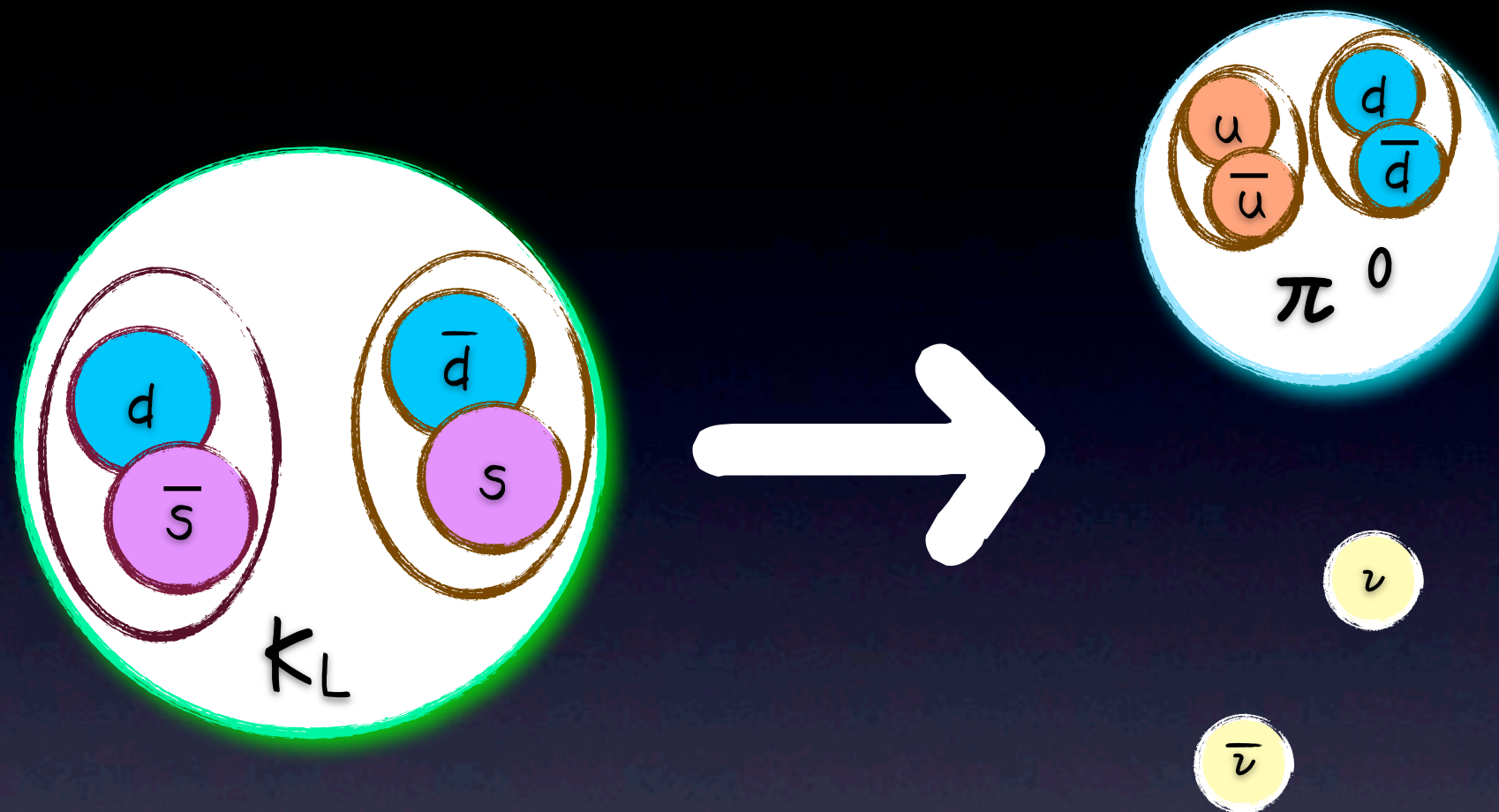


# KOTO グループ 実験 紹介

KOTO 京都グループ 一同



# KOTO Experiment



## $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の探索実験

非常に稀な崩壊

— 予想分岐比  $(2.4 \pm 0.4) \times 10^{-11}$

J.Brod, M.Gorbahn and E.Stamou, Phys. Rev. D 83, 034030(2011)

$4 \times 10^{10}$  個の  $K_L$  が崩壊すると、  
1 個だけこのように崩壊する



# KOTOメンバー

- > 京都グループ 全6名
  - > 助教 南條創
  - > 学生 塩見公志、河崎直樹、増田孝彦  
内藤大地、前田陽祐
- > KOTO全体 約60名
  - > 山形大、KEK、防衛大、大阪大、岡山大、佐賀大
  - > Chicago, Michigan, Arizona (USA)
  - > Korea, Taiwan, Russia



Collaboration meeting @ KEK (2011/2/20)



# contents

> Introduction

> Kaonの物理

>  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  とは

> KOTO実験

> 検出器や実験方法

> 2010年度まで

> 2011年度から



$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu} ???$

$\tau \text{ も } \tau \text{ も } K \rightarrow \tau ?$



K中間子は...近代物理学の歴史においては、  
たぶん水素原子の次くらいに重要な役割を果たしたといえる。  
----西島和彦(1926-2009) 「場の理論」(1987)



## Kaon

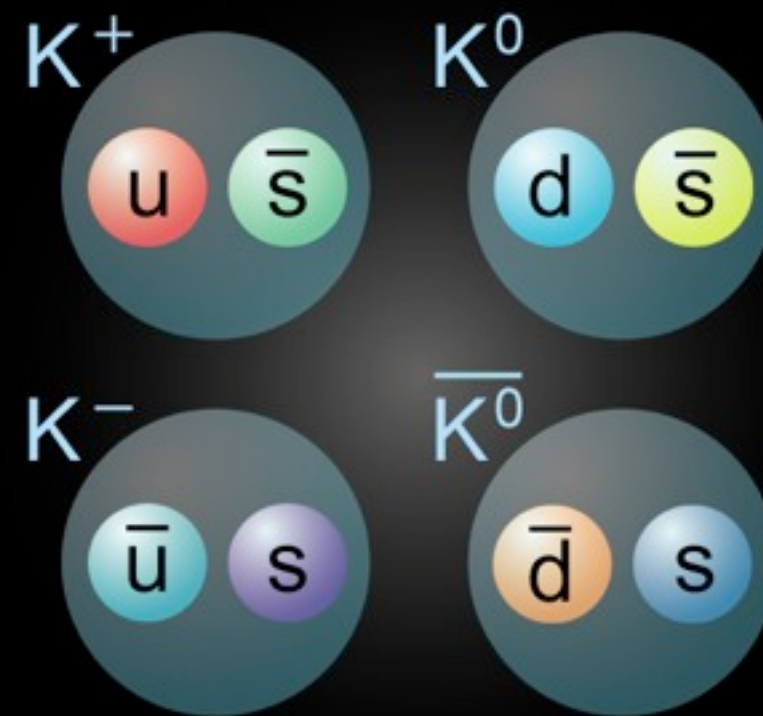
反粒子

反粒子

	$K^0$	$\bar{K}^0$	$K^+$	$K^-$
質量 [MeV/c <sup>2</sup> ]	497.614 $\pm$ 0.024		493.677 $\pm$ 0.016	
寿命 [ns]	51.16 ( $K_L$ :CP=-1) or 0.08953 ( $K_S$ :CP=+1)		12.380 $\pm$ 0.021	
電荷	0	0	+1	-1
スピン	0	0	0	0
クォーク組成	$d\bar{s}$	$\bar{d}s$	$u\bar{s}$	$\bar{u}s$

> Kaonは u, d, s からなる meson

s クォークを含むので、  
基本4種類ある



## Kaon

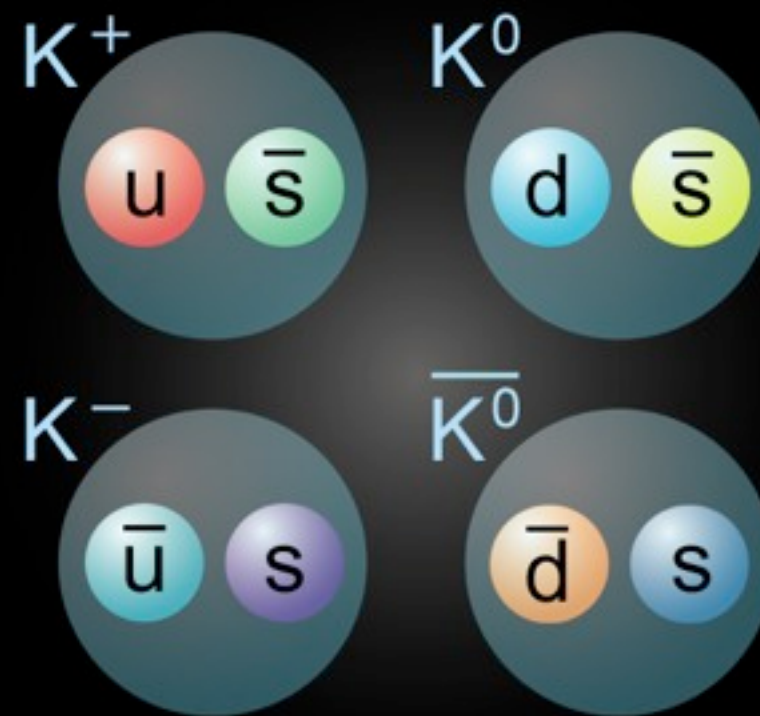
反粒子

反粒子

	$K^0$	$\bar{K}^0$	$K^+$	$K^-$
質量 [MeV/c <sup>2</sup> ]	497.614 $\pm$ 0.024		493.677 $\pm$ 0.016	
寿命 [ns]	51.16 ( $K_L$ :CP=-1) or 0.08953 ( $K_S$ :CP=+1)		12.380 $\pm$ 0.021	
電荷	0	0	+1	-1
スピン	0	0	0	0
クォーク組成	$d\bar{s}$	$\bar{d}s$	$u\bar{s}$	$\bar{u}s$

> Kaonは u, d, s からなる meson

s クォークを含むので、  
基本4種類ある





# Kaon 今昔

西暦	
1947	<b>K中間子の発見!!</b>
1953	中野-西島-ゲルマンの法則。 ストレンジネスの概念を導入。
1956	<b>Parity violationの提唱、発見!!</b>
1956	Landeによる $K_L$ の発見
1960	F.MullerによるRegeneration( $K_L \rightarrow K_S$ )の発見
1964	<b>CP violationの発見!!</b>
1973	<b>CP violationを説明!!</b>
1980年代以降	精密測定の世界へ
1993	Direct CP violationの発見 $Re(\epsilon' / \epsilon) = (23.0 \pm 6.5) \times 10^{-4}$ (CERN NA31)
1999	Direct CP violationの確認 $Re(\epsilon' / \epsilon) = (28.0 \pm 4.1) \times 10^{-4}$ (KTeV)
20xx	標準理論を超える物理へ

標準理論の確立

電弱統一、QCDが  
実験的に確実になり  
1978年に標準理論が  
確立した  
(ICHEP東京会議)

標準理論を超えた  
物理の探索

標準理論の  
精密な検証

# Kaon 今昔

G.D.Rochester and C.C.Butler, Nature 160, 855(1947)

No. 4077 December 20, 1947 NATURE

## EVIDENCE FOR THE EXISTENCE OF NEW UNSTABLE ELEMENTARY PARTICLES

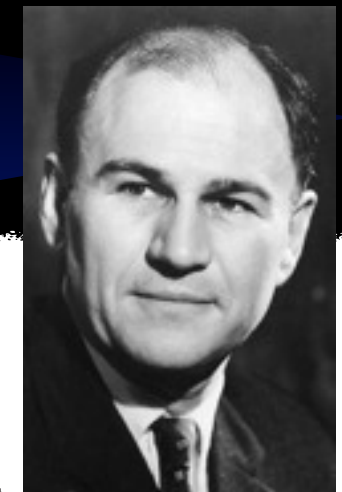
By DR. G. D. ROCHESTER  
AND  
DR. C. C. BUTLER

Physical Laboratories, University, Manchester

AMONG some fifty counter-controlled cloud-chamber photographs of penetrating showers which we have obtained during the past year as part of an investigation of the nature of penetrating particles occurring in cosmic ray showers under lead, there are two photographs containing forked tracks of a very striking character. These photographs have been selected from five thousand photographs



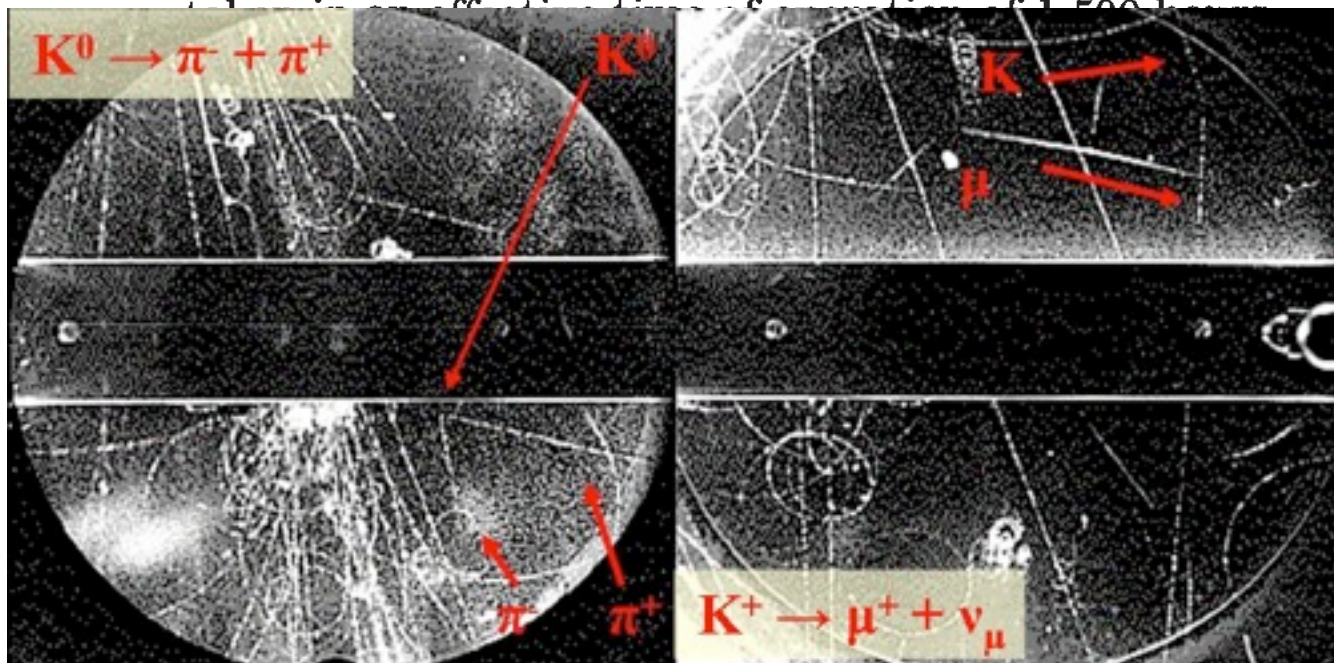
G. Rochester  
(1908-2001)



C. Butler  
(1922-1999)

Photograph	H (gauss)					
1	3500	66.6	a	$3.4 \times 10^8$	$1.0 \times 10^8$	+
			b	$3.5 \times 10^8$	$1.5 \times 10^8$	-
2	7200	161.1	a	$6.0 \times 10^8$	$3.0 \times 10^8$	+
			b	$7.7 \times 10^8$	$1.0 \times 10^8$	+

case is there any sign of a track due to a third ionizing particle. Further, very few events at all similar to these forks have been observed in the 3-cm. lead plate, whereas if the forks were due to any type of collision process one would have expected several hundred times as many as in the gas. This argument indicates, therefore, that the tracks cannot be due to a collision process but must be due to some type of spontaneous process for which the probability depends on the distance travelled and not on the amount of matter traversed.



The argu... were... collis... woul... recor... for... diffic... thro... 2.4°... even... pair... of th... obser...

霧箱で宇宙線を測定中に発見

当時はいし粒子と呼ばれた  
(飛跡がし字だから)

これが初めての  
ストレンジ粒子!



# Kaon 今昔

西暦	
1947	K中間子の発見!!
1953	中野-西島-ゲルマンの法則。 ストレンジネスの概念を導入。
1956	Parity violationの提唱、発見!!
1956	Landeによる $K_L$ の発見
1960	F.MullerによるRegeneration( $K_L \rightarrow K_S$ )の発見
1964	CP violationの発見!!
1973	CP violationを説明!!
1980年代以降	精密測定の世界へ
1993	Direct CP violationの発見 $Re(\epsilon' / \epsilon) = (23.0 \pm 6.5) \times 10^{-4}$ (CERN NA31)
1999	Direct CP violationの確認 $Re(\epsilon' / \epsilon) = (28.0 \pm 4.1) \times 10^{-4}$ (KTeV)
20xx	標準理論を超える物理へ

標準理論の確立

電弱統一、QCDが  
実験的に確実になり  
1978年に標準理論が  
確立した  
(ICHEP東京会議)

標準理論を超えた  
物理の探索

標準理論の  
精密な検証

# Kaon 今昔

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 104, NUMBER 1

OCTOBER 1, 1956

## Question of Parity Conservation in Weak Interactions\*

T. D. LEE, *Columbia University, New York, New York*

AND

C. N. YANG,† *Brookhaven National Laboratory, Upton, New York*

(Received June 22, 1956)

The question of parity conservation in  $\beta$  decays and in hyperon and meson decays is examined. Possible experiments are suggested which might test parity conservation in these interactions.

