

# $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 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

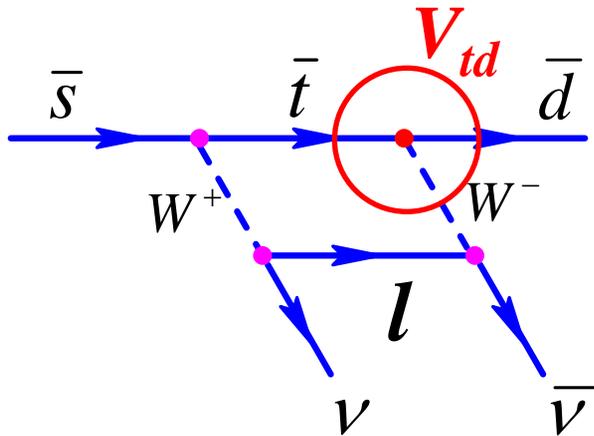
E949 Collaboration

## 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:

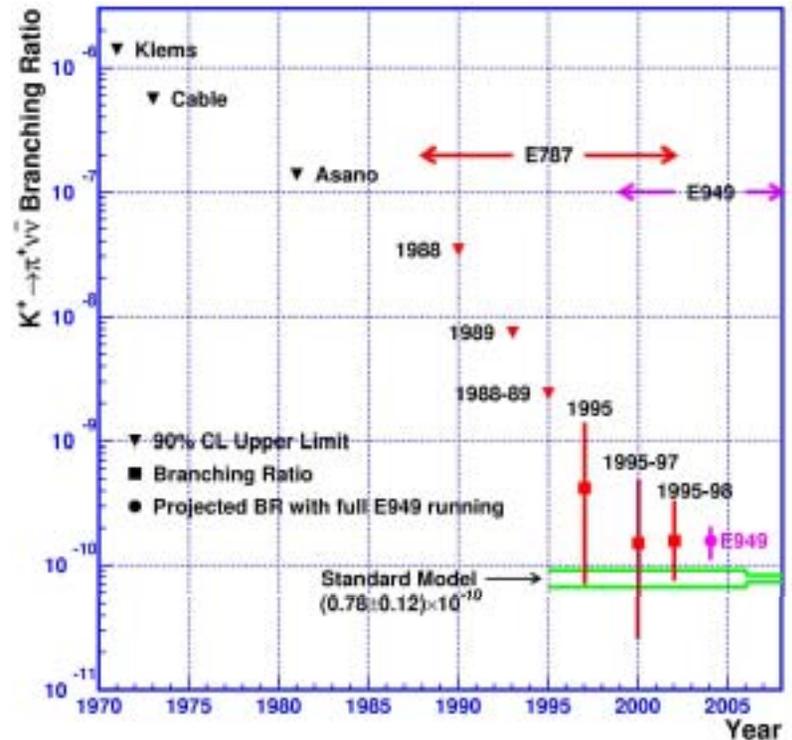
$$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (0.78 \pm 0.12) \times 10^{-10}$$

[ 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) ]

