

平成30年6月14日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287045

研究課題名(和文) 次世代ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索実験のための熱量蛍光検出器の開発

研究課題名(英文) Development of scintillating bolometer for next generation neutrino-less double beta decay search

研究代表者

吉田 斉 (Yoshida, Sei)

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号：60400230

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究計画では、二重ベータ崩壊核の中で最もQ値が大きい、 $^{48}\text{Ca}$ 同位体を含む不活性フッ化カルシウムシンチレーション検出器を、10mK以下という極低温に冷却し、熱量検出器として利用することで、0 崩壊観測に大変重要な高エネルギー分解能検出器を開発する。熱量に加えてシンチレーション光を同時検出し、両者の信号強度を比較して、事象の粒子弁別を行う方法を開発した。

研究期間内に目標としていた、不活性フッ化カルシウム結晶を用いた熱量検出器の実現に世界で初めて成功した。この成果は将来的な $^{48}\text{Ca}$ 同位体を用いた高感度、大規模ニュートリノ欠損二重ベータ崩壊研究への重要な一歩である。

研究成果の概要(英文)：In this research, we developed a high energy resolution detector which is very important for neutrino-less double beta decay search. The scintillating bolometer with undoped calcium fluoride scintillation crystal containing  $^{48}\text{Ca}$  isotope, which has the highest Q value among double beta decay isotopes, was used. The crystal was cooled down to an extremely low temperature of 10 mK. We developed a method to simultaneously detect scintillation light in addition to heat quantity. Compare the signal intensities of both light and heat, types of particles can be identified.

It was succeeded for the first time to realize the scintillating bolometer detector using the undoped calcium fluoride crystals during the research period. This achievement is an important step toward future high-sensitivity, large-scale neutrino-less double beta decay study using  $^{48}\text{Ca}$  isotope.

研究分野：素粒子原子核実験

キーワード：二重ベータ崩壊 ニュートリノ質量 マヨラナニュートリノ ボロメーター シンチレーション検出器  
フッ化カルシウム結晶

### 1. 研究開始当初の背景

ニュートリノレス二重ベータ崩壊( $0\nu\beta\beta$ 崩壊)の観測は、ニュートリノ質量の絶対値を測定する極めて有効な手法である。また、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の発見は、ニュートリノのマヨラナ性の直接的な証明になり、ニュートリノの微小質量を自然に説明するシーソー機構を強く支持する。物質優勢宇宙を説明するレプトジェネシスシナリオではレプトン数保存則の破れを基礎としており、これも  $0\nu\beta\beta$ 崩壊の観測によって検証できる。以上のような背景から、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の研究は、極めて重要と位置づけられている。

研究開始当初は、日本の KamLAND-Zen 実験とアメリカの EXO 実験がともに  $^{136}\text{Xe}$  同位体を使用して、ニュートリノ有効質量で約 100 meV の感度で観測結果を公表し、世界をリードしていた。その後、GERDA 実験 ( $^{76}\text{Ge}$ , 独)、CUORE 実験 ( $^{130}\text{Te}$ , 伊) が観測を開始し、激しい競争が続いている。ニュートリノ振動実験の理論的解釈からニュートリノ質量は、数 meV 領域(順階層構造)と数十 meV 領域(逆階層構造)の2つが有力視されている。数十 meV 領域に感度をもつ検出器は、現在稼働中の実験を含め、いくつも提案されているが、数 meV 領域にまで感度をもつ検出器開発計画は無い。本研究計画では、バックグラウンドフリー観測という、その他の実験計画では実現できていない性能を追及することで、困難とされる数 meV 領域に感度をもつ検出器の提案を目指す。

また、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊観測においては、測定された崩壊寿命をニュートリノ有効質量に換算する際に、原子核の核行列要素に理論的不定性が存在する。そのため複数の崩壊核で観測を行い、比較検証することが重要になる。現在  $^{48}\text{Ca}$  同位体を用いた大規模  $0\nu\beta\beta$ 実験計画は CANDLES 実験のみであり、その将来計画として感度の飛躍的な向上を実現するため、本研究計画を提案した。

