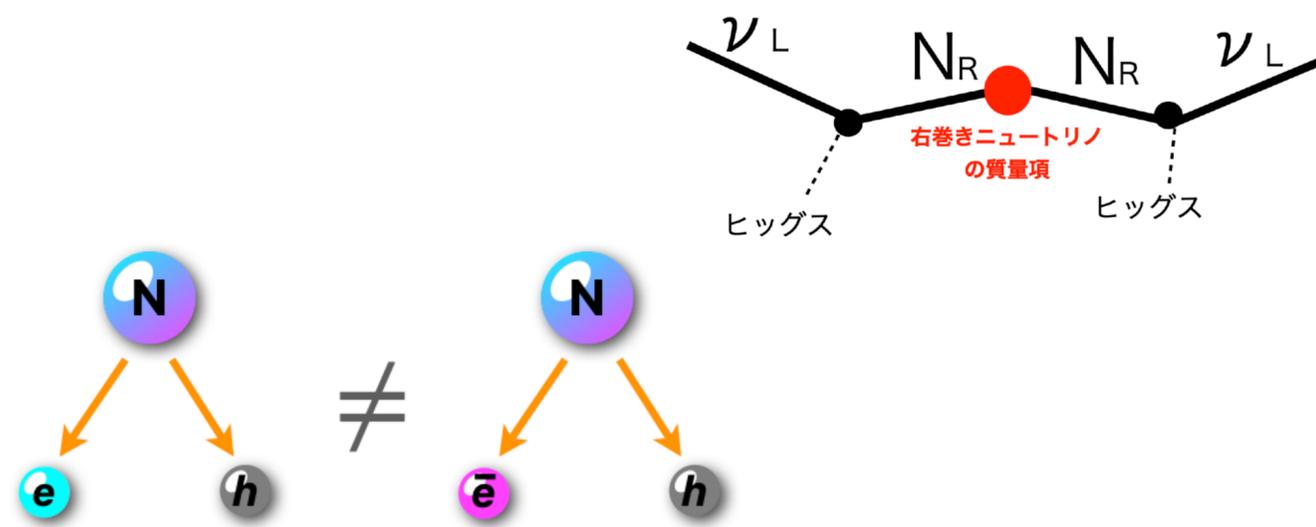
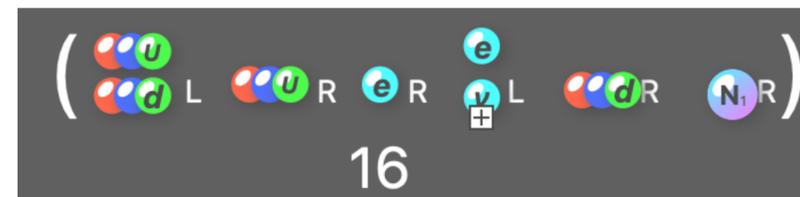


標準模型を超える物理、 マヨラナニュートリノ、 レプトジェネシス



濱口 幸一 (東京大学・理学系研究科)

@ 第1回学術変革「地下稀事象」若手研究会
富山大学, 2025年3月6日(木)-7日(金)



はじめに

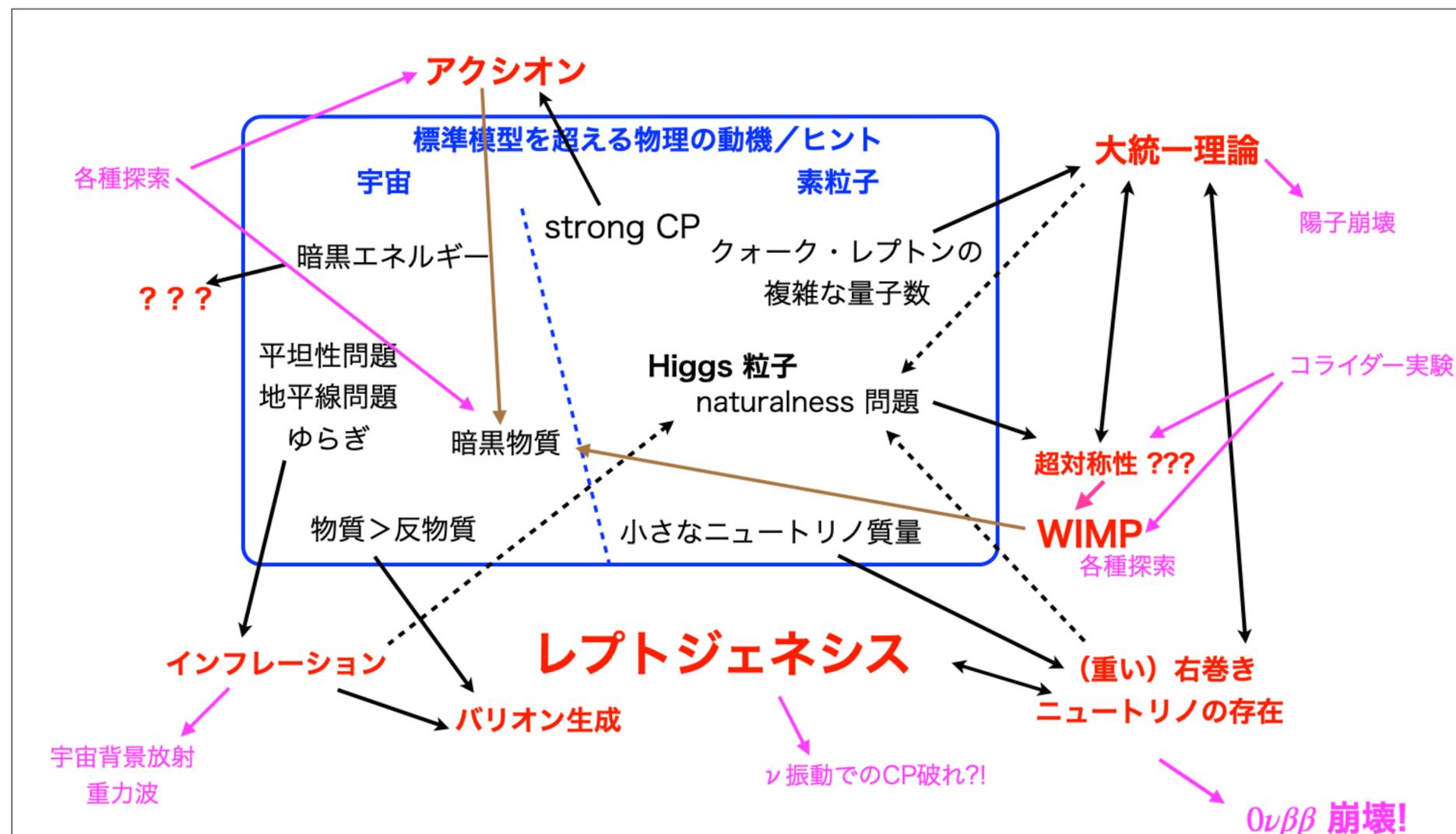
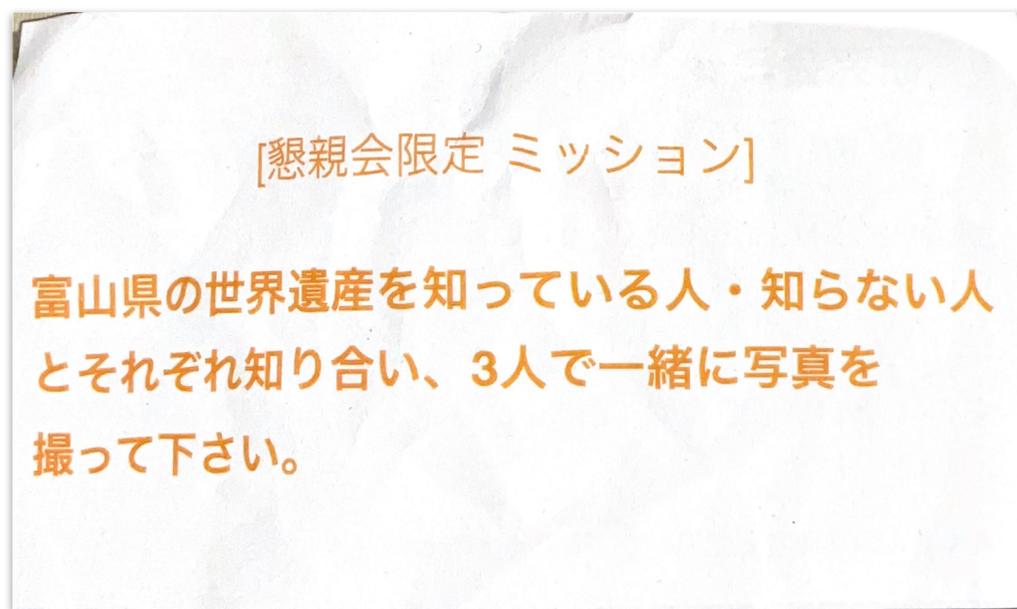
・自己紹介

濱口幸一 (はまぐち こういち)

素粒子物理や初期宇宙の理論的研究をしています。



研究/興味の対象 🖱️
今日この一部を紹介します。



はじめに

怖い「地下」組織の皆さんとの関わり

- ・新学術: **地下素核** (2014-2019) E01分担
- ・新学術: **地下宇宙** (2019-2024) E01代表
- ・学術変革: **地下稀事象** (2024-) E01分担

… いつも大変お世話になっております。

レプトジェネシス
および
0 ν 2 β 発見時の右巻きニュートリノへの質量制限
などについて

浜口幸一 (東京大学)

@新学術領域「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」
第一回A班主催若手研究会, 2016. 2/23

2016年2月 A班若手研究会

チュートリアル講演
二重ベータ崩壊 + **レプトジェネシス**

浜口幸一 (東京大学)

「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」
2017年領域研究会 @ 岡山大学

2017年5月21日

2017年5月 領域研究会

Leptogenesis

Koichi Hamaguchi (University of Tokyo)

Revealing the history of the universe
with underground particle and nuclear research 2019
@ Tohoku Univ., March. 7, 2019.

Mostly review

+ partially based on
K. Asai, KH, N. Nagata, S. Tseng, K. Tsumura, [arXiv:1811.07571]
K. Asai, KH, N. Nagata, [arXiv:1705.00419]

See the poster by
Shih-Yen Tseng
tomorrow!

2019年3月 領域研究会

今回も似たようなレビューです…。が、**新ネタあります!**

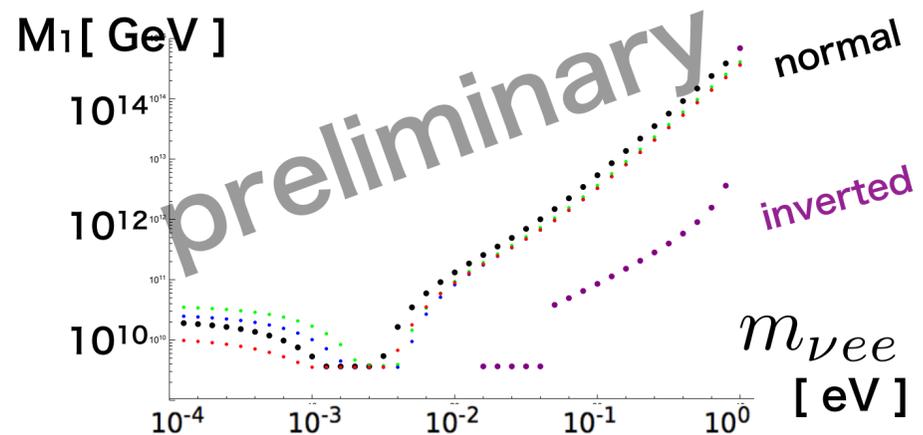
はじめに

$0\nu\beta\beta$ 崩壊とレプトジェネシスの関係についての研究

「あと少しで出来ます」と言い続けて**10年**...

結論 $m_{\nu ee}$ が分かれば (レプトジェネシスを仮定すると)

右巻きニュートリノの質量の下限が分かる！



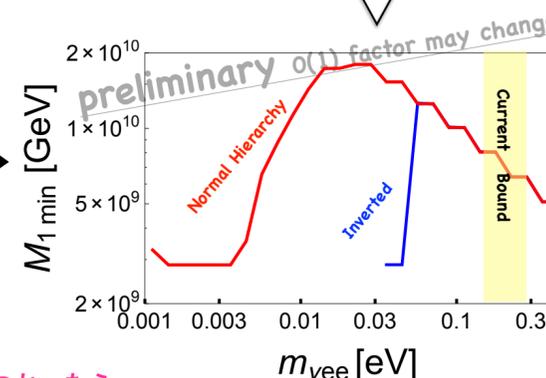
K. Hamaguchi, K. Shimada, in preparation
Assumptions: $M_1 \ll M_{2,3}$. Without flavor effects.

2015年5月 領域研究会

flavor効果 (詳細略・入れなきゃいけない) を入れると (解析がややこしくなる) 残念ながら M_1 の下限の $m_{\nu ee}$ dependence はだいぶ弱まる。でも non-trivialな下限は言える。(はっきり示したのは多分初めて。)

Preliminary result

K. Hamaguchi, K. Shimada, in preparation.
(Assuming $M_1 \ll M_{2,3}$. With flavor effect.
Neglecting scattering and spectator effects for simplicity.)



- 近い将来に $O(0.01 \text{ eV})$ で見つかったら、見つからない場合に比べて約10倍厳しい M_1 の下限が得られる。
- $N_{2(3)}$ の寄与を入れてないので、今後の宿題。
- 原子核行列要素の不定性が大きい。今後の進展に期待。

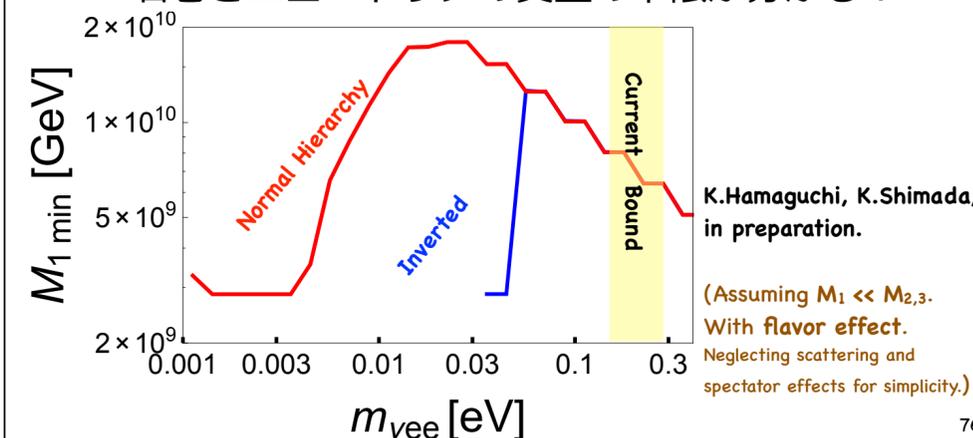
2016年2月 A班若手研究会

レプトジェネシスと $0\nu\beta\beta$ 崩壊

preliminary $\theta(1)$ factor may change

結論 $m_{\nu ee}$ が分かれば (Thermal Leptogenesis を仮定すると)

右巻きニュートリノの質量の下限が分かる！



レプトジェネシスと $0\nu\beta\beta$ 崩壊

すみません！

新学術研究会で「もう出来ます」と言い続けて**2年**。

まだ論文出来てません。

今年こそ完成させます。必ず・・・多分・・・

2017年5月 領域研究会

… やっと論文出ました！ (👉今日の最後に少し紹介します。)

Insights on the Scale of Leptogenesis from Neutrino Masses and Neutrinoless Double-Beta Decay [arXiv:2502.10093]

A. Granelli, K. Hamaguchi, M. E. Ramirez-Quezada, K. Shimada, J. Wada, T. Yokoyama

学会で横山さんの講演もあります

今日の予定

- 宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性
 - ▶ 宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性って？
 - ▶ いつ作られたのか？
 - ▶ 作るには何が必要か？
- レプトジェネシス
 - ▶ なぜ「レプト」ジェネシスなのか？
 - ▶ Big picture 中のマヨラナニュートリノとレプトジェネシス
- レプトジェネシスと $0\nu\beta\beta$ 崩壊
 - ▶ $0\nu\beta\beta$ 崩壊
 - ▶ 最近の研究から

途中でいつでも質問して下さい！

宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性って？

全ての素粒子には **反粒子**が存在する。

粒子

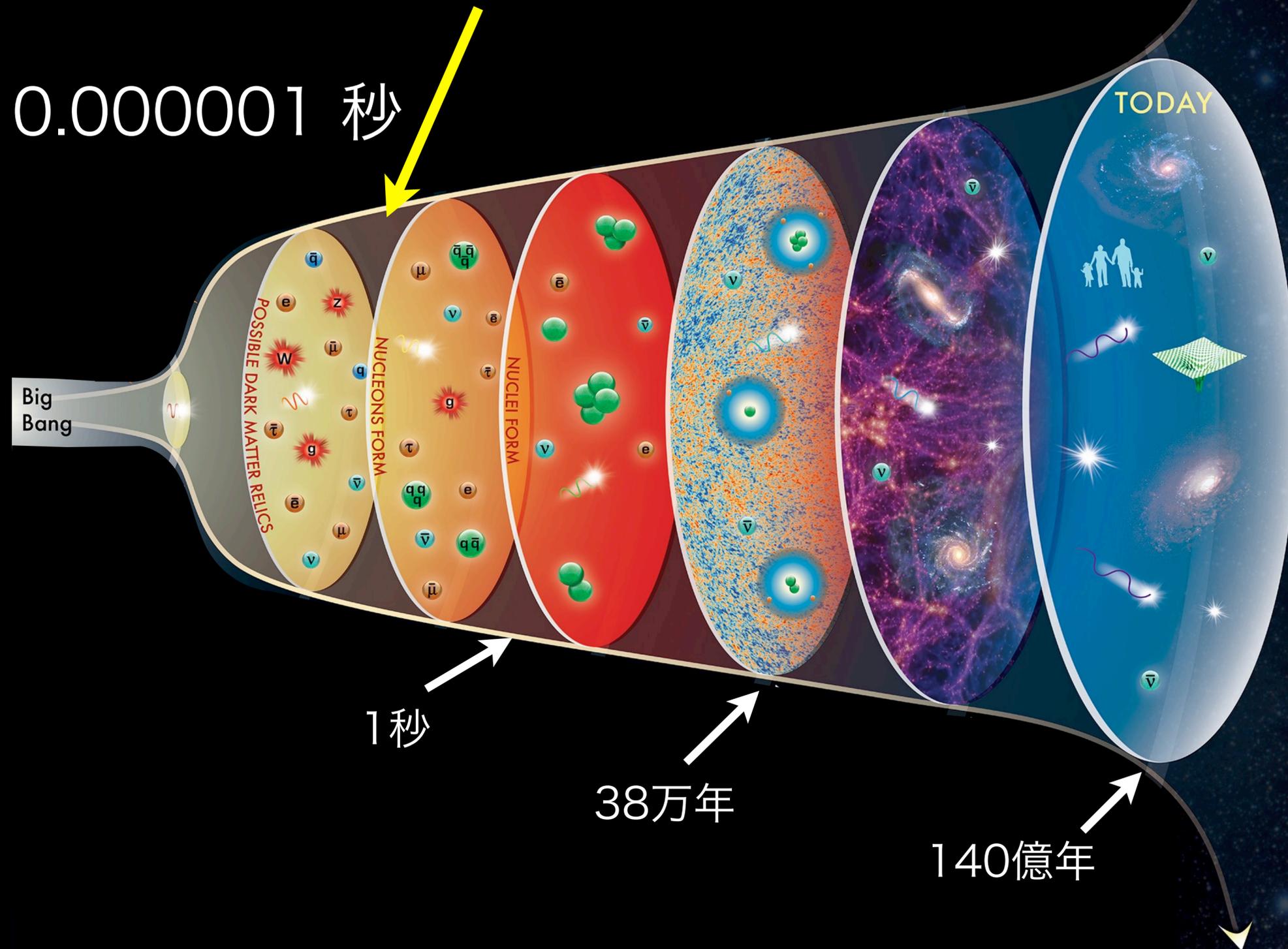
クォーク			
			
レプトン			
			

反粒子

				反クォーク
				
				反レプトン
				

宇宙のずっと始めの頃は . . .

0.000001 秒



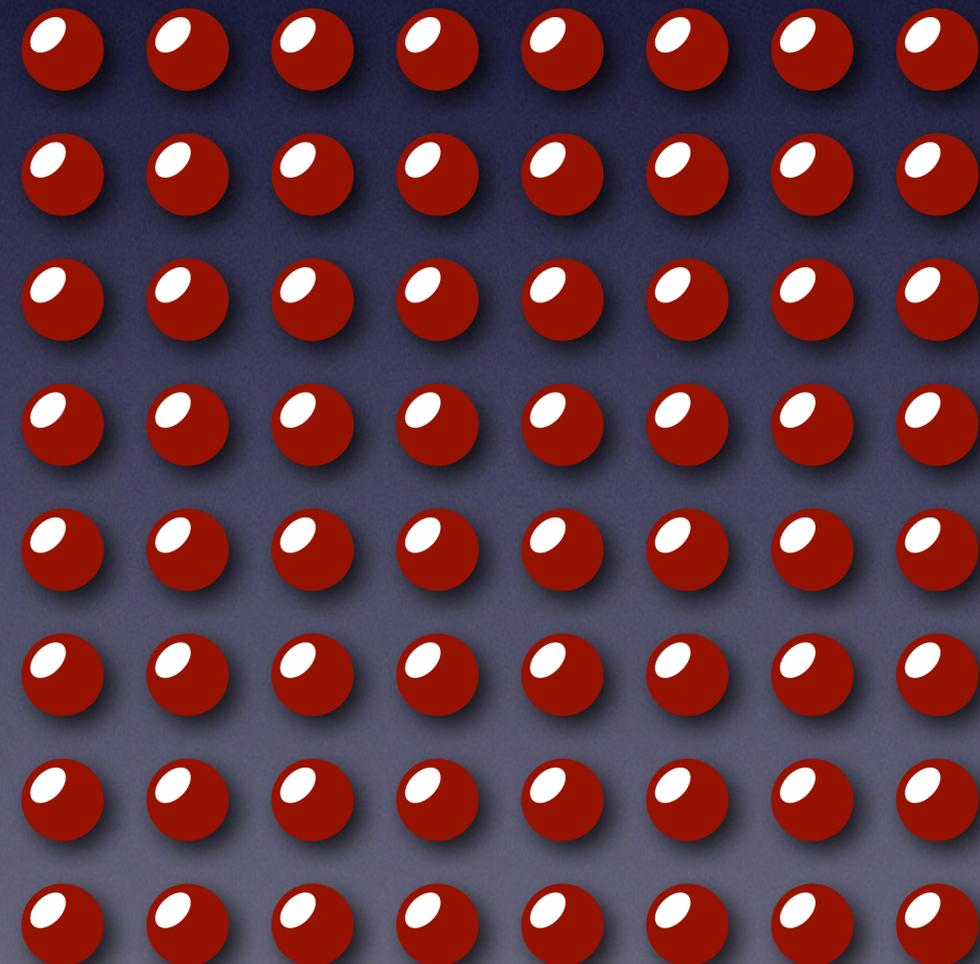
宇宙のずっと始めの頃は・・・
物質と反物質がほぼ同数あった。

ただし物質の方がほんの少しだけ多かった。

物質



反物質



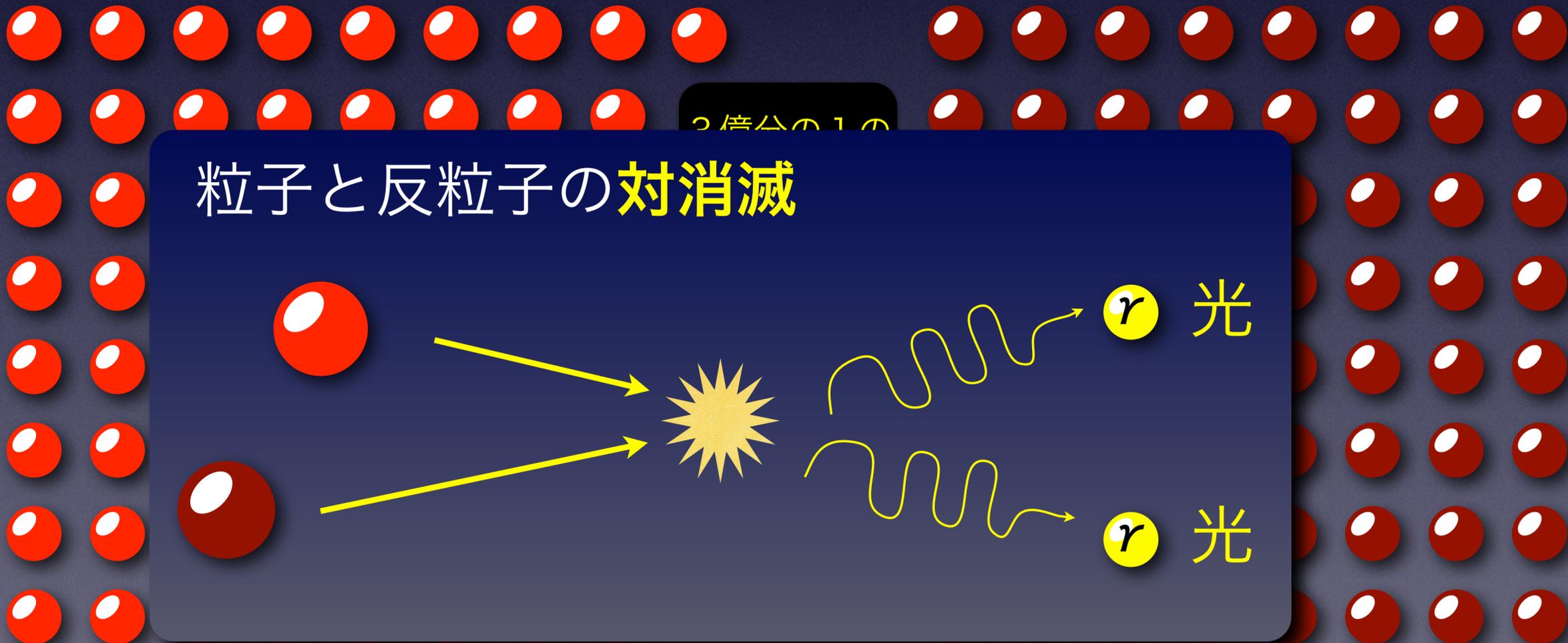
3億分の1の
差

宇宙のずっと始めの頃は
物質と反物質がほぼ同数あった。

やがて温度が冷えてくると**対消滅**して...

