

# ニュートリノを伴わない 二重ベータ崩壊から探る 右巻きニュートリノ

参考文献：

T.Asaka, H.Ishida, K.T., Phys.Rev.D103 (2021) 015014  
+ arXiv:2012.13186 + arXiv:2101.12498

共同研究者：浅賀岳彦（新潟大学）、石田裕之（富山県立大）

新潟大学 田中和樹

# 研究背景

- 標準模型は素粒子の性質や相互作用をゲージ対称性に基づき体系的にまとめた理論で、多くの高エネルギー実験を精度良く説明する
- 標準模型では、説明できない現象論的課題も存在する  
Ex) ニュートリノ質量、宇宙バリオン非対称性、暗黒物質
- ニュートリノについて  
標準模型では左巻きしか含まれず質量がゼロ
  - ニュートリノ質量（振動実験）
  - ディラック粒子orマヨラナ粒子？
  - 右巻きニュートリノ？ etc...

# 研究背景

振動実験では、アクティブニュートリノの質量2乗差 ( $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ ) が観測されている

ニュートリノ振動実験の結果 [NuFIT 5.0(2020)]

順階層性 (Normal Hierarchy)

$$m_1 < m_2 < m_3$$

$$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} eV^2} = 7.42^{+0.21}_{-0.20} \quad \frac{\Delta m_{31}^2}{10^{-3} eV^2} = 2.517^{+0.026}_{-0.028}$$

逆階層性 (Inverted Hierarchy)

$$m_3 < m_1 < m_2$$

$$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} eV^2} = 7.42^{+0.21}_{-0.20} \quad \frac{\Delta m_{32}^2}{10^{-3} eV^2} = -2.498^{+0.028}_{-0.028}$$

- ▶ アクティブニュートリノ  $\nu_i (i = 1 \sim 3)$  の質量  $\sim \mathcal{O}(10^{-11}) \text{ GeV}$ 
  - 他のレプトンに比べ極端に小さい (ex. 電子の質量  $m_e \sim 10^{-4} \text{ GeV}$ )
- ▶ 最低でも2世代のアクティブニュートリノが質量を持つ

**標準模型の枠組みでは説明できない**



解決するものとして  
**シーソー機構**がある

# 目次

- 研究背景
- シーソー機構
- ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊
- 右巻きニュートリノによる寄与
- 異なる原子核を用いた観測実験の有用性
- まとめ



# シーソー機構

[P. Mermod(2017)]

標準模型では、  
ニュートリノだけが右巻き  
を持たない



愚直に導入する  
(今回は簡単のため2世代の右  
巻きニュートリノを導入する)

	mass →	charge →	name →
Quarks	2.4 MeV	$\frac{2}{3}$	Left <b>u</b> Right up
	1.27 GeV	$\frac{2}{3}$	Left <b>c</b> Right charm
	171.2 GeV	$\frac{2}{3}$	Left <b>t</b> Right top
	4.8 MeV	$-\frac{1}{3}$	Left <b>d</b> Right down
	104 MeV	$-\frac{1}{3}$	Left <b>s</b> Right strange
	4.2 GeV	$-\frac{1}{3}$	Left <b>b</b> Right bottom
Leptons	0 eV	0	Left <b><math>\nu_e</math></b> Right electron neutrino
	0 eV	0	Left <b><math>\nu_\mu</math></b> Right muon neutrino
	0 eV	0	Left <b><math>\nu_\tau</math></b> Right tau neutrino
	0.511 MeV	-1	Left <b>e</b> Right electron
	105.7 MeV	-1	Left <b><math>\mu</math></b> Right muon
	1.777 GeV	-1	Left <b><math>\tau</math></b> Right tau

# シーソー機構

## 標準模型 + 2つの右巻きニュートリノ

標準模型の**最小拡張**として、2世代の右巻きニュートリノ  $\nu_{RI}$  ( $I = 1, 2$ ) を新たに導入する。

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + i\overline{\nu_{RI}}\gamma^\mu\partial_\mu\nu_{RI} - \left( F_{\alpha I}\overline{L}_\alpha\Phi\nu_{RI} + \frac{M_I}{2}\overline{\nu_{RI}^c}\nu_{RI} + h.c. \right)$$

$\mathcal{L}_{\text{SM}}$ : 標準模型ラグランジアン  $L_\alpha$  ( $\alpha = e, \mu, \tau$ ): レプトン2重項  $F_{\alpha I}$ : 湯川結合定数  $\Phi$ : ヒッグス2重項

## ディラック質量とマヨラナ質量

$$M_D (\equiv \langle \Phi \rangle F) \ll M_I$$



- ニュートリノが極微な質量を持つ

$$|m_i| = \left| \frac{M_D^2}{M_I} \right| \ll |M_D|$$

- ニュートリノはマヨラナ粒子  
標準模型では許されない反応が起こりうる

**シーソー機構が実現できる**

[P.Minkowski, Phys. Lett. B **67**, 421 (1977)]

