

電弱相転移とそれにつわる新物理

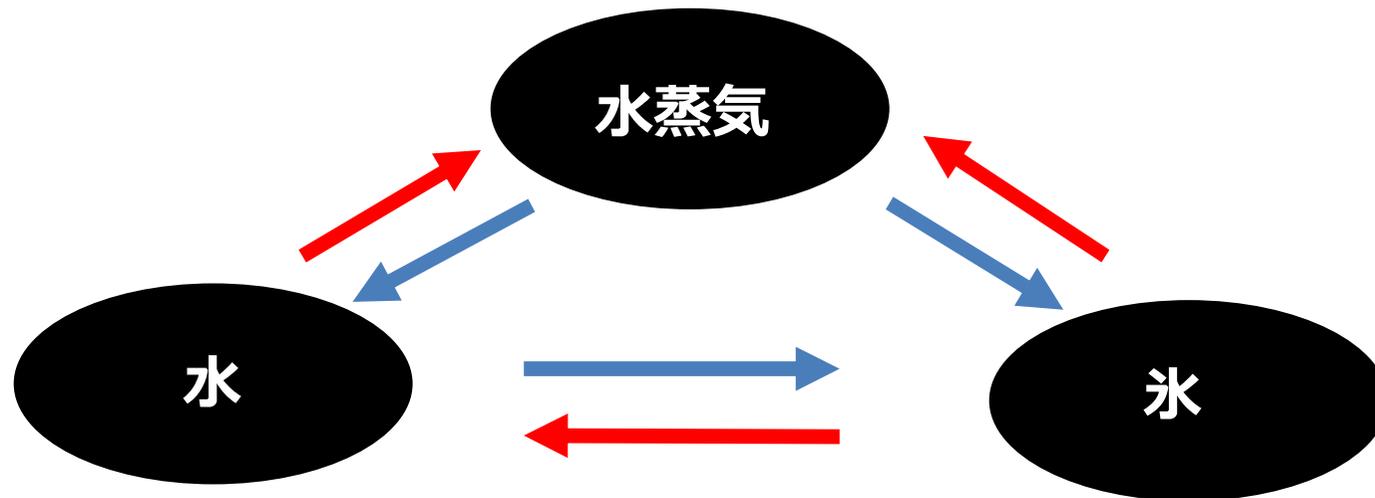
柳生 慶（大阪大学）



2022年3月23日、東京工業大学

相転移

□ ある系の相が別の相に変わること。



□ 相転移の起きる系

- 導体 (常伝導 \leftrightarrow 超伝導)

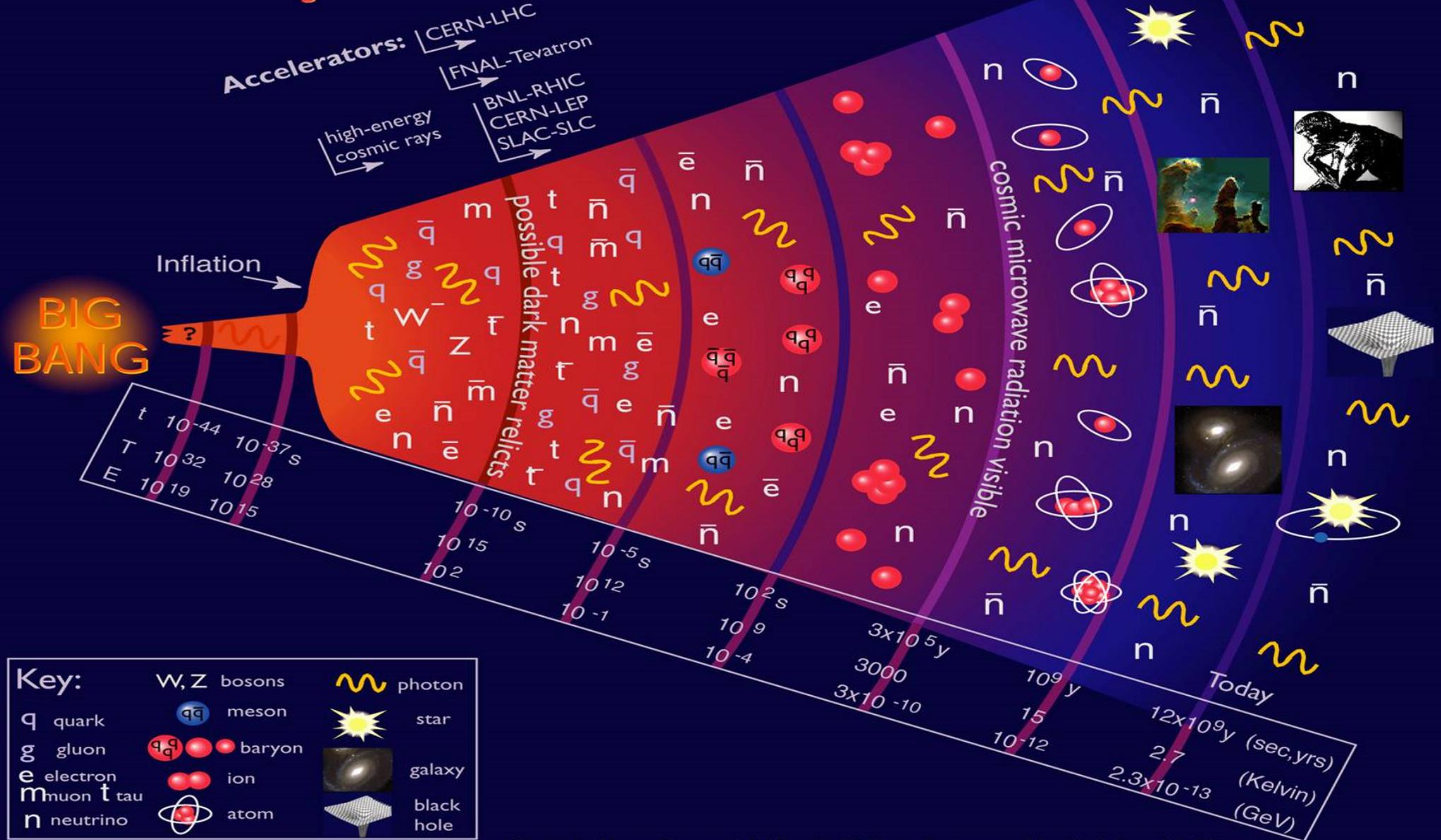
- 磁性体 (常磁性 \leftrightarrow 強磁性)

- 結晶 (グラファイト \leftrightarrow ダイヤモンド)

- 真空 など

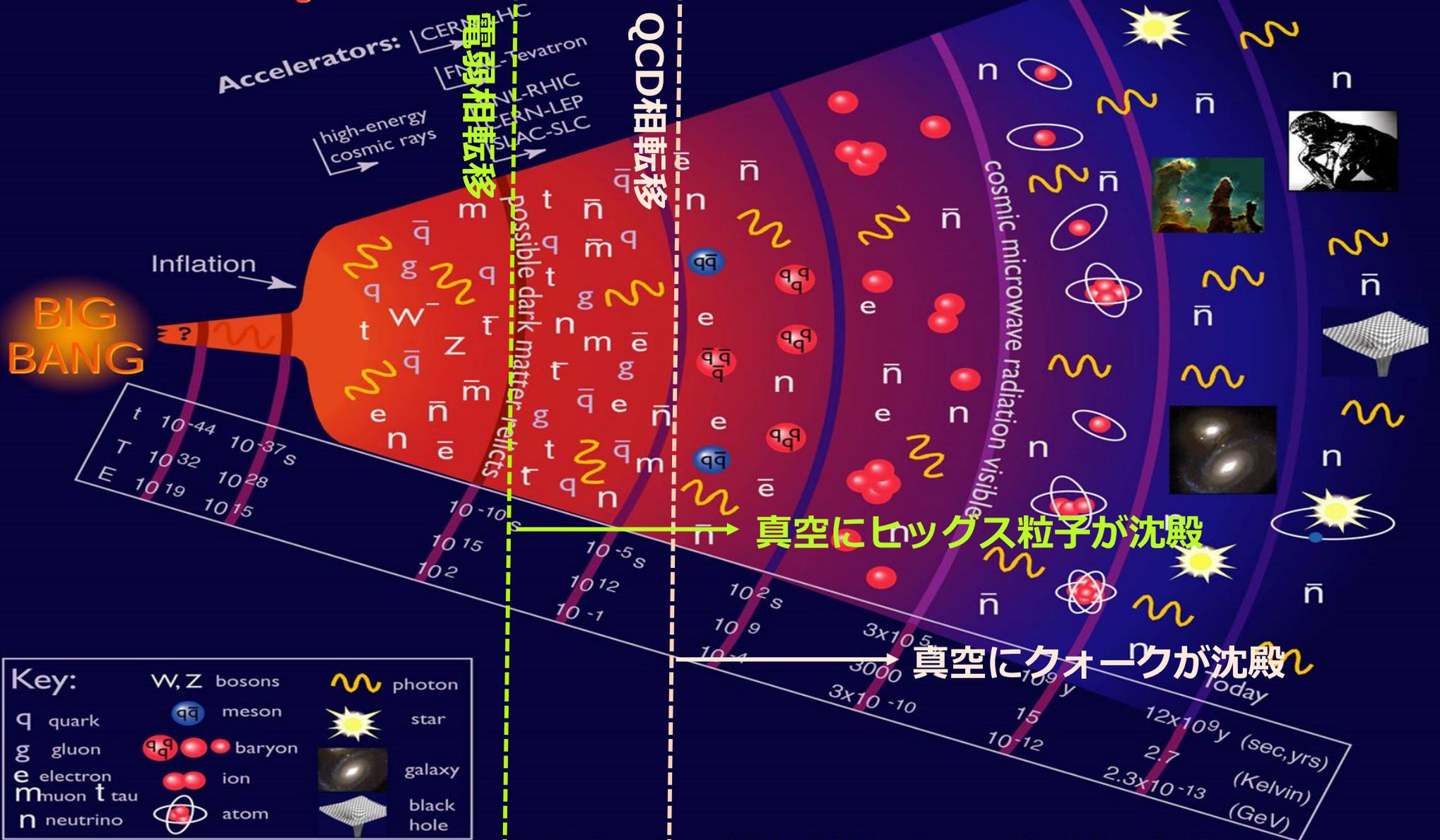
真空の相転移：宇宙の歴史を知る

History of the Universe



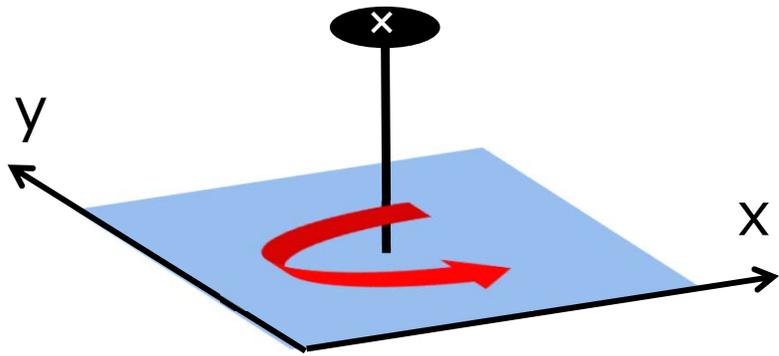
真空の相転移：宇宙の歴史を知る

History of the Universe

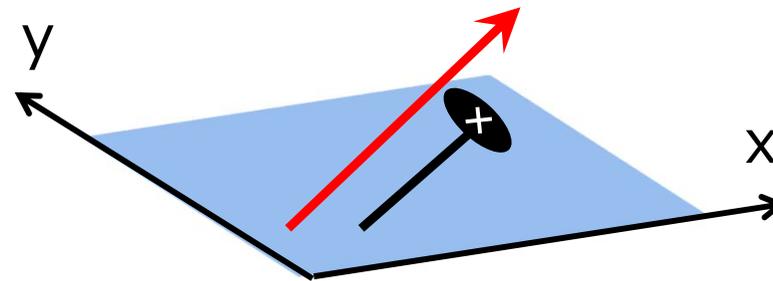


対称性の自発的破れ

□ 電弱相転移は対称性の自発的破れによって生じる。



不安定だが、回転に対して不変



安定だが、回転に対して不変でない

理論（釘の形）は対称性を持つが、真空（倒れた状態）では対称性が破れている。



南部陽一郎

物性物理とのアナロジー

物性物理 (磁性体)

高温



無秩序相

常磁性

$$M = 0$$

低温



秩序相

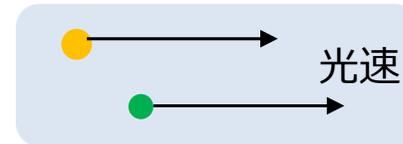
強磁性

$$M \neq 0$$

- 自由エネルギー: $F = E - TS$
- 2 次的相転移

素粒子物理 (電弱相転移)

高温

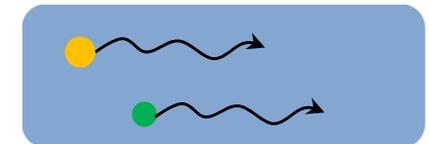


対称相

零質量

$$v = 0$$

低温



破れた相 (ヒッグス相)

