

# フレーバー物理の歴史と現状(実験)

杉本章二郎(KEK)

2007年3月16日

実験の種類は非常に幅広く多様

# フレーバー物理

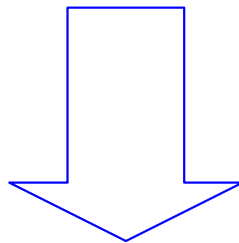
クォーク・フレーバー

レプトン・フレーバー

.....

質量, 起源, 世代, CP, ...

フレーバー物理に関連する多くの実験の内  
以下の話題について触れる予定



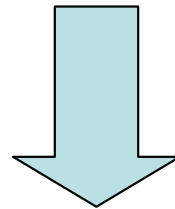
**K<sup>+</sup>中間子崩壊**の実験研究面での、**日本グループの寄与**に触れながら、  
これまでの研究の歩みと現状を概観し、実験の将来について展望する

# (1) 日本のK崩壊実験の黎明期

国内最初のK崩壊実験 KEK-E10( $K \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ )と その前後

**1969-1981**

Bubble Chamber exp,  
spark chamber exp

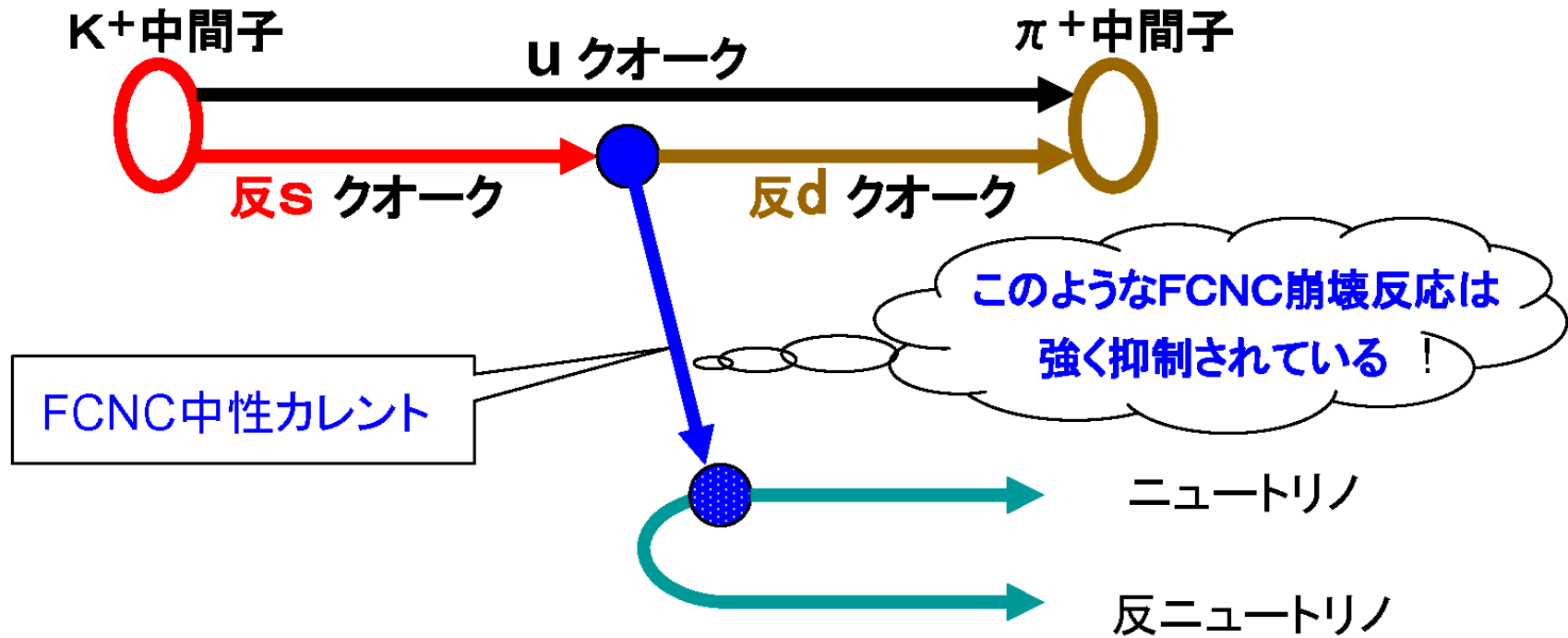


**KEK-PSでの最初のweak decay exp**

物理目的

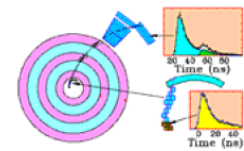
# FCNC (Flavor Changing Neutral Current)崩壊過程

(クォークのフレーバーを変える中性カレントを含む崩壊反応)



短距離相互作用の

理想的なFCNC研究の場



EXPERIMENTAL SEARCH FOR SEMILEPTONIC NEUTRINO NEUTRAL CURRENTS\*

U. Camerini, D. Ljung, and M. Sheaff

University of Wisconsin, Madison, Wisconsin 53706

and

D. Cline†

University of Hawaii, Honolulu, Hawaii 96822, and University of Wisconsin, Madison, Wisconsin 53706

(Received 20 June 1969)

**Bubble Chamber Exp.  
@ZGS Argonne Nat.  
Lab.**

**$4.6 \times 10^{-5}$  @63%CL**

A search for the rare  $K^+$  decay mode  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  has been carried out using stopping  $K^+$  mesons in a heavy-liquid bubble chamber. No events were found, and an upper limit on the branching ratio of this mode of  $5 \times 10^{-5}$  to all  $K^+$  decays is obtained. Comparison is made with various theories which imply the existence of neutral neutrino currents.

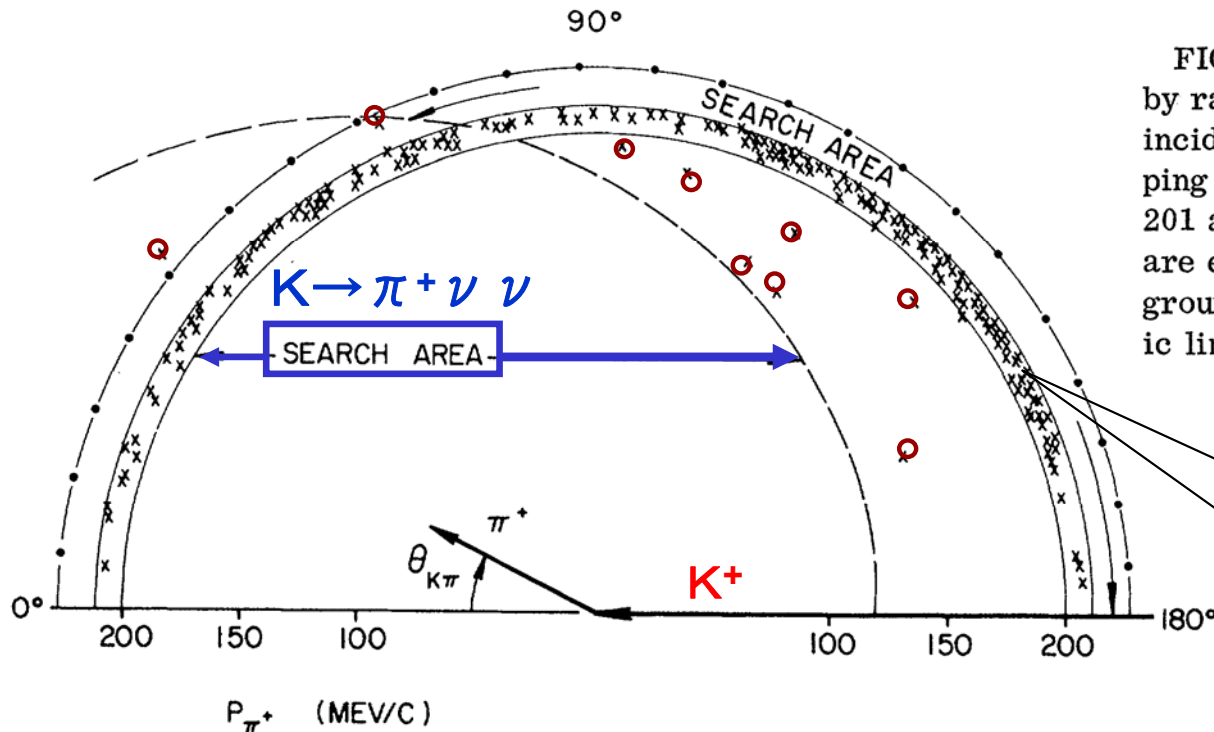
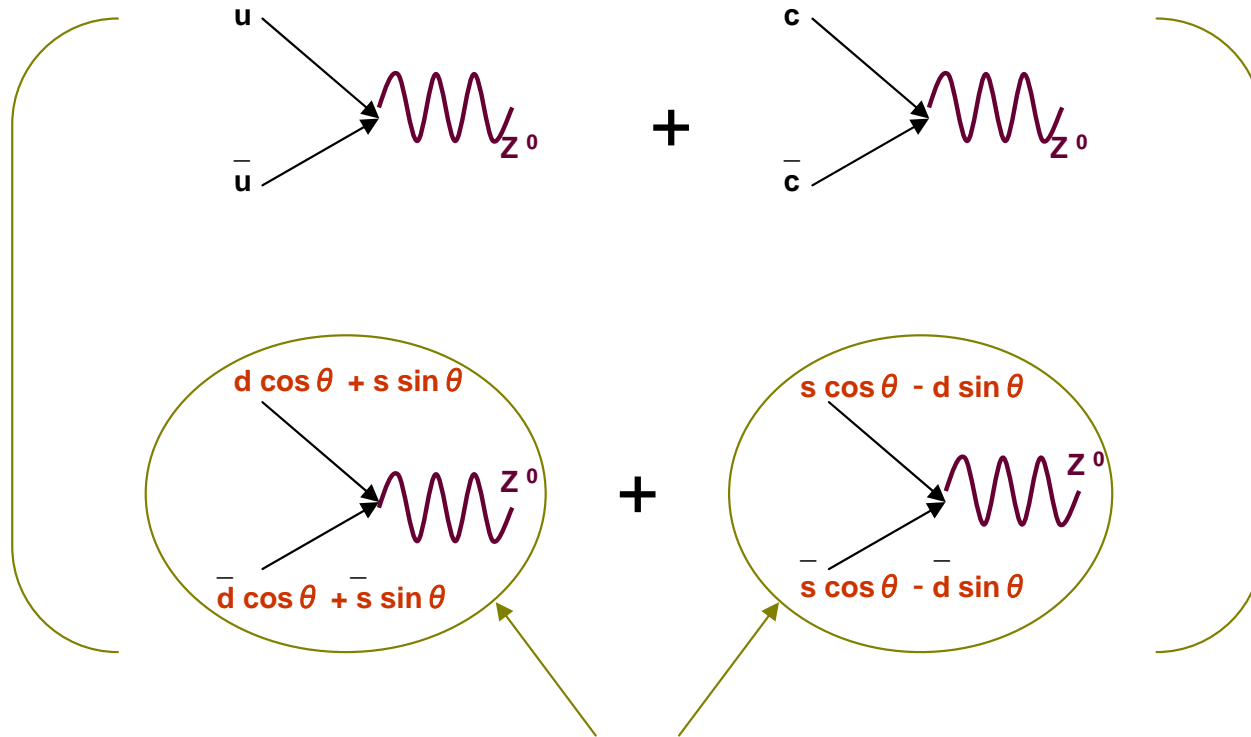


FIG. 1. Scatter plot of the  $\pi^+$  momentum determined by range and the angle between the outgoing  $\pi^+$  and the incident  $K^+$  (prior to stopping).  $K_{\pi 2}$  events from stopping  $K^+$  decays are expected to fall in the band between 201 and 212 MeV/c. The regions labeled "search area" are expected to be free from  $K_{\pi 2}^+$  decay-in-flight background. The dash-dotted curve indicates the kinematic limits for the  $\pi^+ \nu \bar{\nu}$  decay.

**$K \rightarrow \pi^+ \pi^0$**   
 $\uparrow$   
 $p_{\pi} = 205 \text{ MeV/c}$



1970年: GIM proposed the introduction of a new quark with flavor “charm”



$\Delta S=1$  neutral currents  
have been canceled

- 1973年: 小林・益川理論

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}$$

- 1974年:  $J/\psi$  (charm quark) の発見

.....この頃 日本では..

# 国内最初のK中間子稀崩壊実験プロポーザル

(1975年KEK-PS)


※ 受理年月日	50. 3. 31
受理番号	10

## 高エネルギー物理学研究所共同利用実験申請書


昭和50年3月31日

高エネルギー物理学研究所長 殿

実験責任者 氏名  
所 属  
職 名

長島 慎清   
高エネルギー物理学研究所  
助教

下記のとおり、別紙実験計画書を添えて申請します。

1 実験課題名	Rare Decay Mode $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ の研究							
2 実験責任者氏名	実験責任者氏名	長島 慎清 						
	連絡先	茨城県筑波郡大塚町 前野 高エネルギー物理学研究所 (郵便番号) 300 (TEL) 02986-4-117/19296						
3 実験組織	氏名	職名	所属(大学・学部名)	氏名	職名	所属(大学・学部名)		
	浅野 信三	助手	高エネルギー研	森 茂樹	助教	高エネルギー研		
	高崎 次彦	〃	〃	渡瀬 孝行	助手	〃		
	真木 晶三	〃	〃	久米 下朝雄	教授	〃		
	美甘 昭司	助教	〃			〃		
	宮島 克三	助手	〃			〃		
3 実験の年次計画(概要)			4 実験に要する経費(概算)					
準備	予備実験	本実験	ソフト数(学費徴収合計)	50年度	51年度	52年度	53年度	総額
51~53年度	53年度 20ソフト数 (枚数)	53年度 100ソフト数 (枚数)	120	千円	千円	千円	千円	千円
				-	45,000	95,000	12,000	155,000
5 実験目的の要旨								
<p><math>K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}</math> は電磁相互作用を含む弱相互作用における純粋の<math>\Delta F=0</math>の中性カレントを追求するに理想的である。</p> <p>現在分岐比(BR)は実験的には上限のみが知られている。(BR &lt; <math>5.6 \times 10^{-7}</math>)</p> <p>弱相互作用をひき起すカレントに<math>\Delta F=0</math>の成分が<sup>(中性)</sup>存在し得るとその反応は高次効果として現われる。<u>ゲージ理論によると分岐比は<math>10^{-10}</math>程度と予想されているが</u> <math>\Delta F=0</math>の中性カレントが <u>CPの破れに結びついて</u> いるとすると <u>分岐比は<math>4 \times 10^{-7}</math>位にある</u> ことと予想され分岐比の上限は <u>現在値より1桁以上良く</u> <sup>測定</sup> <u>定まる</u> ことになり得るため、本実験の目的とする。</p>								

実験課題名	Rare Decay Mode $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ の研究	実験責任者名	長島 順清
-------	---	--------	-------

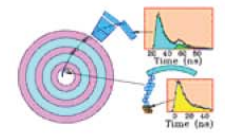
I 実験課題の内容

1 実験の目的及び意義

実験目的は  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  反応の分岐比 (BR) を現在の実験上限値 ( $BR < 5.6 \times 10^{-7}$ ) より 10倍以上精度で抑制してあり、副産物として  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \mu \bar{\nu}$  も同時測定する。  $\Delta Y=0$  の中性カレートの存在は CERN, FNAL において  $\Delta Y=1$  の実験で確かめられ、一方  $\Delta Y \neq 0$  の中性カレートの存在は  $K_L^0 \rightarrow \mu \bar{\mu}$  の実験値 ( $BR = 1.2^{+0.2}_{-0.4} \times 10^{-2}$ ) より存在しないか、又は極めて非常に小さいことがわかってきている。  $\Delta Y \neq 0$  の中性カレートの存在は他の反応 ( $K \rightarrow \ell \bar{\ell}, \pi \ell \bar{\ell}$ ) で探る試みは世界中で行われてはいるが、崩壊の分岐比が  $\Delta Y=1$  の  $K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^-$  (BR =  $2.3 \pm 0.3 \times 10^{-7}$ ) である。しかしこの反応は弱い相互作用の1次と電磁相互作用の2次から成るためである。理論は110%より大きき実験値と矛盾している。理論は不確定性があり弱い相互作用に於ける中性カレートの初階効果は高次元であることがわかってきた。この点  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  反応は  $\Delta Y=1$  の  $K_L^0 \rightarrow \mu \bar{\mu}$  を含み、純粋の中性カレートの反応であるので中性カレートの存在の有無には理論的である。

実験の意義として次の3点を挙げる

- (1)  $\Delta Y \neq 0$  の中性カレートの存在の追求
- (2)  $\Delta Y \neq 0$  の中性カレートの  $K_L^0 \rightarrow \mu \bar{\mu}$  の実験から示唆されるように弱い相互作用の1次の効果と2次以上の高次効果との区別を明らかにする。2次の効果は1次にくらべて弱い相互作用の Characteristic Strength  $g \sim G \Lambda^2$  ( $\Lambda = 44.7 \text{ GeV}$ ,  $G = 10^{-5}$ ) の1/2程度と推定される。従って分岐比の値を測定すれば弱い相互作用の Characteristic Strength がわかる。
- (3) GUT 理論では  $\Lambda \sim 10^{16} \sim 10^{17} \text{ GeV}$  であり  $g \sim \alpha = \frac{1}{137}$  となる。従って通常の弱い相互作用の2次の効果と区別される  $g$  ( $\Lambda \sim 1 \text{ GeV}$  以上  $10^{10}$ ) の1/2程度の値を与える GUT 機構 (110%) によりさらに抑制される ( $g \sim 10^{-2}$  程度) BR  $\approx 10^{-10}$  程度となる。従って理論の有無がわかる。
- (4) 弱い相互作用では CP 破壊  $\sim 10^{-2}$  程度で知られている。この CP 破壊は  $\Delta Y \neq 0$  の中性カレートを介して  $\Delta Y \neq 0$  の中性カレートの存在が破壊されていると推定され  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  の分岐比は  $4 \times 10^{-7}$  以下と推定される。これは現在の実験値 ( $BR < 5.6 \times 10^{-7}$ ) に近づいてくる可能性がある。従ってこの値を 10 以上高めれば CP 破壊の解明は可能である。



$K^+$ 中間子  $\pi^+$ 中間子



反Sクォーク

反dクォーク

FCNC中性カレント

ニュートリノ

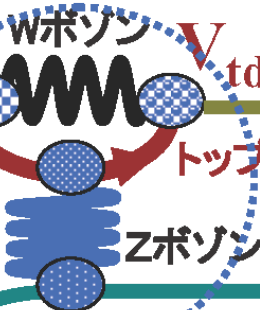
反ニュートリノ

標準模型での  
解釈

反Sクォーク

反dクォーク

FCNC中性カレント



Wボソン  $V_{td}$  反dクォーク  
トッパクォーク (t, c, u)  
Zボソン

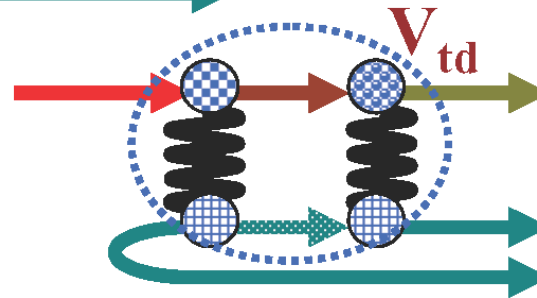
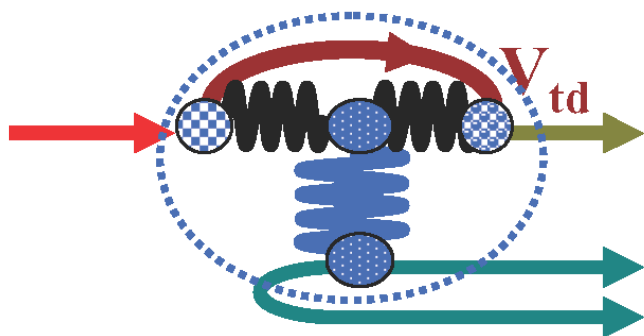
ニュートリノ

反ニュートリノ

$$\begin{bmatrix} d_c \\ s_c \\ b_c \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ s \\ b \end{bmatrix}$$

