

2004年7月1日

基研2004年度研究会「素粒子物理学の進展」

$SU(2)_L$  triplet Higgs モデルに  
おけるバリオン数残存条件

文献

「Protecting the primordial baryon asymmetry in the  $SU(2)_L$  triplet Higgs model compatible with KamLAND and WMAP」

K. Hasegawa, hep-ph/0403272

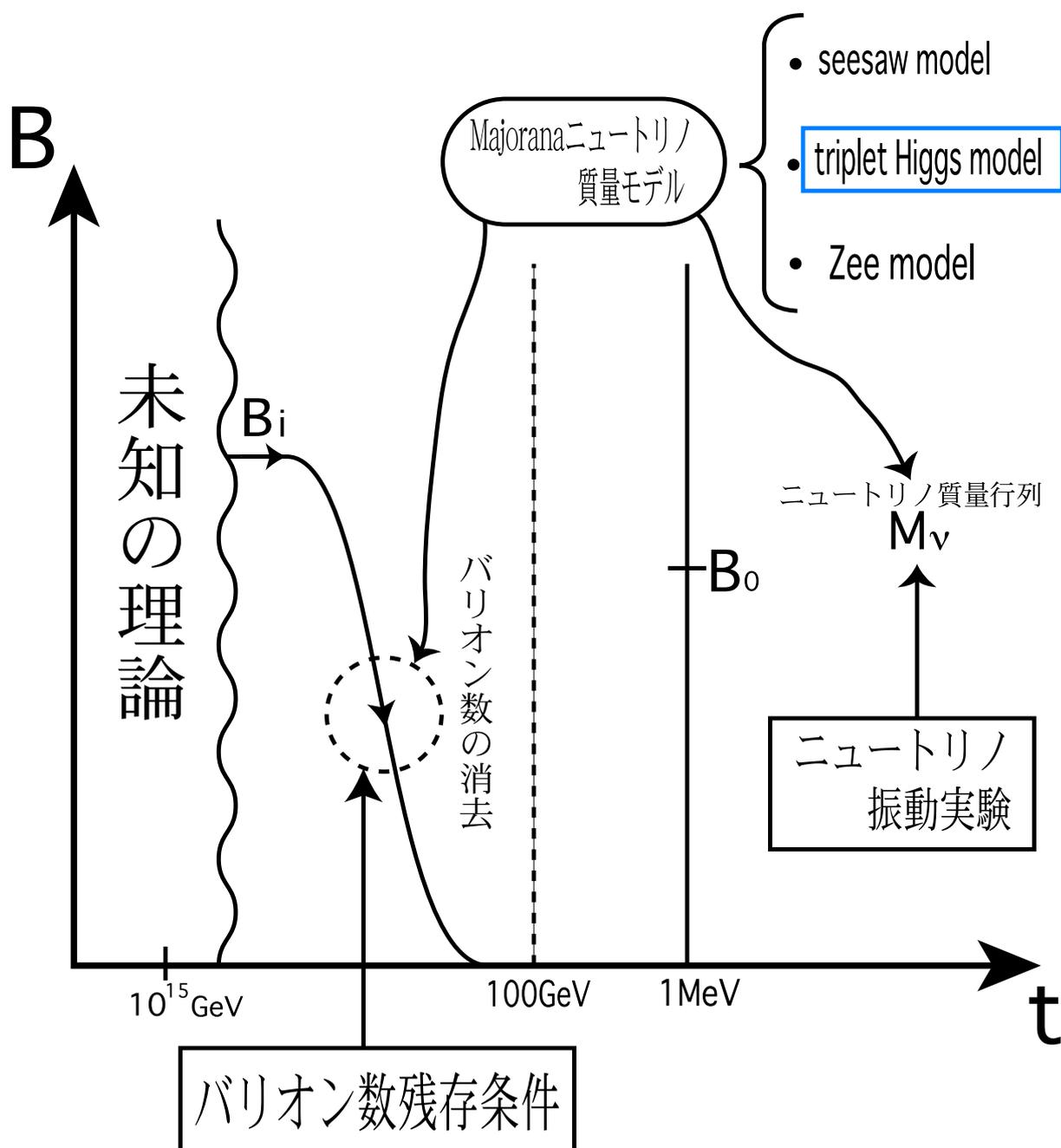
# 1 導入

## 分かっている事

(1) ニュートリノ振動実験 → ニュートリノは質量を持つ： $|m_\nu| \sim 0.1 \text{ eV}$

(2) 元素合成の理論と観測 → 現在のバリオン数:

$$B_0 = \frac{n_B}{s} \simeq 10^{-10}$$



## 目的

### 二つの条件

- **バリオン数残存条件**
- **ニュートリノ振動実験と WMAP の結果、 $\rho$  パラメータに対する制限**

を  $SU(2)_L$  triplet Higgs モデル に課す  
(CP は破れていないとする)