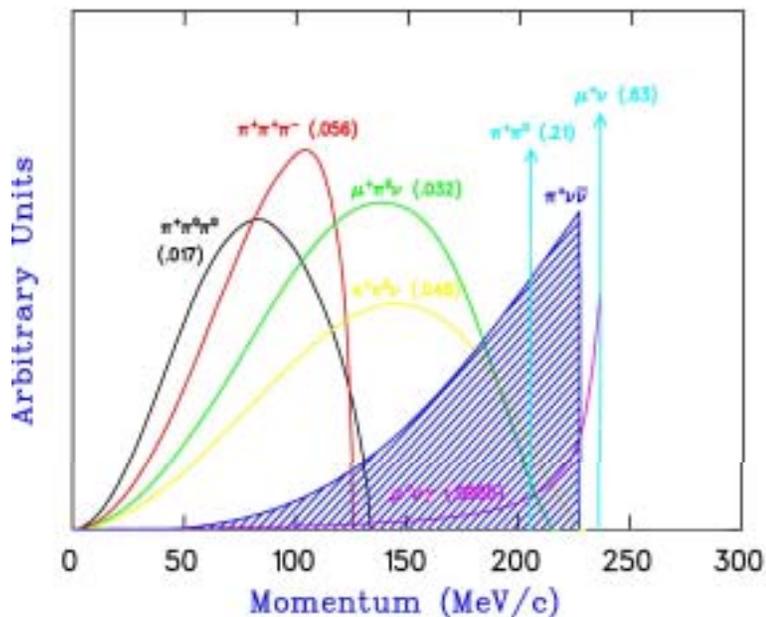


**BNL-E949: BNL-E787のビーム・測定器等を増強し、  
より精度良く崩壊分岐比の測定を行う。**

# K中間子稀崩壊実験BNL-E949

BNL-E949 = 静止K<sup>+</sup>崩壊実験

シグナル = 静止K<sup>+</sup>崩壊 + + nothing



シグナル領域: 211 < P < 229 MeV/c

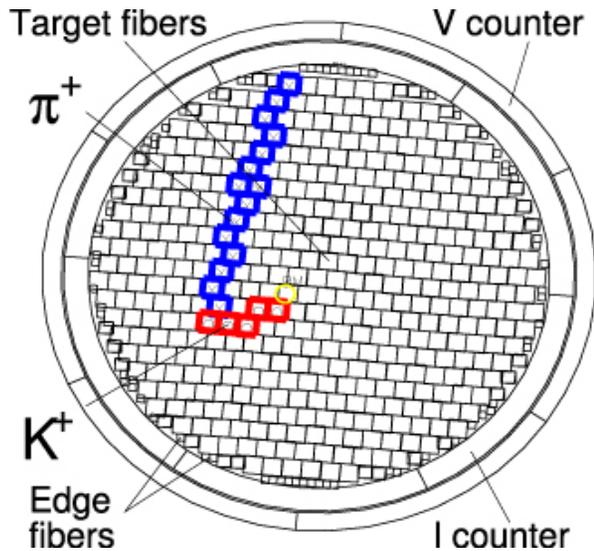
2体崩壊:

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

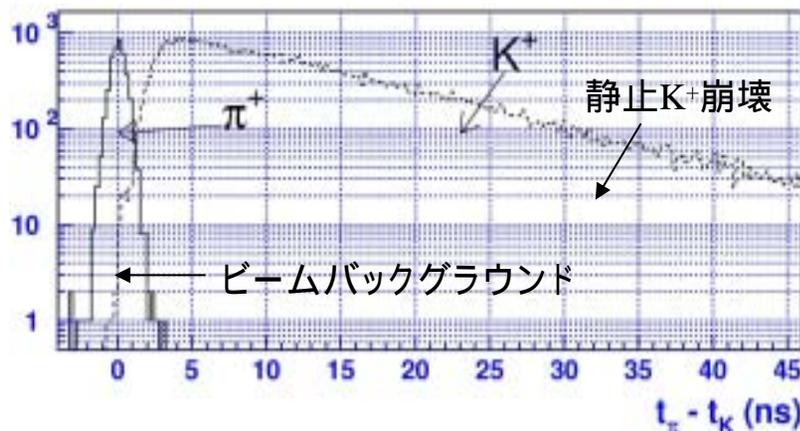
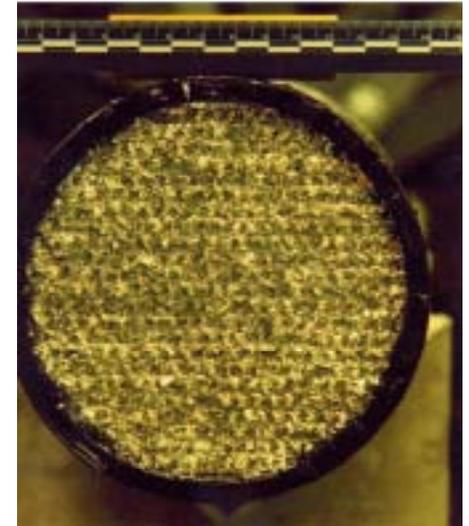
の間の領域

K<sup>+</sup>崩壊における荷電粒子の運動量スペクトル  
(K<sup>+</sup>の静止系で表示)