物質

反物質



宇宙のずっと始めの頃は
物質と反物質がほぼ同数あった。

やがて温度が冷えてくると**対消滅**して・・・

物質だけが残った

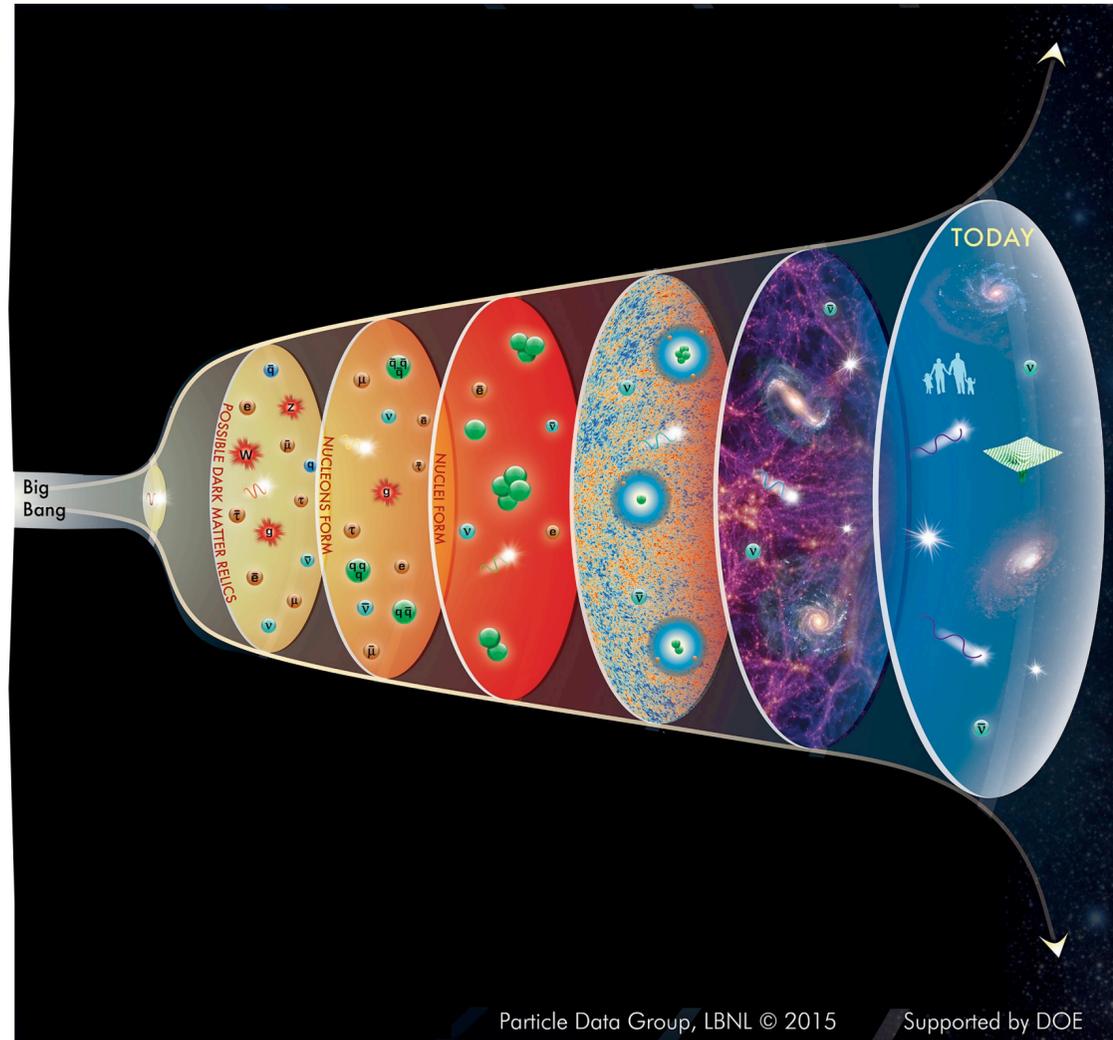


(反物質は消滅)

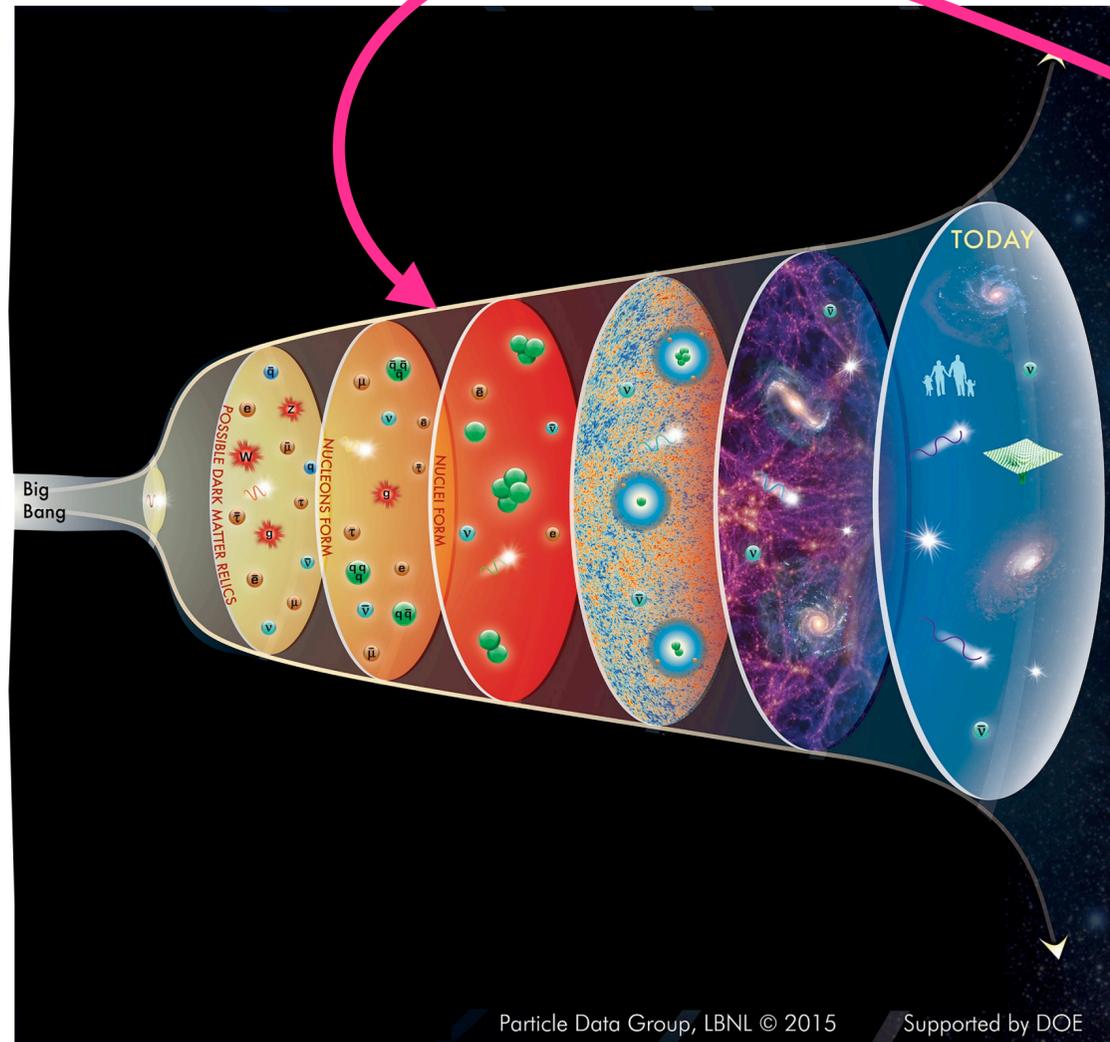
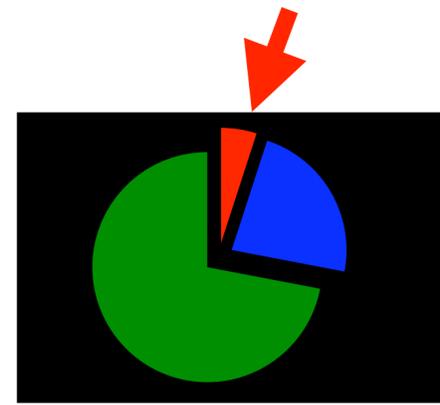


我々は（銀河も地球も人間の体も・・・）
この残った物質で出来ている！

観測値 (2つの独立な証拠)



観測値 (2つの独立な証拠)



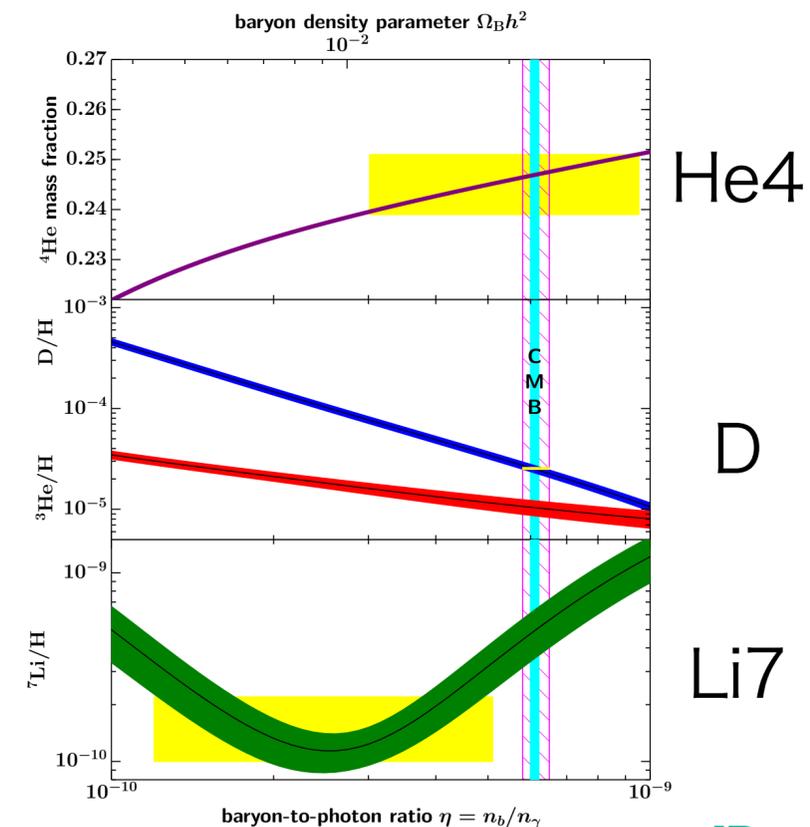
(1) ビッグバン元素合成

(宇宙誕生後 1 秒～)

$$\Omega_b = \frac{\rho_B}{\rho_{\text{crit}}} \simeq \frac{\rho_B}{\rho_{\text{total}}}, \quad h \simeq 0.7$$

$$\Omega_b h^2 = 0.021 - 0.023$$

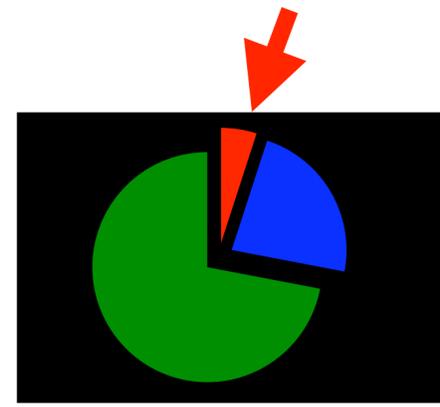
[Particle Data Group]



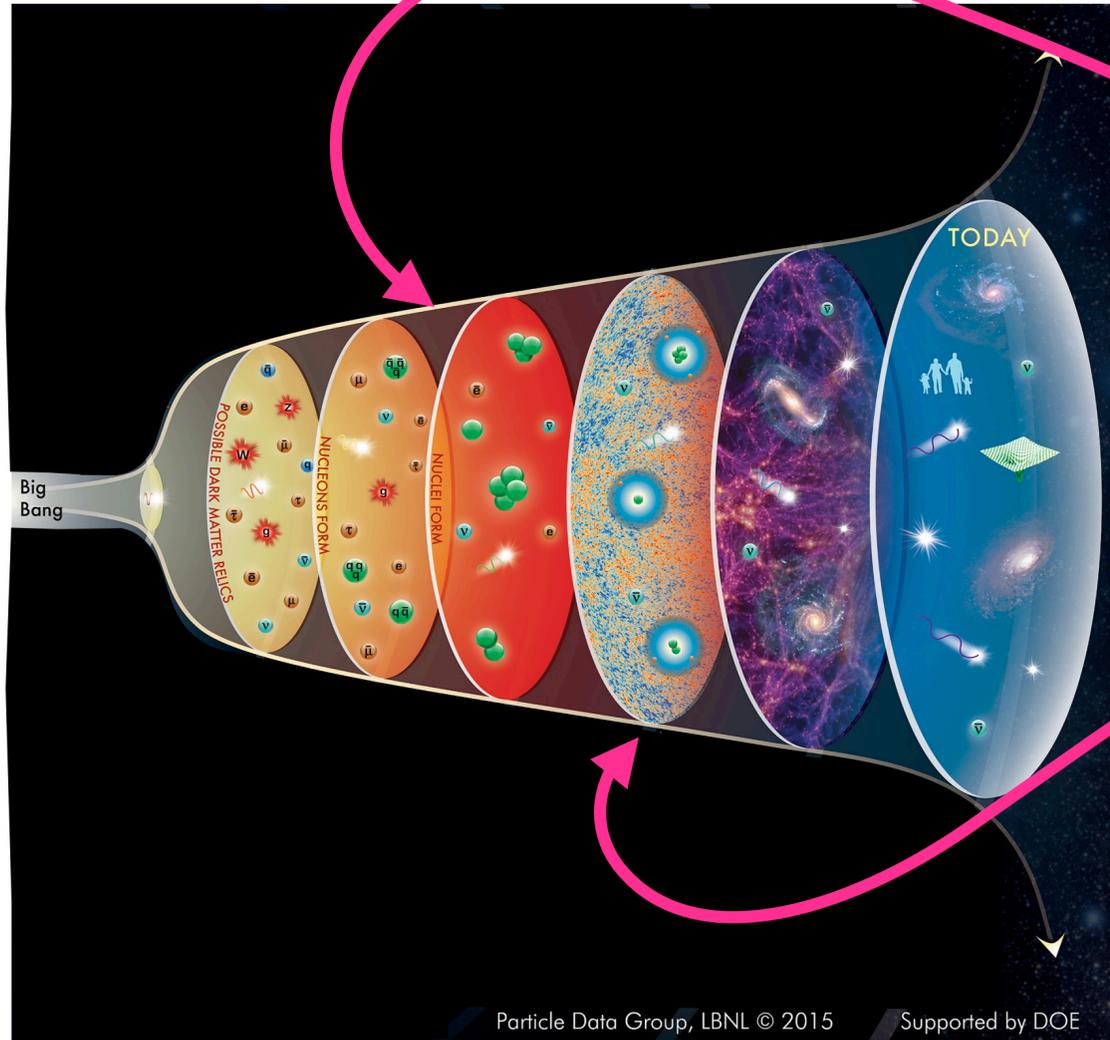
[Particle Data Group]

Figure 24.1: The primordial abundances of ${}^4\text{He}$, D , ${}^3\text{He}$, and ${}^7\text{Li}$ as predicted by the standard model of Big-Bang nucleosynthesis — the bands show the 95% CL range [44]. Boxes indicate the observed light element abundances. The narrow vertical band indicates the CMB measure of the cosmic baryon density, while the wider band indicates the BBN $\text{D}+{}^4\text{He}$ concordance range (both at 95% CL).

観測値 (2つの独立な証拠)



$$\Omega_b = \frac{\rho_B}{\rho_{\text{crit}}} \simeq \frac{\rho_B}{\rho_{\text{total}}}, \quad h \simeq 0.7$$



(1) ビッグバン元素合成
(宇宙誕生後 1 秒～)

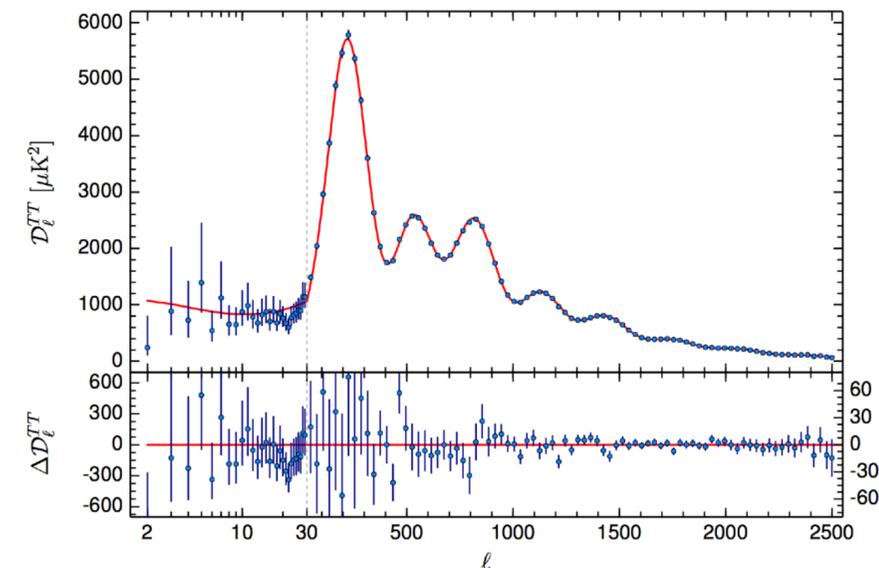
$$\Omega_b h^2 = 0.021 - 0.023$$

[Particle Data Group]

(2) 宇宙背景放射
(宇宙誕生後40万年～)

$$\Omega_b h^2 = 0.0224 \pm 0.0002$$

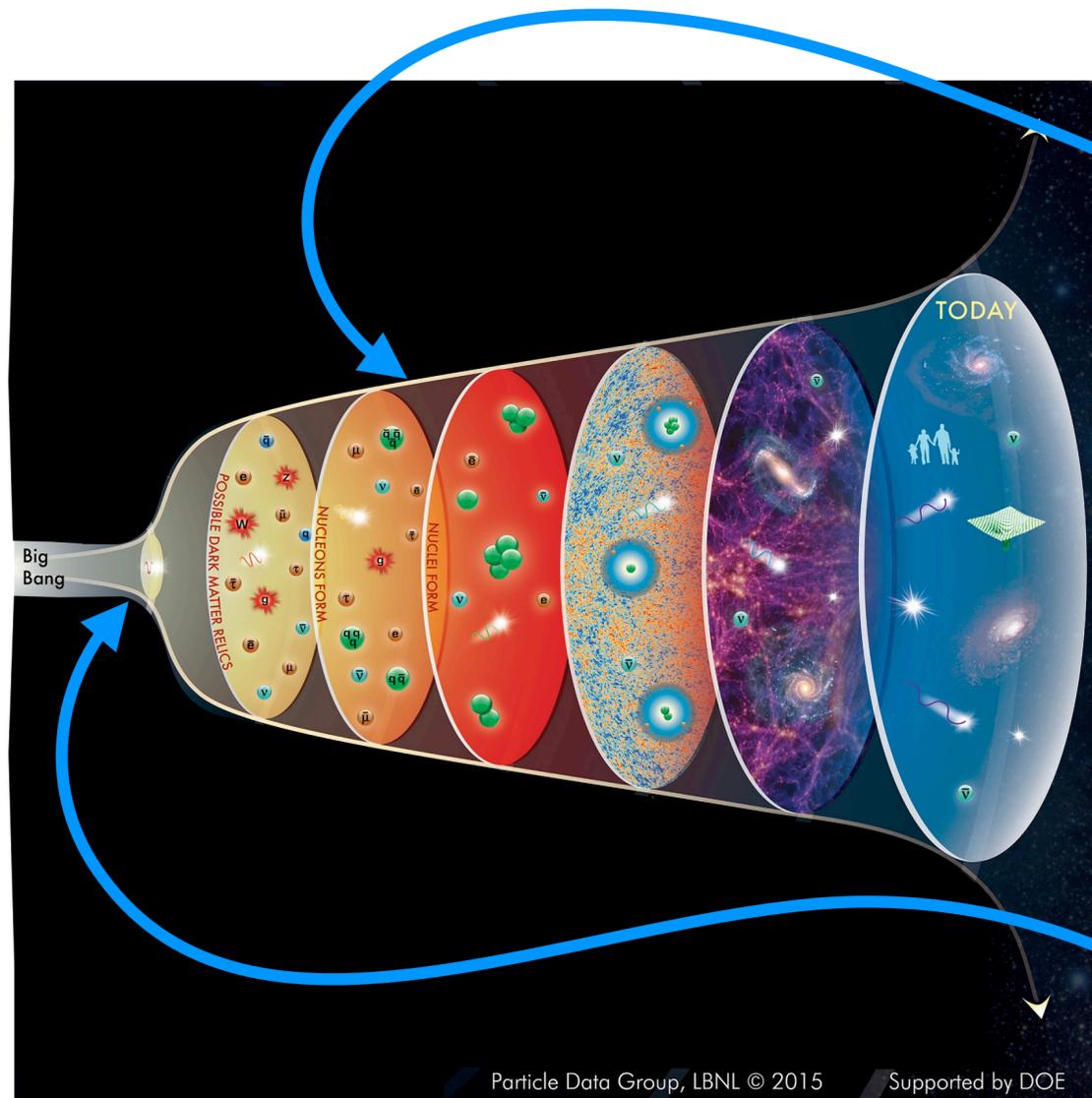
[Planck 2018]



両者は consistent
(2)の方が高精度

宇宙のバリオン数はいつ作られたのか？

宇宙のバリオン数はいつ作られたのか？



遅くてもビッグバン元素合成まで

(宇宙誕生後 1 秒 ↔ 温度 1 MeV より前)

でも実際に元素合成直前に作るの難しいので
もっと前 (高温時) に作られたと思っている。

比較的低温で出来る例：

「電弱バリオジェネシス」

温度～100 GeV程度のときにバリオン数を生成。

インフレーションよりは後

インフレーションで何もかも薄められるので

インフレーション直後に作る例：

「non-thermal leptogenesis」

インフラトンの崩壊で右巻きニュートリノを作って

その崩壊でレプトジェネシス。

宇宙のバリオン数はいっつ作られたのか？

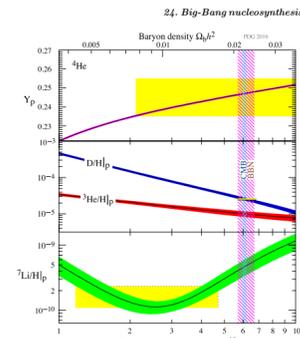
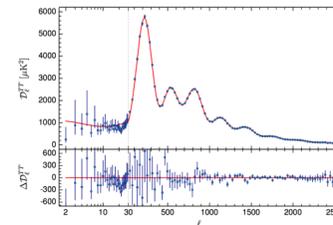
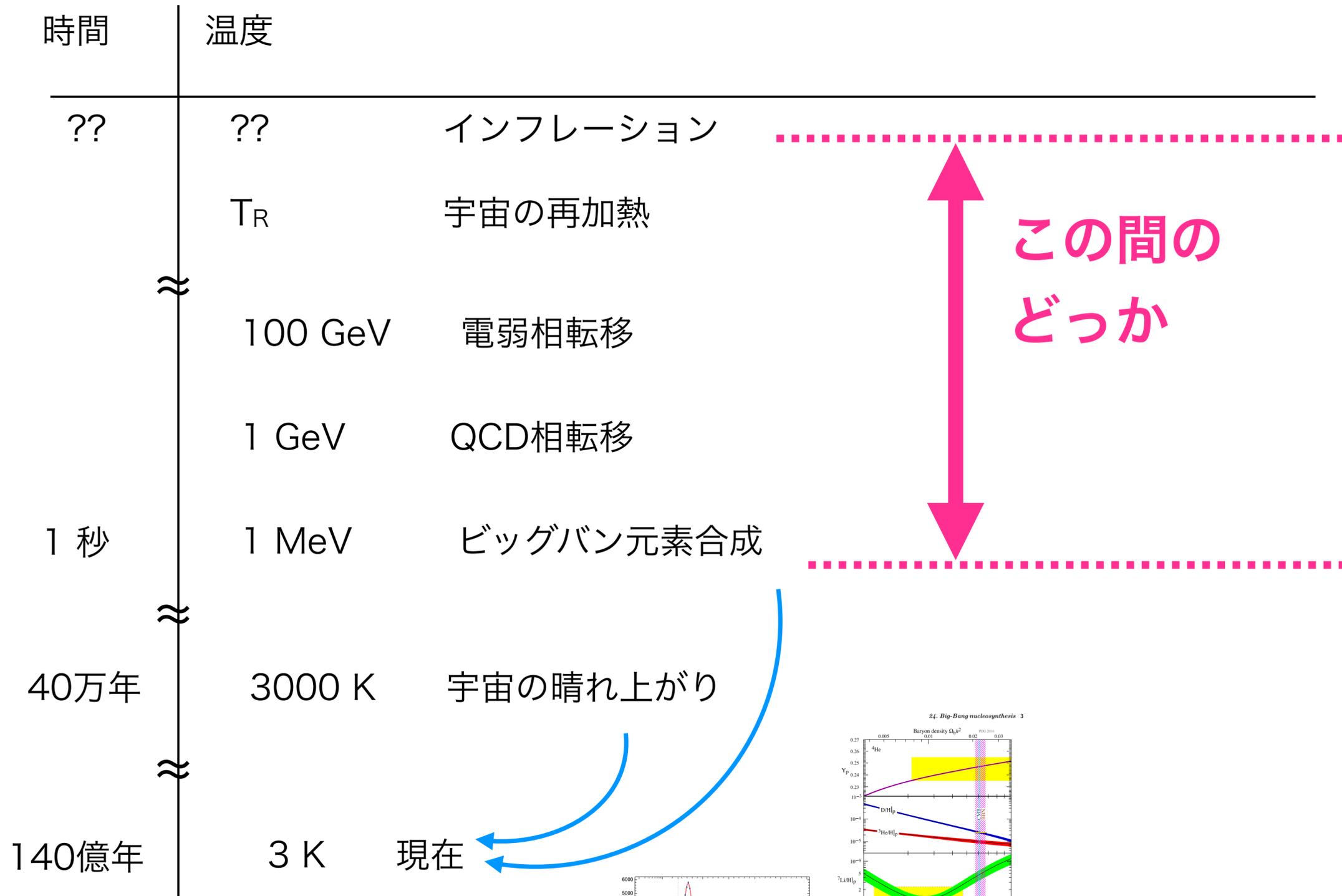


Figure 24.1: The primordial abundances of ^4He , D , ^3He , and ^7Li as predicted by the standard model of Big-Bang nucleosynthesis—the bands show the 95% CL range. Boxes indicate the observed light element abundances. The narrow vertical band indicates the CMB measure of the cosmic baryon density, while the wider band indicates the BBN concordance range (both at 95% CL).

