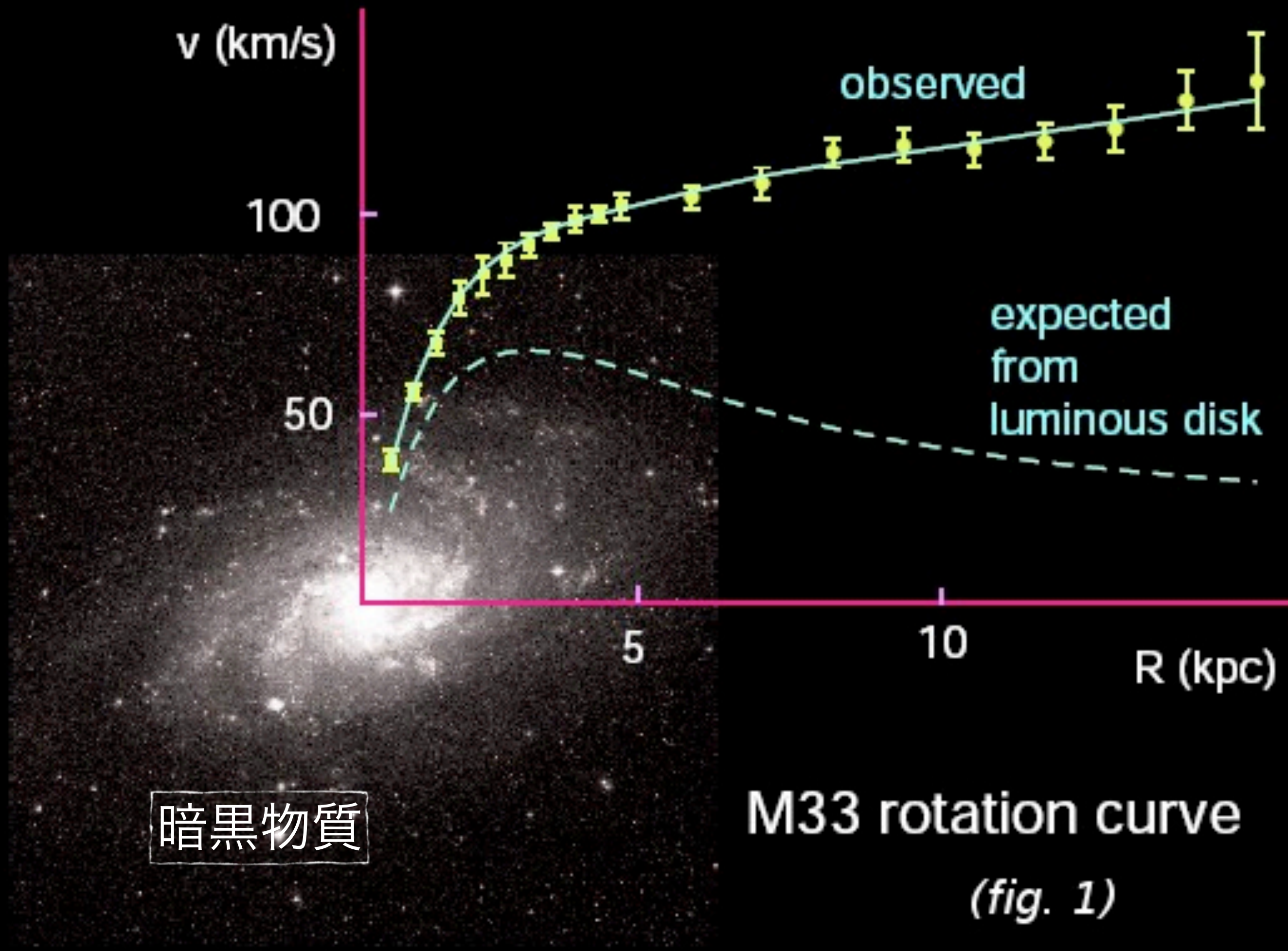


# 素粒子論とDM

野尻美保子

(KEK,IPMU)







# DM evidence

2007



2006

- 銀河団が衝突し、衝突した場所で X線を出していても物質は大半通りぬけている。
- バリオン分布と物質分布が違うことを証明。
- DM は相互作用の弱い素粒子

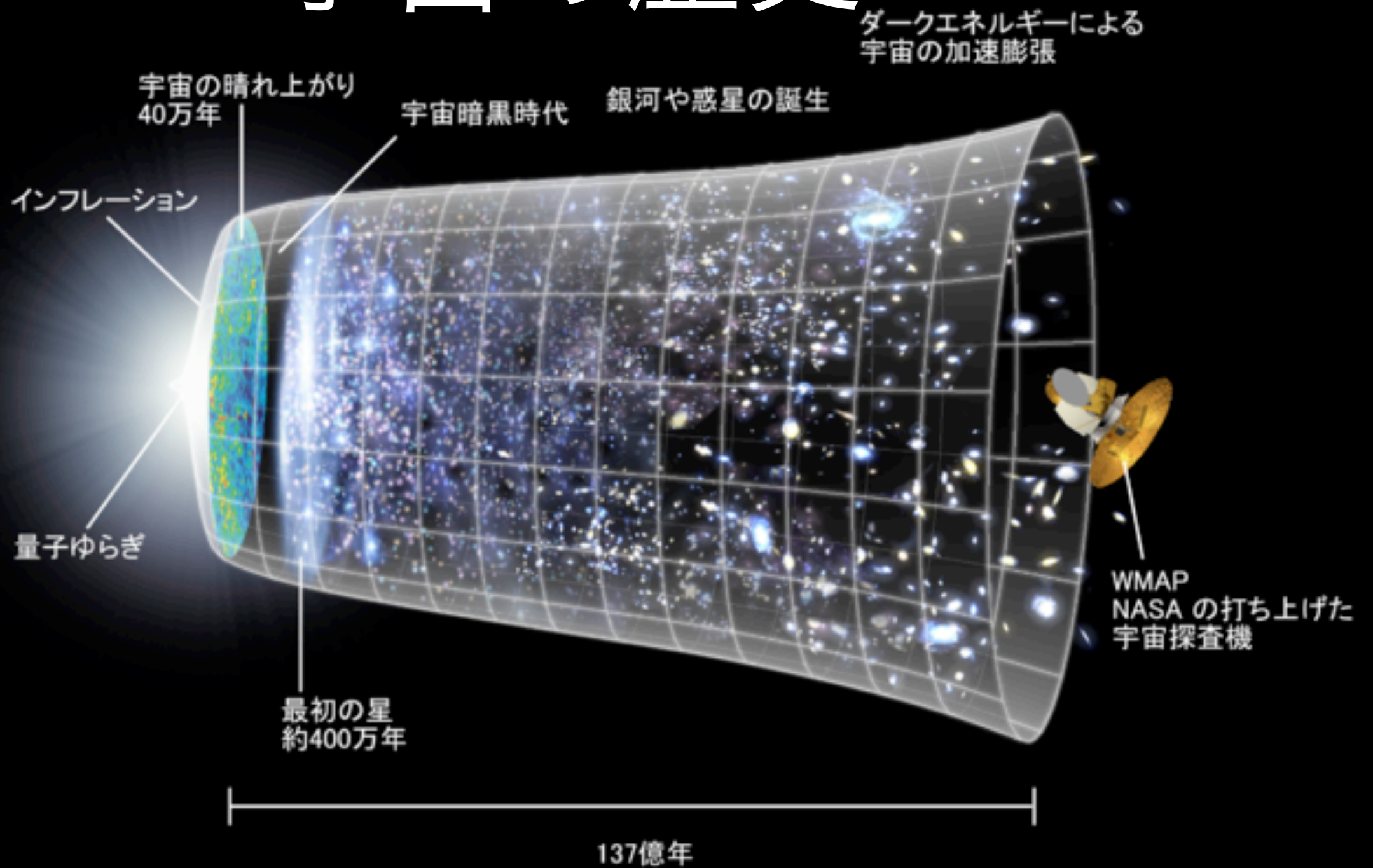


# なぜ

- どうして素粒子がDMなんだろう？
- どうして見えないんだろう？
- しょっちゅう新しいDM候補がでてくるみたいだけど、こないだのとどこが違うの？
- 最近。。。。って聞かなくなったけど、否定されたの？
- で、結局どれがいいの？どうやったらわかるの？



# 宇宙の歴史





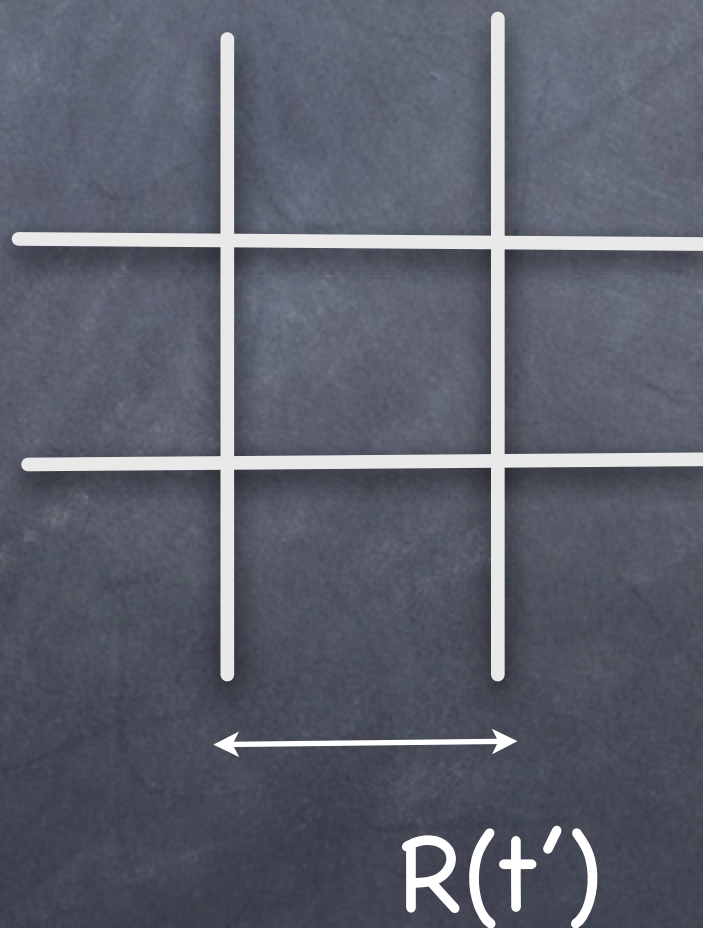
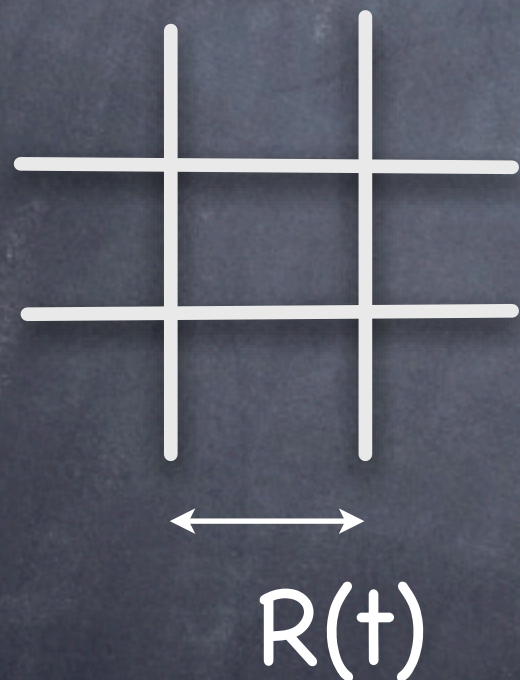
standard な  
dark matter生成



# 宇宙の始め

- 宇宙にエネルギーがあると、空間はどんどん膨張する。

$$H^2 = \left( \frac{\dot{R}}{R} \right)^2 \propto \frac{8\pi G}{3} \rho$$



$R$ が大

- 1) 温度が下がる
- 2) 粒子が薄まる



# インフレーション後

- 爆発的膨張  $H \sim \text{constant}$
- 宇宙の中の粒子の数は一旦0リセット
- 再加熱後 (温度  $T_R$ ) の宇宙はradiation 優勢
- 物質側は熱力学で記述される。(ボルツマン方程式)
- つまり現在の宇宙にどんな素粒子が、どの程度いるかということは、素粒子の性質や数がわかれば記述することができる。

$$\begin{aligned} \dot{n}_i + 3Hn_i &= \int d(\text{PS}) |M(i, j \rightarrow a, b \dots)|^2 (f_i f_j \dots - f_a f_b \dots) \\ &\rightarrow -\langle \sigma v \rangle (n_i n_i - n_{eq}^2) \end{aligned}$$



# 素粒子論は初期宇宙の 「物質側」を全部説明（するはず）

- バリオン数 （CPの破れはどこに。新しい相互作用が必要）  $n_B/n_\gamma$
- 暗黒物質 （安定粒子探し）
- 元素合成（ほぼ解決済み）



# ボルツマン方程式

- 温度と密度と時間  $\rho \propto T^4$   $H \propto T^2$   $t \propto T^{-2}$
- 温度が下がる。重たい粒子は相互作用が強ければ即座に退場。  $\rho \propto n_{\text{light}}$   $n_{\text{heavy}} \sim 0$
- chemical potential がある粒子（保存量がある粒子）はいつまでも残っているが、インフレーションでほとんど0になったはず。



# decoupling

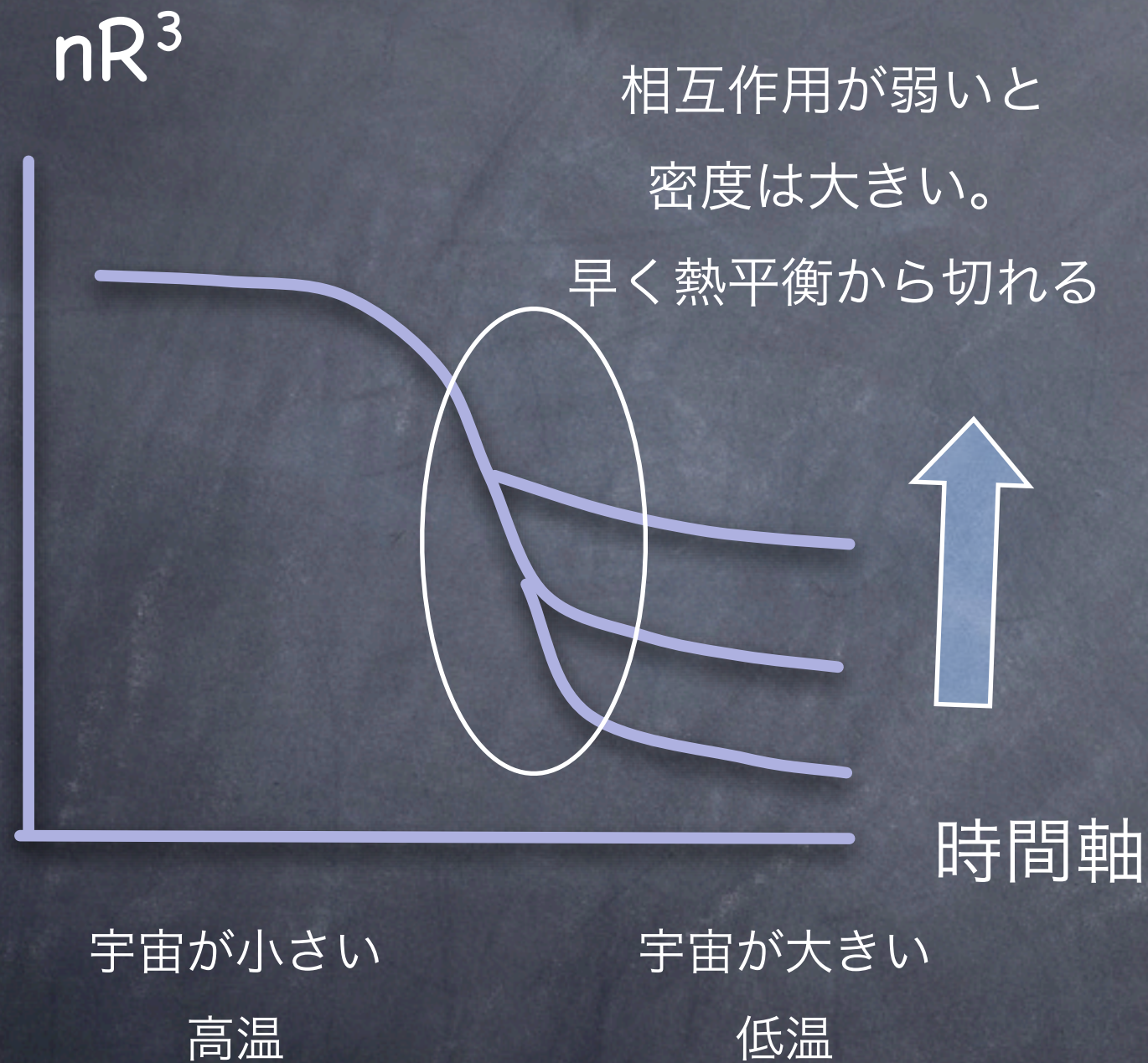
$$H \gg \sigma v n_X \quad \text{at very small } T$$

$$H \propto T^2, n \propto T^3 \quad \text{or} \quad e^{-T/m}$$

- At very low energy scale, the effect of pair annihilation can be ignored completely.
- Number density in the comoving volume is preserved.  $n \propto 1/\sigma v$  (at decoupling)
- Note if Universe does not expand, all heavy particles disappear



# 物質数の“固定”



- Dark matter が他の粒子より重いと、温度が下がったとき、実質的に粒子Xが2度と粒子Xに出合えない時がくる。→消え残りが今宇宙にあるdark matter.
- 対消滅確率が高いほど、暗黒物質は長く熱平衡にとどまって数が少なくなっていく。
- 対消滅確率がわかれば暗黒物質密度は計算できる。

$\sigma$  ( $v^2/c \sim 1/20$ ) の値の情報



# relic density

- 宇宙膨張と粒子相互作用の綱引き
- 相互作用の弱い粒子ほど宇宙にたくさん残っている。(strongly interacting dark matter はX)
- 相互作用が強い粒子ほど、宇宙に残れる数は少ない。
- 粒子、反粒子の数は同じ（宇宙に今ある核子、電子はこれだけでは作れない。



# DM の性質

- 光を出さない→電荷を持たない
- 強い相互作用はしない。（重い原子核を作るので）
- 安定（陽子、電子などのように）あるいは、寿命は宇宙年齢より長い。



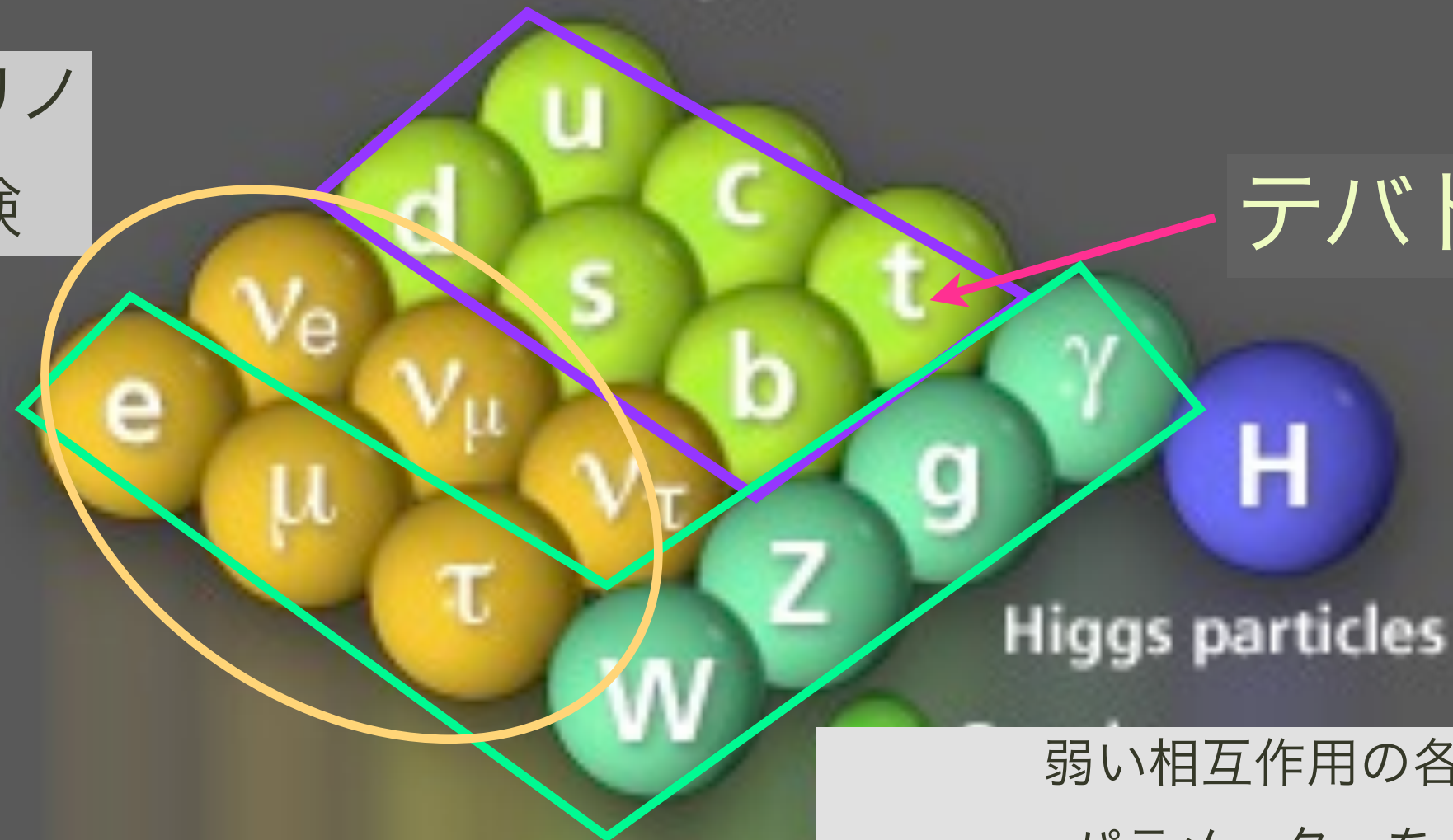
# 知られている素粒子

Normal elementary particles

ニュートリノ  
振動実験

テバトロン

未発見



Higgs particles

LEP実験

弱い相互作用の各種  
パラメーターを  
0.001% の精度で測定。virtual 粒子の  
効果までわかる。

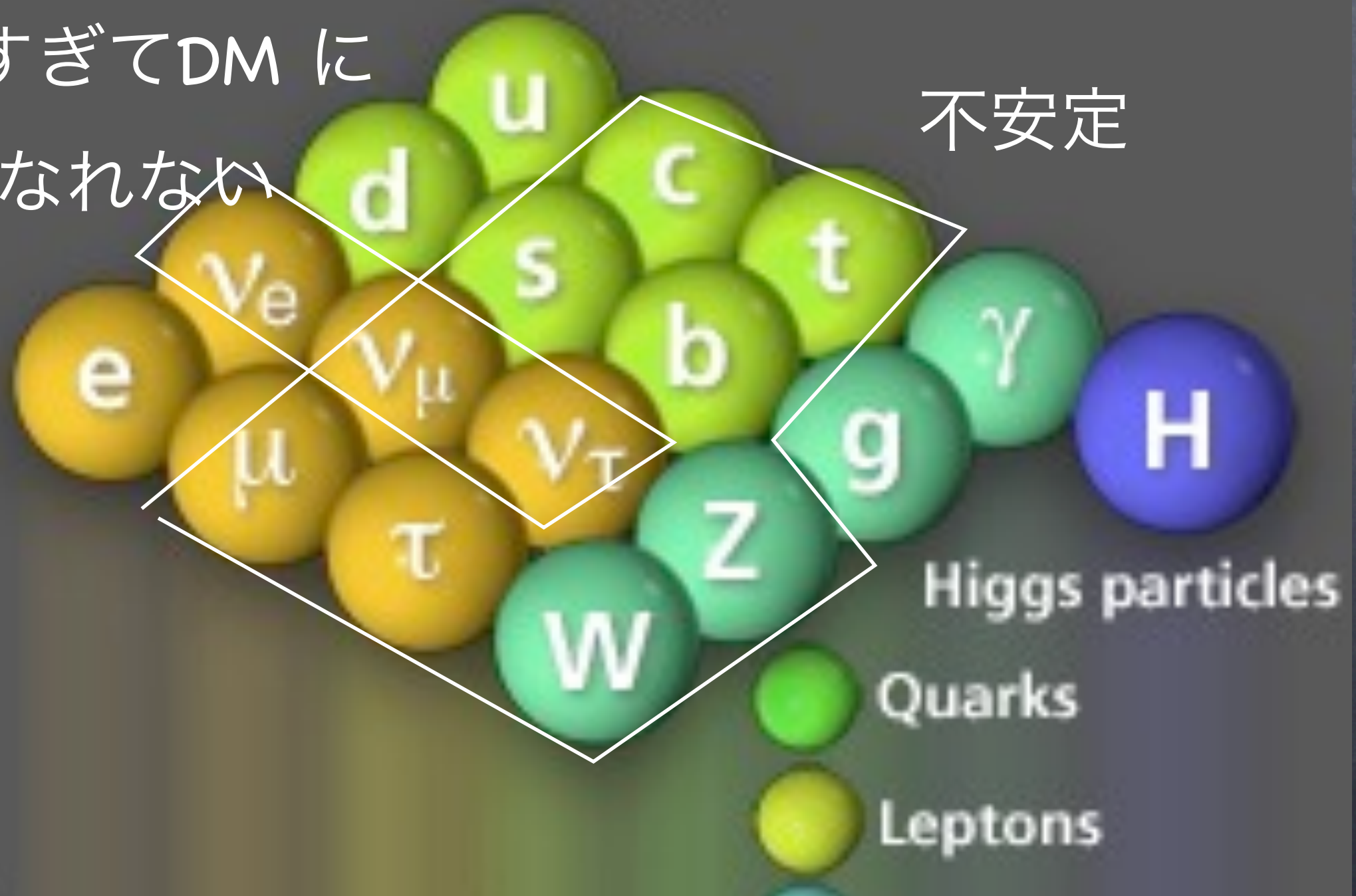


# 素粒子は基本的に不安定

Normal elementary particles

軽すぎてDMに  
なれない

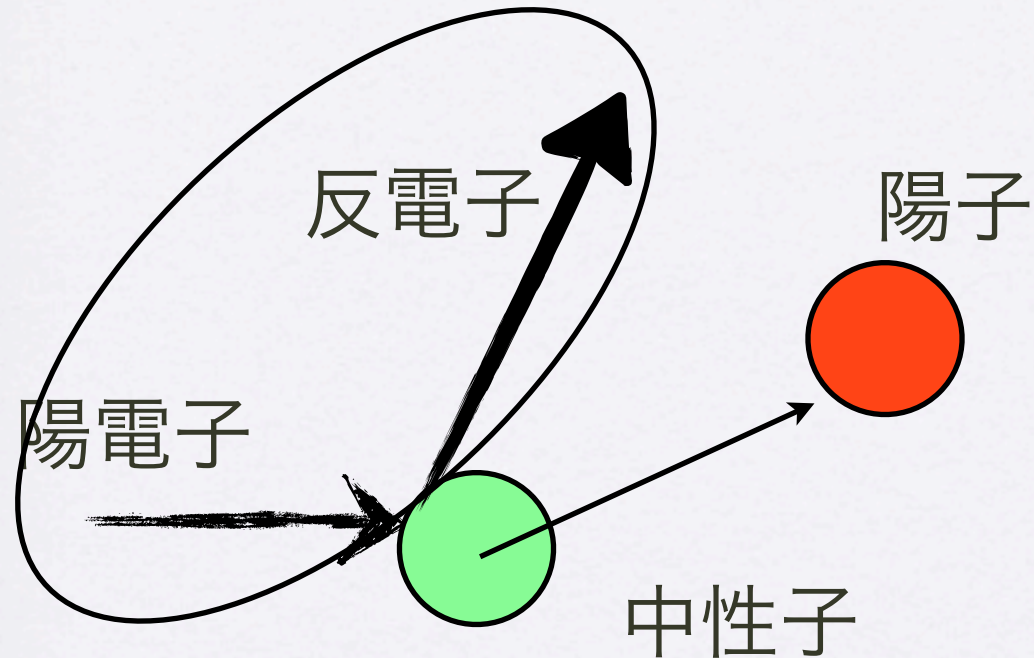
不安定



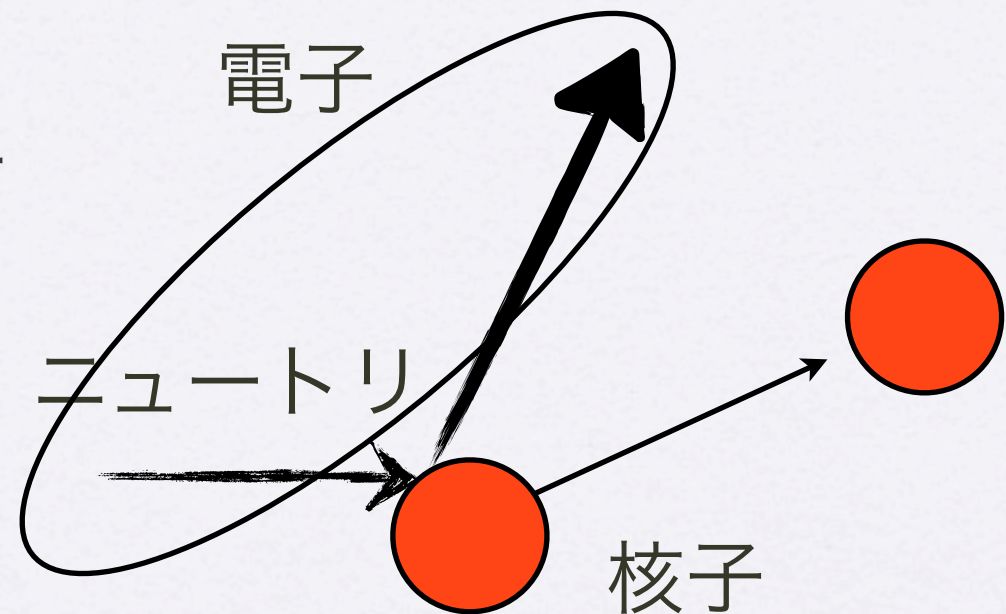


# 弱い相互作用

荷電カレント (W粒子)



