

High Energy Physics/KOTO

2014.4.22

南條 創

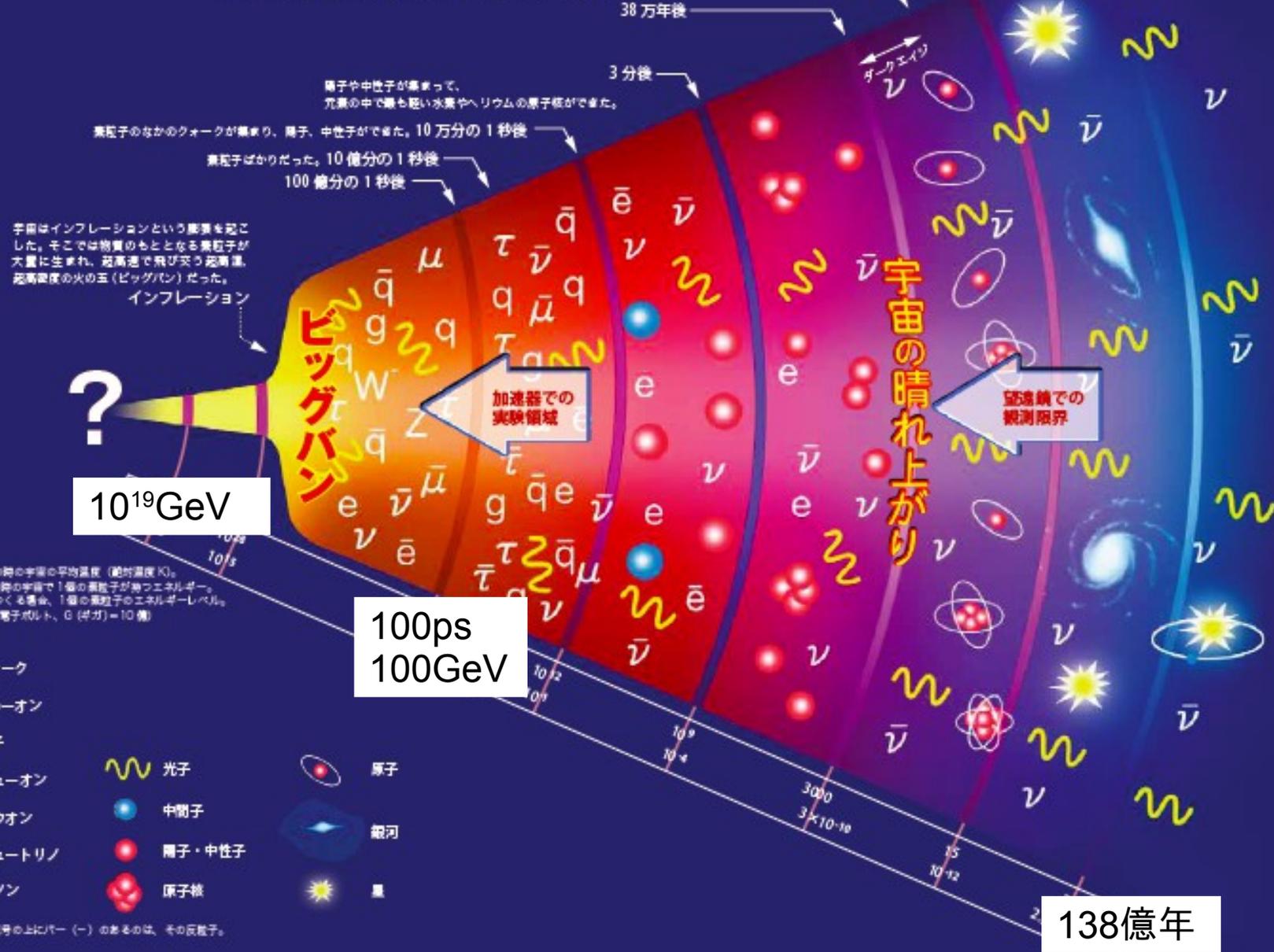
High Energy Physics

- 物質の究極を求めて→素粒子(Particle Physics)
 - $\Delta x * \Delta p \sim h \rightarrow$ High Energy
- 登場人物(素粒子)と人間関係(相互作用)
これを記述する物理法則の枠組み (標準理論)
→物語 ↔ 宇宙

宇宙の晴れ上がり

陽子や電子がばらばらに飛び交う高温のプラズマ状態のなかで、光（光子）は電子に吸収されて直進できなかった。宇宙の温度が 3000 K くらいになると、電子は原子核と結合し原子となり、光は吸収されずに直進するようになった。この宇宙の晴れ上がりは「宇宙の晴れ上がり」と呼ぶ。

このとき光（光は電磁波でもある）が、宇宙のあらゆる方向から飛んできるとして、1965年に初めて観測された「宇宙背景放射」だ。宇宙の膨張によって現在では温度が 3K(270℃)まで下がったこの宇宙での、ビッグバンの残り火とも書われる。



宇宙はインフレーションという膨張を記した。そこでは物質のもととなる素粒子が大量に生まれ、超光速で飛び交う超高温、超高密度の火の玉（ビッグバン）だった。

インフレーション

10¹⁹GeV

100ps
100GeV

138億年

Tは、その時の宇宙の平均温度（絶対温度K）。
Eは、その時の宇宙で1個の素粒子が持つエネルギー。
加速器でつくると場合、1個の素粒子のエネルギーレベル。
単位eV（電子ボルト）、G（ガガ）=10⁹

- q クォーク
- g グルーオン
- e 電子
- μ ミューオン
- τ タウオン
- ν ニュートリノ
- W, Z ボソン
- 光子
- 中間子
- 陽子・中性子
- 原子核
- 原子
- 銀河
- 星

*粒子の記号の上には（-）のあるのは、その反粒子。

フロンティア

- Higgs → 発見
- 階層問題
- 物質優勢宇宙とCP非保存 Fine-tuned universe
- Neutrino

- 宇宙(宇宙背景放射、Dark Matter, Dark Energy...)
- 重力

階層性問題

- Higgs粒子は発見された
- 階層性問題
 - 標準理論を高いエネルギースケールに適用しようとする
と、Higgs粒子の質量は2次発散し、非常に大きくなる。
 - 高いエネルギースケールからスタートすると、ここで与えられる巨大な質量が、異様に正確にあたえられないと、現在のHiggs質量が導けない。
 - 不自然
 - 1TeVくらいでNew Physicsがあったらいいな。これで、発散をキャンセルする。なかなかみつからない。

2013 ノーベル賞

mechanism. The discovery is a milestone for particle physics and a tremendous success for the Standard Model. However, far from closing the book it opens a number of new exciting possibilities: Theorists believe that the SM most probably is but a low-energy approximation of a more complete theory. If this were not so, quantum mechanical corrections to the Higgs mass would drive m_H towards the Planck scale – unless “unnatural” cancellations occur. Therefore, extensions of the SM are proposed, keeping the successful features of the SM but at the same time introducing “new physics” in a way, which stabilises m_H at its low value, which is in accordance with SM expectations (fig. 1). Supersymmetric extensions of the SM predict in their minimal form the existence of five Higgs bosons, three neutral and two charged. The lightest of the neutrals should have couplings similar to the SM Higgs and a mass below 130 GeV/ c^2 . An alternative is “Little Higgs” models where new strong interactions are introduced at the scale (of tens) of TeV. The lightest scalar in these models also resembles the SM Higgs. In yet other

Higgs発見した → Far from closing the book.

高エネルギーにNew Physicsがあるはず。

SUSY, little Higgs, Composite, Extra Dimension,...

Dark matter?

Plank Scale

- 重力energy = 量子揺らぎ

- プランク質量

$$= 2.2 \times 10^{-8} \text{kg}$$

$$= 1.2 \times 10^{19} \text{GeV}$$

$$V = G_N \frac{M^2}{R} = \frac{\hbar c}{R}$$

$$M = \sqrt{\frac{\hbar c}{G_N}}$$

- このenergy scaleでは、重力も強い相互作用
- 量子化された重力相互作用と素粒子

物質優勢宇宙とCP非保存

- 1967:サハロフ:物質優勢宇宙にCP非保存必須
- 1964:Cronin and Fitch: CP非保存の発見
- 1973:小林・益川 : CP非保存 → Standard Model
- これでは物質優勢に不足



→ 必ず新しいCPを破る新物理があるはず!

2008:Nobel Prize

In 1967, Andrei Sakharov [83] (the Nobel Peace Prize 1975) pointed out in a famous work that *CP* violation must be the cause of the asymmetry in the universe. It contains more matter than antimatter. The *CP* violation that the KM Model gives rise to is most probably not enough to explain this phenomenon. To find the origin of this *CP* violation we probably have to go beyond the Standard Model. Such an extension should exist for other reasons as well. It is believed that at higher energies other sectors of particles, so heavy that the present day accelerators have been unable to create them, will augment the model. It is natural that these particles will also cause *CP* violations and in the tumultuous universe just after the Big Bang these particles could have been created. These particles would have been part of the hot early universe and could have influenced it, by an as yet unknown mechanism, to be dominated by matter. Only future research will tell us if this picture is correct.

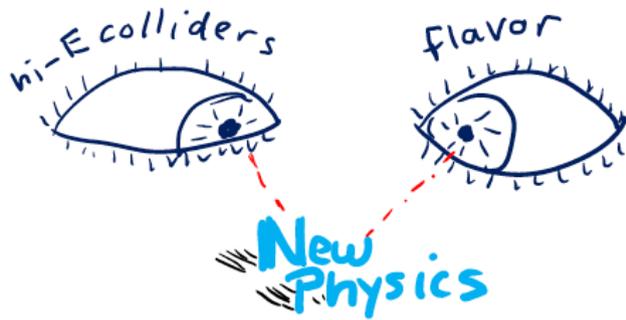
Neutrino

- Neutrinoの絶対質量がわかっていない。
- なぜ、これほど異様に小さい質量なのか？
- 粒子の型が不明
 - Dirac型 or Majorana型
- レプトンセクターでのCPの破れ
- いまだに未開の土地
 - Weak interactionのみで、検出がむずかしい。
 - 大強度neutrino beam、巨大検出器etc...

高エネルギーへのアプローチ

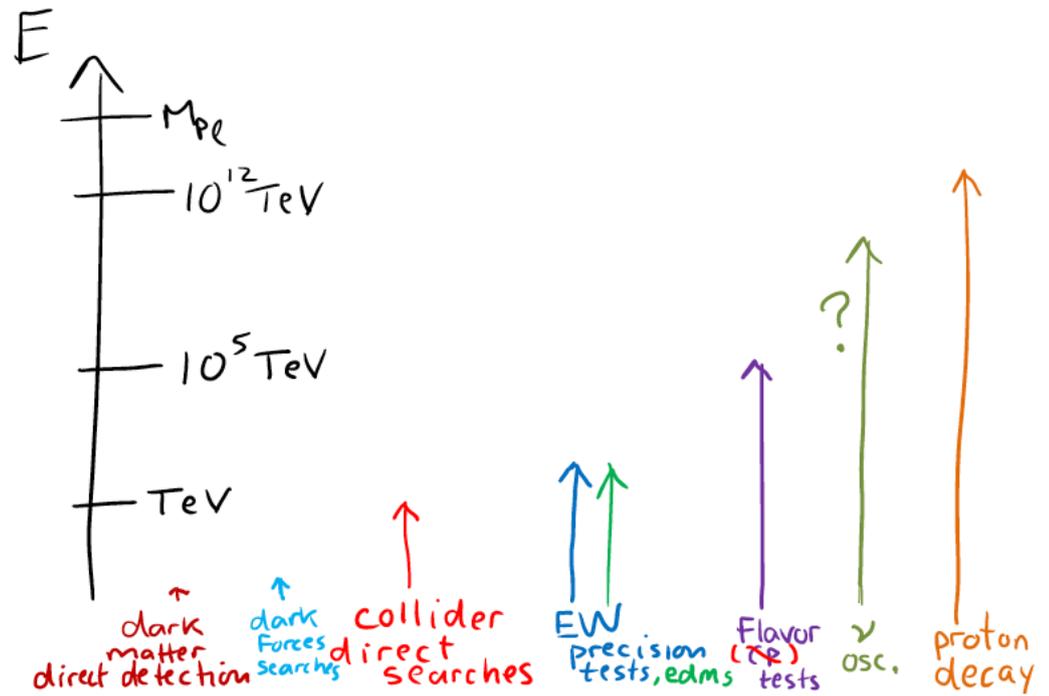
- 直接加速器で粒子を衝突：High Energy Frontier
- $\Delta E * \Delta t \sim h$
 - 短時間の事象(稀事象)に、高いエネルギースケールの物理の寄与を探る。
 - 当然標準理論からの寄与は、強く抑制されていないと、見えない → 見つけにくいものをがんばって探すことになる。
 - GIM,CKM,Helicity,...suppression
 - CP,Lepton [Flavor,Number,Universality],Baryon Number...violation
 - Rare decay：大強度ビーム：Intensity Frontier
 - B, D, K, tau,mu,protonなどの崩壊
 - Flavorを変える崩壊なので、Flavor Physicsとも呼ばれる。
 - Neutron,Electronのelectric dipole moment

- 理論屋さんのスライドから



Flavor expt. is tool for discovery & understanding of New Physics.

