

Electroweak-like Baryogenesis with New Chiral Matter

素粒子物理学の進展2020

藤倉浩平 (東工大)

共同研究者:

張ヶ谷圭介 (IAS)

Ruoquan Wang (Rutgers U.)

中井雄一郎 (TD Lee Institute)

目次

- **イントロダクション**
 - **電弱バリオジェネシスの機構**
 - **電弱バリオジェネシスの問題点**
- **模型の紹介**
- **バリオン数の生成機構と結果**

イントロダクション

バリオン非対称性

ビッグバン元素合成が成功するには、バリオン非対称性が必要

$$\frac{n_B}{s} \sim 10^{-11}$$

n_B : baryon number density

s : entropy density

サハロフの3条件

- バリオン数の破れ
- CP 非対称性
- 非平衡状態の実現

標準模型で満たせるか？

- バリオン数の破れ
- CP 非対称性
- 非平衡状態の実現

B+Lの破れ (スファレロン過程)

[F. R. Klinkhamer and N. S. Manton (1984)]

標準模型において、**B+Lはカイラルアノマリーで破れている**

B+L violation rate:

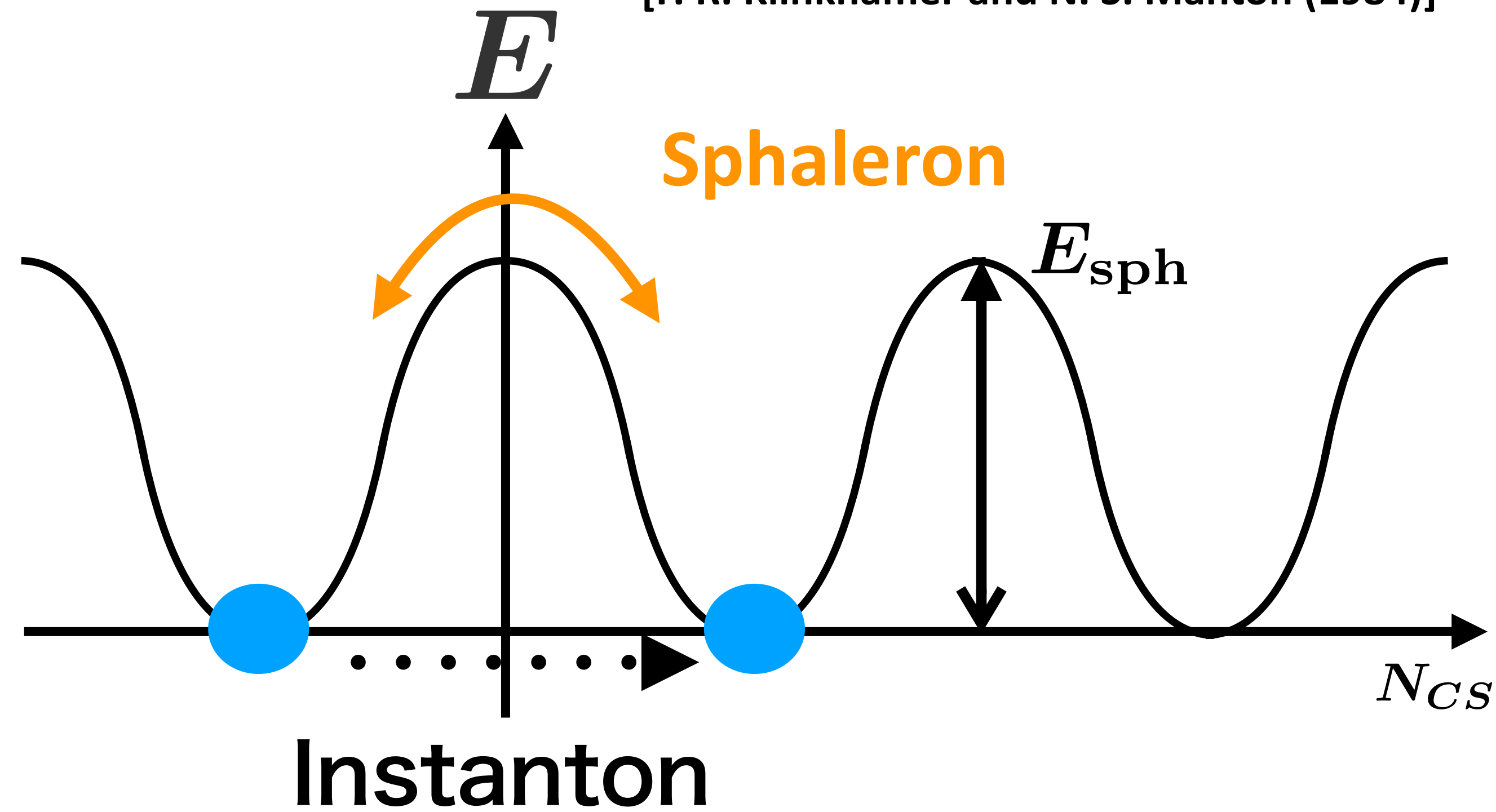
$$\Gamma \simeq T e^{-\frac{E_{\text{sph}}(T)}{T}}$$

$$E_{\text{sph}} \simeq \frac{2\pi v(T)}{g_R} \quad v(T) : \text{Higgs VEV}$$

$$v(T) = 0$$



$$\Gamma \sim T$$



有限温度効果により、B+Lを破る過程が頻繁に起きる

(B-Lは破れない)

Cabbibo-Kobayashi-Maskawa (CKM) matrix

クォークが3世代存在すると、CPを破る位相が一つ現れる

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} \supset i\bar{u}'_L W_\mu^+ \gamma^\mu V_{\text{CKM}} d'_L + \text{c.c.} \quad \text{質量固有状態のクォーク: } u'_L, d'_L$$

