

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03983

研究課題名（和文）二重ベータ崩壊実験のガンマ線背景事象を排除する巨大結像系の開発

研究課題名（英文）Development of large focussing system for particle identification

研究代表者

三井 唯夫（Mitsui, Tadao）

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授

研究者番号：20283864

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：アクリル容器に収められた30リットルの液体シンチレータを、結像ミラーとマルチアノード光電子増倍管からなる「イメージング検出器」2台を用いて「ステレオ撮像」し、液体シンチレータの発光パターンを事象ごとに3次元的に再構成することに成功した。さらに発光パターンの広がりを象徴する「粒子識別パラメータ」を事象ごとに定義し、ベータ線とガンマ線の粒子識別に成功した。これによって、ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索実験「カムランド禅」での巨大結像系を用いた粒子識別の可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

シンチレータの撮像による粒子識別を行ってきた中で、今回初めて「事象ごとに」「3次元的に」という2つの大きな条件を達成することができた。このため、事象の情報の喪失は激減し、それによって事象ごとの粒子識別、すなわち事象の位置をデータ以外から知ることができない、本番の探索実験と同じ状況での粒子識別に成功した。これは、説得力のある原理検証であると考えられる。粒子識別は、高感度で稀現象を探索するとき要となる技術で、シンチレータの撮像という新しい方法で、その可能性が示されたことの意義は大きいと考えられる。

研究成果の概要（英文）：With 30-liter liquid scintillator and 2 "imaging detectors", which consist of focussing mirrors, and multi-anode photomultiplier tubes, we took "stereo images" of scintillator events and reconstructed them event by event 3-dimensionally. We introduced a "particle identification parameter", which reflects spatial distribution of scintillation light in an event. With it, we succeeded in distinguishing beta and gamma events and demonstrated the possibility to employ this method in "KamLAND-Zen" experiment, in which neutrinoless double-beta decay is searched for with high sensitivity.

研究分野：Particle physics

キーワード：imaging particle identification

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

約 800 kg のキセノン 136 を用いたニュートリノレス二重ベータ崩壊探索実験「カムランド禅」では、シグナルであるキセノン 136 の二重ベータ崩壊事象に対して、同一エネルギーに現れる、宇宙線によるキセノン原子核破碎生成物からの放射線(キセノン破碎事象)が、深刻な背景事象となっている。二重ベータ崩壊では、ベータ線 2 本のみが放出されるのに対して、キセノン破碎事象では複数のガンマ線・ベータ線が放出される。したがって、シンチレータの空間的発光パターンを認識できれば背景事象の除去に役立つ。現在、データ取得している光電子増倍管の電荷と時間の情報からも、ある程度、シンチレータの空間的発光パターンを区別することができ、ベータ線とガンマ線を識別する「粒子識別」が功を奏している。我々はこれまで、より効率のよい粒子識別を行うために、シンチレータを直接「撮影」する技術を一貫して研究してきた。

2. 研究の目的

カムランド検出器の、直径 18 m のステンレスタンク内面に鏡を配置し、この内面全体を結像系とする巨大なイメージング検出器(「巨大結像系」)の原理検証を行うことを目的とする。それによってキセノン破碎事象などのガンマ線を含む背景事象を除去し、カムランド禅のニュートリノレス二重ベータ崩壊探索感度を向上させることが最終目的である。当初はテスト検出器を実際にカムランド検出器内に装着し、データ取得を行うことを目指していたが、大人数での作業が難しい状況となったことなどから、実験室スケールでシンチレータの空間的発光パターンを 3 次元的に再構成し、それを用いて粒子識別の原理検証を行うことを目的とした。