小林-益川  
マトリックス



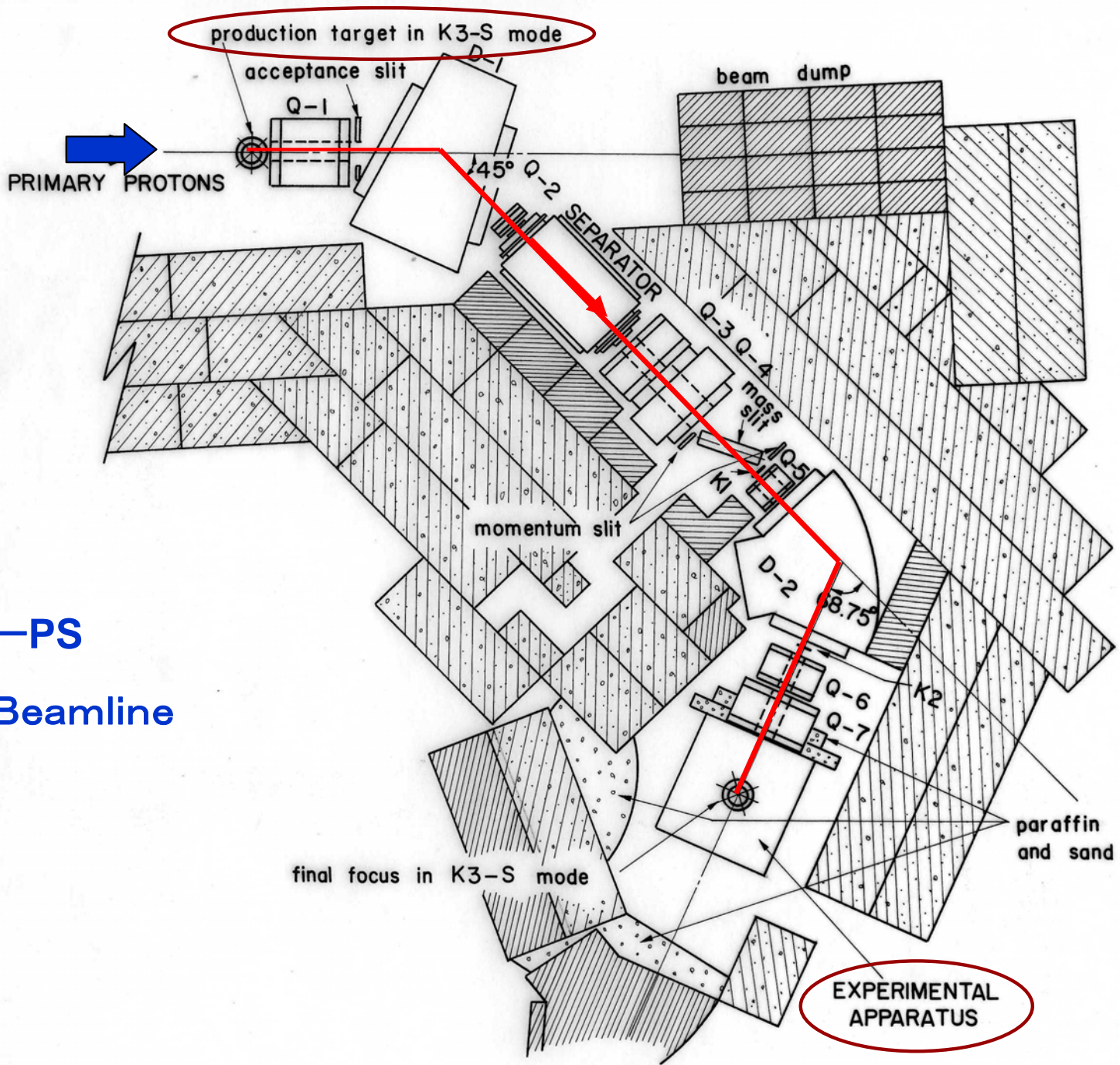
小林・益川の行列要素  $V_{td}$  を決定するのに最適な反応

# 1978年KEK



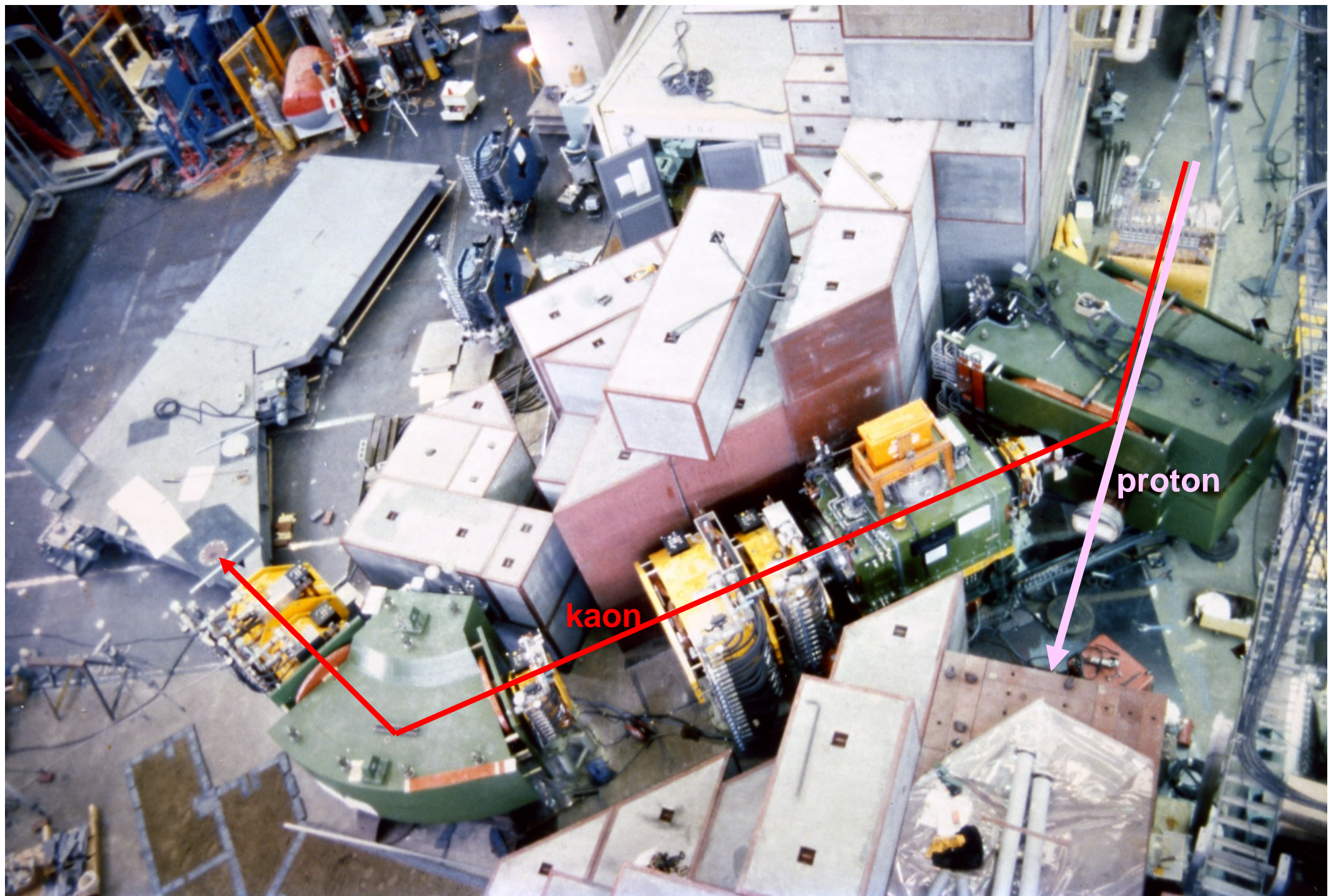
KEK 8-12GeV PS





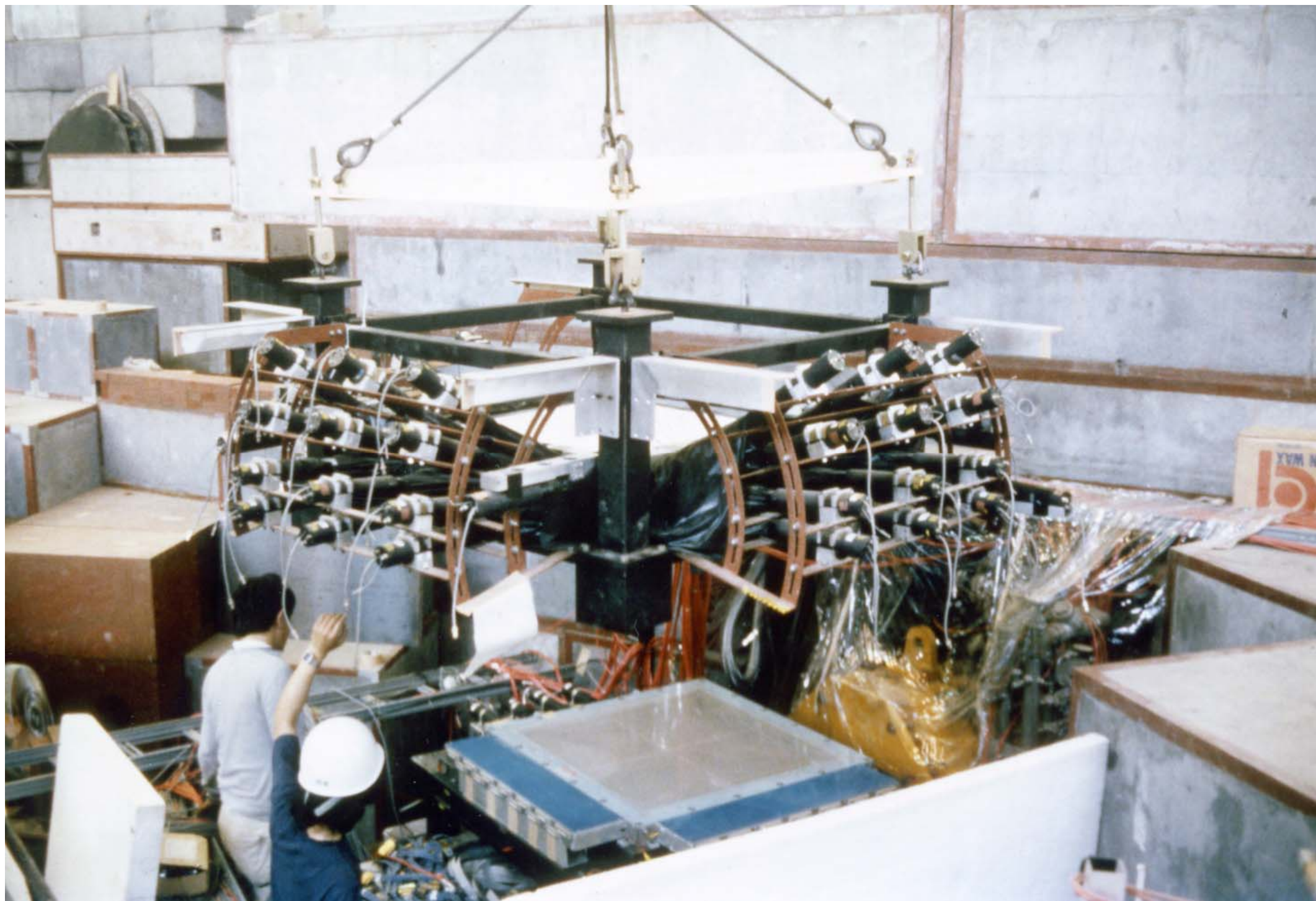
KEK-PS

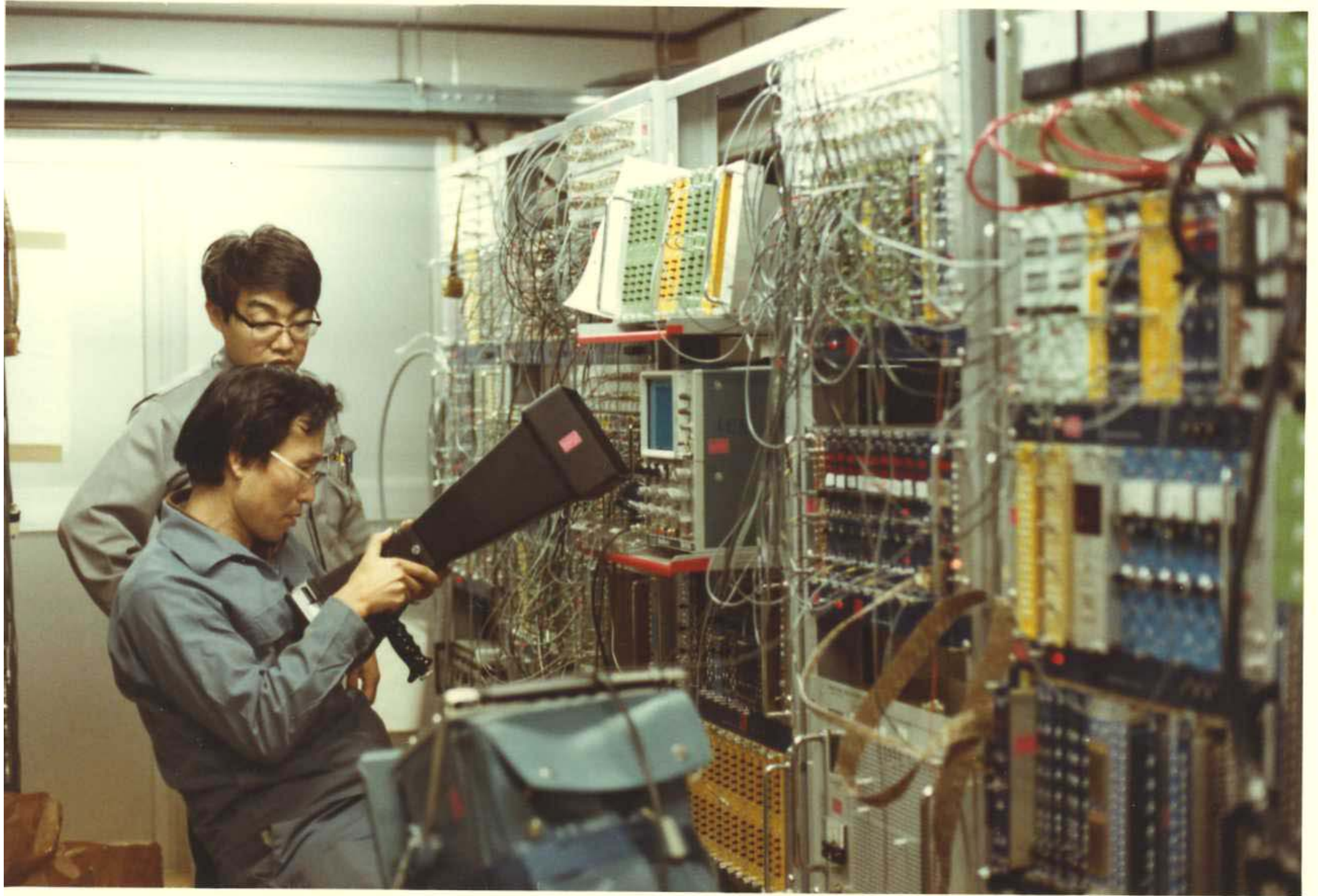
K3 Beamline



KEK-PS K3-beamline







KEK/E10実験のカウンティングルーム (1979-1980)

SEARCH FOR A RARE DECAY MODE  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  AND AXION

Y. ASANO <sup>a,1</sup>, E. KIKUTANI <sup>b</sup>, S. KUROKAWA <sup>a</sup>, T. MIYACHI <sup>c</sup>, M. MIYAJIMA <sup>a</sup>, Y. NAGASHIMA <sup>d</sup>,  
T. SHINKAWA <sup>b</sup>, S. SUGIMOTO <sup>a,2</sup> and Y. YOSHIMURA <sup>a</sup>

<sup>a</sup> KEK, National Laboratory for High Energy Physics, Oho-machi, Tsukuba-gun, Ibaraki 305, Japan

<sup>b</sup> Department of Physics, Faculty of Science, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 117, Japan

<sup>c</sup> Institute for Nuclear Study, University of Tokyo, Tanashi, Tokyo 188, Japan

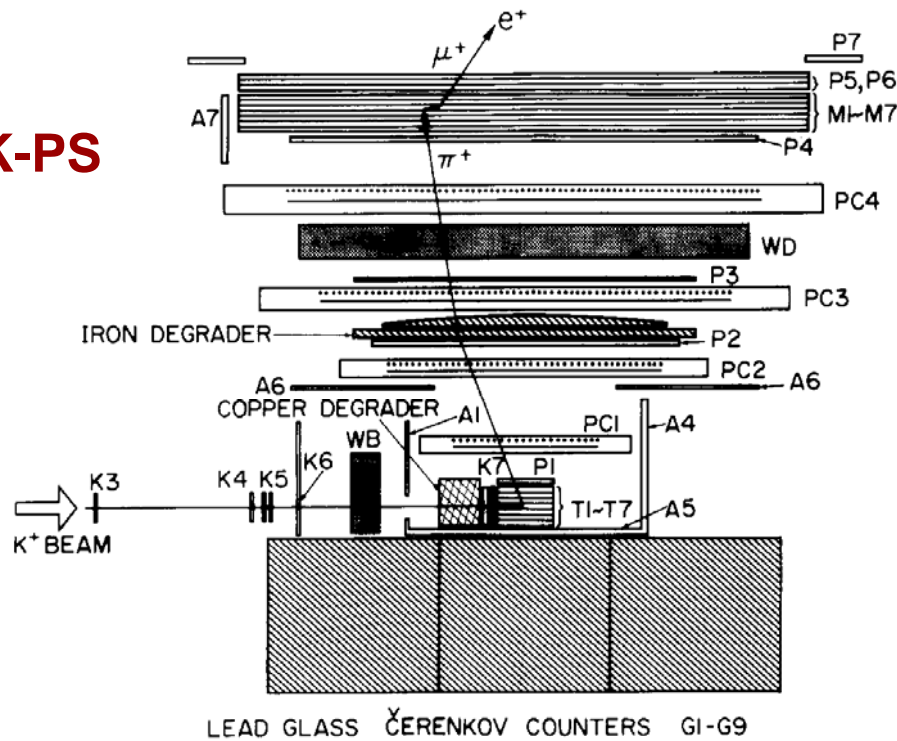
<sup>d</sup> Department of Physics, Faculty of Science, Osaka University, Machikaneyama-cho, Toyonaka 560, Japan

Received 25 September 1981

**$1.4 \times 10^{-7}$  @90%CL**

Using stopped kaons, rare decay modes  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  and  $K^+ \rightarrow \pi^+ a^0$ , where  $a^0$  is the light pseudoscalar meson (axion), have been measured. The upper bound of the branching ratio was found to be  $1.4 \times 10^{-7}$  for  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  and  $3.8 \times 10^{-8}$  for  $K^+ \rightarrow \pi^+ a^0$ .

**E10 Exp. @KEK-PS**



50 cm

## E10で得られた成果

SEARCH FOR A HEAVY NEUTRINO EMITTED IN  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$  DECAY

Y. ASANO<sup>a,1</sup>, R.S. HAYANO<sup>b</sup>, E. KIKUTANI<sup>b</sup>, S. KUROKAWA<sup>a</sup>,  
T. MIYACHI<sup>c</sup>, M. MIYAJIMA<sup>a</sup>, Y. NAGASHIMA<sup>d</sup>, T. SHINKAWA<sup>b</sup>,  
S. SUGIMOTO<sup>a,2</sup>, T. YAMAZAKI<sup>b</sup> and Y. YOSHIMURA<sup>a</sup>

<sup>a</sup> KEK, National Laboratory for High Energy Physics, Oho-machi, Tsukuba-gun, Ibaraki 305, Japan

<sup>b</sup> Department of Physics, Faculty of Science, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 117, Japan

<sup>c</sup> Institute for Nuclear Study, University of Tokyo, Tanashi, Tokyo 188, Japan

<sup>d</sup> Department of Physics, Faculty of Science, Osaka University, Machikaneyama-cho, Toyonaka 560, Japan

Received 15 June 1981

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle,$$

where the  $U_{\alpha i}$  constitute a mixing matrix. While usual neutrino reactions including neutrino-oscillation phenomena depend on "production by flavor" and "observation by flavor" where the mass eigenstates appear only indirectly through the time evolution, the present experiment observes directly the mass itself in "production by flavor", and hence, its probability is given by  $|U_{\alpha i}|^2$ . The masses of  $\nu_1 \simeq \nu_e$  and  $\nu_2 \simeq \nu_\mu$  are too small to be observed in this way while the presently-known mass limit of  $\nu_3 \simeq \nu_\tau$  is  $250 \text{ MeV}/c^2$  [3], thus we are looking for only  $i \geq 3$  (let us call them  $\nu_x$ ).

The muon range spectrum in the stopped  $K^+$  decay has been measured in order to search for a discrete line associated with heavy-neutrino emission in  $K_{\mu 2}$  decay. An upper bound of  $0.5 \sim 2 \times 10^{-5}$  for the mixing ratio between  $\nu_\mu$  and a massive neutrino has been obtained for a mass range of  $160\text{--}230 \text{ MeV}/c^2$ .

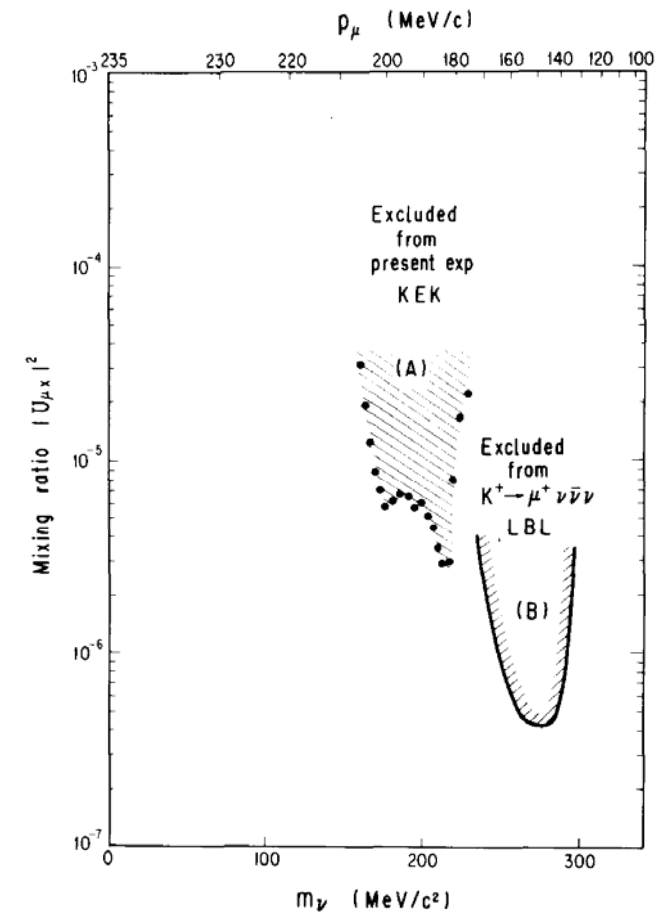


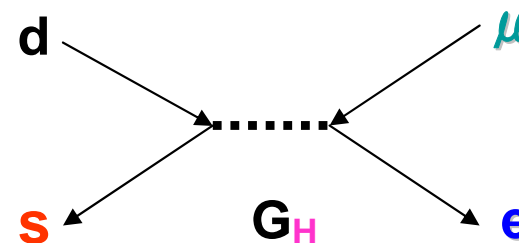
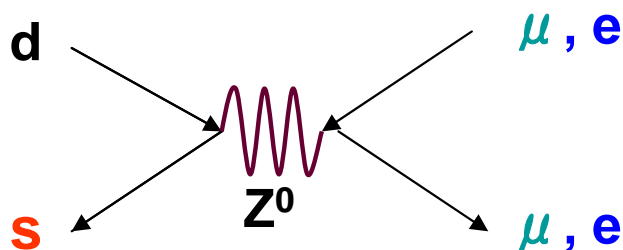
Fig. 3. A two-standard-deviation upper limit of the mixing ratio  $|U_{\mu x}|^2$  deduced from the present experiment is shown (marked "A"). Also shown is the region excluded by the LBL rare-decay experiment [9] (marked "B").

## (2) 日本のK崩壊実験の第2期

KEK-PSで引き続き行われたweak decayの実験

# 1980-1990

- $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ , etc. Heavy-neutrino search using  $K_{\mu 2}$  decay, PRL 49(1982)1305  
Search for right-handed currents in the decay  $K_{\mu 2}$ , PRL 52(1984)329  
Search for a neutral boson in a two-body decay of  $K^+ \rightarrow \pi^+ X^0$ , PRL 52(1984)1089  
Study of the radiative decay  $K_{\mu 2} \gamma$ , PR D32(1985)2911  
Search for right-handed currents in the decay chain  $K_{\mu 2}$ , PRL 69(1992)877
- $K_L \rightarrow \mu \mu, ee, \mu e$  etc. (KEK-E137)



.....

