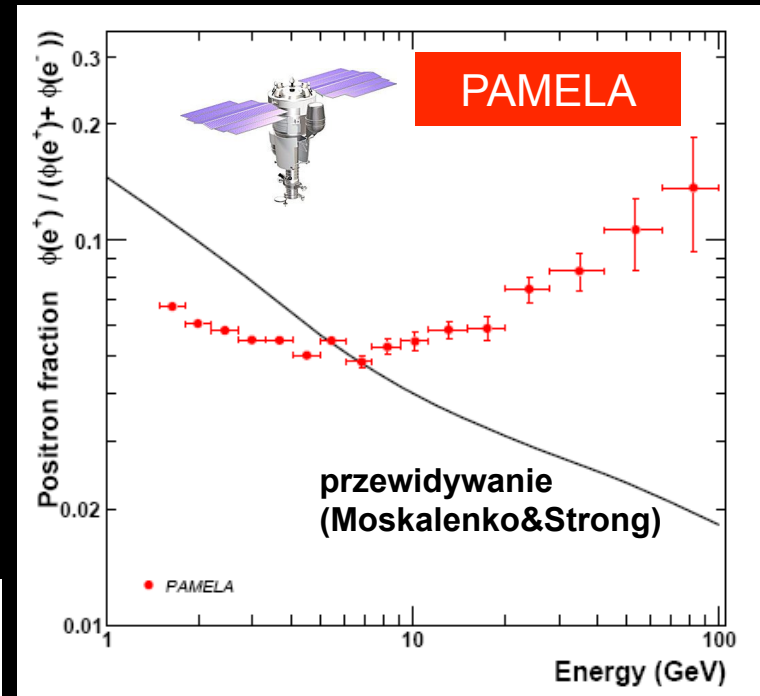
» PAMELA (2009):

- pomiar frakcji pozytonów w pierwotnym promieniowaniu kosmicznym → niezgodność z przewidywaniem
- Pomiar anty-protonów → zgodność z oczekiwaniami

» FERMI (2010) – nadwyżka ($e^+ + e^-$)

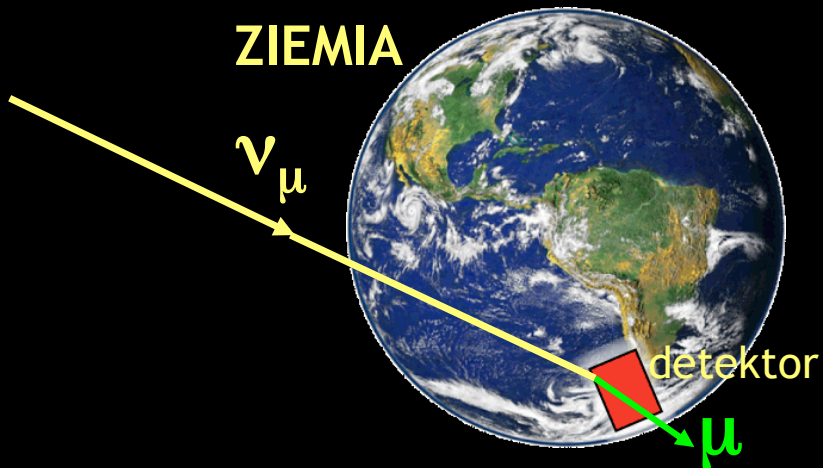
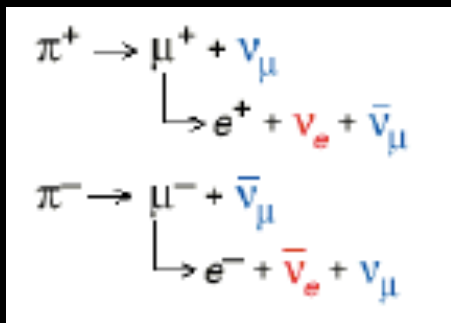
- ## » Obserwacje możliwe do wyjaśnienia przez kilka czynników: (1) pobliski pulsar (2) niepoprawna ocena strum. prom. kosm. (3) anihilacja Ciemnej Materii

Czy CM anihiluje tylko w leptony (brak nadwyżki anty-protonów)? Jeśli tak to spodziewamy się również zaobserwować nadmiar neutrin.

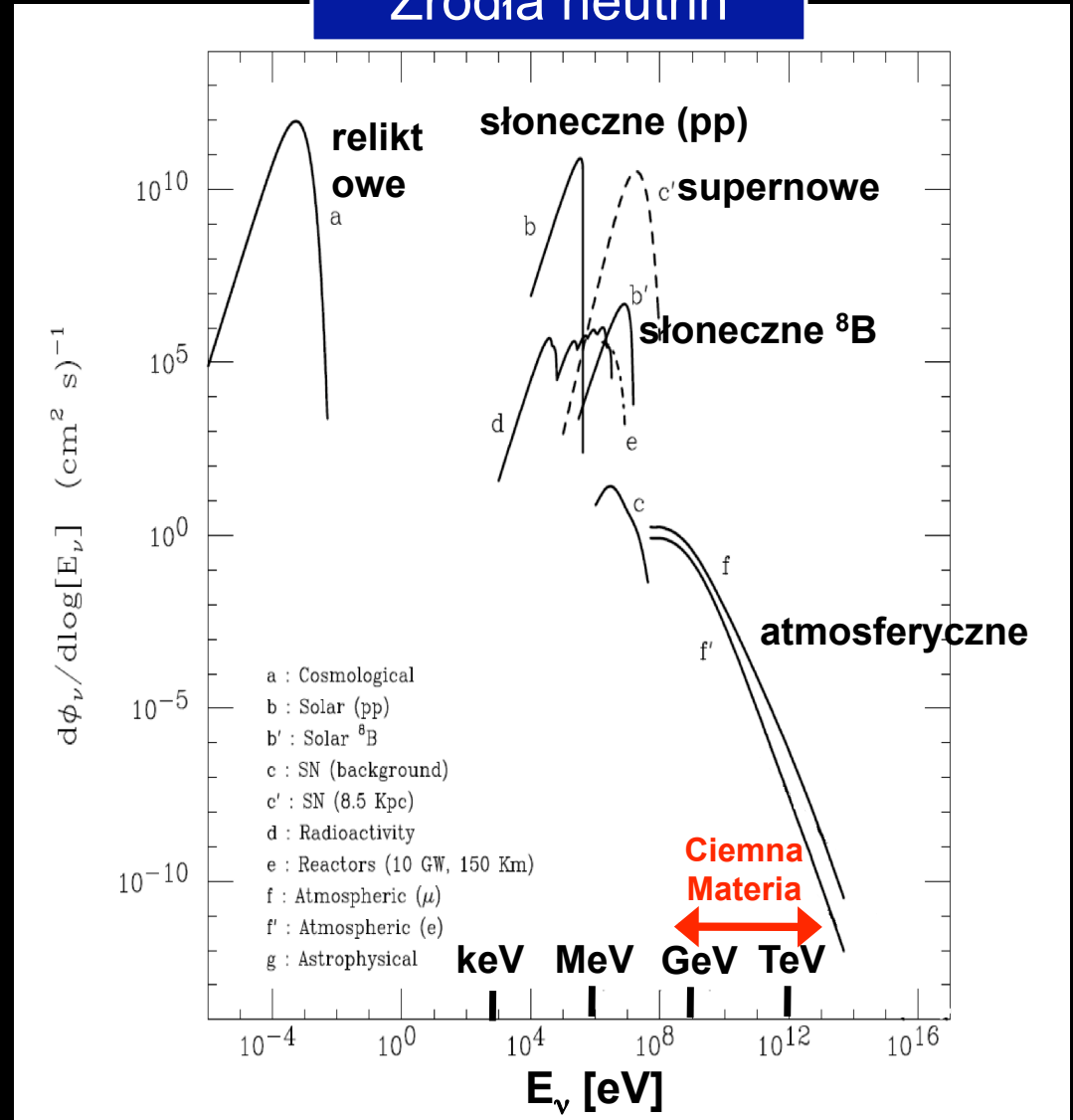


Poszukiwanie neutrin z anihilacji Ciemnej Materii

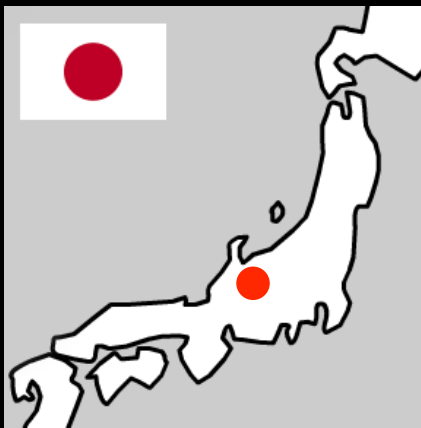
» Główne tło doświadczalne w poszukiwaniach neutrin z anihilacji CM stanowią neutrina atmosferyczne



Źródła neutrin



Super-Kamiokande



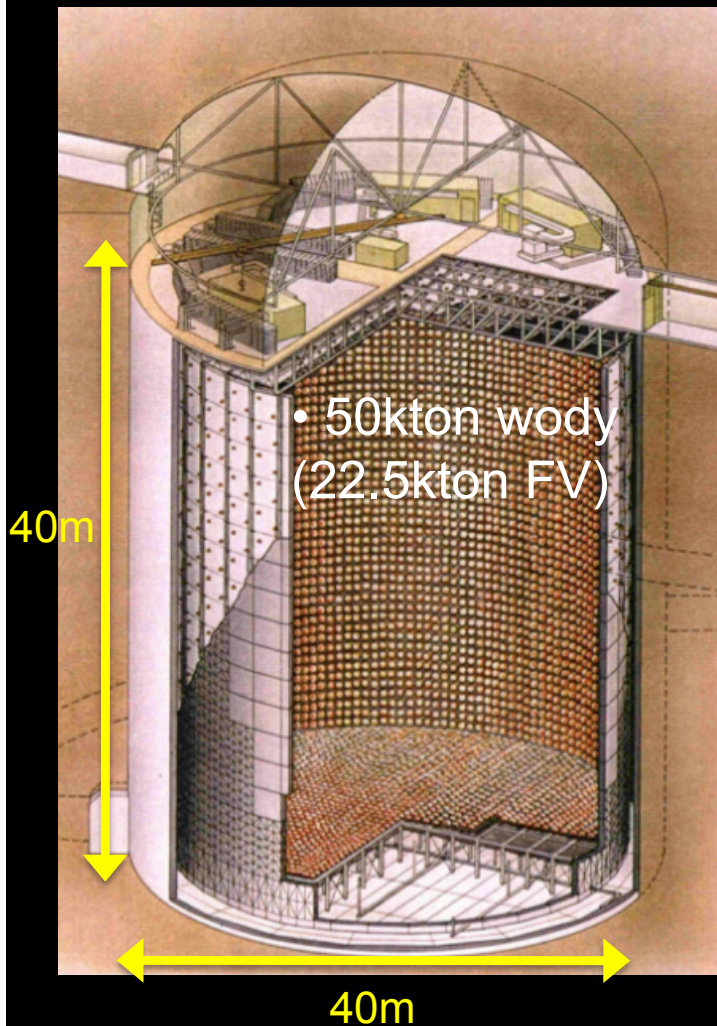
Jak rejestrowane są oddziaływania neutrin?



Super-Kamiokande

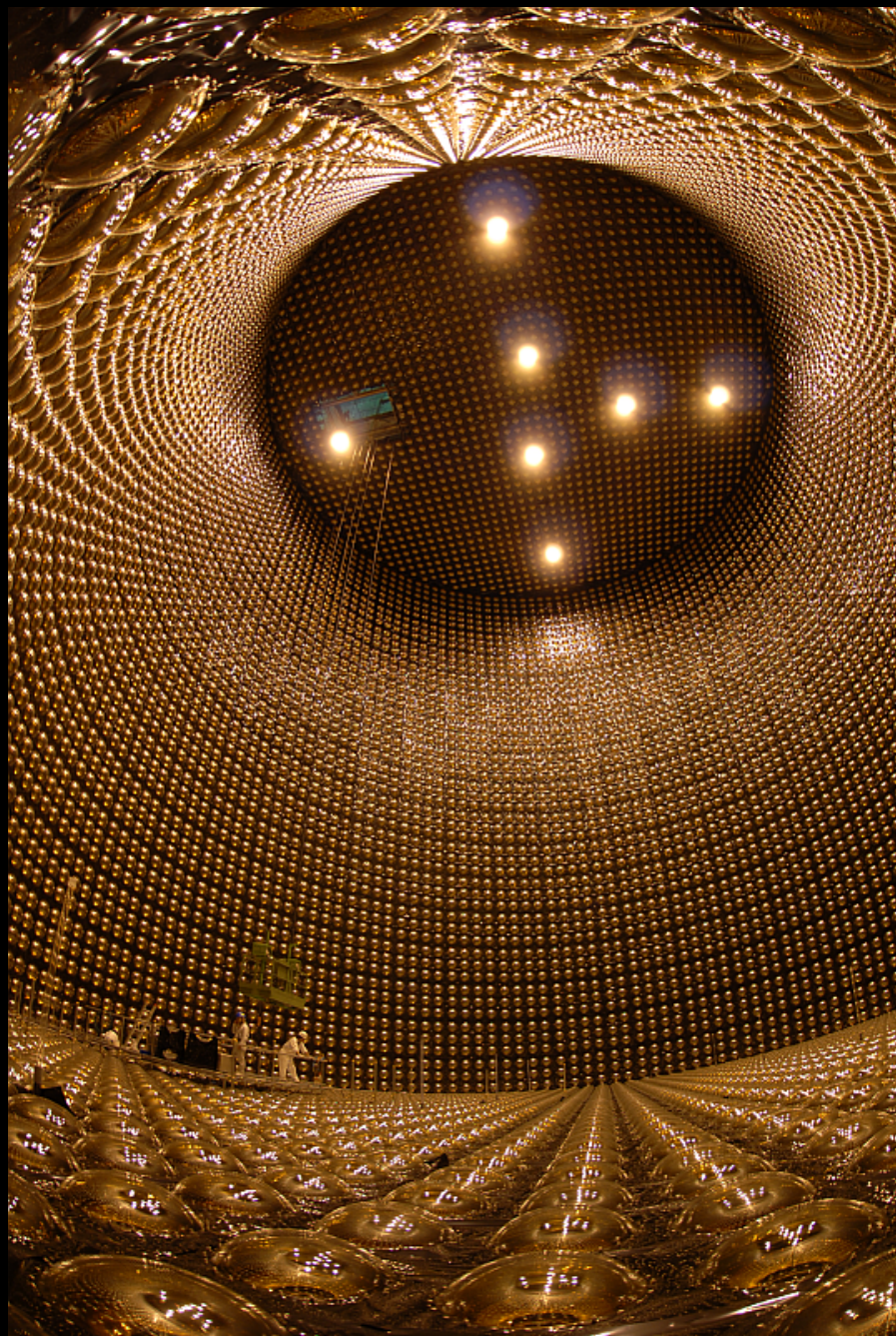
Obserwatorium Kamioka, Japonia

- Fotopowielacze (PMT) rejestrują światło emitowane przez cząstkę naładowaną, która porusza się z $V > c$ (w wodzie) \rightarrow prom. Czerenkowa



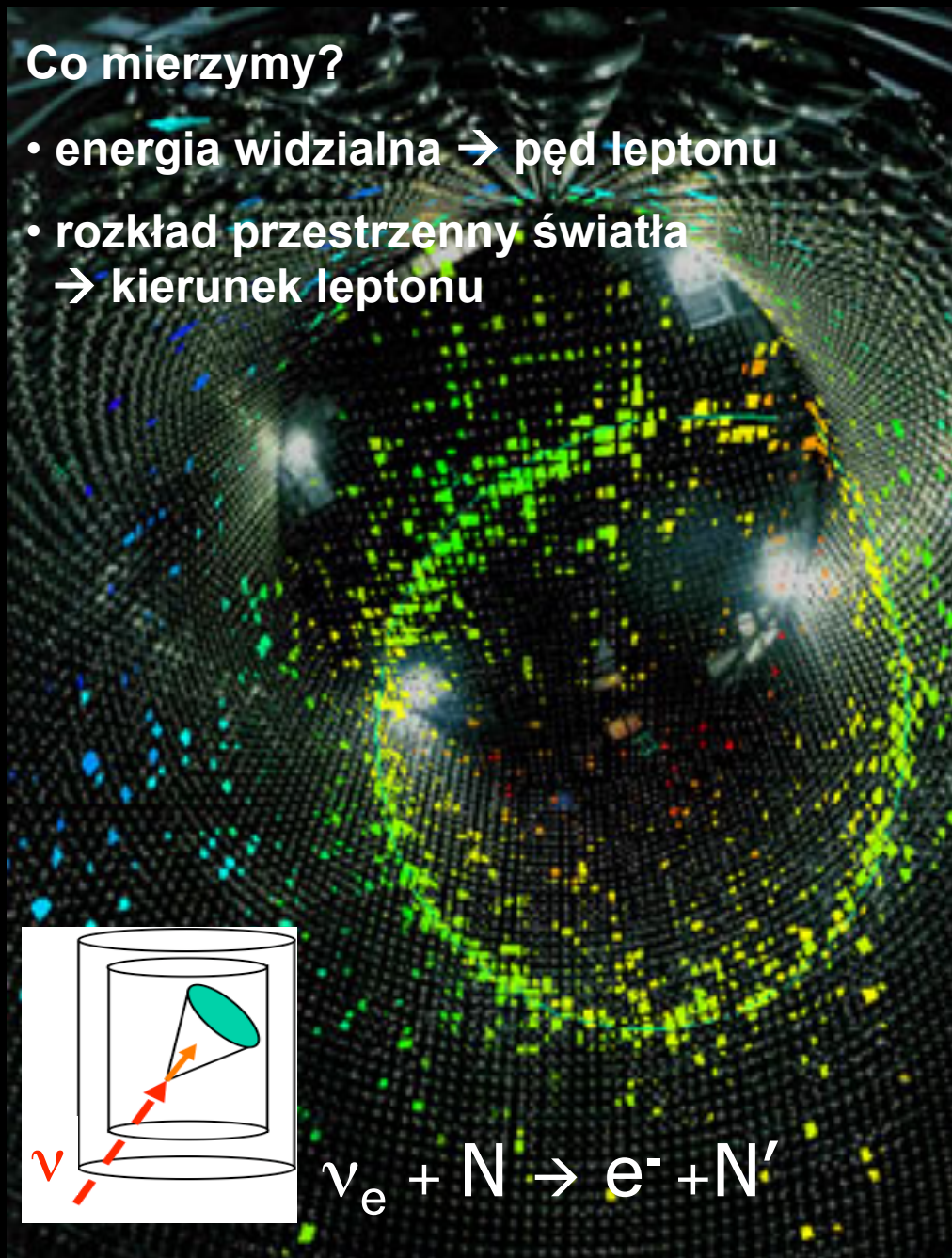
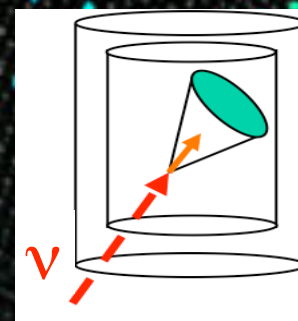
- światło \rightarrow rekonstrukcja energii neutrina i jego kierunku

- SK działa od 1996 r.
- rejestruje ν atm./słon./reaktorowe/kosmiczne
- SK odkrył zjawisko oscylacji neutrin atmosferycznych (1998)
- daleki detektor w **T2K**

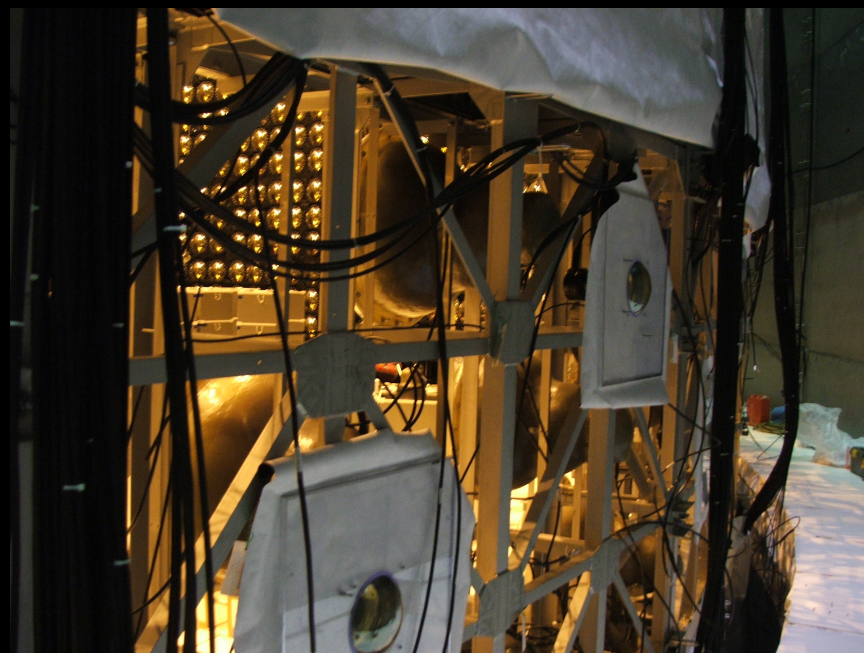


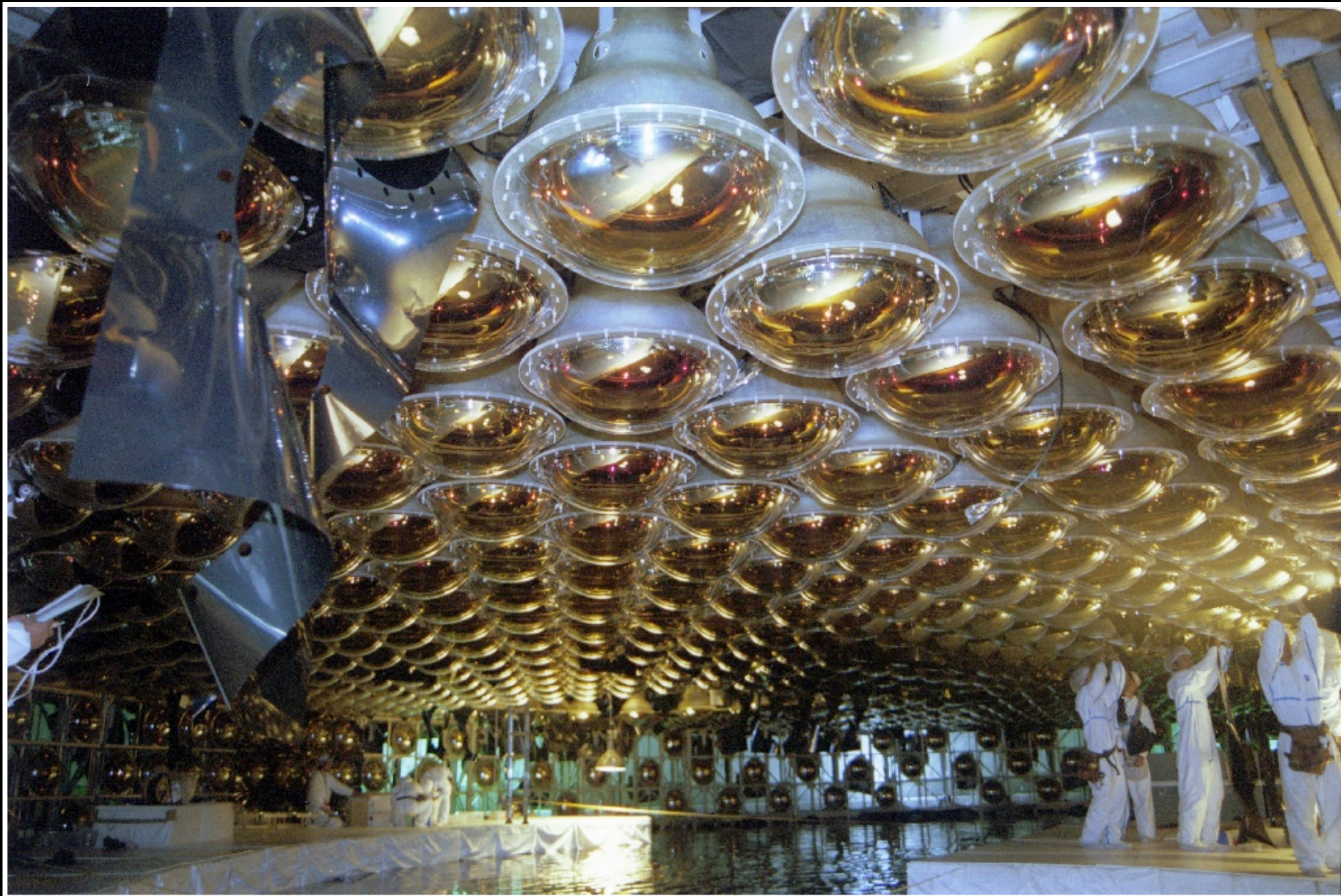
Co mierzymy?

