

Flavor Physics Workshop 2023

# Belle II実験における Sterile Neutrino探索

2023/11/24

東京大学  
理学系研究科  
樋口研 島崎奉文

# ステライルニュートリノとは

- “sterile”【形】 不妊の、不毛な、無菌の、面白くない
- 弱い相互作用をしないニュートリノの総称

\* 通常のニュートリノ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ )を**アクティブニュートリノ**という

## 背景

### 実験的側面

- 標準模型ではニュートリノ質量はゼロ
- ニュートリノ振動の現象はニュートリノが質量をもつことを強く支持

フレーバー遷移確率  $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \propto \sin^2 \frac{\Delta m^2 c^4 L}{4E\hbar c}$ ,  $\alpha, \beta = e, \mu, \tau$ ,  $\Delta m^2$ は質量2乗差

\* これまでの実験では $\Delta m^2$ は $10^{-5} - 10^{-3} [\text{eV}^2]$

- LSND実験やMiniBooNE実験の $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ 振動は $\Delta m^2 \sim 1 [\text{eV}^2]$ に対応

C.Athanassopoulos, *et.al.*, arXiv:nucl-ex/9605003v1, 1996

A.A.Aguilar-Arevalo, *et.al.*, arXiv:1805.12028v2, 2018

→ 4つめの質量固有状態が必要。しかし、アクティブニュートリノは3種類までなので、4つめのニュートリノはステライル

### 理論的側面

SO(10) GUTの16次元表現に自然に出現



16

# keV ~ GeV領域のステライルニュートリノ 1

## $\nu$ MSM(Minimal Standard Model)モデル

- 標準模型に右巻きマヨラナニュートリノ $N$ を追加
- $N$ は $SU(2) \times U(1)$ の1重項

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \bar{N}_I i \partial_\mu \gamma^\mu N_I - F_{\alpha I} \bar{L}_\alpha N_I \Phi - \frac{M_I}{2} \bar{N}_I^c N_I + \text{h.c.}$$

\*  $I = 1, \dots, n$ は $N$ の世代数

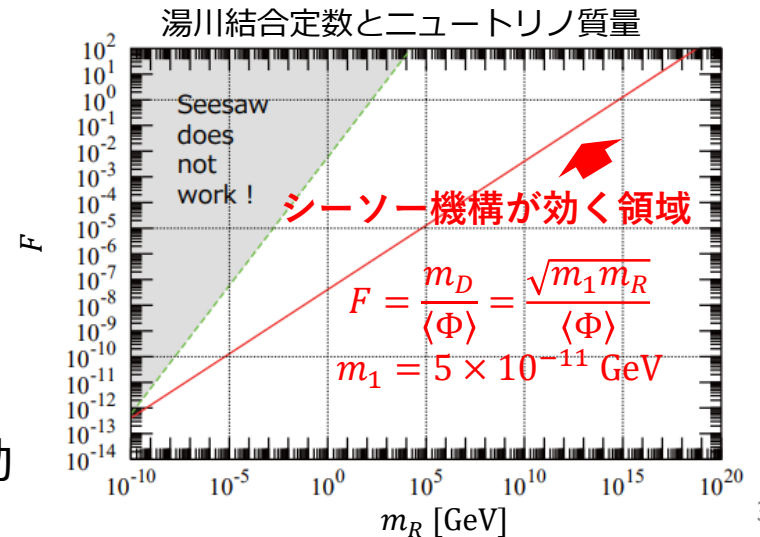
T.Asaka, et.al., Phys. Let. B, **620**, 1, 17-26, 2005

## シーソー機構

- ディラック質量項と右巻きマヨラナ質量項を両方持つとすると

質量行列:  $M = \begin{pmatrix} 0 & m_D \\ m_D & m_R \end{pmatrix}$  但し、右巻きニュートリノは1世代とし、マヨラナ質量項を $m_R$ とした

- $m_D \ll m_R$ のとき、  
小さい質量固有値  $m_1 \sim m_D^2/m_R$  を得る
- GUTスケール( $O(10^{16})$ )でなくても、  
ディラック質量(湯川結合定数 $F$ )  
を小さくとればGeV領域でシーソー機構は有効



