

# 荷電パイ中間子崩壊を用いた 重いニュートリノの探索

岡山大学 伊藤慎太郎



PI E NU

# 目次

- ・  $\pi^+$ の物理とPIENU実験
- ・ Massive neutrinoについて
- ・ 測定方法
- ・ Massive neutrino探索
  - $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$
  - $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$
- ・ まとめと今後



PIENU

# $\pi^+$ の崩壊

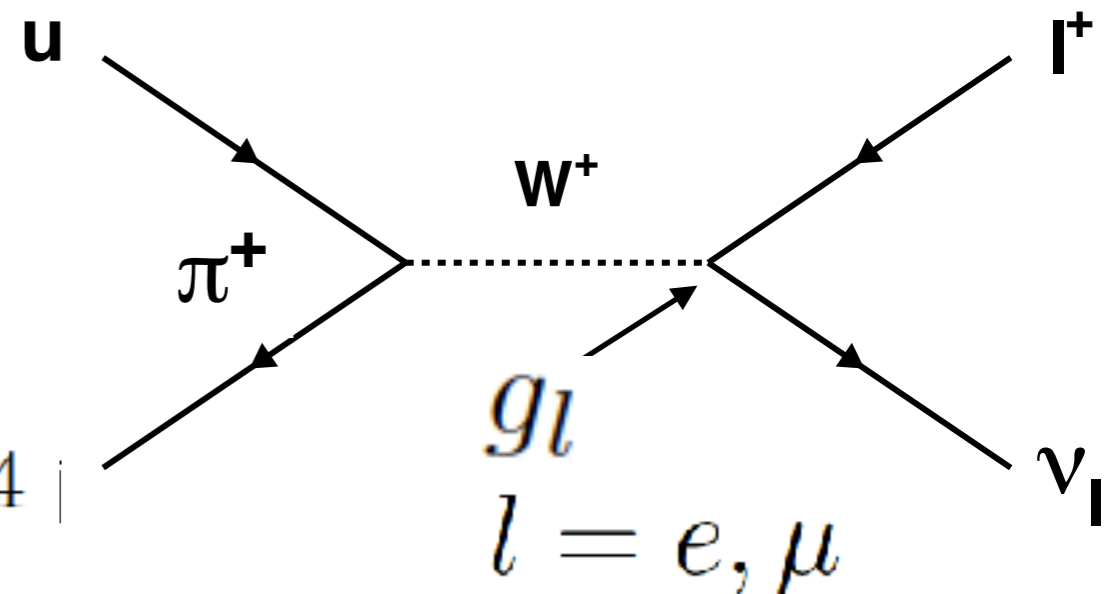
- $\pi^+$  の崩壊分岐比の比  $R^\pi$  は標準理論 (V-A理論) では

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

- 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

- Radiative correction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、 $R^\pi$  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。

- $R^\pi$ の精密測定: **普遍性の検証**。目標は**<0.1%**の精度。

$$R_{\text{exp}}^\pi = [1.2344 \pm 0.0023 (\text{統計}) \pm 0.0019 (\text{系統})] \times 10^{-4} \quad (\text{実験})$$

$$R_{\text{SM}}^\pi = (1.2352 \pm 0.0002) \times 10^{-4} \quad (\text{標準理論})$$

- ✓ 約10%の統計量で、**世界最高精度(0.24%)を達成**。
- ✓ (残念ながら?)標準理論に誤差の範囲で無矛盾。

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

- ✓ 現在、残りのデータを解析中(もう少し時間がかかりそう)。
- ✓ 詳しくは去年のスライドを。

- **重いニュートリノ(Massive neutrino)の探索**

→ 今日はこの話をします。

# Massive Neutrino探索

もし、massive neutrino(ステライルニュートリノ等)が存在すれば  
1.  $R\pi$ が標準理論からずれる。

-  $R\pi$ の測定から求める。

- より高い感度で直接massive neutrinoを探索するには、、、

## 2. Extra peakが見えるはず。

なぜなら、 $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ ,  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$  は二体崩壊だから。

(ニュートリノの質量が0だとすると)

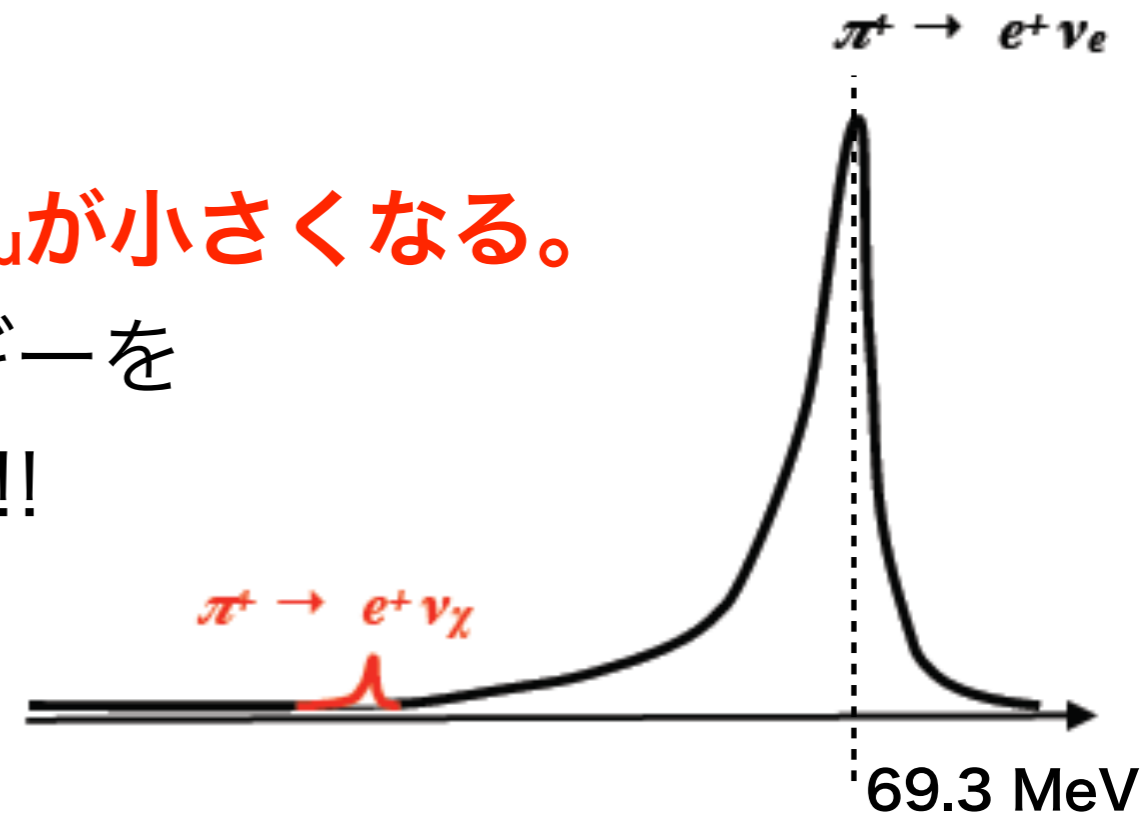
-  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$   $T_e = 69.3$  MeV

-  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$   $T_\mu = 4.12$  MeV

- massive neutrinoがあると、 $T_{e,\mu}$ が小さくなる。

→ 陽電子、ミューオンのエネルギーを  
精密に測定すれば見える(かも)!!

→ PIENUのパイオンデータを  
使って解析!!



# $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ とステライルニュートリノ

- ・ **ステライルニュートリノ**とは、  
- 質量が0ではない、重力とのみ相互作用する未発見粒子。  
- ニュートリノの質量の起源、バリオン数の非対称の謎をとく鍵になりうる。  
- Dark matterの候補とも。
- ・ 3世代のニュートリノに新たな世代を加える。

$$\begin{bmatrix} e \\ \nu_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{bmatrix} + \nu_{\chi 1}, \dots, \nu_{\chi k} \quad (\text{新たに} k \text{世代加えた場合})$$

- ・ ニュートリノは混合していると考えるので、k世代足すと

$$\nu_l = \sum_{i=1}^{3+k} U_{li} \nu_i \quad l = e, \mu, \tau, \chi_1, \dots, \chi_k$$

- ・ 通常の  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$  と  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_i$  の分岐比は、 $U_{ei}$  を用いて、

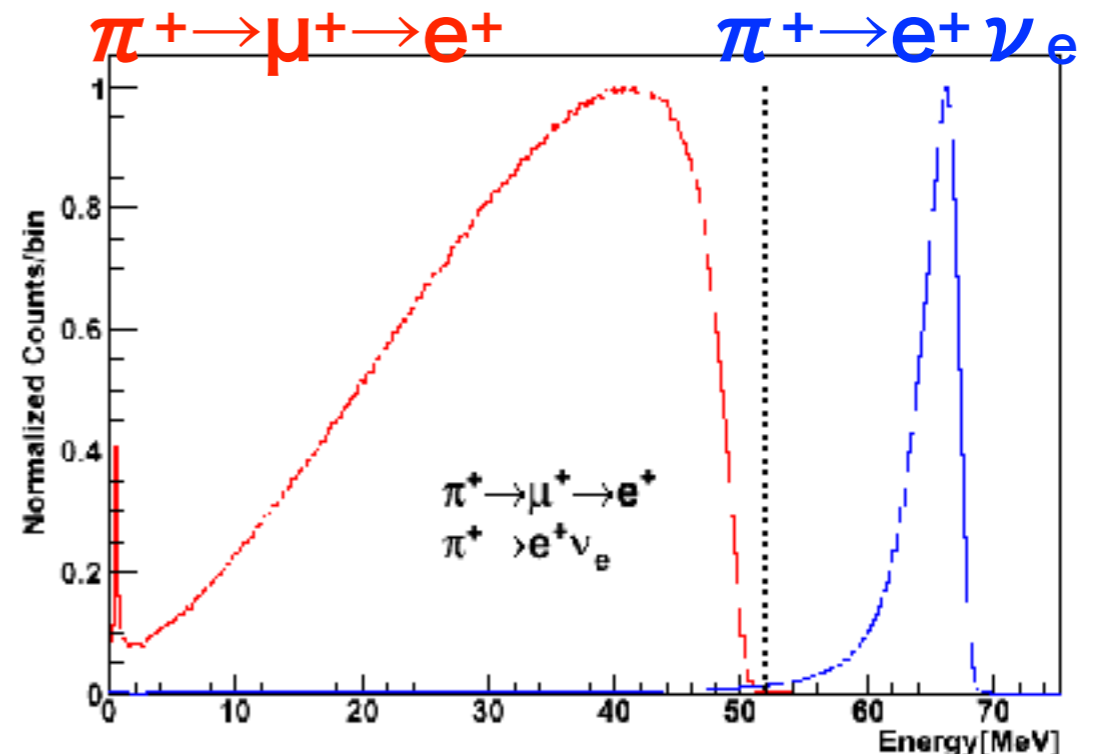
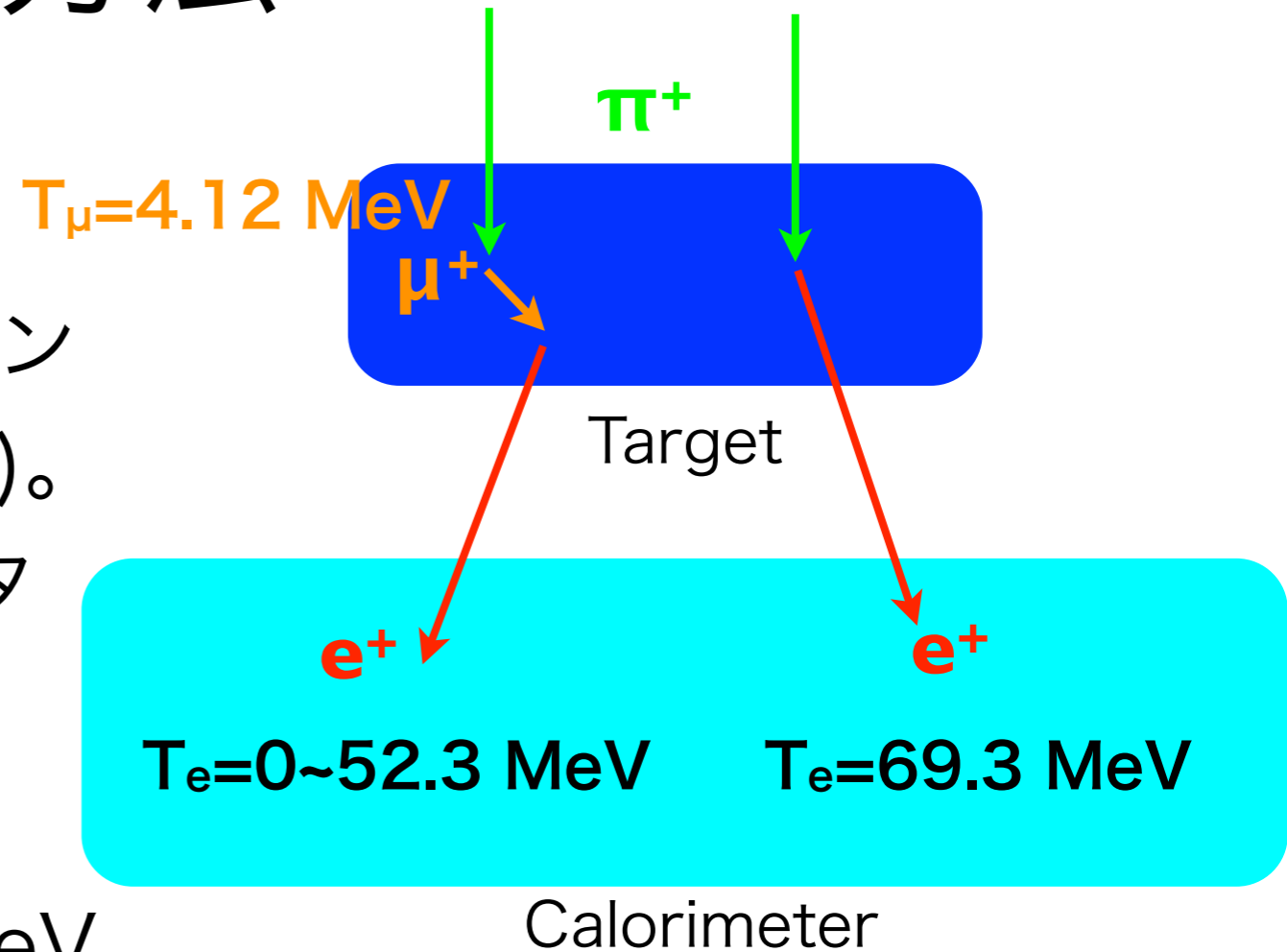
$$R_{ei} = \frac{\Gamma(\pi \rightarrow e \nu_i)}{\Gamma(\pi \rightarrow e \nu_e)} = |U_{ei}|^2 \rho_e \quad \rho_e = \frac{[1 + \delta_e^2 + \delta_i^2 - 2(\delta_i + \delta_e + \delta_e \delta_i)]^{1/2} [\delta_i + \delta_e - (\delta_i - \delta_e)^2]}{\delta_e (1 - \delta_e)^2}$$
$$\delta_e = m_e^2 / m_\pi^2, \delta_i = m_i^2 / m_\pi^2$$

- ・ 例:  $\nu$  MSM (k=3)

# 測定方法

- $\pi^+$ ビームをターゲットに止めて崩壊させる。
- $T_\mu=4.12$  MeVなので、ミューオンもターゲット内に止まる( $\sim 1$ 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  $T_e=69.3$  MeV
  - $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$ は  $T_e=0 \sim 52.3$  MeV ( $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$  chain)

