

# 輻射補正による ニュートリノ質量生成機構

2018.9.11

大阪大学 素粒子論研究室 M2 榎本 一輝

•どんな話をするか。

ニュートリノ質量問題を解決する機構の1つを紹介します。

•何を覚えて帰って欲しいか。

ニュートリノ質量問題を解決する機構だけど...

1. DMなど他の問題も同時に解決しうるモデルも作れます。
2. ニュートリノ質量を生成する機構だけど、HL-LHC やILC など将来の加速器実験で制限をつけられます。

1. 導入 ～ ニュートリノ質量 ～
2. 輻射補正によるニュートリノ質量生成機構
3. レプトンフレーバーを破る過程
4. まとめ

1. 導入 ～ ニュートリノ質量 ～
2. 輻射補正によるニュートリノ質量生成機構
3. レプトンフレーバーを破る過程
4. まとめ

# 1. 導入 ～ ニュートリノ質量 ～

## 素粒子標準模型 ( Standard Model )

### ゲージ対称性 + ヒッグス機構

ヒッグス場  $\phi$  が真空期待値  $v$  を持つことによってゲージボソンが質量を獲得する。標準模型の場合、クォークと荷電レプトンの質量もヒッグスの真空期待値によって生成される。

$$m_e = y_e v$$

標準模型においてニュートリノは質量を獲得しない。

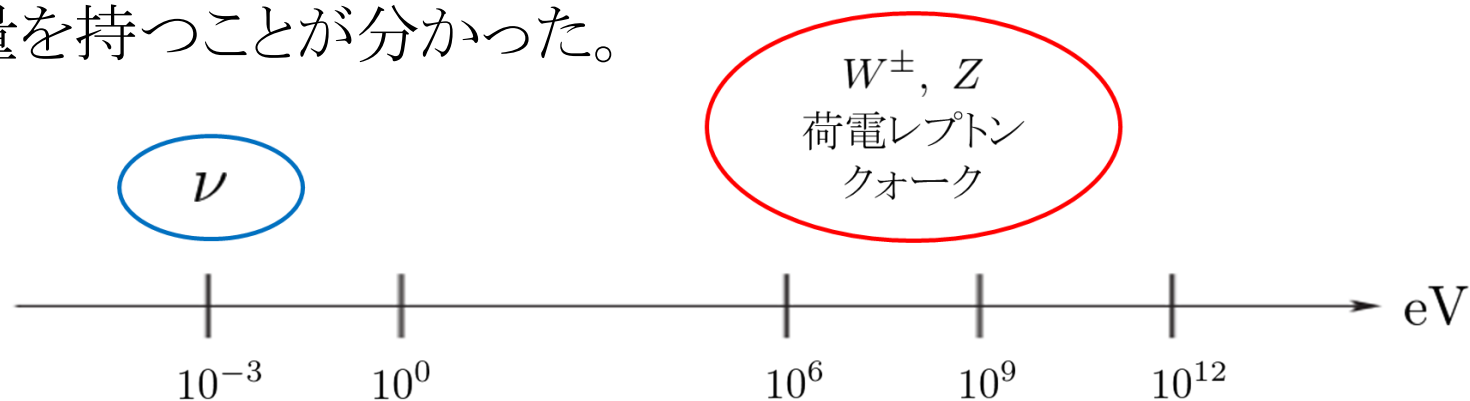
$$m_\nu = 0$$

$y_e$  : 湯川結合定数

しかし、ニュートリノ振動実験から、  
ニュートリノが非常に小さい質量を持つことが分かった。



ニュートリノ質量  
の起源は？



ニュートリノの質量起源が他の粒子と同様にヒッグスの真空期待値であるとする  
と、その質量が非常に小さいことを自然に説明できない。

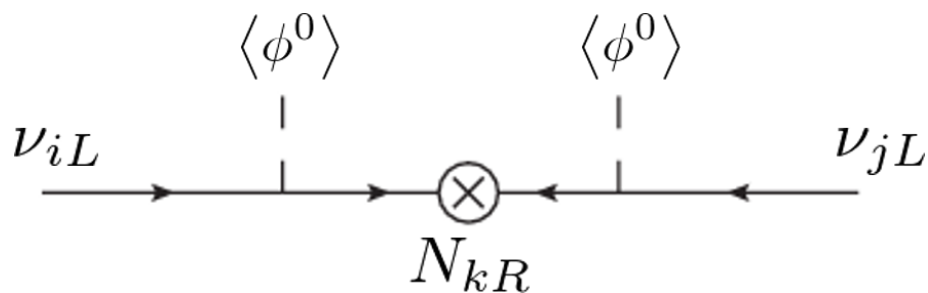
$$m_\nu = y_\nu v \quad \Rightarrow \quad y_\nu \ll y_e$$

