

Big-bang nucleosynthesis and Leptogenesis in the CMSSM

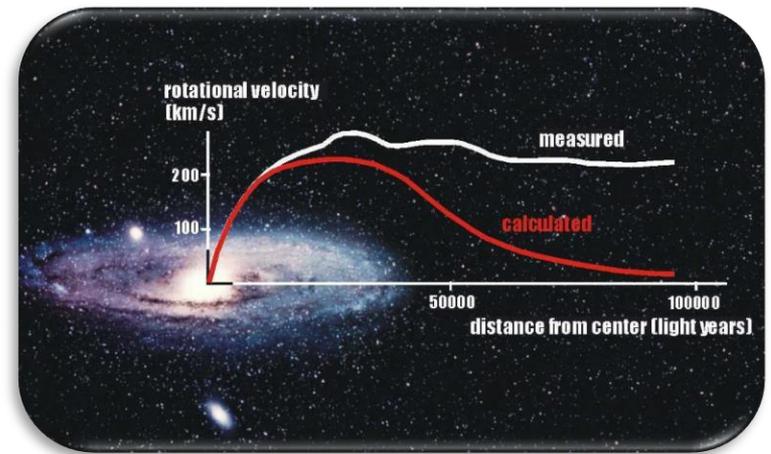
山中 真人 (九州産業大学)

Phys. Rev. D 97, 115013 (arXiv:1803.07686)

共同研究者: 久保 宗弘、佐藤 丈、下村 崇、高西 康敬

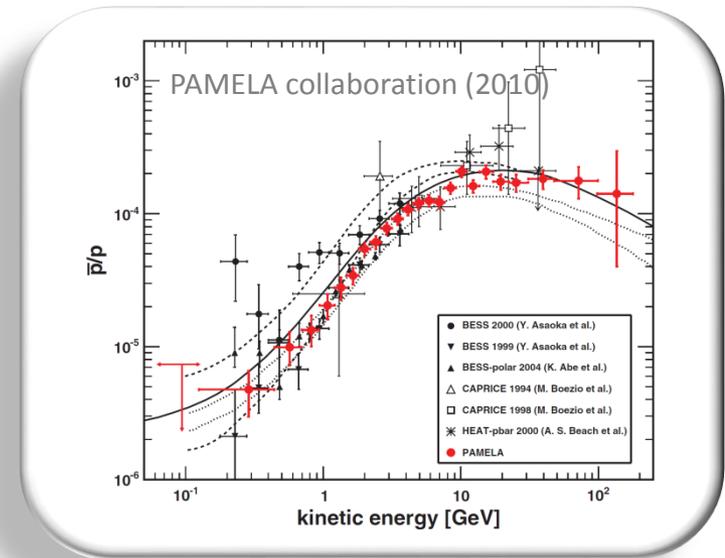
暗黒物質、元素合成、ヒッグス質量等を実験・観測と無矛盾
にもたらずCMSSMは物質・反物質非対称を説明できるか？

標準理論は確立されたが...



新物理の証拠の数々

- 暗黒物質
- リチウム問題
- ニュートリノ質量
- 宇宙の物質・反物質非対称
- などなど



新物理の有力候補：シーソー機構を伴う最少拡張超対称模型

Constrained minimal supersymmetric standard model (CMSSM)

CMSSMにおける現実的許容パラメーター領域は？

CMSSMで予言される超対称粒子の質量

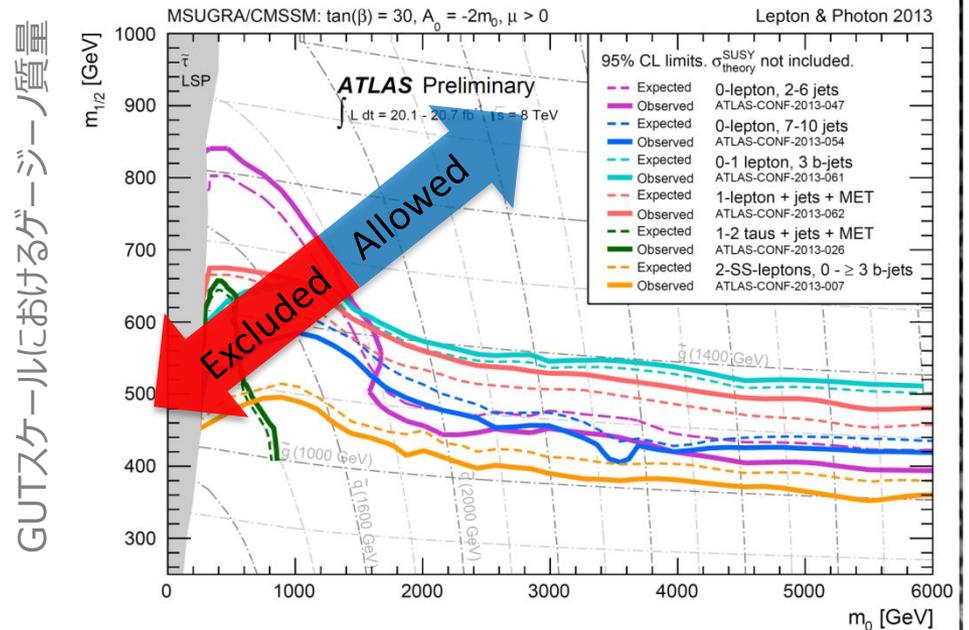
最も軽い超対称粒子(LSP) : ビーノを主成分とするニュートラリーノ $\tilde{\chi}$

次に軽い超対称粒子(NLSP) : スタウを主成分とするスレプトン $\tilde{\ell}$

許容領域は広く残されている???

ほとんどの領域では暗黒物質過多!

マヨラナ粒子であるため、低速のニュートラリーノは対消滅しにくい



GUTスケールにおけるゲージノ質量

GUTスケールにおけるスレプトン質量

CMSSMにおける現実的許容パラメーター領域は？

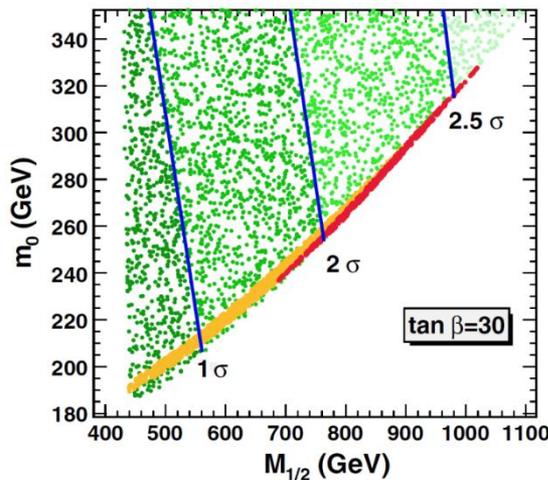
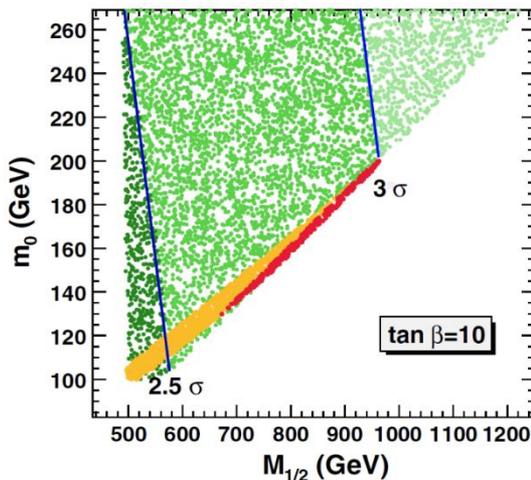
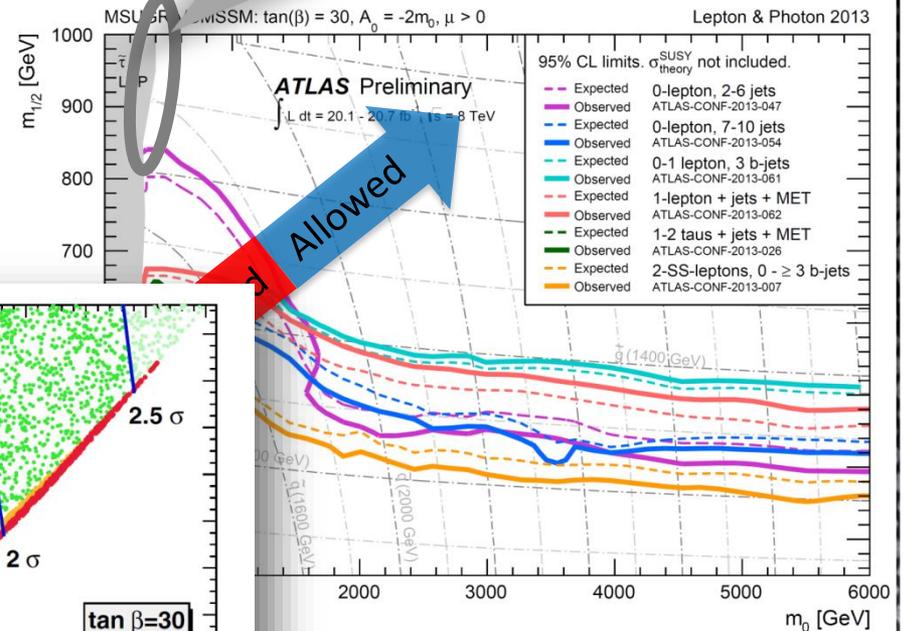
暗黒物質、ヒッグス質量、ミュオンの $g - 2$ のアノマリー等を説明可能な現実的パラメーター

