

## 新しい素粒子物理を中性 K 中間子崩壊で探る J-PARC KOTO 実験



山中 卓  
Yamanaka Taku

### 1 探し物

#### 1.1 何を探しているのか

口の悪い人は、Nothing to nothing と言う。素粒子の理論屋は黄金モードだと言う。中性の長い寿命の K 中間子が中性の  $\pi$  中間子とニュートリノ対に壊れる崩壊  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  を我々は探している。親の  $K_L$  は電荷を持たないので、見えない。崩壊のできる  $\nu \bar{\nu}$  対もめったに反応しないので、もちろん見えない。残りの中性  $\pi$  中間子は瞬時に  $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$  崩壊する。観測できる粒子はその2つの  $\gamma$  線のみである。Nothing to nothing とされるゆえんである。

#### 1.2 なぜ探しているのか

ではなぜ、ほとんど手がかりのないような崩壊を見ようとしているのか。それは、今の素粒子の標準理論の枠組みを超える、より大きな素粒子の世界の糸口をつかむためである。

現在、クォークやレプトン、力を運ぶボゾン、粒子の質量を決めるヒッグス粒子等、素粒子の世界は「標準理論」というものにまとめられ、一見良く理解できているかのように見える。しかし、なぜ宇宙に反物質がほとんどないのか、ダークマターの正体は何か等、まだまだ謎だらけである。これらの謎は標準理論では説明できないため、標準理論を超える、より大きな素粒子の体系があるはずである。そうした体系に属する素粒子は宇宙の初期には存在していたはずにもかかわらず今見つからないのは、それら

が重く、既に軽い粒子に崩壊してしまったからである。

これらの未発見の重い素粒子を探す方法には2種類ある。1つは、エネルギーと質量の等価性  $E=mc^2$  を用い、高いエネルギーの粒子同士を正面衝突させて、重い新粒子を作る方法である。もう1つは、不確定性原理  $\Delta E \Delta t > \hbar/2$  を用いて、一瞬 ( $\Delta t$ ) だけ大きな質量 ( $\Delta E$ ) の粒子が介在する反応を探す方法である。この方法では、加速器のエネルギーに制限されることなく、はるかに重い粒子を探せる。

ただし、後者の反応は稀にしか起きないため、非常に高い感度の実験が必要となり、ノイズの小さな環境で探さなければならない。例えばかすかな音を聞こうとすると、ノイズが小さく、かつそのノイズの音量が良く分かっている必要がある。そのために、新しい素粒子が介在する可能性のある反応として我々が選んだのが、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊である<sup>1)</sup>。標準理論ではこの崩壊の崩壊分岐比の予測は約  $3 \times 10^{-11}$  と非常に小さい上に、メカニズムが単純なために理論的な誤差も小さい。したがって、この崩壊を発見し、その分岐比の測定値が標準理論の予測と異なっていれば、新しい素粒子が介在していることの証拠となる。黄金モードと言われるゆえんである。

#### 1.3 探す方針

では、nothing to nothing とされる崩壊をどのようにして同定するのか。まず、観測できる粒子は  $\gamma$  線2個である。また、ニュートリノ対が運動量を持ち去るため、2個の  $\gamma$  線の運動量の和は、親の  $K_L$  の運

