

フレイバー対称性とループシーソー模型および暗黒物質の考察

著者	岡田 寛
著者別名	Okada, Hiroshi
雑誌名	博士学位論文要旨 論文内容の要旨および論文審査結果の要旨 / 金沢大学大学院自然科学研究科
巻	平成19年9月
ページ	123-126
発行年	2007-09-01
URL	http://hdl.handle.net/2297/26696

氏名	岡田 寛
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	博甲第858号
学位授与の日付	平成19年3月22日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	フレーバー対称性とループシーソーモデルおよび暗黒物質の考察
論文審査委員(主査)	久保 治輔(自然科学研究科・教授)
論文審査委員(副主査)	鈴木 恒男(総合メディア基盤センター・教授), 青木 健一(自然科学研究科・教授), 末松 大二郎(自然科学研究科・教授), 寺尾 治彦(自然科学研究科・助教授)

Abstract

It is now clear that the masses of the neutrino sector are much lighter than those of the other three sectors. There are many attempts to explain the neutrino masses radiatively by means of inert higgses, which don't have vacuum expectation values. Then one can discuss cold dark matter candidates, because of no needing so heavy particles and having a Z_2 parity symmetry corresponding to the R-parity symmetry of the MSSM. Recently a new type model(hep-ph/0601225) along this line of thought was proposed by Mr. E. Ma. We paid attention to this idea. We introduce a flavor symmetry based on a dihedral group D_6 to constrain the Yukawa sector. For the neutrino sector, we find that the maximal mixing of atmospheric neutrinos is realized, it can also be shown that only an inverted mass spectrum, the value of $|V_{MNS}|_{(13)}$ is 0.0034 and so on. For the fermionic CDM candidates, we find that the mass of the CDM and the mass of the inert Higgs should be larger than about 230 and 300 GeV, respectively. If we restrict ourselves to a perturbative regime, they should be lighter than about 750 GeV.

学位論文要旨

ニュートリノ質量は他の三セクターと比べて非常に小さいということが知られている。それを、標準模型を超える枠組みで説明するモデルが多く、研究者達によって考えられた。そのアイデアの一つにラディアチブシーソーモデルがある。それは Zee-model に代表されるのだが、真空期待値を持たないイクストラ(イナート)ーヒッグスを導入させてニュートリノ質量をループ効果でだそうという試みである。つまりカノニカルシーソーモデル(ツリーレベルでニュートリノ質量を生成する。)での分母にある有効質量のベキがナイーブにあがっていく為にその質量自体を軽く出来る性質を持っている。又、通常のラディアチブシーソーモデルは S.M. 粒子以外の新粒子(ここでは、ライトハンディッドニュートリノとイクストラヒッグス)に Z-parity odd なアサインメントを課して他のセクターにカップルしない様にしてあるので SUSY に拡張する事無くダークマター候補にもなりうる。今回我々は Ma 氏によって提案されたモデル Ma-model (hep-ph/0601225) に注目した。このモデルの新しい事はボソニックな新粒子 η が一種類だけしか含まれない事である。我々はそこに、新たなフレーバー対称性を導入して texture を限定した解析を行った。その対称性が D_6 という離散群である。 D_6 とは dihedral N 群の一つで、この場合は六角形の回転と反転を要素にもつ群の事である。一般に D_N 群の要素数は $2N$ 個と書かれるので、この場合の要素の数は 12 個である。この dihedral 群の一番の特徴は N の大きさに関わらず常に一次表現と二次元表現に規約分解できる事である。さらに、その数が N の数によって直ちにわかる。二次元表現の数は $N = \text{偶数} \rightarrow N/2 - 1$ 、 $N = \text{奇数} \rightarrow (N - 1)/2$ 又、一次元表現の数は $N = \text{偶数} \rightarrow 4$ 、 $N = \text{奇数} \rightarrow 2$ となる。 D_6 の積の規則を作り、それらの表現 $(1, 1', 1'', 1''', 2, 2')$ と 2 個の Z_2 対称性を導入

