小松原 健

KEK 素粒子原子核研究所

NP01 ワークショップ WG#3

素粒子原子核研究計画委員会 2002 年 2 月

Kaon Rare-Decay Experiments
K 中間子 稀崩壊 実験

説明内容 (15 分)

- 現在日本で行われている研究
- 物理的意義
  - 現在の研究でどこまで行けるか？
- 統合計画 (JHF) での K 中間子崩壊実験
  - そのための条件
- (競合しうる 外国の実験計画)
- まとめと提言

現在日本で行われている研究

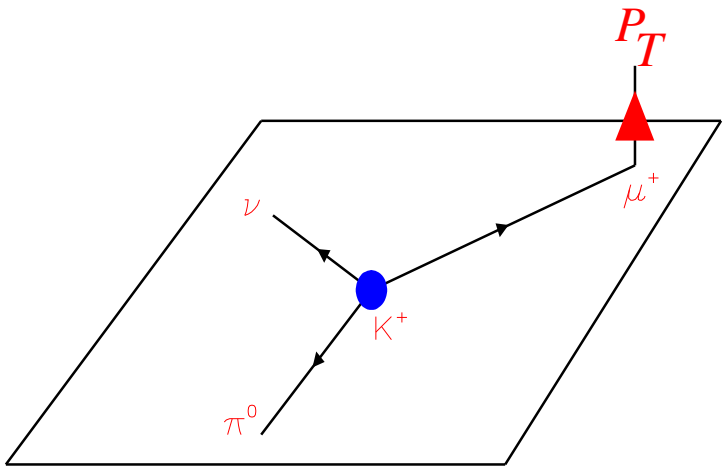
ビームタイム終了 $\rightarrow$ 解析中
データ収集 · 解析中
装置建設中

- KEK 12GeV PS ＜遅い取り出しビーム＞:
  - E246/E470 実験 (KEK, 阪大, 筑波大, ..)
  - E391a 実験 (KEK, 佐賀大, 山形大, 阪大, ..)
- 日米協力:
  - Fermilab - KTEV 実験 (阪大, ..)
  - BNL - E787/E949 実験
    (旧東大核研, KEK, 阪大, 福井大, ..)

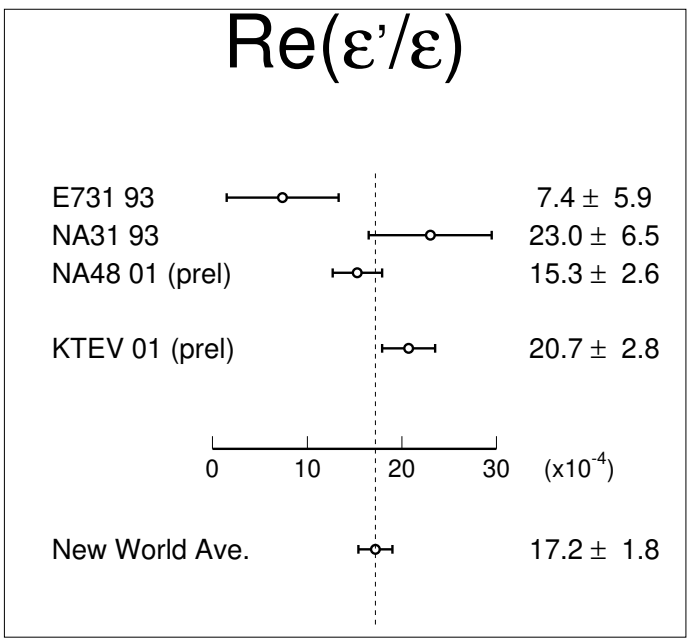
いずれも国際共同実験 (+米, 加, 露, ..)

主な物理の成果

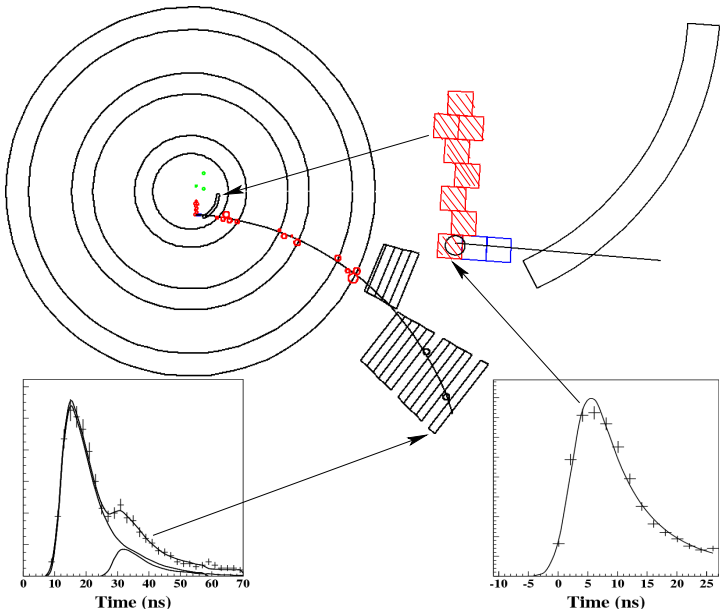
- E246: 時間対称性の破れの探索
  $K^+ \to \pi^0\mu^+\nu$ 崩壊での μ^+ の横偏極
  $\Longrightarrow$CP を破る新しい物理に対する制限