**FCNC (Flavor Changing Neutral Current)**

## Search for the Rare Decays $K_L^0 \rightarrow \mu e$ and $K_L^0 \rightarrow ee$

T. Akagi,<sup>(1)</sup> R. Fukuhisa,<sup>(2)</sup> Y. Hemmi,<sup>(3)</sup> T. Inagaki,<sup>(4)</sup> K. Ishikawa,<sup>(2),(a)</sup> T. Kishida,<sup>(2)</sup> M. Kobayashi,<sup>(4)</sup> T. K. Komatsubara,<sup>(2)</sup> M. Kuze,<sup>(2),(b)</sup> F. Sai,<sup>(2),(c)</sup> T. Sato,<sup>(4)</sup> T. Shinkawa,<sup>(4)</sup> F. Suekane,<sup>(4),(d)</sup> K. Takamatsu,<sup>(4)</sup> J. Toyoura,<sup>(2),(e)</sup> S. S. Yamamoto,<sup>(2)</sup> and Y. Yoshimura<sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup>Department of Physics, Tohoku University, Sendai 980, Japan

<sup>(2)</sup>Department of Physics, University of Tokyo, Tokyo 113, Japan

<sup>(3)</sup>Department of Physics, Kyoto University, Kyoto 606, Japan

<sup>(4)</sup>National Laboratory for High Energy Physics (KEK), Tsukuba 305, Japan

(Received 22 July 1991)

A search for the rare decays  $K_L^0 \rightarrow \mu e$  and  $K_L^0 \rightarrow ee$  was performed at the KEK 12-GeV Proton Synchrotron. No event was observed in the fiducial region for the decay  $K_L^0 \rightarrow \mu e$ . There was one event in the fiducial region for the decay  $K_L^0 \rightarrow ee$ , which was indistinguishable from the background. The upper limits on the branching ratios at 90% confidence level were  $B(K_L^0 \rightarrow \mu e) < 9.4 \times 10^{-11}$  and  $B(K_L^0 \rightarrow ee) < 1.6 \times 10^{-10}$ .

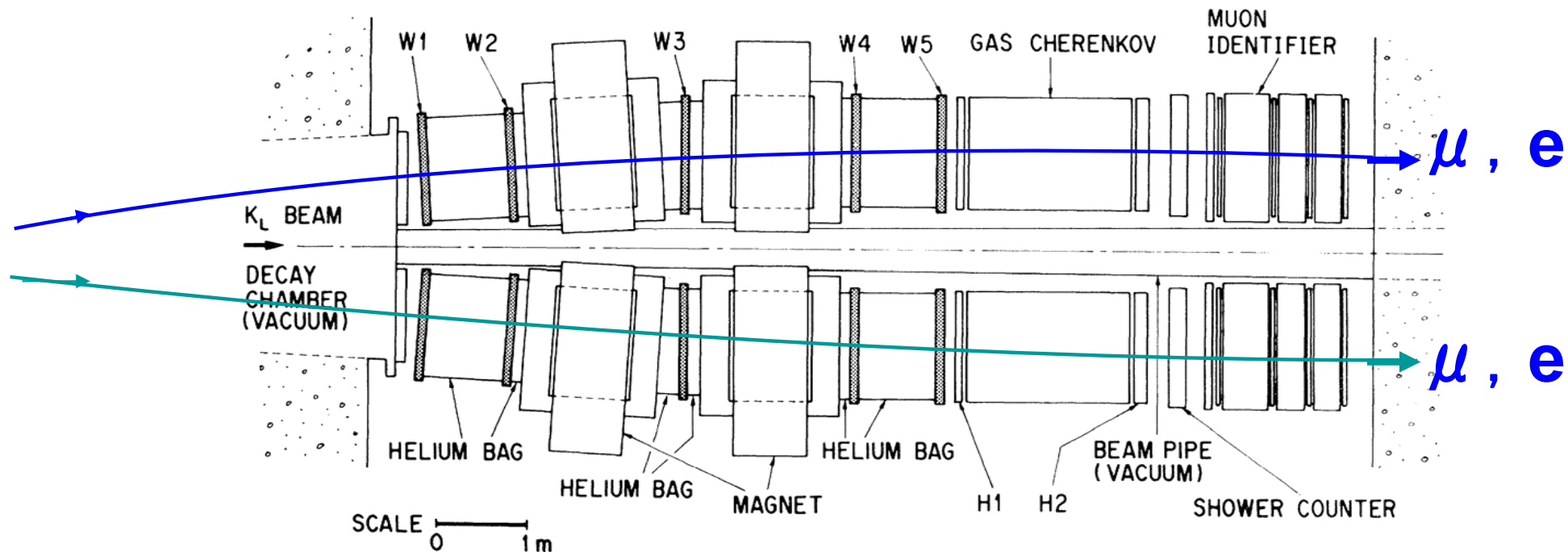
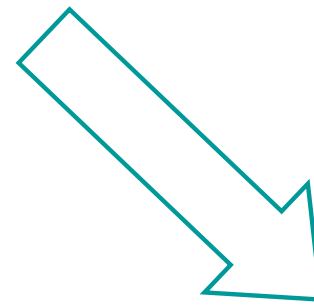
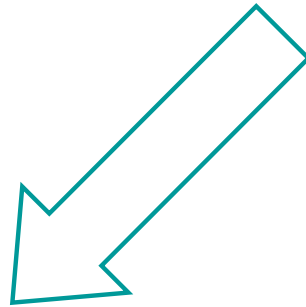


FIG. 1. Plan view of the detector system.

### (3) 日本のK崩壊実験の第3期

最近のK<sup>+</sup>崩壊実験

1991- 2007



日米科学技術協力事業による国際共同実験

- KTeV@FNAL      KL exp.
- E787@BNL      K<sup>+</sup> exp

KEKにおけるK崩壊実験

- $K_L \rightarrow \pi^0 e e$  (CP-V),  $\pi^0 e e \gamma$
- $K^+ \rightarrow \mu^+ \pi^0 \nu$  (T-V)
- ↓
- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  (E391a)

# BNLでの大強度K<sup>+</sup>ビームによる実験

- AGSビームのデーター
- AGSでのK-decay実験
- E787実験からE949実験へ

# BNLで1992年から始まったK崩壊日米共同研究について

- 日本でのFCNCの研究とBNL-E787実験の歴史 -

日本側

米国側

FCNC 過程

1978-1981

KEK-PS Experiment (E10)

$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}, \pi^+ a, \pi^+ \gamma,$   
 $\pi^+ \gamma \gamma, \pi^+ \gamma \gamma \gamma, \mu \nu_H$

1983-1991

BNL-AGS Experiment (E787)

$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}, \pi^+ X^0, \text{etc.}$

1986-1991

KEK-PS Experiment (E137)

$K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-, \mu e, e^+ e^-$

1991 April

INS/KEK-BNL Collaboration for Detector R&D

1992 April

日米共同研究 (E787) の正式発足

日本グループの活動

## エンドキャップ型ガンマ線検出器の設計・製作

機械的構造設計 (森本)

ヨウ化セシウム (CsI) カロリメータ R&D と設計 (稲垣、奥野、小林、杉本)

オプティカル・ファイバー R&D (新川)

ゲイン・モニターシステムの設計と製作 (新川、吉村、小林、小松原、小俣)

高磁界用・光電子増倍管 R&D と長期安定テスト (杉本、佐藤、小松原、稲垣)

検出器性能シミュレーション (猪野)

## アクティブ減速材等の R&D と設計・製作

鉛ガラス減速器設計製作 (吉村)

フッ化鉛 (PbF<sub>2</sub>) の R&D (吉村、久野)

酸化タングステン鉛 (PbWO<sub>4</sub>) の R&D (小林)

波長変換剤入りのプラスチック板による CsI 信号読みだし (稲垣、久野)

## モンテ・カルロ解析

検出器解析 (小松原、久野)

物理解析 (久野)

## 物理データ解析

解析プログラム開発および物理解析 (河辺、久野、鶴飼)

## データ収集

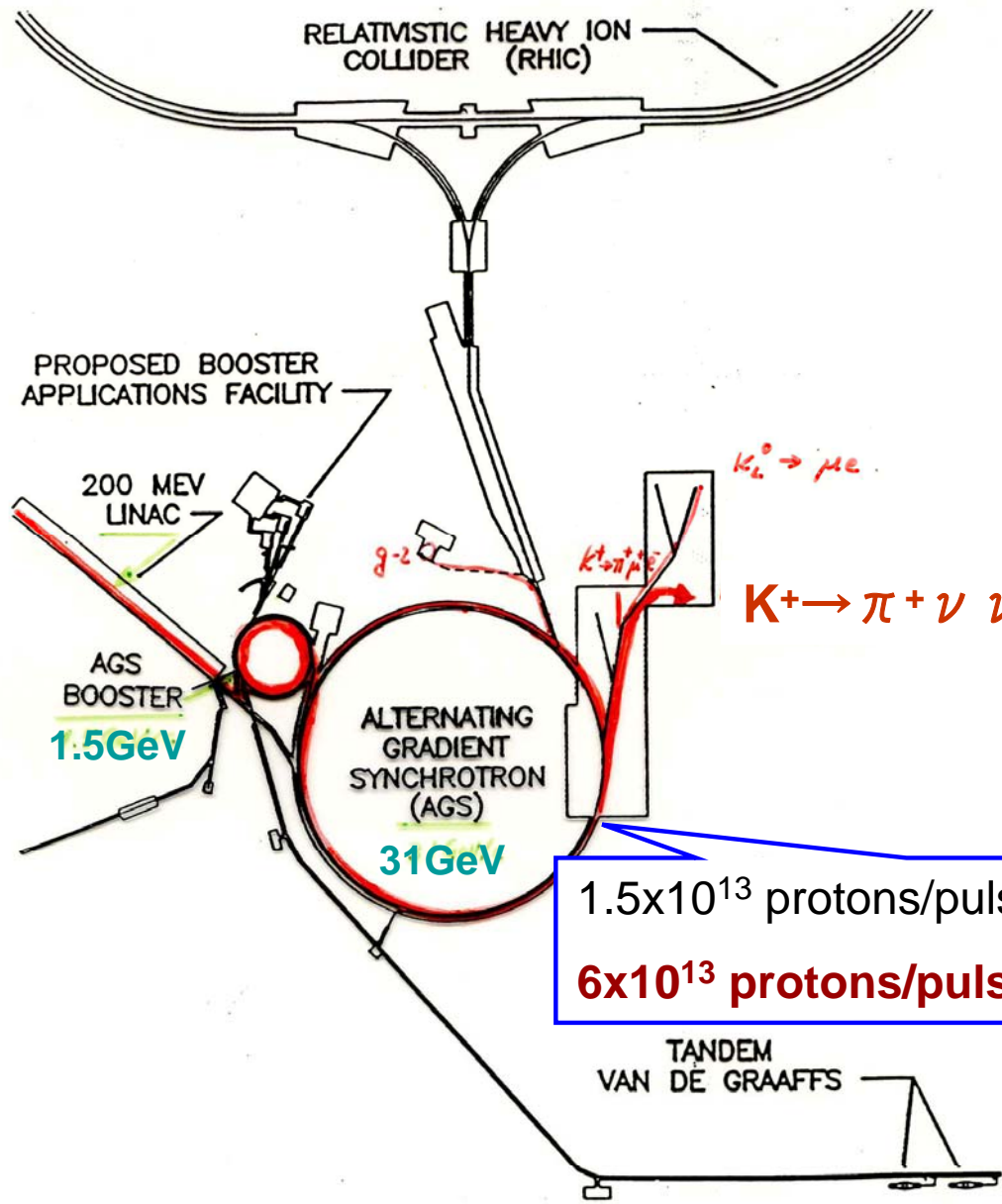
物理データとモニター・データの収集 (小松原、小俣)

