

Dark matter interpretation of the AMS-02 2015 result

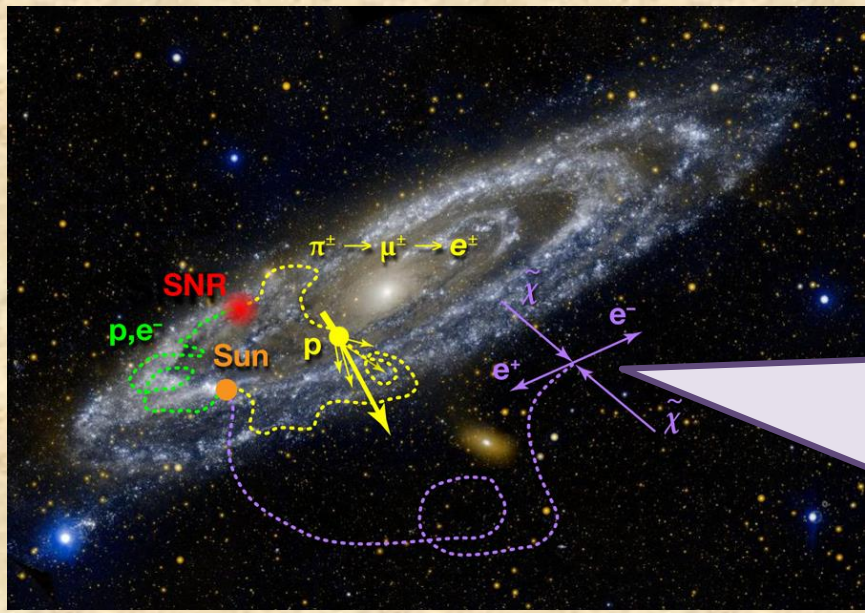
Shigeki Matsumoto (Kavli IPMU)

M. Ibe, S. M., S. Shirai, T. T. Yanagida, PRD91, 2015

R. Huo, S. M., Y.-L. Tsai, T. T. Yanagida, 1506.06929

これまでAMS-02グループにより報告された様々な宇宙線フラックス(電子、陽電子、反陽子)は、BGの見積もりに等による系統誤差のため確たる事は言えないが、興味深い振る舞いを示している。これらの振る舞いが暗黒物質由来であると仮定すると、どのような暗黒物質像が描けるかについて議論する。

ハロー中の暗黒物質活動は宇宙線源(の一つ)!



単位時間, 単位体積, 単位エネルギー当たりの宇宙線生成率は以下の通り。

対消滅ケース:

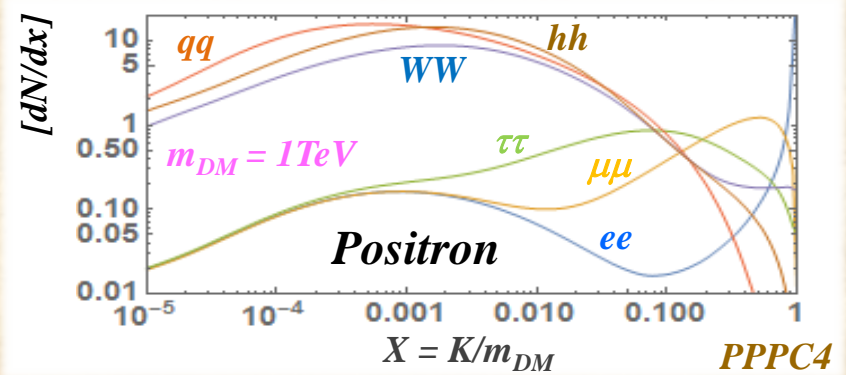
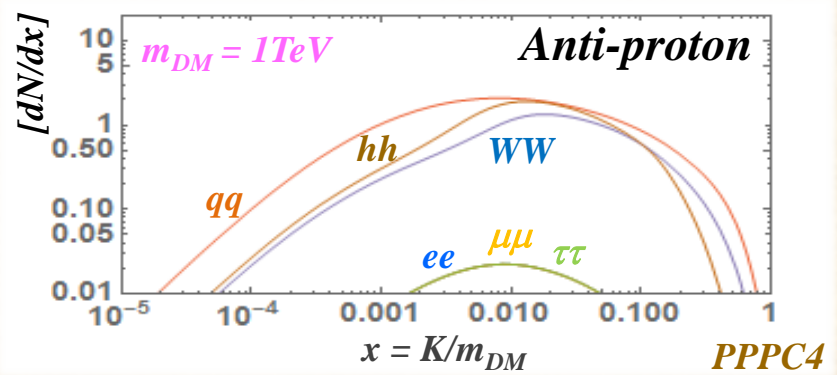
$$R_i = \frac{\langle \sigma v \rangle}{2m_{DM}^2} \rho^2(\vec{r}) \sum_{fin} Br(\chi\chi \rightarrow fin) \left[\frac{dN_i}{dE} \right]_{fin}$$

崩壊ケース:

宇宙年齢よりずっと長寿命

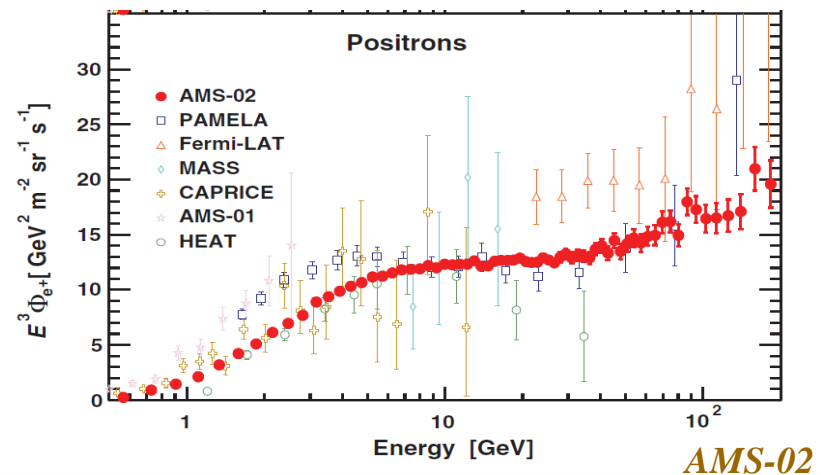
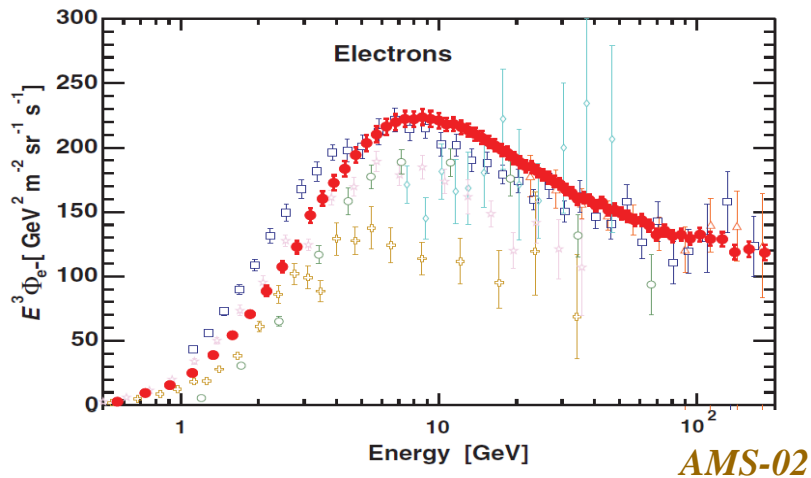
$$R_i = \frac{\Gamma_{DM}}{m_{DM}} \rho(\vec{r}) \sum_{fin} Br(\chi \rightarrow fin) \left[\frac{dN_i}{dE} \right]_{fin}$$

暗黒物質からの宇宙線スペクトル 「 $\chi\chi$ or $\chi \rightarrow fin \rightarrow e^\pm, p, \bar{p}, \gamma, \nu, \bar{\nu}, etc.$ 」



$fin = ee, \mu\mu, \tau\tau, qq, cc, bb, tt, hh, WW, ZZ, lll, lW$ (decay), $ll\nu$ (decay), etc.

まず初めに電子・陽電子アノマリーについて



(陽)電子成分の源 「超新星残骸(SNR), パルサー-星雲(PWN) 暗黒物質(DM)」

e^- (BG): Primary e^- from SNR. [Green catalogue for SNR w/ $d < 3\text{kpc}$]
Secondary e^- from a collision of CR with ISM. [CR p/He data]

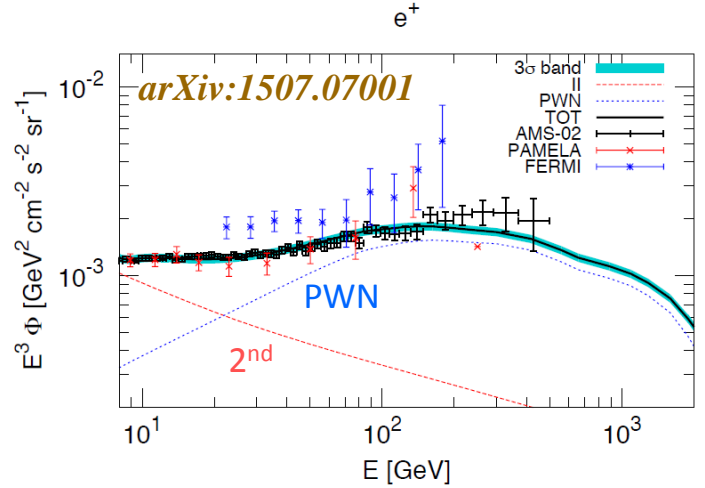
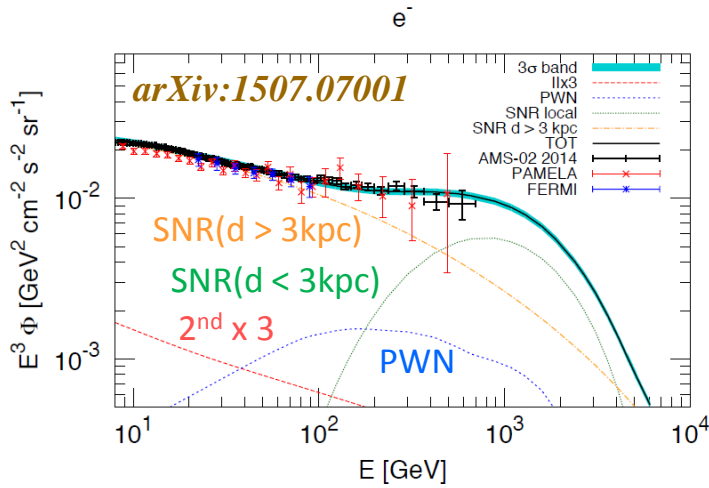
e^+ (BG): Primary e^+ from PWN. [ATFN catalogue with η parameter]
Secondary e^+ from a collision of CR with ISM. [CR p/He data]

