

Review of Baryogenesis

永島 伸多郎 (東京大学宇宙線研究所)

2020年11月9日 @ 高エネルギー将来計画委員会：第5回 勉強会

Baryon asymmetry of the Universe

バリオン数の観測量

宇宙は“物質”優勢

$$\eta = \frac{n_b}{n_\gamma} = \frac{n_b - n_{\bar{b}}}{n_\gamma}$$

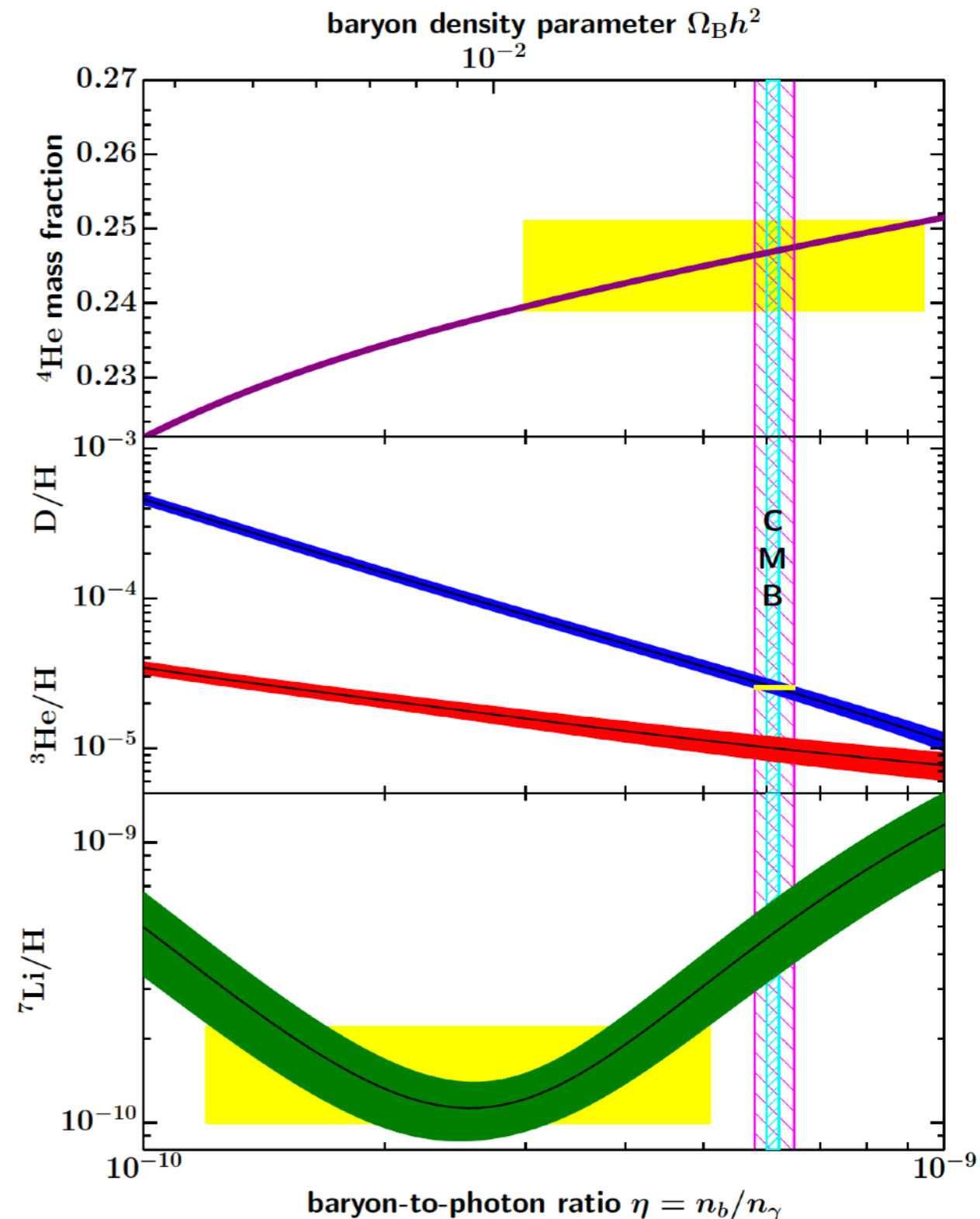
軽元素残存量 (BBN)

$$\eta = (5.8 - 6.5) \times 10^{-10}$$

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)

$$\eta = (6.12 \pm 0.04) \times 10^{-10}$$

2つの観測から同一の値が
高精度で測定されている



Inflation and baryogenesis

その小さな非対称性は宇宙の初期条件では？

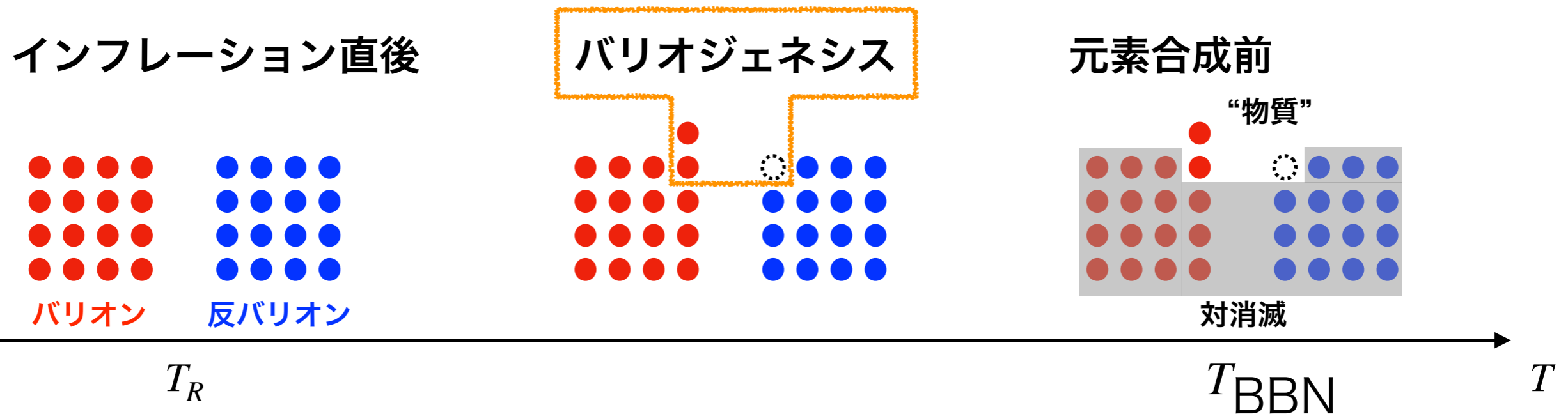
インフレーション：地平線問題、平坦性問題、ゆらぎの起源

インフラトンの崩壊→粒子生成

その際に起こる希釈を考えると、初期条件とするのは困難

宇宙の温度 $T_{\text{BBN}} (\approx 1 \text{ MeV}) < T < T_R (\sim 10^{13} \text{ GeV})$ で、

バリオン数非対称性を作り出す 必要がある



Diverse mechanisms

1. GUT baryogenesis. 2. GUT baryogenesis after preheating. 3. Baryogenesis from primordial black holes. 4. String scale baryogenesis. 5. Affleck-Dine (AD) baryogenesis. 6. Hybridized AD baryogenesis. 7. No-scale AD baryogenesis. 8. Single field baryogenesis. 9. Electroweak (EW) baryogenesis. 10. Local EW baryogenesis. 11. Non-local EW baryogenesis. 12. EW baryogenesis at preheating. 13. SUSY EW baryogenesis. 14. String mediated EW baryogenesis. 15. Baryogenesis via leptogenesis. 16. Inflationary baryogenesis. 17. Resonant leptogenesis. 18. Spontaneous baryogenesis. 19. Coherent baryogenesis. 20. Gravitational baryogenesis. 21. Defect mediated baryogenesis. 22. Baryogenesis from long cosmic strings. 23. Baryogenesis from short cosmic strings. 24. Baryogenesis from collapsing loops. 25. Baryogenesis through collapse of vortons. 26. Baryogenesis through axion domain walls. 27. Baryogenesis through QCD domain walls. 28. Baryogenesis through unstable domain walls. 29. Baryogenesis from classical force. 30. Baryogenesis from electrogenesis. 31. B-ball baryogenesis. 32. Baryogenesis from CPT breaking. 33. Baryogenesis through quantum gravity. 34. Baryogenesis via neutrino oscillations. 35. Monopole baryogenesis. 36. Axino induced baryogenesis. 37. Gravitino induced baryogenesis. 38. Radion induced baryogenesis. 39. Baryogenesis in large extra dimensions. 40. Baryogenesis by brane collision. 41. Baryogenesis via density fluctuations. 42. Baryogenesis from hadronic jets. 43. Thermal leptogenesis. 44. Nonthermal leptogenesis.