[Yanagita, Prog. Theor. Phys. **64**, 1103 (1980)]

# シーソー機構

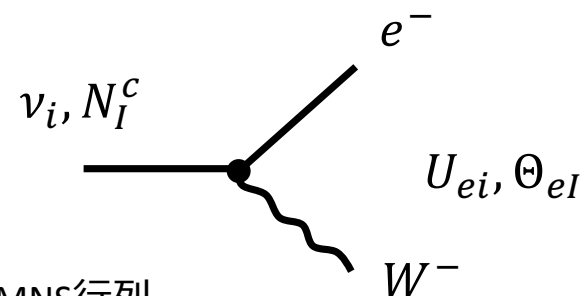
## ニュートリノ混合状態

全ての質量固有状態がゲージ相互作用を持つ

$$\nu_{L\alpha} = \sum_i U_{\alpha i} \nu_i + \sum_I \Theta_{\alpha I} N_I^c$$

$\nu_i$ : アクティブニュートリノ,  $N_I$ : 右巻きニュートリノ,  $U_{\alpha i}$ : PMNS行列

[Maki, Nakagawa, Sakata (1962)]



[Pontecorvo(1958)]

## ニュートリノの弱い相互作用

湯川結合定数の書き直し[Casas, Ibarra('01)]

$$F = \frac{i}{\langle \Phi \rangle} U D_\nu^{1/2} \Omega D_N^{1/2} \quad D_N = \text{diag}(M_1, M_2) \quad \Omega = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \cos \omega & -\sin \omega \\ \xi \sin \omega & \xi \cos \omega \end{pmatrix} \quad \text{(NH)}$$

$$D_\nu = \text{diag}(m_1, m_2, m_3)$$

$\omega$ は複素数

右巻きニュートリノの  
弱い相互作用に関する混合要素

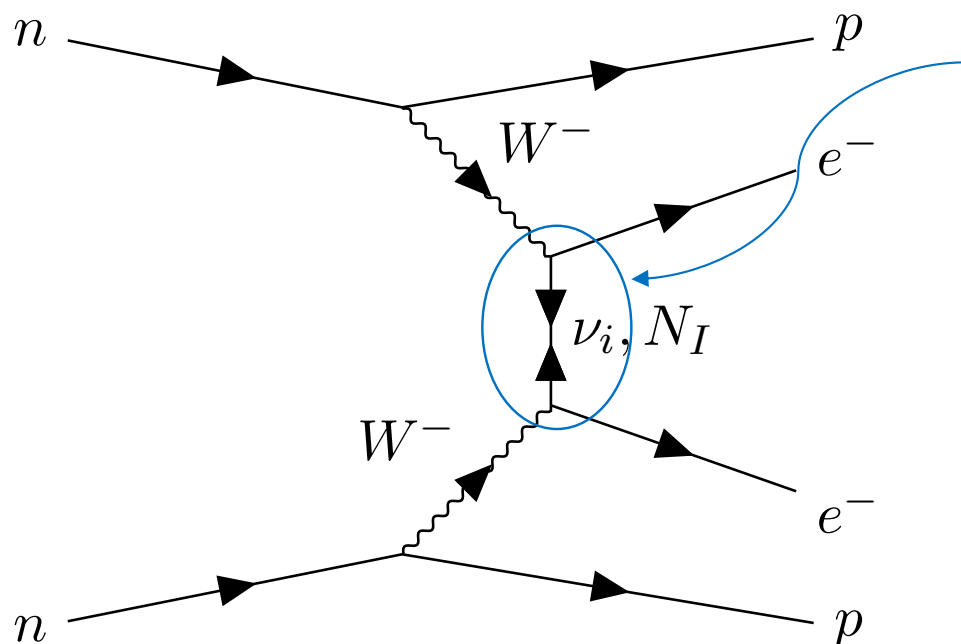
$$\Theta_{\alpha I} = \frac{F_{\alpha I} \langle \Phi \rangle}{M_I}$$

# 目次

- 研究背景
- シーソー機構
- ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊
- 右巻きニュートリノによる寄与
- 異なる原子核を用いた観測実験の有用性
- まとめ

# ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊：  $(Z, A) \rightarrow (Z + 2, A) + 2e^-$



起こりうる可能性の一つとして  
マヨラナニュートリノを媒介



ニュートリノのマヨラナ性  
を検証できる

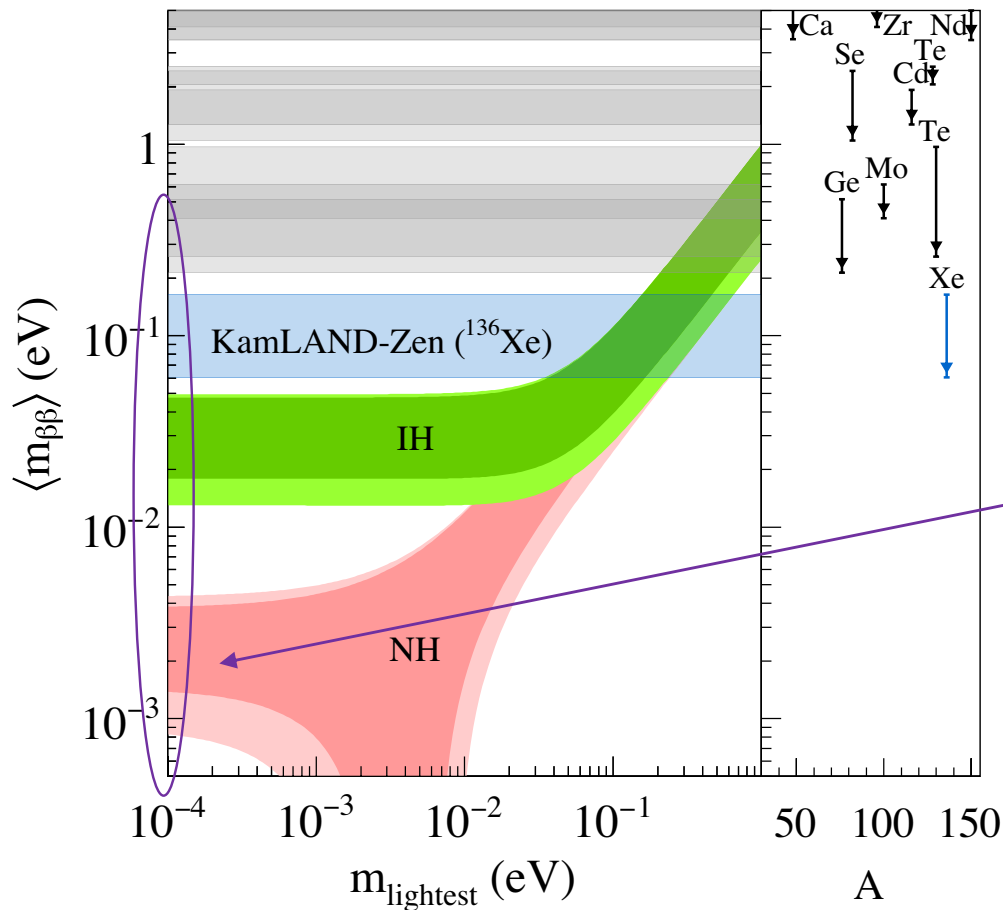
崩壊の寿命  $\tau$  が有効質量  $m_{\text{eff}}$   
で特徴付けられる

$$\tau_{1/2}^{-1} = G |\mathcal{M} m_{\text{eff}}|^2$$

[Faessler, Gonzalez, Kovalenko, Simkovic('14)]

# ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊

[KamLAND-Zen (2016)]



## 崩壊の有効質量

アクティブニュートリノの寄与

$$m_{\text{eff}}^{\nu} = \sum_i U_{ei}^2 m_i$$

右巻きニュートリノの世代数 "2" より

$$m_{\text{lightest}} = 0$$

$$|m_{\text{eff}}^{\nu}| = \begin{cases} 1.45 - 3.68 \text{ meV (NH)} \\ 18.6 - 48.4 \text{ meV (IH)} \end{cases}$$

近未来実験での検証に期待できる

# シーソー機構における崩壊

シーソー機構での有効質量

$$m_{\text{eff}} = \underline{m_{\text{eff}}^\nu} + \underline{m_{\text{eff}}^N}$$

アクティブニュートリノ由来

$$m_{\text{eff}}^\nu = \sum_i U_{ei}^2 m_i$$

右巻きニュートリノ由来

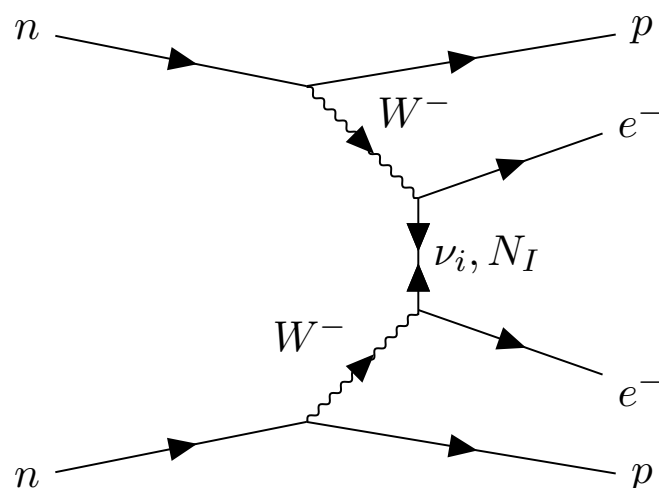
$$m_{\text{eff}}^N = \sum_I \Theta_{eI}^2 M_I f_\beta(M_I)$$

