

暗黒物質は 見えるか

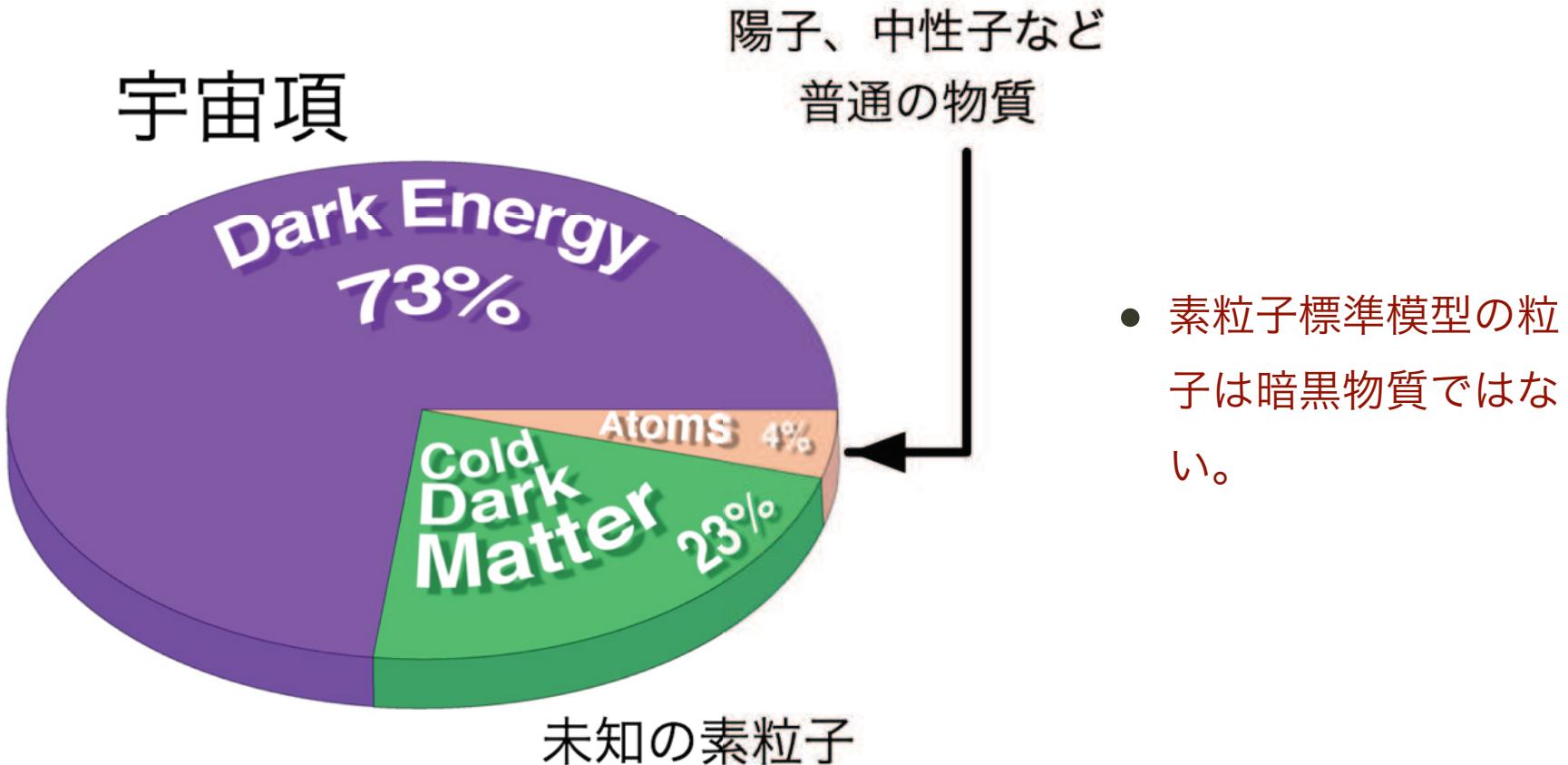
野尻美保子 @引越中
(京都大学基礎物理学研究所
→高エネルギー加速器研究機構)

いいわけ

- 12月15日 最後の送別会。論文投稿。
- 12月20日 KEK出張。家確保。洗濯機購入。
- 12月21日 車契約。KEK冬の学校で講義
- 12月22日 講義続き。カーペット等購入
- 12月23日 京都に戻る。
- 12月25日 引越しらくらくパック初日。理論懇講演。
- 12月26日 らくらくパック2日目
- 12月27日 つくば市転入。車納入。
- 12月29日 オフィスかたづけ
- 12月30日 オフィス2日目

effort 率低いです。間違ってたらごめんなさい。

暗黒物質と素粒子物理



素粒子論は完全ではない。（まだまだやることはある。）

標準的な暗黒物質の候補

宇宙論：重力的な性質だけきめればいい。

素粒子論：素粒子模型の中での粒子の性質に興味がある。

相互作用、質量を知りたい。その粒子がどのようにして宇宙に現れたかを知りたい。

ただのスカラー粒子をいれればよい、というわけにはいかない。

(宇宙屋さんの入れる暗黒物質には素粒子に対する愛情を感じない)

- おすすめ候補

- 超対称粒子
- axion
- KK粒子 (extra次元の模型の粒子)

