

平成 22 年 4 月 14 日現在

研究種目： 基盤研究（B）
 研究期間： 2007～2008
 課題番号： 19340057
 研究課題名（和文） 固体ターゲットを用いた原子炉ニュートリノ検出器の開発
 研究課題名（英文） Development of reactor neutrino detector using solid target
 研究代表者
 氏 名： 宮田 等 (MIYATA HITOSHI)
 所 属： 新潟大学・自然科学系・教授
 研究者番号： 80192368

研究成果の概要：

本研究は、従来と比較して小型（1 m³）で可搬性があり商用原子炉建屋の中に置くことができる安全性の高い固体型原子炉ニュートリノ検出器を開発することを目的として行った。プラスチックシンチレータ板、ガドリニウム板などを多数重ねた小型プロトタイプ検出器を製作し、放射線源（Am241-Be）を用いて擬似ニュートリノ反応事象を作り、遅延同時計数法で測定した。擬似ニュートリノ反応の初期信号（ γ 線）と遅延信号（中性子）を捕らえて反応事象を同定できた。より大型化すれば、原子炉ニュートリノの検出が可能であることがわかった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2008 年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

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： ニュートリノ、中性子モニター、プラスチックシンチレータ、光電子増倍管

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ振動の測定は、素粒子の質量や特異なニュートリノ混合に対する重要な情報を与えるため、素粒子物理学の中でも特に重要な位置をしめ、現在までにスーパーカミオカンデグループ、K2K グループ、カムランドグループなどにより Δm_{23}^2 、 Δm_{12}^2 による振動が確認された。しかし、最後の振動である Δm_{13}^2 による振動の実験的確認は未だなき

れていない。ニュートリノ研究者の間では、この最後の振動の確認と、それを引き起こすニュートリノ混合角 θ_{13} の測定が、次の最も重要な課題であると考えられ、世界中で様々な実験の検討が行われている (White Paper Report on Using Nuclear Reactors to Search for a value of θ_{13} , Jan, 2004)。

日本でも、新潟大学、東北大学、首都大学などの KASKA 実験グループが、ニュートリノ

混合角 θ_{13} の測定を目指していたが、現在では D-Chooz 実験に参加している。(Letter of Intent for KASAK: e-print arXiv: hep-ex/0607013 参照)。これらの原子炉ニュートリノ実験では、通常、原子炉より 1.5km 程度離れた地下に液体シンチレータからなるニュートリノ検出器 (Far Detector) を設置する。 θ_{13} 角に関連したニュートリノ振動は小さいため、ニュートリノ量の測定誤差を 1% 以下にしなければならない。そのため原子炉ニュートリノ実験では、ニュートリノ振動が無視できるような原子炉のなるべく近く (原子炉建屋の外で原子炉からの距離は数 100 m 以内) に、Far Detector と同じ構造の検出器 (Near Detector) を設置し、原子炉ニュートリノの元々の量を測定する。

そこで本研究では、小型で安全で可搬性があり原子炉建屋の中に設置して使うことができる固体型原子炉ニュートリノ検出器の開発を行う。この開発に成功すれば、原子炉 1 基ごとに建屋内の原子炉の至近距離にこれを設置して、より正確なニュートリノ量の測定が可能になる。1 トン程度の液体シンチレータを用いた検出器を原子炉の至近距離に設置してニュートリノの検出を試みるという実験は、KASKA 実験グループが、日本原子力研究開発機構 (JAEA) の実験用原子炉「常陽」で行ったほか、A. Bernstein et. al. (J. Appl. Phys. 91, 4672-4676, 2002) も行っている。しかし、本研究のような小型で安全で可搬性がある固体原子炉ニュートリノ検出器を実用化したという報告は、国内外ともない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、従来と比較して小型で可搬性があり、商用原子炉建屋の中に置くことが許可されるような、より安全性の高い固体型原子炉ニュートリノ検出器を開発することである。この開発研究の成果は、ニュートリノ振動実験などの素粒子物理学の分野に応用できるばかりでなく、ニュートリノによる原子炉運転モニターなど、原子炉を安全に運用するために応用することができる。

一般のニュートリノ実験においては、ニュートリノと物質の反応断面積が非常に小さいことから、測定器の体積/重量が非常に大型化する傾向がある。また、宇宙線のバックグラウンドを避けてニュートリノ反応の S/N

