

PIENU実験

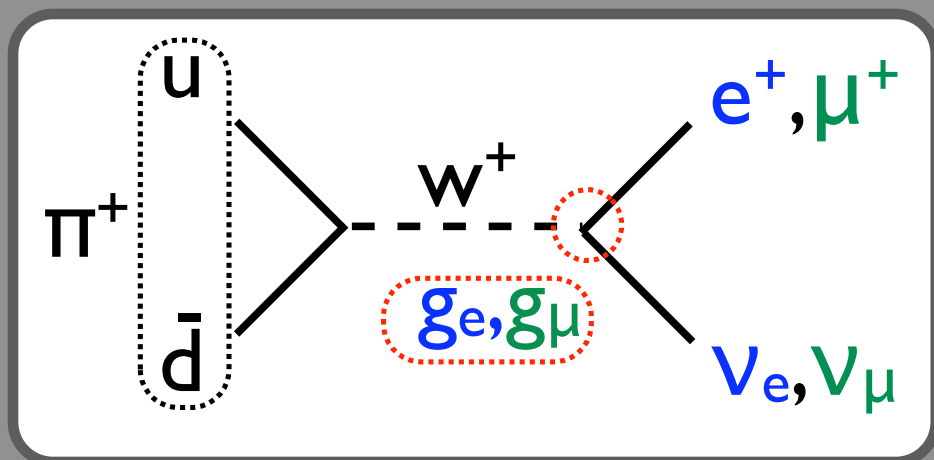
～ $\pi \rightarrow e\nu$ 崩壊分岐比測定実験～

- $\pi e\nu$ 崩壊分岐比について
- PIENU実験について
- ビームテスト@TRIUMF
 - ビームbackground
 - ビームライン
- まとめと今後

2007/12/25 年末発表会 久野研 D1 山田薫

$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ 崩壊分岐比

標準理論



●ヘリシティ抑制により、 $\pi \rightarrow e$ は抑制される

$$R = \frac{\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e}{\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu} = \frac{g_e^2 m_e^2}{g_\mu^2 m_\mu^2} \left(\frac{m_\pi^2 - m_e^2}{m_\pi^2 - m_\mu^2} \right)^2 \sim 10^{-4}$$

●Wのレプトンへの結合定数は世代によらない

$g_e = g_\mu$ 電子-ミューオン普遍性

$$R^{\text{SM}} = 1.2353 \pm 0.0004 \times 10^{-4} \quad (\text{精度:0.03\%})$$

現在の測定値

- TRIUMF(E248) $R^{\text{exp}} = 1.2265 \pm 0.0034(\text{stat}) \pm 0.0044(\text{sys}) \times 10^{-4}$ (1992) 精度:0.5%
- PSI $R^{\text{exp}} = 1.2346 \pm 0.0035(\text{stat}) \pm 0.0036(\text{sys}) \times 10^{-4}$ (1993) 精度:0.4%

感度を持つNew Physics

Non universality

$$g_e \neq g_\mu$$

$$SU(2) \times SU(2) \times SU(2) \times U(1)$$

新しい擬スカラー相互作用

ヘリシティ抑制の
効かない相互作用に敏感
Charged Higgs など

その他

Massive neutrino
R-parity violating SUSY

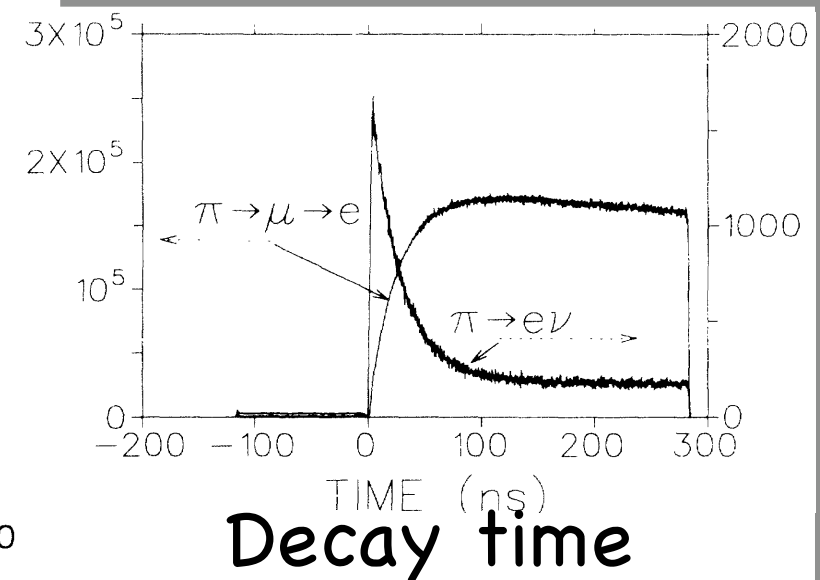
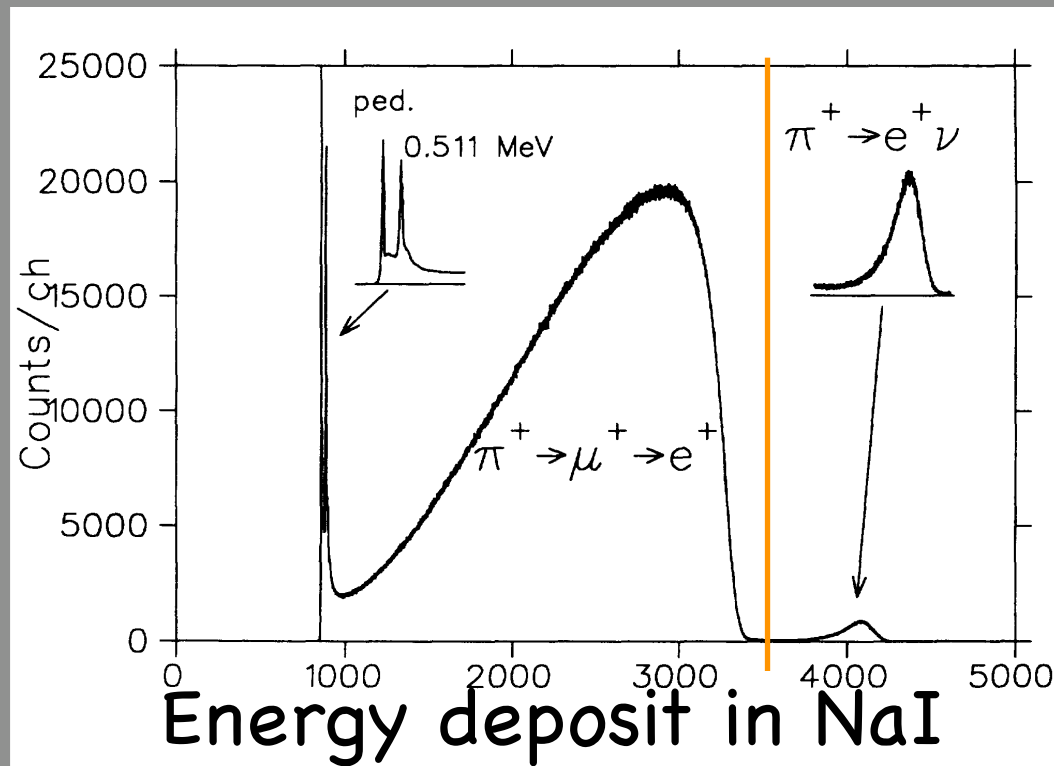
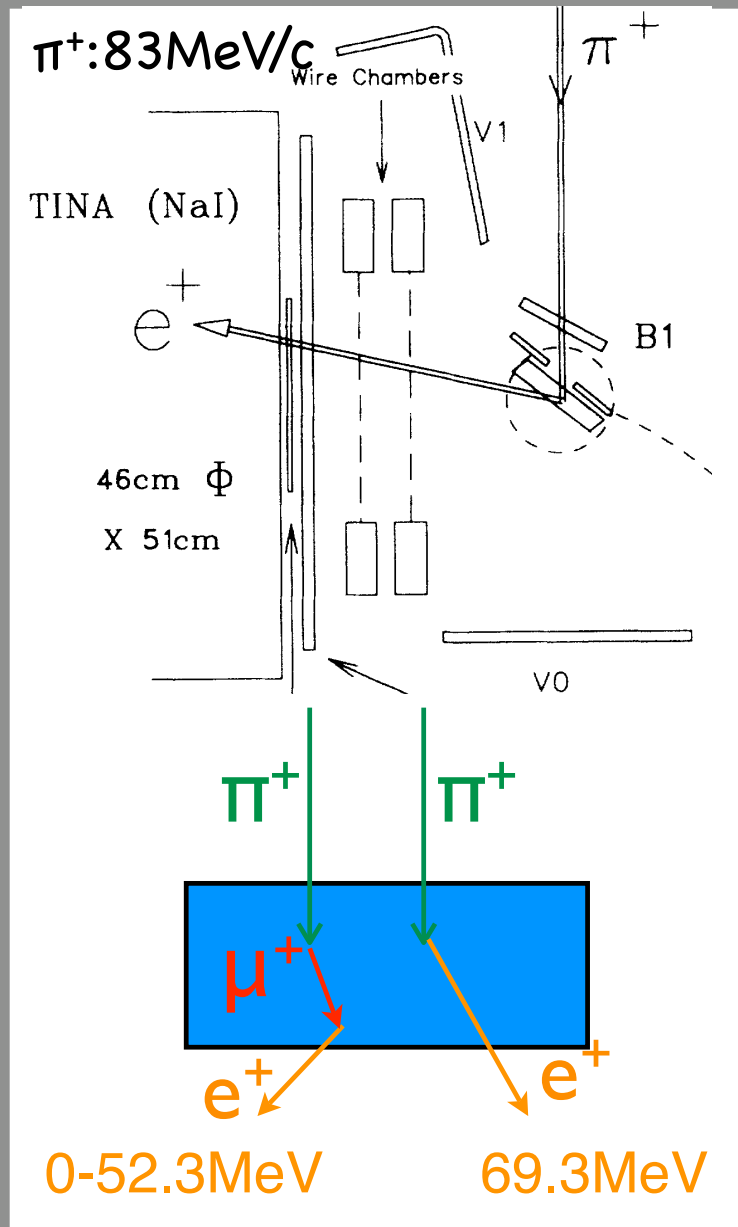
PIENU実験の目標

分岐比Rを0.1%以下の精度で測定、擬スカラーのマススケール $< 1000 \text{ TeV}$

TRIUMF E248 : 前実験 (~1992)

パイオンをターゲットに止め、崩壊陽電子を検出
 陽電子のエネルギー測定により崩壊モードを識別
 時間分布を同時フィットしてRaw Branching Ratioをもとめる

$$R_{exp} = R_{raw} \times \epsilon_{cor} \leftarrow \text{いくつかの補正が必要}$$



$$R^{exp} = 1.2265 \pm 0.0034(\text{stat}) \pm 0.0044(\text{sys}) \times 10^{-4} \quad \text{精度: } 0.5\% (0.28\%, 0.36\%)$$

問題点

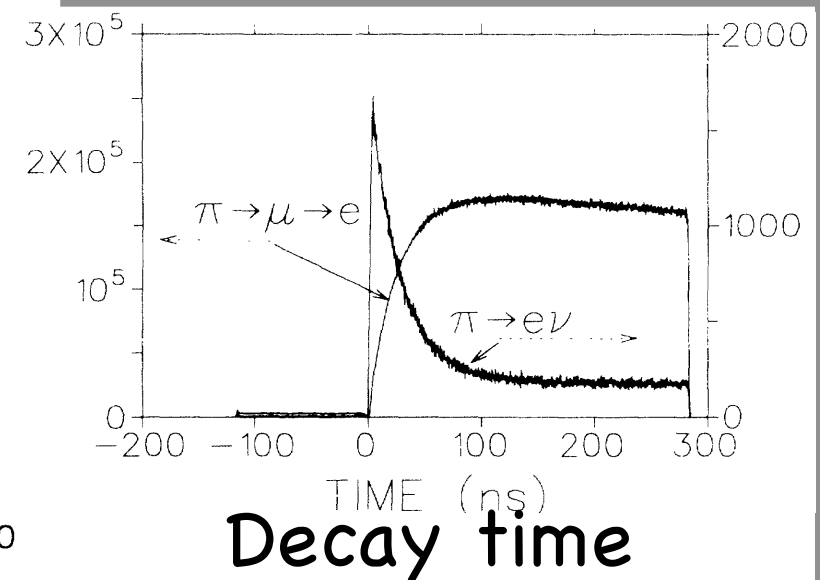
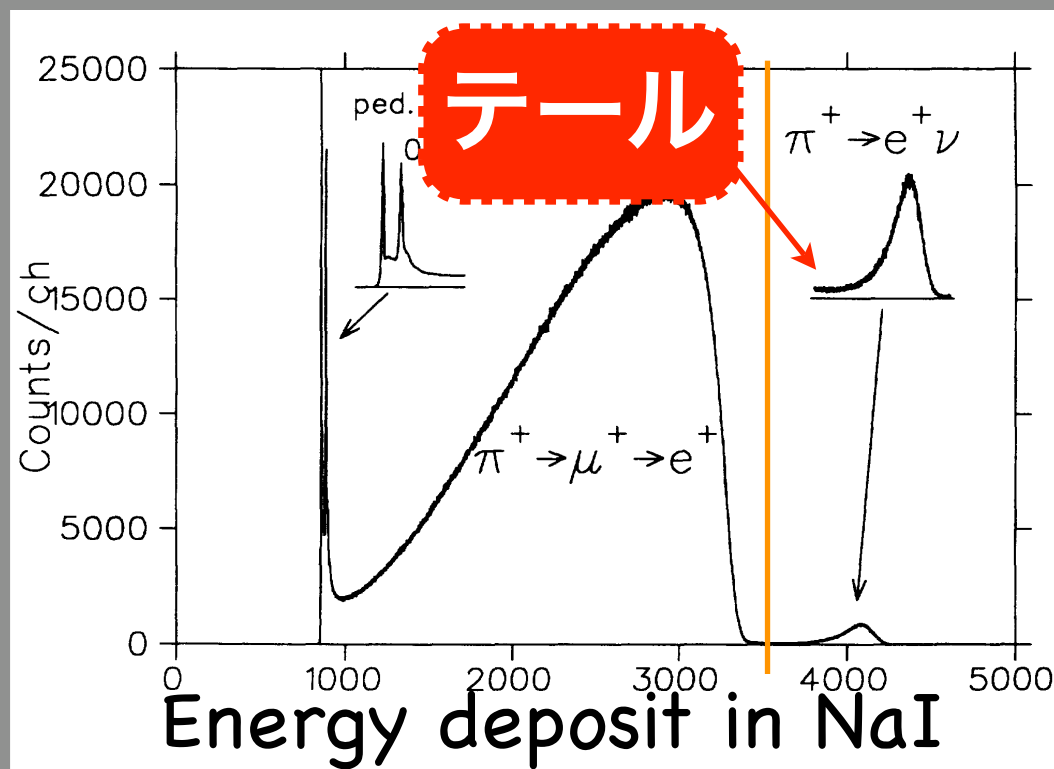
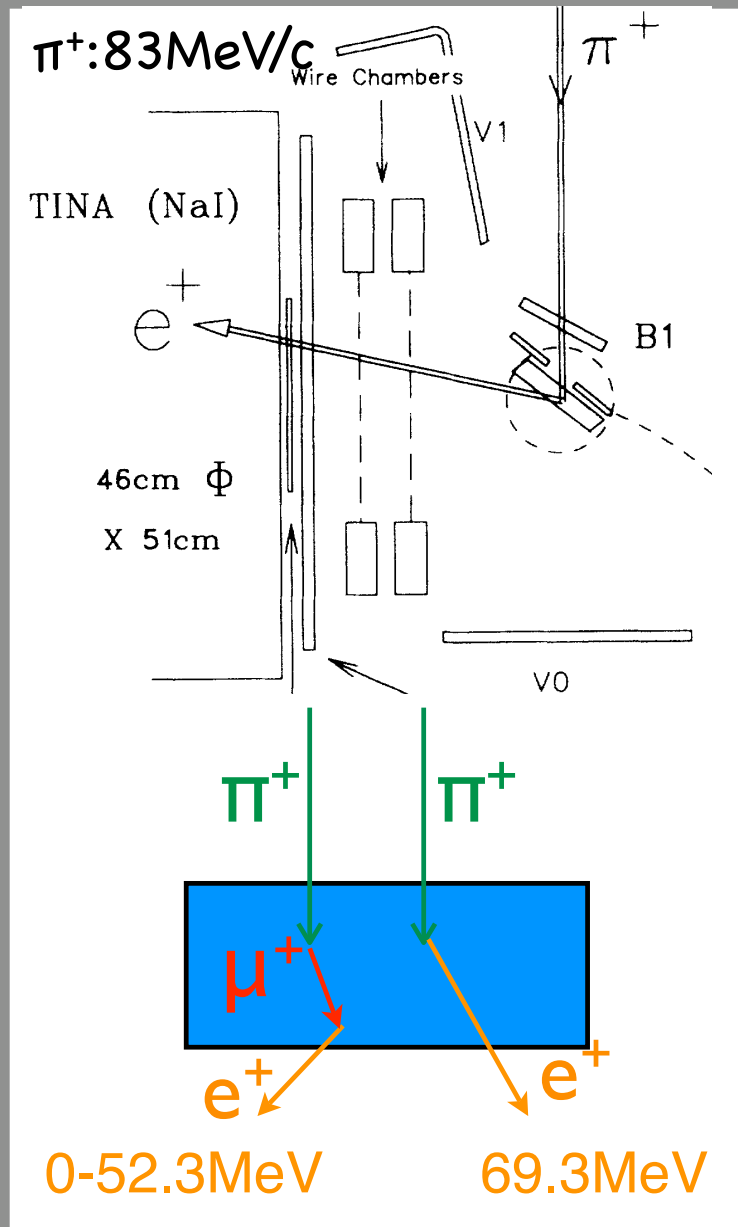
陽電子アクセプタンス(立体角)が小さい (~2%)

NaIの低エネルギーテールの補正の誤差がおおきい (0.3%)

TRIUMF E248 : 前実験 (~1992)

パイオンをターゲットに止め、崩壊陽電子を検出
 陽電子のエネルギー測定により崩壊モードを識別
 時間分布を同時フィットしてRaw Branching Ratioをもとめる

$$R_{exp} = R_{raw} \times \epsilon_{cor} \leftarrow \text{いくつかの補正が必要}$$



$$R^{exp} = 1.2265 \pm 0.0034(\text{stat}) \pm 0.0044(\text{sys}) \times 10^{-4} \quad \text{精度: } 0.5\% (0.28\%, 0.36\%)$$

問題点

陽電子アクセプタンス(立体角)が小さい (~2%)

NaIの低エネルギーテールの補正の誤差がおおきい (0.3%)

PIENU実験@TRIUMF (2008~)

