

無機シンチレーターによるニュートリノのマヨラナ質量
Study on the Majorana mass of the neutrino by means of inorganic
scintillator

代表研究者	徳島大学	伏見賢一	The University of Tokushima	Ken-Ichi Fushimi
協同研究者	大阪大学	嶋達志	Osaka University	Tatsushi Shima
	大阪大学	梅原さおり	Osaka University	Saori Umehara

Thin and large area NaI(Tl) scintillator was applied to search for neutrinoless double beta decay experiment. The performance of the NaI(Tl) scintillator was tested. The NaI(Tl) scintillator was achieved good energy resolution. The energy resolution at 662keV (^{137}Cs) was 3.6% in $1\text{-}\sigma$. The energy dependence of the energy resolution showed the good performance for double beta decay experiment(1.4% $1\text{-}\sigma$ at 3MeV).

The low background measurement was performed in order to estimate the origin of the background. The low background measurement was performed at OTO Cosmo observatory which was located at the center of an underground tunnel.

The origins of the background component were precisely estimated by means of Monte Carlo simulation (Geant4). The main origin of the background was the U-chain and Th-chain contaminants in the aluminum base plate and photo-multiplier tubes.

Finally, the surrounding materials were selected for the low background measurement. The final setup of the MOON (Molybdenum Observatory Of Neutrino) setup was installed at OTO Cosmo Observatory. The low background measurement has been performed. The event selection power and background component were discussed.

研究目的

ニュートリノの正体の研究は、素粒子の標準理論を超える新しい素粒子物理学・宇宙物理学を開く鍵となる。従来の標準理論では、ニュートリノは質量を持たず、粒子と反粒子が異なる「ディラック粒子」と考えられてきたが、最近の素粒子理論では、粒子と反粒子が同一の「マヨラナ粒子」である方がむしろ自然であると考えられている。また、ニュートリノ振動の実験から3種類ニュートリノ (ν_e, ν_μ, ν_τ) は異なる質量を持つことが判明しているが、質量の絶対値は不明である。ニュートリノ振動や宇宙進化の詳細な解析から質量の平均値が数十 meV である可能性が示唆されており、検証が強く望まれている。これらの基本的問題を研究する上で最も有効な方法がニュートリノ放出を伴わない二重ベータ崩壊の測定であり、世界各国の研究グループが初観測に向けて競っている。

我々は、大面積・高エネルギー分解能の無機シンチレーターを用いるという独創的な手法によって他グループより百倍程度高い感度を実現し、30meV の質量領域での観測を目指している。本研究はその第一段階として、大面積・高エネルギー分解能の無機シンチレーターを開発し、我々の手法を実証する。

シンチレーターの開発

初めに、無機シンチレーターの性能を比較検討し、無機シンチレーターとして NaI(Tl) シンチレーターが最適であるとの結論に至った。NaI(Tl) シンチレーターは下記の点で他の無機シンチレーターよりも優れている。

- ① **バックグラウンドが少ない。** 二重ベータ崩壊の測定においてはウラン系列及びトリウム系列の放射性同位元素の混入が多くてはいけない。NaI(Tl) シンチレーターは近年高純度化が世界的に進んでおり、特に深刻な影響を与えるトリウム系列については $10\mu\text{Bq/kg}$ 以下という超低バックグラウンドが実現している。
- ② **エネルギー分解能が良い。** 二重ベータ崩壊の主たるバックグラウンドはその線源自身から出るニュートリノを放出する崩壊 ($2\nu\beta\beta$) である。この事象は本研究の目的であるニュートリノを出さない崩壊 ($0\nu\beta\beta$) に対して 10^7 倍もの確率で起こると予想されている。そのため二重ベータ崩壊の Q 値付近である 3MeV の領域で、1.3%(標準偏差)程度でなければならない。NaI(Tl) シンチレーターは 3MeV 付近で 1.3% 程度のエネルギー分解能を有することができる有望なシンチレーターである。
- ③ **電子の後方散乱が少ない。** 二重ベータ崩壊の実験では二本の β 線のエネルギーを計測しなければならない。そのため電子の後方散乱が起こりにくい検出器が主に使われている。SuperNEMO などでは大面積のプラスチックシンチレーターを用いている。NaI(Tl) シンチレーターについて後方散乱の影響をシミュレーションで評価したところ、計数効率が 30% 程度劣化することが明らかになった。しかしながら、他の無機シンチレーターに較べて十分に有望な検出器であることを示した。

