KEK-素核研

小松原 健

日米協力 BNL-E787/E949 実験

Electronics·Online Users Workshop @KEK Oct'01

K 中間子稀崩壊
～ waveform digitizer の話 ～

Outline:

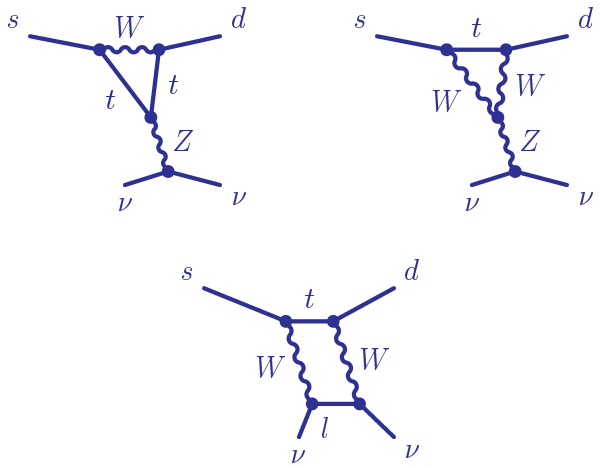
- どんな物理をやりたいか? [K $\to \pi\nu\bar{\nu}$ 崩壊]
- どんな測定器を使うか? [E787 測定器]
- なぜ waveform digitizer (500MHz sampling) が必要が?
  - ガンマ線 veto
  - ミューオンの除去
  - トリガー段階でのミューオンの除去
- どんなエレクトロニクスをどう使っているか?
  - based on flash-ADC [@BNL, USA]
  - based on GaAs-CCD [@TRIUMF, Canada]
- 何が問題か？これからどうしたいか？ [E949, JHF, ...]

* Programmable Logic Device (ALTERA 製) を用いた
トリガーエレクトロニクス: E949 実験, 能町、吉岡、 ...

$K \to \pi\nu\bar{\nu}$ の物理: s-quark $\to$ d-quark

Flavor を変える中性カレント

SM では $W^{\pm}/Z^0$ の高次ループ で起る



重い top-quark ($170\mathrm{GeV}/c^2$) の効果

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

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

稀 [$A^2\lambda^5$] だが極めて重要 [ρ と η]

K^+ では V_{td} の絶対値がわかる。

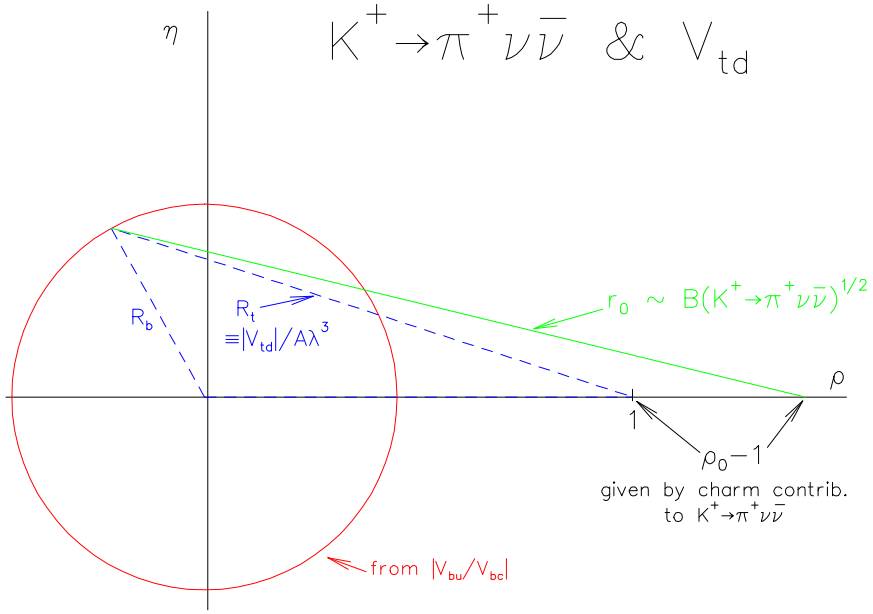
$K_L^0 \simeq K_2(CP-) + \epsilon \cdot K_1(CP+)$:

$$A(K_2 \to \pi^0) \propto A(K^0 \to \pi^0) + A(\bar{K}^0 \to \pi^0)$$
$$\propto V_{td}^* - V_{td} = 2\,\mathrm{Im}(V_{td}) \propto \eta$$

[K_L^0 では CP の直接の破れ がわかる。]

B.R.($K^+ \to \pi^+ \nu\bar{\nu}$)

$$4.11 \times 10^{-11} \cdot A^4 \cdot X(x_t)^2 \cdot [\ (\rho_0 - \rho)^2 \ + \ \eta^2\ ]$$



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

$\Downarrow$

Standard Model の推定値: $(0.75 \pm 0.29) \times 10^{-10}$

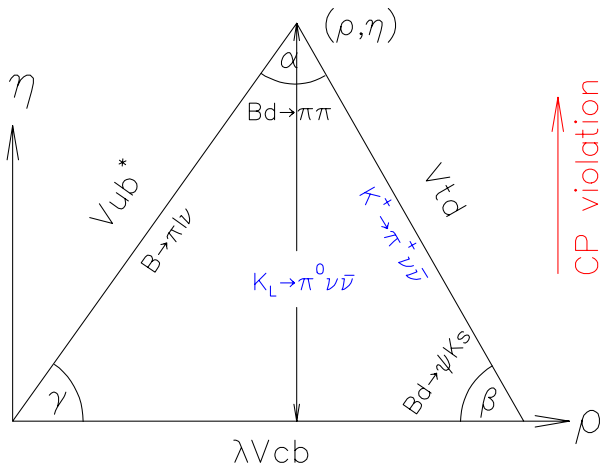
E787 実験: $(1.5^{+3.4}_{-1.2}) \times 10^{-10}$

B.R.($K_L \to \pi^0 \nu\bar{\nu}$) $1.80 \times 10^{-10} \cdot A^4 \cdot X(x_t)^2 \cdot \eta^2$

