

平成21年 4月 3日現在

研究種目： 若手研究 (A)
研究期間： 2007～2008
課題番号： 19684004
研究課題名 (和文)
放射性重元素の高感度測定等による、カムランドニュートリノ高精度測定の研究
研究課題名 (英文) Precision measurement of solar neutrinos by KamLAND with sensitive detection of radio-impurities
研究代表者
岸本 康宏 (Yasuhiro KISHIMOTO)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号： 30374911

研究成果の概要：

本実験は、カムランド実験グループで行われた太陽ニュートリノ観測のための純化工程後のカムランドにおいて、高精度のエネルギー較正と放射性不純物量の測定を実施し、これらのデータを基に、信頼性の高い太陽ニュートリノ信号を抽出することを目的に研究を行った。本研究では、エネルギー較正用の装置を作成し、外部から放射性不純物を持ち込むことなく、高精度でエネルギー較正を行うことに成功した。同時に、純化後のカムランドで主なバックグラウンドであるクリプトンの量を高精度で測定する装置の開発・研究に成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	11,500,000	3,450,000	14,950,000
2008年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
年度			
年度			
年度			
総計	19,400,000	5,820,000	25,220,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： 物理学，素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード： 素粒子物理学

1. 研究開始当初の背景

近年の素粒子物理学の発展はニュートリノを中心の展開してきた、特にスーパーカミオカンデ実験による大気ニュートリノ振動の発見(1996年)以降、太陽ニュートリノが別種のニュートリノに変化していることを示し(スーパーカミオカンデ実験とSNO実験グループ)、更には原子炉ニュートリノ振動の発見(カムランド実験2005年)と目覚ましい成果が続いた。

このように、ニュートリノの性質が明らかになるに伴い、ニュートリノを観測手段として用いることで、非常に大きな成果が得られるようになってきた。2003年にはカムランド実験グループが地球からのニュートリノを世界で初めて観測した。これは、地球の熱の源が放射性元素の崩壊熱であるという地球物理学上のパラダイムを証明する画期的な発見であった。

本研究は、カムランドを用いてニュートリノを観測することで、太陽の性質を明らかに

することを目的として、研究を開始した。太陽ニュートリノ観測としては、スーパーカミオカンデ実験グループ、SNO 実験グループが先達として大きな成果を残している。これら実験では太陽中でホウ素 8 が崩壊する際のニュートリノを検出しているが、本研究では、ベリリウム 7 が陽電子を吸収する際に放出するニュートリノを検出し、太陽の性質を精密に調べることが目標としていた。

太陽についての理論的研究は、太陽の進化を理論的に追跡したモデルと、太陽内での物質密度と音速の観測を基にしたモデルと、独立した 2 つのモデルがあり、実験事実と良く一致するものであった。これらモデルをさらに精密なものとするためにも、本研究は非常に重要な意義を持っていた。

そして、研究開始当初、これらのモデルは太陽の様子を良く記述するモデルであったため、太陽からのニュートリノは性質の良く分かったものとして取り扱うことが出来、従って、太陽ニュートリノを用いて、ニュートリノの性質、特にニュートリノ振動の一層精密な研究が行われることが期待された。

上記のように、カムランドによる太陽ニュートリノの検出実験は非常に重要な実験であったため、カムランドグループでは、その検出を目指し、カムランドの中に残存する極々わずかの放射性不純物を徹底的に削減する、液体シンチレータの純化を進めていた。放射性不純物の中で最も問題となる元素は、放射性鉛(^{210}Pb)と放射性クリプトン(^{85}Kr)であった。また、放射性カリウム(^{40}K)も削減すべき対象として挙げられ、純化プロジェクトが進行中であった。このプロジェクト成功の暁には、ベリリウム太陽ニュートリノの事象数を 10% 以下の精度で測定が可能であり、大きな注目を集めていた。