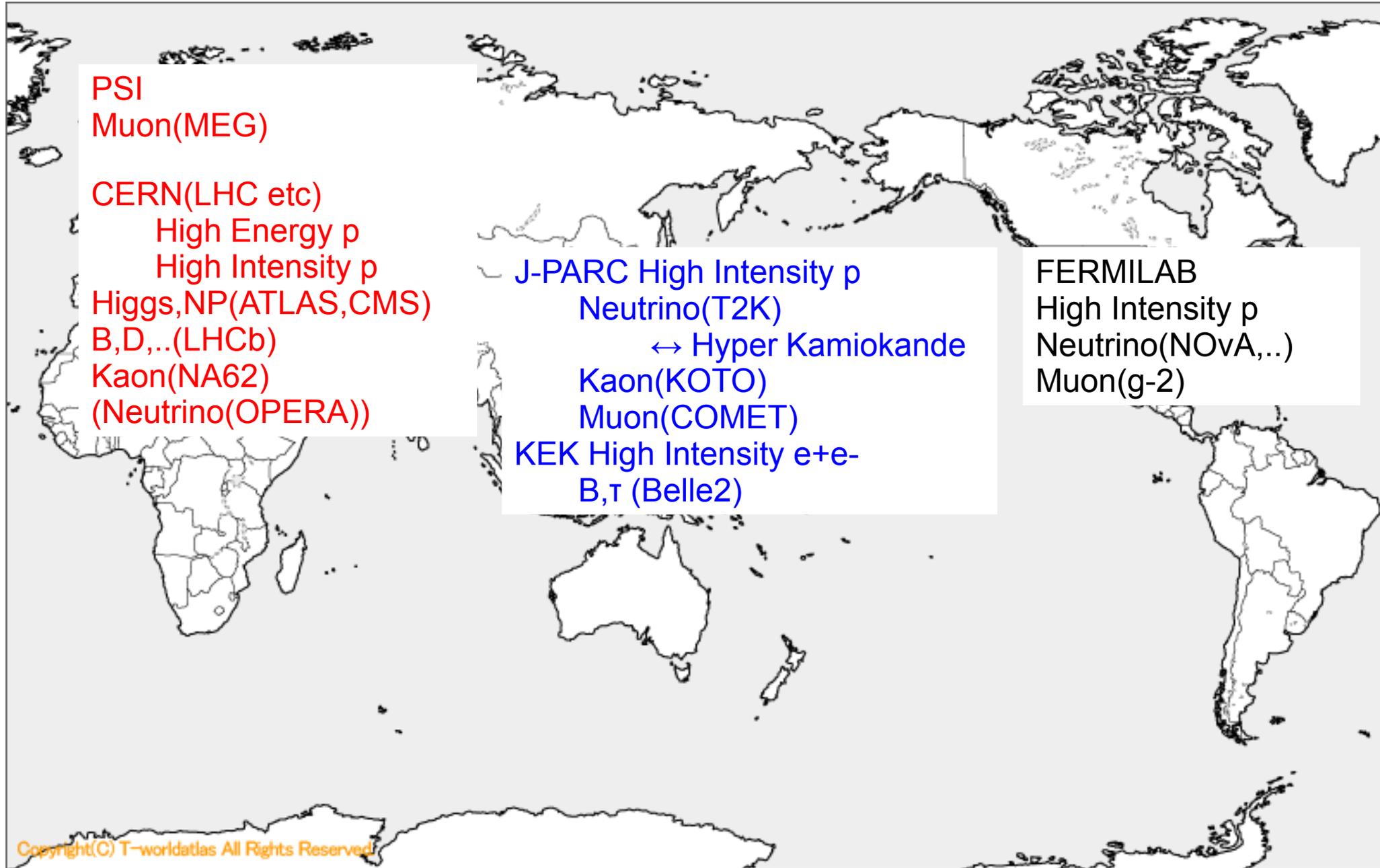
NOTHING YET?



Raman Sundrum
University of Maryland

@CKM2012

世界の情勢



京都大学

- ATLAS
 - 石野(准教授), 隅田(助教)
田代, 加茂, 救仁郷
- KOTO
 - 野村(KEK客員准教授), 南條(助教)
河崎, 内藤, 前田, 関, 上路, 中桐
- Neutrino(T2K, Super-K, Hyper-K, 加速器, ダブルベータ崩壊)
 - 中家(教授), 市川(准教授), 南野(助教)
Christophe, 中村, 久保,
木河, 鈴木, 高橋, 黄, 平木, 廣田,
石山, 中村, 林野, 吉田, 江

KOTO introduction

- Rare decayから、High Energyへ
- 物質優勢宇宙の鍵となるCPを破る新物理探索
- 国際共同の中規模実験



Arizona State, Chicago, Chonbuk, Jeju, JINR, KEK, Kyoto, Kyungpook,
Michigan, NDA, NTU, Okayama, Osaka, Pusan, Saga, Yamagata

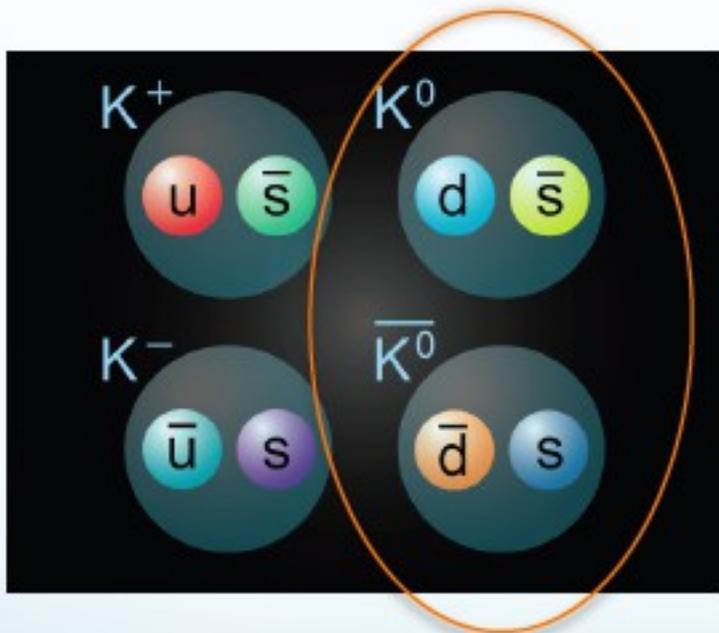
K中間子

+2/3	u	c	t
-1/3	d	s	b

- sクォークを含む
- 崩壊時にsを消す → 弱い相互作用

弱い相互作用の固有状態: K_L and K_S

質量: ~500 MeV



重ねあわせ

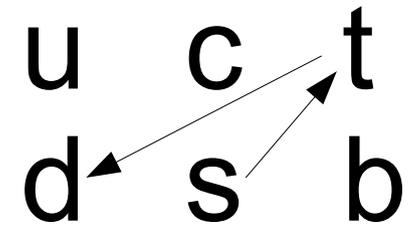


K_S
短寿命: 0.1ns

K_L
長寿命: 51ns

我々が使うのはこちら

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ 崩壊



- CP非保存過程

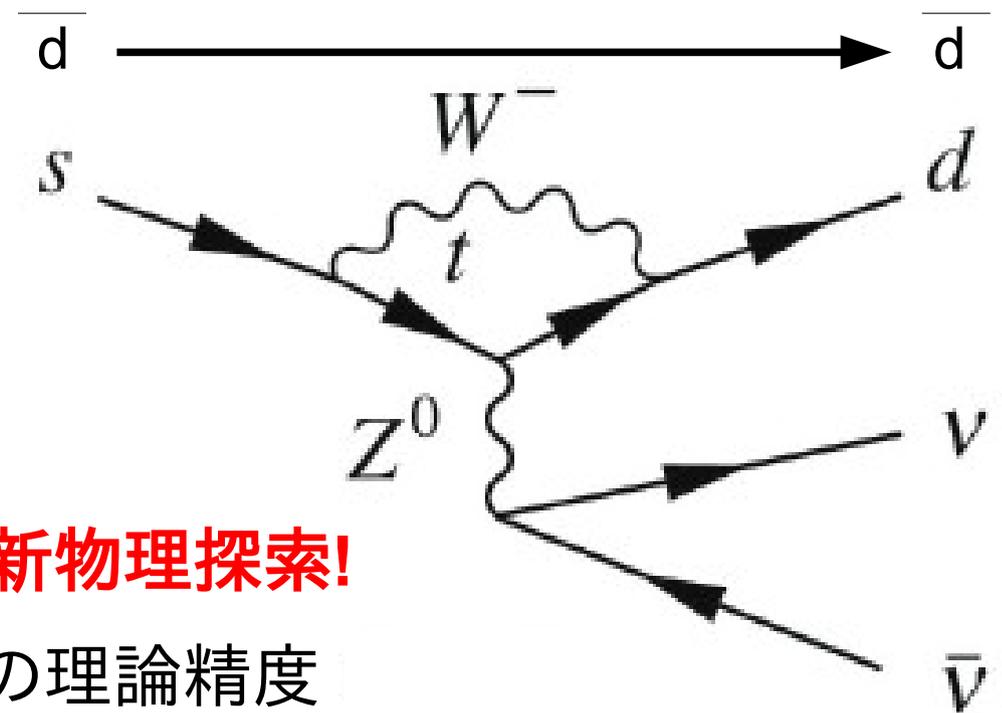
- Rare decay 崩壊分岐比 2×10^{-11} (500億に1回)

