

$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊分岐比の測定

~ $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊の研究における最近の結果 ~

関口 哲郎

KEK, IPNS

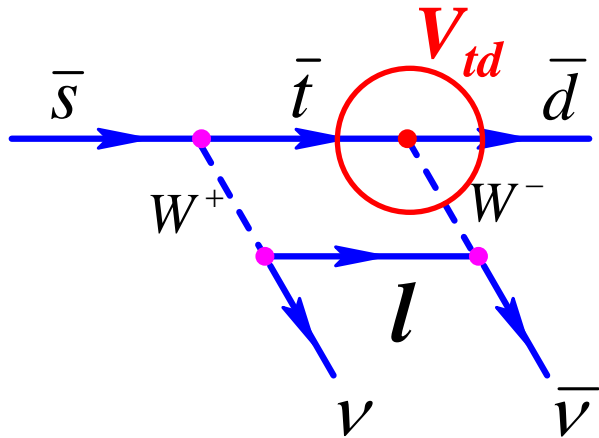
E949 Collaboration

Contents

- 稀崩壊 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$
- BNL-E949
- データ解析
- 物理結果
- まとめ

稀崩壊 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$

$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊 (s → d クォーク遷移) = フレーバーを変える中性カレント反応



- 1次の反応は禁止される
- 2次の反応: トップクォークの寄与が大 V_{td} に結合
- 崩壊分岐比における理論の不定性 ~ 7%

$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊: V_{td} を精度良く決定できる崩壊の一つ。

$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊の探索

標準理論の予言値:

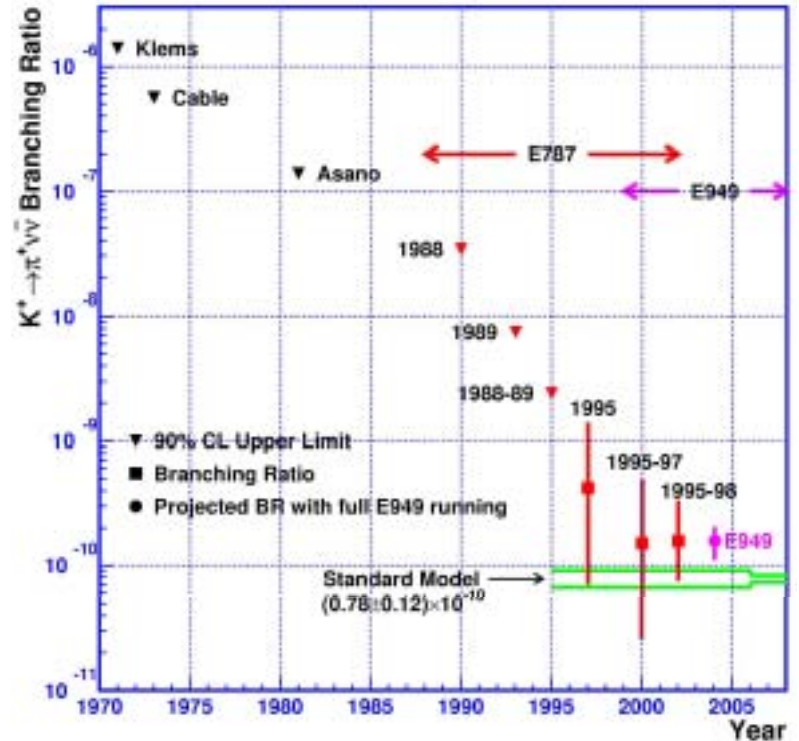
$$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (0.78 \pm 0.12) \times 10^{-10}$$

[A.J. Buras *et al*, arXiv:hep-ph/0405132 (2004)]

実験的にはBNL-E787が2イベントを検出。

$$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = 1.57_{-0.82}^{+1.75} \times 10^{-10}$$

[S. Adler *et al*, Phys. Rev. Lett. **88**, 041803 (2002)]