目標精度：0.1%(現在の1/5)以下

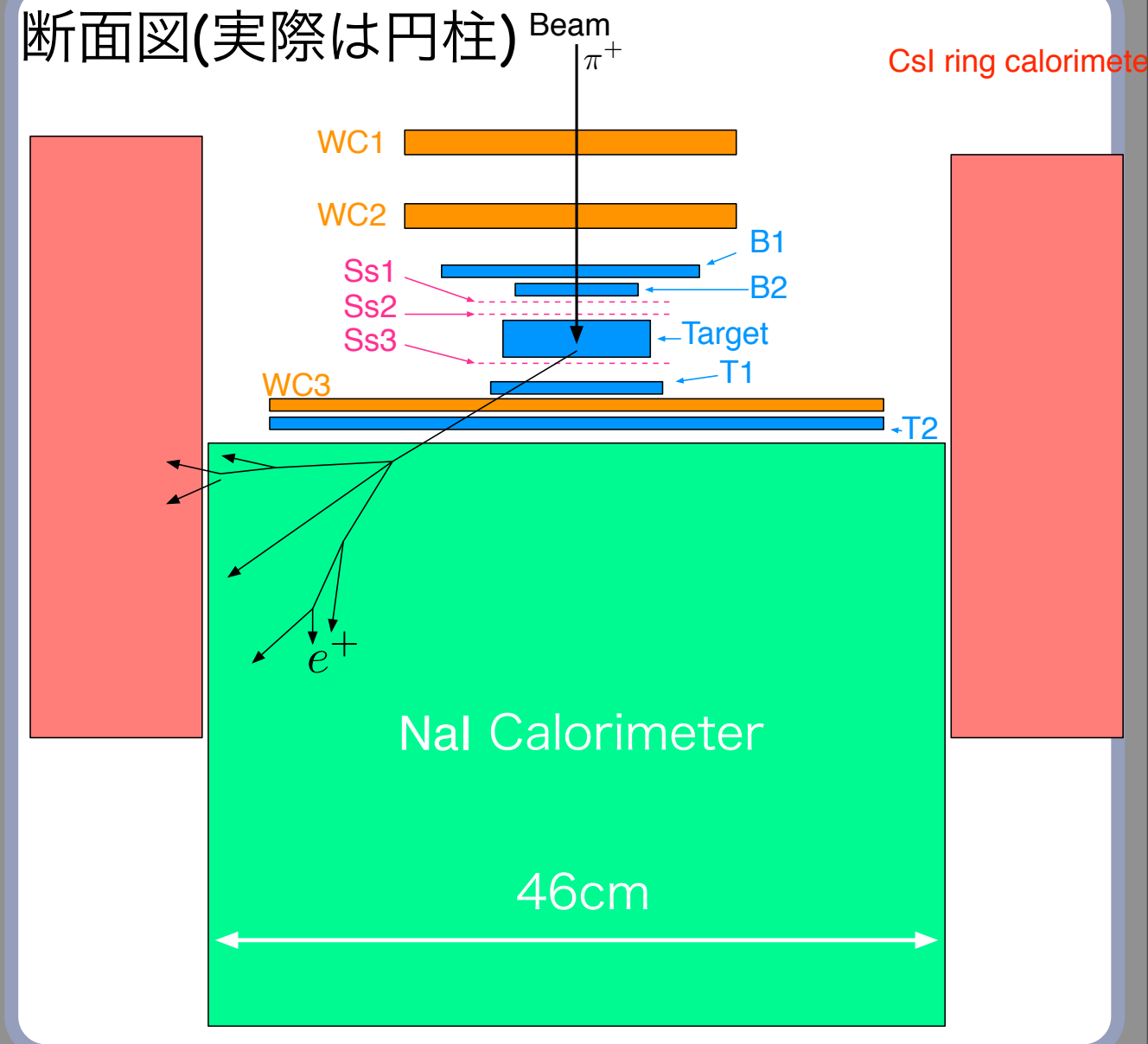
TRIUMF M13ビームライン

パイオンビーム: $73 \pm 1\% \text{MeV}/c$

検出器

- **ビーム軸上にNaI カロリメーター**
 - (+) 立体角 10 倍
 - (-) シャワーリーク増大、ビームBGの増加
- CsIのリング
 - シャワーリークの検出
- シリコン検出器
 - 入射、放出粒子トラッキング
- 500MHz FADC読み出し

断面図(実際は円柱)

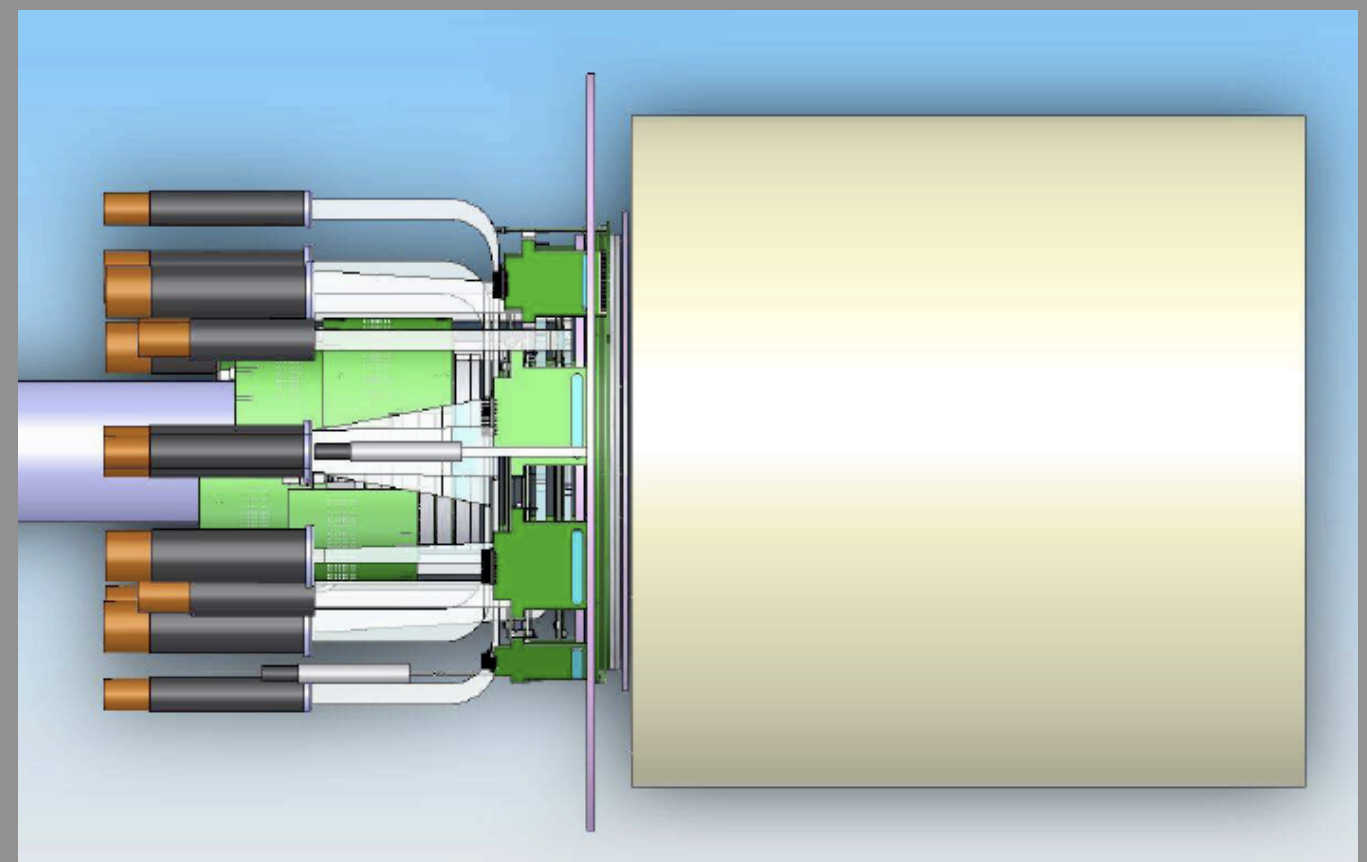
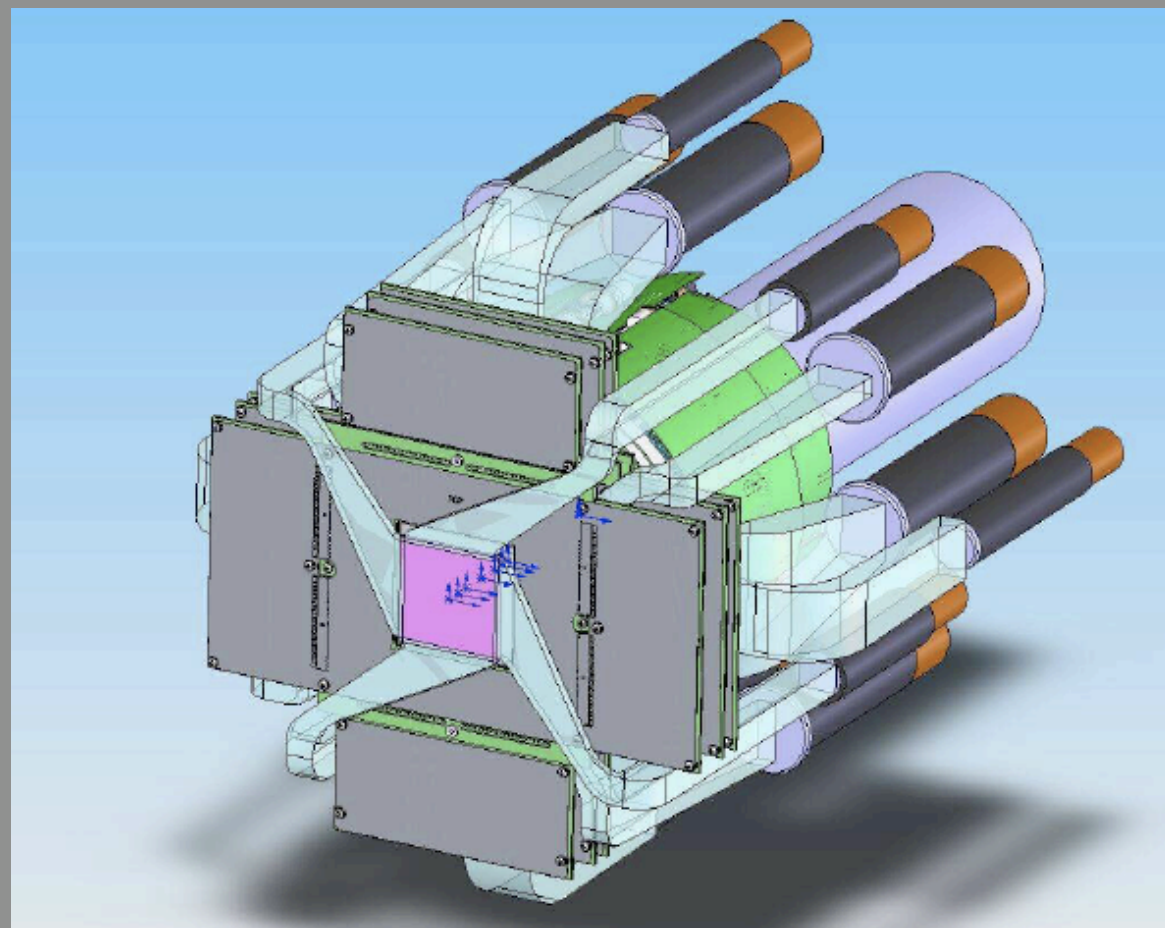
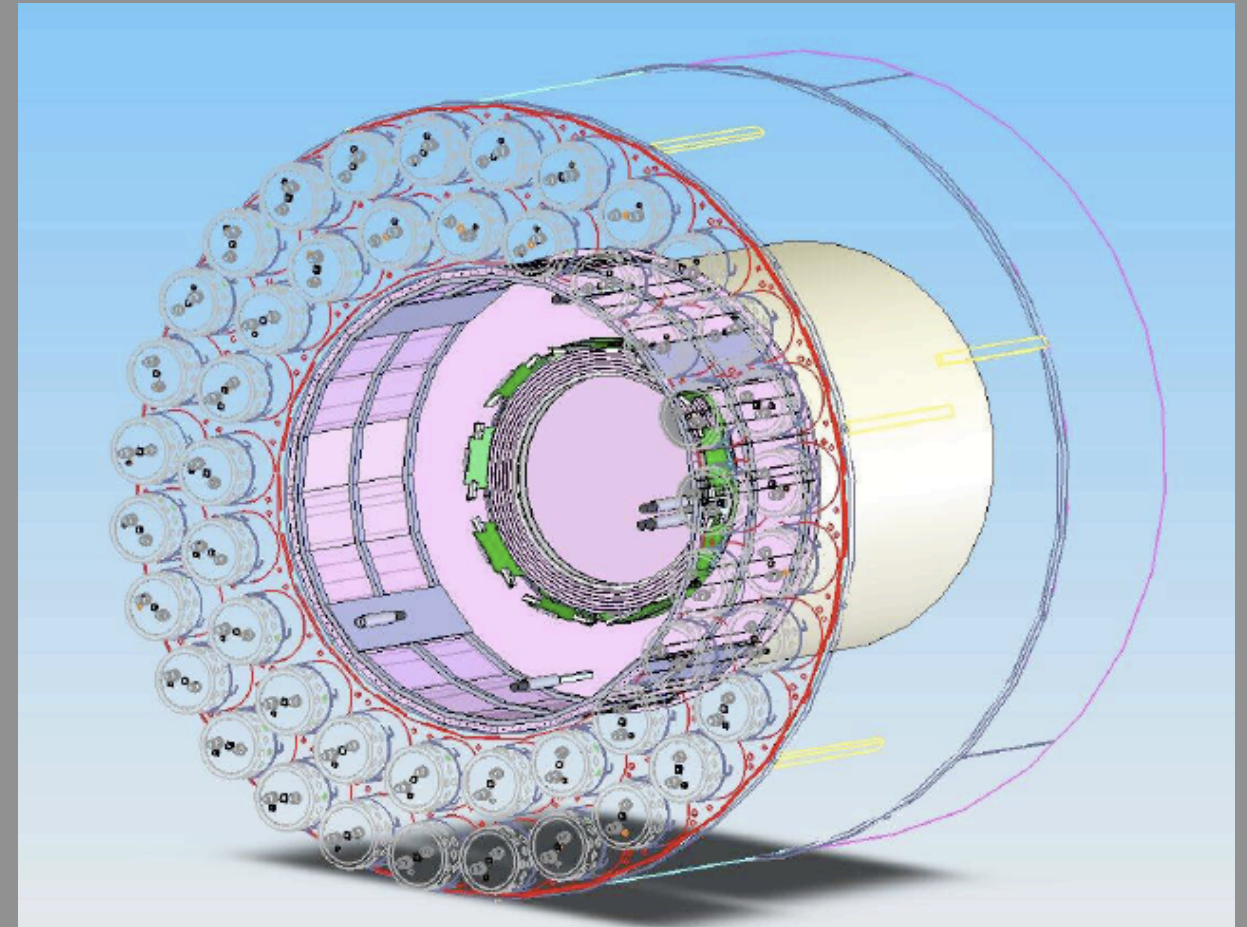
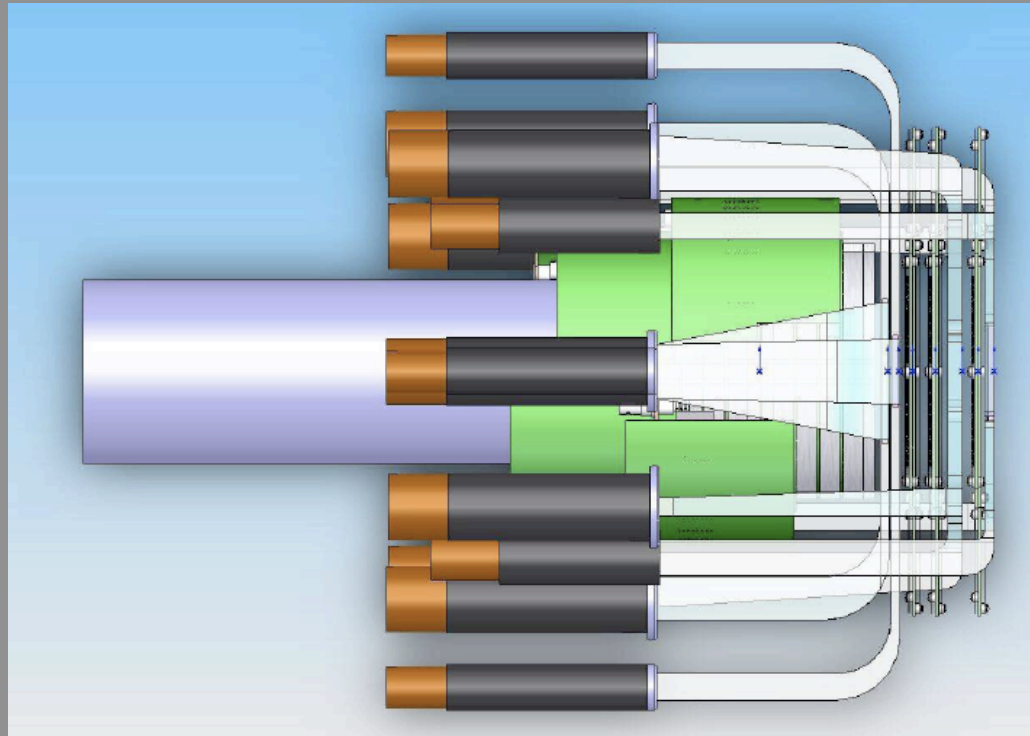


改善点

統計 30 倍：立体角 10 倍(25%) Runタイム 3 倍以上

系統誤差 1/5：テール補正の誤差 1/10(FADCデータの波形解析、トラッキング)

