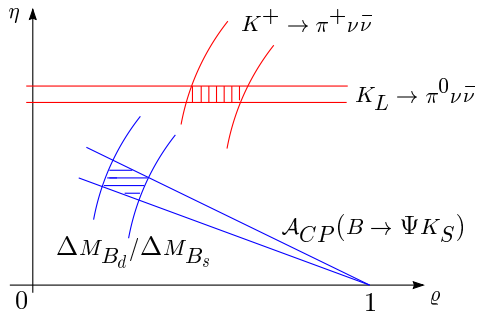


K中間子 稀 崩壊 実験



とその物理

～ 何ができるか、何がわかるか ～

小松原 健 (KEK素粒子原子核研究所)

科研費特定領域研究会「質量起源と超対称性物理の研究」

2004.March.09 ©エポカルつくば

内容 (26 slides、-09:25):

- 最近の理論の話題
- $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 実験の現状 (BNL-E949、J-PARC)
- K中間子によるハドロン長距離相互作用の研究:
 - $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$ 崩壊
 - Chiral(カイラル) Perturbation(摂動)

K 中間子と質量起源

- CPの破れ (1964), $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$

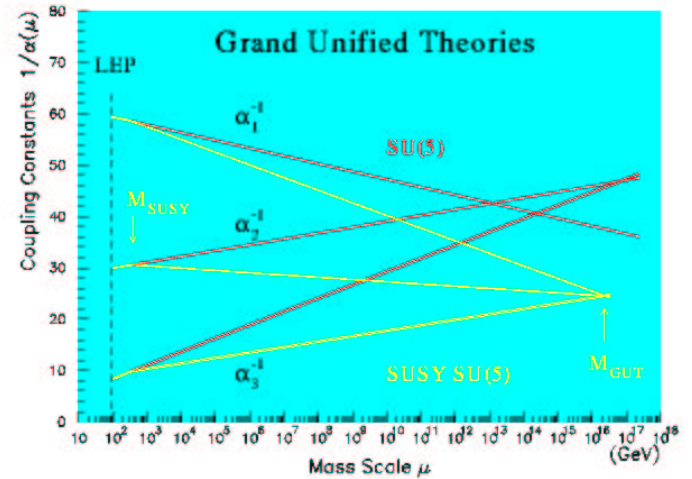
– R.D.Peccei, hep-ph/0209245:

it seems very natural to assume that the experimentally observed CP violation is due to the presence of a scalar sector in the theory. Indeed, personally I think that the existence of CP violation at low energy is as compelling evidence for a Higgs field as are the precision electroweak tests which suggest the presence of a light Higgs boson, ..

90年代の素粒子実験の成果 (biased view)

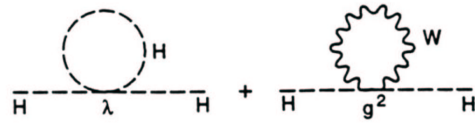
- コライダー実験

SUSY-GUT モデル

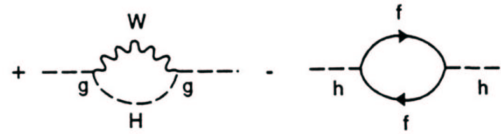


- K中間子の稀崩壊探索:
Flavor Changing Neutral Currents は
(ナイーブな) TechniColor の予言するレベルには無い

- ヒエラルキー問題 (Higgs 質量の補正)



$$\Lambda_{NP} \leq \text{a few TeV}$$



- "フレーバー問題"

$$K^0 - \bar{K}^0 \text{ mixing } \frac{s\bar{d}s\bar{d}}{\Lambda_K^2} \Rightarrow \Lambda_K \geq 10^4 \text{ TeV} \gg \Lambda_{NP}$$

(SUSYはなぜフレーバーを大きく変えないのか?)

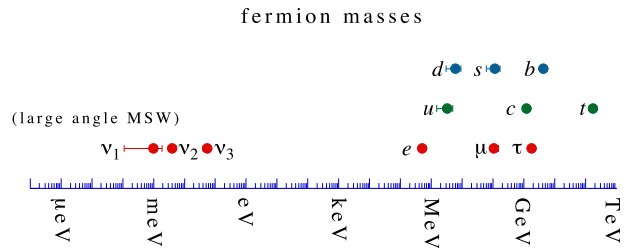
1. 世の中そう出来ている

Buras, hep-ph/0310208

- Minimal Flavor Violation

SM の フレーバー構造

$$\begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$



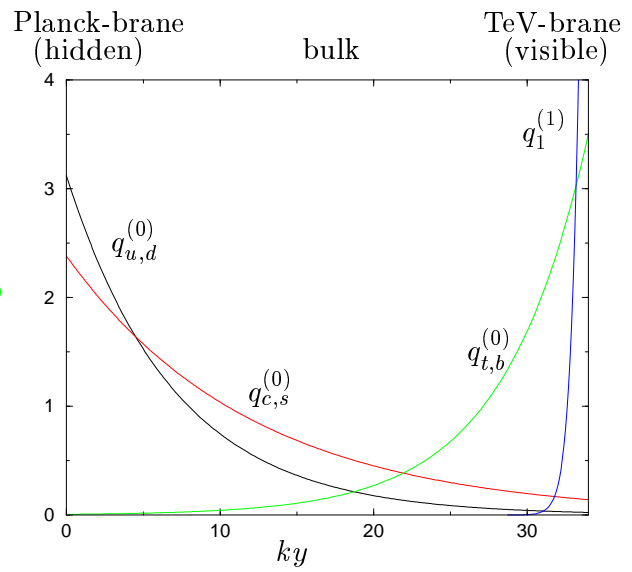
は NP でも基本的に保たれる。

分岐比の "SMからのずれ" は数十%のレベル ← 要精密測定

2. Kを見ているからよくない [Huber, NP B666\(2003\)](#)

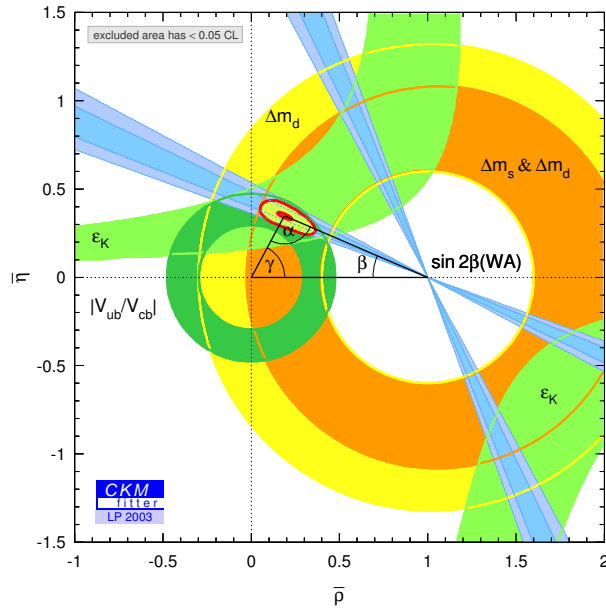
- Extra dimensions with bulk quarks

第三世代 (B) は他と異なる



3. まだ調べ尽くしていない

- (ρ, η) @LP03 CKMfitter



- charged currents (tree amplitudes)
- $\Delta F = 2$ mixings の”比”

$\Delta F = 1$ loop-induced FCNC decays は ??
($K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$)

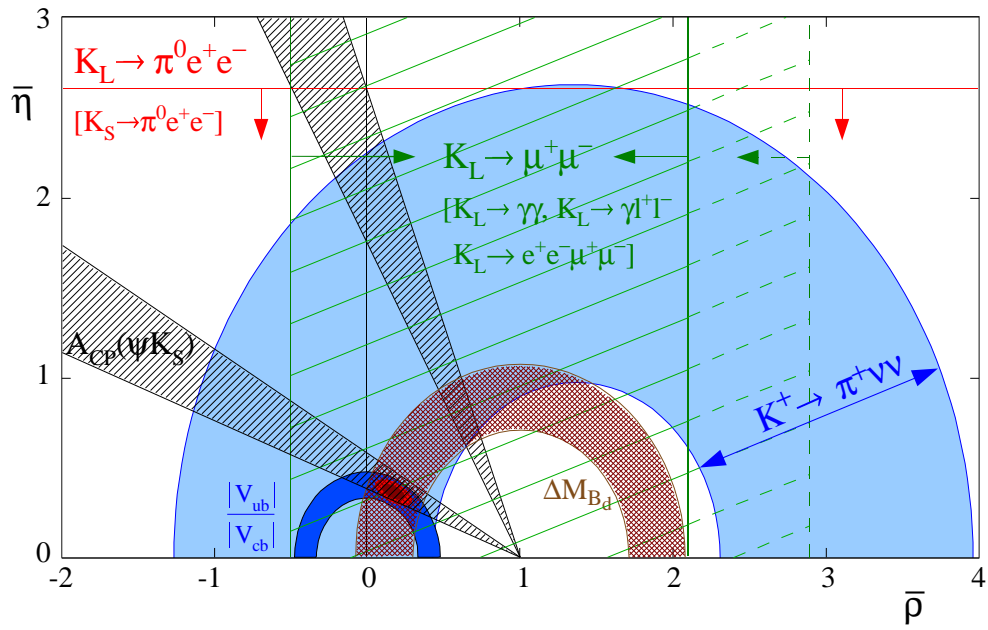
Buras & company, hep-ph/0312259, hep-ph/0402112