中性カレント (Z 粒子)



- 弱い相互作用の Lagrangian

$$L = (\bar{u}_i, \bar{d}_i) \gamma_\mu g T^a W^{a\mu} \begin{pmatrix} u_i \\ d_i \end{pmatrix}_L + (\nu_i, e_i) \gamma_\mu g T^a W^{a\mu} \begin{pmatrix} \nu_i \\ e_i \end{pmatrix}_L$$

$$\rightarrow G_F (\bar{p} \gamma_\mu n_L) (\bar{e} \gamma^\mu \nu)_L$$

- 湯川相互作用が世代を保存していない。

$$L = y_{ji} H u_{Rj} \begin{pmatrix} u_i \\ d_i \end{pmatrix}_L + \dots$$

$$\rightarrow m_{ji} \bar{u}_{Rj} u_{Li} + \dots$$

- charged current で弱い相互作用をする粒子は全部崩壊してしまう。



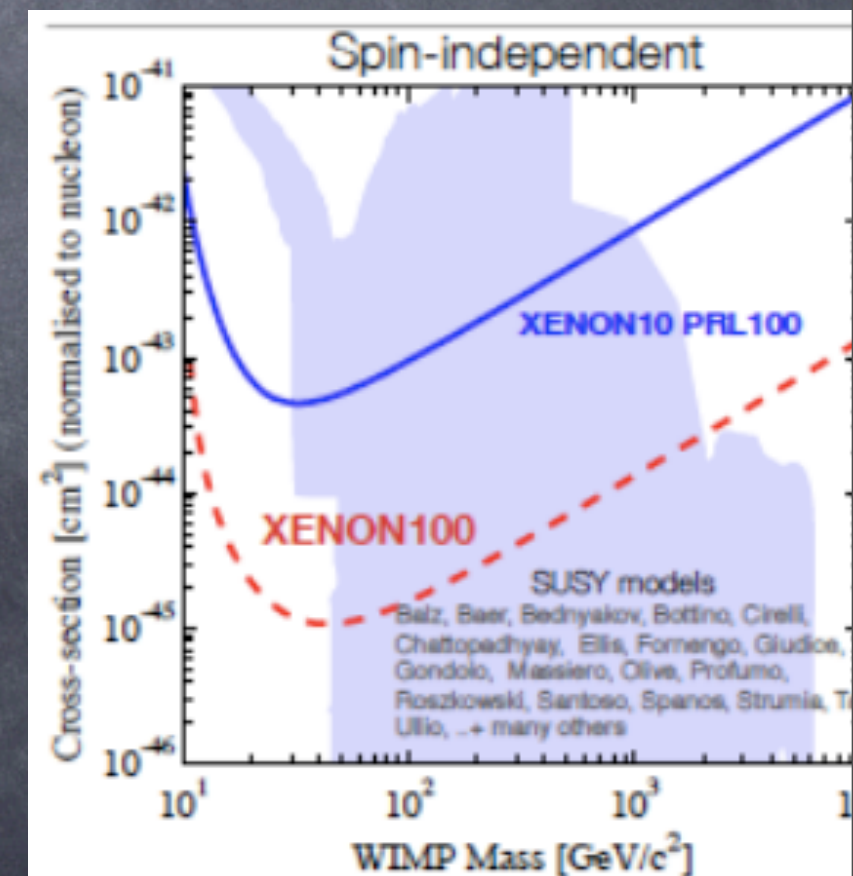
# なぜ暗黒物質は安定か

- 素粒子は一部の例外を除いて壊れる
- 電子 陽子（と中性子） 光は安定
  - 電子 ー 電荷が保存する（ゲージ対称性）から安定
  - 陽子 ー バリオン数が保存するから安定（素粒子標準モデルのaccidental symmetry）
  - 光、ニュートリノ 質量が小さいから安定
- 暗黒物質 宇宙の始めにつくられて以降そのまま残っている。 背景になにか新しい対称性。



# DM = おばけ粒子

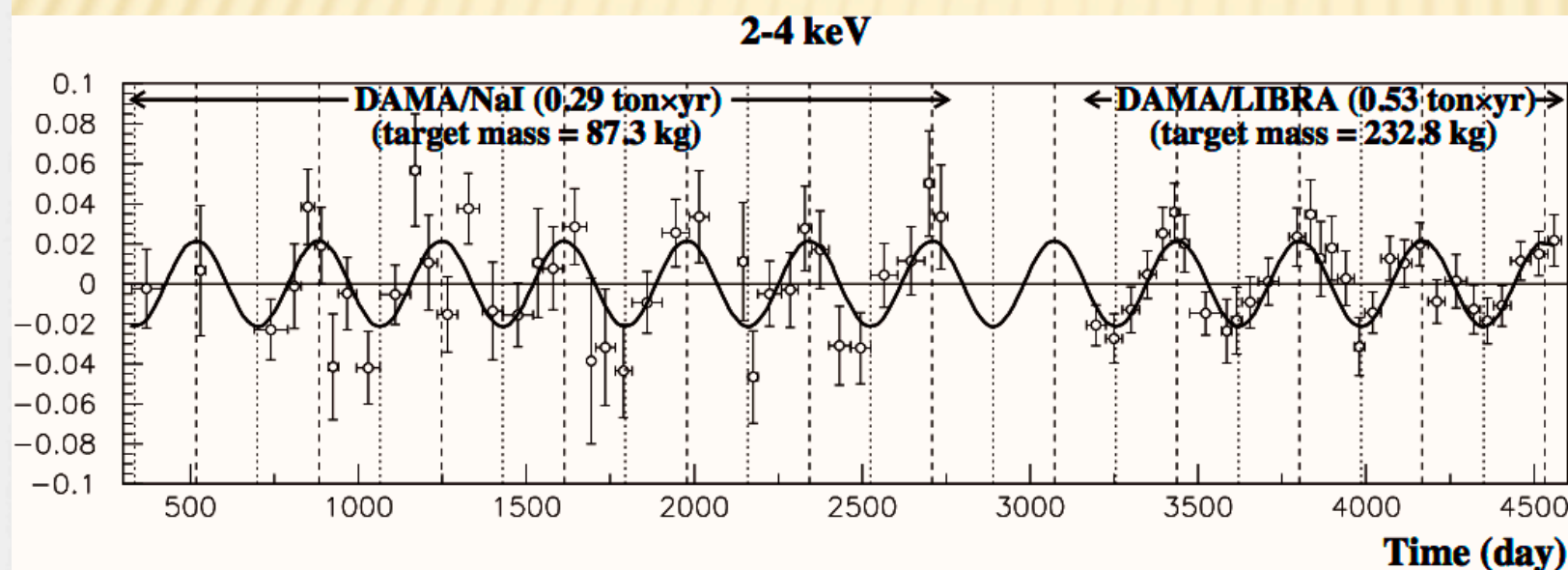
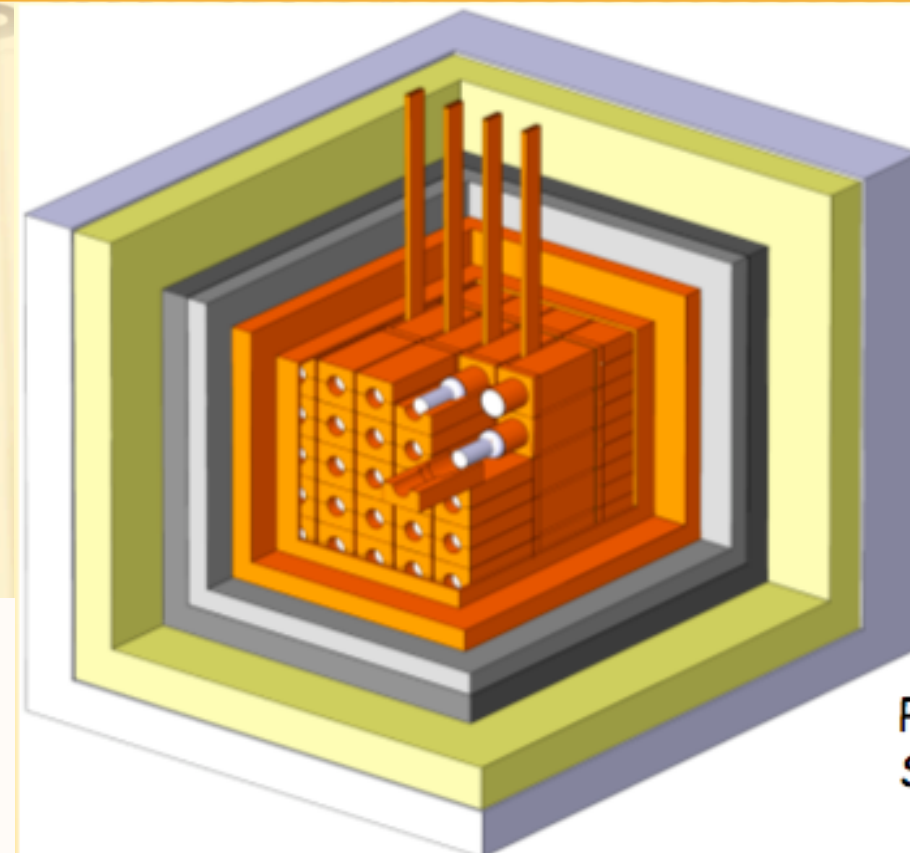
- 我々のまわりの物質の密度はだいたい $1\text{cm}^3$ あたり陽子  $1/3$  個分。 ( $0.3 \text{ GeV} / \text{cm}^3$ )
- DMの速度は  $230\text{Km}/\text{秒}$ くらい。 ( $v/c$ )
- 重たい（仮想的な）ニュートリノと原子核の相互作用は  $\sigma \sim 10^{-36} \text{cm}^2$ 。現在の limit はそれより遥かに小さかった。





# DAMA/LIBRA : modulation still there

- ✗ 25 modules of 9.7 kg
- ✗ 4 years data taking (09/03 to 07/07)
- => 192 000 kg.d = twice DAMA exposure
- ✗ From 6 to  $8.2\sigma$



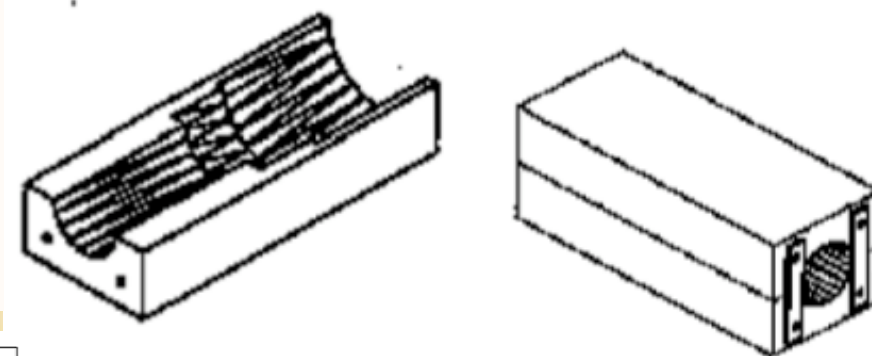
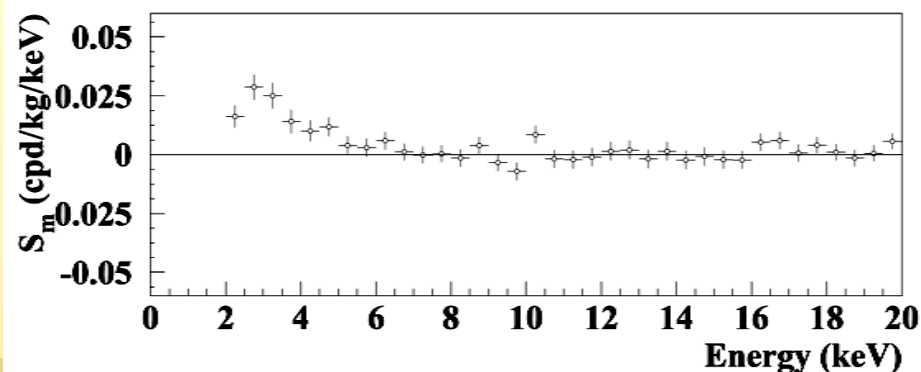
**2-4 keV**

$A = (0.0215 \pm 0.0026)$  cpd/kg/keV

$\chi^2/\text{dof} = 51.9/66$  **8.3  $\sigma$  C.L.**

Absence of modulation? No

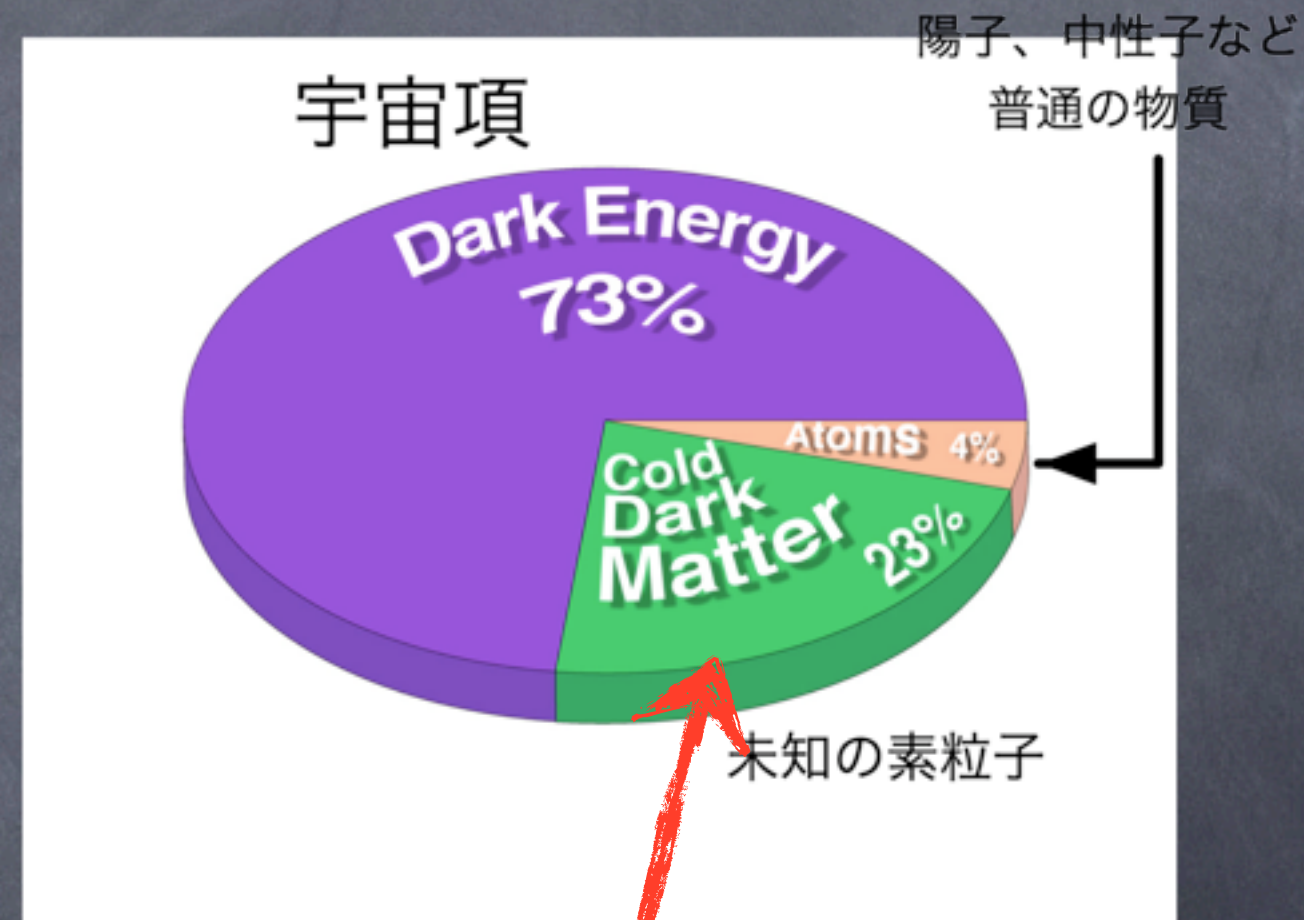
$\chi^2/\text{dof} = 117.7/67 \Rightarrow P(A=0) = 1.3 \times 10^{-4}$





# 役者がたりない

- 素粒子論的には標準模型の粒子ではない新しいタイプの粒子」が存在する。
- 新しいタイプの粒子は新しい対称性を持っている。
- 素粒子論としてこういう対称性が必要な内在的な理由があるだろうか。



ここをほっておいては  
いけない



# 素粒子模型と DM



# 素粒子理論の element

- ゲージ相互作用  $SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)$  + 物質 quark, lepton の存在, chiral な理論 (右巻、左巻きで相互作用が違う)
- Higgs の真空期待値 = ゲージ対称性の破れ
- Higgs と物質との相互作用 = クォークの質量
- 湯川相互作用の階層性  
の湯川結合 > ゲージ相互作用 > それ以外の湯川結合

top

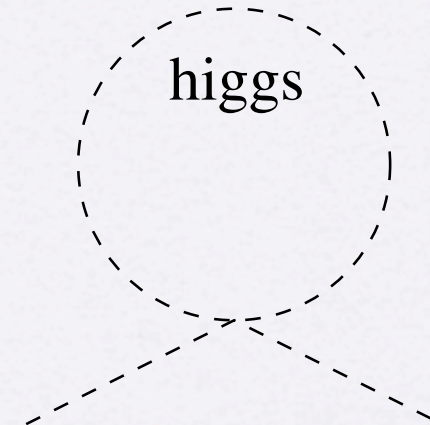
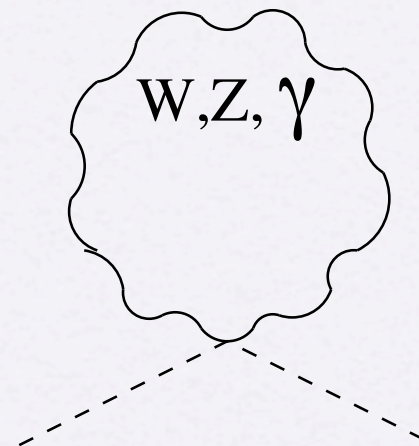
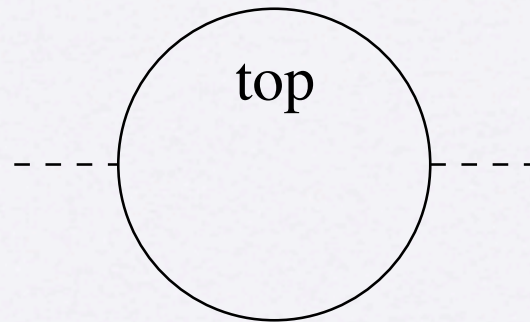


# HIGGS セクターの 2 次発散は

## 素粒子模型の試金石

Higgs sectorの 2 次発散

Why Higgs vev is  $O(200)$  GeV??



top loop

$$-\frac{3}{8\pi^2} \lambda_t^2 \Lambda^2 \sim -(2 \text{ TeV})^2$$

$SU(2)$  gauge boson loops

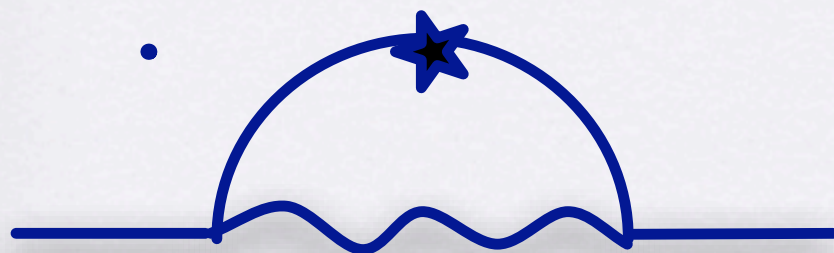
$$\frac{9}{64\pi^2} g^2 \Lambda^2 \sim (700 \text{ GeV})^2$$

Higgs loop

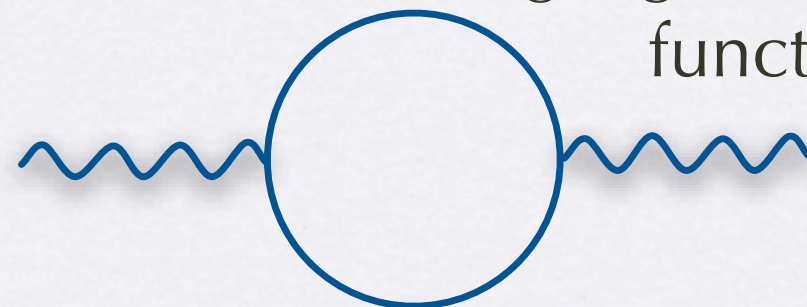
$$\frac{1}{16\pi^2} \lambda^2 \Lambda^2 \sim (500 \text{ GeV})^2.$$

他はまあまし。

$m_f \log \Lambda$  fermion mass



gauge two point function



$$\Pi_{\mu\nu} = (g_{\mu\nu} p^2 - p_\mu p_\nu) \Pi$$

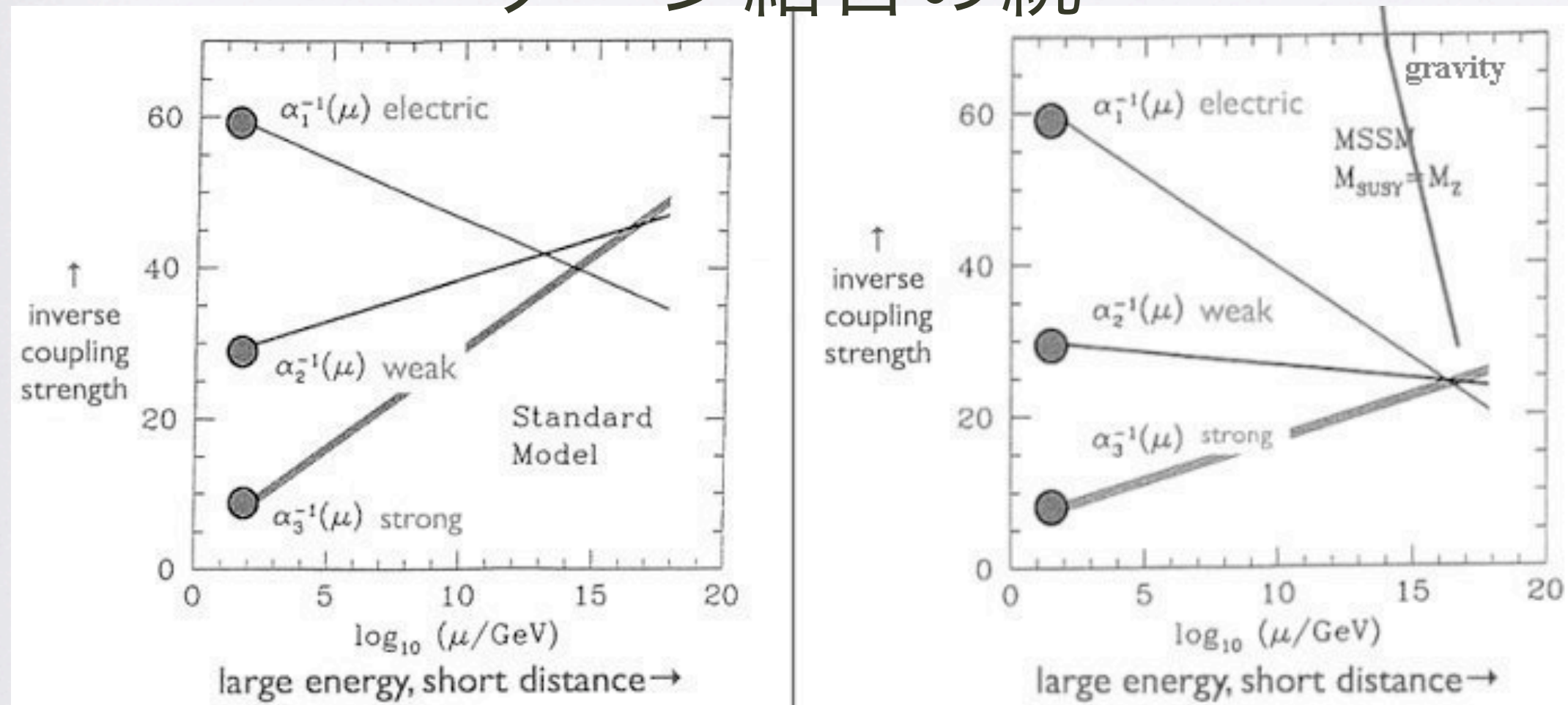


## 2次発散を回避するには

- 理論を超対称にする。 boson $\rightleftharpoons$ fermion 発散の構造は同じ。
$$\Phi = \phi + \theta\psi$$
- 1TeV より高い素粒子理論に global 対称性をいれて、自発的に破る $\rightarrow$  mass less 粒子（対称性で  $m=0$  が補償される。）
- 高次元空間のゲージ粒子にする。