e^\pm (S) : Primary e^\pm from DM annihilation or DM decay.

Ann. $R_e \sim 10^{-30} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1} \rightarrow \langle \sigma v \rangle \sim 0.7 \times (m/1\text{TeV})^{1+\varepsilon} \text{ nb} \cdot \text{c}$

Dec. $R_e \sim 10^{-30} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1} \rightarrow \tau_{\text{DM}} \sim 10^{26} \times (m/1\text{TeV})^{-\varepsilon} \text{ s}$

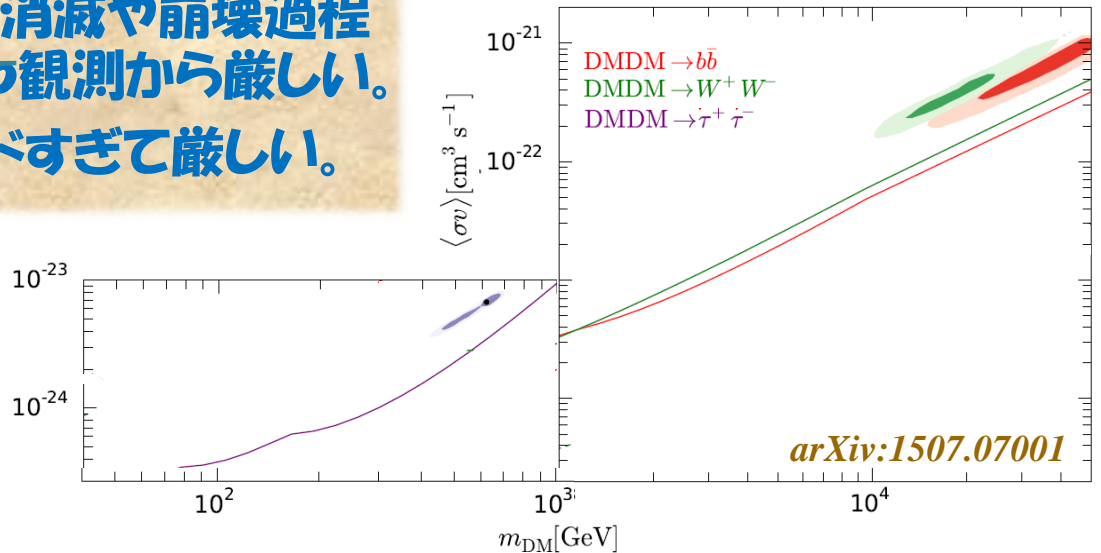
まず初めに電子・陽電子アノマリーについて



PWNの寄与を適当に仮定するとBGのみで電子・陽電子フラックスを説明できる。

- ✓ ハドロンを多く出す単純な対消滅や崩壊過程 (qq , hh , WW , etc.) は γ 線や p 観測から厳しい。
- ✓ ee や $\mu\mu$ はスペクトルをハードすぎて厳しい。
- ✓ $\tau\tau$ も γ 線観測で厳しい。
[Ando, Ishiwata, 2015]
- ✓ lW も γ 線観測で厳しい。
[Ando, Ishiwata, 2015]

