

ニュートリノ質量と暗黒物質

末松大二郎(金沢大学数物科学系)

References

- D.S, T.Toma, Nucl. Phys. B847 (2011) 567.
- H.Fukuoka, D.S., T.Toma, arXiv:1012.4007, To appear in JCAP.
- J.Kubo, E.Ma, D.S, Phys. Lett. B642 (2006) 18.
- J.Kubo, D.S., Phys. Lett. B643 (2006) 336.
- D.S., Eur. Phys. J. C56 (2008) 379.
- D.A.Sierra, J.Kubo, D.Restrepo, D.S.,O.Zepata, Phys. Rev. D79 (2009) 013011.
- D.S, T.Toma, T.Yoshida, Phys. Rev. D79 (2009) 093004.
- H.Fukuoka, J.Kubo, D.S., Phys. Lett. B678 (2009) 401 .
- D.S., T.Toma, Y.Yoshida, Phys. Rev. D82 (2010) 013012.
- H.Higashi, T.Ishima, D.S., Int. J. Mod. Phys. A26 (2011) 995

Contents of this talk

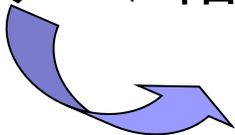
- *Introduction*
- *General arguments* (neutrino mass, DM)
- *Radiative seesaw model*
 - Original Ma model
 - Special neutrino flavor structure
- *Supersymmetric version*
- *Summary*

Introduction and strategy

Standard model (SM) 多様な実験結果を再現

○ 理論的観点

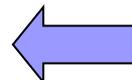
ゲージ階層性問題、パラメータ数 (Yukawa結合定数等)、...



超対称性、余剰次元、GUT、...

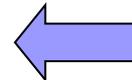
○ SMでは説明のできない実験事実の出現

●ニュートリノ質量の存在



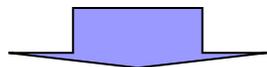
ニュートリノ振動実験

●暗黒物質の存在



宇宙背景放射の精密測定
宇宙の大規模構造の観測

これらの実験事実の説明に基礎をおいた純粹に現象論的
観点に基づくSMの拡張の考察



背後にある物理的構造を抽出し、モデル化を目指す

General arguments (ニュートリノ質量、暗黒物質)

ニュートリノ質量

- ニュートリノ質量とレプトン混合 ← 各種振動実験による検証

$$\nu_\alpha = U_{\alpha j} \nu_j, \quad \begin{cases} \nu_\alpha = \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau \text{ (Charged lepton massは対角化されたbasis)} \\ \nu_j : \text{mass eigenstates with mass } m_j \end{cases}$$

$$U = \begin{pmatrix} \frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \text{ Tribi-maximal mixing}$$

$$m_3 \text{-----} \text{-----} m_2$$
$$\text{-----} \text{-----} m_1$$

$$\Delta m_{21}^2 = \Delta m_{\text{sol}}^2 = 7.9 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$|\Delta m_{32}^2| = \Delta m_{\text{atm}}^2 = 2.3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$m_2 \text{-----}$$
$$m_1 \text{-----} \text{-----} m_3$$

Normal hierarchy Inverse hierarchy

- Dirac質量かMajorana質量か不明
- 質量の絶対値は未定、相互関係についても2つの可能性
- U_{e3} は上限値のみ知られている
- CP位相についての情報はほとんどない

この構造を再現する第0近似としての質量行列の構成は重要な課題

Majorana質量行列の例

$$\mathcal{M}_\nu = \Lambda_0 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \Lambda_1 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} + \Lambda_2 \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

•U : tribi-maximal

•固有値 : $m_1 = \Lambda_0$, $m_2 = \Lambda_0 + 3\Lambda_2$, $m_3 = \Lambda_0 + 2\Lambda_1$

Λ_1 の符号によって、Normal, inverseの両方が実現可能

Ex. $\Lambda_0 = 0$ の場合 Normal hierarchy を仮定

$$\Lambda_1 = \frac{\sqrt{\Delta m_{\text{atm}}^2}}{2}, \quad \Lambda_2 = \frac{\sqrt{\Delta m_{\text{sol}}^2}}{3}$$