# ゲージ結合の統一



- 超対称模型で予言される粒子が存在すれば、gauge 相互作用の大きさは GUT スケールで等しくなる。
- 標準模型のmatter content は大きな群(SU(5) など) の表現とあっている。



# パリティ構造と安定性（混ぜるな危険）

R=1

R=-1

禁止

危険な 混合を禁止

OK

一般的に  $1/4\pi^2$

素粒子実験によってすでにたくさん制限がある。

禁止

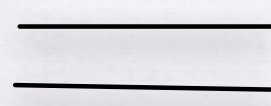
一番軽いR=-1の粒子  
は安定 (DM)

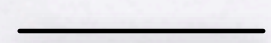


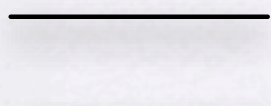
# Beyond the standard model とパリティ

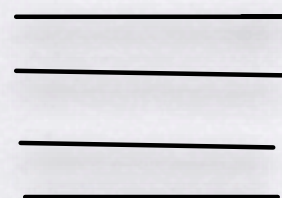
超対称模型

Little Higgs 模型

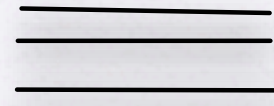

 $\tilde{g}$   
 $\tilde{q}$

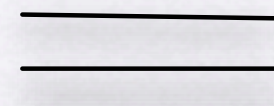

 $\widetilde{W}$


 $\tilde{l}$   
 $\tilde{B}$


 標準模型

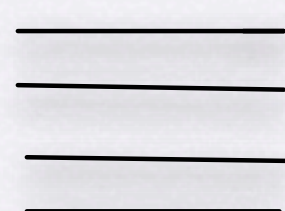
UED


 $n(KK)=2$


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

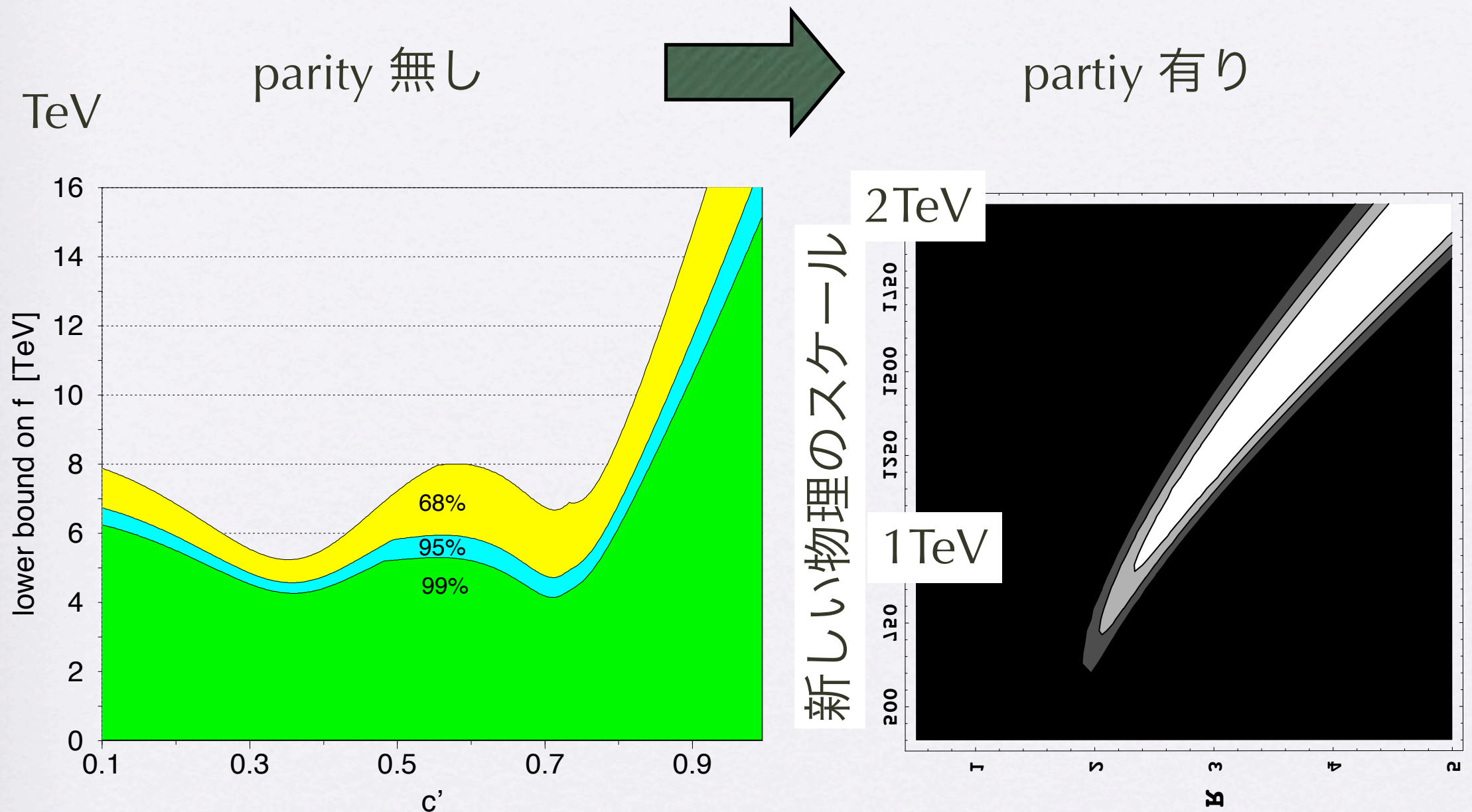
$n(KK)=1$  の粒子のなかで

一番軽いものが安定





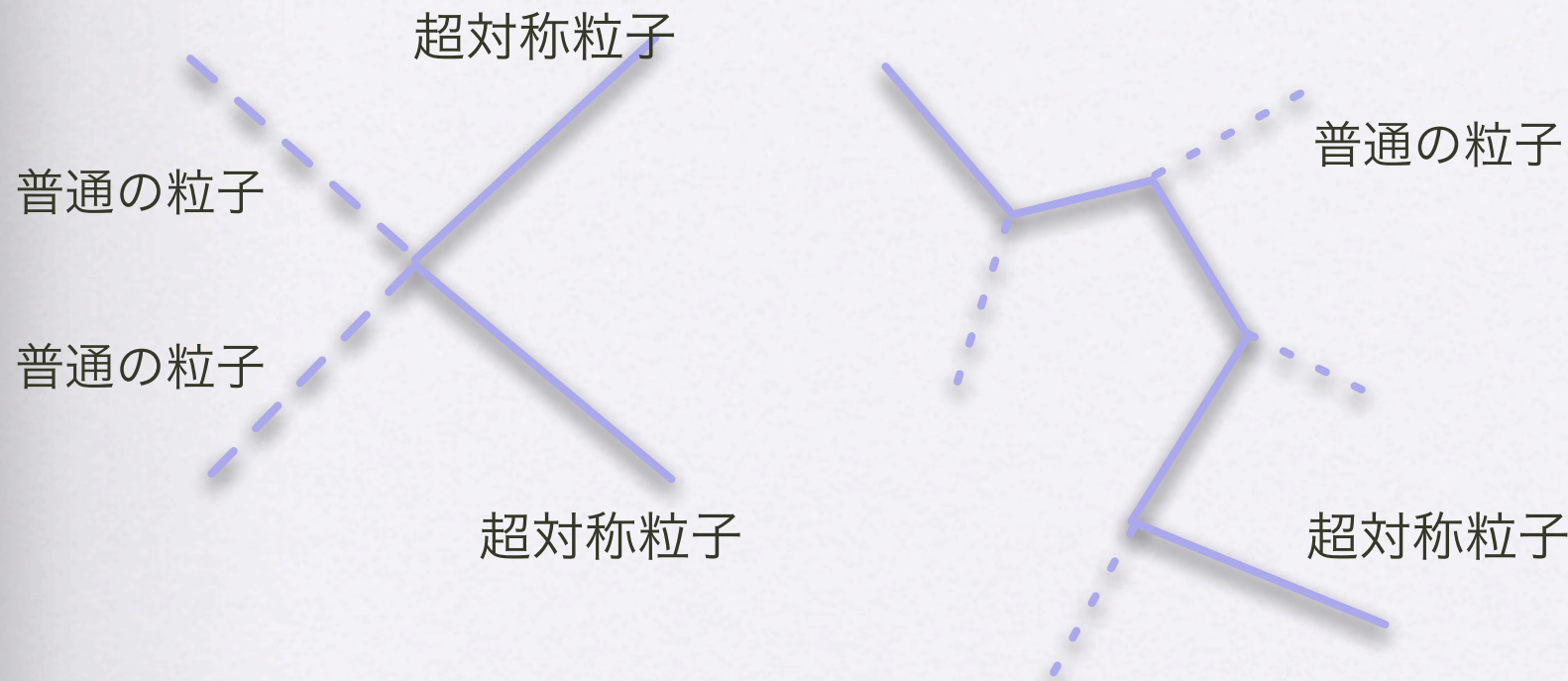
# LEP 実験の制限



Parity のない理論で、新しい物理のスケールを 1TeV 周辺  
にもってくるのは無理

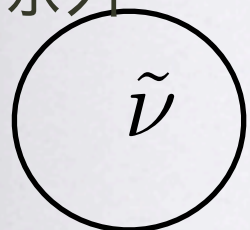


# 超対称模型のDM



- 標準模型の粒子の種類と同じだけ超対称粒子がある。
- 暗黒物質の候補

除外

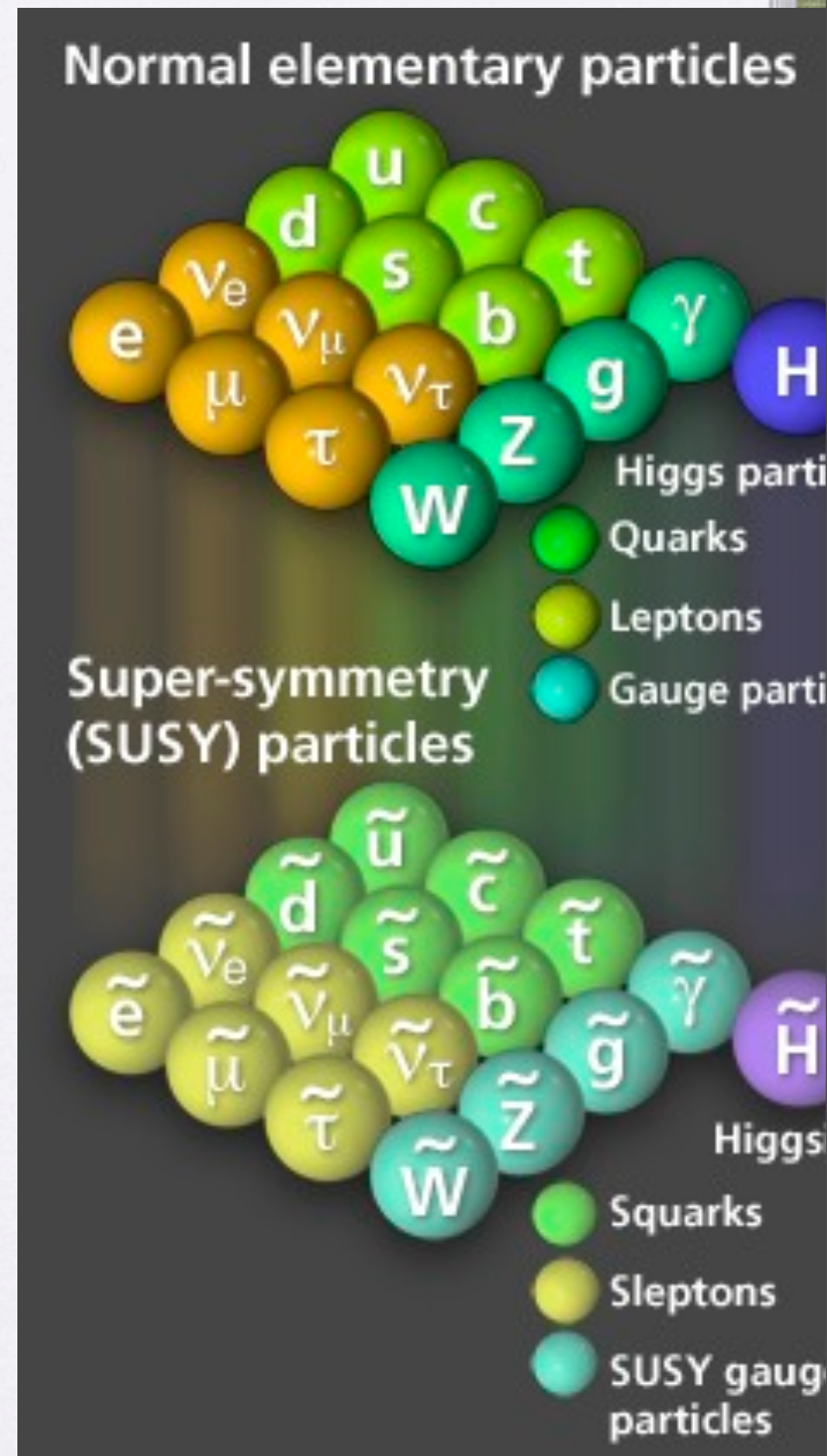


ゲージヒグスのパートナー

$$\circ \tilde{Z} + \circ \tilde{\gamma} + \circ \tilde{H}$$

$$\tilde{\psi}_{3/2}$$

重力相  
相互作用





# 超対称粒子のDM はなぜみつかっていないのか。

- 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。

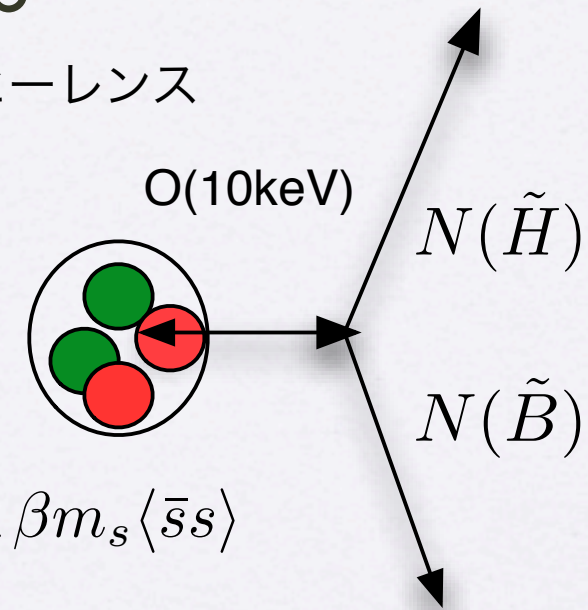
コヒーレンス

- Neutralino の相互作用は ヒッグス交換。

- 核子とHiggs の結合はゲージ結合の。。。  $\tan \beta m_s \langle \bar{s}s \rangle$

$\tan \beta m_s \langle \bar{s}s \rangle$

- 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。（最近lattice の計算でさらに少ない可能性が指摘されてる。）



$$\chi = N_{\tilde{B}} \tilde{B} + N_{\tilde{W}} \tilde{W} + N_{\tilde{H}_1} \tilde{H}_1 + N_{\tilde{H}_2} \tilde{H}_2$$

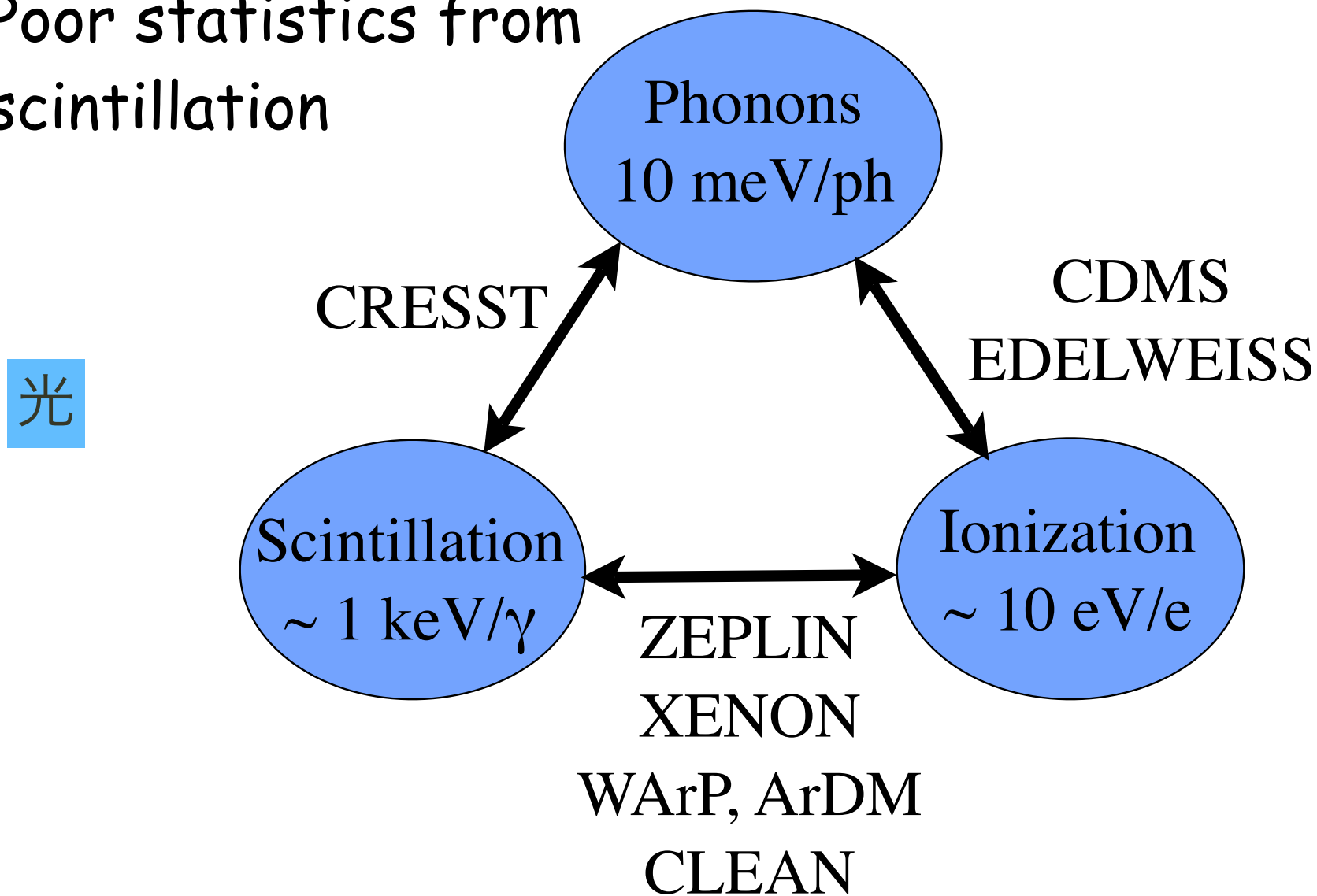
- スピン依存の相互作用は数桁大きい。

- 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。）



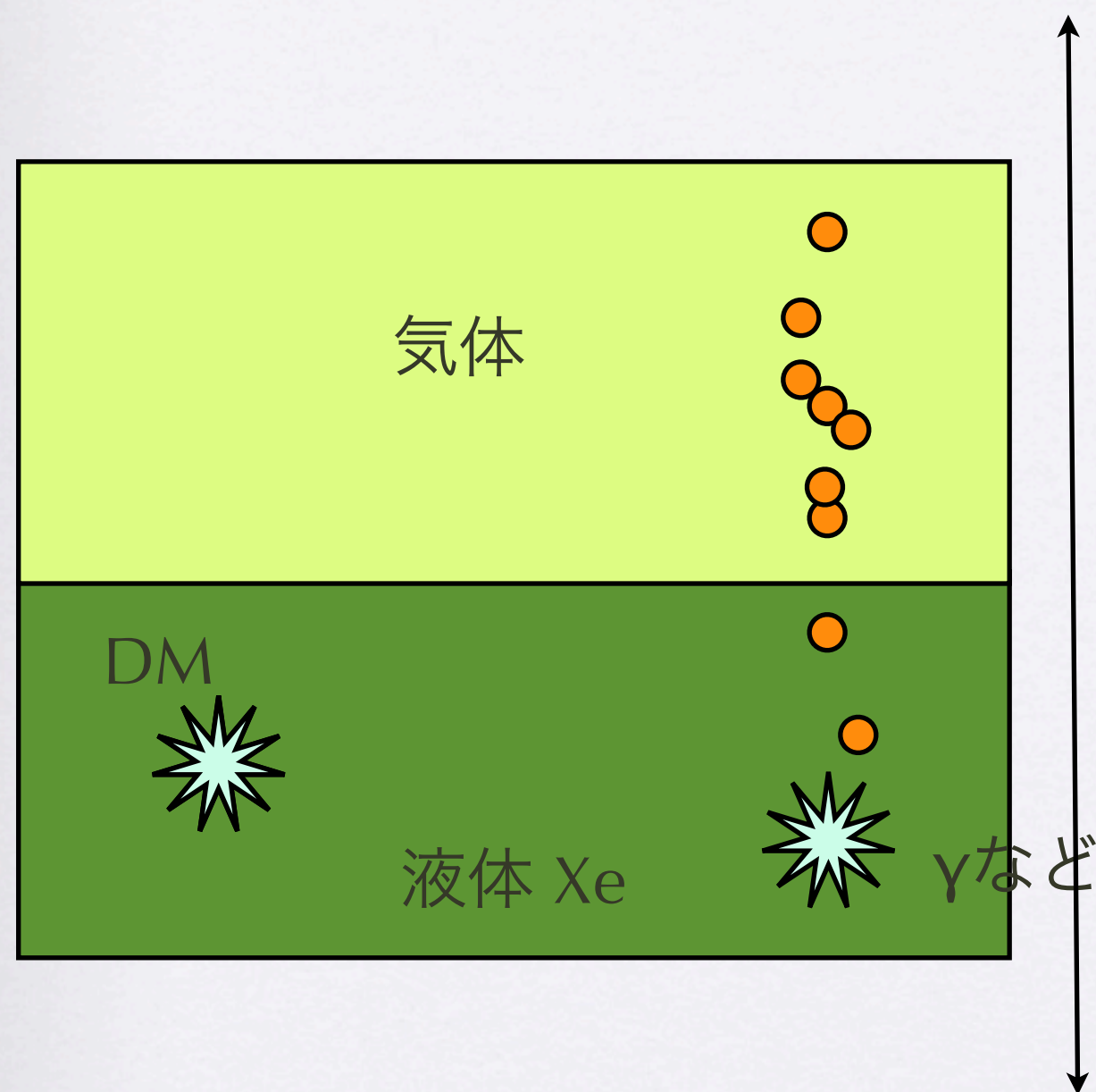
# Discrimination strategies

- Most particle physics experience in MeV range
- Direct detection requires keV scale
- Poor statistics from scintillation





# Xenon10



- シンチレーション光と電荷を同時に計る
- 10 Kgの Xe で感度を5倍あげた。

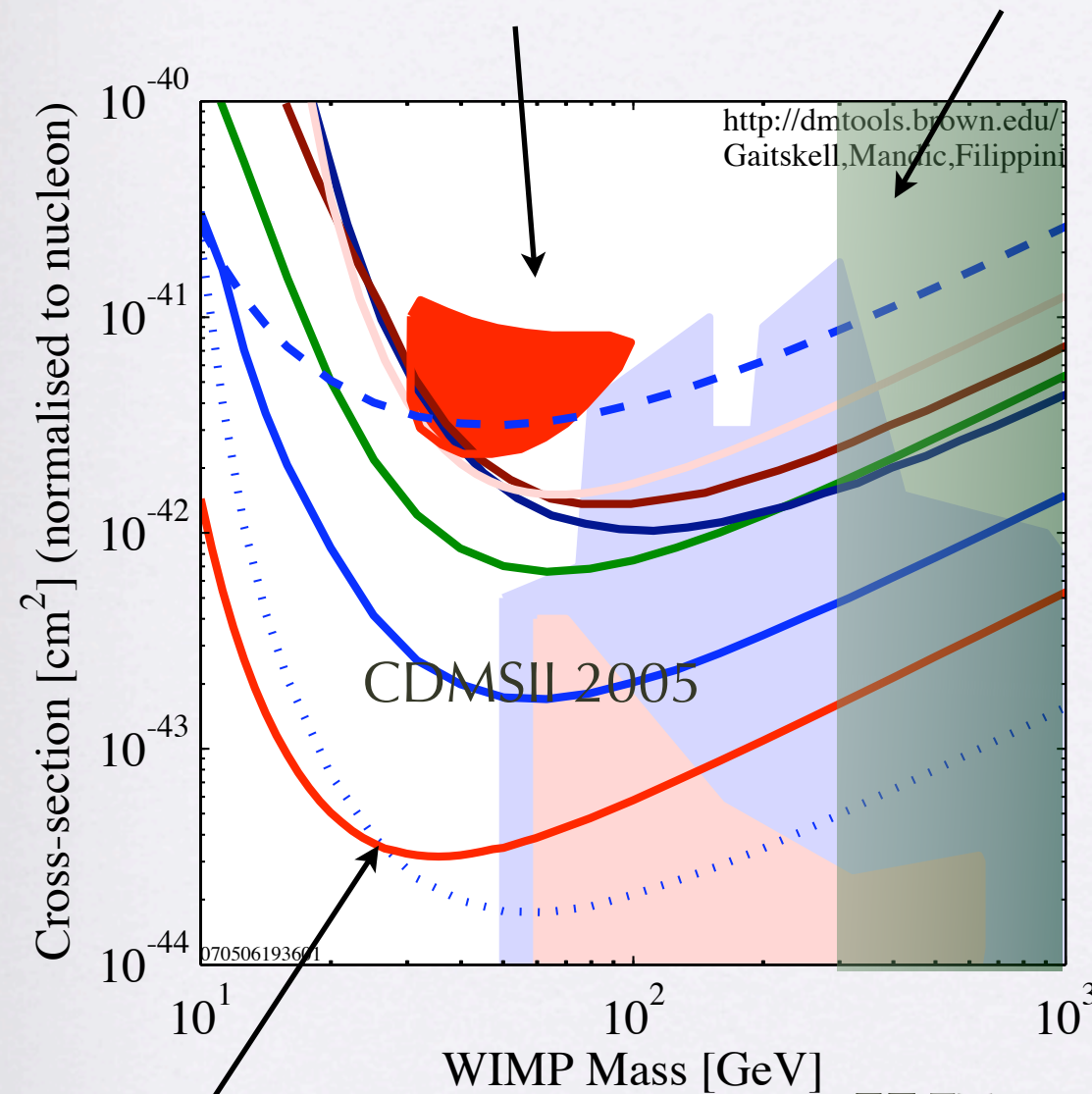


# DMの直接探索

- 2000年  $10^{-41} \text{ cm}^2$  レベル

LHCでアクセス

DAMA2000 不可能(MSUGRA) ● 2005年  $10^{-43} \text{ cm}^2$  レベル



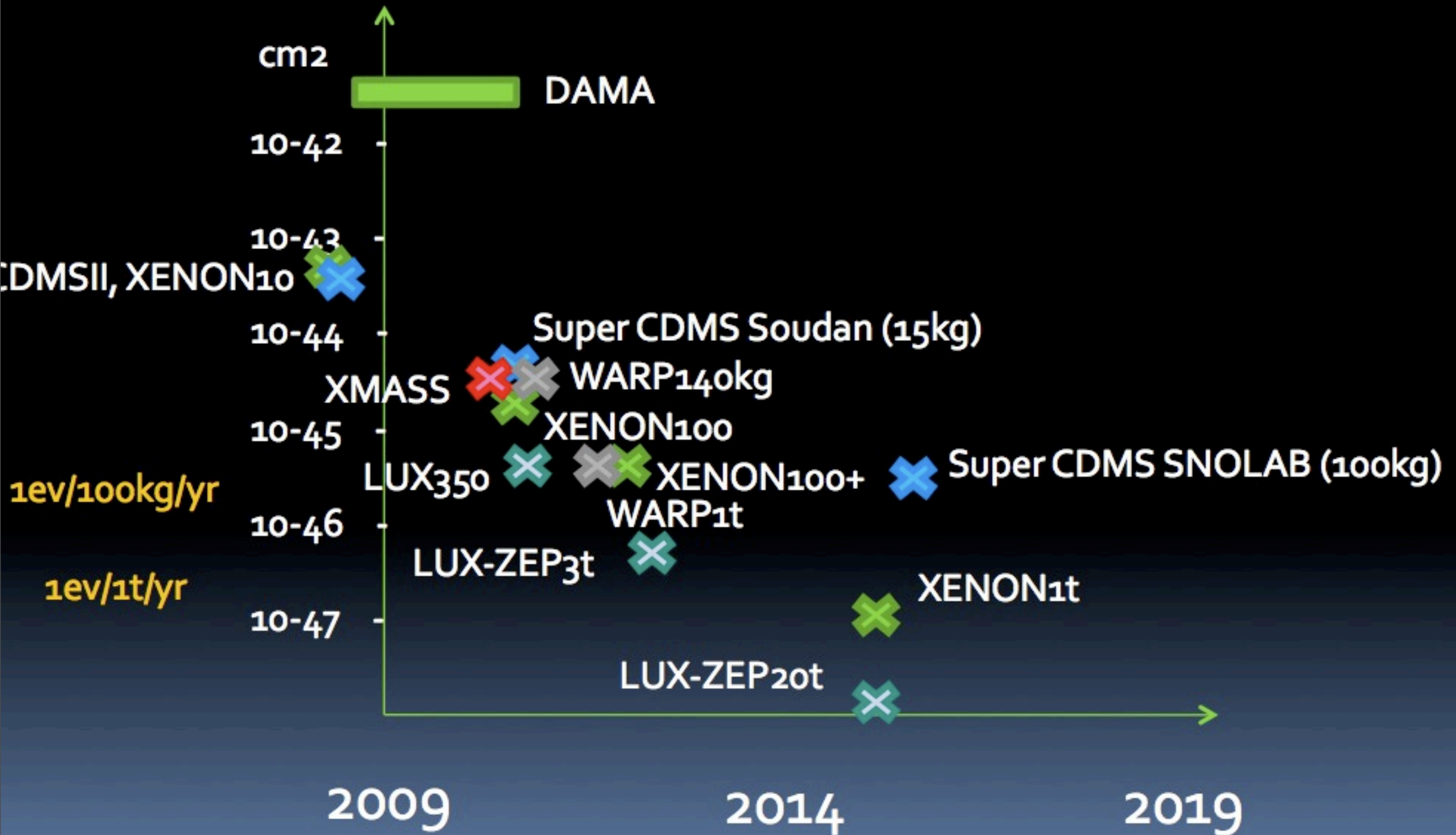
Xenon10 (April 2007)

