

将来計画に向けた勉強会
(第4回)
宇宙基礎物理(その2)

日時: 2006年9月14日

場所: 宇宙線研究所大セミナー室

質問の内訳

- 陽子崩壊
 - 1) ここまで探せば、モデルによらず見つかるはずであるという寿命（中畑）
 - 2) 現在の知見からあり得そうな寿命の範囲。モデル依存があるならば、モデルによる違いはどのぐらいか？（中畑）
 - 3) もし、将来陽子崩壊が見つかり始めたら、いろいろなモードに行く分岐比を測るとどのようなご利益があるか？（中畑）
- 暗黒物質直接探索
 - 1) ここまで探せば、モデルによらず見つかるはずであるという断面積の値（中畑）
 - 2) 現在の知見から予想される断面積の範囲（中畑）
 - 3) LHCとdark matter direct detectionとの関係。（中畑）
 - 4) オメガ(マター) = 20%によればCDMの消滅断面積はかなり大きいですがMSSMでは本当にreasonableな範囲にいるのか？（榎本）
 - 5) DirectなCDM探査ではCDMと核子との断面積が測定できるが、ここからオメガ(マター)を類推したときの不確定性は？（榎本）

- 最高エネルギー宇宙線
 - 1) 最高エネルギー宇宙線は、極高エネルギーでの hadronic interaction を研究するのに価値があるか？（福島）
 - 2) 極高エネルギーでの宇宙ニュートリノ観測に、素粒子・宇宙論的な価値はあるか？（福島）
- 重力波
 - 1) 検出の難易度は別にして、どのような天体現象からの重力波を検出することが最もインパクトがあるのか？（大橋）
 - 2) 重力波を検出することで、重力理論を検証することは可能か？（例えばブランズ・ディッケ理論など）（大橋）
- ガンマ線観測
 - 1) 銀河中心付近のDark matterのDensity profileについて現在最も「もっともらしい」もの、および今後の見通し。（森）
 - 2) CDM分布は本当にCUSPY?であればIsothermalの根拠は今あるのでしょうか？FlatRotationCurveはOK?（榎本）
 - 3) 本当に超新星爆発レートは1/30(発/年)?（榎本）
 - 4) 銀河間の磁場はあるといわれていますが、つながっているのか？起源は？Primordialな磁力線はあるのか？（榎本）

- ガンマ線観測（つづき）

5) GLASTで1 GeV近辺のガンマ線天体はきっとたくさん見えると思いますが、だからそれでなにか根本的な解明になるのでしょうか？（榎本）

6) 宇宙線の加速も伝播も拡散方程式による結論ですが、拡散によりいなくなった宇宙線はいったいどこにいくのでしょうか？もどってくる量は拡散方程式であらわしているのでしょうか？となりの銀河からの流入は？（榎本）

7) シロートの考えですが、宇宙線の起源が衝撃波でありその運動エネルギーの10%程度を受け取るとされていますが、大きすぎませんか？（榎本）

8) 7)の場合宇宙線はアルベーン波を介在してエネルギーを受け取るわけですからアルベーン波がもっと大きなエネルギーを持っていることにはなりますが観測できないのでしょうか？（榎本）

9) 8)なら、、、以降SFになります（i.e., 実験屋のたわごとですが。。。）運動エネルギーをかなり吸収しているので銀河の形成に宇宙線が役にたっているような気もするのですが。。。 (これを東北の学会でいったらかなりばかにされました)。（榎本）

10) 宇宙線中の電子成分は陽子の1/1000程度が太陽系で観測されています。宇宙線の超新星起源説によれば加速領域において電子/陽子の比が1/100であるということ(加速効率のちがひ=電子はロスがある)でかたがついていますが、これでは加速領域はどんどんマイナスの電荷がたまり、地球はどんどんプラスの電荷がたまっていくわけですが。。。これは本当？実際衛星はどんどんプラスにチャージアップしていくそうですが。。。 (榎本)

- Beyond SM全般

1) 超対称性の破れのスケールが1 TeVという可能性の根拠は本当に reasonable? 10 TeVでなにが悪いのでしょうか? (榎本)

2) LHCで本当に何かが見つかるのでしょうか? なにも見えない可能性はあるのでしょうか? (榎本)

3) 河合さん(京都)あたりは数年前にはHiggsはSMで300 GeV、超対称性はプランクスケールで破れたとおっしゃっていましたが、この話はいまだ健在でしょうか? (榎本)

以下の内容

- 1、陽子崩壊
- 2、暗黒物質直接探索
- 3、暗黒物質観測に関して

陽子崩壊

1)ここまで探せば、モデルによらず見つかるはずであるという寿命（中畑）

2)現在の知見からあり得そうな寿命の範囲。モデル依存があるならば、モデルによる違いはどのぐらいか？（中畑）

3)もし、将来陽子崩壊が見つかり始めたら、いろいろなモードに行く分岐比を測るとどのようなご利益があるか？（中畑）

最近の陽子崩壊に関するレビュー:

Proton stability in grand unified theories, in strings and in branes.

Pran Nath, Pavel Fileviez Perez

Submitted to Phys.Rept.

e-Print Archive: hep-ph/060102

次元解析

Weak scale: 10^2 GeV

SUSY breaking scale: $m_{\text{SUSY}} \simeq 10^{(2-3)} \text{ GeV}$

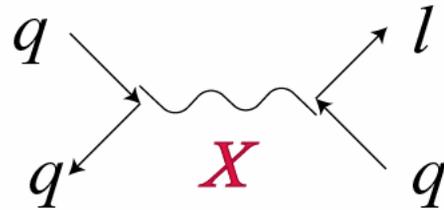
GUT scale: $M_{\text{GUT}} \simeq 10^{16} \text{ GeV}$

Planck scale: $M_{\text{pl}} \simeq 2.4 \times 10^{18} \text{ GeV}$

バリオン数を破る次元6の演算子 $\mathcal{L}_{eff} = \frac{1}{\Lambda^2} qqql$

大統一模型ではゲージボソンにより演算子

SU(5) GUT: $\phi(\mathbf{5}^*) = (d_L^c, e_L, \nu_L)$, $\psi(\mathbf{10}) = (u_L^c, u_L, d_L, e_L^c)$



$$\Rightarrow \tau_p \simeq 10^{(34-35)} \left(\frac{\Lambda}{10^{16} \text{GeV}} \right)^4 \text{ years}$$

比較的模型に依存しない反面、 Λ の値自身 (Xボゾン質量) に強く依存。
一つの指標として

$$\tau_p \simeq 10^{(34-35)} \text{ years} \quad (\Lambda = 10^{16} \text{GeV})$$

$$\tau_p \simeq 10^{(43-44)} \text{ years} \quad (\Lambda = 2.4 \times 10^{18} \text{GeV})$$

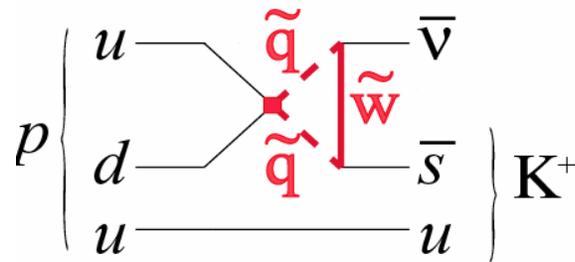
$$\tau_p \simeq 10^{150} \text{ years} \quad (\text{induced by anomaly in SM})$$

超対称理論におけるバリオン数を破る次元5の演算子

$$\mathcal{L}_{eff} = \frac{1}{\Lambda} \int d^2\theta Q_i Q_j Q_k L_l = \frac{1}{\Lambda} (\tilde{q}_i \tilde{q}_j q_k l_l + \dots)$$

(\tilde{q} : squark, \tilde{l} : slepton)

Dressing (超対称粒子の交換) で次元6の演算子になる。
 Q_i の入れ替えに対して反対称。陽子崩壊はストレンジネスを含むモードへの分岐比が大きくなる傾向あり。



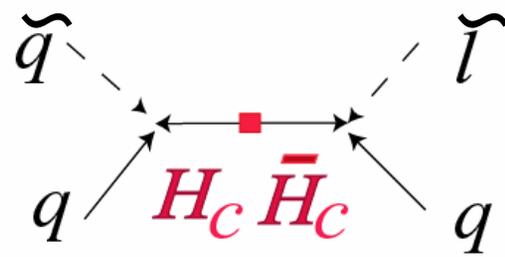
$$\tau_p \simeq 10^{(15-16)} \left(\frac{\Lambda}{10^{16} \text{GeV}} \right)^2 \left(\frac{m_{SUSY}}{1 \text{TeV}} \right)^2 \text{ years}$$