# 静止K<sup>+</sup>崩壊の確認

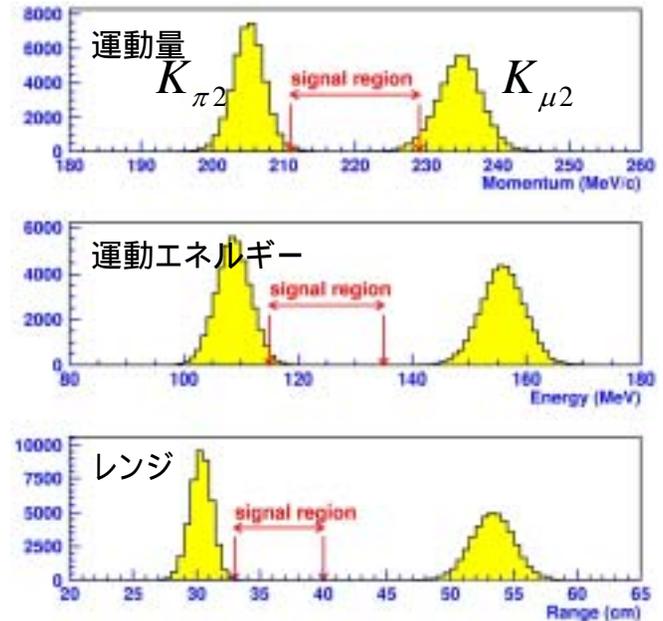
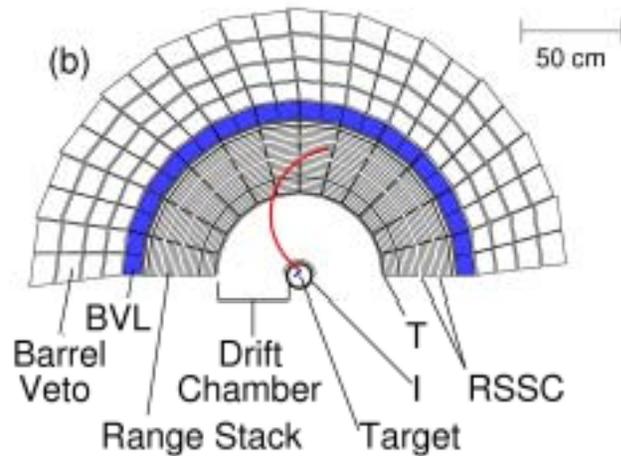


K<sup>+</sup>はプラスチックシンチレーションファイバーのターゲット中で静止する。



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<sup>+</sup>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。

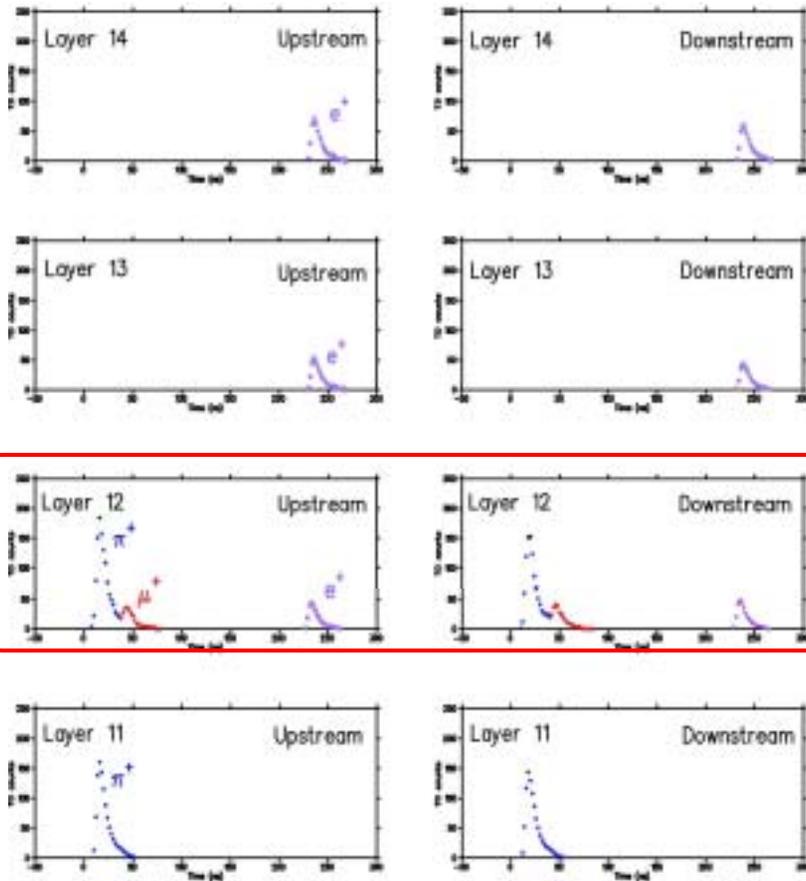
$K_{\pi 2}$ に対する分解能:

運動量  $\sim 1.1\%$

運動エネルギー  $\sim 2.8\%$

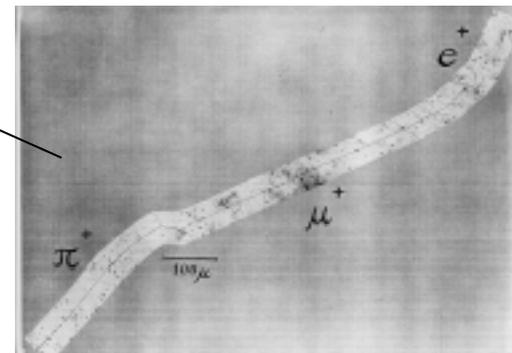
レンジ  $\sim 2.8\%$

# +の識別( + $\mu^+$ $e^+$ 崩壊連鎖の検出)

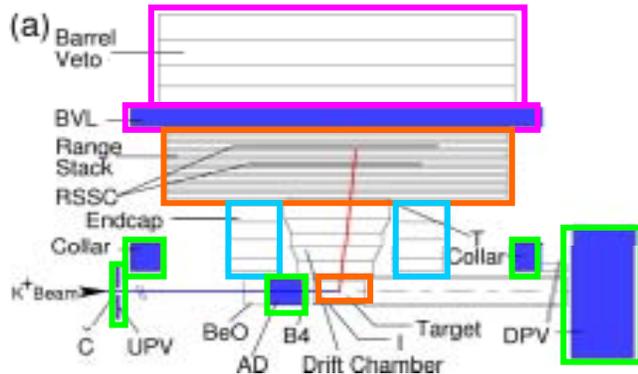


レンジ・スタックのシンチレータ信号は、500MHz Waveform digitizerで波形が記録される。

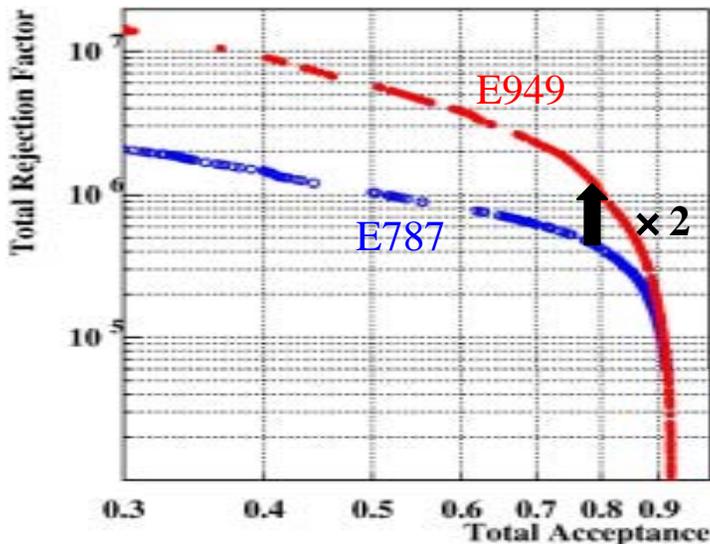
波形解析により、+が静止したレンジ・スタックのカウンターで +  $\mu^+$   $e^+$ 崩壊連鎖を検出する。



# 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**

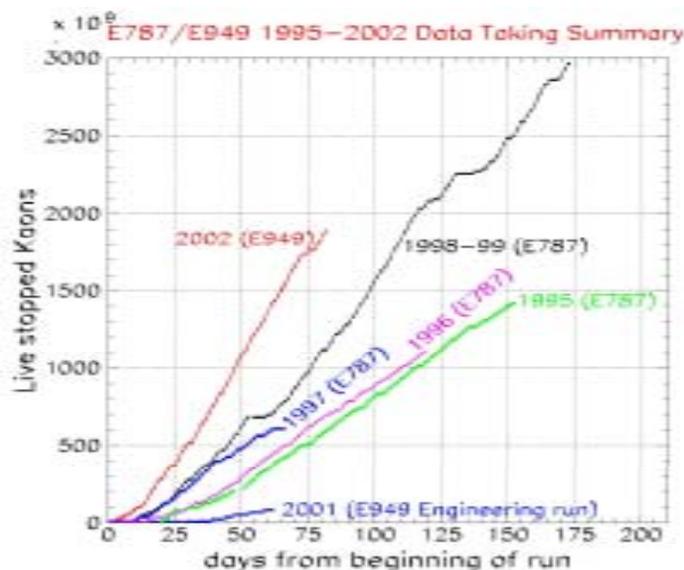


$K_2$ に対するRejectionが2倍に向上。

# 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 <sup>+</sup> 崩壊数/スピル	$2.1 \times 10^6$	$3.9 \times 10^6$
K <sup>+</sup> / <sup>+</sup> 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 =  $1.8 \times 10^{12}$  K<sup>+</sup>崩壊