# keV ~ GeV領域のステライルニュートリノ 2

## 暖かいダークマター

- 標準的な宇宙モデルに必要な(非相対論的に運動する)冷たいダークマターよりも少し軽く、銀河スケール以下の揺らぎをかき消すのに必要
- 湯川結合が小さい右巻きニュートリノの寿命は宇宙年齢を超えて暖かいダークマターの候補
- Asakaらの3世代の右巻きニュートリノのうち、最も軽いものの質量が

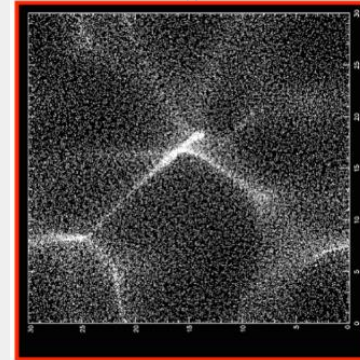
$2 \text{ keV} < M_I < 5 \text{ keV}$  のニュートリノはこの候補

## バリオン非対称性

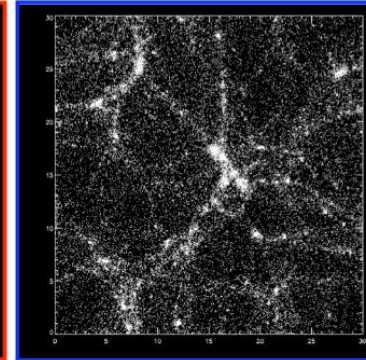
- 3世代のうち重い方の2つのニュートリノがバリオン数非対称性を説明
- 初期宇宙において電弱スケール( $O(100)\text{GeV}$ )以下の右巻きニュートリノのフレーバー間振動とCP対称性の破れによってレプトン数が生成

→ スファレロン過程でバリオン数に転換

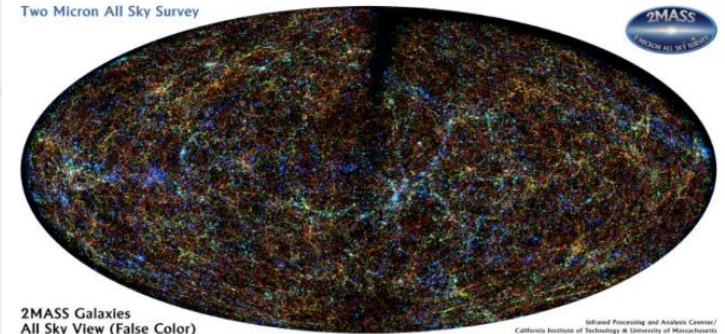
シミュレーション  
with 熱いDM



シミュレーション  
with 冷たいDM



Two Micron All Sky Survey



実際の宇宙の大規模構造

吉田, Kavli IPMU

## 【参考】

T.Asaka, *et.al.*, Phys. Let. B, **620**, 1, 17-26, 2005  
石田裕之, 新潟大, 博士論文  
松原隆彦, 東京大学出版, 2010

