

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：11302

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540295

研究課題名(和文) 発光性ジルコニウム錯体を用いた2重ベータ崩壊実験用液体シンチレータの開発

研究課題名(英文) Development of liquid scintillator using luminous zirconium complex for neutrinoless double beta decay experiment

研究代表者

福田 善之 (FUKUDA, Yoshiyuki)

宮城教育大学・教育学部・教授

研究者番号：40272520

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：ニュートリノを放出しない2重ベータ崩壊事象の探索を目指して、発光性配位子によるジルコニウム錯体を含有した液体シンチレータの開発を行った。発光波長が430nmのジルコニウムODZ錯体を合成し、ガンマ線の観測に成功したものの、量子収率は13.2%しか得られなかった。そこで、量子収率30%が期待されたトリアジン基を導入したジルコニウム・キノリノール錯体を合成した。発光波長は510nmが得られたが、量子収率は12%に留まった。以上の結果から、発光性配位子を用いたジルコニウム錯体は量子収率が20%未満であるため、液体シンチレータの蛍光剤として使用するには十分な性能を得られないことがわかった。

研究成果の概要(英文)：We have developed a liquid scintillator using luminous zirconium complexes for neutrinoless double beta decay experiment. At first, we synthesized zirconium ODZ complex, and it has a peak wavelength for the emission around 430nm as we expected by some thesis, however, the quantum yield was only 13.2%, even though we could observe the signal from gamma-ray irradiation. In order to obtain better quantum yield, we have synthesized 5-(4,6-dimethoxy-1,3,5-triazin-2-yl)-8-quinolinolate zirconium, which should have 30% of the quantum yield. This complex had a peak wavelength of 540nm as we expected, however, the quantum yield achieved to 12%. This value was almost same as normal 8-quinolinolate zirconium. Therefore, we concluded that the luminous zirconium complex with ligand such as ODZ and 8-quinolinolate can not be used for the fluorescent material in the liquid scintillator system.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ニュートリノ 2重ベータ崩壊 ニュートリノ質量 ジルコニウム 液体シンチレータ

1. 研究開始当初の背景

1998年、SKによる大気ニュートリノ振動の発見により、従来質量が無いと考えられてきたニュートリノに有限の質量が存在する決定的な証拠を得た。その後、2001年にはカナダのSNOとSKの⁸B太陽ニュートリノ観測から電子ニュートリノ振動が確立し、更にK2K実験によるミューニュートリノ振動の確証とともに、素粒子の標準理論を超える画期的な結果が次々ともたらされた。最後まで未確定だった振動解 θ_{13} もT2K実験が有限値の兆候を示し始めていた。現在のニュートリノ物理は、CP位相を含めたMNSP行列の総合的解明を図りながら、素粒子の大統一理論を構築するための道標を得ることが次のステップとなっている。特に重要な点は、ニュートリノの絶対質量の測定と、ディラック型かマヨラナ型の確定である。前者は、トリチウムのベータ崩壊電子のエネルギー分布を極限まで精密に測定し、僅かな終端エネルギーの違いを観測するKATRIN実験が進行中であるが、予想される0.1eVを下回る領域を探索することは非常に困難である。そこで、後者の検証も併せて、ニュートリノの絶対質量を求められるニュートリノを放出しない2重ベータ崩壊(0 $\nu\beta\beta$)事象の観測に、世界的な注目が集まっている。

2. 研究の目的

ニュートリノがマヨラナ型の場合、原子核内の核子のベータ崩壊で放出されるニュートリノは反ニュートリノでもあるため、原子核内で別の核子に吸収されて再度ベータ崩壊が起きるため、ニュートリノが放出されない2重ベータ崩壊が起きる。通常