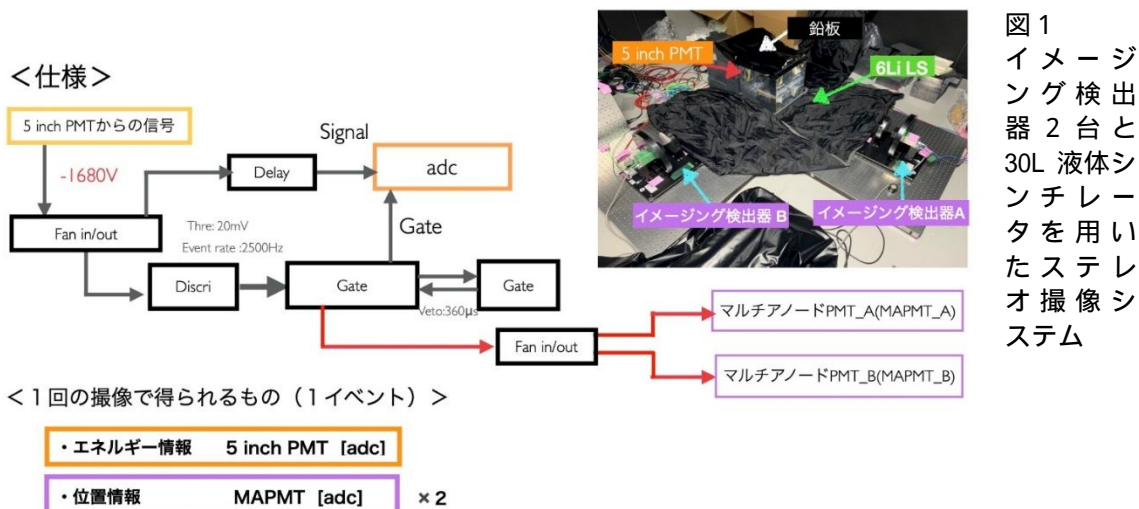
3. 研究の方法

30L の液体シンチレータをアクリル製の透明な箱に保持した「シンチレータボックス」を検出器とし、これを、直径 30 cm の「主鏡」と直径 15 cm の「第二ミラー」からなる「イメージング検出器」2 台を用いて同時に撮像し、ガンマ線、ベータ線がシンチレータで検出された事象を 3 次元的に再構成する。これらの検出器は、先行研究「ガンマ線・中性子イメージングのための結像系を用いた新しい手法の開発」(基盤研究(C)、2017~2019 年度)で開発されたものを改良したものである。今回は、カムランド検出器内に装着する検出機の原理検証を行うことが主目的であるので、焦点深度を大きくする改良を行い、無限遠までの撮影が可能なカメラを開発した。実験室での撮影ではこれまで通り 1 ~ 3 m での撮影を行なったが、カムランド用への拡張性が保証された検出器を用いて全ての実験を行うことの意義は大きい。

4. 研究成果

(1) 先行研究で開発した「イメージング検出器」の視野を広げ、焦点深度を大きくする改良を行った。巨大結像系で使用することを想定した改良である。先行研究で購入した光学シミュレータ「Zemax」を用いてシミュレーションを行なうことで、この改良を達成した。今回はミラーそのものの設計はそのまま焦点深度をより大きくするため、2 枚のミラーの配置を調整した。その結果、カメラ入射面からの距離が 1 m から無限遠まで結像可能なカメラとなり、カムランド本体に挿入してのテストにも対応できるものとなった。今回の研究では残念ながらカムランド本体でのテストは叶わなかったが、このカメラ開発により、将来のさらなる実証実験の可能性が開けた。

(2) この改良されたイメージング検出器 2 台と 30L 液体シンチレータを用いて、図 1 のような検出器システムを構成し、2 方向からの「ステレオ撮像」を行った。

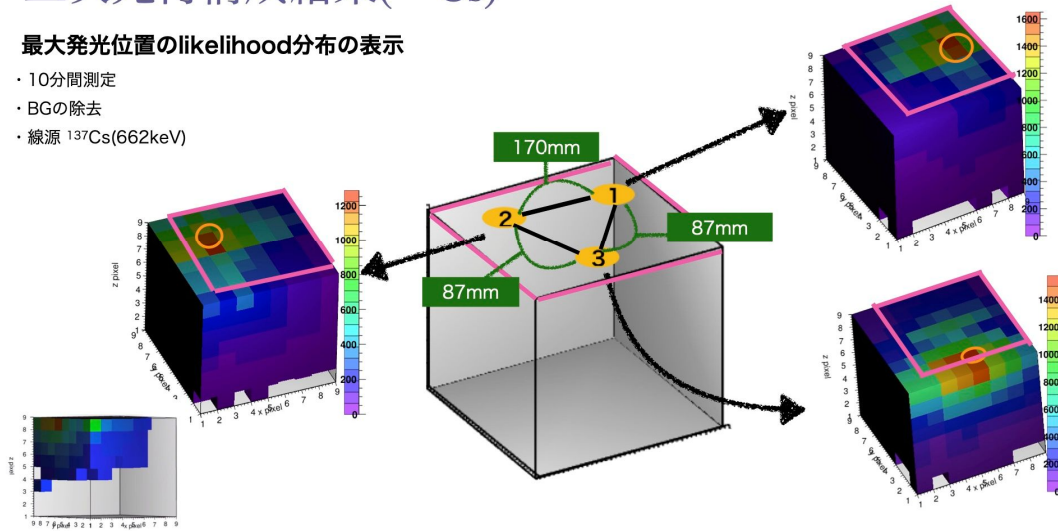


この2つのイメージング検出器を用いて事象単位で取得された画像から、事象単位で3次元的に発光パターンを再構成することに今回初めて成功した。図2は、セシウム137 (662 keV), コバルト60 (1173 keV, 1332 keV)線源からのガンマ線事象を3次元再構成した結果である。