宇宙のバリオン数を作るには何が必要か？

宇宙のバリオン数を作るには何が必要か？

サハロフの3条件

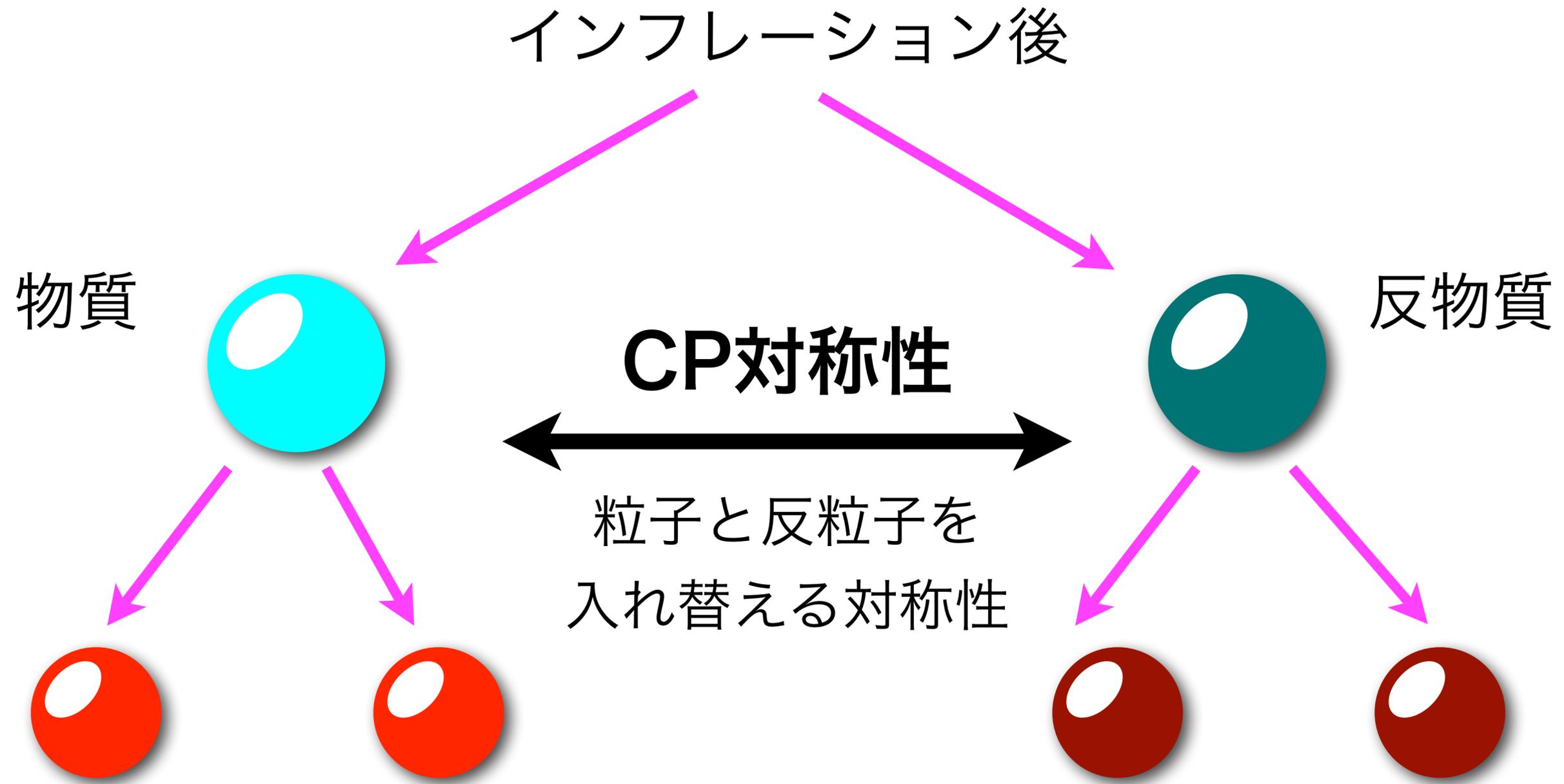
- バリオン数の破れ

もしあらゆる素過程でバリオン数が厳密に保存してたら $n_B = 0 \rightarrow n_B \neq 0$ は無理。

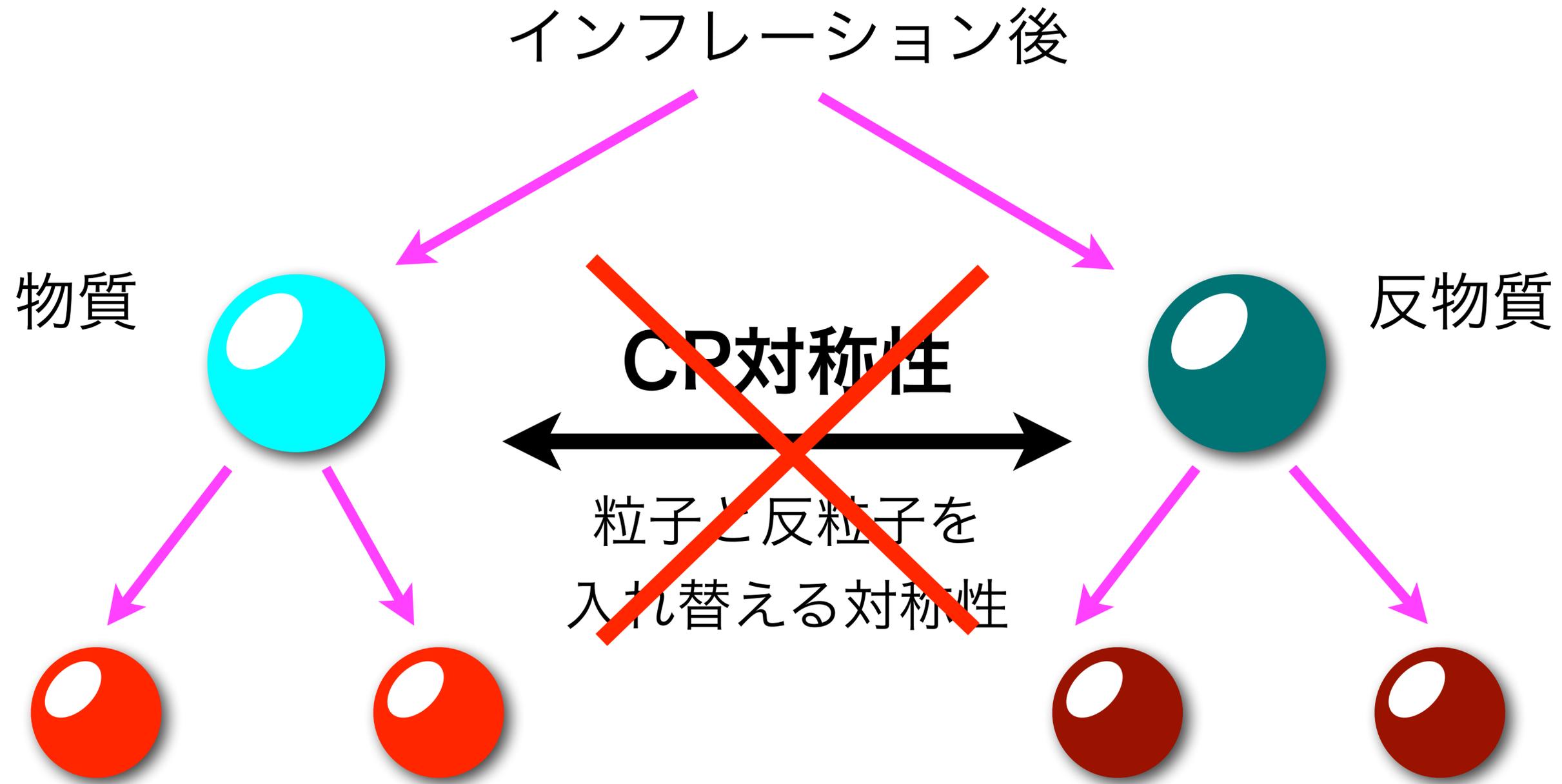
- C, CPの破れ

もしあらゆる素過程で CP が保存してたらやっぱり $n_B = 0 \rightarrow n_B \neq 0$ は無理。

- 非平衡



CP対称性 がある限り、物質と反物質の差は出ない。



CP対称性が破れていれば、物質と反物質の差が出る。

宇宙のバリオン数を作るには何が必要か？

サハロフの3条件

- バリオン数の破れ

もしあらゆる素過程でバリオン数が厳密に保存してたら $n_B = 0 \rightarrow n_B \neq 0$ は無理。

- C, CPの破れ

もしあらゆる素過程で CP が保存してたらやっぱり $n_B = 0 \rightarrow n_B \neq 0$ は無理。

- 非平衡

もし $n_B < 0 \leftrightarrow n_B = 0 \leftrightarrow n_B > 0$ の反応が熱平衡状態にあったら、平衡点 ($n_B = 0$) に落ちついてしまう。

$n_B = 0 \xrightarrow{\hspace{2cm}} n_B > 0$ と非平衡になっていないといけない。

宇宙のバリオン数を作るには何が必要か？

標準模型は？



バリオン数の破れ（後述）、C, CPの破れ（CKM）の必要条件是満たしており、具体的なシナリオ（電弱バリオジェネシス）も考えられたが、、、

今では標準模型では物質＞反物質の起源は説明出来ないことが分かっている。

理由1：物質＞反物質に必要な非平衡が出来ない。

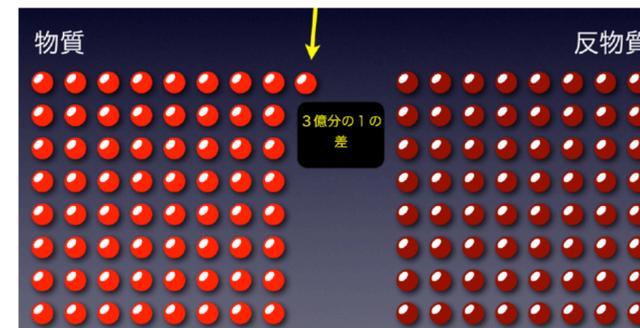
理由2：標準模型のCPの破れ (CKM位相) では定量的に足りない。

標準模型を超える物理による「バリオジェネシス」が必要。

今日の予定

宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性

- ▶ 宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性って？
- ▶ いつ作られたのか？
- ▶ 作るには何が必要か？



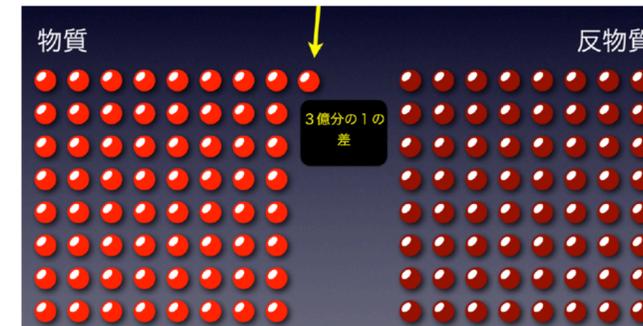
ちょっと休憩…

ここまで何か質問あれば是非！



今日の予定

- 宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性
 - ▶ 宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性って？
 - ▶ いつ作られたのか？
 - ▶ 作るには何が必要か？



- レプトジェネシス
 - ▶ なぜ「レプト」ジェネシスなのか？
 - ▶ Big picture 中のマヨラナニュートリノとレプトジェネシス

- レプトジェネシスと $0\nu\beta\beta$ 崩壊
 - ▶ $0\nu\beta\beta$ 崩壊
 - ▶ 最近の研究から

引き続き
途中でいつでも質問して下さい！

なぜ「レプト」ジェネシスなのか？

なぜ「レプト」ジェネシスなのか？

鍵を握るのは標準模型の「スファレロン」過程

なぜ「レプト」 ジェネシスなのか？

鍵を握るのは標準模型の「スファレロン」過程

標準模型

classical level では バリオン数(B)もレプトン数(L)も保存している。

$$\partial_{\mu} J_B^{\mu} = \partial_{\mu} J_L^{\mu} = 0$$

しかし quantum level では B も L も保存しない！ [t Hooft,'76]

$$\partial_{\mu} J_B^{\mu} = \partial_{\mu} J_L^{\mu} = N_F \frac{g_2^2}{32\pi^2} \epsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \text{Tr} F^{\mu\nu} F^{\rho\sigma}$$

Note: B-L は保存している。

$$\partial_{\mu} (J_B^{\mu} - J_L^{\mu}) = 0$$

幸か不幸か、低エネルギーでは B や L の破れは見えないが、、、

$$\Gamma_{B,L} \sim e^{-16\pi^2/g_2^2} \sim 10^{-170}$$

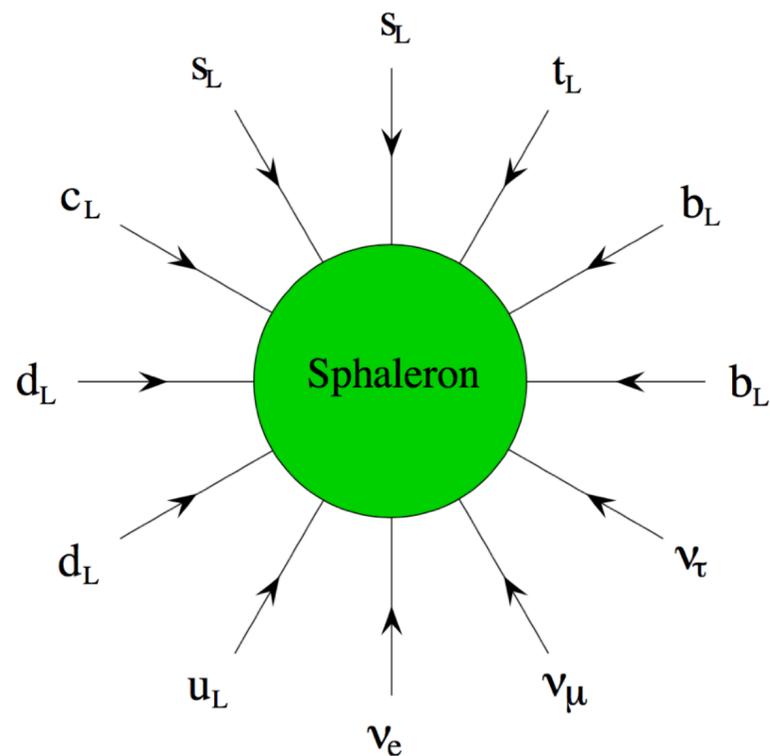
なぜ「レプト」ジェネシスなのか？

鍵を握るのは標準模型の「スファレロン」過程

標準模型

温度が 100 GeV を超えると B や L を破るプロセスの rate が急上昇し熱平衡に！

[Kuzmin, Rubakov, Shaposhnikov, '85]



「スファレロン」過程

クォーク 9 個 ($B=3$) + レプトン 3 個 ($L=3$) の反応。
B-L は保存している。

Figure 1: One of the 12-fermion processes which are in thermal equilibrium in the high-temperature phase of the Standard Model.

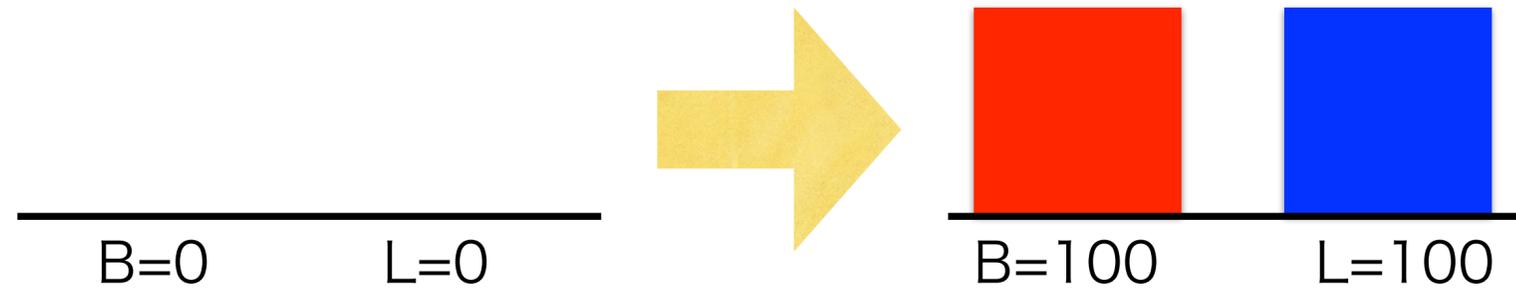
[fig. from W.Buchmuller, 1210.7758]

何だかよく分からない話ですよね…。

backupスライドがあるので、時間あれば and 希望があれば
もうちょっと（さらに良く分からない話を）追加で説明します。

したがって、もし B-L を保存するプロセス でバリオジェネシスをする、

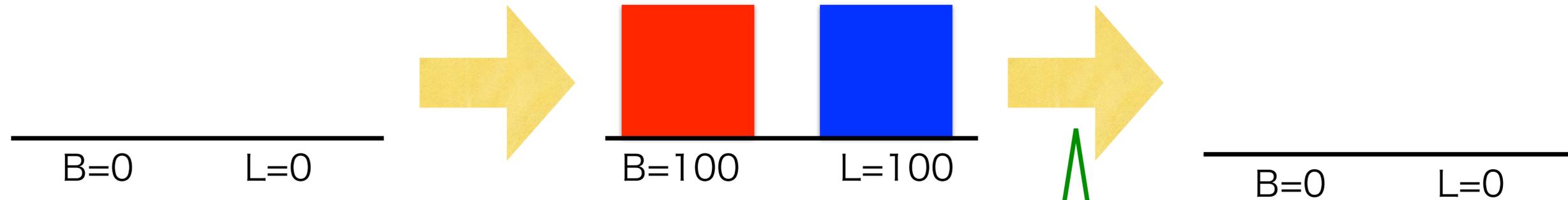
例：大統一理論バリオジェネシス



したがって、もし B-L を保存するプロセス でバリオジェネシスをする、

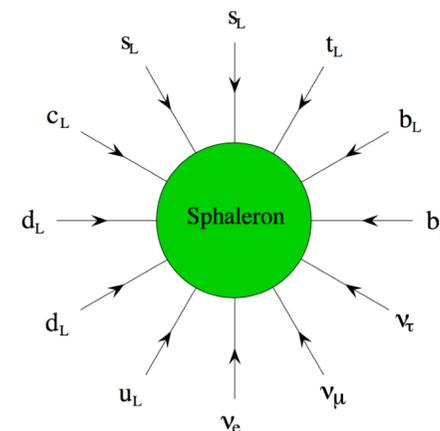
熱平衡で再び $B=0$ になってしまう。

例：大統一理論バリオジェネシス



スファレロン過程

**B-L を破るプロセスによる
バリオジェネシスが必要。**



サハロフの3条件

- ~~バリオン数 (B) の破れ~~
B-L の破れ
- C, CPの破れ
- 非平衡

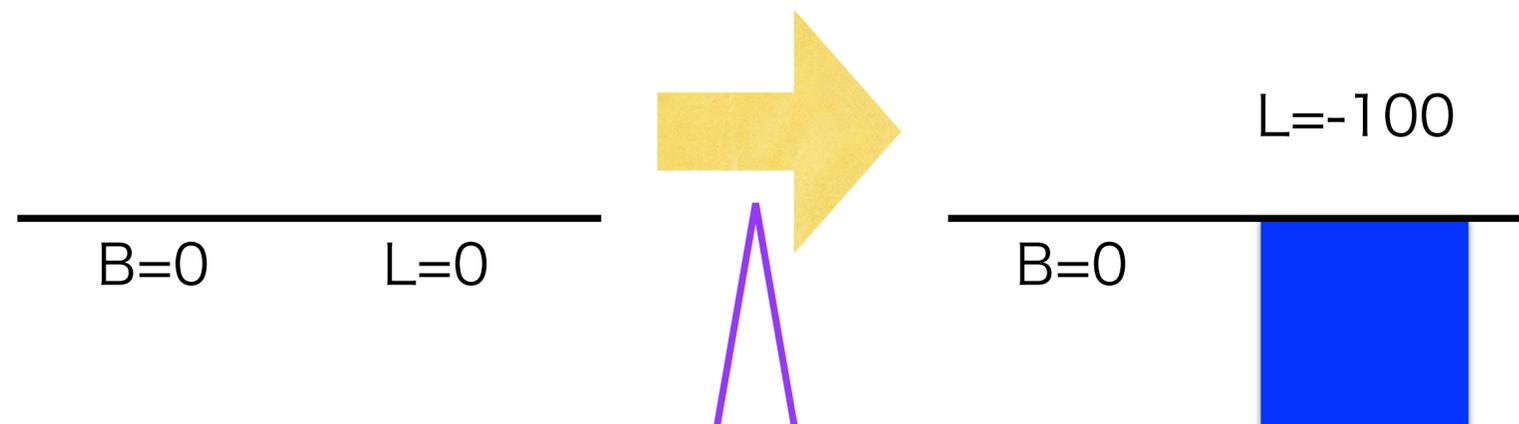
バリオジェネシスを起こすには
B の破れではなく、L の破れでも良い。

L の破れ . . . seesaw機構、マヨラナニュートリノ！

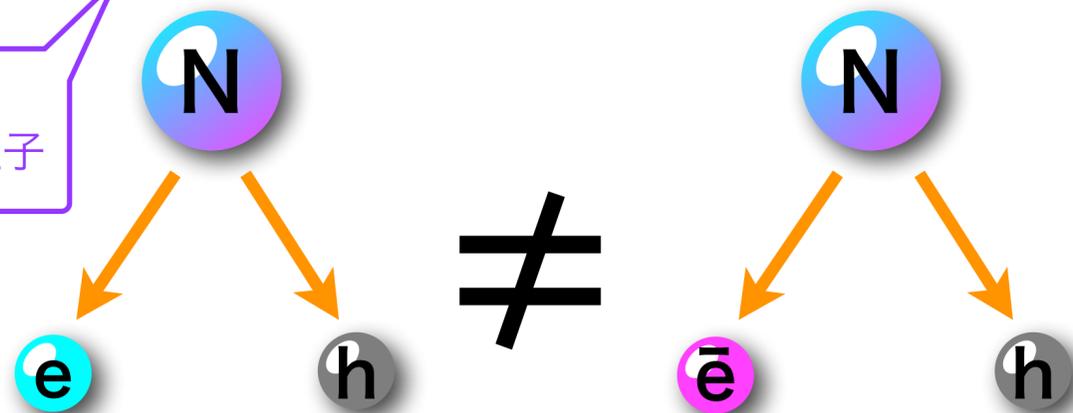
レプトジェネシス

[Fukugita, Yanagida, '86]

まずレプトンの非対称性を作る



右巻きニュートリノの崩壊 (CP-violating)



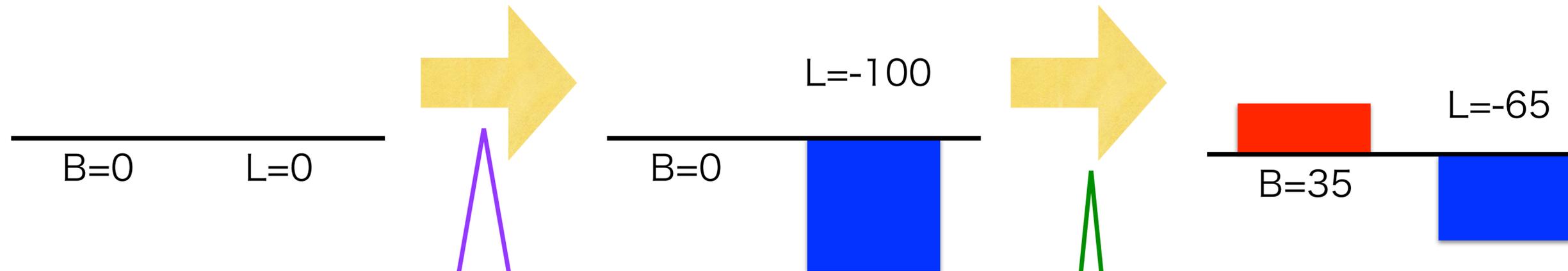
標準模型にはいない、
新たに導入された新粒子

レプトジェネシス

[Fukugita, Yanagida, '86]

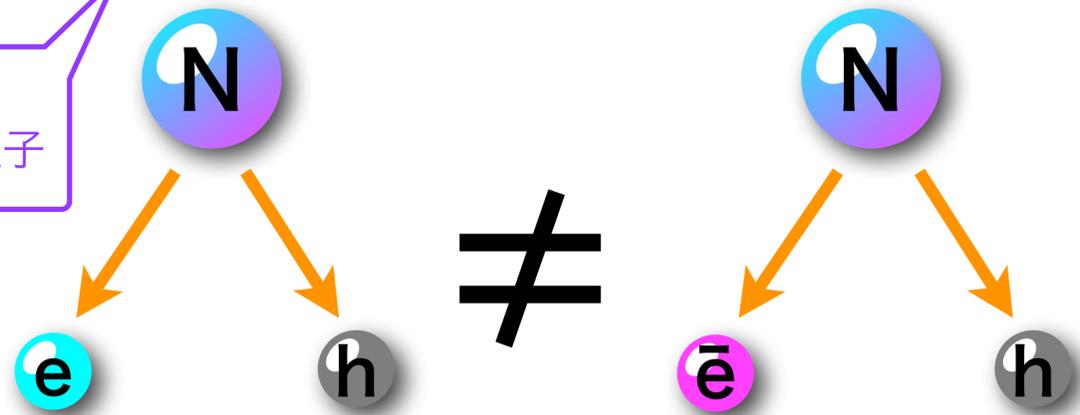
まずレプトンの非対称性を作る

熱平衡で $B \neq 0$ が残る!

