

有効場理論に基づく 電磁レプトジェネシス

—低スケールにおける抑制と共鳴増幅—

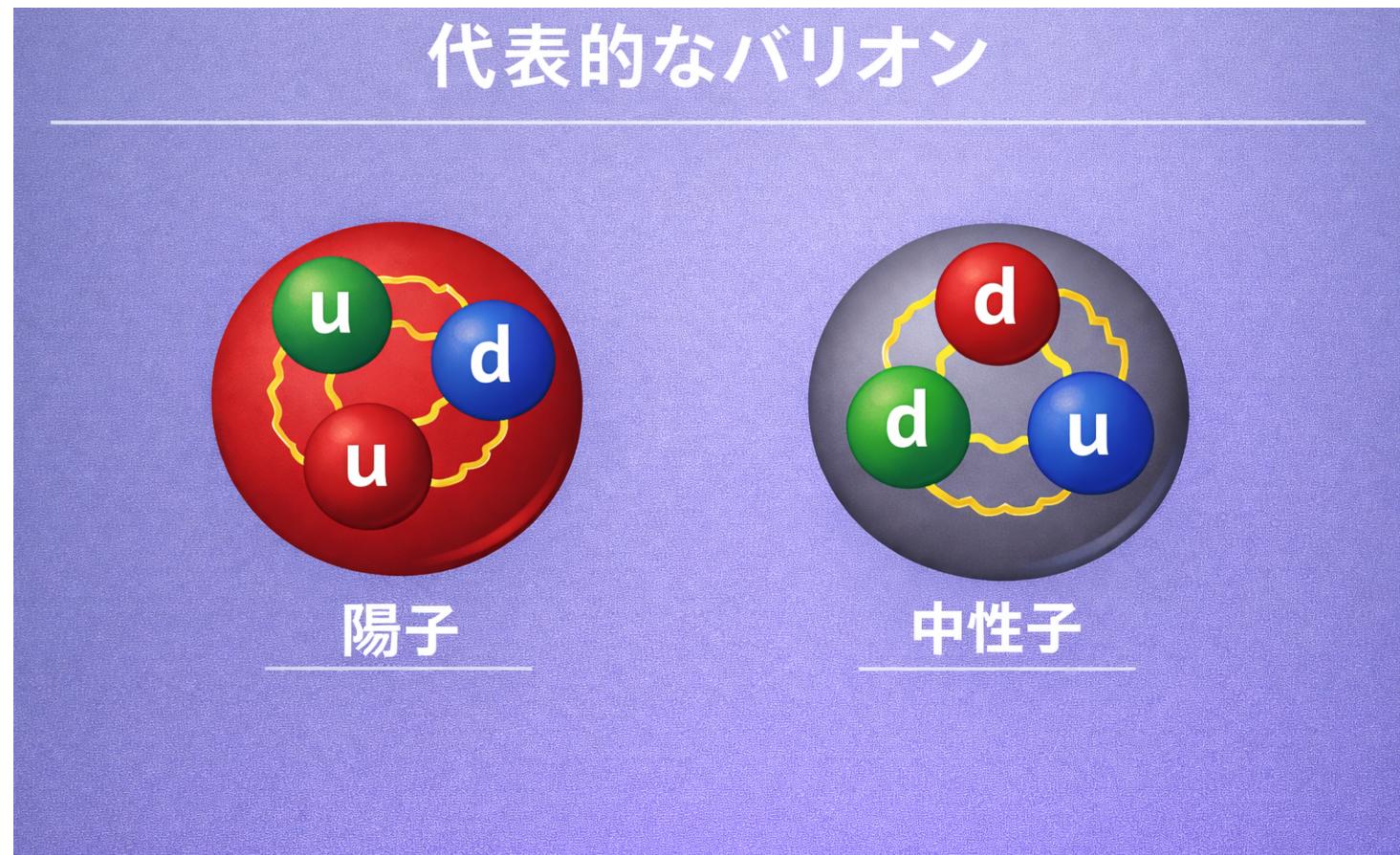
高田 凜 | 東京大学 RESCEU 物理学専攻D2
(セミナー@柳生研究室, 東京理科大学 物理学科)

■ 序論：バリオン非対称性(BAU)とは？

宇宙には我々人間や星、銀河が存在するが、
それらは物質であって反物質ではない

→バリオン非対称性(Baryon Asymmetry of the Universe)

(出典：ChatGPT 5.2 Thinking)

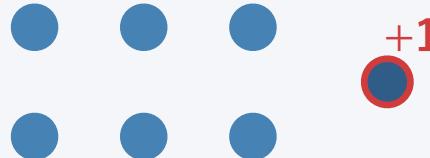


■ 序論：バリオン非対称性(BAU)とは？

非対称性の大きさは

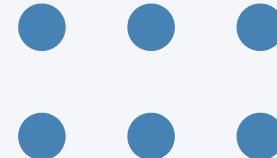
「物質10億個あたり1個」程度

物質



⋮

反物質



⋮

例：物質 270,000,000 対 反物質 269,999,999

■ 本日の目標

1

観測事実の整理

「物質だけが残った」
という事実を
定量化する

2

必要条件の理解

Sakharovの条件と
電弱スファレロンを
直観的に理解する

3

後半への橋渡し

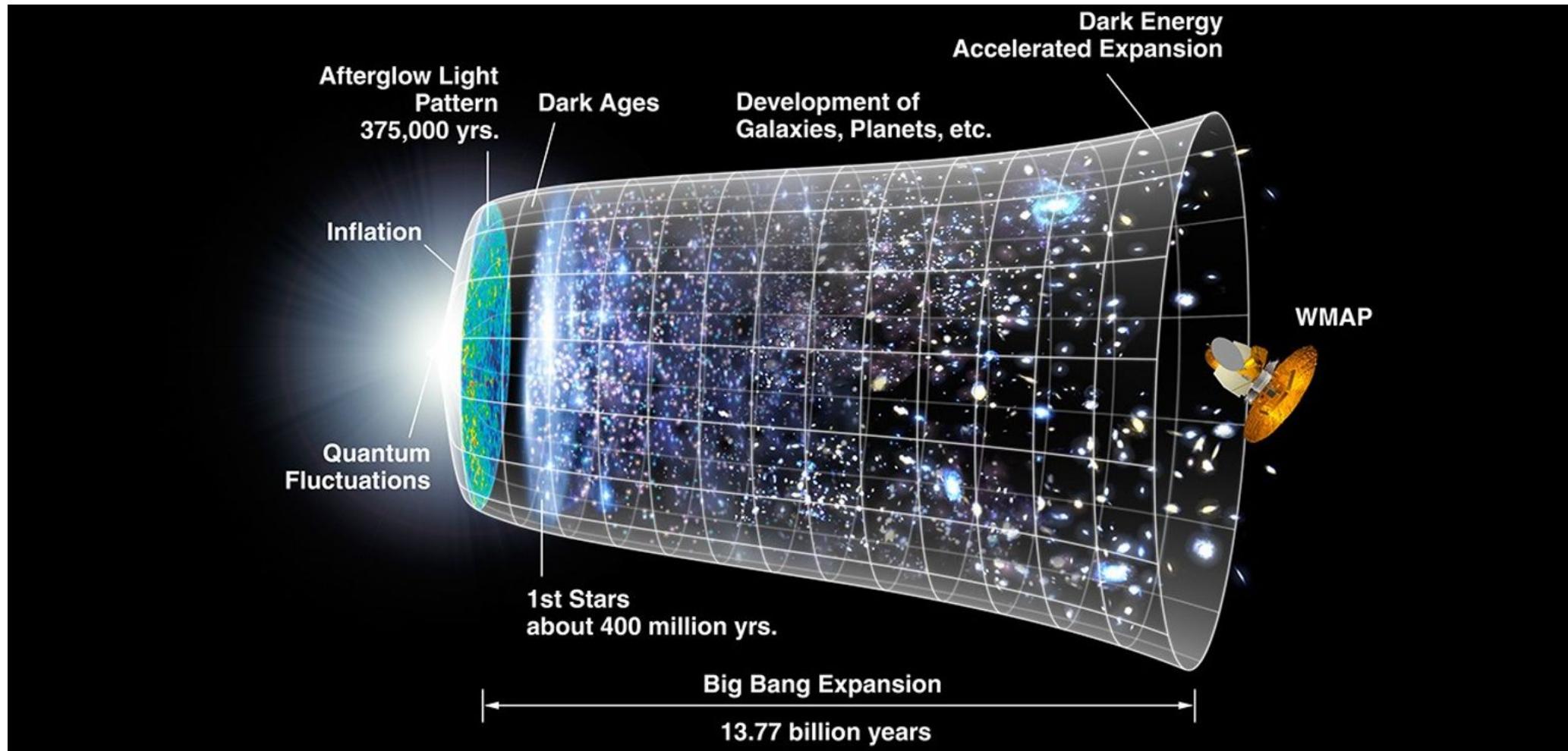
発表者の研究で何を計算し
どこが難所だったかを
見通す

構成 (前半／後半)

