

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340066

研究課題名(和文) 二重ベータ崩壊探索に向けた大型で高エネルギー分解能 CdTe 検出器の開発

研究課題名(英文) Development of a large CdTe detector having high energy resolution for double-beta decay search

研究代表者

市川 温子 (ICHIKAWA, Atsuko)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50353371

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子および宇宙の起源を理解する上で重要な意味を持つニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊を探索するために、大型で高エネルギー分解能を持つテルル化カドミウム(CdTe)半導体検出器の開発を行った。信号の波形を用いることで5mm厚と従来より厚い素子でエネルギー分解能を向上させることに成功したが、現状では結晶の個体差が大きいことが判明した。また、2mm厚の薄い素子を積層することで高いエネルギー分解能を維持したまま、ガンマ線のエネルギーを測定することに成功した。

研究成果の概要(英文)：We did an R&D of the CdTe semi-conductor detector to be used for the search for the neutrinoless double-beta decay. Good energy resolution was obtained with a 10mm-thick device by using signal waveforms. However, difference of the performance in different crystals was observed. A stack of 2mm-thick devices were also produced and good energy resolution was obtained.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：半導体検出器 二重ベータ崩壊

### 1. 研究開始当初の背景

ニュートリノの極端に小さな質量を説明する理論モデルとしてシーソー機構が提唱されている。これは、ニュートリノが、粒子と反粒子が同一粒子であるマヨラナ粒子であることを仮定し、非常に大きな右巻きニュートリノ質量と、荷電レプトンと同程度のディラック質量の混合の結果、現在観測されているような小さな質量状態が実現するというものである。ニュートリノが本当にマヨラナ粒子であるのかどうかは、シーソー機構の前提条件を確かめるという意味で重要なものもあるが、「マヨラナ粒子」の存在を確認するだけでも素粒子物理学および宇宙論(物質・反物質の非対称性の起源)において非常に大きな意味をもち、実験的に解決されるべき問題である。これを確かめるために、ニュートリノを伴わない(0ν)二重ベータ崩壊を検出する試みが、世界中で進んでいる。ベータ崩壊の過程で生成した仮想的な反ニュートリノが質量項を通して(マヨラナ粒子であるために)ニュートリノ成分を持ち、原子核に吸収されることでもう一度ベータ崩壊過程を引き起こす事象である。この崩壊事象は、ニュートリノの質量が小さいほど寿命が長くなるため、現在観測されているような非常に小さな質量では、ごく稀にしか起きない(寿命>20<sup>24</sup>年)。探索は、放出される数 MeV の 2 個の電子のエネルギーの和が作るピークを探すことで行われるが、稀崩壊のため環境背景事象の混入が深刻な問題となる。現在の実験感度は、ニュートリノの質量としては数百 meV 程度であり、さらに小さい質量に感度を持つためには、検出器の大型化(数百 kg 以上)と背景事象の識別が課題となっている。

テルル化カドミウム(CdTe)結晶を用いた半導体検出器は、元素番号が高いためガンマ線吸収効率が高い、また漏れ電流が小さく室温で動作するという利点を持っている。しかし、正孔の移動度が小さく再捕獲が顕著なため、厚くすると検出位置によって収集される電荷量が変わってしまい、エネルギー分解能が悪くなるという欠点を持っている。そのため、1mm 厚程度の素子を用いたガンマ線の計数測定器として主に開発されている。さて、CdTe に含まれる <sup>130</sup>Te は、同位体存在比が 34%と豊富に存在し、かつ Q 値が 2.5MeV と二重ベータ崩壊核の中では比較的高いため有望な核種である。また、<sup>116</sup>Cd は、同位体存在比は 7.5%であるが Q 値が 2.8MeV ありこれも有望な核種である。同位体存在比 1.5%で含まれる <sup>106</sup>Cd は、二重ベータ崩壊で電子ではなく陽電子を放出する核種であり、標準理論には存在しない右巻きカレント反応に敏感と言われており興味深い。

