

CIEMNA MATERIA
przegląd wyników doświadczalnych
i modeli teoretycznych

Marek Olechowski

Instytut Fizyki Teoretycznej

Katedra Teorii Cząstek i Oddziaływań Elementarnych

14.04.2010

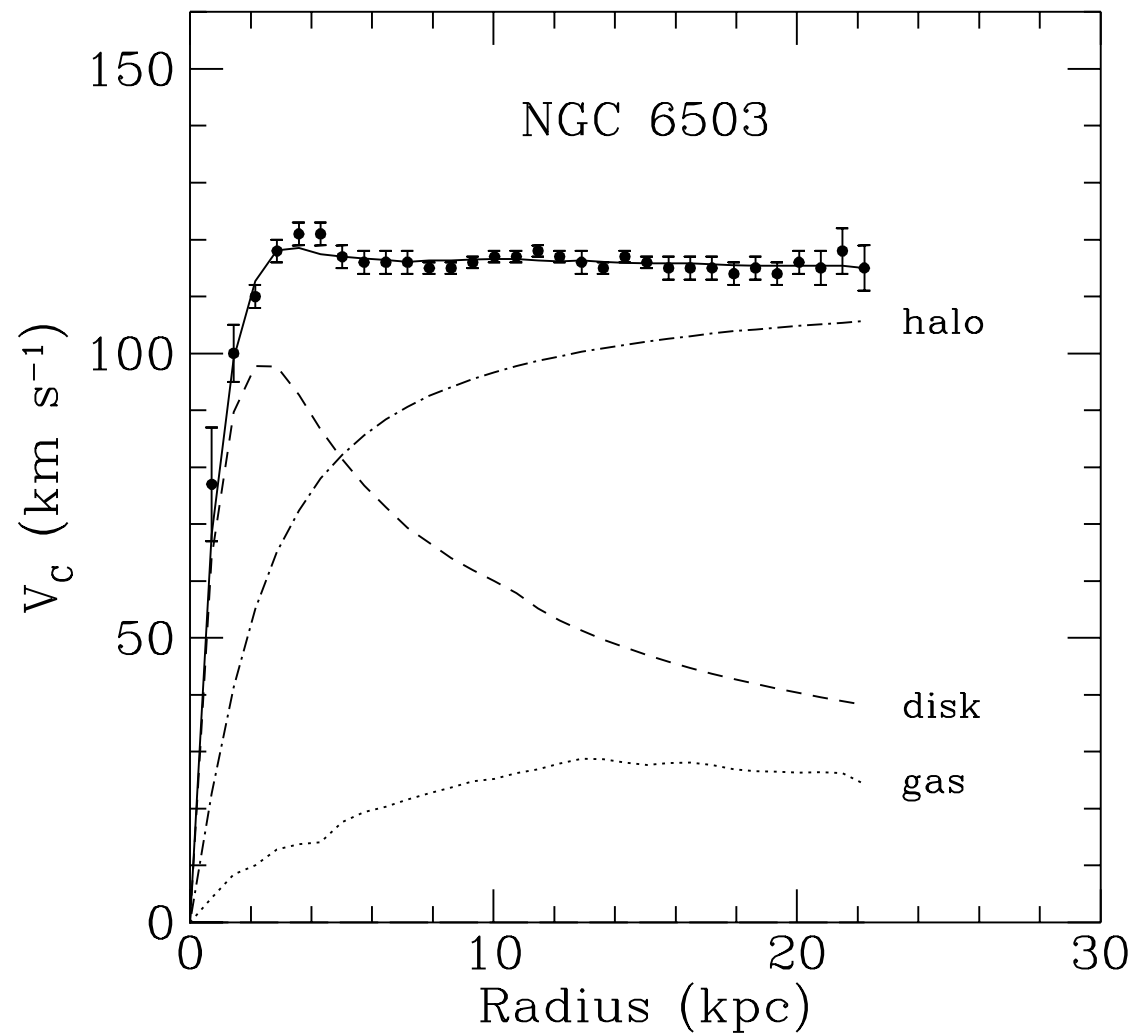
CIEMNA MATERIA

- Dowody na istnienie ciemnej materii
- Kandydaci na cząstki ciemnej materii
 - LSP najbliższa cząstka supersymetryczna
- Eksperymentalne poszukiwanie cząstek ciemnej materii
 - problemy z interpretacją wyników
- Gęstość reliktowa LSP
- Wpływ cząstek ciemnej materii na pierwotną nukleosyntezę
- Grawitina jako ciemna materia

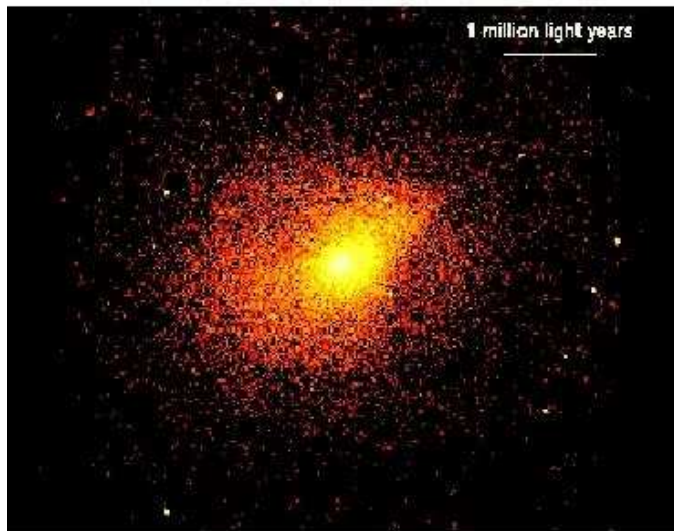
Dowody na istnienie ciemnej materii

- Prędkości części składowych większych struktur
 - gwiazdy i obłoki gazu w galaktykach
 - małe galaktyki i gromady kuliste związane grawitacyjnie przez duże galaktyki
 - galaktyki w gromadach galaktyk
- Soczewkowanie grawitacyjne
- Podwójna gromada galaktyk 1E0657-558
- Struktury wielkoskalowe we Wszechświecie
- Mikrofalowe promieniowanie tła

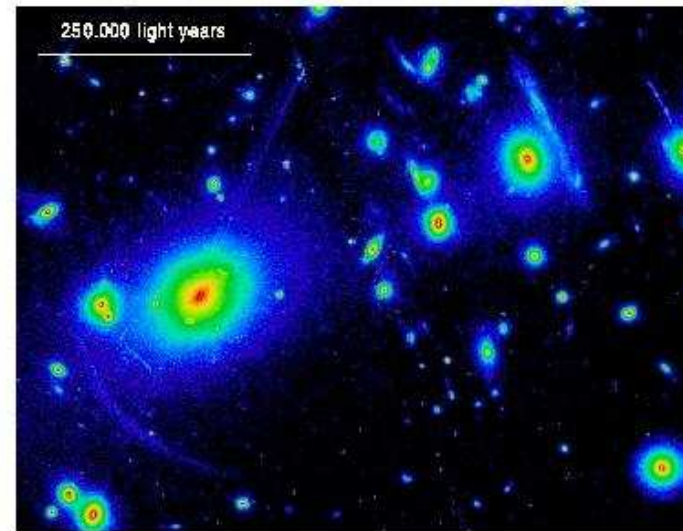
Despersja prędkości na przykładzie krzywych rotacyjnych galaktyk



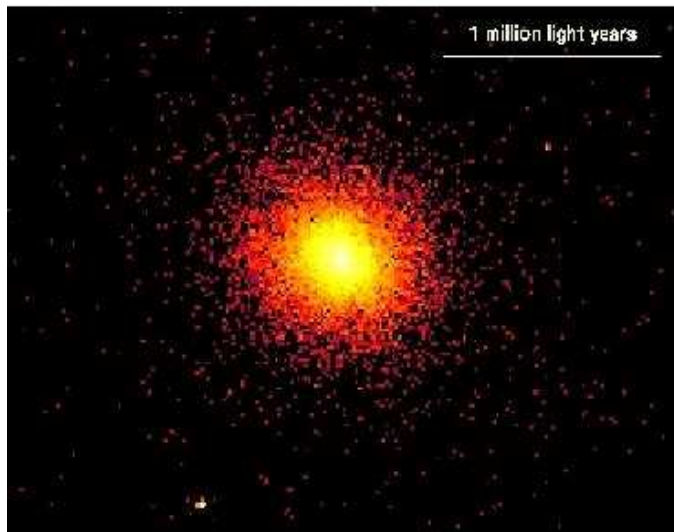
Soczewkowanie grawitacyjne



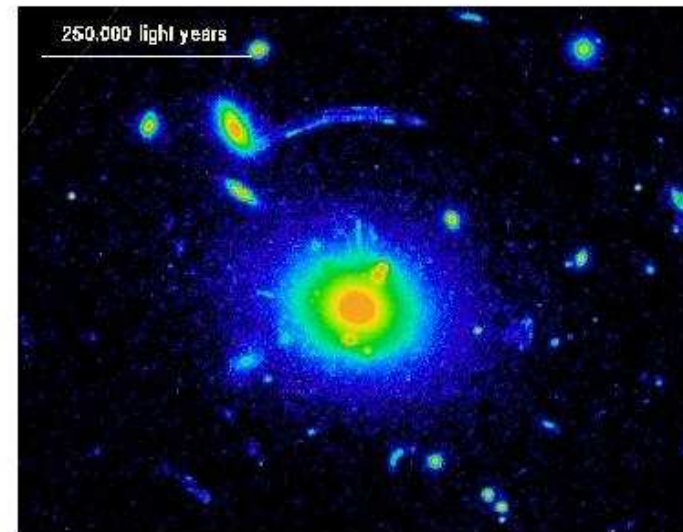
Abell 2390: Chandra (ACIS)



Abell 2390: HST (WFPC2)



MS2137.3-2353: Chandra (ACIS)