2つの質量スケールを生成する機構は異なるflavor構造を持つdynamicsにより、担われている可能性

このような質量行列を可能とする質量生成機構とflavor構造は？

ニュートリノ質量生成機構

- SMでのニュートリノ質量の説明

Nの導入 (gauge singlet)

$$\mathcal{L} \supset y_\nu \bar{N} L H \quad \langle H \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix} \Rightarrow m_\nu = y_\nu v$$

極めて小さい
Yukawa結合

- Effective operator の導入

$$\mathcal{L} \supset y \frac{H H L L}{M_*} \Rightarrow m_\nu = \frac{y v^2}{M_*}$$

$v \ll M_*$
 $y = O(1)$

M_* の起源

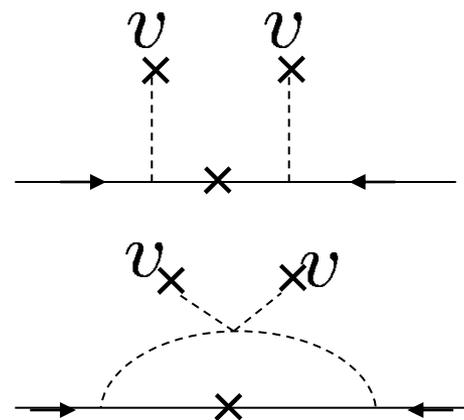
(1) $M_* = M_{\text{pl}}$

(2) Seesaw 機構 $M_* = O(10^{10}) \text{ GeV}$

$M_* N N$ の導入

(3) radiative mass (Zee model 等)

新たなscalar場等の導入、Loop factor の存在
 $1/(4\pi)^n$



暗黒物質

- 暗黒物質存在 ← 銀河の回転曲線、重力レンズ効果、...

電氣的に中性で質量を持つ非相対論的安定な粒子の存在

- ◡ SMに候補となる粒子は見当たらない (axionを除いて)
- ◡ 本当なら、SMの拡張を意味する

宇宙背景放射の精密観測(WMAP) → 暗黒物質の存在の定量的示唆
 宇宙の大規模構造の観測(SDSS等)

$$\Omega_{DM} h^2 \simeq 0.11 \quad \left\{ \begin{array}{l} \Omega_i = \rho_i / \rho_{cr} \\ h = H / (100 \text{ km/sec/Mps}) \end{array} \right.$$

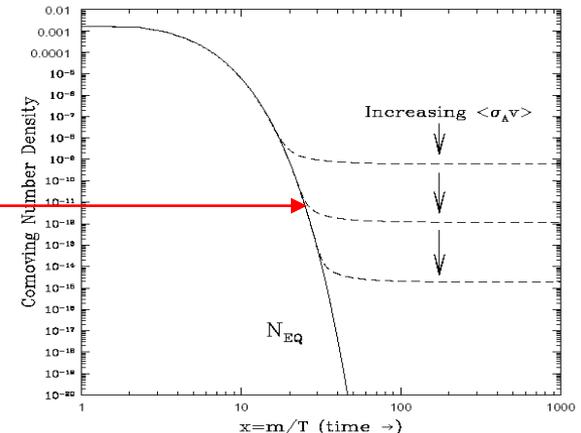
- 暗黒物質の存在量の定性的理解 → 何らかの対称性で保証

初期宇宙に熱平衡状態にあった安定粒子の decoupling 時のエネルギー密度として評価

$$\Gamma \simeq H(T)$$

$$\frac{dn}{dt} + 3Hn = -\langle \sigma v \rangle (n^2 - n_{eq}^2)$$

宇宙膨張効果 生成・消滅効果



どのような粒子が暗黒物質の候補となりうるのか？

$$H(T_F) \simeq \Gamma$$

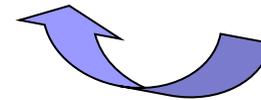
$$\Rightarrow n(T_F) = g \left(\frac{m_{\text{DM}} T_F}{2\pi} \right)^{3/2} e^{-m_{\text{DM}}/T_F}$$

$$\Rightarrow \Omega_{\text{DM}} h^2 = \frac{n(T_F) m_{\text{DM}}}{\rho_{\text{cr}}/h^2}$$