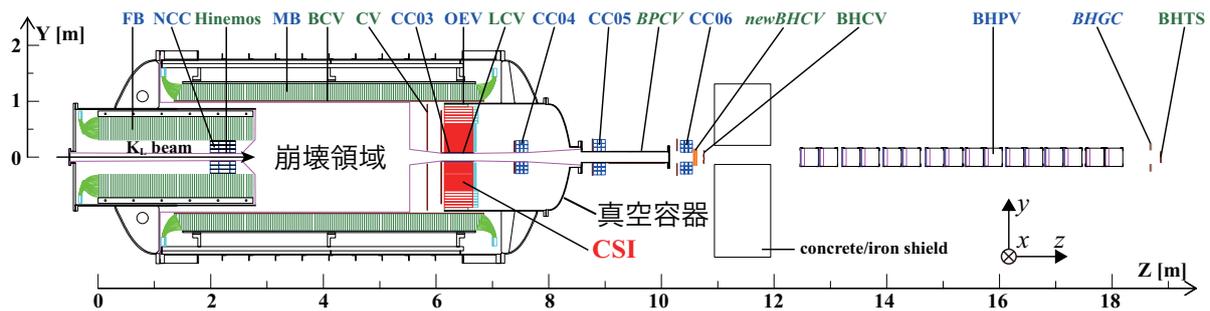


図1 KOTO 実験装置の断面図

$K_L$  ビームは図の左から実験装置内に入る。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊でできた2個の $\gamma$ 線はCsI結晶2,700本からなる電磁カロリメータ (CSI) で検出する。その他の $\gamma$ 線は、崩壊領域を覆う、鉛とシンチレータを積層した検出器 (MB, NCC, FB) で検出する。電磁カロリメータ中央の穴を抜けた $\gamma$ 線は、CsI結晶を積み上げた検出器 (CC04–CC06)、鉛とエアロジェルチェレンコフカウンターの列 (BHPV) で検出する。また、荷電粒子はシンチレータ (CV, BCV, LCV, Hinemos)、ビーム中に設置したガスチェンバー (newBHCV) で検出する。

動量と異なる。これが  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊の特徴である。

稀な崩壊を探すときの一番の難しさは、異なる反応であるにも関わらず、あたかも信号と見えてしまう、背景事象である。例えば、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊からできる4個の $\gamma$ 線のうち2個を見失ってしまうと、これは背景事象となる可能性がある。また、 $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  崩壊の荷電パイオン $\pi^+$ と $\pi^-$ を見失う、検出器にたまたま入った中性子を $\gamma$ 線を見誤る等、様々な可能性がある。 $K_L$ と $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ 以外の $K_L$ 粒子の崩壊モードは4個以上の $\gamma$ 線、もしくは2個以上の荷電粒子を含むため、余分な粒子は確実に検出してその事象を捨てる必要がある。

考えうる背景事象に対する対策はすべて打って実験を設計するが、思いもつかないような非常に稀な現象によって起きる背景事象もある。そのため、一步一步学びながら実験を進めて行く必要がある。稀な崩壊の実験は背景事象との戦いでもある。

## 2 KOTO 実験装置

上記の方針によって我々が行なっているのが、茨城県東海村にあるJ-PARCの30 GeV大強度陽子加速器を用いたKOTO (K0atTOKai) 実験である。これは日本、米国、台湾、韓国、ロシアの国際協力実験である。この実験の原型は、KEKの12 GeV陽子加速器を用いたKEK E391a実験である。E391a実験は $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の分岐比に対して $2.6 \times 10^{-8}$ という上限値を与えた<sup>2)</sup>。KEKよりはるかに大強度のJ-PARCの30 GeV陽子ビームを用い、感度を大幅に上げたのがJ-PARC KOTO実験である。

### 2.1 ビームライン

大強度の $K_L$ ビームは、加速器から引き出した陽子ビームを標的に当て、16度方向にカロリメータを2台設置して作る。カロリメータの穴の形を工夫し、ビームの裾野の広がりをE391a実験より更に抑えた。カロリメータの間には電磁石で磁場をかけ、荷電粒子を排除する。 $\gamma$ 線は、上流に置いた鉛の塊で反応させ、取り除く。標的から約20 m下流の測定器に入るビームの主な成分は $K_L$ と中性子である。

### 2.2 測定器

測定器の断面図を図1に示す。実験では、図中の3~5 mの範囲(崩壊領域)で崩壊した事象を探す。ほとんどの検出器は大きな真空容器の中に入っている。これは、ビームパイプ等の物質が崩壊点と検出器の間にあると、そこで $\gamma$ 線が反応して失われ、背景事象の原因となるためである。

#### 2個の $\gamma$ 線を見るために

$\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ 崩壊の2個の $\gamma$ 線を観測するために、崩壊領域の下流に直径2 mの電磁カロリメータがある。E391a実験では、長さ30 cmで7 cm角のCsI結晶を用いていたが、KOTO実験ではこれらを約2,700本の長さ50 cm (27放射長,  $X_0$ )の、CsIの結晶に置き換えた。中央の1.2 m角の領域には2.5 cm角の結晶、その外側には5 cm角の結晶を並べている。レートの高い環境で用いるため、減衰時間の短い、Tlの入っていないCsIを用いている。 $\gamma$ 線が入射して発生したシンチレーション光を、下流側に取り付けた光電子増倍管で読み出し、エネルギーと入射位置を測定する。ビームがカロリメータに当たるとカロリメータのレートが高くなりすぎるため、カ