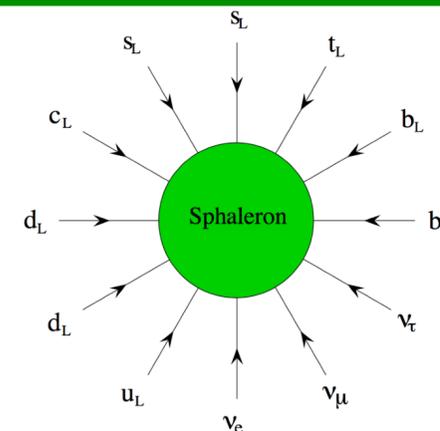


右巻きニュートリノの崩壊 (CP-violating)

標準模型にはいない、
新たに導入された新粒子



スファレロン過程



レプトジェネシス

[Fukugita, Yanagida, '86]

色んなバージョンがあります。

Thermal Leptogenesis

[Fukugita, Yanagida, '86, …… Buchmuller, Plumacher, Di Bari, ……]

Leptogenesis from Inflaton Decay

[…… Asaka, KH, Kawasaki, Yanagida, '99 ……]

Leptogenesis from R.H.Sneutrino dominated Universe

[Murayama, Yanagida, '93, …… KH, Murayama, Yanagida, '01 ……]

[Murayama, Suzuki, Yanagida, Yokoyama, '93, ……]

Affleck-Dine Leptogenesis

[Murayama, Yanagida, '93, …… Asaka, Fujii, KH, Yanagida, '00, Fujii, KH, Yanagida, '01, ……]

via R.H.N oscillation

[Akhmedov, Rubakov, Smirnov, '98, Asaka, Shasposhnikov, '05 ……]

(+ many others …)

この全てのシナリオで
ニュートリノはマヨラナになる
→ $0\nu\beta\beta$ 崩壊！！

レビューも多数あり。

arXiv:0802.2962, 1711.02861 ~ 1711.02866 など。

私も以前、日本語の解説記事を書いたので
良かったら[こちらのリンク](#)からご覧ください。

特集/マヨラナ粒子をめぐって一性質から最先端の研究まで

宇宙における物質の起源とマヨラナニュートリノ

浜口 幸一

この記事は「数理科学」2022年4月号 No.706 「マヨラナ粒子をめぐって一性質から最先端の研究まで」(サイエンス社, 2022)に掲載された記事「宇宙における物質の起源とマヨラナニュートリノ」の原稿を「数理科学」編集部のご厚意により許可を得て公開しているものです。

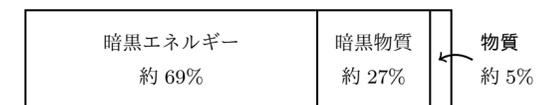


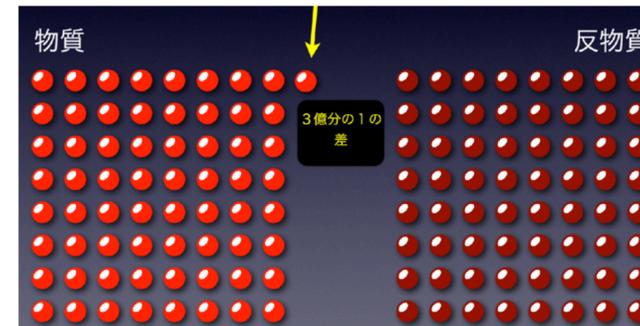
図1 宇宙の平均エネルギー密度の内訳⁴⁾。

ナ性・レプトン数の破れが、宇宙における物質の起源の謎を解くための決定的な鍵を握っている可能性がある。1986年に福来・柳田によって提唱されたレプトジェネシスと呼ばれる理論である³⁾。本稿ではこのレプトジェ

1. はじめに

今日の予定

- 宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性
 - ▶ 宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性って？
 - ▶ いつ作られたのか？
 - ▶ 作るには何が必要か？



- レプトジェネシス
 - ▶ なぜ「レプト」ジェネシスなのか？



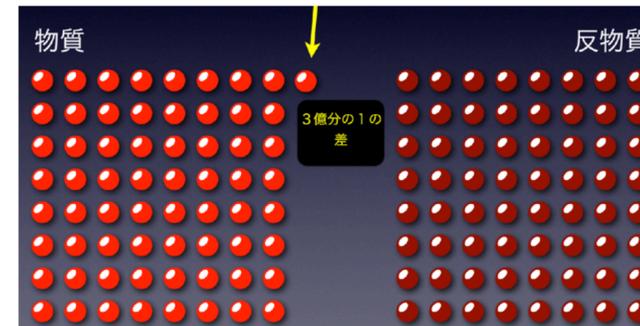
またちょっと休憩…
何か質問あれば是非！



今日の予定

- 宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性

- ▶ 宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性って？
- ▶ いつ作られたのか？
- ▶ 作るには何が必要か？



- レプトジェネシス

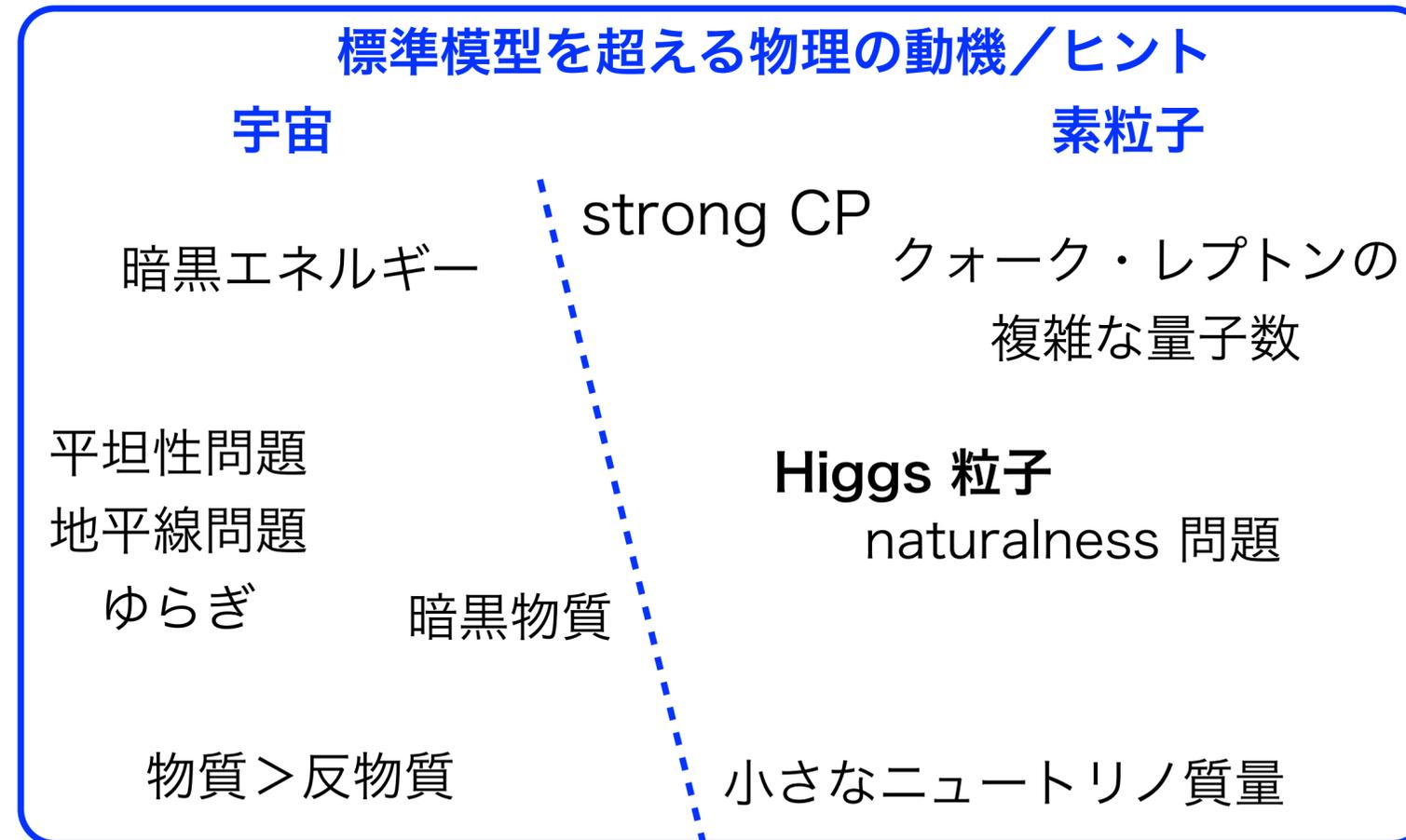
- ▶ なぜ「レプト」ジェネシスなのか？
- ▶ Big picture 中のマヨラナニュートリノとレプトジェネシス

- レプトジェネシスと $0\nu\beta\beta$ 崩壊

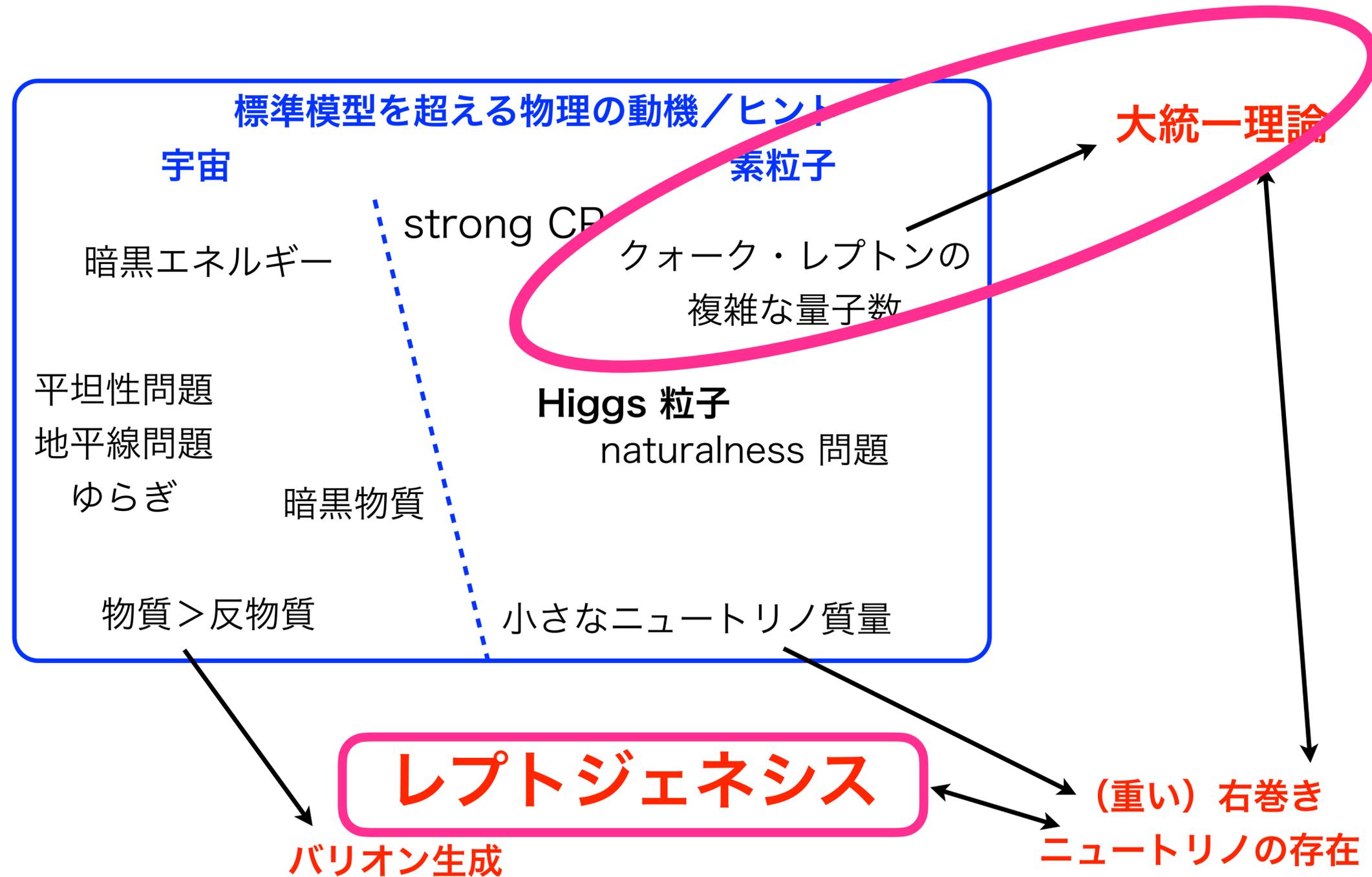
- ▶ $0\nu\beta\beta$ 崩壊
- ▶ 最近の研究から

Big picture 中のマヨラナニュートリノとレプトジェネシス

Big picture 中のマヨラナニュートリノとレプトジェネシス



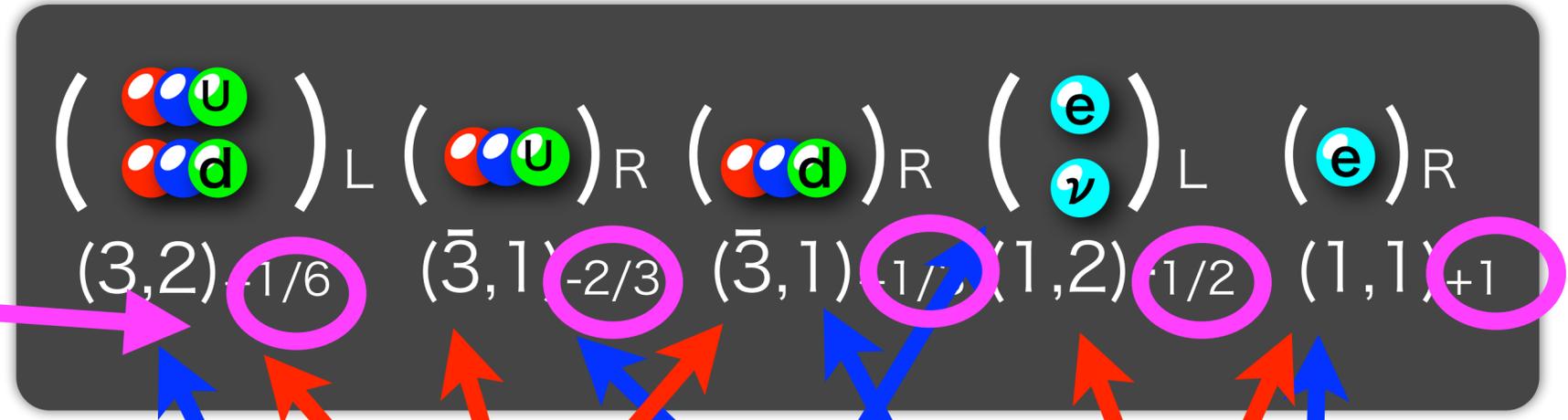
Big picture 中のマヨラナニュートリノとレプトジェネシス



物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons	
1世代	2世代	3世代	電磁気力 electromagnetic	強い力 strong
アップクォーク	チャームクォーク	トップクォーク	光子 (フォトン)	グルーオン
ダウルクォーク	ストレンジクォーク	ボトムクォーク	弱い力 weak	ウィークボソン
電子	ミュー粒子	タウ粒子	ヒッグス粒子 Higgs bosons	ヒッグス粒子
ニュートリノ	ニュートリノ	ニュートリノ		

左巻き クォーク 右巻き アップクォーク 右巻き ダウルクォーク 左巻き レプトン 右巻き レプトン

標準模型の
クォークとレプトン



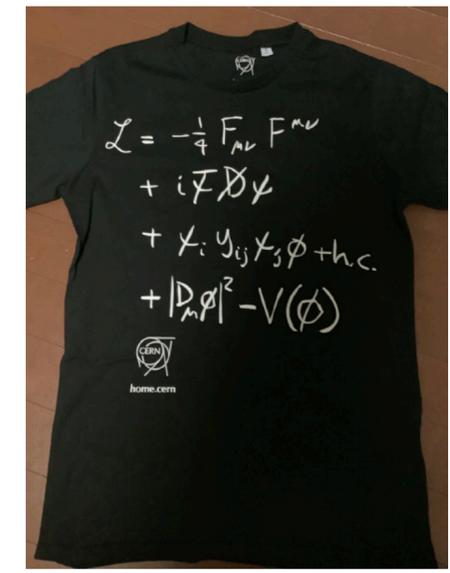
電弱ハイパー電荷
(電荷みたいなもの)

強い力を受ける 強い力を受けない
弱い力を受ける 弱い力を受けない

・・・なんかバラバラ！

謎: クォーク、レプトンの性質がバラバラ。

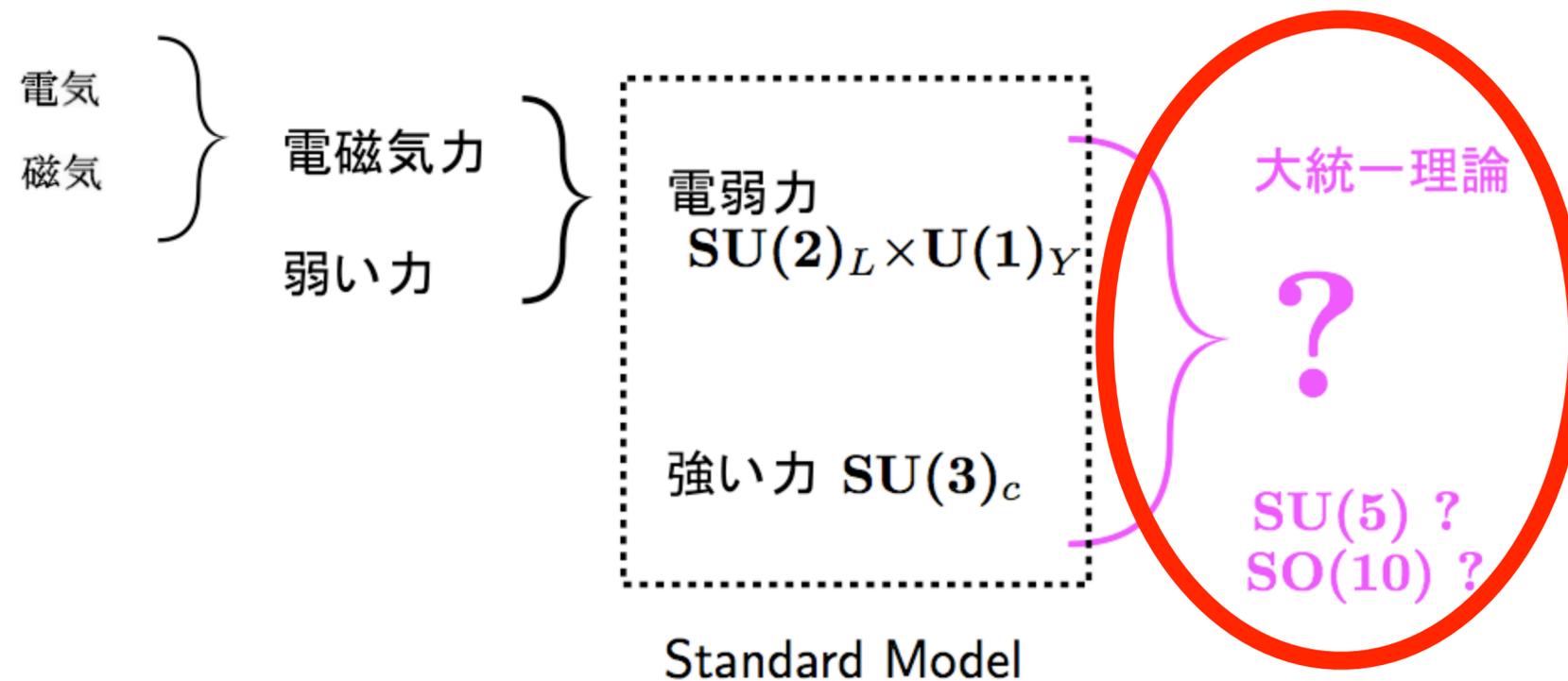
統一的に理解出来ないのか??



謎: クォーク、レプトンの性質がバラバラ。

統一的に理解出来ないのか??

おそらくこの謎の答えは・・・



謎: クォーク、レプトンの性質がバラバラ。

統一的に理解出来ないのか??

標準模型ではクォーク・レプトンはバラバラ

$$\left(\begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \right)_L \quad \left(\text{u} \right)_R \quad \left(\text{d} \right)_R \quad \left(\begin{array}{c} \text{e} \\ \nu \end{array} \right)_L \quad \left(\text{e} \right)_R$$

$$(3,2)_{+1/6} \quad (\bar{3},1)_{-2/3} \quad (\bar{3},1)_{+1/3} \quad (1,2)_{-1/2} \quad (1,1)_{+1}$$

$$1/3 + 1/3 + 1/3 - 1/2 - 1/2 = 0$$

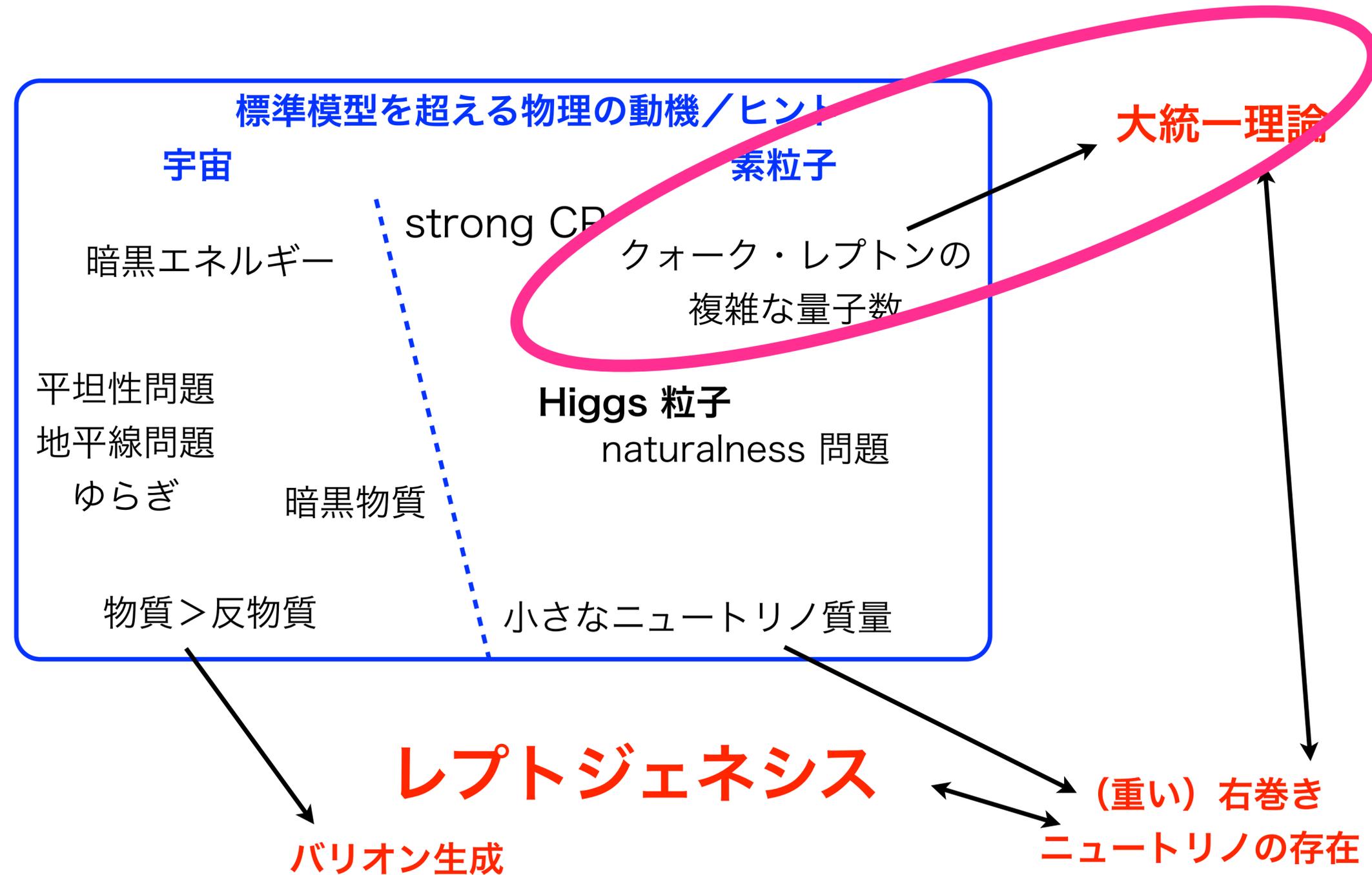
大統一理論では . . . (SU(5)大統一理論の場合)

$$\left(\begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \right)_L \quad \text{u}_R \quad \text{e}_R \quad \left(\begin{array}{c} \text{e} \\ \nu \end{array} \right)_L \quad \left(\begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \right)_R$$

