

48Caの2重ベータ崩壊の研究

Study of double beta decay of 48Ca

課題番号：24224007

岸本 忠史 (KISHIMOTO TADAFUMI)

大阪大学・核物理研究センター・教授



研究の概要

我々の周囲を取り巻く環境はすべて「物質」で出来ている。この「物質」優勢の宇宙を説明するために必要な「物質」と「反物質」の転換可能性を、二重ベータ崩壊を検出することで検証する。そのための測定装置として、「低ノイズの環境」、「大量の二重ベータ崩壊核」を実現したCANDLES 検出器を開発し、長期安定測定によって二重ベータ崩壊の検出を目指す。

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：原子核（実験）

1. 研究開始当初の背景

我々の周囲を取り巻く環境はすべて「物質」で出来ている。一方、「物質」と対をなす「反物質」も存在することが分かっている。しかし、「反物質」は自然界にはほとんど存在していない。この現在の「物質」優勢の宇宙を説明するには、次の二つのことを証明する必要がある。一つは、「物質」と「反物質」の世界の物理法則にわずかな差があること（CP対称性の破れ）、もう一つが、「物質」と「反物質」が転換可能であること（レプトン数保存則の破れ）である。本研究の目的は、「物質」と「反物質」が転換可能であるか否かを検証するものである。

「物質」と「反物質」が転換可能であるか否かを検証するためには、二重ベータ崩壊の研究が必要である。二重ベータ崩壊のなかでも、「ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊」（図1参照）は、「物質」と「反物質」が転換可能である時のみに起こる現象である。本研究課題では、この「ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊」の研究を行う。

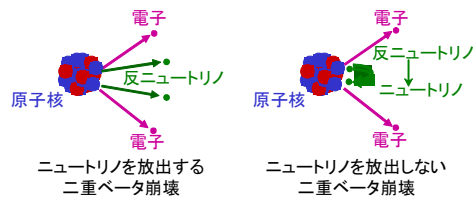


図1：「ニュートリノを放出する二重ベータ崩壊（左）」と「ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊（右）」。

2. 研究の目的

「ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊」の測定は世界各国で行われている。しかし、まだ検出されたことはない。それは、「ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊」は、非常に崩壊確率が低いためである。その半減期は 10^{25} 年以上とされている。これほどまでに崩壊確率が低い事象を検出するためには、まず、低ノイズの環境で測定する必要がある。そのために、我々は、低ノイズの環境で二重ベータ崩壊の測定を行いやすい48Caを用いる。48Caは、二重ベータ崩壊の際に放出される二つの電子のエネルギー和が、環境放射線よりも高いことが、より低ノイズ環境での測定を行いやすいという利点となっている。

崩壊確率が低い事象を検出するためには、前述の「低ノイズの環境」のほかに、「大量の二重ベータ崩壊核」の準備も有効である。ひとつひとつの原子核の崩壊確率は低くとも、対象原子核が大量にあれば、どれかの原子核が崩壊するのを検出すればよいからである。この「大量の二重ベータ崩壊核」の準備に有効な手段は、対象原子核を濃縮することである。実際に、48Ca以外の原子核を用いた「ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊」の測定では、高濃縮した二重ベータ崩壊核を用いている。しかし、48Ca（自然存在比0.187%）は、現状では濃縮した二重ベータ崩壊核を大量に使用することは難しい。濃縮自体が非常に難しいためである。そのため、「低ノイズの環境」に適した原子核であるにもかかわらず、世界の二重ベータ崩壊研究グルー

プは、あまり ^{48}Ca を用いないのである。しかし、我々は、 ^{48}Ca 濃縮技術開発を進め、これを実現しつつある。

本研究において、濃縮 ^{48}Ca の製造手法を確立し、「低ノイズの環境」で、「大量の二重ベータ崩壊核」を使用した、「ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊」の高感度測定を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、 ^{48}Ca を含んだフッ化カルシウム (CaF_2) 結晶をメイン検出器とした CANDLES 装置 (図 2 参照) を用いて二重ベータ崩壊の測定を行う。フッ化カルシウムは、内部の ^{48}Ca が二重ベータ崩壊を起こした際に、シンチレーション光を発生する。そのシンチレーション光を検出するために、フッ化カルシウムの周りに光センサーを配置する。この装置は、集めるシンチレーション光が増えると、装置性能が改善する。そのため、集めるシンチレーション光を増やすためのライトパイプや冷却システムを導入している。合わせて、濃縮度を上げた ^{48}Ca を生産するための装置建設を行う。