**R**ECENT experimental data indicate closely identical masses<sup>1</sup> and lifetimes<sup>2</sup> of the  $\theta^+$  ( $\equiv K_{\pi_2}^+$ ) and the  $\tau^+$  ( $\equiv K_{\pi_3}^+$ ) mesons. On the other hand, analyses<sup>3</sup> of the decay products of  $\tau^+$  strongly suggest on the grounds of angular momentum and parity conservation that the  $\tau^+$  and  $\theta^+$  are not the same particle. This poses a rather puzzling situation that has been extensively discussed.<sup>4</sup>

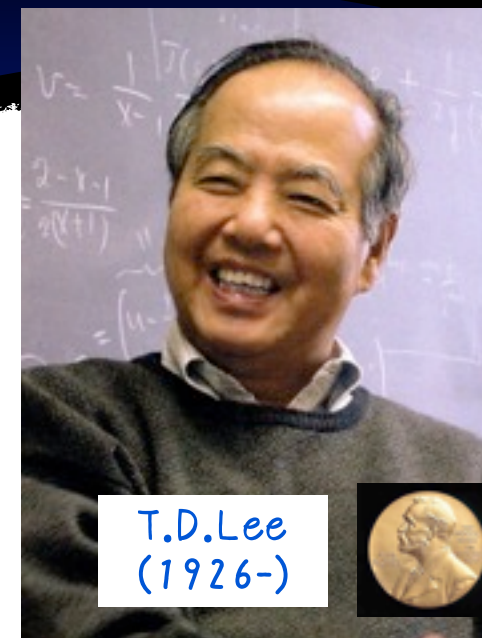
One way out of the difficulty is to assume that parity is not strictly conserved, so that  $\theta^+$  and  $\tau^+$  are two different decay modes of the same particle, which necessarily has a single mass value and a single lifetime. We wish to analyze this possibility in the present paper against the background of the existing experimental evidence of parity conservation. It will become clear that existing experiments do indicate parity conservation in strong and electromagnetic interactions to a

### PRESENT EXPERIMENTAL LIMIT ON PARITY NONCONSERVATION

If parity is not strictly conserved, all atomic and nuclear states become mixtures consisting mainly of the state they are usually assigned, together with small percentages of states possessing the opposite parity. The fractional weight of the latter will be called  $\mathfrak{F}^2$ . It is a quantity that characterizes the degree of violation of parity conservation.

The existence of parity selection rules which work well in atomic and nuclear physics is a clear indication that the degree of mixing,  $\mathfrak{F}^2$ , cannot be large. From such considerations one can impose the limit  $\mathfrak{F}^2 \lesssim (r/\lambda)^2$ , which for atomic spectroscopy is, in most cases,  $\sim 10^{-6}$ . In general a less accurate limit obtains for nuclear spectroscopy.

Parity nonconservation implies the existence of inter-

T.D. Lee  
(1926-)C.N. Yang  
(1922-)C.S. Wu  
(1912-1997)



# Kaon 今昔

Kaonの崩壊パターンが、Parity violationの存在を示していた

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 104, NUMBER 1

OCTOBER 1, 1956

## Question of Parity Conservation in Weak Interactions\*

T. D. LEE, *Columbia University, New York, New York*

AND

C. N. YANG,† *Brookhaven National Laboratory, Upton, New York*

(Received June 22, 1956)

The question of parity conservation in  $\beta$  decays and in hyperon and meson decays is examined. Possible experiments are suggested which might test parity conservation in these interactions.

RECENT experimental data indicate closely identical masses<sup>1</sup> and lifetimes<sup>2</sup> of the  $\theta^+$  ( $\equiv K_{\pi_2^+}$ ) and the  $\tau^+$  ( $\equiv K_{\pi_3^+}$ ) mesons. On the other hand, analyses<sup>3</sup> of the decay products of  $\tau^+$  strongly suggest on the grounds of angular momentum and parity conservation that the  $\tau^+$  and  $\theta^+$  are not the same particle. This poses a rather puzzling situation that has been extensively discussed.<sup>4</sup>

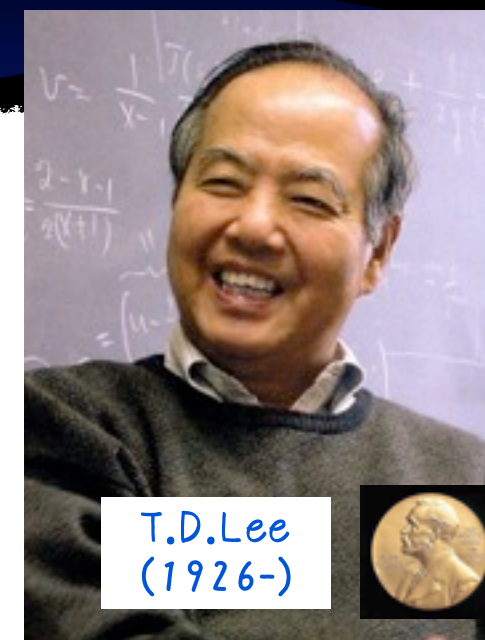
One way out of the difficulty is to assume that parity is not strictly conserved, so that  $\theta^+$  and  $\tau^+$  are two different decay modes of the same particle, which necessarily has a single mass value and a single lifetime. We wish to analyze this possibility in the present paper against the background of the existing experimental evidence of parity conservation. It will become clear that existing experiments do indicate parity conservation in strong and electromagnetic interactions to a

### PRESENT EXPERIMENTAL LIMIT ON PARITY NONCONSERVATION

If parity is not strictly conserved, all atomic and nuclear states become mixtures consisting mainly of the state they are usually assigned, together with small percentages of states possessing the opposite parity. The fractional weight of the latter will be called  $\mathfrak{F}^2$ . It is a quantity that characterizes the degree of violation of parity conservation.

The existence of parity selection rules which work well in atomic and nuclear physics is a clear indication that the degree of mixing,  $\mathfrak{F}^2$ , cannot be large. From such considerations one can impose the limit  $\mathfrak{F}^2 \lesssim (r/\lambda)^2$ , which for atomic spectroscopy is, in most cases,  $\sim 10^{-6}$ . In general a less accurate limit obtains for nuclear spectroscopy.

Parity nonconservation implies the existence of inter-



T.D. Lee  
(1926-)



C.N. Yang  
(1922-)



C.S. Wu  
(1912-1997)

# Kaon 今昔

西暦	
1947	<b>K中間子の発見!!</b>
1953	中野-西島-ゲルマンの法則。 ストレンジネスの概念を導入。
1956	<b>Parity violationの提唱、発見!!</b>
1956	Landeによる $K_L$ の発見
1960	F.MullerによるRegeneration( $K_L \rightarrow K_S$ )の発見
1964	<b>CP violationの発見!!</b>
1973	<b>CP violationを説明!!</b>
1980年代以降	精密測定の世界へ
1993	Direct CP violationの発見 $Re(\epsilon' / \epsilon) = (23.0 \pm 6.5) \times 10^{-4}$ (CERN NA31)
1999	Direct CP violationの確認 $Re(\epsilon' / \epsilon) = (28.0 \pm 4.1) \times 10^{-4}$ (KTeV)
20xx	標準理論を超える物理へ

標準理論の確立

電弱統一、QCDが  
実験的に確実になり  
1978年に標準理論が  
確立した  
(ICHEP東京会議)

標準理論を超えた  
物理の探索

標準理論の  
精密な検証



# Kaon 今昔

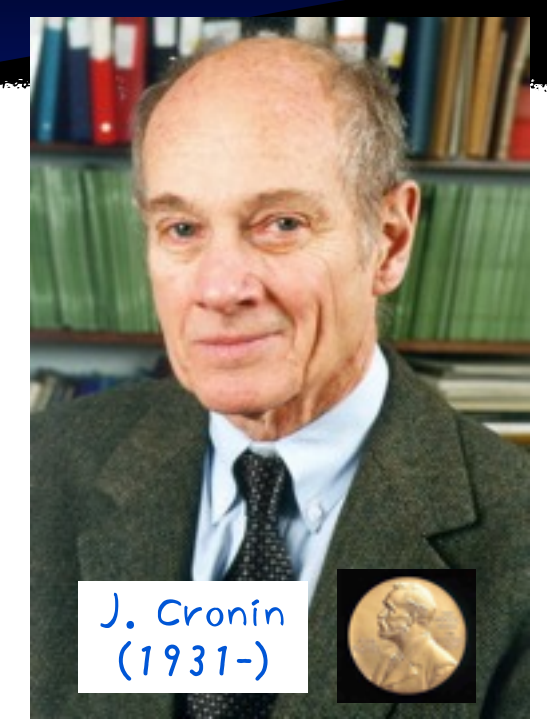
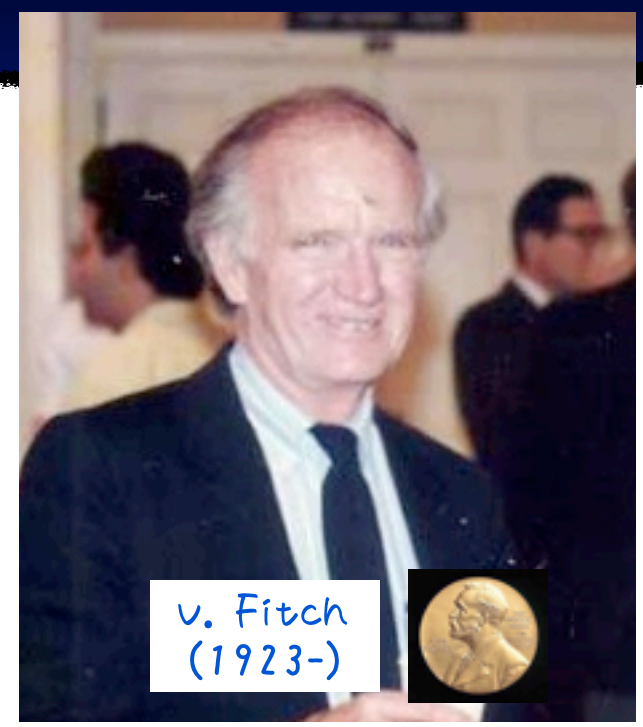
J.H.Christenson, J.W.Cronin, V.L.Fitch and R.Turlay, Phys. Rev. Let. 13, 138(1964)

1964年、FitchとCroninにより、  
 $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$ が発見された。

CP=-1

CP=+1

↓  
CP violationの発見!!



実験セット  
アップ

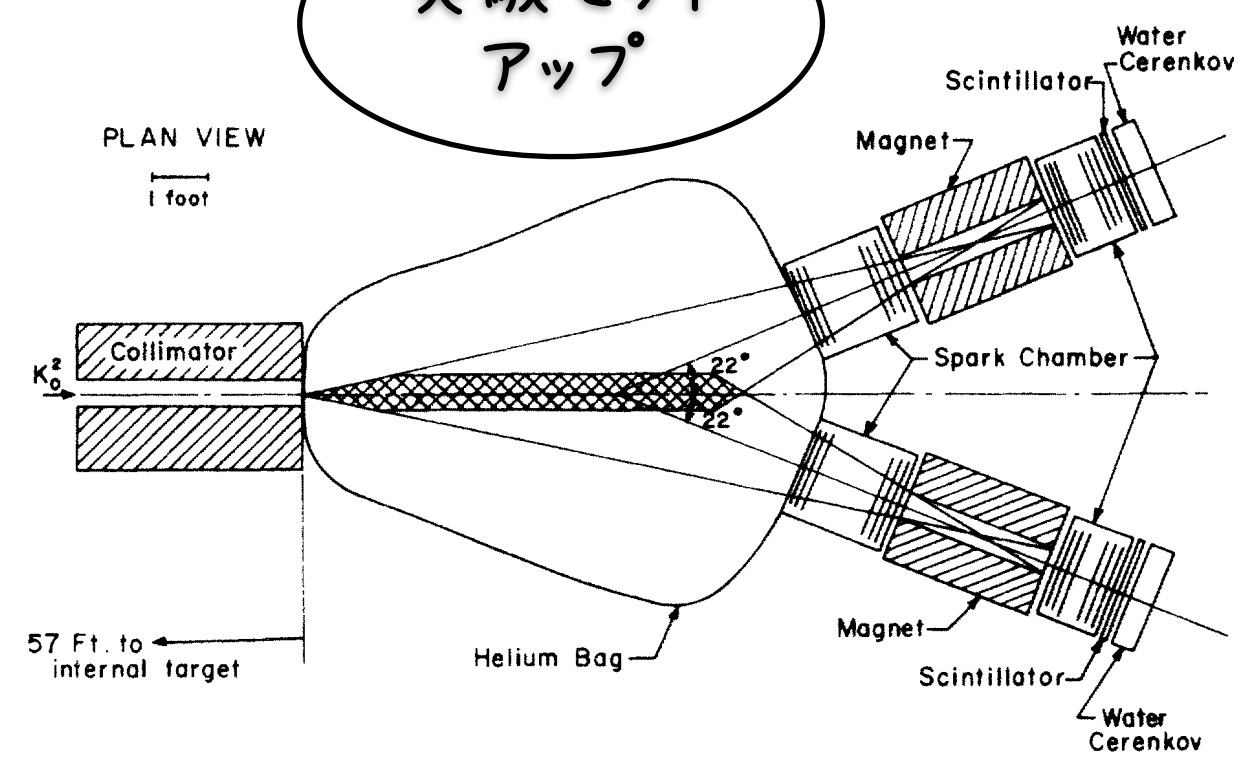
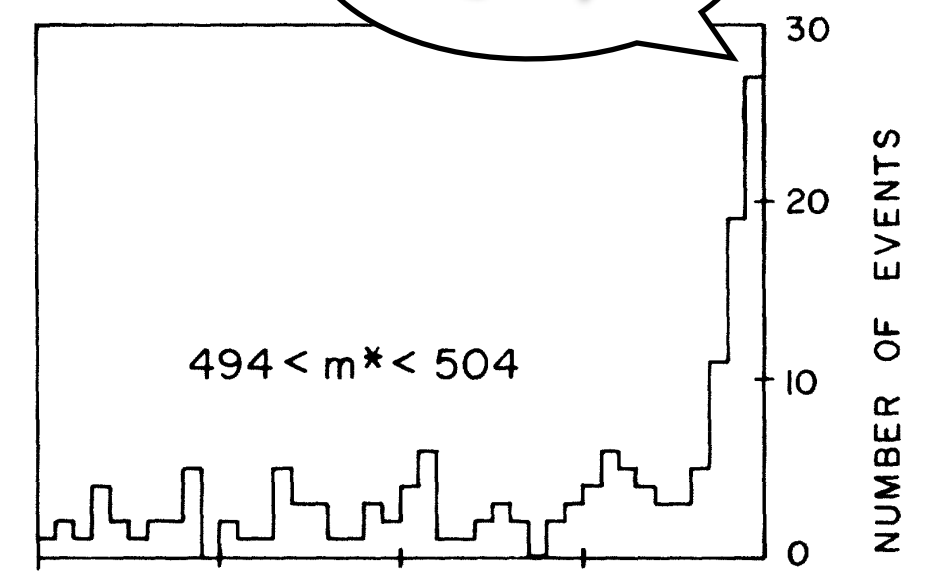


FIG. 1. Plan view of the detector arrangement.

