

暗黒物質の自己相互作用と 対消滅から生じる X 線とガンマ線

藤間 崇

Laboratoire de Physique Théorique d'Orsay

京都大学セミナー

arXiv:1506.02032 to appear in Eur.Phys.J.C

共同研究者: Yann Mambrini (LPT Orsay)



アウトライン

1 イントロダクション

- 暗黒物質の証拠
- 暗黒物質プロファイルの形

2 暗黒物質の自己相互作用とモノクロライン

- 銀河団 Abell3827 のずれ
- X線とガンマ線

3 簡単な擬スカラー暗黒物質模型

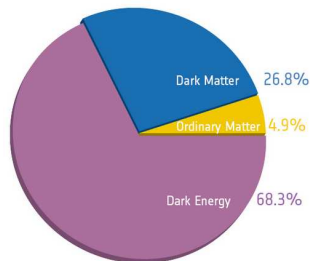
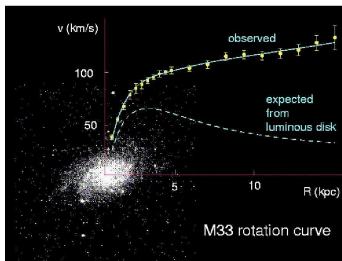
- 自己相互作用
- 色々な制限とモノクロライン
- 軽い暗黒物質の直接検出

4 まとめ

暗黒物質の証拠

多くの暗黒物質の存在証拠がある。

- 渦巻き銀河の回転曲線
- 宇宙背景放射 (CMB) の観測

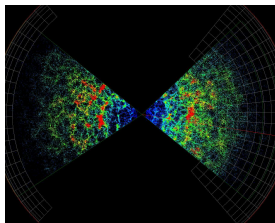
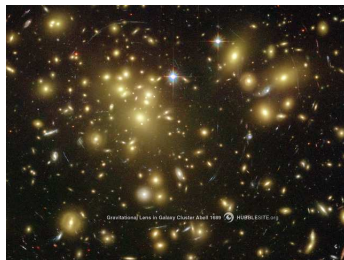


- 星の重力のみ考慮した場合、速度は距離とともに小さくなると思われる。しかし実際は平坦になっている。
- CMBの詳細な解析により宇宙のエネルギー密度が分かる。

暗黒物質の証拠

多くの暗黒物質の存在証拠がある。

- 重力レンズ効果
- 銀河の大規模構造形成
- 銀河団衝突



- 暗黒物質の存在は明らか。
- しかし質量や相互作用の詳細は分かっていない。
- 重力相互作用を通じた間接的な証拠のみ。

満たすべき暗黒物質の特徴

■ 暗黒物質の性質

- ・ 安定 (宇宙年齢に対して十分長寿命)
- ・ 非相対論的粒子 (冷たい暗黒物質)
- ・ 電氣的に中性

■ 素粒子論的暗黒物質候補

$\mathbb{Z}_N$ 対称性 $\rightarrow$ 暗黒物質の安定化

・ WIMP

(Weakly Interacting Massive Particle)

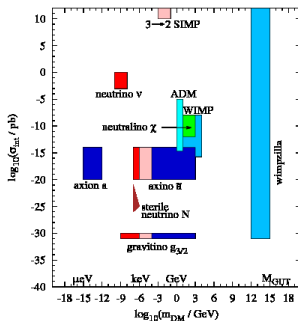
ニュートラリーノ, 最も軽い KK 粒子, 右巻きニュートリノなど

・ WIMPless DM

・ グラビティーノ

・ アクシオン

・ Q-ball etc

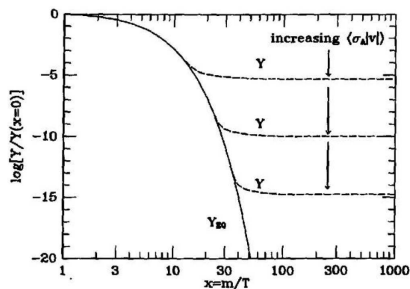


arXiv:1407.0017

暗黒物質 (WIMP) の熱生成

暗黒物質の数密度の時間発展はボルツマン方程式により決定される.

$$\frac{dn}{dt} + 3Hn = -\langle\sigma v\rangle (n^2 - n_{\text{eq}}^2)$$



- 現在の残留密度は対消滅断面積 $\langle\sigma v\rangle$ により決定される.