比を向上させるために、地下深く設置する。これらのことから、現在のニュートリノ実験に用いられている検出器の建設や設置には、非常に大きな費用、労力、時間がかかる。

そこで本研究では、従来の発想とは異なり積極的にニュートリノ検出器の安全性を高め、小型化を推し進める事で、検出器を原子炉の至近距離に設置できるようにする。この結果、原子炉から検出器に届くニュートリノ量が増加する。例えば、新潟県の柏崎刈羽原子力発電所にある熱出力 3 GW の商用原子炉に設置 (炉心からの距離 20 m) できるようにすると、重量 1 トンの検出器の場合で 1 日約 8000 個のニュートリノを観測できる (A. Bernstein et. al., J. Appl. Phys. 91, 4672-4676, 2002)。また、検出器を細分構造にすることでニュートリノ反応点をより正確に測定できるようにする。分割型の VETO 用シンチレーションカウンターを検出器の周囲に配置して、これらのコインシデンスをとり宇宙線バックグラウンドの影響を取り除く。これによって S/N 比が向上し、地上での原子炉ニュートリノの測定が可能となる。

より具体的には、安全で小型の固体検出器を開発するために、まず原子炉からのニュートリノ反応 (図 1) で発生した中性子を捕らえるためのガドリニウム (Gd) を 0.1% 程度ドーブしたプラスチックシンチレータを開発する。

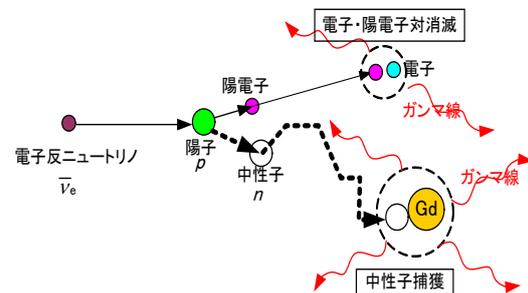


図 1 : ニュートリノ反応

このシンチレータ板にニュートリノの反応点を検出するための波長変換 (WLS) ファイバーを組み込み、Gd から発生する γ 線を電子に転換するための薄い鉛板とともに多層構造の固体シンチレータ検出器を作る。これらの周囲に VETO カウンターを取り付け、その外側をホウ素入りポリエチレンブロックや鉛ブロックで囲んで、宇宙線や環境からくる

中性子、 γ 線等のバックグラウンドを遮蔽できる可動型固体シンチレータ検出器とする(図2)。

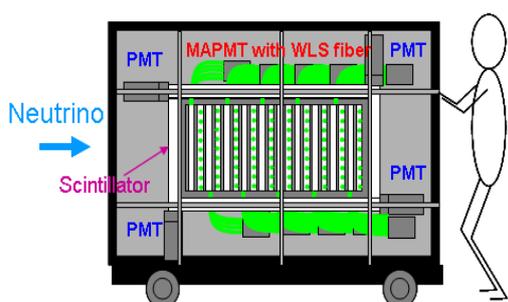


図2：固体シンチレータ検出器

原子炉から発生した反電子ニュートリノが、プラスチックシンチレータ内部の陽子と衝突すると、 $\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$ という反応が起こり、陽電子と中性子が発生する(図1)。陽電子はシンチレータ内を通過する際に信号を発生し、その後電子と共に対消滅して γ 線を発生する。一方中性子は、平均時間 $30 \mu\text{s}$ 後に Gd に吸収され、合計で 8 MeV のエネルギーの γ 線を数個発生する。これらの γ 線は薄い鉛板でコンプトン散乱等を起こしながら、そのエネルギーは主としてプラスチックシンチレータに吸収され、これが中性子の検出信号となる。この陽電子と中性子の信号の遅延同時計測を行うことにより、ニュートリノ信号の同定を行う。これにより自然放射線等のバックグラウンドを排除することが可能になる。

2007年度は、Gd をドーブしたシンチレータを用いた検出器の開発を行う。企業が試作したシンチレータサンプルを用いて小型のテストモジュール(検出器)を製作し、中性子線源等を用いてこの固体シンチレータ検出器の性能(発光量、光の透過率、波長変換ファイバー読み出しの効率や位置分解能など)を明らかにすることを目的とした。

2008年度は、プラスチックシンチレータ板、Gd板、薄い鉛板を交互に50層積み重ねたものを作り、放射線によってこの中で発生した光を5インチ光電子増倍管で捕らえるプロトタイプニュートリノ検出器や波長変換ファイバーとマルチアノードPMT(又はMPPC)で捕らえる検出器をなるべく多く製作する。これらの検出器に対して、ニュートリノ反応事象に類似した信号を出すことができる

Am241-Be線源を用いて擬似ニュートリノ事象測定の本チテストを行う。また日本原子力研究開発機構(JAEA)の実験用原子炉「常陽」(熱出力140MW)が運転された場合には、これの至近距離に設置し総合的なテストを行うことを目的としていた。