⇒ 同時に満たせるかを調べ、結合定数などの理論のパラメータを制限する

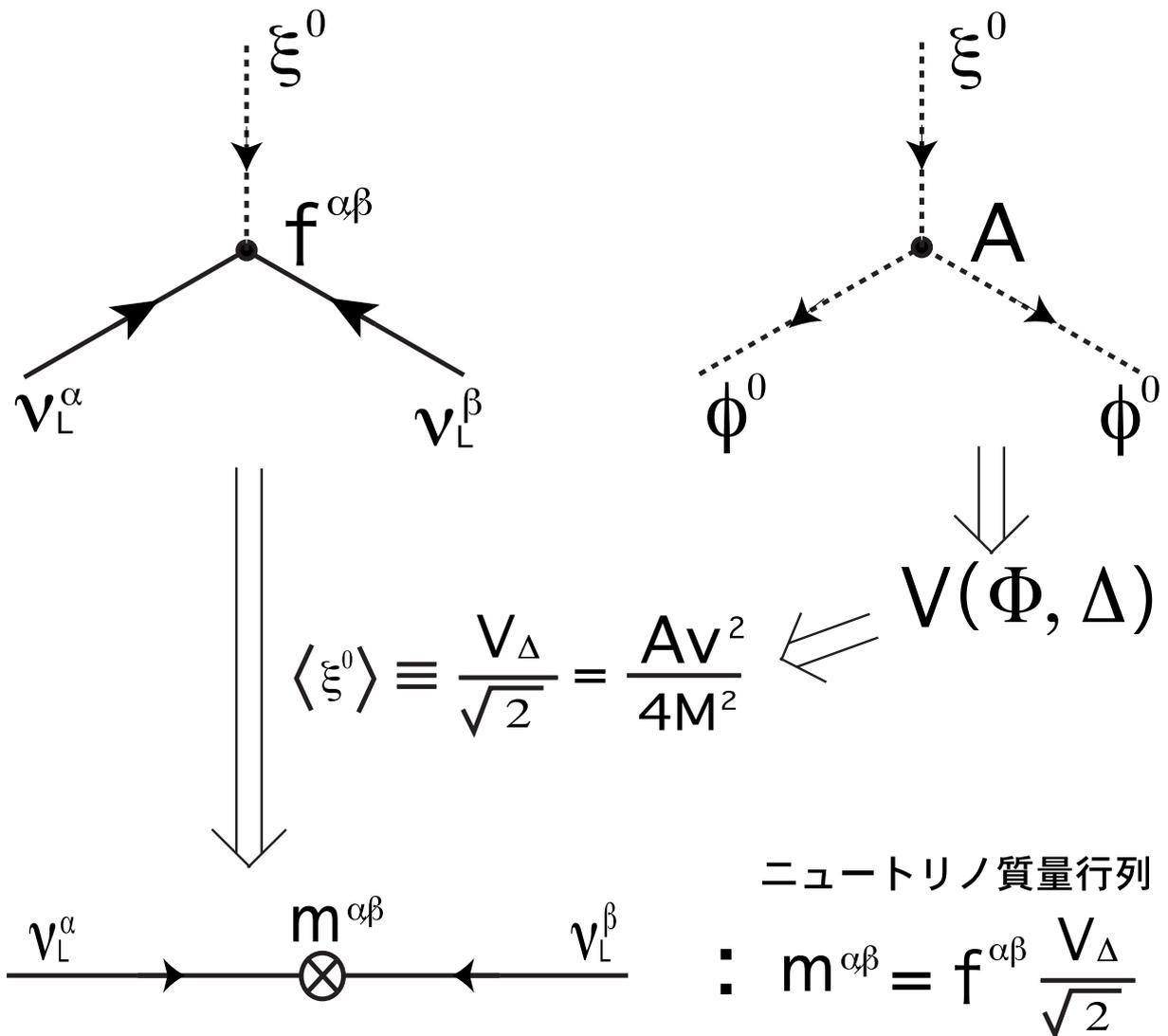
- 
- 以下の話
2.  $SU(2)_L$  triplet Higgs モデル
  3. バリオン数残存条件
  4. 許される領域
  5. 結論
-