**BNL**



**AGS**

Proton beam



1.5x10<sup>13</sup> protons/pulse

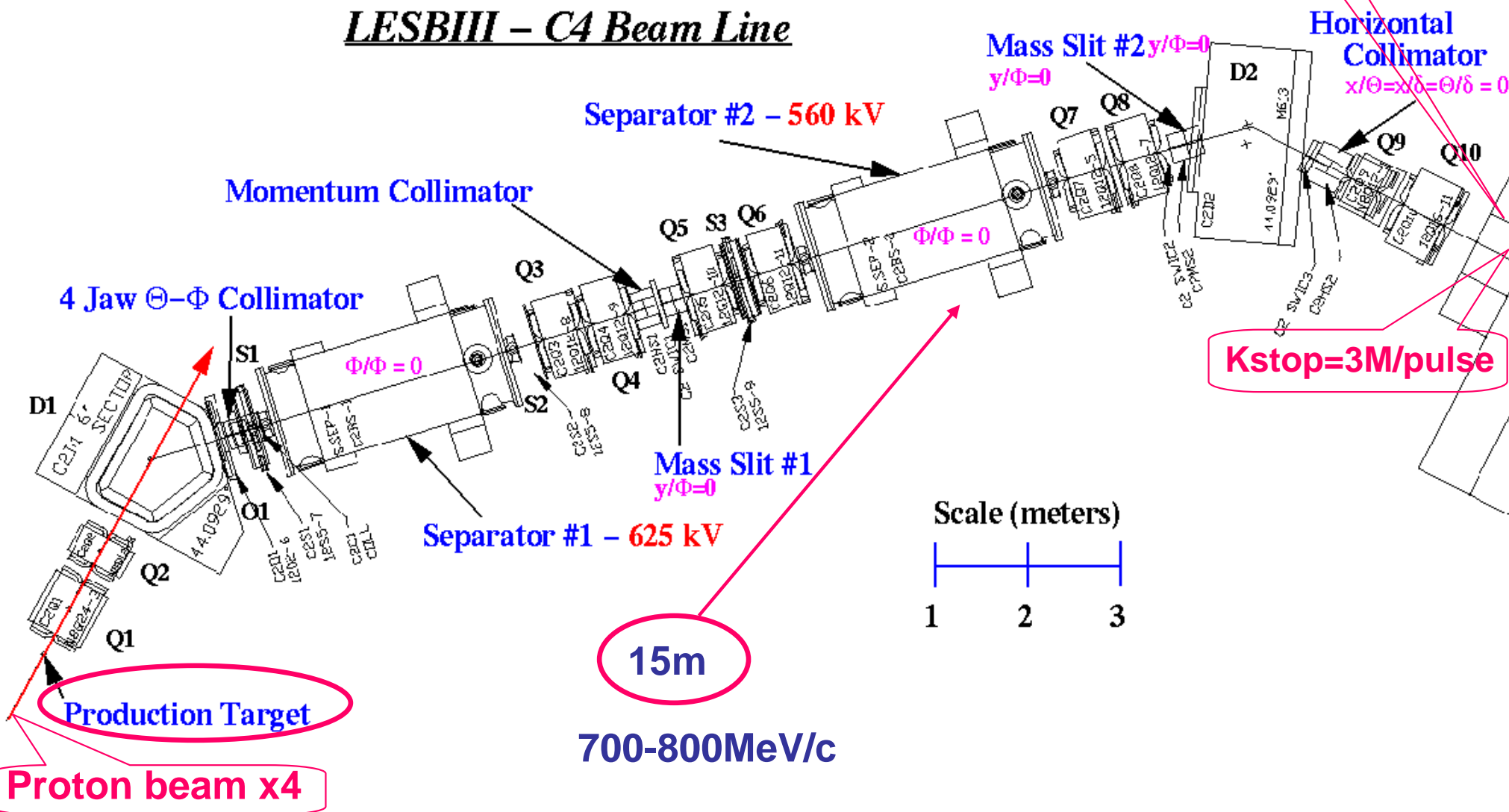
**6x10<sup>13</sup> protons/pulse**

AGS upgrade

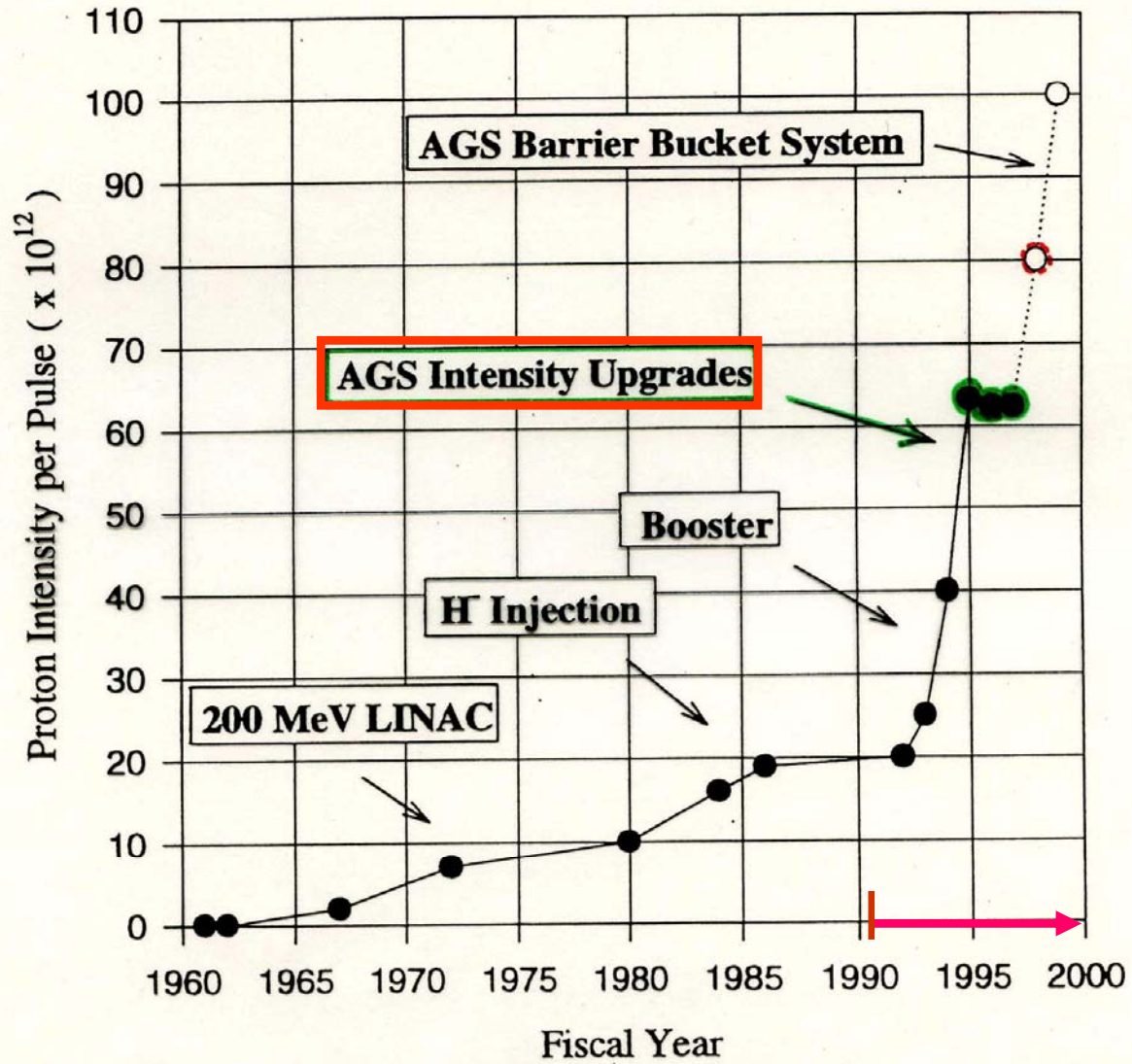
**x4**

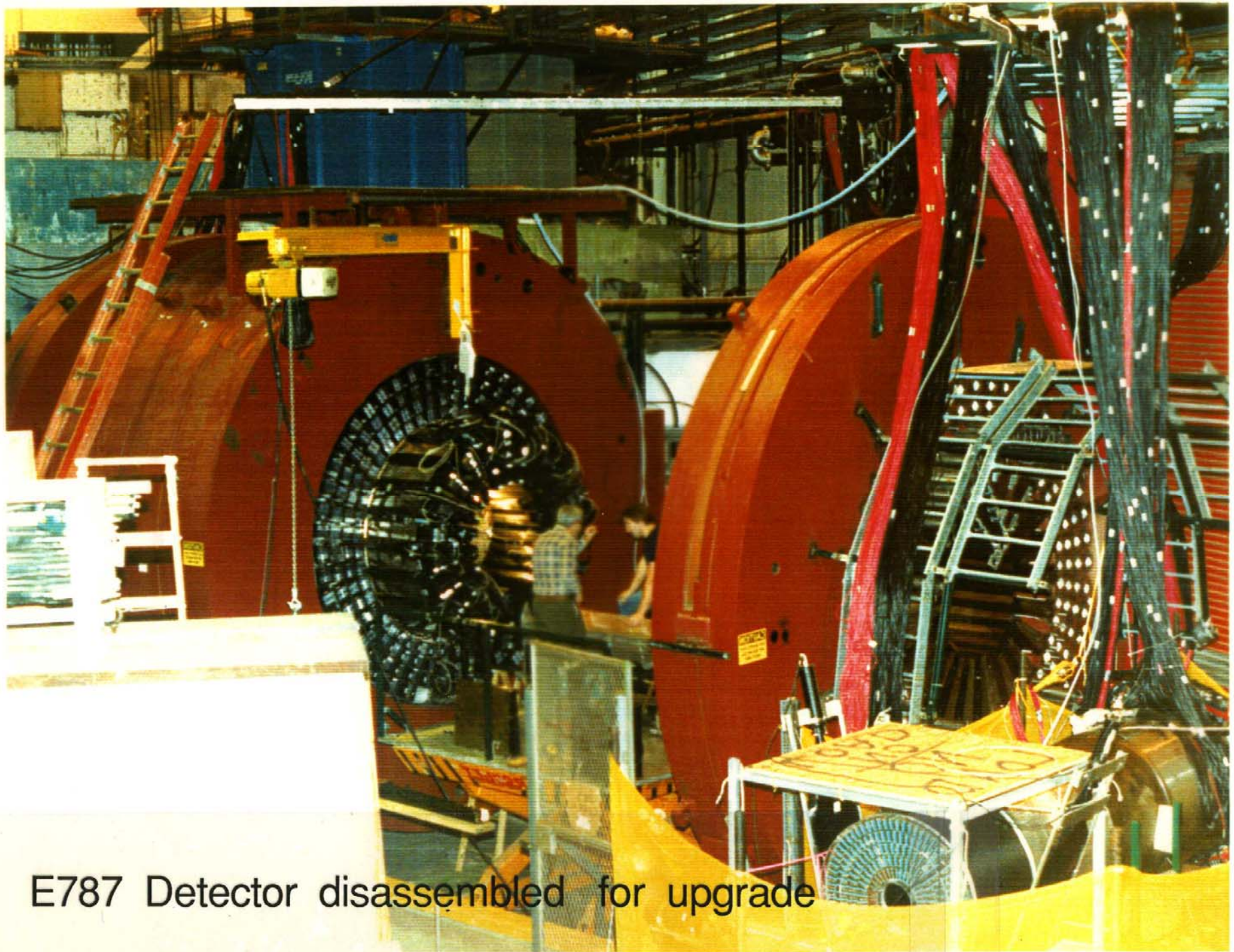
BNL - AGS

# LESBIII - C4 Beam Line



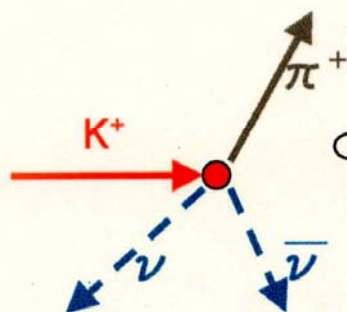
# AGS Proton Intensity History





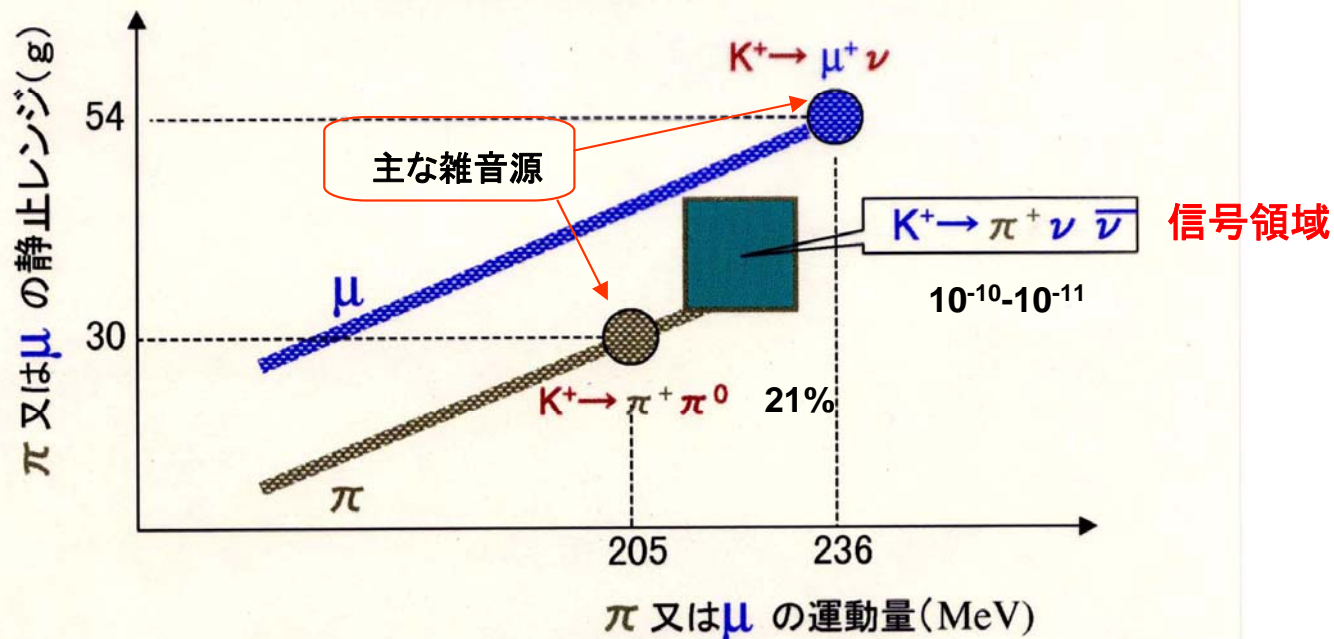
E787 Detector disassembled for upgrade

# $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ の信号とは？

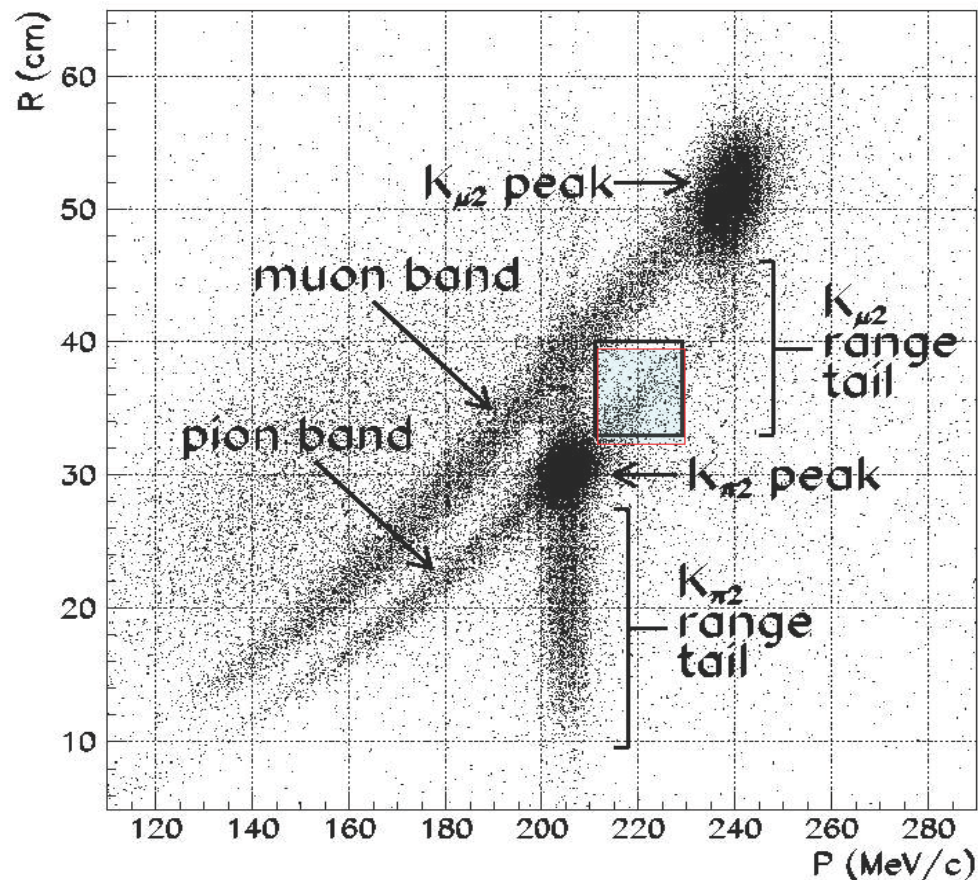


- $K^+$  が完全に静止すること
- $\pi^+$  を1つだけ放出, 他に何も信号がないこと

## $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ の測定領域



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



## $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu(\gamma), (\mu^+ \pi^0 \nu)$

- Wrong kinematics
- Mis-ID of  $\mu$  as  $\pi$
- (Photon(s) undetected)

## $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$

- Wrong kinematics
- $\pi^0$  undetected

## Scattered beam $\pi$

- Incoming  $\pi$  mis-id as K
- $\pi$  fakes K-decay at rest (timing)
- K decay-in-flight mismeasured (timing)
- Two beam particles (segmentation)

## $K^+ n \rightarrow K^0 p, KL \rightarrow \pi^+ l^- \nu$

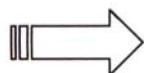
- KL decays in K-stopping target
- Lepton missed
- No gap between  $K^+$  and KL

**Key:** Reliable estimate of backgrounds suppressed to the 0.1 evt level

## どのようにして崩壊比 $10^{-10}$ の

$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  稀崩壊事象を検出するのか？

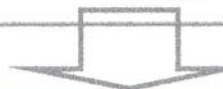
崩壊比 $10^{-10}$   
の  $K^+$ 崩壊事象  
とは？



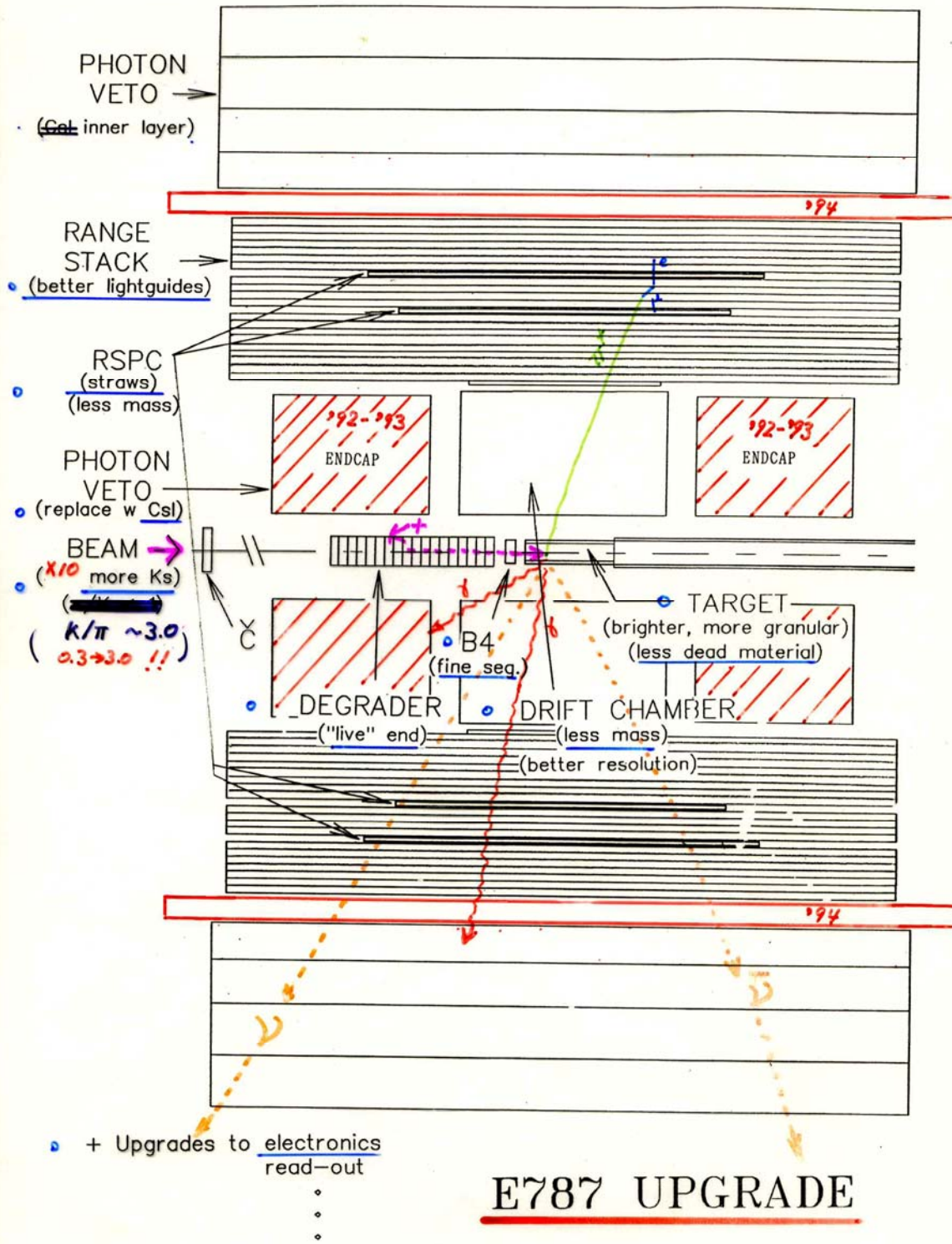
残り $(1 - 10^{-10})$ の崩壊比で  $K^+$  から  
崩壊する事象は 多量のバックグラウ  
ンド事象となって信号事象を隠す

バックグラウンド事象を $10^{-11}$ レベルまで  
抑制する必要がある！

K <sup>+</sup> 中間子 (質量493.68MeV, 寿命12.37ns)		
崩壊モード	崩壊比	γ線を伴うモード
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$	63.5%	
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$	21.2%	★
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$	5.6%	
$K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$	4.8%	★
$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$	3.2%	★
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$	0.5%	★



- 全立体角にわたって ガンマ線を高感度で検出してバックグラウンド事象を除去  $\longrightarrow$  ★ ガンマ線高感度検出の重要性
- $\pi^+$ と $\mu^+$ を識別して $\mu^+$ 事象を除去 ( $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ 崩壊チェーンの測定)
- $\pi^+$ や $\mu^+$ の運動量, エネルギー, 静止レンジを正確に測定して  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$  事象を除去



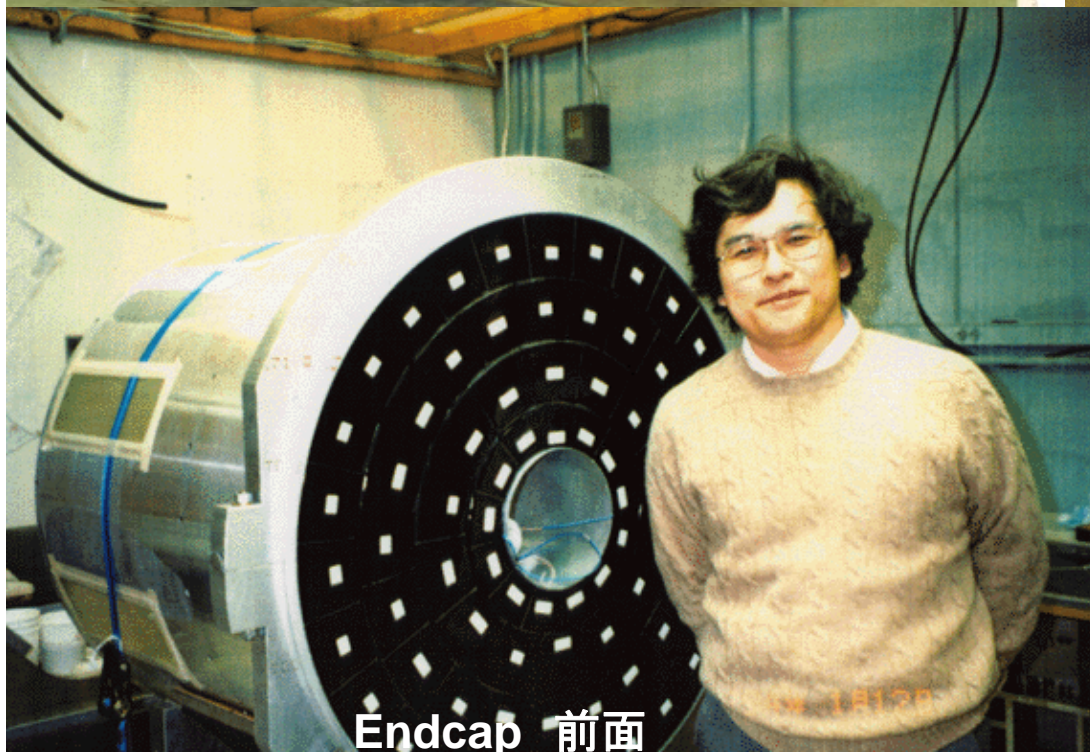
# E787 UPGRADE



Endcapの構造体



Csl (pure) モジュール



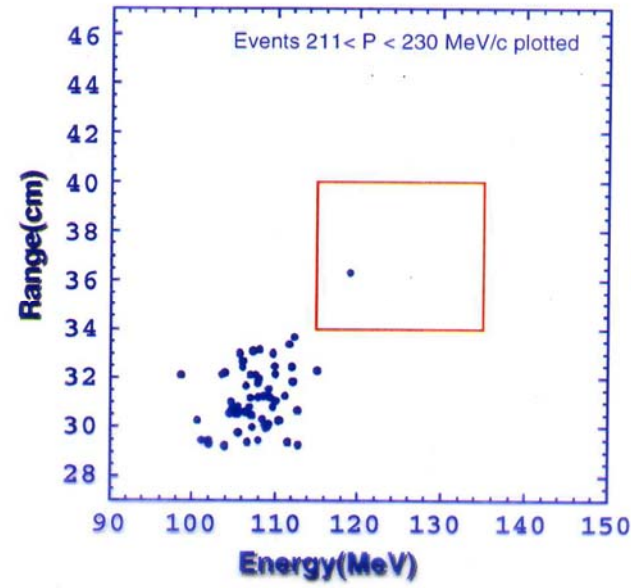
Endcap 前面



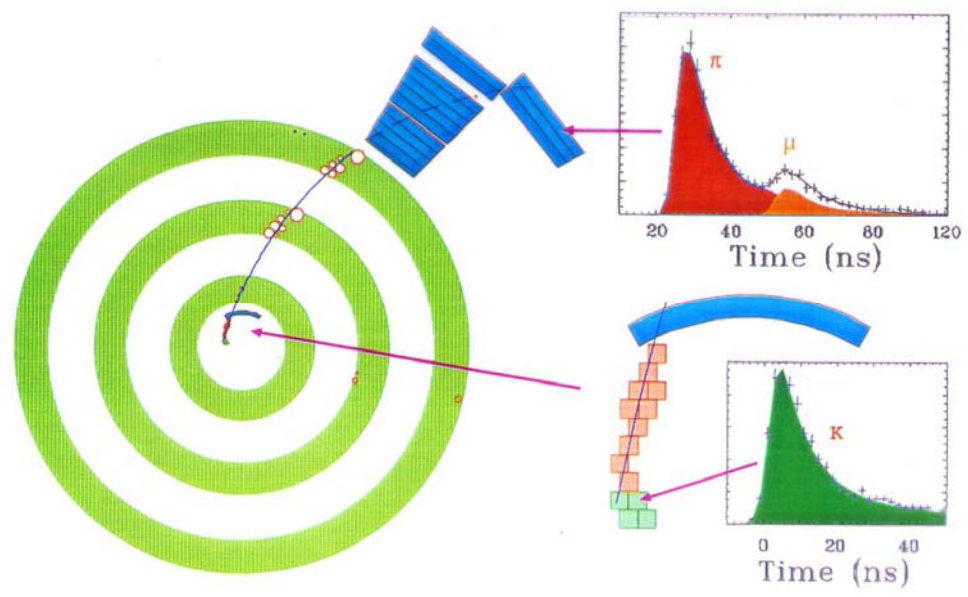
Endcap 裏面 (PMT側)

'95 data

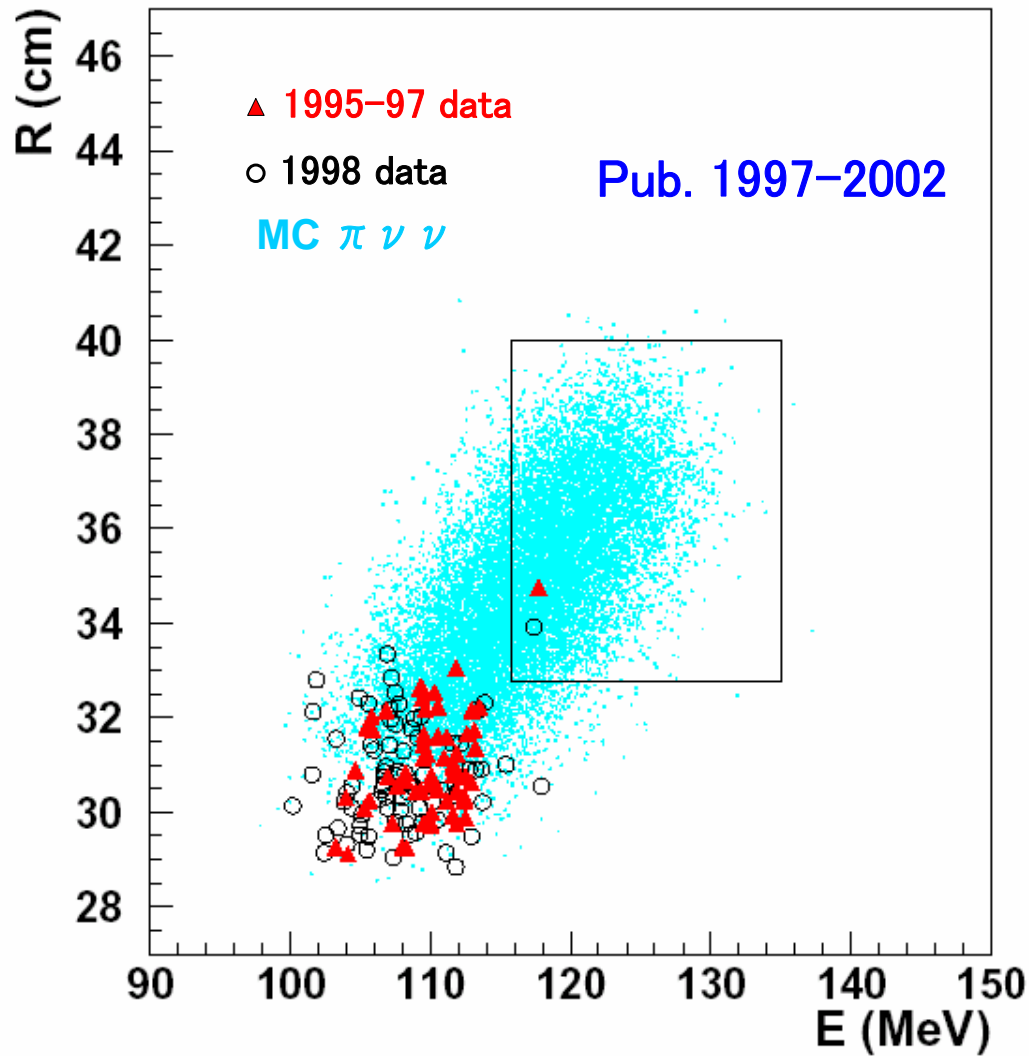
# One event in the fiducial



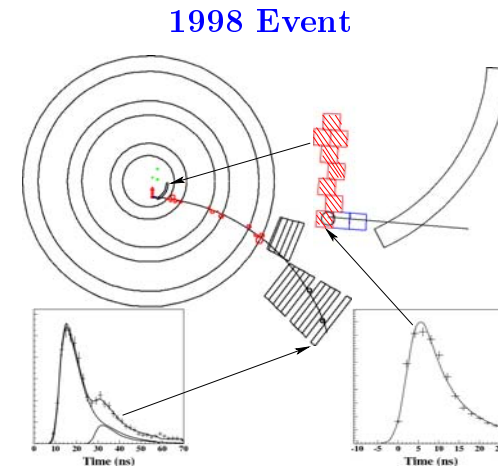
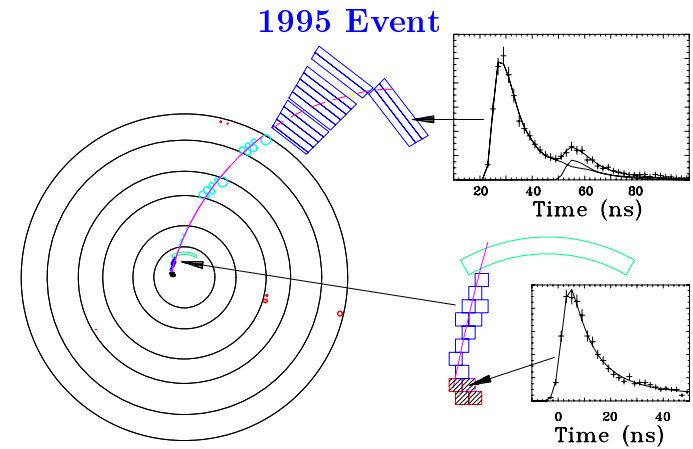
← Estimated Background  
 $0.08 \pm 0.03$   
events



# The two $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ events



## The Two E787 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ Events



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

[1995-8: PRL **88**, 041803 (2002),

1995-7: PRL **84**, 3768 (2000),

1995: PRL **79**, 2204 (1997) ]