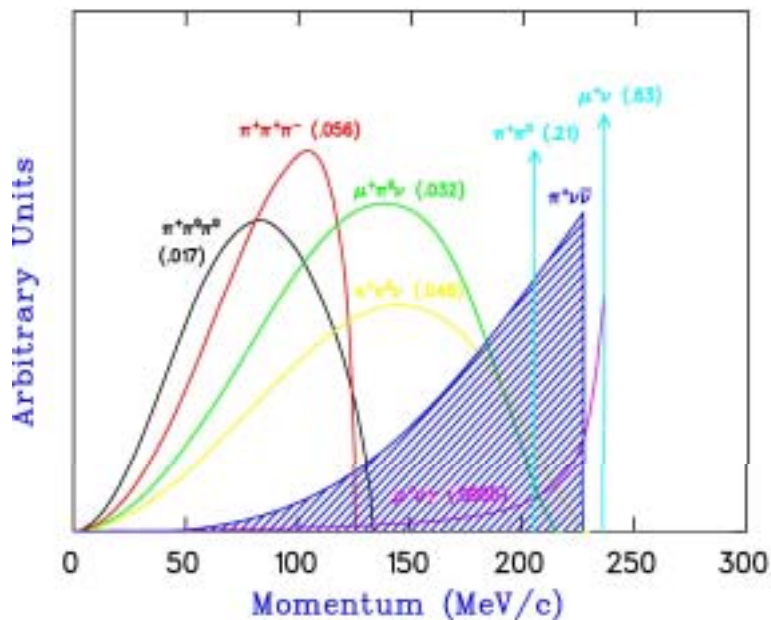


**BNL-E949: BNL-E787のビーム・測定器等を増強し、
より精度良く崩壊分岐比の測定を行う。**

K中間子稀崩壊実験BNL-E949

BNL-E949 = 静止K⁺崩壊実験

シグナル = 静止K⁺崩壊 + + nothing



シグナル領域: 211 < P < 229 MeV/c

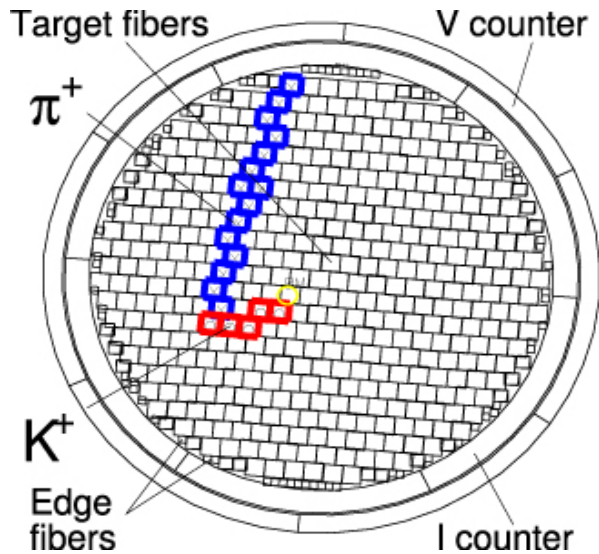
2体崩壊:

$$\begin{cases} K^+ & + & \pi^0 & (K \pi^0) \\ K^+ & + & \mu^+ & \mu^- & (K \mu^+ \mu^-) \end{cases}$$

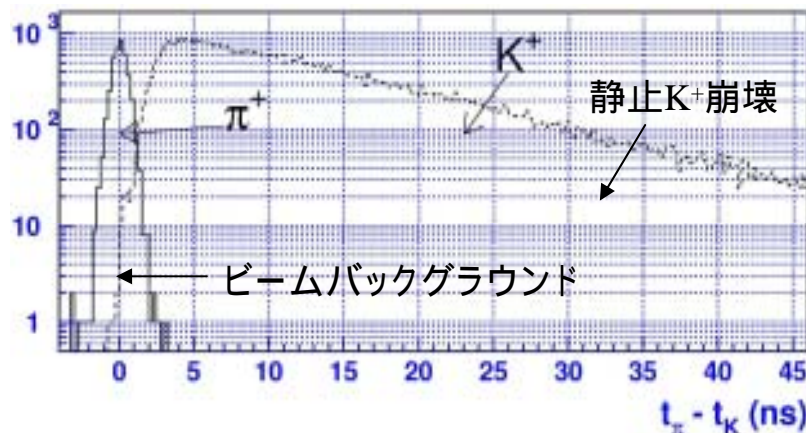
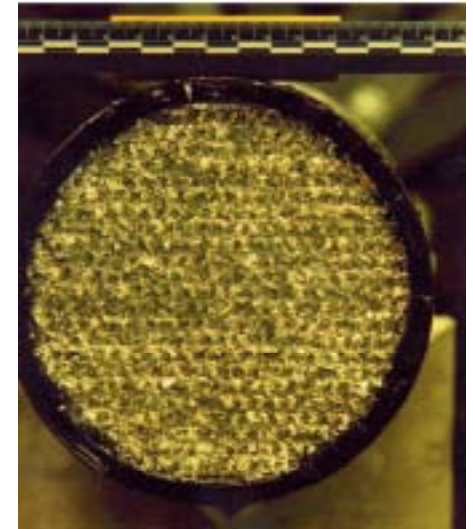
の間の領域

K⁺崩壊における荷電粒子の運動量スペクトル
(K⁺の静止系で表示)

静止K⁺崩壊の確認

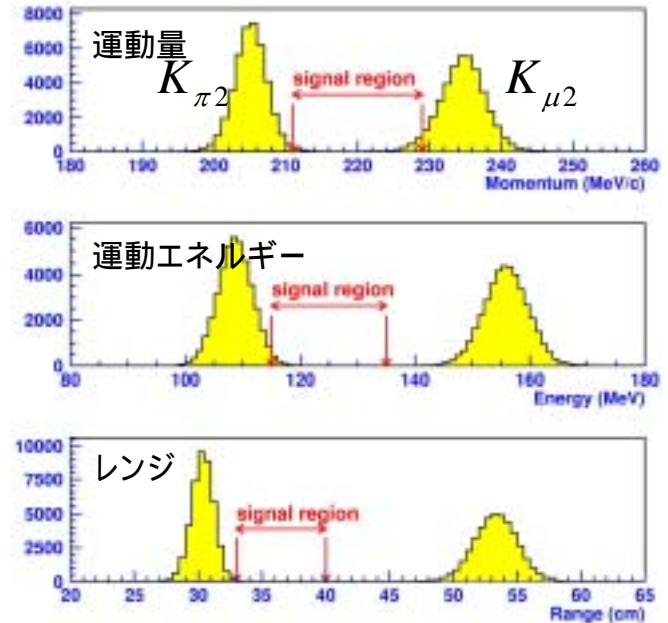
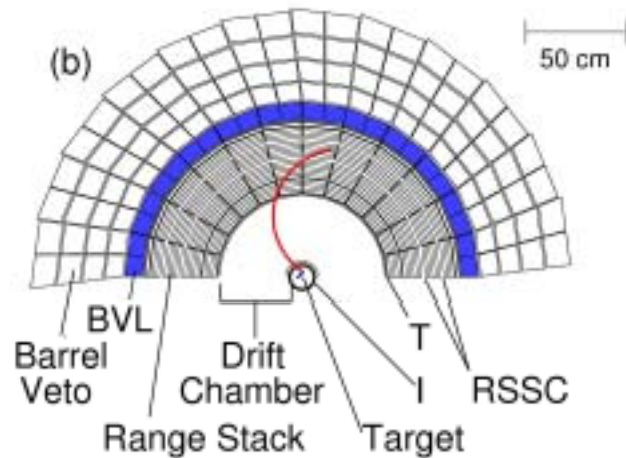