$$\delta m \equiv m_{\tilde{\ell}} - m_{\tilde{\chi}} < m_{\tau}$$

L. Aparicio, D. Cerdeno, L. Ibanez, JHEP (2012),
M. Citron, J. Ellis, F. Luo, et al, PRD87 (2013),
などなど

暗黒物質の観測量と整合する領域

共対消滅領域



赤：残存量OK、 $\delta m < m_{\tau}$

橙：残存量OK、 $\delta m > m_{\tau}$

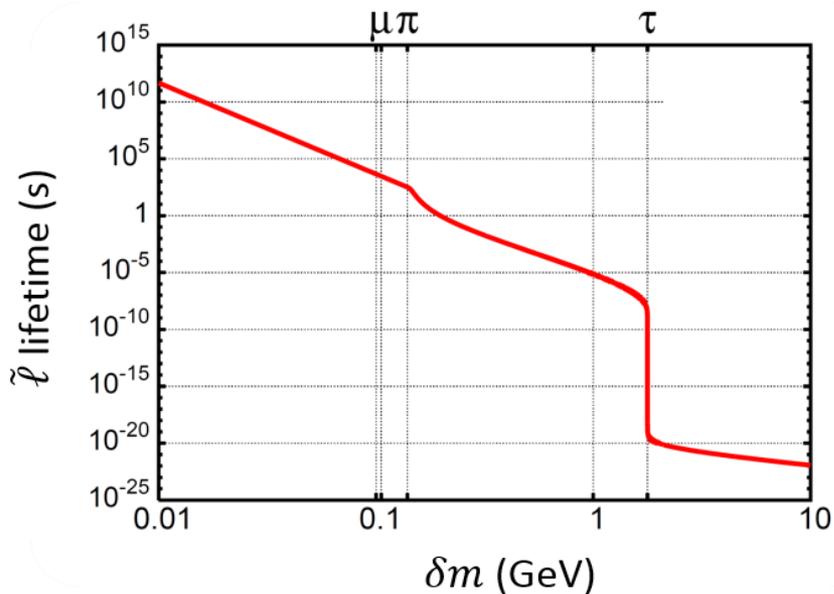
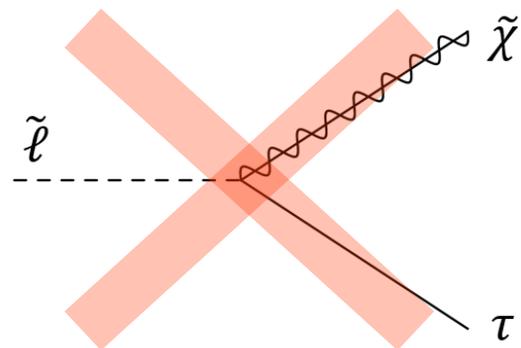
長寿命スレプトン

暗黒物質、ヒッグス質量、ミュオンの $g - 2$ の
 アノマリー等を説明可能な現実的パラメーター

$$\delta m \equiv m_{\tilde{\ell}} - m_{\tilde{\chi}} < m_{\tau}$$

L. Aparicio, D. Cerdeno, L. Ibanez, JHEP (2012),
 M. Citron, J. Ellis, F. Luo, et al, PRD87 (2013),
 などなど

$\delta m < m_{\tau}$ により、スタウを主成分に持つスレプト
 トンは2体崩壊がほぼ禁じられ長寿命粒子に



T. Jittoh, J. Sato, T. Shimomura, MY, PRD73 (2006)

長寿命スレプトンはLi7問題を解決



Li7存在量の理論計算と観測量の不一致

F. Spite and M. Spite, *Astron. Astrophys.* (1982)

- たまたまウチの銀河だけLi7が少ないのでは？

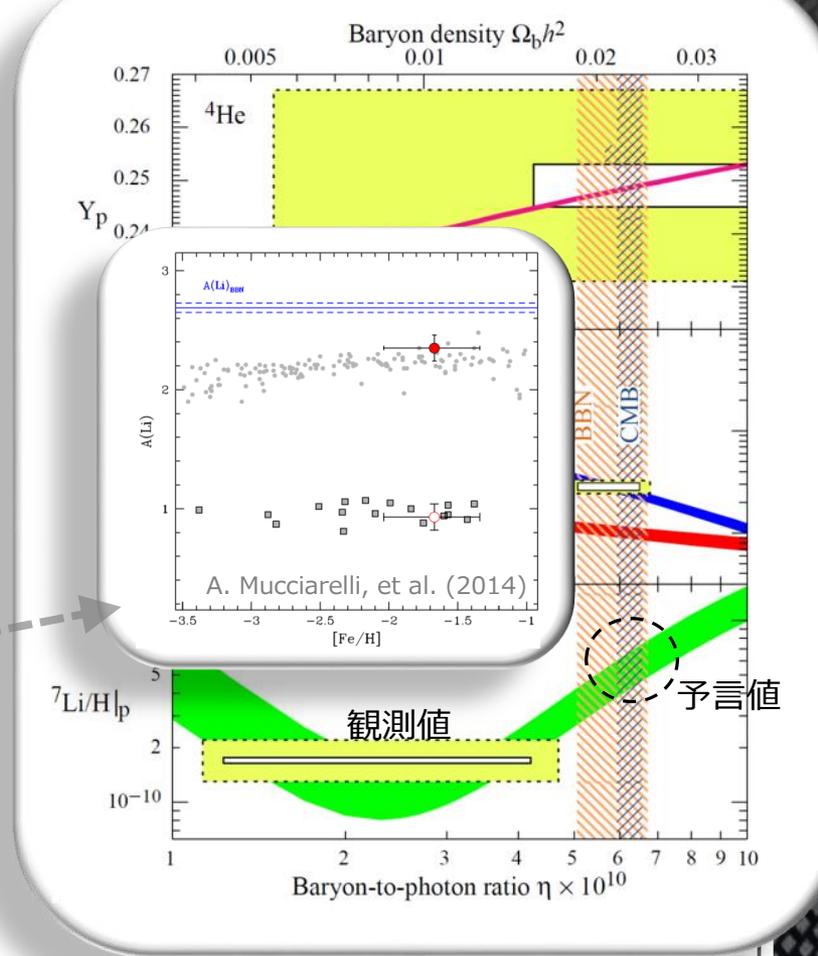
銀河外でもLi7不足が判明

- 核反応の理解が不十分なのは？

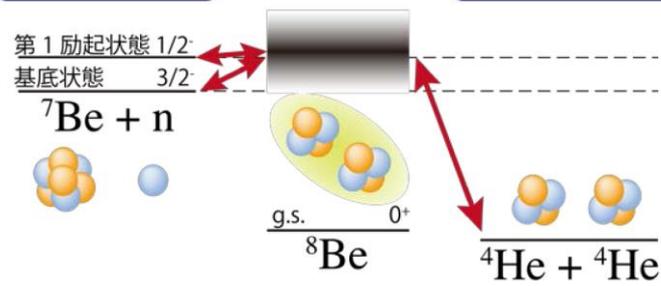
京大を中心とする研究により、解決のカギと期待されていた反応が予想に比べかなり弱いと判明

