

# 宇宙線観測を用いた 暗黒物質間接検出の現状

松本 重貴



## 目次

1. 暗黒物質の間接検出について
2. 最近の観測結果について
3. 観測結果を踏まえた暗黒物質像
4. 結論と展望

# 暗黒物質の間接検出

## 暗黒物質の存在証拠

1. 銀河の回転速度の観測
2. 銀河団観測(X線, 重力レンズ)
3. 宇宙の大規模構造形成
4. 弾丸銀河団の観測
5. 宇宙背景放射の揺らぎ観測



## 暗黒物質について

### 暗黒物質の性質

中性・安定・弱相互作用

















### 暗黒物質の状態

冷たい・銀河や銀河団に付随・

平均質量密度:  $\sim 10^{-6} \text{GeV}/c.c.$

## 暗黒物質の正体について

### 標準模型に候補なし!

	物質粒子			力を伝える粒子
	第1世代	第2世代	第3世代	
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ	強い相互作用  グルオン
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム	
レプトン	 電子	 ミューオン	 タウ	電磁相互作用  光子
	 ニュートリノ	 ミューニュートリノ	 タウニュートリノ	
				弱い相互作用  Wボゾン  Zボゾン

標準模型を超える物理が必要!  
(SUSY・UED・Gauge-Higgs・  
Little-Higgs・Inert H・etc.)

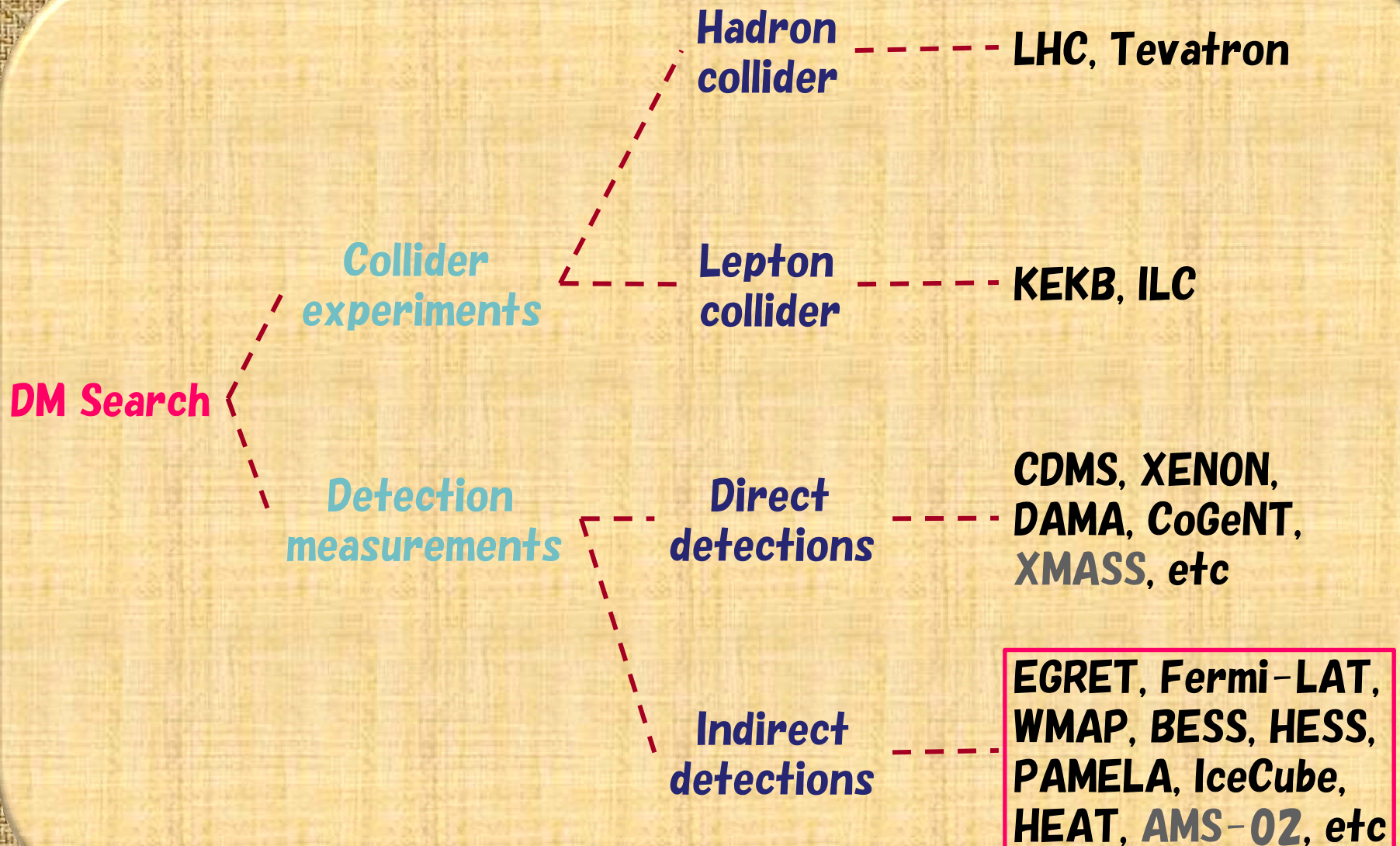


## WIMP暗黒物質仮説

暗黒物質は安定で中性な  
重い(10GeV-1TeV)素粒子。  
(結合定数は $O(1)$ )

1. 上記の暗黒物質の性質・状態をすべて自然に説明可能!
  2. 標準模型を超えるTeVスケールの物理と相性が非常に良い!  
(LSP, LKP, Stable Higgs, LTP, etc)
- 暗黒物質の正体は何?