のベータ崩壊が連続して起きる2重ベータ崩壊(2 $\nu\beta\beta$)の場合、放出されるニュートリノ

はエネルギーを持ち去るので、2個の電子のエネルギーは連続分布となる。一方、0 $\nu\beta\beta$ 事象では電子のエネルギーは崩壊前後の原子核の質量エネルギー差(Q値)となり、一定値となる。(図1参照)しかし、現実には観測装置のエネルギー分解能が有限のため、Q値に2 $\nu\beta\beta$ 事象が被さることや、バックグラウンドとの見分けが困難なことから0 $\nu\beta\beta$ 事象の確たる証拠は得られていない。2重ベータ崩壊の半減期の逆数は、核行列とニュートリノ絶対質量の積の2乗に比例することが理論的に予想されるため、10²⁷年以上の極めて長い半減期を観測すると、0.1eV以下の領域に感度が出てくる。一方、観測される半減期の2乗は、ターゲットの質量と観測時間の積に

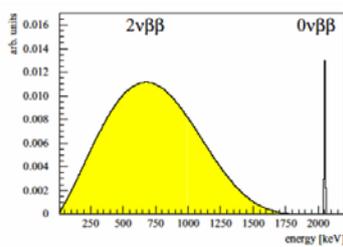


図1 二重ベータ崩壊の電子エネルギー

比例し、エネルギー分解能とバックグラウンドの事象率の積に反比例する。この関係から、0 $\nu\beta\beta$ 事象で0.1eV以下の絶対質量を観測するためには0.01count kg⁻¹ y⁻¹の低バックグラウンド環境下で4%@2.5MeVのエネルギー分解能を有する観測装置で、1000kg・yの大質量のターゲット原子核を観測する実験が必須である。主なバックグラウンドはトリウム系列の²⁰⁸Tlから生ずる γ 線(2.615MeV)であり、Q値が2.6MeV以上の原子核である¹⁰⁰Mo、⁹⁶Zr、⁸²Se、¹¹⁶Cd、¹⁵⁰Nd、⁴⁸Caが期待できる原子核である。

これまでに、MoとSeをトラッキングチェンバーとカロリメータで観測するSuper-NEMOや、CdとTeを含む半導体検出器CdZnTeを用いるCOBRAなど、欧州を中心に様々な計画が存在しているが、どれもターゲット質量が数10~100kgである。一方、0.1eV以下の領域までニュートリノ質量を探索するためには、トンスケールのターゲット質量が必要である。そこで、液体シンチレータに¹⁵⁰Nd(現在は¹³⁰Teに変更)を溶解させるSNO+や、¹³⁶XeをenrichしたXeガスを2.5%溶解させるKamLAND-Zenが進行中である。どちらも元はニュートリノ観測装置なので1000トン以上の容積があり、ターゲット質量として500kg程度を狙っているが、SNO+はNdの溶解度が0.2wt%以下で容積が大きいことからエネルギー分解能の達成に不安があることや、KamLAND-Zenは¹³⁶XeのQ値が低いためバックグラウンドの除去が必至となっている。但し、液体シンチレータは容易にターゲット質量を増やせ、観測技術が確立している点では共通しており、有望な手法と言える。2重ベータ崩壊事象を探索する実験に使用する液体シンチレータには、次の点が要求される。

- (1) 充分な量のターゲット原子核がシンチレータに溶解できること(5~10wt%)
- (2) 発光量が多いことにより、高エネルギー分解能を得ること(4%@2.5MeV)
- (3) 極低バックグラウンドであること(0.01count kg⁻¹ y⁻¹)

研究代表者は、これまで低エネルギー太陽ニュートリノ観測を目的としてInP半導体検出器を開発しているが、ガンマ線の検出が課題として残っていた。そこで、インジウムを液体シンチレータに溶解させる検出器の開発を着想し、インジウム・キノリノール錯体をベンゾニトリルに2wt%含有する液体シンチレータの開発に世界で初めて成功した。更に、ジルコニウム・キノリノール錯体の合成にも成功し、同様にベンゾニトリルに2wt%溶解する液体シンチレータを開発したのである。