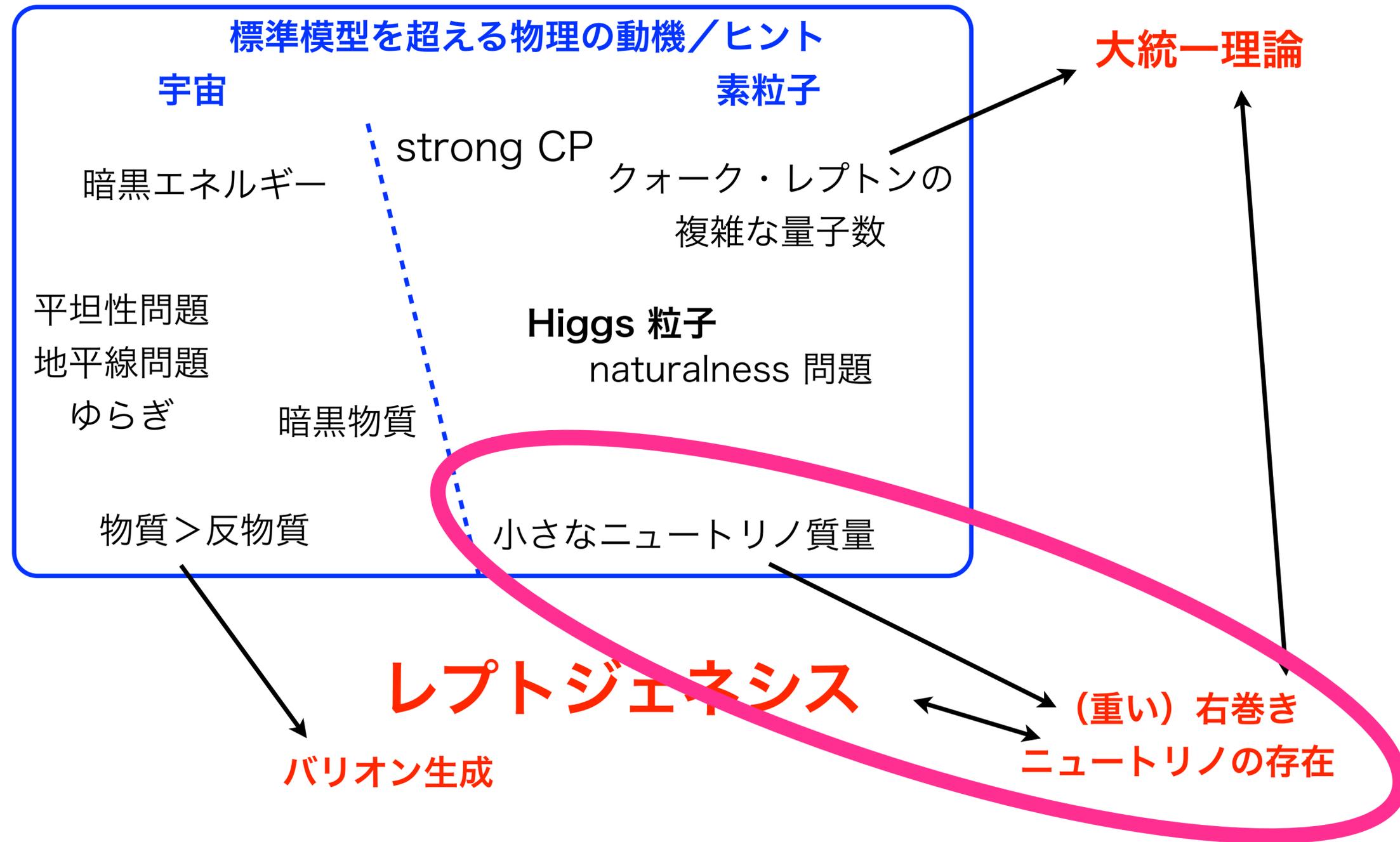
$$10 \quad \bar{5}$$

[Georgi, Glashow 1974]

Big picture 中のマヨラナニュートリノとレプトジェネシス



Big picture 中のマヨラナニュートリノとレプトジェネシス

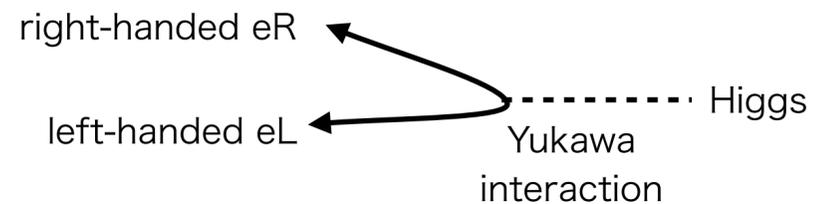


謎：ニュートリノの質量



標準模型のクォークやレプトンはすべて

ヒッグスとの湯川結合を通して、左巻き+右巻きで質量を得ている。



謎：ニュートリノの質量

The diagram shows five fermion multiplets in a dark grey rounded rectangle. Each multiplet is represented by a set of colored circles (red, blue, green) and a letter (u, d, e, ν) inside a white circle, all enclosed in a larger white circle. Below each multiplet are its quantum numbers in parentheses. Below the rectangle, labels in Japanese identify the chirality and type of each multiplet.

Multiplet	Quantum Numbers	Chirality	Type
$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$	$(3, 2)_{+1/6}$	左巻き	クォーク
$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_R$	$(\bar{3}, 1)_{-2/3}$	右巻き	アップクォーク
$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_R$	$(\bar{3}, 1)_{+1/3}$	右巻き	ダウンクォーク
$\begin{pmatrix} e \\ \nu \end{pmatrix}_L$	$(1, 2)_{-1/2}$	左巻き	レプトン
e_R	$(1, 1)_{+1}$	右巻き	レプトン

A red arrow points from the $(1, 2)_{-1/2}$ multiplet to the text below.

よく見るとニュートリノは左巻きしかない

・・・質量を持たない！（質量ゼロ）

しかしニュートリノ質量はある！



Ill: N. Elmehed. © Nobel Media 2015

2015 Nobel Prize
in Physics

謎：ニュートリノの質量

最も有力な解決方法は・・・

$$\begin{pmatrix} \text{u} \\ \text{d} \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \text{u} \end{pmatrix}_R \quad \begin{pmatrix} \text{d} \end{pmatrix}_R \quad \begin{pmatrix} \text{e} \\ \nu \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \text{e} \end{pmatrix}_R$$
$$(3,2)_{+1/6} \quad (\bar{3},1)_{-2/3} \quad (\bar{3},1)_{+1/3} \quad (1,2)_{-1/2} \quad (1,1)_{+1}$$

左巻き
クォーク

右巻き
アップクォーク

右巻き
ダウンクォーク

左巻き
レプトン

右巻き
レプトン

謎：ニュートリノの質量

最も有力な解決方法は・・・

$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$ $\begin{pmatrix} u \end{pmatrix}_R$ $\begin{pmatrix} d \end{pmatrix}_R$ $\begin{pmatrix} e \\ \nu \end{pmatrix}_L$ $\begin{pmatrix} e \end{pmatrix}_R$
 $(3, 2)_{+1/6}$ $(\bar{3}, 1)_{-2/3}$ $(\bar{3}, 1)_{+1/3}$ $(1, 2)_{-1/2}$ $(1, 1)_{+1}$

左巻き
クォーク

右巻き
アップクォーク

右巻き
ダウンクォーク

左巻き
レプトン

右巻き
レプトン

右巻き
ニュートリノ

右巻きニュートリノを足してしまう

右巻きニュートリノ、実はすごい！（一人三役）

右巻きニュートリノ、実はすごい！（一人三役）

① クォーク・レプトンがさらに統一

$$\left(\begin{array}{ccc} \text{u} & & \\ \text{d} & & \\ & \text{u} & \text{e} \\ & & \end{array} \right)_L \quad \left(\begin{array}{ccc} & & \\ & & \\ & & \\ & & \end{array} \right)_R \quad \left(\begin{array}{cc} \text{e} & \\ \nu & \end{array} \right)_L \quad \left(\begin{array}{c} \text{d} \\ \end{array} \right)_R$$

10 5

SU(5)
大統一

+

$$\left(\begin{array}{c} \text{N} \\ \end{array} \right)$$

(1,1)₀

$$= \left(\begin{array}{cccccc} \text{u} & & & \text{e} & & \\ \text{d} & & & \nu & & \\ & \text{u} & \text{e} & & & \\ & & & & \text{d} & \text{N}_1 \end{array} \right)$$

16

SO(10)
大統一

全てのクォーク
レプトンが統一！

右巻きニュートリノ、実はすごい！（一人三役）

① クォーク・レプトンがさらに統一

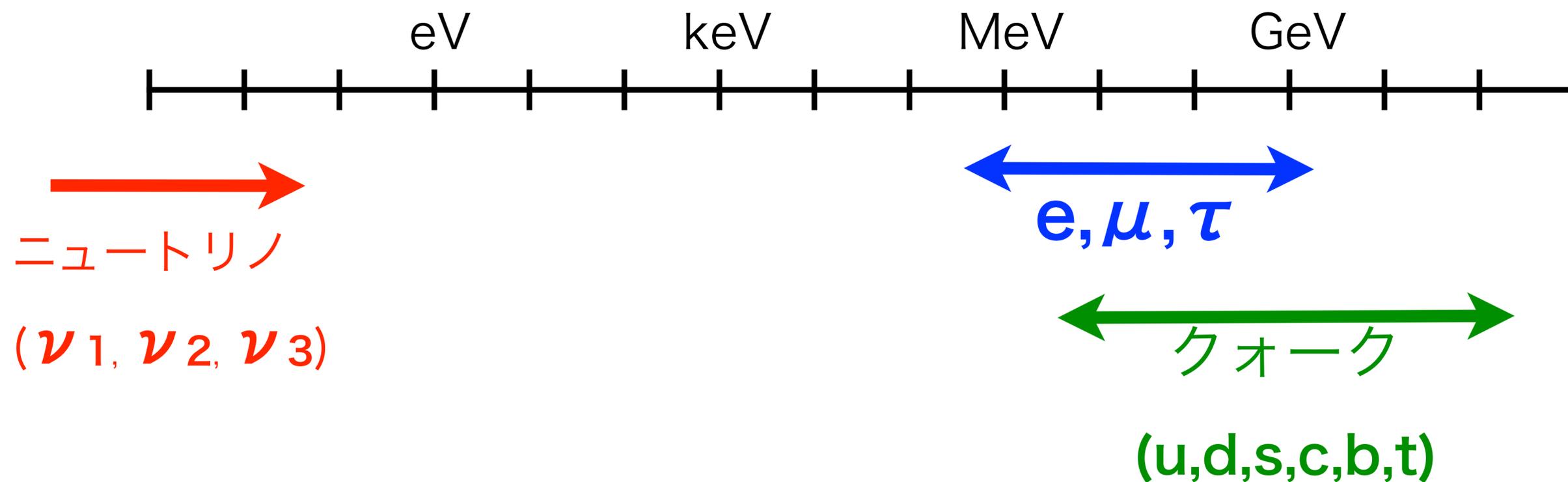
$$= \left(\begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \text{L} \quad \text{u} \text{R} \quad \text{e} \text{R} \quad \text{e} \quad \nu \text{L} \quad \text{d} \text{R} \quad \text{N}_1 \text{R} \right) = \begin{array}{cccc} (\uparrow \downarrow & \downarrow \downarrow & \uparrow) \\ (\uparrow \downarrow & \downarrow \uparrow & \downarrow) \\ (\uparrow \downarrow & \uparrow \downarrow & \downarrow) \\ (\downarrow \uparrow & \downarrow \downarrow & \uparrow) \\ (\downarrow \uparrow & \downarrow \uparrow & \downarrow) \\ (\downarrow \uparrow & \uparrow \downarrow & \downarrow) \\ (\uparrow \uparrow & \uparrow \uparrow & \downarrow) \\ (\uparrow \uparrow & \uparrow \downarrow & \uparrow) \\ (\uparrow \uparrow & \downarrow \uparrow & \uparrow) \\ (\downarrow \downarrow & \uparrow \uparrow & \downarrow) \\ (\downarrow \downarrow & \uparrow \downarrow & \uparrow) \\ (\downarrow \downarrow & \downarrow \uparrow & \uparrow) \\ (\uparrow \downarrow & \uparrow \uparrow & \uparrow) \\ (\downarrow \uparrow & \uparrow \uparrow & \uparrow) \\ (\uparrow \uparrow & \downarrow \downarrow & \downarrow) \\ (\downarrow \downarrow & \downarrow \downarrow & \downarrow) \end{array}$$

16

右巻きニュートリノ、実はすごい！（一人三役）

② 小さなニュートリノ質量を説明

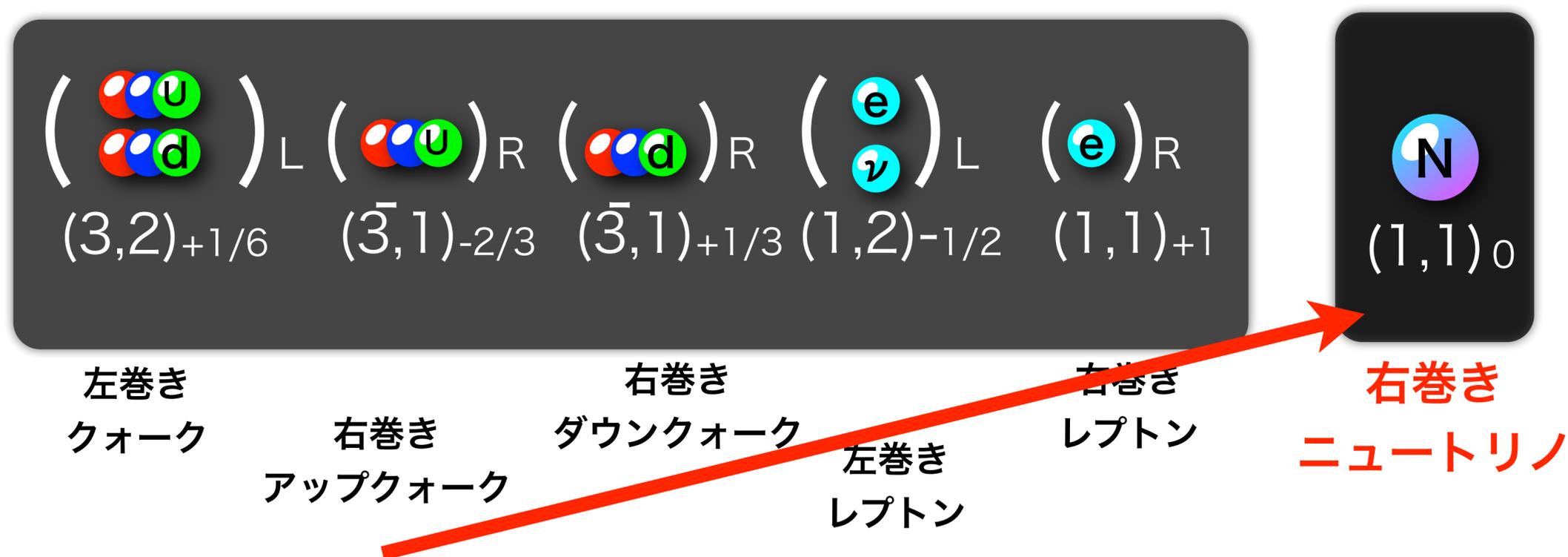
クォーク、レプトンの質量



・・・何でニュートリノだけこんなに軽いのか？

右巻きニュートリノ、実はすごい！（一人三役）

② 小さなニュートリノ質量を説明

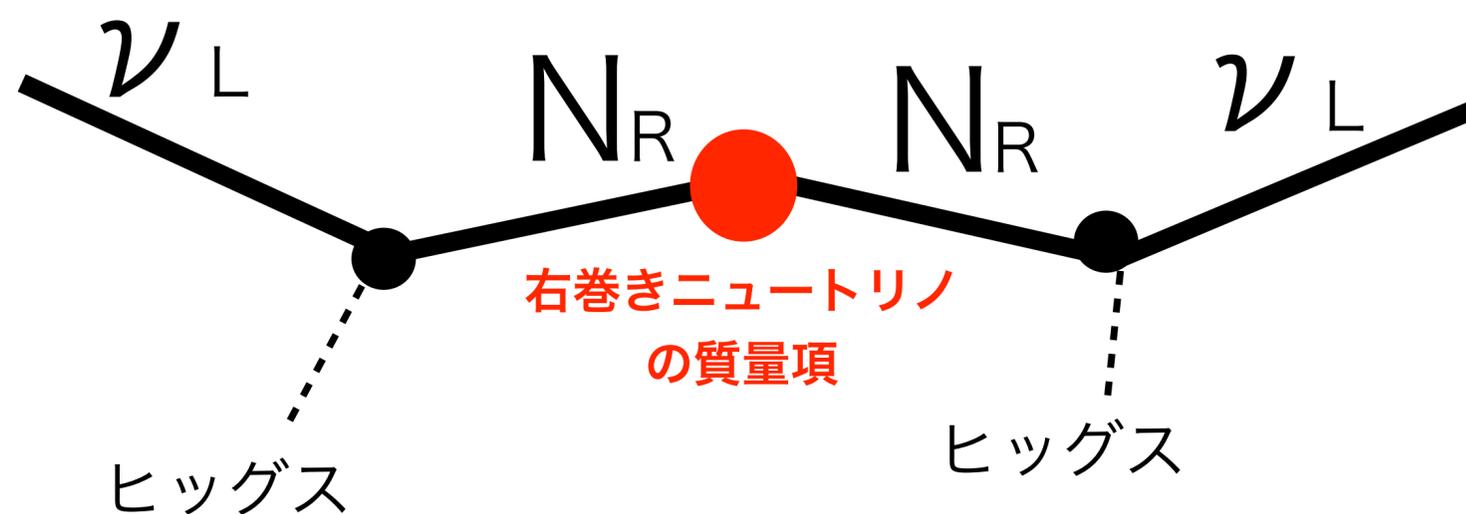


実はこいつだけ特別！ 電磁気・弱い力・強い力どれとも反応しない。

- 電荷を全く持っていない。
- 自分自身の反粒子になれる。
- 自分だけで質量を持てる！

右巻きニュートリノ、実はすごい！（一人三役）

② 小さなニュートリノ質量を説明



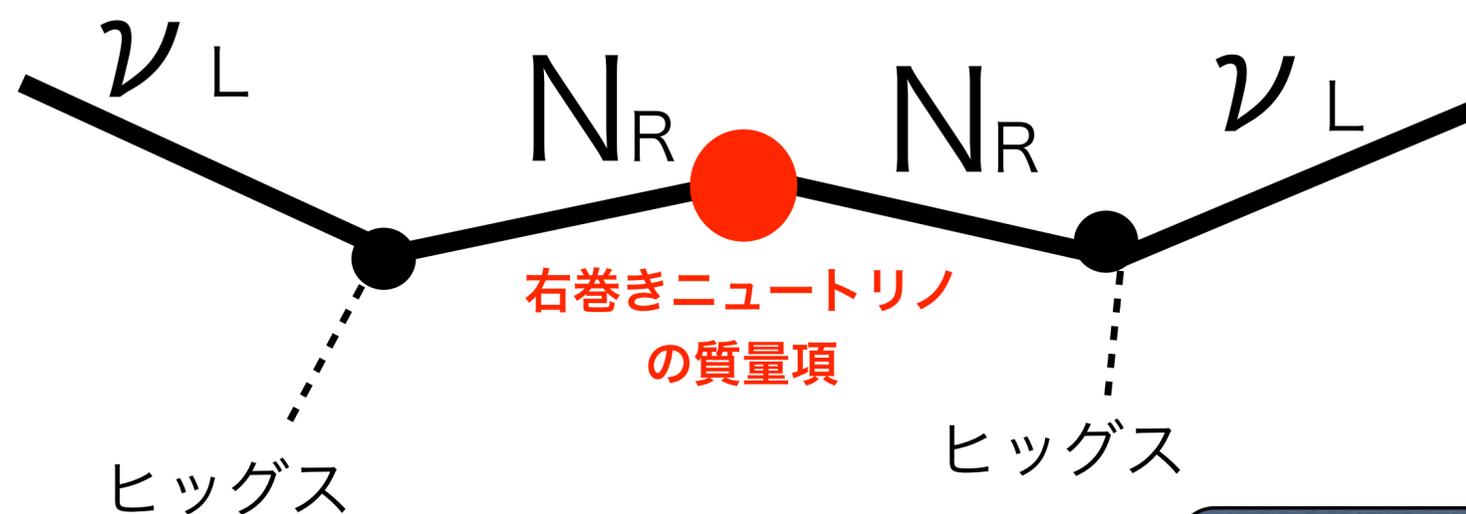
$$\text{(振動実験とかで見える) ニュートリノ質量} = \frac{\text{(他のクォークやレプトンの質量くらい)}^2}{\text{右巻きニュートリノ質量}}$$

右巻き ν ：重い \rightarrow 観測される ν 質量：軽い（“シーソー”）

（大統一理論スケールくらいの重さの右巻き ν で、実験値を説明出来る！）

右巻きニュートリノ、実はすごい！（一人三役）

② 小さなニュートリノ質量を説明



e.g. 100 GeV

(他のクォークやレプトンの質量くらい)²

(振動実験とかで見える)

ニュートリノ質量

0.01 eV

右巻きニュートリノ質量

e.g. 10¹⁵ GeV

右巻きν：重い → 観測されるν質量：軽い（“シーソー”）

（大統一理論スケールくらいの重さの右巻きνで、実験値を説明出来る！）

右巻きニュートリノ、実はすごい！（一人三役）

② 小さなニュートリノ質量を説明



(振動実験とかで
ニュートリノ

右巻きν：重

(大統一理論スケ

このときニュートリノは
マヨラナになる
→ $0\nu\beta\beta$ 崩壊！！

(「シーソー」)

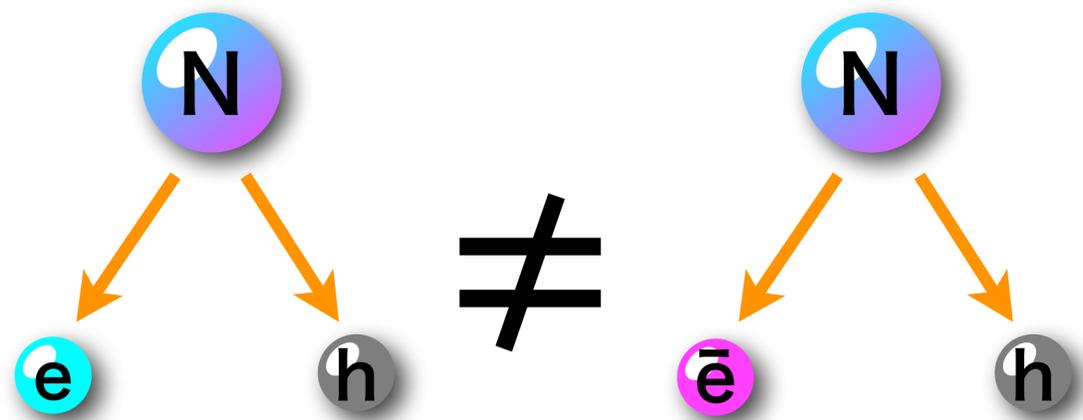
この右巻きνで、実験値を説明出来る！)