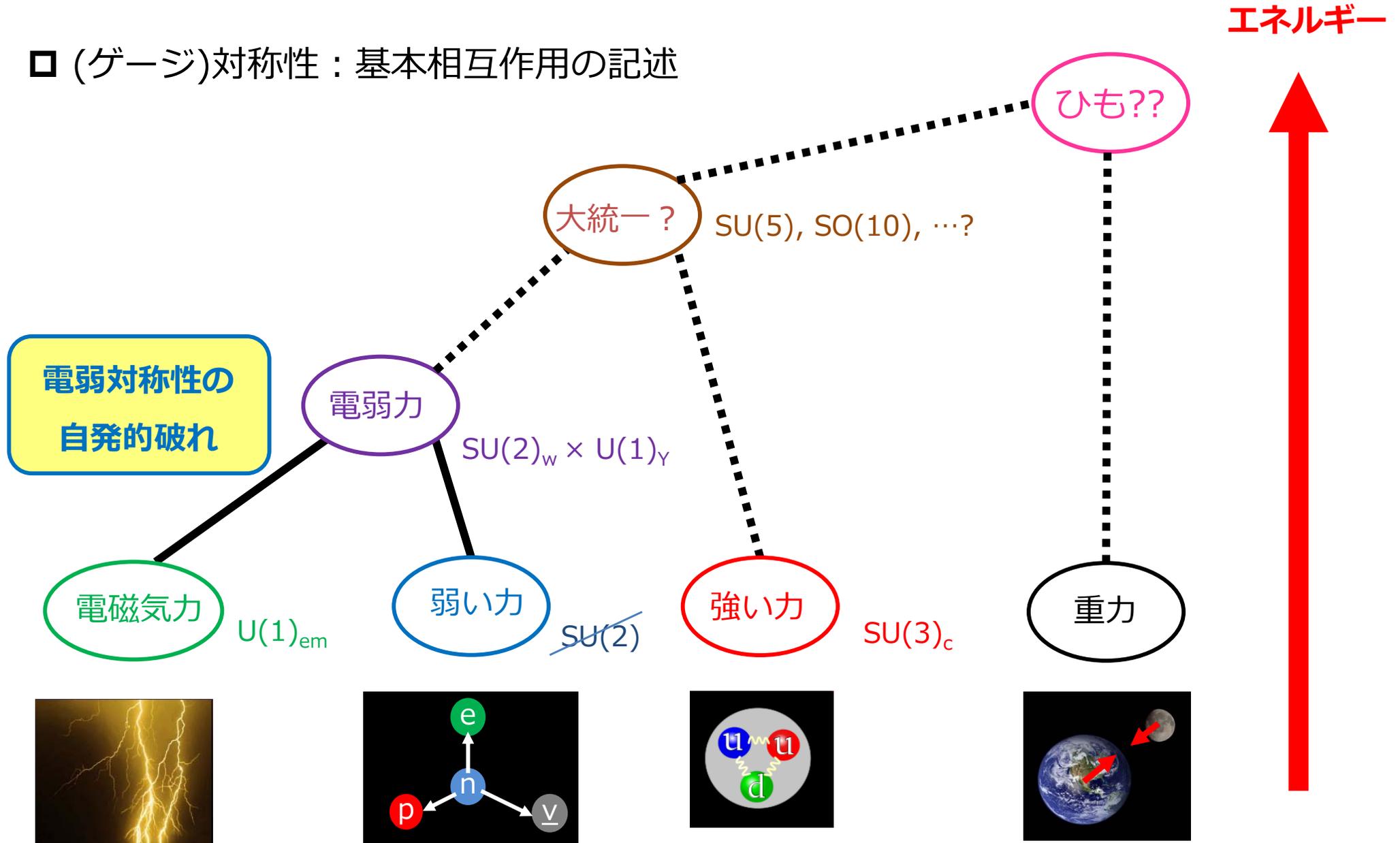
有限質量

$$v \sim 246 \text{ GeV}$$

- 有効ポテンシャル: $V(\Phi, T)$
- ??? (標準模型ではクロスオーバー)

対称性と相互作用

□ (ゲージ)対称性：基本相互作用の記述



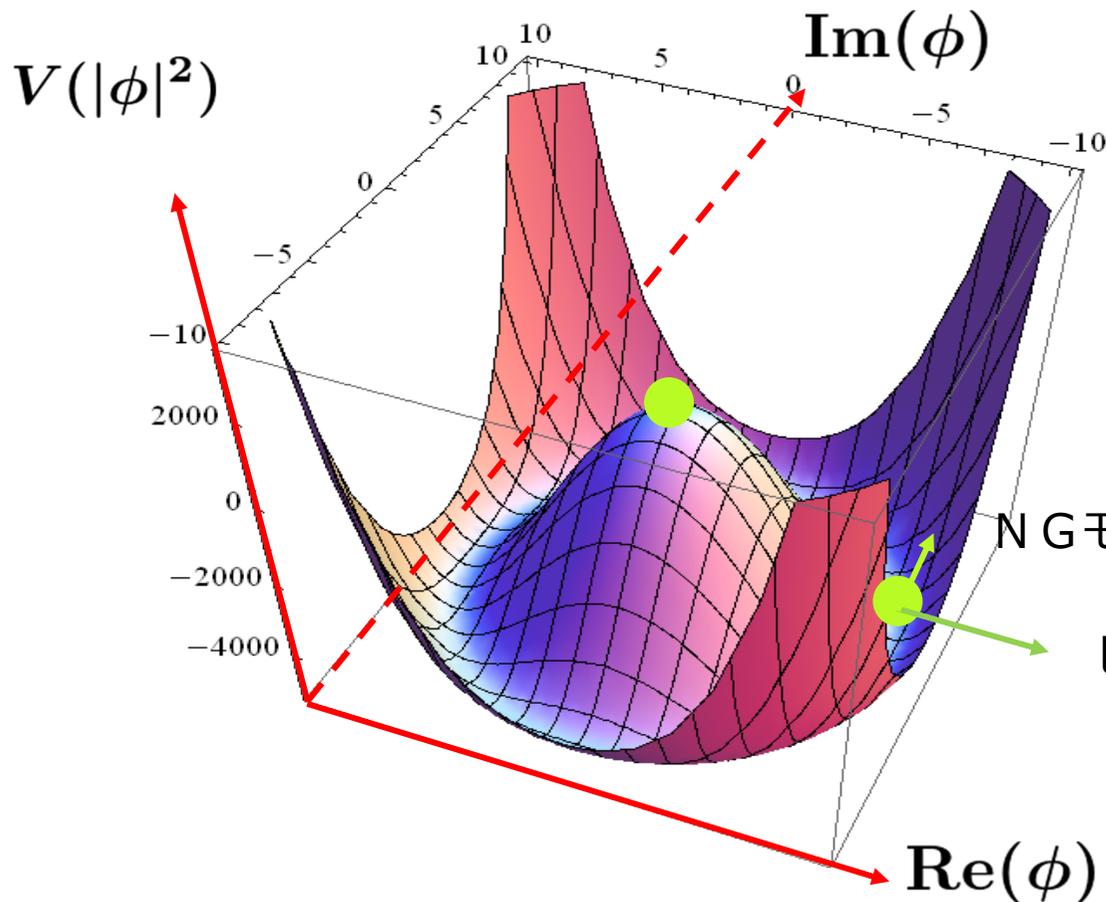
ヒッグス機構

□ スカラー（ヒッグス）場 ϕ を導入する。

$$V = \mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4 \quad \text{with } \mu^2 < 0$$



P. Higgs R. Brout F. Englert

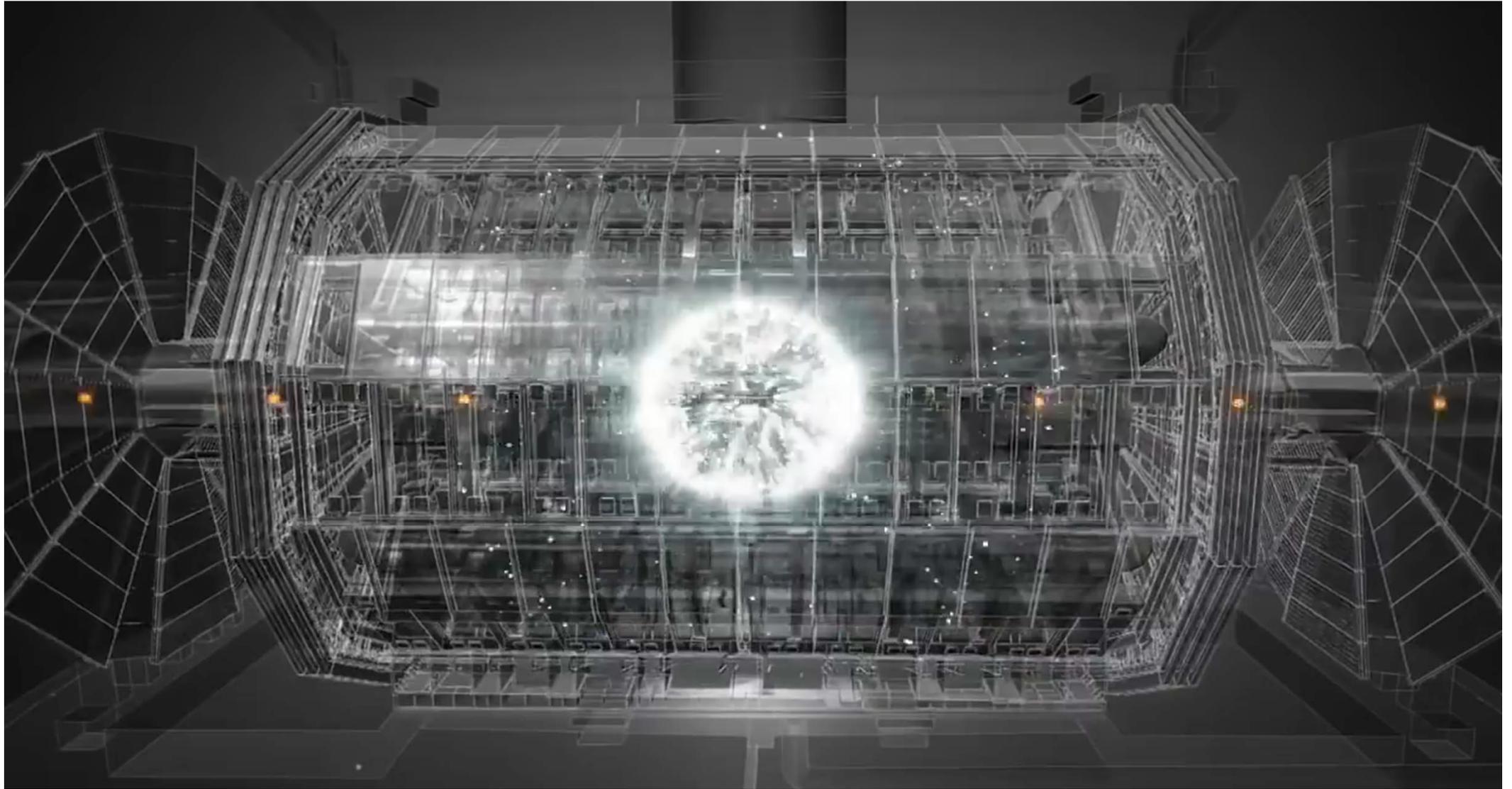


電弱対称性の自発的破れ：

$$SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{\text{em}}$$

ヒッグス粒子の発見

Movie from CERN



なぜ電弱相転移の物理？

1. ヒッグス問題の解決に迫る
2. 宇宙の物質創成の謎に迫る

目次

I. イントロダクション ✓

II. ヒッグス問題

III. 宇宙創成の謎

IV. 具体的な新物理のシナリオ : 2 Higgs doublet models

V. まとめ

ヒッグス問題

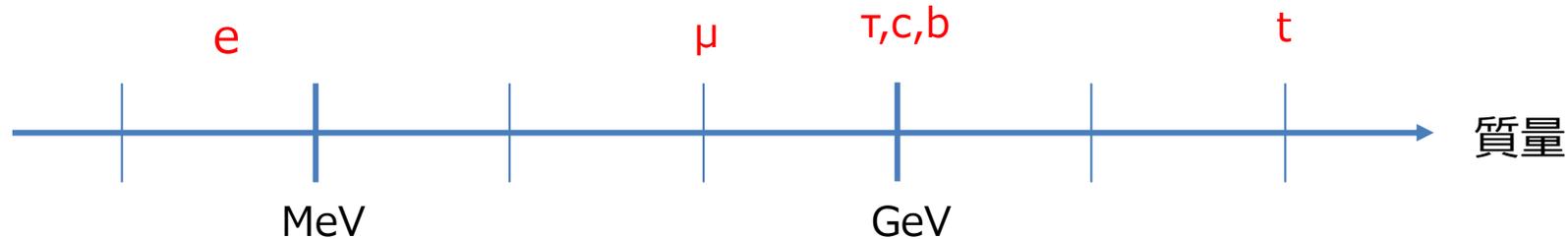
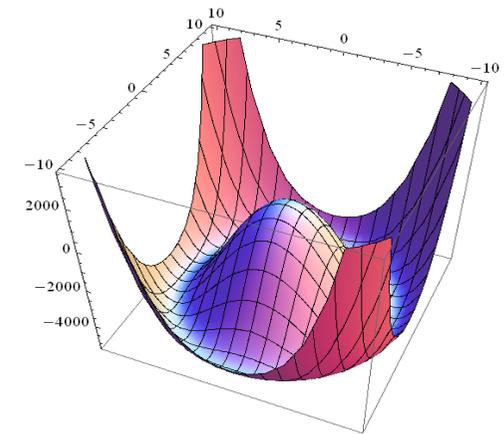
□ 負の質量項 ($\mu^2 < 0$) の起源は?

$$V = \mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4$$

□ ヒッグスセクターの形を決める原理がない。
ヒッグス場の数、表現、対称性 (離散的、大局的) ...

□ 湯川相互作用?

$$m_f = v \times y_f \longleftrightarrow \text{ゲージ相互作用} \quad \text{C.f.}$$

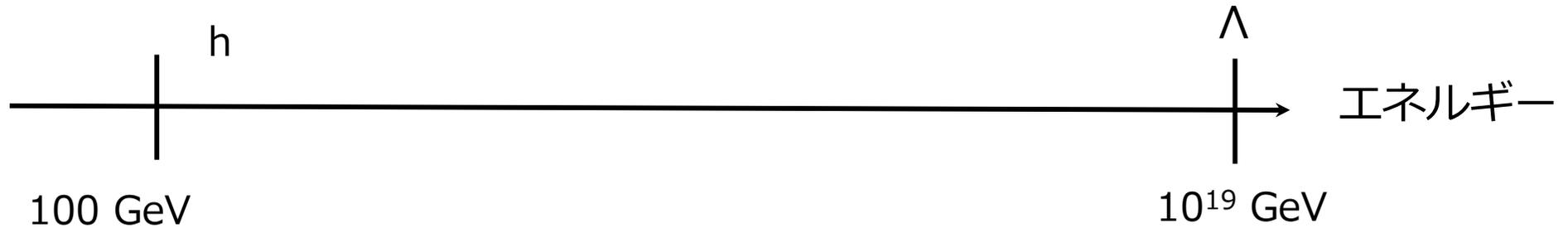


6桁違う現象が同じ物理法則に従う?