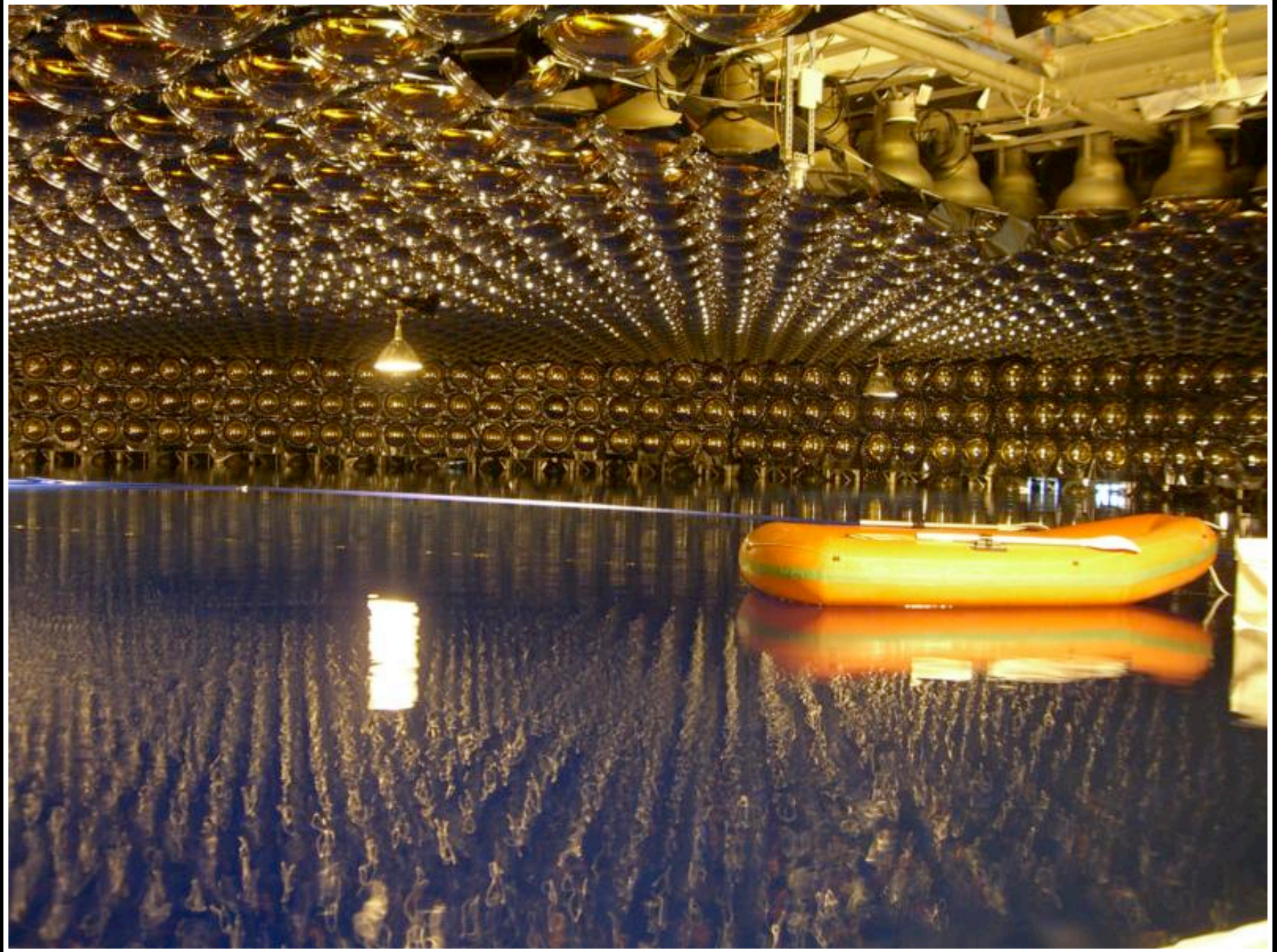
- energia widzialna \rightarrow pęd leptonu
- rozkład przestrzenny światła \rightarrow kierunek leptonu

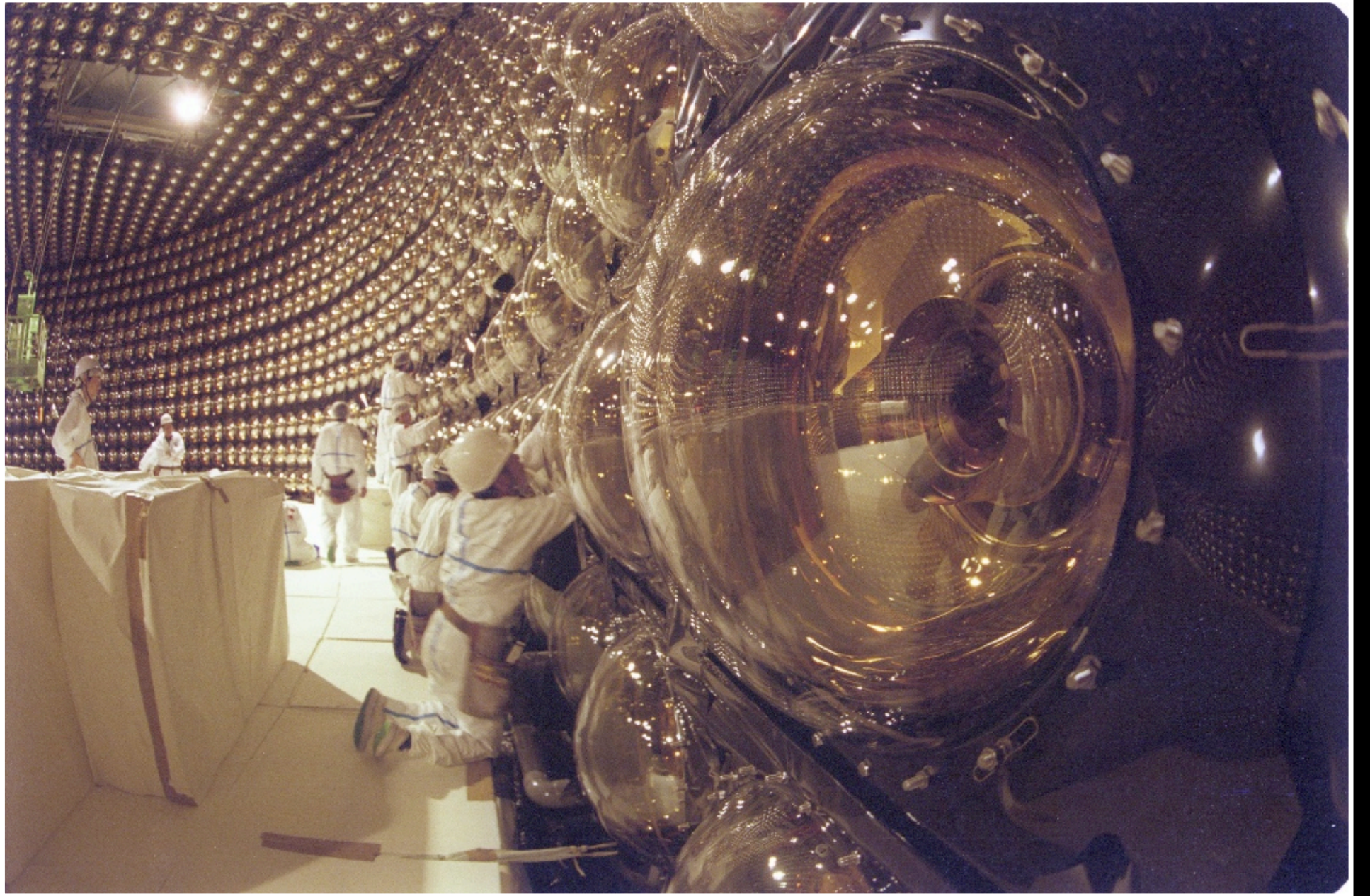


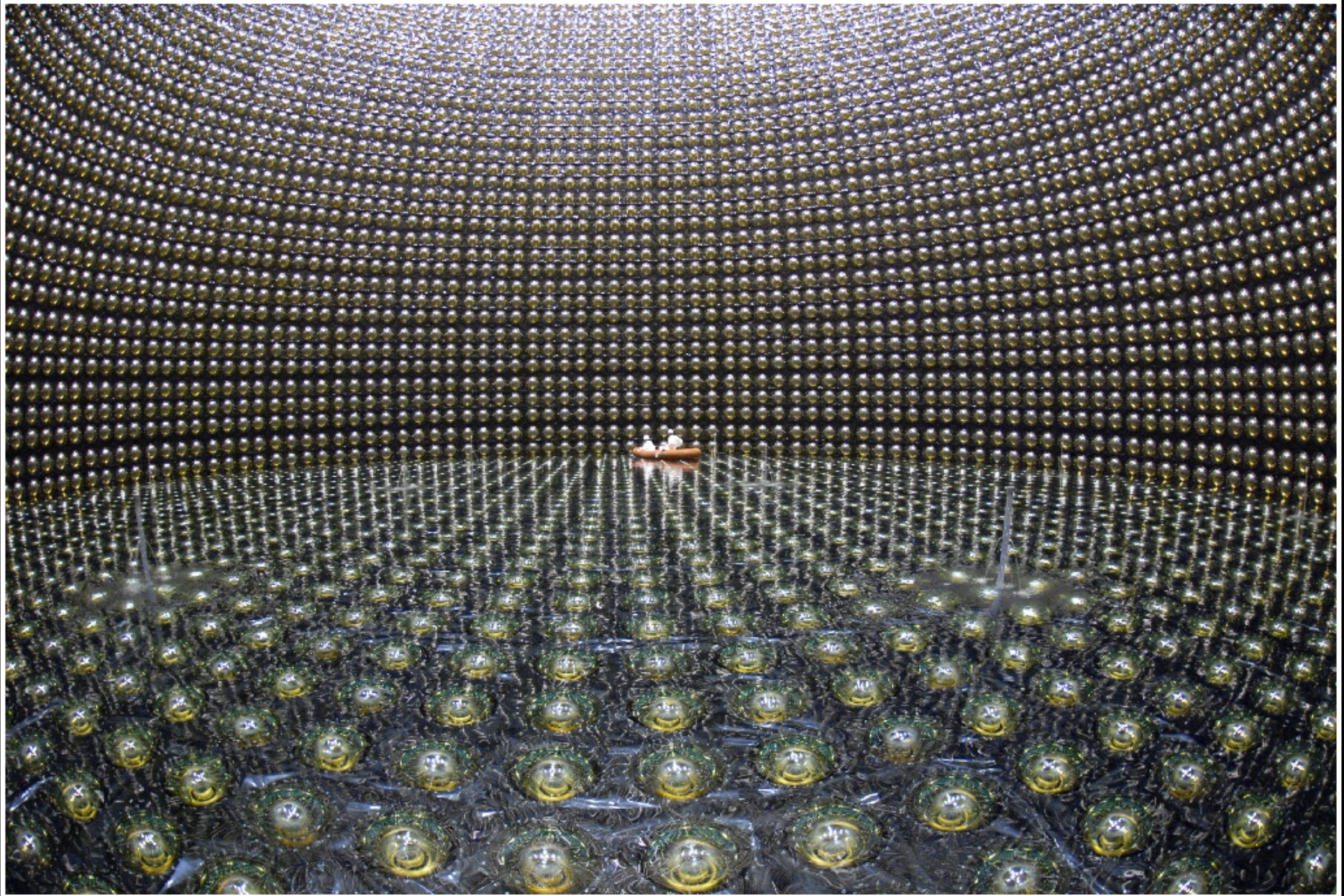
Prace przy SK w 2006 r.

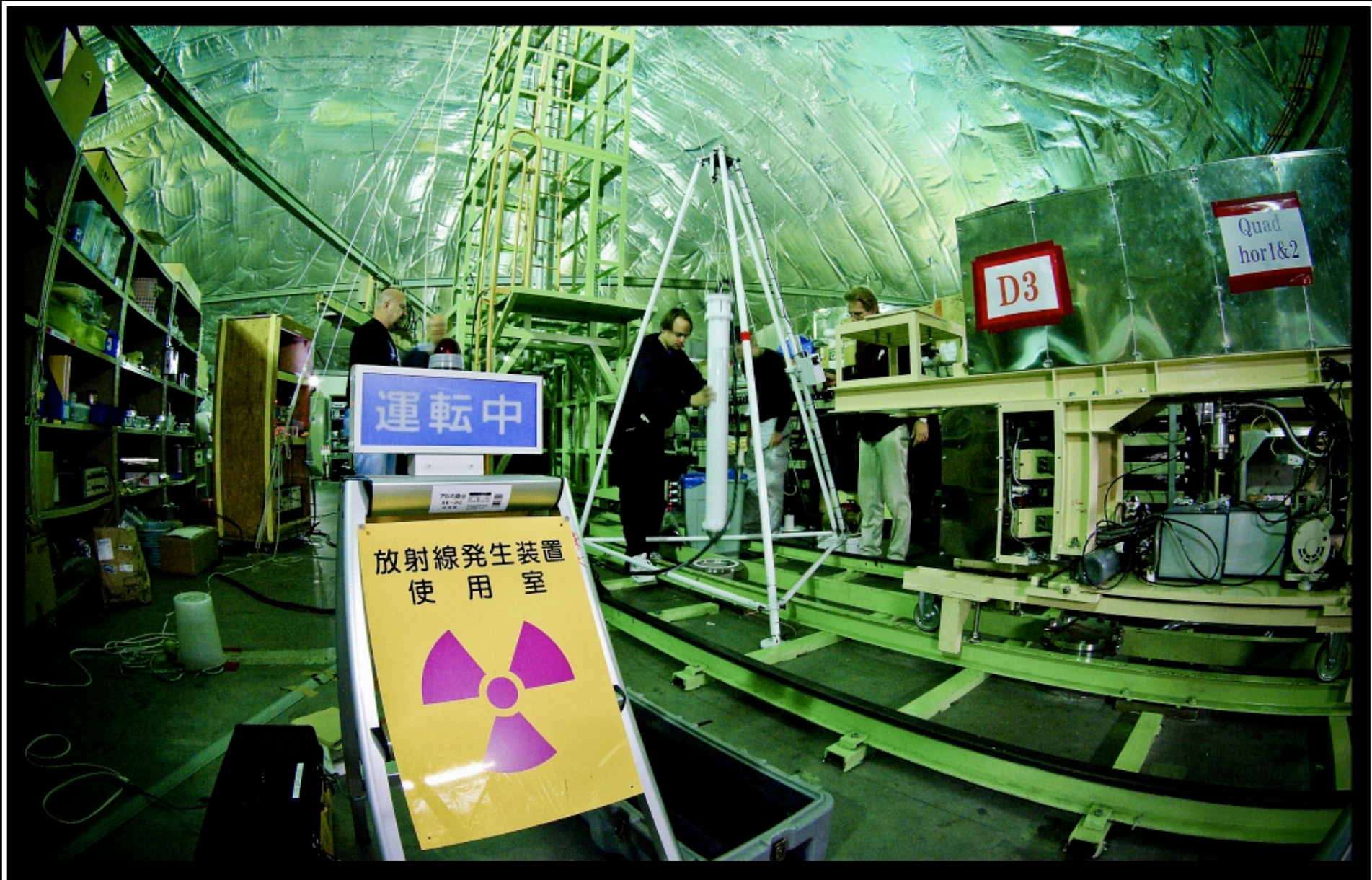


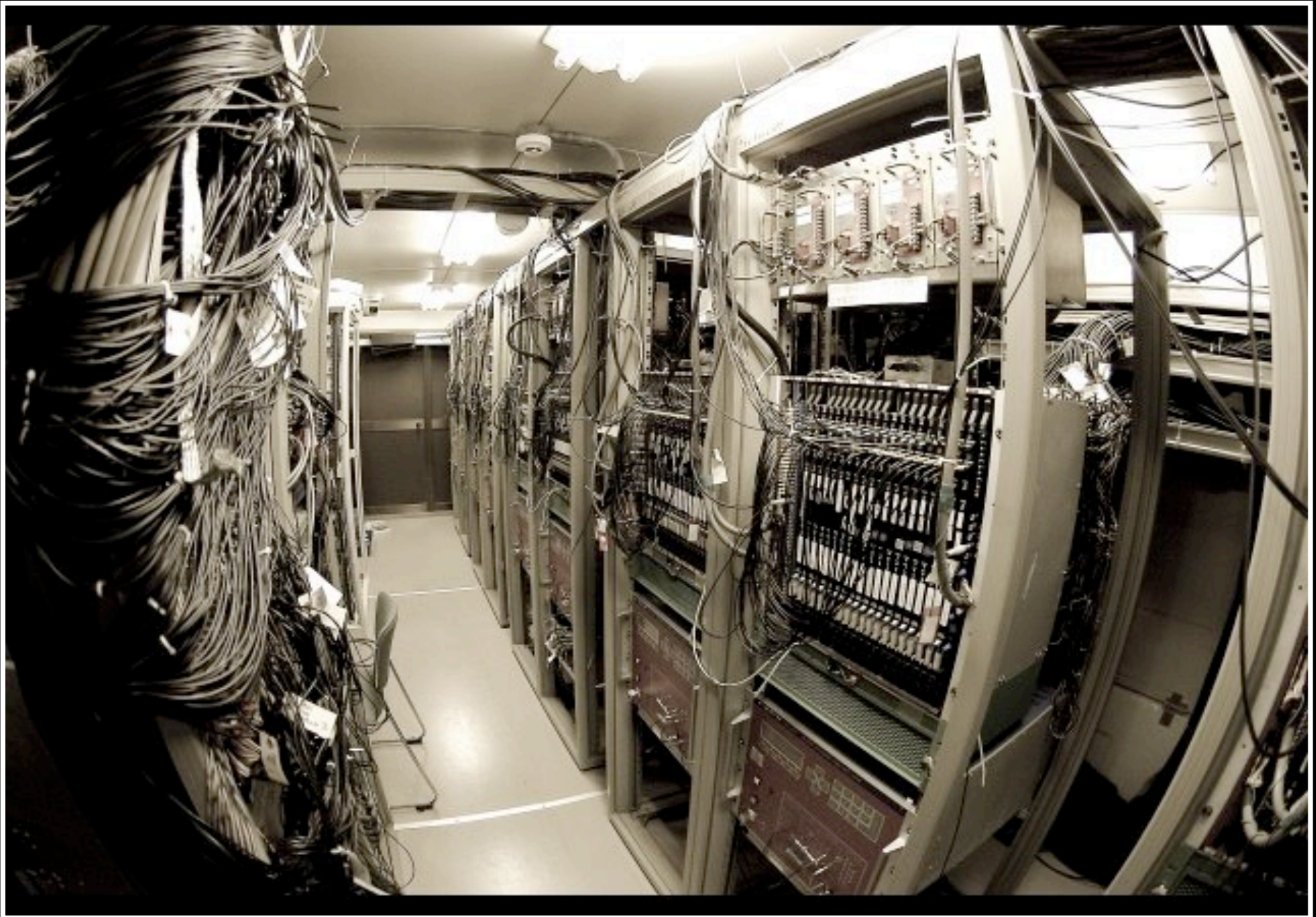






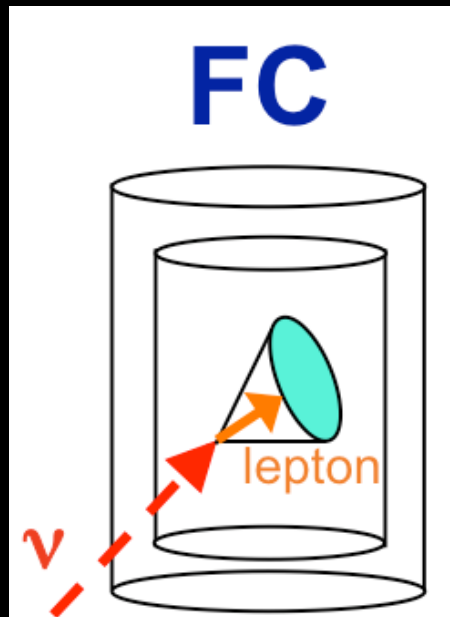






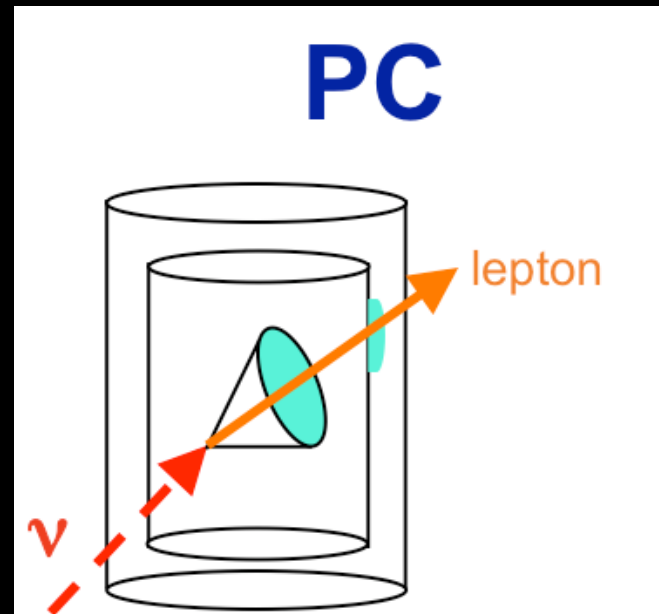
Dane z Super-Kamiokande

Fully-contained



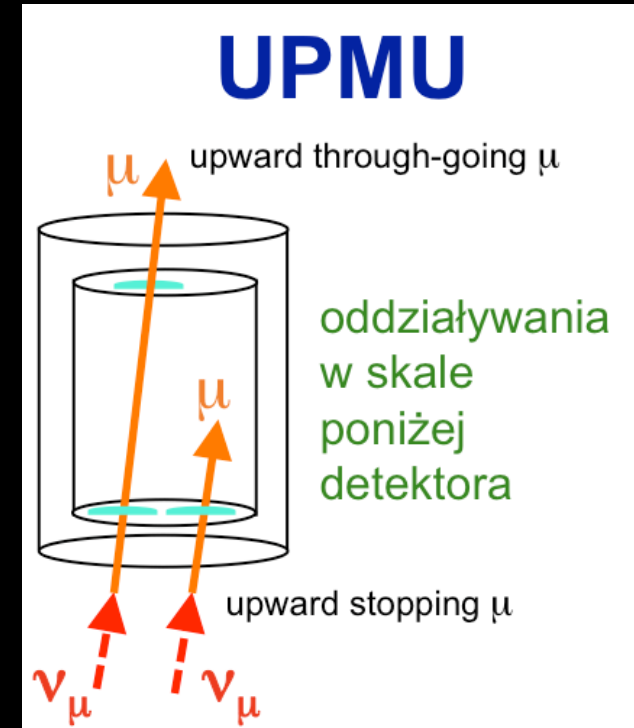
- » $E_{\text{vis}} > 30\text{MeV}$
- » słaba rekonstrukcja prawdziwego kierunku ν dla $E_{\nu} < 1\text{ GeV}$
- » możliwe odróżnienie e/μ