- σv は相対速度 v で展開される.
 $\rightarrow \sigma v = a + bv^2 + \mathcal{O}(v^4)$

a : s-wave, b : p-wave

- $$\Omega h^2 \approx \frac{1.04 \times 10^9 [\text{GeV}^{-1}]}{\sqrt{g_*} m_{\text{pl}} \langle\sigma v\rangle}$$

観測値

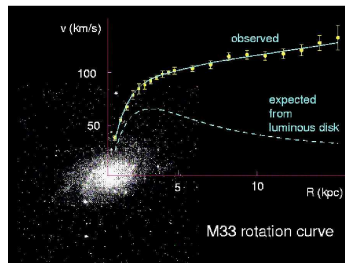
$$\Omega h^2 \approx 0.12 \quad \Leftrightarrow \quad \langle\sigma v\rangle \approx 3 \times 10^{-26} [\text{cm}^3/\text{s}]$$

$$= 3 \times 10^{-9} [\text{GeV}^{-2}]$$

暗黒物質の密度分布関数

- 渦巻き銀河の回転曲線から密度分布関数が分かる.
- 遠心力と重力の釣り合いの式

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{GmM(r)}{r^2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$



$$M(r) = 4\pi \int_0^r r^2 \rho(r) dr, \quad \rho(r) : \text{暗黒物質の密度分布関数}$$

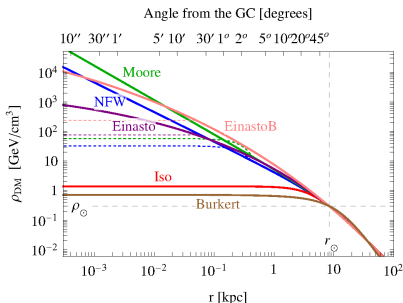
$$\begin{aligned} v \propto r \text{ (small } r) &\Rightarrow \rho(r) \propto r^0 && \Rightarrow \text{例えば } \rho_{\text{iso}}(r) = \frac{\rho_0}{1 + \frac{r^2}{r_s^2}} \\ v \propto r^0 \text{ (large } r) &\Rightarrow \rho(r) \propto r^{-2} && \text{でフィット} \end{aligned}$$

Cored プロファイルでフィットできる

Core vs Cusp

暗黒物質の密度分布 $\rho(r)$

- 銀河の回転曲線から銀河の中心部は cored を示唆
- しかし N 体シミュレーションによると Cusp な分布を示唆
- 衝突銀河団を重力レンズを使って暗黒物質の自己相互作用を見積もると $\sigma/m \lesssim 1 \text{ cm}^2/\text{g}$
→ 大きな自己相互作用で cored profile になる



色々な密度関数

$$\rho_{\text{NFW}}(r) = \frac{\rho_0}{\frac{r}{r_s} \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2}$$

$$\rho_{\text{iso}}(r) = \frac{\rho_0}{1 + \frac{r^2}{r_s^2}}$$

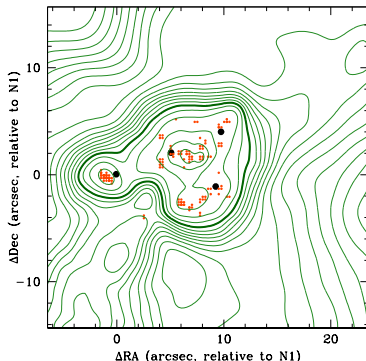
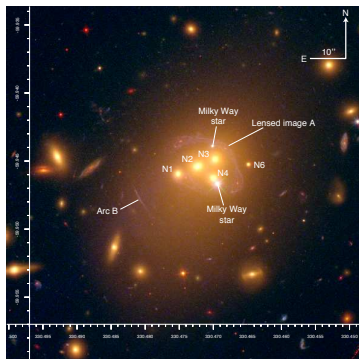
$$\rho_{\text{Ein}}(r) = \rho_0 \exp \left[-\frac{2}{\alpha} \left(\frac{r}{r_s} \right)^\alpha - 1 \right]$$

