

PIENU実験における ヘビーニュートリノの探索

岡山大学 伊藤慎太郎



PI E NU

目次

- ・ π^+ の物理とPIENU実験
- ・ ヘビーニュートリノ探索について
- ・ 測定方法、解析手法
- ・ 結果
- ・ まとめと今後



PI E NU

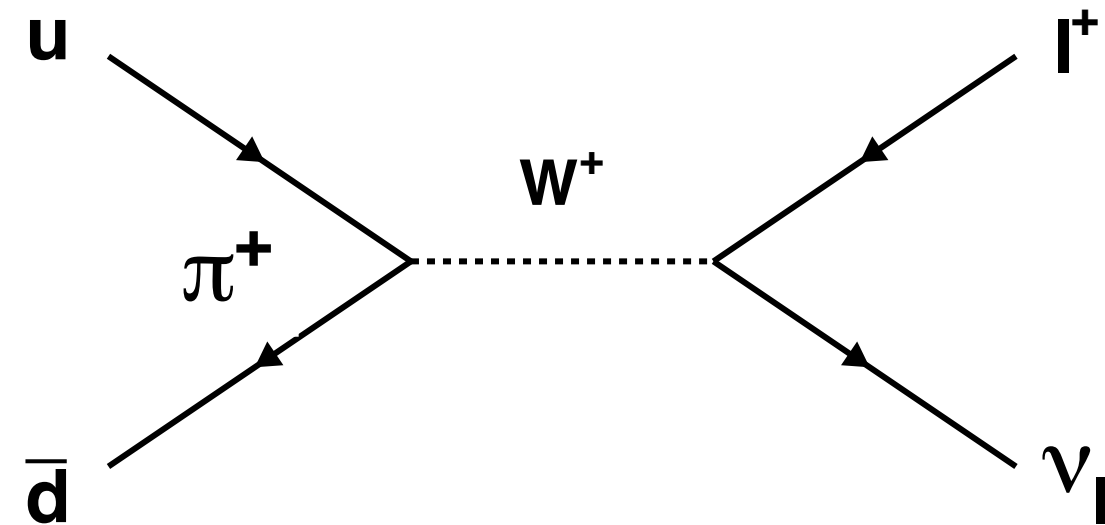
π^+ の崩壊

- π^+ の崩壊分岐比の比 R^π は標準理論(V-A理論)では

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

- 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、

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



- ➔ 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。

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

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

- ✓ 検出器の改善により、統計量は過去の実験の30倍以上。
- ✓ 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。
- ✓ 間もなく全統計量を用いた R^π 解析が完了する。

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

- 一方で、これまでに蓄積されたパイオンデータの解析は、他の新物理の探索に非常に感度が高い。
- 本講演は、パイオン崩壊によるヘビーニュートリノの探索の話。

ヘビーニュートリノの探索

・ もし、ヘビーニュートリノ(ステライルニュートリノ等)が存在すれば

1. R_π が標準理論からずれる。

- R_π の測定から求める。

- より高い感度で直接ヘビーニュートリノを探索するには、、、

2. Extra peakが見えるはず。

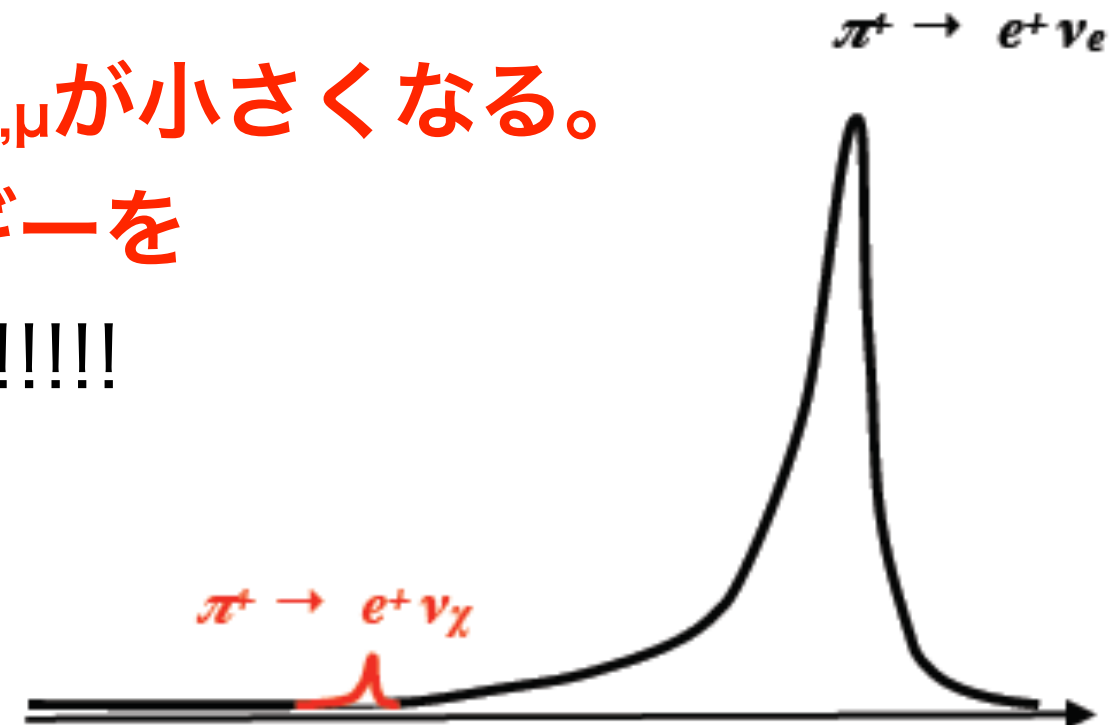
なぜなら、 $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ は二体崩壊だから。

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

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

- ヘビーニュートリノがあると、 **$T_{e,\mu}$ 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)!!!!**



理論的背景

- ・ ステライルニュートリノ
 - 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入れる。

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

- ・ k世代足すと、混合行列Uを用いて、

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

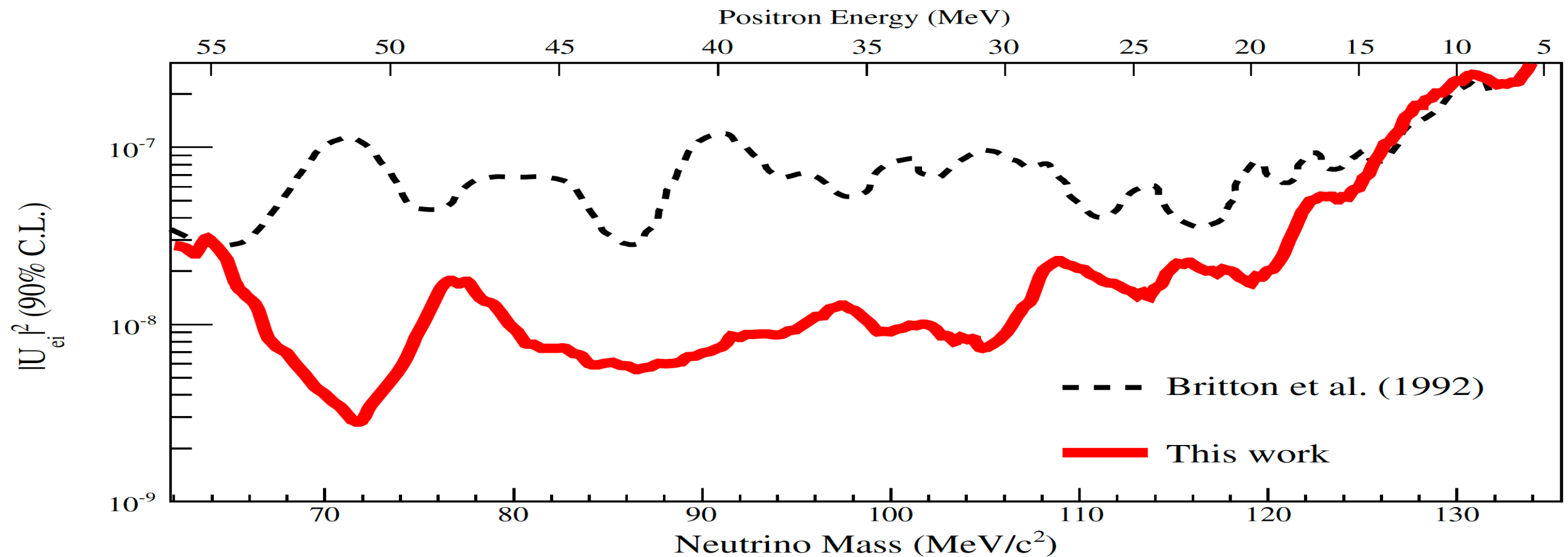
- ・ 通常の $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ と $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_i$ の分岐比は、 U_{li} を用いて、

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

$$\delta_e = m_e^2 / m_\pi^2, \delta_i = m_i^2 / m_\pi^2 \quad (\mu \text{ も同様})$$

- ・ 例: ν MSM (k=3)

$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_H$ について



- 2018年、 $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_H$ の探索が完了した。
→ 過去の実験よりも一桁改善。

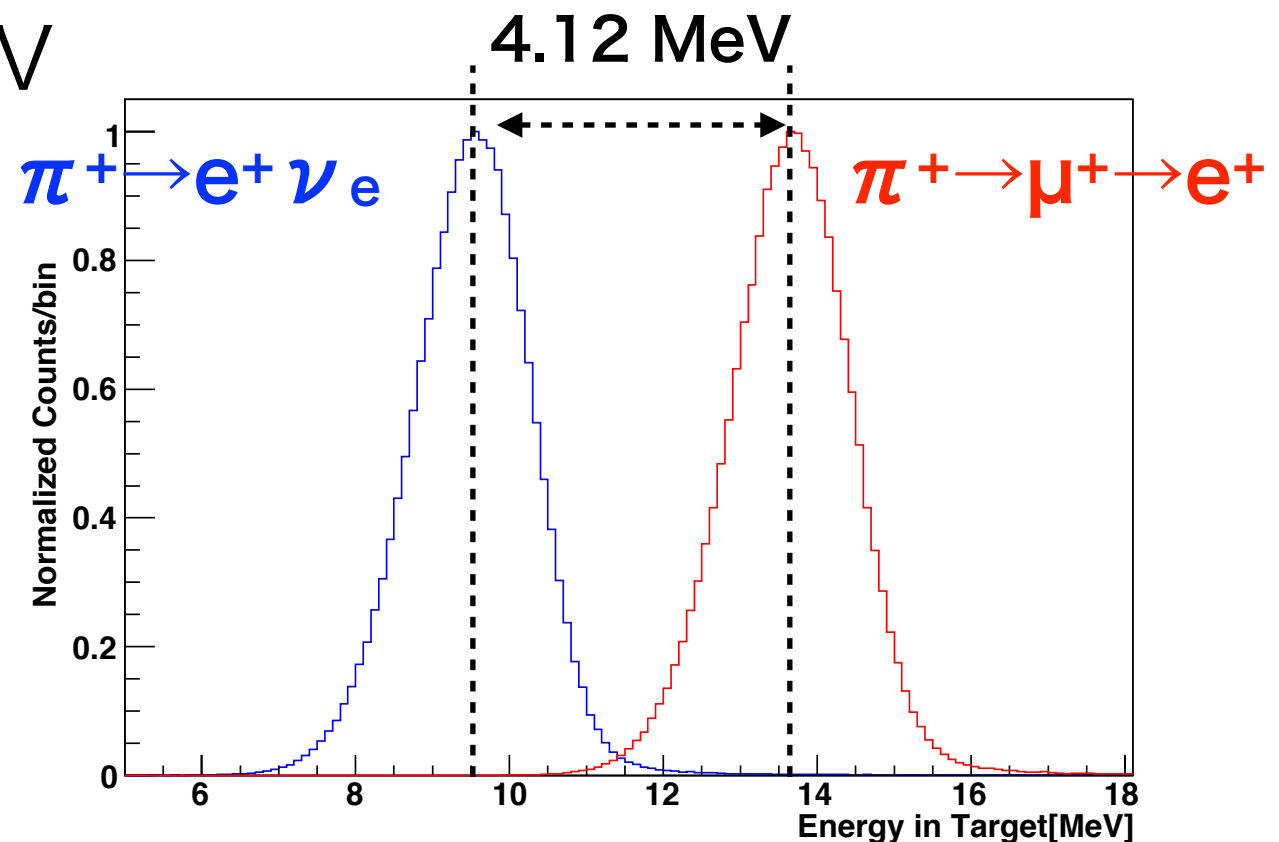
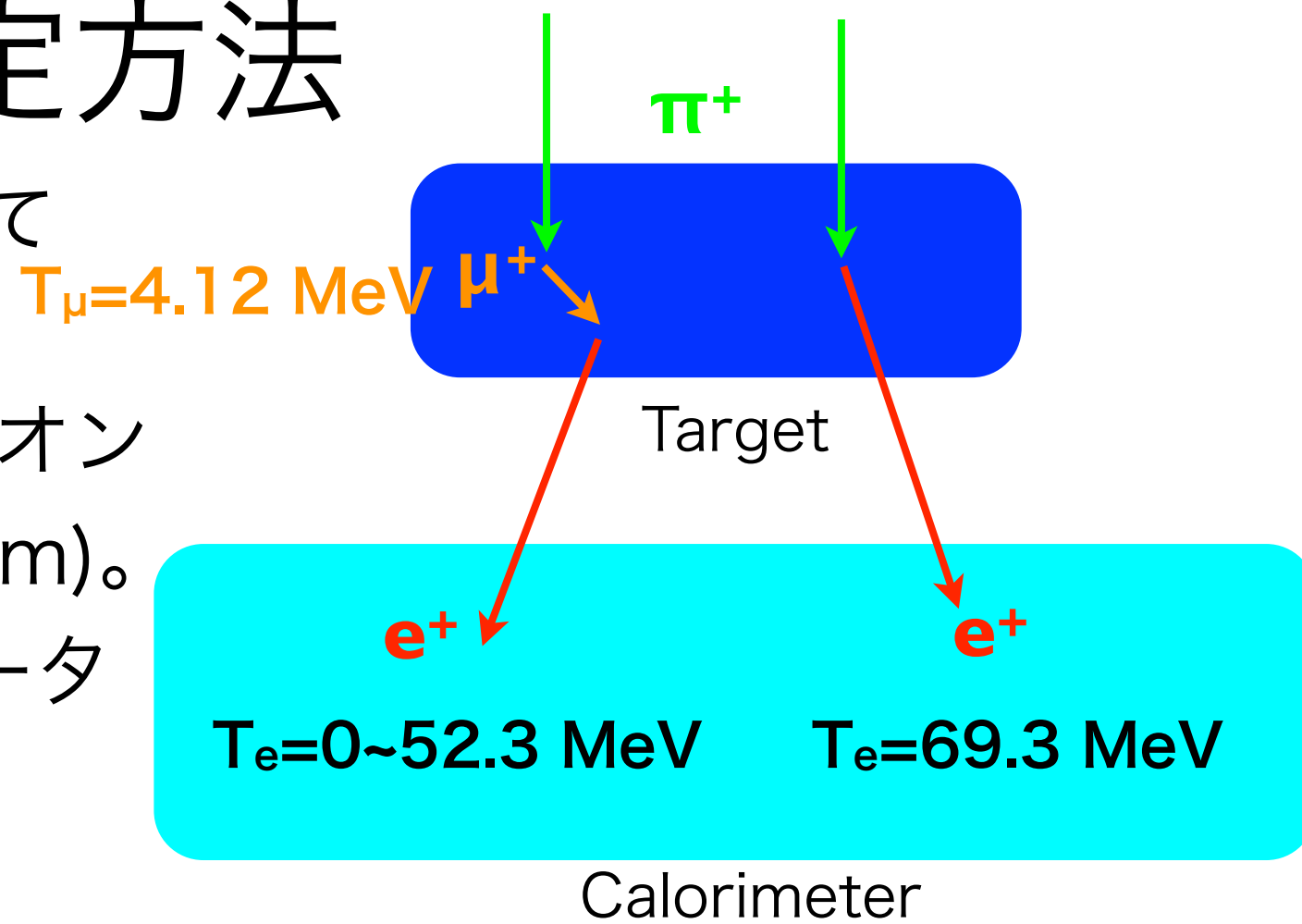
A. Aguilar-Arevalo et al, Phys. Rev. D. 97 072012, (2018)