PIENU Detactor



ビームテスト@TRIUMF、M9Aビームライン, 2006/12

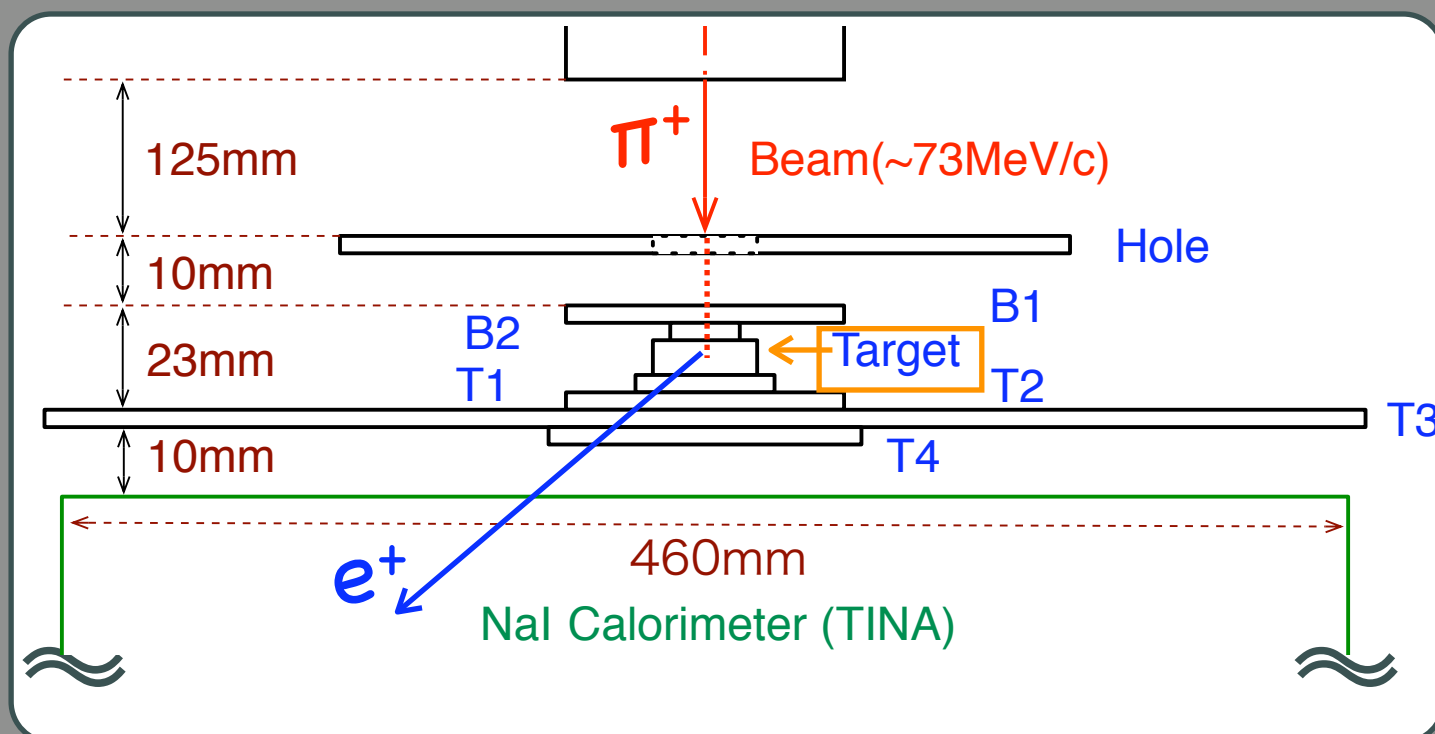
目的

- 500MHz FADCシステムのテスト
- ターゲット信号の波形解析
- テール補正のstudy
- ビーム軸上にNaIを置いたことによるBGのstudy

セットアップ

シンチレータとNaIのみ、PMT読み出し

CsI、Wire Chamber、Silicon Strip は無し

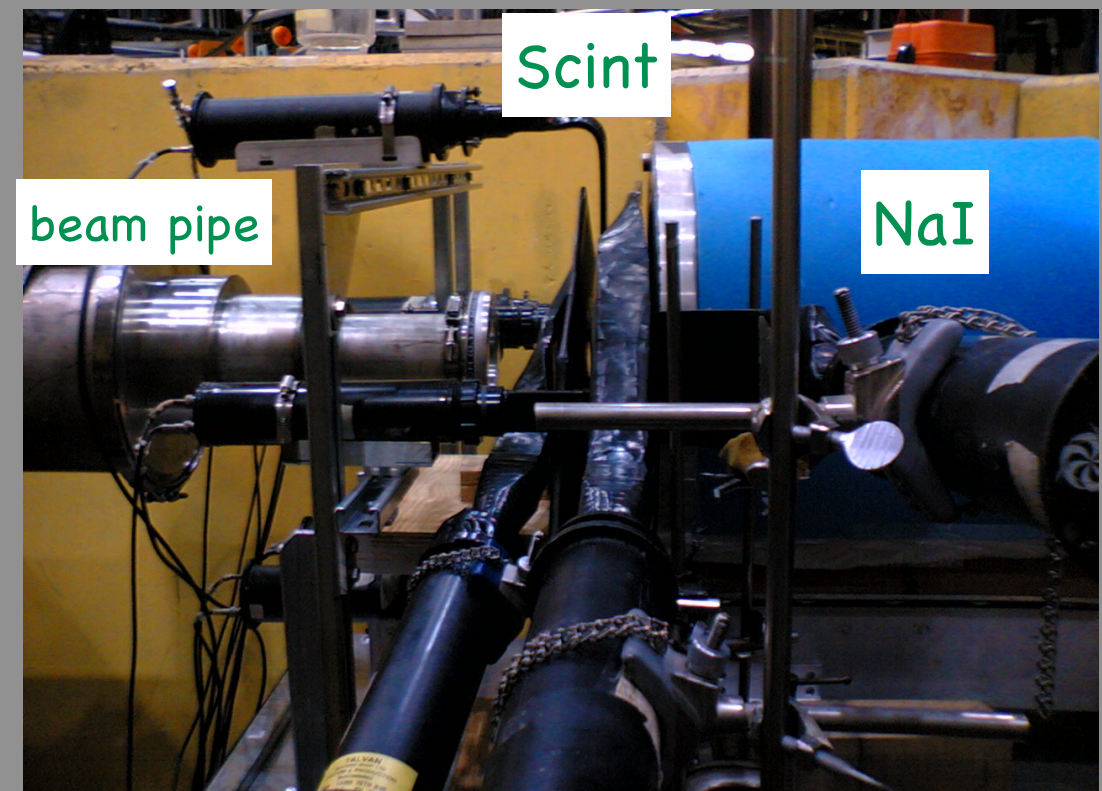


ビーム

73MeV/c

$\pi:\mu:e=3:2:5$

~80kHz

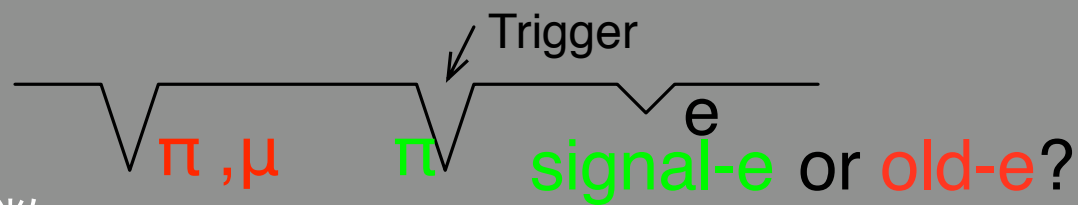


統計数の見積り

事象選択

- パイルアップ除去
- エネルギー損失, TOFによる π^+ 選択
- 突抜け事象の除去
- プリパイルアップ除去

トリガー前6.6 μ sの間に μ 、 π がある事象を除去
(FADCのGATEは7.8 μ s)



統計数

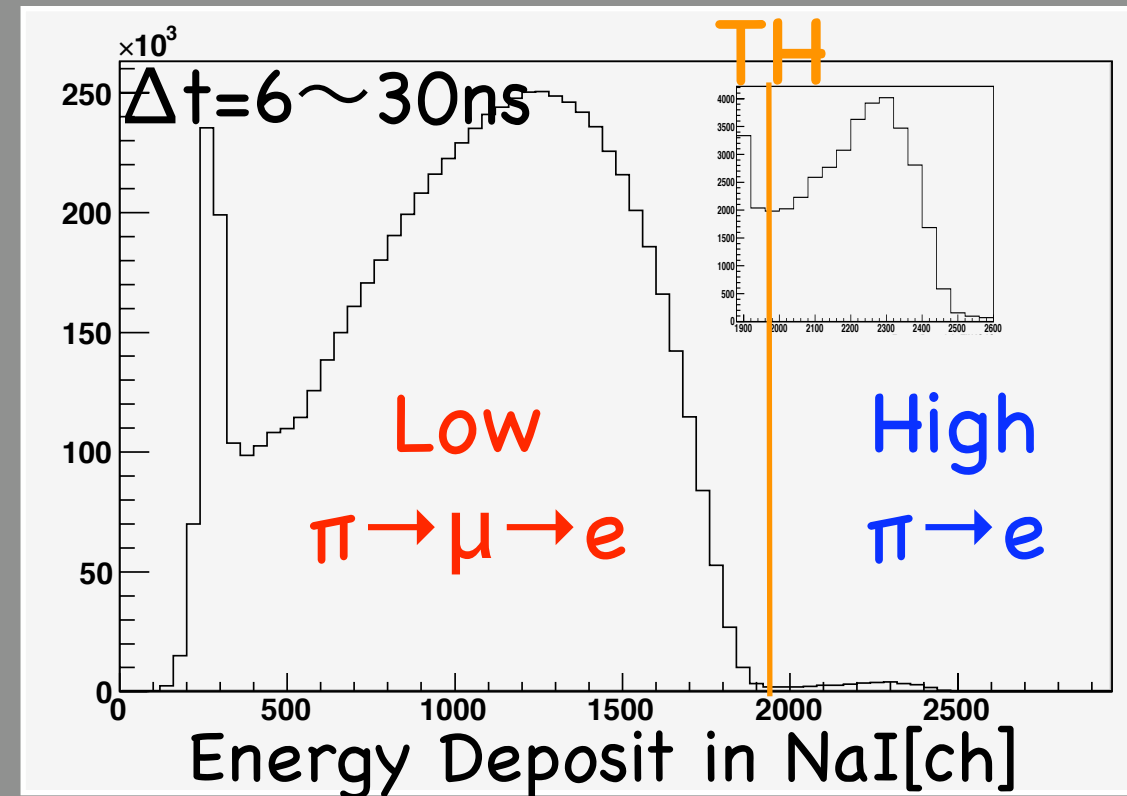
$\pi \rightarrow e$ 事象 46k/60h (前実験:200k)

前実験の30倍の統計 \rightarrow 約320日

ビームライン改善によるビーム陽電子の減少:1/10

パイオンレートの増加:2倍

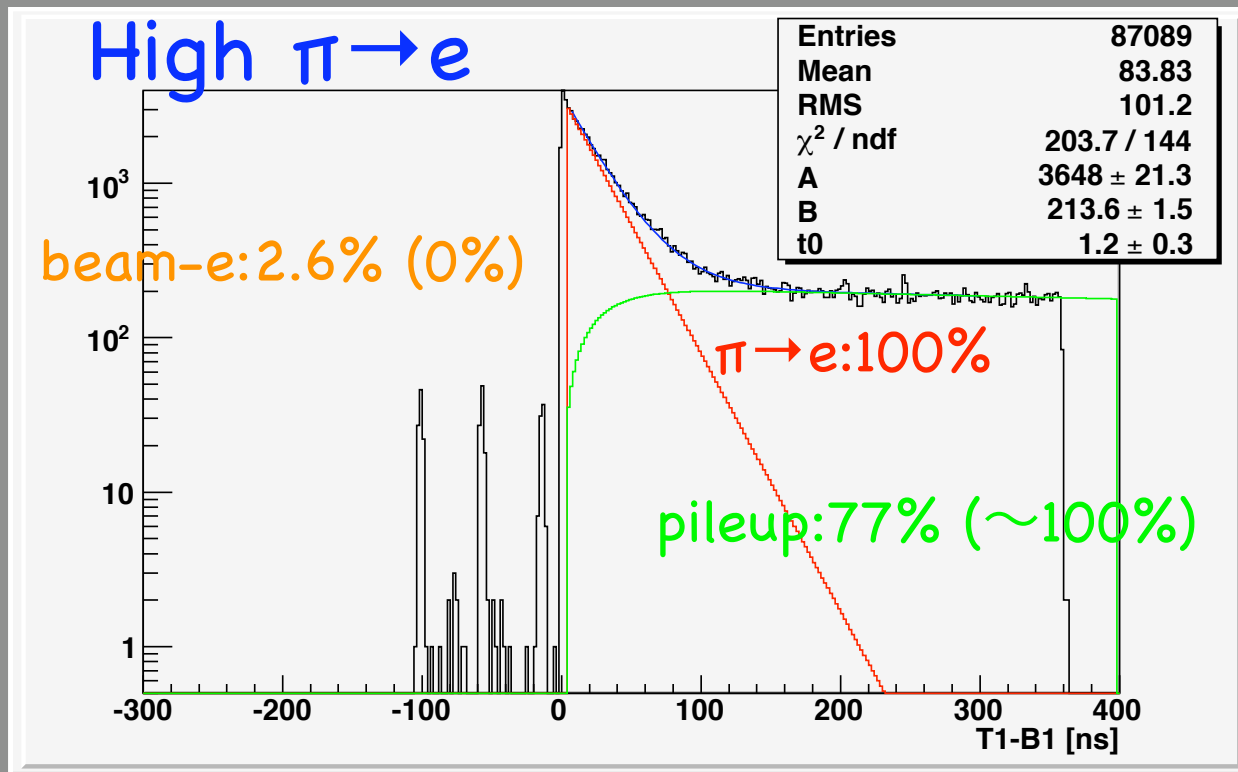
DAQの改善



\rightarrow 2倍ほどの改善が期待

Beam background

Background(1)



beam-e inefficiency background

ビーム軸上にNaIを置いたことによるBG

分布は理解できるので許容できそう

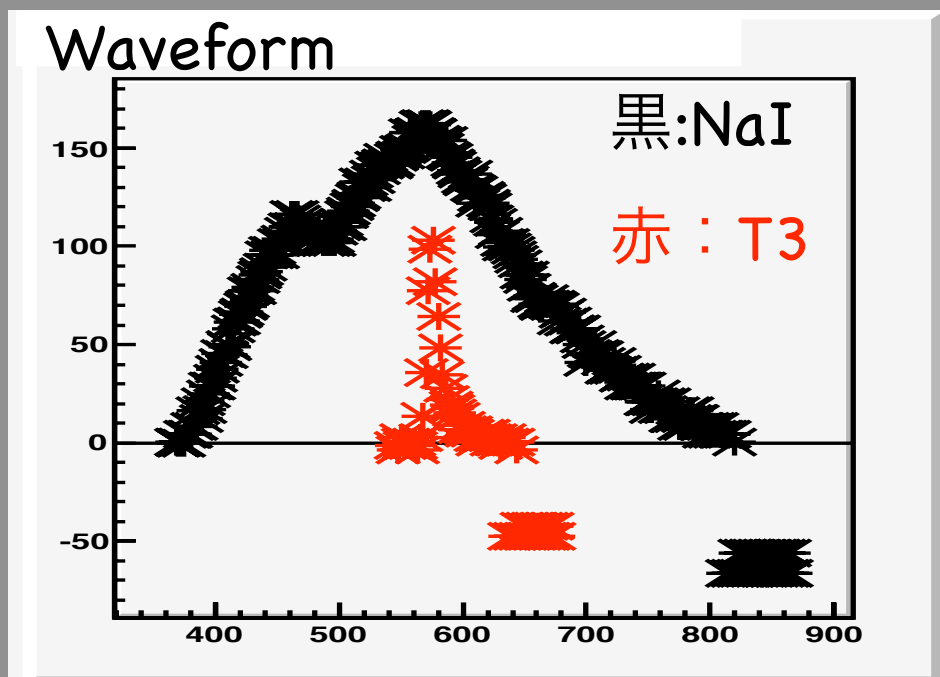
pileup background

前実験と同程度

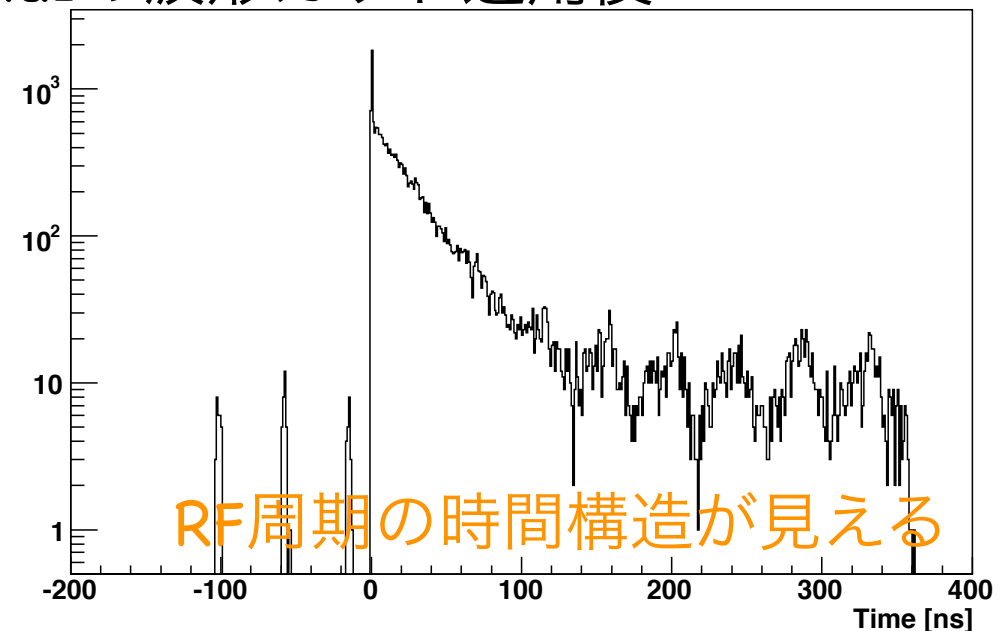
1/10程度に減らしたい

Pileup background

中性粒子によるpileupが支配的(~73%)



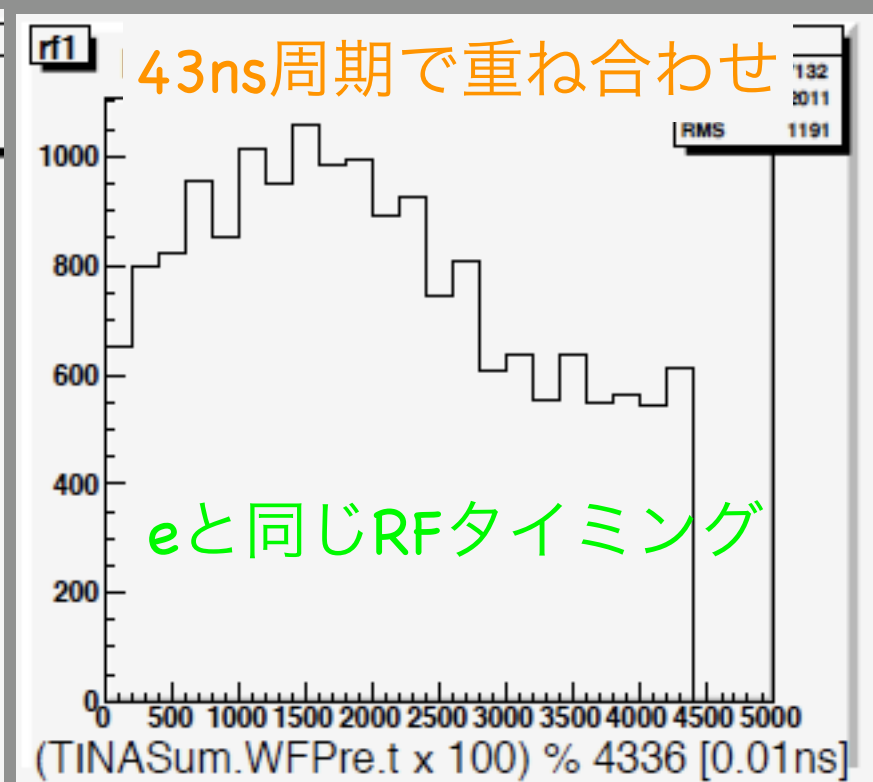
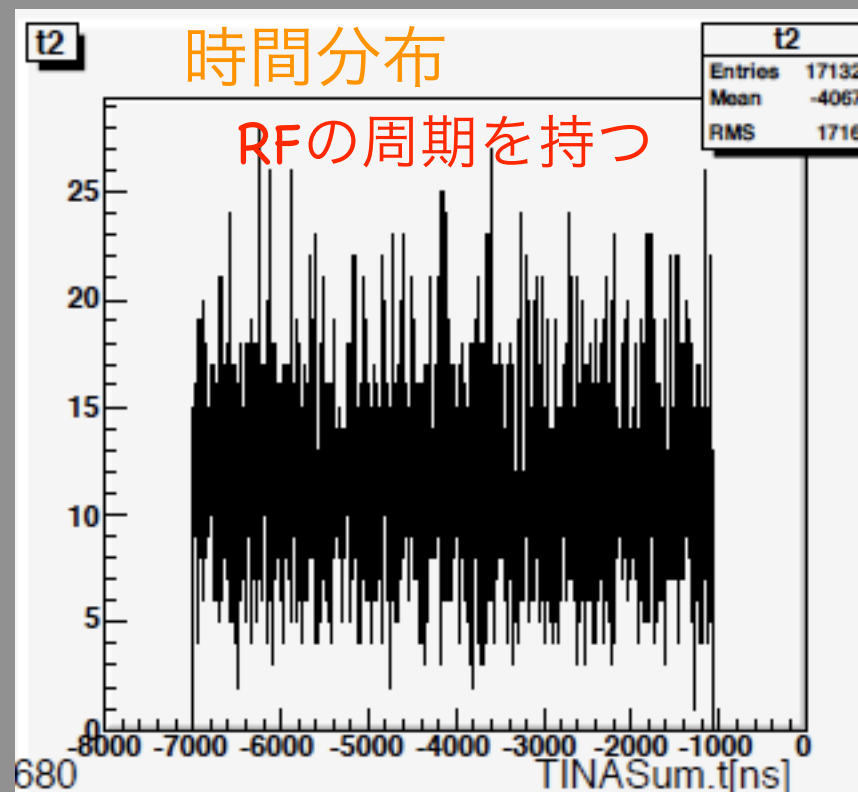
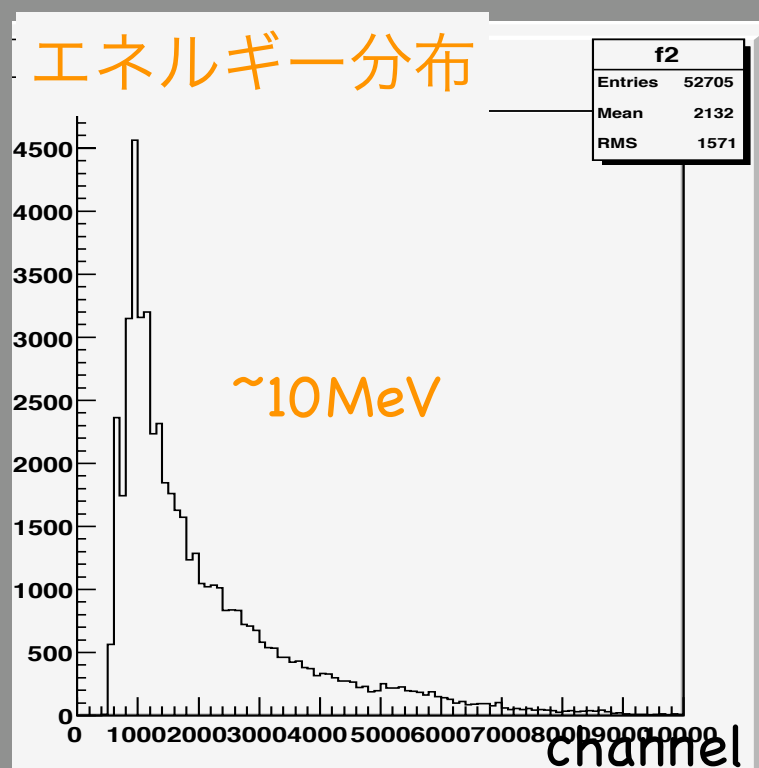
NaIの波形カット適用後



