

物質優勢な宇宙と電弱バリオン数生成

村 勇志 (KEK)

前半パート：電弱バリオン数生成のレビュー + 最後に少し自分の話

Masashi Aiko, Motoi Endo, Shinya Kanemura and YM, JHEP 07 (2025) 236

後半パート：生成バリオン数評価についての近年の進展

Motoi Endo, YM, and Tenta Tsuji, in preparing, arXiv:2607.xxxxx

Seminar at TWCU 2026/07/02

素粒子理論とは？

- 物質(もの)と空間(入れ物)の物理

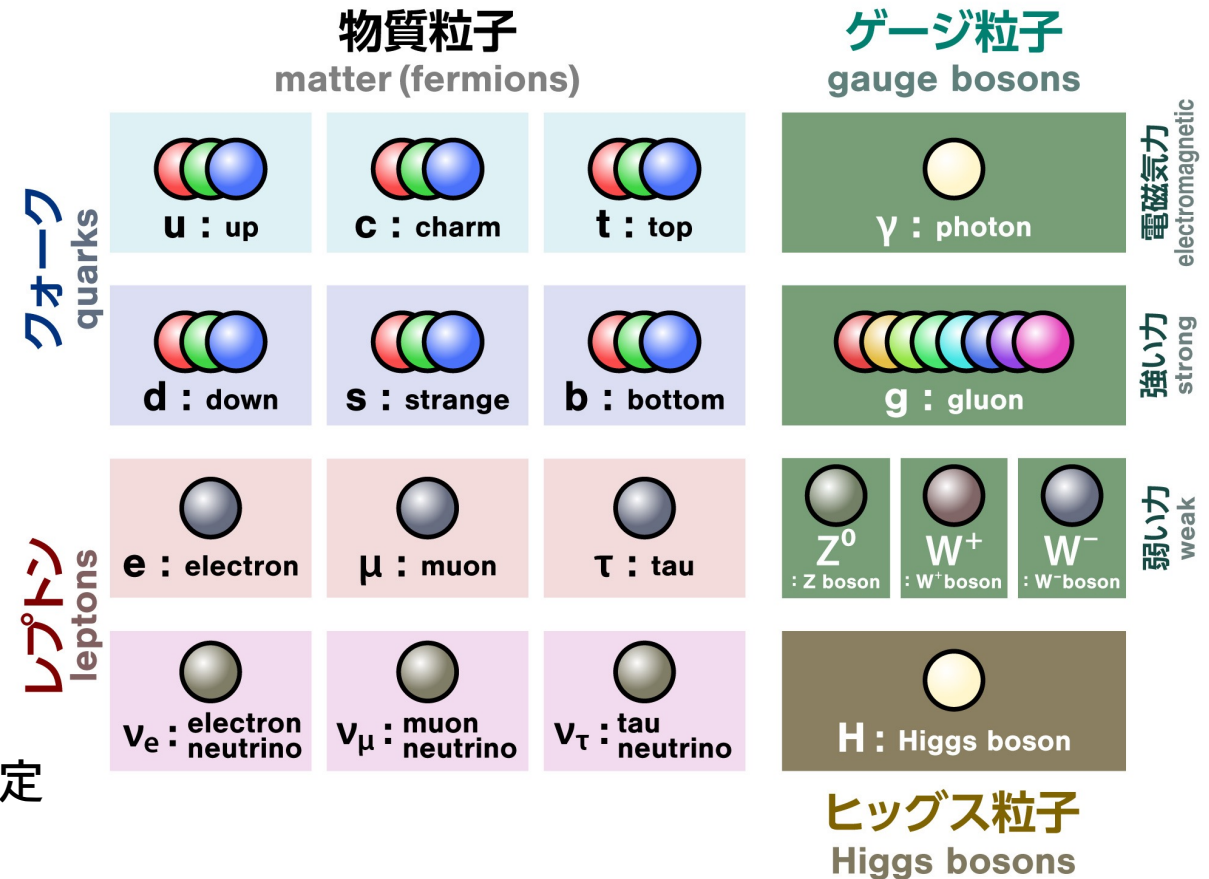
- 「もの」の最小単位: 素粒子
- 「もの」の入れ物: 時間と空間

- 素粒子の標準模型

物質粒子 + 力を伝える粒子 in (平坦な)時空間

これまでの加速器実験、宇宙観測実験などで
18種類全ての粒子が発見 & 理論の独立パラメータは決定

理論予言はこれまでの実験と「ほぼ」無矛盾



謎に満ちた宇宙

・ビッグバン宇宙

初期宇宙は非常に高温で、「もの」は全てバラバラ

→ 素粒子の世界

・標準模型 + 標準宇宙論

宇宙がどのように生まれ、発展し、終わるか？

・現在の宇宙の組成

ダークエネルギーとダークマターが95%ほどに対し、物質(バリオン)は5%ほど

ダークエネルギーとダークマターの正体は不明
標準模型を超える何かが必要？

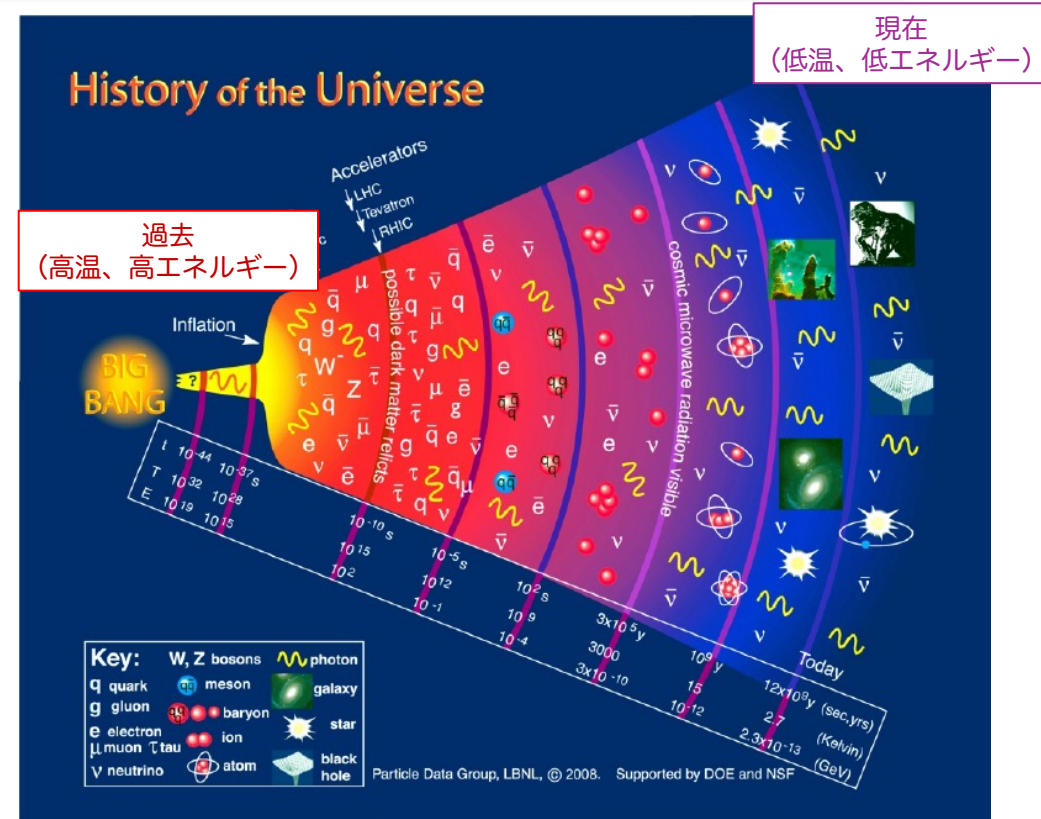


Fig. from Particle Data Group

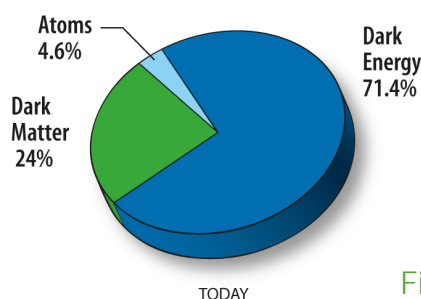


Fig. from WMAP

物質(バリオン)優勢な宇宙

・物質(バリオン数)とは?

陽子、中性子: B (バリオン数) = 1 $\rightarrow$ クォーク: $B = 1/3$
 反クォーク: $B = -1/3$

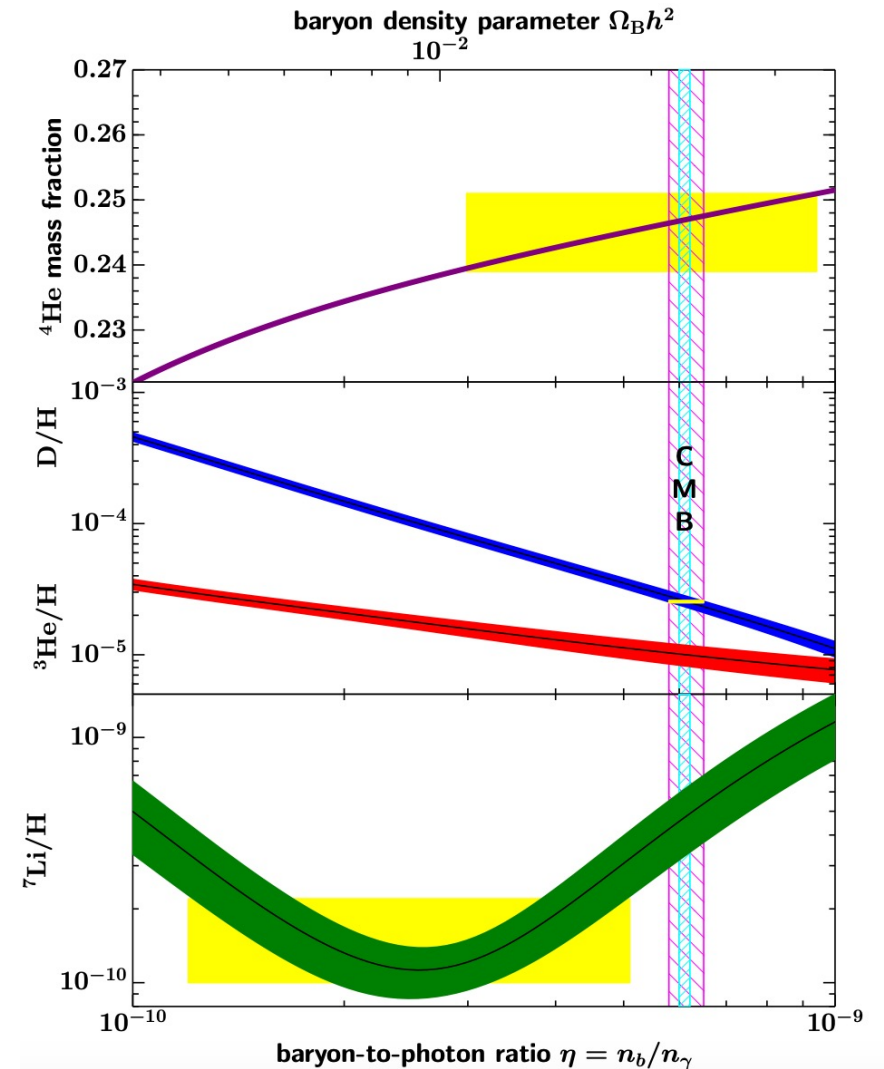
電子、ニュートリノ等は L (レプトン数) = 1

・宇宙におけるバリオン数の非対称性

$$\eta_B = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} \quad \frac{(\text{バリオン密度}) - (\text{反バリオン密度})}{(\text{光子密度})}$$

