

平成21年 6月 11日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19740116
 研究課題名 (和文) 液体シンチレーター中の C13 原子核 (α 、n) 反応の研究
 研究課題名 (英文) A study of (alpha, n) reaction of C13 nucleus in liquid scintillator
 研究代表者
 丸藤 祐仁 (GANDO YOSHIHITO)
 東北大学・大学院理学研究科・助教
 研究者番号：60396421

研究成果の概要：

KamLAND 実験における主要なバックグラウンドである $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応の研究を行った。本研究により、以下のような研究成果を達成した。

- (1) $^{210}\text{Po}^{13}\text{C}$ 線源を用いた較正を元にした、ニュートリノ振動パラメーターの精密測定
 - (2) 液体シンチレーターの純化による、 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ を引き起こす放射性元素 ^{210}Po 、 ^{210}Pb の除去
 - (3) ^{16}O の第3、第4励起状態からの γ 線事象の見積もり
- 特に(2)(3)については、今後期待される地球反ニュートリノの精密測定を切り開く結果である。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,300,000	0	1,300,000
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	480,000	3,380,000

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、ニュートリノ

1. 研究開始当初の背景

KamLAND(Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector)実験は、原子炉反電子ニュートリノ研究を元にした太陽ニュートリノ欠損問題の解決、地球反電子ニュートリノの初観測によるニュートリノ地球物理学の創始など大きな成果を発表し、世界の注目を集めてきた。KamLAND 実験は検出器の周り約 180km に原子炉が多数存在する位置的な優位性と、大型検出器のサイズおよび極低ノイズ環境を有していることから、他の

実験の追従を許さないユニークな実験を行える条件が整っている。この検出器の優位性を最大限に使用し、次の目標としてニュートリノ振動パラメーターと地球ニュートリノの精密測定を掲げ、素粒子物理・地球物理に大きな影響を与える今後も世界をリードする実験として国内外から注目を集めている。

2. 研究の目的

KamLAND では約 180km の範囲で均等に離れた国内の原子炉からの反電子ニュート

リノを観測する事が出来るため、他の電子型ニュートリノ実験とは異なりニュートリノ源からの距離がほぼ一定であるという特徴がある。ニュートリノ振動において振動の周波数は「エネルギー／距離」で表される為、距離を一定とした場合、観測されたニュートリノのエネルギースペクトルを用いてニュートリノ振動特有の‘振動’を精度よく測定する事が可能であり、高統計かつ実験固有の不定性が小さくなればニュートリノ振動パラメーターの精密測定を行う事が可能となる。

ニュートリノ事象の特定には液体シンチレーター中の陽子をターゲットとした逆 β 崩壊反応を用い、この反応によって発生する陽電子(先発信号)と熱中性子(遅延信号)の遅延同時計測により大幅なノイズ事象を除去し、極低ノイズ環境でニュートリノ観測を行う事が可能となっている。しかし偶発信号の大幅な削減に成功しているものの、遅延同時計測でも除去できない、擬似陽電子信号と中性子を発生するノイズ事象を除去する事は不可能となっている。

KamLAND 実験による原子炉反電子ニュートリノの観測において、液体シンチレーター中の放射性不純物の α 崩壊によって引き起こされる $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ は、解析的に除去する事が不可能であるだけでなく、統計的に差し引いた場合でも反応の不定性が大きい事からニュートリノ事象のスペクトル、及びニュートリノ振動固有の振動パターンを調べる場合に大きな影響を与え、振動パターンの決定に必要な一部のエネルギー領域は、ほぼ振動パターンの決定に使用出来なくなっている。

また、地球ニュートリノの信号領域においても $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ のノイズ事象が含まれ、地球ニュートリノの精密測定に多大な影響を及ぼしている。現在地球ニュートリノを観測出来るのは世界で KamLAND のみであり、 (α, n) ノイズ事象の正確な見積もりは地球ニュートリノ事象の有意性を高め、地球内部の熱の起源についての正確な情報を与えるために必要不可欠となっている。

$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応により KamLAND で検出できる先発信号となりうるのは、

- ・ 生成した中性子が陽子を散乱する、 $n+p \rightarrow n+p$ 反応 (3MeV 以下)
- ・ 生成した中性子と ^{12}C の散乱によって励起した、 $^{12}\text{C}^*$ が基底状態に戻る時に発する 4.4MeV の γ 線
- ・ $^{16}\text{O}^*(6.049)$ 状態が基底状態に遷移する時に発する e^+e^- の対生成
- ・ $^{16}\text{O}^*(6.130)$ 状態が基底状態に遷移する時に発する γ 線

