

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料
〔研究進捗評価用〕

平成21年度採択分

平成24年 4月30日現在

研究課題名（和文） **ニュートリノ観測装置カムランドを用いたニュートリノレス二重 β 崩壊の研究**
研究課題名（英文） **Study of neutrinoless double-beta decay using the neutrino detector, KamLAND**

研究代表者

井上 邦雄 (INOUE KUNIO)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・教授



研究の概要：二重 β 崩壊核である ^{136}Xe が液体シンチレータに大量に溶かせることを利用して、極低放射能環境を実現しているニュートリノ観測装置カムランドにキセノン含有液体シンチレータを導入する。高感度でのニュートリノを伴わない二重 β 崩壊の探索から、ニュートリノの物質・反物質同一性やニュートリノ質量構造の究明を目指す。

研究分野：数物系科学、物理学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子（実験）

1. 研究開始当初の背景

(1) 「物質素粒子の中でニュートリノだけが極端に軽い謎」や「無から生じた宇宙に反物質が存在しない謎」など宇宙・素粒子の基本的な問題に対して、ニュートリノと反ニュートリノが同一でありうるというニュートリノのマヨラナ性の検証が大きな課題となっていた。また、ニュートリノ振動研究によって三世代間のニュートリノ質量二乗差が研究されていたが、絶対値や順序などニュートリノ質量構造を特定することも課題として存在していた。これらを研究する唯一現実的な手法としてニュートリノを伴わない二重 β 崩壊 ($0\nu 2\beta$) の探索が世界中で精力的に行われていた。

(2) ニュートリノ振動研究の高精度化によって、ニュートリノ質量構造究明に対する具体的かつ現実的な目標設定が可能となり、二重 β 崩壊核を100から1000kg導入することが必須な状況であった。一方で、地下1000mに1000トンの液体シンチレータを有するカムランド実験は、反ニュートリノ観測を通して検出器の特性が良く理解できており、大規模かつ極低放射能の環境を実現していた。これを活用することで二重 β 崩壊のようなごく希な現象を迅速かつ高いコストパフォーマンスで大規模に研究できる状況であった。

2. 研究の目的

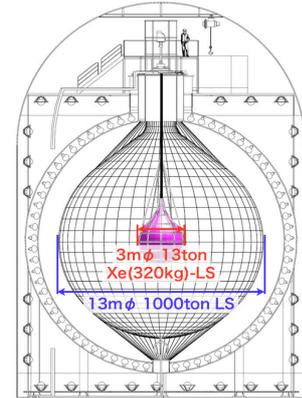
(1) 大量の二重 β 崩壊核を極低放射能環境であるカムランドで観測することで、ニュートリノを伴う二重 β 崩壊 ($2\nu 2\beta$) を高精度

で測定するとともに、 $0\nu 2\beta$ を高感度で探索する。特に、過去の実験でバックグラウンドが多い中測定されその信頼性が議論されている観測結果 (KKDCクレーム) を検証し、さらに高感度を目指す。これにより、ニュートリノのマヨラナ性を検証し、ニュートリノ質量構造を究明する。

(2) 反ニュートリノ観測を並行して行い、特に国内の原子炉全停止状態での地球反ニュートリノ観測から地球内部の熱生成の理解を深める。

3. 研究の方法

(1) カムランド中央に低放射性不純物のミニバルーンを吊し、 ^{136}Xe を大量に溶かしたキセノン含有液体シンチレータで満たす。二重 β 崩壊で生じた電子が液体シンチレータを

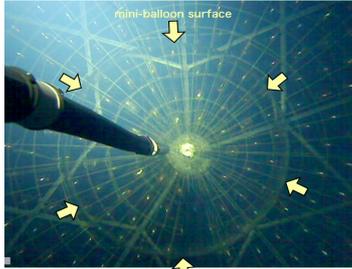


発光させ、内壁に取り付けた光センサーを用いて光量からエネルギーを算出する。 $2\nu 2\beta$ 信号は連続分布し、 $0\nu 2\beta$ 信号は2.46MeVに位置する。液体シンチレータは超高純度であり、巨大なため周囲からの放射線も完全に遮蔽する。

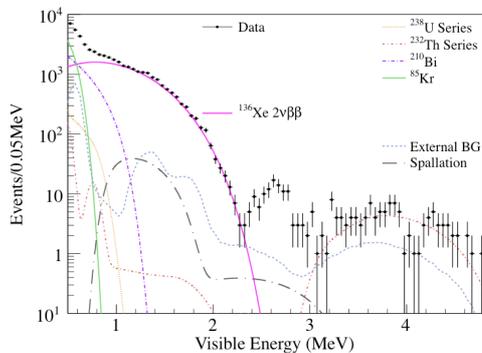
(2) ミニバルーンは全体の1.5%弱の体積にすぎず、特徴的な遅延同時計測を行うことで反ニュートリノ観測も継続する。

