

平成21年5月30日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19540298
 研究課題名（和文） 原子炉ニュートリノ振動実験DCHOOZのためのGd入り液体シンチレータの開発
 研究課題名（英文） The development of a liquid scintillator with Gd for nuclear reactor neutrino oscillation experiment DCHOOZ
 研究代表者
 原 俊雄 (HARA TOSHIO)
 神戸大学・大学院理学研究科・准教授
 研究者番号：50156486

研究成果の概要：原子炉ニュートリノ振動実験DCHOOZで標的として使用するGd入り液体シンチレータの構成は、80% $C_{12}H_{26}$ + 20% PXE + 0.1% Gd + PP0(6 g/l) + Bis-MSB(20mg/l)とした(PXEベースと呼ぶ)。次に、原子炉ニュートリノ反応のバックグラウンドとなる、外部から進入する高速中性子とニュートリノ反応を弁別する方法として、信号波形での弁別法の開発を行った。その結果、BC501-Aの場合、明らかに信号波形が異なり弁別が可能であり、PXEベースの場合は、明らかな差はないが信号波形に異なる部分が見られ、弁別の可能性があることが分かった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：ニュートリノ振動、液体シンチレータ、原子炉ニュートリノ、波形弁別法

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノの混合角のうち θ_{12} と θ_{23} の二つについては、SK、K2K、KamLANDその他の実験により既に測定され、大きい値を持つことが分かっている。しかし、残る一つの θ_{13} については、フランスのCHOOZ原子力発電所での原子炉ニュートリノを用いたCHOOZ実験によって、非常に小さいことが分かったが、実験精度の限界から有限の測定値を得ることができなかった。すなわち、現在は θ_{13} の上限値が求まっているのみである。現在、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} 角の測定が最も重要な

課題であると考えられる。

θ_{13} 角を直接測定する一番良い方法は、原子力発電所の核分裂によって生成放出される膨大なニュートリノ(反 ν_e)束を利用して、反 $\nu_e \rightarrow$ 反 ν_μ の振動を検出することである。エネルギーの小さい原子炉ニュートリノ反応を検出するには、Gd入り液体シンチレータが最適である。その液体シンチレータの構成の特定と、バックグラウンドの除去法の開発は、重要な課題である。

2. 研究の目的

原子炉ニュートリノを効率よく検出する

には、重量比にしてGd濃度が0.1%の液体シンチレータが必要となる。Gdが溶解する可能性がある溶媒を考えると、Gd入り液体シンチレータは、その主たる溶媒により3種類に分類される。フェニルキシリルエタン (phenyl-xlylethane、以下PXEと呼ぶ) を主溶媒 (PXEベースと呼ぶ)、次にフェニルドデカン (Phenyl-dodecane、以下PDと呼ぶ) を主溶媒 (PDベースと呼ぶ)、そしてプソイドクメン (Pseudocumene、以下PCと呼ぶ) を主溶媒 (PCベースと呼ぶ) にした液体シンチレータが考えられる。どれが最適であるかを特定する。

原子炉ニュートリノの反応の検出は、 $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ の反応を起こさせ、その次に起こる $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ (即時信号) と $n + Gd \rightarrow Gd^* \rightarrow Gd + \gamma + \gamma + \dots$ (遅延信号) を捉えることで行う。そのバックグラウンドとなる反応は、外部から入射した高速中性子 n の $n + \text{静止 } p \rightarrow \text{減速 } n + \text{反跳 } p$ の反応を即時信号と間違えることにより起こる。それを除去するために、 γ 線由来の信号波形と高速中性子 n による反跳陽子 p 由来の信号波形との弁別可能性を調べる。放射線源として ^{252}Cf [放出放射線は γ (<1MeV) 80%, n (~2MeV) 20%] を使用し、信号取得のゲート幅を変えて測定する。更に、Flash ADCを用いた波形解析を行い、弁別の可能性を探る。