観測値 $\eta_B = (6.12 \pm 0.04) \times 10^{-10}$ Planck (2018)

$\rightarrow n_\gamma \sim (n_B - n_{\bar{B}}) \times 10^{10}$ (光子密度比で) とても小さい



バリオン数生成

- ・バリオン数の非対称性はどこから来たか？

単純に宇宙の初期条件？

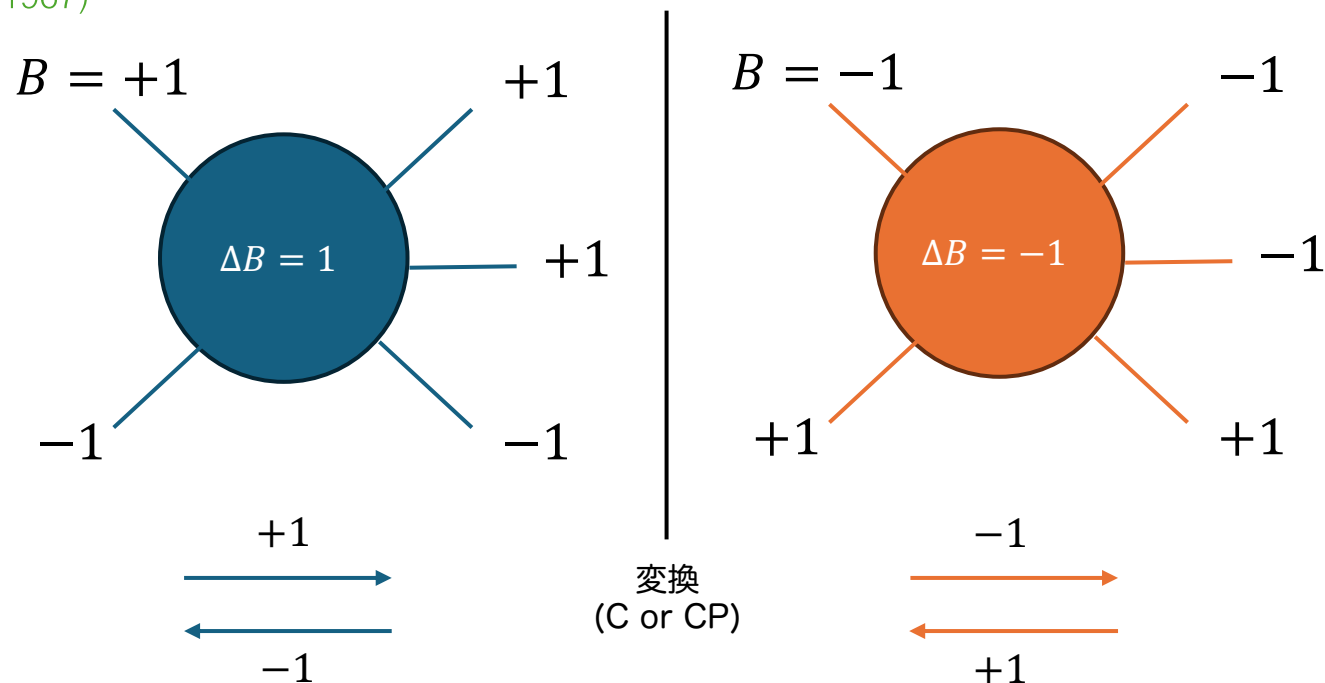
あるいは、何らかのバリオン数を作る何らかのメカニズム？

-> バリオン数+創世: Baryon-genesis

- ・ Sakharovの条件とバリオン数生成 Sakharov (1967)

1. バリオン数を破る過程の存在
2. C and CP対称性の破れ
3. 熱的に非平衡な過程の存在

矢印の大きさが同じだと、正味のバリオン数は0



標準模型を見てみる

標準模型の相互作用

	クォーク (left)	クォーク (right)	レプトン (left)	レプトン (right)
W, Z ボソン	○		○	
ヒッグス	○	○	○	○

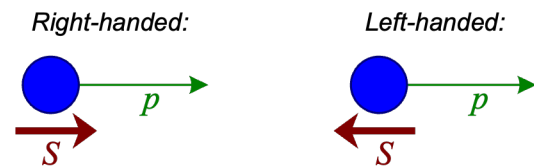
ざっくり、

$$\mathcal{L}_{\text{gauge}} \sim g \bar{\psi}_L \gamma^\mu \psi_L W_\mu$$

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} \sim y \bar{\psi}_L \psi_R \Phi + \text{h.c.} \quad \text{という形}$$

ψ : クォーク or レプトン
 Φ : ヒッグス, W_μ : EWのゲージ場
 g, y : 結合定数

cf.) 左手と右手 in 相対論的極限 ($m=0$)



en:User:HEL, User:Stannered,
Public domain, via Wikimedia Commons

- 電弱ゲージ相互作用はC対称性(だいたい $\psi_L \leftrightarrow \psi_R^*$)を破る
- y はフレーバーの足を持つ 3×3 行列 $\rightarrow$ 1つの複素位相(小林益川位相)でCP対称性(だいたい $\psi_{L,R} \leftrightarrow \psi_{L,R}^*$)を破る
- 素朴には、バリオン数、レプトン数は保存しているように見える

標準模型を見てみる

・カイラルアノマリーとスファレロン過程

カイラルな位相変換 $\psi_L \rightarrow e^{+iQ\theta}\psi_L$, $\psi_R \rightarrow e^{-iQ\theta}\psi_R$ は量子効果で破れている(カイラルアノマリー)

$$\partial_\mu j_B^\mu = \partial_\mu j_L^\mu = \frac{3g^2}{16\pi^2} \text{Tr}[F^{\mu\nu}\tilde{F}_{\mu\nu}] \quad \begin{array}{l} j^\mu \text{は4元カレント} \\ \text{対称性があるならカレントの発散は保存(ネーターの定理)} \end{array}$$

バリオンとレプトンで同じように破れる

-> $B - L$ という量子数は保存するが、left-handedの $B + L$ は保存量にならない

標準模型を見てみる

・カイラルアノマリーとスファレロン過程

カイラルな位相変換 $\psi_L \rightarrow e^{+iQ\theta}\psi_L$, $\psi_R \rightarrow e^{-iQ\theta}\psi_R$ は量子効果で破れている(カイラルアノマリー)

$$\partial_\mu j_B^\mu = \partial_\mu j_L^\mu = \frac{3g^2}{16\pi^2} \text{Tr}[F^{\mu\nu} \tilde{F}_{\mu\nu}] \quad \begin{array}{l} j^\mu \text{は4元カレント} \\ \text{対称性があるならカレントの発散は保存(ネーターの定理)} \end{array}$$

バリオンとレプトンで同じように破れる

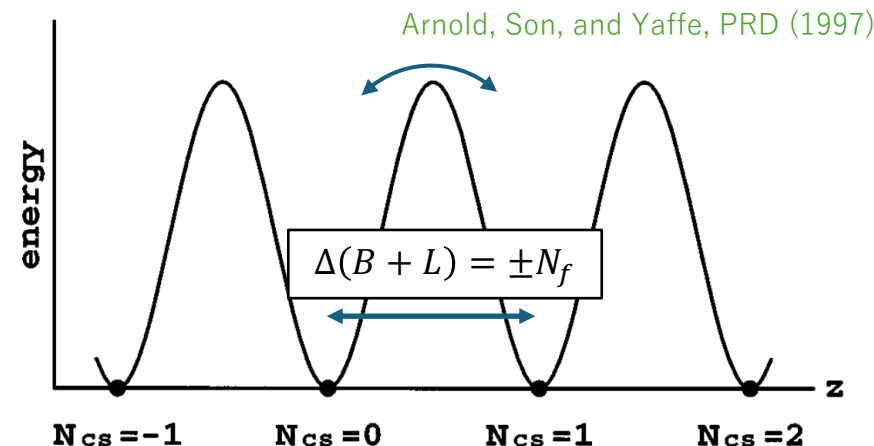
-> $B - L$ という量子数は保存するが、left-handedの $B + L$ は保存量にならない

遷移率は0温度ではものすごく小さい $\Gamma \propto \exp(-8\pi^2/g^2) \sim 10^{-0(10^2)}$

が、有限温度では温度に依存して $B + L \neq 0$ の過程が
高頻度で起こる(スファレロン過程)

Dimopoulos and Susskind, PRD (1978),

Manton, PRD (1983), Klinkhamer and Manton, PRD (1984)



標準模型を見ている

(Sakharovの条件)

1. バリオン数を破る過程の存在
2. C and CP対称性の破れ
3. 熱的に非平衡な過程の存在

標準模型の枠組みで、

スファレロン過程がバリオン数を破る

電弱ゲージ相互作用と湯川(小林益川位相)でC and CP対称性を破る



熱的に非平衡な過程があれば、Sakharovの条件を満たせる

どういう非平衡過程があれば良い？

標準模型で十分？ それとも新物理が必要？

平衡と非平衡

- ・ そもそも、平衡とは？ 熱浴中では、様々な種類の粒子が生成&消滅

cf.) Maxwell-Boltzmann分布

e.g.) 湯川 (left,rightクォークとヒッグス) $\mathcal{L} \sim \overline{q_L} q_R \Phi$ ($m_\Phi > 2m_q$)

$$f = e^{-(E-\mu)/T}$$

$\Phi \leftrightarrow \overline{q_R}, q_L$ という過程が化学平衡なら、粒子の化学ポテンシャルの間に関係 $\mu_\Phi = \mu_{q_L} - \mu_{q_R}$