しかし、ジルコニウム・キノリノール錯体は発光波長が548nmと長く(図2参照)、発光量もBC505の7%という結果が得られた。そこで、本研究では⁹⁶Zrを、ニュートリノを放出しない2重ベータ崩壊事象の標的として、

キノリノール錯体に置換基を導入した新規の配位子を用いたジルコニウム・キノリノール錯体を用いて、発光波長や発光量が改善された液体シンチレータを開発することを目的としている。

3. 研究の方法

ジルコニウムを錯体として形成させる場合、配位子は $\cdot O$ を配位原子として、空気中や溶媒中の水や酸素と反応しやすい Zr^{4+} を安定化させなければいけない。また、キレート配位子であるため、配位子の解離が起りにくいものを考えなければいけない。昨年度までの研究において、ジルコニウム・キノリノール錯体 (ZrQ_4) を合成し、有機 EL として有名なアルミニウム・キノリノール錯体 (AlQ_3) 同様

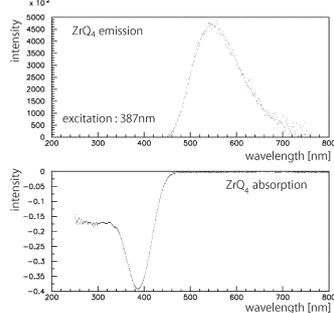


図2 ZrQ₄の発光・吸収分布

に 548nm の可視光領域に発光することを確認した (図2 参照)。また、 ZrQ_4 はベンズニトリルに最大 2.0wt% まで溶解することも発見した。ベンズニトリルはガンマ線の照射に対して蛍光発光することを確認し、そのエネルギースペクトルからガンマ線のコンプトン端が観測されたことから、エネルギーに比例した発光が行われる。従って、ベンズニトリルに蛍光物質である PPO 等の第一蛍光体を加えることで、 ZrQ_4 含有の液体シンチレータの開発に、世界で初めて成功したのである。図1は、 ZrQ_4 を含有した液体シンチレータに、 ^{137}Cs や ^{60}Co のガンマ線を照射したときのエネルギー分布である。但し、量子収率 (吸収光子1個に対し、発光光子を放出する割合) は、 AlQ_3 の 17% と比較して、 ZrQ_4 は僅か 1.1% であることから、発光量が BC505 の 7% という結果であった。そこで、ジルコニウム・キノリノール錯体の発光の量子収率を格段に向上し、光電子増倍管の最大量子効率の波長帯 (450nm~500nm) に合致させるために、ジルコニウム・キノリノール錯体の発光波長の短波長化を計らなければいけない。

そこで、図3のトリアジン基のような置換基をキノリノール配位子に導入する。トリアジン基は電子欠乏の状態であり、キノリノール配位子のフェニル基の π 電子軌道状態を変更し、吸収・発光波長帯を数十 nm 程度短波長側に移動させることが期待される。

実際、置換基を導入したアルミニウム・キノリノール錯体 (AlQ'_3) では、発光波長が 510nm と 30nm 以上短くなり、量子収率も 54% に改善されたことが報告されている (J. Org.

Chem., 69, (2004) 1723)。従って、図4の R の位置にトリアジン基を導入したキノリノール配位子による新規のジルコニウム・キノリノール錯体 (ZrQ'_4) を合成する。これから、 ZrQ'_4 で実効値として BC505 の 30~40% 程