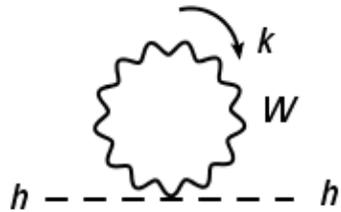
□ ヒッグス質量の問題 (階層性問題)

ヒッグス質量の問題

標準模型

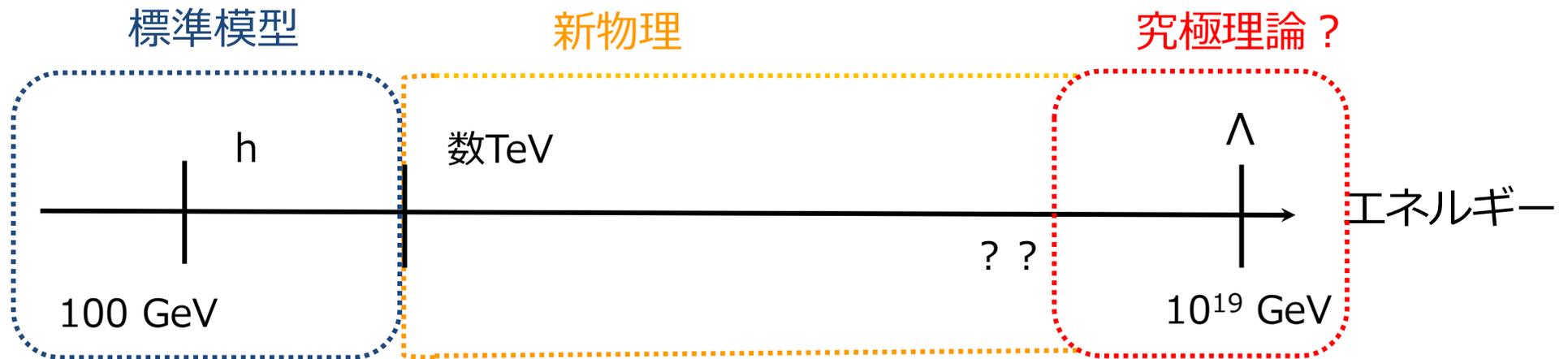


- ヒッグス（スカラー）場の質量は自然には理論の適用限界スケールで決定される。

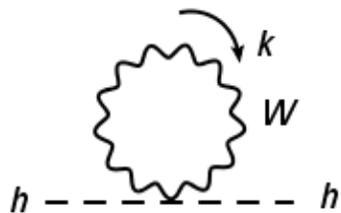


$$m_h^2 \sim \frac{\Lambda^2}{16\pi^2} \gg (125 \text{ GeV})^2$$

ヒッグス質量の問題



□ ヒッグス（スカラー）場の質量は自然には理論の適用限界スケールで決定される。



$$m_h^2 \sim \frac{\Lambda^2}{16\pi^2} \gg (125 \text{ GeV})^2$$

□ ヒッグスの本質は何か？

ヒッグス

スカラー (超対称性)

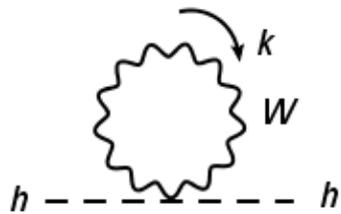
フェルミオン (コンポジットヒッグス)

ゲージボソン (余剰次元)

ヒッグス質量の問題



□ ヒッグス（スカラー）場の質量は自然には理論の適用限界スケールで決定される。



$$m_h^2 \sim \frac{\Lambda^2}{16\pi^2} \gg (125 \text{ GeV})^2$$

□ ヒッグスの本質は何か？

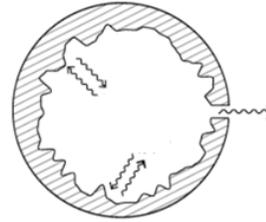
ヒッグス

スカラー (超対称性)

フェルミオン (コンポジットヒッグス)

ゲージボソン (余剰次元)

Paradigm Shift in Early 20th Century



Black-body Radiation

Classical Theory

- Newton Dynamics
- Maxwell Electromagnetism

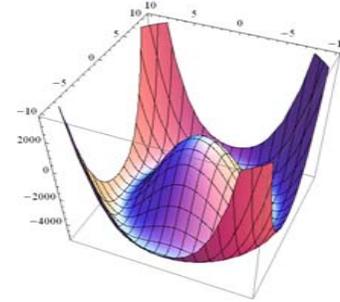
Quantum Theory

- Nuclear Physics
- Particle Physics, ...

Planck's Law

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\exp(h\nu/k_B T) - 1}$$

Paradigm Shift in Early 21st Century



Higgs Physics

Standard Model

- Gauge Principle
- Higgs Mechanism

New Physics

- New dynamics
- New symmetries
- Unifications, ...

$$V = \mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4$$

Higgs as a Probe of New Physics!!

目次

I. イントロダクション ✓

II. ヒッグス問題 ✓

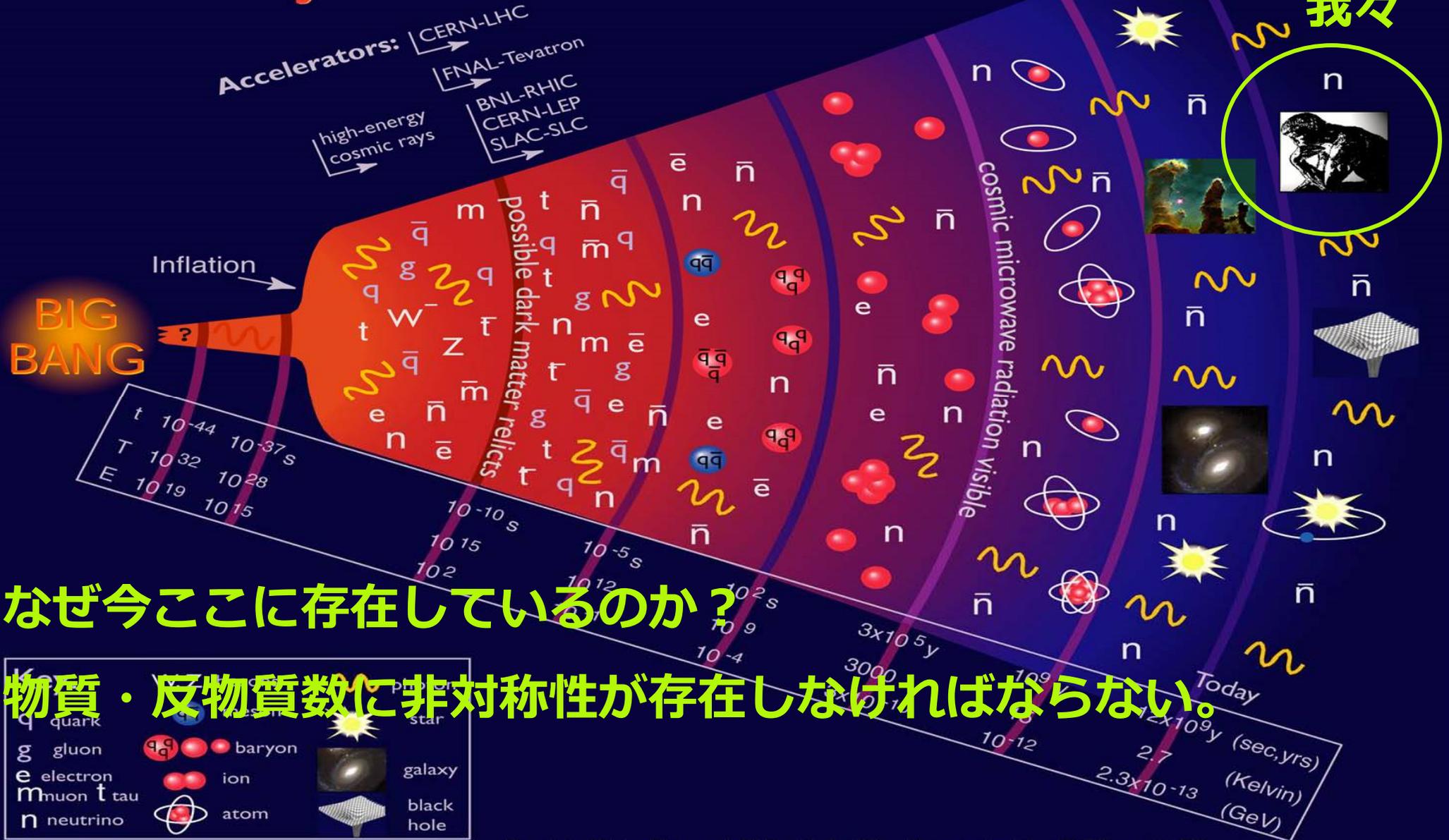
III. 宇宙創成の謎

IV. 具体的な新物理のシナリオ : 2 Higgs doublet models

V. まとめ

宇宙の物質創成

History of the Universe



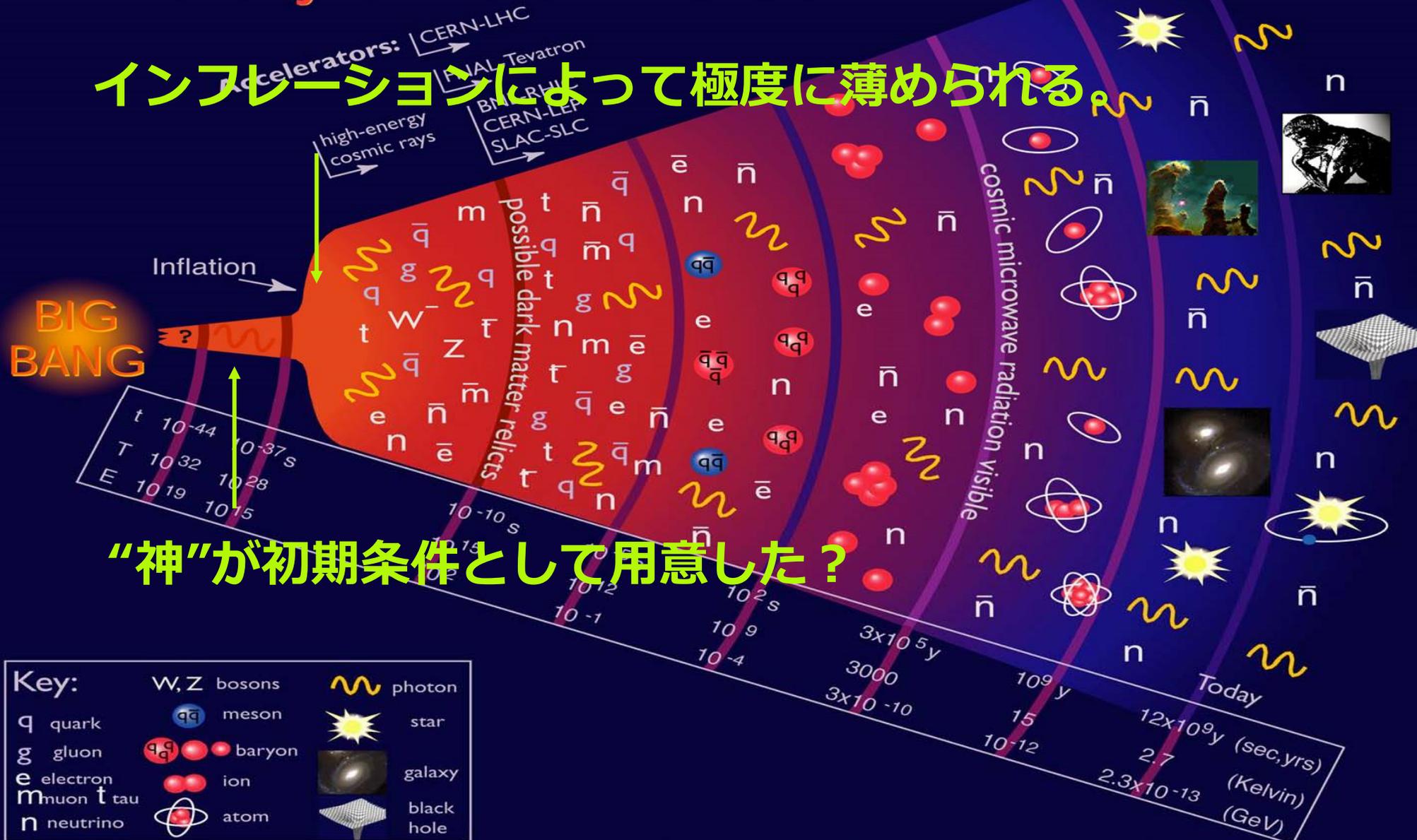
なぜ今ここに存在しているのか？

物質・反物質数に非対称性が存在しなければならない。

宇宙の物質創成

History of the Universe

インフレーションによって極度に薄められる



“神”が初期条件として用意した？

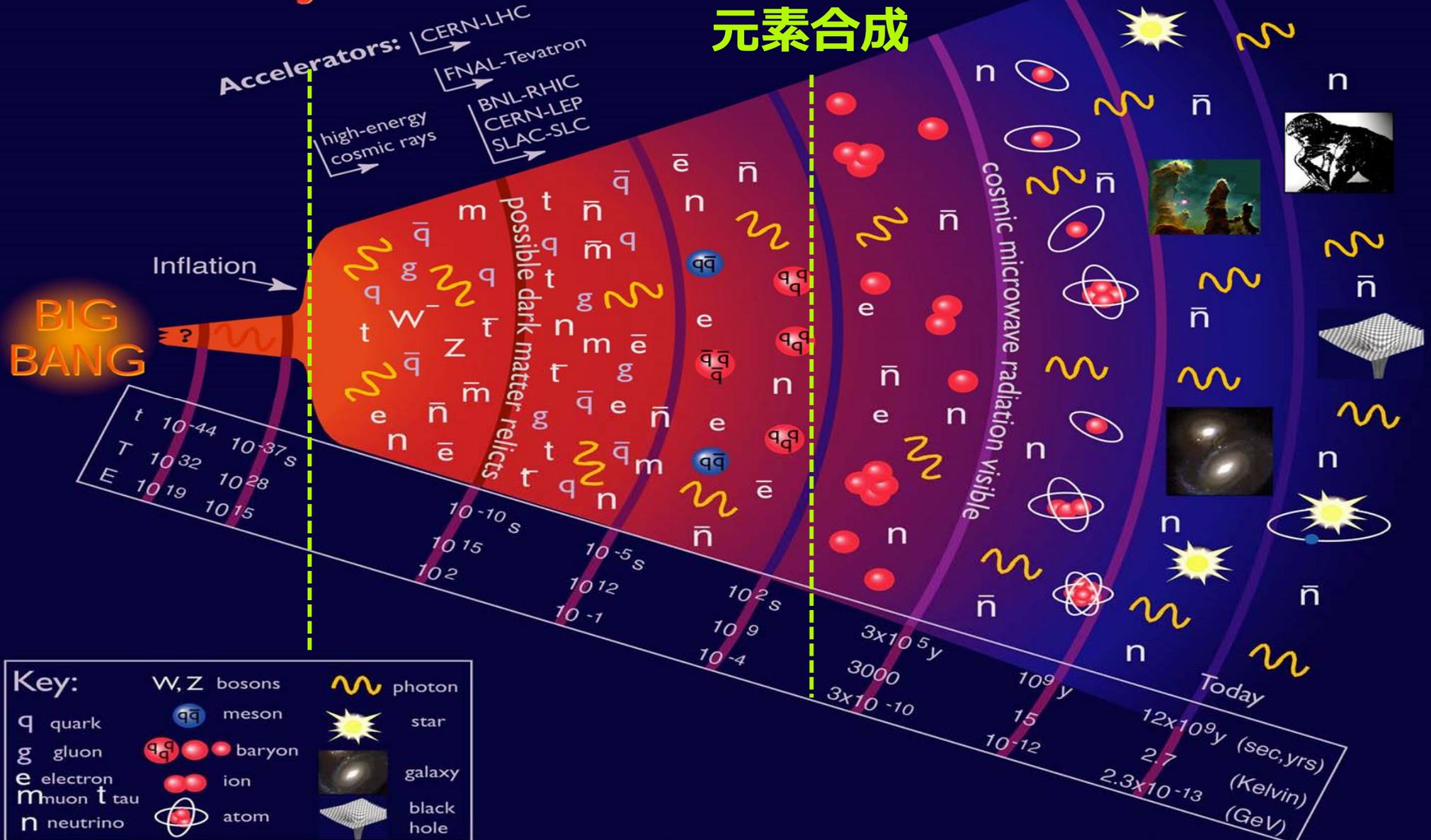
Key:

W, Z bosons	photon
quark	meson
gluon	baryon
electron	ion
muon	atom
tau	star
neutrino	galaxy
	black hole

宇宙の物質創成

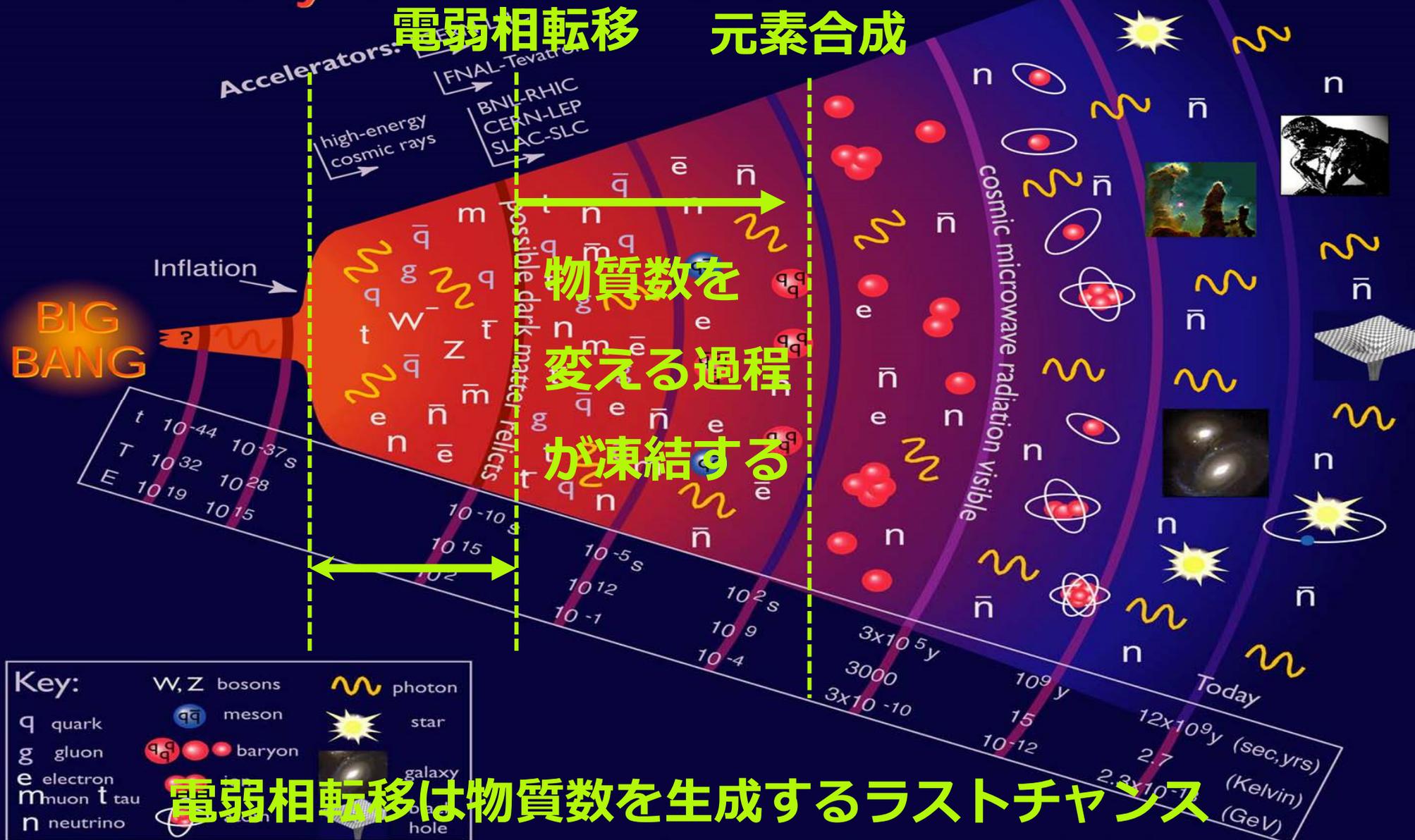
History of the Universe

元素合成



宇宙の物質創成

History of the Universe



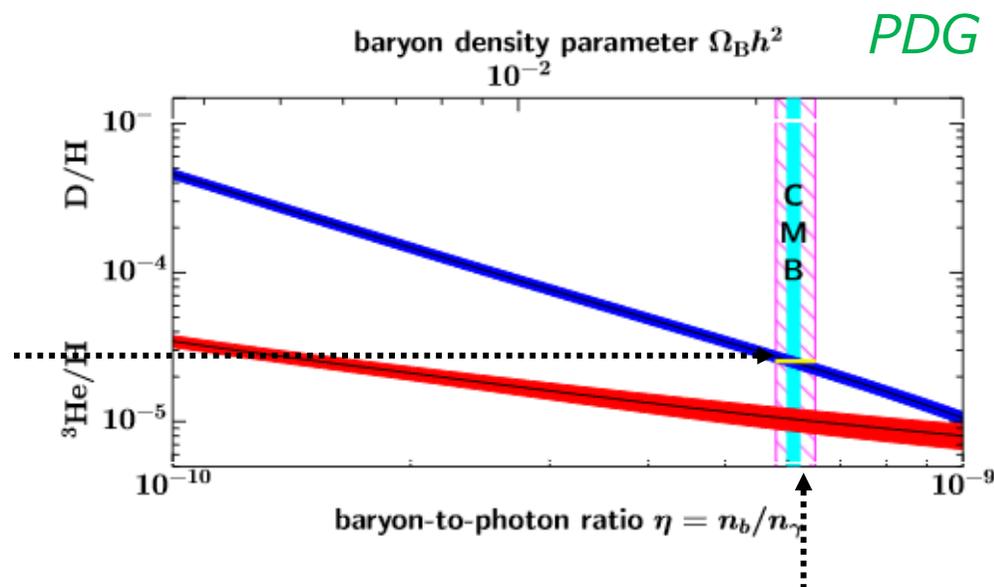
宇宙のバリオン数生成

□ 宇宙のバリオン数非対称性

$$\eta \equiv \frac{n_b - n_{\bar{b}}}{n_\gamma} = (5.8-6.6) \times 10^{-10}$$

重水素の存在比

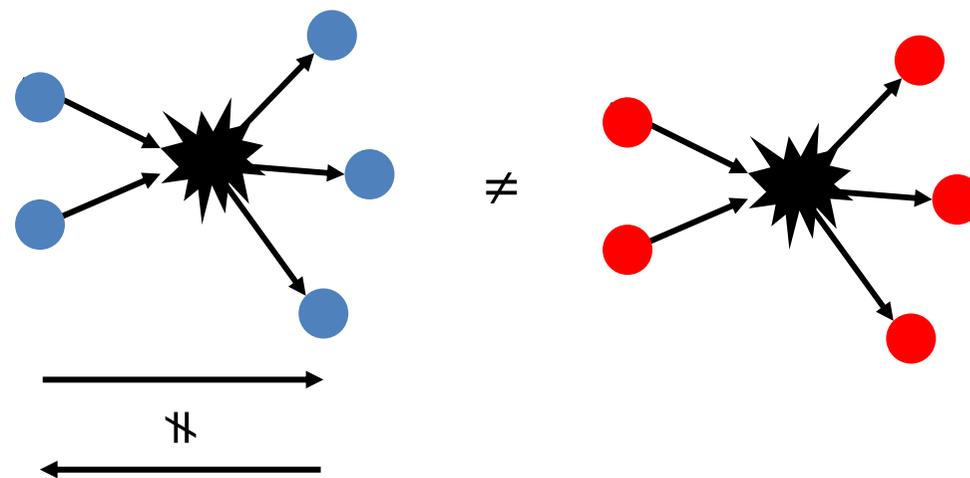
全く独立な観測結果が無矛盾な η 値を示唆



Sakharov (1967)

□ サハロフの3条件

1. バリオン数を変える過程
2. C 及び CP の破れ
3. 熱平衡状態からの逸脱



電弱バリオン数生成

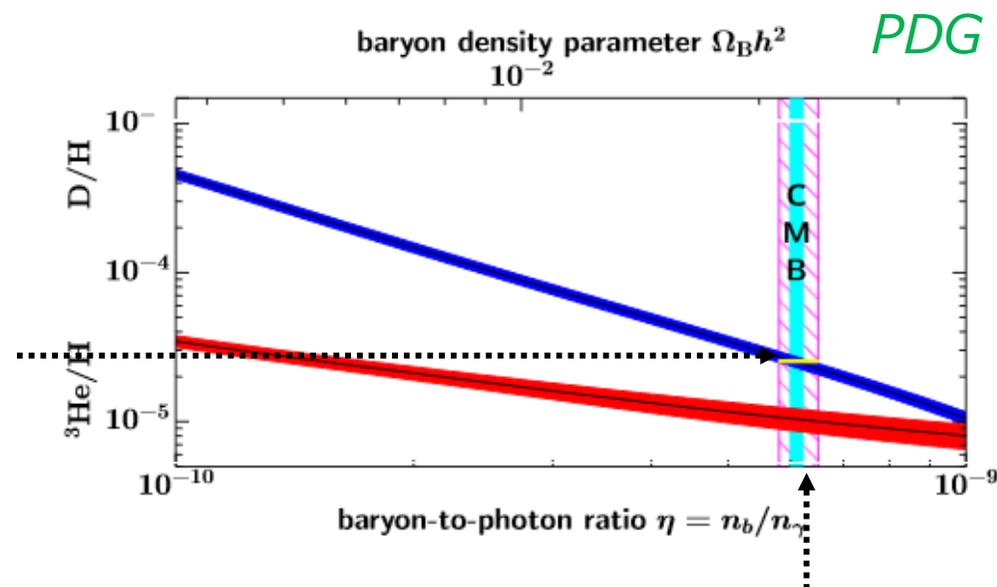
Kuzmin, Ruvakov, Shapshnikov (1985)

□ 宇宙のバリオン数非対称性

$$\eta \equiv \frac{n_b - n_{\bar{b}}}{n_\gamma} = (5.8-6.6) \times 10^{-10}$$

重水素の存在比

全く独立な観測結果が無矛盾な η 値を示唆



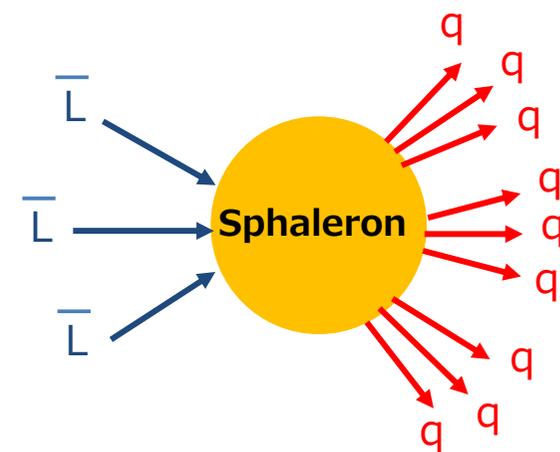
PDG

Sakharov (1967)

□ サハロフの3条件

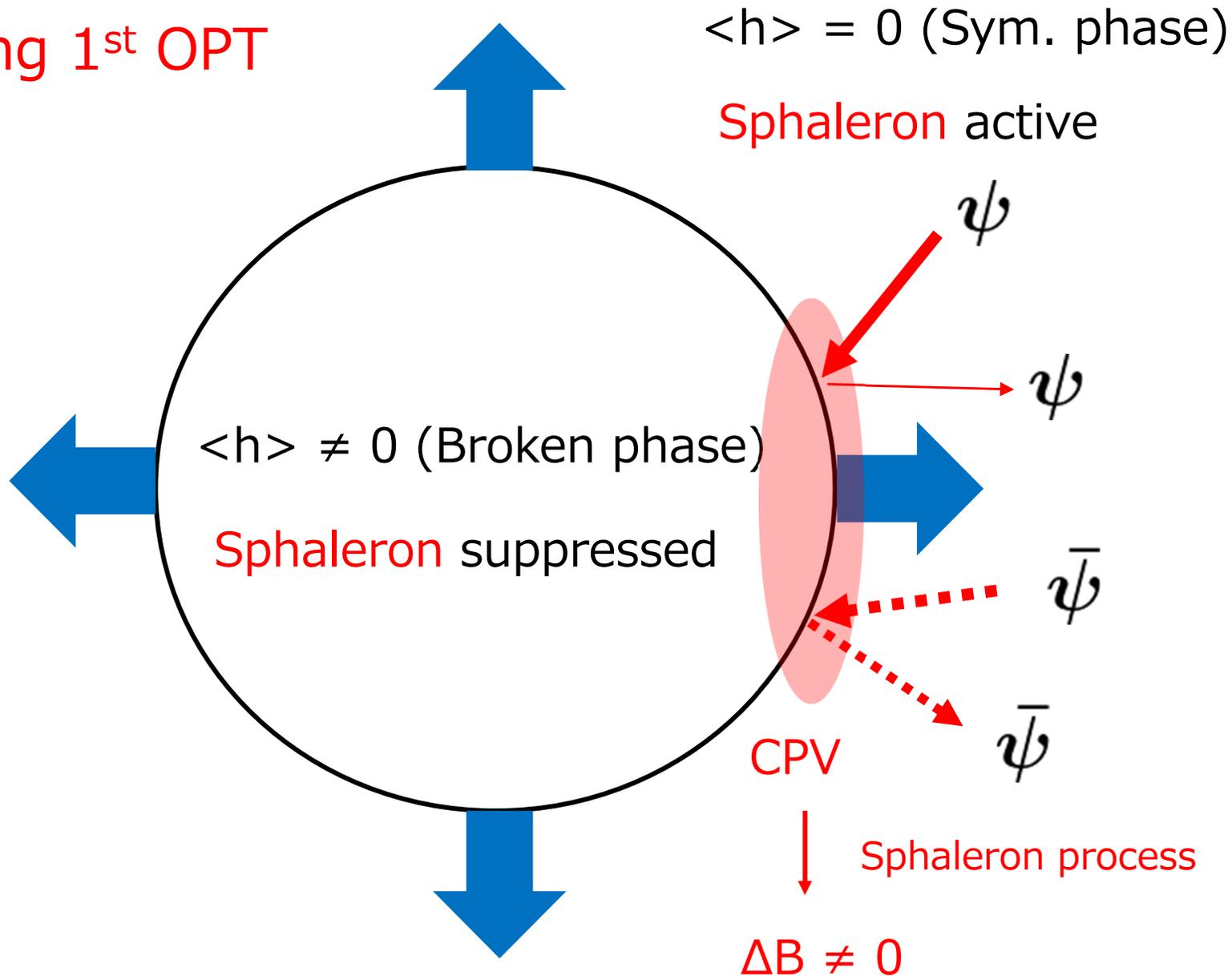
1. バリオン数を変える過程 → スファレロン過程
2. C 及び CP の破れ → 弱い相互作用
3. 熱平衡状態からの逸脱 → 1 次的電弱相転移