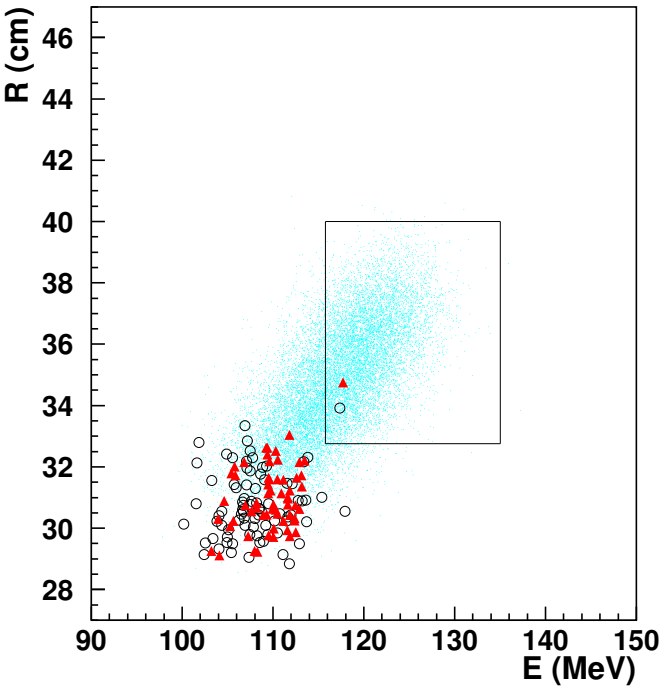


- KTEV: 「直接的な CP の破れ」の確立



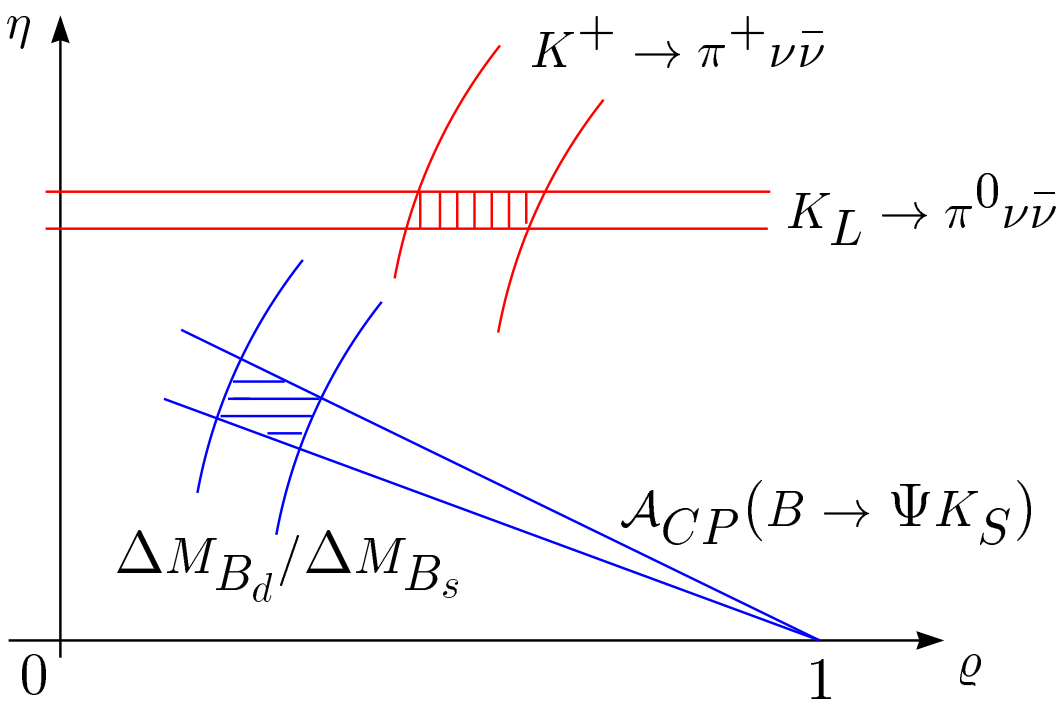
- E787: 稀崩壊 $K^+ \to \pi^+ \nu\bar{\nu}$ 崩壊を初めて測定





分岐比 1.57×10^{-10} (百億回に一度):
稀な崩壊の”測定”により標準理論を検証する

次に何を狙うか？



素粒子の標準模型（小林益川行列）

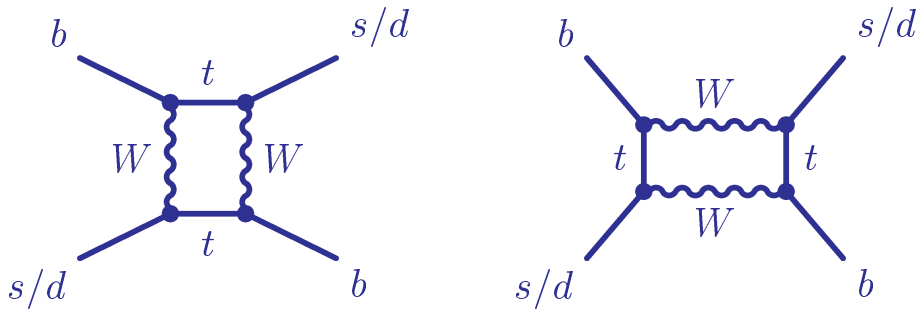
$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \simeq \begin{pmatrix} 1-\lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1-\lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1-\rho-i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