抑制因子  $f_\beta(M_I) = \frac{\Lambda_\beta^2}{\Lambda_\beta^2 + M_I^2}$

原子核中の典型的なフェルミ運動量  
 $\Lambda_\beta \sim \mathcal{O}(10^2) \text{ MeV}$

[Faessler, Gonzalez, Kovalenko, Simkovic('14)]

[Barea, Kotila, Iachello('15)]



# 目次


- 研究背景
- シーソー機構
- ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊
- 右巻きニュートリノによる寄与
- 異なる原子核を用いた観測実験の有用性
- まとめ



# 右巻きニュートリノによる寄与 (崩壊が観測されない場合)

シーソー機構から

$$\begin{pmatrix} 0 & M_D \\ M_D^T & M_I \end{pmatrix} = \hat{U} \begin{pmatrix} D_\nu & 0 \\ 0 & D_N \end{pmatrix} \hat{U}^T$$


$$\sum_i m_i U_{ei}^2 + \sum_I M_I \Theta_{eI}^2 = 0$$

全ての右巻きニュートリノの質量が軽い場合

$$M_1, M_2 \ll \Lambda_\beta$$

$$m_{\text{eff}} = \sum_i m_i U_{ei}^2 + \sum_I M_I \Theta_{eI}^2 = 0$$

$$f_\beta(M_1) = 1, f_\beta(M_2) = 1$$

崩壊は起こらない

# 右巻きニュートリノによる寄与 (崩壊が観測されない場合)

右巻きニュートリノの質量が階層的な場合

$$M_1 < \Lambda_\beta \ll M_2 \Rightarrow f_\beta(M_1) = 1, f_\beta(M_2) = 0 \text{ (抑制因子が具体的に与えられる)}$$

有効質量は、

$$m_{\text{eff}} = U_{e2}^2 m_2 + U_{e3}^2 m_3 + \Theta_{e1}^2 M_1 \overset{1}{f_\beta(M_1)} + \Theta_{e2}^2 M_2 \overset{0}{f_\beta(M_2)}$$

$$= \left( m_2^{1/2} U_{e2} \sin \omega - m_3^{1/2} U_{e3} \cos \omega \right)^2$$

$$\stackrel{!}{=} 0$$

有効質量が特定の  
条件でゼロになる

$$\therefore \tan \omega = \frac{U_{e3} m_3^{1/2}}{U_{e2} m_2^{1/2}}$$

湯川結合定数を具体的に代入

右巻きニュートリノにより  
崩壊が起こらない！！

# 右巻きニュートリノによる寄与 (崩壊が観測されない場合)

右巻きニュートリノの質量が階層的な場合 (より一般的に)

$$M_1 < \Lambda_\beta \ll M_2$$

$$f_\beta(M_1) = 1 - \delta_f^2 \quad f_\beta(M_2) = 0 \quad (\text{重い方が崩壊に寄与しない場合を想定})$$

有効質量はNHで

$$m_{\text{eff}} = m_{\text{eff}}^\nu + m_{\text{eff}}^N = \left( U_{e2} m_2^{1/2} \sin \omega - U_{e3} m_3^{1/2} \cos \omega \right)^2 + \left( U_{e2} m_2^{1/2} \cos \omega + U_{e3} m_3^{1/2} \sin \omega \right)^2 \times \delta_f^2$$

