

スカラー型とベクトル型の暗黒物質の比較

Comparison of scalar type and vector type Dark matter

○ 渡邊 裕介\*1, 二瓶 武史\*2

Yusuke Watanabe, Takeshi Nihei

Abstract : We show that dark matter with mass around 2-10 GeV can explain the annual modulation observed by the DAMA experiment without violating the constraints of other dark matter searches. This explanation implies distinctive and promising signals for other direct detection experiments. We consider light dark matter scalar and vector models and discuss pair annihilation cross section of dark matter.

1. はじめに

暗黒物質とは宇宙にある星間物質で自力で光を発しない、または光を反射しない物質とされている。様々な観測衛星の中の WMAP[1] によると暗黒エネルギー 74 %, 暗黒物質 22 %, 原子 4 % であるとされている。

また暗黒物質を構成する素粒子は電磁相互作用をせず、強い相互作用もしないが、重力相互作用はしている宇宙初期から安定に存在している素粒子であることが判明している。その暗黒物質の候補として一般的にあげられているのは WIMP (Weakly Interacting Massive Particle), ニュートリノ, アキシオン, ミラーマターなどである。

一般に多く研究されているモデルでは暗黒物質をスカラー粒子, フェルミ粒子の場合としている。あまり研究されていないモデルとして WIMPlless モデル [2, 3, 4] があり, このモデルでは暗黒物質をスカラー粒子, ベクトル粒子として研究している。

本研究では暗黒物質  $X$  をスカラー粒子, ベクトル粒子と考え, その対消滅過程  $XX \rightarrow f\bar{f}$  ( $f$  は標準模型のフェルミ粒子) の散乱断面積を計算し, DAMA の観測結果と比較を行い, このモデルの検証を行う。

2. 本研究で用いたモデル

暗黒物質  $X$  がスカラー粒子の場合の相互作用ラグランジアンは

$$\mathcal{L} = X\bar{Y}(\lambda_{fL}P_L + \lambda_{fR}P_R)f + h.c. \quad (1)$$

また, 暗黒物質  $X$  がベクトル粒子の場合の相互作用ラグランジアンは

$$\mathcal{L} = X^\mu\bar{Y}\gamma_\mu(\lambda_{fL}P_L + \lambda_{fR}P_R)f + h.c. \quad (2)$$

と表される。  $X$  は暗黒物質,  $f$  は標準模型に含まれるフェルミ粒子,  $Y$  は未知のフェルミ粒子,  $P_L = \frac{1-\gamma_5}{2}, P_R = \frac{1+\gamma_5}{2}, \lambda$  は結合定数である。

ここでフェルミ粒子  $Y, f$  は標準模型の  $SU(2)_2$  重項, 暗黒物質  $X$  は標準模型の中でゲージ不変な粒子である。

3. 散乱断面積

対消滅過程  $XX \rightarrow f\bar{f}$  について, 暗黒物質  $X$  がスカラー粒子の場合, ベクトル粒子の場合の散乱断面積を評価する。

ここで対消滅過程  $XX \rightarrow f\bar{f}$  の Feynman 図を以下に示す。

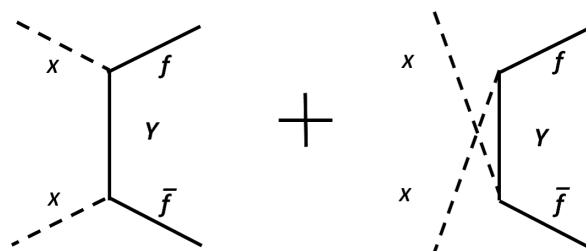


Figure.1. Feynman diagrams for annihilations to the  $XX \rightarrow f\bar{f}$  (Dark matter  $X$  is scalar particle)

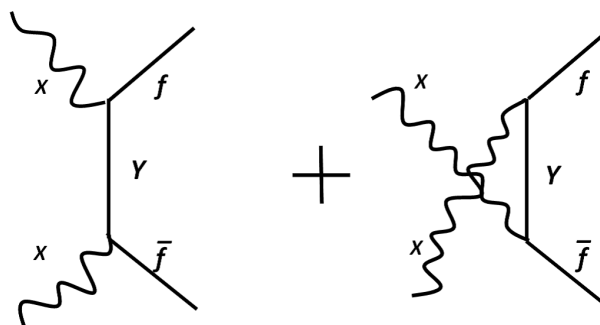


Figure.2. Feynman diagrams for annihilations to the  $XX \rightarrow f\bar{f}$  (Dark matter  $X$  is vector particle)

ここで暗黒物質  $X$  の相対速度  $v_{rel} = 0$  とした。 Figure.1 に対する散乱断面積は

\*1 日大理工・院・物理  
\*2 日大理工・教員・物理

$$\sigma v = \frac{(m_f \lambda_{fL}^2 + m_f \lambda_{fR}^2 + 2\lambda_{fL} \lambda_{fR} m_Y)^2}{8\pi(-m_f^2 + m_X^2 + m_Y^2)^2} \left(1 - \frac{m_f^2}{m_X^2}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