2. 研究の目的

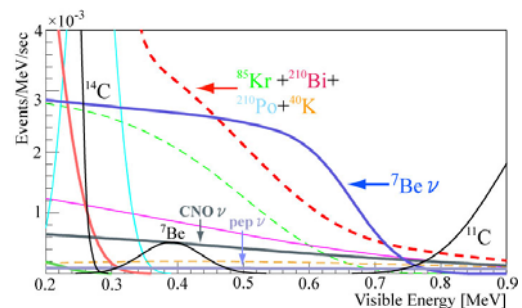
先の節に述べたように、カムランドによる太陽ニュートリノ検出の為には、純化プロジェクトによって、放射性鉛(^{210}Pb)と放射性クリプトン(^{85}Kr)を徹底的に削減することが必須であった。その理由は、太陽ニュートリノ信号そのものの事象数が非常に少ないことが最も大きな要因であった。これに加え、これら 2 つのバックグラウンド事象が、太陽ニュートリノ信号の事象と間違えやすいため、バックグラウンドから信号事象を抽出することも非常に重要であり、本研究はこれを目的としている。即ち、本実験は、ニュートリノ信号と間違えやすいバックグラウンド (特に鉛(^{210}Pb), クリプトン(^{85}Kr), 更にその他放射性元素)の量を測定し、ニュートリノ事象のだけを選択し、データの品質を高めることを目

的としていた。

3. 研究の方法

本研究は、カムランドの液体シンチレータの純化後に開始する、太陽ニュートリノ観測において、バックグラウンドを正確に見積もり、太陽ニュートリノ事象を精度よく測定することを目的としている。

その純化後に期待されるエネルギースペクトルを以下に示す。予想される太陽ニュートリノ事象とバックグラウンドを、夫々青の実線と赤の破線で示している。バックグラウンドの中で主要なものは、クリプトン(^{85}Kr)、ビスマス(^{210}Bi)、ポロニウム (^{210}Po)であり、これは、緑の点線、紫色実線、青色実線であらわしている。



このスペクトルを一瞥して分かることは、ベリリウム太陽ニュートリノの信号の特徴は、0.7~0.6 メガ電子ボルトで急速に立ち上がる点であり、これに対し、バックグラウンドは 0.6 メガ電子ボルト付近から緩やかに増加するという特徴を持っている点である。

実際に観測されるエネルギースペクトルは、これらの太陽ニュートリノ信号と個々のバックグラウンドの和である。カムランドの有効体積が非常に大きい (内部の液体シンチレータ体積が 1200m^3) ため、事象数が非常に多く、従って、統計的な誤差は小さいと期待されるため、高精度の実験を行うためには、以下のことが非常に重要となる。

- (1) 高い精度でのエネルギー較正
図で分かるように、低エネルギーになるにつれて緩やかに多くなるバックグラウンドの中から、0.7~0.6 メガ電子ボルトで急速に立ち上がる太陽ニュートリノ信号を抽出するのであるから、低いエネルギー領域でのエネルギー較正の誤差を抑えることが重要である。
- (2) バックグラウンドの性質と量の測定
クリプトン等の予想されているバックグラウンドの他にもバックグラウンドとなる放射性不純物が残留する可能