# ステライルニュートリノの生成と崩壊

- アクティブニュートリノは弱い相互作用で生成

$$W \rightarrow l \nu$$

$$Z \rightarrow \nu \nu$$

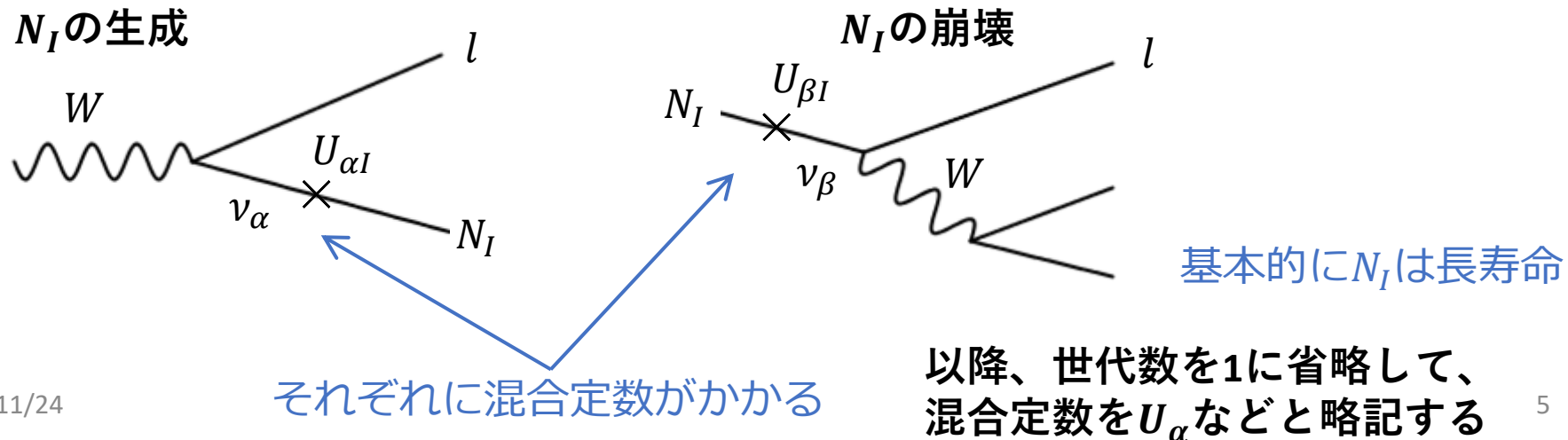
- ステライルはアクティブとの混合で生成

フレーバー固有状態は質量固有状態の線形結合で表される

$$\nu_\alpha = \underbrace{\sum_{i=1}^3 U_{\alpha i} \nu_i}_{\text{PMNS成分}} + \underbrace{\sum_{I=1}^n U_{\alpha I} N_I}_{\text{n世代分のステライルニュートリノ成分}} \quad \alpha = e, \mu, \tau, s \quad \nu_i, N_I: \text{質量固有状態}$$

PMNS成分    n世代分のステライルニュートリノ成分

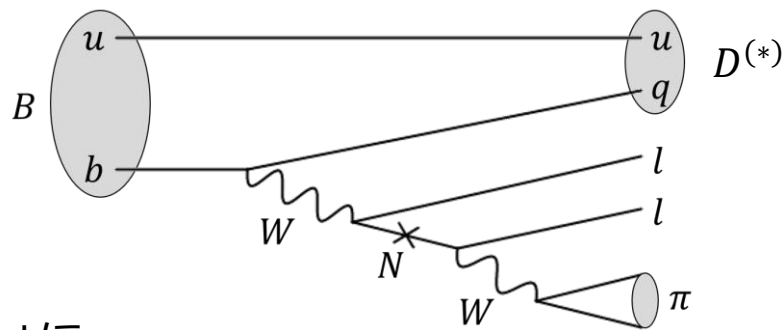
- 崩壊するときも、アクティブと混合して弱い相互作用で崩壊



# 探索 @ Belle

## B中間子崩壊 D.Liventsev, et.al., arXiv:1301.1105v4

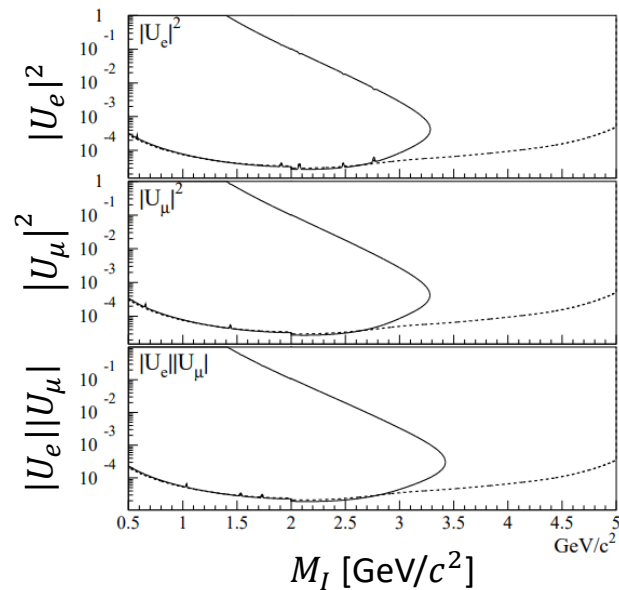
- $B \rightarrow D^{(*)} l (N \rightarrow l \pi)$
- 2つのレプトンは $e, \mu$ で、 $|U_e|^2, |U_\mu|^2, |U_e||U_\mu|$ に  $0.5 - 3.5 \text{ GeV}/c^2$ の範囲で $O(10^{-4})$ まで制限