[Shaposhnikov ('09)]

本日のトーク

1. バリオジェネシスを議論するにあたって指針となること
2. 実験観測と関連のあるシナリオの紹介
電弱バリオジェネシス、レプトジェネシス

Sakharov condition [Sakharov ('67)]

$n_B = n_b - n_{\bar{b}} = 0$ から $n_B \neq 0$ を実現するための必要条件

1. バリオン数の非保存

B数: (反) クォーク $\rightarrow (-)1/3$ L数: (反) レプトン $\rightarrow (-)1$

標準模型: Tree-level で保存しているが、量子アノマリーで非保存

2. C , CP の非保存: 粒子-反粒子の対称性

C : カイラルゲージ相互作用で非保存

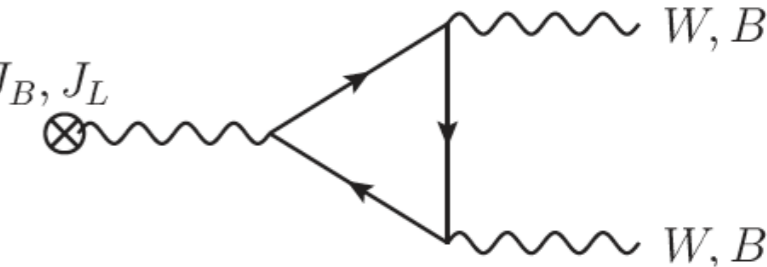
CP : CKM行列のCP位相

3. 熱平衡の破れ: 不可逆過程が必要

宇宙の膨張 $\Gamma < H$ 、一次相転移、インフレーション後の再加熱、...

$B + L$ violation & $B - L$ conservation

標準模型において $B, L, B + L$ は非保存量、 $B - L$ が保存量

$$\partial_\mu j_B^\mu = \partial_\mu j_L^\mu = n_f \left(\frac{g^2}{32\pi^2} W_{\mu\nu}^a \tilde{W}^{a\mu\nu} - \frac{g'^2}{32\pi^2} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} \right)$$


$$B = \int d^3x j_B^0 \quad L = \int d^3x j_L^0$$

B, L の変化は、巻き付き数 N_{CS} で記述される ($n_f = 3$)

$$\Delta B = \Delta L = n_f N_{CS}$$

$$\Delta(B + L) = 2n_f N_{CS}$$

$$\Delta(B - L) = 0$$

CS数 (整数) : $N_{CS} \equiv \int d^3x \left(\frac{g^2}{32\pi^2} W_{\mu\nu}^a \tilde{W}^{a\mu\nu} - \frac{g'^2}{32\pi^2} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} \right)$

Sphaleron process [Kuzmin, Rubakov, Shaposhnikov ('85)]