# BNL/E787 から E949への大改造

(Kビーム強度増強に対する測定器改造)

**1999-2001**

# モニターシステムの導入



# バレルベトロー・カウンターの導入

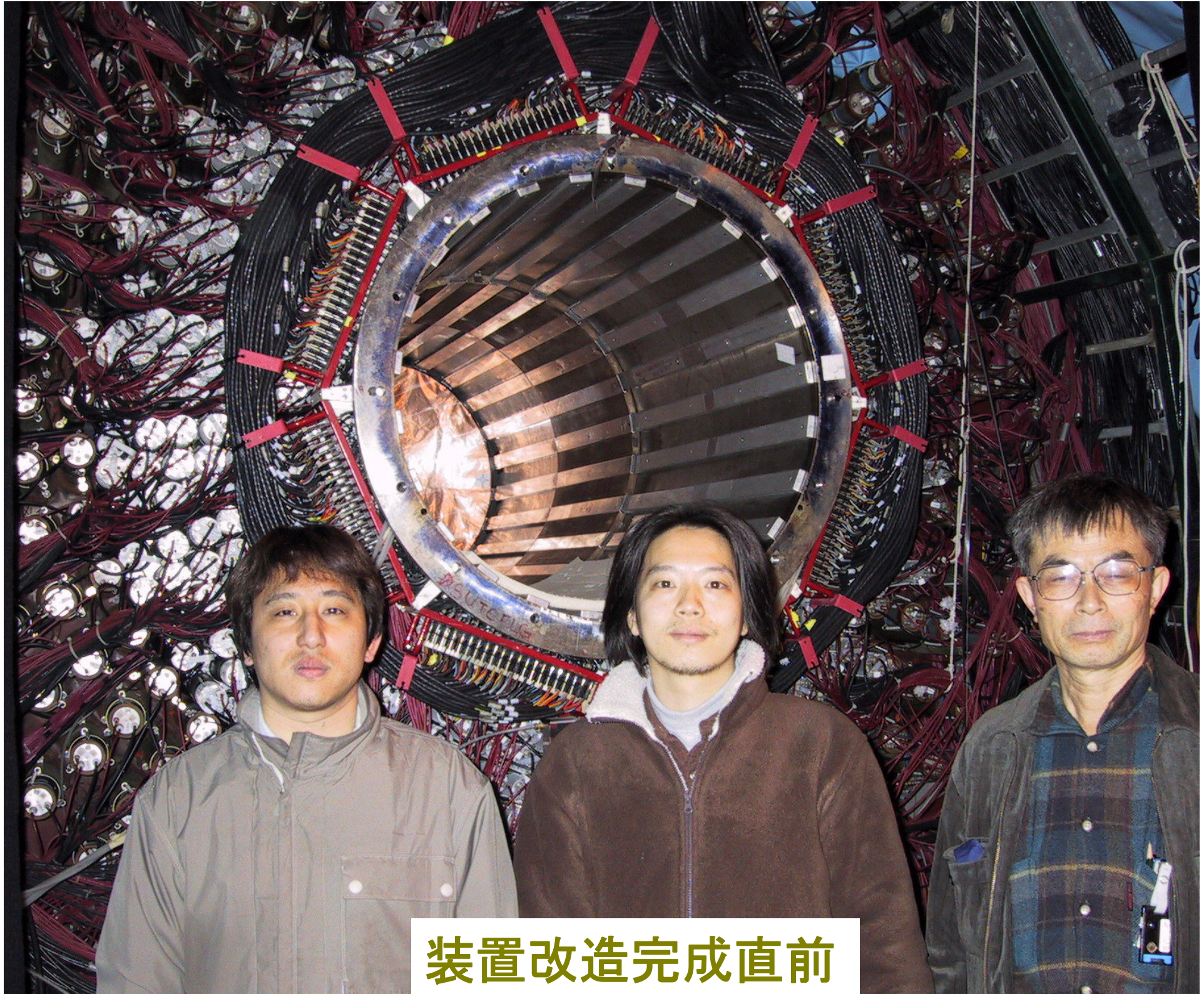




## FPGA トリガー回路の導入



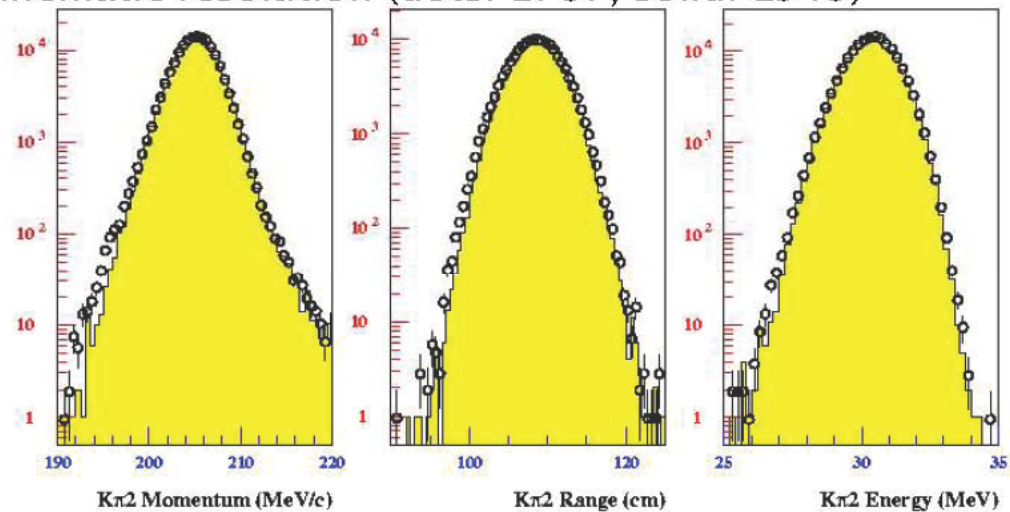
**BNL/E949測定装置再組立**



装置改造完成直前

# E949: Detector upgrades

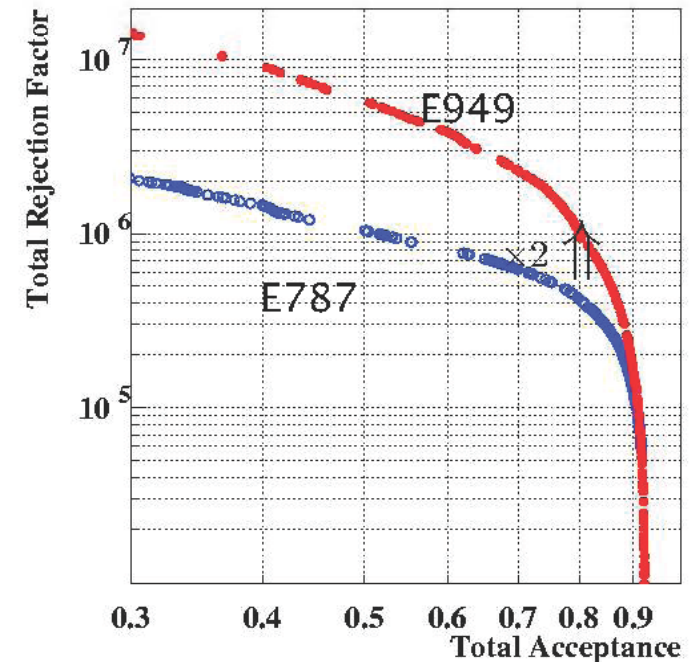
Kinematic resolution (dots: E787, solid: E949)



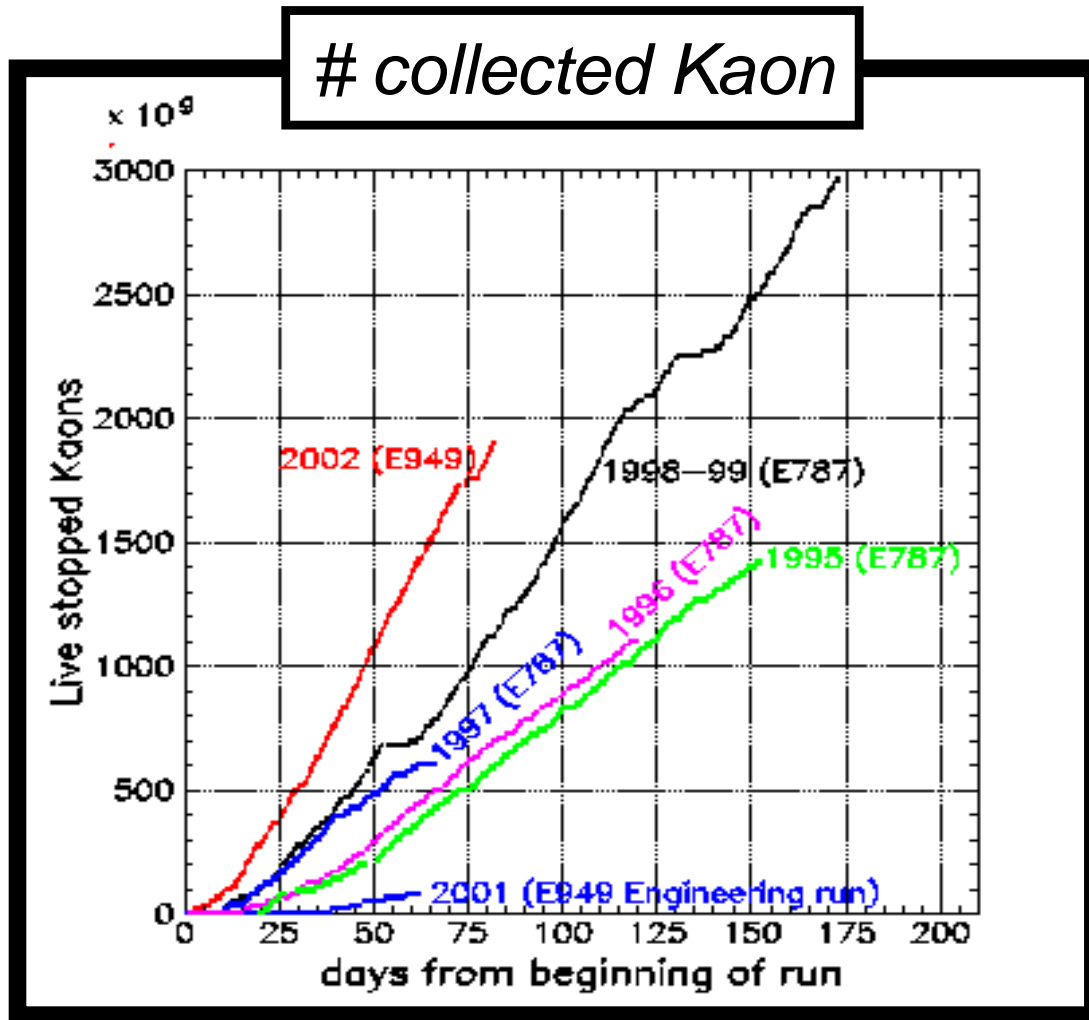
Comparable kinematic resolution at x2 instantaneous rate.

$$\begin{aligned}\sigma(P) &\sim 2.3 \text{ MeV}/c \\ \sigma(R) &\sim 0.9 \text{ cm} \\ \sigma(E) &\sim 3.0 \text{ MeV}\end{aligned}$$

Photon Veto: x2 more rejection at nominal acceptance

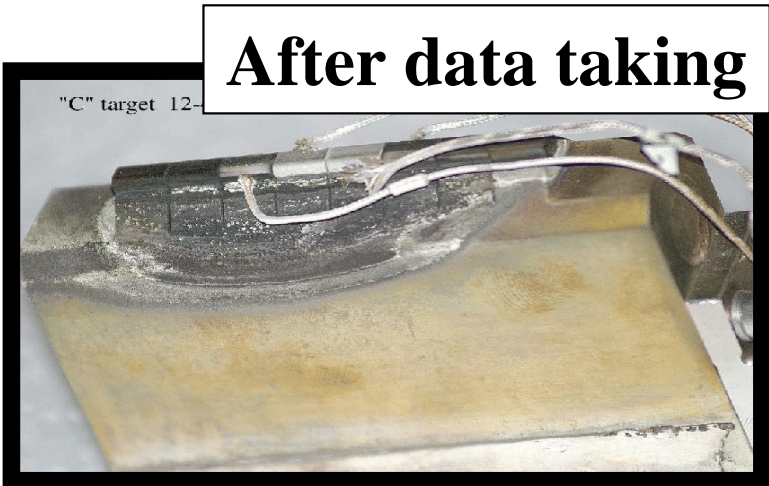
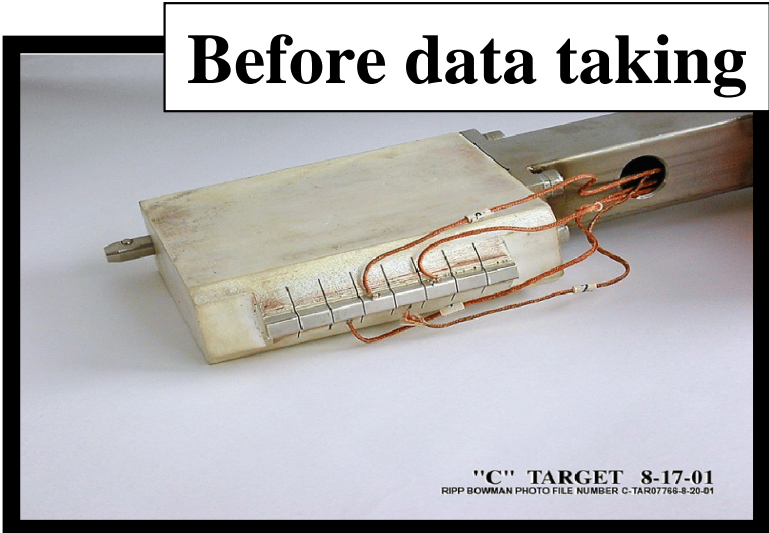


# DAQ Summary



Accumulated  $K^+$ :  $N_K = 1.8 \times 10^{12}$

Platinum target used in 2002



# E949: Beam

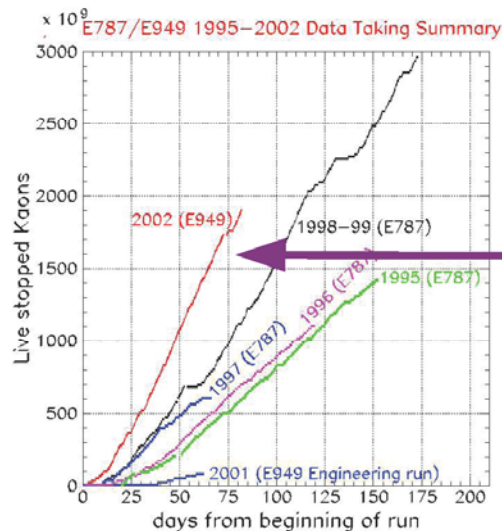
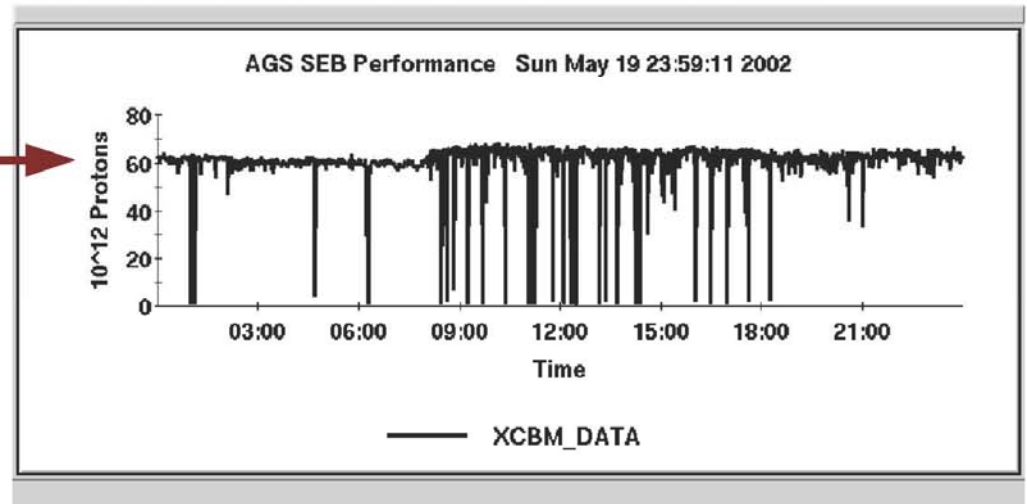
E949 (2002) protons on target (typical day)

Proton intensity:

- $76 \times 10^{12}$ /spill (peak)
- $65 \times 10^{12}$ /spill (typical)

Kaons:

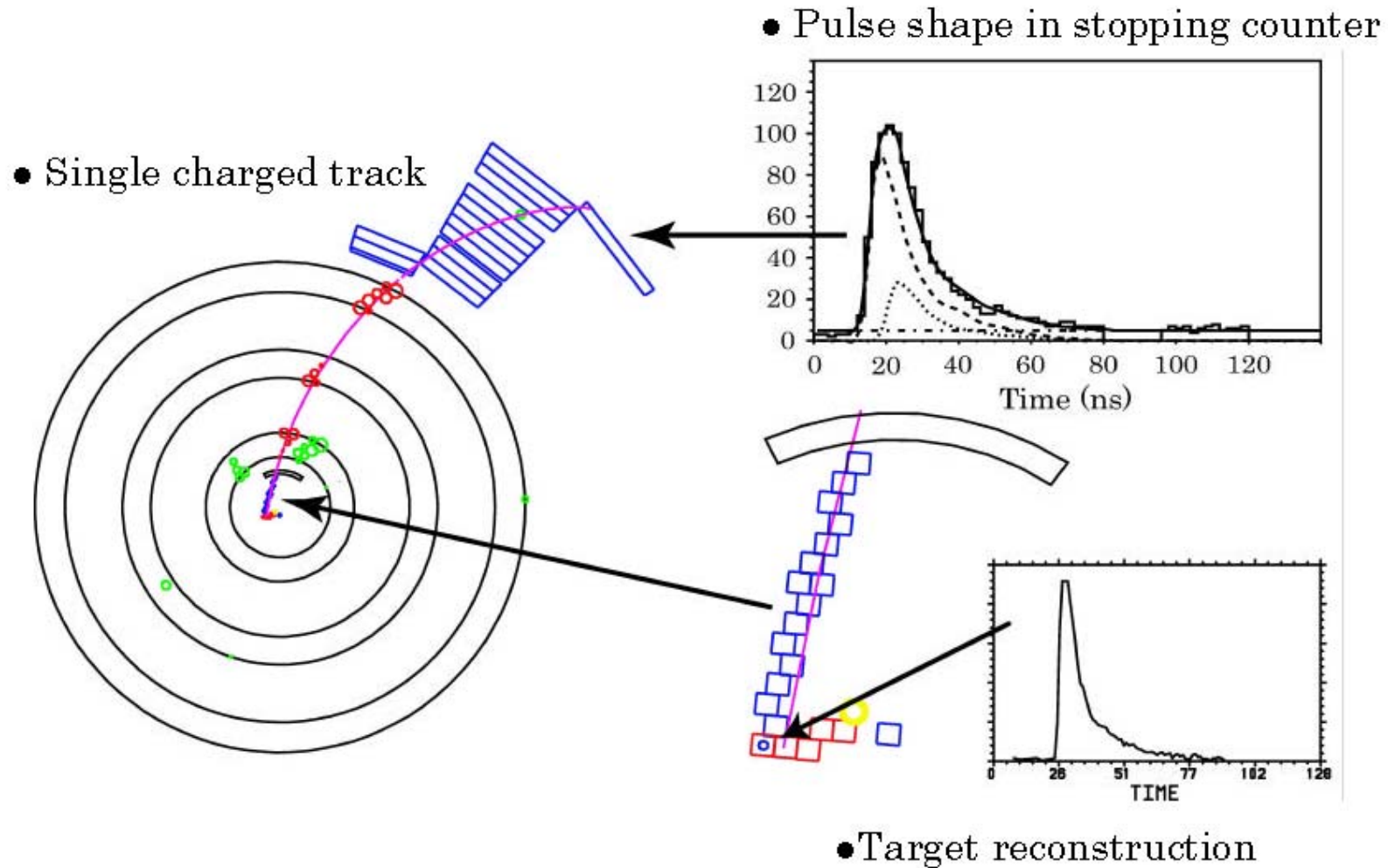
- Incoming: 6–7 MHz
- “Stopping”:  $\sim 2$  MHz



Not optimal in 2002:

- Short run
- AGS main power supply problem. 20% worse duty factor cf. E787. Lower proton momentum  $\Rightarrow$   $\sim 10\%$  in K flux.
- K/ $\pi$  separator problems

# Event reconstruction for the candidate event



E949 最初の事象 = (E787+E949)での3個目の事象

# Branching ratio calculation

E949 data alone:

$$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = 0.96_{-0.47}^{+4.09} \times 10^{-10}$$

(68% CL interval)

or

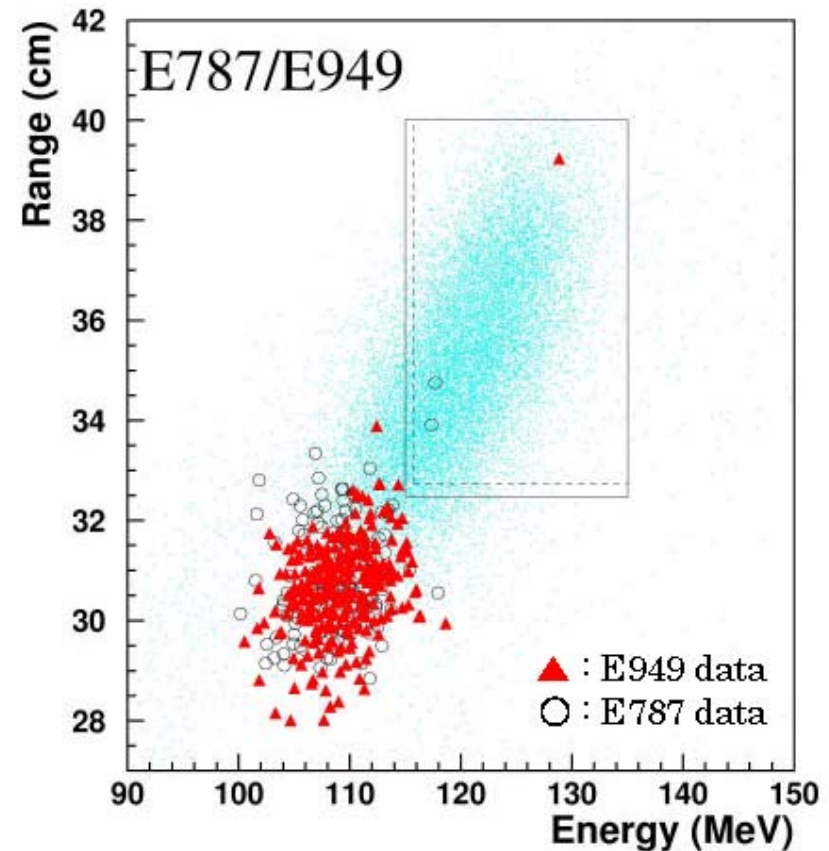
$$< 8.76 \times 10^{-10} \text{ (90% CL)}$$