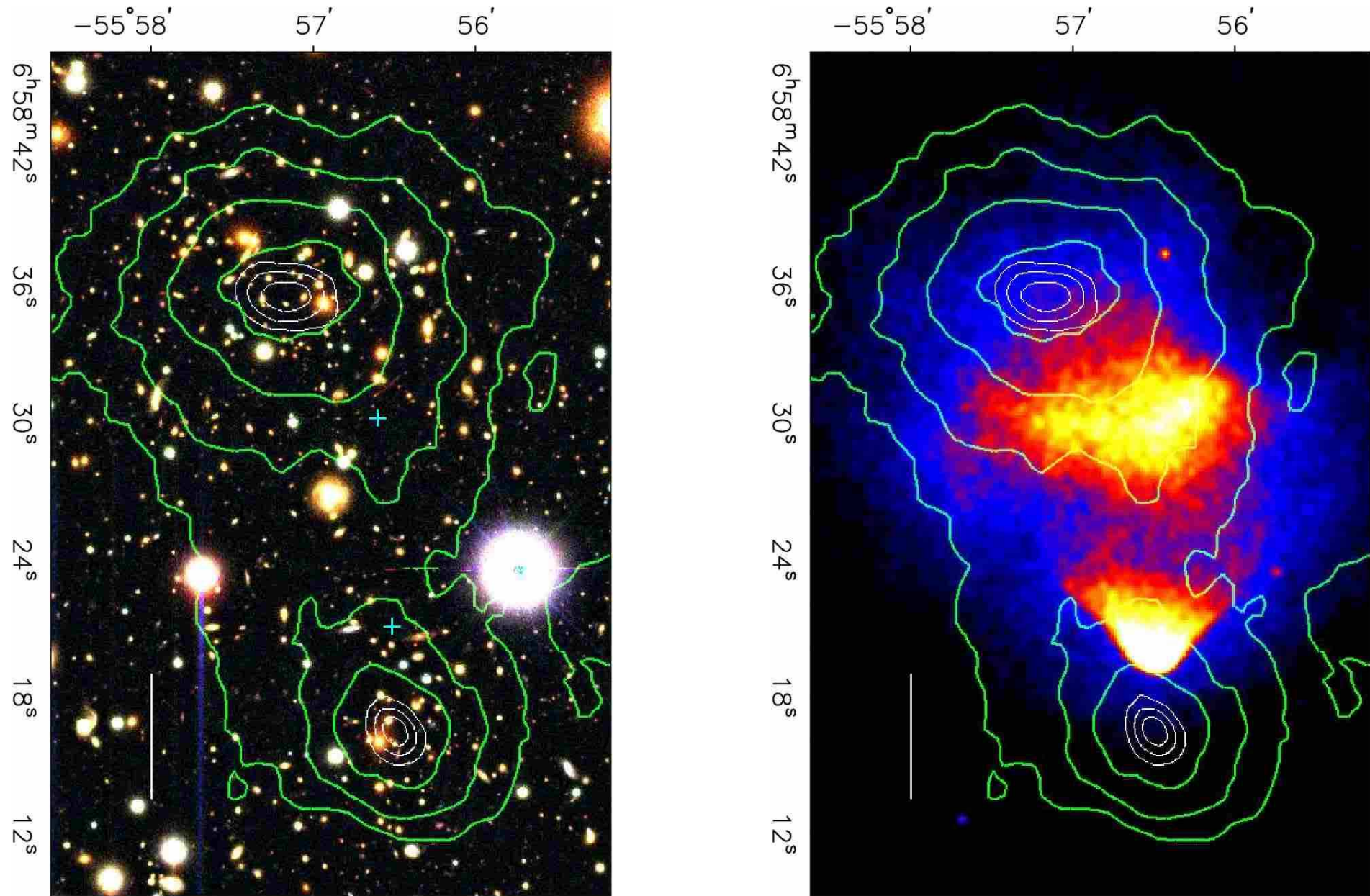
MS2137.3-2353: HST (WFPC2)

Najczęściej rozkłady masy widocznej i niewidocznej są zbliżone

Jest wiele prób wyjaśnienia krzywych rotacyjnych, dyspersji prędkości i soczewkowania grawitacyjnego bez odwoływania się do istnienia ciemnej materii

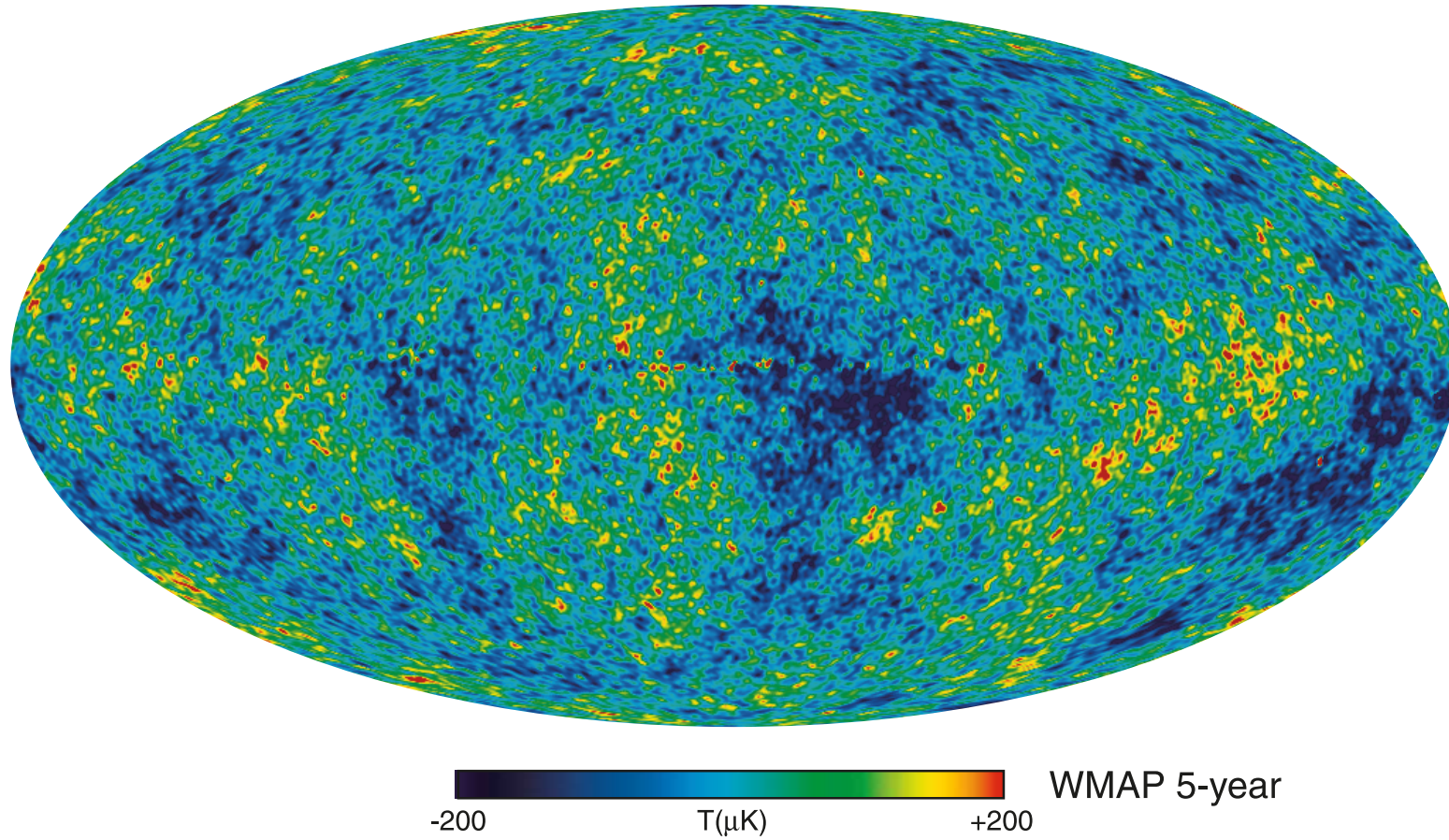
Większość egzotycznych modeli nie potrafi wyjaśnić przypadku gromady galaktyk 1E0657-558

Dwie gromady galaktyk po zderzeniu 1E0657-558



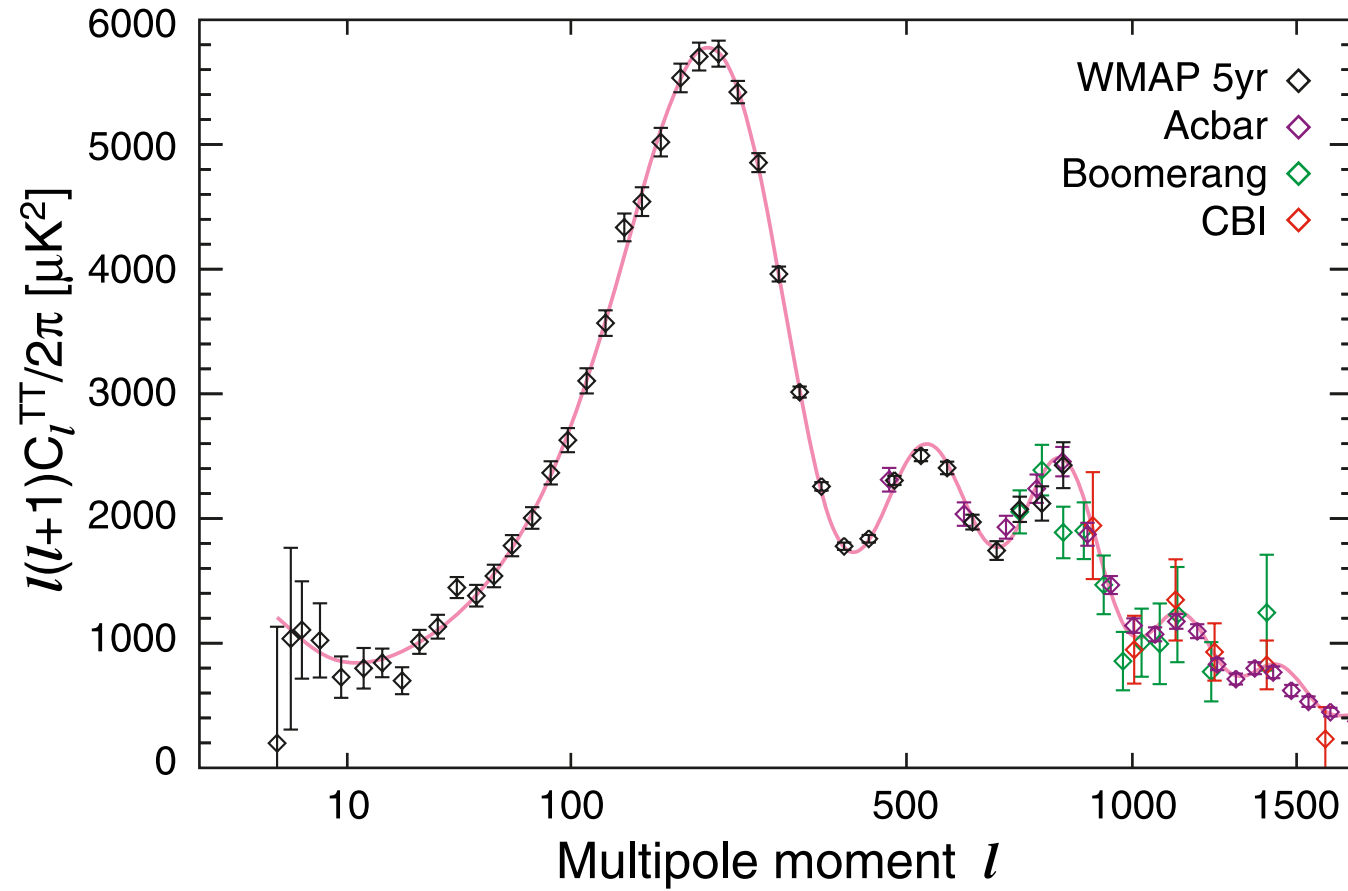
D. Clowe et al. "A direct empirical proof of the existence of dark matter", *Astrophys. J.* 648:L109,2006

Mikrofalowe promieniowanie tła



G. Hinshaw, et al., *Astrophys. J. Suppl.* 180 (2009) 225

Mikrofalowe promieniowanie tła



M. Nolta, et al., *Astrophys. J. Suppl.* 180 (2009) 296

Parameters for Standard Λ CDM Model

Description	Symbol	WMAP-only	WMAP+BAO+SN
Age of universe	t_0	13.69 ± 0.13 Gyr	13.72 ± 0.12 Gyr
Hubble constant	h	$0.719^{+0.026}_{-0.027}$	0.705 ± 0.013
Baryon density	Ω_b	0.0441 ± 0.0030	0.0456 ± 0.0015
Dark matter density	Ω_c	0.214 ± 0.027	0.228 ± 0.013
Dark energy density	Ω_Λ	0.742 ± 0.030	0.726 ± 0.015
Total density	Ω_{tot}	$1.099^{+0.100}_{-0.085}$	$1.0050^{+0.0060}_{-0.0061}$
Neutrino density	$\Omega_\nu h^2$	< 0.014 (95% CL)	< 0.0071 (95% CL)

G. Hinshaw, et al., *Astrophys. J. Suppl.* 180 (2009) 225

Ciemnej materii jest we Wszechświecie znacznie więcej niż materii obserwowalnej

Ciemnej materii nie tworzą ani bariony (MACHO) ani neutrina

Potrzebne jest wyjście poza Model Standardowy oddziaływań fundamentalnych!

