

暗黒物質の非弾性散乱模型

A model of inelastic dark matter

○ 喜田 好彦*¹, 二瓶 武史*²
Yoshihiko Kida, Takeshi Nihei

Abstract : In recent years, various experiments for direct detection of dark matter have been done . Although, those experimental results were not in agreement. We consider an inelastic scattering model for dark matter to explain this mismatch.

1. 導入

近年の宇宙観測の結果, 宇宙空間の暗黒物質の存在が明らかとなってきた. そして, 暗黒物質の地上における直接検出を試みる実験も数多く行われてきた. しかし, 地上における直接検出の実験の結果, DAMA を始めとするグループは暗黒物質の検出に成功したという結果を主張しており [1], CDMS を始めとするグループは暗黒物質は検出されていないと主張している [2]. 一般的には暗黒物質は弾性散乱をしているものと考えられてきたが, D. Smith らはこの不整合である状態を理論的に説明する方法として非弾性散乱模型を提唱した [3].

本研究では暗黒物質の非弾性散乱を考え, 一方では検出され, もう一方では検出されないような状態が存在するのかを DAMA や CDMS と比較して検証する.

2. 直接検出の実験方法

暗黒物質の性質として, 電磁相互作用をしないことが挙げられる. つまり, 暗黒物質は光学的に検出することは出来ない. よって, 実際の検出方法は測定器に入射してきた暗黒物質と原子核が反応し, その原子核の反跳エネルギー E_R を測定する方法が用いられている.(Fig.1).

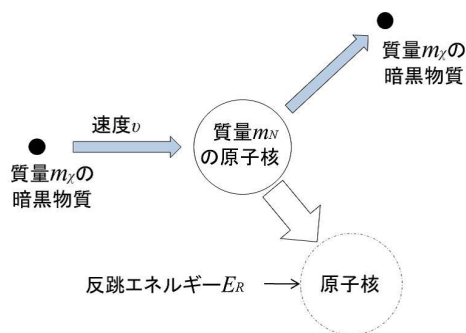


Figure.1. Dark matter elastic scattering

Fig.1 は暗黒物質 χ と原子核 N の弾性散乱 ($\chi N \rightarrow \chi N$) の図である. m_χ, v は暗黒物質の質量と入射速度, m_N, E_R は原子核の質量と反跳エネルギーを表している. 実験の結果を Fig.2 に示す.

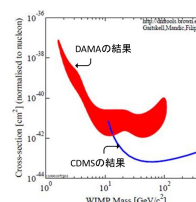


Figure.2. The experimental result of direct detection

Fig.2 は DAMA と CDMS の実験の結果であり, 縦軸は暗黒物質の断面積, 横軸は暗黒物質の質量である. 赤く示されている部分が DAMA の結果で赤い範囲の中に暗黒物質のシグナルが発見されており, 青い線で示されている部分が CDMS の結果で青い線より上の部分で暗黒物質の存在を否定している. ここで挙げた 2 つの実験の主な違いは, ターゲットの原子核の質量である. 具体的には, DAMA はターゲットに質量数 127 のヨウ素を用い, CDMS は質量数 73 のゲルマニウムを用いている. 2 つの実験は矛盾するとは言えないものの DAMA で示される領域の大部分を CDMS が否定している.

3. 暗黒物質の非弾性散乱模型

本研究では DAMA で暗黒物質が検出され CDMS で検出されない状態を同時に説明する模型を考えたい. そこで, 暗黒物質粒子の散乱の運動学に改良を加え, 非弾性散乱を考える [3].

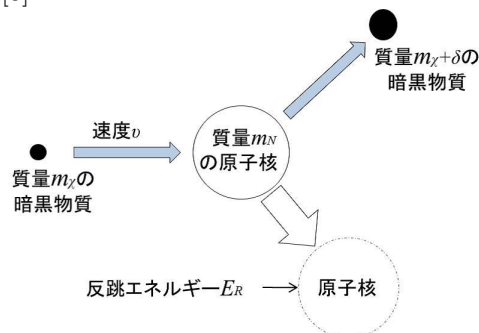


Figure.3. Dark matter inelastic scattering

*¹ 日大理工・院・物理
*² 日大理工・教員・物理

Fig.3 は暗黒物質の非弾性散乱の図である。弾性散乱との違いは、暗黒物質より少しだけ重い粒子 χ' を導入し ($\chi N \rightarrow \chi' N$) と散乱することである。 δ は χ と χ' の質量差である。これより、エネルギーと運動量を保存した式を作り非弾性散乱を起こすための暗黒物質が入射するときの最小速度を考える。

$$v_{min} = \sqrt{\frac{1}{2m_N E_R} \left(\frac{m_N E_R}{\mu} + \delta \right)} \quad (1)$$

ここで、 μ は暗黒物質と原子核の換算質量である。以下に変数を反跳エネルギーにした物と原子核の質量にしたものをそれぞれ表す。尚、計算において暗黒物質の質量 $m_\chi=100\text{GeV}$ と暗黒物質の散乱前後の質量差 $\delta=12\text{keV}$ を与え、さらに左のグラフでは原子核の質量 $m_N=73\text{GeV}$ を、右のグラフでは反跳エネルギー $E_R=12\text{keV}$ をそれぞれ与えた。