ロリメータの中心には穴を空け、ビームを素通りさせる。

### 余分な $\gamma$ 線を検出するために

カロリメータに入射した $\gamma$ 線以外に $\gamma$ 線がないことを要求するために、崩壊領域のほぼ全方向を $\gamma$ 線検出器で覆っている。

まず、崩壊領域の横方向は、内径約2 m、長さ5 mの円筒形の検出器(MB)で覆っている。これはE391a実験用に鉛とシンチレータを積層して作った、厚みが13X<sub>0</sub>の検出器である。

また、2016年には検出器の厚みを増やすために、MBの内側に厚さ5X<sub>0</sub>、長さ3 mの円筒形状の $\gamma$ 線検出器(IB)を新たに製作し、挿入した。

更に、電磁カロリメータ中心の穴を通り抜ける $\gamma$ 線を検出するために、下流に検出器を並べている。角度を持ってビームの外に出てくる $\gamma$ 線は、ビームを取り囲むようにCsIの結晶積み上げた検出器(CC04-CC07)で捕らえる。ビーム中に残る $\gamma$ 線を検出するため、鉛とエアロジェルを組み合わせた新しいチェレンコフカウンター(BHPV)を並べ、 $\gamma$ 線が対生成で作った電子を捕らえる。

### 荷電粒子を検出するために

荷電粒子を検出するために、電磁カロリメータの前面は、厚み3 mmのシンチレータを2層(CV)で覆っている。円筒形の $\gamma$ 線検出器の内側もプラスチックシンチレータで覆っている。また、カロリメータ下流のビーム中に逃げる荷電粒子を検出するためには、物質量の小さいワイヤーチェンバー(newBHCV)を入れている。

### 中性子を見誤らないために

裾野を抑えたビームを作っているが、それでもまだビームの外側を飛んでくる中性子がある。このような中性子が電磁カロリメータに入射してシャワーを作り、そこで反応してできた中性子がまた別の場所でシャワーを起こすと、これを2個の $\gamma$ 線と見誤り、背景事象となる場合がある。そこで、中性子と $\gamma$ 線が作るシャワーの形の違い等を用いて、中性子起源の背景事象を排除する。このためには、最近流行のニューラルネットの手法も取り入れた。

更に中性子起源の背景事象を落とすため、2017年には、電磁カロリメータを大改造した。 $\gamma$ 線は電磁相互作用によって上流部分で反応するのに対し、中性子は強い相互作用によって長さ50 cmの結晶中の

どこでも反応する。そこで、CsIの結晶の上流面に薄い半導体の光検出器を接着し、この光検出器と下流側の光電子増倍管の信号の時間差から、反応の奥行きを測定する。これにより、中性子の背景事象を更に1/30に落とすことができた。結晶でこのような手法を用いたカロリメータは、知る限り世界初である。

### 2.3 データ収集システム

KOTO実験の測定器からは約4,000本の信号線が出ている。これらの信号はすべてADCモジュールに送る。ほとんどの信号は8 nsおきに14 bitに、高いレートの検出器からの信号は2 nsおきに12 bitにデジタル化する。このデジタル化された情報を用いて、8 nsおきにその事象の取捨選択を行い、有効な事象については全信号の波形を読み出す。また、8 ns間隔にデジタル化するADCモジュールでは、あえてパルスを広げてパルスの中でデジタル化する点を増やし、1 nsの時間分解能を得ている。またこのADCモジュールには、電子回路を自由に書き換えられるFPGAを搭載しており、様々な機能を後から追加した。例えば、2018年からは、電磁カロリメータ上のシャワーの数を数え、事象の取捨選択に用いるようにした。このADCモジュールはシカゴ大学が開発した。

測定器から並列に読み出されたデータは、ネットワークスイッチとCPUのサーバーを通して1事象ごとにまとめ、KEKの計算機センターに高速ネットワークを通して送り、そこで磁気テープに保存する。

### 2.4 データ収集

長年にわたるビームラインと実験装置の建設の後、2013年に初めてデータを収集した。ただし、データ収集を開始してからすぐに、J-PARCハドロンホールで放射線事故があり<sup>3)</sup>、100時間でデータ収集を終えた。しかし、それだけの時間のデータでも、約6か月かけてデータを収集したE391a実験と同程度の感度を得ることができた。J-PARCのビーム強度が高い成果である。2年がかりのハドロンホールの改修の後、2015年にデータ収集を再開し、毎年、ビーム強度を上げながらデータを収集している。