問題

10個あたりには何のくらいの物質を用意すればいいでしょう。

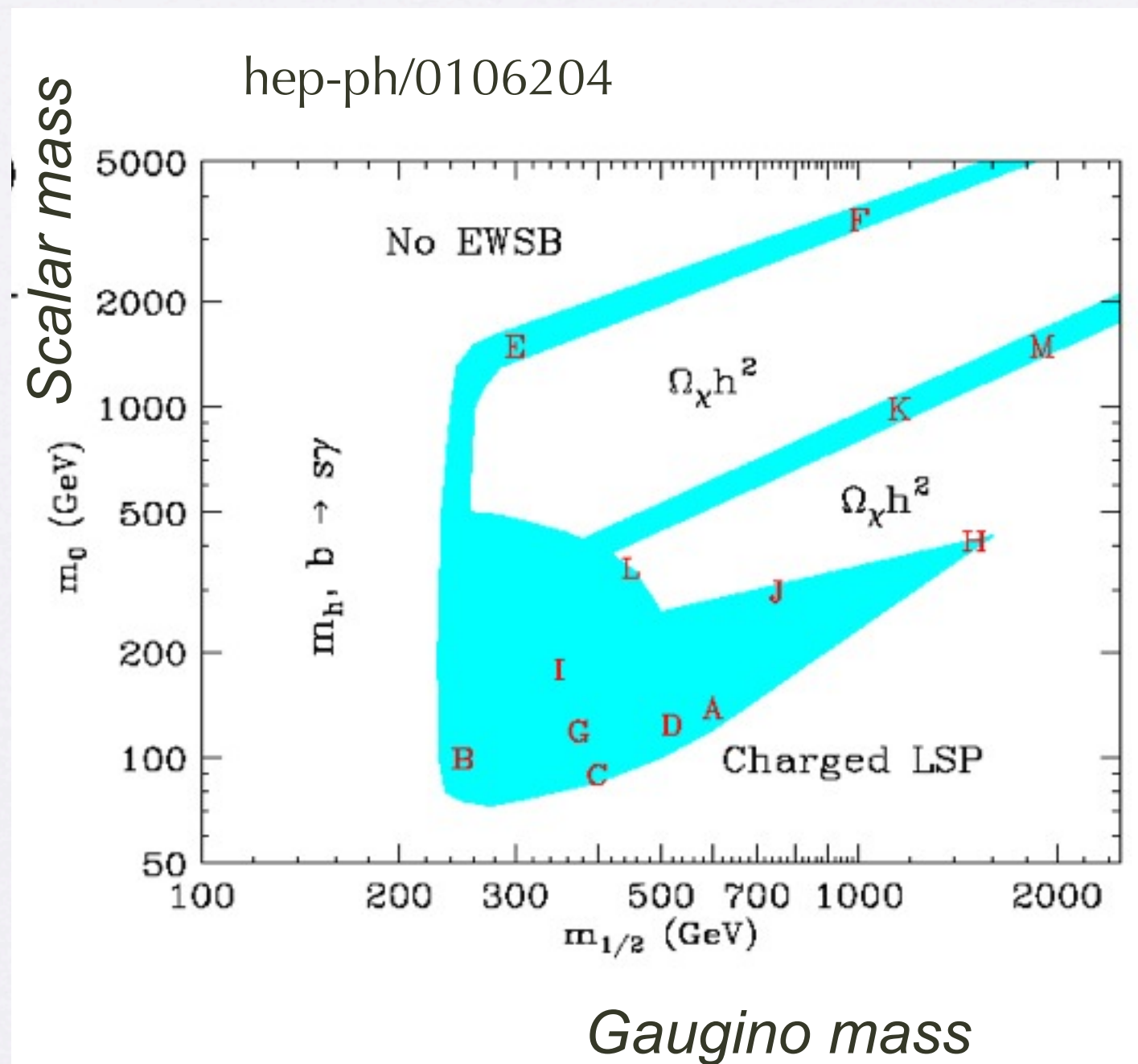


# 感度向上「計画」





# DM density constraint



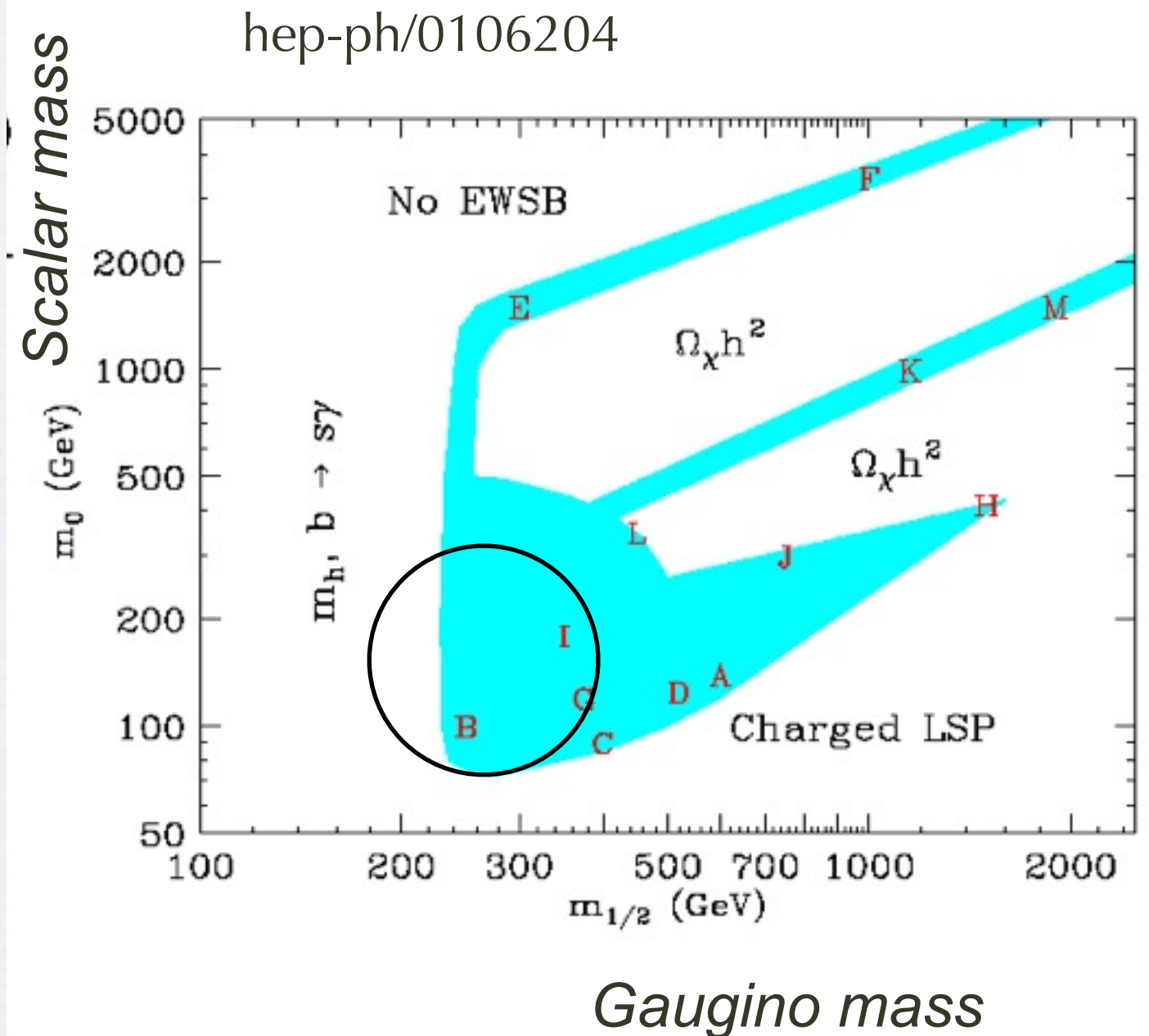


# DM density constraint

1) バルク: LSPはほとんどBino  
Slepton 交換で密度が決まる

$$\Omega h^2 \propto m_{\tilde{l}}^4 / m_{\tilde{\chi}}^2$$

too large mass density





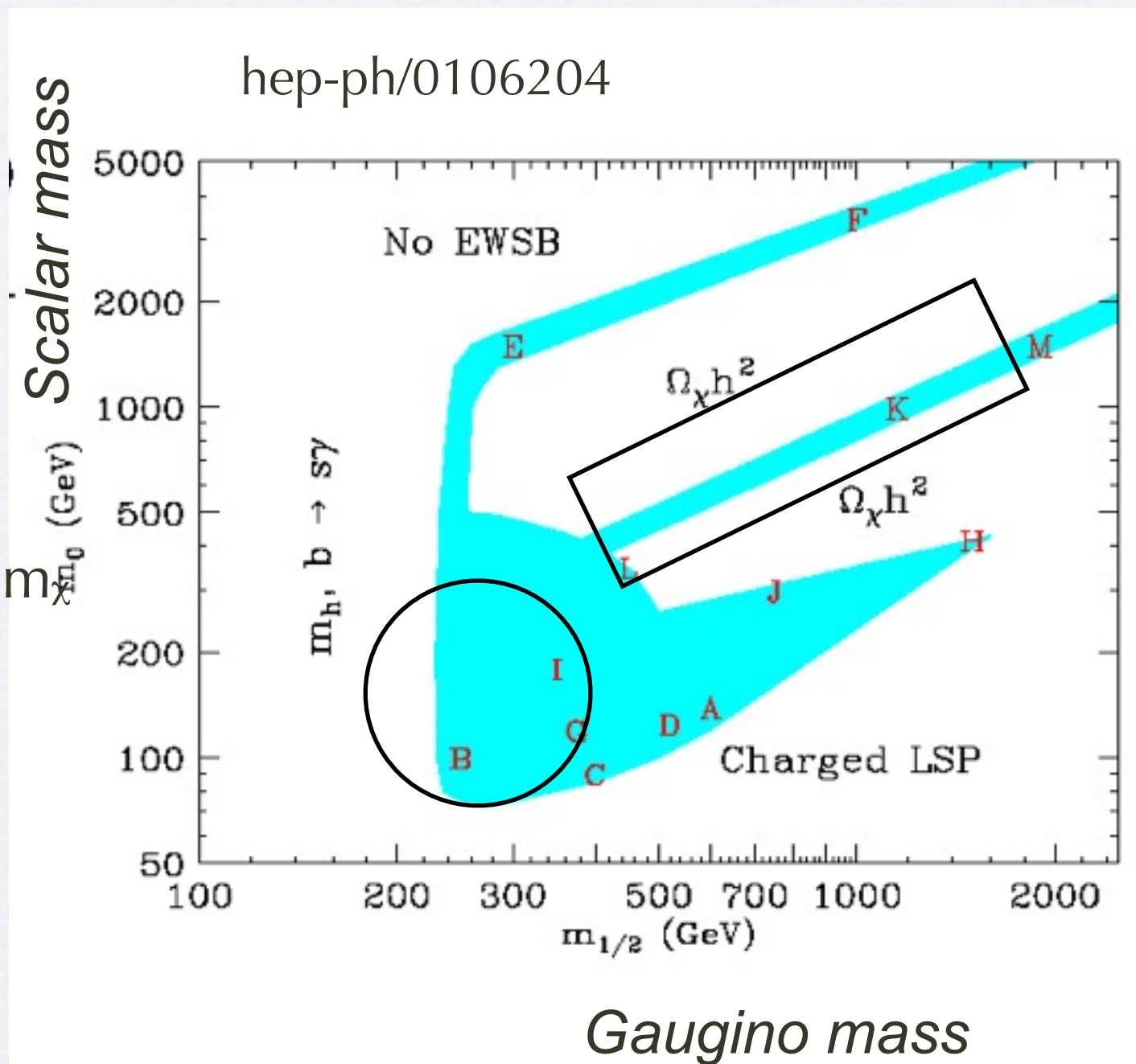
# DM density constraint

1) バルク: LSPはほとんどBino  
Slepton 交換で密度が決まる

$$\Omega h^2 \propto m_{\tilde{l}}^4 / m_{\tilde{\chi}}^2$$

too large mass density

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





# DM density constraint

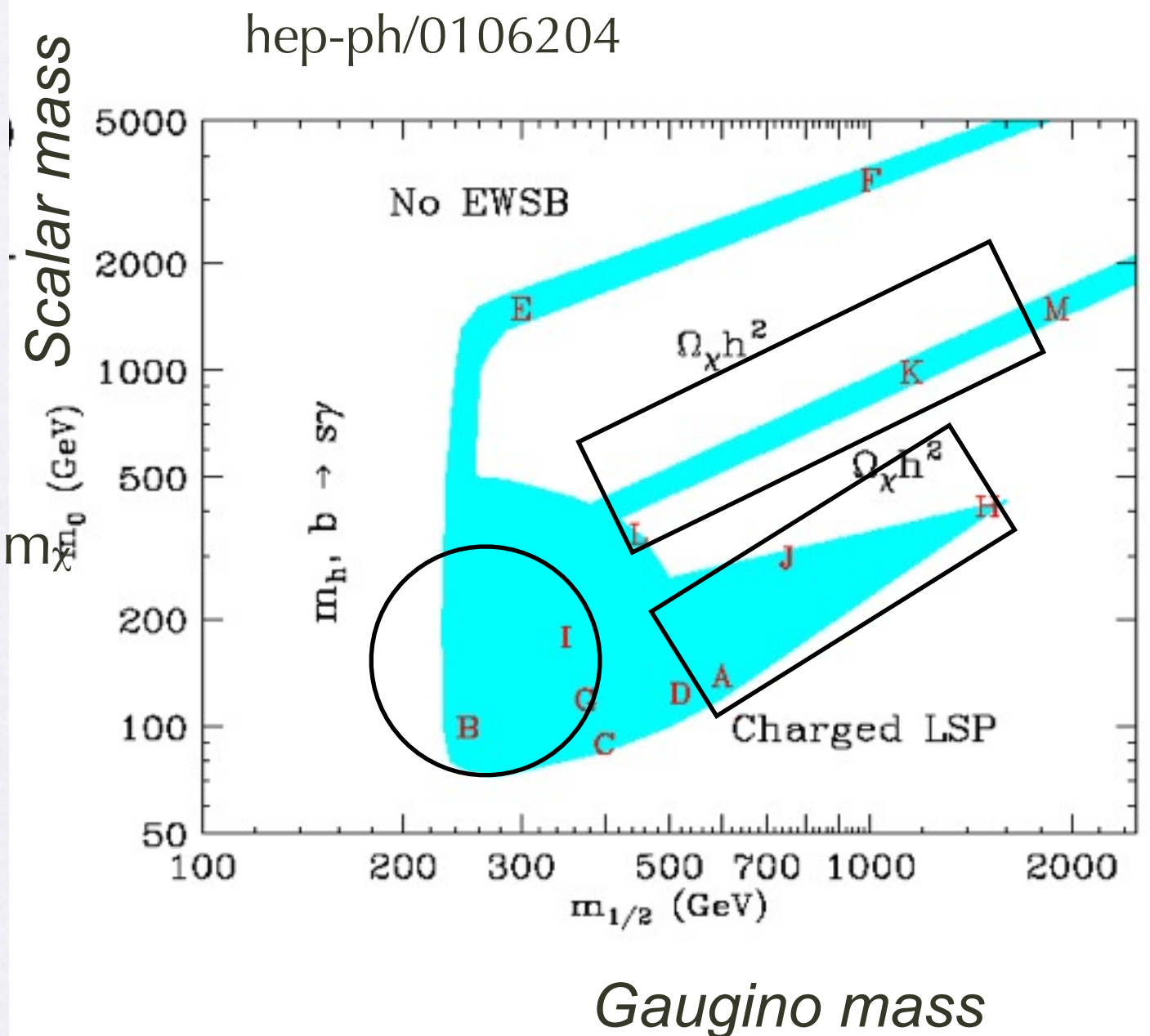
1) バルク: LSPはほとんどBino  
Slepton 交換で密度が決まる

$$\Omega h^2 \propto m_{\tilde{l}}^4 / m_{\tilde{\chi}}^2$$

too large mass density

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

3) 随伴消滅  $\tilde{\tau}\tilde{\chi}$





# DM density constraint

1) バルク: LSPはほとんどBino  
Slepton 交換で密度が決まる

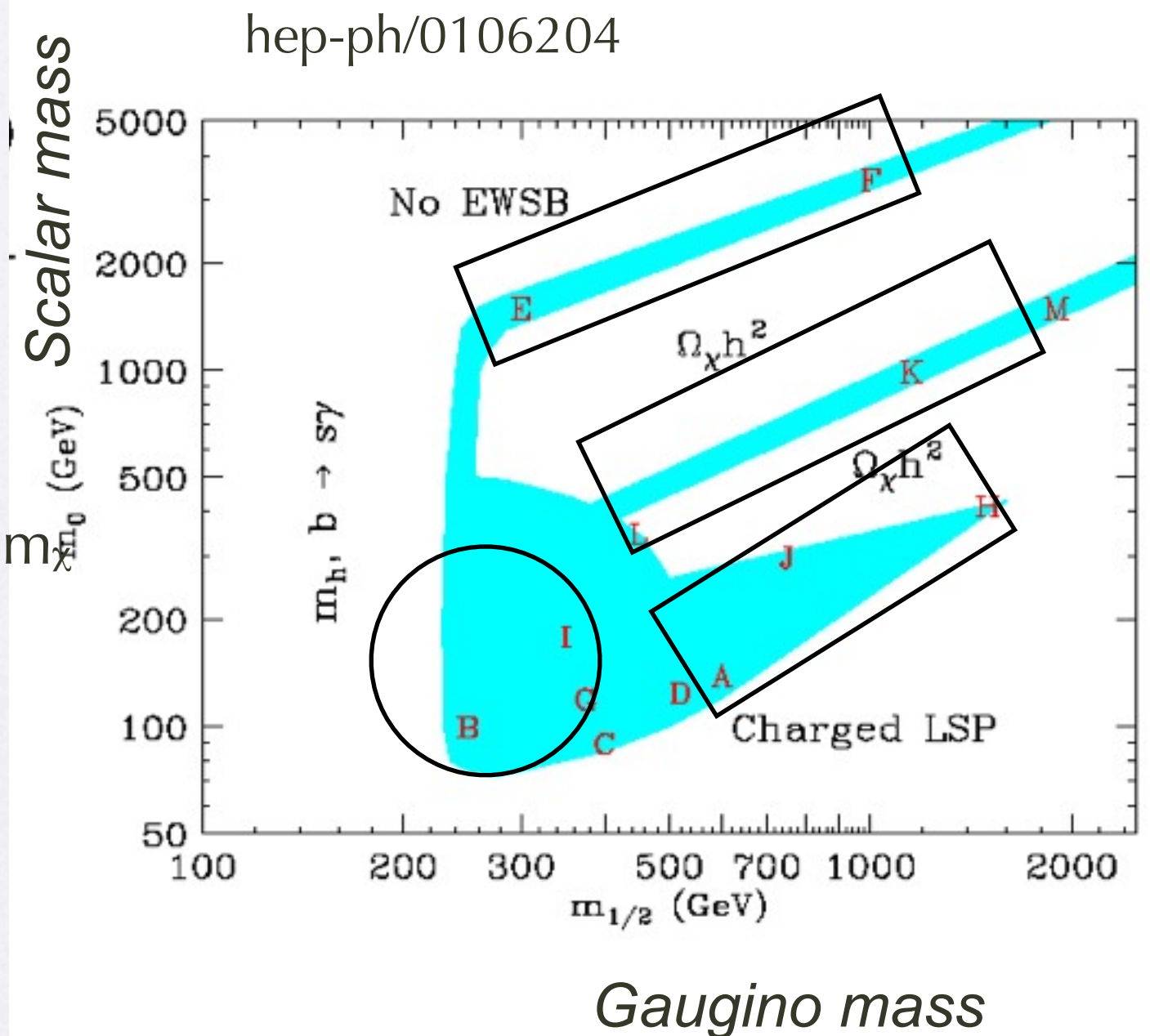
$$\Omega h^2 \propto m_{\tilde{l}}^4 / m_{\tilde{\chi}}^2$$

too large mass density

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

3) 随伴消滅  $\tilde{\tau}\tilde{\chi}$

4) focus point region :  
higgsino-gaugino 混合





# Late decaying particle

- $\Upsilon$  :今の宇宙のダークマター     $\chi$ : さらに質量が重く相互作用の小さい別の粒子。  $\chi$  は不安定
- 早く熱平衡から切れた粒子  $\chi$  は宇宙のエネルギーの中で大きな割合を獲得できる可能性がある。
  - 熱平衡から切れた粒子  $nR^3 = \text{一定}$
  - 熱平衡にある  $m < T$  である粒子  $n R^4 = \text{一定}$
  - 候補    gravitino, Moduli.....
- $\Upsilon$  が  $\chi$  の崩壊から生まれる場合は密度が大きく変わりうる。  
(non-thermal production)



# 修正

- 暗黒物質の密度を知るためには、その粒子の相互作用だけでなく、宇宙の再加熱のあとの *energy flow* をおっかける必要がある。
- 暗黒物質候補    暗黒物質密度
- とりあえず密度が合わなくても別の理由で魅力的な候補なら考えてみてもいいかもしれない？
- たとえば “wino like DM” in anomaly mediation



パリティはかならずしも必要ない場合

空間構造で安定性

われわれの世界

DM が住んでいる世界



とても小さい相互作用が幾何学的に説明できる。



- 超対称模型のめざすもの

- 力の統一

- ゲージ対称性の破れの自然さを説明

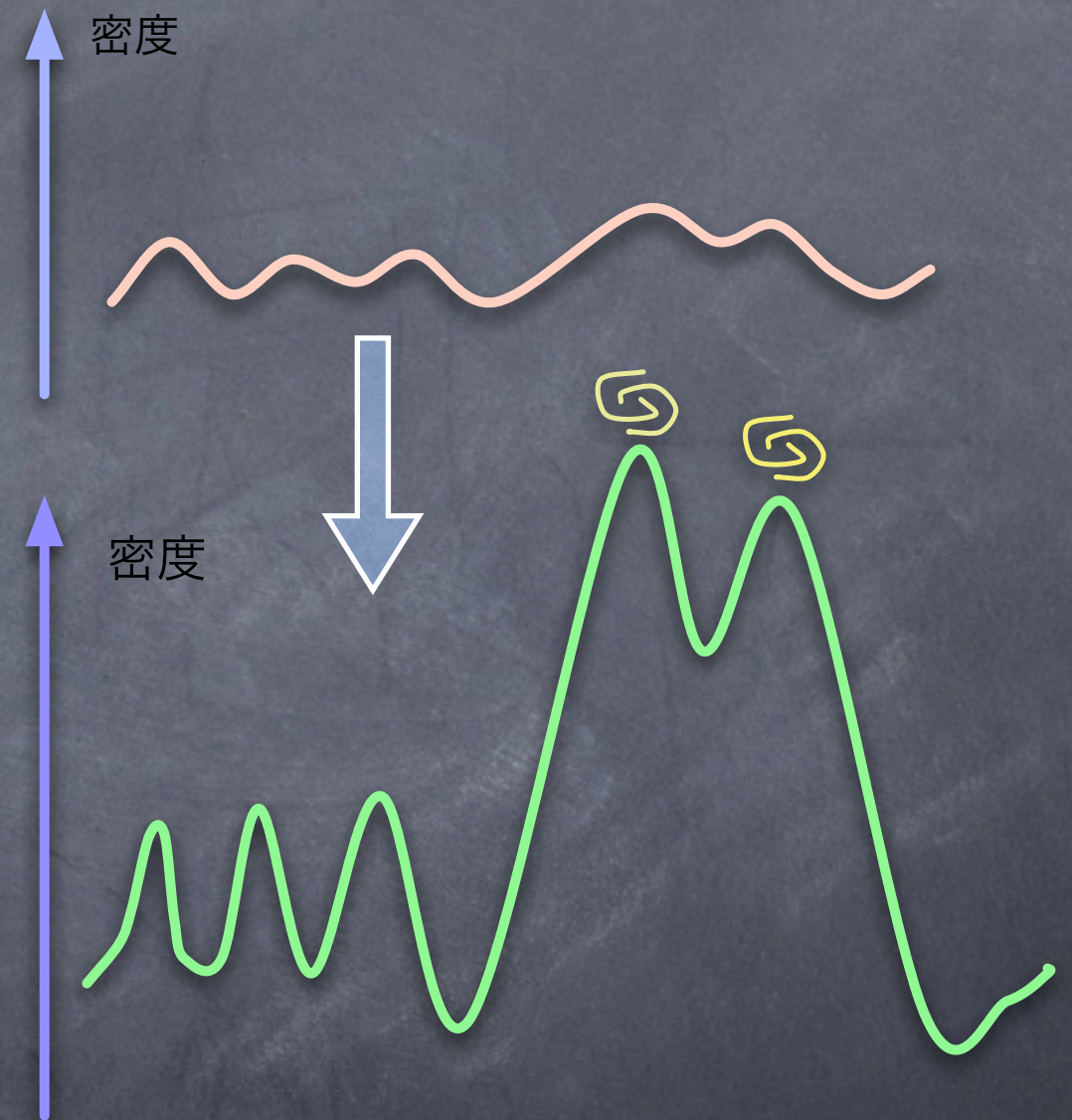
- 単にDM として、新しい粒子と新しい相互作用をいれるのでは説明するのでは素粒子模型としては格下。