前半：BAUの定義からレプトジェネシスの基礎まで

後半：電磁レプトジェネシス（共鳴／非共鳴）

■ 観測可能な宇宙の見取り図



(出典：NASA / WMAP Science Team)

■ 熱浴 (相対論的プラズマ) の直観



高温の熱浴→反応率 Γ vs 膨張率 H (出典：NASA's Goddard Space Flight Center / CI Lab)

■ 宇宙には「物質だけ」しか存在しない

陽子と反陽子の対消滅反応



もし物質と反物質が完全に同数なら
対消滅が進んで「光だけ」が残るが,
実際の宇宙には物質が残っている.
→ 物質をダイナミカルに作る必要
がある

■ バリオン非対称性の観測値

観測されるバリオン非対称性 (バリオン数/エントロピー密度)

$$Y_B^{\text{obs}} \simeq 8.7 \times 10^{-11} \text{ (出典 : Planck 2018)}$$

CMB (宇宙マイクロ波背景放射)

音響ピークの形状から
バリオン密度 $\Omega_b h^2$ を決定

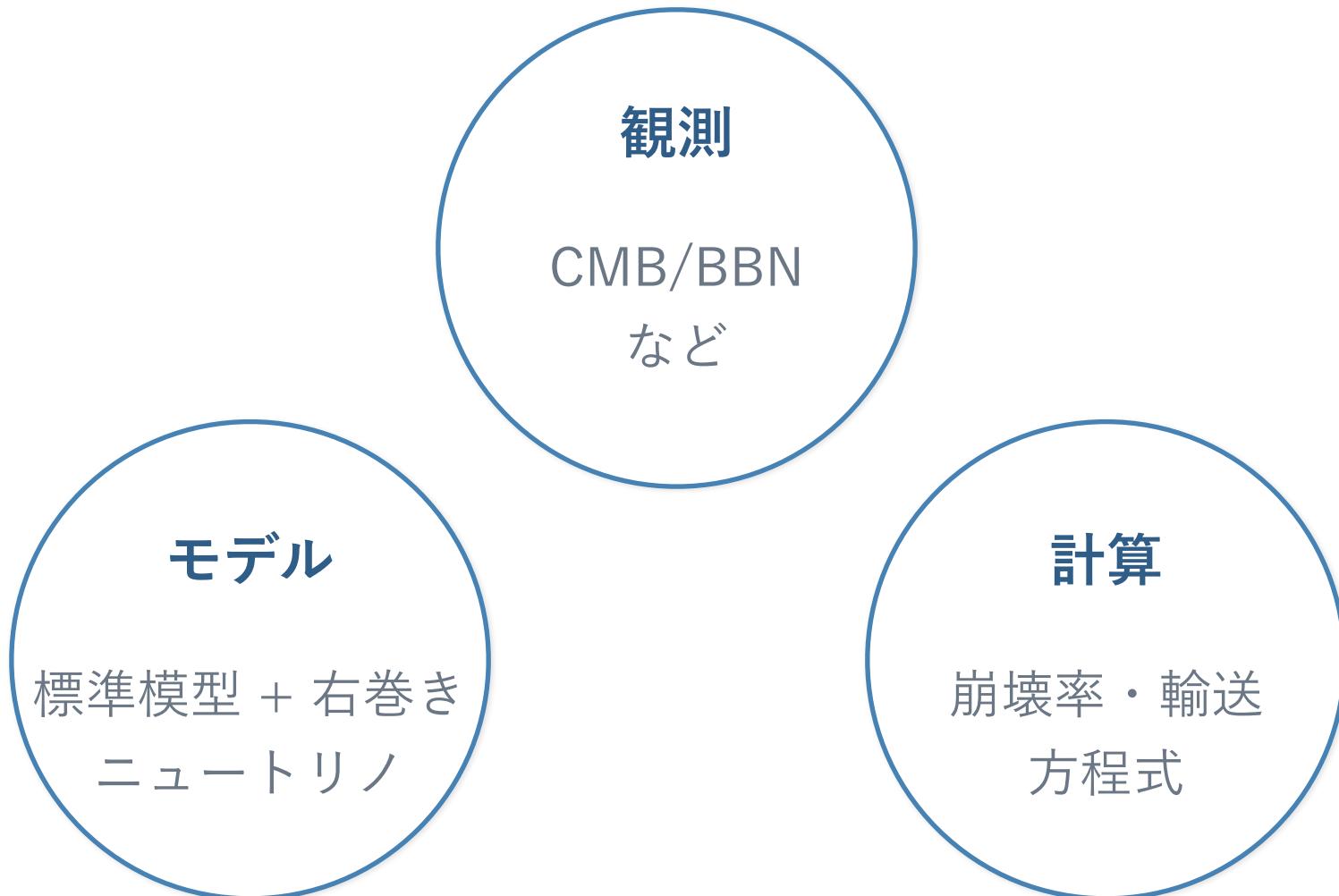
BBN (ビッグバン元素合成)

軽元素(特に D/H など)の
存在比からバリオン存在量を決定

→ 独立な観測が同じ Y_B を与える

■ 初期宇宙 × 素粒子現象論

9



■ バリオジェネシスの必要条件 (Sakharov)

B ① バリオン数の破れ

B を変える反応が必要

CP ② C・CP の破れ

粒子と反粒子の
反応率を変える

≠ ③ 非平衡過程

平衡では生成が相殺
($\Gamma < H$ など)

この3条件を満たす「初期宇宙(熱浴)中の反応」を作ることが、バリオジェネシス模型の仕事

■ 条件①：Bが破れないと非対称性は作れない

B が保存している場合, $\Delta B = 0$

⇒ バリオン数を変える反応が無ければバリオン非対称性は生成できない

B の破れは(直接でなくとも)スファレロン変換で実現できる.

■ 条件①の例：初期条件では足りない

「最初から $B \neq 0$ だった」と仮定しても、インフレーションでほぼ洗い流される。

$$B_{\text{initial}} > 0 \quad \xrightarrow{\text{インフレーション}} \quad B \simeq 0$$

- よって、宇宙の進化のどこかでダイナミカルに非対称性を生成する必要がある
- そのための一般条件が Sakharov の3条件

■ 条件②：CとCPの破れが無いと粒子と反粒子の生成率は同一

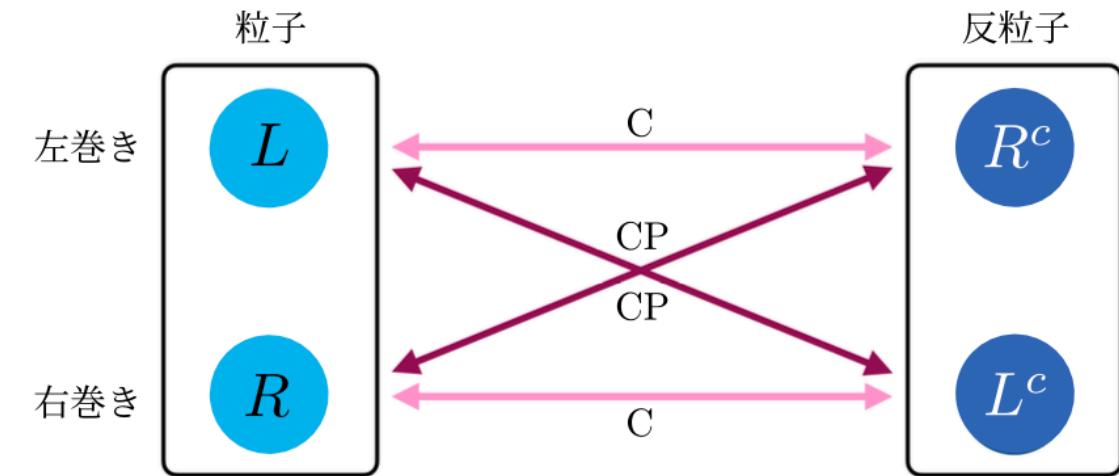
13

$$\text{CP保存} : \Gamma(X \rightarrow f) = \Gamma(\bar{X} \rightarrow \bar{f})$$

⇒ 粒子と反粒子が同数作られ、差が出ない

⇒ 複素位相 + tree × loop 干渉が必要
(後半で具体化)