次元5の演算子は陽子の寿命が模型の詳細に強く依存。

- Minimal SUSY SU(5) GUT

次元5の演算子はcolored Higgsによって生じる。

$$H(\mathbf{5}) = (H_c, H_f), \quad \bar{H}(\mathbf{5}) = (\bar{H}_c, \bar{H}_f)$$



$$\tau_{p \rightarrow K\nu} < \sim 10^{28} \left(\frac{M_{H_c}}{10^{16} \text{GeV}} \right)^2 \left(\frac{m_{SUSY}}{1 \text{TeV}} \right)^2 \text{ years}$$

湯川結合で崩壊は抑制されてはいるが、やはりつよく制限をうける。

- U(1) R 対称性、Peccei-Quinn対称性などのU(1)対称性で次元5の演算子を禁止することが可能。

陽子の寿命はその対称性の破れのパターンによる。

例えば、1つの典型的な模型では寿命に対して以下の増加因子。

PQ対称性: $\sim (M_{GUT}/M_{PQ})^2 \simeq 10^{8-12}$ ($M_{PQ} = 10^{10-12} \text{GeV}$)

R対称性: $\sim (M_{GUT}/m_{SUSY})^2 \simeq 10^{(26-28)}$

次元5の演算子による陽子崩壊

- Minimal SUSY SU(5) GUT

陽子崩壊からのColored Higgs の
質量の下限 (Msuguraを仮定)

$$M_{H_c} > 4.4 \times 10^{17} \text{ GeV}$$

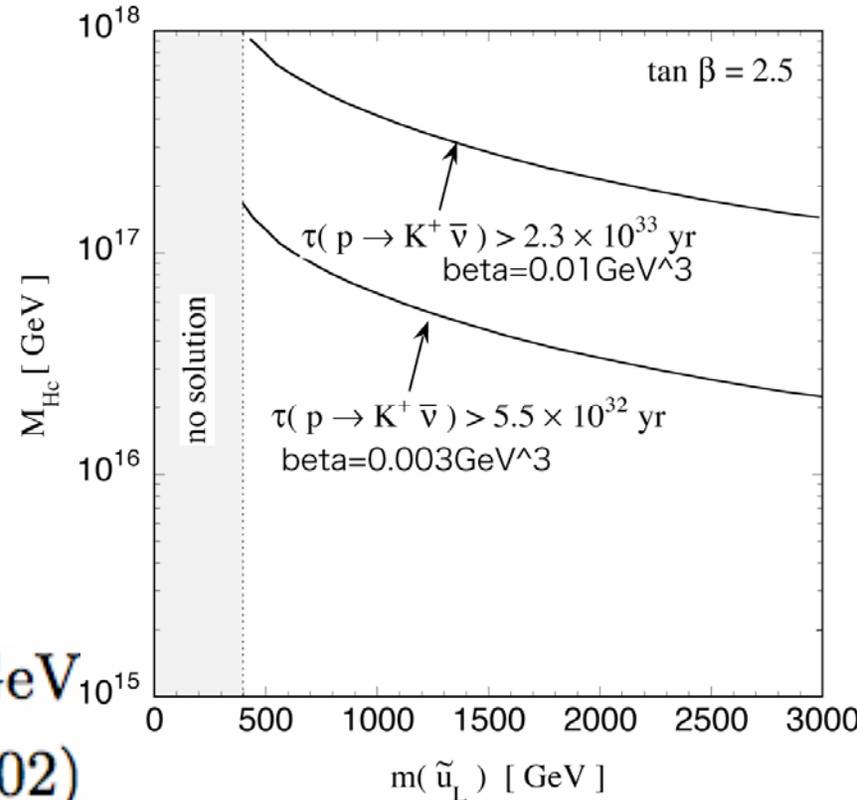
$$(m_{\tilde{f}} < 1 \text{ TeV})$$

ゲージ結合定数の統一からの制限

$$3.5 \times 10^{14} \text{ GeV} < M_{H_c} < 3.6 \times 10^{15} \text{ GeV}$$

$$(\alpha_s(M_z) = 0.1185 \pm 0.002)$$

(Murayama&Pierce)



(Nihei-Gotoより作成)

あと30倍よくなると $M_{H_c} \simeq M_{pl}$ を排除可能。

陽子崩壊をとおしてプランクスケールの物理をさぐれるかもしれない。

フェルミオンの質量構造: フレーバー対称性

$$W_{\text{Yukawa}} = f_u^{ij} Q_i \bar{U}_j H_u + \dots$$

$$f_u^{ij} \sim \left(\frac{A}{M_{\text{pl}}} \right)^{X_{H_u} + X_{Q_i} + X_{\bar{U}_j}}$$

X: U(1) flavor symmetryのチャージ

A: フレーバー対称性を破る場 (X(A)=-1)の期待値

$$A/M_{\text{pl}} \sim 0.2$$

チャージの一例

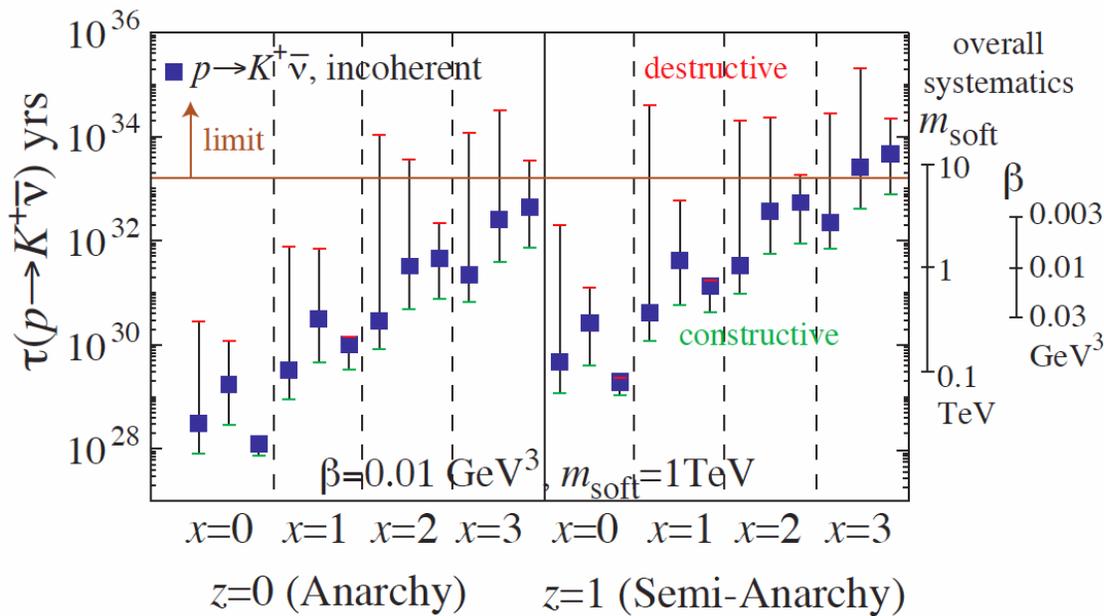
Generation i	1	2	3
X_{Q_i}	5/2	1/2	-3/2
X_{L_i}	13/2	13/2	13/2
$X_{\bar{U}_i}$	5/2	1/2	-3/2
$X_{\bar{D}_i}$	13/2	13/2	13/2
$X_{\bar{E}_i}$	5/2	1/2	-3/2

$$X_{H_D} = -3, X_{H_U} = 3$$

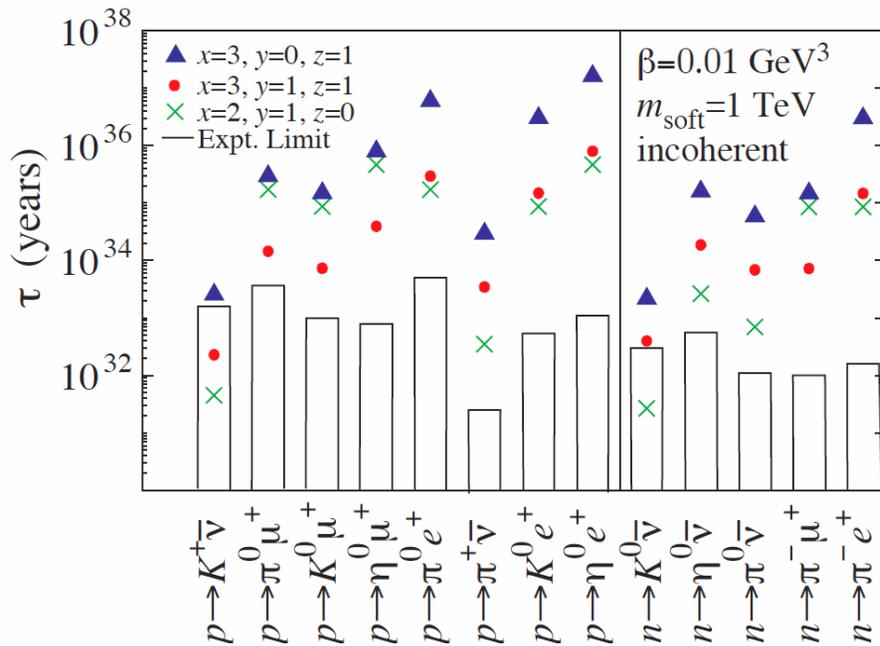
フレーバー対称性が次元5の演算子も抑制

$$W_{\text{dim5}} = C_{ijkl} Q_i Q_j Q_k L_l$$

$$C_{ijkl} \sim \left(\frac{A}{M_{\text{pl}}} \right)^{X_{Q_i} + X_{Q_j} + X_{Q_k} + X_{L_l}}$$



