

[チュートリアル]

レプトジェネシス (とニュートリノレス二重ベータ崩壊)

浜口幸一 (東京大学)

オンライン研究会

「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊とその周辺」

2021年2月12日

オープニングのスライドより

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊とその周辺

$0\nu\beta\beta$ half-life

$$\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu}} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 |m_{\nu ee}|^2$$

注：この式が適用されない場合もあります。
(明日の講演でその辺の話も出てくるかも?)

月曜の講演で!

実験で制限。発見を目指す。

例) $T_{1/2}^{0\nu}(^{136}\text{Xe}) > 1.07 \times 10^{26}\text{yrs}$

[KamLAND-Zen, 2016]

原子核行列要素

素粒子模型
ニュートリノ模型

このトーク

宇宙の
物質 > 反物質
の起源

本研究会で分野を超えた情報交換・研究交流が進めば嬉しいです。

この講演で伝えたいこと

▶ **宇宙の物質反物質非対称性**は標準模型では説明できない。
素粒子物理・宇宙物理の**最大の謎の一つ**。

▶ **レプトジェネシス**によって自然に説明出来る。

(重い)右巻きニュートリノの導入と、**レプトン数を破るマヨラナ質量項**がカギ

$$L = L_{\text{Standard Model}} + \frac{1}{2} \bar{N} (i\gamma^\mu \partial_\mu - M) N - y \bar{N} \ell_L H + h.c.$$

(1) レプトン数非対称性 $\xrightarrow{\text{スファレロン}}$ バリオン数非対称性

(2) (軽い)**ニュートリノ質量**も説明する。(seesaw機構)

▶ **このとき軽い(我々が観測する)ニュートリノもマヨラナになる。**

$\implies 0\nu\beta\beta$ decay !!

もくじ

- $(0\nu\beta\beta)$ 崩壊

- 宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性

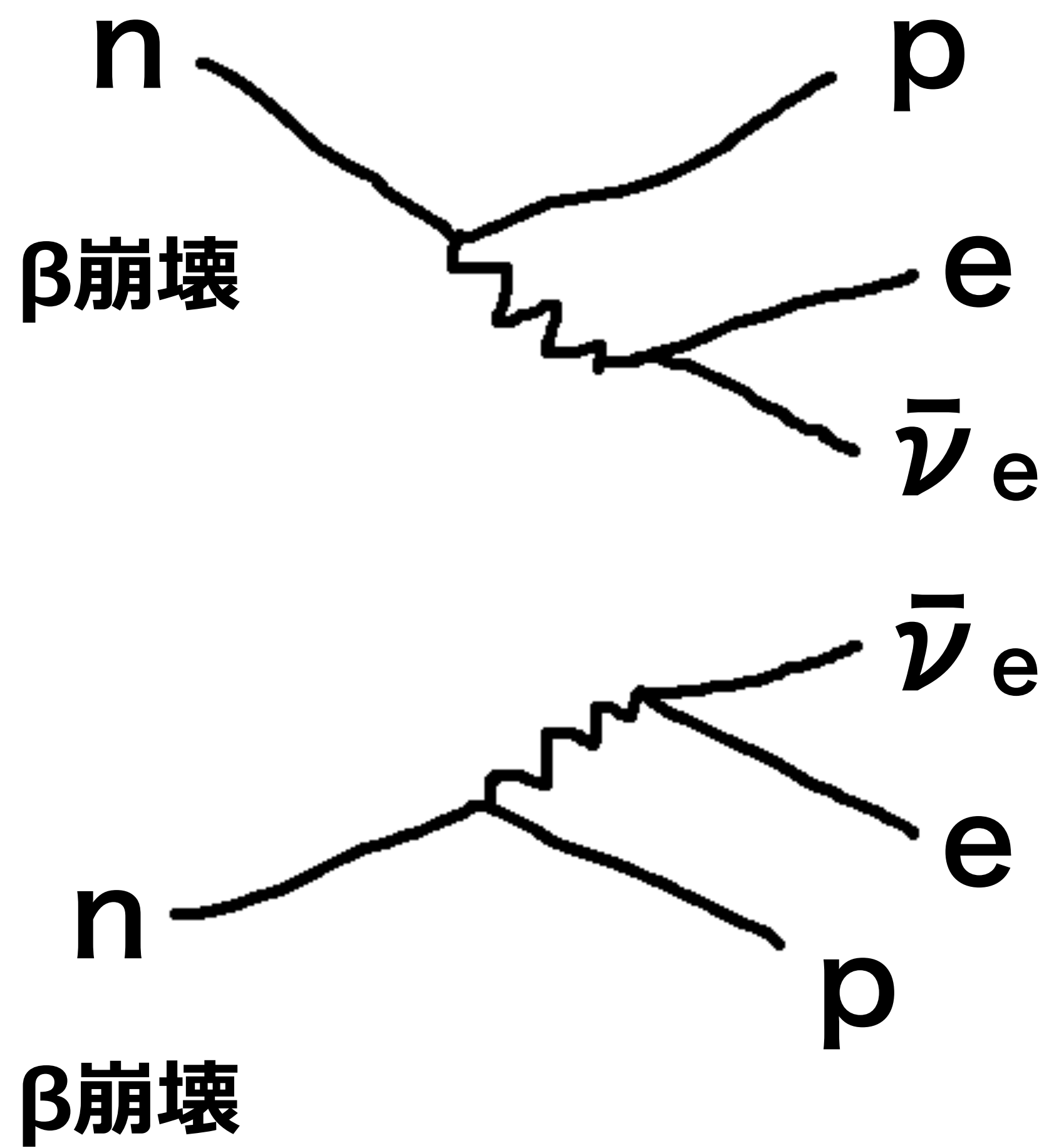
- ▶ 宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性って？
- ▶ いつ作られたのか？
- ▶ 作るには何が必要か？

- レプトジェネシス

- ▶ なぜ「レプト」ジェネシスなのか？
- ▶ 右巻きニュートリノは一人三役
- ▶ いろんなレプトジェネシス
- ▶ 例

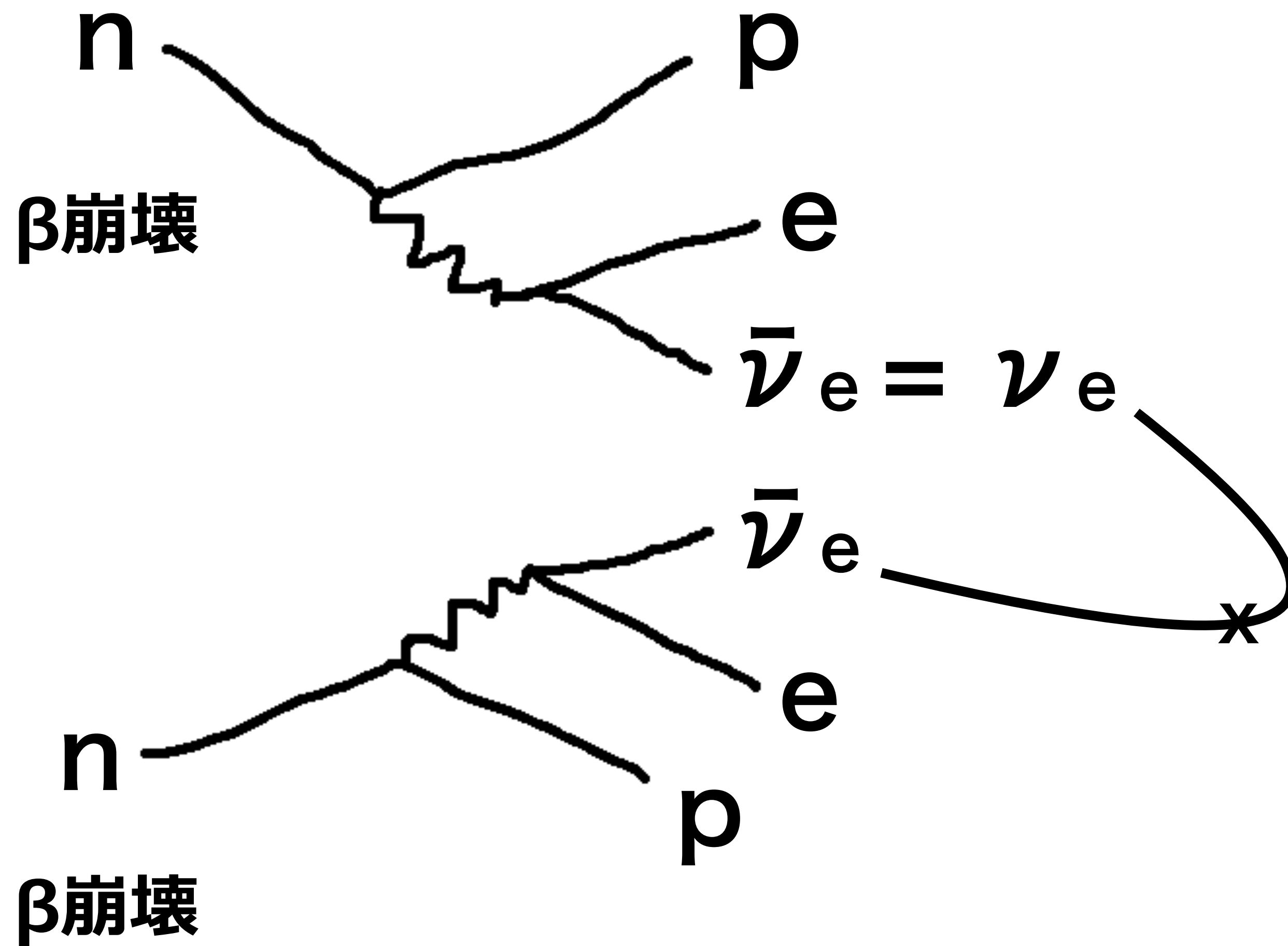
$0\nu\beta\beta$ 崩壊

$0\nu\beta\beta$ 崩壊



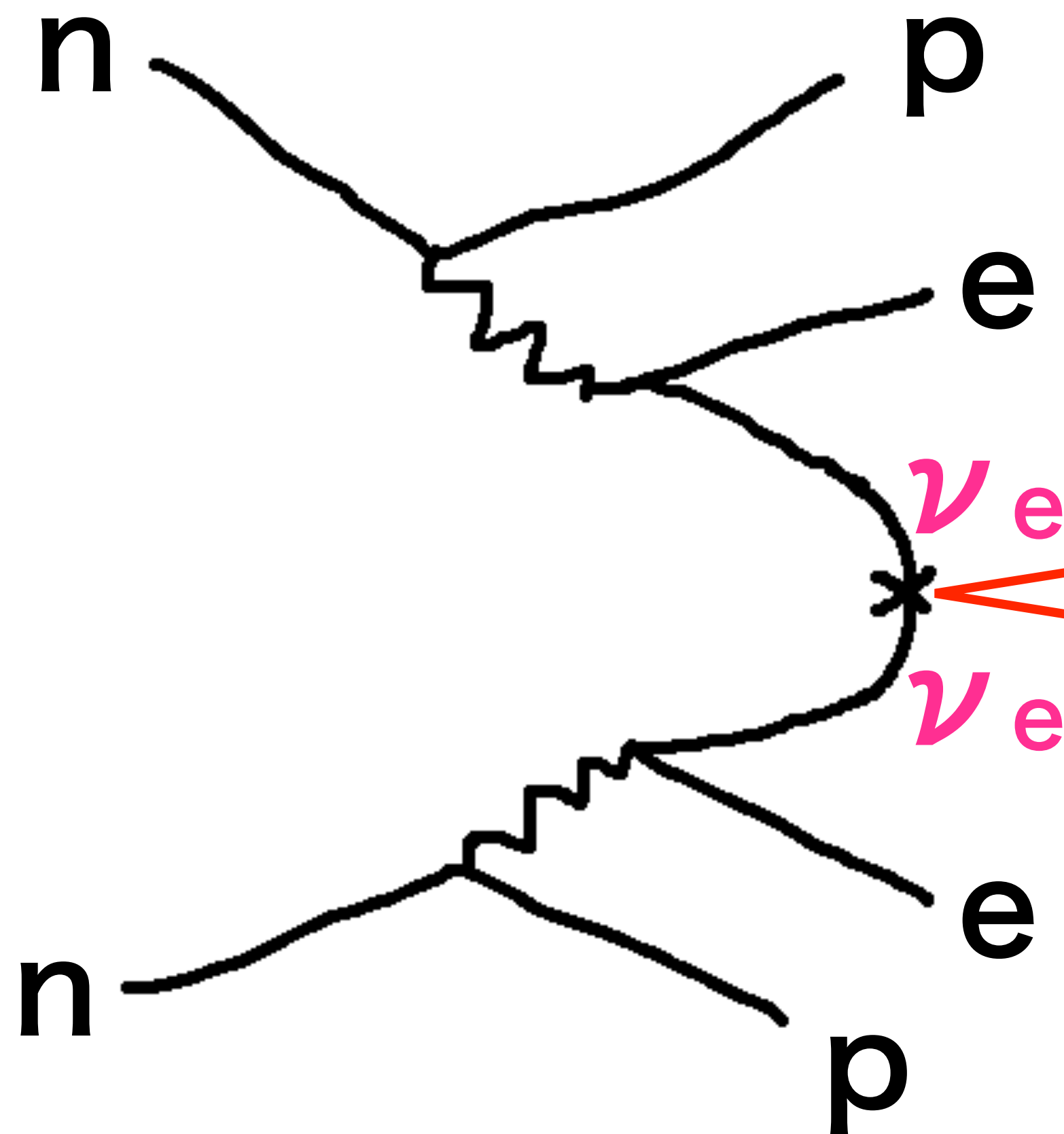
$0\nu\beta\beta$ 崩壊

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・・・

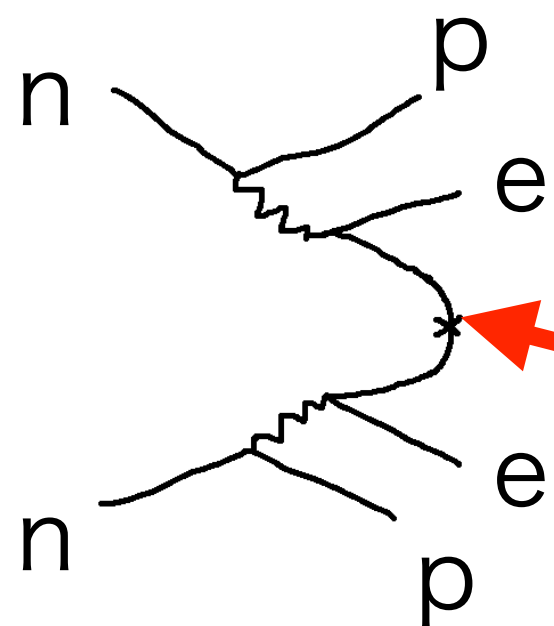


$0\nu\beta\beta$ 崩壊！

$m_{\nu ee}$

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

$0\nu\beta\beta$ 崩壊



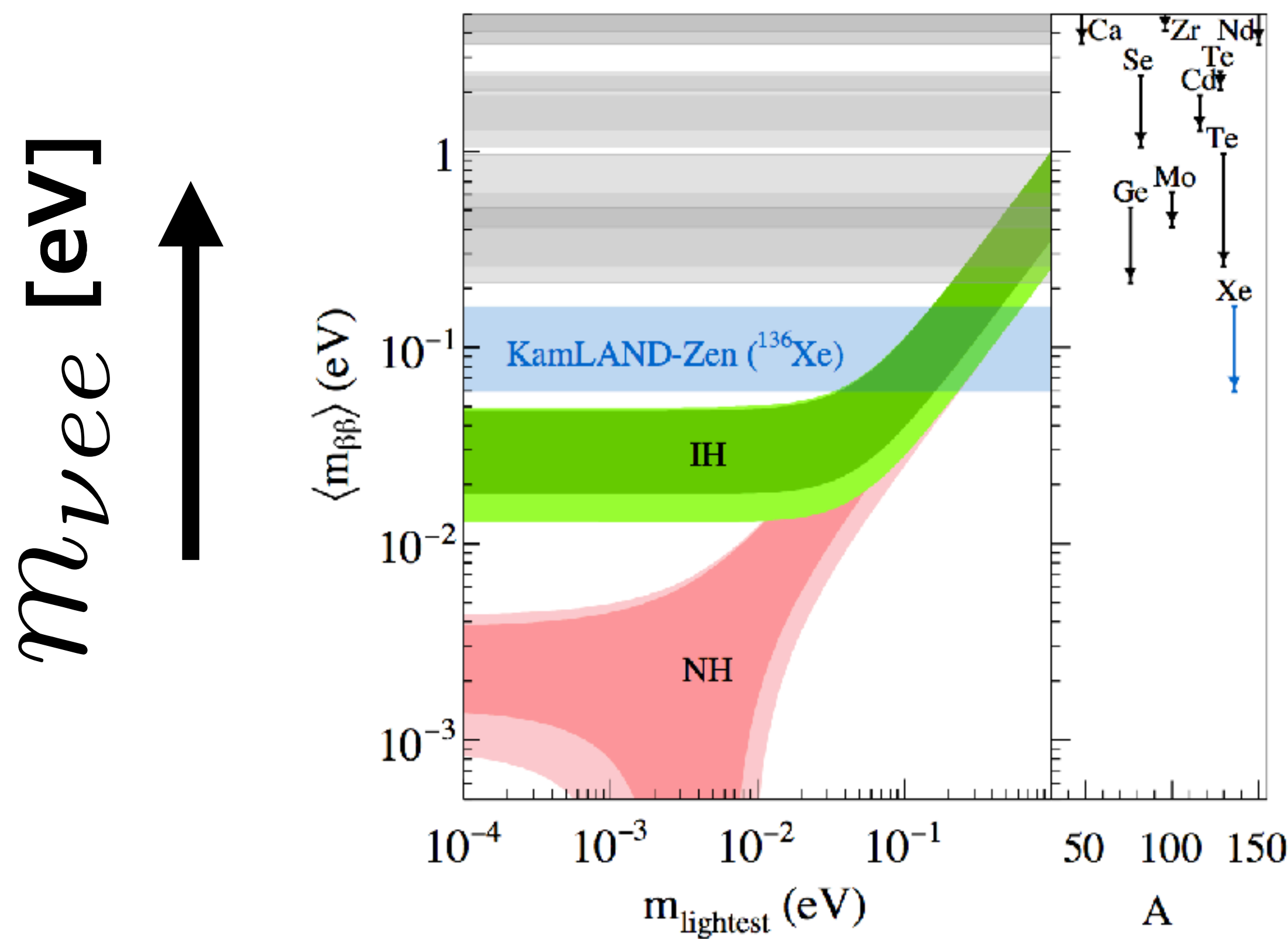
$$|m_{\nu ee}| = \left| m_{\nu 1} |U_{e1}|^2 + m_{\nu 2} |U_{e2}|^2 e^{i\alpha_2} + m_{\nu 3} |U_{e3}|^2 e^{i(\alpha_3 - 2\delta)} \right|$$

$$\simeq \left| 0.69 m_{\nu 1} + 0.29 m_{\nu 2} e^{i\alpha_2} + 0.022 m_{\nu 3} e^{i(\alpha_3 - 2\delta)} \right|$$

$\left\{ \begin{array}{l} \text{mixing} : |U_{ei}| \\ \Delta(\text{mass})^2 : m_{\nu i}^2 - m_{\nu j}^2 \end{array} \right.$

ν 振動で測られている。

Majorana CP phases
(ν 振動では見えない)



KamLAND-Zen
Phys.Rev.Lett.
117 (2016) 109903
arXiv:1605.02889

m_{ν} -lightest [eV]

もくじ

- $(0\nu\beta\beta)$ 崩壊

- 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

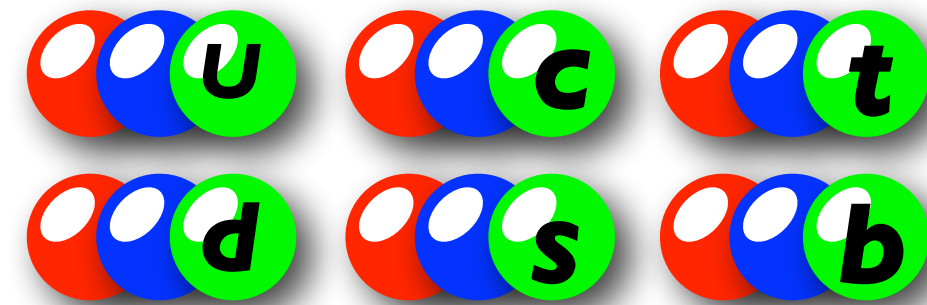
- ▶ なぜ「レプト」ジェネシスなのか？
- ▶ 右巻きニュートリノは一人三役
- ▶ いろんなレプトジェネシス
- ▶ 例

宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性って？

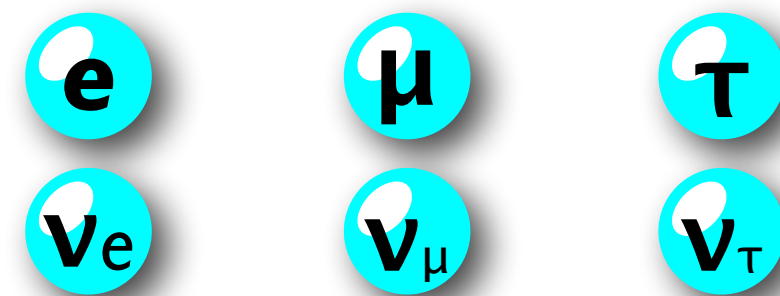
全ての素粒子には **反粒子**が存在する。

粒子

クォーク

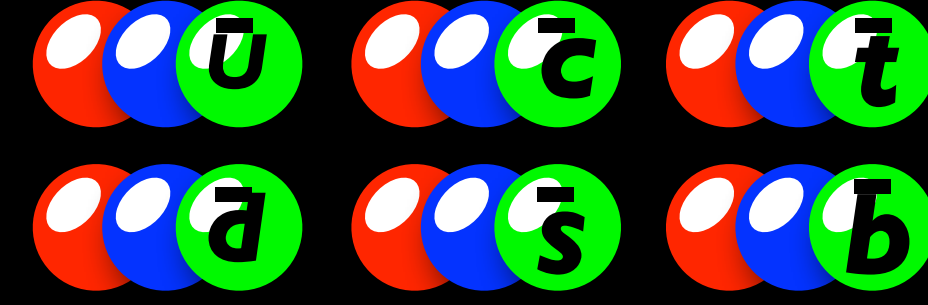


レプトン

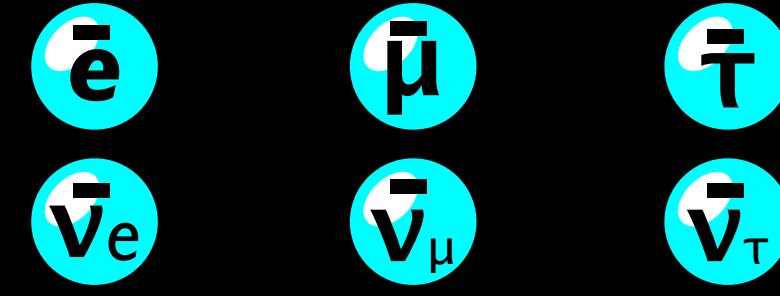


反粒子

反クォーク

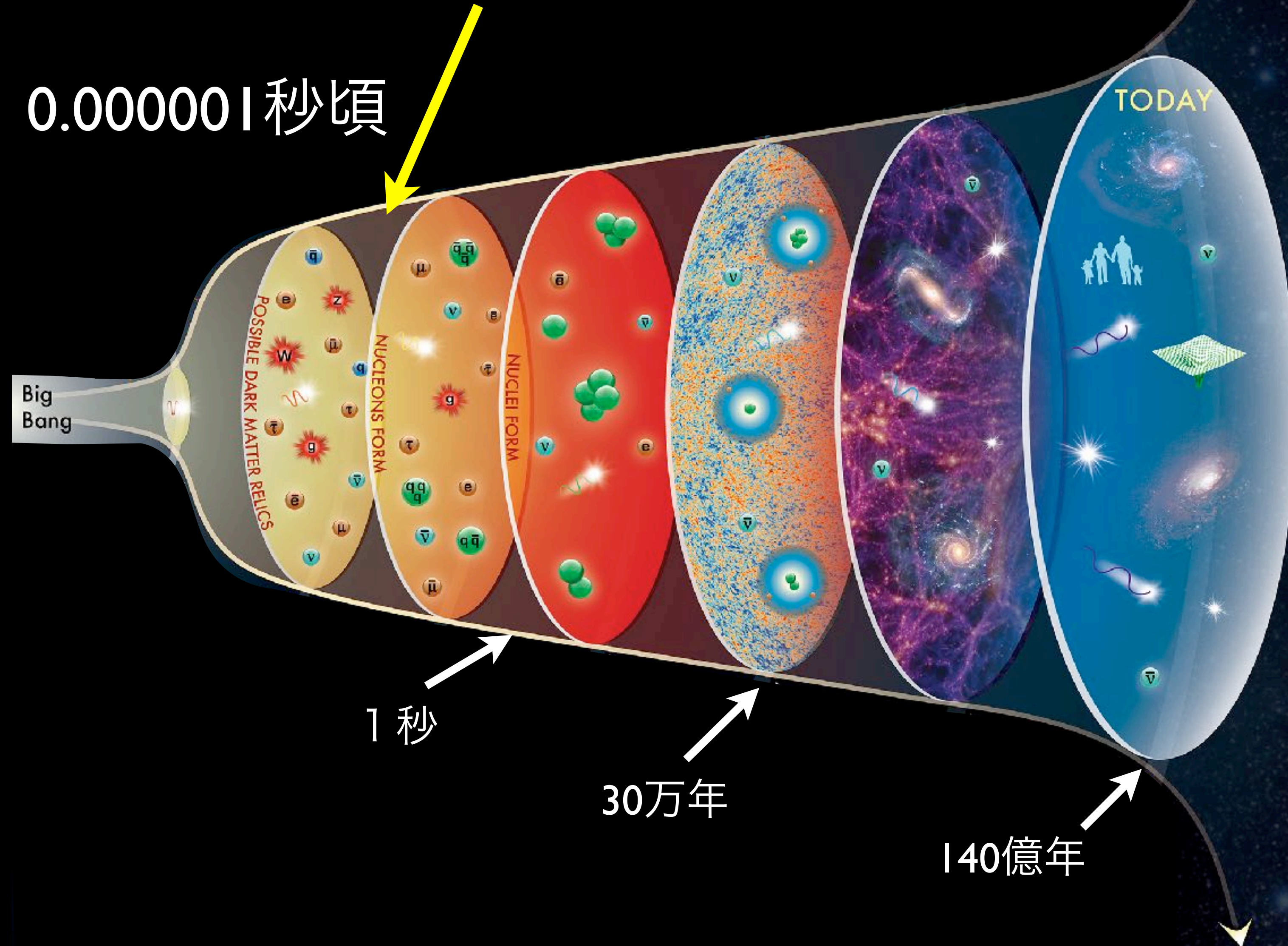


反レプトン



宇宙のずっと始めの頃は . . .