Background(2)

中性粒子

Plastic Scintillatorsにhitなし かつ NaI hit \rightarrow 11.3kHz



beam中に中性粒子が含まれている

最終コリメーターに当たったeが γ を作り出していると考えられる

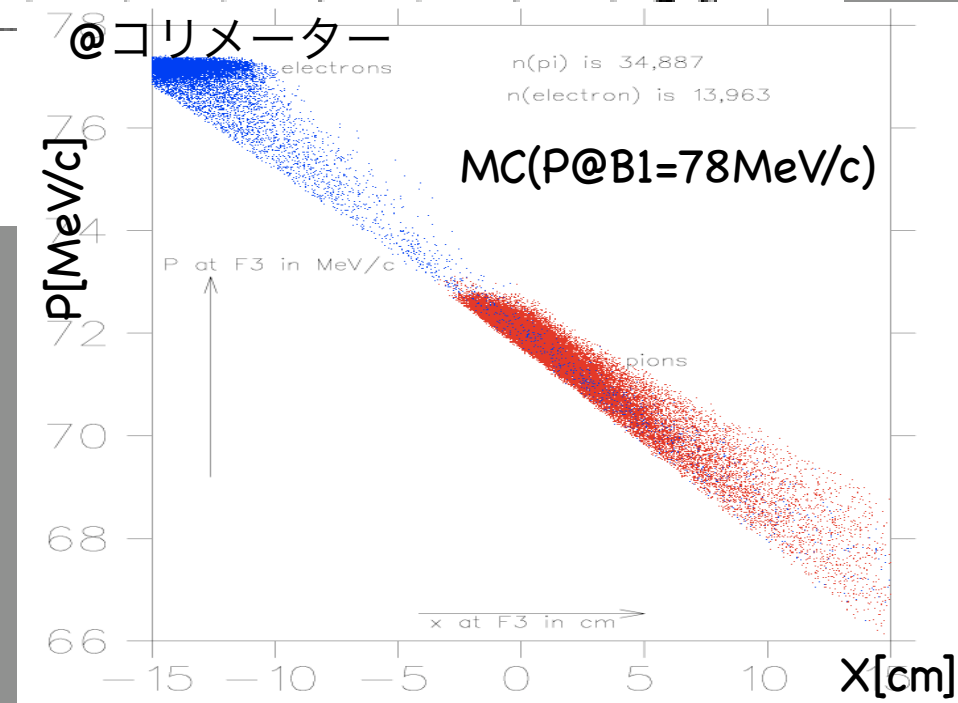
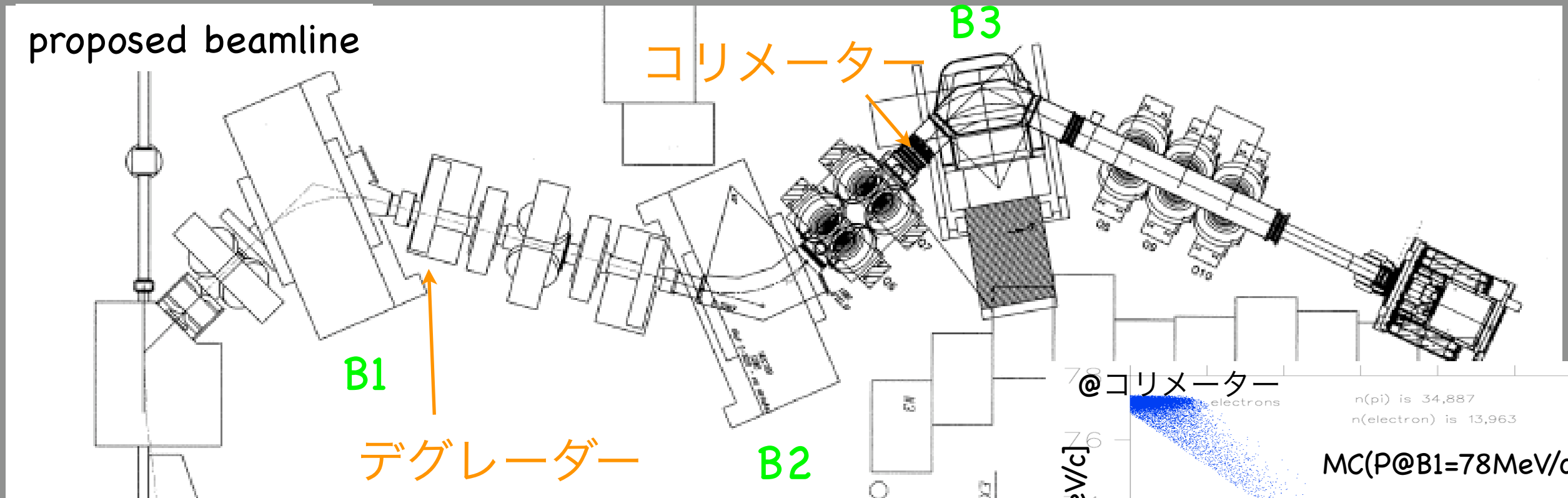
ビームラインの改善が必要

ポジトロンを減らす \rightarrow ごみデータの減少、beam-eBGの減少

中性粒子を減らす \rightarrow pileup BGの減少

M13ビームライン

proposed beamline



陽電子の削減

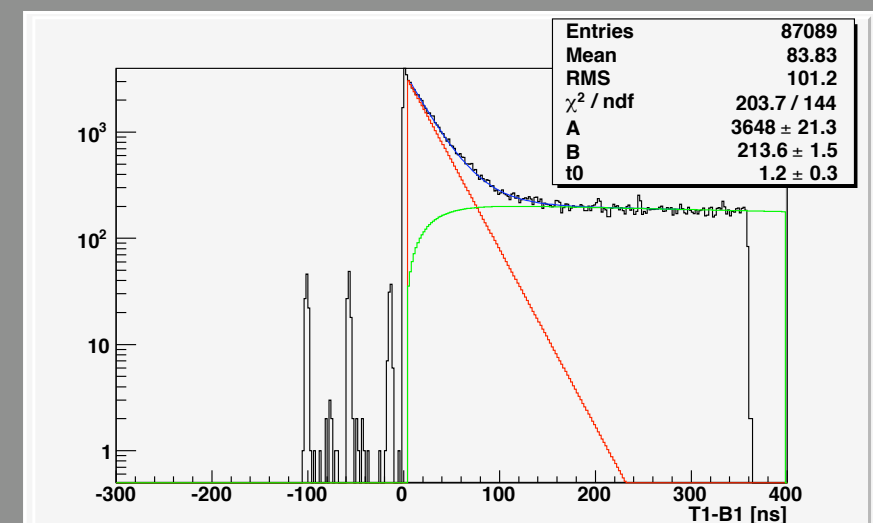
- B1で運動量を選ぶ
- デグレーターにより e, π の運動量を変える
- B2+コリメーターでもう一度運動量を選ぶ

中性粒子の削減

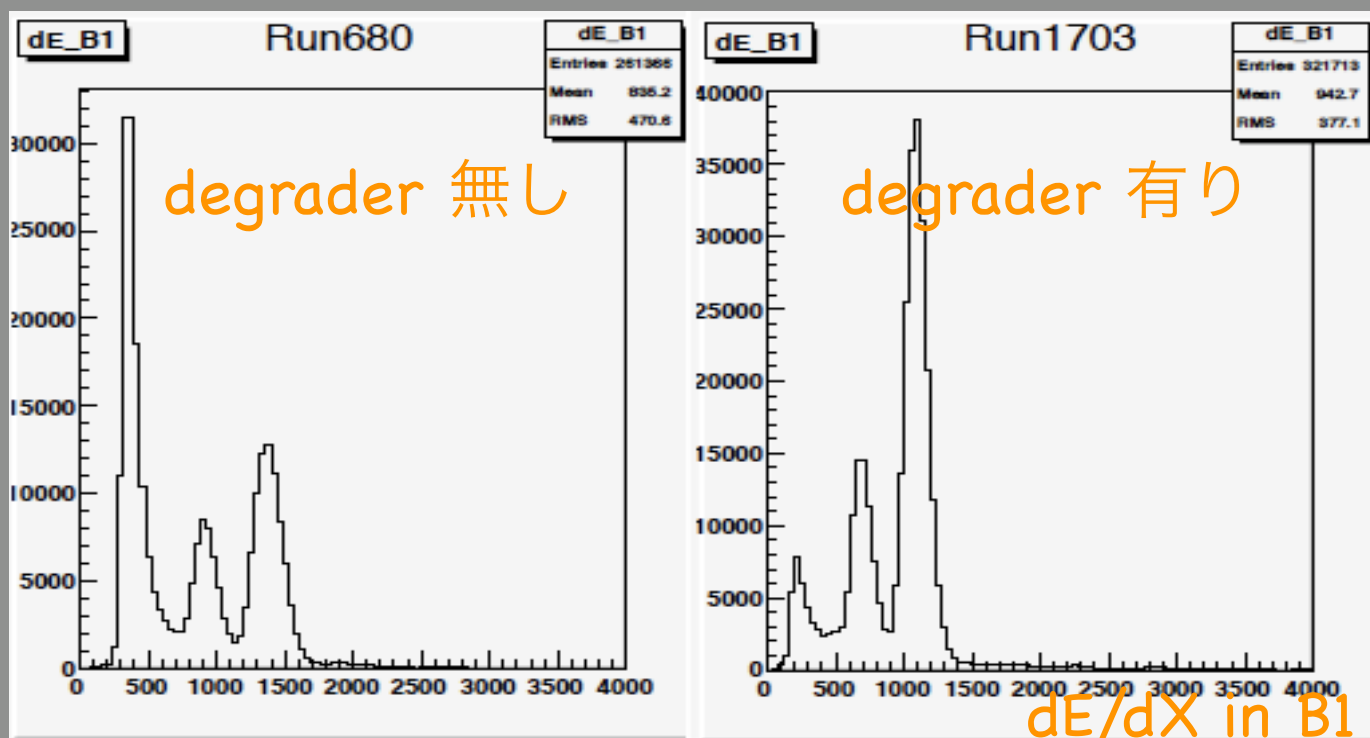
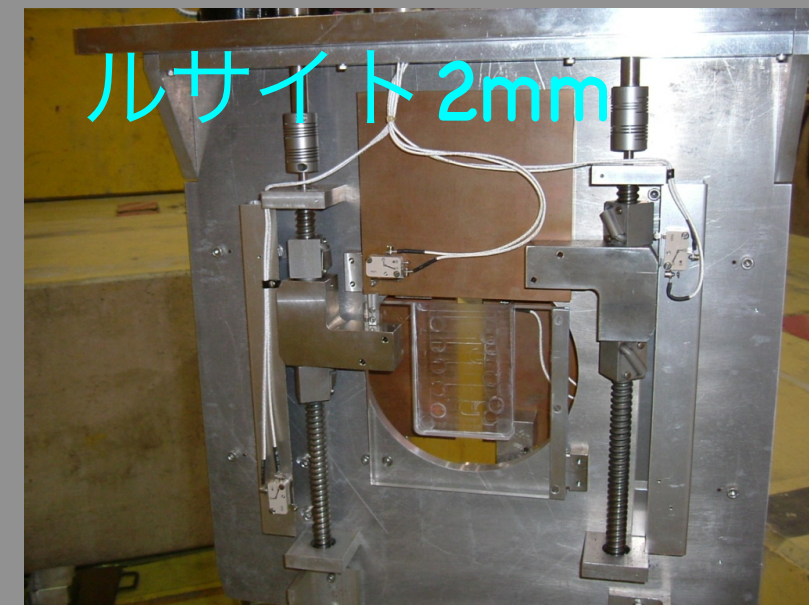
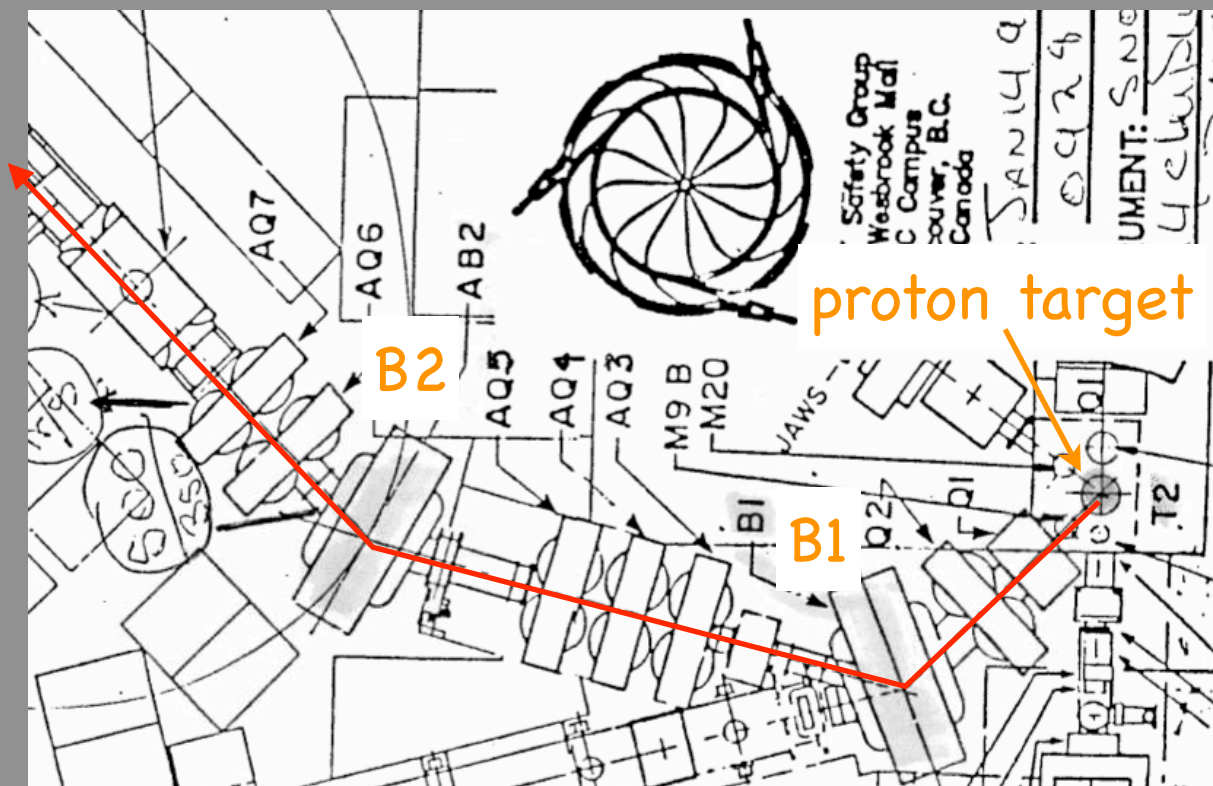
- コリメーターの後もう一度B3で曲げる
- しっかりシールドする

陽電子10分の1

中性粒子が100分の1以上が期待



電子削減のテスト @ M9 ビームライン



e:37, μ :16, π :25 kHz (degraderなし Dec06)

e:10, μ :26, π :60 kHz (degrader有り Aug07)

π/e は10倍改善

陽電子1/10の削減に成功

今後の予定

- ～2008/3 検出器の製作、テスト
サポート
Wire Chamber
CsIリング
シリコン検出器
- 2008/4～6 エンジニアリングラン
- 2008/8～ 物理データ取得開始

まとめ

- 分岐比 $R = \Gamma(\pi \rightarrow e) / \Gamma(\pi \rightarrow \mu \rightarrow e)$ を0.1%以下の精度で測定することを目指したPIENU実験を準備中であり、2008年8月から物理測定を開始する予定である。
- ビームテストを行い基礎的な解析をおこなった。
 - 半年から一年で前実験の30倍の統計が期待。
 - ビーム直下にNaIをおいたことによる致命的なBGはみられなかった。
 - ビームラインの改善によりパイルアップによるBGは前実験の1/10程度になると期待できる
- 現在検出器を製作中。