E787の全データ( $5.9 \times 10^{12}$ )の30%に相当。

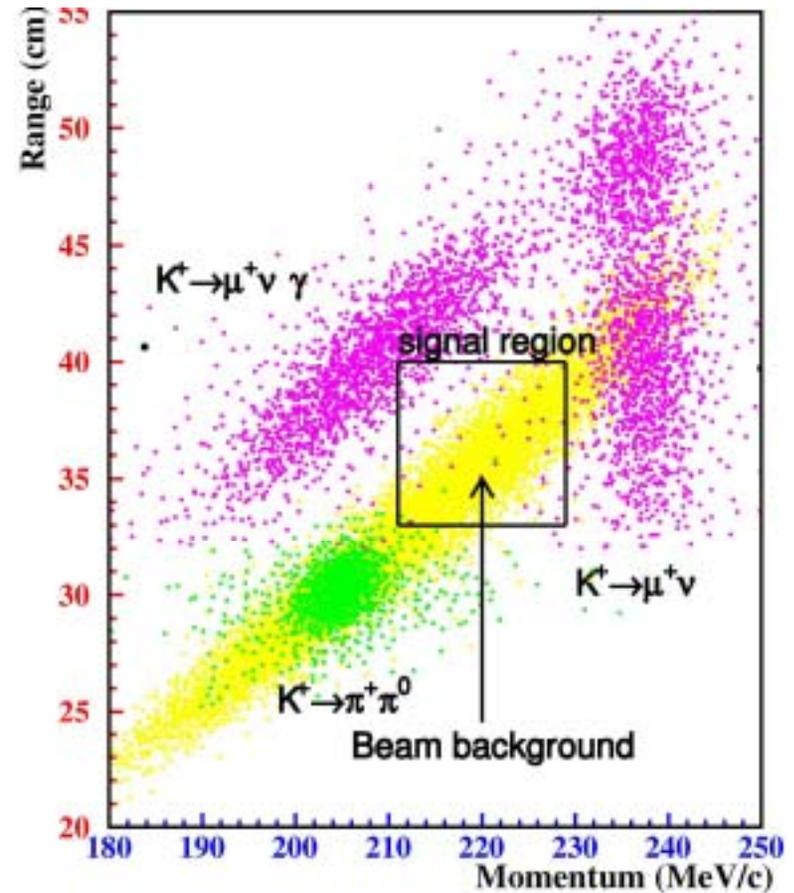
# データ解析

## 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

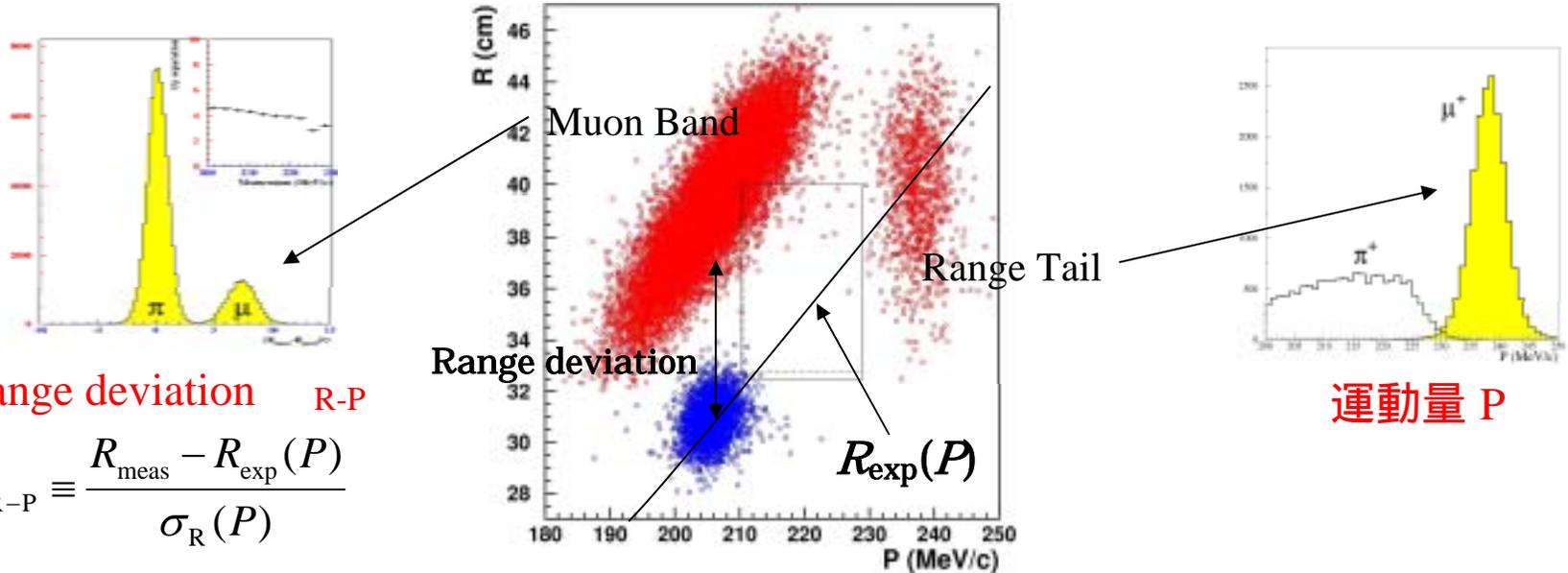
## 解析手法:

- 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

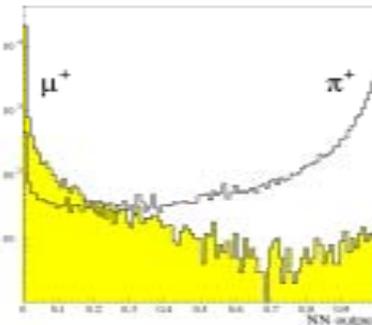
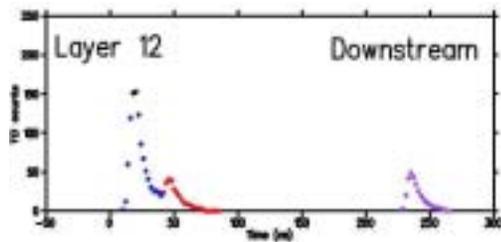


# Background Characterization (Muonバックグラウンド)

## MuonバックグラウンドのKinematics:



## + $\mu^+$ $e^+$ 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

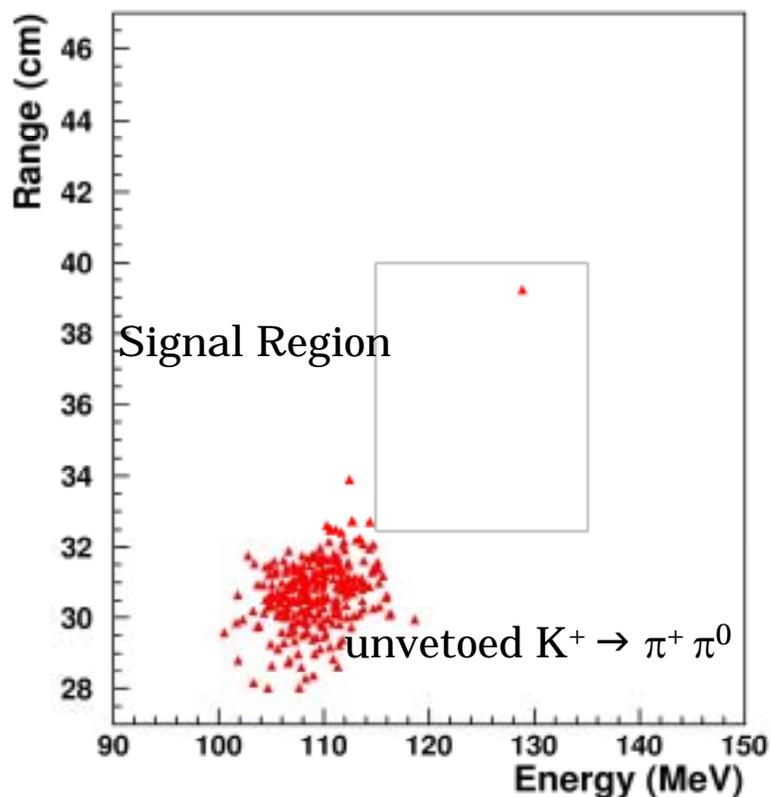
	<b>E787</b>	<b>E949</b>	
K <sup>+</sup> 崩壊数( $10^{12}$ )	5.9	1.8	× 0.305
アクセプタンス(%)	$0.20 \pm 0.02$	$0.22 \pm 0.02$	× 1.1
実験感度 ( $10^{-10}$ )	0.83	2.6	× 0.336

## バックグラウンド・レベル

Source	<b>E787</b>	<b>E949</b>
K <sub>2</sub>	0.032	$0.216 \pm 0.023$
Muon	0.064	$0.068 \pm 0.006$
Beam	0.050	$0.013 \pm 0.003$
<b>Total</b>	<b><math>0.14 \pm 0.05</math></b>	<b><math>0.297 \pm 0.026</math></b>