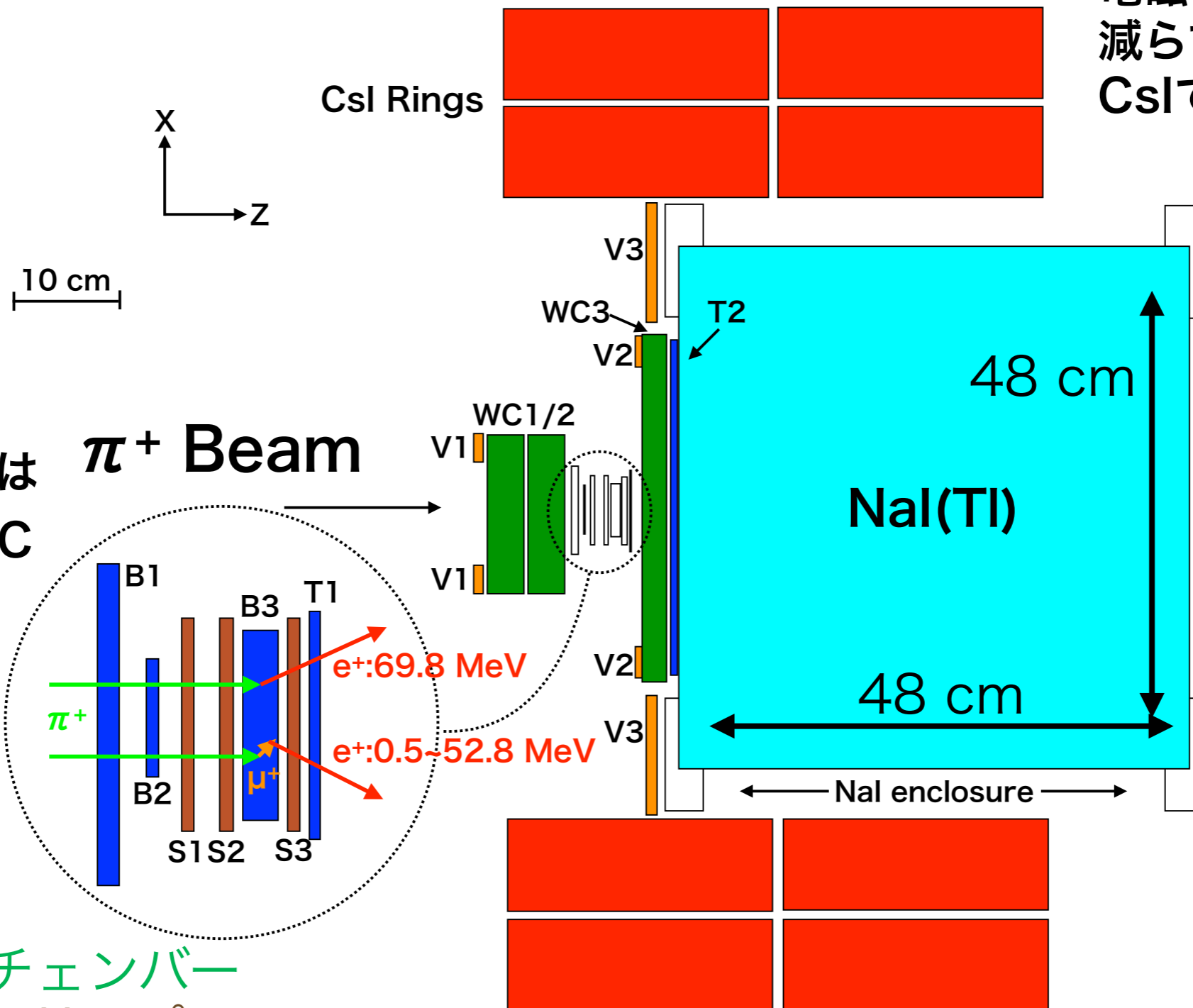
ターゲットとカロリメータのエネルギー情報より、extra peakを探索する。



# PIENU検出器

電磁シャワー漏れを減らすため、環状のCsIでNaIを囲む。

ターゲット(B3)は500 MHz FADCで波形を記録



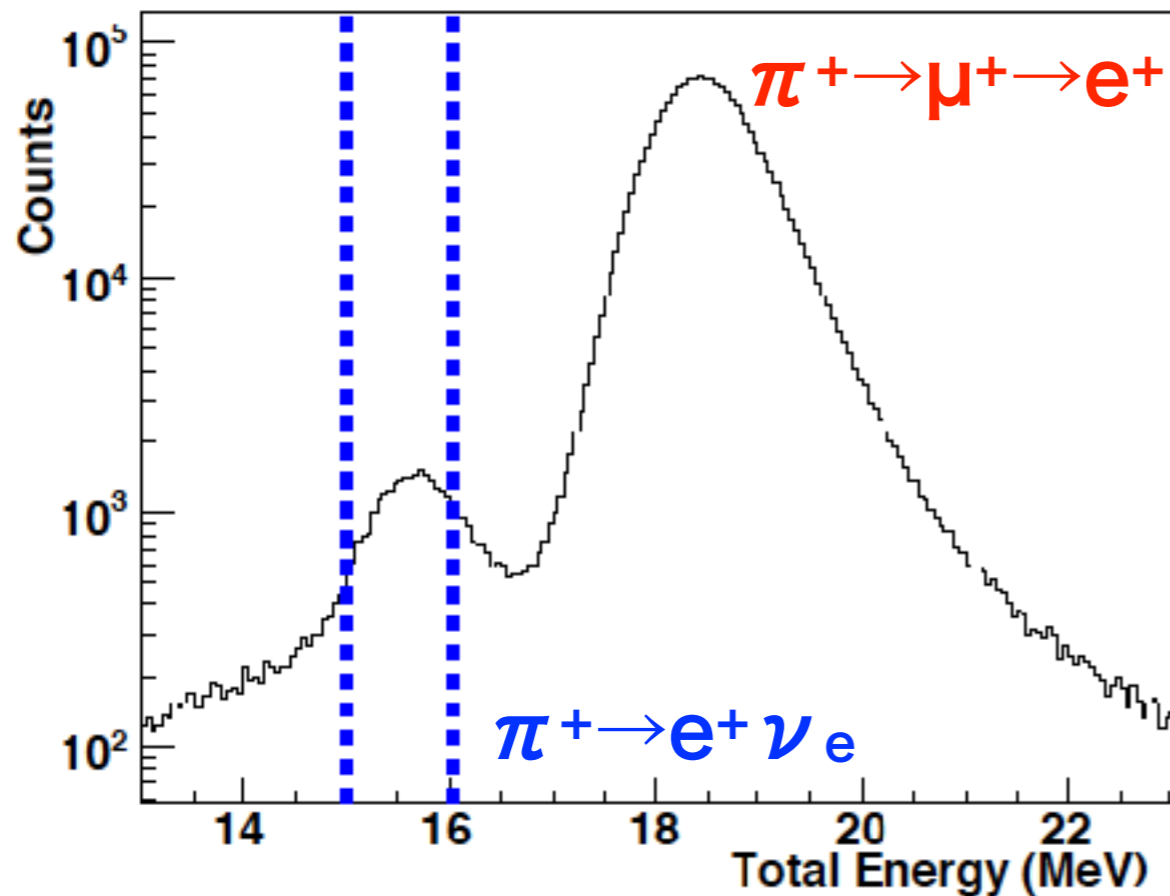
巨大NaI(Tl)で陽電子を測定。

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。

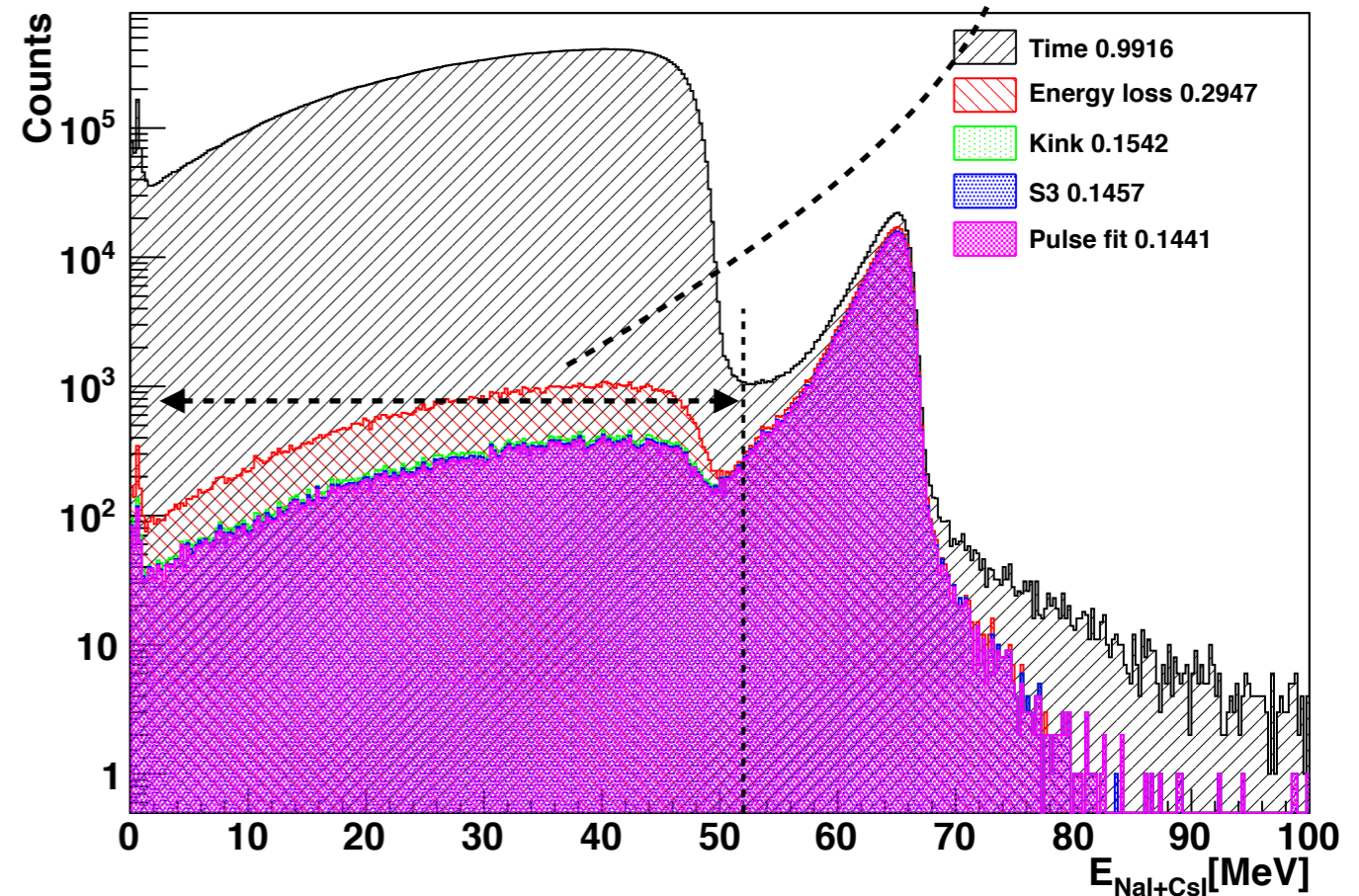
A. A. Aguilar-Arevalo et al,  
 Nucl. Instrum. Meth. A 791, 38, (2015)

# $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_\chi$ の探索

- ・ 支配的な  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$  をカットする (e.g. ターゲット)。
- ・ カット後のスペクトルをフィットする。  
[ $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$  テール] + [除ききれなかった  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ ] + [Extra peak]
- ・  $60 \text{ MeV}/c^2 < m_\nu < 130 \text{ MeV}/c^2$  の領域を探索。
- ・ 残念ながら、優位なピークは見えていない。。。 → フィット結果をもとに、上限値を求める (90% C.L.).



ターゲット中のエネルギー



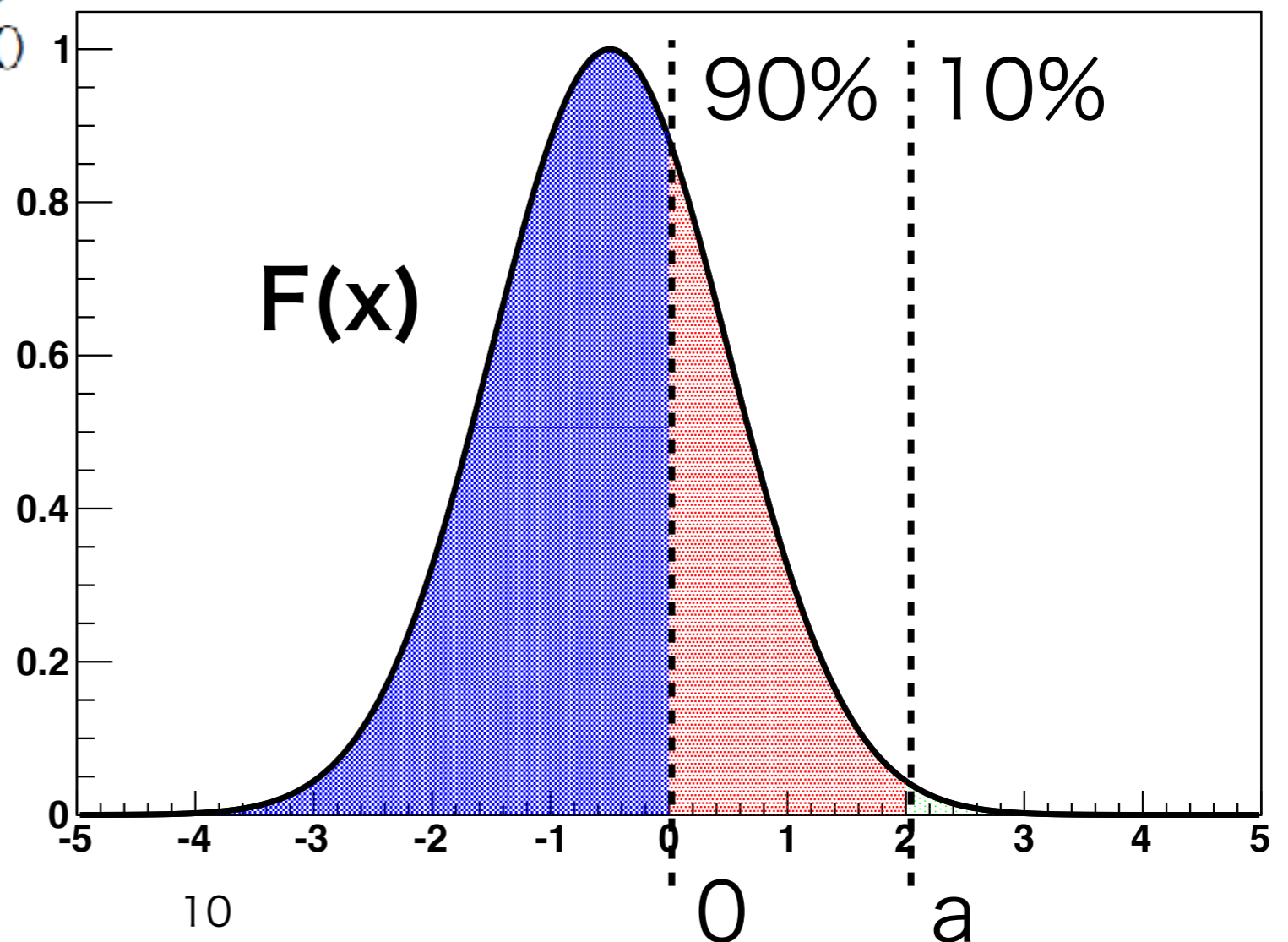
9 カット後の陽電子のエネルギー・スペクトラム

# 90% C.L.(Confidence Level)について

- 例えばフィットの結果、事象数が $-0.50 \pm 1.00$ だったら、中心値が $-0.50$ 、sigmaが $1.00$ の正規分布 $F(x)$ を考える
- 事象数なので、負の数はあり得ない。 $>0$ の領域を使用する。

$$\frac{\int_0^a F(x) dx}{\int_0^\infty F(x) dx} = 90\%$$

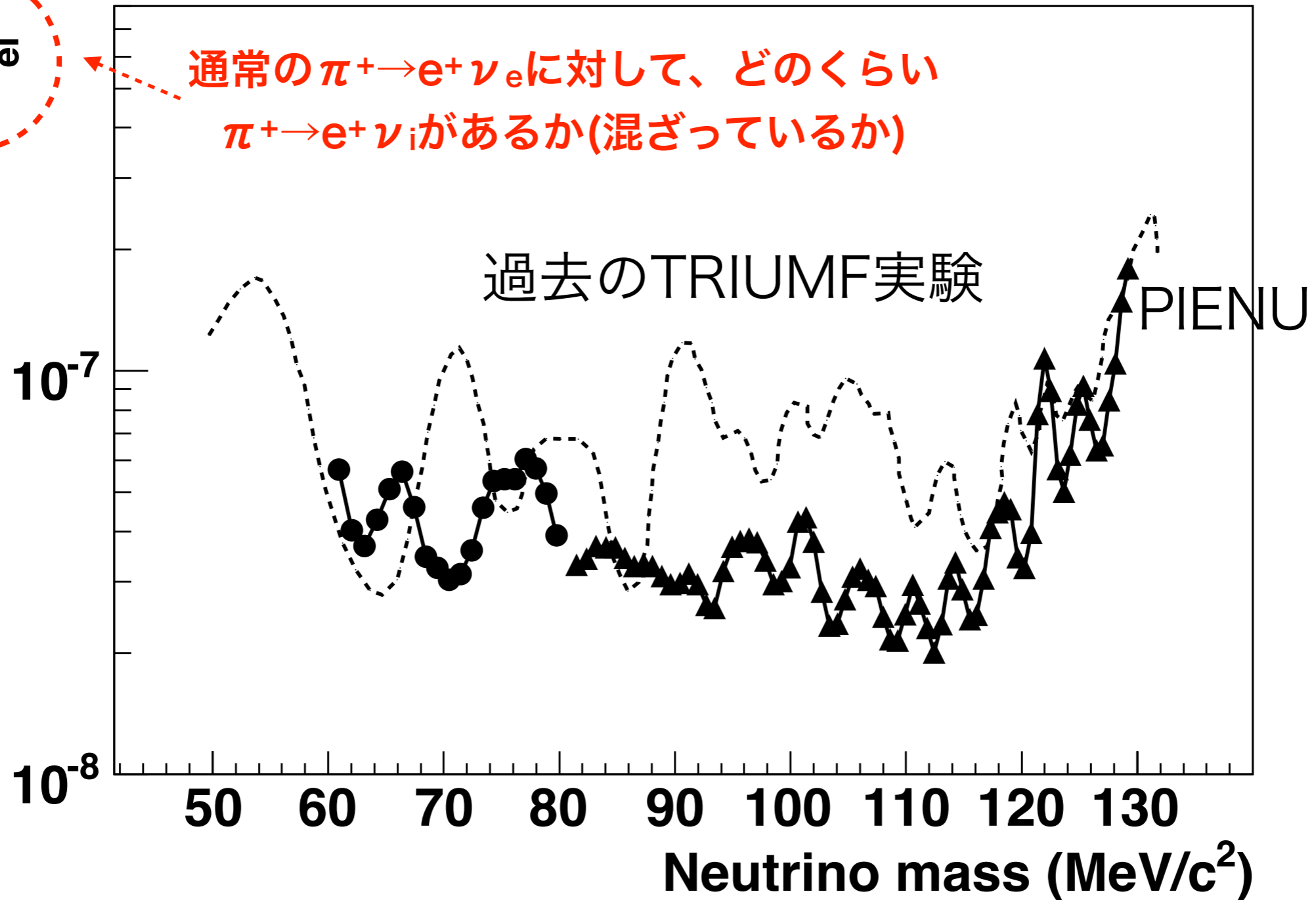
- この式が90%になる $a$ が90% C.L. (上限値)になる。  
→ Bayesian method。



# Massive Neutrinoへの感度

$$|U_{ei}|^2$$

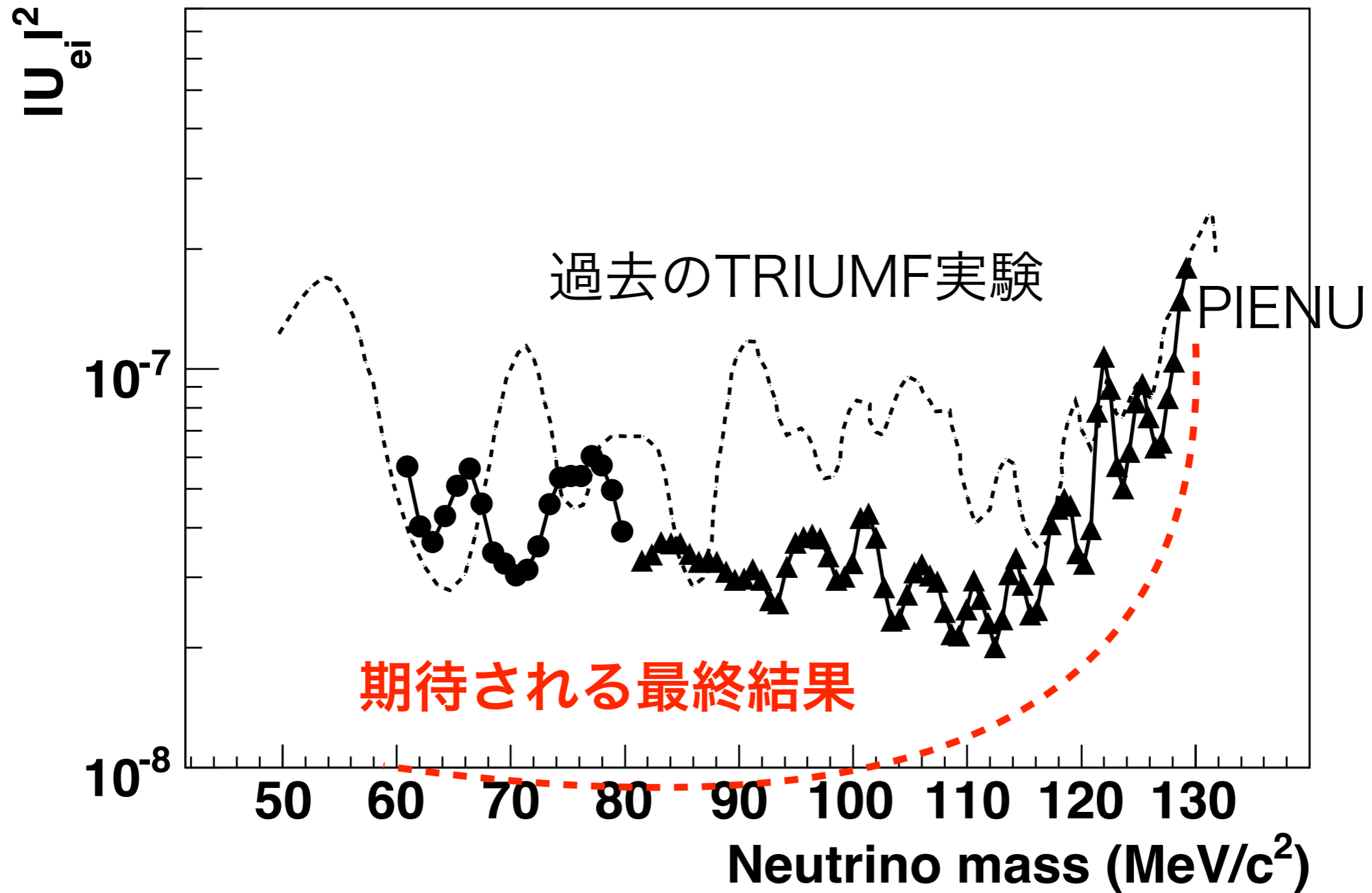
通常の $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ に対して、どのくらい  
 $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_i$ があるか(混ざっているか)