Backup slide

テール補正

テール補正(1):ターゲットカット

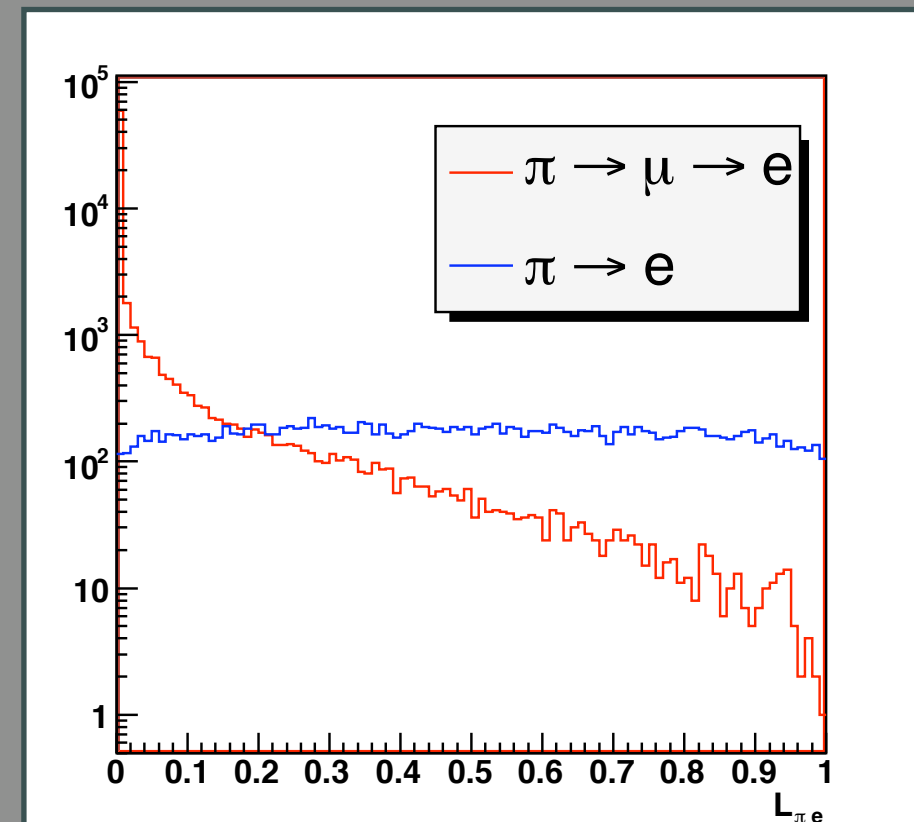
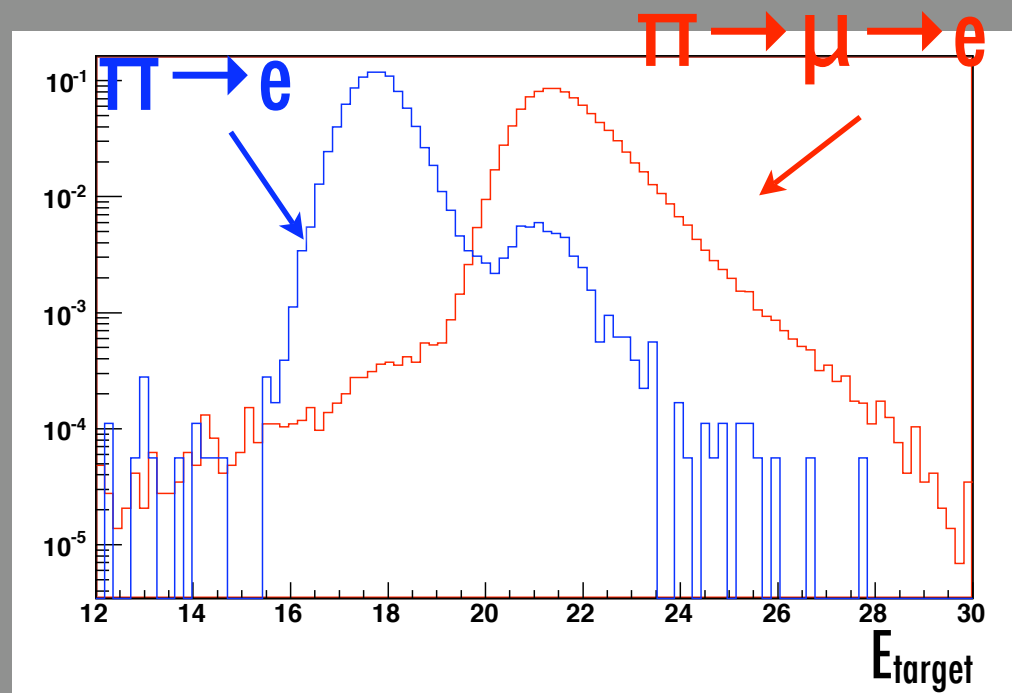
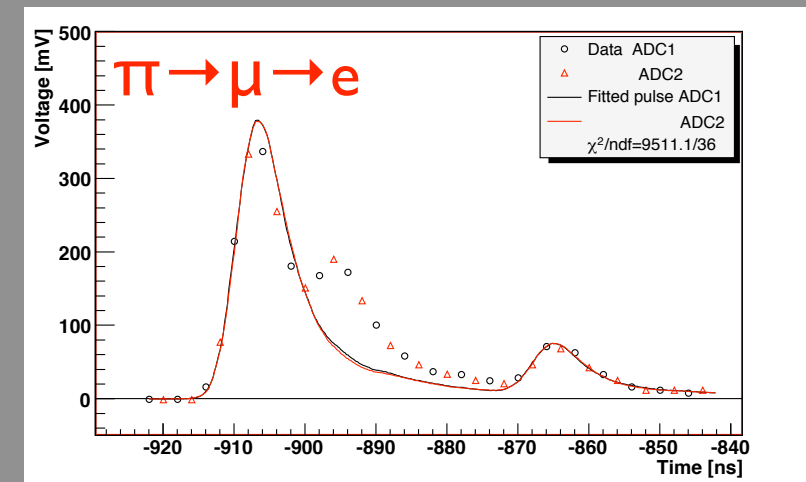
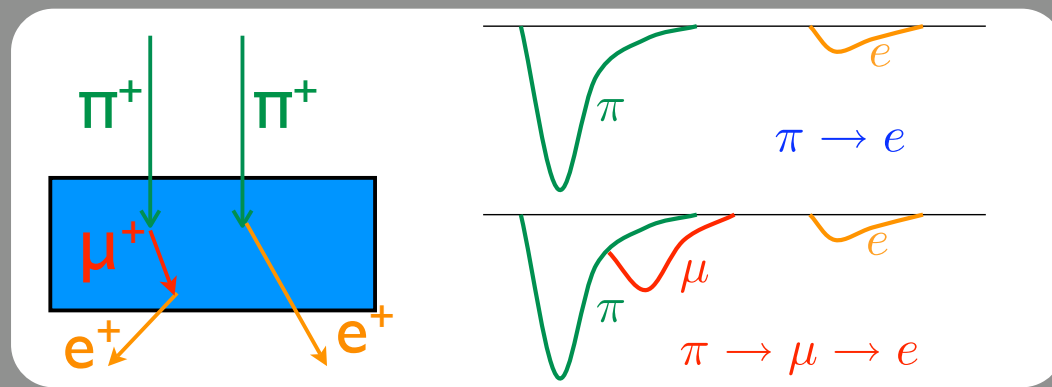
NaIカロリメーターで測定した $\pi \rightarrow e$ (69.3 MeV)の低エネルギーテールを見積る

カロリメーターの応答関数のテール(シャワーリーク)

- ターゲットの情報で $\pi - \mu - e$ の μ を識別し、 $\pi - \mu - e$ をサプレスしたNaIスペクトルを作成

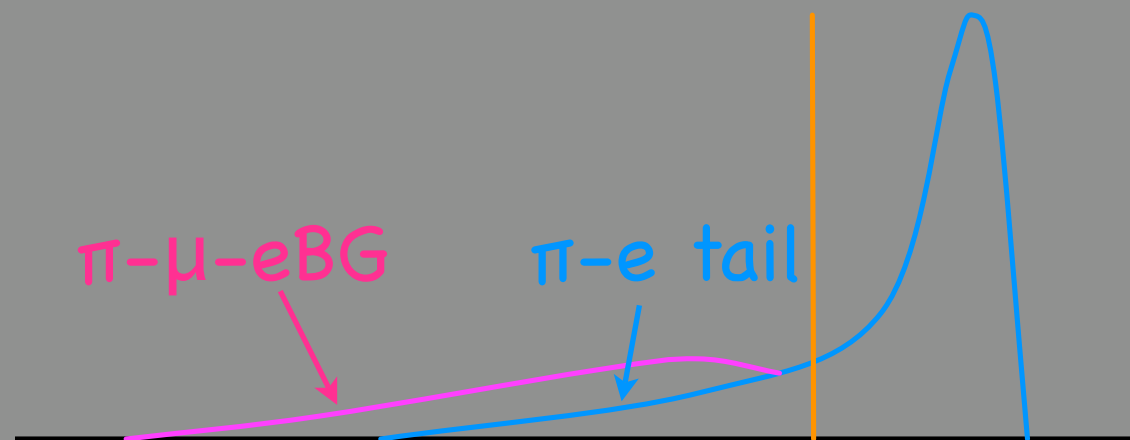
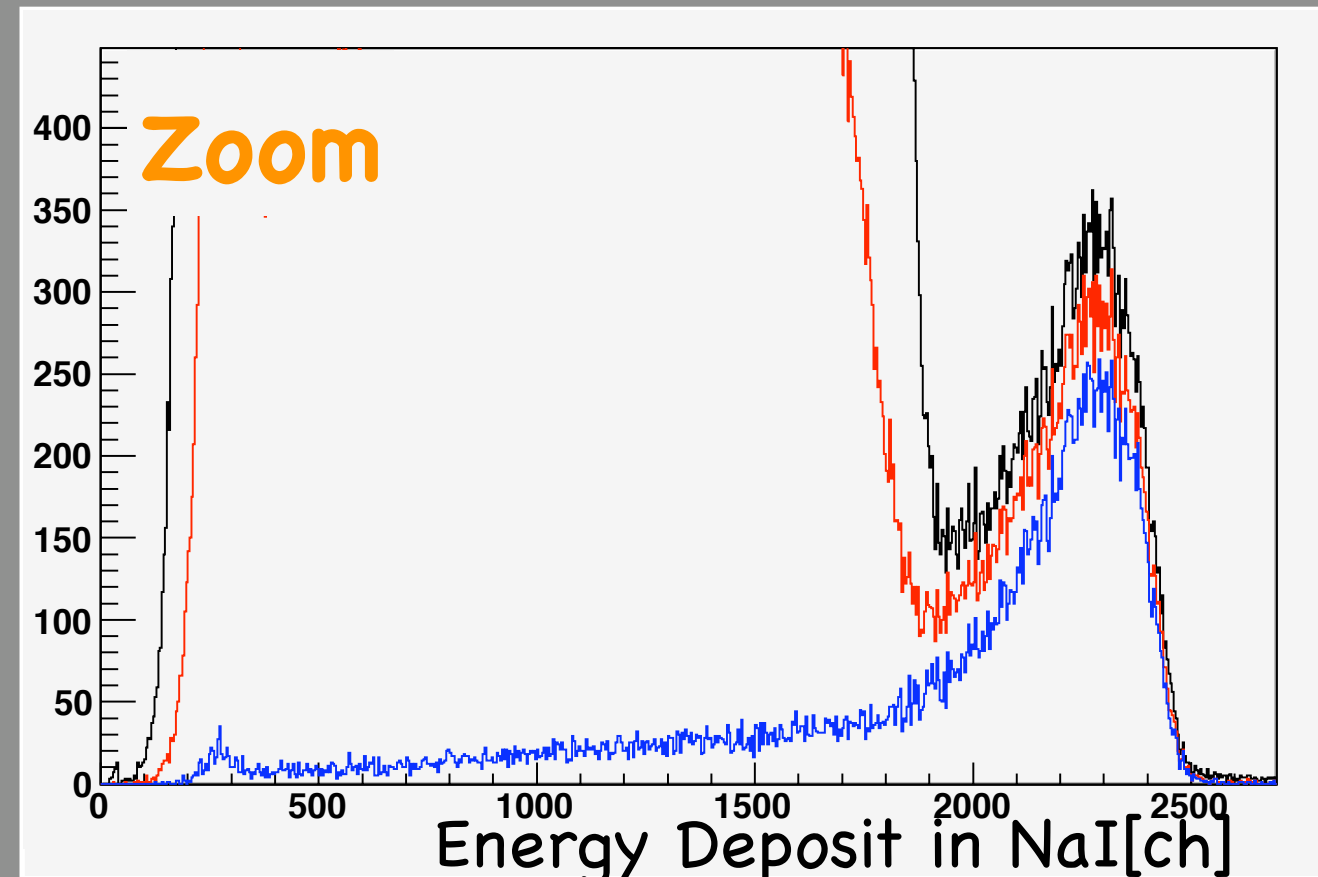
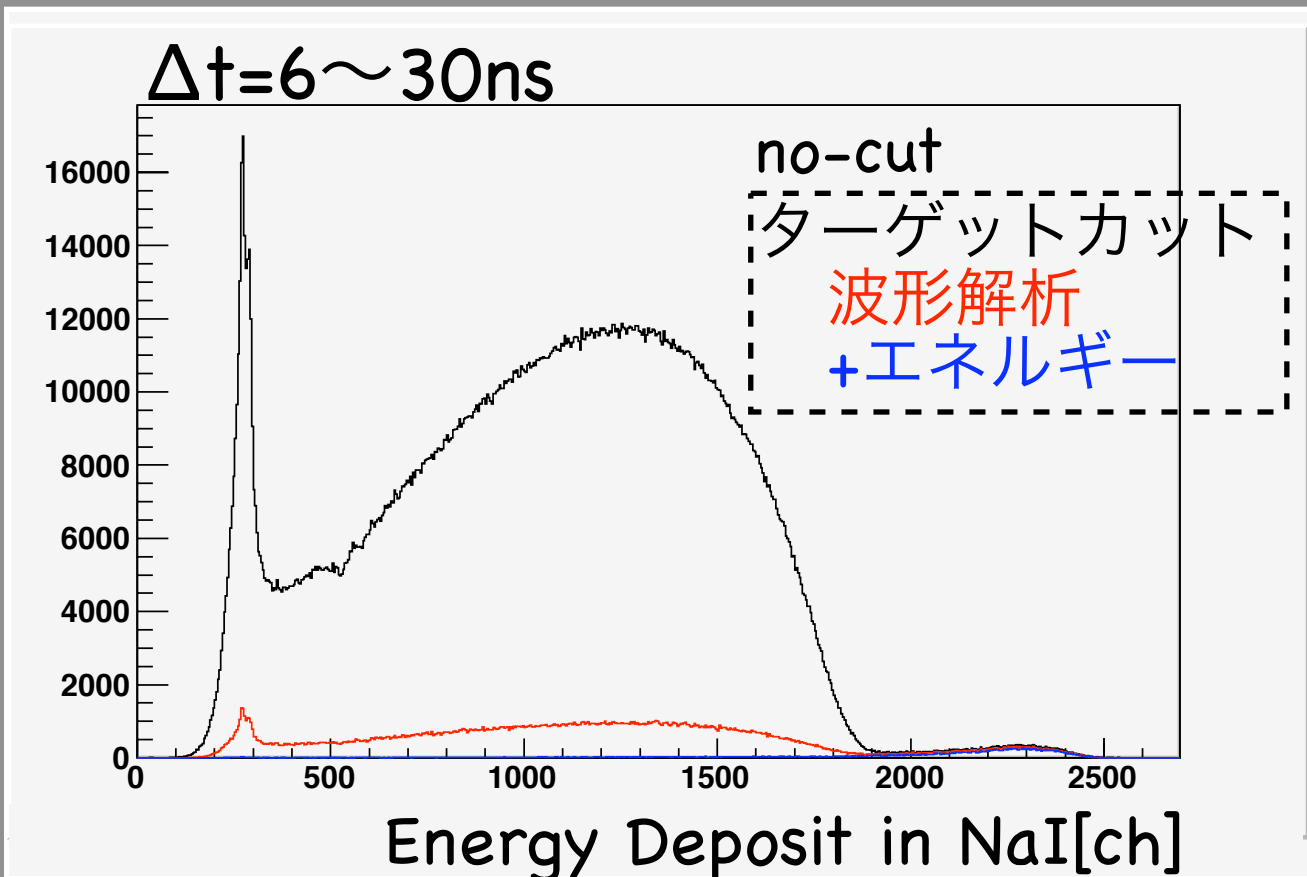
エネルギー損失: +4 MeV

波形解析: 3パルス



テール補正(1)

- ターゲットの情報で π - μ - e の μ を識別し、 π - μ - e をサプレスしたNaIスペクトルを作成



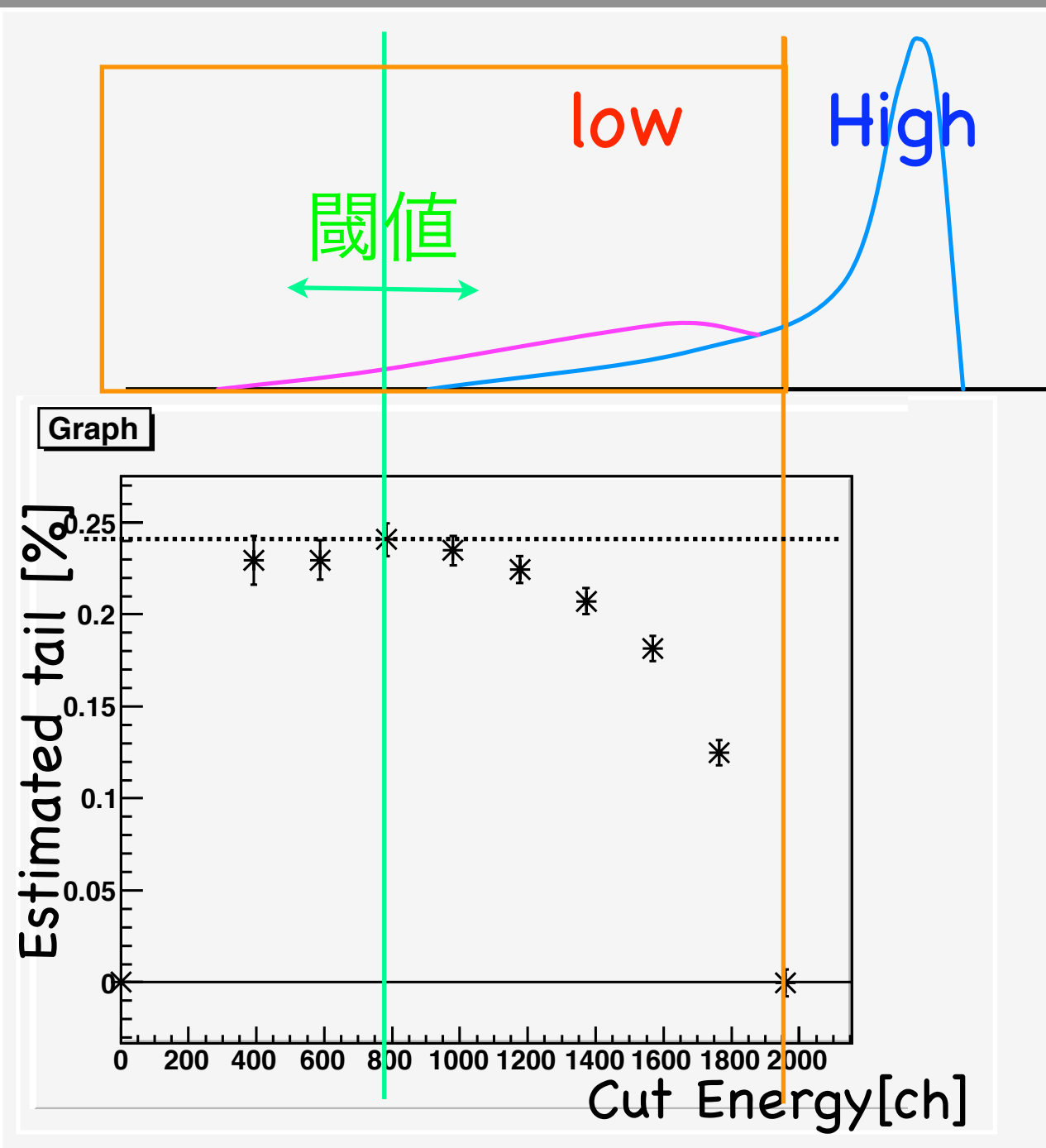
π - μ - e BG

2種類に分別できる

Decay-at-rest

Decay-in-flight

テール補正(2)