宇宙の大規模構造



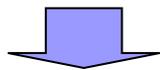
非相対論的粒子
CDM



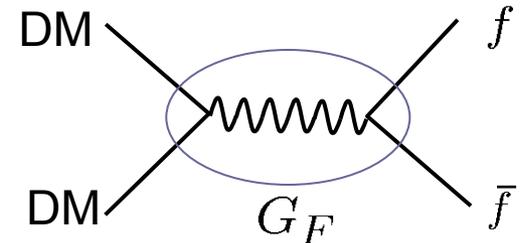
● 暗黒物質の候補

⇒ WIMP (weakly interacting massive particle)

$$m_{\text{DM}} \simeq m_W \quad \Gamma \simeq G_F^2 T^5$$



$$\Omega_{\text{DM}} = O(1)$$



例えば

Supersymmetric model での候補 : the lightest superparticle (LSP)

安定性を保証する対称性 ⇒ R-parity

{	SM contents +1
	superparticle -1

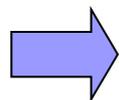
類似の対称性が存在すれば安定性の保証が可能

模型構成の指針と観点

- Tribi-maximal mixingを容易に再現する可能性を持つニュートリノ質量生成機構であること
- ニュートリノ質量の小ささをコントロールする対称性が暗黒物質の安定性を保証する可能性を持つこと
- 既存の実験からの制限との整合性。特にlepton flavor violating process
- Leptogenesisによる宇宙のバリオン数の説明のための拡張を可能とすること
- 超対称模型における暗黒物質候補との整合性

暗黒物質とニュートリノ質量の関連付け

$$M_* = O(1) \text{ TeV}$$



輻射効果によるニュートリノ質量生成

Radiative seesaw model

Ma
Kubo, Ma, Suematsu

● Field contents

- { SM fields
- { η (SU(2) doublet)
- { N_i (right handed neutrinos)

Z_2

+1

-1

-1

$$\langle H \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$$

$$\langle \eta \rangle = 0$$

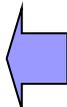
暗黒物質候補

● Z_2 invariant model

$$\mathcal{L}_N = h_{\alpha i} \bar{L}_\alpha \eta N_i + \frac{1}{2} M_i \bar{N}_i^c N_i + \text{h.c.}$$

$$V = m_1^2 H^\dagger H + m_2^2 \eta^\dagger \eta + \frac{\lambda_1}{2} (H^\dagger H)^2 + \frac{\lambda_2}{2} (\eta^\dagger \eta)^2$$

$$+ \lambda_3 (H^\dagger H) (\eta^\dagger \eta) + \lambda_4 (H^\dagger \eta) (\eta^\dagger H) + \frac{\lambda_5}{2} [(H^\dagger \eta)^2 + \text{h.c.}]$$

☆ $\lambda_5 \ll O(1)$ を仮定  何らかの対称性との関連付け

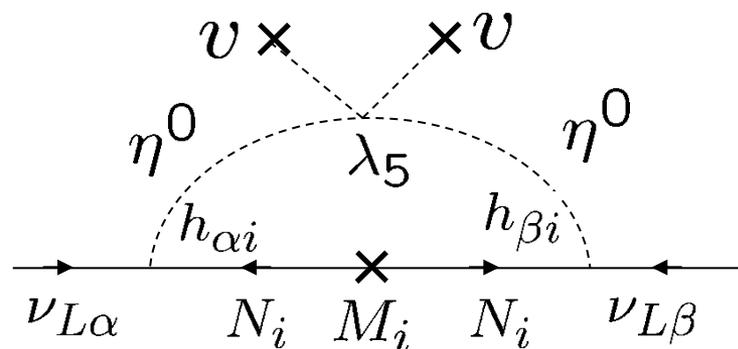
☆ $m_0^2 = m_2^2 + (\lambda_3 + \lambda_4)v^2$

$$m_0^2 = \frac{m_R^2 + m_I^2}{2} \quad \eta^0 = \frac{\eta_R + i\eta_I}{\sqrt{2}}, \quad m_R^2 - m_I^2 = 2\lambda_5 v^2$$

○ ニュートリノ質量

$$(\mathcal{M}_\nu)_{\alpha\beta} = \sum_i h_{\alpha i} h_{\beta i} \frac{I(M_i^2/m_0^2)}{M_i}$$

$$I(x) = \frac{\lambda_5 v^2}{8\pi^2} \left(\frac{x}{1-x} \right) \left[1 + \frac{x \ln x}{1-x} \right]$$



mass scale

$$\frac{\lambda_5 v^2}{8\pi^2 M_i} = O(1) \text{eV} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} \lambda_5 = O(10^{-9}) \text{ の場合} \\ M_i = O(1) \text{TeV} \end{cases}$$

