

PIENU実験における
荷電レプトンフレーバーを破る
崩壊事象の探索

岡山大学 伊藤慎太郎



PIENU



This work is supported by 19K03888

目次

- ・ π^+ の崩壊とPIENU実験
- ・ 荷電レプトンフレーバーの破れ(CLFV)の探索について
- ・ 測定方法、解析手法
- ・ 結果
- ・ その他の物理
- ・ まとめと今後



PI E NU

π^+ の崩壊

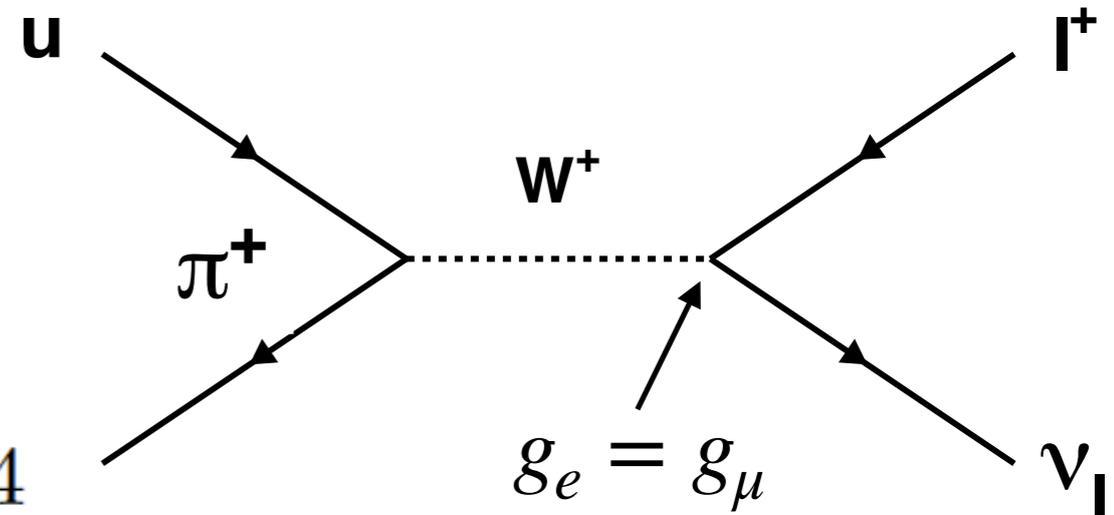
- π^+ の崩壊分岐比の比 R^π は標準理論 (V-A理論) では

$$R_0^\pi = \frac{\Gamma(\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e)}{\Gamma(\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)} = \frac{g_e^2 m_e^2}{g_\mu^2 m_\mu^2} \frac{(m_\pi^2 - m_e^2)^2}{(m_\pi^2 - m_\mu^2)^2}$$

- 標準理論では $g_e = g_\mu$: 電子・ミューオン普遍性
- 電子とミューオンの質量比の2乗で抑制: ヘリシティ抑制

- 放射補正を加えると、

$$R_{SM}^\pi = \frac{\Gamma[\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e(\gamma)]}{\Gamma[\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu(\gamma)]} = (1.2352 \pm 0.0002) \times 10^{-4}$$



- 高精度で計算されている (精度0.02%)。
- 新物理が存在すると、普遍性が破れ、 R^π が標準理論からずれる。

V. Cirigliano and I. Rosell,
JHEP 0710, 005 (2007)

PIENU実験

- PIENU実験がカナダのTRIUMFで行われた。
 - R^π の精密測定: **普遍性の検証**。目標は**<0.1%**の精度。
$$R_{\text{PIENU}}^\pi = [1.2344 \pm 0.0023(\text{stat}) \pm 0.0019(\text{syst})] \times 10^{-4}$$
$$R_{\text{AVG}}^\pi = (1.230 \pm 0.004) \times 10^{-4}$$
 - 検出器の改善により、統計誤差系統誤差共に大幅に改善。
 - 約10%の統計量で、**世界最高精度(0.24%)を達成**。
 - 標準理論($R_{\text{SM}}^\pi = (1.2352 \pm 0.0002) \times 10^{-4}$)に誤差の範囲で無矛盾。
 - 世界最高精度の普遍性の検証: $g_\mu/g_e = 1.0004 \pm 0.0012$

A. Aguilar-Arevalo et al, Phys. Rev. Lett. 115 071801, (2015)

- 一方で、これまでに蓄積されたデータの解析は、他の新物理の探索に非常に感度が高い。
- 本講演は、PIENU実験のデータを用いたミュオンのCLFV崩壊事象の探索の話(+ α)。

ミューオンの崩壊とCLFV探索

- ・ ミューオンは崩壊すると、電子と2つのニュートリノに崩壊。
→ **ミッシェルスペクトラムを用いたCLFV崩壊の探索**
- ・ 現在の物理においては、暗黒物質やバリオン数非対称性、強いCP問題など未解決のものがある。
- ・ 解決するには、massive/masslessの中性の相互作用をしない新ボソンを標準理論に組み込んで拡張させる方法が挙げられる。