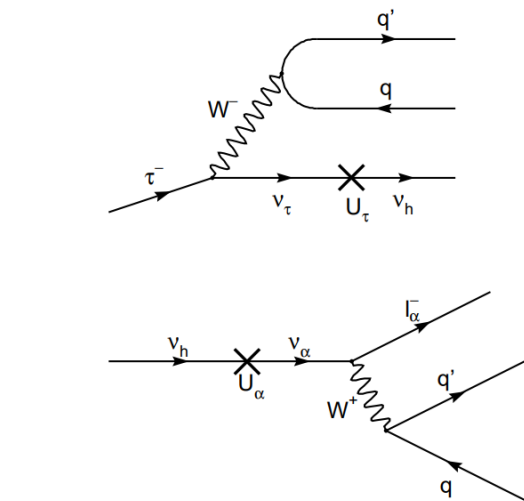
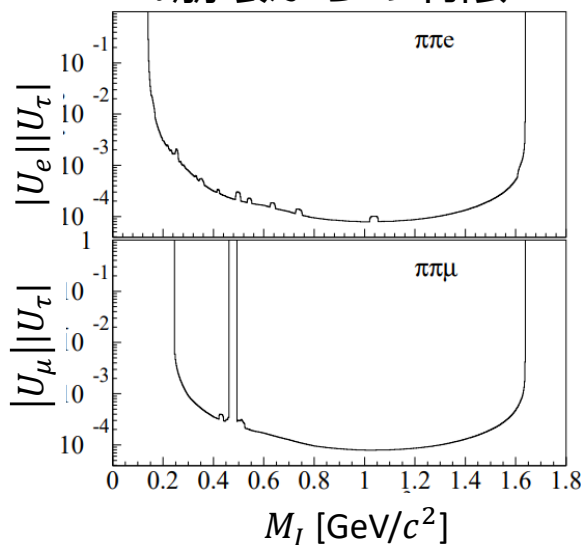
## タウレプトン崩壊 D.Liventsev, et.al., arXiv:2212.10095v1

- $\tau \rightarrow \pi (N \rightarrow l \pi)$
- 終状態のレプトンは $e, \mu$ で、 $|U_e||U_\tau|, |U_\mu||U_\tau|$ に  $1.6 \text{ GeV}/c^2$ までの範囲で $O(10^{-4})$ まで制限

### B中間子崩壊からの制限



### τ崩壊からの制限



# その他の実験

- コライダー実験

- LEP:  $Z \rightarrow \nu N, e^+e^- \rightarrow \nu(N \rightarrow eW)$
- LHC:  $pp \rightarrow lN(jj), B^- \rightarrow \mu^-(N \rightarrow \pi^+\mu^-)$
- Belle

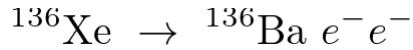
- 固定標的実験

- CHARM

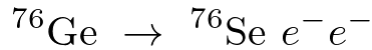
- 二重ベータ崩壊実験

$|U_e|^2$ に強い制限

- KAMLand-Zen:

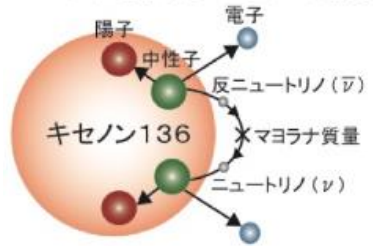


- GERDA:

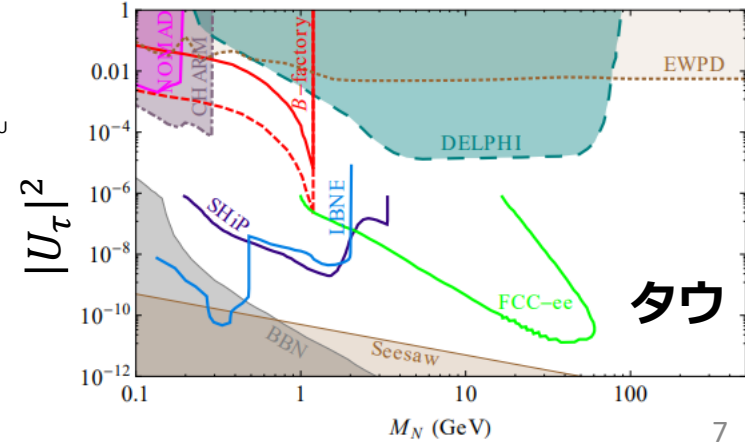
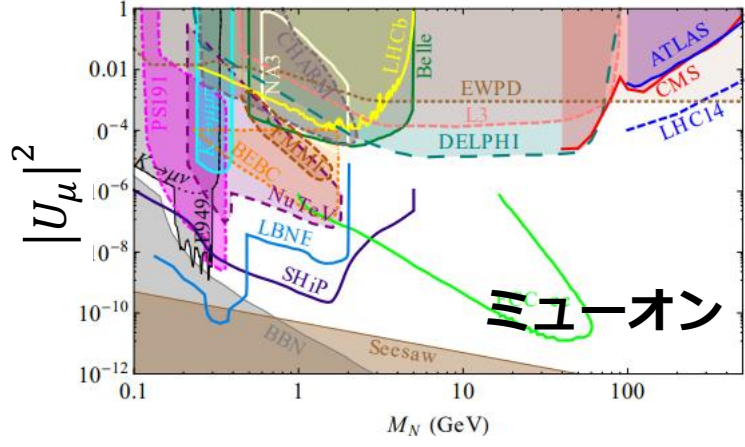
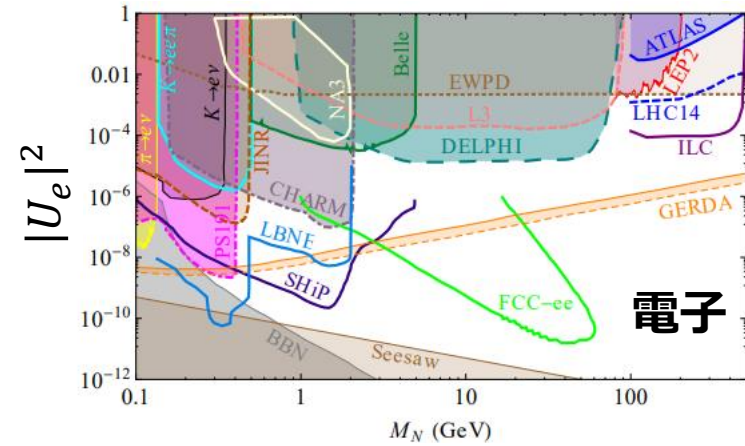


- ミュオンとタウモードの探索が重要

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊



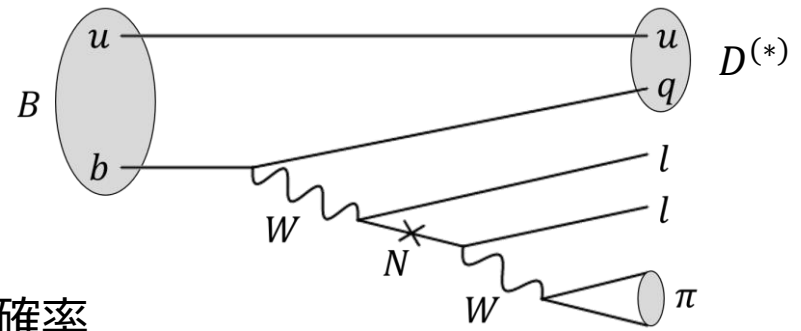
出典: 東北大学ニュートリノ科学研究センター, Kavli IPMU



# Belle IIでの探索モード

## $B \rightarrow D^{(*)} l (N \rightarrow l \pi)$

- $N$ の不変質量を組んでピーク探索
- 制限：混合定数の2乗、検出器内で崩壊する確率
- $N$ が少し走る場合、displaced vertexを考慮



## $B \rightarrow D^{(*)} l N$

- $N$ の崩壊は見ない (ミッシング)
- 反対側の $B$ を再構成してピーク探索
- 振幅は混合定数の1乗の制限
- イベントの完全な再構成が必要なためefficiency(O(1%))が懸念

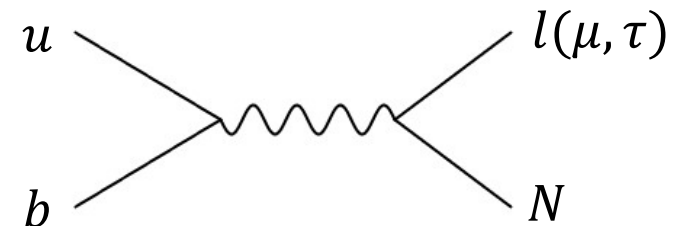
$$m_{\text{miss}} = \sqrt{(\underline{p_B} - p_{D^{(*)}} - p_l)^2}$$