CP が破れる $(\eta \neq 0)$ ことはわかった。では

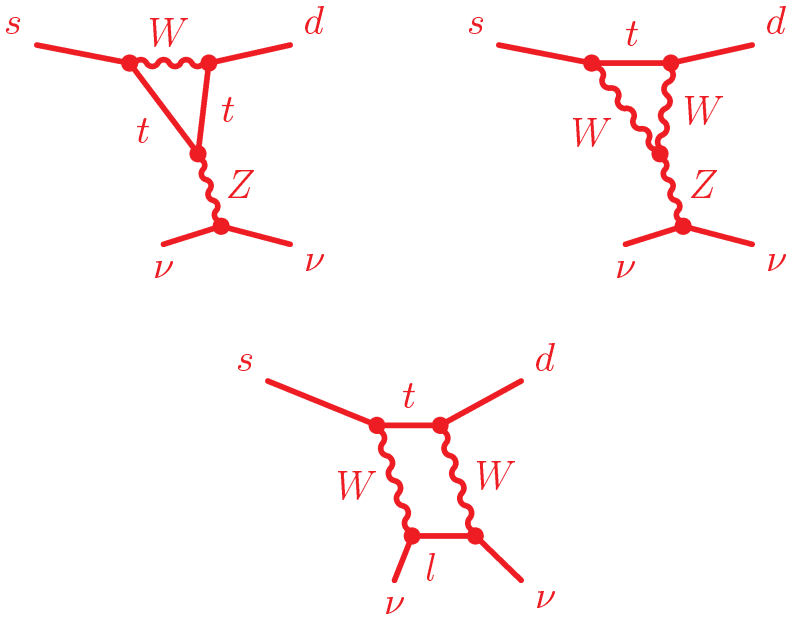
- (ρ, η) の値は？
- η_{KM} で全て説明がつくか？

理論の不定性が小さい “優良” モード

- B 中間子: $B^0(\bar{B}^0) \to \Psi K_S$、 $\Delta M_s/\Delta M_d$
  $|\Delta B| = 2$ の mixing 過程

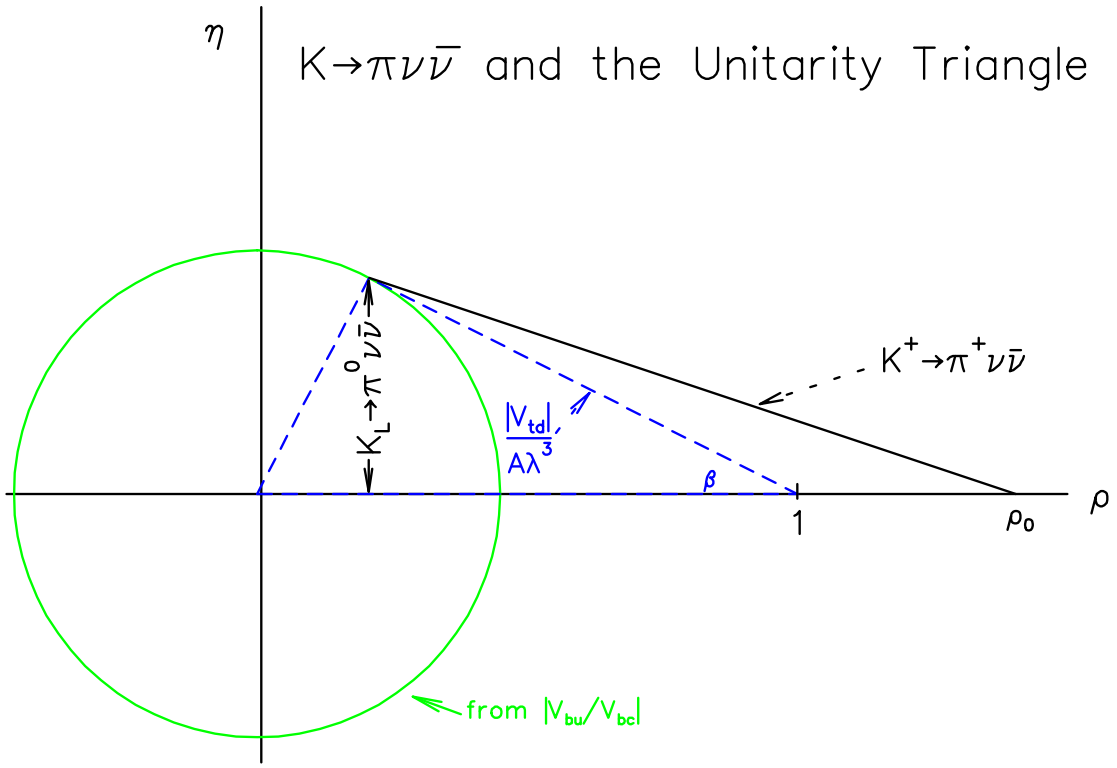


- K 中間子: $K^+ \to \pi^+\nu\bar{\nu}$、 $K_L^0 \to \pi^0\nu\bar{\nu}$
  $|\Delta S| = 1$ の 稀崩壊過程



$$\lambda_t \equiv V_{ts}^* \cdot V_{td} = A^2\lambda^5 \cdot (1 - \rho - i\eta)$$

B 中間子と K 中間子で “新しい物理” の効果が異なる
[クオークフレーバーの物理]