M. Aoki et al, Phys.Rev.D 84 052002 (2011)

S. Ito et al, Hyperfine Interact (2017) 238: 1

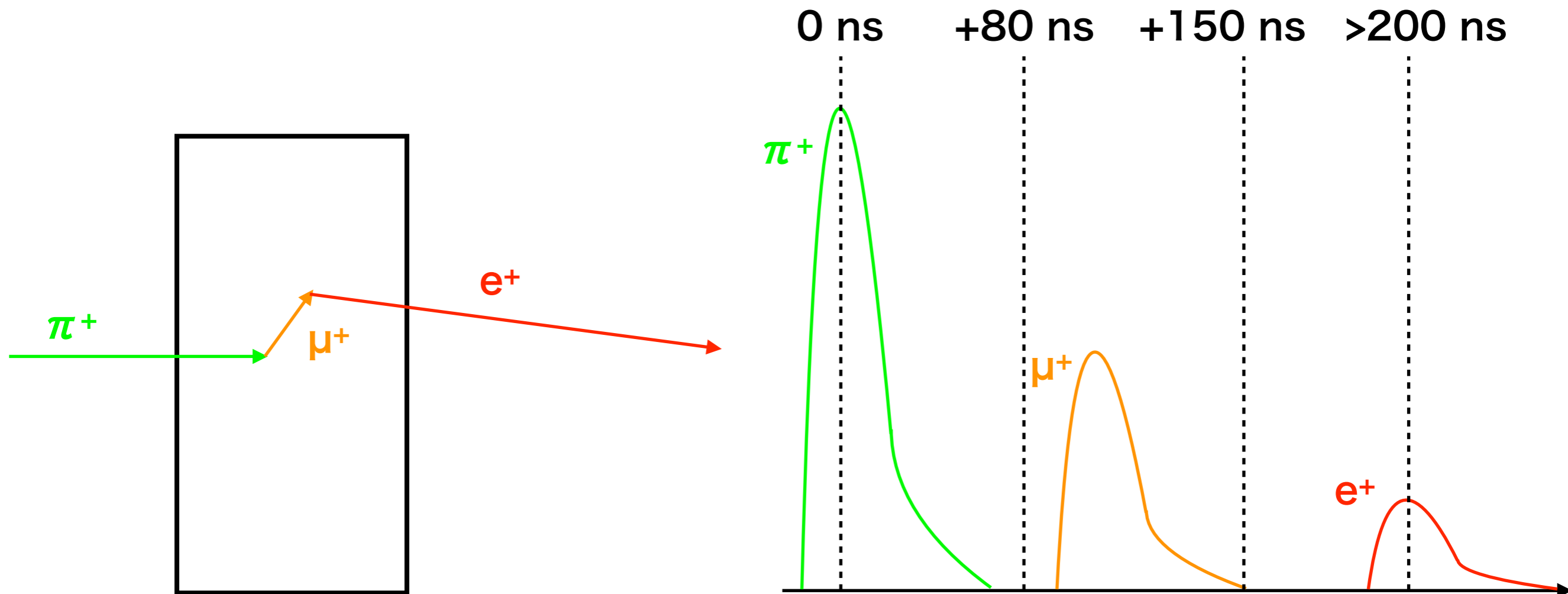
# Massive Neutrinoへの感度



**現在、系統誤差の最終確認中。  
間もなくpublish予定。**

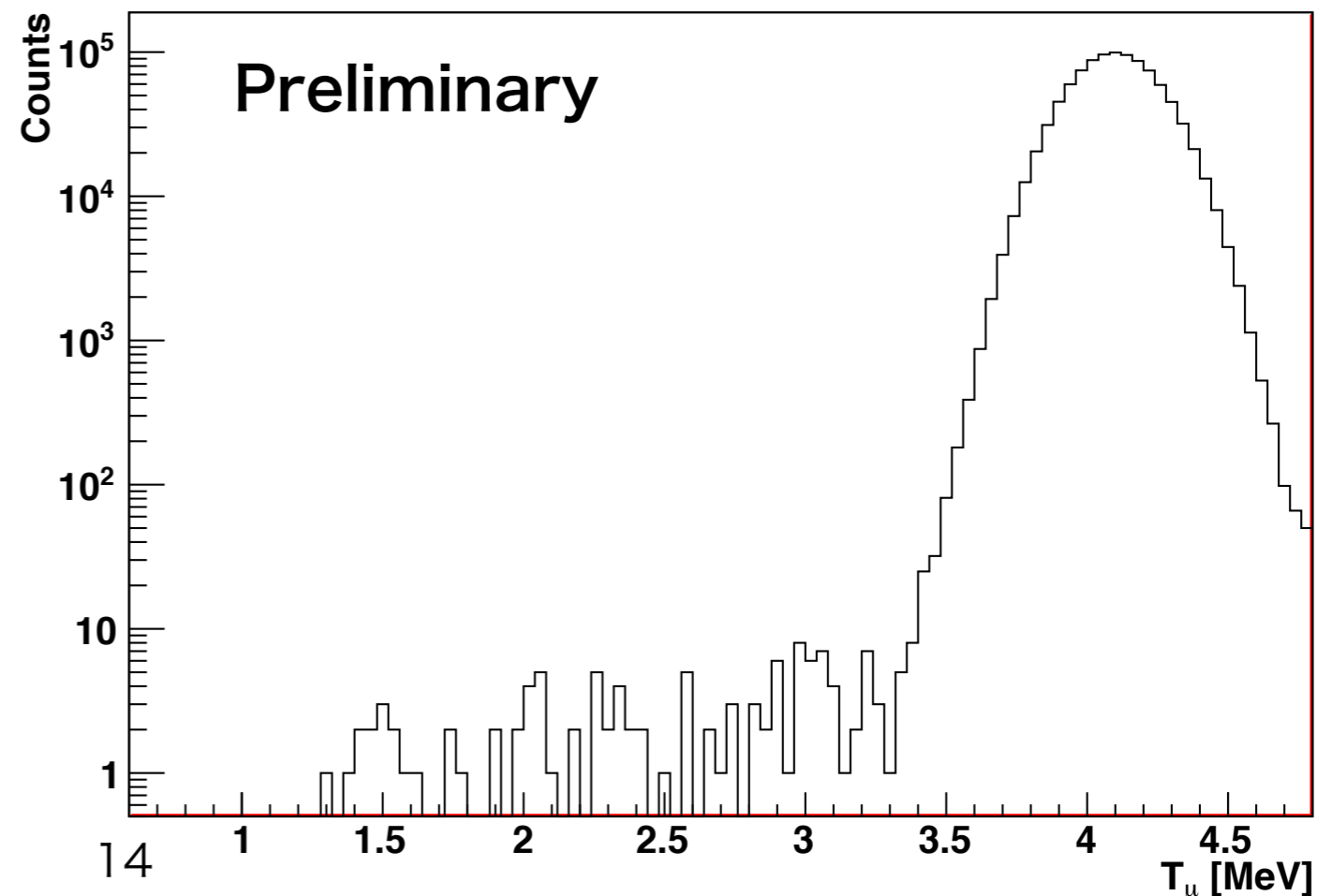
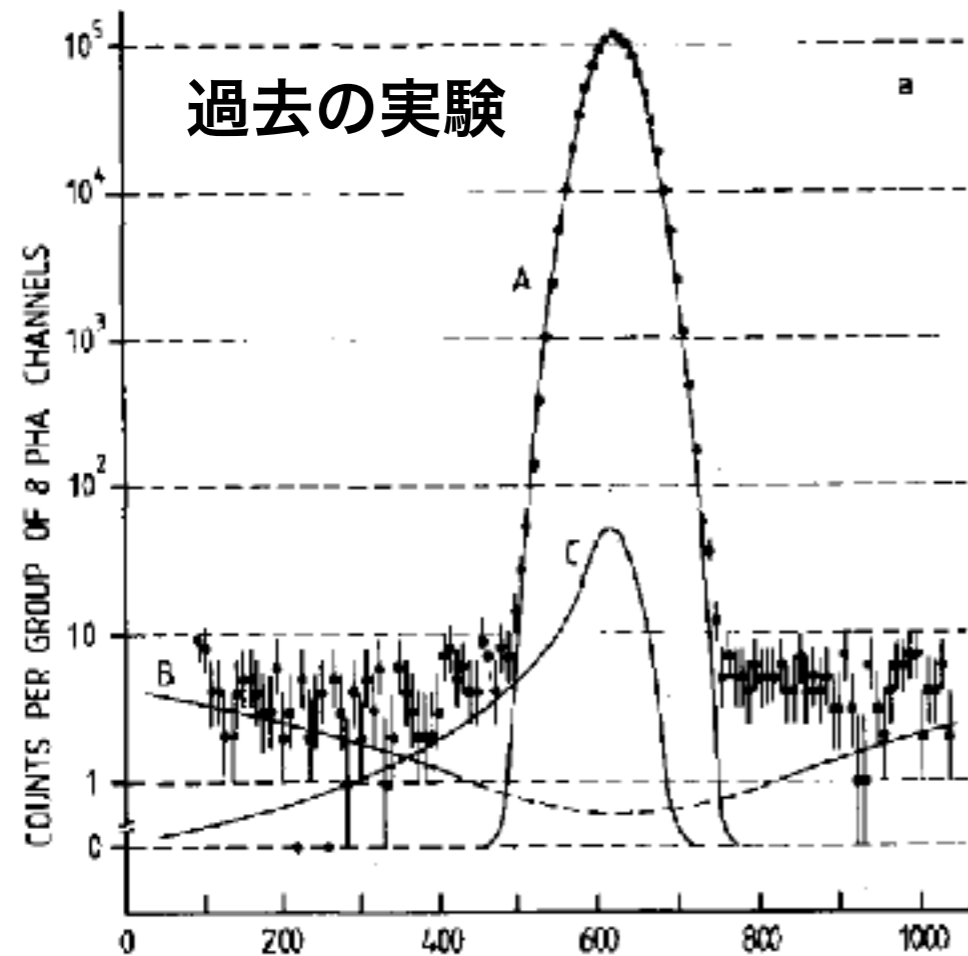
# $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\chi$ の探索

- ターゲット中の  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$  の波形は 500 MHz Flash-ADC で記録されている。⇒  **$\mu^+$  の波形を見ることで、探索する。**
- $\pi^+$ 、 $e^+$  の波形が  $\mu^+$  の波形に影響しない時間領域を設定。
- $T_\mu = 4.12$  MeV よりも低い波形があれば、それは **massive neutrino によるもの** (のはず)!!



# Very Preliminary Result

- ・ 今回は全統計量の約10%の統計を用いた。
  - ➔ まずはカットなどの解析手法の確立する。
- ・  $0 \text{ MeV}/c^2 < m_\nu < 30 \text{ MeV}/c^2$ の探索が可能。
- ・ 過去の実験(R. Abela et al. at SIN, Phys. Lett. 105B. 236, 1981)と比べ、**バックグラウンドを減らすことに成功。**
- ・  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_\chi$ 同様にフィットを行い、 $U_{\mu i}$ の上限値を求める。
  - ➔ 大幅な改善が期待される。

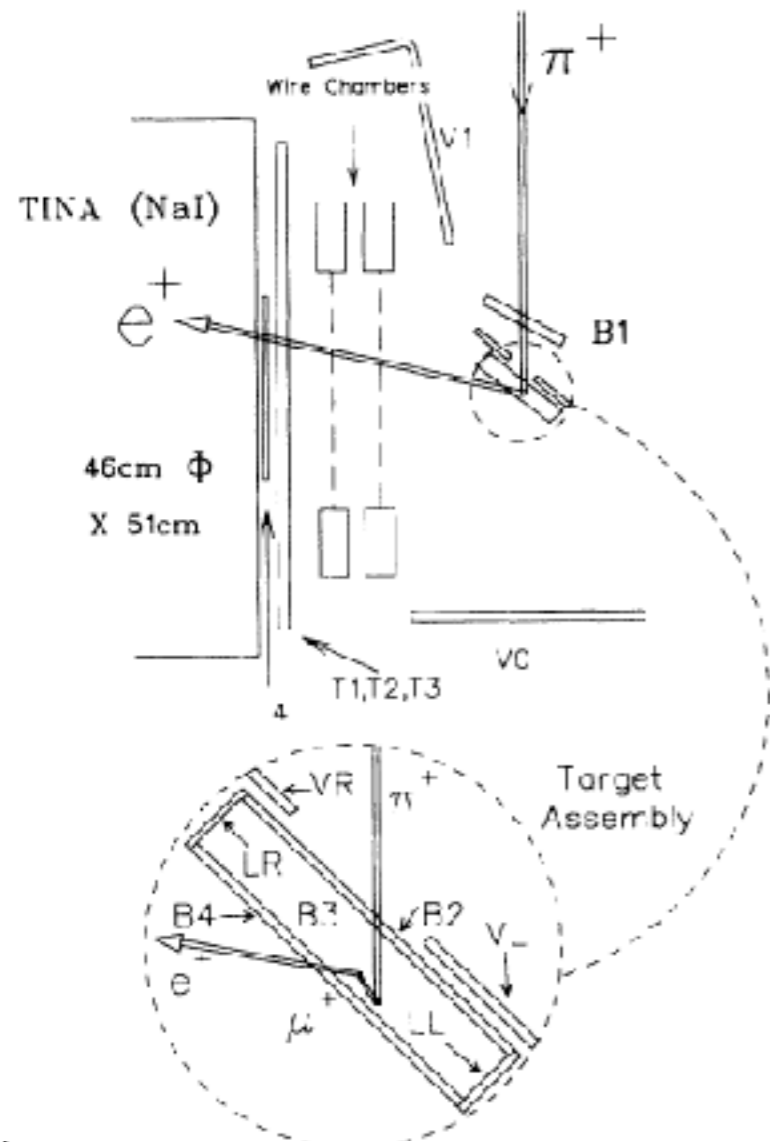


# まとめと今後

- $R_\pi$ を高精度で測定することを目指したPIENU実験がカナダのTRIUMFで行われた。
- $\pi^+$ のデータはステライルニュートリノなどの重いニュートリノに感度がある。
- $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_\chi$ と $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\chi$ の両方を探索。
  - $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_\chi$ は間もなくpublish。
  - $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\chi$ も順調に進んでいる。(今年度中にpublish?)
- $R_\pi$ はもう少し。 $<0.1\%$ の精度へ。

# Back Up

# A Previous Experiment at TRIUMF



- Previous experiment at TRIUMF in 1980's
- $R = [1.2265 \pm 0.0034(\text{stat}) \pm 0.0044(\text{syst})] \times 10^{-4}$
- Weak points

- **Small acceptance (~2%)**

- ✓ Many beam positron contamination.
- ✓ Low statistics.
- ✓ Larger acceptance correction (later).

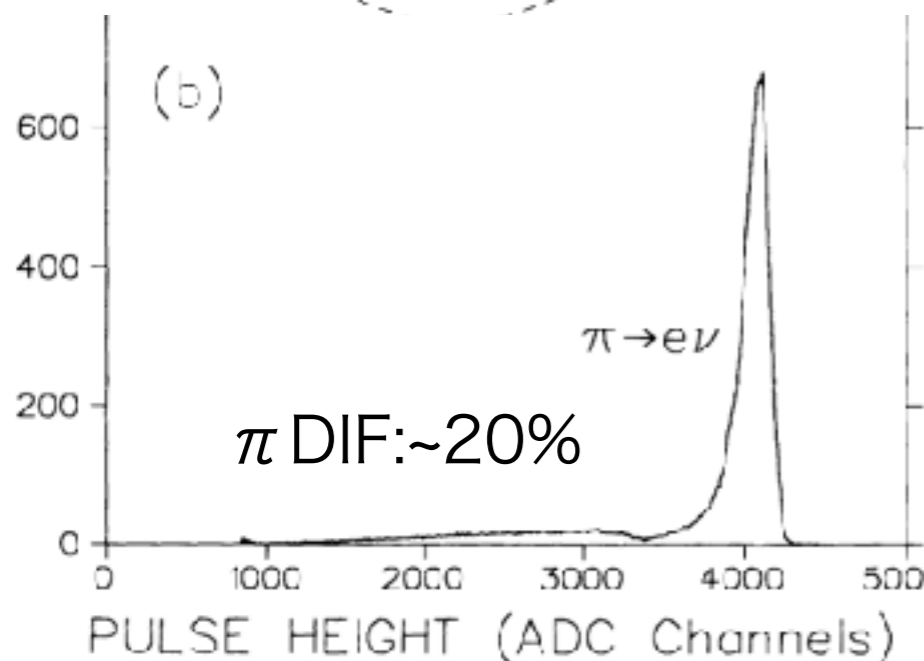
- **Larger error on low-energy tail.**

- ✓ Unsuppressed  $\pi$  DIF events.
- ✓ Low statistics.

- **Bad time fit**

- ✓ BG were not precisely estimated well.