- $s \rightarrow t \rightarrow d$

- High Energy Scale

W, Z, t

ex) SUSY contribution



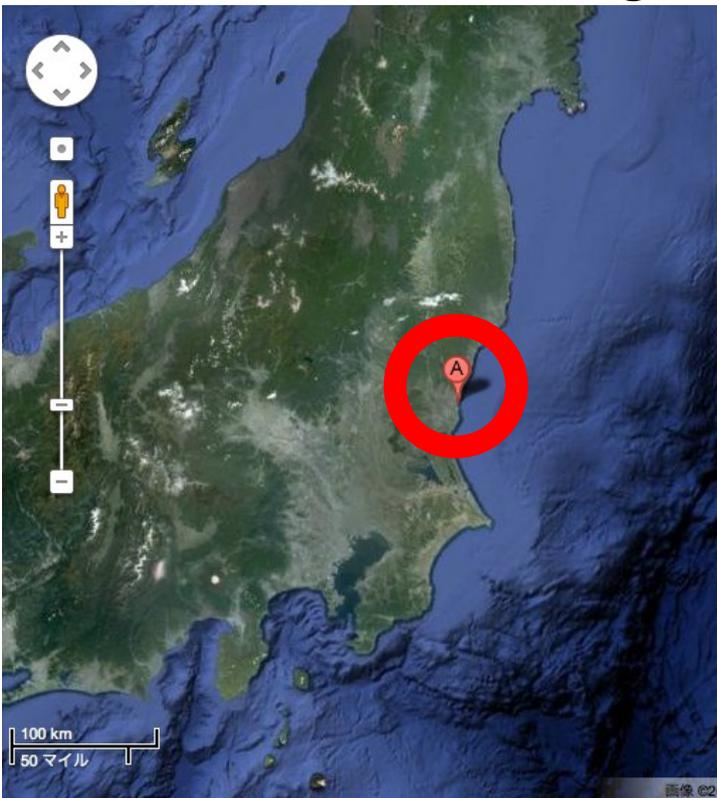
→ **物質優勢宇宙の鍵となる新物理探索!**

- 精密な理論予測 1-2%の理論精度

→ ちよつとのずれでも感度がある

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ 崩壊探索

- KLを大量に作る。
- J-PARC大強度陽子加速器施設
 - 30GeV High intensity proton beam

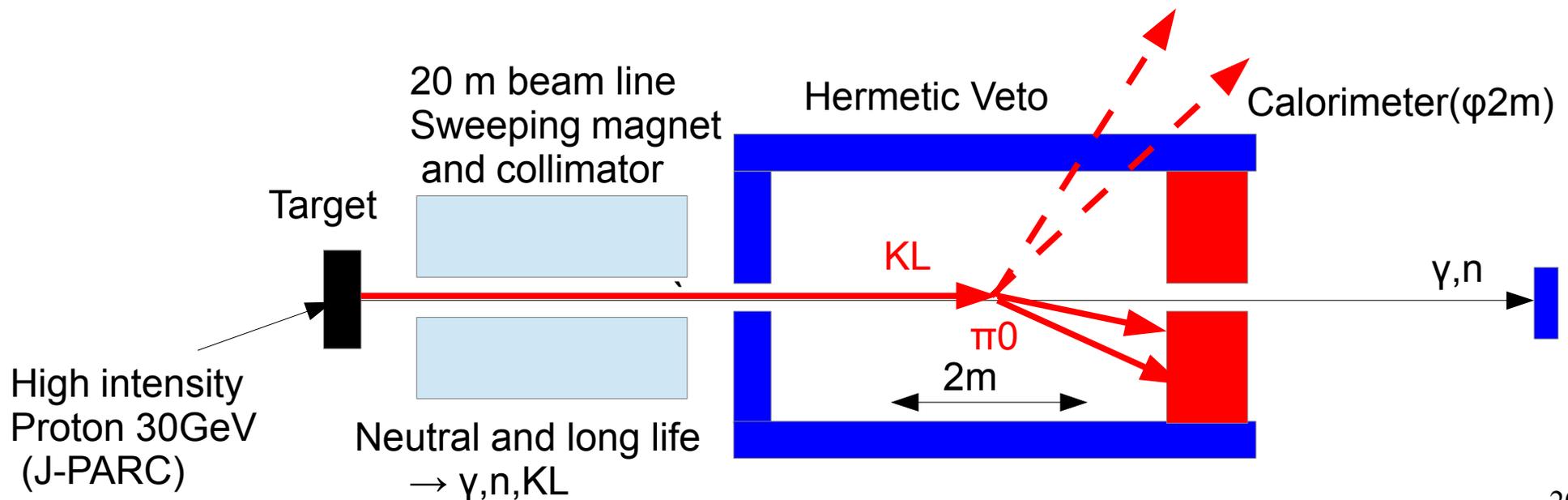




KOTO実験エリア

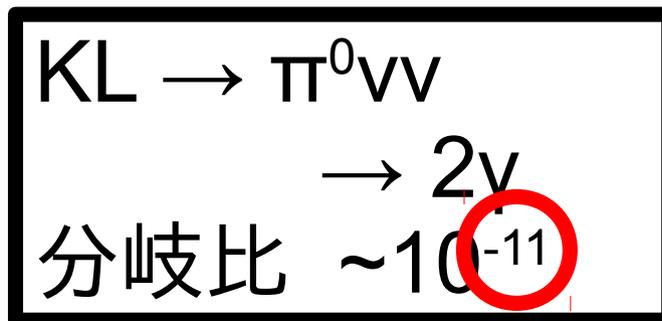
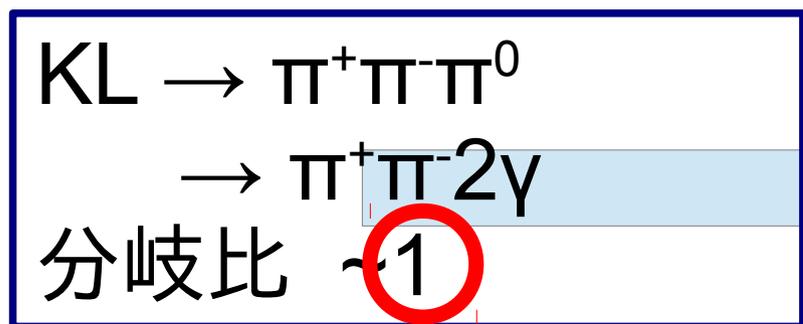
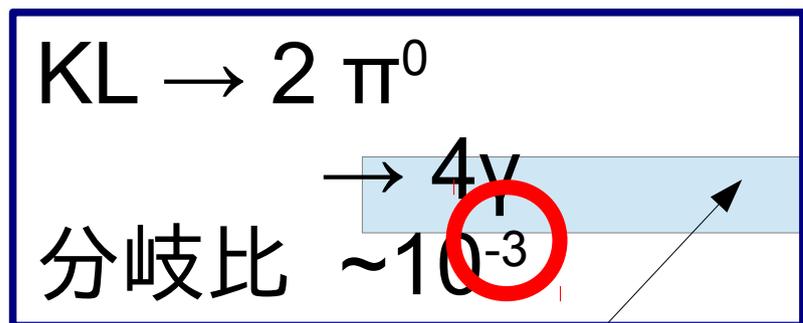
KL

- 30GeV陽子ビームを、Auターゲットに当てる
- 出てくる2次粒子
 - 荷電粒子は磁石で曲げて捨てる
 - 中性が残る
 - 短寿命: 20mのコリメータ中で崩壊
 - 長寿命: ガンマ、中性子、KL → 崩壊
- $KL \rightarrow \pi^0 \nu \nu$: π^0 は2ガンマ崩壊 → only 2 gamma from π^0



Background

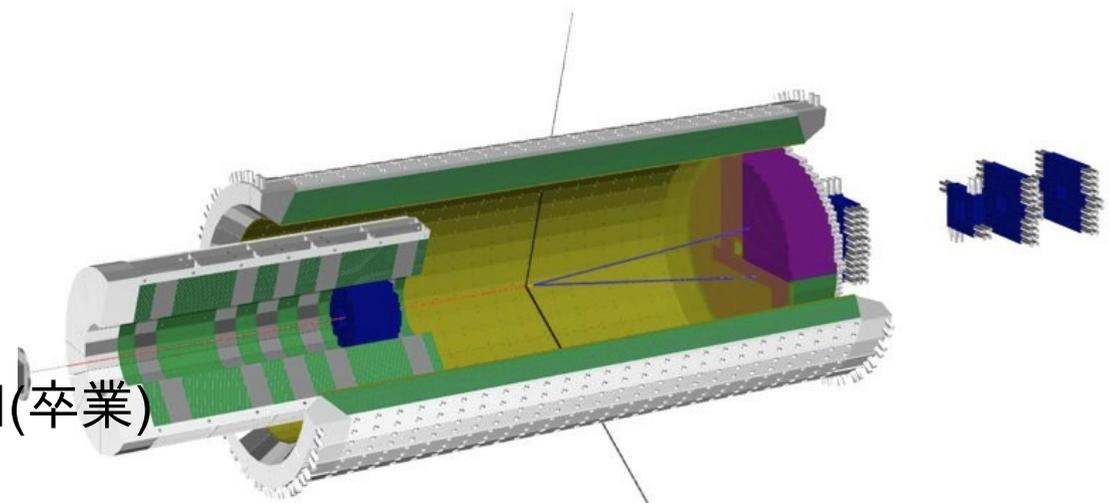
Signal



カロリメータで2 γ

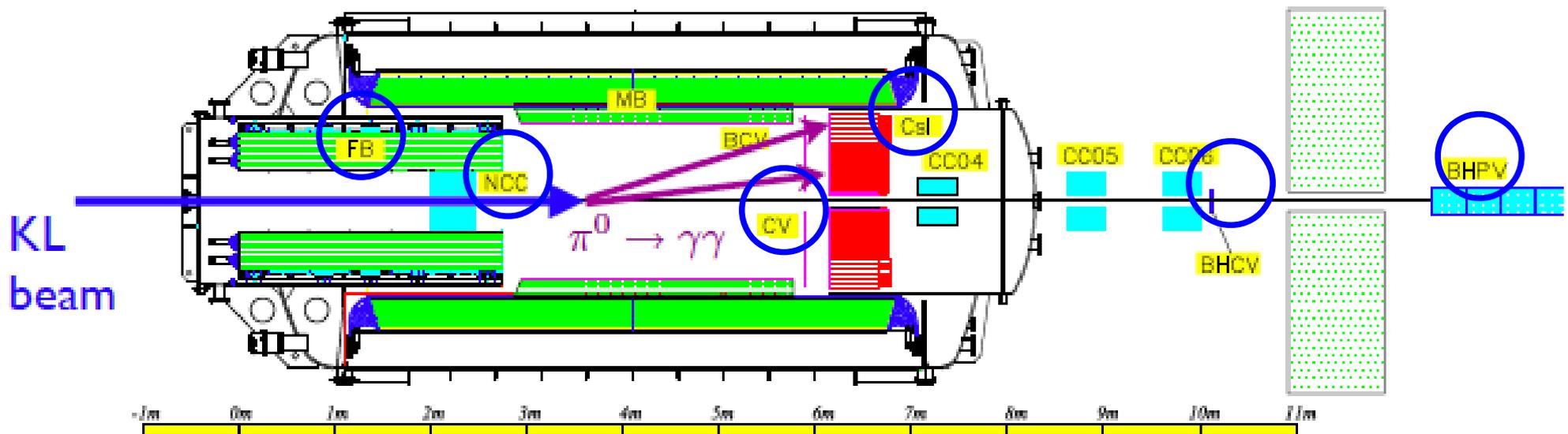
8-11桁上回るバックグラウンドの堤防
この粒子を確実に検出して、バックグラウンド判定
→ Veto検出器 → 実験の鍵

- NCC 河崎、**関**、日根野(卒業)
- HINEMOS 日根野(卒業)
- CV 内藤、前田
- CSI PMT電圧供給システム 増田(卒業)
- BHPV 前田
- New BHCV **中桐**、**上路**
- LED校正システム **上路**



さらに現場での運用、解析
 FB 日根野(卒業)
 LCV 前田
 BHCV 前田

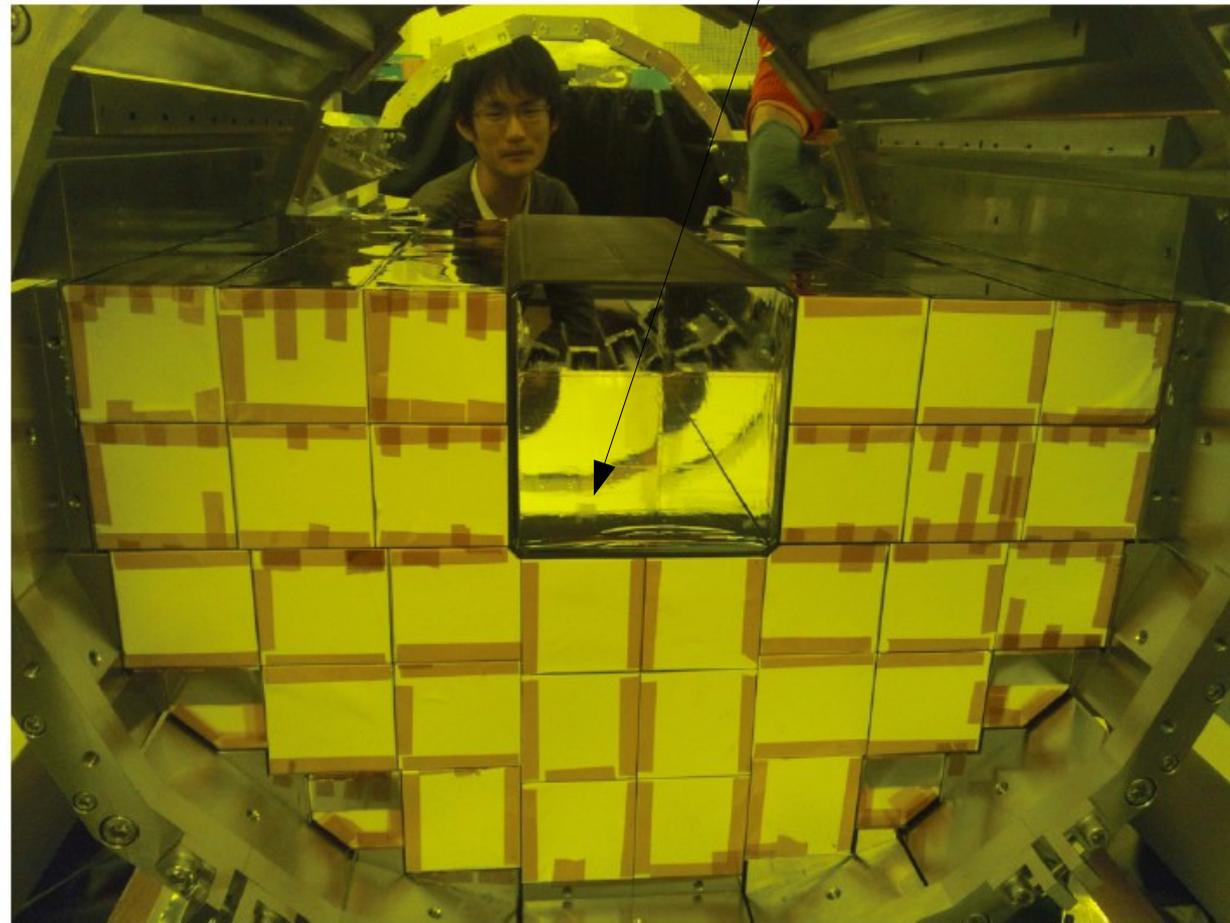
大学院生が中心となって、実験を押し進めている!