逆側の $B$ から

## $B \rightarrow l N$

- $B \rightarrow D^{(*)} l N$ と同様にミッシングサーチ
- もしくは、寿命が短ければ $N$ の崩壊を再構成
- $N$ が重いときはヘリシティ抑制を回避して

$$l = \underline{e}, \mu, \tau$$



※但し、二重ベータ崩壊実験からの制限 強



# ステータス1: Generatorの開発

$B \rightarrow D l N$  ( $l = e, \mu$ )

- Signal MCのため、massiveニュートリノの生成・崩壊モデルを用意
- $B \rightarrow D l N$ の崩壊幅は

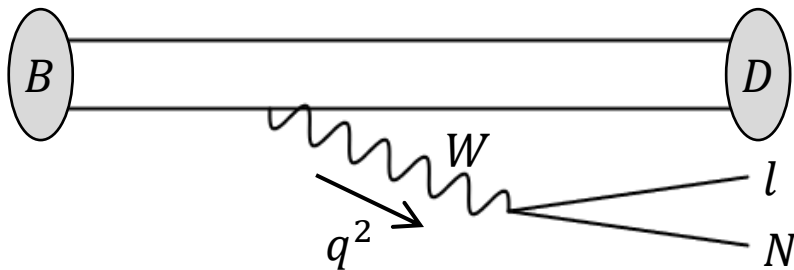
$$d\Gamma \propto G_F^2 |V_{cb}|^2 |L_\mu \langle D | \bar{c} \gamma^\mu b | B \rangle|^2$$

$$\langle D | \bar{c} \gamma^\mu b | B \rangle = f_+(q^2) \left[ (P_B + P_D)^\mu - \frac{m_B^2 - m_D^2}{q^2} q^\mu \right] + f_0(q^2) \frac{m_B^2 - m_D^2}{q^2} q^\mu$$

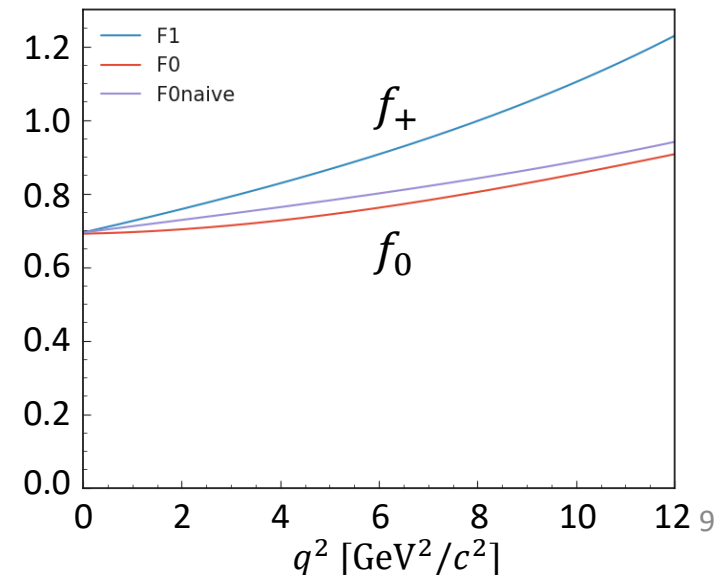
- BGLモデルはForm Factor ( $f_+, f_0$ ) を多項式に展開。basf2では3次までとる

$$f_i(z(q^2)) = \frac{1}{P_i(z)\phi_i(z)} \sum_{n=0}^N a_{i,n} z(q^2)^n \quad i = +, 0$$

