

## 論文の内容の要旨

論文題目：“Lepton Flavor Violation in Supersymmetric Standard Models”  
(超対称標準模型におけるレプトンフレーバーの破れ)

氏名： 野村 大輔

この論文では、超対称標準模型において、最近の太陽、大気ニュートリノ振動の実験結果を考慮に入れた上で、 $\mu \rightarrow e\gamma$  や  $\tau \rightarrow \mu\gamma$  などのレプトンフレーバー数を破る稀過程に関して詳細に調べた。また、JLC をはじめとする将来のレプトン加速器で、レプトンフレーバー数を破る過程がどの程度観測できるか論じた。以下、この論文の背景から順を追って紹介する。

最近 Super-Kamiokande グループによって発表された大気ニュートリノ振動の実験結果は、ニュートリノに 0.1 eV 程度のごく微小な質量と、大角度の世代間混合があることを強く示唆している。また、太陽ニュートリノ実験の結果も、やはりニュートリノにごくごく微小な質量と世代間混合のあることを示唆している。これらの質量の小ささを理解するには、非常に重い右巻きニュートリノを理論に導入して、シーソー機構が起こると考えるのが最も自然である。

ところで、超対称標準模型は輻射補正に対するウィークスケールの安定性を保証する点で有望な模型と考えられているが、一方において実際の自然では超対称性が exact ではないため、超対称性の破れを記述するパラメータを現象論的に導入する必要がある。このと

き導入される、ウィークスケールの安定性を保ちつつ超対称性を破るパラメータのうち、スカラ粒子の soft SUSY breaking masses (soft masses) とスカラ粒子の3点結合項 ( $A$  terms) とは世代の添字をもつことができ、もとの標準模型に存在する世代間混合とは何らかの仮定をおかない限り独立な世代間混合をもたらす。

このことは超対称標準模型に深刻な影響を及ぼす。すなわち、標準模型を超対称化したことによって新たに現れた世代間混合行列が  $K^0$ - $\bar{K}^0$  混合、 $\mu \rightarrow e\gamma$  などの flavor-changing 中性カレント過程に寄与して、これらの実験的制限を越えてしまうことが大いにありうる。実際、これらの過程が実験の制限を越えないためには、squark や slepton の質量がそれぞれの世代間で強く縮退していなければならない。これは非自明な関係であるから、このような状況が実現されるためには、その背後に何らかの基礎理論があると考えるのが自然である。

その有力な候補の一つがこの論文でも仮定した、minimal な超重力理論である。このシナリオは、我々の知らないセクターで起こった超対称性の破れが重力の相互作用を介して我々の観測しているセクターに伝わると考えるもので、重力が世代に依らないことから、soft masses は世代に関して universal になる。ただしこの universality は重力の効果が重要になるスケール  $M_{\text{grav}}$  でのみ成り立つものであって、もしウィークスケールと  $M_{\text{grav}}$  との間に、世代に依存し、かつ、世代間を混ぜるような相互作用があれば、その効果が輻射補正を通じてウィークスケールでの soft mass matrix に非対角成分をもたらす。したがってこのシナリオを仮定した場合、ウィークスケールでのフレーバー物理は高いエネルギースケールの物理を反映したものとなり、非常に興味深いものとなる。とくに  $\mu \rightarrow e\gamma$  や  $\tau \rightarrow \mu\gamma$  は強い相互作用による不定性が入らずに計算できるので、高エネルギーの物理を探るには適当である。

大気ニュートリノ振動の実験結果をシーソー機構で理解しようとした場合、ニュートリノのディラック質量項が第2第3世代間を大きく混合していると考えるのが自然であるが、このような相互作用は輻射補正の形で left-handed slepton の soft mass matrix の第2第3世代間を混ぜる成分を大きく生成する。したがって  $\tau \rightarrow \mu\gamma$  の分岐比は slepton の soft mass matrix の (2,3) 成分を捨てるようなダイアグラムによって大きくなる。

