21 世紀の素粒子ダークマター検証
—素粒子論と、天文学—

基礎物理学研究所 野尻美保子

素粒子論の目標の一つは物質の究極 (planck scale) の姿を理解する事です。電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用は、超対称大統一理論の枠内で、高いスケールで統一され、さらにその先に、重力の量子論が、重要な意味を持つ領域があると、期待されています。[1]重力の量子論は、本来宇宙の成り立ちに大きく関係するはずですが、理論的にも未解決な部分が多く、当面天文、宇宙の業界をわずらわすことはないでしょう。

もう一つ、素粒子論で説明可能なことに物質、エネルギーの量を定量的に理解する、ということがあります。たとえば、現在観測されるバリオン数が、どのように生成されるか、現在ホットな話題である宇宙項の問題、暗黒物質の正体などは、素粒子論的なな手法で解決できる可能性があり、特に、直接、間接の観測がこれから１０年ほどの間に計画されている Cold Dark Matter ($\Omega_{CDM} < 0.3 \mp 0.2$) の正体は、２１世紀初頭に、あるいは一番ホットな話題となるかも知れません。

1　暗黒物質と超対称模型

バリオン数の制限から、暗黒物質は標準模型の粒子ではありえないので、模型を拡張する必要があります。一番よい候補は LSP と呼ばれる一番軽い超対称粒子でしょう[2] 。超対称理論は我々がすでに知っているゲージ粒子、レプトン、クォークにたいして、フェルミ統計が逆の粒子を導入します。さらに、一番軽い超対称粒子 (LSP) が安定であるような対称性が、理論にあることが期待されています。LSP が荷電０なら、 現在の観測に矛盾なく、暗黒物質になる可能性があります。ゲージ粒子 (γ, Z^0) ヒッグス粒子 h^0 の超対称粒子ゲージーノとヒグシーノはゲージ対称性の破れによって混合し、４個のニュートラリーノ $\tilde{\chi}_i^0$ という粒子になりますが、そのうちの一番軽いもの $\tilde{\chi}_1^0$ が、LSP の候補となります。また重力の超対称粒子である グラビティーノ (ψ^μ)　は暗黒物質の候補であるとともに宇宙論的な制限の厳しい粒子でもあります。

このような粒子が超対称粒子であった場合の、Ω_{CDM} 生成の機構は 2 通りに分類されます。

- 熱的生成。これは standard シナリオといってもいいものです。宇宙の熱的平衡から $\tilde{\chi}$ が先に decouple し、その時の密度でニュートラリーノの暗黒物質としての量が決まります。熱平衡から切れる時の温度は $T_{dec} \sim m_\chi/20$ 。質量は $50\text{GeV} < m_{\tilde{\chi}} < 1000\text{GeV}$ くらいです。

- **Late Decaying Particle**。最近活発に研究されています。宇宙の温度が T_{dec} 以下になった後に崩壊する粒子 X から、非熱的に生成されるという考え方です。親の粒子は グラビティーノや ストリングの moduli と言われるもので、いろいろおもしろい模型があります。(たとえば、Moroi and Randall、Nucl.Phys. B570(2000) 455 等)

[1]超対称性が自然界で実現されているどうかは未検証。コライダーの物理は超対称性を検証出来るので、個人的には、一番お値打ちであると思っている。

[2]個人的見解。axion でも良い。

2　LSPダークマターを定量的に理解するために

２１世紀初頭に予定されている観測を踏まえて、暗黒物質としての LSP を理解する上で、ぜひしっておきたい量をいくつかあげます。

- **Dark matter** 総量に関する量として重要なのは暗黒物質の対消滅確率です。熱的生成の場合

$$\Omega_{CDM} \sim (\sigma v)^{-1}|_{T_{dec}} \tag{1}$$

  という関係があり、ここで、σv は熱平衡状態から切れるときに $\tilde{\chi}\tilde{\chi}$ の対消滅する確率となります。

- 宇宙線観測に直接関係する量 (関係観測 **GLAST**、**BESS, Sgr A***) としては、現在の宇宙での

$$\begin{array}{l} \sigma v(\chi\chi \to 2\gamma) \\ \sigma v(\chi\chi \to \bar{P}, e^+ + \text{something}) \end{array} \tag{2}$$

