

素粒子特論

浜口幸一 (東京大学 理学系研究科 物理学専攻)

@お茶の水女子大学, 2023年夏学期

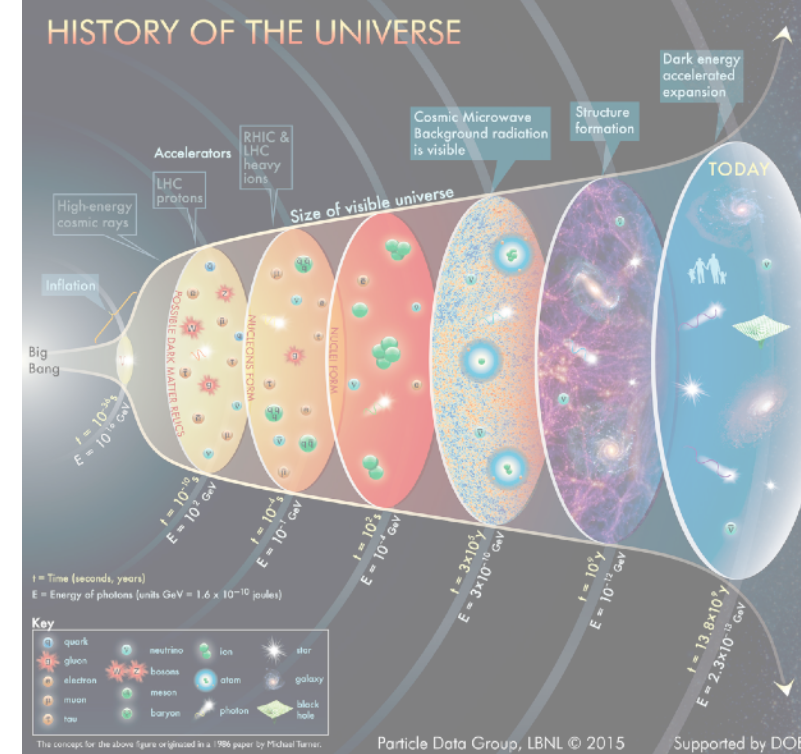
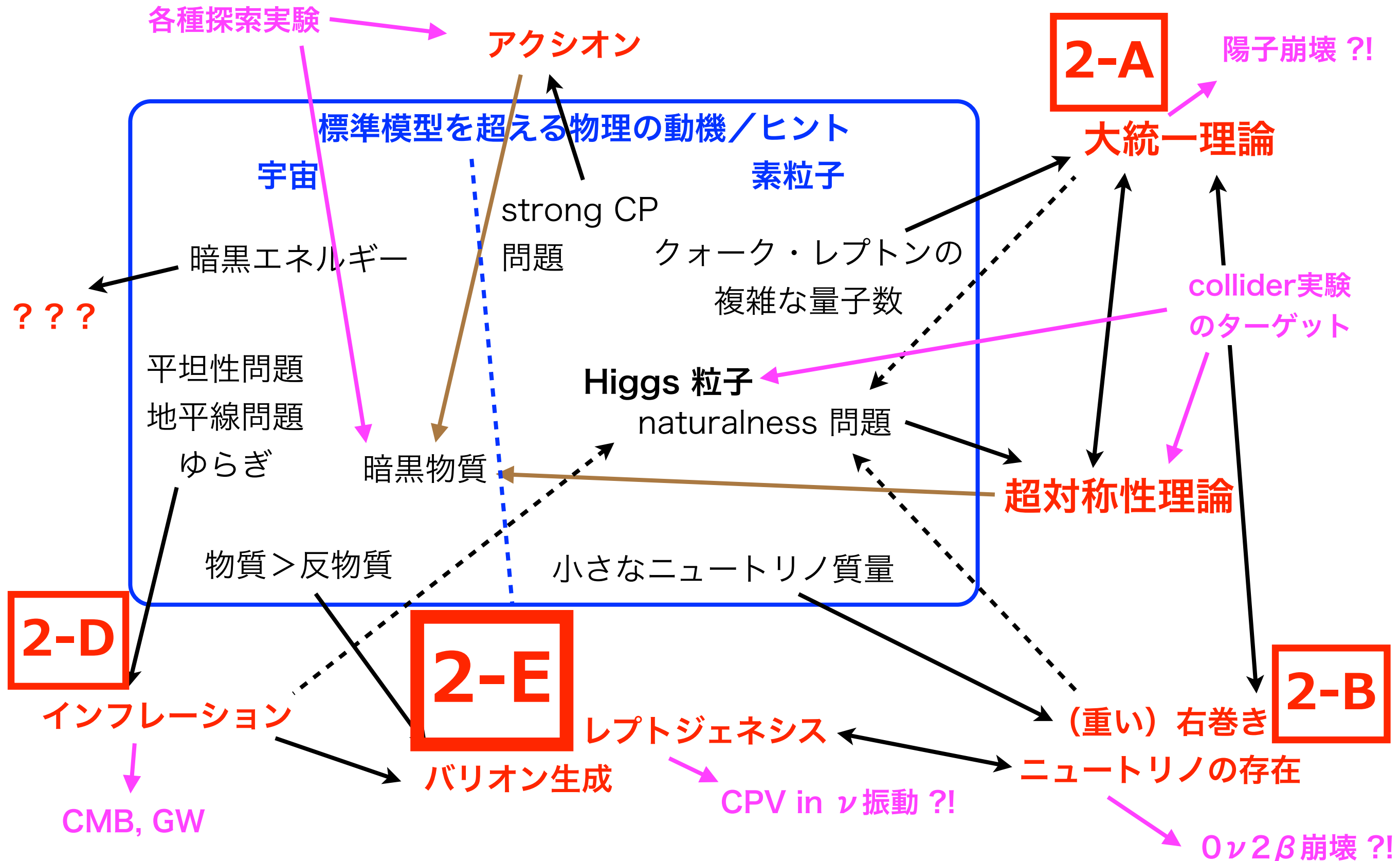


Figure credit;
Particle Data Group
at Lawrence Berkeley National Lab.

第1部まとめ



第2部予定

A 大統一理論

B ニュートリノ質量とシーソー機構

C 標準宇宙論入門

D インフレーション

E 宇宙の物質反物質非対称性とバリオジェネシス／レプトジェネシス

F 暗黒物質

G strong CP問題とアクシオン

H 超対称性模型

2-E 宇宙の物質反物質非対称性とバリオジェネシス／レプトジェネシス

2-E 宇宙の物質反物質非対称性とバリオジェネシス／レプトジェネシス

- 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 の中のレプトジェネシス

- ▶ バリオン数の計算の具体例

2-E 宇宙の物質反物質非対称性とバリオジェネシス／レプトジェネシス

- 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

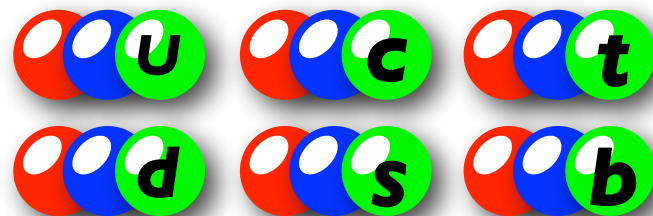
- ▶ なぜ「レプト」ジェネシスなのか？
- ▶ Big picture の中のレプトジェネシス
- ▶ バリオン数の計算の具体例