であり、KamLAND では検出器内部の ^{210}Po 崩壊頻度の不定性(14%)、 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応

断面積の不定性(20%)、生成された中性子の角度分布による不定性(20%)、 $^{12}\text{C}(n, n\gamma)^{12}\text{C}$ 反応断面積の不定性(10%)、 ^{16}O の励起状態への反応の不定性(100%)、クエンチング効果(消光効果)の不定性(10%、4MeV 以下)という大きな誤差を見積もっており、これらをまとめると、4MeV 以下では 32%、4MeV-5.5MeV では 32%、5.5MeV 以上では 100%の誤差となっている。

本研究は、 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応断面積の不定性、生成された $^{12}\text{C}(n, n\gamma)^{12}\text{C}$ 反応断面積の不定性、 ^{16}O の励起状態への反応の不定性について調査し、それぞれのエネルギー領域の不定性を 20%に抑える事を目的とする。また、これらの不定性を抑えると共に、液体シンチレーターの純化によって、 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 事象の元となる ^{210}Po 、その親核である ^{210}Pb の除去を行い、ニュートリノ振動の精密測定・地球ニュートリノの高感度測定への道を切り開くことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) PoC 線源を用いた較正

$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応の誤差を見積もるために、 ^{210}Po と ^{13}C を均一に混合させた放射線源、PoC 線源を導入し、この線源を KamLAND 内部に設置する事によって $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応の測定を行った。線源内の ^{210}Po は徐々に崩壊していくため(半減期 138.4 日)、約 0.00121%の確率で発生する 0.803MeV の γ 線を検出する事により Po の崩壊頻度を決定し、さらに各エネルギー領域における事象のスペクトルおよび発生率を解析した。また、この結果を用いてニュートリノ振動・地球ニュートリノ解析を行った。

(2) 蒸留による ^{210}Po の除去

KamLAND で問題となっている $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応起源のバックグラウンドは、KamLAND 検出器内部の ^{210}Po 、その親核である ^{210}Pb が検出器内に蓄積している事が原因となっている。この為、検出器内部の液体シンチレーターの純化を行い、 ^{210}Pb の除去を図った。

図 1 は KamLAND で使用している純化装置の概略図であるが、主に蒸留手法を用いた重金属除去と窒素パージによる放射性希ガスの除去を手法として採用している。

KamLAND で使用している液体シンチレーターの成分は、ドデカン、プソイドクメン、PPO であるが、それぞれ沸点が異なるため、蒸留する場合はそれぞれの成分を別々に行わなければならない。それぞれの成分は別々に蒸留された後、混合タンクにおいて液体シンチレーターが再生成され、さらに希ガス除去のためパージ塔を通過してから KamLAND 本体に送液される。これらの作業を 24 時間

体制で実行し、KamLANDの液体シンチレーターの純化を行った。

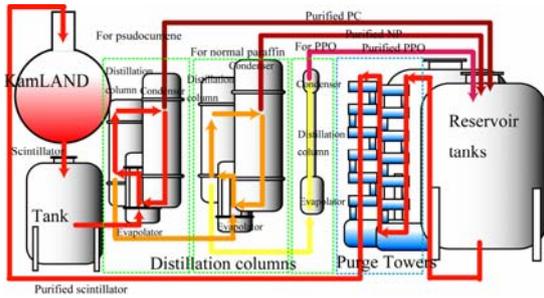


図1 純化装置の概略図

KamLANDから抜き出した液体シンチレーターは、原料タンクに一時保持され、最初の蒸留塔へ送られる。最初の塔で沸点の低いブノイドクメンが蒸留され、残った液体は次の塔へ送液される。2番目の塔ではドデカンが蒸留され、残りの液は3番目の塔へ送られる。3番目の塔ではPPOが蒸留され、各塔で蒸留された成分は混合タンクへ送られ、再度液体シンチレーターが作成される。蒸留塔ではウラン・トリウム・鉛などの極微小な重元素が除去される。次に作成された液体シンチレーターはパージ塔へ送られ、窒素と混合する事によって放射性希ガスが除去される。これら2種類の純化後、液体シンチレーターはKamLANDへ戻される。

(3) ^{16}O の第3第4励起状態からのバックグラウンド事象の見積もり

蒸留やパージによる純化中、送液配管内部の金属中に含まれるウラン・トリウムから発生する ^{222}Rn 、 ^{220}Rn 、また、極微量なリークによる ^{222}Rn 、 ^{220}Rn が液体シンチレーターの製品ラインに混入する。これらの放射性ガスとその娘核が発する α 線は、 ^{210}Po が発する α 線より高エネルギーであるため、これまで観測されていなかった、 (α, n) 反応によって生成される ^{16}O の第3、第4励起状態からの γ 線事象を正確に見積もる必要がある。その為、ウラン・トリウム系列から発生する α 線のエネルギースペクトルを正確に見積もると共に、カムランドへの送液時・送液停止時の事象頻度の時間変化の見積もり、 ^{16}O の第3、第4励起状態からの γ 線のエネルギースペクトルと事象頻度を見積もった。

