

Virtual Internal Bremsstrahlung of Dark Matter

藤間 崇

Durham University
Institute for Particle Physics Phenomenology (IPPP)

素粒子物理学の進展 2013年8月5-9日
Based on arXiv:1307.6181



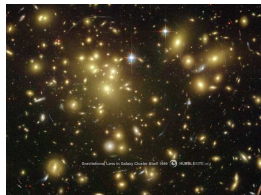
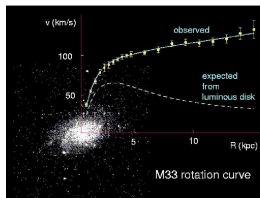
アウトライン

- 1 導入
- 2 暗黒物質の Internal Bremsstrahlung
マヨラナ DM, 実スカラー DM
残留密度
- 3 ガンマ線フィッティング
- 4 まとめ

導入

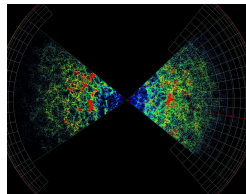
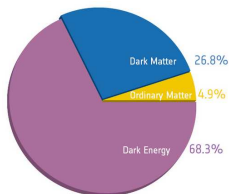
暗黒物質の存在証拠

- 銀河の回転曲線
- CMBの観測
- 重力レンズ
- 宇宙の大規模構造形成



暗黒物質の性質

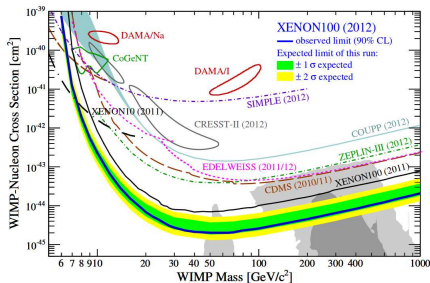
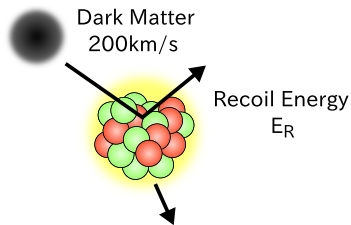
- 安定
- 残留密度 $\Omega h^2 \approx 0.12$
- 電磁相互作用をしない
- 非相対論的



暗黒物質探索の方法

- 加速器検出
DMを人工的に生成させる.
Jets+ミッシングエネルギー
- 間接検出
DMの対消滅により宇宙線や
ガンマ線を出す
- 直接検出
DMと核子の散乱

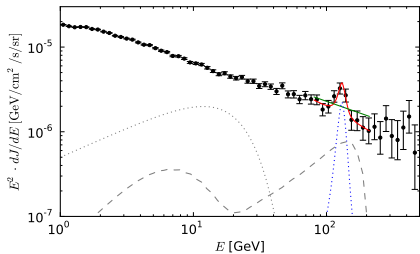
XENON100が最も強い制限
を与えている.
DM質量 $\sim 50 \text{ GeV}$ のとき
 $\sigma_{\text{SI}} \lesssim 3 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$



間接検出

・ e^\pm , ガンマ線, ニュートリノが暗黒物質の対消滅や崩壊により生成される.

・ ガンマ線

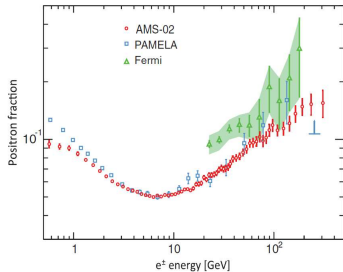


arXiv:1210.3013, 1203.1312

・ 130 GeV 辺りに過剰なガンマ線

・ $\langle\sigma v\rangle \sim 10^{-27} \text{ cm}^3/\text{s}$
(thermal DM : $\sim 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$)