$m_{\text{eff}} = 0$  について解くと

$$\tan \omega = \frac{A \pm i\delta_f}{1 \mp i\delta_f A}$$

ここで

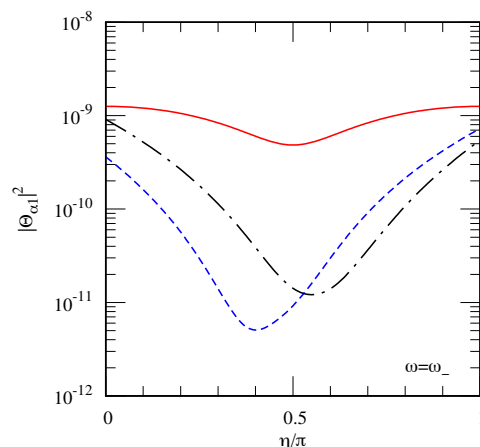
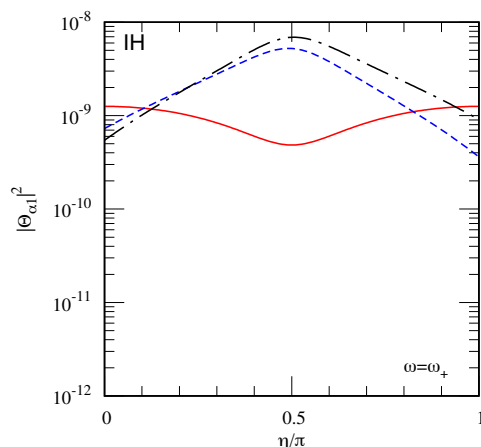
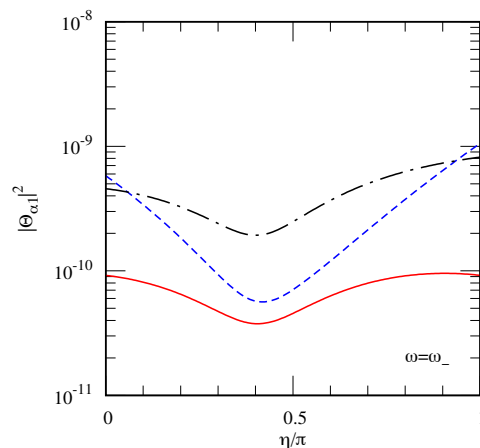
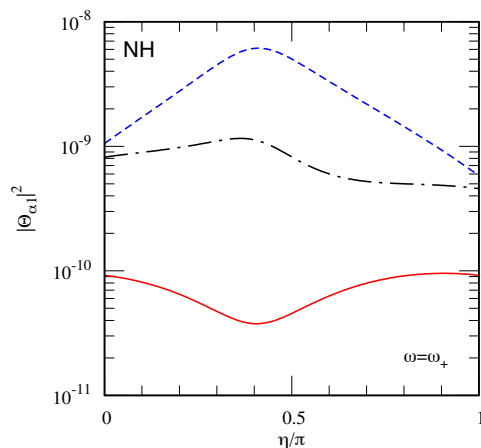
$$A = \frac{U_{e3} m_3^{1/2}}{U_{e2} m_2^{1/2}}$$



**この場合も、  
右巻きニュートリノにより崩壊が起こらない可能性がある**

# 右巻きニュートリノによる寄与 (崩壊が観測されない場合)

混合要素



マヨラナ位相

$M_1 = 1\text{GeV}, M_2 = 200\text{GeV}$

**崩壊が観測されない場合**

崩壊が起こらない条件

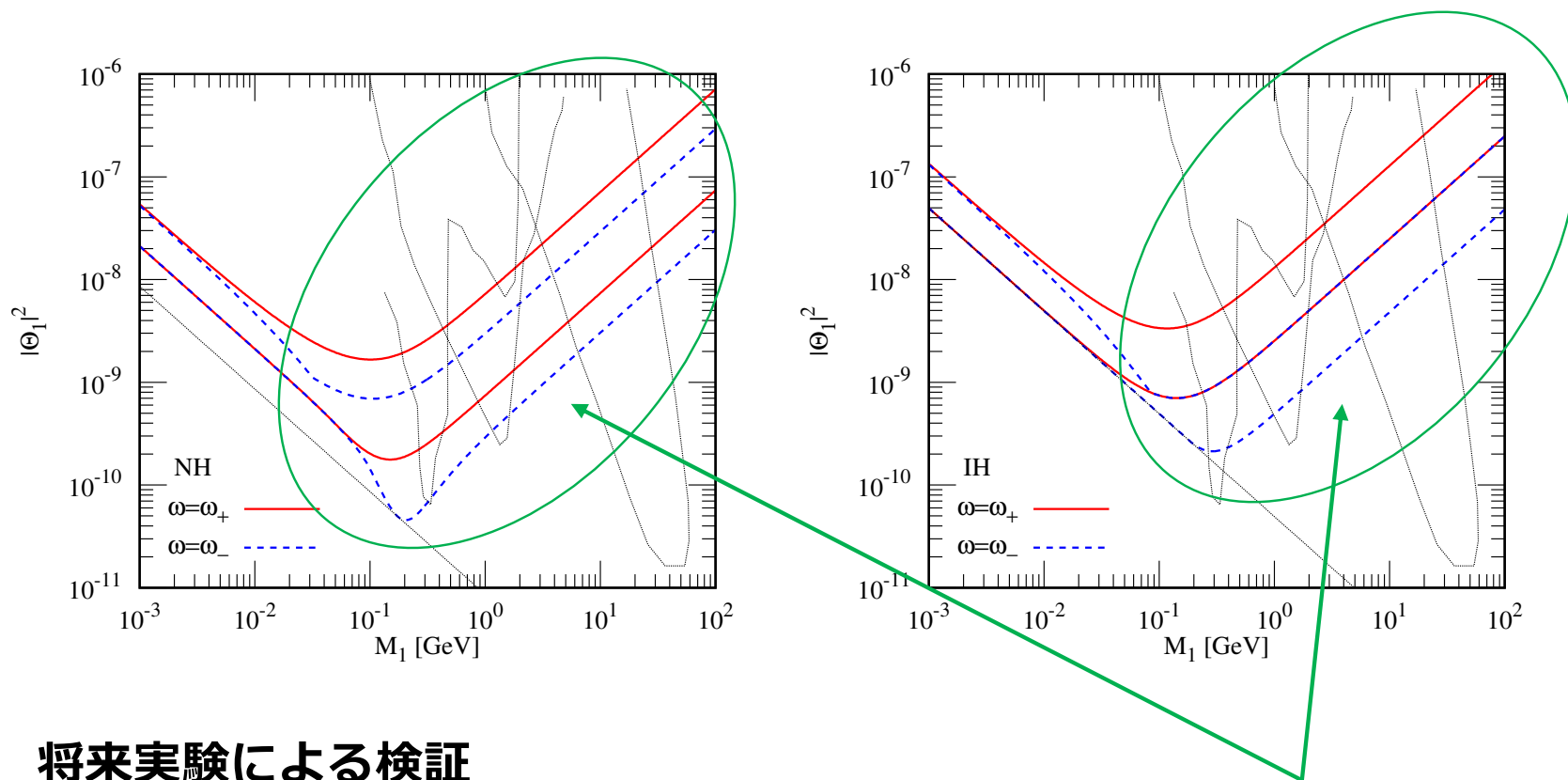
$$\tan \omega = \frac{A \pm i\delta_f}{1 \mp i\delta_f A} \equiv \tan \omega_{\pm}$$