3. 研究の方法

(1) 液体シンチレータの光量とPXEベース液体シンチレータの性能評価方法

液体シンチレータからの光量は、 ^{60}Co からの γ 線を照射して測定する。図1に測定のセットアップを示す。

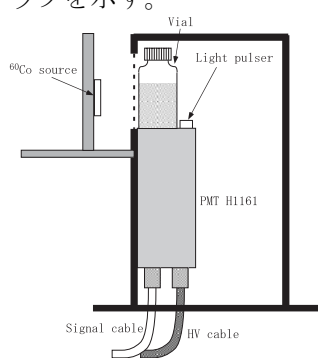


図1 光量測定のセットアップ

光電子増倍管の光電面にバイアル (ガラス瓶) に入れた液体シンチレータを置き、バイアルの側面から ^{60}Co からの γ 線を照射する。

図2に ^{60}Co からの γ 線を照射したときの光量 (ADC) 分布を示す。 ^{60}Co の γ 線のエネルギーはおおよそ1MeVなのでコンプトン散乱が起こりやすい。図2のヒストグラムに見られるコンプトンエッジから液体シンチレータの光量を次の手順で求める。

① ヒストグラムのピーク部にガウス関数

をフィットする。

または、水平部分を求める。

- ② ガウス関数の最大値の半値に直線を引き、ヒストグラムの交点の値を求める。または、水平部分の半値に直線を引き、ヒストグラムの交点の値を求める。
- ③ この交点の所の光量 (ADC) 値をコンプトンエッジの光量 (ADC) 値とみなす。

図2の矢印が指すADC値がコンプトンエッジの光量値である。

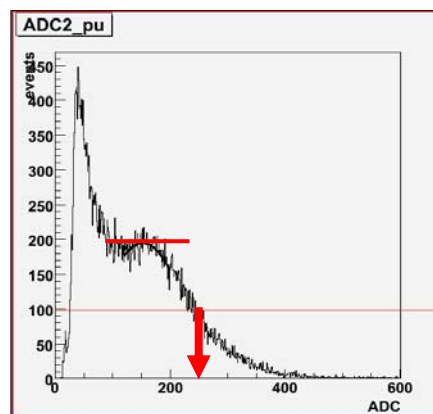


図2 γ 線を照射した光量 (ADC) 分布

以上の方法で求めたコンプトンエッジの光量 (ADC) 値を液体シンチレータの光量値として、液体シンチレータの性能を評価する。

本研究では、特に DCH00Z のドイツグループが開発を進めている PXE ベースの液体シンチレータの性能を評価し、最適な条件を決める。

(2) 波形弁別法 (PSD)

波形弁別法 (Pulse Shape Discrimination method: PSD method) とは、信号波形の形状により放射線を種類ごとに弁別する手法である。ここでは液体シンチレータ内で起こった γ 線イベント ($e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ の即時信号、図3) と高速中性子イベント (高速 $n + \text{静止 } p \rightarrow \text{減速 } n + \text{反跳 } p$ の即時信号、図4) との弁別について説明する。

高速中性子イベントは液体シンチレータ内の陽子を散乱させるので、光電子増倍管 (PMT) で読み取る信号は反跳陽子の信号である。それに対して γ 線イベントは液体シンチレータ内の電子を散乱させるので、信号は電子の信号である。シンチレーション光の遅発成分は粒子のエネルギー損失率に比例するので、反跳陽子の信号の方が遅発成分が多い。この遅発成分による波形の違いを利用し、 γ 線イベントと高速中性子イベントを弁別する。

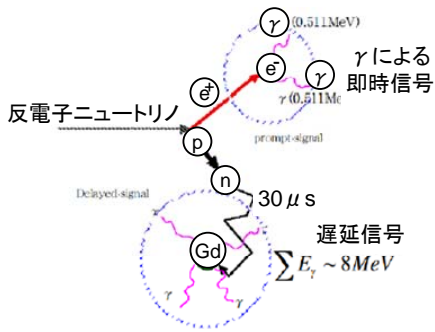


図3 反電子ニュートリノ反応

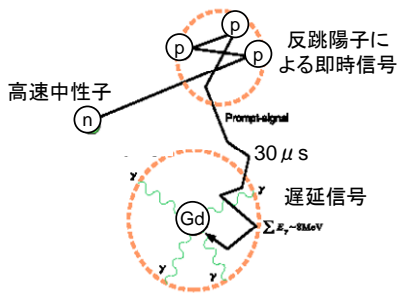


図4 高速中性子反応 (バックグラウンド)