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

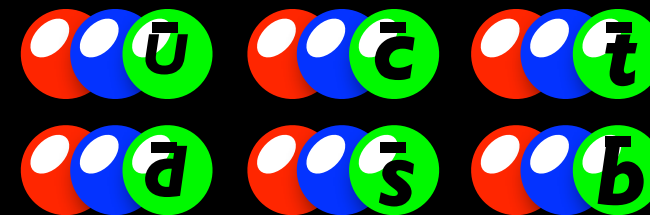
クォーク



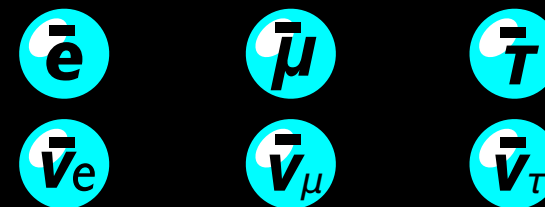
レプトン



反粒子

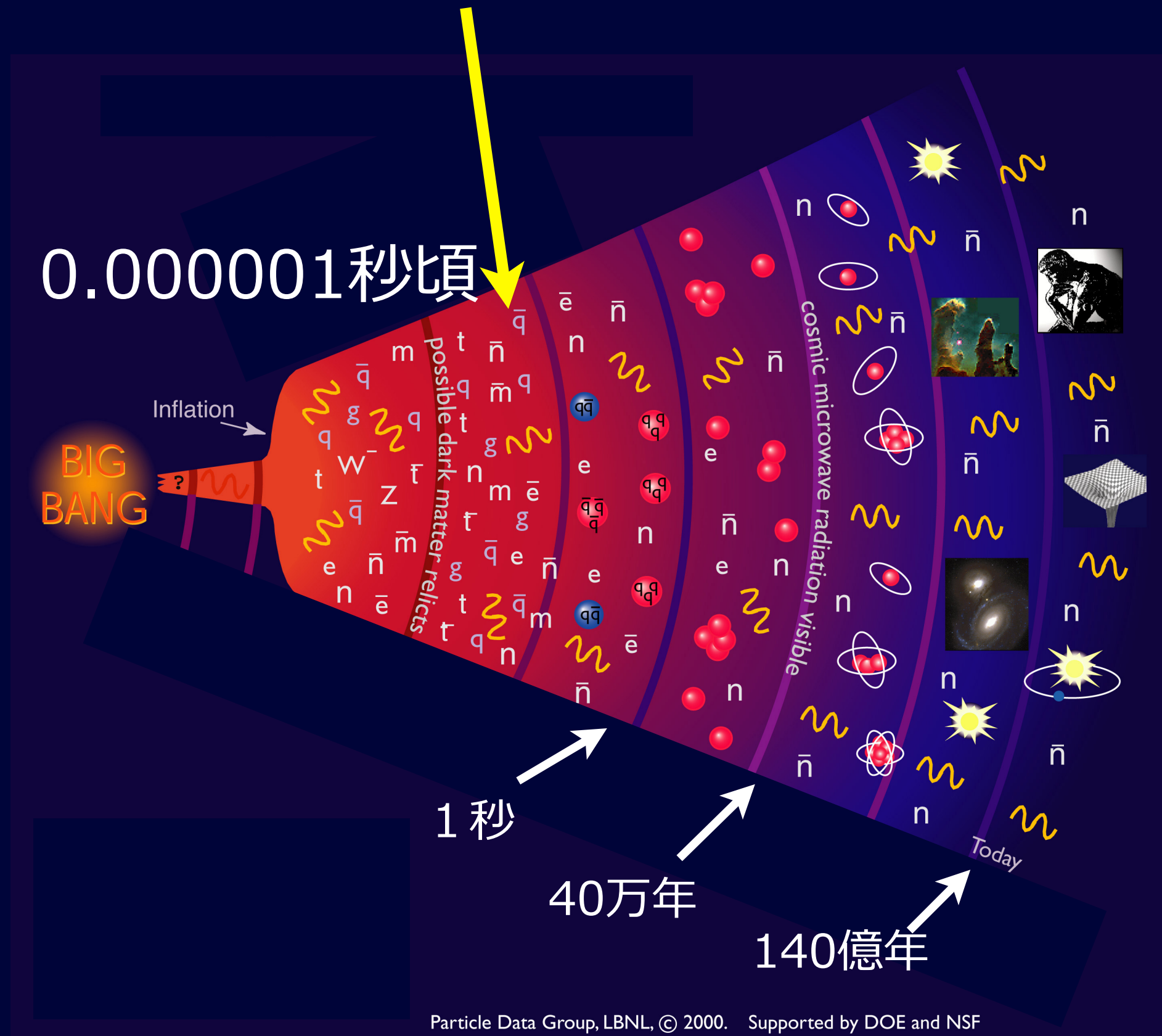


反クォーク



反レプトン

宇宙のずっと始めの頃は・・・



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。

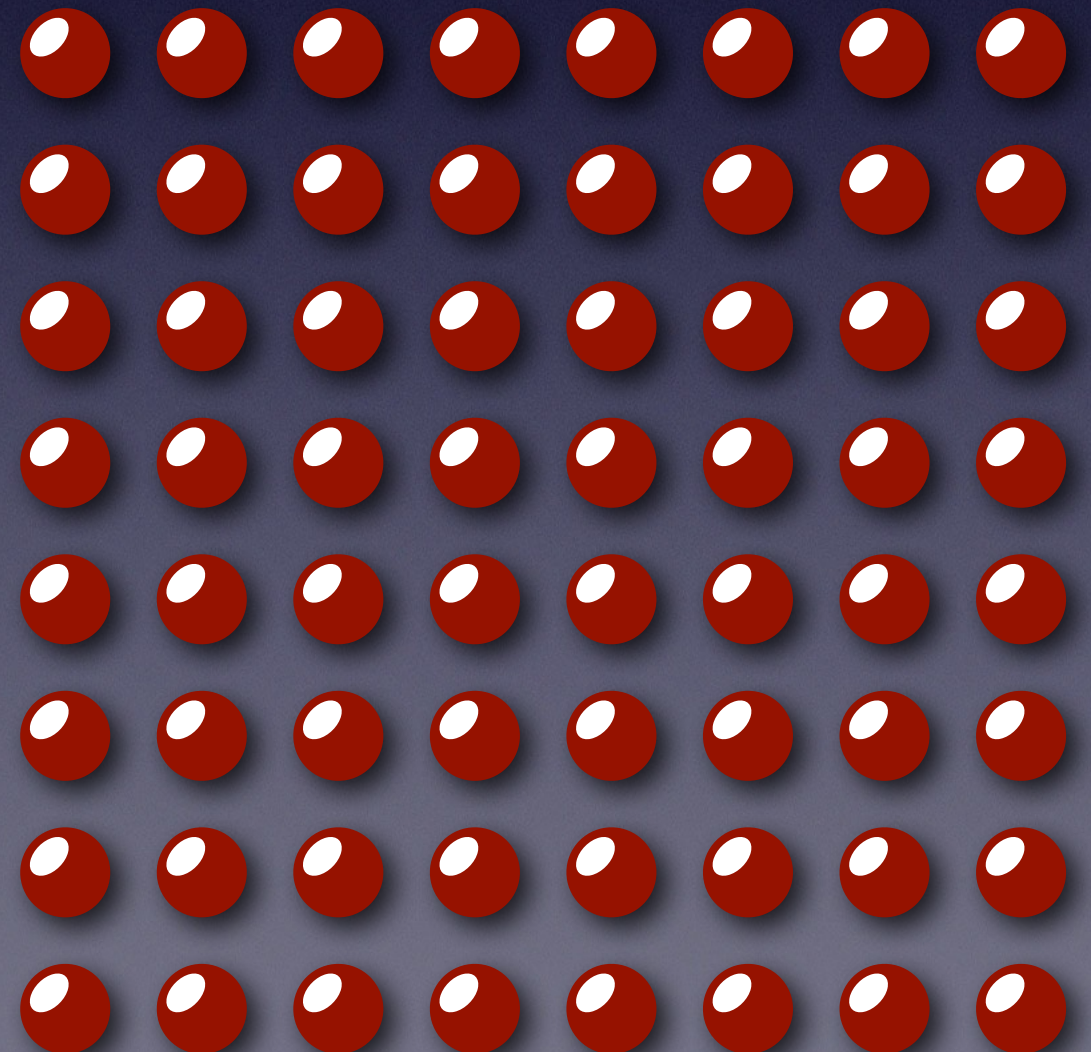
ただし物質の方がほんの少しだけ多かった。

物質



3億分の1
の差

反物質



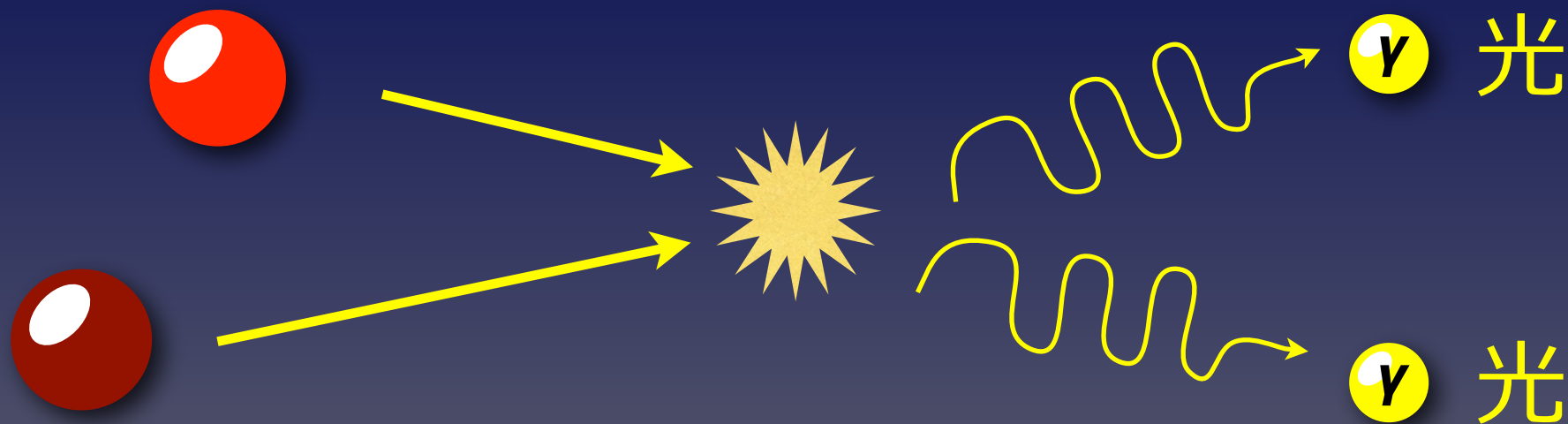
宇宙のずっと始めの頃は
物質と反物質がほぼ同数あった。

やがて温度が冷えてくると**対消滅**して・・・

物質

反物質

粒子と反粒子の**対消滅**



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

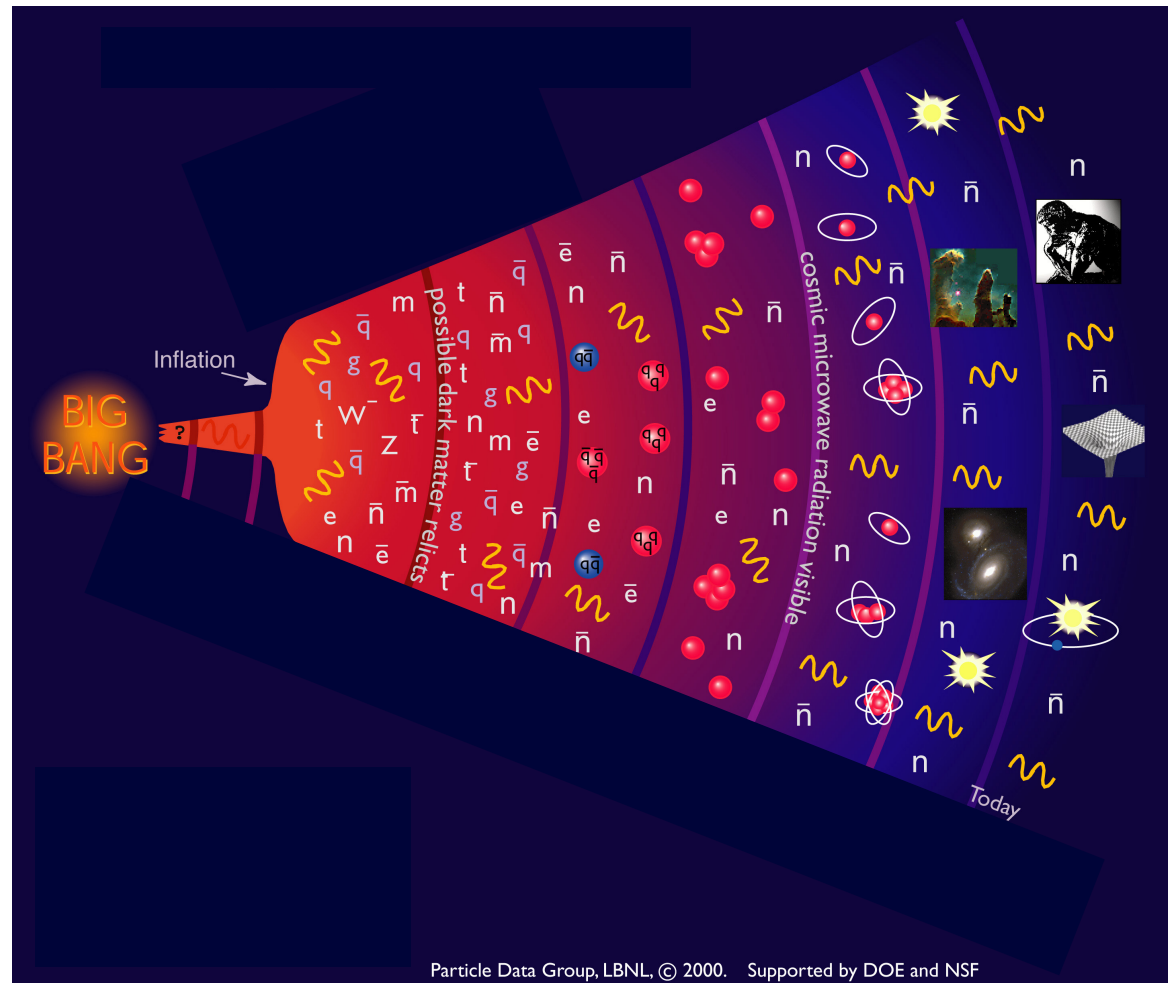


(反物質は消滅)

