

論文の内容の要旨

氏名：首 藤 健 太

博士の専攻分野の名称：博士（理学）

論文題名：暗黒物質対消滅における電弱制動放射の効果

1. 序論

渦巻き銀河の回転速度の観測などによって暗黒物質の存在は以前から示唆されていたが、近年における宇宙背景輻射(CMB)の温度揺らぎ、宇宙の大規模構造、超新星などの観測結果により、その存在が確実なものになりつつある。しかし暗黒物質を構成する素粒子の正体は未だ判明しておらず、その正体を明らかにすることは素粒子物理学及び宇宙物理学における重要な研究課題の一つとなっている。

暗黒物質を構成している素粒子を検出するために、暗黒物質を地球上の測定器内で検出する直接検出実験と、暗黒物質の対消滅により生成される宇宙線を検出する間接検出実験が行われている。間接検出実験との比較を行う際、暗黒物質 χ の対消滅散乱断面積及び対消滅に由来する粒子スペクトルの解析が非常に重要となってくる。

間接検出実験との比較を行っている多くの先行研究では、素粒子模型として最小超対称標準模型(MSSM)が用いられており、暗黒物質を超対称粒子の固有状態であるニュートラリーノ χ と仮定し、二体終状態過程

$$\chi\chi \rightarrow X\bar{X}$$

のみを解析している。この過程のうち、本研究で最も主要なものはフェルミオン対生成過程

$$\chi\chi \rightarrow f\bar{f}$$

である(f はフェルミオン、 \bar{f} は反フェルミオン)。ニュートラリーノが粒子・反粒子の区別がないマヨラナフェルミオンであるために、フェルミオン対生成 $f\bar{f}$ の散乱断面積に対してヘリシティ抑制($\propto m_f^2/m_\chi^2$)が働くことが知られている。即ちフェルミオンの質量 m_f が χ の質量 m_χ に比べて十分小さい場合、その断面積は非常に強い抑制を受ける。

これに対して、ゲージボソンを放出する三体終状態がヘリシティ抑制を押し上げることが知られている。実際に、光子 γ を放出する制動放射過程 $\chi\chi \rightarrow f\bar{f}\gamma$ を評価することによって、ガンマ線観測に対する暗黒物質の影響が考察されている。また近年、WボソンやZボソンを放出する電弱制動放射を考慮した研究が活発に行われている。これらの先行研究では単純化された模型の下でニュートリノ(ν)スペクトルなどの評価が行われているが、MSSMの下ではニュートリノスペクトルの評価が行われていなかった。そこで本研究では、電弱制動放射過程 $\chi\chi \rightarrow lW\nu$ (l は荷電レプトン)の対消滅散乱断面積及びニュートリノスペクトルを、MSSMの下で初めて評価した。

2. 暗黒物質

CMBの観測によると、宇宙における暗黒物質の残留密度は

$$0.11 \leq \Omega_\chi h^2 \leq 0.13.$$

と判明している。ここで、

$$\Omega_\chi = \frac{\rho_\chi}{\rho_c},$$

は暗黒物質が占めるエネルギー密度の割合で、 $h \approx 0.7$ である。様々な観測によると、暗黒物質が満たすべき性質は、少なくとも電磁相互作用と強い相互作用は受けないが、重力相互作用は受けるような安定な素粒子であるというものである(弱い相互作用については未だ不明)。近年、暗黒物質の検出を試みる実験が多数行われており、その方法には大きく分けて直接検出と間接検出の2種類がある。本研究では間接検出実験との比較を行ったため、本要旨では間接検出実験についてのみ説明する。銀河中心および太陽中心には、それらの重力によって暗黒物質が蓄えられていると考えられる。よって、周りの空間よりも暗黒物質の対消滅過程

$$\chi\chi \rightarrow \gamma\gamma, e^+e^-, \nu\bar{\nu}, \text{etc}$$

が起きやすくなっている。そのため、この対消滅による暗黒物質由来の宇宙線のシグナルが期待される。間接検出実験とは、その宇宙線を検出することによって、暗黒物質の存在を間接的に検証しようとする実

験である。本研究では、電弱制動放射を考慮した暗黒物質由来の宇宙線ニュートリノを評価し、間接検出実験への影響を考察した。

3. 超対称性理論

超対称性とは、ボース粒子とフェルミ粒子を入れ替える対称性である。超対称性を導入する利点は、標準模型が持っていた質量階層性の二次発散問題を解決できることとゲージ結合定数の統一が可能となることである。

