

平成 29 年 5 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26707009

研究課題名(和文) 希ガスを用いた超低バックグラウンド多目的検出器の研究開発

研究課題名(英文) R&D for the ultra low BG multipurpose detector using noble gas

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) 15,500,000円

研究成果の概要(和文)：キセノンを用いたニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊探索、希ガスを用いた暗黒物質探索、pp太陽ニュートリノ観測が行える多目的検出器の研究開発を行った。TPB波長変換剤を溶かし込んだプラスチックシンチレータ容器を開発し、液体キセノンのシンチレーション光を可視光に変換して光電子増倍管で読み出す事に成功した。プラスチックシンチレータと液体キセノンの発光波形の違いを利用して超低バックグラウンド化が可能であることを実証した。

研究成果の概要(英文)：R&D for the multipurpose detector for neutrino less double beta decay using xenon, dark mater search using noble gas, and pp solar neutrinos observation was performed. The plastic scintillator vessel in which TPB wavelength shifter was melted was developed. The wavelength shifted scintillation light of liquid xenon was detected using photomultiplier tubes. It has been demonstrated that ultra-low background can be achieved by utilizing the difference in emission waveform between plastic scintillator and liquid xenon.

研究分野：ニュートリノ物理学、暗黒物質探索

キーワード：二重ベータ崩壊探索 希ガス 暗黒物質探索 シンチレーション光

1. 研究開始当初の背景

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、ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊($0\nu 2\beta$)探索が開始された。約 300kg の二重ベータ崩壊核であるキセノン 136 を 3wt%液体シンチレータに溶かしこみ探索を開始した。極低放射能環境であるカムランドの中心を利用することで、極低バックグラウンドでの $0\nu 2\beta$ 探索が可能となる。

しかし、カムランドのエネルギー分解能はキセノン 136 の Q 値付近で約 4%(RMS)と悪く、将来通常のニュートリノを放出する二重ベータ崩壊($2\nu 2\beta$)のバックグラウンドが問題となってくる。また有機液体シンチレータを用いるため、宇宙線ミュオンにより生成される 10C がバックグラウンドとなる。

およそ 8 ヶ月の探索により世界最高感度を達成し、半減期 1.9×10^{25} 年以上という下限値を得た。

カムランド禅の 1st Phase では放射性銀の影響で探索感度が想定していた値よりも悪い結果であったが、液体シンチレータ、およびキセノンの純化が完了し、再度キセノンを液体シンチレータに溶かして探索を再開させた。

2. 研究の目的

将来 $0\nu 2\beta$ の探索感度を制限する宇宙線ミュオン起源の 10C を減らし、 $2\nu 2\beta$ のバックグラウンドを低減させるためにエネルギー分解能を向上させる基礎研究を行う。

本研究では液体シンチレータにキセノンを溶かすのではなく、キセノンを液体にし、キセノンのみを使って $0\nu 2\beta$ 探索を行う。液体キセノンを用いることで、有機液体シンチレータには含まれる炭素がなくなり、10C のバックグラウンドを大幅に低減できる。また液体キセノンの発光量は、カムランド液体シンチレータと比べて約 6 倍の発光量があり、収集光量を向上させることで、エネルギー分解能の向上につながり、 $2\nu 2\beta$ のバックグラウンドを低減できる。

キセノンの発光波長は真空紫外線でカムランドの中心にセットし、光電子増倍管で読み出すには可視光に変換する必要がある。 $0\nu 2\beta$ 探索ではエネルギー付加による不感領域が存在すると、 214Bi のバックグラウンドが増大する。カムランド禅実験で使用している厚さ $25\mu\text{m}$ のミニバルーンフィルムですら 214Po の α 線がフィルム内で止まってしまい、 Bi-Po の連続崩壊のイベントをタグすることができず、 214Bi が $0\nu 2\beta$ 探索の主要なバックグラウンドとなっている。

本研究では波長変換効率の良いテトラフェニルプタジエン (TPB) 波長変換剤をプラスチックシンチレータに溶かしこみ、液体キセノンを導入する容器を開発する。TPB 波長変換剤を溶かし込んだプラスチックシンチレータ容器を用いることで、キセノンのシンチレ

ーション光は高効率で可視光に変換され、また液体キセノンの周りにエネルギー付加による不感領域がなくなり、 214Po の α 線をタグすることで、 214Bi のバックグラウンドも低減できる。

さらに TPB を溶かし込んだプラスチックシンチレータ容器を開発することで、キセノンだけでなく、同じ希ガスのアルゴンやネオンを容器内に導入し、同じプラスチックシンチレータ容器を用いて暗黒物質探索や pp 太陽ニュートリノ観測が行える多目的な検出器へと発展させることができる。

