

令和元年6月18日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05370

研究課題名(和文) 大型液体キセノン検出器における効率的バックグラウンド削減のための充填液体の研究

研究課題名(英文) Study of Filled Liquid for Efficient Background Reduction in Large Volume Liquid Xenon Detector

研究代表者

小川 洋 (OGAWA, Hiroshi)

日本大学・理工学部・助手

研究者番号：20374910

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：次期またはそれ以降の暗黒物質探索実験において、感度向上のための手法を用意しておきたい。手法の一つとして、検出器表面付近を液体の充填液体によって満たし、暗黒物質からの事象の反応する液体キセノン領域と分ける。これにより検出器表面からのバックグラウンド事象を、有効体積内事象として間違われるのを防ぎ、暗黒物質探索の感度が上がることが期待される。この充填液体は、真空紫外光を透過することと、液体キセノン温度(-100℃)において液体であること、耐物性、低バックグラウンドなのが要求される。本研究はこの充填液体の選定と、性能の評価を実施する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

液体キセノンは低バックグラウンド実験において、シンチレータとして、暗黒物質探索だけでなく、太陽ニュートリノ観測、0 $\nu\beta\beta$ 探索にも大変有望なものであり、将来における大型化が必要不可欠である。よって、本研究は、“想定外”のバックグラウンド事象をコントロールしつつ、大型化のために有用な研究である。

研究成果の概要(英文)：I would like to prepare a method to improve sensitivity in the next or subsequent dark matter search experiment. One approach is to fill the vicinity of the detector surface with a liquid fill liquid and separate it from the liquid xenon area which the event from the dark matter responds to. This is expected to prevent background events from the detector surface from being mistaken as fiducial volume events and to improve the sensitivity of the dark resource search. This filling liquid is required to transmit vacuum ultraviolet light, to be liquid at liquid xenon temperature (-100 deg), to be resistant to physical properties, and to have low background. This study will carry out the selection of this filling liquid and the evaluation of its performance.

研究分野：素粒子・原子核物理実験

キーワード：暗黒物質探索 光検出器 低温物性 極低放射能技術

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

液体キセノンは、暗黒物質探索など、低エネルギー、超低バックグラウンド実験用シンチレータとして広く用いられている。XMASS実験はおよそ1tonの液体キセノンをを用いたシンチレーション検出器により、暗黒物質探索を行う。装置の絵を図1(左)に示す。暗黒物質がキセノン原子核と弾性散乱を起こしたときの反跳エネルギーによって生じるシンチレーション光を光電子増倍管(PMT)で検出する。本実験では、大容量のキセノン(有効体積で100kg)にすることで暗黒物質の標的となる物質を増やし、キセノン自身の大きい原子数( $Z=54$ )を利用した“自己遮蔽効果”により外部からの環境バックグラウンドを低減させている。もし、内部バックグラウンドを $1 \times 10^{-4}/\text{day}/\text{kg}/\text{keV}$ を達成出来れば、XMASS実験で期待される暗黒物質探索感度として、WIMPsと核子の断面積にして $\sim 2 \times 10^{-46}\text{cm}^2$ (WIMPs質量 $100\text{GeV}/c^2$ として)の検出感度が期待される。

XMASS実験は、2010年10月より開始され、2013年の改造を経て、2019年2月で実験を完了した。ここで、検出器表面に予期せぬ放射性不純物からのバックグラウンドが存在することがわかった。解析では、PMTで検出された光量分布によって位置事象再構成をすることで、有効体積外の事象を除去する。解析によって、暗黒物質探索のエネルギー領域(2-30keV)におけるバックグラウンド事象の起源について主に以下のことが分かってきた。

1) 液体キセノン中に溶存する放射性不純物からの崩壊による低エネルギー線。Rn222, Kr85など。これらはキセノンの純化による低減が可能となる。Rn222については、検出器材料のラドン放出量を測定することによる選定や、除去技術の改良をおこなっている。

2) 検出器表面に存在する放射性不純物(主にPb210)からの事象が、間違っって有効体積内に位置事象再構成されてしまうもの(以下、表面漏れ事象と呼ぶ)。XMASS実験では、PMTを直接液体キセノン中に配置している。図1(右)のように、液体キセノンのシンチレーション光は、PMTの死角で起こった事象でも発光してしまうため、光量分布が有効体積内で起こった事象に似てしまう。この表面漏れ事象は、検出器表面部材の状態や、非常に微細(数~数 $10\mu\text{m}$ )な隙間や構造により、光量分布パターンや頻度が大きく変わってしまう。このことは暗黒物質探索におけるバックグラウンドの評価、削減に多大な支障をきたすことから、検出器構造の改良が必要とされる。

