

## 5. HD 中性二次ビームライン

高エネルギー加速器研究機構

Lim Gei Youb

# 目 次

## HD 中性二次ビームライン

1	はじめに .....	5-1
2	KOTO 実験の概要 .....	5-1
2.1	実験方法 .....	5-1
2.2	$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の背景事象とビームラインへの要求 .....	5-2
3	KL ビームライン .....	5-3
3.1	構成要素 .....	5-3
3.2	コリメーションライン .....	5-4
3.3	ビームライン建設 .....	5-5
3.4	ビームライン性能評価 .....	5-6
4	まとめと今後の展望 .....	5-8
	参考文献 .....	5-8

# HD 中性二次ビームライン

## 1. はじめに

J-PARC ハドロン実験施設に建設されている KL ビームラインは KOTO 実験[1]に特化した中性二次ビームラインである。KOTO 実験は中性 K 中間子( $K_L$ )が中性パイ中間子( $\pi^0$ )と二つのニュートリノになる現象( $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊)を探索している国際共同研究である。2009 年にビームラインを完成し、2013 年に初めての物理データを取得した。陽子ビームの性能向上とともに、検出器の改善作業を行いながらデータ収集を重ね、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索の実験感度を更新し続けている。

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊は s クォークが d クォークに遷移する現象で、CP 対称性を破る過程である。標準模型の枠組みでは、弱い相互作用を媒介する 2 種類の重いボゾン(W, Z)が同時に作用する時のみに起きる過程であり、非常に小さい( $3 \times 10^{-11}$ )分岐比が予測されている。極めて短い距離での相互作用がメインである過程なので、今まで発見できなかった新しい物理の寄与が見られる可能性が高い。さらに、理論的な不確実性が大きいハドロニックマトリックス部分を高精度の測定結果を用いて求めることができたので、2%という異例な精度で分岐比の予測ができています[2]。

KOTO 実験で要求される  $K_L$  ビームは、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊信号を再構成するために必要な、断面が小さい「細いビーム」である。また、バックグラウンド事象を抑えるために、ビーム中心から離れて検出器に入ってくる粒子が少ない「綺麗なビーム」である。

2 章では KOTO 実験の概要とビームラインへの要求を記述する。3 章では KL ビームラインを説明し、4 章では簡単なまとめと今後の展望を述べる。

## 2. KOTO 実験の概要

### 2.1. 実験方法

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊は全ての粒子が電荷を持っていないので、各粒子の情報を直接求めることはできな

い。特にニュートリノを観測するためには巨大な検出器が必要なので、検出できない粒子として扱うのが現実的な考えである。 $\pi^0$ は生成されると 2 個の光子( $\gamma$ )に崩壊するので、この光子対のみが観測される事象を  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の信号として選別する。中性ビームラインには光子、中性子、 $K_L$ が混在しているが、検出器の内部では  $K_L$ だけが崩壊するので、ビームの通過範囲外で観測される粒子は  $K_L$ 崩壊によるもだと考えられる。

図 1 にはカロリメータで測定される光子対から  $\pi^0$ を再構成する方法を示す。 $\pi^0$ は  $8 \times 10^{-17}$ 秒という極めて短い時間で崩壊するので、 $K_L$ 崩壊点と  $\pi^0$ の崩壊点は同等に扱うことができる。KL ビームラインの中心線上で  $\pi^0$ が崩壊する仮定では、カロリメータに入射する光子対は  $\pi^0$ の静止質量 ( $M_{\pi^0} = 135 \text{ MeV}/c^2$ )により決められた交角( $\theta$ )を持つ。カロリメータで測定した光子のエネルギーや入射位置を用いて、式 1 の

$$\cos(\theta) = 1 - \frac{M_{\pi^0}}{2E_1 E_2} \quad (1)$$

条件を満たす曲面とビームラインの中心線が交わる位置がカロリメータから  $\pi^0$ の発生点までの距離として求められる。発生点が決まると、 $\pi^0$ の運動量を求めることができ、測定した光子対が  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の真の信号になるかを調べる作業に入る。