信号の  
ピーク



# Kaon 今昔

西暦	
1947	<b>K中間子の発見!!</b>
1953	中野-西島-ゲルマンの法則。 ストレンジネスの概念を導入。
1956	<b>Parity violationの提唱、発見!!</b>
1956	Landeによる $K_L$ の発見
1960	F.MullerによるRegeneration( $K_L \rightarrow K_S$ )の発見
1964	<b>CP violationの発見!!</b>
1973	<b>CP violationを説明!!</b>
1980年代以降	<b>精密測定の世界へ</b>
1993	<b>Direct CP violationの発見</b> $Re(\epsilon' / \epsilon) = (23.0 \pm 6.5) \times 10^{-4}$ (CERN NA31)
1999	<b>Direct CP violationの確認</b> $Re(\epsilon' / \epsilon) = (28.0 \pm 4.1) \times 10^{-4}$ (KTeV)
20xx	<b>標準理論を超える物理へ</b>

標準理論の確立

電弱統一、QCDが  
実験的に確実になり  
1978年に標準理論が  
確立した  
(ICHEP東京会議)

標準理論を超えた  
物理の探索

標準理論の  
精密な検証



標準理論を超えるには

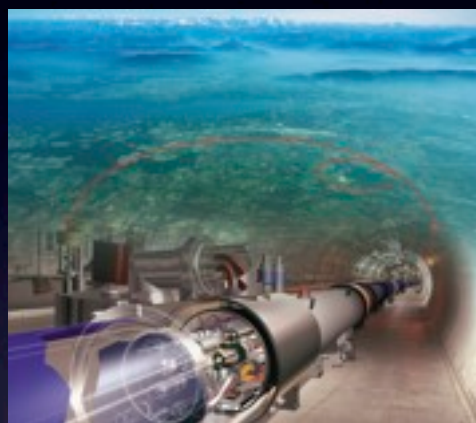




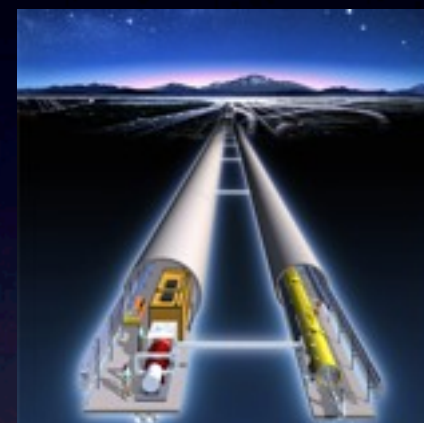
# Beyond the SM

## > エネルギーフロンティア

- > 加速器のエネルギーを上げ、もっと重い粒子を直接生成する



LHC(2008-)



ILC(計画中)

## > 強度フロンティア

- > 粒子を大量に生成して、超高精度・高感度の測定を行い、標準理論の予想からのズレを探す



J-PARC  
(2009-)



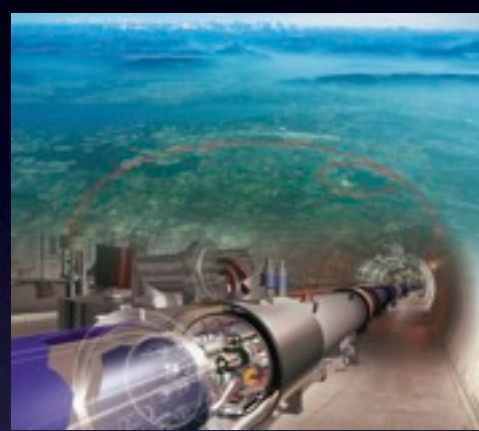
SuperKEKB(計画中)



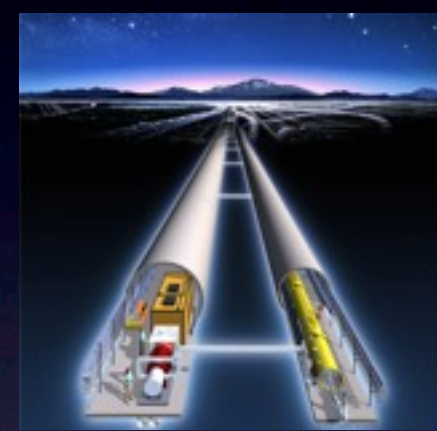
# Beyond the SM

## > エネルギーフロンティア

> 加速器のエネルギーを上げ、もっと重い粒子を直接生成する



LHC(2008-)



ILC(計画中)

## > 強度フロンティア ←Kはもちろんこっち

> 粒子を大量に生成して、超高精度・高感度の測定を行い、標準理論の予想からのズレを探す



J-PARC  
(2009-)



SuperKEKB(計画中)



# Kaon rare decay experiments

L.Littenberg and G.Valencia, Journal of Physics G 37, 742(2010)


## > 標準理論で禁止されている崩壊を探す

Mode	分岐比(上限値)	Experiment	Year
$K^+ \rightarrow \pi^+ e^- \mu^+$	$< 1.2 \times 10^{-11}$	BNL-865	2005
$K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ \mu^-$	$< 5.2 \times 10^{-10}$	BNL-865	2000
$K_L \rightarrow \mu e$	$< 4.7 \times 10^{-12}$	BNL-871	1998
$K_L \rightarrow \pi^0 e \mu$	$< 7.6 \times 10^{-11}$	KTeV	2008
$K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 e \mu$	$< 1.7 \times 10^{-10}$	KTeV	2008
$K_L \rightarrow \mu \mu e e$	$< 4.1 \times 10^{-11}$	KTeV	2003


## > 標準理論のパラメータを精密測定する

Mode	分岐比	Experiment	Year
$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$	$(1.7 \pm 1.1) \times 10^{-10}$	BNL-949	2009
$K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-$	$(6.84 \pm 0.11) \times 10^{-9}$	BNL-871	2000
$K_L \rightarrow e^+ e^-$	$(9^{+6}_{-4}) \times 10^{-12}$	BNL-871	1998

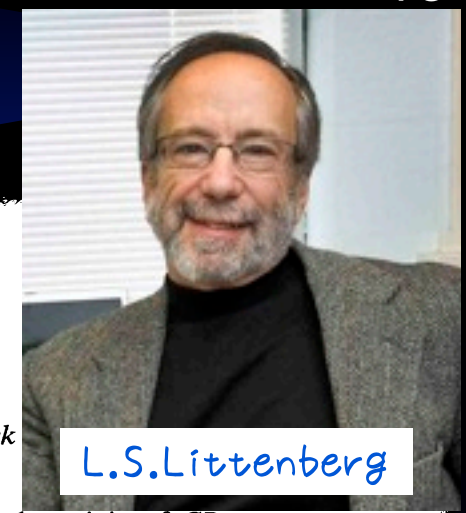
## > CP violationを精密測定する

Mode	分岐比(上限値)	Experiment	Year
$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$	$< 2.6 \times 10^{-8}$	E391a	2010 
$K_L \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$	$< 2.8 \times 10^{-10}$	KTeV	2004
$K_L \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-$	$< 3.8 \times 10^{-10}$	KTeV	2000

## > その他

Mode	分岐比	Experiment	Year
$K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^-$	$(3.0 \pm 0.1) \times 10^{-7}$	NA48	2009
$K_L \rightarrow \pi^0 \gamma \gamma$	$(1.27 \pm 0.03) \times 10^{-6}$	KTeV	2008
$K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 X, X \rightarrow 2\gamma$	$< 2.4 \times 10^{-7}$	E391a	2009
$K_L \rightarrow 3\gamma$	$< 7.4 \times 10^{-8}$	E391a	2011 





L.S.Littenberg

PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 39, NUMBER 11

### CP-violating decay $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

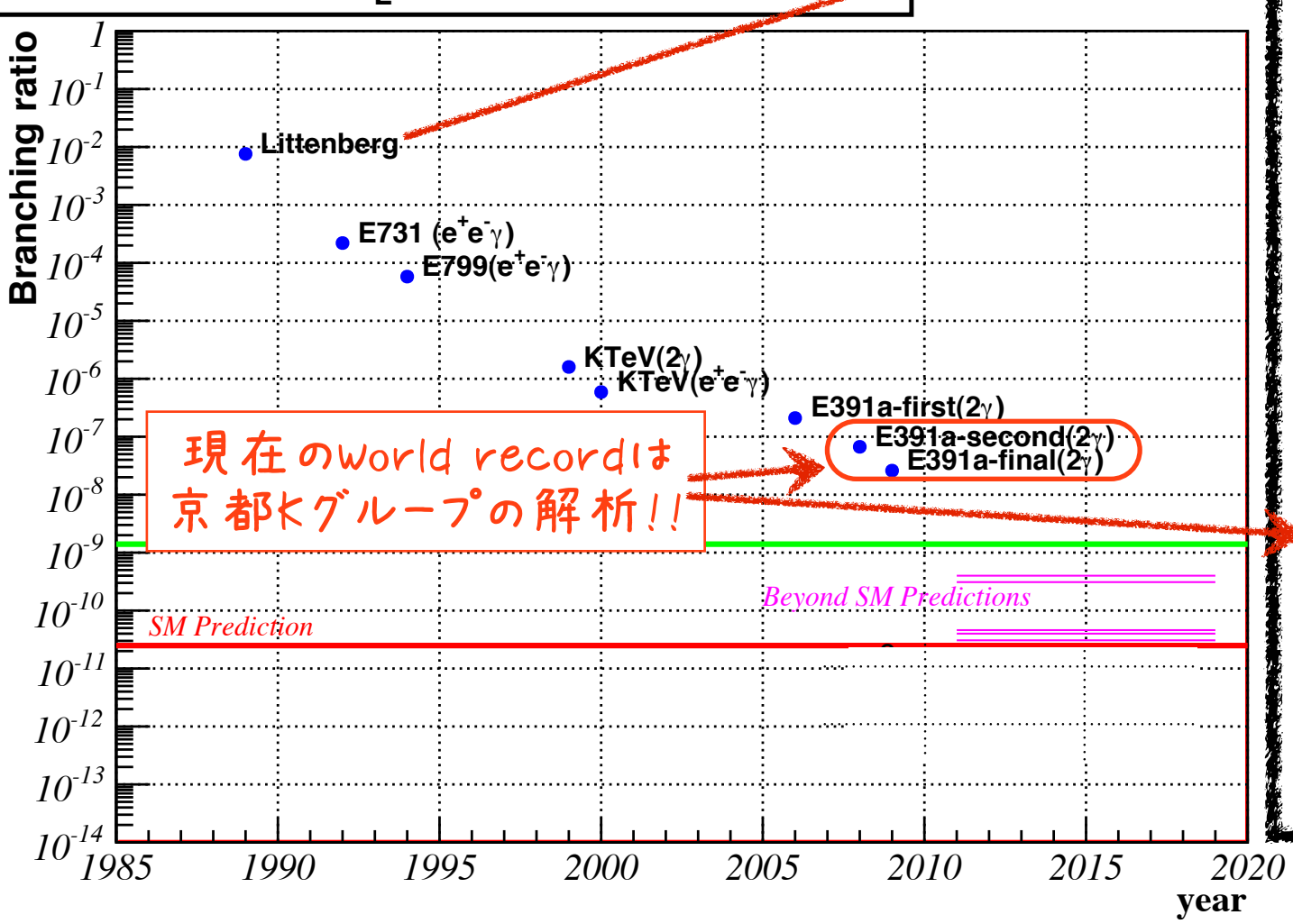
Laurence S. Littenberg

Department of Physics, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York  
(Received 6 January 1989)

The process  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  offers perhaps the clearest window yet proposed into the origin of CP violation. The largest expected contribution to this decay is a direct CP-violating term at  $\approx \text{few} \times 10^{-12}$ . The indirect CP-violating contribution is some 3 orders of magnitude smaller, and CP-conserving contributions are also estimated to be extremely small. Although this decay has never been directly probed, a branching ratio upper limit of  $\sim 1\%$  can be extracted from previous data on  $K_L^0 \rightarrow 2\pi^0$ . This leaves an enormous range in which to search for new physics. If the Kobayashi-Maskawa (KM) model prediction can be reached, a theoretically clean determination of the KM product  $\sin\theta_1 \sin\theta_2 \sin\delta$  can be made.

今まで測られてきた崩壊分岐比の上限値の変遷  
(分岐比はこれより小さいという値)

### The history of $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ Branching ratio



PHYSICAL REVIEW D 81, 072004 (2010)

### Experimental study of the decay $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

J. K. Ahn,<sup>1</sup> Y. Akune,<sup>2</sup> V. Baranov,<sup>3</sup> K. F. Chen,<sup>4</sup> J. Comfort,<sup>5</sup> M. Doroshenko,<sup>6,\*</sup> Y. Fujioka,<sup>2</sup> Y. B. Hsiung,<sup>4</sup> T. Inagaki,<sup>6,7</sup> S. Ishibashi,<sup>2</sup> N. Ishihara,<sup>7</sup> H. Ishii,<sup>8</sup> E. Iwai,<sup>8</sup> T. Iwata,<sup>9</sup> I. Kato,<sup>9</sup> S. Kobayashi,<sup>2</sup> S. Komatsu,<sup>8</sup> T. K. Komatsubara,<sup>7</sup> A. S. Kurilin,<sup>3</sup> E. Kuzmin,<sup>3</sup> A. Lednev,<sup>10,11</sup> H. S. Lee,<sup>1</sup> S. Y. Lee,<sup>1</sup> G. Y. Lim,<sup>7</sup> J. Ma,<sup>11</sup> T. Matsumura,<sup>12</sup> A. Moissenko,<sup>3</sup> H. Morii,<sup>13</sup> T. Morimoto,<sup>7</sup> Y. Nakajima,<sup>13</sup> T. Nakano,<sup>14</sup> H. Nanjo,<sup>13</sup> N. Nishi,<sup>8</sup> J. Nix,<sup>11</sup> T. Nomura,<sup>13,†</sup> M. Nomachi,<sup>8</sup> R. Ogata,<sup>2</sup> H. Okuno,<sup>7</sup> K. Omata,<sup>7</sup> G. N. Perdue,<sup>11,‡</sup> S. Perov,<sup>3</sup> S. Podolsky,<sup>3</sup> S. Porokl N. Sasao,<sup>13</sup> H. Sato,<sup>9</sup> T. Sato,<sup>7</sup> M. Sekimoto,<sup>7</sup> T. Shimogawa,<sup>2</sup> T. Shinkawa,<sup>12</sup> Y. Stepa T. Sumida,<sup>13,‡</sup> S. Suzuki,<sup>2</sup> Y. Tajima,<sup>9</sup> S. Takita,<sup>9</sup> Z. Tsamalaidze,<sup>3</sup> T. Tsukamoto H. Watanabe,<sup>11,†</sup> M. L. Wu,<sup>4</sup> M. Yamaga,<sup>7,8,||</sup> T. Yamanaka,<sup>8</sup> H. Y. Yoshida,<sup>9</sup> Y.

(E391a Collaboration)

- <sup>1</sup>Department of Physics, Pusan National University, Busan 609-735, Republic of Korea
- <sup>2</sup>Department of Physics, Saga University, Saga 840-8502, Japan
- <sup>3</sup>Laboratory of Nuclear Problems, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow Region, Russia
- <sup>4</sup>Department of Physics, National Taiwan University, Taipei 10617, Republic of China
- <sup>5</sup>Department of Physics, Arizona State University, Tempe, Arizona 85287, USA
- <sup>6</sup>Department of Particle and Nuclear Research, The Graduate University for Advanced Studies, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan
- <sup>7</sup>Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki 305-0855, Japan
- <sup>8</sup>Department of Physics, Osaka University, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan
- <sup>9</sup>Department of Physics, Yamagata University, Yamagata 990-8565, Japan
- <sup>10</sup>Institute of High Energy Physics, Protvino, Moscow Region 142230, Russia
- <sup>11</sup>Enrico Fermi Institute, University of Chicago, Chicago, Illinois 60637, USA
- <sup>12</sup>Department of Applied Physics, National Defense Academy, Yokosuka, Kanagawa 239-8626, Japan
- <sup>13</sup>Department of Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan
- <sup>14</sup>Research Center of Nuclear Physics, Osaka University, Ibaragi, Osaka 565-0871, Japan



H.Morii

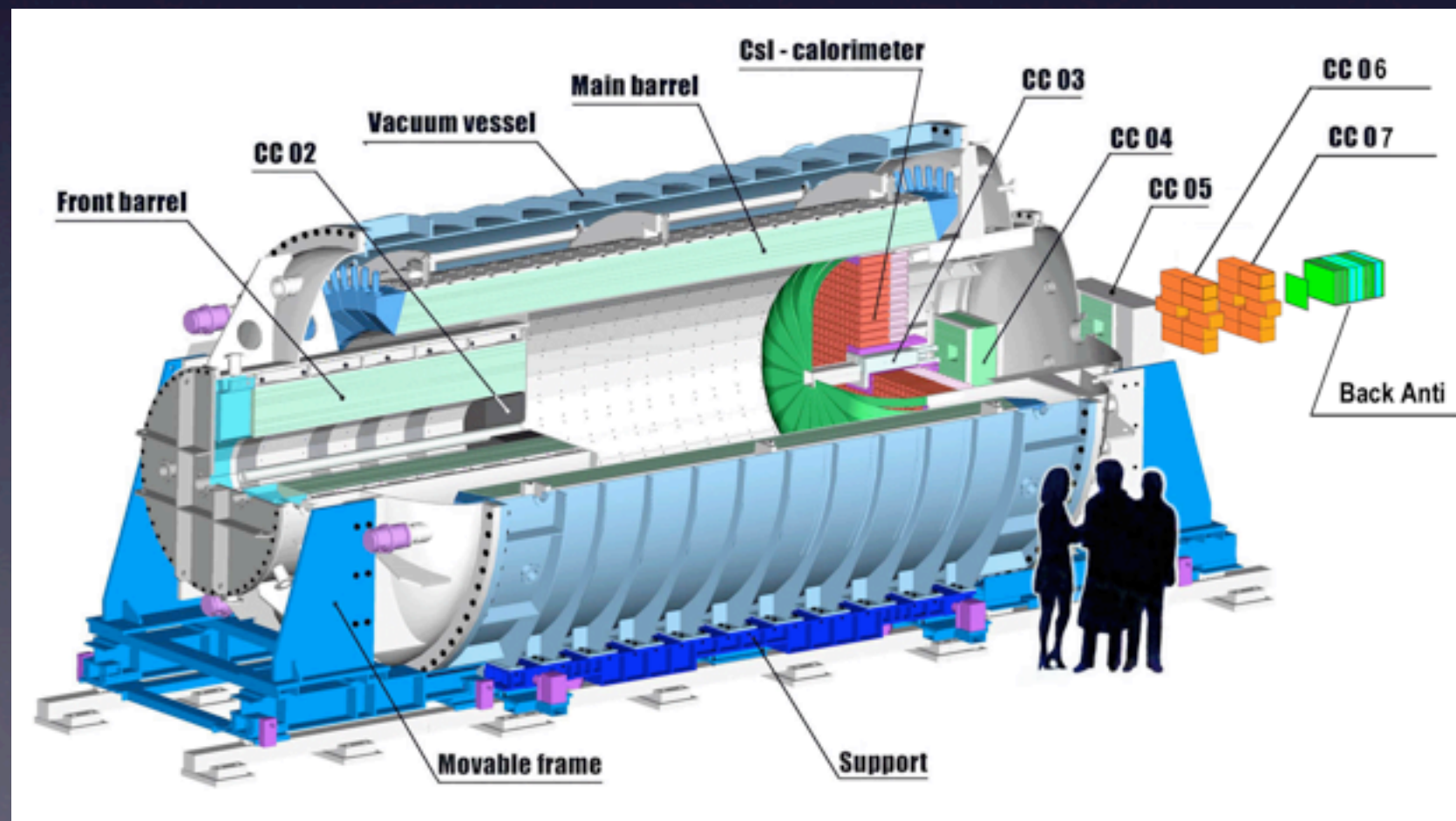
The first dedicated search for the rare neutral-kaon decay  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  has been carried out in the E391a experiment at the KEK 12-GeV proton synchrotron. The final upper limit of  $2.6 \times 10^{-8}$  at the 90% confidence level was set on the branching ratio for the decay.