## 3 データ解析

電磁カロリメータで得た2つの $\gamma$ 線が $\pi^0$ から崩

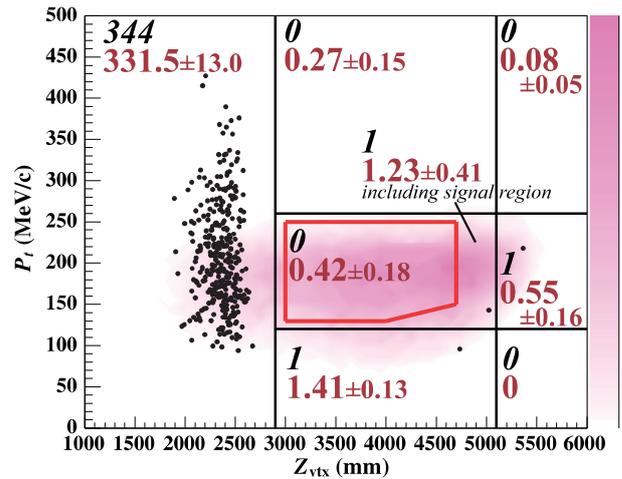
壊してできたならば、2つの $\gamma$ 線の不変質量が $\pi^0$ の質量と等しいことを用いて、2つの $\gamma$ 線の間隔の開き角が決まる。更に崩壊がビーム軸上で起きたと仮定すると、崩壊位置 ( $Z_{\text{ vtx}}$ ) が求まる。その崩壊位置と電磁カロリメータ上の $\gamma$ 線のエネルギーから、元の $\pi^0$ の運動量を求め、 $\pi^0$ の運動量のビーム軸と垂直な成分を $P_T$ とする。この $Z$ と $P_T$ の2次元平面上に、信号領域を設定する。

データ解析では、blind analysis という手法を用いている。解析で信号領域に残る事象は少ないはずであり、残った事象の特徴を見てしまうと、故意でなくとも、事象選別にバイアスをかける可能性がある。そのような人為的なバイアスの可能性を一切省くため、信号領域の中の事象は見えないような仕掛けをする。様々な背景事象は信号領域の外にも分布するため、カットを緩める等して、予測する背景事象数とデータの事象数が合うかどうか等を調べ、見えない信号領域内の背景事象数が十分小さくなるようにカットを決める。長い時間をかけてこのような地道な作業を続けた後、コラボレーション全員の合意のもとで信号領域内を見る。まさに箱を開ける感覚である。2015年に収集したデータの解析の結果、**図2**に示すように、信号領域内に事象はなかった。これをもとに、崩壊分岐比に対して $3.0 \times 10^{-9}$  (信頼区間 90%) という結果を出した<sup>4)</sup>。これは、E391aが出していた世界記録を1桁更新する結果である。

現在、2016年以降に収集したデータの解析と理解を進めている。

## 4 将来

2021年に予定されている加速器の改良等により、ビームパワーは今の50 kW から約100 kW まで段階



**図2** 2015年に収集したデータから再構成された $\pi^0$ の崩壊位置 ( $Z_{\text{ vtx}}$ ) と運動量の横方向成分 ( $P_T$ ) の分布<sup>4)</sup>

誤差なしの数字は観測された事象数、誤差付きの数字は予測された背景事象数。中央の5角形が信号領域を表す。それを含む中央の長方形の領域を隠して解析した

的に上がっていく。それに伴い、感度も上がり、2025年ごろには $10^{-11}$ 桁台まで行く予定である。これにより、標準理論の予測から大きく外れる場合について検証することができる。しかし、それよりも更に2桁高い感度の実験の検討も始めている。これができるれば、10%程度のずれも検証することができるようになる。大発見を狙い、蓄積してきた経験をもとに工夫を重ね、更に一步一步着実に探索を進めて行く予定である。

## 参考文献

- 1) L. S. Littenberg, *Phys. Rev. D*, **39**, 3322 (1989)
- 2) J. K. Ahn, *et al.*, *Phys. Rev. D*, **81**, 072004 (2010)
- 3) 小松原 健, 高エネルギーニュース, **34**, 56 (2015)
- 4) J. K. Ahn, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **122**, 021802 (2019)

(大阪大学大学院理学研究科)