

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610052

研究課題名(和文) 高粘度液体中に結晶シンチレータを分散した，ニュートリノ実験用装置の開発・研究

研究課題名(英文) R&amp;D Study for a future neutrino experiment by scintillator suspended in high viscosity media

研究代表者

岸本 康宏 (Kishimoto, Yasuhiro)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：30374911

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では，高粘度媒体中に多数の結晶シンチレータを分散し，あたかもそれを1つのシンチレータ系として取り扱い，将来の大型ニュートリノ研究に用いる事を目的に，この系の開発・研究を行った．この目的のため，2種類の結晶シンチレータの発光スペクトルと屈折率，加えて，6種類の高粘度媒体の屈折率を測定した．この測定を元に，3つの短い結晶シンチレータを媒体に導入した場合と，1つの長い場合とで，Cs137からのガンマ線に対して発光量がどのように変わるかを比較した．その結果，複数のシンチレータを用いた場合でも，界面での発光量の減少は予測よりも少なく，従って，あたかも1つの系として取り扱う可能性を示した．

研究成果の概要(英文)：We conducted R&D studies to know possibility to use scintillators suspended in high viscosity media as a kind of scintillation system, which is utilized as a large future neutrino detector. We measured scintillation spectrum and optical indexes of two scintillators and optical indexes of six high-viscosity media. Based on these measurements, we performed experimental studies by comparison of three short-length scintillators in the media and one long-length one. We used gamma-rays from Cs137 to measure the scintillation amount in each system and found that the loss at the surfaces were less than the expected and it supported the possibility to treat plural scintillators system as a one system for a future large neutrino detector.

研究分野：天体素粒子物理学

キーワード：シンチレータ 屈折率

1. 研究開始当初の背景

2011年、スイスジュネーブ郊外のCERNにおける実験で、質量を司る粒子、Higgs粒子が発見された。

このHiggs粒子の発見によって、現代の素粒子物理学のパラダイムである標準模型の全ての粒子が発見された。この標準模型は、これまでの素粒子物理学の全てを記述するモデルであり、これから逸脱する現象は、ニュートリノ振動、ただ1つである。

ニュートリノ振動の他にも、標準模型が完全でないことを暗示する事象はいくつか存在する。例えば、この標準模型では、粒子と反粒子は同一の反応を生じ、従って、この宇宙はなぜ物質でできているのか？なぜ反物質でできていないのか？を説明することが出来ない。このように、標準理論を超えた物理学の構築が、現代物理学の使命である。

先に、宇宙の物質と反物質の非対称性に触れたが、この非対称性についての1つの仮説がレプトジェネシス仮説である。ここでは、ニュートリノは粒子と反粒子の区別のない粒子(マヨラナ粒子)とされ、これが原因で、物質優勢の現在の宇宙が出来上がったとされている。

特に、ニュートリノがマヨラナ粒子である場合には、特定の原子核で、ニュートリノ放出を伴わない二重ベータ崩壊(Neutrino Less Double Beta Decay, 以下では、Less DBDと略記)が予言されており、このLess DBD事象の発見を目指して、激しい競争が行われている。

この競争では、液体シンチレータにキセノンを溶解した、KamLAND Zen実験が最も高い感度を持ち、世界をリードしており、同じくキセノンを用いたEXO実験が後を追っている。他にも多くの実験が実行あるいは計画されているが、真の意味で、大型で現在稼働している実験は、GERDA(ゲルマニウムを標的に使用)、CUOLE(テルルを標的に使用)、CANDLES(カルシウムを標的に使用)といった所である。

標準理論を超えた物理を探る鍵はニュートリノにあると言っても良いが、ニュートリノは電荷を持たず、ほとんど反応しない。従って、ニュートリノを研究するためには、非常にバックグラウンドが小さな、巨大な装置が要求されている。この相反する要求のために、先述のKamLAND Zen等、実際に稼働している実験は多くない。

一方で、Less DBDが生じる原子核種は、Ca48, Ge76, Se82, Zr96, Mo100, Cd1

16, Te128, Te130, Nd150, U238の10種類もあり、現状では、まだ研究が着手されていない原子核が多く残っている。

先行するLess DBD実験では、キセノンを用いた探索が独走状態にあるが、たとえDBD事象発見の一番乗りを逃したとしても、その後続く、DBD事象の詳細、例えばニュートリノ質量測定、レプトジェネシス仮説の検証などを研究するためには、より多くの原子核種でLess DBD事象を調べることが必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、素粒子物理学の最重要課題の1つである、Less DBD事象の探索を将来の目標に据え、そのための大型シンチレータ系の開発・研究を行うことである。

DBD事象の探索においては、先述のように、「極低バックグラウンド」の「超大型実験装置」という相反する要求を満足する必要がある。この相反する要求を満足する実験系は、シンチレータからの発光を光電子増倍管で測定するという系である。例えば、EXO実験は液体キセノンがシンチレータとして動作することをフルに利用している。KamLAND Zen実験では、有機液体シンチレータにキセノンを溶解させているが、これもキセノンが不活性な希ガスであり、且つ、液体シンチレータに高濃度で溶解するという特性を利用している。