お薦めしない候補の例

strongly interacting dark matter

暗闇に光をあてるには

- 暗黒物質をみつける?
 - 直接探索（測定器に残るエネルギーを見る）
 - 間接探索（暗黒物質が対消滅してできる宇宙線を見る）
- New high energy frontier (LHC) $\sqrt{s}=2\text{TeV} \Rightarrow 14\text{TeV}$
 - SUSY ("standard new physics") Extra dimension
dynamical sectors?
 - 強い相互作用する新しい粒子が暗黒物質に崩壊できるなら、それは運動量のバランスしていないイベントとして見つかるはず。

超対称模型

- ボソンとフェルミオンの間の対称性。新粒子たくさん。
- 一定の成功を治めている（力の統一）
- 場の理論的に筋がよい。
 - 2次発散がない。相互作用が制限されている
- R parity \rightarrow stable particle (LSP) \rightarrow DM
 - DMがあることで、勇気づけられるところはある。
 - 宇宙初期に熱平衡 \rightarrow decoupling. 対消滅確率に反比例する暗黒物質密度
 - LSP : ニュートラリーノ（ゲージーノとヒグシーノの混合状態）
グラビティーノ（重力の超対称粒子。スピン 3/2）

DM density constraint is important in "MSUGRA"

1)バルク: LSPはほとんどBino
Slepton 交換で密度が決まる

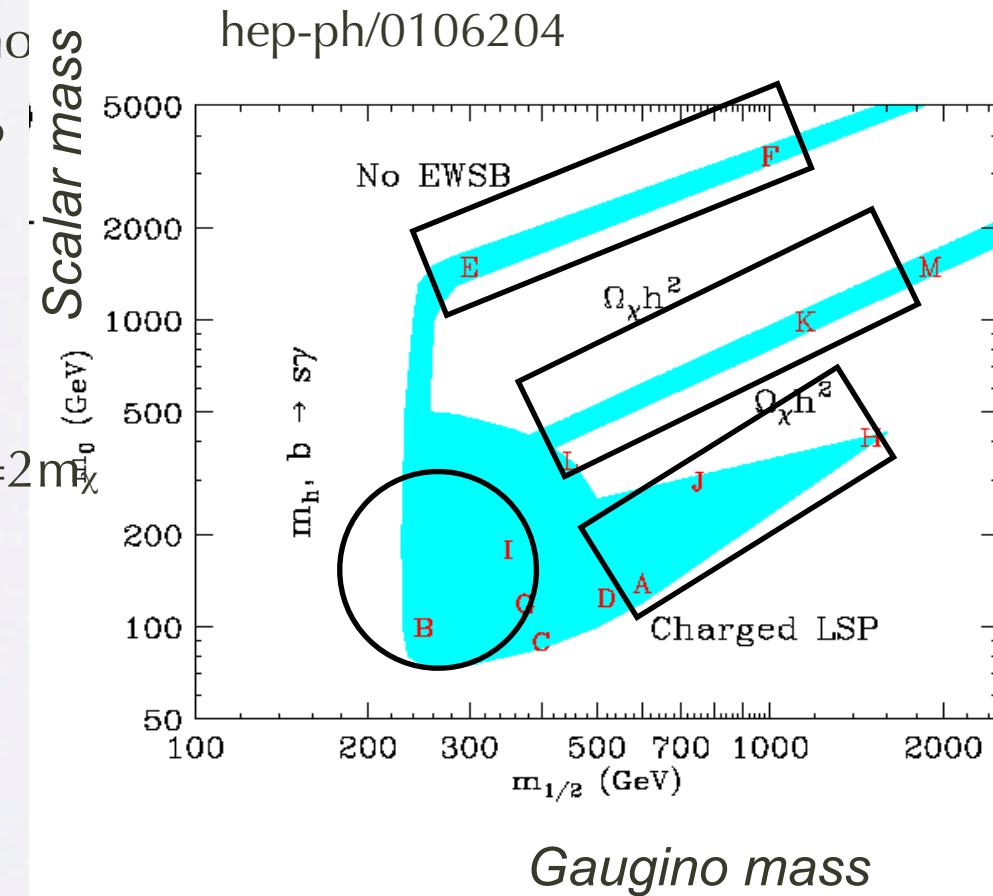
$$h^2 \sim m_{\tilde{l}}^4 / m_{\tilde{e}}^2$$

too large mass density

2)Higgs pole effect near $m_H = 2m_{\tilde{\chi}^0}$

3)隨伴消滅 ~ ~

4)focus point region :
higgsino-gaugino 混合



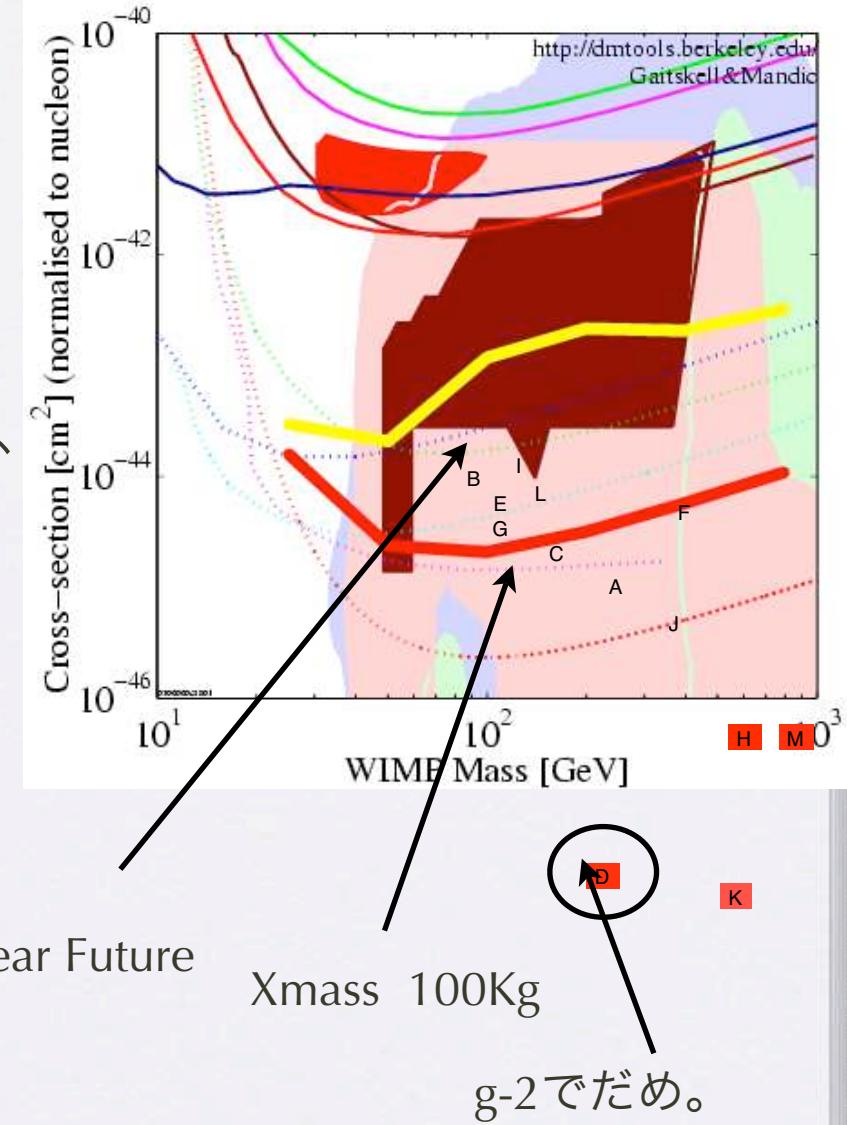
直接探索の将来

DM フラックスがある:
 $\rho=0.3\text{GeV}, v=230\text{Km/s}$

χN 散乱による直接探索

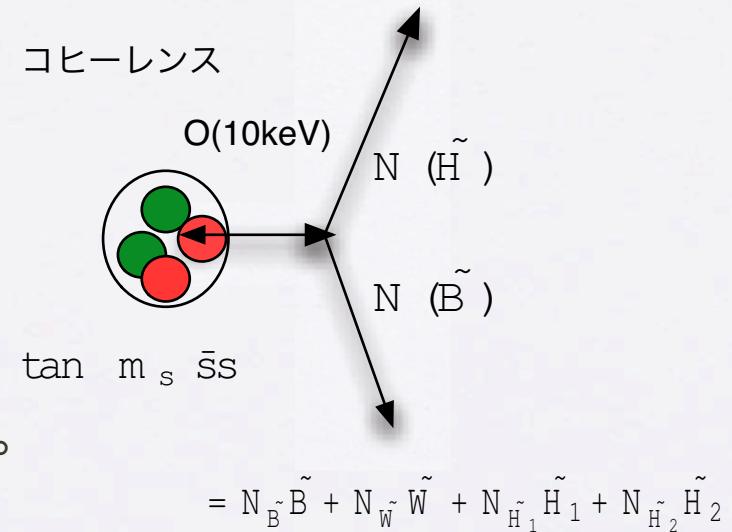
Limit $10^{-6}\text{ pb}(\text{current}) \Rightarrow 10^{-10}\text{ pb}$

LSPが一番軽いニュートラリーノなら、
直接探索でかなりの領域が探査でき
る。「新しい実験技術」に対する
投資が必要。



Why Challenging

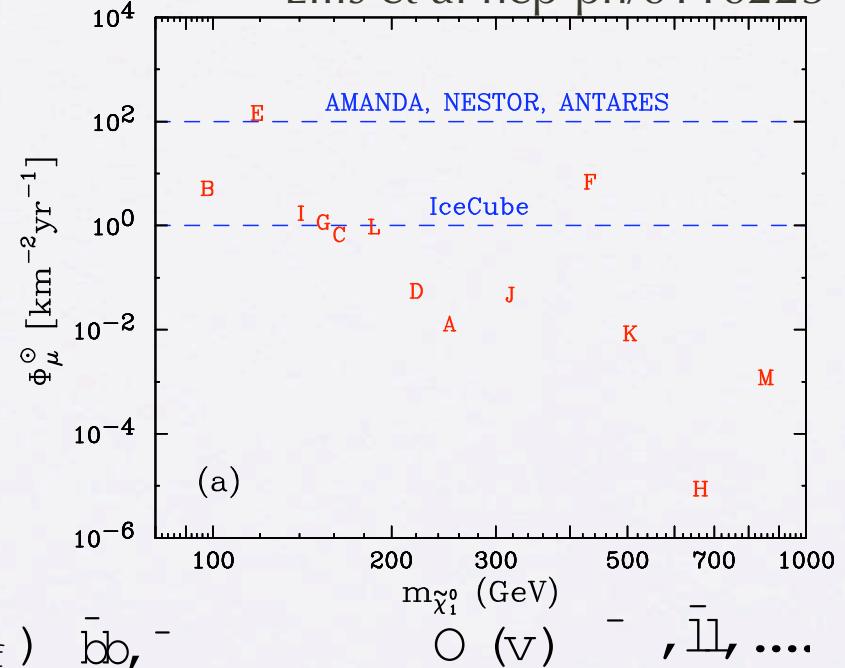
- すべての相互作用が suppress されている。
- コヒーレントな相互作用は原子核の核子数 N^2 に比例するので有利。
 - もとになる相互作用は ヒッグス交換。
 - 核子のストレンジ成分に比例。実験的、理論的不定性は大きい。
- スピン依存の相互作用は数桁大きい。しかし原子核自身はスピン0。スピンを持つ原子核は軽い（止める能力が弱い）か、値段が高い。太陽は例外（たくさん水素がある。）



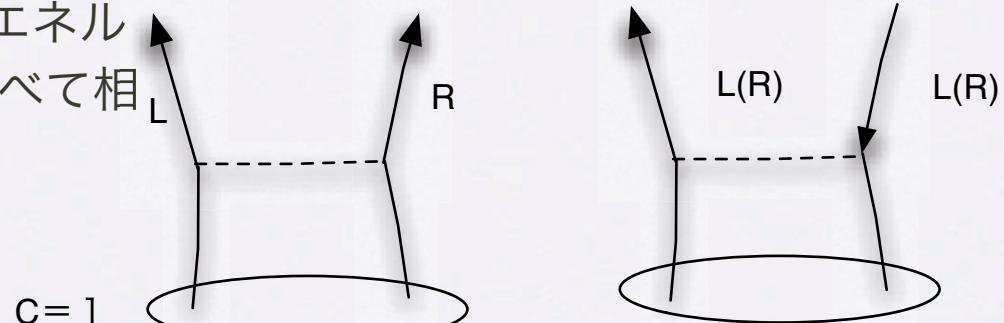
ν による探索

Ellis et al hep-ph/0110225

- 太陽が暗黒物質を捕まえる。
- 対消滅が起源のる ν_μ のフラックスはそこそこ高い。
 - 低エネルギーLSPの対消滅はほとんど bb , $\tau\tau$ にいってしまう。ここからくるニュートリノのエネルギーは低い。
- ICE cube ではミューイオンのエネルギー下限はAMANDAにくらべて相当に高い。



○ (m_f) $\bar{b}b$, $\bar{\tau}\tau$ ○ (v) e^+ , \bar{e}^+ ,



$$= a + bv^2$$

銀河からの贈り物？

銀河中心に暗黒物質が集積、
対消滅。密度、伝搬に大きな不定性。
銀河中心密度、Local clump など

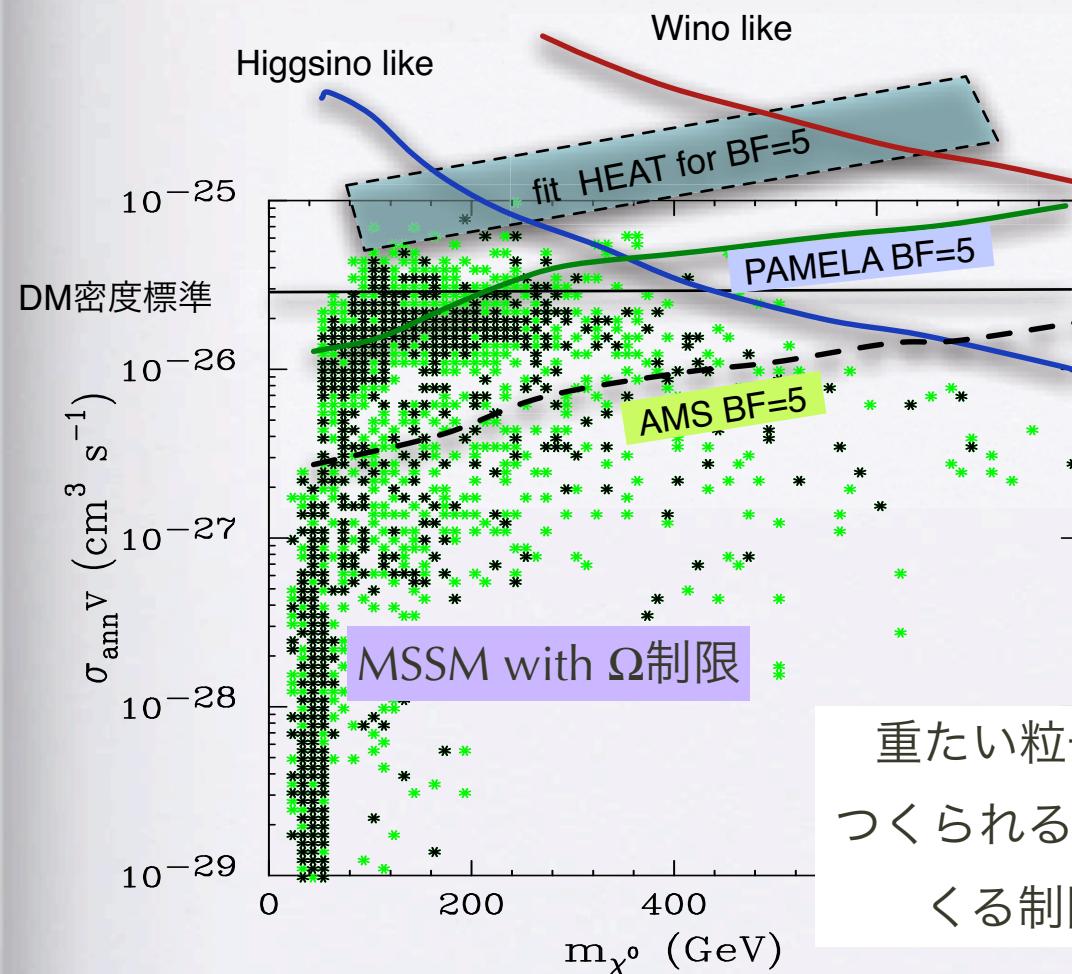
反陽子（銀河全体の蓄積がきく。）
陽電子（近傍のDM）
ガンマ線（銀河中心から）

- 1) HEAT のバンプ？
- 2) Integral

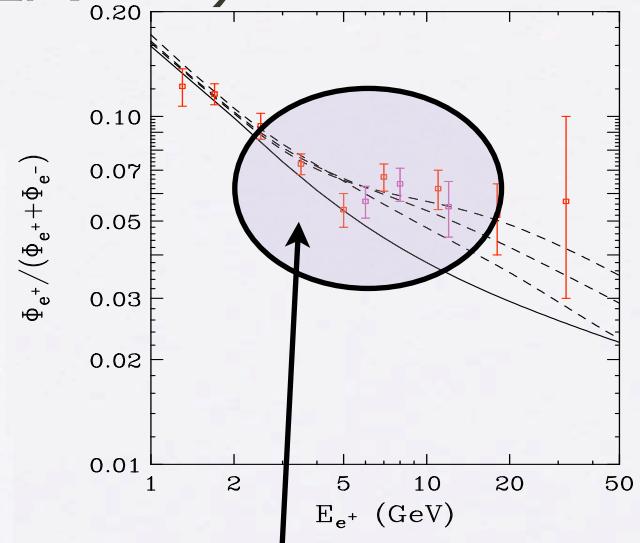
対消滅シグナルの基本

- 暗黒物質密度が小さい ($\Omega h^2=0.1$) ということは、宇宙初期での対消滅確率は小さくなかったことをしめす。
 - 熱平衡から切れた時の温度は $O(10)\text{GeV}$
 - 質量が縮退した他の新粒子があればそれとの隨伴消滅も重要
- 現在の宇宙線の量は温度 0 での対消滅確率関係。暗黒物質密度を決めた対消滅確率はその上限にすぎない。
- 主に重たい粒子に対消滅。役にたつもの（ニュートリノ、光、反陽子、陽電子）などはトータルエネルギーリースのごく一部。

positron signature (HEATからPAMELAへ)



Hooper and Silk hep-ph/0409104



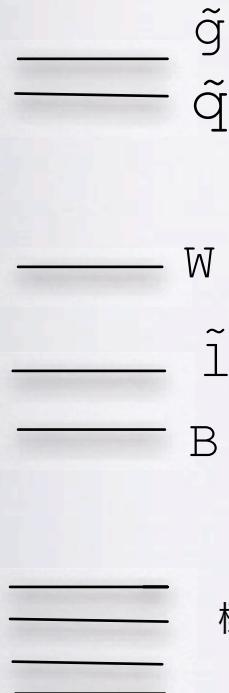
高エネルギー物理学の感覚で
いえばバンプではない。

重たい粒子の崩壊によって暗黒物質が
つくられるような模型では、DM密度から
くる制限ははずすことができる。

SUSY vs UED

$a \ll b$ の制限がはずれている模型もある。

超対称模型



UED



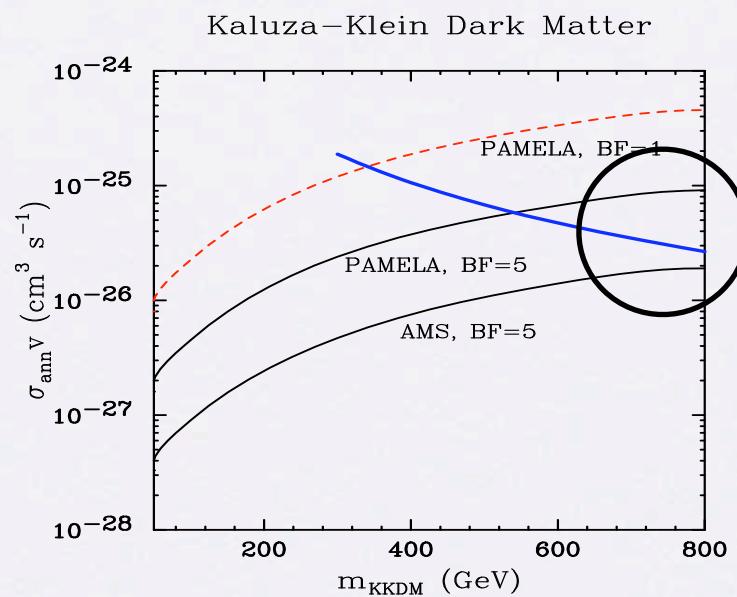
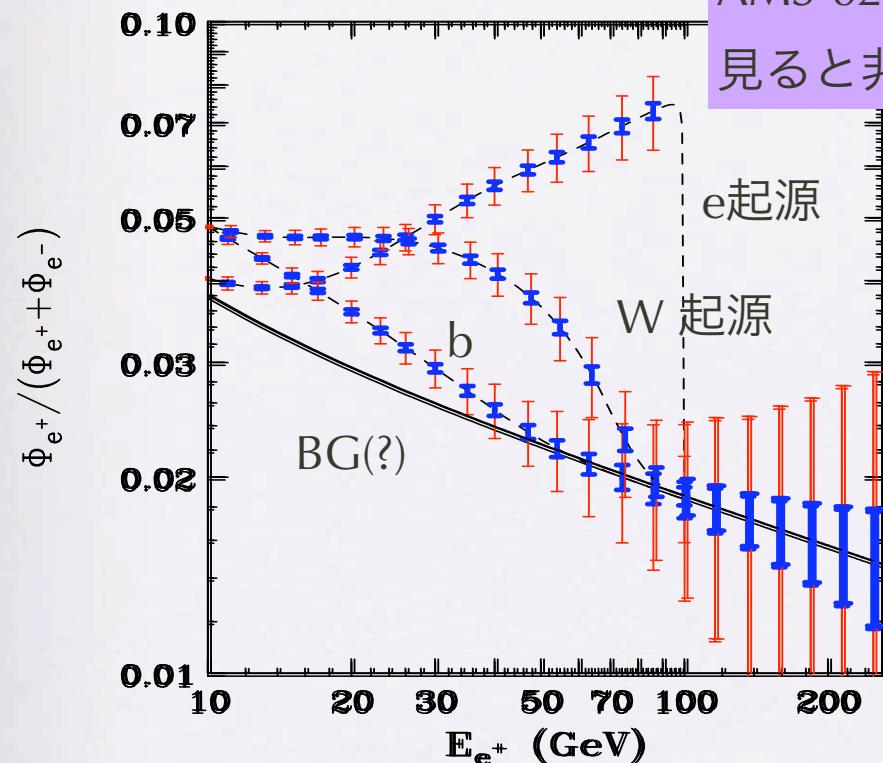
- UED model: 標準模型の粒子が extra dimension にいるような模型。
- 5 次元の理論は vector like. カイラルな理論 → 境界のあるコンパクト化。KK mode のレベル 1 の一番軽い粒子は安定。
- 非常に縮退した質量スペクトラム。一番軽い粒子はスピン 1 のゲージ粒子。
- 前述のカイラリティによる制限はない。直でニュートリノ、電子などへ。

UEDならかなりはっきりした陽電子スペクトルのedge もあります。

Edgeでもないと discoverly は無理。

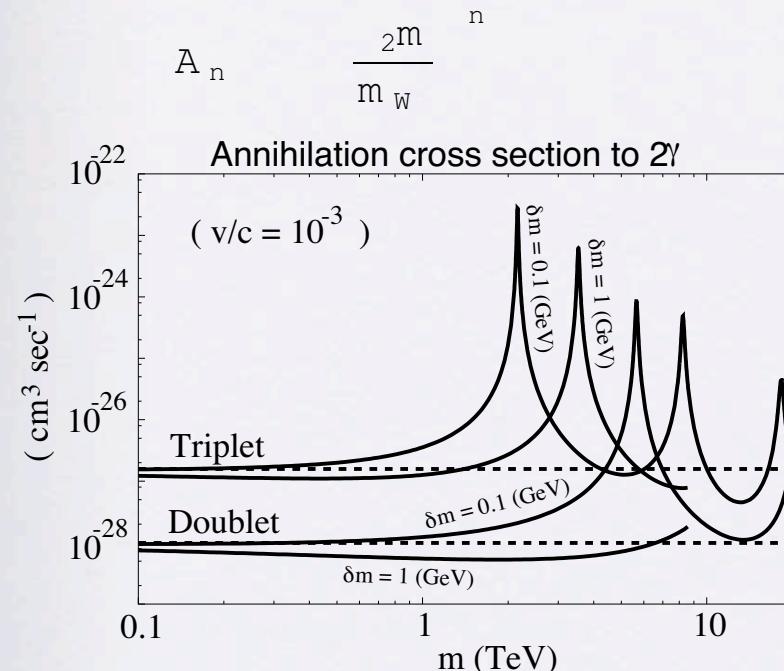
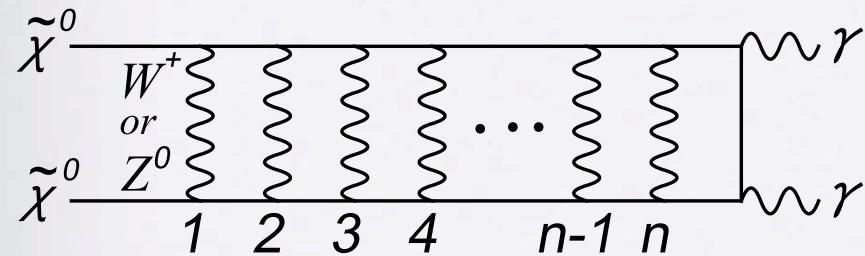
青いバー:AMS, 赤いバー : PAMELA(2005)

AMS-02はスペースステーションの現状を見ると非現実的。(教訓は?)

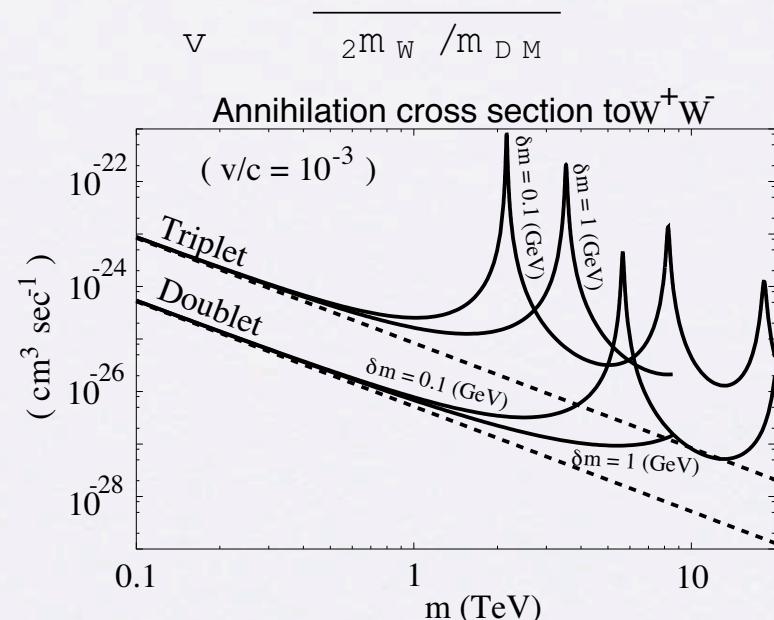


Hooper and Silk hep-ph/0409104

温度が低いと対消滅が爆発的に
増える場合もある。

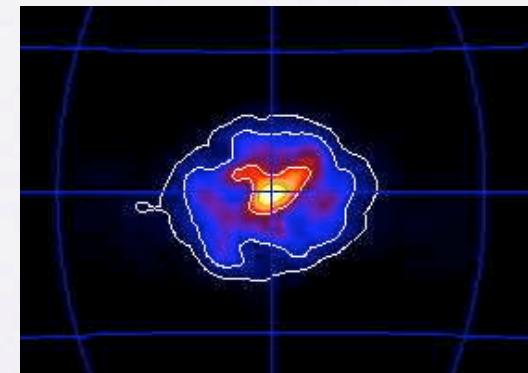


- SU(2) doublet or triplet dark matter has its brothers.
- The non perturbative effect from W exchange. if velocity is small enough.



exotic dark matter

- INTEGRAL (International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory)
- バルジから 511 keV γ 線 (ポジトロニウムの消滅から、つまりもとの陽電子はエネルギーが低い。)
- FWHM 8度。バルジからのフラックス
 - バルジ $1.05 \pm 0.06 \times 10^{-3} \text{ ph cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - デスク $0.7 \pm 0.4 \times 10^{-3} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Astrophysical なソースは分かってない。デスクに少ないソースが必要 (LMXB, Novae, SN....)
- 軽いDMを suggest? 対消滅->シグナル? 親が MeV の質量でないとガンマ線のシグナルに跳ね返る。



崩壊粒子が起源の可能性も

- moduli decay : life time 10^{19} sec、 $\Omega = 10^{-6}$ 程度(dilution必要) Kawasaki and Yanagida hep-ph/0505167 $L = \frac{m_e}{M} \bar{e} e$
- Axino(axino のsuperpartner) + Rparity violating coupling。
そこまでせんといかんかという気はちょっとする。
Hooper et al hep-ph/0402220
- Q ball の崩壊(Kasuya and Takahashi astro-ph/0508391)
 - Q ball は超対称模型のnon-topological solitonで高いレプトンあるいはバリオン数が持てる。
 - 崩壊確率は表面積に比例。Q が大きければゆっくり崩壊する。
 - レプトン数をもっていれば陽電子がたくさんできても不思議ではない。
- なんかステライルニュートリノで

一般論

- シグナルの広がりをDMプロファイルと比較。

$$(r) \quad \frac{1}{(r/a) [1 + (r/a)]^{(-)/a}} \quad \frac{1}{(r/a)}$$

- Rate から対消滅確率あるいは、DMの崩壊確率を推定。

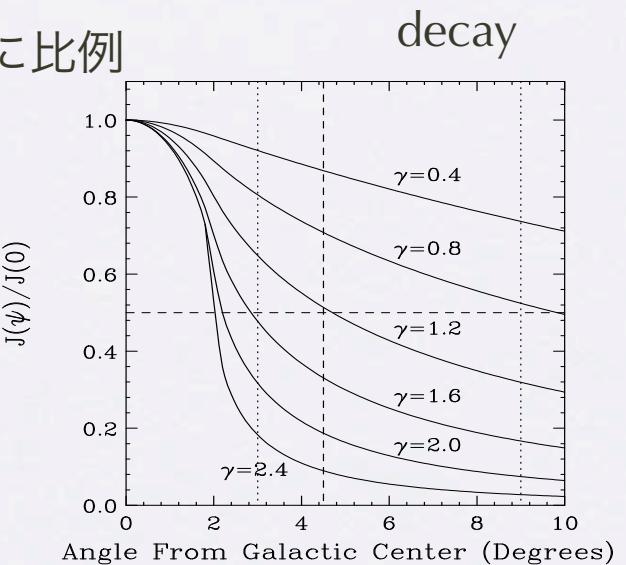
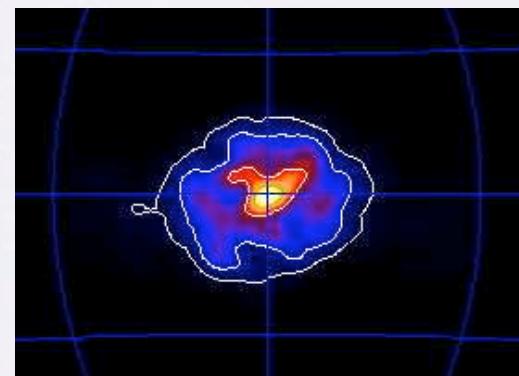
• DM 対消滅 $\gamma=0.4-0.8$ $\frac{v}{pb} \frac{1M_eV}{m_{DM}}^2 J = 0.003.$

$$J=187 \text{ for } \gamma=1, 17.1 \text{ for } \gamma=0.4$$

- DM 崩壊 $\gamma=0.8-1.5$, signal は life time に比例

$$m_{DM} \quad 4 \times 10^{26} \text{ sec/m}_{DM} (M_eV)$$

Boehm et al
astro-ph/0309686



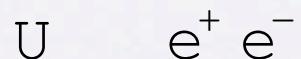
生成過程と関係づけると

シグナルの大きさから

$$\frac{v}{\text{pb}} = \frac{1M \text{ eV}}{m_{DM}}^2 J^{-0.003}$$

$10^{-4} \sim 10^{-5}$ pb for 1 MeV
 0.1 ~ 1 pb for 100MeV

P wave



熱生成を仮定して暗黒物質密度から

$$v = 0.2 \sqrt{\frac{x_F}{g}} \cdot \frac{D_M h^2}{0.11}^{-1} \text{ pb}$$

$$x_F = 12-19$$

スカラ-粒子あるいはスピン 1/2
 vector like gauge boson exchange
 コライダーバウンドは大丈夫

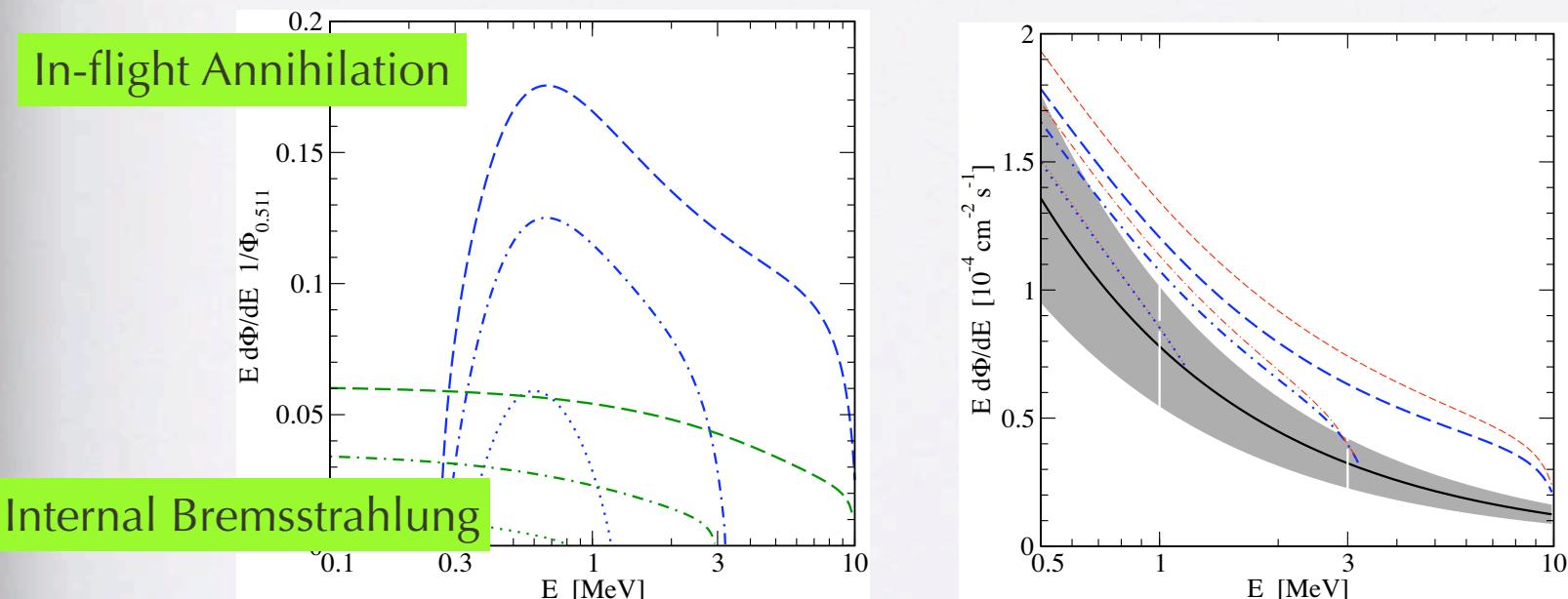
- L/Mの小さい矮小銀河で、 511keVの線が見えるかどうか
 が焦点。 (Hooper astro-ph/0311150)
- 期待される flux at Sagittarius dwarf galaxy

$$= 3 \cdot 4^{+3.1}_{-1.7} \times 10^{-4} \text{ to } 1 \cdot 6^{+1.5}_{-0.8} \times 10^{-4} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

current upper limit $1.7 \times 10^{-4} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

スペクトルも大事かもしれない。

Beacom et al astro-ph/0512411



- Internal Bremsstrahlung からはエネルギーが 20 MeV 以下に制限される。PRL 94, 171301
- In-flight Annihilation から 3 MeV 以下？あるいはなにか構造が見えれば、injection energy についてなにか言える。

まとめ

- Solid な発見は大変難しい。一番よさそうなのは直接探索だが、シグナルが出てからが難しい。(DAMA の教訓)
- BGもシグナルも連続スペクトラム。BG、DM密度分布等には大きな不定性。超対称模型の場合は「マヨラナの呪い」も。
- Power law が変わった程度では、シグナルという判別は難しい。一方、シグナルにピークやエッジが出るのは例外的。
- まず暗黒物質の質量や相互作用を知っていて、それを見ながら進むのが一番確実。