- ・ スファレロン含め標準模型の相互作用が化学平衡にあると仮定 $10^2 \text{ GeV} \lesssim T \lesssim 10^{12} \text{ GeV}$
(電子とかのことを考えると、 $T \lesssim 10^5 \text{ GeV}$)

化学平衡の関係式を用いれば、バリオン、レプトン数は保存量であるB-Lを用いて書ける

e.g.) バリオン数 = (世代) $\times$ (カラー) $\times$ (up and down) $\times$ (Lクォーク + Rクォーク) / 3

$$B = \frac{28}{79} (B - L), \quad L = -\frac{51}{79} (B - L) \quad \text{この係数は標準模型の化学平衡の関係式から導ける} \quad \text{Harvey and Turner, PRD (1990)}$$

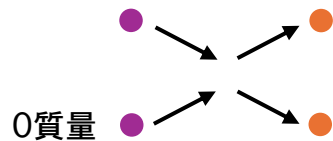
平衡と非平衡

- ・ 非平衡その1: 膨張宇宙 (膨張率: ハッブル定数 H)

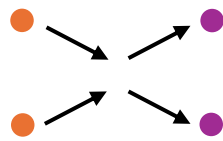
ある確率 Γ で起こる過程が宇宙の膨張率に負ける($\Gamma \ll H$)と、その過程は凍結する(Freeze-out)

-> 宇宙膨張を使って、非平衡な状況を作ることができる

e.g.) 対生成



対消滅

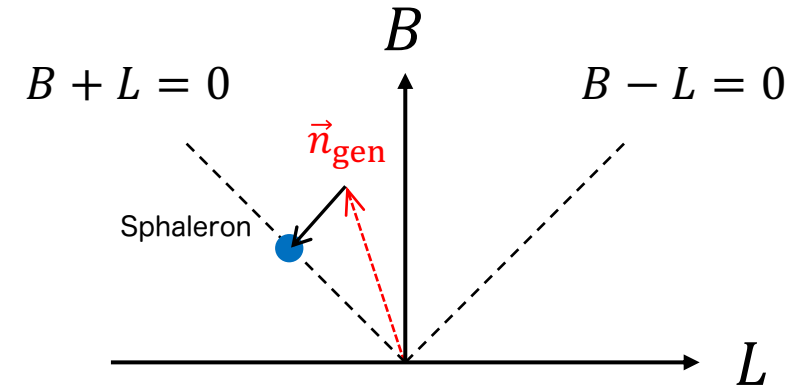


平衡なら消滅=生成 -> 化学ポテンシャルの関係
冷えてくると($T \sim$ 質量)、生成は起こらない
もっと冷えるとどちらも起こらない(凍結)

バリोजェネシス via B-L ジェネシス

- ・ バリोजェネシス via B-L ジェネシス (標準模型では不可能)

十分時間経てばスファレロン過程で $B+L=0$ 上に(ルシャトリエの原理)



$\vec{n}_{\text{gen}}$ を生む(CP対称性を破る)過程が宇宙膨張に負けて起こらなくなる(非平衡過程)
 -> バリオン数が凍結

e.g.) レプトジェネシス (右巻きニュートリノの崩壊)
 GUTバリोजェネシス (重いゲージボソンの崩壊)

$$\vec{n}_{\text{gen}} = (L, 0)$$

Fukugita and Yanagida (1986)

$$\vec{n}_{\text{gen}} = (L, B)$$

Yoshimura (1978), Weinberg (1979)

電弱バリオン数生成

- ・ 非平衡その2: 相転移

電弱バリオン数生成は、
非平衡状態の実現に電弱対称性の破れ(電弱相転移)を用いる

Kuzmin, Rubakov, and Shaposhnikov (1985)

電弱バリオン数生成

・ 非平衡その2: 相転移

電弱バリオン数生成は、
非平衡状態の実現に電弱対称性の破れ(電弱相転移)を用いる

Kuzmin, Rubakov, and Shaposhnikov (1985)

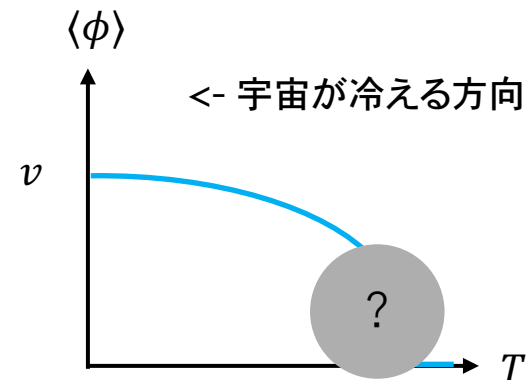
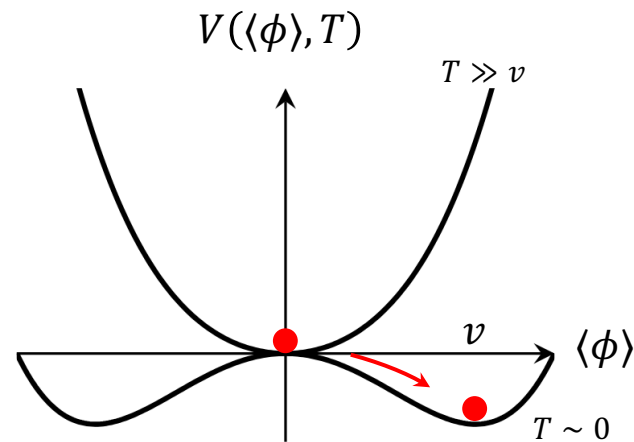
標準模型には、ゲージ対称性 (ゲージ化された $SU(2) \times U(1)$ 対称性)が存在

秩序変数: スカラー場の真空期待値 $\langle \phi \rangle$

真空の自由エネルギー(有効ポテンシャル) によって、
ゲージ対称性が自発的に破れる(ヒッグス機構)

電弱対称性の破れのスケール $\langle \phi \rangle = v \simeq 246 \text{ GeV}$

どのような相転移かは、有効ポテンシャルで決まる



電弱バリオン数生成

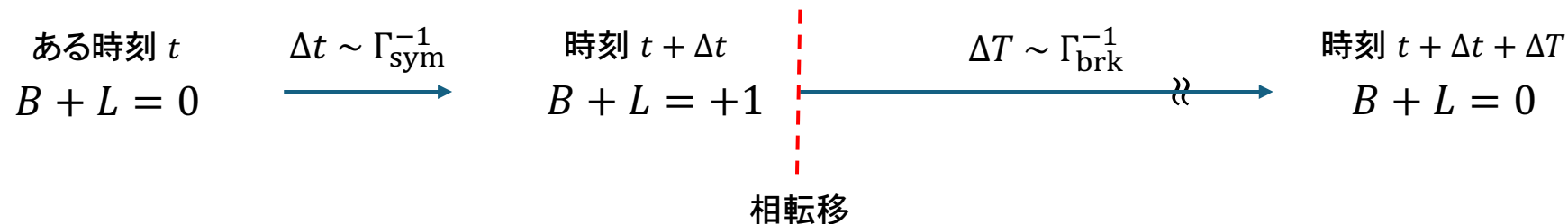
- なぜ電弱相転移で非平衡？

スファレロン遷移確率

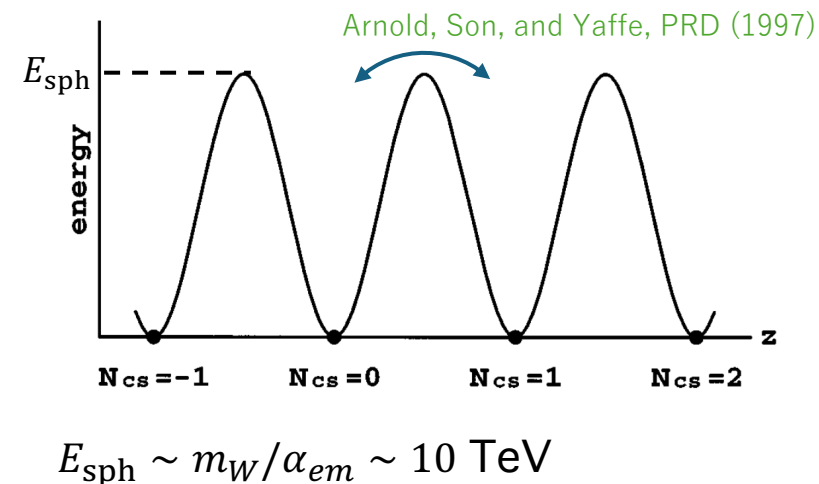
$$\Gamma_{\text{sym}} \propto T^4 \quad (\text{電弱相転移の前})$$