DOI: 10.1103/PhysRevD.81.072004

PACS numbers: 13.20.Eb, 11.30.Er, 12.15.Hh

# E391a 実験

- > 現在のワールドレコード保持実験
- > KOTO実験のプロトタイプ
  - > KEK 12GeV陽子シンクロトロン
  - > 世界で初めてこの崩壊モードに特化した実験
  - > 2004/2 - 2005/12





$$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$$

- > 初結果から20年たつても、いまだ観測されず。。。
- > 非常に難しい実験
  - > 邪魔なバックグラウンドが多すぎる。  
 $\pi^0 \nu \bar{\nu}$  以外は全部邪魔。

10<sup>11</sup>個のバックグラウンドの中から、  
1個だけの信号を見つけ出す

$$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$$

- > 初結果から20年たつても、いまだ観測されず。。。
  - > 非常に難しい実験
    - > 邪魔なバックグラウンドが多すぎる。  
 $\pi^0 \nu \bar{\nu}$  以外は全部邪魔。

10<sup>11</sup>個のバックグラウンドの中から、  
1個だけの信号を見つけ出す

- > KOTO実験で世界初観測を目指す!

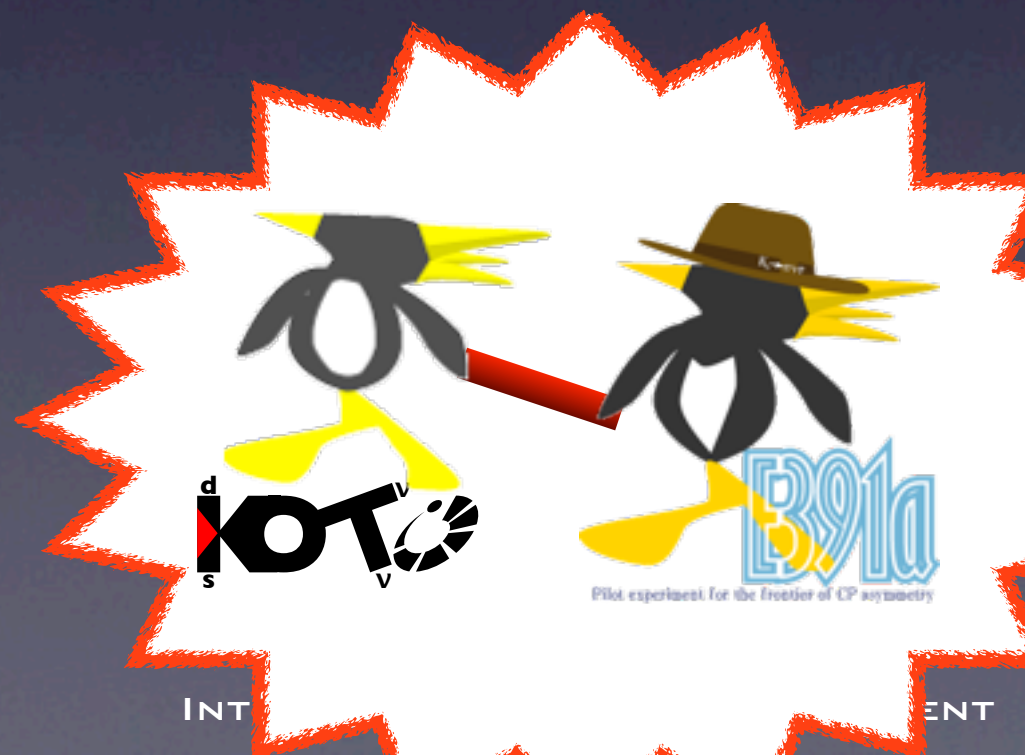


$$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$$

- > 初結果から20年たつても、いまだ観測されず。。。
  - > 非常に難しい実験
    - > 邪魔なバックグラウンドが多すぎる。  
 $\pi^0 \nu \bar{\nu}$  以外は全部邪魔。

$10^{11}$ 個のバックグラウンドの中から、  
1個だけの信号を見つけ出す

- >  $K^0$ T0 実験で 世界初観測 を目指す!
- > E391a 実験で培ったノウハウ
  - > J-PARCの大強度ビームで、  
より大量の $K_L$ を集める
  - > E391aで問題になったB.G.には  
新型検出器で対応



確かに、全て高貴なものは稀であるとともに困難である。

---スピノサ(1632-77) 「エチカ(倫理学)」 結語



ようやく  
KOTO実験の話に入ります





# J-PARC

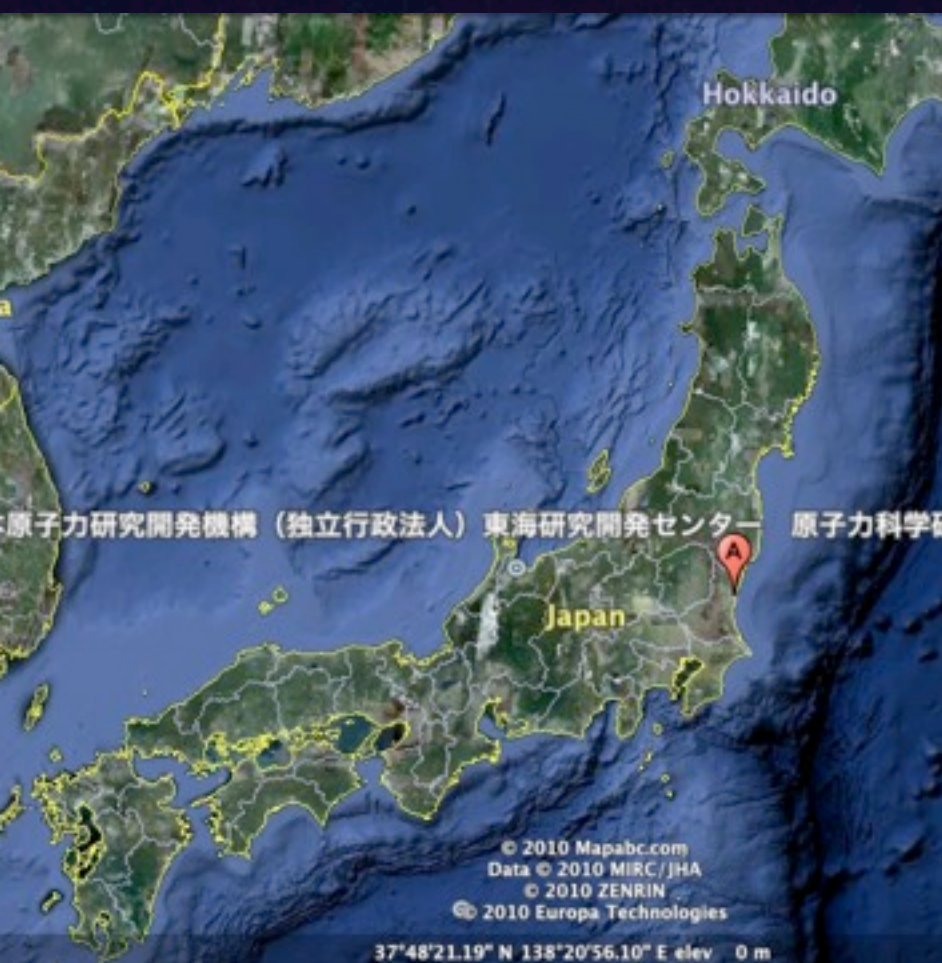
- > Japan Proton Accelerator research complex
- > 5/13に復旧計画が発表される予定