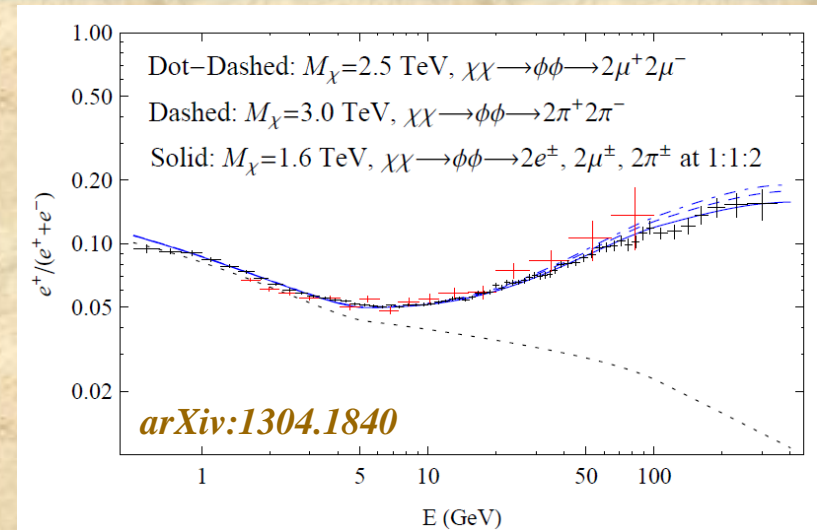
2体終状態系は厳しくなった。



まず初めに電子・陽電子アノマリーについて

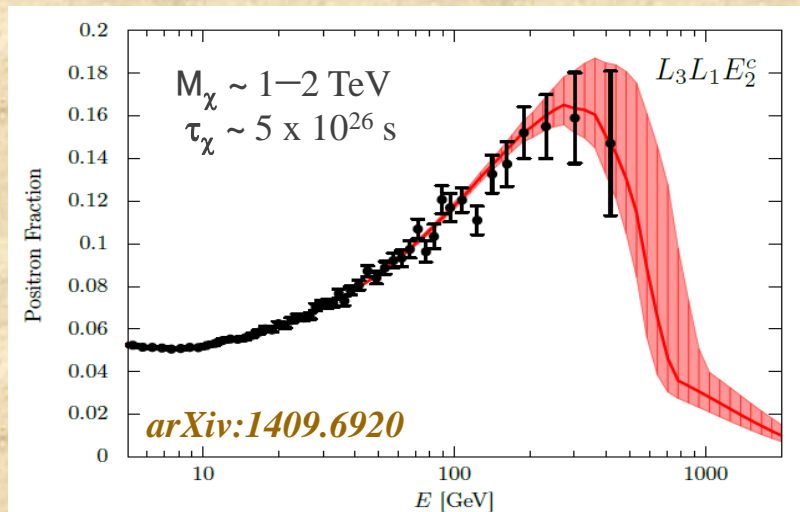
$DM DM \rightarrow \phi\phi \rightarrow ll\bar{l}$ [arXiv:0810.0713]

- 熱的残存量で暗黒物質密度を説明可。
- Sommerfeld効果により現在の宇宙における暗黒物質対消滅断面積が増大。
(暗黒物質間で ϕ が交換され長距離力が発生。)
- e^\pm スペクトルは程よくソフトになる \rightarrow
- 再結合時における暗黒物質対消滅への厳しい制限! [arXiv:1506.03811]

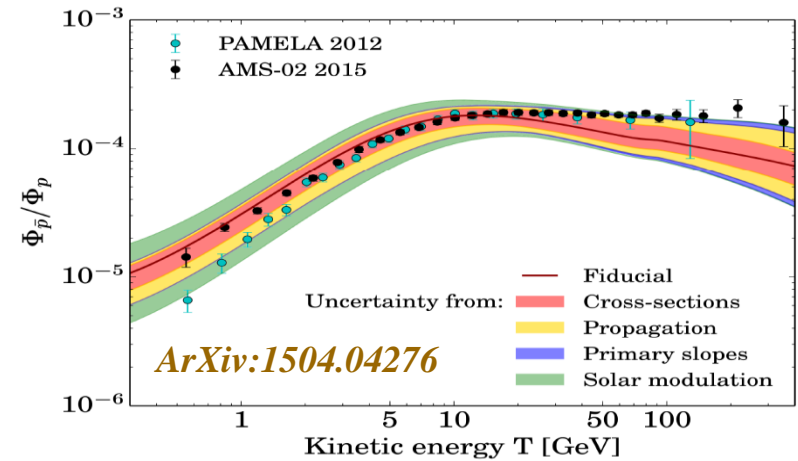
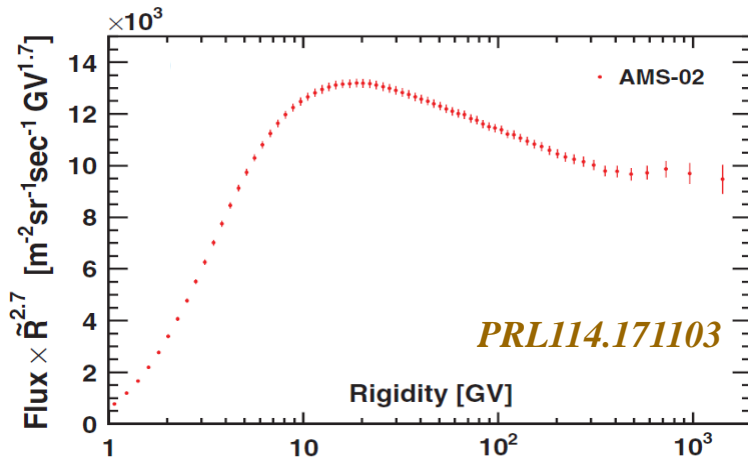