ニュートリノの小さな質量を自然に説明する方法はあるか？

よく知られた例

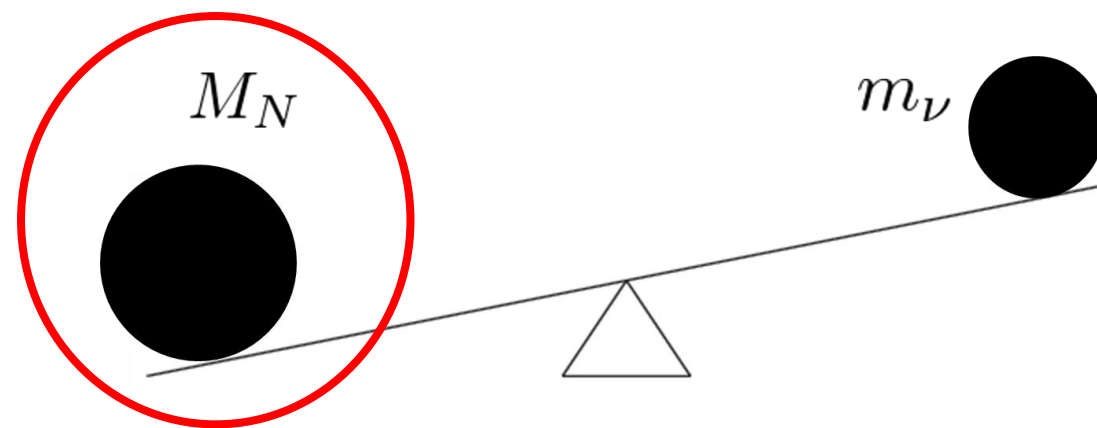
○ (Type-I) シーソー機構

マヨラナ型の質量を持った右巻きニュートリノを導入する。  $N_{iR}$



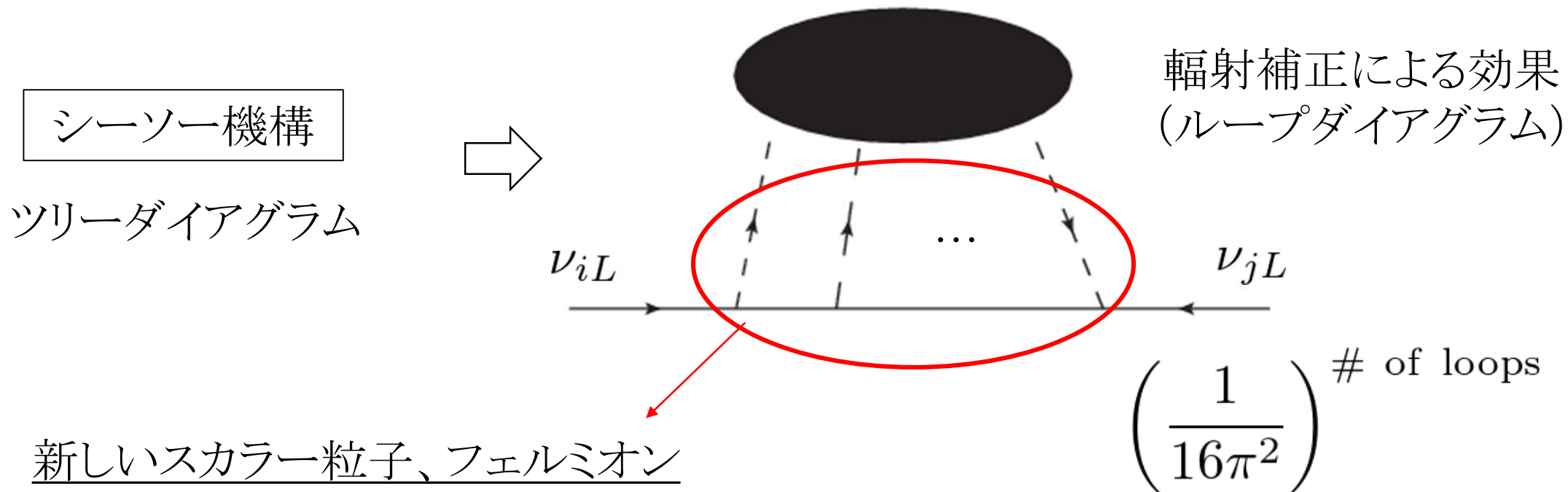
$$m_\nu \sim \frac{(y_\nu v)^2}{M_N}$$

GUT スケール ( $\sim 10^{15} \text{ GeV}$ )  
のような高いエネルギーの新物理



実験による検証が難しい

より低いエネルギーにおける新物理でニュートリノ質量は説明できないか？



$o(100\text{GeV}) \sim o(1\text{TeV})$  実験による検証の可能性はある！