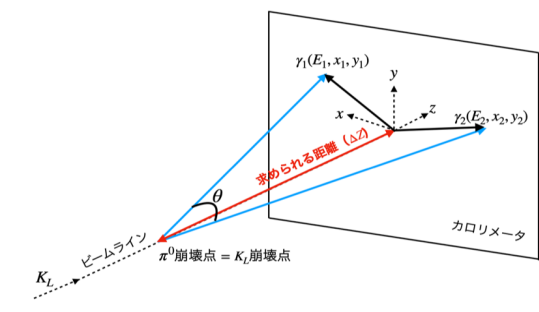


Fig. 1 カロリメータで測定した光子のエネルギー(E)と入射位置(x,y)から、 $\pi^0$ 崩壊を仮定してビームライン上での崩壊点を求められる。

$K_L$ は多様なモードに崩壊するので、カロリメータに光子対の信号を残す事象が数多く存在する。 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ 崩壊モードでは 6 個の光子が、 $K_L \rightarrow$

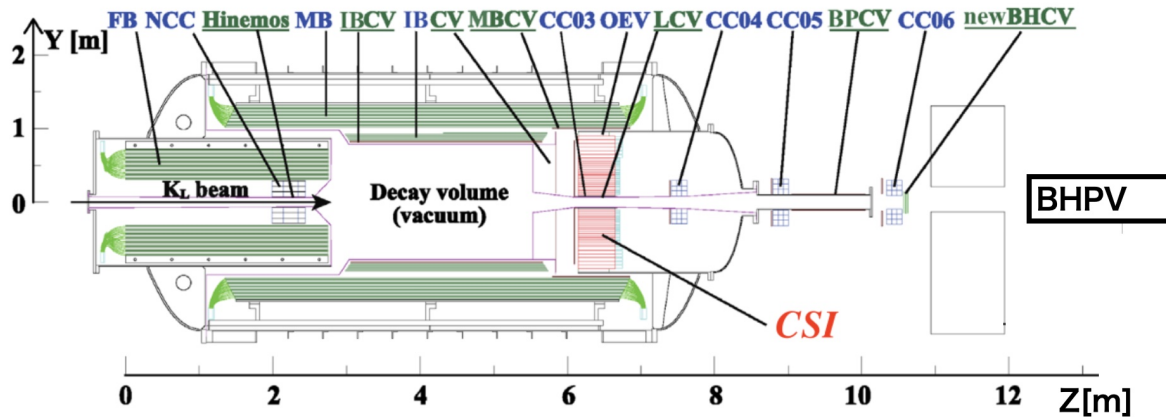


Fig. 2 KOTO 検出器の断面図

$\pi^0\pi^0$ 崩壊モードでは4個の光子が生成され、そのうち2個のみがカロリメータに入る事象は多々存在する。そのため、KOTO 検出器は探索する $K_L$ 崩壊領域を完全に囲み、崩壊で生成されるすべての粒子を検出するように建設されている。

図2はKOTO 検出器の断面図である。左から $K_L$ ビームが入り、Decay Volume と表示されている領域で崩壊し、CsI と表示されている電磁カロリメータに2個の光子信号を残す事象が探索対象になる。他 $K_L$ 崩壊モードは探索領域を完全に囲む検出器 (veto カウンター<sup>1</sup>と呼ぶ) に信号を残すので、バックグラウンドとして探索対象から排除される。完全な囲みのために、FB と MB は探索領域の上流まで伸びている。また、BHCV(Beam Hole Charged Veto) と BHPV (Beam Hole Photon Veto) はビームライン中に設置されている。

## 2.2. $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊の背景事象とビームラインへの要求

標準模型の計算によると $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊分岐比は $3 \times 10^{-11}$ であり、一つの信号事象を観測するためには300億個の他崩壊事象を排除しなければならない。大半の $K_L$ 崩壊は2個の光子以外の粒子が同時に発生することから、veto カウンターの検出能力が実験の成功を左右する。例えば、 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$

崩壊モードを排除するためには、光子に対する veto カウンターの検出効率が99.99%程度になる必要がある。

バックグラウンドを排除するためには、検出器の光子検出効率だけではなく、ビームラインの性能も重要である。二千万倍高い確率で起きる $K_L \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊は $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊と同様に2個の光子のみが存在する。ただし、 $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊にはニュートリノ対が持っていき運動量のため、 $\pi^0$ 運動量の $K_L$ 運動方向と垂直方向の運動量成分 (transverse momentum,  $P_T$ ) が大きくなるが、 $K_L \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊では再構成された $\pi^0$ <sup>2</sup>には $P_T$ がない。この $P_T$ が分別力ある変数になるためには、入射 $K_L$ の運動方向が揃っている必要がある。また、 $\pi^0$ の崩壊位置がビーム中心線上にあると仮定したので、ビームサイズが $P_T$ 再構成の誤差として反映される。