➔ **The PIENU experiment was designed with taking into account these weak points.**

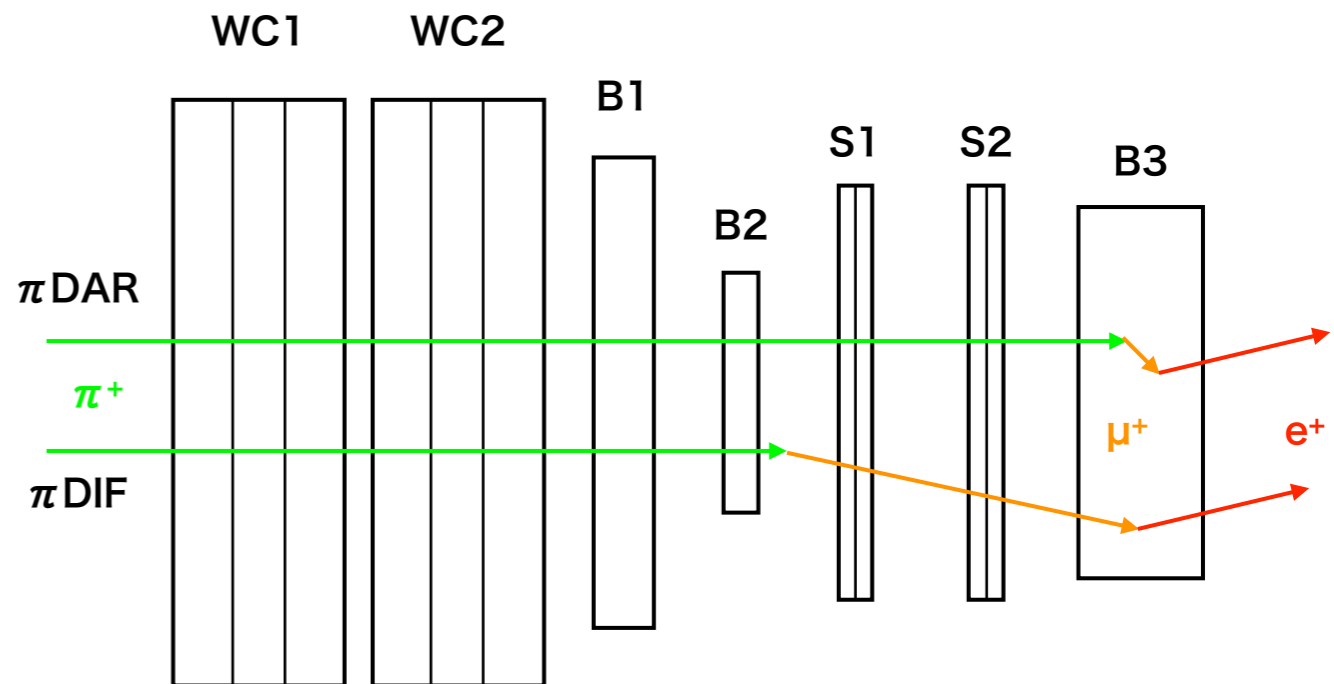
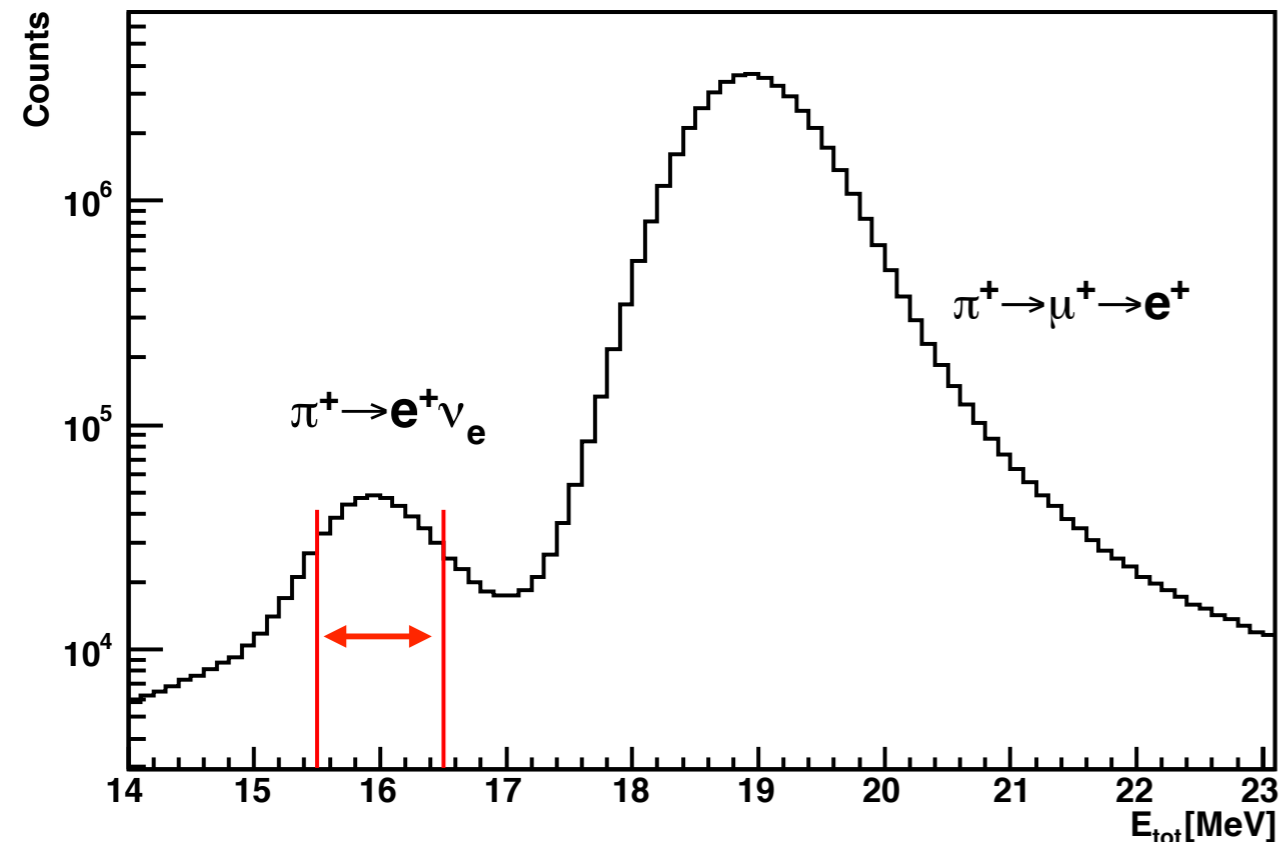
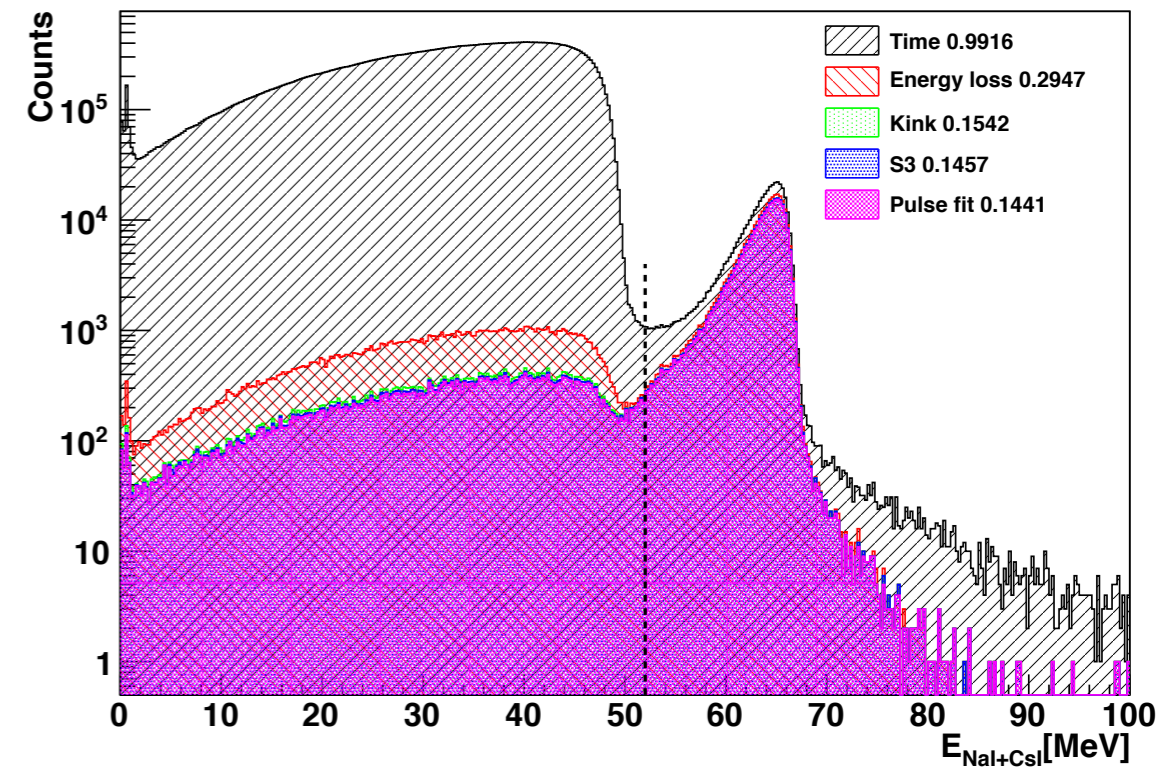


# Suppression of $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$

$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$  events could be suppressed using target and trackers.

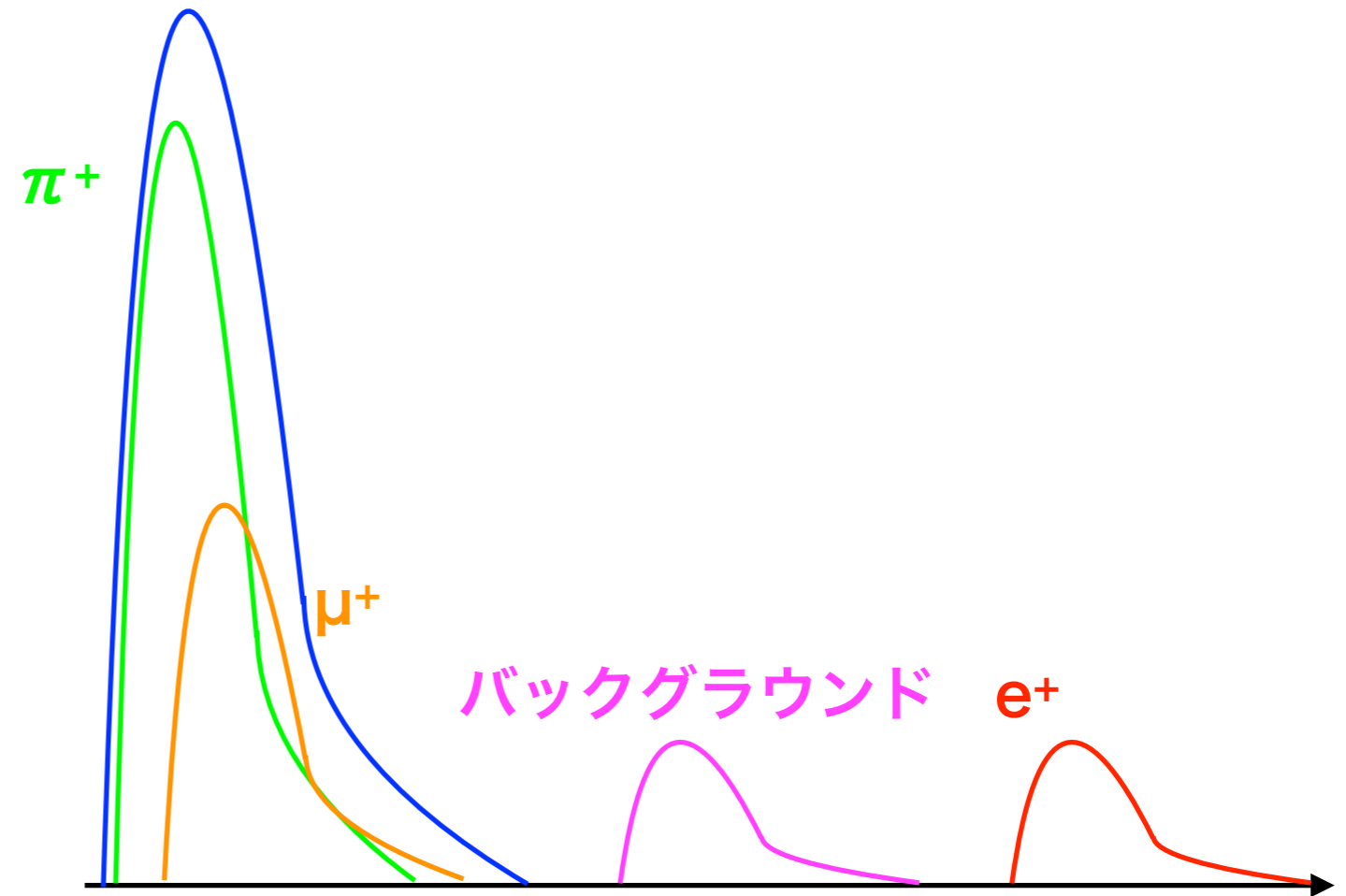
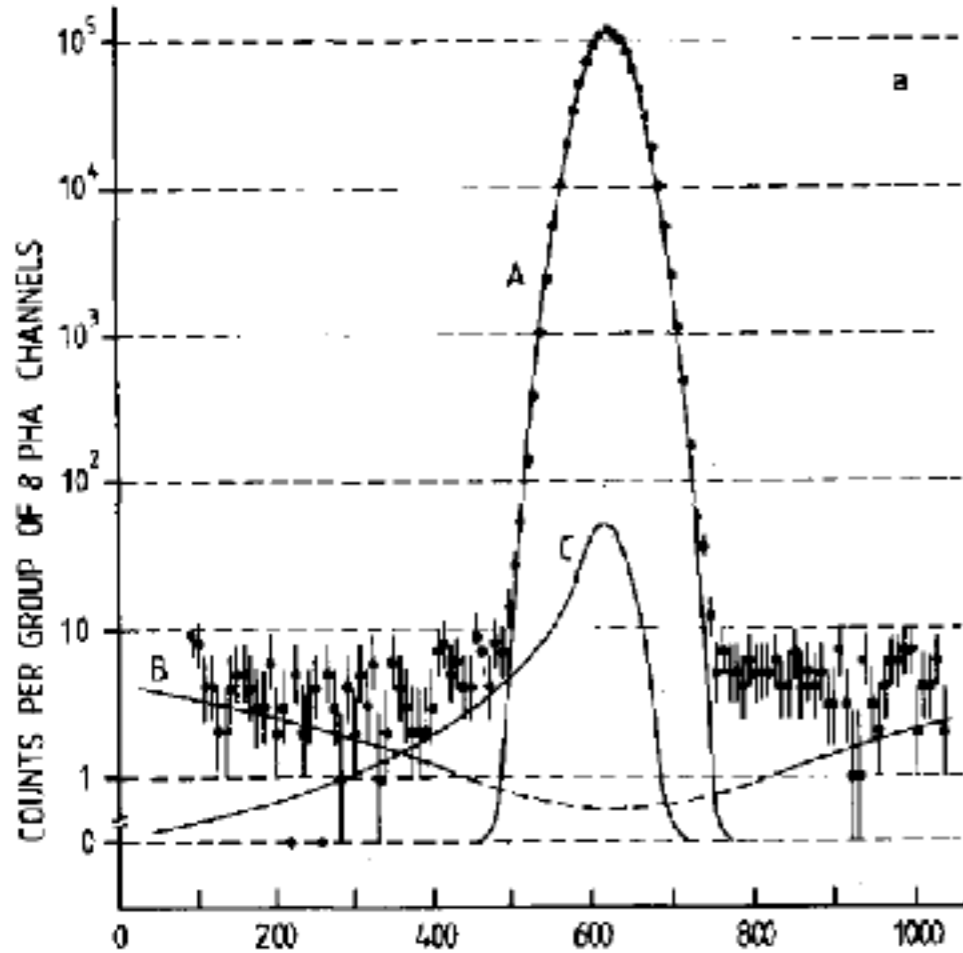
- $\mu^+$  had a kinetic energy of 4.1 MeV.
- $\pi$  DIF events had larger angle than  $\pi$  DAR in the target.