TeV領域にnew physics

● MNS行列 大気ニュートリノ $\Rightarrow \tan \theta_{12} \simeq 1/\sqrt{2}$

$$U \simeq \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & s_{13} e^{-i\delta} \\ -\frac{s_{12}}{\sqrt{2}} + \frac{c_{13} s_{13} e^{i\delta}}{\sqrt{2}} & \frac{c_{12}}{\sqrt{2}} + \frac{s_{12} s_{13} e^{i\delta}}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \\ \frac{-s_{12}}{\sqrt{2}} - \frac{c_{13} s_{13} e^{i\delta}}{\sqrt{2}} & \frac{c_{12}}{\sqrt{2}} - \frac{s_{12} s_{13} e^{i\delta}}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Majorana phases

Yukawa couplingsに特別なflavor 構造を仮定すれば、tribi-maximal mixingが実現

○ 暗黒物質

lightest N ($\equiv N_k$) と仮定

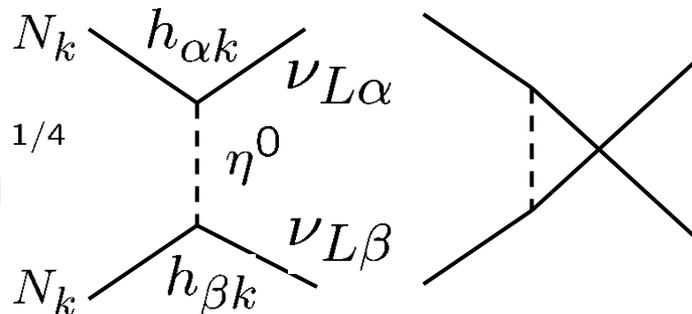
$$M_k < m_0$$

対消滅断面積 N_k の相対速度に関して展開

η^0, η^\pm の質量

$$\langle \sigma v \rangle = a + bv^2 + \dots$$

$$\begin{cases} a = 0 \\ b = \frac{y_k^4 M_k^2 (1 - 2r + 2r^2)}{24\pi(m_0^2 + M_k^2)^2} \end{cases} \quad y_k = \left(\sum_{\alpha, \beta} |h_{\alpha k} h_{\beta k}^*|^2 \right)^{1/4}$$



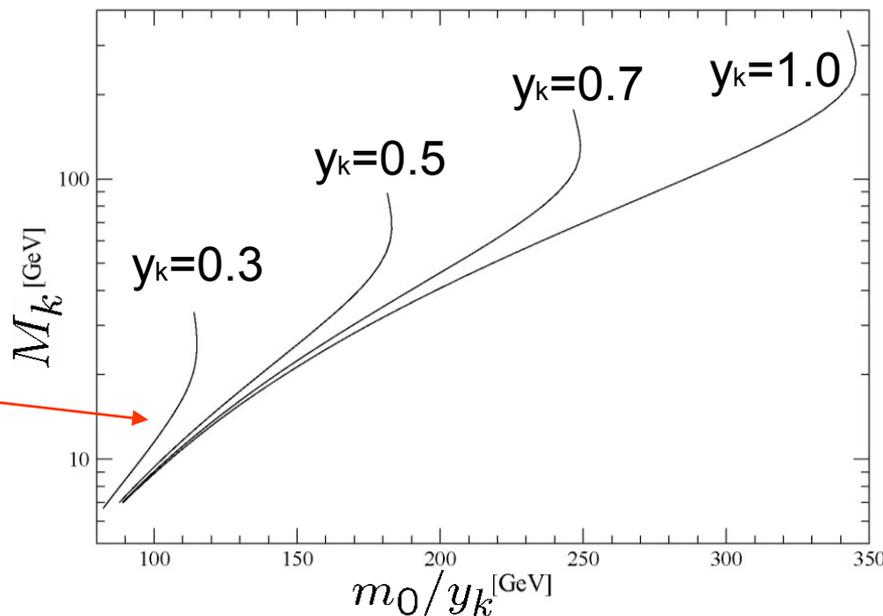
$$\Omega_{N_k} h^2|_0 \simeq \frac{8.76 \times 10^{-11} g_*^{-1/2} x_F}{(a + 3b/x_F) \text{GeV}^2}$$