図3は $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊探索結果の一例である[3]。色付けられている部分が $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ 崩壊に感度があるところで、濃くなっている場所ほど発見可能性が高い領域になる。探索領域は右下が切られている四角形で表示されていて、バックグラウンドになる他 $K_L$ 崩壊 (大半は $P_T$ が探索領域より小さい) は完全に排除されている。

探索領域の上流 (2m から 2.5m) に残っているイベントはビーム中心から離れて検出器に入射

<sup>1</sup> 電磁カロリメータでも2個を超える光子信号が存在すると、veto カウンターの役割をする。

<sup>2</sup> 観測された光子対は $K_L$ から発生したものであるが、 $\pi^0$ を仮定して再構成されたので、ここでは $\pi^0$ という表現を使う。

する中性子（ハロー中性子）起因のものである。中性子は物質との反応で $\pi^0$ を生成する。探索領域の上流にはビームライン付近を囲む検出器が設置されていて、ハロー中性子がこの検出器に入り、 $\pi^0$ を作る。2個の光子のみが存在する事象なので、探索の最終段階まで残る事象が多く存在する。ハロー中性子起因の $\pi^0$ 事象は、崩壊点が検出器の位置になるので、探索領域を検出器位置から離れて設定することで排除することができる。ただし、ハロー中性子数が多くなると、探索領域に入り込むことになる。

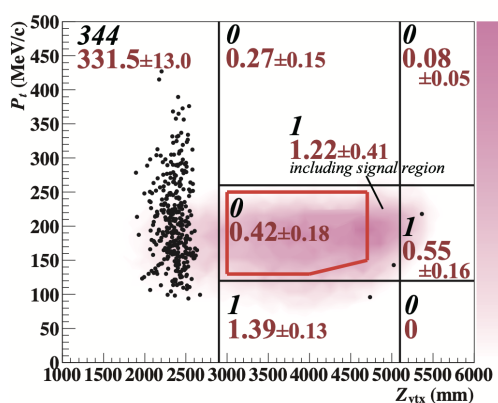


Fig. 3  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の探索領域

以上の要求を満たすために、KL ビームラインは「細くて綺麗なビーム」を実現するように作られている。

### 3. KL ビームライン

#### 3.1. 構成要素

図4にハドロン実験施設でのKL ビームラインの配置を示す。メインリング (MR) から取り出された30GeVの陽子ビームが長さ60mmの金標的に入射し、2次粒子を生成する。生成された2次粒子のうち、陽子ビームの進行方向から16度の方向に飛び出す粒子がKL ビームラインに入ってくる。

ビームの強度、形状は2台のコリメーターにより決められ、標的から20m下流のKL 実験エリアに導かれる。ハドロン実験施設にはT1標的に生成された2次粒子を三つのビームラインが共有することで、陽子ビームを最大限に活用する。K1.1 ビームラインとの共存のため、KL ビームラインのコリメーターは標的から6.5m下流から始まる。

KOTO 実験では電磁カロリメータのビームホールを通りぬける光子を検出するため、ビーム中にも検出器が設置されている (BHPV)。検出器が正しく作動する条件である「エネルギーが100 MeV以上の光子によるカウンティングレートが1MHz以下であること」を満たすために、長さ70mmの鉛ブロックをコリメーターの上流に設置している。この光子吸収体はビームラインを妨

