

軽い暗黒物質と電子の散乱

Scattering of Light Dark Matter and Electron

○亀山峻吾*1, 二瓶武史*2

*Shungo Kameyama, Takeshi Nihei

Abstract: We assume that light dark matter with mass below about 1 GeV exist, and consider light dark matter-electron scattering. Technology that detection of single electron events in semiconductor materials would allow direct detection of dark matter as light as 10 MeV in mass.

1. 研究の目的・概要

暗黒物質は銀河の回転速度や重力レンズ効果等からその存在が必要とされている物質である。しかし未だにその正体はわかっていない。

暗黒物質の研究では 10 GeV 以上の質量のものを扱うことが多いが、近年では軽い暗黒物質に関する研究も行われている。本研究では軽い暗黒物質 (10MeV~10GeV 程度) が存在すると仮定し、これをゲルマニウム半導体検出器により直接検出する場合 [1] について考える。

通常、暗黒物質の直接検出では、暗黒物質と衝突した原子核の受け取る反跳エネルギーを観測する。しかし軽い暗黒物質では衝突しても原子核がほとんど動かない。そこで本研究では暗黒物質と電子の散乱 [1, 2, 3] を考え、電子の反跳エネルギーを観測する。

2. モデル

Figure. 1 の反応における量子効果により生成される有効相互作用として、次のラグランジアンを考える。

$$\mathcal{L}_{\text{dipole}} = -\frac{i}{2}\bar{\chi}\sigma^{\mu\nu}(\mu_\chi + d_\chi\gamma_5)\chi F_{\mu\nu} \quad (1)$$

ここで $\sigma^{\mu\nu} = \frac{i}{2}[\gamma^\mu, \gamma^\nu]$, $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$, χ は暗黒物質の場, d_χ は電気双極子モーメント, μ_χ は磁気双極子モーメント, γ^μ はガンマ行列, A_μ は電磁ポテンシャルである。以下ラグランジアン中の電気双極子モーメントの項に注目する。

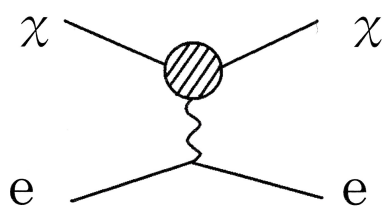


Figure 1. Feynman diagrams

3. 原子のイオン化

1 個の原子が暗黒物質と衝突しイオン化する場合を考える。一般に微分散乱断面積 $d\sigma$ は次のように書ける。

$$d\sigma = \frac{1}{v_{\text{rel}}} \left(\prod_f \frac{d^3k_f}{(2\pi)^3} \right) 2\pi\delta(E_f - E_i) |\langle f|H|i\rangle|^2 \quad (2)$$

これを計算し整理すると、微分散乱断面積は次のように近似される。

$$\frac{d\sigma}{dE_R} \approx \frac{16a^2 d_\chi^2 k_e F(k_e)}{\pi v_\chi^2} \left[\ln \left(\frac{1 + a^2 q_{\text{min}}^2}{a^2 q_{\text{min}}^2} \right) - \frac{6a^4 q_{\text{min}}^4 + 45a^2 q_{\text{min}}^2 + 11}{6(1 + a^2 q_{\text{min}}^2)^3} \right] \quad (3)$$

上式において a はボーア半径, E_R は電子の反跳エネルギー, $q_{\text{min}} = m_\chi v_\chi - \sqrt{m_\chi^2 v_\chi^2 - 2m_\chi(E_R + E_B)}$ は暗黒物質の最小運動量遷移である。 $F(k_e)$ は原子核がつくるクーロンポテンシャルが電子の波動関数に与える影響を補正するための因子 [4] として知られていて, $F(k_e) = 2\pi\nu/(1 - e^{-2\pi\nu})$, $\nu = Z_{\text{eff}}m_e\alpha/k_e$ である。ここで Z_{eff} は有効核電荷, m_e は電子の質量, α は微細構造定数, k_e は電子の運動量である。

4. 半導体のバンド構造

電子の束縛エネルギーを E_B として、式 (1) の微分散乱断面積にゲルマニウムの状態密度 $\rho(E_B)$ (実験値) をかけたものを新たに微分散乱断面積として扱う [1]。

$$d\sigma \approx \int dE_B \rho(E_B) d\sigma(E_B) \quad (4)$$

5. 暗黒物質と電子の反応率

銀河内での暗黒物質と電子の反応率を計算する。反応率は次のように書ける。

$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{\rho_\chi \eta_e}{m_\chi} \int d^3v_\chi f(\vec{v}_\chi) v_\chi \frac{d\sigma}{dE_R} \quad (5)$$

ここで暗黒物質の質量 m_χ , 暗黒物質の速度 \vec{v}_χ , 暗黒物質のエネルギー密度 $\rho_\chi = 0.3\text{GeV}/\text{cm}^3$, ゲルマニウムの価