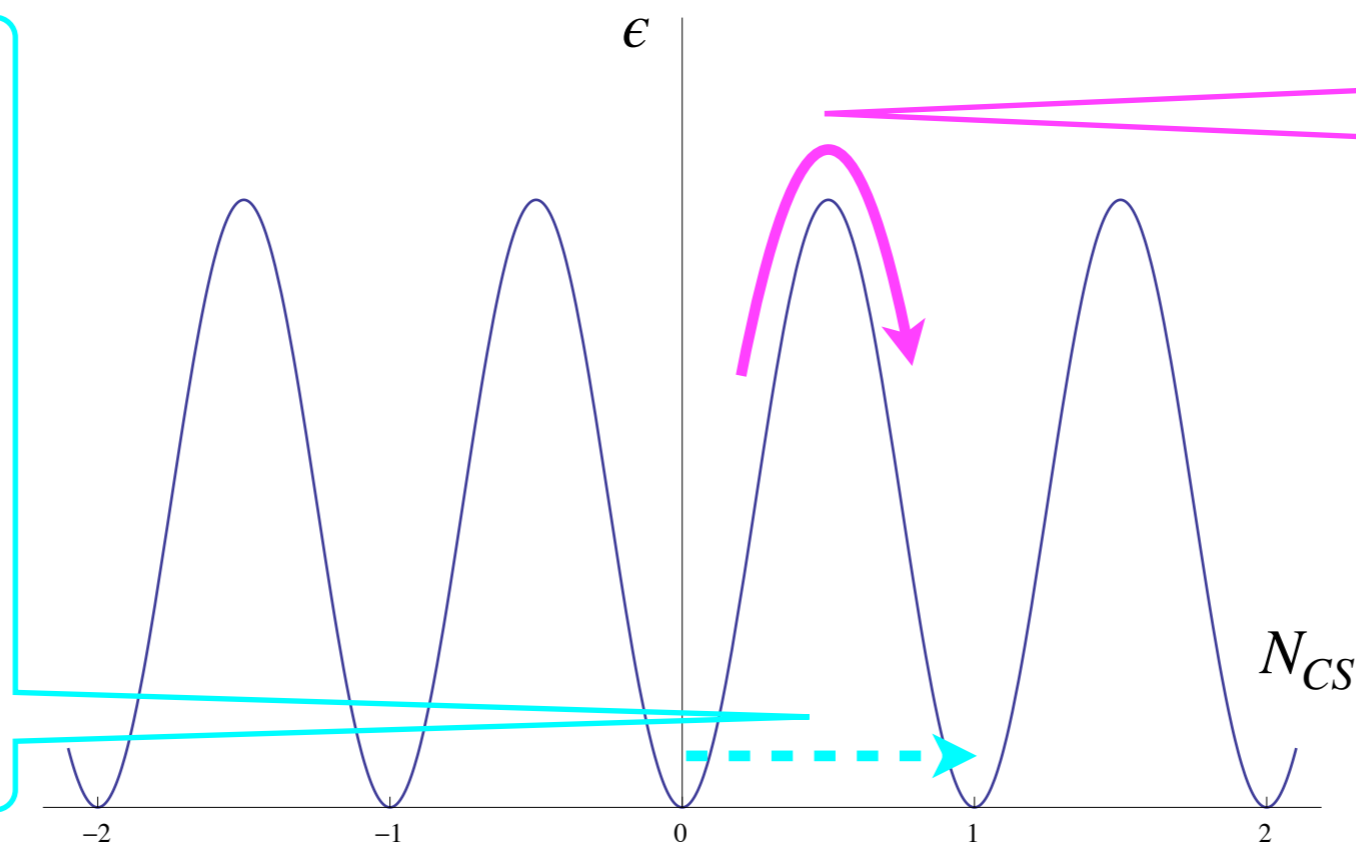
SU(2) gauge + Higgs 理論

真空の配位は、CS数によってラベルされる縮退したもの

ゼロ温度：
トンネル効果

Instanton

$$\Gamma_{ins} \propto e^{-16\pi^2/g^2} \simeq 10^{-170}$$



有限温度：
熱的ゆらぎ

Sphaleron

$$\Gamma_{sph} \sim \alpha_W^5 T^4 \quad (T > T_{EW})$$

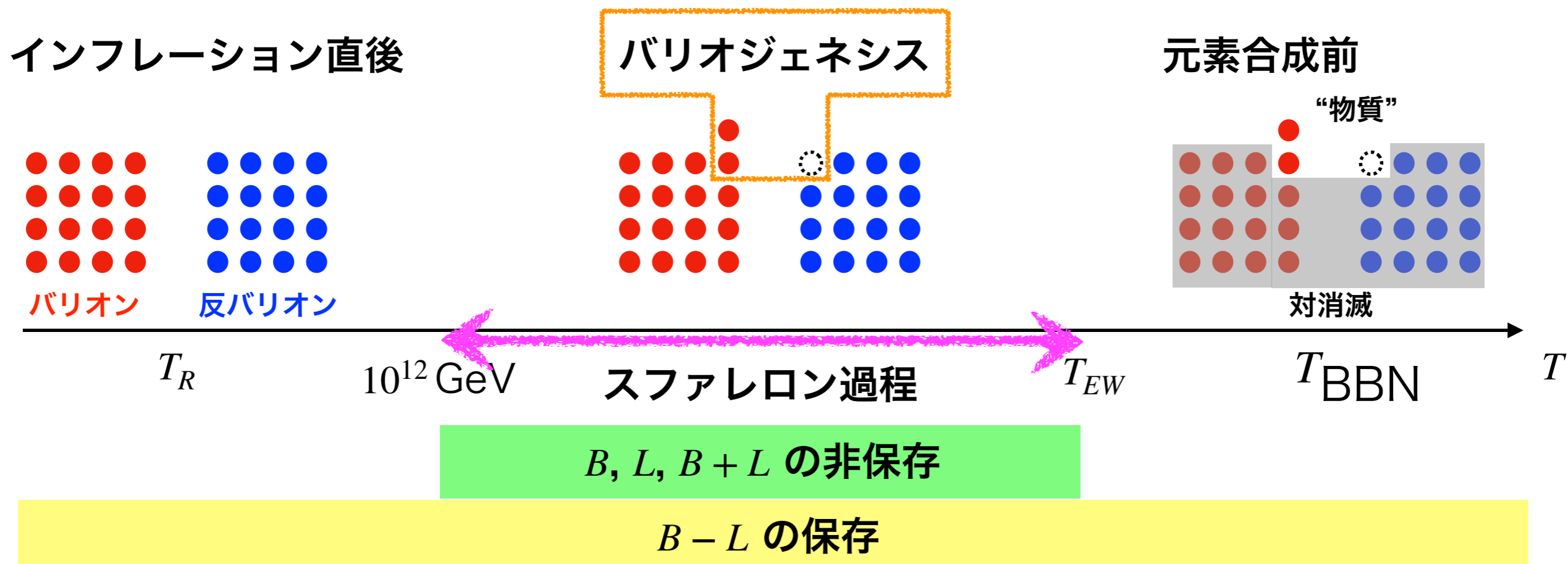
$T_{EW} \lesssim T \lesssim 10^{12} \text{ GeV}$ で、スファレロン過程は熱平衡

$B, L, B + L$ は頻繁に変化、その中で $B - L$ だけが保存量

Baryogenesis with Sphaleron

バリオジェネシスにおけるスファレロン過程

$T \gtrsim T_{EW}$ で $\Delta B \neq 0$ だとしても、 $\Delta B = \Delta L \neq 0$ なら全てwash-out



$\Delta(B - L) \neq 0$ を作り出せれば、 $T \simeq T_{EW}$ で $B = \frac{28}{79}(B - L)$

Sakharov condition and Sphaleron

$n_B = n_b - n_{\bar{b}} = 0$ から $n_B \neq 0$ を実現するための必要条件

1. ~~バリオン数の非保存~~ $\rightarrow B - L$ の非保存
2. C, CP の非保存
3. 熱平衡の破れ

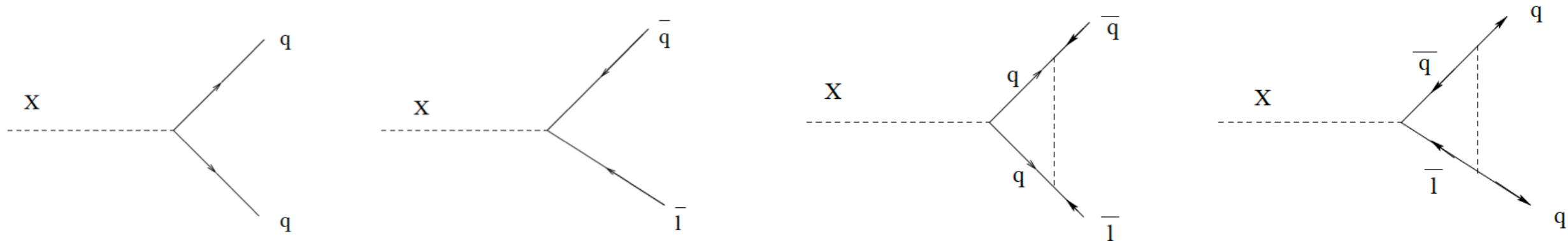
- GUTバリオジェネシスの除外
- 電弱相転移前後のバリオン数の保存・非保存を活用
 \rightarrow 電弱バリオジェネシス
- $L \neq 0$ を作り出し、それを部分的に B へ転換
 \rightarrow レプトジェネシス

GUT baryogenesis [Yoshimura ('78)]

Minimal SU(5) GUT: $SU(5) \supset SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

ゲージ相互作用の統一という素粒子論的な魅力だけでなく、
バリオジェネシスを担う B を破る重い粒子 X を自然に含む

$$m_X \sim 10^{16} \text{ GeV} \text{ のとき、 } \Gamma_X \sim \alpha m_X \lesssim H = \left(\frac{90}{\pi^2 g_*} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{T^2}{M_P} \Bigg|_{T=m_X} \quad (\alpha \sim 1/40)$$



$$\frac{n_B}{n_\gamma} = \Delta \sim \frac{1}{N_{\text{eff}}} \delta_{CP} \cdot S_{\text{macro}}$$

$$\delta_{CP} = \frac{\Gamma(X \rightarrow qq) - \Gamma(\bar{X} \rightarrow \bar{q}\bar{q})}{\Gamma_{\text{tot}}}$$

GUT baryogenesis and Sphaleron

Exercise

	B	L	Br
$X \rightarrow qq$	$2/3$	0	r
$X \rightarrow \bar{q}\bar{l}$	$-1/3$	-1	$1 - r$
$\bar{X} \rightarrow \bar{q}\bar{q}$	$-2/3$	0	\bar{r}
$\bar{X} \rightarrow ql$	$1/3$	1	$1 - \bar{r}$

$$\langle \Delta B \rangle = 2/3r - 1/3(1 - r) - 2/3\bar{r} + (1 - \bar{r}) = r - \bar{r}$$