Combined E787 and E949 data:

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

(68% CL interval)

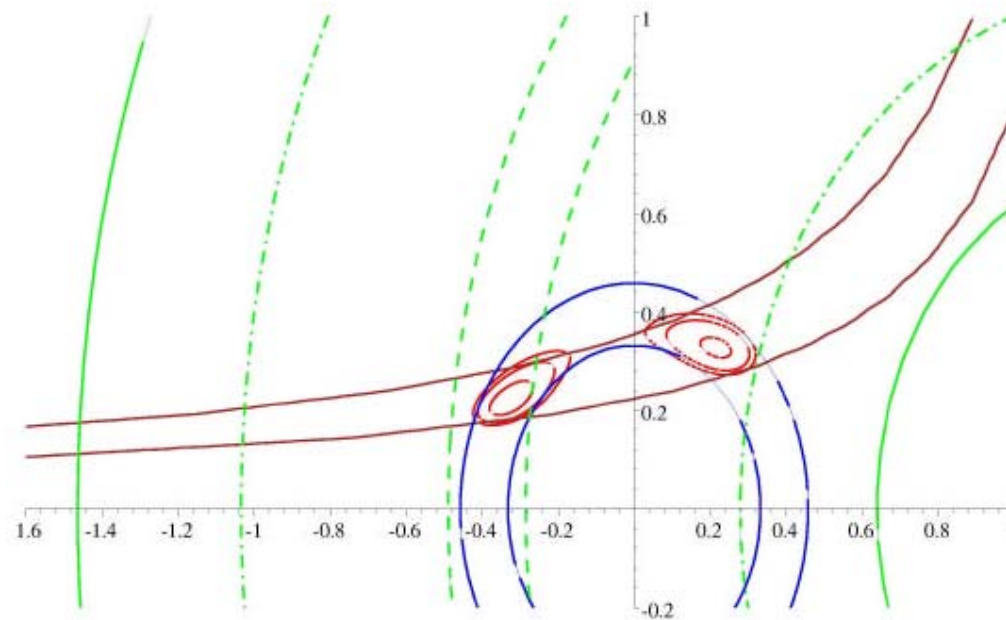
Candidate	E787		E949
	1995A	1998C	2002A
$S_i / b_i$	50	7	0.9
$W_i \equiv S_i / (S_i + b_i)$	0.98	0.88	0.48
Background prob.	0.006	0.02	0.07



Solid line : E949 signal region  
Dashed line: E787 signal region

## $\rho$ and $\eta$ without constraints from $\Delta B = 2$ weak processes

Provided by G. Isidori

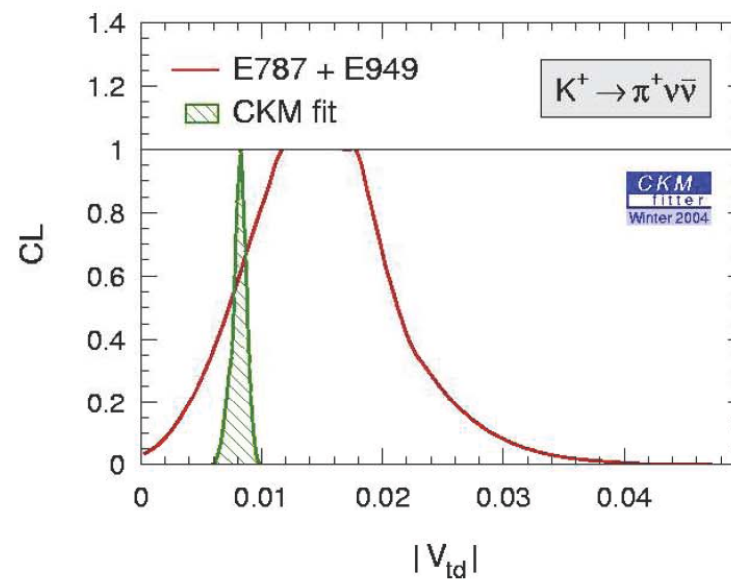
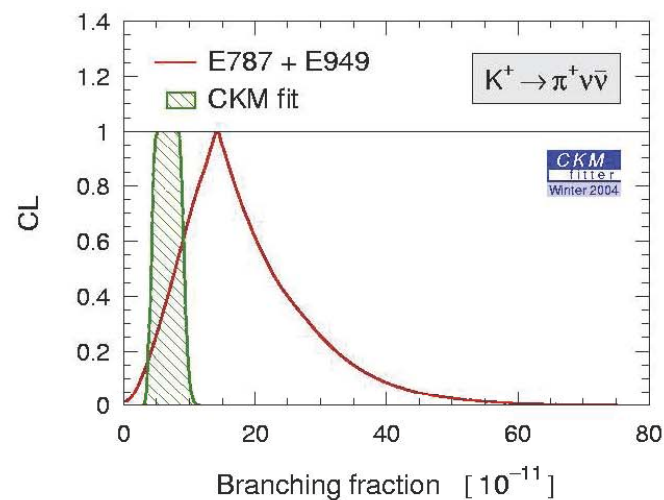


$A_{CP}, \Delta m_d \leftarrow$  obtained from  $\Delta B = 2$  weak processes.

- Red ovals: 68%, 90%, 95% CL areas for  $\rho$  and  $\eta$ .
- Green lines: constraints from  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$
- Red hyperbolas: constraint from  $\epsilon_K$  measurement.
- Blue circles: constraint from  $|V_{ub}|$  measurement.

# Impact on unitarity triangle

CKM fitter: hep-ph/0406184



Still room for new physics to appear in  $\Delta F=1$  kaon decays.

Needs more data.

# E787

1992	Japan-US (E787) start	測定器大改造(endcap)
1995	data taking	
1996	data taking	
1997	data taking	
1998–1999	data taking	

# E949

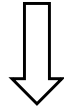
1999	approved by DOE	測定器大改造(BVL/trigger/etc.)
2001-2002	data taking	
2004	cosmic-ray run	
2005	RSVP cancellation by NSF	

# 稀崩壊モード $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 研究の歴史

泡箱による実験研究

ANL-ZGS

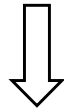
—1968 (1事象検出感度  $4.6 \times 10^{-5}$ )



スパークチェンバーによる実験研究

LBL-Bevatron

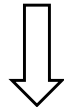
—1973 (1事象検出感度  $2 \times 10^{-7}$ )



高速度電子回路による実験研究

KEK-E10

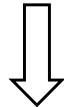
—1981 (1事象検出感度  $6 \times 10^{-8}$ )



大規模高精度実験研究

BNL-E787<sub>old</sub>

—1991 (1事象検出感度  $1 \times 10^{-8}$ )



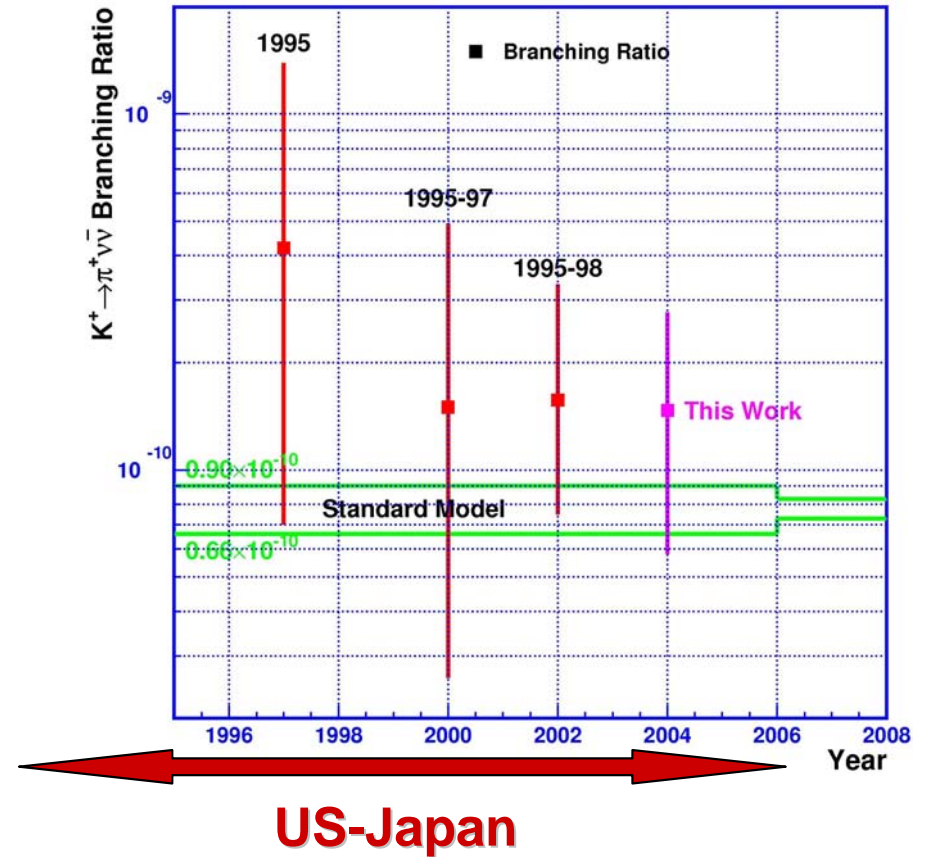
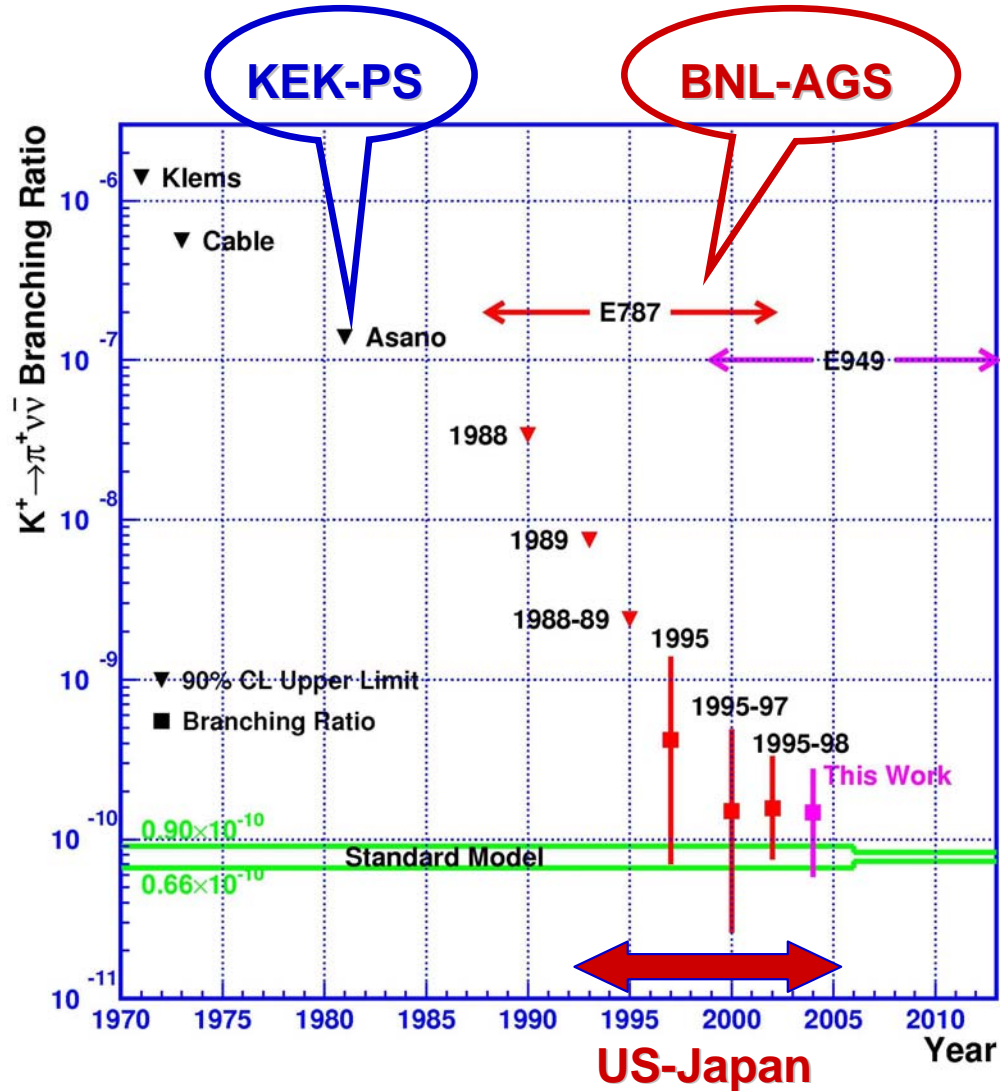
超高精度実験研究(日米共同研究)

BNL-E787/E949

1992—1999—2002 (1事象検出感度  $1 \times 10^{-11}$ )

中断

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



Narrowing of “SM prediction” assumes measurement of  $B_s$  mixing (at Tevatron, LHC, ..) consistent with prediction.

# BNL-E787/E949 Summary

- The result for  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  from E787 and E949

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

The limits on  $|V_{td}|$ :  $0.0056 < |V_{td}| < 0.0266$

( $Br < 2.7 \times 10^{-7}$  (90% CL))

- **New results** for
  - $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$  (E787)
  - $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$  (E787)
  - $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \nu \nu$  (E787)
  - $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma$  (E787)
  - $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$  (E949)
  - $\pi^0 \rightarrow \nu \nu$  (E949)
  - $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$  (E787)
  - $K^+ \rightarrow \mu^+ \pi^0 \nu \gamma$  (E787)

We hope further  $\pi^+ \nu \nu$  runs at J-PARC

# (4) 国内のK崩壊実験の第3期の成果

## 国内でのK崩壊実験

### CP-exp

Observation of the decay mode  $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$ , PL B443(1998)409

Experimental research for the decay mode  $K_L \rightarrow \pi^0 \gamma e^+ e^-$ , PL B443(1998)409

### T-exp

Search for T-violating transverse muon polarization in  $K_{\mu 3}$  decay using stopped kaons, PRL 83(1999)

A kinematically complete measurement of  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^+$  decays, Eur Phys J C12(2000)627

Test of exotic scalar and tensor couplings in  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$  decay, PL B495(2000)33

Measurement of  $\Gamma(K_{\mu 3})/\Gamma(K_{e3})$  ratio using stopped positive kaons, PL B513(2001)311

Measurement of direct photon emission in  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$  decay using stopped positive kaons, PL B554(2003)7

First measurement of the T-violating muon polarization in the decay  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$ , PL B562(2003)166

New limit on the T-violating transverse muon polarization in  $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$  decays, PRL 93(2004)131601

Measurement of  $K^+ \rightarrow \pi^0 \pi^0 e^+ \nu$  ( $K_{e4}^{00}$ ) decay using stopped positive kaons, PR D70(2004)037101

New result on the measurement of the direct photon emission in  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^+$  decay, Eur Phys J C46(2006)61

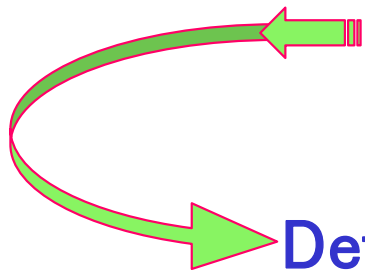
Measurement of  $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu \gamma$  decay using stopped kaons, PL B633(2006)190

Search for T-violating transverse muon polarization in the  $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$  decay, PR D73(2006)072005

# 次期計画への取り組み

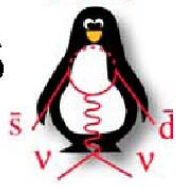
## Proposal / LOI

- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  @JPARC
- $K^+ \rightarrow \mu^+ \pi^0 \nu$  @JPARC (stopped kaons)
- $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$  @CERN decay in flight
- $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$  @JPARC (stopped kaons)
- DAFNE experiments



## Detector R&D

- 高速波形記録
- SSD
- GSO/PWO
- Range Stack

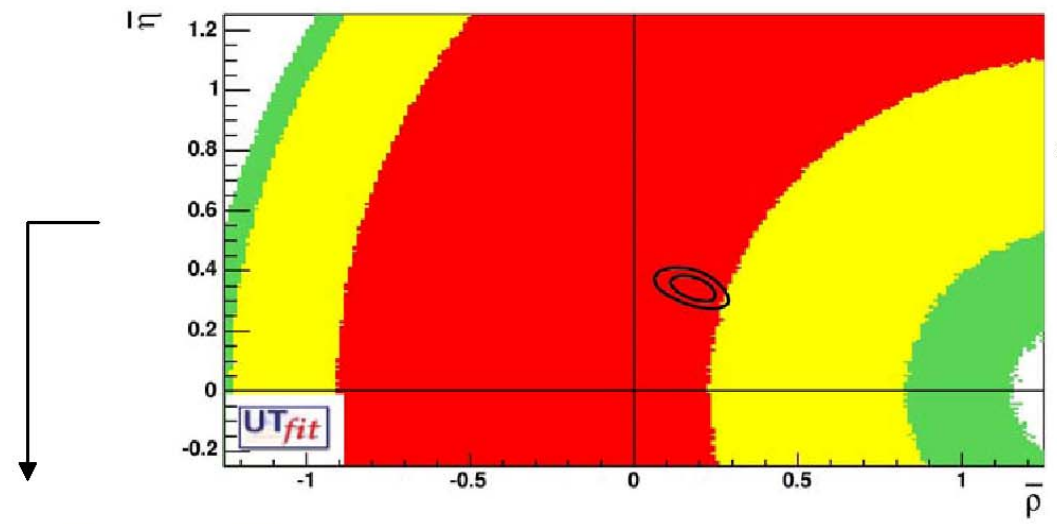


# Setting the bar for future Kaon experiments

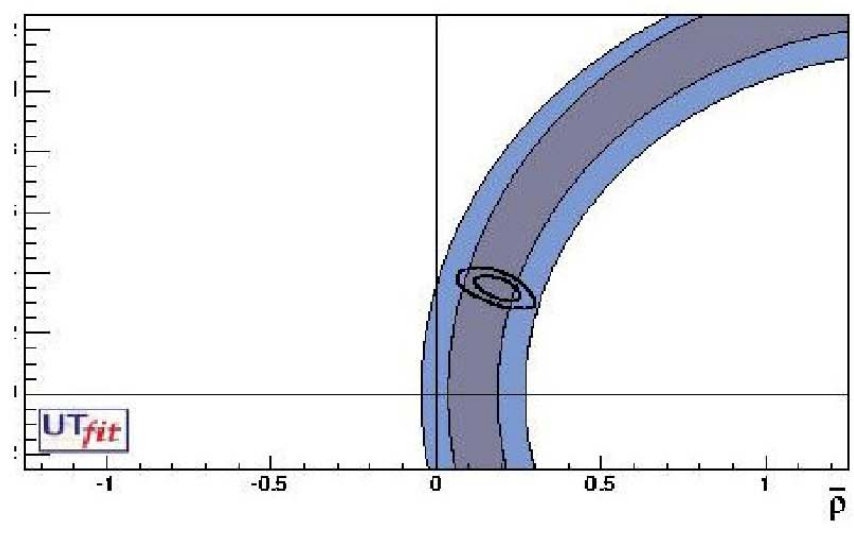
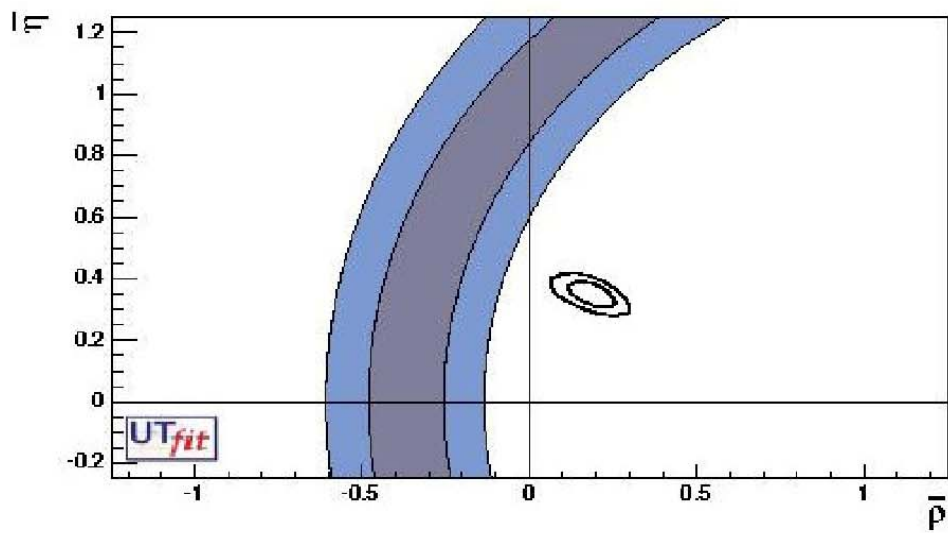
- Present (E787/949):  $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = 1.47^{+1.30}_{-0.89} \times 10^{-10}$

Current constraint on  $\rho, \eta$  plane

100 events  
Mean:  
E787/949



100 events  
Mean: SM



# Proposal to Measure the Rare Decay $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ at the CERN SPS (NA48/3 – P326)



Located in the same hall of NA48

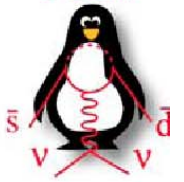
CERN SPSC-2005-013 & SPSC-P-326

CERN, Dubna, Ferrara,  
Florence, Frascati, Mainz,  
Merced, Moscow, Naples,  
Perugia, Protvino, Pisa,  
Rome, Saclay,  
San Luis Potosi,  
Sofia, Turin



## Schedule

- Presented at CERN SPSC in September 2005
- R&D endorsed by CERN Research Board on December 2005
- Test beams in October - November 2006
- Test beam for RICH in 2007
- Aims to complete the R&D by the end of 2007 !!
- Start of data taking 2011 !!