# J-PARC

- > Japan Proton Accelerator research complex
- > 5/13に復旧計画が発表される予定





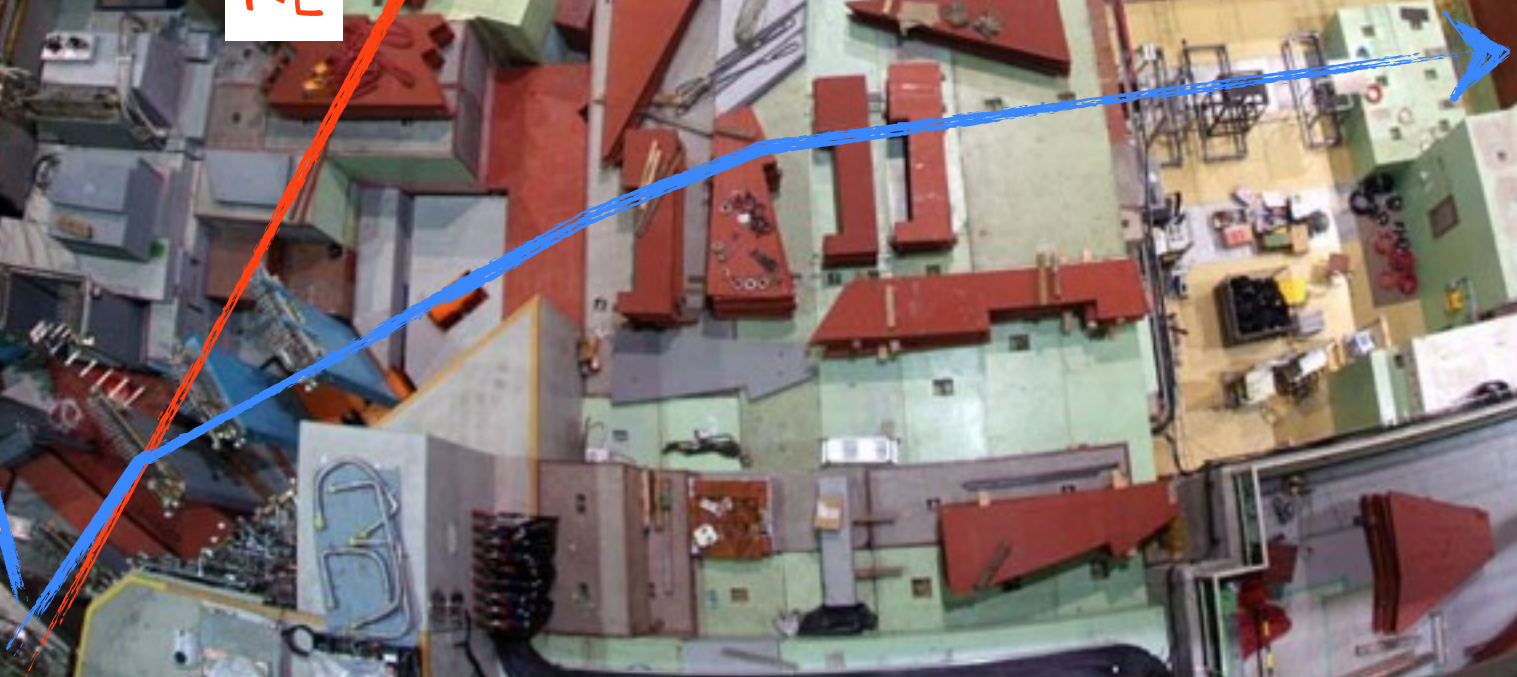
# ハドロンホール

KOTO beam line



KOTO実験エリア

KL





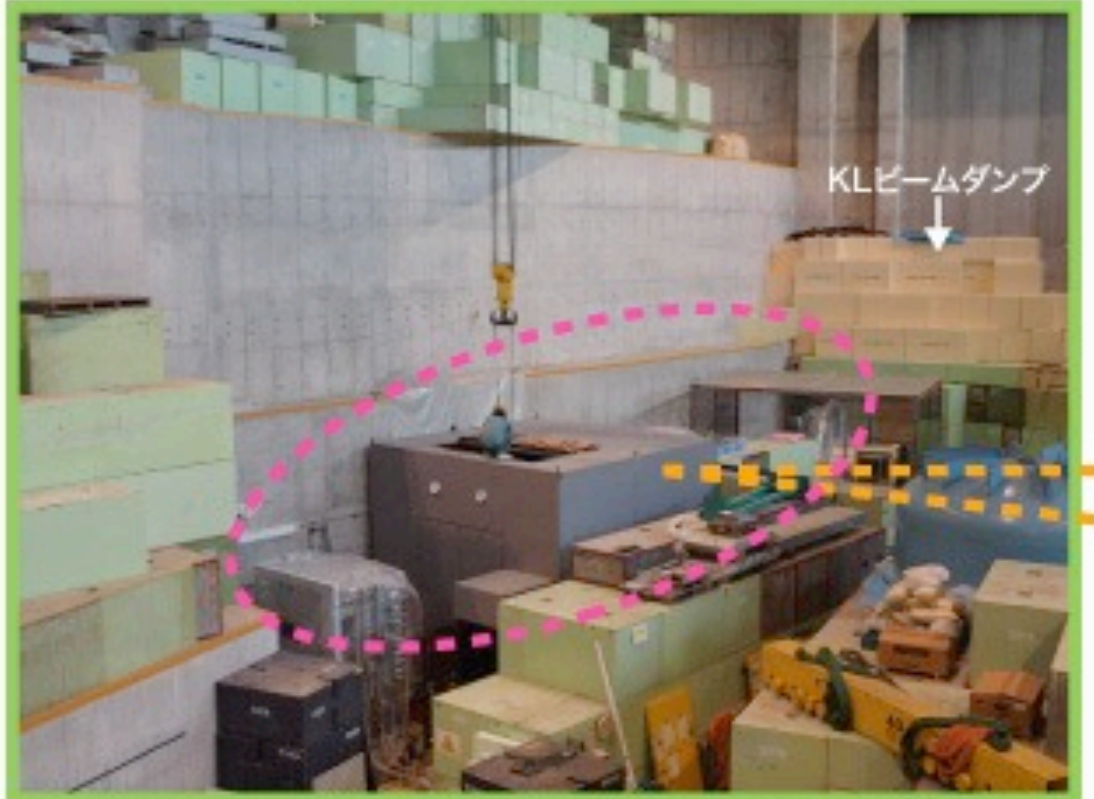
# ハドロンホール

KOTO beam line



KOTO実験エリア

KL

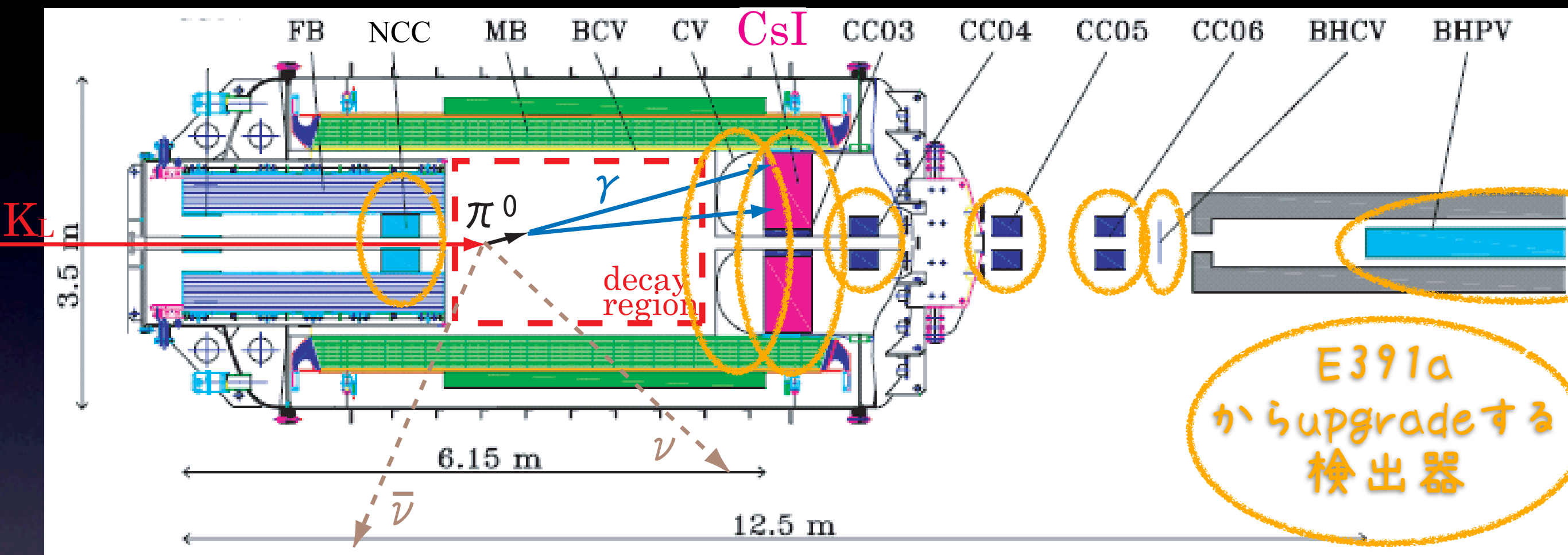


KLビームダンプ

CsI検出器のための「箱」の搬入作業



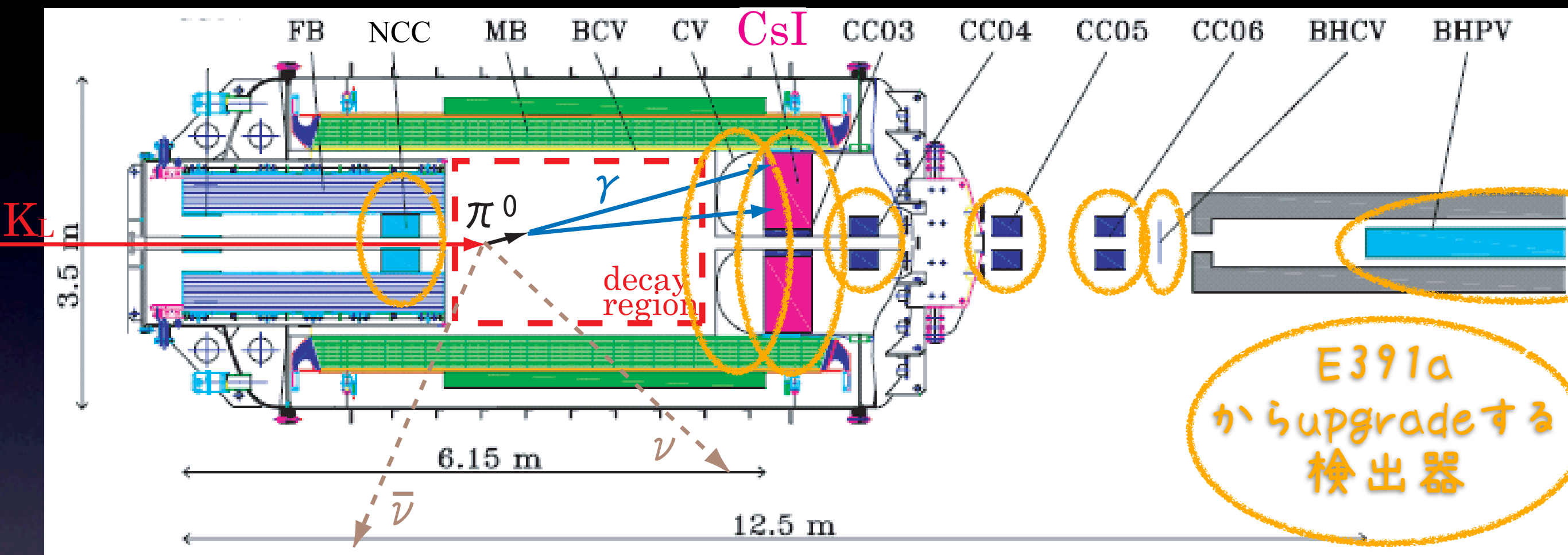
# 検出器



- > ほぼ全ての検出器をE391aからUpgrade
- > 京都が担当しているのは  
NCC, CV, CsI, BHCV, BHPV



# 検出器



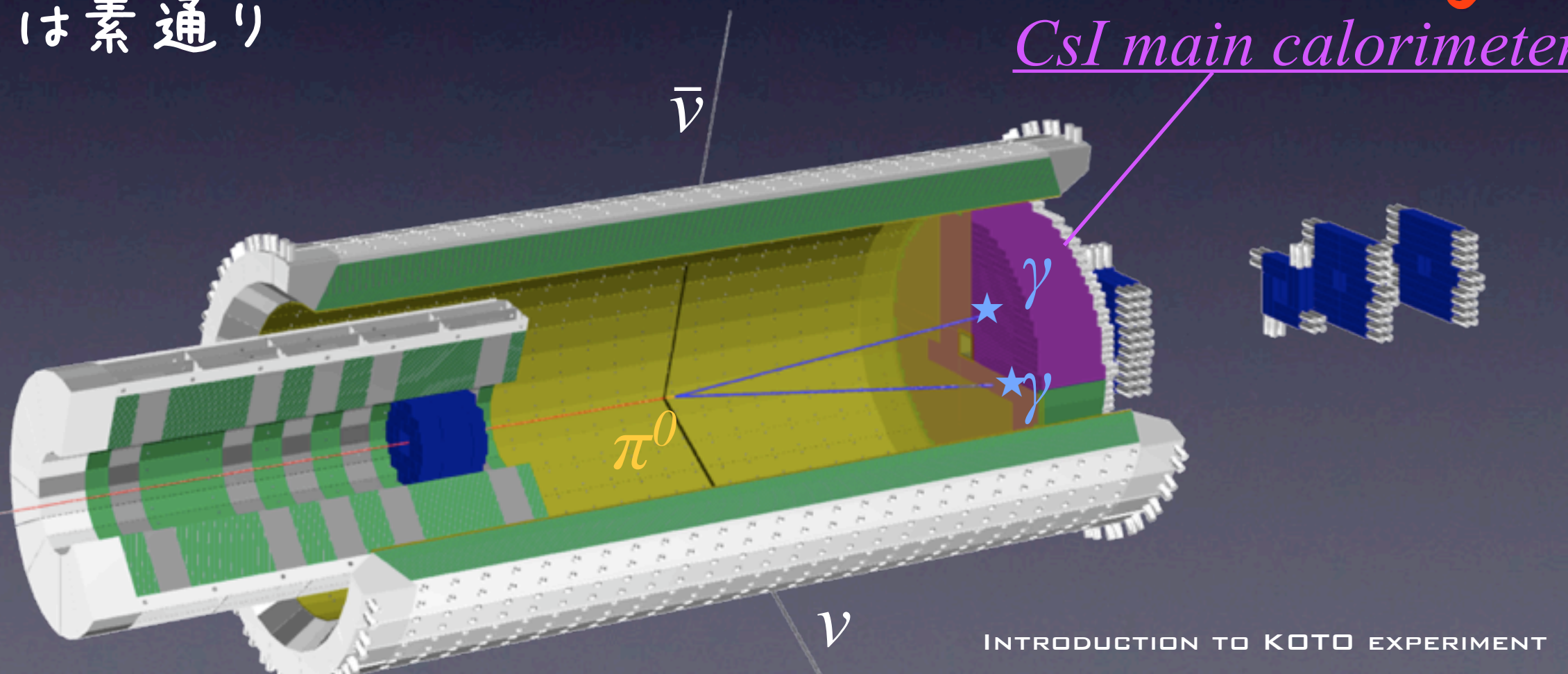
- > ほぼ全ての検出器をE391aからUpgrade
- > 京都が担当しているのは  
NCC, CV, CsI, BHCV, BHPV

今日の目玉

# KOTO実験での $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ イベント

## $\pi^0 + \text{nothing}$

- >  $\pi^0$ は一瞬(数10nm飛ぶ間)で2 $\gamma$ に崩壊する
- > 2 $\gamma$ をCsIメインカロリメータで捉える  $\rightarrow \pi^0$
- > 2 $\gamma$ のエネルギーと位置から、  
 $\pi^0$ の崩壊位置と運動量がわかる
- > 他の検出器は何も捉えていない  $\rightarrow \text{nothing}$
- >  $\nu$ は素通り







KOTO実験のこれまで

—2010年度の歩み—

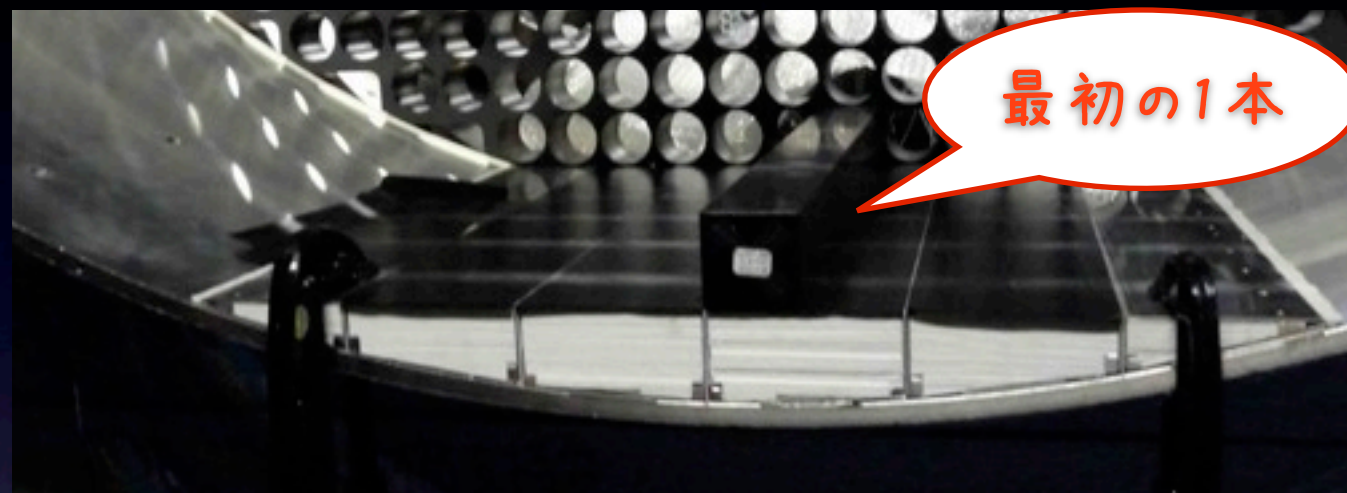




# 2010年度の歩み

> 2010年度はCS/ Calorimeterの年でした。

> 5月、建設開始



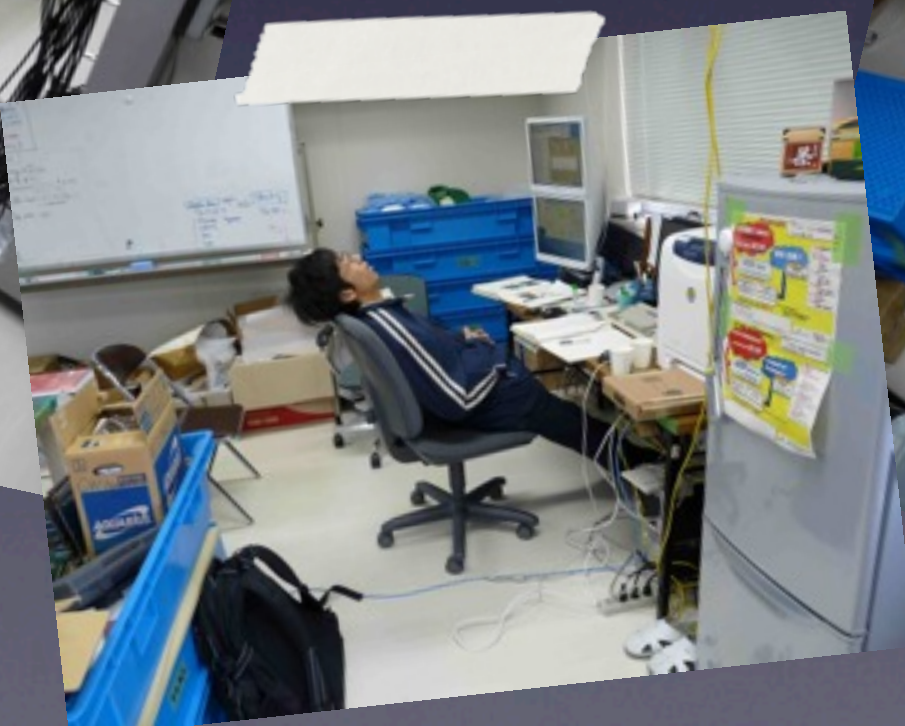
> 10-11月、実際のビームを用い、動作試験・性能評価。この時は1200/2800chを動かした。





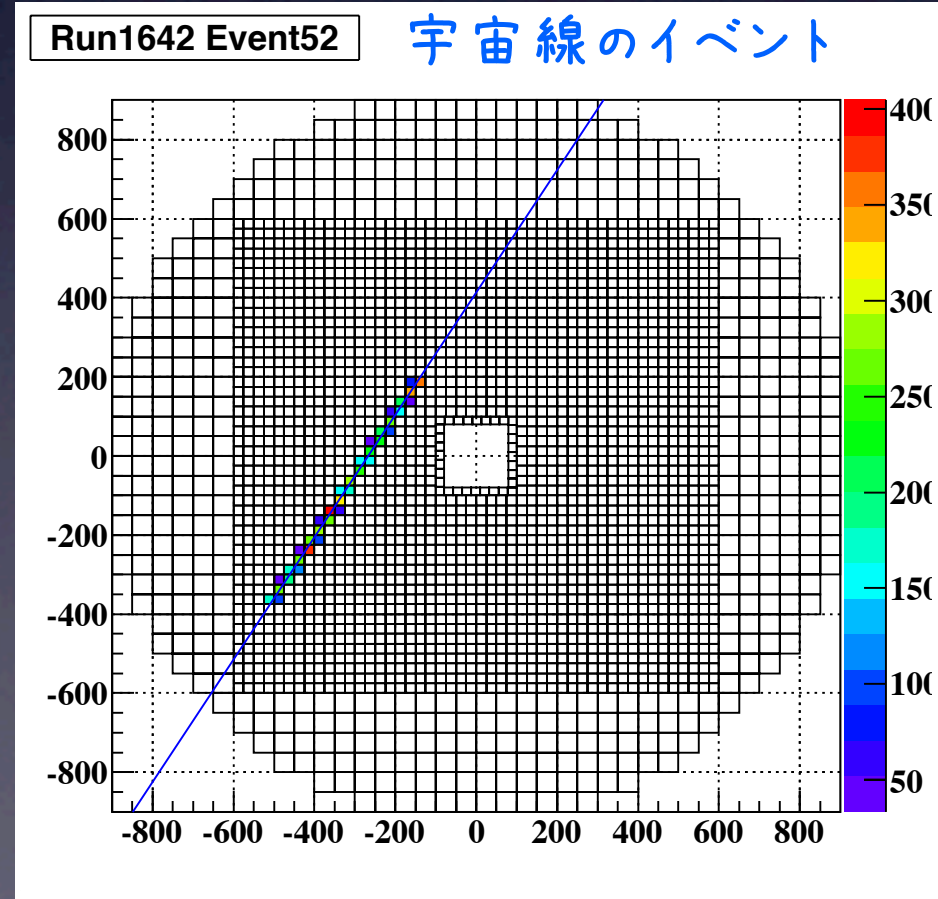
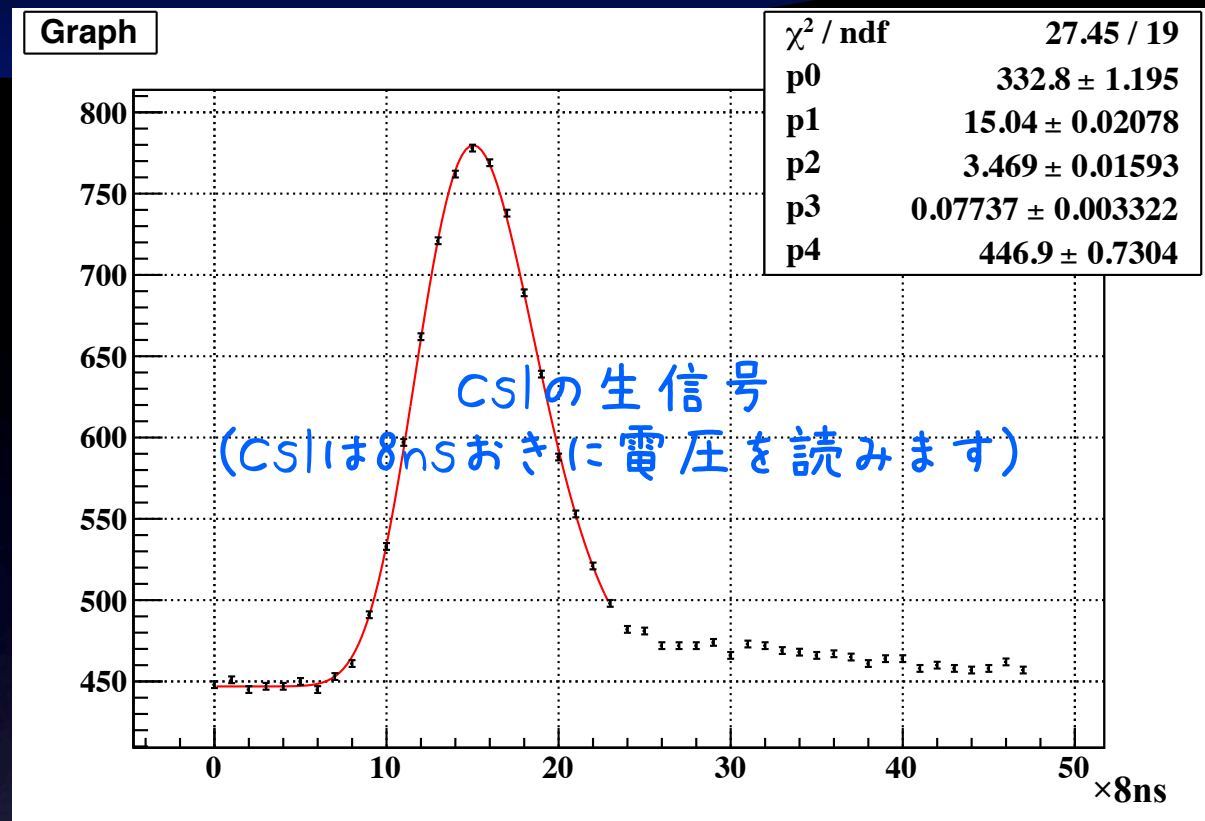
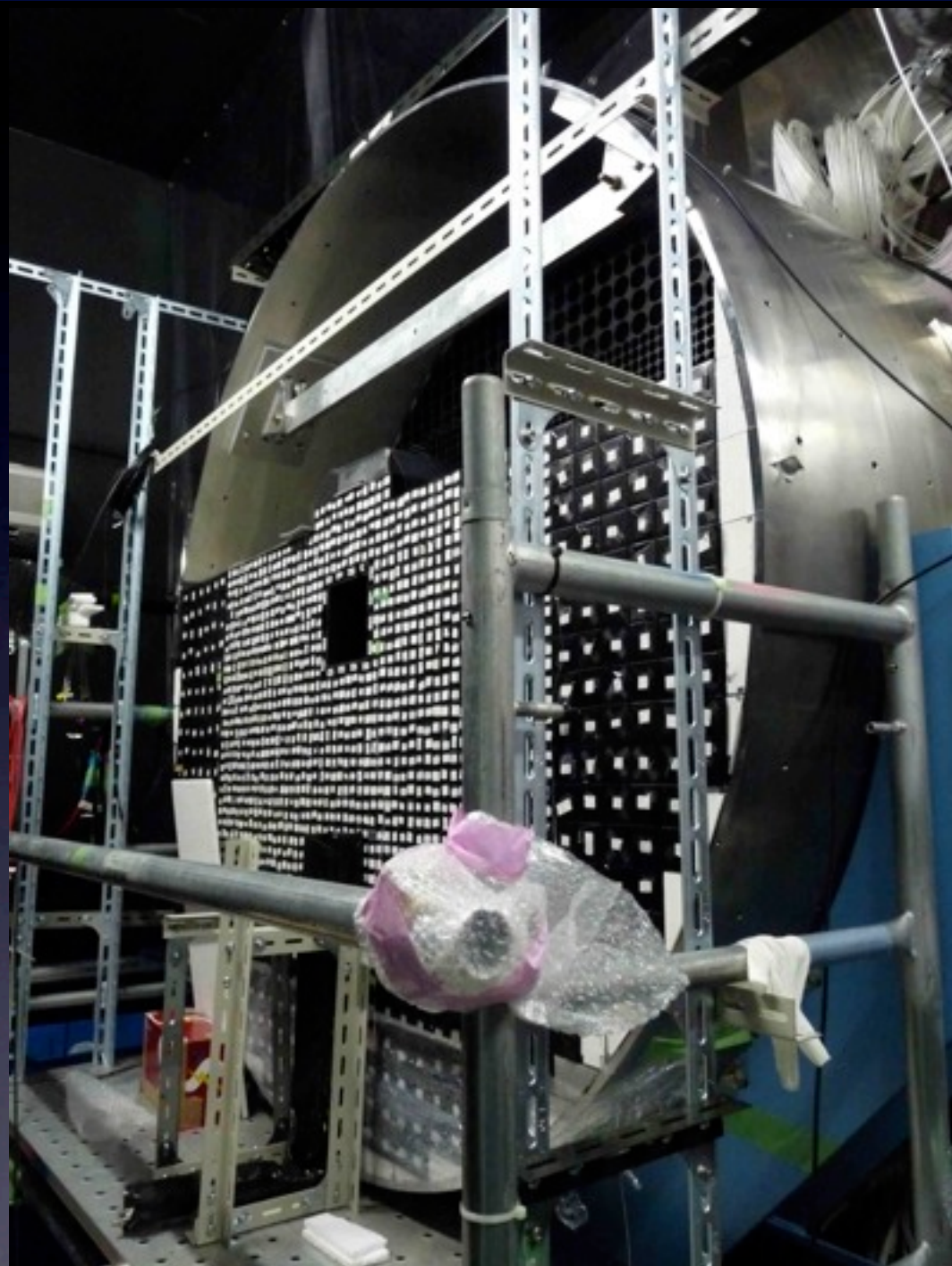
# CSL beam test