CP の破れ $\rightarrow r \neq \bar{r}$

$$\langle \Delta L \rangle = r - \bar{r}$$

$$\langle \Delta(B - L) \rangle = 0$$

Minimal SU(5) 理論は、標準模型と同様に $B - L$ の破れを持たない

\rightarrow バリオン数非対称性を生成できない

B を破る X の伝搬 \rightarrow 陽子崩壊 $\tau_p \sim 10^{31}$ year

実験からの制限 $\tau_p^{exp} > 10^{34}$ year から minimal SU(5) GUT は排除

Electroweak baryogenesis

標準模型の枠組みで全ての材料がそろっている！？

1. バリオン数の非保存

→ スファレロン過程によって大きく破れている

対称相 ($\Delta B \neq 0$) と非対称相 ($\Delta B = 0$) が同時に存在

2. C , CP の非保存

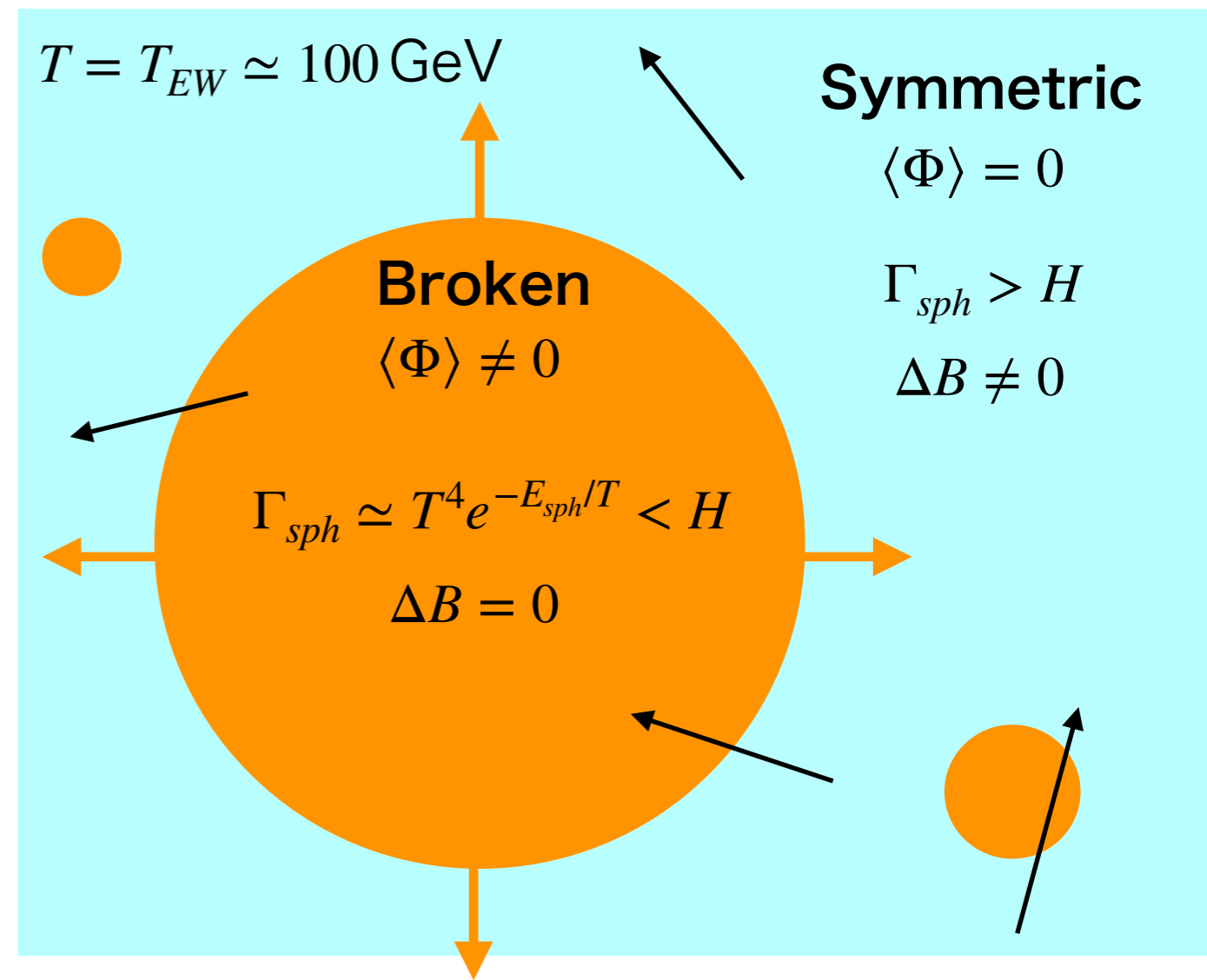
→ CKM行列のCP位相

3. 熱平衡の破れ

→ 電弱相転移が一次

相転移後、直ちに $\Delta B = 0$

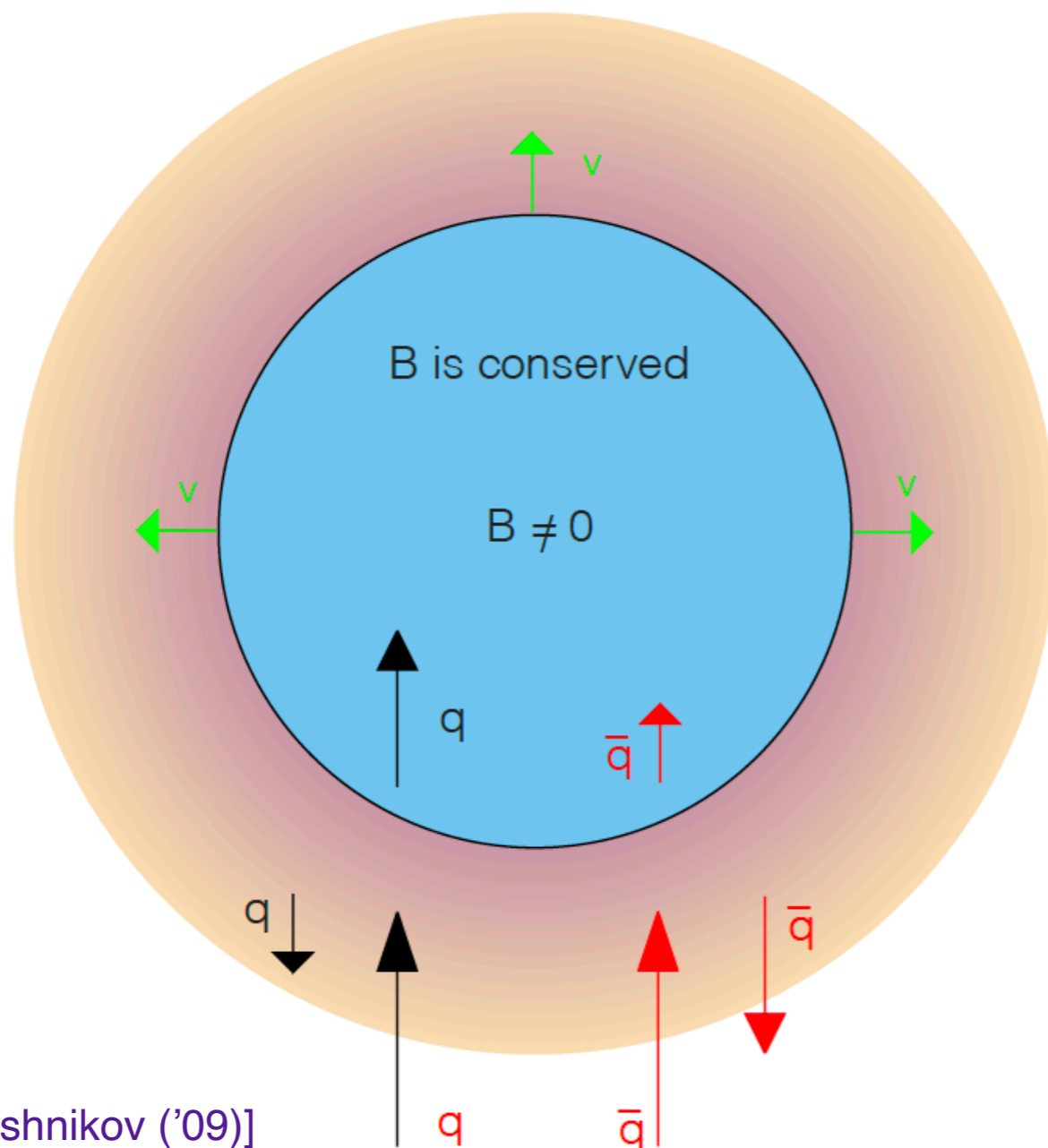
泡が形成される



Mechanism of EWBG

泡の周りで起きる現象

B is not conserved: $B = 0$



[Shaposhnikov ('09)]

1. 泡に q, \bar{q} が飛び込む。
2. 泡の壁における CP の破れによって、壁面での侵入と反射に q, \bar{q} 間の差ができる。
3. 泡内部では B が保存されているので、 $n_q \neq n_{\bar{q}}$ が維持される。
4. 泡外部では B が激しく変化しているため $n_q = n_{\bar{q}}$ となる。
5. 泡が拡大、衝突しながら上記過程を繰り返す。
6. 最終的に $B \neq 0$ の非対称相の宇宙となる。

EWBG, observations and Physics BSM

不十分なCPの破れ

$$d_{CP} = \sin(\theta_{12}) \sin(\theta_{23}) \sin(\theta_{13}) \sin \delta_{CP} (m_t^2 - m_c^2)(m_t^2 - m_u^2)(m_c^2 - m_u^2)(m_b^2 - m_s^2)(m_b^2 - m_d^2)(m_s^2 - m_d^2)$$

$$\frac{n_B}{s} \lesssim \frac{d_{CP}}{g_* T^{12}} \sim 10^{-20} \quad (T = 100 \text{ GeV})$$