- 今日は、 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ についての講演。

測定方法

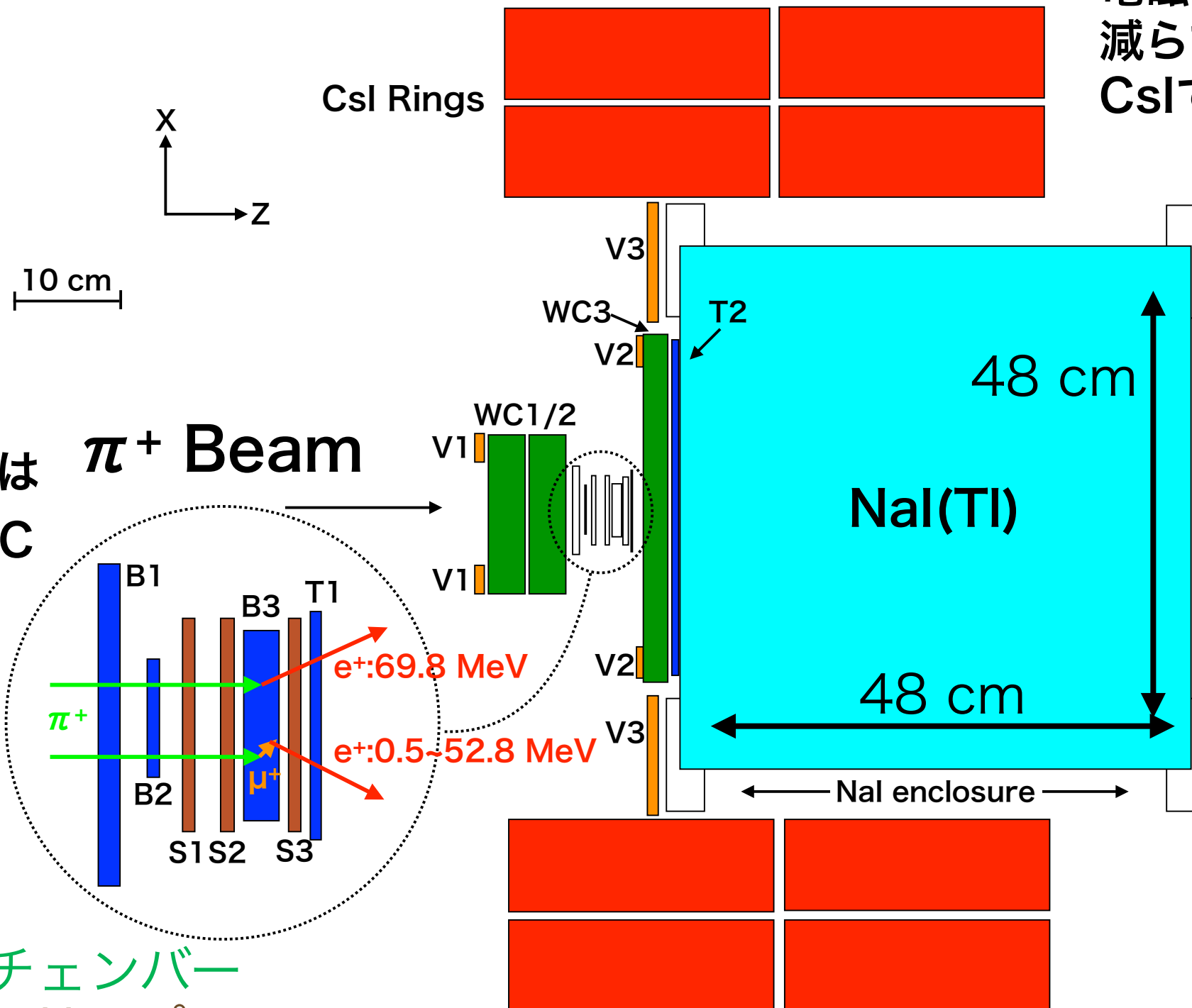
- π^+ ビームをターゲットに止めて崩壊させる。
- $T_\mu=4.12$ MeVなので、ミューオンもターゲット内に止まる(~ 1 mm)。
- 放出された陽電子をカロリメータで測定する。
 - $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ は $T_e=69.3$ MeV
 - $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$ は $T_e=0 \sim 52.3$ MeV ($\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ chain)

ターゲットの情報により、
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。



巨大な単結晶のNaI(Tl)で陽電子を測定。

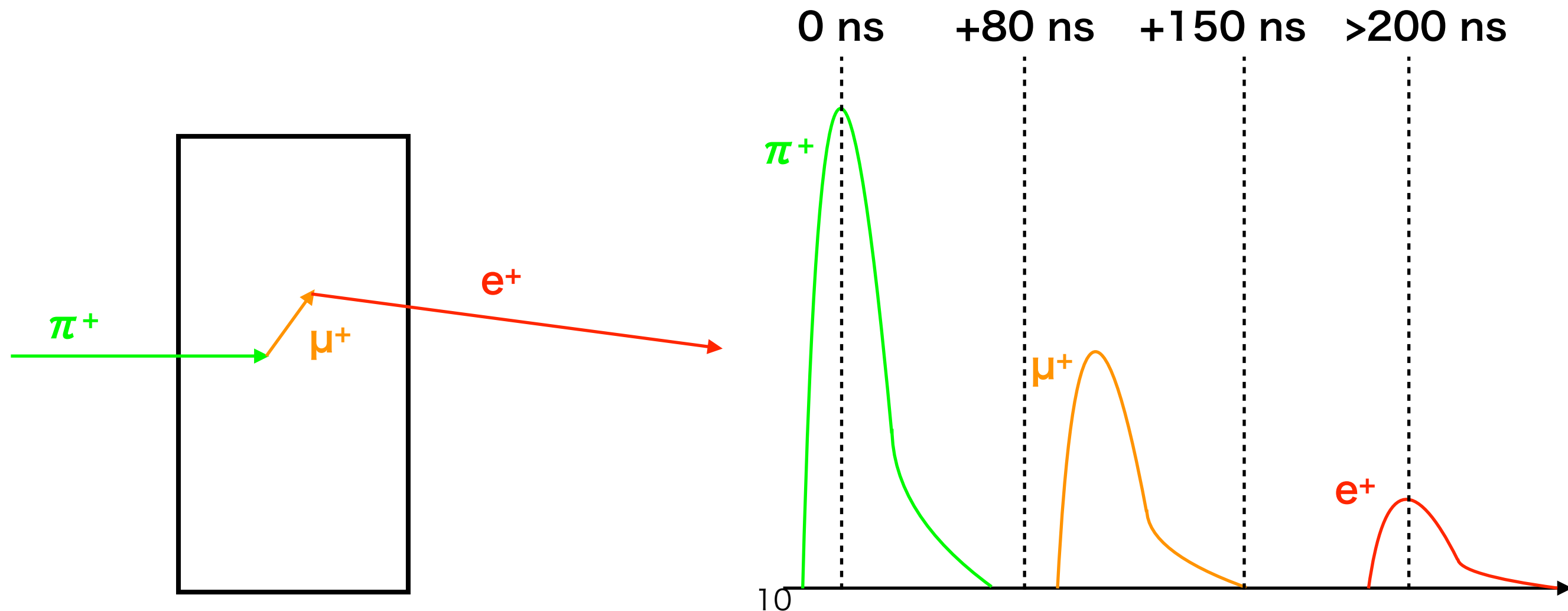
ターゲット(B3)は500 MHz FADCで波形を記録

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)

$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\chi$ の探索 — その1 —

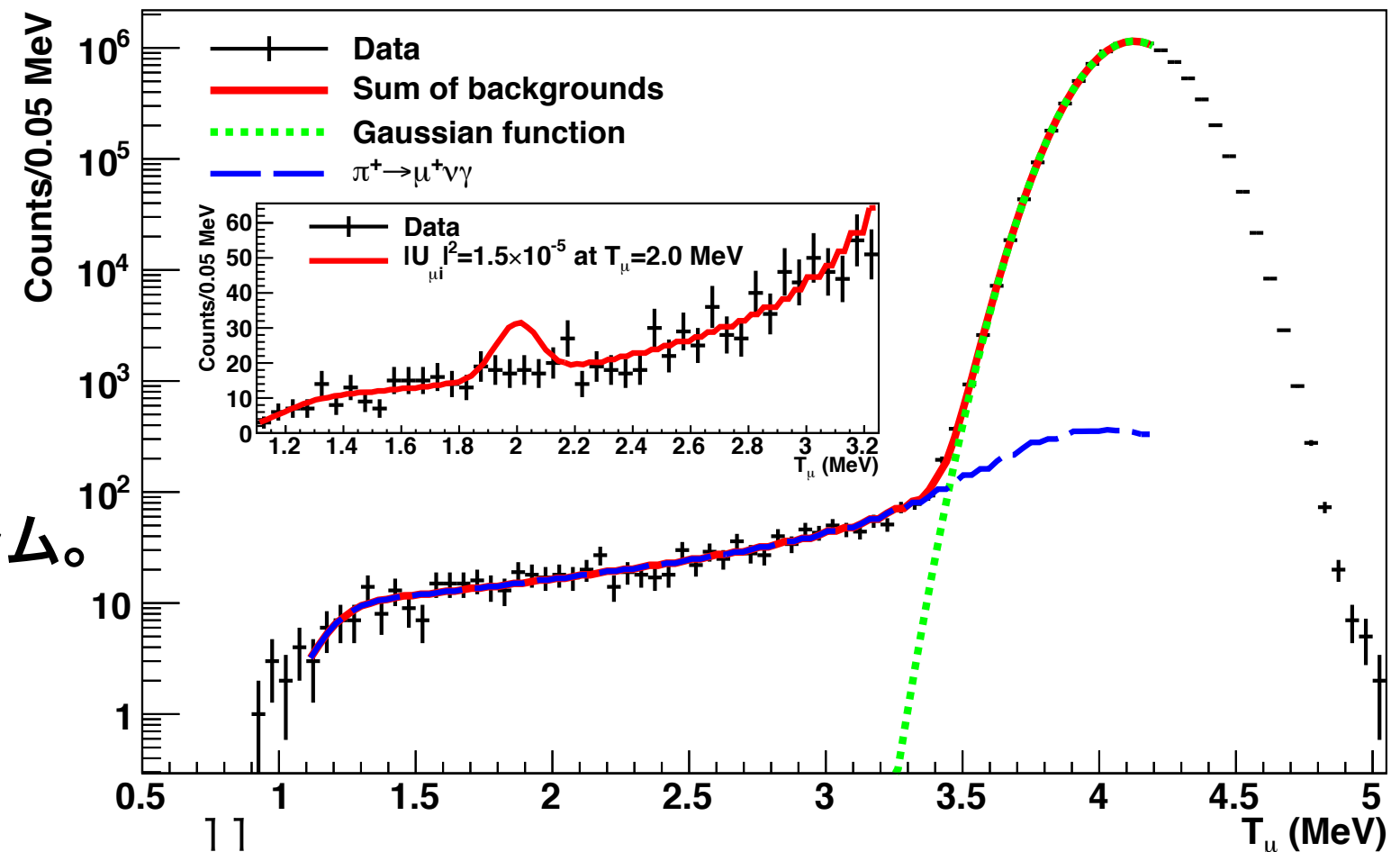
- ターゲット中の $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ のパルスは 500 MHz Flash-ADC で記録されている。⇒ **μ^+ の波形を見ることで、探索する。**
- 1つ目 (π^+)、3つ目 (e^+) のパルスが μ^+ の波形に影響しないタイムウィンドを設定。
- 2つ目のパルスが $T_\mu = 4.12$ MeV よりも低ければ、それは**ヘビーニュートリノによるもの!!!!**



$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\chi$ の探索 — その1 —

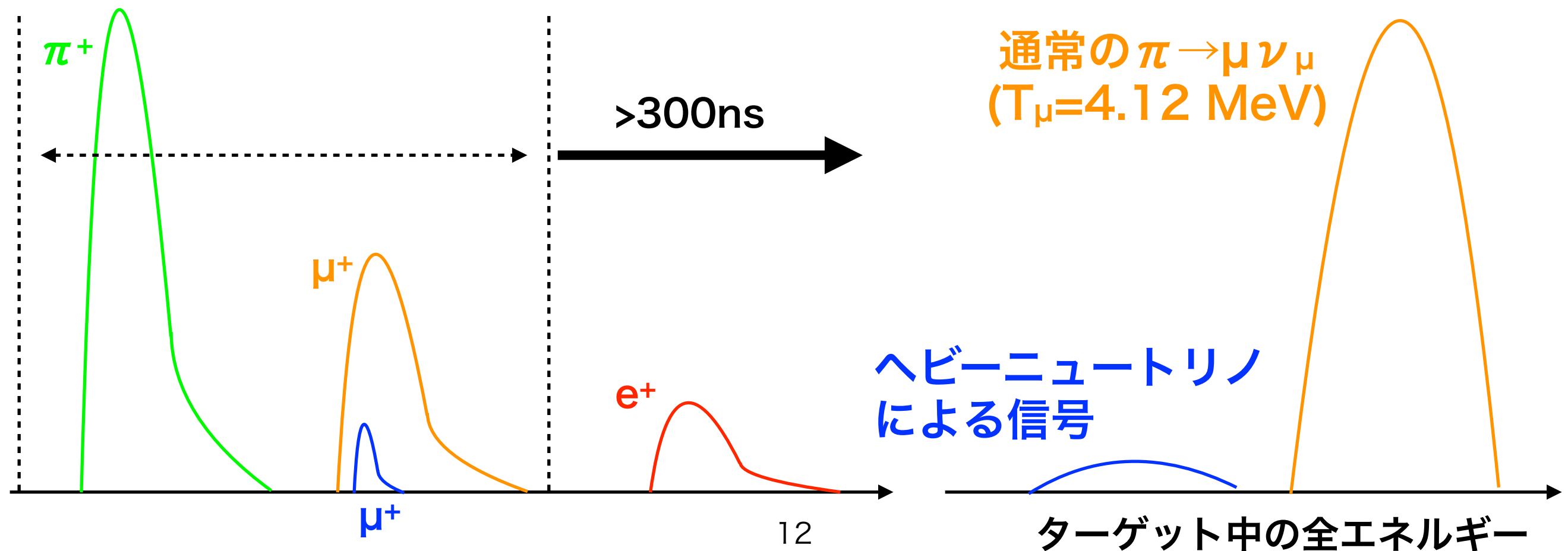
- 過去の実験 (Abela et al., Phys. Lett. 105B. 263 1981) では、アクシデンタルなバックグラウンド (主にミューオン) が支配的。
- PIENU 実験では、**500 MHz Flash-ADC** でターゲットの波形を記録していたため、精密な波形解析が可能になり、**アクシデンタルなバックグラウンドが大幅に除去できた** (残りは $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$)。
- メインピーク (ガウシアン、4.12 MeV) と $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$ (MC)、そして信号 (ガウシアン) の関数でフィットして、ピークを探す。
- 探索領域: 1.2 ~ 3.3 MeV

ミューオンのエネルギースペクトラム。
 $|U_{\mu i}|^2 = 1.5 \times 10^{-5}$ at $T_\mu = 2.0 \text{ MeV}$
($m_\nu = 24 \text{ MeV}/c^2$) を仮定。