arXiv:1012.4515

暗黒物質の自己相互作用と モノクロシグナル

Abell3827 銀河団

- 部分的に 4 つの銀河で形成される (N1,N2,N3,N4)
- 暗黒物質ハロー中心と星の中心のずれ
- N1 に $\Delta = 1.62^{+0.47}_{-0.49}$ kpc ずれがある (3.3 σ significance)



Abell3827 銀河団

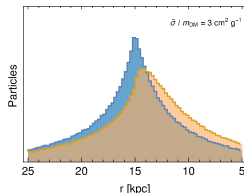
$\Delta = 1.62$ kpc のずれの解釈

- 暗黒物質の自己相互作用？
- 自己相互作用が抵抗力となる．
説明に必要な値

$$(1) \sigma/m \sim 1.7 \times 10^{-4} \times \left(\frac{10^9 \text{ yrs}}{t_{\text{infall}}} \right)^2 \text{ cm}^2/\text{g}$$

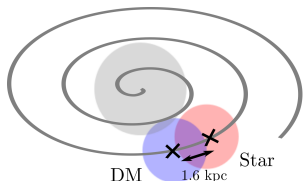
$$\gtrsim 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{g} \text{ arXiv:1504.03388}$$

$$(2) \sigma/m \sim 1.5 \text{ cm}^2/\text{g} \text{ arXiv:1504.06576}$$



$$\ddot{r}_{\text{sh}} = -\frac{F_{\text{cluster}}}{m_{\text{DM}}} + \frac{F_{\text{drag}}}{m_{\text{DM}}}$$

$$\ddot{r}_{\text{star}} = -\frac{F_{\text{cluster}}}{m_{\text{star}}} + \frac{F_{\text{sh}}}{m_{\text{star}}}$$



- 銀河団衝突からの制限と僅かなテンションがある
 $\sigma/m \lesssim 1.25 \text{ cm}^2/\text{g} \text{ arXiv:1503.07675}$

Abell3827 銀河団

$\Delta = 1.62$ kpc のずれの解釈

- 通常の WIMP で理解しようとするのが難しい。
例: シングレット 実スカラー DM

$$\mathcal{V} \supset m_\chi^2 \chi^2 + \lambda_{H\chi} |H|^2 |\chi|^2 + \frac{\lambda_\chi}{4!} \chi^4$$

$$\rightarrow \frac{\sigma_{\chi\chi}}{m_\chi} = \frac{\lambda_\chi^2}{128\pi m_\chi^3} \sim 4 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{g}$$

($\lambda_\chi = 1$, $m_\chi = 50$ GeV のとき)

- 別の暗黒物質シナリオ
 $\mathbb{Z}_3$ SIMP, 軽い媒介粒子による Sommerfeld 効果,
hidden sector DM など

うまくいく例: $\mathbb{Z}_3$ SIMP

$$\mathcal{V} = m_\chi^2 |\chi|^2 + \frac{\kappa_\chi}{6} (\chi^3 + \chi^{\dagger 3}) + \frac{\lambda_\chi}{4} |\chi|^4$$

- SM セクターと弱く結合している

- Hidden セクターへの消滅で DM の数を減らす

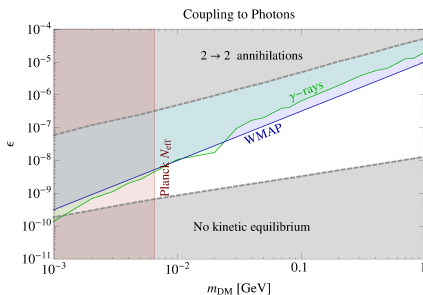
$$\Gamma_{\text{ann}} \lesssim \Gamma_{3 \rightarrow 2} \lesssim \Gamma_{\text{kinetic}}$$