ある意味マージナルではあるが不定性も大。

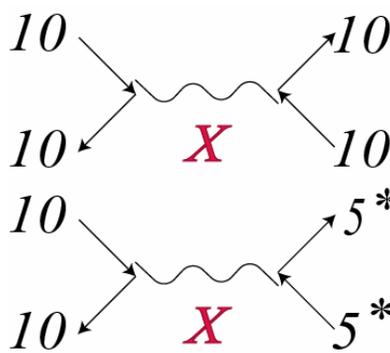


フェルミオン質量と陽子崩壊の分岐比から模型を分類。

(Harnik et al (hep-ph/0404260))

次元6の演算子による陽子崩壊

Minimal SUSY SU(5) GUT



$$2A_R \frac{g_5^2}{M_X^2} (d_L u_L)(u_R e_R)$$

$$A_R \frac{g_5^2}{M_X^2} (d_R u_R)((u_L e_L) - (d_L \nu_L))$$

$$\tau(p \rightarrow \pi^0 e^+) = 1.0 \times 10^{35} \text{ years} \\ \times \left(\frac{\alpha_H}{0.015 \text{ GeV}^3} \right)^{-2} \left(\frac{\alpha_5}{1/25} \right)^{-2} \left(\frac{A_R}{3.4} \right)^{-2} \left(\frac{M_X}{10^{16} \text{ GeV}} \right)^{-4}$$

ゲージ結合定数の統一から (Σ はSU(5)を破るHiggs)

$$1.7 \times 10^{16} \text{ GeV} < (M_X^2 M_\Sigma)^{1/3} < 2.0 \times 10^{16} \text{ GeV}$$

プランクスケール以下で摂動論的 ($M_X/M_\Sigma = g_5/\lambda_\Sigma > 0.56$)

$$M_X > 1.4 \times 10^{16} \text{ GeV}$$

- より現実的なSU(5) GUT模型:

フェルミオンの質量構造が簡単なGUTの模型では再現できない。

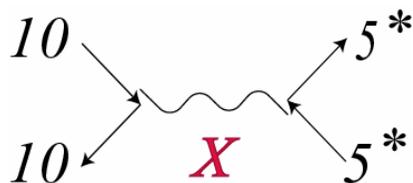
$$m_{d_i} = m_{l_i} \text{ at GUT scale}$$

→CKM以外の混合行列が入ってくる。

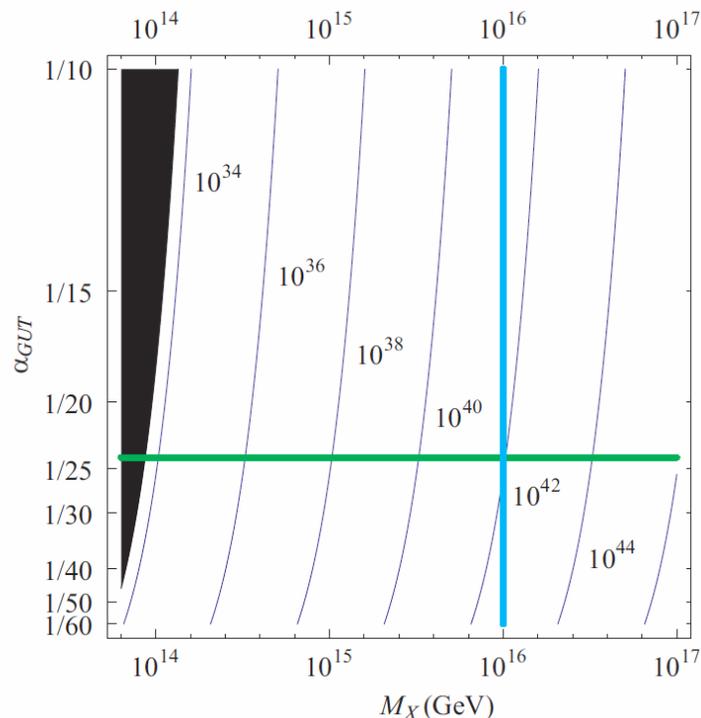
→分岐比に模型依存が入る。

新たな混合行列によらない分岐比の関係
(アップクォークの湯川結合が対称行列)

$$\frac{Br(p \rightarrow K^+ \bar{\nu})}{Br(p \rightarrow \pi^+ \bar{\nu})} \simeq 0.044$$



陽子の寿命の上限がSU(5)の場合は導かれる。(Nath, Perez)



- 繰り込み可能なFlipped SU(5) GUT (SU(5)*U(1))

$$\phi(\mathbf{5}^*) = (u_L^c, e_L, \nu_L), \quad \psi(\mathbf{10}) = (d_L^c, u_L, d_L, \nu_L^c), \quad e_L^c$$

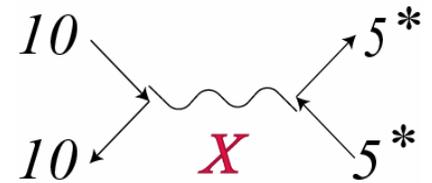
$$(d_L^c(d_L) \leftrightarrow u_L^c(u_L), \quad e_L^c(\nu_L) \leftrightarrow \nu_L^c(e_L))$$

メインモード: $p \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}$ ($\pi^0 e^+$)

混合行列に依存しない分岐比の関係

$$\frac{Br(p \rightarrow K^0 e^+(\mu^+))}{Br(p \rightarrow \pi^0 e^+(\mu^+))} \simeq 0.019$$

$$Br(p \rightarrow K^+ \bar{\nu}) = Br(n \rightarrow K^0 \bar{\nu}) = 0$$



暗黒物質直接探索

•暗黒物質直接探索

- 1) ここまで探せば、モデルによらず見つかるはずであるという断面積の値 (中畑)
- 2) 現在の知見から予想される断面積の範囲 (中畑)
- 3) LHCとdark matter direct detectionとの関係。(中畑)
- 4) オメガ(マター) = 20%によればCDMの消滅断面積はかなり大きいですがMSSMでは本当にreasonableな範囲にいるのか？ (榎本)
- 5) DirectなCDM探査ではCDMと核子との断面積が測定できるが、ここからオメガ(マター)を類推したときの不確定性は？ (榎本)

暗黒物質の候補: 安定、中性な素粒子

超対称模型: R パリティ (陽子の安定性)

もっとも軽い超対称粒子 (LSP): 暗黒物質の候補

Neutralino:

$$\tilde{\chi}^0 = c_{\tilde{B}^0} \tilde{B}^0 + c_{\tilde{W}^0} \tilde{W}^0 + c_{\tilde{H}_1^0} \tilde{H}_1^0 + c_{\tilde{H}_2^0} \tilde{H}_2^0$$

\tilde{B}^0, \tilde{W}^0 : U(1), SU(2) gaugino の中性成分

$\tilde{H}_1^0, \tilde{H}_2^0$: Higgsino の中性成分

最も軽い neutralino: SUSY の破れの起源に依存

MSUGRA (CMSSM)