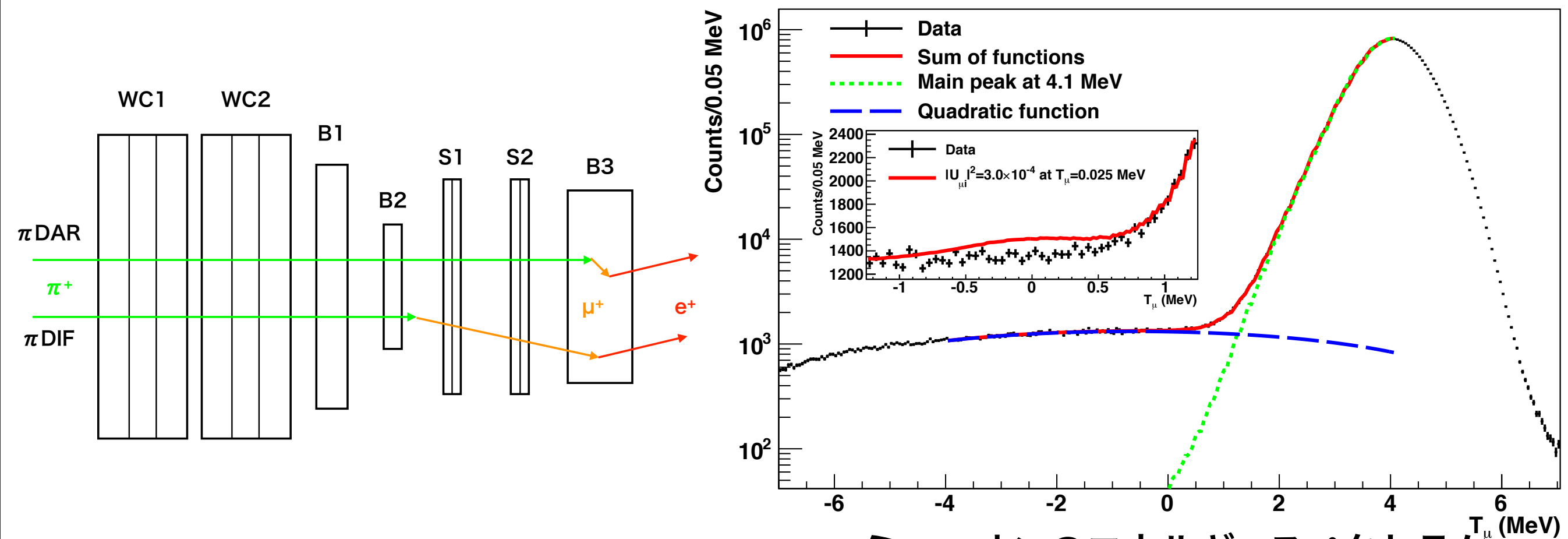
$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\chi$ の探索 —その2—

- パルスサーチのアルゴリズムの関係で、波高が低いパルス (1.2 MeV以下) はエフィシエンシが悪く、探索できない。
- エネルギーの低いパルス (つまり、より重いニュートリノ) を探索すべく、以下の手法により、解析を行った。
 - ターゲット中の陽電子のパルスより前を全て積分する ($\pi + \mu$)。
 - メインピークを4.12 MeVにシフトさせる。
 - メインピーク以下の領域で、ピークを探す。



$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\chi$ の探索 —その2—

- ・ 支配的なバックグラウンドは π DIF 事象。
- ・ WC とシリコンストリップにより、過去の実験 (Byman and Numao, Phys. Rev. D53 558 1996) よりも、 **π DIF 事象を半減することに成功した。**
- ・ 0~1.2 MeV の領域を探索。



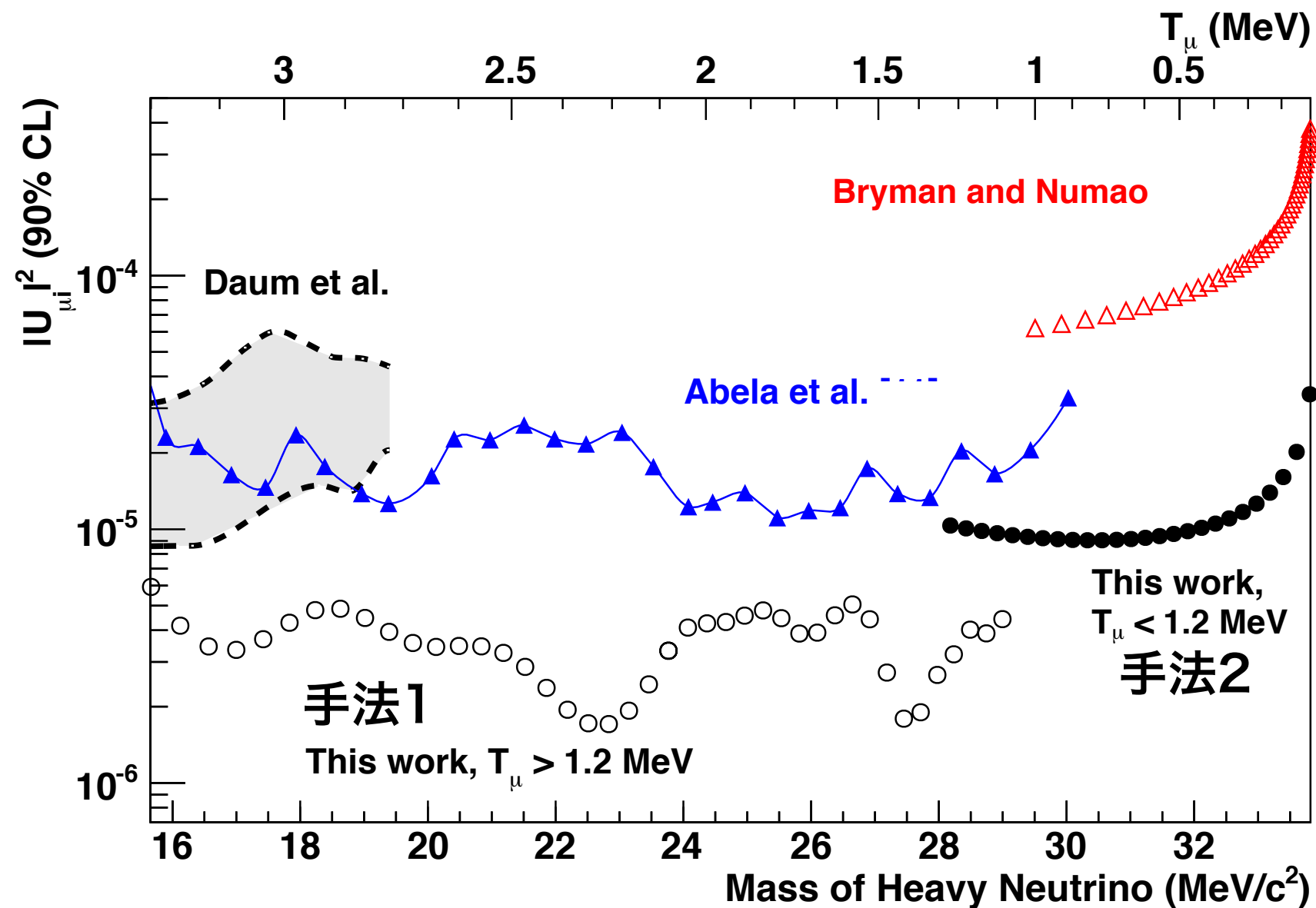
ミューオンのエネルギースペクトラム。

$|U_{\mu i}|^2 = 3.0 \times 10^{-4}$ at $T_\mu = 0.025$ MeV

($m_\nu = 33.8$ MeV/ c^2)を仮定。

結果

- 15.7~33.8 MeV/c²の質量領域を探索したが、残念ながら有為な信号は見られなかった。
- 上限値(90% CL)は過去の実験よりも1桁改善された。**
- すでに、Phys. Lett. Bに投稿済み。 arXiv: 1904.03269



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30倍以上あり、新物理の探索に非常に有効である。
- ・ ヘビーニュートリノを伴うパイオンの崩壊過程 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ の探索を行った。
- ・ 残念ながら、有為な信号は見られなかったが、 $|U_{\mu i}|^2$ の上限値を一桁改善した。
- ・ 今後もパイオンデータを用いた、新物理事象の探索を継続する。

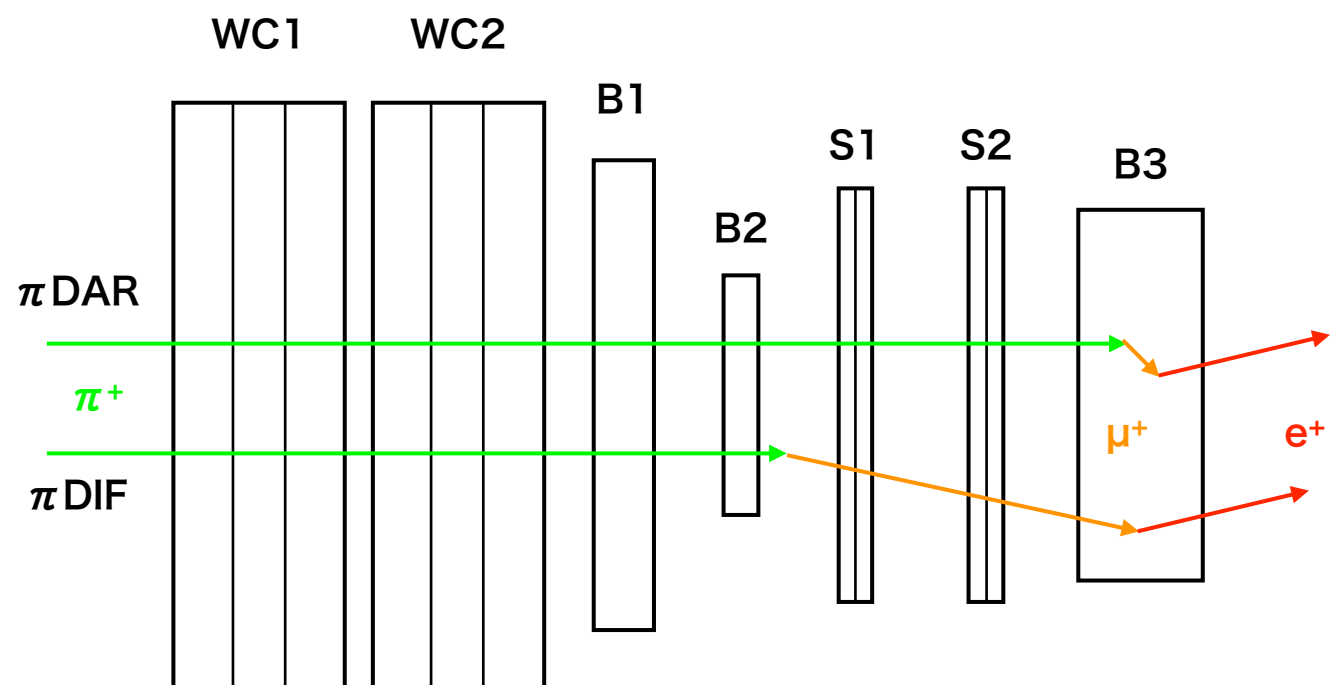
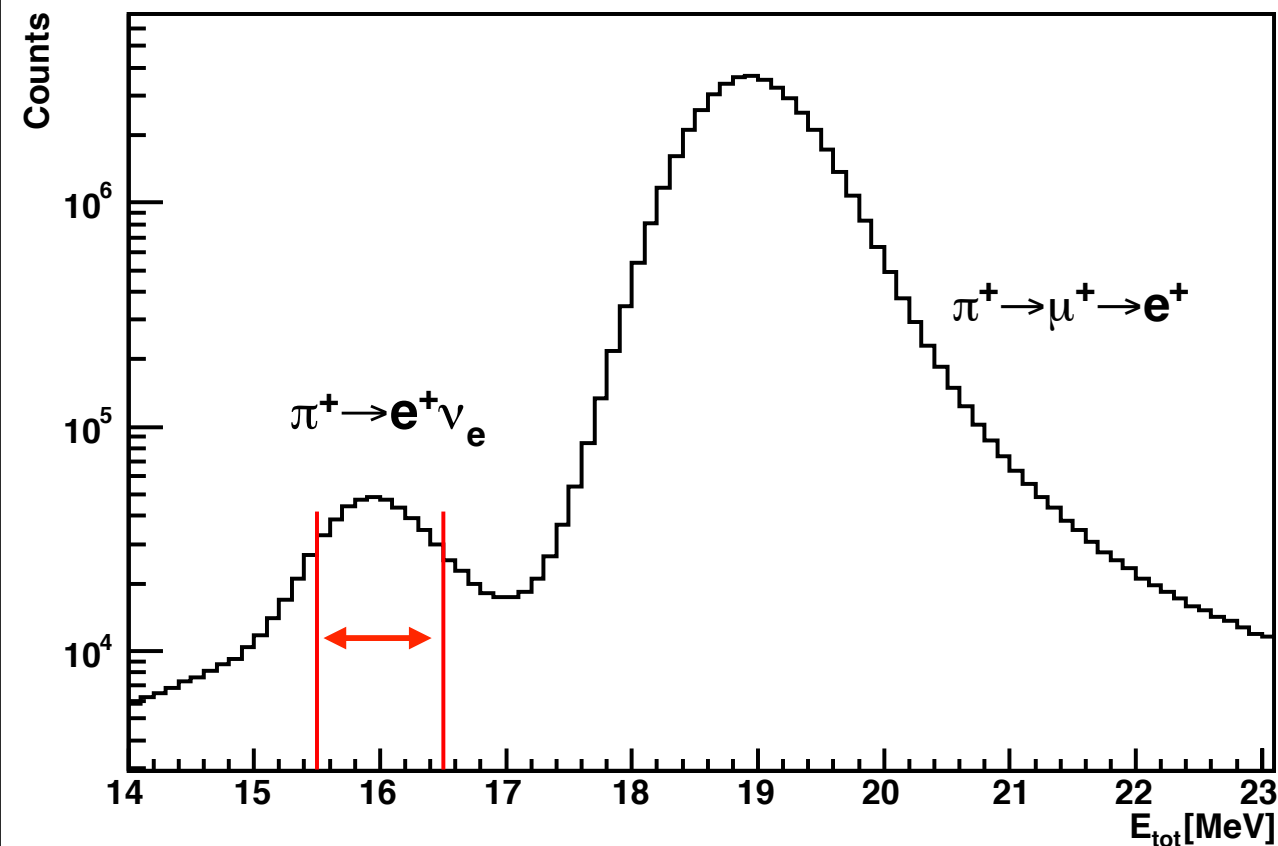
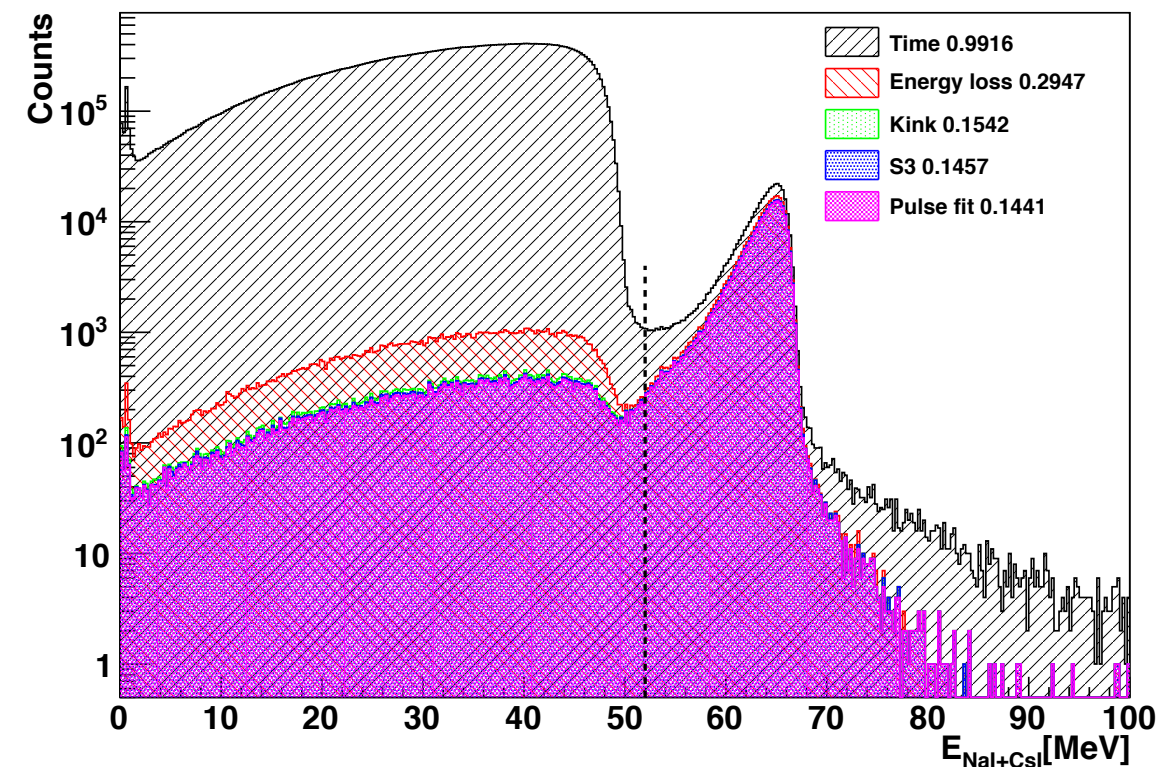
Back Up