0.000001 秒頃



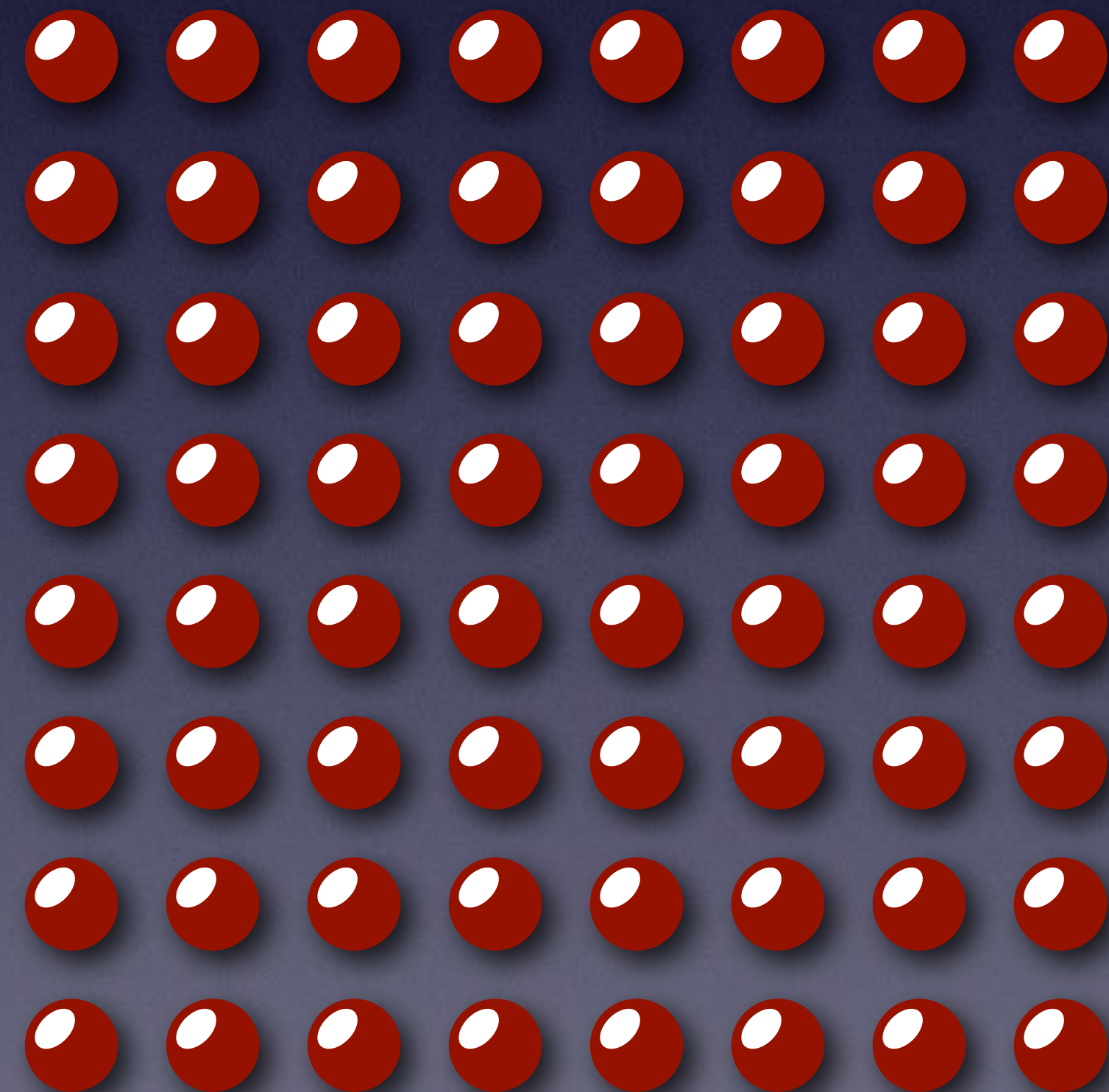
宇宙のずっと始めの頃は・・・
物質と反物質がほぼ同数あった。

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・・・

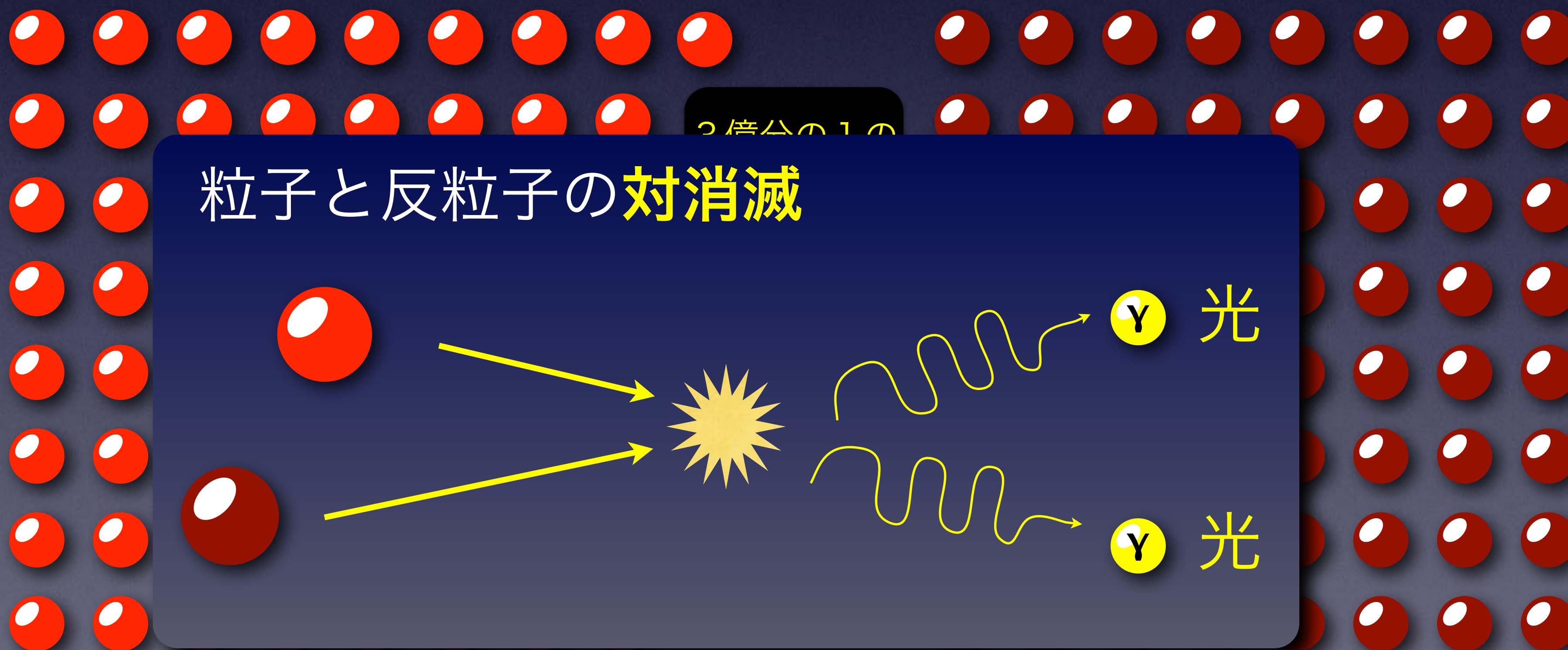
物質と反物質がほぼ同数あった。

やがて温度が冷えてくると**対消滅**して・・・

※ 温度 $T \sim 1 \text{ GeV}$ くらいの頃

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



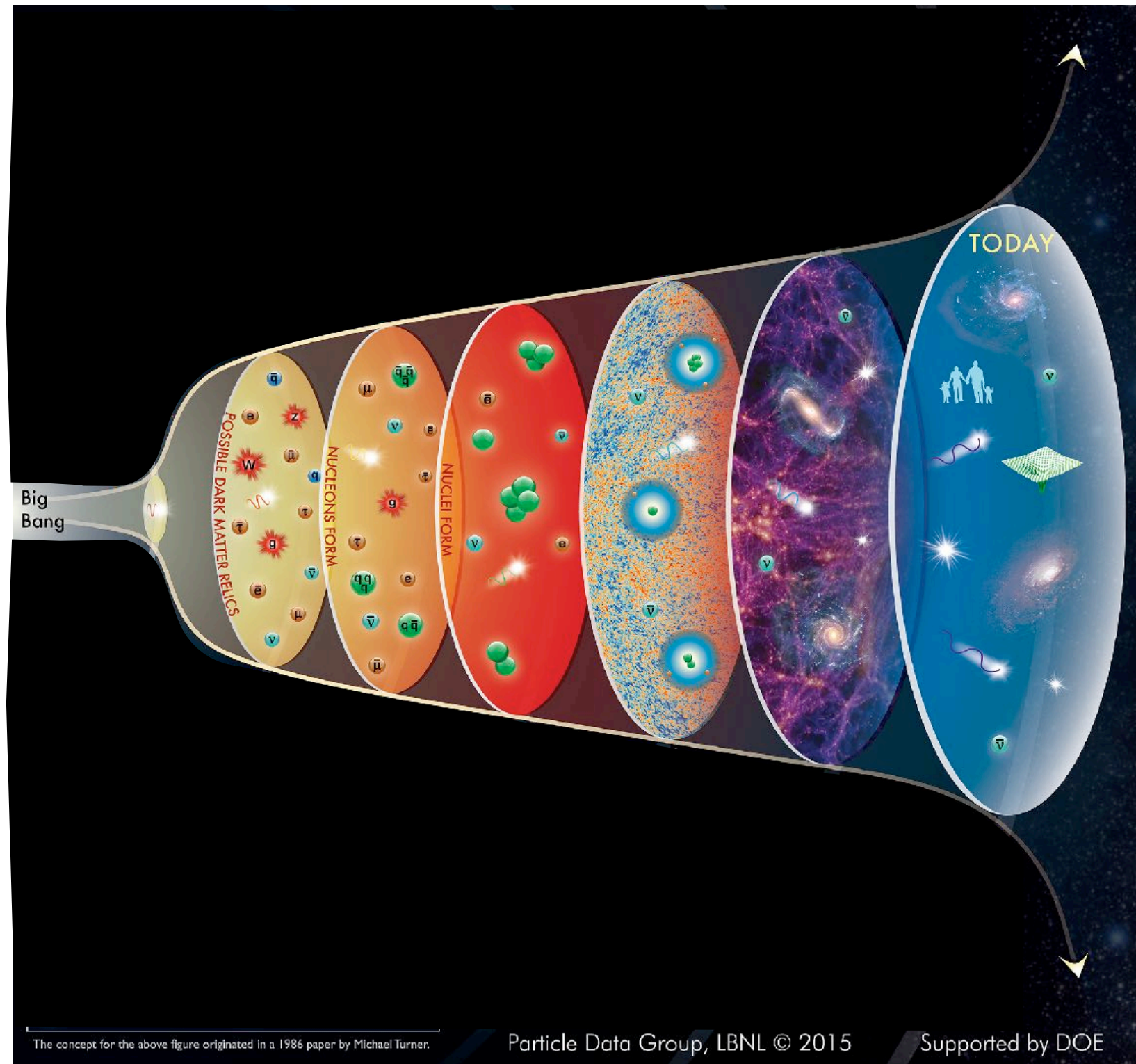
(反物質は消滅)



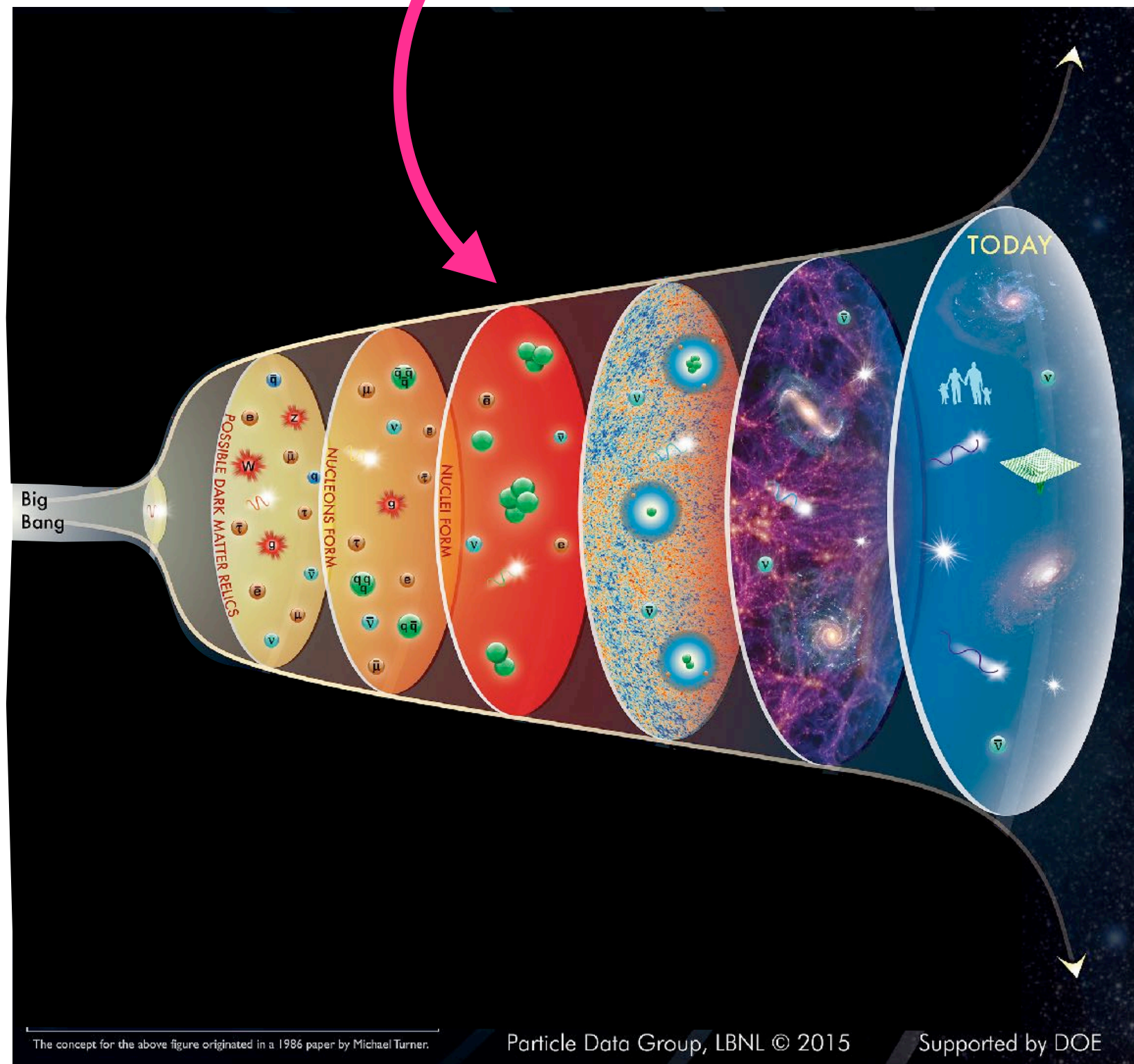
我々は（銀河も地球も人間の体も・・・）

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~)

$$\eta = (5.8 - 6.5) \times 10^{-10} \quad (95\% \text{ CL})$$

$$\longleftrightarrow \Omega_B h^2 = 0.021 - 0.024 \quad (95\% \text{ CL})$$

3

24. Big Bang Nucleosynthesis

[Particle Data Group]

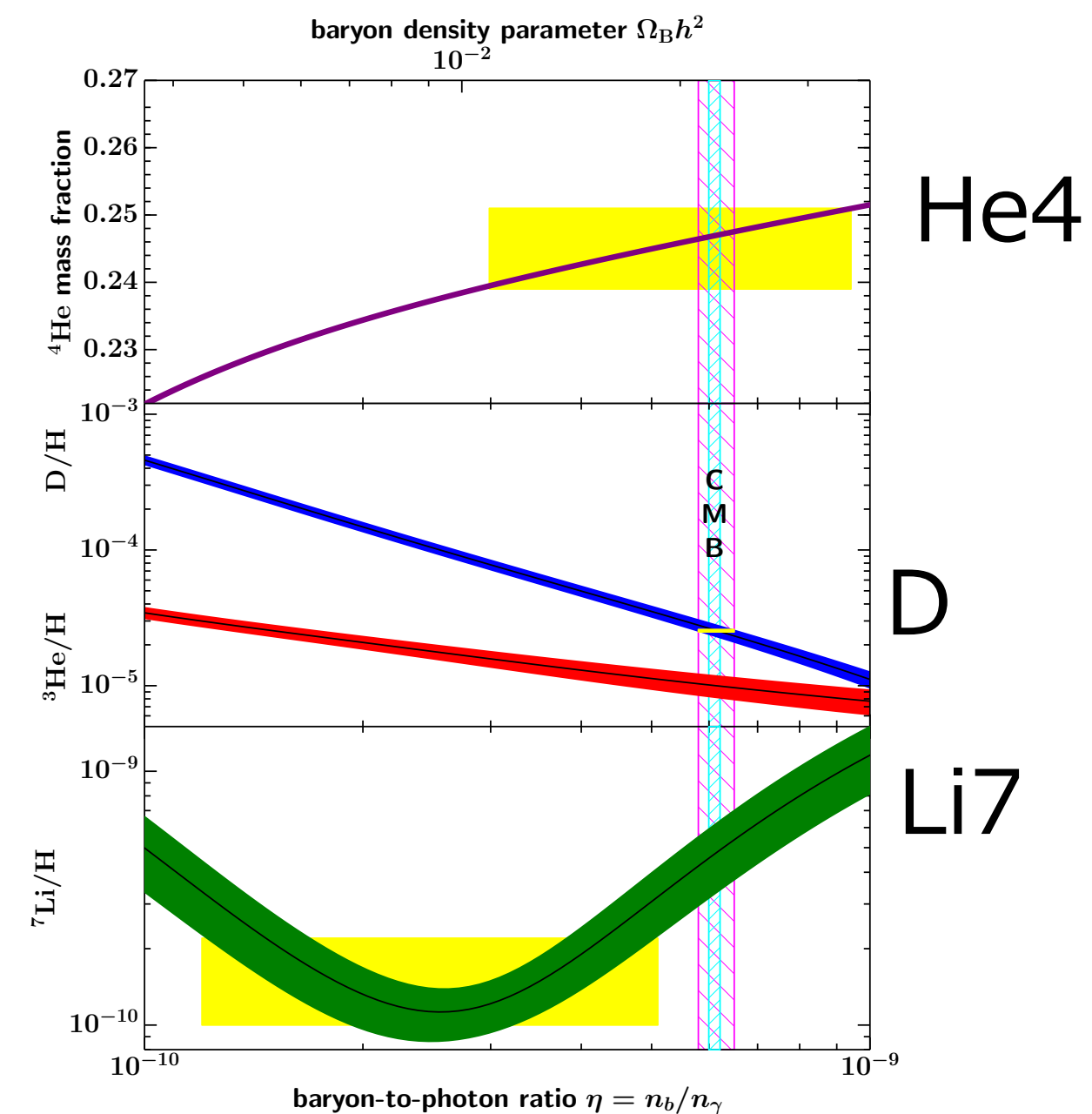
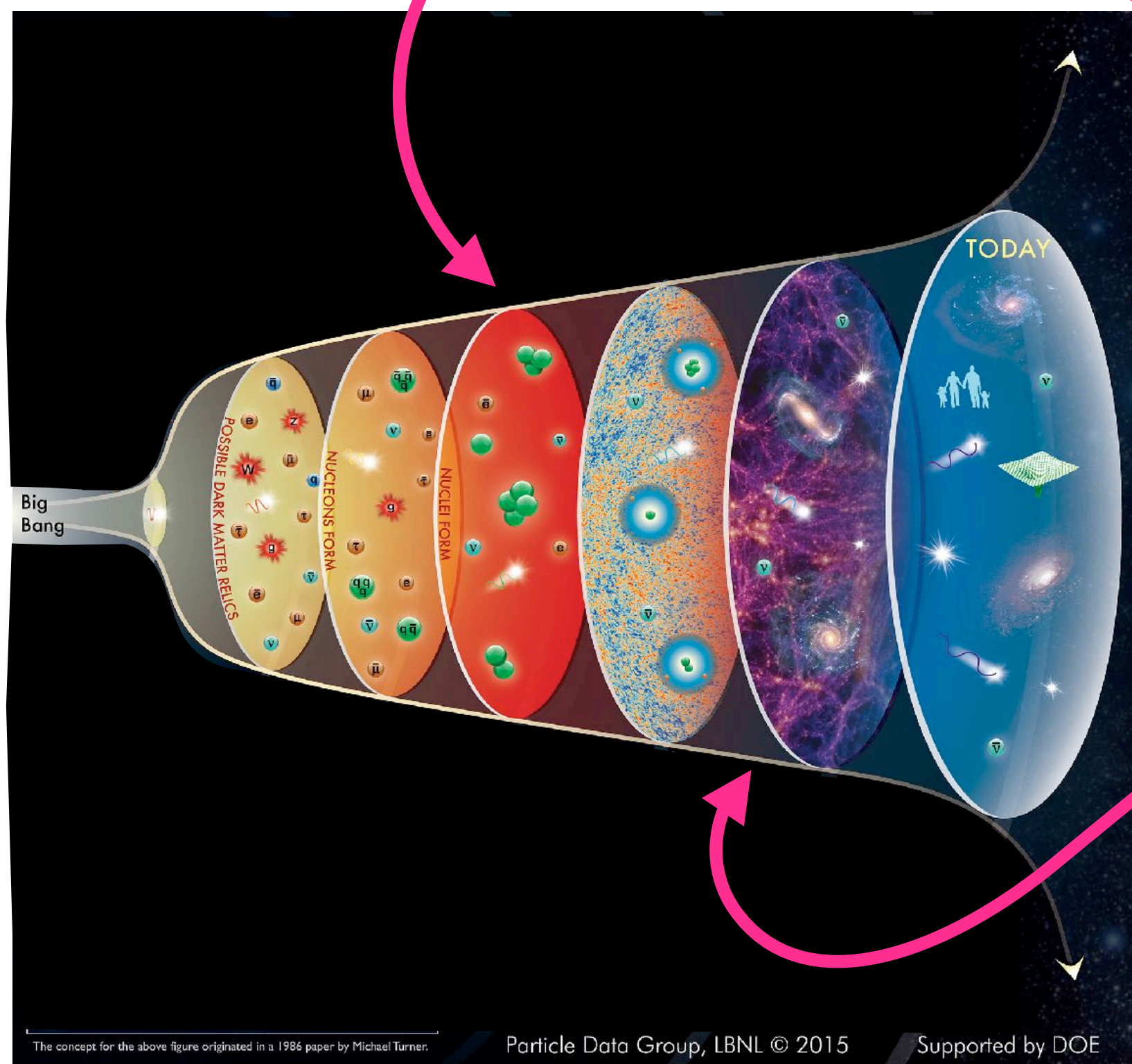


Figure 24.1: The primordial abundances of ${}^4\text{He}$, D , ${}^3\text{He}$, and ${}^7\text{Li}$ as predicted by the standard

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～)

$$\eta = (5.8 - 6.5) \times 10^{-10} \quad (95 \% \text{ CL})$$

$$\longleftrightarrow \Omega_B h^2 = 0.021 - 0.024 \quad (95 \% \text{ CL})$$

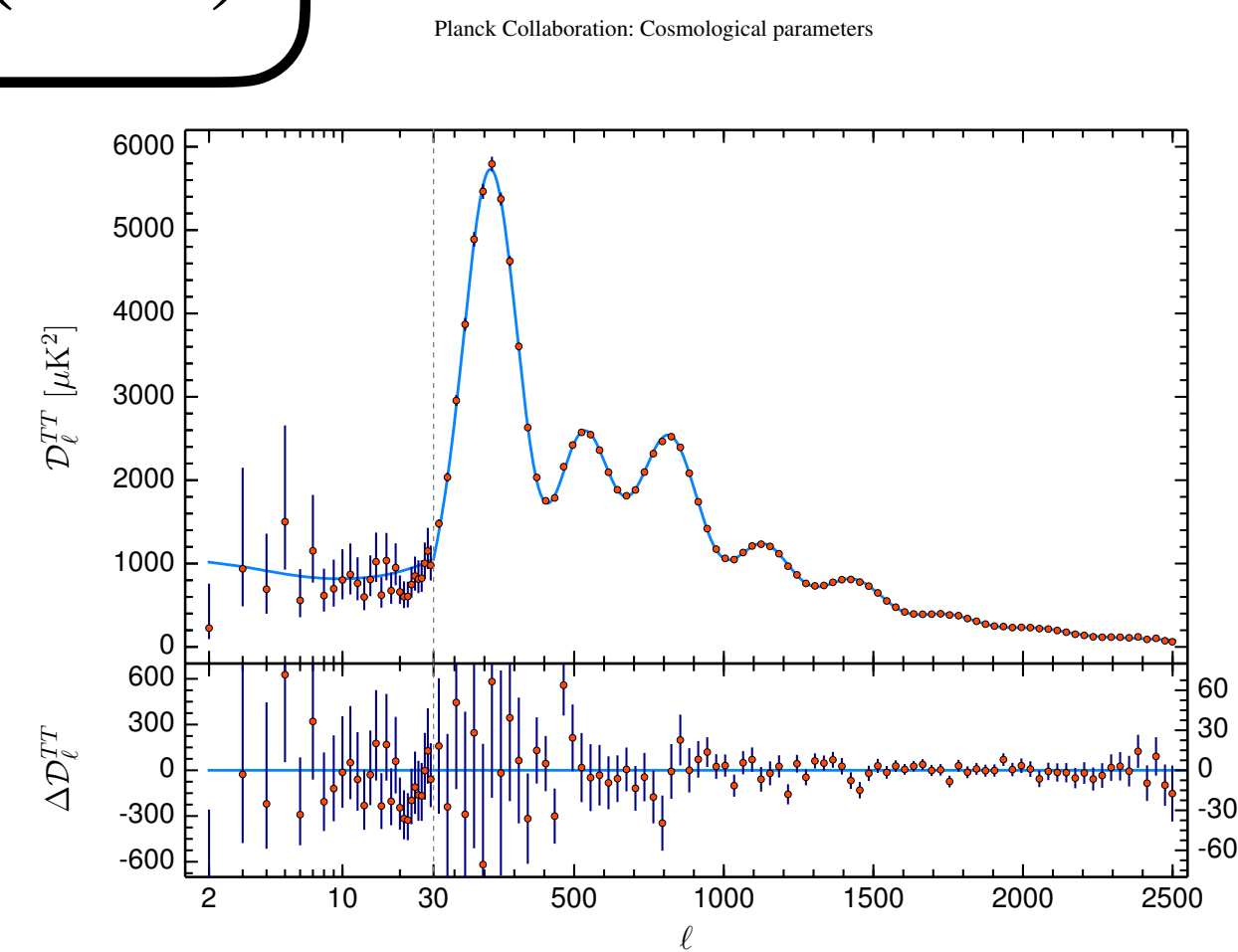
(2) 宇宙背景放射

(宇宙誕生後40万年～)

$$\Omega_B h^2 = 0.0224 \pm 0.0001 \quad (68\%)$$

両者は consistent
(2)の方が高精度

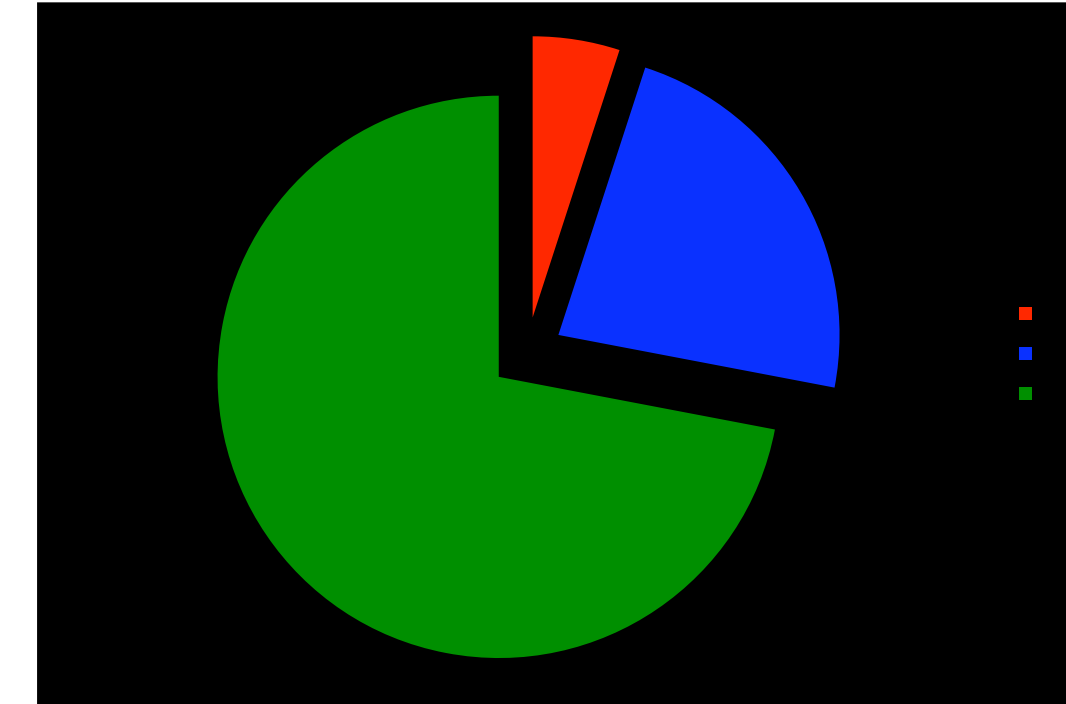
[Planck 2018]