CMB揺らぎの観測



電弱バリオン数生成

Strong 1st OPT



標準模型での電弱バリオン数生成

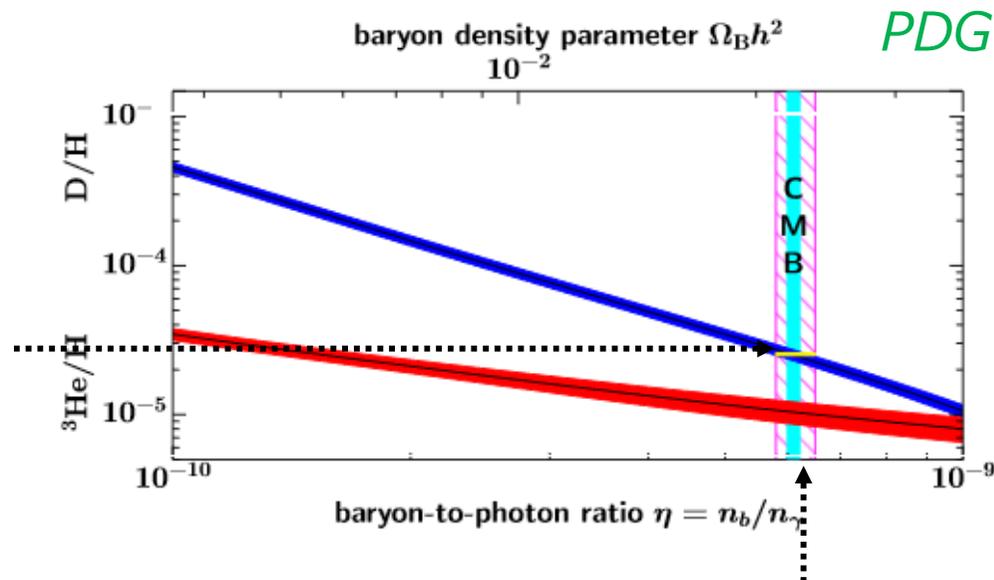
Kuzmin, Ruvakov, Shapshnikov (1985)

□ 宇宙のバリオン数非対称性

$$\eta \equiv \frac{n_b - n_{\bar{b}}}{n_\gamma} = (5.8-6.6) \times 10^{-10}$$

重水素の存在比

全く独立な観測結果が無矛盾な η 値を示唆



PDG

Sakharov (1967)

□ サハロフの3条件

CMB揺らぎの観測

1. バリオン数を変える過程 → スファレロン過程 → OK

Farrar, Shaposhnikov (1993)

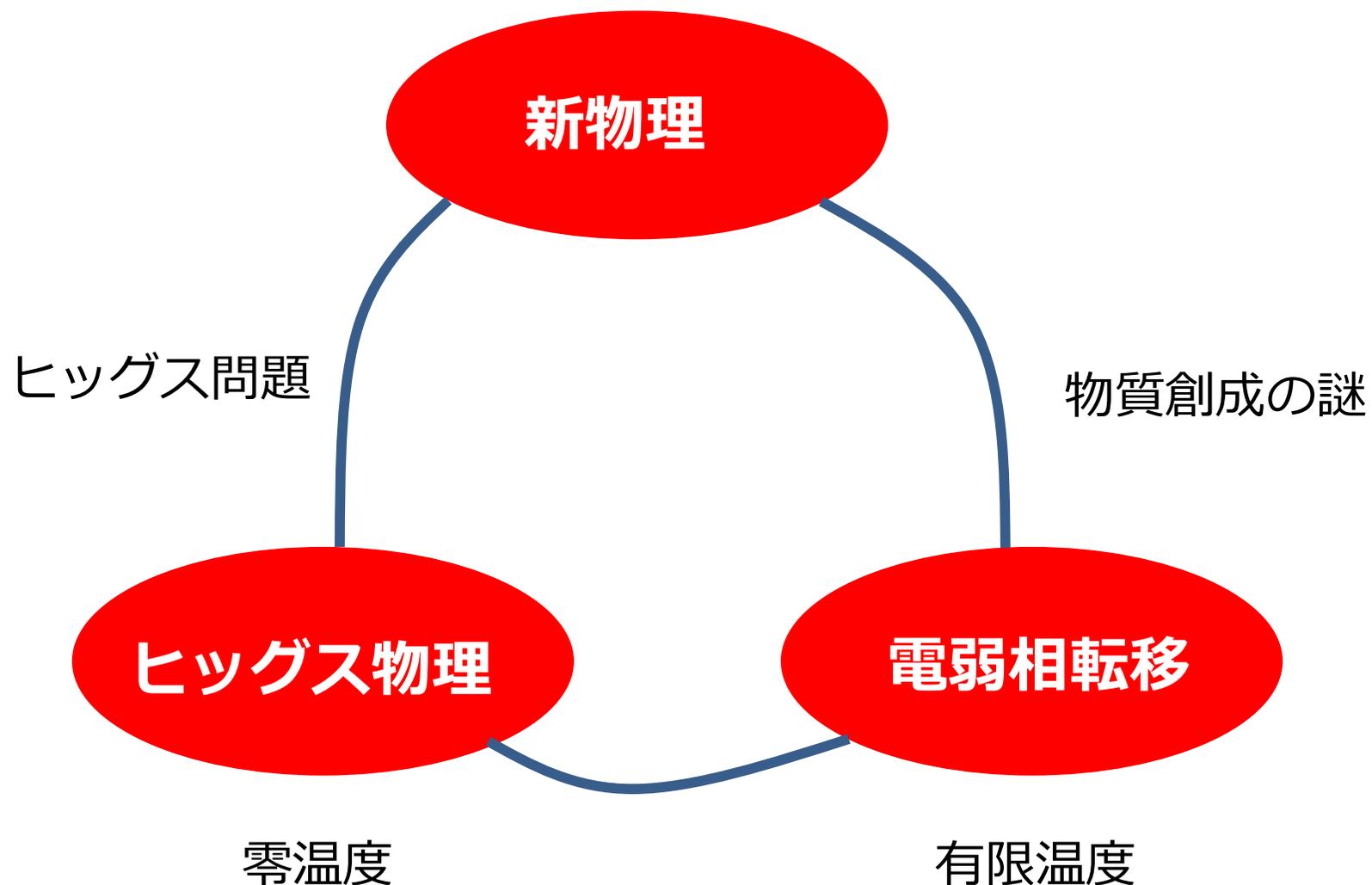
2. C 及び CP の破れ → 弱い相互作用 → 小林・益川位相 (足りない)

Kajantie, Laine, Rummukainen, Shaposhnikov (1996)

3. 熱平衡状態からの逸脱 → 1 次的電弱相転移 → クロスオーバー

新物理への拡張が必要不可欠である。

ここまでのまとめ



電弱相転移を明らかにすることは新物理を知る上で重要！

目次

I. イントロダクション ✓

II. ヒッグス問題 ✓

III. 宇宙創成の謎 ✓

IV. 具体的な新物理のシナリオ : 2 Higgs doublet models

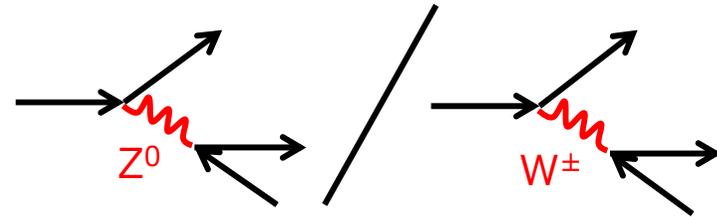
V. まとめ

2 Higgs doublet models (2HDMs)

□ 標準模型にアイソ2重項場を1個追加した模型。 $\Phi \rightarrow \Phi_1, \Phi_2 \supset h(125), H, A, H^\pm$

- 電弱 ρ パラメータがツリーレベルで1となる。

$$\rho_{\text{exp}} = 1.00038 \pm 0.0002$$



- ヒッグス問題を解く新物理の低エネルギー有効理論に現れる。

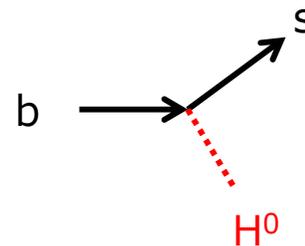
e.g., 超対称性、複合ヒッグスなど

- 電弱バリオン数生成に必要な「新たなCPV位相」と「強い1次的電弱相転移」が実現可能。

□ 現在の実験結果

- フレーバーを破る中性カレントの抑制

→ 湯川アラインメント

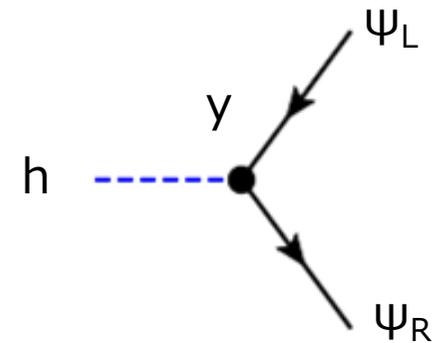
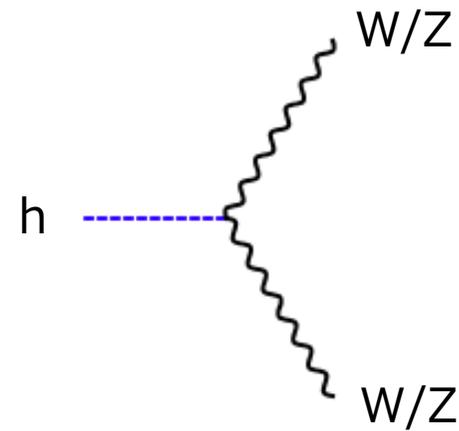
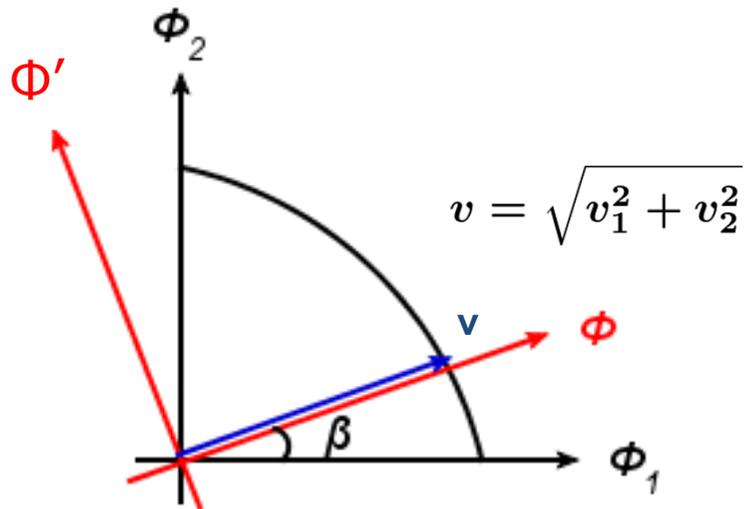


- 付加的なヒッグスボソンは見つかっておらず、 $h(125)$ は標準模型的な性質を持つ。

→ ヒッグスアラインメント

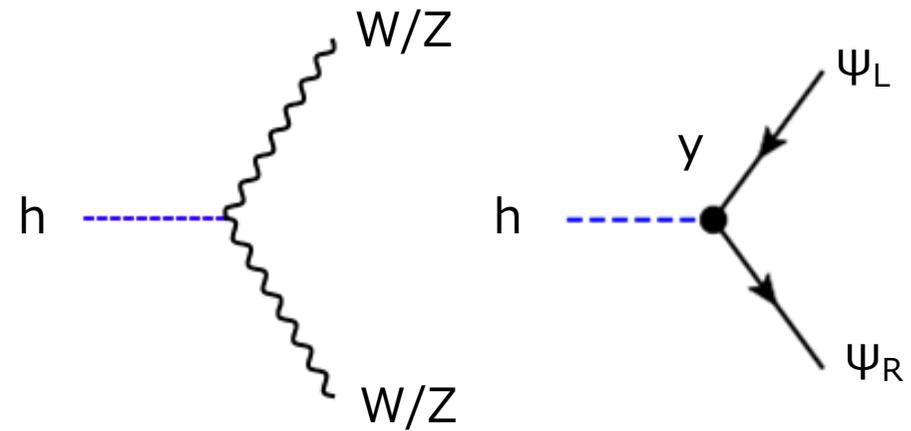
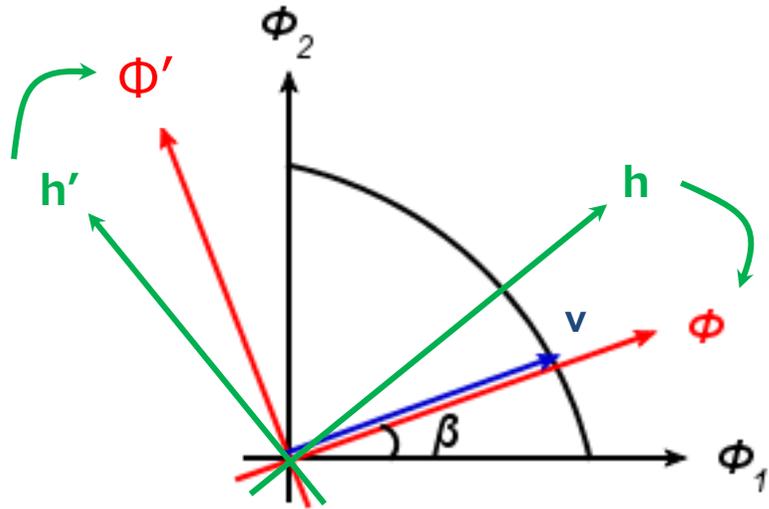
Aligned 2HDM (A2HDM)