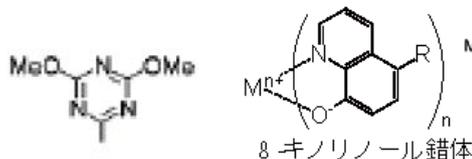


図3 トリアジン基 (置換基) 図4 置換基を導入した金属キノリノール錯体

度の発光量が期待される。そこで、作成した ZrQ'_4 錯体をベンズニトリルに 30 μ M 溶解させ、吸収発光スペクトル測定装置を用いて吸収・発光スペクトルの物性量を計測し、置換基を導入する前の錯体とのスペクトルの比較から、吸収・発光帯が 30nm 以上短波長に遷移することを確認する。また、標準物質 (硝酸キニーネ等) による発光スペクトルとの比較から、 ZrQ'_4 錯体の量子収率が 30% 以上に改善することを確認する。一方、蛍光吸収分光器を用いて、発光波長光による溶媒中の減衰係数 (透過率) を計測する。なお、置換基を導入したキノリノール配位子及びジルコニウム・キノリノール錯体の合成は、東京化成工業に委託する。

合成した ZrQ'_4 錯体をベンズニトリルに溶解させた溶液を 20mL のシンチレーションバイアルに入れ、PPO/BPO/ブチル-PBD などの 1 次蛍光体を溶解させ、 ^{137}Cs 等のガンマ線を照射し、発生する光電子やコンプトン電子のエネルギーを観測することにより発光量を計測する。またベンズニトリルに ZrQ'_4 を溶解させず、1 次蛍光体のみを溶解させた液体シンチレータに同様にガンマ線を照射し測定される発光量から、 ZrQ'_4 に対するシンチレーション発光に対する量子収率を測定し、標準物質による発光スペクトルによる量子収率の値との整合性を確認する。これらの測定から、1 次蛍光体の変換効率の最も良い組み合わせを選択し、 ZrQ'_4 錯体含有の液体シンチレータカクテルを決定する。確定したシンチレータカクテルより、 ZrQ'_4 錯体を 5wt% 溶解させた液体シンチレータ 1kg を作成し、10cm 立方体のアクリル容器に入れ、外部からのガンマ線照射により 4 本の光電子増倍管による同時計測を行う 2 重ベータ崩壊実験プロトタイプ装置を作成する。この装置を用いて、

- (1) 標準シンチレータ BC505 の 40% の発光量
 - (2) 4% @ 2.5MeV のエネルギー分解能
 - (3) 50ns 以下の減衰時間
- を達成させる計画であった。

4. 研究成果

まず、発光性ジルコニウム錯体として、ODZ 錯体の合成を行った。

これは、Al や Zn を用いた ODZ 錯体において、発光波長が 450nm 付近であり、量子収率も Al(ODZ)₃ では 8%であった

が、Zn(ODZ)₂ では 45%という高い値を得ていたからである (J. Mater. Chem., 8, (1998) 1999)。そこで、東京化成工業 (株) に Zr(ODZ)₄ の合成を依頼した (図 5)。合成された Zr(ODZ)₄ の光学特性を計測したところ、発光スペクトルのピーク波長は 430nm であり、吸収スペクトルのピーク波長は 250nm、290nm と 340nm の 3カ所にあり、最大発光は 250nm の励起光によるものであった (図 6)。このことから、それまで液体シンチレータの溶媒として使用していたベンゾニトリルの発光のピーク波長が 290nm であるため、電子のエネルギーを効率的に錯体の発光に移動できない可能性が問題となった。しかし、290nm の吸収帯を用いても発光できるため、PPO 100mg、及び POPOP 10mg 溶解させた液体シンチレータに、Zr(ODZ)₄ を 100mg 溶解させたサンプルを調製した。ガンマ線による照射により量子収率を評価したところ 30%程度であると予想された (図 7)。

そこで、正確な量子収率を求めるために、数ヶ月後に吸収及び発光スペクトルを再測定したところ、Zr(ODZ)₄ の吸収スペクトルの内、250nm にピークを持つ吸収が消滅してしまい、290nm と 340nm の吸収による発光