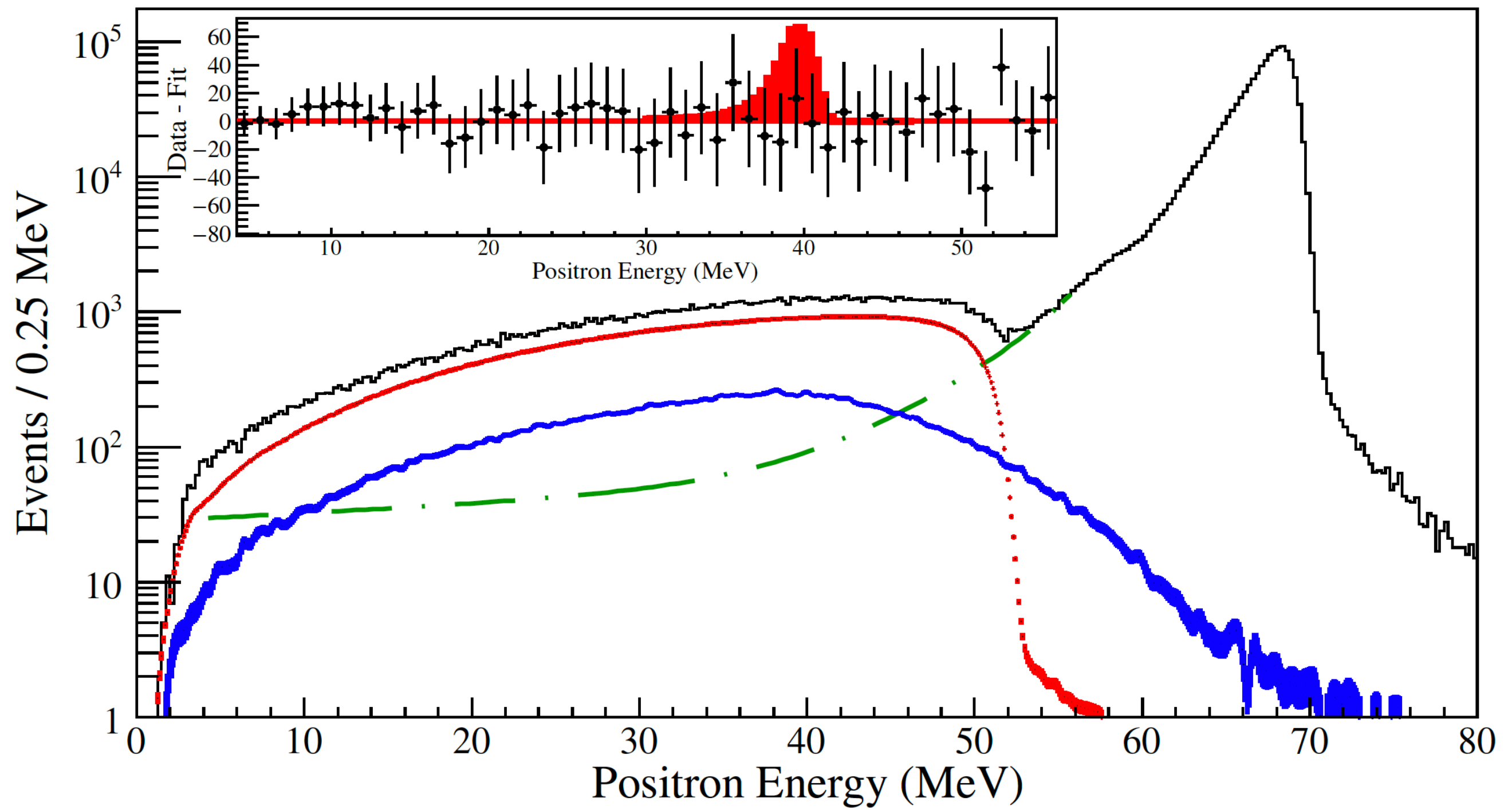
Suppression of $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$

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

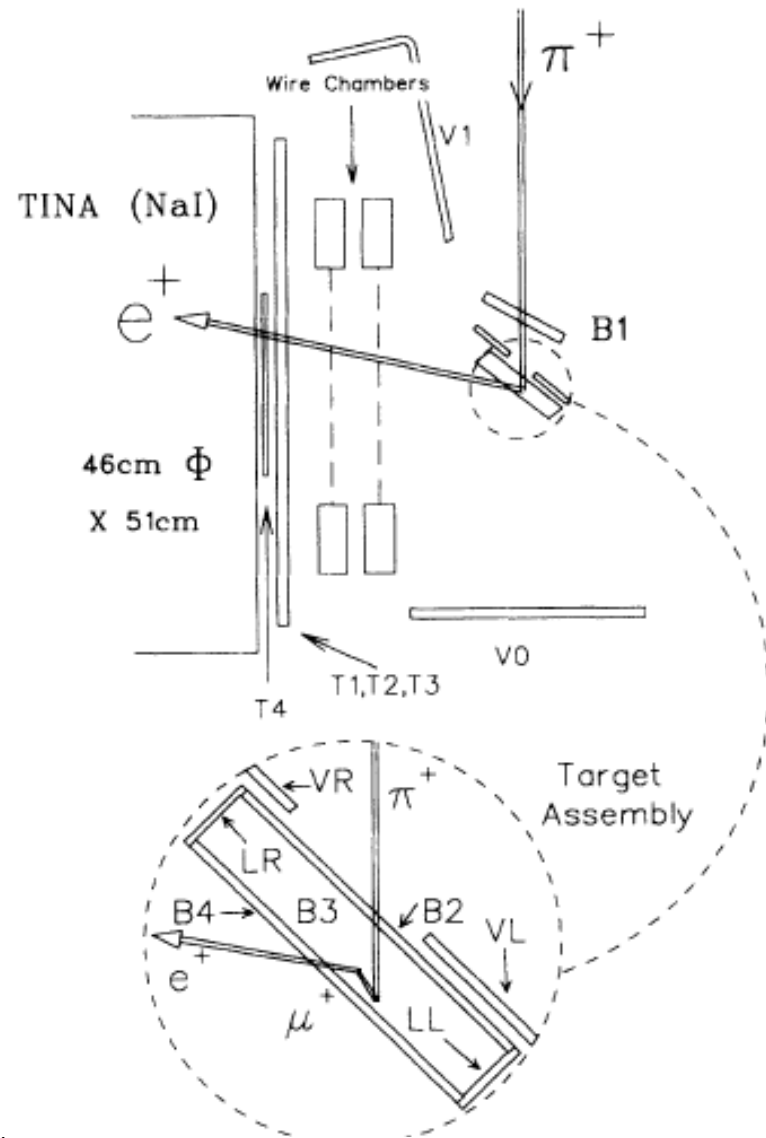
- μ^+ had a kinetic energy of 4.1 MeV.
- π DIF events had larger angle than π DAR in the target.

→ There was no tracker in the previous experiment.

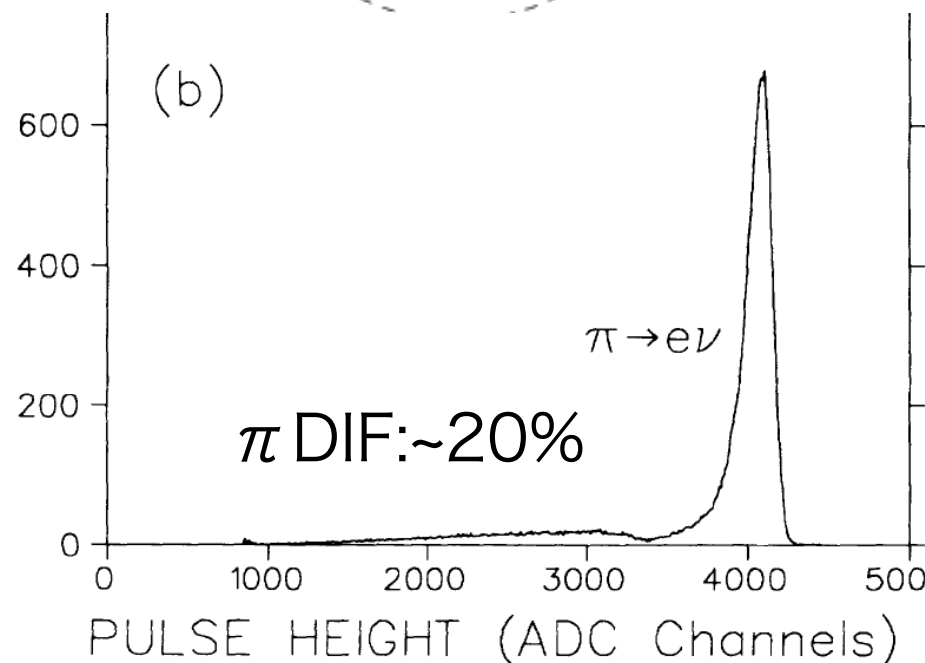




A Previous Experiment at TRIUMF



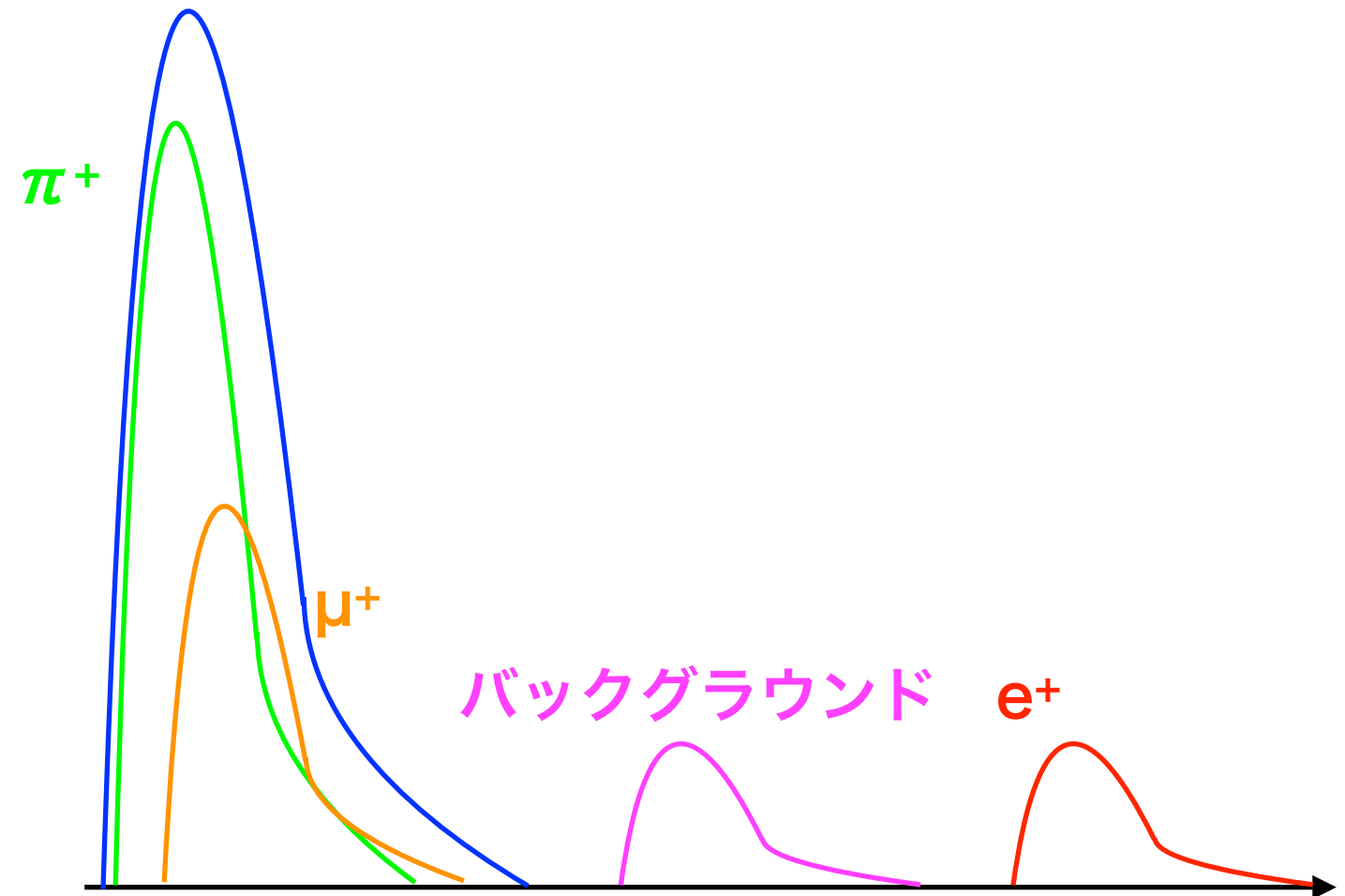
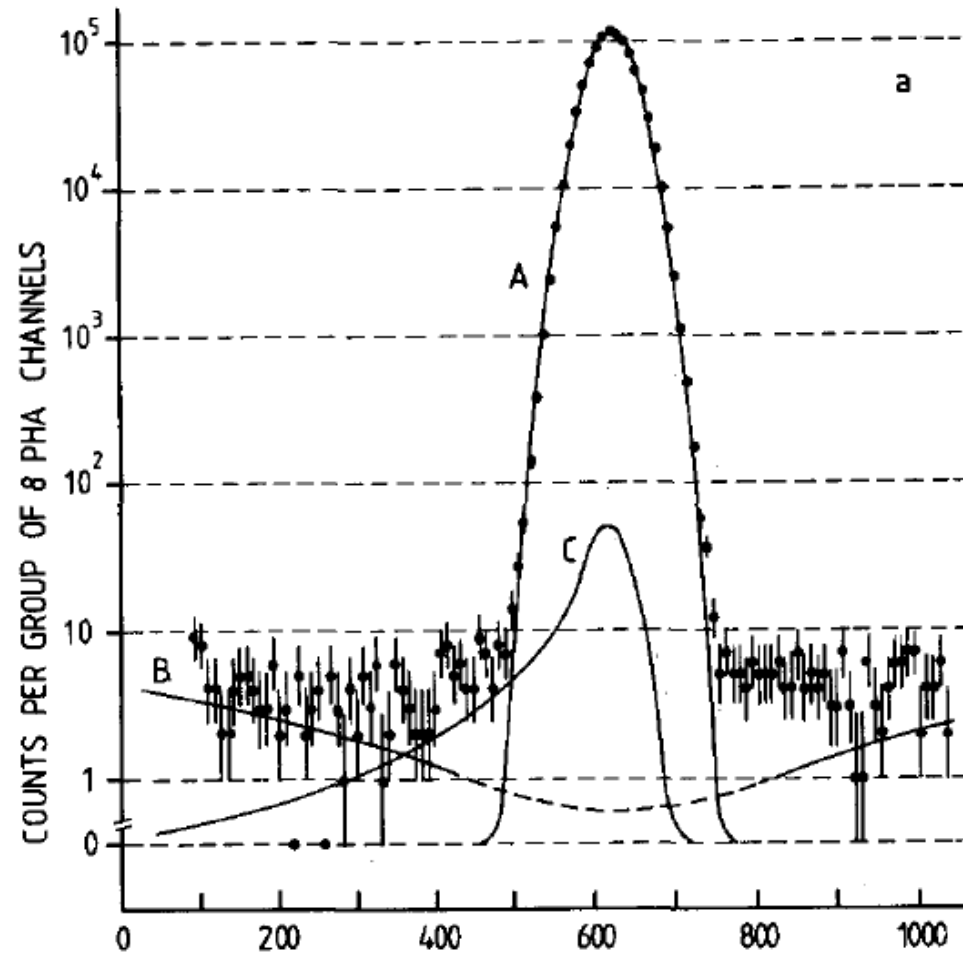
- Previous experiment at TRIUMF in 1980's
 $R = [1.2265 \pm 0.0034(\text{stat}) \pm 0.0044(\text{syst})] \times 10^{-4}$
- Week points
 - **Small acceptance (~2%)**
 - ✓ Many beam positron contamination.
 - ✓ Low statistics.
 - ✓ Larger acceptance correction (later).
 - **Larger error on low-energy tail.**
 - ✓ Unsuppressed π 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.**