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。

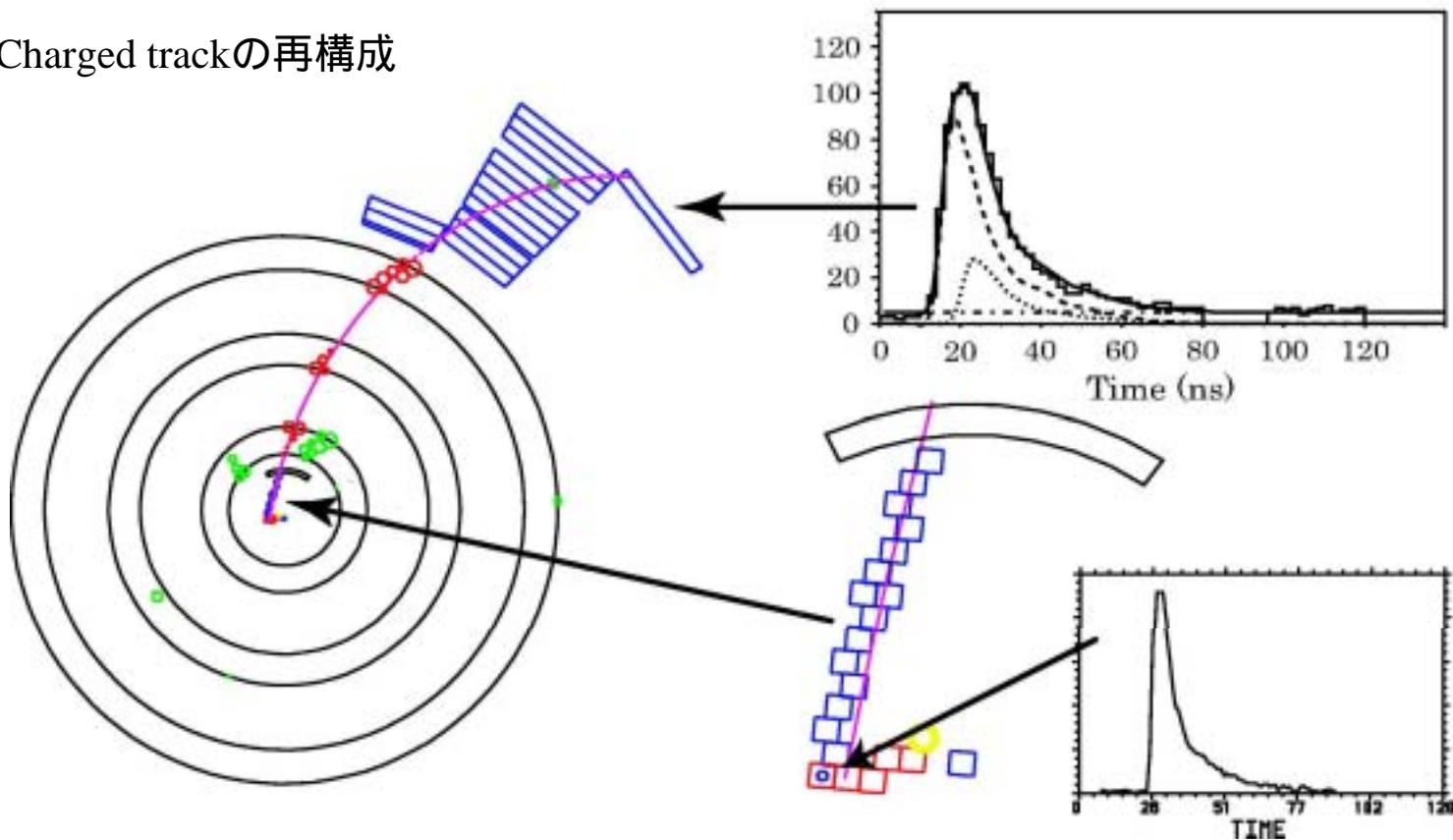
1イベントがシグナル領域に残った。

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
$\mu^+$ 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。