3. 研究の方法

(1) 2007年度

プロトタイプ検出器の本チテストを行うと共に、この検出器のシミュレーションを行った。研究は次のような手順で進めた。

①プラスチックシンチレータ製造企業と協力して、この企業が試作した直径6cm×長さ22cmの大きさのGd入りプラスチックシンチレータ(Gd含有量0.1%/W)に関する測定を行った。最終的には、60cm×60cmの大きさで厚さ1cmのGd入りプラスチックシンチレータ板を製作したい。このサイズは原子炉の至近距離に設置してニュートリノ観測をするための基本サイズである。このシンチレータ板を多数(100枚程度)用いることでニュートリノを検出する。液体シンチレータに使用されているような有機溶媒に可溶性有機Gd分子をプラスチックの元材に溶かし込み固化することで製造する。

試作品の円柱状Gd入りプラスチックシンチレータについて、そのバックグラウンド量や発光量などの測定を β 線源、 γ 線源等を用いて行った。

②Gd入りプラスチックシンチレータはバックグラウンドが多いことがわかり、現状の技術で低バックグラウンドのものを作ろうとすると非常に高価になることがわかった。それなので、十分性能が良いGd入りプラスチックシンチレータが作れなかった場合の対処(研究が当初計画どおりに進まない時の対応)として、もともと考えてあった次のような構造の小型プロトタイプ検出器を製作した。

通常のプラスチックシンチレータ板、無機や有機のGdをプラスチックの薄板等に薄く塗って作ったGd板、薄い鉛板を重ねたものを1センサーユニットとする。このユニットを多層構造になるように積み重ねて1つの検出器とし、これの本チテストを行って中性子検出の性能等を明らかにする。

また通常のプラスチックシンチレータの表面に波長変換ファイバーを埋め込んだものを作り、これとGd板、薄い鉛板を重ねたものを1センサーユニットとする。このユニットを多層構造になるように積み重ねてファイバー読み出し型検出器とし、これについても本チテストを行って中性子検出の性

能等を明らかにした。

③Gd 入りプラスチックシンチレータを用いる検出器や Gd 板を用いる検出器について、シンチレータの分割構造や鉛板の厚さなどの最適値を知るためのシミュレーションを行った。

(2) 2008 年度以後

日本原子力研究開発機構(JAEA)の実験用原子炉「常陽」が運転される場合には、これの至近距離に設置し、少なくとも中性子等のバックグラウンドを測定したいと考えていた。しかし、実際には運転されなかったため擬似ニュートリノ信号を出すことができる線源を用いて大学において、より本格的な開発研究を行うことにした。Am241-Be 線源は次のような擬似ニュートリノ反応($\alpha + \text{Be} \rightarrow n + {}^{12}\text{C}^*$, ${}^{12}\text{C}^* \rightarrow \gamma + {}^{12}\text{C}$) 事象を作ることができる中性子線源であり、これを購入して用いた。上記の反応で ${}^{12}\text{C}^*$ から発生する γ 線のエネルギーは 4.4 MeV であり、これがニュートリノ反応の陽電子信号(プロンプト信号)の代わりになる。発生する中性子は熱中性子化して数 10 μs 後に Gd に吸収され、合計 8 MeV の γ 線となり遅延信号を作る。

また、2007 年度までの研究によって、プロトタイプニュートリノ検出器の環境バックグラウンドに対するシールド(鉛ブロック、ホウ素入りポリエチレンブロックなど)はかなり厚いものが必要であることがわかった。よってプロトタイプモジュールの数を増やしてニュートリノ検出器を単純に大型化するのはコスト的に難しいことがわかった。

①通常プラスチックシンチレータ板(18cm×18cm×2mm)、Gd 板、薄い鉛板を重ねたものを 1 センサーユニットとして、これを 50 ユニット積み重ね、発生した光を 5 インチ光電子増倍管で捕らえるプロトタイプニュートリノ検出器モジュールを数個製作する。これらの検出器モジュールに対して、ニュートリノ反応事象に類似した信号を出すことができる Am241-Be 線源を用いて擬似ニュートリノ反応事象測定のベンチテストを行う。遅延同時計数を行うことで、より現実的な原子炉ニュートリノ検出のための実験を行う。

②新潟大学アイソトープ総合センターで Cf252 線源を用いて、信号の波形弁別(PSD)