$DM \rightarrow ll\nu$ [arXiv:0903.0242, 1305.0084]

- e^\pm スペクトルは程よくソフトになる \rightarrow
- $L_{\text{int}} = (1/\Lambda_{\text{GUT}})^2 LLE^c\chi \rightarrow \tau_\chi \sim 10^{26}$ s
(注意! $L_{\text{int}} + LHE^c \rightarrow LH^c\chi \rightarrow$ SUSY needed.)
- 熱的残存量で暗黒物質密度を説明可。
- γ 線観測の制限OK。 [arXiv:1502.02007]
- 系外 γ 線と銀河カタログとの相関を用いた制限もOKそう。 [arXiv:1506.01030]



AMS-02で観測された陽子・反陽子フラックス



(反)陽子成分の源 「超新星残骸(SNR), 暗黒物質(DM)」

p (BG): Primary p from SNR. [Origin of the spectrum hardening?]

Secondary p from inelastic scatterings, etc. is negligible.

\bar{p} (BG): Primary \bar{p} is usually not expected. [From local SNR?]

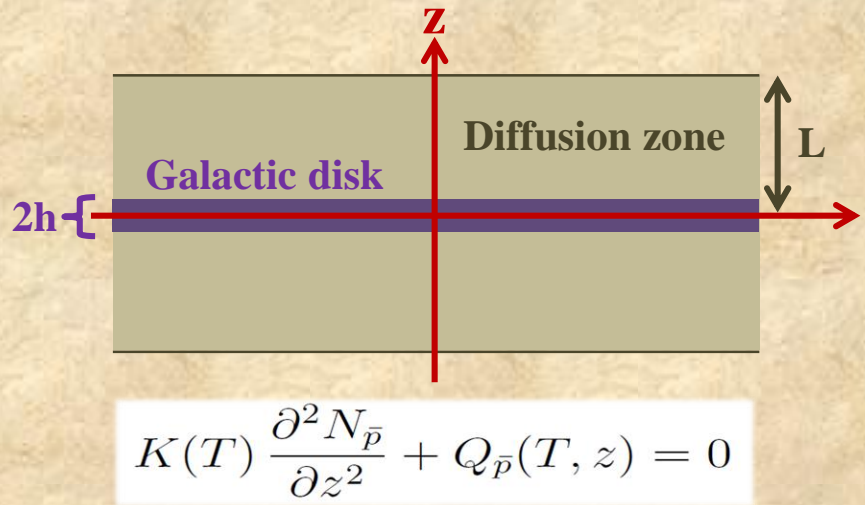
Secondary \bar{p} from a collision of CR with ISM. [CR p/He data]

\bar{p} (S): Primary \bar{p} from DM annihilation or DM decay.

Ann. $R_p \sim 0.04 \times R_e \rightarrow \langle \sigma v \rangle \sim 30 \times (m/1\text{TeV})^{1+\varepsilon} \text{ pb} \cdot \text{c}$

Dec. $R_e \sim 0.04 \times R_e \rightarrow \tau_{\text{DM}} \sim 10^{27} \times (m/1\text{TeV})^{-\varepsilon} \text{ s}$

AMS-02で観測された陽子・反陽子フラックス



$$K(T) \frac{\partial^2 N_{\bar{p}}}{\partial z^2} + Q_{\bar{p}}(T, z) = 0$$

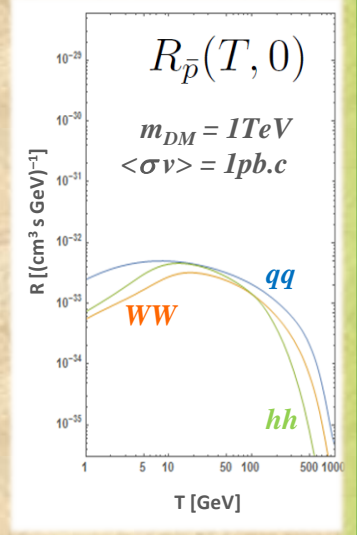
BG

$$Q_{\bar{p}} = R_{\bar{p}}(T, z)$$

↓

$$\left[\frac{\bar{p}}{p} \right]_S \sim \frac{L^2}{8\pi K} \frac{R_{\bar{p}}(T)}{\Phi_p}$$

Flux比のT依存性
Tの領域全体にわたり
 R_p の振る舞いが支配

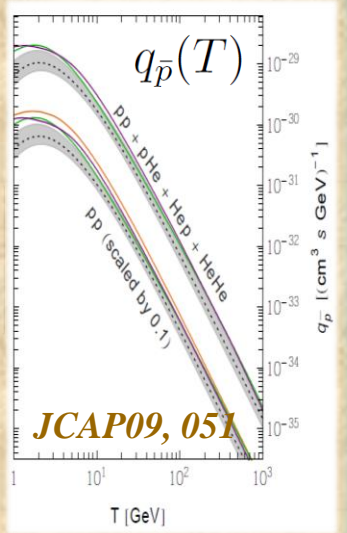


$$Q_{\bar{p}} = 2h\delta(z) q_{\bar{p}}(T)$$

↓

$$\left[\frac{\bar{p}}{p} \right]_{BG} \sim \frac{hL}{4\pi K} \frac{q_{\bar{p}}(T)}{\Phi_p}$$