Bino-like、Higgsino-like もしくはその混合

Anomaly 伝搬模型

Wino-like、Higgsino-like もしくはその混合

- MSUGRA (CMSSM)のインプットパラメータ (4+1)

m_0 Universal scalar mass

$m_{1/2}$ GUT-scale gaugino mass

A_0 A parameter

$\tan \beta$ 真空期待値の比

$\text{sign}(\mu)$ Higgsino massの符号

- MSUGRA (CMSSM)のスペクトラム

$$M_{\tilde{g}} : M_{\tilde{W}} : M_{\tilde{B}} : M_{1/2} = 7 : 2 : 1 : 2 : 5$$

$$\mu^2 \simeq -m_{H_u}^2 + m_Z^2/2$$

$$m_{\tilde{q}}^2 \simeq m_0^2 + M_{\tilde{g}}^2$$

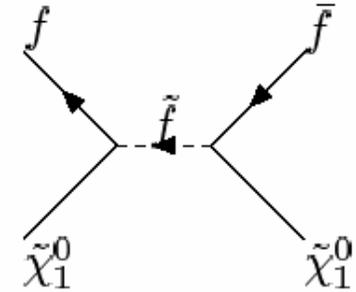
$$m_{\tilde{l}}^2 \simeq m_0^2 + M_{\tilde{W}}^2$$

$$m_{\tilde{e}_R}^2 \simeq m_0^2 + M_{\tilde{B}}^2$$

Thermal relic abundance of neutralino

Bino-like neutralino:

$$\Omega \sim 0.2 \left(\frac{m_{\tilde{e}}}{m_{\tilde{\chi}^0}} \right)^4 \left(\frac{m_{\tilde{\chi}^0}}{100\text{GeV}} \right)^{-2}$$



Wino, Higgsino-like neutralino:

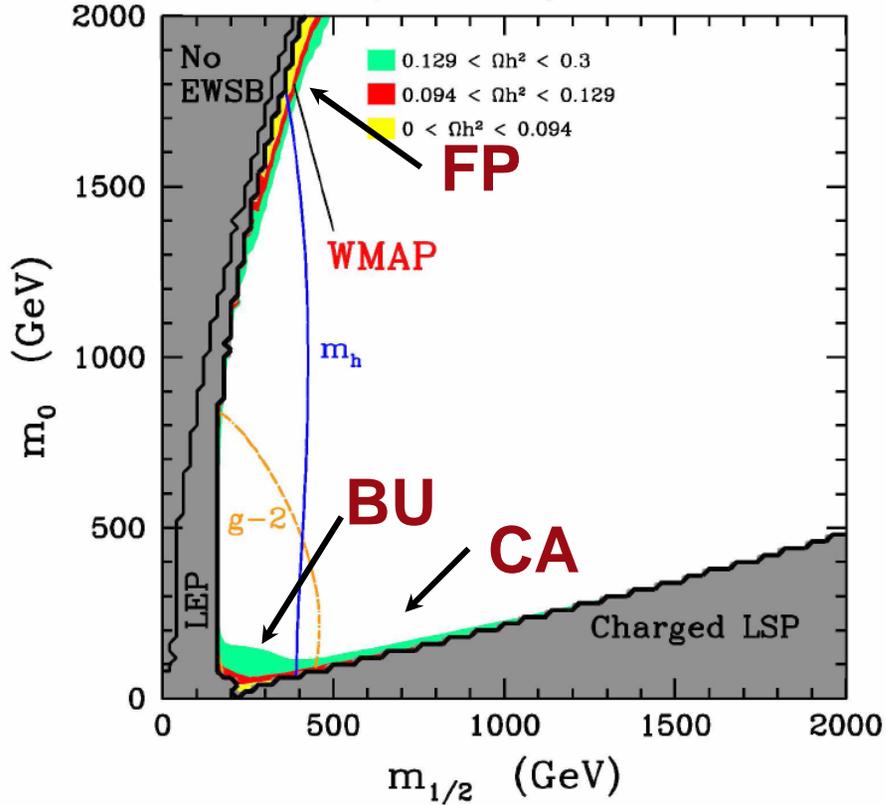
ゲージ相互作用を持つ。

$$\Omega \sim 0.1 \left(\frac{m_{\tilde{\chi}^0}}{1\text{TeV}} \right)^{-2}$$

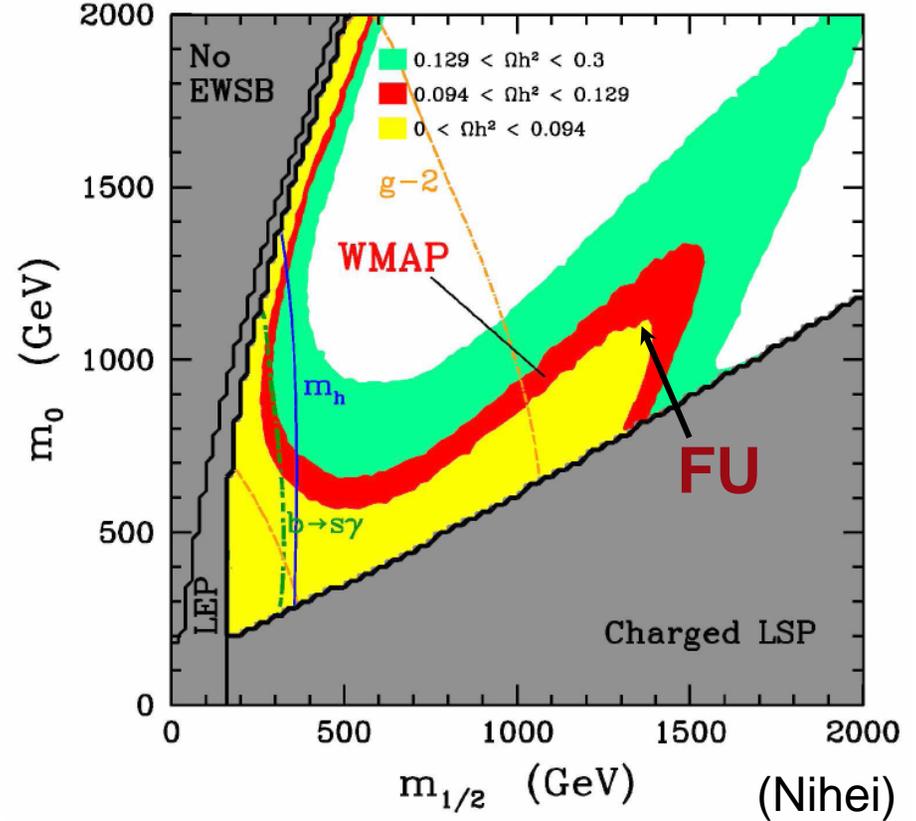
WMAPを再現するには

- BinoとHiggsinoまたはWinoを適当に混ぜる
- 他の粒子の力を借りる。

CMSSM: $\tan\beta = 10, \mu > 0, A = 0$



CMSSM: $\tan\beta = 50, \mu > 0, A = 0$



BU: bulk region

FP: focus point region ($\mu^2 \simeq -m_{H_u}^2 + m_Z^2/2 \rightarrow 0$
Higgsino成分が多くなる領域

CA: coannihilation region ($m_{\tilde{\chi}_0} \simeq m_{\tilde{\tau}}$
neutralino+stau annihilationが有効

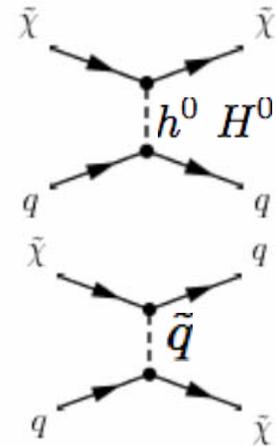
FU: funnel region ($2 \times m_{\tilde{\chi}_0} \simeq m_{A^0}$
Pseudoscalar Higgs (A) のポールを經由

Neutralino DMの直接検出

$$\mathcal{L}_{eff} = \sum_{N=p,n} f_{SI}(\tilde{\chi}^0\tilde{\chi}^0)(\bar{N}N) + f_{SD}(\tilde{\chi}^0\gamma_\mu\gamma_5\tilde{\chi}^0)(\bar{N}\gamma^\mu\gamma_5N)$$

Spin-independent
Spin-dependent

$\sigma_{SI} \propto A^2$



SI への dominant contribution: Higgs exchange

$\tilde{\chi}^0 - \tilde{\chi}^0 - h^0(H^0)$ は SU(2)*U(1) を破っている。

軽い Higgs boson の寄与 ($m_{h^0} = 116\text{GeV}$)