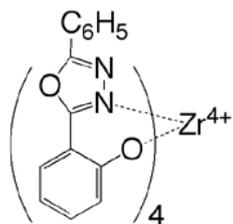


図 5 Zr(ODZ)₄ 錯体の構造式

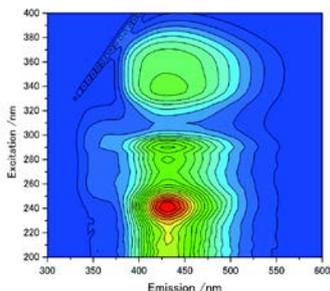


図 6 Zr(ODZ)₄ の発光強度マップ

そこで、正確な量子収率を求めるために、数ヶ月後に吸収及び発光スペクトルを再測定したところ、Zr(ODZ)₄ の吸収スペクトルの内、250nm にピークを持つ吸収が消滅してしまい、290nm と 340nm の吸収による発光

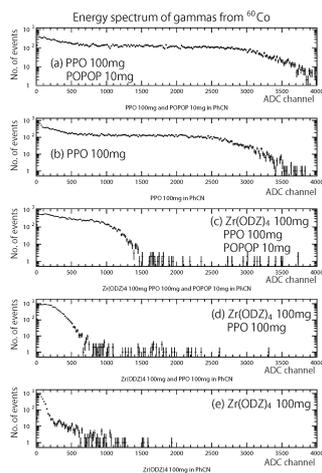


図 7 Zr(ODZ)₄ を含有した液体シンチレータのガンマ線によるコンプトン分布と含有しないサンプルのコンプトン分布

ただになってしまった。また、ベンゾニトリルに Zr(ODZ)₄ を溶解させた液体シンチレータサンプルは赤色に変色していることもわかった。このことから、Zr(ODZ)₄ は極性の高いベンゾニトリル中では安定ではなく、錯体が壊れてしまうことが疑われた。そこで、発光波長のピークが 280nm であるアニソールに対する溶解度を調べたところ、ベンゾニトリルの 5wt.%には達しなかったが、2wt.%は溶解することがわかった。従って、ベンゾニトリルに代えて極性の低いアニソールを用いて液体シンチレータサンプルを作成することにした。

アニソールを溶媒とした液体シンチレータのサンプルにガンマ線を照射してみたところ、Zr(ODZ)₄ による発光が観測されたことから、アニソールに対する量子収率を求めた。アニソールの発光スペクトルに対し、Zr(ODZ)₄ の吸収スペクトルと PPO の吸収スペクトルが概ね近いことから、それぞれの吸収がモル数に比例すると仮定し、吸収スペクトルの形状を考慮して発光量を求めたところ、Zr(ODZ)₄ の量子収率は 13.2%であることがわかった (図 8)。これは、8-キノリノール・ジルコニウム錯体(ZrQ₄)と同程度であり、目標としている 30%の量子収率には届かないことがわかった。

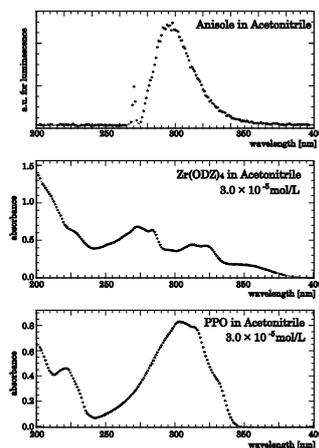
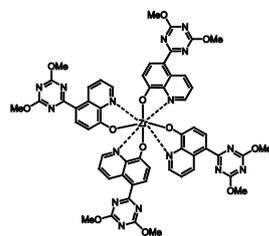


図 8 アニソールの発光スペクトル、Zr(ODZ)₄ の吸収スペクトル、PPO の吸収スペクトル

次に、発光性錯体であるトリアジン基を導入したジルコニウム・キノリノール錯体 (Zr(Q-T)₄) を合成した (図 9)。ZrQ₄ の観測結果と前述の論文に記載されたトリアジン基を導入した Al(Q-T)₄ のから、Zr(Q-T)₄ の量子収率は 37% に達することが期待されていた。錯体合成は Zr(ODZ)₄ 同様に、東京化成工業 (株) に委託した。合成した Zr(Q-T)₄ の光学特性を測定したところ (図 10)、発光最大波長は 510nm であり、通常の ZrQ₄ の発光最大波長が