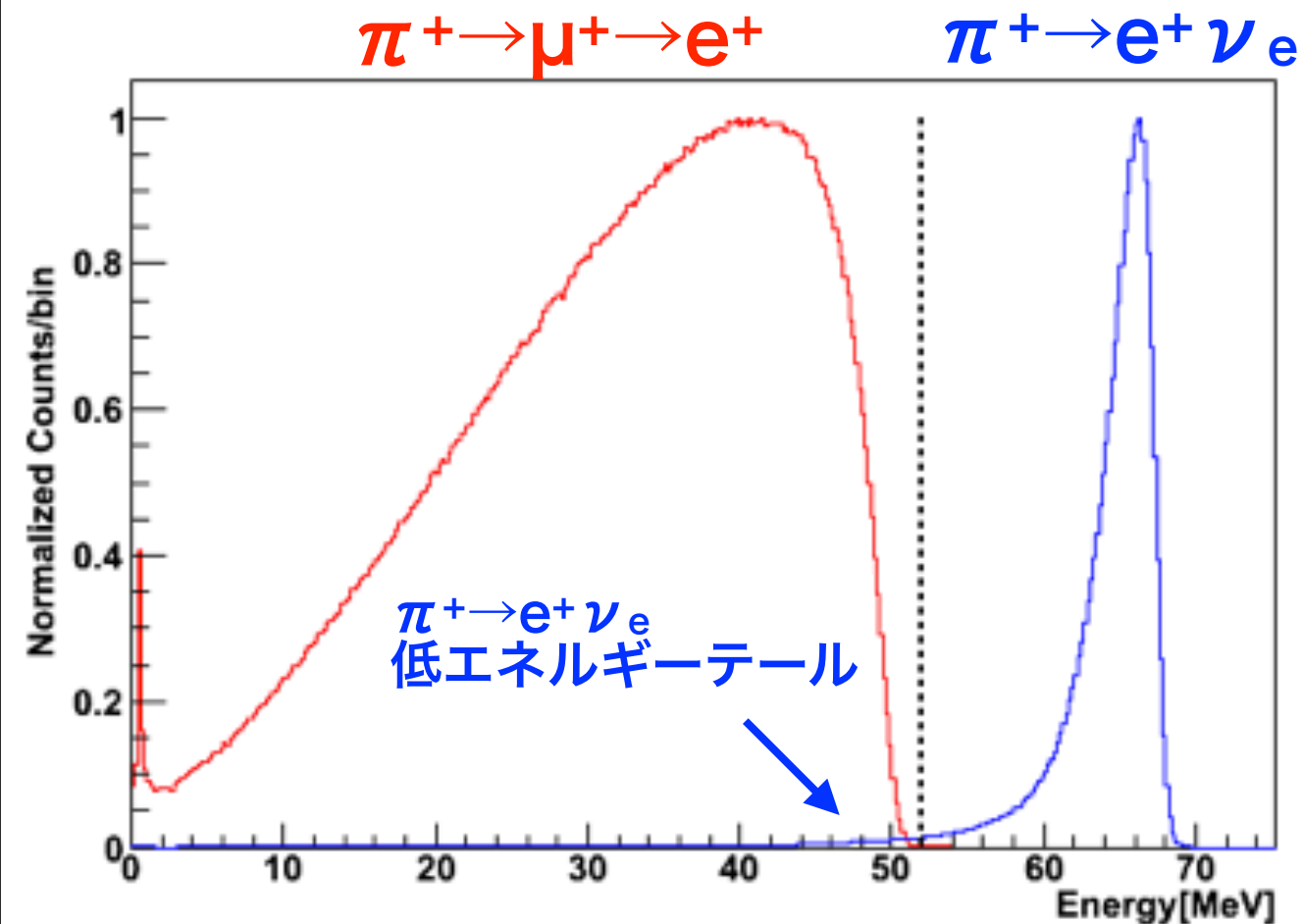
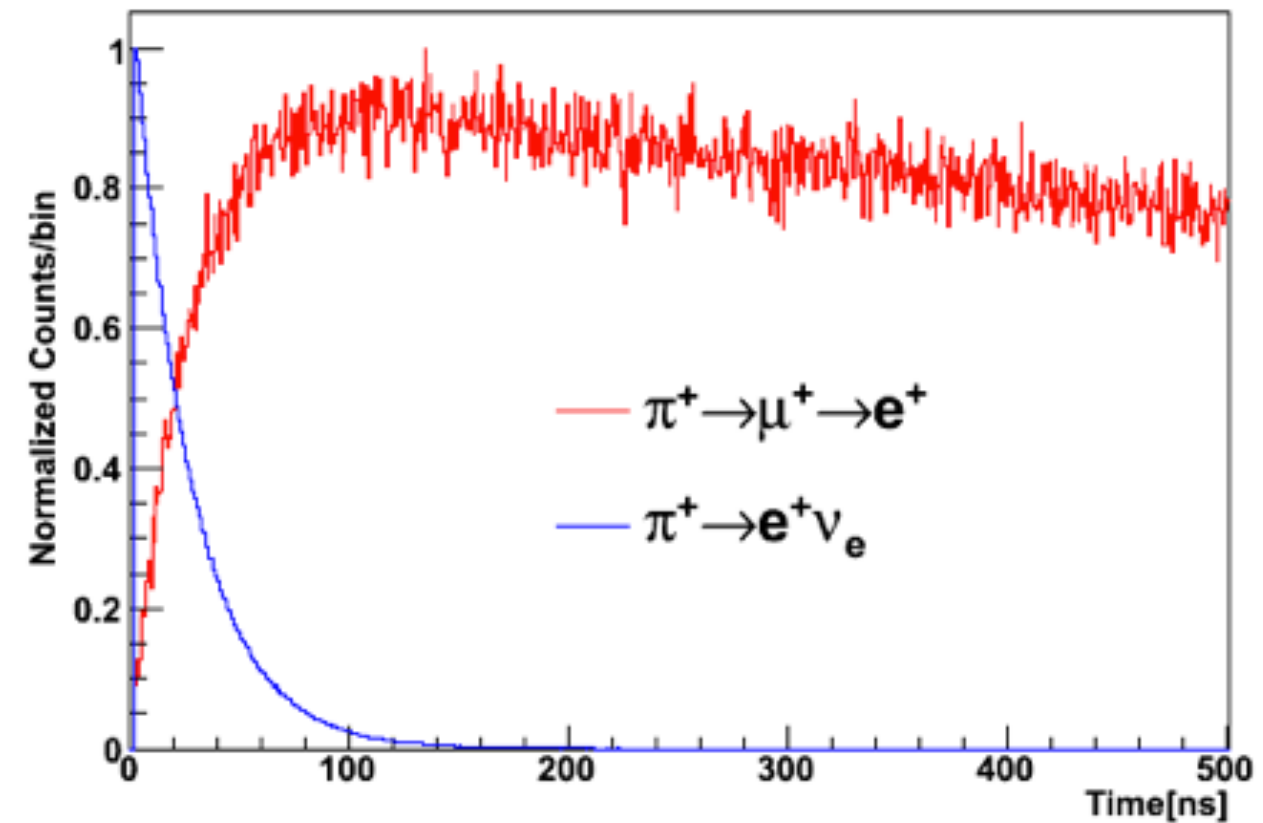
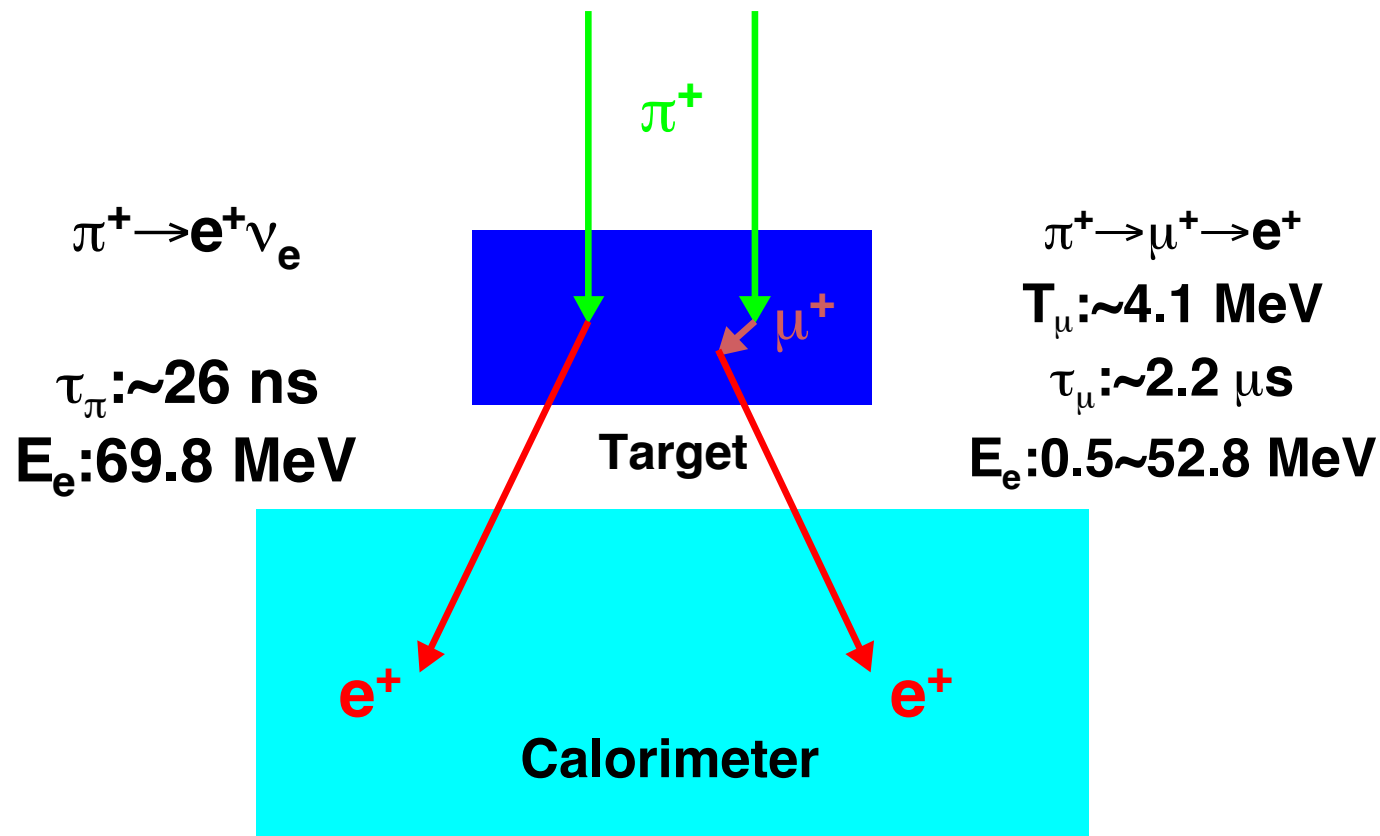
$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\chi$ の探索

$\pi + \mu$ 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 μ -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

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_{raw}^π

補正

テール補正等

Measured Branching Fractions

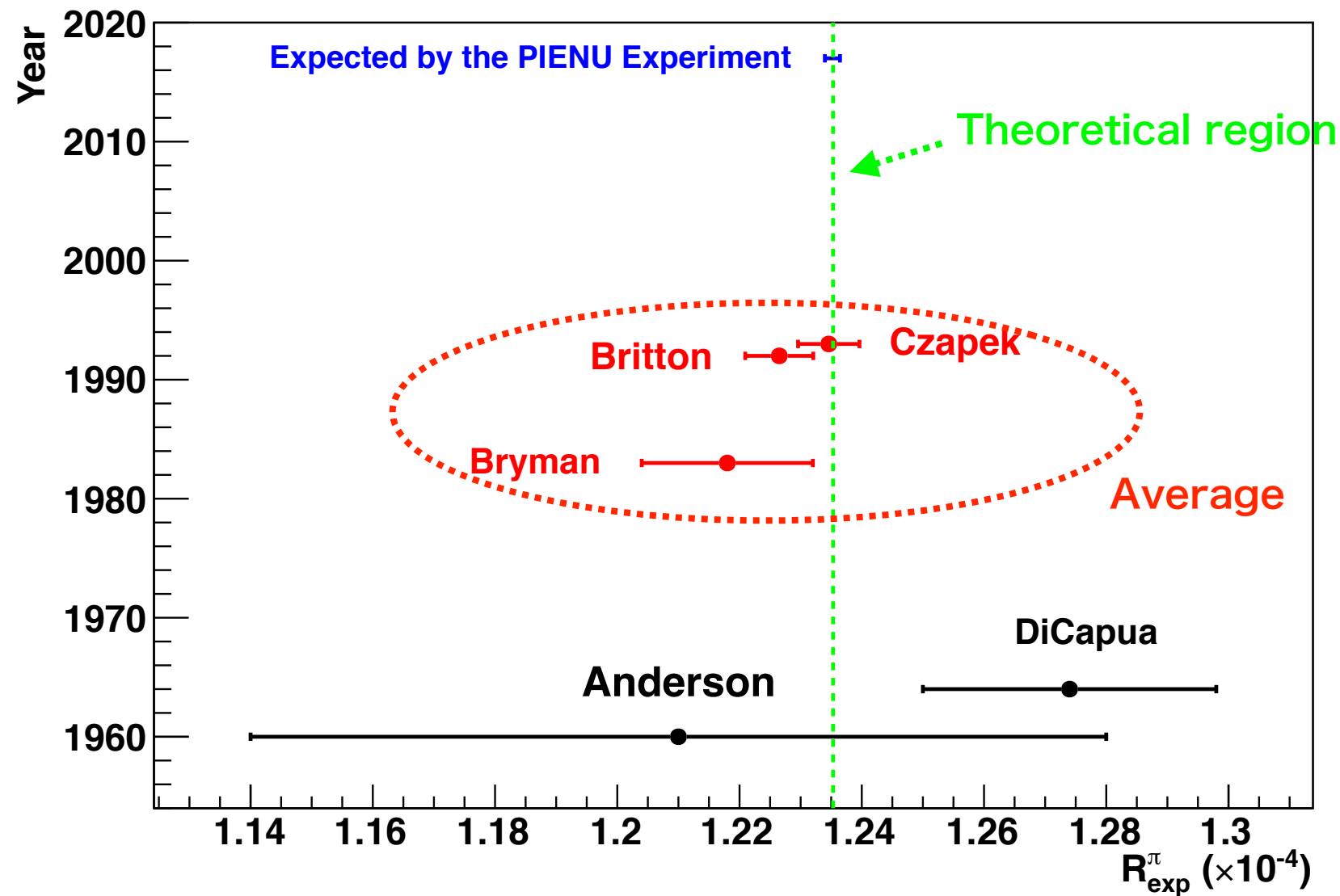
Table 1.3: Measured pion decay modes [16].

	Decay mode	Fraction (Γ_i^π/Γ^π)
Γ_1^π	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	0.9998770 ± 0.00004
Γ_2^π	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$	$(2.00 \pm 0.25) \times 10^{-4}$ ($E_\gamma > 1$ MeV)
Γ_3^π	$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$	$(1.230 \pm 0.004) \times 10^{-4}$
Γ_4^π	$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$	$(7.39 \pm 0.05) \times 10^{-7}$ ($E_\gamma > 10$ MeV)
Γ_5^π	$\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$	$(1.036 \pm 0.006) \times 10^{-8}$
Γ_6^π	$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$	$(3.2 \pm 0.5) \times 10^{-9}$

Table 1.4: Measured muon decay modes [16].