## 2 $SU(2)_L$ triplet Higgs モデル

- $SU(2)_L$  triplet Higgs 場を導入

$$\Delta \equiv \begin{pmatrix} \xi^+/\sqrt{2} & \xi^{++} \\ \xi^0 & -\xi^+/\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

- $SU(2)_L$  triplet Higgs 場を含む相互作用を導入



- $\rho$  パラメータに対する制限

$$\frac{v_\Delta}{v} = \frac{Av}{2\sqrt{2}M^2} \lesssim 0.03 \quad (\text{LEP})$$

### 3 バリオン数残存条件

「 $SU(2)_L$  triplet Higgs モデルでのバリオン数残存条件は何か？」

- スファレロン-アノマリー過程

$\Delta B = \Delta L \neq 0$  ( $B - L$  を保存)、

100GeV  $\sim$   $10^{12}$  GeV で平衡

⇒ レプトン数を破る相互作用が平衡

⇒  $B_{fin} = L_{fin} = 0$

⇒ レプトン数を破る相互作用が非平衡である必要

- 「どの反応が非平衡ならばよいか？」

$$\begin{cases} A = 0 & \Rightarrow \text{保存量} : P = B - L + 2\Delta \\ f^{\alpha\beta} = 0 & \Rightarrow \text{保存量} : P = B - L \end{cases}$$

保存量は近似的でよい (実際に消えなければよい)

$$\boxed{\Gamma_A < H \text{ or } \Gamma_f < H} \quad (1)$$

(  $\Gamma_A \equiv \Gamma(\xi^0 \rightarrow \phi^{0*} \phi^{0*})$ ,  $\Gamma_f \equiv \Gamma(\xi^0 \rightarrow \bar{\nu}_L^\alpha \bar{\nu}_L^\beta)$  )

- バリオン数残存条件 (1) は Boltzmann 方程式を解く事により求められるはず

- (粒子数－反粒子数) の定義

$$\text{バリオン数 : } B \equiv \frac{n_B}{s} = \frac{n_b - n_{\bar{b}}}{s}$$

$$\text{レプトン数 : } L \equiv \frac{n_L}{s} = \frac{n_l - n_{\bar{l}}}{s}$$

$$\text{triplet Higgs 数 : } \Delta \equiv \frac{n_{\Delta}}{s} = \frac{n_{\delta} - n_{\bar{\delta}}}{s}$$

( $n_X$  : 粒子数密度、 $s$  : エントロピー密度)

- ( $L, \Delta$ ) に対する Boltzmann 方程式

$$\boxed{\frac{d}{dT} \vec{N} = f(T) \cdot M \vec{N}}$$

$$\vec{N} \equiv \begin{pmatrix} L \\ \Delta \end{pmatrix}, f(T) \equiv \begin{cases} 2.3 \frac{M^3}{T^4} & (T > M) \\ 2.8 \frac{M^{7/2}}{T^{9/2}} e^{-\frac{M}{T}} & (T < M) \end{cases}$$

$$M \equiv \begin{pmatrix} 2K_f & \frac{11}{14}K_f \\ K_f - \frac{4}{63}K_A & \frac{11}{28}K_f + \frac{5}{36}K_A \end{pmatrix}$$

$$K_f \equiv \left. \frac{\Gamma_f}{H} \right|_{T=M}, \quad K_A \equiv \left. \frac{\Gamma_A}{H} \right|_{T=M}$$

$$B = -\frac{28}{51}L + \frac{2}{17}\Delta$$

$$\boxed{\begin{pmatrix} L_{fin} \\ \Delta_{fin} \end{pmatrix} = V \begin{pmatrix} e^{-r\lambda_1} & 0 \\ 0 & e^{-r\lambda_2} \end{pmatrix} V^{-1} \begin{pmatrix} L_{ini} \\ \Delta_{ini} \end{pmatrix}}$$