上記の検討をもとに、大面積かつ薄型の NaI(Tl) シンチレーターを提案し、設計した。

大面積・薄型の NaI(Tl)シンチレーターは、縦横各 18cm、厚さ 0.5cm である。蛍光は薄い側の四面からクォーツのライトガイドを通して取り出し、光電子増倍管で計測する。図1に開発した薄型 NaI(Tl)シンチレーターの写真を示す。中央の銀色の正方形の物体が NaI(Tl)シンチレーターである。四方に蛍光読み出し用の光電子増倍管をセットする台が設置されている。NaI(Tl)の結晶自体は非常にもろいため、端にアルミニウムの補強材を施している。また、通常空気中では潮解してしまうため、気密にしてある。同じ形の NaI(Tl)シンチレーターをもう一枚作り、その間に二重ベータ崩壊の線源を挿入することで二重ベータ崩壊の実験をする。

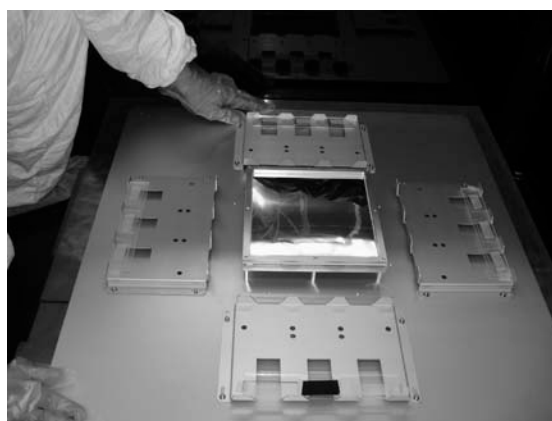


Fig.1 : Large area and thin NaI(Tl) detector.

はじめに一枚の NaI(Tl)シンチレーターを用いてエネルギー分解能を測定した。エネルギー分解能は γ 線源から放出される γ 線の全吸収ピークの幅から求めた。線源と γ 線のエネルギーは、それぞれ、 ^{137}Cs (662keV)、 ^{22}Na (511keV, 1274keV) および ^{60}Co (1173keV, 1332keV)を用いた。図2にエネルギースペクトルの一例として ^{137}Cs を照射した場合の応答スペクトルを示す。横軸はADCのチャンネル番号で、NaI(Tl)シンチレーターで発生した蛍光光子の数に対応する。

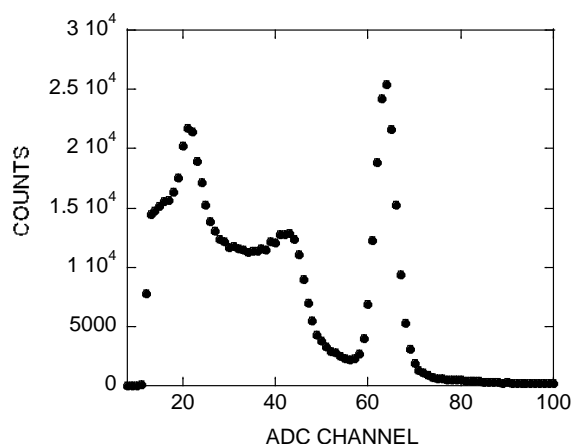


Fig.2 : Energy spectrum of thin NaI(Tl) detector. ^{137}Cs source was irradiated.

縦軸は10分間の計測数である。662keVのピーク幅において、単純なガウスフィットで8.5%の半値全巾を得ることに成功した。これは標準偏差で3.6%に相当する。他の γ 線でも同様の測定を行い、エネルギー分解能のエネルギー依存性を調べた。

エネルギー分解能のエネルギー依存性は、シンチレーターの蛍光光子数に依存するため、単純なエネルギー依存性を示す。シンチレーターの場合はエネルギーEにおけるエネルギー分解能 $\Delta E/E$ は次の式によってあらわされる。

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} + b$$

ここで、aはシンチレーターから単位エネルギーあたりに放出される蛍光光子の数に依存する係数、bは検出器システムに依存する分解能の係数である。このような条件でエネルギー

分解能をフィッティングした結果を図 3 に示す。横軸はエネルギー(keV)、縦軸はエネルギー分解能(標準偏差)である。

今回の開発で最も懸念していた問題は、NaI(Tl)結晶の形状が特殊であることであった。きわめて薄く、面積の広い結晶から十分な蛍光が取り出せるか、詳細な反射材やライトガイド、光電子増倍管の吟味を重ねた結果、通常の NaI(Tl)シンチレーターと同等の性能が、特殊な形状のシンチレーターでも達成できた。二重ベータ崩壊の Q 値におけるエネルギー分解能は約 1.3%と、目標とするエネルギー分解能を達成することができた。