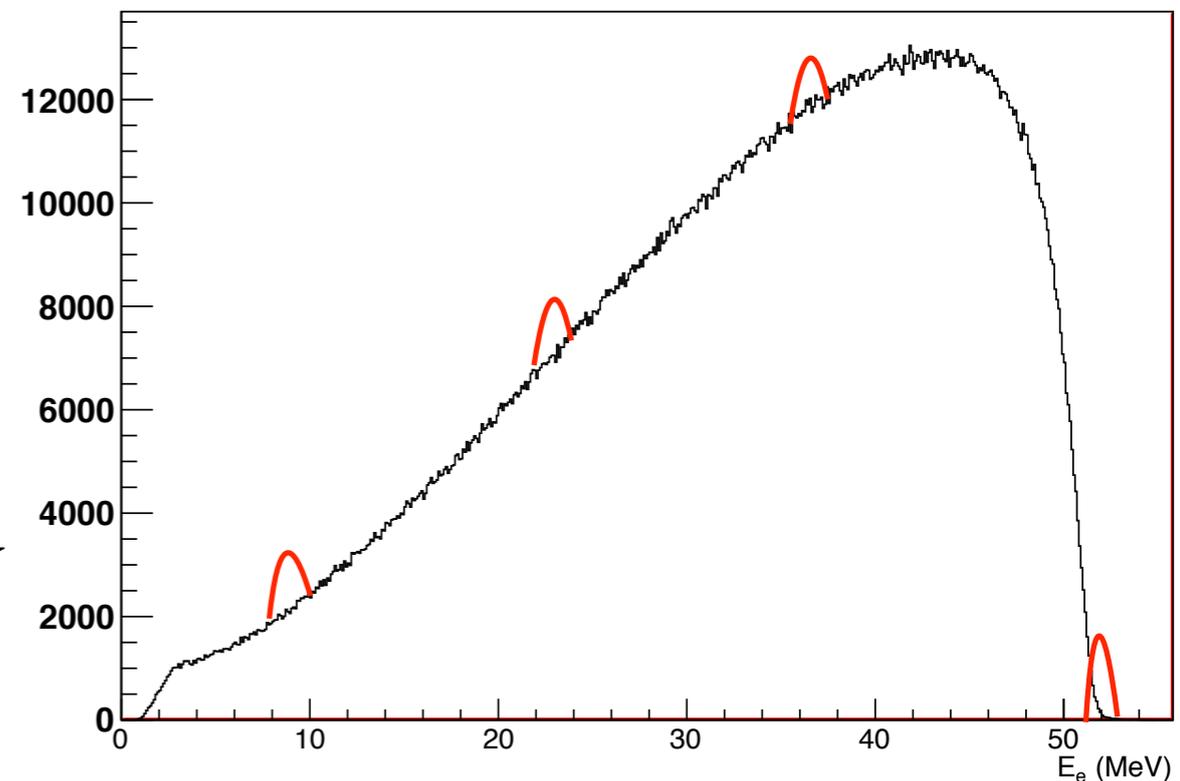
- FAMILON (PRL 49 1549 (1982))
- Majoron (PLB 99 411 (1981))
- ALPs (JHEP 12 (2018) 029)

- ・ これらが存在すれば、ミューオンやK中間子などでCLFV崩壊が起こる。

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + X, K^+ \rightarrow \pi^+, e^+, \mu^+ + X$$

→ **二体崩壊なのでピークが現れる。**

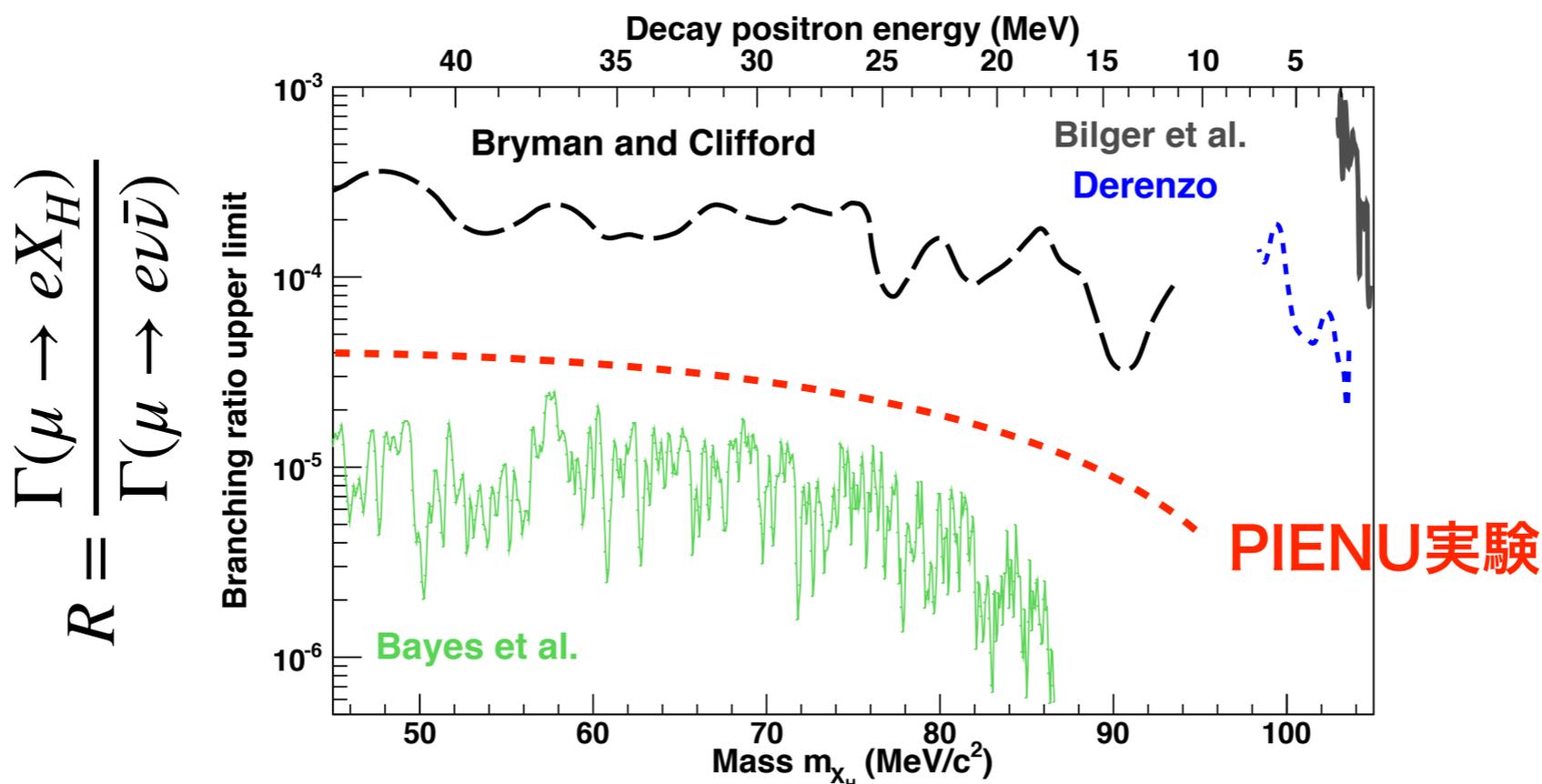
(Xが長寿命を仮定)