性も含め、バックグラウンドの性質と量を見積もり、観測量からバックグラウンドを差し引く必要がある。

これらを実現するために以下の開発と研究を行う。

- (1) エネルギー較正用のクリーンボックスの作成とエネルギー較正用の放射線源の準備：
カムランドは純化以前においてさえ、すでに世界で最も不純物の少ない空間であるので、この内部に新たな不純物を持ち込むことないように、外部から隔離され、しかもその上で、放射線源を用いて容易にエネルギー較正作業を行うことが出来る様にするための、クリーンボックスを作成する。それを用いて、放射線源を新たに導入してエネルギー較正を行う。
- (2) 放射性クリプトンの測定：
液体シンチレータ中に溶解している放射性クリプトン量を測定するため、液体シンチレータ中の天然のクリプトン量を測定する。このために、液体シンチレータ中からクリプトンをパージする装置と、そのクリプトンを冷却液化して、トラップする装置を作成し、それを残留ガス分析器に接続する。これによって、僅かな量のクリプトンを濃縮して、定量を行う。
- (3) 放射性鉛の測定：
カムランド中の放射性鉛(^{210}Pb)は、純化前のカムランドにおいてさえ、わずかの量しか存在しないので、世界最高感度のカムランド以外に測定する手段はない。従って、純化後の液体シンチレータを測定することは大変困難ではあるため、カムランド中の放射性鉛を濃縮し、それをカムランド内で測定する他ない。このためには、放射性鉛の濃縮法の確立と濃縮率の測定が必要である。濃縮に関しては、純化に使用している方法が蒸留法であるので、その残留物を採取すれば、自動的に濃縮された放射性鉛(^{210}Pb)が得られる。一方、その濃縮率の測定のために、寿命の短い放射性鉛(^{212}Pb)を含んだ液体シンチレータを蒸留装置に導入して、濃縮率を測定する。この方法は、放射性鉛(^{212}Pb)の寿命が、カムランド中の放射性鉛(^{210}Pb)のそれに比べ、約 2000 倍短いため、2000 倍も高感度であるうえ、放射性鉛(^{212}Pb)は短時間(300ns)の間に β 崩壊、 α 崩壊を

連続的に引き起こすため、遅延同時計数によってバックグラウンドを抑制して測定することが出来る。

- (4) 太陽ニュートリノの観測
以上の成果をもとに、太陽ニュートリノの事象を正確に測定し、太陽そのものの性質、そしてまたニュートリノの性質について研究を行う。
- (5) その他
ウラン、トリウム、カリウム、ポロニウムなどの放射線源の量を用いて測定する。そして測定量からニュートリノ観測におけるバックグラウンドを見積もる。

これらの成果を、国内外の学会等で報告するとともに、論文をまとめる。

4. 研究成果

カムランド実験グループは、本研究の推進期間中に、太陽ニュートリノ検出を目指し、純化プロジェクトを2度実行した。純化の工程は、液体シンチレータをカムランドから取り出しては、純化して戻すという形で実施され、純化した液体シンチレータの量は、2007年には1699 m^3 、2008年には4855 m^3 に及んだ。カムランドの液体シンチレータ量が約1200 m^3 であるから、全体で、5.5サイクルの純化を行った。

この純化の工程は、予定よりも長期に亘った。この理由は、主要なバックグラウンドであるクリプトンを更に減少させるために、純化のサイクルと当初よりも増やしたためである。その理由は、本研究を始めた当初から、太陽観測のデータがより精密化し、また理論的研究が進んだ結果、現状では、2つの太陽モデルの間に矛盾があることが明らかとなったため、それらを実験的に解明することに注目が集まったためである。そのため、太陽ニュートリノ観測の精度の目標を10%の誤差から5%の誤差へとより高精度なものに設定し直したことによる。そして、カムランドの液体シンチレータの純化サイクルを多くするためには、その準備として、カムランドの液体シンチレータ密度を調整する必要がある等、数ヶ月を要した。

この純化の工程に並行して、外部から不純物を持ち込むことなく、エネルギー較正を実施するための、クリーンボックスを開発し、カムランド上部に設置した。

また、新たな較正線源としてゲルマニウムを入手した。この線源は、カムランド内に直接入れられるものであるため、放射性不純物の混入は絶対に許されない。放射性不純物の混入がないことはゲルマニウム検出器によ

って確認されたが、米国からの輸入途中でクリーンボックスへの取り付け部分に変形してしまっていたため、較正作業が実施出来なかった。現在は、取り付け部分を補修し終わり、放射性不純物の混入がないかを再度確認している最中である。