### 2. 研究の目的

二重ベータ崩壊核の中で最も Q 値が大きい、 $^{48}\text{Ca}$  同位体を含む不活性フッ化カルシウム(以下  $\text{CaF}_2$ )シンチレーション検出器を、10 mK 以下という極低温に冷却し、熱量検出器として利用することで、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊観測に極めて重要な高エネルギー分解能検出器を開発する。また、熱量に加えてシンチレーション光(蛍光)を同時に検出し、両者の信号強度を比較することで事象の粒子弁別を行う方法を確立する。その結果としてバックグラウンドを徹底的に排除し、バックグラウンドフリー観測の実現可能性を立証して、ニュートリノ質量の絶対値測定に対して数 meV 以下の領域を探索できる手法を開発する。

### 3. 研究の方法

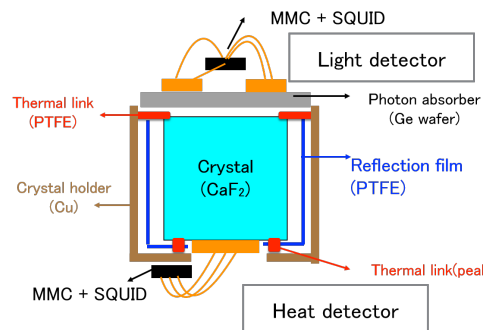
$\text{CaF}_2$  結晶を極低温 (10mK 以下)に冷却し、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊事象によるエネルギーは温度上

昇の測定(熱量測定)を行うことで高いエネルギー分解能を実現する。同時に蛍光信号も検出し、蛍光の $\alpha$ 粒子による消光(クエンチング)効果を利用して、 $\alpha/\beta$ 粒子弁別を行う。高いエネルギー分解能の実現により、 $2\nu\beta\beta$ 崩壊によるバックグラウンド事象を排除が可能となり、 $\alpha/\beta$ 粒子弁別の実現により、環境放射能によるバックグラウンド候補の $\alpha$ 壊事象の排除が可能となる。これらの結果として、将来計画として提案する大規模  $0\nu\beta\beta$ 崩壊観測装置において、バックグラウンドフリー観測が実現され、 $^{48}\text{Ca}$ 濃縮による崩壊核の増量と組み合わせることで、数 meV 領域でのニュートリノ質量の測定が実現できることを立証する。

### 4. 研究成果

韓国標準科学院との共同研究を行い、新しい超電導センサー(MMC)と  $\text{CaF}_2(\text{pure})$ 結晶を組み合わせた蛍光熱量システムを採用し、優れたエネルギー分解能を目指し開発を行った。検出器の概念図を図1に示す。

図1: 検出器の概念図



$\text{CaF}_2(\text{pure})$ 結晶で相互作用した放射線は、エネルギーを損失し、エネルギーは大部分が熱に変換され、図1下部の熱検出用 MMC で検出される。残りの数%が蛍光に変換され、結晶内を伝搬して、図1上部の光子吸収材 (Ge-wafer) で吸収される。Ge-wafer で吸収された蛍光はそこで熱に変換され、同様に MMC で検出される。熱信号 MMC の出力と蛍光信号 MMC の出力の相関を見ることで、検出器で相互作用した放射線の種類 ( $\alpha$ もしくは  $\beta$ や  $\gamma$ ) を識別することが可能となる。 $\text{CaF}_2$  結晶は、内部にウラン系列崩壊核の不純物を多く含む結晶を使用し、結晶内部で発生する $\alpha$ 線事象を人為的に増やして、検出器性能の評価をしやすいように工夫されている。

図2は粒子識別の結果を示している。横軸に相互作用した粒子のエネルギーを示す熱信号の出力を、縦軸には熱信号と光信号の出力比をとり、各事象をプロットしている。 $\alpha$ 線事象は、蛍光の発光におけるクエンチングがあるため、期待通り熱-蛍光出力比が小さいところに事象が分布し、 $\gamma$ 線や宇宙線 $\mu$ 粒子とは異なった分布をしている。線事象の分布は出力比の大きいほうに(図2矢印B)エ