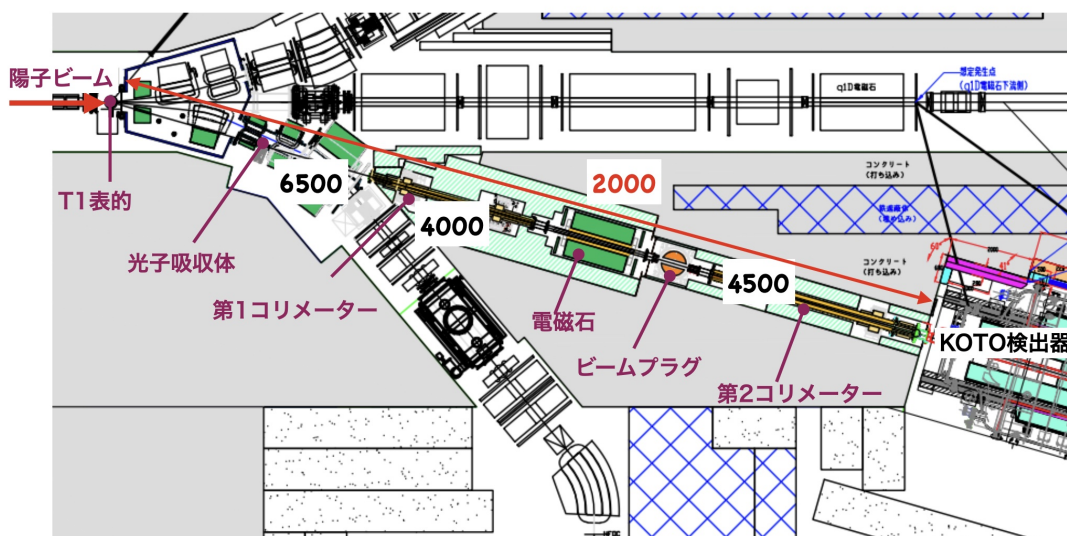


Fig. 4 KL ビームラインの構成要素

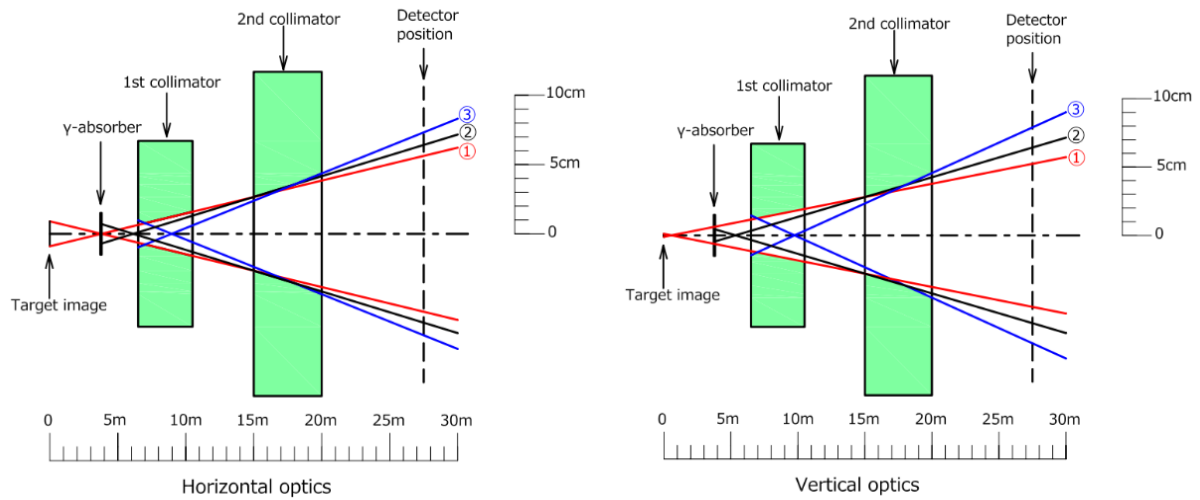


Fig. 5 水平方向(左)と垂直方向(右)の コリメーションライン

げることになるので、通過する中性子の散乱源にもなる。そのため、可能な限り上流で K1.1 ビームラインとの干渉がない場所に設置されている。第1 コリメーターと第2 コリメーターの間には 3 T・m の磁場を設置し、荷電粒子を排除する。

T1 標的までのビーム運転を止めずに KL 実験エリアに入る時には、電磁石の下流部に設置されているビームプラグを活用する。ビームプラグは円筒の側面に穴が作られていて、普段はこの穴をビームが通過する。ビームを遮断する時には、このビームプラグを 90 度回転させる。

空気との散乱によるハロー中性子の生成や空気の放射化を防ぐために、光子吸収体を除くすべてのビームライン要素は真空チャンバーの中に置かれている。

### 3.2. コリメーションライン

KL ビームはコリメーターの内部に作られている空洞を通して実験エリアに到達するので、コリメーター空洞の形状（コリメーションラインと呼ぶ）がビームの特性を決める。KL ビームラインではハロー中性子の生成を抑えることが最も重要である。ハロー中性子はコリメーターの内部での多重散乱により生成されるので、コリメーション

ラインは散乱可能性を最小限にするように決められている[4]。コリメーター内部での散乱を防ぐためには、生成された二次粒子からコリメーターの内部が見られないコリメーションラインが必要になり、標的イメージを考慮しなければならない。