Radiative Seesaw Mechanism



1. 導入 ～ ニュートリノ質量 ～
2. 輻射補正によるニュートリノ質量生成機構
3. レプトンフレーバーを破る過程
4. まとめ

## 2. 輻射補正によるニュートリノ質量生成機構

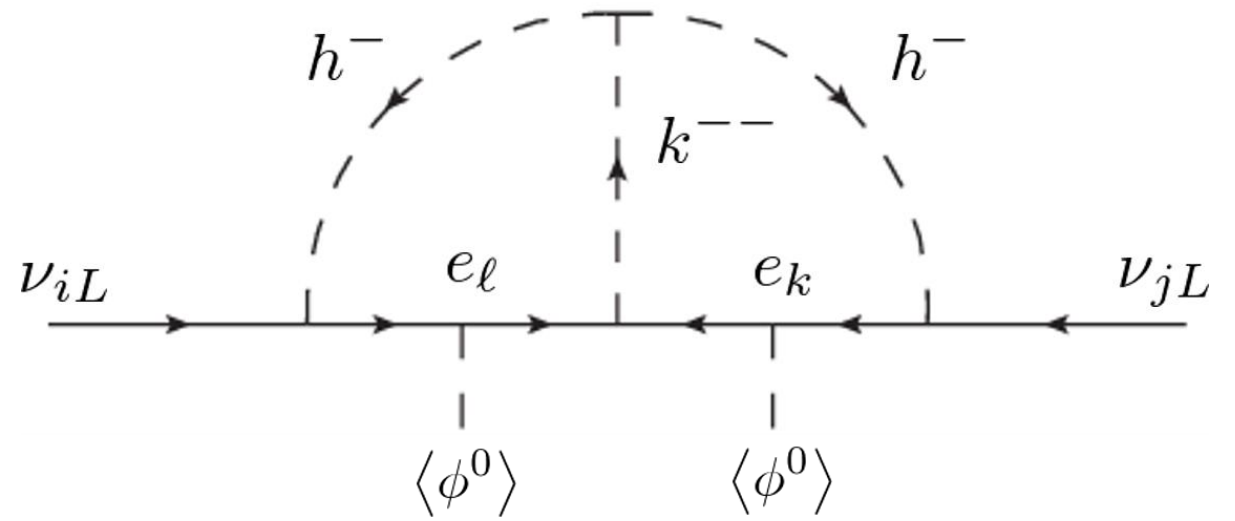
### ○ Zee-Babu model

**A.Zee, Nucl. Phys. B264, 99 (1986)**

**K.S.Babu, Phys. Lett. B203, 132 (1988)**

新粒子

$$h^- : (1, -1) \quad k^{--} : (1, -2)$$



○ Ma model