例えば $\chi\chi\chi \rightarrow \chi\chi^\dagger$

- 強い結合定数 $\kappa_\chi, \lambda_\chi = \mathcal{O}(1)$ が必要

- DM 質量 $m_\chi = \mathcal{O}(100)$ MeV [arXiv:1402.5143](https://arxiv.org/abs/1402.5143)

- $\sigma/m \sim 1 \text{ cm}^2/\text{g}$

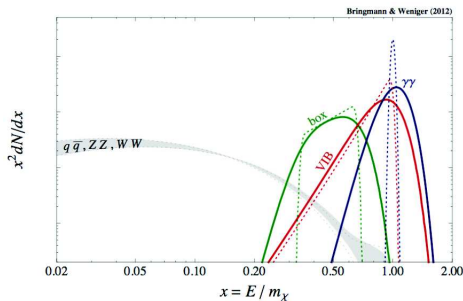


暗黒物質由来のX線とガンマ線

暗黒物質の対消滅, 崩壊により生じるモノクロラインフォトン(光子)は暗黒物質の強いシグナルとなる.

- 様々な実験でX線, ガンマ線が観測されている
HEAO-1, INTEGRAL, COMPTEL, EGRET, FERMI.
- 銀河中心からの過剰な数 GeV ガンマ線 (フーペロン)
- 過剰な 3.5 keV X線 (ペルセウス銀河団, アンドロメダ銀河).

ここでは暗黒物質の自己相互作用とモノクロラインシグナルの関係を議論する.



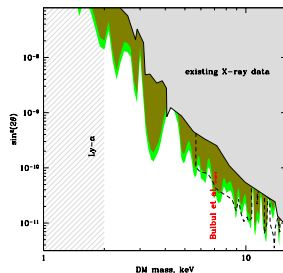
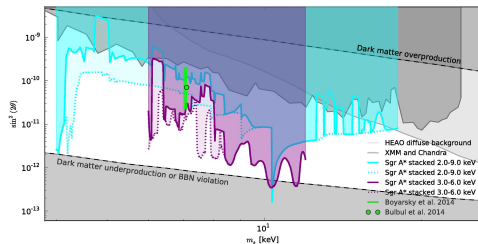
3.5 keVライン

- より小さな銀河からはラインは観測されていない。

7.1 keV ステライルニュートリノ DM の場合

・ 天の川銀河 [arXiv:1405.7943](https://arxiv.org/abs/1405.7943)

・ 矮小銀河 [arXiv:1408.3531](https://arxiv.org/abs/1408.3531)
[arXiv:1408.4115](https://arxiv.org/abs/1408.4115)



少なくとも Cusp な DM プロファイルの場合は矛盾する

別なシナリオの例

■ Exciting DM (励起状態の暗黒物質)

(0) 質量差は $\delta m = 3.5 \text{ keV}$

(1) 高密度の DM 銀河中心で励起状態の DM が作られる

$$\chi\chi \rightarrow \chi^*\chi^*$$

(2) 励起状態が基底状態に戻るときに X 線を放出 $\chi^* \rightarrow \chi\gamma$

大きい銀河ほど励起状態の DM が作られやすい

■ アクシオンライクな粒子を通じたシナリオ

(1) 7.1 keV の暗黒物質がアクシオンライク粒子に崩壊する

(2) 生成されたアクシオンライク粒子が銀河中の磁場を通じて 3.5 keV の X 線を作る.