Partially-contained



- » tylko częściowa informacja nt. energii leptonu/neutrino
- » $E_{\text{vis}} > 300\text{MeV}$

Upward-going muons



- » miony lecące do dołu nie są uwzględniane
- » brak informacji nt. E_{ν}
- » znakomita rekonstrukcja kierunku ν

Neutrina atmosferyczne w Super-K

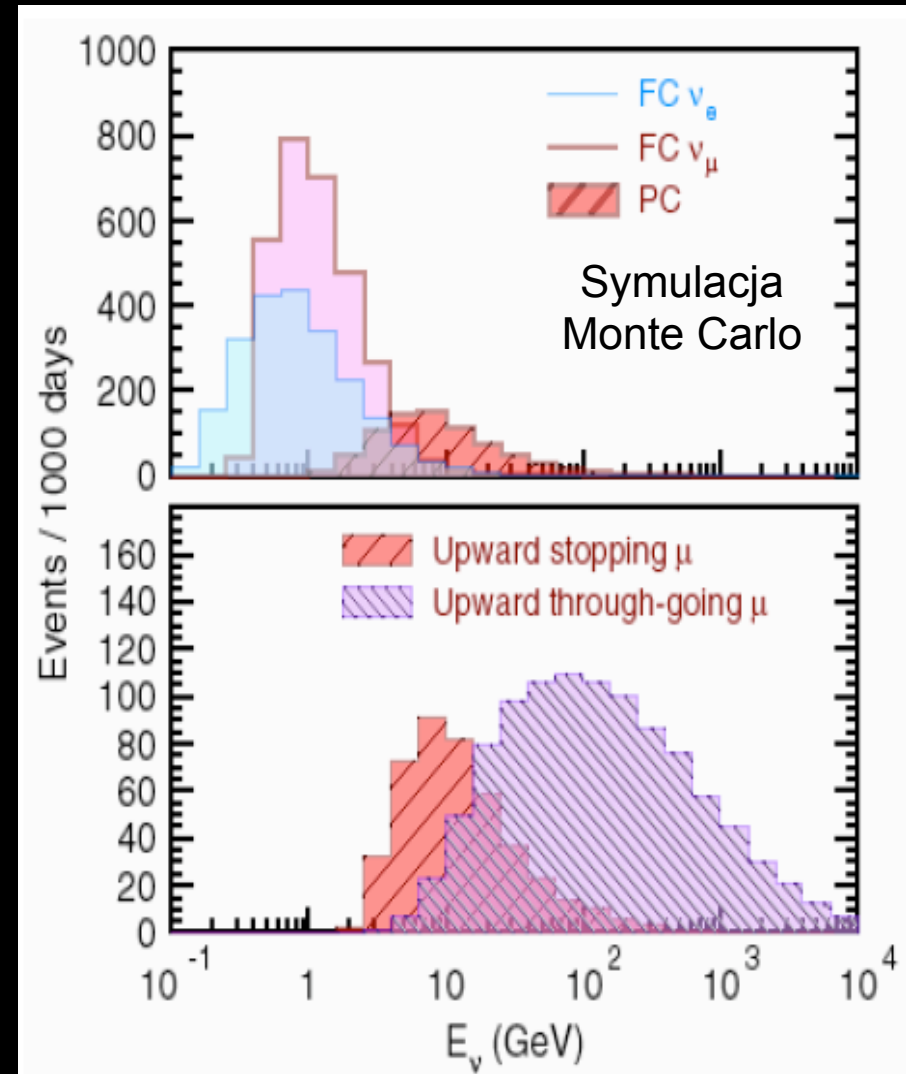
- » W zależności od energii neutrina przypadek jest klasyfikowany jako FC, PC lub UPMU
- » Rejestrowana liczba przypadków neutrin atmosferycznych:

FC = ~8.3 przyp./dzień

PC = ~0.7 przyp./dzień

UPMU = ~1.5 przyp./dzień

Oczekiwana liczba przypadków oddz. neutrin atmosferycznych każdej kategorii

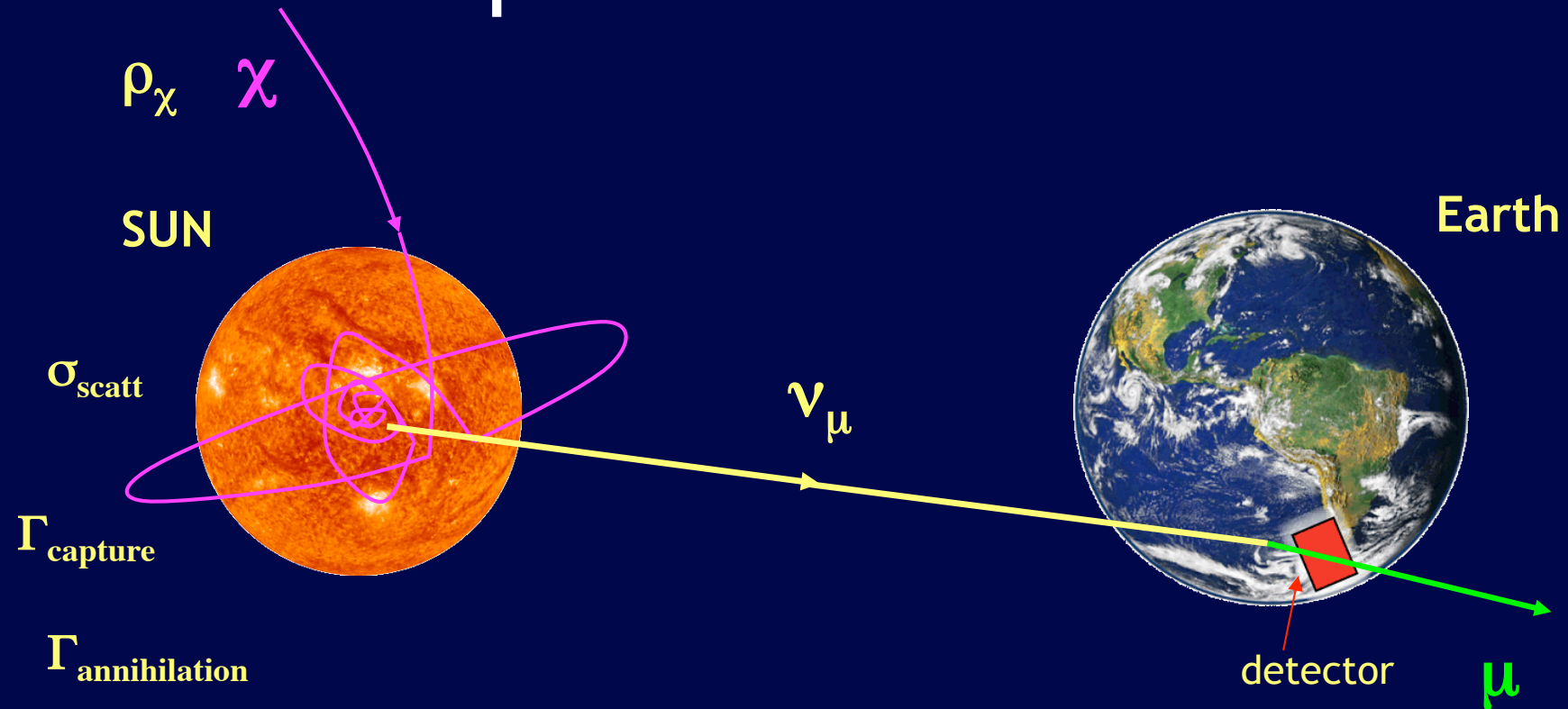


Poszukiwania neutrin z anihilacji Ciemnej Materii w Super-Kamiokande

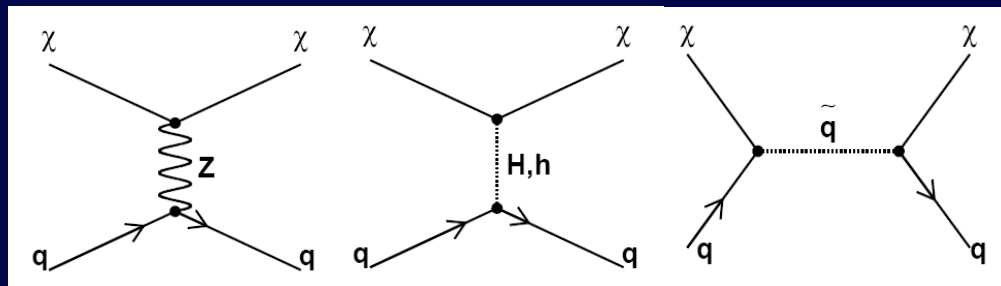


1. Poszukiwanie sygnału z określonych kierunków (Ziemia, Słońce)
 - wynik na $\sigma_{\chi n}$, porównanie z DAMA/CoGeNT/CRESST
2. Poszukiwanie sygnału w rozproszonym strumieniu neutrin z całej Galaktyki
 - wynik na $\langle \sigma_A V \rangle$, porównanie z PAMELA/ATIC/FERMI

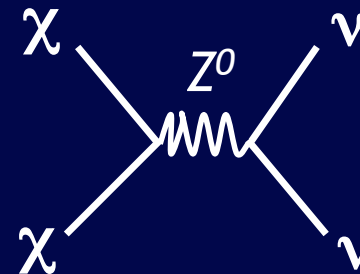
WIMP capture and annihilation



χ scattering



χ annihilation



$$\chi\chi \rightarrow \begin{matrix} q\bar{q}(c\bar{c}, b\bar{b}, t\bar{t}, \dots) \\ \bar{l}l \\ W^\pm, H \end{matrix} \rightarrow \dots \rightarrow \nu$$

spin independent int. – on nuclei with paired spin

spin dependent int. – on nuclei with odd no of nucleons

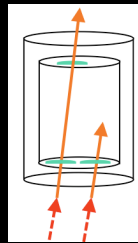
Poszukiwanie neutrin z anihilacji CM w Słońcu

Publikacja XI/2011

SŁOŃCE / przypadki UPMU

» Czy jest **nadwyżka** neutrin z kierunku Słońca ponad tło neutrin atmosferycznych?

» DANE: przypadki mionów lecących od dołu detektora



UPMU

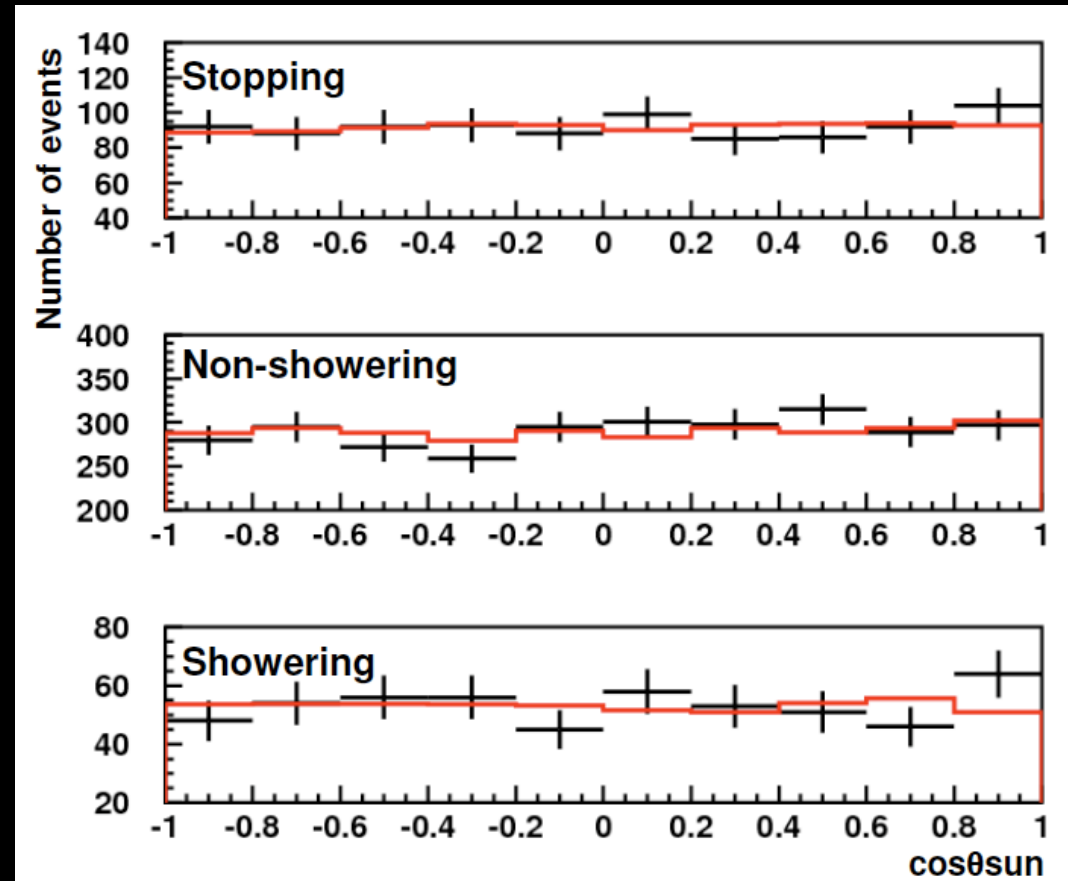
stopping

through-going:

- non-showering
- showering

» Statystyka: 3109.6 dni, 1996-2008 r. (2 x więcej niż w poprzedniej publikacji)

» Czulość na zakres mas WIMP-ów 10 GeV – 10 TeV



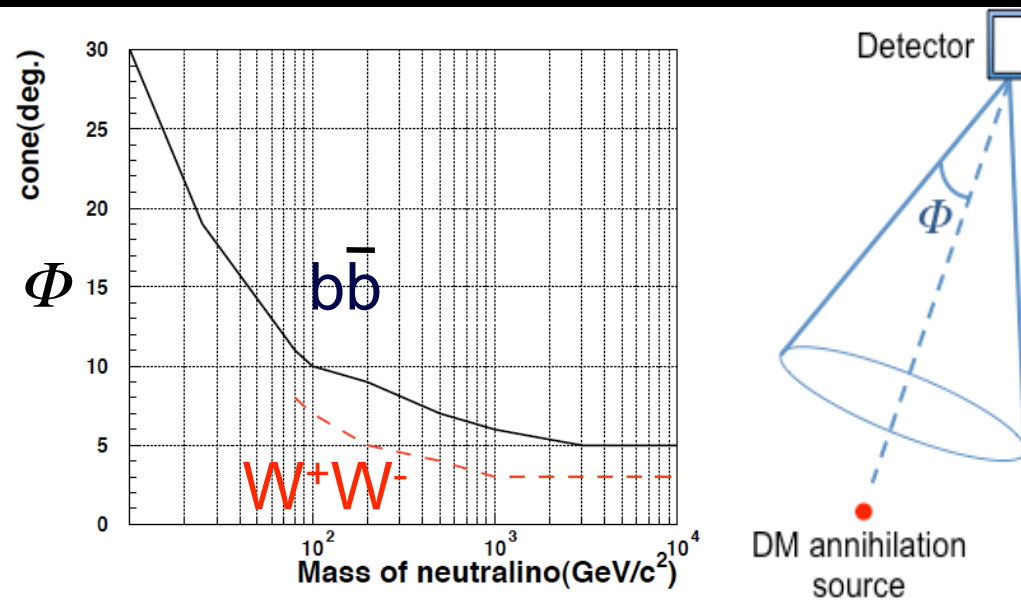
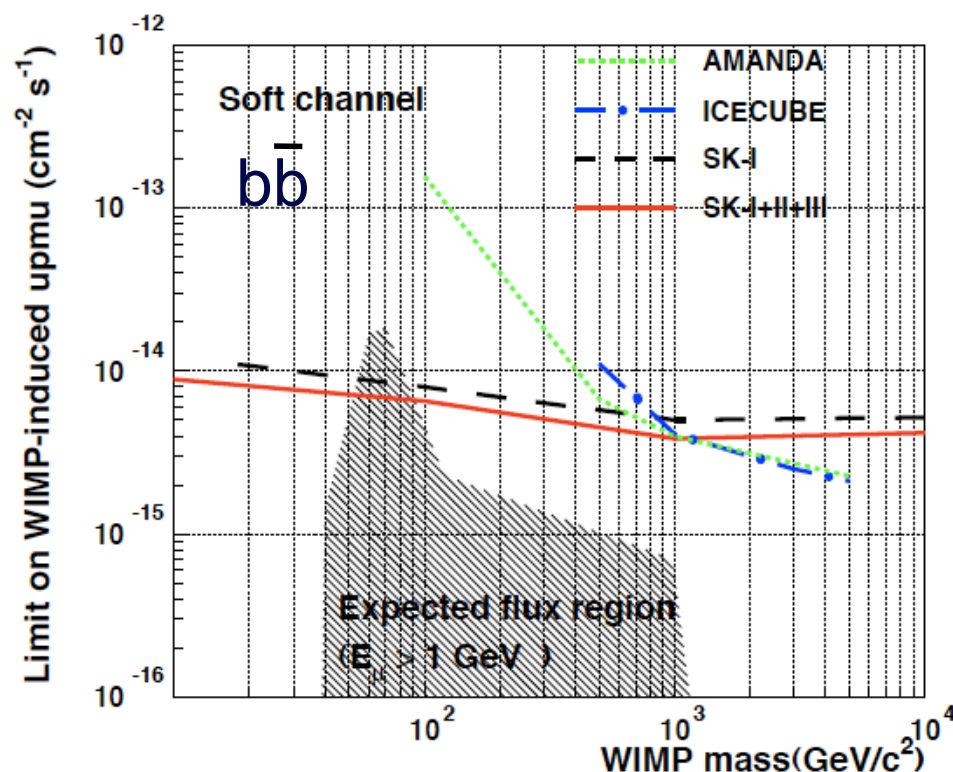
Sygnal spodziewany z tego kierunku

Limit na strumień lecących do góry mionów

Limit: strumień mionów (UPMU) związanych z oddziaływaniem neutrin z anihilacji CM w Słońcu

Symulacja

Jak połączyć informację nt. strumienia neutrin z kierunku Słońca z masą WIMP-ów?