> CSL beam testは  
10/12-11/1, 11/7-11/16  
の31日間行いました。





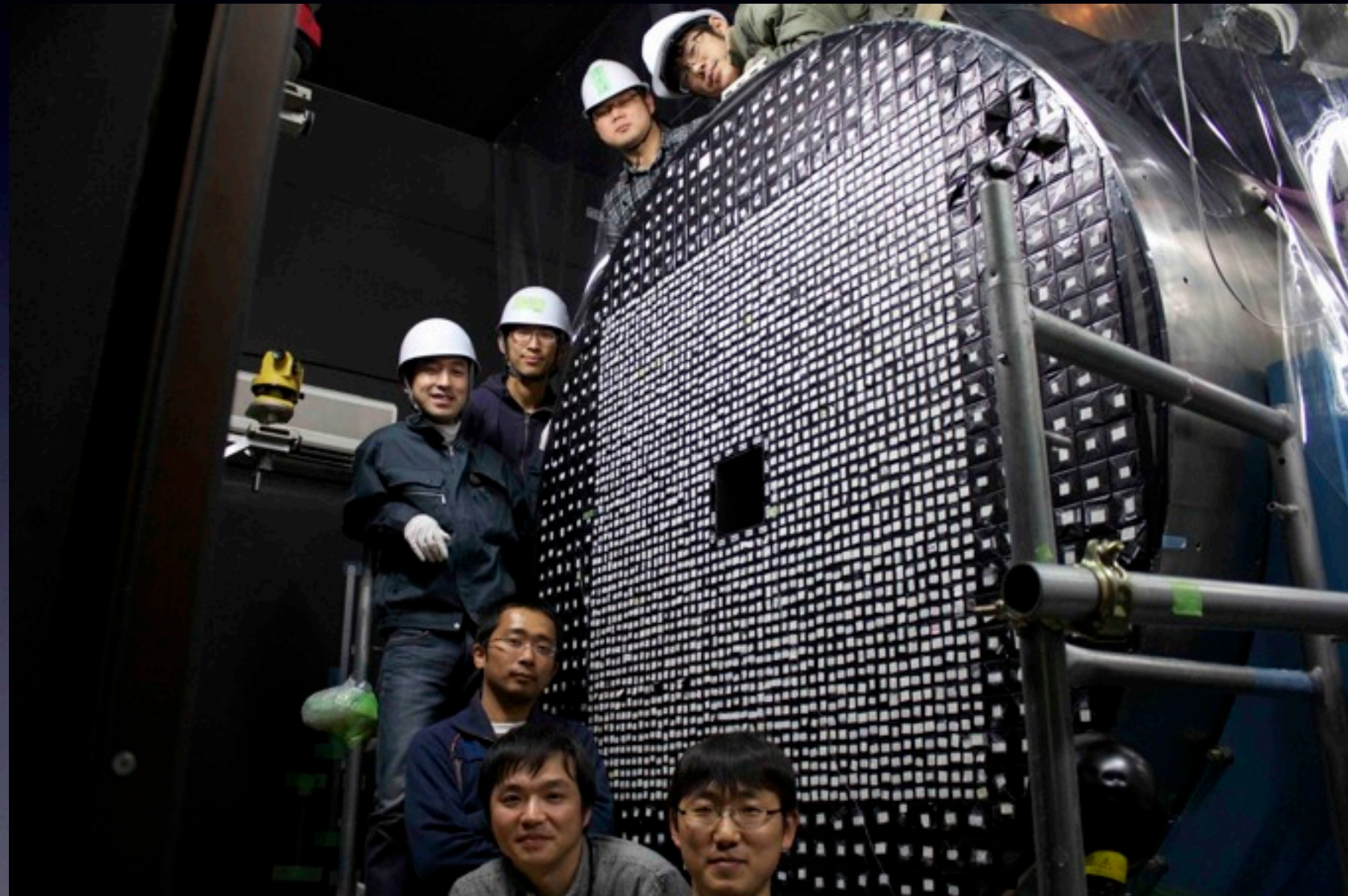
# 解析の様子など





# 2010年度の歩み

- > ビームテストの後、CS/ Calorimeterは全て積みました
- > 配線はまだ途中



2011/3/8 記念撮影。この3日後に地震。





# KOTO実験のこれから

—2011年度の目標—

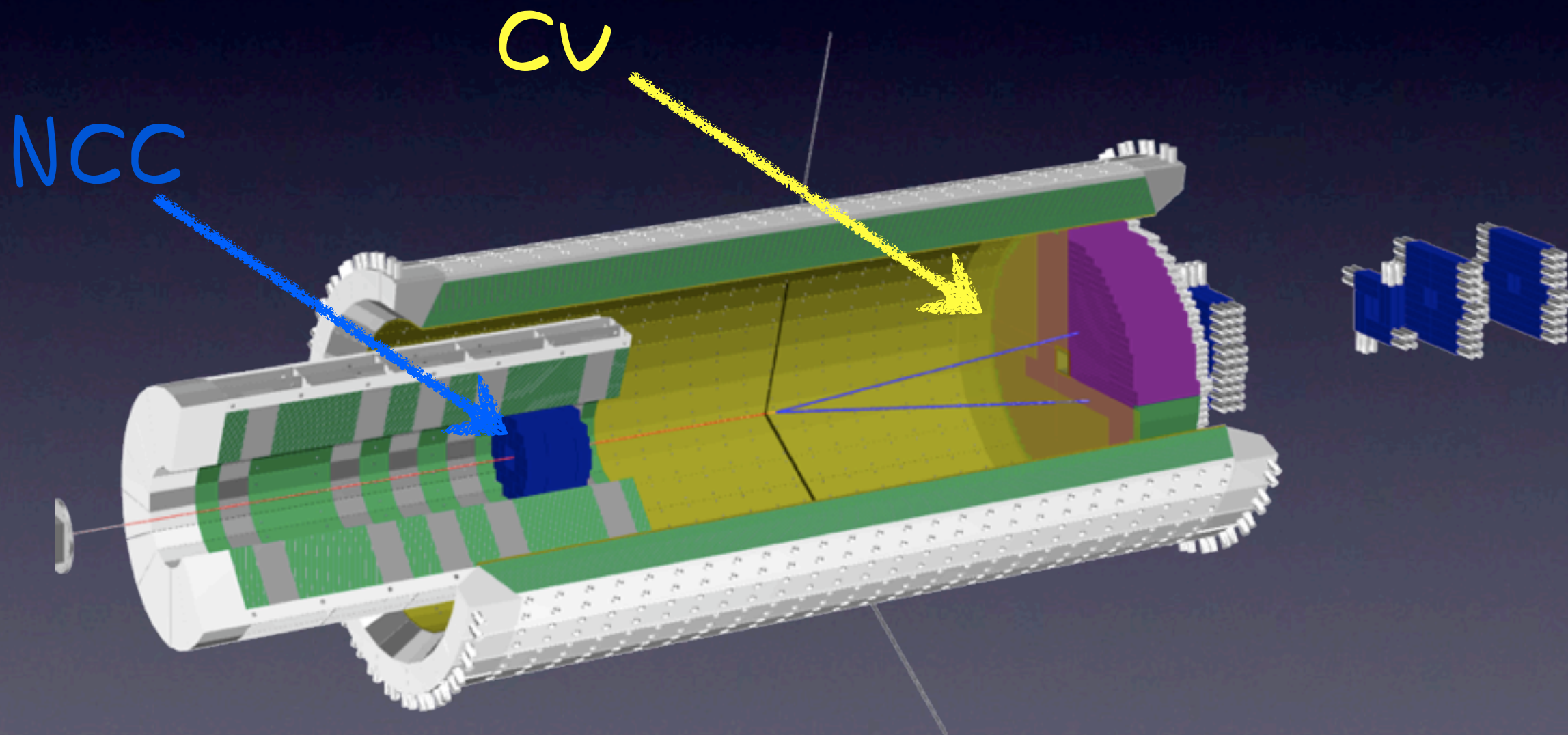
M1としてKOTOに参加すると、  
どんなことが出来るのか？





# 2011年度の歩み(目標)

- > NCCとCVの製作がKOTO最重要課題
- > 今年中に必ずインストール

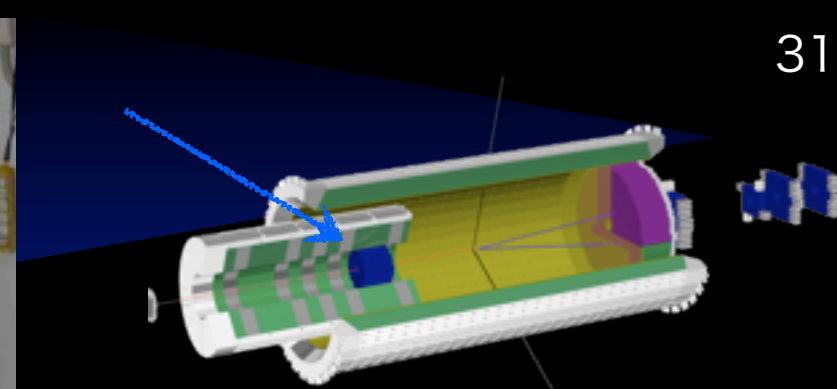




# NCC (河崎君)



N. Kawasaki

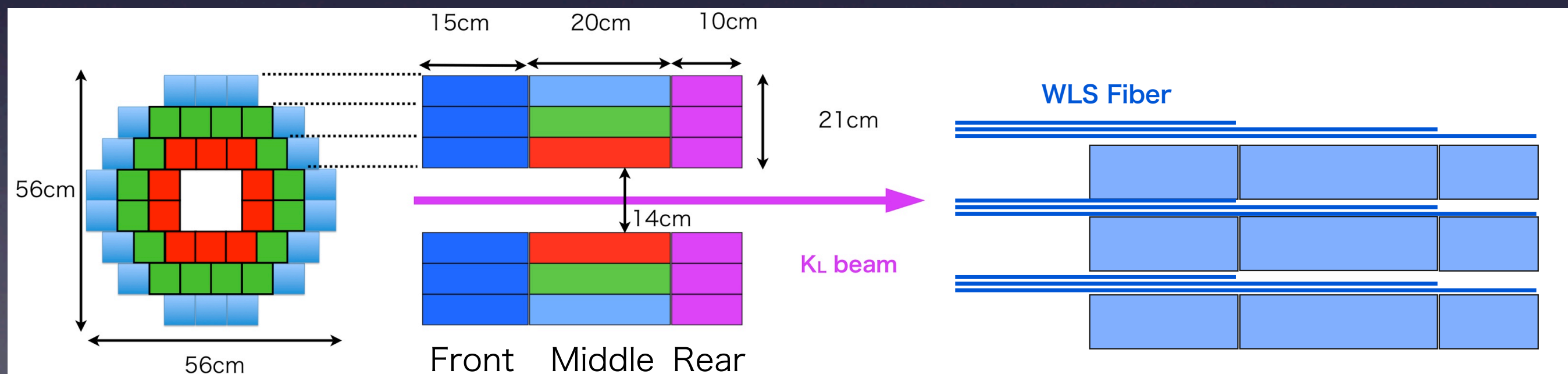


## > 主な役割

- > E391aに比べ、バックグラウンドを1/1000に削減!
- > ビームの周りに薄く広がる中性子の測定をする

## > 特徴

- > CsI結晶をファイバー読み出し。世界初の試み。
- > Segmentationを工夫し、 $\gamma$ と中性子を弁別する





# To do for NCC

- > 外周部の不感領域を埋めるための材料の選定
- > CSI結晶とファイバーの接着方法の選定
- > 実際にインストールするための材料の選定
- > 使用PMTの選定



## > 本番用モジュールの量産・性能測定

- > 実際に使用するモジュールを用いた、PMTのゲイン測定・CSIの光量測定。基礎的な実験テクニックが身に付く。
- > 河崎君がマンツーマンで指導します。



# To do for NCC

- > 外周部の不感領域を埋める
- > CSI結晶とファイバーの接着方
- > 実際にインストールするための
- > 使用PMTの選定



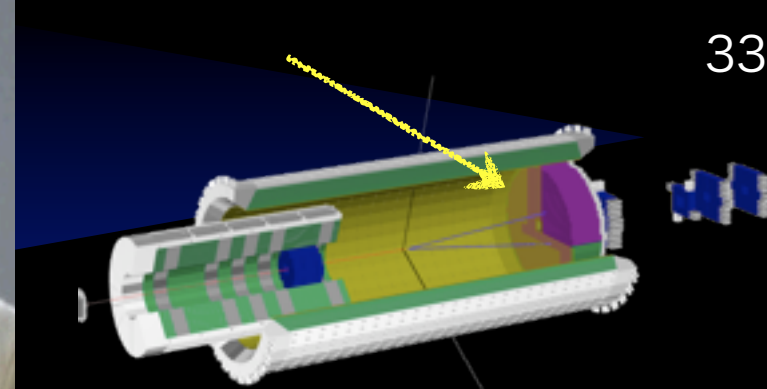
## > 本番用モジュールの量産・性能測定

- > 実際に使用するモジュールを用いた、PMTのゲイン測定・CSIの光量測定。基礎的な実験テクニックが身に付く。
- > 河崎君がマンツーマンで指導します。

**NCCの完成後は、宇宙線を用いた検出器としての性能評価や、NCCの初期データを解析し、修論にまとめる。その後は河崎君からNCCを完全に引き継いで、NCCの責任者としてK<sup>o</sup>TO実験を成功させる。(一例)**



# CV (内藤君)



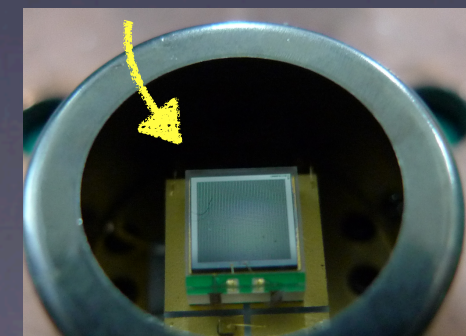
## > 主な役割

- > CSIカロリメータの直前に置かれ、CSIに入射した粒子が荷電粒子かどうかを判別する

## > 特徴

- > 荷電粒子を逃さず捉える(99.99%)ための大光量
- > 余計な粒子(ビームの周りに広がる中性子など)と反応しないため、出来る限り薄いシンチレータ

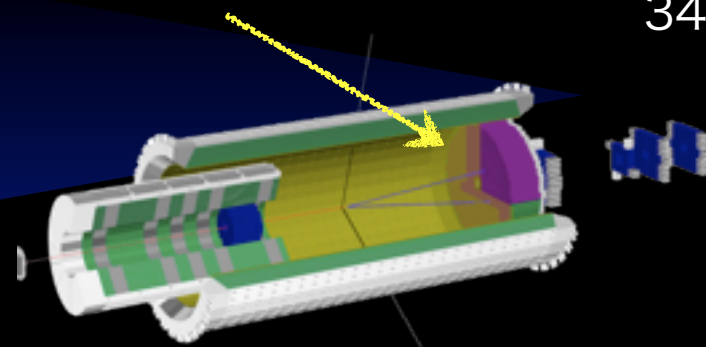
★「3mm厚プラシン + ファイバー読出し + MPPC」  
の組み合わせで、  
この相反する要請を満たす!!