Kandydaci na ciemną materię

- neutrino (tylko niewielki wkład do całkowitej gęstości)
- cząstki występujące w modelach supersymetrycznych
 - neutralina
 - sneutrino
 - grawitino
- aksjony (zapostulowane w związku z problemem CP w oddziaływaniach silnych, bardzo lekkie, bardzo słabo oddziałujące)
- “cząstki lustrzane”
- mody Kaluzy-Kleina
- “Q-balls” (i inne stany silnie związane)
- ... wiele innych egzotycznych obiektów

Model Standardowy

bozony cechowania: γ , Z^0 , W^\pm , g

fermiony materii: $\begin{pmatrix} e_L \\ \nu_e \end{pmatrix}$, e_R , ...

skalary Higgsa: h^0

Supersymetryczny Model Standardowy

bozony cechowania: γ , Z^0 , W^\pm , g

fermiony cechowania (gaugina): $\tilde{\gamma}$, \tilde{Z} (\tilde{B} , \tilde{W}^0), \tilde{W}^\pm , \tilde{g}

fermiony materii: $\begin{pmatrix} e_L \\ \nu_e \end{pmatrix}$, e_R , ...

skalary materii (sfermiony): $\begin{pmatrix} \tilde{e}_L \\ \tilde{\nu}_e \end{pmatrix}$, \tilde{e}_R , ...

skalary Higgsa: h^0 , H^0 , A , H^\pm

fermiony Higgsa (higgsina): \tilde{h}_1^0 , \tilde{h}_2^0 , \tilde{h}^\pm

Supersymetryczny Model Standardowy

bozony cechowania: γ, Z^0, W^\pm, g

fermiony cechowania (gaugina): $\tilde{\gamma}, \tilde{Z} (\tilde{B}, \tilde{W}^0), \tilde{W}^\pm, \tilde{g}$

fermiony materii: $\begin{pmatrix} e_L \\ \nu_e \end{pmatrix}, e_R, \dots$

skalary materii (sfermiony): $\begin{pmatrix} \tilde{e}_L \\ \tilde{\nu}_e \end{pmatrix}, \tilde{e}_R, \dots$

skalary Higgsa: h^0, H^0, A, H^\pm

fermiony Higgsa (higgsina): $\tilde{h}_1^0, \tilde{h}_2^0, \tilde{h}^\pm$

Parzystość R pozwala wydłużyć czas życia protonu

- przy okazji daje stabilność najbliższej cząstki supersymetrycznej LSP

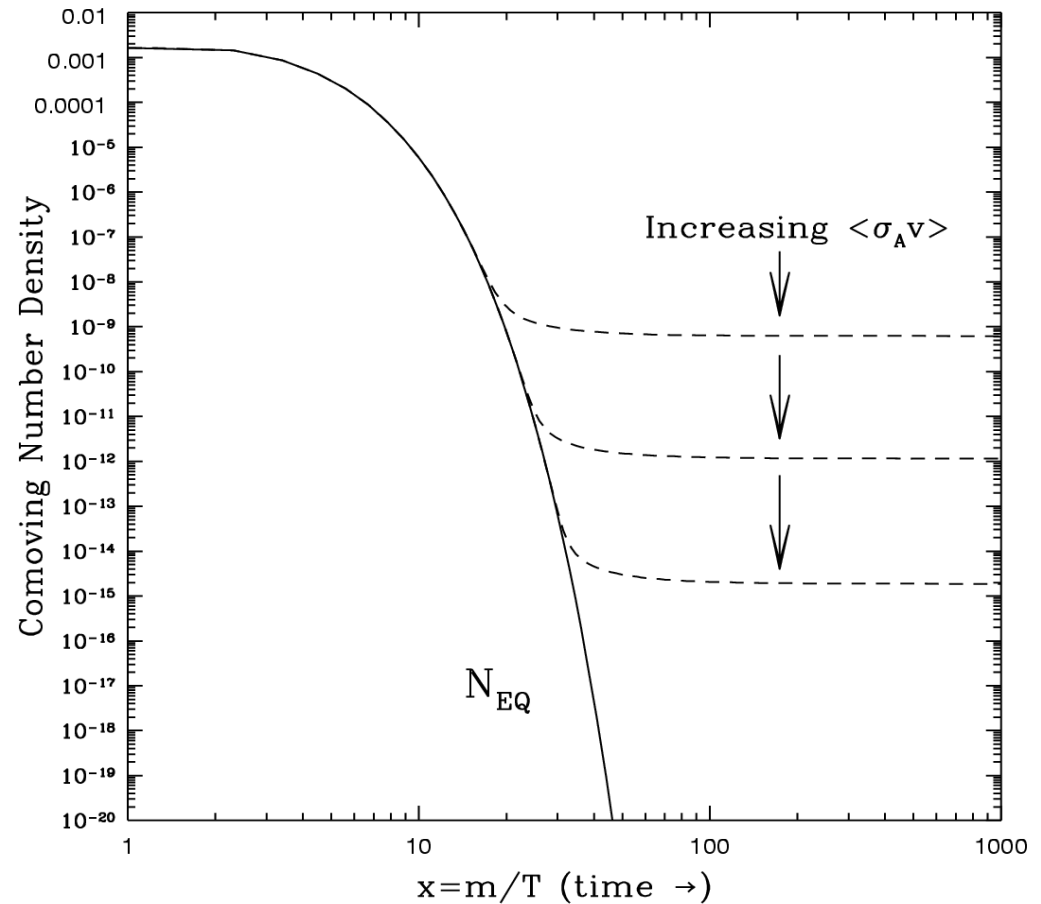
Elektrycznie obojętne cząstki **R**-nieparzyste: neutralina (mieszanki stanów $\tilde{B}, \tilde{W}^0, \tilde{h}_1^0$ i \tilde{h}_2^0) i sneutrino $\tilde{\nu}_l$

W modelach supergrawitacyjnych pojawia się superpartner grawitonu - grawitino \tilde{G} , które może być LSP

Gęstość relikтовая

Cząstki z silniejszymi sprzężeniami :

- dłużej pozostają w równowadze termodynamicznej, w której ich liczba zmniejsza się jak $\exp(-m/T)$
- mają mniejszą gęstość relikтовую



Stabilne, słabo oddziałujące cząstki o masach rzędu GeV–TeV są bardzo dobrymi kandydatami na ciemną materię

Np. neutralina i sneutrino z modeli supersymetrycznych z symetrią R

Gęstość relikтовая LSP

- Modele supersymetryczne zostały zaproponowane w związku z problemem hierarchii skal
- **Przy okazji dostarczają naturalnych kandydatów na cząstki ciemnej materii.**
- Rozsądne gęstości relikowe LSP (neutralina, sneutrina)

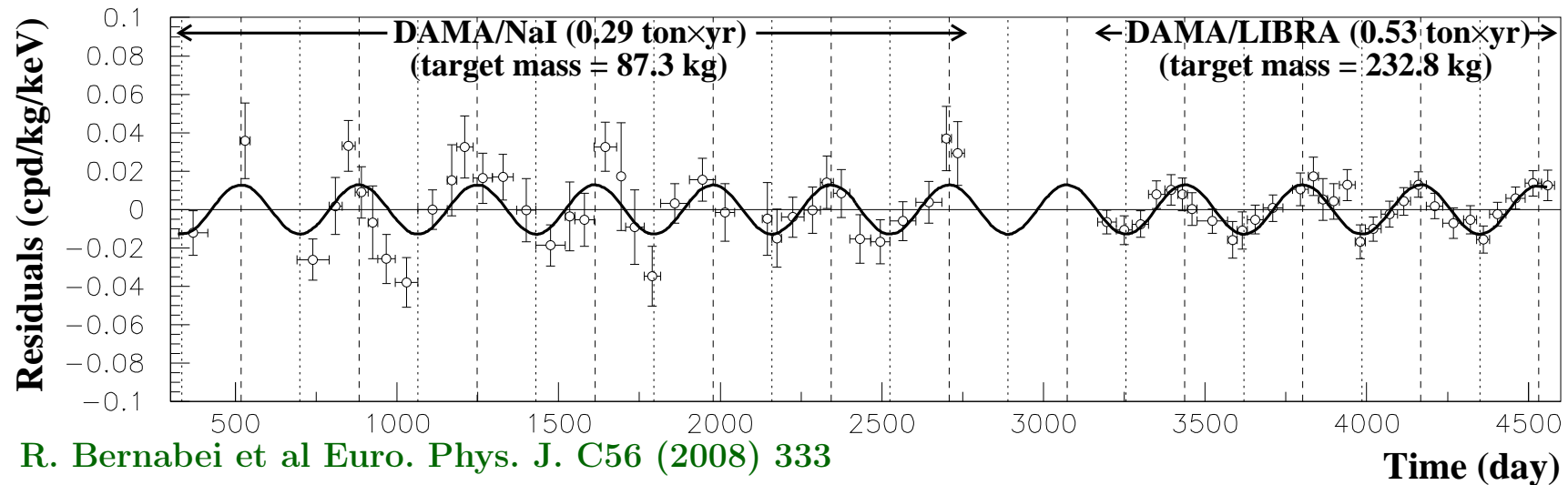
$$\Omega_\chi h^2 \approx 0.034 \frac{\sqrt{g_*}}{g_{*s}} \Big|_{x=1} \frac{(n+1)x_F^{n+1}}{(\sigma_0/\text{pb})} \quad x = \frac{m_\chi}{T}, \quad \langle \sigma_{Av} \rangle = \sigma_0 x^{-n}$$

- Dokładna wartość tej gęstości reliktovej zależy od szczegółów modelu
 - sprzężenia
 - kanały dostępne dla anihilacji
 - anihilacja rezonansowa
 - koanihilacja
- Dane astrofizyczne pozwalają
 - wykluczyć modele przewidujące $\Omega_{\text{LSP}} > \Omega_{\text{DM}}^{\text{max}}$
 - wyróżnić modele przewidujące $\Omega_{\text{DM}}^{\text{max}} > \Omega_{\text{LSP}} > \Omega_{\text{DM}}^{\text{min}}$