$$x_F = \ln \frac{0.0955 m_{\text{pl}} M_{N_k} (a + 6b/x_F)}{(g_* x_F)^{1/2}}$$

$$\Omega_{N_k} h^2 \simeq 0.11$$

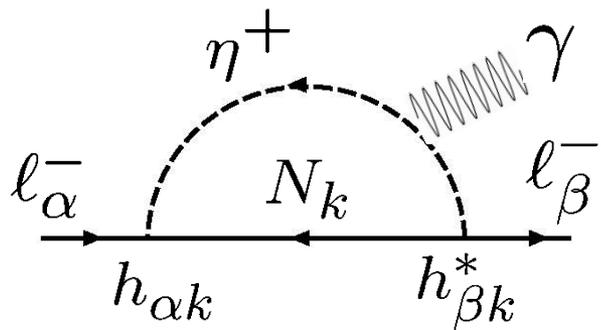
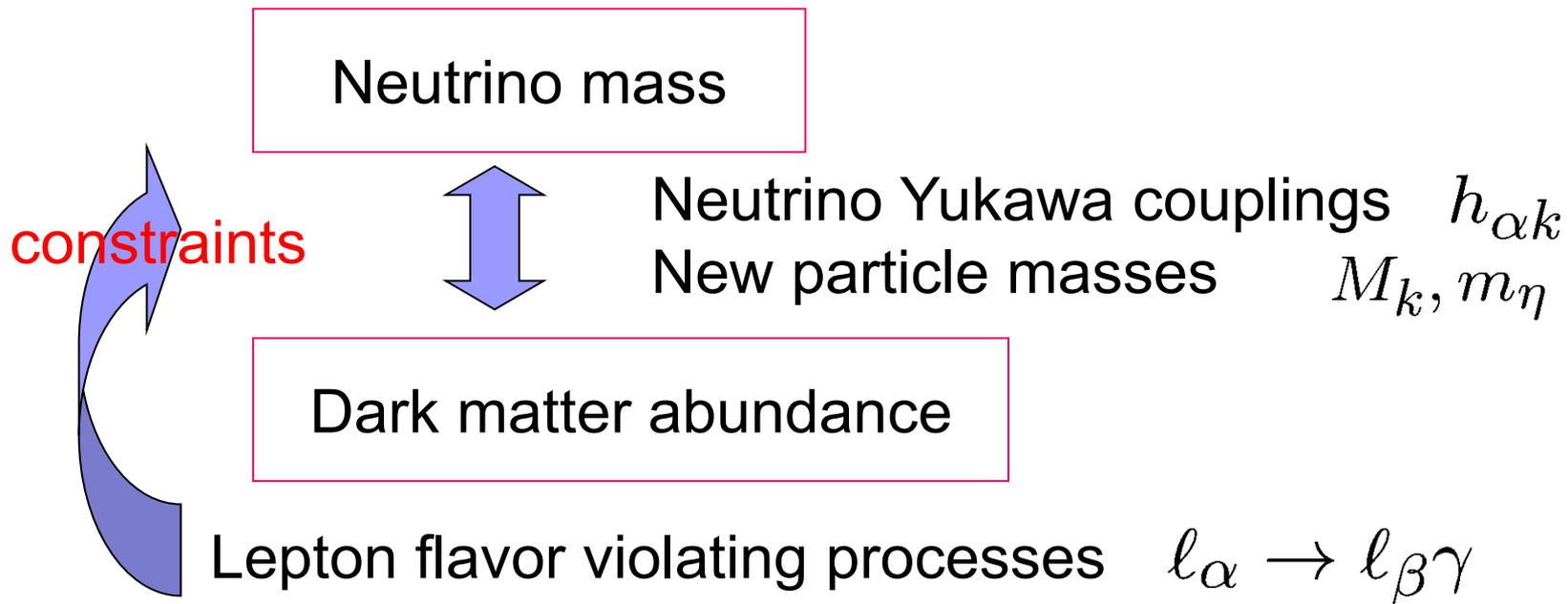
$$m_0 / y_k < 350 \text{ GeV}$$

$$\text{for } y_k \lesssim 1$$



lepton flavor violating process からの制限?