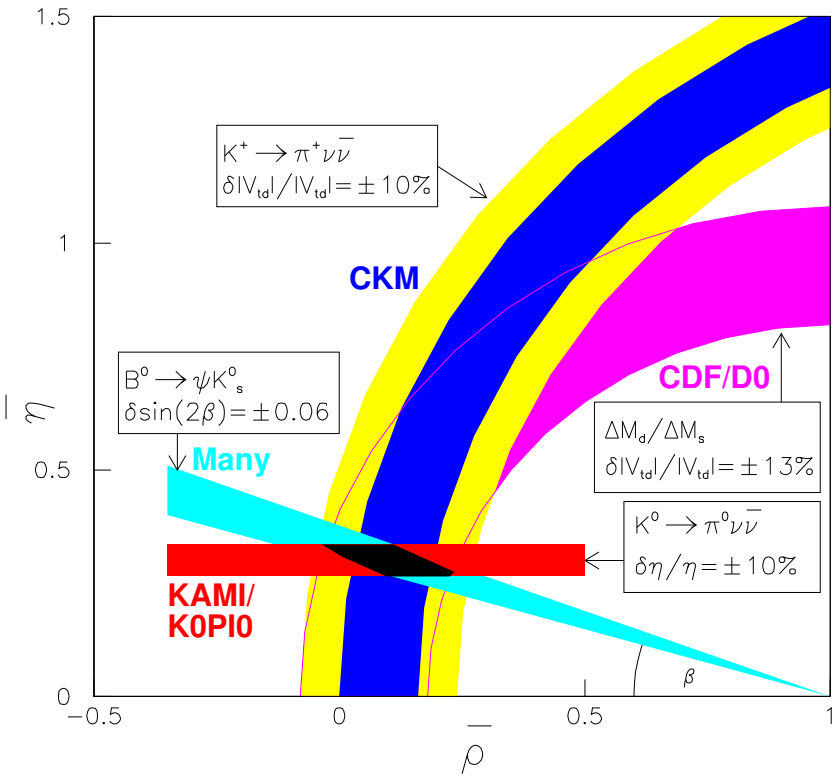
Standard Model の推定値: $(2.6 \pm 1.2) \times 10^{-11}$

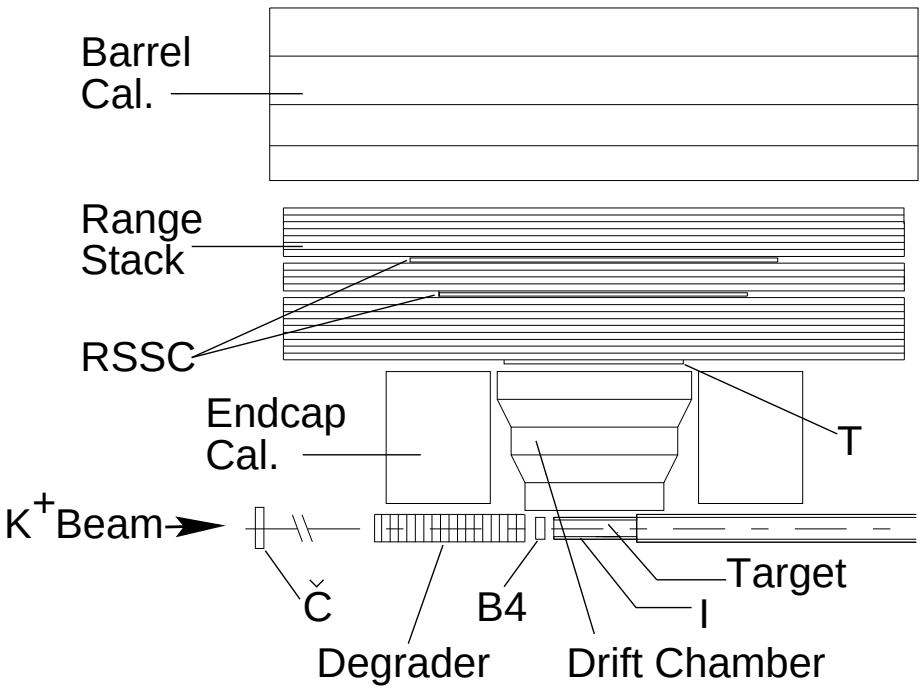
KTEV 実験: $< 5.9 \times 10^{-7}$

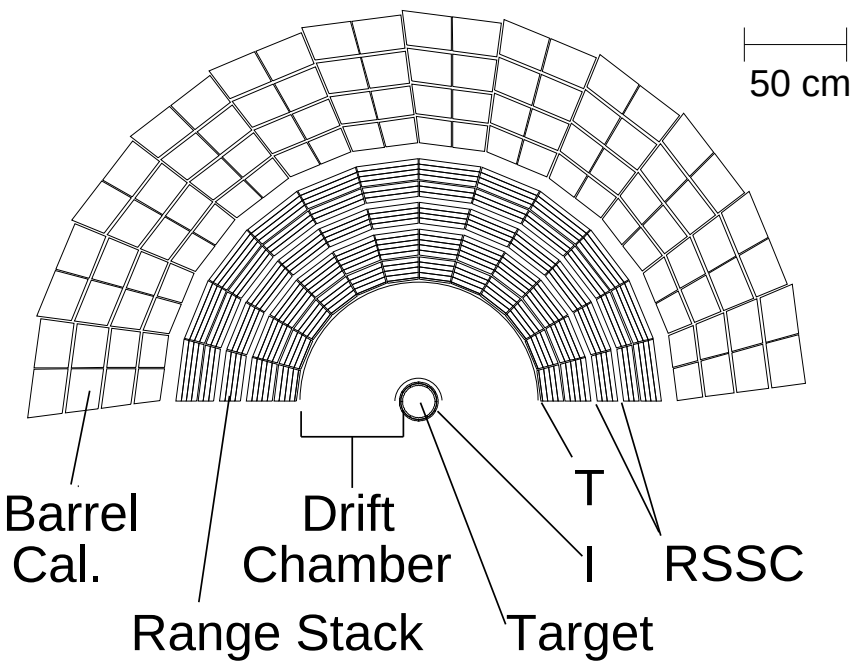
B.R.($K_L \to \pi^0 \nu\bar{\nu}$) と B.R.($K^+ \to \pi^+ \nu\bar{\nu}$)の各々を10%程度の精度で測定することができれば