$$\Gamma_{\text{brk}} \propto T^4 \exp(-v/T) \quad (\text{電弱相転移の後})$$

電弱相転移のあり方によっては、
相転移の最中でスファレロン過程そのものが非平衡になる状況が起こる！



注意: CP対称なので $B + L = -1$ の過程も同様に起こる

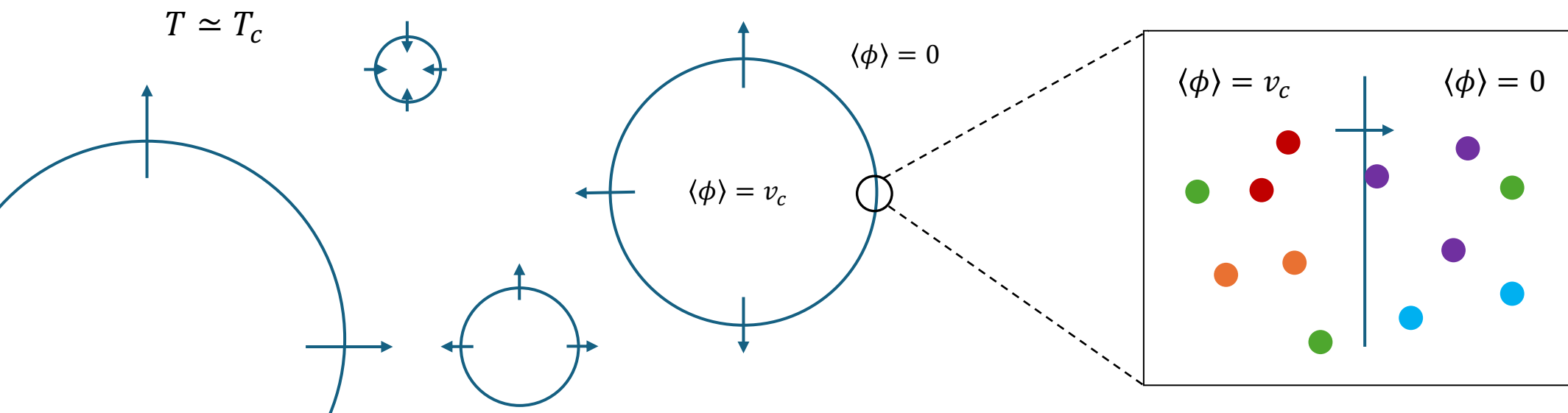
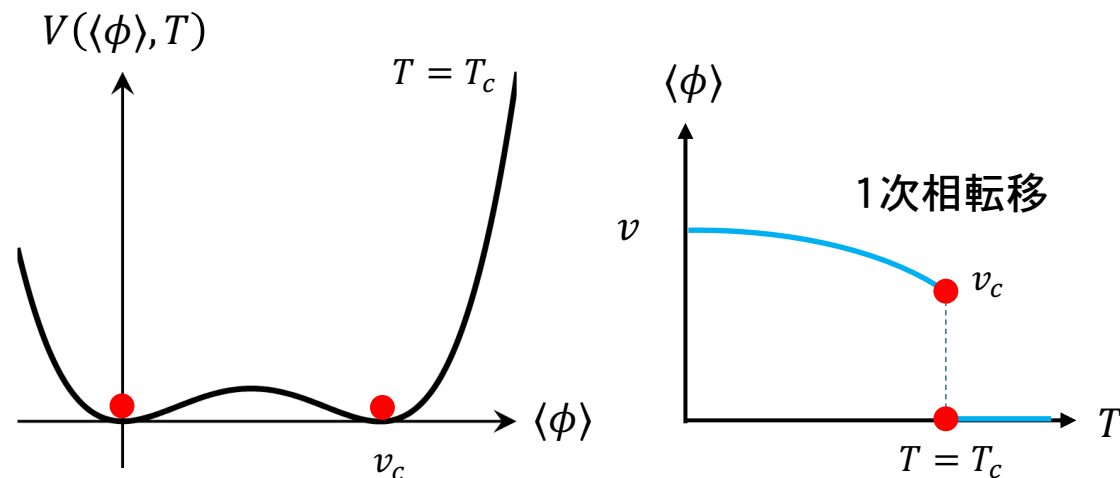
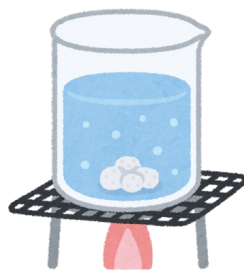


電弱バリオン数生成

- CPの破れ (in 湯川相互作用) をどう組み込むか?

縮退した真空を伴う1次相転移であれば、
 $T \simeq T_c$ で2つの真空が共存する

-> 真空(ヒッグス)の泡ができる



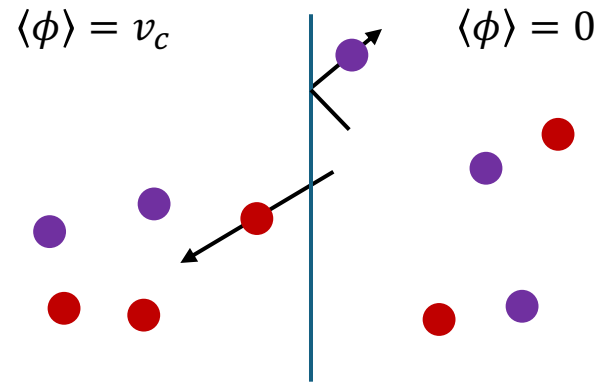
電弱バリオン数生成

L粒子 ● とL反粒子 ●
+1 -1

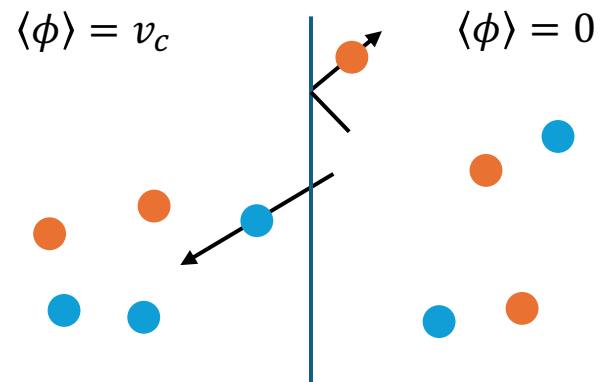
R粒子 ● とR反粒子 ●
+1 -1

① CP非対称な相互作用

Left



Right



この段階では、 $B+L$ は保存

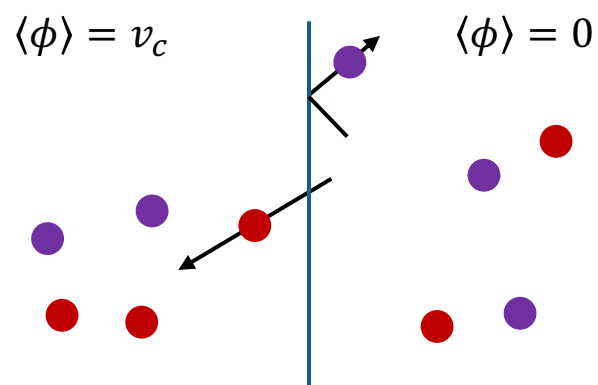
電弱バリオン数生成

L粒子 ● とL反粒子 ●
+1 -1

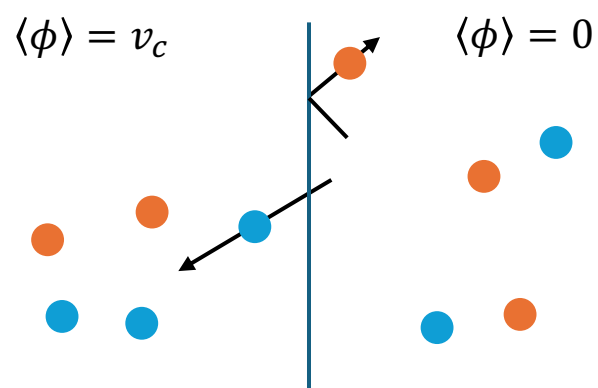
R粒子 ● とR反粒子 ●
+1 -1

① CP非対称な相互作用

Left

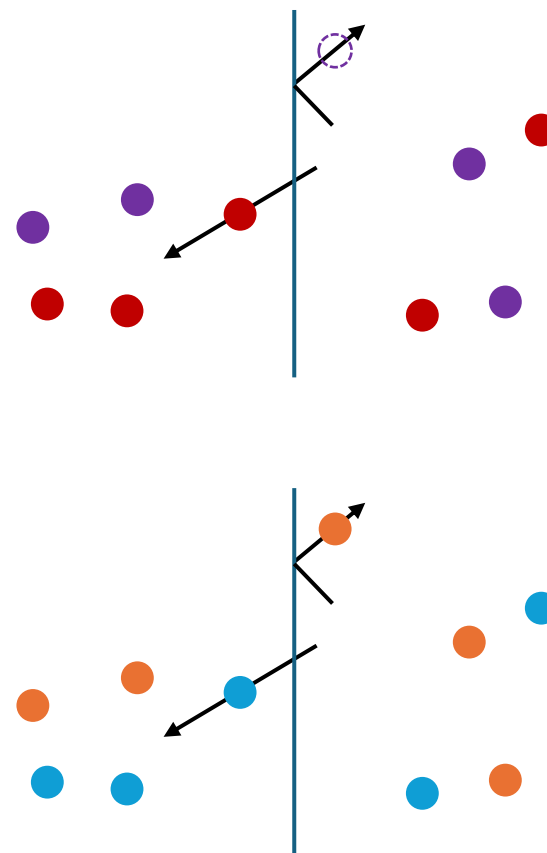


Right



この段階では、 $B+L$ は保存

② スファレロン過程



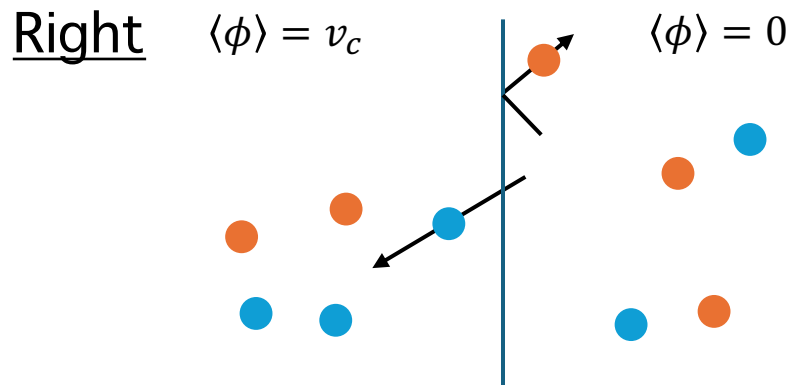
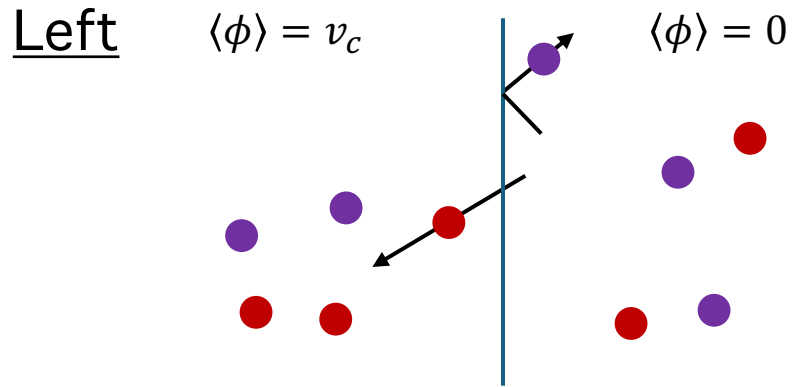
壁の外でLeftの $B+L$ を動かせる