K⁺はプラスチックシンチレーションファイバーのターゲット中で静止する。



ターゲットに入射してから崩壊するまでに2ナノ秒以上を課すことにより、K⁺の静止を要求する。

+の運動量・運動エネルギー・レンジの測定



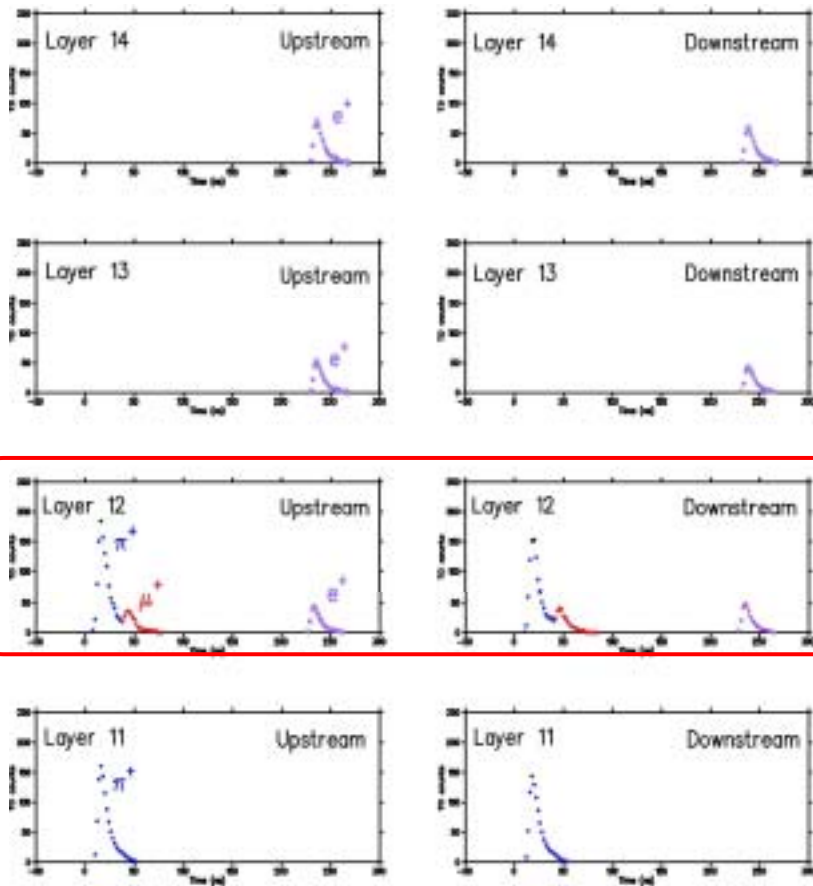
測定器全体に1Tの磁場
ドリフトチェンバーで運動量測定

レンジ・スタック:
19層、24セクターのプラスチックシンチレーター
運動エネルギー・レンジを測定。

$K_{\pi 2}$ に対する分解能:

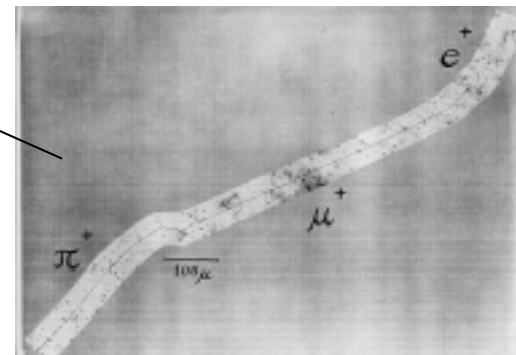
運動量	~ 1.1%
運動エネルギー	~ 2.8%
レンジ	~ 2.8%

π^+ の識別 (π^+ μ^+ e^+ 崩壊連鎖の検出)