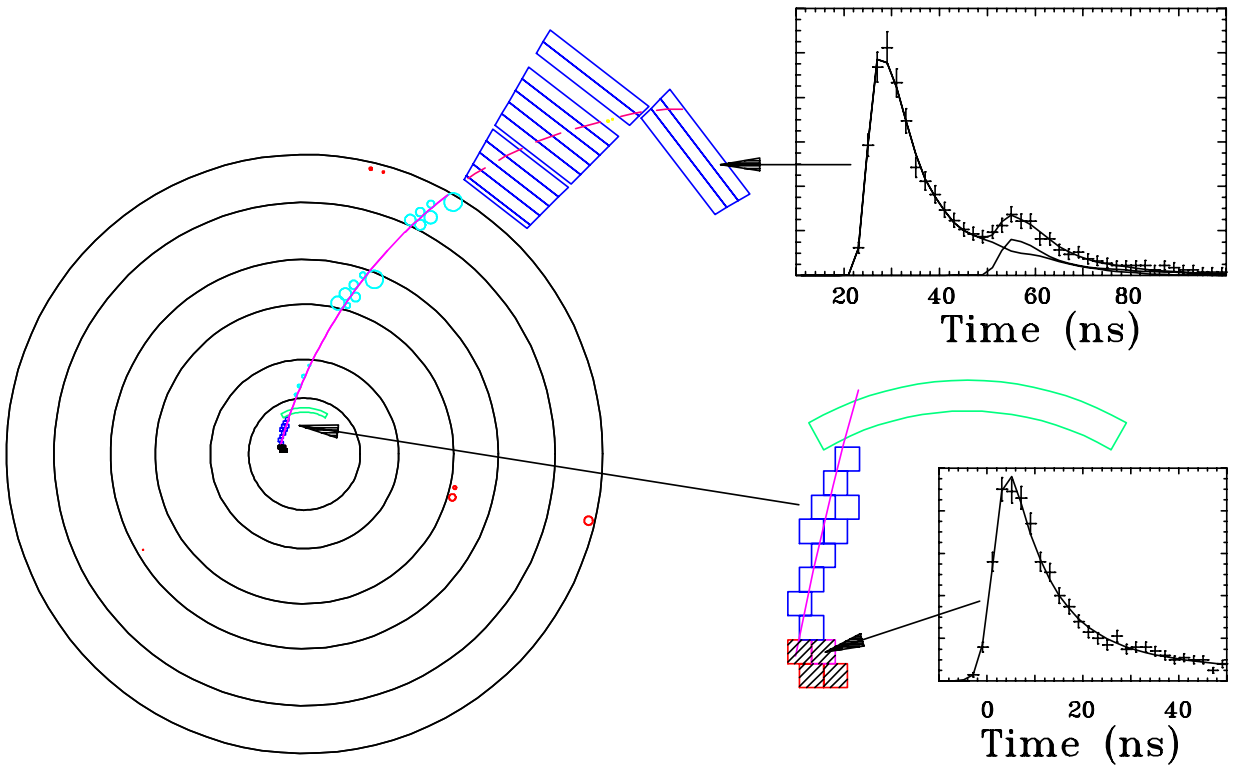


B-meson で決まる三角形と比べて、
beyond-the-SM を探索する
(次の十年間の quark-flavor 物理)




Barrel
Cal.
Range
Stack
RSSC
Endcap
Cal.
T
K+Beam
Target
Č
B4
I
Degrader
Drift Chamber

