

平成 21 年 5 月 15 日現在

研究種目：若手研究 (B)
研究期間：2007～2008
課題番号：19740118
研究課題名 (和文) 原子炉反ニュートリノスペクトルの精密測定手法の開発研究
研究課題名 (英文) Development of a Method for Precision Measurement of Reactor Antineutrino Spectra
研究代表者 中嶋 享 (NAKAJIMA KYO) 岡山大学・理学部・助教 研究者番号：80400240

研究成果の概要：

ニュートリノ振動実験を始めとするニュートリノの物理的性質の解明は素粒子物理のみならず宇宙物理、地球物理に大きな寄与をもたらす。その中で原子炉反ニュートリノの検出実験はこれまで以上に実験誤差の少ない精密測定が必要とされている。本研究では液体シンチレータを用いて原子炉反ニュートリノの飛来方向を識別する新しい検出原理の検討を行った。初期モデルによる予備実験として1リットルサイズの液体シンチレータと高速デジタルカメラを用いたイメージンテンシファイアにより宇宙線事象のシンチレーショントラックの撮像実験を行った。

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	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,200,000	270,000	2,470,000

研究分野：素粒子物理学

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 (実験)

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノの物理的性質を解明する実験としてニュートリノが質量もつことによるフレーバーの混合を検出するニュートリノ振動実験のほか、トリチウムの β 崩壊によるニュートリノの絶対質量の測定、二重 β 崩壊によるマヨラナ質量の測定、低エネルギー原子炉反ニュートリノの精密測定によるニュートリノ磁気モーメントの測定などが行われてきた。

この中で、ニュートリノ振動現象については素粒子物理学の標準理論を越える現象と

して存在が確立し、個々の振動パラメータの精密測定が今後の素粒子物理の発展における課題と位置づけられている。これまでのニュートリノ振動実験によると、大気ニュートリノ振動に關与する混合角 θ_{23} は45度に近く、太陽ニュートリノ振動の混合角も同様に大きいことが明らかになっている。これらの大きな混合角は物質を構成するもう一種類の基本粒子であるクォークの混合とまったく異なるパターンであることが知られている。しかし、現状ではニュートリノの質量差や混合角の測定精度はまだ十分とは言えず、第3

の角度は上限値が得られているのみである。フレーバー構造の起源を解明するためには、これら基本粒子の質量スケールの物理を理解することが鍵であると考えられている。クォークやレプトンのフレーバー混合等の基本パラメータを精密測定し、標準理論を越える物理を明らかにしていくことが今後の研究のステップとして求められている。したがって、まだ測定されていない第3の混合角を測定することと共に、すでに測定されている質量差、混合角の測定精度を上げ、ニュートリノの混合を表現するMNS行列の全体像を明らかにすることには重要な意義がある。ニュートリノ検出に係わる実験手法はより精密・高精度を要求するものに移行しようとしている。

1000 トンの液体シンチレータを用いた反ニュートリノ・ニュートリノ検出器を用いたKamLAND 実験はこれまで世界で唯一、電子型反ニュートリノの混合角 θ_{12} の測定に成功し、現在も継続中である。この実験は長基線原子炉反ニュートリノ振動実験として、日本国内計 52 基を始めとする複数の原子炉で発生する原子炉反ニュートリノを観測している。検出器に関わる系統誤差は年々改善されてきている一方、原子炉反ニュートリノ発生量の計算値に関わる系統誤差が今後、最大の系統誤差として残る可能性が高い。系統誤差 1% レベルによる精密測定を実現するためには原子炉反ニュートリノスペクトルの詳細な評価が求められる。そのためには、これまでの数%レベルの系統誤差による測定では必ずしも必要がなかった原子炉近傍の前置検出器による原子炉反ニュートリノのエネルギースペクトルの直接検証が有効である。

また、反ニュートリノ混合角 θ_{12} を精密測定するためには、反ニュートリノの観測エネルギースペクトルに現れる振動の効果が最大となる、飛行距離 70km 近辺の原子炉反ニュートリノを積極的に検出することが有効である。

2. 研究の目的

本研究は、原子炉反ニュートリノエネルギースペクトルの精密測定を行うニュートリノ検出器の実現に向けて、液体シンチレータを用いた新しい検出原理に係わる測定手法の検討及びテスト実験を行うことを目的とした。特に、 ${}^6\text{Li}$ 含有液体シンチレータの利用による反ニュートリノの飛来方向検出は、原子炉反ニュートリノの飛行距離弁別や、バックグラウンド事象との分離検出に有効な手法として適用できる可能性がある。しかし、大容量の標的物質からの微弱シンチレーション光を長期間にわたって監視し続けることが必要な上、3次元座標の再構成に必要な

