



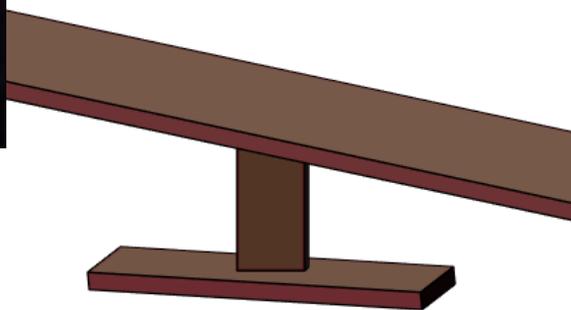
遼寧師範大學

Liaoning Normal University



物理与电子技术学院
School of Physics and Electronic
Technology, LNNU

轻子生成介绍



赵振华 辽宁师范大学

江门中微子暑期学校 2023

2023年6月20-29日 广东江门开平市

目录

- **正反物质不对称与重子生成**
- 轻子生成机制：标准情形
- 轻子生成机制：非标准情形
- 其它方面
- 总结与展望

宇宙正反物质不对称



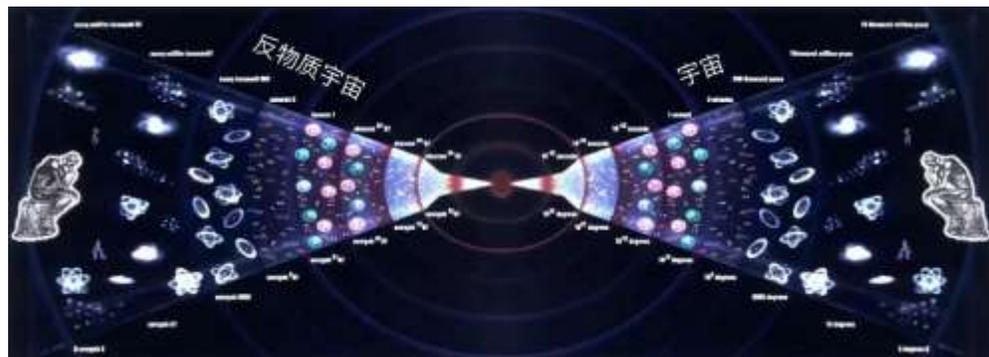
狄拉克 (1902-1984)

1928年，**狄拉克**方程首先从理论上预言了存在**正电子**

1932年，美国物理学家**安德森**利用云室发现了正电子

量子场论+实验证实：每一种粒子都有自己的反粒子

CPT定理：粒子与其反粒子具有相同的质量、寿命等



自然的猜想：宇宙中正、反物质的数量一样多

反物质会和周围的物质发生湮灭产生大量辐射，

未观测到这种现象，表明**宇宙主要由物质组成**

宇宙正反物质不对称度

两种**定量**的表示方法:

$$\eta \equiv \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma}$$

n_B : 正重子密度

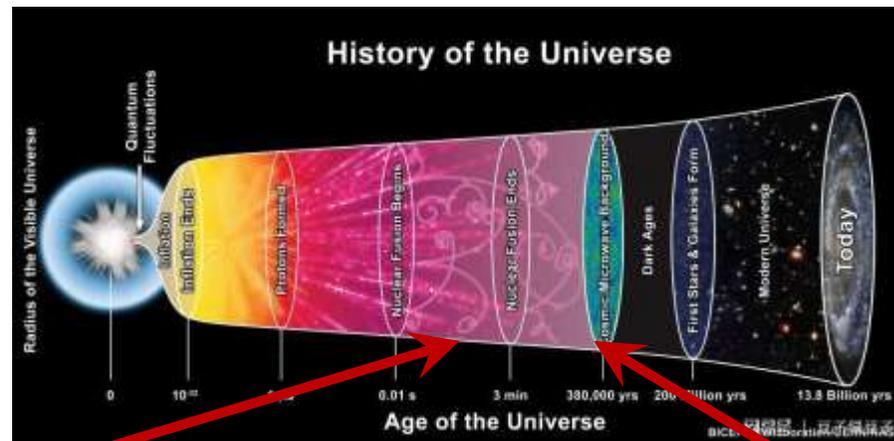
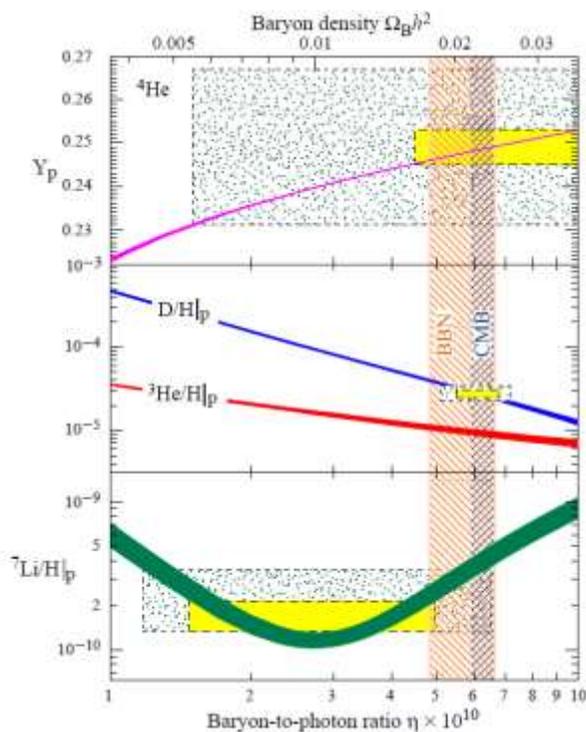
$n_{\bar{B}}$: 反重子密度

n_γ : 光子数密度

$$Y_B \equiv \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{s} \simeq \eta/7.04$$

s : 熵密度

两种**宇宙学**测量方法:

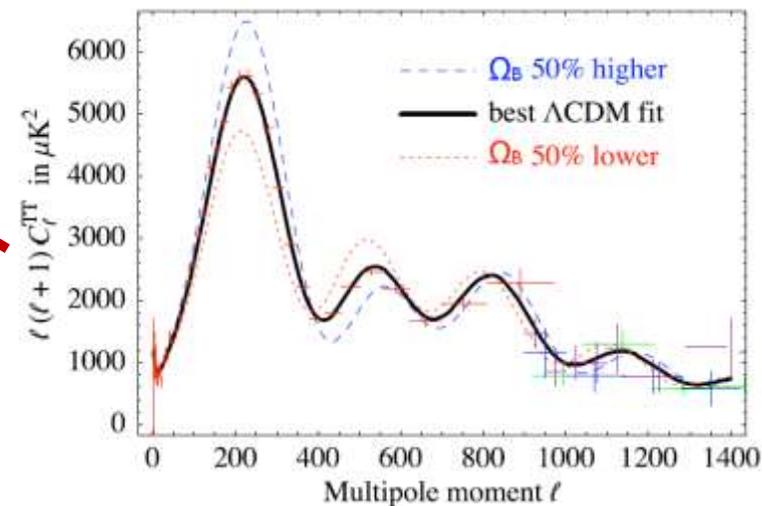


$$\eta \simeq (6.12 \pm 0.03) \times 10^{-10}$$

Aghanim et al. (Planck), 1807.06209

正反物质不对称的出现**早于核合成**

CMB (eV): 各向异性与 Ω_B

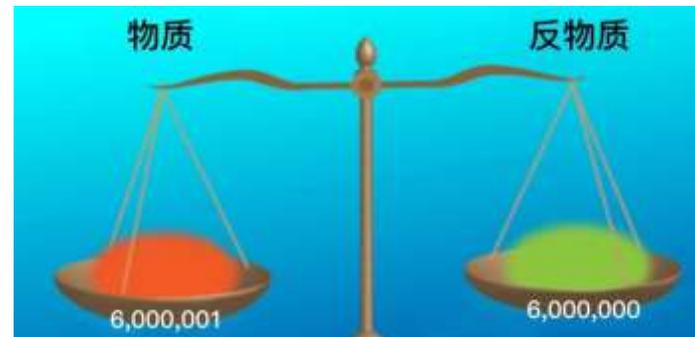


BBN (MeV): 轻核丰度与 η

初始条件 or 动力学产生

重子不对称作为**初始条件**面临的问题:

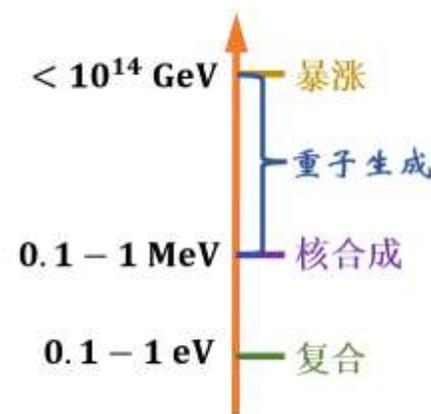
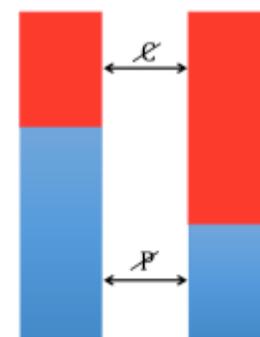
- 精细调节问题: **6000000**个反重子vs **6000001**个重子
- 早期宇宙的**暴涨**会将原初重子不对称指数式稀释掉



萨哈罗夫(1921-1989)

动力学产生: 萨哈罗夫三条件 Sakharov, Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. (1967)

- **重子数破坏:** $X \rightarrow p^+ e^-$
- **C/CP 破坏:** $\Gamma(X \rightarrow p^+ e^-) \neq \Gamma(\bar{X} \rightarrow p^- e^+)$
- **偏离热平衡:** $\Gamma(X \rightarrow p^+ e^-) \neq \Gamma(p^+ e^- \rightarrow X)$



电弱重子生成

SM定性上满足萨哈罗夫三条件

- CP破坏由CKM矩阵的 δ 相位提供、对热平衡的偏离由电弱相变实现

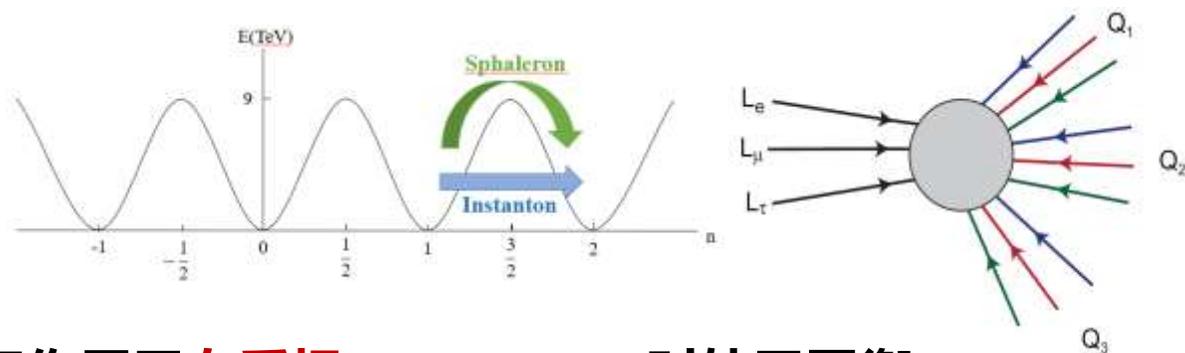
- 三角反常使得B、L在量子层面被破坏

$$\partial_\mu J_B^\mu = \partial_\mu J_L^\mu = \frac{N_f}{32\pi^2} \left(g^2 W_{\mu\nu}^p \tilde{W}^{p\mu\nu} - g'^2 B_{\mu\nu} \tilde{B}^{\mu\nu} \right)$$