超対称性を導入した場合のラグランジアン構成方法について簡単に述べる。まず超対称変換の下で、交じり合う成分場 A, ψ, F を考える。ただし A はスカラー場、 ψ はスピノル場、 F は補助場である。また超対称変換とはテンソル場をスピノル場へ、スピノル場をテンソル場へ変換させる変換性である。この3つの成分場で構成される超場を導入し、ラグランジアンを構成していく。超場に条件を課すことによって、フェルミ粒子及びヒッグス粒子に対するラグランジアン、ゲージ粒子に対するラグランジアンが得られる。さらに標準模型のゲージ対称性を課すことで、標準模型に超対称性を導入したラグランジアンを構成することが出来る。ただし実験では超対称粒子が発見されていないため、超対称性は少なくとも低エネルギー領域では破れている。そのため超対称性の利点は保ちつつ、超対称性を破る項を導入する。このような破れをソフトな破れという。この項を加えて最終的にMSSMを構成する。

MSSMには標準模型に含まれていない未知の素粒子が数多く含まれており、暗黒物質の候補となり得る素粒子が存在する。その内の一つにゲージ粒子の超対称パートナー \tilde{B}, \tilde{W}^3 とヒッグス粒子の超対称パートナー $\tilde{H}_1^0, \tilde{H}_2^0$ を基底とした質量固有状態ニュートラリーノ

$$\chi = N_{i1}\tilde{B} + N_{i2}\tilde{W}^3 + N_{i3}\tilde{H}_1^0 + N_{i4}\tilde{H}_2^0, \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

がある。ここで N_{ij} はニュートラリーノ質量行列に対する対角化行列の ij 成分である。ニュートラリーノは暗黒物質が持つ性質を自然に満たす素粒子であるため、暗黒物質の最も有力な候補の一つである。本研究ではニュートラリーノを暗黒物質と仮定した。

4. 暗黒物質対消滅における電弱制動放射

間接検出実験との比較を行っている多くの先行研究では、MSSMの下で二体終状態 $X\bar{X}$ のみで評価が行われている。この解析の下では、軽いフェルミオン対生成 $f\bar{f}$ の散乱断面積に対してヘリシティ抑制が働くことが知られている。特にニュートリノ質量が非常に小さいため、ニュートリノ対生成 $\nu\bar{\nu}$ は強く抑制されてしまい、直接放出されるニュートリノを解析できない。つまり二体終状態のみの解析では、二体終状態に含まれる不安定粒子の崩壊で生じるニュートリノを解析していることになる。これに対して、ゲージボソンを放出する三体終状態（電弱制動放射）がヘリシティ抑制を押し上げることが知られている。本研究では、ニュートラリーノ暗黒物質 χ の対消滅断面積に対する電弱制動放射の影響を評価した。同時に、ニュートリノスペクトルに対する電弱制動放射の影響をMSSMの下で初めて評価した。