ここでの差が CP 非対称性 ϵ に対応する。



右巻き・左巻きの粒子・反粒子に対する C 変換性と CP 変換性。

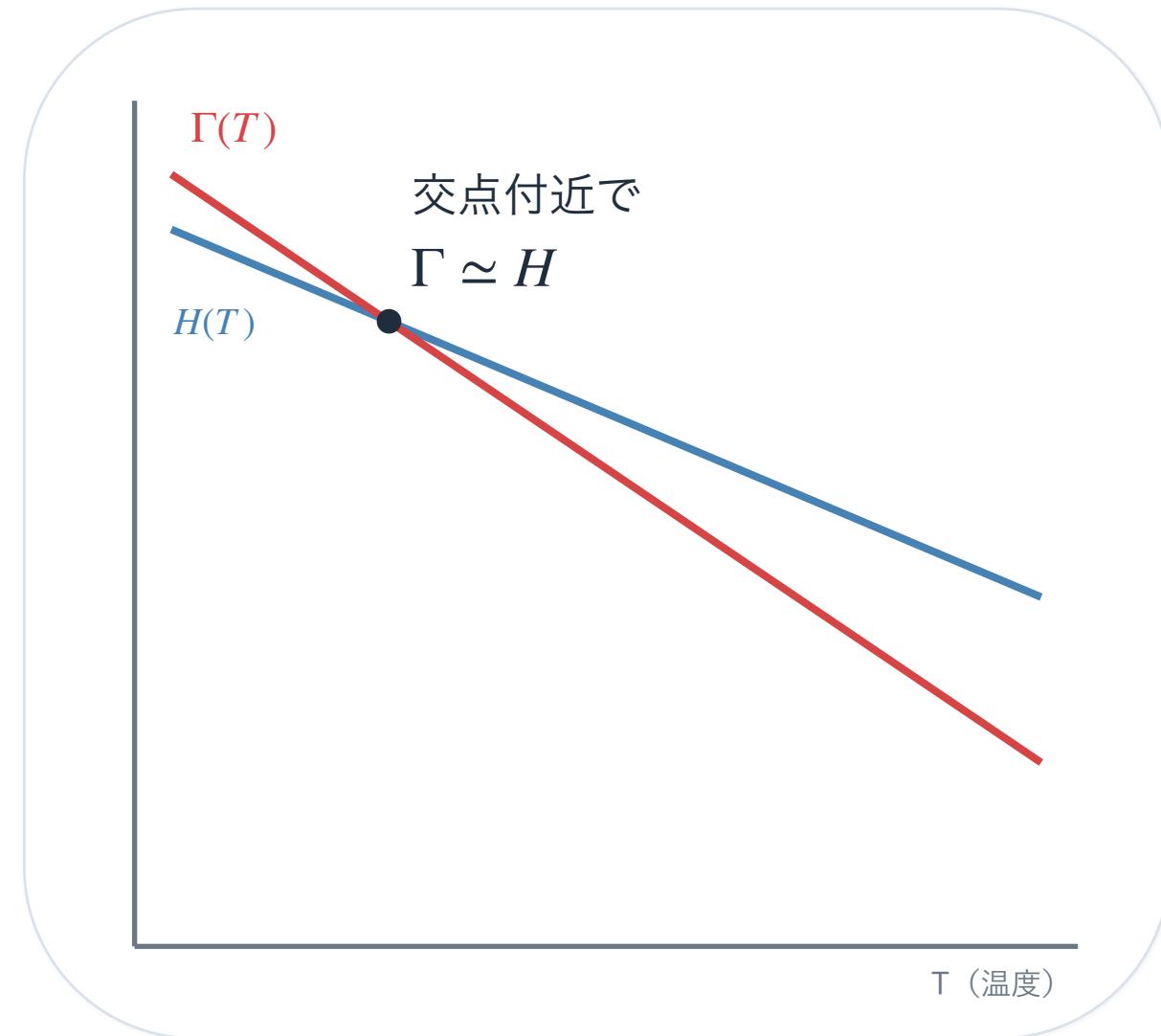
■ 条件③：非平衡条件 Γ vs H

反応が平衡から外れる目安：

$$K \equiv \Gamma/H \simeq 1$$

→ 境界(凍結の目安)

- 平衡($\Gamma \gg H$)：正反応と逆反応がつり合いで、非対称性は残りにくい
- 非平衡($\Gamma \ll H$)：反応が追いつかず、生成された非対称性が凍結して残る



■ 電弱スファレロン： $B + L$ を破って $B - L$ を保存

15

標準模型の非摂動過程(高温の電弱対称相)で起こるバリオン数・レプトン数の変換：

電弱スファレロンの「選択則」

$$\Delta(B + L) = 2N_f \Delta N_{\text{CS}}$$

$$\Delta(B - L) = 0$$

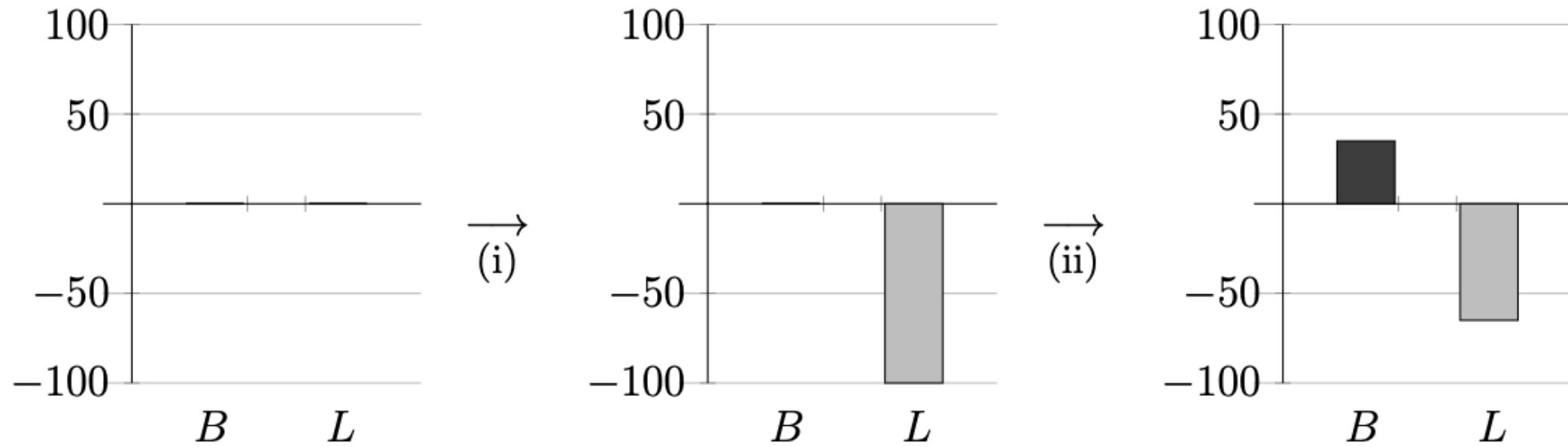
ΔN_{CS} は $SU(2)_L$ 真空間の遷移に対応する。

意味

L の非対称性 $\xrightarrow{\text{(部分変換)}}$ B の非対称性

- 「 $B - L$ を作る」ことができれば、スファレロン過程で B が得られる
- 従って、 B の生成機構としてレプトン非対称性の生成機構(レプトジェネシス)が有力