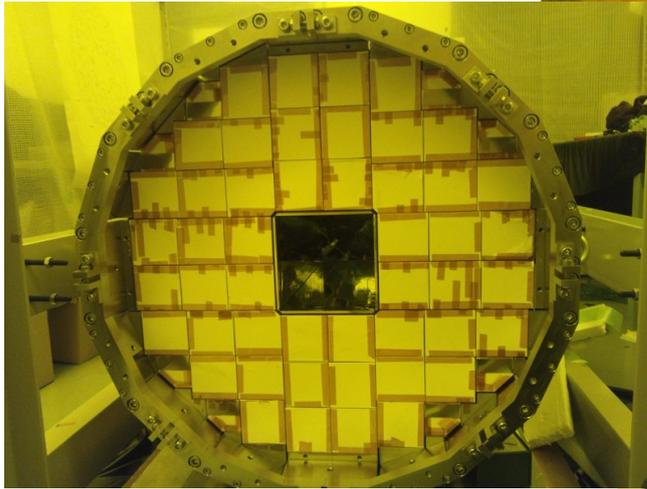
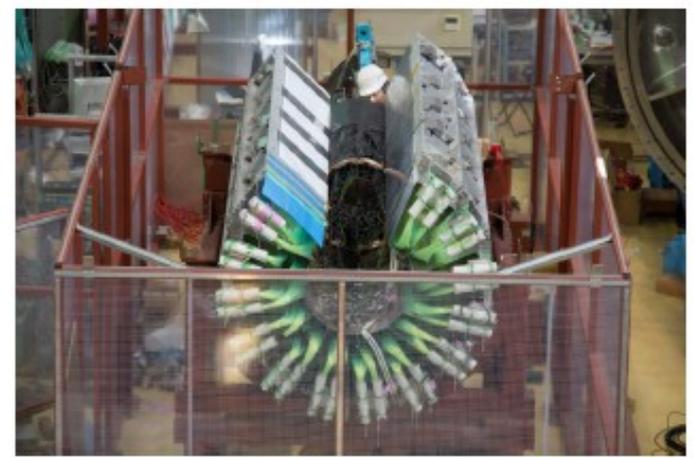
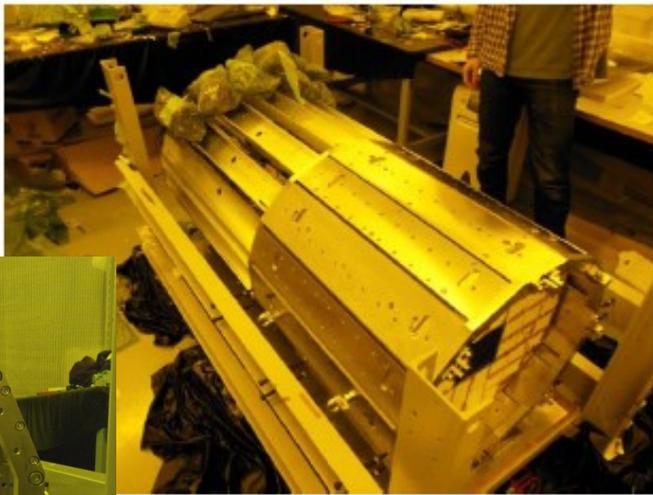


NCC, HINEMOS(河崎、関)

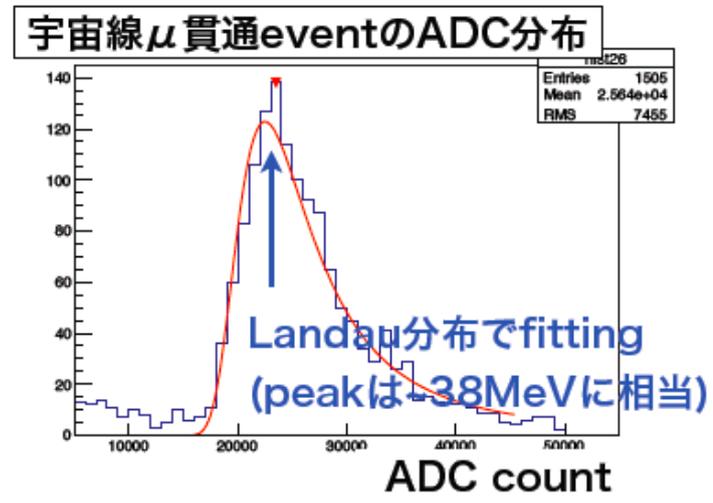
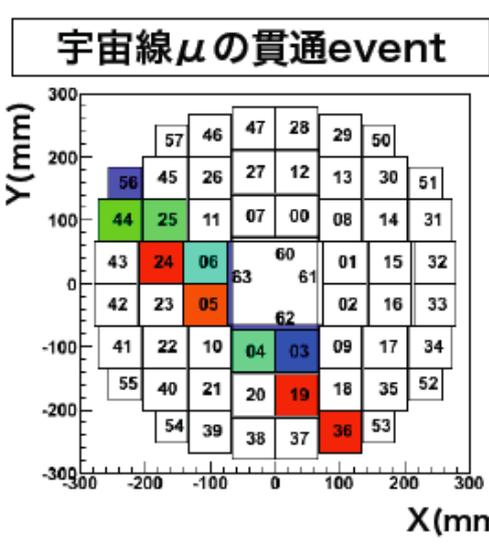
- NCC:上流部ガンマ線、中性子検出器
 - Pure CsI結晶の波長変換ファイバー読み出しによる
中性子、ガンマ弁別 → 世界初 → D論へ

HINEMOS



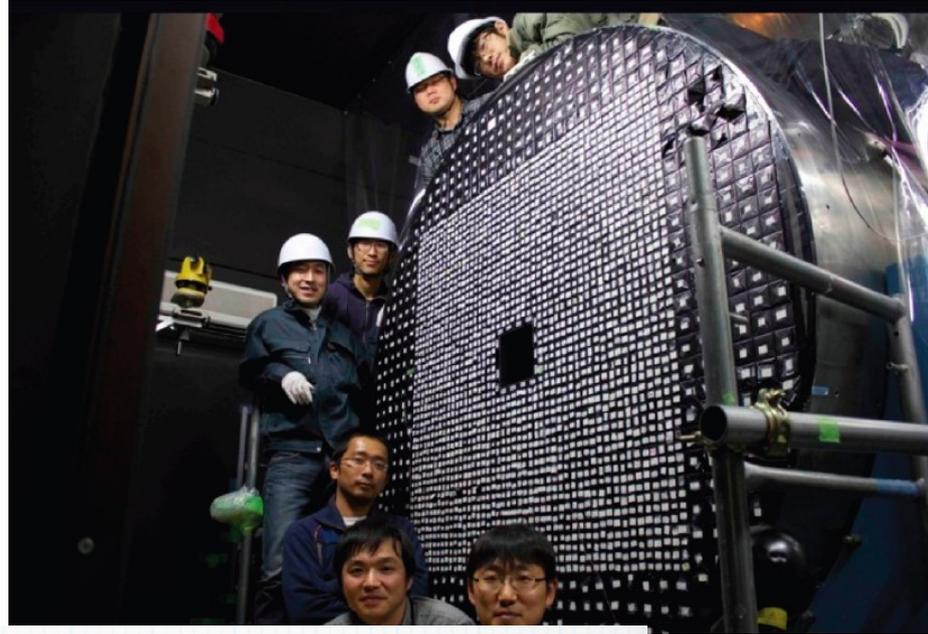


FB

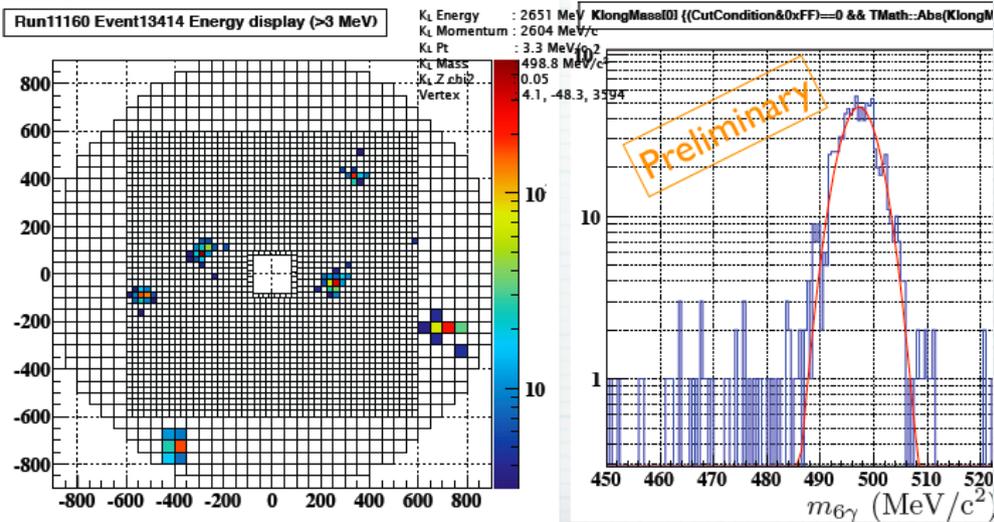


CsI(増田)

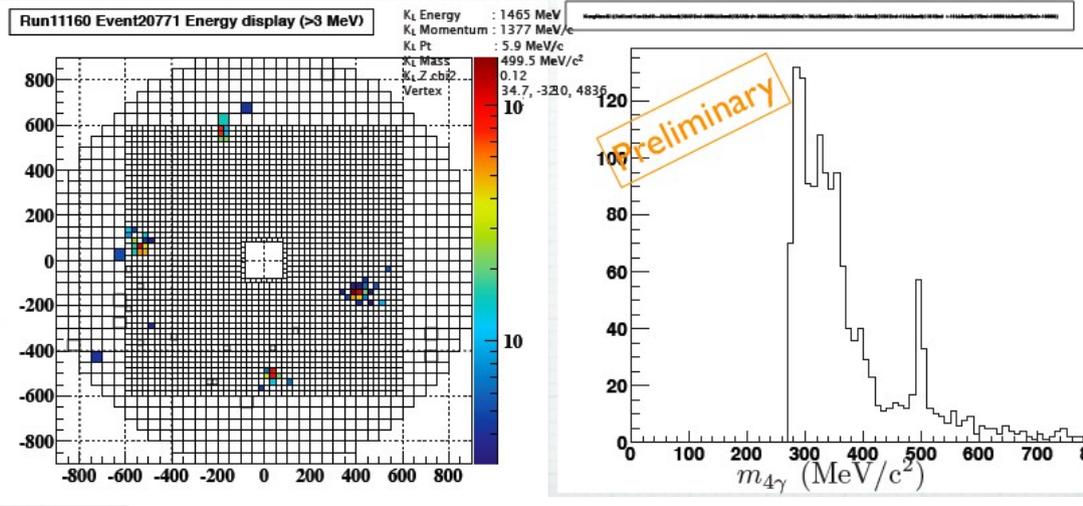
- ~2700本のCsI結晶+PMT+preAmp+高電圧供給



$$K_L \rightarrow 3\pi^0$$



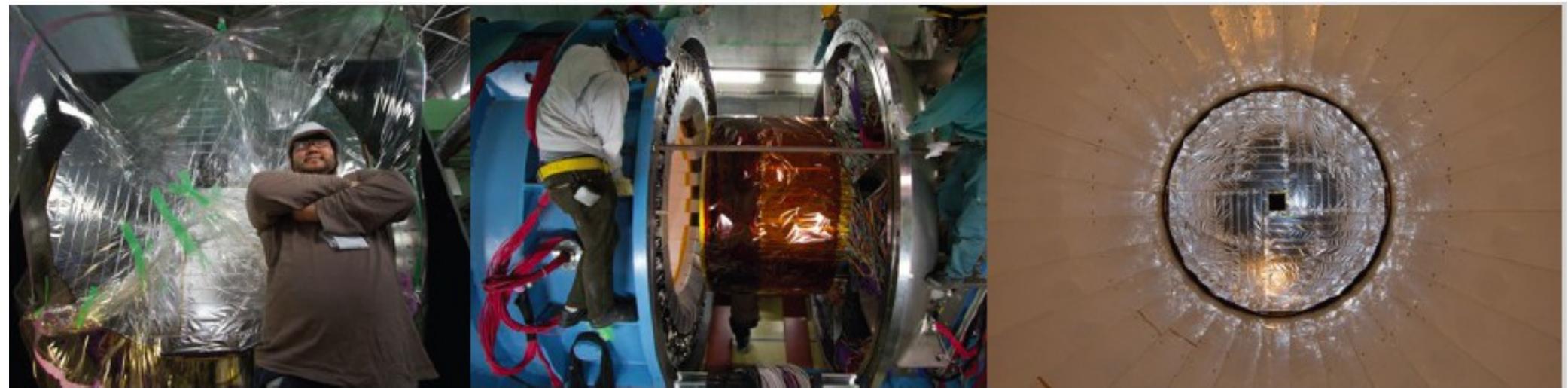
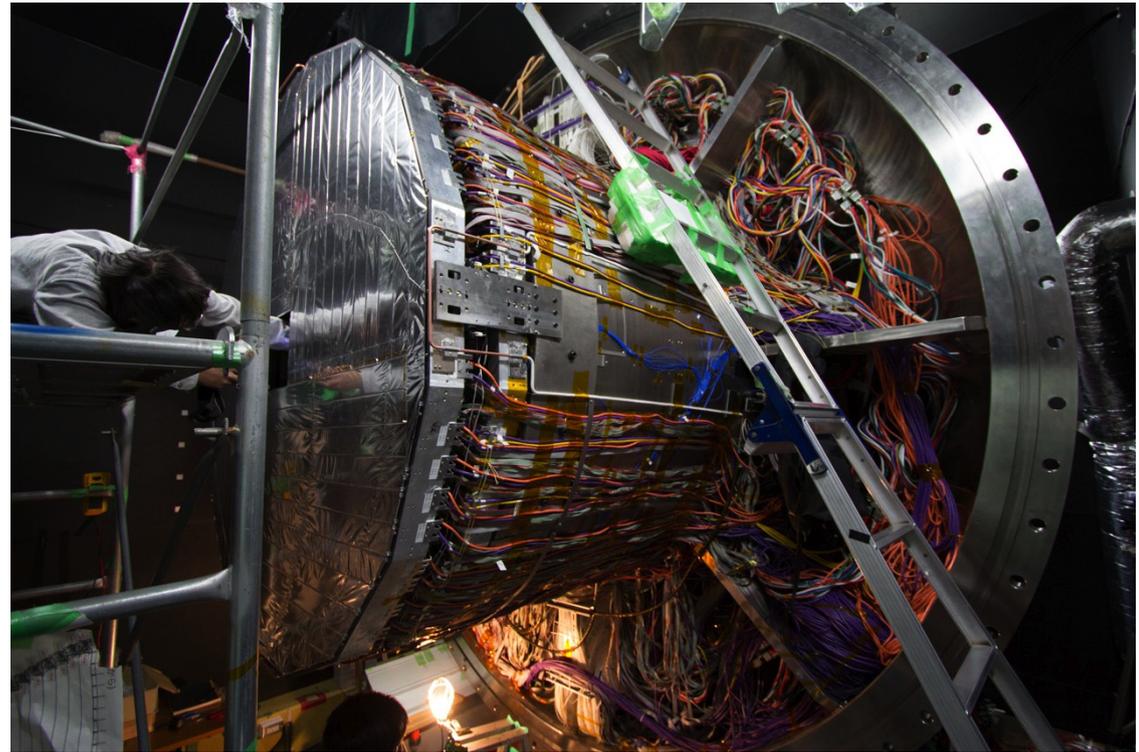
$$K_L \rightarrow 2\pi^0$$