オマケ：バリオン数の3通りの数え方

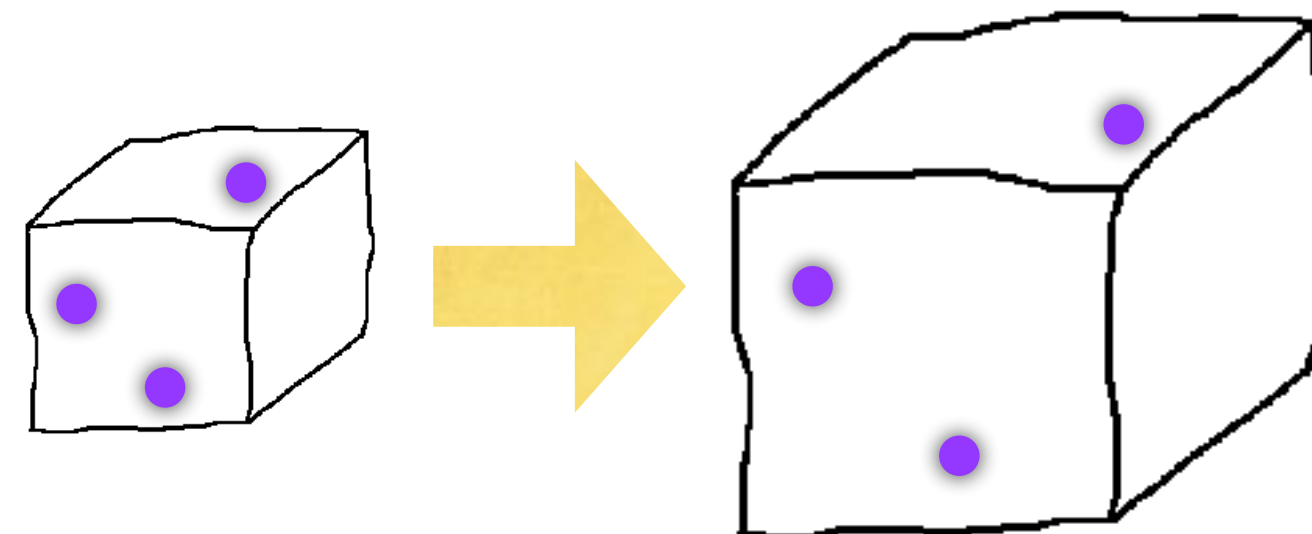
$$\Omega_B h^2 \simeq 0.0224$$

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



※ でも初期宇宙を議論するときには、これだとちょっと不便

- ・理由 (1) 温度 $> 1 \text{ GeV}$ では対消滅、対生成が起きる。
→ $N_B = N_b$ (バリオン数) - $N_{\bar{b}}$ (反バリオン数) で数えておけば、対消滅・対生成しても保存する。
- ・理由 (2) 「密度」だと宇宙膨張と共に変化する。



→ 宇宙膨張の効果を規格化しておけばよろしい。

オマケ：バリオン数の3通りの数え方

$$\Omega_B h^2 \simeq 0.0224$$

Ω_B = (現在のバリオン質量密度) / (宇宙の臨界密度)

\simeq 全宇宙のエネルギーに占めるバリオンの割合 $\simeq 0.05$

$h \simeq 0.67$ (規格化されたハッブル定数)

$$\longleftrightarrow \eta = \frac{n_B}{n_\gamma} \simeq 6.1 \times 10^{-10}$$

$n_B = n_b$ (バリオン密度) $- n_{\bar{b}}$ (反バリオン密度) = 「バリオン数密度」

n_γ = 光子数密度

..... こうしておけば、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) 厳密に言うとこれも少し不便。

オマケ：バリオン数の3通りの数え方

$$\Omega_B h^2 \simeq 0.0224$$

Ω_B = (現在のバリオン質量密度) / (宇宙の臨界密度)

\simeq 全宇宙のエネルギーに占めるバリオンの割合 $\simeq 0.05$

$h \simeq 0.67$ (規格化されたハッブル定数)

$$\longleftrightarrow \eta = \frac{n_B}{n_\gamma} \simeq 6.1 \times 10^{-10}$$

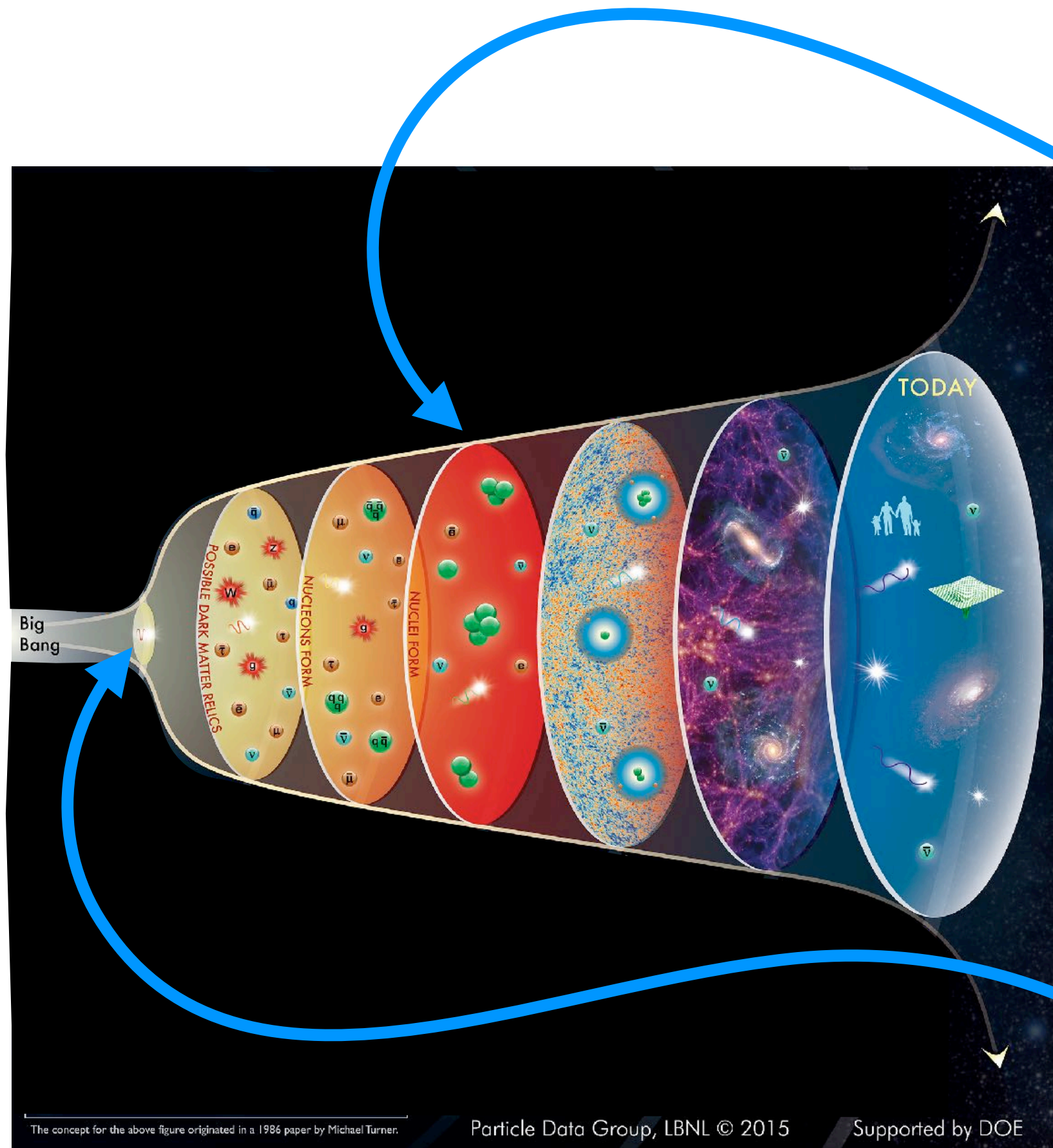
$$\longleftrightarrow \frac{n_B}{s} \simeq 0.87 \times 10^{-10}$$

$n_B = n_b$ (バリオン密度) $- n_{\bar{b}}$ (反バリオン密度) = 「バリオン数密度」

s = エントロピー密度 宇宙膨張に対して n_B/s は不変。

宇宙のバリオン数非対称性はいつ作られたのか？

宇宙のバリオン数非対称性はいつ作られたのか？



遅くと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は難しいので
もっと前 (高温時) に作られたと思っている。

インフレーションよりは後

インフレーションにより、 $(e^{-(40\sim 60)})^3$ くらいの factor で
何もかも薄められてしまうので。

宇宙のバリオン数非対称性はいつ作られたのか？

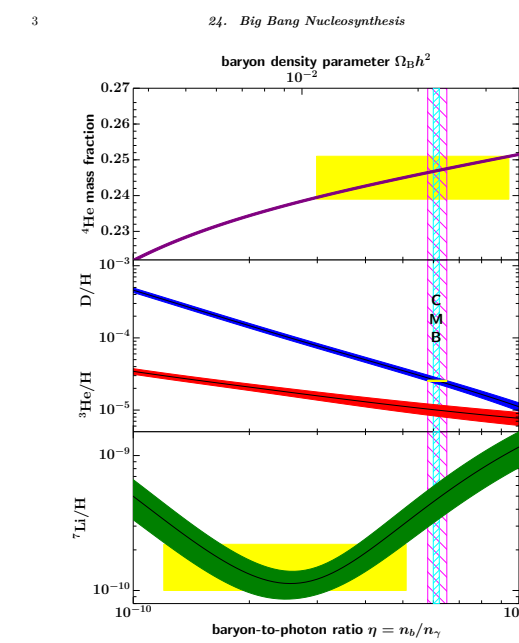
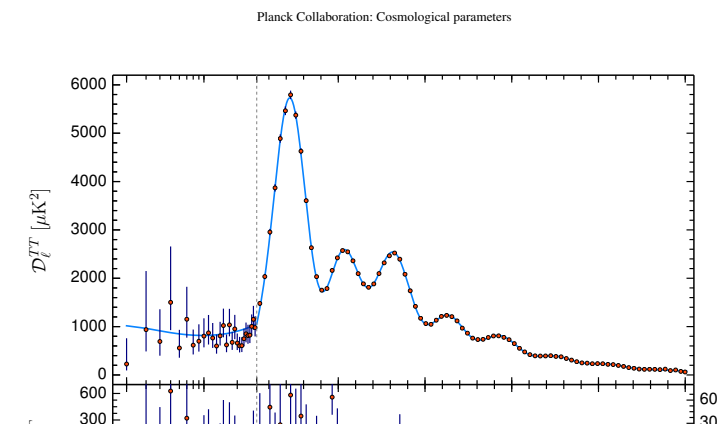
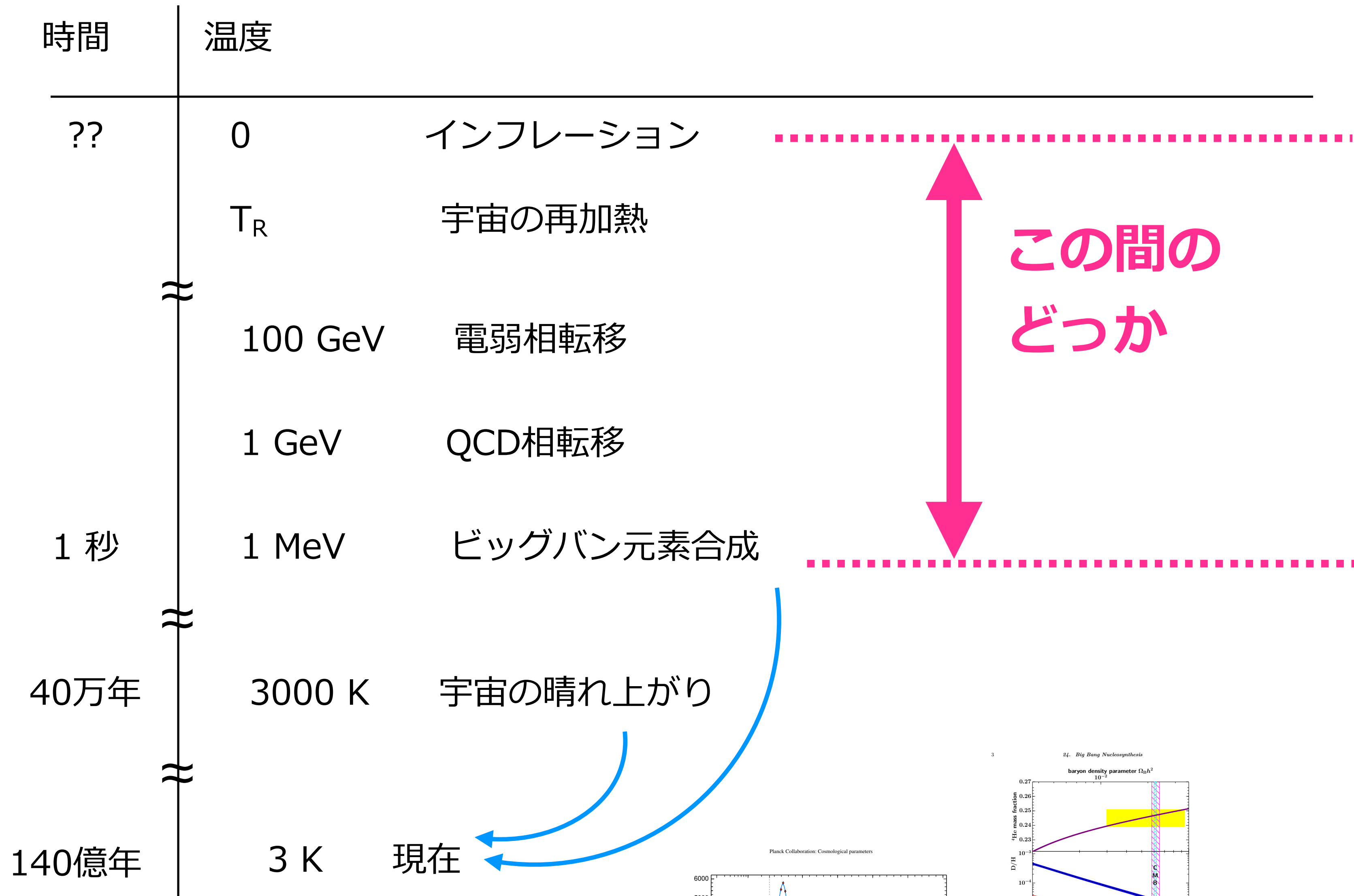


Figure 24.1: The primordial abundances of ^4He , D , ^3He , and ^7Li as predicted by the standard

宇宙のバリオン数非対称性を作るには何が必要か？

宇宙のバリオン数非対称性を作るには何が必要か？

サハロフの3条件 [Sakharov,'67]

- バリオン数の破れ

もしあらゆる素過程でバリオン数が保存してたら $n_B = 0 \longrightarrow n_B > 0$ は無理。

宇宙のバリオン数非対称性を作るには何が必要か？

サハロフの3条件 [Sakharov,'67]

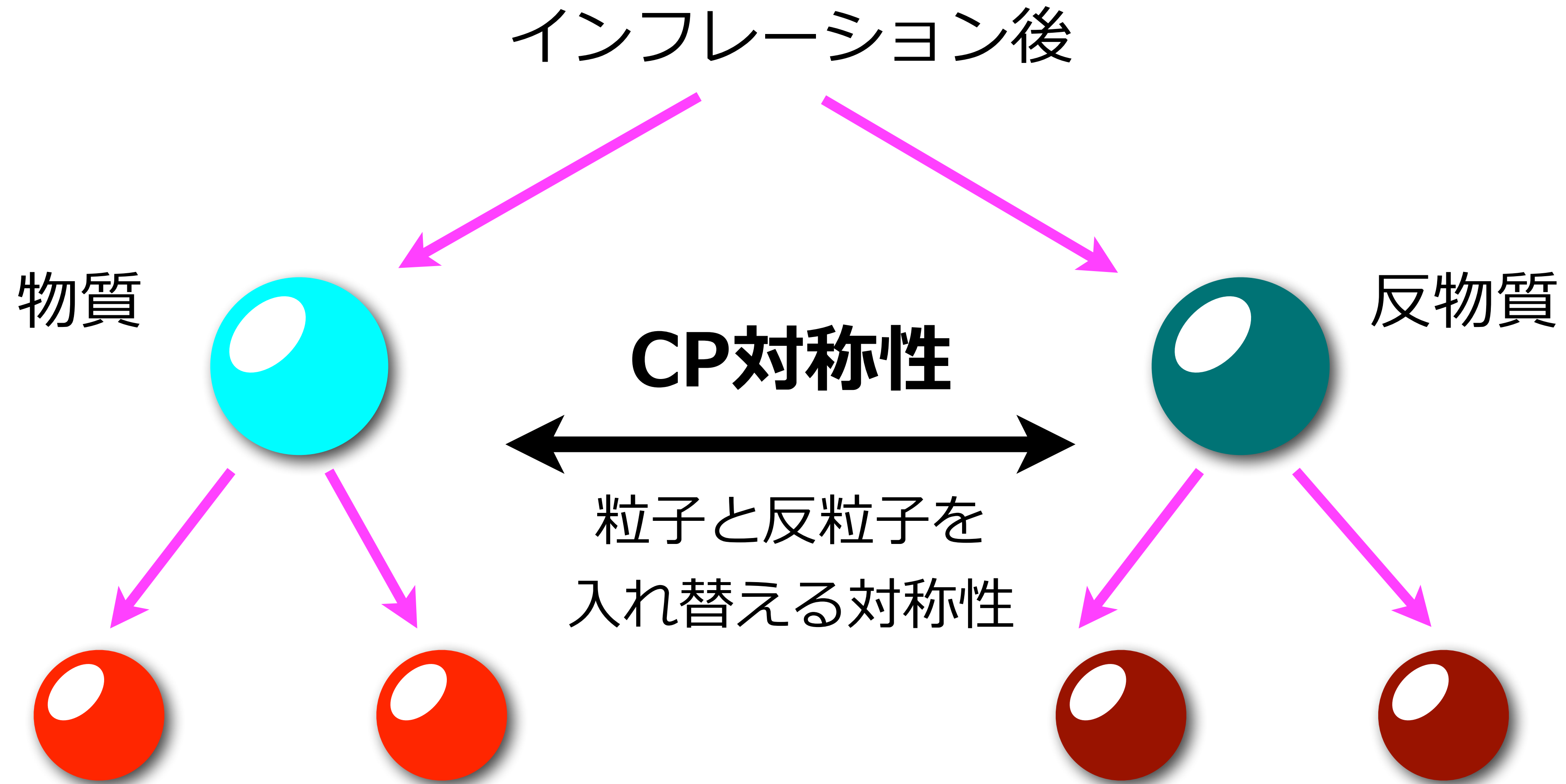
- バリオン数の破れ

もしあらゆる素過程でバリオン数が保存してたら $n_B = 0 \longrightarrow n_B > 0$ は無理。

- C, CPの破れ

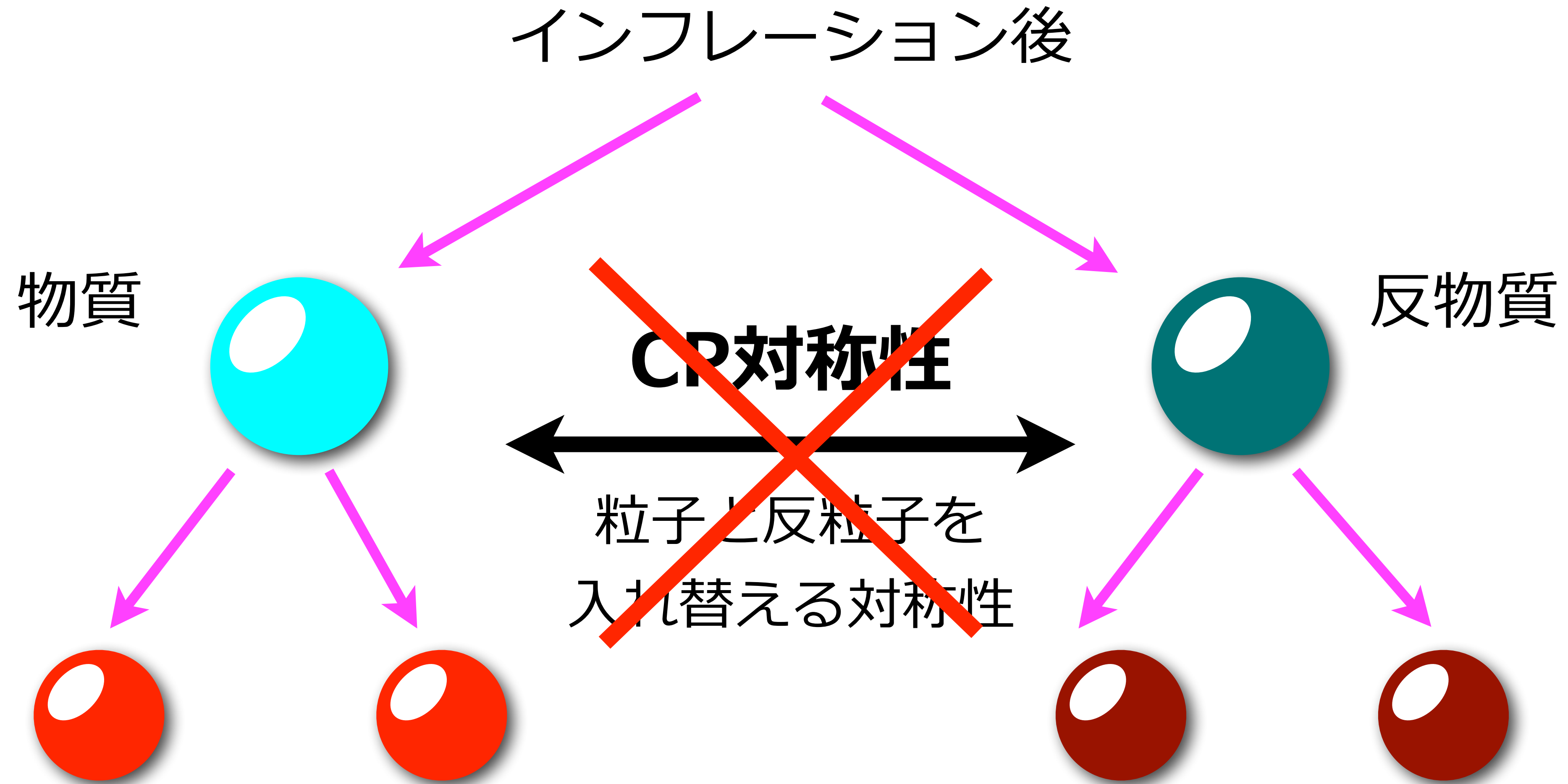
もしあらゆる素過程で CP が保存してたらやっぱり $n_B = 0 \longrightarrow n_B > 0$ は無理。

宇宙のバリオン数非対称性を作るには何が必要か？



CP対称性 がある限り、物質と反物質の差は出ない。

宇宙のバリオン数非対称性を作るには何が必要か？



CP対称性が破れていれば、物質と反物質の差が出る。

宇宙のバリオン数非対称性を作るには何が必要か？

サハロフの3条件 [Sakharov,'67]

- バリオン数の破れ

もしあらゆる素過程でバリオン数が保存してたら $n_B = 0 \longrightarrow n_B > 0$ 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 $n_B = 0 \longrightarrow n_B > 0$ は無理。

宇宙のバリオン数非対称性を作るには何が必要か？

サハロフの3条件 [Sakharov,'67]

- バリオン数の破れ

もしあらゆる素過程でバリオン数が保存してたら $n_B = 0 \longrightarrow n_B > 0$ 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 $n_B = 0 \longrightarrow n_B > 0$ は無理。