Flux比のT依存性
 $T < 0(10) \text{ GeV}$: $q_{\bar{p}}(T)$
 $T > 0(10) \text{ GeV}$: $K(T)$



- ✓ **BGは0(10)%の精度での予言が必要**
- ✓ **L/K(T)の情報**はB/Cのデータから
[B/CデータとB生成断面積の精密データ]
- ✓ **反陽子の生成断面積の精度**は現在
30% @ 0.1TeV & 50% @ 1TeV.
[新しいコライダー・データが必要?]
- ✓ **DMの寄与**はLの大きな不定性を被る
- ✓ **DMの質量密度**も不定性の原因
[DM対消滅の時には不定性が大きい]

暗黒物質対消滅とAMS-02 \bar{p} data

$SU(2)_L$ triplet Majorana DM (= Wino)

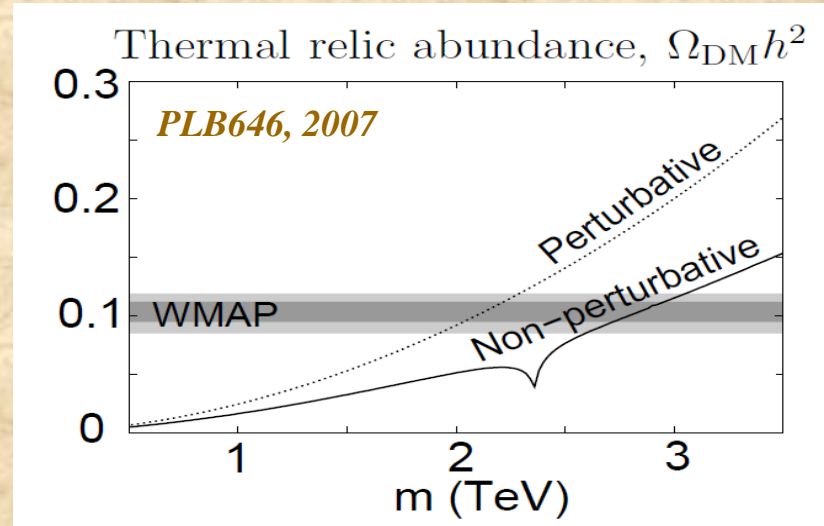
暗黒物質の熱的残存量が観測値と一致するためには0(1)TeVの質量が必要 →

$SU(2)_L$ doublet: $m_{DM} \sim 1\text{TeV}$

$SU(2)_L$ triplet: $m_{DM} \sim 3\text{TeV}$

$SU(2)_L$ quintet: $m_{DM} \sim 5\text{TeV}$

$SU(2)_L$ septet: $m_{DM} \sim 9\text{TeV}$



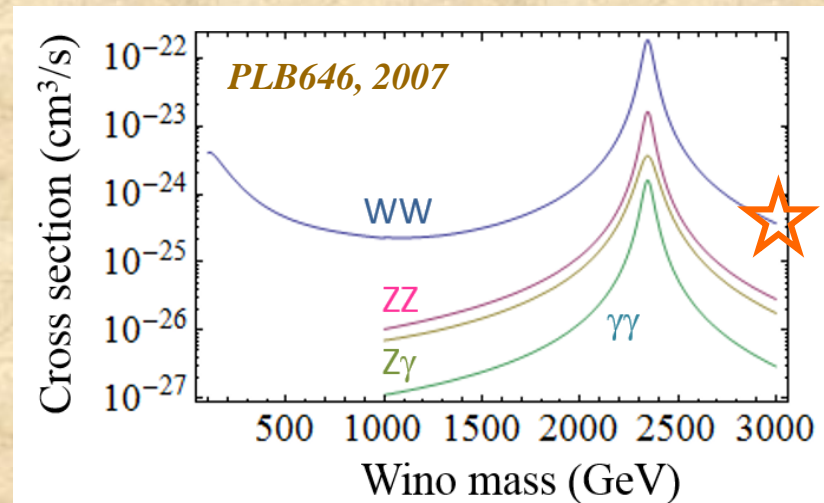
Annihilation of the DM is boosted!