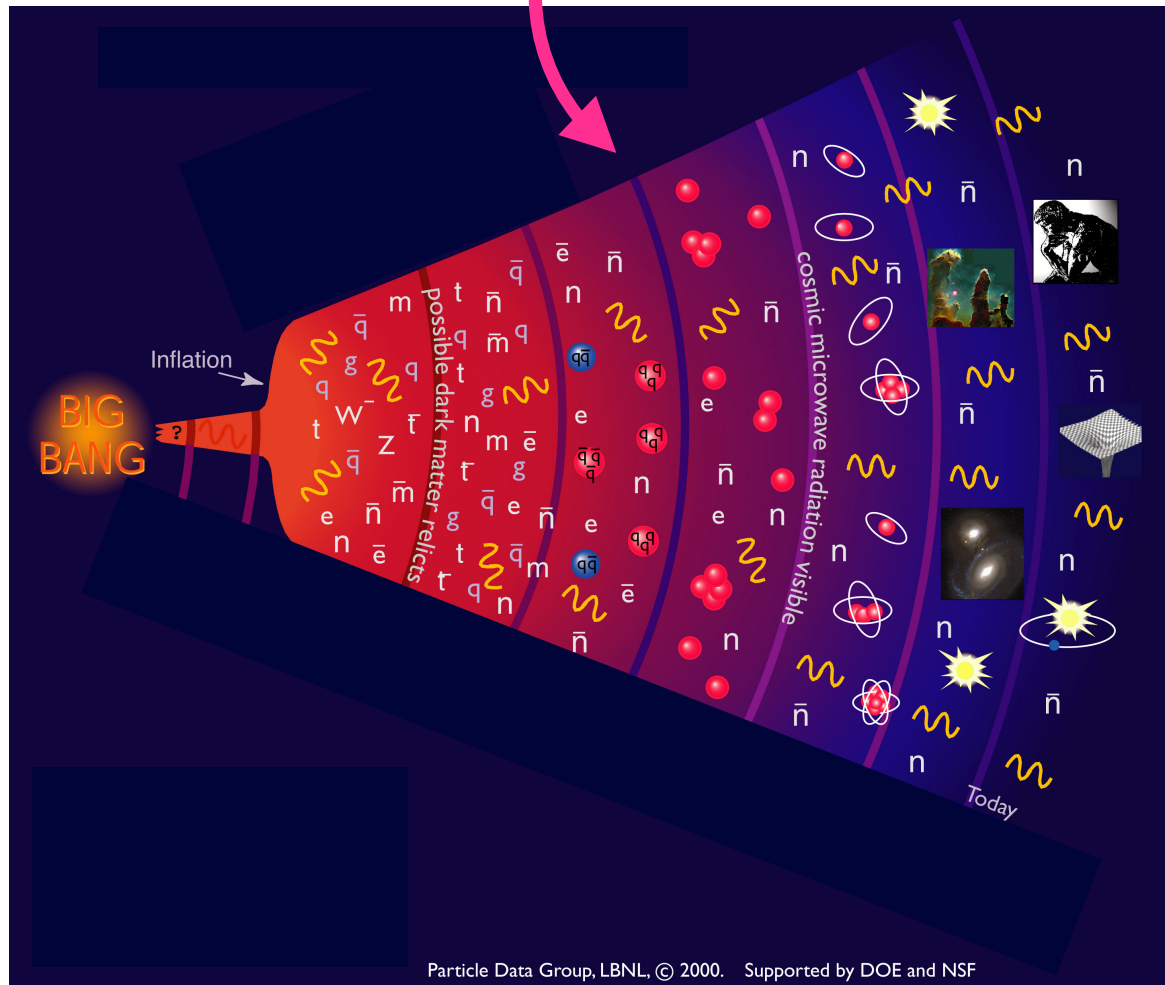


我々は（銀河も地球も人間の体も・・・）
この残った物質で出来ている！

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～)

$$5.8 \leq \eta_{10} \leq 6.6 \text{ (95\% CL).}$$

$$\longleftrightarrow 0.021 \leq \Omega_b h^2 \leq 0.024 \text{ (95\% CL).}$$

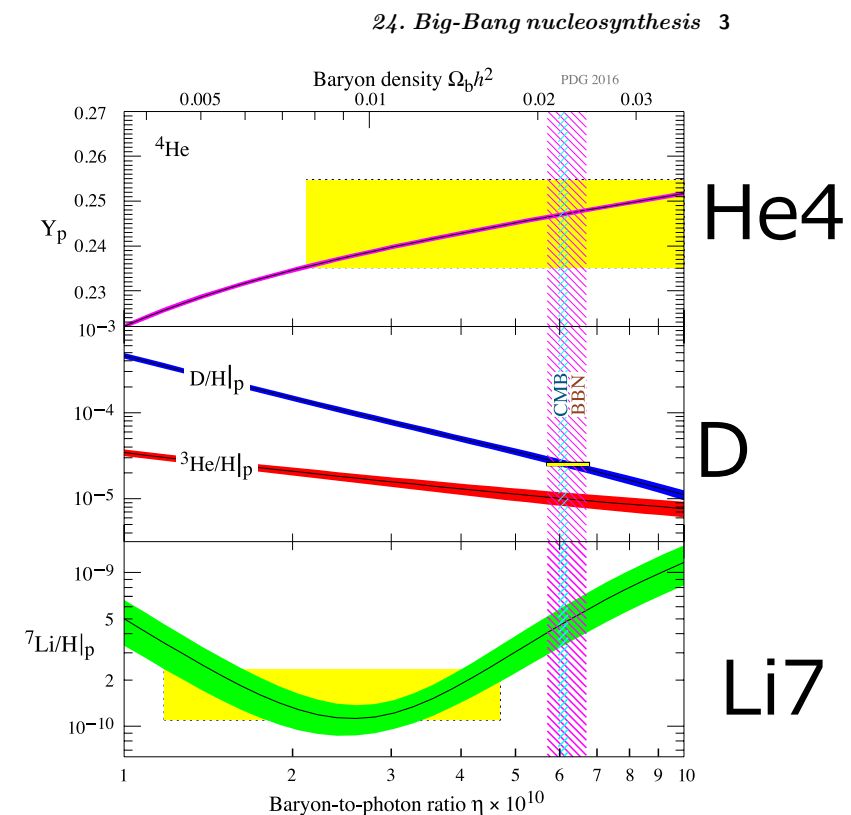
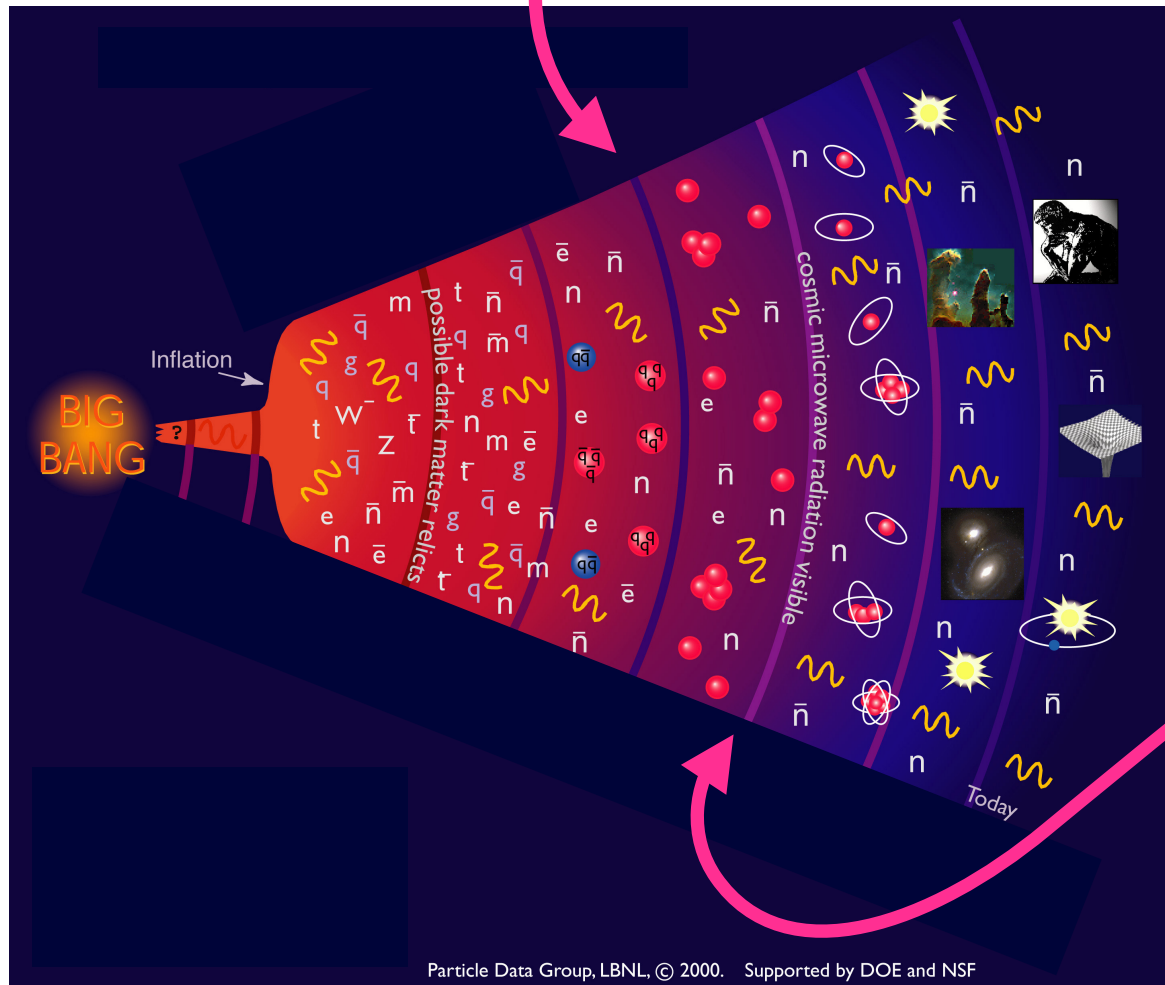


Figure 24.1: The primordial abundances of ^4He , D , ^3He , and ^7Li as predicted by the standard model of Big-Bang nucleosynthesis—the bands show the 95% CL range [5]. Boxes indicate the observed light element abundances. The narrow vertical band indicates the CMB measure of the cosmic baryon density, while the wider band indicates the BBN concordance range (both at 95% CL).

[Particle Data Group]

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～)

$$5.8 \leq \eta_{10} \leq 6.6 \text{ (95\% CL).}$$

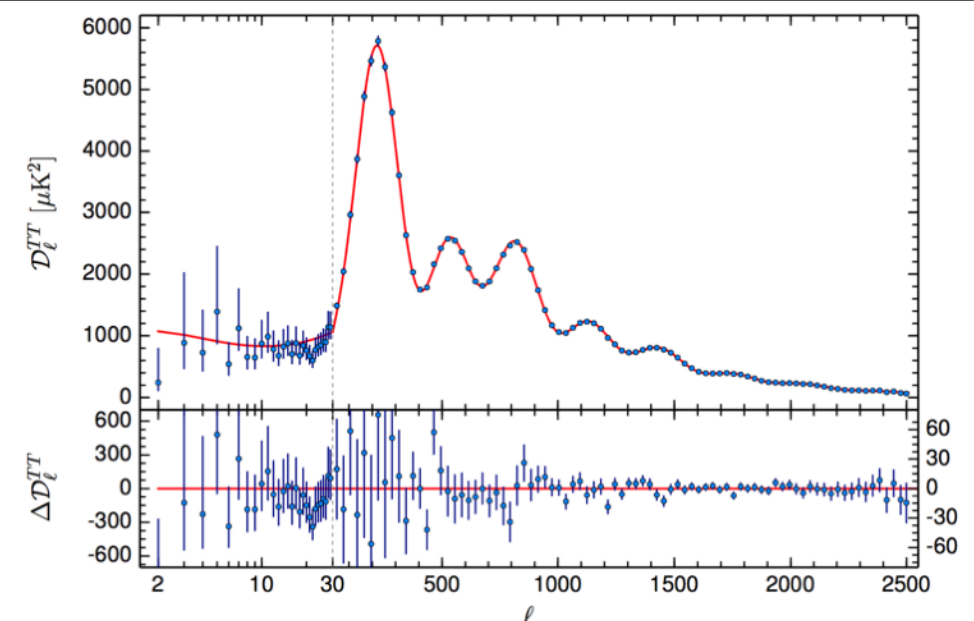
$$\longleftrightarrow 0.021 \leq \Omega_b h^2 \leq 0.024 \text{ (95\% CL).}$$

(2) 宇宙背景放射

(宇宙誕生後40万年～)

$$\Omega_b h^2 \dots 0.02222 \pm 0.00023 \text{ (68\%)}$$

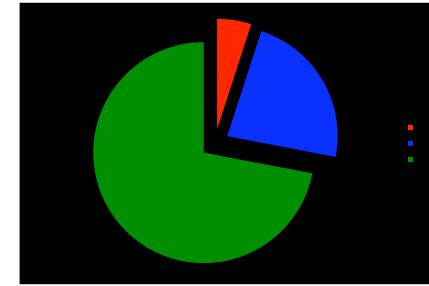
[Planck 2015]