**E.Ma, Phys. Rev. D73, 077301 (2006)**

新しい対称性  $Z_2$  symmetry

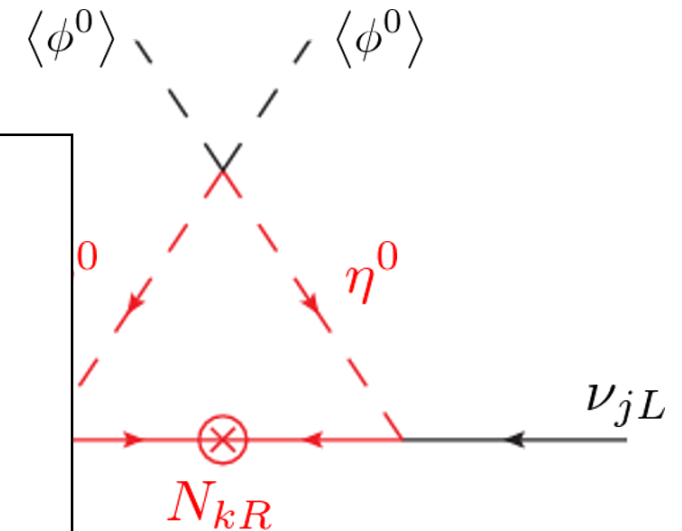
新粒子

$\eta : \left( 2 \right.$

2回変換すると元に戻る変換

even parity :  $\varphi_{\text{even}} \rightarrow \varphi_{\text{even}}$

odd parity :  $\varphi_{\text{odd}} \rightarrow -\varphi_{\text{odd}}$



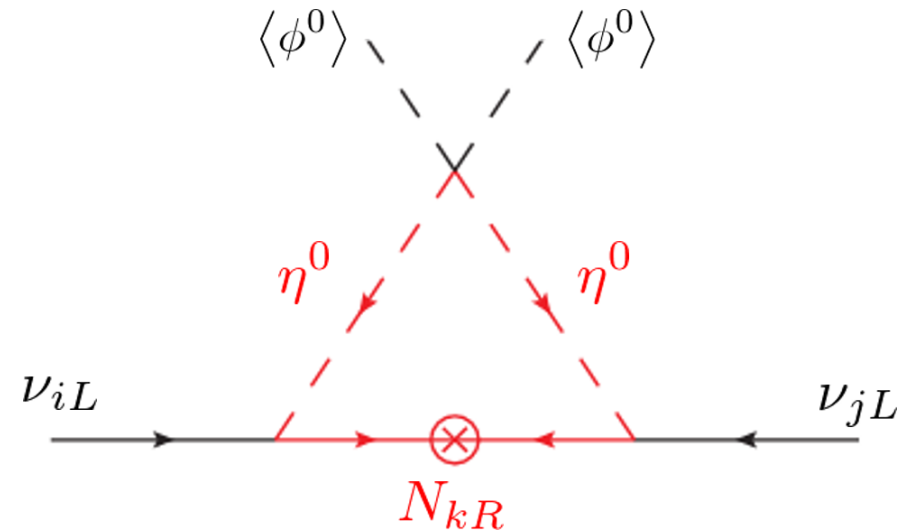
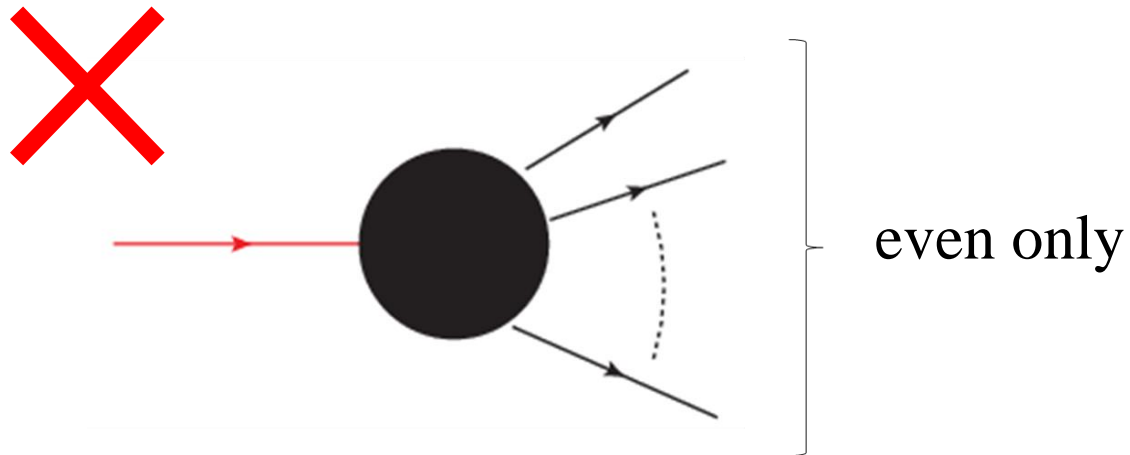
○ Ma model