軽い右巻きニュートリノの  
弱い相互作用に関する混合要素

$$\Theta_{\alpha I} = \frac{F_{\alpha I} \langle \Phi \rangle}{M_I}$$

アクティブニュートリノの質量階層性  
とマヨラナ位相に強く依存する

# 右巻きニュートリノによる寄与 (崩壊が観測されない場合)



## 将来実験による検証

将来の右巻きニュートリノ直接探索実験で広い質量領域を確認できる

# 右巻きニュートリノによる寄与 (崩壊が観測される場合)

## ■ 崩壊が観測される場合はどうなるか？

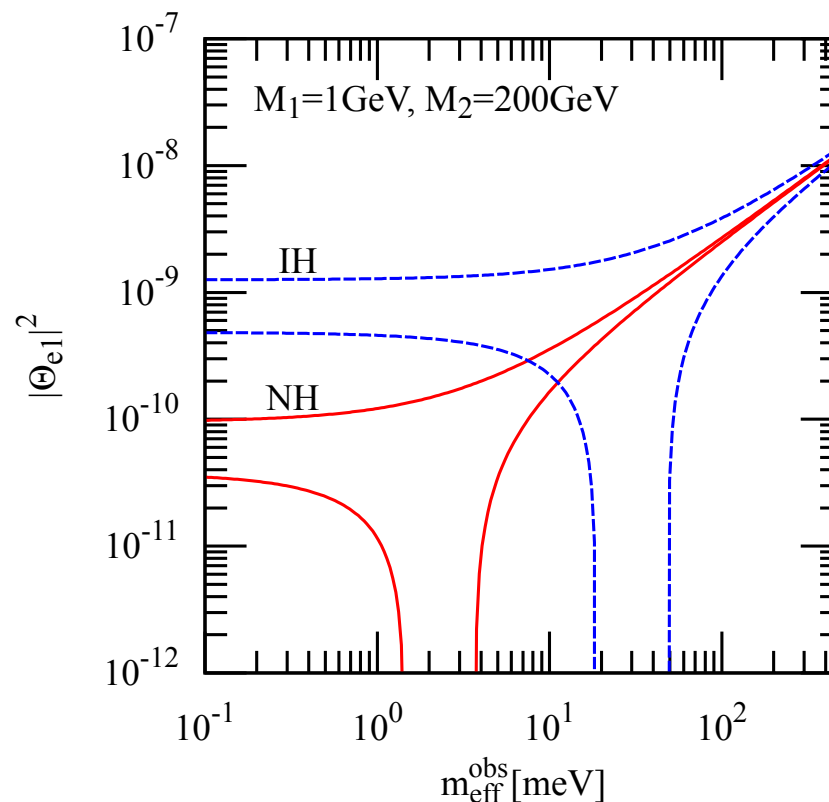
右巻きニュートリノが階層的な  
質量の場合  $M_1 \neq M_2$

混合要素

$$\Theta_{e1}^2 = \frac{m_{\text{eff}} - m_{\text{eff}}^\nu [1 - f_\beta(M_2)]}{M_1 [f_\beta(M_1) - f_\beta(M_2)]}$$