### 2. 研究の目的

CdTe を用いた高いエネルギー分解能を持つ大型の検出器の開発に成功すれば 0 二重

ベータ崩壊探索の有望な検出器となる。結晶自体は、すでに国内のメーカーで直径 100mm、長さ 300mm(重さ 18kg)の単結晶の製造に成功している。本研究では、波形情報を用いることで『素子の体積が 10~50cm<sup>3</sup> で 2.5MeV の電子に対して 0.5%(FWHM)のエネルギー分解能をもつ検出器』の開発を目標とする。また背景事象の除去の研究を行う。

### 3. 研究の方法

CdTe 半導体素子においては正孔の移動が遅くまた寿命が短いため、放射線によって生成した正孔が電極に到達する前にある割合で捕獲されてしまう。したがって、信号の大きさが放射線の反応した深さによって変わってしまいエネルギー分解能が悪化する。この傾向は、素子が大きくなればより顕著になる。本研究では、信号の波形情報を用いてエネルギー分解能を向上することを目指す。図 1 にあるように正孔の移動が遅いため、信号の波形は、電子・正孔対が誘起する部分と電子が電極へ到達した後に正孔のみが誘起する部分に分かれる。この情報を元に対生成が起こった場所と正孔の吸収の度合いを推定し、信号を補正することによってエネルギー分解能を改善する。

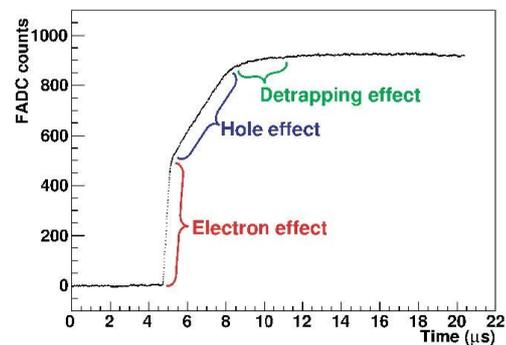


図 1: CdTe 素子からの信号

将来 0 二重ベータ崩壊探索を実際に行うためには、数 100kg~1,000kg の CdTe 素子が必要となる。そこで、10~50cm<sup>3</sup>の素子数千個をグリッド状に並べることを想定している。それぞれの素子について FADC 等を用いて波形情報を読み出す。このように複数の素子を多数並べて信号をそれぞれ読み出すことにより、コンプトン散乱などによって、いくつかの検出器に渡ってエネルギーを落とすような事象を識別することができる。二重ベータ崩壊からの電子は、ほぼ 1 か所でエネルギーを落とすのに対して、背景事象となるガンマ線はコンプトン散乱を起こす確率が非常に高い。上記の波形情報を用いれば、一つの素子内で起きた複数の反応(例えばコンプトン散乱+光電効果)も識別できると考えられる。

目標とするエネルギー分解能を得るため、分解能の限度を決めている要因を、結晶内の非一様性や、塩素ドーピングの量、温度依存性等を評価することによって、特定する。

大型で高いエネルギー分解能ということの他にも、二重ベータ崩壊探索実験を行うには、検出器内外の放射性物質による背景事象が小さいということと、背景事象の識別能力が要求される。これらについても測定、考察を行う。

#### 4. 研究成果

波形情報を用いた方法によるエネルギー高分解能化を進め、図2に示すように5mm角の素子を用いて662keVで2%(FWHM)、1.33MeVで1%(FWHM)のエネルギー分解能を達成した。しかし15mmx15mmx10mm(厚さ)の素子については、そのエネルギー分解能は3%に留まった。その原因を追究するため、新たに5mm角素子を作成し、バイアス電圧、温度に対する依存性の測定を行うとともに、補正法の改良も行った。その結果、結晶の製作時期によってキャリアの移動度など結晶としての性質に違いがあり、分解能を悪化させていることがわかった。