このこととまったく同様なことが、太陽ニュートリノ振動についても起こる。すなわち、太陽ニュートリノ問題の解の有力な候補である MSW 大角度解、MSW 小角度解、“just so” 解のうち、MSW 大角度解ではニュートリノのディラック質量項が第1第2世代間を大きく混合すると考えるのが自然である。しかももしニュートリノの質量が階層的である ( $m_{\nu_\tau} \gg m_{\nu_\mu} \gg m_{\nu_e}$ ) と仮定するとこの解では第2世代のニュートリノ湯川結合定数  $f_{\nu_2}$  が比較的大きいため、これによる輻射補正は slepton 質量の縮退を解くのに十分である。従ってこのとき、上と平行な議論から、 $\mu \rightarrow e\gamma$  の分岐比  $\text{Br}(\mu \rightarrow e\gamma)$  は soft mass matrix の (1,2) 成分を捨てるようなダイアグラムによって大きくなる。ニュートリノ湯川結合定数から soft mass matrix の非対角成分が輻射補正の形で生成されることは既に知られていたが、第2世代のニュートリノ湯川結合定数  $f_{\nu_2}$  の寄与からだけでも十分大きな  $\text{Br}(\mu \rightarrow e\gamma)$  が導

$\mu \rightarrow e\gamma$  in the MSSMRN with the MSW large angle solution

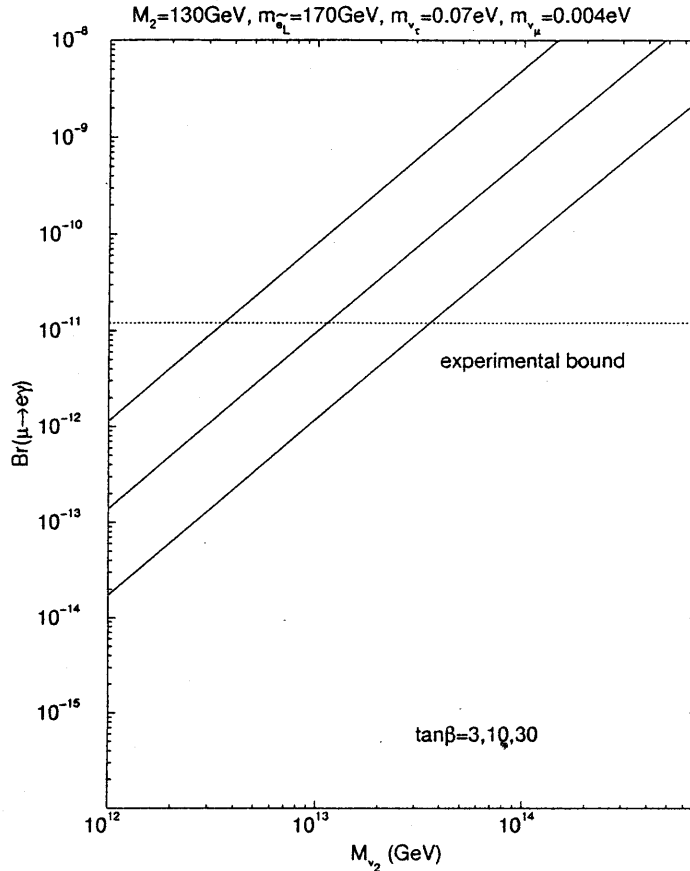


図 1:  $\mu \rightarrow e\gamma$  の分岐比の、第 2 世代右巻ニュートリノ質量  $M_{\nu_2}$  に対する依存性。MSW 大角度解に対応するパラメータ  $V_{D21} = -0.42, m_{\nu_\mu} = 0.004\text{eV}$  をとった。第 1 第 3 世代間混合を記述するパラメータ  $V_{D31}$  は 0 にとった。点線は現在の実験的制限。他のパラメータは wino mass  $130\text{GeV}$ , left-handed selectron  $170\text{GeV}$ ,  $m_{\nu_\tau} = 0.07\text{eV}$ ,  $\tan\beta = 3, 10, 30$ 。大きい  $\tan\beta$  の値ほど大きい分岐比を予想する。

かれることは久野純治氏との共著論文 *Phys. Rev. D* **59** (1999) 116005 において我々が最初に指摘した。我々は、同時に数値計算によってすでに実験的に排除されているパラメータ領域さえ存在するほど大きな  $\text{Br}(\mu \rightarrow e\gamma)$  の値が得られることを示した (図 1)。現在 東京大学素粒子物理国際研究センター (ICEPP) が中心となってスイス PSI 研究所で準備中の  $\mu \rightarrow e\gamma$  崩壊探索実験は分岐比  $\text{Br}(\mu \rightarrow e\gamma)$  が  $10^{-14}$  までの精度で  $\mu \rightarrow e\gamma$  崩壊を探ることを試みているが、もし MSW 大角度解が本当なら、 $\mu \rightarrow e\gamma$  崩壊が見付かることが大いに期待できる。