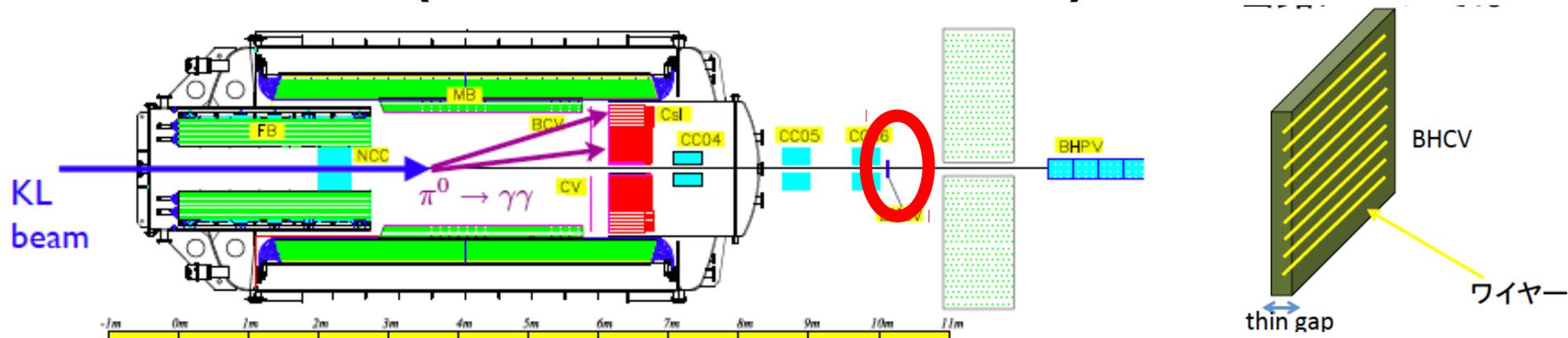
CV(内藤、前田)