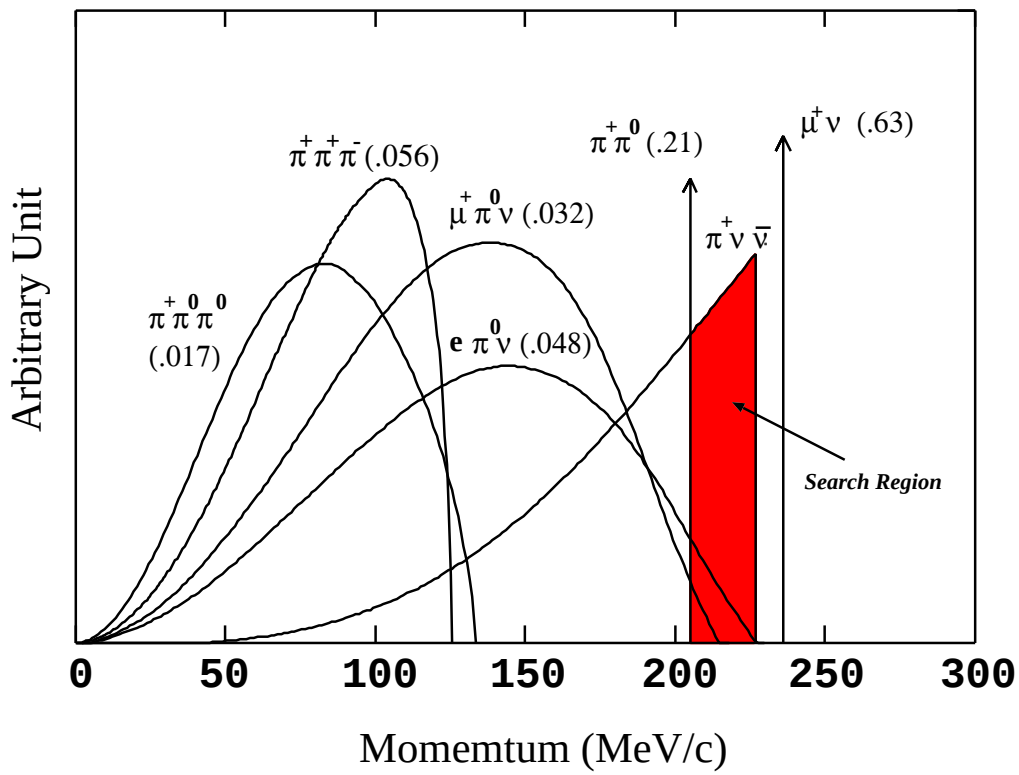

50 cm
Barrel
Cal.
Drift
Chamber
T
I
RSSC
Range Stack
Target



Evidence for the Decay $K^+ \to \pi^+ \nu\bar{\nu}$

S. Adler *et al.*(E787 collaboration), PRL79(1997)2204

静止した K^+ decay（重心系）が
π^+ と “他に何もなし” に崩壊



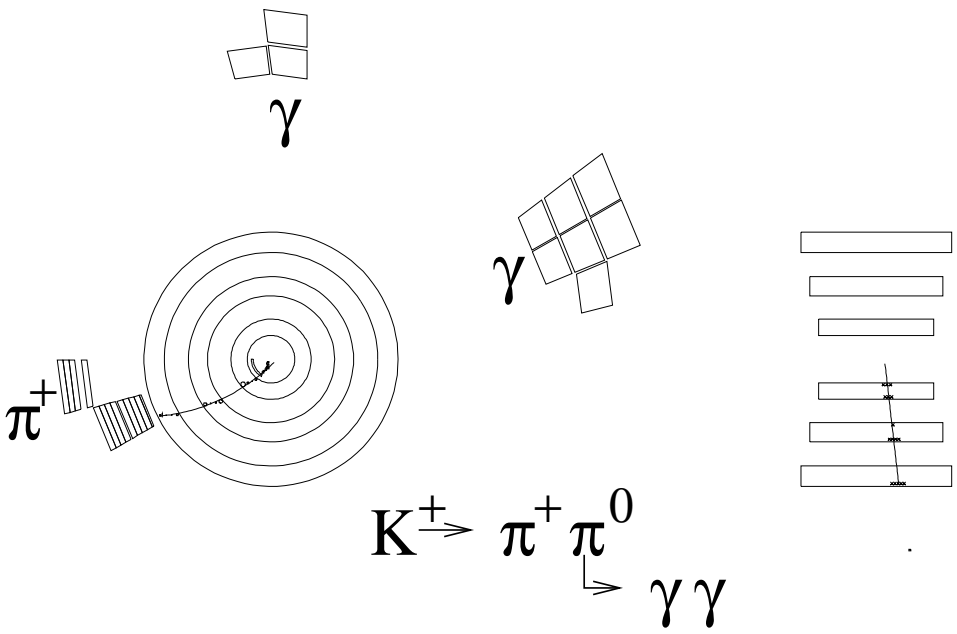
三体崩壊からの π^+ $(< 227\mathrm{MeV}/c)$

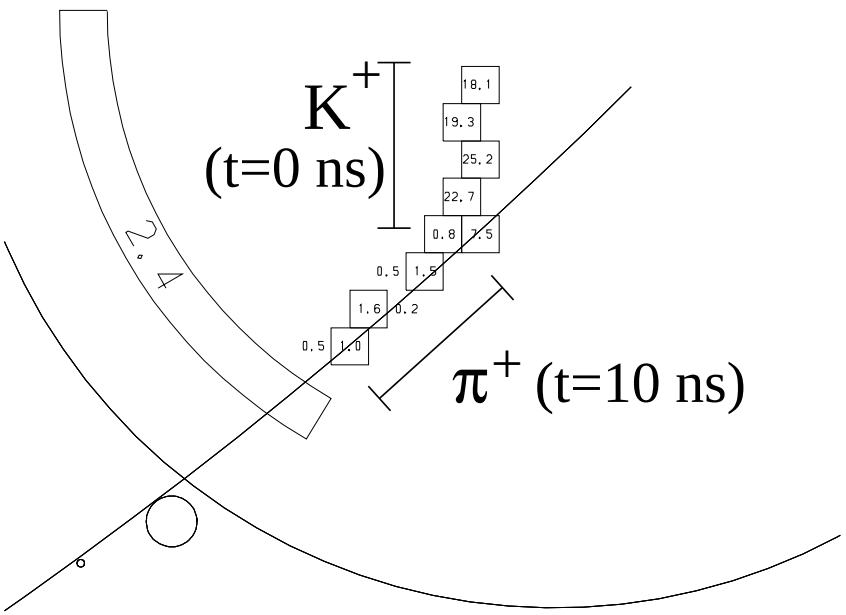
バックグラウンドの除去で実験の成否が決まる。

- π^+ の運動量、運動エネルギー、レンジを測定
- γ 線の Veto $\Longleftrightarrow K^+ \to \pi^+\pi^0$
- μ^+ の除去 $\Longleftrightarrow K^+ \to \mu^+\nu$