- 非平衡

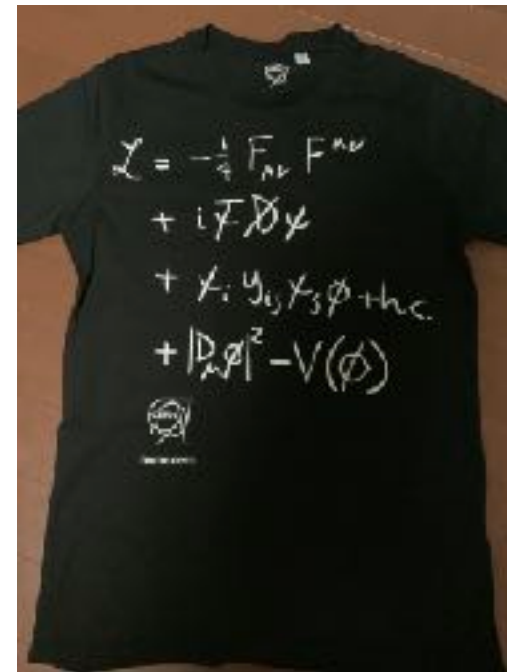
もし $n_B < 0 \longleftrightarrow n_B = 0 \longleftrightarrow n_B > 0$ の反応が熱平衡状態にあったら、平衡点 ($n_B = 0$) に落ちついてしまう。

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

宇宙のバリオン数非対称性を作るには何が必要か？

標準模型は？

	電荷 Charge	スピン Spin	世代 Generation		
			I	II	III
クォーク Quarks	+2/3	1/2	u up	c charm	t top
	-1/3	1/2	d down	s strange	b bottom
レプトン Leptons	-1	1/2	e electron	μ muon	τ tau
	0	1/2	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino



サハロフの3条件

- バリオン数の破れ ← スファレロン (後述)
- C, CPの破れ ← クォークのCKM行列
- 非平衡

バリオン数の破れ、C, CPの破れの必要条件は満たしているが、非平衡の条件を満たせないため、物質 > 反物質の起源を説明出来ない。

標準模型を超える物理による「バリオジェネシス」が必要。

もくじ

- $(0\nu\beta\beta)$ 崩壊

- 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？ → 標準模型を超える物理が必要！

- レプトジェネシス

- ▶ なぜ「レプト」ジェネシスなのか？
- ▶ 右巻きニュートリノは一人三役
- ▶ いろんなレプトジェネシス
- ▶ 例

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]

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

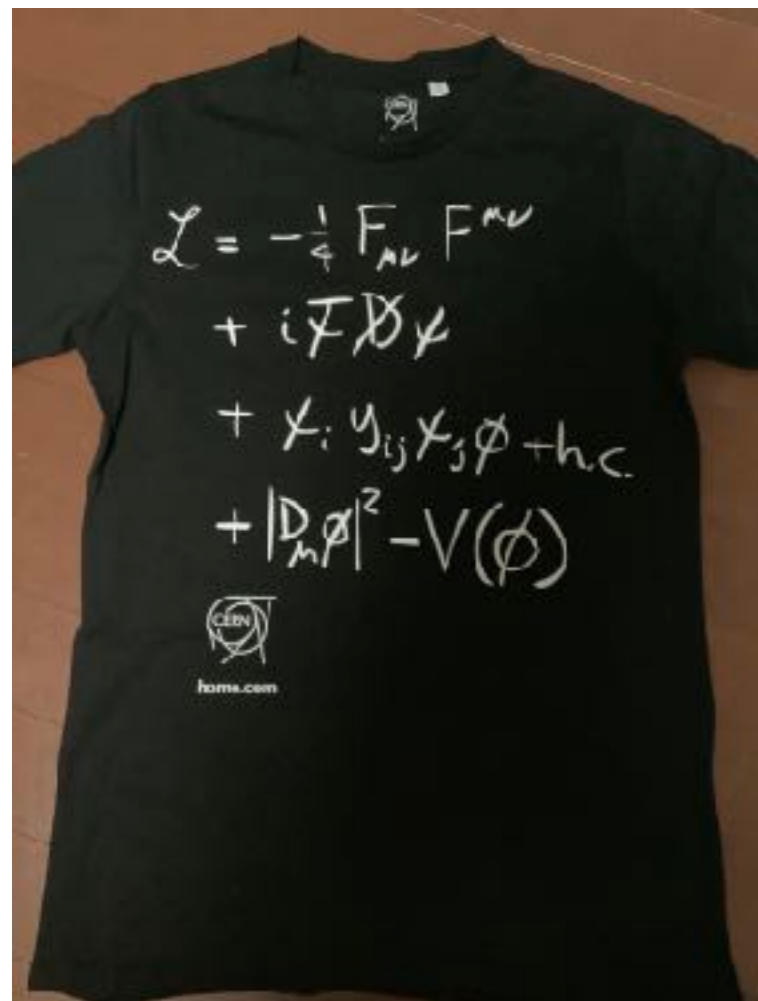
Note: $B-L$ は保存している。

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

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、、、

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

		世代 Generation		
		I	II	III
電荷 Charge	スピン Spin			
クォーク Quarks	+2/3	u up	c charm	t top
	-1/3	d down	s strange	b bottom
レプトン Leptons	-1	e electron	μ muon	τ tau
	0	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino



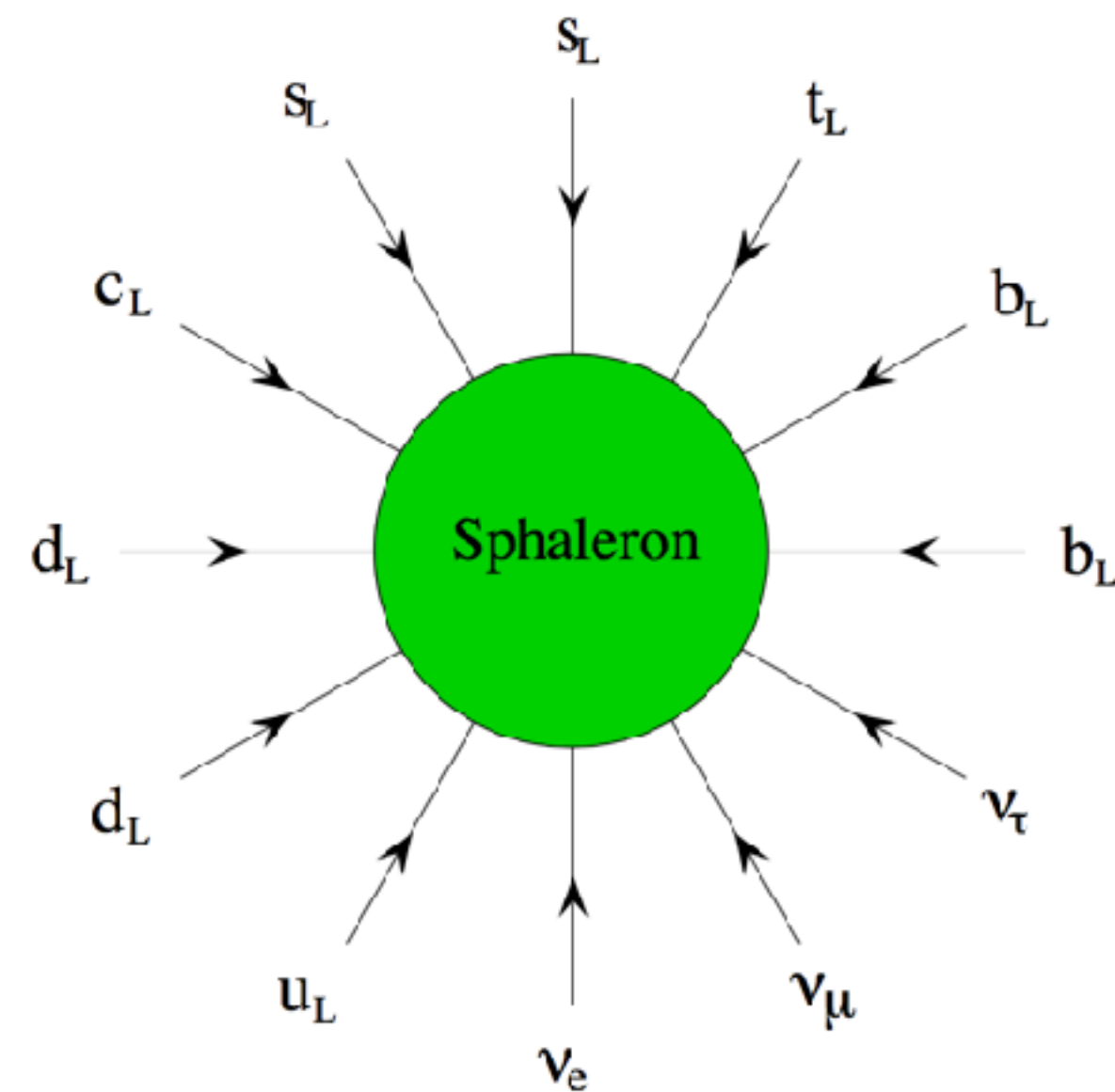
なぜ「レプト」 ジェネシスなのか？

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]



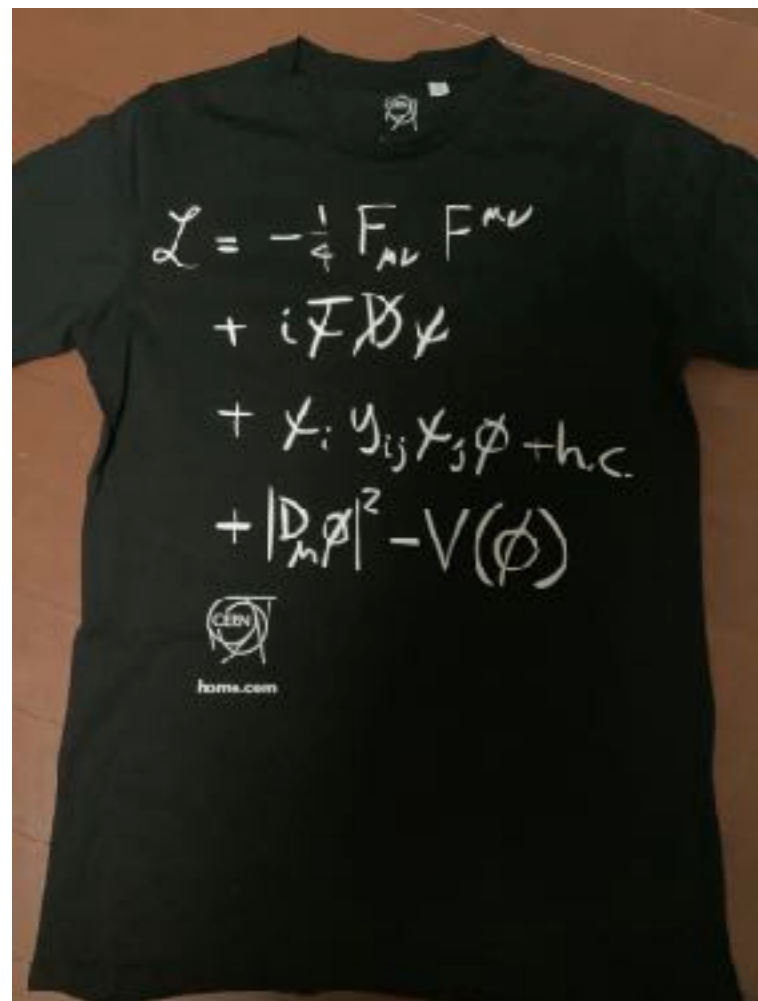
「スファレロン」過程

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.

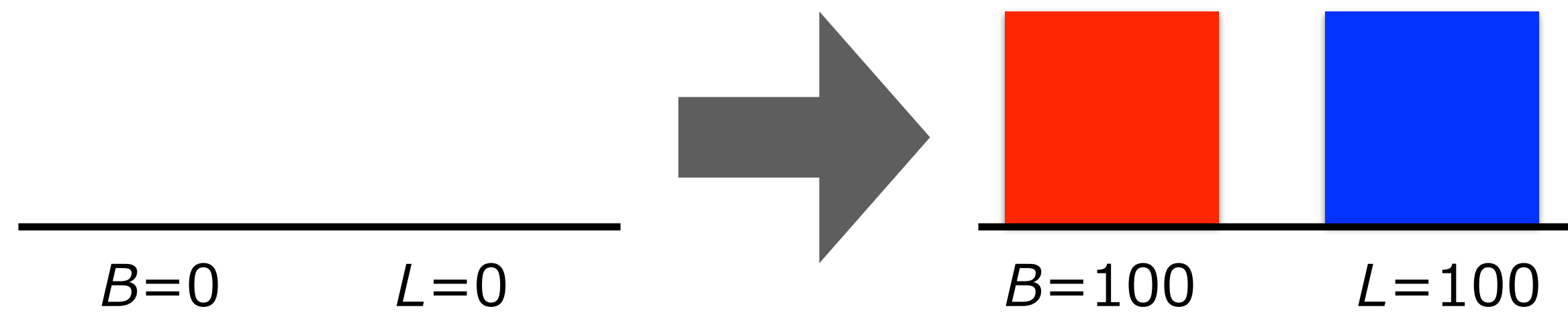
[fig. from W.Buchmuller, 1210.7758]

	電荷 Charge	スピン Spin	世代 Generation		
			I	II	III
クォーク Quarks	+2/3	1/2	u up	c charm	t top
	-1/3	1/2	d down	s strange	b bottom
レプトン Leptons	-1	1/2	e electron	μ muon	τ tau
	0	1/2	ν _e electron neutrino	ν _μ muon neutrino	ν _τ tau neutrino



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、

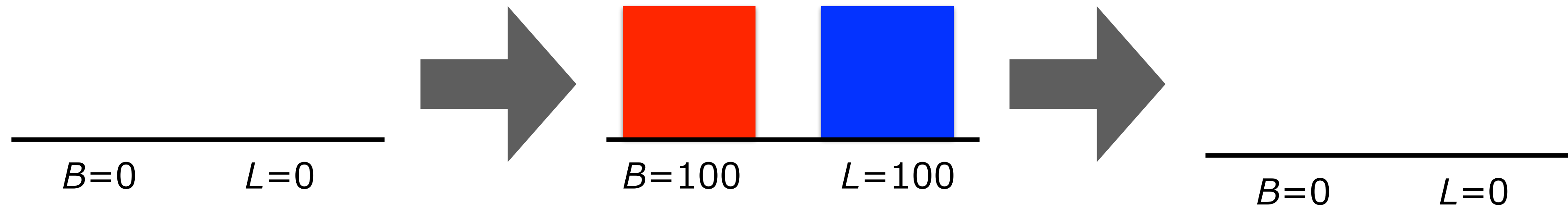
例：GUT バリオジェネシス



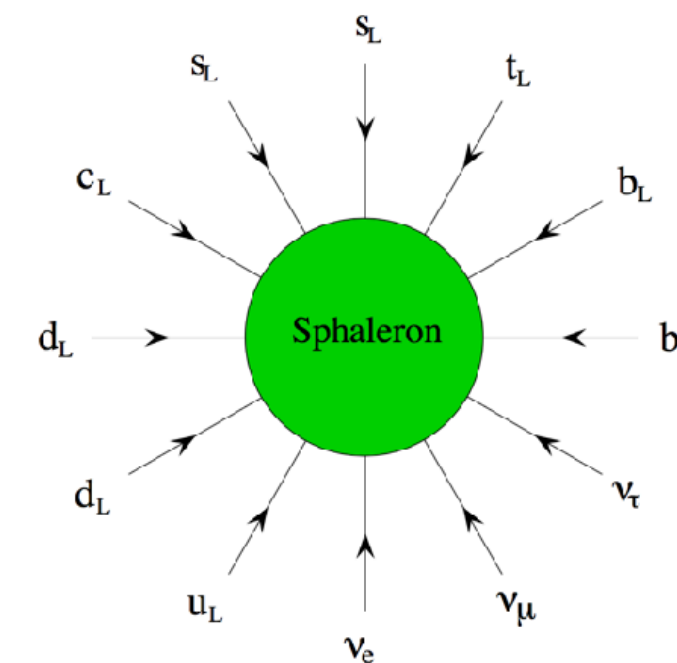
したがって、もし $B-L$ を保存するプロセス でバリオジェネシスをする、

熱平衡で再び $B=0$ になってしまう。

例：GUT バリオジェネシス



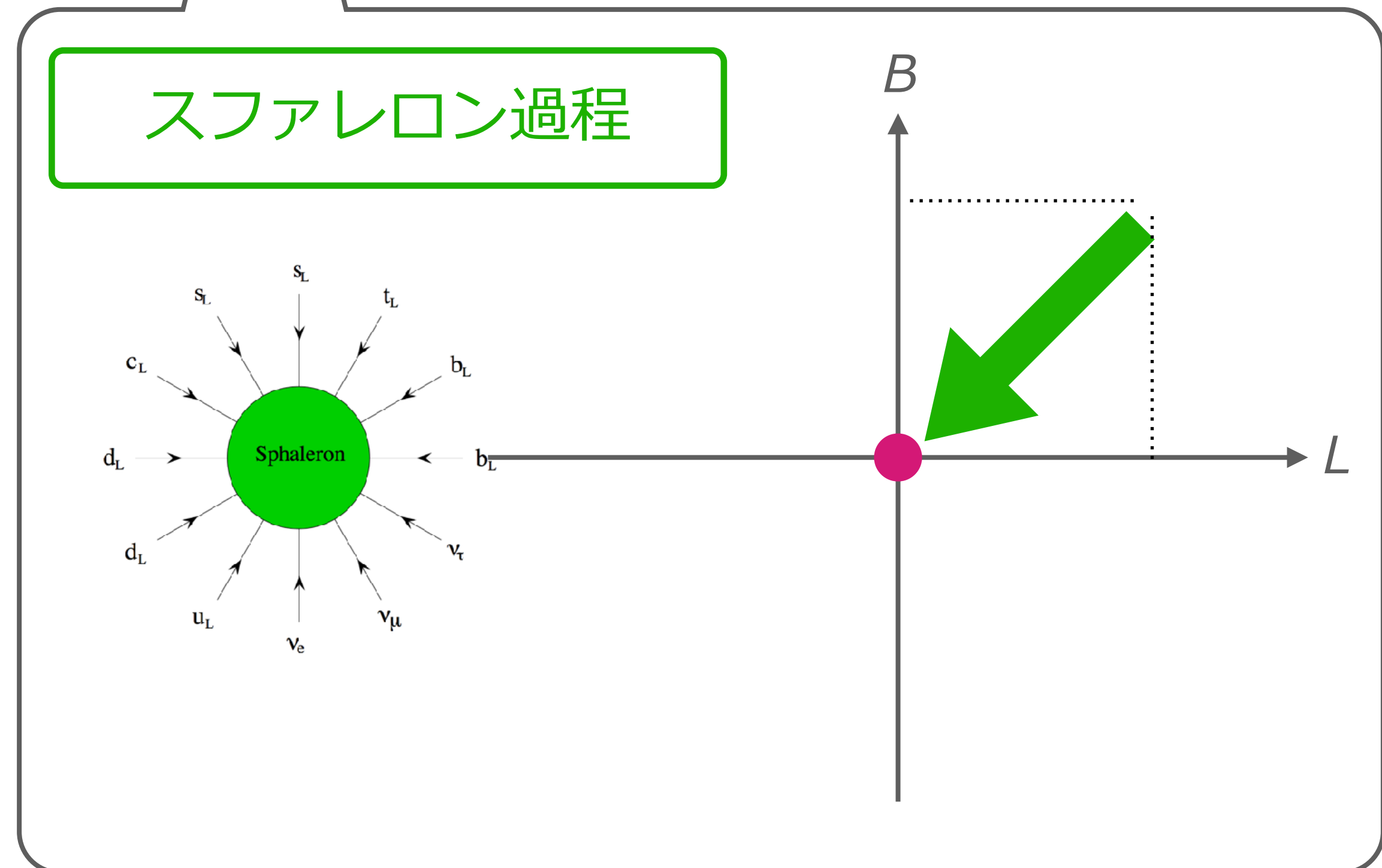
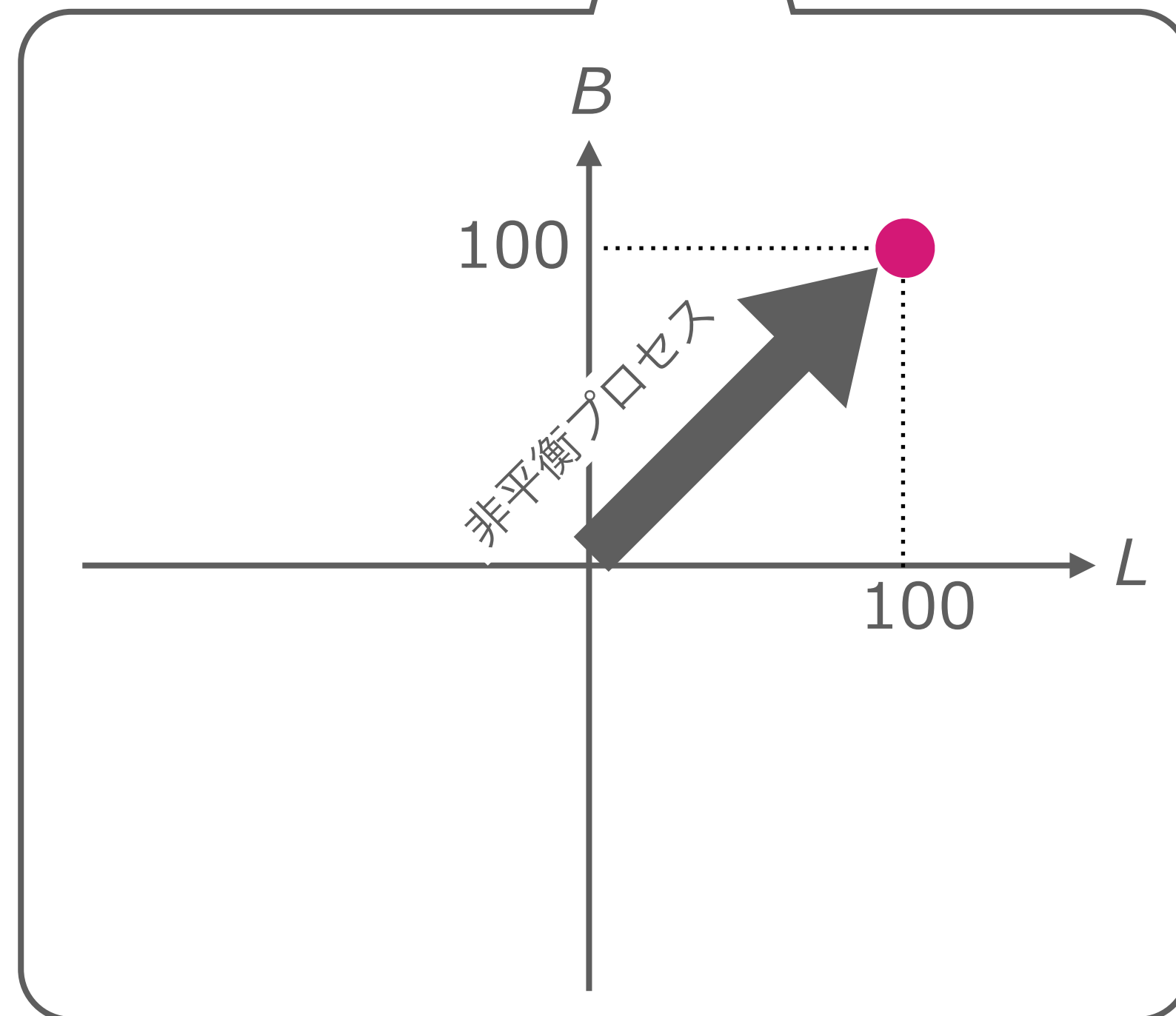
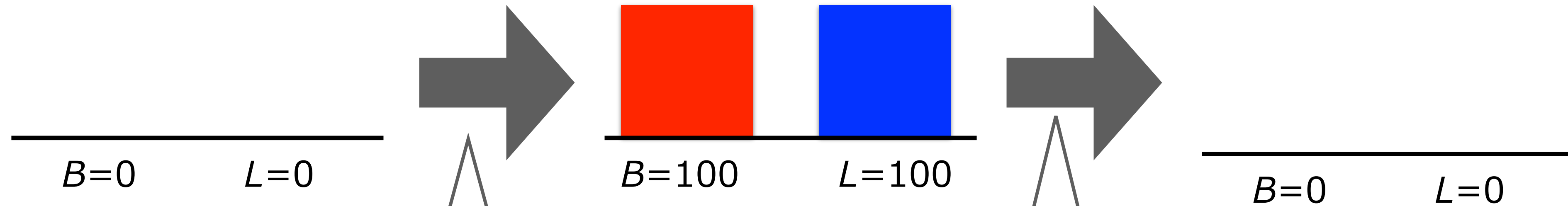
スファレロン過程

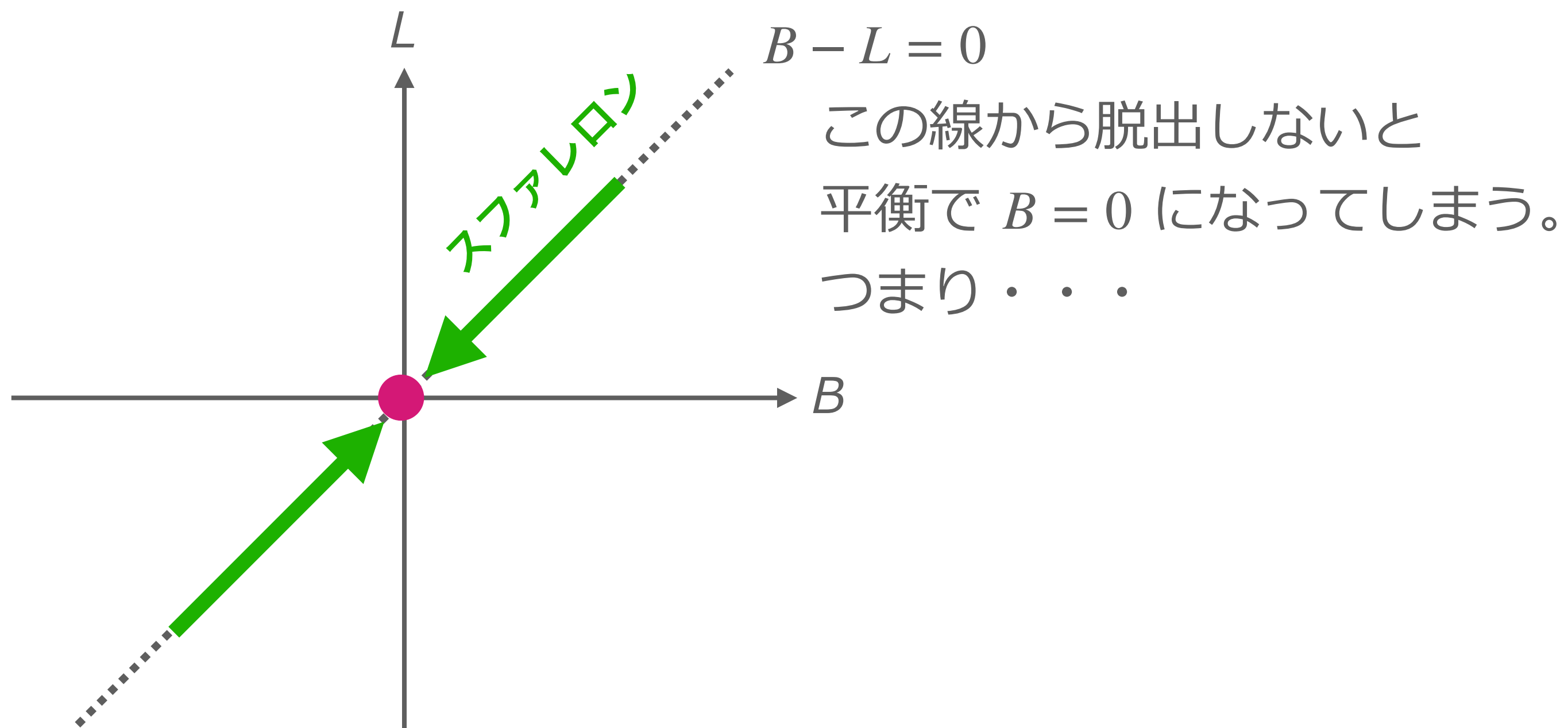


したがって、もし $B-L$ を保存するプロセス でバリオジェネシスをする、

熱平衡で再び $B=0$ になってしまう。

例：GUT バリオジェネシス





サハロフの3条件

~~・ バリオン数 (B) の破れ~~

$B-L$ の破れが必要

・ C, CP の破れ

・ 非平衡

※ $T \lesssim 100$ GeV でバリオン数を作る場合はそうではない。
 (例：電弱バリオジェネシス。)