低物質高感度
荷電粒子検出器
検出感度:>99.99%
3mm厚プラシン
波長変換ファイバー
MPPC

内藤:性能評価
高性能検出器 → D論



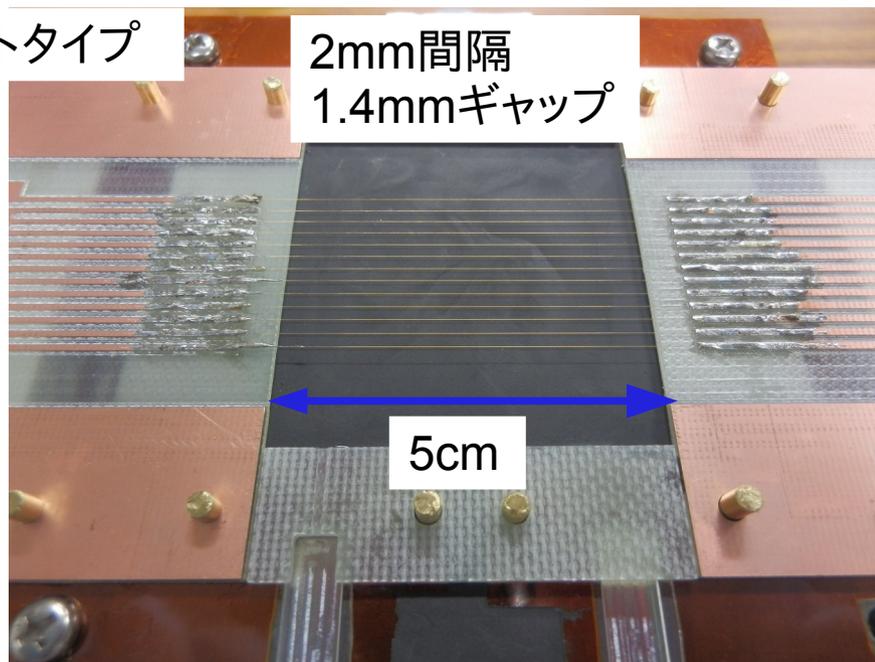
New BHCV (Wire Chamber) 中桐、上路

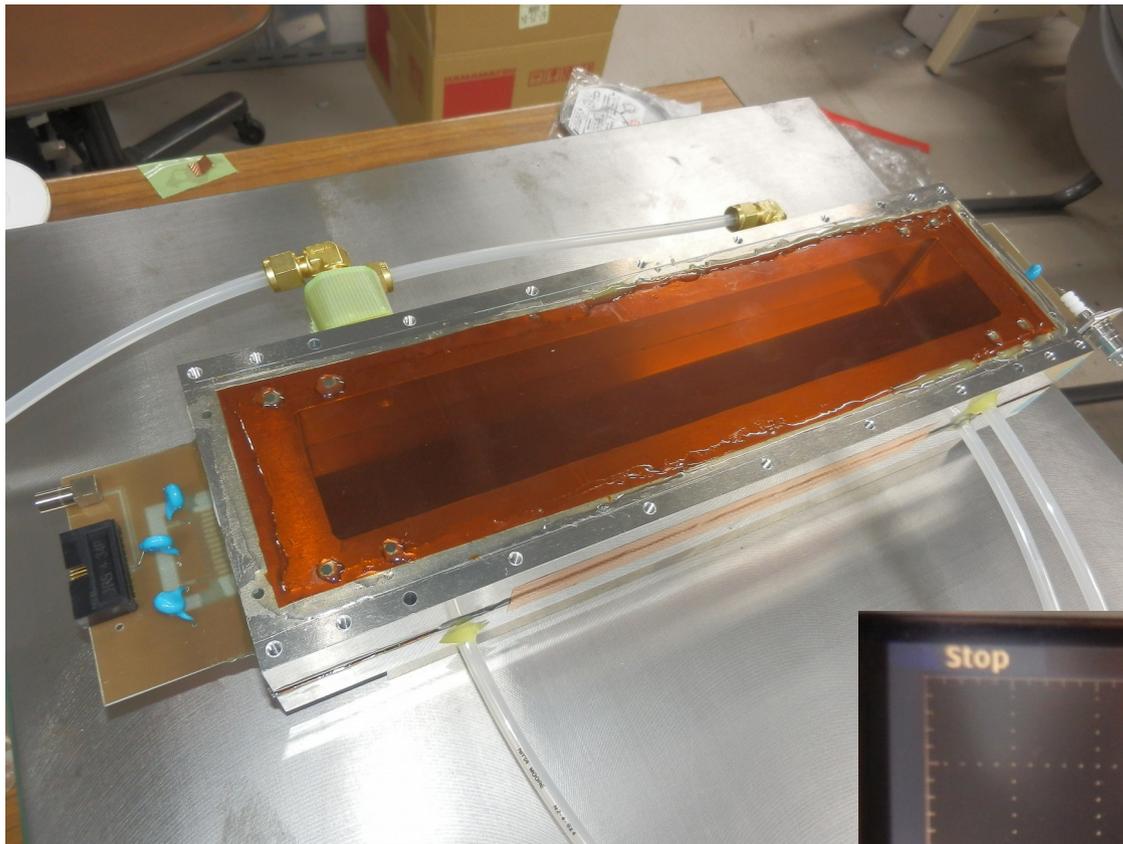


- ガンマ線0.6GHz/中性子0.6GHzの暴風雨
- この中でも耐えて、荷電粒子検出感度 99.5%

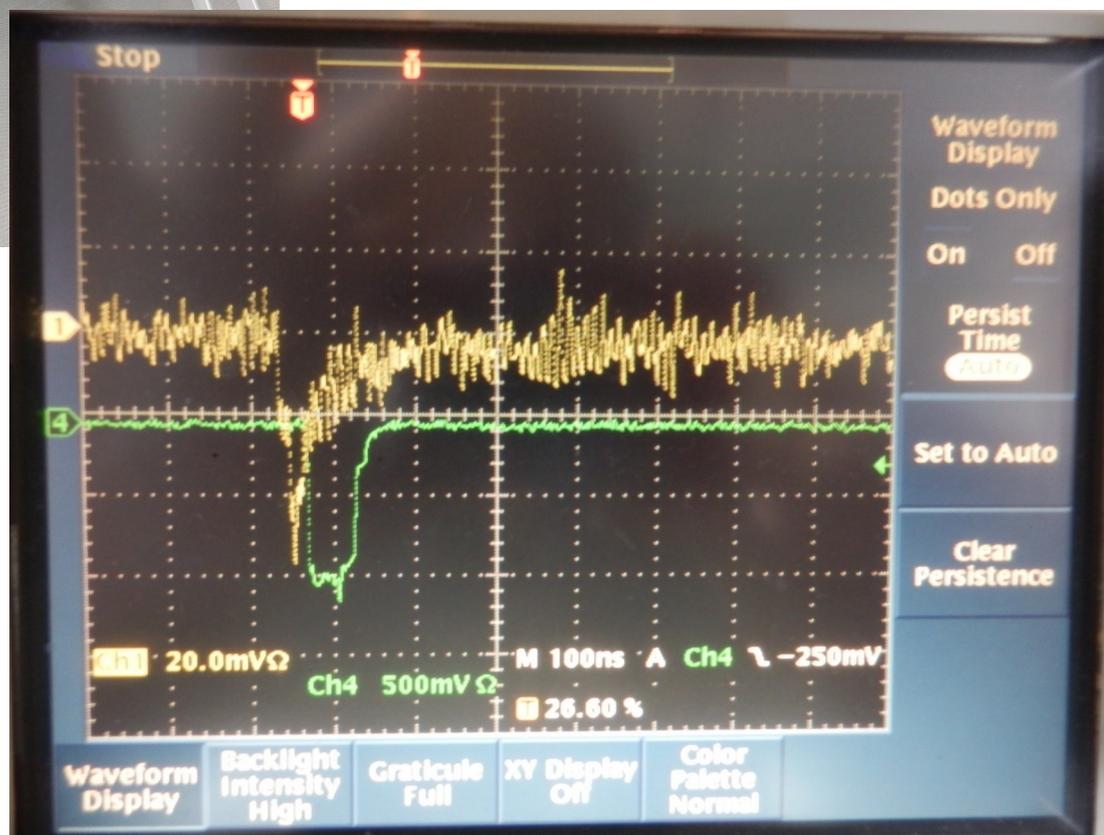


1/36 プロトタイプ



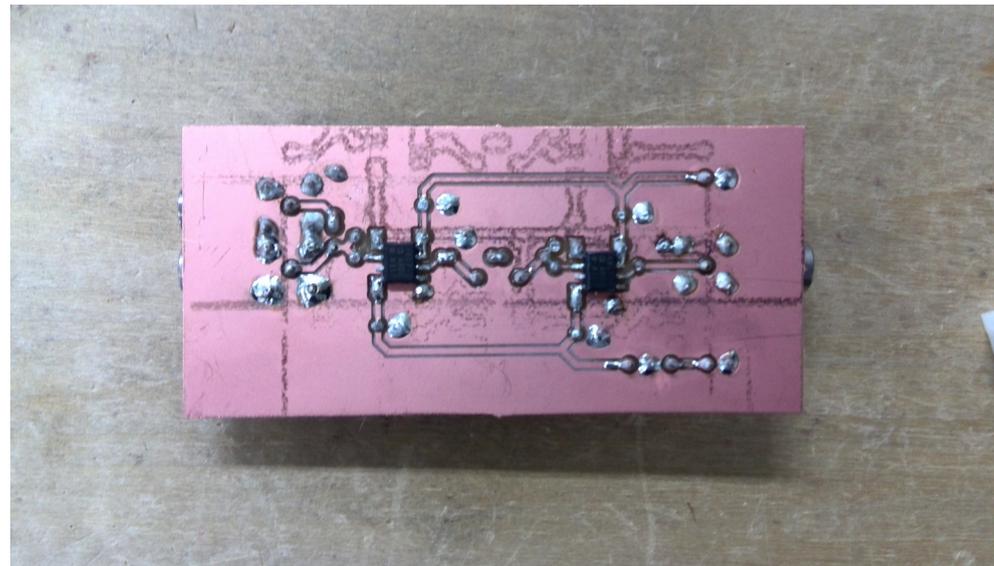
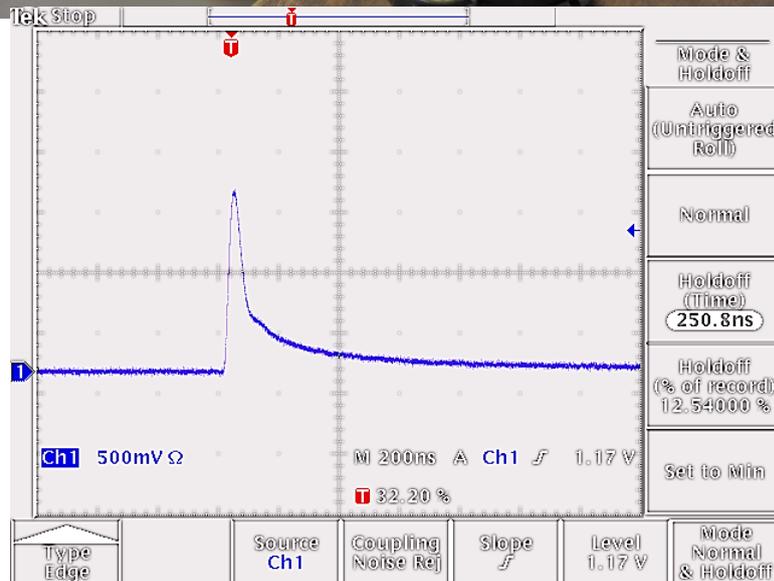
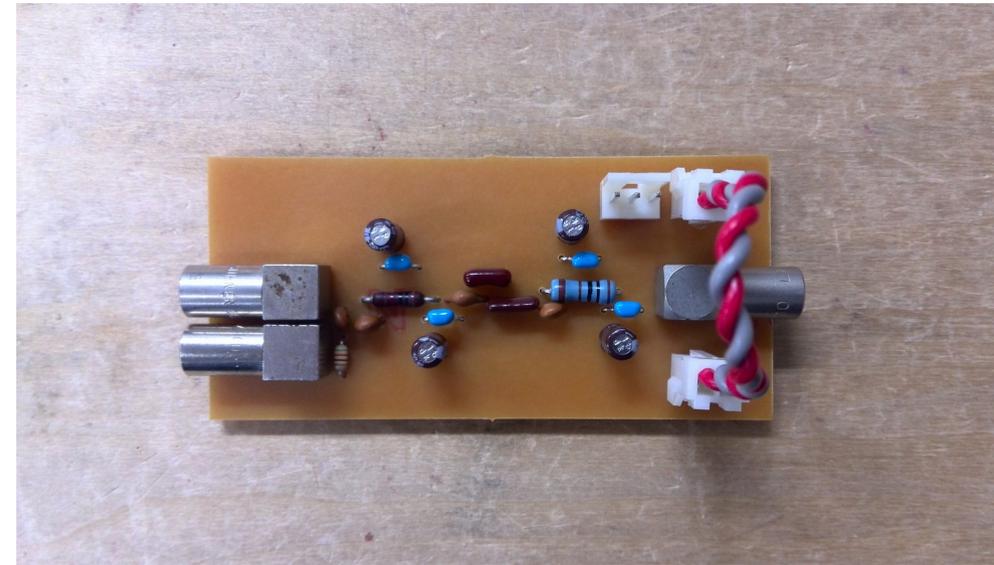


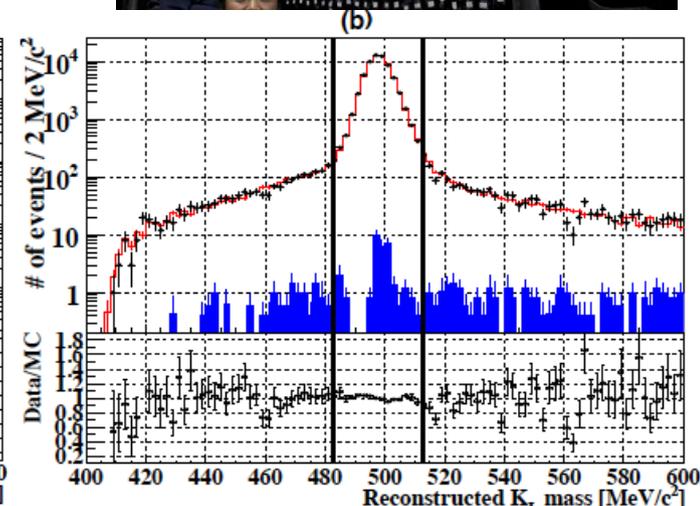
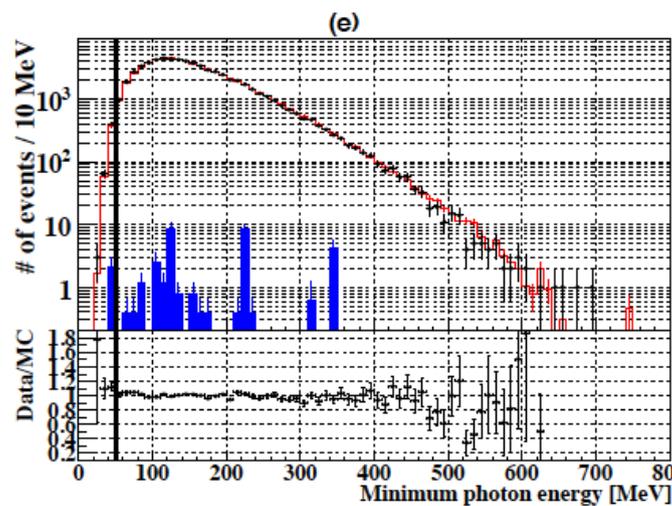
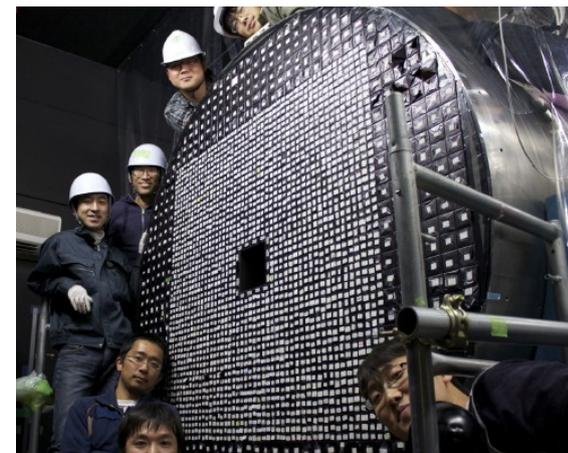
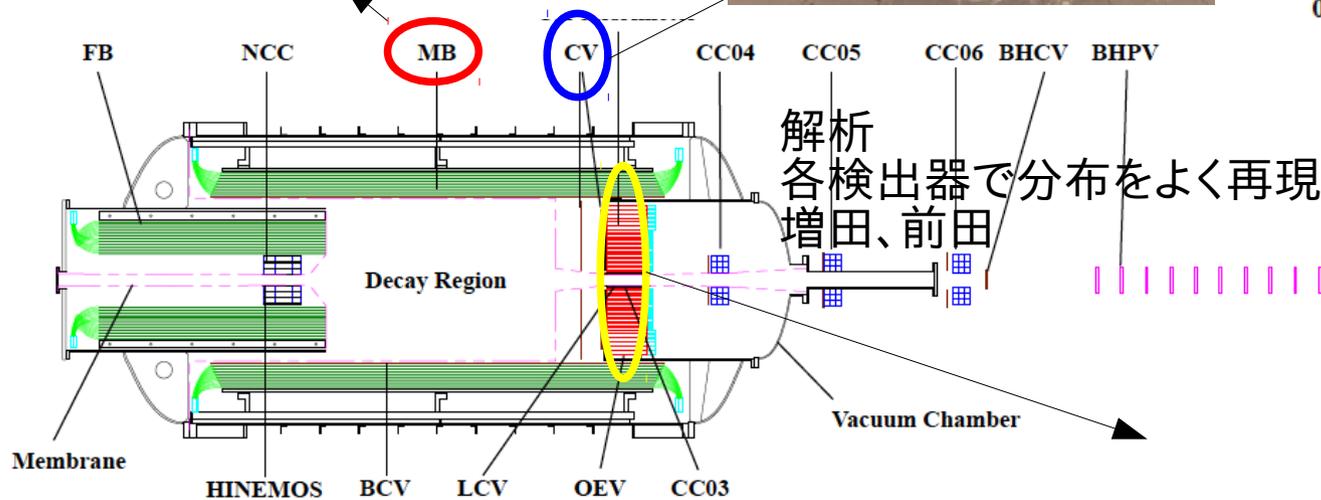
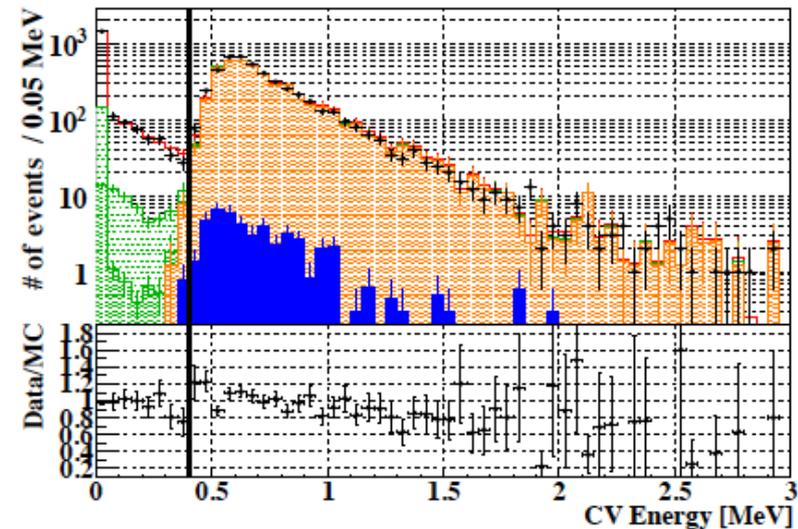
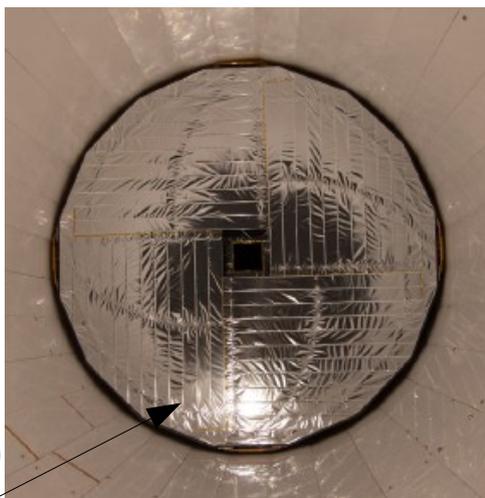
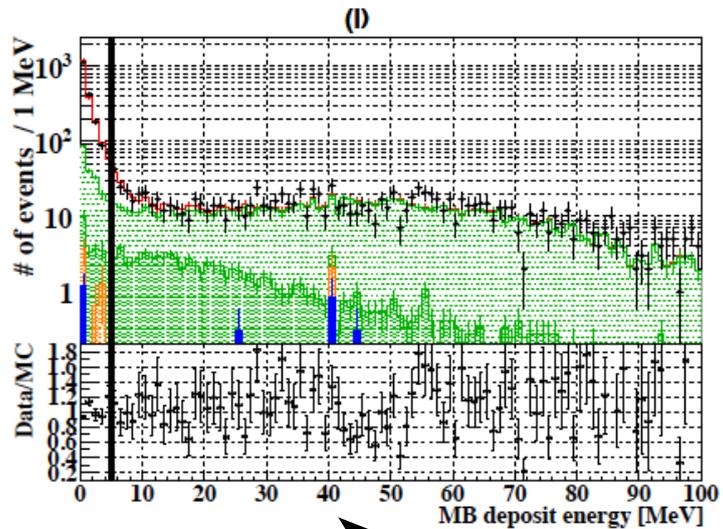
1/6 プロトタイプ
信号みえたね!



Wire Chamber Amp/Shaper 上路

LED校正システムも





スケジュール

2013

- 1月検出器調整Run
- 5月物理解析Run → 加速器事故で4日で終了
- Hadron Hallの事故調査 → 対策
 - 解析 → World Record更新を目指す
 - Inner MB建設
 - BHCV/BHPLED systemなどの準備

2014

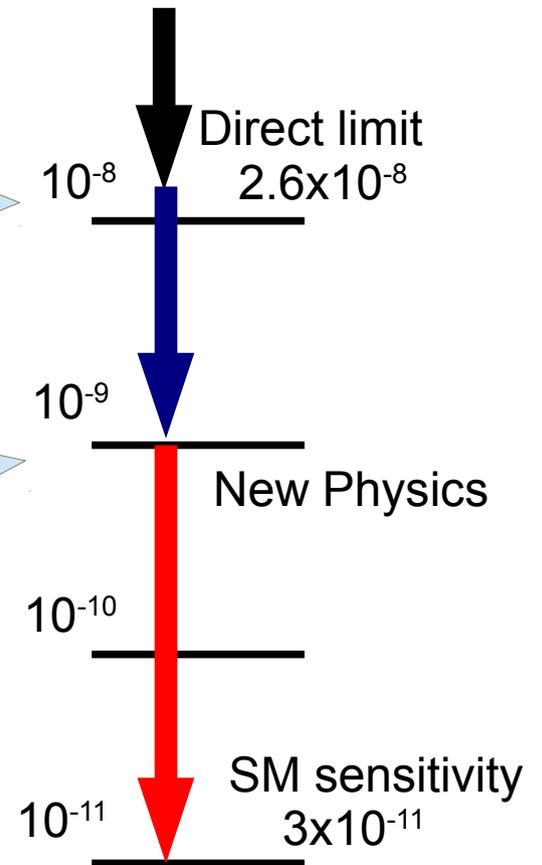
- 9月に陽電子を使ったビームテスト
- 物理Run → 何がみつかるか?