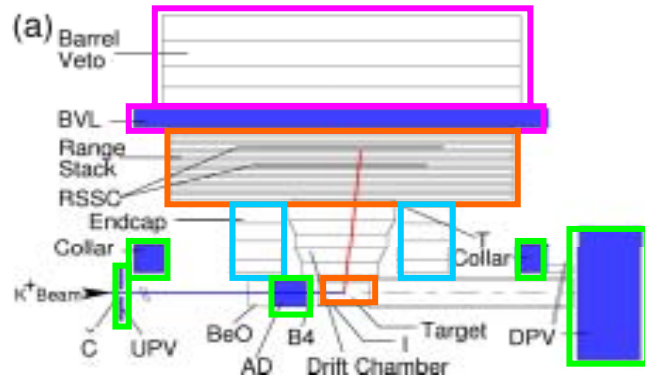


レンジ・スタックのシンチレーター信号は、500MHz Waveform digitizerで波形が記録される。

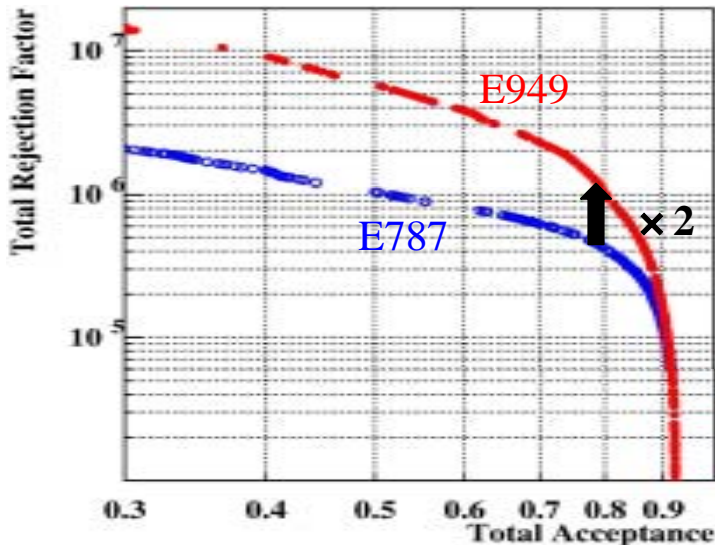
波形解析により、 π^+ が静止したレンジ・スタックのカウンターで π^+ μ^+ e^+ 崩壊連鎖を検出する。



線等を含むイベントの除去



- K^+ の崩壊点を覆う光子検出器。
 - **バレル部**: 鉛/プラスチックシンチレーターのサンプリング・カロリメーター
 - **エンドキャップ部**: CsI カロリメーター
 - **ビームライン周辺**
 - **レンジスタック及びターゲット**
- 崩壊時間と同時に光子・その他の粒子が検出されたイベントを除去。
- E949では、新しい光子検出器を導入。
 - **バレル部にサンプリング・カロリメーター 2.3輻射長が追加。**
 - **ビームライン周辺の光子検出器**

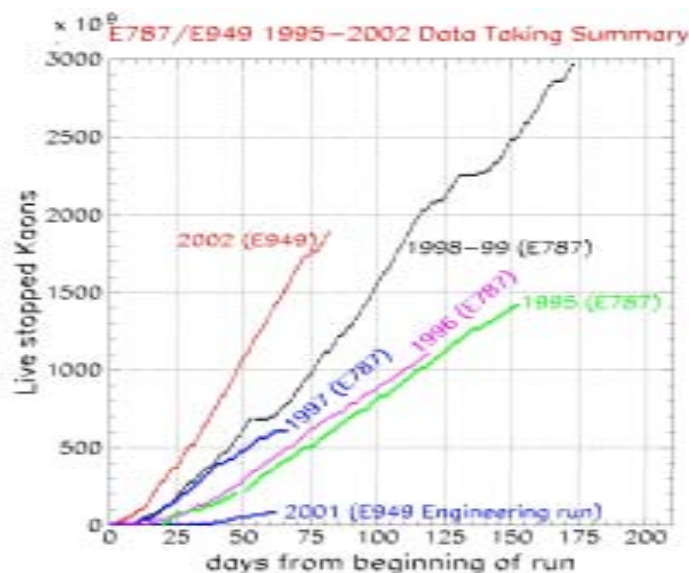


K_2 に対するRejectionが2倍に向上。

E949 2002年のデータ収集

- E787に比べてビーム強度は2倍。
- ビーム・コンディションは必ずしも良くなかった。

	E787 1998	E949 2002
スピル長(秒)	2.2	2.2
ビーム周期(秒)	4.2	5.4
Duty factor(%)	52	41
K ⁺ 崩壊数/スピル	2.1×10^6	3.9×10^6
K ⁺ / ⁺ 比	4	3