  などがあげられます。銀河中心では暗黒物質の密度が高く、その対消滅から出てくる粒子が、様々な形で観測されることが、期待されています。

- 直接観測に関係する量 (関係観測 **CDMSII**) としては、原子核との散乱確率 $\sigma(\chi N \to \chi N)$ が重要です。暗黒物質は、我々の周りにも、相当の密度で分布しており、これが原子核と散乱する事を利用した直接観測は、2001 年頃から急速に進展するものと期待されています。

これらの量は、超対称模型のなかに含まれる変数が決まれば、決めることが出来る量です。現在実験的な制限はほとんどありませんが、FermiLab での Tevatron RunII, CERN で 2006 年から始まる LHC (Large Hadoron Collider) で超対称粒子の生成が確認されれば、いずれ決めることが出来ます。一方、(宇宙線) 天文学 で期待できることとしては、以下のようなことが挙げられると思います。

- 超対称性の (間接的な) 証拠をみつけること。

  LHC では、「 確実に超対称粒子がみつかる 」と、思われていますが、2006 年までかかります。。一方、LSP は ひょっとすると来年以降(CDMSII,GLAST 等で) 見つかる可能性があります。[3]

さらに、上に挙げた基本的な量が決まれば[4]

- Dark matter の 総量、分布を理解し、宇宙の歴史、構造形成、ハロー分布、銀河中心磁場、などについて、なにか言えるかもしれません。

3　Dark matter 総量 とコライダー物理

Ω_{CDM} は様々な観測から　２０％程度の誤差で決めることができた、といわれています。一方、熱的に生成される、暗黒物質の量 Ω_{TH} は、コライダー実験で決めることが可能な量です。両者が十分な精度で決まったとき、なにがいえるでしょうか。

[3]でも見つからないかも
[4]捕らぬ狸の皮算用

- $\Omega_{TH} \sim \Omega_{CDM}$ の場合、T_{dec} まで Big Bang picuture が正しいということが、いえるでしょう。今は元素合成がビックバンの仮定とあっていることから、 1MeV まで OK と思われていますから、３桁以上宇宙の歴史がさかのぼれることになったというわけです。とくに　Large extra dimension といった極端なシナリオの成立する余地はまったくなくなります。

- $\Omega_{TH} \gg \Omega_{CDM}$: T_{dec} から 今までの間に entropy production があり、LSP が薄められた、ということが示唆されます。

- $\Omega_{TH} \ll \Omega_{CDM}$ ：非熱的な方法で、DM が出来た、あるいは、なにか他の dark matter が いることが示唆されます。

これらはどれをとっても、重要な事を言っています。多少消極的なやり方だけど、Ω_{TH} Ω_{CDM} を決めると、宇宙の歴史に対して、大きな絵がかけるかも知れないのです。

　では、熱的に生成される暗黒物質の量を決めるには、どのような量を知っていればいいでしょうか。超対称重力模型では、LSP はゲージーノとヒグシーノの混合状態ですが、ゲージーノ的な LSP の場合、t-channel でのスカラーレプトン (レプトンの超対称粒子) の交換によって、対消滅確率が決まります。一方ヒグシーノの場合には s-channel での　ゲージ粒子の交換が主な過程となります。前者の場合、暗黒物質の量は、LSP とスカラーレプトンの質量比によっており、非常に大きな値から、非常に小さな値となることが可能ですが、ヒグシーノの場合は、小さすぎることが多いようです。したがって、LSP の量を決める上で大事なのは、
１) LSP、スカラーレプトンの質量
２) LSP がどのくらいの、ヒグシーノ、ゲージ-ノ成分を持っているか、を決めることとなります。

　コライダー物理の詳細に立ち入ることはこの講演の趣旨ではありませんが、どの程度のことが可能となるか、概観することにします。**LHC** (2006 $\sim$) では、陽子陽子衝突から、多くの 超対称粒子が作られ、それが多段崩壊をすることによって、 LSP やスカラーレプトンが作られます。たとえば、

$$\begin{array}{rcl} qq & \to & \tilde{q}\tilde{q} \\ & & \tilde{q} \to \tilde{\chi}_2^0 q \\ \tilde{\chi}_2^0 & \to & l\tilde{e} \\ & & \tilde{e} \to \tilde{\chi}_1^0 e \end{array}$$