本研究では以下の二つの方法を用いて弁別を行う。

① ダブルゲート法での弁別

ある信号に対して2つの積分区間(ゲート)を用意する。一つはγ線由来の電子信号の幅(short gate)で50ns、もう一つは高速中性子由来の反跳陽子信号の幅(long gate)で300nsとする。それぞれの区間で信号の積分を行う(図5)。γ線由来のイベントの場合、2つの区間で積分した値はほとんど変わらないはずである。また高速中性子由来のイベントの場合、long gateの積分値がshort gateの値よりも大きくなるはずである。そこで弁別比Rを以下のように定義する。

$$\text{弁別比 } R = (\text{long gate}) / (\text{short gate})$$

この弁別比Rの違いからγ線由来のイベントと中性子由来のイベントを弁別する。

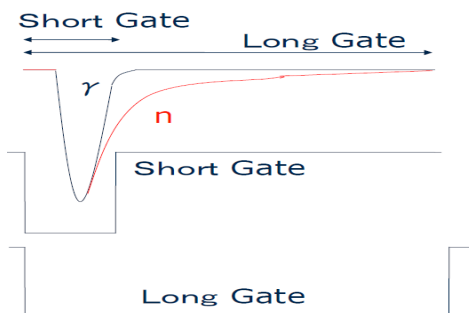


図5 ダブルゲートによる弁別

② Flash ADCを用いた弁別

Flash ADCを用いて波形を直接観測する。γ線由来と中性子由来のイベントの波形は遅発蛍光成分により、テイル部が異なることが分かっている。このテイル部に適当な関数をフィットし、それぞれのフィット関数のパラメータの違いから弁別する(図6)。

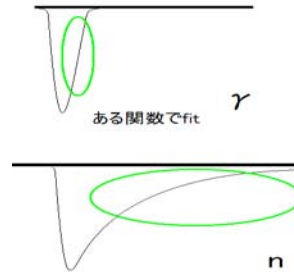


図6 Flash ADCで得られた波形による弁別

以上の二つの弁別法の実験に対して、原子炉ニュートリノ振動実験DCH00Zで使用するPXEベースの液体シンチレータを含む以下の4種類の液体シンチレータで、波形弁別の可能性を探る。

(3) 液体シンチレータ

① BC501A

波形弁別法(PSD)用に開発されたサンゴバン社製の液体シンチレータ。弁別能力は優れていて、小規模・短時間の原子核実験等に使用されている。引火点が29°Cと非常に低いため、原子炉ニュートリノ実験に適していない。波形弁別の基準値として、測定に加えた。

② PXEベース

DCH00Z実験に用いられるものと同じ成分比で製作された液体シンチレータ。PXEは1-Phenyl-1-xylyl ethaneの略称で、溶媒として使われている。他に発光剤としてPPO、波長変換剤としてbis-MSB、希釈剤としてドデカン(C₁₂H₂₆)を使用している。その構成は、
80% C₁₂H₂₆ + 20% PXE + 0.1% Gd
+ PPO(6 g/l) + Bis-MSB(20m g/l)

③ BC521(PCベース)

Gdを0.5%含有させたサンゴバン製の液体シンチレータ。Palo Verde実験で使用された。その成分の重量比85%以上は、プソイドクメンである。アクリルを長時間浸すと侵食する。

④ 常陽タイプ

高速原子炉「常陽」の炉心から約30mの地点で、原子炉ニュートリノの検出に使用した液体シンチレータ。プソイドクメンとパラオール850を15:85で混合し、PPO(3.6g/liter)とbis-MSB(0.053g/liter)を溶解させる。できた液体シンチレータを10%除き、BC521を10%入れて制作した。

(4) 波形弁別の実験のセットアップ

本実験では液体シンチレータを容量1.5Lのステンレス製の円筒容器（内直径13cm、長さ12cm）に充填し、5インチ光電子増倍管（PhotoMultiplier Tube、浜松ホトニクス社H6527）で測定を行った。光電子増倍管を密着させる円筒端の窓には、紫外線通過型アクリル板（厚さ：5mm）を使用した（図7）。