3. 研究の方法

(1) TPB 波長変換剤を溶かし込んだプラスチックシンチレータ容器の開発

液体キセノンは通常 -100°C で導入されるため、 -100°C の低温でも問題なく取り扱える必要がある。また液体キセノンのシンチレーション光は水、酸素等の不純物があると大幅に減衰してしまう。液体キセノンを導入する前にプラスチックシンチレータ容器内を高真空な状態に保つ必要がある。

(2) 波長変換したシンチレーション光の測定、波形弁別の研究

開発したプラスチックシンチレータ容器に液体キセノンを導入し、真空紫外線のシンチレーション光を可視光に波長変換し、光電子増倍管で読み出す。

また波長変換した液体キセノンのシンチレーション光とプラスチックシンチレータのシンチレーション光の波形の違いを利用してバックグラウンドを低減できるか波形弁別の研究を行った。

(3) 大型クライオスタットの開発

直径 20cm の大型プラスチックシンチレータ容器を導入する大型クライオスタットを開発する。液体キセノンは通常 -100 度の低温で取り扱われるため、カムランドに導入する際には断熱真空層が必要になる。可視光に変換したシンチレーション光を検出するためには透明な断熱真空容器を開発する必要がある。

(4) 液体シンチレータの耐性試験評価

プラスチックシンチレータ容器をカムランド中心にセットするには、耐有機溶剤特性が必須である。次期カムランド 2 計画では液体シンチレータとして高発光量なリニアアルキルベンゼン (LAB) を採用する予定で、プラスチックシンチレータ容器の液体シンチレータ耐性試験を行い、問題がある場合は対策を講じる。

(5) プラスチックシンチレータ容器の内部 BG の評価

U/Th 等の放射性不純物がプラスチックシンチレータ容器内部に混入していると $0\nu 2\beta$ 探索の感度を制限してしまう。U/Th 等の放射性不純物がどの程度内部に含まれているか評価し、低減方法を検討する。

4. 研究成果

(1) TPB を 3wt% 溶かし込んだプラスチックシンチレータ容器の開発に成功した。(図 1 左) また将来大型化に向けて直径 20cm のプラスチックシンチレータ容器を開発した。(図 1 右)

キセノン導入前に 10^{-3} Pa 程度まで真空引きでき、真空状態でも問題なく取り扱える事を確認した。

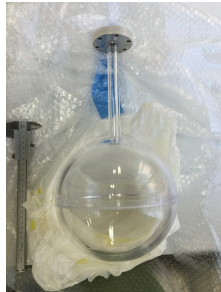
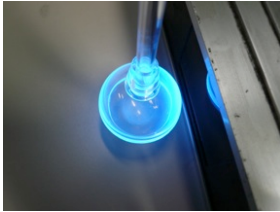


図 1, TPB を溶かし込んだ小型プラスチックシンチレータ容器 (左) と大型プラスチックシンチレータ容器 (右)

(2) TPB を溶かし込んだプラスチックシンチレータ容器に -100°C の液体キセノンを導入し、キセノンのシンチレーション光を可視光に変換して、光電子増倍管で読み出す事に成功した。(図 2)

またプラスチックシンチレータのシンチレーション光と波長変換した液体キセノンのシンチレーション光の波形が大幅に違う事を実証し、波形弁別を用いて $0\nu 2\beta$ 探索のバックグラウンドを低減できる事を示した。(図 3)

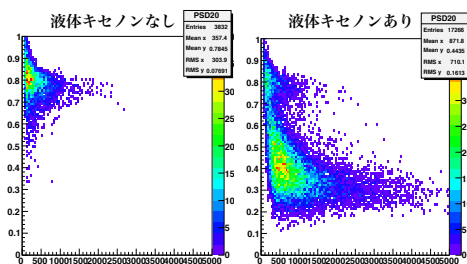


図 2, 液体キセノン導入前後の光電子増倍管で検出した波形情報、縦軸は波形の違いを示すパラメータ、横軸は charge 量

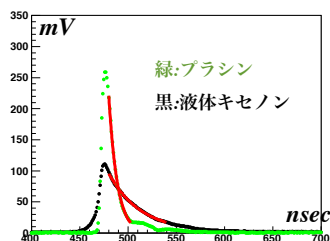


図 3, 波長変換した液体キセノンのシンチレーション光とプラスチックシンチレータのシンチレーション光の違い (同 charge 量で比較)

(3) 直径 20cm のプラスチックシンチレータ容器と透明な断熱真空層を設けた大型クライオスタットの開発に成功した。(図 4)

キセノンを用いた $0\nu 2\beta$ 探索だけでなく、アルゴン、ネオンをプラスチックシンチレータ容器に導入し、宇宙暗黒物質探索や pp 太陽ニュートリノ観測など多目的な検出器へと発展できることを示すため、液体ネオン温度 -250°C まで冷却できるクライオスタットを開発した。約 7K まで冷やすことができ、液体ネオン温度 -250°C で 15W 程度の液化能力のあるクライオスタットの開発に成功した。

今後アルゴン、ネオンを直径 20cm の大型プラスチックシンチレータ容器に導入し、液体アルゴン、液体ネオンのシンチレーション光を可視光に波長変換し、光電子増倍管で読み出し、暗黒物質探索や pp 太陽ニュートリノ観測が行える多目的検出器化への研究を行う。

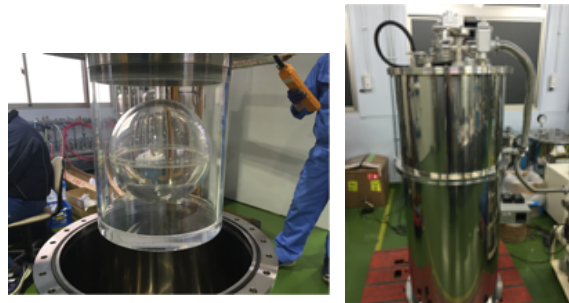


図 4, 直径 20cm のプラスチックシンチレータ容器と透明な断熱真空層を伴う大型クライオスタット

(4) プラスチックシンチレータを LAB に浸し恒温槽で耐有機溶剤試験を行ったところ、プラスチックシンチレータが LAB に溶け出した。カムランド検出器中心にプラスチックシンチレータ容器を導入するためには、エネルギー付加による不感領域を無くし、耐有機溶剤性も担保するために薄い発光性のフィルムでプラスチックシンチレータ容器外側をコーティングする必要があると判明した。すでに耐有機溶剤性を持った薄い発光フィルムは開発されており、耐有機溶剤性を持ったプラスチックシンチレータ容器開発の目処は立っている。

(5) プラスチックシンチレータ容器の内部放射性不純物の分析を ICP-MS を用いて行った。U/Th 量はプラスチックシンチレータを分析前に洗浄しない状態で U 量 12ppt、Th 量 28ppt と有現値であったが、希硝酸及び超純水でプラスチックシンチレータを洗浄した結果、U/Th 量とも ICP-MS の測定限界である 5ppt 以下まで低減することに成功した。この結果、U/Th の放射性不純物は、プラスチックシンチレータ表面に付着したものが主要なものであると分かり、プラスチックシンチレータ内部に含まれるものは ICP-MS の測定限界以下であることが判明した。高感度での $0\nu 2\beta$ 探索

を行うには U/Th 量を ppq レベル以下まで低減させる必要があり、今後さらに感度を向上させた U/Th 量の評価を行っていく。

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 0 件)

[学会発表] (計 7 件)

① 上島考太 高圧液体キセノンを用いた $0\nu 2\beta$ 探索の基礎研究
宇宙をひもとく地下素粒子原子核研究 2017 領域研究会 2017 年 5 月 21 日
岡山大学 (岡山県岡山市)

② K.Ueshima KamLAND-Zen results and purification methods
XeSAT2017 2017 年 4 月 5 日
Khon Kaen (Thailand)

③ 上島考太 高圧液体キセノンを用いた $0\nu 2\beta$ 探索の基礎研究
第 3 回極低放射能技術研究会
2017 年 2 月 20 日 流葉山荘(岐阜県飛騨市)

④ K.Ueshima Results and Prospects from KamLAND-Zen
6th International Symposium on Symmetries in Subatomic Physics
2015 年 6 月 12 日 Victoria (Canada)

⑤ 上島考太 高圧液体キセノンを用いた $0\nu 2\beta$ 探索の基礎研究
宇宙をひもとく地下素粒子原子核研究領域研究会
2015 年 5 月 16 日 神戸大学(兵庫県神戸市)

⑥ K.Ueshima KamLAND-Zen Purification Methods and R&D
Advances in Neutrino Technology 2014
2014 年 9 月 23 日 Los Angeles (USA)

⑦ K.Ueshima Status of KamLAND-Zen and purification methods
Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014
2014 年 6 月 5 日 Amsterdam (Nederland)

[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) 連携研究者 ()

研究者番号：

(4) 研究協力者 ()