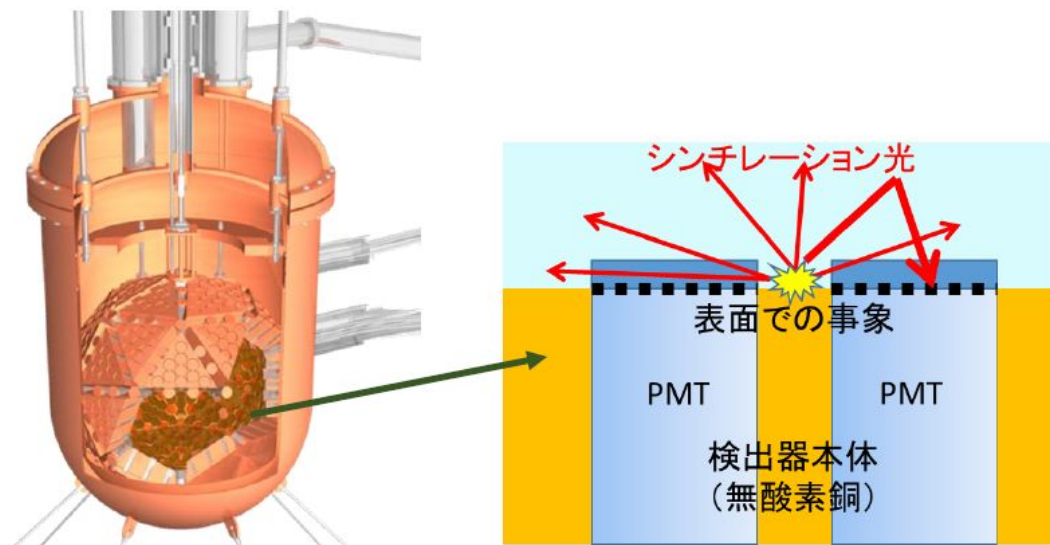


図1: 左: XMASS 検出器の概略、右: 表面漏れ事象になる例。

### 2. 研究の目的

本研究では、暗黒物質探索の高感度化のために、上記の問題を解決するアイデアとして、PMTと液体キセノン領域を分け、PMT周辺を充填液体で埋め、シンチレーション光の不感度領域とすることで、表面起源事象そのものをなくした検出器アイデアを検討するのを目標とする。

図2に、本研究用液体キセノン検出器の概略を示す。液体キセノンは石英デュアー(真空紫外光を通す)で保持されている。その周りには充填液体で満たされており、PMTは充填液体中に配置されることになる。ここで検出器表面での事象が起こっても、シンチレーション光は発生せず(チェレンコフ光は発生するが、解析的に除去可能である)表面漏れ事象にはなりえない。液体キセノン領域に着目すると、PMTの光検出における死角となる構造はない。石英デュアー、充填液体の光学特性を理解していれば、検出器表面構造によらない位置事象再構成ができる。また、この技術は将来における10トンクラスの液体キセノン検出器のような、検出器表面部のコントロールが困難になると考えられる場合にも対応可能である。