(ρ, η) from ϵ_K, $|V_{ub}/V_{cb}|$, ΔM_{Bd}, ΔM_{Bs}

$\Downarrow$

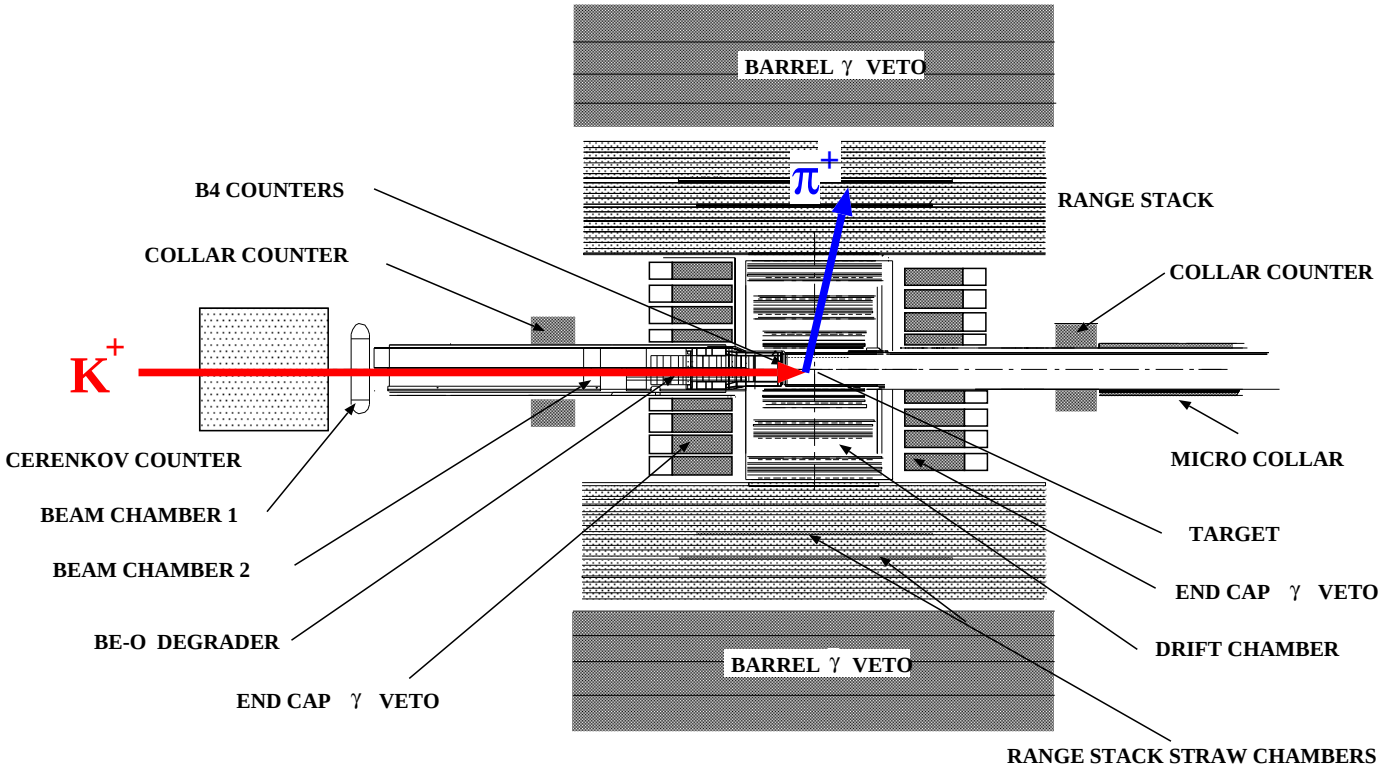
- B.R.($K^+ \to \pi^+ \nu\bar{\nu}$): $(7.5 \pm 2.9) \times 10^{-11}$
- B.R.($K^0 \to \pi^0 \nu\bar{\nu}$): $(2.6 \pm 1.2) \times 10^{-11}$

- BNL - E949 実験: $K^+ \to \pi^+ \nu\bar{\nu}$
- E391a 実験: $K_L^0 \to \pi^0 \nu\bar{\nu}$

どちらも今 世界で唯一の 実験
(崩壊モードに最適化した測定器)