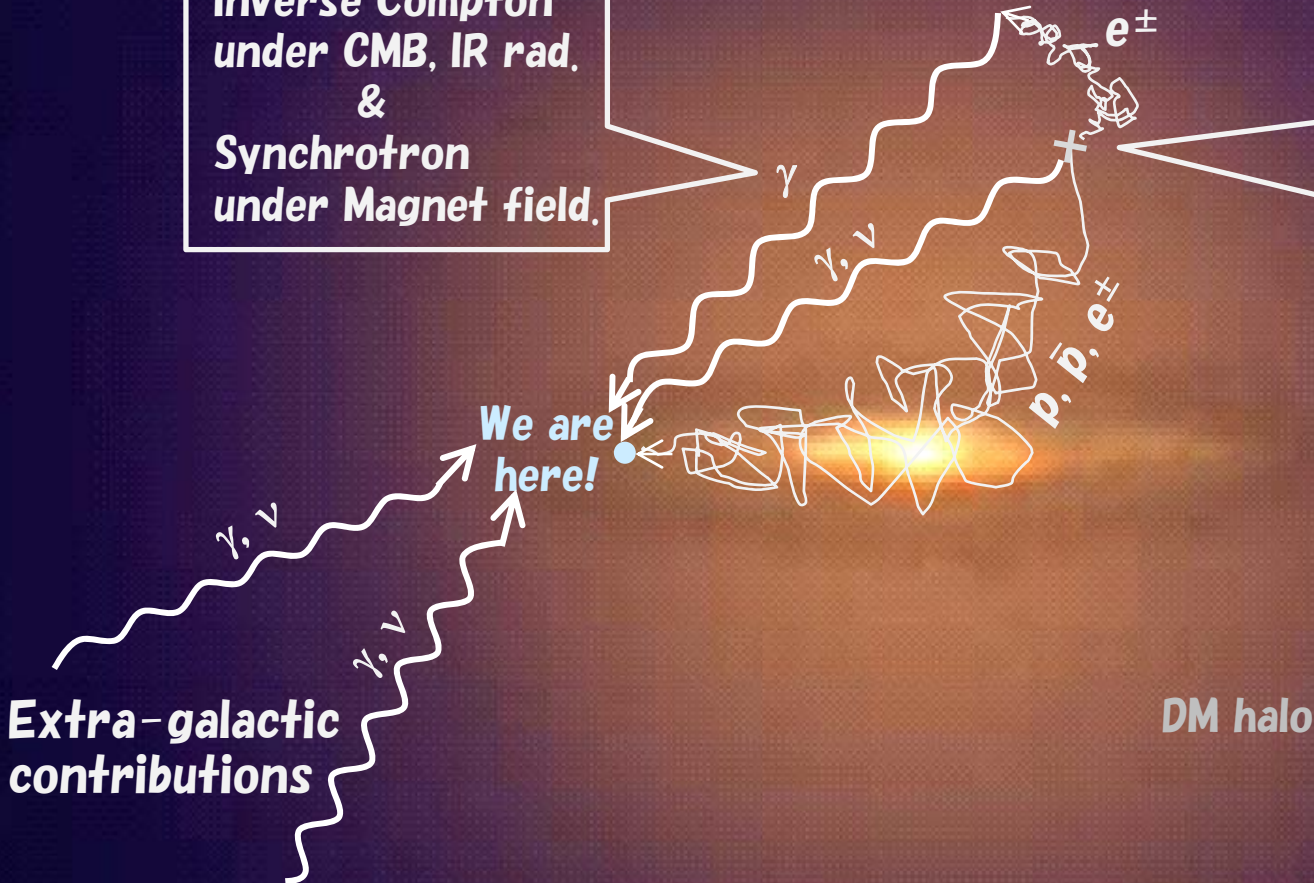
# 暗黒物質の間接検出



# 暗黒物質の間接検出

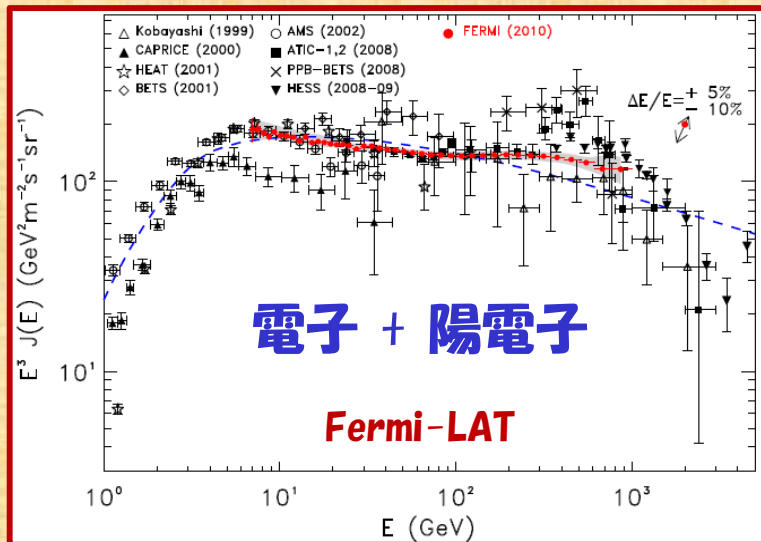
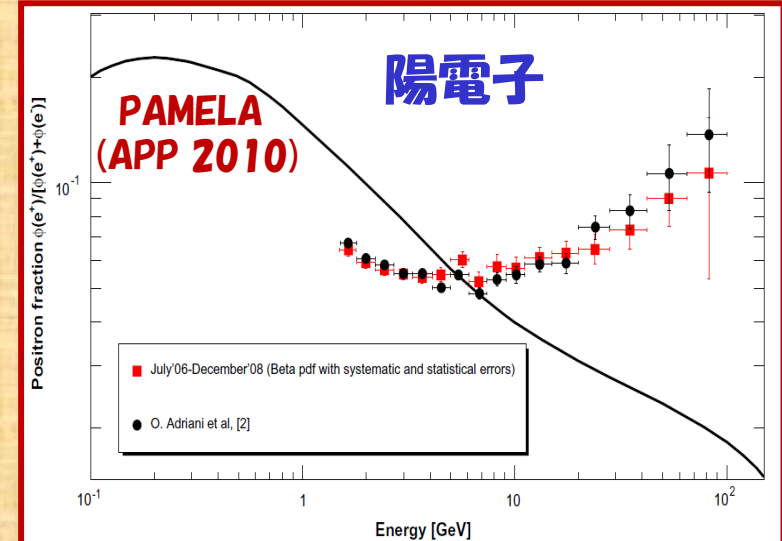
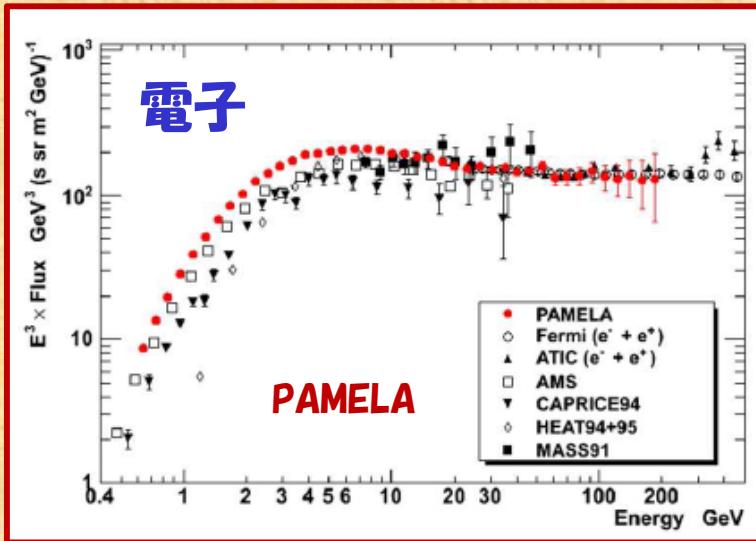
Inverse Compton  
under CMB, IR rad.  
&  
Synchrotron  
under Magnet field.

Annihilation of DM  
or Decay of DM  
↓  
Productions of  
 $p, \bar{p}, e^{\pm}, \gamma, \nu$



In the following, we will show some recent results on  $e, p$  and  $\gamma$  fluxes.