Kąt stożkowy zawierający 90% strumienia neutrin z anihilacji WIMP-ów w Słońcu

Im mniejsza masa M_χ tym szerszy kąt wokół Słońca trzeba uwzględnić ze względu na zachowanie prawdziwego kierunku neutrina przez mion

referencja: T.Tanaka et al.,
Astrophysical J. 742 78 (arXiv:1108.3384)

Limit na przekrój czynny $\sigma_{\chi N}$ (spin dependent)

- » Rozpraszanie χ w Słońcu na H (oddz. zależne spinu)
- » Równowaga pomiędzy wychwytem χ przez Słońce a ich anihilacją

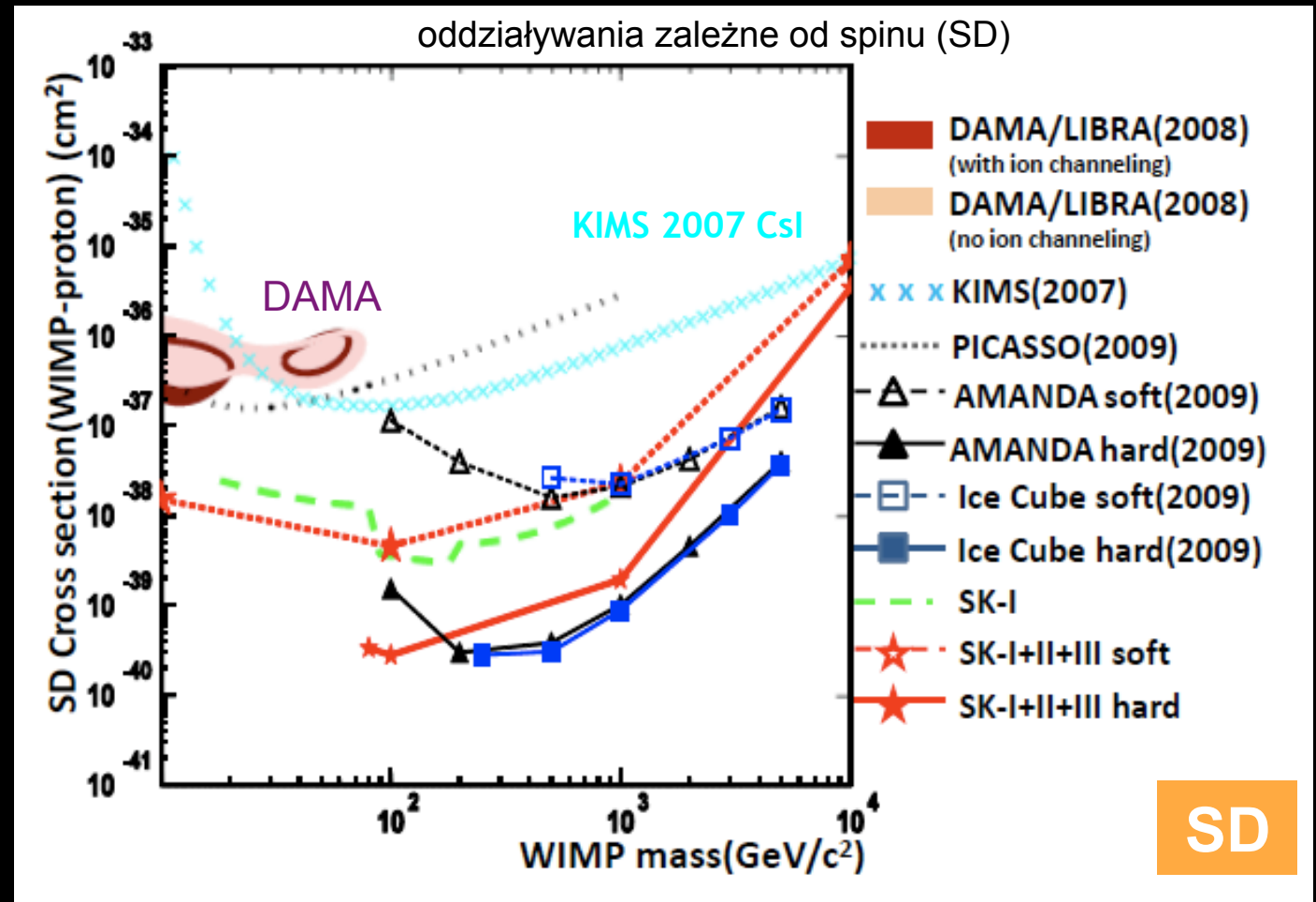
wychwył = anihilacja



Oddz. z nukleonami

$$\sigma_{\chi N}$$

- » Wykluczenie wyników DAMY
- » Przyszłość SK → wyniki < 10 GeV



hard channel: W^+W^-
soft channel: $b\bar{b}$

referencja: T.Tanaka et al.,
Astrophysical J. 742 78 (arXiv:1108.3384)

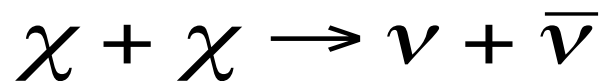
Poszukiwania neutrin z anihilacji Ciemnej Materii w Super-Kamiokande



1. Poszukiwanie sygnału z określonych kierunków (Ziemia, Słońce)
 - wynik na $\sigma_{\chi n}$, porównanie z DAMA/CoGeNT/CRESST
2. Poszukiwanie sygnału w rozproszonym strumieniu neutrin z całej Galaktyki
 - wynik na $\langle \sigma_A V \rangle$, porównanie z PAMELA/ATIC/FERMI

Poszukiwanie sygnału z anihilacji Ciemnej Materii w rozproszonym strumieniu neutrin

- » Model z anihilacją CM w parę neutrino anty-neutrino:



- » Powstaje tyle samo neutrin wszystkich zapachów
- » Charakterystyczne własności takiego sygnału pozwalają na odróżnienie go od tła neutrin atmosferycznych

SYGNAŁ:

monoenergetyczny $E_\nu = M_\chi$

izotropowy

ukierunkowany na GC

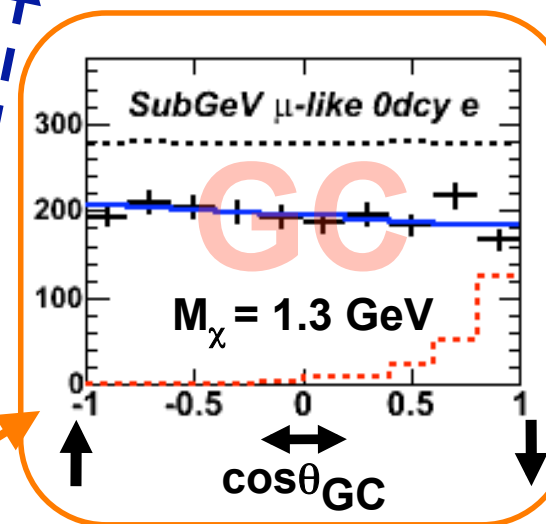
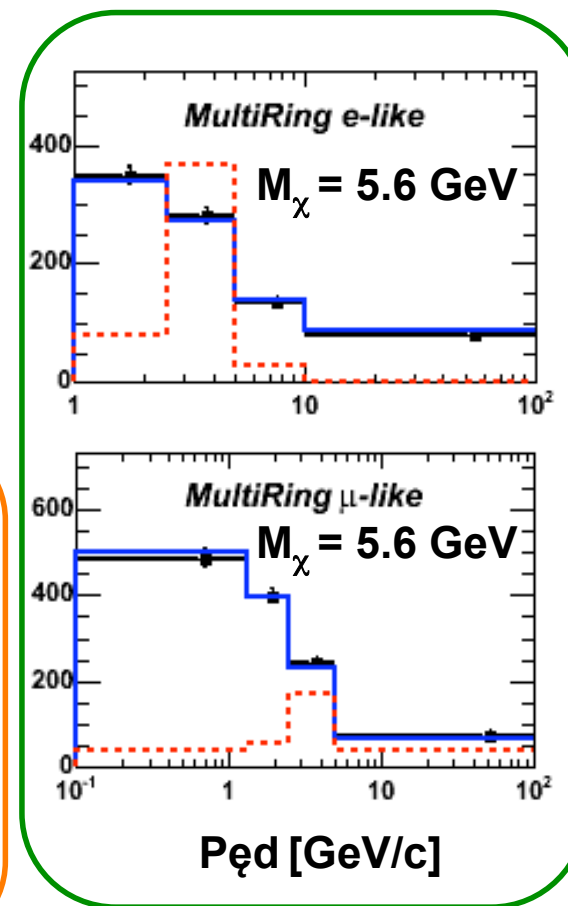
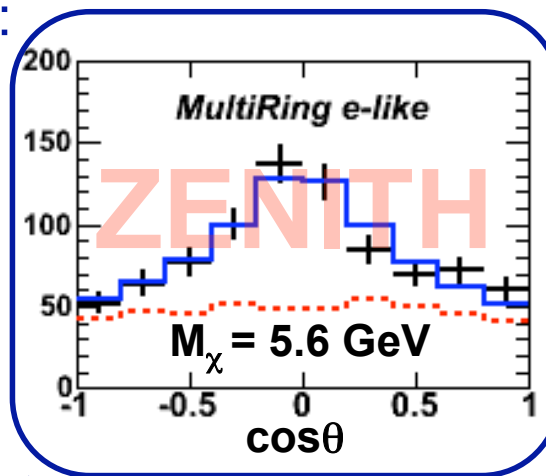
—+— DANE SK

— ATM MC

z oscylacjami

- - - kształt

sygnału DM



Idea analizy

- » Poszukiwanie sygnału w danych Super-K zebranych w latach 1996-2008 lifetime: FC/PC 2806 dni, UPMU 3109 dni
- » Symulacja **sygnału** i odpowiedzi detektora dla wszystkich zapachów neutrin ν_e , ν_μ , ν_τ dla różnych M_χ
- » Dopasowanie **sygnału** i tła neutrin atm. do danych metodą minimalizacji χ^2

$$\text{DANE} = \text{SYGNAŁ} + \nu \text{ ATM}$$

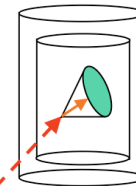
Monte Carlo

- » Dwa podejścia – dopasowanie na podstawie:
 1. rozkładów w kącie zenitalnym + rozkładów pędu
 2. rozkładów w kącie względem Centrum Galaktyki + rozkładów pędu

Ilustracja sygnału

FC

$$M_\chi = 5.6 \text{ GeV}$$

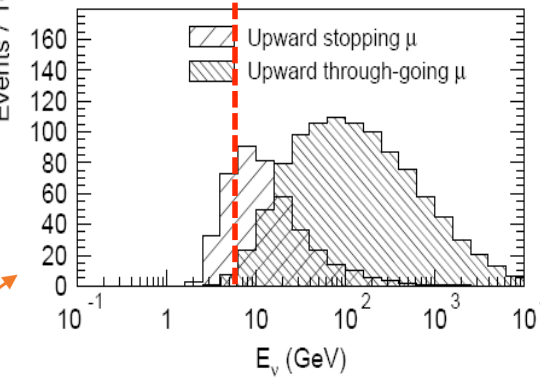
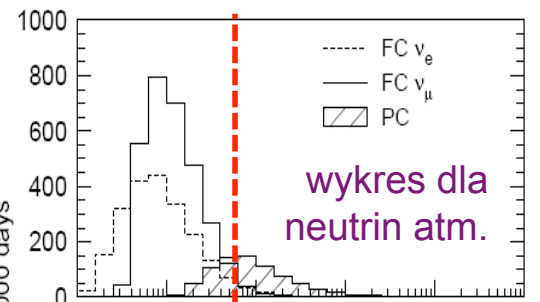
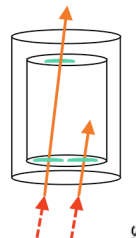


—+— DANE SK

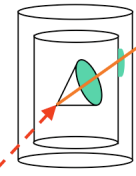
— ATM MC
z oscylacjami

- - - kształt
sygnału DM

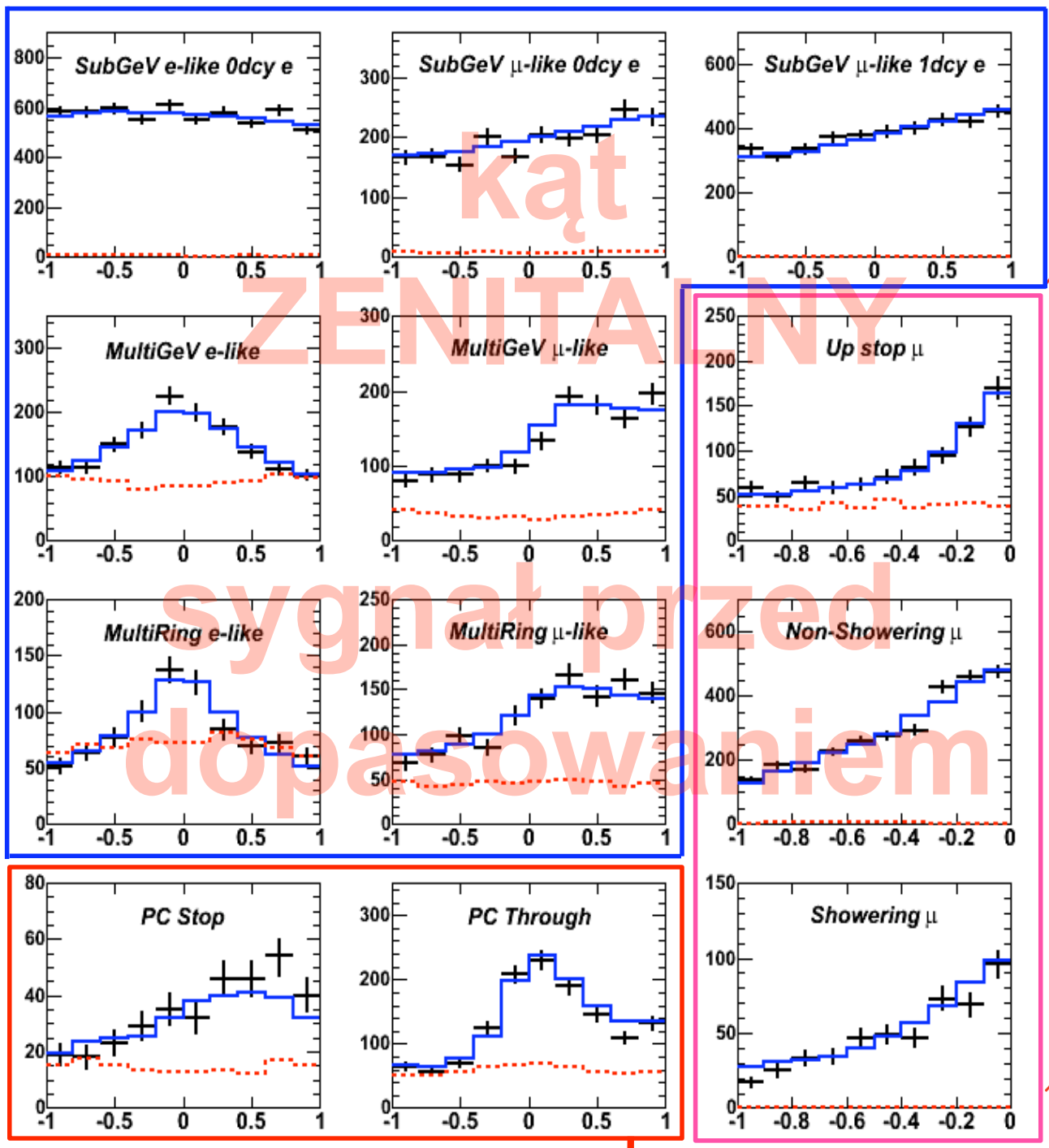
UPMU



PC



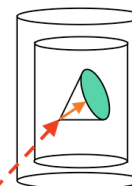
↑ Zakładając $\phi(\nu_e) = \phi(\nu_\mu) = \phi(\nu_\tau)$
dla sygnału



$\cos\theta$

Ilustracja sygnału

FC



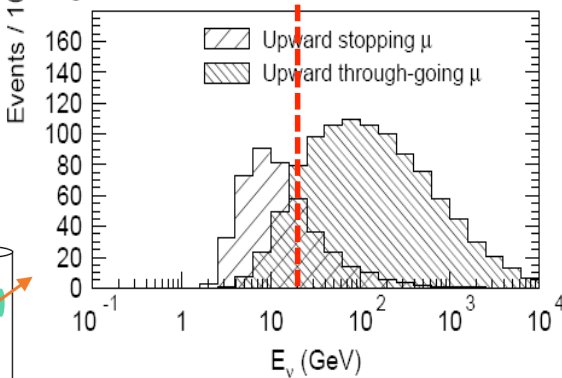
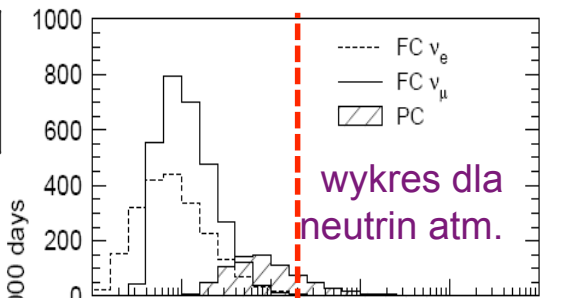
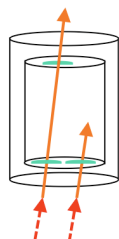
$$M_\chi = 20 \text{ GeV}$$

—+— DANE SK

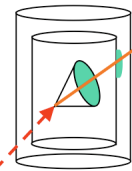
— ATM MC
z oscylacjami

- - - kształt
sygnału DM

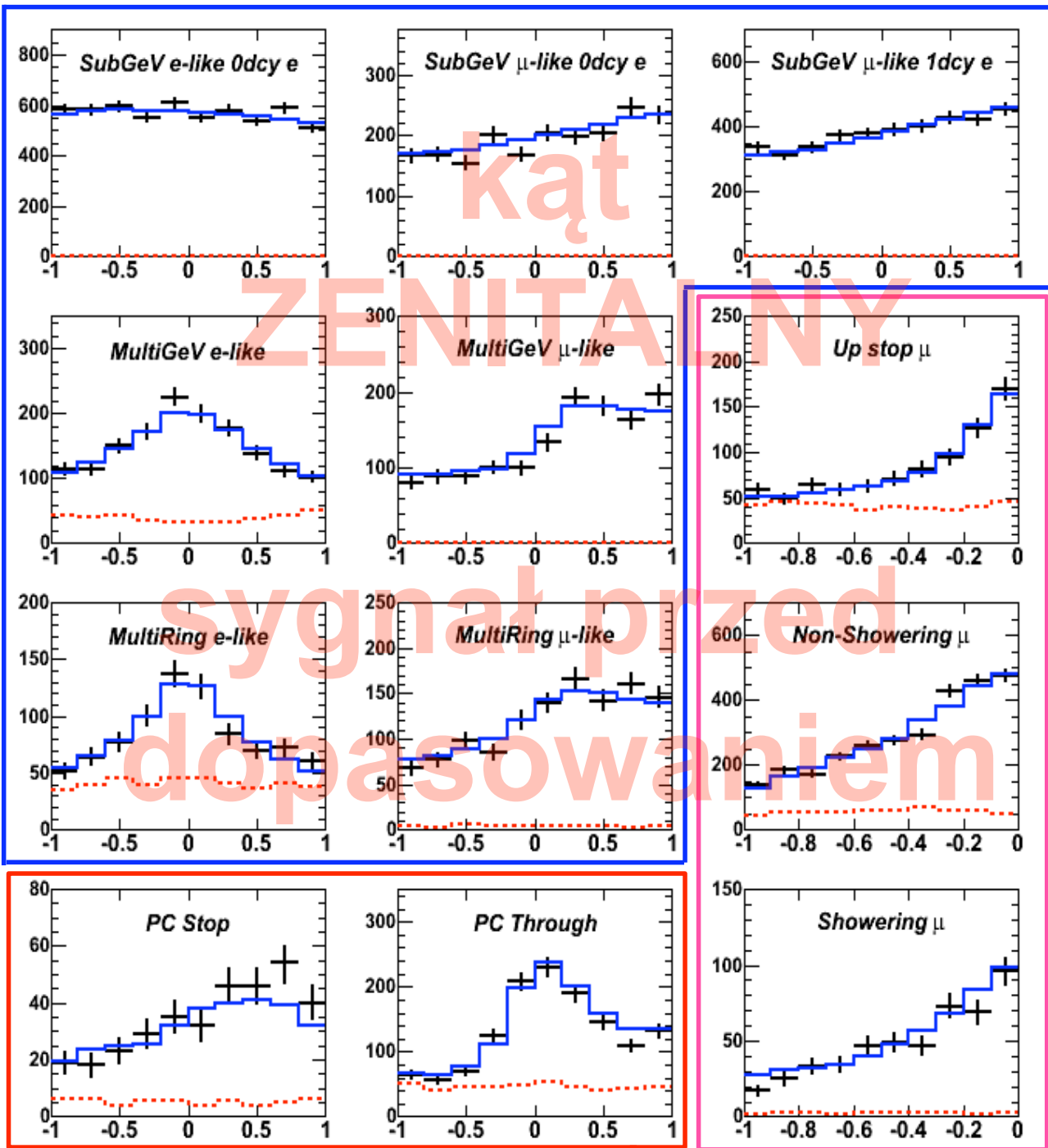
UPMU



PC



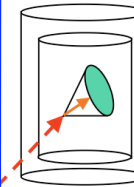
↑ Zakładając $\phi(\nu_e) = \phi(\nu_\mu) = \phi(\nu_\tau)$
dla sygnału



$\cos\theta$

Ilustracja sygnału

FC



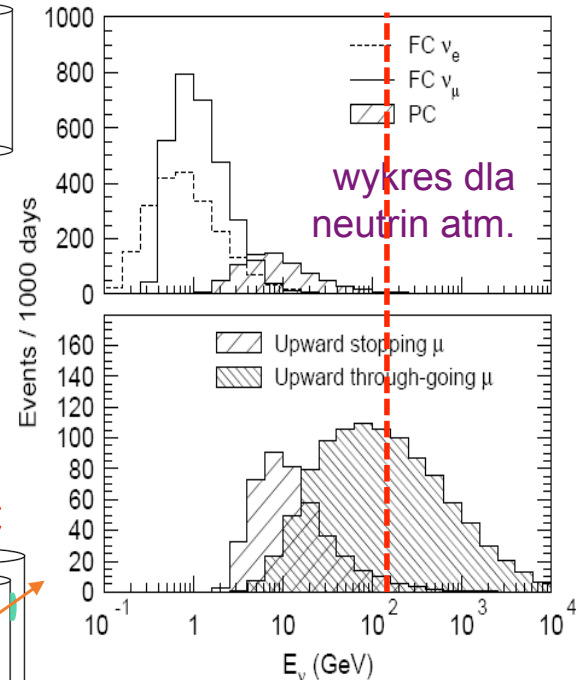
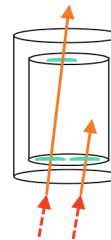
$$M_\chi = 130 \text{ GeV}$$

—+— DANE SK

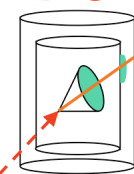
— ATM MC
z oscylacjami

- - - kształt
sygnału DM

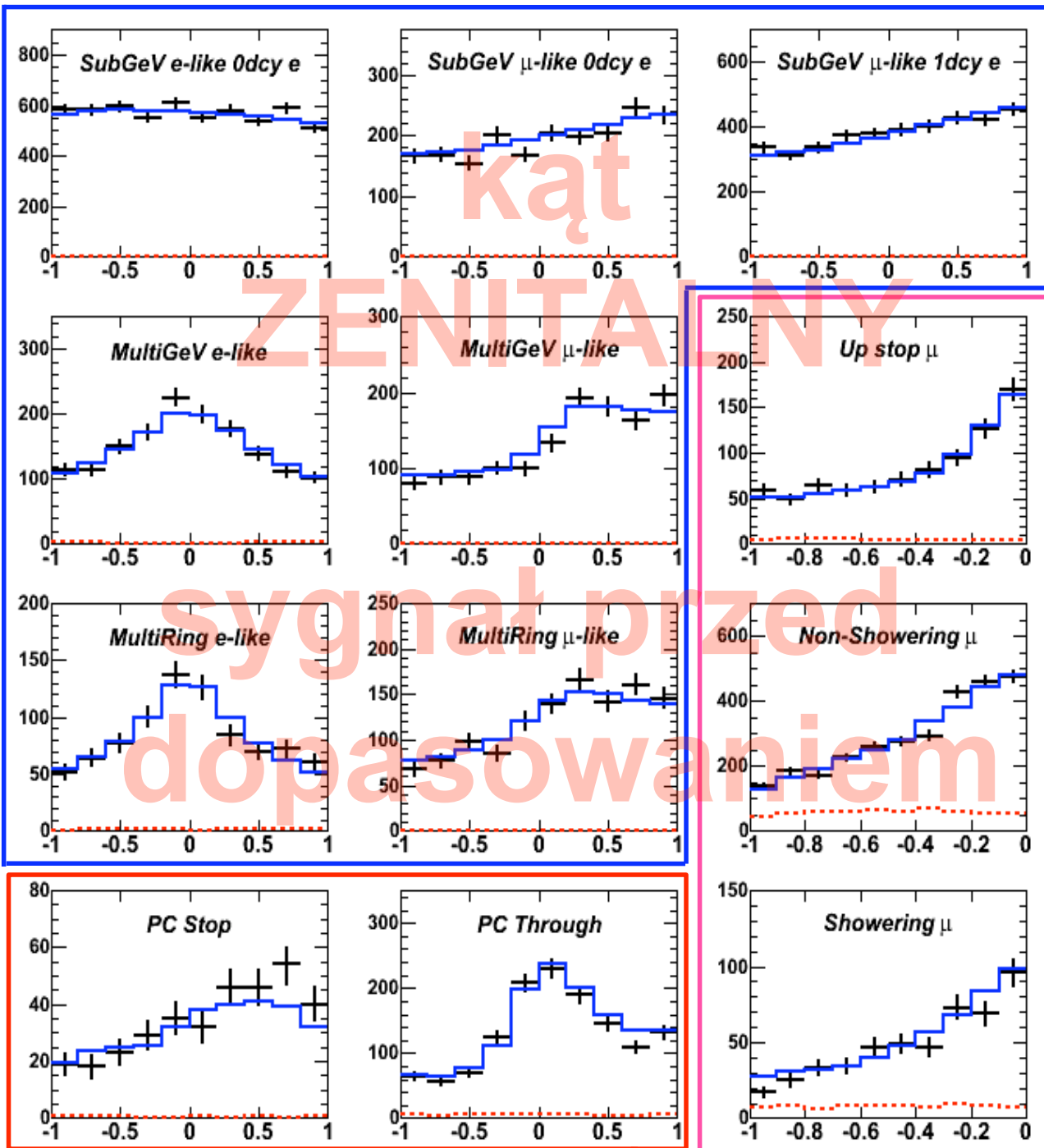
UPMU



PC



↑ Zakładając $\phi(\nu_e) = \phi(\nu_\mu) = \phi(\nu_\tau)$
dla sygnału



$\cos\theta$

Procedura dopasowywania

» minimalizacja χ^2 (postać „poisson-owska”):

ATM MC zależy od wartości parametrów oscylacji

f_j^i wiedza tajemna

dane

ϵ_j fitowane

$$\chi^2 = 2 \sum_{i=1}^{nbins} \left((N_i^{atmv} + \beta \cdot N_i^{WIMP}) \cdot \left(1 + \sum_{j=1}^{N_{syserr}} f_j^i \cdot \epsilon_j \right) - N_i^{obs} + N_i^{obs} \ln \frac{N_i^{obs}}{(N_i^{atmv} + \beta \cdot N_i^{WIMP}) \cdot \left(1 + \sum_{j=1}^{N_{syserr}} f_j^i \cdot \epsilon_j \right)} + \sum_{j=1}^{N_{syserr}} \left(\frac{\epsilon_j}{\sigma_j} \right)^2 \right)$$

normalizacja sygnału z anihilacji WIMP-ów

nbins → wszystkie przedziały używane w analizie

niepewności syst.

» Dopasowywane parametry:

(1) normalizacja sygnału β

(2) Δm_{23}^2 , (3) $\sin^2 2\theta_{23}$ → parametry oscylacji neutrin atm., $N^{atmv}(\Delta m_{23}^2, \sin^2 2\theta_{23})$

+ 122 ϵ_j → wpływ 122 źródeł niepewności systematycznych

Niektóre z parametrów syst. spełniają rolę normalizacji ATM MC!

Wyniki dopasowania przykład dla $M_\chi = 90$ GeV

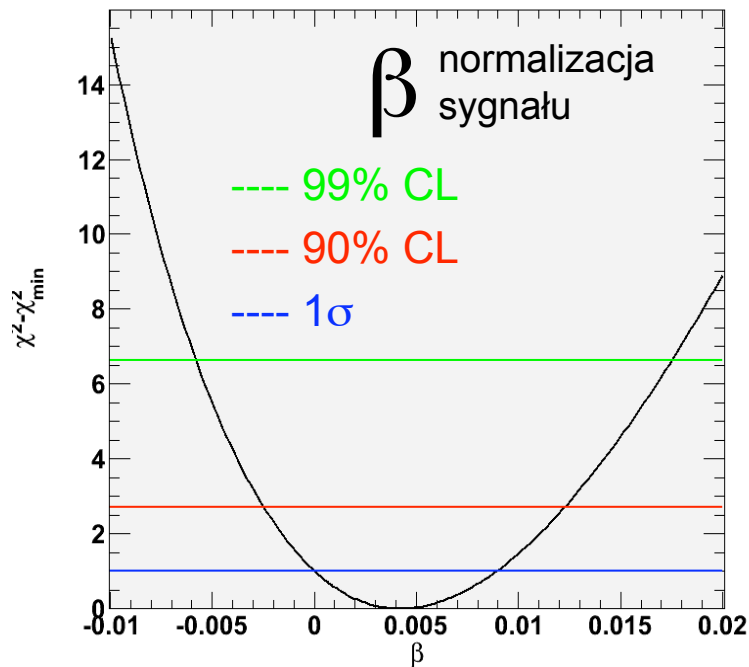
» Fit tylko parametrów oscylacji: $\chi^2/\text{dof} = 1.13$

$$\Delta m_{23}^2 = 2.1 \times 10^{-3} \text{ eV}^2, \sin^2 2\theta_{23} = 1.0$$

» Fit $\beta + \Delta m_{23}^2 + \sin^2 2\theta_{23}$ dla 90 GeV $\chi^2/\text{dof} = 1.12$

#WIMPs = 114 (0.5% danych)

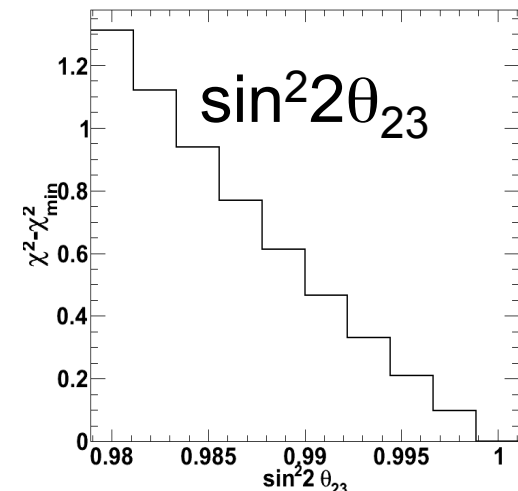
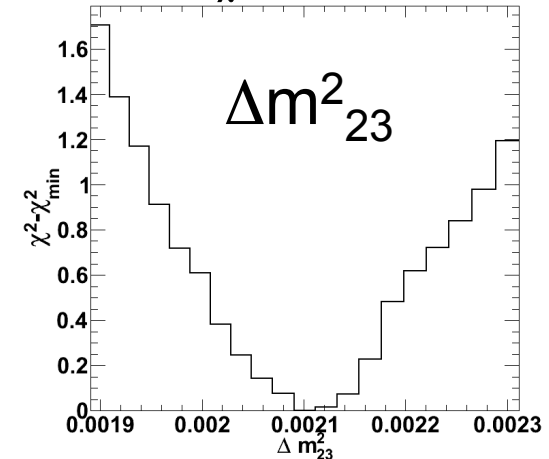
Wartości Δm_{23}^2 , $\sin^2 2\theta_{23}$ wychodzą zgodne
z fitem bez WIMP-ów



β oznacza frakcję danych które można opisać
przez sygnał z anihilacji Ciemnej Materii

OSCYLACJE NEUTRIN

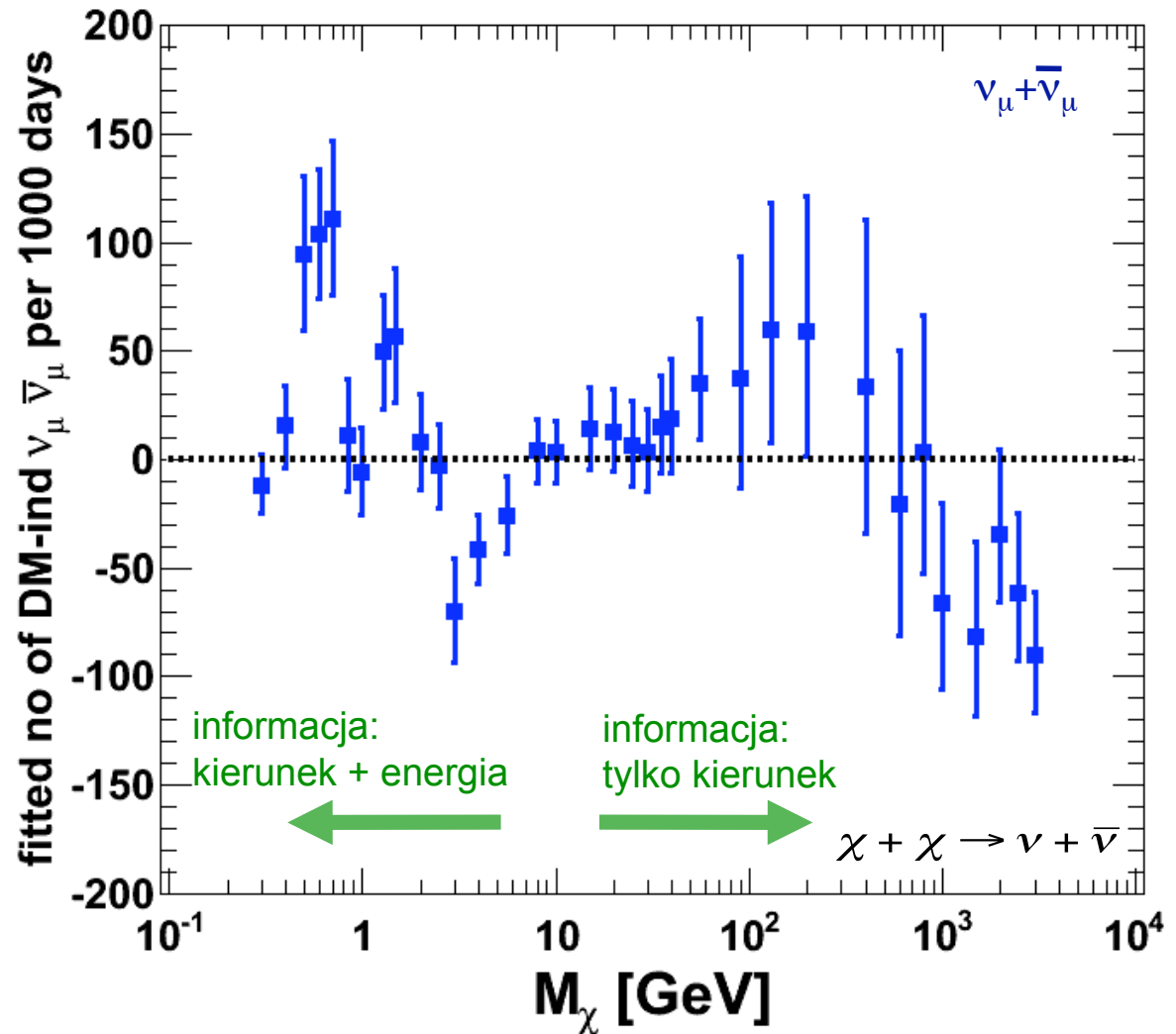
$M_\chi = 90$ GeV



Dopuszczalna liczba przypadków oddziaływań neutrino z anihilacji Ciemnej Materii w Super-K

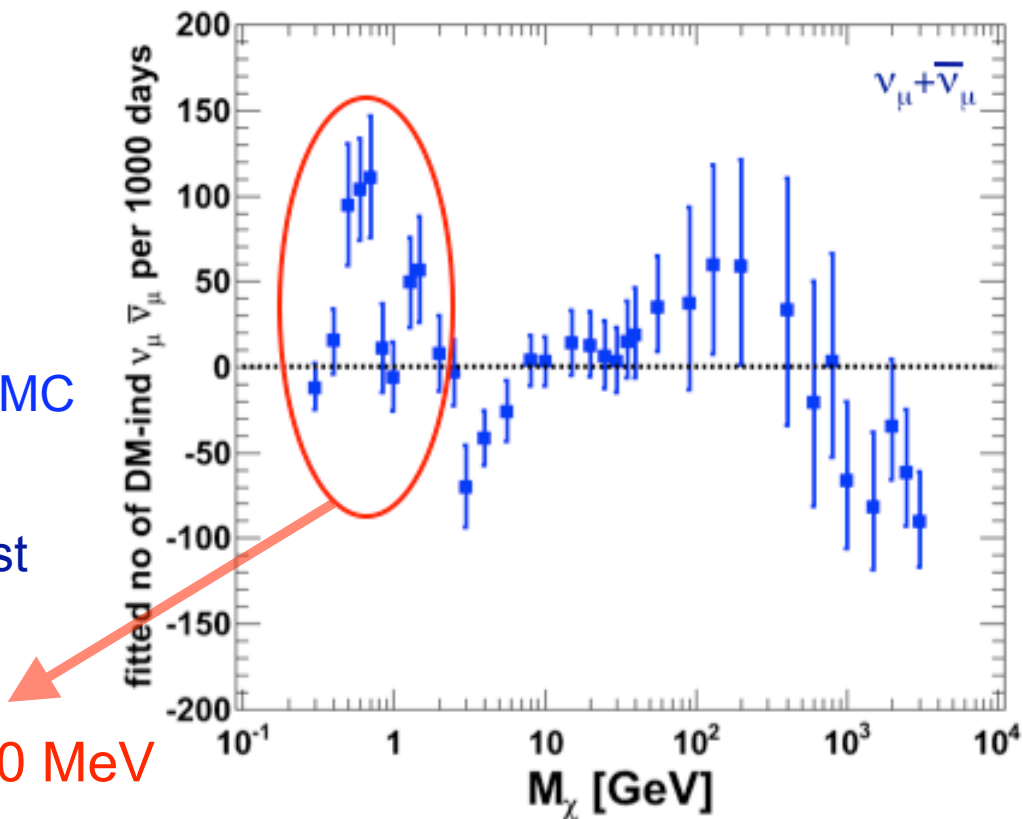
FIT na podstawie rozkładów w kącie zenitalnym

- » Wynik dopasowania dla
neutrino mionowych $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$
- » Punkty nie są niezależne
→ za każdym razem te
same dane; inne proporcje
sygnału w próbkach FC,
PC, UPMU
- » WYNIK:
 - $M_\chi = 3 \text{ GeV} - 3 \text{ TeV}$ brak
obserwacji przypadków
sygnału
 - $M_\chi < 3 \text{ GeV}$, nadwyżka dla
ok. 1 GeV i 600 MeV

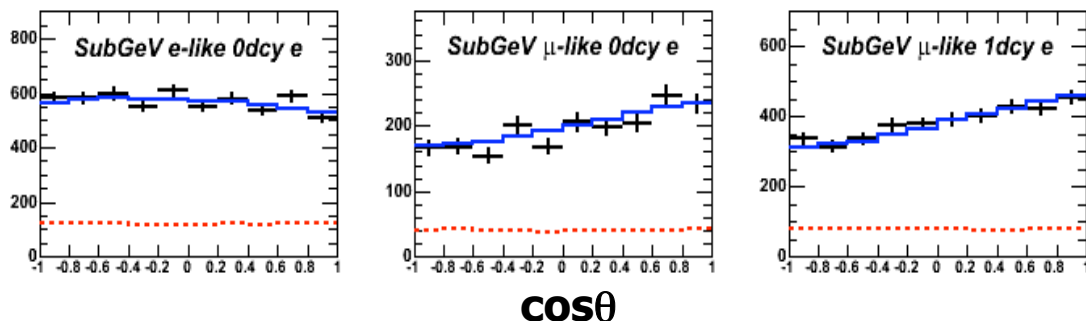


Dyskusja – dopasowanie w kącie zenitalnym

- » Nadwyżka przypadków dla niewielkich mas WIMP-ów na poziomie 2-3 sigma
- » ... ale wówczas sygnał jest dopasowywany na podstawie próbek SubGeV → DANE, ATM MC oraz SYGNAŁ są 'płaskie'
- » ... dodatkowo dla tych próbek jest duża niepewność związana z całkowitą normalizacją



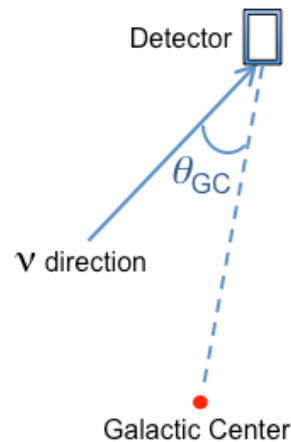
Ilustracja – sygnał $M_\chi = 500$ MeV



Alternatywne podejście – fit w rozkładach względem Centrum Galaktyki

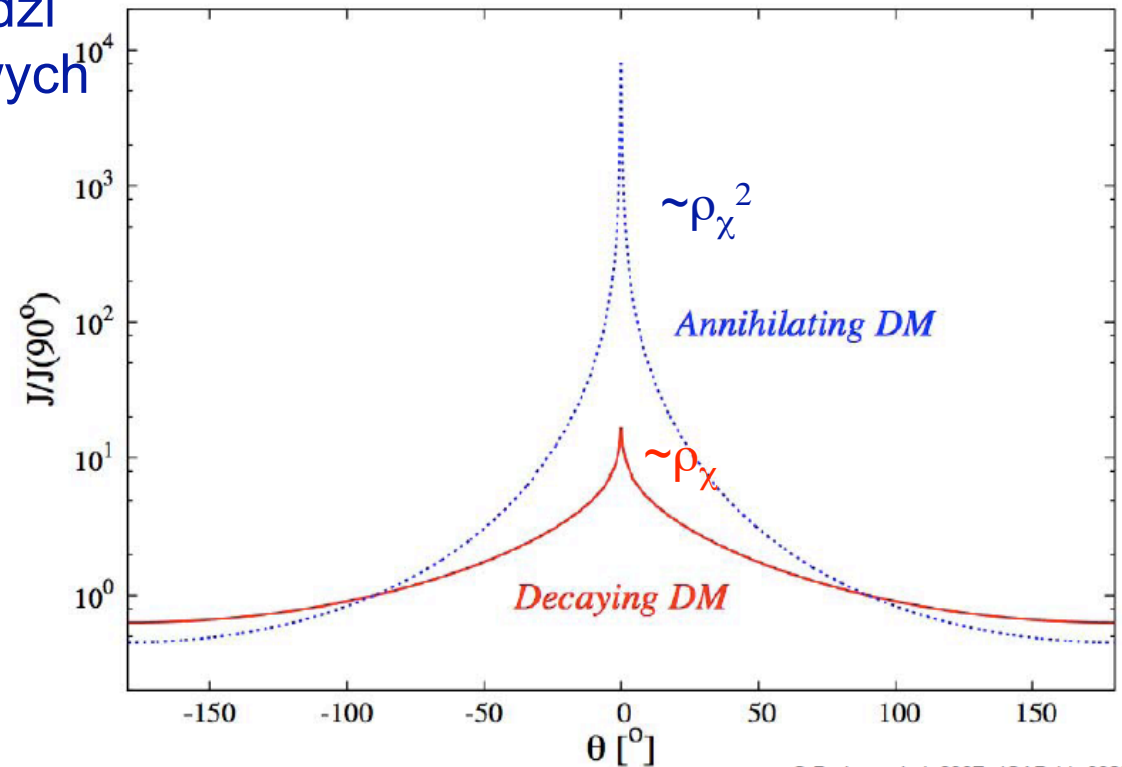
NOWE PODEJŚCIE:

- » Symulacja sygnału i odpowiedzi detektora w rozkładach kątowych względem Centrum Galaktyki (θ_{GC})



- » Sygnał powienien pochodzić głównie z Centrum Galaktyki
- » Możliwe efektywne dopasowanie sygnału dla małych M_χ

Spodziewana intensywność sygnału w funkcji kąta względem Centrum Galaktyki (model NFW)

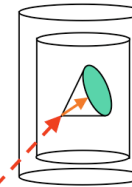


G.Bertone et al. 2007, JCAP 11, 003B

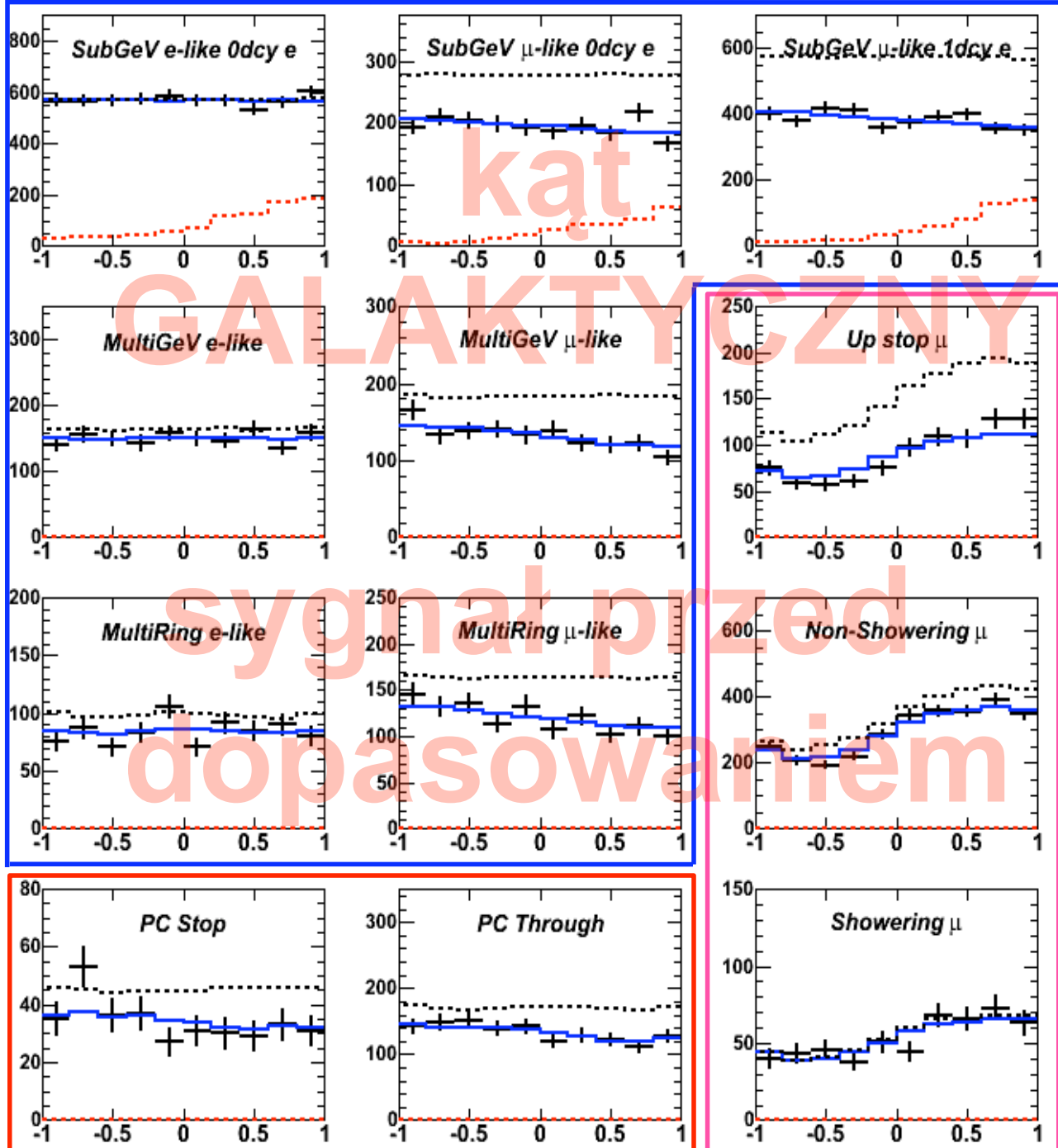
- » Główna trudność \rightarrow redefinicja wpływu systematyki w nowym układzie (Fij)