三次元再構成結果(^{137}Cs)

最大発光位置のlikelihood分布の表示

- ・10分間測定
- ・BGの除去
- ・線源 ^{137}Cs (662keV)



三次元再構成結果(^{60}Co)

最大発光位置のlikelihood分布の表示

- ・10分間測定
- ・BGの除去
- ・線源 ^{60}Co (1173keV,1332keV)

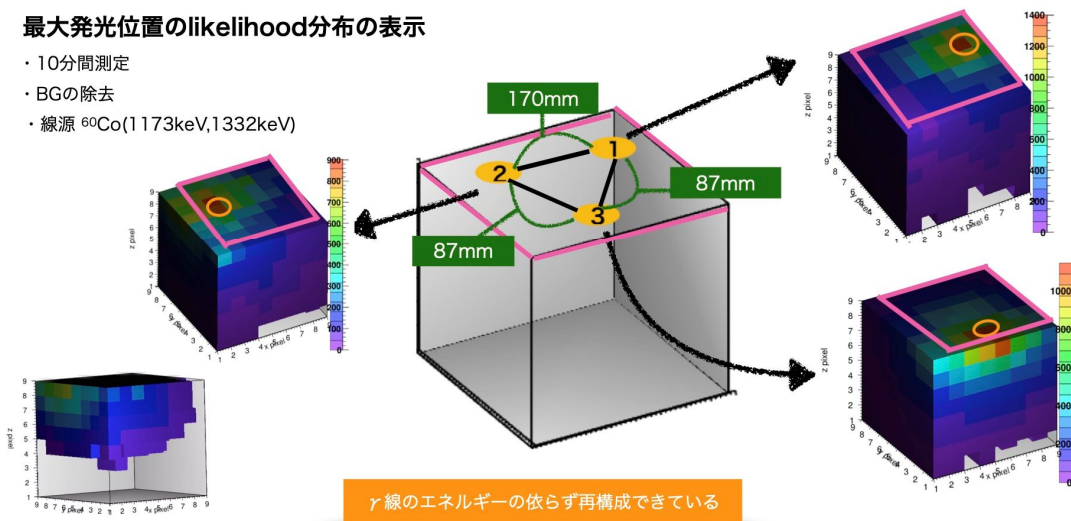


図2 ステレオ撮像システムで検出し3次元再構成されたセシウム137, コバルト60のガンマ線事象。エネルギーに寄らず3次元再構成されていることが分かる。

再構成のためのアルゴリズムは、各3次元位置に対して尤度関数に比例した強度をプロットする考え方を基礎としており、モンテカルロシミュレーションで生成されたデータに対して、同一の再構成を行って実データと比較することにより、妥当性を確認した(図3)。

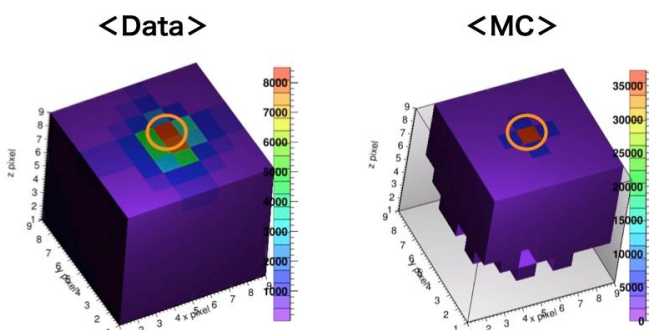


図3 再構成アルゴリズムの確認。実データとモンテカルロシミュレーションで生成されたデータについて、同一のアルゴリズムで3次元再構成を行い、比較を行った。

(3) 次にコバルト 60 からのガンマ線事象と、ストロンチウム 90 からのベータ線事象を解析することにより粒子識別を行った。エネルギーによる違いを排除するため、両線源ともエネルギーが 1.1 MeV から 1.5 MeV の事象のみを選択した。図 4 に示すように、両者は空間的広がりが異なることがはっきりとわかる。このことは、線源の「真の位置」を知っていれば、粒子識別が可能であることを意味している。このことは先行研究でも確認されていた。今回、焦点深度を拡大し、カムランド本体用に対応したイメージング検出器で、この「統計的粒子識別」が再確認されたことは、巨大結像系開発に向けた大きな成果である。