始状態の暗黒物質間にEWボソンが交換され長距離力を生み、Sommerfeld効果の為対消滅断面積が増大する →

$DM + DM \rightarrow WW, ZZ, Z\gamma, \gamma\gamma$

前の3つのモードは連続ガンマ線を生む。

後の2つのモードは単色ガンマ線を生む。



暗黒物質対消滅とAMS-02 \bar{p} data

Motivation

AMSBに基づいて超対称シナリオ
(例 PGM [hep-ph/0610277] 等々)
ゲージ/達のみTeV領域にいる。

- ✓ 最も簡単な超対称の破れ模型
- ✓ 125GeVのヒッグス質量を预言
- ✓ 現象論や宇宙論との整合性有
- ✓ LSP(暗黒物質候補)はWino

境界条件@ M_{pl} に関する新シナリオ
(例 MPP [hep-ph/9511371] 等々)

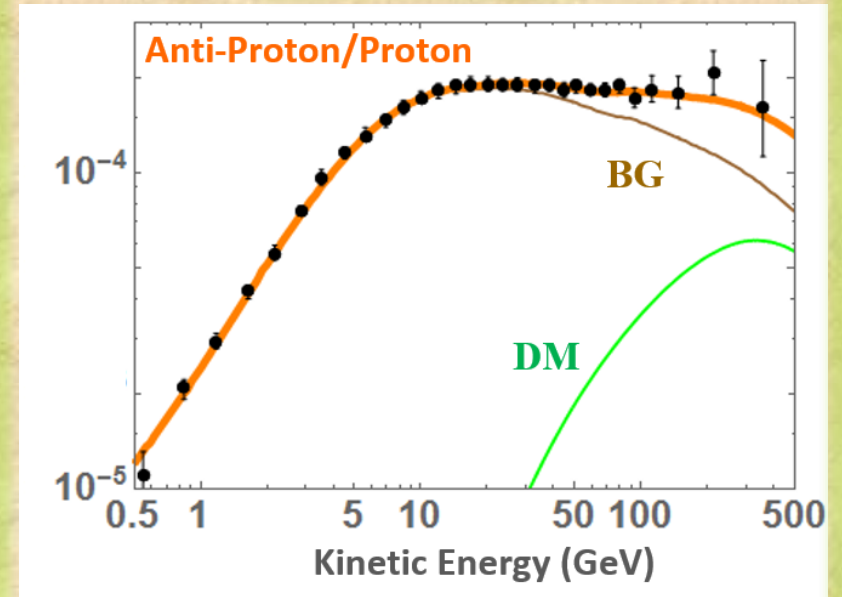
トップやヒッグスの質量は M_{pl} における物理に何か示唆を与えている？

- ✓ $0(M_{pl})$ に縮退した真空がある？
- ✓ $0(M_{pl})$ にPlateauがある？ (MEP)

SM + Wino DM [arXiv:1506.06553]

→ $m_h = 126\text{GeV}$ & $m_t = 173\text{GeV}$

Prediction



- ✓ DM: Wino with 2.8TeV mass
- ✓ Propagation: MED parameters
- ✓ Background: arXiv:1504.04276
- ✓ DM profile: NFW ($\rho_\odot = 0.4\text{GeV}/\text{c.c.}$)

Burkert profile を使うと、DMの寄与は約半分になる。その場合は、Lを増やしたい δ を減らせばOK。

暗黒物質崩壊とAMS-02 \bar{p} data

Baryonic DM in some hidden sector

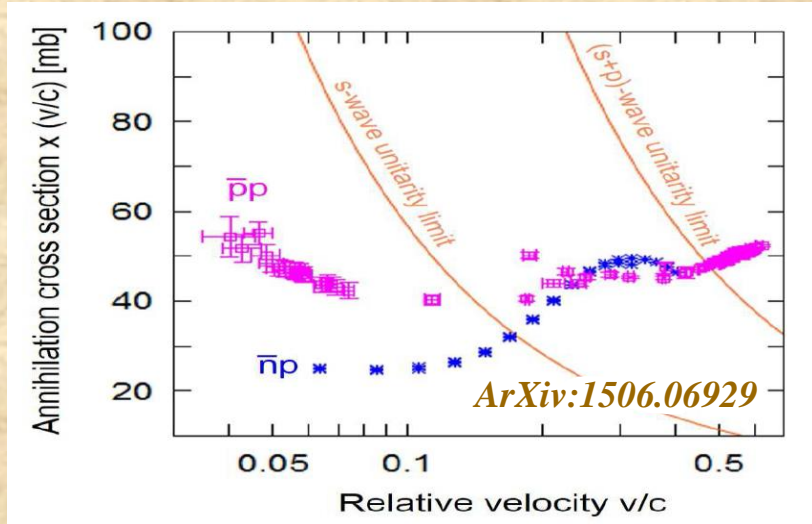
暗黒物質の熱的残存量が観測値と一致するには0(0.1)PeVの質量が必要 ↓→

(nlσ等の低エネルギー定理は使えず。)

$$0.5 \times 45 \text{ mb} \times (m_p / m_{\text{DM}})^2 = 1 \text{ pb}$$

↓ WIMP miracle

$$m_{\text{DM}} = 150 \text{ TeV}$$



Decay via a Planck scale suppressed interaction!