Eksperymentalne poszukiwanie cząstek ciemnej materii

- Bezpośrednie - rozpraszanie na jądrach
 - detektory w bardzo niskich temperaturach z możliwie małym tłem
 - fotony, fonony, jonizacja
 - **DAMA/LIBRA** (NaI, Gran Sasso), **CDMS** (Ge, Si, kopalnia Soudan), CRESST (CaWO₄, Gran Sasso), XENON (Xe, Gran Sasso), ZEPLIN (Xe, kopalnia Boulby), EDELWEISS (Ge, tunel Frejus), **CoGeNT** (Ge, kopalnia Soudan), ...
- Pośrednie - poszukiwanie produktów anihilacji zachodzącej w galaktycznym halo, w centrum Słońca itd.
 - promienie gamma - teleskopy naziemne i umieszczone w przestrzeni kosmicznej (EGRET, GLAST)
 - neutrino - teleskopy neutrinowe AMANDA, ANTARES, IceCube
 - antycząstki w promieniowaniu kosmicznym - HEAT, CAPRICE, **PAMELA**

Zespół DAMA/LIBRA od wielu lat obserwuje modulacje liczby elastycznych zderzeń jakichś cząstek z jądrami kryształów NaI (których nie potrafi wyjaśnić w żaden standardowy sposób)



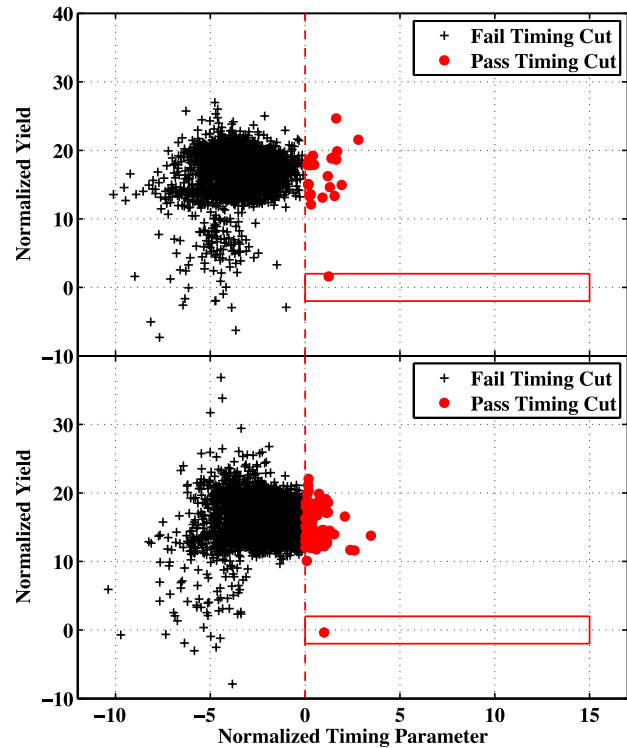
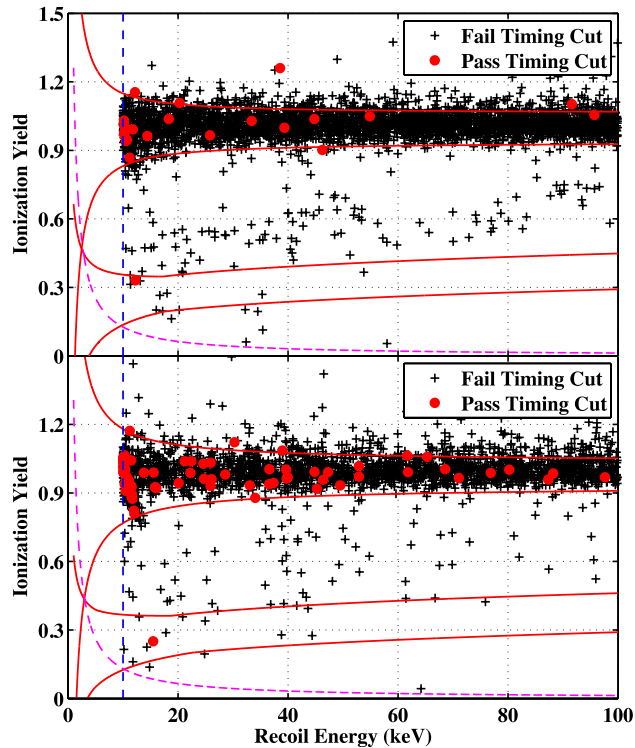
Roczna modulacja potwierdzona na poziomie 8.9σ !

Źródłem tego sygnału mogą być cząstki ciemnej materii tworzące galaktyczne halo.

Średnia prędkość takich cząstek względem Ziemi zmienia się w ciągu roku.

Jest wiele innych czynników sezonowych. Czy wszystkie zostały należycie uwzględnione?

Zespół CDMS ogłosił nowe wyniki w grudniu 2009.



Dwa przypadki rozpraszania na jądrach
(przy analizie “w ciemno”)

Przewidywane tło:
 $0.8 \pm 0.1 \pm 0.2$

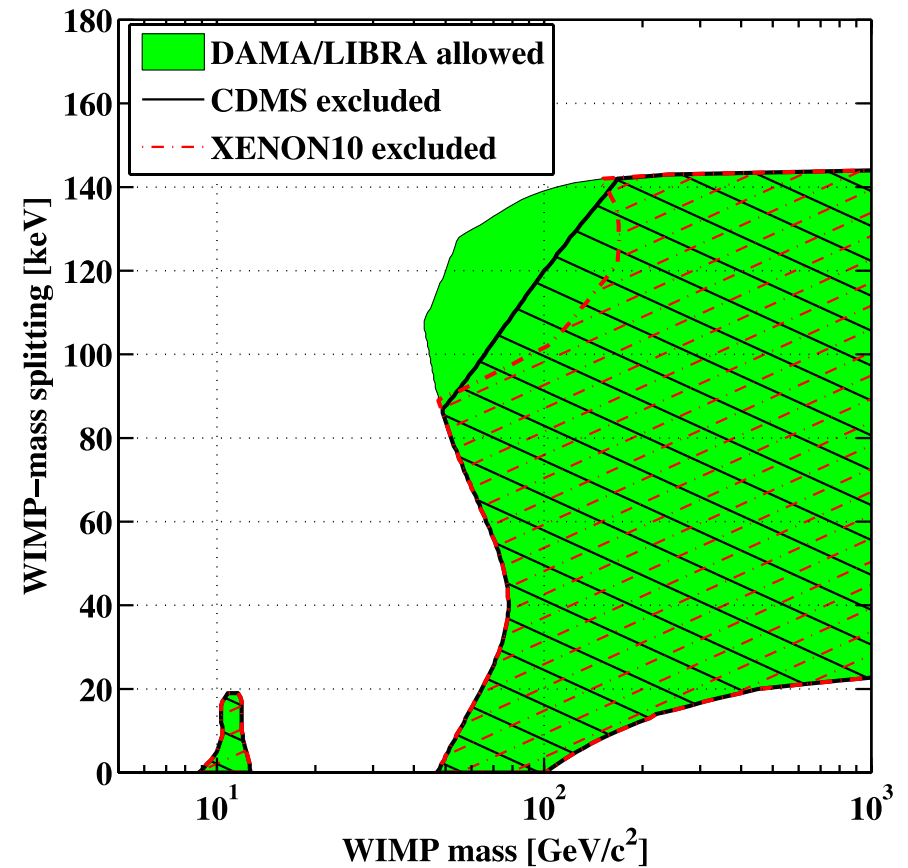
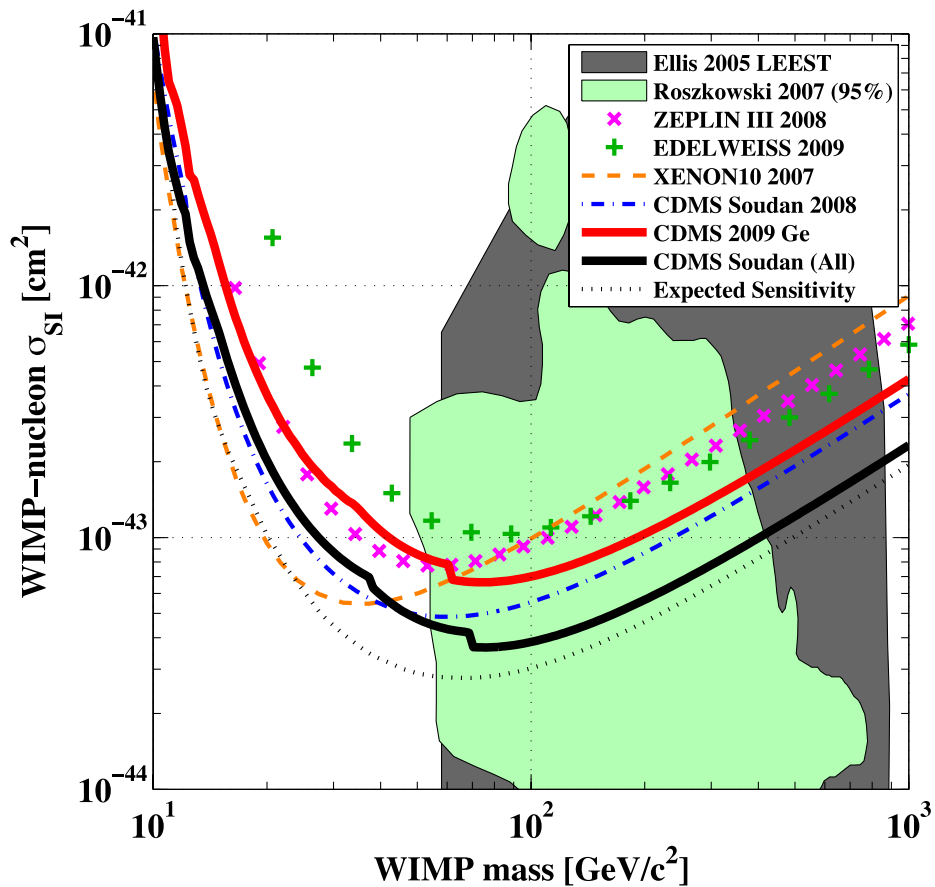
Cięcia zmniejszające tło do 0.4 redukują czułość na WIMP o 28% i usuwają oba przypadki

Z. Ahmed et al. [CDMS Collaboration] arXiv:0912.3592

Wnioski CDMS:

Nowe ograniczenia na przekroje czynne na rozpraszanie WIMP-nukleon.