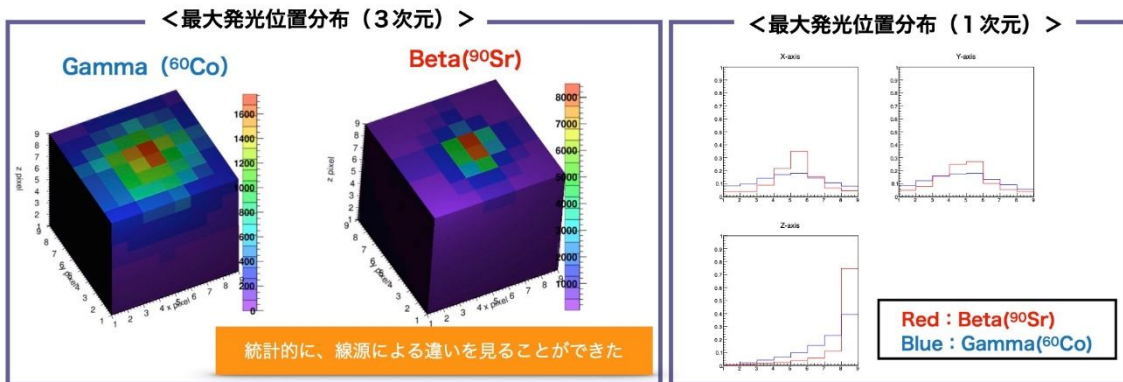


図 4 ガンマ線とベータ線の事象の再構成結果。同一エネルギー範囲でも空間的広がりが異なり、統計的に両者が区別できることが分かる。

(4) 最後に、統計的分布に頼らず、事象単位で粒子識別を行うため、「粒子識別パラメータ」の研究を行った。一事象内での尤度関数の広がりを象徴するパラメータを様々な定義し、その分布をテストすることにより、ガンマ線とベータ線で有意に異なる分布を示す粒子識別パラメータを導入することに成功した。

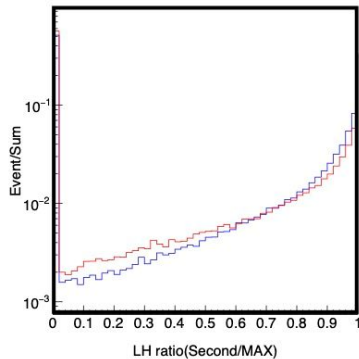


図 5 上：粒子識別パラメータの分布。パラメータ = 0 のときベータ線的、パラメータ = 1 のときガンマ線的であることを意味する。赤、青はそれぞれ、ストロンチウム 90、コバルト 60 の事象の分布である。
下：このパラメータを用いてガンマ線事象の除去を行った場合の除去率とシグナル取得率の関係。

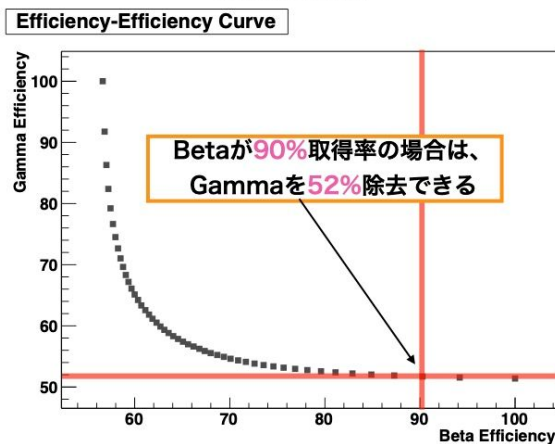


図 5 に示すように粒子識別パラメータはストロンチウム 90 からのベータ線事象とコバルト 60 からのガンマ線事象で異なる分布を示しており、事象単位の粒子識別に初めて成功した。このパラメータを用いてガンマ線の背景事象を排除した場合、ニュートリノレス二重ベータ崩壊のシグナルであるベータ線事象を 90%取得するとき、ガンマ線事象を約 50% 排除できることが分かった。

以上の成果により、イメージング検出器と巨大結像系をカムランドに導入して粒子識別を行う方法の原理検証が行えた。特に最後に行った事象単位の粒子識別は、事象の真の位置をデータ以外から知ることができない、カムランドの本物のデータと同じ状況での粒子識別であり、これに初めて成功したことは、この方法が現実的になったことを意味し、本研究の最大の成果である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------