両者は consistent
(2) の方が高精度

オマケ：バリオン数の3通りの数え方

$$\Omega_b h^2 \approx 0.022$$

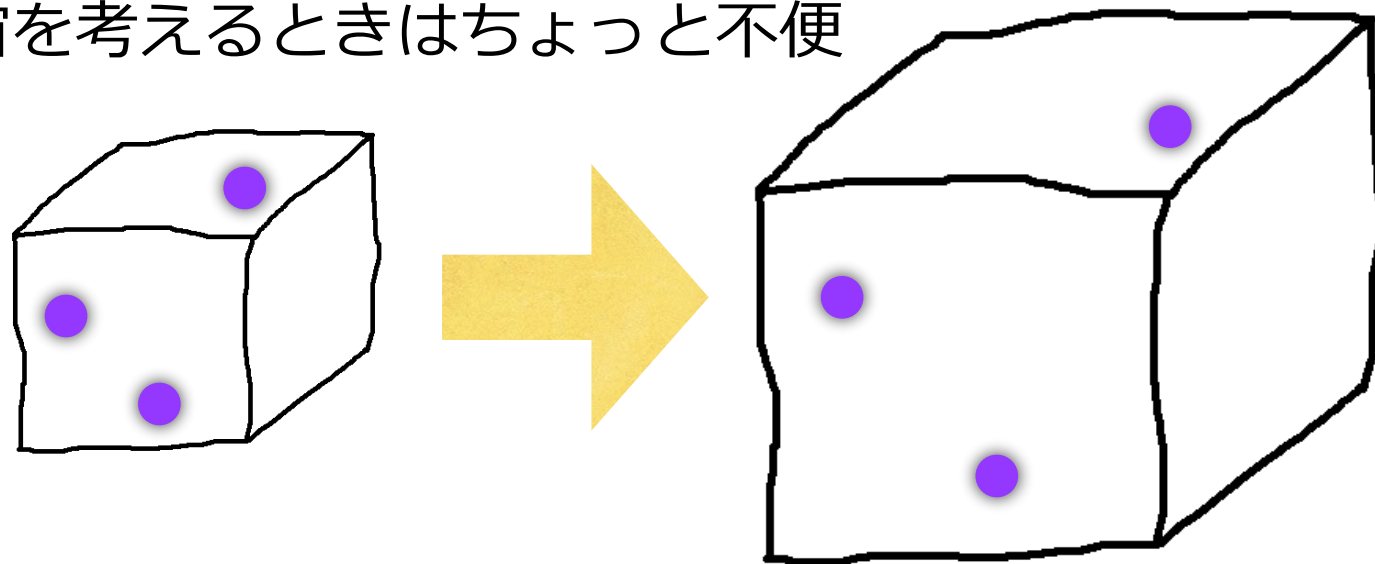


Ω_b = (現在のバリオン質量密度) / (宇宙の臨界密度)

$\approx$ 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きはちょっと不便



オマケ：バリオン数の3通りの数え方

$$\Omega_b h^2 \approx 0.022$$

Ω_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

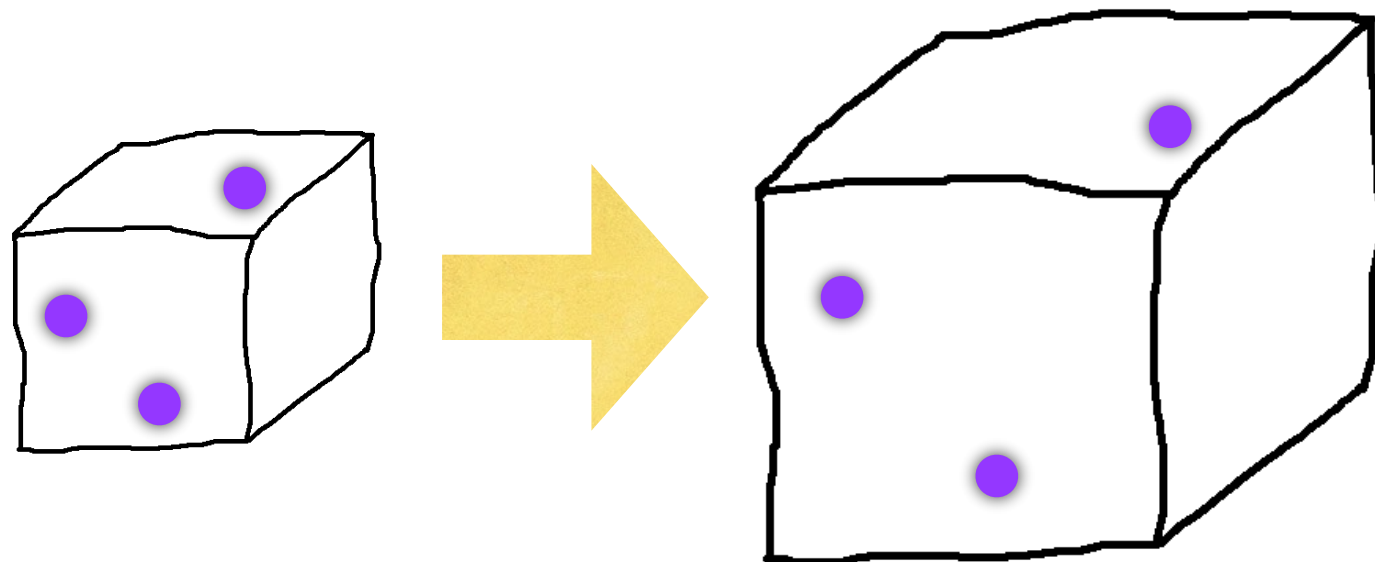
$h \approx 0.67$ (規格化されたハッブル定数)

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

$n_B = n(\text{baryon}) - n(\text{anti-baryon}) =$ (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)
厳密に言うとこれも少し不便。

オマケ：バリオン数の3通りの数え方

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

Ω_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)

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

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

$n_\gamma =$ 光子数密度

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

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

$s =$ (エントロピー密度)

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？)

もちろんそう名付けたんだけど、符号には意味がある。

例えば… あなたが

「同じラグランジアンで記述されているけど、

宇宙の物質と反物質だけが逆転した世界」

に転生してしまったとしましょう。

あなたは、物質と反物質が入れ替わったことに気づけるでしょうか？



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。

例えば… あなたが

**「同じラグランジアンで記述されているけど、
宇宙の物質と反物質だけが逆転した世界」**

に転生してしまったとしましょう。



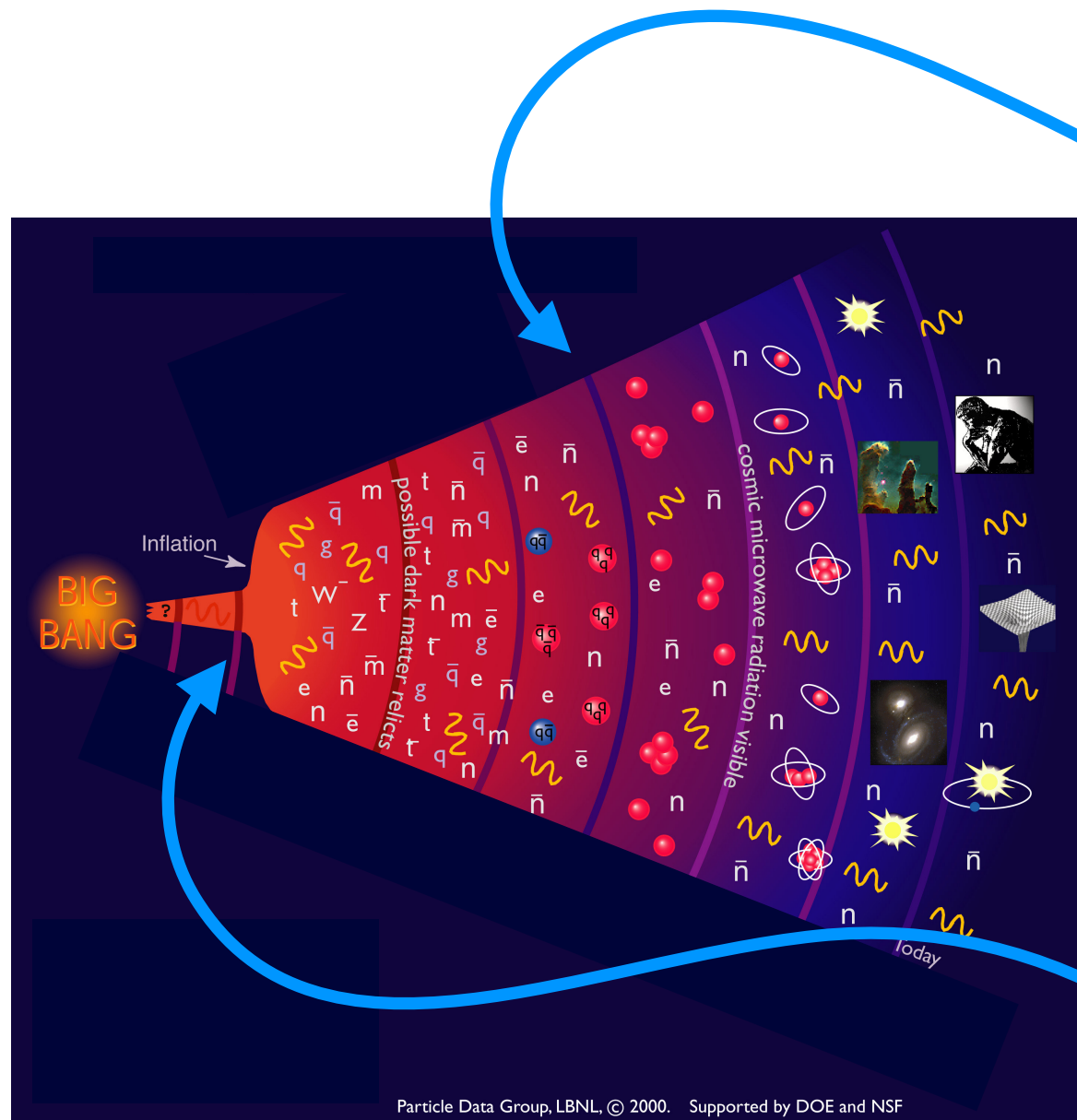
あなたは、物質と反物質が入れ替わったことに気づけるでしょうか？

答えは「Yes」です。例えば K_L という中間子 semi-leptonic 崩壊を見て多い方が
(我々の宇宙では) 「反レプトン」と定義されているものです。
これは宇宙に残っているのがどちらか？という質問とは別に確認できます。

$$A_L = \frac{\Gamma(K_L^0 \rightarrow \pi^- \ell^+ \nu) - \Gamma(K_L^0 \rightarrow \pi^+ \ell^- \nu)}{\Gamma(K_L^0 \rightarrow \pi^- \ell^+ \nu) + \Gamma(K_L^0 \rightarrow \pi^+ \ell^- \nu)} = (3.32 \pm 0.06) \times 10^{-3}.$$

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は難しいので
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