□ ヒッグスアラインメント



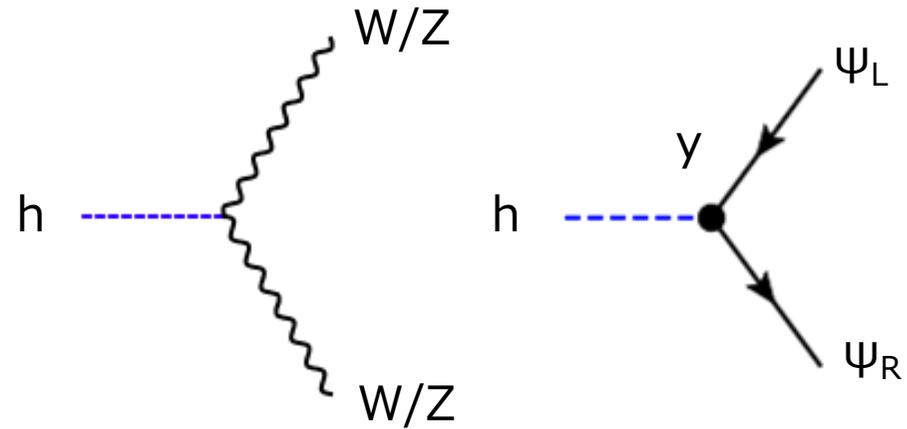
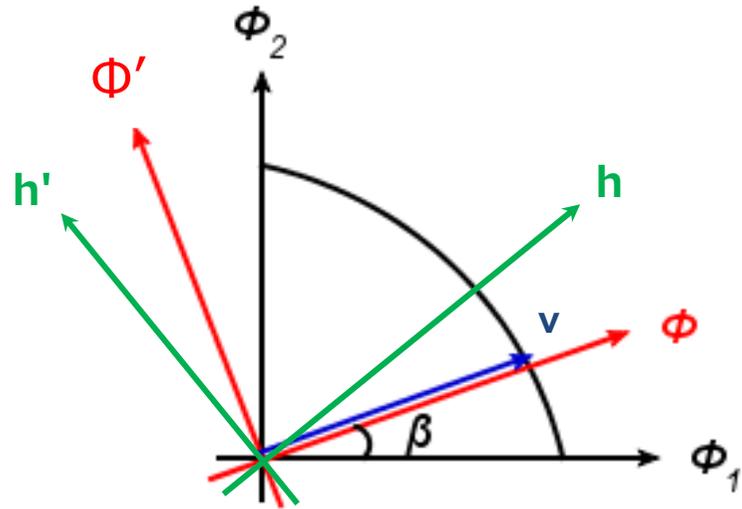
Aligned 2HDM (A2HDM)

□ ヒッグスアライメント



Aligned 2HDM (A2HDM)

□ ヒッグスアラインメント



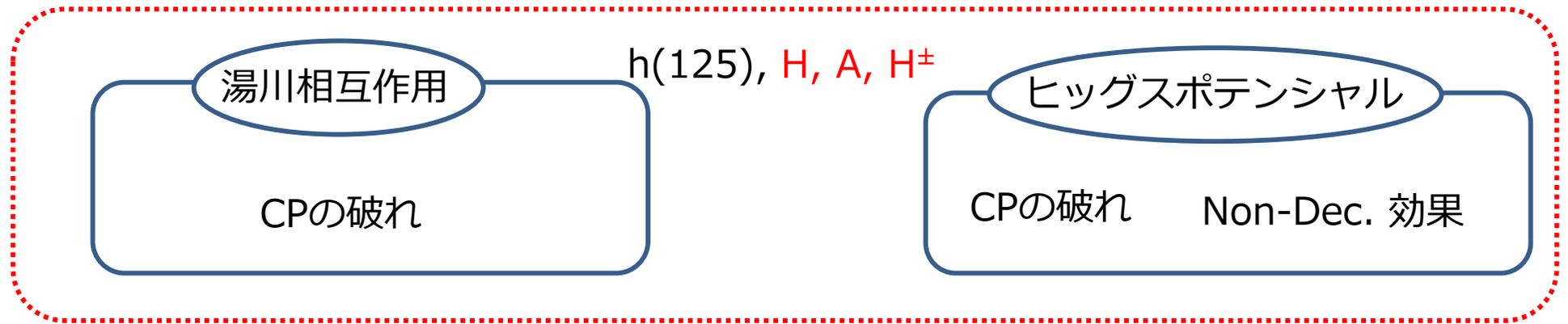
□ 湯川アラインメント

$$\mathcal{L} \supset (\bar{d}, \bar{s}, \bar{b})_R \left[\frac{1}{v} \begin{pmatrix} m_d & 0 & 0 \\ 0 & m_s & 0 \\ 0 & 0 & m_b \end{pmatrix} \Phi^0 + \begin{pmatrix} Y_{dd} & Y_{ds} & Y_{db} \\ Y_{sd} & Y_{ss} & Y_{sb} \\ Y_{bd} & Y_{bs} & Y_{bb} \end{pmatrix} \Phi'^0 \right] \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}_L$$

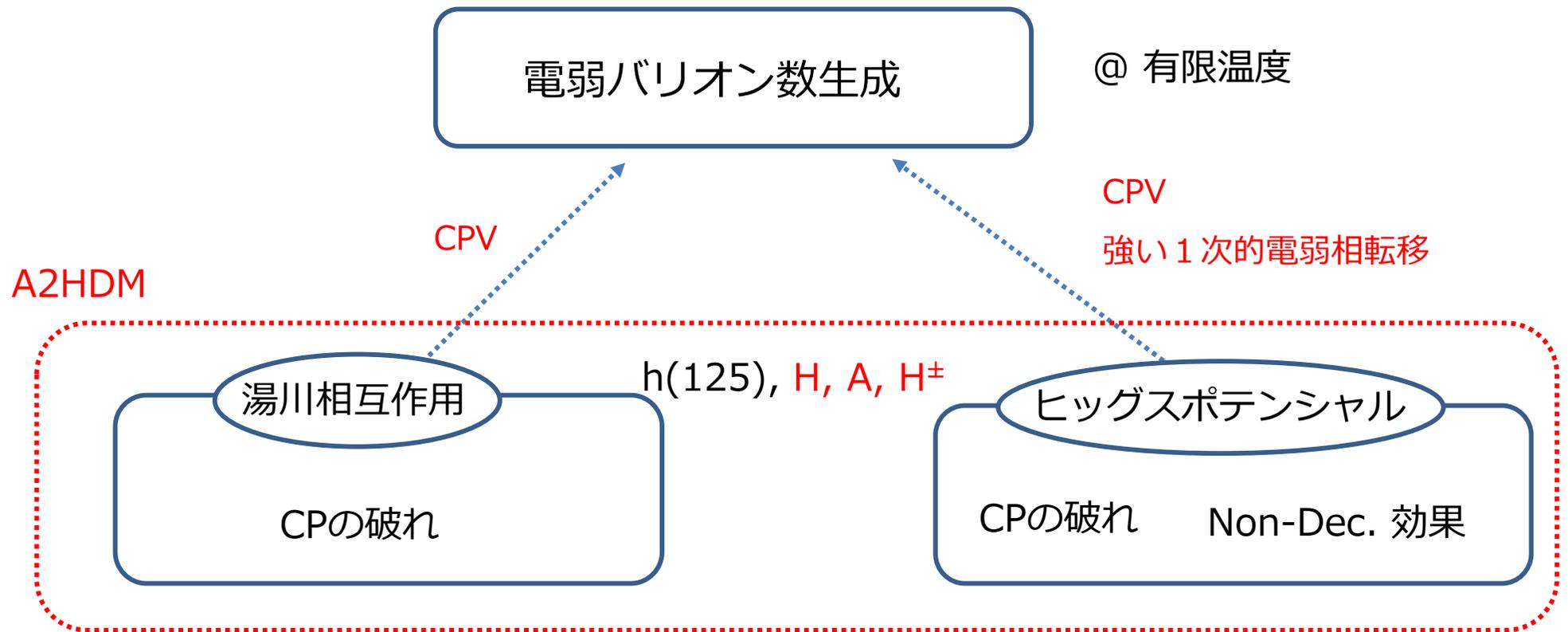
質量行列: M_d $\propto \zeta_d M_d$

A2HDMにおける電弱バリオン数生成

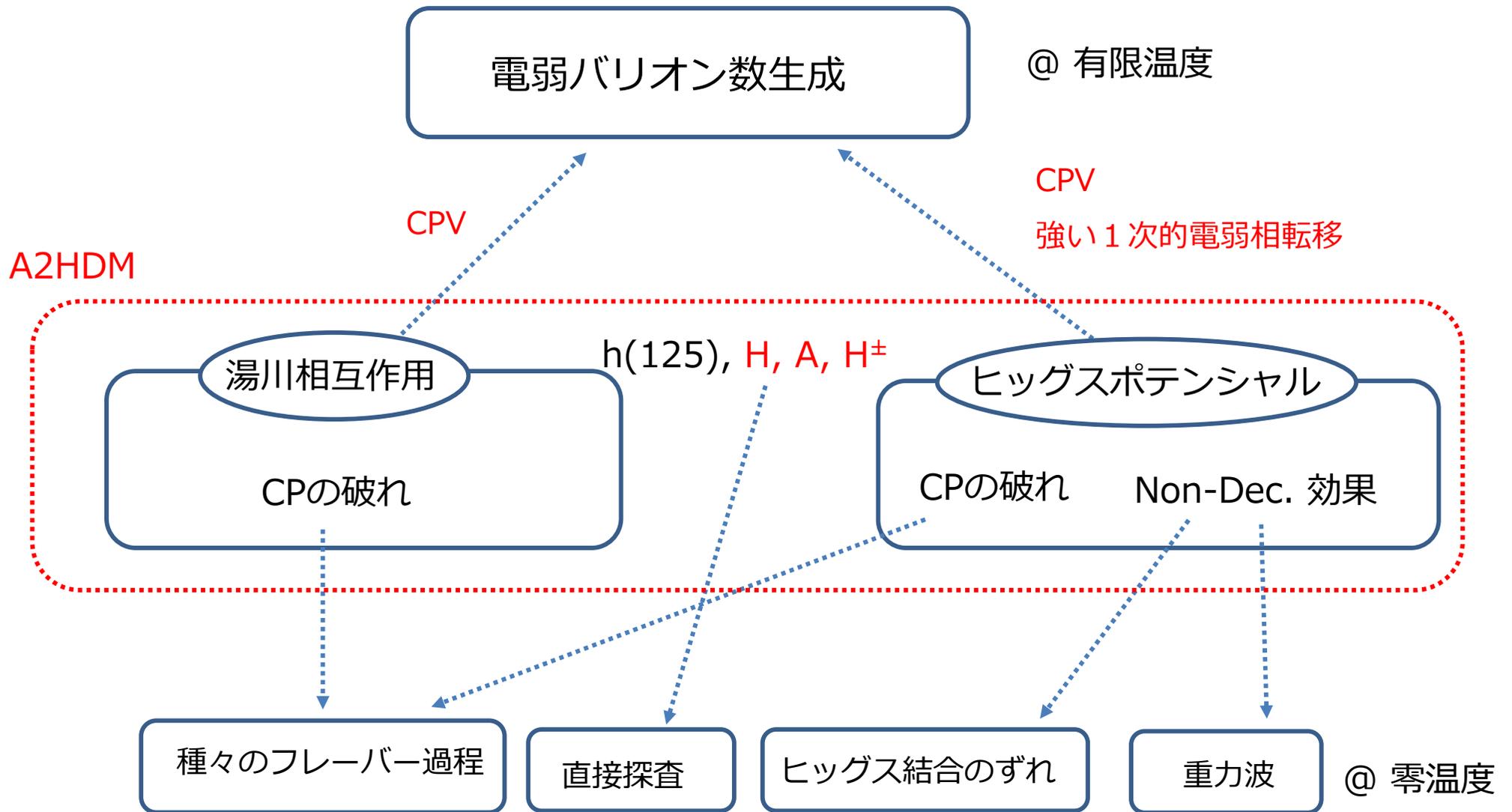
A2HDM



A2HDMにおける電弱バリオン数生成

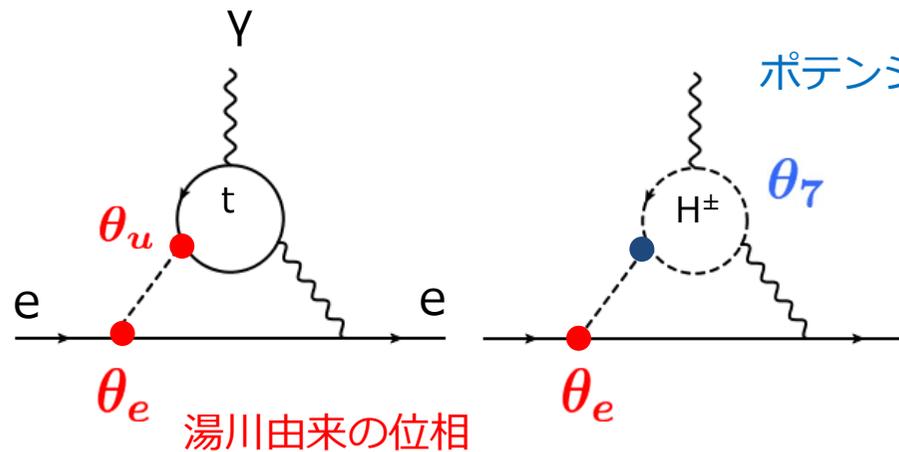


A2HDMにおける電弱バリオン数生成



電子EDM実験からの制限

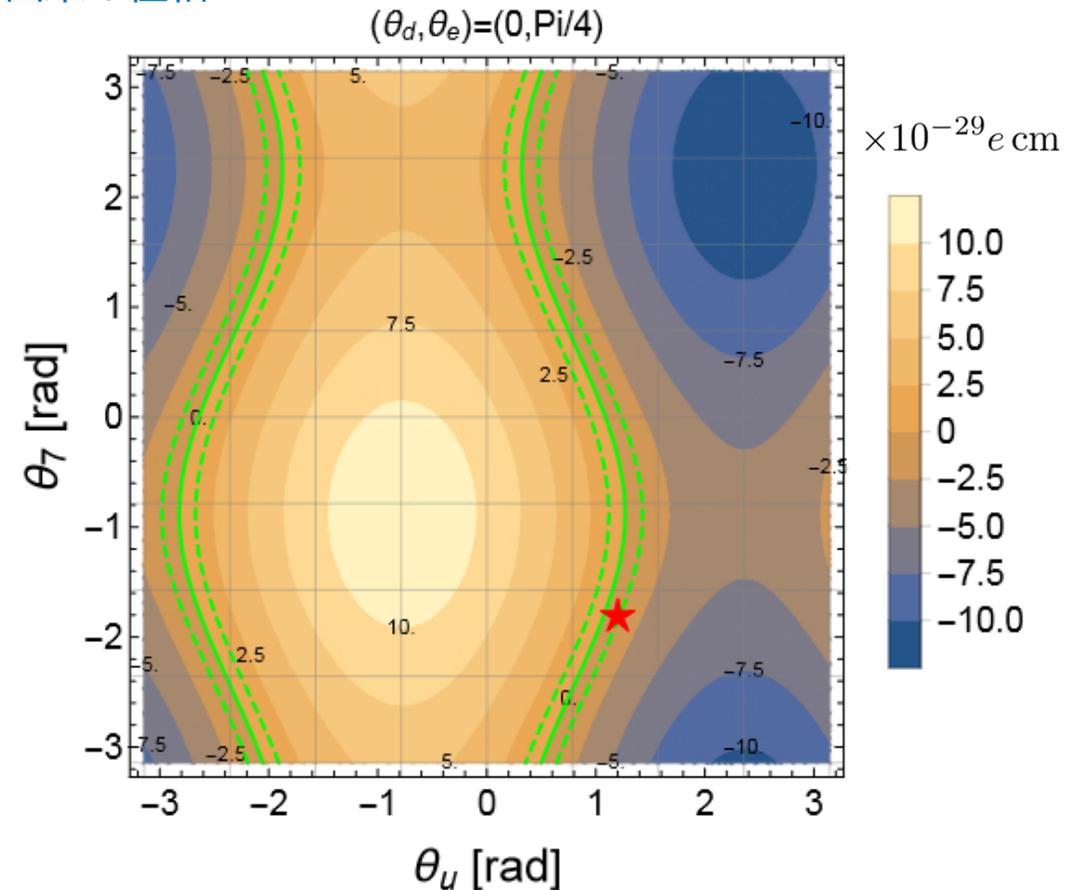
Kanemura, Kubota, KY (2020)