非阿贝尔规范场有无穷多简并的真空，

sphaleron过程导致不同真空空间的跃迁：

$\Delta B = \Delta L = \pm 3$ Klinkhamer, Manton, PRD (1984)

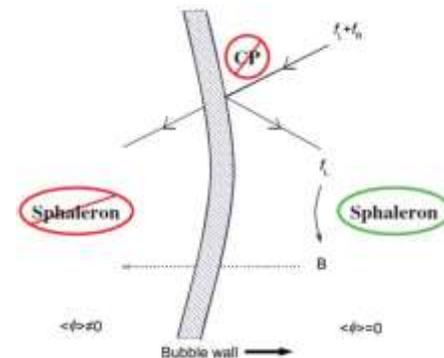


特点：B和L相互转换，但B-L保持守恒；仅作用于左手场； $T > 130 \text{ GeV}$ 时处于平衡

定量上不成功 Trodden, 9803479

- CP破坏强度太弱、电弱相变非所需的强一级相变(需要 $m_h < 72 \text{ GeV}$)

- 需要改变电弱相变的性质、新的CP破坏来源：2HDM、MSSM 等



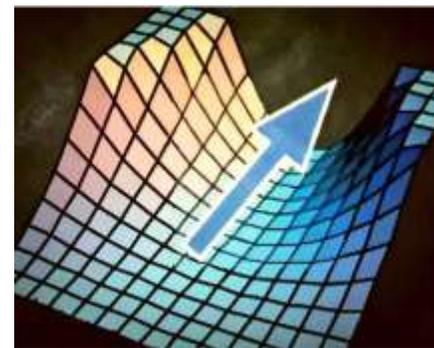
其它代表性重子生成模型

大统一理论重子生成

- 引入了**新粒子和新相互作用**，普遍存在 B 和 CP 破坏：如质子衰变
- 偏离热平衡：随着宇宙**膨胀&冷却**，**重粒子的衰变**逐渐偏离热平衡
- 问题：**质子衰变实验的结果为重粒子的质量(重加热温度 T_{reh})设置了 10^{15} GeV的下限**
产生**gravitino**等危险的残余粒子；与**CMB各向异性**观测结果设置的上限冲突

Affleck-Dine机制 Affleck, Dine, NPB (1985)

- 一个**携带重子数**的经典场沿**势能平坦方向**获得一个大的**期望值**
随后滚向势能原点，最终衰变为粒子，并伴随着重子数的产生
- 在**超对称模型**中可以自然实现：**squark**、**slepton**场的某个组合可以扮演该场的角色



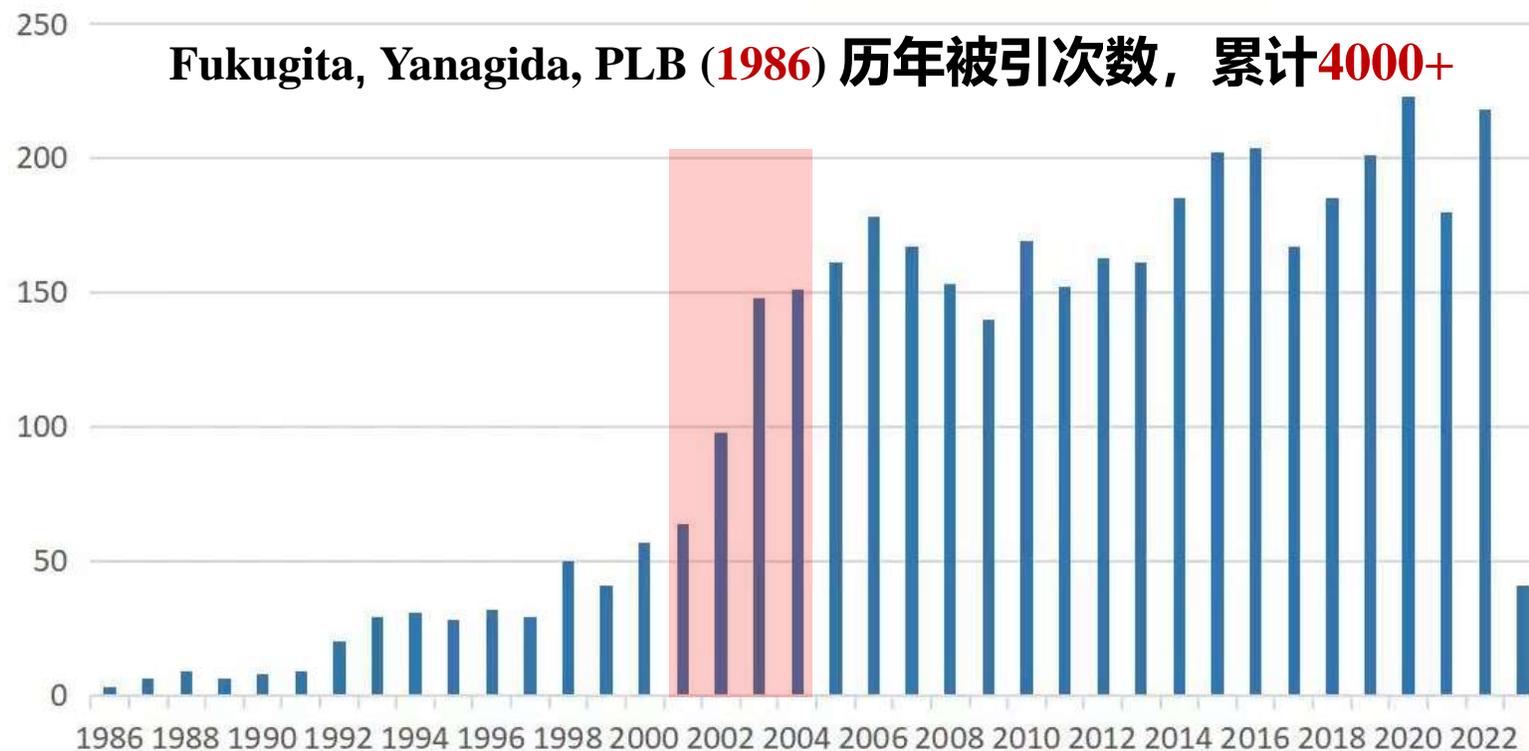
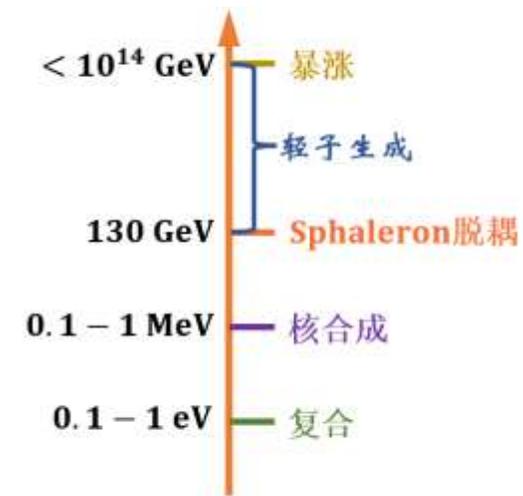
目录

- 正反物质不对称与重子生成
- **轻子生成机制：标准情形**
- 轻子生成机制：非标准情形
- 其它方面
- 总结与展望

轻子生成

基本思想：首先产生**轻子不对称**，然后借助**sphaleron过程**转化为**重子不对称**

化学势分析给出 $Y_B \approx -1/3 Y_L$ (**反轻子 > 轻子**) Harvey, Turner, PRD (1990)



Fukugita



Yanagida

2000年后激增：各类重子生成模型有自身的问题；实验上确立了**中微子振荡现象**

跷跷板模型与轻子生成

中微子振荡表明中微子具有**非零的质量**，因此需要对SM做扩展

第一类跷跷板模型：在SM中引入3个**右手中微子** N_I

$$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}, u_R, d_R$$

$$\begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}, e_R \quad ?$$

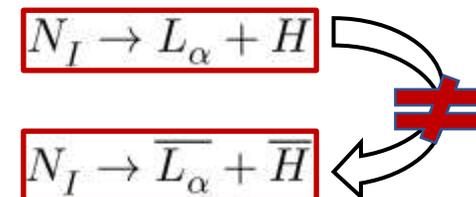
$$(Y_\nu)_{\alpha I} \bar{L}_\alpha H N_I + M_I \bar{N}_I^c N_I \implies (\bar{\nu}_\alpha, \bar{N}_I^c) \begin{pmatrix} 0 & M_D \\ M_D^T & M_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\alpha^c \\ N_I \end{pmatrix} \implies M_\nu \simeq -M_D M_N^{-1} M_D^T$$

Fritzsch et al., PLB (1975); Minkowski, PLB (1977); Yanagida, Conf. Proc. C (1979);

Gell-Mann, Conf. Proc. C (1979); Glashow, NATO Sci. Ser. B (1980); Mohapatra, Senjanovic, PRL (1979)

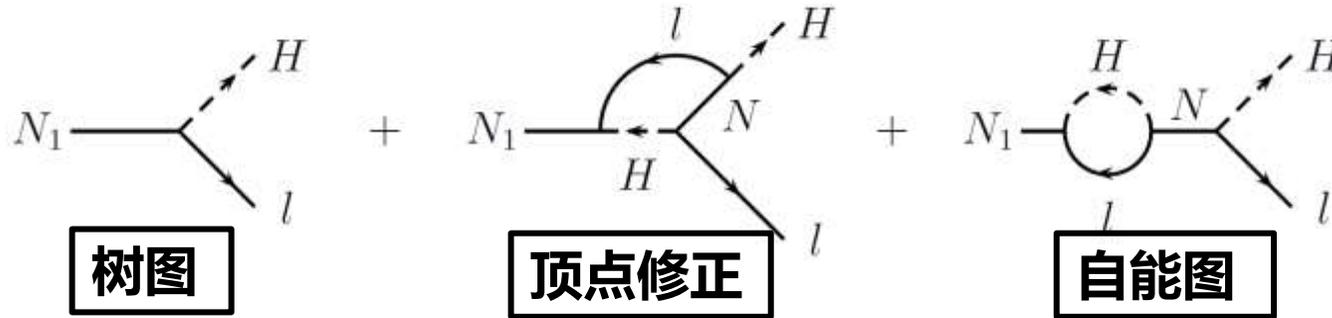
一石二鸟：跷跷板模型自然地满足产生轻子不对称的三个条件

- **轻子数破坏**：右手中微子的**马约拉纳质量**项破坏轻子数守恒
- **CP破坏**：左、右手中微子的**Yukawa系数**提供CP破坏的来源
- **偏离热平衡**：随着宇宙膨胀，**右手中微子的衰变**偏离热平衡