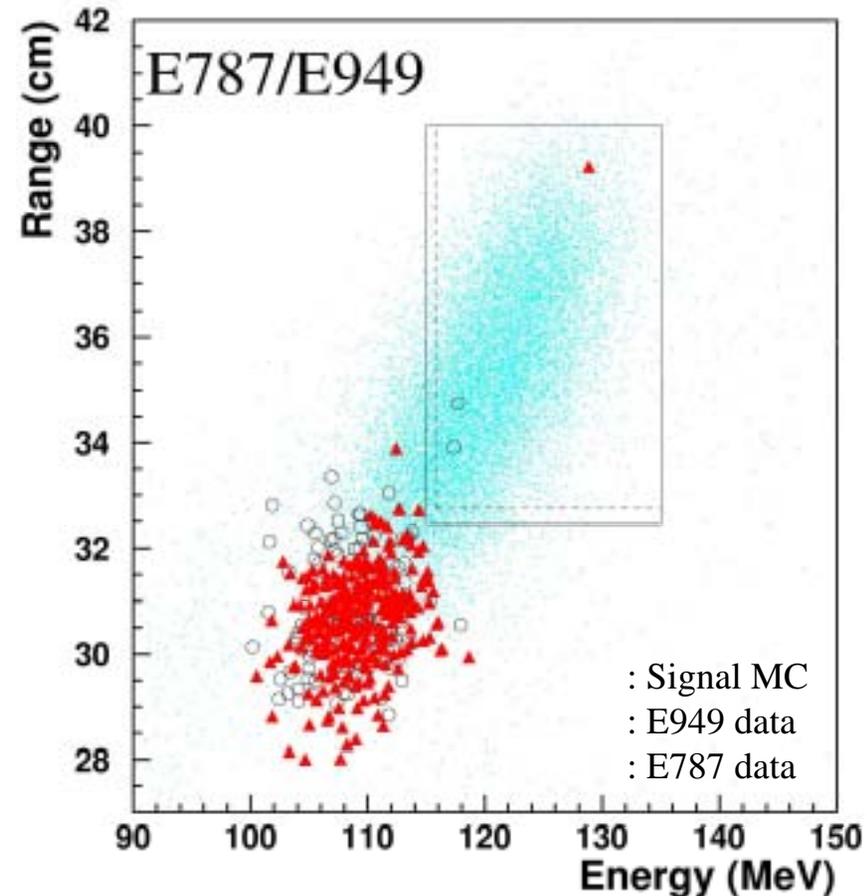
E787とE949のデータを合わせると、

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

(68% CL interval)

が得られた。

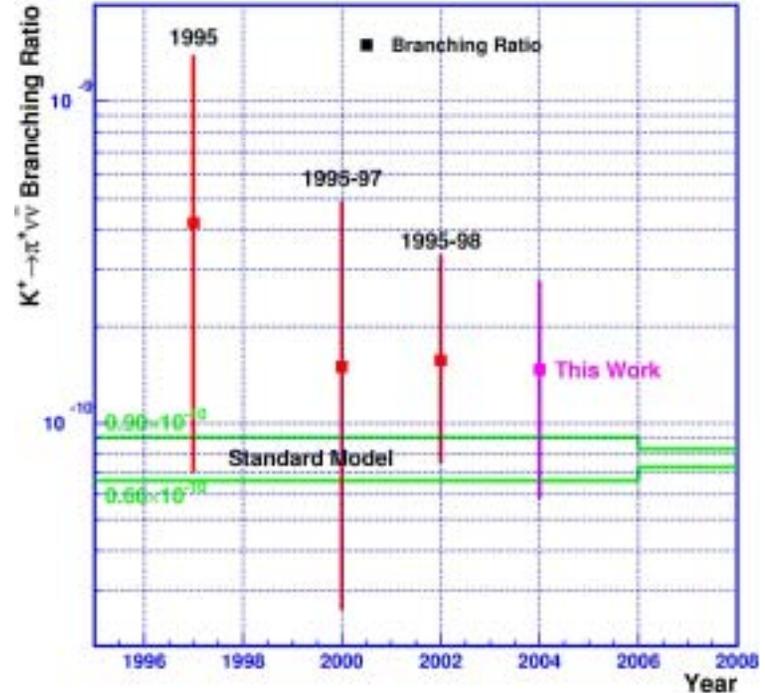
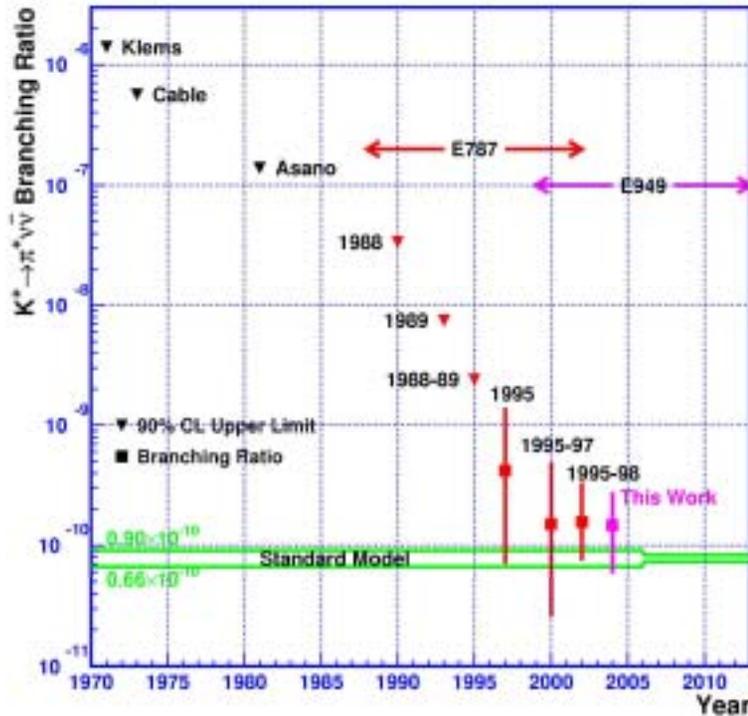
	E787		E949
Candidate	1995A	1998C	2002A
$S_i / b_i$	50	7	0.9
$W_i = S_i / (S_i + b_i)$	0.98	0.88	0.48
Background prob.	0.006	0.02	0.07



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:  $1.8 \times 10^{12}$ の $K^+$ 崩壊に相当するデータを収集。
- 実験感度 =  $2.6 \times 10^{-10}$ 、バックグラウンド・レベル =  $0.30 \pm 0.02$  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。