○ Lepton flavor violationからの制限



$$Br(l_\alpha \rightarrow l_\beta \gamma) = \frac{3\alpha}{64\pi(G_F m_\eta^2)^2} C_{\alpha\beta}^2$$

$$C_{\alpha\beta} = \left| \sum_k h_{\alpha k} h_{\beta k}^* F_2(M_k^2/m_\eta^2) \right|^{1/2}$$

ニュートリノ質量の場合と異なり、
 λ_5 による抑制効果なし

$$\mu \rightarrow e\gamma$$

● η^\pm 交換による効果

$$B(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{3\alpha}{64\pi(G_F m_0^2)^2} C^4 \simeq \left(\frac{30 \text{ GeV}}{m_0/C} \right)^4$$

$$C^2 = \left| \sum_i h_{\mu i} h_{ei}^* F_2(M_i^2/m_0^2) \right|$$

$$F_2(x) = \frac{1 - 6x + 3x^2 + 2x^3 - 6x^2 \ln x}{6(1-x)^4}$$

DM abundanceからの条件

$$m_0 \sim 350 \text{ GeV}$$

$$|\sum_k h_{\mu k} h_{ek}^*| \sim 1$$

$$B(\mu \rightarrow e\gamma) \gtrsim 5 \times 10^{-7}$$

Heavy DM の場合にも、状況は厳しい

Serious contradiction

$$B(\mu \rightarrow e\gamma) < 1.2 \times 10^{-11}$$

現在の実験の上限

modelに共通のこの難点に対する解決策は？

Various extensions

模型に共通するこの問題に対するいくつかの解

DM abundance を適切な値にする Neutrino Yukawa coupling に対して $\mu \rightarrow e\gamma$ をいかに抑制できるか

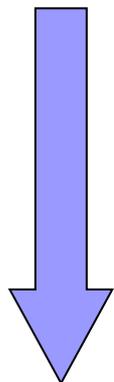
- To assume degeneracy among right-handed neutrinos
 - ➡ cancellation in $C_{\mu e}$ Kubo, Ma, D.S.
- To introduce Z' interaction Kubo, D.S.
 - ➡ enhancement of DM annihilation
- To assume a light right-handed neutrino N_1 A.D.Sierra, et al.
 - ➡ warm dark matter, smaller Yukawa couplings $h_{\alpha 1}$
- To assume special flavor structure of $h_{\alpha k}$
 - ➡ suppression of $\mu \rightarrow e\gamma$ D.S., Toma, Yoshida

Special neutrino flavor structure

Radiative seesaw mass

$$(\mathcal{M}_\nu)_{\alpha\beta} = \sum_k h_{\alpha k} h_{\beta k} \bar{\Lambda}_k$$

$$\bar{\Lambda}_k = \frac{\lambda_5 v^2}{8\pi^2 M_k} \left(\frac{M_k^2/m_0^2}{1 - M_k^2/m_0^2} \right) \left[1 + \frac{(M_k^2/m_0^2) \ln(M_k^2/m_0^2)}{1 - M_k^2/m_0^2} \right]$$



$$h_{ei} = 0, \quad h_{\mu i} = h_{\tau i} \quad (i = 1, 2);$$
$$h_{e3} = h_{\mu 3} = -h_{\tau 3}$$

$$\mathcal{M}_\nu = \Lambda_1 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} + \Lambda_2 \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

Tri-bimaximal混合は
自動的に実現

$$\Lambda_1 = h_{\tau 1}^2 \bar{\Lambda}_1 + h_{\tau 2}^2 \bar{\Lambda}_2, \quad \Lambda_2 = h_{\tau 3}^2 \bar{\Lambda}_3$$

ニュートリノ振動実験データの説明可能

$$\Lambda_1 = \frac{\sqrt{\Delta m_{\text{atm}}^2}}{2}$$
$$\Lambda_2 = \frac{\sqrt{\Delta m_{\text{sol}}^2}}{3}$$