2015

- Inner MB install
- 真空タンク内部のメンテナンス
- 物理Run

2018

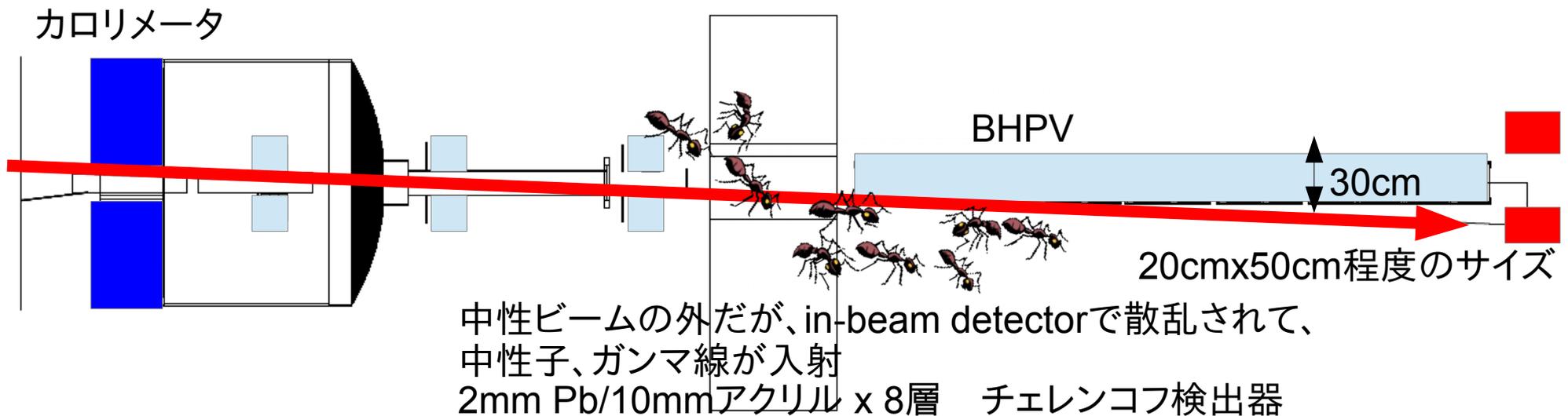
標準理論感度までの2桁にわたる新物理探索



M1のみなさんへ

1. Beam Hole Guard Counter

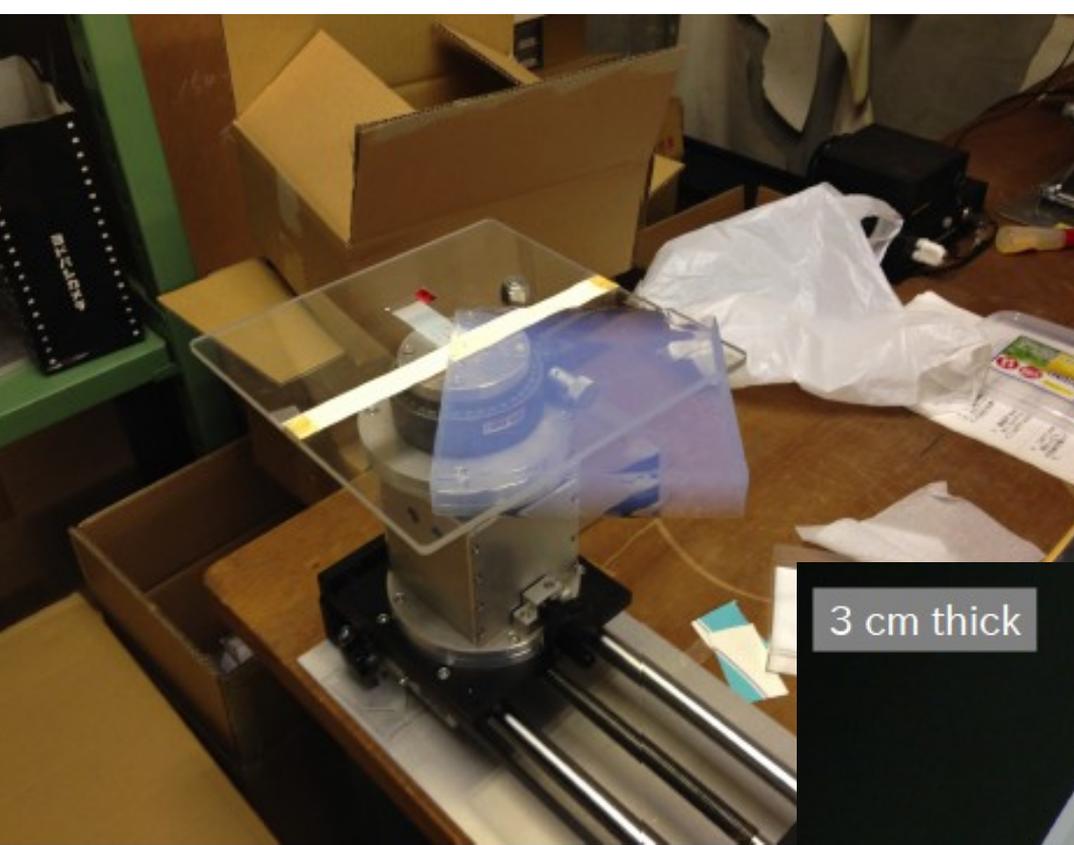
蟻の一穴：検出器をかすって、堤防に穴



2. Beam Hole Photon Veto増強

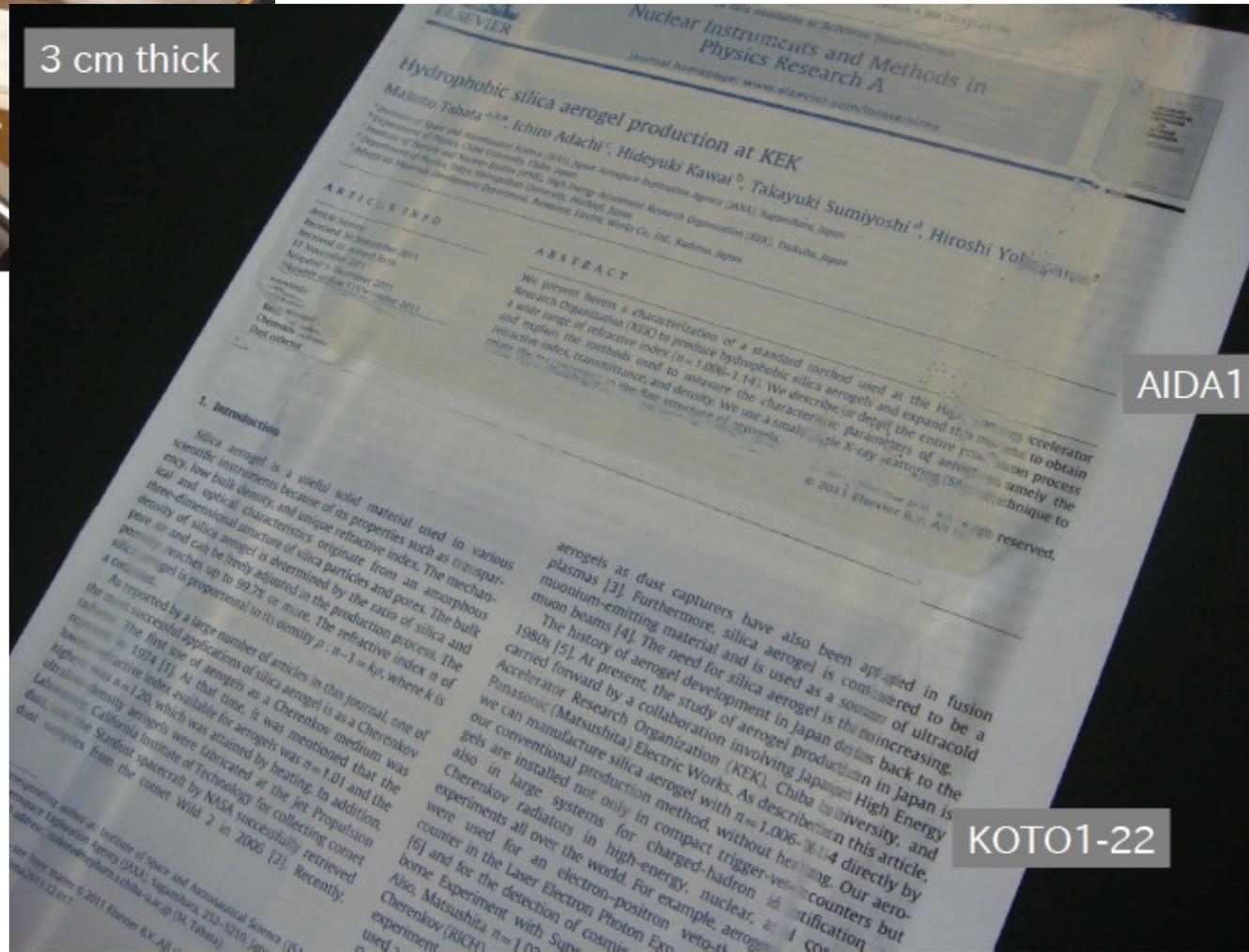
エアロゲルを作って、検出器の数を増やす

検出器を持って、KOTOに乗り込む。
視野を広げていき、物理解析へ。



薬剤を混合
熟成 → シリカネットワーク
超臨界乾燥
(液体と気体の境がない)