ACME Collaboration (2018)

$$|d_e| \leq 1.1 \times 10^{-29} e \text{ cm} @ 90\% \text{ CL}$$

典型的に各ダイアグラムは、
制限より一桁大きい寄与を与える。



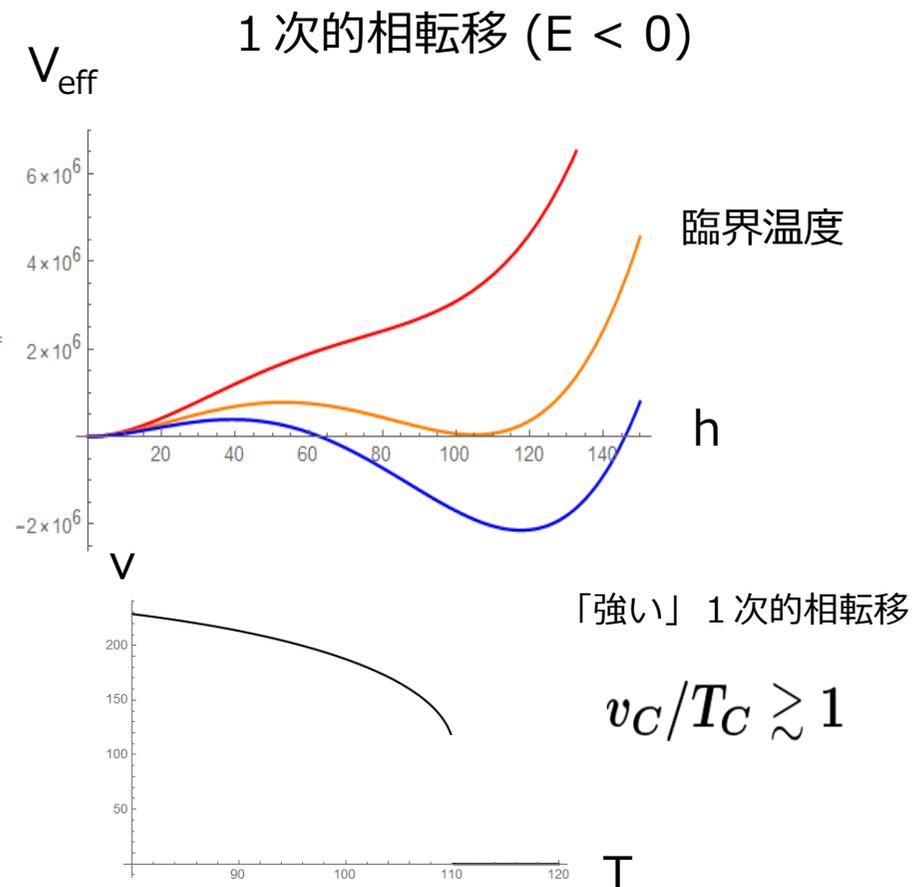
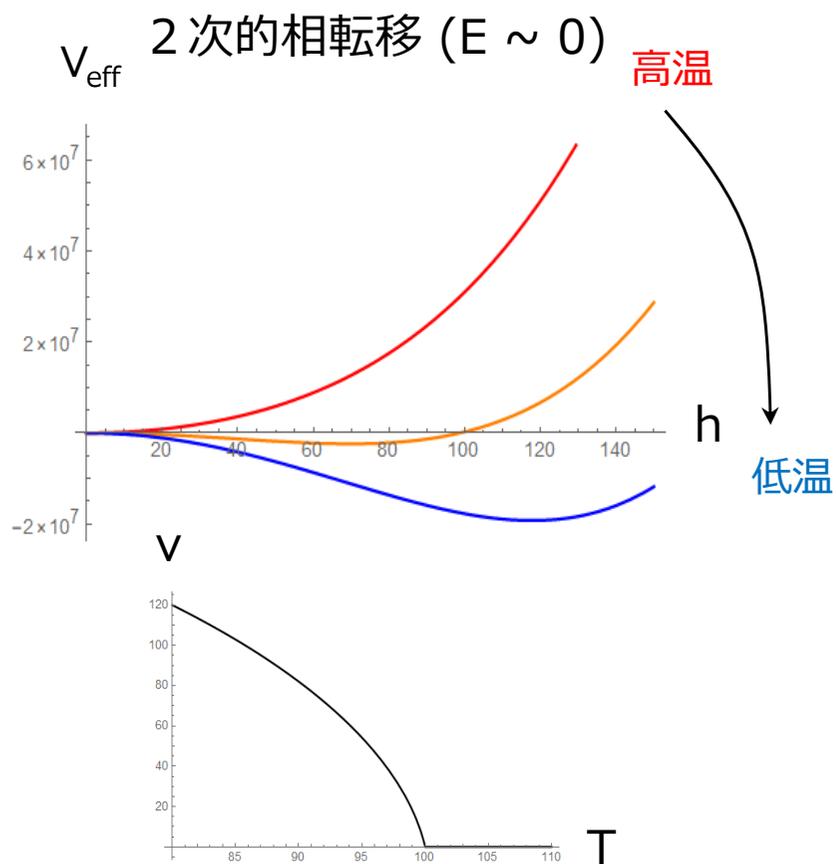
負の干渉により、EDM制限を満たした上で大きなCP位相をとることが可能。

→ 電弱バリオン数生成のシナリオに新たな活路が見いだされた。

電弱相転移

□ 有限温度でのポテンシャル：

$$V_{\text{eff}} \simeq (T^2 + \mu^2)h^2 + ET h^3 + \lambda_T h^4$$



新物理（付加的なボゾンループ）による E （ヒッグス3点結合）への寄与が必要。

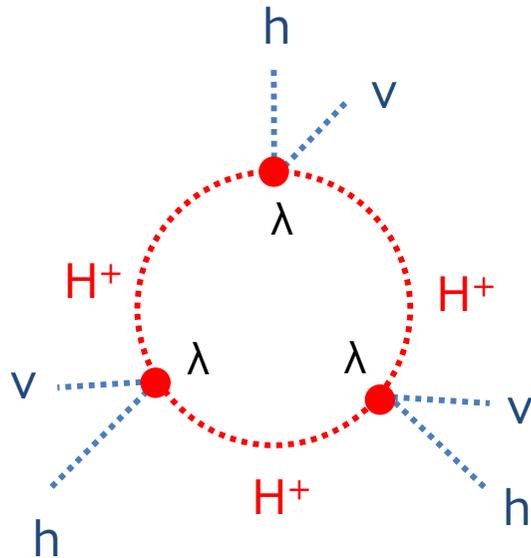
A2HDMでは付加的なヒッグス粒子が寄与！

ノンデカップリング効果

Kanemura, Okada, Senaha, Yuan (2004)

□ ヒッグス3点結合に対する量子補正

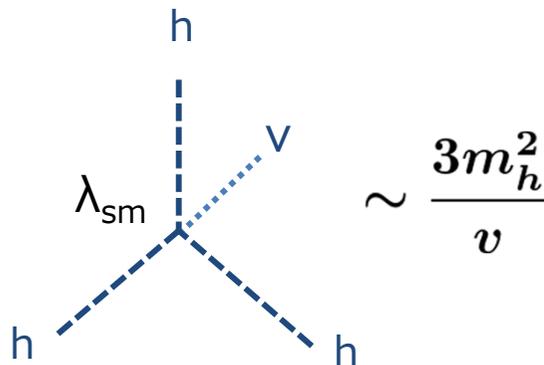
$$V \supset M^2 H^+ H^- + \lambda h h H^+ H^- \quad \longrightarrow \quad m_{H^\pm}^2 = M^2 + \lambda v^2$$



$$\sim \frac{1}{16\pi^2} \frac{(v\lambda)^3}{m_{H^\pm}^2} = \frac{1}{16\pi^2} \frac{m_{H^\pm}^4}{v^3} \left(1 - \frac{M^2}{m_{H^\pm}^2}\right)^3$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sim \frac{v^3}{M^2} \quad (m_{H^\pm}^2 \sim M^2) \quad \text{Decoupling case} \\ \sim \frac{m_{H^\pm}^4}{v^3} \quad (m_{H^\pm}^2 \sim v^2 \lambda) \quad \text{Non-dec. case} \end{array} \right.$$

c.f. ツリーレベルの寄与

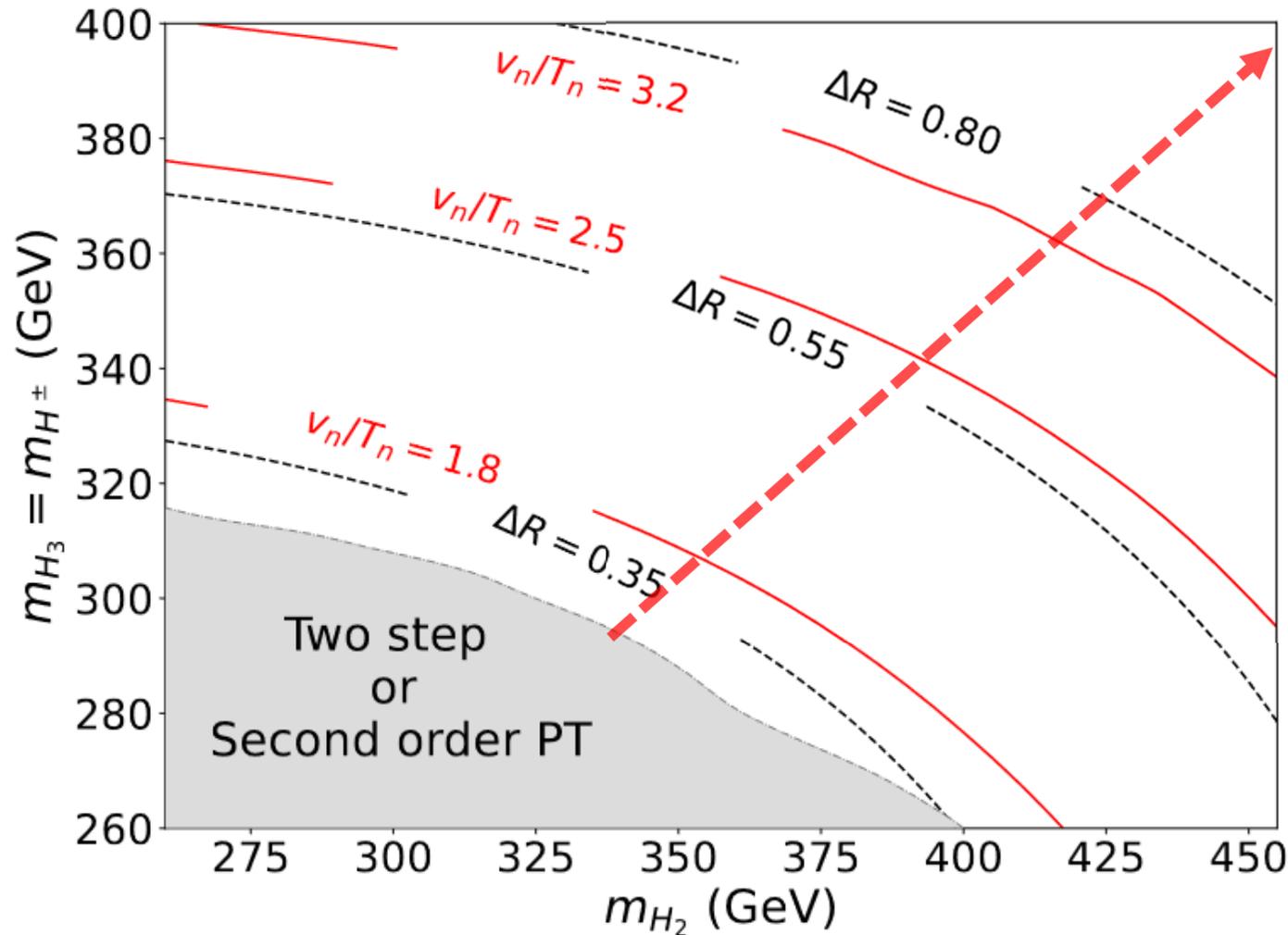


付加的なスカラー粒子の **ノンデカップリング効果** による、
3点結合への大きな寄与 \rightarrow Eに寄与 \rightarrow 強い1次的相転移

強い1次的相転移とヒッグス3点結合

$$\Delta R \equiv \frac{\lambda_{hhh}^{2\text{HDM}} - \lambda_{hhh}^{\text{SM}}}{\lambda_{hhh}^{\text{SM}}}$$