しかしながら、

2倍のビーム強度でも測定器のパフォーマンスは良く、スムーズなデータ収集を行った。

収集したデータ = 1.8×10^{12} K⁺崩壊

E787の全データ(5.9×10^{12})の30%に相当。

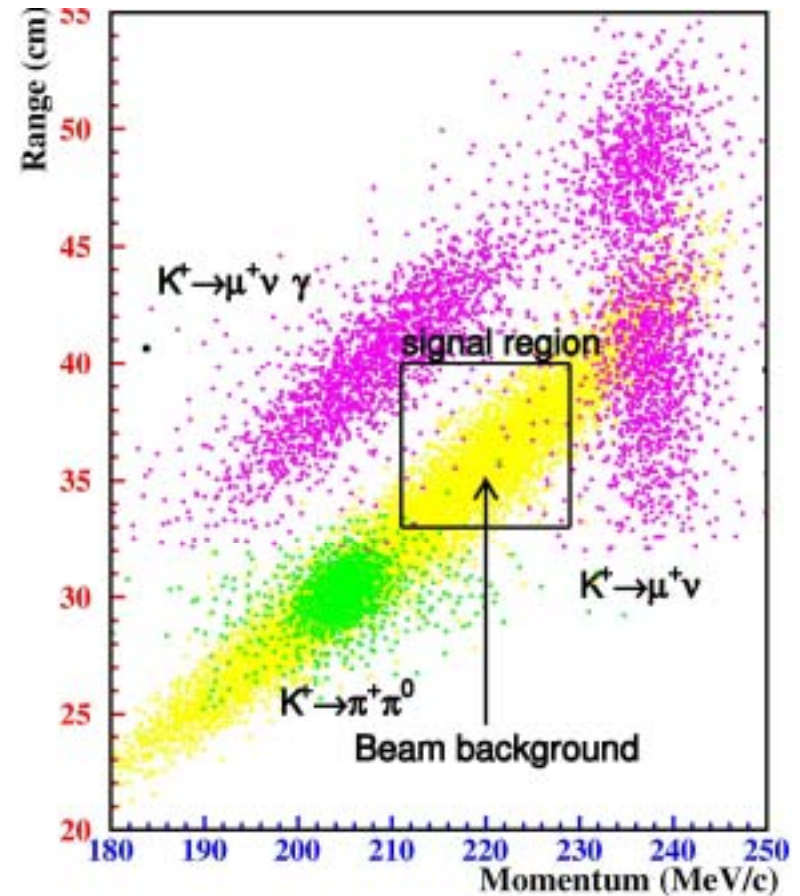
データ解析

バックグラウンド:

- $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ ($K_{\pi 2}$)
- Muon バックグラウンド:
 - $K_{\mu 2}$ Range Tail
 - $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ (Muon Band)
- ビームに起因するバックグラウンド

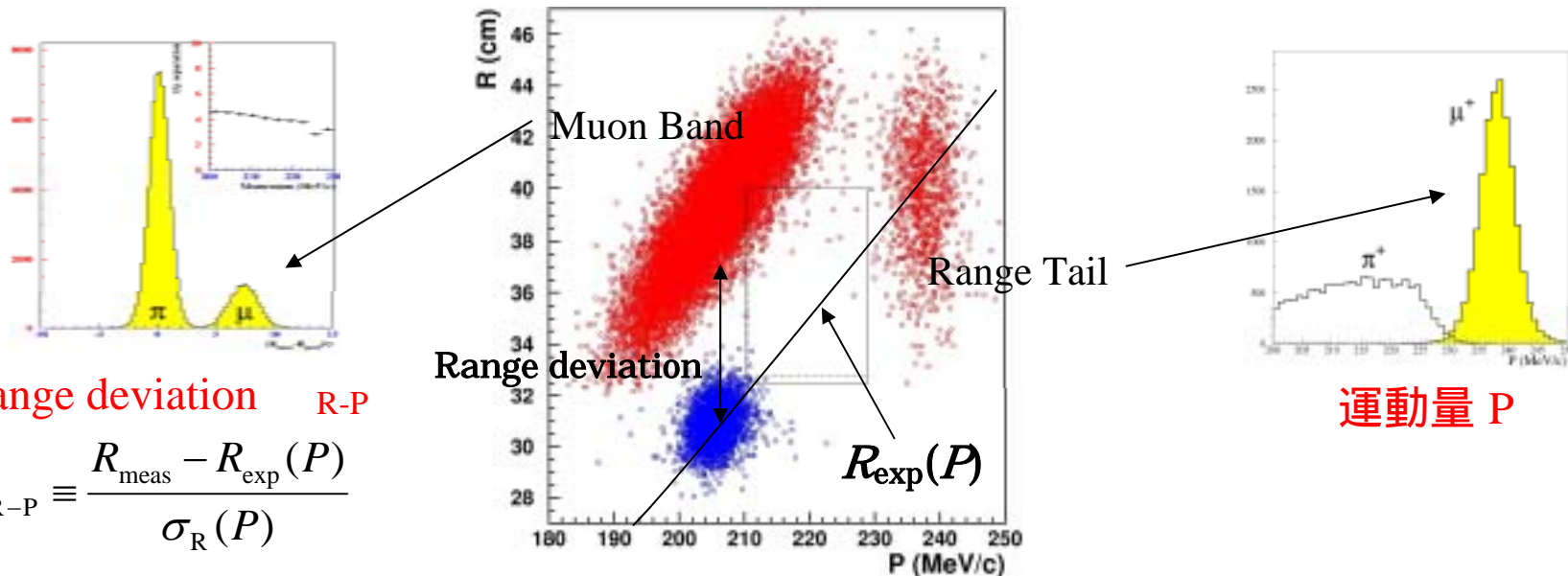
解析手法:

- Blind analysis
- リアルデータを用いてバックグラウンド解析を行う。
- バックグラウンド解析におけるバイアスを低減するために、全データの1/3のサンプル カットの決定
2/3のサンプル バックグラウンド・レベル
- Likelihood analysis