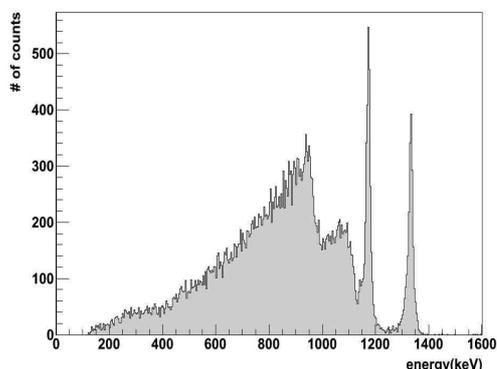


図2: 5mm角素子で得られた<sup>60</sup>Coからのガンマ線のスペクトラム

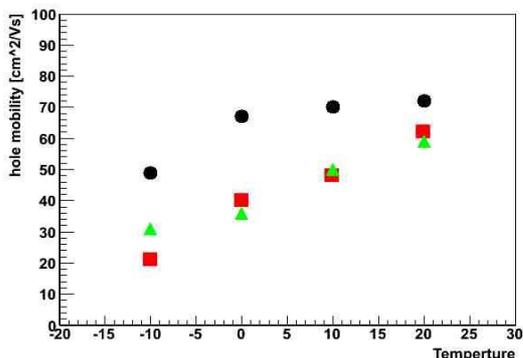


図3: 正孔の移動度と温度の関係

エネルギー分解能を向上するための別の切り口として、薄い素子(15mmx15mmx2mm(厚さ))および異なる電極構造(コプラナーグリッド)の素子の試作を行った。薄型にする場合には、大面積化は難しくなるが、キャリアの再結合は小さいと期待されるということ

と、二重ベータ崩壊探索時には、ガンマ線背景事象の除去が可能になるという利点がある。2mm厚素子で、1.33MeVガンマ線に対し2%(FWHM)のエネルギー分解能が得られ、また複数の素子を積層することで、コンプトン散乱事象の同定に成功した。

15mmx15mmx10mm(厚さ)素子について、長期安定性の評価を行った。ガンマ線源を用いてエネルギー分解能を評価した所、数か月に渡る断続的な測定ではエネルギー分解能の劣化は観測されず、安定した測定が可能であった。

二重ベータ崩壊探索において背景事象となる外部からの環境放射線を除去するための希ガス検出器の開発も進めた。希ガス内でガンマ線やアルファ線がエネルギー損失した際の電離電子を電場で加速して2次シンチレーション光を発生させ、マルチピクセル光検出器で観測することに成功した。これにより、環境放射線を有効に除去できると考えられる。

ソフトウェアとしては、二重ベータ崩壊事象や背景事象のシミュレーションコードを開発した。背景事象となりうる環境中の放射線核種の調査を行うとともに、希ガス雰囲気中にCdTeを設置したシミュレーションコードを開発し、これらの背景事象の除去効率の評価を行った。

#### 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 0件)

〔学会発表〕(計 6件)

潘 晟、0 崩壊探索実験 AXEL のための紫外光感度を持つPMTおよびMPPCの評価、日本物理学会、2015年3月21日、早稲田大学(東京都新宿区)

石山 優貴、二重ベータ崩壊探索のためのXe比例シンチレーションTPC検出器用MPPCの性能評価、日本物理学会、2014年3月28日、東海大学(神奈川県平塚市)

市川 温子、二重ベータ崩壊探索に向けたキセノン比例シンチレーションTPC検出器の開発 I、日本物理学会、2013年9月20日、高知大学(高知県高知市)

秋山晋一、二重ベータ崩壊探索に向けたキセノン比例シンチレーションTPC検出器の開発 II、日本物理学会、2013年9月20日、高知大学(高知県高知市)

平木貴宏、大型で高エネルギー分解能のCdTe半導体検出器の開発、日本物理学会、2012年3月25日、関西学院大学(兵庫県西宮市)

平木貴宏、大型で高エネルギー分解能のCdTe半導体検出器の開発、日本物理学会、2011年9月18日、弘前大学(青森県弘前市)

〔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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

市川 温子 (ICHIKAWA, Atsuko)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：50353371

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：