電弱バリオン数生成

L粒子 ● とL反粒子 ●
+1 -1

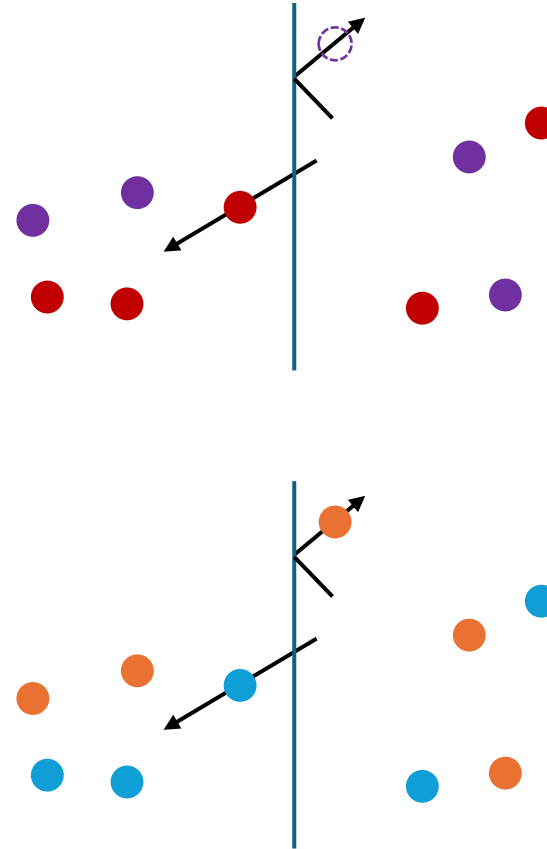
R粒子 ● とR反粒子 ●
+1 -1

① CP非対称な相互作用



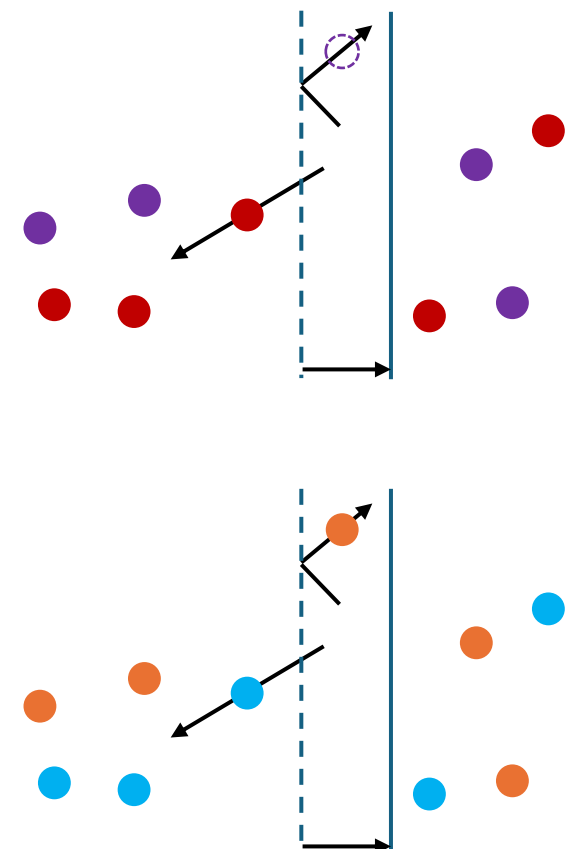
この段階では、 $B+L$ は保存

② スファレロン過程



壁の外でLeftの $B+L$ を動かせる

③ 膨張する壁



壁の内側では $B+L$ は変化しない

電弱バリオン数生成

- ・作られたバリオン数が壁の内側で保存する条件

単位時間、体積あたりのスファレロン遷移確率
(壁の内側)

$$\Gamma_{\text{brk}} \sim T_c^4 \exp(-2gv_c/\alpha_W T_c)$$

<<

宇宙膨張(ハッブル)

$$HT_c^3 \sim \frac{T_c^5}{M_P}$$

->

$$\frac{v_c}{T_c} \gtrsim 0.5$$

- ・「強い」電弱1次相転移 バリオン数が十分残るには、 $\frac{v_c}{T_c} \gtrsim 1$

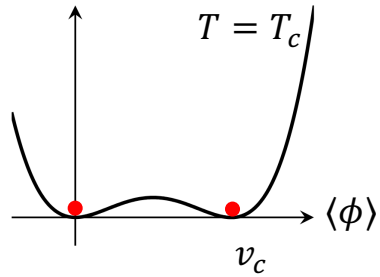
ここまでの話が、標準模型で実現するか？

標準模型で電弱バリオン数生成をしよう

・ ゲージ場による3次の項 $V(\langle\phi\rangle, T) = \frac{1}{2}m_T^2\langle\phi\rangle^2 - ET\langle\phi\rangle^3 + \frac{\lambda}{4}\langle\phi\rangle^4 + \dots$

$$E \simeq \frac{1}{4\pi v^3} (2m_W^3 + m_Z^3)$$

ボソンの効果



$$\begin{cases} V(0, T_c) = V(v_c, T_c) \\ \frac{\partial V(v_c, T_c)}{\partial v_c} = 0 \end{cases}$$

を解いて、 $\frac{v_c}{T_c} \simeq \frac{2E}{\lambda} = \frac{4E v^2}{m_h^2}$

強い1次相転移の条件 $\frac{v_c}{T_c} \gtrsim 1 \quad \rightarrow \quad m_h \lesssim \sqrt{4E v^2} \simeq 48 \text{ GeV}$

Shaposhnikov, Nucl. Phys. B (1987)

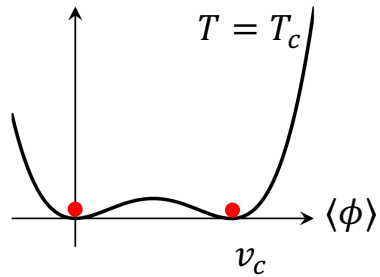
Dine et al., PLB (1992), PRD (1992)

標準模型で電弱バリオン数生成をしよう

- ゲージ場による3次の項 $V(\langle\phi\rangle, T) \simeq \frac{1}{2}m_T^2\langle\phi\rangle^2 - ET\langle\phi\rangle^3 + \frac{\lambda}{4}\langle\phi\rangle^4 + \dots$

$$E \simeq \frac{1}{4\pi v^3} (2m_W^3 + m_Z^3)$$

ボソンの効果



$$\begin{cases} V(0, T_c) = V(v_c, T_c) \\ \frac{\partial V(v_c, T_c)}{\partial v_c} = 0 \end{cases}$$

を解いて、

$$\frac{v_c}{T_c} \simeq \frac{2E}{\lambda} = \frac{4Ev^2}{m_h^2}$$

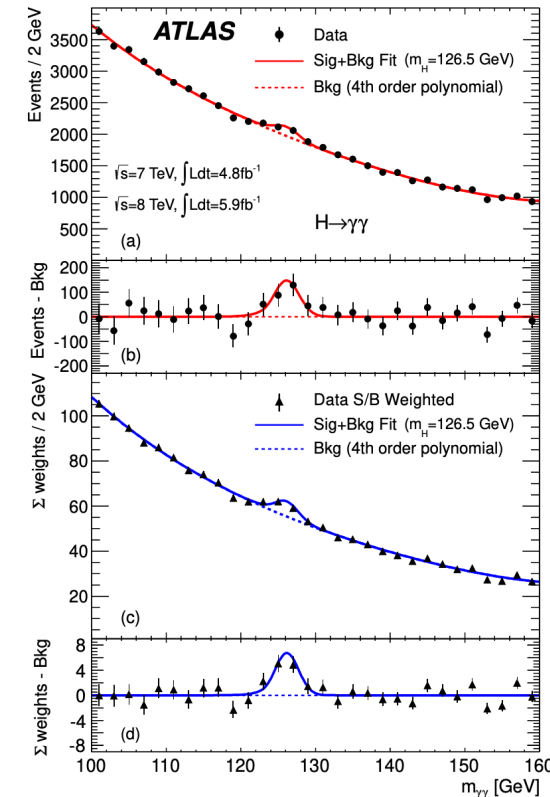
強い1次相転移の条件 $\frac{v_c}{T_c} \gtrsim 1 \quad \rightarrow \quad m_h \lesssim \sqrt{4Ev^2} \simeq 48 \text{ GeV}$

- 125GeV ヒッグス at LHCに合わない

標準模型では電弱相転移を1次相転移にできない

cf.) Lattice results $m_h \gtrsim 60 \text{ GeV}$ ではクロスオーバー的 Kajantie et al., PRL (1996)

ATLAS (2012)



標準模型で電弱バリオン数生成をしよう

・ CPの破れはどうか? (小林益川位相) $\mathcal{L}_W \sim g \bar{u}_L \gamma^\mu V_{\text{CKM}} d_L W_\mu^+ + \text{h.c.}$ $V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$

物理的な位相: Jarlskog不変量 $J_{CP} = \text{Im}[V_{ud}V_{us}^*V_{cs}V_{cs}^*] = 3.12 \times 10^{-5}$ PDG (2024)

・ Order estimation

$$\Delta_{CP} = J_{CP} \times (m_t^2 - m_u^2)(m_t^2 - m_c^2)(m_c^2 - m_u^2)(m_b^2 - m_d^2)(m_b^2 - m_s^2)(m_s^2 - m_d^2)$$

$T_c \sim 100 \text{ GeV}$ だと思つと、
無次元のバリオン数密度 $\eta_B \sim \frac{\Delta_{CP}}{T_c^{12}} \sim 10^{-20} \rightarrow \text{観測値 } \eta_B \sim 10^{-10} \text{ よりも桁違いに小さい}$

・ P. Huet and E. Satherの議論 Huet and Sather, PRD (1995)

準粒子描像(コヒーレント状態)はCPを破る相互作用をする前にデコヒーレンス $\frac{n_B}{s} < 10^{-26}$

ということで、標準模型で電弱バリオン数生成はできない

B-Lジェネシス同様、電弱バリオン数生成でも
新物理が必要！

どのような新物理を考えればいいか？

- ・ 課題その1: 強い1次相転移
- ・ 量子補正で強い1次相転移を起こす新物理

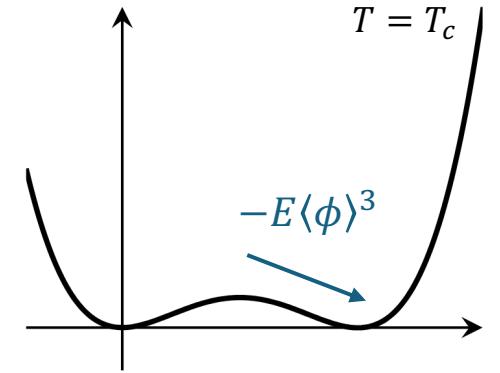
ゲージ場の寄与のアナロジー $\mathcal{L} \sim g^2 \phi_{\text{SM}}^\dagger \phi_{\text{SM}} WW \rightarrow E \simeq \frac{1}{4\pi v^3} (2m_W^3 + m_Z^3)$