次に、発光性錯体であるトリアジン基を導入したジルコニウム・キノリノール錯体 (Zr(Q-T)₄) を合成した (図 9)。ZrQ₄ の観測結果と前述の論文に記載されたトリアジン基を導入した Al(Q-T)₄ のから、Zr(Q-T)₄ の量子収率は 37% に達することが期待されていた。錯体合成は Zr(ODZ)₄ 同様に、東京化成工業 (株) に委託した。合成した Zr(Q-T)₄ の光学特性を測定したところ (図 10)、発光最大波長は 510nm であり、通常の ZrQ₄ の発光最大波長が



Zr4680 Tetrakis[5-(4,6-dimethoxy-1,3,5-triazin-2-yl)-8-quinoloinato]zirconium(IV)

図 9 トリアジン基を導入したジルコニウム錯体 (Zr(Q-T)₄) の構造式

ただになってしまった。また、ベンゾニトリルに Zr(ODZ)₄ を溶解させた液体シンチレータサンプルは赤色に変色していることもわかった。このことから、Zr(ODZ)₄ は極性の高いベンゾニトリル中では安定ではなく、錯体が壊れてしまうことが疑われた。そこで、発光波長のピークが 280nm であるアニソールに対する溶解度を調べたところ、ベンゾニトリルの 5wt.%には達しなかったが、2wt.%は溶解することがわかった。従って、ベンゾニトリルに代えて極性の低いアニソールを用いて液体シンチレータサンプルを作成することにした。

540nmであったことから、ほぼ予想通りに短波長側に移動した発光スペクトルが得られた。一方、吸収スペクトルについては、各々259nm、303nm、及び396nmにピークが存在し、 ZrQ_4 の吸収ピークが388nmに一つだけ観測された結果と大きく異なっていた。更に、合成した $Zr(Q-T)_4$ はア

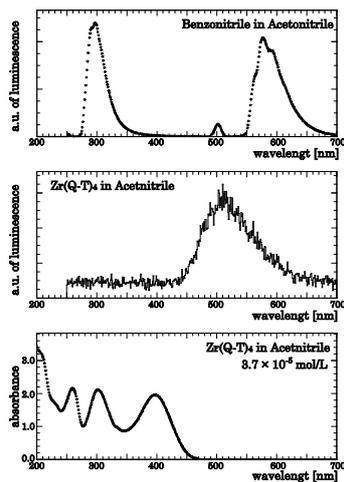


図 10 $Zr(Q-T)_4$ の発光・吸収スペクトル

ニソールへの溶解度がほとんどなく、ベンゾニトリルに対して 100mg (5wt.%)を溶解させることができた。そこで、PPO を 100mg、POPOP を 10mg 溶解させた液体シンチレータに、 $Zr(Q-T)_4$ を 100mg 溶解させたサンプルに対してガンマ線を照射したところ、全く信号を観測することは出来なかった。すなわち、量子収率の改善が図られていないことが予想されたため、ベンゾニトリルにおける $Zr(Q-T)_4$ の量子収率を測定した。測定方法は $Zr(ODZ)_4$ と同様であり、 $Zr(Q-T)_4$ の吸収スペクトルと PPO の吸収スペクトルが概ね近いことから、それぞれの吸収がモル数に比例すると仮定し、吸収スペクトルの形状を考慮して発光量を求めたところ、 $Zr(Q-T)_4$ の量子収率は 12%に留まった。これは、 ZrQ_4 の量子収率であった 11.5%と全く同じ結果となったのである。