5 $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu, E_e = 0.5 \sim 52.8 \text{ MeV}$

過去のミュオンCLFV探索

- これまでにいくつか $\mu^+ \rightarrow e^+ X_H$ の探索が行われてきた。
 - 最も制限の強い結果はBayes et al. PRD 91 052020 (2014)。
 - Bryman and CliffordはTRIUMFで行われたPIENUの前実験。
 - ✓ PIENU実験は前実験の数十倍の統計量。
 - ✓ PIENU検出器のエネルギー分解能は前実験よりも2倍良い。
- 前実験よりも感度を一桁向上でき、かつBayes et al.よりも重い質量領域を探索できる。

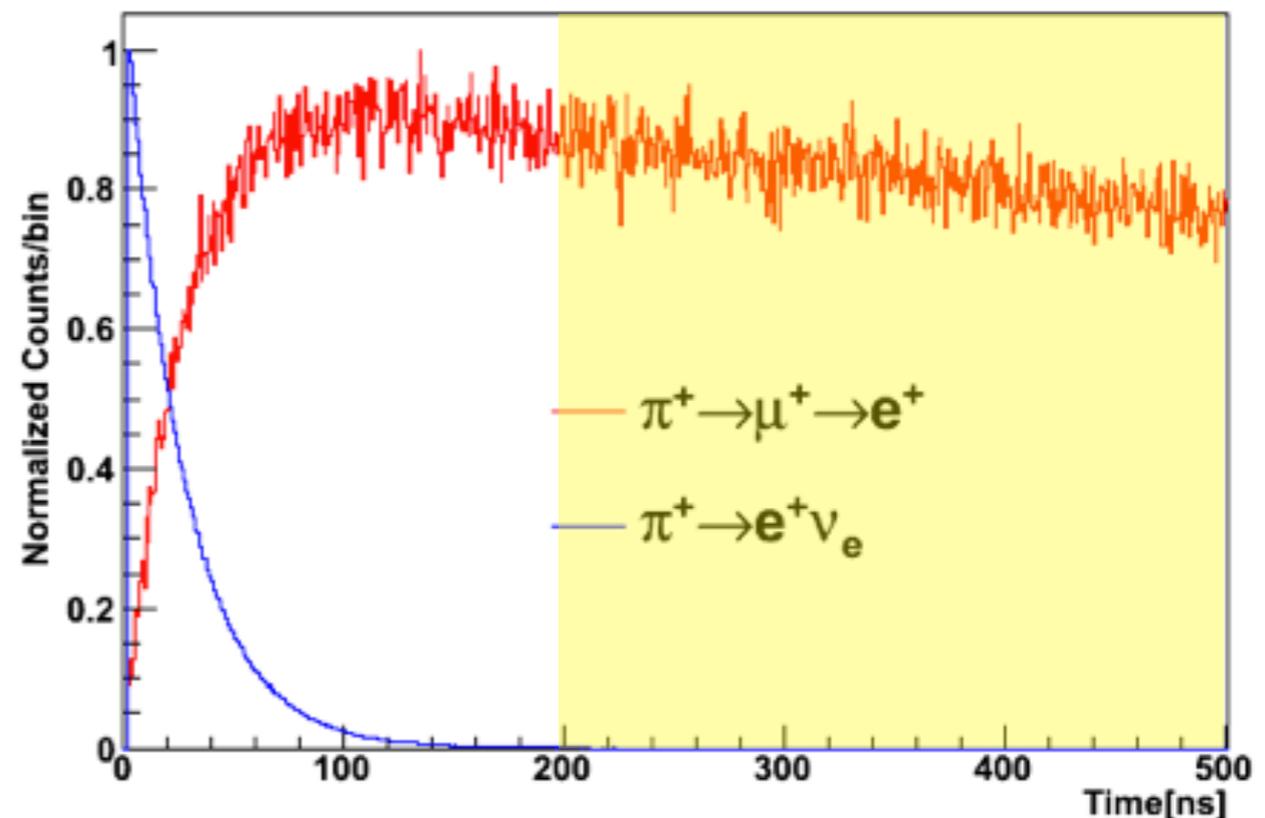
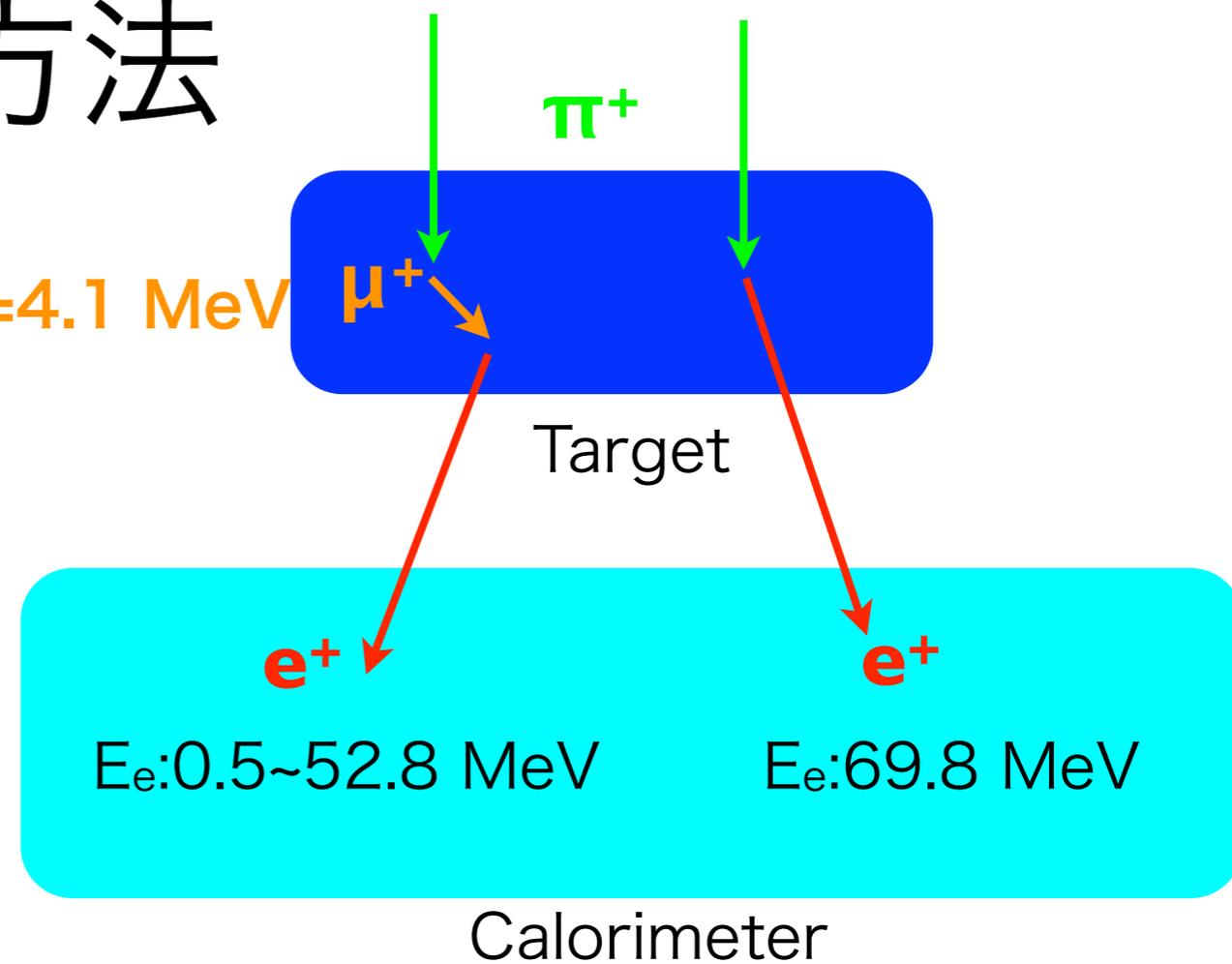