T. Kawabata, et al. *PRL118* (2017)

暗黒物質同様、軽元素量の予言値・観測値の整合性も丁寧に考えるべき



宇宙における反応 \longleftrightarrow 今回測定した逆反応

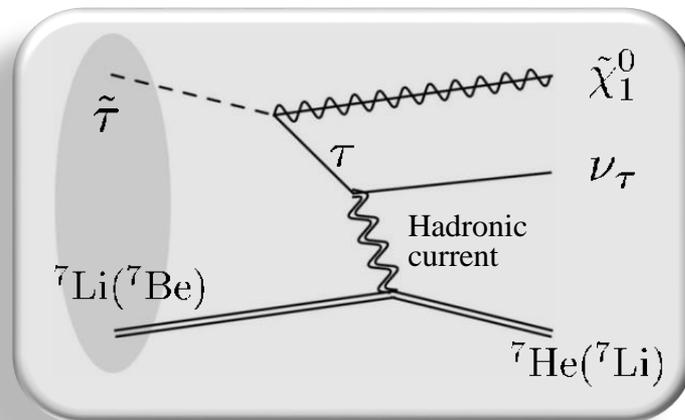


長寿命スレプトンはLi7問題を解決

長寿命スレプトンは原子核と束縛状態を形成後、
 新奇な核種変換反応を起こし、Li7を十分に減らす

T. jittoh, et al, PRD76 (2007)

C. Bird, et al, PRD78 (2008)

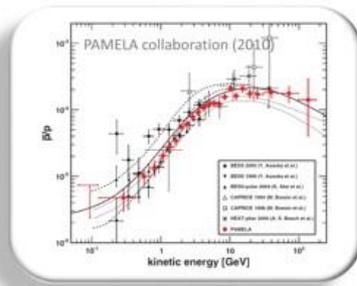
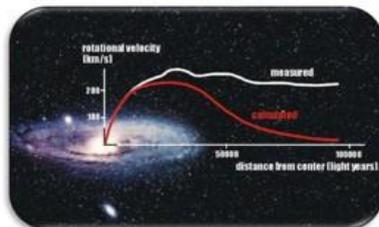


(c.f., 電子捕獲やミューオン捕獲)

標準理論は確立されたが...

新物理の証拠の数々

- 暗黒物質
- リチウム問題
- ニュートリノ質量
- 宇宙の物質・反物質非対称
- などなど



もしこのシナリオが宇宙を記述している
 ならば、物質・反物質非対称も本シナ
 リオ内で説明できて然るべき

新物理の有力候補：シーソー機構を伴う最少拡張超対称模型

Constrained minimal supersymmetric standard model (CMSSM)

研究の狙い、トークの流れ

研究の狙い

- ☑ 宇宙の物質・反物質非対称を本シナリオで説明できるかどうか検証
- ☑ 本シナリオの確立をもたらす特徴的実験兆候を明らかに

トークの流れ

1. 導入
2. CMSSMにおける許容パラメーター探し
3. 数値計算による解析
4. まとめ

2. CMSSMにおける許容パラメーター探し

注目する枠組み：右巻きニュートリノを導入したCMSSM

CMSSMを支配するパラメーター： $M_{1/2}$, m_0 , A_0 , $\tan \beta$, $\text{sign}(\mu)$

GUTスケールで値を定め、MSSMスケールまでくりこみ群方程式を走らせることで質量などを算出

LSP : ビーノ主成分のニュートラリーノ $\tilde{\chi}$

NLSP : スタウ主成分のスレプトン

$$\tilde{\ell} = \sum_{f=e,\mu,\tau} C_f \tilde{f}$$

$$\left(\tilde{f} = \cos \theta_f \tilde{f}_L + \sin \theta_f \tilde{f}_R \right)$$

右巻きニュートリノ： $\mathcal{W} = (\hat{y}_\ell)_\alpha L_\alpha H_d E_\alpha^c + (y_\nu)_{\alpha i} L_\alpha H_u N_i^c + (\hat{M}_R)_i N_i^c N_i^c$

注目する枠組み：右巻きニュートリノを導入したCMSSM

CMSSMを支配するパラメーター： $M_{1/2}$, m_0 , A_0 , $\tan \beta$, $\text{sign}(\mu)$

GUTスケールで値を定め、MSSMスケールまでくりこみ群方程式を走らせることで質量などを算出

LSP : ビーノ主成分のニュートラリーノ $\tilde{\chi}$

NLSP : スタウ主成分のスレプトン

$$\tilde{\ell} = \sum_{f=e,\mu,\tau} C_f \tilde{f}$$

スレプトン混合 C_f と各スレプトンの右-左混合 θ_f はニュートリノ湯川を含めたくりこみ群方程式で決まる

$$\left(\tilde{f} = \cos \theta_f \tilde{f}_L + \sin \theta_f \tilde{f}_R \right)$$

右巻きニュートリノ： $\mathcal{W} = (\hat{y}_\ell)_\alpha L_\alpha H_d E_\alpha^c + (y_\nu)_{\alpha i} L_\alpha H_u N_i^c + (\hat{M}_R)_i N_i^c N_i^c$

注目する枠組み：右巻きニュートリノを導入したCMSSM

- 暗黒物質残存量の整合性から θ_f を制限
- 軽元素存在量の整合性から C_f を制限
- 物質・反物質非対称の生成から $(y_\nu)_{\alpha i}$ と M_R を制限

NLSP：スタウ主成分のスレプトン

スレプトン混合 C_f と各スレプトンの右-左混合 θ_f はニュートリノ湯川を含めたくりこみ群方程式で決まる

$$\tilde{\ell} = \sum_{f=e,\mu,\tau} C_f \tilde{f}$$
$$\left(\tilde{f} = \cos \theta_f \tilde{f}_L + \sin \theta_f \tilde{f}_R \right)$$

右巻きニュートリノ： $\mathcal{W} = (\hat{y}_\ell)_\alpha L_\alpha H_d E_\alpha^c + (y_\nu)_{\alpha i} L_\alpha H_u N_i^c + (\hat{M}_R)_i N_i^c N_i^c$

注目する枠組み：右巻きニュートリノを導入したCMSSM

- 暗黒物質残存量の整合性から θ_f を制限
- 軽元素存在量の整合性から C_f を制限
- 物質・反物質非対称の生成から $(y_\nu)_{\alpha i}$ と M_R を制限

宇宙物理からニュートリノ湯川の構造を厳しく縛ることができ、レプトンフレーバーの破れに予言

NLSP：スタウ主成分のスレプトン

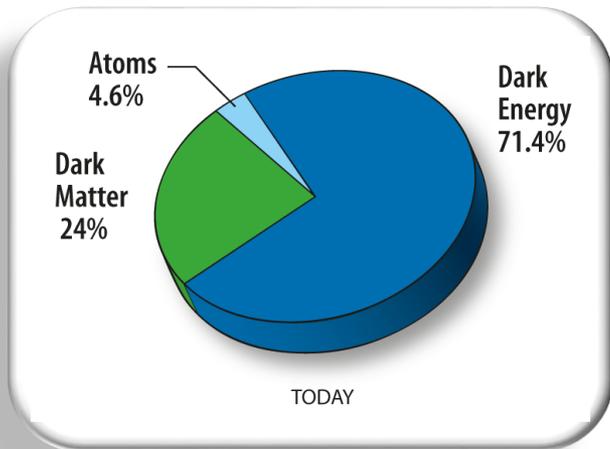
スレプトン混合 C_f と各スレプトンの右-左混合 θ_f はニュートリノ湯川を含めたくりこみ群方程式で決まる

$$\tilde{\ell} = \sum_{f=e,\mu,\tau} C_f \tilde{f}$$
$$\left(\tilde{f} = \cos \theta_f \tilde{f}_L + \sin \theta_f \tilde{f}_R \right)$$

右巻きニュートリノ： $\mathcal{W} = (\hat{y}_\ell)_\alpha L_\alpha H_d E_\alpha^c + (y_\nu)_{\alpha i} L_\alpha H_u N_i^c + (\hat{M}_R)_i N_i^c N_i^c$