による中性子検出実験を行い、中性子に対する波形弁別能力の改善のための開発を行う。

③通常のプラスチックシンチレータの表面に波長変換ファイバーを埋め込んだものを作り、これと Gd 板、薄い鉛板を重ねたものを 1 センサーユニットとして、これを 50 ユニット積み重ねて 1 つのプロトタイプニュートリノ検出器モジュールとする。これに対して Am241-Be 線源を用いて、擬似ニュートリノ反応検出のベンチテストを行う。線源による擬似ニュートリノ反応($\alpha + \text{Be} \rightarrow n + {}^{12}\text{C}^*$, ${}^{12}\text{C}^* \rightarrow \gamma + {}^{12}\text{C}$) が起こると、セグメント化されたプラスチックシンチレータで発生した光は、波長変換ファイバーを通して、光電子増倍管で読み出され、発生光量、発生点の位置、発生時刻を測定する。取得したデータからこの検出器の中性子検出効率、位置分解能などの値を求める。Am241-Be 線源以外の線源も用いて、この小型プロトタイプ検出器モジュールについて中性子線、 β 線、 γ 線の検出効率、位置分解能、時間分解能等の測定を行う。

4. 研究成果

(1) 2007 年度

企業が試作した Gd 入りプラスチックシンチレータ(直径 6cm×長さ 22cm)について、 γ 線、 β 線等の放射線源を用いて性能評価を行った。発光量や光の透過率については、それほど悪くないことが分かったが、ドープしている Gd には同位体が多数有り、その放射性同位体などのためにシンチレータ自身からのバックグラウンドが増えることが分かった。この問題を解決した Gd 入りシンチレータを作ると、かなり高価になることが分かったため、通常のプラスチックシンチレータを用いる次のような構造の小型プロトタイプ検出器を Geant4 を用いたシミュレーションを行って設計し、製作した。最初のプロトタイプニュートリノ検出器として、通常のプラスチックシンチレータ板(18cm×18cm×2mm)、Gd 板、薄い鉛板を重ねたものを 1 センサーユニットとした。このユニットを 50 層積み重ねて 1 つの検出器モジュールとし、5 インチ光電子増倍管でその光信号を観測する。このモジュールを多数作ることで、原子炉ニュートリノ検出器になる。このようなモジュールを 1 つ用いるだけでも、原子炉ニュートリノ

反応の生成粒子である中性子を捕まえることはできるので、これを用いて中性子検出のベンチテストを行った。鉛ブロックやホウ素入りポリエチレンブロックを多数用いて、この検出器モジュールを遮蔽し、Am241-Be 線源からの中性子を捕獲する実験を行った。

線源の強度が不足していることが分かったので、新潟大学アイソトープ総合センターで Cf252 線源を用いて、信号の波形弁別 (PSD) による中性子検出実験を行い、中性子の信号を捕らえることに成功した。よって、検出器モジュールの数を増やすことや遅延同時計数を行うことで、より現実的な原子炉ニュートリノ検出のための実験を行えることがわかった。

これらの結果を第9回フィリピン中南部物理学会 (9th SPVM, 2007年10月)、日本物理学会第63回年次大会 (2008年3月、近畿大学) 等で報告した。

(2) 2008年度以後

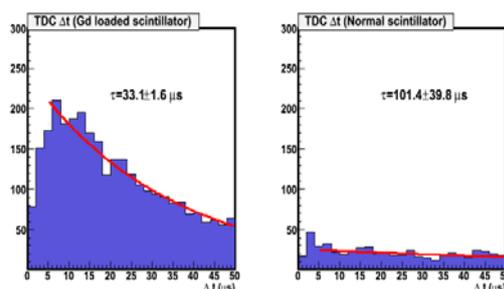
①通常プラスチックシンチレータ板 (18cm×18cm×2mm)、Gd 板、薄い鉛板を重ねたものを1センサーユニットとして、これを50ユニット積み重ね、発生した光を5インチ光電子増倍管で捕らえるプロトタイプニュートリノ検出器モジュールを製作した。これらの検出器モジュールに対して、ニュートリノ反応事象に類似した信号を出すことができる Am241-Be 線源を用いて擬似ニュートリノ反応事象測定のベンチテストを行った。遅延同時計数を行うことができる VME を用いたデータ取得システムを作り測定を行った。擬似ニュートリノ反応のプロンプト信号、遅延信号を捕らえることができた。取得したデータからこの検出器の中性子検出効率が約1%と求まった。

②通常プラスチックシンチレータの表面に波長変換ファイバーを埋め込んだものを作り、これと Gd 板、薄い鉛板を重ねたものを1センサーユニットとして、これを50ユニット積み重ねて1つのファイバー読み出し型プロトタイプニュートリノ検出器モジュールとした。これについても、Am241-Be 線源を用いた擬似ニュートリノ反応のベンチテストを行った。線源による擬似ニュートリノ反応に対して、プラスチックシンチレータで発生した光は、波長変換ファイバーを通して、