簡単な暗黒物質模型

暗黒物質模型

- SM singlet $\Phi = \frac{s + ia}{\sqrt{2}}$ を加える
- スカラー暗黒物質の場合, 必ず自己相互作用が許される $\frac{\lambda}{4}|\Phi|^4$
- CP-odd 粒子 a は厳密な global $U(1)$ の下では質量ゼロ.
しかしある高エネルギーで非摂動効果で $U(1) \rightarrow \mathbb{Z}_N$ に破れる
と期待される. $\rightarrow m_a \ll m_s$

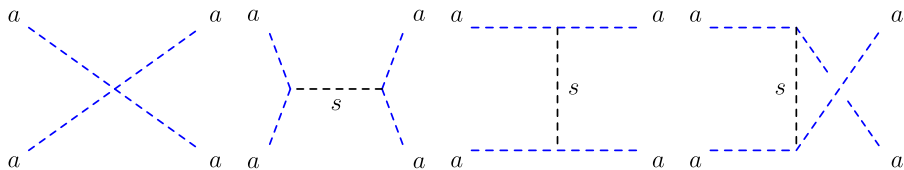
スカラーポテンシャル

$$\mathcal{V} = -\mu^2 |\Phi|^2 + \frac{\lambda}{4} |\Phi|^4 \left(+\lambda_{H\Phi} |H|^2 |\Phi|^2 \right)$$

自発的対称性の破れの後

$$\rightarrow \mathcal{V} = \frac{m_s^2}{2} s^2 + \frac{m_a^2}{2} a^2 + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{2}} m_s s (s^2 + a^2) + \frac{\lambda}{16} (s^2 + a^2)^2$$

自己相互作用断面積



$$\frac{\sigma_{aa}}{m_a} = \frac{\lambda^2 m_a}{32\pi (4m_a^2 - m_s^2)^2} \approx \frac{\lambda^2 m_a}{32\pi m_s^4} \quad \text{for } m_a \ll m_s$$

特徴

- 断面積 σ_{aa} は m_a^2 に比例する.
- 通常の振る舞いとは異なる $\sigma_{aa} \propto 1/m_a^2$.
- 擬ゴールドストーンボソンの性質.

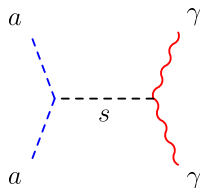
フォトンへの対消滅

フォトンとの有効相互作用

$$\mathcal{L}_\gamma = \frac{s}{\Lambda} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

対消滅断面積

$$\rightarrow \sigma_{\gamma\gamma} v = \frac{\lambda m_a^2 m_s^2}{\pi \Lambda^2 (m_s^2 - 4m_a^2)^2} \approx \frac{\lambda m_a^2}{\pi \Lambda^2 m_s^2}$$



■ 断面積は m_a^2 に比例する.

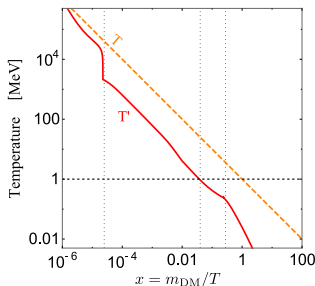
■ カット オフスケール Λ は観測により制限される.

自己相互作用断面積と組み合わせると

$$\begin{aligned} \sigma v_{\gamma\gamma} &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{4m_a^{3/2}}{\Lambda^2} \sqrt{\frac{\sigma_{aa}}{m_a}} \\ &\approx 1.3 \times 10^{-33} \left(\frac{100 \text{ TeV}}{\Lambda} \right)^2 \left(\frac{m_a}{3 \text{ keV}} \right)^{3/2} \left(\frac{\sigma_{aa}/m_a}{1 \text{ cm}^2/\text{g}} \right)^{1/2} [\text{cm}^3/\text{s}] \end{aligned}$$

暗黒物質の残存量

- Hidden セクターを仮定する
- Hidden セクターへの対消滅により DM の数を減らす
- 脱結合後の温度が SM セクターと異なる
→ BBN や CMB の制限を緩和できる