どうやって許容パラメーターを探し出すか

暗黒物質残存量



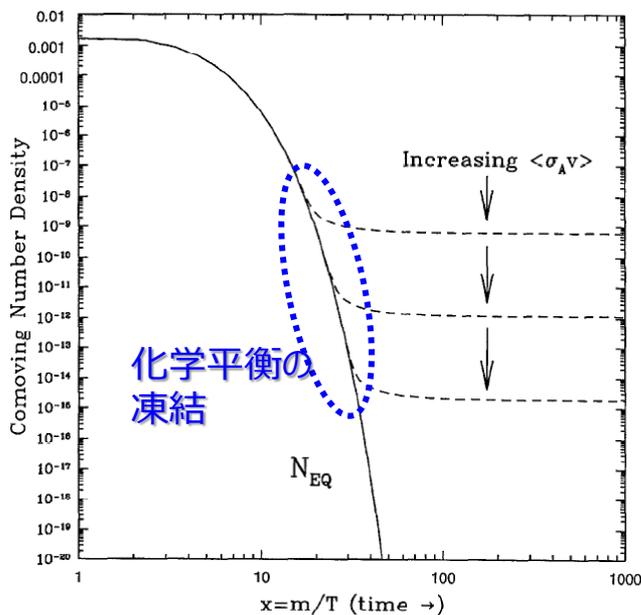
残存量観測値 PLANCK 2015 results

$$0.1126 \leq \Omega_{\text{DM}} h^2 \leq 0.1246$$

超対称粒子の全数密度の凍結 @ $T \simeq m_{\tilde{\chi}}/25$

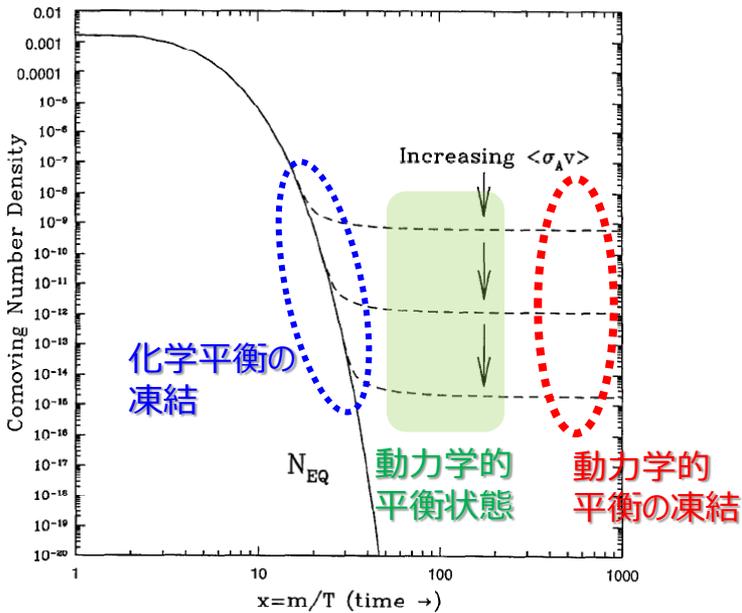
$$n \equiv n_{\tilde{\chi}} + n_{\tilde{\ell}^-} + n_{\tilde{\ell}^+}$$

**CMSSMパラメーター ($M_{1/2}, m_0, \tan\beta,$
etc.) が残存量の整合性から決まる**



注意：スレプトンの数密度はこの段階では未凍結！

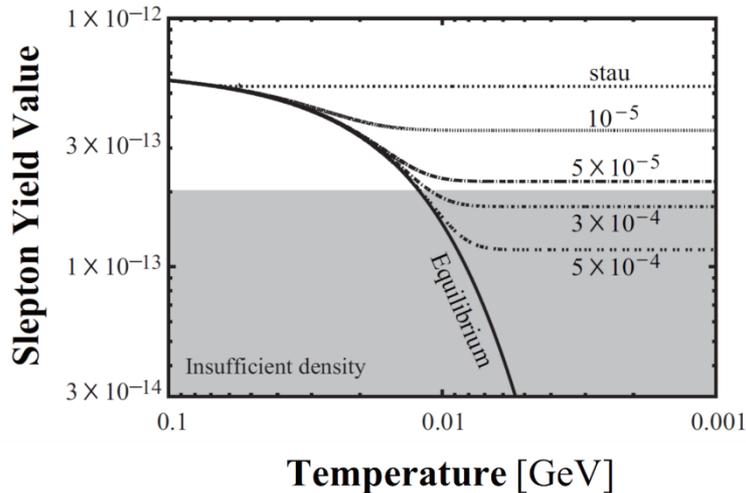
スレプトンの数密度



化学平衡凍結後も、超対称粒子とSM粒子の動力的平衡は維持される

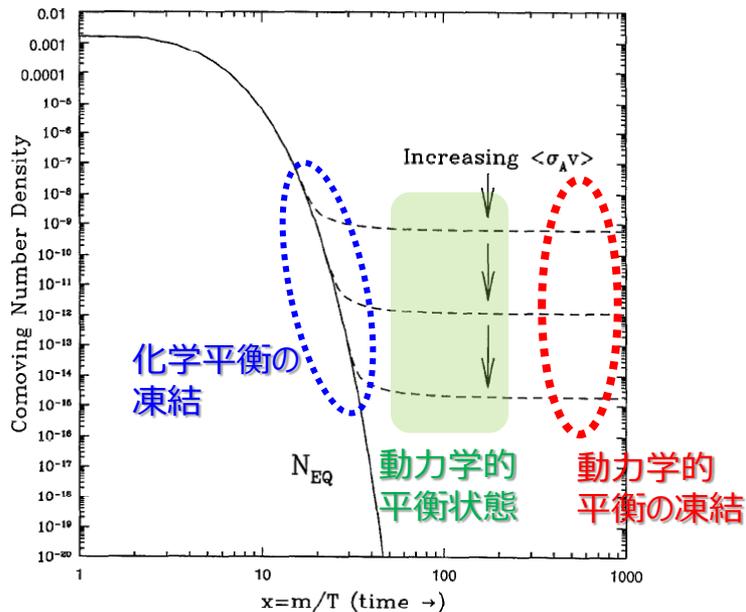
$$\begin{aligned} \tilde{l}\gamma &\leftrightarrow \tilde{\chi}\tau, & \tilde{l}\gamma &\leftrightarrow \tilde{\chi}\mu, \\ \tilde{l}\tau &\leftrightarrow \tilde{\chi}\gamma, & \tilde{l}\mu &\leftrightarrow \tilde{\chi}\gamma, & \tilde{l}e &\leftrightarrow \tilde{\chi}\gamma \end{aligned}$$

動力的平衡にある限り、スレプトン数密度は分布関数に従って温度と共に減少



$$\begin{aligned} n_{\tilde{l}^-} &= \frac{n_{\tilde{l}_1^-} n_{\tilde{\chi}_1^0}}{n_{\tilde{\chi}_1^0} n} n \\ &= n \frac{e^{-\delta m/T}}{2(1 + e^{-\delta m/T})} \end{aligned}$$

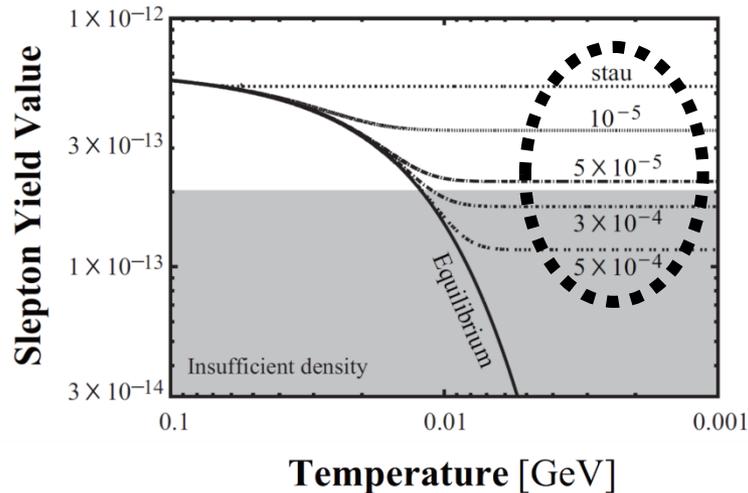
スレプトンの数密度



化学平衡凍結後も、超対称粒子とSM粒子の動力的平衡は維持される

$$\begin{aligned} \tilde{l}_\gamma &\leftrightarrow \tilde{\chi}_\tau, & \tilde{l}_\gamma &\leftrightarrow \tilde{\chi}_\mu, \\ \tilde{l}_\tau &\leftrightarrow \tilde{\chi}_\gamma, & \tilde{l}_\mu &\leftrightarrow \tilde{\chi}_\gamma, & \tilde{l}_e &\leftrightarrow \tilde{\chi}_\gamma \end{aligned}$$