Ilustracja sygnału

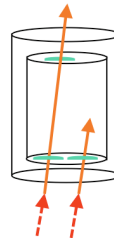
FC



$$M = 500 \times \text{MeV}$$

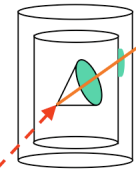


UPMU



- DANE SK
- ATM MC z oscylacjami
- ATM MC bez oscylacji
- kształt sygnału DM

PC



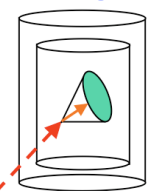
Proporcje sygnału pomiędzy próbkami są zachowane

↑ Zakładając $\phi(\nu_e) = \phi(\nu_\mu) = \phi(\nu_\tau)$ dla sygnału

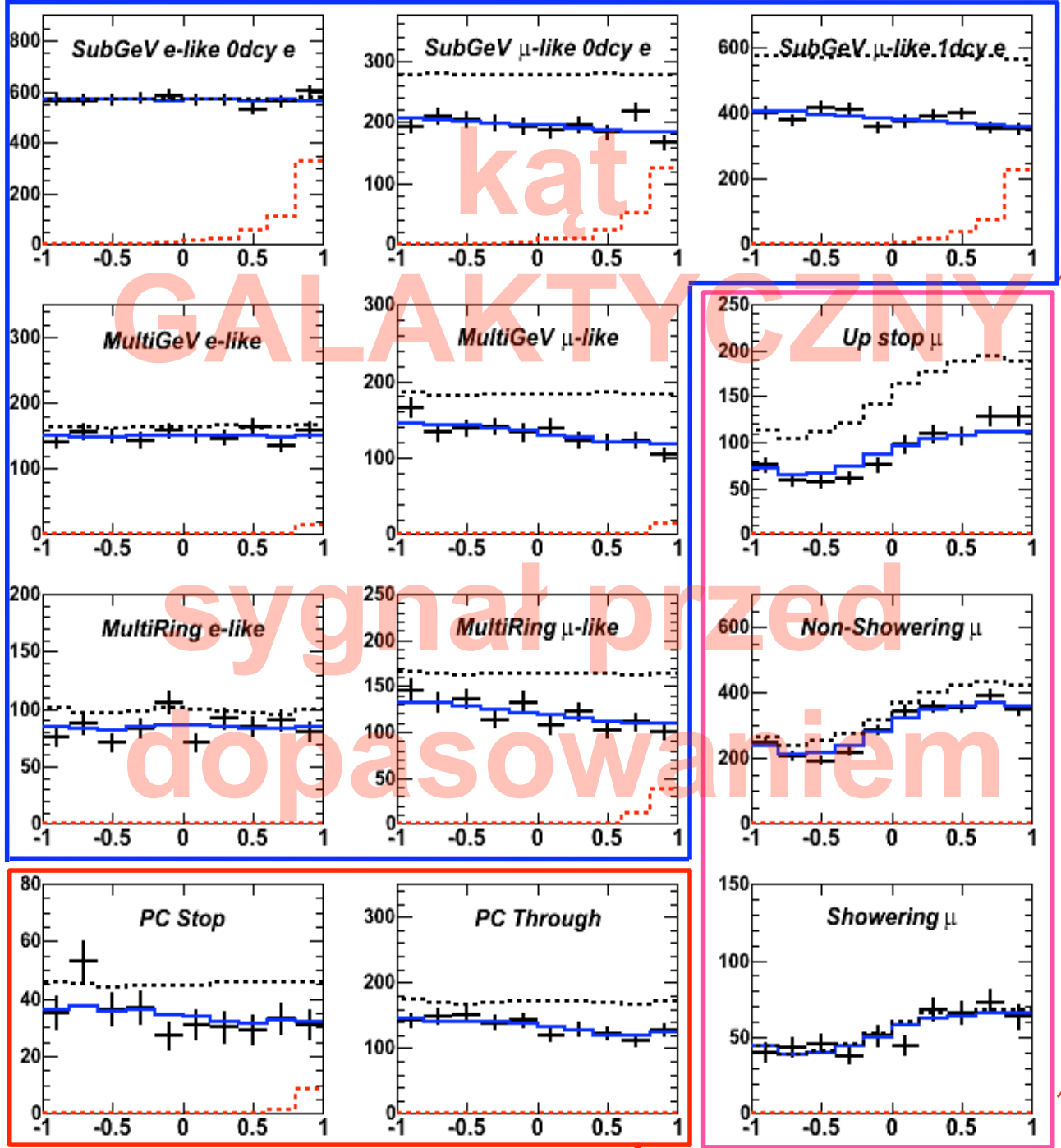
$\cos\theta_{GC}$

Ilustracja sygnału

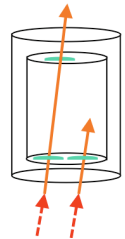
FC



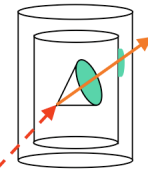
$$M_{\chi} = 1.3 \text{ GeV}$$



UPMU



PC



- DANE SK
- ATM MC z oscylacjami
- ATM MC bez oscylacji
- kształt sygnału DM

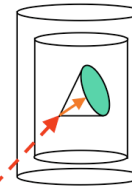
Proporcje sygnału pomiędzy próbkami są zachowane

Zakładając $\phi(\nu_e) = \phi(\nu_\mu) = \phi(\nu_\tau)$ dla sygnału

$\cos\theta_{GC}$

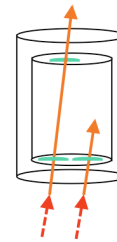
Ilustracja sygnału

FC

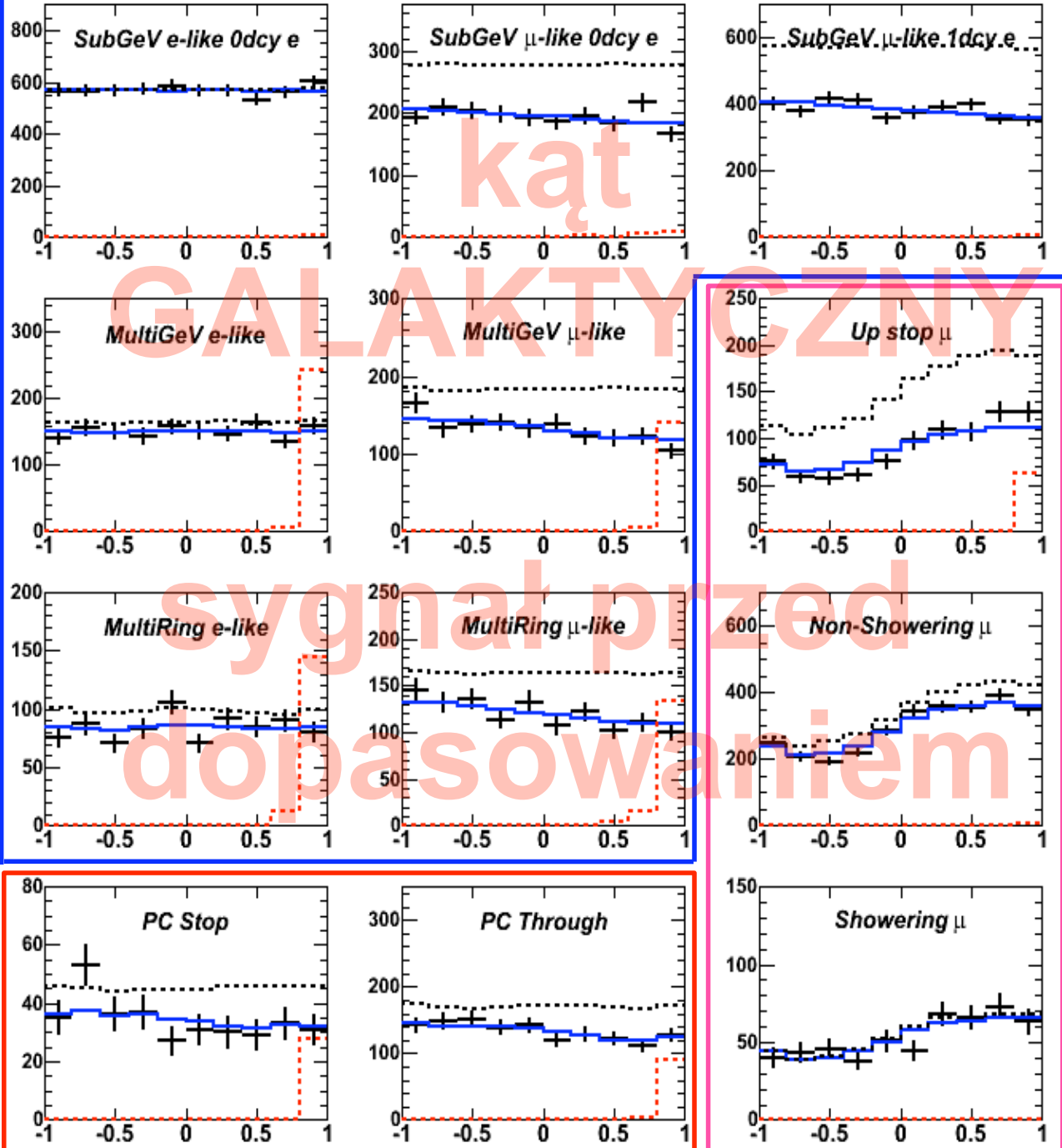
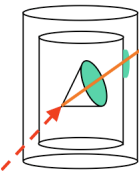


$$M_\chi = 4 \text{ GeV}$$

UPMU



PC



- DANE SK
- ATM MC z oscylacjami
- ATM MC bez oscylacji
- kształt sygnału DM

Proporcje sygnału pomiędzy próbkami są zachowane

Zakładając $\phi(\nu_e) = \phi(\nu_\mu) = \phi(\nu_\tau)$ dla sygnału

$\cos\theta_{GC}$

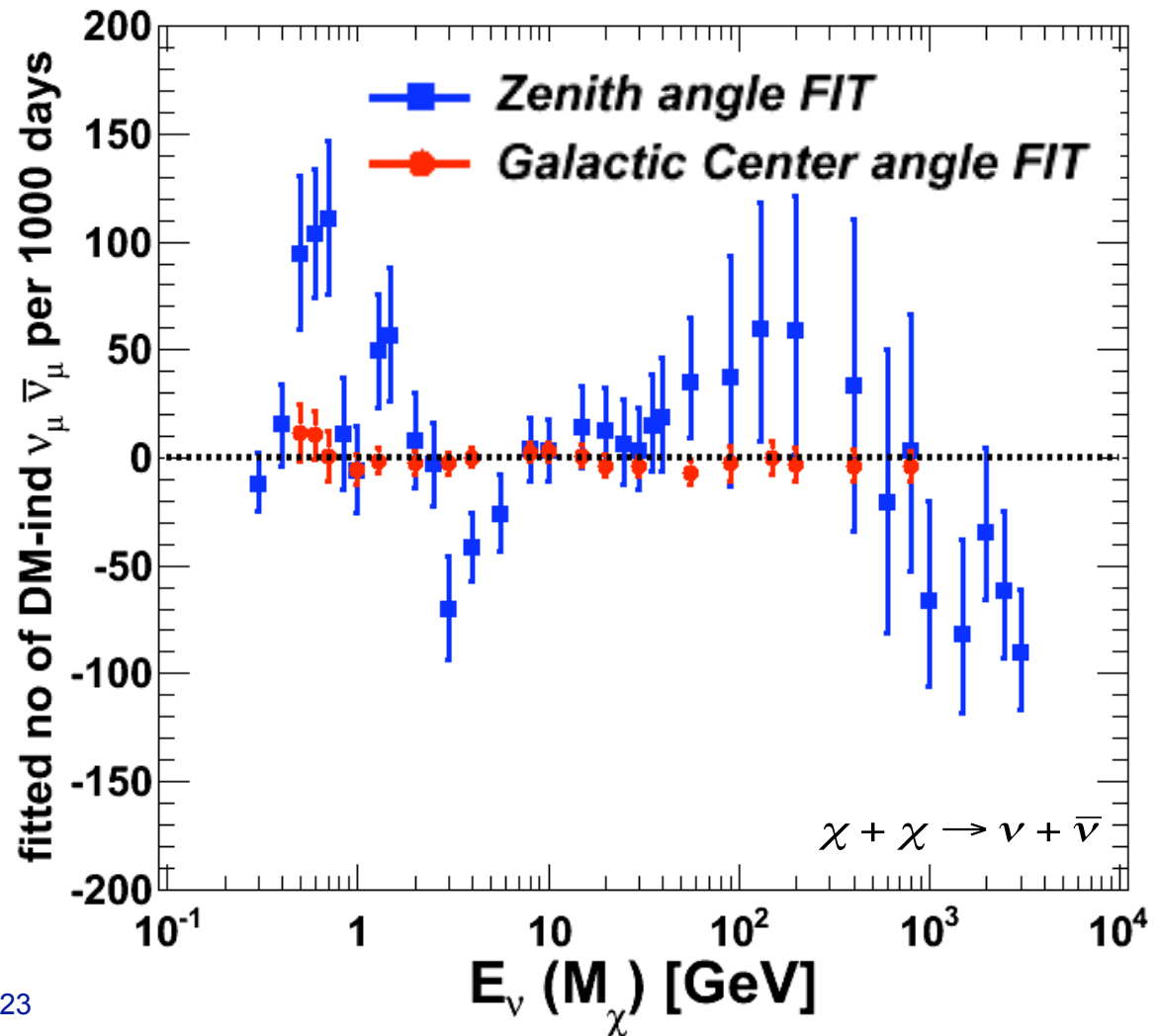
Dopuszczalna liczba przypadków oddziaływań neutrino z anihilacji Ciemnej Materii w Super-K

Centrum Galaktyki

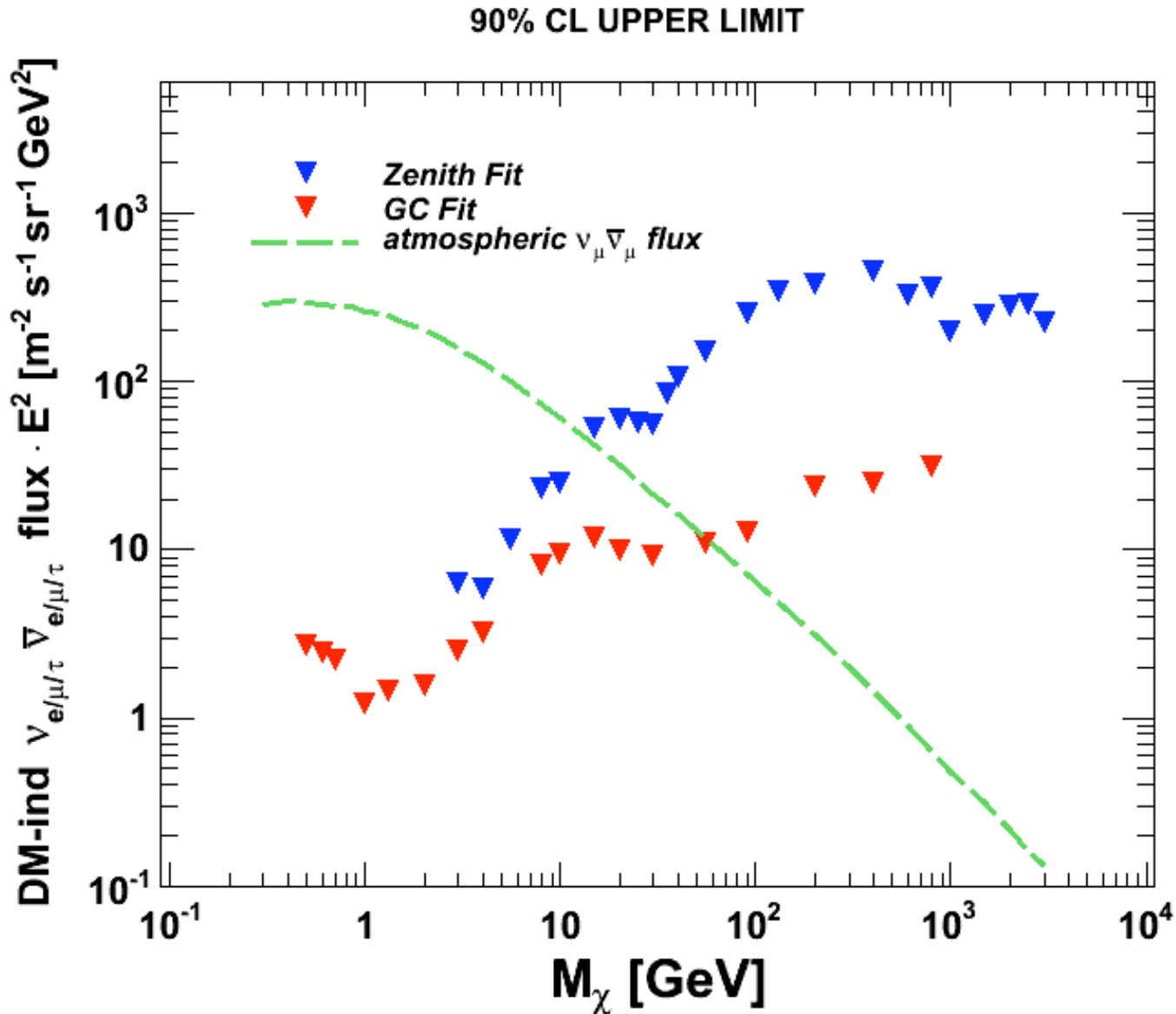
- Fit: normalizacja sygnału WIMP + niepewności syst.
- Wartości Δm^2_{23} , $\sin^2 2\theta_{23}$ nie były dopasowywane w tym podejściu
- Bardzo silny wiąz \rightarrow kształt sygnału
- Rozkłady DANYCH i ATM MC wyglądają podobnie dla wszystkich próbek (FC/PC/UPMU) \rightarrow jednakowy wynik dla szerokiego zakresu M_χ

ZENIT

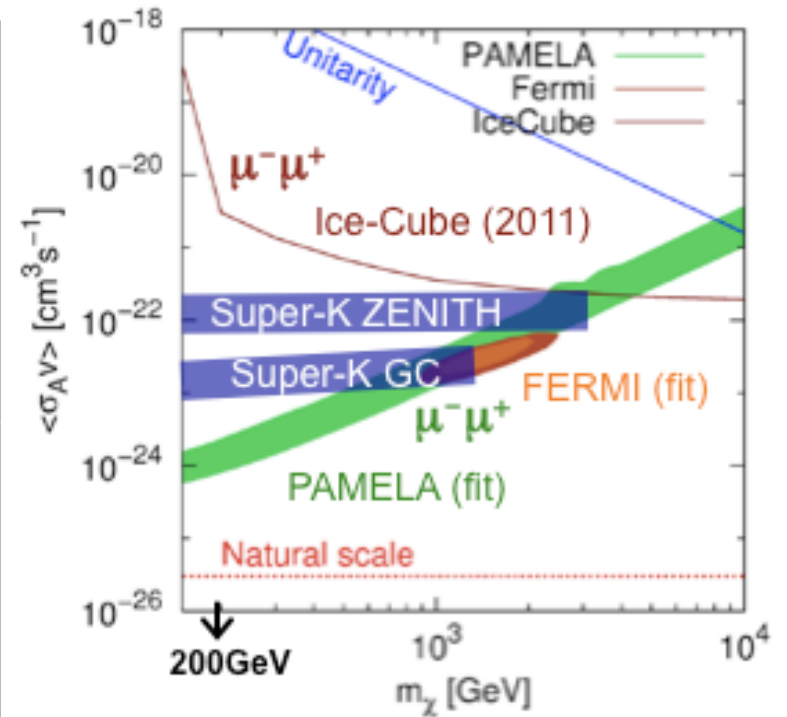
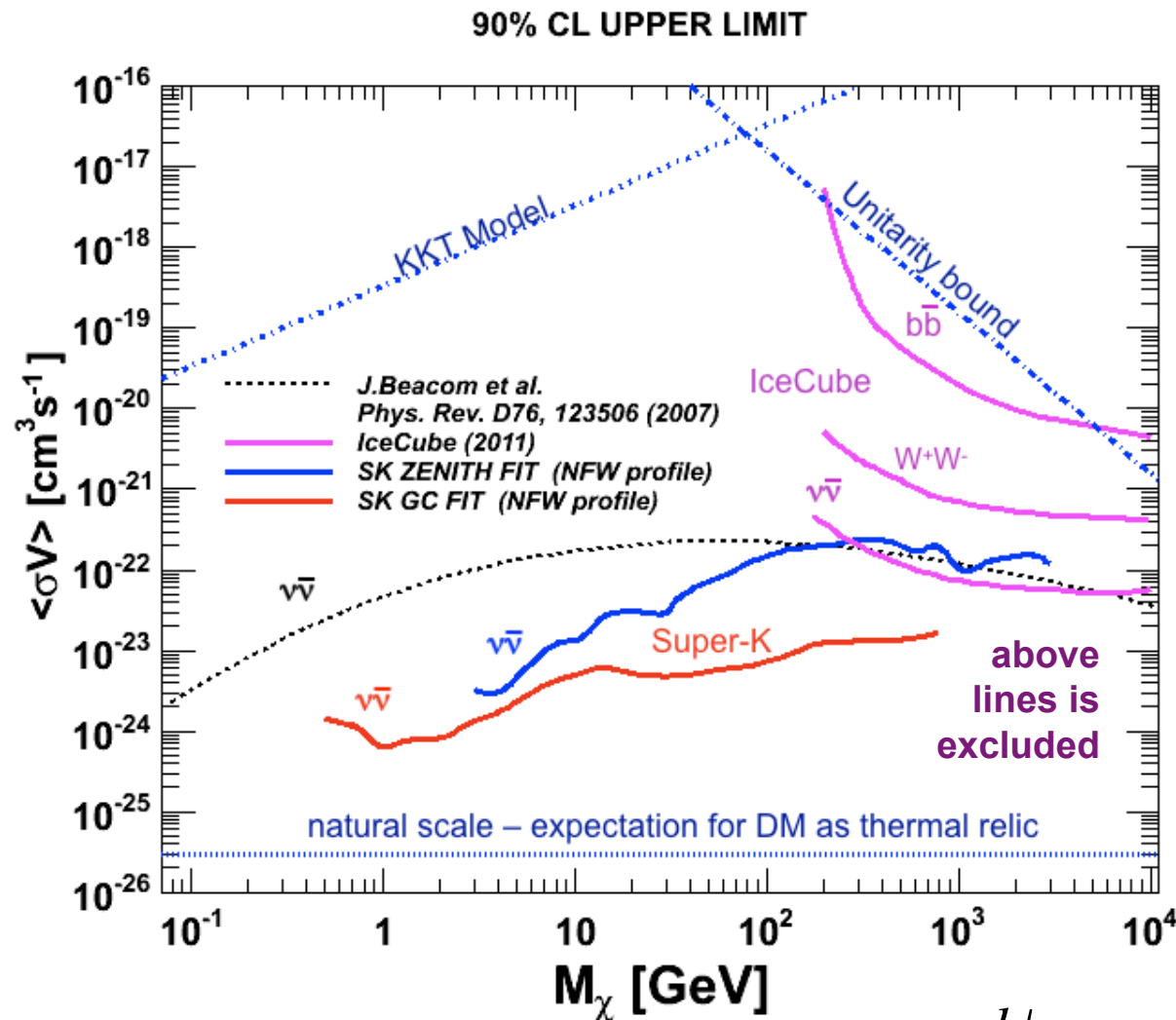
- FIT: norm. WIMP, Δm^2_{23} , $\sin^2 2\theta_{23}$ + niepewności syst.