一定の大きさ ( $\sigma_x = \sigma_y = 1.3\text{mm}$ ) の陽子ビームが長さ 54mm の Ni 標的<sup>3</sup>で 2 次粒子を生成する様子を 16 度のビームラインから見ると、 $x=4.3\text{mm}$ ,  $y=1.3\text{mm}$  の長方形のイメージになる。そのため、コリメーションラインは水平(X)方向と垂直(Y)方向で異なる。

図5のライン①はビームの大きさを決める線である。得られる  $K_L$  数とバックグラウンド除去能力の観点から、検出器の入口(標的から 21m 下流)で  $85\text{mm} \times 85\text{mm}$  に決められた。このビームサイズであれば、崩壊点や  $P_T$  の再構成精度が実験の要求を満たしているからである。コリメーターの内面がライン①に整列されていれば、二次粒子の生成点からはコリメーターの内面が見えなくなり、内面での散乱が発生しない。

光子吸収体で散乱された中性子が第2 コリメーターの内部で再び散乱される事象を抑えるため、第2 コリメーターはライン②により決められる。

<sup>3</sup> KL ビームライン建設時の標的は直径 360mm で異なる厚みの Ni 円盤を 5 枚合わせて総 54mm の長さを持つ標的を使用した。

さらに、第2 コリメーターの後半部では第1 コリメーターの入口で散乱された中性子が再散乱によりハロー中性子になる確率を抑えるため、ライン③で示す微調整を行なっている。

### 3.3. ビームライン建設

#### 3.3.1. コリメーター製作

第1 コリメーターは4m、第2 コリメーターは5m の鉄ブロックで製作されている。コリメーター内部の空洞にコリメーションラインの台形穴を製作するために、半割りの鉄ブロックに台形の溝を製作し、結合した[5]。

図6で示すように、製作された鉄ブロックはステンレス鋼の角パイプの中に収納され、真空状態でビームを通す。各コリメーターの先端50cm領域はコリメーターを通り抜ける中性子を防ぐために、鉄の代わりにタングステンブロックを設置している。同じ目的で、第2 コリメーターの終段50cmにもタングステンブロックを使用している。



Fig. 6 製作されたコリメーターの写真

#### 3.3.2. XY ステージ製作

コリメーターは設置後に設計されたコリメーションラインにアライメントされる。そのためにXY ステージと呼ばれる架台を各コリメーターの上流と下流に設定して、コリメーターを載せている。各XY ステージは水平方向と垂直方向に独立に移動し、コリメーターの位置を調整する。コリメーターの位置情報を各ステージに設置されているポテンショメータから取得することで、コリメーターの調整をビームライン外部からリモートで行う。

#### 3.3.3. 電磁石

電磁石は KEK-PS で使用していた偏向電磁石を再利用することで、建設費用の削減をはかった。長さ1.5mで、2.2kAの電流で2Tの磁場を提供する。ビームパイプの内部には熱中性子吸収のため、ボロン入りのシートが設置されている。

#### 3.3.4. ビームプラグ製作

図7は製作されたビームプラグの写真である。黄銅で作られた、直径60cm、高さ25cmの円筒の横に直径15cmの穴が作られている。ビーム運転時はビームラインに穴の中心を合わせていて、ビームを遮断する時には、プラグを90度に回転する。

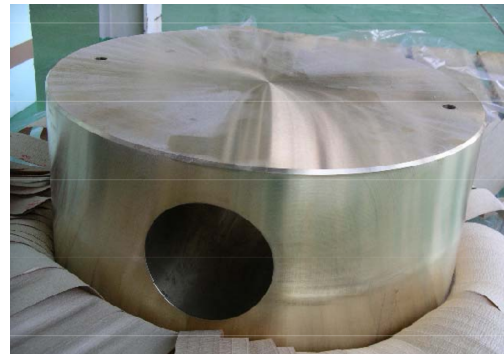


Fig. 7 ビームプラグの写真

#### 3.3.5. 構成要素の設置

図8は製作されたビームライン構成要素の設置作業の様子を示す。実験ホール建設時にKLビームラインのために幅2m(上流部)と1m(下流部)のコンクリート溝を予め設置した。深さ2mの溝の中心部に前述の構成要素が設置されていて、設置場所以外は鉄遮蔽体で隙間なく埋められている。コリメーターの周辺にはアラインメントのために20mm程度の自由空間が設けられているが、ビームライン上流からの粒子の通過を防ぐために凸凹とした構造になっている。