Wykluczona zostaje większość obszaru zgodnego z wynikami modulacji obserwowanej przez DAMA/LIBRA



Z. Ahmed et al. [CDMS Collaboration] arXiv:0912.3592

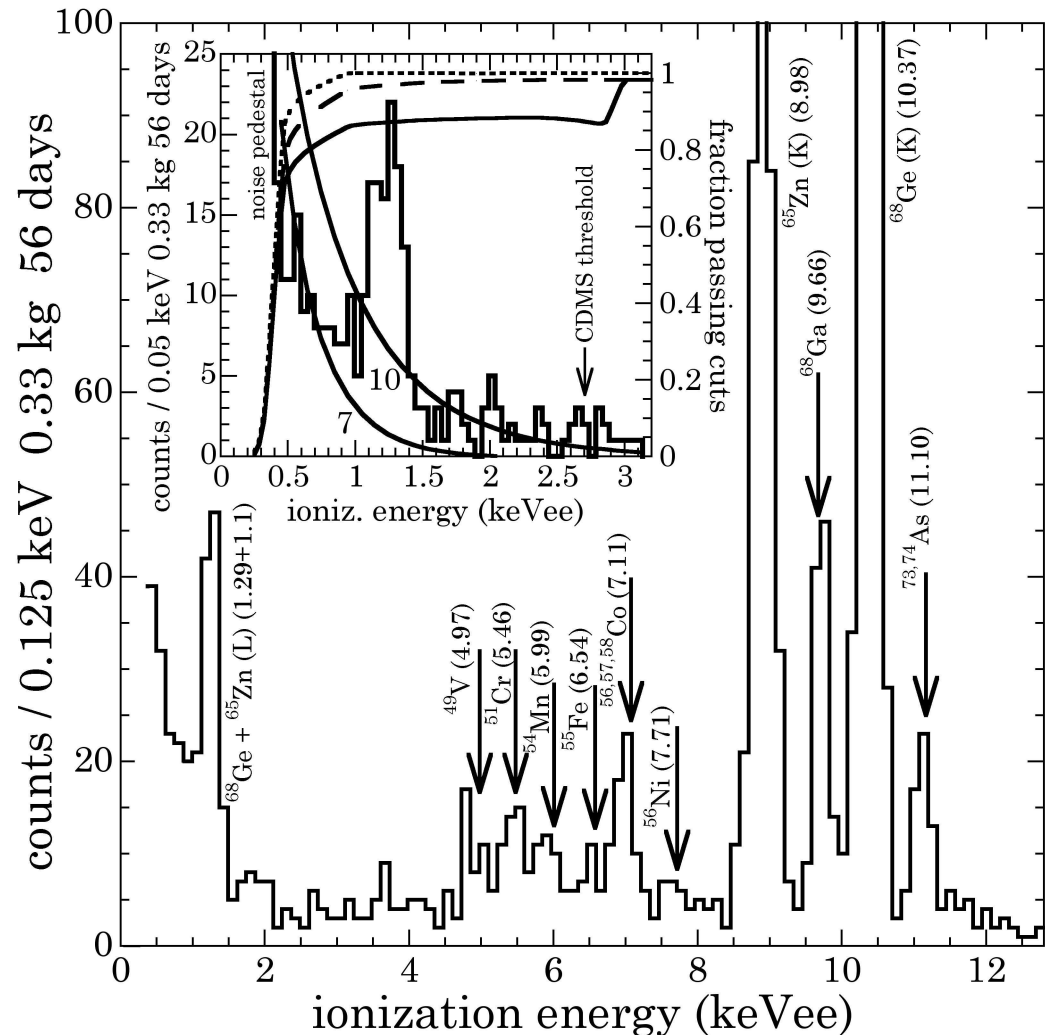
Zgodny w wynikami DAMA/LIBRA wydaje się tylko hipoteza nieelastycznego rozpraszania cząstek WIMP o masie z przedziału 50-200 GeV i energii wzbudzenia 90-140 keV

W lutym 2010 pojawiły się wyniki kolaboracji CoGeNT, które są interpretowane jako sygnał rozpraszania cząstek WIMP na jądrach.

Detektor o niespotykanie niskich szumach elektroniki na poziomie 0.4 keV.

Zespół zaobserwował około 100 przypadków, których nie potrafi przypisać do standardowych źródeł.

Niskie szumy elektroniki ale dość “brudne” materiały



Pozytywna interpretacja wyników CoGeNT:

C.E. Aalseth et al., arXiv:1002.4703

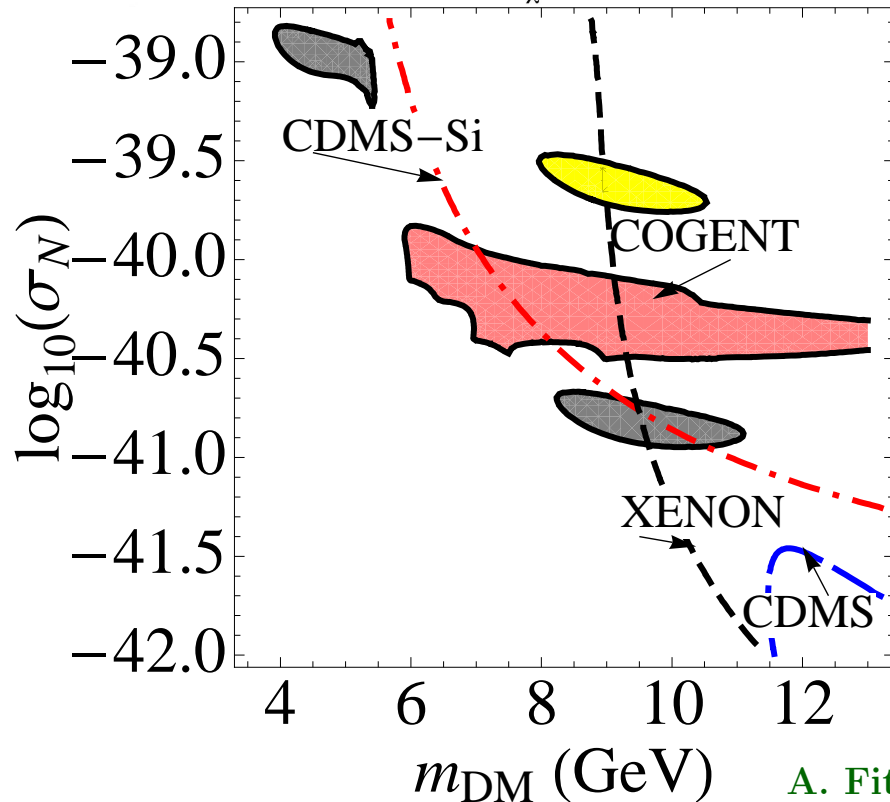
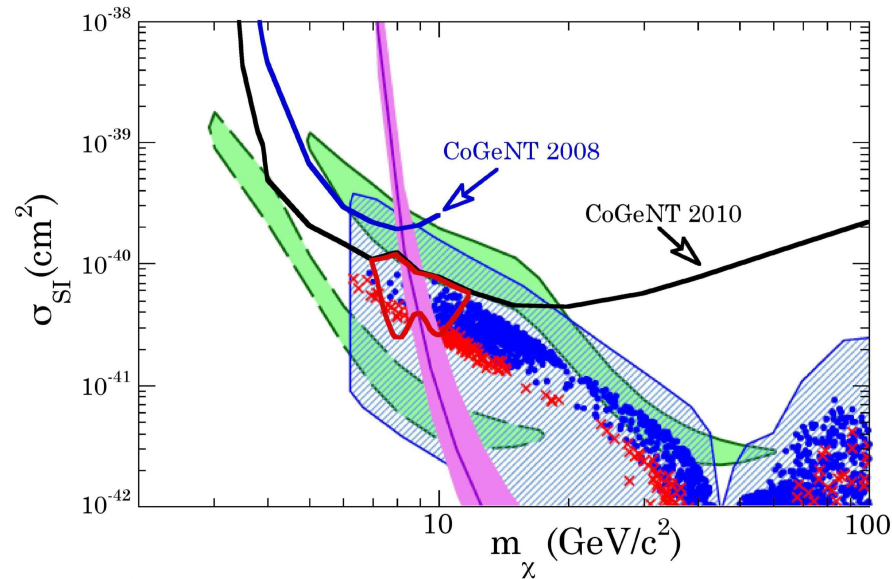
(using: A. Bottino et al., arXiv:0912.4025)

Czerwony kontur:

“Models including WIMPs with $m_\chi \approx 7-11 \text{ GeV}/c^2$ provide a good fit to CoGeNT data”

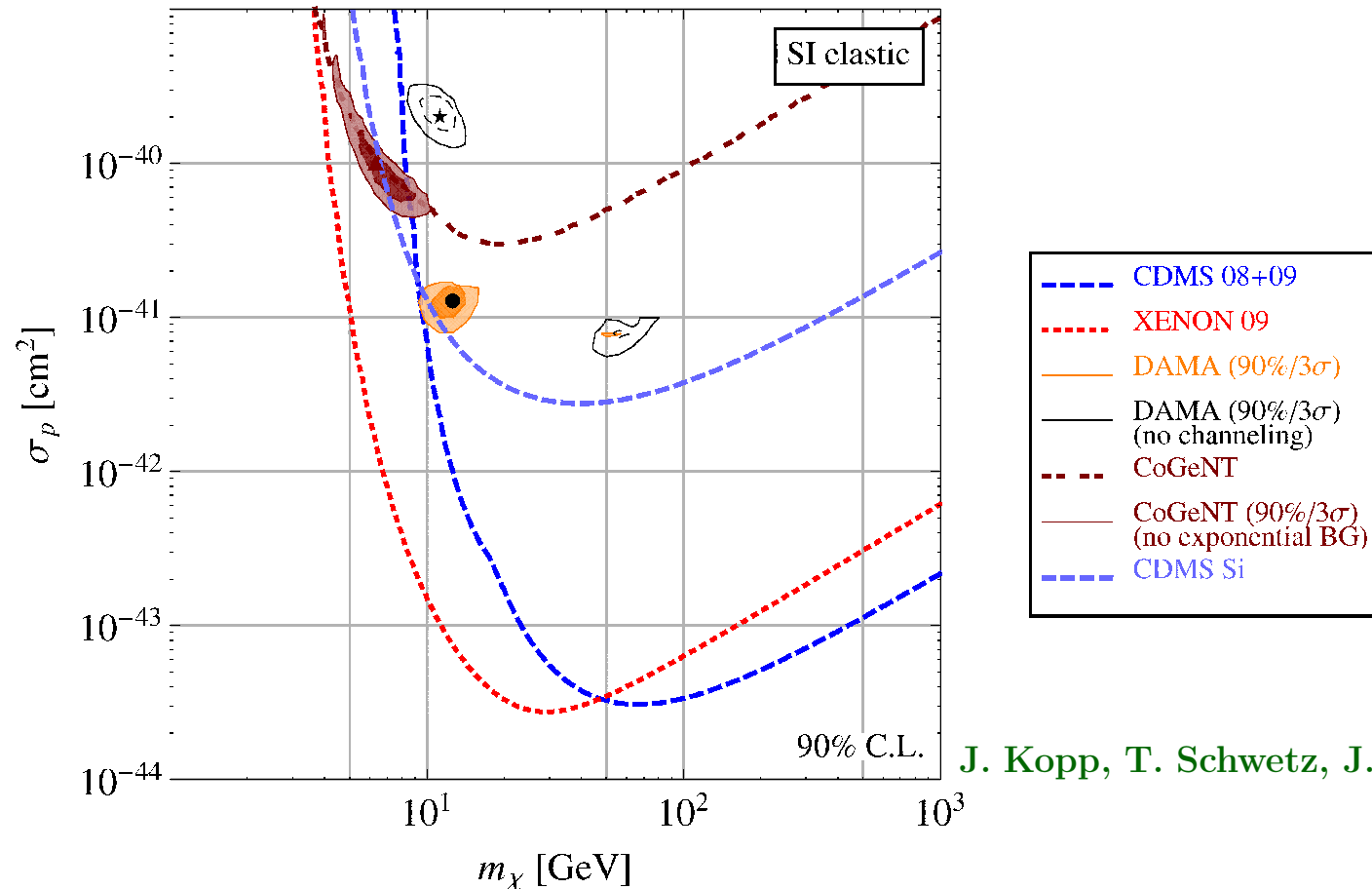
Ale:

nawet bardzo optymistycznie potraktowane wyniki CDMS i XENON wykluczają większość obszaru sugerowanego przez DAMA/LIBRA i CoGeNT