- 一方で、明らかな実験的事実(DM の存在) を無視する模型は良くない



# その後の宇宙

- 物質優勢になると、物が多いところますます物が集まるようになる。
- 物が多いところに天体、銀河、銀河団ができる。
- 暗黒物質も銀河の中に集まってくる。
- DMとDM が衝突 → 見える粒子に対消滅（粒子と反粒子が 1:1 でできる）！





# 銀河からの贈り物？

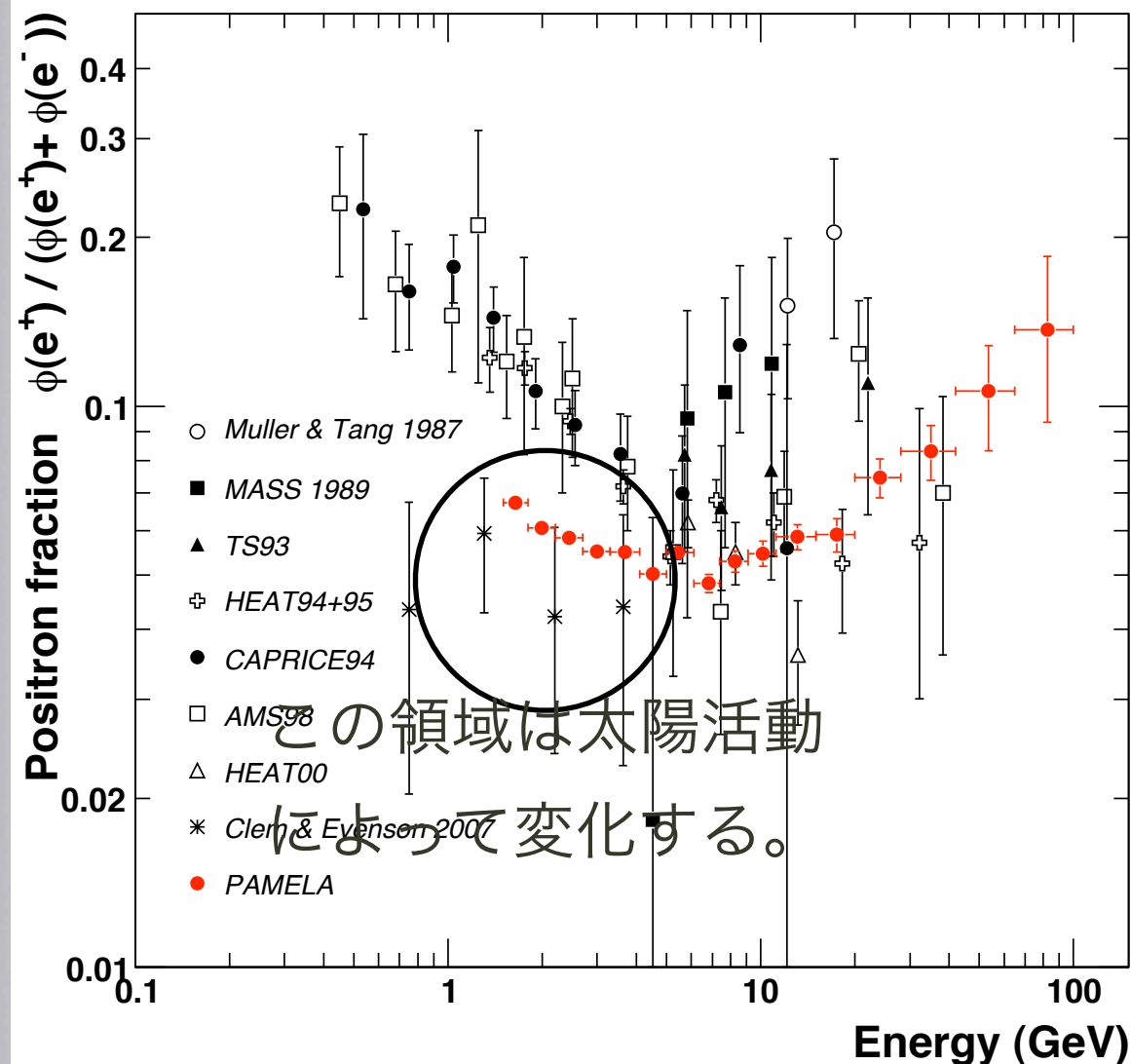
銀河中心に暗黒物質が集積、  
対消滅。密度、伝搬に大きな不定性。  
銀河中心密度、Local clump など

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) 電子陽電子 HEAT → Pamela → 今度こそAMS?
- 2) EGRET → FERMI
- 3) Integral (銀河中心の反陽子)



# New Pamela data



suppression at lower energy  
is probably modulation effect.

constant increase of high energy  
component up to 100 GeV

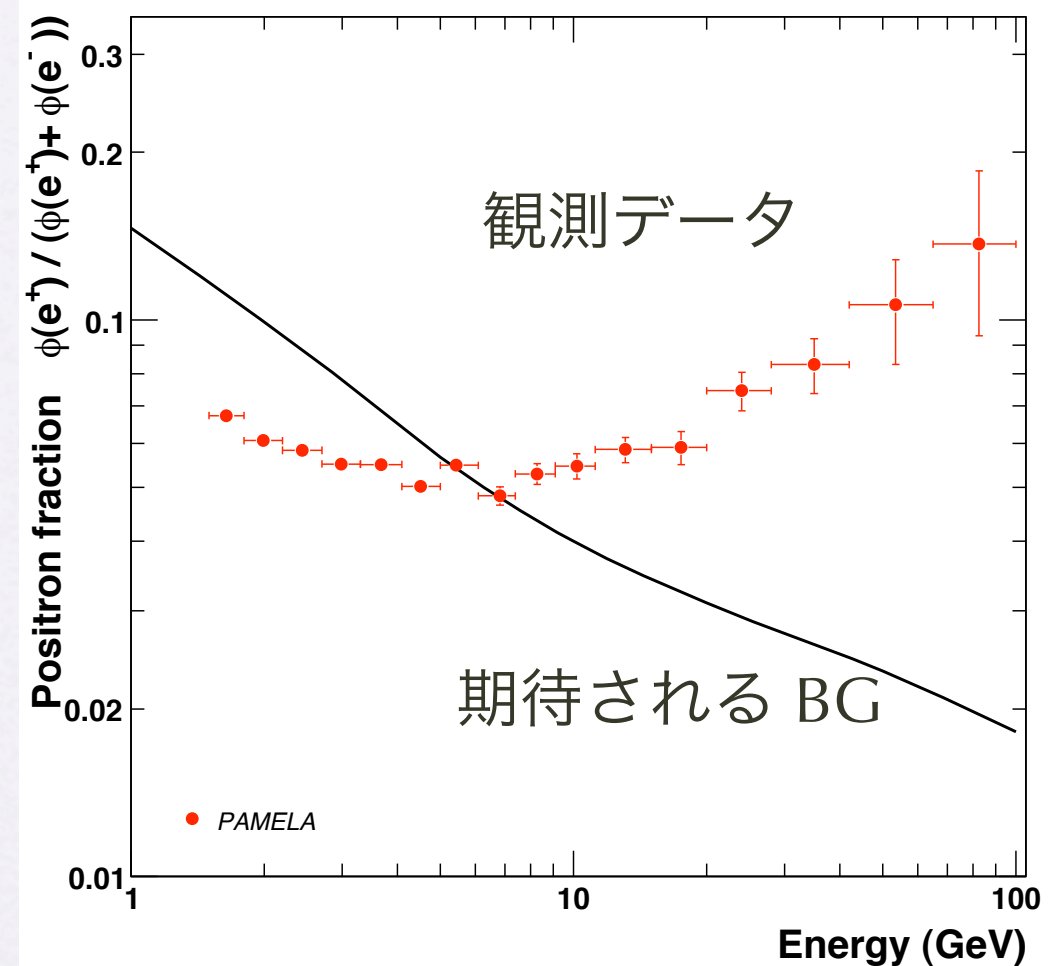
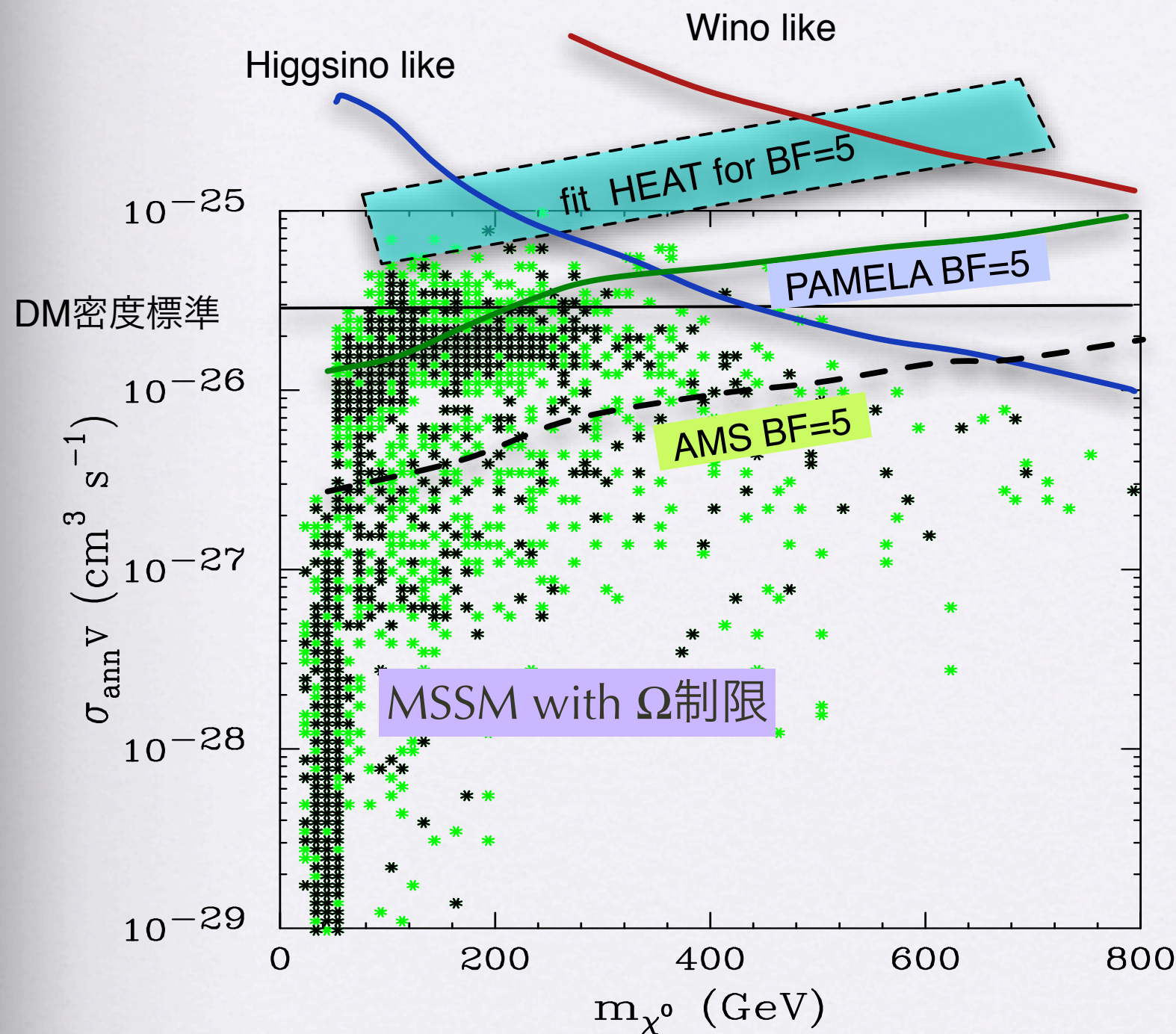


FIG. 4: PAMELA positron fraction with theoretical models. The PAMELA positron fraction compared with theoretical model. The solid line shows a calculation by Moskalenko & Strong[39] for pure secondary production of positrons during the propagation of cosmic-rays in the galaxy. One standard deviation error bars are shown. If not visible, they lie inside the data points.



# positron signature (HEATからPAMELAへ)



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。

しかし、普通に考えれば、  
シグナルは小さい

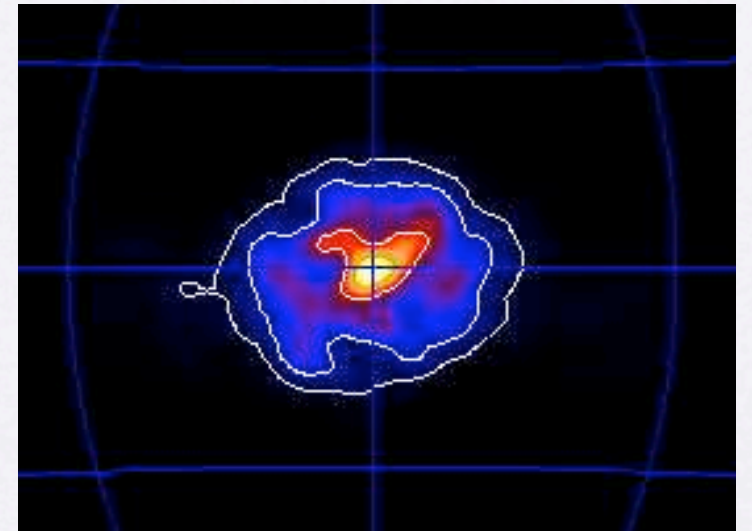
Pamela はなんとか、ATIC は  
SUSY では難しい

Hooper and Silk hep-ph/0409104



# exotic dark matter

- INTEGRAL (International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory)
- バルジから511 keV  $\gamma$ 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。





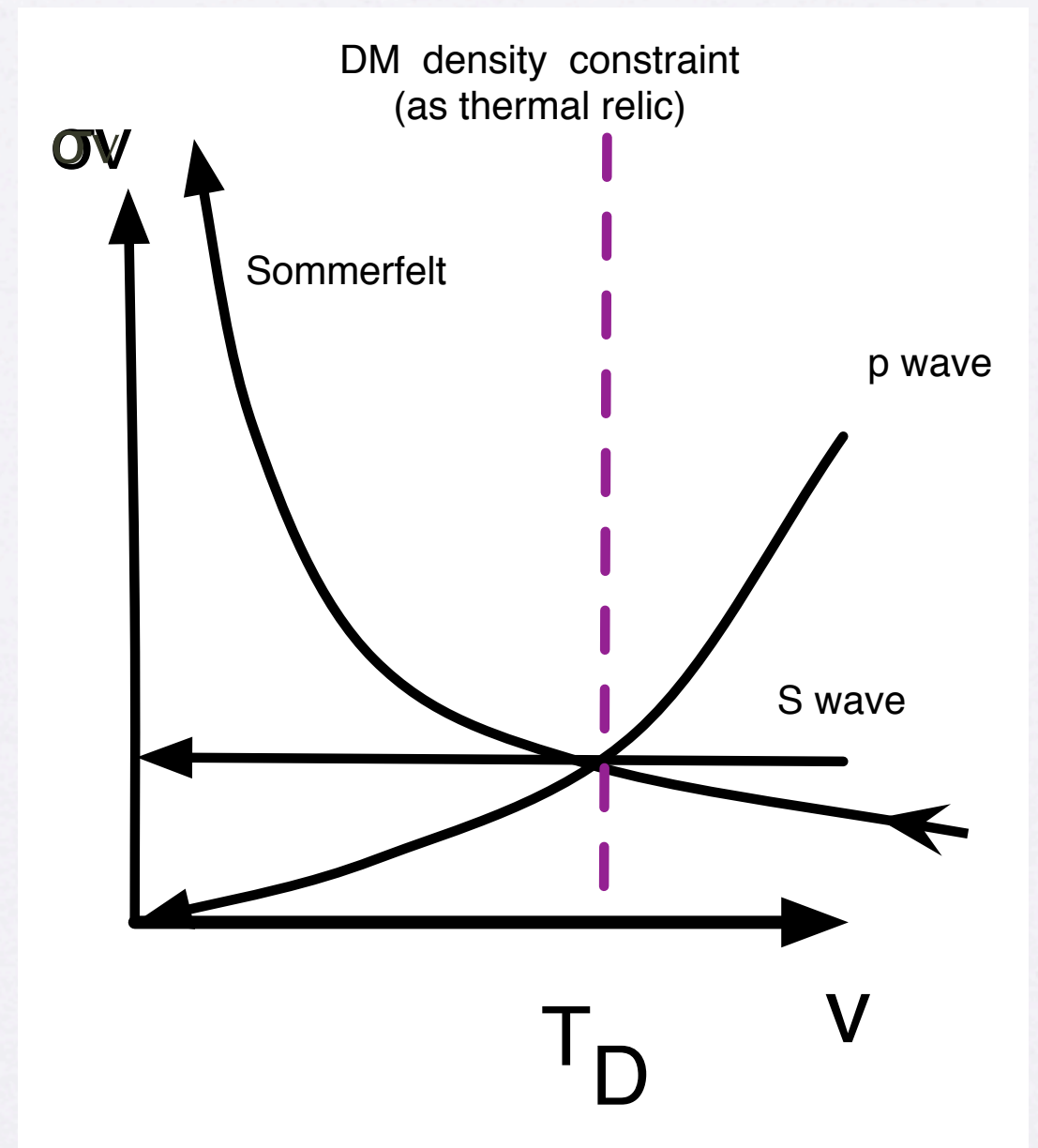
# 対消滅シグナルとダークマター密度

- 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そこそこあったということを示している。
  - 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との関係は不明
- 崩壊先も重要。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一部である可能性も。



# 対消滅確率の温度依存性

- S wave  $\sigma v = \text{const}$  (Little Higgs with T parity)
- P wave  $\sigma v = bv^2$  (SUSY neutralino DM)
- Sommerfeld Enhancement (threshold resummation effect)  $\sigma v \sim 1/v$



TD



# s-wave vs p wave



重たい素粒子にしかいかない。

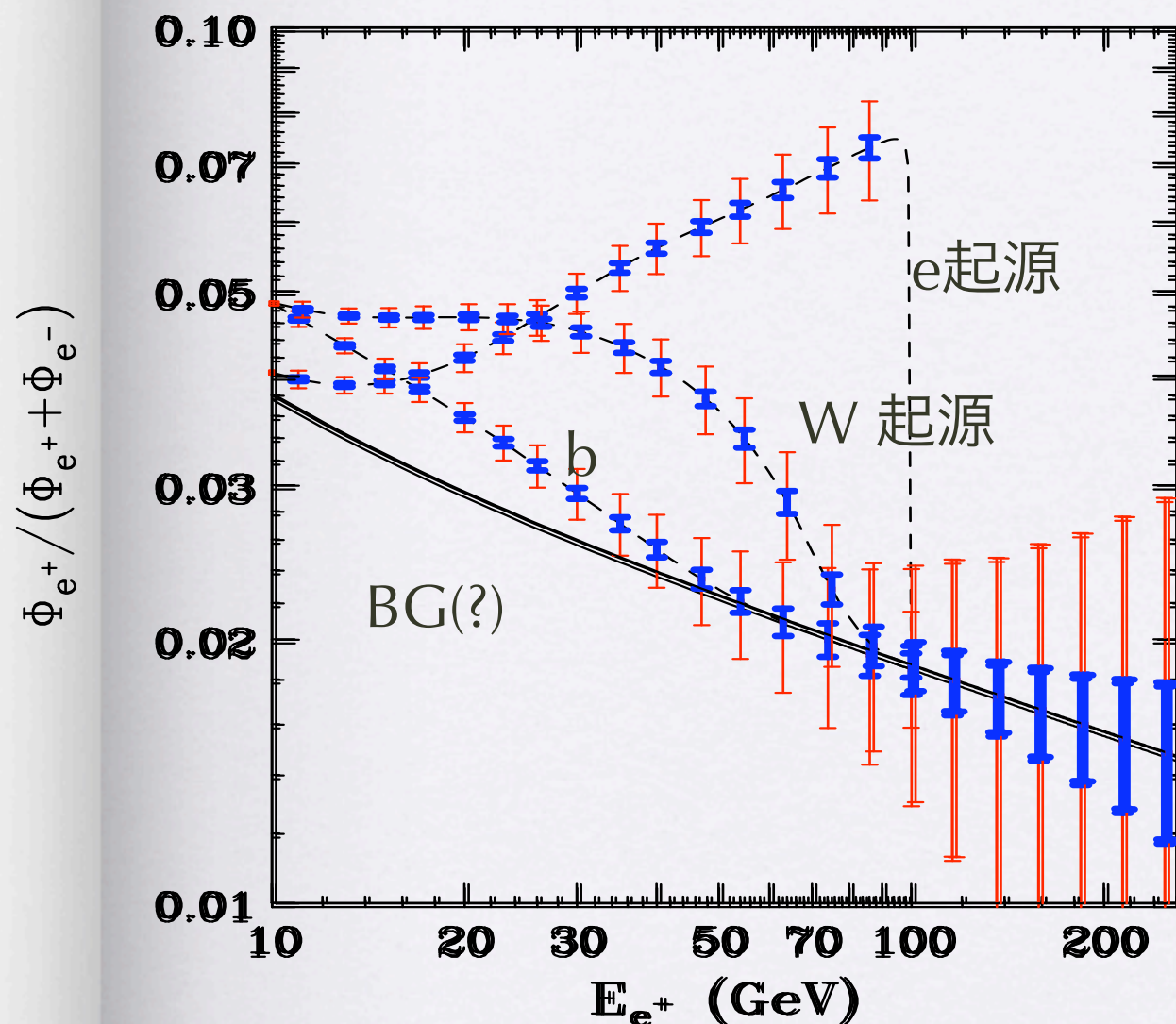
- 超対称模型 (Majorana fermion)  $\sigma v = \frac{m_f^2}{m_{SUSY}^4} a + \frac{m_\chi^2}{m_{SUSY}^4} b v^2$
- Dark matter が gauge 粒子に崩壊する場合、あるいは gauge 粒子 (UED, gauge boson 等) では chirality suppression がない。



ダークマターがゲージ粒子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。

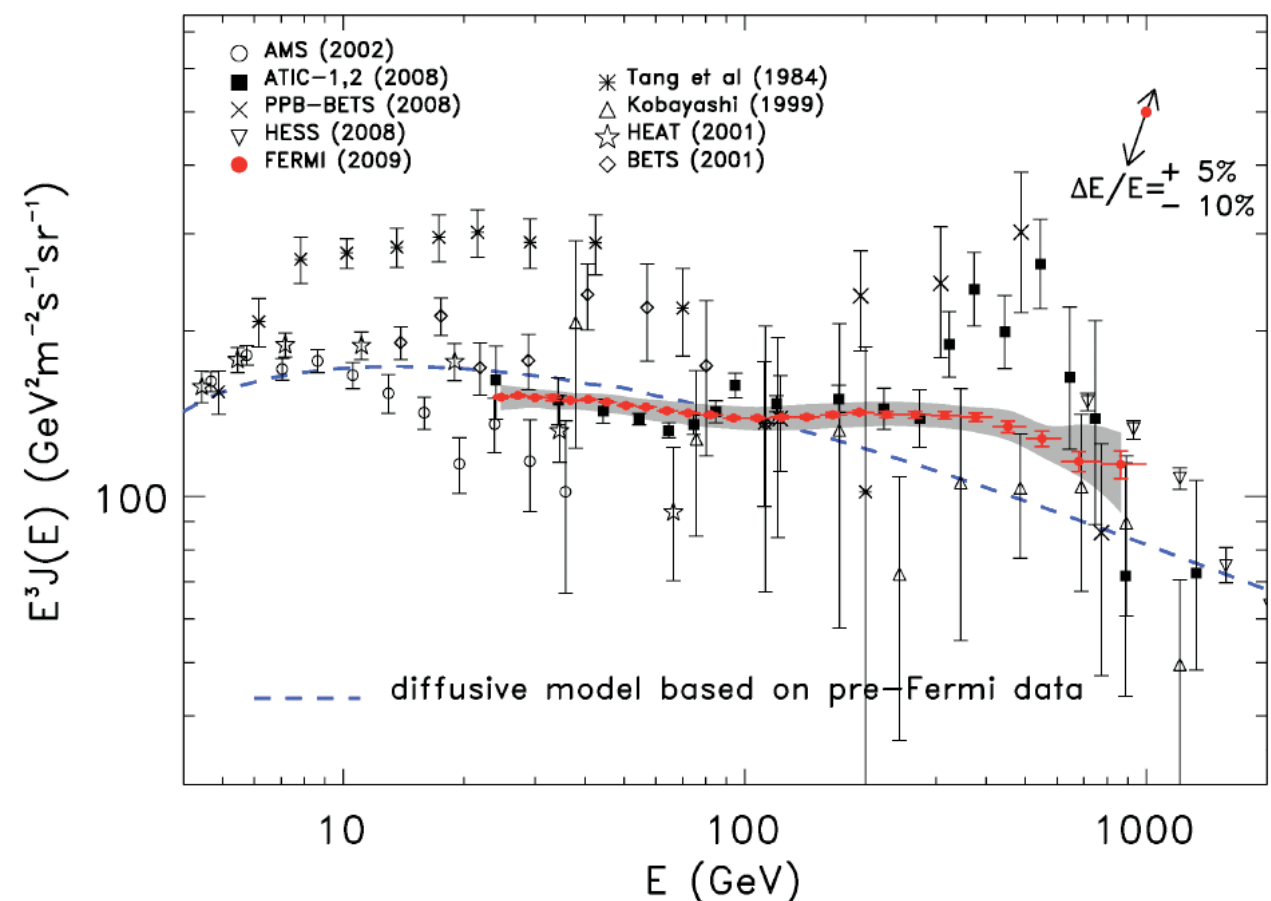
ATIC/PBS はSUSY DM ではほとんど無理

Edgeでもない discoverly は無理。 なスペクトラムだったので、みんなびっくりした。



Hooper and Silk hep-ph/0409104

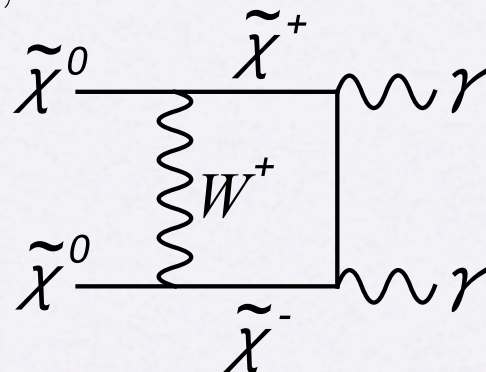
CRE SPECTRUM FROM 20 GeV TO 1 TeV  
SUBMITTED TO PRL ON MARCH, 19TH AND ACCEPTED APRIL, 21ST 2009