$B-L$ を破ればいいのだから、、、

バリオジェネシスを起こすには **L の破れだけでも十分** ということ。

L の破れ・・・マヨラナニュートリノ！

レプトジェネシス

[Fukugita, Yanagida, '86]

標準模型に、**右巻きニュートリノ**を導入

標準模型
レプトン

標準模型
ヒッグス

$$L = L_{\text{Standard Model}} + \frac{1}{2} \bar{N} (i\gamma^\mu \partial_\mu - M) N - y \bar{N} \ell_L H + h.c.$$

マヨラナ質量項

レプトジェネシス

[Fukugita, Yanagida, '86]

標準模型に、**右巻きニュートリノ**を導入

$$L = L_{\text{Standard Model}} + \frac{1}{2} \bar{N} (i\gamma^\mu \partial_\mu - M) N - y \bar{N} \ell_L H + h.c.$$

標準模型
レプトン

標準模型
ヒッグス

マヨラナ質量項

右巻きニュートリノは・・・

- マヨラナ質量項のおかげで、**マヨラナ (粒子=反粒子)** となる。

レプトジェネシス

[Fukugita, Yanagida, '86]

標準模型に、**右巻きニュートリノ**を導入

標準模型

レプトン

標準模型

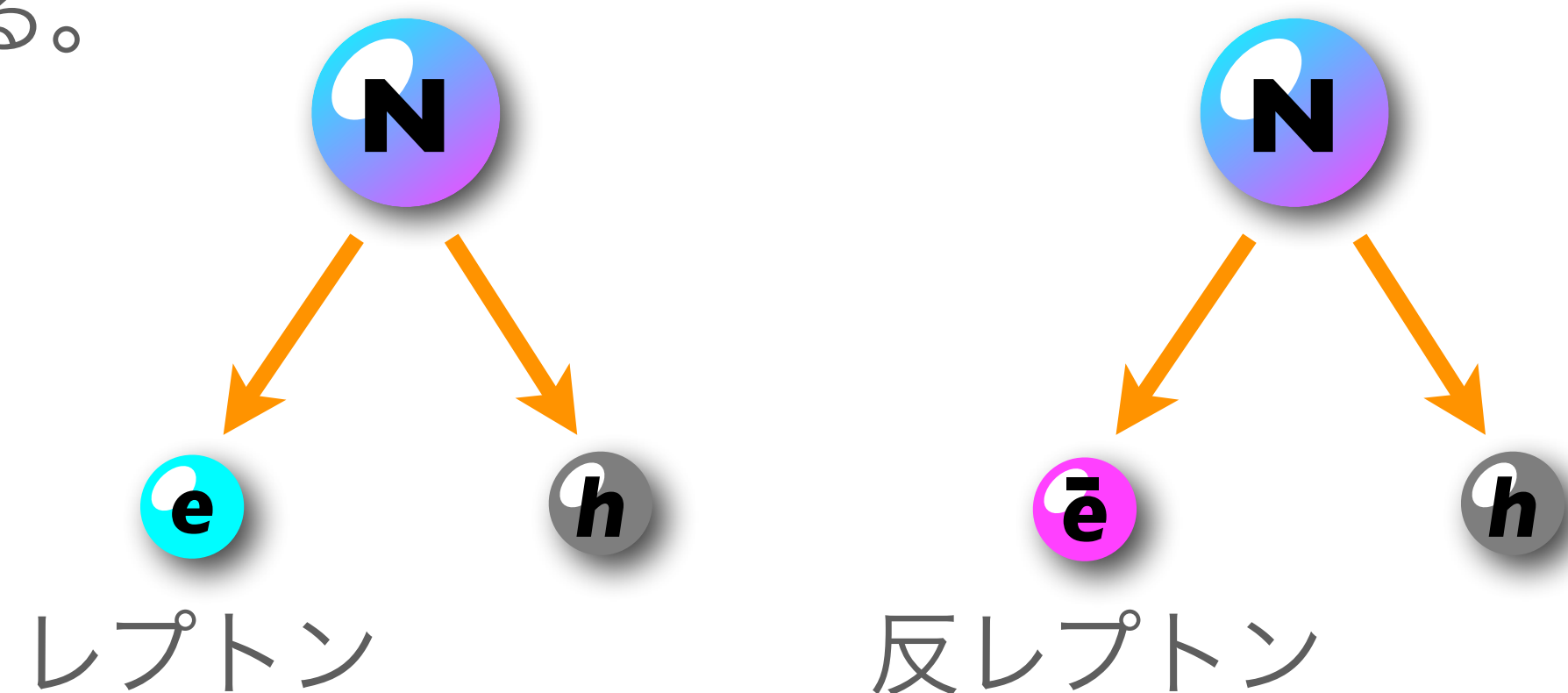
ヒッグス

$$L = L_{\text{Standard Model}} + \frac{1}{2} \bar{N} (i\gamma^\mu \partial_\mu - M) N - y \bar{N} \ell_L H + h.c.$$

マヨラナ質量項

右巻きニュートリノは・・・

- マヨラナ質量項のおかげで、**マヨラナ（粒子=反粒子）**となる。
- レプトンにも反レプトンにも崩壊できる。**



レプトジェネシス

[Fukugita, Yanagida, '86]

標準模型に、**右巻きニュートリノ**を導入

$$L = L_{\text{Standard Model}} + \frac{1}{2} \bar{N} (i\gamma^\mu \partial_\mu - M) N - y \bar{N} \ell_L H + h.c.$$

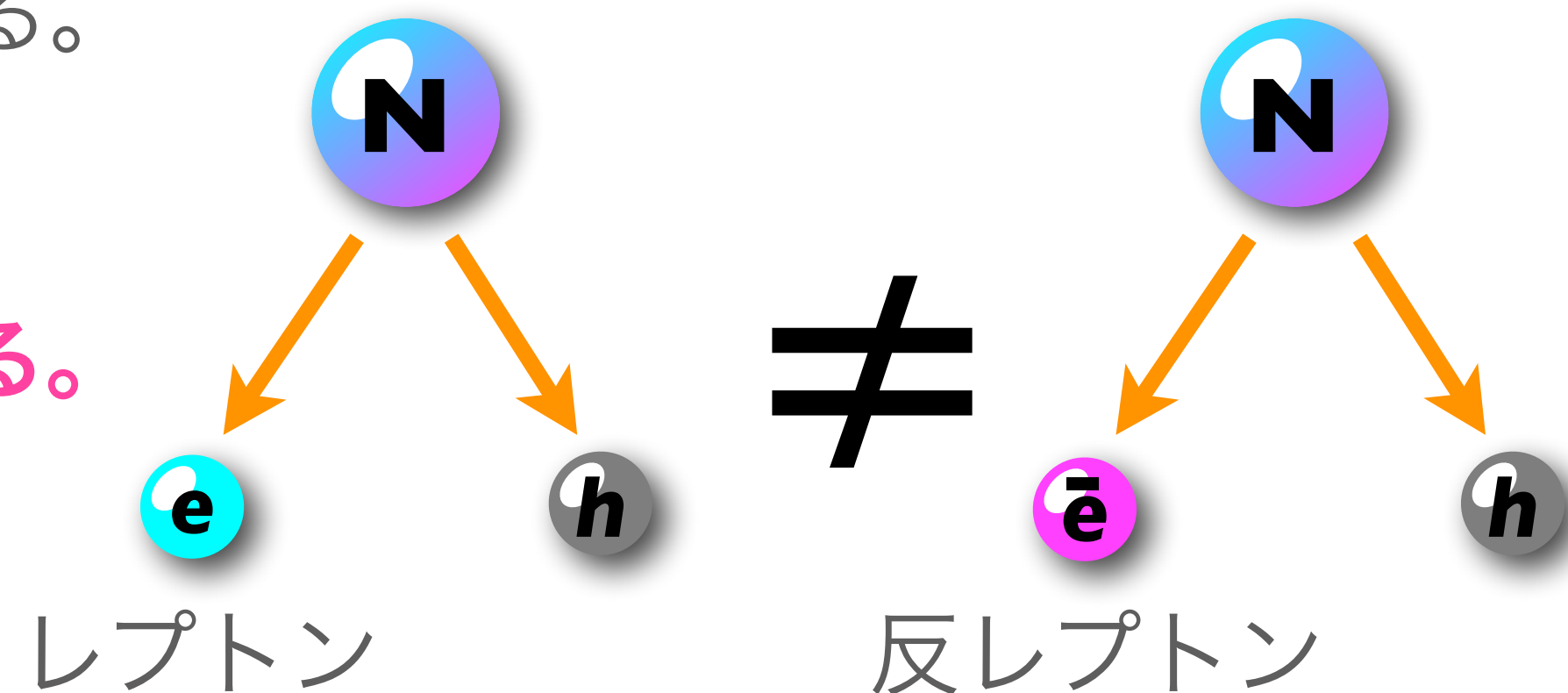
標準模型
レプトン

標準模型
ヒッグス

マヨラナ質量項

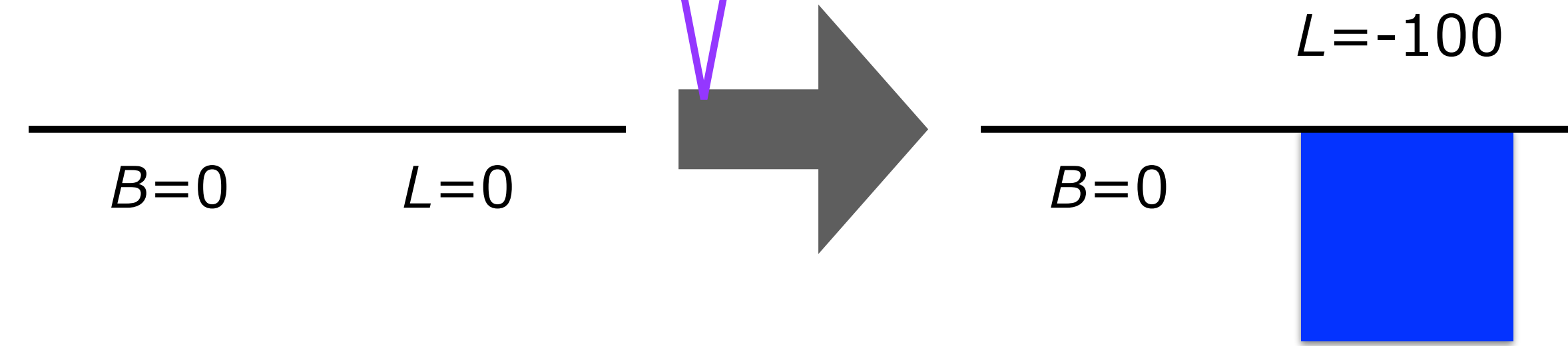
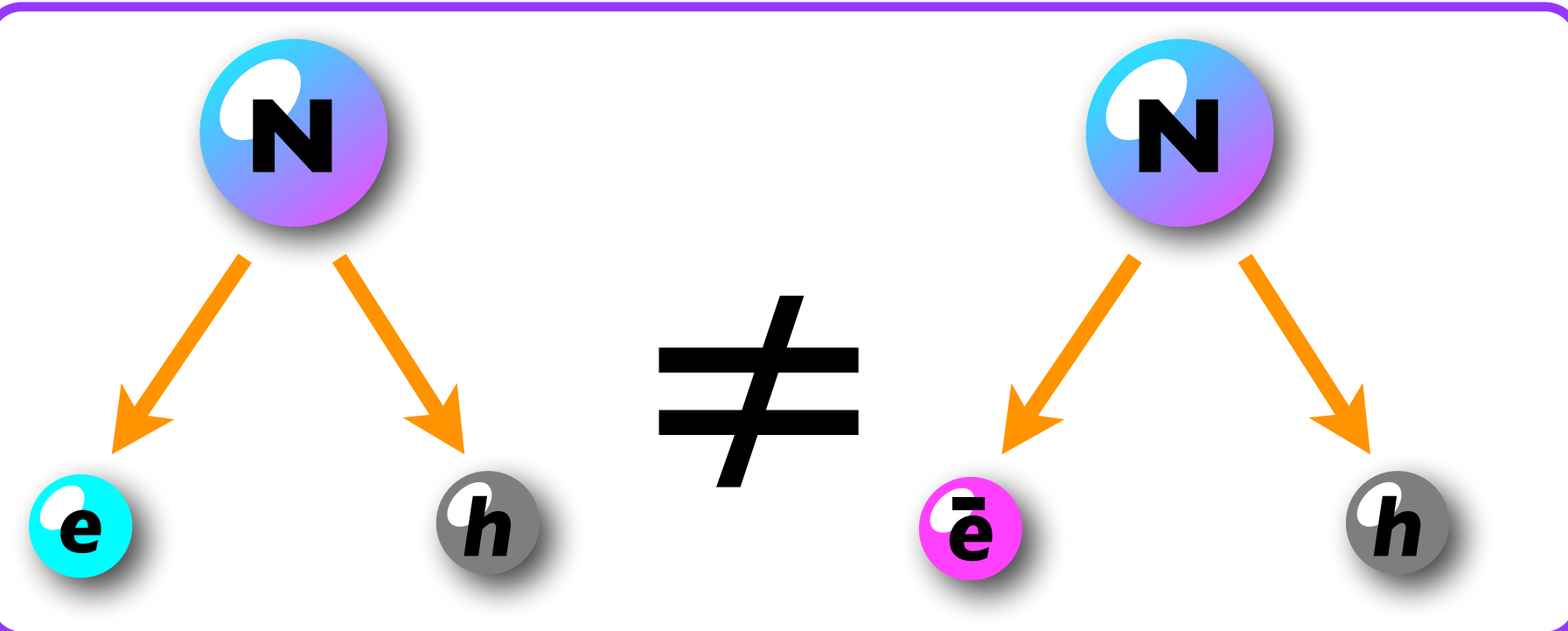
右巻きニュートリノは・・・

- マヨラナ質量項のおかげで、**マヨラナ（粒子=反粒子）**となる。
- レプトンにも反レプトンにも崩壊できる。**
- さらにCPの破れにより、**レプトン数 \neq 反レプトン数** を作れる。



レプトジェネシス

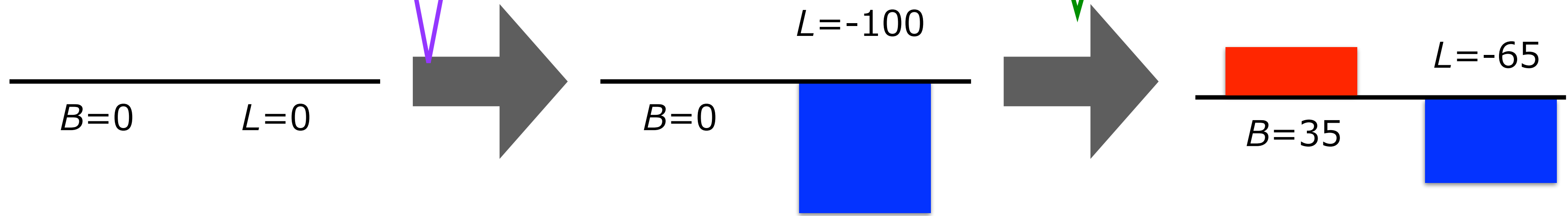
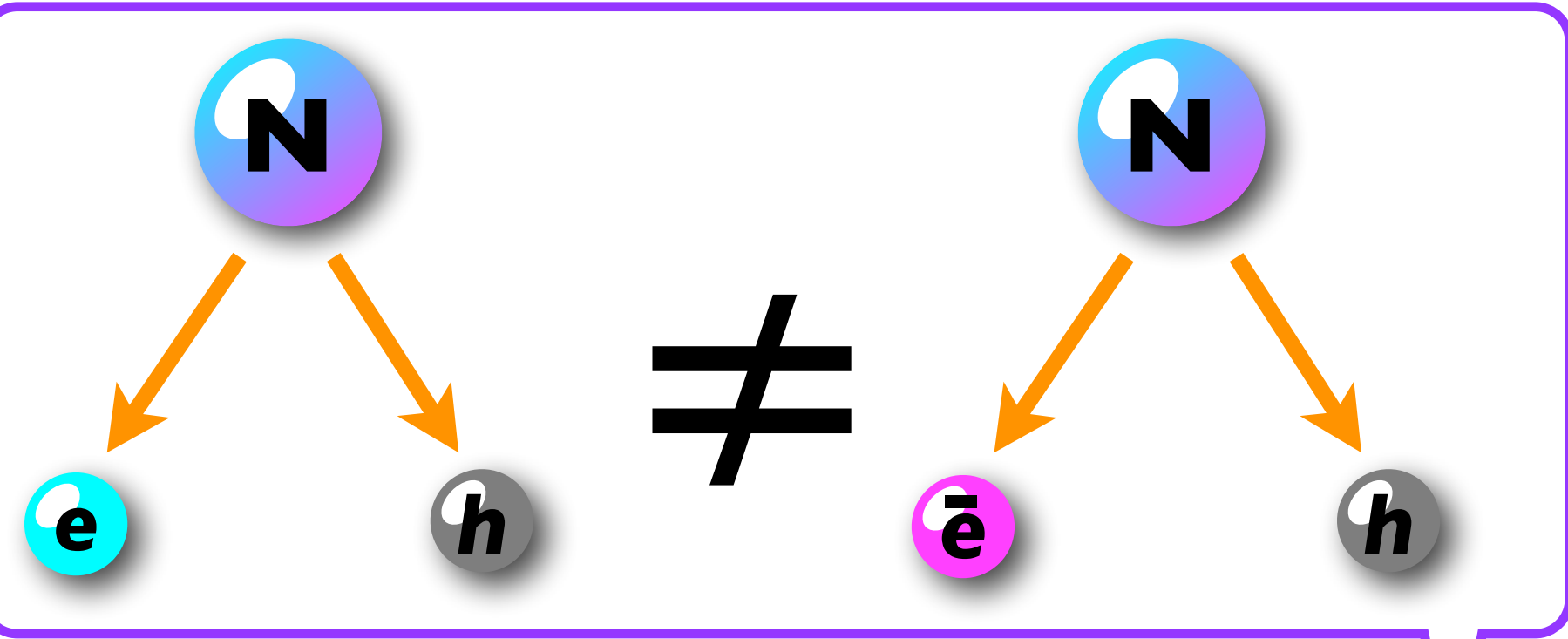
[Fukugita, Yanagida, '86]



まず レプトン数
を作る

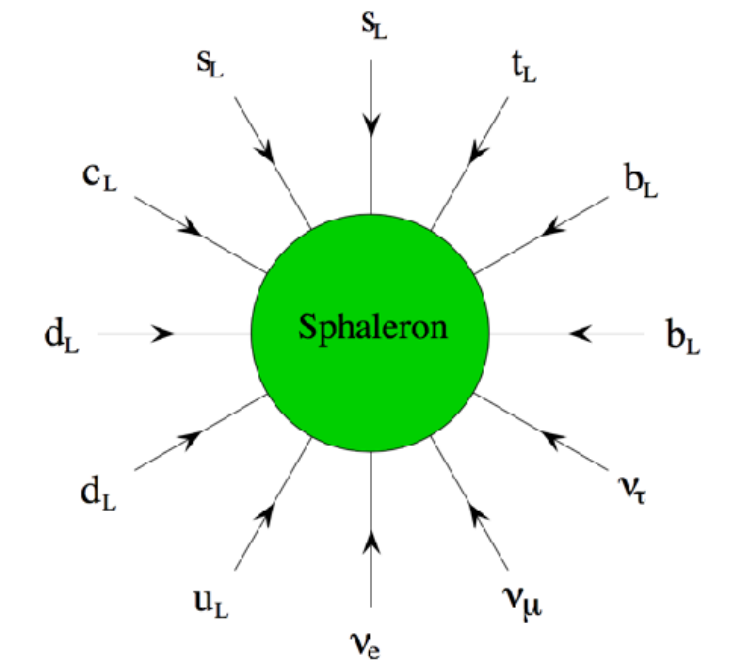
レプトジェネシス

[Fukugita, Yanagida, '86]



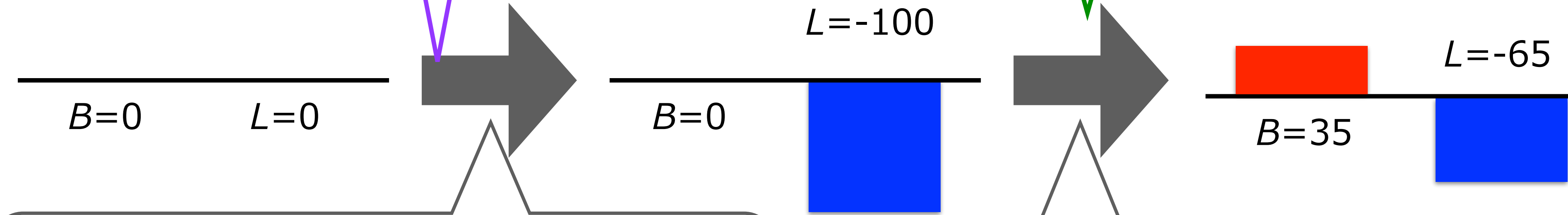
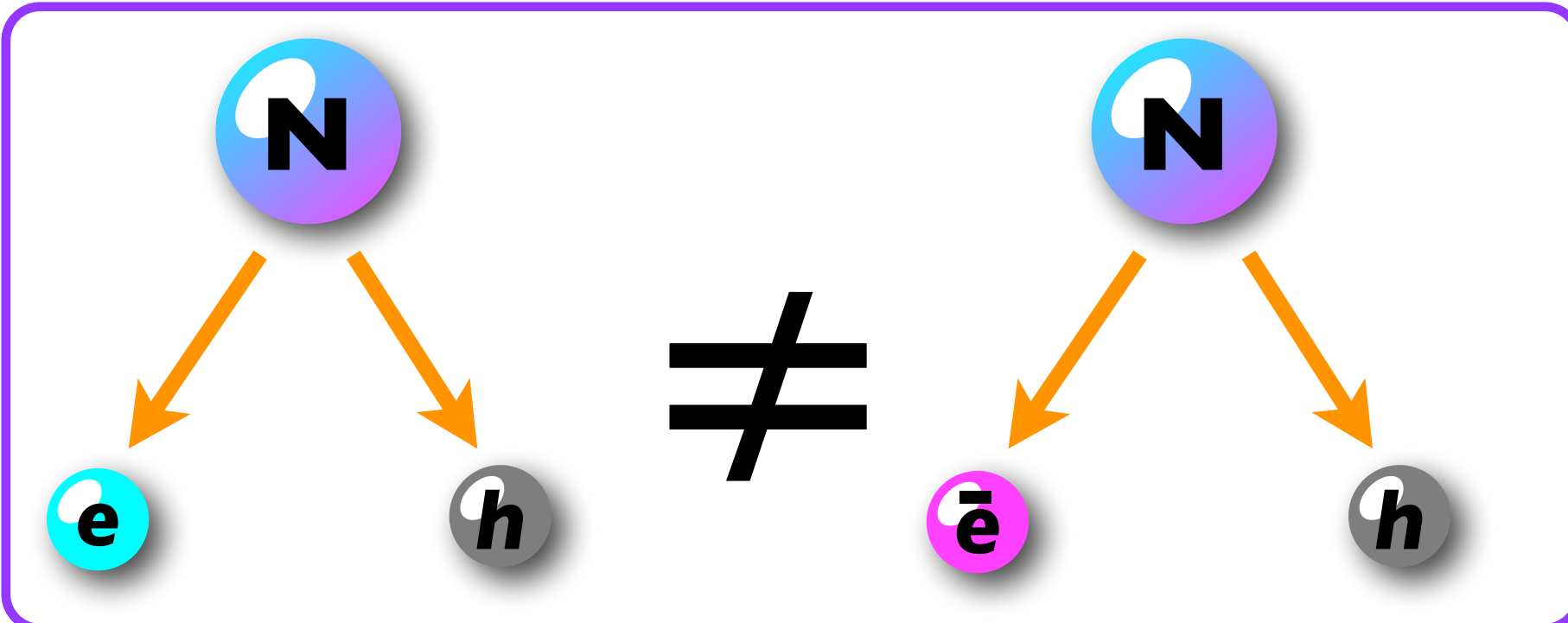
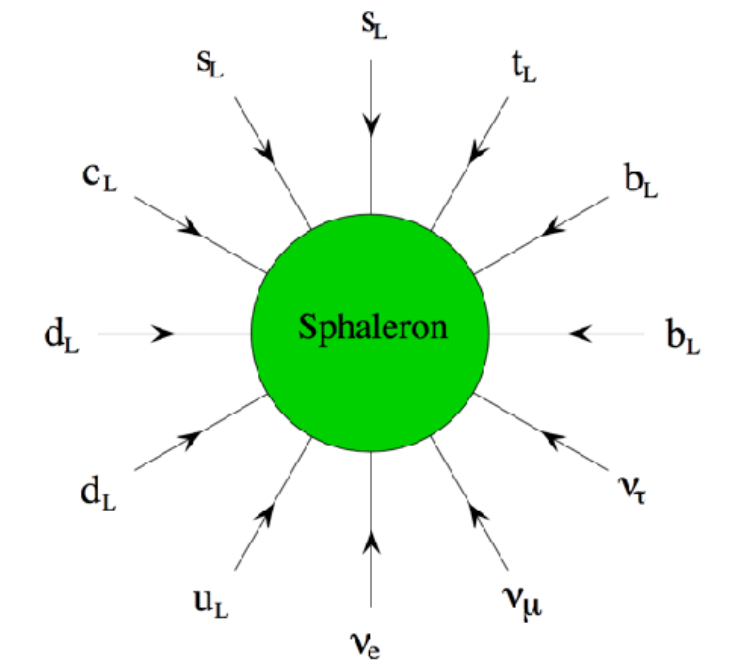
まずレプトン数
を作る

熱平衡で $B \neq 0$ が残る!