有効質量が

$$m_{\text{eff}}^{\text{obs}} = |m_{\text{eff}}| \quad \text{で観測された時}$$



## 崩壊が観測された場合

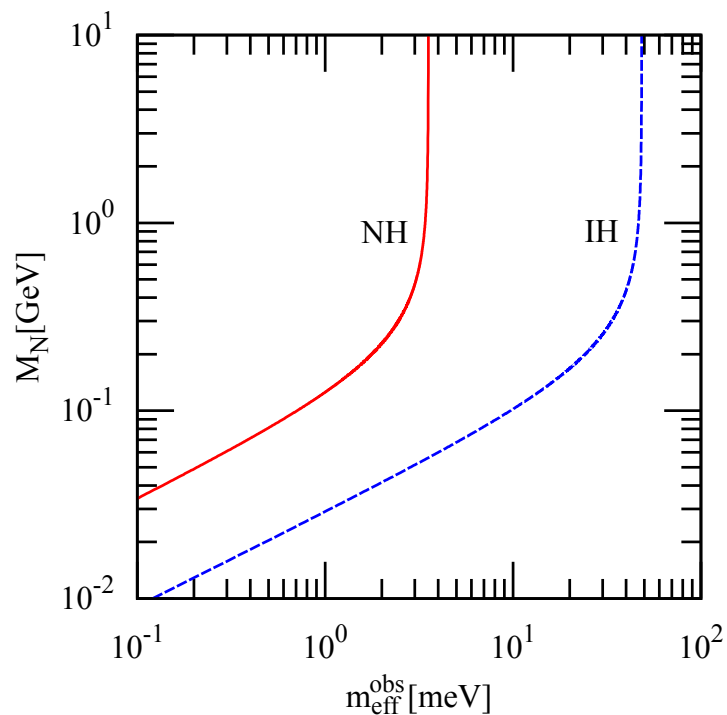
シーソー機構の仮定から、右巻きニュートリノの弱い相互作用に関する混合要素に予言が得られる。

# 右巻きニュートリノによる寄与 (崩壊が観測される場合)

右巻きニュートリノが縮退している場合  $M_1 = M_2 = M_N$

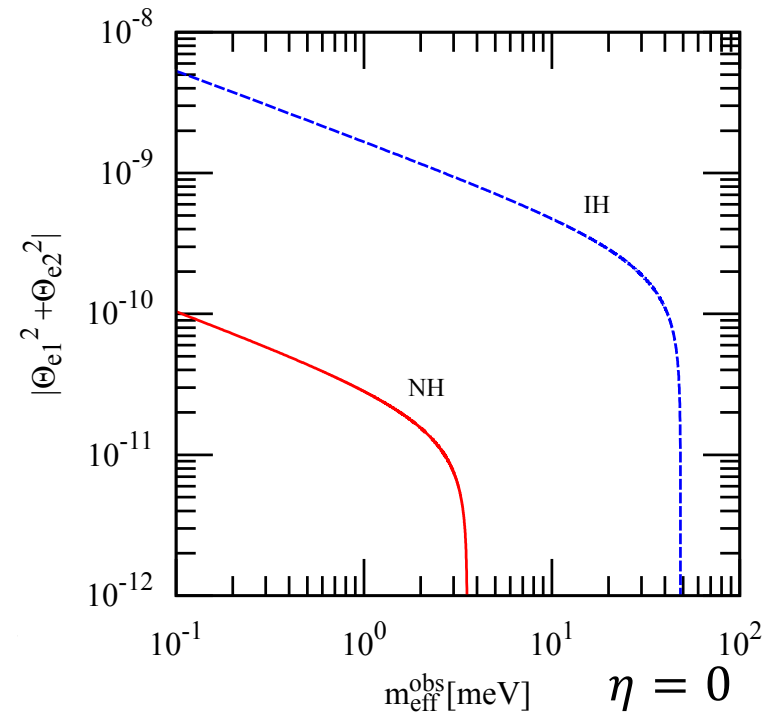
右巻きニュートリノ質量

$$M_N = \Lambda_\beta \sqrt{\frac{m_{\text{eff}}^{\text{obs}}}{|m_{\text{eff}}^\nu| - m_{\text{eff}}^{\text{obs}}}}$$