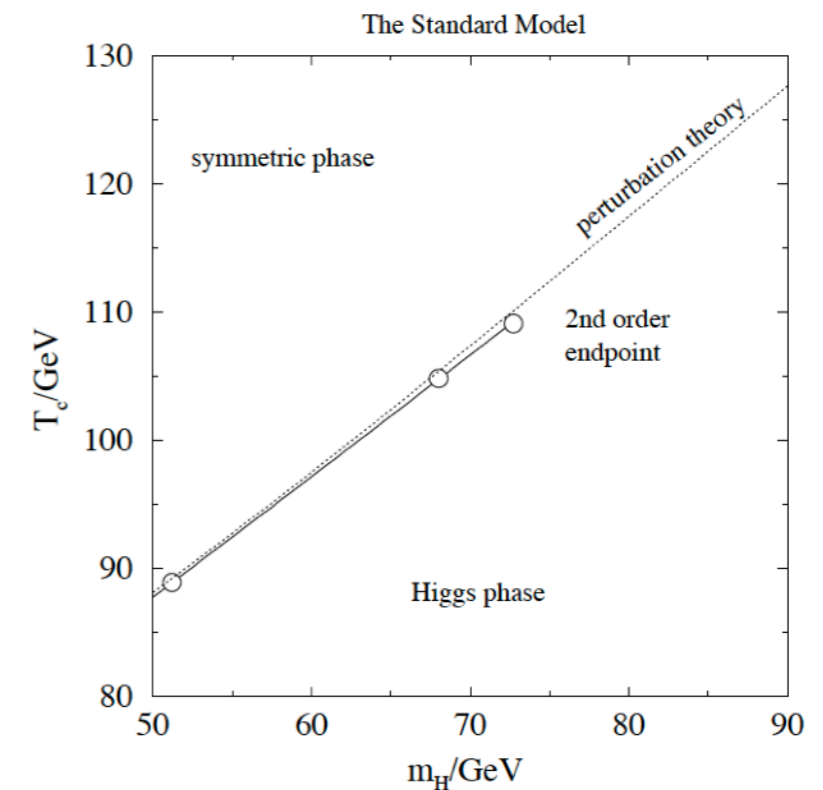
[Farrar, Shaposhnikov ('94)]

SM Higgs は crossover を示唆

一次相転移を起こすには $M_H \lesssim 72 \text{ GeV}$

LEP bound: $M_H > 114 \text{ GeV}$

LHC discovery: $M_H = 125 \text{ GeV}$



[Laine, Rummukainen ('98)]

標準模型での電弱バリオジェネシスは観測から排除

→

宇宙バリオン数非対称性 = 標準模型を超えた物理現象

EWBG with additional scalars

標準模型のスカラー拡張とEWBGの実現可能性

Higgs ポテンシャルに対するボゾンloop の寄与は
相転移を一次にできる

- Supersymmetric extension
 - MSSM は除外：一次相転移を起こす軽いstop がLHCと矛盾
- Two (or Multi) Higgs double model
- SM with complex singlet scalar
- ...

[Cline ('17)]

上記のモデルは新たなCPの破れをヒッグスセクターに含む

導入された新粒子は電気双極子能率(EDM)に大きな寄与

ACME (2018) : $|d_e| < 1.1 \times 10^{-29} e \cdot \text{cm}$ [Andreev et al. ('18)]

Signals of EWBG in colliders

加速器実験への示唆

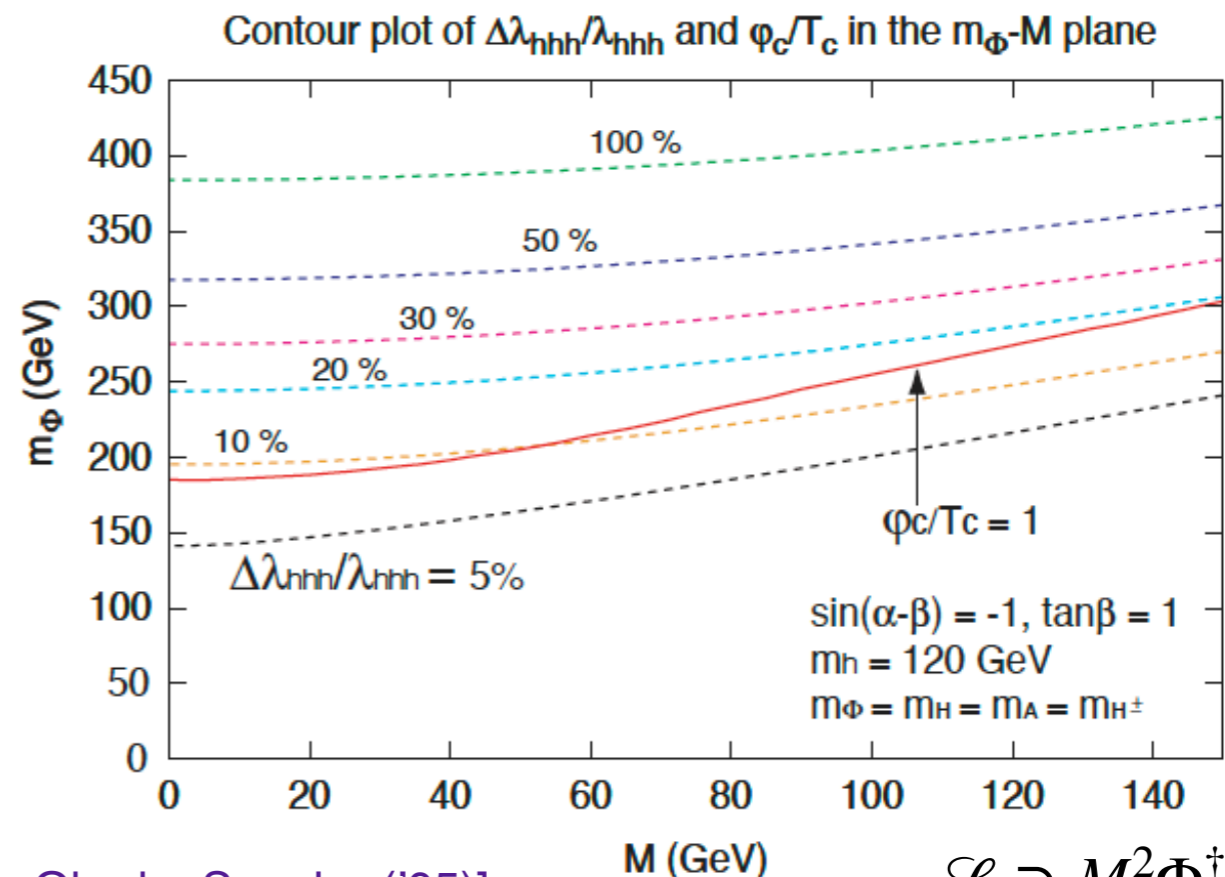
間接検証：EWBG が機能するモデルの検証

重いヒッグス、荷電ヒッグスの探索

直接検証：EWBG が要求するヒッグス結合定数の標準模型からのズレ → 精密測定

2HDM で、一次相転移を
起こすためにはヒッグス3
点結合に対し

$$\Delta\lambda_{hhh}/\lambda_{hhh} \sim 10\%$$



[Kanemura, Okada, Senaha ('05)]