測定方法

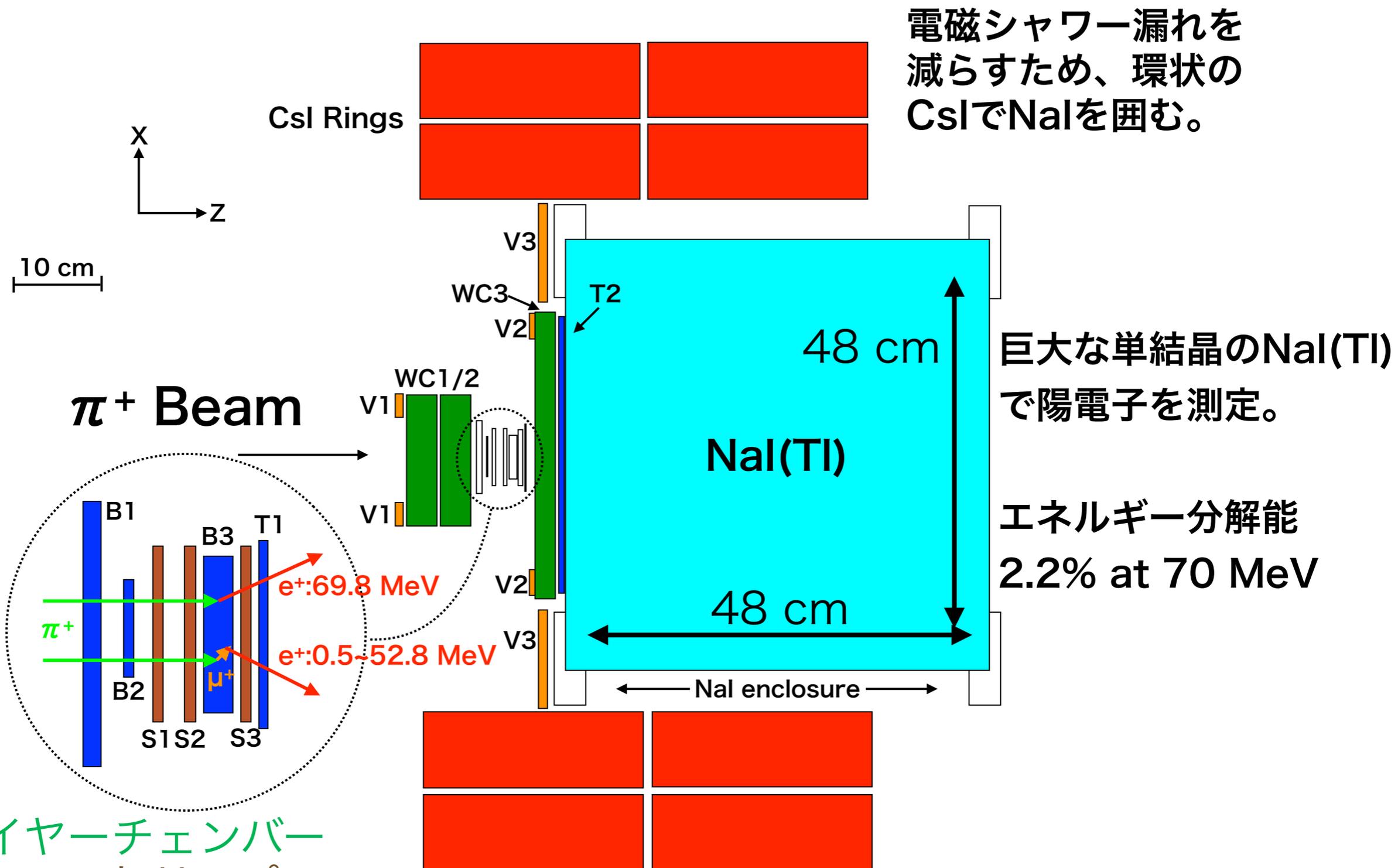
- π^+ ビームをターゲットに止めて崩壊させる。
 - $T_\mu=4.1$ MeVで、ミューオンもターゲット内に止まる(~ 1 mm)。
 - 放出された陽電子をカロリメータで測定する。
 - $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ は $E_e=69.8$ MeV
 - $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$ は $E_e=0.5\sim 52.8$ MeV
- $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ chain

時間情報により $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ 事象を選択し、ミツシエルスペクトラム中のピークを探索する。