Ograniczenie na strumień neutrin z anihil. Ciemnej Materii



Limit na przekrój czynny na anihilację CM $\langle\sigma_A V\rangle$



Ice-Cube: arXiv:1101.3349v1

$$\frac{d\phi_{\Delta\Omega}}{dE} = \frac{\langle\sigma_A \cdot V\rangle}{2} J_{\Delta\Omega} \frac{R_{sc} \rho_{sc}^2}{4\pi \cdot m_\chi^2} \frac{dN}{dE}$$

$\left. \begin{array}{l} \frac{d\phi}{dE} \\ J \end{array} \right\}$

Limit na strumień neutron z anihilacji Ciemnej Materii

Intensywność sygnału z anihilacji zależna od modelu halo

Podsumowanie 1/2

- » Poszukiwanie Ciemnej Materii w Super-Kamiokande → dwie analizy
 1. 'Punktowa' – neutrina związane z anihilacją CM w różnych obiektach kosm.
Publikacja 2011/XI (Słońce) ale też i wcześniej 2004 (Słońce, Ziemia, GC)
 2. 'Rozproszona' – poszukiwanie sygnału w rozproszonym strumieniu neutrin z całej Galaktyki. Tego w tym typu analiza przeprowadzona w Super-K **po raz pierwszy** (więcej w doktoracie P.Mijakowski <http://neutrino.fuw.edu.pl/node/429>)
- » Ad 2. → Etapy analizy
 - Symulacja sygnału od Ciemnej Materii
 - Dopasowanie sygnału i tła neutrin atm. do danych Super-K
 - Dwa podejścia – fit w kącie zenitalnym oraz galaktycznym
 - Dane Super-K zgodne z przewidywanym tłem, wkład od przypadków związanych z CM zgodny z 0 dla zakresu $M_\chi \sim 0.5 \text{ GeV} \rightarrow \sim 1 \text{ TeV}$
 - Ograniczenie na strumień neutrin od CM, limit na $\langle \sigma_A V \rangle$
 - W tej chwili **najlepsze na świecie** ograniczenie na $\langle \sigma_A V \rangle$ uzyskane z eksperymentów neutrinowych
- » Analiza 'punktowa' będzie wykorzystywać w przyszłości bardziej ogólne narzędzia analizy 'rozproszonej': globalny fit do wszystkich próbek SK + uwzględnienie systematyki

Podsumowanie 2/2

» Ciemna Materia

Detekcja bezpośrednia

- DAMA – twierdzi że odkryła CM już przeszło 10 lat temu
- CRESST i CoGeNT obserwują sygnał dla $M_\chi \sim$ kilku – kilkunastu GeV
- Pozostałe eksperymenty nie potwierdzają tych wyników

Detekcja pośrednia

- PAMELA/ATIC – nadmiar pozytonów (oraz e^+e^-) ponad spodziewane tło, przy energiach > 10 GeV (ATIC: 300-600 GeV) ... sytuacja trudna do wytłumaczenia anihilacją CM w ramach standardowych modeli i założeń
- FERMI – nie potwierdza tak znaczącego efektu nadmiaru e^+e^-

» Super-Kamiokande poszukuje neutrin z anihilacji CM

- w Słońcu, jądrze Ziemi – brak nadwyżki ponad spodziewane tło neutrin atmosferycznych, limit na $\sigma_{\chi N}$
- w rozproszonym strumieniu z Galaktyki – brak nadwyżki, limit na $\langle \sigma_A V \rangle$ w tej chwili najlepszy z eksperymentów neutrinowych

» Aby poznać naturę CM potrzebna będzie jej detekcja w eksperymentach różnych typów (akceleratorowych, bezpośrednich, pośrednich)

... szukamy dalej

Dziękuję za uwagę



SLAJDY ZAPASOWE

DM self-annihilation cross section

$\langle \sigma_A V \rangle$ – cross section averaged over the relative velocity distribution

- » Self-annihilation cross section sets the obs. DM mass density

$$\Omega_\chi = 0.23 \pm 0.03$$

- » In thermal relic scenarios of Universe evolution

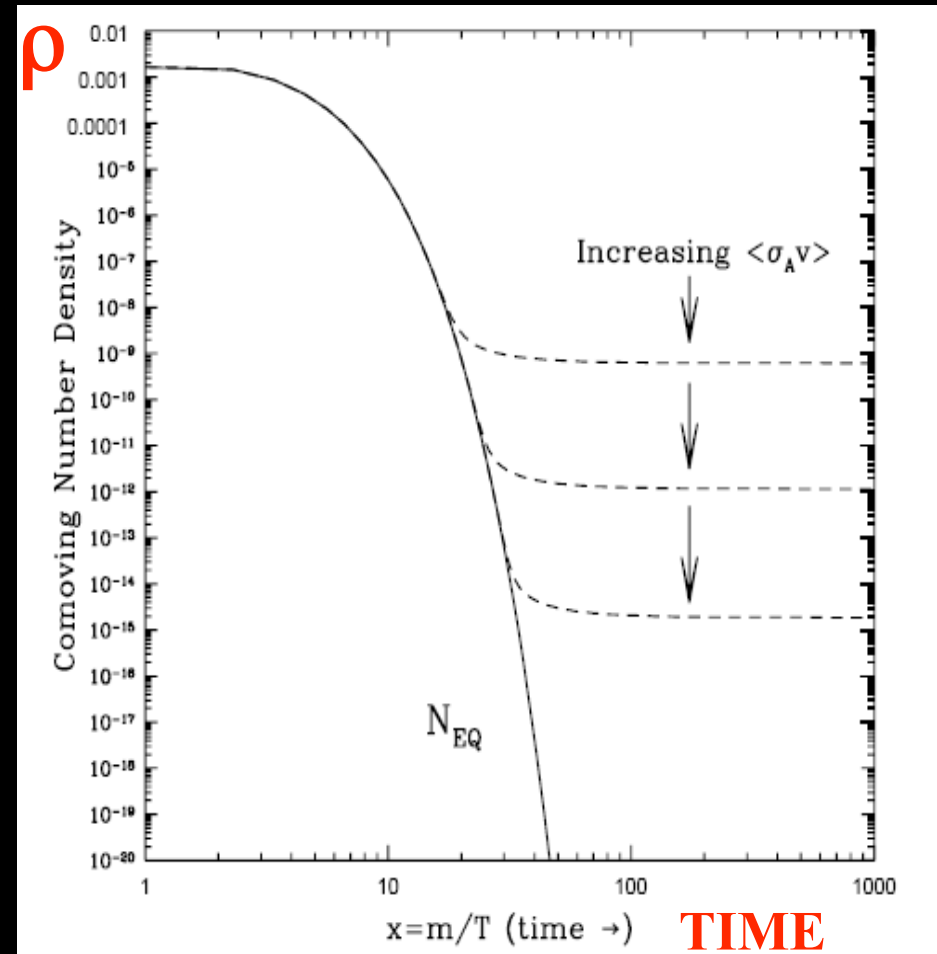
$$\langle \sigma_A V \rangle \approx 3 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

- » Sets DM annihilation rate in galactic halos

$$\Gamma_A \propto \langle \sigma_A V \rangle \frac{\rho_\chi^2}{M_\chi^2}$$

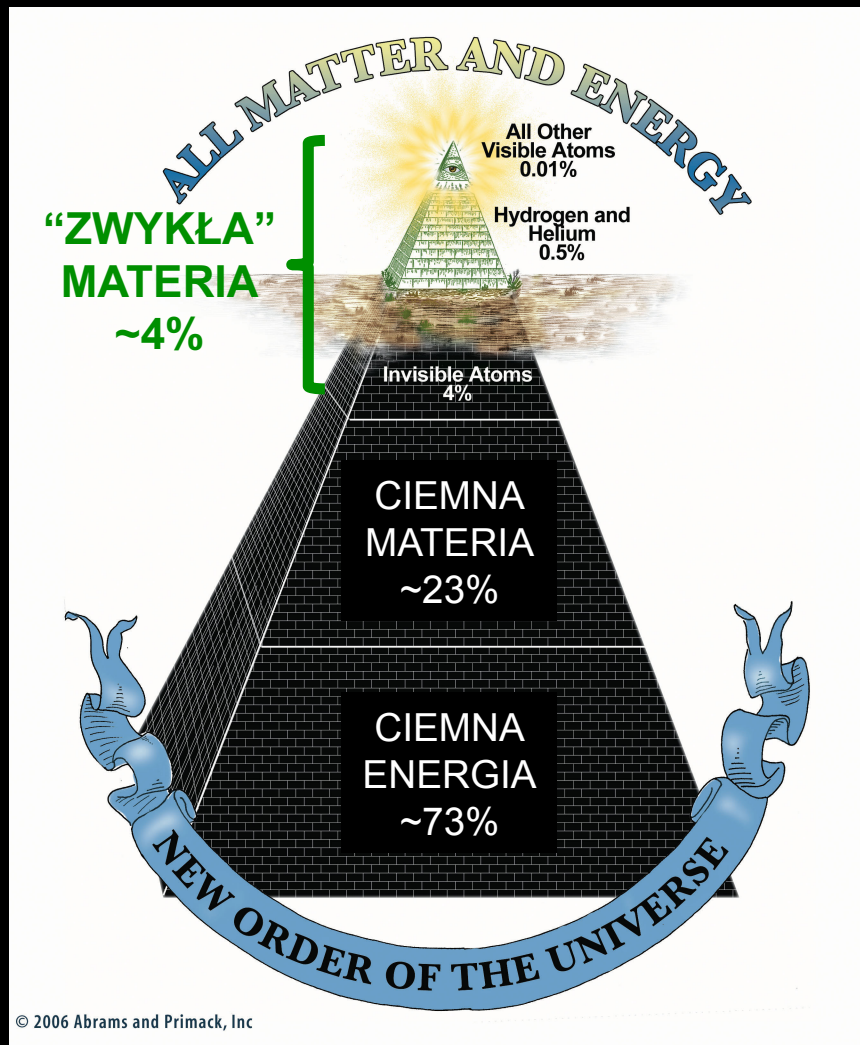
numerical density squared

„freeze out” of thermal relic particle



Ciemna Materia we Wszechświecie

Zagadkowy składnik masy Wszechświata. Spodziewane słabe oddziaływania z materią. Grawitacyjny wpływ na otaczającą materię. Determinuje ewolucję Wszechświata.



Halo Ciemnej Materii otaczające galaktykę

Ciemna Materia stanowi ok 95-99% masy galaktyk

Poszukiwania cząstek Ciemnej Materii

- » Najpowszechniej rozważany kandydat na cząstkę Ciemnej Materii

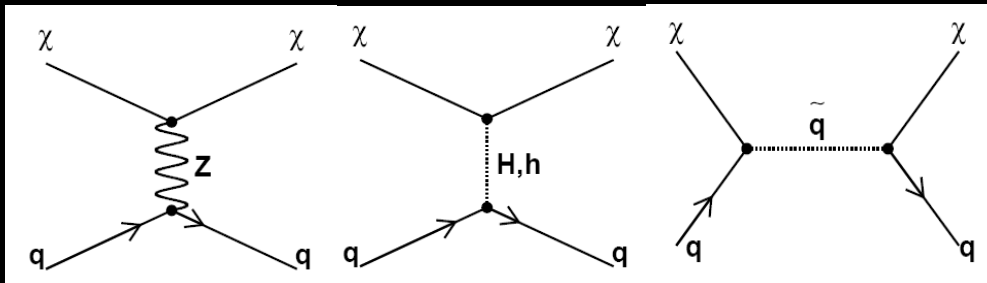
neutralino χ

najlżejsza cząstka przewidywana przez *Supersymetrię*
 kilka GeV < M_χ < kilkanaście TeV

LEP

kosmologia

Przykładowe oddziaływania neutralin

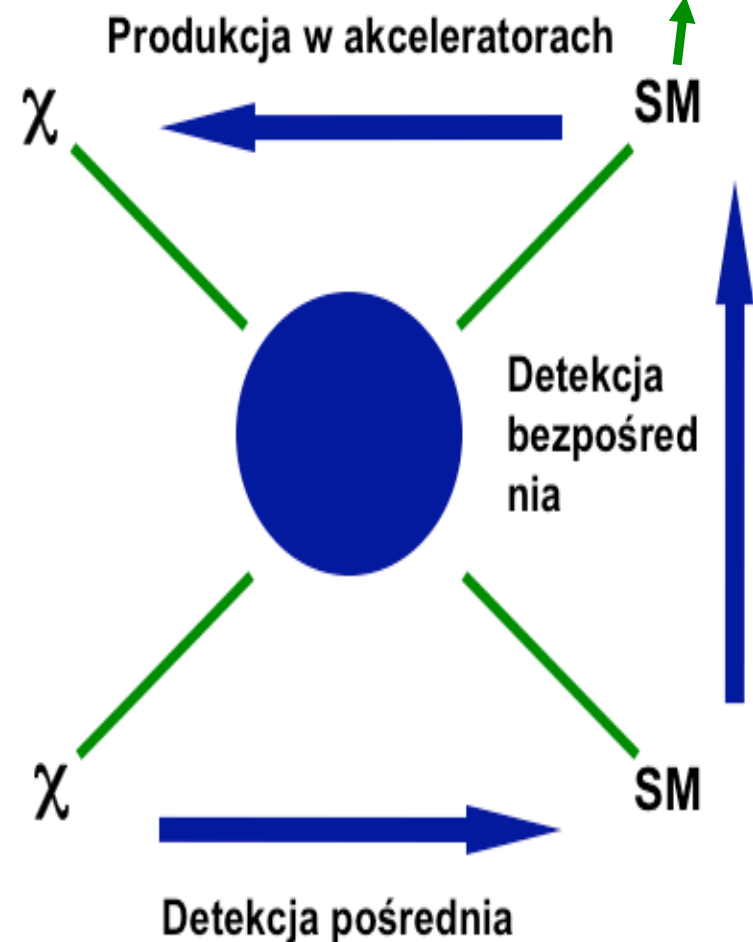


Jungman, Kamionkowski, Griest, Phys. Rep., 267, 195 (1996)

- » Inni kandydaci
 - Aksjon, grawitino, cząstka Kałuży-Kleina... i wiele innych (bardziej egzotycznych)

Metody poszukiwania Ciemnej Materii

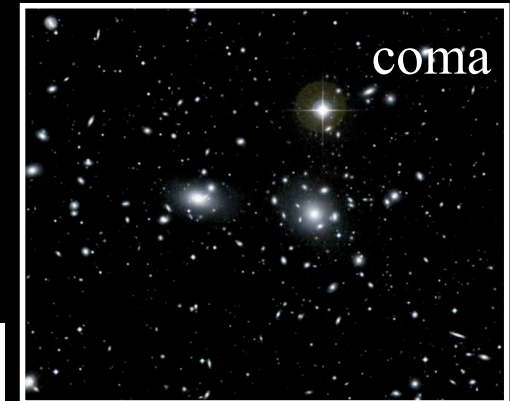
SM: cząstka z Modelu Standardowego



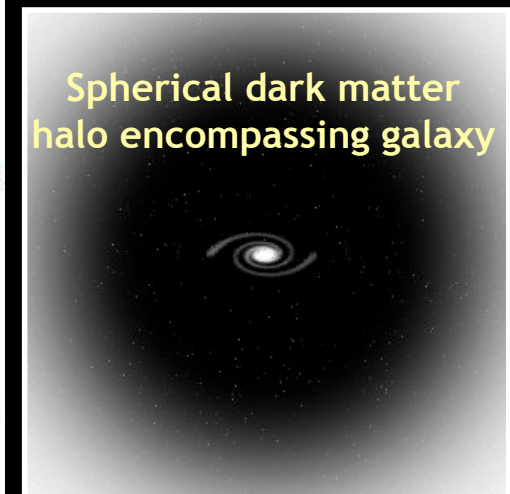
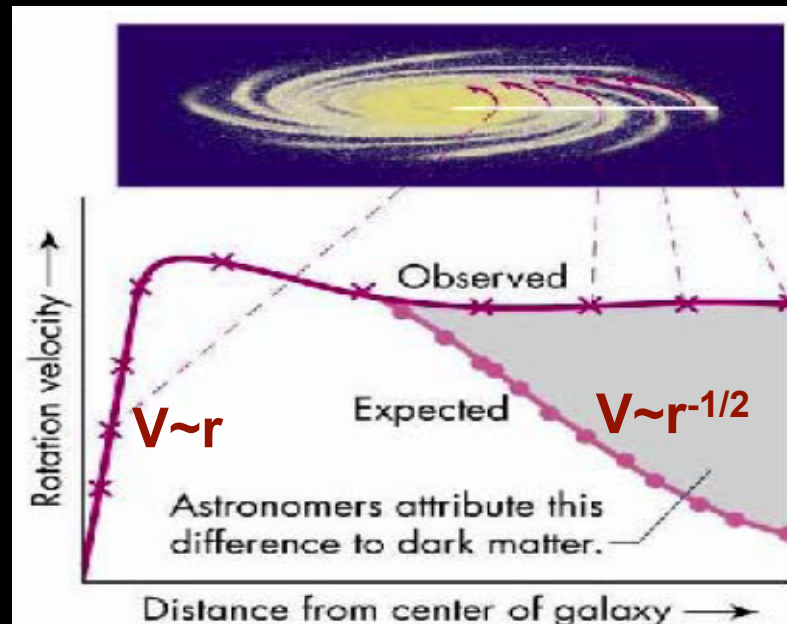
Ciemna Materia we Wszechświecie



- » 1933 r. - Fritz Zwicky, gromada COMA. Prędkość obrotu galaktyk wokół wspólnego środka masy zbyt duża aby mogły one tworzyć układ związany.



- » Lata 70,80 – krzywe rotacji galaktyk; halo niewidzialnej materii (?)



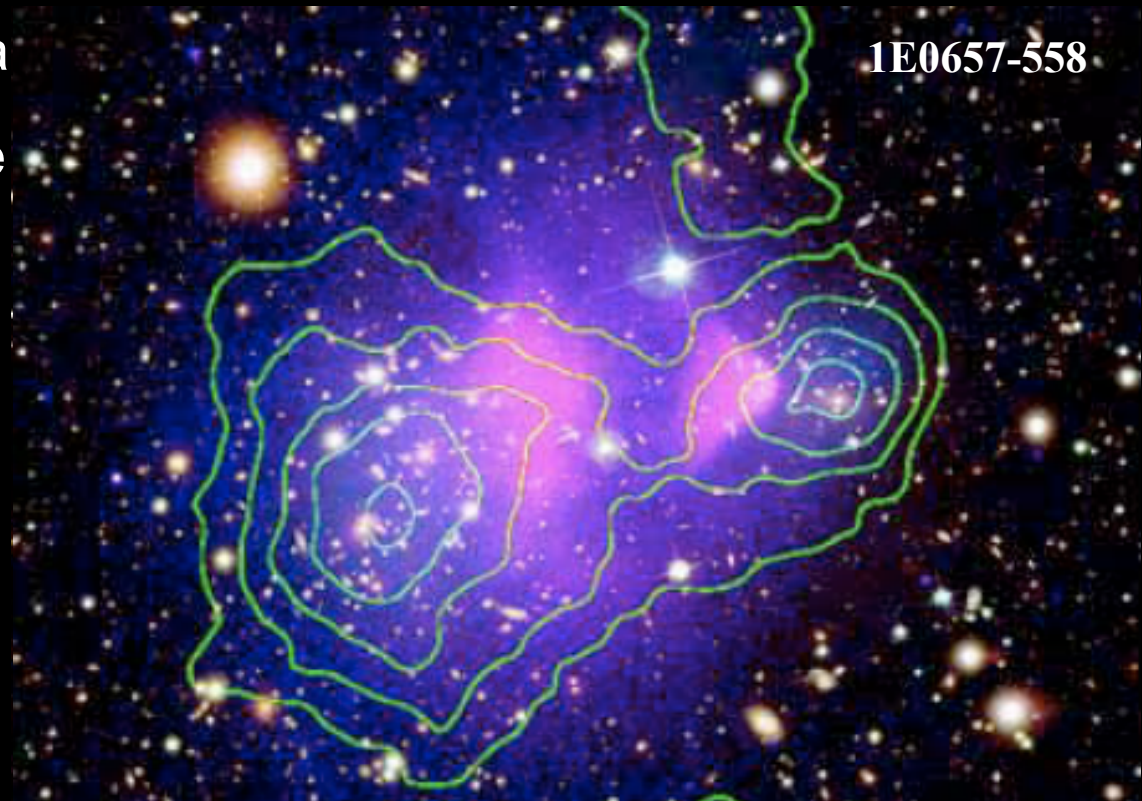
ROZWIĄZANIA

- nieświecząca materia, tylko oddziaływania grawitacyjne
- modyfikacja prawa grawitacji? *MOND* (*MO*dified *N*ewtonian *D*ynamics)

Bullet Cluster

- » Analiza rozkładu masy w obszarze przechodzących przez siebie gromad galaktyk (1E0657-558) (*)
- » Soczewkowanie grawitacyjne – pomiar potencjału grawitacyjnego (obrazy z Hubble Space Telescope, European Southern Observatory VLT, Magellan) / **fioletowy**
- » Promieniowanie X – Chandra X-ray Observatory (NASA) / **różowy**
- » Masa gazu typowo 2x większa od masy materii świecącej w galaktykach. Gaz oddziałuje E-M podczas kolizji
- » Wynik: koncentracja masy grawitacyjnej tam gdzie znajdują się galaktyki
- » Obszary emisji prom. X: 10% całkowitej masy układu

- CIEMNA MATERIA
~~- MOND~~



(*) D.Clowe et al. 2006 Ap. J. 648 L109

Λ CDM

Λ CDM – czołowy model kosmologiczny: promieniowanie mikrofalowe tła, struktury wielkoskalowe, przyśpieszanie ekspansji Wszechświata