右巻きニュートリノ、実はすごい！（一人三役）

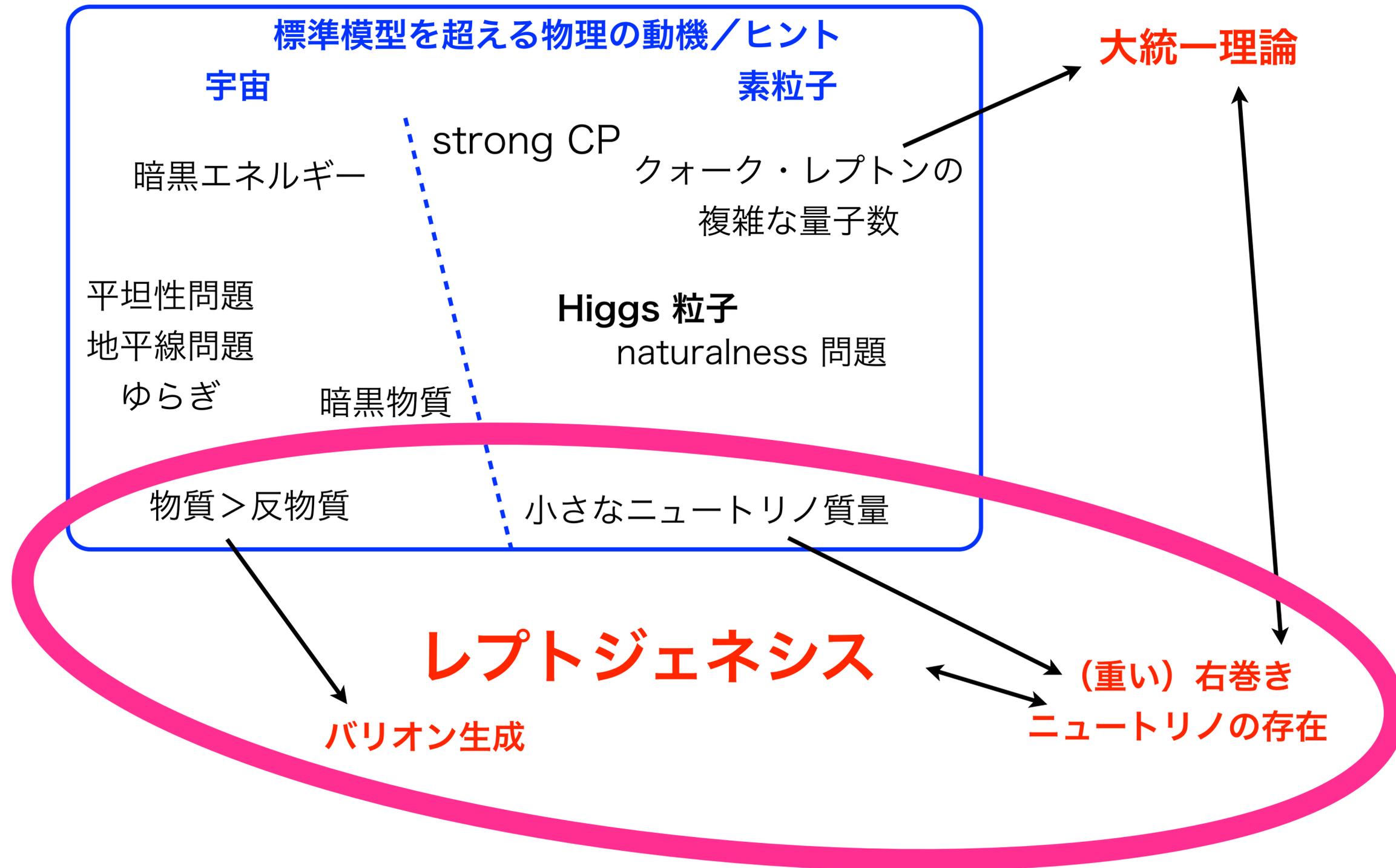
③ 宇宙の物質 > 反物質を・・・

→ レプトジェネシス！！

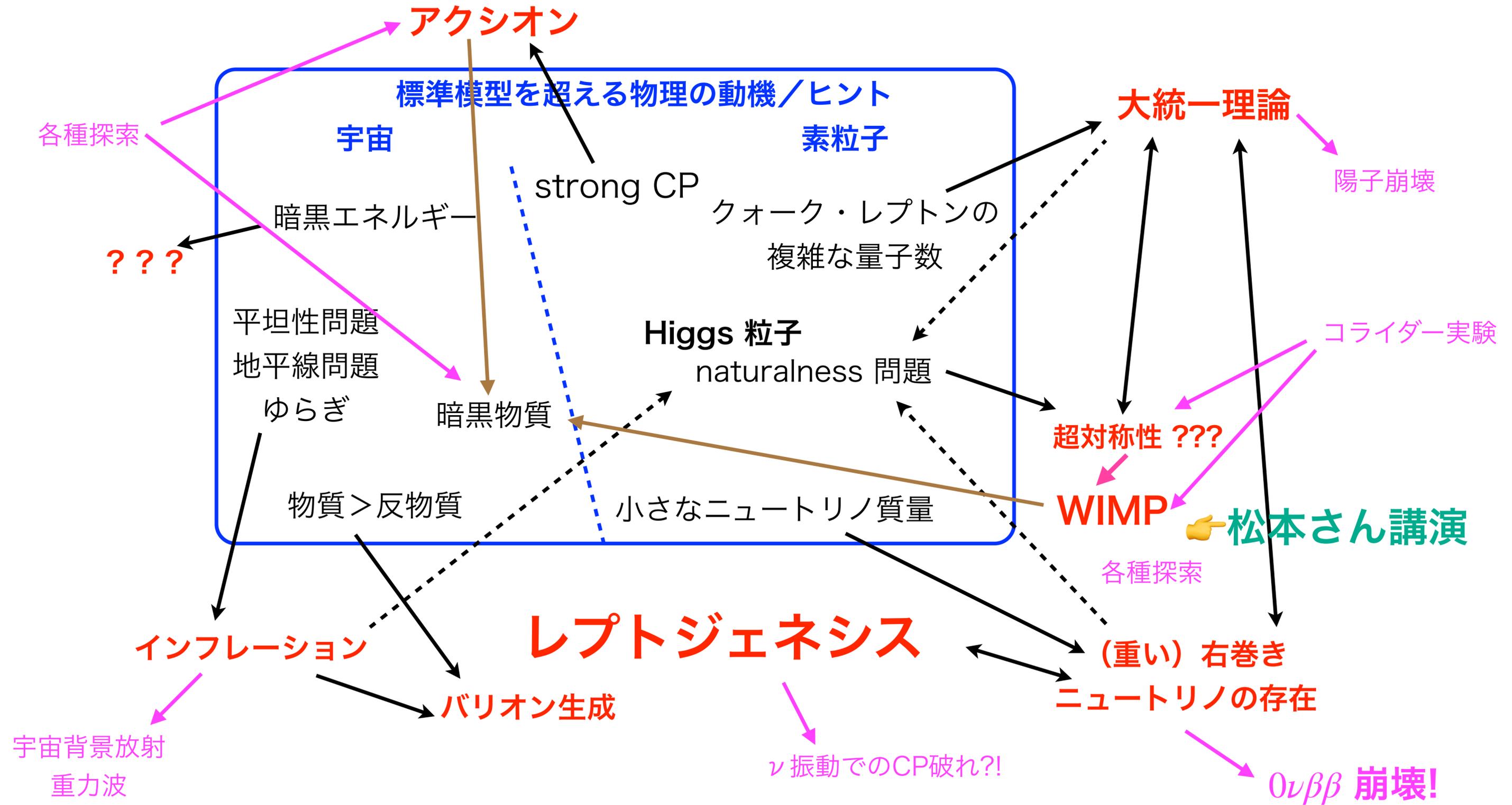
右巻きニュートリノの崩壊（CP-violating）



Big picture 中のマヨラナニュートリノとレプトジェネシス



Big picture 中のマヨラナニュートリノとレプトジェネシス

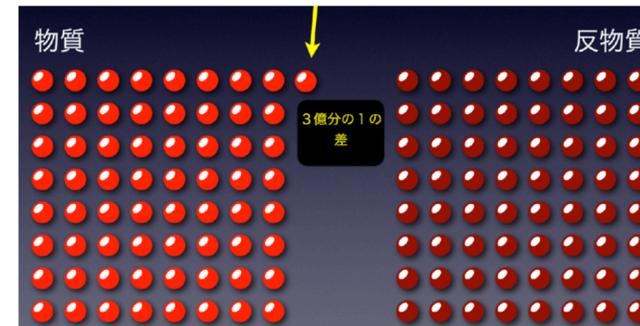


その他については時間がないので省略しますが、、、

今日の予定

- 宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性

- ▶ 宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性って？
- ▶ いつ作られたのか？
- ▶ 作るには何が必要か？



- レプトジェネシス

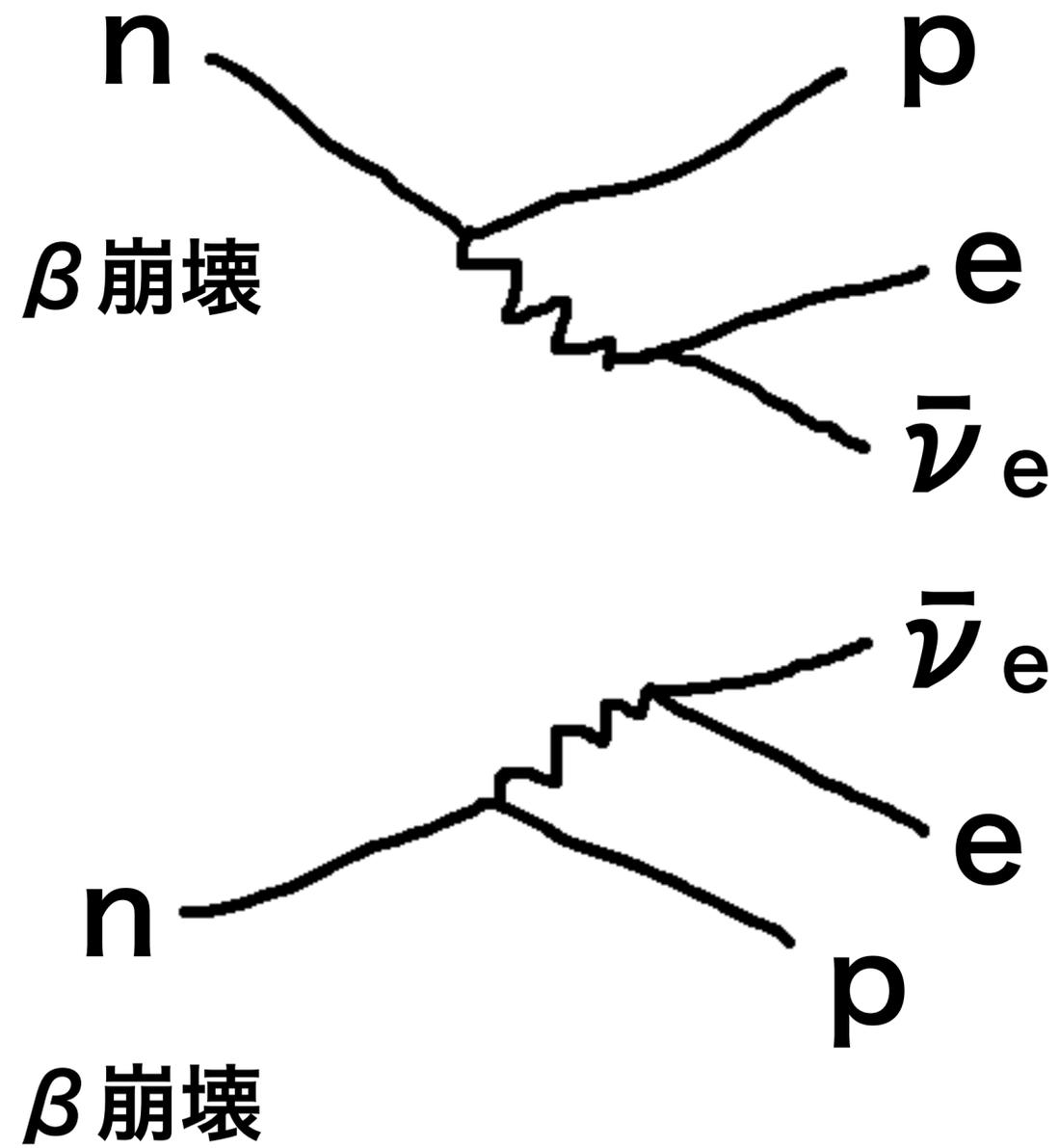
- ▶ なぜ「レプト」ジェネシスなのか？
- ▶ Big picture 中のマヨラナニュートリノとレプトジェネシス

- レプトジェネシスと $0\nu\beta\beta$ 崩壊

- ▶ $0\nu\beta\beta$ 崩壊
- ▶ 最近の研究から

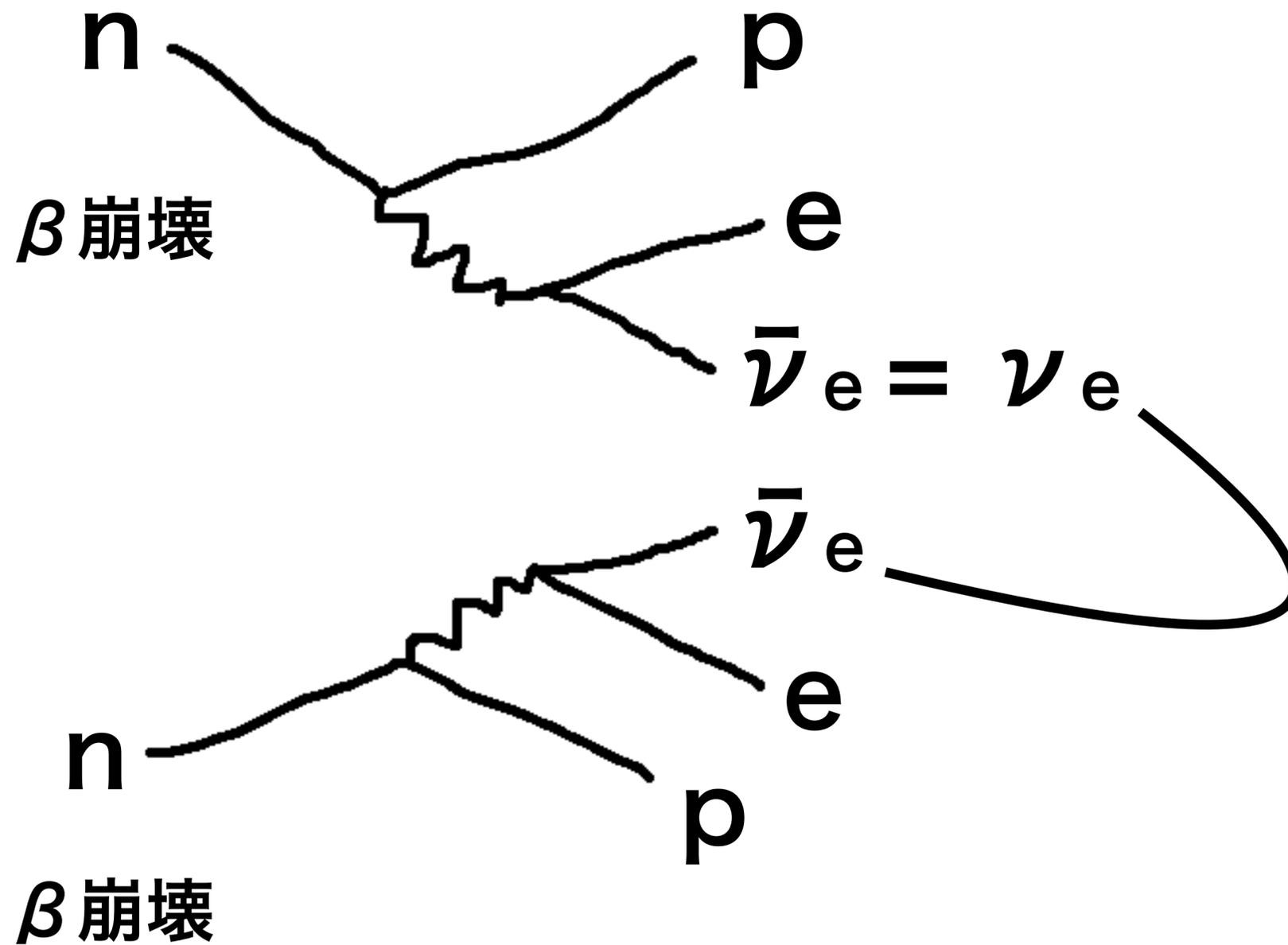
$0\nu\beta\beta$ 崩壊

$0\nu\beta\beta$ 崩壊



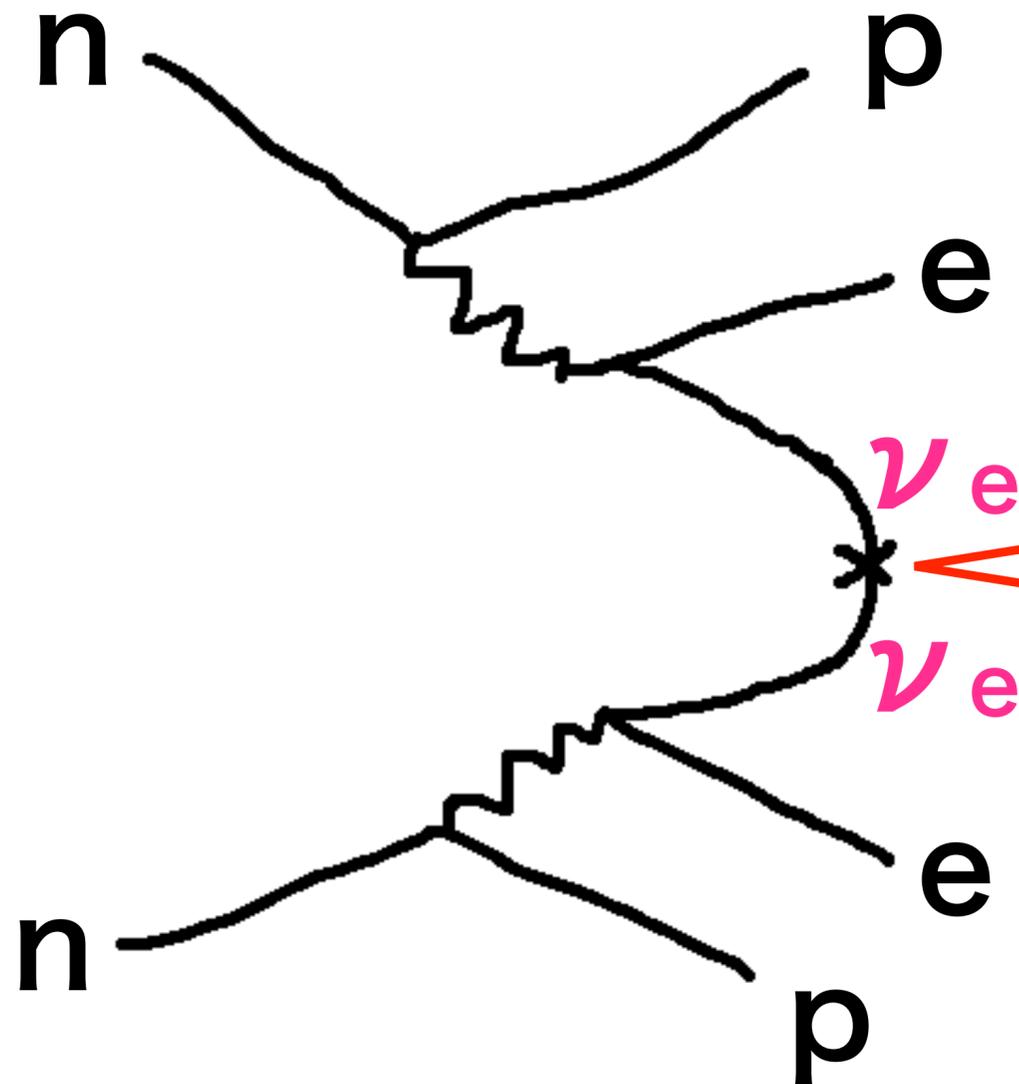
$0\nu\beta\beta$ 崩壊

もしニュートリノ=反ニュートリノ (マヨラナ) なら・・・



$0\nu\beta\beta$ 崩壊

もしニュートリノ=反ニュートリノ (マヨラナ) なら・・・

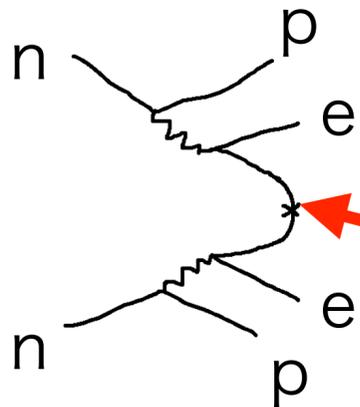


$0\nu\beta\beta$ 崩壊！

$m_{\nu ee}$

$$\begin{pmatrix} m_{\nu ee} & m_{\nu e\mu} & m_{\nu e\tau} \\ m_{\nu\mu e} & m_{\nu\mu\mu} & m_{\nu\mu\tau} \\ m_{\nu\tau e} & m_{\nu\tau\mu} & m_{\nu\tau\tau} \end{pmatrix}$$

$0\nu\beta\beta$ 崩壊



$$m_{\beta\beta}^{\text{eff}} \equiv |(m_\nu)_{ee}| = \left| m_1 |U_{e1}|^2 + m_2 |U_{e2}|^2 e^{i\alpha_{21}} + m_3 |U_{e3}|^2 e^{i(\alpha_{31}-2\delta)} \right|.$$

$$\begin{cases} \text{mixing} & : |U_{ei}| \\ \Delta(\text{mass})^2 & : m_{\nu i}^2 - m_{\nu j}^2 \end{cases}$$

ν 振動で測られている。

Majorana CP phases
(ν 振動では見えない)

$m_{\nu ee}$ [eV]

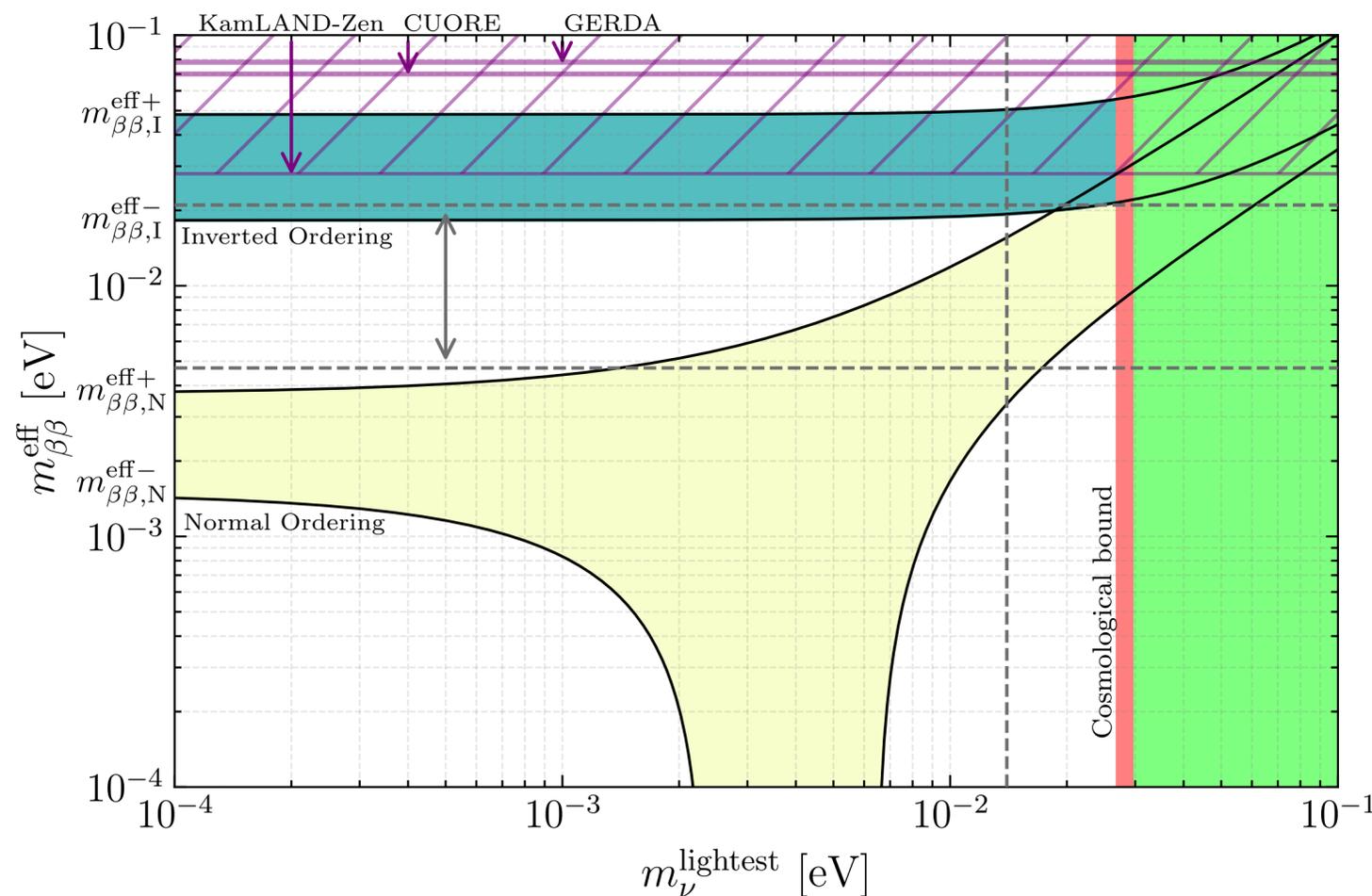


Fig. from [arXiv:2502.10093]

A. Granelli, K. Hamaguchi, M. E. Ramirez-Quezada,
K. Shimada, J. Wada, T. Yokoyama

m_{ν} -lightest [eV]



Q: $0\nu\beta\beta$ 崩壊が見えたらレプトジェネシスについて何か言えるか？

Q: $0\nu\beta\beta$ 崩壊が見えたらレプトジェネシスについて何か言えるか？

Insights on the Scale of Leptogenesis from Neutrino Masses and Neutrinoless Double-Beta Decay
[arXiv:2502.10093] A. Granelli, K. Hamaguchi, M. E. Ramirez-Quezada, K. Shimada, J. Wada, T. Yokoyama

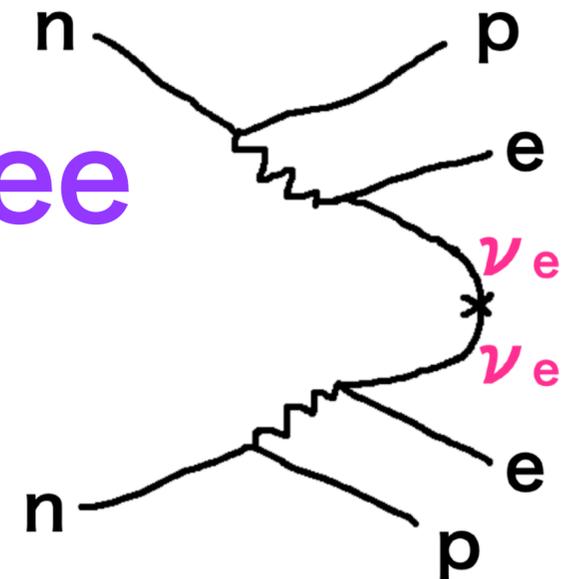
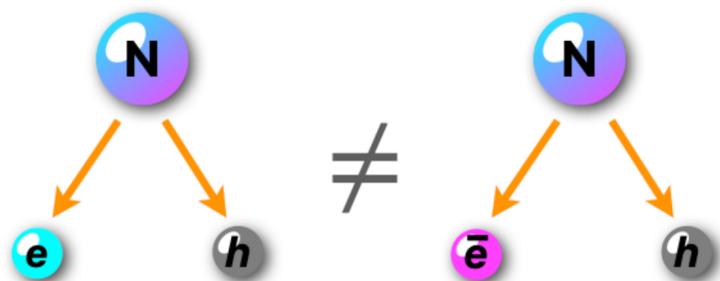
元は同じラグランジアン

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \frac{1}{2}\overline{N_R}(i\not{\partial} + M_R)N_R + y_\nu\overline{N_R}\ell_L H + h.c.$$

レプトジェネシス

何か情報を
引き出せないか？

$m_{\nu ee}$



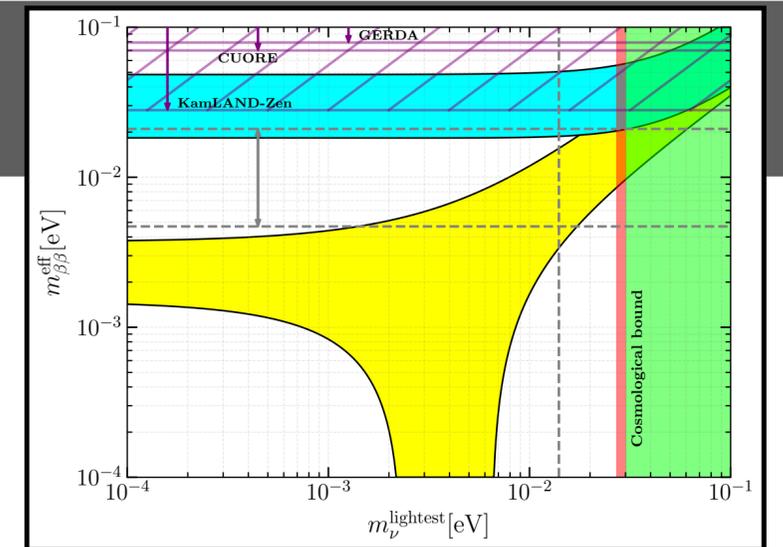
Q: $0\nu\beta\beta$ 崩壊が見えたらレプトジェネシスについて何か言えるか？

Insights on the Scale of Leptogenesis from Neutrino Masses and Neutrinoless Double-Beta Decay
[arXiv:2502.10093] A. Granelli, K. Hamaguchi, M. E. Ramirez-Quezada, K. Shimada, J. Wada, T. Yokoyama

やったこと

Analysis

Minimize M_1 on the $(m_\nu^{\text{lightest}}, m_{\beta\beta}^{\text{eff}})$ plane under...
Successful Leptogenesis



KEK-PH 2025での
横山さんのスライドより👉

物理学会で横山さんの講演
あります！

セミナー招待も大歓迎！

Q: $0\nu\beta\beta$ 崩壊が見えたらレプトジェネシスについて何か言えるか？

Insights on the Scale of Leptogenesis from Neutrino Masses and Neutrinoless Double-Beta Decay
[arXiv:2502.10093] A. Granelli, K. Hamaguchi, M. E. Ramirez-Quezada, K. Shimada, J. Wada, T. Yokoyama

やったこと

Analysis

Minimize M_1 on the $(m_\nu^{lightest}, m_{\beta\beta}^{eff})$ plane under...