■ 電弱スファレロン変換の直観的理解



ステップ(i) : $B - L$ を破る反応で、レプトン数 L に偏りを作る

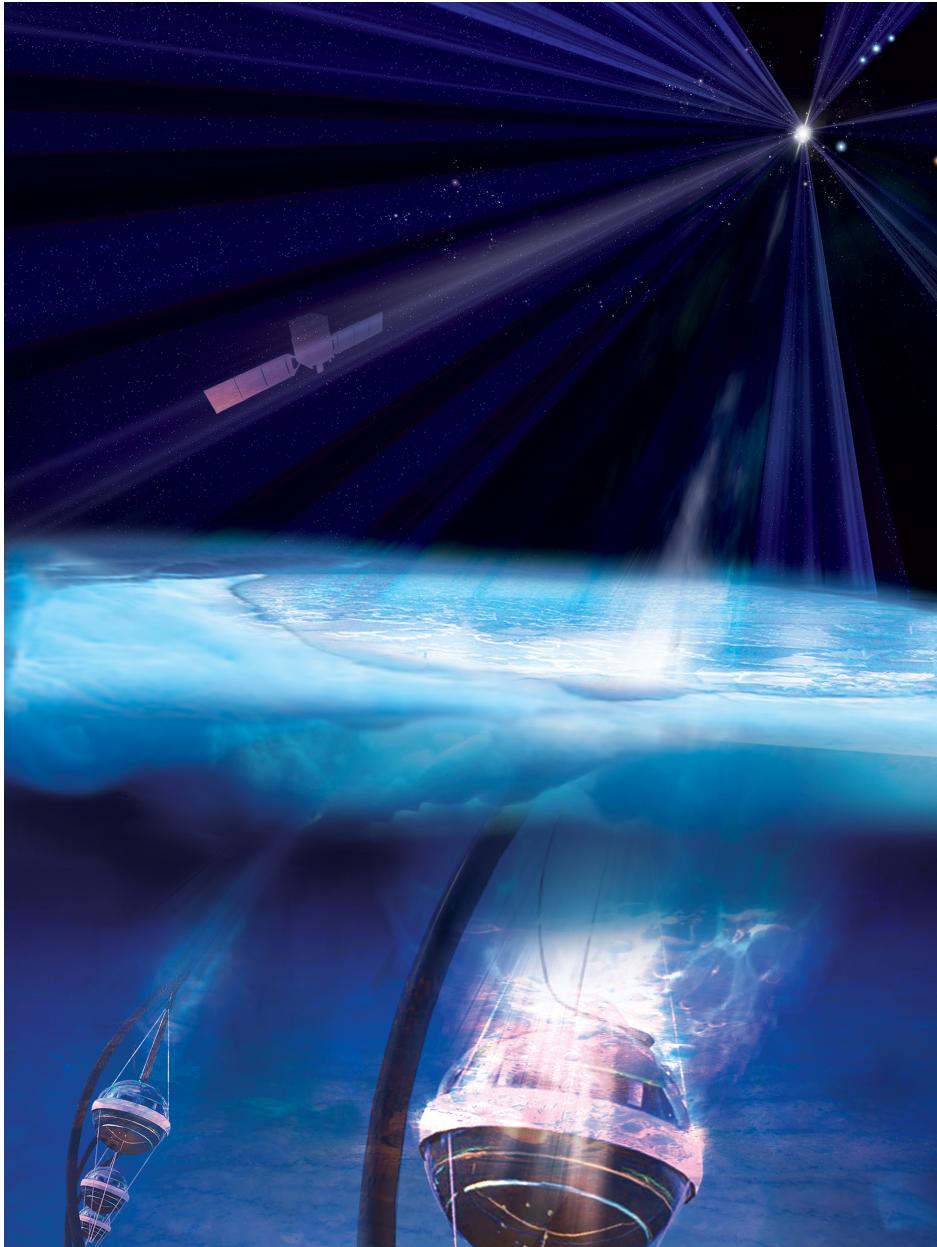
ステップ(ii) : 電弱スファレロンが働く温度領域で、 B と L が再配分され $B > 0$ が残る

要点 : 『 B を直接作る』 のではなく 『 $B - L$ を作る』

図 : (i) $B - L$ 生成 → (ii) 電弱スファレロンで B が誘起($B - L$ 保存)

■ 宇宙背景ニュートリノと非対称成分の直観的理解

17



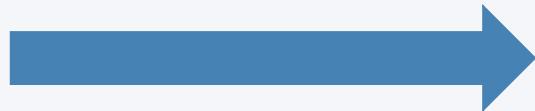
IceCube実験@南極

※観測されている(高エネルギー)宇宙ニュートリノの例。
他方、宇宙背景ニュートリノ($C\nu B$)はCMBに類似する熱的残光であるが、
直接検出には至っておらず、もし非対称成分があっても非常に小さい。
(出典：NASA / Fermi and Aurore Simonnet, Sonoma State University)

■ 帰結： $B - L$ を作ると B が得られる

18

$B - L$ 非対称性



B (バリオン)非対称性

電弱スファレロンが動いている間に、 $B - L$ の一部が B に変換される。

レプトン非対称性を生成し
電弱スファレロンでバリオン非対称性に変換する

(ここまででは普遍的な基礎. 次から熱的レプトジェネシスの描像へ. フレーバー効果は当面無視する.)

■ 作業仮説： N_1 優勢, 単一フレーバー近似

20

仮定①： N_1 優勢 ($M_1 \ll M_2, M_3$) … 生成は主に N_1 の崩壊で決まる

仮定②：単一フレーバー近似 … 合計の $B - L$ のみ追跡

目的：最小の方程式で『生成 vs 消去』の構造を掴む

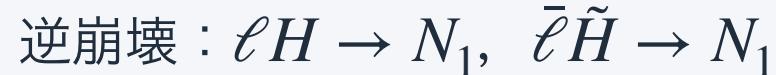
規格化にはエントロピー密度 s を用いる： $Y_X \equiv n_X/s$

(光子数密度で規格化する流儀もある)

■ 基本過程：崩壊と逆崩壊

21

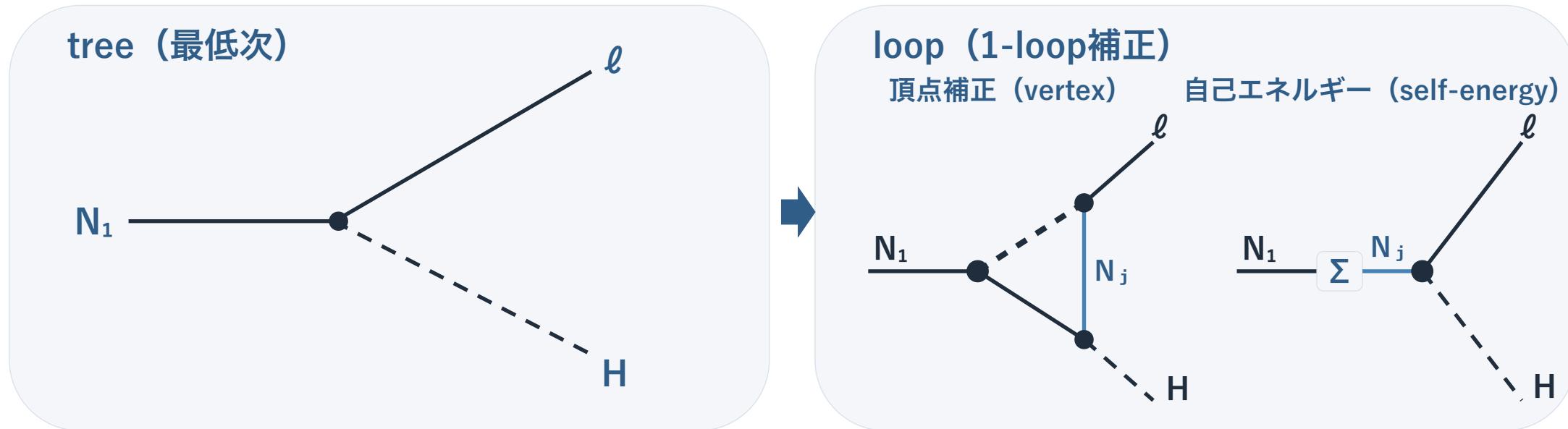
主要過程(熱浴中)



『崩壊→非対称性の生成』と『逆崩壊→washout』の競合が最終的な Y_{B-L} を決める

散乱過程($\Delta L = 1, 2$)も存在するが、ここでは簡単のため崩壊・逆崩壊のみの最小模型で理解を深める。

■ CP非対称性 ε_1 : tree × loop干渉



$\varepsilon_1 \propto \text{Im}(A_{\text{tree}}^* \cdot A_{\text{loop}})$ の on-shell 部分を計算

定義: $\varepsilon_1 = (\Gamma - \bar{\Gamma}) / (\Gamma + \bar{\Gamma})$

■ 追跡する量と温度変数： Y と z

追跡する量

- ・ 温度変数： $z \equiv M_1/T$ (冷えるほど z が増える)
- ・ $Y_{N_1}(z) \cdots N_1$ の存在量 (エントロピー密度 s で規格化)
- ・ $Y_{B-L}(z) \cdots$ 生成された $B - L$ 非対称性 (s で規格化)

最終的にスファレロン停止温度で Y_{B-L} は Y_B に変換されて凍結.