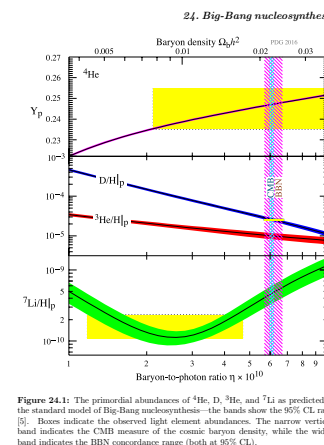
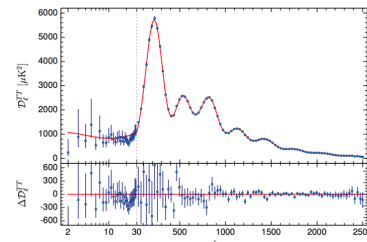
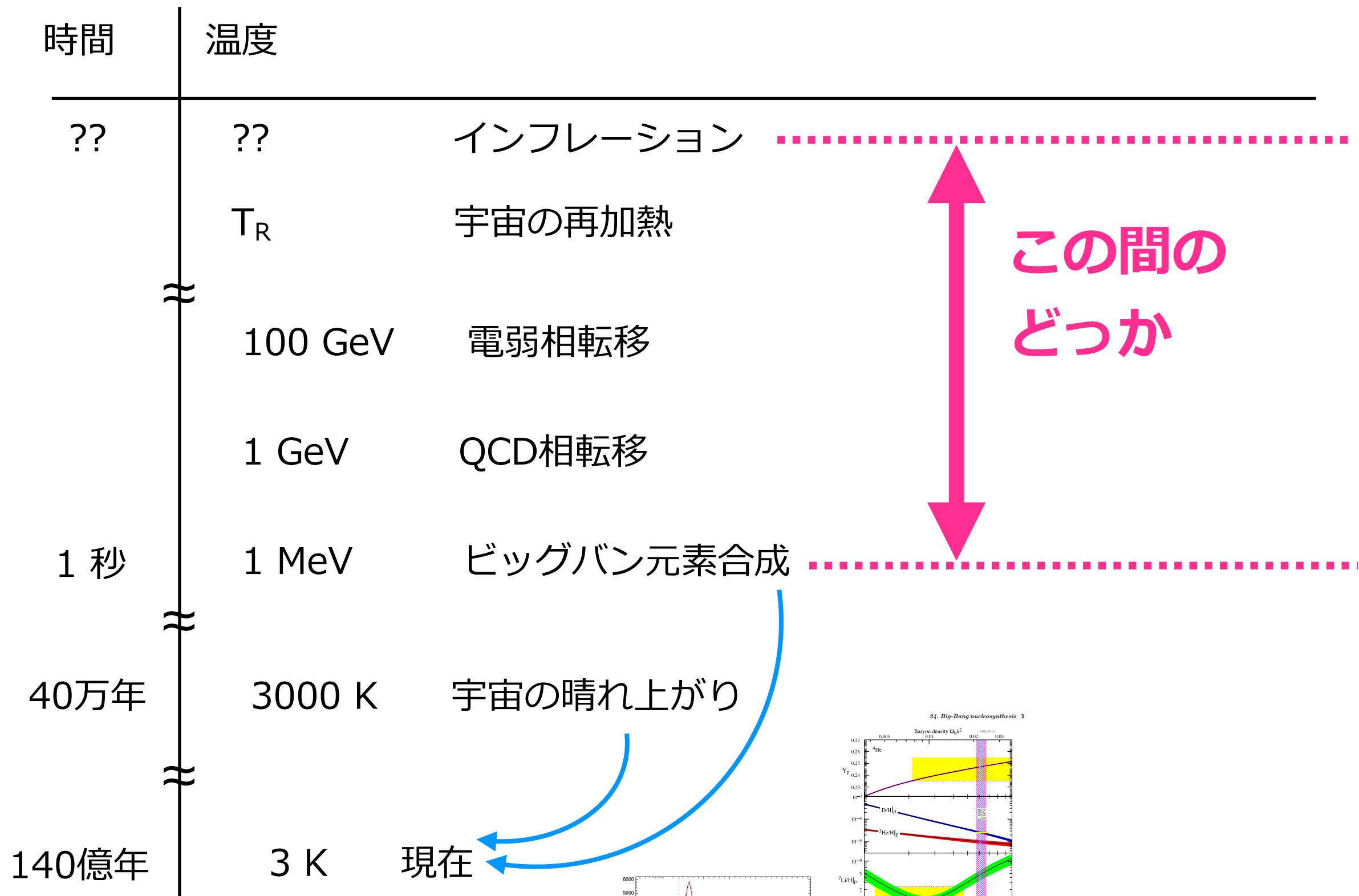
インフレーションで何もかも薄められるので

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つ作られたのか？



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

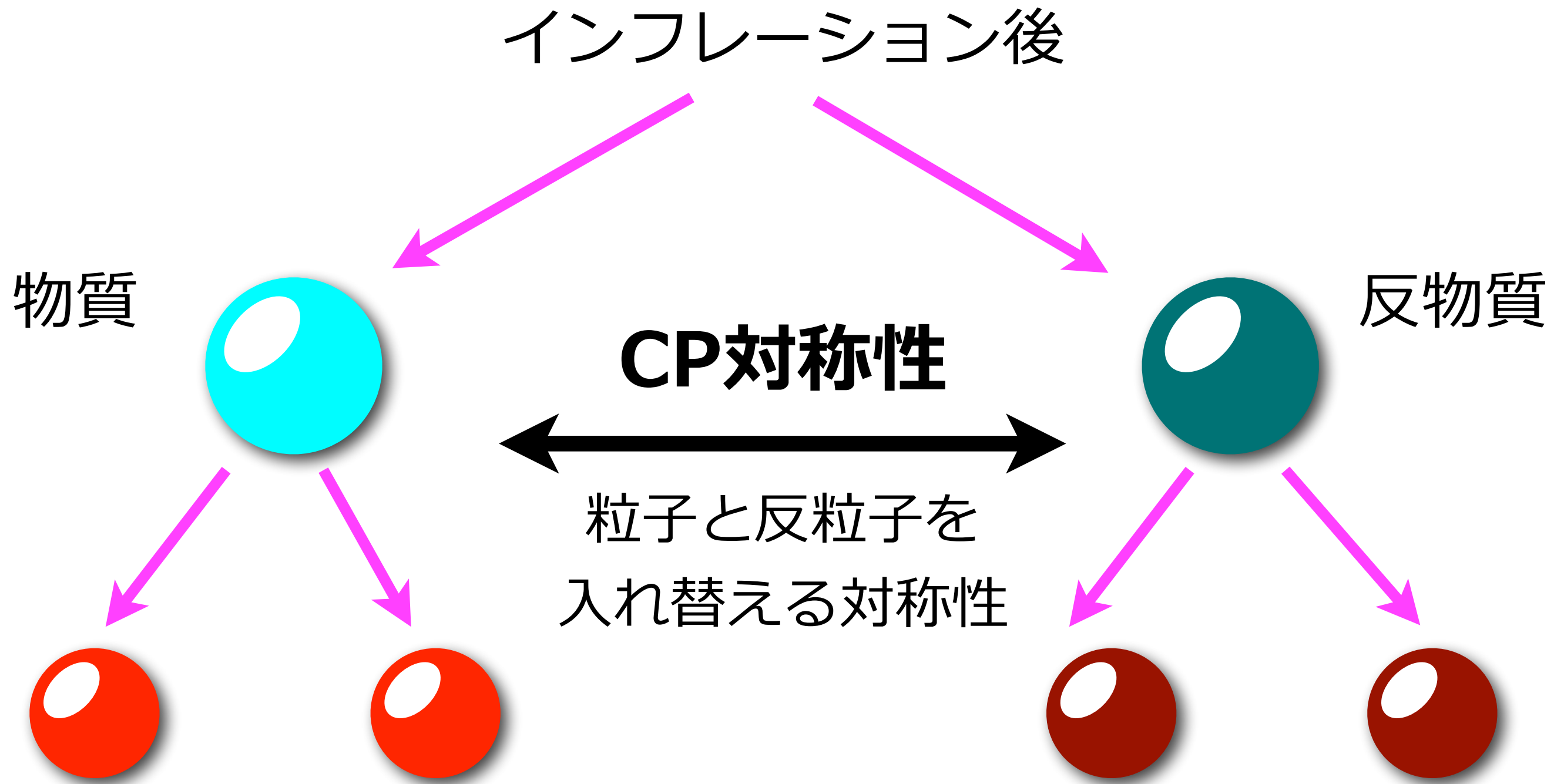
- バリオン数の破れ

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。

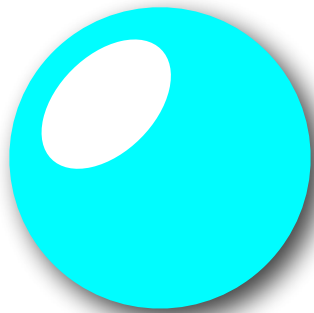
- 非平衡



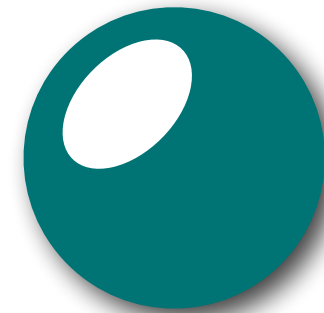
CP対称性 がある限り、物質と反物質の差は出ない。

インフレーション後

物質



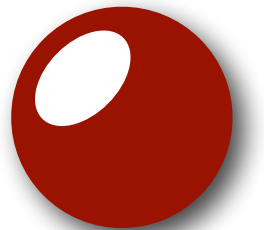
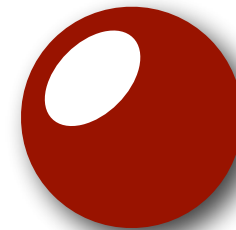
反物質



CP対称性



粒子と反粒子を
入れ替える対称性



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。

$n_B = 0 \xrightleftharpoons{\hspace{1cm}} n_B > 0$ と非平衡になっていないといけない。

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。

- 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 の中のレプトジェネシス
- ▶ バリオン数の計算の具体例

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、、、

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

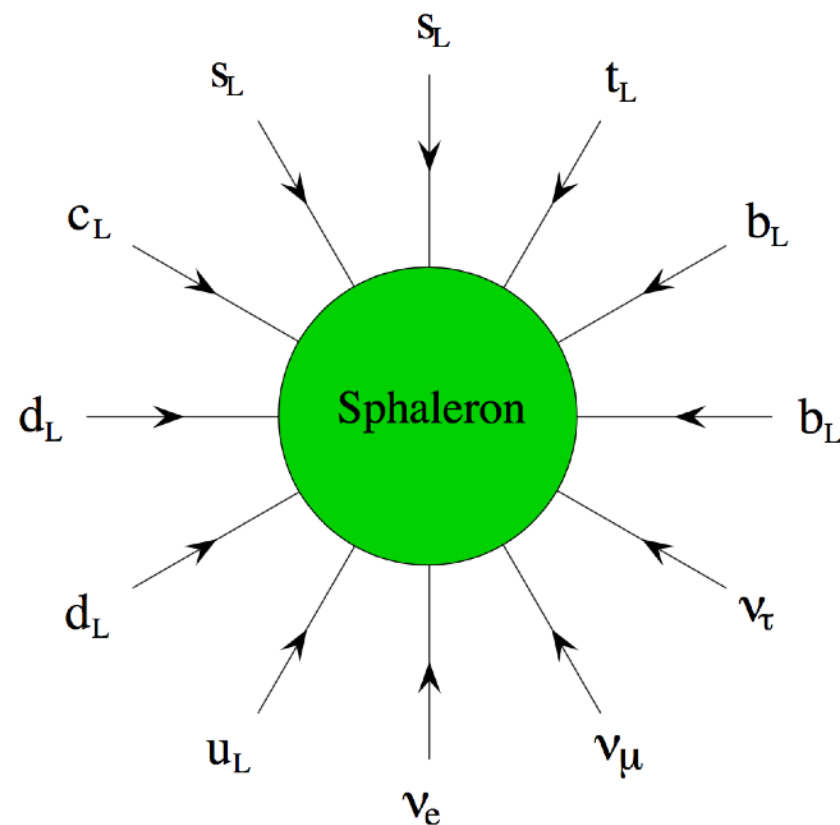
なぜ「レプト」ジェネシスなのか？

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.