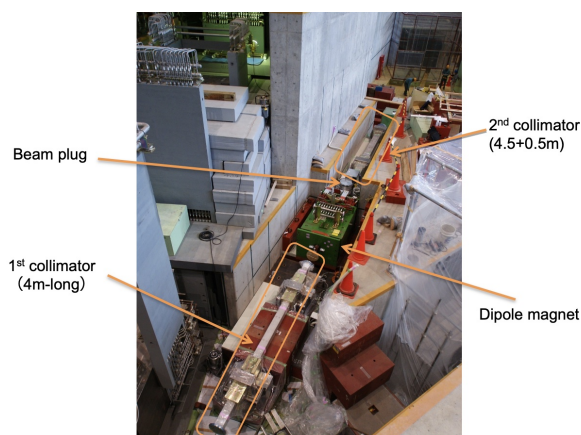


Fig. 8 ビームライン建設の写真

### 3.3.6. コリメータ調整

データ取得の前に、コリメーションラインの健全性を確認する。ビームの中心位置、形状などの情報は蛍光体スクリーンに映るビームイメージを高性能カメラで読み取るビームプロファイルモニター[6]を用いて得られる。このモニターをビーム中心に挿入し、各コリメータの両端を順次動かしながらビーム情報の変化を測定する。

図9に第1コリメータ先端部の水平位置を動かした時のビームプロファイルモニターの応答を示す。コリメータの先端部を中心位置から左右にずらすと、総光量が減り分布も歪む。最大の光量と対称分布を持つところをコリメータの位置とする。同様の作業を上下にも行い、垂直位置を決める。第1コリメータの終端、第2コリメータの両端でも同じ作業を順次行い、アライメントを完了する。作業完了後には物理データ

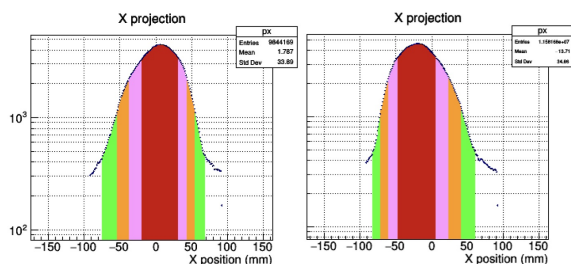


Fig. 9 第一コリメータの先端部を左右に動かすと、モニターの応答が歪む。

の取得のため、プロファイルモニターをビームラインから取り外す。

## 3.4. ビームライン性能評価

### 3.4.1. ビームプロファイル

ビームライン建設後にはビームプロファイル測定を行った。中性ビームには光子、中性子、 $K_L$ が混在しているので、粒子に対して違う応答特性を持つ2種類の検出器を用いて、それぞれの寄与を詳細に確認した。

図10は細長い2種類の検出器(PWO結晶とプラスチックシンチレータ)を水平方向に移動させながら測定したカウンティングレートを示す。PWO結晶(上)とプラスチックシンチレータ(下)で測定したカウンティングレートはシミュレーション予測とよく一致している。右の図はそれぞれの検出器により高い閾値をセットして測定したカウンティングレートである。高い閾値では中性子のプロファイルが主な測定対象になっているが、シミュレーション計算とはよく一致している。ハロー領域でのカウンティングレートはビーム粒子の空気との散乱によるものが多く含まれている。また、荷電粒子を含む $K_L$ 崩壊からの寄与も存在する。

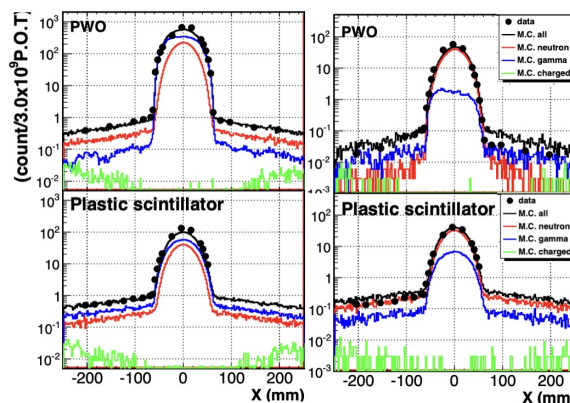


Fig. 10 ビーム中心からの離れた位置で得られるカウンティングレート

### 3.4.2. 中性子測定

中性子のエネルギー分布の測定は  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  の有感領域を持つハドロンカロリメータを用いて行った。厚さ4mmの鉄板と3.7mmのプラス



チックシンチレータを交互に積層した検出器である。24層を1個のモジュールにして、5モジュールで構成された3.6ハドロン反応長(3.6 $\lambda$ )を持つサンプリングカロリメータである。