- バリオン数残存条件

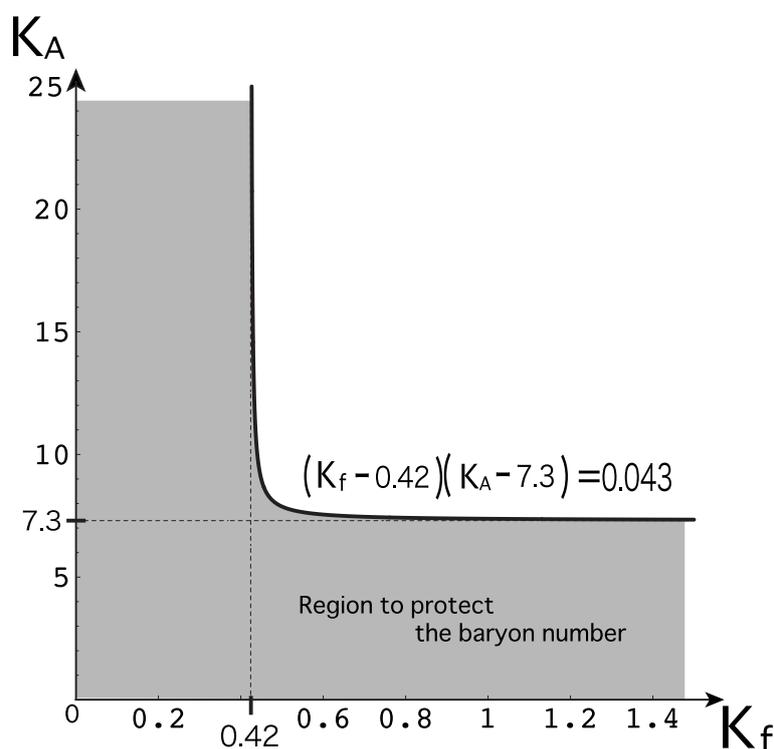
$$\lambda_2 = 0 \Leftrightarrow \text{固有モード } P \text{ が保存} \Leftrightarrow B_f \propto P_i \neq 0$$