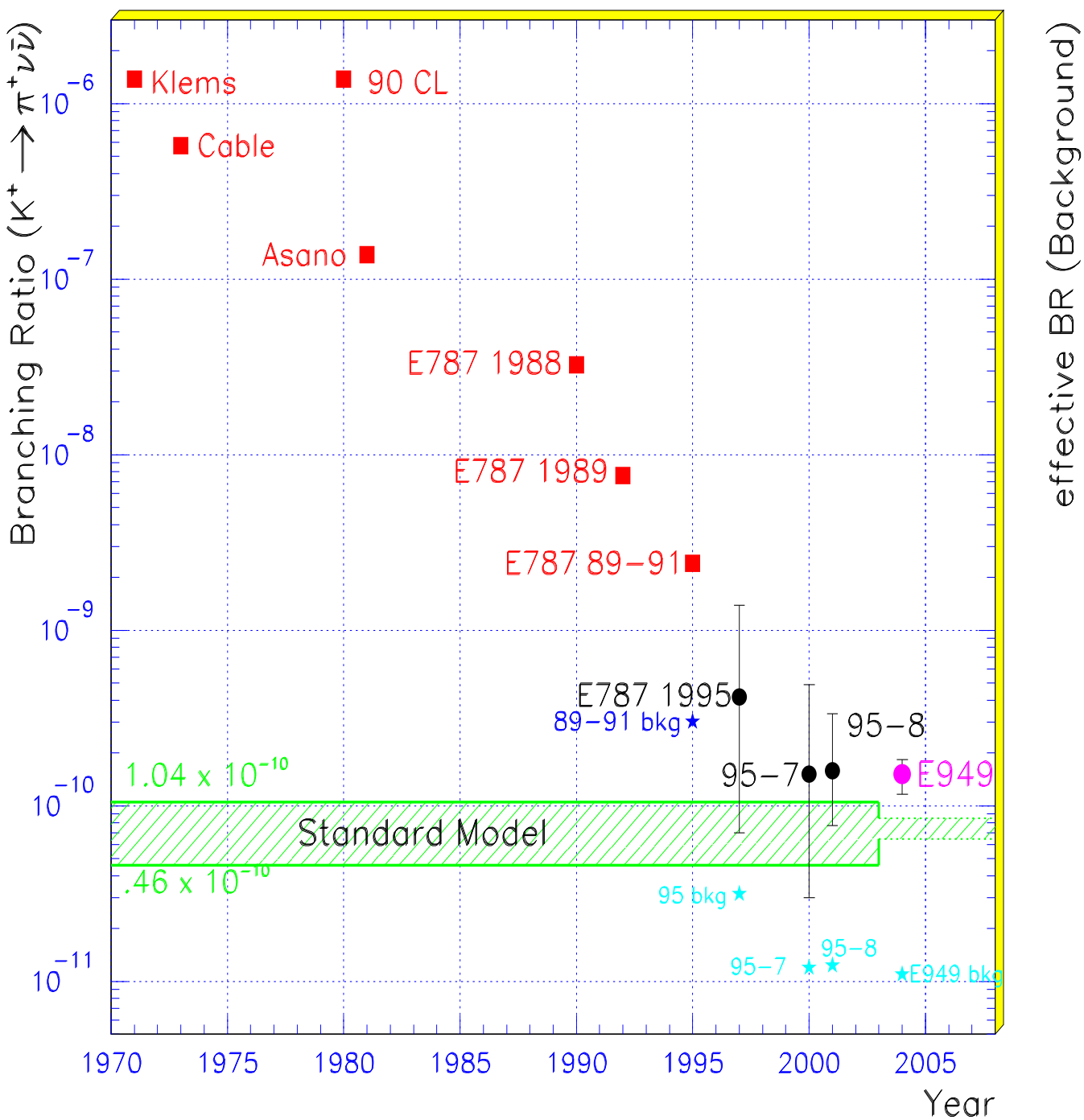
BNL-E949 http://www.phy.bnl.gov/e949/

静止したK^+から$\pi^+\nu\bar{\nu}$への崩壊



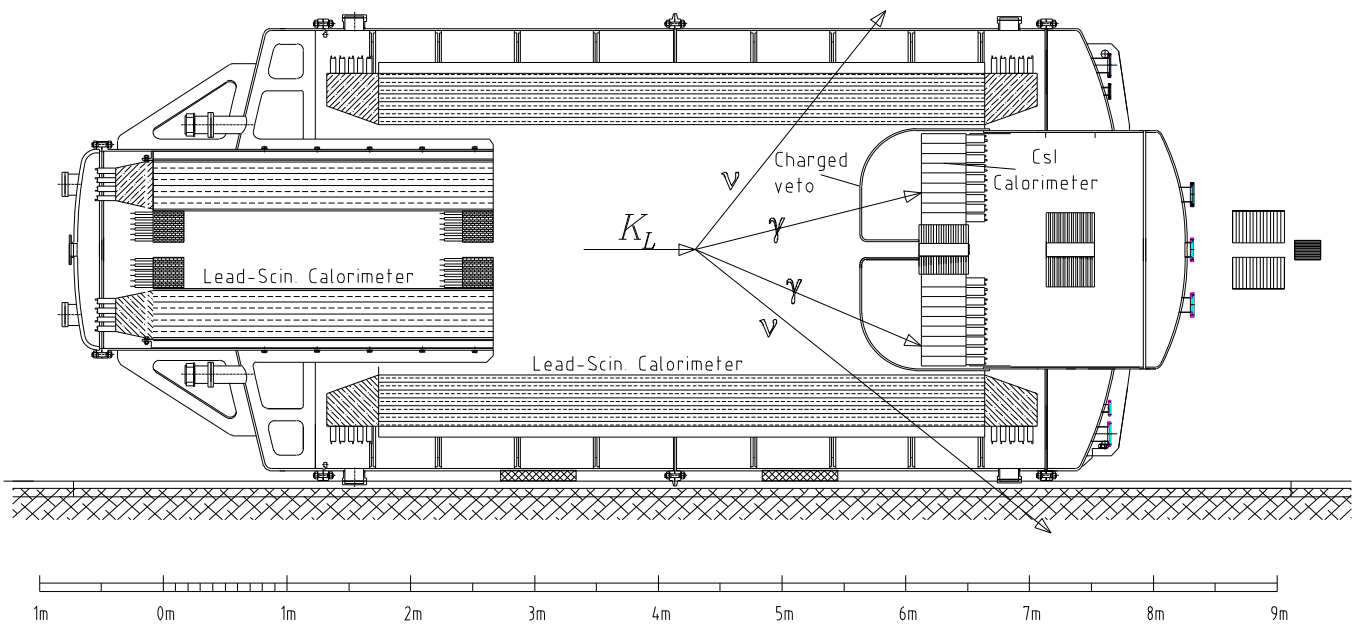
- 分岐比の感度 $(8\text{–}14)\times10^{-12}$ $\Longleftarrow$ ∼2 年、6000 時間
  標準理論が正しければ $5 \sim 10$ events
- データ収集開始目前