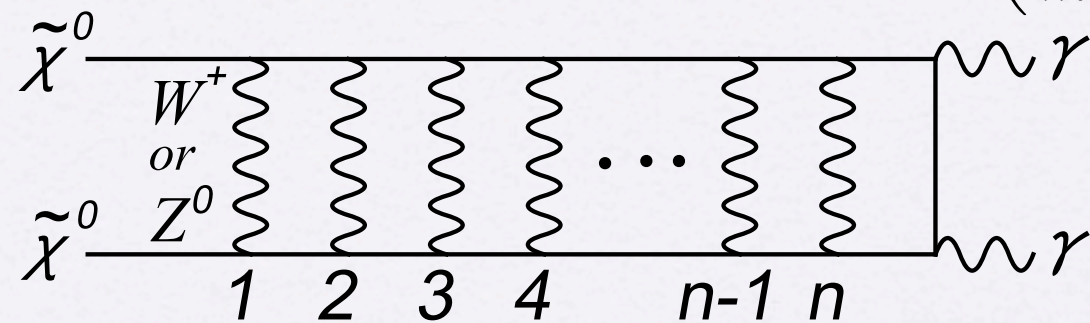


# Sommerfelt effect

$$\sigma v \sim \frac{\alpha^2 \alpha_2^2}{m_W^2},$$



$$A_n \simeq \alpha \left( \frac{\alpha_2 m}{m_W} \right)^n.$$



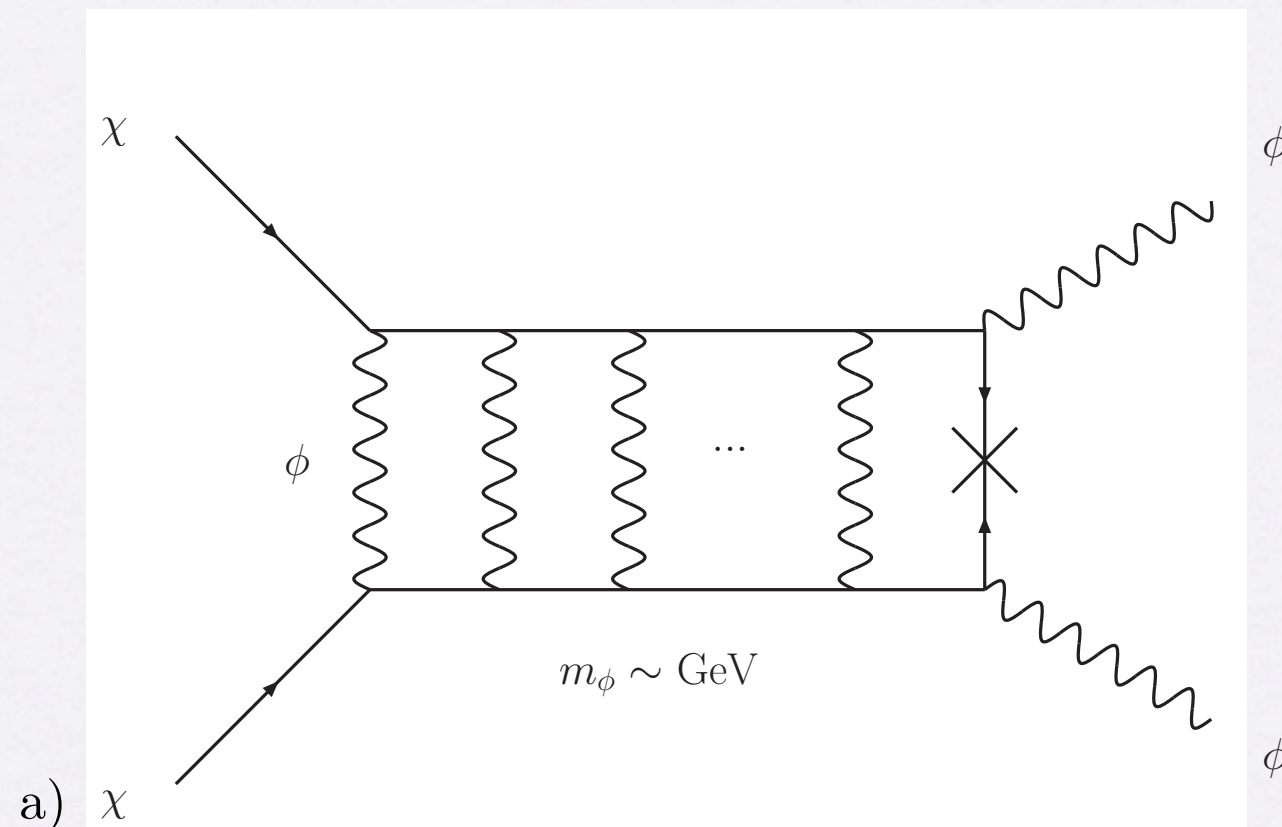
- 超対称模型では、W粒子の多重交換で2TeVのneutralino DMの $v \sim 0$ の対消滅確率が、100倍程度大きくなる場合がある。
- 全く新しい粒子Xと未知の軽い粒子 $\phi$ で起こしても良い。
- 見えるシグナルが全く出そうもない模型でも、未知の粒子を付け加えれば大きなシグナルを出すことができる



# Sommerfelt effect

$$\sigma v \sim \frac{\alpha^2 \alpha_2^2}{m_W^2},$$

$$\mathcal{A}_n \simeq \alpha \left( \frac{\alpha_2 m}{m_W} \right)^n.$$



- 超対称模型では、W粒子の多重交換で2TeVの neutralino DM の  $v \sim 0$  の対消滅確率が、100倍程度大きくなる場合がある。
- 全く新しい粒子  $\chi$  と未知の軽い粒子  $\phi$  で起こしても良い。
- 見えるシグナルが全く出そうもない模型でも、未知の粒子を付け加えれば大きなシグナルを出すことができる



# A theory of dark matter (PRD 79,015014)

- Dark matter  $X$ , 未知の粒子  $Y$  ( $m_Y \ll O(1) \text{ GeV}$ )
- Sommerfelt Enhancement で対消滅確率を小さくできる。さらに、 $Y$  がきわめて軽いスカラーなら電子対等へ対消滅。もし質量が  $100 \text{ MeV}$  以下なら 電子線だけにシグナルが残せる。
- $Y$  がゲージ粒子の場合、対称性は破れているはずなので、 $X$  に質量のきわめて近い粒子がいくつか存在。 (Exciting dark matter)  
Dark matter 同士の衝突で Integral or Dama を説明か？
- "全部説明" は結局それほどうまくいかなかった。



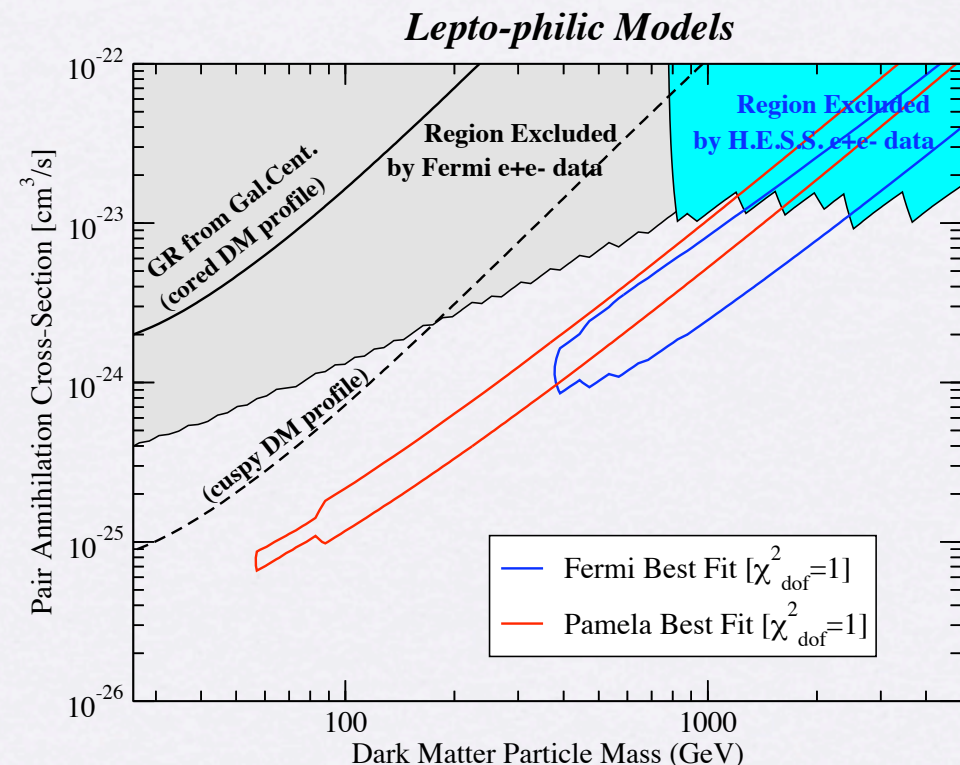
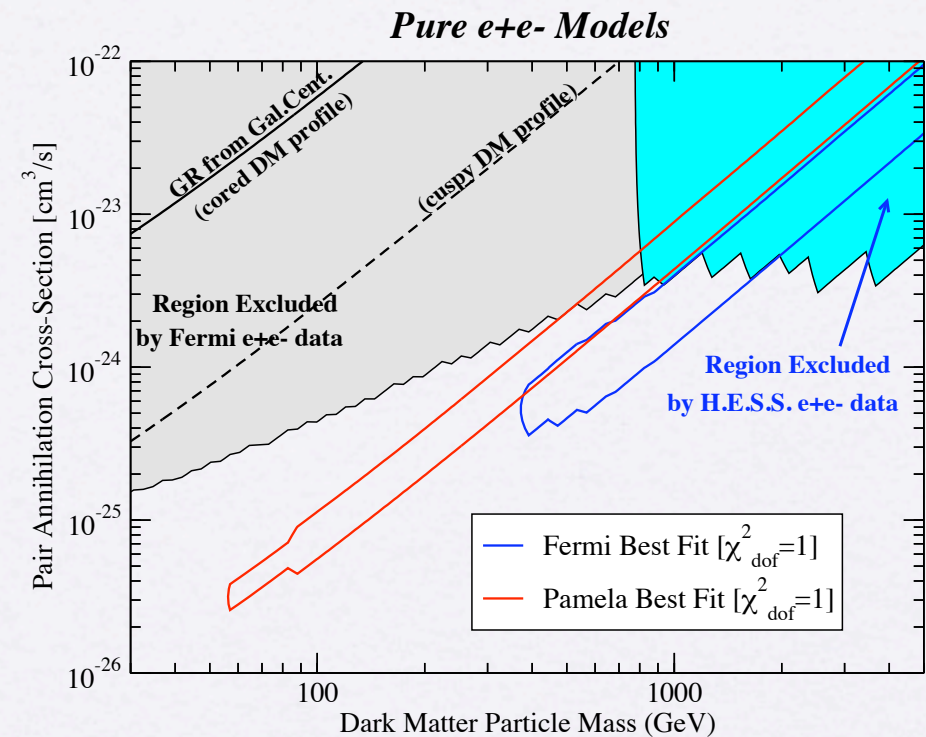
# その他のアイディア

- 対消滅で陽電子を説明しようとする、100倍から 1000倍くらいの boost factor が必要。
- ゆっくり decay する dark matter なら、他の dark matter に出会うまでまっている必要はない。
- 他の brane に住む gauge 粒子.  $U(1)$  混合などでゆっくり崩壊
- gravitino dark matter  $\rightarrow$  lepton through R parity violation.



# 今後の課題

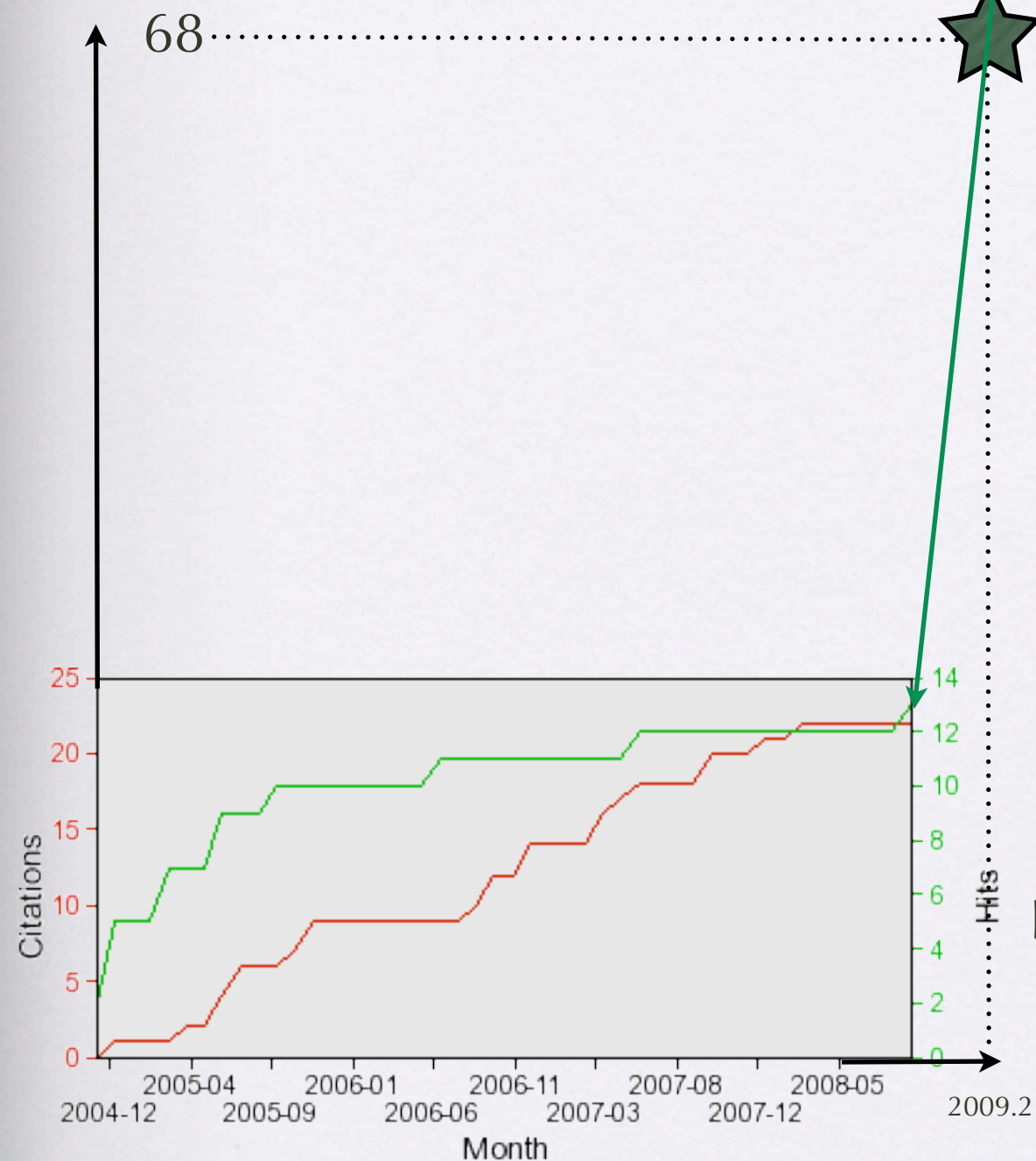
- Pamela と Fermi を同時に fit するモデルを作ることとはnon-trivial。
- DM は単に現在存在するだけではなく、なにかの機構によって作りだされたものである。生成から、今日までコンシステントなシナリオを作ることがより重要。





# おまけ

まるでハドロンコライダーの  
ルミノシティカーブのようだ。  
最初は全然でない。。。



Hisano et al PRD71 063528(2005)



# DMを作る



# DMとコライダー物理

- 宇宙の始めには粒子と反粒子がぶつかりあって、DMをつくった。
- 人工的に粒子を高いエネルギーに加速して衝突させたら、DMもできるに違いない
- つまりDMの存在を確かめることができる（？）



# LHC実験 (2008~)

円周 27Kmのリング(陽子陽子衝突) 10Km/h の車なら

一周するのに  $2.7 \times 150 = 405$  分

ビームエネルギー 3.5TeV→ 5TeV→ <7TeV (今の3.5

倍からスタート

場所：スイス、フランス



# LHC実験 (2008～)

円周 27Kmのリング(陽子陽子衝突) 10Km/h の車なら  
一周するのに  $2.7 \times 150 = 405$ 円

ビームエネルギー 3.5TeV→ 5TeV→ <7TeV (今の3.5  
倍からスタート

場所：スイス、フランス

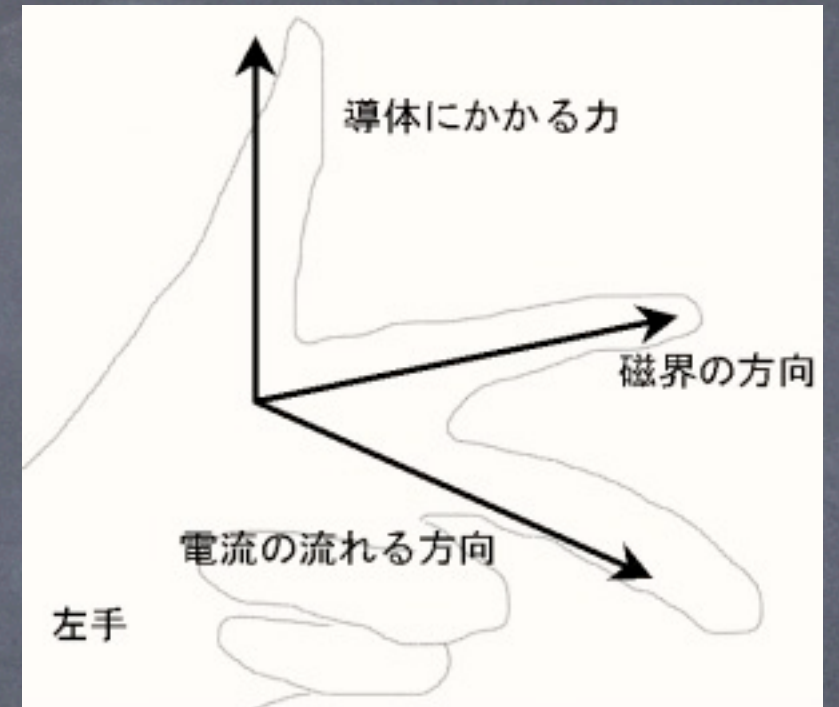
- 1) 27Km にわたって、精密機器を並べ
- 2) 1K 程度に冷やす。(磁石)
- 3) そこにTNT火薬にして100Kg のエネルギーを持った陽子ビームを通す。
- 4) ビームの太さは 16マイクロメータ。25nsに一回衝突。
- 5) 部品は世界中からやってくる。



# 加速器の仕組み

- 電場をかけて陽子ビームを加速（非常に光速に近い）
- 磁場をかけてビーム（電流）を曲げる
- 高い電流→とても強い磁石→普通の磁石だと発熱が大変、だから
  - 全部超伝導磁石（1.9K）
- 制動放射をおさえるためにやたらでかくなる

この管の中に液体ヘリウムが  
入っている

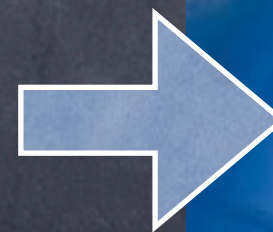
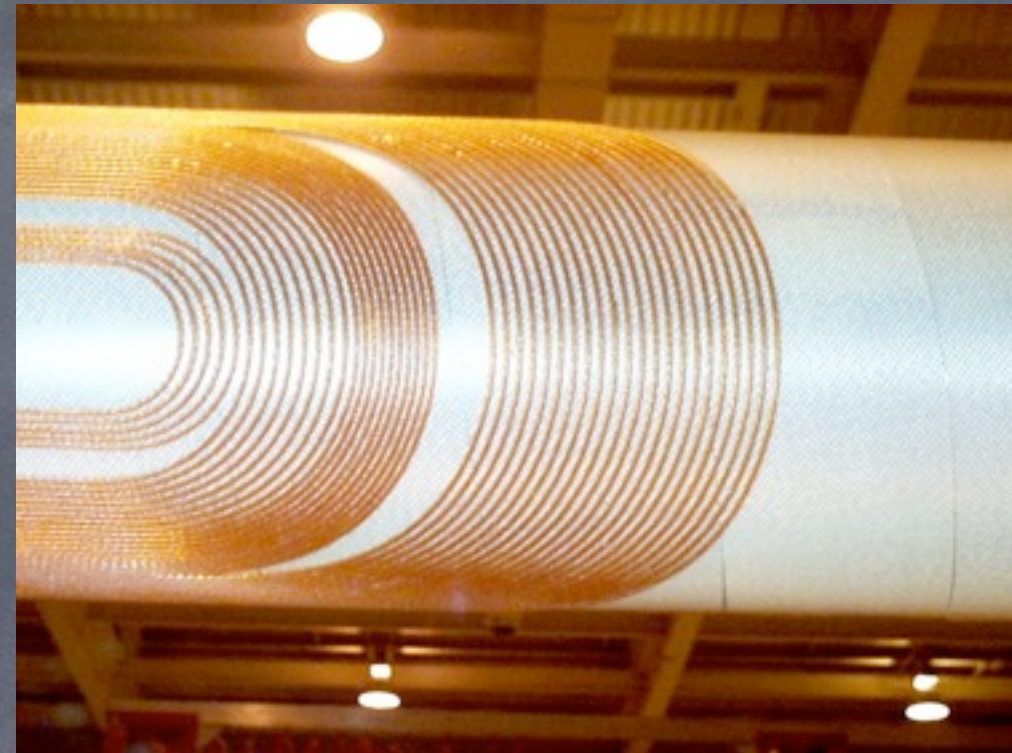




# 加速器の仕組み

- 電場をかけて陽子ビームを加速（非常に光速に近い）
- 磁場をかけてビーム（電流）を曲げる
- 高い電流→とても強い磁石→普通の磁石だと発熱が大変、だから
  - 全部超伝導磁石（1.9K）
- 制動放射をおさえるためにやたらでかくなる

この管の中に液体ヘリウムが  
入っている





# 2008年9月19日 ヘリウム漏出

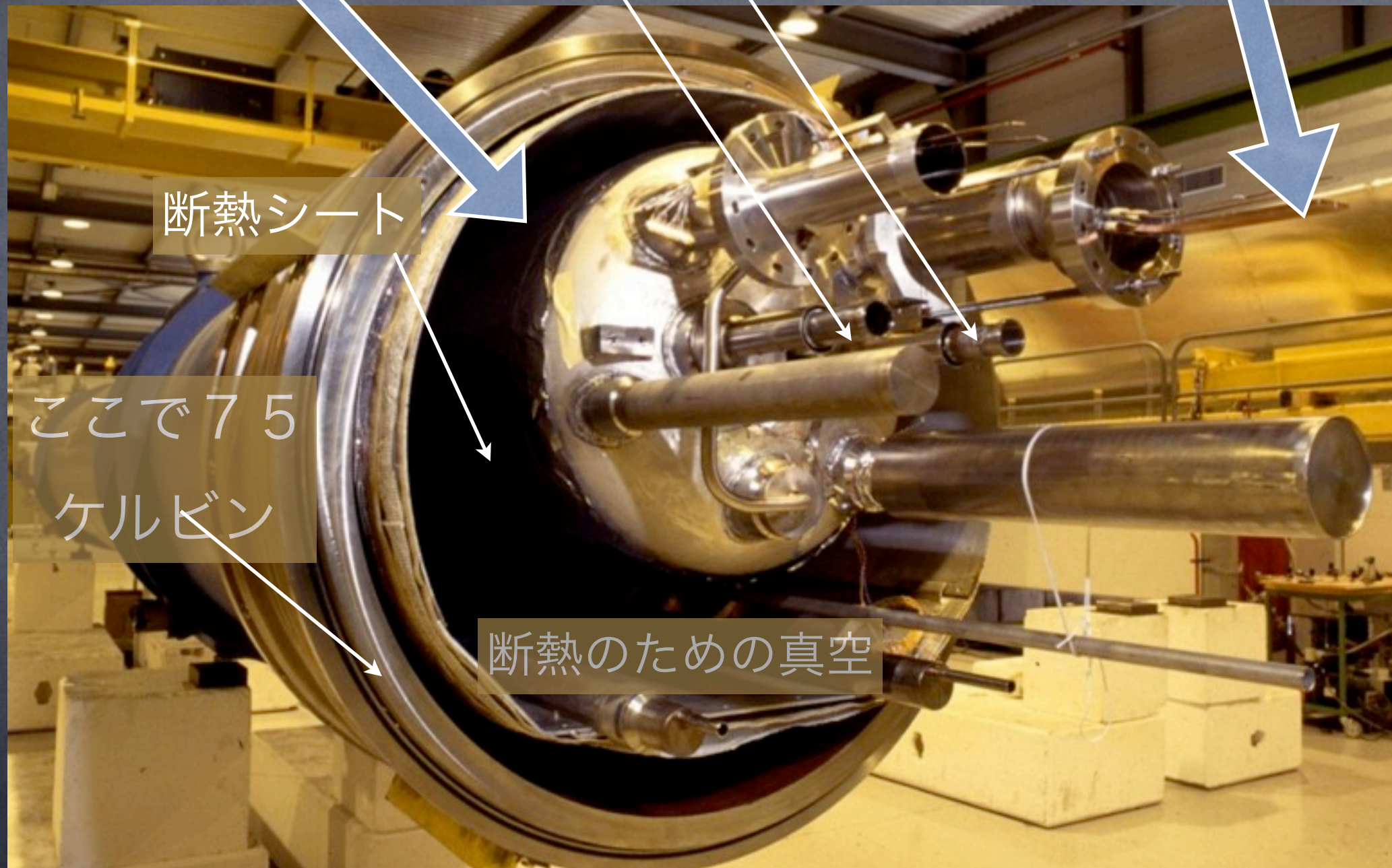
He の容器

なかは1.9K

隣の磁石につながる

超伝導線(9kA)

ビームはここ



ビーム衝突は今年末. 3.5TeV +3.5TeV 12月



## 予定(II) 2010年

2月第1週 7TeV実験再開  
 3-4ヶ月  $L=100\text{pb}^{-1}$ 程度  
 (いろいろなopticsを試し  
 $10^{32}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ をめざす)