**→ There was no tracker in the previous experiment.**



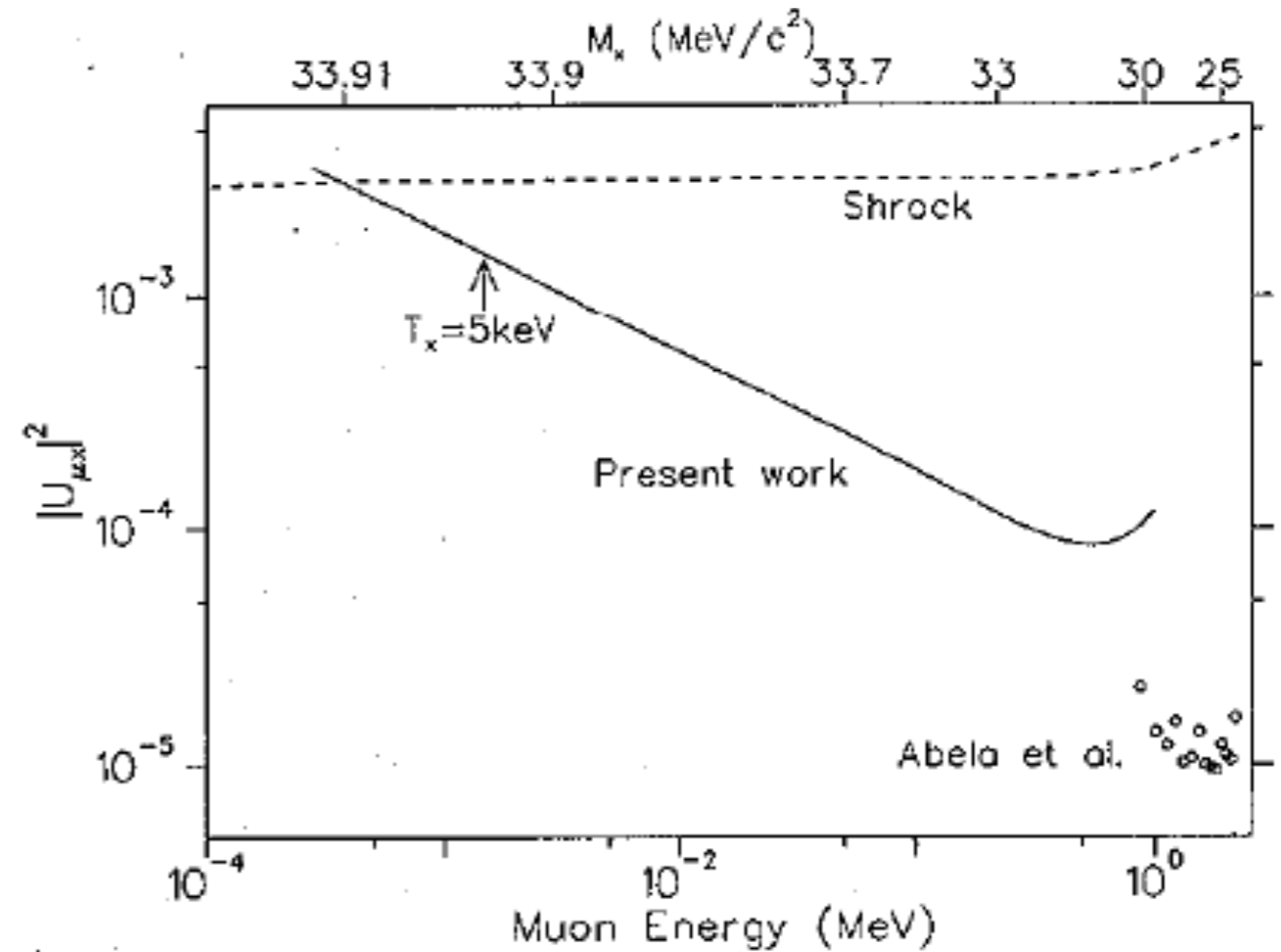
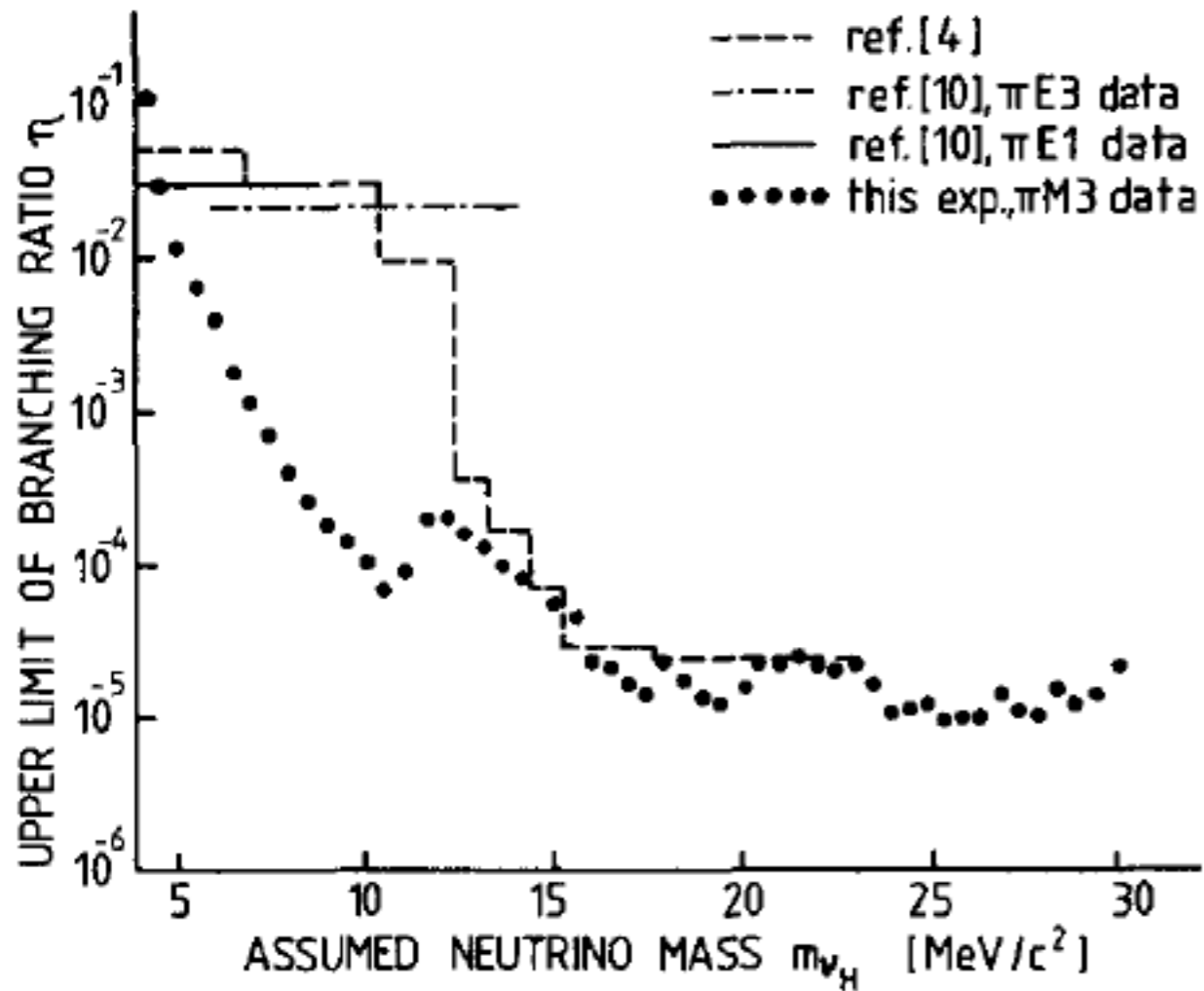
# $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\chi$ の探索

$\pi + \mu$  1つの波形に見える

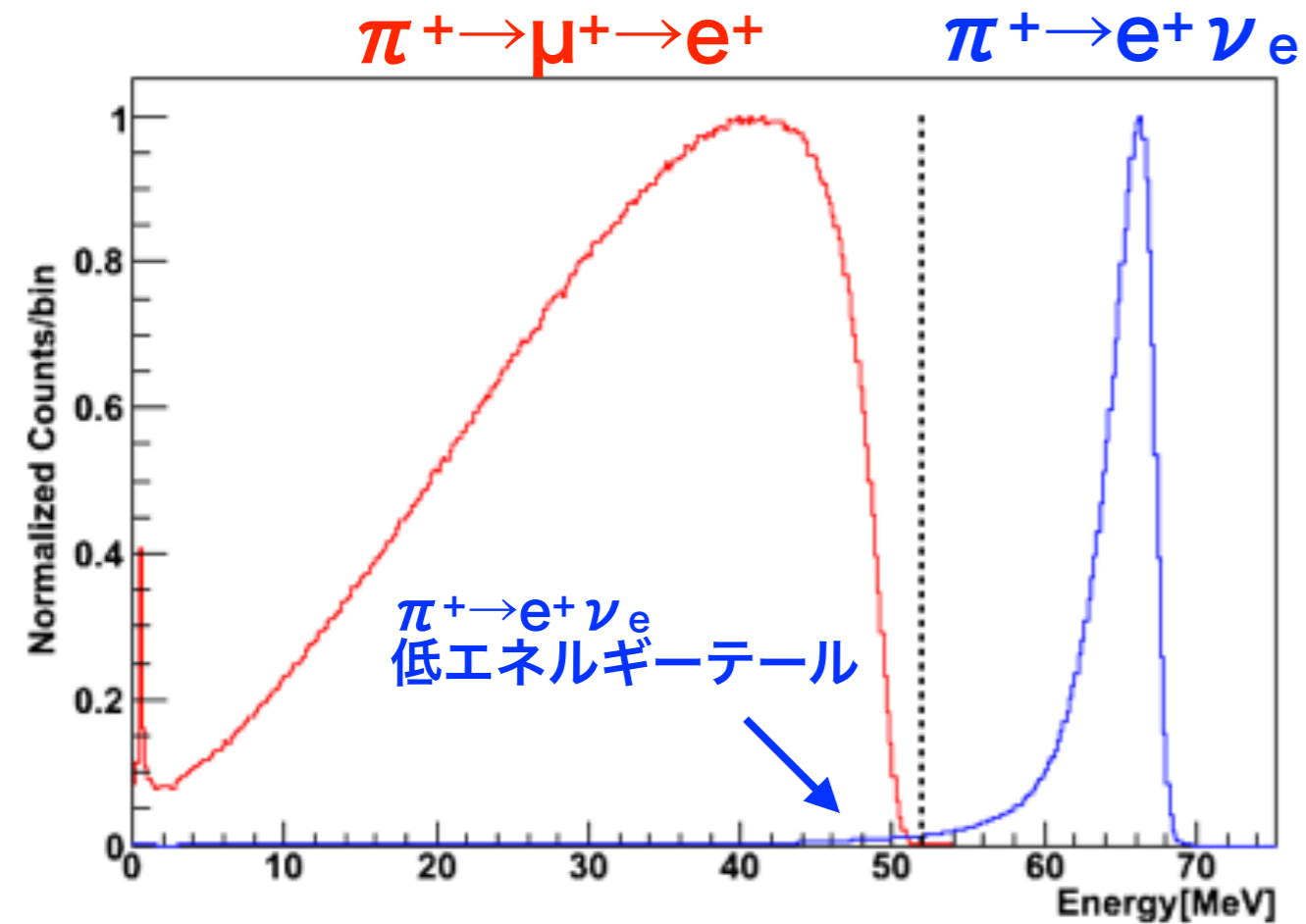
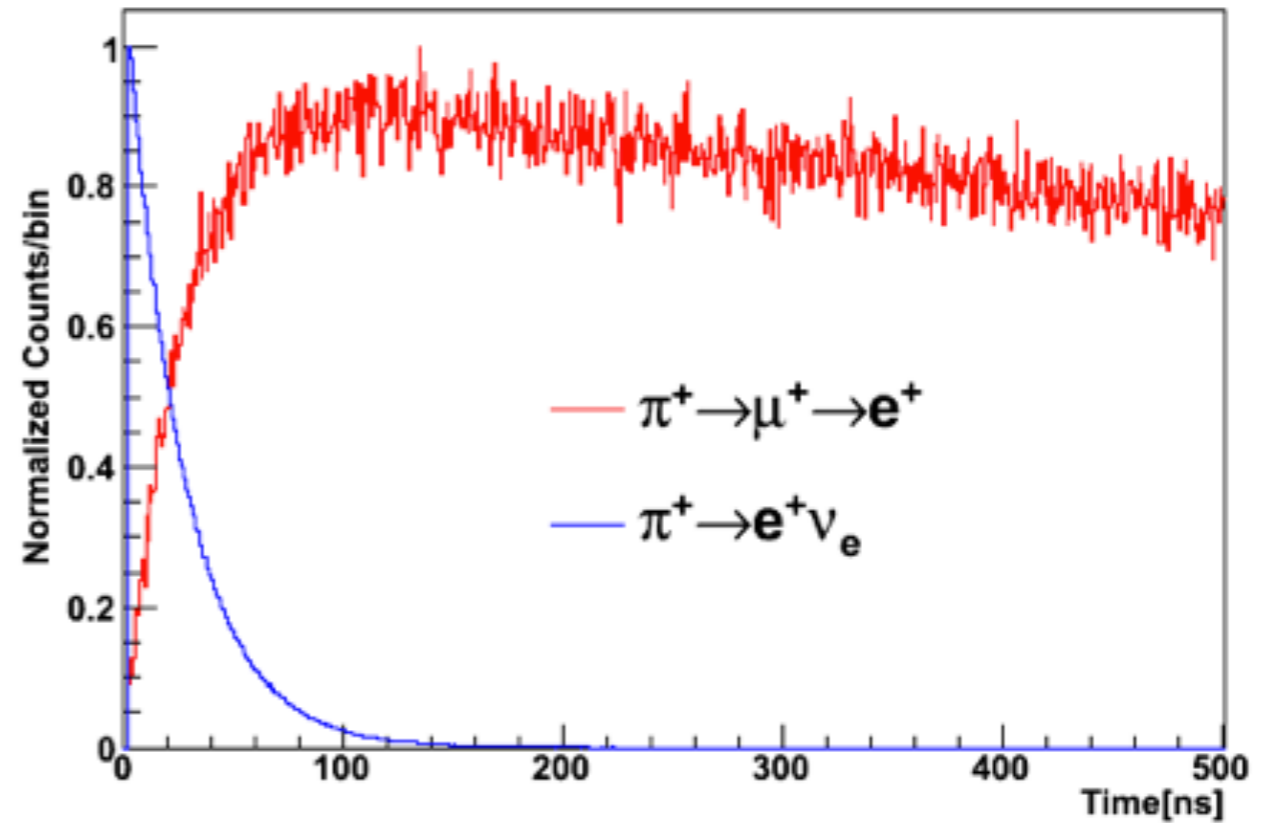
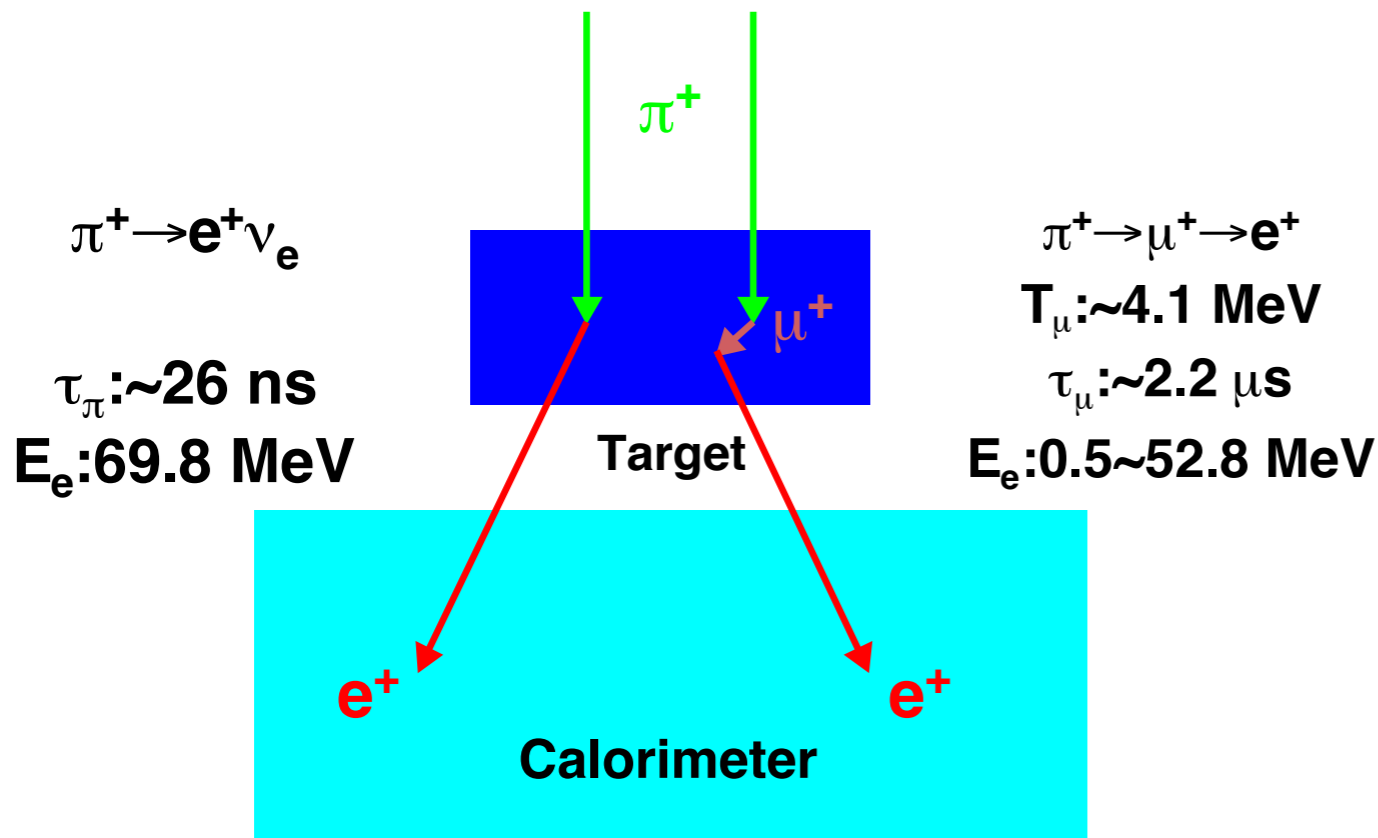


- ・ バックグラウンドB:  $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e + \text{BG}$  (主に $\mu$ -BG)  
→ 波形を見ることで除ける。
- ・ バックグラウンドC:  $\pi \rightarrow \mu \nu \gamma$   
→ 除けない

# Upper Limits on $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu \chi$



# 測定原理



$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$

$$N_{\text{PIMU}} / (\tau_{\mu} - \tau_{\pi}) \times (e^{-t/\tau_{\mu}} - e^{-t/\tau_{\pi}})$$

$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$

$$(N_{\text{PIE}} / \tau_{\pi}) e^{-t/\tau}$$

$$R^{\pi} = \frac{N_{\text{PIE}}}{N_{\text{PIMU}}} \times (1 + \varepsilon)$$

補正前の比  $R_{\text{raw}}^{\pi}$

補正

テール補正等

# Measured Branching Fractions

Table 1.3: Measured pion decay modes [16].

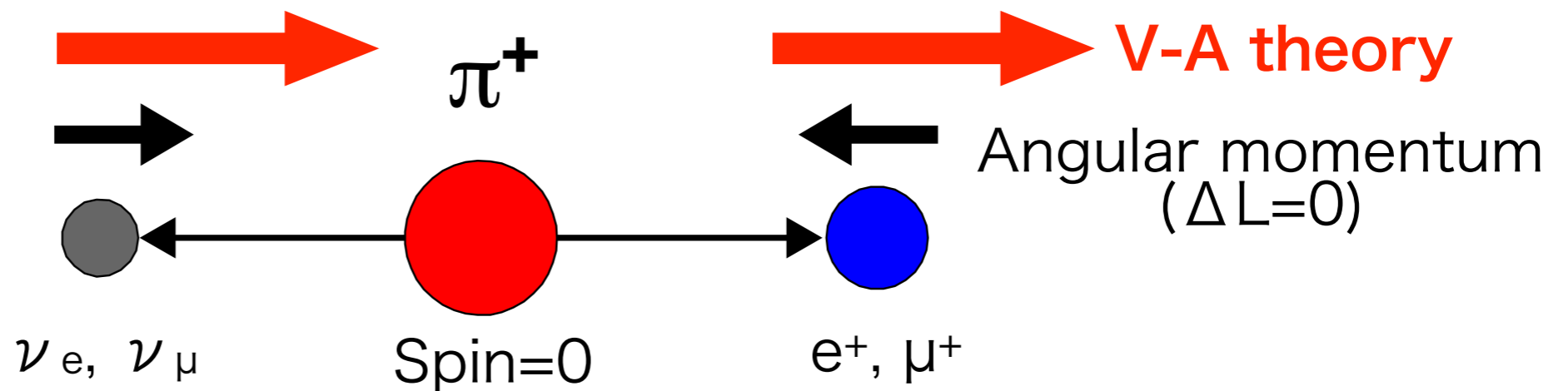
	Decay mode	Fraction ( $\Gamma_i^\pi/\Gamma^\pi$ )
$\Gamma_1^\pi$	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	$0.9998770 \pm 0.00004$
$\Gamma_2^\pi$	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$	$(2.00 \pm 0.25) \times 10^{-4}$ ( $E_\gamma > 1$ MeV)
$\Gamma_3^\pi$	$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$	$(1.230 \pm 0.004) \times 10^{-4}$
$\Gamma_4^\pi$	$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$	$(7.39 \pm 0.05) \times 10^{-7}$ ( $E_\gamma > 10$ MeV)
$\Gamma_5^\pi$	$\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$	$(1.036 \pm 0.006) \times 10^{-8}$
$\Gamma_6^\pi$	$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$	$(3.2 \pm 0.5) \times 10^{-9}$

Table 1.4: Measured muon decay modes [16].