しかし、それが故に、最も先行する2つの実験で、キセノン以外の核種を調べることは(現段階では)不可能である。

本研究では、微小な結晶シンチレータを高粘度の媒体に分散させることによって、その系をあたかも1つのシンチレータ系として取り扱うことが出来るかどうかの開発・研究を行う。

1つの系として取り扱うには、以下の点が重要である。

結晶シンチレータと高粘度媒体の屈折率がマッチしていること

高粘度媒体がシンチレーション領域で高い透明度を持つこと

微小な結晶シンチレータを、高粘度媒体中に分散できること

要素 は、高粘度媒体と結晶シンチレータの界面でシンチレーション光の散乱を抑えるための要請であり、要素 は説明する必要はなからう、要素 は、必須ではないが、高粘度媒体中に微小な結

晶を一様に分散させることが出来れば、エネルギー較正などの面で有利となる。

結晶シンチレータとしては、ユーロピウム含有フッ化カルシウムの結晶シンチレータ ( $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ ) と、タングステン酸カドミウムの結晶シンチレータ ( $\text{CdWO}_4$ ) に特に注目している。

その理由は、Caは、Less D B D探索に用いる原子核種のうち、最も高い崩壊エネルギー ( $Q$ 値) をもっており ( $Q=4.27$  メガ電子ボルト)、これは、天然放射線の最大エネルギー (ガンマ線で  $2.6$  メガ電子ボルト、ベータ線で  $3.3$  メガ電子ボルト) よりも大きく、従って、天然放射線源に起因するバックグラウンドの影響を受けにくいからである。

一方の、Cdであるが、Cdの  $Q$ 値は、 $Q=2.81$  メガ電子ボルトと、上記の転々放射線の最大エネルギーよりも小さいが、しかし、Cdは、他の原子核種と異なり (キセノンは例外)、同位体濃縮が実現されており、少量の結晶でも、高濃度のCd116を用いた実験を遂行が出来る点に注目した。これは、装置の大型化という面からは非常なメリットとなるからである。

また、Cdの同位体には、Cd106が存在し、この核種を用いて、未発見の地球ニュートリノ、即ちK40由来の地球ニュートリノを検出できる可能性がある。この大きな魅力のため、タングステン酸カドミウムは、その  $Q$ 値の大きさにも関わらず、本研究で注目している。

しかし、タングステン酸カドミウムの屈折率は、約  $2.2$  と大きく、これにマッチした媒体の候補が思い浮かばない。誘電多層膜での反射防止処理なども含めて検討を進めることで、Less D B DとK40地球ニュートリノ双方に応用可能な系の開発を進める。

### 3. 研究の方法

研究の第一歩は、

- シンチレータの発光波長スペクトルの測定
- シンチレータの屈折率の波長依存性の測定
- 高粘度媒体の屈折率の測定

である。これらのデータをもとに、屈折率が、シンチレータのそれにマッチした高粘度媒体を選択する。

高粘度媒体の光透過率とシンチレータの光透過率も非常に重要な物理量であるが、後者は、十分な先行研究があり、そのデータを用いる。前者についても、本研究では高粘度媒体としてシリコンオイル (東レSH200 化学名はジ

メチルポリシロキサン) を用いることとしており、この光透過度の波長依存性はメーカーによって詳しく測定されており、これが影響することはないと考えられるため、カタログ値を用いることとする。

これらによって、高粘度媒体中に結晶シンチレータを分散させた際のシンチレーション光の伝播、特に高粘度媒体とシンチレータの界面における散乱の影響を見積もる。

また、本研究では、高粘媒体に結晶を分散させることを考えているため、高粘媒体中に結晶を分散させ、それを長期間放置した場合にどのようなようになるかを見る。

次に、結晶シンチレータを実際に高粘度媒体に導入し、光の伝播の様子を調べる。手段としては、

- レーザーによる目視による観察
- 放射線源を用いて外部からガンマ線を照射し、その際のシンチレーションを調べ、屈折率、光透過率の測定結果と比較する

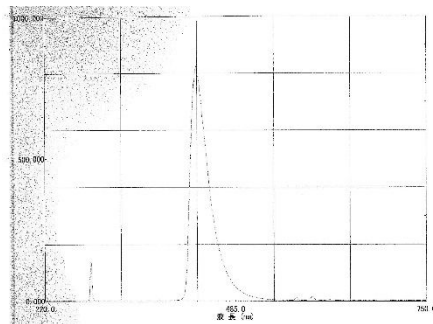
という手段をとる。

これらの結果をもとに、本研究で提案した、高粘度媒体中に結晶シンチレータを分散させた系によって、将来の大型ニュートリノ実験装置の可能性を探る。

### 4. 研究成果

シンチレータとしてCsI (Tl)、 $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 、 $\text{CaWO}_4$ 結晶を入手した。

CsI (Tl)と $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ の発光波長を測定した。CsI (Tl)の例では、励起光  $325\text{nm}$  の光を入射し、その結果、 $520\text{nm}$  を中心に半値全幅  $150\text{nm}$  の発光スペクトルを得た。これは先行研究等を再現したものであるが、一方  $400\text{nm}$  付近で小さなピークも確認された。下に $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ の発光スペ