$$\Leftrightarrow \det[M] = 0 \Leftrightarrow K_f = 0 \text{ or } K_A = 0$$

$$(\because \det[M] = \frac{289}{882} \cdot K_f \cdot K_A)$$

◆  $\lambda_2 \lesssim 1$  でも固有モードは近似的に保存するはず

$$\lambda_2 < 1 \Leftrightarrow$$



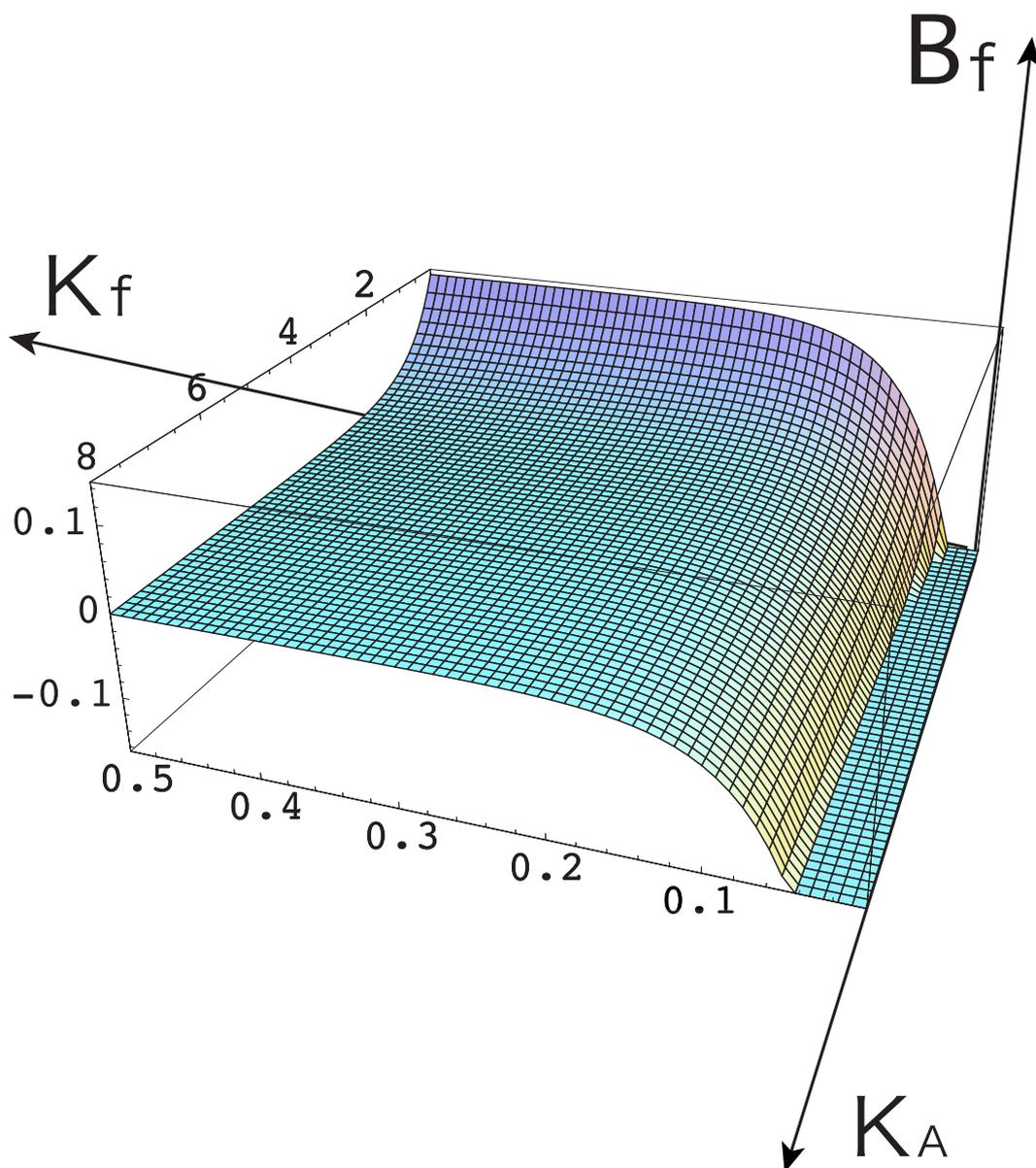
よってバリオン数残存条件は

$$K_f \lesssim 1 \text{ or } K_A \lesssim 1$$

- $B_{fin} = F(L_{ini}, \Delta_{ini}, K_f, K_A)$

初期条件  $(L_{ini}, \Delta_{ini})$  を固定する

$$(L_{ini}, \Delta_{ini}) = (1, 1)$$



● レプトンフレーバー  $e, \mu, \tau$  を区別した場合

スファレロン・アノマリー過程は

$$\frac{B}{3} - L_e, \frac{B}{3} - L_\mu, \frac{B}{3} - L_\tau$$

を保存する  $\Rightarrow$

	近似的保存量	バリオン数残存条件
(0)	$P_0 = B - L + 2\Delta$	$K_A < 1$
(1)	$P_1^a = B/3 - L_e$	$K_{L_e} < 1$
(2)	$P_1^a = B/3 - L_\mu$	$K_{L_\mu} < 1$
(3)	$P_1^a = B/3 - L_\tau$	$K_{L_\tau} < 1$
(4)	$P_2^a = L_e - L_\mu$	$K_{L_e - L_\mu} < 1$
(5)	$P_2^b = L_e - L_\tau$	$K_{L_e - L_\tau} < 1$
(6)	$P_2^c = L_\mu - L_\tau$	$K_{L_\mu - L_\tau} < 1$
(7)	$P_3^a = B/3 + L_{e\mu}$	$K_{L_{e\mu}} < 1$
(8)	$P_3^b = B/3 + L_{e\tau}$	$K_{L_{e\tau}} < 1$
(9)	$P_3^c = B/3 + L_{\mu\tau}$	$K_{L_{\mu\tau}} < 1$

バリオン数残存条件

「条件 (0) ~ (9) のうち少なくとも一つを満たす事」

## 4 許される領域

### ① バリオン数残存条件

$$K_A < 1 \Leftrightarrow |A| < 12 \times \left( \frac{M}{\text{GeV}} \right)^{\frac{3}{2}} \text{eV}$$

or

$$K_f < 1 \Leftrightarrow |f^{\alpha\beta}| < 4.3 \times 10^{-9} \times \left( \frac{M}{\text{GeV}} \right)^{\frac{1}{2}} \text{eV}$$