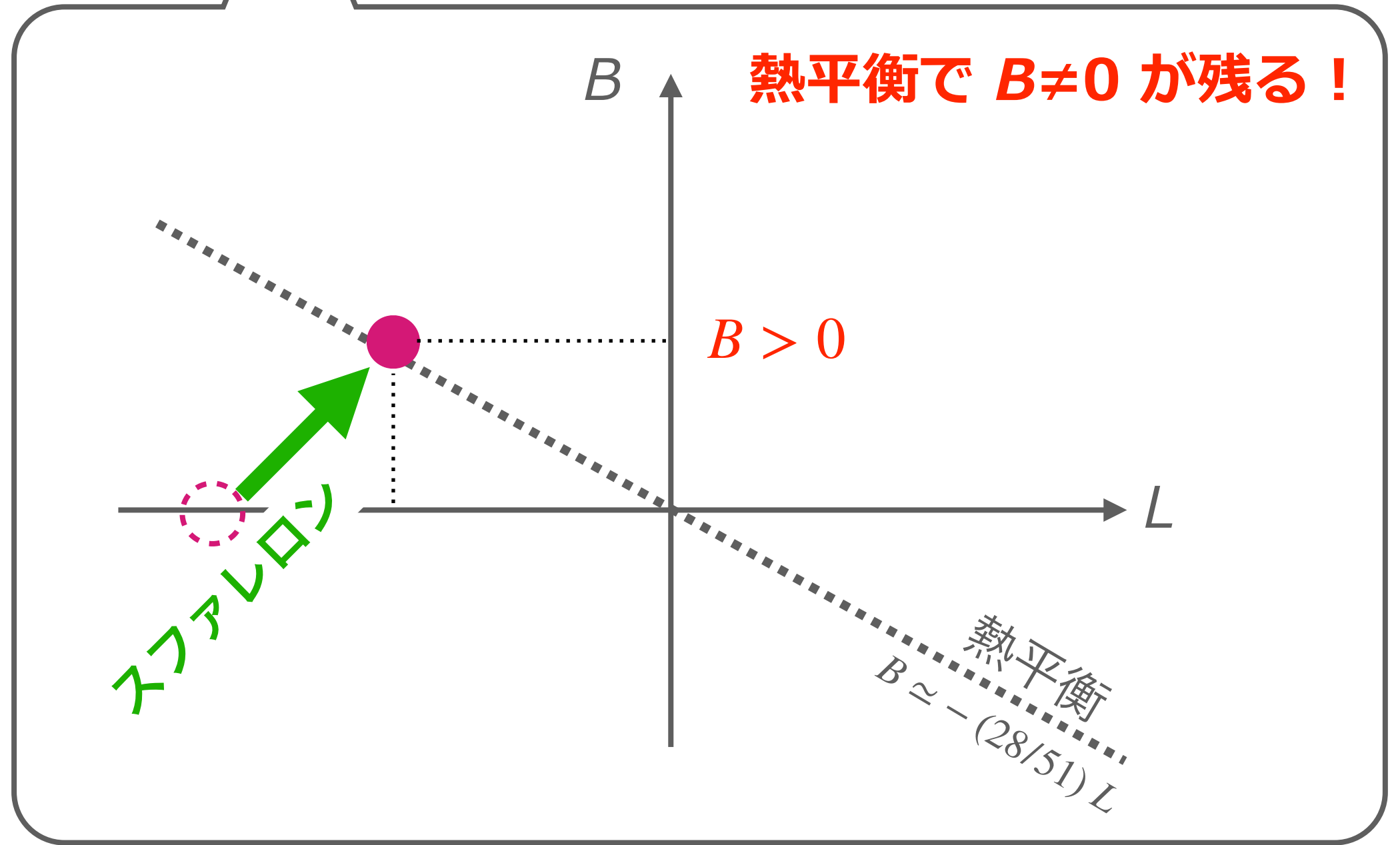
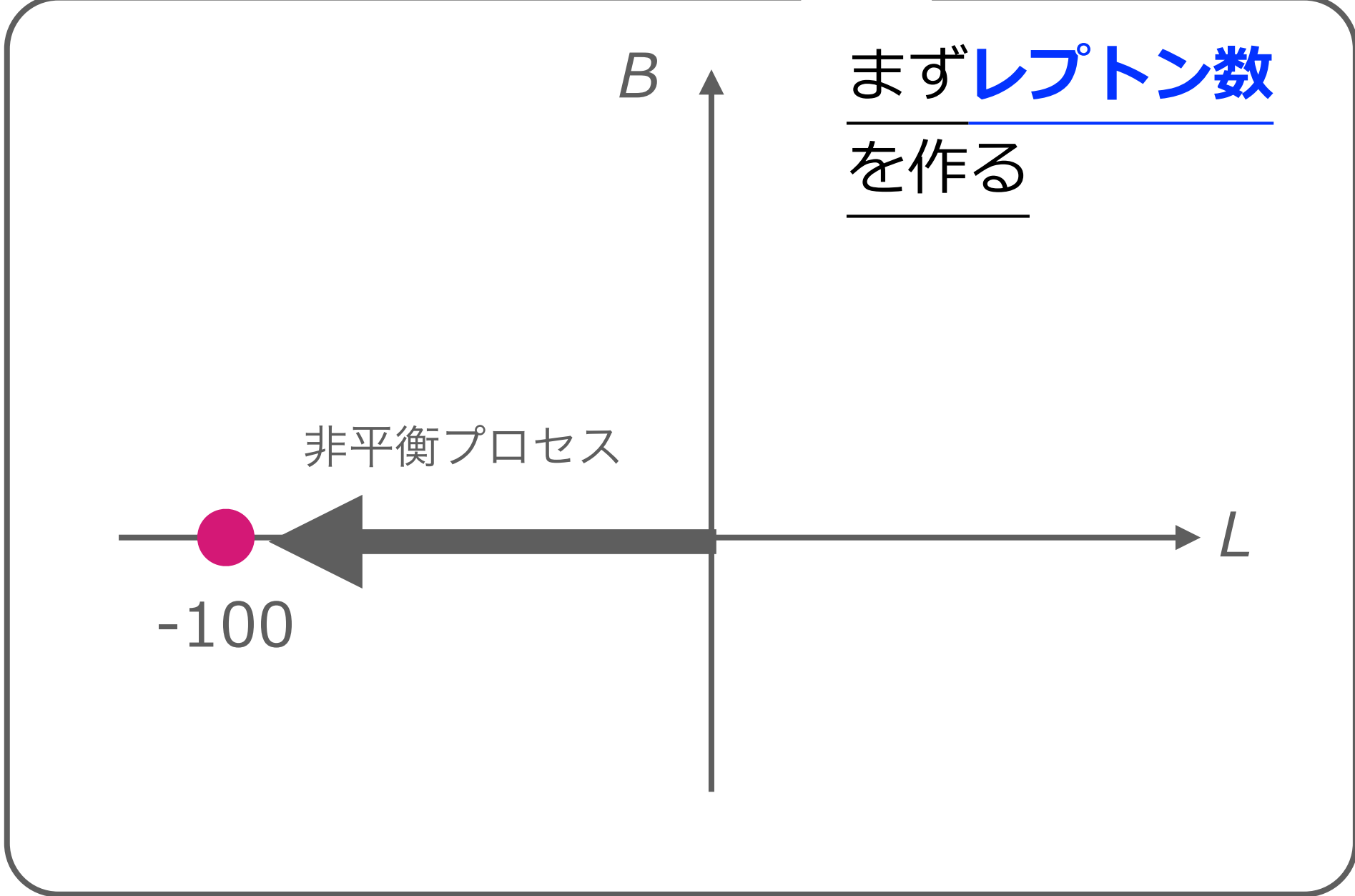


レプトジェネシス

[Fukugita, Yanagida, '86]



スファレロン過程



もくじ

- $(0\nu\beta\beta)$ 崩壊
- 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？ → 標準模型を超える物理が必要！

レプトジェネシス

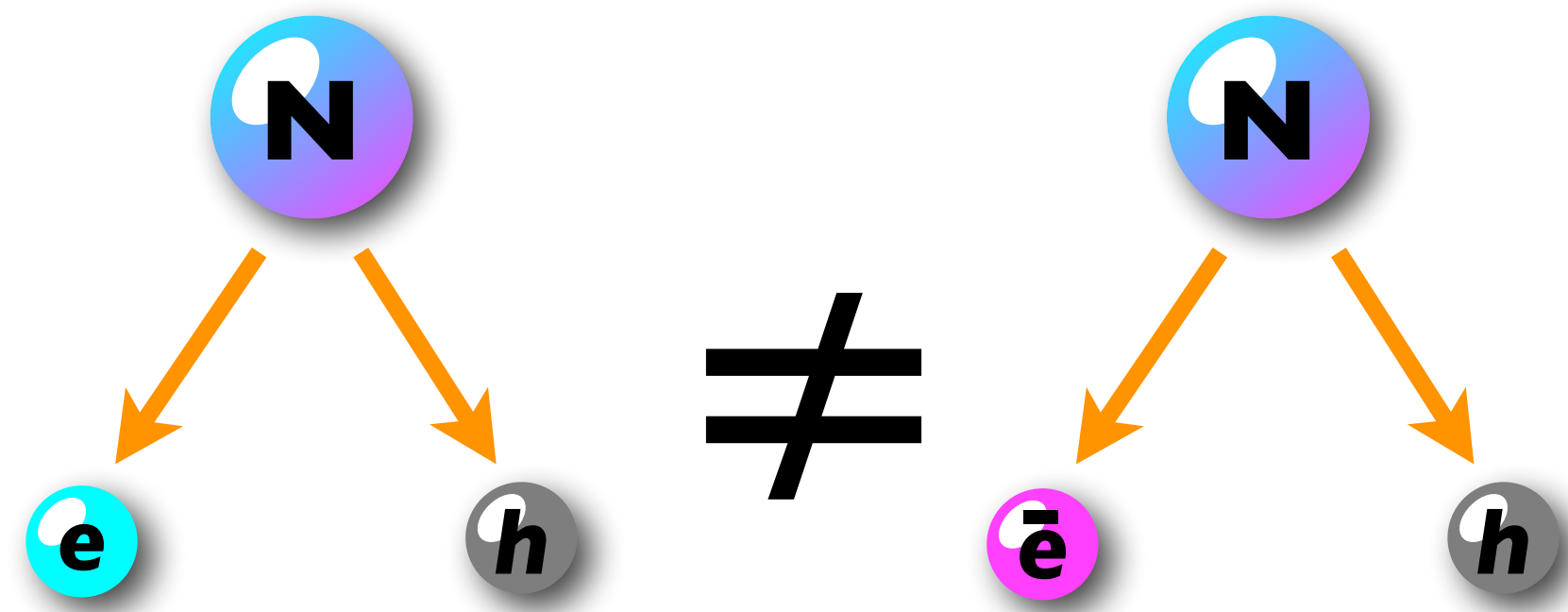
- ▶ なぜ「レプト」ジェネシスなのか？
- ▶ 右巻きニュートリノは一人三役
- ▶ いろんなレプトジェネシス
- ▶ 例

マヨラナ右巻きニュートリノは一人三役

マヨラナ右巻きニュートリノは一人三役

① レプトジェネシス：宇宙の物質反物質非対称性の起源

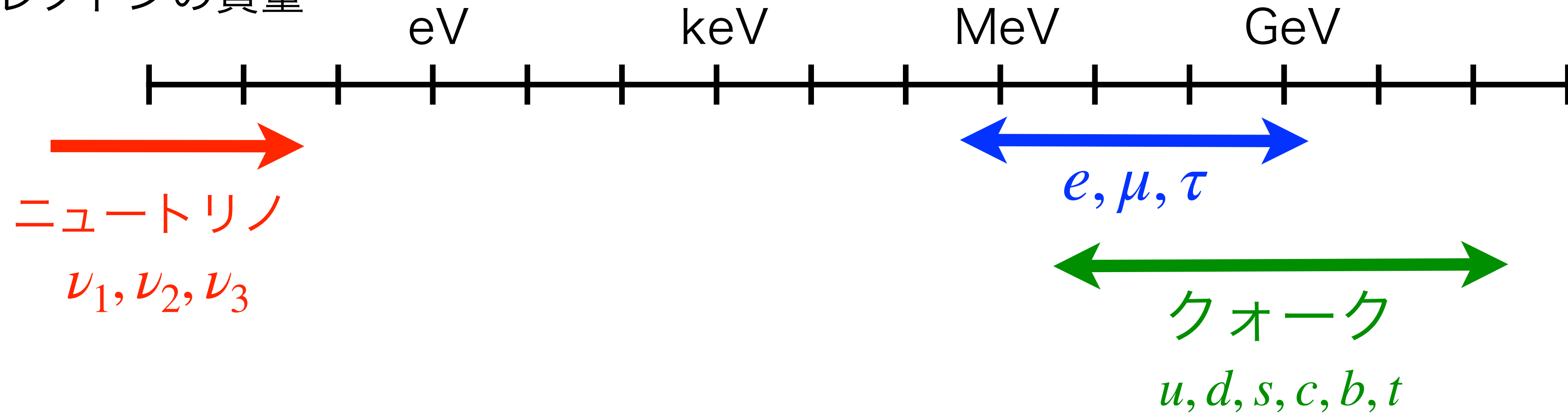
右巻きニュートリノの崩壊 (CP-violating)



マヨラナ右巻きニュートリノは一人三役

- ① **レプトジェネシス**：宇宙の物質反物質非対称性の起源
- 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？

マヨラナ右巻きニュートリノは一人三役

① **レプトジェネシス**：宇宙の物質反物質非対称性の起源

② **(小さな)ニュートリノ質量を説明**

他のクォーク、レプトンの質量

$$L = y_Q H \bar{Q}_L Q_R$$

$$\rightarrow m_Q = y_Q \langle H \rangle$$

Higgs の期待値 (~ 100 GeV) に比例。

ニュートリノの質量

$$L = y_\nu H \bar{N}_R \nu_L + \frac{1}{2} M_R \bar{N}_R^c N_R + h.c.$$

$$\rightarrow m_{N,\text{heavy}} \simeq M_R,$$

$$m_{\nu,\text{light}} \simeq \frac{y_\nu^2 \langle H \rangle^2}{M_R}$$

$M_R \gg \langle H \rangle$ のときニュートリノが軽いのは自然。

(seesaw機構)

さらにこのとき軽い方のニュートリノもマヨラナになり
non-zero の $0\nu\beta\beta$ 崩壊が预言される。

マヨラナ右巻きニュートリノは一人三役

- ① **レプトジェネシス**：宇宙の物質反物質非対称性の起源
- ② **(小さな)ニュートリノ質量を説明**：seesaw機構
- ③ **クォーク・レプトンを統一**

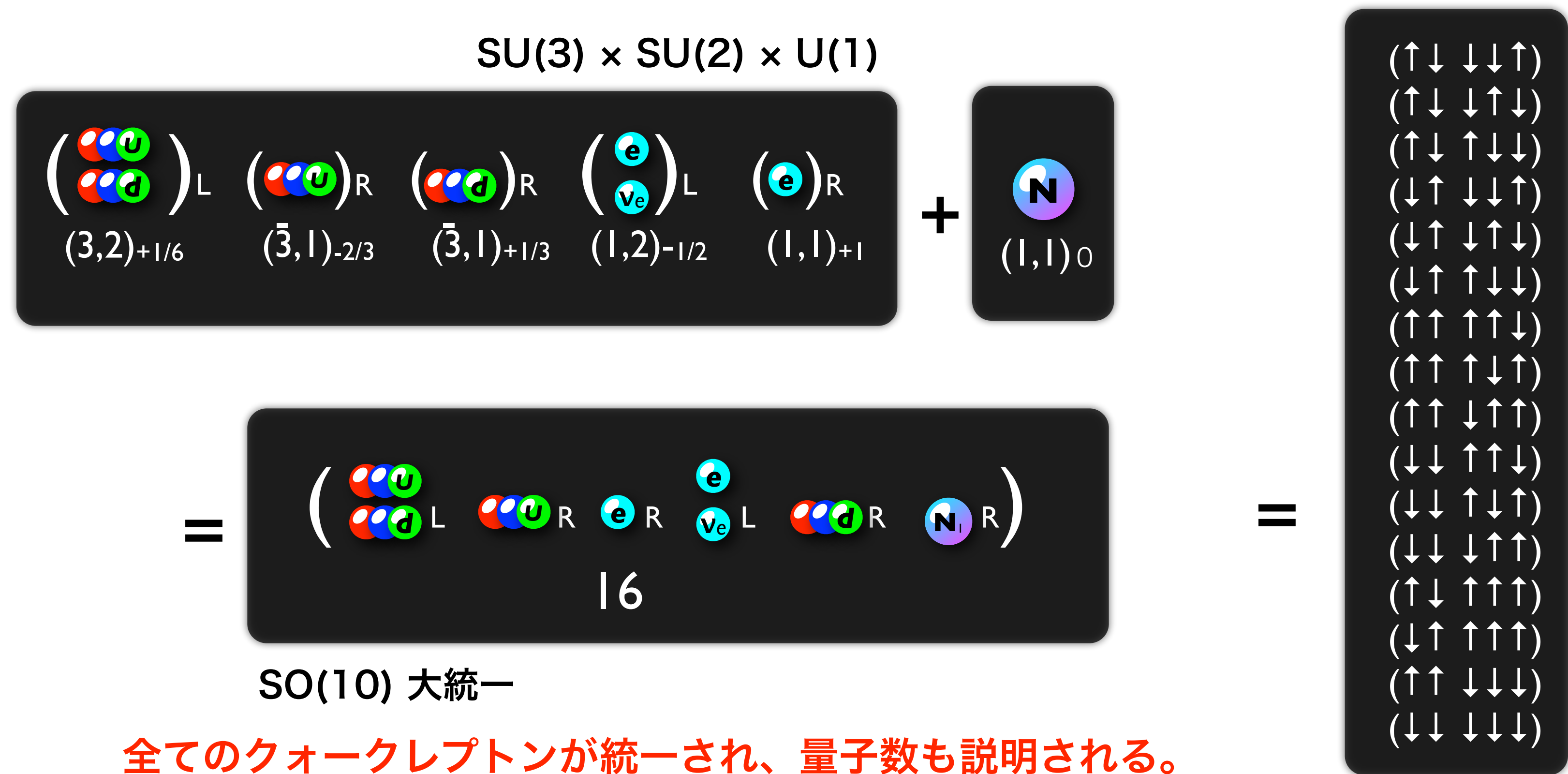
SU(3) × SU(2) × U(1)

$$\begin{array}{ccccc} \left(\begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \right)_L & \left(\text{u} \right)_R & \left(\text{d} \right)_R & \left(\begin{array}{c} \text{e} \\ \nu_e \end{array} \right)_L & \left(\text{e} \right)_R \\ (3, 2)_{+1/6} & (\bar{3}, 1)_{-2/3} & (\bar{3}, 1)_{+1/3} & (1, 2)_{-1/2} & (1, 1)_{+1} \end{array}$$

標準模型のクォーク・レプトンの量子数・・・バラバラ

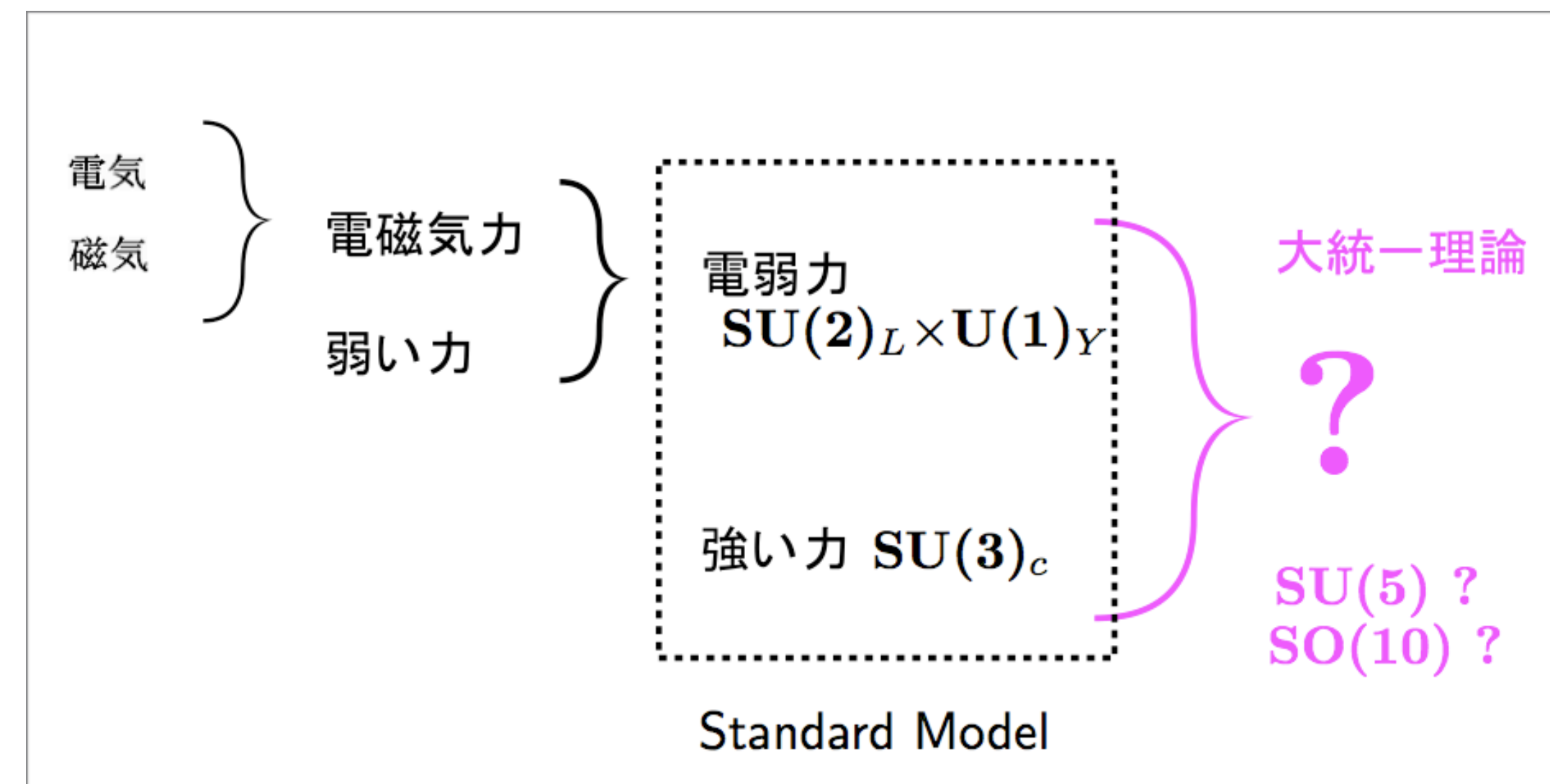
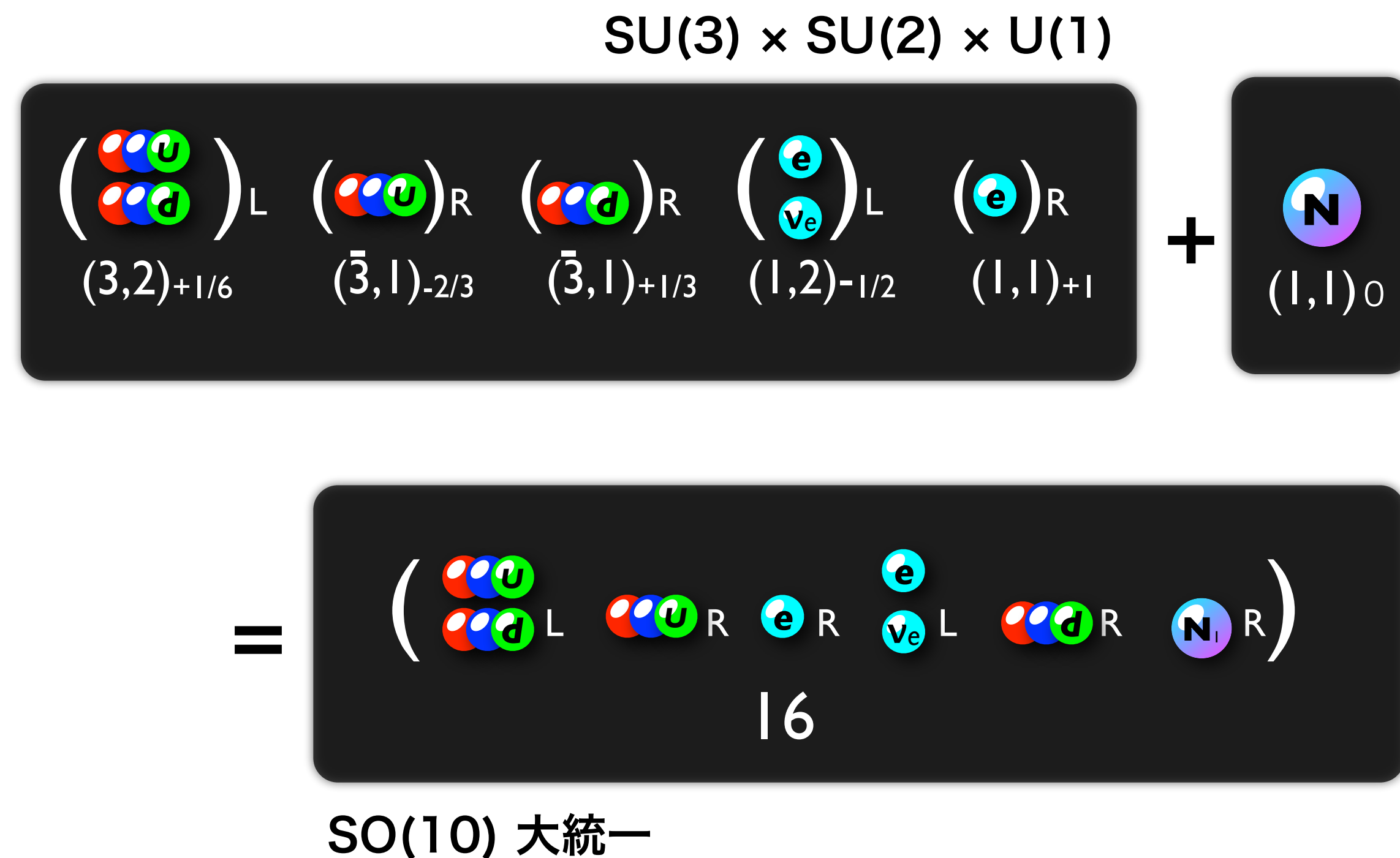
マヨラナ右巻きニュートリノは一人三役