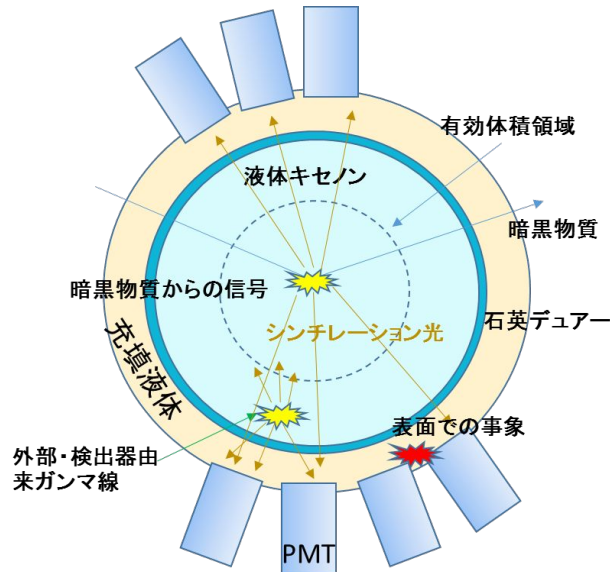


図 2：本研究用液体キセノン検出器の概略

### 3. 研究の方法

まず、本研究の課題である、表面漏れ事象の XMASS 検出器における定量的な評価を、暗黒物質探索解析において実施する。

一方、充填液体の選定条件は以下の 4 つになる。検証方法と共に示す。

- 1) 真空紫外光を透過すること。
- 2) 液体キセノン温度 -100 での液体であること。
- 3) 検出器部材からの溶け出しがないこと。
- 4) 放射性不純物が少ないこと。

特に重要なのが 1) である。真空紫外光は、酸素、窒素をはじめ多くの物質で吸収が起こり、透過のための部材は石英などに限られる。しかし n-フルオロカーボン n-fluorocarbon については、不純物として含まれる炭化水素基などをモリキュラーシーブス、活性炭などで除去する“純化”を行えば、真空紫外光の透過も十分可能であることが示されている (E. Albrecht et al NIM A 510 (2003) 262-272、以下 E. Albrecht et al)。

本研究では、冷媒としてよく使われるフロリナート®3M を充填液体の候補として挙げる。特に 1) について、真空紫外光レーザー及び透過率測定器のセットアップを作り、透過率の測定を試みる。

図 3 に、実験装置の全体図を示す。透過率測定は測定チェンバーにフロリナートを入

れることで行う。フロリナートは、液送ポンプによって循環が可能であり、ゼオライトフィルターを用いて純化をすることができる。ゼオライトとしては、モリキュラーシーブス 5A を用意した。測定チェンバーの上部は、液相のバッファーとなっている。系は真空引き及び窒素パージ、窒素によるバブリングでの純化が可能になっている。

図 4 に、測定チェンバーの概略を示す。真空紫外光源としては、浜松フォトニクス社の L10366 を用意した。また、透過率測定用の分光器としては、オーシャンフォトニクス社製 MAYA2000PRO を用いた。これは、深紫外光に感度を持つようにカスタマイズをされている。レーザー光源および分光器の空間部分は、真空紫外光を吸収しないようにするために常時窒素によるパージを実施する。レーザー照射および、透過窓として、真空紫外光を透過できる CaF<sub>2</sub> 窓を設置した。