$B \rightarrow \pi\pi, K\pi$ 崩壊 Heavy Flavor Averaging Group

	Modes	Ratio	理論との比較
B^\pm, B_d	$2\Gamma(\pi^\pm\pi^0) / \Gamma(\pi^+\pi^-)$	2.12 ± 0.37	$\times 2$ large ?
B_d	$2\Gamma(\pi^0\pi^0) / \Gamma(\pi^+\pi^-)$	0.83 ± 0.23	$\times 10$ large ?
B^\pm	$2\Gamma(K^\pm\pi^0) / \Gamma(K^0\pi^\pm)$	1.17 ± 0.12	why > 1 ??
B_d	$\Gamma(K^\pm\pi^\mp) / 2\Gamma(K\pi^0)$	0.76 ± 0.10	why < 1 ??
B_d, B^\pm	$\Gamma(K^\pm\pi^\mp) / \Gamma(K\pi^\pm)$	0.91 ± 0.07	(reasonable)

- “ $B \rightarrow \pi\pi$ puzzle” :
SM: non-factorizable hadronic interference effects
- “ $B \rightarrow K\pi$ puzzle” :
NP: enhanced ElectroWeak penguins
with a large CP-violating phase
- K の物理:

	SM	NP
$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$	$(8.0 \pm 1.1) \times 10^{-11}$	$(7.5 \pm 2.1) \times 10^{-11}$
$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$	$(3.2 \pm 0.6) \times 10^{-11}$	$(3.1 \pm 1.0) \times 10^{-10}$



BNL E949 国際共同実験

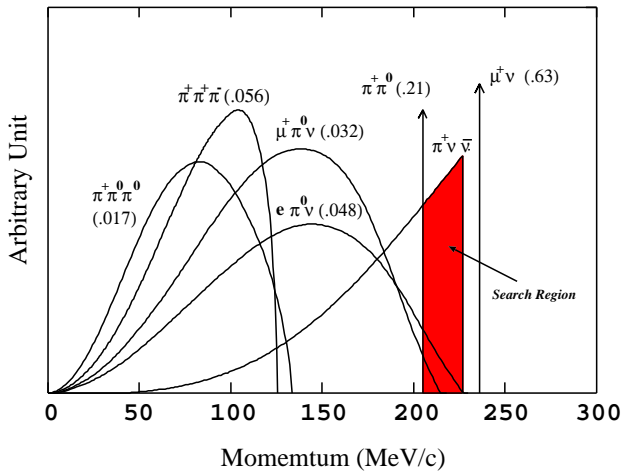
- 日: 福井大, KEK, 京大, 阪大, RCNP, 東大, ...
- 米: BNL, FNAL, New Mexico大, Stony Brook大
- 加: Alberta大, British Columbia大, TRIUMF
- 露: IHEP, INR

BNL-E787 実験 (-1998) に引き続き $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ を研究

米国 DOE 承認 (1999), 建設 (-2001),
エンジニアリングラン (2001),
物理ラン (2002-)

静止 K^+ 崩壊 $\rightarrow \pi^+ + \text{"nothing"}$

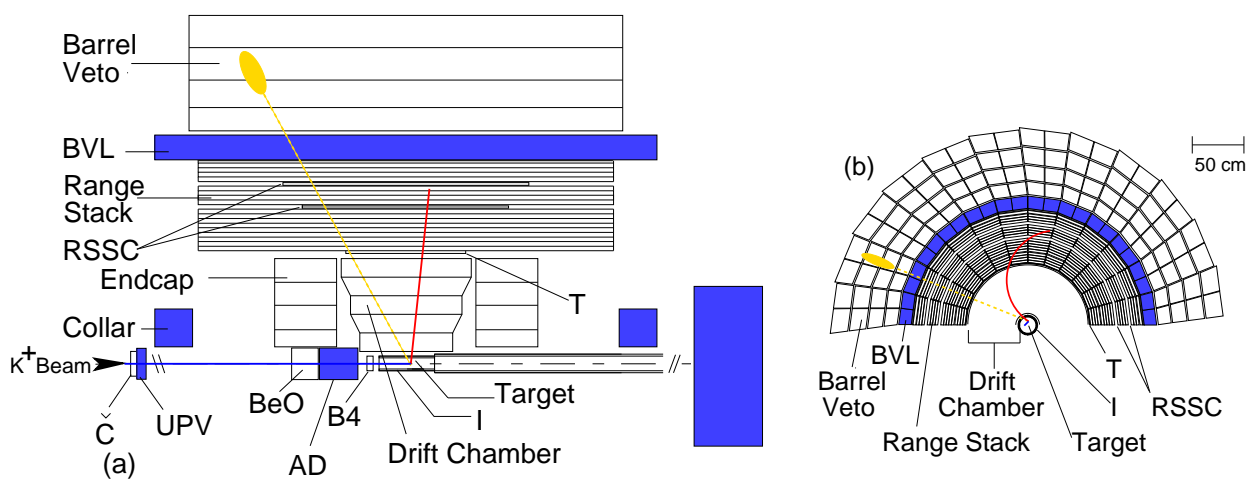
三体崩壊 ($P_{\pi^+} < 227\text{MeV}/c$)



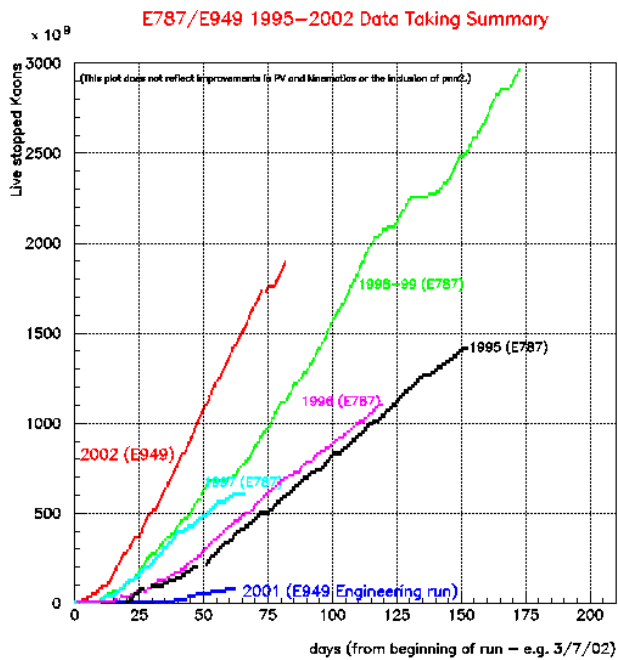
バックグラウンドの除去

- π^+ の kinematics:
 - 運動量
 - 運動エネルギー
 - レンジ
- π^+/μ^+ の識別
 $\iff K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$
- 余計な粒子 (γ) の検出
 $\iff K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$

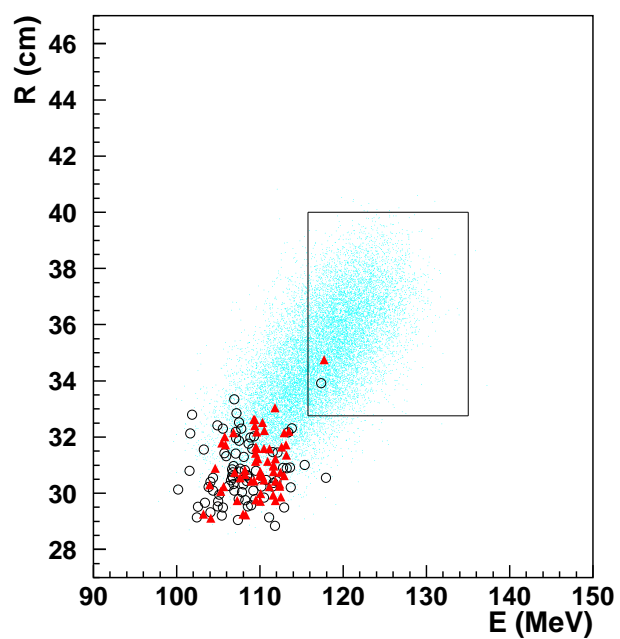
700 MeV/c DC-separated K^+ ビーム + ソレノイド磁場の スペクトロメータ



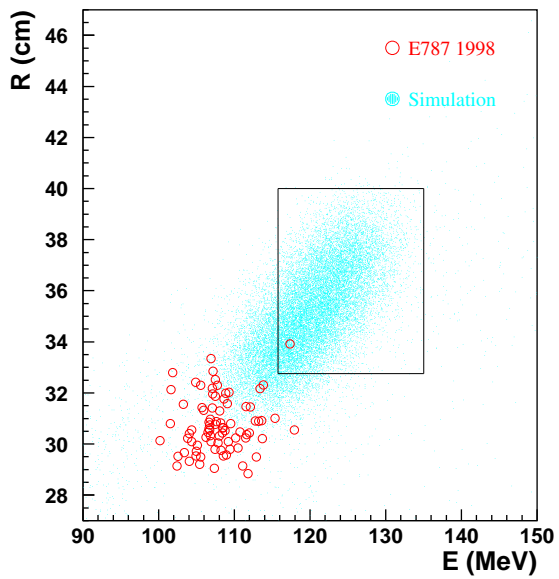
E949 2002 ラン



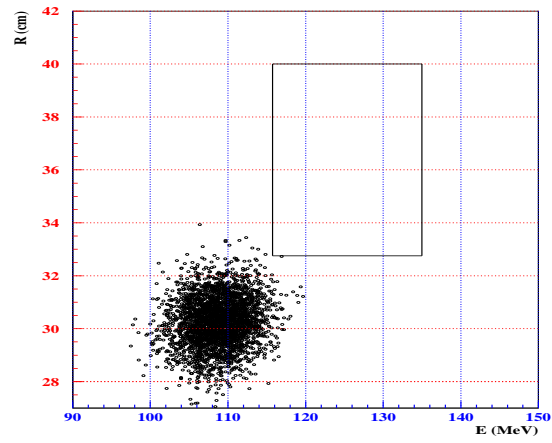
- 1.2 MHz live stopped kaons: $\times 2$ of E787
- $N_{K^+} = 1.8 \times 10^{12}$:
1/3 of E787
- Acceptance, Bgd level (< 1 ev): well under control
- results: coming soon...



- π^+ の Range と Energy
- real data: 95-97 98
- MonteCarlo
- バックグラウンド
 0.15 ± 0.05 events

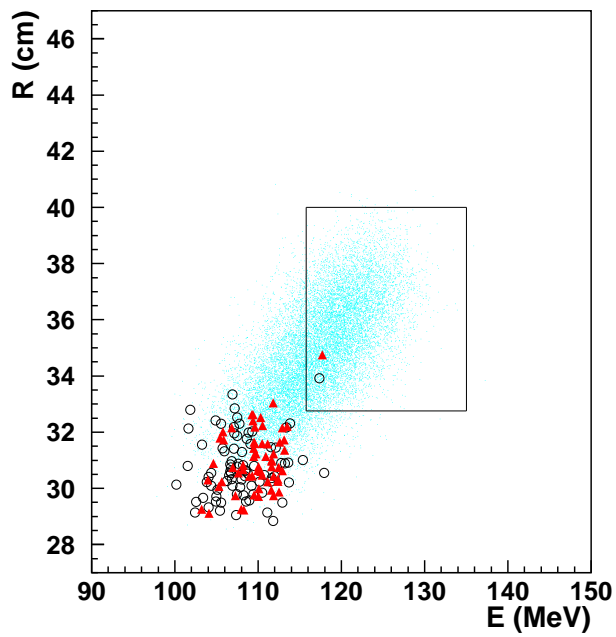


π^+ kinematic Bgd shape
from $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$



$$X_i = \frac{\exp^{-(S_i+b_i)}(S_i + b_i)^{d_i}}{d_i!} / \frac{\exp^{-b_i}(b_i)^{d_i}}{d_i!} = \exp^{-S_i} \left(1 + \frac{S_i}{b_i}\right)^{d_i}$$

Likelihood ratio technique: [Junk, NIM A434\(1999\)435](#)



- Signal Region:

\triangle : $S_i/b_i = 35$

\circ : $S_i/b_i = 3.6$

- Likelihood algorithm



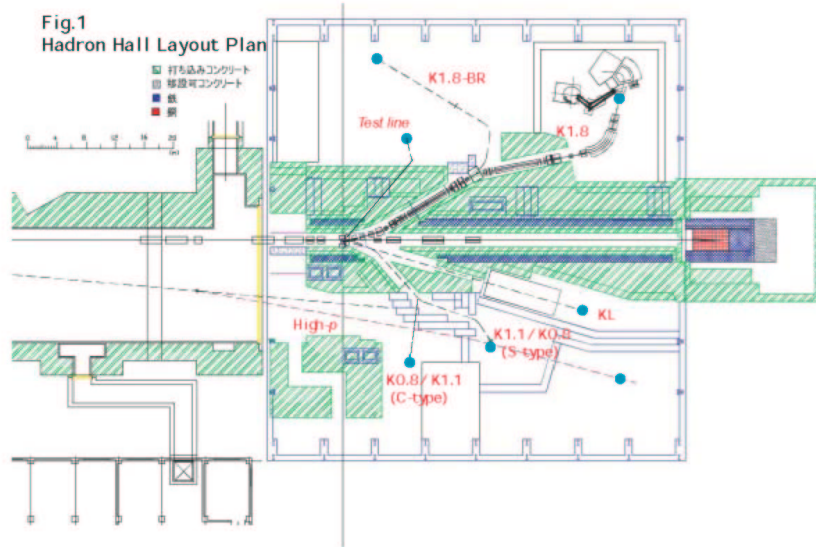
– $(1.57^{+1.75}_{-0.82}) \times 10^{-10}$

– $P_{bgd} = 0.02\%$
(3.5σ)

J-PARC サイト © 東海村

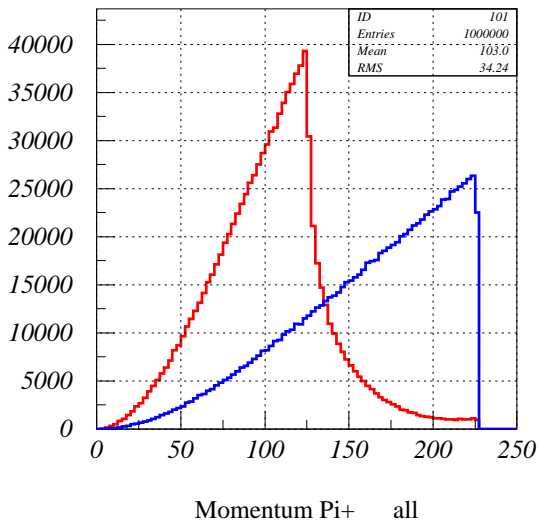


Phase-1 layout

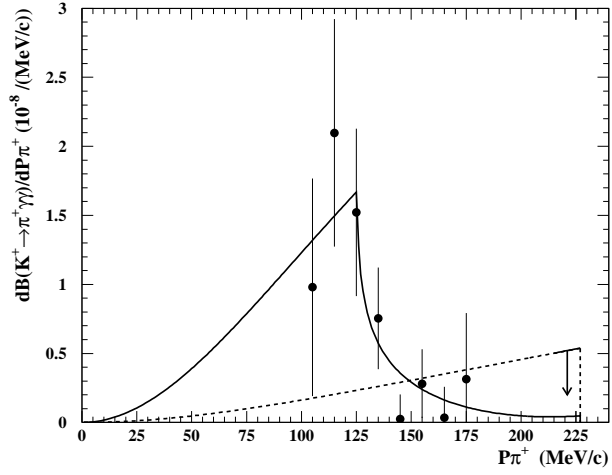


$K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma\gamma$ 崩壊

$(6.0 \pm 1.5_{stat} \pm 0.7_{syst}) \times 10^{-7}$ (E787): a medium-rare decay



π^+ momentum spectrum



Chiral Perturbation Theory ('80 -)

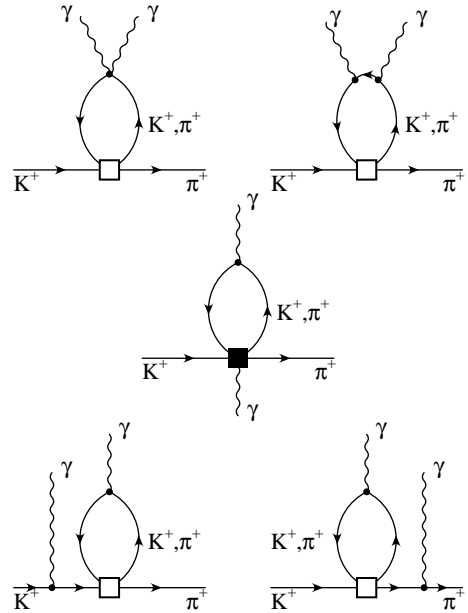
SSB of Chiral Sym:

$$SU(3)_L \times SU(3)_R \rightarrow SU(3)_V$$

$$\phi = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}\pi^0 + \frac{1}{\sqrt{6}}\eta & \pi^+ & K^+ \\ \pi^- & -\frac{1}{\sqrt{2}}\pi^0 + \frac{1}{\sqrt{6}}\eta & K^0 \\ K^- & \bar{K}^0 & -\frac{2}{\sqrt{6}}\eta \end{pmatrix}$$

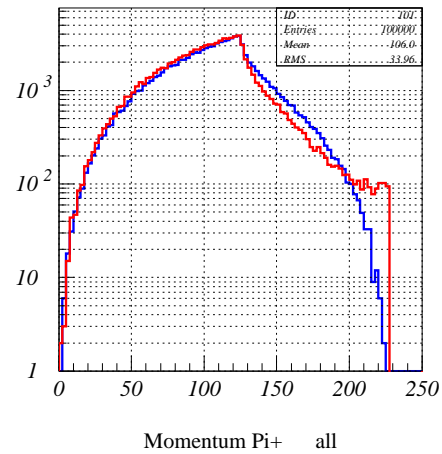
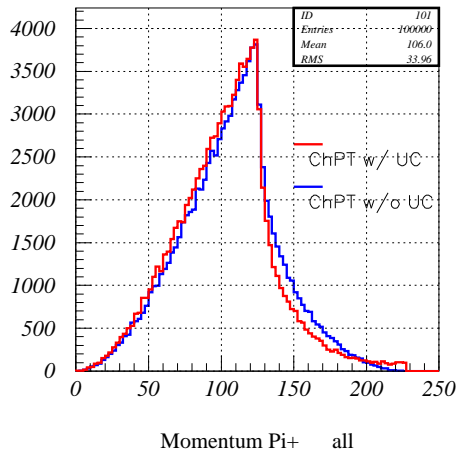
$$U(\phi) = \exp(i \sqrt{2} \phi / F_\pi)$$

$$L = \frac{F_\pi^2}{4} \text{Tr}(\partial_\mu U \bullet \partial^\mu U^\dagger) + \dots$$



* radiative 崩壊: $\partial_\mu \rightarrow D_\mu - i e A_\mu$ で系統的に記述できる

$K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$ 崩壊 at $P_{\pi^+} > 215 \text{ MeV}/c$
 not observed yet; "Unitarity Corrections in ChPT ?"



- above the peak from $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ (205 MeV/c)
- $\pi^+ \nu \bar{\nu}$ のバックグラウンドになりえるかどうかを理解する

ハドロン長距離相互作用（低エネルギー QCD）の理解

メソン	近似理論	直接計算
K, π	Chiral Perturbation Theory large- N_c QCD sum rules	Lattice
B	Heavy Quark Effective Theory Heavy Quark Expansion QCD factorization	

- 対称性 [Chiral, Heavy Quark] プラス ”有効場の理論” でどれだけ精度よく自然を記述できるか？
- FCNC, CPV (へのバックグラウンド) の理解に必須

E949 実験-2002 :

- 溝内 (京都大): Photon Detection from π^0 decays
[次の講演]
- 関口 (東京大): $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$
- 吉岡 (東京大): $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$

E787 実験-1998 :

- 藤原 (京都大): $K^+ \rightarrow \mu^+ \pi^0 \nu \gamma$
- 常見 (東京大): $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$

まとめ： ～ 何ができるか、何がわかるか ～

- “フレーバー問題”
⇒ $\Delta F = 1$ の崩壊過程をきちんと調べておく必要がある。
- $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ on BNL-E949 実験:
Searches with Small Statistics
using Likelihood ratio technique
- 低エネルギー QCD の物理は K, B とともに重要

我々は粒子の全てを理解できていない。