多くの情報量処理の必要があり、現実的な規模で検出器を最適化することが課題となっている。また、発光位置の測定精度はこの検出手法の重要な要素であるため、本研究ではイメージング検出器による微弱光検出に焦点をあて、集光系および単一光電子の増幅・撮像手法の検討を行うこととした。

一方、ニュートリノの物理的性質は素粒子物理のみでなく宇宙物理、地球物理にも密接な関係を持つ。反ニュートリノの飛来方向が識別できる検出器はニュートリノ振動の混合角 θ_{12} の測定以外にも幅広い用途が考えられる。特に地球反ニュートリノの飛来方向分布を観測することができれば、地球内部のウランやトリウム分布を直接測定する手法に道を開くことになり、ニュートリノ地球物理学の新たな発展にも寄与できる。また、原子炉近辺に飛来方向特定可能な検出器を設置することにより、原子炉熱出力の直接測定をバックグラウンドの少ない環境でより容易に行うことが可能である。核分裂反応による熱出力は原子炉解析における重要なパラメータであるが、原子炉反ニュートリノを用いて直接測定することができれば原子炉工学においても大きな意義を持つことになる。

3. 研究の方法

反ニュートリノと陽子の逆 β 崩壊反応では、陽電子と共に反ニュートリノの飛来方向に感度を持った反跳角で中性子が発生する。反ニュートリノの飛来方向を検出するためには、陽電子が発生した空間的な位置と、中

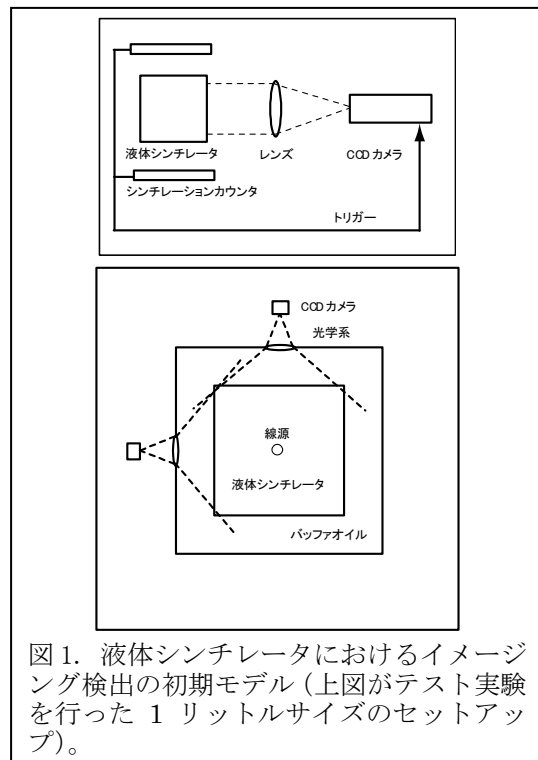


図1. 液体シンチレータにおけるイメージング検出の初期モデル (上図がテスト実験を行った 1 リットルサイズのセットアップ)。

中性子が熱中性子化した後に中性子捕獲反応が起きた空間的な位置を識別する必要がある。液体シンチレータへの添加物質として有望な⁶Liは中性子捕獲断面積が大きい核種であると同時に、中性子捕獲反応後に飛程の短い α 粒子を放出する。したがって γ 線を放出する核種に比べ捕獲反応の起きた位置情報が失われにくいという利点がある。本研究では反ニュートリノ反応によるシンチレーション光をイメージングとして観測し、これら反応点の空間的位置情報を取得する手法の検討を行った。

液体シンチレータ検出器で反ニュートリノ反応のイメージングを行う基本的な構成要素は、中心部分の液体シンチレータで発生したシンチレーション光を集光し(集光系)、焦点面に光検出器を配置し画像として取得する部分(撮像系)である。反ニュートリノ検出のために必要な大容量標的でのイメージング観測を行うために必要な項目を、小規模のセットアップを用いたテスト実験により検討することとした。図1に実験セットアップのモデルを示す。まず1リットルサイズの小規模な装置を用意し、宇宙線による液体シンチレータのシンチレーション光をイメージングすることで必要な要素を抽出することにした。主要な装置は液体シンチレータ、光学レンズ、CCDカメラ等である。