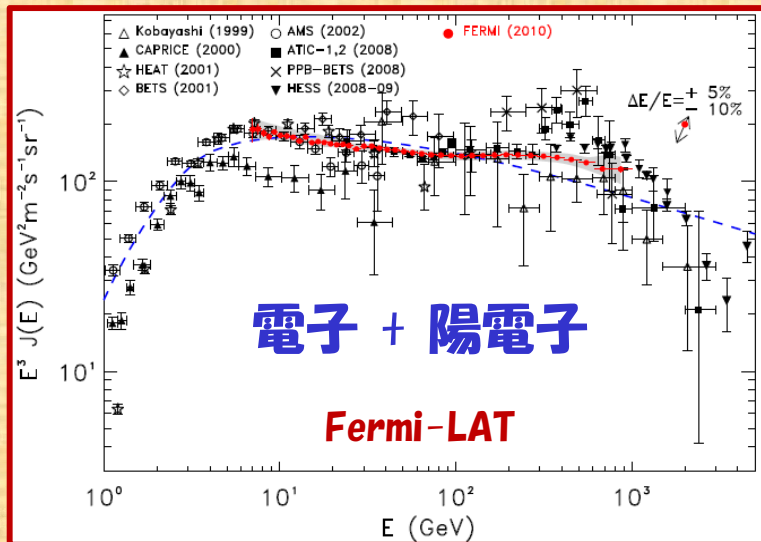
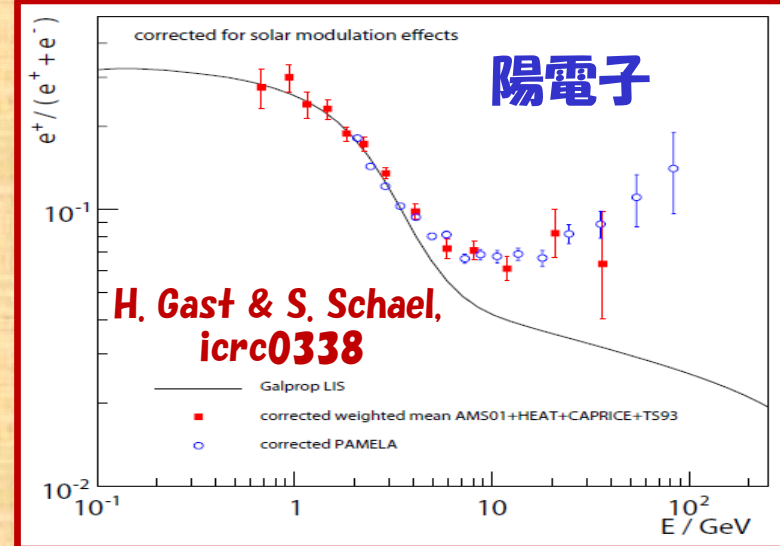
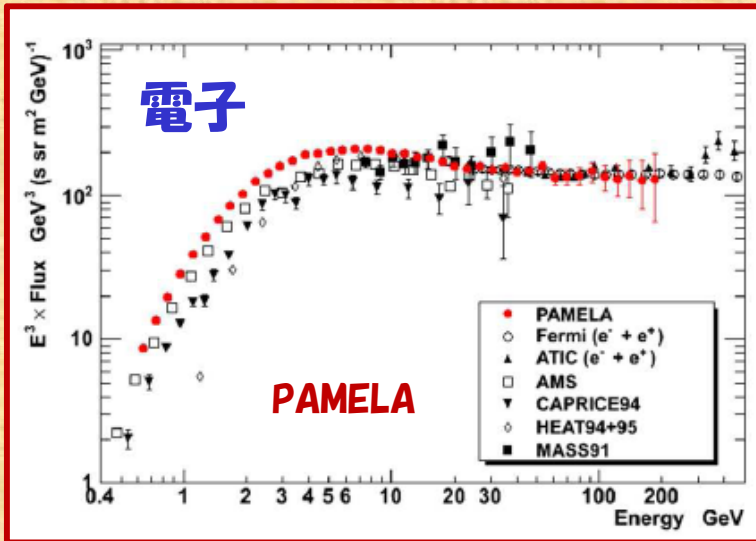
# 観測結果(電子・陽電子)



## データから読み取れること

1. 低エネルギー領域(数GeV以下)でフラックスの季節変動有り!
2. 高エネルギー領域(10GeV以上)で陽電子成分にアノマリー!
3. 電子+陽電子フラックスにおいても、宇宙線BGとの相性(Fit)が、あまり良くない。

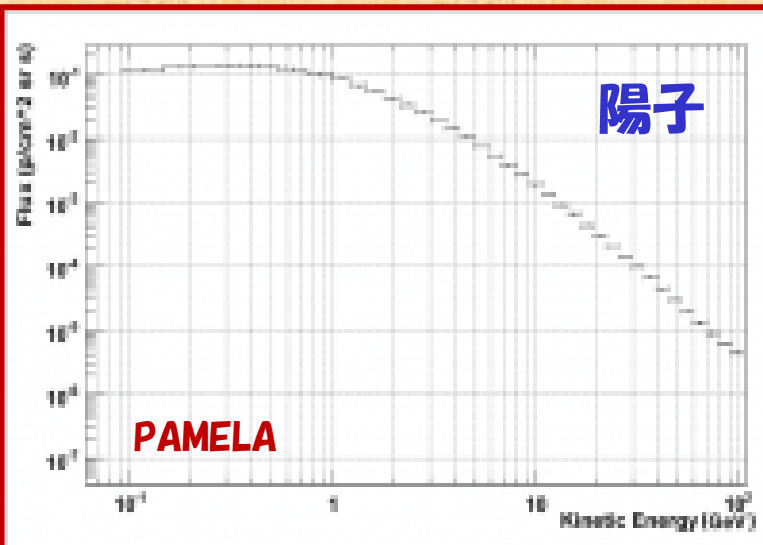
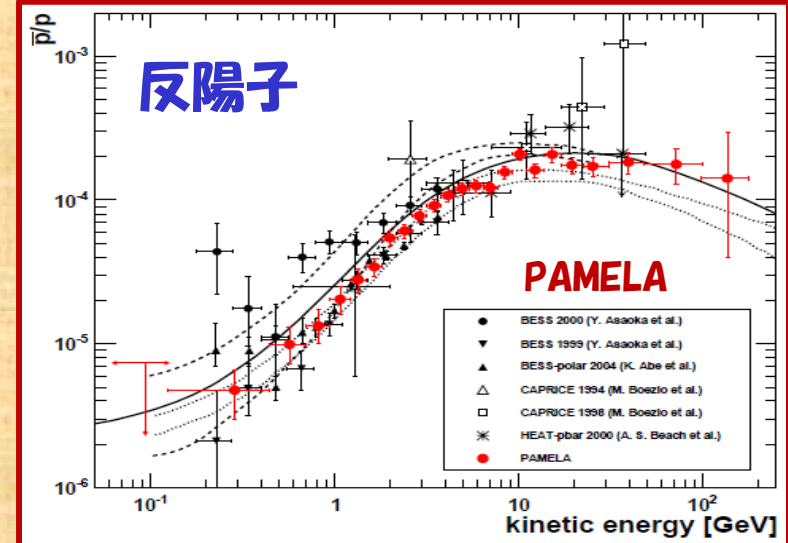
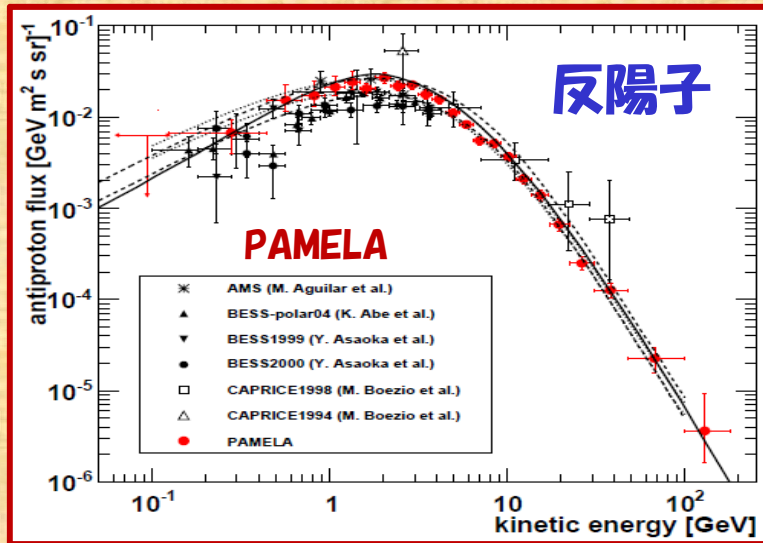
# 観測結果(電子・陽電子)