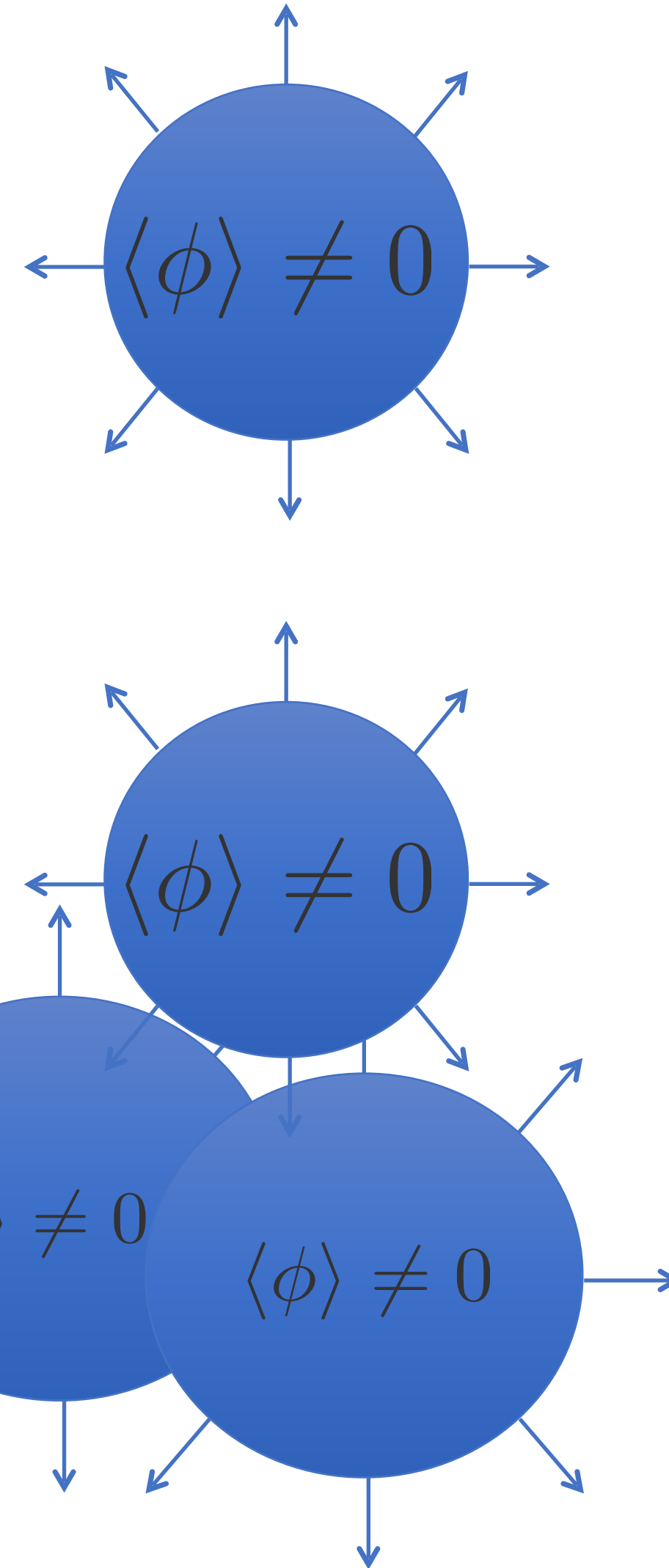
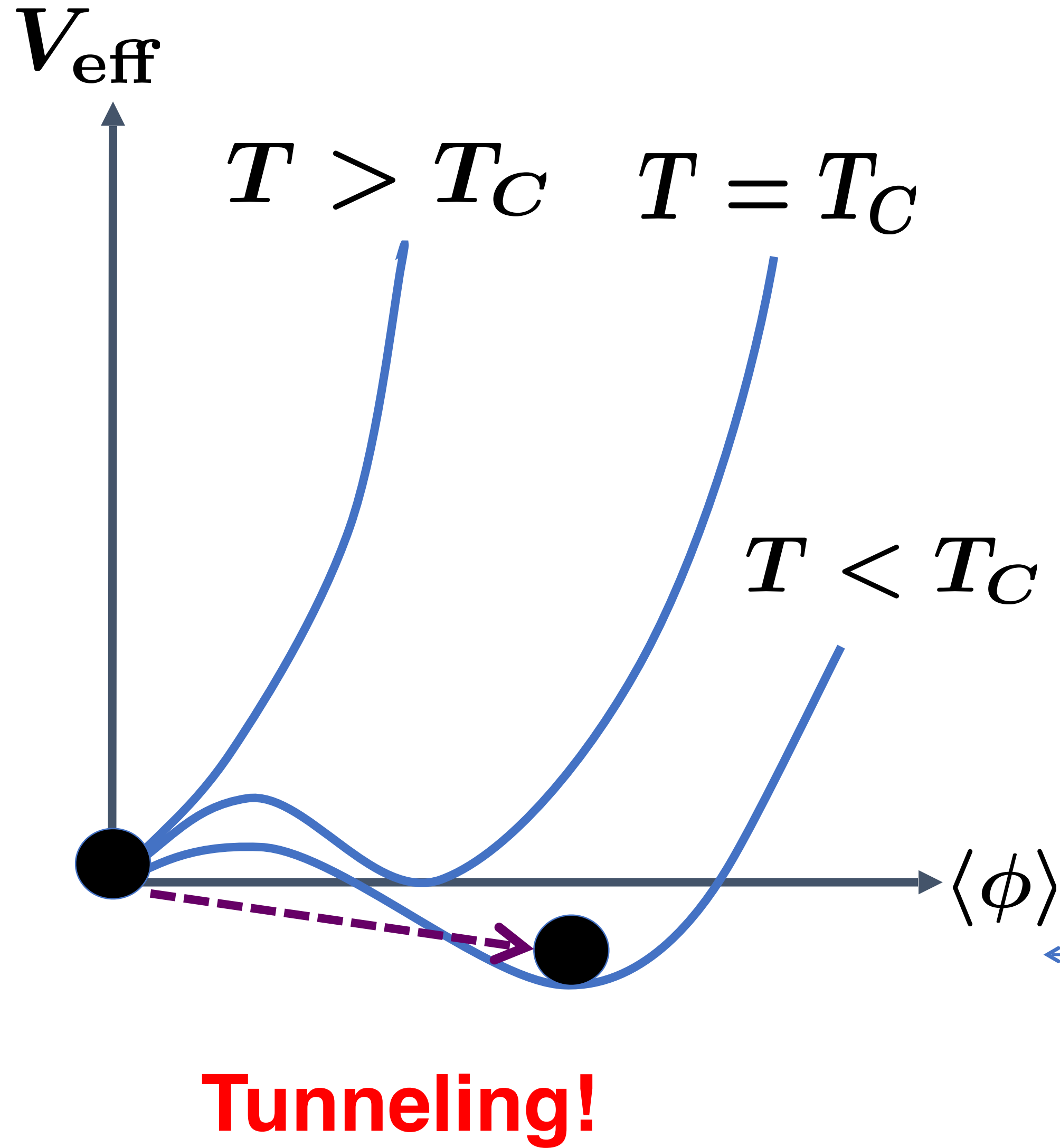
$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{31} & s_{12}c_{31} & s_{31}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{31}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{31}e^{i\delta} & s_{23}c_{31} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{31}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{31}e^{i\delta} & c_{23}c_{31} \end{pmatrix}$$

$$s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij}, c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij}$$

CP violationの度合い (Jarlskog invariant)

$$J \equiv s_{12}s_{23}s_{31}c_{12}c_{23}c_{31}^2 \sin \delta$$

一次相転移



一次相転移が起きると宇宙に泡が生成される

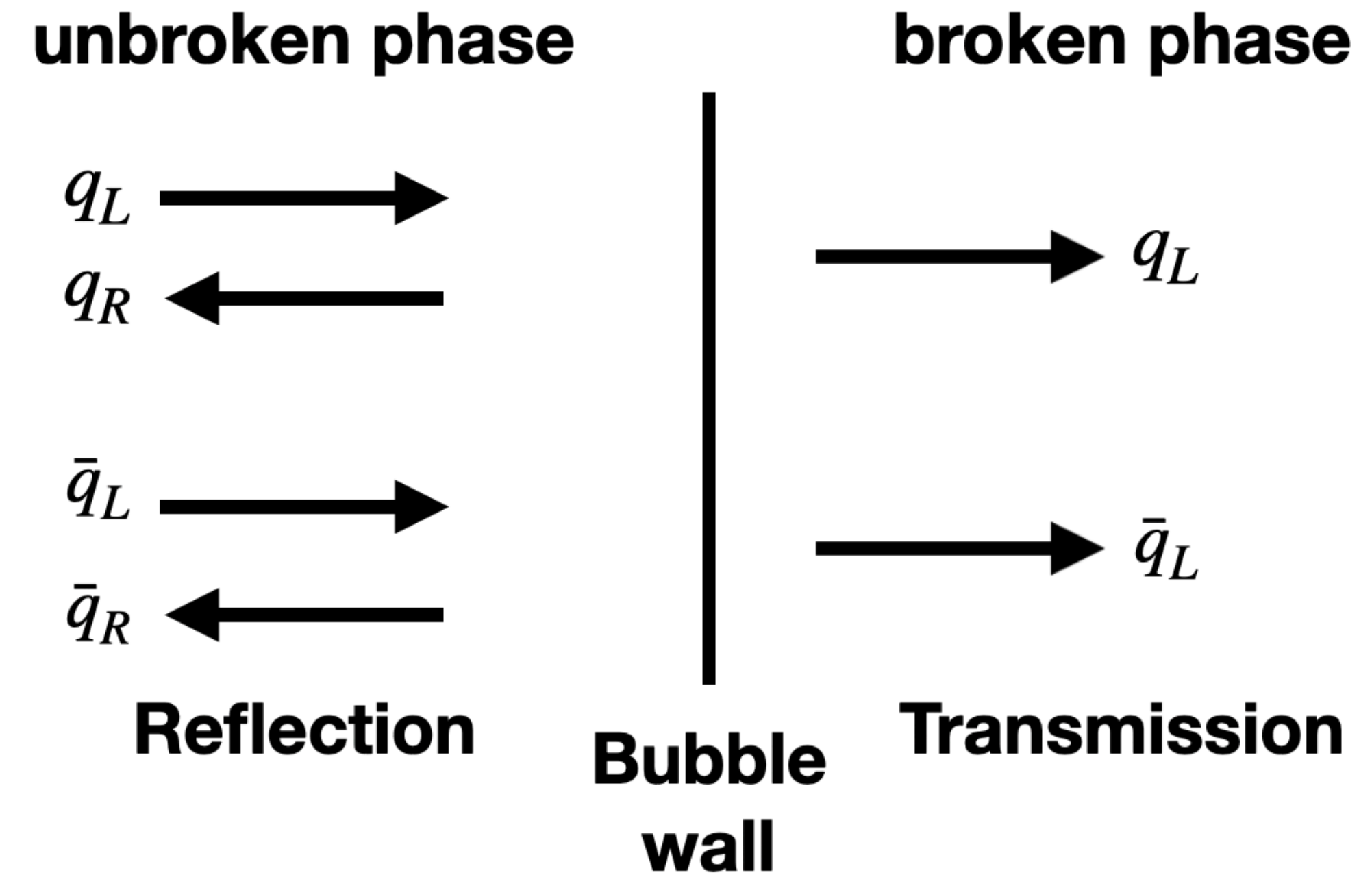
泡の生成後に、膨張して相転移は進行

電弱バリオジェネシス

- 泡の境界でクォークと反クォークが反射

- クォークと反クォークの反射率はCP violationの効果で異なる

- 泡の内側で、スファレロン過程が凍結(強い一次相転移)すれば、バリオン非対称性が生成される



標準模型で満たせるか？

- バリオン数の破れ

スファレロン過程

- CP 非対称性

Cabbibo-Kobayashi-Maskawa (CKM) 位相

- 非平衡状態の実現

強い電弱一次相転移

標準模型でバリオン数が生成できるか？

- CKM位相では、十分なバリオン数が生成できない

[M. B. Gavela, P. Hernandez, J. Orloff and O. Pene (1993)]

[P. Huet and E. Sather (1994)]

[M. B. Gavela, P. Hernandez, J. Orloff, O. Pene and C. Quimbay (1994)]

$$d_{\text{CP}} \sim J \times (m_u^2 - m_c^2)(m_c^2 - m_t^2)(m_t^2 - m_u^2) \\ \times (m_d^2 - m_s^2)(m_s^2 - m_b^2)(m_b^2 - m_d^2)$$

$$\frac{n_B}{s} < \frac{d_{\text{CP}}}{T_c^{12}} \sim 10^{-27} \ll 10^{-10}$$

電弱相転移の臨界温度

$$T_C \sim 100\text{GeV}$$

- $m_h \simeq 125\text{GeV}$: 電弱相転移は**一次相転移でない (Lattice simulation)**

[A. I. Bochkaev and M.E. Shaposhnikov (1987)]