### ② $\rho$ パラメータに対する制限

$$|A| < 0.03 \times \frac{2\sqrt{2}M^2}{v}$$

### ③ ニュートリノ振動実験の結果

$$\mathcal{M}_\nu = \begin{pmatrix} c^2 m_1 + s^2 m_2 & -\frac{1}{\sqrt{2}} sc(m_1 - m_2) & \frac{1}{\sqrt{2}} sc(m_1 - m_2) \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} sc(m_1 - m_2) & \frac{1}{2}(s^2 m_1 + c^2 m_2 + m_3) & -\frac{1}{2}(s^2 m_1 + c^2 m_2 - m_3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} sc(m_1 - m_2) & -\frac{1}{2}(s^2 m_1 + c^2 m_2 - m_3) & \frac{1}{2}(s^2 m_1 + c^2 m_2 + m_3) \end{pmatrix}$$

$$\Delta_a = |m_3^2 - m_2^2|, \quad \Delta_s = m_2^2 - m_1^2,$$

$$\theta_{atm} = \theta_{23}, \quad \theta_{13}, \quad \theta_{\odot} = \theta_{12}$$

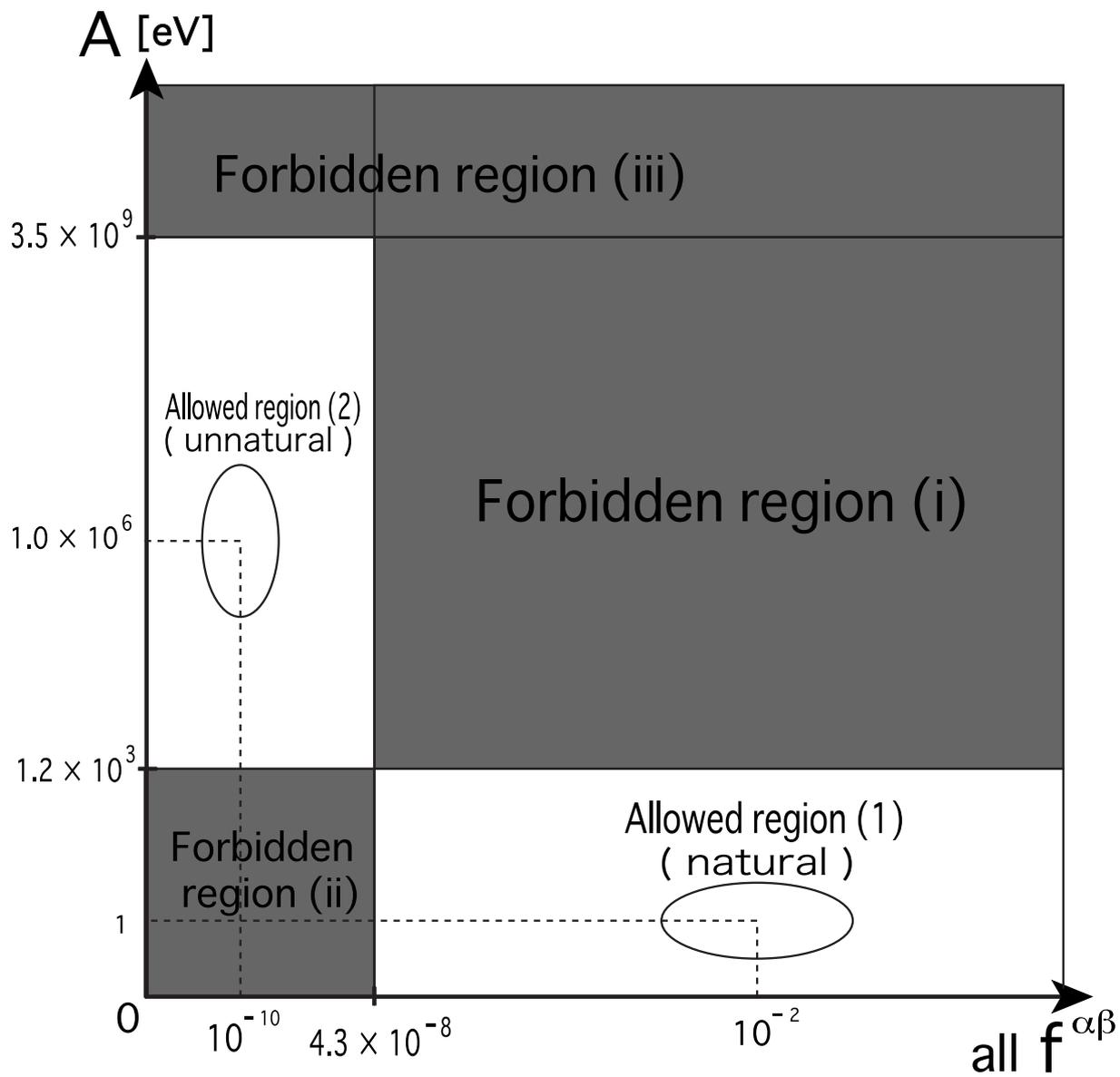
### ④ WMAPの結果

$$\sum_i |m_i| < 0.71 [\text{eV}]$$

- $K_A < 1$ かつ $K_f < 1$ はニュートリノ振動実験と

WMAPの結果を満たせない

●  $M = 100\text{GeV}$  の場合



## 5 結論

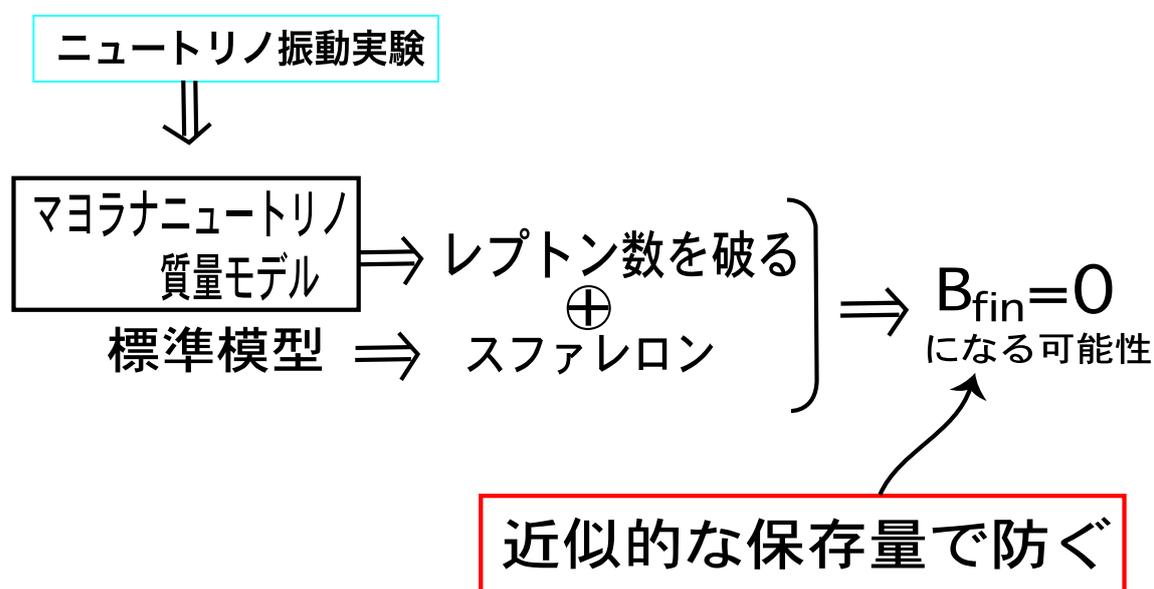
(レプトンセクターではCPが破れていないとする)

$SU(2)_L$  triplet Higgs モデルにおいて、

- バリオン数残存条件
- ニュートリノ振動実験と WMAP の結果、 $\rho$  パラメータに対する制限

を同時に満たせるパラメータ領域を求めた。

- 一般的に



- 他のマヨラナニュートリノ質量モデル

### (i) Zee モデル

[ K. Hasegawa, C. S. Lim, K. Ogure, Physical Review D 68, 053006 (2003) ]

### (ii) Seesaw モデル

[ K. Hasegawa, Physical Review D 69, 013002 (2004) ]