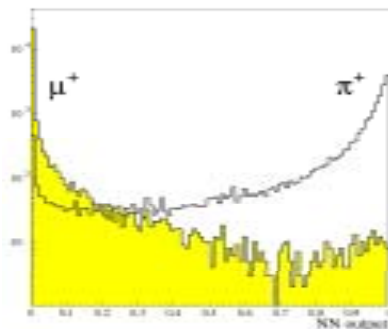
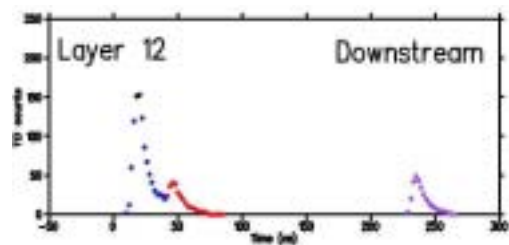


Background Characterization (Muonバックグラウンド)

MuonバックグラウンドのKinematics:



+ μ^+ e^+ 崩壊連鎖の検出



ニューラル・ネットワークを用いた
シグナル・バックグラウンドの分離

実験感度およびバックグラウンド・レベル

アクセプタンスおよび実験感度

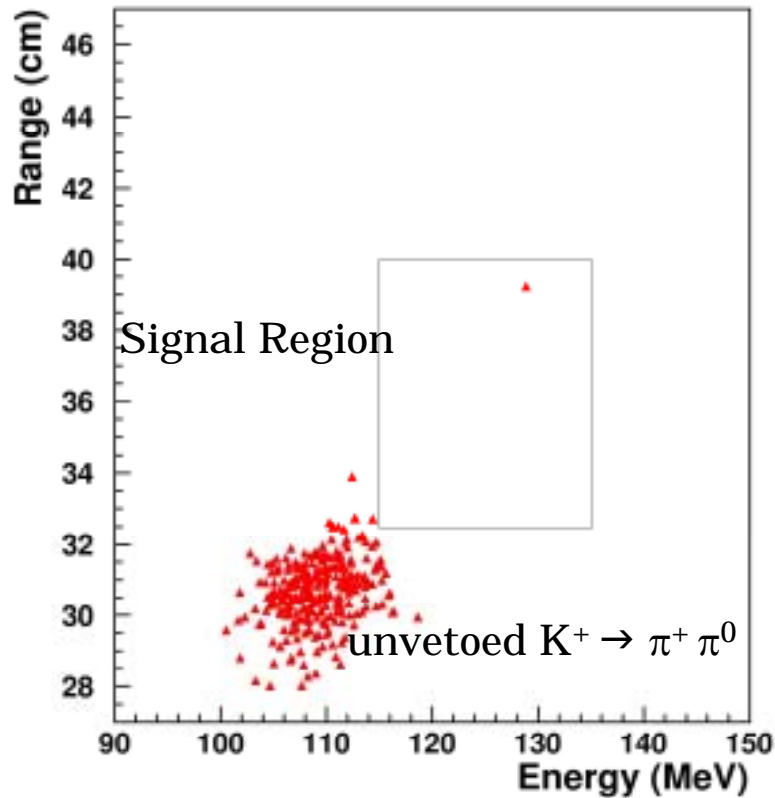
	E787	E949	
K ⁺ 崩壊数(10^{12})	5.9	1.8	× 0.305
アクセプタンス(%)	0.20 ± 0.02	0.22 ± 0.02	× 1.1
実験感度 (10^{-10})	0.83	2.6	× 0.336

バックグラウンド・レベル

Source	E787	E949
K ₂	0.032	0.216 ± 0.023
Muon	0.064	0.068 ± 0.006
Beam	0.050	0.013 ± 0.003
Total	0.14 ± 0.05	0.297 ± 0.026