低バックグラウンド測定

一枚の薄型 NaI(Tl)シンチレーターを、大塔コスモ観測所の地下実験室に設置し、バックグラウンドの原因を探った。大塔コスモ観測所は、奈良県五條市大塔町のトンネル内にある。実験室はトンネルの中央付近にあり、上部には約 450m の岩盤があって宇宙線のバックグラウンドを除去している。検出器は厚さ 15cm の鉛と厚さ 10cm の無酸素銅で作られた放射線シールドの内部に設置されている。検出器の上下には超大型の NaI(Tl)シンチレーターが設置されていてγ線を遮蔽している。測定は 2008 年の夏に行われた。測定結果を図 4 に示す。図の赤点が実験結果である。同時に青点でバックグラウンドシミュレーションの結果を示す。シミュレーションでは、検出器を構成するアルミ部材、光電子増倍管を構成する部品に一般的に含まれているウラン系列とトリウム系列を仮定してエネルギースペクトルを作った。そののち、実験結果に一致するように比率を変化させて実験データを完全に再構成することに成功した。この結果、検出器部材に使用されているアルミにウランが 54ppb、トリウムが 50ppb 含まれていること、光電子増倍管にはウランが 90ppb、トリウムが 140ppb、カリウ

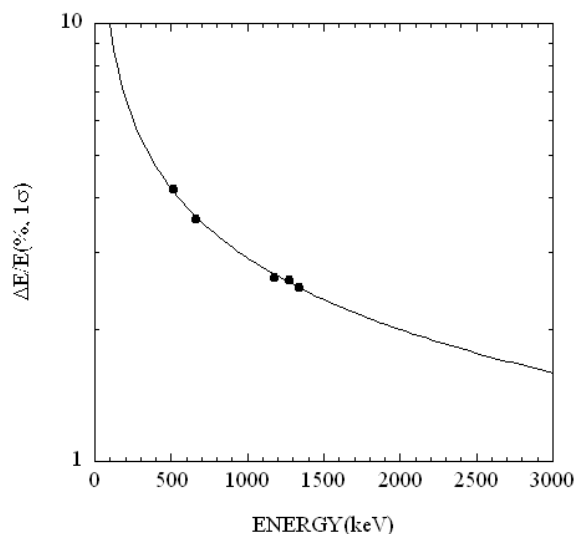


Fig.3 : The energy dependence of the energy resolution.

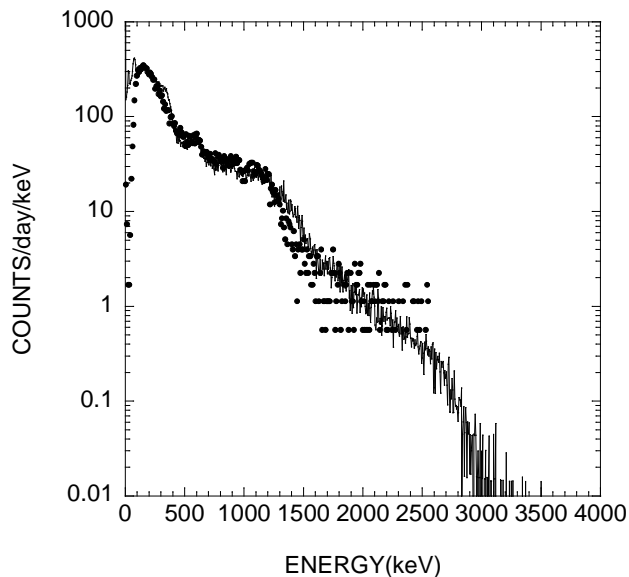


Fig. 4 : Dots: Experimental result.
Line: Reconstructed energy spectrum by Monte Carlo simulation

ム(天然)が 150ppm 含まれていることがわかった。これらの値は通常の素材に含まれている典型的な値である。

この実験結果をもとに、検出器部材の選定を行った、素材に関しては放射性不純物の濃度を吟味し、最も深刻な影響を与えていたアルミニウムの土台を透明なアクリルに変更した。光電子増倍管も重大なバックグラウンド源であるため、低バックグラウンド仕様(XMASS などに使用されているもの)を購入し、さらに長さ15cmのライトガイドを用いて検出器本体から遠ざけてバックグラウンドの影響を低減した。

二枚構成のシンチレーター

薄型・大面積の NaI(Tl)シンチレーターを二枚積層させた MOON(Molybdenum Observatory Of Neutrino)システムを構築し、その性能検査と低バックグラウンド測定を実施した。図5に大塔コスモ観測所に設置した様子を示す。図の白い四角い板がライトガイド、その内側の正方形の部分が NaI(Tl)検出器である。検出器の土台には透明なアクリルを使用してバックグラウンドの低減を図っている。この結果、バックグラウンドの計数率はおよそ10分の1に低減した。