$q^2$ は移行運動量



Form Factorの $q^2$ 依存性

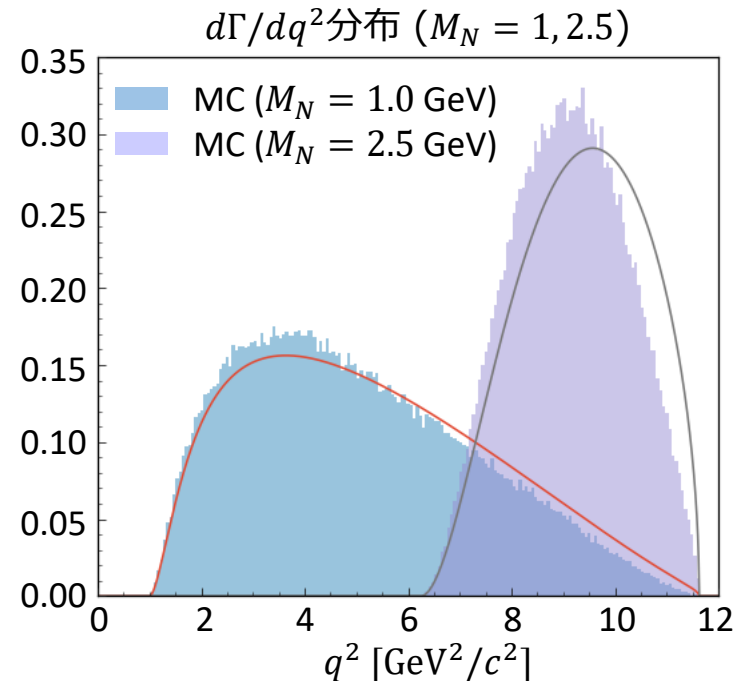
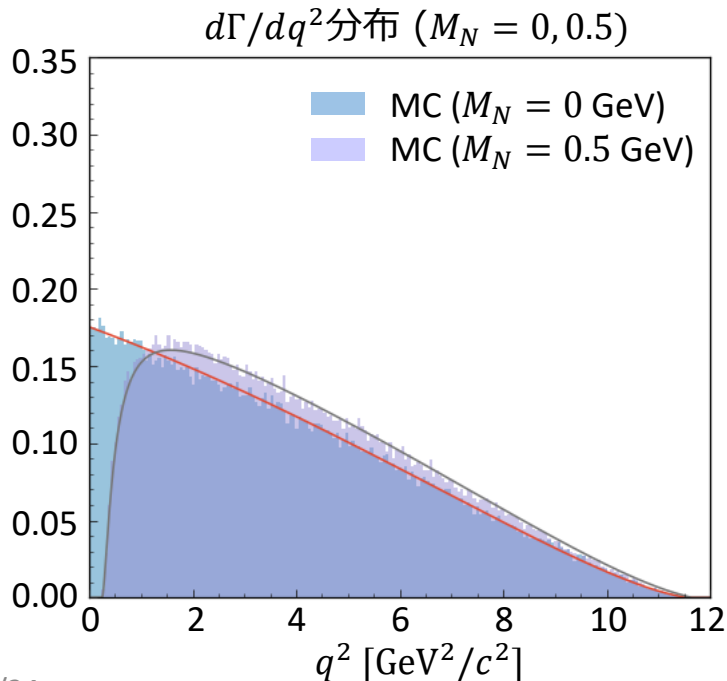


# ステータス2: $N$ の生成モデル ( $B \rightarrow D l N$ )

- 一般的な崩壊幅は $q^2$ と $M_N$ ( $N$ の質量)の関数で表される。 G.Cvetic, et.al., arXiv:1606.04140v4

$$\frac{d\Gamma(B \rightarrow D l N)}{dq^2} \propto \frac{1}{(q^2)^2} \lambda^{1/2} \left( 1, \frac{q^2}{M_B^2}, \frac{M_D^2}{M_B^2} \right) \lambda^{1/2} \left( 1, \frac{M_l^2}{q^2}, \frac{M_N^2}{q^2} \right) \\ \times \{ f_+^2(q^2) A(q^2, M_N^2) + f_0^2(q^2) B(q^2, M_N^2) \}$$

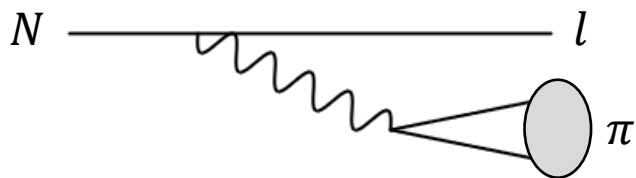
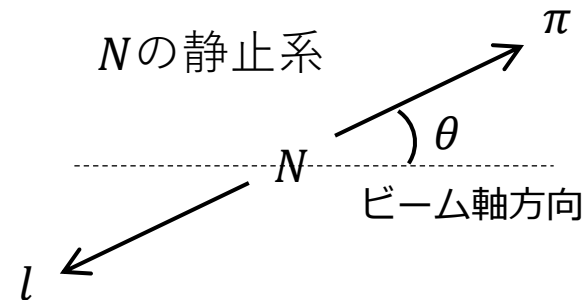
- basf2の既存のBGLモデルをmassiveニュートリノに適用
- $N$ の質量が大きいとき、MCと理論式で崩壊幅分布にギャップが存在