カット、バックグラウンド・レベルが全て決定したので、
シグナル領域を探索する準備は完了。

シグナル領域の探索



全てのカットをかけた後に残るイベントのレンジ vs. 運動エネルギー分布。

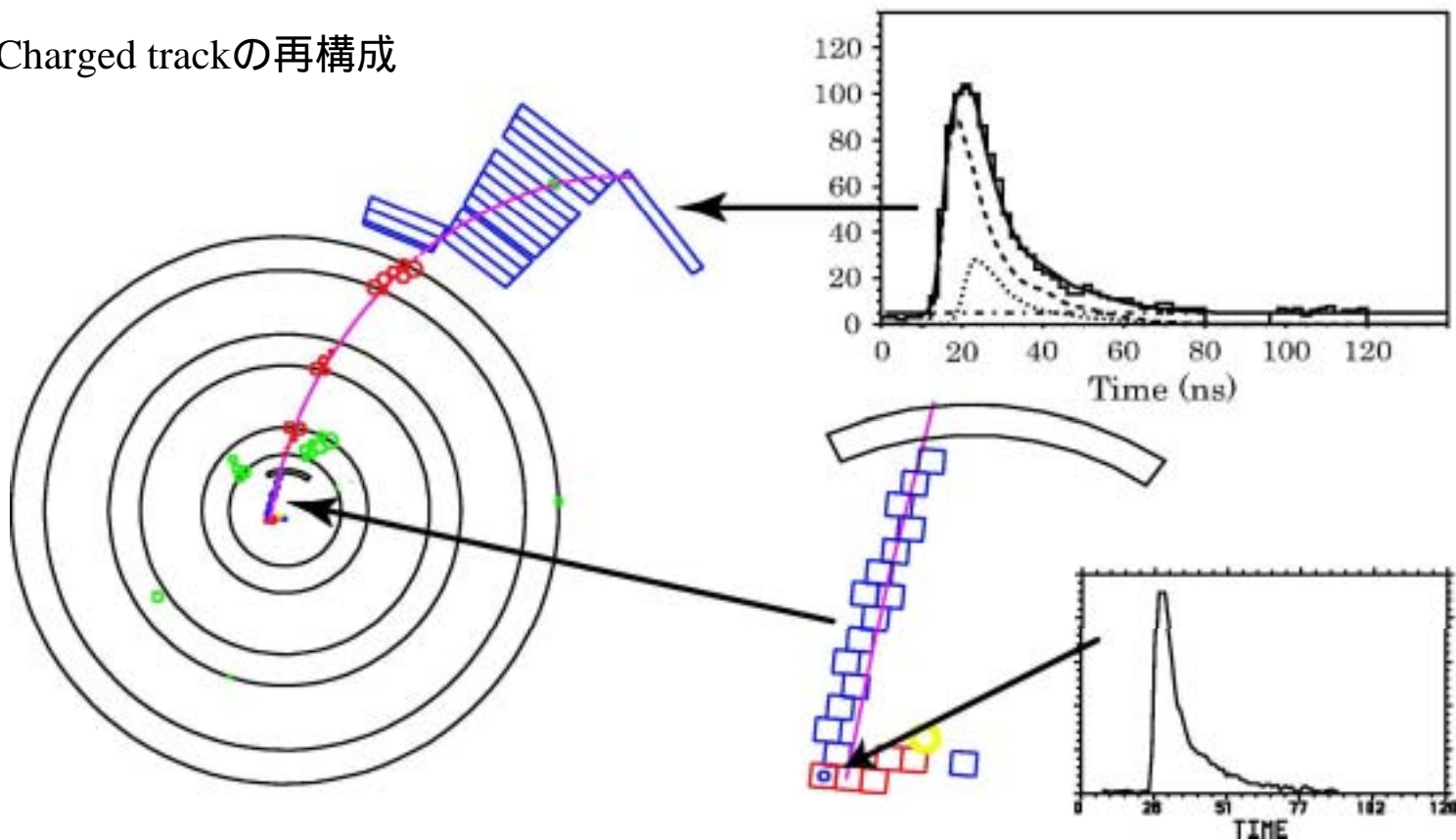
1イベントがシグナル領域に残った。

運動量 (MeV/c)	227.3
運動エネルギー (MeV)	128.9
レンジ (cm)	39.2
K^+ 崩壊時間 (ナノ秒)	4.3
μ^+ 崩壊時間 (ナノ秒)	6.2
e^+ 崩壊時間 (ナノ秒)	1370.5
Photon	No
Extra beam	No

イベント・ディスプレイ

Charged trackが静止したレンジ・スタック
シンチレーターの波形

Charged trackの再構成



ターゲットにおけるCharged trackの
再構成

$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊分岐比の測定

Likelihood analysis:

シグナル領域を小さなセルに分割し、
イベントが検出されたセルにおける
シグナル・バックグラウンド比から
崩壊分岐比を算出。

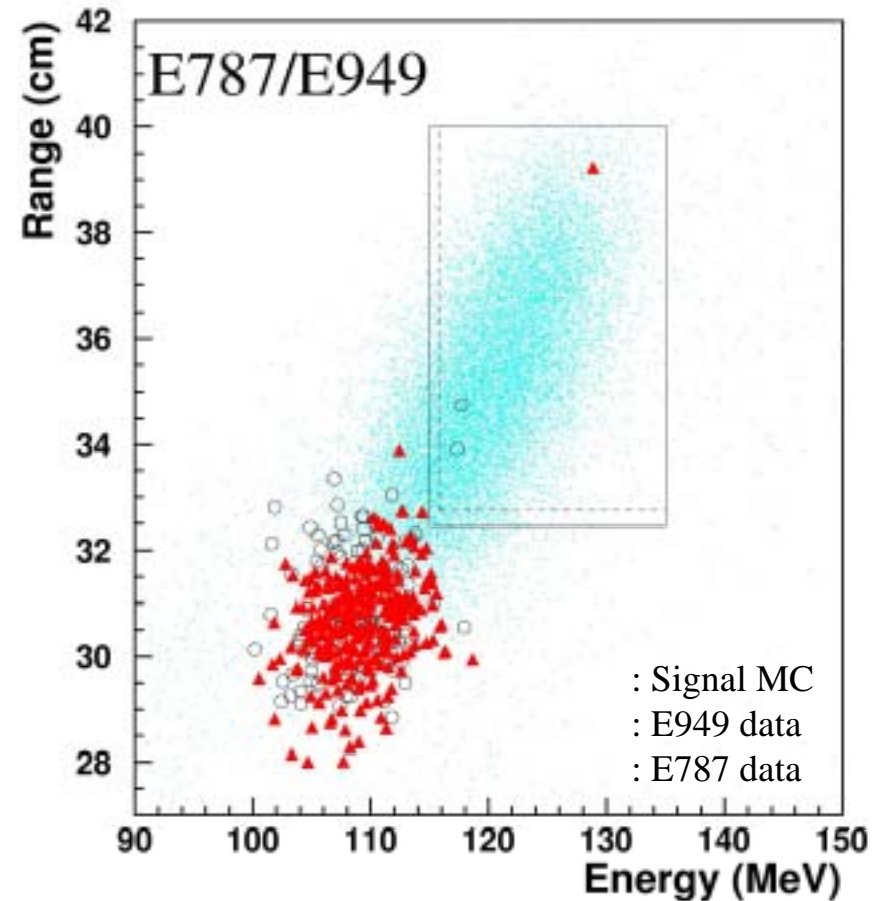
E787とE949のデータを合わせると、

$$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = 1.47^{+1.30}_{-0.89} \times 10^{-10}$$