## データから読み取れること

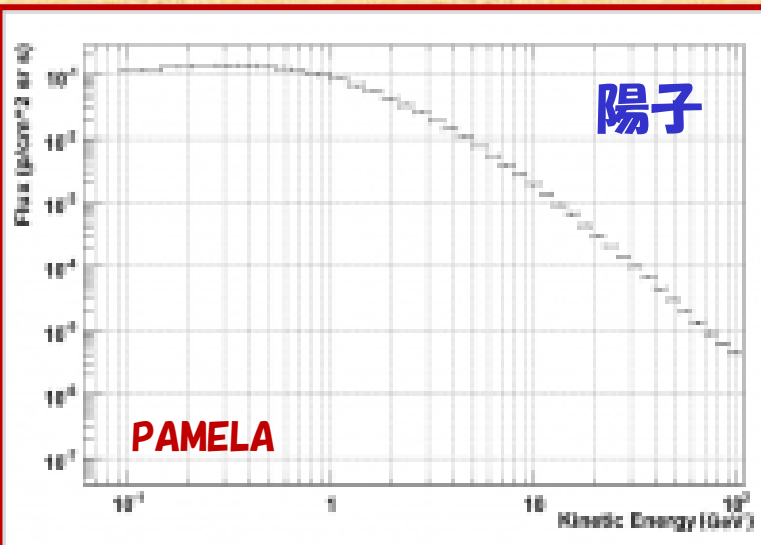
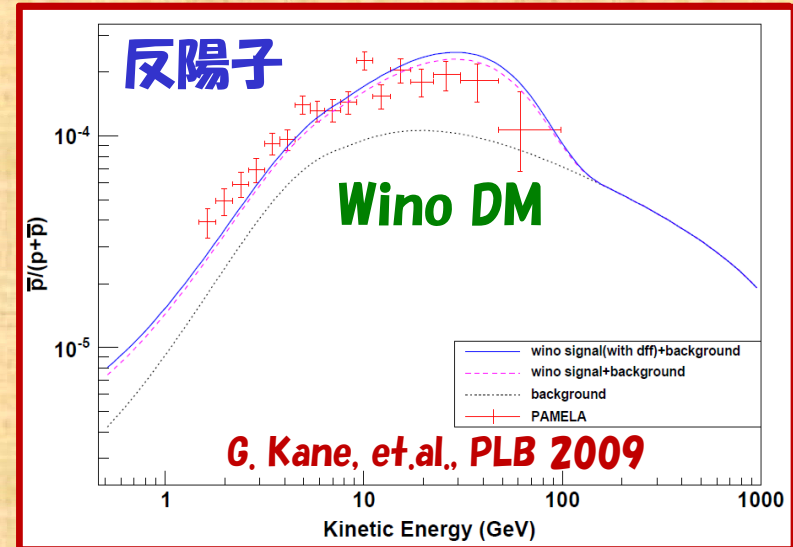
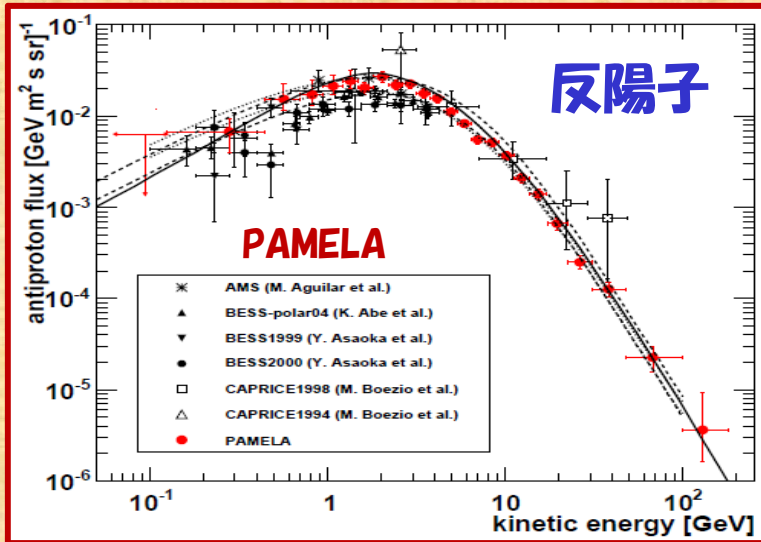
1. 低エネルギー領域(数GeV以下)でフラックスの季節変動有り!
2. 高エネルギー領域(10GeV以上)で陽電子成分にアノマリー!
3. 電子+陽電子フラックスにおいても、宇宙線BGとの相性(Fit)が、あまり良くない。

# 観測結果(陽子・反陽子)



- データから読み取れること**
1. 陽子・反陽子スペクトル共に  
2宇宙線で良く説明される!  
(反陽子/陽子は不定性小!)
  2. 反陽子を多く出す暗黒物質  
候補は制限される傾向にあり
  3. 例外あり! 必ずしも反陽子  
SignalがBGを超えて存在  
しないことを意味しない!

# 観測結果(陽子・反陽子)



- データから読み取れること**
1. 陽子・反陽子スペクトル共に  
2宇宙線で良く説明される!  
(反陽子/陽子は不定性小!)
  2. 反陽子を多く出す暗黒物質  
候補は制限される傾向にあり
  3. 例外あり! 必ずしも反陽子  
SignalがBGを超えて存在  
しないことを意味しない!

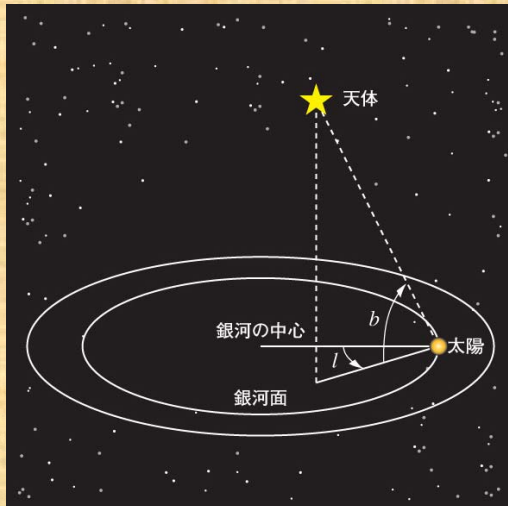
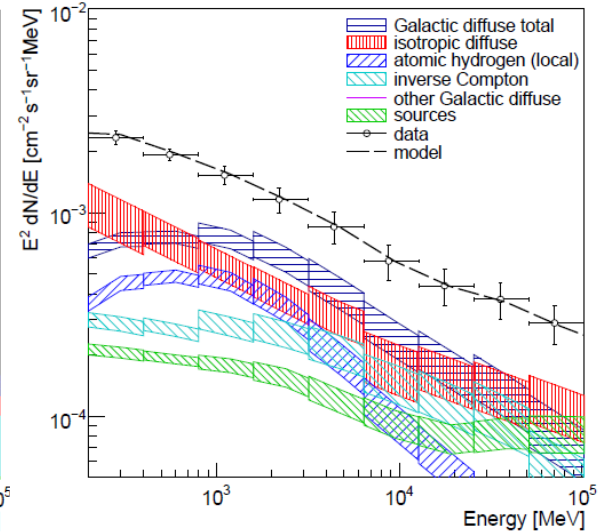
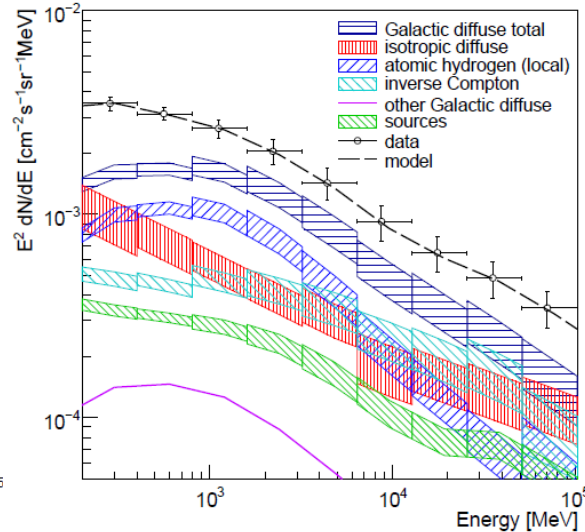
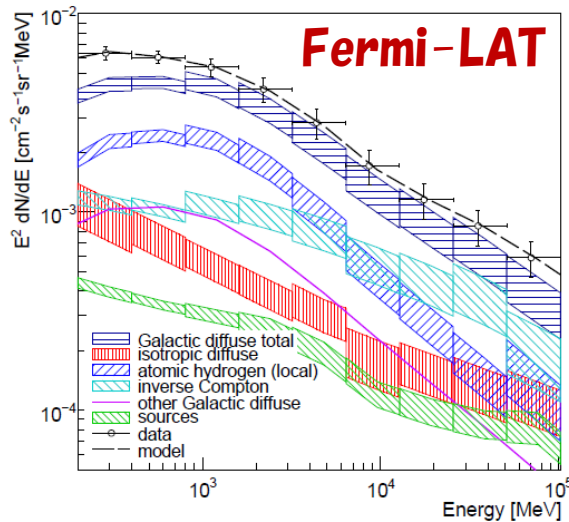