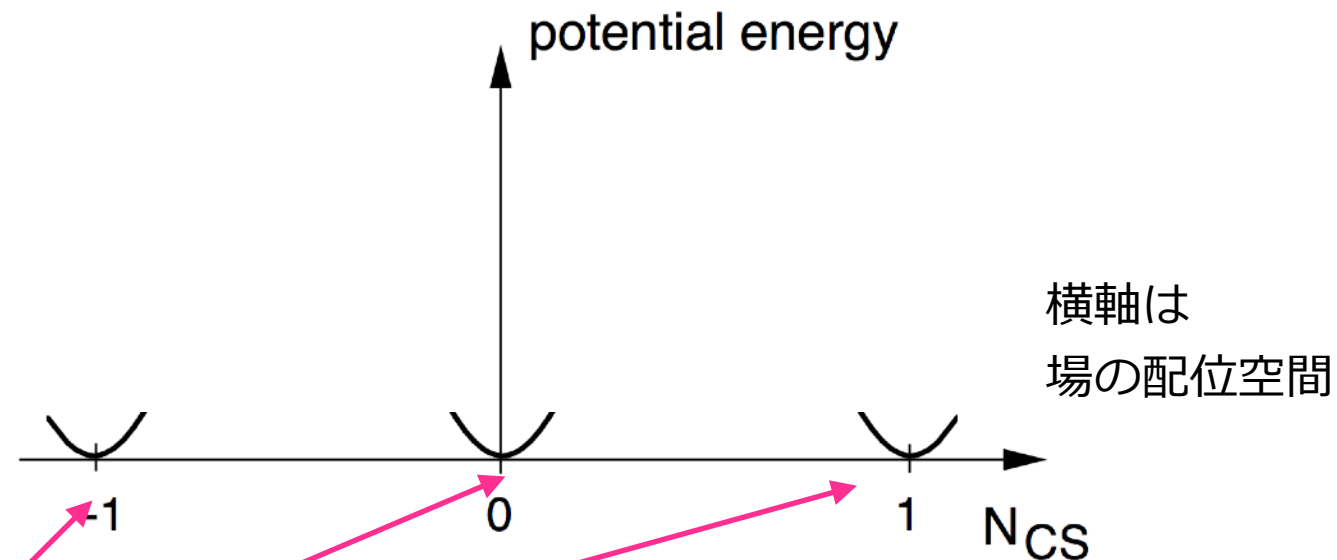
[fig. from W.Buchmuller, 1210.7758]

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。

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



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

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

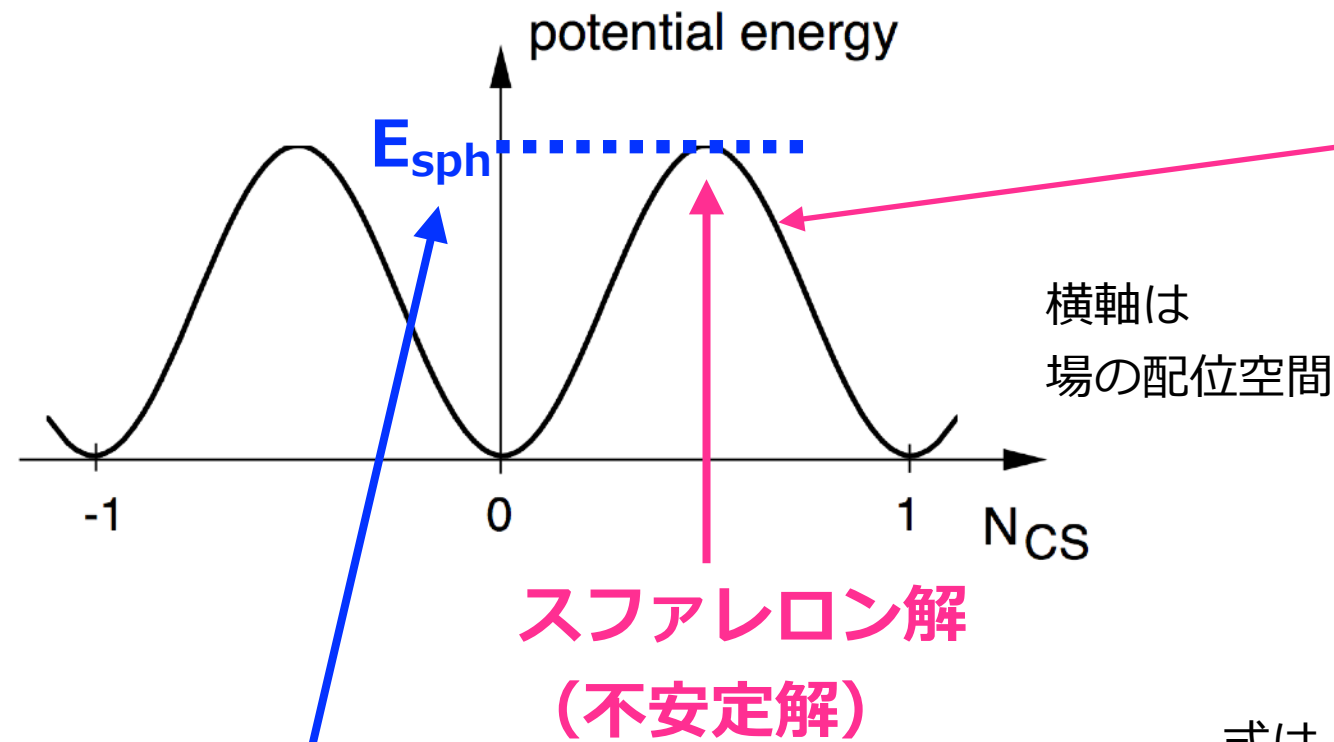
= integer

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)]

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



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

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

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

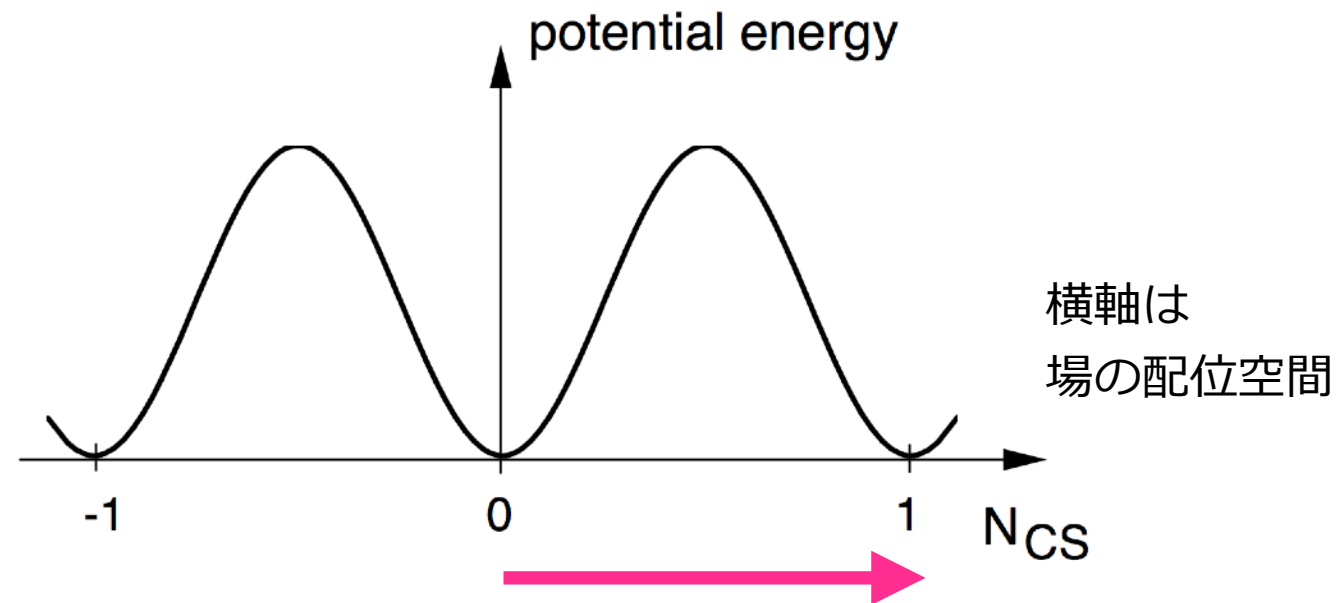
式は Funakubo, Fuyuto, Senaha 1612.05431 から。

$\mu = 0 \sim \pi$ 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！

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



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

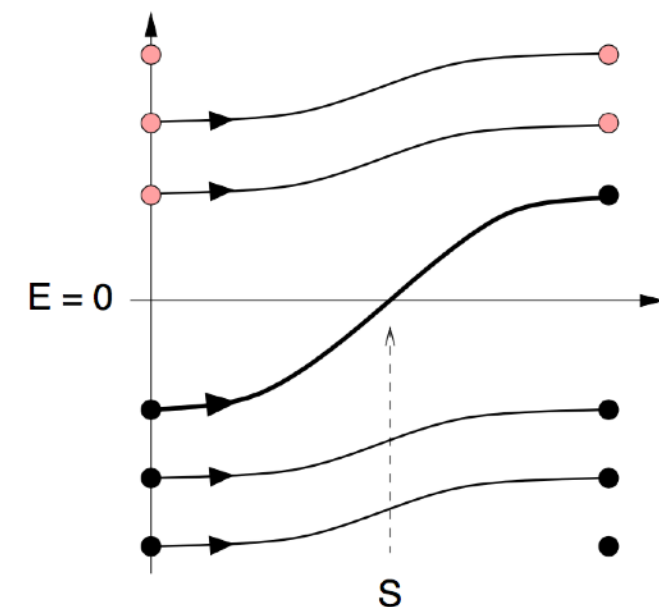
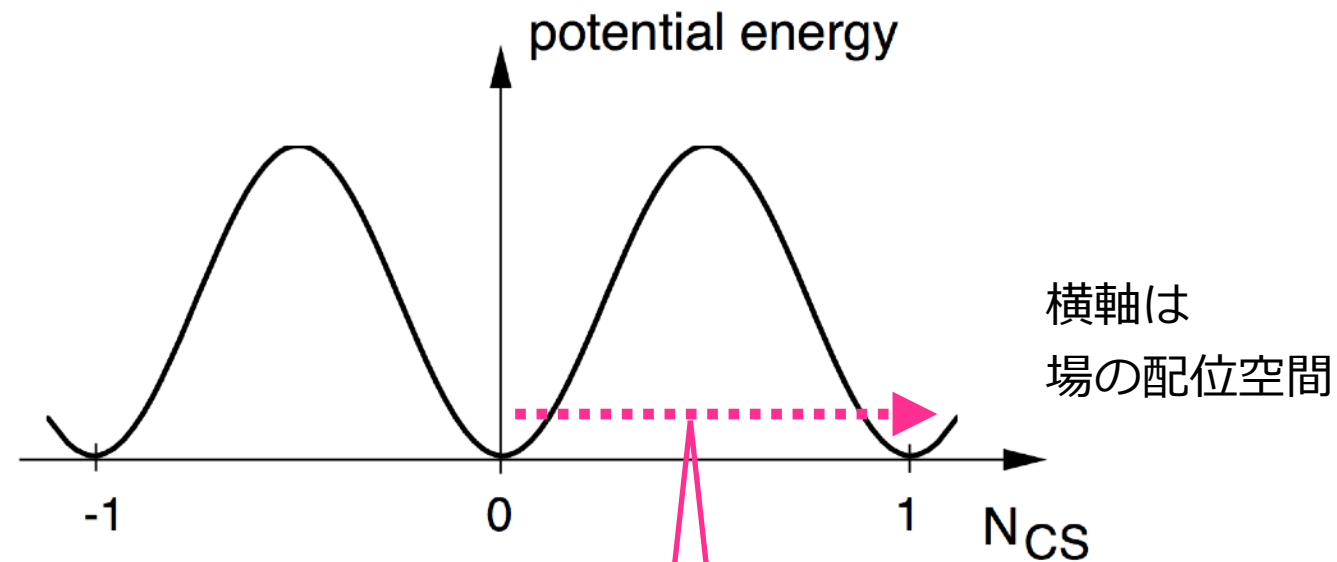