図7 ステンレス製円筒容器（右の白い円筒）に光電子増倍管（左の黒い筒状のもの）を取り付けた装置

実験は新潟大学R Iセンターで行い、放射線源として、以下のものを使用した。

① ^{60}Co

原子番号27の遷移金属Coの放射性同位元素。半減期は5.2714年。1.173MeVと1.333MeVの γ 線を放出し、 ^{60}Ni になる。本実験ではエネルギー較正と光量比較のために用いた。

② ^{137}Cs

原子番号55のアルカリ金属Csの放射性同位元素。半減期は30.07年。0.662MeVの γ 線を放出し、 ^{137}Ba になる。本実験ではCfの γ 線との比較のために用いた。

③ ^{252}Cf

原子番号98のアクチノイドCfの放射性同位元素。半減期は2.65年。自発核分裂を起こし平均0.6MeVの中性子を放出する。
～20 γ / fission : 80%以上が1MeV以下
～4n / fission : 2.14MeV
本実験では γ 線を含む中性子源として用いた。

実験のセットアップを、図8に示す。図7の装置を黒シートで覆い（右側）、黄色の円筒が放射線源、左の白いブロックは、中性子を遮蔽するホウ素入りポリエチレンブロックである。



図8 実験のセットアップ

4. 研究成果

(1) PXEベース液体シンチレータの光量測定と構成物質の特定

PXEベースの液体シンチレータのPPOの割合を変えて、光量が最適になるPPO量を決定する。図9、図10、図11、図12は、順にPPOの割合を、2g/l、4g/l、6g/l、8g/lと変えて測定した光量分布である。

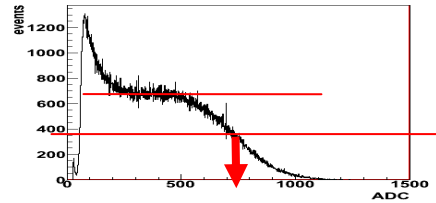


図9 PPOが2g/lの時の光量分布
コンプトンエッジのADC値は720

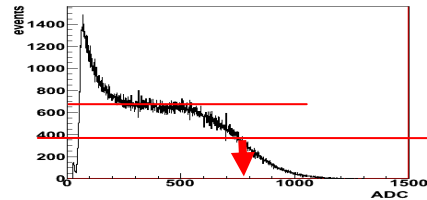


図10 PPOが4g/lの時の光量分布
コンプトンエッジのADC値は740

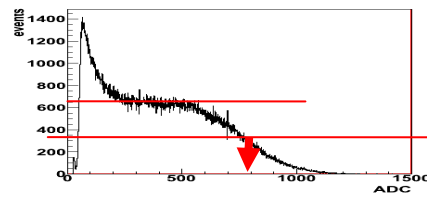


図11 PPOが6g/lの時の光量分布
コンプトンエッジのADC値は750

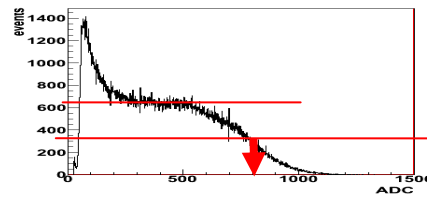


図12 PPOが8g/lの時の光量分布
コンプトンエッジのADC値は750

PPOの割合が増すに連れて光量が増えていくのが分かる。そのPXEベース液体シンチレータの光量のPPO濃度依存性を図13に示す。光量は、PPOの濃度が6g/l辺りで飽和領域に入っている。測定に用いる液体シンチレータのPPO濃度を6g/lと決定した。この値は、DCH00Z実験で液体シンチレータを担当しているドイツグループの値と同じであった。