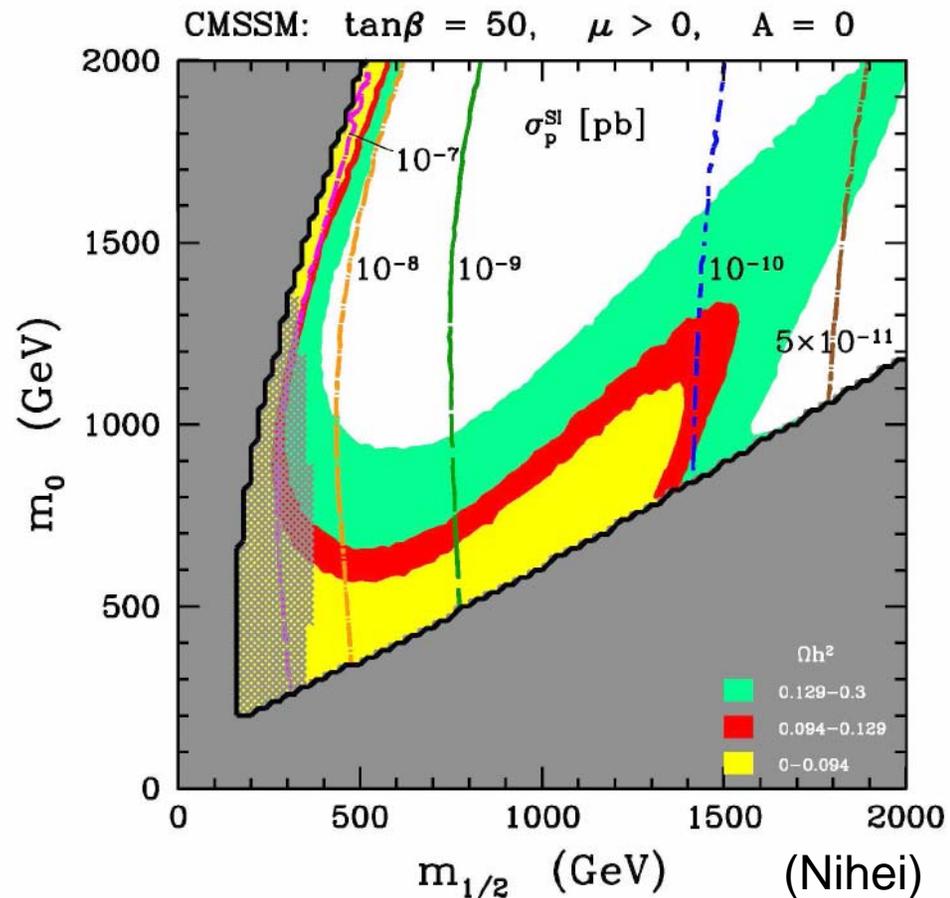
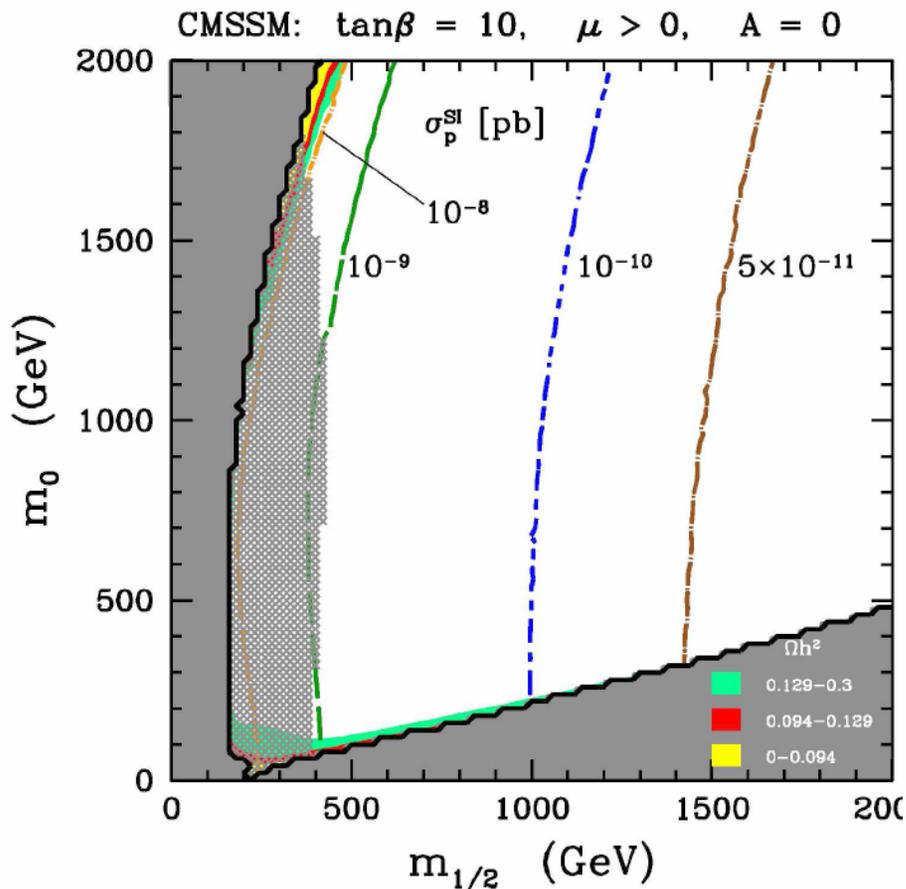
$$\sigma \sim 2 \times 10^{-44} \text{cm}^2 \left(\frac{100\text{GeV} \times m_{\tilde{B}}}{\mu^2} \right)^2 \left(\frac{m_{\tilde{B}}}{\mu} + \sin 2\beta \right)^2 \quad (\text{Bino-like})$$

$$\sigma \sim 3 \times 10^{-43} \text{cm}^2 \left(\frac{100\text{GeV} \times m_{\tilde{W}}}{\mu^2} \right)^2 \left(\frac{m_{\tilde{W}}}{\mu} + \sin 2\beta \right)^2 \quad (\text{Wino-like})$$

$$\sigma \sim 2 \times 10^{-43} \text{cm}^2 \left(\frac{100\text{GeV}}{m_{\tilde{W}}} \right)^2 \quad (\text{Higgsino-like})$$

• $\tan \beta m_{h^0}^2 / m_{H^0}^2 \gg 1$ の時は heavy Higgs の寄与が dominant になる。

CMSSMでのSI cross section (I)

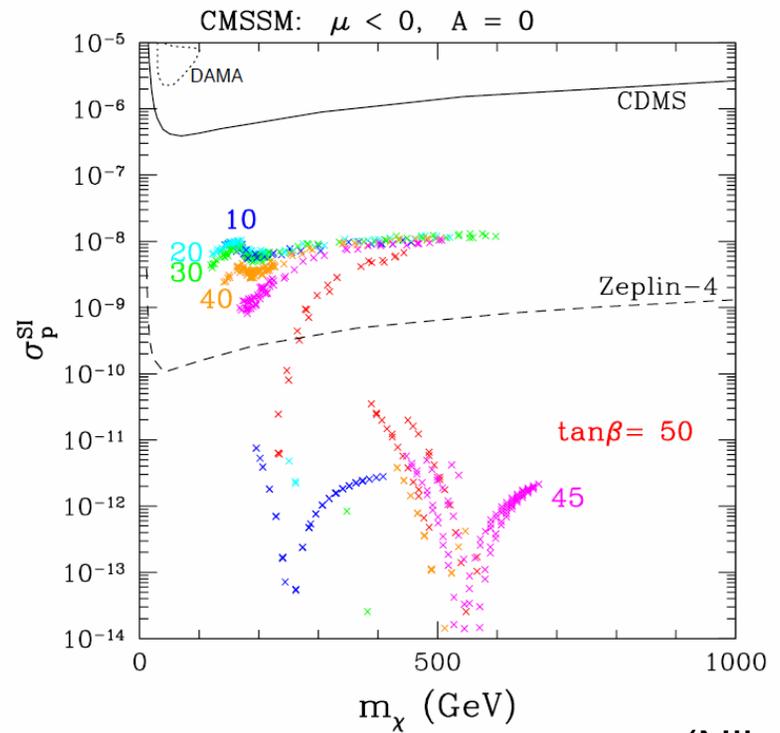
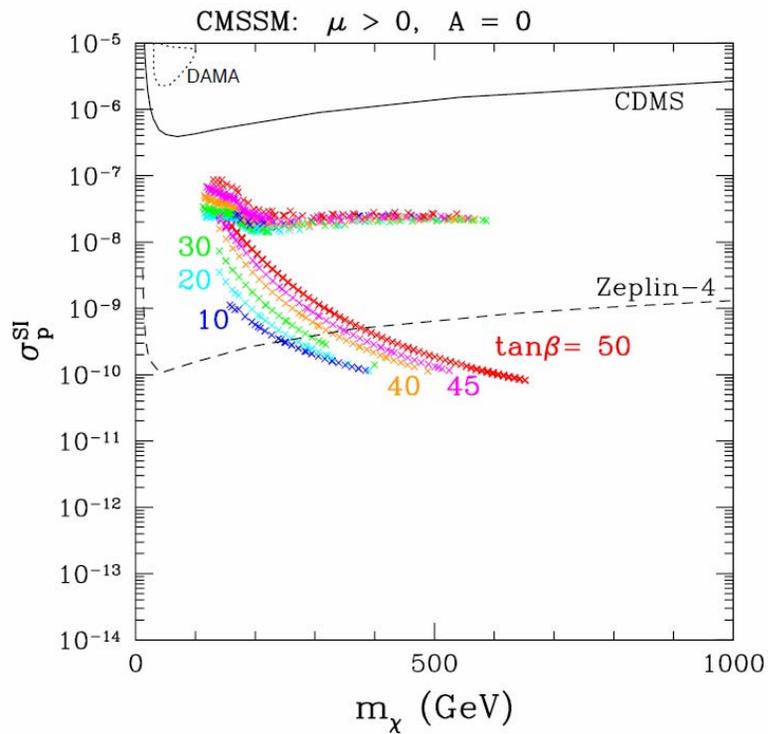