# 観測結果(拡散ガンマ線)

$10^\circ < |b| < 20^\circ$

$20^\circ < |b| < 60^\circ$

$60^\circ < |b| < 90^\circ$

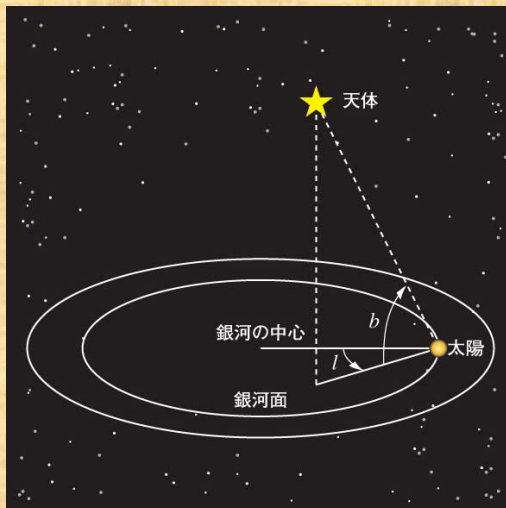
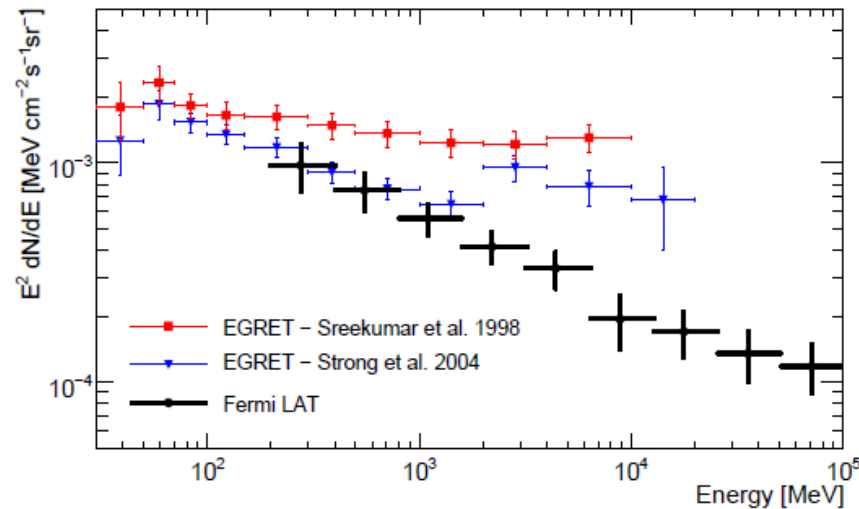


## データから読み取れること

1. 拡散ガンマ線のエネルギースペクトルに微的な振る舞いは観測されず。(EGRET Anomaly は消失)
2. 等方成分に対する、銀河外成分の寄与(フレイザー等)は分からないため、暗黒物質模型に対する制限にのみ使用可。
3. 質量の重い暗黒物質に制限を与える。

# 観測結果(拡散ガンマ線)

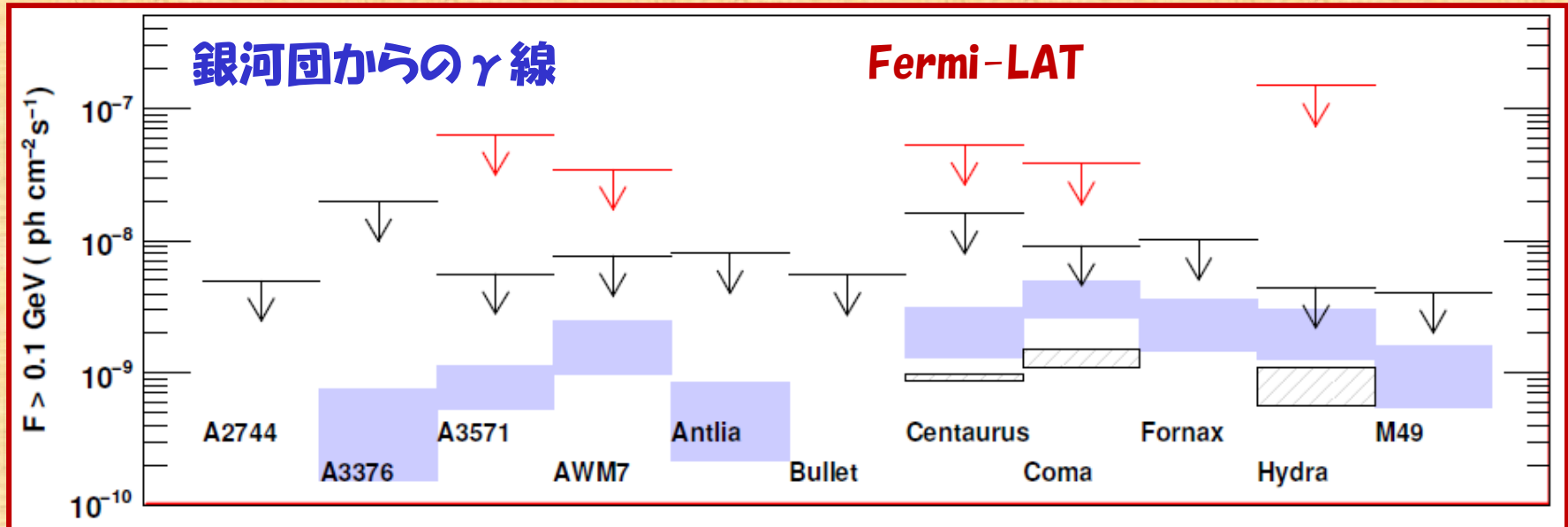
## Isotropic diffuse



## データから読み取れること

1. 拡散ガンマ線のエネルギースペクトルに微的な振る舞いは観測されず。(EGRET Anomaly は消失)
2. 等方成分に対する、銀河外成分の寄与(フレイザー等)は分からないため、暗黒物質モデルに対する制限にのみ使用可。
3. 質量の重い暗黒物質に制限を与える。

# 観測結果(天体からのガンマ線)



## 天体の候補

1. 銀河中心
2. 銀河面 (Galactic Ridge)
2. 近傍の矮小銀河 (Draco)
3. 近傍の銀河 (M31)
4. 銀河団
5. ...