1. ある閾値以下の事象数を数える
2. これがすべて π - μ - e と仮定してlow領域全体の π - μ - e の数を見積る
3. これを全low事象からさし引いて
4. π - e テールを見積もる

誤差の要因

統計：30倍

π - μ - e BGの量： π - e の4%以下が目標

ビームテストの解析結果

(%はHigh領域の事象数に対して)

π - e テール : 24%

π - μ - e BG : 27%

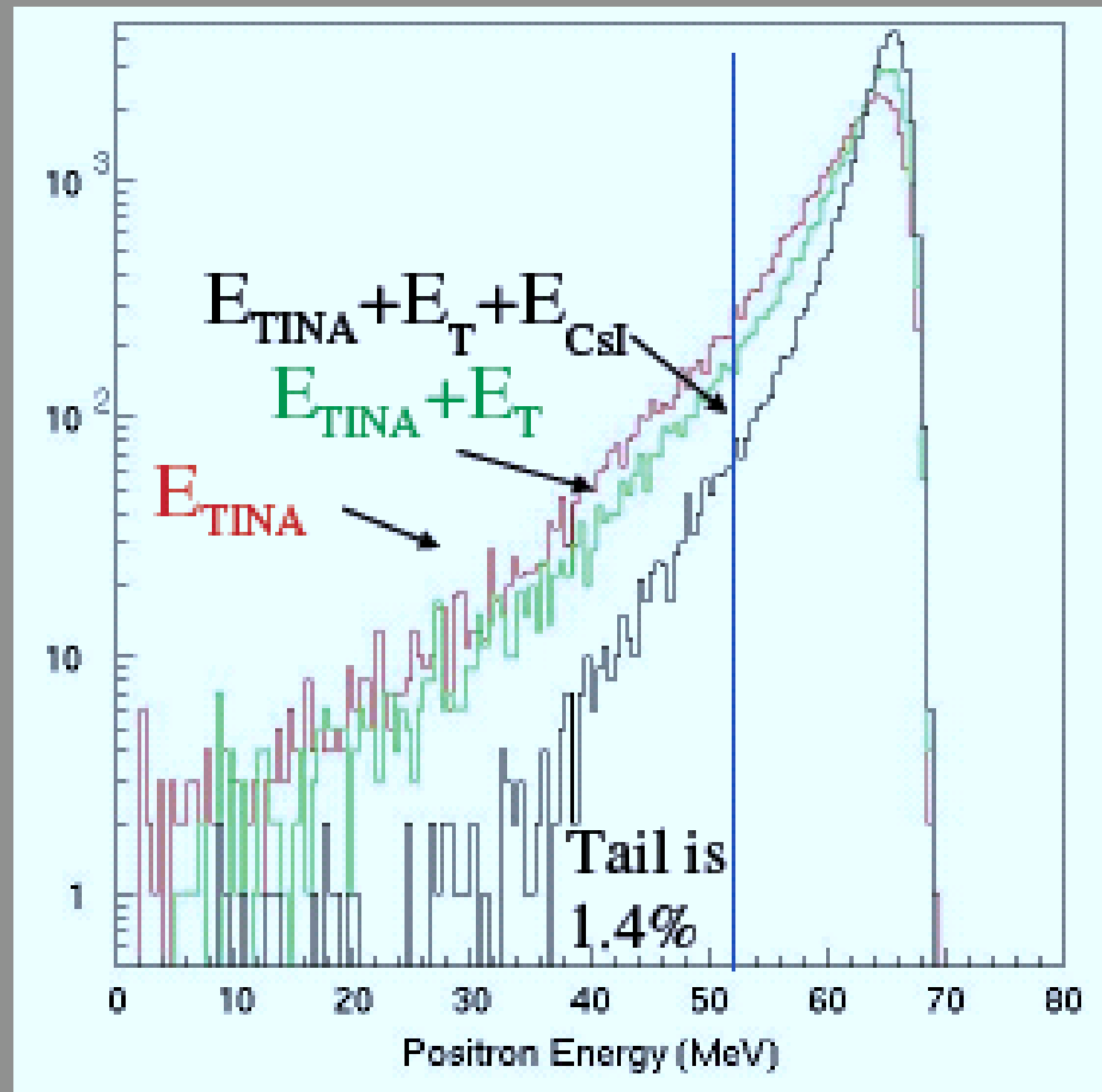
DIF BGが支配的(波形解析, MCから)

本実験での期待値

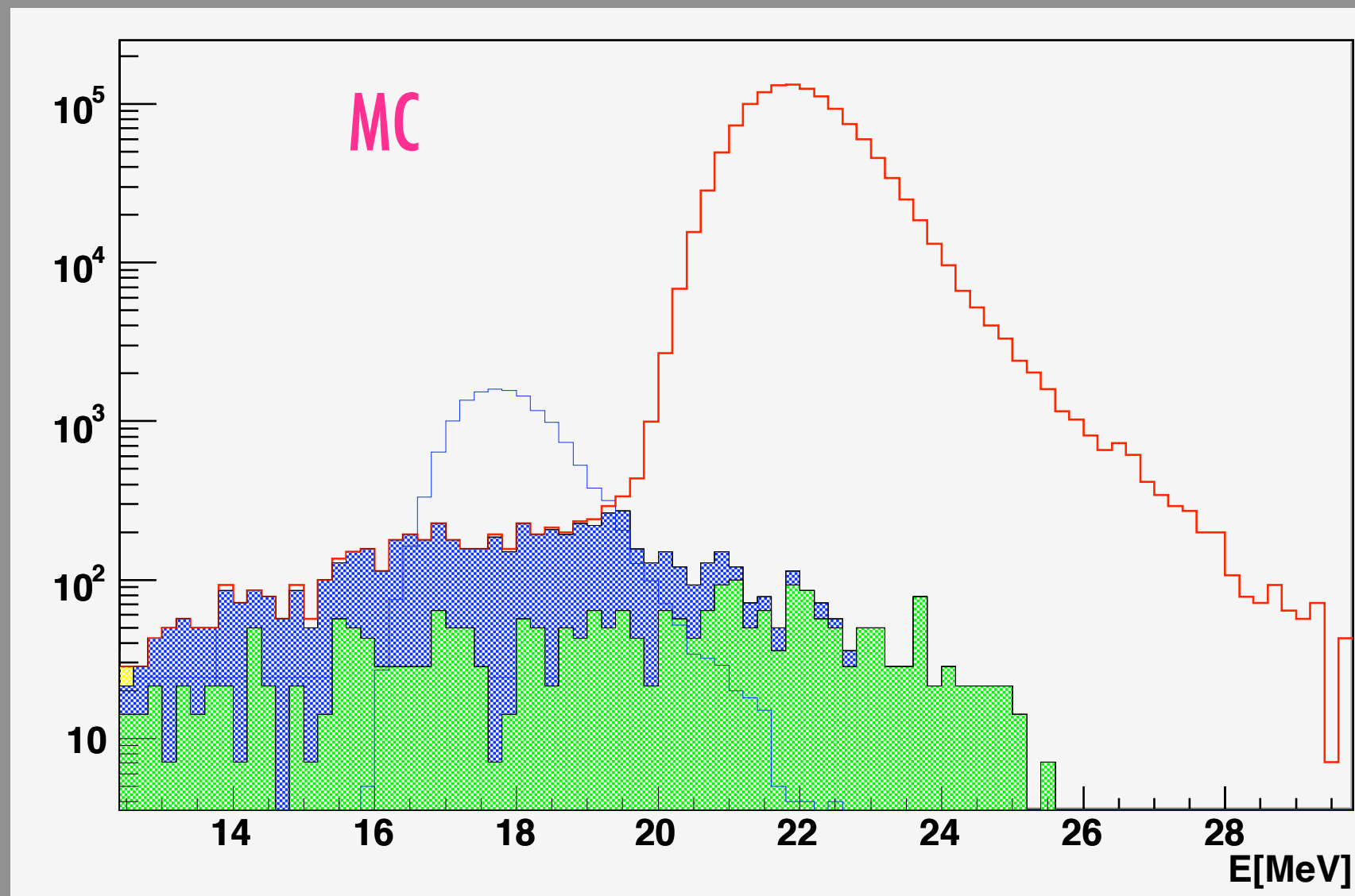
π - e テール：CsIリングにより 24%→2%

π - μ - e BG：シリコン検出器によるトラッキング 27%→3%

Tail with CsI



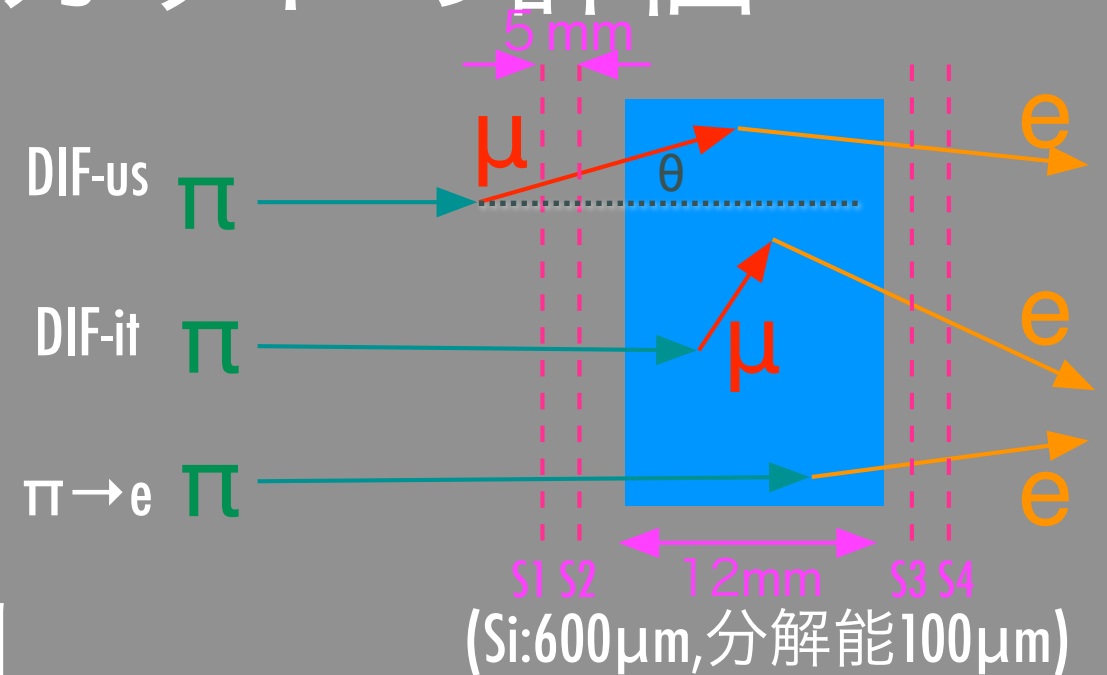
DIF事象のターゲットでのエネルギー損失(MC)



トラッキングによるDIFカットの評価

Monte Carloによる評価

- DIF事象によるバックグラウンド:22%
- ターゲットの上流で崩壊(DIF-us):19%
- ターゲット中で止まる前に崩壊(DIF-it):3%



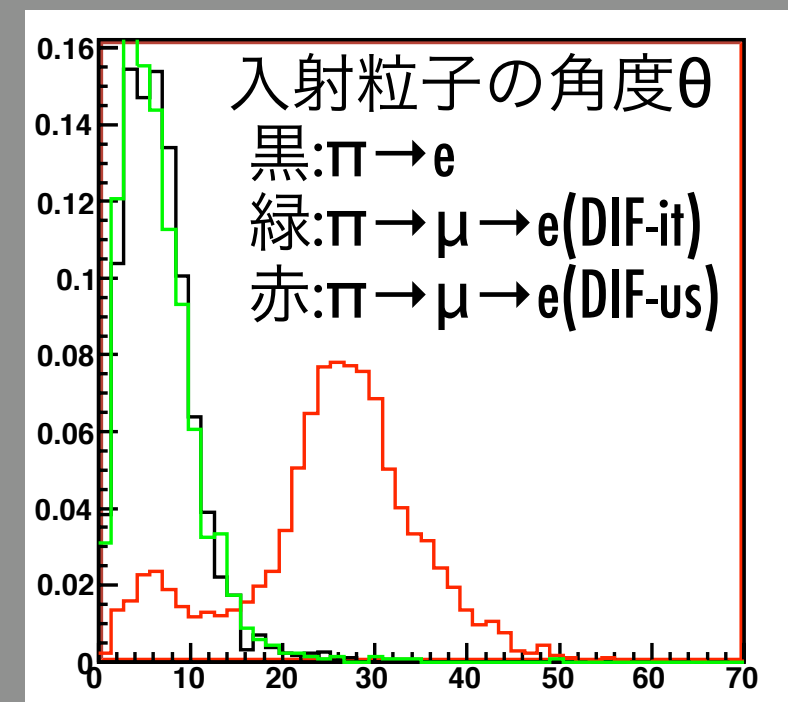
トラッキングによるDIF事象の識別

4層のシリコン検出器による入射、放出粒子のトラッキングによりDIFを識別

入射粒子の角度 : DIF-us

崩壊点再構成(再近接距離、崩壊点) : DIF-us DIF-it

DIF(all) 22% \rightarrow 1.7%

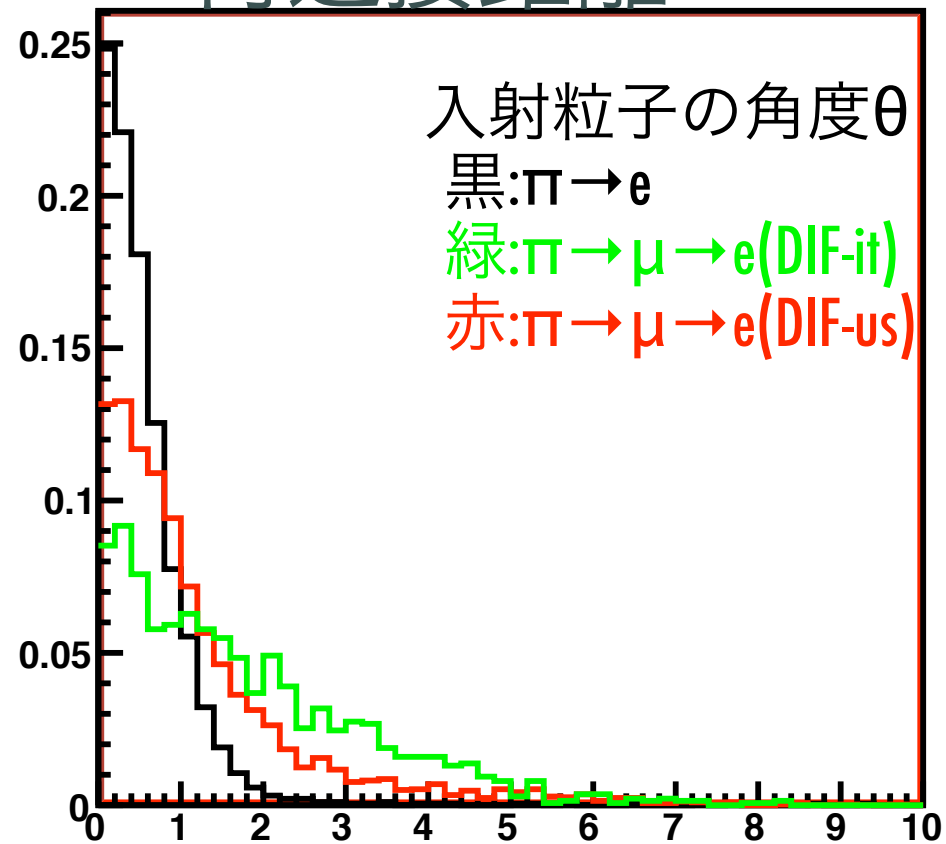


これらにより1/10程度のサプレッションが期待

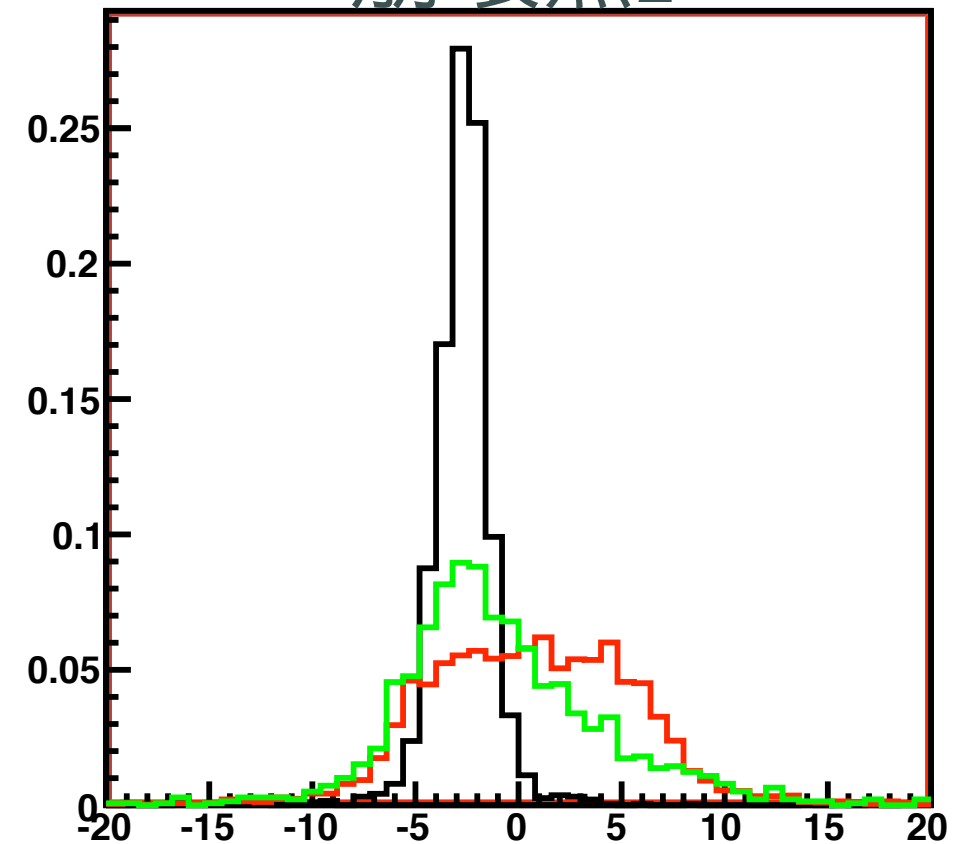
現在、より現実的なMCにより評価中

トラッキングによるDIFカットの評価2

再近接距離



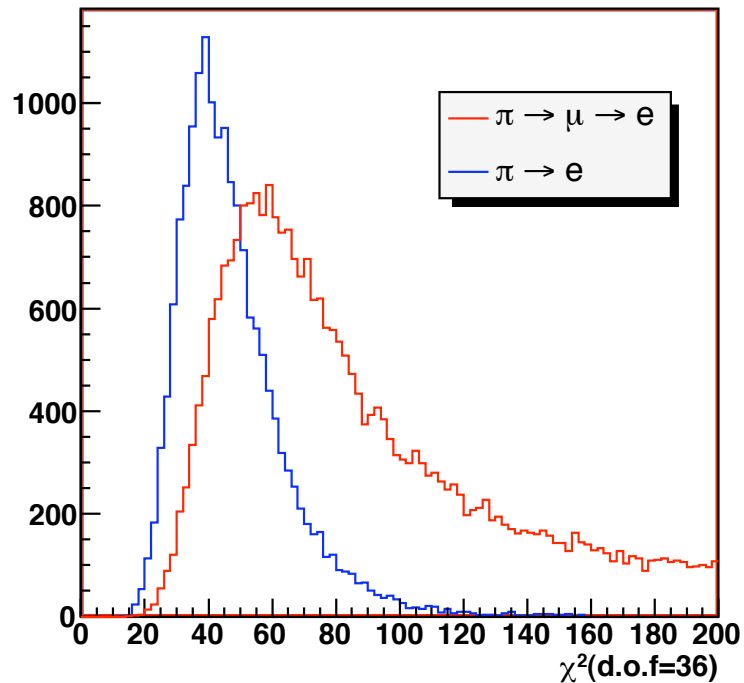
崩壊点Z



波形解析:モード識別に有用な変数

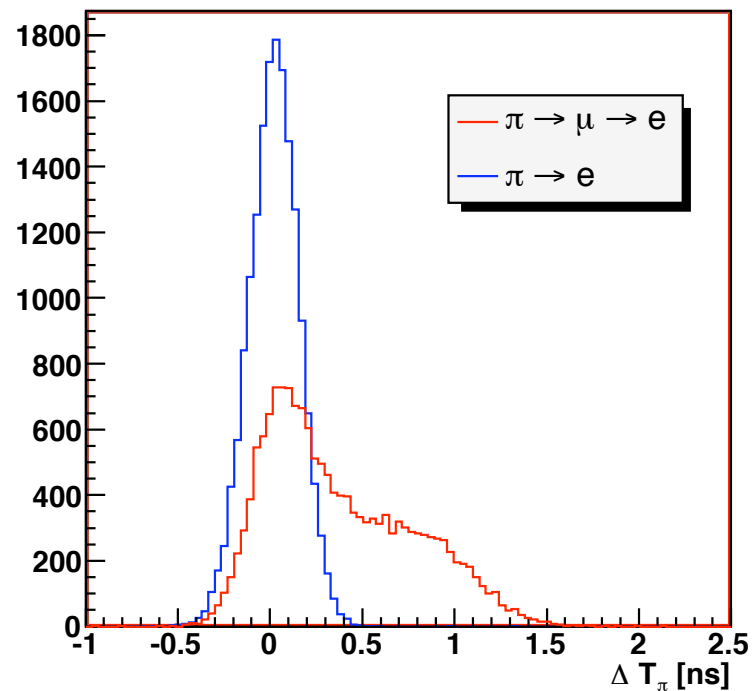
$$\chi^2$$

χ^2 が大きい($T_\pi \ll T_\mu \ll T_e$)