FP領域では10の-8から-9乗pb程度になる。

M0にはあまりよらない。(light Higgsの寄与できまっている。)

M1/2を大きくするとダンプする。

CMSSMでのSI cross section (II)

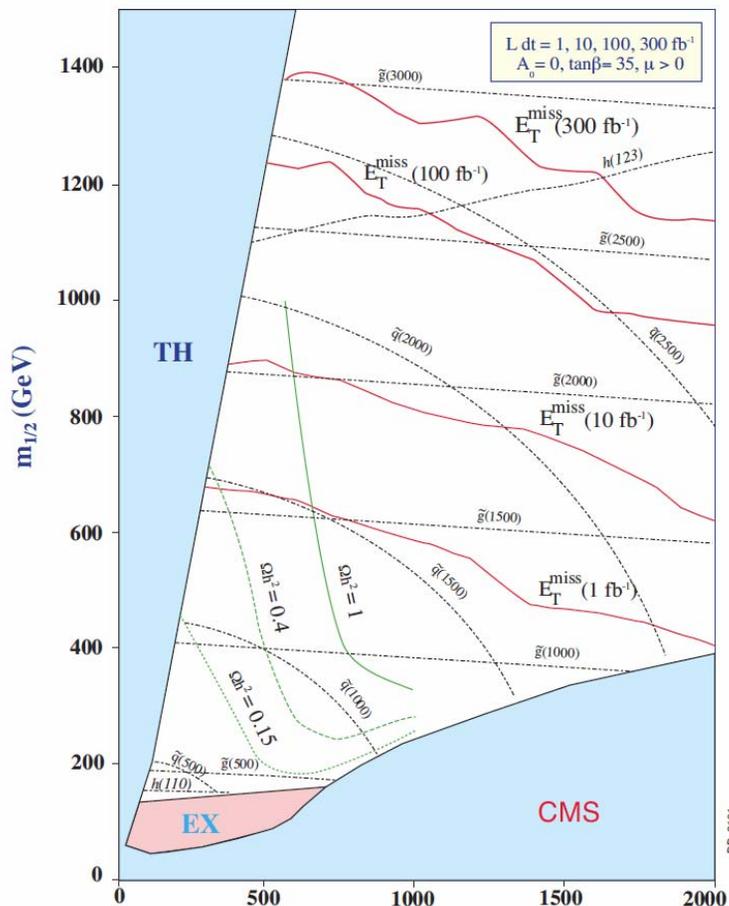


(Nihei)

$\mu < 0$ の時deconstructive. 断面積に下限はない。

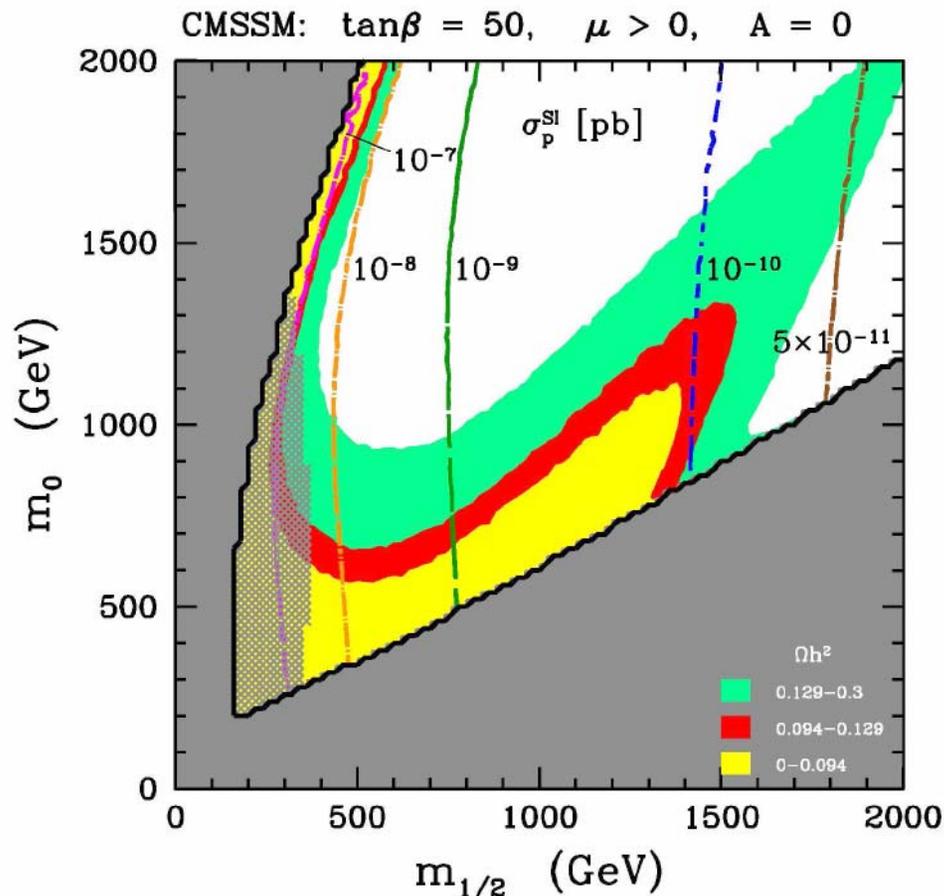
Discovery potential

LHC



$m_{\tilde{q}}, m_{\tilde{g}} < \overset{m_a \text{ (GeV)}}{\sim} (2-3)\text{TeV}$
 は5シグマで発見可