■ Boltzmann方程式：生成 vs Washout

Boltzmann方程式系：

$$\frac{dY_{N_1}}{dz} = - D(z) \left[Y_{N_1}(z) - Y_{N_1}^{\text{eq}}(z) \right]$$

$$\frac{dY_{B-L}}{dz} = - \varepsilon_1 D(z) \left[Y_{N_1}(z) - Y_{N_1}^{\text{eq}}(z) \right] - W(z) Y_{B-L}$$

$$= (\text{生成}) \times (\text{平衡からの乖離}) - (\text{Washout})$$

ここでは簡単のため散乱を省略。

■ 研究への橋渡し：電磁レプトジェネシスでは何が変わるか

25

ここまで：標準的なレプトジェネシスの最小模型

次：この枠組みを保ったまま、CPソースを「電磁双極子演算子」に置き換える。

有効場理論で定義された電磁双極子演算子から バリオン非対称性を計算する

最初のパートは非共鳴(階層)領域：まず『なぜ出ないか』を明確化する。

の見取り図

有効場理論に基づく
電磁レプトジェネシス

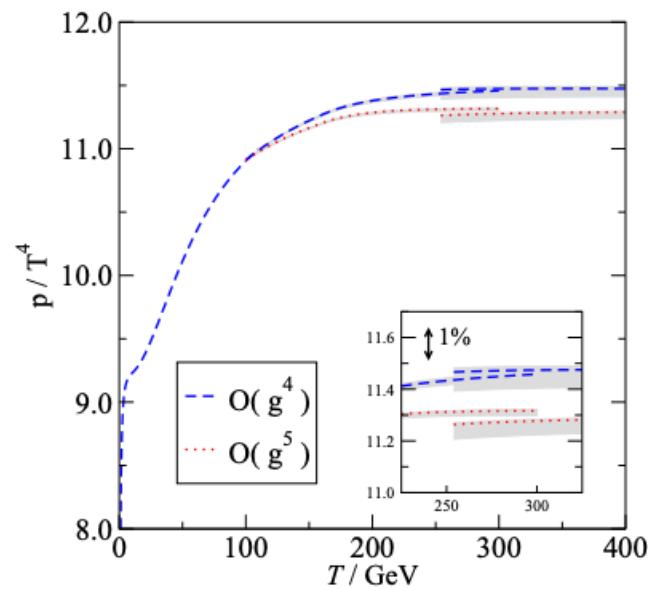
Part I (非共鳴)：有効場理論に基づくと、BAUは構造的に抑制される

Part II (準縮退)：自己エネルギーがBreit-Wigner型共鳴増幅し、密度行列で混合・振動・デコヒーレンスを扱う。その結果、強いwashout領域で Y_B^{FO} が観測値を再現

細部の仮定は最小限に留め、主張の骨格＝抑制→共鳴救済を図で押さえる。

■ 低スケールの舞台：電弱窓 (160→130 GeV)

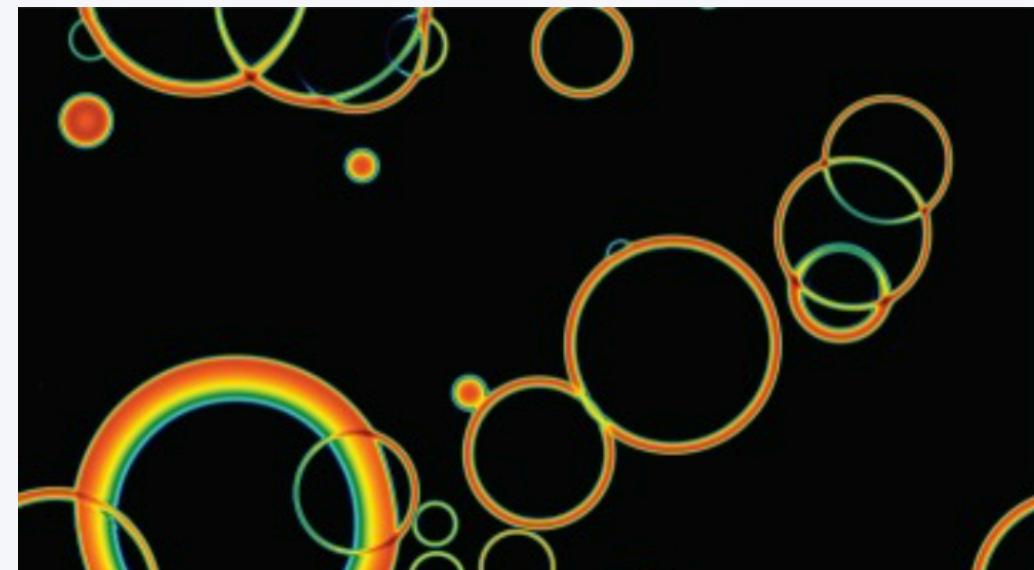
本研究の仮定：クロスオーバー



出典：M. Laine and M. Meyer.
JCAP07(2015)035.

秩序変数が連続的に変化(泡核生成は起こらない)

(参考) 一次相転移：泡核生成 → 衝突



出典：David J Weir. Philos Trans A Math Phys Eng Sci. 2018 Jan 22;376(2114):20170126.

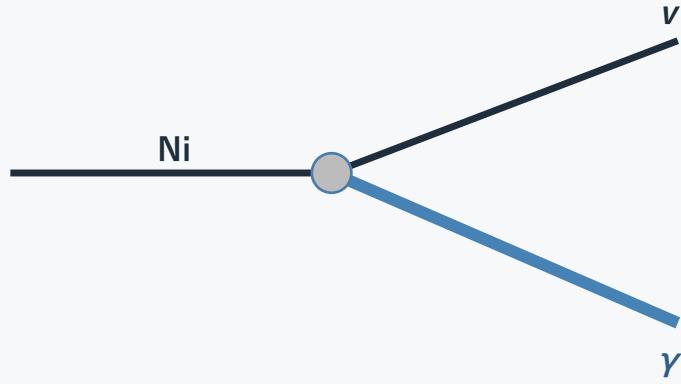
泡が成長して衝突

宇宙の電弱相転移でよく描かれる“泡だらけ”は一次相転移のイメージ。
本研究では、複雑な泡のダイナミクスを避けるためクロスオーバーを仮定。

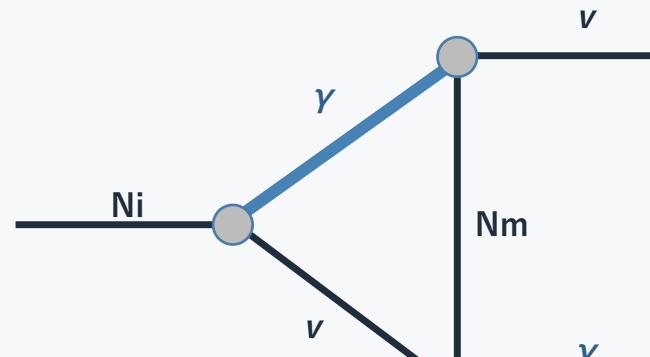
■ 放射崩壊 $N \rightarrow \nu + \gamma$ (CPソース)

29

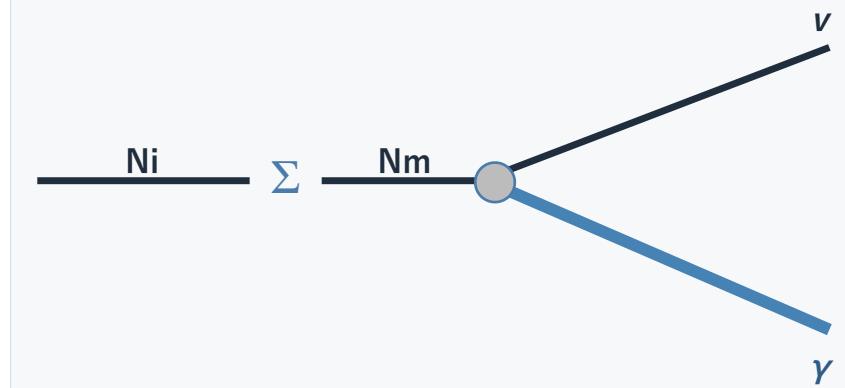
tree



vertex



self-energy



■ 抑制の起源：電磁双極子結合 $\mu_{\alpha i}$ は二重に小さい

標準的なレプトジェネシスの湯川結合に相当する電磁双極子結合 $\mu_{\alpha i}$ は

$$\mu_{\alpha i} = (\nu \cos \theta_W) / (\sqrt{2} M_\Psi^2) \times C_{NB}(\mu_{\text{ref}})$$

$$\Rightarrow \mu_{\alpha i} \propto (1/16\pi^2) \times (\nu/M_\Psi^2)$$

loop因子 $1/(16\pi^2) \simeq 0.006$ と、UVスケールの質量²で割った因子 ν/M_Ψ^2 の積を
「二重の抑制」として受ける

ゲージ不变性が Higgs 挿入を強制 $\rightarrow \nu/M_\Psi^2$ が必ず付随する。

■ 結果：生成(ε)も Washout (Γ)も $\mu_{\alpha i}^2$ に比例

CPソース (生成側)