といった多段崩壊は、重要であることが知られています。クォークの作るジェットやレプトンの 不変質量分布をみて、超対称粒子の質量を決めることができ、さらに様々な過程の相対的な大きさで、相互作用に迫ることが可能です。LHC は、LSP とスカラーレプトンの質量を決めることは、とても得意です。(Hinchiliffe et al PRD '99)　また LSP のヒグシーノ成分が重要になるような場合には、それに対応して、重たい neutralino 等が生成され、これを解析することで、 ヒグシーノ成分の大きさに迫ることが可能となります。 (Drees et al hep-ph/0007202)

　いずれにせよ、$\delta\Omega_{CDM} \sim 20\%$[5] ですから、コライダー実験は $\delta\Omega_{TH} \ll 20\%$[6] を目指すべきですし、観測される Ω の誤差が小さければ小さいほど、コライダー実験での詳細な解析も重要になるでしょう。

[5] 天文の統計誤差は、気合いで決まる。
[6] コライダーの統計誤差は本物。

4　宇宙線とダークマター対消滅

どうやって Dark matter が作られたかはさて置いて、いま銀河のなかに現実に暗黒物質は存在しています。これが現在、何をしているかを考えていきましょう。銀河の中心部で起こっている基本的な過程は、暗黒物質の対消滅です。ここで多少注意しなければならないのは、問題になるのは温度 0 でも生きている s 波の過程だけ、ということです。主なものには次のようなものがあります。

$$\begin{aligned} \tilde{\chi}\tilde{\chi} &\rightarrow \gamma\gamma \\ &\rightarrow \tau\bar{\tau}, b\bar{b}, W^+W^-, Z^0h, Z^0Z^0, gg \\ &\rightarrow e^+, \bar{P}..... \end{aligned} \tag{3}$$

最初の過程は、one loop で初めて出てくる過程ですが、tree level の過程が一般に抑制されているために、重要です。ガンマ線のエネルギーが LSP の質量と同じであるという特徴があります。二列目の過程は、 tree level で見られる過程ですが、これらの粒子はさらに崩壊して、多くの荷電粒子や反粒子を作ります。これが、シンクロトロン放射を起こしたり、銀河の中を伝搬して宇宙線として観測されます。

これらの過程が、どのくらいの頻度で起きているかは、銀河の密度分布模型に大きく依っており、この節で議論したいのは主にこの問題です。暗黒物質の反応率は以下の式であらわされます。

$$\text{Rate} \sim \left(\frac{\rho}{m_\chi}\right)^2 \sigma v \tag{4}$$

ここで、ρ は暗黒物質の密度。 σv は対消滅の散乱断面積です。密度 ρ は 銀河中心に行くほど高いので、ガンマ線は銀河中心から来るはずです。また反陽子の場合、銀河中心から伝搬してきたものが、観測されることになります。銀河内密度分布モデルはとてもたくさんありますが、一般的に以下のように、あらわされます。

$$\rho(r) \propto \frac{1}{(r/a)^\gamma \left[1+(r/a)^\alpha\right]^{(\beta-\gamma)/\alpha}} \tag{5}$$

ここで、r: 動径方向の距離です。profile の例として、
modified isothermal $(\alpha, \beta, \gamma) = (2, 3, 0)$

$$\rho_{\rm is}(r) = \frac{\rho'_{\rm is}}{\left[1+(r/a)^2\right]^{1.5}} \tag{6}$$

Navarro Frenk White (1996) (1,3,1)

$$\rho_{\rm nfw}(r) = \frac{\rho'_{\rm nfw}}{(r/a)\left[1+r/a\right]^2} \tag{7}$$

Moore (1999) (1.5, 3, 1.5)

$$\rho_{\rm moore} = \frac{\rho'_{\rm moore}}{(r/a)^{1.5}\left[1+(r/a)^{1.5}\right]} \tag{8}$$