(1) 集光系

逆 β 崩壊反応に伴う陽電子と中性子がそれぞれ起こす先発信号・後発信号の3次元情報を、2次元情報に分離・撮像する集光系の性能は大容量標的の場合に最大の課題となりうる。光学系は反応点からの光を効率よく捕捉することができ、標的の広い範囲で焦点が合うことが望ましい。レンズの光学的特性から制約を受ける被写界深度と有効受光面積の最適化を行った。被写界深度を深くするために必要となる短焦点・小口径のレンズによる遠距離からの観測という要請により、被写界深度を確保しつつ受光面積を確保するため多数の検出器を必要とする可能性がある。また、複数のカメラによる撮像画像の2次元座標から発光点の3次元座標を再現するために必要なカメラパラメータのキャリブレーションを行う。モデルケースとして、像面への射影方式が固定されていてデータの扱いやすい等立体角射影方式の魚眼レンズ(焦点距離4.5mm、F2.8)を利用した。

(2) 撮像系

集光系で変換された2次元情報を取得する撮像系(2次元検出器)の可能性を検討した。原子炉反ニュートリノの検出信号では検出器あたりの入射光は単一光子レベルになる

と予測されている。そのため、発光点位置を再構成するには撮像画面に表れる暗計数を抑制できることが要求される。

微弱光のイメージング検出器としては電子増幅段をもつEM-CCDカメラや、MCPとCCDの組み合わせが考えられる。これらは単一光子検出性能や取得画像の分解能で優れており、初期実験での検討対象として利用できる。大容量標的での観測ではより多くの検出器が要求されるため、CCDより簡易的な読み出しシステムを備えた検出器の利用が期待される。これにはMCPとPSDの組み合わせ、MCPにDelay Line Anodeを組み合わせたものなどの可能性が考えられる。

また、逆 β 崩壊反応における先発信号・後発信号は数十 μ 秒程度の時間間隔があり、これを分離撮像できる遅延同時計測手法の検討を行った。ゲート動作によって露光時間の制御が可能なイメージインテンシファイアと、露光・読み出しが同時に可能な高速デジタルカメラの組み合わせによるもので初期のテスト実験用のセットアップとして利用した。

4. 研究成果

図1に示した実験装置を構築し、⁶Liを含まない通常ミネラルオイルベースの液体シンチレータを用いて宇宙線の飛跡を撮像した。図2に有効径101mm、焦点距離70mmのフレネルレンズを集光レンズとして撮像した場合の宇宙線の飛跡を示す。このセットアップのアライメントからは集光の立体角は

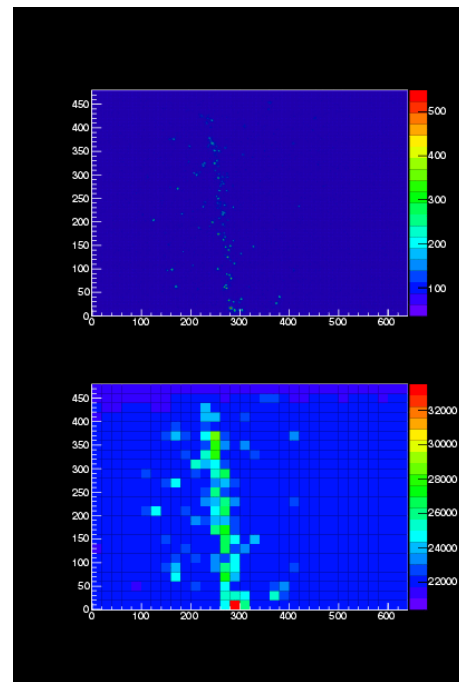


図2. 撮像された宇宙線事象の例(上が撮像解像度によるもの、下がビンニングしたもの)。

3. 4%、光収集量は434光子/cmと予測される。より大型の検出器開発に向けた第一段階として、集光レンズの被写界深度に大きな制限はあるが、宇宙線事象のシンチレーショントラックが撮像できるシステムの構築を行った。

単一光子検出時における光電面起因の暗計数率の制御を目的として、電子冷却型光電子増倍管を用いた微弱蛍光検出システムを構築した。電子冷却温度の調整により有効光電面φ5mmにおいて～4Hzに暗計数率を削減し、光学フィルターとの組み合わせで100光子/秒～ 10^9 光子/秒レベルの蛍光検出を可能とした。このシステムを用いた微弱蛍光の検出テスト実験としてRb原子を標的とした原子衝突断面積や蛍光時間分布に関する基礎データ収集測定を行った。

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 1件)

- ① S. Abe, K. Nakajima et al. [KamLAND collaboration], Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND, Physical Review Letters, 100, 221803-1-221803-5, (2008), 査読有, 82人中15番目。

[学会発表] (計 1件)

- ① 中嶋 享、原子を利用したニュートリノ対生成の基礎研究Ⅲ-赤外・マイクロ波分光の利用-、日本物理学会第63回年次大会、2008年3月26日、近畿大学本部キャンパス。

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中嶋 享 (NAKAJIMA KYO)

岡山大学・理学部・助教

研究者番号：80400240