**E.Ma, Phys. Rev. D73, 077301 (2006)**

新しい対称性  $Z_2$  symmetry

新粒子

$$\eta : \left( 2, \frac{1}{2}, - \right) \quad N_{iR} : (1, 0, -)$$



最も軽い odd 粒子は DM の候補となりうる。

$$\text{Re}\eta^0, \text{Im}\eta^0$$

# ○ AKS (Aoki-Kanemura-Seto) model

**M.Aoki, S.Kanemura, O.Seto, Phys. Rev. Lett. 102, 051805 (2009)**

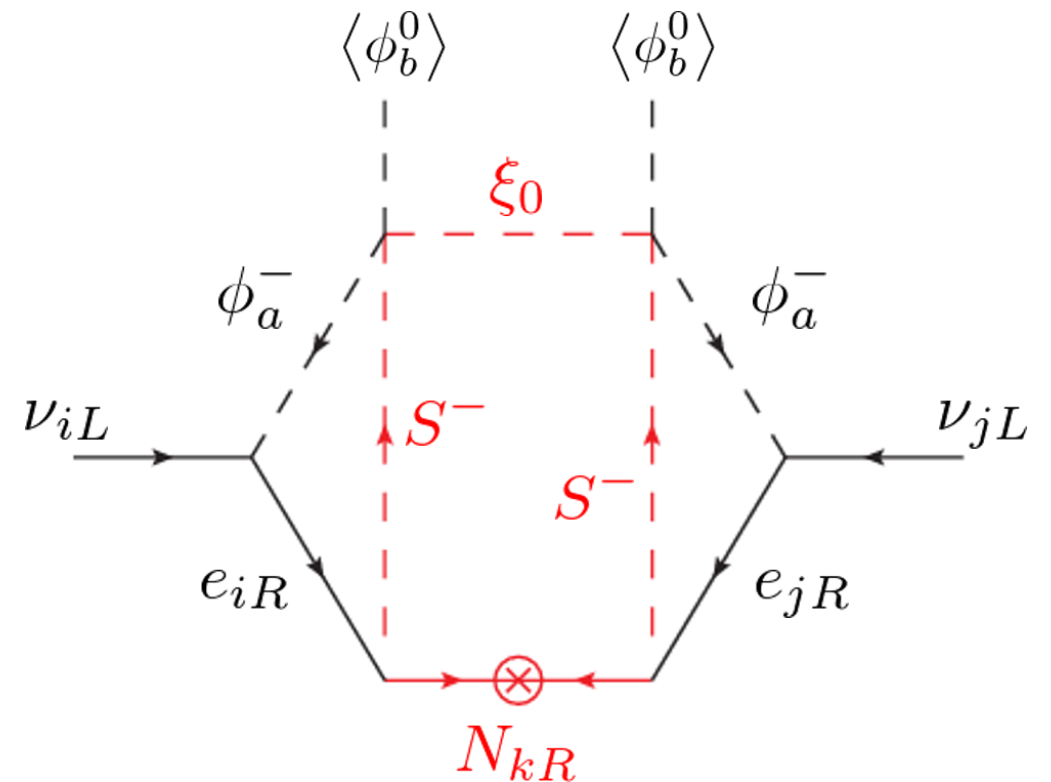
新しい対称性  $Z_2$  symmetry

新粒子

$$\phi_2 : \left( 2, +\frac{1}{2}, + \right) \quad \xi_0 : (1, 0, -)$$