$$\mathcal{L} \supset M^2 \Phi_1^\dagger \Phi_2$$

Gravitational wave and EWBG

一次相転移は重力波を生成

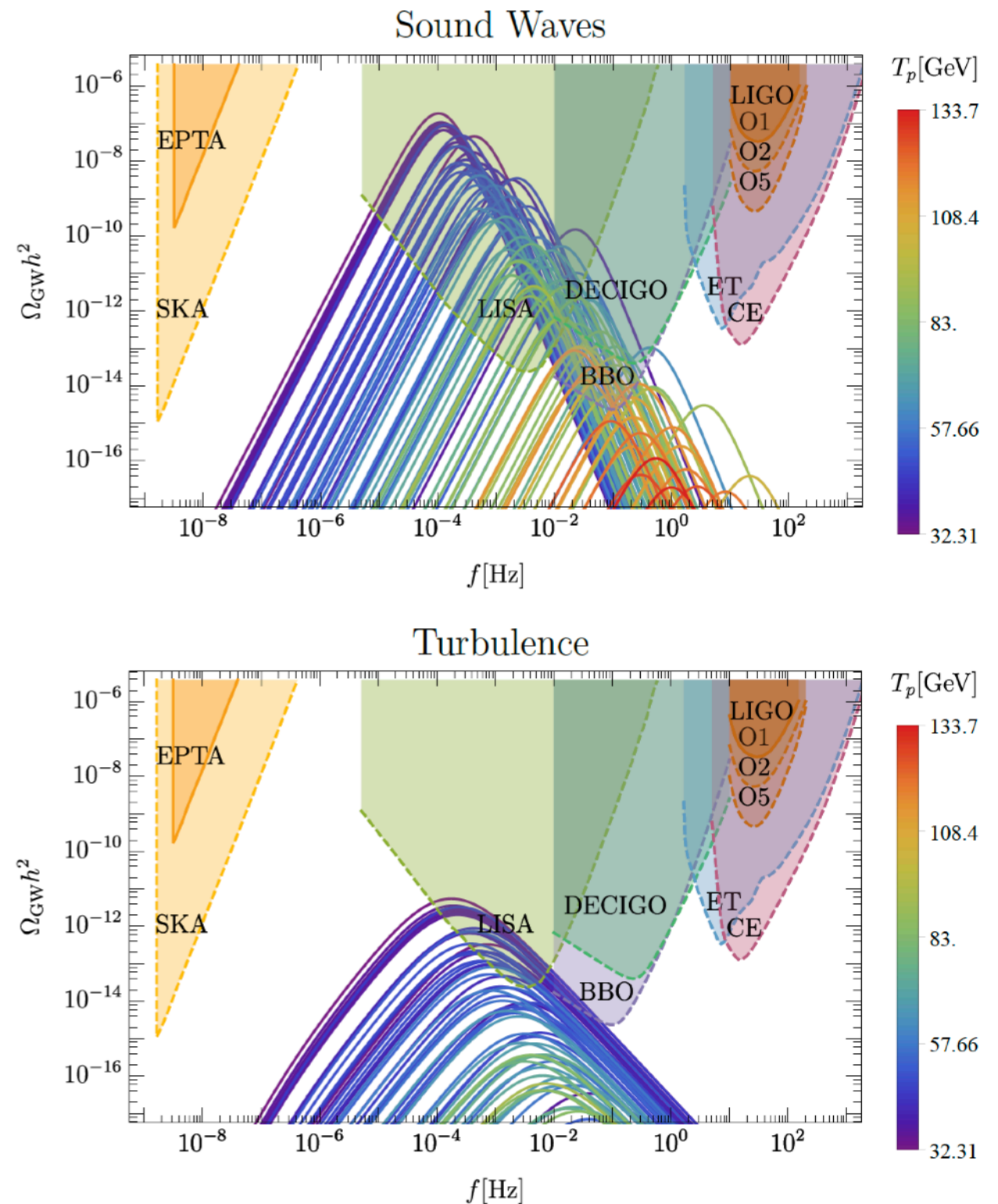
Singlet scalar による拡張の場合

バブルの生成、衝突、プラズマ中
な粗密波や乱流によって、エネル
ギー運動量テンソルに大きな非当
方性。

→ 重力波の生成

重力波の波動方程式：

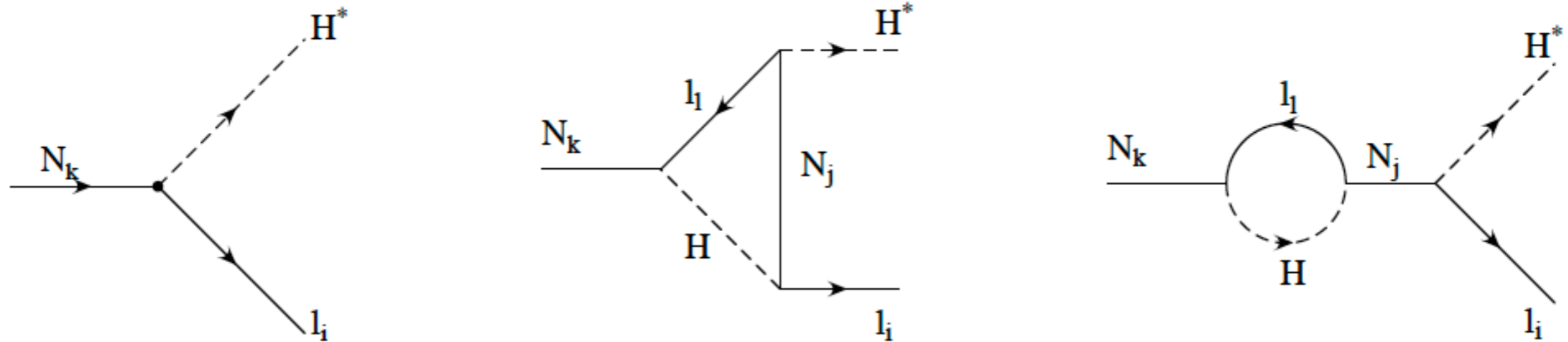
$$\square h_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



Leptogenesis

重い右巻きニュートリノの崩壊によるレプトン数非対称性の生成

[Fukugita, Yanagida ('86)]



右巻きニュートリノ：Gauge singlet、マヨラナフェルミオン

フェルミオン数の破れ： $N \rightarrow LH, N \rightarrow \bar{L}\bar{H} \rightarrow \Delta L = \pm 1$

CPの破れ：ニュートリノ湯川結合定数 $\mathcal{L} \supset -y_\nu \bar{L}\tilde{H}N$

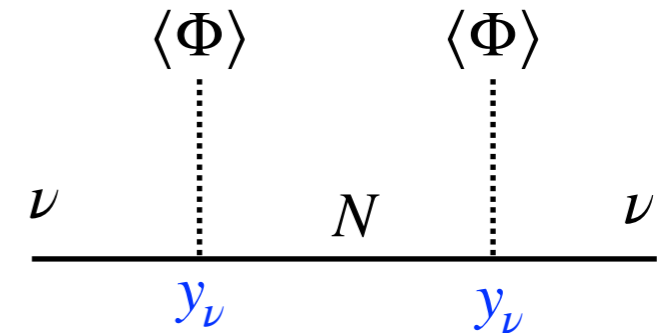
熱平衡からの離脱： $T \sim M_N$ で非相対論的に

→ スファレロン過程 $n_B = (28/79)n_{B-L} = -(28/79)n_L$

Leptogenesis and Seesaw mechanism

ニュートリノ振動と右巻きニュートリノ

$$[m_\nu]_i = - \langle \Phi \rangle^2 U_{PMNS}^\dagger [y_\nu M_M^{-1} y_\nu^T] U_{PMNS}^*$$



右巻きニュートリノも3世代

$$y_\nu = \frac{i}{\langle \Phi \rangle} U_{PMNS} m_\nu^{\frac{1}{2}} \Omega M_N^{\frac{1}{2}}$$

[Casas, Ibarra ('01)]

Ω : 複素直行行列 → 3つの右巻きニュートリノの混合角
3つのCP位相

$\Delta m^2, \theta_{ij}$

Dirac phase : δ

Majorana phase : α_{21}, α_{31}

湯川のフレーバー構造

右巻きニュートリノの物理は、常にニュートリノ振動と関連付く

Leptogenesis and neutrino oscillation

右巻きニュートリノが階層的な場合 $M_1 \ll M_2 \ll M_3$

$$Y_B = \frac{28}{79} Y_{B-L} \quad Y_{B-L} = \epsilon_1 Y_{N_1}$$

Decay asymmetry param.