エネルギーの高い方へ（図2の矢印A）tailを持って広がっているのが見て取れる。 $\alpha$ 事象が、 $\gamma/\mu$ 事象のバンドに染み込んでおり、粒子の識別能を悪くしているように見られる。これは、予期していなかった特性である。原因は、 $\text{CaF}_2$ (pure)結晶から発生した蛍光の一部が、蛍光波長が短いために熱信号用検出器に吸収されることが影響していることを突きとめた。

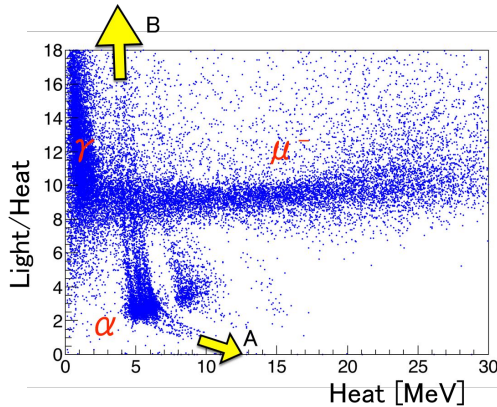


図2: 観測された事象のエネルギーと熱信号-蛍光信号出力比。結晶内部に多く含まれているU系列崩壊核からの $\alpha$ 線、環境 $\gamma$ 線と宇宙線 $\mu$ 粒子による事象が観測されている。

バンドが重なってしまう部分に関しては、蛍光信号波形の立ち上がり時間を分析することで、粒子の種類を識別できることがわかり、その情報も複合的に解析に使うことで図3のように、 $\alpha$ 粒子の信号をほぼ100%同定することが可能になっている。

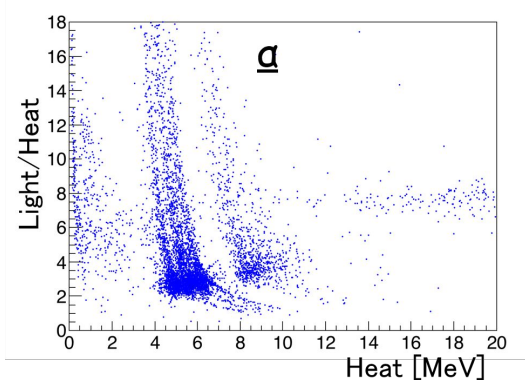


図3:  $\alpha$ 事象のエネルギーと熱信号-蛍光信号出力比（図2と同じデータを使用）。

図4には、分離同定された $\alpha$ 粒子の事象のみを使用して得られるエネルギースペクトルを示す。 $\alpha$ 線事象は、 $\text{CaF}_2$ 結晶内部に含まれるウラン系列の不純物の $\alpha$ 崩壊に起因するため、崩壊核によって $\alpha$ 線のエネルギーが単一的に決まる。ウラン系列崩壊核種（特に、 $^{222}\text{Rn}$ 崩壊の娘核種）による、3本の $\alpha$ 線エネルギーピークと $^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po} \rightarrow ^{210}\text{Pb}$ の連続崩壊による幅の広いバンプが観測された。得られたエネルギーは、4.87MeVで2.30%と十分の性能とは言えない。原因としては、出力

比の分布の広がりと同様に、発生した蛍光の一部が、熱量検出器に吸収・検出され、その確率的な揺らぎのため、エネルギー分解能が悪化していることを突きとめた。開発競争の激しい本分野において、発光波長特性によっては、同様のことが起こる場合が想定され、この研究で得られた知見が、広く検出器性能の理解に用いられることになるとと思われる。