($Z_2 \times Z'_2$) し適当にレプトン場とヒッグス場にアサインした。

Z_2 アサインは MSSM での R-parity の役目を果たしており、この対称性は最後まで破れない。 Z_2 アサインメントがないと (quark はもちろん)、 η が charged-lepton sector にもカップルしてしまう。例えば、 D_6 だけだと $L_S e_L^c \eta_I$ が作れてしまう。よって、粒子を安定にする為に無くてはならない対称性である。又、 Z'_2 と共に、higgs sector のポテンシャルの構造を簡単にする。quark-sector についてはその場に D_6 singlet をアサインする事で、ヒッグスを介する tree-level での FCNC はないので、実験と consistent なモデルを構成する事は出来る。

$D_6 \otimes Z_2 \otimes Z'_2$ の元で不変な Yukawa Lagrangian から、我々の欲しい texture

$$M_e = \begin{pmatrix} -m_2 & m_2 & m_5 \\ m_2 & m_2 & m_5 \\ m_4 & m_4 & 0 \end{pmatrix}, M_\nu = \begin{pmatrix} 2(\rho_2)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 2(\rho_2)^2 & 2\rho_2\rho_4 \\ 0 & 2\rho_2\rho_4 & 2(\rho_4)^2 + (\rho_3)^2 \exp(i2\Phi_3) \end{pmatrix}$$

をだせる事がわかる。¹

ただし、 M_e は荷電レプトン質量行列、 M_ν はニュートリノ質量行列である。パラメータ数は real part が 6 個で imaginary part が 1 個である。これから予言が得られる。まず、atmospheric 混合角を最大にする為にはニュートリノスペクトラムを inverted hierarchy にしなければならない。又二番目のニュートリノ質量が $m_{\nu_2} = f(\tan\theta_{12}, \Delta m_{32}^2, \Delta m_{12}^2, \phi_\nu)$ で表せる。 θ_{12} は solar 混合角、 $\Delta m_{32}^2, \Delta m_{12}^2$ はそれぞれ atmospheric mass difference, solar mass difference と実験で観測出来る量である。つまり、 $\phi_\nu = 0$ と置くと $m_{\nu_2} = 0.038 \sim 0.067 eV$ となる事がわかる。ニュートリノレスダブルベータ崩壊の最小値も同様に $\langle m_{ee} \rangle = 0.034 \sim 0.069 eV$ とする (図を参考)。最後に MNS の 1-3 成分が $\sim 3.4 \times 10^{-3}$ と出る事も分かる。

今回のダークマターの候補となるものは、right-handed neutrino (n_1, n_S の 2 個) と inert higgs ($\eta_a^0, a = (+, -, S)$) がある。ただし、 η の $+, -$ はその質量固有状態を意味する。特に right-handed neutrino (M_1, M_S の 2 個) が CDM の場合を考えた。それを元に一番制限のきついであろう $\mu \rightarrow e, \gamma$ の計算を行うと、 D_6 siglet な right-handed neutrino n_S がより自然な CDM の候補である事が分かる。又、その下限も $n_S > 300 GeV$ 位だとわかる。更に、 η_S^+ は e_L としか主にカップルしない非常にクリーンな反応が LHC で確認できる可能性がある。宇宙論から n_S が本当に CDM の候補になりうるかを調べる必要がある。この計算から CDM 候補 n_S の質量の上限と η の質量との関係がわかる。 n_S が annihilate するダイアグラムからそのくクロスセクションを計算する訳だが、今のモデルではほとんどが η と介して $e^+ - e^-$ と $\nu_\tau - \bar{\nu}_\tau$ に annihilate する。 $e^+ - e^-$ への annihilate は $h_3 e_L n_S \eta_S^+$ の箇所から、 $\nu_\tau - \bar{\nu}_\tau$ への annihilate はニュートリノ質量行列で $Y^{\nu S}$ の行列が (3,3) 成分しか値を持っていない所から来る寄与である。その結果、摂動の範囲内では m_S は 750 GeV を超えられないという事などが分かる。 $n_S - \eta_S$ の関係は $\mu \rightarrow e, \gamma$ の結果も考慮すると、下図の様になる。