以上の結果から、発光性配位子である ODZ 並びに発光波長の短波長化と量子収率の向上が期待されたトリアジン基を導入した 8-キノリノールの配位子を用いたジルコニウム錯体に対して、いずれも量子収率は 20%未滿しか得られないことがわかり、液体シンチレータの蛍光剤として使用するには十分な性能を得られないことがわかった。

一方、 β ケトエステル配位子によるジルコニウム錯体が BC505 の $48.7 \pm 7.1\%$ の光量と、エネルギー分解能 $4.1 \pm 0.6\% @ 3.35\text{MeV}$ を達成していることから、今後は β ケトエステル・ジルコニウム錯体を用いた液体シンチレータの開発を推進する計画である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

(1) Yoshiyuki Fukuda, Shigetaka Moriyama, Izumi Ogawa, Takahiro Gunji and Satoru Tsukada: "Development of a liquid scintillator

containing a zirconium complex for the ZICOS experiment", Nuclear Physics B Proceedings Supplement (2015) 発刊予定、査読有

(2) Yoshiyuki Fukuda, Narengerile, Akira Obata, Shigetaka Moriyama, Izumi Ogawa, Takahiro Gunji, Satoru Tsukada, and Ryohei Hayami: "Performance of a liquid scintillator containing a zirconium beta-keto ester complex developed for the ZICOS experiment" 宮城教育大学紀要 49 (2015) 109-117 査読無

(3) Yoshiyuki Fukuda, Shigetaka Moriyama, and Izumi Ogawa: "Development of liquid scintillator containing a zirconium complex for neutrinoless double beta decay experiment" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 732. 397-402 (2013), 査読有 doi:10.1016/j.nima.2013.06.043

(4) Yoshiyuki Fukuda, Narengerile, Akira Obata, Shigetaka Moriyama and Izumi Ogawa: "Development of liquid scintillator containing a zirconium complex for neutrinoless double beta decay experiment" 宮城教育大学紀要 48 (2013) 125-131 査読無

(5) Yoshiyuki Fukuda: "Development of InP solid state detector and liquid scintillator containing indium complexes for a measurement of $pp/7\text{Be}$ solar neutrinos" Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 513. 229-232 (2012), 査読有 doi:10.1088/1742-6596/375/1/042054

[学会発表] (計 16 件)

(1) 福田善之、那仁格日樂、小畑旭、森山茂榮、小川泉、郡司天博、塚田学、速水良平: ジルコニウム 96 を用いたニュートリノを放出しない 2 重ベータ崩壊事象の探索実験 VII" 日本物理学会第 70 回年次大会 2015年3月21日 早稲田大学 (東京都新宿区)

(2) 福田善之、那仁格日樂、小畑旭、森山茂榮、小川泉、郡司天博、塚田学: ジルコニウム 96 を用いたニュートリノを放出しない 2 重ベータ崩壊事象の探索実験 V" 日本物理学会 2014 年秋季大会 2014 年 9 月 20 日 佐賀大学 (佐賀県佐賀市)

(3) 那仁格日樂、福田善之、小畑旭、森山茂榮、小川泉、郡司天博、塚田学: ジルコニウム 96 を用いたニュートリノを放出しない 2 重ベータ崩壊事象の探索実験 VI" 2014 年秋季大会 2014 年 9 月 20 日 佐賀大学 (佐賀県佐賀市)

(4) 福田善之、那仁格日樂、小畑旭、森山茂榮、小川泉、郡司天博、塚田学: "ジルコニウム 96 を用いたニュートリノを放出しない 2 重ベータ崩壊の研究" 新学術領域"宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究" 第 1 回研究会 (招待講演) 2014 年 8 月 24 日 大阪大学 (大阪府豊中市)

(5) Y.Fukuda, T.Muramatsu, S.Moriyama, Narengerile, A.Obata, I.Ogawa, T.Gunji, and S.Tsukada: "Development of liquid scintillator containing zirconium complex for neutrinoless double beta decay experiment" The 37th International Conference on High Energy