	Decay mode	Fraction (Γ_i^μ/Γ^μ)
Γ_1^μ	$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$	$\approx 100\%$
Γ_2^μ	$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \gamma$	$(1.4 \pm 0.4)\%$ ($E_\gamma > 10$ MeV)
Γ_3^μ	$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu e^+ e^-$	$(3.4 \pm 0.4) \times 10^{-5}$

$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ 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^{π} を測定

R^π の精密測定のもちベーション

- ・ 新物理が存在すると、

電子・ミューオン普遍性が破れる。

- ・ π^+ による測定は他の実験と比べると精度が高い。

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

→ π^+ 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!!**

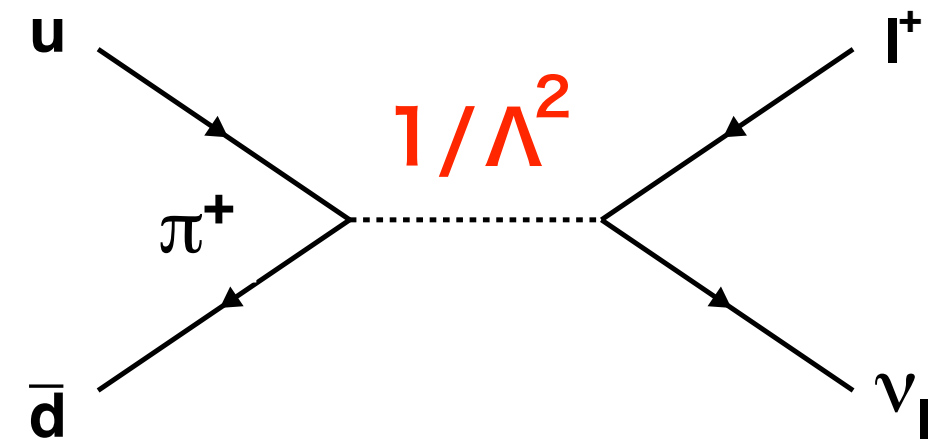
Decay mode	g_μ/g_e
$B_{\pi \rightarrow \mu}/B_{\pi \rightarrow e}$	1.0021±0.0016
$B_{\tau \rightarrow \mu}/B_{\tau \rightarrow e}$	1.0018±0.0014
$B_{B \rightarrow K\mu\mu}/B_{B \rightarrow Kee}$	1.159±0.069
$B_{K \rightarrow \mu}/B_{K \rightarrow e}$	0.996±0.005
$B_{K \rightarrow \pi\mu}/B_{K \rightarrow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

R^π 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**

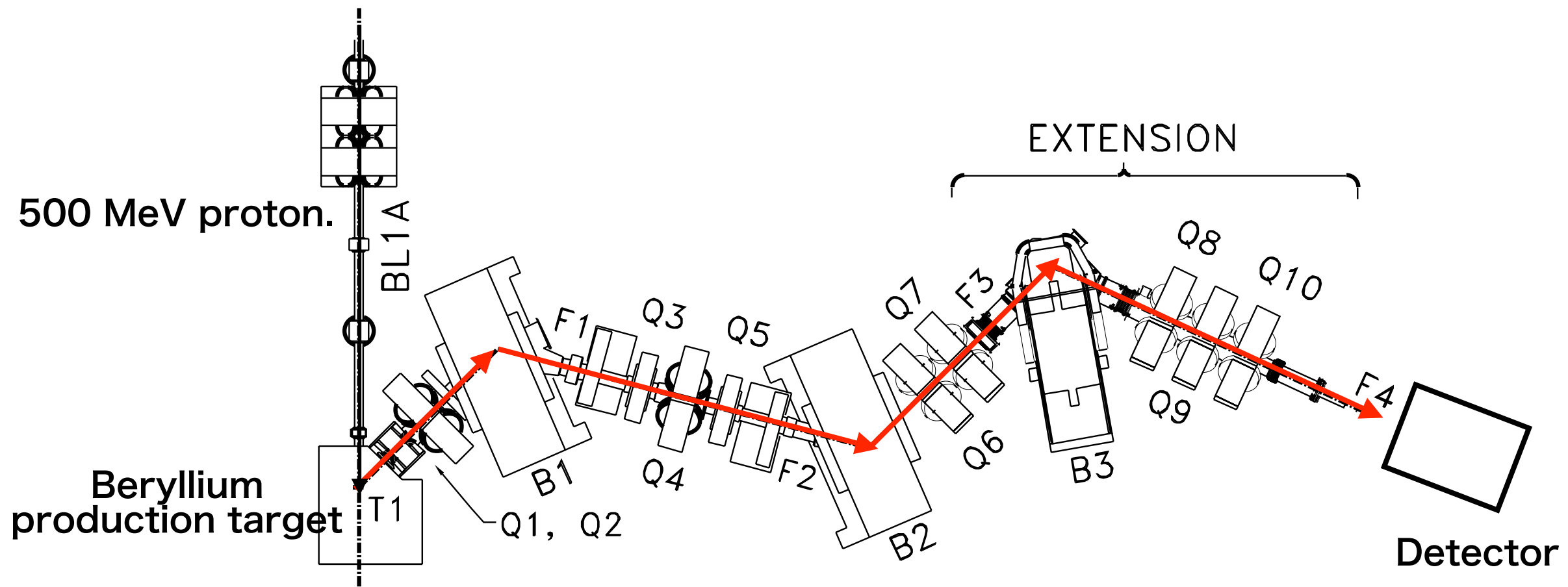
- 擬スカラーの例
 - R-Parity violation SUSY
 - Leptoquark.
 - Charged Higgs.
- その他: Massive neutrino

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



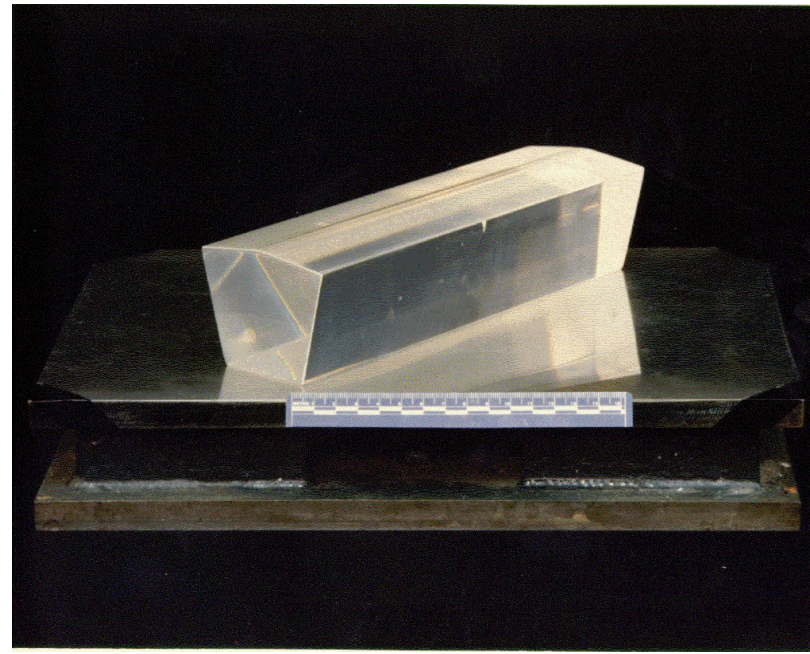
- TRIUMF M13 beam line.
- To increase the detector acceptance, the beam line was updated.
 - Added one more bending magnet → **<1/10 of beam positron.**
 - The detector was located at the exit → **×10 larger acceptance.**

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

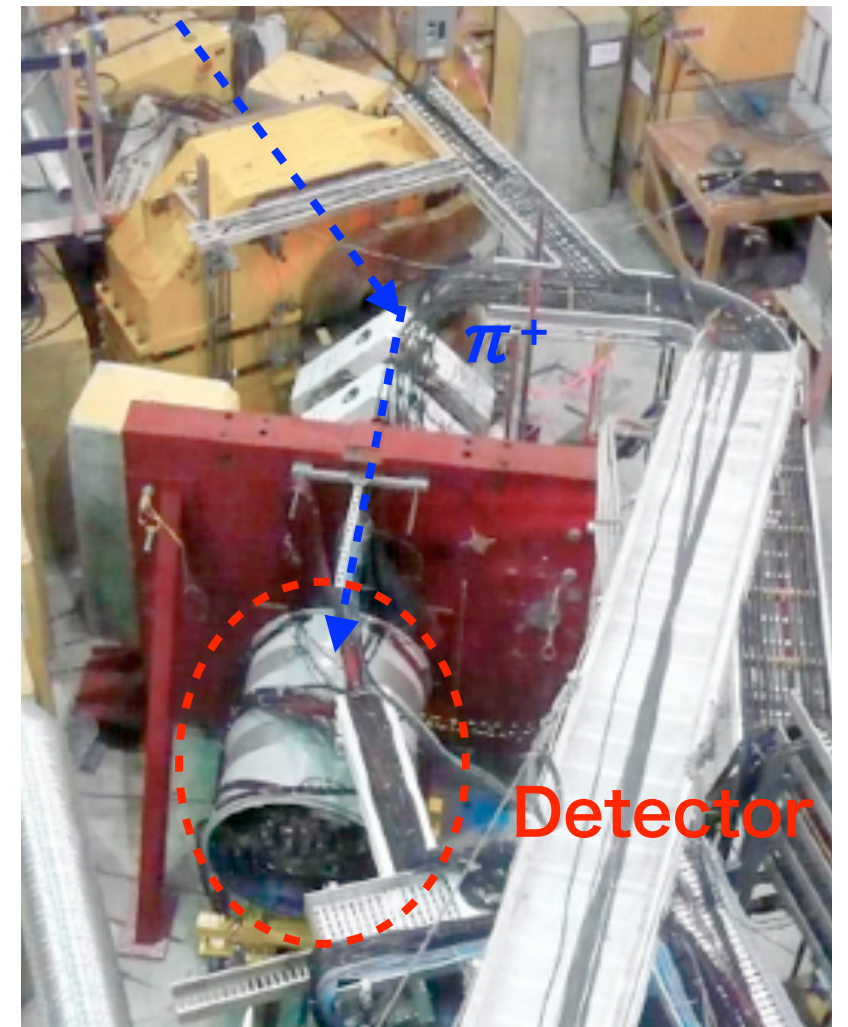
Nucl. Instrum. Methods., A
609 102 (2009)