A. Fitzpatrick, D. Hooper, K. Zurek, arXiv:1003.0014v2

Negatywna (realistyczna?) interpretacja wyników CoGeNT:



J. Kopp, T. Schwetz, J. Zupan, arXiv:0912.4264v3

CoGeNT:

“However, the null hypothesis (no WIMP component in the model) fits the data with a similar reduced chi-square $\chi^2/dof = 20.4/20$ (for example, the best fit for $m_\chi = 9 \text{ GeV}/c^2$ provides $\chi^2/dof = 20.1/18$ at $\sigma_{SI} = 6.7 \times 10^{-41} \text{ cm}^2$)”

Grawitino jako LSP

- Grawitina są LSP w modelach, w których łamanie supersymetrii jest przekazywane do sektora standardowego przez oddziaływania cechowania
- Grawitina oddziałują niezwykle słabo - tylko grawitacyjnie
- Ważne stają się własności drugiej najbliższej cząstki supersymetrycznej - NLSP
- NLSP nie jest stabilna, ale rozpada się zawsze na grawitino (+ coś jeszcze), więc może mieć bardzo długi czas życia
- To “coś jeszcze” może w istotny sposób zmienić przewidywania pierwotnej nukleosyntezy i wpłynąć na pierwotną zawartość pierwiastków we Wszechświecie

Przebieg pierwotnej nukleosyntezy

- dla temperatur powyżej 10 MeV ($t < 10^{-2}$ s) przestrzeń była wypełniona plazmą zawierającą: neutrony, protony, elektrony, neutrino i bardzo dużo fotonów. Cięższe jądra są zbyt słabo związane

$$X_n \approx 1/2 \quad X_p \approx 1/2 \quad X_2 < 10^{-11} \quad \left(X_A = \frac{A n_A}{n_B} \right)$$

- $T = \mathcal{O}(1 \text{ MeV})$, $t = \mathcal{O}(1\text{s})$:

neutrony odprzegają się z równowagi $X_n/X_p = e^{-Q/T} \approx 1/6$

$$X_n \approx 1/7 \quad X_p \approx 6/7 \quad X_2 < 10^{-11}$$

- $T < \mathcal{O}(1 \text{ MeV})$, $t > \mathcal{O}(1\text{s})$: neutrony rozpadają się z $\tau_n \approx 10.5 \text{ min}$.

- $T = \mathcal{O}(0.1 \text{ MeV})$, $t = \mathcal{O}(3 \text{ min})$: $X_n \approx 1/8$, $X_p \approx 7/8$

Praktycznie wszystkie neutrony zostają związane w jądra ${}^4\text{He}$

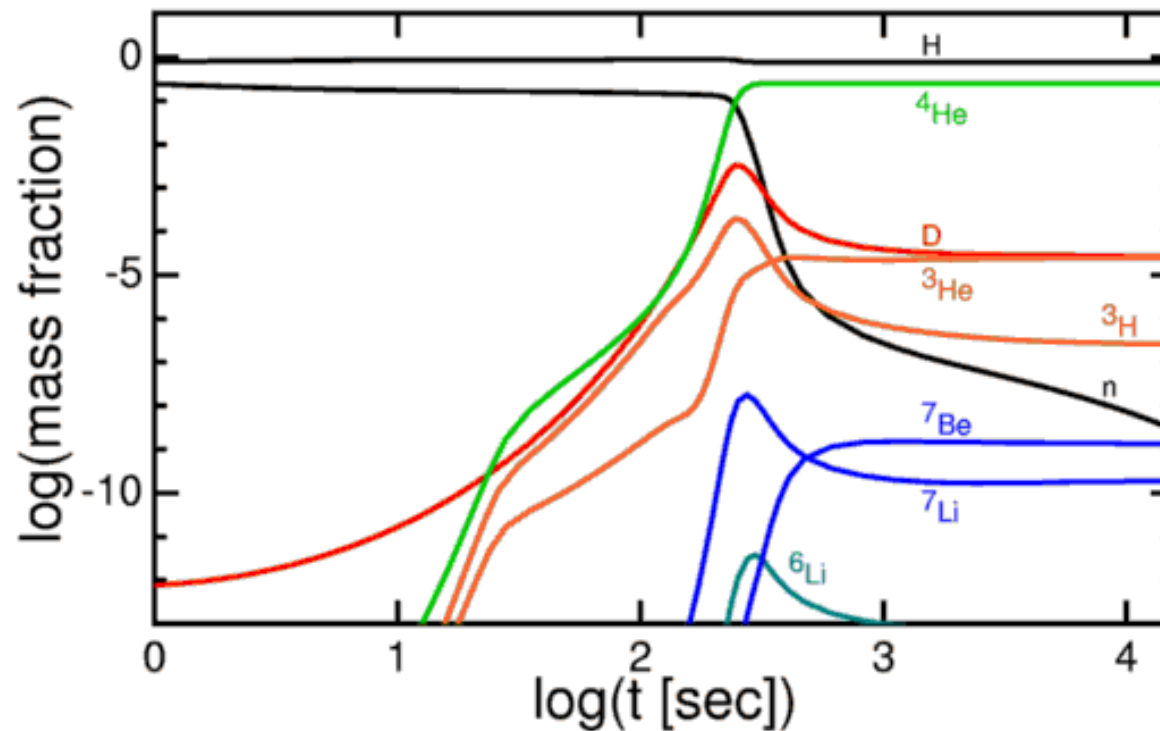
$$X_4 = \frac{4n_4}{n_B} = \frac{4(n_n/2)}{n_n + n_p} = \frac{2(n_n/n_p)}{1 + (n_n/n_p)} \approx \frac{2/7}{8/7} = \frac{1}{4}$$

Przebieg pierwotnej nukleosyntezy

- $T < \mathcal{O}(0.1 \text{ MeV})$, $t > \mathcal{O}(3 \text{ min})$: ... dalej prawie nic się nie dzieje.

Nie są tworzone silniej związane jądra (^{12}C , ^{16}O , ... ^{56}Fe) ponieważ:

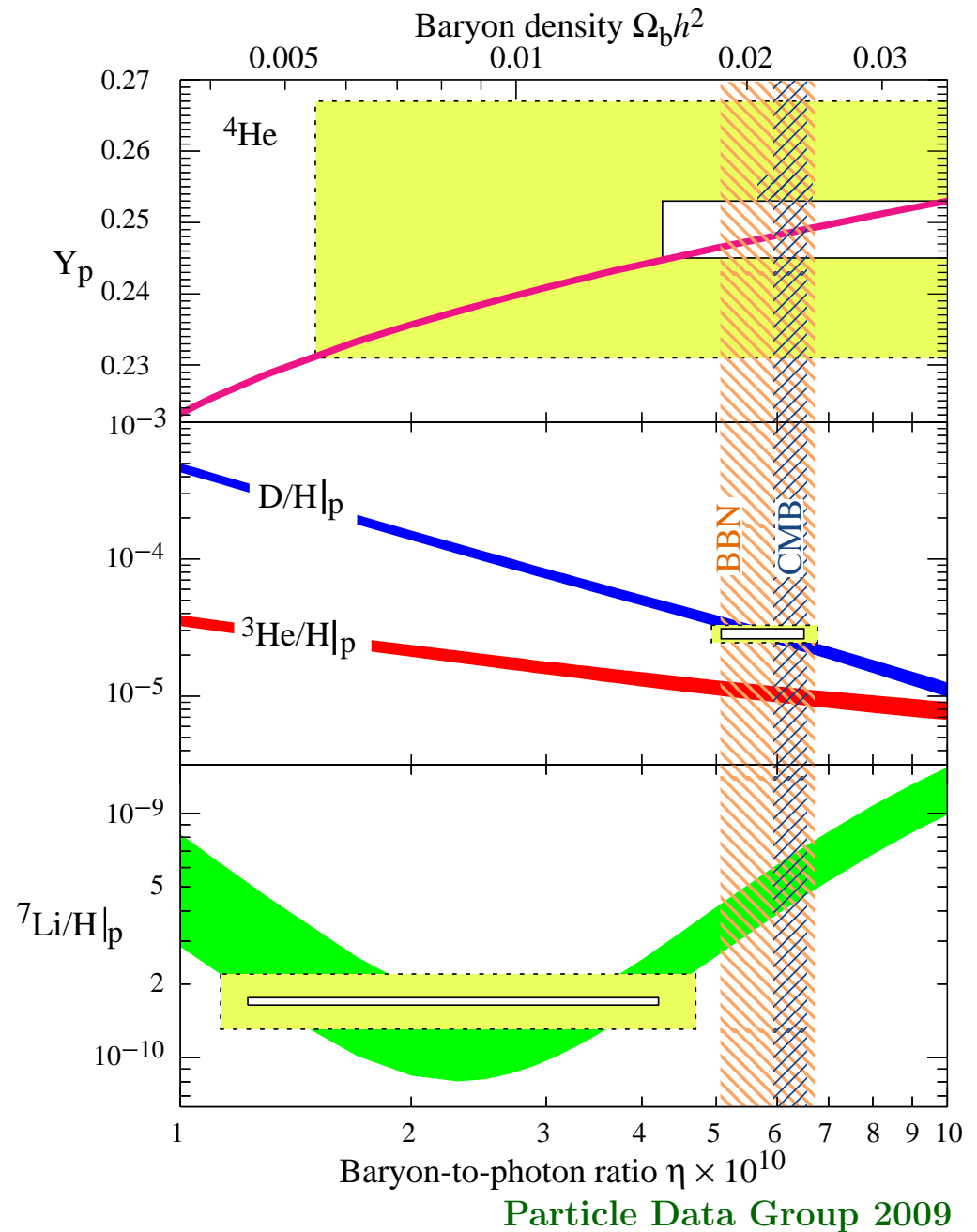
- bariera kulombowska jest coraz silniejsza
- nie ma stabilnych jąder o $A = 5, 8$
- zbyt mała gęstość dla procesów trójciałowych $3\ ^4\text{He} \rightarrow\ ^{12}\text{C} + \gamma$



pierwotna nukleosynteza
zależy między innymi od:

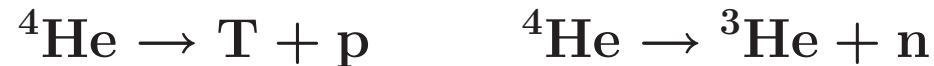
- liczby rodzin neutrin
- ... i innych lekkich cząstek
- czasu życia neutronu
- $m_n - m_p$
- masy bozonów W^\pm i Z^0
- stosunku liczby barionów do liczby fotonów η
- ...

Pierwotna nukleosynteza
jest bardzo czułym testem
nowych modeli!