## 銀河団からの $\gamma$ 線観測の利点

1. Fermi-LATの空間解像度が高いため、銀河団からの $\gamma$ 線は暗黒物質のシナリオに強い制限を与える。
2. 暗黒物質の崩壊シナリオに(対消滅シナリオに比べ)強い制限を与える
3. Fornaxが最も強い制限を与える。

# 観測結果を踏まえた暗黒物質像

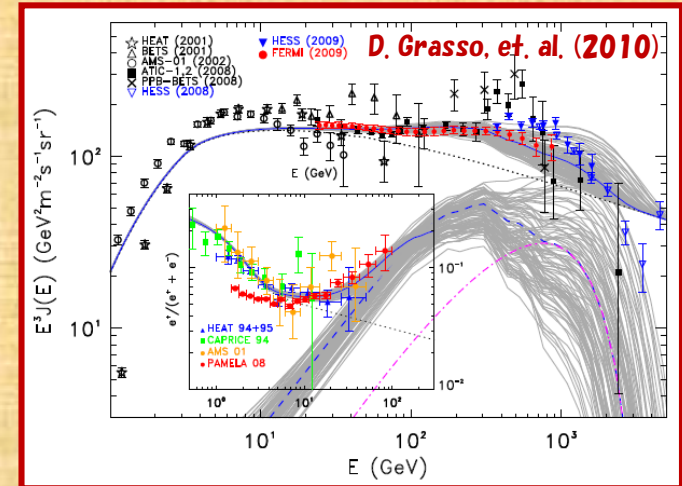
## 宇宙線観測の現状

1. 陽電子 (アノマリーあり)
2. 電子 (宇宙線BGとのFitやや難)
3. 反陽子 (2次宇宙線でFit可)
4. 拡散  $\gamma$  (特異な振る舞いなし)
5. 特定  $\gamma$  (フラックスの上限有)

保守的



アノマリー等は天体現象で説明



暗黒物質シグナルは小さく、  
観測結果を制限として使用

積極的

アノマリー等は暗黒物質で説明

- 暗黒物質対消滅シナリオ
- 暗黒物質の崩壊シナリオ (宇宙年齢より充分長い)

生成量:  $10^{-30} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$

質量:  $0(100 - 1000) \text{ GeV}$

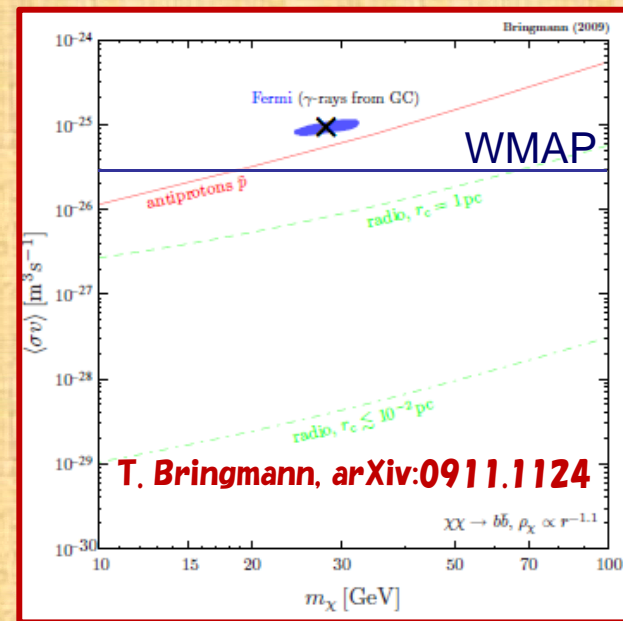
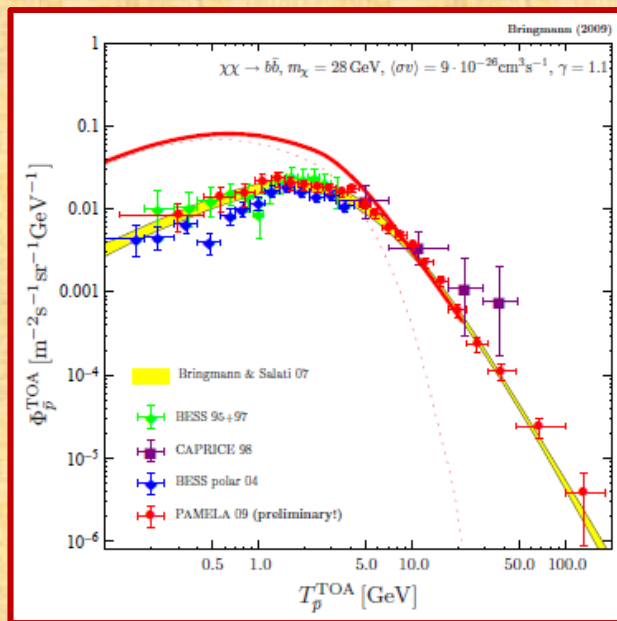
他の観測(反陽子・ $\gamma$ 線)と矛盾  
しないシナリオを考える必要あり!

# 観測結果を踏まえた暗黒物質像

～ 保守的な場合 ～

伝統的なWIMPシナリオ ( $\langle \sigma v \rangle \sim 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$  &  $m_{\text{DM}} \sim 100 \text{ GeV}$ )  
は全ての宇宙線観測(電子・陽電子・反陽子・ガンマ線)とConsistent!

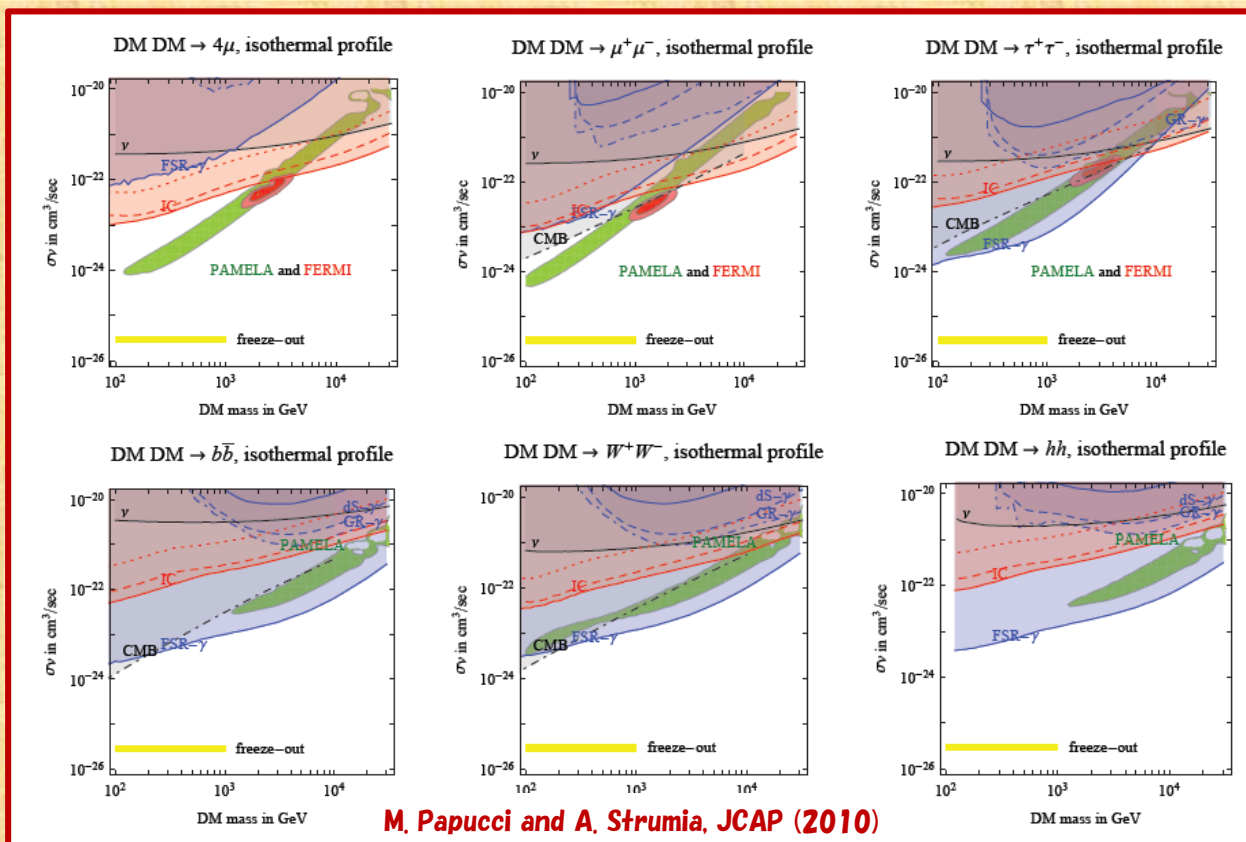
暗黒物質が $\sim 10 \text{ GeV}$ 程度になると、反陽子観測から制限されつつある。  
(暗黒物質対消滅によりanti-protonを多く出す場合。例  $\text{DM DM} \rightarrow b\bar{b}$ 等)