$$\epsilon_I = \frac{\sum_{\alpha} [\Gamma(N_I \rightarrow L_{\alpha} H) - \Gamma(N_I \rightarrow \bar{L}_{\alpha} \bar{H})]}{\sum_{\alpha} [\Gamma(N_I \rightarrow L_{\alpha} H) + \Gamma(N_I \rightarrow \bar{L}_{\alpha} \bar{H})]} \quad \epsilon_1 \approx \frac{3M_1}{16\pi(y^{\dagger}y)_{11}} \sum_J \text{Im}[(y_{\nu}^{\dagger}y_{\nu})_{J1}^2] M_J^{-1}$$

$$|\epsilon_1| \lesssim |\epsilon_1^{\text{max}}| = \frac{3M_1}{16\pi v^2} (m_3 - m_1) \approx \frac{3M_1}{16\pi v^2} m_3 \approx 10^{-16} \left(\frac{M_1}{\text{GeV}} \right)$$

$$Y_B = 8.8 * 10^{-11} \lesssim \frac{28}{79} |\epsilon_1^{\text{max}} Y_{N_1}^{\text{max}}| = 1.4 \times 10^{-19} \left(\frac{M_1}{\text{GeV}} \right)$$

$$Y_{N_1}^{\text{max}} = n_{N_1}^{\text{max}}/s \approx 3.9 \times 10^{-3} \quad (g_* = 106.75)$$

ニュートリノ質量スケールから
右巻きニュートリノの質量を制限

$$M_1 \gtrsim 6.2 \times 10^8 \text{GeV}$$

[Davidson, Ibarra ('02)]

Leptogenesis and low-energy CP violation

Flavor effect

$T \gtrsim 10^{12}$ GeV: レプトンを区別できない → High energy CP のみ

$$\epsilon_1 \approx \frac{3M_1}{16\pi(y^\dagger y)_{11}} \sum_J \text{Im}[(y_\nu^\dagger y_\nu)_{J1}^2] M_J^{-1} \longrightarrow y_\nu^\dagger y_\nu = \frac{1}{\langle \Phi \rangle^2} M_N^{\frac{1}{2}} \Omega^\dagger m_\nu \Omega M_N^{\frac{1}{2}}$$

$T \lesssim 10^{12}$ GeV: τ とそれ以外の区別 ($\Gamma_\tau \sim y_\tau^2 T > H$)

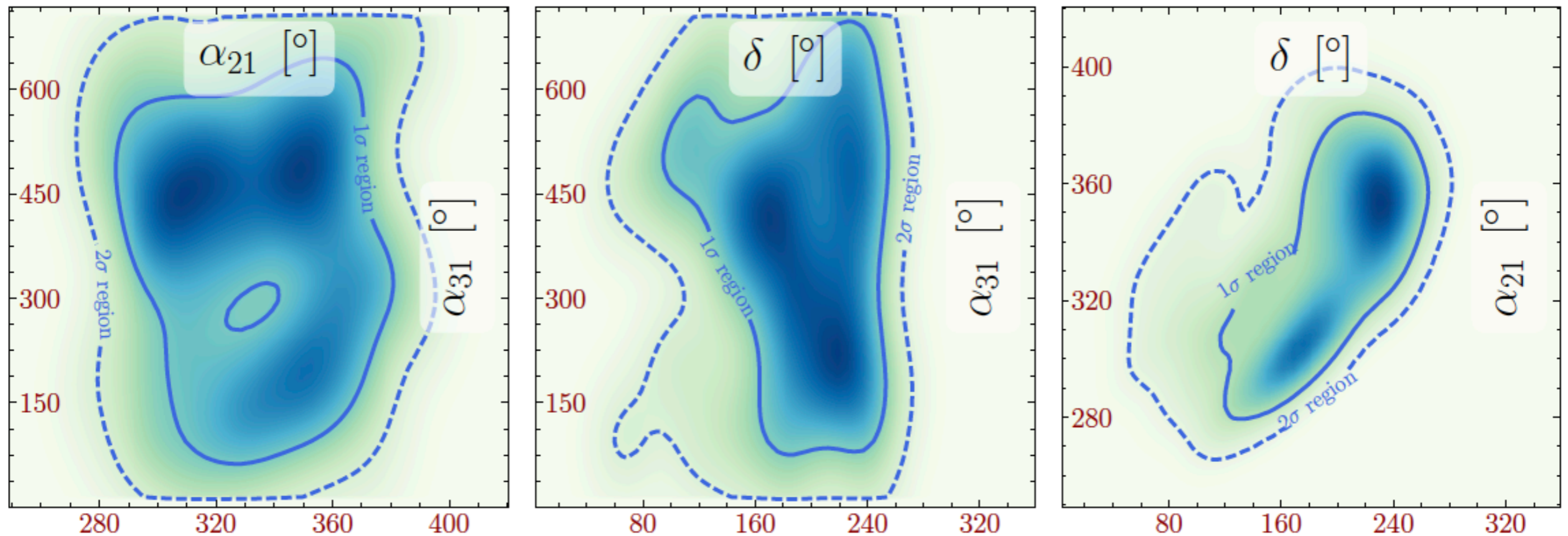
$Y_{B-L} \longrightarrow Y_{B/3-L_e}, Y_{B/3-L_\mu}, Y_{B/3-L_\tau}$ の発展をそれぞれ求める

$$\epsilon_{1,\alpha} \approx \frac{3M_1}{16\pi v^2} \frac{\sum_{\beta,\gamma} \text{Im}[m_\beta^{\frac{1}{2}} m_\gamma^{\frac{3}{2}} U_{PMNS,\alpha\beta}^* U_{PMNS,\alpha\gamma} \Omega_{1\beta} \Omega_{1\gamma}]}{\sum_\beta m_\beta |\Omega_{1\beta}|^2}$$

→ Low energy CP も寄与する

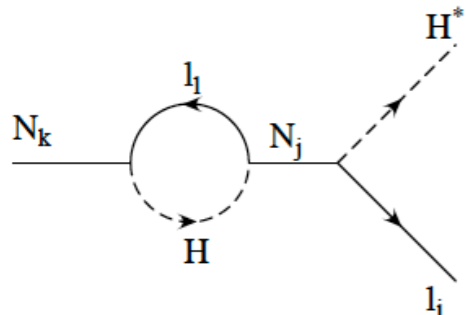
Leptogenesis and low-energy CP violation