・ 陽電子



PRL 110 (2013) 14, 141102

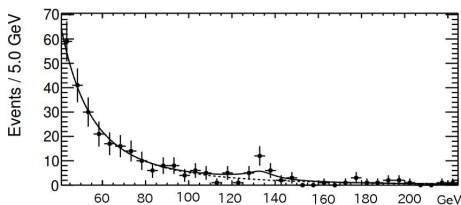
・ エネルギーの高いところで陽電子比が増加.
線源が分かっていない

しかし、ガンマ線については Fermi Co. は否定的

arXiv: 1305.5597

significance 1.6σ at 133 GeV

もっと分解能の高い実験が必要



次世代実験

	GAMMA400	DAMPE	Fermi	CTA
Energy range [GeV]	0.1-3000	5-10000	0.1-300	>10
Angular res [deg]	~ 0.01	0.1 at 100 GeV	0.1	0.1
Energy res [%]	~ 1	~ 1 at 800 GeV	10	15

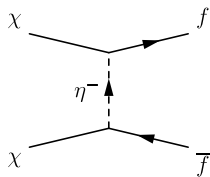
- GAMMA400: 2018年 \sim , γ 観測
- DAMPE: 2015-2016年 e^- , γ 観測
Energy range: 100GeV-100TeV for e^-
- CTA: γ 観測 underground

Internal Bremsstrahlung

Internal Bremsstrahlung

マヨラナ DM χ を考える

$$\mathcal{L} = y\eta^+\bar{\chi}P_L f + \text{h.c.}$$

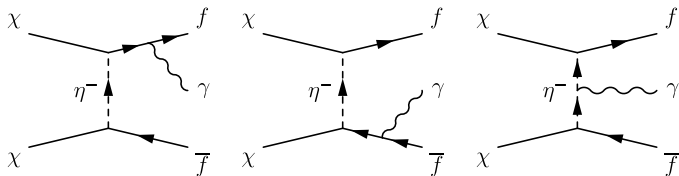


- 散乱断面積 $\chi\chi \rightarrow f\bar{f}$ は v で展開される. $\sigma_{v f\bar{f}} \approx a + bv^2$

$$\sigma_{v f\bar{f}} \approx \frac{y^4}{32\pi m_\chi^2} \frac{m_f^2}{m_\chi^2} \frac{1}{(1+\mu)^2} + \frac{y^4}{48\pi m_\chi^2} \frac{1+\mu^2}{(1+\mu)^2} v^2, \quad \mu \equiv \frac{m_\eta^2}{m_\chi^2} > 1$$

- ・ $m_f \ll m_\chi$ のとき, s-wave は無視できる. \rightarrow chiral suppression
- ・ 現在の宇宙での DM の相対速度: $v \sim 10^{-3}$
- ・ p-wave は DM の残留密度を決める.

■ Internal Bremsstrahlung (2-体プロセス $\chi\chi \rightarrow f\bar{f}$ の輻射補正)



不変振幅は2つのパートに分かれる. (それぞれゲージ不変)

$$i\mathcal{M} = i\mathcal{M}_{\text{FSR}} + i\mathcal{M}_{\text{VIB}}$$

・微分散乱断面積

$$\frac{d\sigma_{f\bar{f}\gamma}}{dx} = \frac{d\sigma_{f\bar{f}\gamma}^{\text{FSR}}}{dx} + \frac{d\sigma_{f\bar{f}\gamma}^{\text{VIB}}}{dx}, \quad x \equiv \frac{E_\gamma}{m_\chi}, \quad (\text{干渉項は無視})$$

FSR : ならかなエネルギースペクトル

VIB : $E_\gamma \sim m_\chi$ 辺りにラインのようなスペクトル

微分散乱断面積の具体的な形

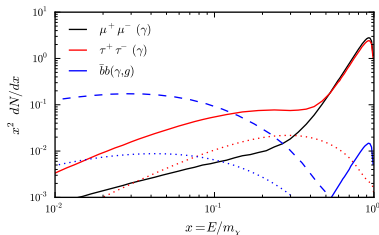
$$\text{FSR} : \frac{d\sigma_{ff\gamma}^{\text{FSR}}}{dx} = \sigma_{ff\bar{f}} \frac{\alpha_{\text{em}}}{\pi} \frac{1 + (1-x)^2}{x} \log \left(\frac{4m_\chi^2 (1-x)}{m_f^2} \right) + (\text{Hadronization})$$