History of the Search for $K^+ \to \pi^+ \nu\bar{\nu}$

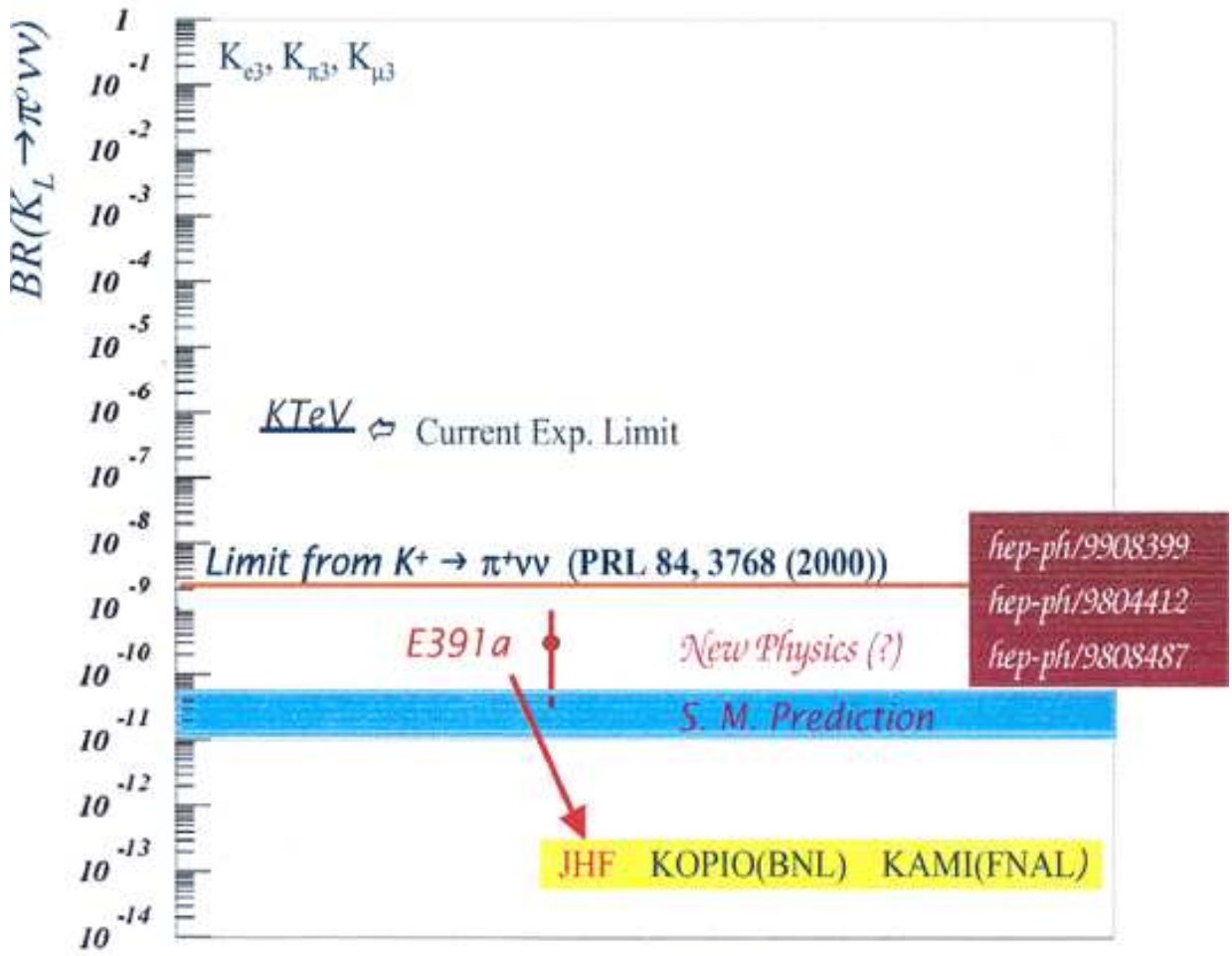


KEK-E391a http://psux1.kek.jp/~e391/

K_L^0 in flight から $\pi^0\nu\bar{\nu}$ への崩壊



- 建設中:
  - "ペンシル" ビームライン
  - CsI カロリメーター ($\pi^0 \to \gamma\gamma$)
  - ガンマ線検出器 ($K_L^0 \to \pi^0\pi^0$ のバックグラウンド)
- 2003 年秋よりデータ収集開始予定


$BR(K_L \to \pi^0 \nu\nu)$
1
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
10^{-6}
10^{-7}
10^{-8}
10^{-9}
10^{-10}
10^{-11}
10^{-12}
10^{-13}
10^{-14}
K_{e3}, $K_{\pi 3}$, $K_{\mu 3}$
KTeV ⇦ Current Exp. Limit
Limit from $K^+ \to \pi^+\nu\nu$ (PRL 84, 3768 (2000))
hep-ph/9908399
hep-ph/9804412
hep-ph/9808487
E391a
New Physics (?)
S. M. Prediction
JHF KOPIO(BNL) KAMI(FNAL)