更に、液体シンチレータ中のクリプトンを測定する装置の開発・研究を行った。この装置の原理は、液体シンチレータ中のクリプトンを高純度のヘリウムガスで追い出し、その試料気体を液体窒素温度下の吸着体で冷却し、クリプトンを濃縮し、それを高感度の残留ガス検出器 (RGA) を用いて測定するものである。この装置の最も重要な部分、即ち窒素温度トラップと残留ガス検出器の作成がなされ、テストを行った結果、所定の能力を有していることを示した。しかし、ヘリウムガス中に水分や液体シンチレータのガスが混入すると、それらがバックグラウンドとなることが判明したため、タングステンリボンによってそれらを焼却する装置と、その前段に油分除去トラップを設置する改良を行った。現在、最終段階の性能テストを行っており、試験終了後、直ぐにクリプトン量の測定を行う。

カムランド中の放射性鉛 (^{210}Pb) の測定については、純化装置内で濃縮された試料をカムランドで測定する予定であった。この方法では、濃縮率の測定が実験の鍵であり、濃縮率の測定には、放射性鉛 (^{210}Pb) を用いる予定であった。この原理を説明すると、この放射性鉛 (^{210}Pb) は、放射性ラドン (^{222}Rn) の娘原子核種であるので、気体の放射性ラドン (^{222}Rn) を純化装置内に導入し、崩壊後の娘原子核の鉛 (^{210}Pb) をトレーサーとして用いて、濃縮率を測定するという巧妙な方法であった。しかし、純化装置内の一部に極僅かな漏れがあることが判明し、この漏れ個所から放射性ラドン (^{222}Rn) の一部が実験室内に漏れる恐れがあることが分かった。装置の漏れが純化の性能に影響がないことと、時間と予算の制約もあって、漏れ個所の補修作業が純化作業後に延期されている。従って、放射性ラドン (^{222}Rn) を用いた濃縮率の測定も、漏れ個所の補修後に延期されることが決定された。(仮に測定を実施したとしても、外部に流出する放射能は、天然放射線と比較して桁違いに少量で、人体への影響は全くない程の微量であることは分かっているのではあるが、作業の実施は、漏れを補修して、絶対の安全が確認された後に行われるべきであると判断している。)

現在のカムランドは、2月までの純化作業の後、カムランドの中の対流などが治まり、装置が安定状態になることと、短寿命の放射性不純物が崩壊して、バックグラウンドが低下するのを待っている状態である。

この待ち時間中の3月、本研究のエネルギー

一較正装置を使用して、エネルギー較正作業を行った。較正作業中に外部から放射性不純物を持ち込むことなく、作業は成功した。現在、解析と、較正テーブルの作成作業が行われている。

現在、カムランドの状態は常時モニターされ、現状では特に大きな問題は見られない。クリプトンの測定も装置の完成後直ぐに行われる見込みであるので、あと数週間で、太陽ニュートリノ観測を実施出来ると期待されており、本研究の目的である、太陽ニュートリノの精密観測の成果が得られると確信している。

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2件)

- (1) 著者名: S. Abe, ..., Y. Kishimoto, 他
カムランド共同研究者(82名中10番目)
論文標題: Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND
雑誌名: Physical Review Letters
査読: 有
巻: 100
発行年: 2008年
ページ: 221803
- (2) 著者名: Y. Kishimoto
論文標題: KamLAND Status for Solar Neutrino Phase
雑誌名: Journal of Physics Conference Series
査読: 有
巻: 120
発行年: 2008年
ページ: 052010

[学会発表] (計2件)

- (1) 発表者: 岸本康宏
発表表題: KamLAND recent results and future prospects
学会名: KEK 理論研究会
発表年月日: 2007年12月12日
発表場所: 高エネルギー加速器研究機構
- (2) 発表者: 岸本康宏
発表表題: KamLAND Purification Status
学会名: TAUP2007
発表年月日: 2007年9月17日
発表場所: 仙台市市民会館

[その他]

ホームページ等

http://www.awa.tohoku.ac.jp/KamLAND/index_j.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岸本 康宏 (Yasuhiro KISHIMOTO)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：30374911

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし