

暗黒物質は 見えるか

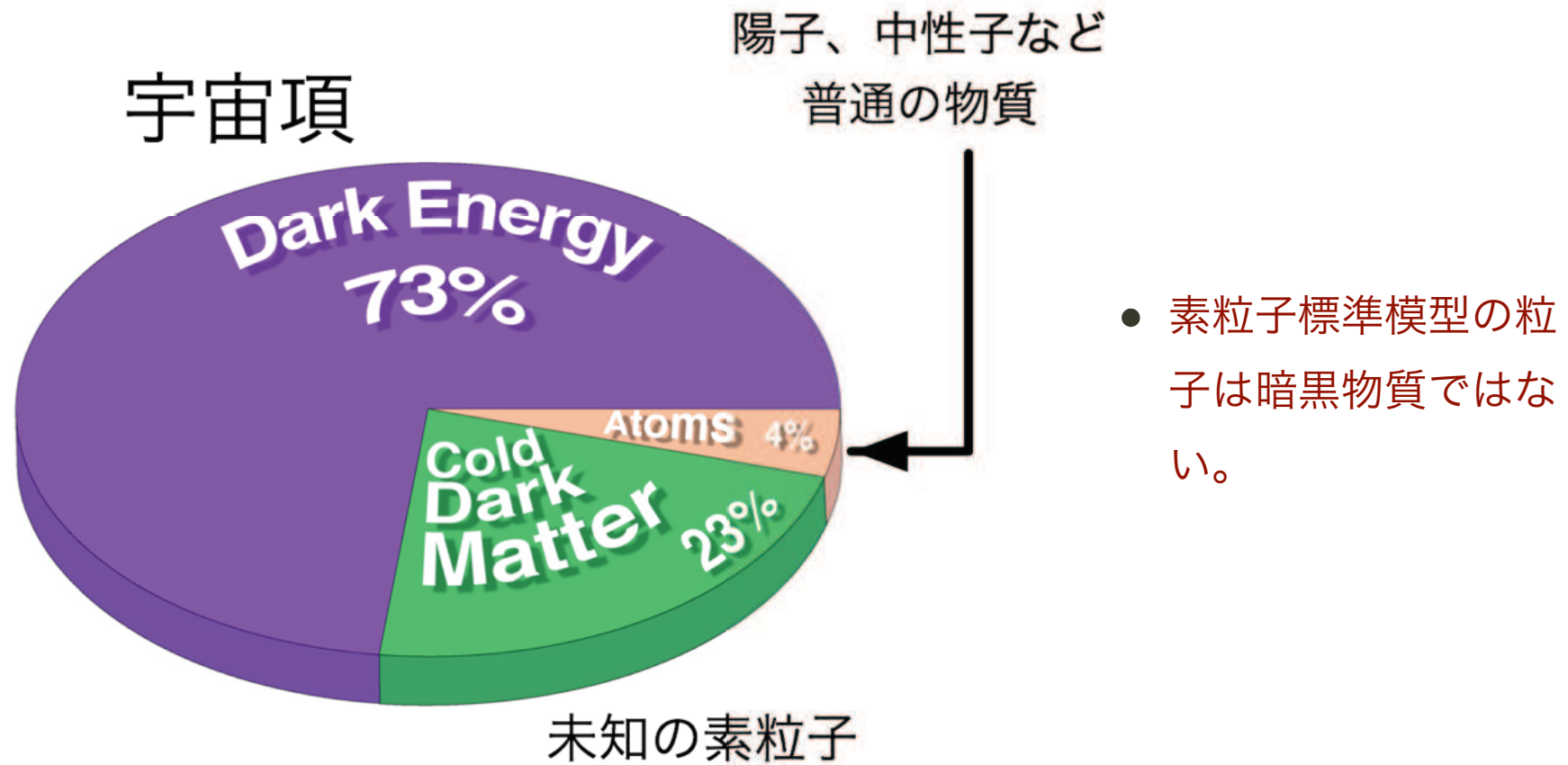
野尻美保子 @引越中
(京都大学基礎物理学研究所
⇒高エネルギー加速器研究機構)

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 オフィスカたづけ
- 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)

お薦めしない候補の例
strongly interacting dark matter

- おすすめ候補
 - 超対称粒子
 - axion
 - KK粒子 (extra次元の模型の粒子)

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

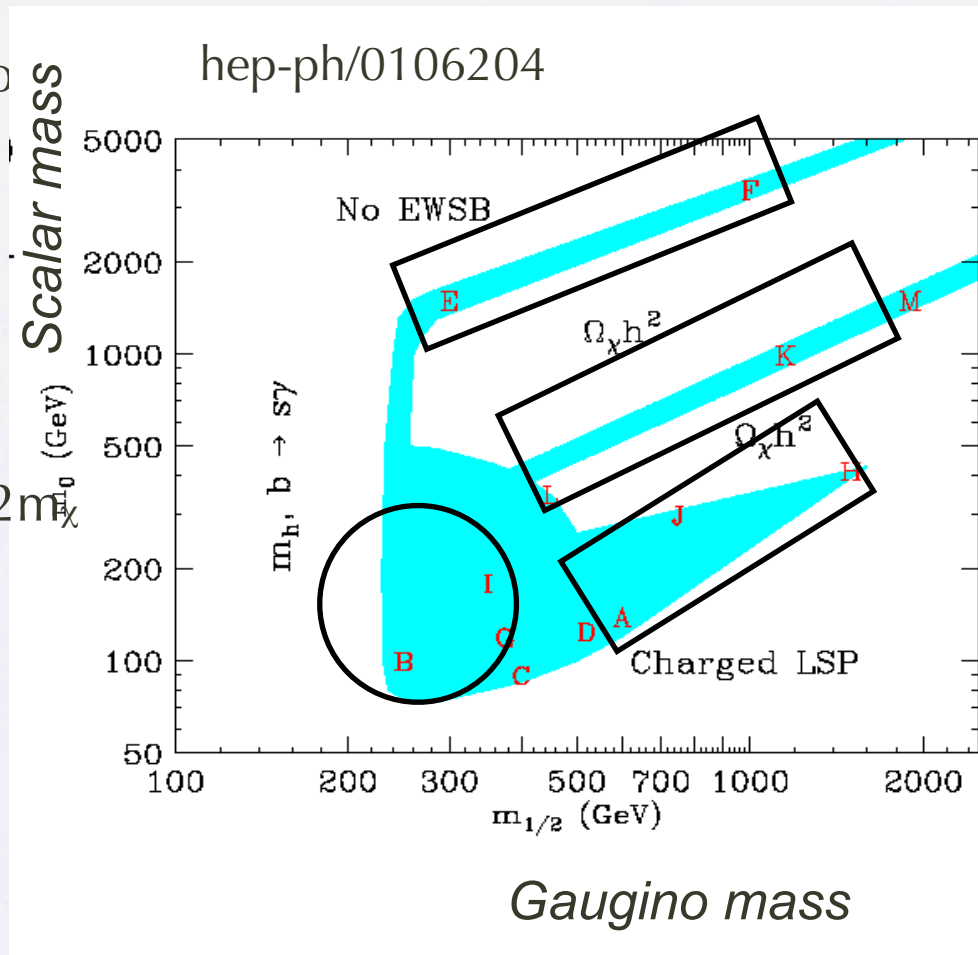
$$h^2 \approx m_{\tilde{1}}^4 / m_{\tilde{2}}^2$$

too large mass density

2) Higgs pole effect near $m_H = 2m_{\tilde{\chi}_1^0}$

3) 随伴消滅 $\sim \sim$

4) focus point region :
higgsino-gaugino 混合



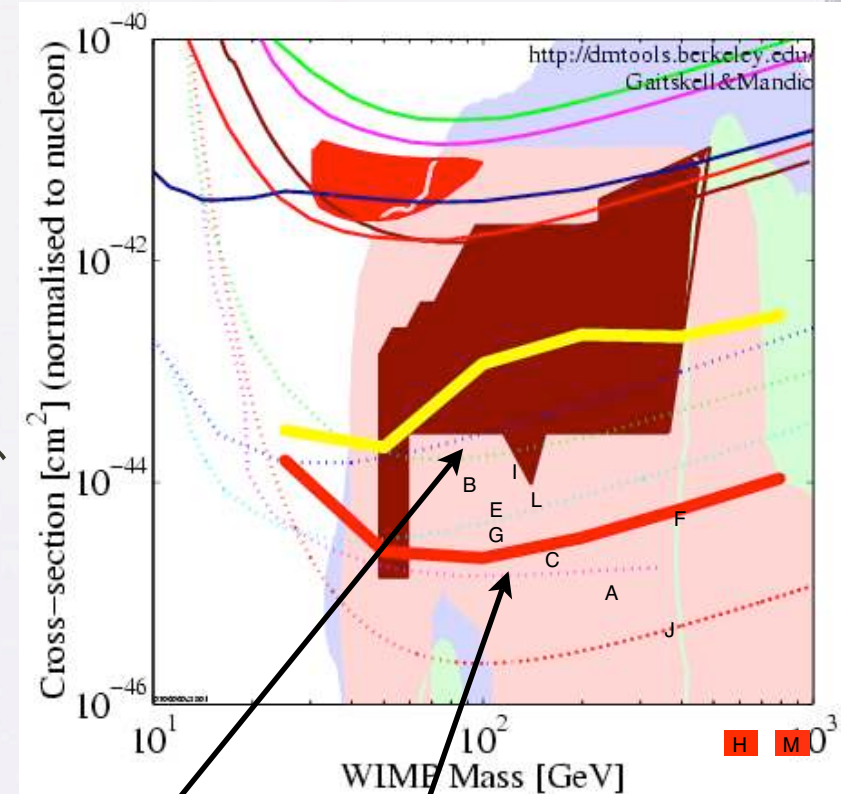
直接探索の将来

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。



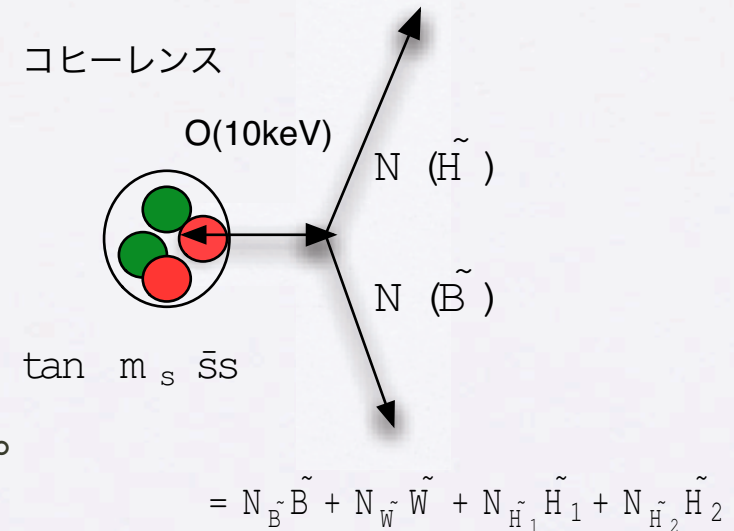
Near Future

Xmass 100Kg

g-2でだめ。

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。

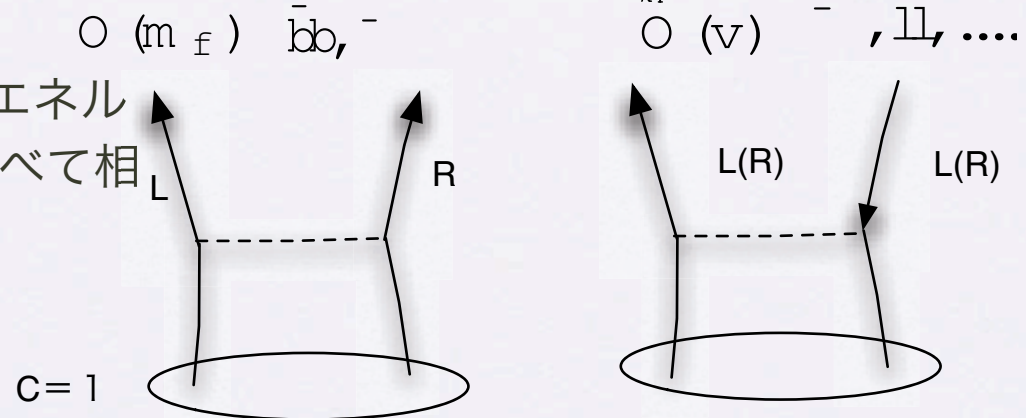
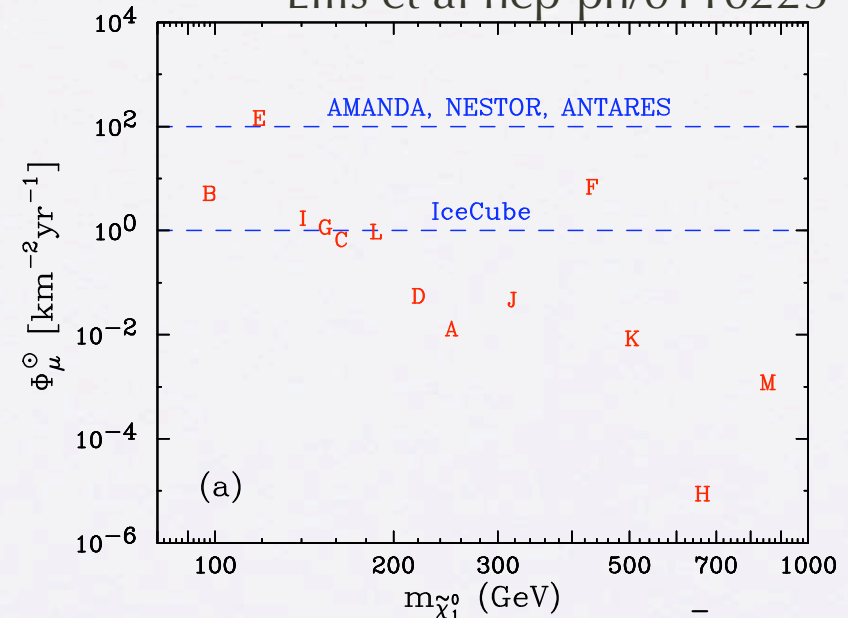


- スピン依存の相互作用は数桁大きい。しかし原子核自身はスピン0。スピンを持つ原子核は軽い（止める能力が弱い）か、値段が高い。太陽は例外（たくさん水素がある。）

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 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 $b\bar{b}$, $\tau\bar{\tau}$ 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 ではミューオンのエネルギー下限はAMANDAにくらべて相当に高い。



$$= a + bv^2$$

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

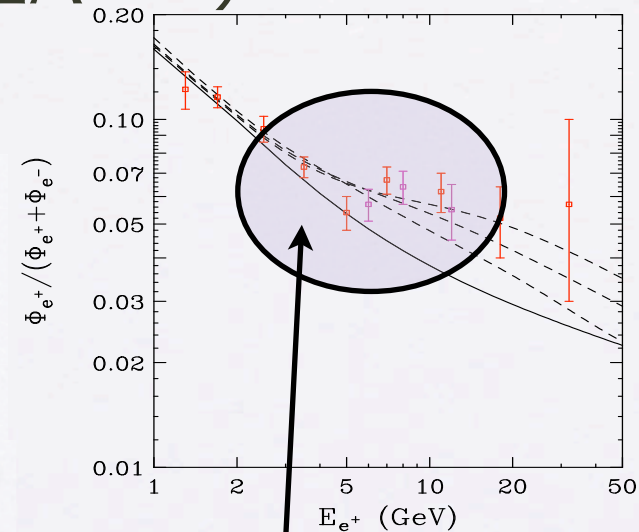
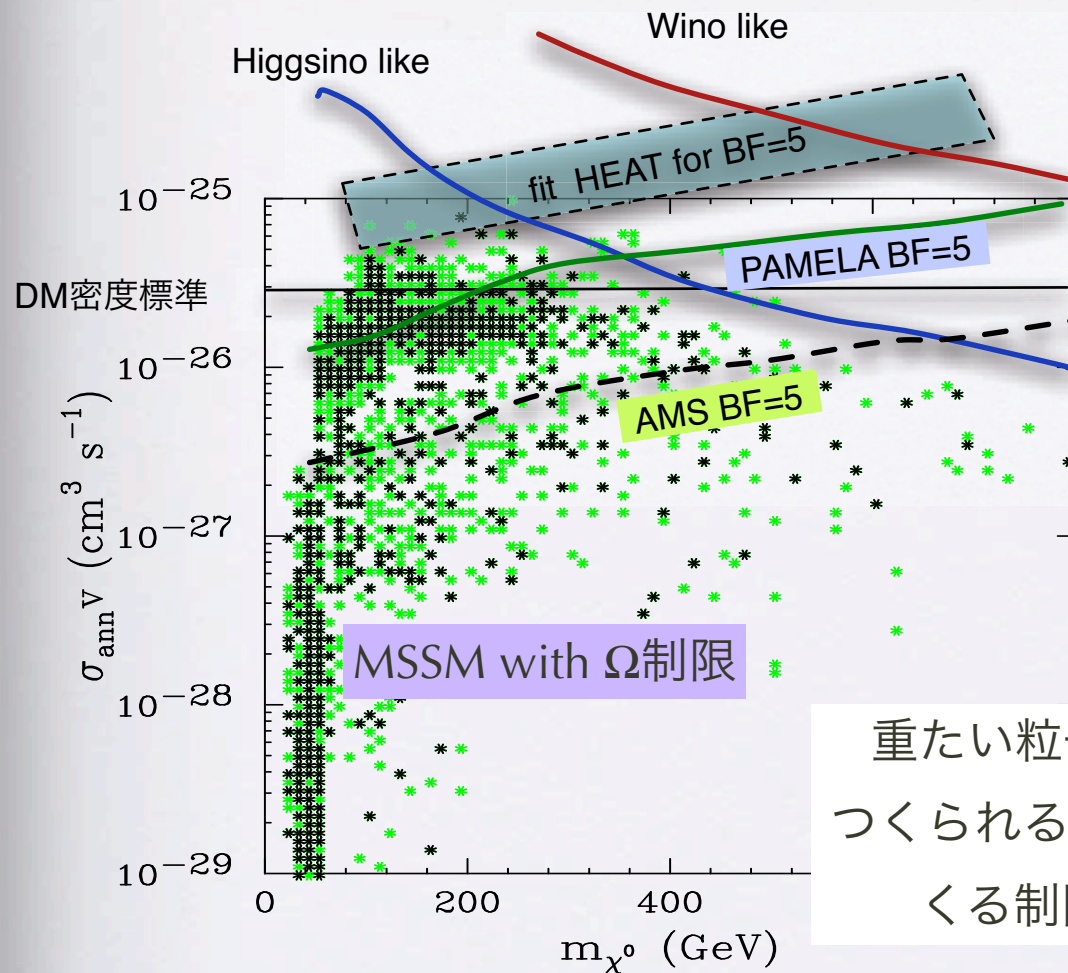
反陽子（銀河全体の蓄積がきく。）
陽電子（近傍のDM）
ガンマ線（銀河中心から）

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随伴消滅も重要
- 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リースのごく一部。

positron signature (HEATからPAMELAへ)



HEAT data
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
つくられるようなモデルでは、DM密度から
くる制限ははずすことができる。

Hooper and Silk hep-ph/0409104

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

===== \tilde{g}
===== \tilde{q}

===== W

===== \tilde{l}
===== B

===== 標準模型
=====

UED

===== $n(KK)=2$

===== $n(KK)=1$
===== $g_{(1)}, q_{(1)}, W_{(1)}, B_{(1)}, l_{(1)}$

=====

- 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 \rightarrow 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。

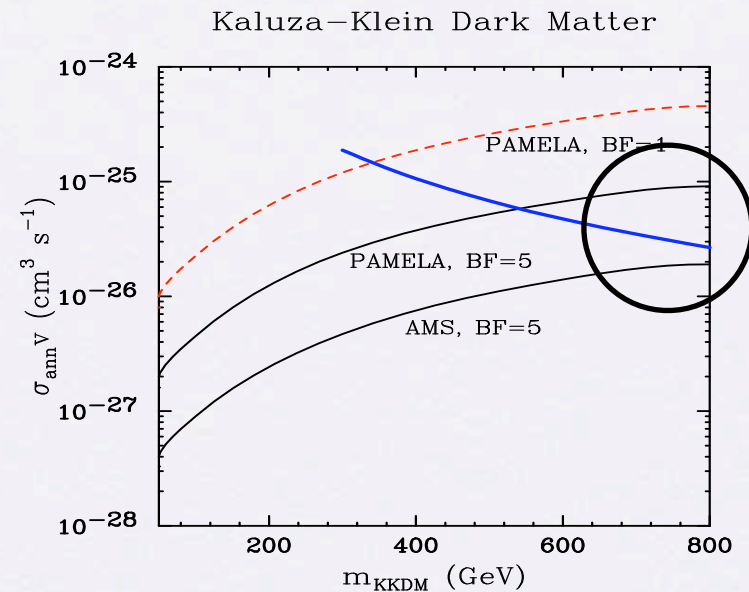
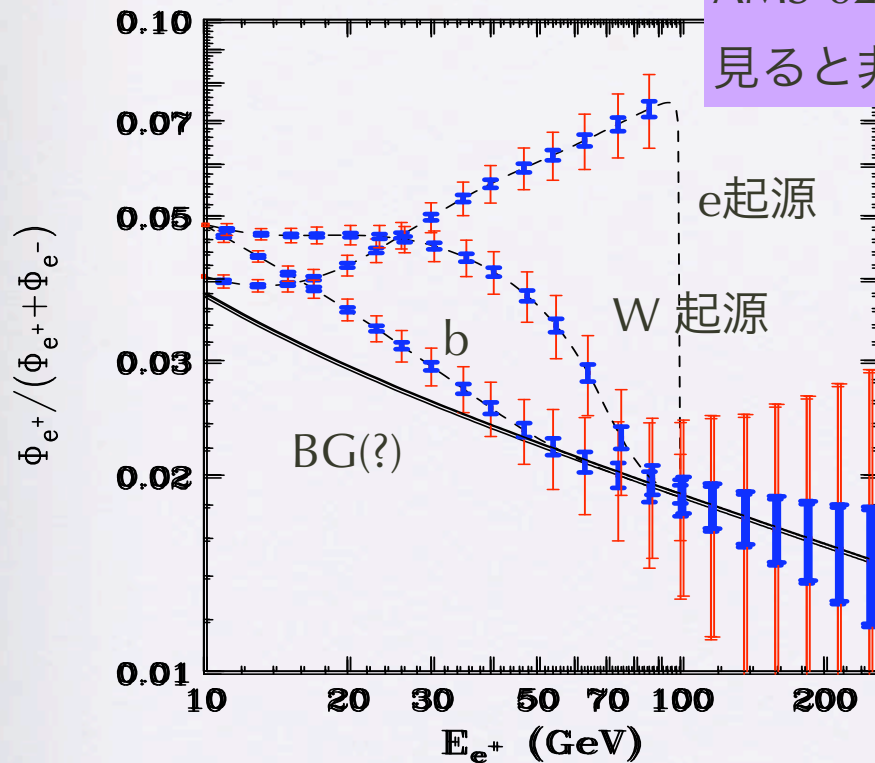
- 非常に縮退した質量スペクトラム。一番軽い粒子はスピン1のゲージ粒子。

- 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 もありうる。

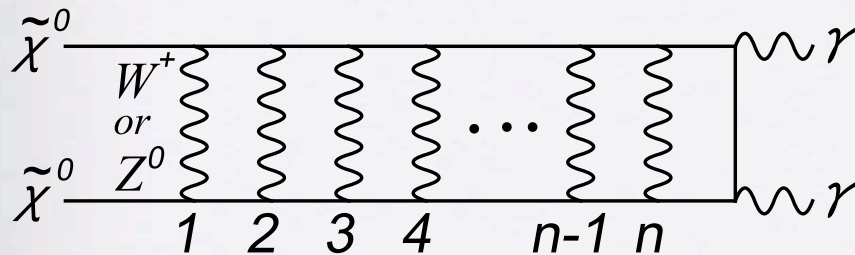
Edgeでもない discovery は無理。

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

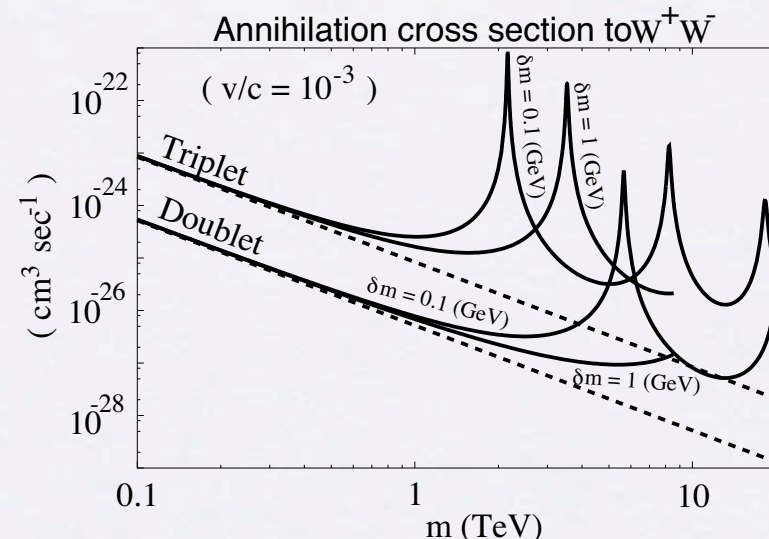
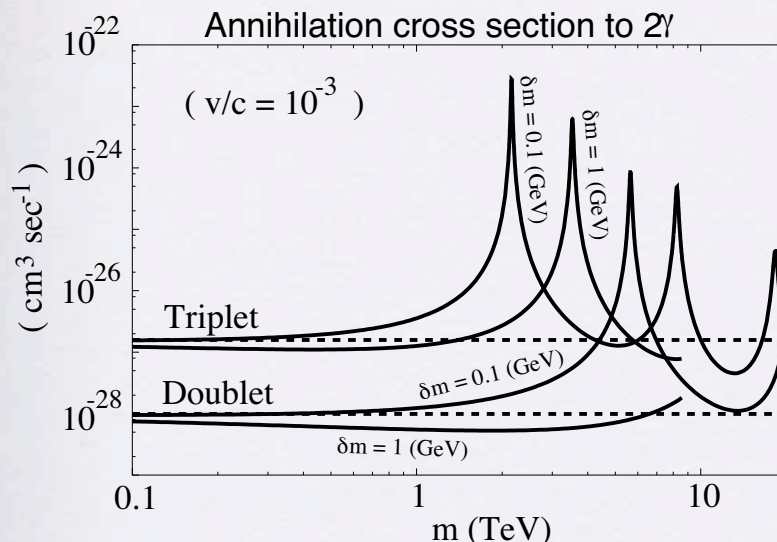
温度が低いと対消滅が爆発的に
増える場合もある。



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

$$A_n \propto \frac{2m}{m_W}^n$$

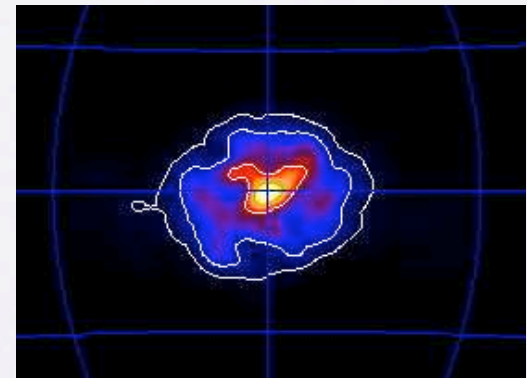
$$v \propto \frac{2m_W}{m_{DM}}$$



Hisano et al hep-ph/0412403

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 \rightarrow 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。

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

- Rate から対消滅確率あるいは、DMの崩壊確率を推定。

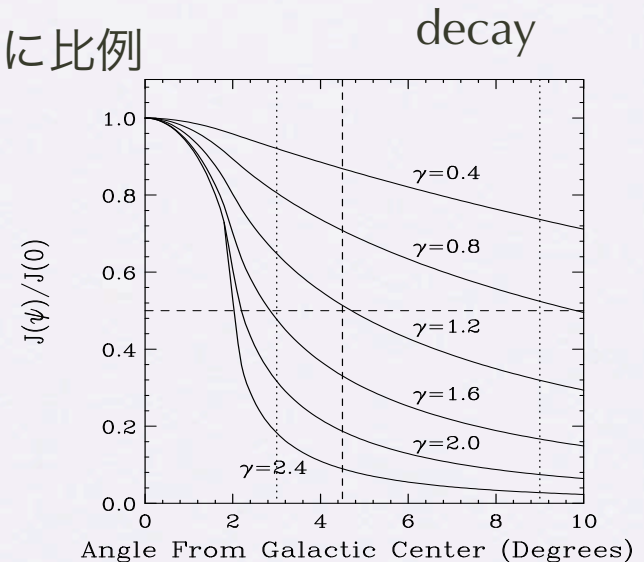
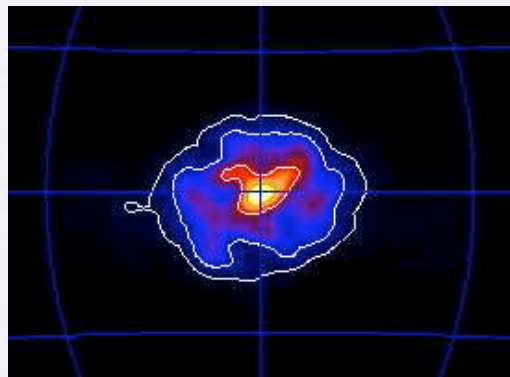
$$\bullet \text{ DM 対消滅 } \gamma=0.4-0.8 \quad \frac{v}{\text{pb}} = \frac{1 \text{ M eV}^2}{m_{\text{DM}}} J^{-1} \approx 0.003.$$

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

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

$$\tau_{\text{DM}} \approx 4 \times 10^{26} \text{ sec} / m_{\text{DM}} (M \text{ eV})$$

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

$$\frac{\nu}{\text{pb}} = \frac{1 \text{ MeV}}{m_{\text{DM}}}^2 \bar{J} = 0.003.$$

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

0.1 ~ 1 pb for 100 MeV

P wave

U $e^+ e^-$

熱生成を仮定して暗黒物質密度から

$$\nu = 0.2 \sqrt{\frac{x_F}{g}} \frac{m_{\text{DM}}^2 h^2}{0.11}^{-1} \text{ pb}$$

$x_F = 12-19$

スカラー-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

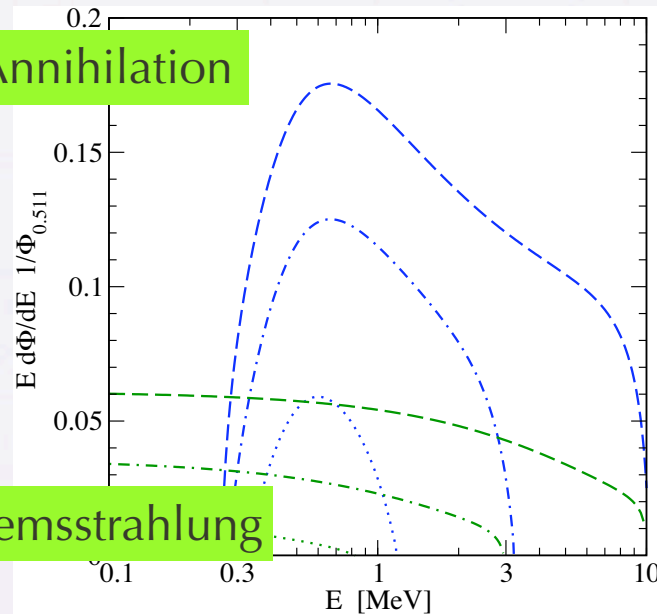
$$= 3 \cdot 4_{-1.7}^{+3.1} \times 10^{-4} \text{ to } 1 \cdot 6_{-0.8}^{+1.5} \times 10^{-4} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

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

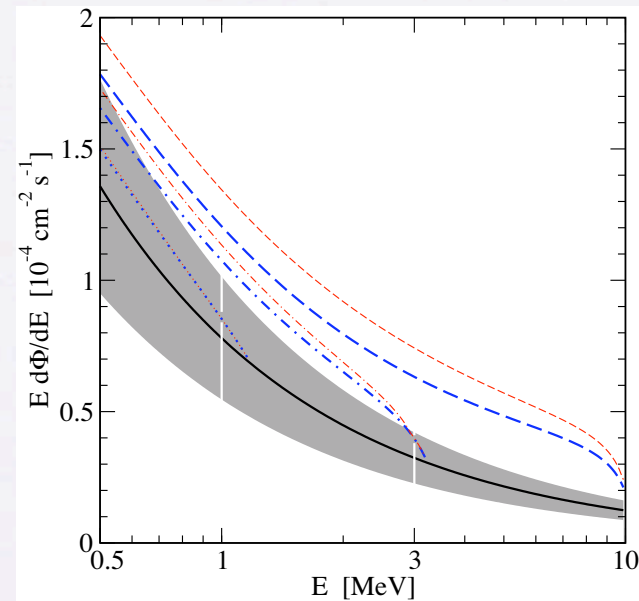
スペクトルも大事かもしれない。

Beacom et al astro-ph/0512411

In-flight Annihilation



Internal Bremsstrahlung



- 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。