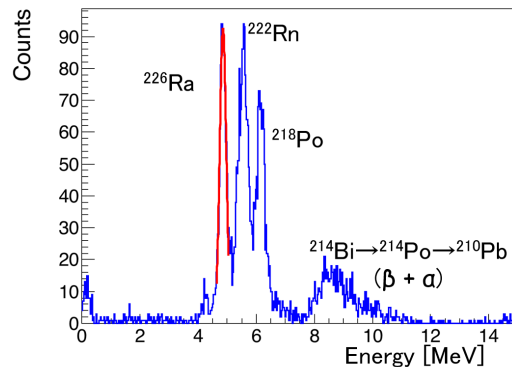


図4:  $\alpha$ 事象のエネルギースペクトル

研究期間内に目標としていた、不活性フッ化カルシウム結晶を用いた蛍光熱量検出器の実現に世界で初めて成功した。この成果は将来的な $^{48}\text{Ca}$ 同位体を用いた高感度、大規模ニュートリノ欠損二重ベータ崩壊研究への重要な一歩である。

#### 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9件)

K.Nakajima, T.Iida, (途中省略), S.Yoshida, N. Yotsunaga (著者41名), Background studies of high energy  $\gamma$  rays from  $(n,\gamma)$  reactions in the CANDLES experiment, Astroparticle Physics 100, 2018, 54-60, 査読有, DOI:10.1016/j.astropartphys.2018.02.012  
K.Nakajima, (途中省略), S.Umehara, W.Wang, S.Yoshida and N.Yotsunaga(著者41名), Performance of updated shielding system in CANDLES, AIP Conf. Proc.1921, 2018, 60003, 査読有, DOI:10.1063/1.5018999

W.M.Chan, T.Kishimoto, S.Umehara, K.Matsuoka, K.Suzuki, S.Yoshida, K.Nakajima, T.Iida, K.Fushimi, M.Nomachi, I.Ogawa, Y.Tamagawa, R.Hazama, Y.Takemoto, N.Nakatani, Y.Takihira, M.Tozawa, H.Kakubata, V.T.T.Trang, T.Ohata, K.Tetsuno, T.Maeda, B.T.Khai, X.Li and T.Batpurev, Development of CANDLES low background HPGe detector and half-life measurement of  $^{180}\text{Ta}^m$ , AIP Conf. Proc.1921, 2018, 30004, 査読有, DOI: 10.1063/1.5018991

Saori Umehara, T. Kishimoto, M.

Nomachi, S. Ajimura, T. Iida, Y. Takemoto, K. Matsuoka, V.T.T.Trang, S. Yoshida 他 40 名, Search For Neutrino-less Double Beta Decay Of  $^{48}\text{Ca}$ - Candles -, The Proceedings of The 26th International Nuclear Physics Conference(INPC2016), PoS INPC2016, 2017, 246, 査読有, DOI: 10.22323/1.281.0246

T.Iida 他, Status and future prospect of  $^{48}\text{Ca}$  double beta decay in CANDLES, Journal of Physics: Conference Series, 718, 2016, 62026, 査読有,

DOI:10.1088/1742-6596/718/6/062026

T.Iida 他, The CANDLES experiment dor the study of  $^{48}\text{Ca}$  double beta decay, Nucl. Part. Phys. Proceedings, 273, 2016, 2633-2635, 査読有,

DOI:10.1016/j.nuclphysbps.2015.10.013

S.Umehara 他, Search for Neutrino-less Double Beta Decay of  $^{48}\text{Ca}$ , Physics Procedia 61, 2015, 283, 査読有,

DOI:10.1016/j.phpro.2014.12.046

K.Nakajima 他, Low Background technique in CANDLES, AIP Conference Proc., 1672, 2015, 110004, 査読無, DOI: 10.1063/1.4928006

S.Umehara 他, CANDLES : Search for neutrino-less double beta decay of  $^{48}\text{Ca}$ , EPJ Web Conference 66, 2014, 8008, 査読有, DOI:10.1051/epjconf/20146608008

〔学会発表〕(計 18 件)