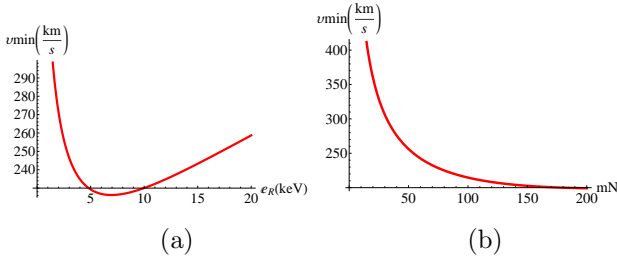


Figure.4. Recoil energy dependence of the velocity and Nuclear mass of a dark matter

Fig.4(a) のグラフは暗黒物質が非弾性散乱を起こすための最小速度の反跳エネルギー依存性のグラフであり、反跳エネルギーが小さいときには非弾性散乱を起こすための最小速度が非常に高くなる。そして Fig.4(b) のグラフは暗黒物質が非弾性散乱を起こすための最小速度のターゲットの質量依存性であり、重い原子核を用いたほうが非弾性散乱を起こしやすいと言える。

4. イベントレート

次に、実際にイベントレートを計算して確かめてみる。そこで、このような式を考える。

$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{N_T m_N \rho_\chi}{4v_0 m_\chi} F^2(E_R) \frac{\sigma_n}{\mu_n^2} \frac{(f_p Z + f_n(A-Z))^2}{f_n^2} \times \left(\frac{\text{erf}(x_{min} + \eta) - \text{erf}(x_{min} - \eta)}{\eta} \right) \quad (2)$$

ここで、 N_T は単位質量当たりのターゲットの原子の数、 ρ_χ は暗黒物質の局所密度、 v_0 は銀河の回転速度、 σ_n は暗黒物質と中性子の断面積、 μ_n^2 は暗黒物質と核子の換算質量、 A は原子核の質量数、 Z は原子核の陽子数、 f_p は陽子との結合強度、 f_n は中性子との結合強度、 $\frac{\text{erf}(x_{min} + \eta) - \text{erf}(x_{min} - \eta)}{\eta}$ は暗黒物質の速度分布を考えた物で Maxwell-Boltzman 分布を考えた。erf は誤差関数である。さらに、 $F^2(E_R)$ は ヘル

μ の原子核形状因子であり、以下の形である。

$$F^2(E_R) = \left(\frac{3j_1(qr_0)}{qr_0} \right)^2 e^{-s^2 q^2} \quad (3)$$

j_1 は球面ベッセル関数、 $q = \sqrt{2m_N E_R}$ 、 $s=1\text{fm}$ 、 $r_0 = \sqrt{r^2 - 5s^2}$ 、 $r = 1.2A^{1/3}$ である。結果を Fig.5 に表す。

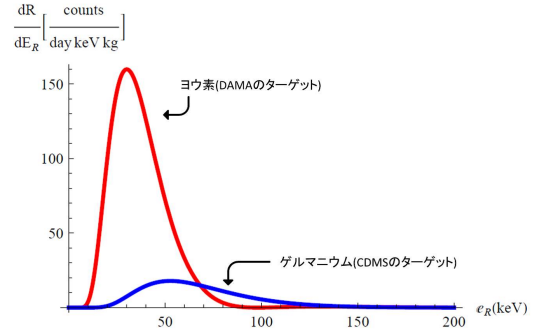


Figure.5. Event rate

ここでは、原子核の質量を DAMA 実験で用いられた結果 (赤線・質量数 127) と CDMS 実験で用いられた結果 (青線・質量数 73) の両方を用いて比較をした。尚、この計算を行うに当たり暗黒物質の質量 $m_\chi=100\text{GeV}$ と暗黒物質の散乱前後の質量差 $\delta=120\text{keV}$ に加え、

ヨウ素のターゲット・・・ $N_T = 4.74 \times 10^{21}$ 、 $A = 127$ 、 $Z = 53$

ゲルマニウムのターゲット・・・ $N_T = 8.25 \times 10^{21}$ 、 $A = 73$ 、 $Z = 32$

を用いた。以上より、DAMA で見つかれば CDMS で見つからない状況が存在することが言えた。

5. まとめと今後の課題

今回は、暗黒物質の直接検出において結果が食い違うという状況が存在し得るということが示された。今後はこれを元に様々な方向から検証していきたい。

参考文献

- [1] R.Bernabei et al
“ New results from DAMA/LIBRA ”
arXiv:astro-ph/1002.1028v1 4 Feb 2010
- [2] Z.Ahmed et al
“ Status of the Cryogenic Dark Matter Search Experiment ”
J Low Temp Phys (2008)151: 800-805
- [3] D.Smith,N.Weiner “ Inelastic Dark Matter ”
arXiv:hep-ph/0101138v1 15 Jan 2001
- [4] Spender Chang et al
“ Inelastic Dark Matter in light of DAMA/LIBRA ”
Phys.Rev.D79,043513(2009)