$$\text{VIB} : \frac{d\sigma_{ff\gamma}^{\text{VIB}}}{dx} = \frac{\alpha_{\text{em}} y^4}{32\pi^2 m_\chi^2} (1-x) \left[\frac{2x}{(\mu+1)(\mu+1-2x)} - \frac{x}{(\mu+1-x)^2} - \frac{(\mu+1)(\mu+1-2x)}{2(\mu+1-x)^3} \log \left(\frac{\mu+1}{\mu+1-2x} \right) \right]$$

FSR : モデルに依らない

エネルギースペクトル

- もし $\text{FSR} \ll \text{VIB}$ ならば特徴的なシグナル
- マヨラナ DM
→ chiral suppression
- しかし e^\pm 生成は小さい。



arXiv:1203.1312

ディラック DM では？

$$\sigma_{Vf\bar{f}} = \frac{y^4}{\pi m_\chi^2} \frac{1}{(1+\mu)^2} + \mathcal{O}(v^2)$$

大きな s-wave \rightarrow FSR が常に支配的.

複素スカラー DM では p-wave dominant (マヨラナ DM と同様).

実スカラー DM では？

$$\sigma_{Vf\bar{f}} = \frac{y^4}{4\pi m_\chi^2} \frac{m_f^2}{m_\chi^2} \frac{1}{(1+\mu)^2} - \frac{y^4}{6\pi m_\chi^2} \frac{m_f^2}{m_\chi^2} \frac{1+2\mu}{(1+\mu)^4} v^2$$

$$+ \frac{y^4}{60\pi m_\chi^2} \frac{1}{(1+\mu)^4} v^4 + \mathcal{O}(v^6)$$

まとめ

	マヨラナ	ディラック	実スカラー	複素スカラー
支配的な項	p-wave	s-wave	d-wave	p-wave

実スカラー DM の場合, chiral suppression が最も効く .

$\chi\chi \rightarrow f\bar{f}\gamma$ については不変振幅の二乗はマヨラナの場合と定数倍だけ異なる .

$$\frac{d\sigma_{f\bar{f}\gamma}^{\text{VIB}}}{dx}_{\text{real}} = 8 \frac{d\sigma_{f\bar{f}\gamma}^{\text{VIB}}}{dx}_{\text{majorana}}$$

その結果, 熱的 DM 生成と矛盾なく強いガンマ線を予言できる .

ガンマ線を出す σv のまとめ

$$\chi\chi \rightarrow f\bar{f}\gamma : \alpha_{\text{em}} \sim 10^{-2}, \quad (\text{cf : } \chi\chi \rightarrow \gamma\gamma : \alpha_{\text{em}}^2 \sim 10^{-4})$$

マヨラナ DM の場合

$$\sigma v_{f\bar{f}} \sim 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s} \text{ (p-wave)} \rightarrow \sigma v_{f\bar{f}\gamma} \sim 10^{-28} \text{ cm}^3/\text{s}$$

実スカラー DM の場合

$$\sigma v_{f\bar{f}} \sim 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s} \text{ (d-wave)} \rightarrow \sigma v_{f\bar{f}\gamma} \sim 10^{-27} \text{ cm}^3/\text{s}$$

右巻きと左巻き両方相互作用を持つ場合

$$\mathcal{L} = y_L \chi \bar{\psi} P_L f + y_R \chi \bar{\psi} P_R f + \text{h.c.}$$

散乱断面積

$$\sigma_{V_{f\bar{f}}} = \frac{y_L^2 y_R^2}{\pi m_\chi^2} \frac{\mu}{(1+\mu)^2} - \frac{y_L^2 y_R^2}{3\pi m_\chi^2} \frac{\mu + 3\mu^2}{(1+\mu)^4} v^2 + \mathcal{O}(v^4)$$

s-wave と p-wave が現れる.