Flavor structure のもたらす特徴

- $\mu \rightarrow e\gamma$ の制限をDMのrelic abundance と矛盾することなく緩和する可能性を持つ

$$M_1 \lesssim M_2 < M_3, m_0 \quad \longrightarrow \quad N_1 : \text{DM}$$

$$h_{ei} = 0, \quad h_{\mu i} = h_{\tau i} \quad (i = 1, 2)$$

Relic abundance

$$h_{e3} = h_{\mu 3} = -h_{\tau 3}$$

$\mu \rightarrow e\gamma$

それぞれの仮定に關与するYukawa coupling の役割分担が実現される。

- N_1 対消滅の終状態に μ^\pm と τ^\pm は含まれるが、 e^\pm は含まれない。

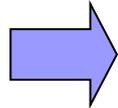
PAMELA等のデータをDMの対消滅で説明するには都合が良い。

- DMはleptonとのみ相互作用をするので直接観測は難しいかも知れない。

One-loop effects として核子との散乱は起こる。

Supersymmetric version

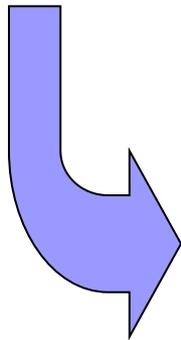
弱い相互作用スケールの起源(hierarchy 問題)



超対称性の導入

DM候補が複数存在 $\left\{ \begin{array}{l} \text{Lightest neutralino } \chi \\ N_1 \end{array} \right.$

Anomalous U(1)対称性の存在を仮定



○ 理論的帰結

- Neutrino YukawaのFlavor構造
- N_i, η 等の質量階層構造
- λ_5 の小ささの説明
- Z_2 対称性の起源

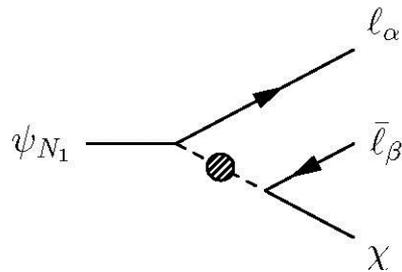
○ DM物理に様々な特徴

2成分暗黒物質 N_1 と χ

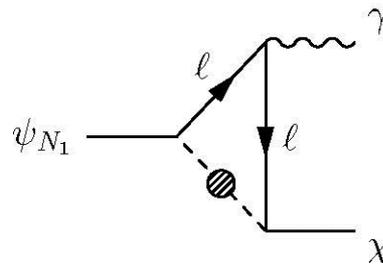
暗黒物質の検出I

- 間接検出(DMの対消滅からのelectron,positron, γ)

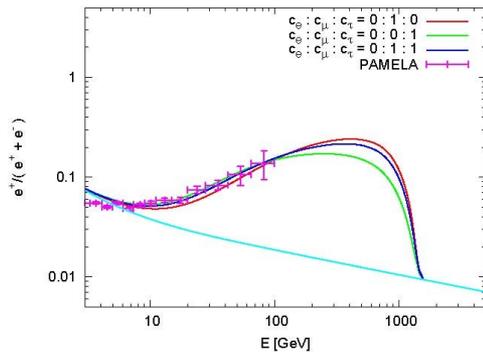
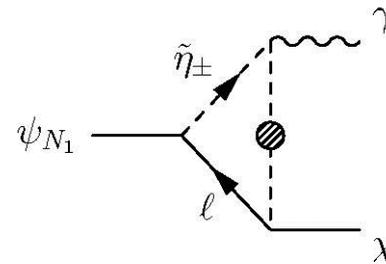
N_1 は不安定で崩壊するが、十分長寿命 $O(10^{26})\text{sec}$