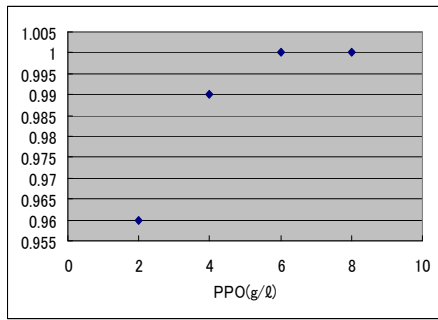


図 1 3 PXE ベース液体シンチレータの光量の PPO 濃度依存性

最終的な PXE ベース液体シンチレータの構成は、80% C₁₂H₂₆ + 20% PXE + 0.1% Gd + PPO(6 g/l) + Bis-MSB(20 mg/l) である。

(2) 波形弁別法による粒子識別

① ダブルゲート法での弁別

横軸に弁別比

$$R = (\text{long gate}) / (\text{short gate})$$

をとり、縦軸にイベント数をとったグラフを示す。図 1 4, 1 5, 1 6, 1 7 は、それぞれ、BC501A、PXE ベース、BC521 そして常陽タイプの液体シンチレータに対する弁別比の分布を表している。

図 1 4, 1 5, 1 6 の黒線は実験値を表し、青線は γ 由来の信号、赤線は中性子由来の信号をガウス関数と仮定してフィットしたものである。図 1 7 の赤線は、中性子由来の信号をガウス関数と仮定してフィットしたものを表す。

BC501A では、中性子由来の分布が弁別比 R の大きいところに偏り、 γ 由来と中性子由来のイベントを識別できることを示している。PXE ベースと BC521 は、BC501A ほど明確ではないが、中性子由来の分布の弁別比 R が大きい方への偏りが認められる。常陽タイプの場合は、同じ傾向は認められるが、その効果は小さい。BC501A では、中性子由来のイベントの 70% 弱は、イベント毎に識別できる。しかし、PXE ベースと BC521 の液体シンチレータでは、イベント毎の識別は困難で、統計的に処理するのが適当と考えられる。

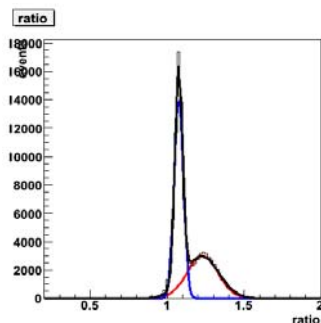


図 1 4 BC501A の弁別比 R の分布

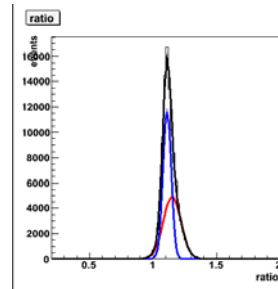


図 1 5 PXE ベースの弁別比 R の分布

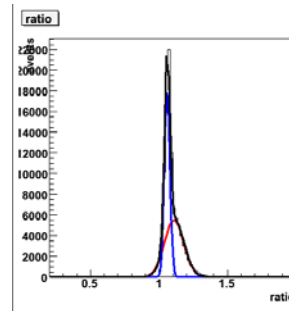


図 1 6 BC521 の弁別比 R の分布

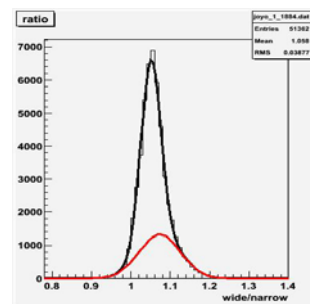


図 1 7 常陽タイプの弁別比 R の分布

図 1 4 で赤色で示した部分が中性子由来のものであることを確認するために、BC501A に対して ²⁵²Cf 線源と測定器との間に、中性子を良く吸収し遮蔽するホウ素入りポリエチレンブロックを置いて測定を行った。図 1 8 はホウ素入りポリエチレンブロックが無い場合、図 1 9 はホウ素入りポリエチレンブロックがある場合の弁別比 R の分布を表す。