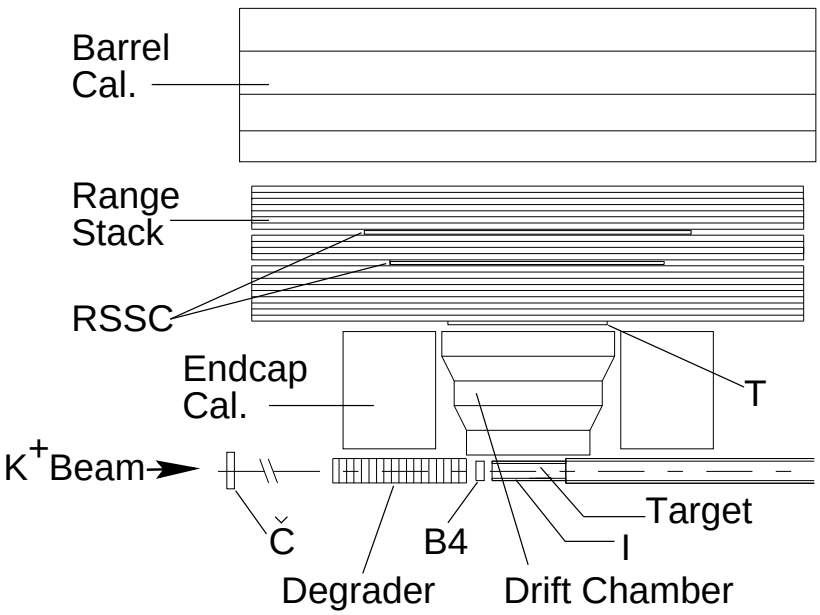
* バックグラウンドをトリガー段階で抑えないと
データが取れない。

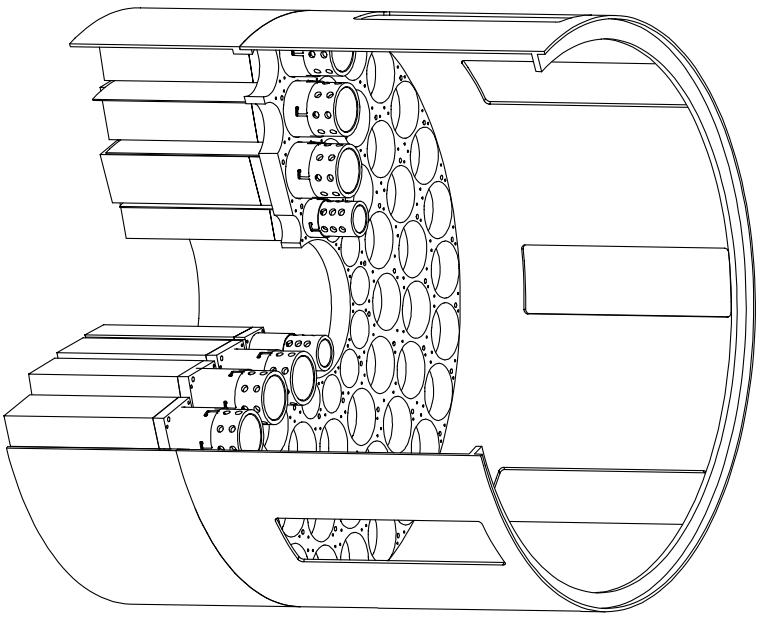
γ線の Veto


γ
γ
π+
K+ → π+ π0
γ γ

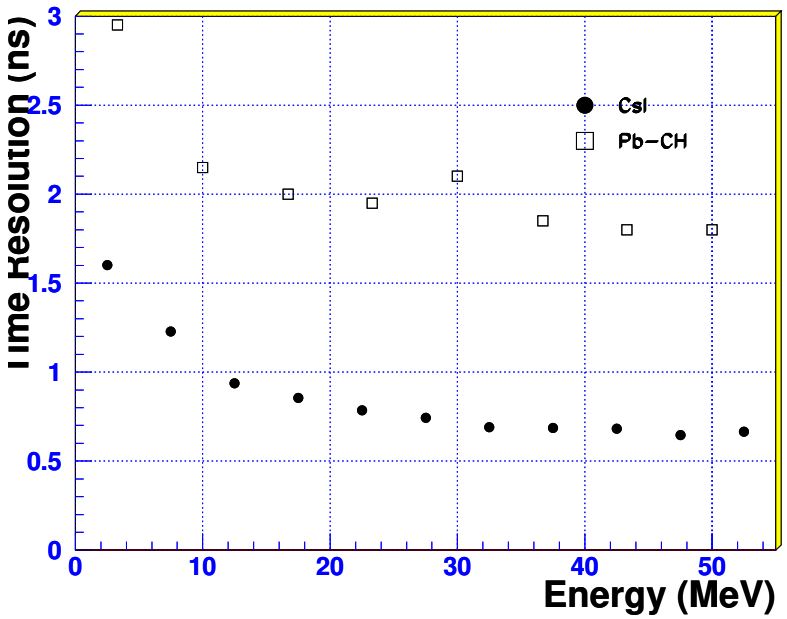

K+
(t=0 ns)
18.1
19.3
25.2
22.7
0.8
7.5
0.5
1.5
1.6
0.2
0.5
1.0
2.4
π+ (t=10 ns)