などが知られています。係数 γ が大きいほど、シグナルが多くなることが期待されることは、容易にわかると思います。

N 体の粒子を質点として取り扱って、重力相互作用の数値計算を行う研究が活発に行われていますが、数値シミュレーション精度が向上するにつれて、中心

付近の密度分布の巾 γ が高くなる傾向があり、最近は $\gamma = 1.5$ に集約しつつあります。 Moore のモデルは、それに対応しています。現在のシミュレーションは $N = O(10^7)$ に達しており、単なる精度の向上で、この結果が変わるとは思われません。

4.1 ガンマ線探索

singular な 分布 (NFW, Moore) をとった場合には何が起こるでしょうか。ガンマ線探索を例に取ってみます。LSP 対消滅からくるガンマ線は連続的なバックグラウンド上に line spectrum となって現れます。バックグラウンドは、

$$\phi \sim 6 \cdot 10^{-5} \left(\frac{E_\gamma}{1\mathrm{GeV}} \right)^{-2.7} \mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}\mathrm{sr}^{-1}\mathrm{GeV}^{-1} \tag{9}$$

程度と期待されていますが、signal の量は、視線方向の物質密度の二乗を積分したもの、

$$\propto \int_{\text{line of sight}} \rho^2(l) dl(\Psi) \tag{10}$$

で、あらわされます。単純な計算を行えば、巾 $\gamma = 1.5$ だと、発散していますから、中心部の暗黒物質は現在では全部対消滅しており、その周りから spot 状にガンマ線を出していることになります。(Moore、 astro-ph/0010056) さらに数値計算の結果は、$\gamma = 1.5$ であるだけでなく, 至るところに cusp 状の構造を持っており、銀河のハロー部分にもこのような spot が分布している可能性があります。これが見えれば、決定的で、数値モデルが正しくかつ暗黒物質はニュートラリーノ LSP ということになるでしょう。

今後の観測で、もっとも有望なのは、2005 年実験開始予定の衛星、GLAST (Gamma-ray large Area space Telescope) です。energy range は、0.02-300 GeV と EGRET $E < 30$ GeV を大幅に超えており、エネルギー分解能 10%程度です。(astro-ph/9901187) この観測は、(NFW 模型を仮定した場合) 超対称模型全体をカバーする感度を持っているわけではありませんが、意味のある領域に感度を持っています。

4.2 シンクロトロン放射からの制限。

銀河中心で、暗黒物質の対消滅から生成された、荷電粒子は、磁場の中を伝播していく中で、シンクロトロン放射を行います。最近 G.Berton et al (astro-ph/0011553) の中で、面白い解析がされているので紹介します。

まず、Sgr A* を 2.6×10^6 solar mass の balck hole であるとします。この black hole のまわりで、 物質の密度　ρ の形はさらに変形され、rate が高くなります。さらに強い磁場が存在していると仮定します。 equipatition だと思うと、$G(r) = 1\mu G\,(r/\mathrm{pc})^{-5/4}$ となりますが、変形された密度分布では、殆んどすべての対消滅が、 $10R_s \sim 10^{-6}$pc の中でおこり、典型的な磁場の大きさは 1 G となります。

この大きな磁場中で、シンクロトロン放射を計算します。観測されている、Sgr A* からの、電波と比較すると、γ が大きいモデルでは、多くの超対称模型の変数領域が観測と矛盾します。定性的には、シンクロトロン放射の cut off 振動数は、

$$10^{1.2}(B_{\mathrm{Tr}}/1\mu\mathrm{G})(E/1\mathrm{GeV})^2\mathrm{MHz} \tag{11}$$

で、これより低い周波数にシンクロトロン放射がでます。磁場が高いとより高周波な成分が出ますが、逆にいうと、低周波成分が弱く、実験的な制限は、磁場

が高いほうが弱くなります。磁場が弱いと仮定するとより強い制限になります。(Gondolo, Phys.Lett. B 494(2000) 181)

これは、**LSP** 暗黒物質はすでに観測と矛盾する、ということを意味しているのでしょうか。それとも **black hole** 周りの暗黒物質分布や、銀河密度分布の計算に何らかの問題があるのでしょうか。

4.3 washing out?