動力的平衡の凍結温度はスレプトン混合に強く依存。**混合が大きいほどスレプトンは減少。**



Li7(Li6)問題を解決するためにはスレプトンを数多く残さないといけない

➡ **スレプトン混合に上限**

➡ **ニュートリノ湯川の各成分に上限**
 ≈ **右巻きニュートリノの質量に上限**

宇宙論的制限からニュートリノ湯川行列の制限へ

“物理量”を用いて書き直したニュートリノ湯川行列 (Casas-Ibarra parametrization)

$$\lambda_{\alpha j} = v^{-1} \left[\sqrt{M} R \sqrt{m} U^\dagger \right]_{\alpha j}$$

J. A. Casas and A. Ibarra, NPB618 (2001)

複素直交行列 $R = \begin{pmatrix} \tilde{c}_{13}\tilde{c}_{12} & \tilde{c}_{13}\tilde{s}_{12} & \tilde{s}_{13} \\ -\tilde{c}_{23}\tilde{s}_{12} & \tilde{c}_{23}\tilde{c}_{12} - \tilde{s}_{23}\tilde{s}_{13}\tilde{s}_{12} & \tilde{s}_{23}\tilde{c}_{13} \\ \tilde{s}_{23}\tilde{s}_{12} - \tilde{c}_{23}\tilde{s}_{13}\tilde{c}_{12} & -\tilde{s}_{23}\tilde{c}_{12} - \tilde{c}_{23}\tilde{s}_{13}\tilde{s}_{12} & \tilde{c}_{23}\tilde{c}_{13} \end{pmatrix}$

角度引数が複素数！

$$z_{ij} = x_{ij} + \sqrt{-1} y_{ij}$$

実部 x_{ij} ・虚部 y_{ij} 合わせて18自由度

張れる空間が大き過ぎるため、
一般的には、予言らしい予言は
できない

しかも、ニュートリノ振動実験から一切制限付けられず

宇宙論的制限から

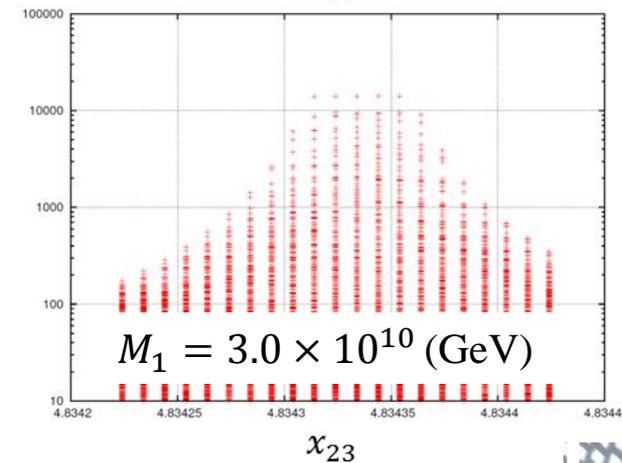
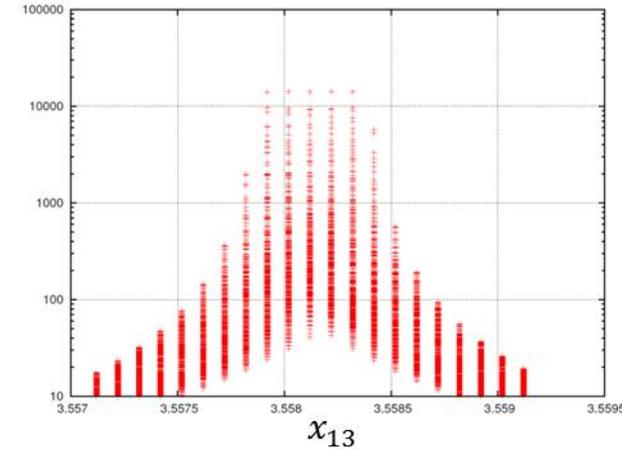
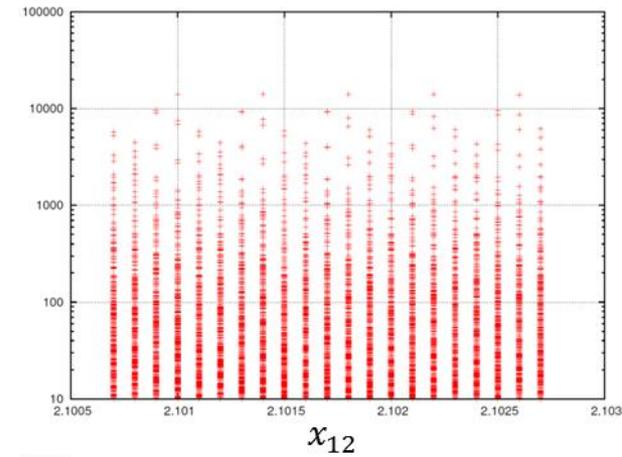
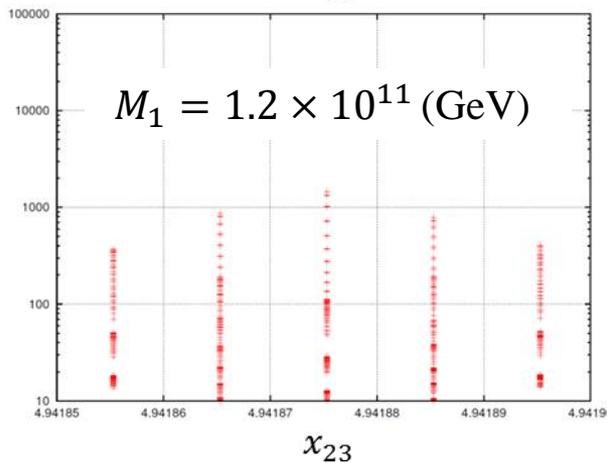
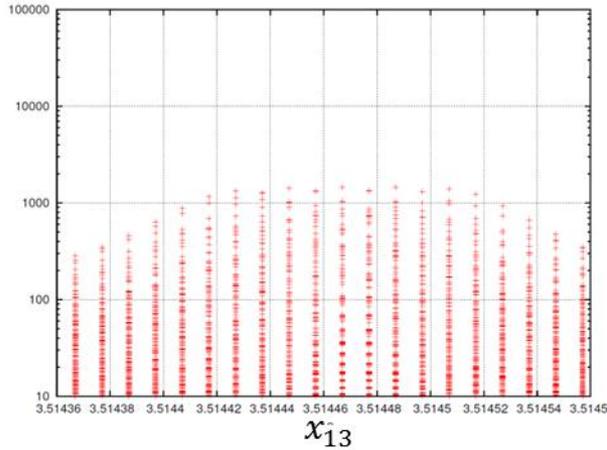
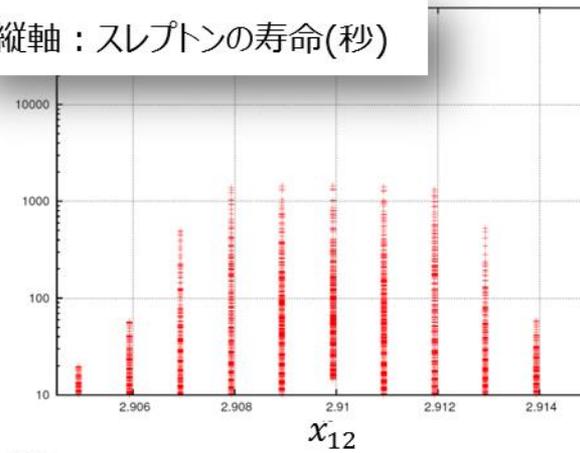
縦軸：スレプトンの寿命(秒)

「スレプトンを長寿命に」という要請が R の構造と右巻きニュートリノ質量を極めて強く制限

R の成分をわずかに動かすだけでスレプトン混合が大きく変動

M_1 が大きくするとニュートリノ湯川が大きくなり、やはりスレプトン混合が過大に

スレプトンの寿命、つまり、軽元素存在量の要請が R の構造制限と M_1 の上限導出を可能に



DMやBBNから絞り込んだマヨラナ質量とニュートリノ湯川を用いて、物質・反物質非対称を算出

フレーバー効果込のレプトン数計算

R. Barbieri, P. Creminelli, A. Strumia, N. Tetradis, NPB575 (2000)
E. Nardi, Y. Nir, E. Roulet, J. Racker, JHEP01 (2006)

ニュートリノ湯川構造から導かれるスレプトン混合が本研究のカギ

➡ 物質・反物質非対称も湯川構造に起因するフレーバー効果を取り入れ丁寧に

右巻きニュートリノ、および、各フレーバーのレプトン数密度の連立時間発展方程式

$$\frac{dY_{N_1}}{dz} = -\frac{z}{sH(z=1)} \left(\frac{Y_{N_1}}{Y_{N_1}^{eq}} - 1 \right) [\gamma_D + 2\gamma_{S_s} + 4\gamma_{S_t}]$$

$$\begin{aligned} \frac{dY_{\Delta_i}}{dz} = & -\frac{z}{sH(z=1)} \left\{ \left(\frac{Y_{N_1}}{Y_{N_1}^{eq}} - 1 \right) \epsilon_{1i} \gamma_D + K_i^0 \sum_j \left[\frac{1}{2} (C_{ij}^l + C_j^H) \gamma_D \right. \right. \\ & \left. \left. + \left(\frac{Y_{N_1}}{Y_{N_1}^{eq}} - 1 \right) \left(C_{ij}^l \gamma_{S_s} + \frac{C_j^H}{2} \gamma_{S_t} \right) + (2C_{ij}^l + C_j^H) \left(\gamma_{S_t} + \frac{\gamma_{S_s}}{2} \right) \right] \frac{Y_{\Delta_i}}{Y_l^{eq}} \right\} \end{aligned}$$