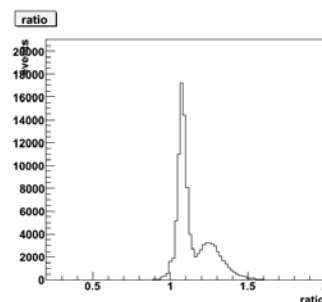


図 1 8 ホウ素入りポリエチレンブロックが無い場合の弁別比 R 分布

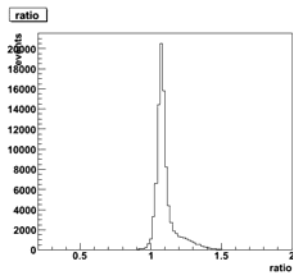


図 19 ホウ素入りポリエチレンブロックがある場合の弁別比R分布

ホウ素入りポリエチレンブロックで中性子を遮蔽すると、右の山形の分布が無くなり、この部分が中性子由来のイベントであることを示している。

② Flash ADCを用いた弁別

BC501Aの液体シンチレータに対してFlash ADC のデータから得られた典型的な γ 線イベントと高速中性子イベントの信号波形を図20と図21に示す。本実験では単純な指数関数 $f(x) = -\{A \exp(-\alpha x) - 255\}$ でフィットした。フィットする範囲は波形の違いが顕著に現れるピーク値の1/3の値から60nsと設定した。今回の解析ではテイル部の伸びを確認して γ 線か中性子か決定した。

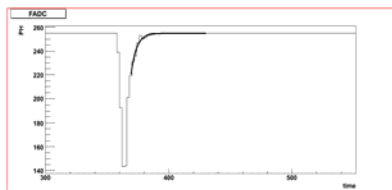


図 20 ^{60}Co からの γ 線による波形

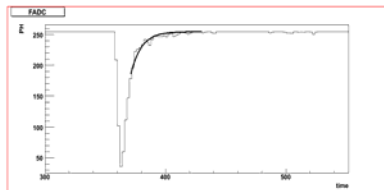


図 21 ^{252}Cf からの中性子によると考えられる波形

γ 線由来と中性子由来の波形は確かに異なっており、フィット関数のパラメータの値は、 γ 線由来の波形は $\alpha = 0.218$ で、中性子由来の波形は $\alpha = 0.113$ であった。このパラメータの違いをみると、波形のテイルの違いからも弁別可能だということが分かる。

しかし、本実験ではセットアップ時にベースラインの設定ミスにより肝心のテイル部が隠れてしまっているイベントがあり、現在取得しているデータから精密な解析は困難である。

今後、解析の最適化とともに、再度中性子源でのテストを行い、改善を図る予定である。

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)

[学会発表] (計 2 件)

- ①宮本賀透、富山翔、宮田等、田村詔男、天野翔太、原俊雄、他KASKA/D-Chooz
「原子炉ニュートリノ実験での、波形弁別法による高速中性子バックグラウンドの識別可能性の研究」日本物理学会 2008 年秋季大会 2008 年 9 月 21 日
山形大学小白川キャンパス
- ②原俊雄、他KASKA/Double Choozメンバー
「Double Chooz 実験における光電子増倍管テスト」日本物理学会第 63 回年次大会 2008 年 3 月 24 日近畿大学本部キャンパス

[その他]

- ①廣政達也
「原子炉ニュートリノ実験における波形弁別法によるバックグラウンド除去法の開発」神戸大学卒業論文2009年3月
- ②秦豪均
「原子炉ニュートリノ実験におけるバックグラウンド高速中性子の研究」神戸大学卒業論文2009年3月
- ③原田卓也
「原子炉ニュートリノ実験におけるバックグラウンド宇宙線ミュー粒子の研究」神戸大学卒業論文2009年3月
- ④ Shota Amano
「Pulse Shape Discrimination with Liquid Scintillator in Reactor Neutrino Experiment」
2008 年 3 月 4 日
Double Chooz Collaboration Meeting in Kobe University, Kobe, Japan
- ⑤天野翔太
「原子炉ニュートリノ実験用液体シンチレータの経年変化測定および γ/n 波形弁別実験」神戸大学卒業論文2008年3月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原 俊雄 (HARA TOSHIO)
神戸大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：5 0 1 5 6 4 8 6

(2) 研究分担者

鈴木 州 (SUZUKII ATSUMU)
神戸大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：2 0 2 4 3 2 9 8

(3) 連携研究者 なし