ε は tree \times loop

$\rightarrow \varepsilon \propto |\mu_{\alpha i}|^2$ (非共鳴)

崩壊幅 (washout側)

$\Gamma \propto |\mu_{\alpha i}|^2 M_i^3$ より,

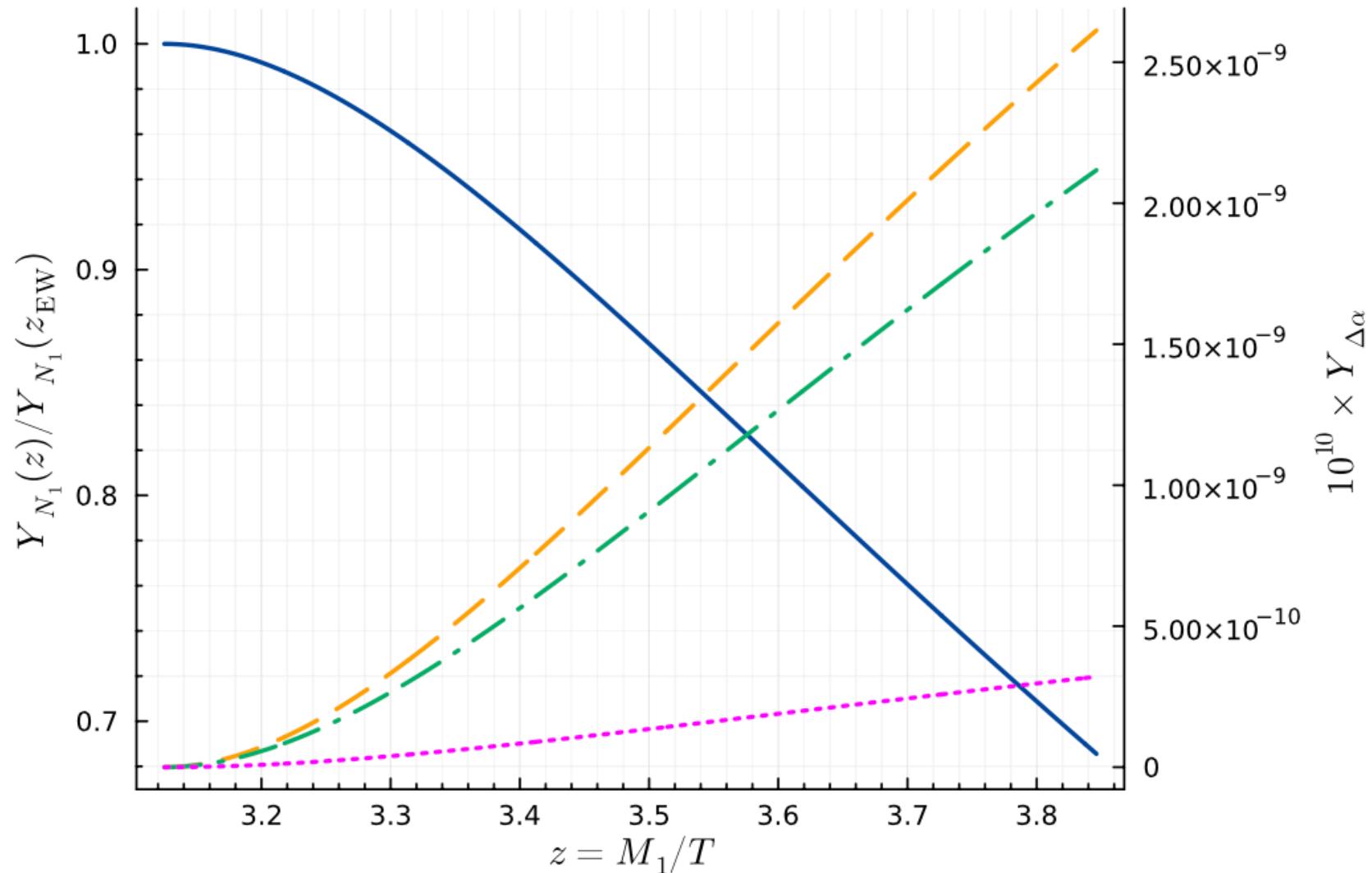
逆崩壊も同じ結合で起こる

一様に $\mu_{\alpha i}$ を大きくしても, source と washout が同時に増える

\rightarrow 増加も減少もせずプラトーを作ってしまうので, BAUが伸びにくい.

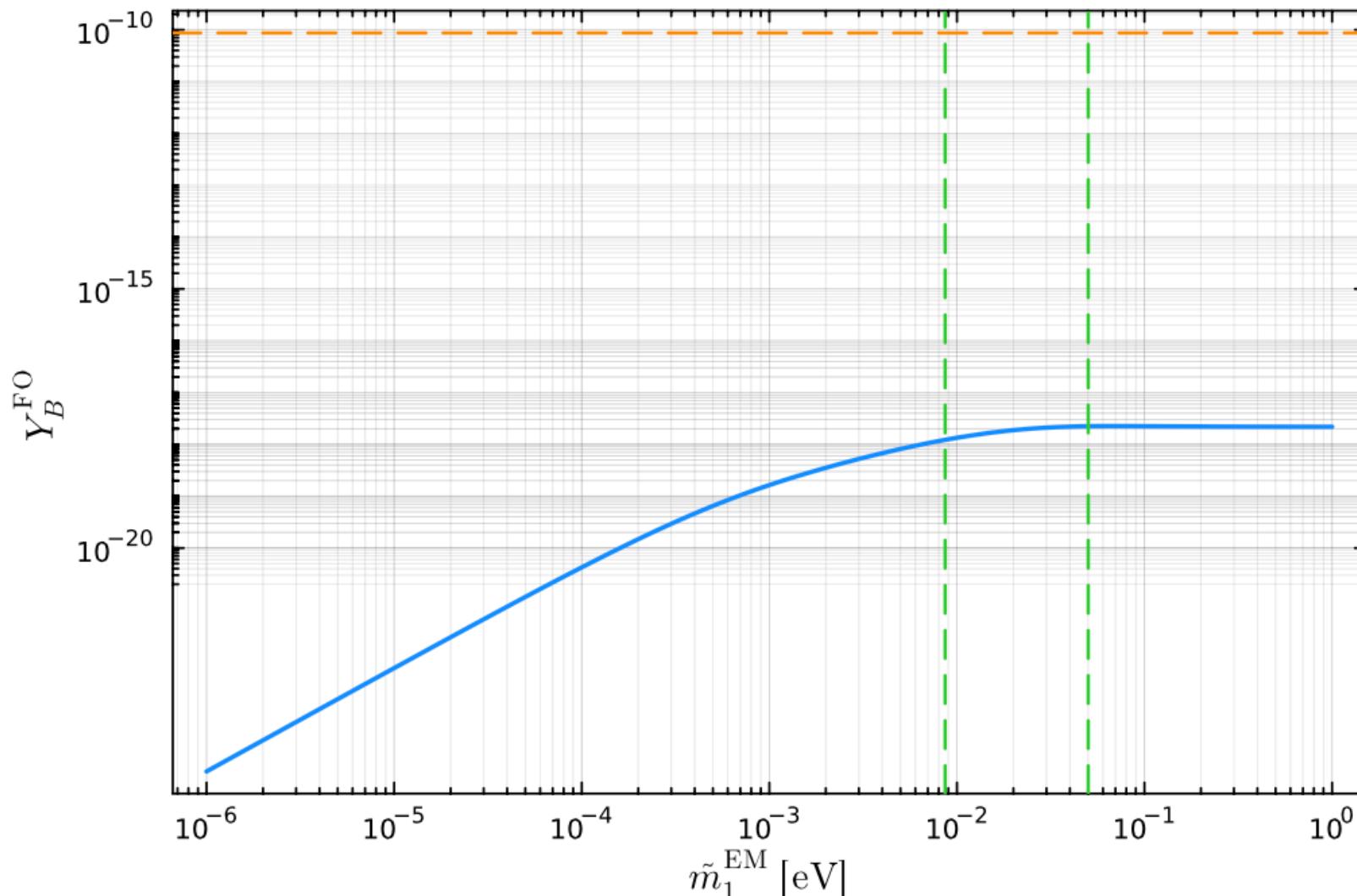
(次スライド以降のグラフを参照)