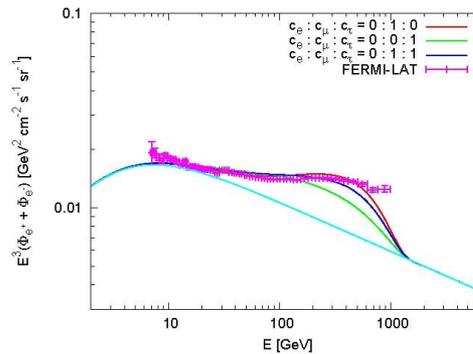
electron,positron



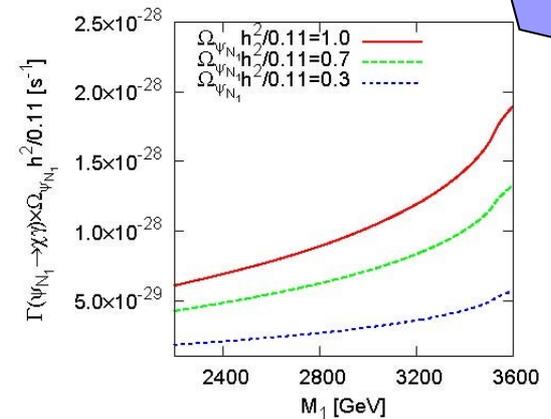
Monochromatic γ



PAMELA



Fermi

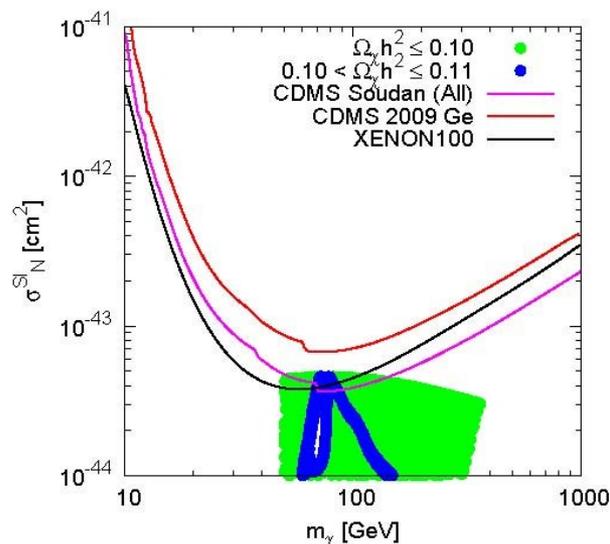
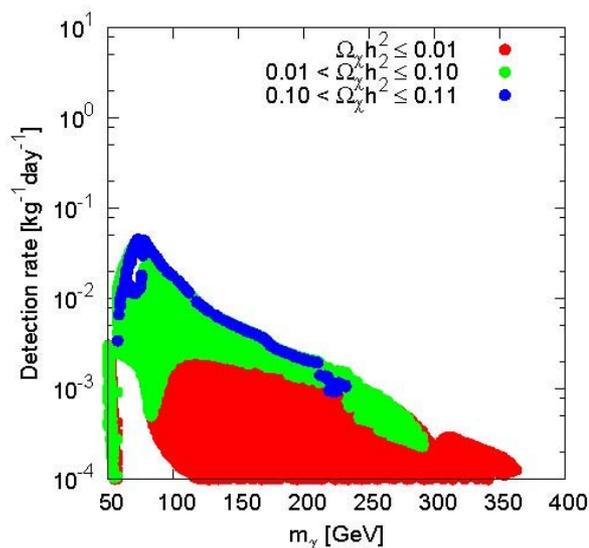


暗黒物質の検出II

■ 直接検出

直接検出され得るのはLSP成分であるが、要求されるLSPの密度は、通常のMSSMの場合とは異なる。

$$\Omega_{N_1} h^2 + \Omega_\chi h^2 = 0.11$$



MSSMの場合と相互作用は同じであっても、検出率などは異なってくる。このような可能性の考慮は重要だろう。

Summary

- ニュートリノ質量と暗黒物質の存在というSMでは説明できない実験結果が得られた現在、理論的動機付けとは一步離れ、純粹に現象論的立場でこれらを説明できるようなSMの拡張を考えることは有効かつ重要な試みと考えられる。
- ニュートリノ質量の小ささを説明する対称性が、暗黒物質の安定性を保証する模型の存在は、レプトンフレーバー構造が暗黒物質の性質に深く関係しているという可能性を示唆している。興味深い可能性として研究を進める価値があるだろう。
- 暗黒物質はTeV領域の物理として説明される可能性が大きく、これをニュートリノ質量と関連させる場合、輻射補正による質量生成が重要な役割を演じることが期待される。この場合、Lepton flavor violating processes (LFV) からの制限が重要になると同時に、LFVは模型の検証にも使える可能性がある。
- 模型を超対称化した場合には、2成分暗黒物質となり、超対称模型において従来想定されてきたものとは異なる性質を持つLSPを実現する可能性がもたらされる。
- 模型はニュートリノ質量と混合、暗黒物質、Leptogenesisによるバリオン数生成のすべてを同時に説明できる可能性を持つ。また、LHCで模型の兆候が見える可能性もあり、さらに深く検討してみる価値がある。