エンドキャップ CsI γ Veto

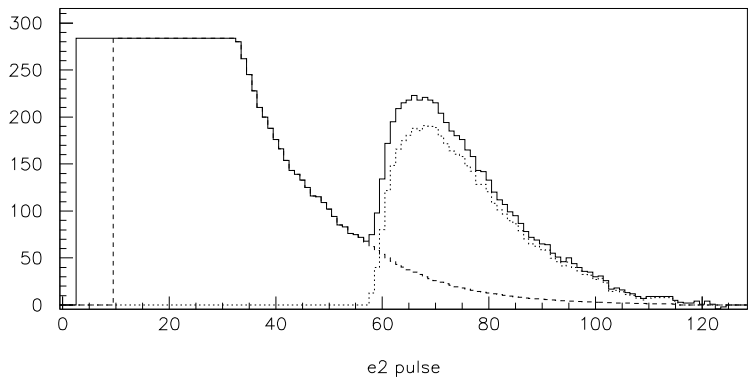


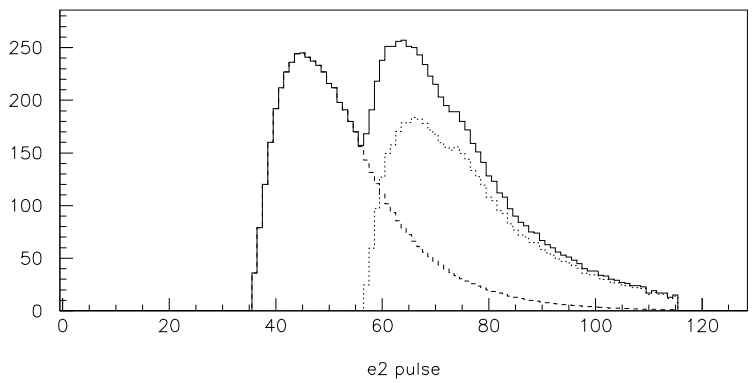


waveform digitizing で得られた時間分解能



CCD-TD がとらえた double-pulses

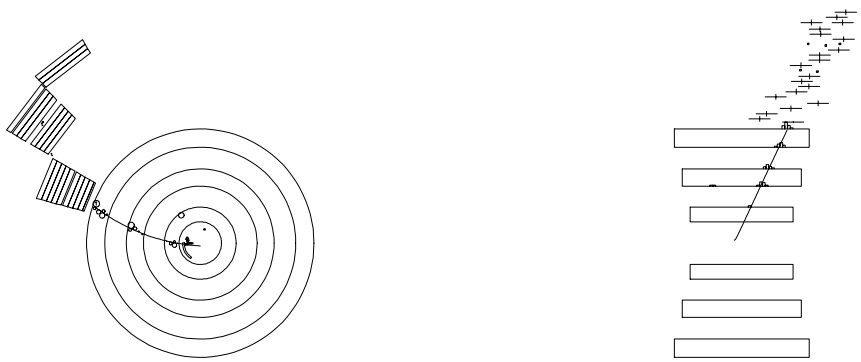




$K^+ \to \mu^+\nu$ からの μ^+ の除去

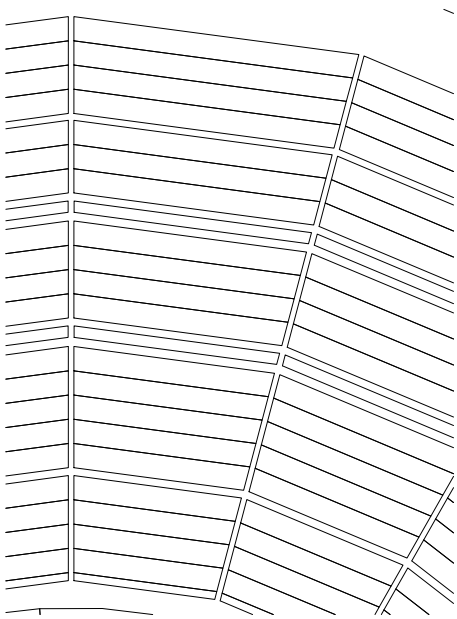
($K^+ \to \pi^+\nu\bar{\nu}$ に特有のバックグラウンド)

KMU2(1)　　SCALE 1:16.0



RUN　38624
EVENT　28238

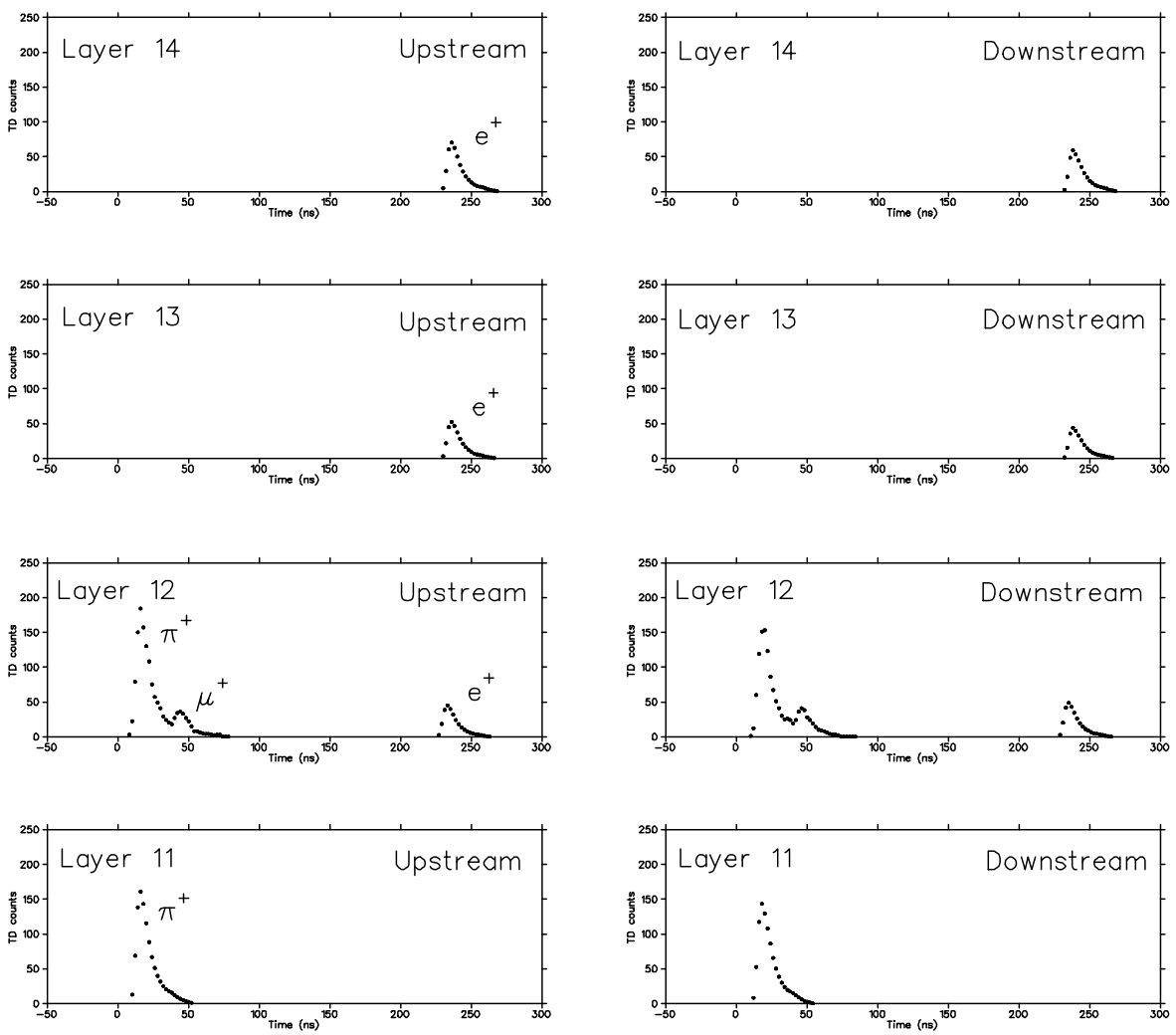
-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50