Successful Leptogenesis

based on Density Matrix Equation.

$$\frac{dN_{B-L}^{\alpha\beta}}{dz} = -\epsilon^{\alpha\beta} D_1 (N_1 - N_1^{eq}) - \frac{1}{2} W_1 \{P, N_{B-L}\}^{\alpha\beta} \\ - \frac{1}{2} \frac{\Gamma_\tau}{Hz} \begin{pmatrix} 0 & N_{B-L}^{\tau\mu} & N_{B-L}^{\tau e} \\ N_{B-L}^{\mu\tau} & 0 & 0 \\ N_{B-L}^{e\tau} & 0 & 0 \end{pmatrix} - \frac{1}{2} \frac{\Gamma_\mu}{Hz} \begin{pmatrix} 0 & N_{B-L}^{\tau\mu} & 0 \\ N_{B-L}^{\mu\tau} & 0 & N_{B-L}^{\mu e} \\ 0 & N_{B-L}^{e\mu} & 0 \end{pmatrix}.$$

[Sigl & Raffelt (2002), Abada et al. (2006), Blanchet et al. (2013)]

KEK-PH 2025での

横山さんのスライドより👉

物理学会で横山さんの講演
あります！

セミナー招待も大歓迎！

Q: $0\nu\beta\beta$ 崩壊が見えたらレプトジェネシスについて何か言えるか？

Insights on the Scale of Leptogenesis from Neutrino Masses and Neutrinoless Double-Beta Decay
 [arXiv:2502.10093] A. Granelli, K. Hamaguchi, M. E. Ramirez-Quezada, K. Shimada, J. Wada, T. Yokoyama

やったこと

KEK-PH 2025での
 横山さんのスライドより👉

物理学会で横山さんの講演
 あります！

セミナー招待も大歓迎！

Analysis

Minimize M_1 on the $(m_\nu^{lightest}, m_{\beta\beta}^{eff})$ plane under...

Successful Leptogenesis
 based on Density Matrix Equation.

	Boltzmann Equation (standard method)	Density Matrix Equation
Flavor Effects <small>[Barbieri et al. (2000), Abada et al. (2006), Nardi et al. (2006)]</small>	▲	✓
(Semi-) Analytical solution	known Cf. Davidson-Ibarra bound <small>[Davidson & Ibarra (2002), Buchmuller et al. (2004)]</small>	not known

We numerically solved DME by Ulysses.

arXiv > hep-ph > arXiv:2007.09150

High Energy Physics - Phenomenology

[Submitted on 17 Jul 2020]

ULYSSES: Universal Leptogenesis Equation Solver

Alessandro Granelli, Kristian Moffat, Yuber Perez-Gonzalez, Holger Schulz, Jessica Turner

ULYSSES is a python package that calculates the baryon asymmetry produced from leptogenesis in the context of a type-I seesaw mechanism. The code solves the semi-classical Boltzmann equations for points in the model parameter space as specified by the user. We provide a selection

Access Paper:

- View PDF
- TeX Source
- Other Formats

Current browse context: **hep-ph**

< prev | next >

new | recent | 2020-07

Q: $0\nu\beta\beta$ 崩壊が見えたらレプトジェネシスについて何か言えるか？

Insights on the Scale of Leptogenesis from Neutrino Masses and Neutrinoless Double-Beta Decay
[arXiv:2502.10093] A. Granelli, K. Hamaguchi, M. E. Ramirez-Quezada, K. Shimada, J. Wada, T. Yokoyama

やったこと

Analysis

Minimize M_1 on the $(m_\nu^{lightest}, m_{\beta\beta}^{eff})$ plane under...

Other conditions:

[1] Perturbative: $|\lambda| < \sqrt{4\pi}$.

[2] Hierarchy: $M_1 \ll M_2 < M_3$, $T_i = 10M_1$ (for N_1 leptogenesis).

[3] Zero initial conditions: $N_1(T = T_i) = 0$, $N_{B-L}(T = T_i) = 0$.

[4] Avoid the fine-tuning in the seesaw relation.

$$\hat{m}_i = \frac{\hat{m}_i^{(1)}}{} + \frac{\hat{m}_i^{(2)}}{} + \frac{\hat{m}_i^{(3)}}{}, \quad \hat{m}_i^{(k)}: N_k \text{'s contribution to } \hat{m}_i$$

A severe cancellation among them makes M_1^{min} smaller and smaller. [Blanchet & Bari (2009), Moffat, et al. (2018)]

In this talk, we concentrate on the mild cancellation case ($\mathcal{O}(10\%)$).

N_2, N_3 contribution \longrightarrow Future work

We define a fine-tuning measure:

$$\Delta \equiv \sum_{a=1}^3 \Delta_a \quad \Delta_a \equiv \frac{\sum_{j=1}^3 |m_a^{(j)}|}{m_a}$$

Here, we show the results for 10% cancellation ($\Delta = 10$).

KEK-PH 2025での

横山さんのスライドより👉

物理学会で横山さんの講演
あります！

セミナー招待も大歓迎！

Q: $0\nu\beta\beta$ 崩壊が見えたらレプトジェネシスについて何か言えるか？

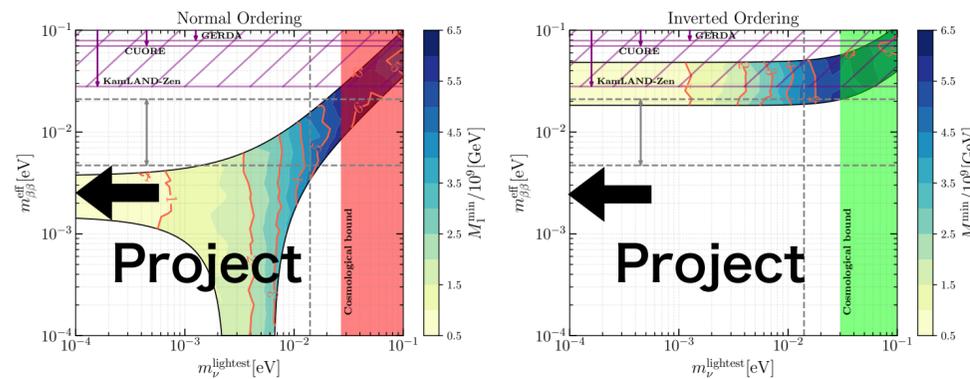
Insights on the Scale of Leptogenesis from Neutrino Masses and Neutrinoless Double-Beta Decay
 [arXiv:2502.10093] A. Granelli, K. Hamaguchi, M. E. Ramirez-Quezada, K. Shimada, J. Wada, T. Yokoyama

結果 (の一部)

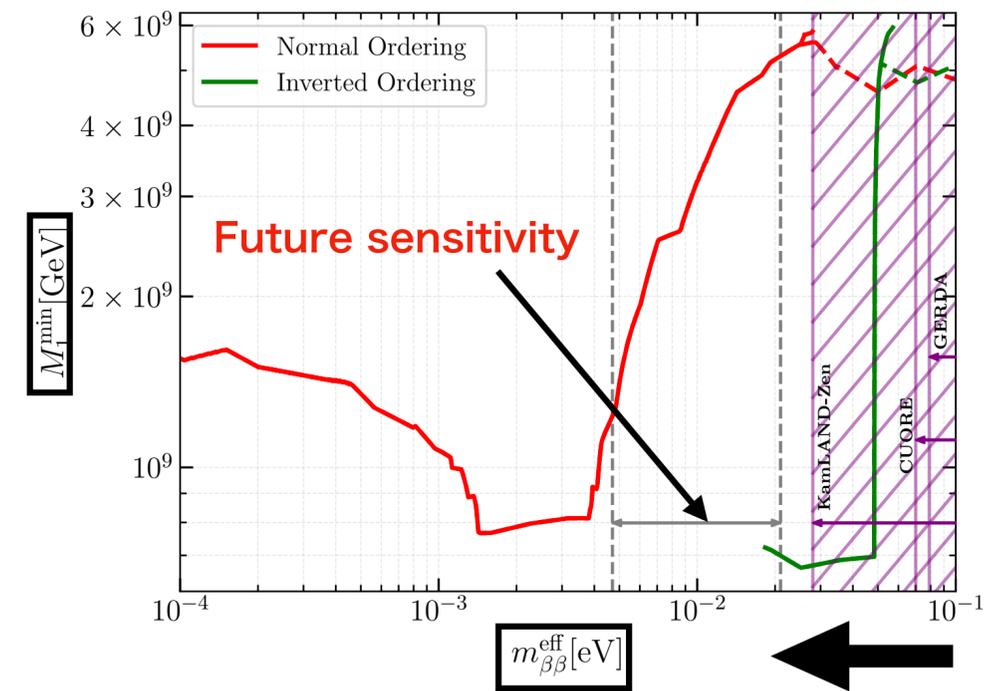
Result

2502:10093 [hep-ph]
 A. Granelli, K. Hamaguchi, M. E. Ramirez-Quezada, K. Shimada, J. Wada, and T. Yokoyama

Projection of the contour plots on the vertical axis.



Lower bound of RHN's mass



KEK-PH 2025での
 横山さんのスライドより👉

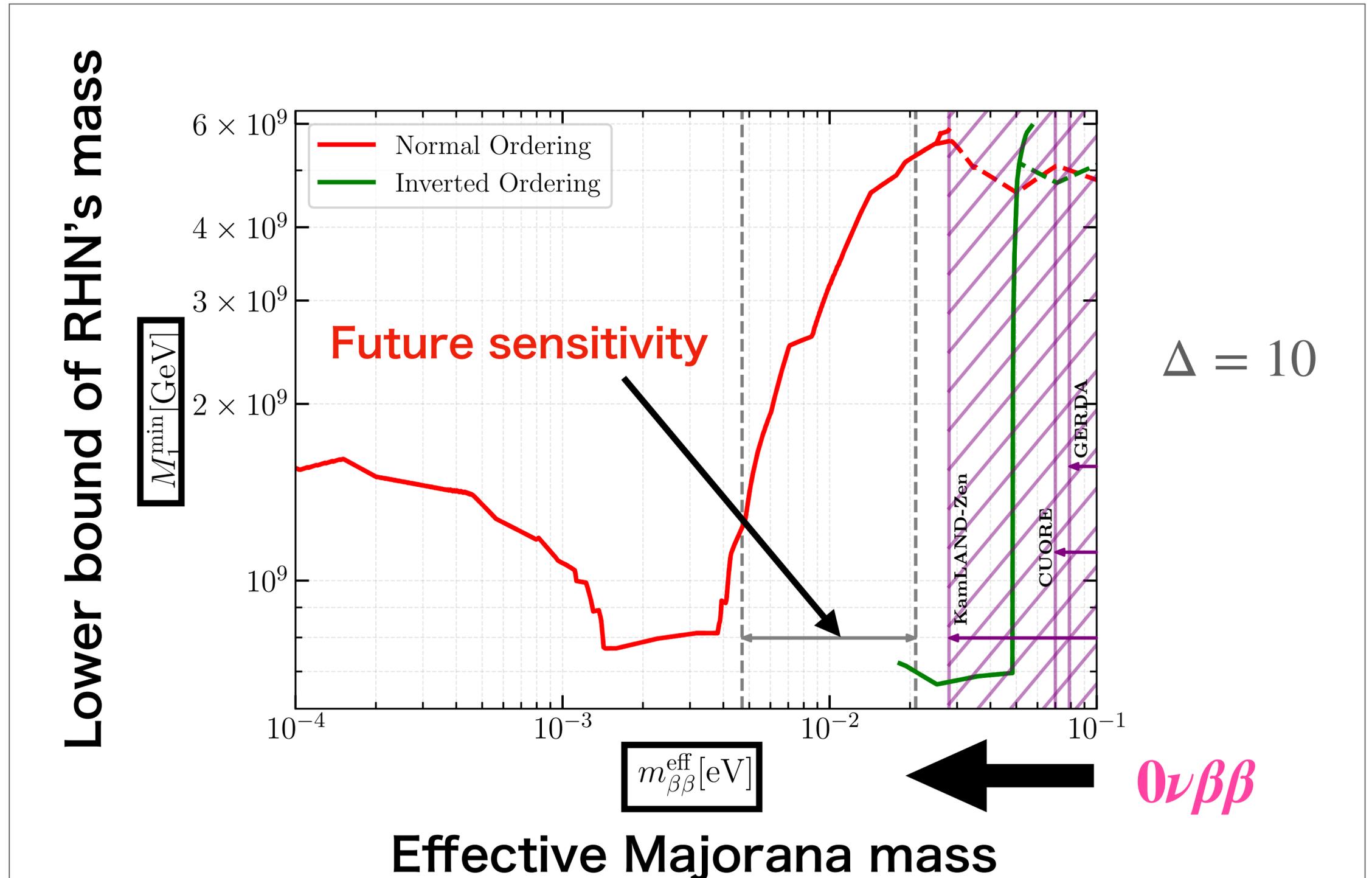
物理学会で横山さんの講演
 あります！

セミナー招待も大歓迎！

Q: $0\nu\beta\beta$ 崩壊が見えたらレプトジェネシスについて何か言えるか？

Insights on the Scale of Leptogenesis from Neutrino Masses and Neutrinoless Double-Beta Decay
[arXiv:2502.10093] A. Granelli, K. Hamaguchi, M. E. Ramirez-Quezada, K. Shimada, J. Wada, T. Yokoyama

結果 (の一部)



KEK-PH 2025での
横山さんのスライドより👉

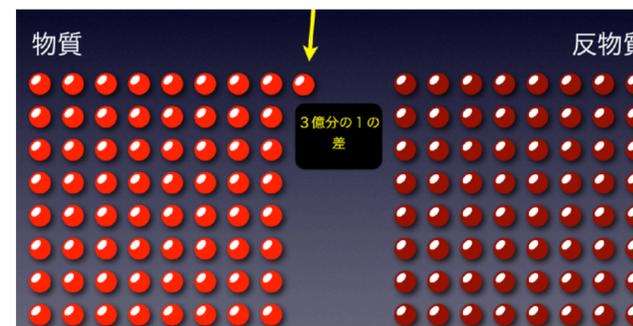
物理学会で横山さんの講演
あります！

セミナー招待も大歓迎！

まとめ

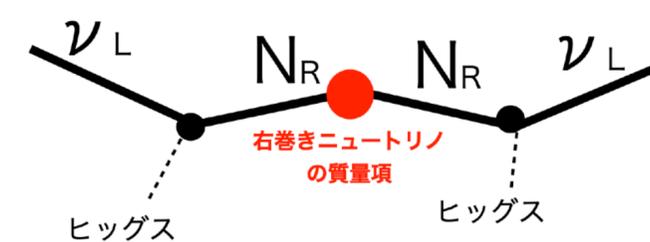
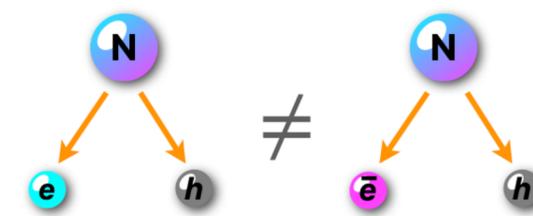
- 宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性

- ▶ 宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性って？
- ▶ いつ作られたのか？
- ▶ 作るには何が必要か？



- レプトジェネシス

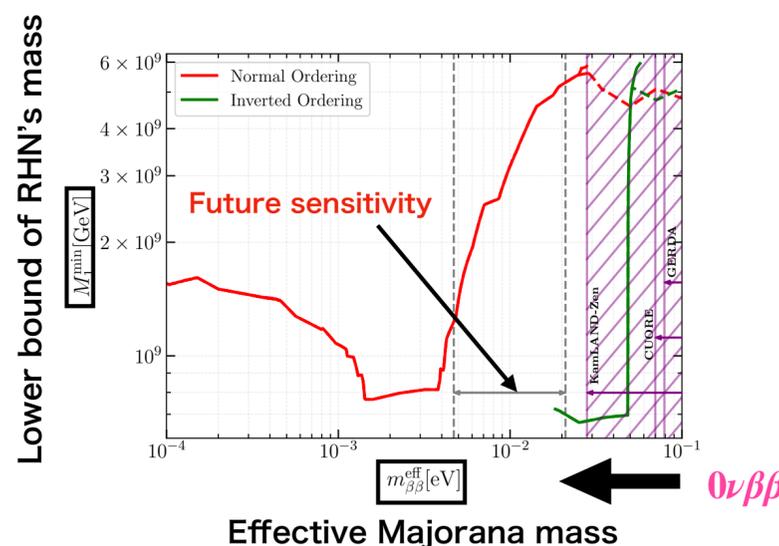
- ▶ なぜ「レプト」ジェネシスなのか？
- ▶ Big picture 中のマヨラナニュートリノとレプトジェネシス



$$\left(\begin{array}{c} \text{u}_L, \text{d}_L, \text{e}_L, \nu_L \\ \text{u}_R, \text{d}_R, \text{e}_R, N_R \end{array} \right) = 16$$

- レプトジェネシスと $0\nu\beta\beta$ 崩壊

- ▶ $0\nu\beta\beta$ 崩壊
- ▶ 最近の研究から

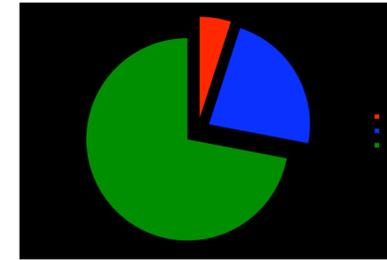


backup slides

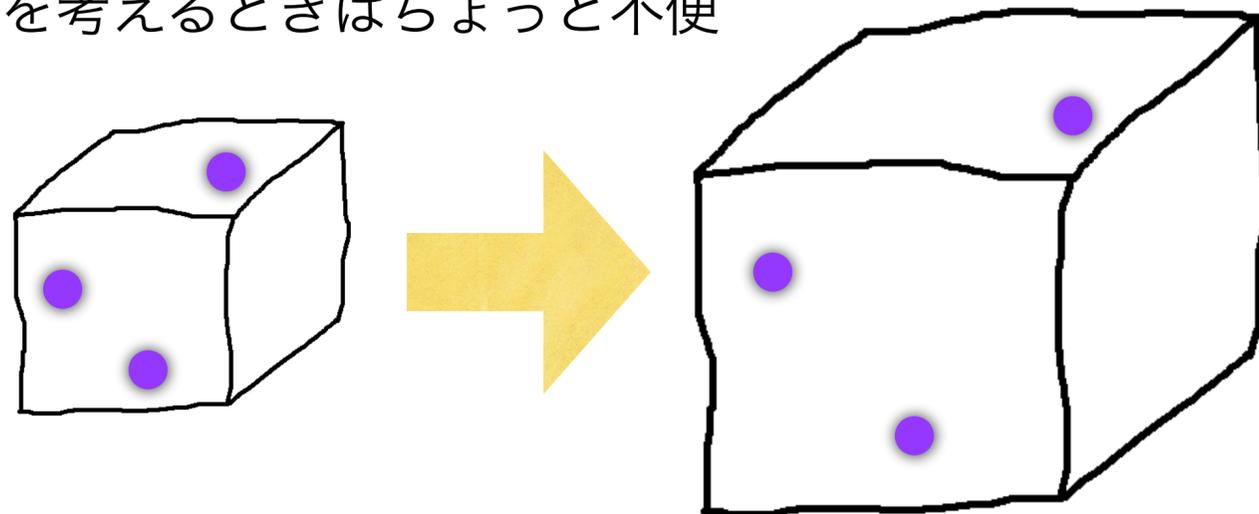
オマケ：バリオン数の3通りの数え方

$$\underline{\Omega_b h^2 \approx 0.022}$$

$\Omega_b =$ (現在のバリオン質量密度) / (宇宙の臨界密度)
 \approx 全宇宙のエネルギーに占めるバリオンの割合 ≈ 0.05
 $h \approx 0.67$ (規格化されたハッブル定数)



でも「密度」は膨張と共に変化するので
初期宇宙を考えるとちょっと不便



オマケ：バリオン数の3通りの数え方

$\Omega_b h^2 \approx 0.022$

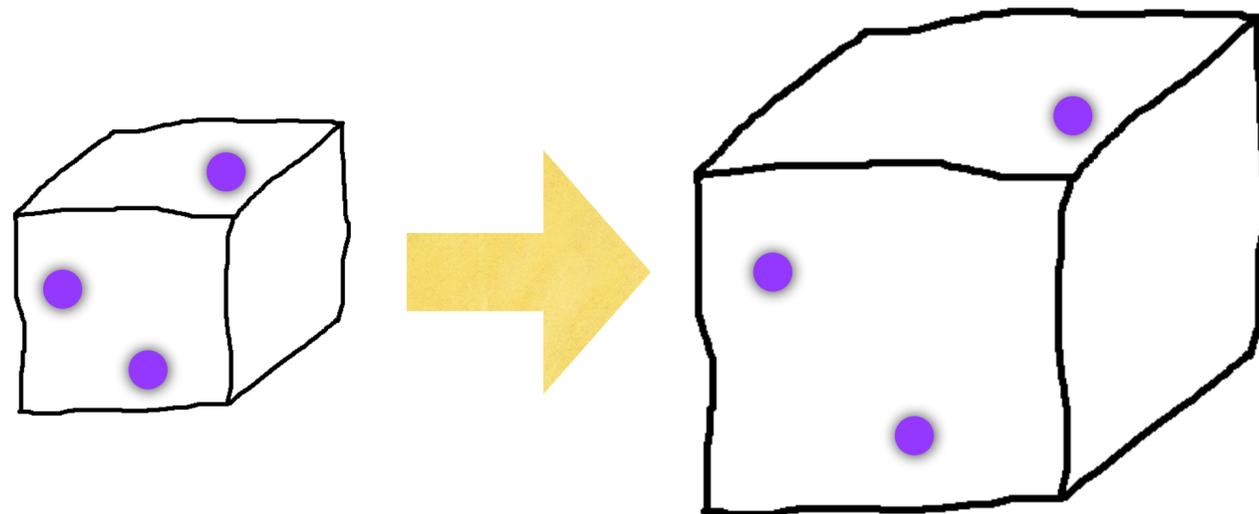
$\Omega_b =$ (現在のバリオン質量密度) / (宇宙の臨界密度)
 \approx 全宇宙のエネルギーに占めるバリオンの割合 ≈ 0.05
 $h \approx 0.67$ (規格化されたハッブル定数)

$\Leftrightarrow \eta = n_B/n_\gamma \approx 6.1 \times 10^{-10}$

$n_B = n(\text{baryon}) - n(\text{anti-baryon}) =$ (バリオン数密度)

$n_\gamma =$ 光子数密度

..... 光子数密度で規格化しておけば、膨張に対して不変。



でも初期宇宙では光子数密度は膨張以外の影響も受けるので
(電子陽電子対消滅とか)
厳密に言うところでも少し不便。

オマケ：バリオン数の3通りの数え方

$$\underline{\Omega_b h^2 \approx 0.022}$$

$$\begin{aligned}\Omega_b &= (\text{現在のバリオン質量密度}) / (\text{宇宙の臨界密度}) \\ &\approx \text{全宇宙のエネルギーに占めるバリオンの割合} \approx 0.05 \\ h &\approx 0.67 \text{ (規格化されたハッブル定数)}\end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow \underline{\eta = n_B/n_\gamma \approx 6.1 \times 10^{-10}}$$

$$\begin{aligned}n_B &= n(\text{baryon}) - n(\text{anti-baryon}) = (\text{バリオン数密度}) \\ n_\gamma &= \text{光子数密度}\end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow \underline{n_B/s \approx 0.87 \times 10^{-10}}$$

$$\begin{aligned}n_B &= n(\text{baryon}) - n(\text{anti-baryon}) = (\text{バリオン数密度}) \\ s &= (\text{エントロピー密度})\end{aligned}$$