Fig. from Klinkhamer and Rupp
hep-th/0304167

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、、、

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



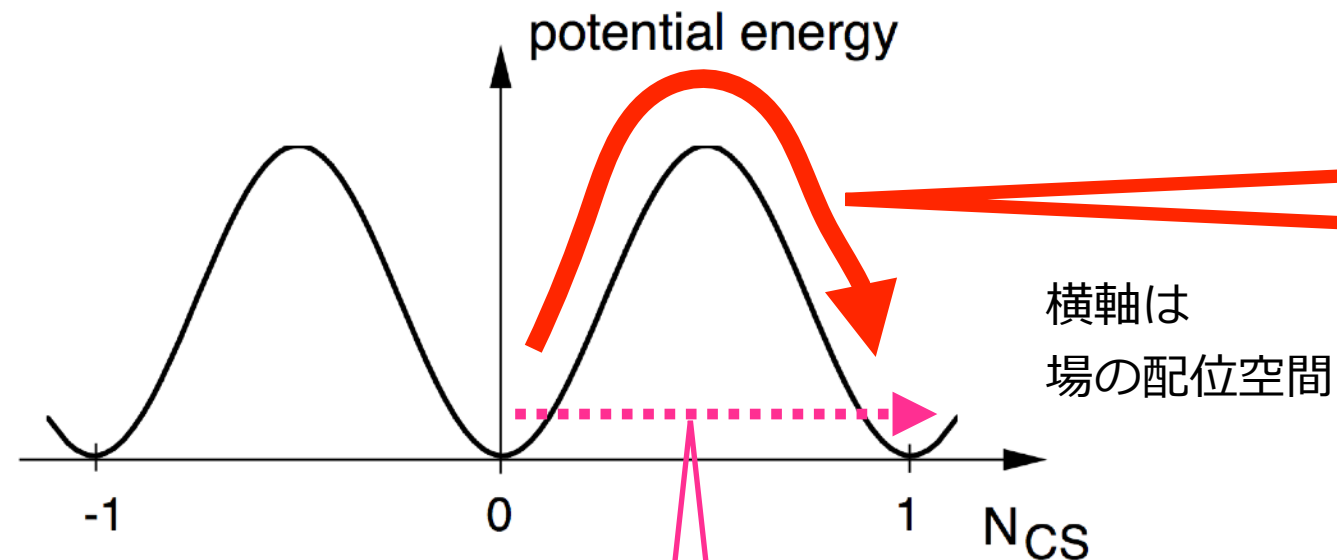
$$\Gamma_{\cancel{B}, \cancel{L}} \sim e^{-16\pi^2/g_2^2} \sim 10^{-170}$$

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！

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



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

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

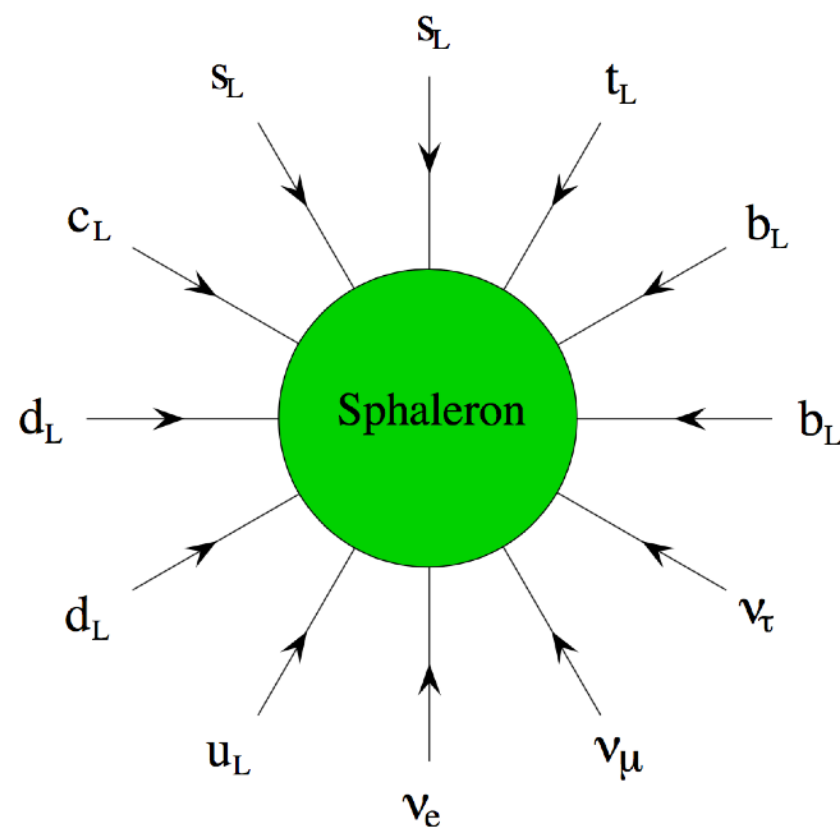
なぜ「レプト」ジェネシスなのか？

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

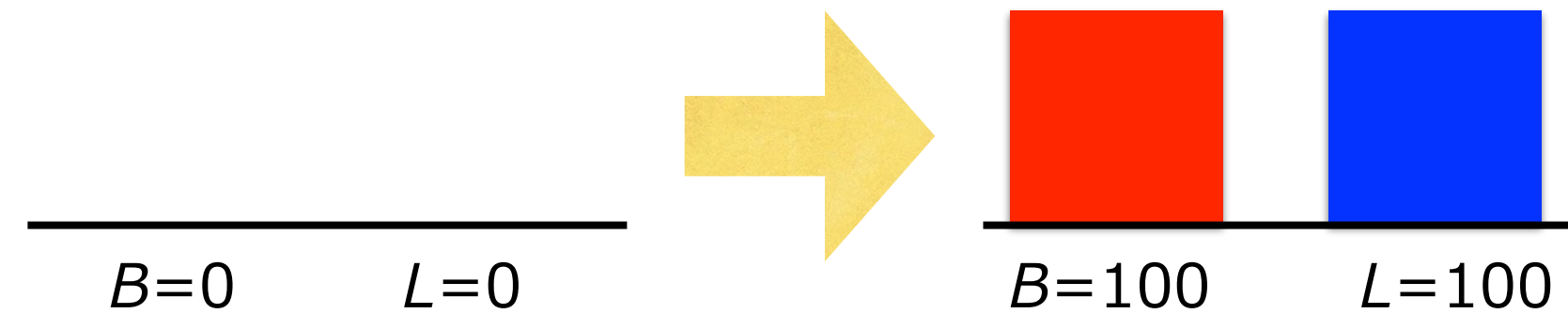
クォーク 9 個 ($B=3$) + レプトン 3 個 ($L=3$) の反応。
 $B-L$ は保存している。

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]

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、、、、

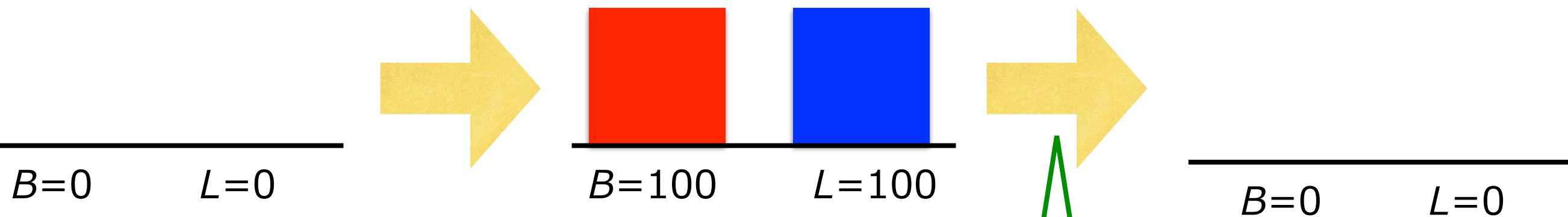
例：GUT バリオジェネシス



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、

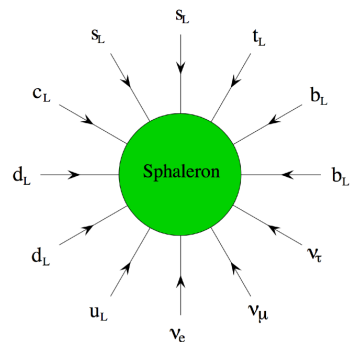
熱平衡で再び $B=0$ になってしまう。

例：GUT バリオジェネシス



**$B-L$ を破るプロセスによる
バリオジェネシスが必要。**

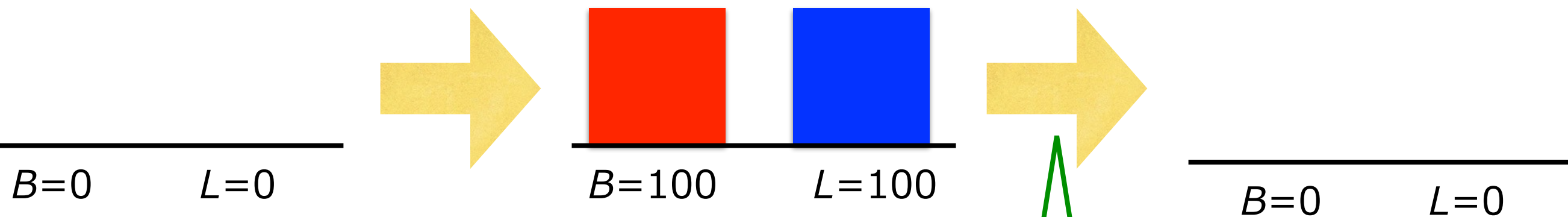
スファレロン過程



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、

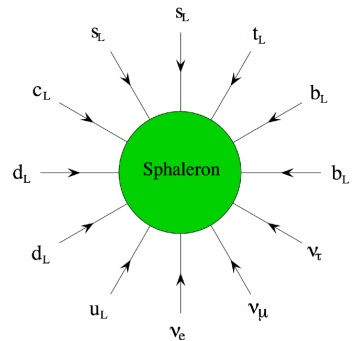
熱平衡で再び $B=0$ になってしまう。

例：GUT バリオジェネシス



**$B-L$ を破るプロセスによる
バリオジェネシスが必要。**

スファレロン過程

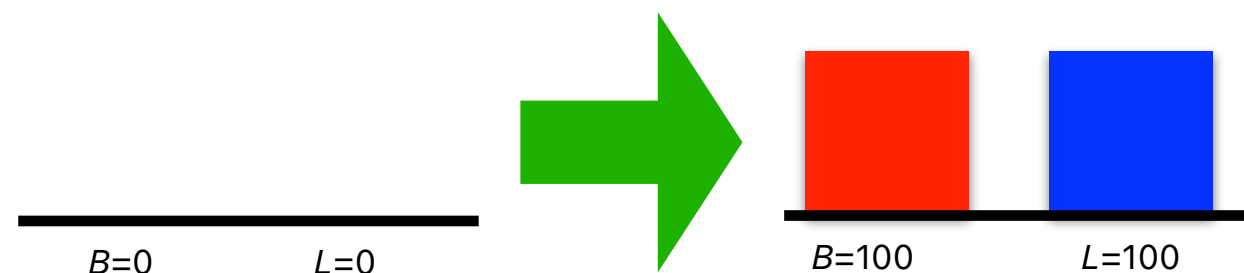


※ 例外:

電弱バリオジェネシス

(バリオジェネシスの有力候補の1つ)

スファレロン + 一時相転移 (非平衡)