- ① レプトジェネシス：宇宙の物質反物質非対称性の起源
- ② (小さな)ニュートリノ質量を説明：seesaw機構
- ③ クォーク・レプトンを統一



マヨラナ右巻きニュートリノは一人三役

- ① レプトジェネシス：宇宙の物質反物質非対称性の起源
- ② (小さな)ニュートリノ質量を説明：seesaw機構
- ③ クォーク・レプトンを統一



全てのクォークレプトンが統一され、量子数も説明される。

もくじ

- $(0\nu\beta\beta)$ 崩壊
- 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？ → 標準模型を超える物理が必要！
- レプトジェネシス
 - ▶ なぜ「レプト」ジェネシスなのか？
 - ▶ 右巻きニュートリノは一人三役
 - ▶ いろんなレプトジェネシス
 - ▶ 例

いろんなレプトジェネシス

- ▶ Thermal Leptogenesis [Fukugita, Yanagida,'86, …… Buchmuller, Plumacher, Di Bari, ……]
 - ▶ via $RH\nu$ oscillation (ν MSM) [Akhmedov, Rubakov, Smirnov,'98, Asaka, Shasposhnikov,'05 ……]
 - ▶ via neutrino oscillation (with the LHLH operators) [… Hamada, Kitano, Yin, '18 ……]
 - ▶ Leptogenesis from Inflaton Decay […… Kumekawa, Moroi, Yanagida,'94, …… Asaka, KH, Kawasaki, Yanagida,'99 ……]
 - ▶ Leptogenesis from RH-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, ……]
- + many others …

※ 右巻きニュートリノも “sterile neutrino” や “heavy neutral lepton” など色々な呼び方をされています。

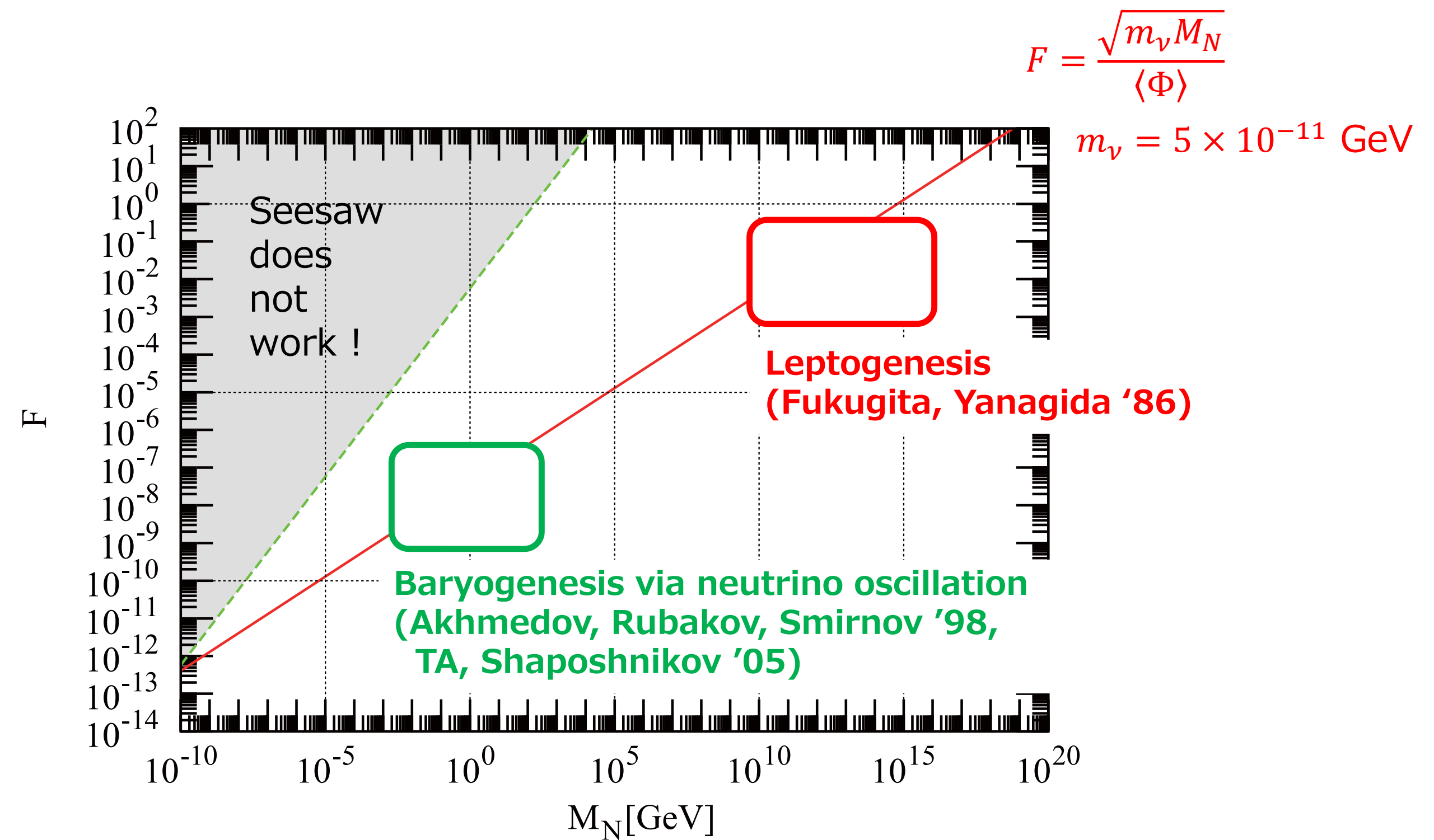
いろんなレプトジェネシス

浅賀さんのトークスライドより

スケールもいろいろ

Yukawa Coupling and Mass of HNL

7



いろんなレプトジェネシス

- ▶ Thermal Leptogenesis [Fukugita, Yanagida,'86, …… Buchmuller, Plumacher, Di Bari, ……]
 - ▶ via $RH\nu$ oscillation (ν MSM) [Akhmedov, Rubakov, Smirnov,'98, Asaka, Shasposhnikov,'05 ……]
 - ▶ via neutrino oscillation (with the LHLH operators) [… Hamada, Kitano, Yin , '18 ……]
 - ▶ Leptogenesis from Inflaton Decay […… Kumekawa, Moroi, Yanagida,'94, … Asaka, KH, Kawasaki, Yanagida,'99 ……]
 - ▶ Leptogenesis from RH-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, ……]
- + many others …

※ 右巻きニュートリノも “sterile neutrino” や “heavy neutral lepton” など色々な呼び方をされています。

これら全てのシナリオで、レプトン数の破れが本質的に重要。

→ ニュートリノはマヨラナになり、non-zero の $0\nu\beta\beta$ 崩壊を予言する！

もくじ

- $(0\nu\beta\beta)$ 崩壊

- 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？ → 標準模型を超える物理が必要！

- レプトジェネシス

- ▶ なぜ「レプト」ジェネシスなのか？
- ▶ 右巻きニュートリノは一人三役

- ▶ いろんなレプトジェネシス → ほとんどのシナリオでニュートリノはマヨラナになり、non-zero の $0\nu\beta\beta$ 崩壊を预言する！

- ▶ 例

例：gauged $U(1)_{\mu-\tau}$ 模型

Journal of Cosmology and Astroparticle Physics
An IOP and SISSA journal

Leptogenesis in the minimal gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ model and the sign of the cosmological baryon asymmetry

Kento Asai,^a Koichi Hamaguchi,^{a,b} Natsumi Nagata^a and Shih-Yen Tseng^a

^aDepartment of Physics, University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

^bKavli IPMU (WPI), UTIAS, The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8583, Japan

E-mail: asai@hep-th.phys.s.u-tokyo.ac.jp, hama@hep-th.phys.s.u-tokyo.ac.jp, natsumi@hep-th.phys.s.u-tokyo.ac.jp, shihyen@hep-th.phys.s.u-tokyo.ac.jp

Received June 1, 2020

Revised July 27, 2020

Accepted September 22, 2020

Published November 9, 2020

Abstract. The minimal gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ model is a simple extension of the Standard Model and has a strong predictive power for the neutrino sector. In particular, the mass spectrum and couplings of heavy right-handed neutrinos are determined as functions of three neutrino Dirac Yukawa couplings, with which we can evaluate the baryon asymmetry of the Universe generated through their decay, i.e., leptogenesis. In this letter, we study leptogenesis in the minimal gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ model. It turns out that the sign of the resultant baryon asymmetry for the case with the Dirac CP phase, δ , larger than π is predicted to be opposite to that for $\delta < \pi$. In addition, if lepton asymmetry is dominantly produced by the decay of the lightest right-handed neutrino, then the correct sign of baryon asymmetry is obtained for $\delta > \pi$, which is favored by the current neutrino-oscillation experiments, whilst the wrong sign is obtained for $\delta < \pi$. We further investigate a non-thermal leptogenesis scenario where the $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ breaking field plays the role of inflaton and decays into right-handed neutrinos, as a concrete example. It is found that this simple framework offers a successful inflation that is consistent with the CMB observation. We then show that the observed amount of baryon asymmetry can be reproduced in this scenario, with its sign predicted to be positive in most of the parameter space.

Keywords: baryon asymmetry, inflation, leptogenesis

ArXiv ePrint: [2005.01039](https://arxiv.org/abs/2005.01039)

© 2020 IOP Publishing Ltd and Sissa Medialab

<https://doi.org/10.1088/1475-7516/2020/11/013>

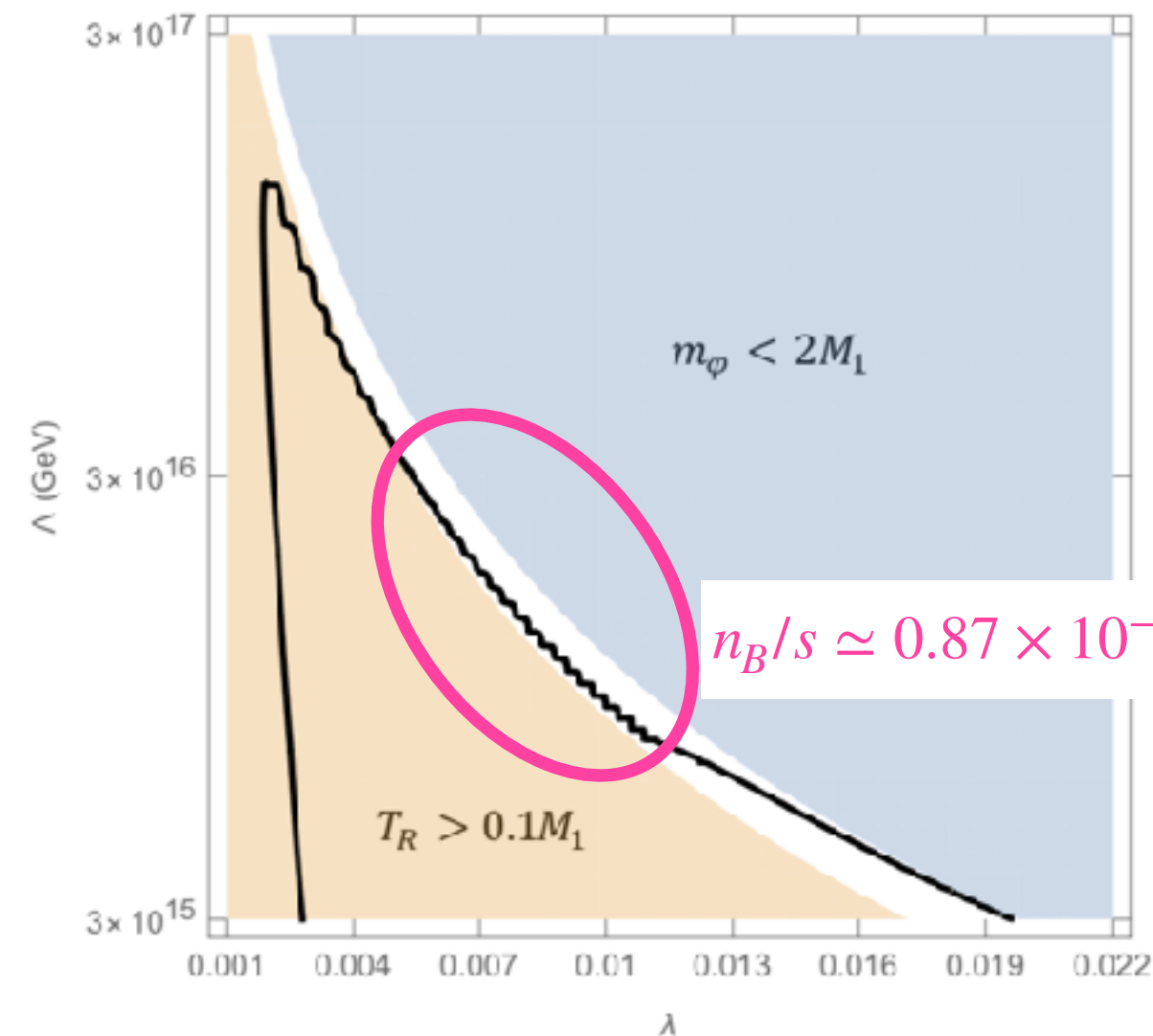
JCAP11(2020)013

$$\mathcal{L}_N = -\lambda_e N_e^c (L_e \cdot H) - \lambda_\mu N_\mu^c (L_\mu \cdot H) - \lambda_\tau N_\tau^c (L_\tau \cdot H) - \frac{1}{2} M_{ee} N_e^c N_e^c - M_{\mu\tau} N_\mu^c N_\tau^c - \frac{1}{2} \sum_{\alpha,\beta=e,\mu} h_{\alpha\beta} \sigma N_\alpha^c N_\beta^c - \frac{1}{2} \sum_{\alpha,\beta=e,\tau} h_{\alpha\beta} \sigma^* N_\alpha^c N_\beta^c + \text{h.c.},$$

$$\mathcal{L}_\sigma = \frac{|D_\mu \sigma|^2}{(1 - |\sigma|^2/\Lambda^2)^2} - \kappa (|\sigma|^2 - \langle \sigma \rangle^2)^2,$$

インフラトン崩壊による
レプトジェネシス

対称性により、
ニュートリノセクターに強い予言



$$\langle m_{\beta\beta} \rangle \gtrsim \begin{cases} 0.027 \text{ eV} & \text{for } \theta_{23} \lesssim 50.1^\circ [1\sigma, \text{NuFit5.0}] \\ 0.017 \text{ eV} & \text{for } \theta_{23} \lesssim 51.7^\circ [3\sigma, \text{NuFit5.0}] \end{cases}$$

※ 他の振動パラメータは best fit value に固定。

まとめ

▶ **宇宙の物質反物質非対称性**は標準模型では説明できない。
素粒子物理・宇宙物理の**最大の謎の一つ**。

▶ **レプトジェネシス**によって自然に説明出来る。

(重い)右巻きニュートリノの導入と、**レプトン数を破るマヨラナ質量項**がカギ

$$L = L_{\text{Standard Model}} + \frac{1}{2} \bar{N} (i\gamma^\mu \partial_\mu - M) N - y \bar{N} \ell_L H + h.c.$$

(1) レプトン数非対称性 $\xrightarrow{\text{スファレロン}}$ バリオン数非対称性

(2) (軽い)**ニュートリノ質量**も説明する。(seesaw機構)

▶ **このとき軽い(我々が観測する)ニュートリノもマヨラナになる。**

$\Rightarrow 0\nu\beta\beta$ decay !!

バックアップ

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?)

もちろんそう名付けたんだけど、符号には意味がある。

「残ったのはどっちか」を知らなくても
どっちが「物質」かというのは定義出来る。
(例えば K_L の semi-leptonic 崩壊を見て多い方が「反レプトン」)

反物質で出来た宇宙 (ただしラグランジアンは同じ) に住む宇宙人と交信が出来たとして、
主成分が物質か反物質か聞きたければ、
「うちの電子は K_L の semi-leptonic 崩壊で少なく出る方だがお前んとこの電子はどっちだ？」
と聞けばよい。

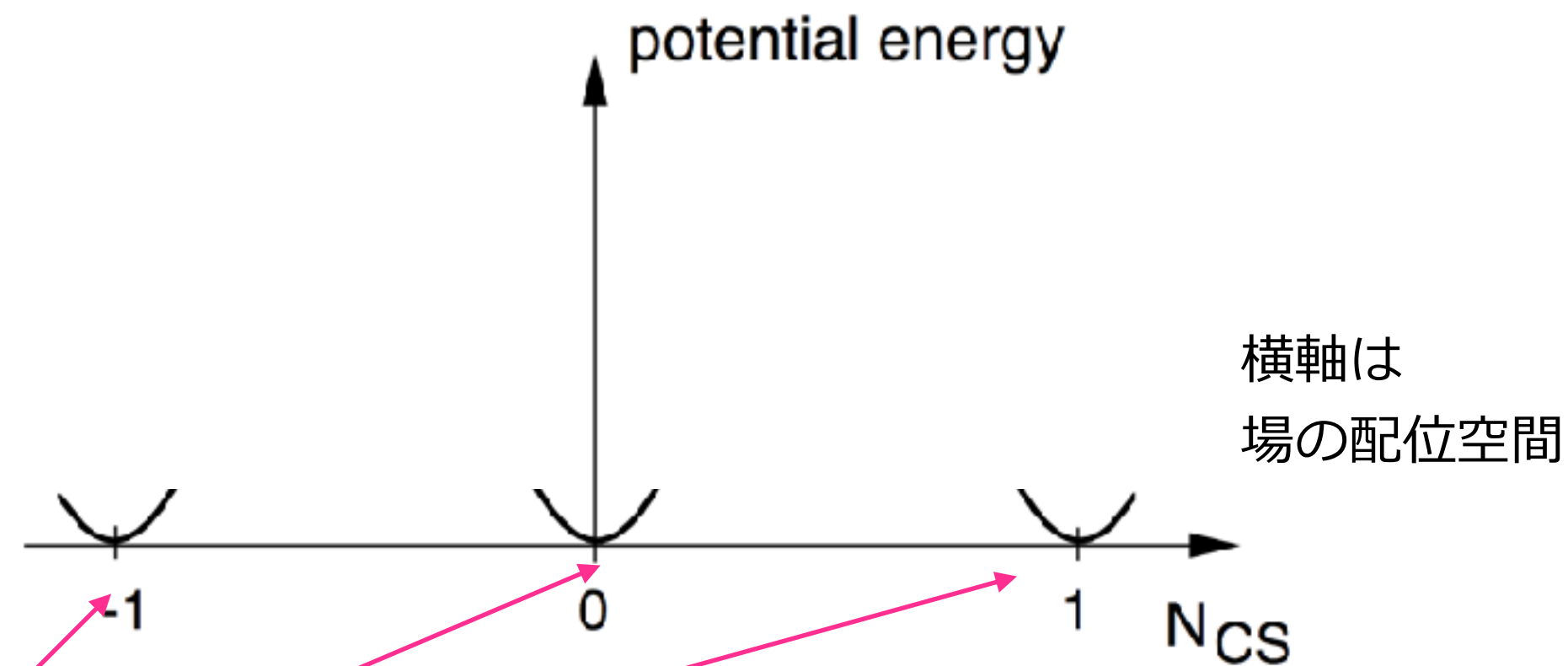
スファレロンについて：

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。

		世代 Generation		
電荷 Charge	スピン Spin	I	II	III
クォーク Quarks	+2/3	u up	c charm	t top
	-1/3	d down	s strange	b bottom
レプトン Leptons	-1	e electron	μ muon	τ tau
	0	ν _e electron neutrino	ν _μ muon neutrino	ν _τ tau neutrino

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



それぞれの真空での場の配位

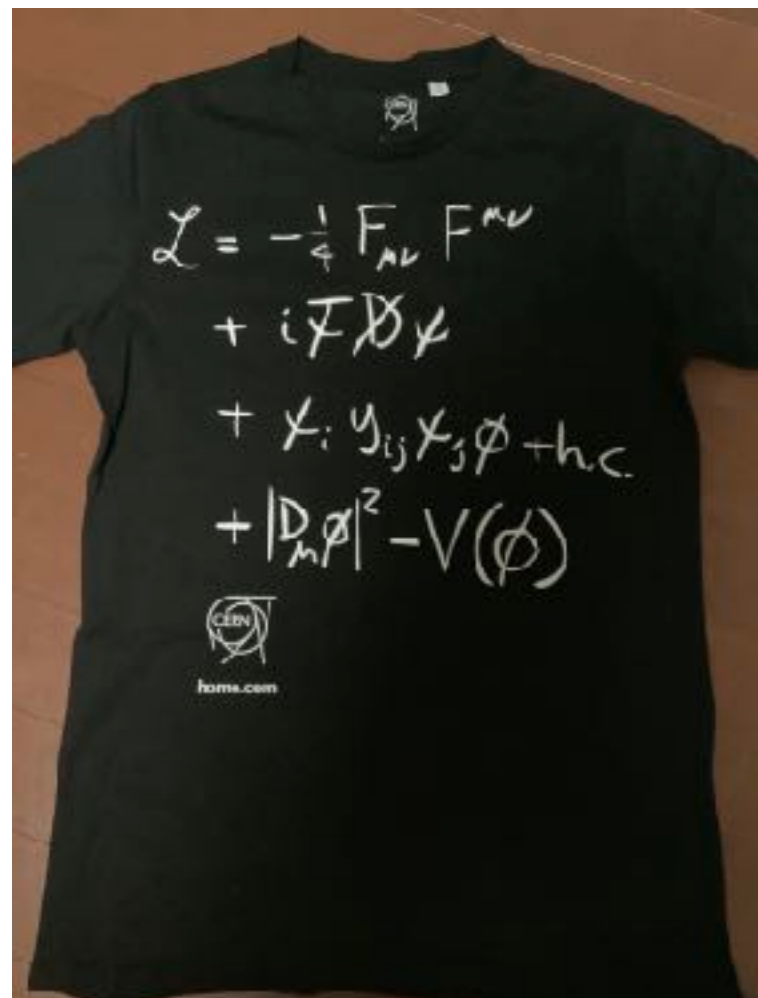
$$A_\mu(x) = \frac{i}{g} \partial_\mu U(x) U^{-1}(x)$$

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

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

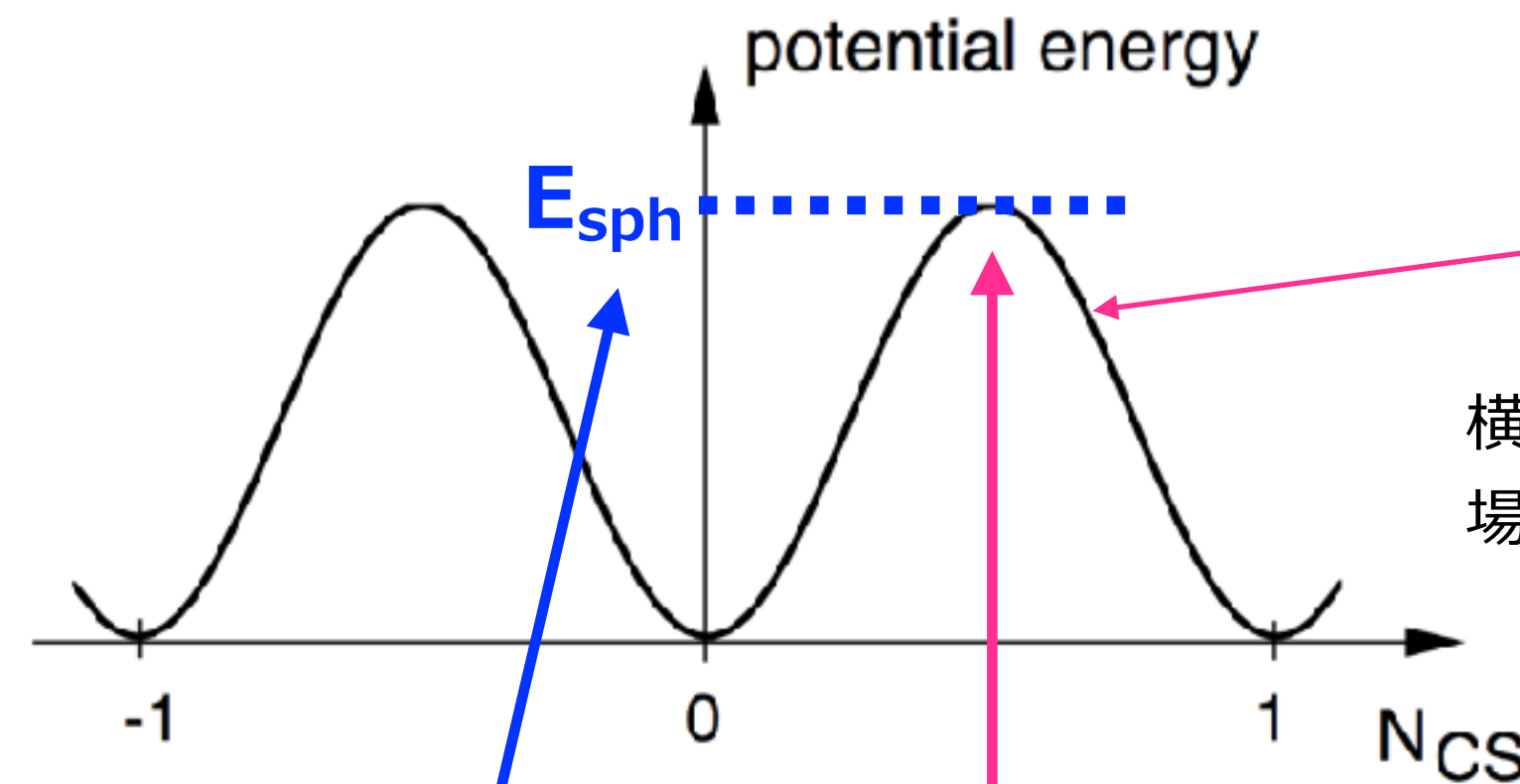


スファレロンについて：

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。

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

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

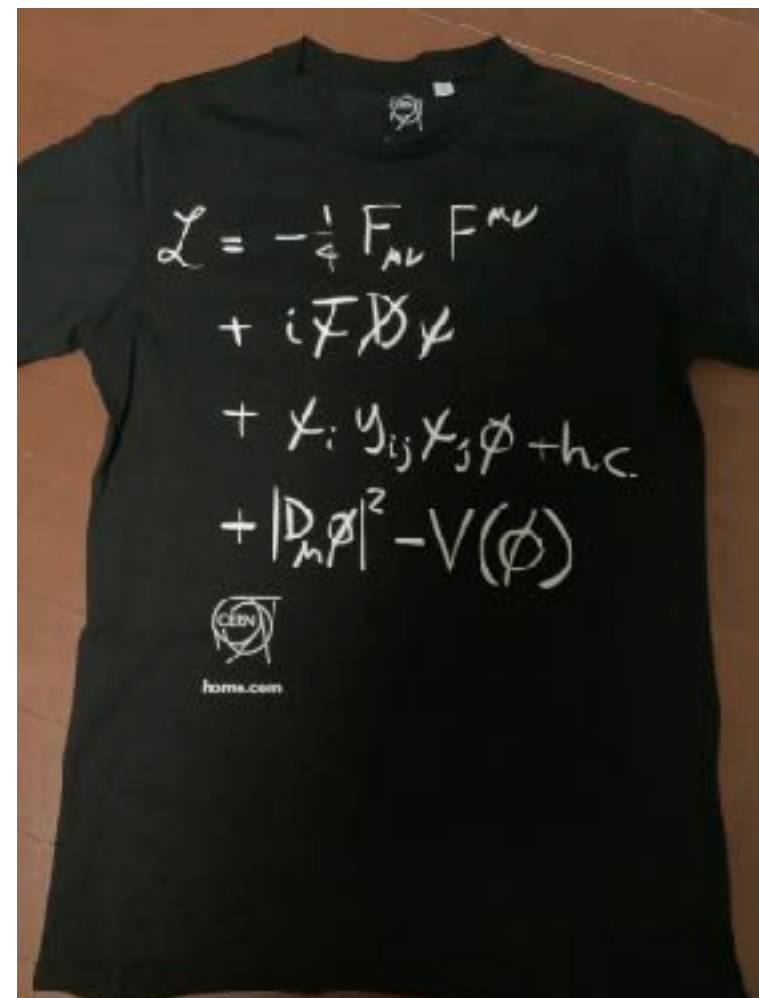
with

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

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。

月曜のスピーカーの冬頭さん

		世代 Generation			
		I	II	III	
電荷 Charge	スピン Spin				
クォーク Quarks	+2/3	1/2	u up	c charm	t top
	-1/3	1/2	d down	s strange	b bottom
レプトン Leptons	-1	1/2	e electron	μ muon	τ tau
	0	1/2	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