# NA48/3 guidance principles

~80  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$  events

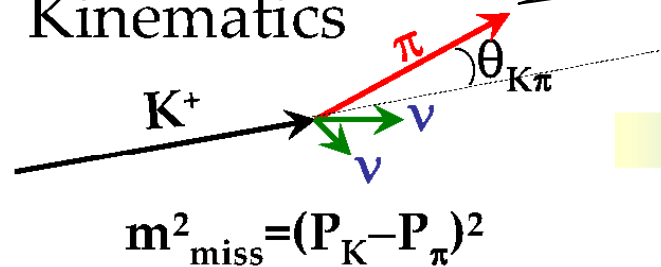
- **BR(SM) =  $8 \times 10^{-11}$**
- **Signal acceptance 10%**
- **K decays  $\sim 10^{13}$**



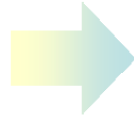
- Kaon decay in flight technique
- **Intense proton beam from SPS**
- High energy K ( $P_K = 75 \text{ GeV}/c$ )
- **Cerenkov counter for kaon ID**

Low Level of background

- Kinematics



15-35 GeV/c

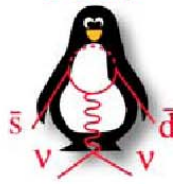


- **Kaon**: Beam Tracker
- **Pion**: Spectrometer

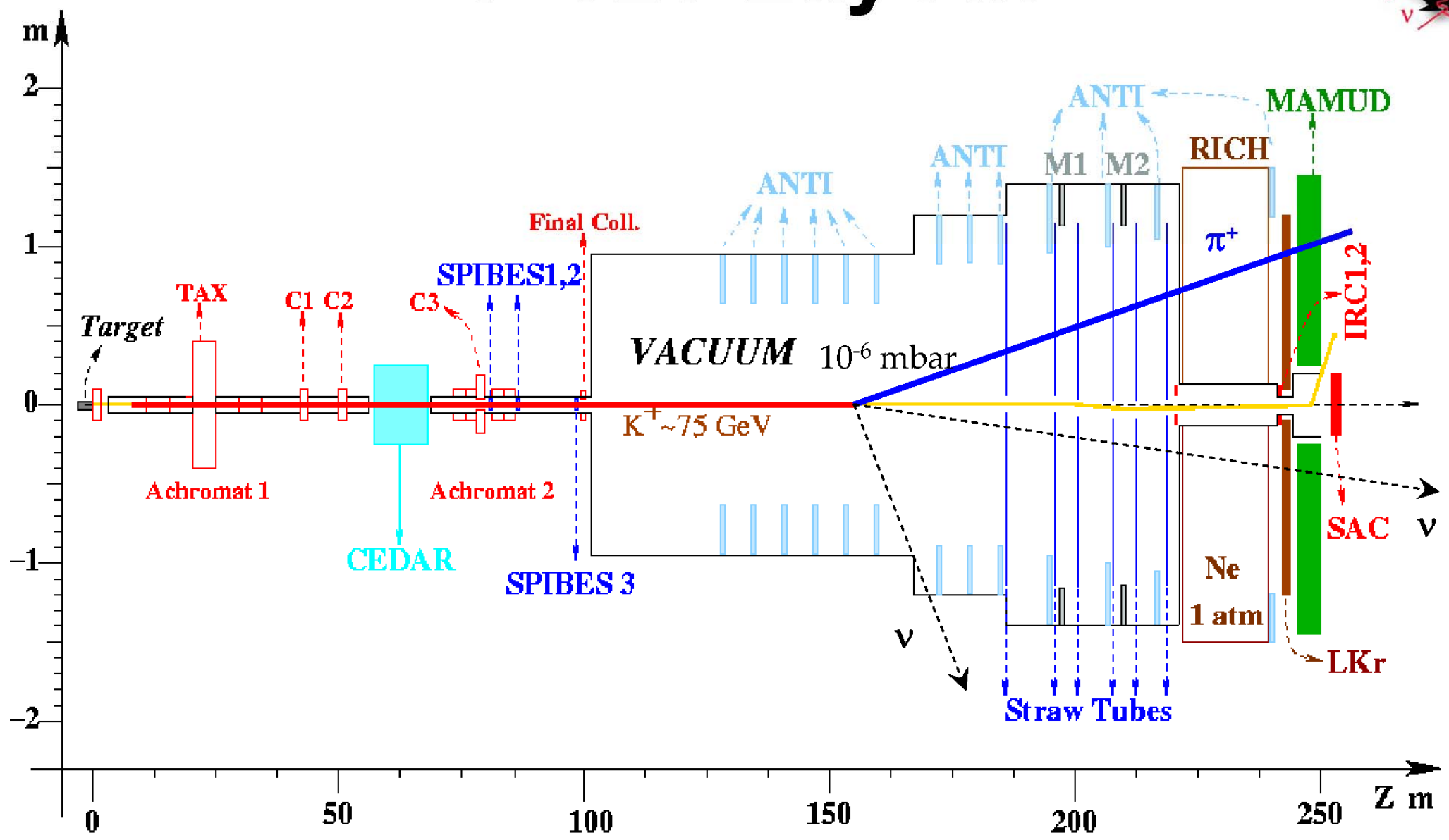
- Vetoes & Particle ID



- Calorimeter for  $\gamma/\mu$  detection
- **RICH ( $\pi/\mu$  separation)**
- Spectrometer for charged particle rejection



# P-326 Layout





# Analysis: background rejection

<i>Events/year</i>	Total	Region I	Region II
<b>Signal</b> ( <i>acc=17%</i> )	<b>65</b>	<b>16</b>	<b>49</b>
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$	2.7	1.7	1.0
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$	1.2	1.1	<0.1
$K^+ \rightarrow e^+ \pi^+ \pi^- \nu$	~2	negligible	~2
Other 3 – track decays	~1	negligible	~1
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$	1.3	negligible	1.3
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$	0.5	0.2	0.2
$K^+ \rightarrow e^+ (\mu^+) \pi^0 \nu$ , others	negligible	–	–
<b>Total bckg.</b>	<b>9</b>	<b>3.0</b>	<b>6</b>

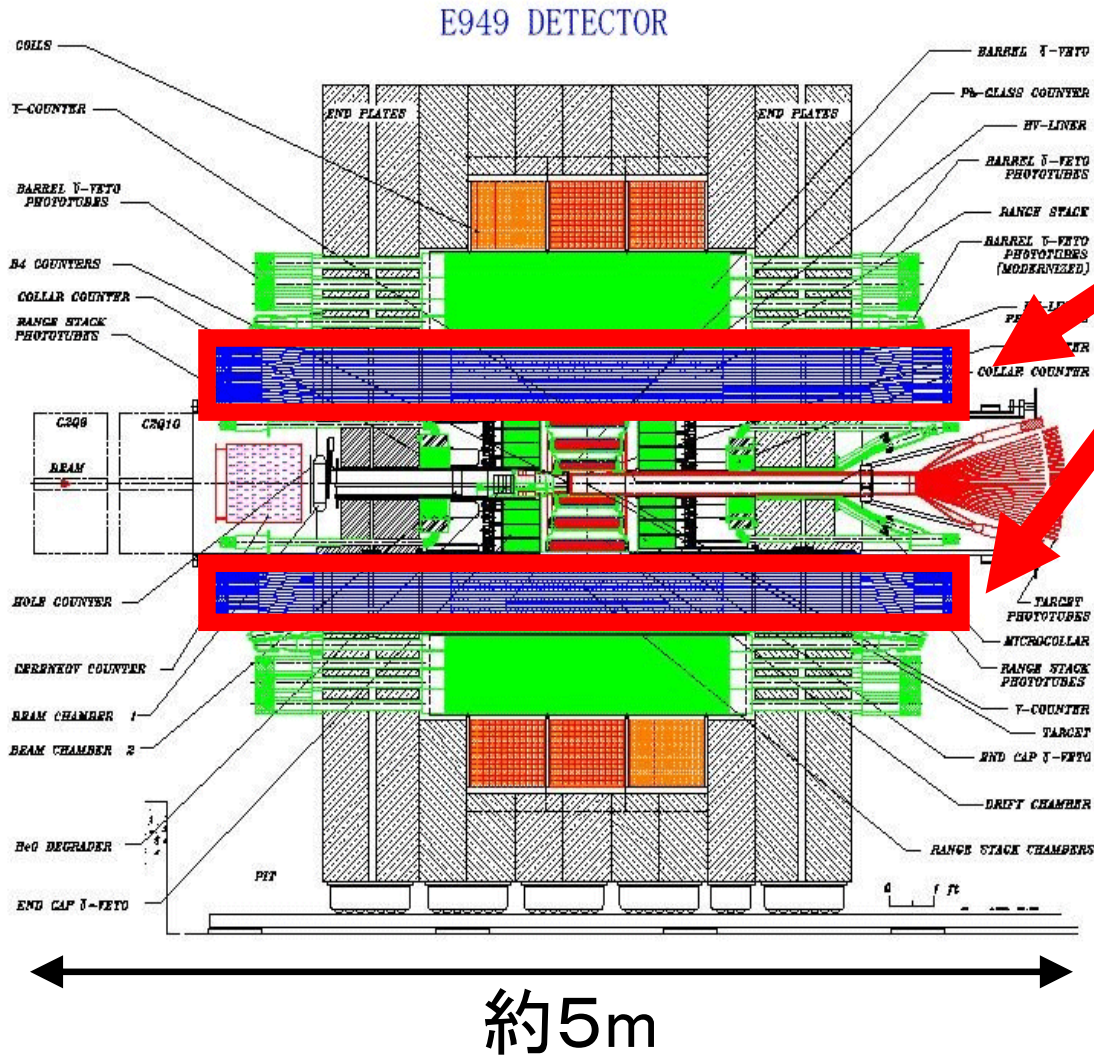
➡ S/B ~ 8 (Region I ~5, Region II ~9)

# K<sup>+</sup>静止稀崩壊実験のための準備

## 測定器開発研究

- 1) 大強度に対応できるレンジカウンター(レンジスタック検出器)の開発

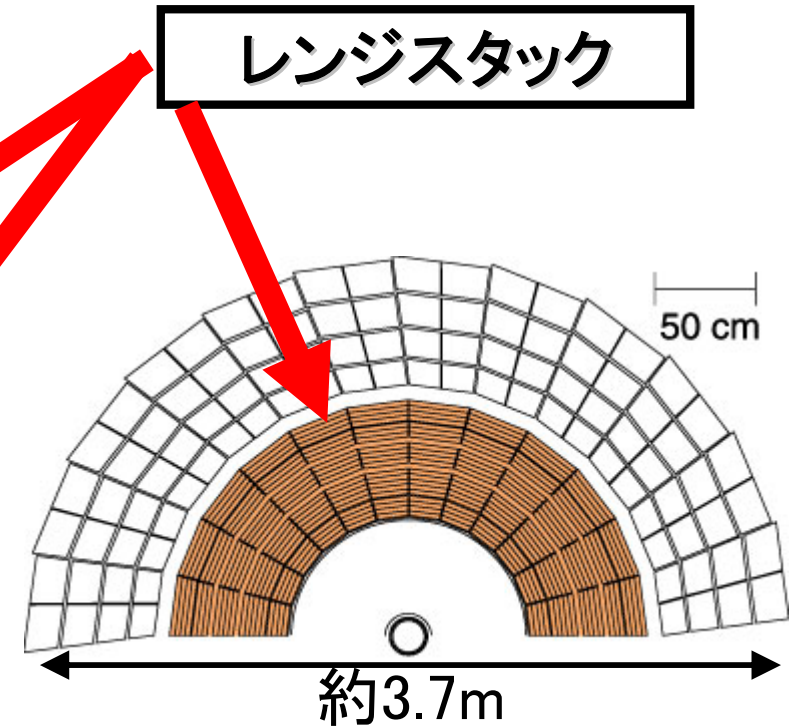
# E949レンジスタック検出器



E949検出器 断面図

$\pi^+$  レンジの測定と、崩壊によって発生した粒子のエネルギー測定

$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$  の観測



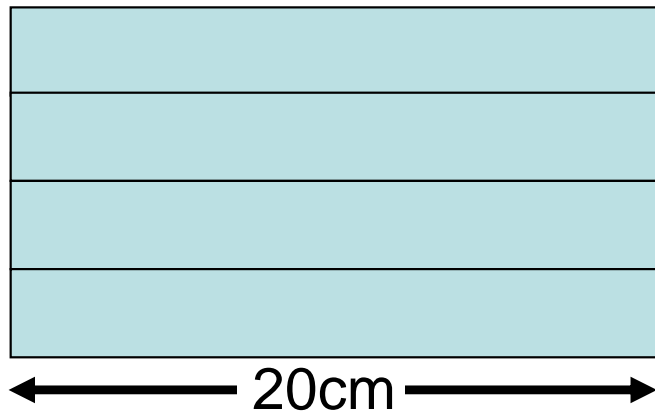
E949検出器 上半分

プラスチックシンチレータ  
19 Layers 48 sectors

# レンジスタック・プロトタイプの特徴

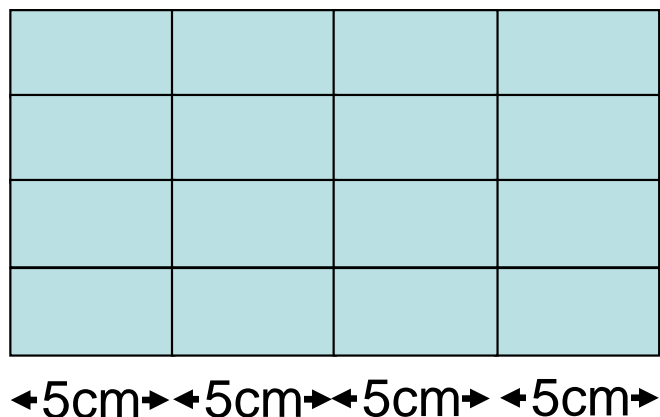
## E949レンジスタックの改善

E949型レンジスタック(断面図)



1層1枚のプラスチックシンチレータ(幅20cm)を積み上げてできていたが、Kビーム強度を上げるにつれて1本のシンチレータに「近接した時間に複数の粒子が飛び込む」確率が増加する。

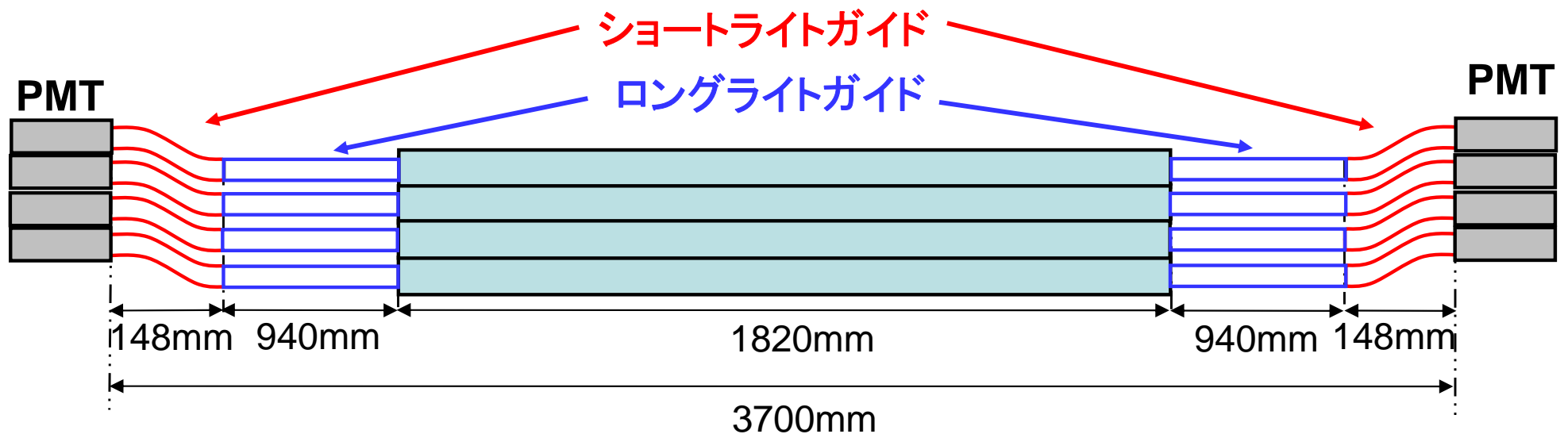
レンジスタック・プロトタイプ(断面図)



1層のプラスチックシンチレータを4分割(幅5cm)にして近接粒子入射に対応している。寸法精度、隙間の程度、エネルギー分解能の劣化の有無についてテストを行う

# レンジスタック・プロトタイプの概観

一本のプラスチックシンチレータの両側には、ライトガイド、(光電子増倍管)PMTが接続される。PMTを含むと全長は4m以上になる。これを四つ並べてレンジスタック検出器の一層目となる。



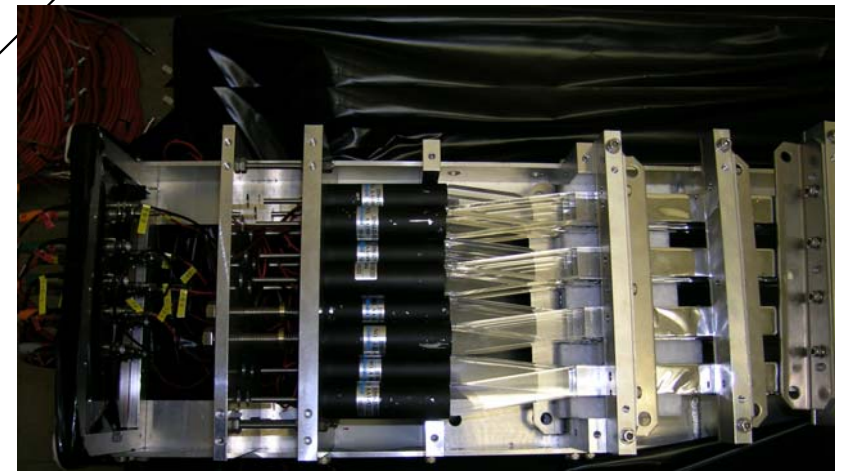
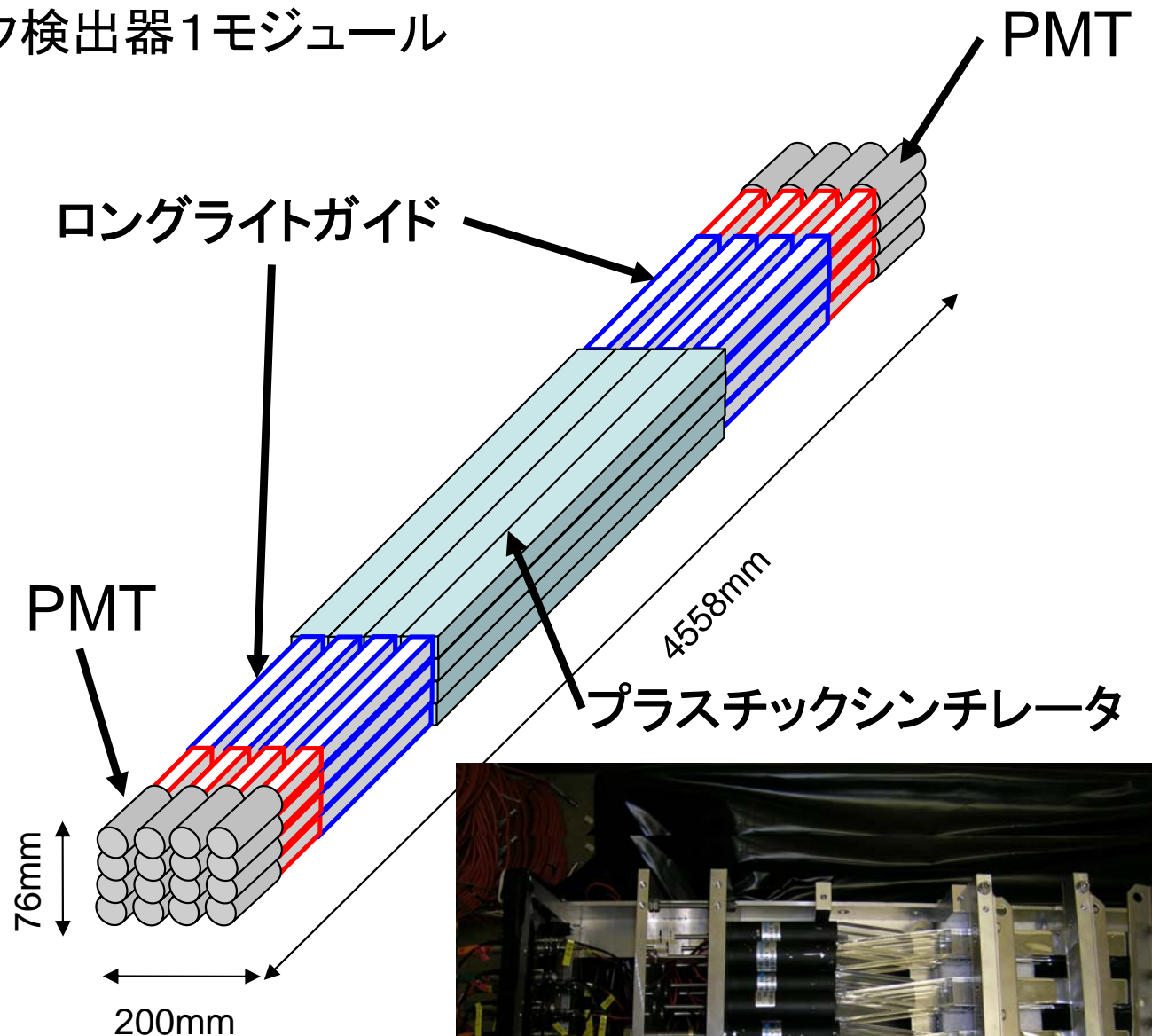
## レンジスタックを上部から見た平面概略図(一層)