$$S^- : (1, -1, -) \quad N_{iR} : (1, 0, -)$$

DM の候補:  $\xi_0$

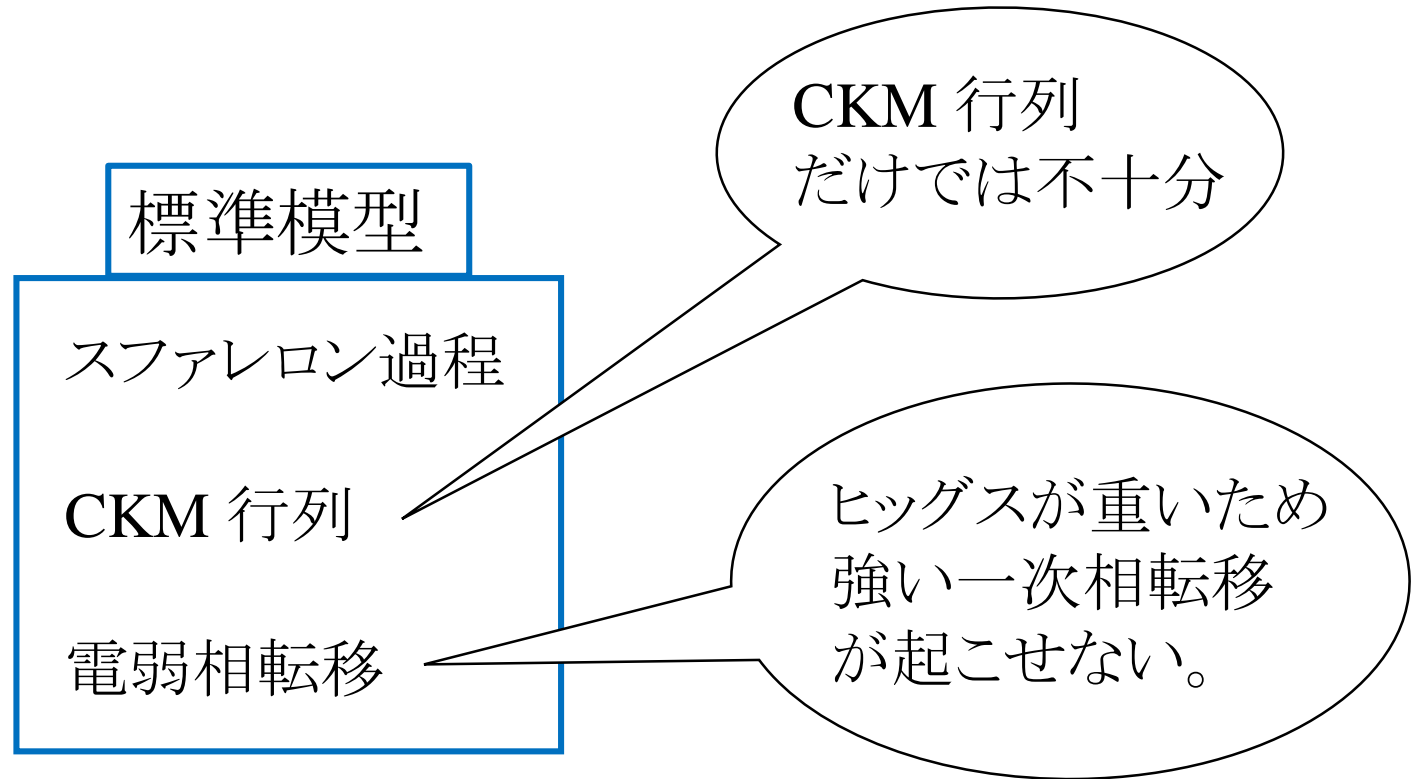


AKS 模型はバリオン非対称性の問題も解決しうる模型である。

## 電弱バリオン数生成

### サハロフの3条件

1. バリオン数を破る過程
2. C, CP を破る過程
3. 平衡状態からの離脱



標準模型では電弱バリオン数生成を実現できない。

AKS 模型はバリオン非対称性の問題も解決しうる模型である。

## 電弱バリオン数生成

### サハロフの3条件

1. バリオン数を破る過程
2. C, CP を破る過程
3. 平衡状態からの離脱

### AKS 模型

スファレロン過程

CKM 行列

スカラーポテンシャル

電弱相転移

スカラーポテンシャルを  
拡張したことにより可能  
(THDMを内包する。)