(68% CL interval)

が得られた。

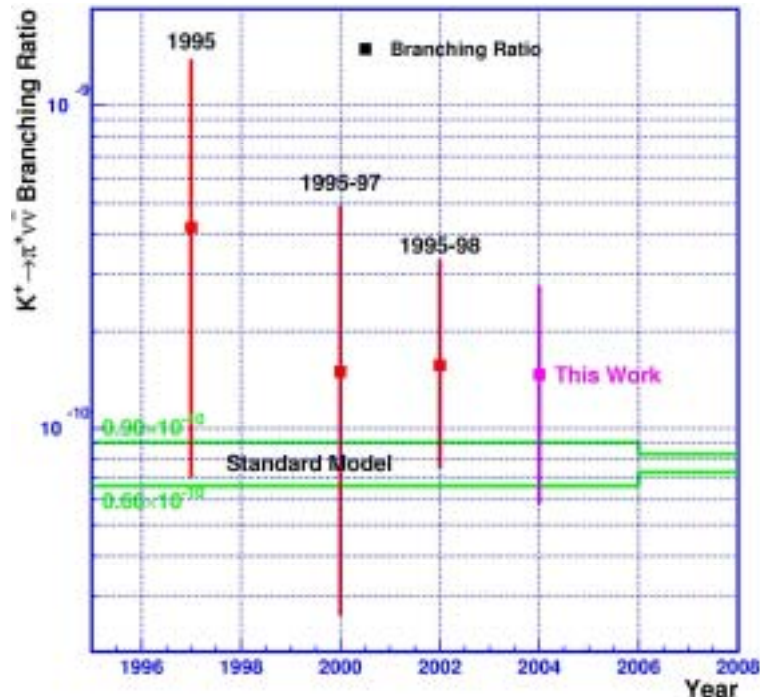
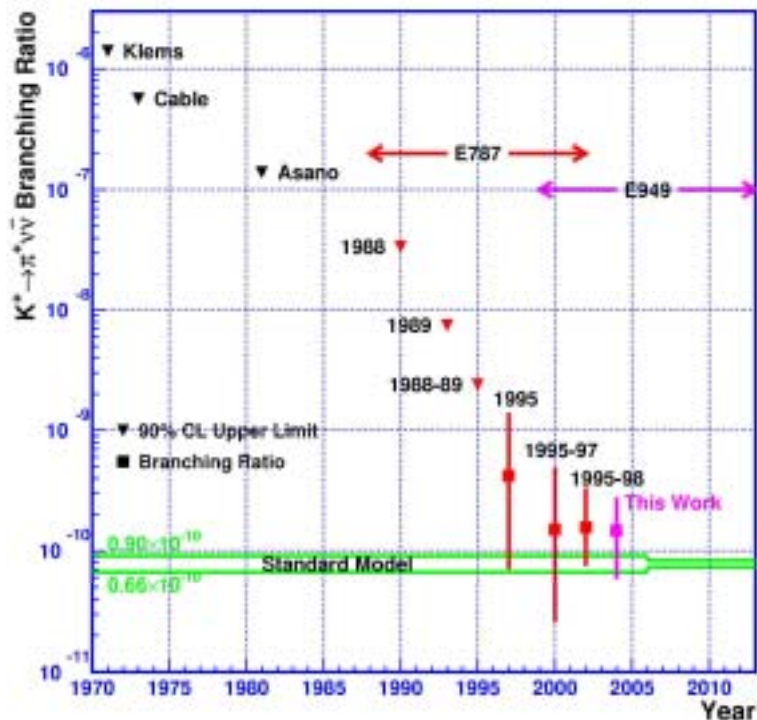
	E787		E949
Candidate	1995A	1998C	2002A
S_i / b_i	50	7	0.9
$W_i = S_i / (S_i + b_i)$	0.98	0.88	0.48
Background prob.	0.006	0.02	0.07



実線：E949のシグナル領域
点線：E787のシグナル領域

$$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = 1.47_{-0.89}^{+1.30} \times 10^{-10} \quad (68\% \text{ CL int.})$$

$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 分岐比測定の変遷



V_{td} へのリミット

$$0.0056 < |V_{td}| < 0.0266$$

他の測定からのリミット: $0.0048 < |V_{td}| < 0.014$ (90% CL)

まとめ

- BNL-E949: 稀崩壊 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ の探索実験。
- E787のビーム、測定器等を増強。
- 2002年にデータ収集: 1.8×10^{12} の K^+ 崩壊に相当するデータを収集。
- 実験感度 = 2.6×10^{-10} 、バックグラウンド・レベル = 0.30 ± 0.02 events。
- Likelihood analysisによる崩壊分岐比測定。
- シグナル領域の探索の結果1イベントが検出され、E787とE949のデータを合わせると、 $1.47_{-0.89}^{+1.30} \times 10^{-10}$ (68% CL)の崩壊分岐比が得られた。