$T_\mu=4.1$ MeV



PIENU検出器

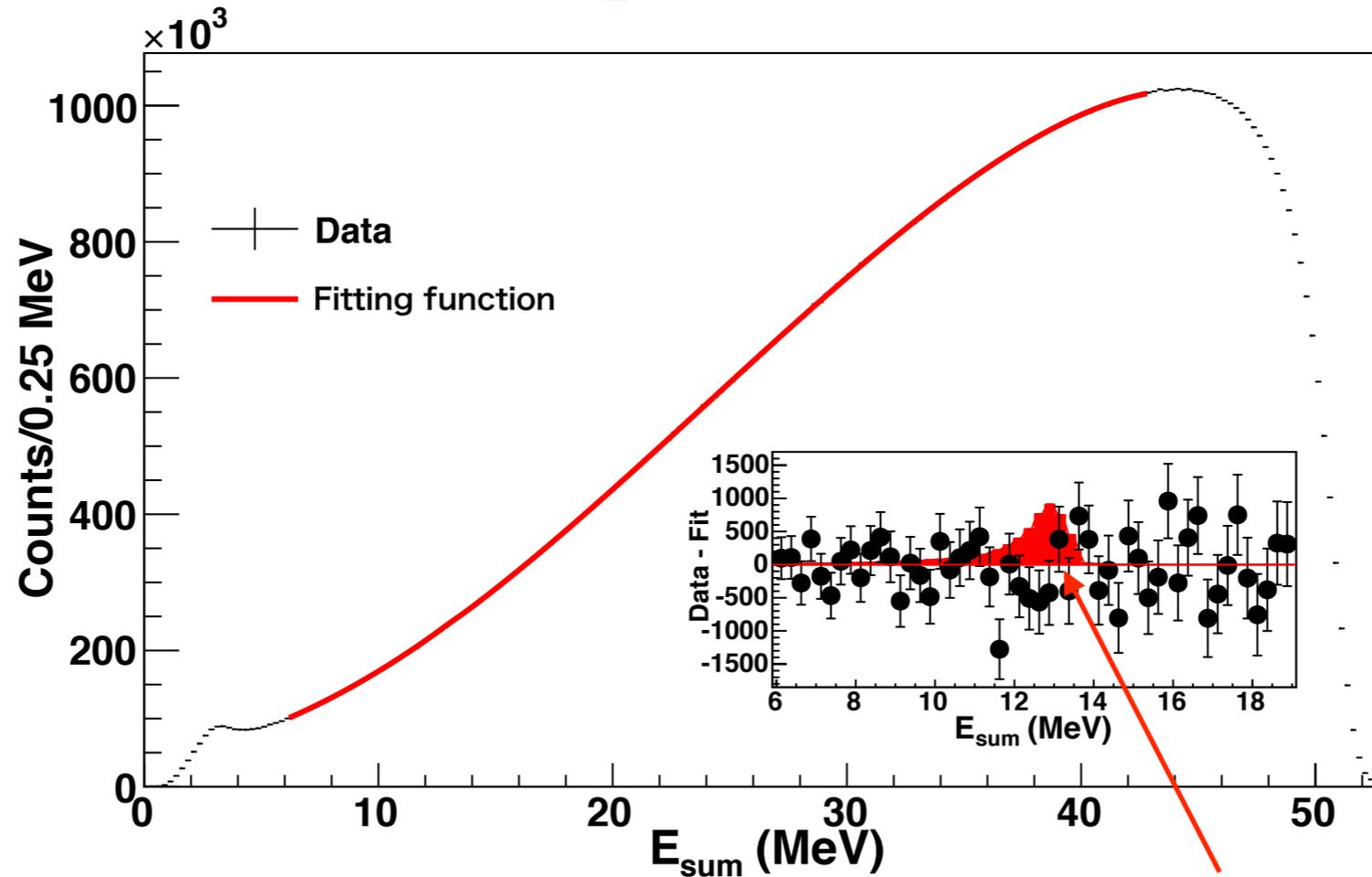


WC:ワイヤーチェンバー
 S:シリコンストリップ
 B1,B2,Tg,T1,T2:
 プラスチックシンチレータ
 2009~2012年にデータ収集。

A. A. Aguilar-Arevalo et al.,
 Nucl. Instrum. Meth. A 791, 38, (2015)

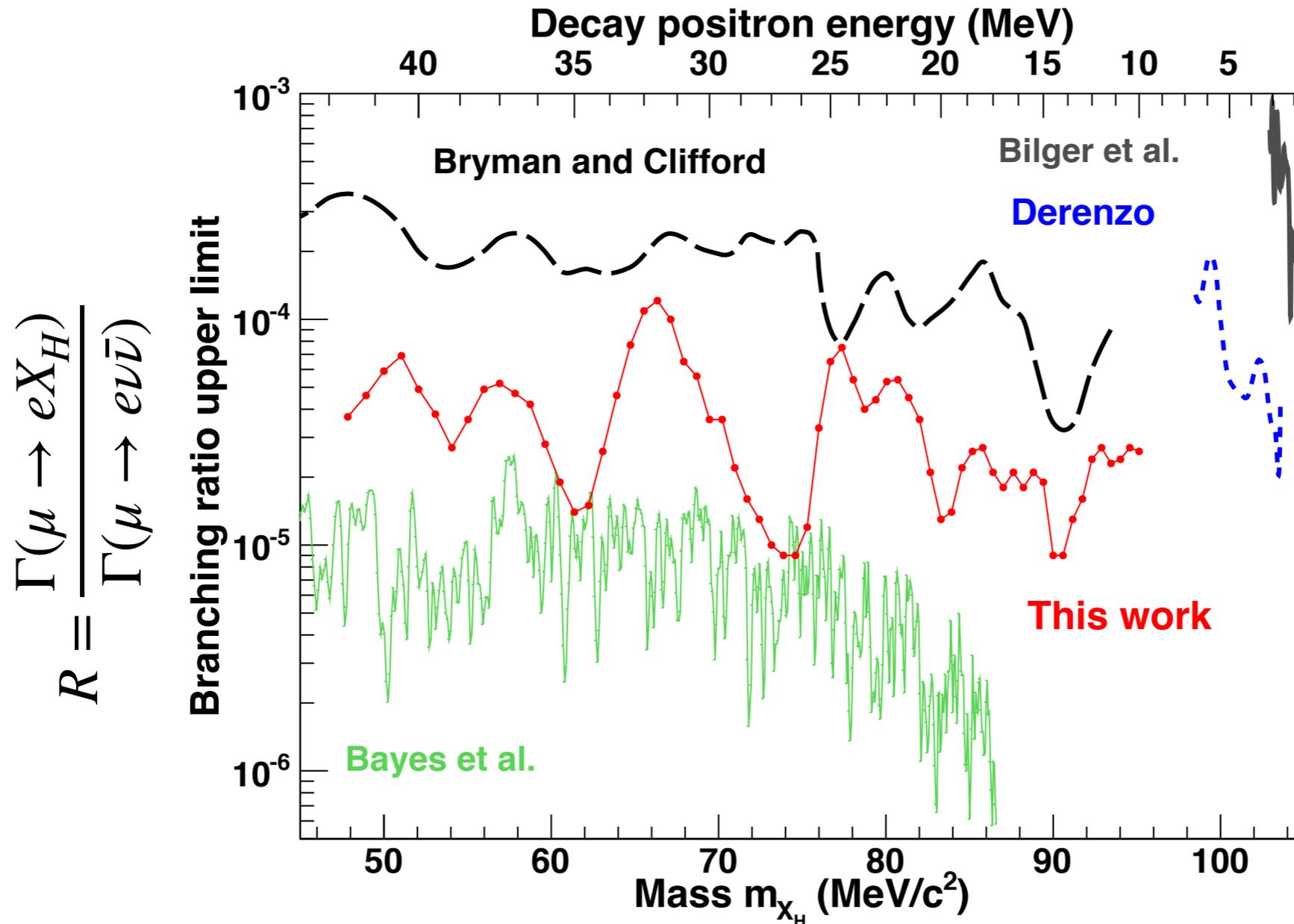
ピーク探索

- PIENU実験の全データを使用: $1.9 \times 10^8 \mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$ decays
- 解析手法はシンプル。
 - ミツシエルスペクトラムをフィットする。
 - MCにより作成した信号を用いて、ピークを探索する。
 - $E_e = 10 \sim 42$ MeVを0.5 MeV毎に探索。
 - 質量に直すと、 $47.8 < m_{X_H} < 95.1$ MeV/c²



9 $m_{X_H} = 90$ MeV/c², BR = 5.0×10^{-5}