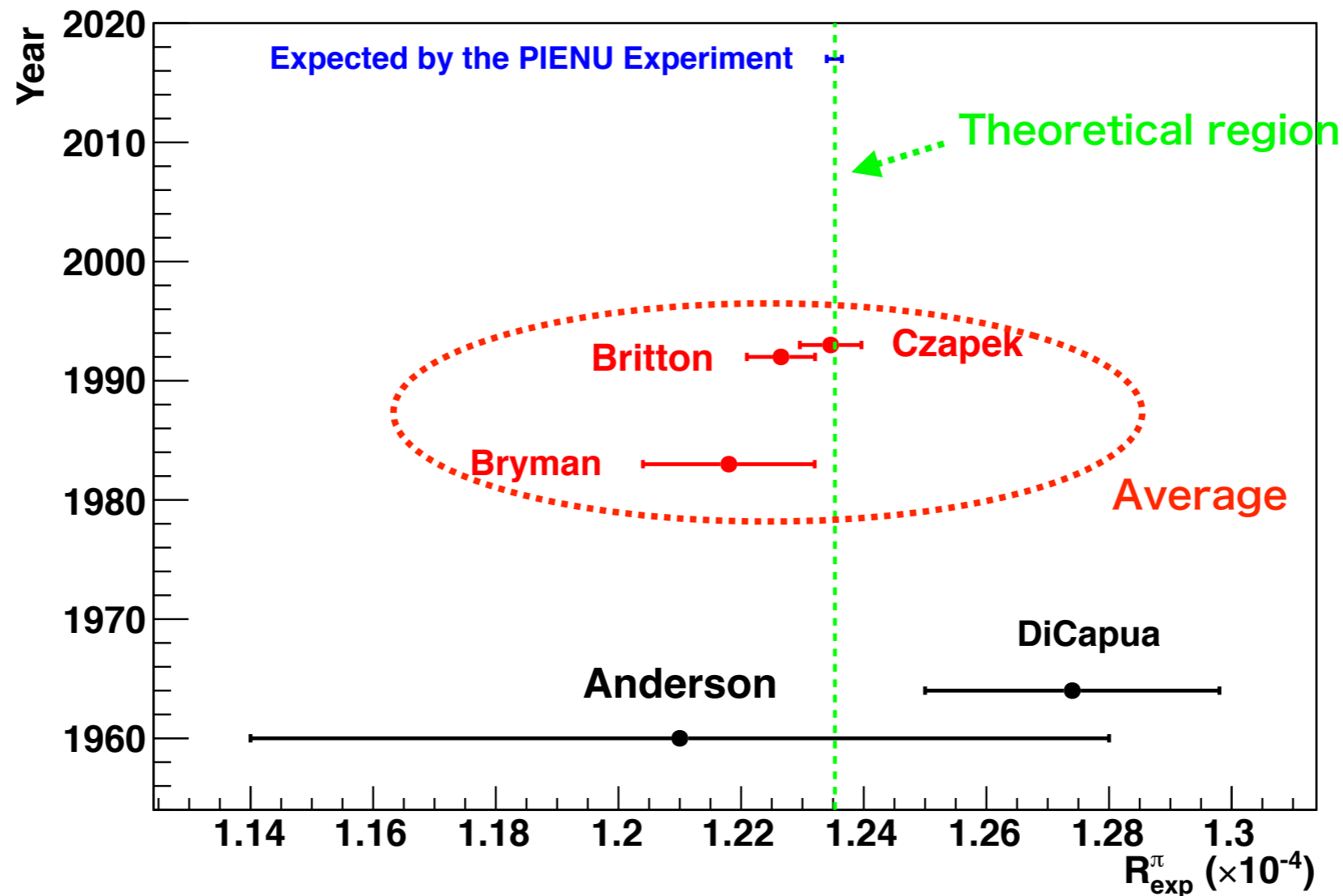
	Decay mode	Fraction ( $\Gamma_i^\mu/\Gamma^\mu$ )
$\Gamma_1^\mu$	$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$	$\approx 100\%$
$\Gamma_2^\mu$	$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \gamma$	$(1.4 \pm 0.4)\%$ ( $E_\gamma > 10$ MeV)
$\Gamma_3^\mu$	$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu e^+ e^-$	$(3.4 \pm 0.4) \times 10^{-5}$

# The Pion Decay in the SM

- Pion was discovered by  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$  decay.
  - $\downarrow$
  - $\rightarrow e^+ \nu_e \nu_\mu$
- **Why don't we see  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$  decay?**
  - $m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$
  - $m_\mu = 105.7 \text{ MeV}/c^2$
- Weak interaction: **V-A theory**
  - Selects left-handed massless particle or right-handed massless anti-particle : neutrino is (assumed to be) massless particle.
  - If positron is massless, positron should be **right-handed**.
    - Actually **not massless** particle, so  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$  decay is allowed.
  - But muon has **~200 times larger mass** than positron
    - $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$  is disfavored: **helicity suppression**.



# $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ 崩壊分岐比の測定の歴史



Experiment:  $R_{\text{AVG}}^{\pi} = (1.230 \pm 0.004) \times 10^{-4}$

SM prediction:  $R_{\text{SM}}^{\pi} = (1.2352 \pm 0.0002) \times 10^{-4}$

理論値に比べて、実験の精度が悪い。  
 PIENU実験(TRIUMF):0.1%よりも高い精度で $R^{\pi}$ を測定

# $R^\pi$ の精密測定のもちベーション

- 新物理が存在すると、

**電子・ミュオン普遍性が破れる。**

$$\frac{R_{\text{SM}}^\pi}{R_{\text{exp}}^\pi} = \frac{g_\mu^2}{g_e^2}$$

- $\pi^+$ による測定は他の実験と比べると精度が高い。

→  $\pi^+$ は最も軽い中間子。

- きれいなパイオンビーム。
- 崩壊過程も少ない。

⇒ **系統誤差が抑えられる。**

→ 過去の実験は20年以上前: **PIENU実験で<0.1%を目指す!!**

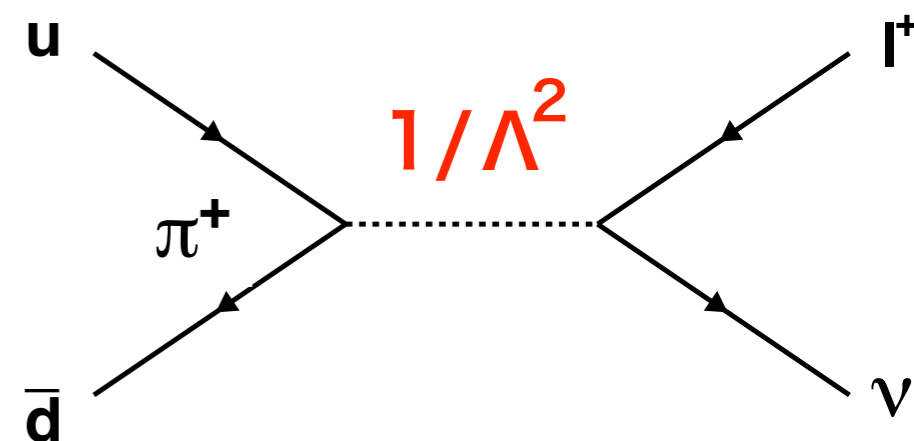
Decay mode	$g_\mu/g_e$
$B_{\pi \rightarrow \mu} / B_{\pi \rightarrow e}$	<b>1.0021 ± 0.0016</b>
$B_{\tau \rightarrow \mu} / B_{\tau \rightarrow e}$	1.0018 ± 0.0014
$B_{B \rightarrow K\mu\mu} / B_{B \rightarrow Kee}$	1.159 ± 0.069
$B_{K \rightarrow \mu} / B_{K \rightarrow e}$	0.996 ± 0.005
$B_{K \rightarrow \pi\mu} / B_{K \rightarrow \pi e}$	1.002 ± 0.002
$B_{W \rightarrow \mu} / B_{W \rightarrow e}$	0.997 ± 0.010

# $R^\pi$ の精密測定のもちベーション

- 特に、擬スカラー作用に感度がある。
- 一般には、 $1/\Lambda^4$ だが、V-A currentと擬スカラー作用が干渉して

$$1 - \frac{R_{\text{exp}}^\pi}{R_{\text{SM}}^\pi} \approx \frac{\sqrt{2}\pi}{G_F} \frac{1}{\Lambda^2} \frac{m_\pi^2}{m_e(m_d + m_\mu)}$$

$$\approx \left( \frac{1 \text{ TeV}}{\Lambda} \right)^2 \times 10^3$$



C.Campbell and D. Maybury,  
Nucl.Phys.B 709, 419 (2005)

D. Bryman et al., Ann. Rev.  
Nucl. Part. Sci. 61 331 (2011)

→ 0.1%の精度で**1000 TeVの擬スカラーのエネルギースケール**

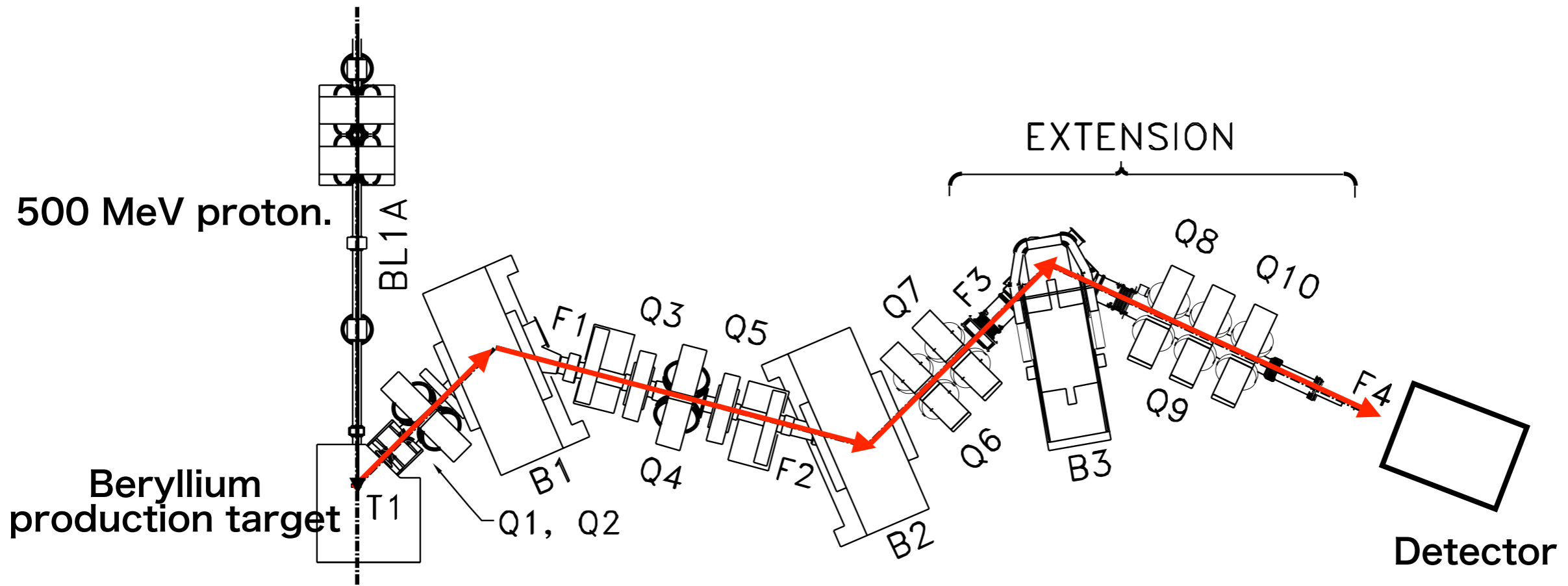
- 擬スカラーの例
  - R-Parity violation SUSY
  - Leptoquark.
  - Charged Higgs.
- その他: Massive neutrino

M. J. Ramsey-Musolf et al.,  
Phys. Rev. D76, 095017, (2007)

O. Shanker, Nucl. Phys.  
B, 204(3), 375-386 (1982)

D. Bryman et al., Ann. Rev.  
Nucl. Part. Sci. 61 331 (2011)

# The TRIUMF Beam Line for the PIENU



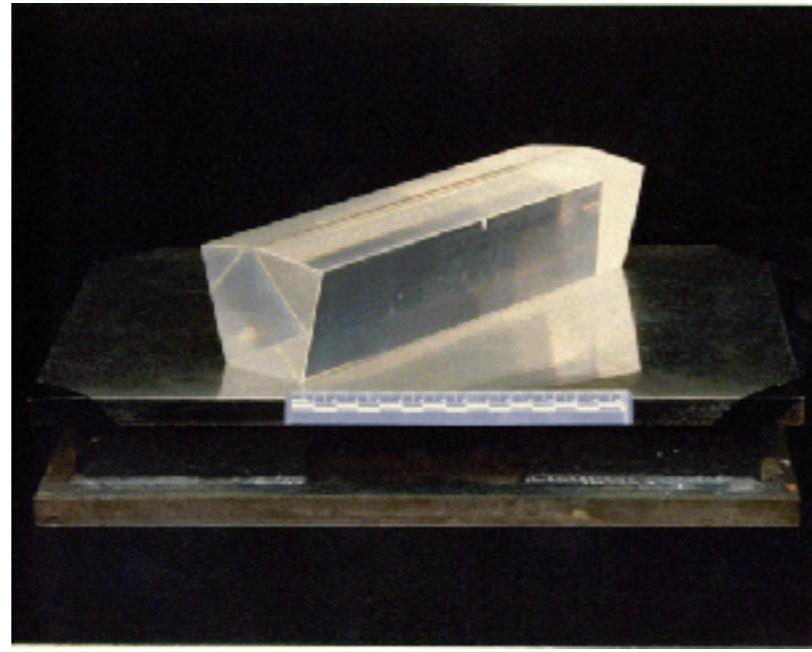
- TRIUMF M13 beam line.
- To increase the detector acceptance, the beam line was updated.
  - Added one more bending magnet → **<1/10 of beam positron.**
  - The detector was located at the exit → **x10 larger acceptance.**

- ✓ Beam rate: 70 kHz
- ✓ Beam momentum:  $75 \pm 1$  MeV/c
- ✓  $\pi : \mu : e = 84 : 14 : 2$

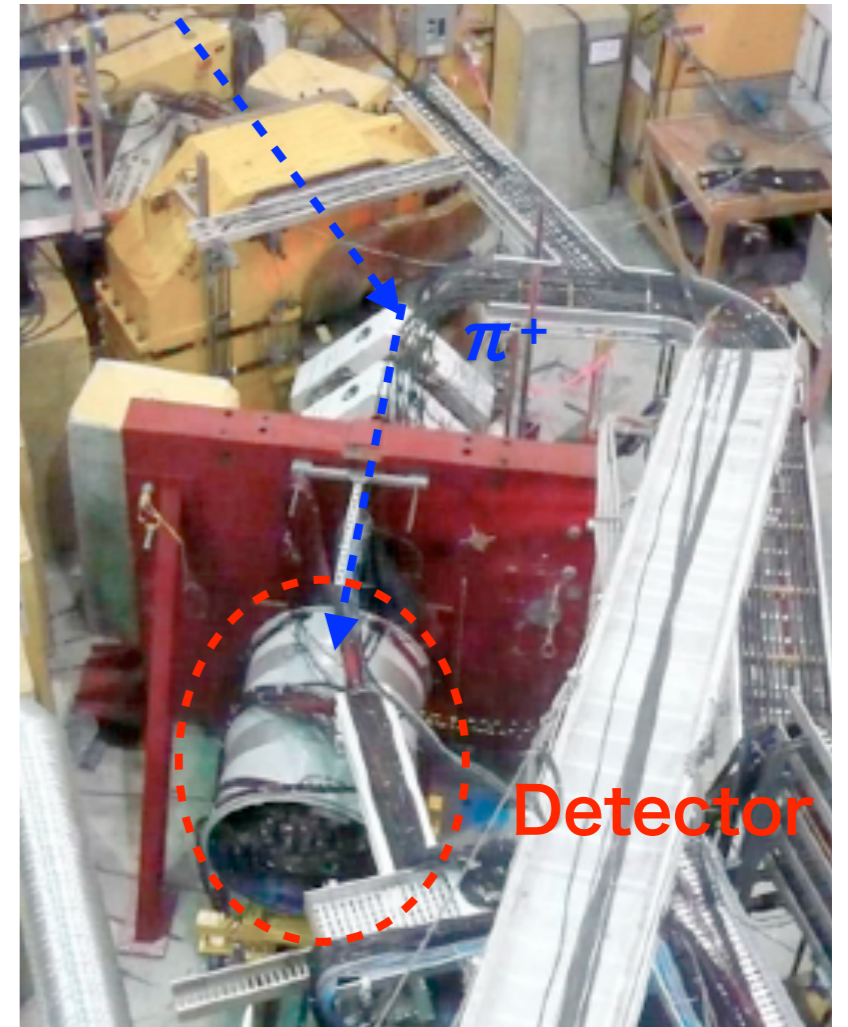
Nucl. Instrum. Methods., A  
609 102 (2009)