半導体タイプの光検出器  
大面積、低ノイズ、温度コントロール

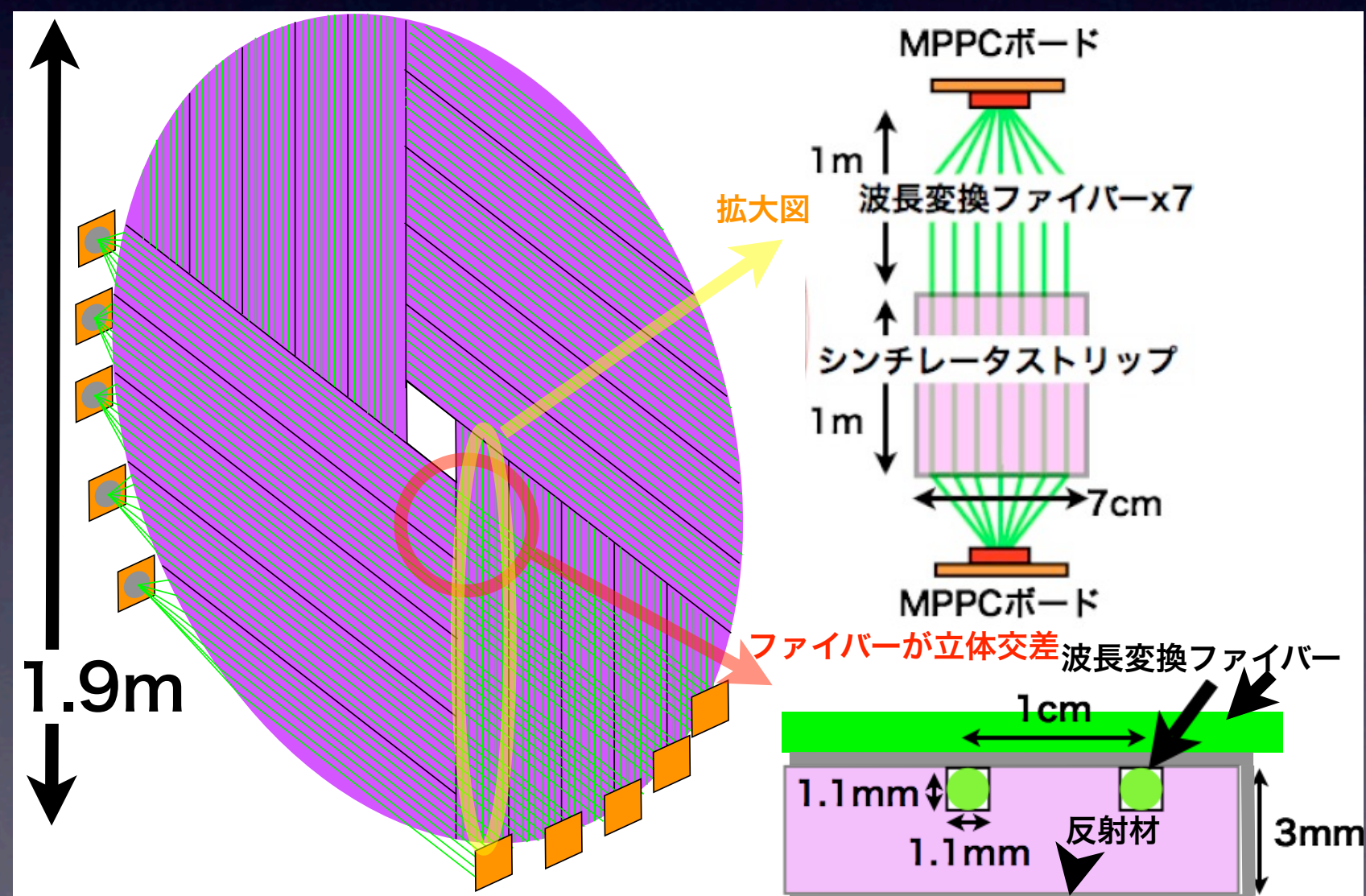


# CV (内藤君)



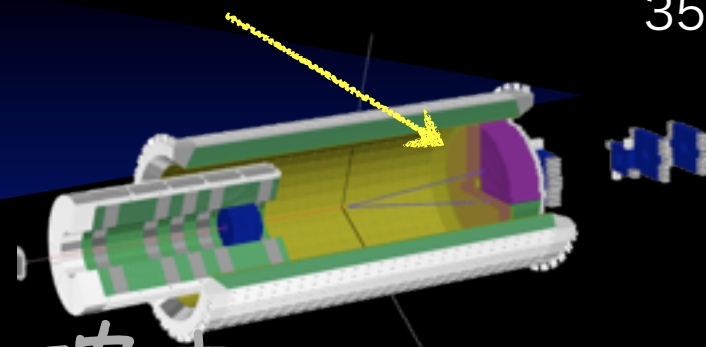
## > 構造

- > 前後2枚構造
- >  $3\text{mm}^t \times 70\text{mm}^w$ のプラスチックシンチレータ100枚
- > 200個のMPPCで読み出し





# To do for CV



- > プラスチックシンチレータの加工手順の確立
- > CSIカロリメータ構造体への取り付け構造決定
- > 信号送信用アンプの開発
- > 量産版MPGCの基礎特性評価システムの開発・運用
  - > CVのMPGCはKOTOと浜松ホトニクスとの共同開発です(温度コントロール内蔵型低ノイズver.)。最新の検出器を使って、実験の基本(Gain測定, DAQ, データ処理など)を学びます。

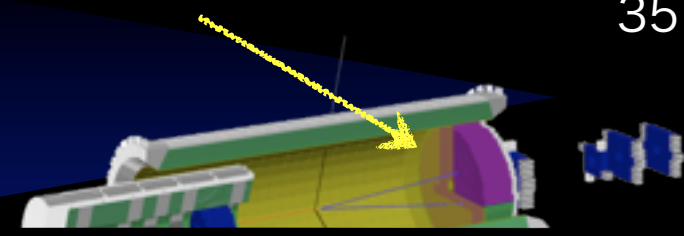
## > CVコントロールシステムの開発

- > 実際に本番でCVを運用するためのエレクトロニクスの開発です。右写真のような物を0から作ります。(写真はCSIカロリメータのコントローラ)  
電気回路・ファームウェア・ソフトウェアなどの知識が身に付きます。





# To do for CV



完成後は、開発したコントロールシステムを用いたCVの運用、  
CVの初期データを解析し、修論にまとめる。  
その後は内藤君からCVを完全に引き継いで、  
CVの責任者としてK<sup>o</sup>TO実験を成功させる。(一例)

## > 量産版MPPCの基礎特性評価システムの開発・運用

- > CVのMPPCはK<sup>o</sup>TOと浜松ホトニクスとの共同開発です(温度コントロール内蔵型低ノイズver.)。最新の検出器を使って、実験の基本(Gain測定, DAQ, データ処理など)を学びます。

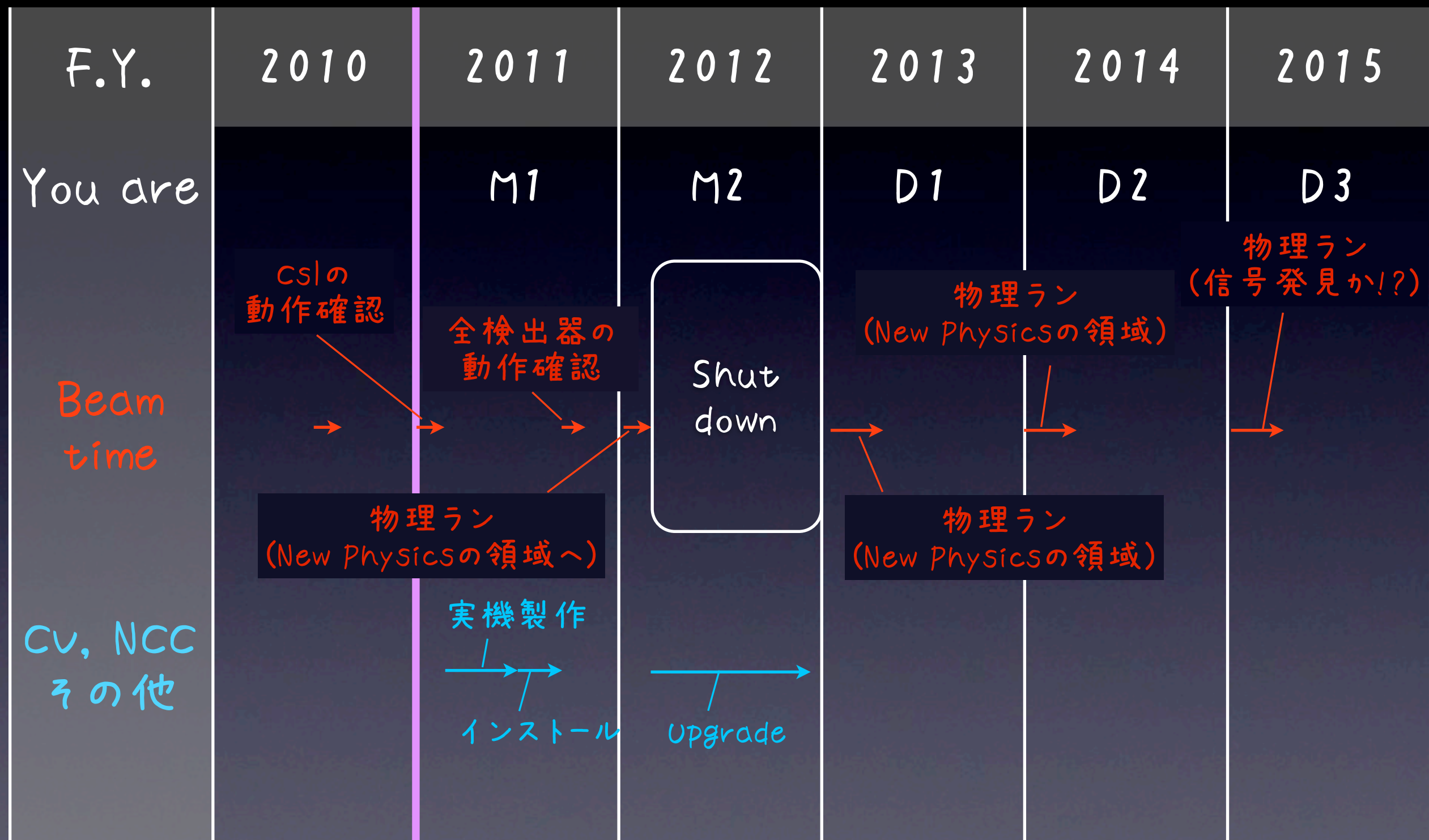
## > CVコントロールシステムの開発

- > 実際に本番でCVを運用するためのエレクトロニクスの開発です。  
右写真のような物を0から作ります。  
(写真はCSIカロリメータのコントローラ)  
電気回路・ファームウェア・ソフトウェアなどの知識が身に付きます。



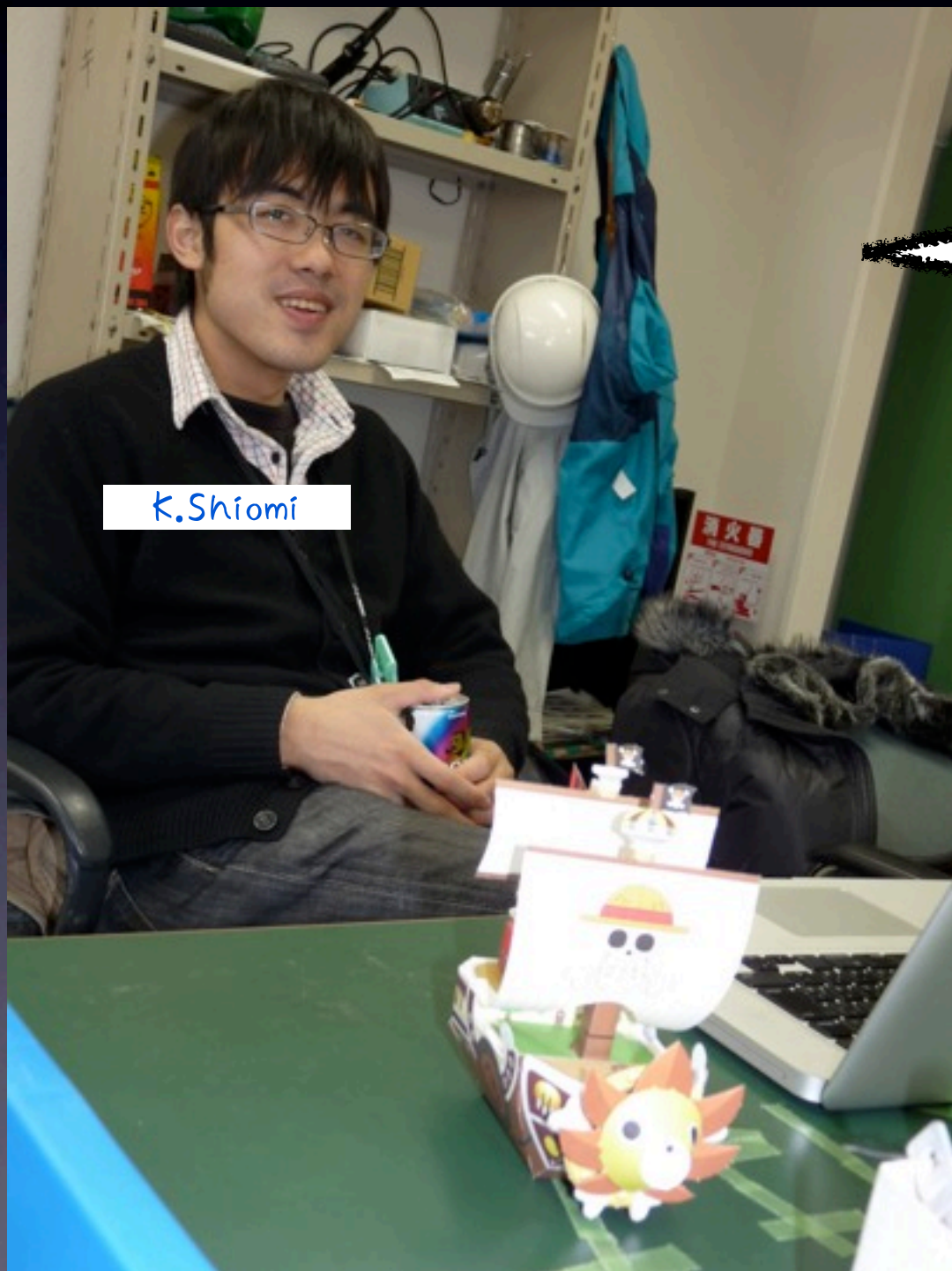


# 数年間の歩み (地震前の予想)





# 塩見さんから M1へのメッセージ



K.Shiomi

今年卒業する塩見だ。

KOTOは慢性的な人手不足で  
困っている。

君たちの力が必要だ。

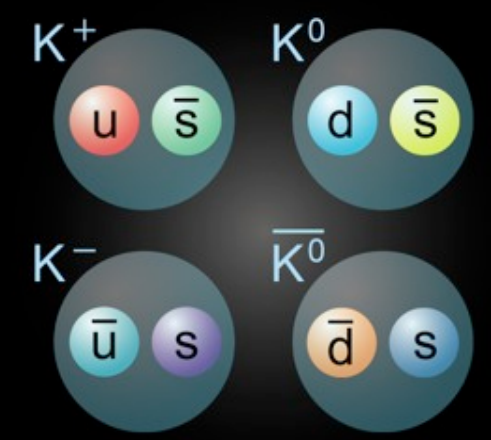
俺たちと一緒にKOTO実験を  
押し進めて行こうぜ!!!