本研究ではMSSMの下で、電弱制動放射 $lW\nu$ （図1参照）を解析した。

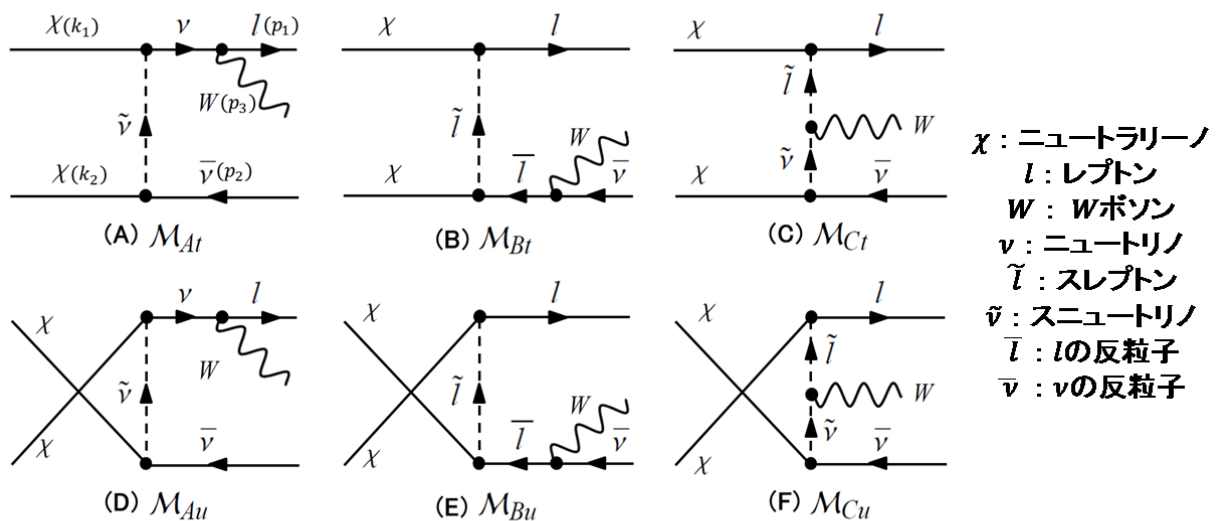


図1. 電弱制動放射過程 $\chi\chi \rightarrow lW\nu$ のファインマン図.

この過程に対する断面積は次のように与えられる。

$$\sigma v_{rel} = \int_{x_{1min}}^{x_{1max}} dx_1 \int_{x_{2min}}^{x_{2max}} dx_2 \frac{1}{128\pi^3} |M_{At} + M_{Au} + M_{Bt} + M_{Bu} + M_{Ct} + M_{Cu}|^2.$$

ただし $M_{At}, M_{Au}, M_{Bt}, M_{Bu}, M_{Ct}, M_{Cu}$ は図1 (A)~(F)にそれぞれ対応する不変振幅である.

また, 電弱制動放射 $lW\nu$ より得られるニュートリノスペクトルは次のように与えられる.

$$\frac{d\sigma v}{dE'_\nu} = \int_{x_{imin}}^{x_{imax}} \frac{dx_i}{\sqrt{x_i^2 - 1}} \frac{d(\sigma v)}{dx_i} \int_{E'_{min}(x_i, E_\nu)}^{E'_{max}(x_i, E_\nu)} \frac{dE'_\nu}{E'_\nu} \frac{dN_\nu}{dE'_\nu}. (i = 1, 3)$$

ここで $d(\sigma v)/dx_i$ は電弱制動放射 $lW\nu$ に含まれるタウ(τ), W のスペクトルに対応している. また dN_ν/dE'_ν は, プログラムPYTHIAで作成した静止している不安定粒子の崩壊によるニュートリノスペクトルである.

5. 電弱制動放射の数値解析

まず解析した電弱制動放射 $lW\nu$ の散乱断面積 (図2参照)の結果について述べる.