このように slepton の世代間混合を間接的に調べる手法のほかに、JLC などの将来の加速器で slepton を実際に生成して、その崩壊モードを調べることによって、直接的に slepton の世代間混合を探る試みもあり、博士論文の後半の部分ではこれを調べた。

超対称模型では slepton は soft mass matrix によって世代間で混合するために、弱い相

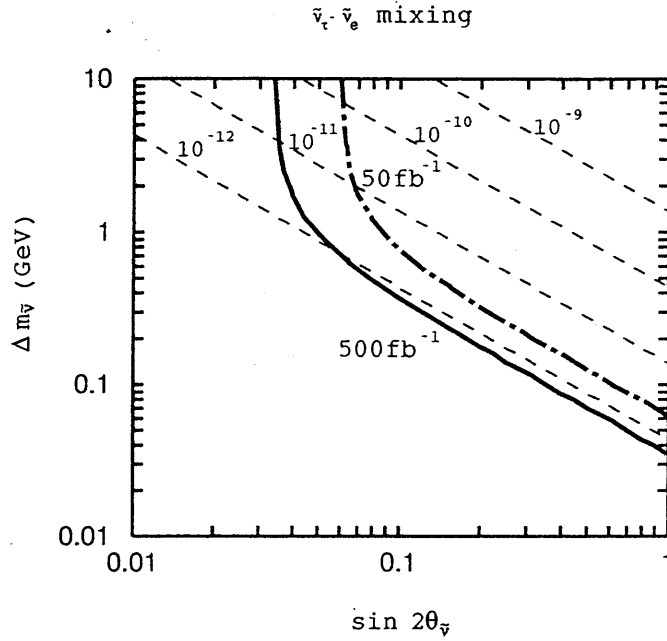


図 2: 我々のサンプルパラメータに対する第一第三世代間スレプトン振動現象の  $5\sigma$  ディスカバリーリーチを left-handed slepton の第一第三世代間の混合角  $\theta_{\bar{\nu}}$  と質量差  $\Delta m_{\bar{\nu}}$  の関数として示した図。積分ルミノシティが  $\mathcal{L} = 50\text{fb}^{-1}$  の場合 (太い破線) と  $\mathcal{L} = 500\text{fb}^{-1}$  の場合 (太い実線) を示してある。  $\text{Br}(\tau \rightarrow e\gamma) = 10^{-9}, 10^{-10}, 10^{-11}, 10^{-12}$  にそれぞれ対応する等高線 (細い破線) も示した。

相互作用に関する固有状態と質量の固有状態とが、一般には一致しない。このことはニュートリノ振動と同じ理屈で slepton 間の振動 (スレプトン振動 (slepton oscillation)) をもたらす。つまり、slepton が違うフレーバーの charged lepton に崩壊するような確率は、slepton の世代間混合に大きく依存するため、このことを利用して slepton の世代間混合を探れる可能性がある。

$\mu \rightarrow e\gamma$  や  $\tau \rightarrow \mu\gamma$  などの slepton が仮想粒子としてしか効かない過程に比べた場合のスレプトン振動の利点は、slepton が real particle として寄与するために、GIM 的な相殺が弱いことにある。実際、left-handed slepton の第 2 第 3 世代間の混合に関してはスレプトン振動は JLC などの現在計画中の  $e^+e^-$  collider で  $\tau \rightarrow \mu\gamma$  の現在の実験的制限よりも 2-3 桁 鋭敏である可能性があることが指摘されていた。この論文ではこの解析を拡張し、 $e^+e^-$  collider では第 1 第 3 世代間の混合に関しては  $s$ -channel からの寄与に加え、 $t$ -channel も断面積に寄与するので、第 1 第 3 世代間の混合に関しては非常に鋭敏な probe でありうることを指摘し、数値計算の結果、少なくとも我々のサンプルパラメータに対しては第 1 第 3 世代間のスレプトン振動実験は  $\tau \rightarrow e\gamma$  の現在の実験的制限よりも 5 桁程度鋭敏でありうるという結果を得た (図 2)。