JHFでのK中間子崩壊実験

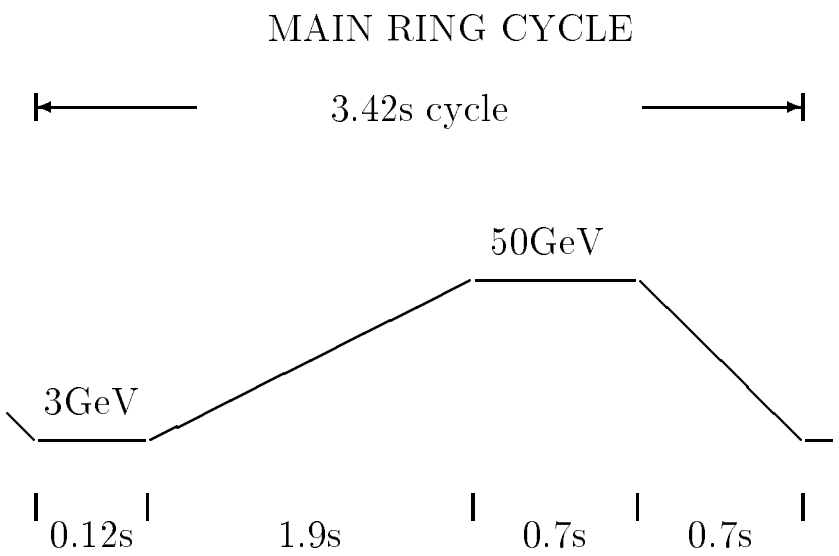
LoI within 6 months（各実験）

B.R.($K^+ \to \pi^+\nu\bar{\nu}$) と B.R.($K_L^0 \to \pi^0\nu\bar{\nu}$)
各々10%の精度で測定する
(≥ 100 events)

- 低エネルギー K^+ ビーム [静止K^+崩壊実験]
  550~800MeV/c, K/π $\geq$3 (DC セパレータ)
  - $K^+ \to \pi^+\nu\bar{\nu}$ 稀崩壊の測定
    （$\Longleftarrow$BNL-E949 実験）
  - μ^+ 横偏極による時間対称性の破れの探索
    （$\Longleftarrow$E246 実験）
  - K^+ 崩壊の形状因子測定による
    低エネルギーQCD の検証
- 高エネルギー 中性ビーム [K_L^0崩壊実験]
  5Gev/c, ペンシルビーム
  - $K_L^0 \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ 稀崩壊の測定
    （$\Longleftarrow$E391a 実験）

大強度、K生成の増加
$K_L^0 \to \pi^0\nu\bar{\nu}$: ガンマ線検出に有利

JHF 50GeV PS: Duty factor



PS operation		AGS	JHF-0		KAON	
proton energy	GeV	24	50		30	
protons on Tgt	10^{12}/spill	65	330	$\times 5.0$	62.5	$\times 0.96$
machine cycle	sec	6.4	3.42	$\times 1/1.87$	0.1	$\times 1/64$
average current	μA	1.63	15.6	$\times 9.6$	100	$\times 61$
slow extraction	sec	4.1	0.7	$\times 1/6$	0.085	$\times 1/48$
duty factor		0.64	0.20	$\times 0.31$	0.85	$\times 1.33$
instantaneous rate	10^{12}/sec	16	470	$\times 29$!!	735	$\times 46$

- The JHF-50GeV Slow-Ext. is not optimized to the K $\rightarrow \pi\nu\bar{\nu}$ experiments (or any type of coincidence experiment).

optimization of the accelerator and beam line for a new $K^+ \to \pi^+ \nu \bar{\nu}$ experiment @JHF

PS operation		AGS to LESB3 E949	JHF-mod to K550 pnnJHF	[1/3]
proton energy	GeV	24	30	
protons on Tgt	10^{12}/spill	65	100	$\times$ 1.54
machine cycle	sec	6.4	3.42	$\times$ 1/1.87
average current	μA	1.63	4.68	$\times$ 2.88
slow extraction	sec	4.1	1.8	$\times$ 1/2.3
duty factor		0.64	0.53	$\times$ 0.83
instant. rate	10^{12}/sec	16	55.6	$\times$ 3.5
K^+ momentum	MeV/c	730	550	(no lose)
stopping fraction		0.26	0.4	$\times$ 1.5

まとめと提言

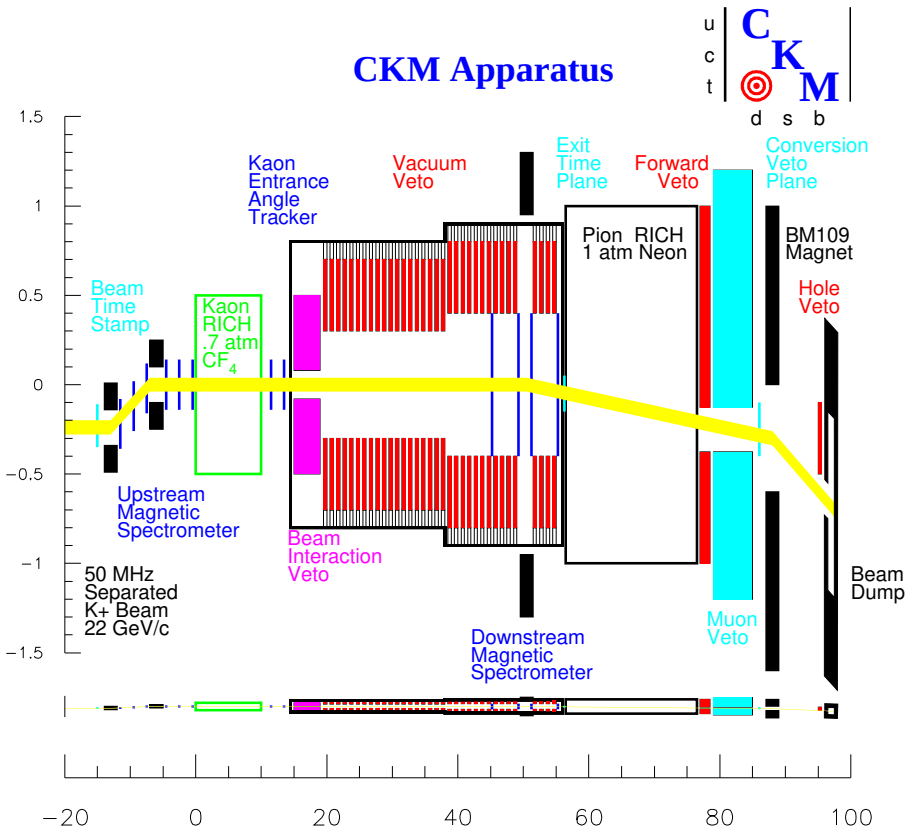
$K^+ \to \pi^+ \nu\bar{\nu}$ と $K_L^0 \to \pi^0 \nu\bar{\nu}$
稀な崩壊の測定で
“新しい物理” を探索する