ビームラインに混在する光子の寄与の取り除くために、鉛板とプラスチックシンチレータで構成されている電磁カロリメータ(輻射長:18X $\phi$ )をハドロンカロリメータの前に設置する。

測定したエネルギーデポジットから中性子の入射エネルギーを求めるにはハドロンカロリメータの測定精度が十分ではない。そのかわりに、シミュレーション計算で得た中性子の運動量分布(図11の左)をインプットにして、ハドロンカロリメータの応答特性を入れたシミュレーション計算(M.C.)を得られたデータと比較した(図11の右)。測定データとシミュレーション計算はよく一致することがわかる[7]。中性子のシミュレーション計算及び測定の精度には限度があるので、物理データの解析を行う時に、正確なバックグラウンド予測は物理データと同じ環境で取得したデータを用いて行っている。

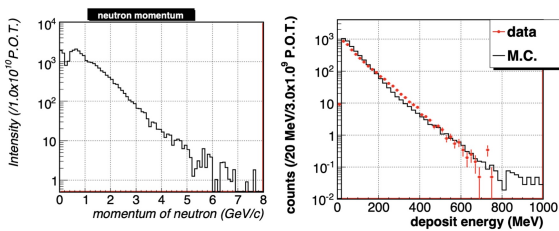


Fig. 11 中性子運動量のシミュレーション結果(左)とハドロンカロリメータの測定結果

### 3.4.3. $K_L$ 測定

検出器に入る $K_L$ 数はKOTOの実験感度に繋がる重要な情報であるが、シミュレーション計算の予測値が使用する計算コードにより異なる結果になっている。表1には各計算コードが予測している、T1標的に入射する $2 \times 10^{14}$ 陽子から得られる $K_L$ 数を示す。ハドロン反応の計算で3倍ほどの違いはあり得ることはあるが、目指す実験感度達

成に要する時間差の観点では正確な情報は欲しくなる

Table 1.  $2 \times 10^{14}$ POT<sup>4</sup>で得られる $K_L$ 数の予測

GEANT4	$0.74 \times 10^7$
GEANT3	$1.51 \times 10^7$
FLUKA	$2.07 \times 10^7$

図12は $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 崩壊を選別し、 $K_L$ 数を求める実験のセットアップを示す[8]。 $\pi^+$ と $\pi^-$ の運動方向を2層のプラスチックホドスコープで求める。 $\pi^0$ はCsI結晶で測定された光子対から、2章で説明した方法で再構成される。 $K_L$ 崩壊から発生する全粒子を検出することになり、 $K_L$ ビームの特徴を活用することで $K_L$ の再構成が可能になる。 $2 \times 10^{14}$ POT に $1.94 \times 10^7$ 個の $K_L$ を観測する結果となり、KOTO実験の達成可能な実験感度について信頼できる予測が可能になった。

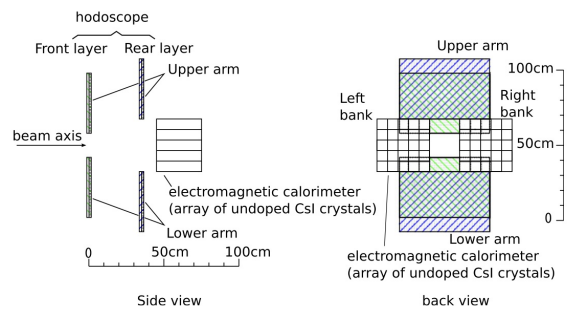


Fig. 12  $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 崩壊を用いて、 $K_L$ フラックスを求める検出器セットアップ

上記実験では $K_L$ の運動量分布も求められたが、運動量が4GeV/c以上の $K_L$ については感度が低い。測定された運動量分布のクロスチェックと高い運動量領域の精度をあげるために、スペクトロメータを用いた運動量測定を行った[9]。

図13には運動量測定実験の検出器配置を示す。CsI結晶を用いて光子の情報を獲得し、荷電粒子の情報は0.7Tの偏向電磁石と3台のドリフトチ

<sup>4</sup> Proton On Targetの略言で、標的に入射する陽子数を意味する。表で示す予測値は厚さ54mmのNi標的での計算結果である。測定もNi標的を用いて行った。