NaI



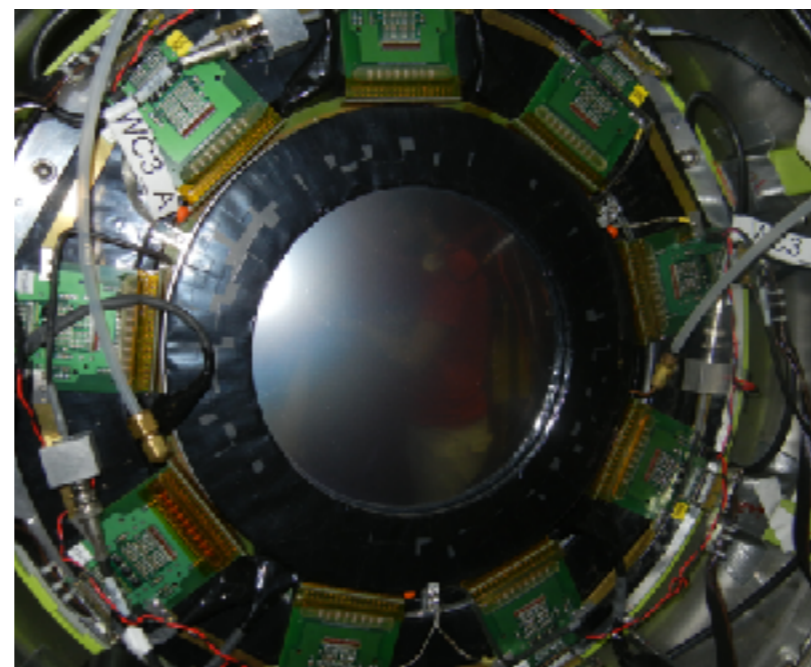
1 CsI crystal



Detector

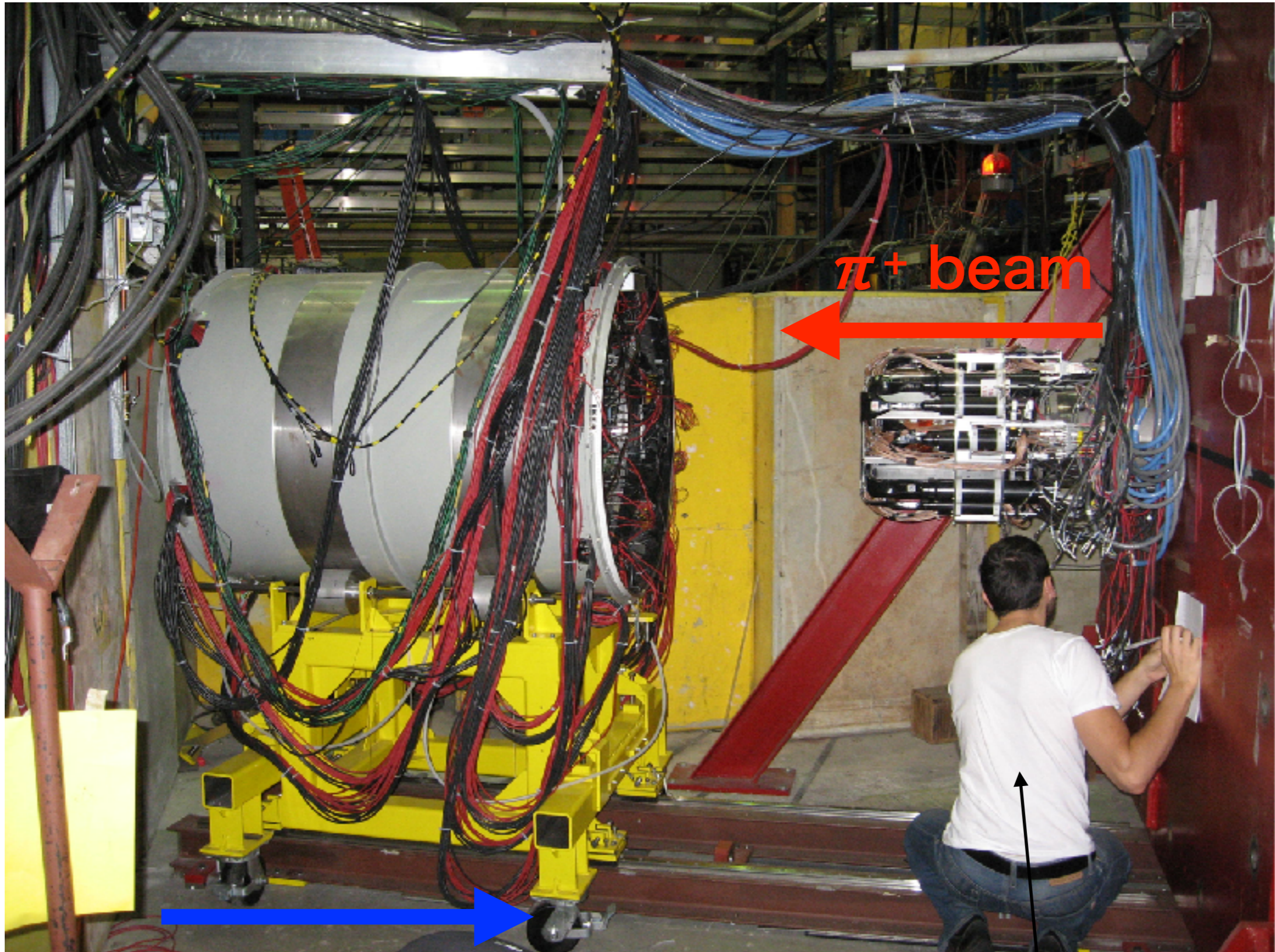


Scint + Si Strip



WC3

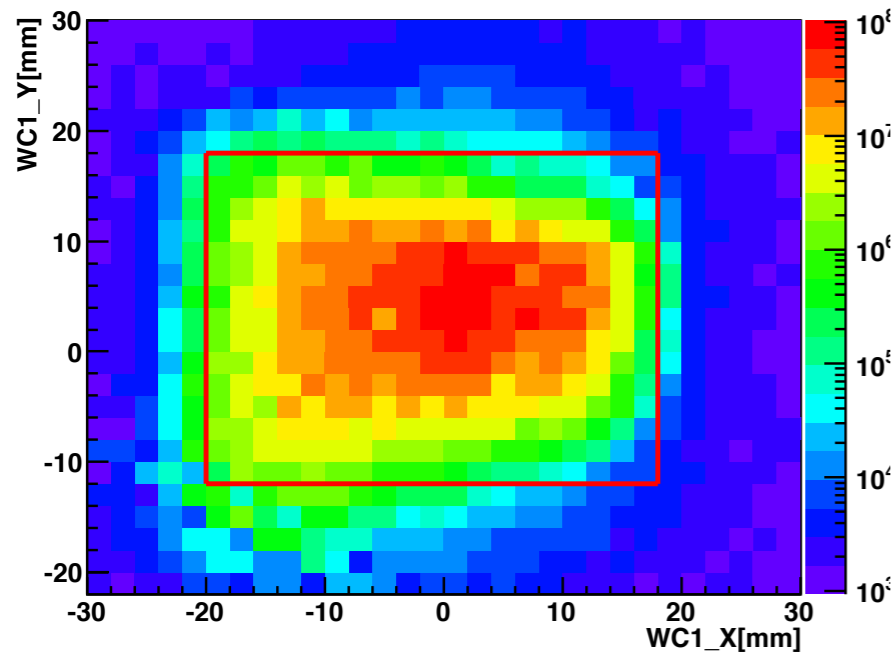
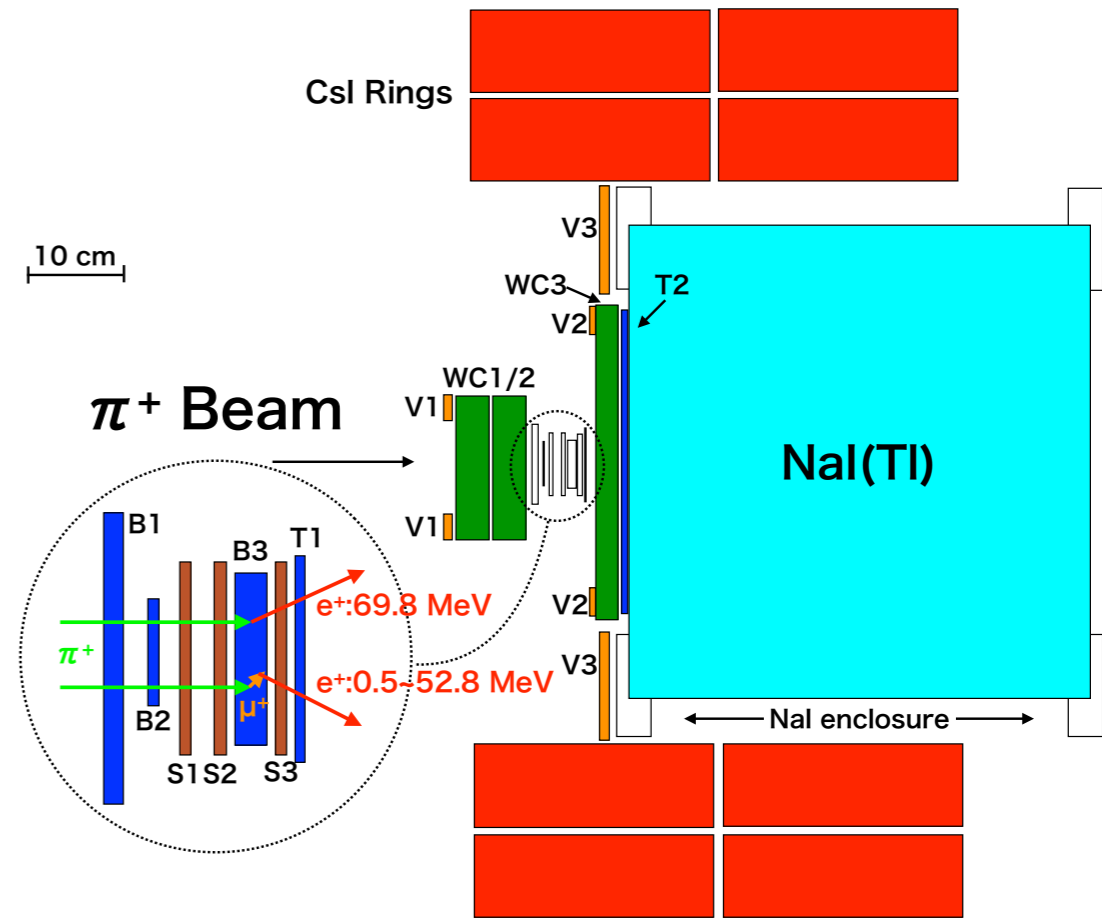
# The PIENU Detector



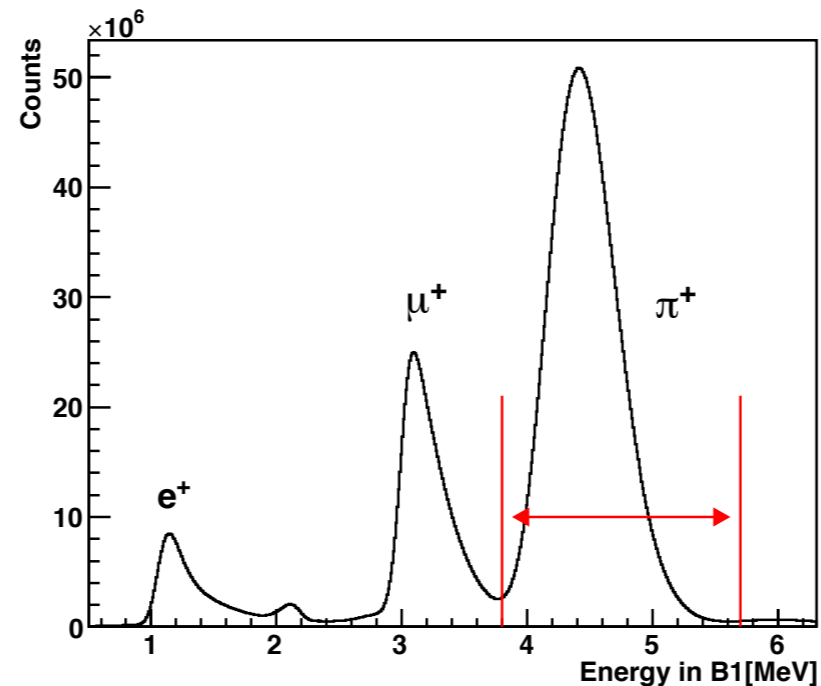
Move the detector assembly during beam time.

# Event Selection Cuts

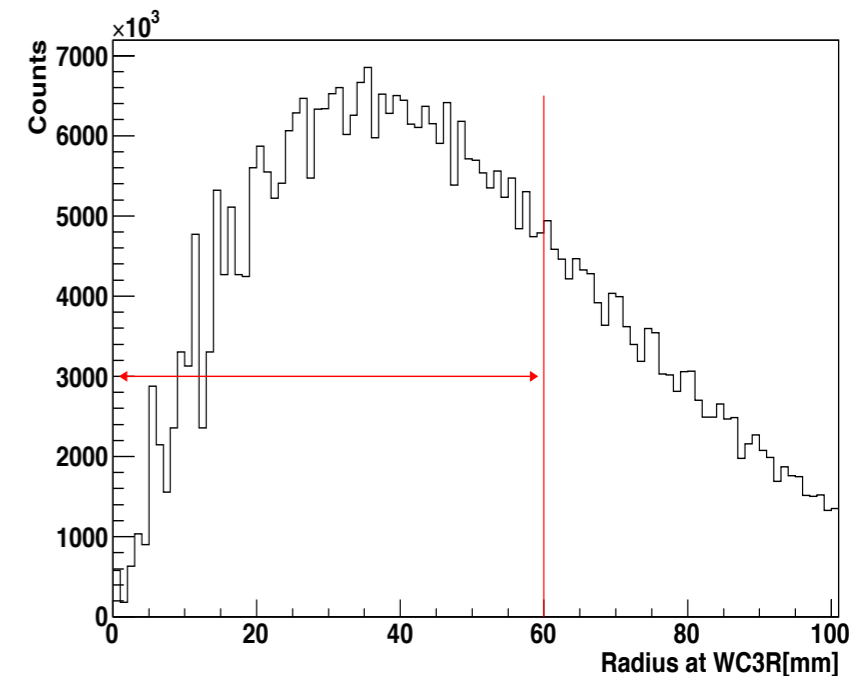
- Beam tracking in WC1 and WC2
- Energy in B1 and B2
- Single hit requirement in B1, B2, T1, and T2.
- Radius cut at WC3, decay positron was reconstructed by S3 and WC3.