- $Y_i = n_i/s$ (s : エントロピー密度)
- $z = M_1/T$ (M_1 : 右巻きニュートリノの質量)
- γ_D ($\gamma_{S_s}, \gamma_{S_t}$): 熱平均崩壊率 (熱平均断面積)

フレーバー効果込のレプトン数計算

- フレーバー- j のレプトン数 ($n_{l_j} - n_{\bar{l}_j}$) から
フレーバー- i のレプトン数への転換率

- ニュートリノ湯川構造で決まる
フレーバーごとの崩壊パラメーター

- $Y_{L_i} = -(C_{ie}^l Y_{\Delta_e} + C_{i\mu}^l Y_{\Delta_\mu} + C_{i\tau}^l Y_{\Delta_\tau})$

- フレーバー効果込のCP非対称

$$\frac{dY_{\Delta_i}}{dz} = -\frac{z}{sH(z=1)} \left\{ \left(\frac{Y_{N_1}}{Y_{N_1}^{eq}} - 1 \right) \left[\epsilon_{1i} \gamma_D + K_i^0 \sum_j \left[\frac{1}{2} (C_{ij}^l + C_j^H) \gamma_D \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \left(\frac{Y_{N_1}}{Y_{N_1}^{eq}} - 1 \right) \left(C_{ij}^l \gamma_{S_s} + \frac{C_j^H}{2} \gamma_{S_t} \right) + (2C_{ij}^l + C_j^H) \left(\gamma_{S_t} + \frac{\gamma_{S_s}}{2} \right) \right] \frac{Y_{\Delta_i}}{Y_l^{eq}} \right\}$$

- “ヒッグス数”からフレーバー- j のレプトン数への転換率

- $Y_H - Y_{\bar{H}} = -(C_e^H Y_{\Delta_e} + C_\mu^H Y_{\Delta_\mu} + C_\tau^H Y_{\Delta_\tau})$

フレーバー効果込のレプトン数計算

各温度において、平衡反応により各粒子の化学ポテンシャル間に関係式

関係式同士の連立方程式を解くことで転換率が決まる

J. A. Harvey and M. S. Turner, PRD42 (1990)

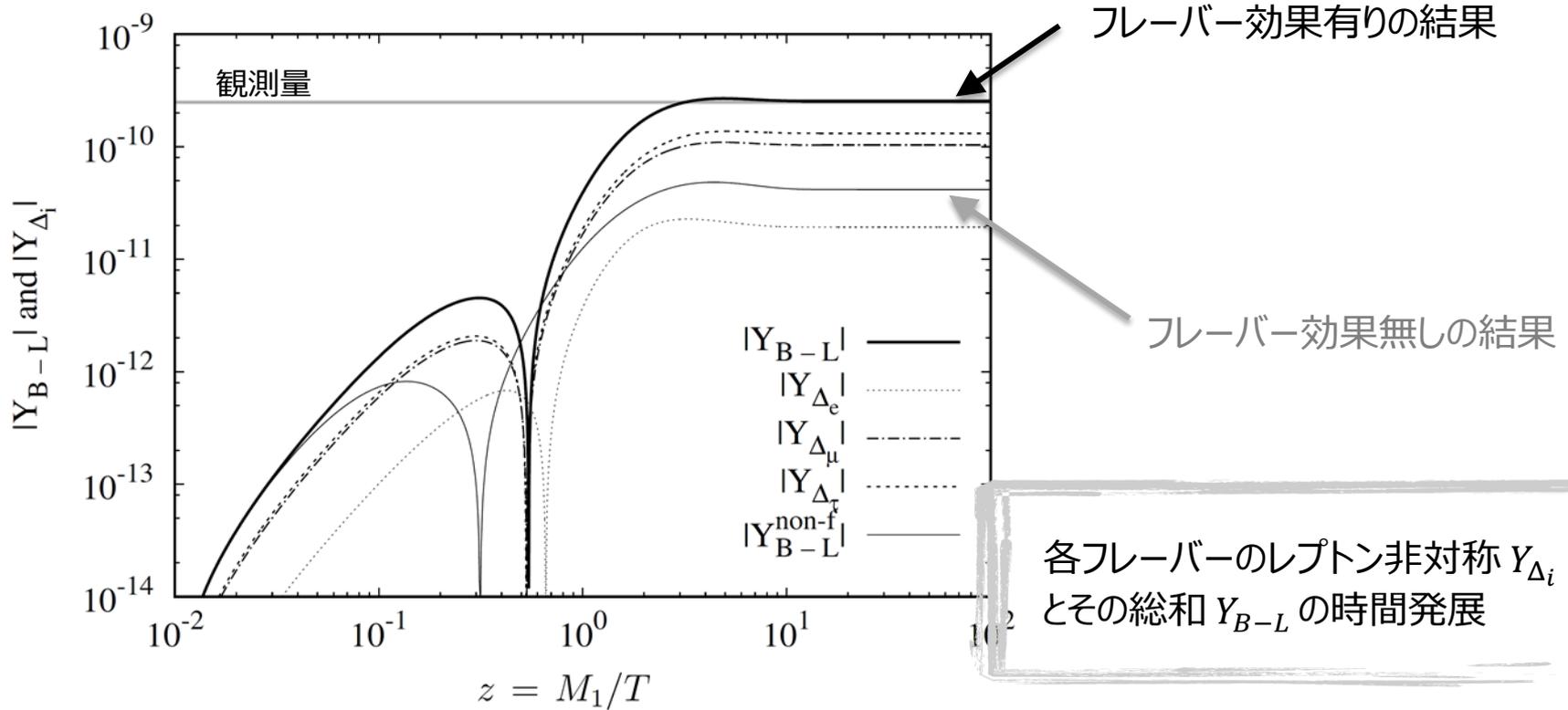
E. Nardi, Y. Nir, E. Roulet and J. Racker, JHEP01 (2006)

| T (GeV) | 平衡状態にある反応 | 化学ポテンシャルの関係式 |
|---------------------|--------------------------|---|
| $10^{12} - 10^{13}$ | + h_b, h_τ 相互作用 | $b = Q_3 - H$ $\tau = l_\tau - H$ |
| $10^{11} - 10^{12}$ | + 電弱スファレロン | $\sum_i (3Q_i + l_i) = 0$ |
| $10^8 - 10^{11}$ | + h_c, h_s, h_μ 相互作用 | $c = Q_2 + H$ $s = Q_2 - H$ $\mu = l_\mu - H$ |
| $\ll 10^8$ | 全ての湯川相互作用 | $u = Q_1 + H$ $d = Q_1 - H$ $e = l_e - H$ |

$$C_{\alpha\beta}^l = \frac{1}{3 \times 2148} \begin{pmatrix} 906 & -120 & -120 \\ -75 & 688 & -28 \\ -75 & -28 & 688 \end{pmatrix}, \quad C^H = \frac{1}{2148} \begin{pmatrix} 37 & 52 & 52 \end{pmatrix}$$