混合要素の和

$$|\Theta_{e1}^2 + \Theta_{e2}^2| = \frac{|m_{\text{eff}}^\nu|}{\Lambda_\beta} \sqrt{\frac{|m_{\text{eff}}^\nu| - m_{\text{eff}}^{\text{obs}}}{m_{\text{eff}}^{\text{obs}}}}$$



# 目次

- 研究背景
- シーソー機構
- ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊
- 右巻きニュートリノによる寄与
- 異なる原子核を用いた観測実験の有用性
- まとめ



# 異なる原子核を用いた実験による検証

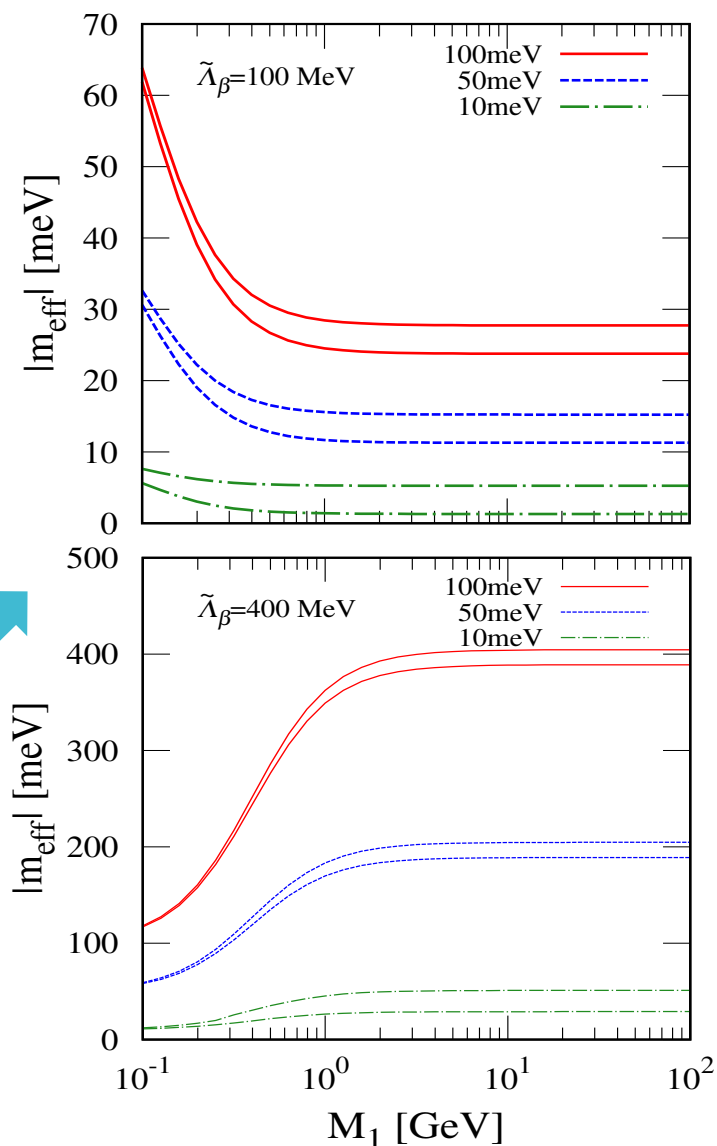
ある種類の原子核で崩壊が観測された場合、

$$\tilde{m}_{\text{eff}} = \left[ 1 - \tilde{f}_\beta(M_2) \right] m_{\text{eff}}^\nu + \left[ m_{\text{eff}} - m_{\text{eff}}^\nu \left[ 1 - f_\beta(M_2) \right] \right] \frac{\tilde{f}_\beta(M_1) - \tilde{f}_\beta(M_2)}{f_\beta(M_1) - f_\beta(M_2)}$$

異なる種類の原子核の実験における有効質量の値が変わる。

$\Lambda_\beta = 200\text{MeV}$ の原子核で、有効質量が100meV, 50meV, 10meVと観測された場合

右巻きニュートリノの性質解明には、異なる種類の原子核を用いた複数の実験による検証が有効。



# 目次

- 研究背景
- シーソー機構
- ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊
- 右巻きニュートリノによる寄与
- 異なる原子核を用いた観測実験の有用性
- まとめ

# まとめ

- 振動実験を説明するため、標準模型に2世代の右巻きニュートリノを導入したシーソー機構を検討した
- 崩壊への軽い右巻きニュートリノの付加的な寄与を網羅的に調べた
- 付加的な寄与により崩壊が制限され、特定の条件下で崩壊が起こらなくなることを見出した
- 崩壊が観測できない場合と観測された場合の両方について、右巻きニュートリノの性質の予言をまとめた
- 右巻きニュートリノの性質を解明するためには、異なる種類の原子核を用いた複数の観測実験による検証が有効であることを指摘した

御清聴ありがとうございました