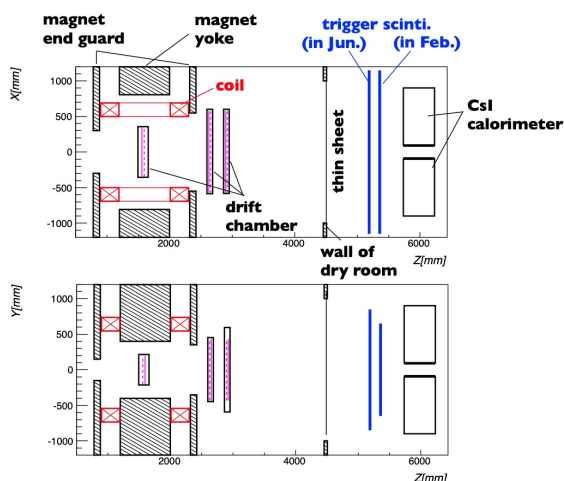


Fig. 13  $K_L$ 運動量測定実験のセットアップ

エンバーで構成されるスペクトロメータで求める。2種類の崩壊モード ( $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$  と  $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ ) から  $K_L$  を再構成し、運動量分布を求めた。

図14は二つの崩壊モードから求めた運動量分布を示す。3GeV/c以下の領域では  $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$  崩壊から、それ以上の領域では  $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  崩壊から精度良く運動量分布を求めることができた。この結果は前に行った測定と一致する結果となった。

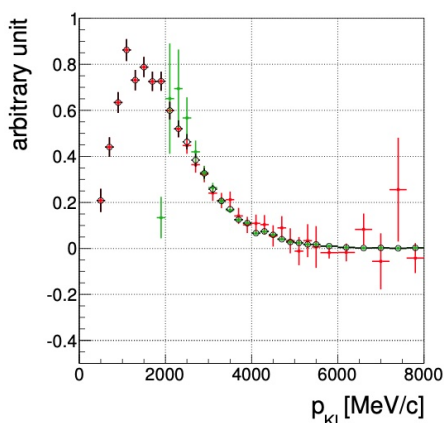


Fig. 14  $K_L$ 運動量分布。

#### 4. まとめと今後の展望

KL ビームラインは  $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$  崩壊を探索する KOTO 実験に特化した中性二次ビームラインである。  $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$  崩壊をカロリメータで測定され

た2個の光子のみが存在する事象として選別するために、KL ビームラインは「細くて綺麗なビーム」を提供する。

ハロー中性子を抑えるためのコリメーションラインを設け、コリメータの最適化は GEANT3 中心のシミュレーション計算を用いて行った。2009年にビームライン建設を完了し、ビームラインの性能評価実験を行った。ビームラインの性能が概ね期待通りになっていることがわかった。

2013年にテータ取得を開始してから、KOTO 実験が実験感度の向上に伴い、新しいバックグラウンドを見つけ出すことができた。現れたバックグラウンドの原因を取り除くための実験方法及び検出器の開発を続け、KOTO 実験は真の信号に届く直前に立っている。

本文では言及していなかったが、ビームラインの改修が必要となるバックグラウンドも最近判明した。電磁石の下流に設置されている第2コリメータで  $K_L$  から荷電 K 中間子 ( $K^\pm$ ) が生成され、バックグラウンドになり得ることがわかった。そのため、2番目の磁場を第2コリメータの下流に設置する作業が進行中である。

ハドロンホールの拡張計画に伴い、より強い  $K_L$  ビームと増強された検出器で  $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$  崩壊分岐比の精密測定を行う実験(KOTO-II)が準備中である。新たなビームラインの建設は、現存 KL ビームラインの概念を基にし、前述した2番目磁場の効果の実証を含め KOTO-II の実験環境での最適化を行うことになる。

#### 参考文献

- [1] J. Comfort, et al., E14 Collaboration, Proposal for  $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$  Experiment at J-Parc, ([http://j-parc.jp/NuclPart/Proposal\\_e.html](http://j-parc.jp/NuclPart/Proposal_e.html)).
- [2] Andrzej J. Buras, et. al., J. High Energy Phys. 11 (2015) 033.
- [3] J.K.Ahn et. al., Phys. Rev. Lett. 122, 021802 (2019).
- [4] T. Shimogawa, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A623 (2010) 585-587.
- [5] H. Watanabe, Page76-78, Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting (2009).
- [6] T. Matsumura, et al, Nucl. Instrum. Methods. A885(2018) 91-97.

- [7] 佐々木未来、修士論文、山形大学 (2011) .
- [8] K. Shiomi, et al, Nucl. Instrum. Methods. A885(2018) 91-97.
- [9] K. Sato, 博士論文、大阪大学 (2015).