5月 調整

6月 8-10TeV実験

4-5ヶ月  $L=200\text{pb}^{-1}$ 程度  
 11月におまけの重イオン

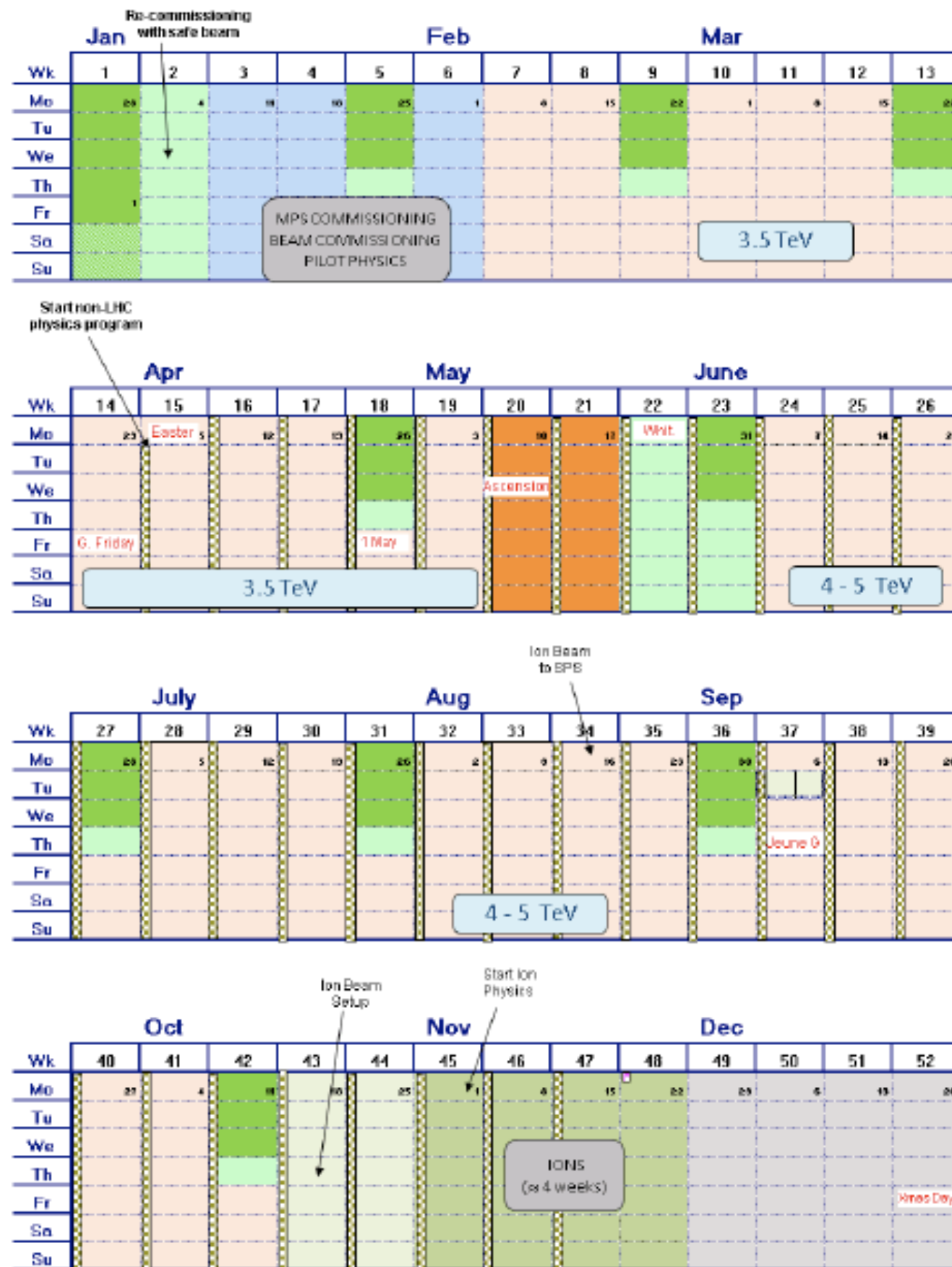
または、

(Fast dumpがうまくいかず  
 あげるのが危険場合)

2月から10月から

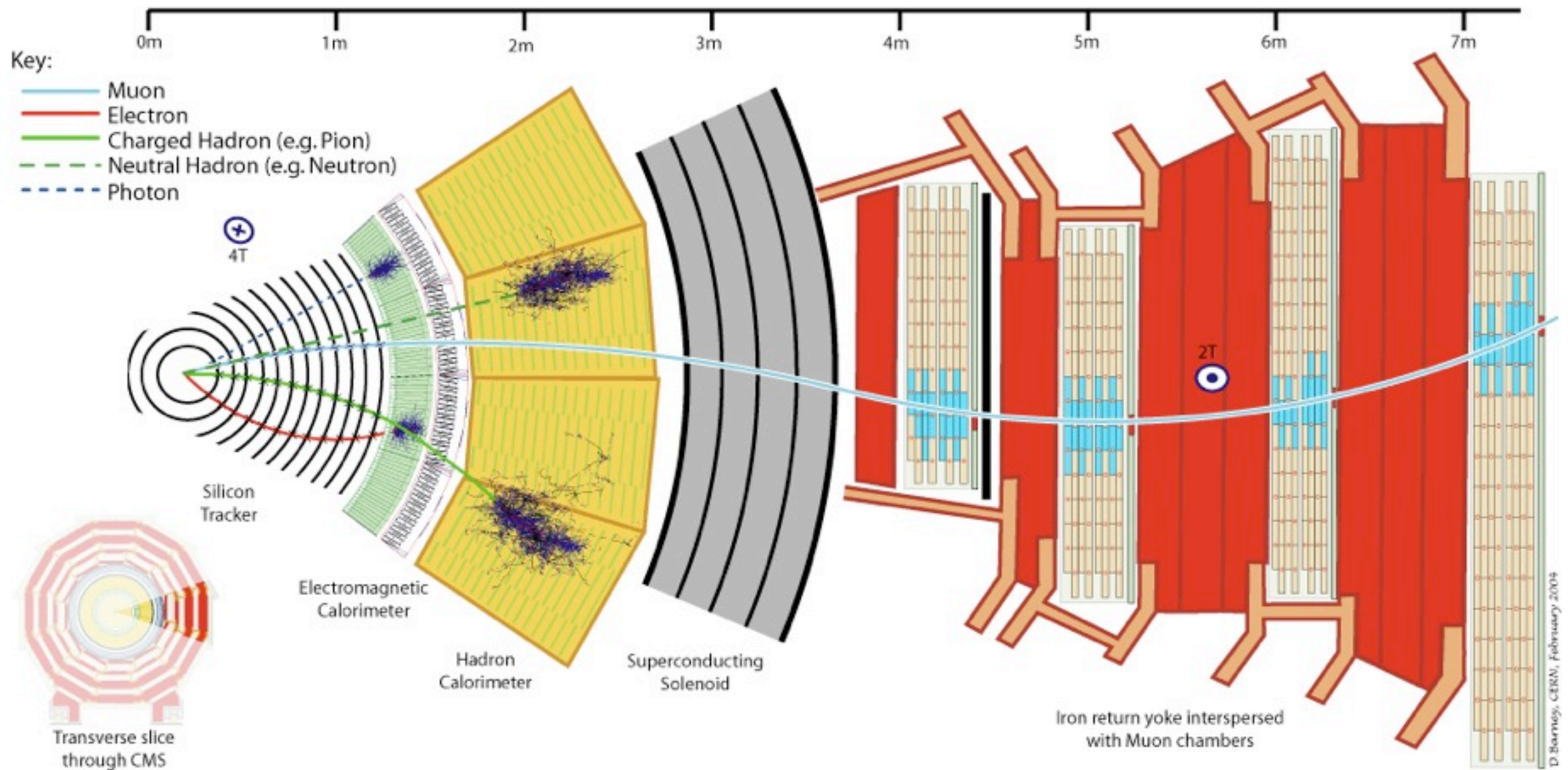
ずっと7TeV(絶対安全)で  
 $L=400\text{pb}^{-1}$ 程度

(10TeV  $200\text{pb}^{-1}$ と同じ程度  
 物理performanceが期待)





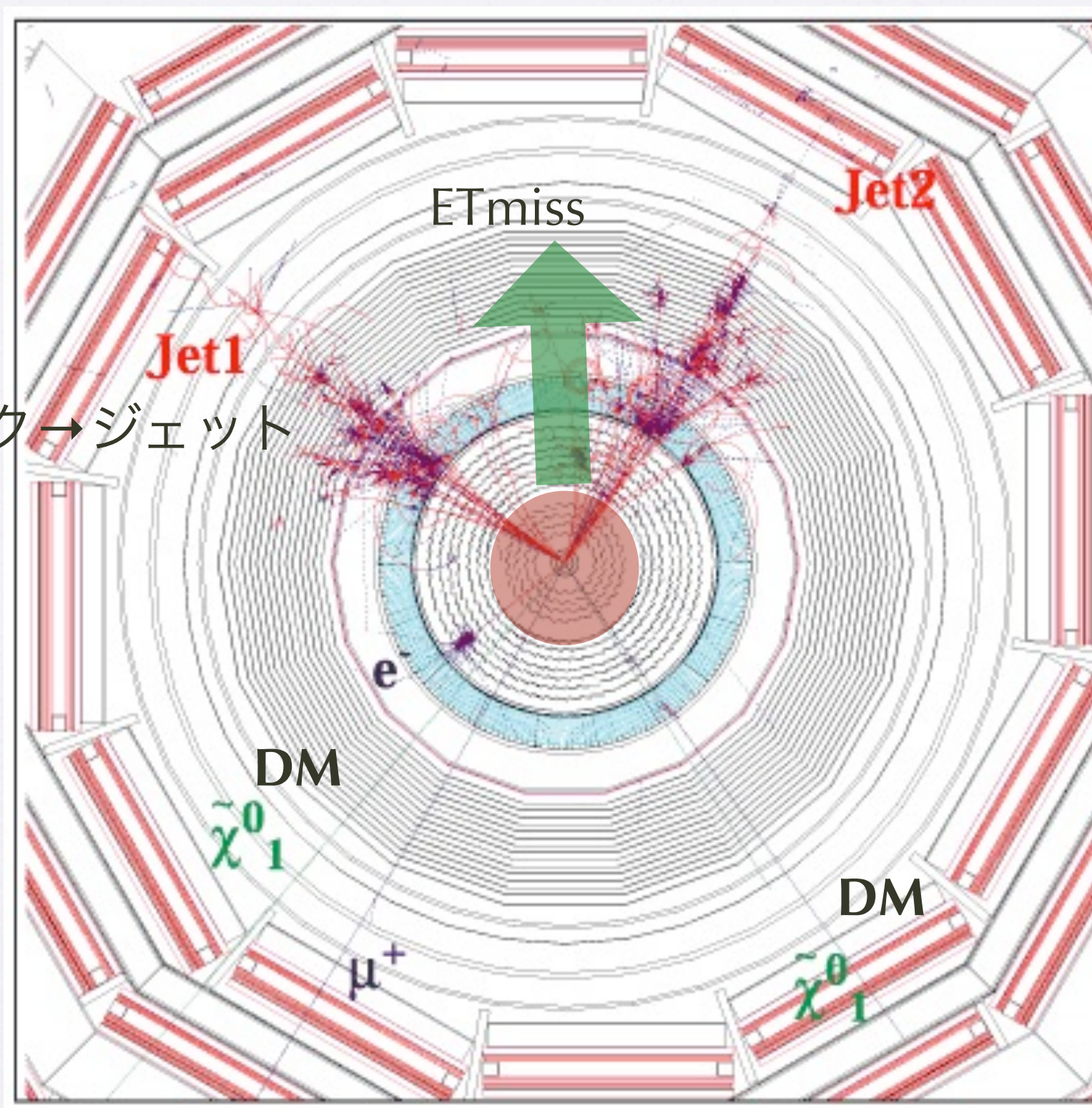
# 測定器を横から見る (CMS)





# 歪んだイベント探し=DM探し

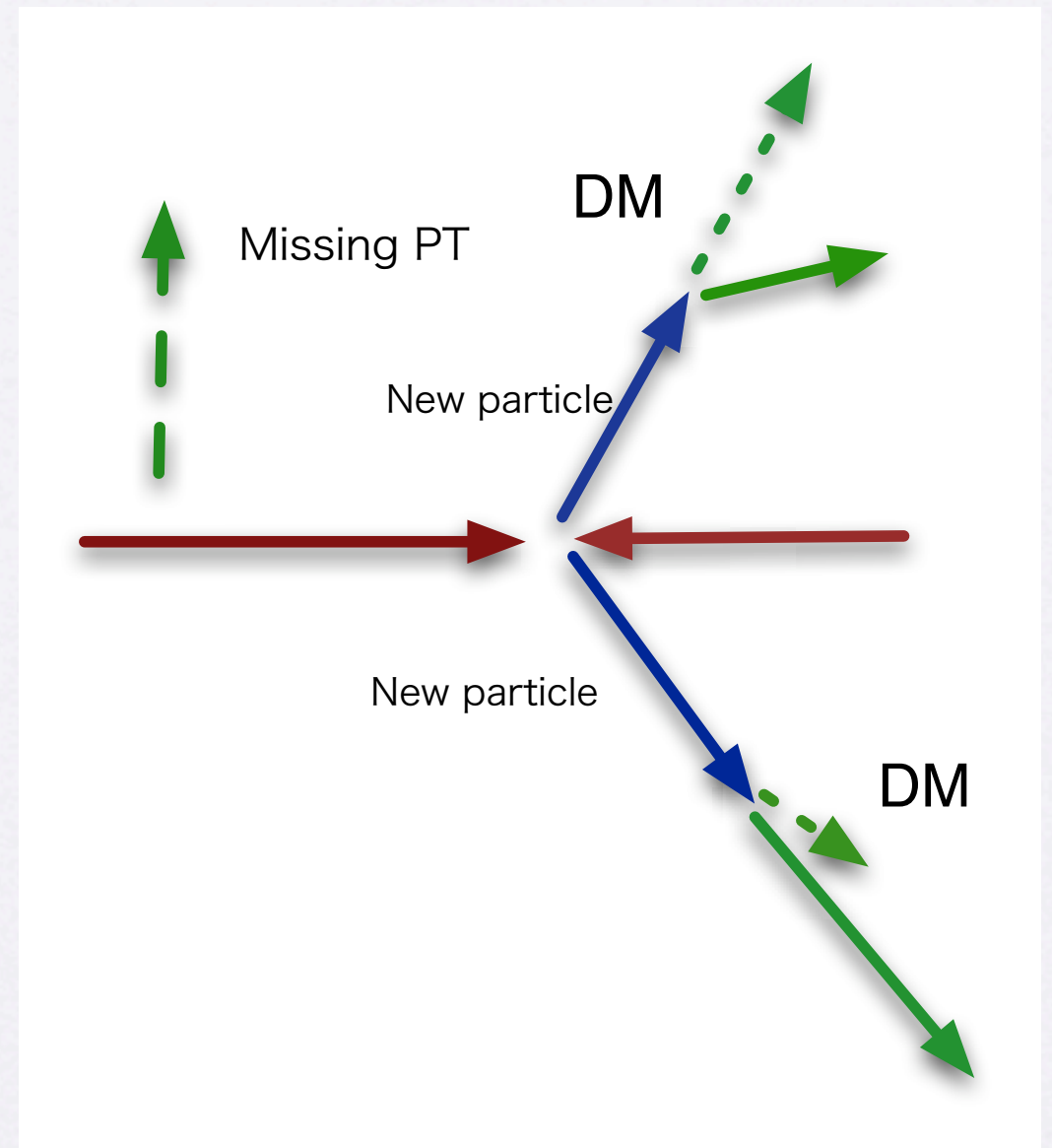
クォーク→ジェット





# DM生成

- ビーム方向に抜けていったものはわからない。(測定器がおけないから)
- クォーク、グルオンが生成されると「ジェット」という粒子の束になる。
- 粒子の運動量は 見えない粒子(ニュートリノやDM)がなければ釣り合っている。

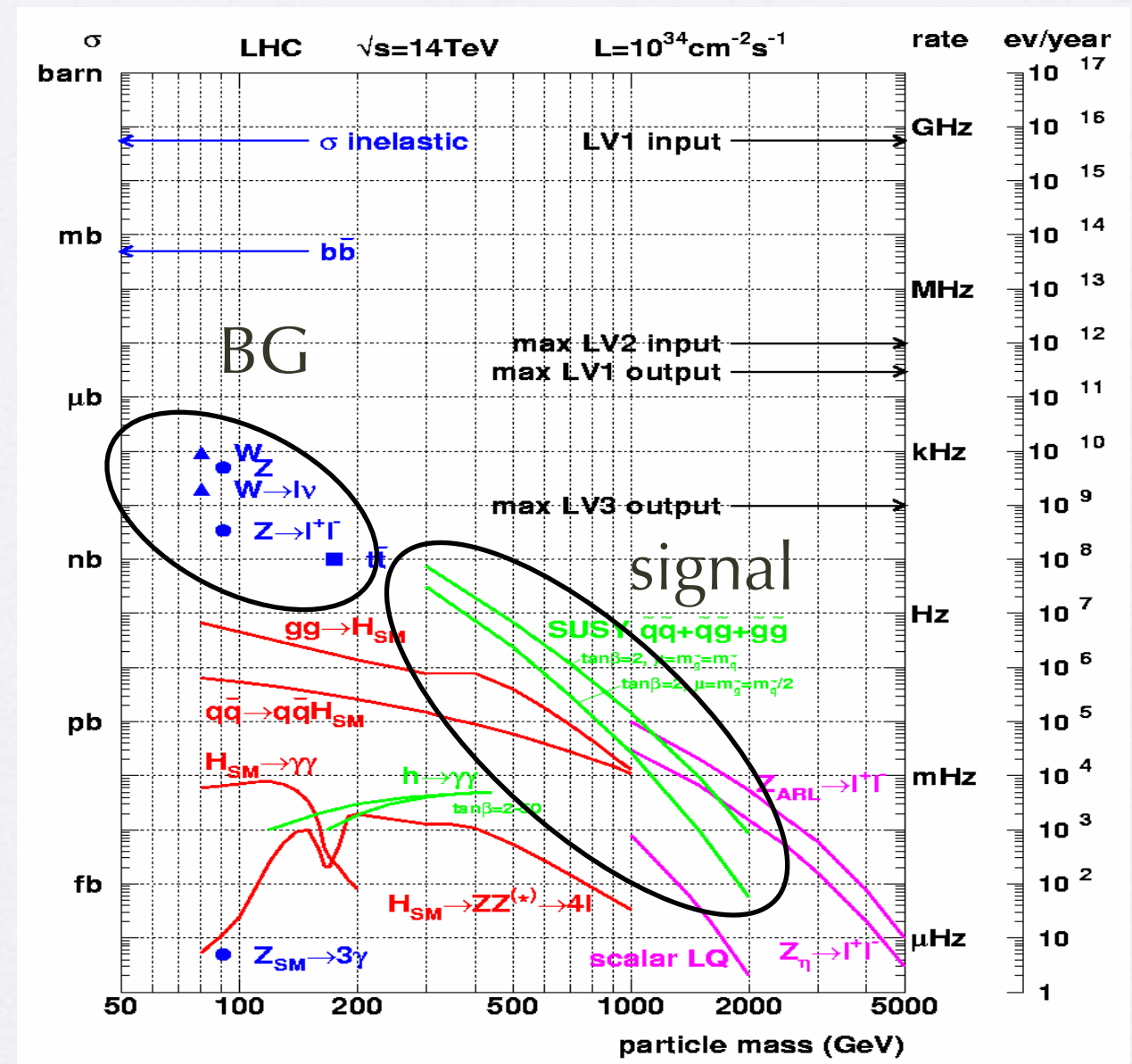


$$M_{\text{eff}} \equiv \sum_{i=1, \dots, 4} p_{Ti} + \sum_{\text{leptons}} p_{Tl} + E_{T\text{miss}}$$



# バックグラウンドと発見

- 典型的なSUSY 粒子の生成率は  
1TeV の粒子では  $10 \text{ fb}^{-1}$  で  $10^4$   
個、一方バックグラウンドになり  
そうな粒子の生成数は  $10^{9-8}$  ( $W, Z$   
ttbar)
- 分布の理解が重要
  - でてくる粒子の横方向運動量
    - 軽い粒子小さい運動量
    - 重い粒子が軽い粒子に崩壊  
大きい運動量
  - みええない運動量をきちんと  
計る (DM が重い粒子の崩壊  
から作られる)

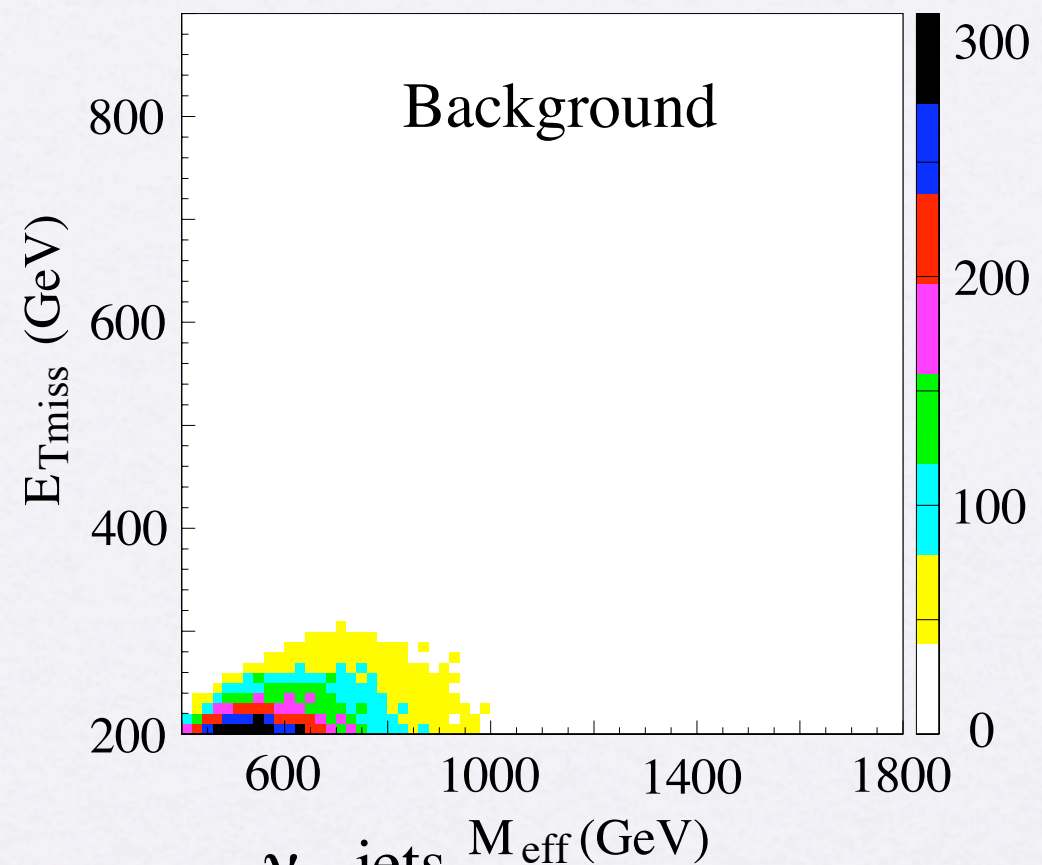
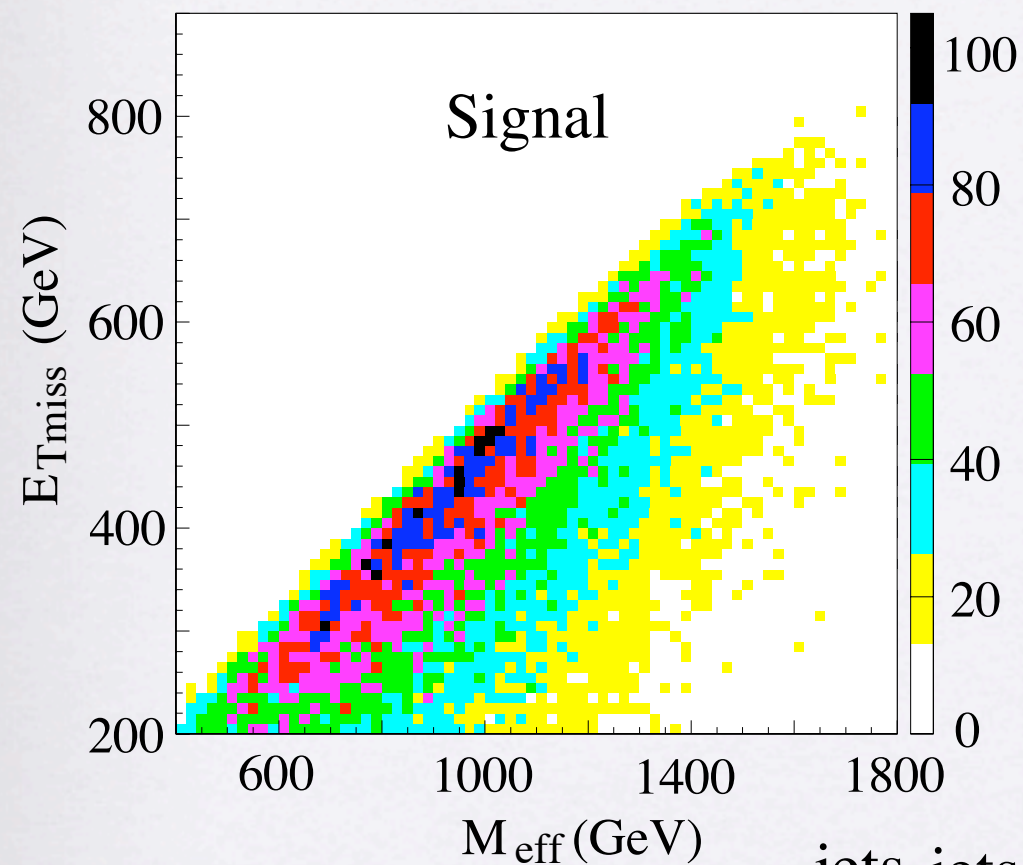




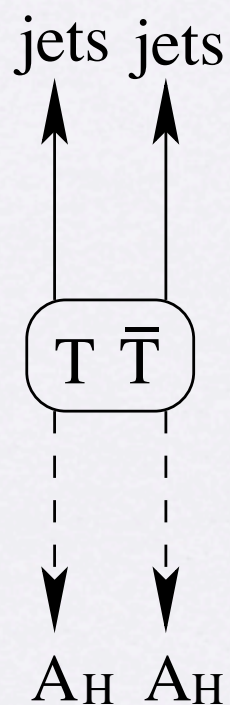
# シグナルとバックグラウンド分布

$$gg \rightarrow T_- T_-^*, T_- \rightarrow t B_H$$

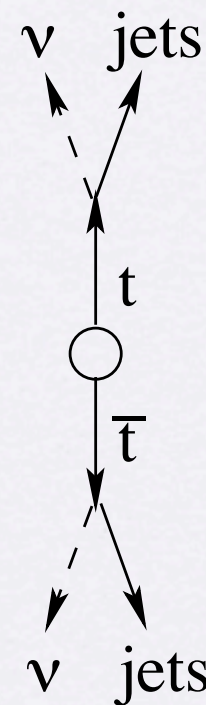
BG 多いが分布は異なる



Etmiss が Meff にくらべ  
相対的におおきいのが  
シグナル



( $T \bar{T}$  production)



( $t \bar{t}$  production)