Wpływ rozpadów NLSP na pierwotną nukleosyntezę

- Szczególnie niebezpieczne są hadronowe rozpady NLSP
 - konwersja $p \leftrightarrow n$ dla $10^{-2}\text{s} < \tau_{\text{NLSP}} < 10^2\text{s} \Rightarrow$ nadprodukcja ${}^4\text{He}$
 - dysocjacja dla $10^2\text{s} < \tau_{\text{NLSP}} < 10^7\text{s} \Rightarrow$ nadprodukcja ${}^6\text{Li}$ i D

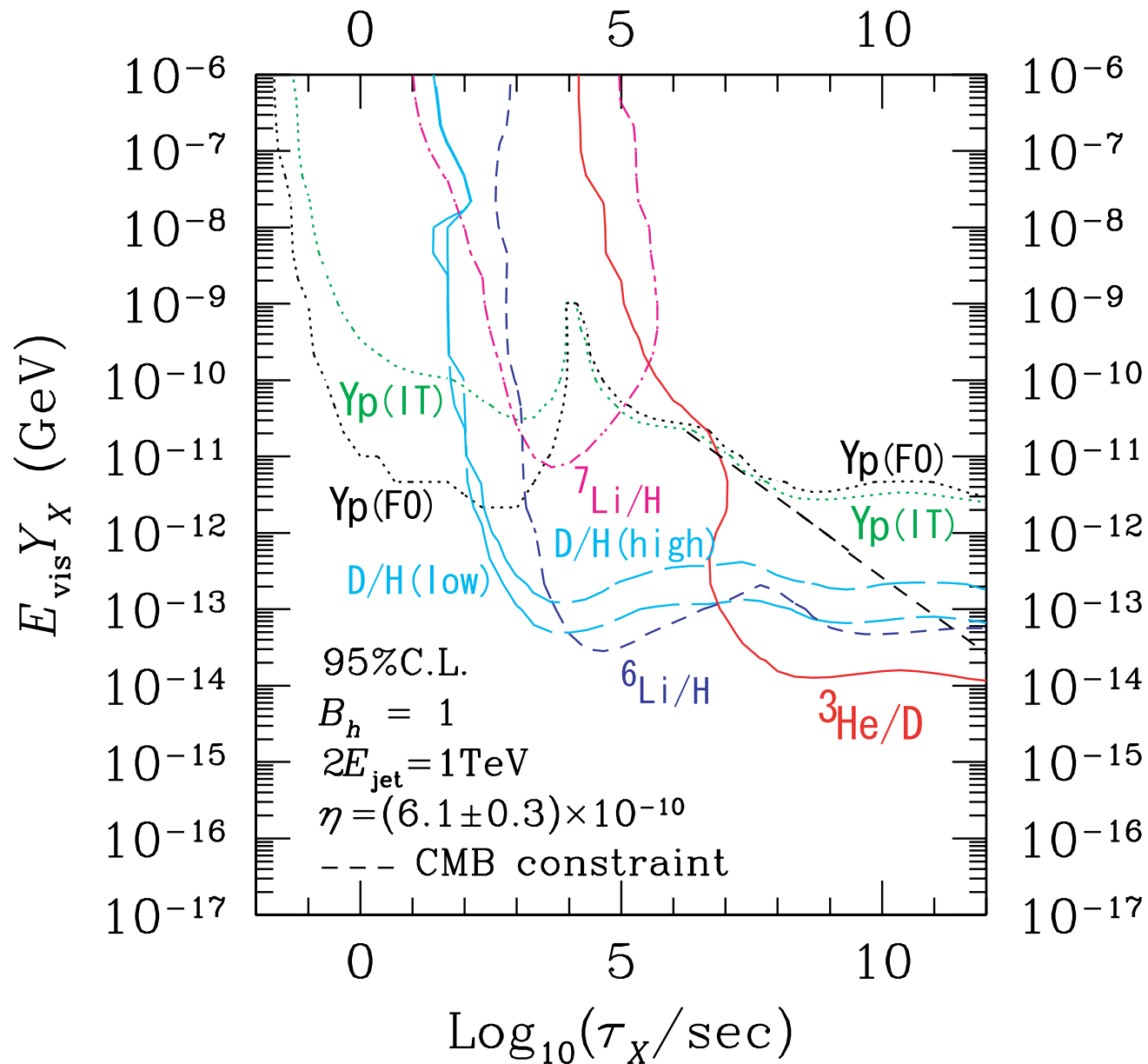


- dla $\tau_{\text{NLSP}} > 10^7\text{s}$ fotodysocjacja dająca głównie nadprodukcję ${}^3\text{He}$ i T



- Długożyciowe cząstki o ujemnym ładunku elektrycznym mogą katalizować nadprodukcję jąder litu





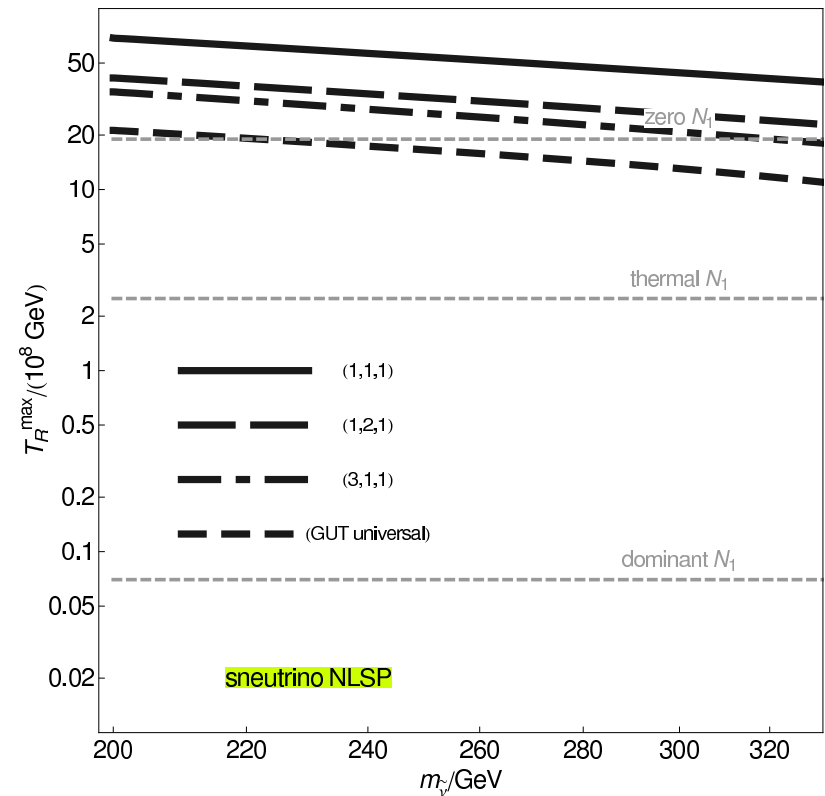
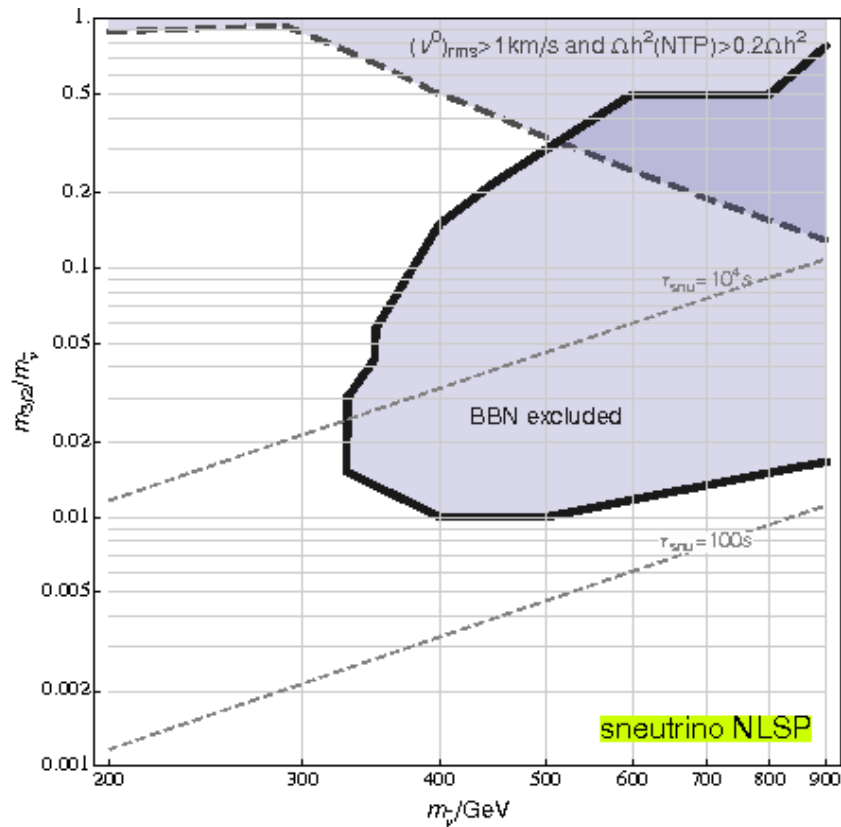
M. Kawasaki, K. Kohri, T. Moroi, Phys. Rev. D71 083502

Ograniczenia na masę gravitina (LSP) i na własności NLSP

- ograniczenia z pierwotnej nukleosyntezy
 - czas życia NLSP
 - gęstość relikтовая NLSP
 - kanały rozpadu NLSP - szczegóły
- ograniczenia na gęstość relikтовую grawitin
 - termiczna produkcja grawitin po zakończeniu inflacji
 - nietermiczna produkcja z rozpadów NLSP
- ograniczenia z analizy tworzenia się struktur wielkoskalowych
 - nie może być zbyt dużo zbyt szybkich grawitin