ボルツマン方程式

$$\frac{dn}{dt} + 3H(T)n = -\langle\sigma v\rangle [n^2 - n_{\text{eq}}^2(T')]$$

arXiv:1510.08527

Λ への制限

■ Horizontal Branch stars

媒介粒子スカラー s が星の中で生成される

星の中でのヘリウム燃焼時間が短くなる $\rightarrow$ 制限を与える

■ モノフォトン+ミッシングエネルギー (ASP and LEP bounds)

$$e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow s\gamma$$

s は検出器の外で崩壊する $\Gamma_s = \frac{m_s^3}{4\pi\Lambda^2} < \text{a few m}$

■ 自己相互作用の摂動論的パラメータ $\lambda \leq 4\pi$

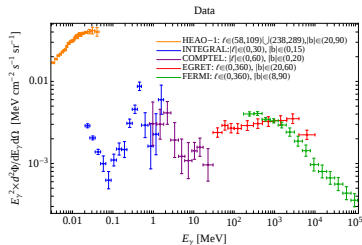
■ 暗黒物質の対消滅による

フォトン生成.

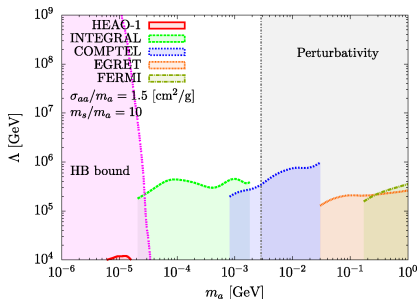
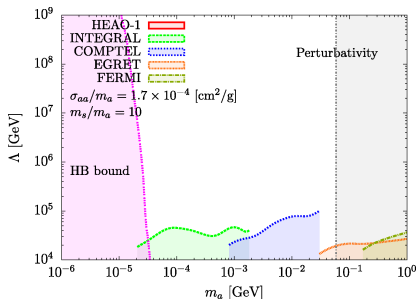
HEAO-1, INTEGRAL,

COMPTEL, EGRET, FERMI.

keV — GeV の暗黒物質質量に
制限を与える.



数値計算

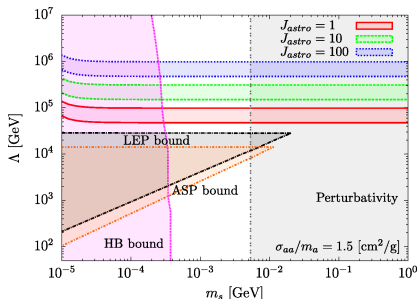
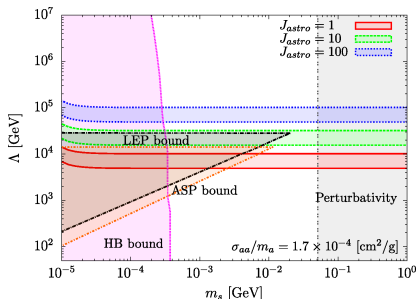


- 暗黒物質質量は HB と摂動により制限される.

$\sigma_{aa}/m_a = 1.7 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{g}$ のとき, $10 \text{ keV} \lesssim m_a \lesssim 10 \text{ MeV}$
と $\Lambda \gtrsim 10^5 \text{ GeV}$

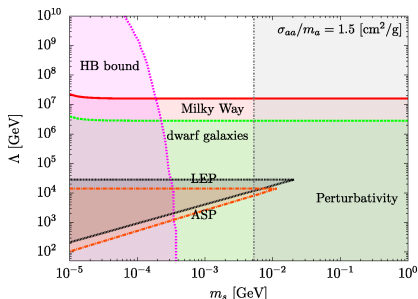
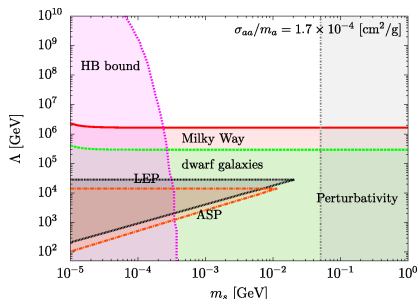
$\sigma_{aa}/m_a = 1.5 \text{ cm}^2/\text{g}$ のとき, $10 \text{ keV} \lesssim m_a \lesssim 1 \text{ MeV}$
と $\Lambda \gtrsim 10^6 \text{ GeV}$