# 観測結果を踏まえた暗黒物質像

～ 積極的な場合(対消滅シナリオ) ～

対消滅の終状態は反陽子及び拡散ガンマ線の観測により強く制限される。  
主にレプトン(特に $\mu$ 粒子等)へ対消滅するシナリオが望ましい。



銀河団からの $\gamma$ 線の制限は、対消滅シナリオに対しては強くない。

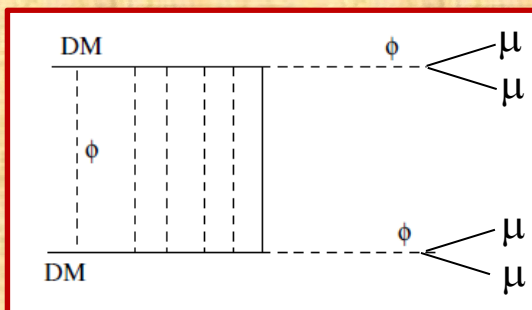
# 観測結果を踏まえた暗黒物質像

～ 積極的な場合(対消滅シナリオ) ～

$\langle \sigma v \rangle \sim 5 \times 10^{-24} \text{ cm}^3/\text{s}$   
(For e-Anomaly)

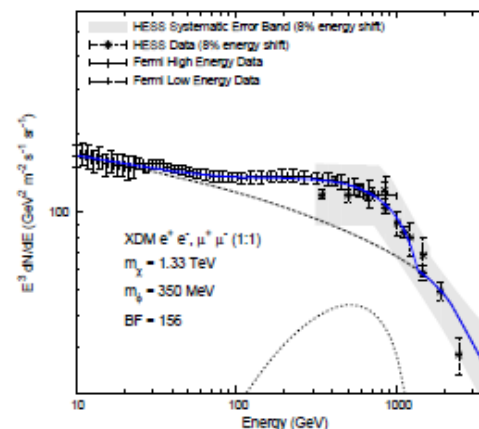
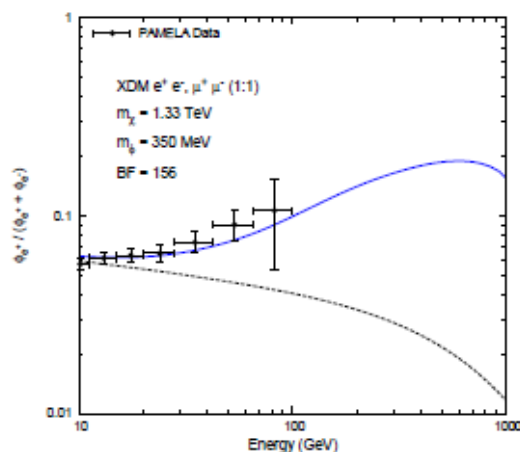
vs.  $\langle \sigma v \rangle \sim 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$   
(For Relic Abundance)

→ Sommerfeld [Hisano, SM, Nojiri (2004)], Resonance [Ibe, Yanagida, Murayama, (2008)]