M. Olechowski, S. Pokorski, K. Turzynski, J.D. Wells,
Reheating Temperature and Gauge Mediation Models of Supersymmetry Breaking,
JHEP 0912 (2009) 026

sneutrino NLSP



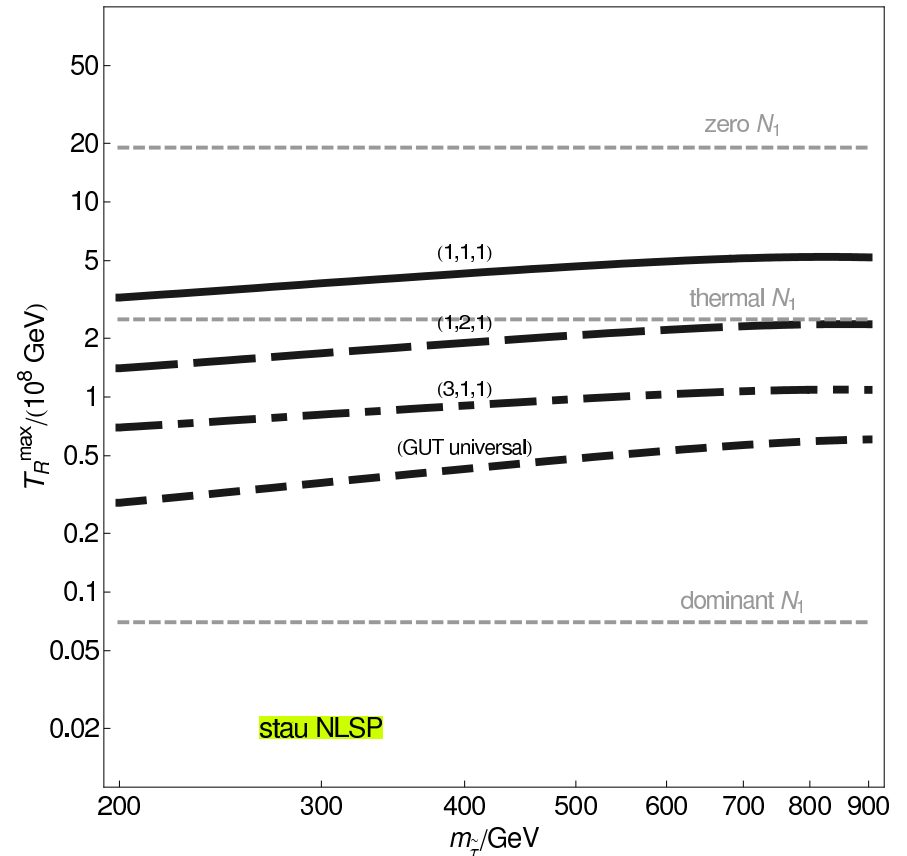
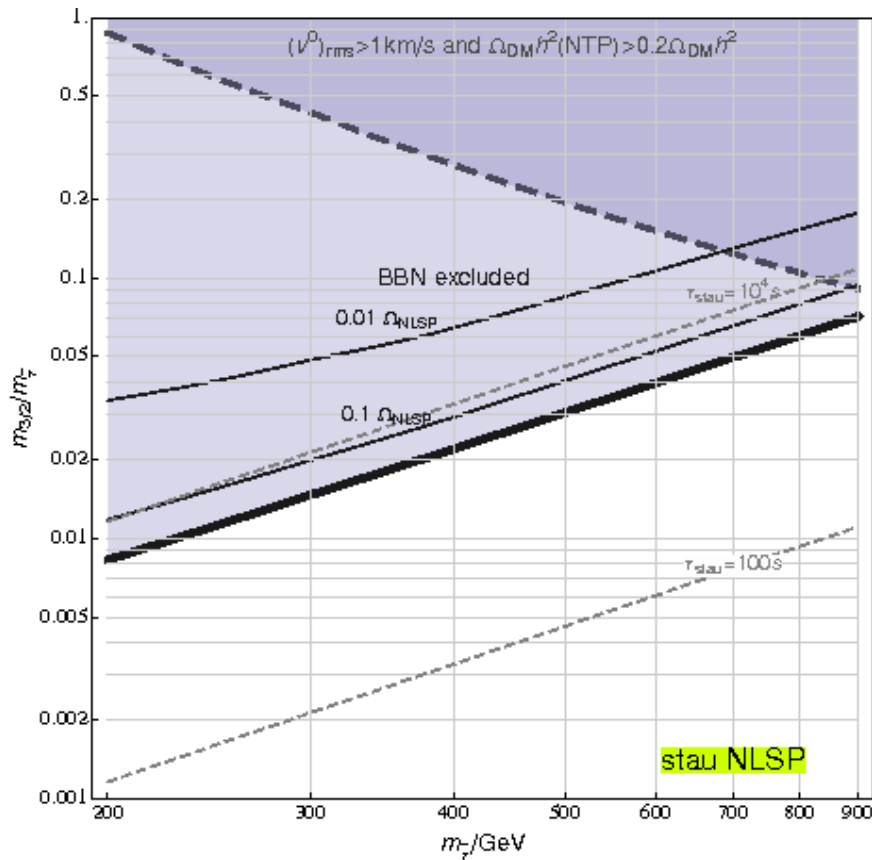
$$\tilde{\nu}_l \rightarrow \nu_l \tilde{G}$$

$$\tilde{\nu}_l \rightarrow \nu_l \tilde{G} \bar{f} f$$

$$\tilde{\nu}_l \rightarrow l \tilde{G} \bar{f} f'$$

- grawitino może mieć masę porównywalną z masą sneutrina
- temperatura podgrzania po zakończeniu inflacji może być wyższa niż 10^9 GeV

stau NLSP



- grawitino musi być znacznie lżejsze od stau
- temperatura podgrzania po zakończeniu inflacji nie może być tak wysoka jak w przypadku sneutrino jako NLSP

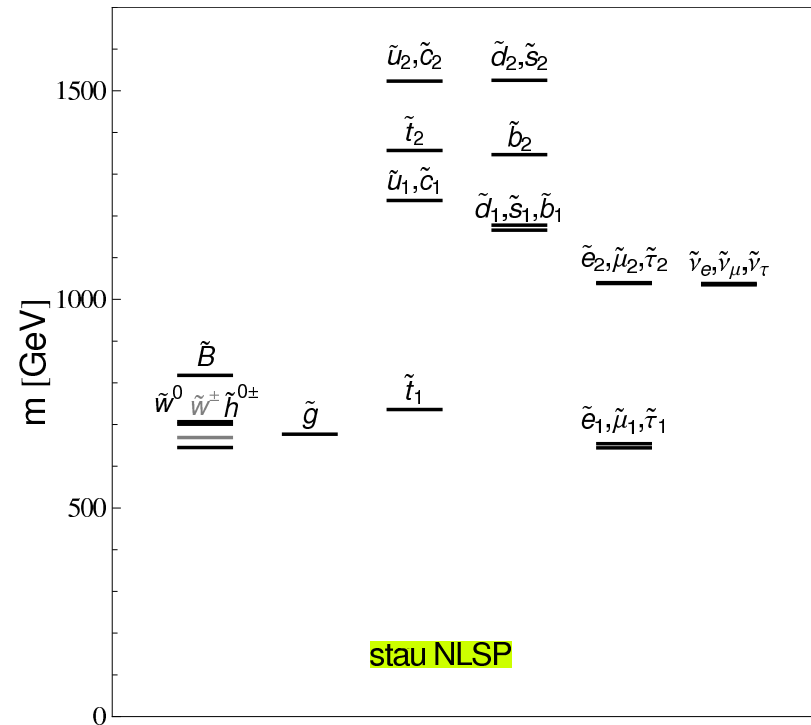
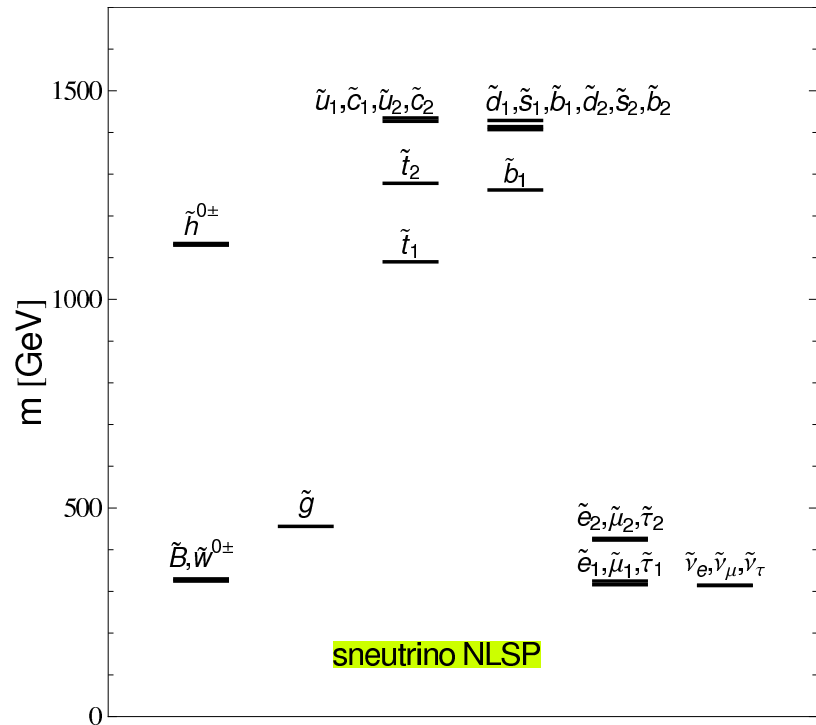
Spektrum

- Warunki:
 - odpowiednia gęstość relikтовая grawitin
 - nie za duży wkład grawitin do ciepłej/gorącej ciemnej materii
 - ograniczenia z pierwotnej nukleosyntezy
 - ograniczenia akceleratorowe na masy cząstek supersymetrycznych, masę cząski Higgsa itd
- Mile widziane:
 - możliwie niska skala łamania supersymetrii (problem hierarchii)
 - możliwie wysoka temperatura podgrzania po inflacji (bariogeneza)
- Wnioski:
 - lekkie sneutrino najlepszym kandydatem na NLSP
 - cięższe sneutrino i stau też mogą być NLSP
 - ciężkie skwarki
 - stosunkowo lekkie fermiony cechowania, w szczególności gluina

Budowanie modeli

- Modele z najbardziej ogólnym sektorem przekazywania łamania supersymetrii przez oddziaływania cechowania (general gauge mediation models)
- Najprostsze sektory posłańców (messenger sector) nie dają odpowiedniego łamania supersymetrii w sektorze obserwowalnym
- Można znaleźć odpowiednie (stosunkowo proste) sektory posłańców
- Przykłady
Grupa symetrii cechowania odpowiedzialnej za przenoszenie łamania supersymetrii - $SU(5)$.
Możliwe reprezentacje pól posłańców:
 - $40 + \overline{40}$
 - 3 kopie 24
 - 75

Przykłady realizacji



Poszukiwania w eksperymentach akceleratorowych

niemal stabilne sneutrino lub niemal stabilne stau

zawsze stosunkowo lekkie gluina

Podsumowanie

- Badanie ciemnej materii
 - jedno z najbardziej interesujących zagadnień współczesnej fizyki
 - jest trudne i łączy wiele dziedzin (kosmologia, fizyka cząstek elementarnych, fizyka jądrowa, termodynamika, grawitacja ...)
- Wykrycie cząstek ciemnej materii - trudne eksperymentalnie
 - kilka eksperymentów obserwuje sygnał (?)
dla parametrów wykluczonych przez inne eksperymenty (?)
- Konieczność wyjścia poza Model Standardowy oddziaływań fundamentalnych
- Teorie supersymetryczne (w tym supergrawitacja) dostarczają bardzo naturalnych kandydatów na cząstki tworzące ciemną materię

Podsumowanie

- Badanie ciemnej materii
 - jedno z najbardziej interesujących zagadnień współczesnej fizyki
 - jest trudne i łączy wiele dziedzin (kosmologia, fizyka cząstek elementarnych, fizyka jądrowa, termodynamika, grawitacja ...)
- Wykrycie cząstek ciemnej materii - trudne eksperymentalnie
 - kilka eksperymentów obserwuje sygnał (?)
dla parametrów wykluczonych przez inne eksperymenty (?)
- Konieczność wyjścia poza Model Standardowy oddziaływań fundamentalnych
- Teorie supersymetryczne (w tym supergrawitacja) dostarczają bardzo naturalnych kandydatów na cząstki tworzące ciemną materię
- Analiza danych kosmologicznych (pierwotna nukleosynteza, leptogeneza) wskazuje na modele z: LSP = grawitino, NLSP = sneutrino (stau)
- Bezpośrednia obserwacja grawitin nieosiągalna eksperymentalnie
- Dalsze badania dotyczące ciemnej materii w toku ...