3. 数値計算による解析

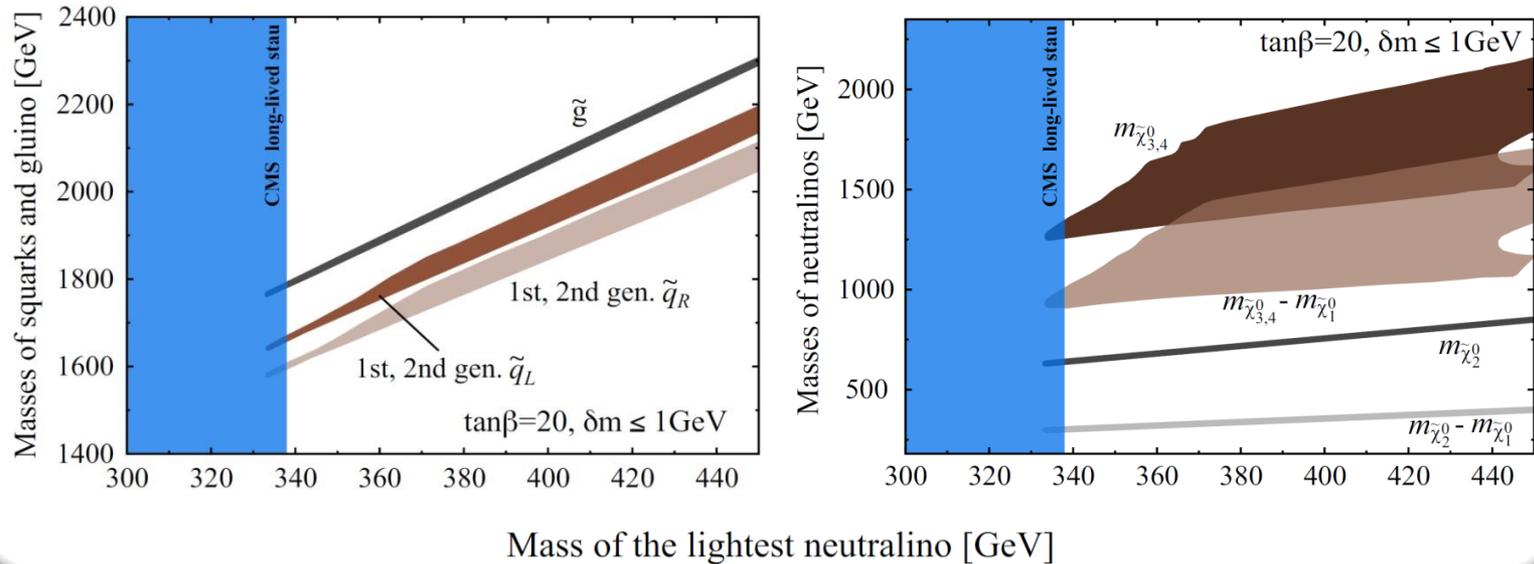
本シナリオにおける物質・反物質非対称



本シナリオは、暗黒物質や軽元素の存在量に加え、物質・反物質非対称も見事に説明可能

フレーバー効果で大きく増加するので、正しく $(y_\nu)_{\alpha i}$ を決めるにはこの効果込みの解析が不可欠

加速器における特徴的シグナル



- ☑ $m_{\tilde{q}}$ と $m_{\tilde{g}}$ が $m_{\tilde{\chi}_1^0}$ に対しシャープな比例関係 (from $\delta m < m_{\tau}$)

$m_{\tilde{q}}$ ($= m_{\tilde{\chi}_1^0}$) の測定から $m_{\tilde{q}}$ と $m_{\tilde{g}}$ をはっきりと予測可能、また、 $m_{\tilde{g}} \lesssim 2\text{ TeV}$

- ☑ 重い長寿命荷電粒子のトラックとミッシングエネルギーがほぼ同数

- ☑ 軽めのストップ ($m_{\tilde{t}} \sim 1\text{ TeV}$) ($m_H = 125\text{ GeV}$ を得るために A_0 を大きく取るため)

BR(LFV decay) vs M_1

暗黒物質、軽元素、物質・反物質非対称、ヒッグス質量等の制限に整合するパラメーターがもたらす予言

- 近未来、ミューオンLFVを通じてシナリオの検証が可能

MEG-II, Mu3e, COMET, Mu2e, DeeMeに期待

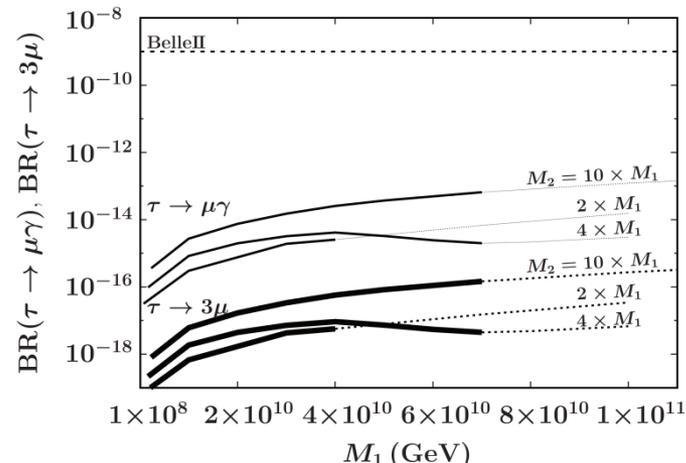
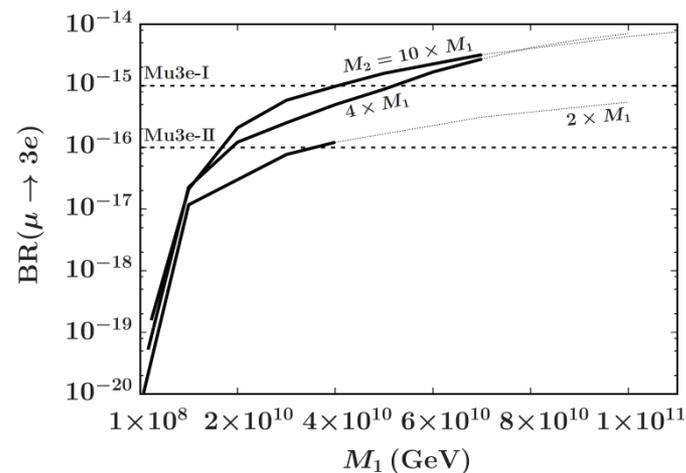
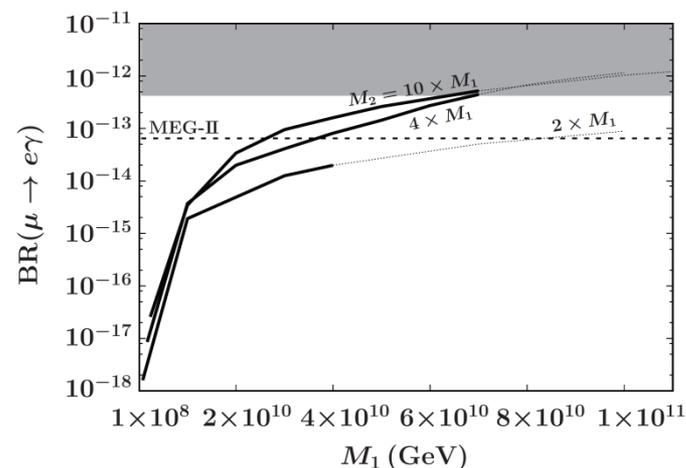
- タウLFVは全く期待できないほど小さな崩壊分岐比

理由は簡単：スタウ主成分のスレプトンを長寿命にするため、スタウと他のスレプトンとの混合が極小

- M_1 の下限は物質・反物質非対称の整合性から

M_1 が小さ過ぎる場合、つまり、ニュートリノ湯川が小さ過ぎる場合、十分なレプトン非対称を作れない

それどころか、右巻きニュートリノを熱化できない



4. まとめ

まとめ

新物理の有力候補: CMSSM

- ・ 力・物質の統一
- ・ 階層性問題
- ・ などなど

- $\tilde{\ell}-\tilde{\chi}$ 共対消滅機構
- ・ 暗黒物質の残存量

$$\delta m < m_\tau$$

- ・ Li7(Li6)問題解決
- ・ ヒッグス質量
- ・ ミューオンのg-2

まとめ

新物理の有力候補: CMSSM

- ・ 力・物質の統一
- ・ 階層性問題
- ・ などなど

シーソー機構

- ・ 物質・反物質非対称
- ・ ニュートリノ質量

M_1 に対しフレーバー効果付きSUSYレプトジェネシスより下限、BBNより上限

➡ レプトンフレーバーの破れに対し特徴的予言

- $\tilde{\ell}-\tilde{\chi}$ 共対消滅機構
- ・ 暗黒物質の残存量

$$\delta m < m_\tau$$

- ・ Li7(Li6)問題解決
- ・ ヒッグス質量
- ・ ミューオンのg-2

**共対消滅機構とシーソー機構を併せ持つ
CMSSMは確かにこの宇宙を記述できる!**

Backup slides

Coannihilation mechanism k. Griest, D. Seckel (1991)