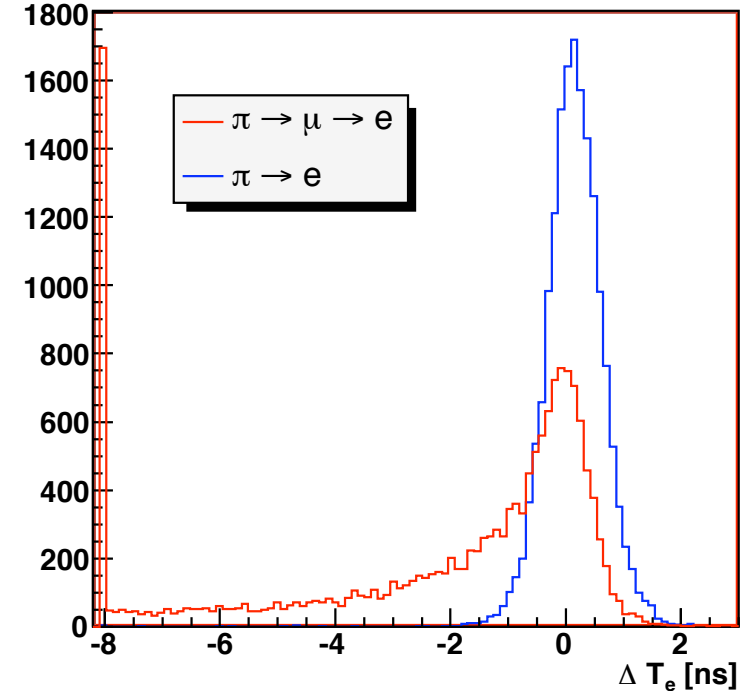
$$\Delta T_\pi = (T_1^{TA} - T^{BI})$$

ΔT_π が大きくなる($T_\pi \approx T_\mu$)

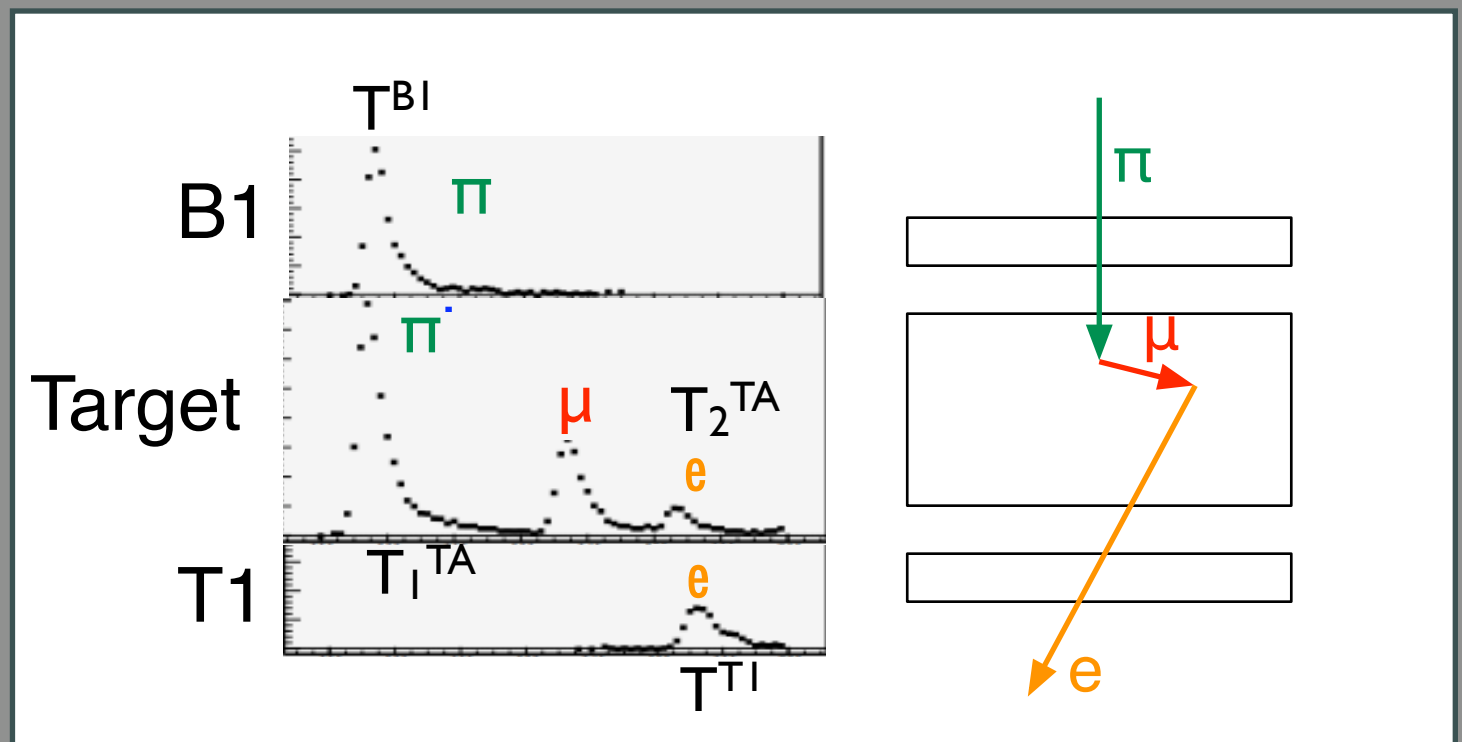
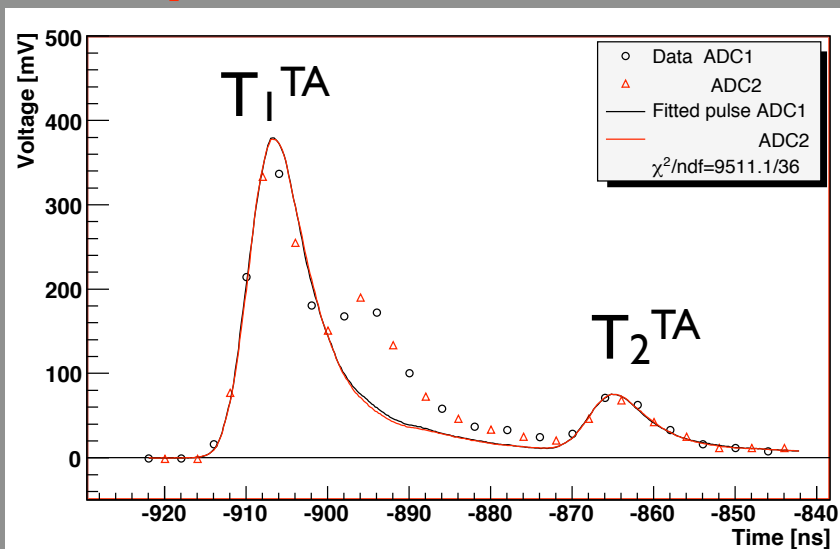


$$\Delta T_e = (T_2^{TA} - T^{TI})$$

ΔT_e が小さくなる($T_e \approx T_\mu$)



$\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$



Pulse shape cut(2)

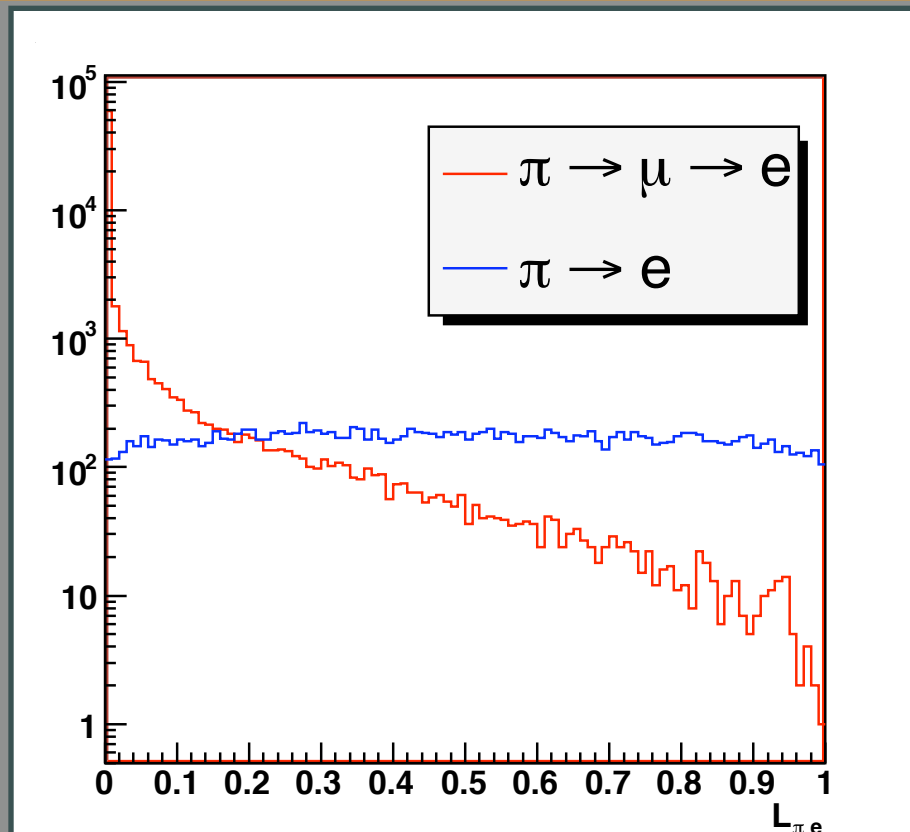
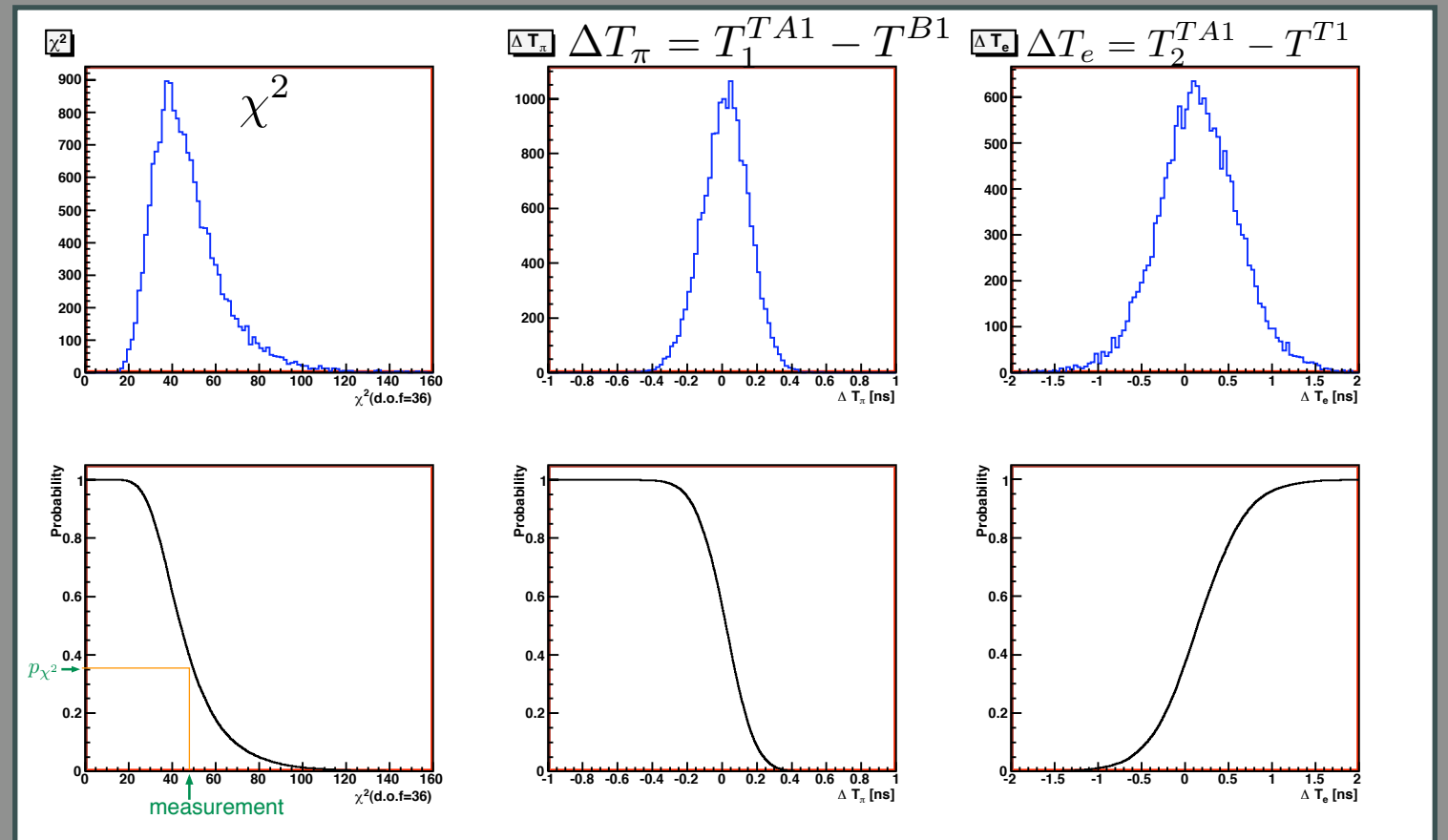
Define probability from each variable

Then define likelihood from them

Likelihood

$$P = p_{\chi^2} \times p_{\Delta T_{\pi}} \times p_{\Delta T_e}$$

$$L_{\pi e} = P(1 - \ln P + \frac{1}{2}(\ln P)^2)$$



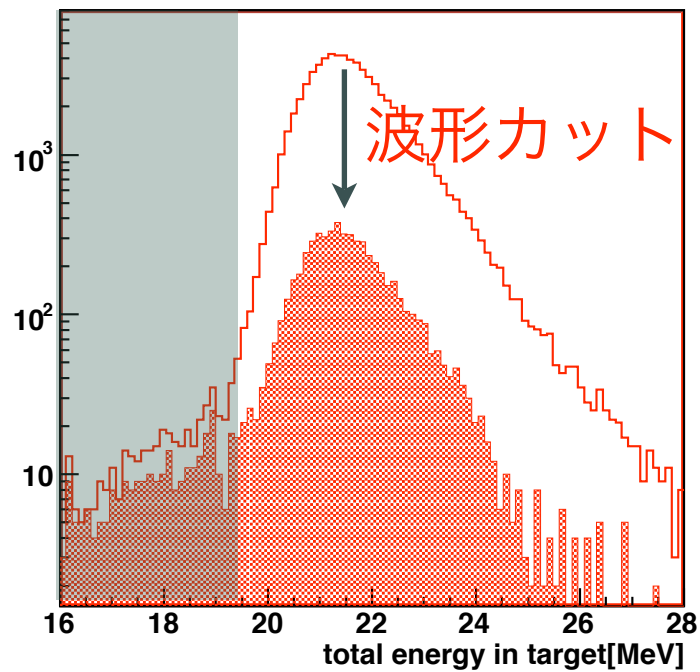
Pulse shape cut $L_{\pi e} > 0.1$
 pie acceptance 91%
 pimue suppression
 $8.36 \pm 0.07\% \sim 1/10$

This corresponds to identify double pulses
 $\Delta T > 1.2 \text{ ns}$

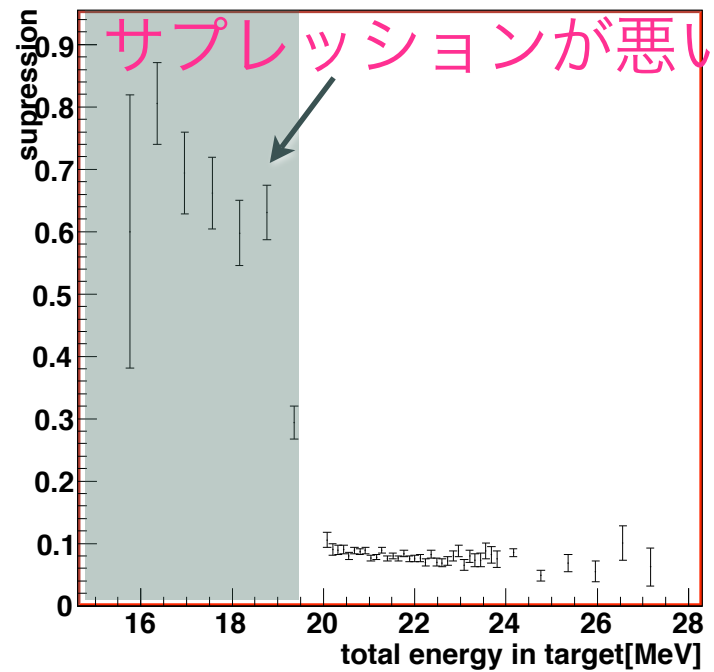
波形解析とdecay-in-flight事象

波形解析カットとターゲットエネルギー

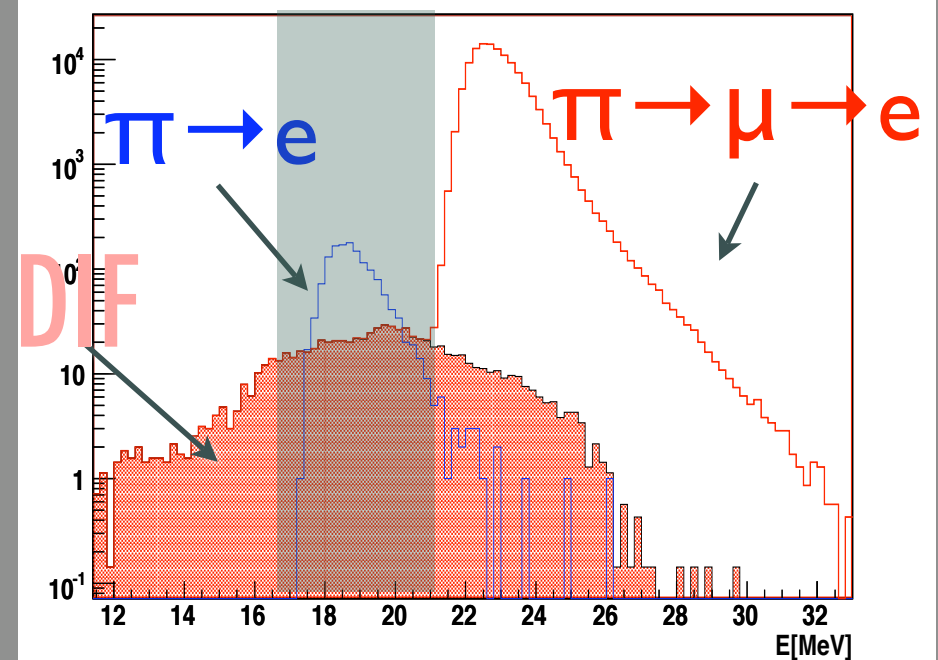
$\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ データ