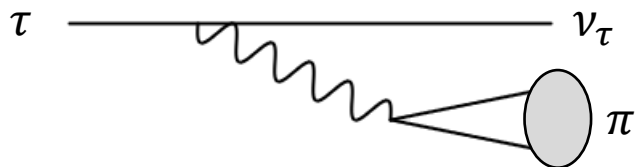
# ステータス3: $N$ の崩壊モデル ( $N \rightarrow \pi l$ )

$N \rightarrow \pi l$  ( $l = e, \mu, \tau$ )

- 同じV-Aカレントの $\tau \rightarrow \pi \nu_\tau$ のモデルをベースに開発中
- [スピン  $\rightarrow$  スカラー + スピン]なのでなにか角度分布を持つはず
- $M_N = 0.5, 1.0, 2.5$  [GeV/ $c^2$ ] の、 $\pi$ の運動量の角度分布をプロット

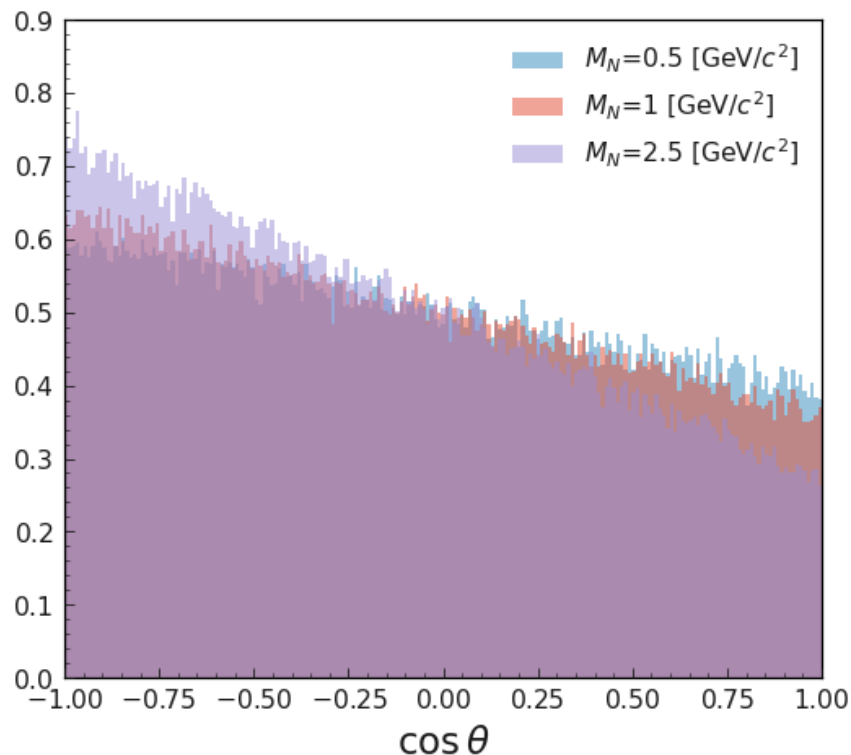


$N$ の崩壊ダイアグラム



$\tau$ の崩壊ダイアグラム

$N$ の静止系における $\cos \theta$ 分布



# まとめと今後

- keV~GeV領域質量のステライルニュートリノは以下を説明する
  - 小さな(アクティブ)ニュートリノ質量
  - ダークマター
  - バリオン非対称性
- Belle IIではGeV領域のステライルニュートリノの直接探索が可能
- 現在はSignal MCに向けてGeneratorを開発中
- $B \rightarrow D\ell N$ のMCの理論式からのギャップへの対応
  - (案1) 原因がEvtGenがニュートリノmassを考慮していないことなら、EvtGenを修正
  - (案2) ギャップは大きくないとして、weightをかけることで調整
- $N$ の崩壊モデルを検討
  - 理論屋さんに要相談
- Displaced vertexを考慮したイベント再構成

# Backup

# シーソー機構

- TBA

# BGLモデル

- TBA

# タウレプトン

- $\tau \rightarrow \pi\nu_\tau, \tau \rightarrow 3\pi\nu_\tau$ などの特徴的なイベントを探す