d-wave が s-wave よりも大きくなる条件

$$\left(\frac{y_R}{y_L} \right)^2 \lesssim \frac{v^4}{60\mu(1+\mu)^2}$$

例えば $\mu \sim 1$, $v^2 \sim 0.3$ のとき $y_R/y_L \lesssim 0.02$

ガンマ線フラックス

■ ガンマ線バックグラウンド

$$\frac{d\Phi_{\gamma}^{\text{bkg}}}{dE_{\gamma}} = 2.4 \times 10^{-5} E_{\gamma}^{-2.55} [\text{GeV}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}]$$

■ DMからのガンマ線

$$\frac{d\Phi_{\gamma}^{\text{DM}}}{dE_{\gamma}} = \eta \frac{r_{\odot}}{8\pi} \frac{\rho_{\odot}^2}{m_{\chi}^2} \bar{J} \langle \sigma v_{\gamma} \rangle \frac{dN_{\gamma}}{dE_{\gamma}}$$

η : symmetry factor, \bar{J} : 積分 $\rho(r)$ in target region

・パラメータセッティング

DM profile : generalized NFW profile $\rho(r)$ with $\alpha = 1.15$

規格化 : $\rho_{\odot} = 0.4 \text{ GeV}/\text{cm}^3$, $r_{\odot} = 8.5 \text{ kpc}$

target region : $|\ell| \lesssim 10^{\circ}$, $|b| \lesssim 15^{\circ}$

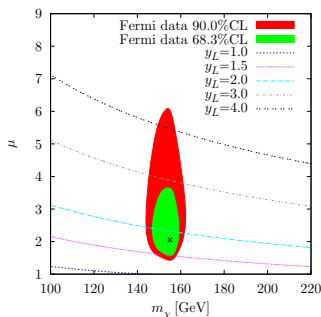
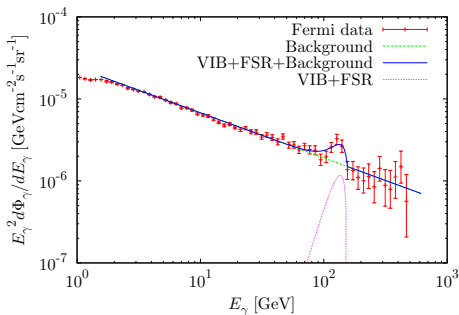
ガンマ線のフィッティング (実スカラーDM)

エネルギーが高いところから 53 点のデータを使用.

熱的 DM 生成による制限: $\Omega h^2 = 0.12$

パラメータ 3 つ: m_χ, μ, y . \rightarrow 1 つは $\Omega h^2 = 0.12$ により fixed
 \rightarrow パラメータ自由度 2

$$m_\chi = 155 \text{ GeV}, \quad \mu = 2.05, \quad y_L = 1.82, \quad \chi_{\min}^2 = 65.51 \quad (51)$$



異常磁気能率の制限

$$\delta a_e = a_e(\text{SM}) - a_e(\text{exp}) = 1.06 \times 10^{-12}$$

$$\delta a_\mu = a_\mu(\text{SM}) - a_\mu(\text{exp}) = 25.5 \times 10^{-10}$$

湯川相互作用

$$\delta a_f = \frac{y^2}{(4\pi)^2} \frac{m_f^2}{m_\chi^2} \frac{2 + 3\mu - 6\mu^2 + \mu^3 + 6\mu \log \mu}{6(1 - \mu)^4}$$

ベストフィットのパラメータセットを用いると

$$\delta a_e = 9.4 \times 10^{-15}, \quad \delta a_\mu = 4.0 \times 10^{-10}$$

制限を満足する.

しかし, 異なるフレーバーに対して同時に相互作用を持つと $\mu \rightarrow e\gamma$ などの LFV により厳しく制限される.

まとめ

- Internal Bremsstrahlung は特徴的なガンマ線を示す.
- それを見るためには, s-wave が抑制されている必要がある.
- 実スカラー DM の場合, 初期宇宙では d-wave が支配的となる.
熱的 DM 生成と矛盾なく, 強いガンマ線を出すことができる.
- LFV により強い制限が与えられる.