対消滅シグナルの強度に対し以下の上限があり、これを検出するのは難しい。

$$R < (1/4) (4\pi/v) (m_{\text{DM}})^{-2} (\rho_{\text{DM}}/m_{\text{DM}})^2 \sim 10^{-34} (10^{-4}/v) \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

この暗黒物質は $L_{\text{int}} = (1/M_{\text{pl}})^2 \psi_H \psi_H \psi_H \psi_{\text{SM}}$ を通じて崩壊する可能性がある。

$$\tau_{\text{DM}} \sim 32\pi (M_{\text{pl}})^4 (m_{\text{DM}})^{-3} (0.1 m_{\text{DM}})^{-2} \sim 10^{27} \text{ sec.}$$

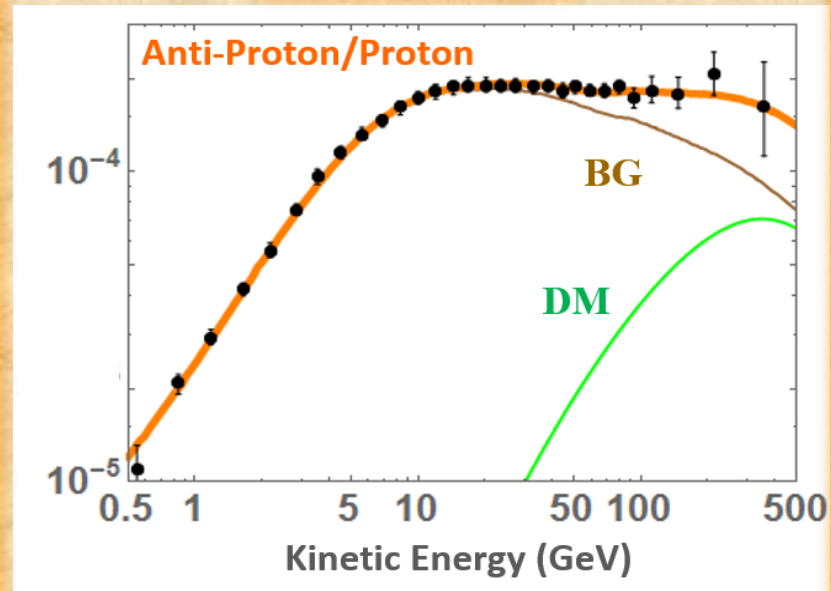
典型的な暗黒物質の寿命を陽子崩壊と同様の計算で求めると上記の通り

Motivation

DMとSM粒子間の相互作用が必要。

- ✓ 例. $L-R$ 模型 $\times SU(3)_H$ ($\supset \psi, \bar{\psi}$)
 [$\psi, \bar{\psi}$ are $SU(2)_R$ -charged.]
 [$SU(2)_L$ -charged ψ is not favored.]
- ✓ DM = Hidden Baryon ($\psi\psi\psi$)
 [DM $\subset SU(2)_R$ iso-doublet.]
 [Hidden NGBs exist $\pi_H = \bar{\psi}i\gamma_5\psi$.]
- ✓ DMの安定性はHidden sector
 のAccidental対称性で保証。
- ✓ DM decay via $L = \psi\psi\psi l_R / M_{pl}^2$
 [$l_R = SU(2)_R$ doublet SM lepton.]
- ✓ Dominant decay mode
 $DM \rightarrow e_R \pi_H$ ($\pi_H \rightarrow tb$)
 [Anti proton from bottom quarks.]

Prediction



- ✓ DM Mass: $m_{DM} = 150 \text{ TeV}$
- ✓ DM lifetime: $\tau_{DM} = 6 \times 10^{26} \text{ s}$
- ✓ Propagation: MED parameters
- ✓ Background: arXiv:1504.04276
- ✓ DM profile: NFW ($\rho_\odot = 0.4 \text{ GeV/c.c.}$)

DM profile依存性は非常に小さい。
 L依存性は対消滅の場合と同様。

まとめ

AMS-02により報告された宇宙線フラックス(電子、陽電子、反陽子等)を、暗黒物質で説明しようとする、現時点では、結果は以下の通り。

電子フラックス:

基本的には伝統的な寄与(SNRからの電子)で**説明可能**。他の寄与(2次的に生成されたものや、(あったとして)暗黒物質等)は**10%程度**。

陽電子フラックス:

伝統的な寄与(CRとISMからの2次的生成)では**説明不可能**。PWNで**説明可能**($\eta \sim 4\%$)。暗黒物質の対消滅では基本的には**説明不可能**。暗黒物質の単純な崩壊(2体状態への崩壊)でも**難しい**。暗黒物質が質量が1TeV程度のフェルミオンのとき、レプトンへの3体崩壊を用いれば**説明可能**。

反陽子フラックス:

暗黒物質の対消滅と崩壊どちらでも**説明可能**。暗黒物質の熱的残存量が観測された暗黒物質量を説明すると仮定すると、対消滅による反陽子フラックスの説明の場合は **3_0 のマヨラナ・フェルミオン**が、崩壊による説明の場合は**閉じ込めの起こるSU(3)_Hゲージ理論のバリオン**が候補として有力である。

一方、2次生成された反陽子フラックス(BG)の不定性を最大限使用して観測データを**説明可能**。また何か他の天体活動で**説明できる可能性**もある。