1. 導入 ～ ニュートリノ質量 ～
2. 輻射補正によるニュートリノ質量生成機構
3. レプトンフレーバーを破る過程
4. まとめ

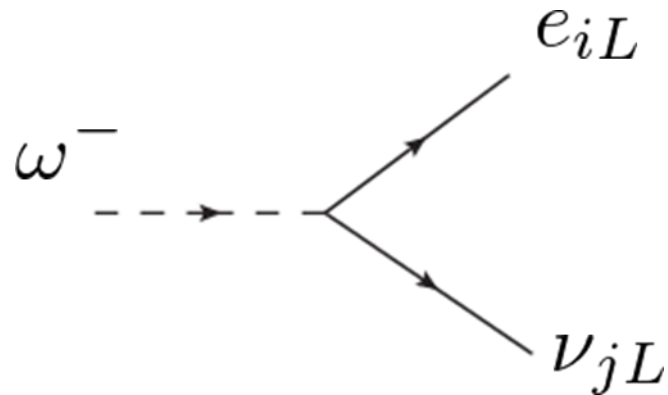


### 3. レプトンフレーバーを破る過程

#### Radiative seesaw 模型の特徴

1. 拡張されたスカラーポテンシャル
2. 新しく導入したスカラー粒子による湯川相互作用

一般に対角化されていない。

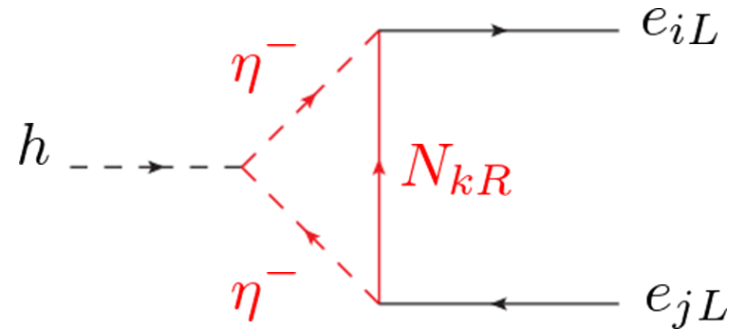


レプトンフレーバーを破る過程が生じる。

$$\mu \rightarrow e\gamma \quad \tau \rightarrow e\gamma \quad \mu \rightarrow 3e \quad \text{etc...}$$

# レプトンフレーバーを破るヒッグスの崩壊チャンネル

例:  $h \rightarrow \mu\tau$  in “Ma model”



○ 現在の制限

$$\text{Br}(h \rightarrow \mu\tau) < 1.43\% \quad (95\% \text{CL})$$

**PDG201  
8**

○ 将来実験

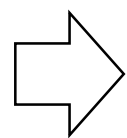
$$\text{ILC (@ 250 GeV)} : \text{Br}(h \rightarrow \mu\tau) \approx 0.4\% \quad (2\sigma) \quad (\mathcal{L} = 250 \text{ fb}^{-1})$$

$$\text{HL-LHC (@ 14 TeV)} : \text{Br}(h \rightarrow \mu\tau) \approx 0.5\% \quad (2\sigma) \quad (\mathcal{L} = 3000 \text{ fb}^{-1})$$

**S. Banerjee et al, JHEP 1607  
(2016) 059**

1. 導入 ～ ニュートリノ質量 ～
2. 輻射補正によるニュートリノ質量生成機構
3. レプトンフレーバーを破る過程
4. まとめ

- ニュートリノの小さな質量を自然に説明する比較的低エネルギーの新物理模型: **Radiative seesaw 模型**
- Radiative seesaw 模型は拡張の仕方によって、**DM**や**バリオン非対称性**など他の問題を同時に解決しうる模型である。
- Radiative seesaw 模型は新しいスカラーを導入するため、**レプトンフレーバーを破る過程**を预言する。



HL-LHC や ILC など将来の加速器実験において  
検証可能

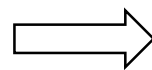
Back up Slides

Q. なぜ、標準模型においてニュートリノは質量0なのか？

A. 右巻きのニュートリノ場を含んでいないため

電子の質量項

$$m_e \bar{e}_L e_R + m_e \bar{e}_R e_L$$



$e_L$ と $e_R$ が必要

ニュートリノの質量項



$$m_\nu \bar{\nu}_L \nu_R + m_\nu \bar{\nu}_R \nu_L$$

$\nu_R$ がないためこの形を作れない。

Q. なぜ  $\text{Re } \eta^0$  と  $\text{Im } \eta^0$  を分けて書いたか。

A. 質量が違うから。

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{mass}} &\ni \lambda_5 (\eta^\dagger \phi)^2 + \text{h. c.} \\ &\rightarrow \lambda_5 \{(\eta^0)^2 + \text{h. c.}\} v^2 \\ &= \lambda_5 \{(\text{Re } \eta^0)^2 - (\text{Im } \eta^0)^2\} v^2\end{aligned}$$