光電子増倍管で読み出された。光電子増倍管で捕らえた光量が①の場合の10分の1程度になったが、擬似ニュートリノ反応の信号を捕らえることはできた。

③プロトタイプニュートリノ検出器モジュールについて、シンチレータの分割構造や鉛板の厚さの最適値、原子炉ニュートリノを実際に検出するために必要な検出器モジュール数などを知るために Geant4 を用いたシミュレーションを行った。1枚のシンチレータ板の大きさが 18cm×18cm×2mm であり、これを50層重ねたプロトタイプ検出器モジュールの場合には、シンチレータ板の間に挟む鉛板の厚さは0.5mm以下が好ましいことがわかった。

④企業が試作したGd入りプラスチックシンチレータ (直径6cm×長さ22cm, Gd含有量0.1%/W) について、2インチ光電子増倍管を2本用いて両側から読み出すことができるプロトタイプ検出器を製作した。これに対して Am241-Be 線源を用いて擬似ニュートリノ反応事象測定のベンチテストを行った。VME規格のADCとTDCを用いて遅延同時計数法でデータを取得した。プロンプト信号と遅延信号の時間差を測ることによって、Gd含有量0.1%/Wの場合の平均中性子捕獲時間として33 μ sという値を得ることができた。これは予想値 (30 μ s) と良く一致している。



これらの結果を日本物理学会第65回年次大会 (平成22年3月、岡山大学) で報告した。

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3件)

1) Physics Research by International Exchange

H. Miyata

Proceedings of the 11th SPVM National Physics Conference and Workshop, Father Saturnino Urios University, Butuan City, Philippines, October 22-24, 2009, P99-100

- 2) Study of Neutrino Detector using Solid Scintillator

K. Toyama, H. Miyata, H. Ono

Proceedings of the 10th SPVM National Physics Conference and Workshop, St. Louis University, Baguio City, Philippines, October 16-18, 2008, P92-94

- 3) Development of Solid Neutrino/Neutron Detector

H. Miyata, K. Toyama, H. Katsuyama, H. Ono

Proceedings of the 9th SPVM National Physics Conference and Workshop and 1st Asian Regional High Energy Physics Meeting, Holy Name University, Tagbilaran City, Philippines, October 25-27, 2007, P36-37

[学会発表] (計8件)

- 1) プラスチックシンチレータを用いた原子炉ニュートリノ検出器の開発
小野裕明,
日本物理学会第65回年次大会
平成22年3月20日, 岡山大学・岡山市
- 2) プラスチックシンチレータを用いたニュートリノ検出器の開発
高橋克幸
日本物理学会新潟支部第38回例会
平成21年12月12日, 新潟大学・新潟市
- 3) Physics Research by International Exchange
H. Miyata
11th SPVM National Physics Conference and Workshop, Father Saturnino Urios University, Butuan City, Philippines, October 22-24, 2009
- 4) 固体シンチレータを用いたニュートリノ検出器の開発
富山幸祐
日本物理学会新潟支部第37回例会

- 平成20年12月21日, 新潟大学・新潟市
- 5) Study of Neutrino Detector using Solid Scintillator

K. Toyama

10th SPVM National Physics Conference and Workshop, St. Louis University, Baguio City, Philippines, October 16-18, 2008

- 6) 固体シンチレータを用いたニュートリノ検出器の開発

富山幸祐

日本物理学会第63回年次大会

平成20年3月24日, 近畿大学・東大阪市

- 7) 固体シンチレータを用いたニュートリノ検出器の開発

富山幸祐

日本物理学会新潟支部第36回例会

平成19年12月8日, 新潟大学・新潟市

- 8) Development of Solid Neutrino/Neutron Detector

H. Miyata

9th SPVM National Physics Conference and Workshop and 1st Asian Regional High Energy Physics Meeting, Holy Name University, Tagbilaran City, Philippines, October 25-27, 2007

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮田 等 (MIYATA HITOSHI)

所属 新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号: 80192368

(2) 研究分担者

川崎 健夫 (KAWASAKI TAKEO)

所属 新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号: 00323999

坂本 泰伸 (SAKAMOTO YASUNOBU)

所属 東北学院大学・教養学部・准教授

研究者番号: 60350328

(3) 連携研究者

小野 裕明 (ONO HIROAKI)

所属 日本歯科大学・新潟生命歯学部・

助教

研究者番号: 70453925