Suppression=after cut /before cut



モンテカルロ

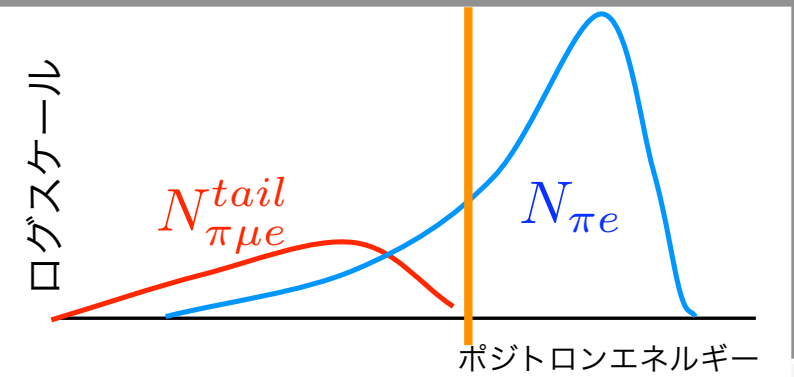


$E_{\text{target}} < 20 \text{ MeV}$: $\sim 70\%$ のサプレッション

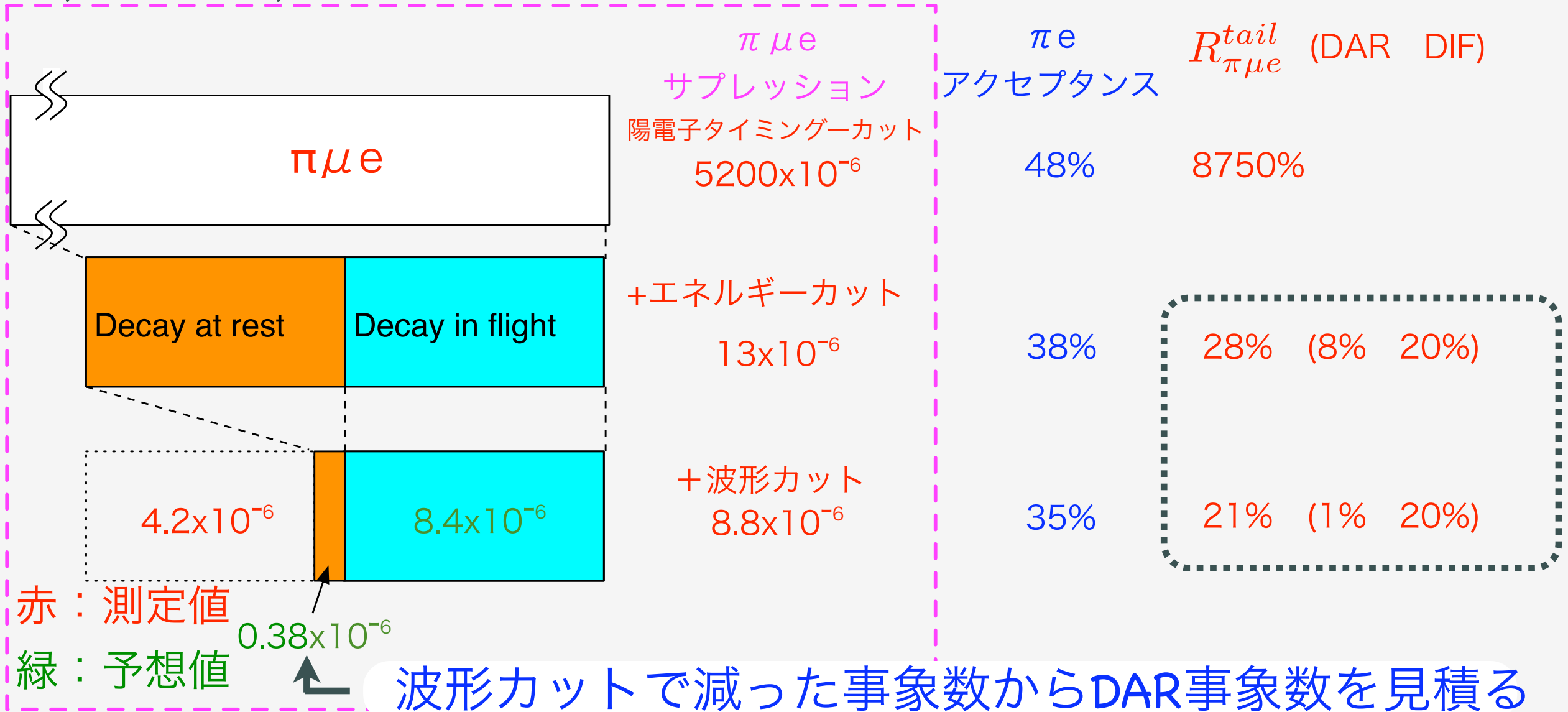
波形解析カットの効が悪い

ビーム π のdecay-in-flight(DIF)事象が支配的

$\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ サプレスの総合評価



$R_{\pi\mu e}^{tail} = N_{\pi\mu e}^{tail} / N_{\pi e}$ の見積もり (目標4%, 前実験16%)



Decay-at-rest事象によるバックグラウンドは1%

PIENU本実験の目標である4%に比べて小さい!!

期待される誤差のまとめ

アクセプタンス補正誤差目標：0.11%→0.03%

MCの改善、立体角の増加、物質量の減少

パイオン寿命：0.11%→0.02%

測定データの改善(PDG)

統計誤差	0.05%(0.28)
Raw Branching Ratio	0.03%(0.19%)
テール補正	0.03%(0.25%)
アクセプタンス補正	0.03%(0.11%)
パイオン寿命	0.03%(0.11%)
その他	0.03%(0.11%)
全系統誤差	0.07%(0.31%)
全誤差	0.08%(0.5%)

()は前実験

0.1%以下の精度での測定を目指す！！

Dominant Errors

Previous experiment

TABLE I. $\pi \rightarrow e\nu$ branching ratio summary.

Raw branching ratio R' ($\times 10^{-4}$)	$1.1994 \pm 0.0034(\text{stat}) \pm 0.0023(\text{sys})$
Multiplicative corrections	
Tail correction	1.0193 ± 0.0025
Pion stop time t_0	0.9998 ± 0.0008
Time calibration	1.0000 ± 0.0003
Monte Carlo	1.0027 ± 0.0011
V1 veto	1.0009 ± 0.0005
Wire-chamber inefficiency	0.9998 ± 0.0004
π lifetime	1.0000 ± 0.0009
Branching ratio R_{expt} ($\times 10^{-4}$)	$1.2265 \pm 0.0034(\text{stat}) \pm 0.0044(\text{sys})$

There were 3 kind of dominant errors

Discussion about periodic BG

Before TINA pileup cut

Timing defined by e^+ in T2
ADC GATE is $\sim 100\text{ns}$

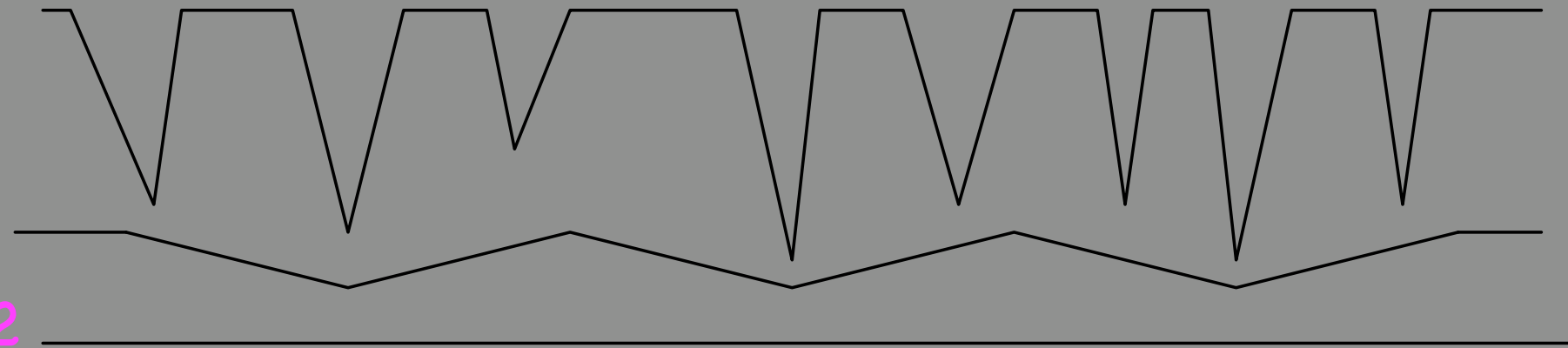
e^+ from μ pileup

flat(μ life time)

neutral particle

periodic 43ns

Timing distribution in T2



After TINA pileup cut

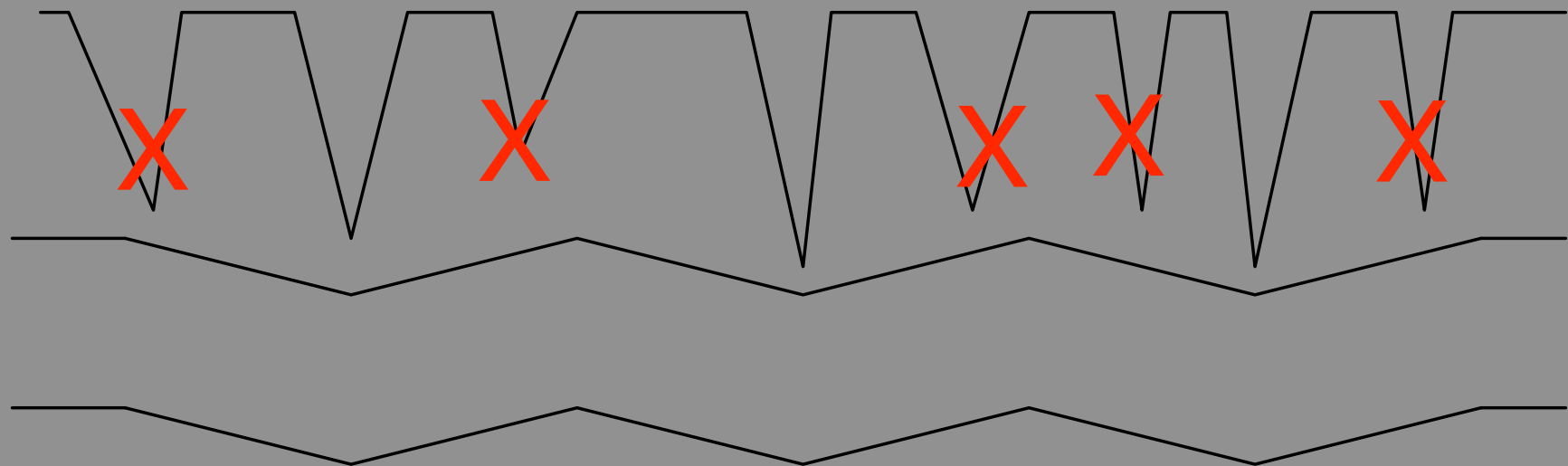
e^+ from μ pileup

flat(μ life time)

neutral particle

periodic 43ns

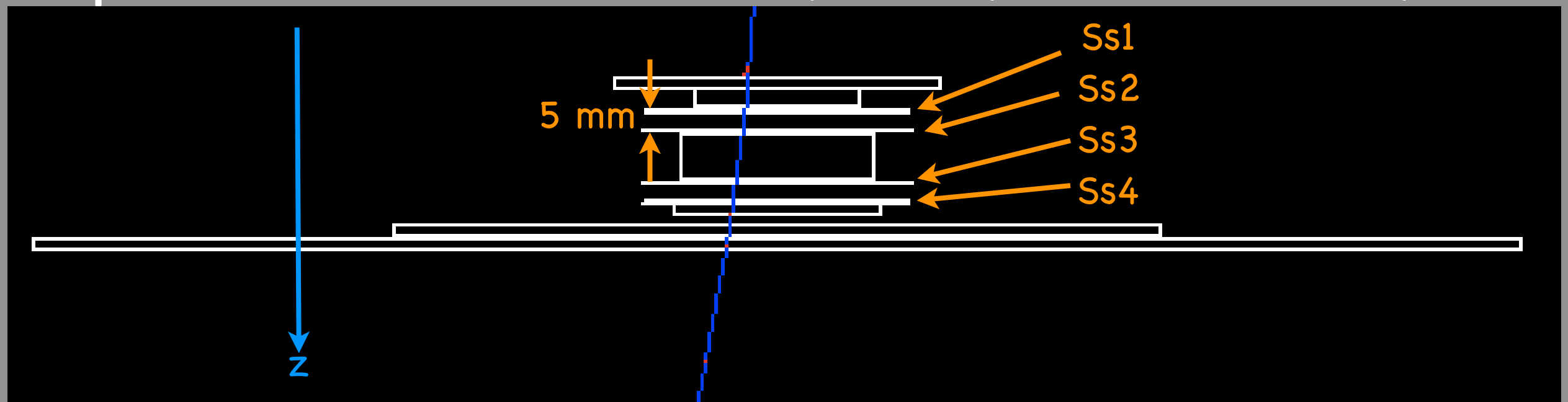
Timing distribution in T2



Set up

4 Silicon strip detectors are put in

Other counter sizes is not changed, only shift z position of the B1&B2 (-3mm) and T1&T2 (+3mm)



Pencil beam

$70 \pm 1\% \text{ MeV}$

Target size 5x5x12

mm

Silicon

Thickness : 570 μm (285 $\mu\text{m} \times 2$)

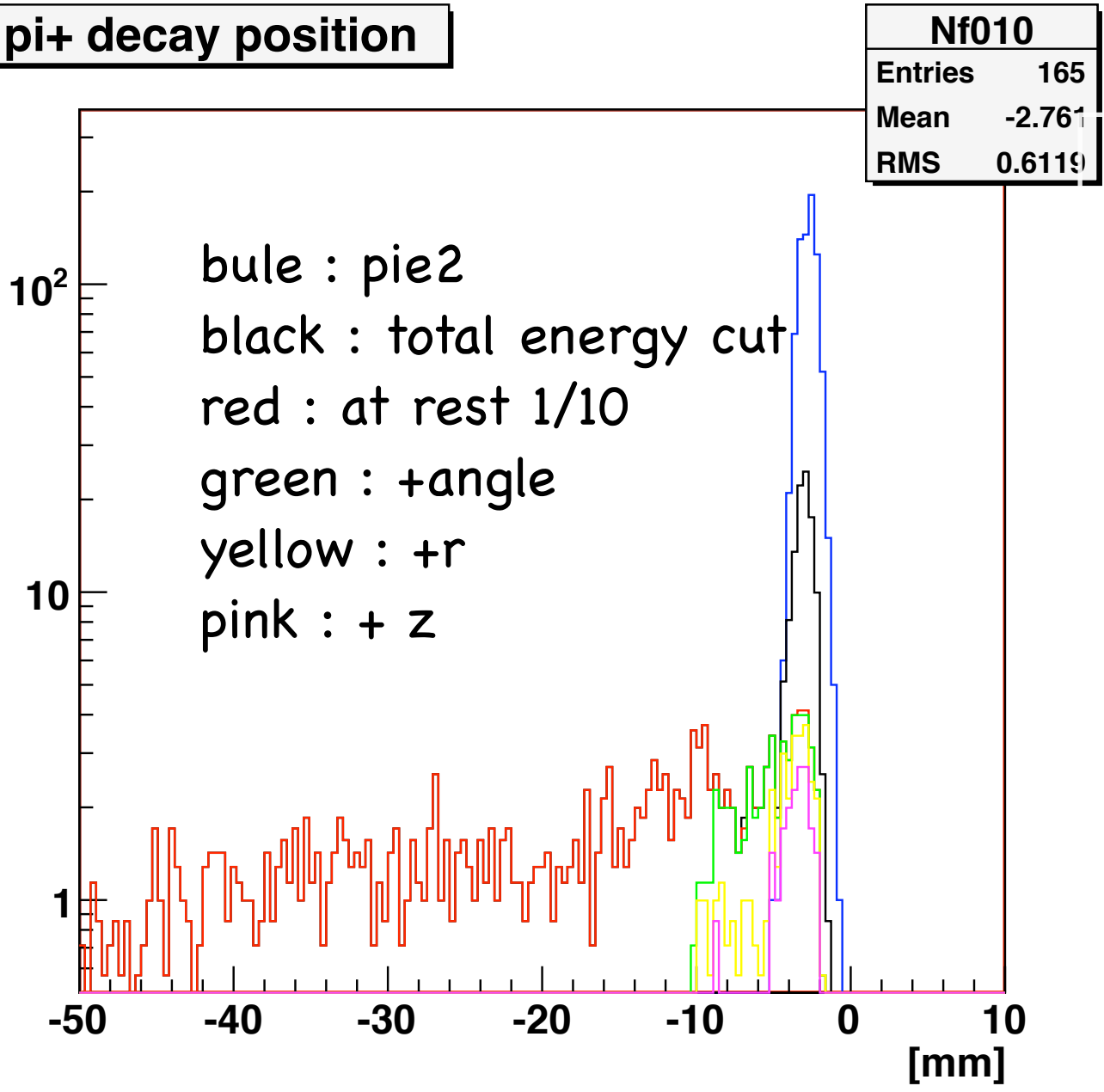
Distance : 5 mm

Position resolution: 100 μm

energy resolution $40\text{p.e./MeV}=5\% @ 10\text{MeV}$

$N=N_{\text{pie}}/\text{sqrt}(N_{\text{pimu-tail}})$ $S=N_{\text{pimu-tail}}/N_{\text{pie}}$

pi+ decay position



cut	N	S	at-rest	DIF-u/s	DIF-i/t
-	34.0	38.3%	11.3%	23.5%	3.5%
at-rest 1/10	40.8	27.9%	1.0%	23.5%	3.4%
angle<18 °	77.8	7.6%	1.0%	3.2%	3.4%
r<2	93.7	5.2%	0.9%	1.8%	2.5%
-5<z<0	116.4	3.1%	0.7%	0.5%	1.9%