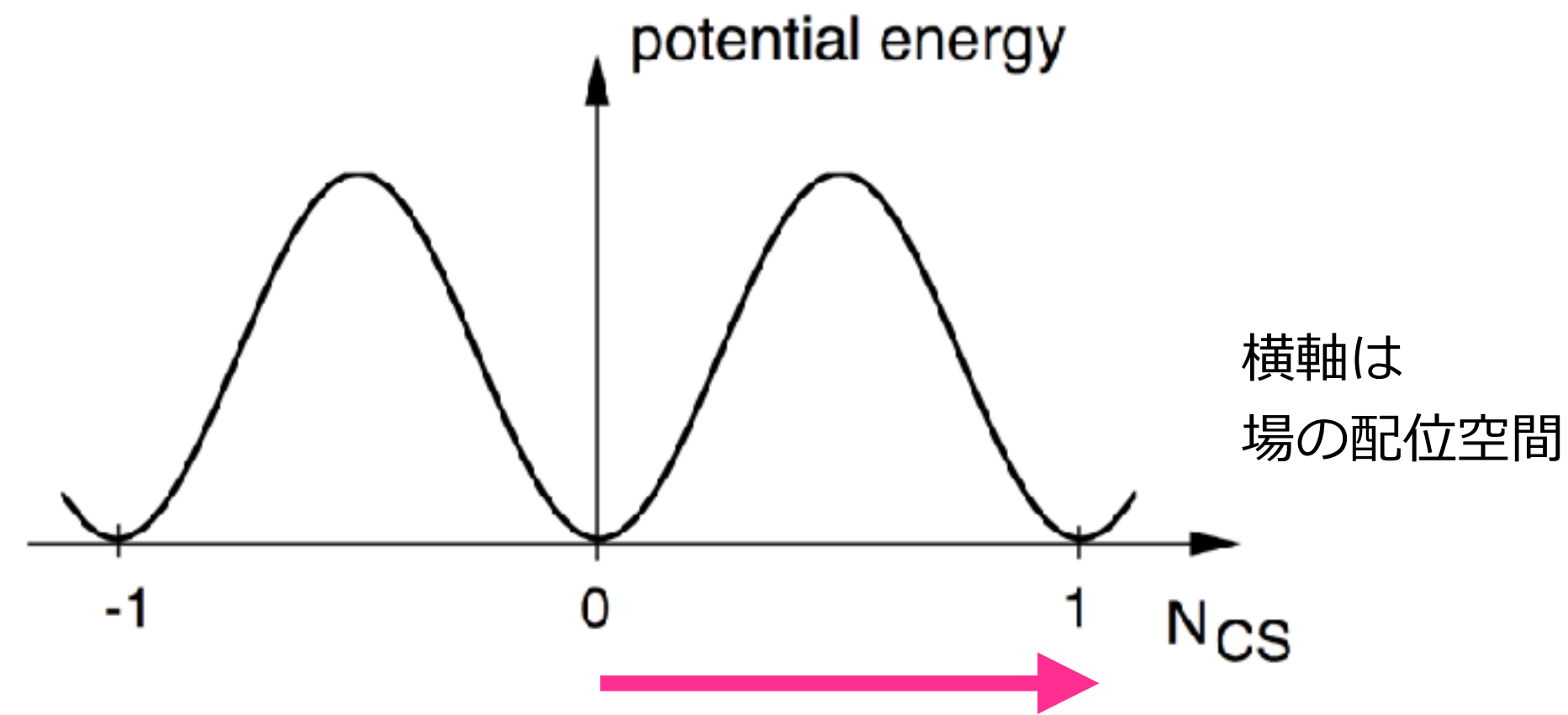


スファレロンについて：

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!

		世代 Generation		
電荷 Charge	スピン Spin	I	II	III
クォーク Quarks	+2/3	u up	c charm	t top
	-1/3	d down	s strange	b bottom
レプトン Leptons	-1	e electron	μ muon	τ tau
	0	ν _e electron neutrino	ν _μ muon neutrino	ν _τ tau neutrino
	1/2			

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



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

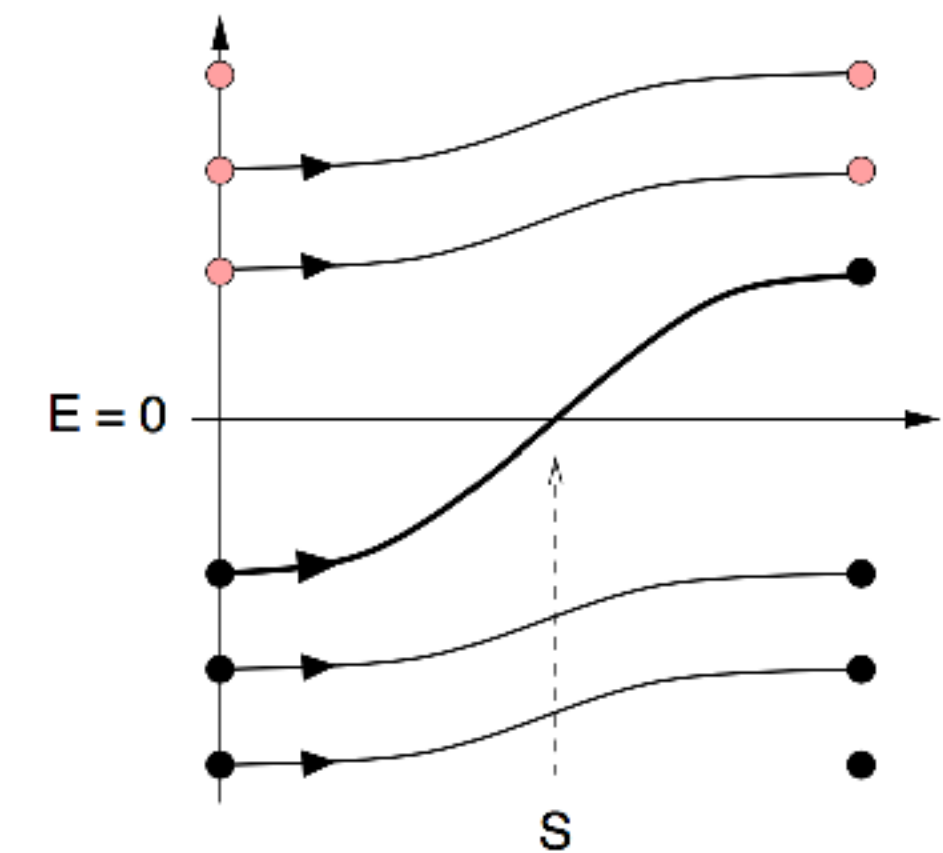
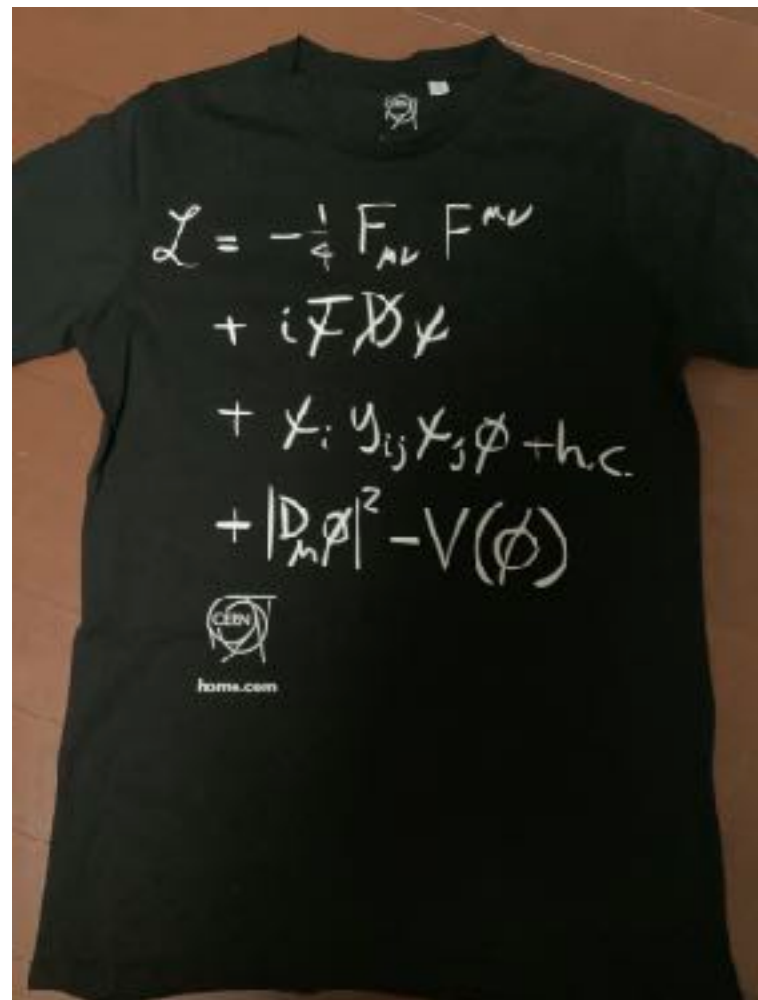
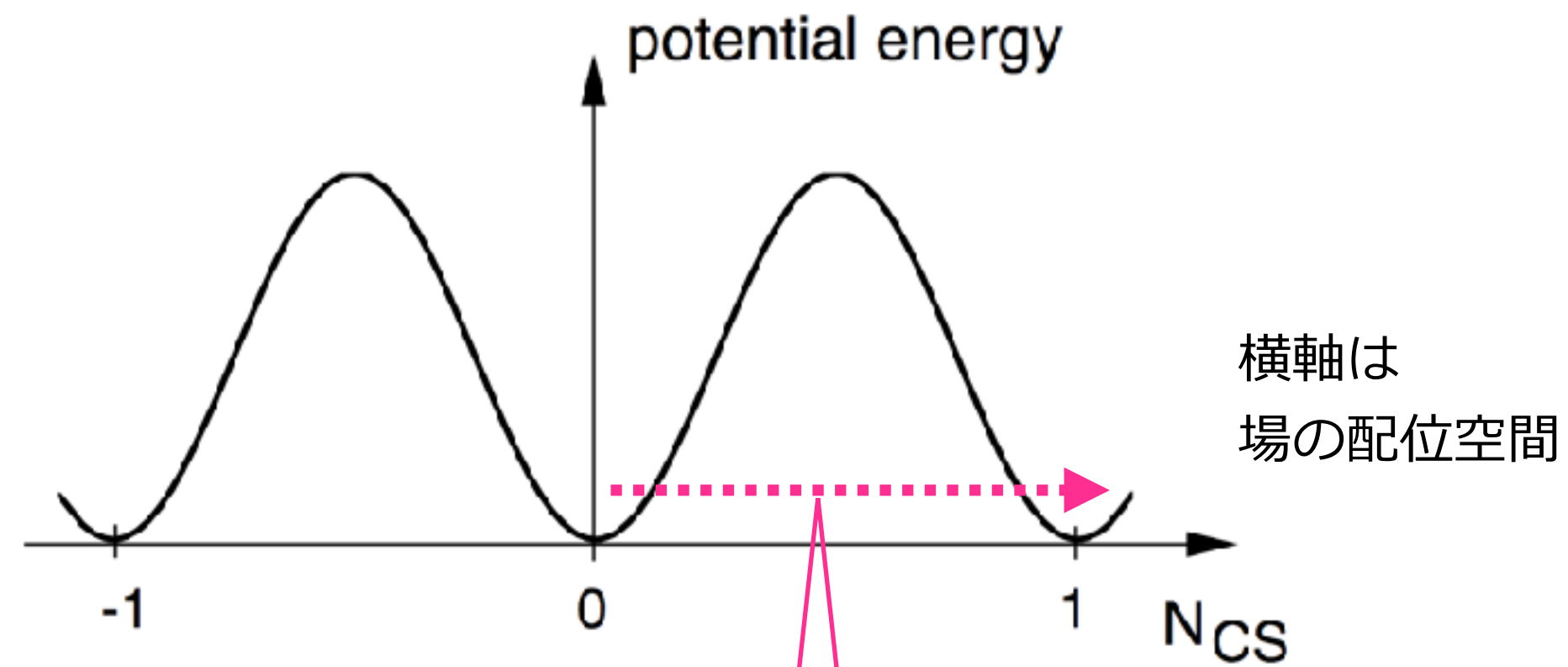


Fig. from Klinkhamer and Rupp
hep-th/0304167

スファレロンについて：

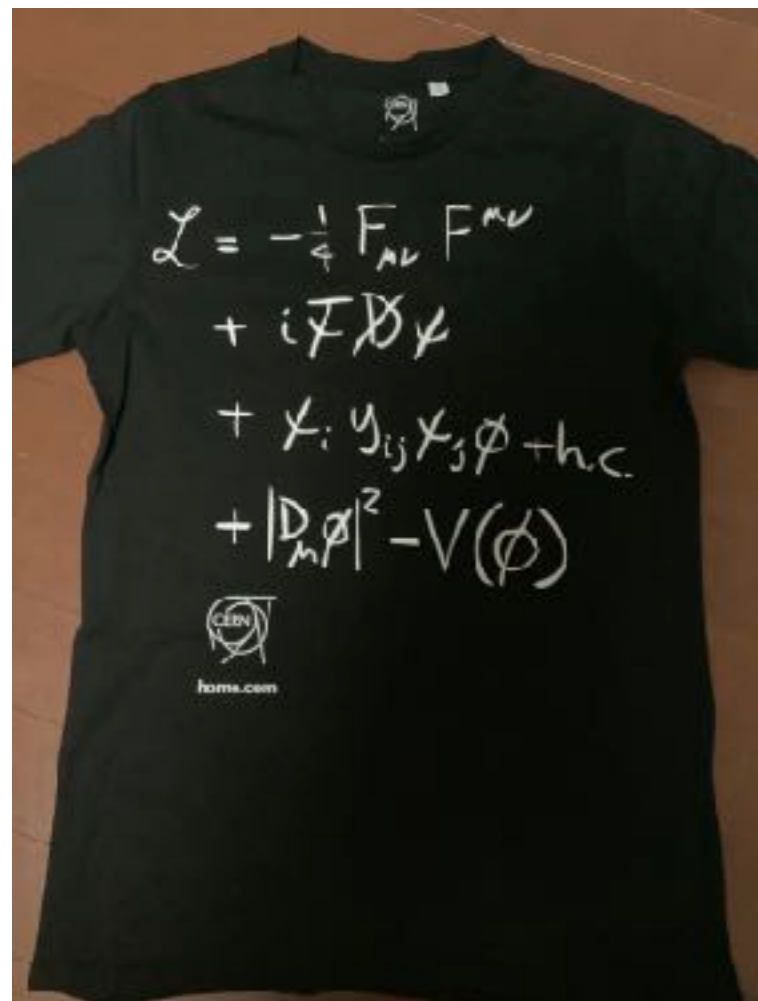
point 4: ゼロ温度ではトンネル効果による遷移は無視できるけど、、、

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



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

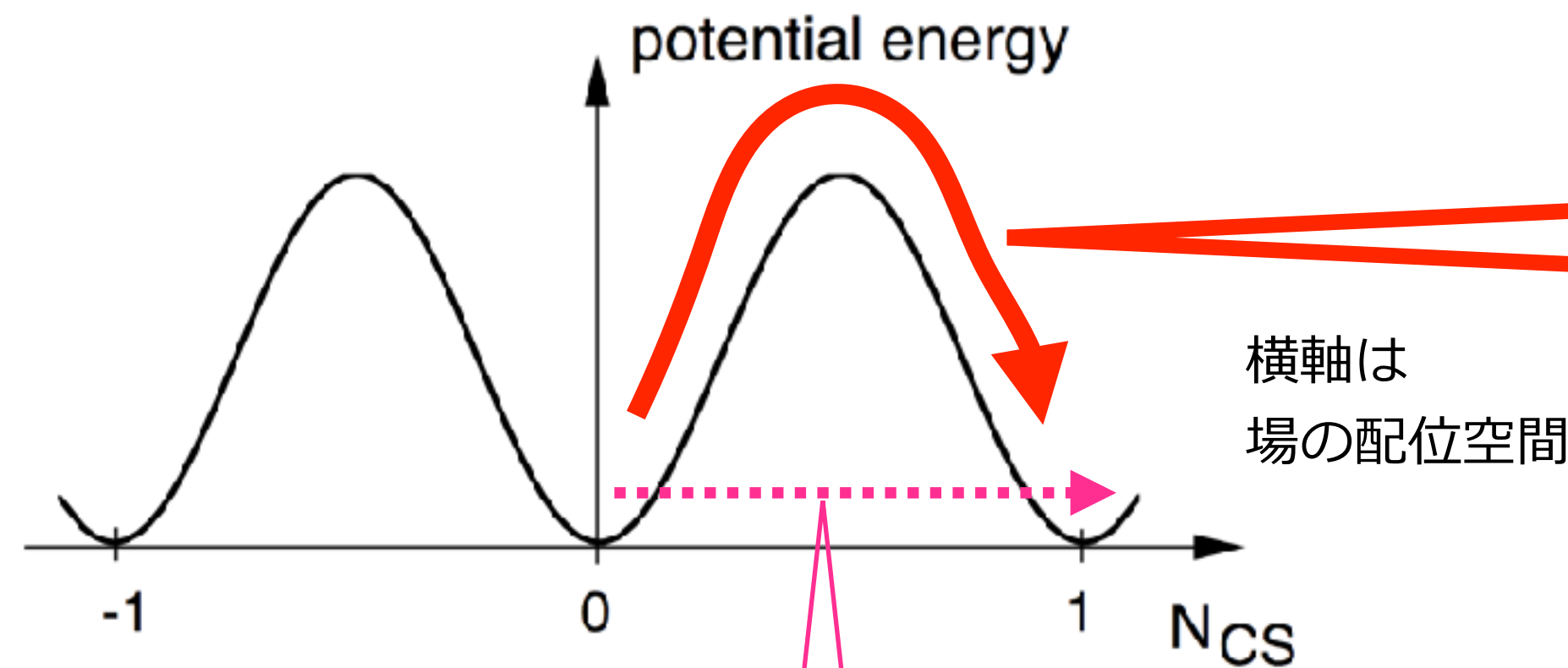
	電荷 Charge	スピン Spin	世代 Generation		
			I	II	III
クォーク Quarks	+2/3	1/2	u up	c charm	t top
	-1/3	1/2	d down	s strange	b bottom
レプトン Leptons	-1	1/2	e electron	μ muon	τ tau
	0	1/2	ν _e electron neutrino	ν _μ muon neutrino	ν _τ tau neutrino



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！

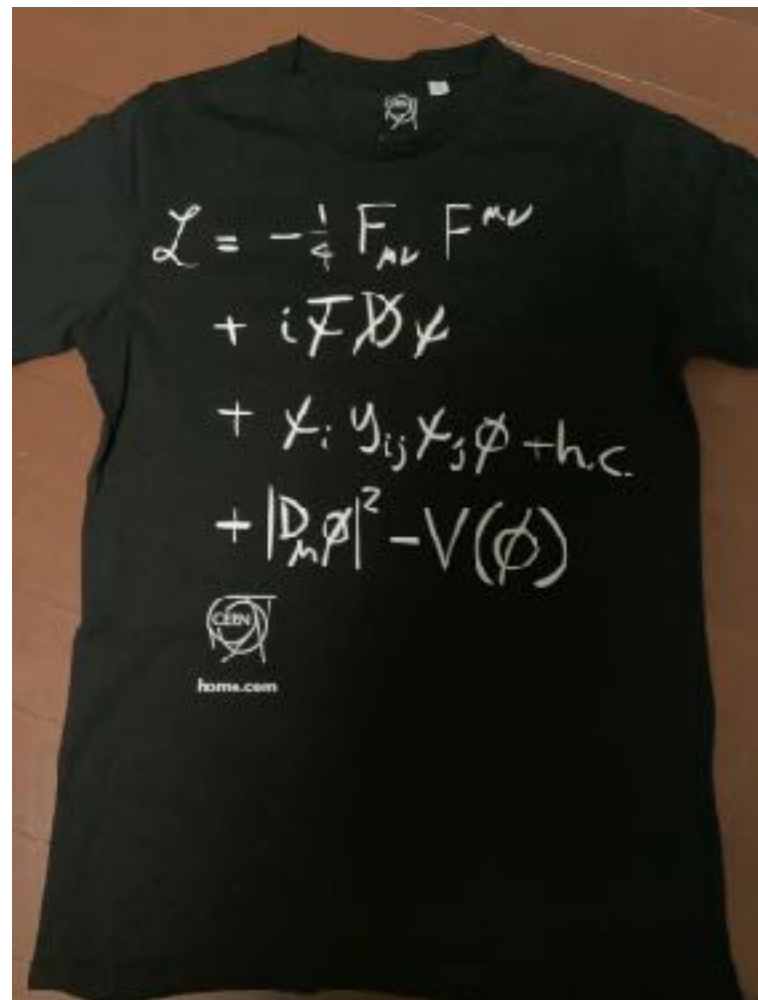
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + (D_\mu \Phi)^\dagger D^\mu \Phi - \lambda \left(\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2} \right)^2$$



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

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

	電荷 Charge	スピン Spin	世代 Generation		
			I	II	III
クォーク Quarks	+2/3	1/2	u up	c charm	t top
	-1/3	1/2	d down	s strange	b bottom
レプトン Leptons	-1	1/2	e electron	μ muon	τ tau
	0	1/2	ν _e electron neutrino	ν _μ muon neutrino	ν _τ tau neutrino



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

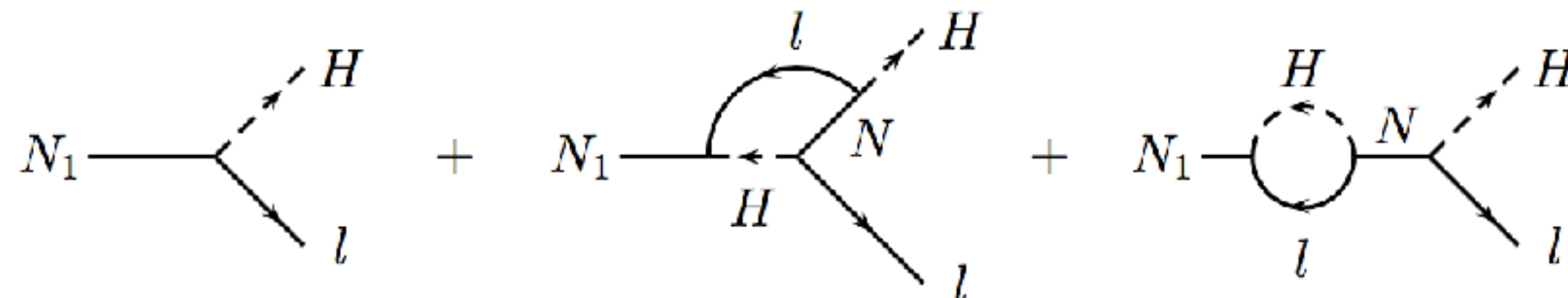
“Leptogenesis in inflaton decay” の場合

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

“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

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

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

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]

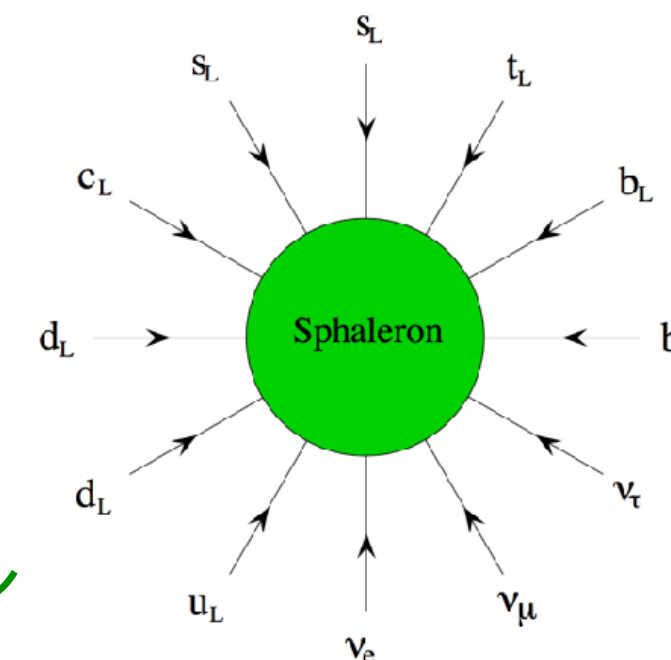
$$\frac{n_B}{s} = \frac{n_{\text{inf}}}{s} \times \frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} \times \frac{n_L}{n_{N_R}} \times \frac{n_B}{n_L}$$

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

``Leptogenesis in inflaton decay'' の場合

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

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

全部合わせると . . .

$$\begin{aligned} &\simeq 2.5 \times 10^{-10} \cdot \left(\frac{m_{\nu 3}}{0.05 \text{ eV}} \right) \delta_{\text{eff}} \quad \text{effective CP phase} \\ &\times \text{Br}_{(\text{inf} \rightarrow NN)} \cdot \left(\frac{T_R}{10^7 \text{ GeV}} \right) \left(\frac{2m_{N_R}}{m_{\text{inf}}} \right) \quad \begin{array}{l} \text{右巻きニュートリノ質量} \\ \text{崩壊分岐比} \quad \text{再加熱温度} \quad \text{inflaton の質量} \end{array} \end{aligned}$$

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・・・

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

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

適切なパラメータを持ってくれば観測値を説明出来る。