■ Part I : 数値解 (電弱窓での時間発展)



- フレーバー非対称性は単調増加するが、その総量は極めて少ない。

■ Part I : 最終 BAU は観測値から程遠い



- $Y_B^{\text{FO}} \lesssim 10^{-17}$ を観測値 $Y_B^{\text{obs}} \simeq 8.7 \times 10^{-11}$ (出典 : Planck 2018) と比較すると、約7桁不足)

■ Part Iの結論：非共鳴（かつ階層極限）では BAU が僅少

Part Iの模型が生成可能なバリオン非対称性の凍結値

$$Y_B^{\text{FO}} \lesssim 10^{-17}$$

観測値 $Y_B^{\text{obs}} \simeq 8.7 \times 10^{-11}$ (出典：Planck 2018) より約7桁小さい。

原因：ゲージ不变性が $\mu_{\alpha i}$ のスケーリングを固定し、
CP非対称性 ε とwashout項 W が同じ $|\mu_{\alpha i}|^2$ に比例するため。

■ 次に何ができるか

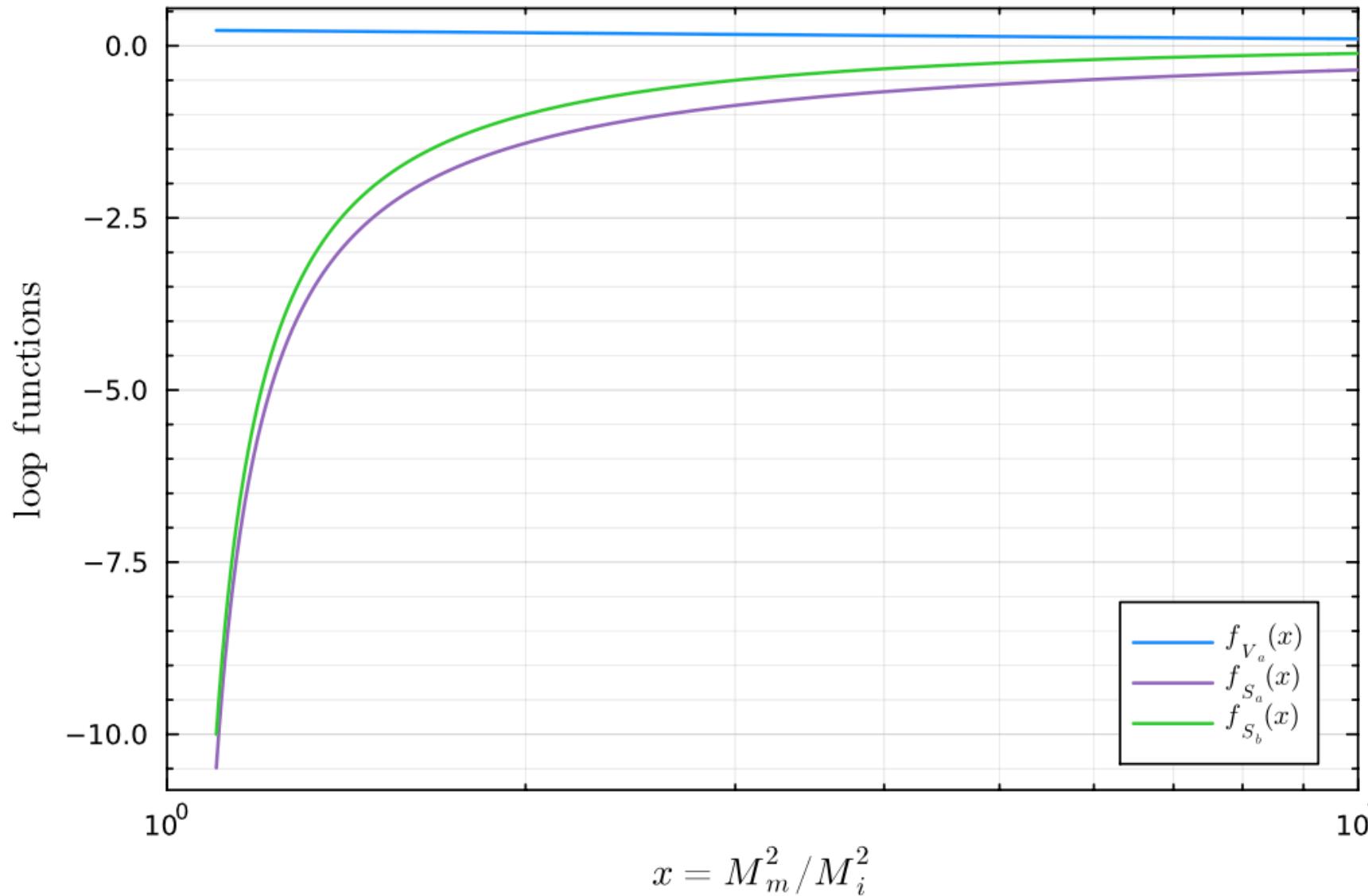
準縮退 ($M_2 \simeq M_1$) においては、 CP非対称性 ε の自己エネルギー寄与が共鳴
自己エネルギーが Breit-Wigner 型に増幅
→ ε が相対的に持ち上がる一方、 washout は飽和
→ BAU が観測値に到達し得る