ただし、relic density は 0.12、 $B(\mu \rightarrow e, \gamma) < 1.2 \times 10^{-11}$ で固定して、 $|h_3| < 1.5$ の条件で書いている。これから n_S と η_S の質量の allowed region がそれぞれ $230 GeV \leq m_S \leq 750 GeV, 300 GeV \leq \eta_S \leq 750 GeV$ となる結論を得た。

¹これらの texture を出すには、ヒッグス ϕ の D_6 doublet の真空期待値が $v_1 = v_2 = v_D$ となる必要がある。又イナートヒッグス η_I も同様にその D_6 doublet の場 η_1 と η_2 を入れ替えても不変になる必要がある。場のアサインメントはヒッグスポテンシャルにこうした対称性も、できるように作られている。

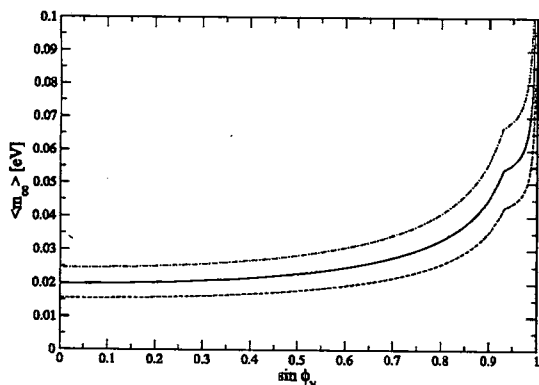


図 1: $\sin^2 \theta_{12} = 0.3$ 又 $\Delta m_{21}^2 = 6.9 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ にとったときの effective Majorana mass $\langle m_{ee} \rangle$ と $\sin \phi_\nu$ のグラフ。dashed, solid, dot-dashed line はそれぞれ $\Delta m_{23}^2 = 1.4, 2.3, 3.0 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ を表す。 Δm_{21}^2 の依存性は非常に小さい。

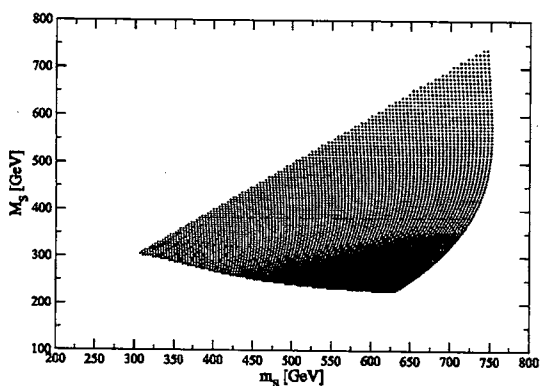


図 2: The region in the $m_S - M_S$ plane での allowed region が示されている。ただし、 $\Omega_d h^2 = 0.12, B(\mu \rightarrow e\gamma) < 1.2 \times 10^{-11}, |h_3| < 1.5$ が満たされている。

学位論文審査結果の要旨

岡田寛君の学位論文について、上記5名の審査委員による査読の後、平成19年2月2日に口頭発表が行われた。同日に審査会を開き、以下の理由で彼の論文は博士（理学）の学位に値すると判定した。最近の続出する宇宙観測データにより、暗黒物質と暗黒エネルギーは宇宙の90%以上をしめていることが判明してきた。暗黒物質は未知の物質で、素粒子の標準理論の枠組みではそれになれる候補が存在しない。標準理論を超対称化された模型に有力候補が存在するが、超対称はまだ実験的に検証されていない。従って、それ以外の候補を理論的に探求することは重要なことである。最近、ニュートリノの質量が量子補正によって生成される模型（ループシーソー模型）に、暗黒物質の候補が存在していることが指摘された。岡田君は、このような模型に離散群 D_6 に基づくフレーバー対称性を導入し、模型の予言力をさらに増強することに成功した。彼は、この模型に電荷を持った Higgs 粒子が存在し、それがほとんど 100%の確率で電子と暗黒物質の候補に崩壊することを見いだした。この Higgs 粒子は、今年から始まる CERN の LHC 加速器実験で生成される可能性があり、もし生成されれば非常にクリーンなシグナルが観測されることになる。岡田君の学位論文には、関連分野に関する review が丁寧に書かれている。また、関連論文も発表している。以上の点から委員会は本論文が学位論文として値すると結論した。