暗黒物質とカッパルシ、及びSM粒子と弱く相互作用する粒子  $\phi$  が存在すると

1. 対消滅断面積がSommerfeld効果で低速度の暗黒物質に対し増大。
2. 自動的にlepton終状態。

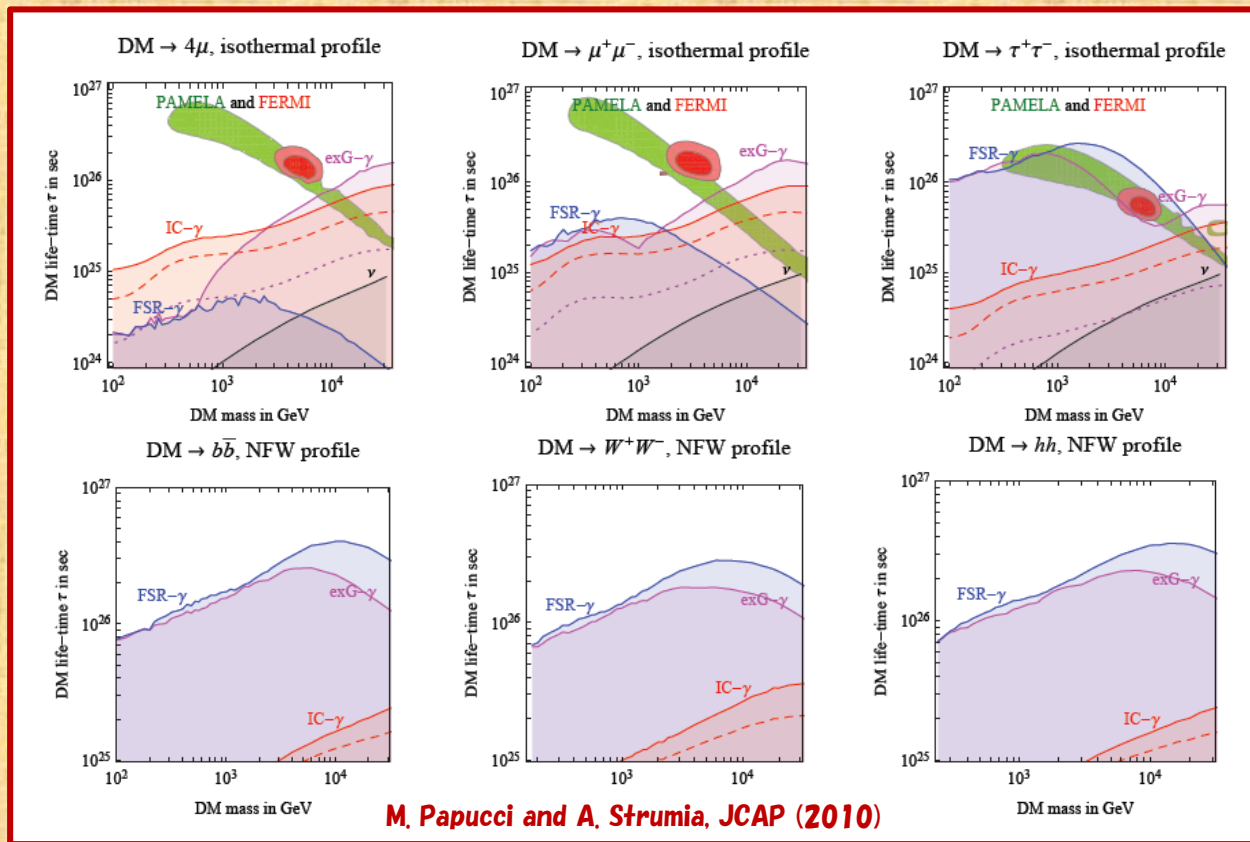


D. P. Finkbeiner, et al., arXiv:1011.3082.

# 観測結果を踏まえた暗黒物質像

～ 積極的な場合(崩壊シナリオ) ～

崩壊の終状態は反陽子及び拡散ガンマ線の観測により強く制限される。  
主にレプトン(特に $\mu$ 粒子等)へ対消滅するシナリオが望ましい。

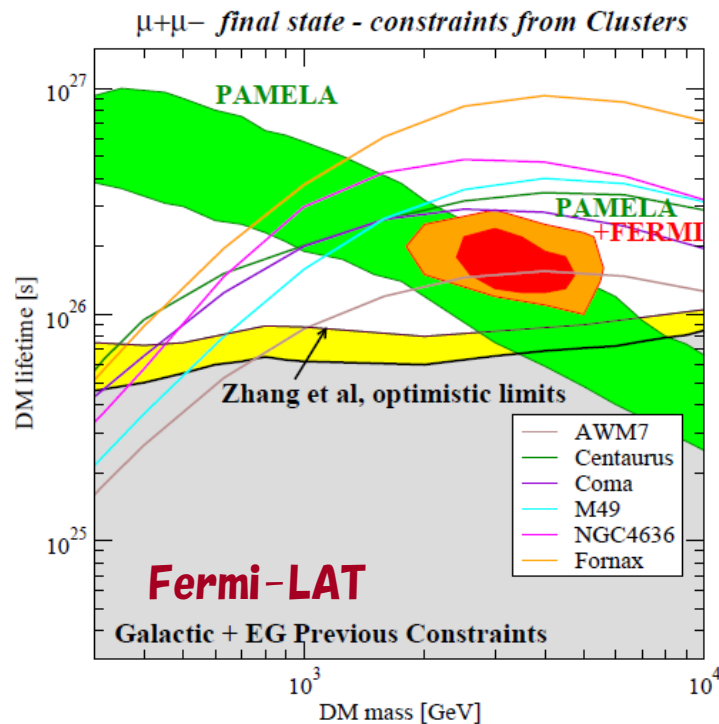




# 観測結果を踏まえた暗黒物質像

## ～ 積極的な場合(崩壊シナリオ) ～

崩壊の終状態は反陽子及び拡散ガンマ線の観測により強く制限される。  
主にレプトン(特に $\mu$ 粒子等)へ対消滅するシナリオが望ましい。



銀河団からの $\gamma$ 線観測は崩壊シナリオを強く制限!

# 観測結果を踏まえた暗黒物質像

～ 積極的な場合(崩壊シナリオ) ～

$$\Gamma \sim 10^{-26} \text{ sec}^{-1} \quad \text{vs.} \quad 1/\text{宇宙年齢} \sim 2 \times 10^{-18} \text{ sec}^{-1}$$

→ Higher-dim. Operator [K. Hamaguchi, S. Shirai, T. T. Yanagida, 2008]

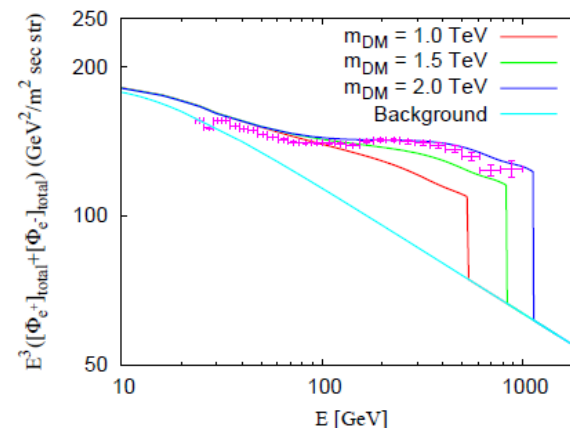
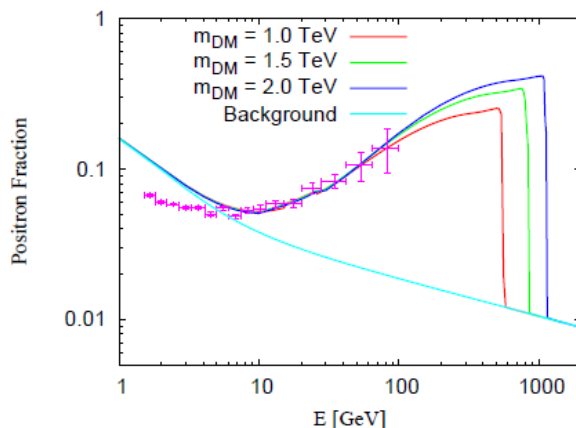
Extra-dimension setup [C. R. Chen, F. Takahashi, T. T. Yanagida, 2009]

Anomalous interaction [H. Fukuoka, J. Kubo, D. Suematsu, 2009]

$$\Gamma_{\text{DM}} \simeq 10^{-26}/\text{sec} \simeq \left( \frac{1 \text{ TeV}}{\Lambda_{\text{GUT}}} \right)^4 \text{ TeV}$$

Imposing Discrete symmetry  $A_3$   
E, L = Triplet, others = singlet!

Dimensions	DM decay operators
4	$\bar{L}H^c X$
5	—
6	$\bar{L}E\bar{L}X$ , $H^\dagger H \bar{L}H^c X$ , $(H^c)^\dagger D_\mu H^c \bar{E}\gamma^\mu X$ , $\bar{Q}D\bar{L}X$ , $\bar{U}Q\bar{L}X$ , $\bar{L}D\bar{Q}X$ , $\bar{U}\gamma_\mu D\bar{E}\gamma^\mu X$ , $D^\mu H^c D_\mu \bar{L}X$ , $D^\mu D_\mu H^c \bar{L}X$ , $B_{\mu\nu} \bar{L}\sigma^{\mu\nu} H^c X$ , $W_{\mu\nu}^a \bar{L}\sigma^{\mu\nu} \tau^a H^c X$



Haba, Kajiyama, S.M., H. Okada, Yoshioka, PRD 2010.

# 結論と展望

## ～ 結論 ～

**宇宙線を用いた観測の現状:** 陽電子にアノマリーあり。  
 電子にもアノマリーがあるかも。  
 反陽子は2次宇宙線と無矛盾  
 $\gamma$ 線はBGと無矛盾。

**伝統的な暗黒物質シナリオ:** 暗黒物質の質量が軽いと( $\sim 10\text{GeV}$ )、  
 反陽子観測で制限されつつあり。

**PAMELAアノマリーを説明:** 反陽子・ $\gamma$ 線観測(銀河団からの $\gamma$ 含む)  
 する暗黒物質シナリオにより、終状態に強い制限あり!  
 対消滅・崩壊シナリオとともに  
 アノマリーを説明するシナリオあり。

## ～ 展望 ～

**AMS-02実験が今春始まる予定!** 宇宙線(電子・陽電子・反陽子等)のエネルギースペクトルが非常に精密に測定されるはず!

1. 陽電子スペクトルの( $< 300\text{ GeV}$ )観測  $\rightarrow$  暗黒物質質量
2. 反陽子スペクトルの詳細な観測  $\rightarrow$  シナリオの制限
3. 宇宙線原子核成分の観測  $\rightarrow$  拡散モデルの不定性減少