ここまでで非共鳴パートは終了。 続いて共鳴パートへ。

右巻きニュートリノ質量の準縮退

- Breit—Wigner型の共鳴増幅
- 抑制を克服して Y_B^{obs} に到達

■ 共鳴の兆候：自己エネルギー項が $x \rightarrow 1$ で発散



Loop関数 $f_{S_{a,b}}$ は
 $x \rightarrow 1$ (準縮退) で発散
 \Rightarrow 共鳴増幅の源

この発散は摂動論の破綻を示す。
 正則化には崩壊幅を入れた再和が必要。

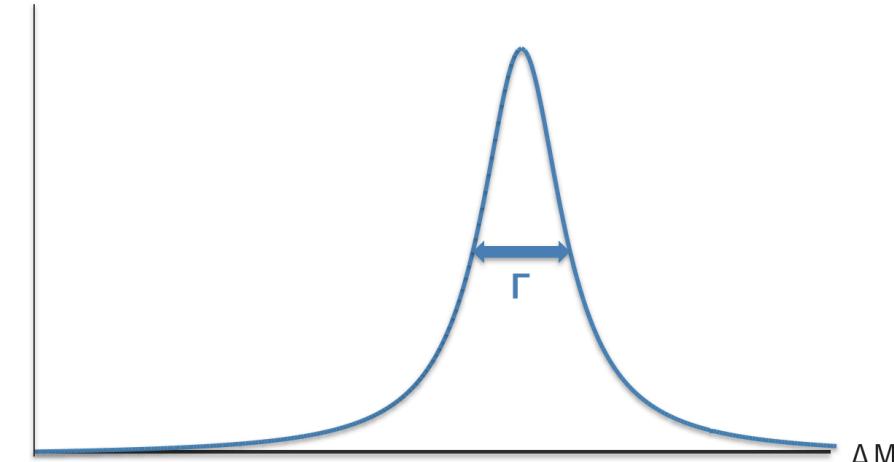
■ Pilaftsis—Underwood再和：崩壊幅で正則化

38

再和した伝播関数 : $\frac{1}{p^2 - M^2} \rightarrow \frac{1}{p^2 - M^2 + iM\Gamma}$

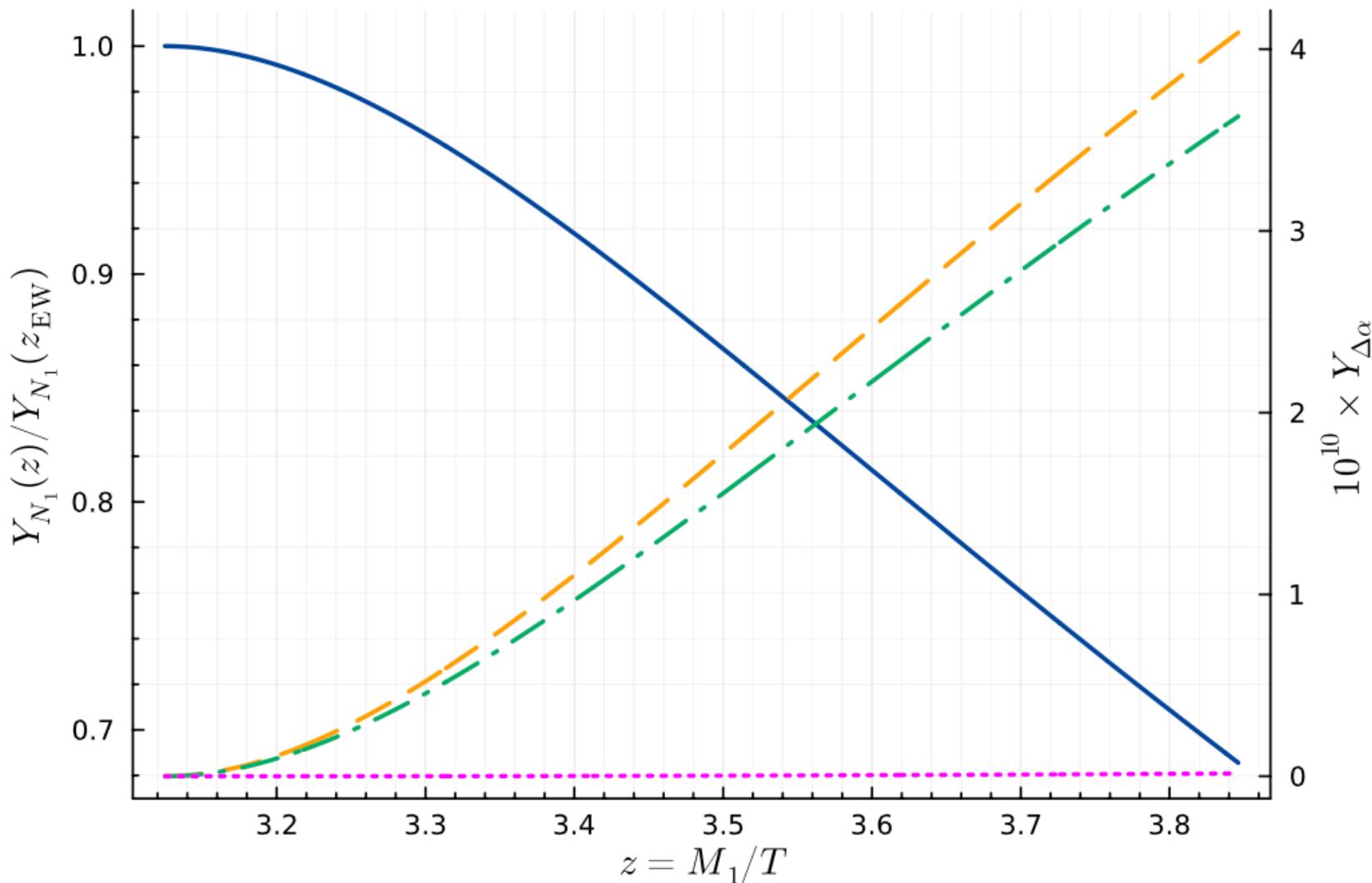
⇒ 自己エネルギーの有効因子 $\sim \frac{\Delta M^2}{(\Delta M^2)^2 + (M\Gamma)^2}$

最大 : $\Delta M \simeq \frac{\Gamma}{2}$ (Breit—Wigner 型)



共鳴でCPソースが増幅し, washoutは飽和する。

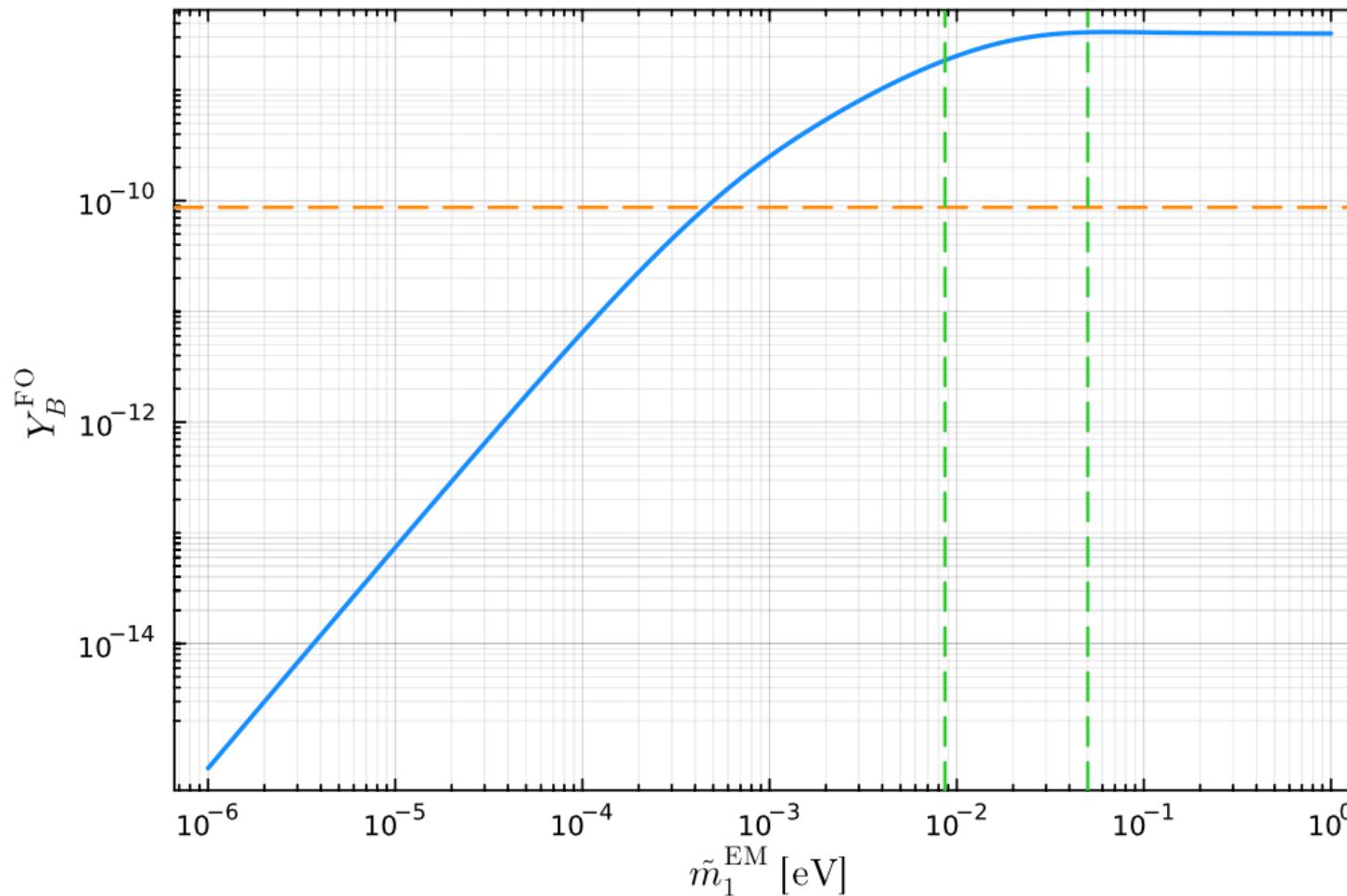
Part II : 数値解 (電弱窓での時間発展)



- 電弱窓で $Y_{\Delta\alpha}$ が $\mathcal{O}(10^{-10})$ まで成長

■ Part II：構造的抑制を克服（最終BAUが観測値に到達）

40



- ・強いwashout領域でプラトー
- ・ニュートリノ振動が示唆する質量窓で Y_B^{obs} を1桁以上上回る領域が存在

Part I : ゲージ不变性により双極子結合 $\mu_{\alpha i}$ が二重に抑制 $\rightarrow Y_B^{\text{FO}}$ は僅少

Part II : $\mu_{\alpha i}$ への二重抑制は依然として存在するものの、

自己エネルギーがBreit-Wigner型共鳴増幅 \rightarrow CPソースが回復

FCTEを解くと、強いwashout領域で Y_B^{FO} が観測値に到達

→ 共鳴電磁レプトジェネシスはバリオン非対称性を生成可能！

■ まとめと今後の展望

まとめ

- ・有効場理論に基づく低スケール電磁レプトジェネシス(非共鳴)には構造的抑制が存在
→ BAUに届かない
- ・準縮退でCP非対称性への自己エネルギー寄与が共鳴増幅 → 抑制を克服
- ・観測値を上回るバリオン非対称性のプラトーが得られる

今後の展望

- ・散乱と有限温度効果を含む量子輸送の体系化(CTP/Schwinger—Keldysh)
- ・低エネルギー観測量(e.g. $\mu \rightarrow e\gamma$, eEDM, ミューオン $g - 2$)からの制限
- ・有効場理論に基づく高スケール電磁レプトジェネシス(2-loop計算)