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

※ 例外:
電弱バリオジェネシス

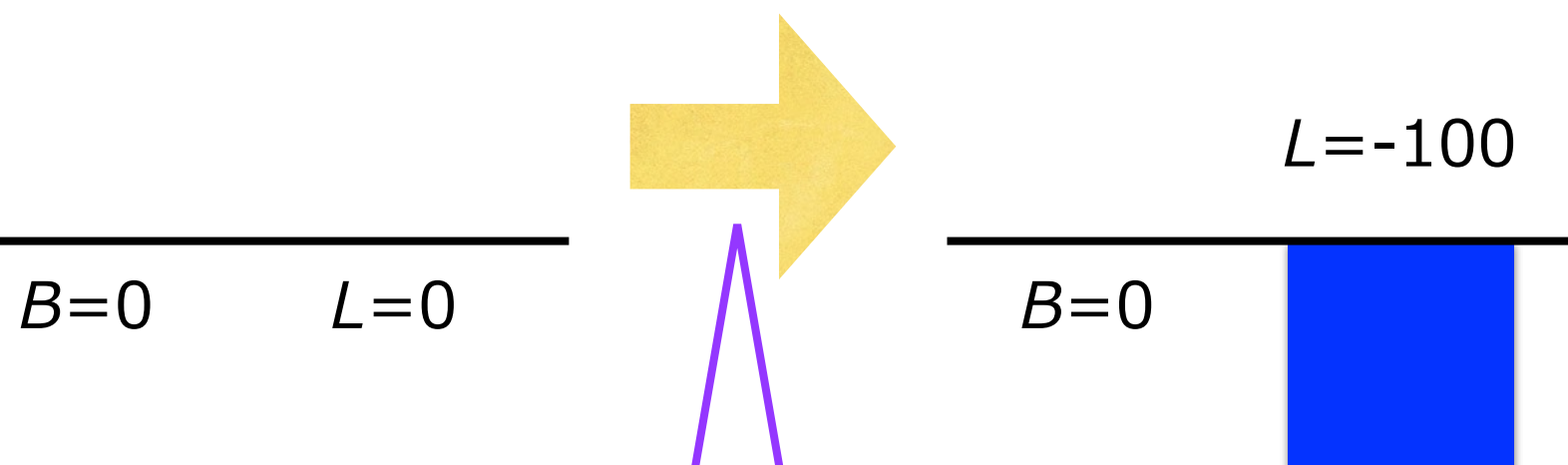
バリオジェネシスを起こすには
 B の破れではなく、 L の破れでも良い。

L の破れ ・ ・ ・ seesaw機構、マヨラナニュートリノ

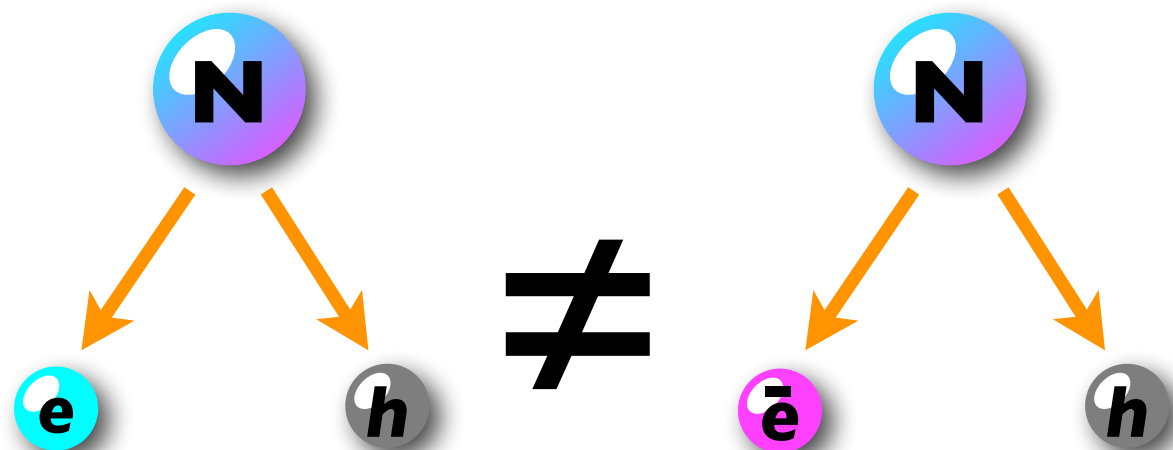
レプトジェネシス

[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)

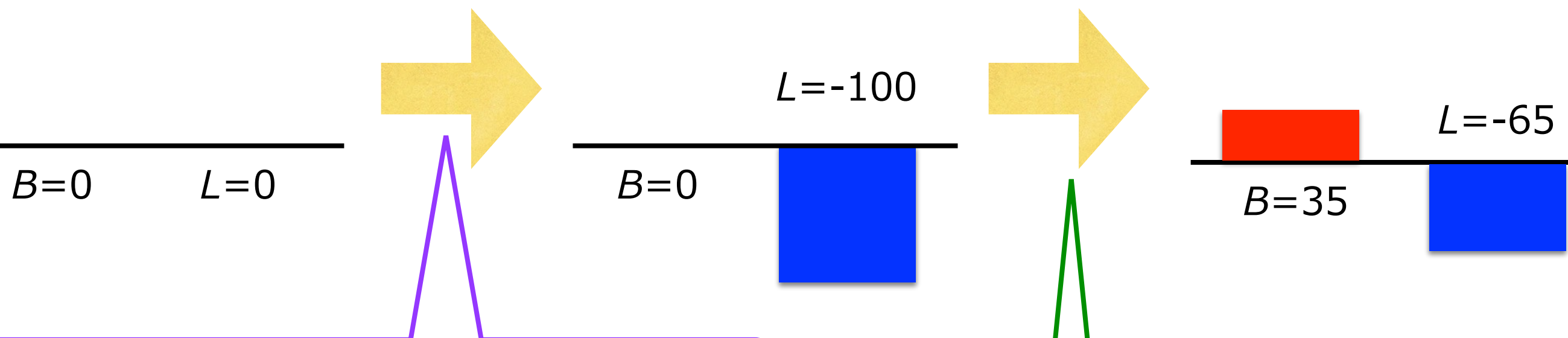


レプトジェネシス

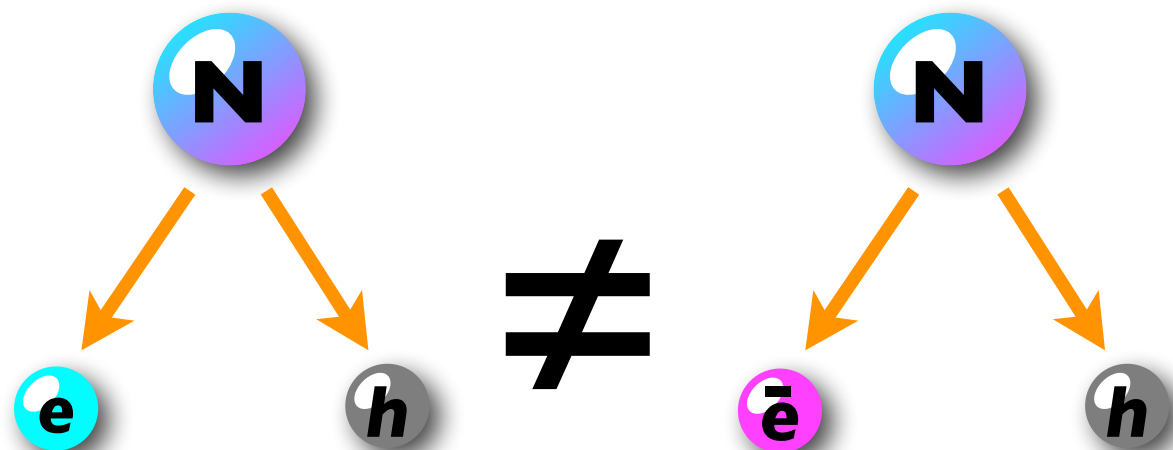
[Fukugita, Yanagida, '86]

まずレプトンの非対称性を作る

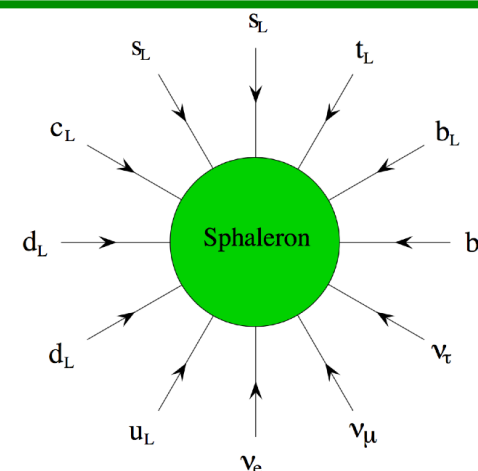
熱平衡で $B \neq 0$ が残る !



右巻きニュートリノの崩壊 (CP-violating)



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 ...)

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

``Leptogenesis in inflaton decay" の場合

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

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

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]

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

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

“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 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

inflatonの数

2体崩壊で作られると仮定

$$\frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} = 2 \cdot \text{Br}(\text{inflaton} \rightarrow N_R N_R)$$

単に崩壊分岐比

バリオン数の計算の具体例

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

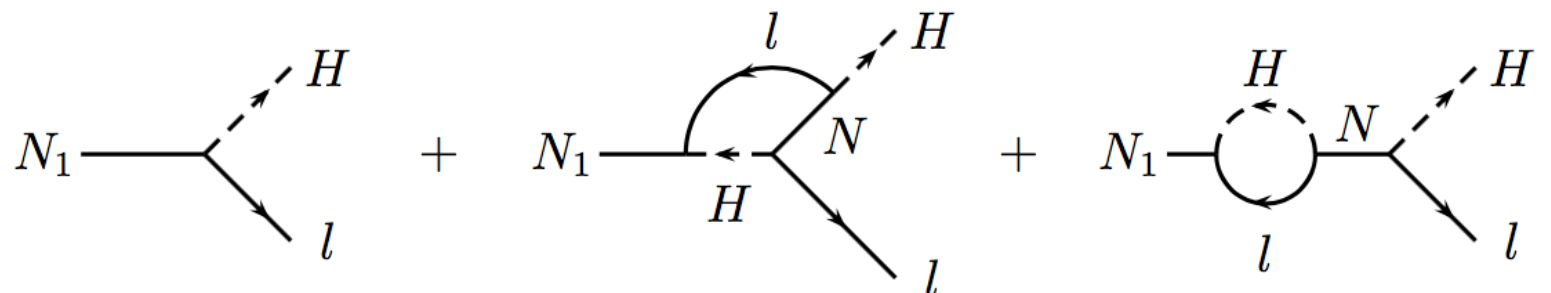
“Leptogenesis in inflaton decay” の場合

[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

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



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]

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

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

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

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

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]

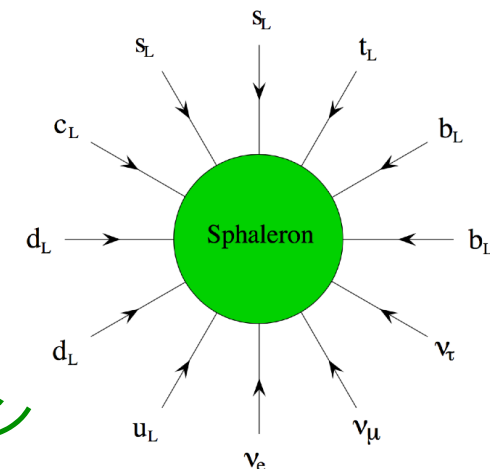
$$\frac{n_B}{s} = \frac{n_{\text{inf}}}{s} \times \frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} \times \frac{n_L}{n_{N_R}} \times \frac{n_B}{n_L}$$

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・・・

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

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・・・

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

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。