# ECM=10TeV $L=200\text{pb}^{-1}$ 発見能力( $5\sigma$ )

( $M_{\text{eff}} > 800\text{GeV}$ )

multijets +  $m_{E_T}$

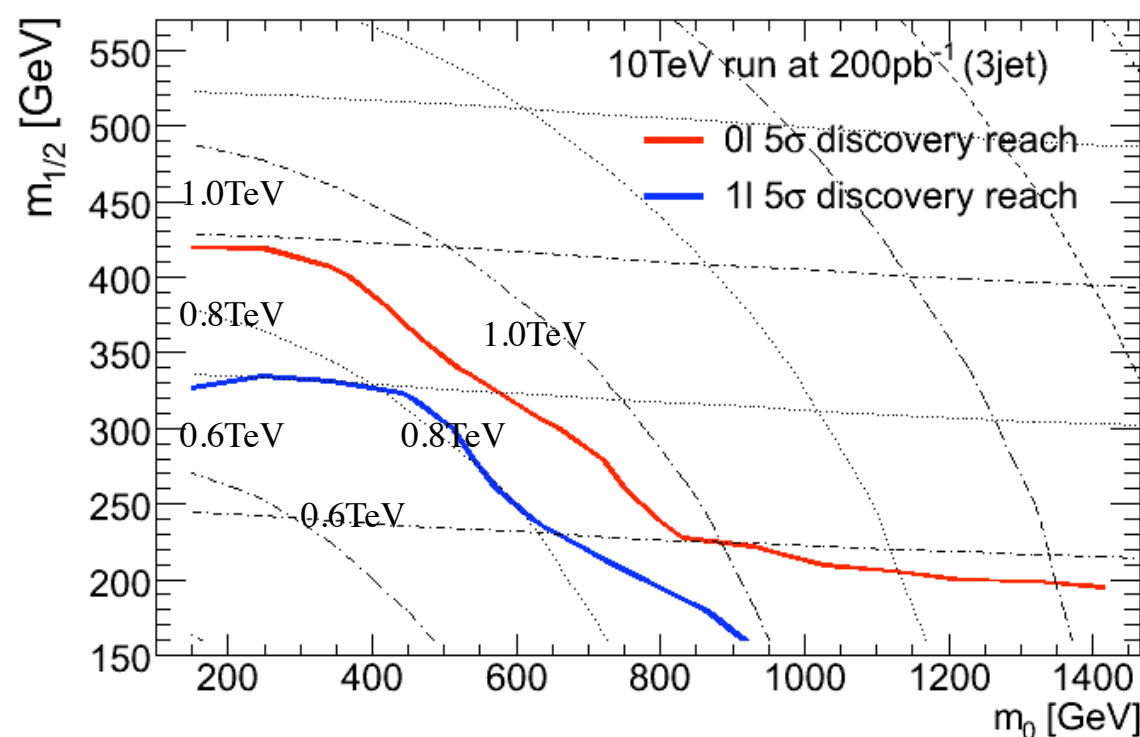
BG統計誤差 11%    BG評価系統誤差 35%

multijet +  $m_{E_T}$  + lepton(e,  $\mu$ )

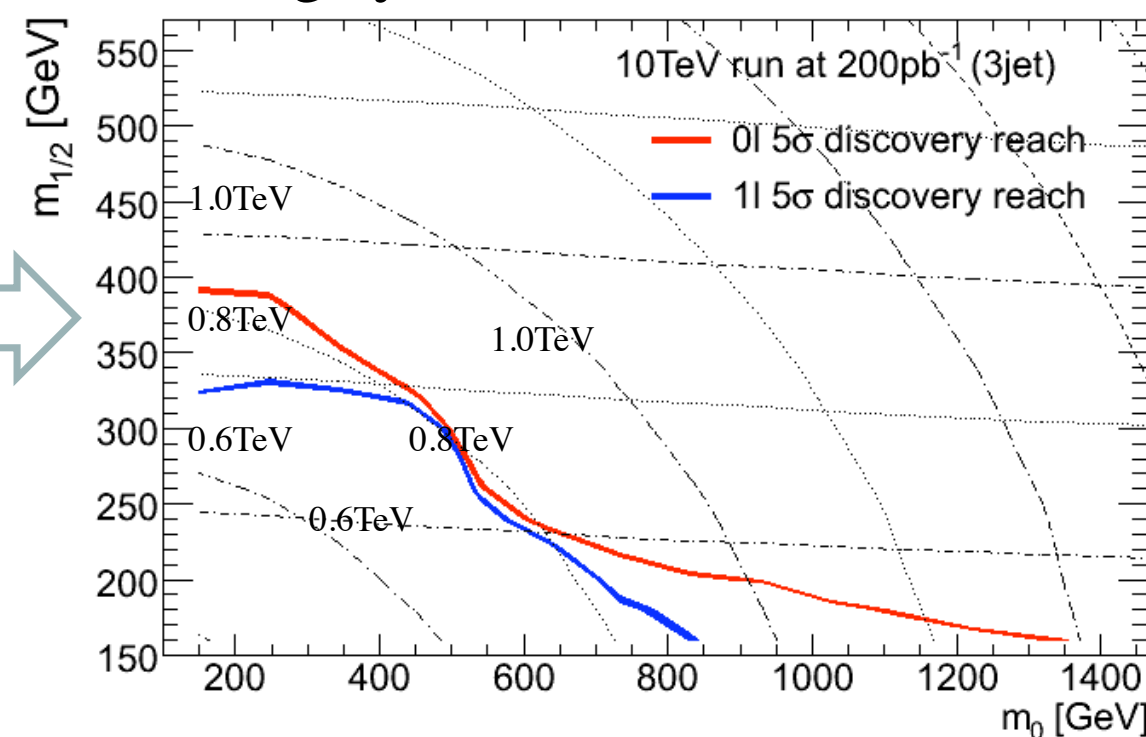
BG統計 50%

BG評価系統誤差 30%

only statistics



including systematics of BG estimation



Gluino, Squark  $\sim 800\text{GeV}$ 程度まで $5\sigma$ 発見可能:

(95%CL. exclusion も似たようなスケール: 次のページ)

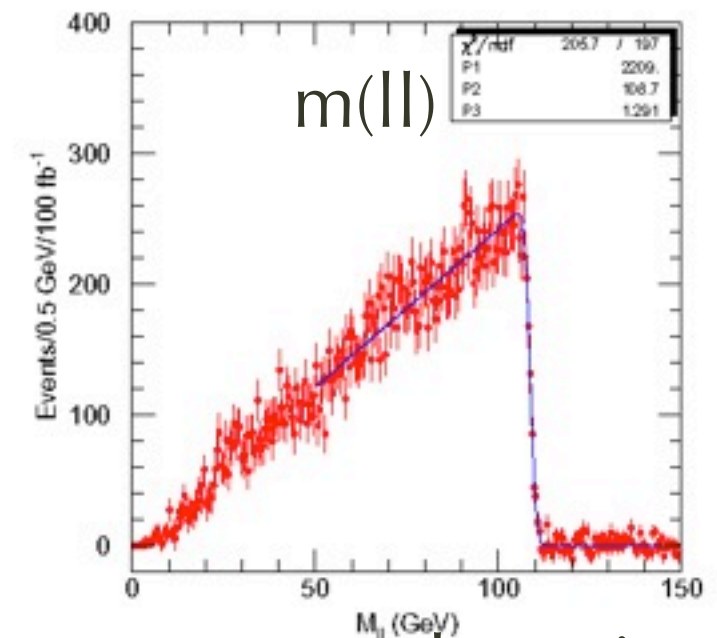
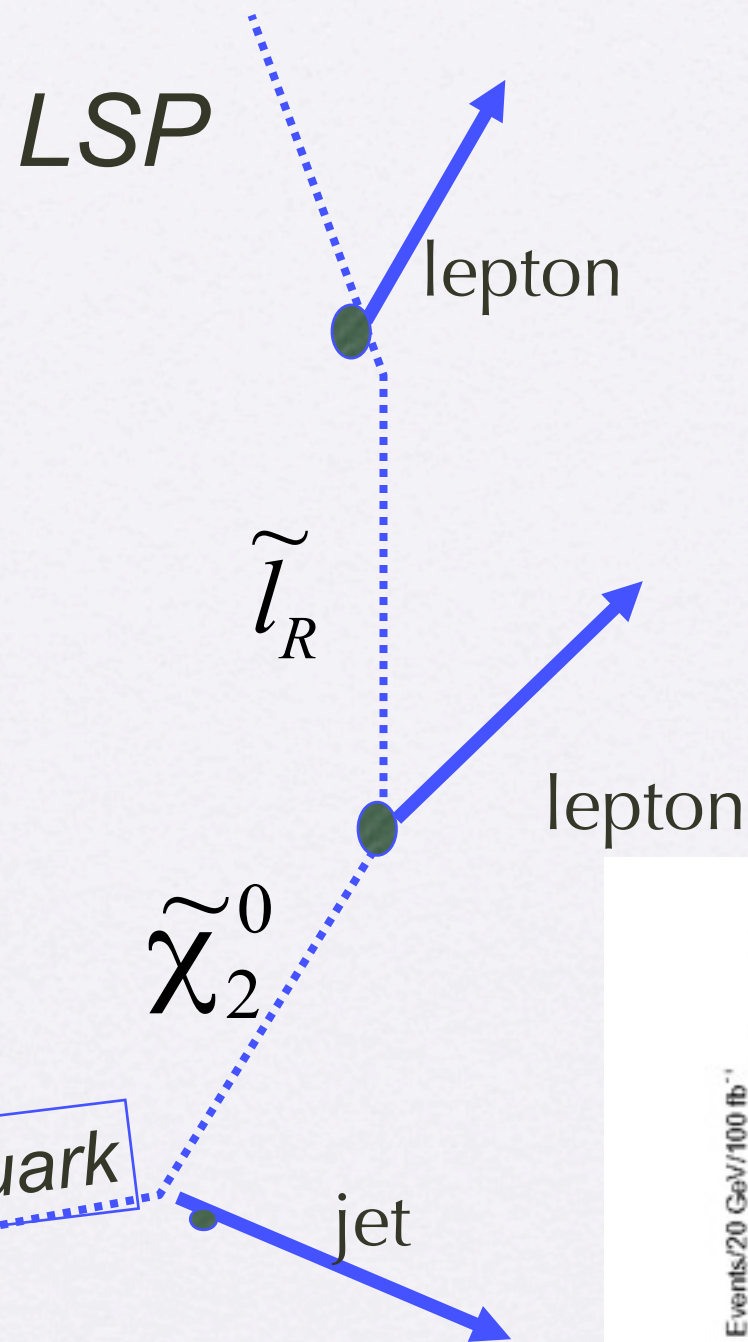
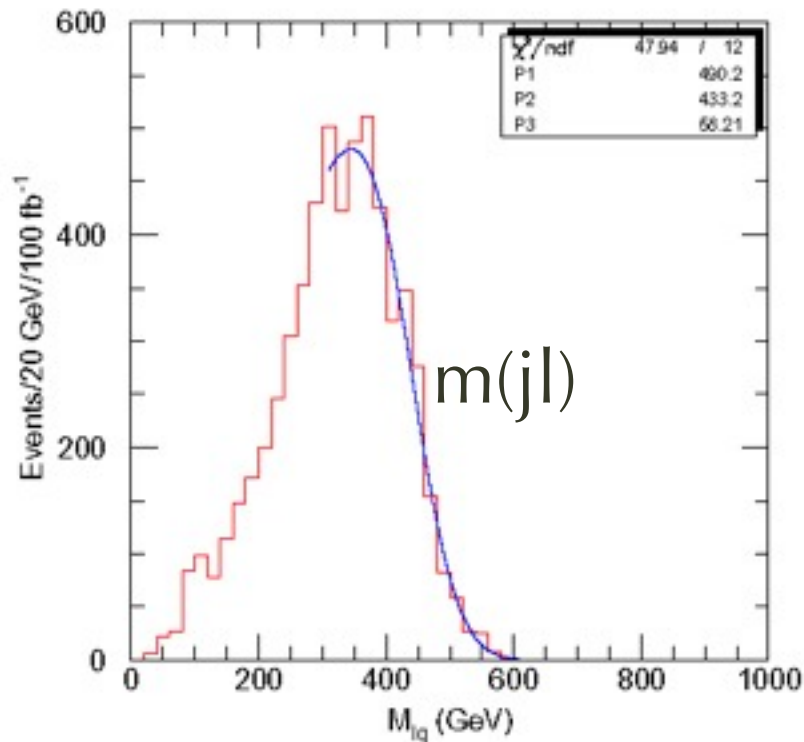
(BGもデータから評価する方法で評価し、Noise, cosmic, beamなどの効果も加味している)

Chargino  $\sim 250\text{GeV}$  Neutralino  $\sim 130\text{GeV}$  の DMのちょうどいいところ

はカバーできる。(細く伸びるcoannihilation, Focus pointはもう少しdata必要)

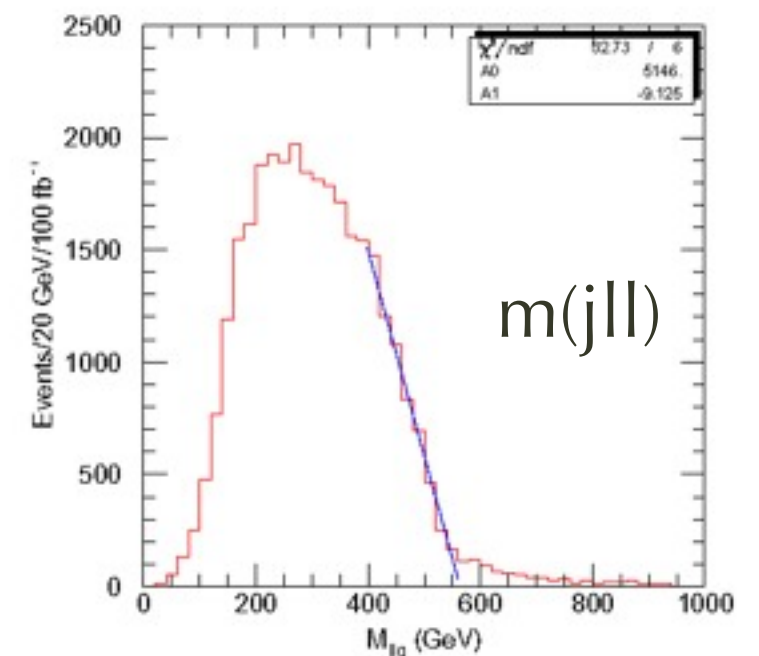
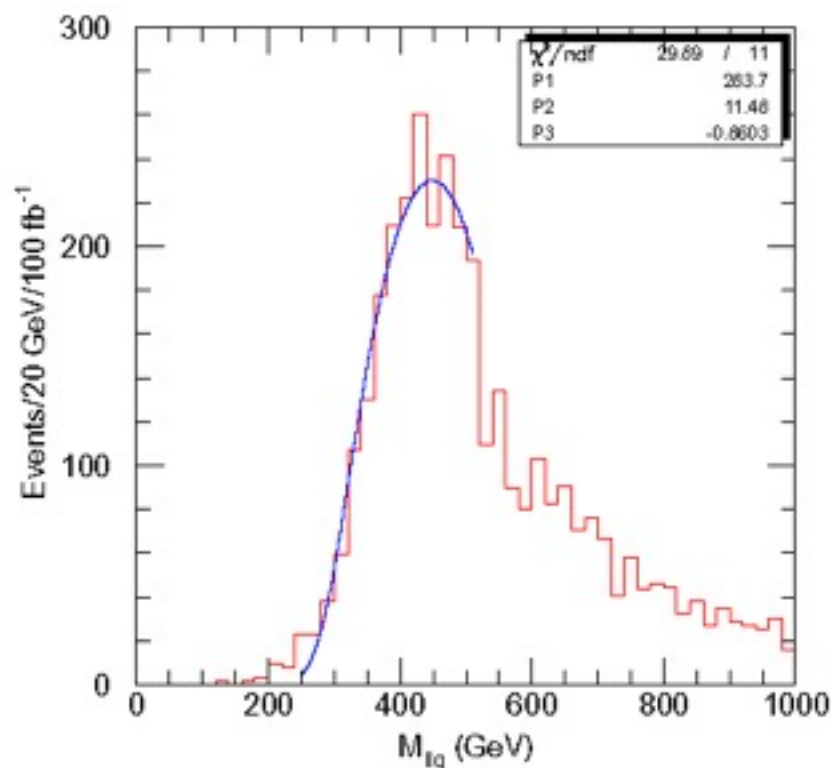


# 見えない粒子の質量の測定



$ee+\mu\mu-e\mu$  subtraction  
is effective to select  
single channel

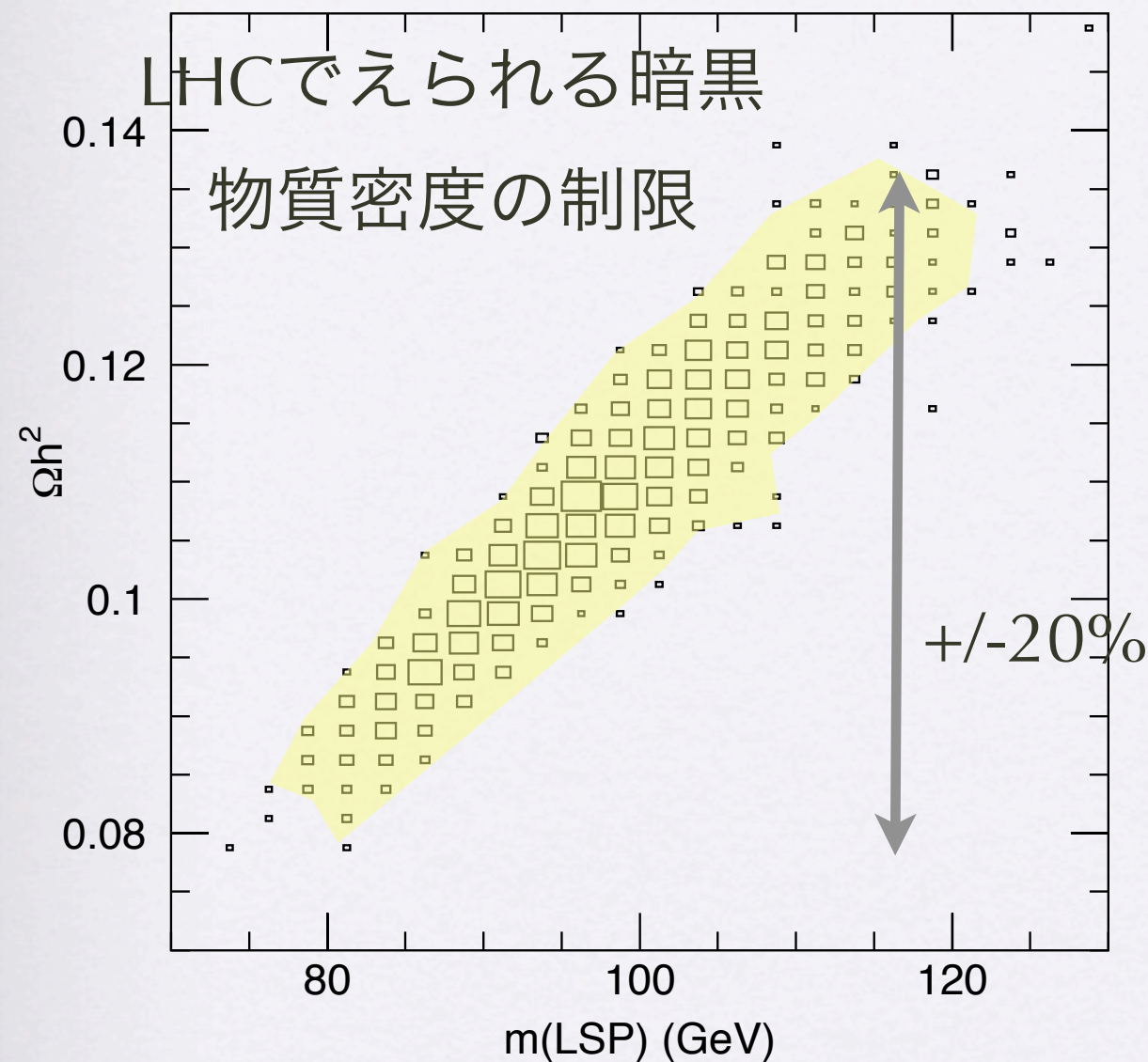
$m(jll)$  with  $m_{ll} > 0.5 m_{ll}(\max)$



Hinchliffe et al (97)

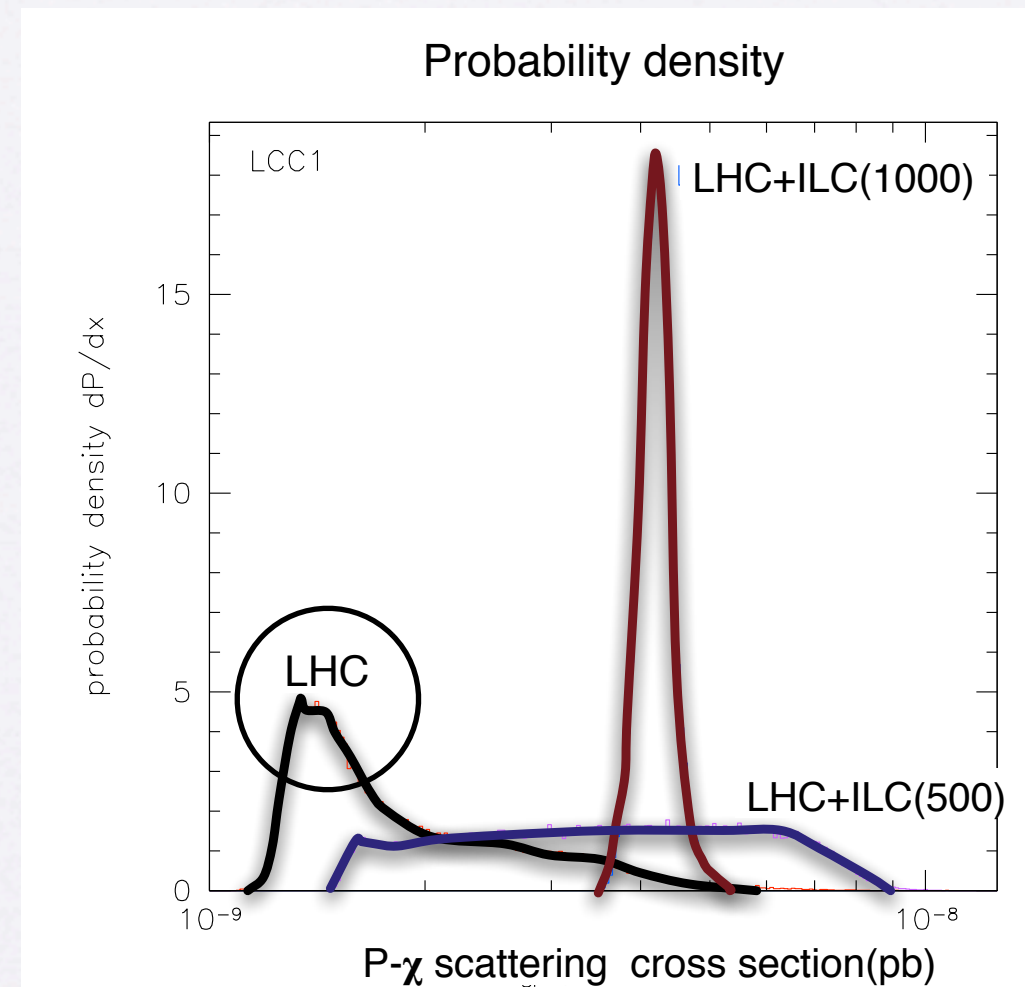


MN, Polesello and Tovey  
hep-ph/0512204



レプトンにいくモードが多く、s-channelのプロセスが押さえ込める場合はある程度（20%くらい）DM密度を決めることができる。

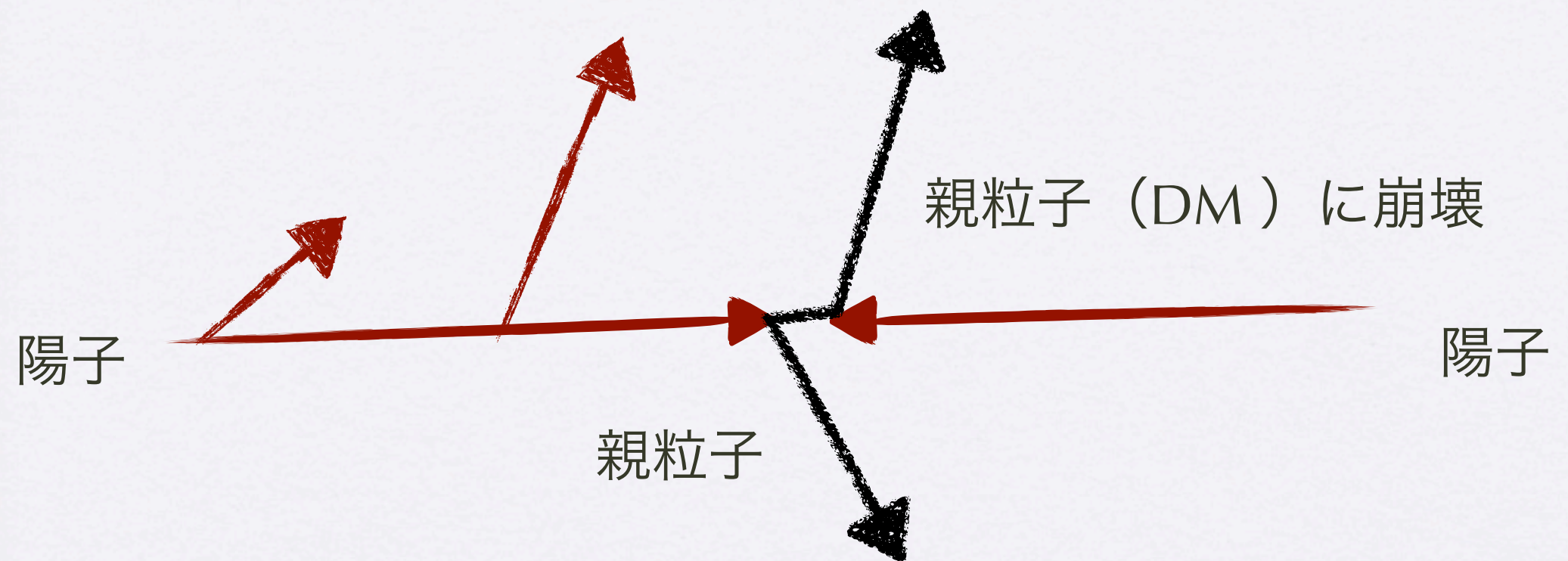
Baltz et al (2006)



DMと原子核との  
散乱断面積はほとんど  
決まらない



## 縮退している場合



- レプトン (BG を減らすのに効果あり) と Initial state radiation (重い粒子を作るときに、余計な放射がある) で発見できる。



# 宇宙物理が素粒子物理と出会う。

コライダーによる暗黒物質  
の発見。相互作用の決定

ビッグバンを  
仮定した暗黒  
物質の量

原子核へのあたりやすさ  
宇宙での対消滅レート  
反陽子、光子のスペクトラム

初期宇宙の  
素粒子現象

銀河内分布や  
伝播の不定性

CDMの量

暗黒物質の直接探索  
宇宙線の観測の  
高精度化

宇宙の観測



# 宇宙物理が素粒子物理と出会う。