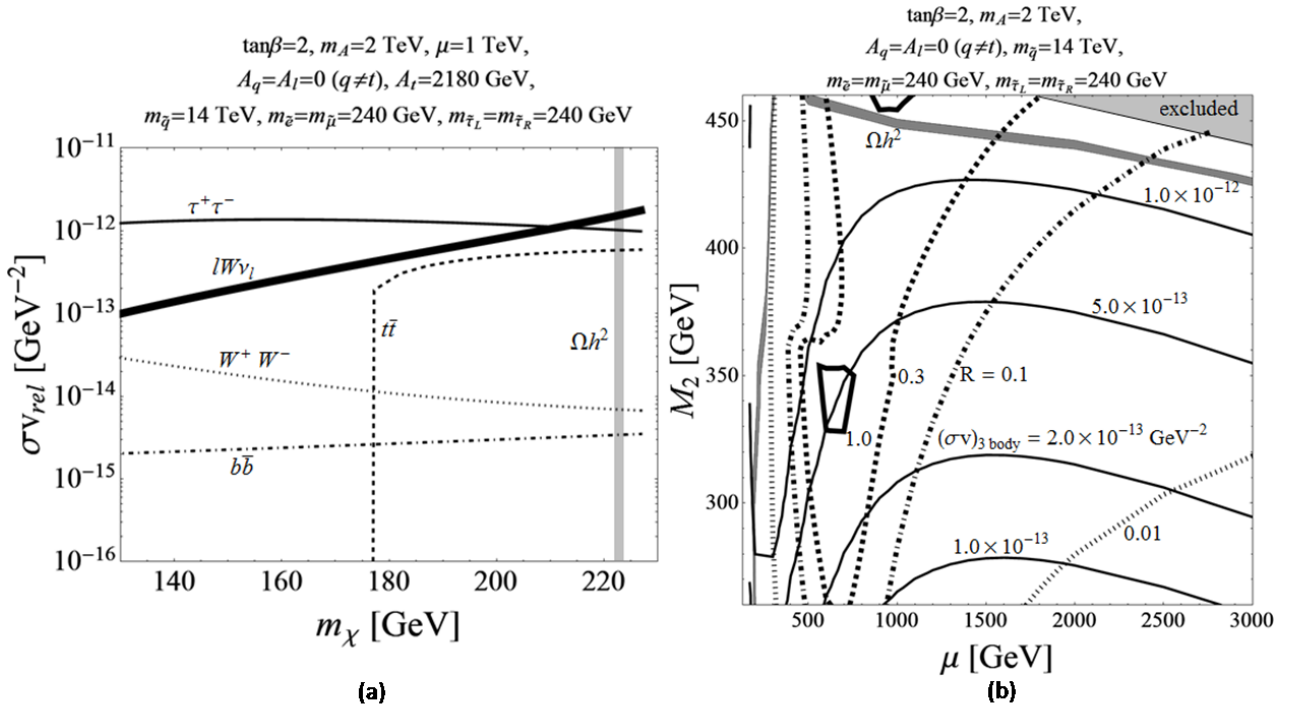


図2. (a) 非相対論的なニュートラリーノ対消滅の散乱断面積と相対速度の積 σv_{rel} のニュートラリーノ質量 m_χ 依存性 (b) 電弱制動放射過程 $\chi\chi \rightarrow lW\nu$ の散乱断面積と比 $R = (\sigma)_{lW\nu} / (\sigma)_{2body}$ の等高線プロット.

ただし図2 (b)の M_2, μ はそれぞれゲージノ \tilde{W}^3 , ヒッグシーノ $\tilde{H}_1^0, \tilde{H}_2^0$ の質量パラメータである.

図2 (a)に関しては, 残留密度の観測結果を満たしている $m_\chi \approx 222 \text{ GeV}$ の領域において,

$$(\sigma v)_{lW\nu} \approx 2 \times (\sigma v)_{\tau\tau}$$

となるため, 電弱制動放射 $lW\nu$ が最も主要となることが分かる. 即ち, 観測実験の制限を満たしながら電弱制動放射の効果が重要となるパラメータ領域が存在することが分かった.

また図2 (b)においては, $800 \text{ GeV} < \mu < 1100 \text{ GeV}$ の領域で $R \geq 0.3$ となっており, この領域では電弱制動放射 $lW\nu$ の寄与を無視できないことが分かる.

3つの先行研究との比較を行い, 本研究の数値解析結果と一致することも確認した (解析的にも確認した).

本研究では, このパラメータ以外でも電弱制動放射 $lW\nu$ の影響が非常に重要となる領域を評価しているが, 本要旨では省略した.

続いて、ニュートリノスペクトルの数値解析（図3参照）の結果について述べる。

$$\begin{aligned} \tan\beta &= 2, M_2 = 450 \text{ GeV}, m_A = 2 \text{ TeV}, \mu = 1 \text{ TeV}, \\ A_q &= A_l = 0 \ (q \neq t), A_t = 2180 \text{ GeV}, \\ m_{\tilde{q}} &= 14 \text{ TeV}, m_{\tilde{e}} = m_{\tilde{\mu}} = 240 \text{ GeV}, m_{\tilde{\tau}_L} = m_{\tilde{\tau}_R} = 240 \text{ GeV} \end{aligned}$$