CP不对称

右手中微子衰变的CP不对称由**树图**与**圈图(顶点修正、自能图)**贡献的干涉引起



- **特定味道(e, μ , τ)CP不对称** Luty, PRD (1992); Covi et al., 9605319; Plumacher, 9604229

$$\varepsilon_{I\alpha} \equiv \frac{[\Gamma(N_I \rightarrow L_\alpha + H) - \Gamma(N_I \rightarrow \bar{L}_\alpha + \bar{H})]}{\sum_\alpha [\Gamma(N_I \rightarrow L_\alpha + H) + \Gamma(N_I \rightarrow \bar{L}_\alpha + \bar{H})]}$$

$$= \frac{1}{8\pi(Y_\nu^\dagger Y_\nu)_{II}} \sum_{J \neq I} \left\{ \text{Im} [(Y_\nu^*)_{\alpha I} (Y_\nu)_{\alpha J} (Y_\nu^\dagger Y_\nu)_{IJ}] \mathcal{F} \left(\frac{M_J^2}{M_I^2} \right) + \text{Im} [(Y_\nu^*)_{\alpha I} (Y_\nu)_{\alpha J} (Y_\nu^\dagger Y_\nu)^*_{IJ}] \mathcal{G} \left(\frac{M_J^2}{M_I^2} \right) \right\}$$

- **对味道求和后总的CP不对称**

$$\varepsilon_I = \sum_\alpha \varepsilon_{I\alpha} = \frac{1}{8\pi(Y_\nu^\dagger Y_\nu)_{II}} \sum_{J \neq I} \text{Im} [(Y_\nu^\dagger Y_\nu)_{IJ}^2] \mathcal{F} \left(\frac{M_J^2}{M_I^2} \right)$$

最简单轻子生成情形

- 假设1: 右手中微子质量具有显著等级 ($M_3, M_2 \geq 3M_1$), 仅考虑 N_1 产生的轻子不对称, 假设 N_2, N_3 产生的轻子不对称被 N_1 的相互作用冲刷掉
- 假设2: N_1 衰变产生的轻子其味道组成对最终结果没有影响, 即单味道近似(ϵ_1 起作用)

$$|L_1\rangle \propto (Y_\nu)_{e1}^* |L_e\rangle + (Y_\nu)_{\mu 1}^* |L_\mu\rangle + (Y_\nu)_{\tau 1}^* |L_\tau\rangle$$



$$Y_L = \epsilon_1 \kappa_1 / g^*$$

g^* : 等离子体中相对论性自由度, SM中为106.75

效率因子 $\kappa_1 < 1$ 来自冲刷作用(如逆衰变): 衰变的 N_1 中偏离热平衡的比例

N_1 密度

$$\frac{dN_{N_1}}{dz_1} = -D_1 (N_{N_1} - N_{N_1}^{\text{eq}})$$

+

$$\frac{dN_{B-L}}{dz_1} = -\epsilon_1 D_1 (N_{N_1} - N_{N_1}^{\text{eq}}) - W_1^{\text{ID}} N_{B-L}$$

B-L密度

$$z_1 = M_1/T$$

$$D_1 = \Gamma_{1D}/Hz_1$$

$$W_1^{\text{ID}} = \Gamma_{1\text{ID}}/Hz_1$$

冲刷作用

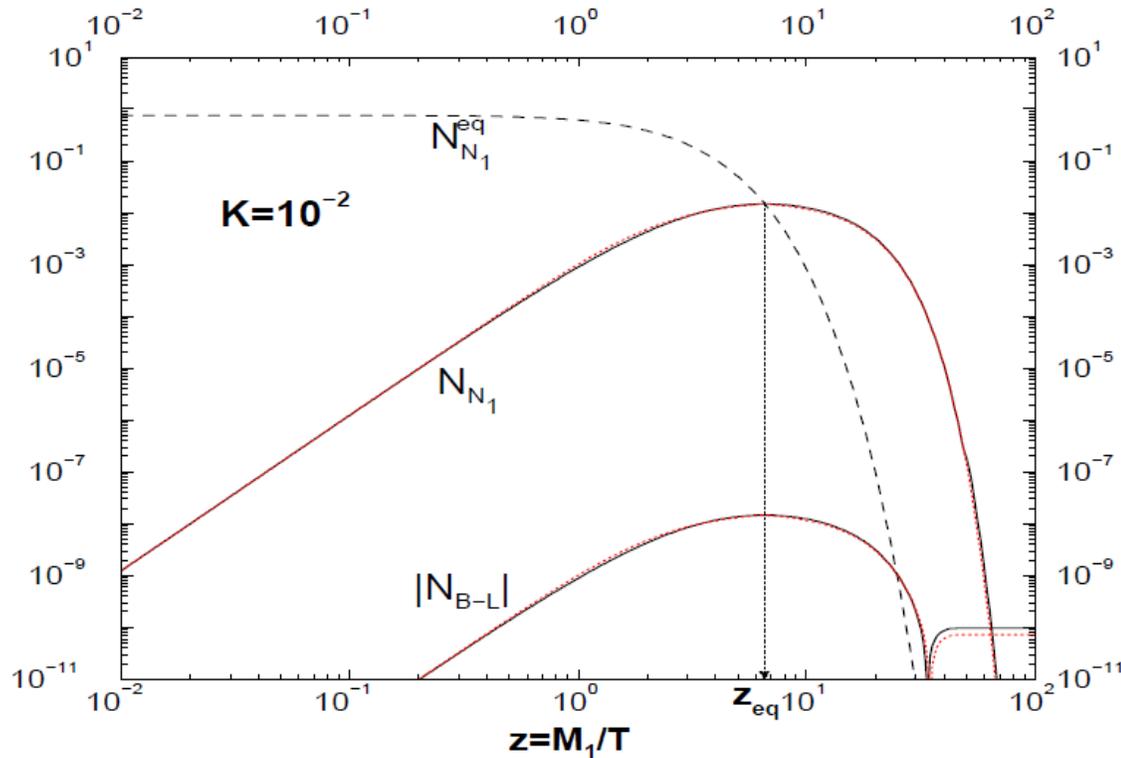
$$\kappa(z) = \frac{4}{3} \int_{z_1}^z dz' D (N_{N_1} - N_{N_1}^{\text{eq}}) e^{-\int_{z'}^z dz'' W(z'')}$$

弱冲刷情形

轻子生成发生于 $T \sim M_1$, N_1 衰变偏离热平衡的条件: $\Gamma_1 < H|_{T=M_1}$

衰变参数 $K_1 = \Gamma_1 / H|_{T=M_1}$ 衡量 N_1 衰变偏离热平衡及冲刷作用的强弱

弱冲刷 ($\Gamma_1 < H$ 即 $K_1 < 1$): 最终的结果将依赖于 N_1 的初始数密度 N_1^0



- $N_1^0=0$: 通过逆衰变产生, $T \sim M_1$ 时达不到平衡
产生和衰变过程中产生的不对称相抵消
由于冲刷效应, 未完全抵消: $\kappa_1 \propto K_1$
- $N_1^0 \neq 0$: 通过其它机制产生, 如inflaton的衰变,
由于冲刷效应弱: $\kappa_1 \approx 1$

Buchmuller, Di Bari, Plumacher, 0401240

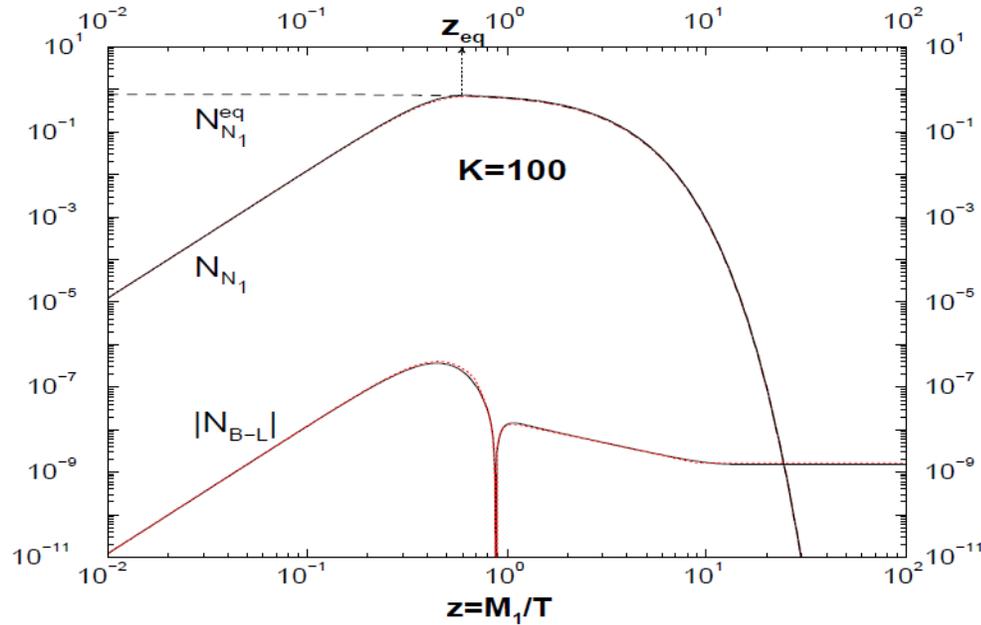
强冲刷情形

强冲刷($\Gamma_1 > H$ 即 $K_1 > 1$): 最终的结果不依赖于初始条件

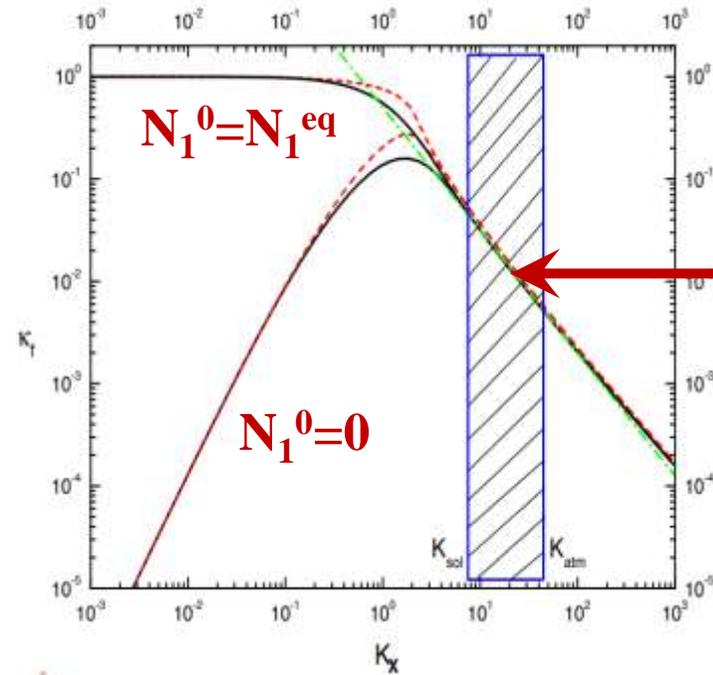
- $T \sim M_1$, N_1 达到平衡数密度, 之前存在的轻子不对称被冲刷掉

$$N_{B-L}^0 \rightarrow N_{B-L}^0 e^{-\frac{3\pi}{8} K_1}$$

- $T < M_1$, N_1 开始衰变, 但直到逆衰变偏离热平衡轻子不对称才得以存活: $\kappa_1 \propto 1/K_1$



Buchmuller, Di Bari, Plumacher, 0401240



中微子振荡
实验结果

Di Bari, 2107.13750

理想情况: 冲刷效应足够强(消除对初始条件的依赖)但又不能太强(确保 κ_1 不能太小)