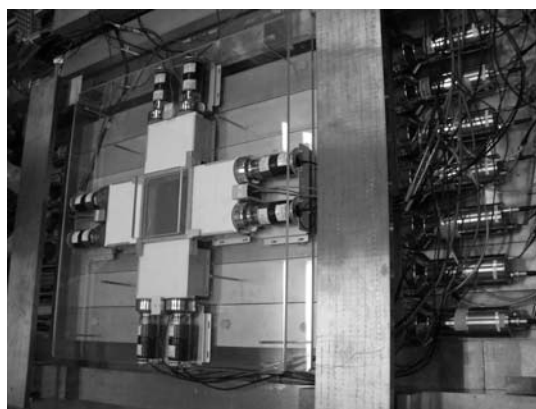


Fig.5 : MOON system which was installed at OTO Cosmo Observatory.

将来展望

MOON-NaI 検出器の性能評価を実施し、二重ベータ崩壊の感度を評価した。二枚のシンチレーターで同時に計数することによって二重ベータ崩壊の信号を抽出して計数することができる。現在収集しているバックグラウンドデータによる解析では、単独の測定に比べてバックグラウンドの計数率がおよそ10分の1に低減している。

将来計画では二重ベータ崩壊の測定は数トン規模の二重ベータ線源を測定する必要がある。その場合無機シンチレーターをエネルギー検出器に使用することは、大型化に際して困難な条件になる。しかし、薄型・大面積の無機シンチレーターは、卓越した事象の弁別能力とエネルギー分解能を示した。この性能は宇宙暗黒物質探索や天体核物理学研究に対して極めて有効な検出器として使用することができる。

研究発表

口頭発表

K.Fushimi 他、”PICO-LON project for WIMPs search”, TENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON TOPICS IN ASTROPARTICLE AND UNDERGROUND PHYSICS (TAUP2007) 11–15 September 2007, Sendai, Japan

T.Shima 他、” MOON for next-generation neutrino-less double-beta decay experiment; present status and perspective”, TENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON TOPICS

IN ASTROPARTICLE AND UNDERGROUND PHYSICS (TAUP2007) 11–15 September
2007, Sendai, Japan

亀田勇樹、伏見賢一他、”積層型 NaI(Tl)シンチレータによる宇宙素粒子探索計画”，研究会「放射線検出器とその応用」(第 23 回) (つくば 高エネルギー物理学研究機構、2009 年 1 月)

誌上発表

Ken-Ichi Fushimi, K. Yasuda, Y. Kameda, Hiroyasu Ejiri, Ryuta Hazama, K. Ichihara, K. Imagawa, H. Ito, Norihiko Koori, H. Nakamura, Shintaro Nakayama, Masaharu Nomachi, T. Shima, S. Umehara and S. Yoshida, “PICO-LON project for WIMPs search”, *Journal of Physics Conference Series*, Vol.120, p.042024, 2008.

H. Ejiri, K. Fushimi, R. Hazama, H. Nakamura and T. Shima, “Double beta decay experiments and ν -mass sensitivities”, *Journal of Physics Conference Series*, Vol.120, p.052550, 2008.

T. Shima, P.J. Doe, H. Ejiri, S.R. Elliot, J. Engel, M. Finger, M. Finger, Jr., K. Fushimi, V.M. Gehman, M.B. Greenfield, R. Hazama, H. Imaseki, P. Kavutov, V.D. Kekelidze, H. Kitamura, K. Matsuoka, H. Nakamura, M. Nomachi, A. Para, R.G.H. Robertson, M. Slunecka, G.D. Shirkov, A.N. Sissakian, A.I. Titov, Y. Uchihori, S. Umehara, V. Vaturin, V.V. Voronov, J.F. Wilkerson, D.I. Will, K. Yasuda, and S. Yoshida, “MOON for next-generation neutrino-less double-beta decay experiment; present status and perspective”, *Journal of Physics Conference Series*, Vol.120, p.052555, 2008.

Y.Kameda, K. Fushimi, H. Ejiri, K.Harada, K.Imagawa, H.Ito, N.Koori, H.Nakamura, S.Nakayama, T.Shima, S.Umehara and S.Yoshida, “Study on neutrino and neutralino by means of thin NaI(Tl) scintillator”, *Radiation Detectors and Their Uses*, KEK Proceedings (出版予定)