クトルを示す。(左端のピークは励起光  $285\text{nm}$  のものである)

シンチレータの屈折率に関しては、 $400\text{nm}$  から  $800\text{nm}$  の間でほぼ等間隔に8点のデータ (d線, C線, F線, e線, g線, h線,  $780.4\text{nm}$  (レーザー

ダイオード), 706.5nm を取得した . 測定範囲でほぼフラットな構造であった . (CaF<sub>2</sub>(Eu) の場合 , h 線 404.7nm で  $n=1.44644$ , 785.4nm で  $n=1.43071$ )

同様に , 6 種類の高粘度媒体について , 波長ごとの屈折率を測定した . その結果 , シンチレーション波長域では , 屈折率は一樣であることが分かった . (例 : 東レ SH200 の場合 , h 線で  $n=1.4179$ , 785.5nm で  $n=1.39936$ )

しかし , カタログによると , 高粘度の液体ほど屈折率が高いとされていたが , カタログ値ほどの差はないことが分かった . この違いが何に起因するものかを突き止めることはできなかった . また , この結果 , 高粘度媒体の屈折率を , シンチレータのそれに完全にマッチさせることが出来なかった .

しかし , CaF<sub>2</sub>(Eu) と高粘度媒体の屈折率のマッチングは高いことが分かった . 下に高粘度液体に CaF<sub>2</sub>(Eu) を入れた際の写真を示す . レーザーのような高輝度な光を入れた際にも , 界面の反射が大きくないことが分



る .

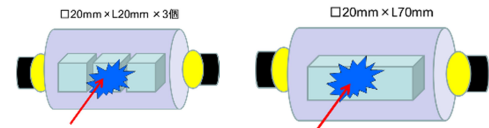
CsI(Tl) の場合は , 結晶 1 つを通過するごとに約 3 % の光がフレネル反射によって損出すると見積もられた .

また , 高粘度媒体に結晶シンチレータを導入した場合 , 時間が経つと結晶が下に沈んでしまうことが分かった . 結晶サイズと沈降の関連性を調べることはできなかったが , 粘度が高い場合には一樣に混合することが難しいことと相まって , 小結晶を一樣に分散・保持することが



が容易でないことが分

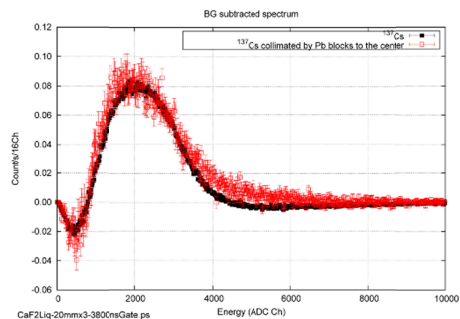
かった .



これらの結果をもとに , 次のような実験セットアップを用いて , 媒体中に 3 つの短い結晶を入れた系と 1 つの長い結晶を入れた系で界面での散乱による効果を比較した .

この実験では , 小結晶を一樣に分散することが困難であると判明したため , 比較的大きな結晶を少数利用する系を想定している . また , 屈折率のマッチングが必ずしも取れない点も考慮し , 屈折率の異なる組み合わせで実験を行った . (CaF<sub>2</sub>(Eu) と , フッ化炭素 ( $n=1.290$ )) これによって , 屈折率差が小さい場合の効果も拡大してみることになる . また , CdWO<sub>4</sub> のように屈折率の高い結晶に合う媒体を見つけることが出来なかったため , ある程度屈折率に差がある場合のテストベンチとなっている .

この系に外部から , 結晶中央 , 端などにコリメートとして Cs137 のガンマ線を照射して , 発光量を比較した .



上図赤線が中央にガンマ線を照射した際のヒストグラムである .

このヒストグラムの比較から , 結晶が複数ある場合の発光量に対する影響は約 5 % と見積もられ , 予測値 10 % よりも小さかった . この差は , 系のセットアップによる系統誤差と考えている . (例えば , 光電子増倍管と石英セル窓を接続する際のオプティカルグリースの付き具合等)

以上 , 本研究によって , 大きな結晶複数個を高粘度媒体に導入した系をあたかも 1 つの系として構築する可能性を示した . 特に , CaF<sub>2</sub>(Eu) と高粘度液体は有望である . CdWO<sub>4</sub> は適切な屈折率を持った溶媒を探すことで , 界面の影響を最小限にとどめた系を構築する可能性が残っており , 今後の課題といえよう .

## 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 1件)

- 岸本康宏「屈折率を合わせた媒体によって結合された複数の結晶シンチレータ系の開発・研究」 2014年9月  
日本物理学会 秋の年会 (佐賀大学本庄キャンパス 佐賀県佐賀市本庄町)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

岸本 康宏 (KISHIMOTO, Yasuhiro)  
東京大学 宇宙線研究所  
附属神岡宇宙素粒子研究施設  
准教授

研究者番号： 30374911