標準模型ヒッグスに比較的強く結合するスカラー場 ϕ を導入

Anderson and Hall, PRD (1992),

Funakubo, Kakuto and Takenaga, PTP (1994), and more

$$\mathcal{L} \sim -\lambda \phi_{\text{SM}}^\dagger \phi_{\text{SM}} \phi^\dagger \phi \rightarrow E \simeq \frac{1}{4\pi v^3} (2m_W^3 + m_Z^3 + (\lambda v^2)^{3/2}) \rightarrow \frac{v_c}{T_c} \simeq \frac{2E}{\lambda_{\text{SM}}} \quad \text{も大きくなる}$$



cf.) 場の3次の項は
ボソンの効果によって生じる

- 標準模型ヒッグス + SU(2) doubletスカラーの例

$$\mathcal{L}_{2\text{HDM}} \supset -M^2 \phi^\dagger \phi - \lambda \phi_{\text{SM}}^\dagger \phi_{\text{SM}} \phi^\dagger \phi$$

新粒子の2乗質量 $m_\phi^2 \simeq M^2 + \lambda v^2 \quad (\langle \phi_{\text{SM}} \rangle = v)$

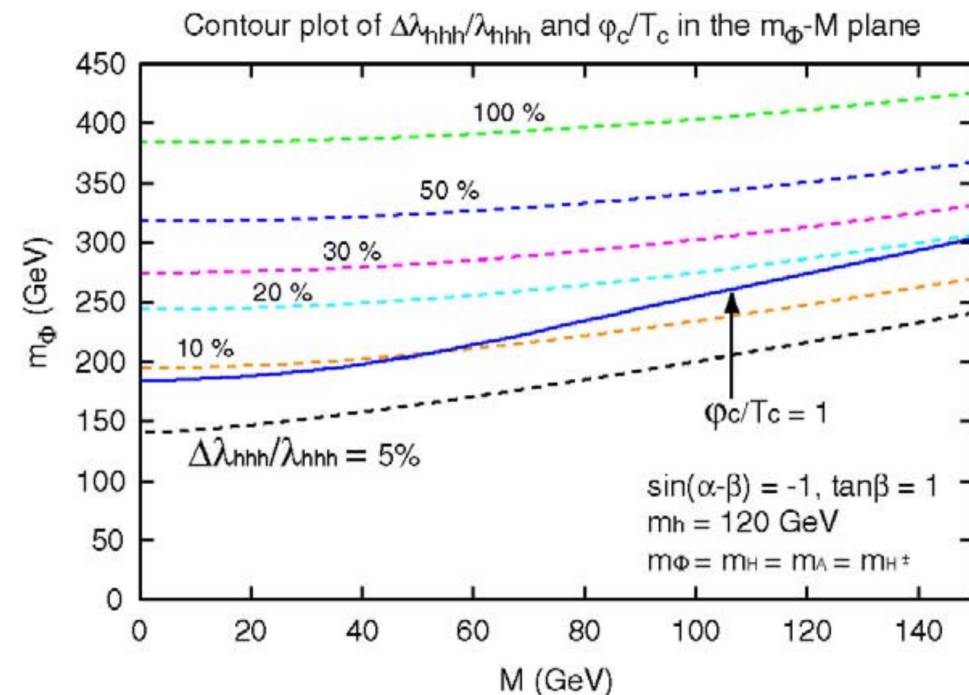
電弱とは無関係なスケール M が大きいと ϕ はデカップル

λv^2 が支配的だと ϕ は電弱スケール(デカップルできない)

- ・ヒッグス3点結合のずれ

$$\lambda_{hhh} \simeq h \text{---} \lambda_{\text{SM}} \begin{array}{c} \nearrow h \\ \searrow h \end{array} + \text{---} \text{red circle} \text{---} \dots$$

	LHC	HL-LHC	ILC(1TeV)	FCC-ee/eh/hh
$\frac{\Delta\lambda_{hhh}}{\lambda_{hhh}}$	$\sim 600\%$	$\sim 50\%$	$\sim 10\%$	$\sim 5\%$



Kanemura, Okada, and Senaha (2005)

CMS (2022), ATLAS (2023),
de Blas *et al.* (2020)

どのような新物理を考えればいいか？

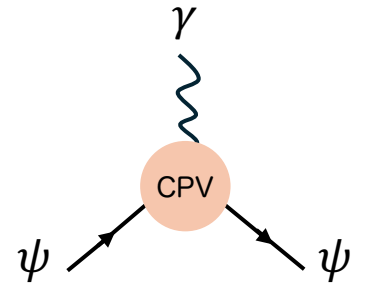
- ・ 課題その2: CPの破れ
- ・ 壁(ヒッグス)との相互作用に新しいCPの破れ

(e.g.) 複数のスカラー場 $\mathcal{L} = -y_t \overline{Q}_L t_R \tilde{\phi}_1 - \rho_t \overline{Q}_L t_R \tilde{\phi}_2$ (ρ_t は複素数)

- ・ 壁の周りで変化するスカラー場があれば、壁の周りでLeft-Rightの非対称性を生み出せる (後半パート)
- ・ 新しいCPの破れは様々な観測量に顔をだす

(e.g.) CPを破る演算子: 電気双極子モーメント(EDM)

$$\mathcal{L}_{\text{EDM}} = -\frac{d_\psi}{2} \bar{\psi} i \gamma^5 \sigma^{\mu\nu} \psi F_{\mu\nu} \quad \xrightarrow{\text{非相対論極限}} \quad H_{\text{EDM}} = -d_\psi \frac{\mathbf{S}}{|\mathbf{S}|} \cdot \mathbf{E}$$

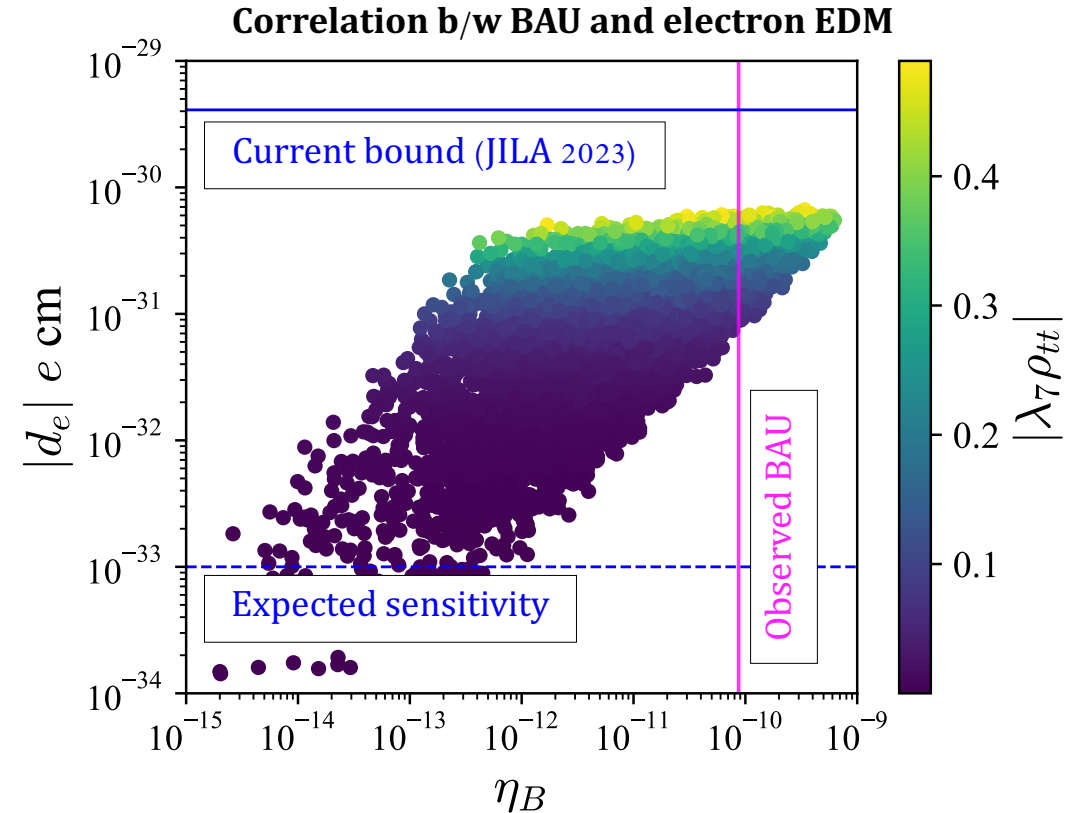
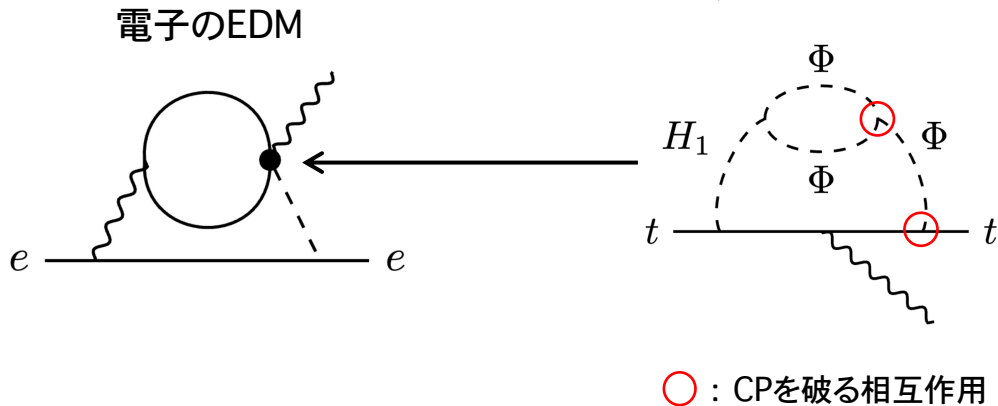


拡張ヒッグス模型における電弱バリオン数生成

- 標準模型ヒッグス+SU(2) doubletスカラーの例

CPを破る新しい相互作用

$$\mathcal{L} = -y_t \bar{Q}_L t_R \tilde{\phi} - \rho_{tt} \bar{Q}_L t_R \tilde{\Phi}$$



Aiko, Endo, Kanemura and YM, JHEP (2025)