Zawartość masy-energii we Wszechświecie

$$\Omega_{tot} = \frac{\rho}{\rho_{crit}}$$

$$\rho_{crit} = \frac{3H_0^2}{8\pi G_N} = 5.6 \frac{GeV}{c^2} \frac{1}{m^3}$$

ρ_{crit} – gęstość krytyczna

G_N – stała grawitacji

H_0 – stała Hubble'a

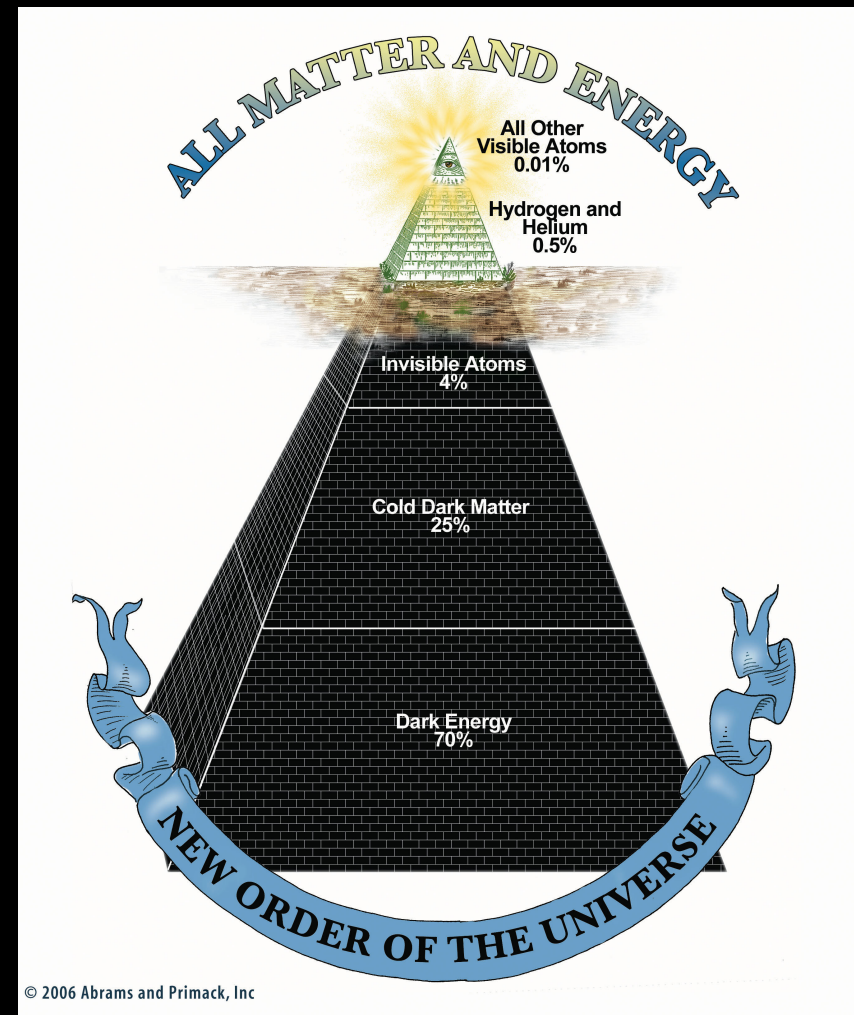
» Ω_{tot} Całkowita gęstość masy-energii
 $\Omega_{tot} = 1.02 \pm 0.02$

» Ω_m Materia
 $\Omega_m = 0.27 \pm 0.03$

» Ω_χ Ciemna Materia
 $\Omega_\chi = 0.23 \pm 0.03$

» Ω_b Bariony
 $\Omega_b \sim 0.045 \pm 0.003$

» Ω_Λ Ciemna Energia
 $\Omega_\Lambda = 0.73 \pm 0.03$



Kandydat na cząstkę Ciemnej Materii

» Bardzo dobrze umotywowany teoretycznie kandydat

WIMP

(weakly interacting massive particle)

Słabo Oddziałująca Masywna Cząstka

- ◆ Neutralne
- ◆ Długożyciowe
(z $\tau \sim$ czas życia Wszechświata)
- ◆ Masywne ($M_\chi \sim 100$ GeV)
- ◆ Słabo oddziałujące z materią
 $\sigma \leq 10^{-2}\text{pb}$ (10^{-38} cm²)

◆ taką cząstką jest neutralino χ

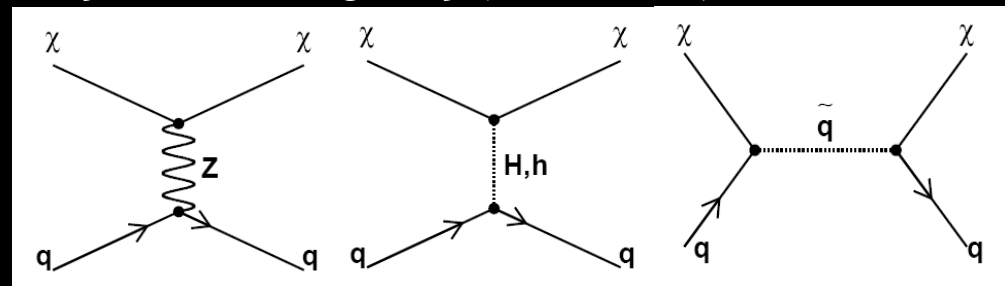
najlżejsza cząstka *supersymetryczna* LSP
(Lightest Supersymmetric Particle)

$$\sim 6 \text{ GeV} < M_\chi < \sim 10 \text{ TeV}$$

LEP

kosmologia

Przykładowe diagramy (neutralino)

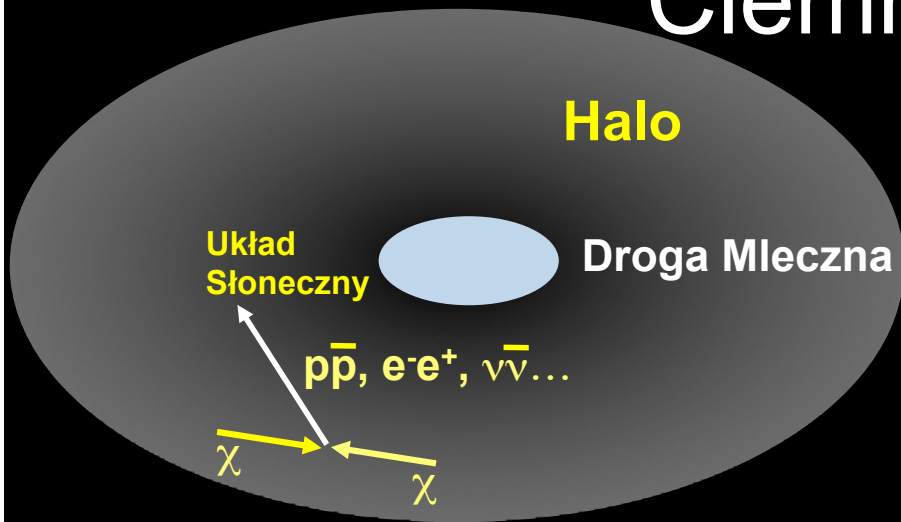


Jungman, Kamionkowski, Griest, Phys. Rep., 267, 195 (1996)

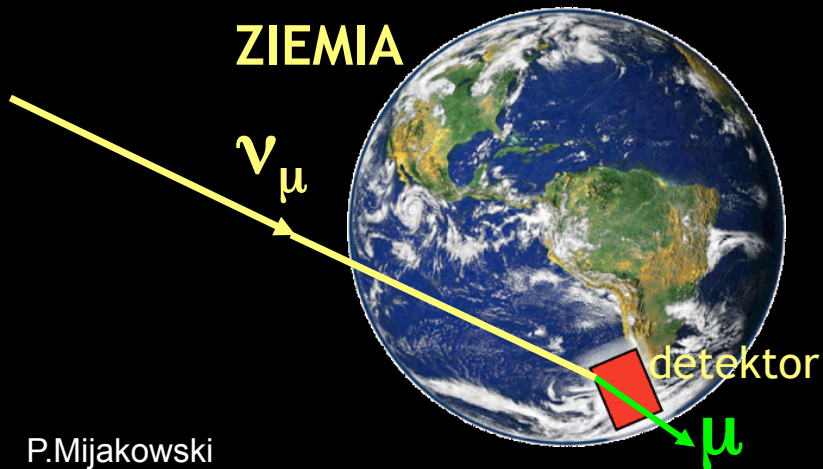
» Inni kandydaci

- Aksjon, grawitino, cząstka Kaluza-Klein... i wiele innych (bardziej egzotycznych)

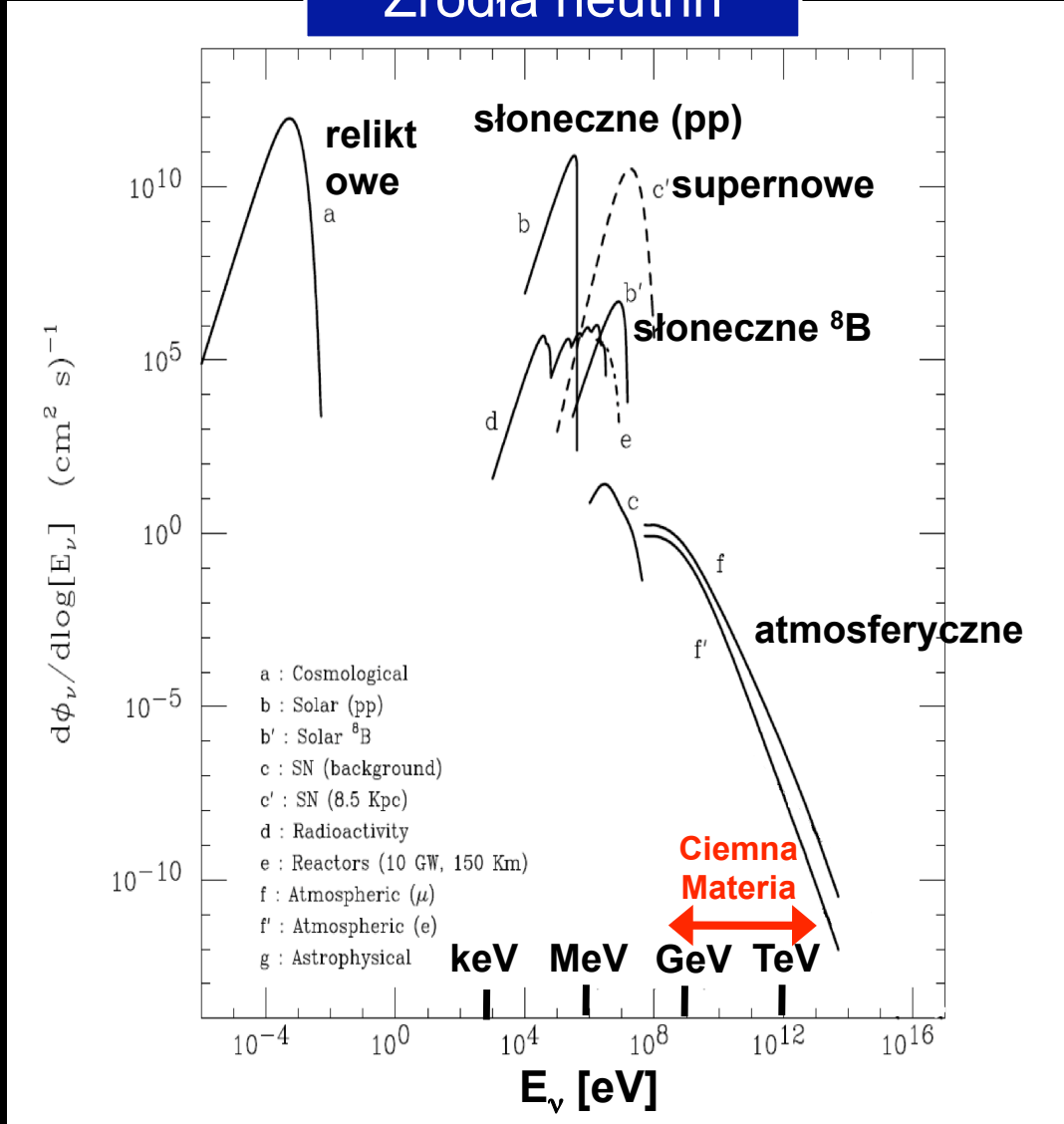
Poszukiwanie neutrin z anihilacji Ciemnej Materii

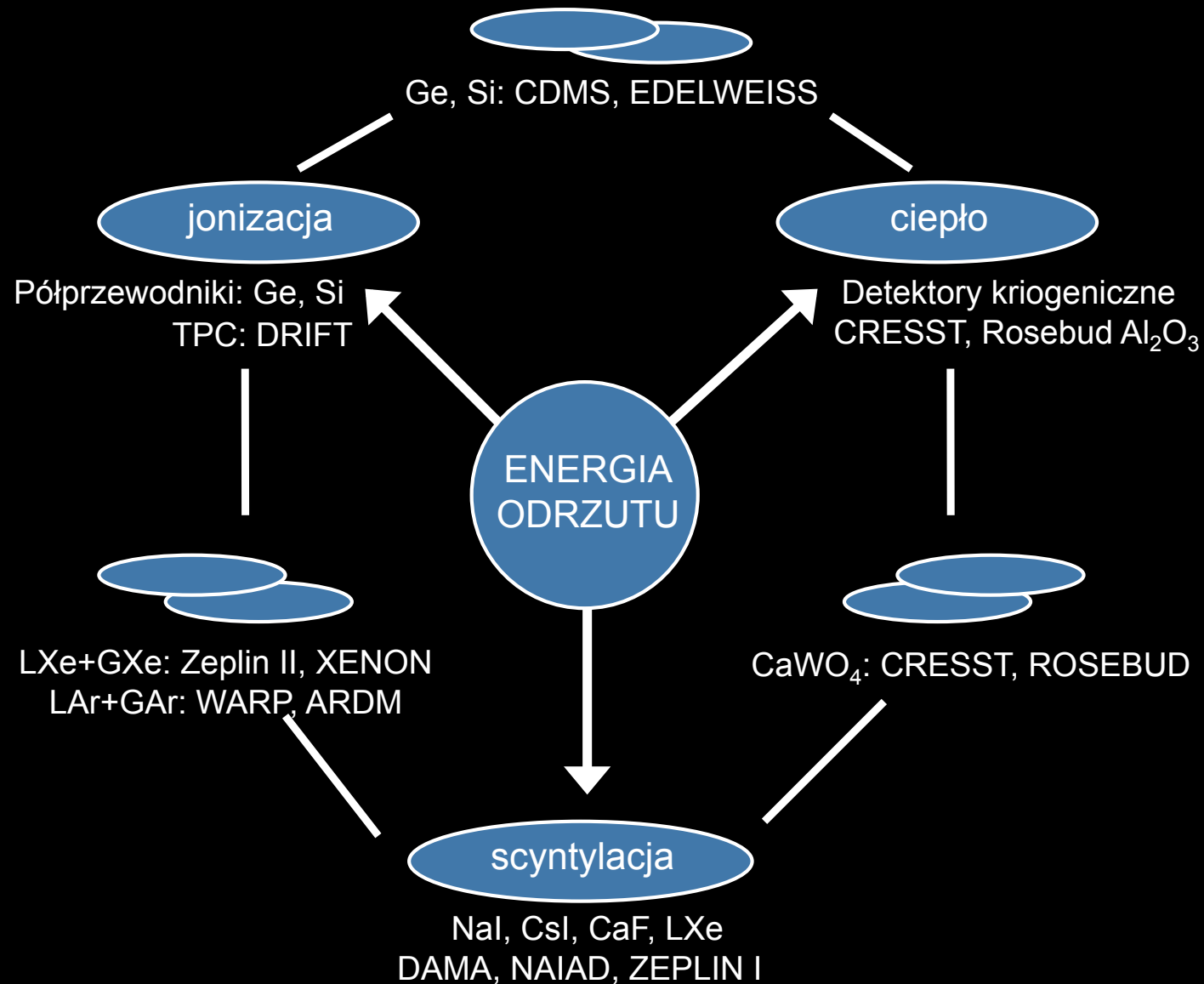


$$\chi\chi \rightarrow q\bar{q}(c\bar{c}, b\bar{b}, t\bar{t}, \dots) \rightarrow \dots \rightarrow \nu, \gamma, e, \bar{p}, \bar{H}_2, W^\pm, Z^0, H$$



Źródła neutrin





Pomiar energii jąder odrzutu wieloma sposobami pozwala eliminować tło doświadczalne – odróżnienie rozpraszania na elektronach (np. elektronów lub fotonów) od rozpraszania neutronów/ α /WIMP-ów na jądrach

Energia odrzutu

» Energia odrzutu zależy od:

- masy χ oraz masy jądra tarczy
- Energii kinetycznej WIMP-ów T_χ (model halo)

przykładowy model halo

- prędkość WIMP-ów w halo: rozkład *Maxwella-Bolzmannna* ze średnią prędkością względem centrum Galaktyki = 0, jej dyspersją ≈ 230 km/s, $V_{\text{esc}} \approx 600$ km/s
- $V_{\text{układu słońca}} \approx 230$ km/s (względem halo) -> określa śred. T_χ
- ρ - gęstość WIMP-ów w halo galaktycznym ($\sim 0.3 \text{ GeV}/c^2 \cdot 1/\text{cm}^3$)

» Np. (rozpraszanie w fali S):

» Widmo energii jąder odrzutu dla ustalonej m_χ jest ciągłe i ma charakter eksponencjalny

Ar
(Z=40)

$$M_\chi = 50 \text{ GeV}/c^2 \quad \langle T_{\text{odrzutu}} \rangle = 14 \text{ keV}$$

$$M_\chi = 100 \text{ GeV}/c^2 \quad \langle T_{\text{odrzutu}} \rangle = 24 \text{ keV}$$

Częstość zdarzeń

Liczba rejestrowanych przypadków (Rate):

$$R \sim \rho \cdot V \cdot \sigma$$

ρ - gęstość WIMP-ów w halo galaktycznym $0.3 \text{ GeV}/c^2 \cdot 1/\text{cm}^3$

σ - elastyczny przekrój czynny zależny od materiału tarczy - rodzaju sprzężenia WIMP-nukleon (spinu) ... dla WIMP-ów spodziewamy się

$\sigma_{\chi\text{-nukleon}} \sim \sigma_{EW} < 10^{-38} \text{ cm}^2$

» Strumień WIMP-ów (ϕ_χ):

$$\phi_\chi = \frac{\rho_\chi}{M_\chi} \cdot V_\chi$$

Przy założeniach:

$$\rho_\chi = 0.3 \text{ GeV}/(c \cdot \text{cm}^3)$$

$$V_\chi = 230 \text{ km/s}$$

$$M_\chi = 100 \text{ GeV}/c^2$$

Strumień WIMP-ów:

$$\phi_\chi \approx 7 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Np. dla dektora Ar oznacza to rejestrację

$\sim 1000 \text{ przyp./ kg /dzień}$

przy $\sigma_{\chi\text{-nukleon}} = 10^{-38} \text{ cm}^2 (10^{-2} \text{ pb})$

Częstość zdarzeń. Efekt modulacji sezonowej

Liczba rejestrowanych przypadków (Rate):

$$R \sim \rho \cdot V \cdot \sigma$$

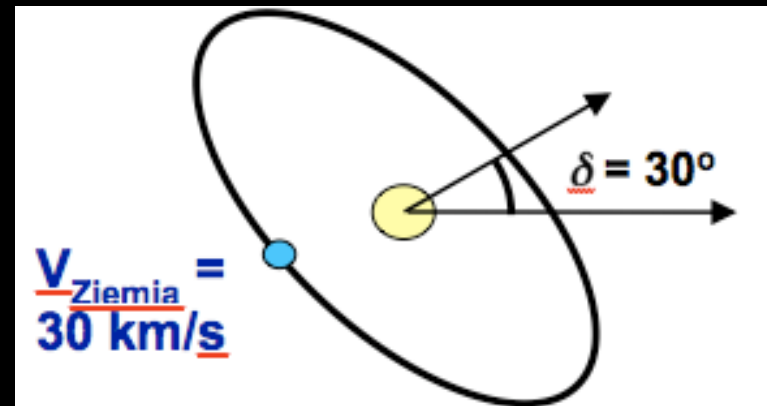
ρ – gęstość WIMP-ów w halo galaktycznym
 $0.3 \text{ GeV}/c^2 \cdot 1/\text{cm}^3$

σ – elastyczny przekrój czynny zależny od rodzaju sprzężenia WIMP-nukleon

- prędkość WIMP-ów w halo: rozkład *Maxwella-Bolzmann*a ze średnią prędkością względem centrum Galaktyki = 0

- $V_{\text{układu słoń.}} \approx 230 \text{ km/s}$ (względem halo) określa śred. energię kinetyczną WIMPów

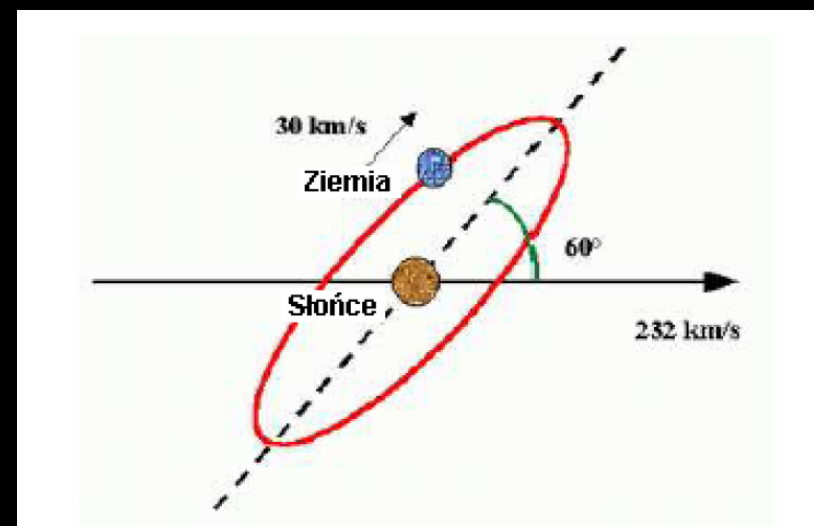
V – średnia prędkość cząstki WIMP względem nukleonu (tarczy) – **ZALEŻY OD PORY ROKU!**



Wypadkowa prędkość Ziemi względem Centrum Galaktyki:
Maksimum – 2 czerwiec - $V \approx 248 \text{ km/s}$
Minimum – 2 grudzień - $V \approx 219 \text{ km/s}$

Efekt modulacji sezonowej

- » V – średnia prędkość cząstki WIMP względem nukleonu (tarczy) – **ZALEŻY OD PORY ROKU!**



Sumaryczna prędkość Ziemi i Słońca względem centrum Galaktyki:

Maksimum - **2 czerwiec** - $V \approx 245$ km/s

Minimum - **2 grudzień** - $V \approx 215$ km/s

Cherenkov ring categories

How can we distinguish interacting neutrino flavor?

» e-like (electrons, gammas)

» μ -like (muons, pions)

fuzzy rings (due to E-M showers)

solid rings