3 cm thick

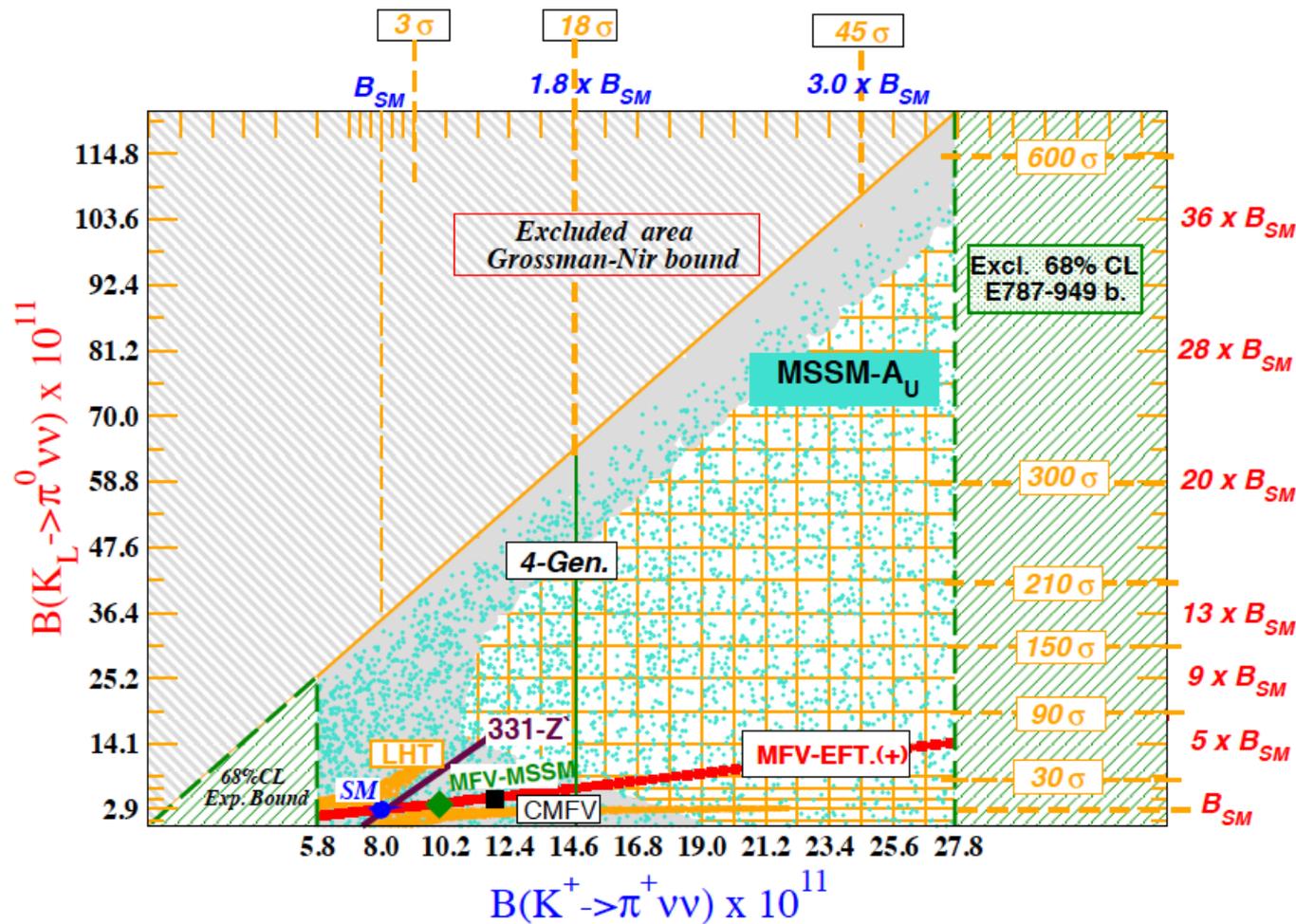


屈折率1.05
密度0.2g/cc
高性能エアロゲル
3cmx15cmx15cm
試作OK

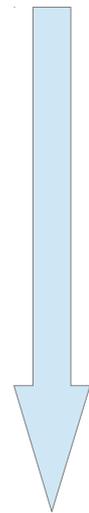
→ 本作へ向けた調整

KOTO1-22

- 自分の検出器を準備し、
KOTOに乗り込み、世界最高感度の物理解析
- いつ、なにが出てくるか？



JFY2014



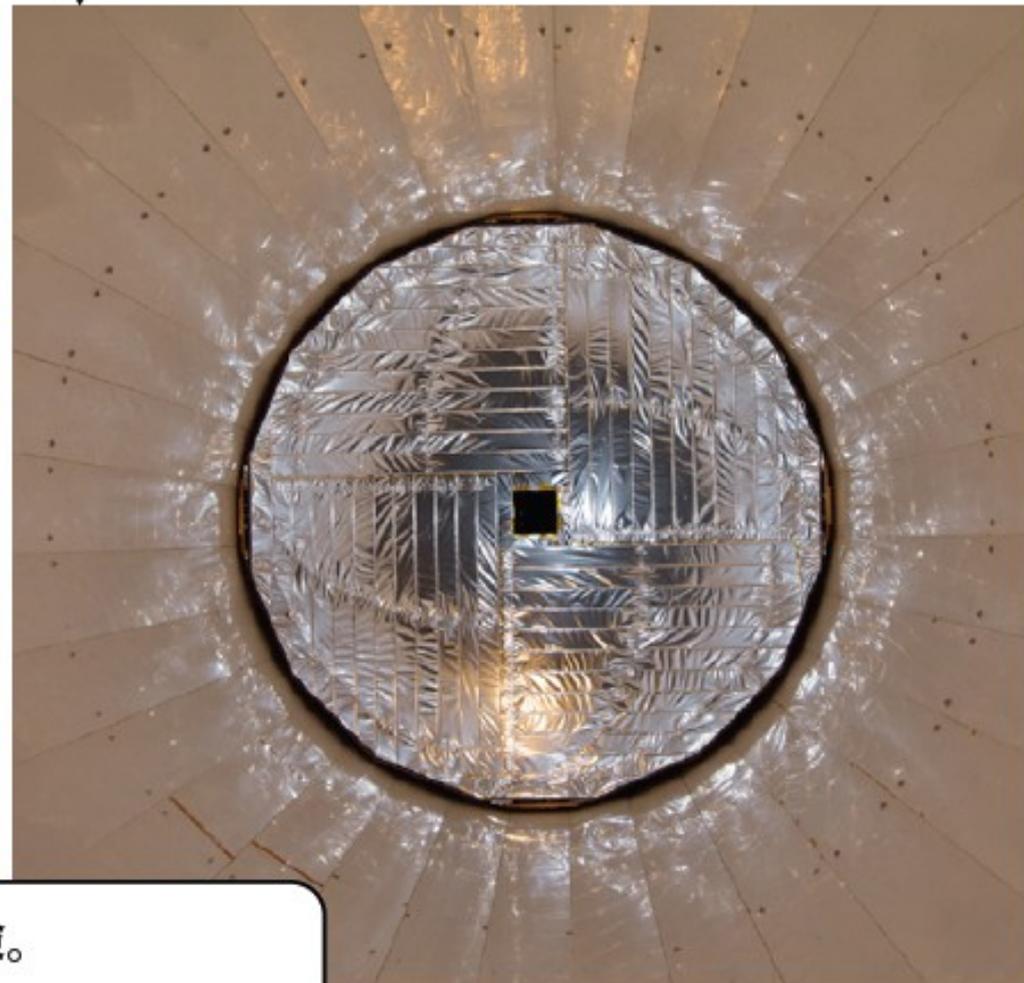
JFY2018

M1さんに向けて



← 完成した検出器と記念写真

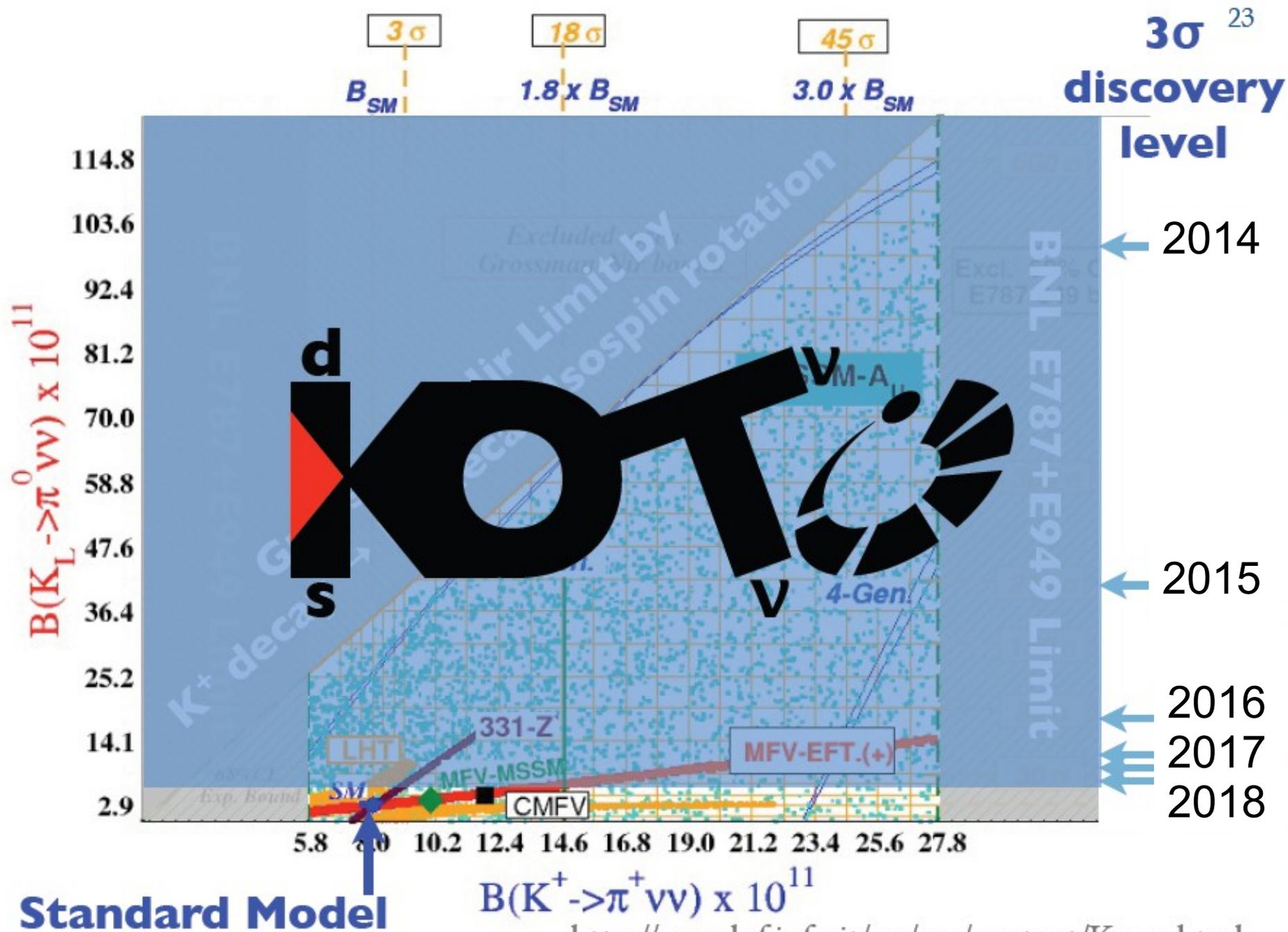
↓ 無事インストールされた検出器



KOTO実験は小規模実験。

京都の学生が中心となり行っている。

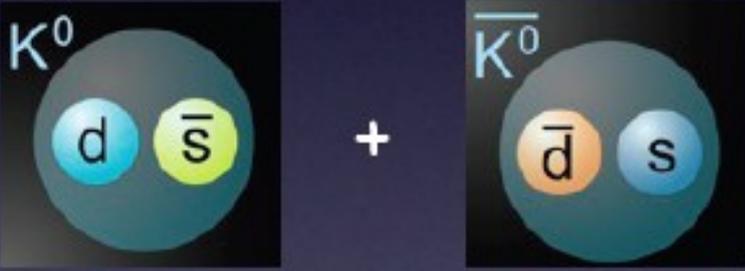
君の力が明日のKOTO実験を作る！！



<http://www.lnf.infn.it/wg/vus/content/Krare.html>

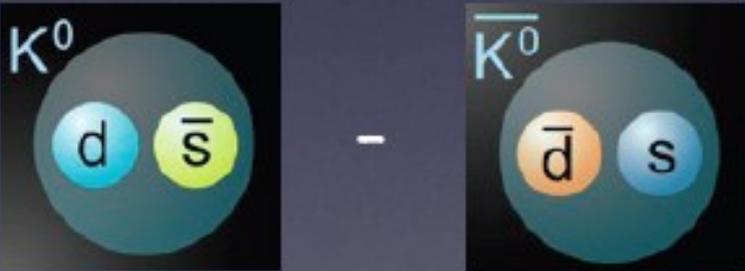
- CP変換(粒子、反粒子変換)

$K_S \sim \frac{1}{\sqrt{2}} (K^0 + \bar{K}^0)$



CP : even (符号正)

$K_L \sim \frac{1}{\sqrt{2}} (K^0 - \bar{K}^0)$



CP : odd (符号負)

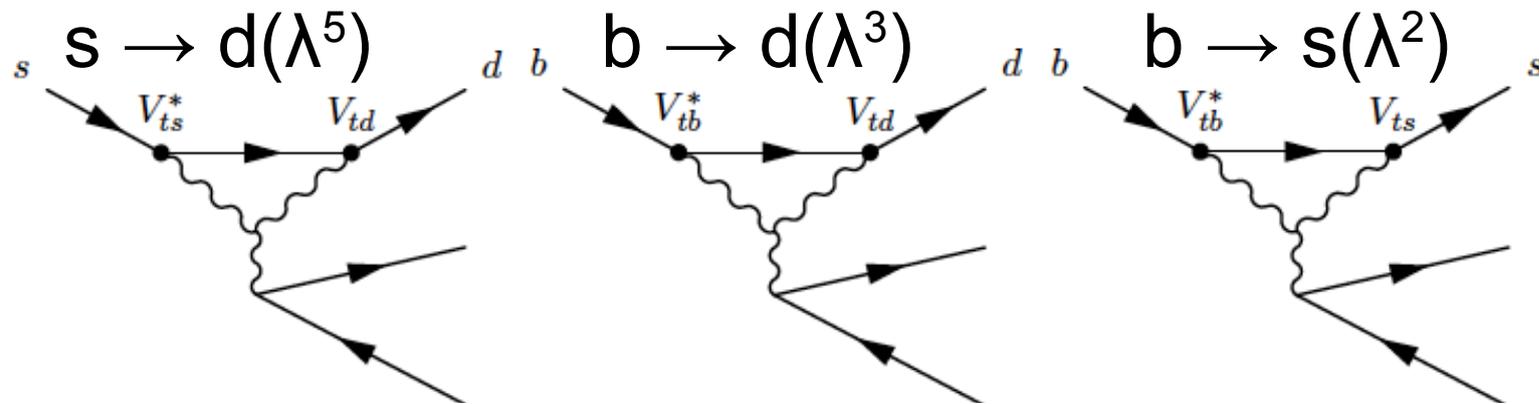
- $K_S \rightarrow 2 \pi^0$ (CP even) 崩壊が主 (π^0 のCPはodd)
- $K_L \rightarrow 3 \pi^0$ (CP odd) 崩壊が主
 - 僅かに $2\pi^0$ (CP even) 崩壊 → CP破れの発見
- 弱い相互作用の固有状態 \neq CPの固有状態!

Special role played by K sector

- Flavor Changing Neutral Current
 - GIM suppression of u and c quarks
 - Hierarchical structure of CKM for t quarks

$$\begin{array}{c}
 u \\
 c \\
 t
 \end{array}
 \begin{pmatrix}
 1 & \lambda & \lambda^3 \\
 -\lambda & 1 & \lambda^2 \\
 \lambda^3 & -\lambda^2 & 1
 \end{pmatrix}
 \begin{array}{c}
 d \\
 s \\
 b
 \end{array}$$

($\lambda=0.23$)



$$\underbrace{|V_{ts}^* V_{td}|}_{K \text{ system}} \sim 5 \cdot 10^{-4} \ll \underbrace{|V_{tb}^* V_{td}|}_{B_d \text{ system}} \sim 10^{-2} < \underbrace{|V_{tb}^* V_{ts}|}_{B_s \text{ system}} \sim 4 \cdot 10^{-2},$$

- K sector is most sensitive to New Physics with different flavor structure
- Large NP effect is possible event with SM-like B_s mixing and $B_s \rightarrow \mu\mu$