Pion tracking at WC1

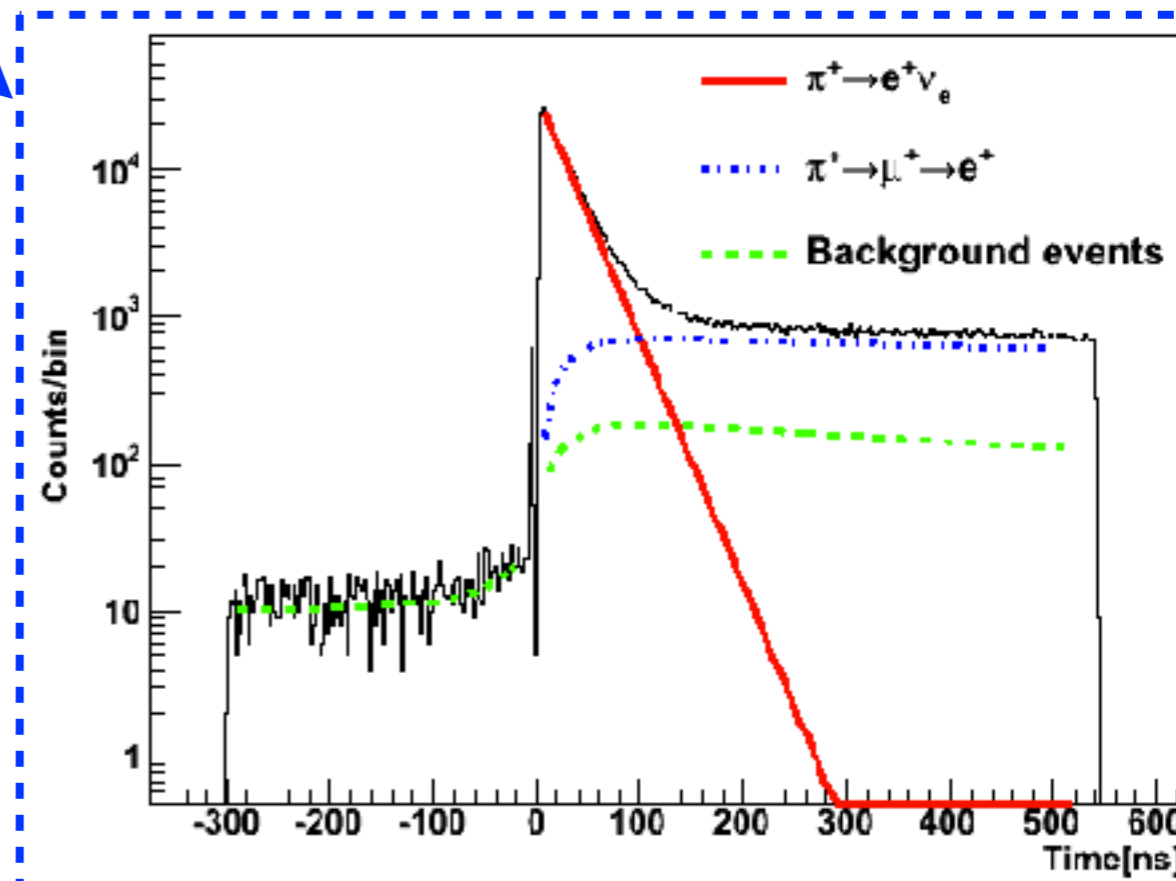
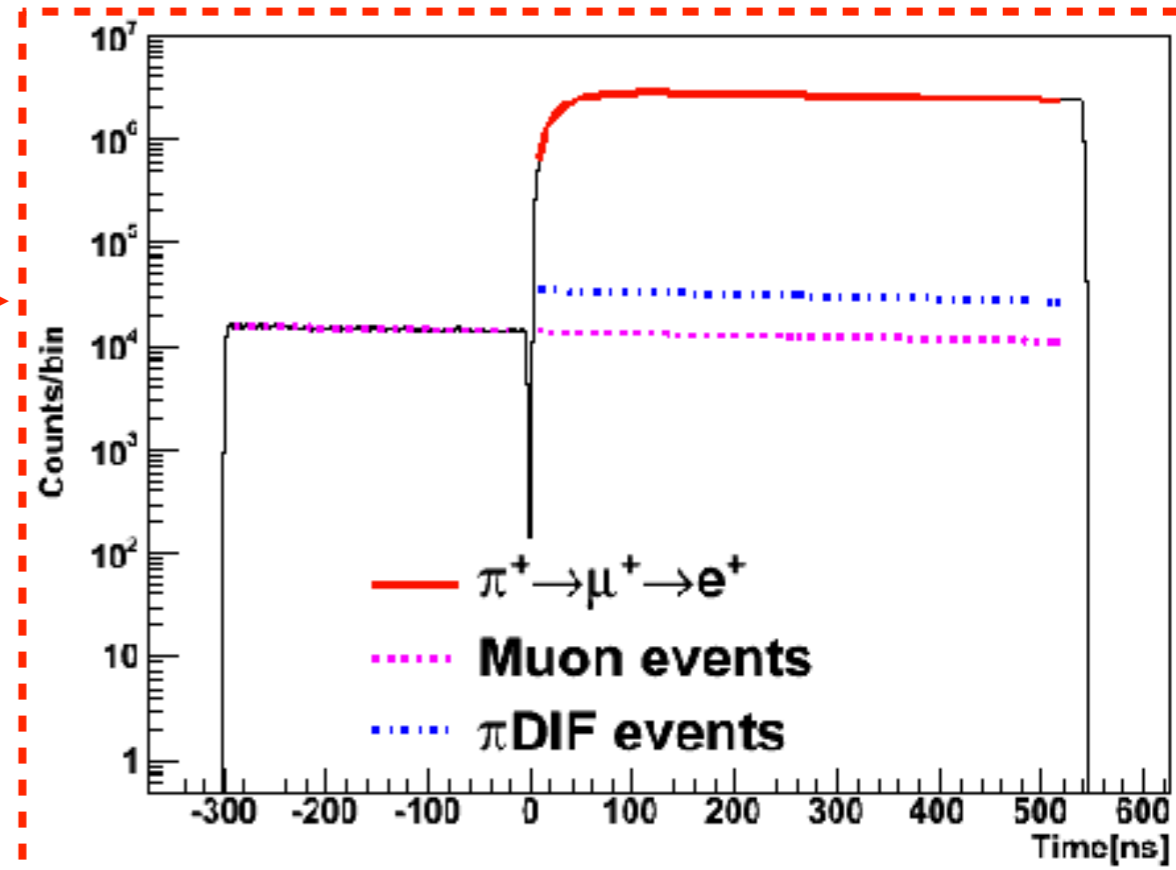
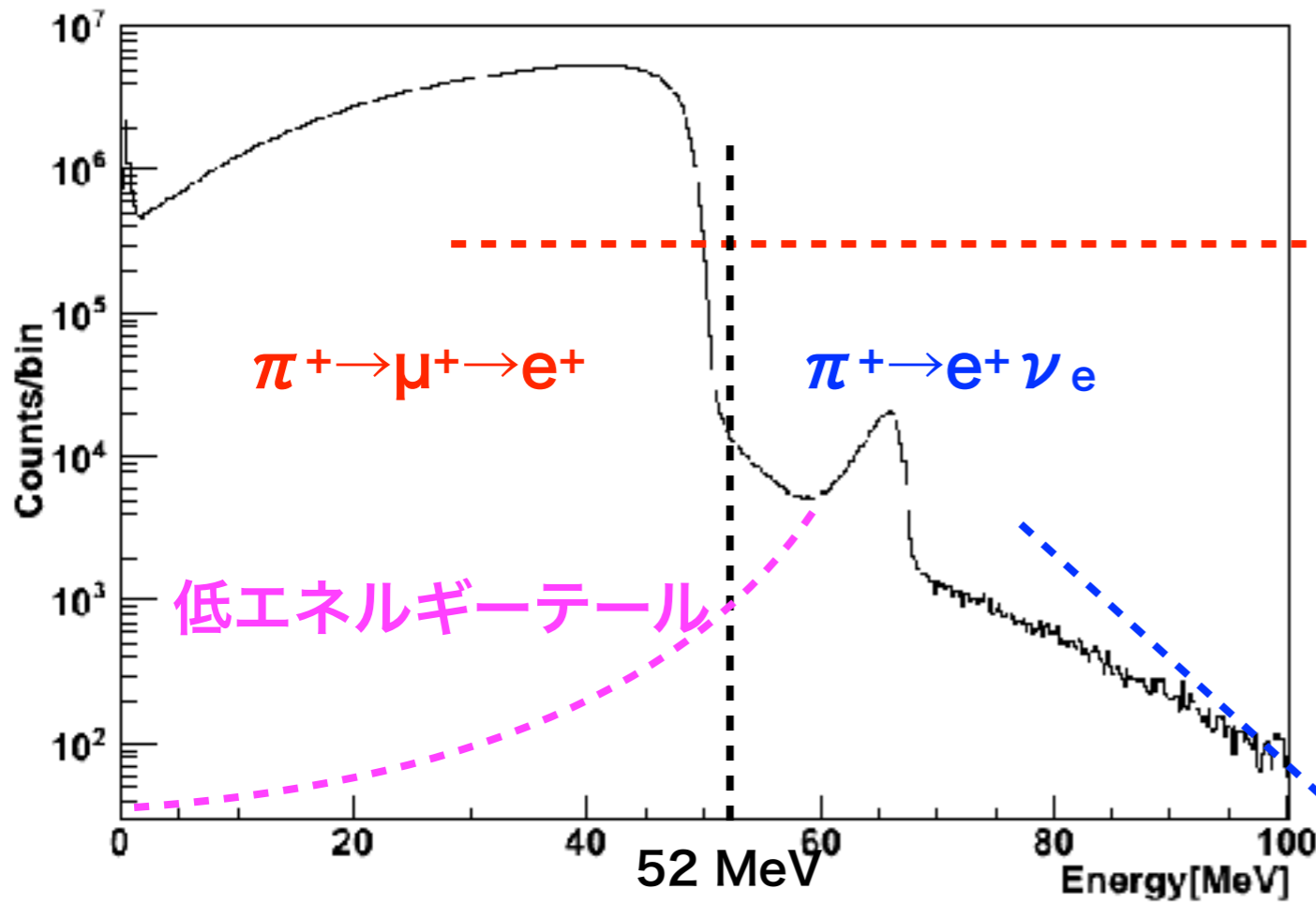


Energy in B1  
30



Reconstructed  
radius for  $e^+$  at WC3

# 時間スペクトラム解析



- データセット: 2010年11月
- 約 $4 \times 10^5$   $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$  イベント
- 両時間スペクトラムを同時にフィット

$$R_{\text{raw}}^{\pi} = (1.1972 \pm 0.0022 \pm 0.0005) \times 10^{-4}$$

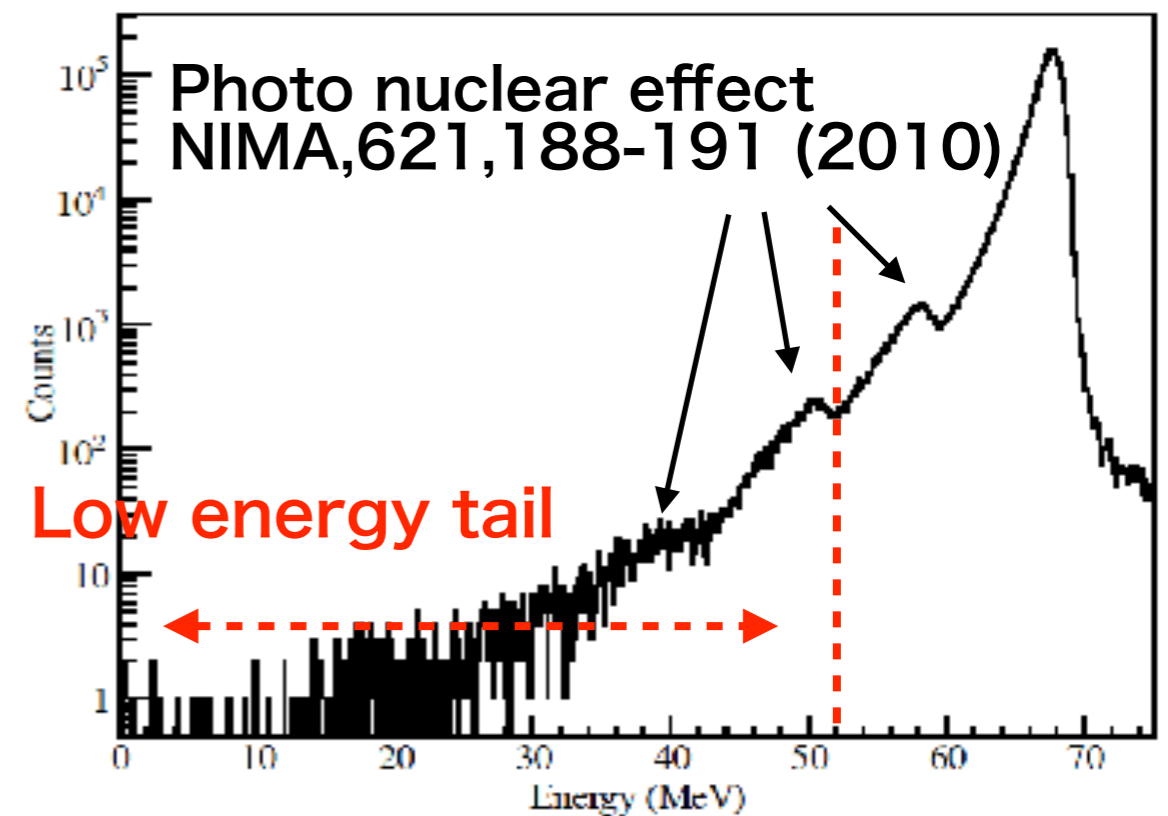
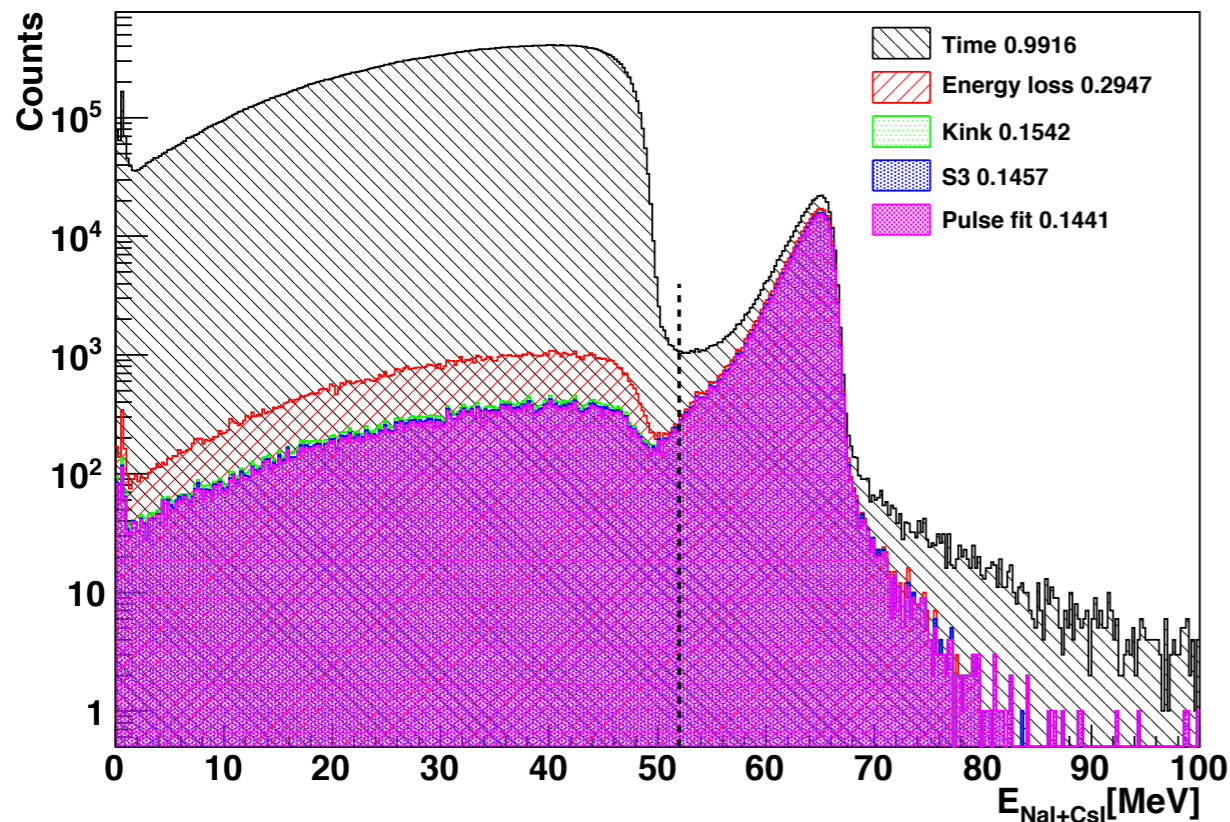
(統計誤差)                      (系統誤差)

➡ テール補正等を加える。

# テール補正

- 低エネルギー  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$  テールの補正: 最も支配的
- Photo-nuclear effectによりMCでテールがうまく再現できない。  
→ **実験データを用いた評価が必要。**
  - 実際のパイオンデータを使用。  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$  を抑制。
  - 単色の陽電子ビームを用いた特別データ。実験的にテールを得る。

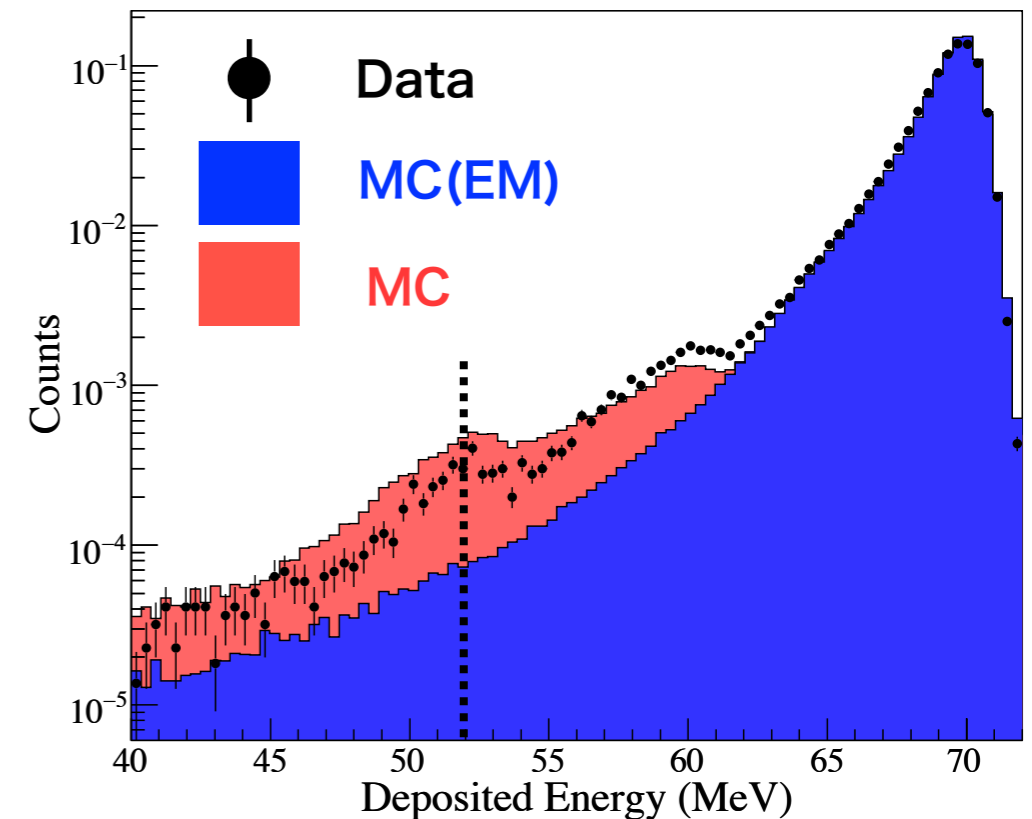
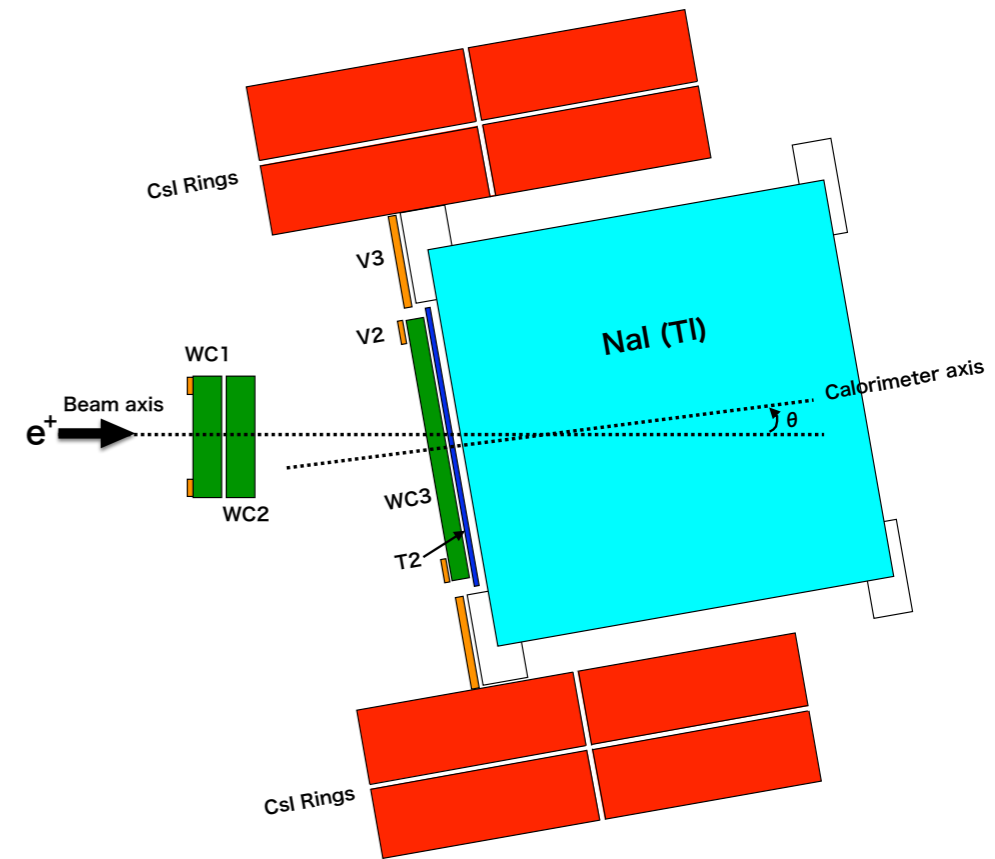
**テール量:  $N_{<52 \text{ MeV}}/N_{\text{all}} = (3.07 \pm 0.12)\%$**



# Photo-Nuclear Effect

- Using 70 MeV positron beam to understand low energy tail empirically.
- There are additional bumps below peak.
  - Photo-nuclear effect.
    - $\gamma$  was absorbed by iodine.
    - Neutrons were emitted.
    - Binding energy  $\sim 8$  MeV.
    - This process was confirmed by MC.
- However, not completely reproduced.
- Photo-nuclear effect was also present when measuring  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ .

→ Need empirical estimation.



# 議論 -電子・ミューオン普遍性-

$$\frac{R_{\text{SM}}^\pi}{R_{\text{exp}}^\pi} = \frac{g_\mu^2}{g_e^2} \rightarrow \frac{g_\mu}{g_e} = 1.0004 \pm 0.0012$$

世界最高精度!!!