もう一度始めに立ち返って、銀河中心の分布を特異的でないものにする方法を、探ってみましょう。小さい構造を消す方法は、すでにいくつか知られています。

Warm dark matter を用意する、というのは簡単な方法です。暗黒物質の Free Streaming scale R_f が現在の長さで、 0.1 Mpc もあれば、先ほどのような問題はまったくなくなります。ニュートラリーノ LSP の場合とは異なりますが、gravitino dark matter $m_{3/2} \sim 1$ keV は自然な候補の一つです。R_f は　　グラビティーノの質量の関数で

$$R_f = 0.2(\Omega_W h^2)^{1/3} \left(\frac{m_{3/2}}{\mathrm{KeV}}\right)^{-4/3} \mathrm{Mpc} \tag{12}$$

とあらわされます。

ニュートラリーノ LSP を warm にするには、もう少し工夫をしなければいけません。始めに述べたように、非熱的に LSP を生成すれば、 LSP が生成される時刻での温度に比べて、非常に相対論的にすることが可能です。Topological defect(Lin et al asto-ph/0009003) の崩壊や、moduli や 重たいグラビティーノの崩壊からくる LSP (Hisano, Kohri and M.N. hep-ph/0011216)) はこのような条件を満たします。バックグラウンドとの相互作用が無視できるとすると、

$$\frac{E_I}{T_I} = 2.1 \times 10^{7\sim 8} \left(\frac{m_\chi}{50\mathrm{GeV}}\right) \tag{13}$$

という条件が満たされれば、warm dark matter として、0.1 Mpc 程度の構造を消すことが可能です。ここで、T_I は LSP 生成 の時点の温度で、元素合成の制限から 1 MeV 以上である必要があり、E_I は LSP 生成時の LSP エネルギーです。10 TeV 程度の初期エネルギーが必要ということがわかります。

しかしながら、LSP が生成されても、バックグラウンドを熱化して十分に warm にならない可能性があります。一般に、ニュートラリーノ LSP の場合には、 $T_I < 5$MeV とし、さらに、スカラーレプトンの質量が非常に重く、ゲージ粒子との結合が、非常に小さいといった、特別な状況が必要です。

もっと根本的な治療法としてとしてスケールの小さな密度揺らぎを tune する。(Kamionkowski and Liddle PRL80(2000)4525, J. Yokoyama astro-ph/0009127) という可能性がありますが、小さなスケールの密度揺らぎを消すと、初期の星の形成がおくれ、たとえば Lyman- α forest の制限が厳しくなる可能性も指摘されており (Narayanan et al astro-ph/0005095) もう少し慎重な検討が必要かもしれません。

5　直接探索の技術と、ハローの測定

銀河中心に限らず、暗黒物質は我々のまわりにたくさんいます。われわれの周辺でのハローの密度は　$\rho_{halo} = 0.3\mathrm{GeV/cm}^3$ です。 これらは、原子核とヒグス粒子の交換を行って散乱します。ヒグス交換がきくのは LSP がマヨラナ粒子で、 Z

交換がきかないためです。LSP がヒグシーノ成分とゲージーノ成分を両方持っていると、大きい相互作用が期待されます。

この散乱は我々の周りで常に起こっていますが、これを見つけるのはなかなか大変です。この種の探索を始めた当初は、巨大な Ge 半導体検出器を使っていました。バックグラウンドは環境中の放射線、宇宙線からくる、γ, n, e で、これを暗黒物質の散乱と区別する能力はありません。とてもではないですが、意味のある領域まで、感度はありませんでした。

しかし 最近、新しい技術やアイディアを使った、新しい観測が次々と出て、また 2001 年には、飛躍的に感度の上がる実験がスタートします。ここ数年物議をかもしてきたのは、イタリア　グランサッソーの **DAMA** といわれる実験です。これは、地下深くににおかれた 100Kg サイズの巨大な NaI クリスタルです。バックグラウンドを除く能力は、相変わらず、たいしたことはありませんが、year modulation といわれる地球の公転による flux 変化を探すことで、バックグラウンドより相当小さいシグナルが探せるという考えで、暗黒物質の証拠を見つけたと主張しています。

一方 1999 年からスタートした **CDMS** はフォノンと電離エネルギーを両方はかることの出来る検出器です。この基本技術は 1993 年頃からあり、私などもこれにだまされて論文を書いた（;;）口ですが、去年、 DAMA のシグナル領域を殆んど 排除するする結果を発表しました。2001 年からは地下 2090mwe で実験を始めます。(CDMS II)。