最後に

- ・ 電弱バリオン数生成は新物理を考えることで実現できる
- ・ 強い1次相転移と新たなCPの破れをもたらす新物理は、様々な観測量に顔を出し得る
 - > バリオン数生成を起こす新物理が電弱スケール付近にあることの帰結
 - > 検証が可能な(死ねる)シナリオ
- ・ 我々の電弱スケールの物理、特にヒッグスセクターの理解は完全ではない
 - ただ単に検証が可能というだけでなく、電弱スケールの物理のより深い理解と共にある

Back up

標準模型で電弱バリオン数生成をしよう

- 標準模型における有効ポテンシャル $V(\langle\phi\rangle, T)$ (摂動的な理解)

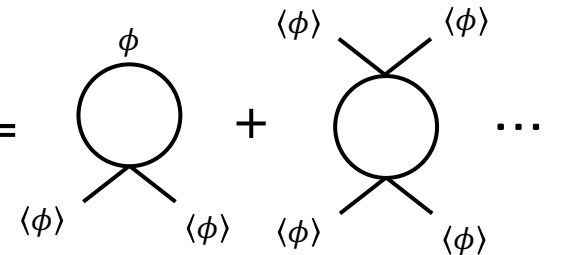
Dolan and Jackiw, PRD (1974)

Carrington, PRD (1992), and more

スカラーのみのラグランジアン $\mathcal{L} = |\partial_\mu \phi|^2 + \mu^2 \phi^\dagger \phi - \lambda (\phi^\dagger \phi)^2$

Tree level $V_0 = -\mu^2 \langle\phi\rangle^2 + \lambda \langle\phi\rangle^4$

量子補正 $V_1 = \frac{T}{2} \sum_n \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} \ln(\omega_n^2 + p^2 + m(\langle\phi\rangle)^2) \quad (\omega_n = 2\pi n T)$



-> $V_1 \supset (\text{const}) \times m(\langle\phi\rangle)^3 T$ (ボソンのみ0モードを取れる)

高温展開
($n=0$ が主要)

$m(\langle\phi\rangle)$ は $\phi = \langle\phi\rangle$ の時の
ループを走る粒子の質量

他のボソンとの相互作用(e.g. ゲージ相互作用 $\mathcal{L} \sim g^2 \phi^\dagger \phi WW$)があれば、それも3次の項に寄与する

どのような新物理を考えればいいか？

- 新しいCPの破れは様々な観測量に顔をだす

(e.g.) CPを破る演算子：電気双極子モーメント(EDM)

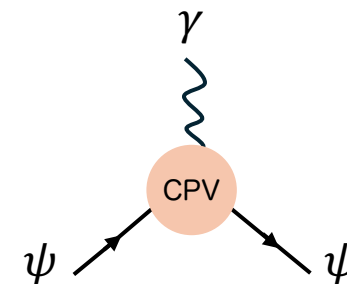
$$\mathcal{L}_{\text{EDM}} = -\frac{d_\psi}{2} \bar{\psi} i \gamma^5 \sigma^{\mu\nu} \psi F_{\mu\nu}$$

非相対論極限

$$H_{\text{EDM}} = -d_\psi \frac{\mathbf{S}}{|\mathbf{S}|} \cdot \mathbf{E}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{T}(\mathbf{S}) &= -\mathbf{S} \\ \mathcal{T}(\mathbf{E}) &= +\mathbf{E} \end{aligned}$$

時間反転変換に対してodd



- 様々な粒子のEDM (chromo EDM)

EDMs	Current bounds	Expected limits
Electron	$4.1 \times 10^{-30} e \text{ cm}$ JILA (2023)	$O(10^{-33}) e \text{ cm}$ Vutha, et al. (2018)
Neutron	$1.8 \times 10^{-26} e \text{ cm}$ Abel, et al. (2020)	$O(10^{-28}) e \text{ cm}$ nEDM (2019)
Proton	$2.1 \times 10^{-25} e \text{ cm}$ Sahoo (2017)	$O(10^{-29}) e \text{ cm}$ Alarcon, et al. (2022)

電弱相転移 on lattice

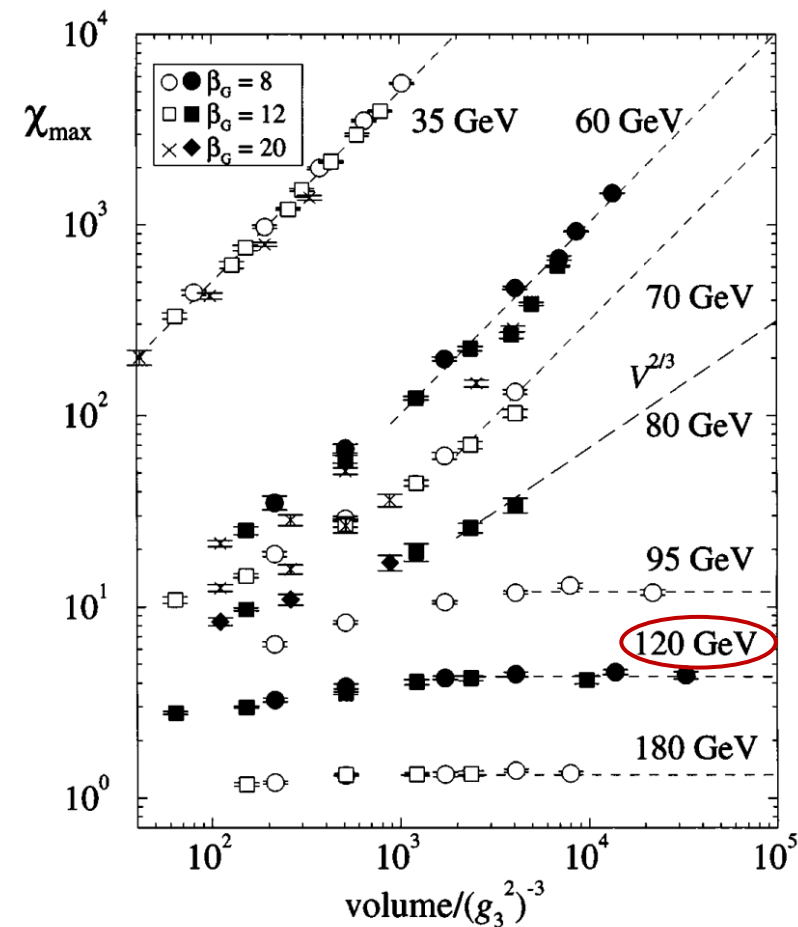
• Lattice results

サイズを大きくするに従って、感受率がスケーリング

$$\chi = V \left(\langle (\phi^\dagger \phi)^2 \rangle - \langle \phi^\dagger \phi \rangle^2 \right)$$

1次相転移なら2相共存 -> スケーリング則は V の1次

125 GeVではスケーリング則が見られない



CPを破るソースと輸送方程式

Cline, Joyce, and Kainulainen (2000);
Fromme and Huber (2007); and more

- Dirac方程式 $(i\partial_\mu \gamma^\mu - m(z)P_L - m^*(z)P_R)\psi = 0$

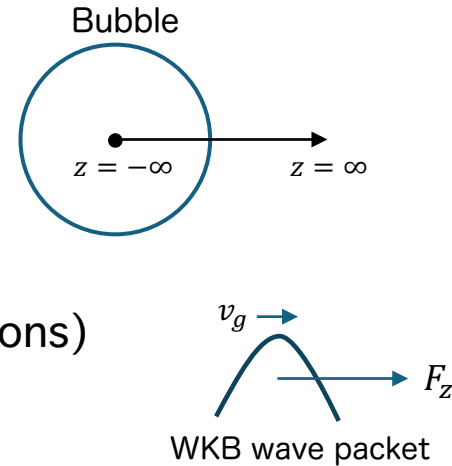
Thick wall近似

$$p \sim T \gg \partial \sim L_w^{-1}$$



$$v_g = \frac{p_z}{E} \pm (\partial_z \theta \text{ corrections})$$

$$F_z = -\frac{\partial_z |m^2|}{2E} \pm (\partial_z \theta \text{ corrections})$$



- 輸送方程式 $C_1 \mu''(z) + C_2 \mu'(z) + C_3 \mu(z) = S_{\text{CPV}}$ (C_i は z, T, m, v_w の関数)

$$\text{where, } \mu(z) = \mu_\psi - \mu_{\bar{\psi}}$$

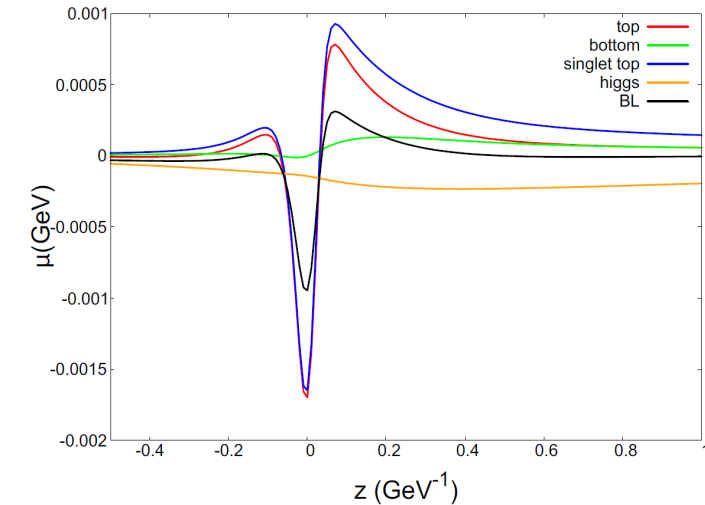
$$S_{\text{CPV}} = C_4 (m_\psi^2 \theta'_\psi)' + C_5 m_\psi^2 \theta'_\psi (m_\psi^2)'$$

- バリオン数非対称性 $\eta_B \simeq (\text{const.}) \Gamma_{\text{sph}}^{\text{sym}} \int_0^\infty dz \mu_{BL} e^{-(\text{const.}) \Gamma_{\text{sph}}^{\text{sym}} z}$
washout