Back up





# K<sub>L</sub> と K<sub>S</sub>



> あくまで簡単に、、、

> K<sub>L</sub> と K<sub>S</sub> は中性 K 中間子の CP 固有状態

> CP 変換 (粒子と反粒子の変換) に対して不変

> 自分自身が自分の反粒子になるような状態

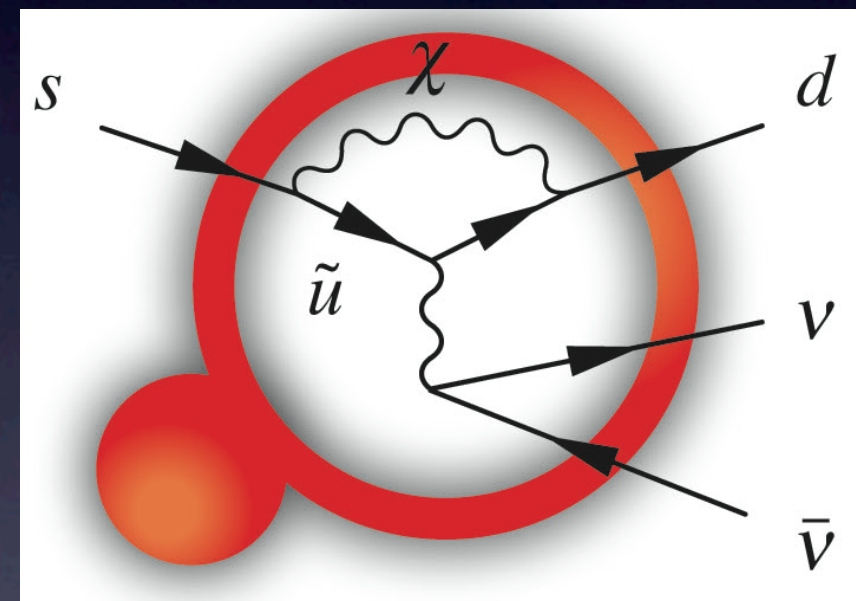
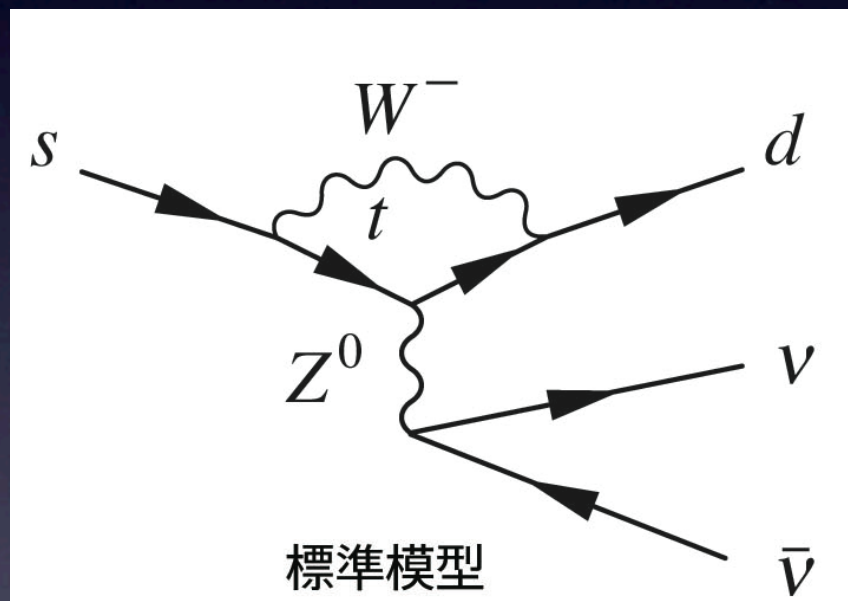
$$K_S = 1/\sqrt{2} \left( \begin{array}{c} K^0 \\ d \quad \bar{s} \end{array} + \begin{array}{c} \bar{K}^0 \\ \bar{d} \quad s \end{array} \right) \rightarrow CP |K_S\rangle = + |K_S\rangle$$

$$K_L = 1/\sqrt{2} \left( \begin{array}{c} K^0 \\ d \quad \bar{s} \end{array} - \begin{array}{c} \bar{K}^0 \\ \bar{d} \quad s \end{array} \right) \rightarrow CP |K_L\rangle = - |K_L\rangle$$



# Rare decay experiment

- >  $K$  experimentはもちろん強度フロンティア
  - > Rare decay experimentになる。なぜなら
  - > 標準理論を超える物理の効果は、ループダイアグラム中に現れる



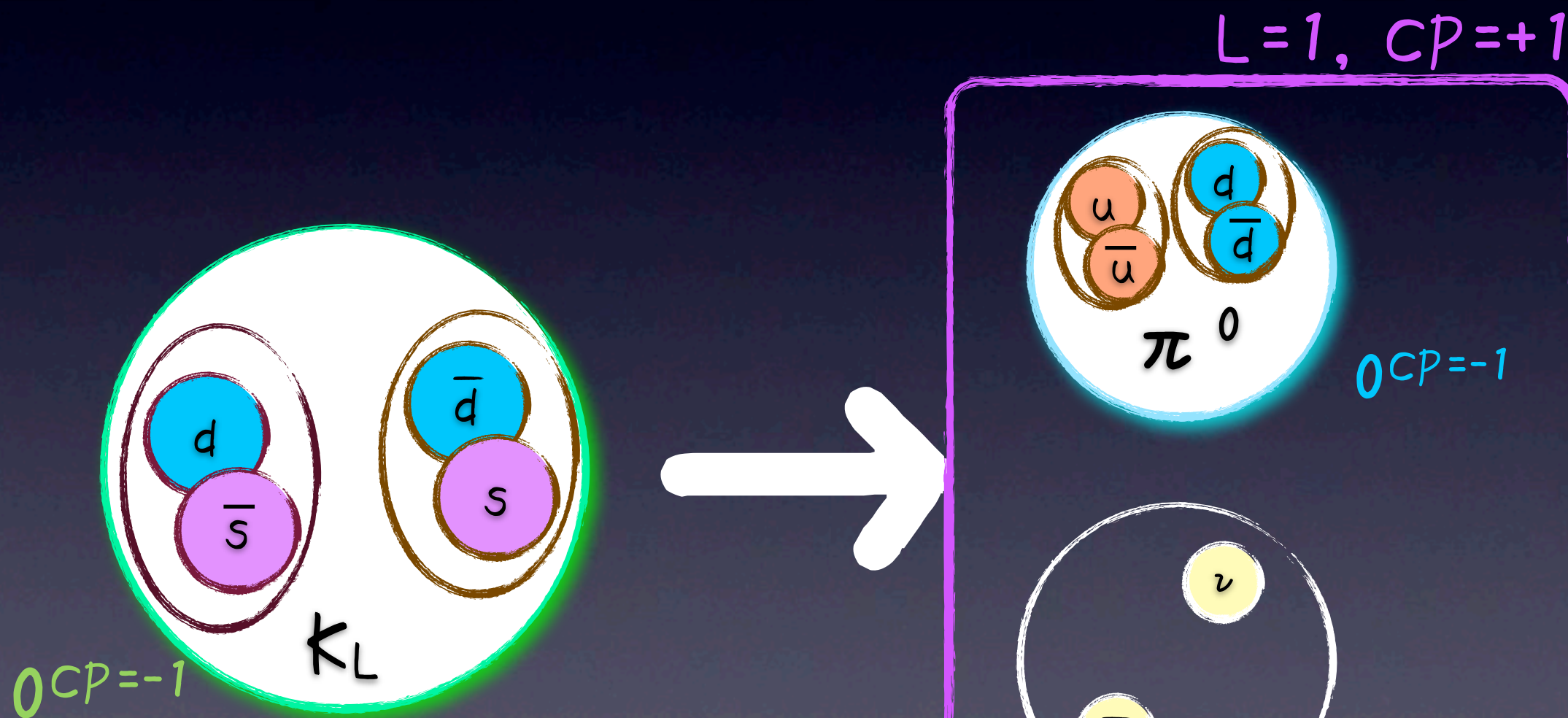
- > 分岐比のSM予想からのわずかなズレをみたいのもともとの予想分岐比自体が小さい方が見やすい
  - >  $0.5+0.000001$ より $0.00001+0.000001$ の方が、、、



$$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$$

> Rare decayであると同時に、CPを破っている

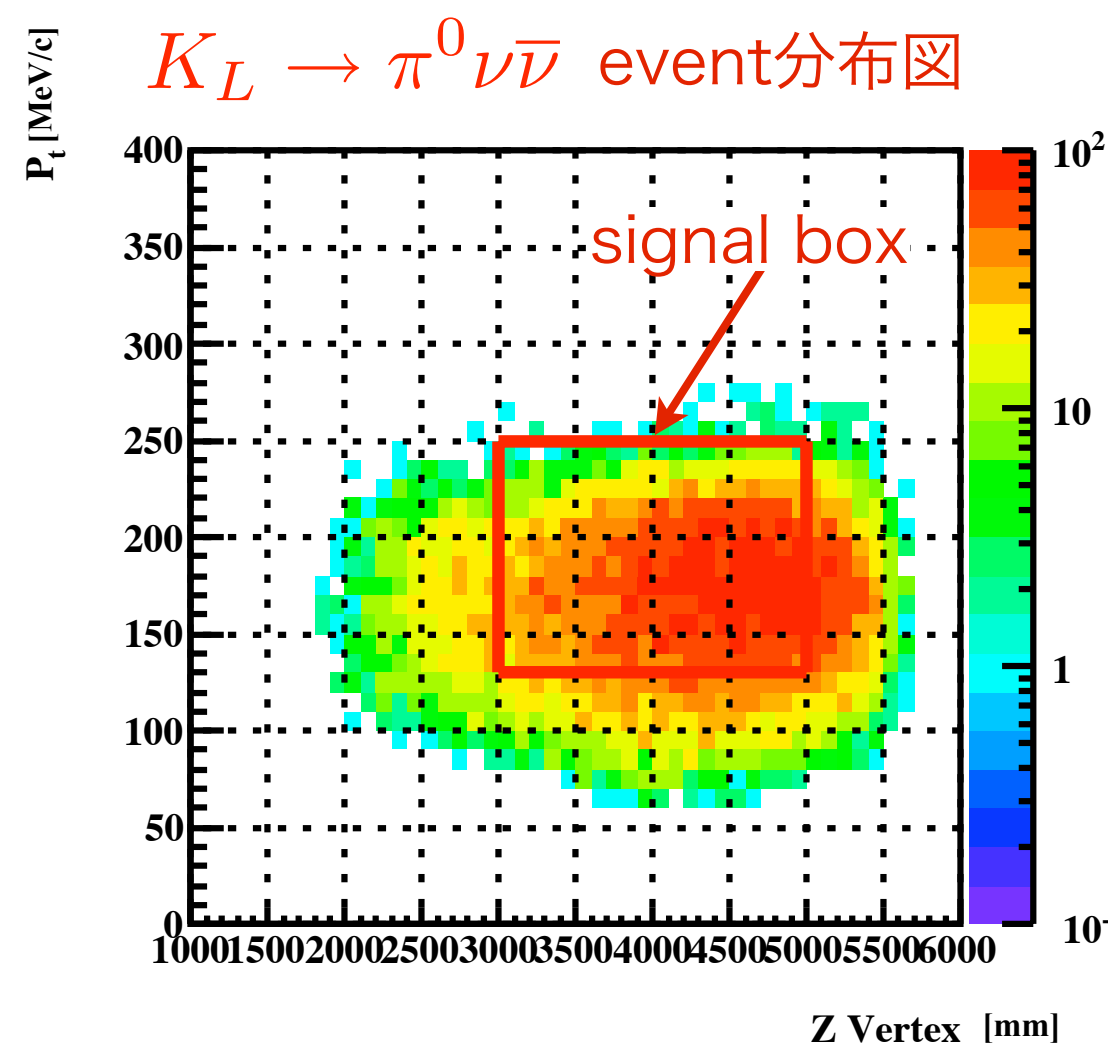
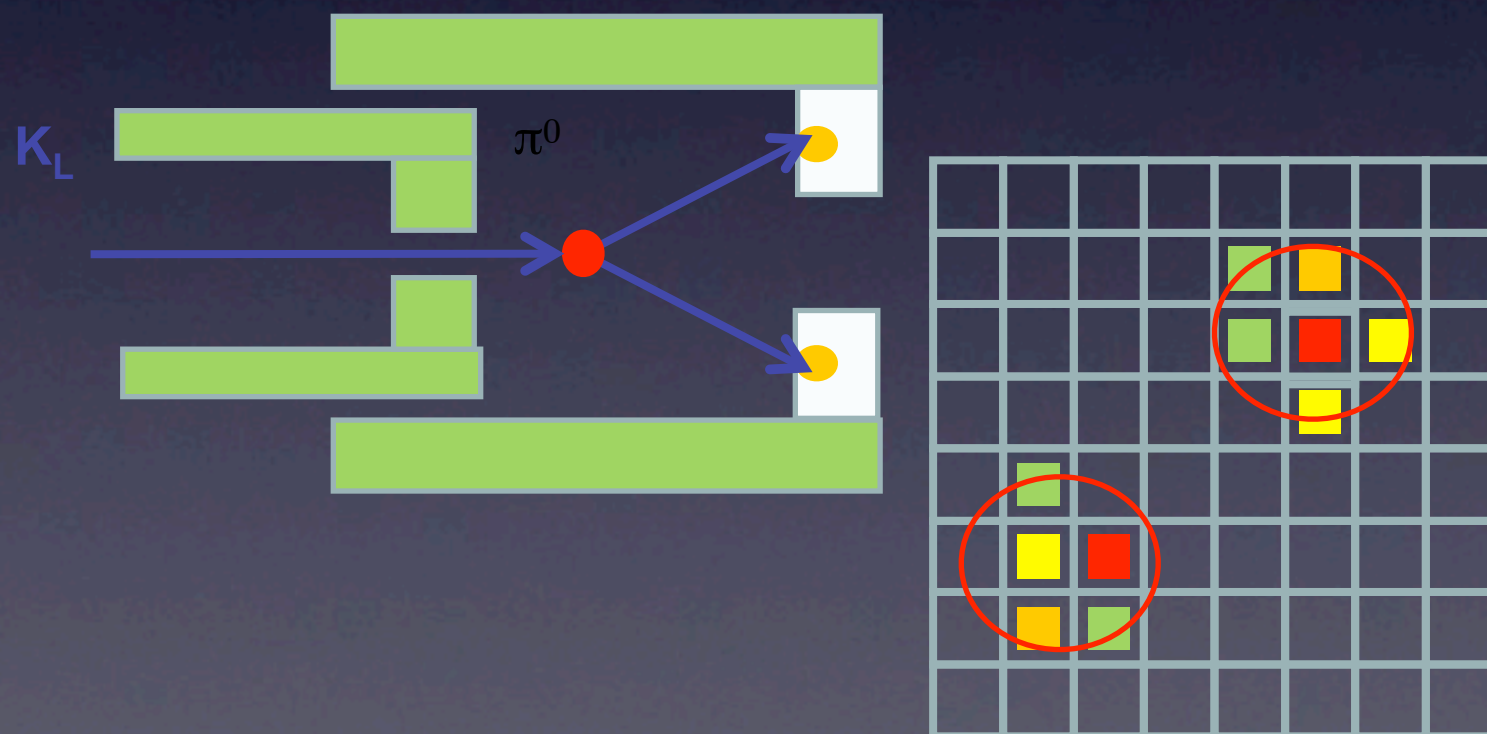
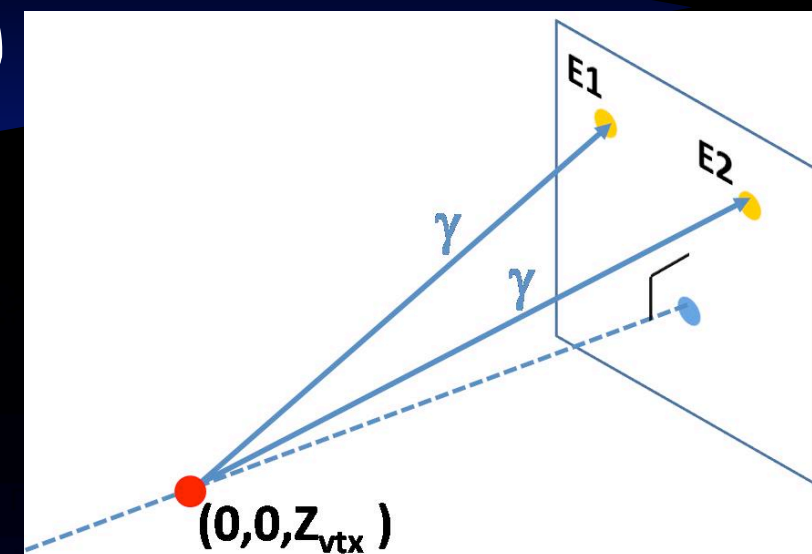
→ 標準理論を超えるCP violationに敏感!



# Signal reconstruction

## > CsIカロリメータで $\gamma$ を検出

- > 2つの $\gamma$ のエネルギーと位置を測定
- >  $\pi^0(K_L)$ の崩壊点を再構成
- > 崩壊点をビーム軸上に仮定
- > 2 $\gamma$ の不変質量が $\pi^0$ の質量となる点を崩壊点( $Z_{\text{ vtx}}$ )とする
- > さらに2 $\gamma$ の横運動量から $\pi^0$ の横運動量( $P_t$ )も求める





# Signal reconstruction