CDMS　は実は　CDMSII のテスト実験です。地下 16mwe のごく浅いところで、検出器の性質を調べながら実験を行っています。このような浅いところでは、バックグラウンドは 2event(KeV $\cdot$ Kg $\cdot$ d) はあります。検出器も total で 700g と非常に小さいものです。しかしこの検出器は、極低温で、フォノンと電離エネルギーを同時にはかるという、特性を生かして、電子や、ガンマのバックグラウンドを、効率よく除く事が出来ます。これらのバックグラウンドは、強く電離を行いますが、シグナルとなる、暗黒物質の散乱は、電荷ががないので、電離作用は強くありません。残るバックグラウンドは、 主に中性子ノイズですが、中性子が多重散乱を起こすという特性を利用して、引くことが出来ます。[7]

CDMSII は今年、Soudan という地下鉱山で、7 Kg の検出器で始まります。地下深いところで実験することで、宇宙線が原子核を叩くことによって出る中性子バックグラウンドの数は少なくなります。この実験は $3 \times 10^{-4}/(\mathrm{Kg} \cdot \mathrm{KeV} \cdot \mathrm{day})$ までの観測を目指しています。

暗黒物質は見つかるでしょうか、また **signal** がみつかった場合、**counting ratio** にどういう意味があるでしょうか。これは微妙な問題です。超対称粒子の質量を作り出す機構をいろいろ検討することによって、この質問の答えを探ってみることは可能です。極小超重力模型では、シグナルが見つかる可能性は極めて低いといわざ るをえません。この模型では、LSP はほぼ純粋なゲージーノになってしまい、 暗黒物質と原子核との散乱断面積が小さくなります。とくに新しい解析結果が出ると期待されている、ミュー中間子の異常磁気能率の測定は、暗黒物質の探索よりも、超対称模型に対して感度がいいといわれています。一方、ある種のストリング模型や、超対称粒子の質量に、大統一理論の対称性の破れが関わる模型では、暗黒物質の散乱断面積ははるかに高くなる可能性があります。(M.Drees et al,hep-ph/0011359)

いったん counting rate が決まっても、暗黒物質の散乱断面積と、 counting rate の間に、不定性が残っています。counting rate は、散乱断面積と、暗黒物質の速度分布の、双方によっていますが、後者は未知の量です。この速度分布は、暗黒物質の散乱が原子核に与えるエネルギーの分布から求めることが可能で、最

[7] MC 不定性が心配ですが。

近盛んに理論的な研究がされています。また、ダークマターの非ビリヤル成分が、観測に重要な影響を与えることが、Sikivi らによって指摘され、最近何本かの論文が発表されています。(Gelmini et al, hep-ph 0012315)

6 結論

暗黒物質に関わる素粒子の現象論は、ここ 10 年の間に相当に精密化されました。これは、今まで実験的に不可能だった観測が可能になったこと、また暗黒物質の存在が、今まで以上に確実になってきたことに、関係しています。、素粒子論と天文学の間のキャッチボールでとてもおもしろいことが出来る時代が、すぐそこに来ているかもしれません。

7 謝辞

普段から勉強不足の私ですが、今回たくさんの人にお世話になり、なんとか当日に持ち込むことが出来ました。このような機会を与えていただいたことに、感謝しています。自分の仕事も紹介させていただきましたが、共著者である M Drees 先生 (Munich, Tech U.)　高エネ研の久野先生, 基研の郡さん、Kim さん、東京大学素粒子物理国際センターの戸谷さん、小林先生、 京大理 (物二) の小林先生に感謝します。 また突拍子のない質問に丁寧に答えてくださった、東大素粒子センターの浅井先生　理学部の白水先生、須藤先生、国立天文台の杉山先生、トラペの御検閲をいただいた基研の田中先生、阪大の横山先生、感謝します。特に久野先生、浅井先生には、いろいろ励ましていただきました。ありがとうございました。

この talk に間違いがある場合、ひとえに私のいたらなさから来るものと思います。ご指導頂けると幸いです。nojiri@yukawa.kyoto-u.ac.jp