実験結果



- ・ 統計的に有意な信号は見つからなかった。
 - ・ 47.8~95.1 MeV/c²に上限値をセット。
 - ・ 特に、87.0~95.1 MeV/c²は本解析結果が最高感度となった。
- Phys. Rev. D 101, 052014 (2020)

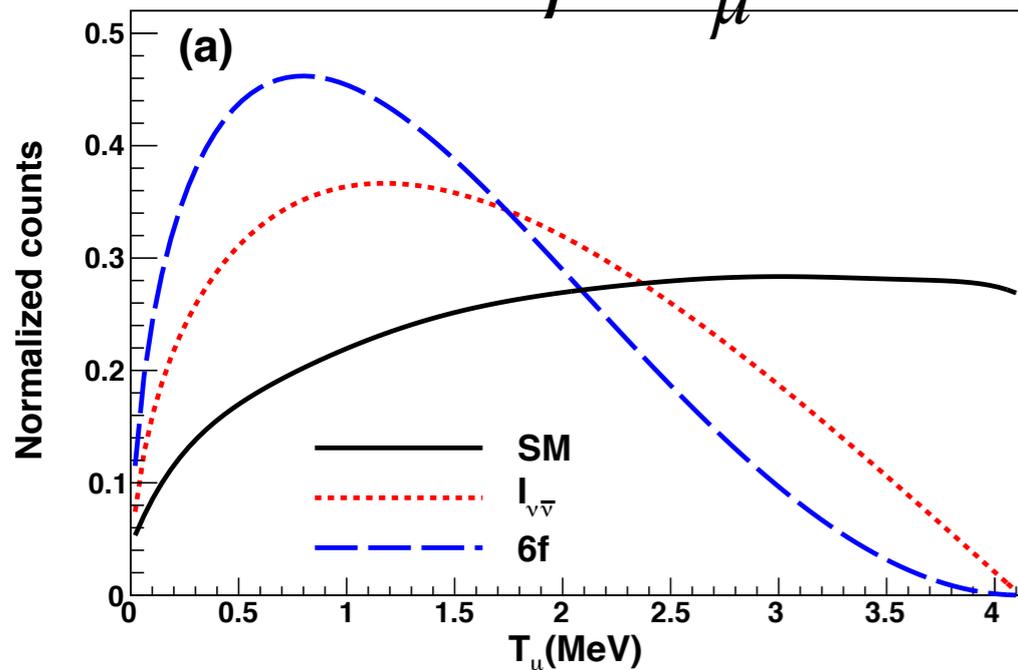
その他の物理 — $\pi^+ \rightarrow l^+ \nu_l \nu \bar{\nu}$ —

- PIENUデータを用いた稀事象の探索を引き続き行っている。
- パイ中間子がレプトンと3つのニュートリノに崩壊する事象。
 - 標準理論ではBR $\sim 10^{-18}$ レベル、観測不可能。
 - 標準理論を超えたモデルでは観測可能レベルになる(かも)。
 - ✓ Nu-nu interaction (Phys. Lett. 32B 121 (1970))
 - ✓ 6-fermion interaction (Phys. Rev. 133 B130 (1964))
- 過去にK中間子崩壊で探索が行われたが、見つかっていない。
- 一方で、 π 中間子崩壊は詳細に探索されていない。