4. 研究成果

(1) PoC線源を用いた較正と原子炉ニュートリノを用いたニュートリノ振動パラメータの精密測定

PoC線源を用いた較正と詳細な解析により

(図2)、これまでKamLANDの原子炉ニュートリノ、地球ニュートリノ解析において5.5MeV以下で32%、5.5MeV以上で100%と見積もられていた $\text{C}13$ 原子核の (α, n) バックグラウンド事象の誤差を、それぞれ11%、20%と改善する事に成功した。この結果を元に、ニュートリノ振動パラメータの精密測定に成功し、 $\Delta m_{21}^2 = 7.58^{+0.14}_{-0.13}(\text{stat})^{+0.15}_{-0.15}(\text{syst}) \times 10^{-5} \text{eV}^2$ 、 $\tan^2 \theta_{12} = 0.56^{+0.10}_{-0.07}(\text{stat})^{+0.10}_{-0.06}(\text{syst})$ (図3)を得た。

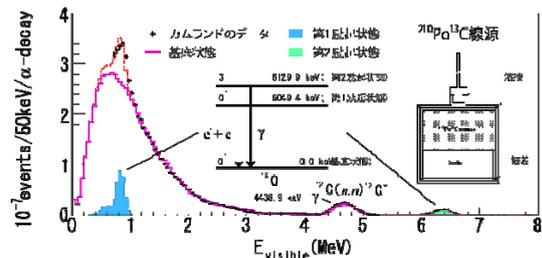


図2 PoC線源を用いた較正結果

ステンレス製のカプセル内に ^{210}Po および ^{13}C を一様に混合した放射線源を導入し、KamLAND内に設置して測定した γ 線の結果。この結果により、断面積の不定性は、基底状態において11%、励起状態において20%と見積もられた。

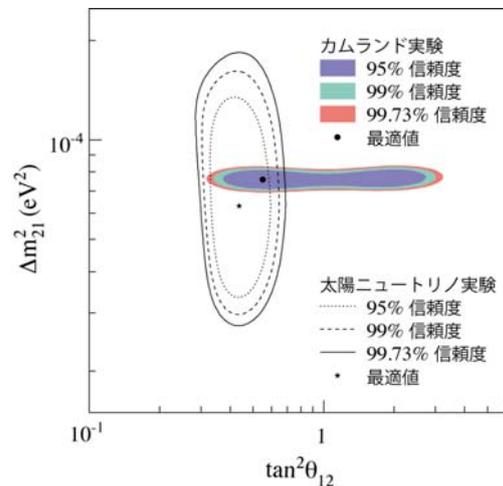


図3 原子炉反ニュートリノ測定によるニュートリノ振動パラメータの許容領域

(2) 蒸留による ^{210}Po の除去

2007年度、2008年度に蒸留法・パージ法による液体シンチレーターの純化を行い、KamLANDの液体シンチレーターの体積を基準に、約5.5周分の液体シンチレーターの純化を行った。この純化により、 α 線を発する ^{210}Po の親核である ^{210}Pb を大幅に除去し、

原子炉ニュートリノ，地球ニュートリノのバックグラウンドとなる ^{13}C の (α , n) 反応の削減に成功した。これにより，特に地球ニュートリノの精密測定への道が切り開かれた。

(3) ^{16}O の第3第4励起状態からのバックグラウンド事象の見積もり

現在，2007年度，2008年度に行った純化中，および純化後の ^{222}Rn ， ^{220}Rn 量の，カムランド検出器内部の位置，および時間変化を見積もる為の詳細な解析が進行中である。この解析結果を元に，純化中，および純化後の原子炉ニュートリノ，地球ニュートリノの精密観測へつなげる予定である。

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1件)

① S. Abe, T. Ebihara, S. Enomoto, K. Furuno, Y. Gando, et. al.,
Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND,
Physical Review Letters, 100,
221803-1~221803-5, (2008), 査読有り

[学会発表] (計1件)

① 今野百合, 他 KamLAND collaboration,
KamLAND 実験における原子炉反ニュートリノの解析(2)-系統誤差の改善-,
日本物理学会, 2008年3月23日, 近畿大学

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丸藤 祐仁 (GANDO YOSHIHITO)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：60396421