

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24654055

研究課題名(和文) 波長変換材と液体キセノンを用いた多目的検出器開発の基礎研究

研究課題名(英文) R&D of the multipurpose detector using wavelength shifter and liquid xenon

研究代表者

上島 考太 (Ueshima, Kota)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・助教

研究者番号：80605379

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：アクリル容器内面に波長変換材を蒸着した容器に液体キセノンを導入するため、液体窒素とノベック7100を用いて、アクリル容器を-100℃まで冷却することに成功した。キセノンを実験容器に導入し、ガンマ線を照射し、液体キセノンのシンチレーション光を可視光に変換し、PMTで読み出すことに成功した。

低バックグラウンド化のためのシンチレーション光測定器を開発した。PMTをアクリル容器から40cm遠ざけた状態でも600p.e./MeV以上の収集光量を実現した。

検出器表面バックグラウンドを低減させるためにTPBをプラスチックシンチレータに溶かし込んだ新型プラスチックシンチレータ容器を開発した。

研究成果の概要(英文)：The acrylic vessel evaporating the wavelength shifter in the inner surface was cooled down to -100 degree using liquid nitrogen and Novec7100 to fill the liquid xenon into the acrylic vessel. The xenon scintillation light caused by gamma ray was detected as the visible light by PMT after the liquid xenon filled into the acrylic vessel.

The scintillation light measurement system was developed to realize the low BG detector. The light yield more than 600p.e./MeV was achieved even though the PMT was kept 40 cm away from the acrylic vessel.

To reduce the surface BG of the detector, the new plastic scintillator was developed by dissolving TPB into the plastic scintillator.

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：波長変換剤 シンチレーション光 二重 崩壊探索 暗黒物質探索

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノがマヨラナ粒子(粒子と反粒子の区別がない粒子)であるかは未だにわかっていない。これはニュートリノの質量の起源にかかわる非常に重要な問題である。ニュートリノがマヨラナ粒子であるときに起こる $0\nu 2\beta$ 探索が、このニュートリノのマヨラナ性や有効質量を測定できる唯一の手段であると考えられている。 $0\nu 2\beta$ を発見できれば、崩壊前後のレプトン数が保存せず、レプトン数非保存を示す重要な実験である。また宇宙初期に生成された重い右巻きニュートリノの崩壊に CP の破れを考慮することで、現在の物質優位宇宙の説明にもつながる。

現在探索が行われている領域は inverted ヒエラルキーの領域である。将来 $0\nu 2\beta$ の感度を 0.03eV まで上げようとする、バックグラウンドのレベルを 1 年に 1 個程度にする必要がある。また通常のニュートリノを放出する二重ベータ崩壊 ($2\nu 2\beta$) のイベントが $0\nu 2\beta$ のエネルギー領域にしみ込まないために、良いエネルギー分解能 (RMS 2%以下) が必須である。2011 年に 1kton の液体シンチレータを用いたニュートリノ観測装置カムランドの中心にキセノン 136 を溶解した液体シンチレータをセットし、 $0\nu 2\beta$ 探索実験が開始された。初めに 300kg の二重ベータ崩壊核であるキセノン 136 を濃縮したキセノンを液体シンチレータに 3 wt% 溶かして観測を開始した。カムランドの中心にキセノンを溶かしたミニバルーンをセットするため、低いバックグラウンドでの探索が可能である。しかしカムランドのエネルギー分解能はキセノンの Q 値 2.5MeV で約 4% であり、また宇宙線ミューオンにより発生する $10C$ がバックグラウンドとなる。

2. 研究の目的

キセノン、波長変換材を用いた検出器の基礎研究を行う。キセノンはそれ自身が大発光量のシンチレータであるが、発光波長が

175nm であるために、直接光センサーをキセノンに浸し、シンチレーション光を読み出すのが主流になっている。しかし、光センサーに含まれる放射性不純物がバックグラウンド (BG) となり、検出器全体を低 BG 化するのが困難であった。波長変換材を用いることで、キセノンのシンチレーション光を可視光として読み出すことができる。波長変換材を蒸着した容器にキセノンを入れ、カムランドのような直径 10m を超える大型の検出器の中心にセットすることで、極低 BG な環境を作り出し、二重ベータ崩壊探索の感度を大きく向上できる。キセノン自身が液体シンチレータの 4 倍以上の大発光量なシンチレータである利点が生かせる上に、液体にしたキセノンを使用することで、液体シンチレータに溶かすよりも 100 分の 1 以下の体積にしかならず、格段にコンパクトな有効体積を実現できる。また液体シンチレータに溶かした際、宇宙線ミューオンにより生成される $C10$ が二重ベータ崩壊探索のバックグラウンドとなるが、キセノンのみをターゲットにすることにより、 $C10$ はバックグラウンドとならない。カムランドの中心に液体キセノンと波長変換材を組み合わせた検出器をセットすることで、良いエネルギー分解能、極低バックグラウンドな環境を兼ね備えた画期的な検出器の製作が可能となる。

本研究ではカムランドの中心に、液体キセノンの層を作り、高いエネルギー分解能でかつ極低バックグラウンドな環境での二重ベータ崩壊探索を行える検出器の基礎研究を行う。液体キセノンは -100 度と低温であるため、透明なアクリル容器でできた断熱真空層がさらに必要となる。あるいはこれまで研究を行ってきた常温高圧の液体キセノンの状態でカムランドの中心にセットする方法もある。

本研究により、キセノンのシンチレーション光を可視光に変換することで、遠くに離れ

た光検出器でシンチレーション光を検出することができる。そのため光検出器に含まれる放射性不純物からのバックグラウンドは液体シンチレータにより遮蔽でき、極低バックグラウンドな環境を実現できる。極稀な事象を探索する二重ベータ崩壊探索において、活気的な検出器の製作が可能となる。

$0\nu 2\beta$ 探索では通常のニュートリノを放出する二重ベータ崩壊 ($2\nu 2\beta$) がバックグラウンドとなる。 $2\nu 2\beta$ を取り除くには良いエネルギー分解能が必要である。キセノンは液体シンチレータと比べて4倍以上の発光量があり、キセノン自身をシンチレータとして使用すれば、検出できる光量が増加し、エネルギー分解能を向上できる。また液体シンチレータの場合は、宇宙線ミュオンにより生じた $C10$ がバックグラウンドとなるが、キセノンのみを用いる場合にはバックグラウンドとならない。

さらに波長変換材と液体キセノンを組み合わせた検出器は、大発光量なシンチレータであり、集光能力を向上させることにより、暗黒物質探索実験や太陽から最も多く放出されている pp 太陽ニュートリノ探索など、将来の多目的な研究が行える検出器へと発展させることができる。

3. 研究の方法

(1) 波長変換材を蒸着したアクリル容器の開発 (図1、図2右)、プラスチックシンチレータにTPBを溶かし込んだ容器の開発を行った (図2左、図2中央)。

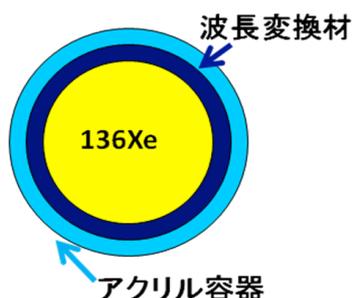


図1、波長変換材と液体キセノンを組み合わせたセットアップ



図2、液体キセノン容器
左:プラスチックシンチレータ
中央:TPB 入りプラスチックシンチレータ
右:TPB 蒸着アクリル



図3、ブラックライトをあてたTPB蒸着アクリル容器

波長変換後の波長が光電子増倍管(PMT)の感度波長とよく一致するTPB(テトラフェニルブタジエン)を波長変換材の候補とした。研究計画ではパラタフェニルも波長変換材の候補であったが、特にTPBは液体アルゴンを用いた暗黒物質探索実験でよく使用されており、液体アルゴン(-186度)のシンチレーション光128nmを高い効率で可視光に変換できることが知られているため、TPBを用いて設計を行った。蒸着量は液体アルゴンで最も変換効率の高いTPB量とした。図3のようにブラックライトをあてると青く光っている。比較のため、図3の右側に液体シンチレータの入ったバイアル容器が置いてある。また更なるバックグラウンド低減のための研究も行った。アクリル表面に波長変換材を蒸着した場合、波長変換材、アクリル容器に含まれる放射性不純物の影響で暗黒物質探索、pp太陽ニュートリノ観測のバックグラウンドとなる可能性がある。そこで本研究では表面バックグラウンドを除去するため、プラスチックシンチレータにTPB波長変換材を溶かし込んだ容器の開発も行った。

(2) シンチレーション光測定器の開発
波長変換材を蒸着したアクリル容器をセットし、シンチレーション光はPMTで検出する。外部からCs137などの γ 線源を用いて、シンチレーション光を検出できるようなセットアップ

プの設計を行った。液体キセノンは -100 度と低温であるため、通常真空断熱層を設けて外部との熱のやり取りを断たなければならないが、本研究では液体窒素とノベック7100という -100 度でも凍らず透明な冷媒を用いて設計した。またPMTからのBGを低減させるために、波長変換材を蒸着したアクリル容器をPMTから遠ざけシンチレーション光を測定できるシステムを開発した(図4)。



図4, PMTを遠ざけたシンチレーション光測定器

4. 研究成果

(1) アクリルに波長変換材を蒸着した容器に液体キセノンを導入するため、液体窒素とノベック7100を用いて、アクリル容器を -100°C まで冷却することに成功した。キセノンを導入し、 γ 線を外から照射し、液体キセノンのシンチレーション光を真空紫外光から可視光領域に波長変換し、PMTで読み出すことに成功した。

(2) シンチレーション光測定器(図4)を開発した。可視光での反射率95%以上あるESR反射シートを測定器の側面に配置し、PMTを40cm液体キセノンの入ったアクリル容器から遠ざけ、600p.e./MeV以上の高い収集光量を実現した。今後PMTの配置を最適化し、さらに収集光量を向上させる。

(3) 検出器表面のバックグラウンドを低減させるためにTPBをプラスチックシンチレータに溶かし込んだ新型プラスチックシンチレータ容器を開発した。今後TPBを溶かし込んだプラスチックシンチレータ容器内に液体キセノンを導入し、収集光量の評価を行う。またBGの評価を行い、将来 $0\nu 2\beta$ 探索、宇宙暗黒物質探索、pp太陽ニュートリノ観測のために極低バックグラウンド化を達成できるか評価を行っていく。

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 6件)

- ①, Search for solar axions in XMASS, a large liquid-xenon detector
K. Abe, K. Hieda, ...K. Ueshima, ... 47人中17番目
Physics Letters B 査読あり 724 (2013) P46-50
DOI:10.1016/j.physletb.2013.05.060
- ②, XMASS detector K. Abe, K. Hieda, ...K. Ueshima, ... 47人中17番目
Nucl. Instru. and Methods A 査読あり 716 (2013) P78-85
DOI:10.1016/j.nima.2013.03.059
- ③, Limit on Neutrinoless $\beta\beta$ Decay of ^{136}Xe from the First Phase of KamLAND-Zen and Comparison with the Positive Claim in ^{76}Ge
A. Gando, Y. Gando, ...K. Ueshima, ... 39人中20番目
Physical Review Letters 査読あり 110 062502(2013)
DOI:10.1103/PhysRevLett.110.062502,
- ④, Light WIMP search in XMASS K. Abe, K. Hieda, ...K. Ueshima, ... 47人中17番目
Physics Letters B 査読あり 719 (2013) P78-82
DOI:10.1016/j.physletb.2013.01.001
- ⑤, Limits on Majoron-emitting double- β decays of ^{136}Xe in the KamLAND-Zen experiment A. Gando, Y. Gando, ...K. Ueshima, ... 39人中20番目
Physical Review C 査読あり 86 021601-4(R) (2012)
DOI:10.1103/PhysRevC.86.021601
- ⑥, Measurement of the double- β decay half-life of ^{136}Xe with KamLAND-Zen experiment A. Gando, Y. Gando, ...K. Ueshima, ... 39人中20番目 Physical Review C

査読あり 85 054404 (2012)

DOI:10.1103/PhysRevC.85.045504

〔学会発表〕(計 2 件)

1, K.Ueshima KamLAND and KamLAND-Zen results REN050
2013年6月13日-6月14日 Seoul Korea

2, K.Ueshima Purification system of KamLAND-Zen experiment (poster)
Neutrino2012 2012年6月3日-6月9日
Kyoto Japan

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上島 考太 (Ueshima Kota)
東北大学・ニュートリノ科学研究センター・
助教
研究者番号：80605379

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研

()

研究者番号：