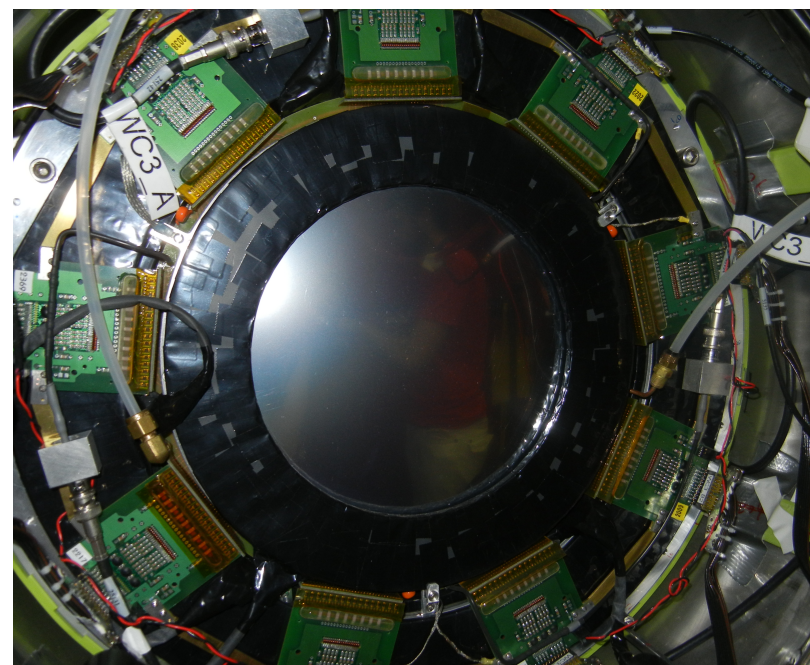
NaI



1 CsI crystal

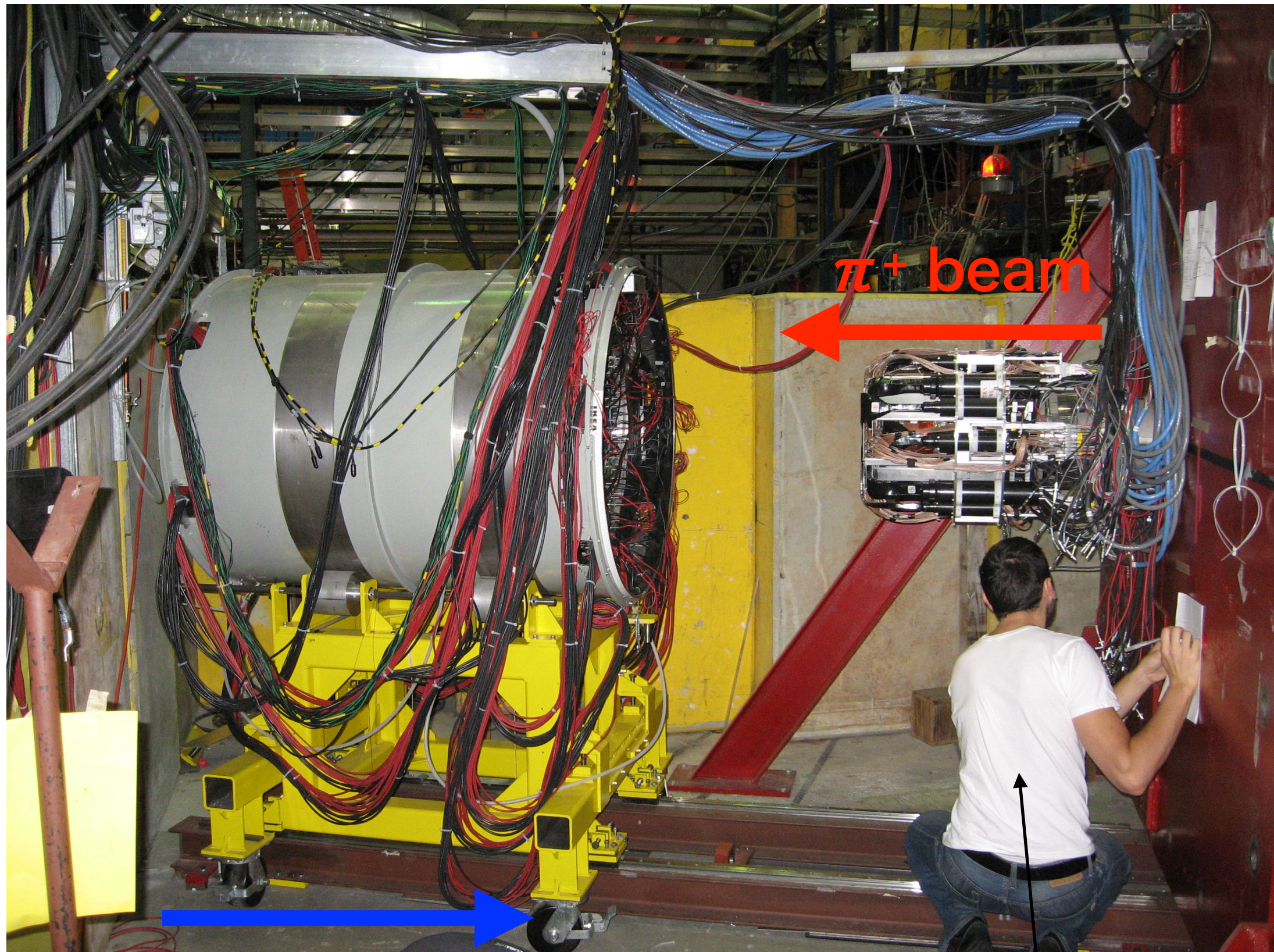


Scint + Si Strip



WC3

The PIENU Detector

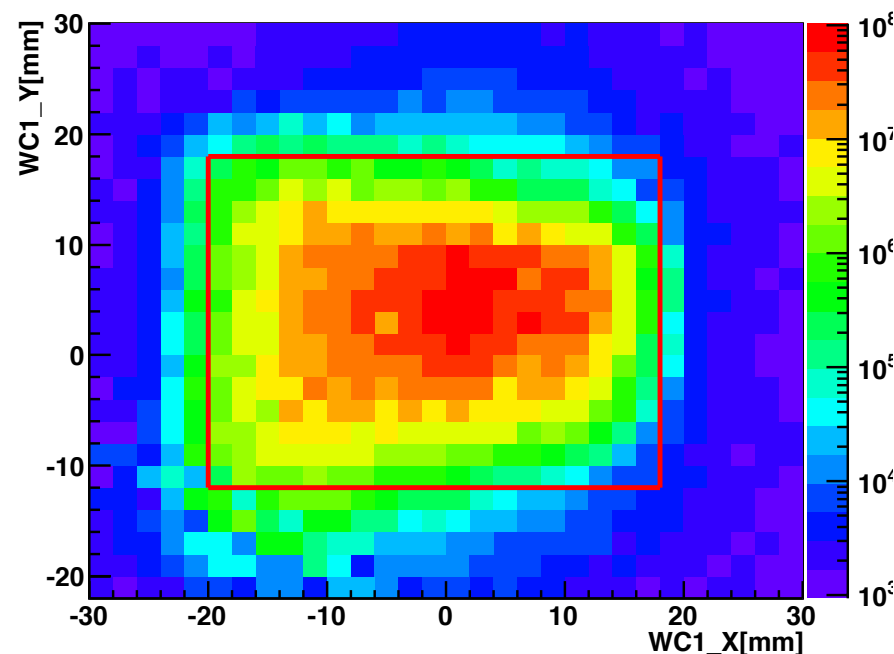
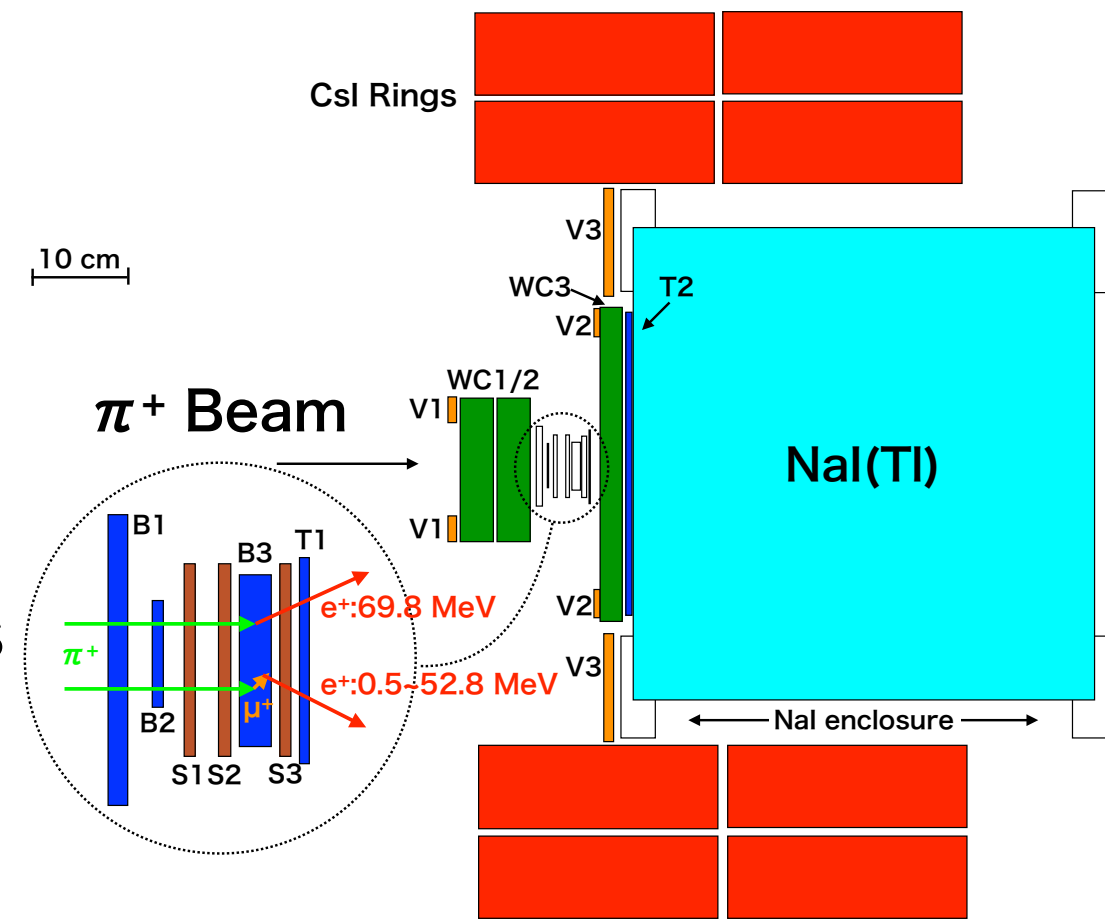


Moved to the detector
assembly during beam time.

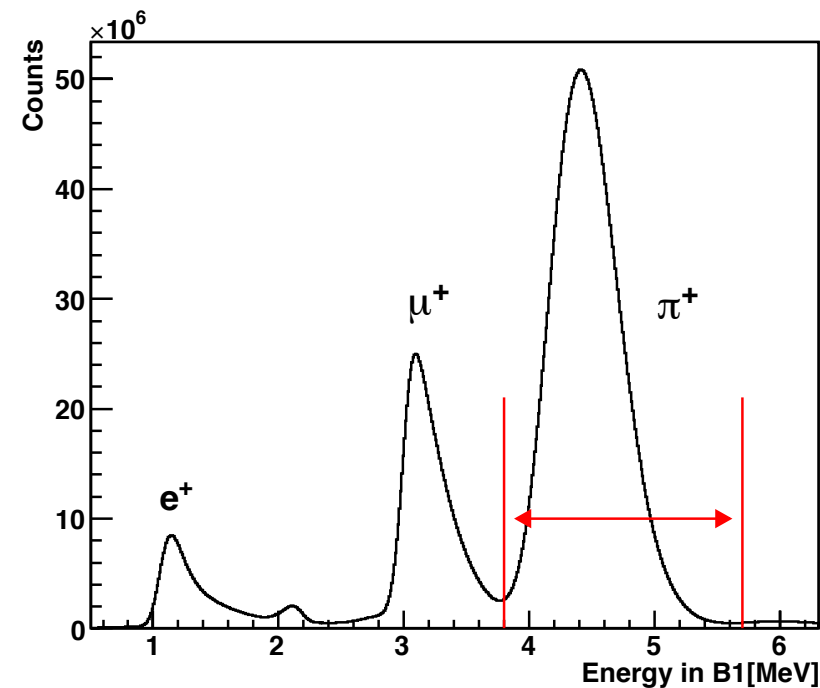
A. Sher (TRIUMF)

Event Selection Cuts

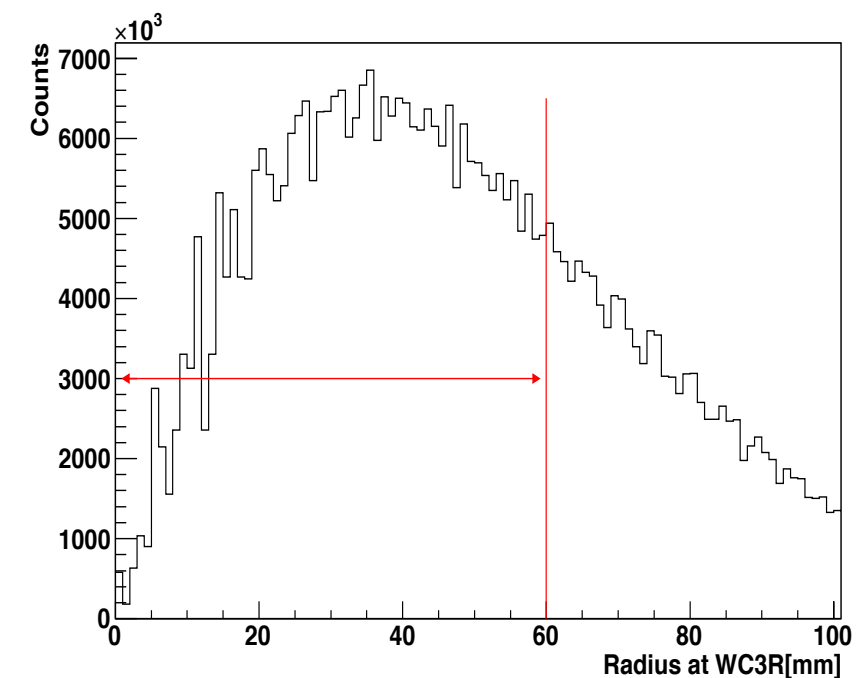
- Beam tracking in WC1 and WC2
- Energy in B1 and B2
- Single hit requirement in B1, B2, T1, and T2.
- Radius cut at WC3, decay positron was reconstructed by S3 and WC3.



Pion tracking at WC1

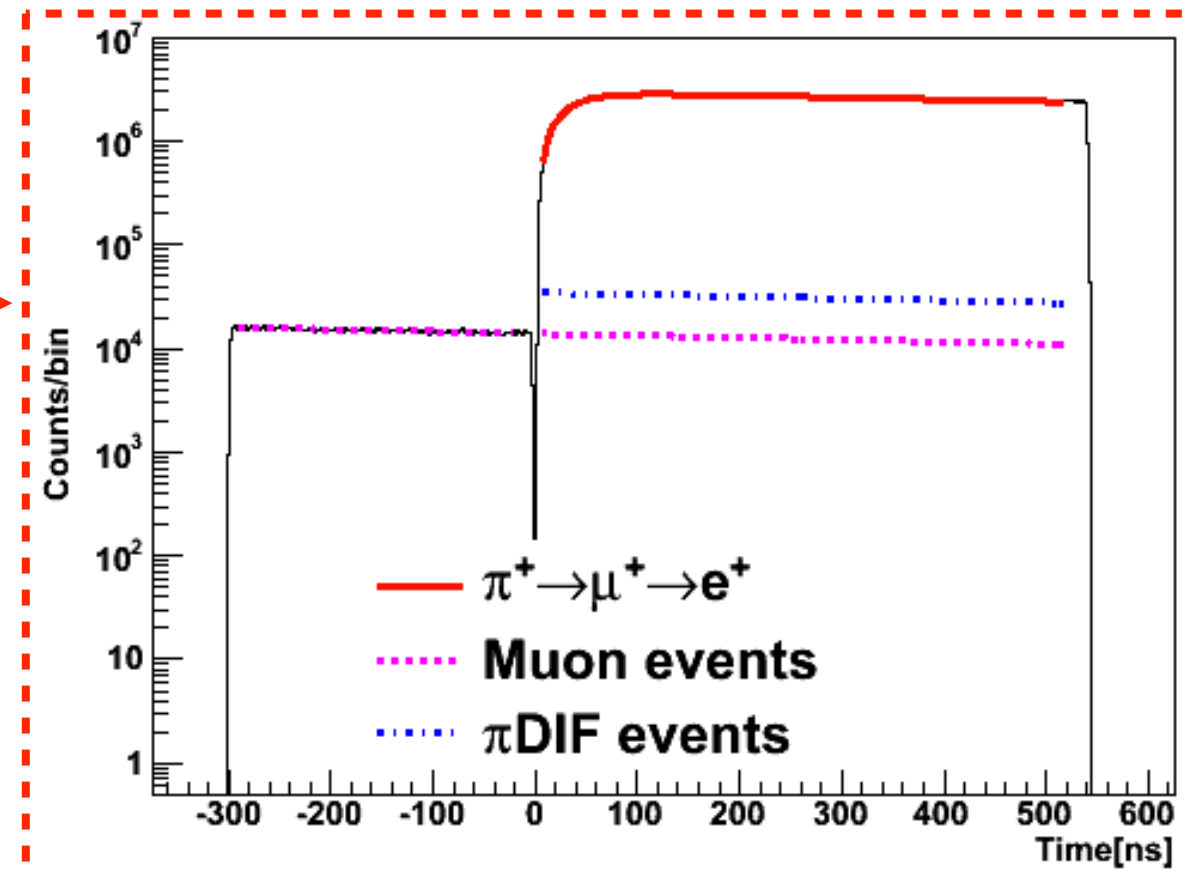
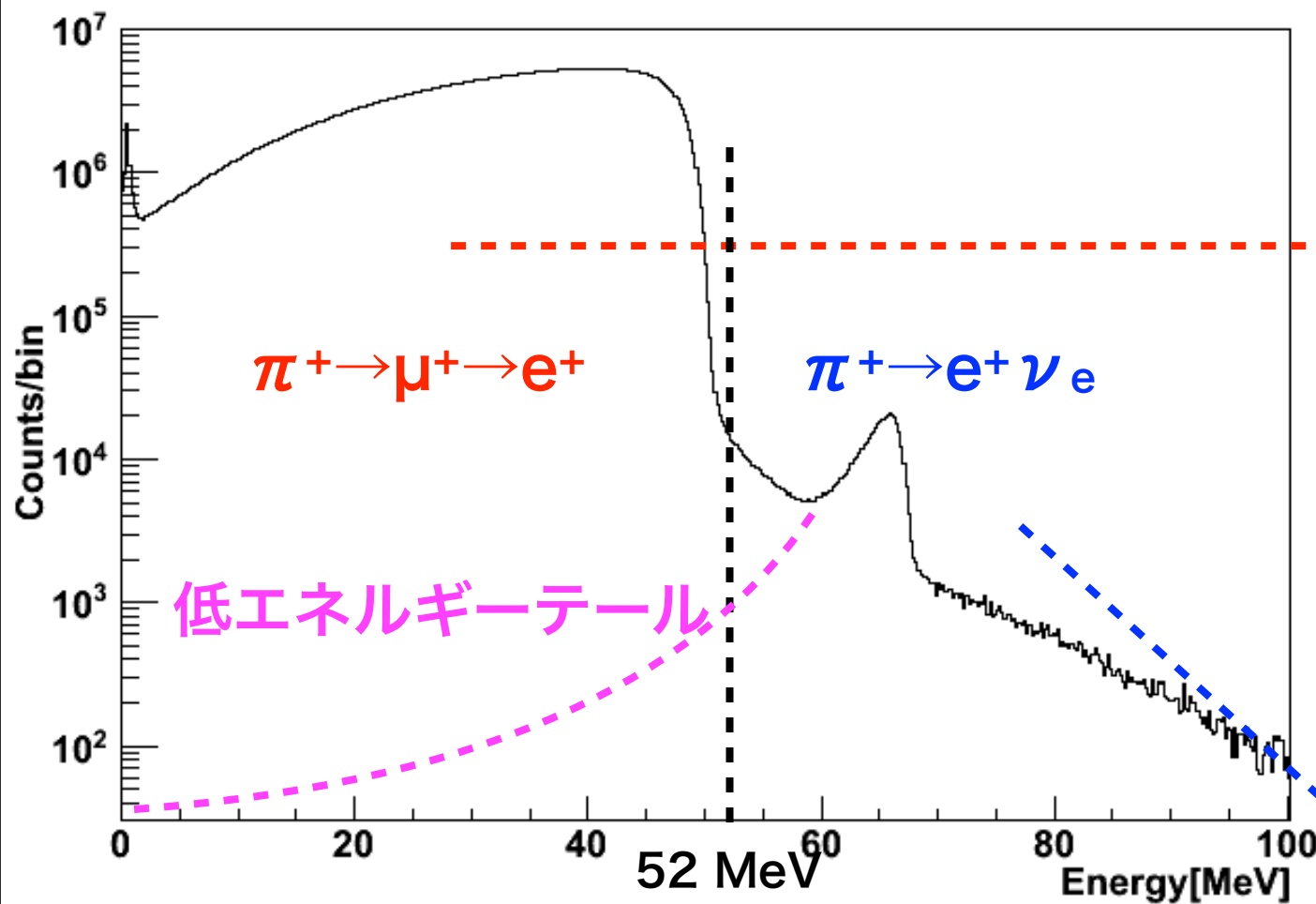