[K. Kajantie, M. Laine, K. Rummukainen and M.E. Shaposhnikov(1996)]

電弱バリオジェネシス

電弱バリオジェネシスのメカニズム自体に問題はないが、

- **新しいCP violation**
- **“強い”電弱一次相転移の実現** **が必要**

例:

Minimal supersymmetric Standard Model (MSSM)

[M.S. Carena, M. Quiros and C. E. M. Wagner (1996)]

CP violation: SUSY breaking パラメータ

強い一次相転移: スカラートップクォークのthermal loop

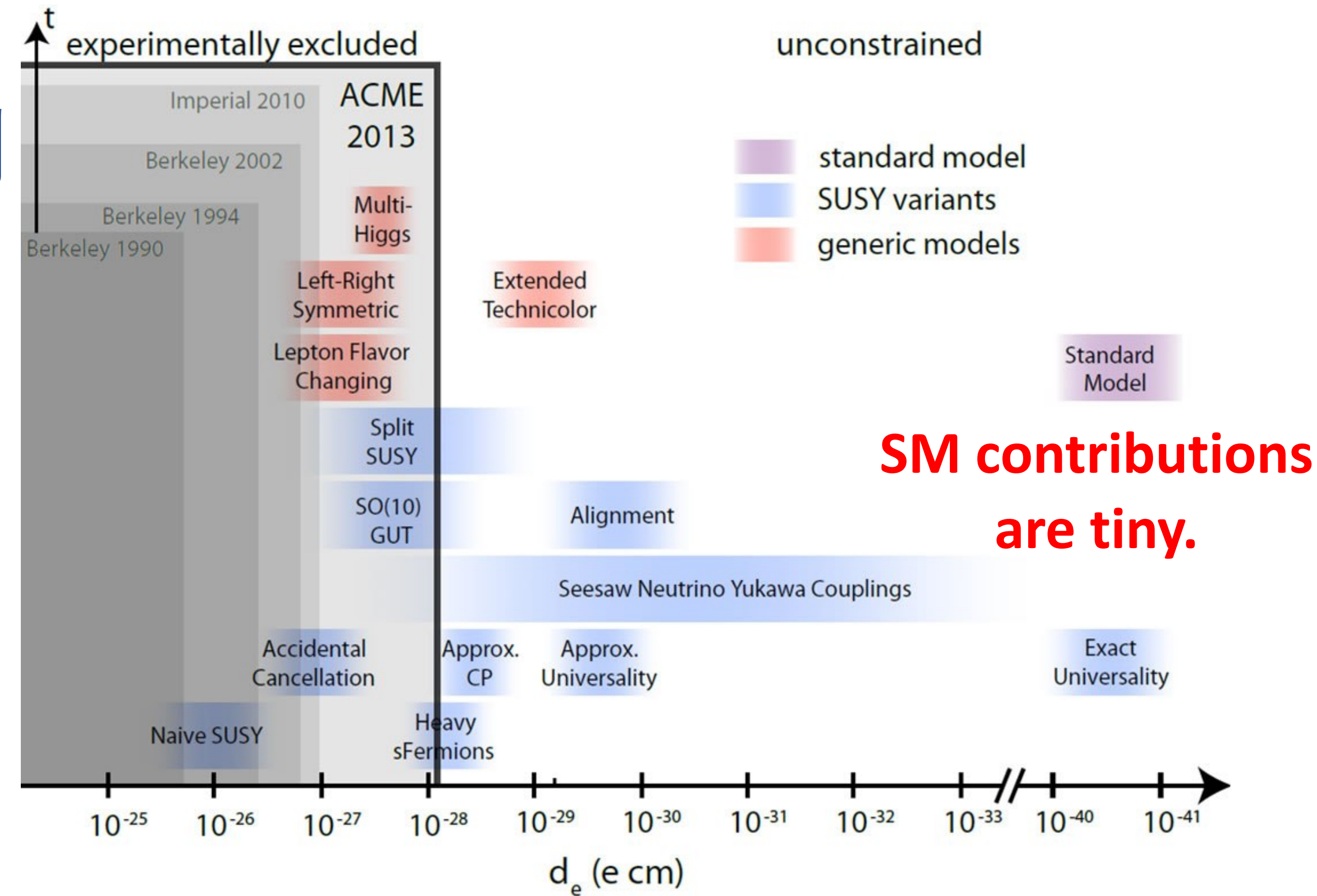
Electric Dipole Moment (EDM)

[W. Bernreuther, M. Suzuki (1991)]

新たなCP violationはEDMの観測
によって強く制限される

MSSMの電弱バリオジェネシス
はすでに97%CLで否定

[D. Curtin, P. Jaiswal and P. Meade (2012)]



EDMの制限を満たしながら、バリオン非対称性を（一次相転移を用いて）生成することができるか？

目次

- **イントロダクション**
 - **電弱バリオジェネシスの機構**
 - **電弱バリオジェネシスの問題点**
- **模型の紹介**
- **バリオン数の生成機構と結果**

Electroweak-like baryogenesis (EW-like BG)

- 標準模型のゲージ対称性を拡張をした $SU(3)_C \times SU(2)_R \times SU(2)_L \times U(1)_X$ が $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ に破れる模型を考えた
- $SU(2)_R \times U(1)_X \rightarrow U(1)_Y$ の一次相転移によって、B-LをSU(2)Rのスファレロン過程利用して生成
- $SU(2)_R \times U(1)_X \rightarrow U(1)_Y$ の破れのスケールが10TeVスケールならば、実験の制限と矛盾しない
- 生成されたB-Lは、電弱スファレロン過程によってバリオン非対称性に転換

模型の紹介(1)

- ヒッグスセクター:

$$G_{\text{LR}} \equiv SU(3)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_X$$

$$G_{\text{SM}} \equiv SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

$$H_R(\mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{2}, \frac{1}{2}) : G_{\text{LR}} \rightarrow G_{\text{SM}}$$

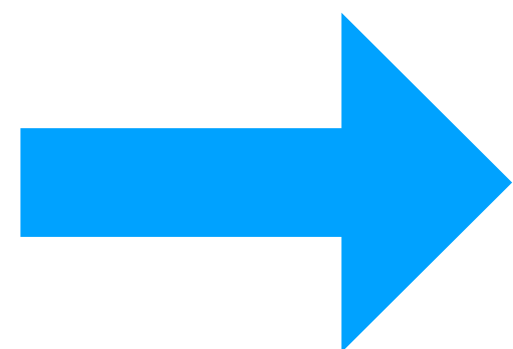
$$H_L(\mathbf{1}, \mathbf{2}, \mathbf{1}, \frac{1}{2}) \text{ or } \Phi(\mathbf{1}, \mathbf{2}, \mathbf{2}, 0) : G_{\text{SM}} \rightarrow SU(3)_c \times U(1)_{\text{EM}},$$

模型の紹介(2)

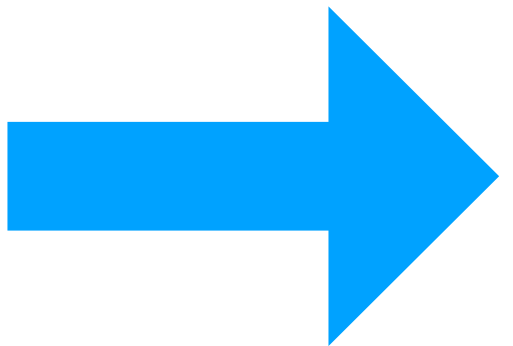
- 標準模型のクォーク・レプトン:

$$q_i = \begin{pmatrix} u_i \\ d_i \end{pmatrix} : (\mathbf{3}, \mathbf{2}, \mathbf{1}, \frac{1}{6})_{B=1/3}, \quad \bar{q}_i = \begin{pmatrix} \bar{u}_i \\ \bar{d}_i \end{pmatrix} : (\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, \mathbf{2}, -\frac{1}{6})_{B=-1/3},$$
$$l_i = \begin{pmatrix} \nu_i \\ e_i \end{pmatrix} : (\mathbf{1}, \mathbf{2}, \mathbf{1}, -\frac{1}{2})_{L=1}, \quad \bar{l}_i = \begin{pmatrix} \bar{\nu}_i \\ \bar{e}_i \end{pmatrix} : (\mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{2}, \frac{1}{2})_{L=-1},$$

- このMinimalなフェルミオンのextensionだと、B-LはSU(2)_LとSU(2)_Rのカイラルアノマリーで破れていない



SU(2)_Rのスファレロン過程でB-Lは生成できない！



B-Lを破るような新しいカイラルフェルミオンが必要！

模型の紹介(3)

- **新しいレプトン**: [J.E. Kim (2017) arXiv:1703.10925]

$$\bar{L}_i = \begin{pmatrix} \bar{E}_i \\ \bar{N}_i \end{pmatrix} : (1, 1, 2, \frac{1}{2})_{L=-1}, \quad \tilde{L} = \begin{pmatrix} \mathcal{E} \\ \mathcal{X} \end{pmatrix} : (1, 1, 2, -\frac{3}{2})_{L=1},$$

$$E_i : (1, 1, 1, -1)_{L=1}, \quad N_i : (1, 1, 1, 0)_{L=1}, \quad \bar{\mathcal{E}} : (1, 1, 1, 1)_{L=-1}, \quad \bar{\mathcal{X}} : (1, 1, 1, 2)_{L=-1},$$

$$\mathcal{L}_R = y_E^{ij} H_R \bar{L}_i E_j + y_N^{ij} H_R^\dagger \bar{L}_i N_j + y_\mathcal{E} H_R \tilde{L} \bar{\mathcal{E}} + y_\mathcal{X} H_R^\dagger \tilde{L} \bar{\mathcal{X}} + \text{h.c.}$$

**レプトン数を持つ新たな3世代の
フェルミオン**

模型の紹介(3)

- **新しいレプトン**: [J.E. Kim (2017) arXiv:1703.10925]

$$\bar{L}_i = \begin{pmatrix} \bar{E}_i \\ \bar{N}_i \end{pmatrix} : (1, 1, 2, \frac{1}{2})_{L=-1}, \quad \tilde{L} = \begin{pmatrix} \mathcal{E} \\ \mathcal{X} \end{pmatrix} : (1, 1, 2, -\frac{3}{2})_{L=1},$$

$$E_i : (1, 1, 1, -1)_{L=1}, \quad N_i : (1, 1, 1, 0)_{L=1}, \quad \bar{\mathcal{E}} : (1, 1, 1, 1)_{L=-1}, \quad \bar{\mathcal{X}} : (1, 1, 1, 2)_{L=-1},$$

$$\mathcal{L}_R = y_E^{ij} H_R \bar{L}_i E_j + y_N^{ij} H_R^\dagger \bar{L}_i N_j + y_\mathcal{E} H_R \tilde{L} \bar{\mathcal{E}} + y_\mathcal{X} H_R^\dagger \tilde{L} \bar{\mathcal{X}} + \text{h.c.}$$

**レプトン数を持つ新たな3世代の
フェルミオン**

**アノマリー相殺のために導入された1世代
のフェルミオン**

模型の紹介(3)

- **新しいレプトン**: [J.E. Kim (2017) arXiv:1703.10925]

$$\bar{L}_i = \begin{pmatrix} \bar{E}_i \\ \bar{N}_i \end{pmatrix} : (1, 1, 2, \frac{1}{2})_{L=-1}, \quad \tilde{L} = \begin{pmatrix} \mathcal{E} \\ \mathcal{X} \end{pmatrix} : (1, 1, 2, -\frac{3}{2})_{L=1},$$

$$E_i : (1, 1, 1, -1)_{L=1}, \quad N_i : (1, 1, 1, 0)_{L=1}, \quad \bar{\mathcal{E}} : (1, 1, 1, 1)_{L=-1}, \quad \bar{\mathcal{X}} : (1, 1, 1, 2)_{L=-1},$$

$$\mathcal{L}_R = y_E^{ij} H_R \bar{L}_i E_j + y_N^{ij} H_R^\dagger \bar{L}_i N_j + y_\mathcal{E} H_R \tilde{L} \bar{\mathcal{E}} + y_\mathcal{X} H_R^\dagger \tilde{L} \bar{\mathcal{X}} + \text{h.c.}$$

レプトン数を持つ新たな3世代の
フェルミオン

アノマリー相殺のために導入された1世代
のフェルミオン

- **新しいレプトンと標準模型のレプトンとのcoupling:**

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = g_{\bar{\mathcal{E}}}^i H_L \ell_i \bar{\mathcal{E}} + g_E^{ij} H_R \bar{\ell}_i E_j + g_N^{ij} H_R^\dagger \bar{\ell}_i N_j + \text{h.c.},$$

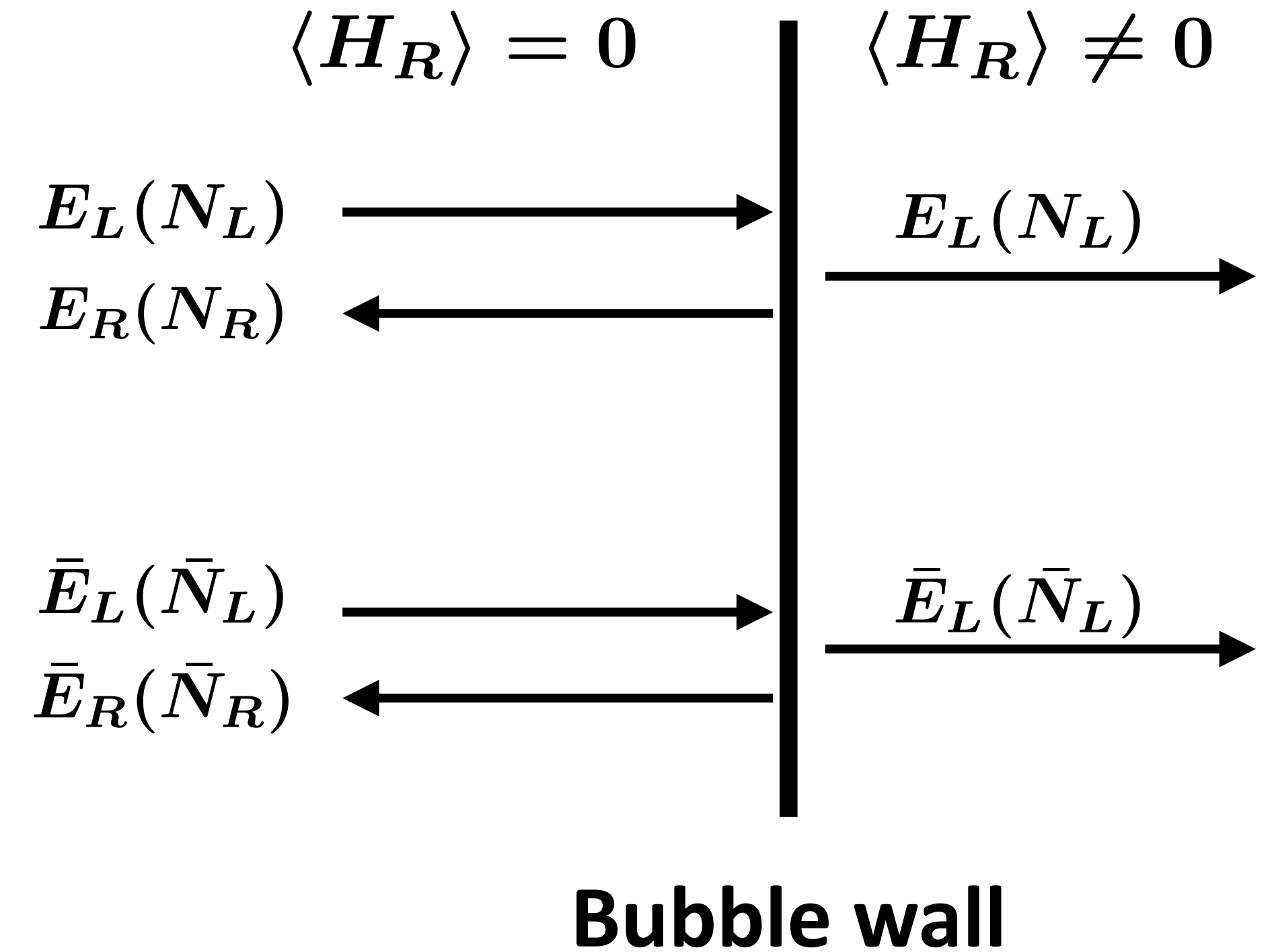
新しいレプトン数を標準模型のレプトン数に伝達

レプトン非対称性の生成

- 泡の境界でレプトンと反レプトンが反射

- レプトンと反レプトンの反射率はCP violationの効果で異なる

- 泡の内側で、 $SU(2)_R$ スファレロン過程が凍結すれば、レプトン数(B-L)が生成



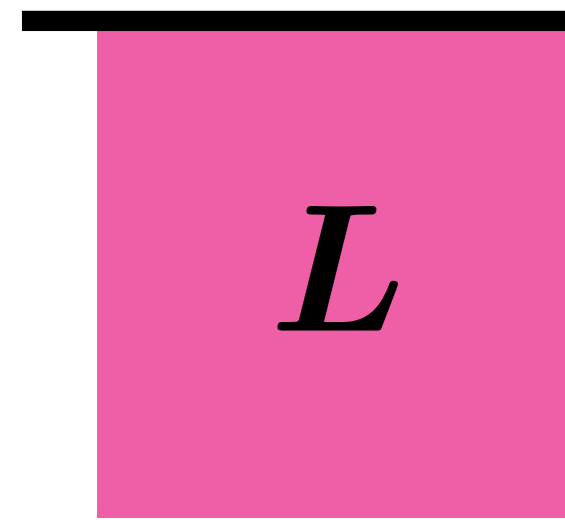
非対称性の転換(1)

N_i, E_i

l_i

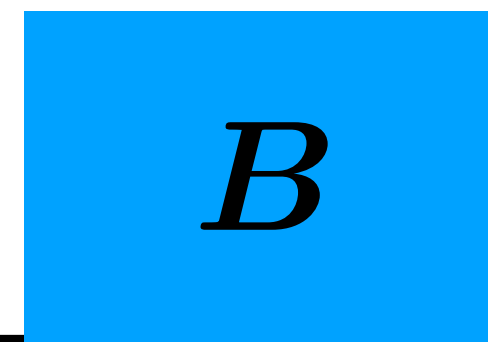
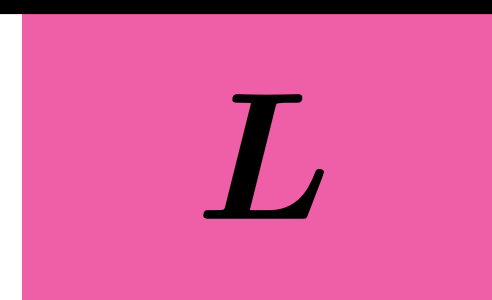
q_i

(i)

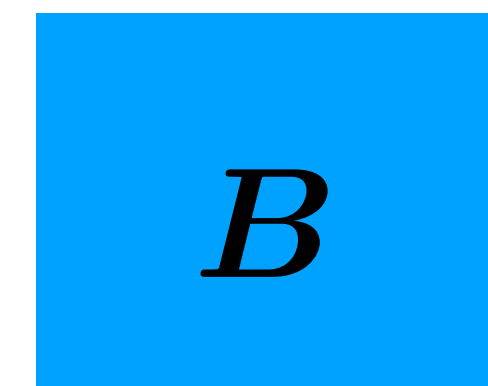


$G_{LR} \rightarrow G_{SM}$ の一時相転移で生成した
レプトン非対称性

(ii)



(iii)



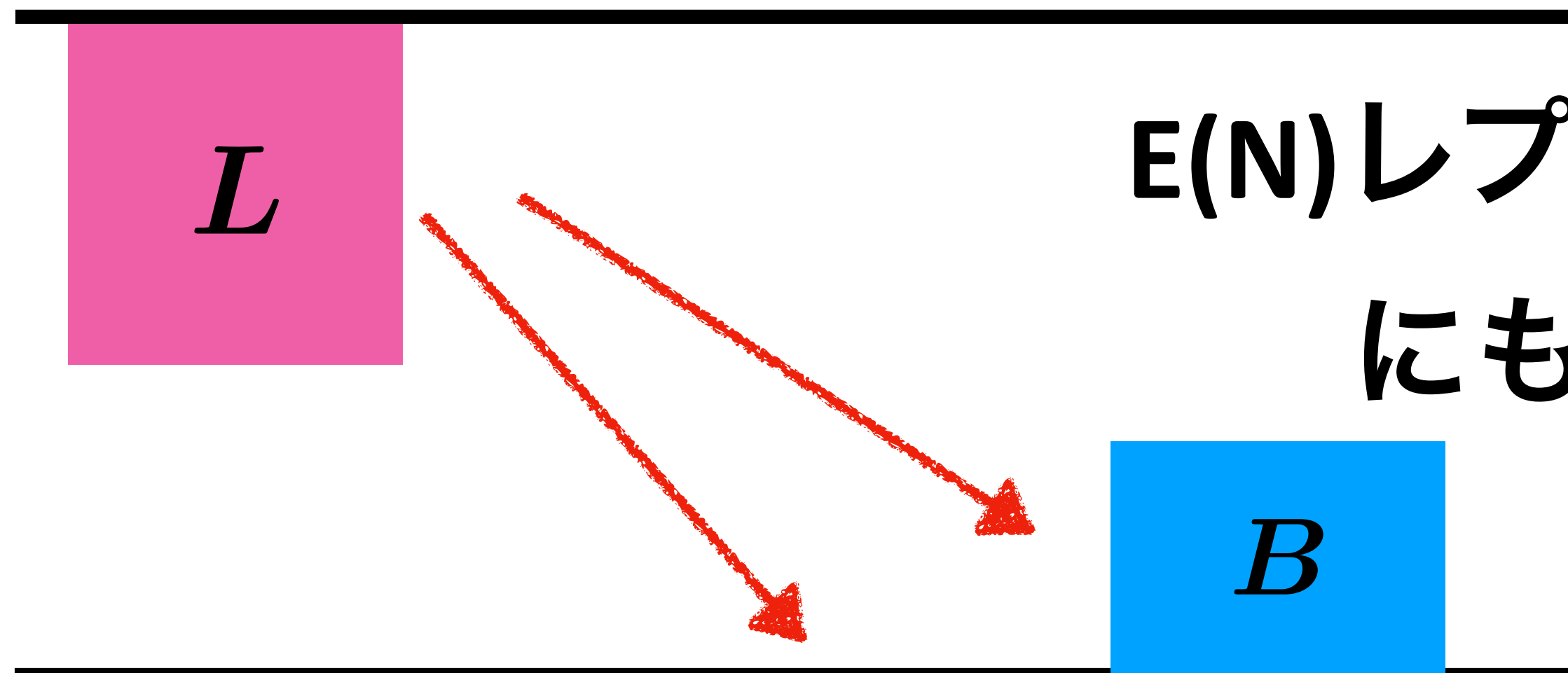
非対称性の転換(2)

N_i, E_i

l_i

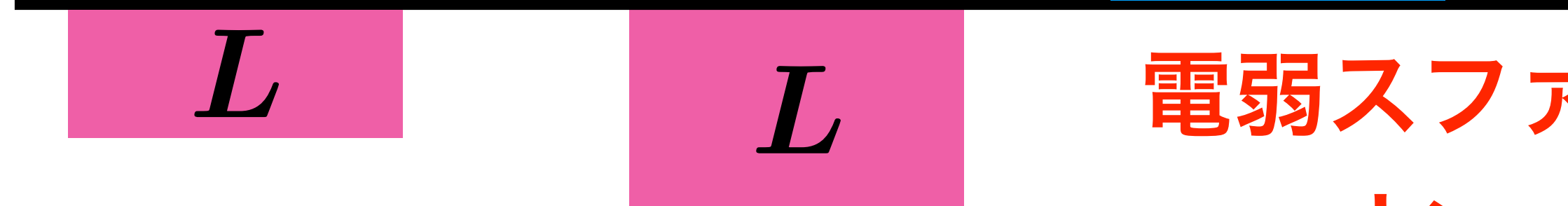
q_i

(i)



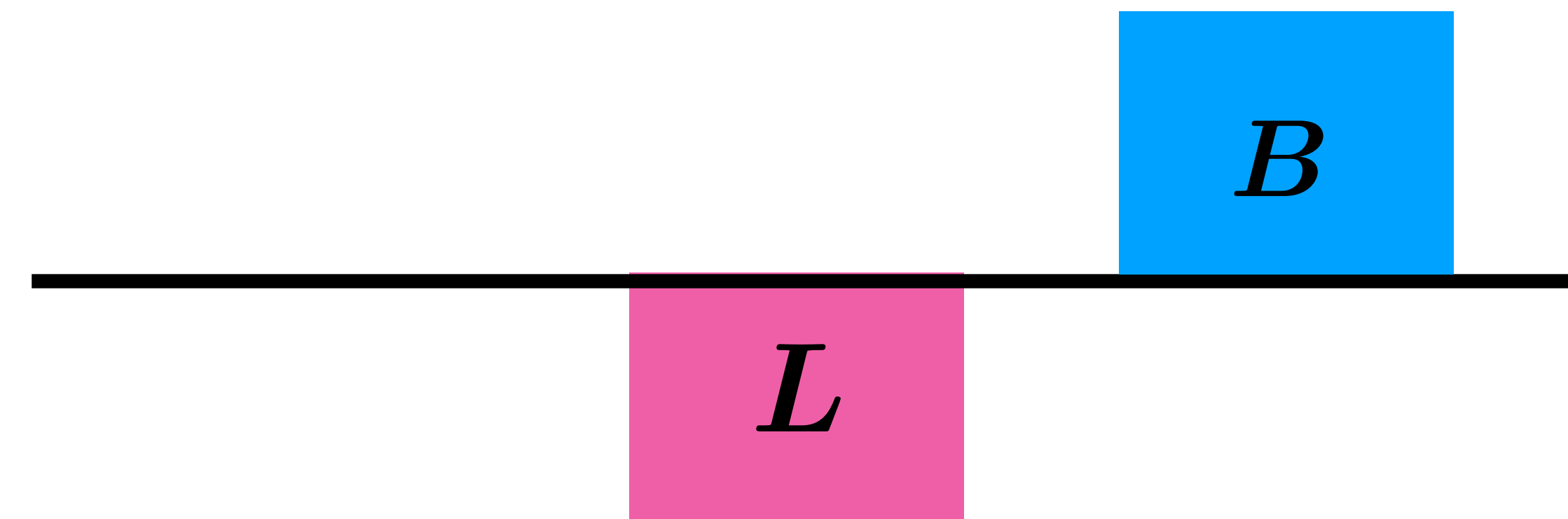
$E(N)$ レプトンは相転移後
にも熱平衡状態

(ii)



電弱スファレロンを通じて、標準模型のバリ
オン・レプトン数に転換 ($B-L$ は不変)

(iii)

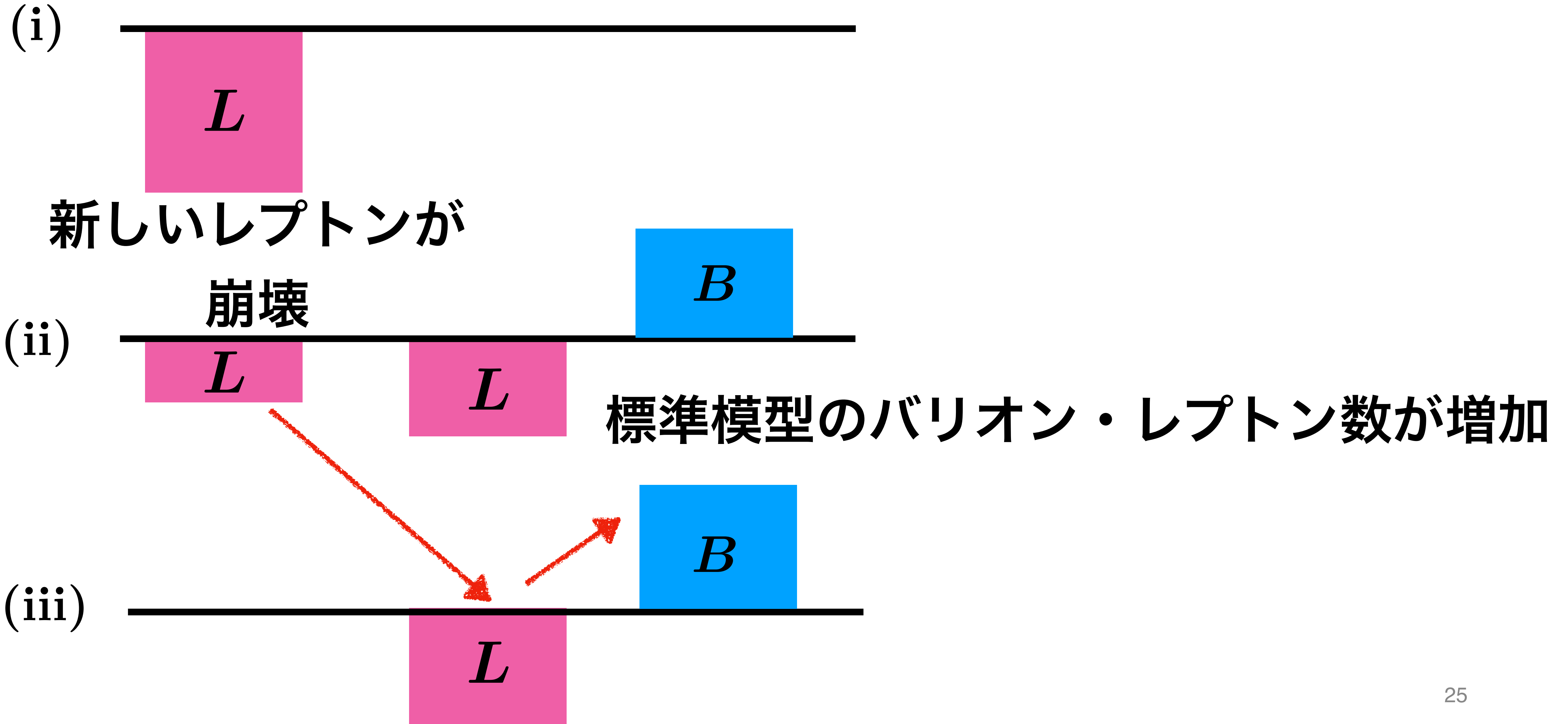


非対称性の転換(3)

N_i, E_i

l_i

q_i



目次

- **イントロダクション**
 - **電弱バリオジェネシスの機構**
 - **電弱バリオジェネシスの問題点**
- **模型の紹介**
- **バリオン数の生成機構と結果**

レプトン数の生成

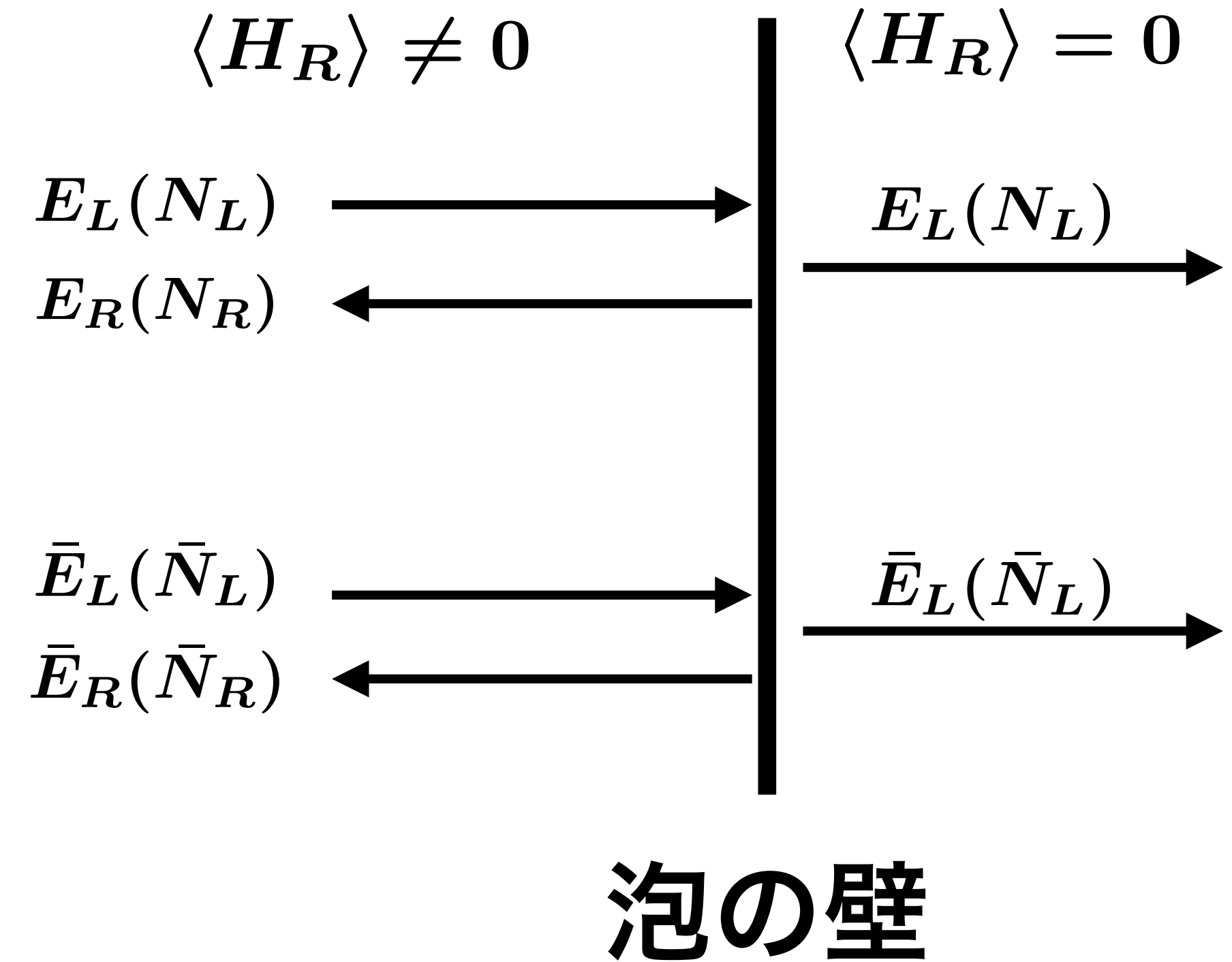
$$n_L^r \simeq \int \frac{d\omega}{2\pi} n_0(\omega) [1 - n_0(\omega)] \frac{(p_R - p_L) \cdot v_w}{T} \Delta(\omega)$$

フェルミ・ディラック分布

$$\Delta(\omega) \equiv \text{Tr}[\bar{R}_{LR}^\dagger \bar{R}_{LR} - R_{LR}^\dagger R_{LR}]$$

$\neq 0$ ~~CP~~

R_{LR} : reflection coefficient



反射の問題

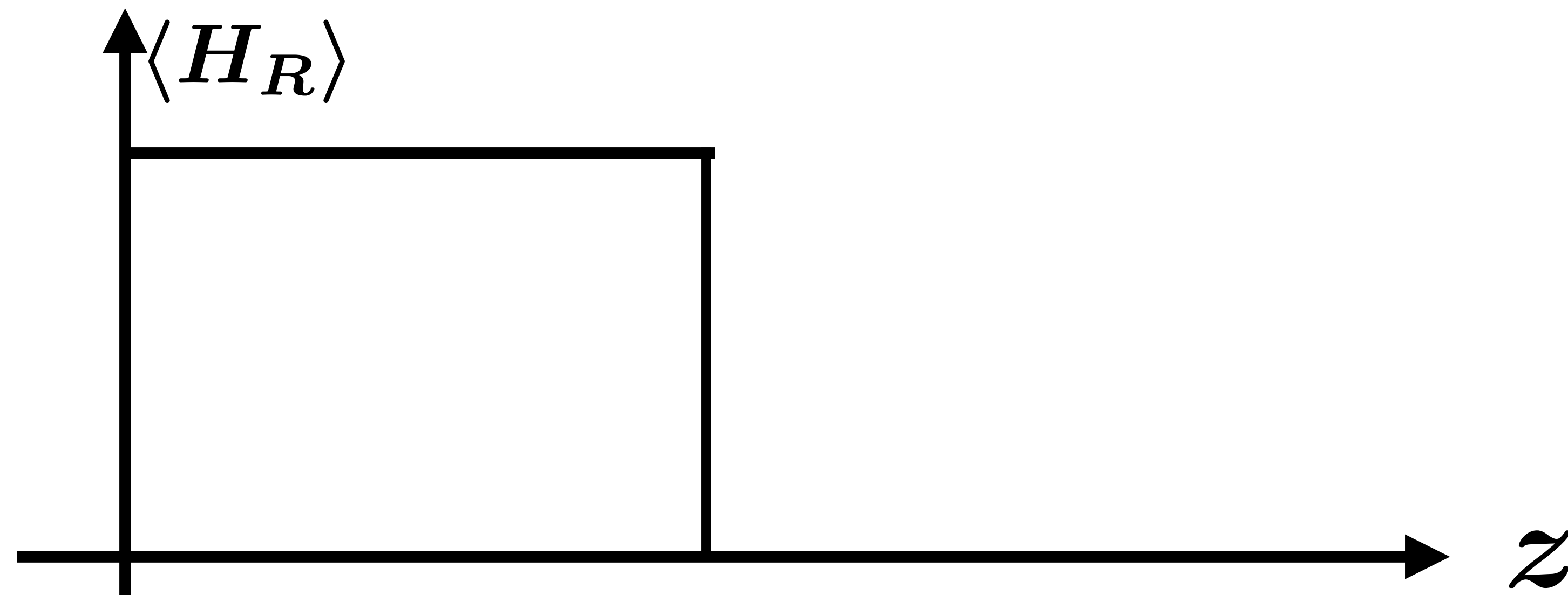
Effective Dirac equation:

$$\begin{pmatrix} (\omega + \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p}) - \Sigma_L(\omega, \mathbf{p}) & M(z) \\ M^\dagger(z) & (\omega - \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p}) - \Sigma_R(\omega, \mathbf{p}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_L \\ \Psi_R \end{pmatrix} = 0$$

質量項(非対称相のみである)

熱場の効果

Thin-wall近似



Quasiparticles

$$\Sigma_{L,R} = \Omega_{L,R} - 2i\gamma_{L,R}$$

Thermal mass

Damping rate

[M. B. Gavela, P. Hernandez, J. Orloff and O. Pene (1993)]

[P. Huet and E. Sather (1994)]

[M. B. Gavela, P. Hernandez, J. Orloff, O. Pene and C. Quimbay (1994)]

• CP violation は flavor changing thermal mass から出現:

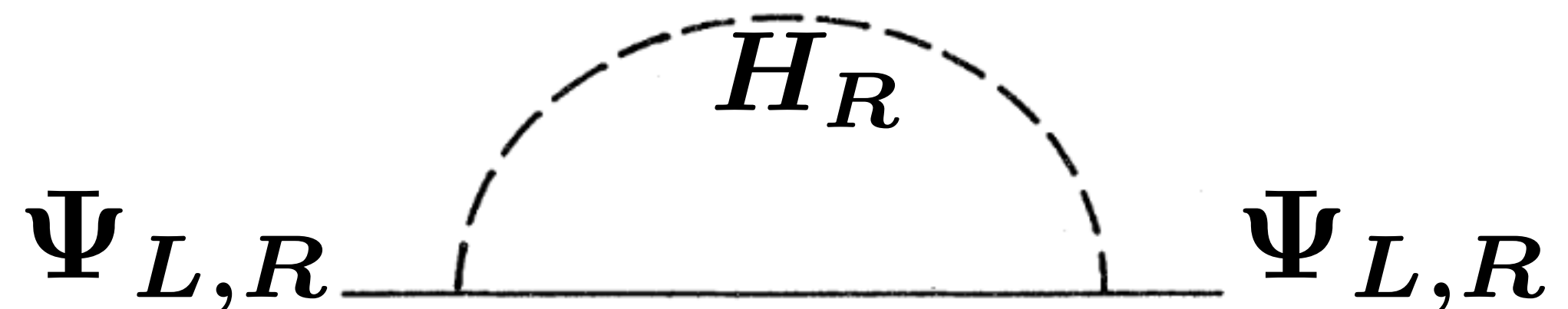
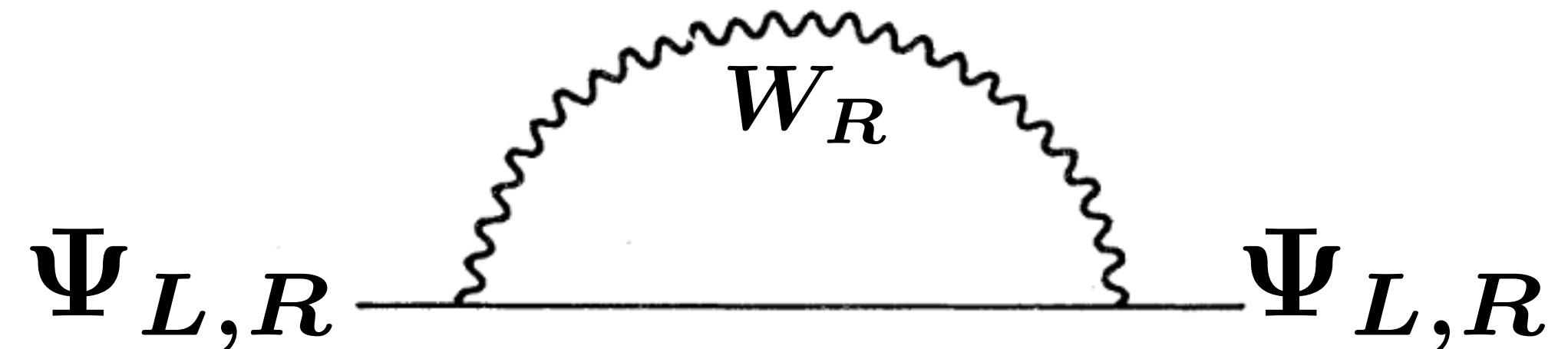
$$\Omega_{\bar{L}}^2 \simeq \frac{3\pi\alpha_R T^2}{8} + \frac{\pi\alpha_R T^2}{2} \frac{K \mathcal{M}_N^\dagger \mathcal{M}_N K^\dagger}{4m_{W_R}^2}$$

$$\Omega_E^2 = \frac{\pi\alpha_R T^2}{2} \tan^2 \theta_X + \frac{\pi\alpha_R T^2}{2} \frac{M_E^\dagger M_E}{4m_{W_R}^2}$$

$$\Omega_N^2 = \frac{\pi\alpha_R T^2}{2} \frac{M_N^\dagger M_N}{4m_{W_R}^2}$$

[G. R. Farrar and M. E. Shaposhnikov (1993)]

K: CKM matrix



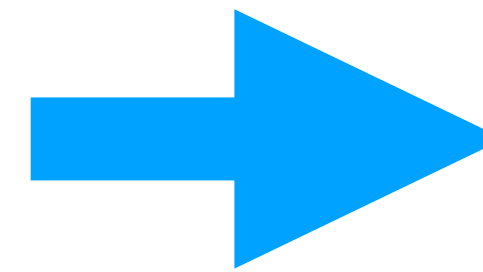
ディラック方程式の解法

Effective Dirac equation:

$$\begin{pmatrix} 2 \left((\omega + i\gamma_L + \frac{1}{3} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p}) - \Omega_L \right) & \mathcal{M}(z) \\ \mathcal{M}^\dagger(z) & 2 \left((\omega + i\gamma_R - \frac{1}{3} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p}) - \Omega_R \right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_L \\ E_R \end{pmatrix} = 0$$

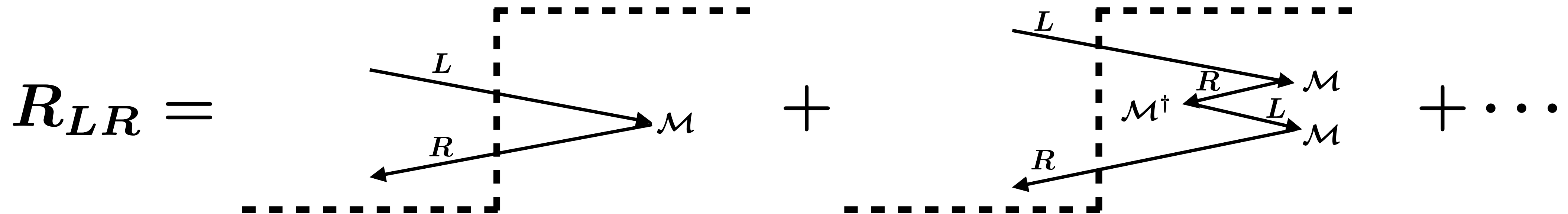
\mathcal{M} : perturbation

Flavor non-diagonal thermal mass: perturbation



解析的な解

[P. Huet and E. Sather (1994)]



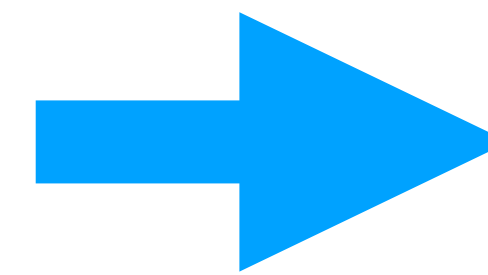
ディラック方程式の解法

Effective Dirac equation:

$$\begin{pmatrix} 2 \left((\omega + i\gamma_L + \frac{1}{3} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p}) - \Omega_L \right) & \mathcal{M}(z) \\ \mathcal{M}^\dagger(z) & 2 \left((\omega + i\gamma_R - \frac{1}{3} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p}) - \Omega_R \right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_L \\ E_R \end{pmatrix} = 0$$

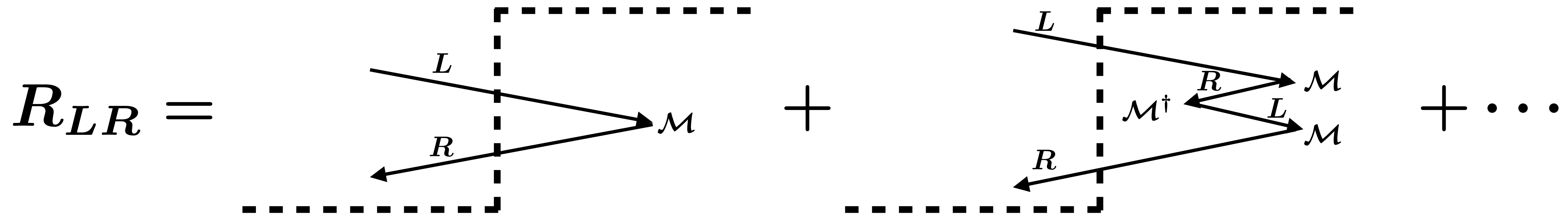
\mathcal{M} : perturbation

Flavor non-diagonal thermal mass: perturbation

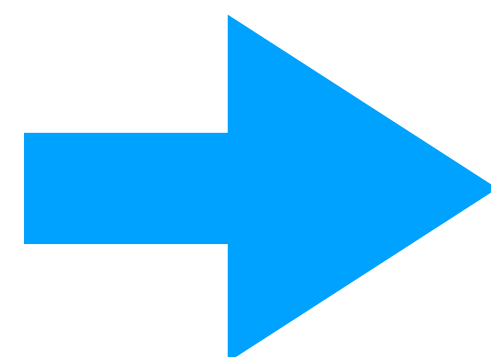


解析的な解

[P. Huet and E. Sather (1994)]



CP violationを出すために泡との多重散乱が必要



Damping rateから強い抑制が入る

泡によるレプトン数の生成量

$$\frac{n_L^r}{s} \sim \left(\frac{\alpha_R T^2}{\Omega_+ M_{W_R}^2} \right)^3 \frac{d_{\text{CP}}}{(\gamma)^9} \quad \Omega_+ \sim g_R T$$
$$\gamma \sim \alpha_R T$$

Flavor changing process

(3世代関わらなければならない)

Damping effectの抑制

$$d_{\text{CP}} \equiv J' (m_{E_1}^2 - m_{E_2}^2) (m_{E_2}^2 - m_{E_3}^2) (m_{E_3}^2 - m_{E_1}^2)$$
$$\times (m_{N_1}^2 - m_{N_2}^2) (m_{N_2}^2 - m_{N_3}^2) (m_{N_3}^2 - m_{N_1}^2)$$

Damping effectの抑制を小さくするために、

大きい湯川結合定数が必要

最終的なバリオン数

Broken
phase

Symmetric
phase

Diffusion time scale:

$$l_{\text{diff}} = \sqrt{D_L t}$$

$$l_w = v_w t$$

$$\tau_{\text{diff}} \sim \frac{D_L}{v_w^2}$$

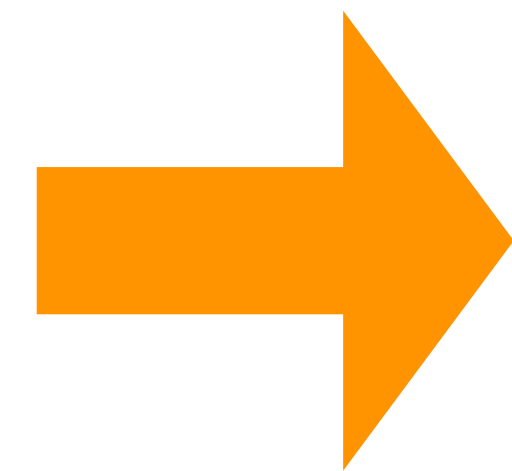
$$D_L^{-1} \sim \alpha_R^2 T$$

SU(2)_Rスファレロン過程の変化率:

$$\frac{\Gamma_{\text{Sph}}}{T^3}$$

$$\Gamma_{\text{Sph}} \simeq \alpha_R^5 T^4$$

$$n_L \sim \tau_{\text{diff}} \frac{\Gamma_{\text{Sph}}}{T^3} n_L^r$$



$$\frac{n_B}{s} \simeq \frac{12}{37} \frac{n_L}{s}$$

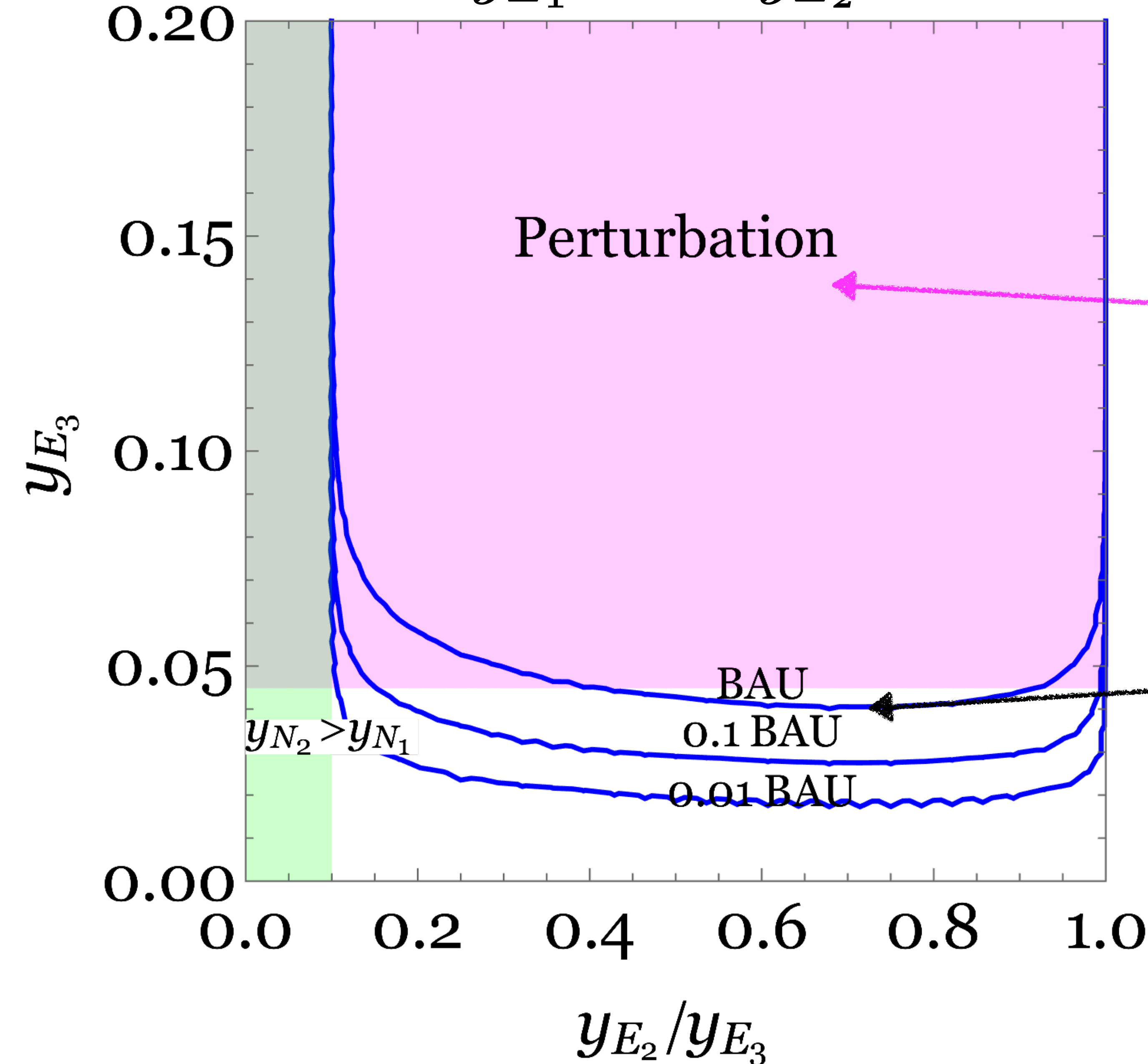
電弱スファレロンでバリオン非対称性に転換

Result

$$y_{E_1} = 0.1 y_{E_2}$$

$$g_R = 1.3, y_{N_1} = 0.05, y_{N_2} = 0.7, y_{N_3} = 1$$

$$J' = 0.08, v_w = 0.05, \lambda_R = 0.03$$



摂動論の計算が信用
できない領域

湯川結合定数が大きい方が
バリオン数がたくさん供給
できる！

まとめ

- 従来の電弱バリオジェネシスはEDMの観測などから、厳しい制限を受けている。
- 標準模型にない新たな対称性の破れ(10TeV スケール)に伴う一次相転移を利用して、B-Lを生成する機構を考えた。
- 新たなレプトンセクターのCKM位相がCP violationの起源になっており、バリオン非対称性を説明することができた。