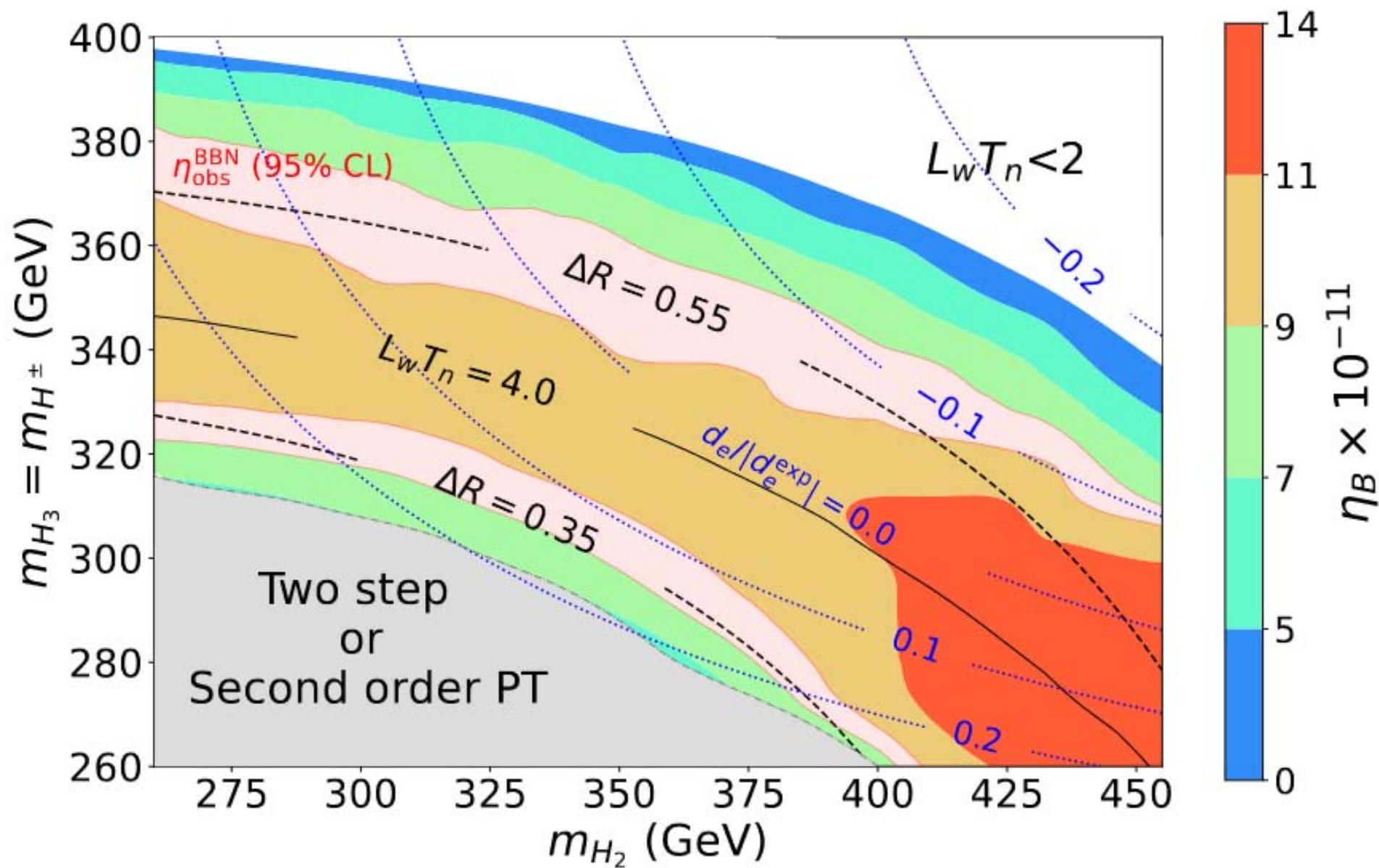
Large deviation in hhh coupling



ILC 実験では、 $\Delta R \geq 0.27$ であれば検出可能と期待されている。

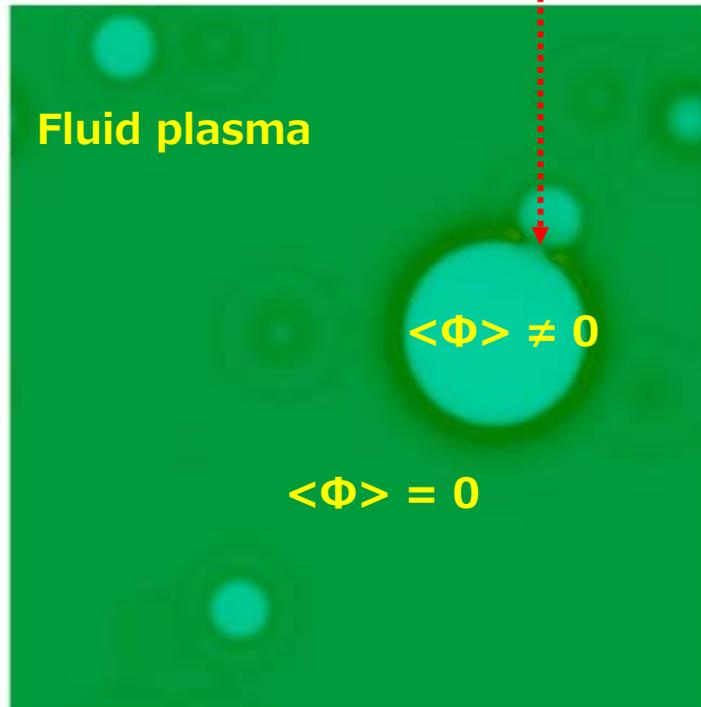
バリオン数生成

Enomoto, Kanemura, Mura (2021)

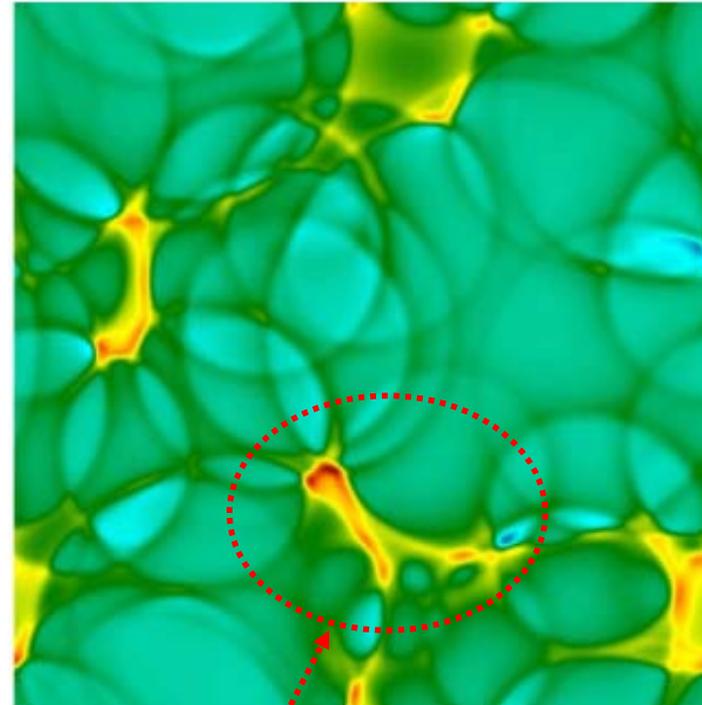


1 次的電弱相転移由来の重力波

泡の衝突



Hindmarsh, Huber, Rummukainen, Weir (2013)



Grojean, Servant (2007)

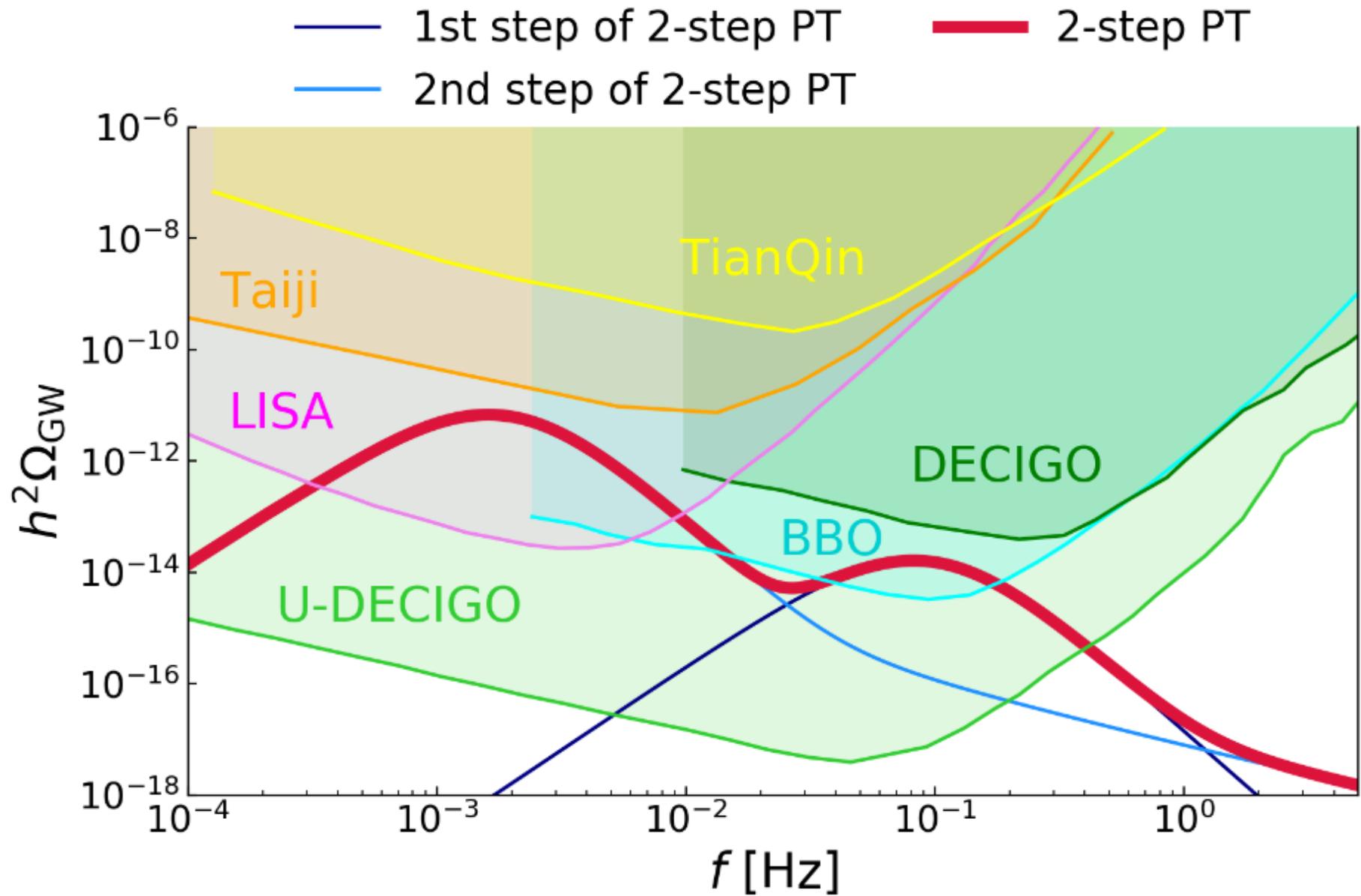
Leitao, Megevand, Sanchez (2012)

Jinno, Nakayama, Takimoto (2016)

Hashino, Kakizaki, Kanemura, Matsui (2016), ...

重力波スペクトル

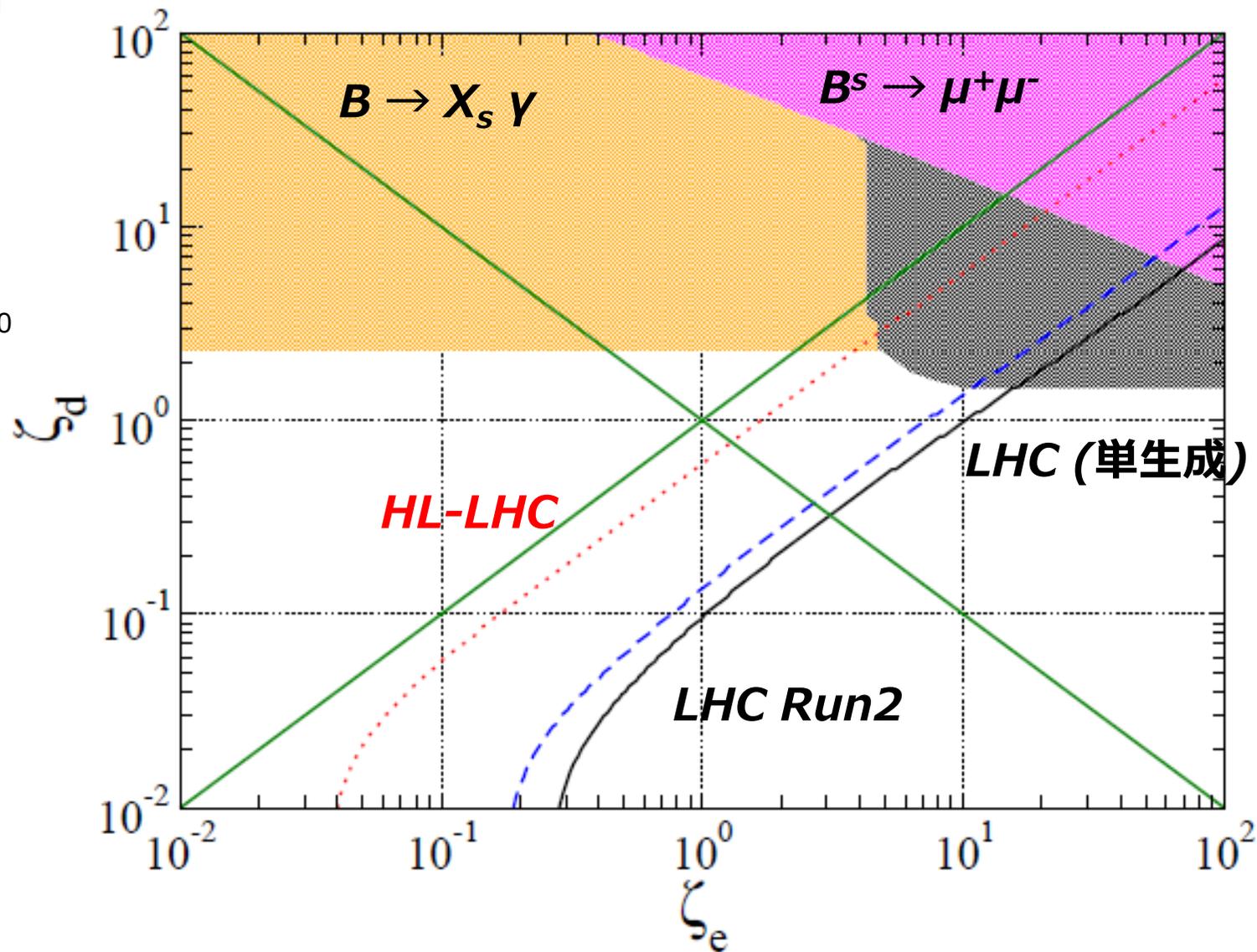
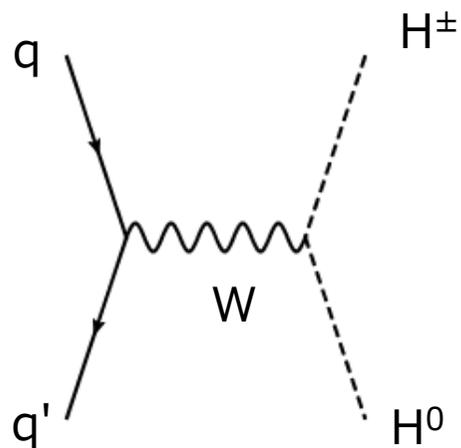
Aoki, Komatsu, Shibuya (2021)



加速器実験での直接検証

Kanemura, Takeuchi, KY (2021)

□ 付加的なヒッグス粒子の対生成 @ LHC



まとめ