4. これまでの成果

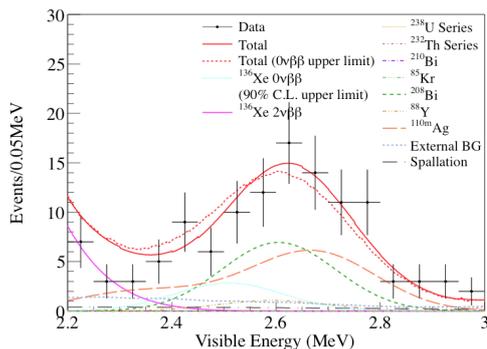
(1) 強度・光透過度・ガスバリア性・化学耐性・接着性に優れ、放射性不純物の少ないナイロンフィルムを開発し、クラス1スーパークリーンルームでミニバルーンに加工した。また、発光量・密度・透過率ともにカムランド液体シンチレータと整合性を持つキセノン含有液体シンチレータを開発し、カムランド中央に設置したミニバルーンを、320kgのキセノンを含む13トンの液体シンチレータで満たし、観測を開始した。



(2) 78日の観測から、世界最高精度で $0\nu 2\beta$ を測定し、半減期 $2.38 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.14(\text{syst}) \times 10^{21}$ 年を得た。その結果、過去の実験間の5倍の矛盾を決着した。



(3) $0\nu 2\beta$ 探索に対しては、90%信頼度で半減期 5.7×10^{24} 年以上を得た。ニュートリノ有効質量に換算すると、原子核行列要素の不定性も含めて世界最高感度となる $300 \sim 600\text{meV}$ 以下という上限値を達成した。



(4) $0\nu 2\beta$ 領域の事象の隆起は $0\nu 2\beta$ 信号と3%のエネルギーのずれがある。原子核データベース ENSDF を用いて全崩壊系列を検索したところ $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{88}Y , ^{208}Bi , ^{60}Co がバックグラウンドの候補としてあがった。さらに、宇宙線による原子核破碎をシミュレーションしたところ、地表で作られた半減期250日の $^{110\text{m}}\text{Ag}$ が地下でもゆっくり崩壊し続けることがわかった。

(5) 地球反ニュートリノ観測から、地熱生成に占める放射性熱の割合が約半分程度であることを始めて実験的に検証し、地球形成時の原始の熱が今でも残存しているという地球物理の重要な知見に実験的裏付けを与えた。

5. 今後の計画

(1) 地表滞在時に宇宙線による原子核破碎で ^{136}Xe から生成された放射性原子核 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ がごく微量(1000個程度)キセノン含有液体シンチレータ中に残留しているため、真空脱気により一旦キセノン回収し蒸留・ゲッター等で高度な純化を施す。純化したキセノンで新たにキセノン含有液体シンチレータを作成し導入することで、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ を100分の1以下に低減し、 $0\nu 2\beta$ 探索感度を飛躍的に高める。その後バルーンの再作成やキセノンの増量、シンチレーティングフィルムやイメージング装置の開発を行い、さらなる感度向上を目指す。

(2) 並行して蓄積する、国内原子炉全停止状態での反ニュートリノ観測データから、原子炉反ニュートリノ観測に対するバックグラウンドの理解を深めるとともに、良質な地球反ニュートリノデータを用いて地球内部の熱生成をより詳細に研究する。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

(研究代表者は二重線、研究分担者は一重下線、連携研究者は点線)

(1) A. Gando, Y. Gando, H. Hanakago, H. Ikeda, K. Inoue, R. Kato, M. Koga, S. Matsuda, T. Mitsui, T. Nakada, K. Nakamura, A. Obata, A. Oki, Y. Ono, I. Shimizu, J. Shirai et al. (39人) (KamLAND-Zen Collaboration), "Measurement of the double- β decay half-life of ^{136}Xe with the KamLAND-Zen experiment," Physical Review C85, 045504 (2012)

(2) A. Gando, ..., K. Inoue (5番目), ..., M. Koga (8番目), ..., T. Mitsui (10番目), ..., J. Shirai (18番目) et al. (66人) (KamLAND Collaboration), "Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements," Nature geoscience 4, 647-651 (2011)

(3) A. Gando, ..., K. Inoue (5番目), ..., M. Koga (8番目), ..., T. Mitsui (10番目), ..., J. Shirai (18番目) et al. (65人) (KamLAND Collaboration), "Constraints on θ_{13} from a three-flavor oscillation analysis of reactor antineutrinos at KamLAND," Physical Review D83, 052002 (2011)

ホームページ等

<http://www.awa.tohoku.ac.jp/kamland/>