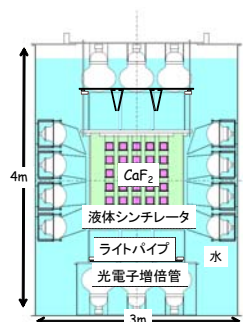


図 2 : CANDLES 装置の図。フッ化カルシウムからのシンチレーション光を光センサー (光電子増倍管) で検出する。

4. これまでの成果

図 2 に示している CANDLES 装置の設置が終了している。装置の性能を向上させるためのライトパイプや冷却システムの導入も終了した。現在、ライトパイプや冷却システムの性能評価を進めるとともに、次の性能改善システム (遮蔽システム) の導入が進められている段階である。導入終了後に、二重ベータ崩壊測定を開始する。

また、濃縮 ^{48}Ca の製造開発も進んでいる。 ^{48}Ca の自然同位体比は 0.19% と低い。そのため、高濃縮 ^{48}Ca を製造するためには、それぞれの濃度に応じた濃縮手法を開発することが効率的。

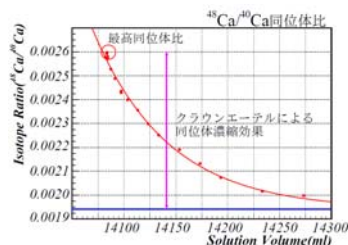


図 3 : 化学法による濃縮。 $^{48}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$ 比が 0.0026 に増えていることがわかる。

まず、低濃度濃縮用の手法：有機化合物 (クラウンエーテル) を用いた化学的濃縮法では、10 日間の濃縮プロセスによって、 ^{48}Ca 濃度を 30% 上げることに成功している。また、現在、この濃縮 ^{48}Ca を大量生産するためのプラント開発を進めている。

一方で、知られている濃縮法は多くあり、研究グループでも他の方法も並行して R&D を進めて来た。その中で、電気泳動法をベースにする濃縮法に新しい進展があった。MCCCE (Multi-Channel Counter Current Electrophoresis) 法と呼ぶ方法である。熱伝導率は高いが絶縁体の BN 板に細い溝を多数空けて泳動路とし、高い電場を掛けると共に、その電場での泳動を打ち消す水溶液の流れ (向流) を作ることで、シンプルな小型の装置で、 $^{48}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$ の比で、数倍から 10 倍の濃縮度が達成できた。しかも、1 時間程度という短時間で達成できた。これは本研究計画に取って非常に大きなステップである。更に本方法は水溶液中でイオン化する全ての元素や化合物に適用可能なので、濃縮を必要とする全ての分野に波及効果が期待できる。

5. 今後の計画

図 2 の CANDLES 装置に遮蔽システムを導入した後、二重ベータ崩壊測定を開始する。また、 ^{48}Ca の大量濃縮を進め、濃縮 ^{48}Ca を用いたフッ化カルシウム ($^{48}\text{CaF}_2$) 結晶開発を進める。このことにより、高感度な「ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊」の測定を実現する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

• T. Kishimoto, et al. "Calcium isotope enrichment by means of multi-channel counter-current electrophoresis (MCCCE) for the study of particle and nuclear physics", Progress of Theoretical and Experimental Physics, Article ID: 033D03, (2015)

• S. Umehara, T. Kishimoto et al. "Search for neutrino-less double beta decay of ^{48}Ca ": EPJ Web of Conf. 66, 08008, (2014)

• 特許出願

特願2014-205196 / 特願2012-250804

発明者：岸本忠史

「電気泳動装置、電気泳動法および電気泳動法を用いた濃縮・分離・分析方法」

ホームページ等

<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~candles/KibanS2012/index.html>

e-mail:candles@rcnp.osaka-u.ac.jp