Energy in B1



Reconstructed radius for e^+ at WC3

時間スペクトラム解析

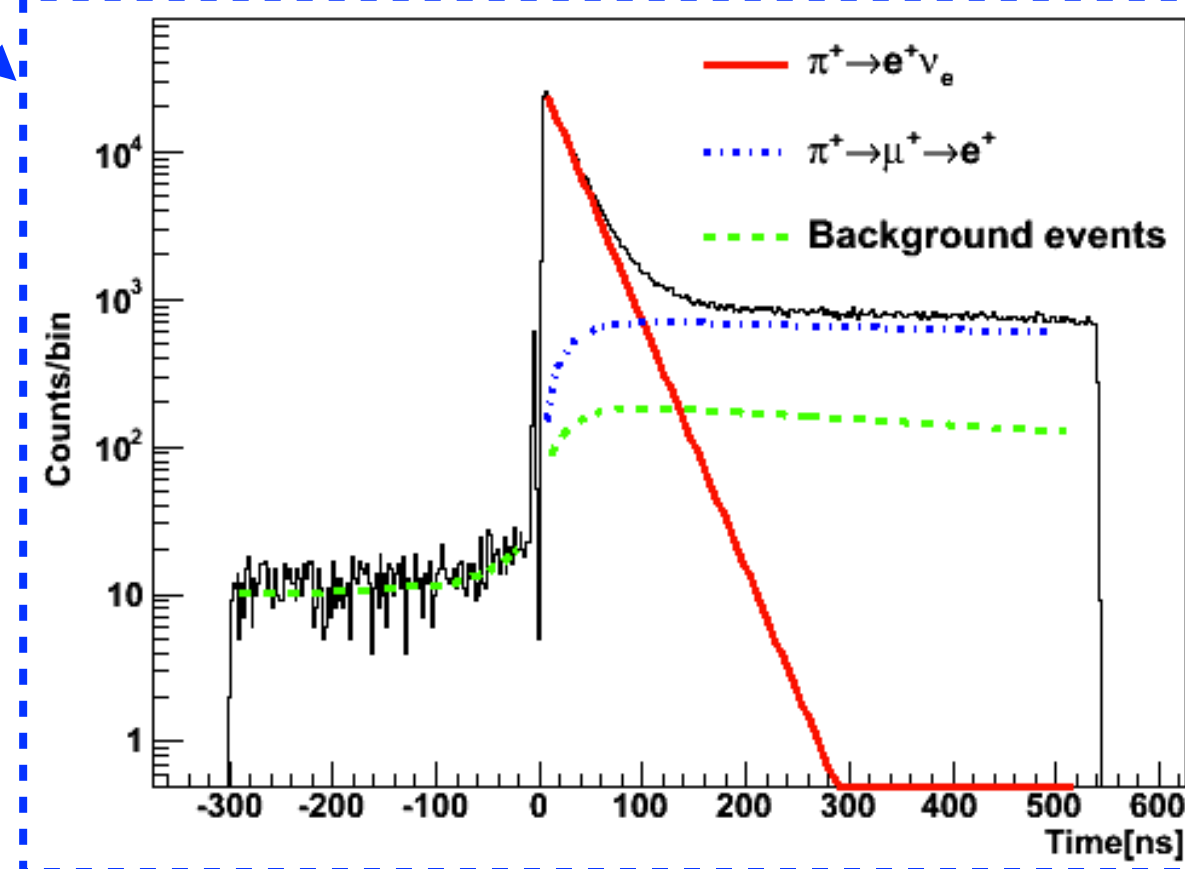


- ・ データセット: 2010年11月
- ・ 約 4×10^5 $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ イベント
- ・ 両時間スペクトラムを同時にフィット

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

(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

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

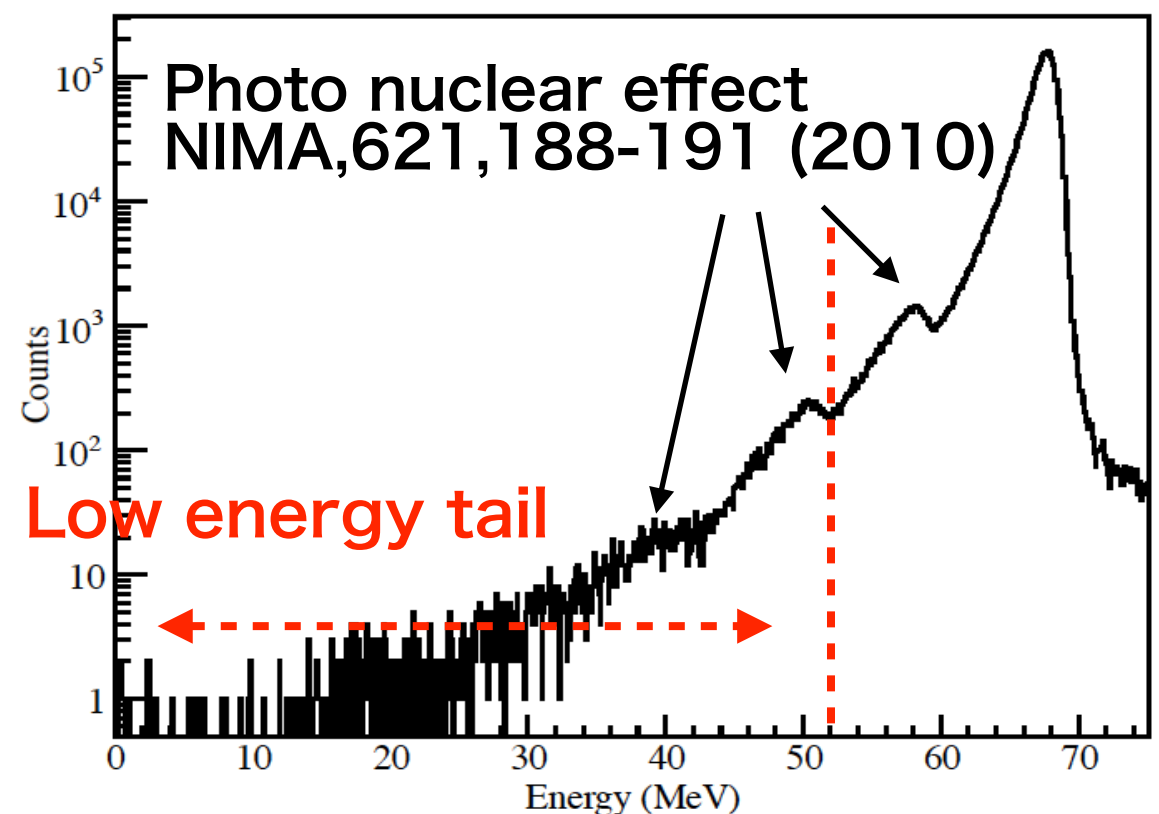
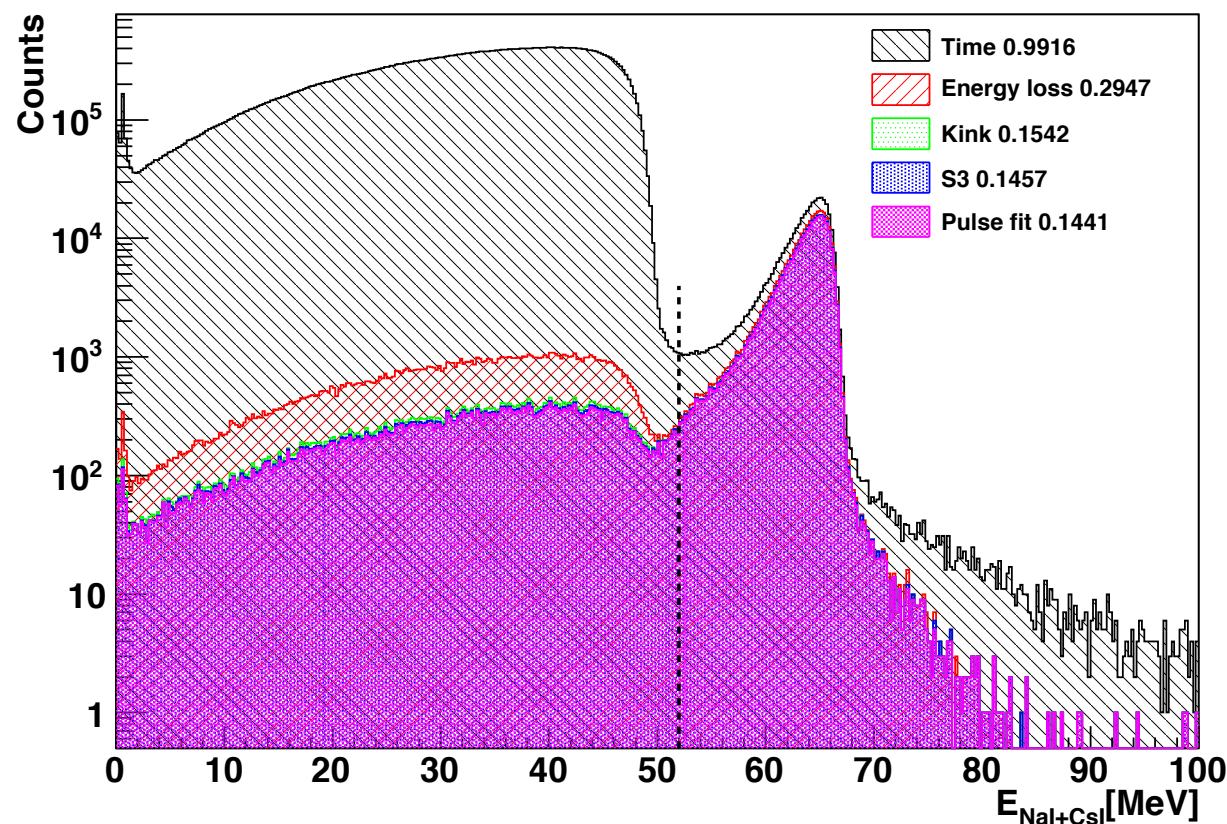
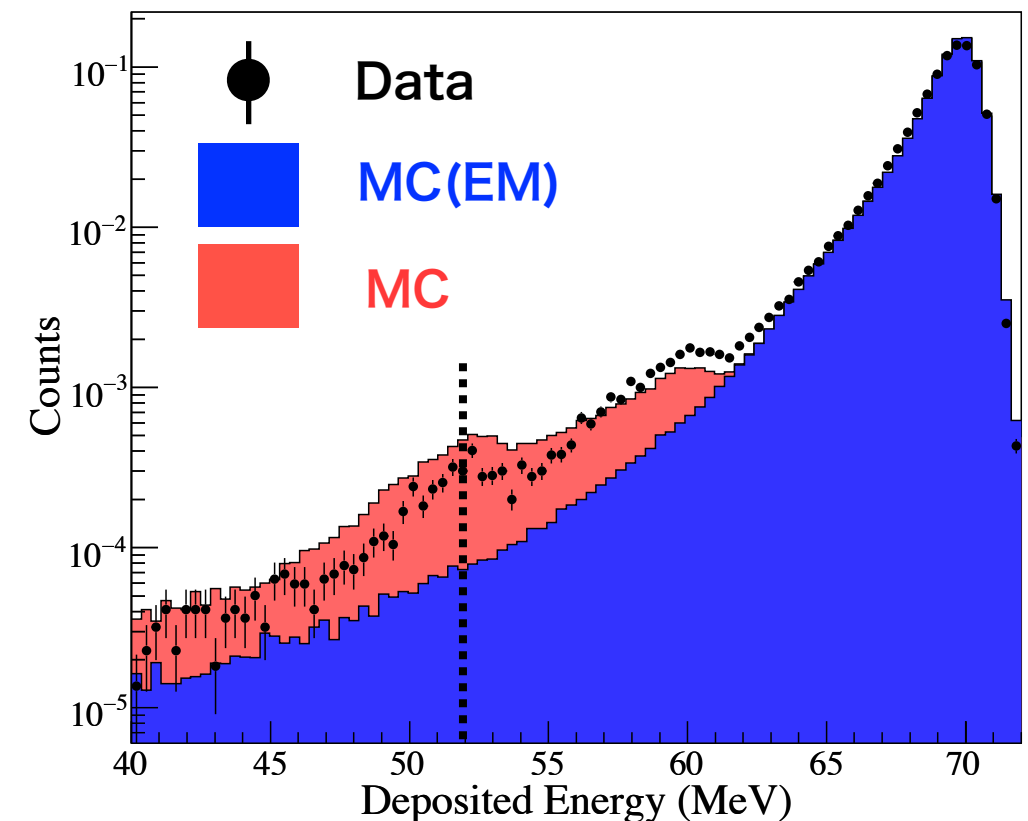
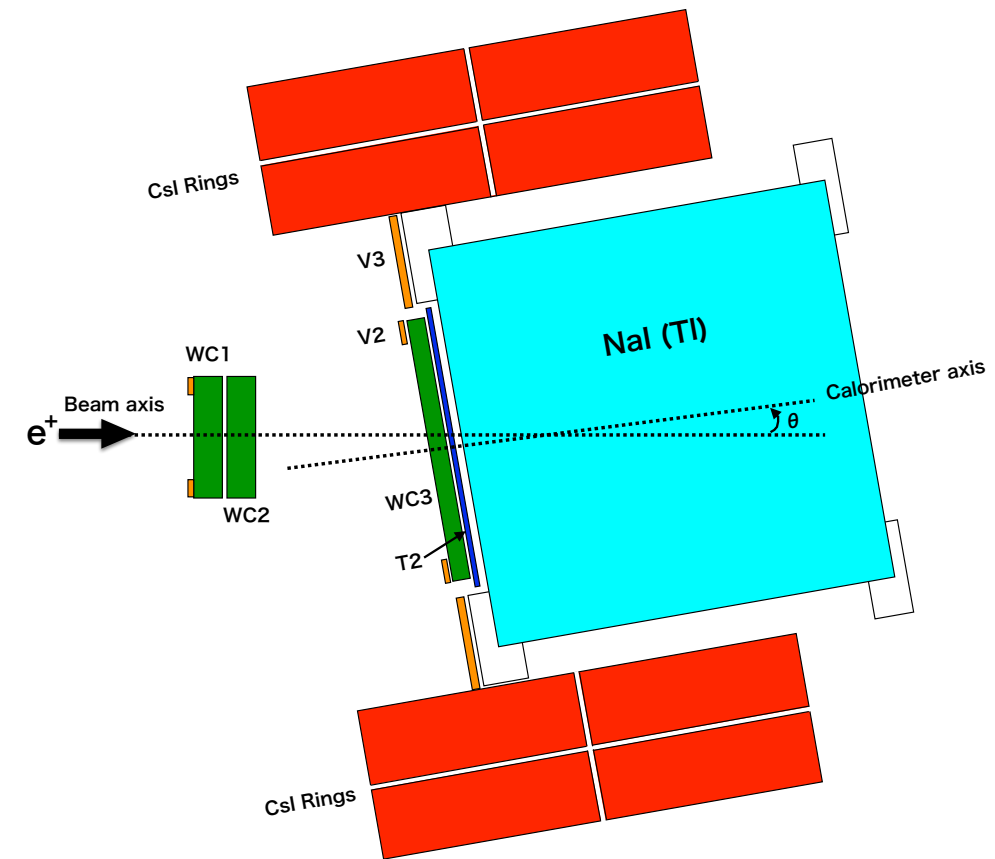


Photo-Nuclear Effect

- Using 70 MeV positron beam to understand low energy tail empirically.
- There are additional bumps below peak.
 - ➔ Photo-nuclear effect.
 - γ was absorbed by iodine.
 - Neutrons were emitted.
 - Binding energy ~ 8 MeV.
 - This process was confirmed by MC.
 - ➔ **First observation.**
- 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!!!