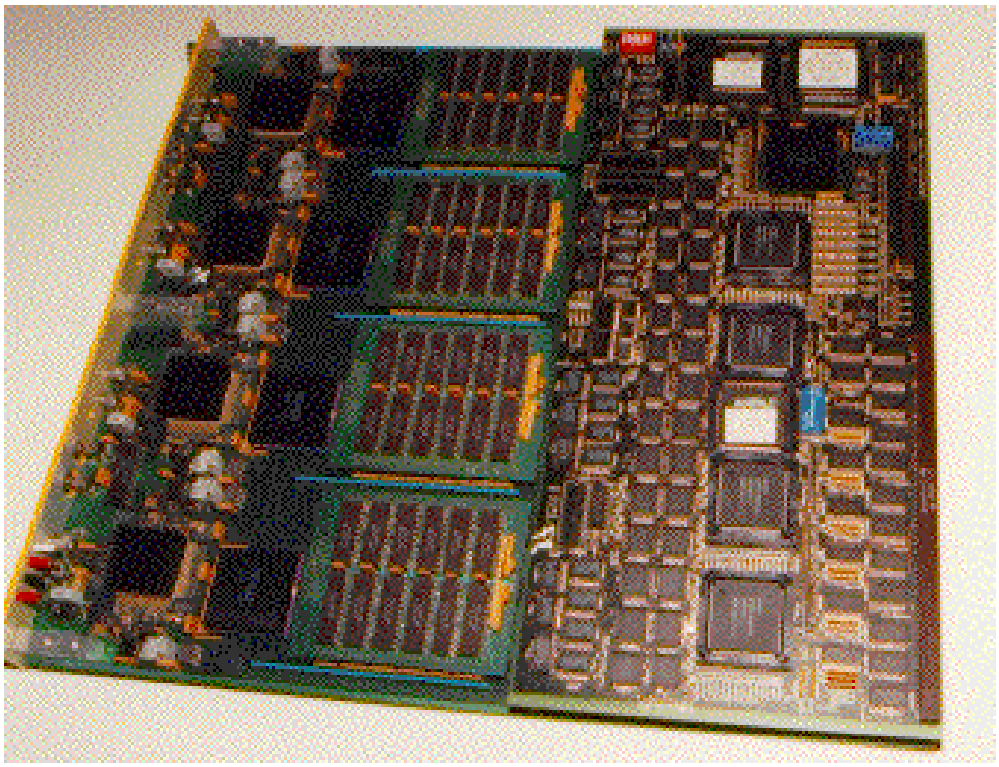
waveform digitizer の威力: $\pi^+ \to \mu^+ \to e^+$ chain の同定

- プラスチックシンチレータ出力: 信号幅 30-40nsec
- π^+ の寿命 26 nsec (early decay $<$ 10nsec)
- 決まったエネルギーの μ^+ (4MeV) と
  遅れて e^+ (upto a few μsec, upto 53MeV)

8-bit sampling every 2 nsec, for 4.5 μsec



トリガー段階 での $\pi^+ \to \mu^+$ chain の同定 (レベル 1.1 トリガー)



Control Board with ASIC's (1994∼)

(Application Specific Integrated Circuits)

$\Rightarrow$ decision time : $(150 \sim 250\mu s)_{L1.6}$ $\to$ 15-20 μs

- π^+ tagging efficiency $\sim$ 60%
- μ^+ rejection factor $\sim$ 15-25

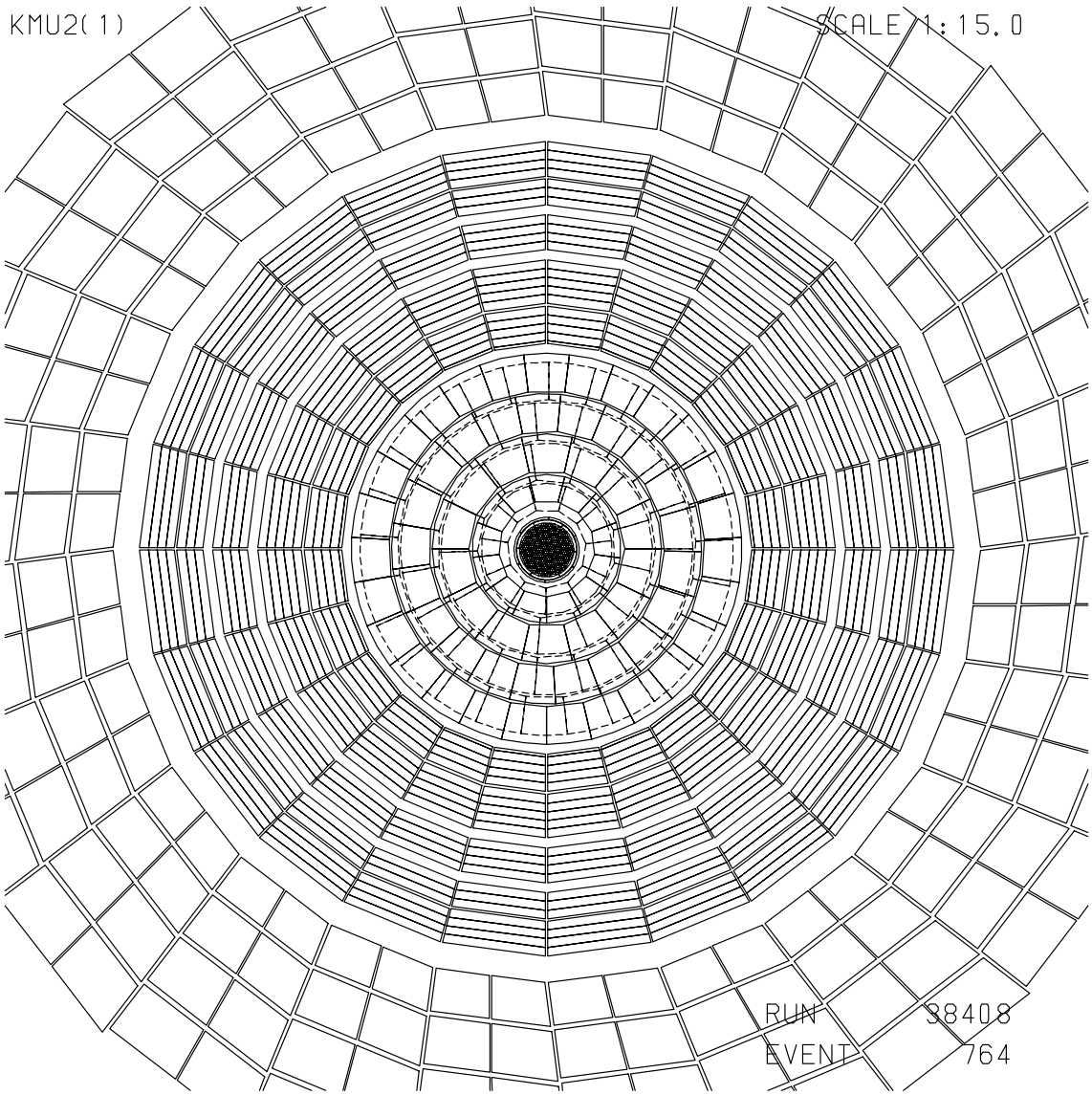
flash-ADC based TD (1988$\sim$)