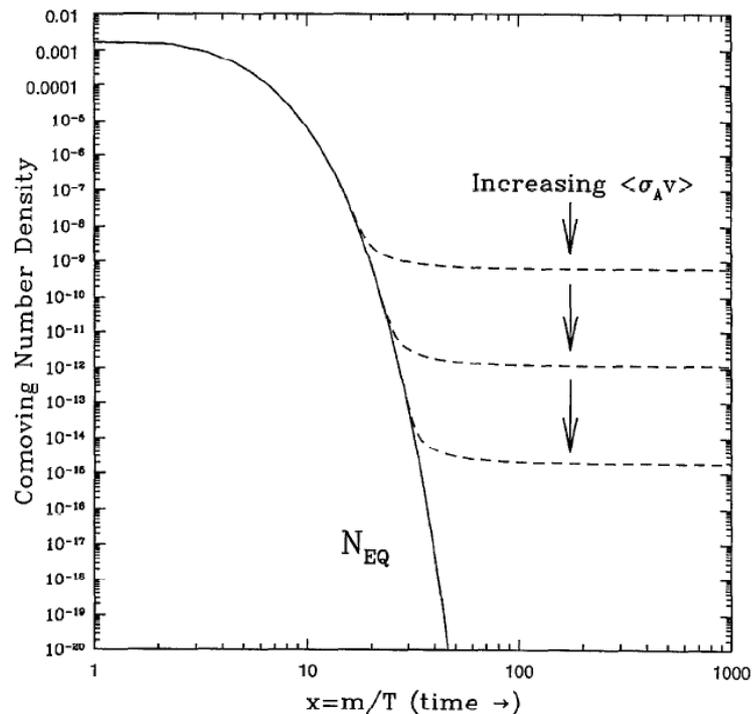
共対消滅機構 (Coannihilation mechanism)

$$m_{\tilde{\chi}} \simeq m_{\tilde{\ell}}$$

→ $\tilde{\chi} + \text{SM} \rightarrow \tilde{\ell} + \text{SM}$ の反応率増大

→ $\tilde{\ell} + \tilde{\ell} \leftrightarrow \text{SM} + \text{SM}$ により超対称粒子と標準理論粒子の化学平衡維持

平衡が長く維持され、超対称粒子の数 (= 暗黒物質の数) は統計分布関数に従い十分に減少



Flavored leptogenesisの影響の例

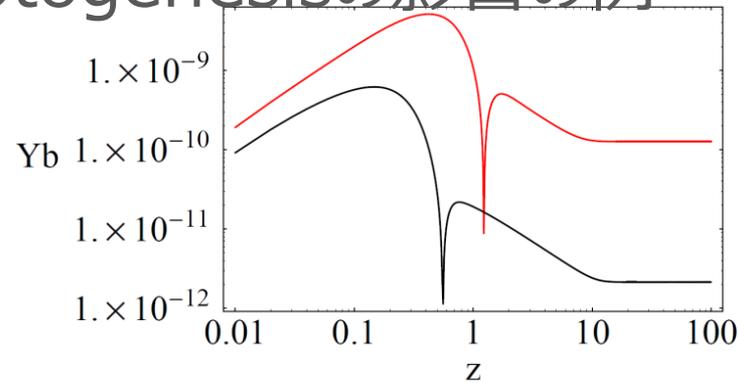


Figure 1: The total baryon asymmetry including flavours (upper) and within the one-flavour approximation (lower) as a function of z . The chosen parameters are $K_{ee} = 10$, $K_{\mu\mu} = 30$, $K_{\tau\tau} = 30$, $\epsilon_{ee} = 2.5 \times 10^{-6}$, $\epsilon_{\mu\mu} = -2 \times 10^{-6}$, $\epsilon_{\tau\tau} = 10^{-7}$ and $M_1 = 10^{10}$ GeV.

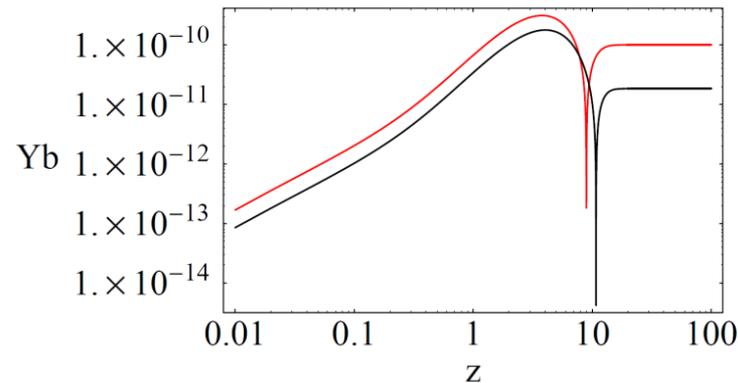
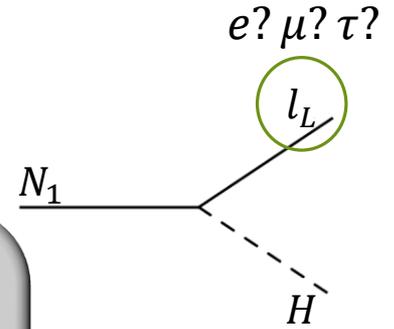


Figure 2: The total baryon asymmetry including flavours (upper) and within the one-flavour approximation (lower) as a function of z . The chosen parameters are $K_{ee} = 5 \times 10^{-2}$, $K_{\mu\mu} = 10^{-2}$, $K_{\tau\tau} = 10^{-3}$, $\epsilon_{ee} = 2.5 \times 10^{-6}$, $\epsilon_{\mu\mu} = -2 \times 10^{-6}$, $\epsilon_{\tau\tau} = 10^{-7}$ and $M_1 = 10^{10}$ GeV.

フレーバー効果が現れる温度は？



$T \gtrsim 10^{12}$ GeV

- ☑ 宇宙はレプトンフレーバーを“観測”しない
- ☑ N_1 崩壊で生成されたレプトンはコヒーレントな状態のまま
- ☑ 生み出される物質・反物質非対称にフレーバーの効果は現れず

$T \lesssim 10^{12}$ GeV

- ☑ 宇宙はレプトンフレーバーを“観測”可能
- ☑ N_1 崩壊で生成されたレプトンはもはや相互作用の固有状態に非ず、各フレーバーの固有状態に射影される
- ☑ レプトン非対称の生成・時間発展がフレーバー依存し大きく変化

フレーバー効果によりなぜ物質・反物質非対称が増大？

一旦レプトンが相互作用状態からフレーバー固有状態に射影されると、電子数、ミューオン数、タウ数それぞれが別個に時間発展

各フレーバー非対称性はフレーバー崩壊パラメーターでコントロールされる

フレーバー崩壊パラメーター

$$K_e = \frac{\Gamma(N_1 \rightarrow l_e H)}{H(T = M_1)} = K \cdot \text{BR}(N_1 \rightarrow l_e H)$$

$$K_\mu = \frac{\Gamma(N_1 \rightarrow l_\mu H)}{H(T = M_1)} = K \cdot \text{BR}(N_1 \rightarrow l_\mu H)$$

$$K_\tau = \frac{\Gamma(N_1 \rightarrow l_\tau H)}{H(T = M_1)} = K \cdot \text{BR}(N_1 \rightarrow l_\tau H)$$

フレーバー効果によりなぜ物質・反物質非対称が増大？

大きな K で十分に右巻きニュートリノを生成（生成には全てのフレーバーが寄与）

$K_e \sim K_\mu \sim 1$ であり、電子(ミュオン)数の洗い流しはほとんど起こらず

例えば、 $K = 5$ としてみると

フレーバー崩壊パラメーター

$$K_e = \frac{\Gamma(N_1 \rightarrow l_e H)}{H(T = M_1)} = K \cdot \text{BR}(N_1 \rightarrow l_e H) = 0.1K$$

$$K_\mu = \frac{\Gamma(N_1 \rightarrow l_\mu H)}{H(T = M_1)} = K \cdot \text{BR}(N_1 \rightarrow l_\mu H) = 0.2K$$

$$K_\tau = \frac{\Gamma(N_1 \rightarrow l_\tau H)}{H(T = M_1)} = K \cdot \text{BR}(N_1 \rightarrow l_\tau H) = 0.7K$$

試しに選んだ崩壊分岐比