鉄野高之助, CANDLES による二重ベータ崩壊の研究(127) 二重ベータ崩壊のためのシンチレーティングボロメーターの開発, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月

鉄野高之助, シンチレーティングボロメーター開発現状(招待講演), SMART2017 : Scintillator for Medical, Astroparticle and environmental Radiation Technologies, 2017 年 11 月

吉田 齊, ニュートリノレス二重ベータ崩壊実験の現状と展望 (シンポジウム講演), 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月

吉田 齊, 新学術領域・地下素粒子原子核研究の現状 (招待講演), X 線天体と元素合成を中心とする宇宙核物理研究, 2017 年 9 月

吉田 齊, 蛍光熱量計実験開発(  $\text{CaF}_2$ ), 2017 年宇宙線研究者会議将来計画タウンミーティング, 2017 年 6 月

吉田 齊, ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索実験の将来, 「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」研究会, 2017 年 5 月

李曉龍, ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索と暗黒物質探索のための熱量蛍光 検出器の開発(poster), 「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」研究会, 2017 年 5 月

李曉龍, CANDLES による二重ベータ崩壊の研究(118) 次世代 CANDLES 検出器 Scintillating Bolometer の開発, 日本物理学

会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月

Xiaolong Li, Development of Light Detector in CANDLES Scintillating Bolometer(Poster), International Workshop on Double Beta Decay and Underground Science (DBD16), 2016 年 11 月

K.Tetsuno, Development of bolometer for  $^{48}\text{Ca}$  neutrino-less double beta decay search(Poster), International Workshop on Double Beta Decay and Underground Science (DBD16), 2016 年 11 月

鉄野高之助, CANDLES による二重ベータ崩壊の研究(113) 二重ベータ崩壊のためのシンチレーティングボロメーターの開発, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月

Konosuke Testuno, Development of scintillating bolometer for  $^{48}\text{Ca}$  neutrinoless double beta decay search (Poster), XXVII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics(Neutrino2016)(国際学会), 2016 年 7 月

Sei Yoshida ,CANDLES and Scintillating Bolometer, Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research (招待講演)(国際学会), 2016 年 5 月

K. Tetsuno, Development of scintillating bolometer for  $^{48}\text{Ca}$  neutrinoless double beta decay search(Poster), Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research (国際学会), 2016 年 5 月

鉄野高之助, CANDLES による二重ベータ崩壊の研究 (108) シンチレーティングボロメーターの開発, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月

Sei Yoshida, Development of CANDLES detector to search for neutrinoless double beta decay of  $^{48}\text{Ca}$ , Vienna Conference of Instrumentation ( VCI2016 ), 2016 年 2 月

鉄野高之助, Development of scintillating bolometer for neutrinoless double beta decay search, 新学術領域「地下素核研究」領域研究会, 2015 年 5 月

吉田 齊, Study of Double beta decay of  $\text{Ca}^{48}$ , International workshop on double beta decay and underground science (招待講演), 2014 年 10 月

〔図書〕(計 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：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~candles/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉田 斉 (Sei Yoshida)  
大阪大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：60400230

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

小川 泉 (Izumi Ogawa)  
福井大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：20294142

岸本 忠史 (Tadafumi Kishimoto)  
大阪大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：90134808

身内 賢太郎 (Kentaro Miuchi)  
神戸大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：80362440

梅原 さおり (Saori Umehara)  
大阪大学・核物理研究センター・准教授  
研究者番号：10379282

飯田 崇史 (Takashi Iida)  
筑波大学・数理物質系・助教  
研究者番号：40722905

中島 恭平 (Kyouhei Nakajima)  
福井大学・大学院工学研究科・講師  
研究者番号：30722540

### (4) 研究協力者

Yong-Ham Kim  
韓国 IBS 研究所・教授

鉄野 高之助 (Kounosuke Tetsuno)  
大阪大学・大学院理学研究科・大学院生

李 暁龍 (Xiaolon Lee)  
大阪大学・大学院理学研究科・大学院生