### ロングライトガイドが必要な理由

実機ではプラスチックシンチレータはソレノイド磁石の中に設置され、磁石のポールピースの隙間から光を取り出さなければならないのでライトガイドが必要となる。

# レンジスタック・プロトタイプの概観

4層積み上げ、レンジスタック検出器1モジュールとして利用される。

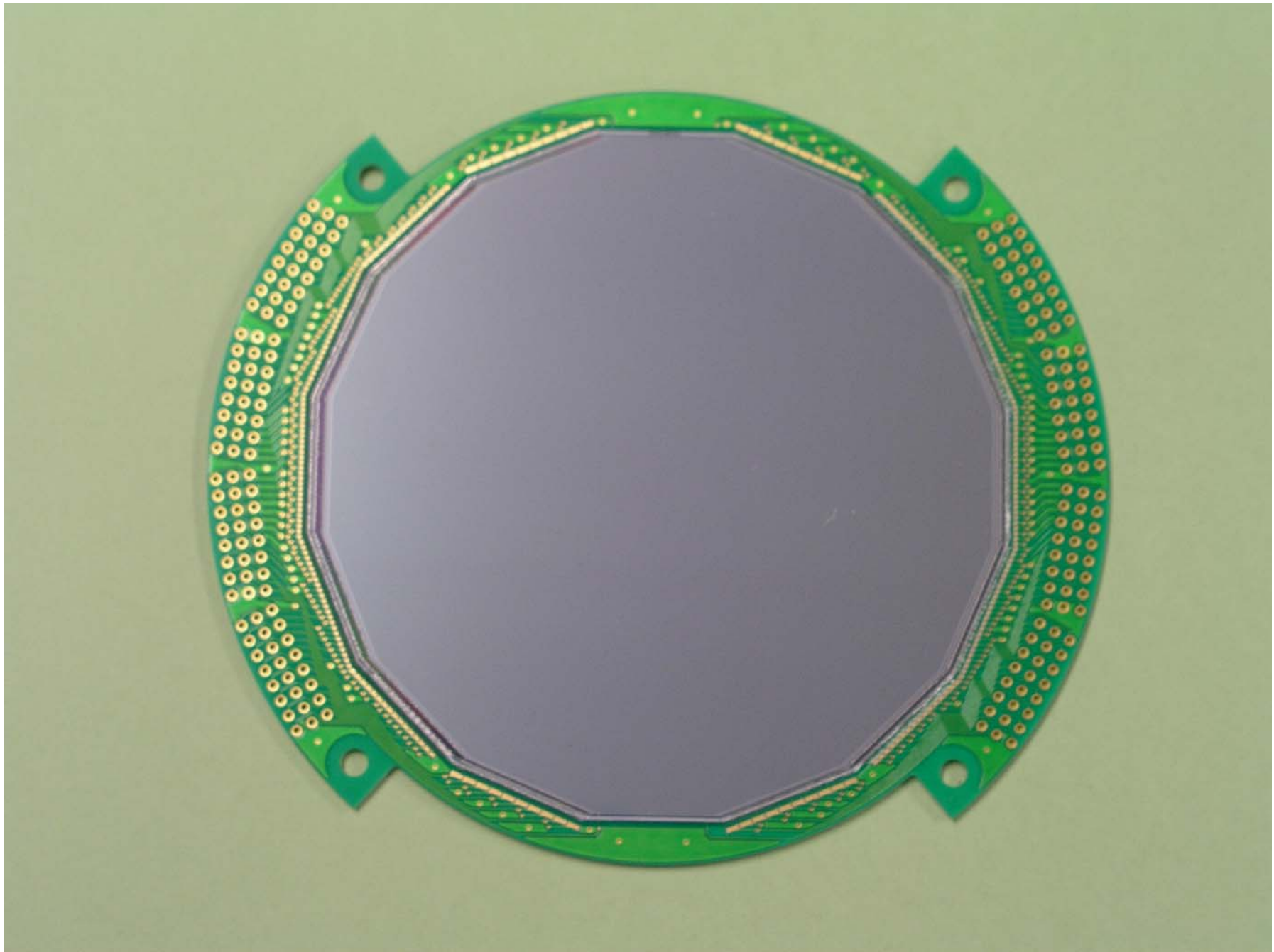


K<sup>+</sup>入射粒子の静止点測定

および

ビームバックグラウンド除去のための

**シリコンストリップ測定器**



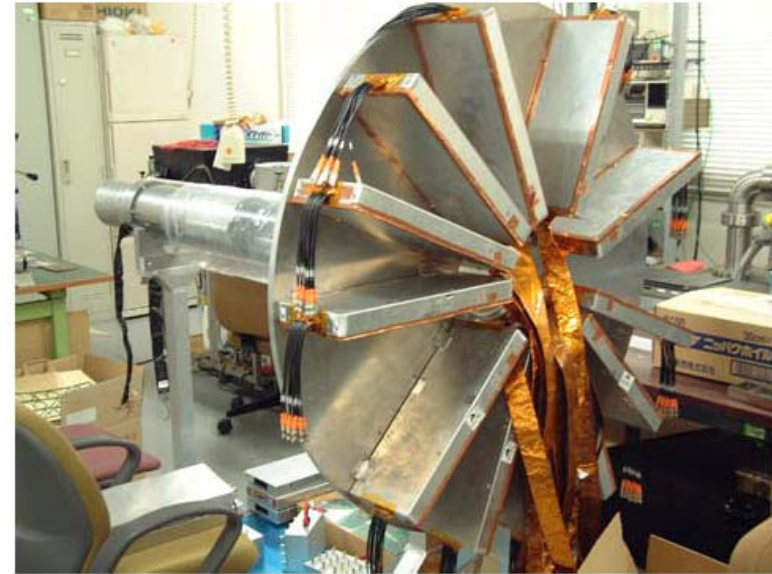
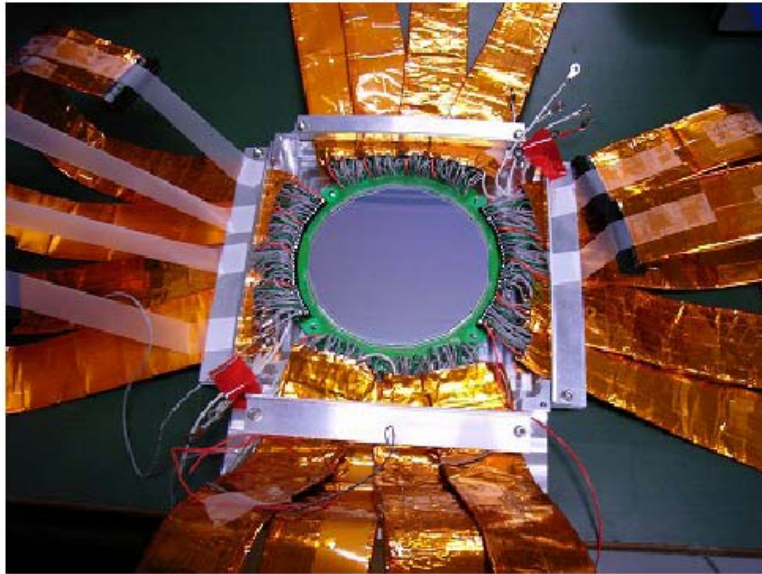


図 65: 左図は粒子識別用 16 角形 SSD にフラットケーブルを装填したところ。右図は  $K^+$  静止崩壊実験装置に挿入される SSD 関連部品の配置を確認するためのモックアップ。図中左端に SSD を取付け，図中右の円盤上にプリアンプを設置，中間のパイプ部分で 2 m ケーブルの導入および設置方法の検討を行った。

Signal: Mip in  $410 \mu\text{m}$  (Si)  $\sim 41,300e$

Noise: フラットケーブル 30cm: ENC $\sim 1,500e$   
フラットケーブル 200cm: ENC $\sim 3,100e$

# 信号波形記憶処理高速回路の開発



図 66: KEK 回路室との共同研究で開発された 500MHz トランジェントデジタルライザーの 6 U-VME モジュール。

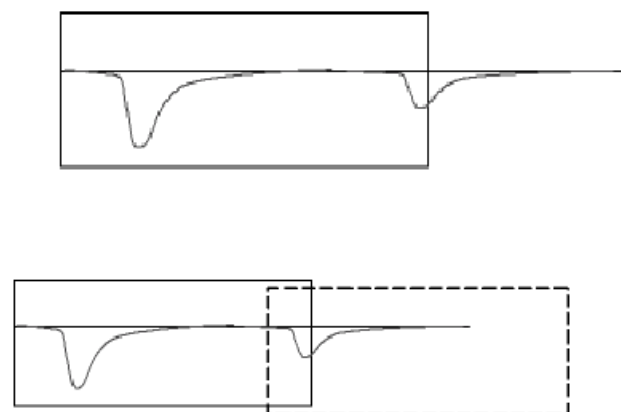


図 67: 波形読み出し中に来た次の信号のパイプライン処理

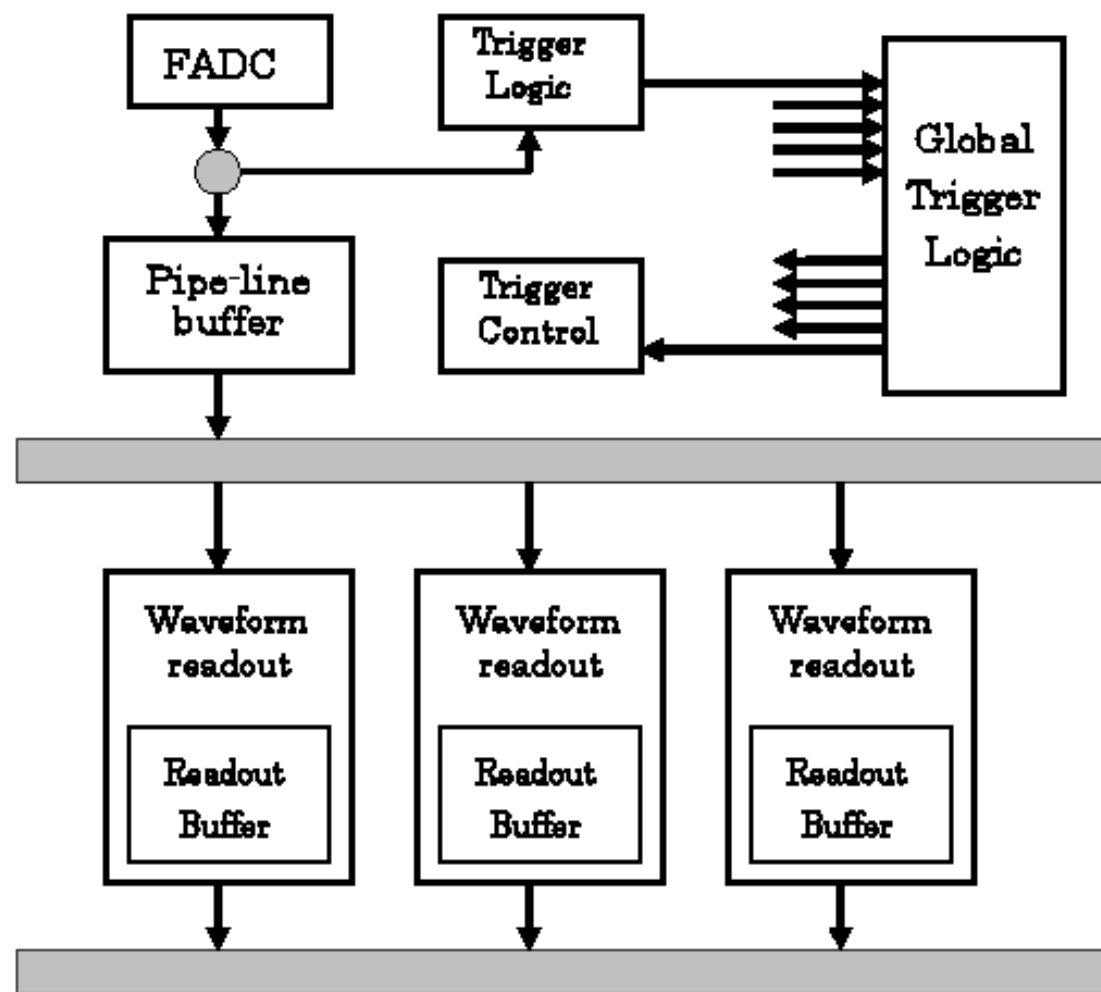
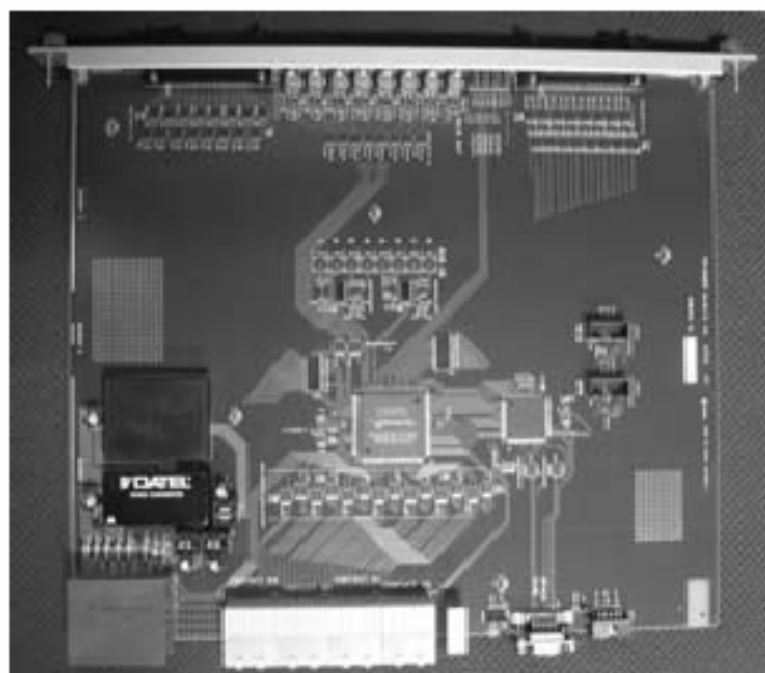


図 68: FADC 読み出し回路のブロック図



☒ 69: Advanced TCA crate



☒ 70: Advanced TCA trigger module

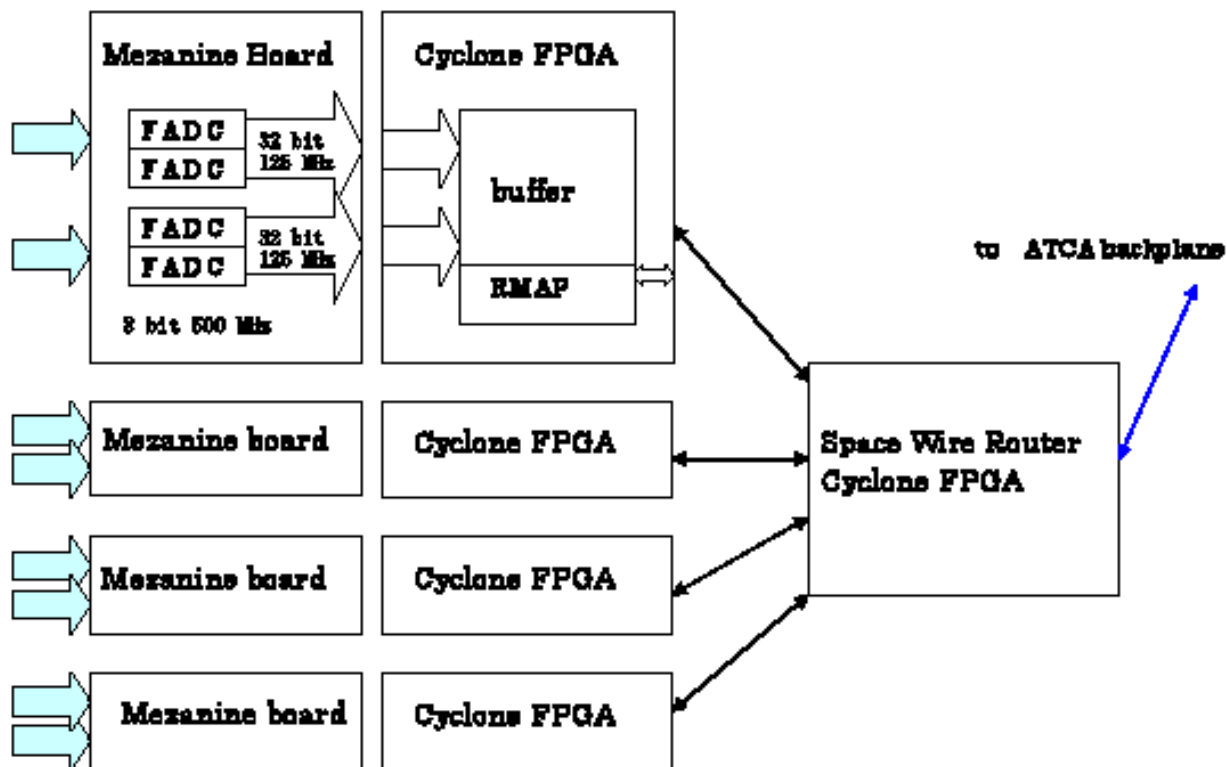


図 71: FADC 読み出し回路のブロック図

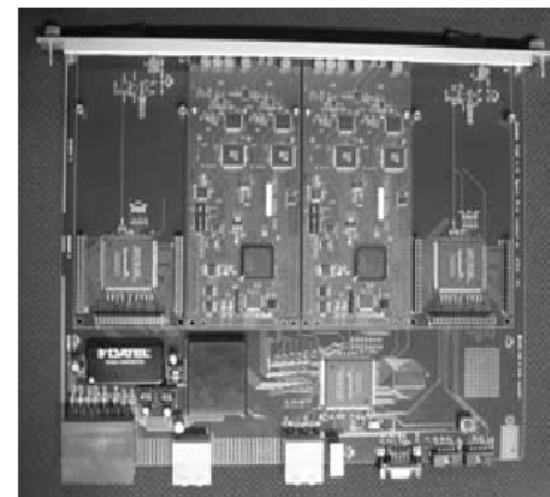


図 72: Advanced TCA 500 MHz FADC module  
FADC の FINESS カードは使用時には 4 枚実装されるが、ここでは 2 枚のみが実装表示されている。

# “K稀崩壊でのFCNC”の研究の過去・現在・未来

GIM... Charm-quark  
Kobayashi-Maskawa  
Ting/Richter... J/ψ

KEK / E10  $\pi^+ \nu \nu$

KEK / KL  $K_L \rightarrow \mu e, \mu \mu$

1990 -

BNL / E787  $\pi^+ \nu \nu$

BNL / E949  $\pi^+ \nu \nu$

CDF/D0...top-quark

2000 -

KEK / E391a  $\pi^0 \nu \nu$

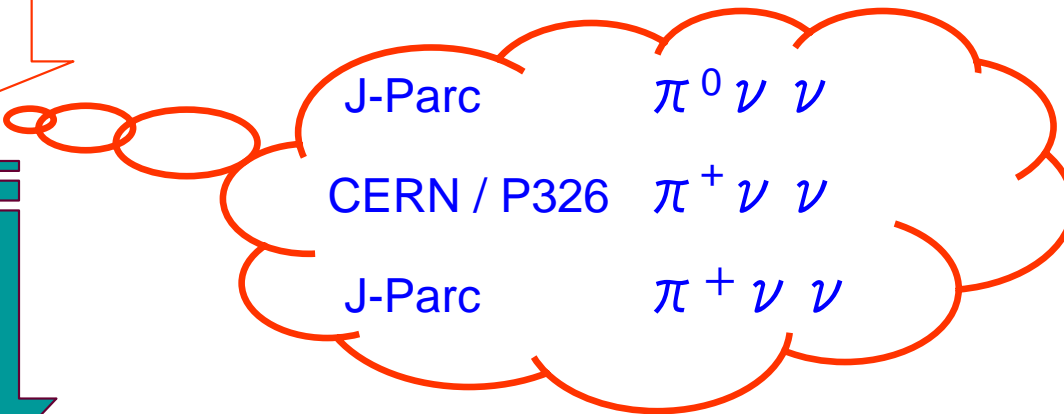
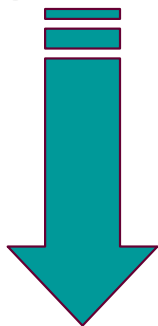
R&D

2010 -

J-Parc  $\pi^0 \nu \nu$

CERN / P326  $\pi^+ \nu \nu$

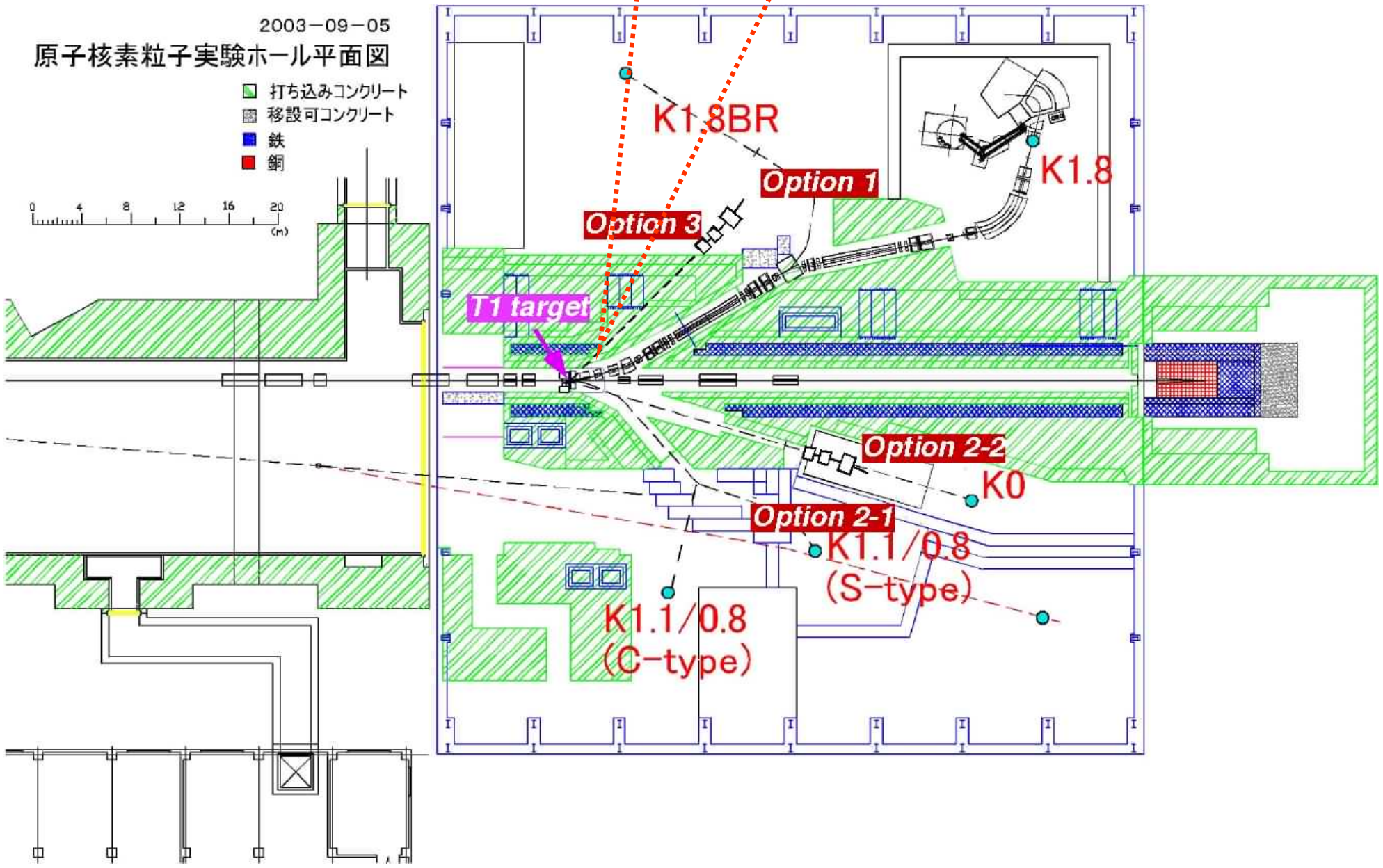
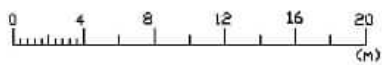
J-Parc  $\pi^+ \nu \nu$



# いざ J-PARC へ!

2003-09-05  
原子核素粒子実験ホール平面図

- 打ち込みコンクリート
- 移設可コンクリート
- 鉄
- 銅



完