DM direct detection



FP領域ではdirect detection
 に軍配

暗黒物質観測に関して

Annual modulation of DM counting rate

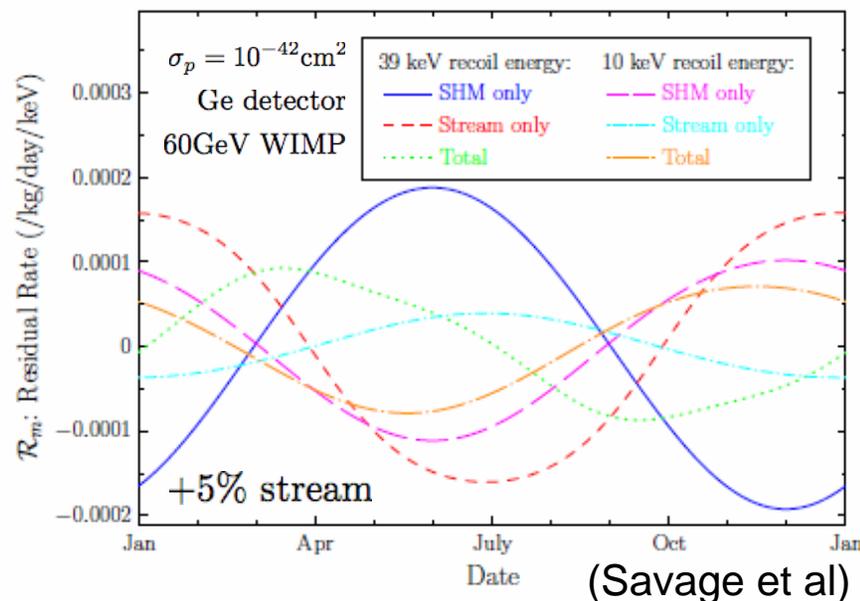
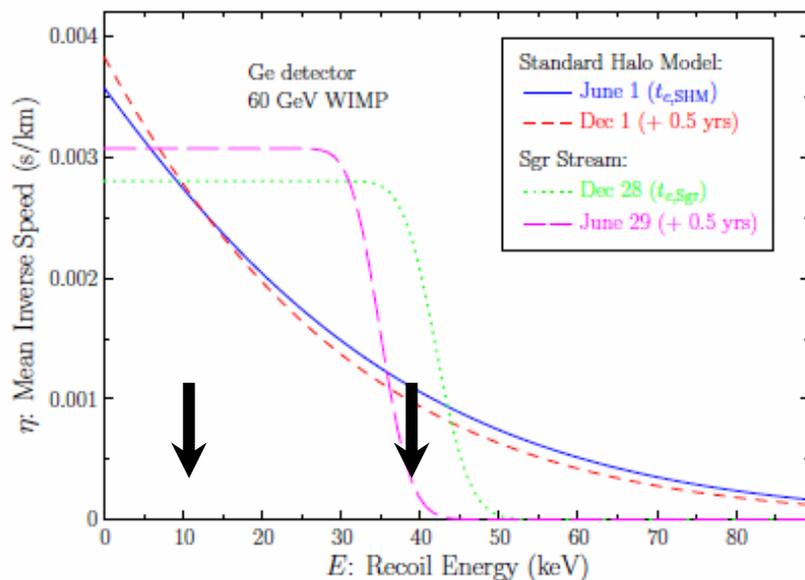
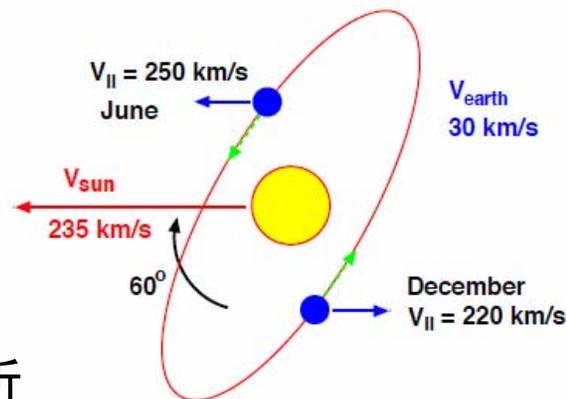
Isothermal halo model

counting rateが6月1日最大、12月2日最小
 +-7%程度のmodulation

Sagittarius dwarf tidal stream

(0.3-23)%程度local densityに寄与(?)

Energy-dependentなannual modulation の解析
 が必要。



加速器による直接探索

スカラー電子質量殻生成過程: $\tilde{\chi}^0 e^- \rightarrow \tilde{e}^- \rightarrow \chi^0 e^-$

$$\sigma = \pi / (\Delta m)^2 \quad (\Delta m = m_{\tilde{e}^-} - m_{\tilde{\chi}^0})$$

イベント数:

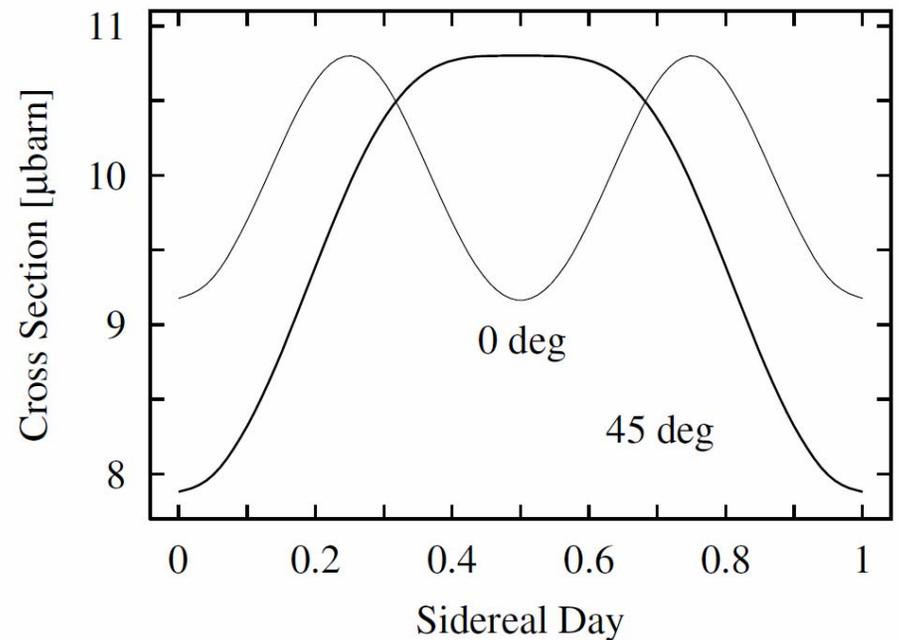
$$N = 73(150) \times \left(\frac{\Delta m}{10\text{GeV}} \right) \left(\frac{m_{\tilde{\chi}^0}}{100\text{GeV}} \right)^{-1} \left(\frac{j_e}{100\text{A}} \right) \left(\frac{L}{100\text{m}} \right) \left(\frac{\text{events}}{1\text{year}} \right)$$

イベント数の日変化

$$\Gamma_{\tilde{e}^-} = 20\text{MeV} \left(\frac{\Delta m}{10\text{GeV}} \right) \left(\frac{m_{\tilde{e}^-}}{100\text{GeV}} \right)$$

$$\Delta(\sqrt{s} - m_{\tilde{e}^-}) = 10\text{MeV} \left(\frac{\Delta m}{10\text{GeV}} \right) \left(\frac{v_{\text{DM}}}{220\text{km/s}} \right)$$

ビームの軸とDMの向きに
断面積が依存



Proto(Micro) halo

Small scaleでの密度揺らぎはDMのcollisional dampによって消される。

最初に来るハロー r のサイズはkinetic decouplingの温度によってきまる。典型的には

$$R \sim 10^{-3} \text{ pc} \quad M \sim 10^{-6} M_{\odot}$$

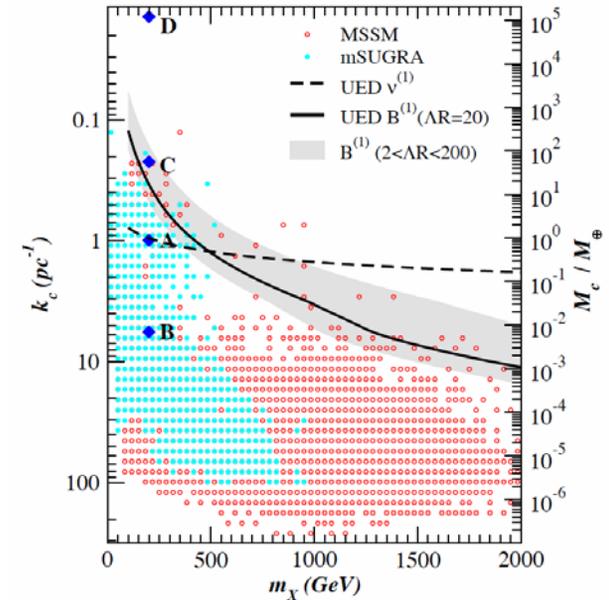
Proto(Micro) haloは現在のハローに残っているか
--Silk versus Moore--

- 星との衝突で壊れる (by Silk)。
- $Z = 130$ 以降にvirializeしたprotohaloは壊れる。ただし太陽近傍はそれ以前に出来たものが20%くらいある。(by Moore)

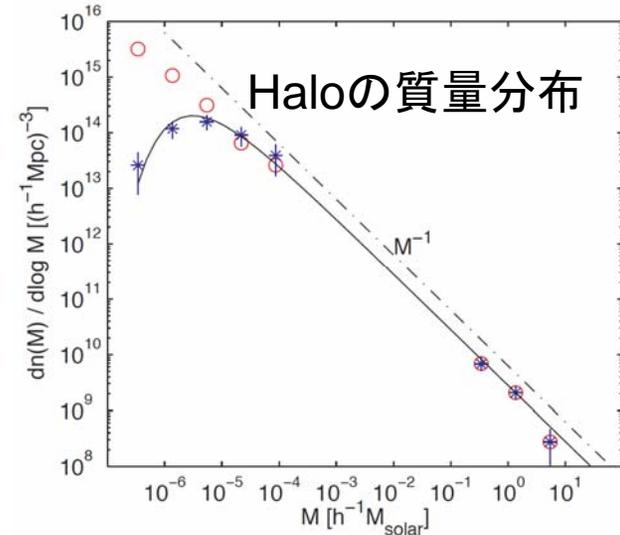


GLASTの観測

太陽近傍にあるmicrohaloは観測可能なガンマ線源
ガンマ線源の固有運動の観測



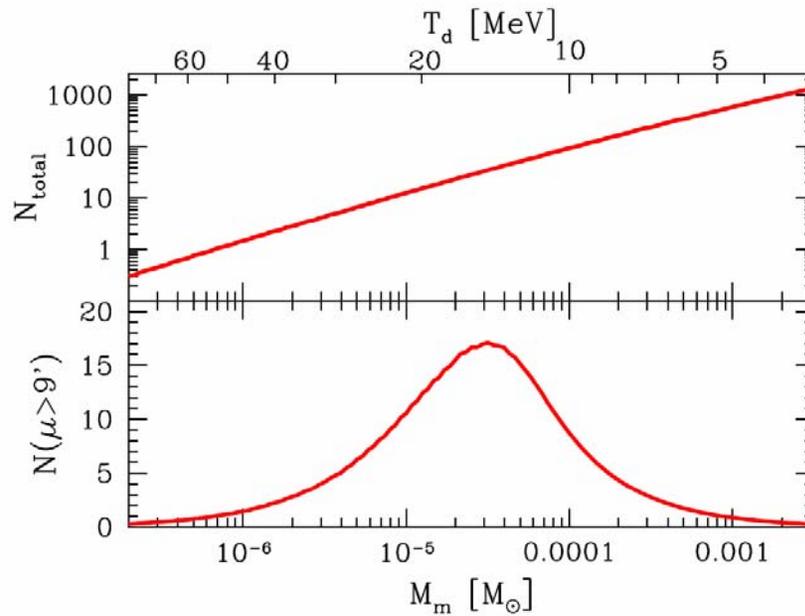
(Profumo et al)



(Diemand et al)†

2年で観測される
microhaloの数

9分以上の
固有運動がある
ものの数



(microhalo mass)

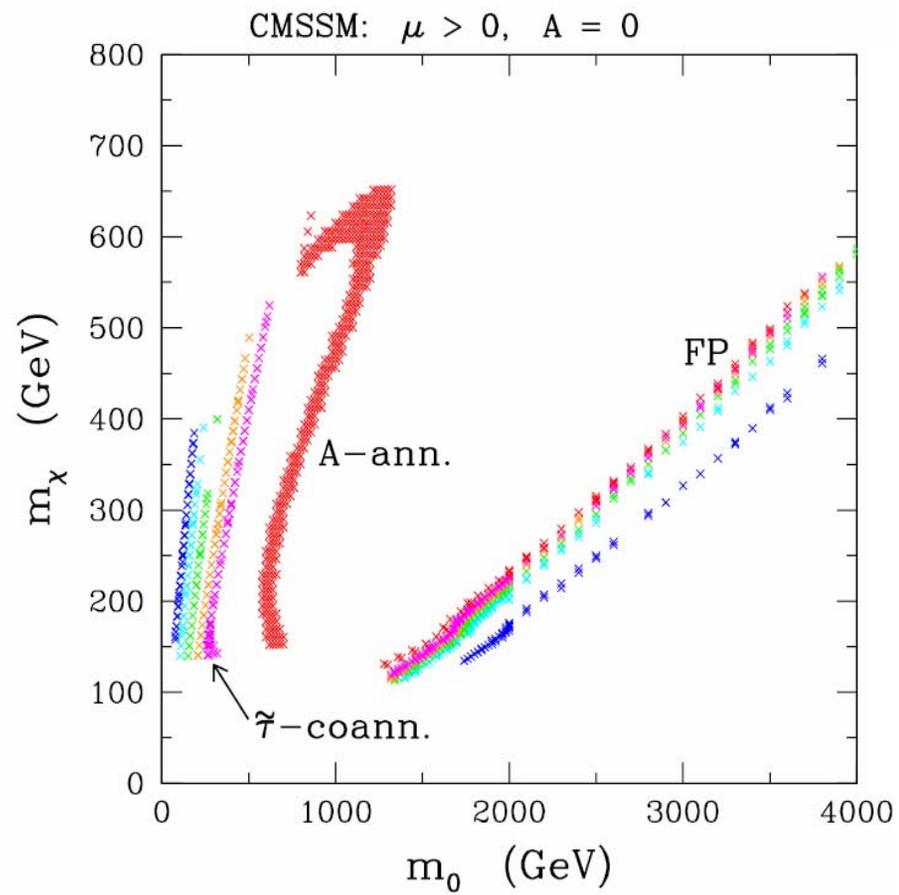
(Koushiappas)

Local densityの
10%がMicrohalo
にあると仮定。

Backup Slide

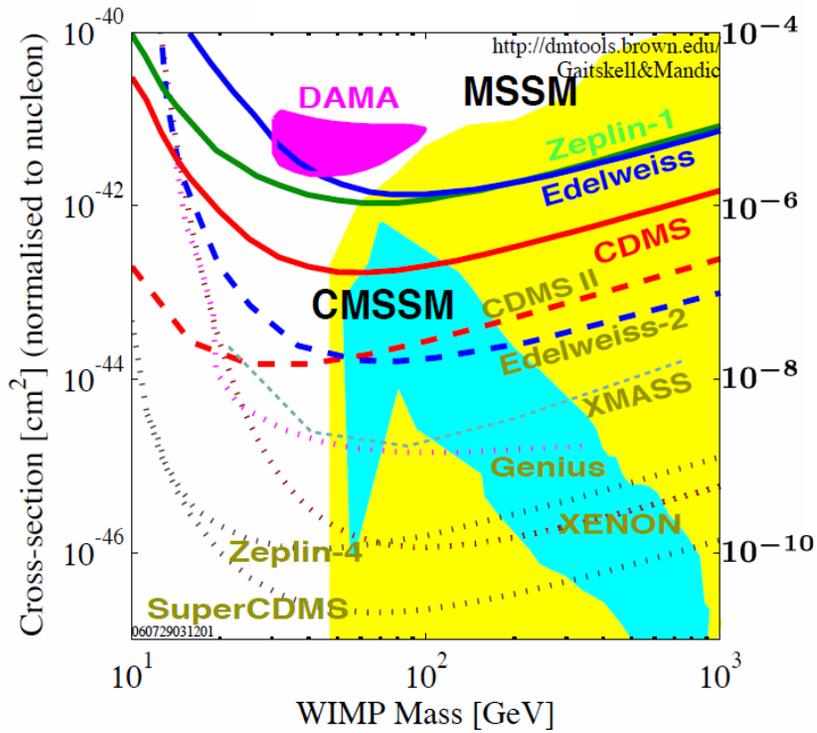
Summary of Nucleon Decay Searches

mode	exposure (kt·yr)	ϵB_m (%)	observed event	B.G.	τ/B limit (10^{32} yrs)
$p \rightarrow e^+ + \pi^0$	141	40,42	0	0.4	84
$p \rightarrow \mu^+ + \pi^0$	141	32	0	0.3	66
$p \rightarrow e^+ + \eta$	92	17	0	0.2	23
$p \rightarrow \mu^+ + \eta$	92	9	0	0.2	13
$n \rightarrow \bar{\nu} + \eta$	45	21	5	9	5.6
$p \rightarrow e^+ + \rho$	92	4.2	0	0.4	5.6
$p \rightarrow e^+ + \omega$	92	2.9	0	0.5	3.8
$p \rightarrow e^+ + \gamma$	92	73	0	0.1	98
$p \rightarrow \mu^+ + \gamma$	92	61	0	0.2	82
$p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$	92				23
$K^+ \rightarrow \nu\mu^+$ (spectrum)		36	--	--	6.4
prompt $\gamma + \mu^+$		8.6	0	0.7	10
$K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$		6.0	0	0.6	7.8
$n \rightarrow \bar{\nu} + K^0$	92				1.3
$K^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$		6.9	14	19.2	1.3
$K^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$		5.5	20	11.2	0.69
$p \rightarrow e^+ + K^0$	92				10
$K^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$		9.2	1	1.1	8.4
$K^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$					
2-ring		7.9	5	3.6	3.5
3-ring		1.3	0	0.04	1.6
$p \rightarrow \mu^+ + K^0$	92				13
$K^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$		5.4	0	0.4	7.0
$K^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$					
2-ring		7.0	3	3.2	4.4
3-ring		2.8	0	0.3	3.6



(Nihei)

SI cross section



SD cross section