バリオン数が保存している限り、

$$n_B \propto a^{-3}, s \propto a^{-3} \rightarrow n_B/s = \text{const.}$$

(a = scale factor)

オマケ2：バリオン数の符号について

「物質の方が反物質より多い」と言ったとき、その符号に意味はあるか？
(残った方を「物質」と名付けただけで、単なる convention では？)

仮にあなたが

「今と同じ標準模型のラグランジアンで記述されていて
宇宙の物質と反物質だけが入れ替わった世界」

に転生したとしたら、あなたはそれに気づけるだろうか？



答えは、、、気づける！

例えば K_L の semi-leptonic 崩壊を見て、

その世界の「電子」か「陽電子」のどちらが多いかを調べれば

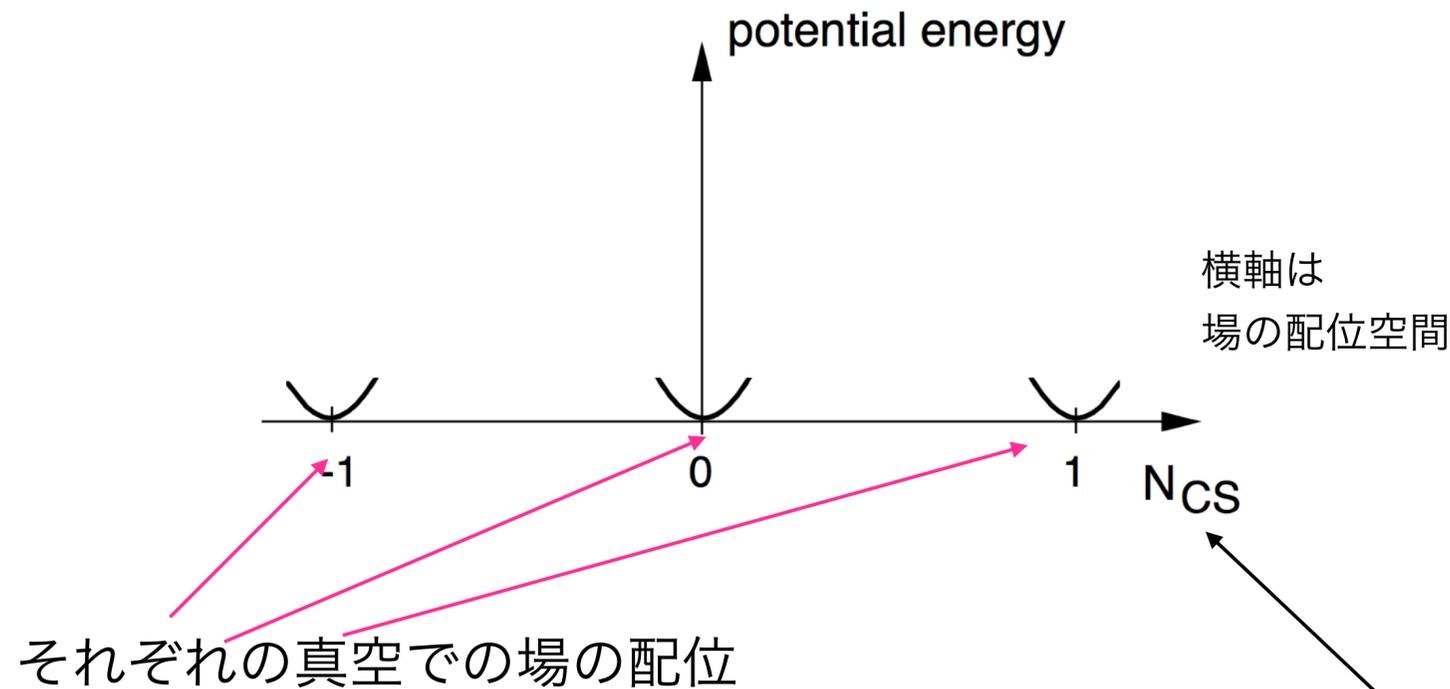
今住んでいる世界の「物質・反物質」との相対符号を確認できる。

スファレロンについて：

スファレロンについて：

point 1: 標準模型のラグランジアンは「topological に異なる、縮退した真空」を持つ。

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + (D_\mu\Phi)^\dagger D^\mu\Phi - \lambda\left(\Phi^\dagger\Phi - \frac{v^2}{2}\right)^2$$



$$A_\mu(x) = \frac{i}{g}\partial_\mu U(x)U^{-1}(x)$$

$$\Phi(x) = \frac{v}{\sqrt{2}}U(x)\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad U(x) \in \text{SU}(2)$$

Chern-Simons number

$$N_{\text{CS}} = \frac{1}{24\pi^2} \int d^3x \epsilon_{ijk} \text{Tr} [(\partial_i U U^{-1})(\partial_j U U^{-1})(\partial_k U U^{-1})]$$

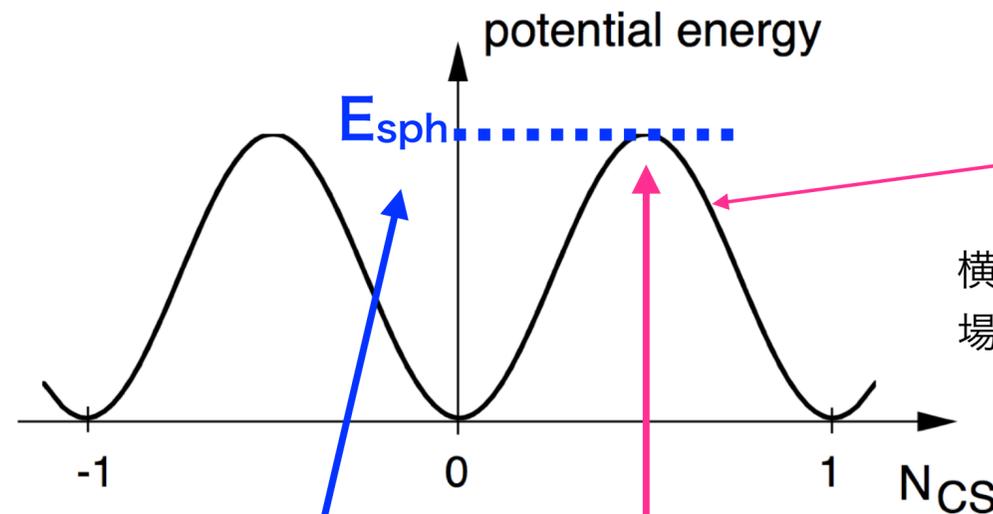
= integer

スファレロンについて：

point 2: 異なる真空をつなげる場の配位空間上の「パス」が知られており、
 そのてっぺんの配位が「スファレロン」解。

[Klinkhammer & Manton, Phys. Rev. D30 ('84)]

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + (D_\mu\Phi)^\dagger D^\mu\Phi - \lambda\left(\Phi^\dagger\Phi - \frac{v^2}{2}\right)^2$$



スファレロン解
 (不安定解)

スファレロン解のエネルギーも計算されていて、
 (ゼロ温度では) $E_{\text{sph}} = 9.1 \text{ TeV}$.

スファレロン解の空間的なサイズは $r \sim (m_W)^{-1}$ くらい。

$$A_i(\mu, r, \theta, \phi) = \frac{i}{g_2} f(r) \partial_i U(\mu, \theta, \phi) U^{-1}(\mu, \theta, \phi), \quad (2)$$

$$\Phi(\mu, r, \theta, \phi) = \frac{v}{\sqrt{2}} \left[(1 - h(r)) \begin{pmatrix} 0 \\ e^{-i\mu} \cos \mu \end{pmatrix} + h(r) U(\mu, \theta, \phi) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right], \quad (3)$$

with

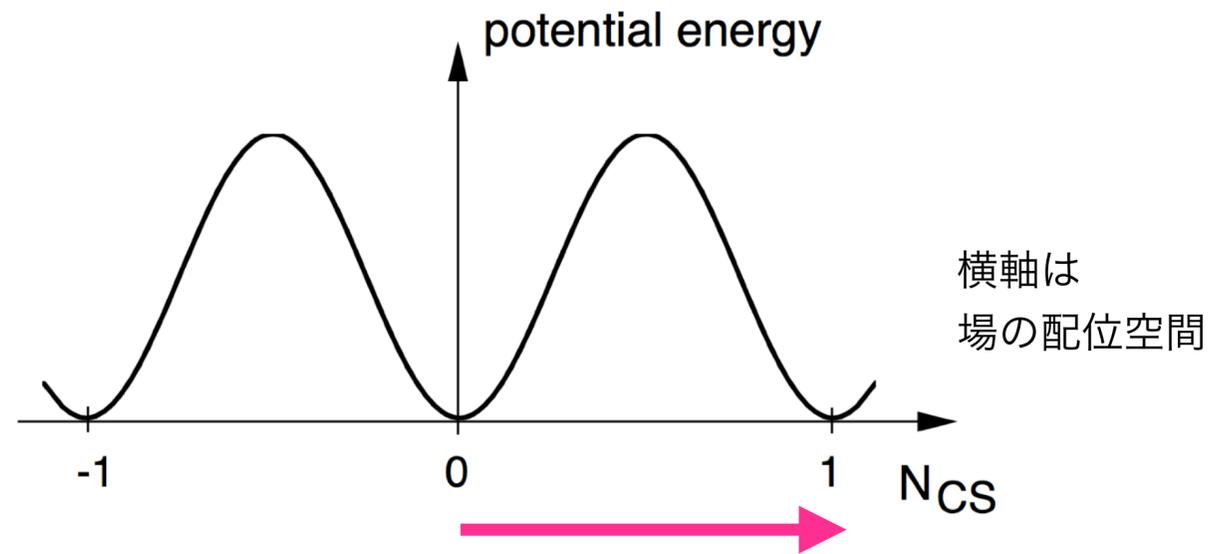
$$U(\mu, \theta, \phi) = \begin{pmatrix} e^{i\mu}(\cos \mu - i \sin \mu \cos \theta) & e^{i\phi} \sin \mu \sin \theta \\ -e^{-i\phi} \sin \mu \sin \theta & e^{-i\mu}(\cos \mu + i \sin \mu \cos \theta) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式は Funakubo, Fuyuto, Senaha 1612.05431 から。
 $\mu = 0 \sim \pi$ で、 $\mu = \pi/2$ がスファレロン解。

スファレロンについて：

point 3: 場の配位を (adiabatic に) 隣の真空に移すと、バリオン数とレプトン数が変化する!

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + (D_\mu\Phi)^\dagger D^\mu\Phi - \lambda\left(\Phi^\dagger\Phi - \frac{v^2}{2}\right)^2$$



$$\Delta B = \Delta L = N_f = 3$$

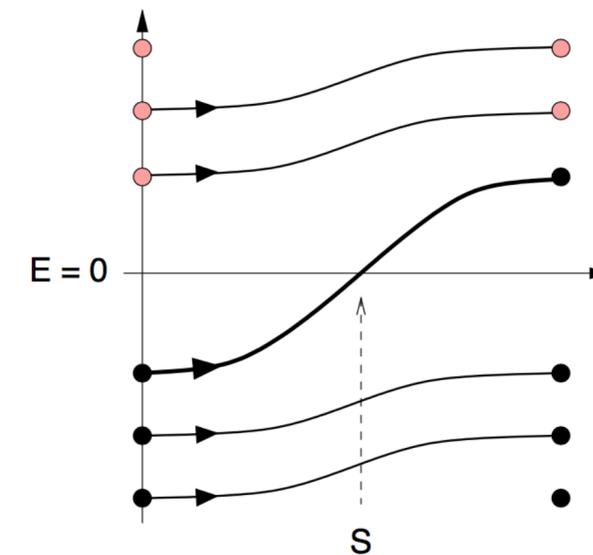
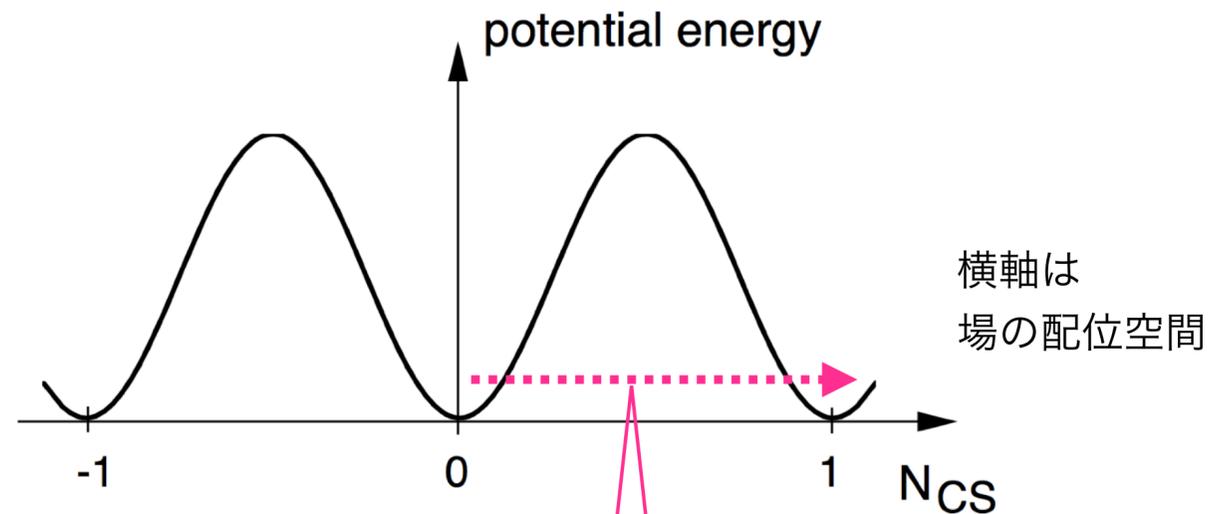


Fig. from Klinkhamer and Rupp
hep-th/0304167

スファレロンについて：

point 4: ゼロ温度ではトンネル効果による遷移は無視できるけど、、、

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + (D_\mu\Phi)^\dagger D^\mu\Phi - \lambda\left(\Phi^\dagger\Phi - \frac{v^2}{2}\right)^2$$

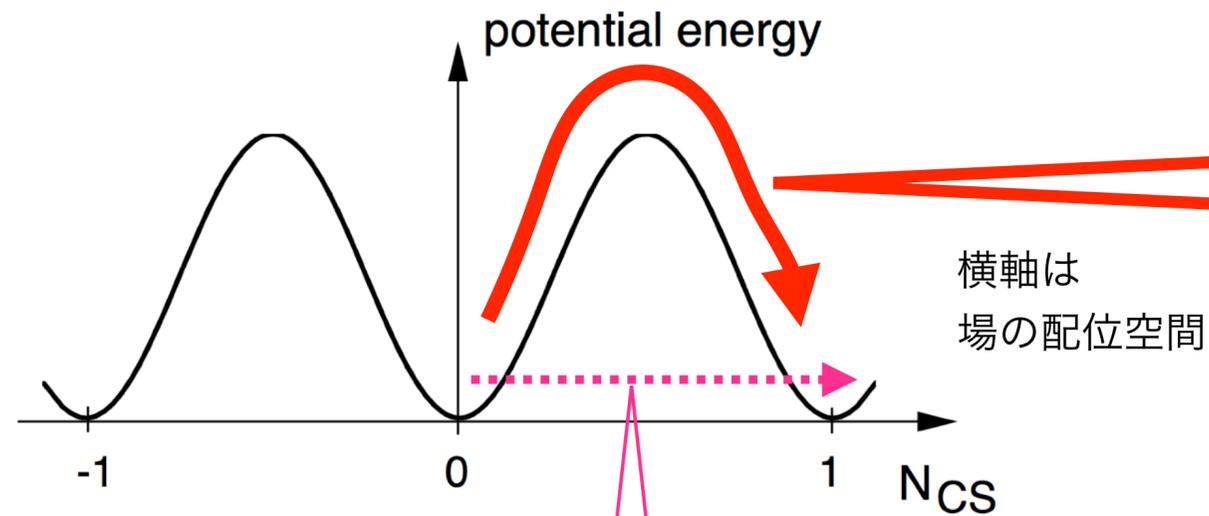


$$\Gamma_{\mathcal{B}, \mathcal{L}} \sim e^{-16\pi^2/g_2^2} \sim 10^{-170}$$

スファレロンについて：

point 4: ゼロ温度ではトンネル効果による遷移は無視できるけど、、、
温度が高いと熱揺らぎでバリアを超えられる！

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + (D_\mu\Phi)^\dagger D^\mu\Phi - \lambda \left(\Phi^\dagger\Phi - \frac{v^2}{2} \right)^2$$



$$\Gamma \sim \begin{cases} e^{-E_{\text{sph}}/T} & T < T_C \\ \alpha^5 T^4 & T > T_C \end{cases}$$

$$\Gamma_{\beta, \mathcal{L}} \sim e^{-16\pi^2/g_2^2} \sim 10^{-170}$$

バリオン数の計算の具体例

バリオン数の計算の具体例

目標: $\frac{n_B}{s} \Big|_{\text{obs}} \simeq 0.87 \times 10^{-10}$

``Leptogenesis in inflaton decay” の場合

[cf. Asaka, KH, Kawasaki, Yanagida, '99]

$$\frac{n_B}{s} = \frac{n_{\text{inf}}}{s} \times \frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} \times \frac{n_L}{n_{N_R}} \times \frac{n_B}{n_L}$$

バリオン数の計算の具体例

目標: $\left. \frac{n_B}{s} \right|_{\text{obs}} \simeq 0.87 \times 10^{-10}$

``Leptogenesis in inflaton decay” の場合

[cf. Asaka, KH, Kawasaki, Yanagida, '99]

$$\frac{n_B}{s} = \frac{n_{\text{inf}}}{s} \times \frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} \times \frac{n_L}{n_{N_R}} \times \frac{n_B}{n_L}$$

inflatonの数

再加熱温度

$$\frac{n_{\text{inf}}}{s} = \frac{3}{4} \cdot \frac{T_R}{m_{\text{inf}}}$$

インフレーション模型
によって決まる。

inflaton の質量

バリオン数の計算の具体例

目標: $\frac{n_B}{s} \Big|_{\text{obs}} \simeq 0.87 \times 10^{-10}$

``Leptogenesis in inflaton decay” の場合

[cf. Asaka, KH, Kawasaki, Yanagida, '99]

$$\frac{n_B}{s} = \frac{n_{\text{inf}}}{s} \times \frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} \times \frac{n_L}{n_{N_R}} \times \frac{n_B}{n_L}$$

inflaton 1 個あたり右巻きニュートリノ何個作られるか

右巻き
ニュートリノの数 \longrightarrow $\frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} = 2 \cdot \text{Br}(\text{inflaton} \rightarrow N_R N_R)$

inflatonの数 \longrightarrow n_{inf}

単に崩壊分岐比

2体崩壊で作られると仮定

バリオン数の計算の具体例

目標: $\frac{n_B}{s} \Big|_{\text{obs}} \simeq 0.87 \times 10^{-10}$

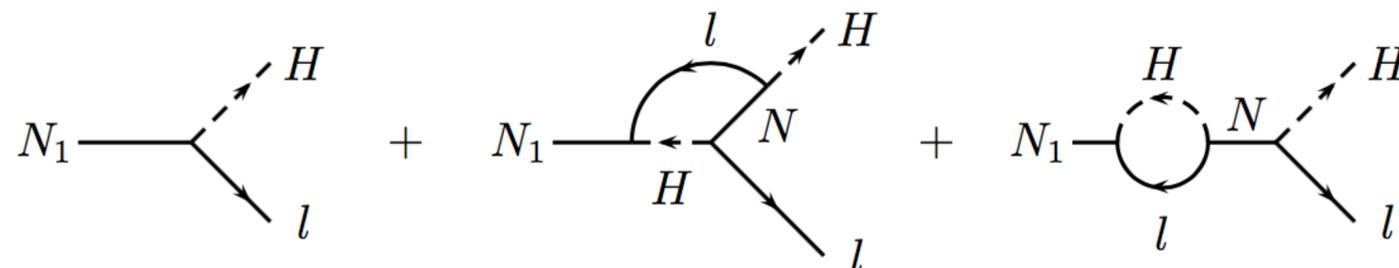
“Leptogenesis in inflaton decay” の場合

[cf. Asaka, KH, Kawasaki, Yanagida, '99]

$$\frac{n_B}{s} = \frac{n_{\text{inf}}}{s} \times \frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} \times \frac{n_L}{n_{N_R}} \times \frac{n_B}{n_L}$$

右巻きニュートリノ 1 個あたりどれだけレプトン数が作られるか

$$\frac{n_L}{n_{N_R}} = \frac{\Gamma(N_R \rightarrow \ell H) - \Gamma(N_R \rightarrow \bar{\ell} H^*)}{\Gamma(N_R \rightarrow \text{all})} \equiv \epsilon_1$$



バリオン数の計算の具体例

目標: $\left. \frac{n_B}{s} \right|_{\text{obs}} \simeq 0.87 \times 10^{-10}$

“Leptogenesis in inflaton decay” の場合

[cf. Asaka, KH, Kawasaki, Yanagida, '99]

$$\frac{n_B}{s} = \frac{n_{\text{inf}}}{s} \times \frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} \times \frac{n_L}{n_{N_R}} \times \frac{n_B}{n_L}$$

右巻きニュートリノ 1 個あたりどれだけレプトン数が作られるか

$$\frac{n_L}{n_{N_R}} = \frac{\Gamma(N_R \rightarrow \ell H) - \Gamma(N_R \rightarrow \bar{\ell} H^*)}{\Gamma(N_R \rightarrow \text{all})} \equiv \epsilon_1$$

$$= \dots = \frac{3}{16\pi} \frac{M_R}{\langle H \rangle^2} m_\nu \delta_{\text{eff}}$$

右巻きニュートリノ質量
(左巻き)ニュートリノ質量
effective CP phase

Higgs VEV = 174 GeV

[cf. KH, Murayama, Yanagida, '01, Davidson, Ibarra, '02]

バリオン数の計算の具体例

目標: $\frac{n_B}{s} \Big|_{\text{obs}} \simeq 0.87 \times 10^{-10}$

``Leptogenesis in inflaton decay” の場合

[cf. Asaka, KH, Kawasaki, Yanagida, '99]

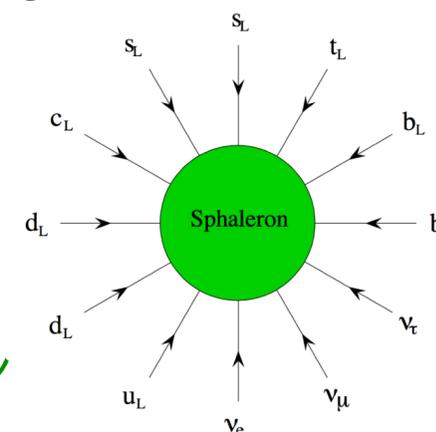
$$\frac{n_B}{s} = \frac{n_{\text{inf}}}{s} \times \frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} \times \frac{n_L}{n_{N_R}} \times \frac{n_B}{n_L}$$

作られたレプトン数のうちバリオン数に移る割合

$$\frac{n_B}{n_L} = \frac{8N_f + 4}{22N_f + 13} = \frac{28}{79} \simeq 0.35$$

[Khlebnikov, Shaposhnikov, '88,
Hurvey, Turner, '90]

スファレロン



バリオン数の計算の具体例

目標: $\left. \frac{n_B}{s} \right|_{\text{obs}} \simeq 0.87 \times 10^{-10}$

``Leptogenesis in inflaton decay” の場合

[cf. Asaka, KH, Kawasaki, Yanagida, '99]

$$\frac{n_B}{s} = \frac{n_{\text{inf}}}{s} \times \frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} \times \frac{n_L}{n_{N_R}} \times \frac{n_B}{n_L}$$

全部合わせると・・・

$$\begin{aligned} &\simeq 2.5 \times 10^{-10} \cdot \left(\frac{m_{\nu 3}}{0.05 \text{ eV}} \right) \delta_{\text{eff}}^{\text{effective CP phase}} \\ &\times \text{Br}_{(\text{inf} \rightarrow NN)} \cdot \left(\frac{T_R}{10^7 \text{ GeV}} \right) \left(\frac{2m_{N_R}}{m_{\text{inf}}} \right) \end{aligned}$$

崩壊分岐比 再加熱温度 右巻きニュートリノ質量 inflaton の質量

バリオン数の計算の具体例

目標: $\frac{n_B}{s} \Big|_{\text{obs}} \simeq 0.87 \times 10^{-10}$

“Leptogenesis in inflaton decay” の場合

[cf. Asaka, KH, Kawasaki, Yanagida, '99]

$$\frac{n_B}{s} = \frac{n_{\text{inf}}}{s} \times \frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} \times \frac{n_L}{n_{N_R}} \times \frac{n_B}{n_L}$$

全部合わせて・・・

$$\simeq 2.5 \times 10^{-10} \cdot \left(\frac{m_{\nu 3}}{0.05 \text{ eV}} \right) \delta_{\text{eff}} \times \text{Br}_{(\text{inf} \rightarrow NN)} \cdot \left(\frac{T_R}{10^7 \text{ GeV}} \right) \left(\frac{2m_{N_R}}{m_{\text{inf}}} \right)$$

effective CP phase

右巻きニュートリノ質量

崩壊分岐比 再加熱温度 inflaton の質量

適切なパラメータを持って来れば観測値を説明出来る。