Figure.2 に対する散乱断面積は

$$\begin{aligned} \sigma v = & \frac{1}{72\pi(-m_f^2 + m_X^2 + m_Y^2)^2} \left(1 - \frac{m_f^2}{m_X^2}\right)^{\frac{3}{2}} \\ & \times \{-12m_f m_Y \lambda_{fL} \lambda_{fR} (\lambda_{fL}^2 + \lambda_{fR}^2) \\ & + 2\lambda_{fL}^2 \lambda_{fR}^2 (9m_f^2 + 10m_Y^2) \\ & + (\lambda_{fL}^4 + \lambda_{fR}^4)(m_f^2 + 8m_X^2)\} \end{aligned} \quad (4)$$

と求まる．さらに  $m_Y \gg m_X, m_f$  として近似した場合、(3) 式は

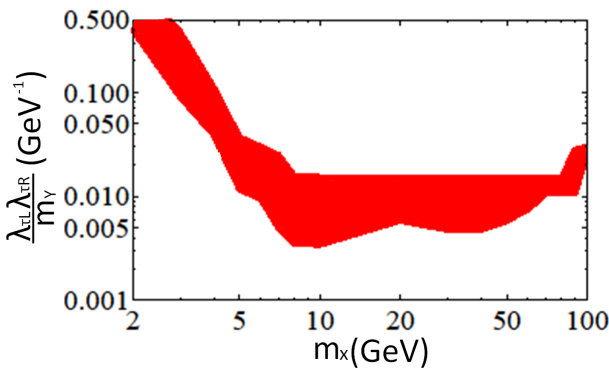
$$\sigma v = \frac{\lambda_{fL}^2 \lambda_{fR}^2}{2\pi m_Y^2} \left(1 - \frac{m_f^2}{m_X^2}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

(4) 式は

$$\sigma v = \frac{5\lambda_{fL}^2 \lambda_{fR}^2}{18\pi m_Y^2} \left(1 - \frac{m_f^2}{m_X^2}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

と求められる．この結果を用いて、DAMA の実験結果を満たせる領域  $\sigma v(\text{DAMA})_{\min} < \sigma v < \sigma v(\text{DAMA})_{\max}$  をみていく．

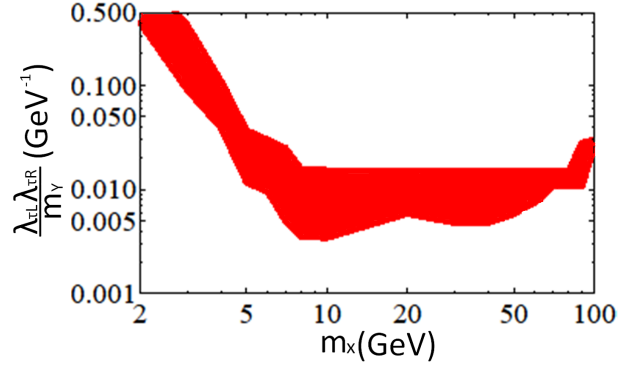
ここで  $f$  が  $\tau$  レプトンの場合について、暗黒物質  $X$  がスカラー粒子である場合のグラフを以下に示す．



**Figure.3.** The experimental result of DAMA fill region (Dark matter  $X$  is scalar particle)

Figure.3 は横軸を暗黒物質の質量  $m_X$ 、縦軸を  $\frac{\lambda_{\tau L} \lambda_{\tau R}}{m_Y}$  としたとき、図における赤い領域が DAMA の実験結果を満たせる領域である．

続いて  $f$  が  $\tau$  レプトンの場合について、暗黒物質  $X$  がベクトル粒子である場合のグラフを以下に示す．



**Figure.4.** The experimental result of DAMA fill region (Dark matter  $X$  is vector particle)

Figure.4 は横軸を暗黒物質の質量  $m_X$ 、縦軸を  $\frac{\lambda_{\tau L} \lambda_{\tau R}}{m_Y}$  としたとき、図における赤い領域が DAMA の実験結果を満たせる領域である．

#### 4. まとめと今後の課題

本研究では暗黒物質  $X$  をスカラー粒子、ベクトル粒子の場合で対消滅過程  $XX \rightarrow f\bar{f}$  の散乱断面積を評価した．また DAMA の観測結果と比較を行い、スカラー粒子、ベクトル粒子で実験結果で求める領域を示した．

今後の課題として、簡単化のため暗黒物質の相対速度  $v_{\text{rel}} = 0$  として計算を行ったので相対速度  $v_{\text{rel}} \neq 0$  の場合でも評価する．また  $m_Y$  を十分大きくする近似を使い評価を行ったが、これを行わない場合についても評価する必要がある．さらに別の散乱過程についての散乱断面積の評価も行う．

#### 参考文献

- [1] WMAP
- [2] Jonathan L.Feng and Jason Kumer  
The WIMPLess Miracle:Dark Matter Particles without Weak-scale Masses or Weak Interactions  
Phys.Rev.Left.101,231301(2008)
- [3] Jonathan L.Feng and Jason Kumer,and Louis E. Strigari  
Explaining the DAMA Signal with WIMPLess Dark Matter  
arXiv:0806.3746v4(2008)
- [4] Guohuai Zhu  
WIMPLess dark matter and the excess gamma rays from the Galactic center  
arXiv:1101.4387v1(2011)