Physics (ICHEP2014) 2014年7月7日 バレンシア (スペイン)

(6) Y.Fukuda, T.Muramatsu, S.Moriyama, Narengerile, A.Obata, I.Ogawa, T.Gunji, and S.Tsukada: "Development of liquid scintillator containing zirconium complex for neutrinoless double beta decay experiment" The XXXVI International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino2014) 2014年6月6日 ボストン (米国)

(7) 小畑旭、那仁格日楽、福田善之、森山茂栄、小川泉:" ジルコニウム96を用いたニュートリノを放出しない2重ベータ崩壊事象の探索実験 IV" 日本物理学会第69回年次大会 2014年3月27日 東海大学 (神奈川県平塚市)

(8) Y.Fukuda, T.Muramatsu, S.Moriyama, Narengerile, A.Obata, I.Ogawa, and T.Gunji: "Development of liquid scintillator containing zirconium complex for neutrinoless double beta decay experiment" The 14th International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN13) 2013年11月11日 IPMU (千葉県柏市)

(9) 福田善之、森山茂栄、小川泉:" ジルコニウム96を用いたニュートリノを放出しない2重ベータ崩壊事象の探索実験 III" 日本物理学会2013年秋季大会 2013年9月20日 高知大学(高知県高知市)

(10) Y.Fukuda, T.Muramatsu, S.Moriyama, Narengerile, A.Obata, I.Ogawa, and T.Gunji: "Development of liquid scintillator containing zirconium complex for neutrinoless double beta decay experiment" The 2013 European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPSHEP 2013) 2013年7月23日 ストックホルム (スウェーデン)

(11) 福田善之、那仁格日楽、中川貴仁、森山茂栄、小川泉:" ジルコニウム96を用いたニュートリノを放出しない2重ベータ崩壊事象の探索実験 II" 日本物理学会 第68回年次大会 2013年3月29日 広島大学 (広島県東広島市)

(12) 福田善之:"液体シンチレータの開発とニュートリノ物理学への応用" 放射線科学とその応用第186委員会(招待講演). 2013年3月2日 大観荘 (宮城県松島市)

(13) Yoshiyuki Fukuda, Shigetaka Moriyama, and Izumi Ogawa: "Development of liquid scintillator containing zirconium complex for neutrinoless double beta decay experiment" The 13th Vienna Conference on Instrumentation (VCI2013) 2013年2月13日 ウィーン (オーストリア)

(14) Yoshiyuki Fukuda: "IPNOS experiment for low energy solar neutrinos and ZICOS experiment for neutrinosless double beta decay" Aspen Winter Workshop-New Directions in Neutrino Physics (招待講演) 2013年2月4日 アスペン (米国)

(15) 福田善之、那仁格日楽、中川貴仁、三好直哉、村松隆、森山茂栄、小川泉:" ジルコニウム96を

用いたニュートリノを放出しない2重ベータ崩壊事象の探索実験 I" 日本物理学会 2012年秋季大会 2012年9月11日 京都産業大学 (京都府京都市)

(16) Y.Fukuda, M.Asakura, T.Izawa, S.Moriyama, T.Muramatsu, T.Namba, T.Nakagawa, Narengerile and H.Sekiya: "Development of InP detector and liquid scintillator containing metal complexes for pp/7Be neutrinos and neutrinoless double beta decay" The XXV International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2012) 2012年6月5日 京都テルサ (京都府京都市)

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://masamune.miyakyo-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田 善之 (FUKUDA, Yoshiyuki)
宮城教育大学・教育学部・教授
研究者番号: 40272520

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

森山 茂栄 (MORIYAMA, Shigetaka)
東京大学・宇宙線研究所・准教授
研究者番号: 50313044
小川 泉 (OGAWA, Izumi)
福井大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 20294142