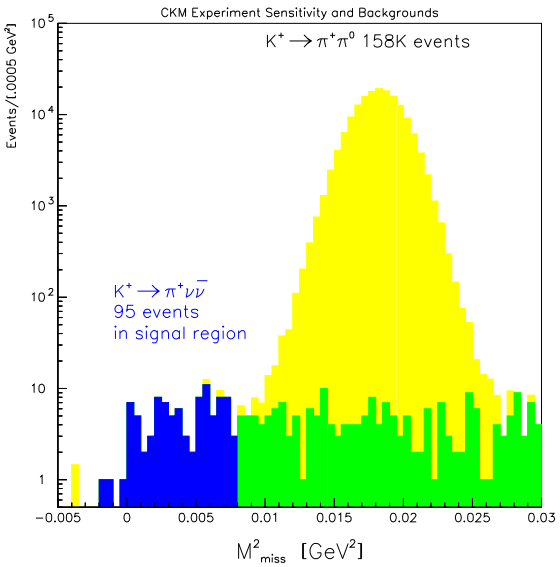
- K 中間子崩壊実験は国際協力のもと
  これまで着実な物理の成果を収めている。
  - JHF での実験の基盤は確立した。
- 現在の実験プログラム (BNL-E949, E391a) が
  中途半端に “次の実験のための R&D” で
  止まってはいけない。
  - 可能な限り充分なビームで実験を遂行し
    物理の結果を出すことが極めて重要。
- JHF での実験で物理を出すためにはまず
  - 加速器の運転モード (Duty Cycle)
  - ビームラインのデザイン

  が鍵になる。
  - 他の実験 (原子核) ではどうか？

Fermilab CKM 実験

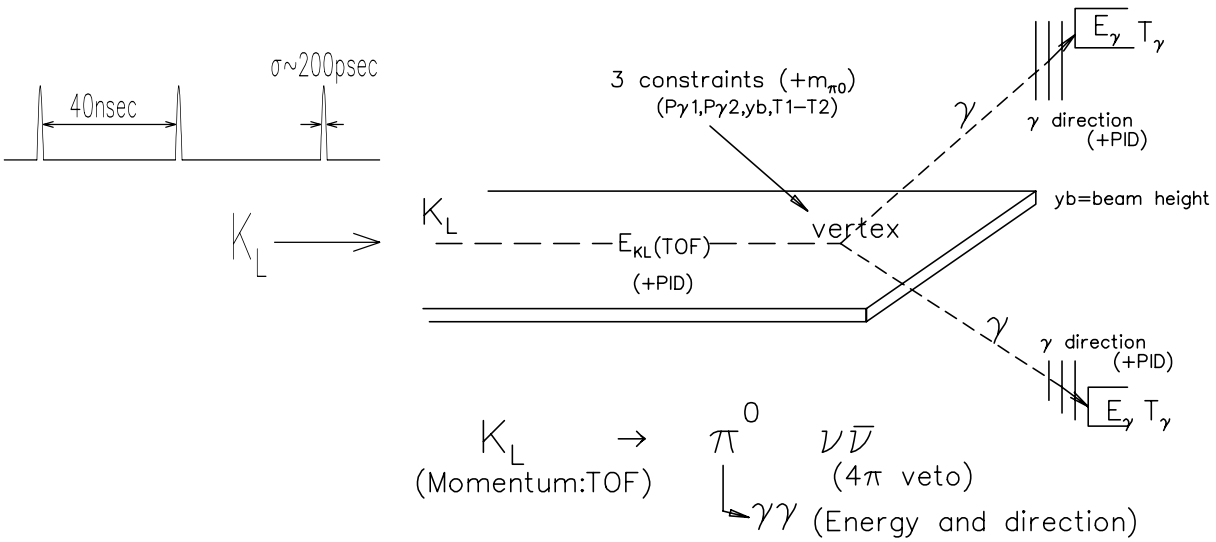
K^+ in flight から $\pi^+\nu\bar{\nu}$ への崩壊





- Scientific approval (2001)
- reviewed by
  Particle Physics Project Prioritization Panel (P5) in the future

BNL KOPIO 実験　　(←京大)



- “RF バンチ” ビーム (800MeV/c): TOF 測定
- γ のエネルギー、位置、角度の測定
- 標準理論が正しければ 50 events (S/N=2)
- NSF Major Research Equipment program