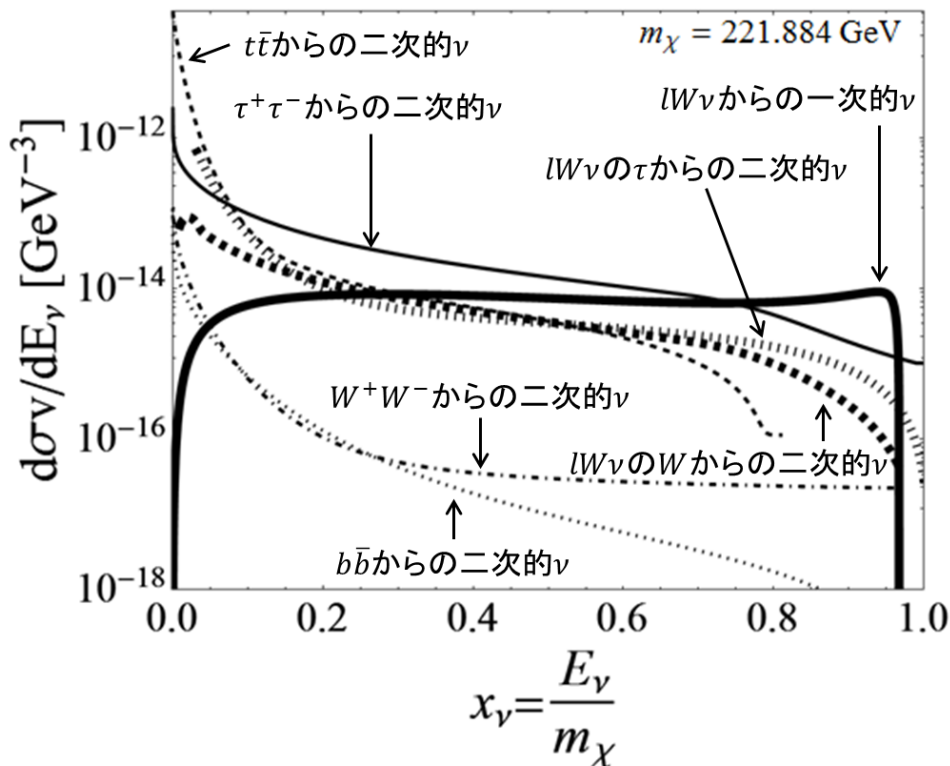


図3. 非相対論的なニュートラリーノ χ 対消滅によって生成されるニュートリノスペクトル。

ただし図において、一次的とは終状態に直接含まれるニュートリノを意味し、二次的とは不安定粒子の崩壊により生じるニュートリノを意味している。

過去のほとんど全ての研究では二体終状態のみで評価を行っているため、図3の色付き線の寄与のみでスペクトル解析を行っていることになる。これに対し、電弱制動放射 $lW\nu$ より得られる一次的ニュートリノスペクトルは、高エネルギー領域で主要かつピークを持っている。一般にニュートリノ検出実験では、高エネルギーのニュートリノの方が、反応率が大きいと期待される。そのため、電弱制動放射 $lW\nu$ の方が二体終状態よりも検出される可能性が高いことになり、間接検出実験に対して多大な影響を与えると予想される。

6. 結論と今後の課題

本研究では、非相対論的な暗黒物質 χ の対消滅における電弱制動放射過程 $\chi\chi \rightarrow lW\nu$ の散乱断面積及びニュートリノスペクトルを、MSSMの下で初めて評価した。その結果、暗黒物質の残留密度の観測値と加速器実験による制限を満たしながら、電弱制動放射 $lW\nu$ の寄与が主要となるパラメータ領域が存在することが分かった。同時に電弱制動放射 $lW\nu$ に直接含まれる一次的ニュートリノが、ニュートリノスペクトルへ多大な影響を与える可能性があることが分かった。特に、散乱断面積の比較において電弱制動放射の寄与が最大とはならず $(\sigma\nu)_{2body} \geq (\sigma\nu)_{3body}$ となるパラメータ領域であったとしても、電弱制動放射 $lW\nu$ からの一次的ニュートリノスペクトルが高エネルギー領域では主要となり得ることが分かった。この結果より、散乱断面積の比較においては電弱制動放射の寄与が大きくない領域においても、ニュートリノスペクトル解析における高エネルギー領域においては電弱制動放射の効果が確認できる可能性が示唆された。

間接検出実験で期待されるイベント数を評価するためには、太陽中もしくは銀河中心での媒質の効果を考慮したニュートリノフラックスを計算する必要がある。本論文で得られたニュートリノスペクトルは不安定粒子の崩壊が、真空中で起こると仮定して得られたものであるため、フラックス解析については今後の課題とした。またフラックスを解析し実験と比較することで、スレプトン質量 $m_{\tilde{\tau}}$ への制限に何らかの示唆が与えられることを期待したい。