3.5 keV X線ラインにフィットさせるためには



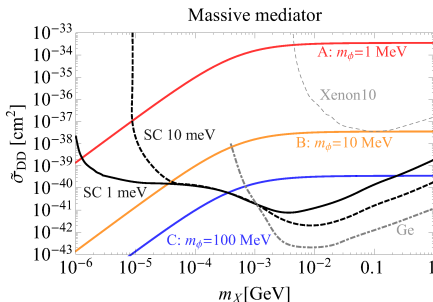
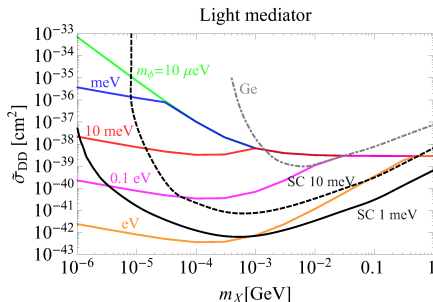
- m_a は $m_a = 3.5$ keV に固定.
- J_{astro} は宇宙物理の不確定性
- $10 \text{ TeV} \lesssim \Lambda \lesssim 1000 \text{ TeV}$ がラインを説明するためにはよい

X線ラインが見えないのを考慮すると



- 矮小銀河からの制限 $\sigma v_{\gamma\gamma} \lesssim 2.5 \times 10^{-36} \text{ cm}^3/\text{s}$.
- 単純な暗黒物質対消滅での解釈は排除される.
- 別なシナリオ (励起 DM など) は OK.

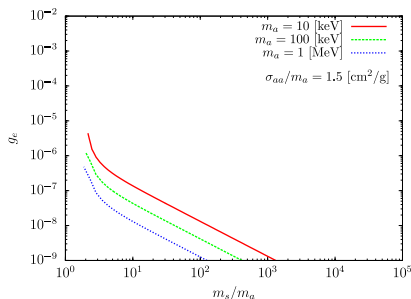
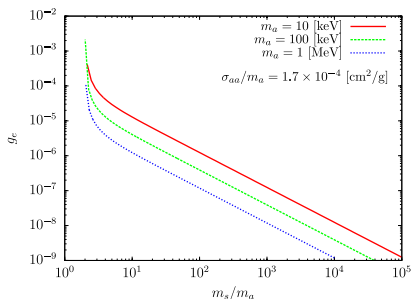
軽い暗黒物質の直接検出



arXiv:1504.07237

- 超電導体を使った将来実験
- 電子との散乱イベントを探索
- 暗黒物質質量のターゲットレンジ: $10 \text{ keV} - 1 \text{ GeV}$
- 反跳エネルギー $\mathcal{O}(\text{meV})$ までの感度が期待されている

軽い暗黒物質の直接検出



電子との相互作用 $\mathcal{L} = g_e s \bar{e} e$ を仮定したとき

$$\sigma_{\text{DD}}^e = \frac{\lambda^2 g_e^2}{2\pi m_s^4} \frac{m_a^2 m_e^2}{(m_a + m_e)^2} \frac{m_s^2}{4m_a^2}$$

結合定数 $g_e \gtrsim 10^{-7}$ まで調べられる (1kg·year exposure).

$g_e \lesssim 10^{-7}$ は λ の摂動限界までとったとしても直接検出では見えない。

まとめ

- 1 銀河団 Abell3827 の暗黒物質ハローと通常の星の分布にずれがあるとの報告があり、暗黒物質の自己相互作用を示唆している可能性がある。
- 2 ここでは擬ゴールドストーンボソンが暗黒物質として自己相互作用と対消滅から生じるモノクロラインシグナルを議論した。
- 3 様々な制限を逃れつつ、要求される自己相互作用を満たすためには暗黒物質質量は $\text{keV} - \text{MeV}$ である必要がある。
- 4 MeV スケール暗黒物質は将来ガンマ線実験 ASTROGAM や超電導体を使った直接検出実験でさらに検証がなされる。