Leptogenesis only with low energy CP violation



$M_1 = 10^{10}$ GeV, high energy CP violation = 0

Low-scale Leptogenesis

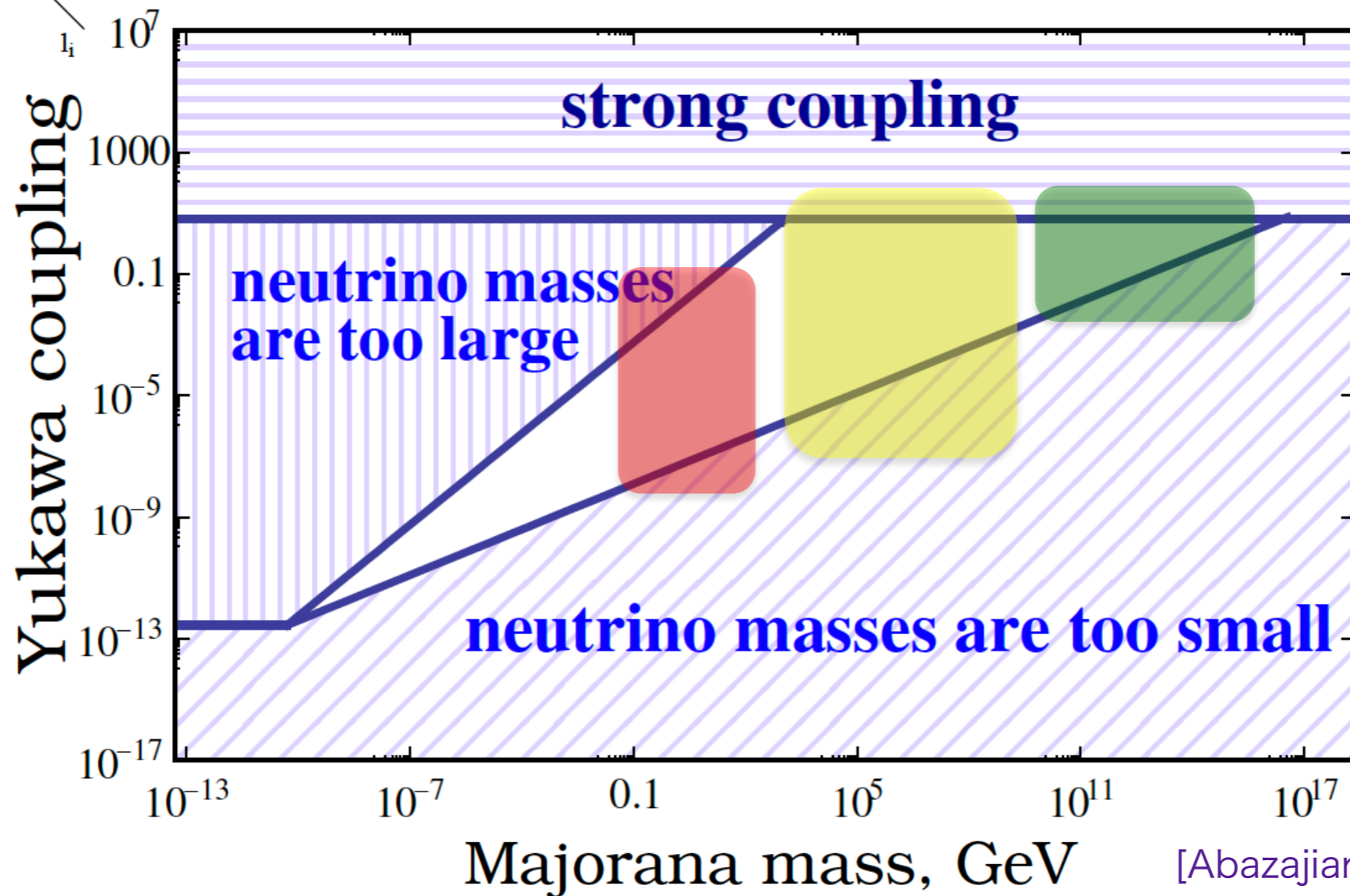


Resonant leptogenesis

[Pilaftsis ('97)]
[Pilaftsis, Underwood ('05)]

Thermal leptogenesis

[Fukugita, Yanagida ('86)]



Baryogenesis via $RH\nu$ oscillation

[Akhmedov, Rubakov, Smirnov ('98)]
[Asaka, Shaposhnikov ('05)]

崩壊ではなく振動におけるCPの破れ
抑制された湯川によって熱平衡から外れる

Testability of leptogenesis

直接検証

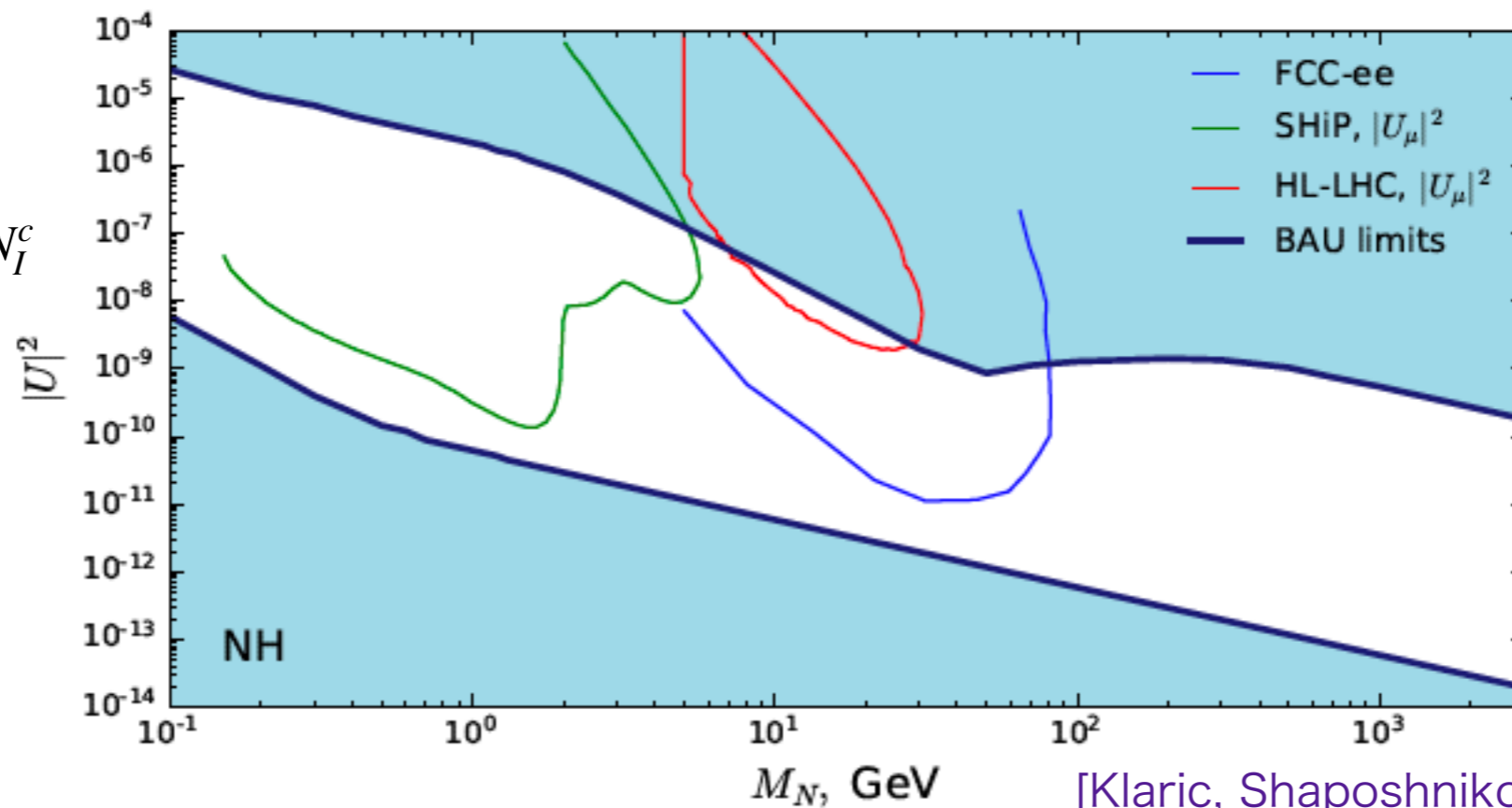
- Beam-dump exps.
- Displaced vertex
- Collider exps.

Active-sterile mixing:

$$\nu_\alpha = [U_{PMNS}]_{\alpha i} \nu_i + \Theta_{\alpha I} N_I^c$$

$$|U|^2 = \sum_{\alpha, I} |\Theta_{\alpha I}|^2$$

$$\Theta_{\alpha I} = \frac{\langle \Phi \rangle F_{\alpha I}}{M_I}$$



[Klaric, Shaposhnikov, Tmiryasov ('20)]

2つの右巻き
ニュートリノ
の場合

理論のフリー
パラメータ：
 $\bar{M}, \Delta M, \delta, \eta,$
 $\text{Re } \theta_R, \text{Im } \theta_R$

間接検証

- Lepton number violation
- Lepton flavor violation

Summary

サハロフ条件 + スファレロン過程 + ヒッグス粒子の発見

宇宙バリオン数非対称性 = 標準模型を超えた物理現象

標準模型の拡張に要求されることは、

1. $B - L$ の非保存
2. 新たな CP の破れ
3. 宇宙初期に熱平衡を破る過程

多種多様な機構が提唱されている中、将来の実験観測と関連付く機構は、

1. スカラー拡張：電弱バリオジェネシス
→ 未知のボゾン、ヒッグスパラメータ、重力波
2. フェルミオン拡張：レプトジェネシス
→ LNV、LFV、右巻きニュートリノの検証