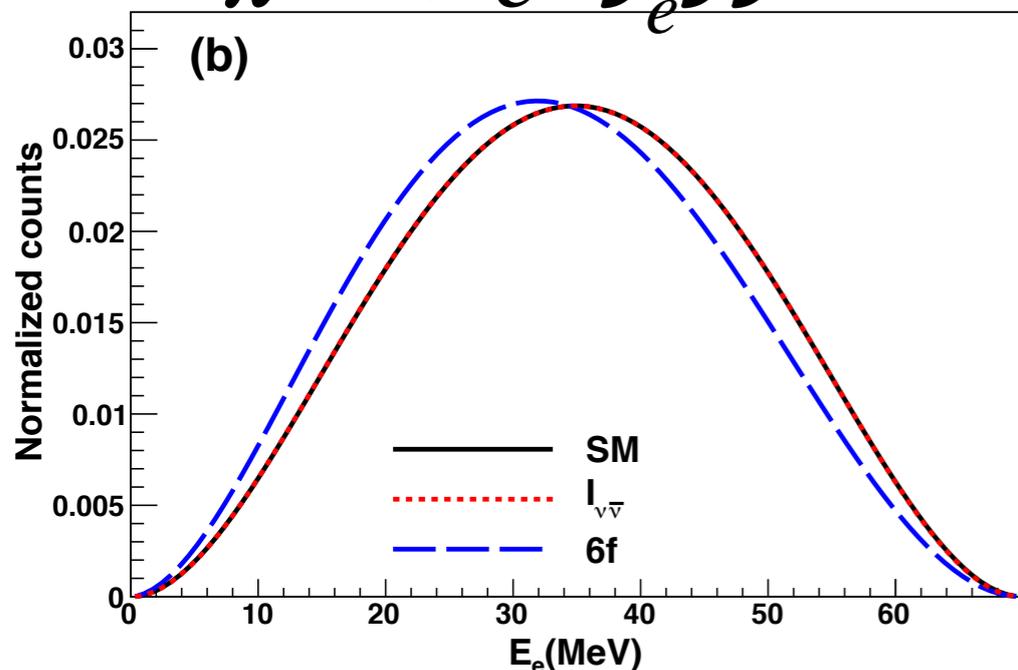
崩壊過程	SM	Nu-Nu	6-f
$\pi \rightarrow e \nu_e \nu \bar{\nu}$	5×10^{-6}	No result	No result
$\pi \rightarrow \mu \nu_\mu \nu \bar{\nu}$	No result	No result	No result
$K \rightarrow e \nu_e \nu \bar{\nu}$	No result	6×10^{-5}	No result
$K \rightarrow \mu \nu_\mu \nu \bar{\nu}$	2.4×10^{-6}	2.4×10^{-6}	2.7×10^{-6}

その他の物理 — $\pi^+ \rightarrow l^+ \nu_l \nu \bar{\nu}$ —

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \nu \bar{\nu}$$



$$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \nu \bar{\nu}$$



- レプトンのエネルギー・スペクトラム解析により探索。
- いずれも有意な信号は見つからなかったが、 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \nu \bar{\nu}$ は**世界初の解析結果**に、 $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \nu \bar{\nu}$ は**過去よりも1桁高い感度**で求めた。

Phys. Rev. D 102 012001 (2020)

崩壊過程	SM	Nu-Nu	6-f
$\pi \rightarrow e \nu_e \nu \bar{\nu}$	1.6×10^{-7}	1.6×10^{-7}	1.7×10^{-7}
$\pi \rightarrow \mu \nu_\mu \nu \bar{\nu}$	8.6×10^{-6}	6.4×10^{-6}	6.2×10^{-6}
$K \rightarrow e \nu_e \nu \bar{\nu}$	No result	6×10^{-5}	No result
$K \rightarrow \mu \nu_\mu \nu \bar{\nu}$	2.4×10^{-6}	2.4×10^{-6}	2.7×10^{-6}

Limits of the branching ratio (90% CL)

まとめと今後

- ・パイ中間子の崩壊分岐比の精密測定を目指したPIENU実験がカナダのTRIUMFで行われた。
- ・蓄積されたパイオンデータは過去の実験の数十倍あり、新物理の探索に非常に有効である。
- ・今回は、ミューオンのCLFV二体崩壊 $\mu^+ \rightarrow e^+ X$ を探索。
- ・残念ながら、有意な信号は見られなかったが、過去の上限值を一桁改善し、87~95.1 MeV/c²の質量領域は最高感度となった。
- ・加えて、 $\pi^+ \rightarrow l^+ \nu_l \nu \bar{\nu}$ 崩壊も探索した。
→ $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \nu \bar{\nu}$ は世界初の結果、 $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \nu \bar{\nu}$ は一桁更新した。
- ・今後もPIENUデータを用いた新物理事象の探索を継続する。
 - 現在は $\pi^+ \rightarrow l^+ \nu X$ を解析中。
 - 詳細は先日のSnowMass Meetingにて発表。
(<https://indico.fnal.gov/event/44819/>)。