BNL-team: M.Atiya $et\ al$, NIM A279 (1989) 180-185

- 8-bit sampling every 2 nsec ($\equiv$ 500MHz), for $+4.5$ μsec
- Tektronix ADC hybrid TKAD508:
  - 500MHz sample-and-hold circuit
  - two interleaved 250MHz ADCs
- dynamic range up to 1 V
- zero-suppression $\Leftrightarrow$ small DC voltage shifts
- FASTBUS, 4 channels/module, 8 modules/crate

In the E787/E949 experiment,

- 8 crates, 256 channels in total
  for the Range Stack counters
  (24 sectors $\times$ 21 layers $\times$ 2 ends $=$ 1008 counters).
- "multiplexed":
  summing the signals of 4 PMTs on one end
  into one digitizer
  - in offline,
    "demultiplexed" by "flag" signals from the 4 PMTs


KMU2(1)
SCALE 1:15.0
RUN 38408
EVENT 764

GaAs-CCD based TD (1994∼)

TRIUMF-team: D.A.Bryman *et al*, NIM A396 (1997) 394-404

- 8-bit sampling every 2 nsec (≡ 500MHz), for 512 nsec
- GaAs resistive gate CCD (fabricated at TRIUMF):
  - 320 pixcels (covering 2 nsec/pixcel)
  - "charge packets" are transported to the gate
  - Data Compactor Modules for readout
- dynamic range up to 0.3 V
- zero-suppression (DC coupled; "pedestal" subtraction)
- in offline:
  - pedestal correction to each bucket
  - linearity correction
- FASTBUS, 16 channels/module, 8 modules/crate

In the E787/E949 experiment,

- 8 crates, ∼ 700 channels in total for
  - endcap CsI γ Veto (143 counters)
  - kaon stopping target (400 counters)
  - beam counters, ...
- "high-gain" and "low-gain" inputs
  for wide dynamic ranges

何が問題か

1. Data size が膨大 (zero-suppression していても)

experiment		LHC	BELLE	BaBar	E787
event size	(KByte)	1000	30	33	100
trigger rate	(Hz)	$<$100	$<$500	100	100
data flow	(MByte/sec)	$<$100	$<$15	3.3	10

- $\sim$40 KByte for fADC-TDs, $\sim$20Kbyte for CCD-TDs
- DAQ livetime: still $>$80 %
- rate master のメモリにため込んで、
  beam spill の間にまとめて取り込む

2. FASTBUS 仕様
   TD が FASTBUS 仕様なので、
   E787/E949 実験の trigger/DAQ システム全体が
   FASTBUS から抜けられない。

これからどうしたいか？

1. waveform digitizer 抜きでやれるか？ [E949]
   - RS-TD は +500nsec まで走らせる
     $\pi^+ \to \mu^+$ chain の同定のみ digitizer で
   - e^+ の測定は TDC で
   - e^+ のエネルギーの測定は TDC の width で代用
2. event size の縮小 [E949]
   不必要な waveform 情報を切り捨てる
   - offline PASS1 [E787] $\longrightarrow$ semi-online [E949]
3. trigger/DAQ システムの” 現代化 (？) ” [JHF]
   - VME 仕様
   - pipeline trigger/DAQ system
   - ....
4. 高い rate に対応して、
   測定器の segment を細かくする [JHF]
   $\Longrightarrow$ さらに多チャンネルを製作し読み出す
5. waveform digitizing、及び高速の波形解析トリガーを
   日本でもやれるようにする [JHF]
   - パイプライン ADC 読み出しシステム
     (ADC+FIFO+DSP: 渡辺研一さん)
   - ....

まとめ

- $K \to \pi\nu\bar{\nu}$ 崩壊によるフレーバー物理は続く
- 大強度、高いレート ("pile-up") の環境下でも
  waveform digitizer を用いて
  高い時間分解能と efficiency を達成することが可能
- 特殊な波形情報の同定が
  トリガー・解析に必要な場合
  (例: $K^+ \to \pi^+\nu\bar{\nu}$ 実験でのミューオンの除去)
  には waveform digitizer が必要不可欠
- いまそこにある技術 $\to$ 現代化できるはず
- Data size が問題;
  闇雲には使わない
  いろいろと工夫が必要