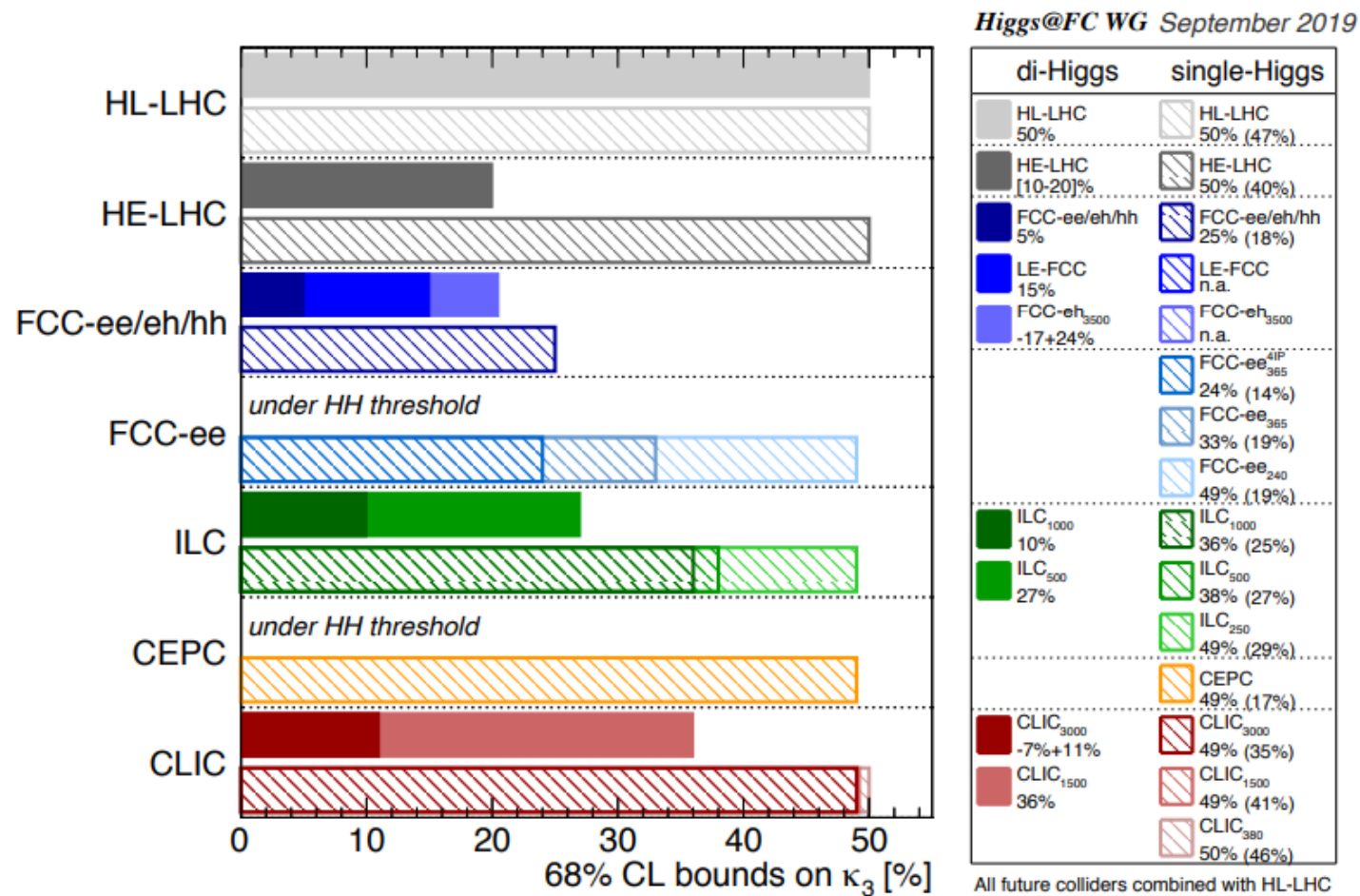
- VEV-Insertion-Approximation (VIA) method

Riotto (1996) (1998);
Kainulainen (2021); Postma et al. (2022);

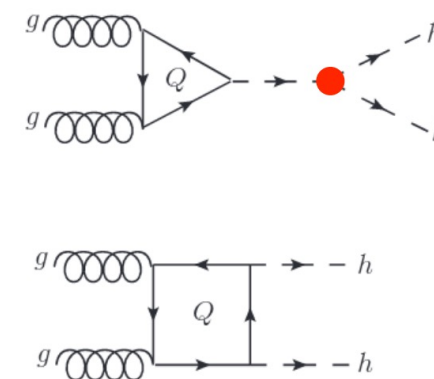
(e.g.) 壁の周りでの化学ポテンシャル



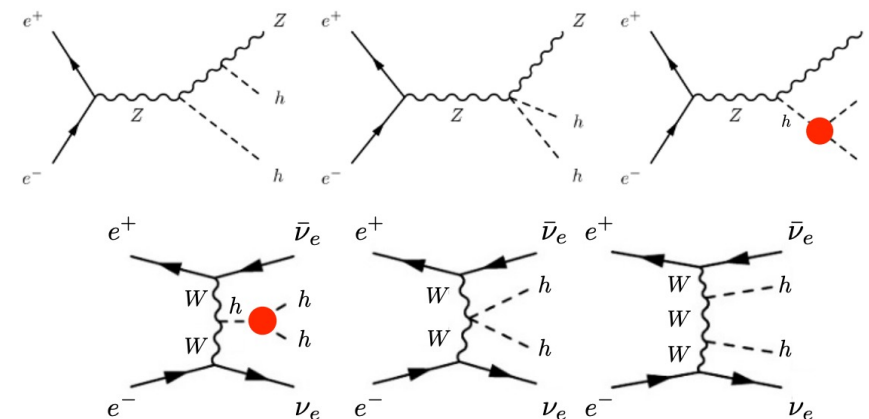
ヒッグス自己結合



Hadron collider

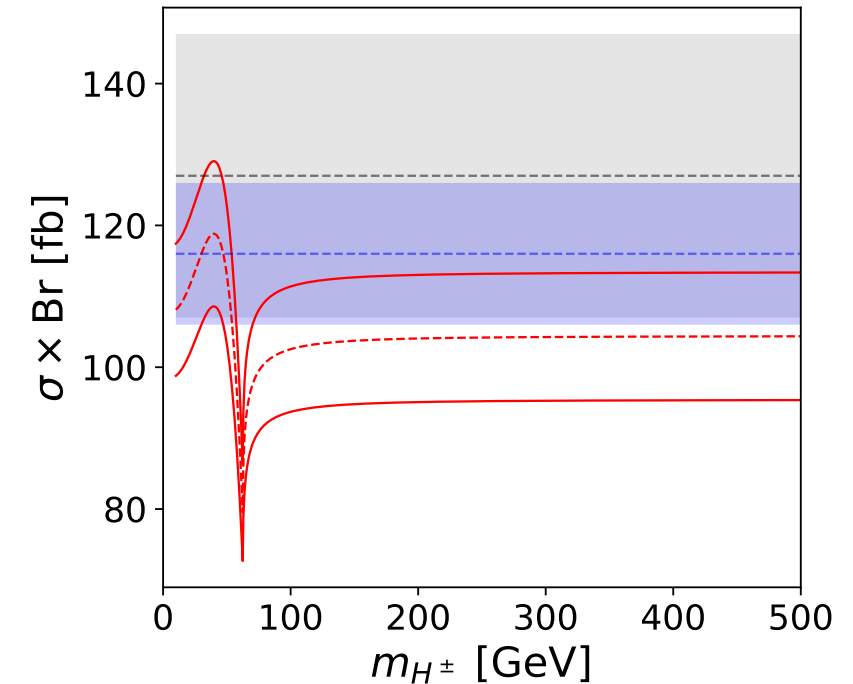
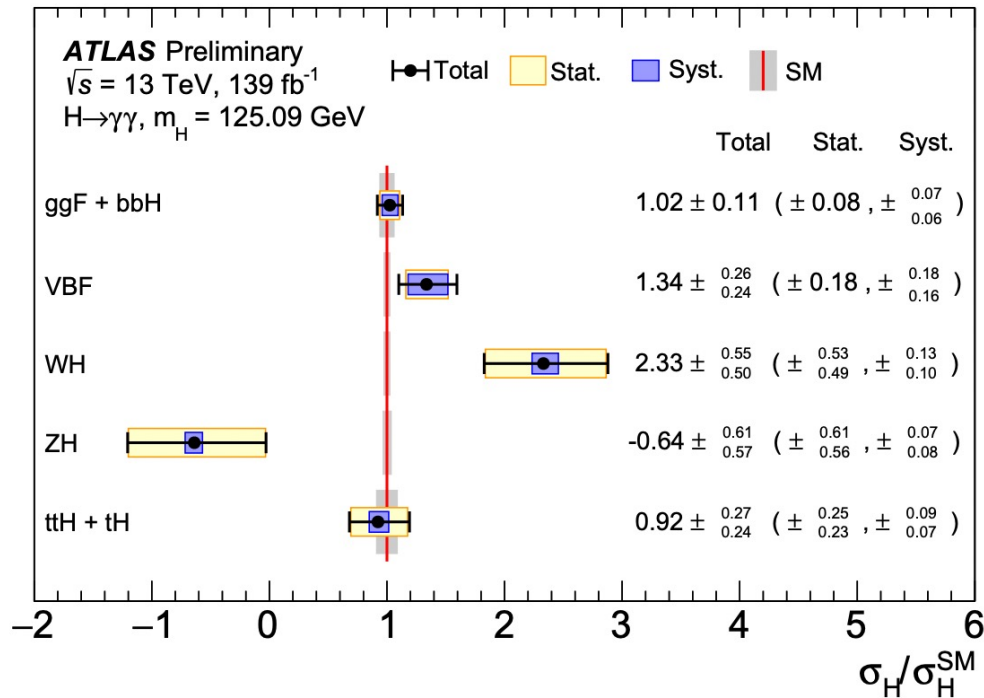


Lepton collider



Higgs to di-photon decay

- $h \rightarrow \gamma\gamma$ におけるノンデカップリング効果 $m_{H^\pm}^2 = M^2 + \frac{\lambda_3}{2} v^2$



2HDM ($M = 30 \text{ GeV}$) prediction

SM expected: $\sigma\text{Br}(h \rightarrow \gamma\gamma) = 116 \pm 5 \text{ fb}$

Observed: $\sigma\text{Br}(H_1 \rightarrow \gamma\gamma) = 127 \pm 10 \text{ fb}$

ランダウポールとその先

- ・ 比較的大きなスカラー結合はランダウポールを予言 ($\beta_\lambda > 0$ at the 1 loop)

- ・ その先にあるゲージ理論

(e.g.) Minimal SUSY fat Higgs model

Harnik, Kribs, Larson and Murayama (2004)

- ・ 閉じ込めの結果としての拡張ヒッグス模型

Kanemura, YM and Shindou, arXiv 2509.05934