*1 日大理工・院 (前)・物理

*2 日大理工・教員・物理

電子の数密度 $\eta_e = 4 \times 6.02 \times 10^{23} / (72.63\text{g})$ であり, 銀河の暗黒物質の速度分布 $f(\vec{v}_\chi)$ は Maxwell 分布を仮定する.

$$f(\vec{v}_\chi) = \frac{1}{k} e^{-\frac{(\vec{v}_\chi + \vec{v}_E)^2}{v_0^2}} \quad (6)$$

式 (6) の中に現れる k は以下のように書ける [5].

$$k = (\pi v_0^2)^{3/2} \left[\text{erf}\left(\frac{v_{\text{esc}}}{v_0}\right) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{v_{\text{esc}}}{v_0} e^{-v_{\text{esc}}^2/v_0^2} \right] \quad (7)$$

上式の $\text{erf}(v_{\text{esc}}/v_0)$ は誤差関数とよばれ次式で書ける.

$$\text{erf}(v) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^v e^{-v'^2} dv' \quad (8)$$

地球の平均速度 $v_E = 240$ km/s, 暗黒物質の平均速度 $v_0 = 230$ km/s, 銀河系脱出速度 $v_{\text{esc}} = 600$ km/s である.

最終的に暗黒物質と電子の反応率は次のように書ける.

$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{\rho_\chi \eta_e \pi v_0^2}{m_\chi k v_E} \left(\int_{v_{\min}}^{v_{\text{esc}} + v_E} dv_\chi v_\chi^2 e^{-\frac{(v_\chi - v_E)^2}{v_0^2}} \frac{d\sigma}{dE_R} - \int_{v_{\min}}^{v_{\text{esc}} - v_E} dv_\chi v_\chi^2 e^{-\frac{(v_\chi + v_E)^2}{v_0^2}} \frac{d\sigma}{dE_R} \right) \quad (9)$$

ここで $v_{\min} = \sqrt{2(E_R + E_B)/m_\chi}$ は暗黒物質が散乱するのに必要な最小速度である.

4.4kg のゲルマニウム検出器で 1 年間観測した場合の, 暗黒物質と電子の反応率の計算結果を Figure. 2 に示す.

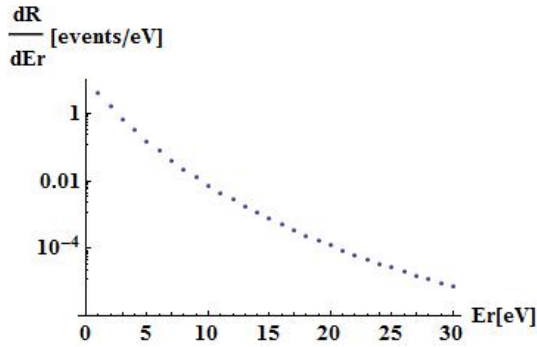


Figure 2. Detection rates after 1 year, for $m_\chi=100\text{MeV}$.

6. まとめ・今後の課題

本研究では軽い暗黒物質の存在を仮定し, 原子核ではなく電子との散乱する場合について調べた. 式 (1) の電気双極子モーメントの項における有効相互作用を考え, 測定にゲルマニウム半導体検出器を用いた場合の, 軽い暗黒物質と電子の反応率を計算した結果, 反応率は反跳エネルギーの増加に伴い大きく減少した. 今後は他の反応についても調べ, DAMA や CDMS などの暗黒物質の直接検出実験でまだ明確な制限がない範囲 (暗黒物質の質量が 10 GeV 以下) における考察を行っていく.

参考文献

- [1] P. W. Graham, D. E. Kaplan, S. Rajendran and M. T. Walters, *Semiconductor probes of light dark matter*, (2012), arXiv:1203.2531
- [2] J. Kopp, V. Niro, T. Schwetz and J. Zupan, *DAMA/LIBRA and leptonicly interacting dark matter*, Phys. Rev. D80, 8 (2009), arXiv:0907.3159
- [3] A. Dedes, I. Gimataris, K. Suxho and J. D. Vergados, *Searching for secluded dark matter via direct detection of recoiling nuclei as well as low energy electrons*, Nucl. Phys. B826, 148 (2010), arXiv:0907.0758
- [4] M. Morita, *Beta Decay and Muon Capture*, 1973
- [5] J. D. Lewin, P. F. Smith, *Review of mathematics, numerical factors, and corrections for dark matter experiments based on elastic nuclear recoil*, Astropart. Phys. 6, 87 (1996)
- [6] S. D. McDermott, H.-B. Yu and K. M. Zurek, *Turnig off the lights: How dark is dark matter?*, Phys. Rev. D83 063509 (2011), arXiv:1011.2907