对中微子参数的限制

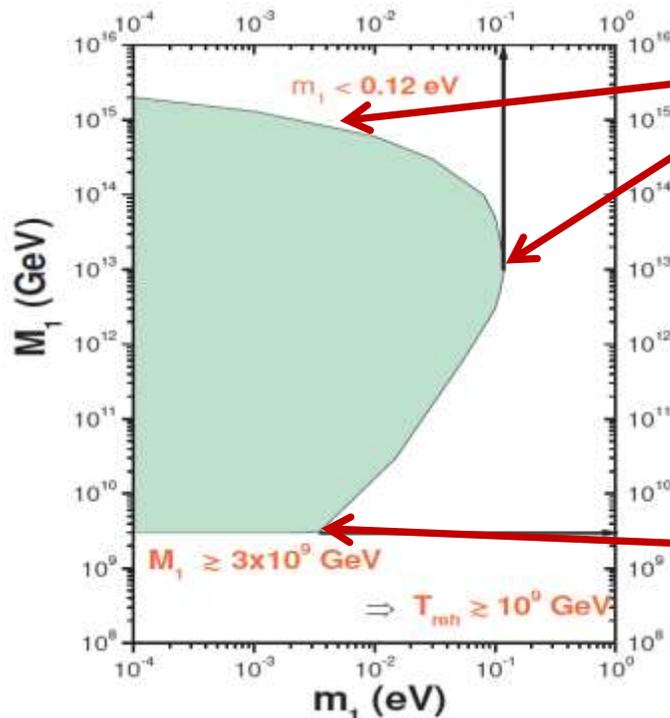
- 低能标CP相位与轻子生成没有任何关系

$$\epsilon_I \propto \text{Im} [(Y_\nu^\dagger Y_\nu)_{IJ}^2]$$

Casas-Ibarra参数化: $Y_\nu = U D_\nu^{1/2} R D_N^{1/2} / v$ Casas, Ibarra, 0103065

U: 中微子混合矩阵, R: 复对称矩阵 $RR^T = 1$, $D_\nu = \text{diag}(m_1, m_2, m_3)$, $D_N = \text{diag}(M_1, M_2, M_3)$

- 轻子生成对 $M_1 - m_1$ 的限制



● N_1 传递的 $\Delta L = 2$ 散射

$$\kappa_1 \propto \exp[-f(K_1) M_1 (m_1^2 + m_2^2 + m_3^2)]$$

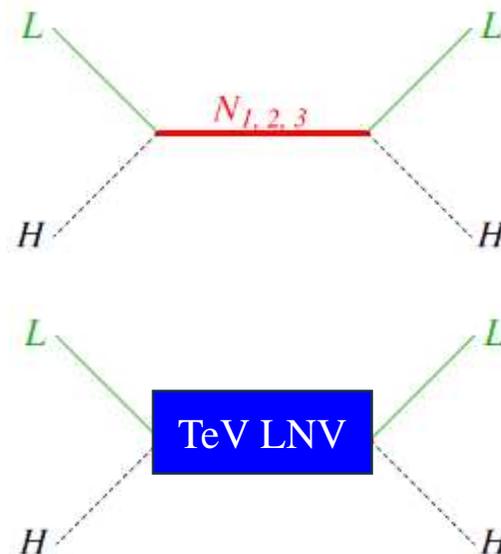
LNV 过程 @ LHC 将否决高能标

轻子生成 Deppisch et al., 1312.4447

● Davidson-Ibarra 上限

Davidson, Ibarra, 0202239

$$|\epsilon_1| \leq \frac{3M_1}{16\pi v^2} (m_3 - m_1)$$



味道效应

味道效应的重要性源自**冲刷效应** Abada et al., 0605281; Nardi et al., 0601084

- **单味道情形**: 仅在 $M_1 > 10^{12} \text{ GeV}$ 时成立, 带电轻子Yukawa($y_\alpha = m_\alpha/v$)相互作用尚未进入热平衡, 量子态 L_1 在参与**逆衰变(冲刷作用)**前相干性演化, 味道组成对最终结果没有影响

- **两味道情形**: 当 $M_1 < 10^{12} \text{ GeV}$, y_τ 相互作用进入热平衡; L_1 在参与逆衰变前与**右手 τ** 相互作用, 被分解为 τ 分量以及 **e 、 μ** 分量的相干叠加态($e\mu$)

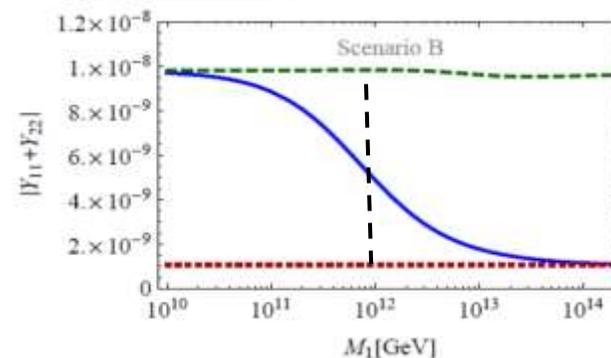
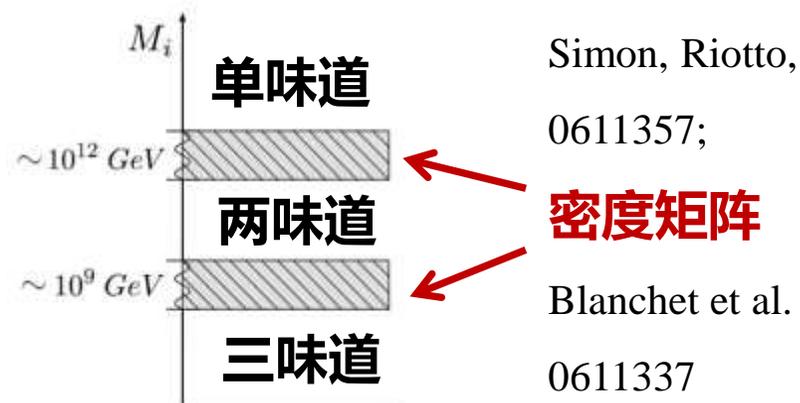
τ 、 $e\mu$ 分量中的CP不对称受到**不同的冲刷效应**

$$Y_L \propto (\varepsilon_{1\tau} \kappa_{1\tau} + \varepsilon_{1e\mu} \kappa_{1e\mu})$$

- **三味道情形**: 当 $M_1 < 10^9 \text{ GeV}$, y_μ 作用将 L_1 分解为 **e 、 μ 、 τ** 分量

e 、 μ 、 τ 分量中的CP不对称受到不同的冲刷效应

$$Y_L \propto (\varepsilon_{1\tau} \kappa_{1\tau} + \varepsilon_{1\mu} \kappa_{1\mu} + \varepsilon_{1e} \kappa_{1e})$$



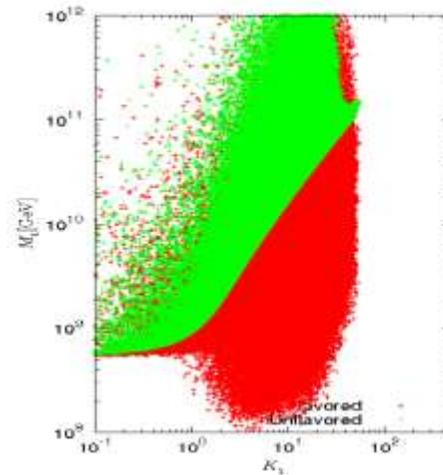
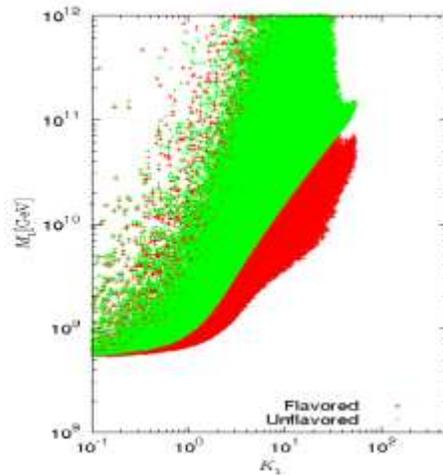
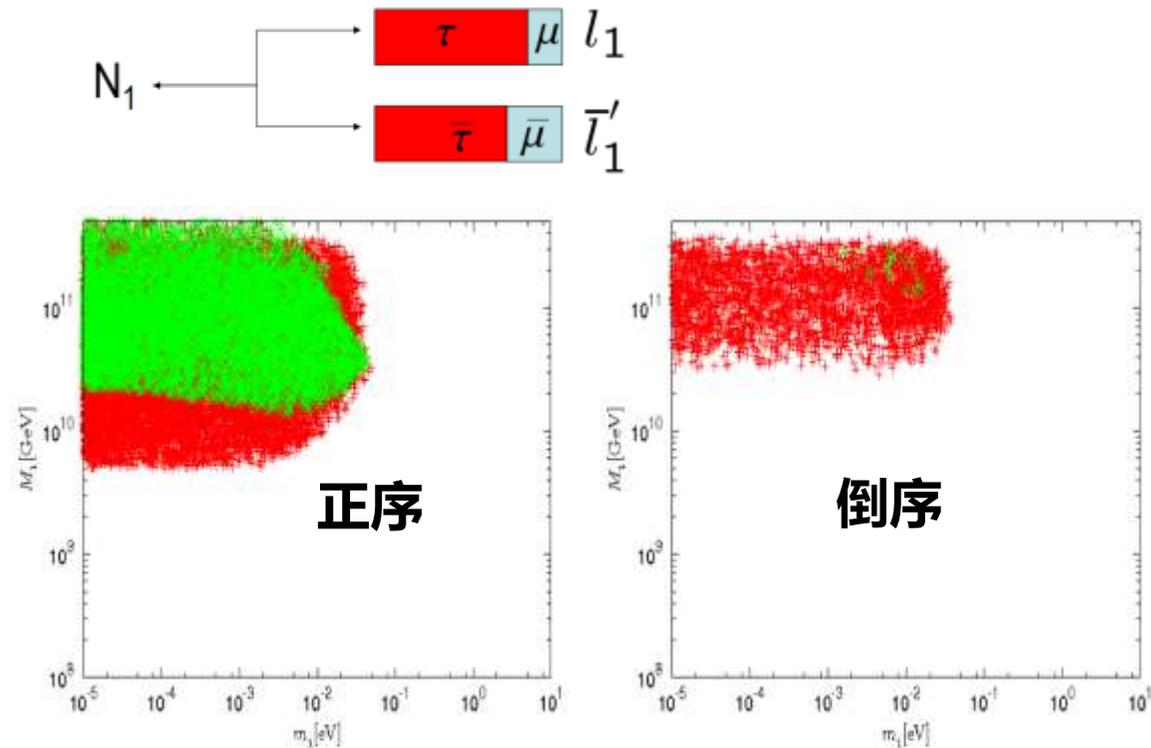
味道效应的影响

- 即使 $\varepsilon_1=0$ ，如果 $\varepsilon_{1\alpha}\neq 0$ ，轻子生成仍可能成功
- **U**保留在 $\varepsilon_{1\alpha}$ 的表达式中，为**低能标CP相位与轻子生成联系**提供了可能 Pascoli et al., 0611338
- 极端可能性：**前者为后者CP破坏的唯一来源**
- **绿**: 只有狄拉克相位；**红**: 只有马约拉纳相位

Blanchet et al., 0807.0743; New: Moffat et al., 1809.08251

- 由于新的CP破坏来源，**对 M_1 的下限得到放松**
- **最小可到 10^6 GeV量级**

Moffat et al., 1804.05066



绿: 无味道效应
 红: 有味道效应
 左: 无精细调节
 右: 有精细调节

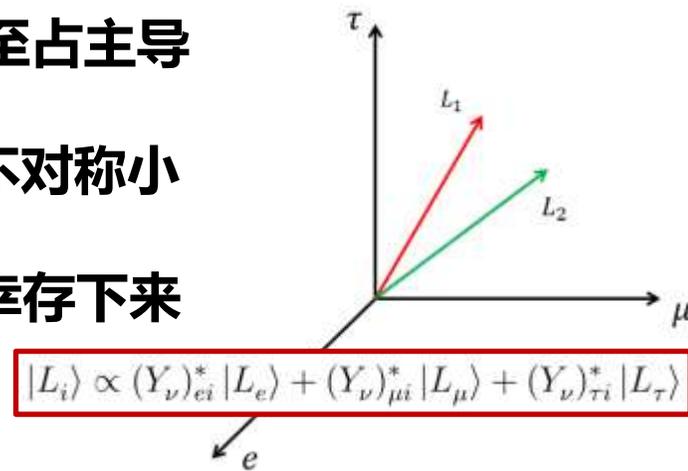
N₂的贡献

很多情况下, N₂衰变产生的(部分)轻子不对称可以逃脱N₁的冲刷, 甚至占主导

- N₁脱耦的情形: N₁的Yukawa耦合很弱 (K₁≪1), 自身产生的轻子不对称小

N₁的冲刷作用弱, N₂衰变产生的轻子不对称可以幸存下来

Di Bari, 0502082; Vives, 0512160



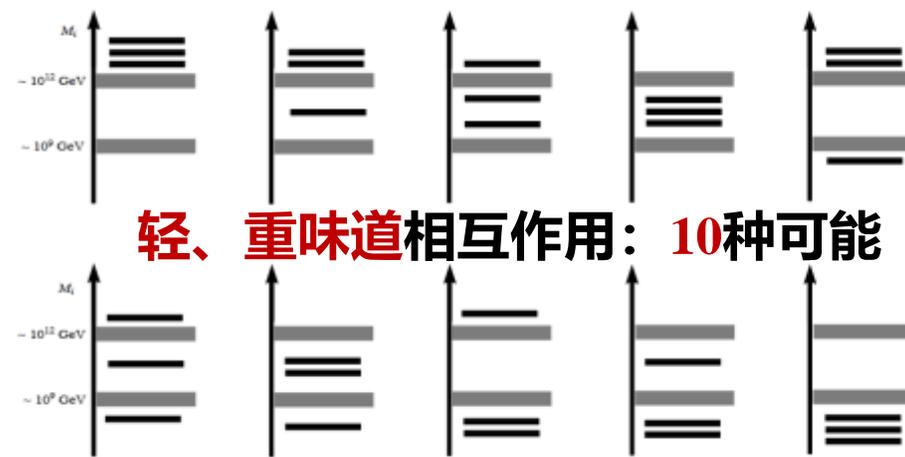
- N₁强耦合情形: 在味道空间L₂与L₁正交的部分不被冲刷

Strumia, 0608347; Engelhard, 0612187

- 考虑味道效应: N₁的冲刷作用在某个味道方向可能较弱

P(K₁<0.1) ≈ 0.1% vs P(K_{1e}<1) ≈ 26% & P(K_{1μ}, K_{1τ}<1) ≈ 7%

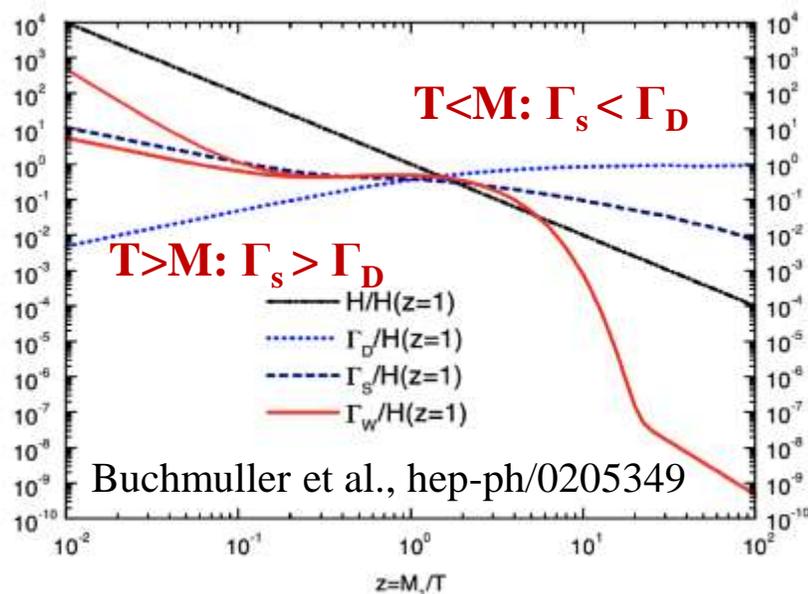
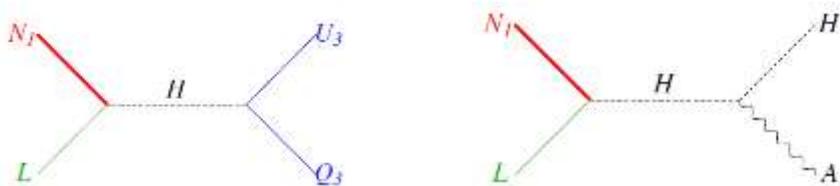
Di Bari, Fiorentin, Samanta, 1812.07720



除非T_{reh} 低于M₂或N₁的冲刷作用在所有味道方向都强, N₂的贡献一般不可忽略

其它重要过程

- **$\Delta L=1$ 散射过程:** $N\bar{L} \rightarrow UQ$ $N\bar{L} \rightarrow HA$



- **旁观者过程:** 不直接改变轻子数, 通过改变轻子二重态和Higgs的密度(进而影响冲刷作用)间接影响轻子不对称

Buchmüller, Plümacher, 0104189

	T (GeV)	Equilibrium	Constraints	c_ℓ	c_ϕ	$\delta(Y_{\Delta_\alpha})$	
$B=0$	-	no spectators	-	1	0	-	
	$\gg 10^{13}$	$h_\ell, \text{ gauge}$	$B = \sum_i (2q_i + u_i + d_i) = 0$	1	$\frac{2}{3}$	-40%	
	$\sim 10^{13}$	+ QCD-Sph	$\sum_i (2q_i - u_i - d_i) = 0$	1	$\frac{14}{23}$	-37%	
	$10^{12 \div 13}$	+ h_b, h_τ	$b = q_3 - \phi, \begin{cases} P_{\tau\tau} = 0 \\ P_{\tau\tau} = 1 \end{cases}$ $\tau = \ell_\tau - \phi$	1 $\frac{3}{4}$	$\frac{3}{8}$ $\frac{1}{2}$	-27% -17%	
$B \neq 0$	$10^{11 \div 12}$	+ EW-Sph	$\sum_{i,\alpha} (3q_i + \ell_\alpha) = 0$	$\begin{cases} P_{\tau\tau} = 0 \\ P_{\tau\tau} = 1 \end{cases}$	$\frac{98}{115}$ $\frac{78}{115}$	$\frac{41}{115}$ $\frac{56}{115}$	-15% -10%
	$10^{8 \div 11}$	+ h_c, h_s, h_μ	$c = q_2 + \phi, \begin{cases} P_{ee} = 1 \\ P_{\tau\tau} = 1 \end{cases}$ $s = q_2 - \phi,$ $\mu = \ell_\mu - \phi$	$\frac{151}{179}$ $\frac{344}{537}$	$\frac{37}{179}$ $\frac{52}{179}$	-3% +12%	
	$\ll 10^8$	all Yukawas h_i, h_α	$P_{ee} = 1$	$\frac{442}{711}$	$\frac{16}{79}$	+27%	

- **强冲刷:** 不依赖 $T > M$ 时的动力学
- **弱冲刷:** 依赖于 $T > M$ 时的动力学

热效应和非平衡性

- **热效应**: 轻子生成发生在**极热**的环境中, 轻子和Higgs场通过规范作用与环境达到平衡

会对**耦合常数、粒子传播子、CP不对称**带来修正 Giudice et al., 0310123

例如: $T > 2M$ 时, $N \rightarrow LH$ 衰变被运动学禁止; $T > 5M$ 时, $H \rightarrow LN$ 衰变可以发生

某些情形下可能对**弱冲刷**情形带来可观的影响, 但对**强冲刷**情形基本没有影响

- **非平衡性**: 轻子生成本质上是一个**非平衡态问题**(萨哈罗夫三条件之一即为偏离热平衡)

严格理论: **非平衡量子场论**, closed-time-path (**CTP**) or Keldysh-Schwinger

该方法考虑了经典玻尔兹曼方程没有考虑的**量子效应**

研究表明传统的玻尔兹曼方程方法**理论误差50%左右**

Buchmuller, Fredenhagen, 0004145

目录

- 正反物质不对称与重子生成
- 轻子生成机制：标准情形
- **轻子生成机制：非标准情形**
- 其它方面
- 总结与展望

共振轻子生成

右手中微子质量**近简并** $\Delta M/M \ll 1$ ($\Delta M \sim \Gamma$), CP不对称得到**共振增强**(最大可达**1/2**)

$$\varepsilon_{I\alpha} = \frac{\text{Im} \{ (Y_\nu^*)_{\alpha I} (Y_\nu)_{\alpha J} [M_J (Y_\nu^\dagger Y_\nu)_{IJ} + M_I (Y_\nu^\dagger Y_\nu)_{JI}] \}}{8\pi (Y_\nu^\dagger Y_\nu)_{II}} \cdot \frac{M_I (M_I^2 - M_J^2)}{(M_I^2 - M_J^2)^2 + M_I^2 \Gamma_J^2}$$

对 M_1 的下限得到放松, **低能标(TeV)轻子生成和直接探测成为可能** Pilaftsis, 9707235

近简并右手中微子的实现

- **近似的轻子数对称性** Branco et al., NPB (1989); Shaposhnikov, 0605047

N_1 轻子数为**+1**, 与左手中微子有Yukawa耦合; N_2 轻子数为**-1**, 只与 N_1 形成质量项

$$\begin{cases} M_\nu = 0 \\ M_1 = M_2 \end{cases}$$

L守恒

$$M_{\nu+N} = \begin{pmatrix} 0 & y_1 v & 0 \\ y_1^T v & 0 & M \\ 0 & M & 0 \end{pmatrix}$$

L破坏

$$M'_{\nu+N} = \begin{pmatrix} 0 & y_1 v & \epsilon y_2 v \\ y_1^T v & \mu_1 & M \\ \epsilon y_2^T v & M & \mu_2 \end{pmatrix}$$

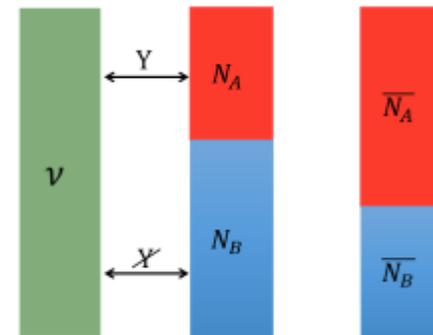
- 在**高能标**右手中微子质量简并, **重整化群跑动诱导质量差** Gonzalez et al., 0311029

Freeze-in轻子生成

sphaleron在 $T > 130 \text{ GeV}$ 时平衡：比之较轻的 N_1 ，轻子不对称在其产生(而非衰变)过程中产生

- 右手中微子以味道本征态产生，以CP破坏的方式振荡产生味道轻子不对称(总轻子数为0)

- 当中微子Yukawa作用达到平衡，右手中微子的轻子不对称传递给左手中微子



若中微子Yukawa作用存在等级：有的在 $T > 130 \text{ GeV}$ 达到平衡，有的则达不到

右手和左手中微子就会分别产生轻子不对称(大小相等、符号相反)

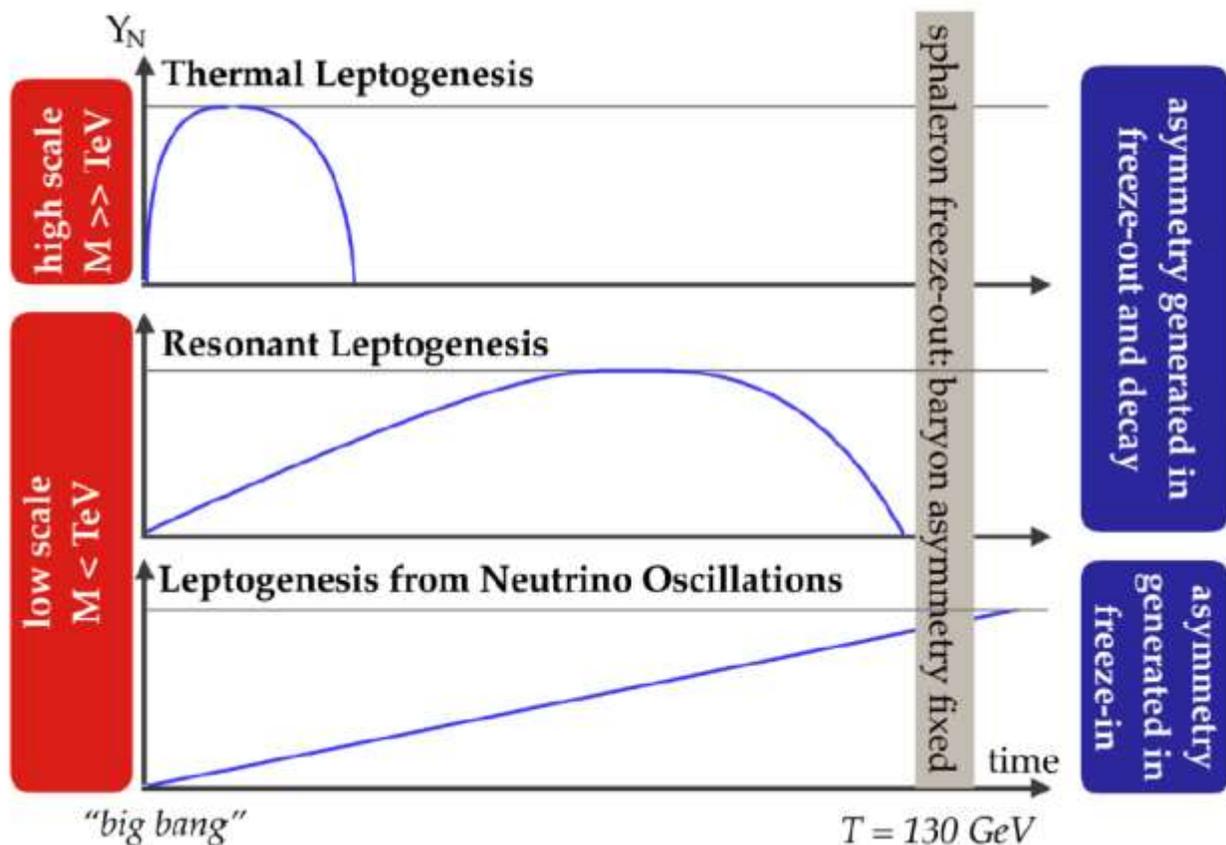
- sphaleron将左手中微子的轻子不对称转化为重子不对称 Akhmedov et al., 9803255
- 2个右手中微子需要10%的近简并实现振荡的共振增强；3个不需要 Drewes, Garbrecht, 1206.5537

vMSM: SM+3个右手中微子，2个GeV且近简并的右手中微子 $N_{2,3}$ 负责跷跷板和轻子生成机制

1个keV的右手中微子 N_1 作为温暗物质候选者 Asaka, Shaposhnikov, 0505013

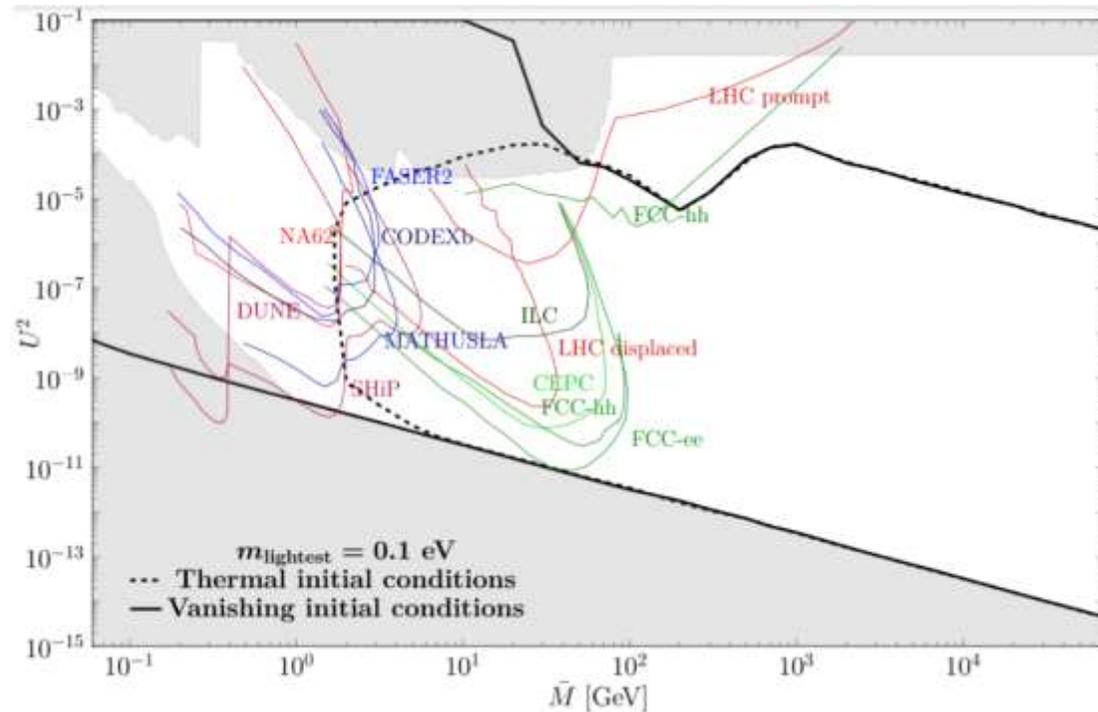
要(共振)产生足够多的 $N_1 \rightarrow$ 需要轻子不对称高达 $10^{-5} \rightarrow$ 需要 $N_{2,3}$ 质量简并度高达 10^{-11}

三种轻子生成情形对比



Agrawal et al., 2102.12143

白色区域：轻子生成允许的M-U² 参数空间



Drewes et al., 2106.16226

两种低能标轻子生成实际上是相互联系的，可以用相同的方程统一描述

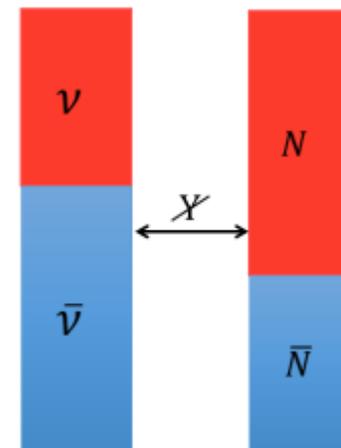
右手中微子质量从0.1GeV到大统一能标范围内，轻子生成都有可能成功

左、右手中微子的混合可以比较强，从而被现有实验探测到 Klasic et al., 2008.13771

狄拉克轻子生成

狄拉克轻子生成 Dick et al., 9907562

- 右手中微子没有马约拉纳质量项，**轻子数保持守恒**
- 重粒子X的衰变在左、右手中微子中产生**大小相等、符号相反的不对称**
- 由于中微子的**Yukawa**耦合特别弱，两部分的轻子不对称不会被平衡掉
- sphaleron过程将**左手中微子的轻子不对称转化为重子不对称**



Heeck, Heisig, Thapa, 2304.09893

Case	$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$	spin	g_X	$(B - L)(X)$	Relevant Lagrangian terms that induce X decay	ϵ_{wave}	ϵ_{vertex}	ΔB
<i>a</i>	(1, 1, -1)	0	1	-2	$\nu_{ReR}\bar{X}, LL\bar{X}$	✓	✗	0
<i>b</i>	(1, 2, 1/2)	0	2	0	$\bar{H}X, \bar{\nu}_R L X, \bar{L} e_R X, \bar{Q}_L d_R X, \bar{u}_R Q_L X, X^\dagger H^\dagger H H$	✓	✓ or ✗	0
<i>c</i>	(3, 1, -1/3)	0	3	-2/3	$d_R \nu_R X^\dagger, u_R e_R X^\dagger, Q_L L X^\dagger, u_R d_R X, Q_L Q_L X$	✓	✓ or ✗	0 or 1
<i>d</i>	(3, 1, 2/3)	0	3	-2/3	$u_R \nu_R X^\dagger, d_R d_R X$	✓	✗	1
<i>e</i>	(3, 2, 1/6)	0	6	4/3	$\bar{Q}_L \nu_R X, \bar{d}_R L X$	✓	✗	0
<i>f</i>	(1, 2, -1/2)	1/2	2	-1	$\bar{X} L, \bar{\nu}_R X H, \bar{X} e_R H$	✓	✓	0

注意：在狄拉克轻子生成情形下，不会发生无中微子双贝塔衰变！！！！

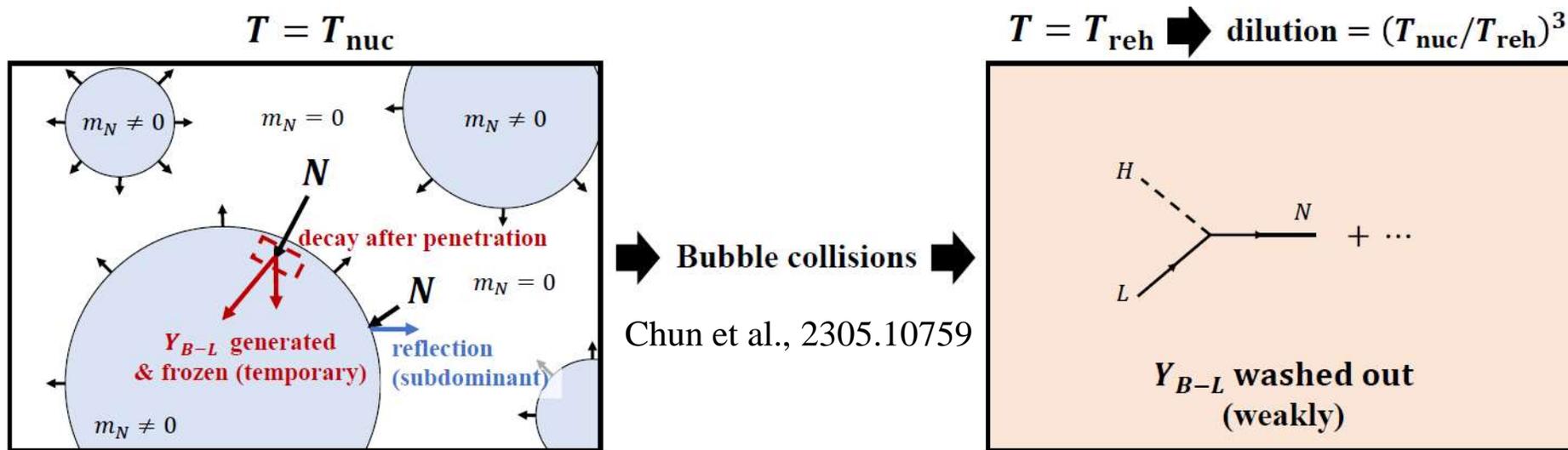
一级相变轻子生成

假设：右手中微子的质量来自某个**标量场的真空期望值**，对应的相变为**一级相变**

- 旧真空(泡泡外): 右手中微子质量为零；新真空(泡泡内): 右手中微子**获得质量**
- 若 $M_1 \gg T_p$ ，进入泡泡的右手中微子偏离热平衡并很快衰变，产生轻子不对称

冲刷作用受到温度压低几乎不起作用 Huang, Xie, 2206.04691; Baldes et al., 2106.15602

- 泡泡碰撞后提升环境温度 T_{reh} ：**稀释**产生的不对称 $(T_p/T_{reh})^3$ ；使冲刷作用变强



其它由**相变**引起的轻子生成情形：如Pascoli, Turner, Zhou, 1609.07969

目录

- 正反物质不对称与重子生成
- 轻子生成机制：标准情形
- 轻子生成机制：非标准情形
- **其它方面**
- 总结与展望

超对称理论

- $\tan\beta=v_u/v_d$: $y_\alpha^2 \rightarrow y_\alpha^2(1+\tan^2\beta)$, 不同味道情形的分界变为 $(1+\tan^2\beta)10^{12}$ 、 $(1+\tan^2\beta)10^9$ GeV

- 最终的轻子不对称相对于SM仅差一个O(1)的比例因子

$$\frac{Y_B^{\text{MSSM}}}{Y_B^{\text{SM}}}\bigg|_{M_i, Y_\nu, Y_l} \simeq \begin{cases} \sqrt{2} & (\text{strong washout}) \\ 2\sqrt{2} & (\text{weak washout}) \end{cases}$$

圈图内线粒子的加倍: CP不对称 $\times 2$

Plumacher, 9704231; Campbell et al., 9302223

N_1 超对称伴子的贡献: 轻子不对称 $\times 2$

熵密度(g_*)的加倍: 轻子不对称 $\times 1/2$

宇宙膨胀($\propto \sqrt{g_*}$)速率 $\times \sqrt{2}$: 强冲刷: 冲刷时间 $\times 1/\sqrt{2}$; 弱冲刷: N_1 及其伴子产生时间 $\times 1/\sqrt{2}$

逆衰变过程的加倍: 强冲刷: 冲刷效应 $\times 2$; 弱冲刷: N_1 及其伴子的产生 $\times 2$

- **软轻子生成**: sneutrino相关的**软超对称破坏项**在轻子生成中占主导 Grossman et al., 0307081

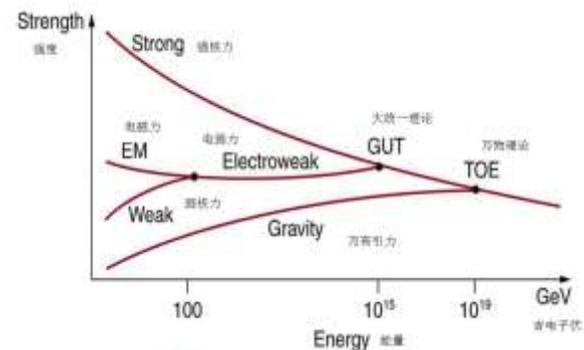
- **gravitino问题**: 为避免gravitino的过量产生破坏BBN的成功, 要求 $T_{\text{reh}} < 10^9$ GeV

轻子生成对 T_{reh} 的下限: **暴涨**后要产生足够多的 N_1 Khlopov, Linde, PLB (1984)

SO(10)大统一

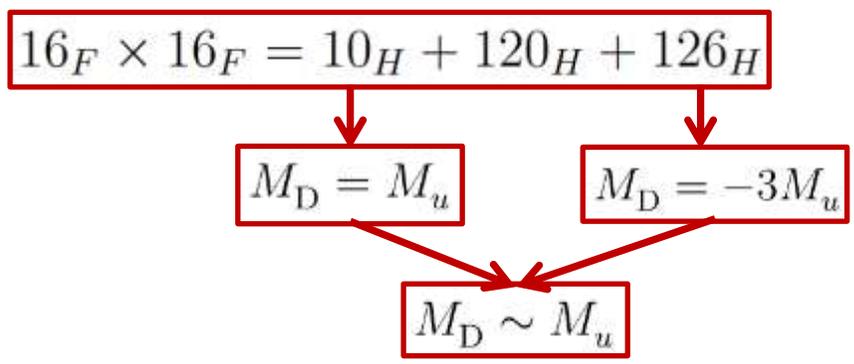
大统一理论：电磁、弱、强三种相互作用的统一，

$$SO(10)/SU(5) \rightarrow SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

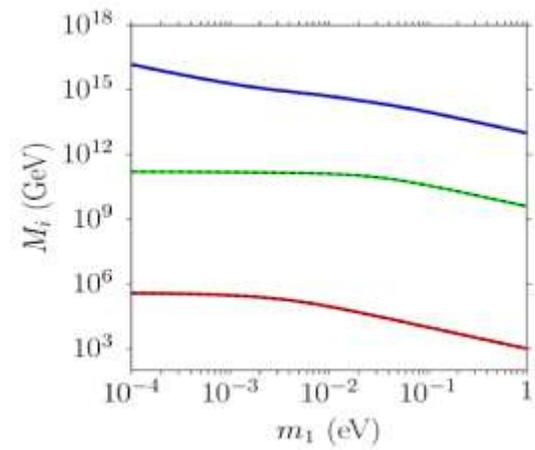


物质场统一：SO(10) GUT中，物质场组成16维表示

$$\underbrace{16}_{\psi} = \underbrace{(3, 2)}_Q + \underbrace{(\bar{3}, 1)}_{u_R^c} + \underbrace{(\bar{3}, 1)}_{d_R^c} + \underbrace{(1, 2)}_L + \underbrace{(1, 1)}_{e_R^c} + \underbrace{(1, 1)}_N$$



A recent work: Fu et al., 2209.00021



右手中微子质量谱

Di Bari, 2107.13750

N_1 轻子生成失效 vs N_2 轻子生成成功(N_1 沿某个味道方向的冲刷作用弱) Di Bari, Riotto, 0809.2285

$$\longrightarrow \quad m_1 \gtrsim 34 \text{ meV}, \quad |m_{\beta\beta}| \gtrsim 31 \text{ meV}$$

味道对称性

Tri-bimaximal混合 Harrison, Perkins, Scott, 0202074; Xing, 0204049

$$\begin{array}{c} \sin^2 \theta_{12} \sim 1/3 \\ \sin^2 \theta_{23} \sim 1/2 \\ \theta_{13} \sim 0 \end{array} \longrightarrow U_{\text{TBM}} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 2 & \sqrt{2} & 0 \\ -1 & \sqrt{2} & \sqrt{3} \\ 1 & -\sqrt{2} & \sqrt{3} \end{pmatrix} \longrightarrow M_{\text{D}} = \begin{pmatrix} 2a & b & 0 \\ -a & b & c \\ a & -b & c \end{pmatrix} \longrightarrow \Delta_{\alpha} = \frac{3}{32\pi^2} \int_0^{\ln(\Lambda_{\text{FS}}/\Lambda_{\text{EW}})} y_{\alpha}^2(t) dt$$

● **RGE诱导轻子生成** Cooper et al., 1110.5676; Xing, Zhang, 2003.00480

Mu-tau reflection对称性 Harrison, Scott, 0210197; Xing, Zhao, 1512.04207

$$\begin{array}{c} \theta_{23} \sim \pi/4 \\ \delta \sim -\pi/2 \end{array} \longrightarrow \begin{array}{c} \nu_e \rightarrow \nu_e^c \\ \nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}^c \\ \nu_{\tau} \rightarrow \nu_{\mu}^c \end{array} \longrightarrow M_{\text{D}} \propto \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_2^* & b_2^* & c_2^* \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{array}{c} \varepsilon_{1e} = 0 \\ \varepsilon_{1\mu} = -\varepsilon_{1\tau} \\ \tilde{m}_{1\mu} = \tilde{m}_{1\tau} \end{array}$$

$$M_{\text{D}}(\Lambda_{\text{EW}}) \propto \begin{pmatrix} 1 + \Delta_e & & \\ & 1 + \Delta_{\mu} & \\ & & 1 + \Delta_{\tau} \end{pmatrix} M_{\text{D}}(\Lambda_{\text{FS}})$$

● 当 $M_1 > 10^{12} \text{GeV}$, **单味道情形**

$$Y_{\text{L}} \propto \varepsilon_1 \kappa_1 = 0$$


● 当 $M_1 < 10^{12} \text{GeV}$, **两味道情形**

$$Y_{\text{L}} \propto \varepsilon_{1\tau} [\kappa(\tilde{m}_{1\tau}) - \kappa(\tilde{m}_{1e} + \tilde{m}_{1\mu})] \neq 0$$

Mohapatra, Nishi, 1506.06788

● 当 $M_1 < 10^9 \text{GeV}$, **三味道情形**

$$Y_{\text{L}} \propto \varepsilon_{1\tau} [\kappa(\tilde{m}_{1\tau}) - \kappa(\tilde{m}_{1\mu})] = 0$$


最小跷跷板模型

一般跷跷板模型：除3个右手中微子质量外， Y_ν 包含15个物理参数 \gg 9个低能标可观测量

$$Y_\nu = \begin{pmatrix} (Y_\nu)_{e1} & (Y_\nu)_{e2} & (Y_\nu)_{e3} \\ (Y_\nu)_{\mu1} & (Y_\nu)_{\mu2} & (Y_\nu)_{\mu3} \\ (Y_\nu)_{\tau1} & (Y_\nu)_{\tau2} & (Y_\nu)_{\tau3} \end{pmatrix}$$

$$U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\rho} & & \\ & e^{i\sigma} & \\ & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{pmatrix}$$

最小跷跷板模型：2个右手中微子， Y_ν 包含9个物理参数 $>$ 7个低能标可观测量 Xing, Zhao, 2008.12090

● Frampton-Glashow-Yanagida模型 0208157

Y_ν 包含5个物理参数(1个相位)：低能标预言

正序：✗ vs 倒序： A_1, A_2, A_4, A_5 ✓

$$A_1: \begin{pmatrix} 0 & \times \\ \times & 0 \\ \times & \times \end{pmatrix}, \quad A_2: \begin{pmatrix} 0 & \times \\ \times & \times \\ \times & 0 \end{pmatrix}, \quad A_3: \begin{pmatrix} \times & \times \\ 0 & \times \\ \times & 0 \end{pmatrix},$$

$$A_4: \begin{pmatrix} \times & 0 \\ 0 & \times \\ \times & \times \end{pmatrix}, \quad A_5: \begin{pmatrix} \times & 0 \\ \times & \times \\ 0 & \times \end{pmatrix}, \quad A_6: \begin{pmatrix} \times & \times \\ \times & 0 \\ 0 & \times \end{pmatrix}.$$

$$M_1 \simeq 5 \times 10^{13} \text{ GeV}$$

Harigaya et al., 1205.2198

● Littlest seesaw模型

King, 1512.07531

Y_ν 包含2个自由参数

$$\begin{pmatrix} 0 & be^{i\frac{\pi}{3}} \\ a & 3be^{i\frac{\pi}{3}} \\ a & be^{i\frac{\pi}{3}} \end{pmatrix}$$

θ_{12} (°)	θ_{13} (°)	θ_{23} (°)	δ_{CP} (°)	m_1 (meV)	m_2 (meV)	m_3 (meV)
34.3	8.67	45.8	-86.7	0	8.59	49.8
$33.48^{+0.78}_{-0.75}$	$8.50^{+0.20}_{-0.21}$	$42.3^{+3.0}_{-1.6}$	-54^{+39}_{-70}	0	8.66 ± 0.10	49.57 ± 0.47

$$M_1 \sim 4.0 \times 10^{10} \text{ GeV}$$

Bjorkerth et al., 1505.05504

引力波探测

假设：某种对称性(如 $U(1)_{B-L}$)禁止右手中微子获得质量，其自发破缺(相变)赋予后者质量

- 可能的扩展规范群及其破缺导致的拓扑缺陷： Dror et al., 1908.03227

$$G_{\text{disc}} = G_{\text{SM}} \times \mathbb{Z}_N,$$

$$G_{B-L} = G_{\text{SM}} \times U(1)_{B-L},$$

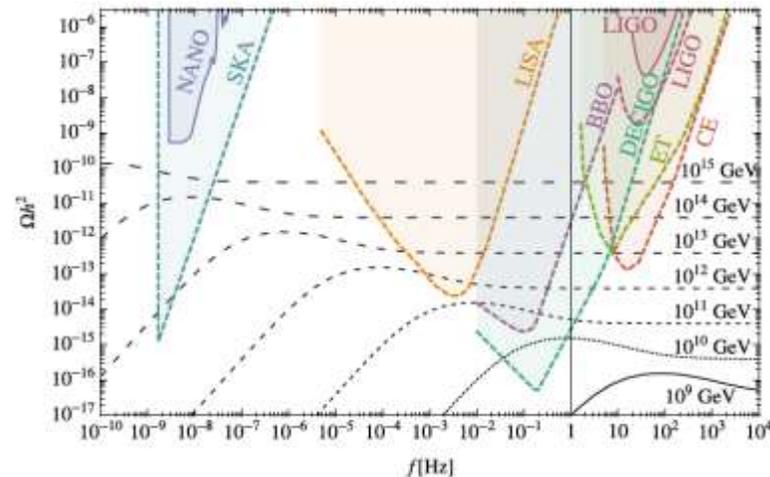
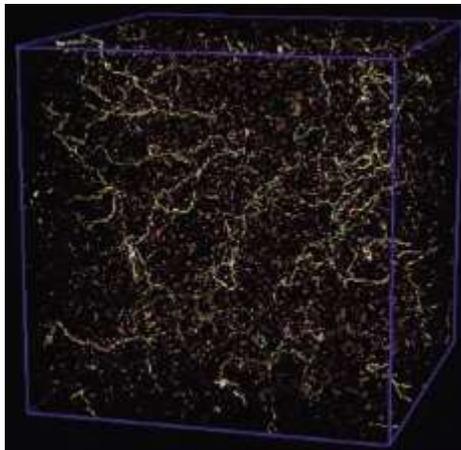
$$G_{LR} = SU(3)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L},$$

$$G_{421} = SU(4)_{\text{PS}} \times SU(2)_L \times U(1)_Y,$$

$$G_{\text{flip}} = SU(5) \times U(1).$$

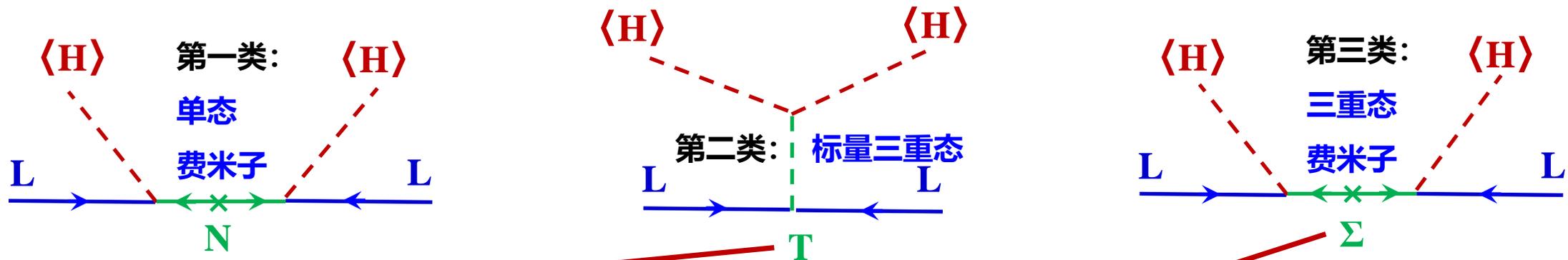
G	$H = G_{\text{SM}}$		$H = G_{\text{SM}} \times \mathbb{Z}_2$	
	defects	Higgs	defects	Higgs
G_{disc}	domain wall*	$B-L=1$	domain wall*	$B-L=2$
G_{B-L}	abelian string*	$B-L=1$	\mathbb{Z}_2 string [†]	$B-L=2$
G_{LR}	texture*	$(1, 1, 2, \frac{1}{2})$	\mathbb{Z}_2 string	$(1, 1, 3, 1)$
G_{421}	none	$(10, 1, 2)$	\mathbb{Z}_2 string	$(15, 1, 2)$
G_{flip}	none	$(10, 1)$	\mathbb{Z}_2 string	$(50, 2)$

- 宇宙弦网络产生随机引力波；热轻子生成大部分参数空间都能被引力波实验观测到



利用宇宙对撞机观测轻子生成：暴涨期间产生可探测原初非高斯性 Cui, Xianyu, 2112.10793

第二、三类跷跷板模型

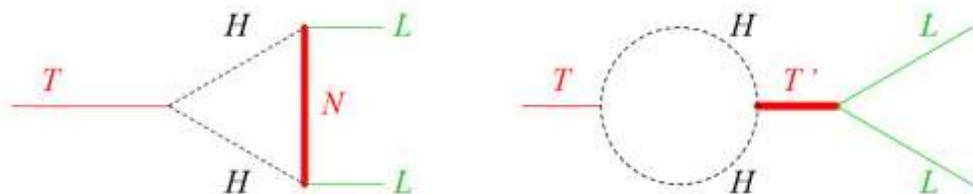


$$\mathcal{L} \supset \frac{1}{2}([\lambda_L]_{\alpha\beta} L_\alpha L_\beta T + \lambda_H M_T H H T^*) + \text{h.c.}$$

$$\mathcal{L} \supset \bar{L}_\alpha \sqrt{2} [Y_\Sigma]_{\alpha i} \Sigma_i^c \tilde{H} + \frac{1}{2} \text{Tr} (\Sigma_i [M_\Sigma]_{ij} \Sigma_j^c) + \text{h.c.}$$

- **第二类:** 尽管 1 个三重态足以产生三个轻中微子质量(记为 m_{II}), 为了产生足够的不对称需要额外**三重态**或**右手中微子**对中微子质量有贡献(记为 m_I) Ma, Sarkar, 9802445

Exception: **三重态作为暴涨场**+**Affleck-Dine**机制 Barrie, Han, Murayama, 2106.03381



$$\epsilon_T = \frac{1}{4\pi} \frac{M_T}{v_u^2} \sqrt{B_L B_H} \frac{\text{Im}[\text{Tr}(m_{II}^\dagger m_I)]}{\text{Tr}(m_{II}^\dagger m_{II})}$$

$$M_T > 10^9 - 10^{12} \text{ GeV}$$

- **第三类:** 除 Σ 有 3 个分量并参与规范作用, 与第一类类似: $M_I > 10^{10} \text{ GeV}$ Hambye, Senjanovic, 0307237

目录

- 正反物质不对称与重子生成
- 轻子生成机制：标准情形
- 轻子生成机制：非标准情形
- 其它方面
- **总结与展望**

总结与展望

轻子生成非常具有**吸引力**:

- **一石二鸟**: 是解释中微子质量的跷跷板模型必然的一个后果
- **强冲刷情形**: 既不依赖于初始条件, 又能自然地实现观测值

完整、严格计算轻子生成的理论已经建立(考虑了各种修正效应)

但传统的轻子生成情形具有两个**不足之处**:

- 需要右手中微子的质量高于 10^9 GeV, 远远超出了实验**直接探测**能力
- 跷跷板模型包含的参数远多于低能标可观测量, 因此缺乏**定量的预言**
- ◆ 低能标 (**TeV乃至GeV**) 轻子生成的实现为实验上**直接探测**提供了可能
- ◆ 中微子部分可能存在的**味道对称性**有助于减少跷跷板模型的自由参数
- ◆ 随着**引力波**被探测到, 利用引力波观测**高能标**轻子生成成为新兴话题

轻子生成综述文献

- Y. Nir: *Leptogenesis: a pedagogical introduction*
- M. C. Chen: *TASI 2006 Lectures on Leptogenesis*
- S. Davidson, E. Nardi, Y. Nir: *Leptogenesis*
- W. Buchmuller, R. D. Peccei, T. Yanagida: *Leptogenesis as the origin of matter*
- W. Buchmuller, P. Di Bari, M. Plumacher: *Leptogenesis for pedestrians*
- C. S. Fong, E. Nardi, A. Riotto: *Leptogenesis in the Universe*
- S. Blanchet, P. Di Bari: *The minimal scenario of leptogenesis*
- Z. Z. Xing, Z. H. Zhao: *The minimal seesaw and leptogenesis models*
- D. Bodeker, W. Buchmuller: *Baryogenesis from the weak scale to the GUT scale*
- P. Di Bari: *On the origin of matter in the Universe*

感谢垂听!

敬请批评指正!