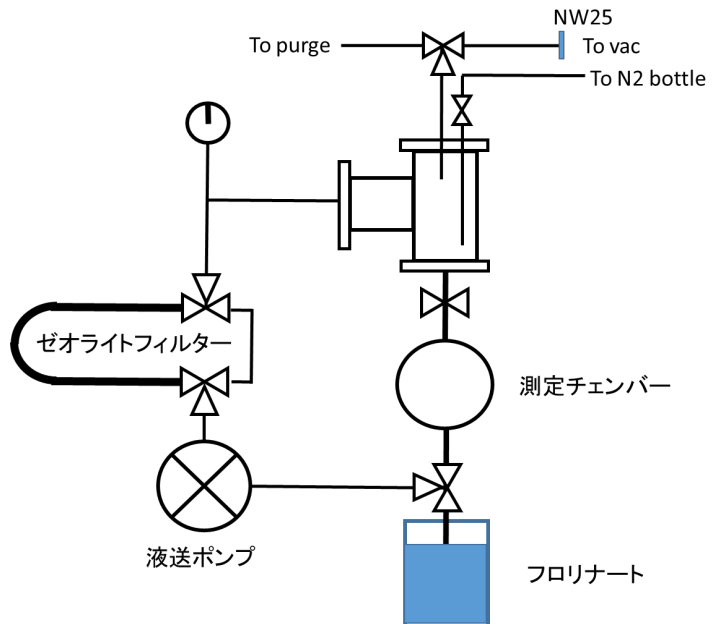


図 3：実験装置全体の概略

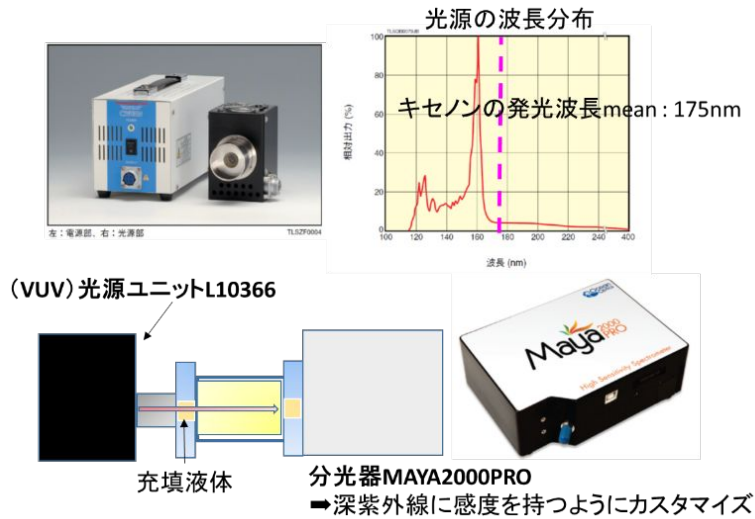


図4 測定チェンバーの概略

#### 4. 研究成果

まず、XMASS検出器における有効体積内部に残るバックグラウンドの評価を行った。図5に有効体積内に残ると期待される事象のエネルギー分布を、バックグラウンドの起源ごとと、系統誤差付きで示した。この検出器シミュレーションによると、表面バックグラウンド事象のおよそ5%が表面漏れ事象となってしまう、現在のXMASS実験において予想される有効体積内バックグラウンドの90%以上を占めると考えられている。また、系統誤差についても、ほとんどが、表面の状態に起源を持つものと分かった。以上のことから、表面漏れ事象を削減するだけで、バックグラウンドが1/10になることを示し、暗黒物質探索において、大きな感度向上が見込まれる。

また、図3, 4で示した実験装置の開発をした。図6にその写真を載せる。測定チェンバー、ゼオライトフィルター、バッファは、アルミフレームにより固定した上で、ステンレス配管とバルブとつながれている。レーザー照射、分光器の動作チェックは実施されており、実験の為のセットアップは完了している。今後は、このセットアップを用いて、充填液体候補の透過率測定と、純化の試み等を実施する予定となっている。

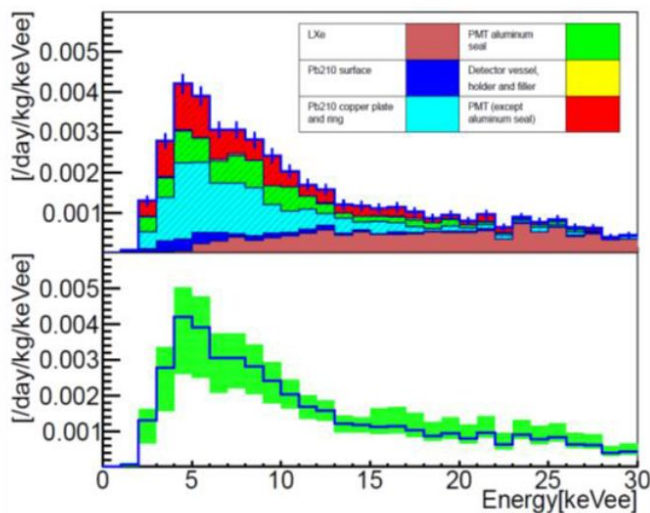


図5:シミュレーションによる、XMASSにおける有効体積内の事象のエネルギー分布。上がバックグラウンド起源ごとのエネルギー分布となる。茶色が内部起源のバックグラウンドで、他が表面漏れ事象となる。下の緑のバンドが系統誤差の合計となる。



図6:実験装置の写真



## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

K.Abe,... H.Ogawa... et. al.( XMASS collaboration 計41名 ) A direct dark matter search in XMASS-I, Phys. Lett. B 789 , 2016, 45-53 査読有

Hiroshi. Ogawa, Search for WIMPs with background evaluation in a fiducial volume by XMASS-I PoS ICRC2017 (2018) 888 Talk at "ICRC2017" Korea, July 12-20, 2017 BEXCO, BUSAN, KOREA, 査読なし

〔学会発表〕(計4件)

小川 洋 “液体キセノンを用いた暗黒物質探索の結果と、探索感度向上の研究”、日本大学学部連携ポスターセッション、2018年7月

小川 洋 “XMASS実験：有効体積解析による暗黒物質探索の為のバックグラウンドの評価” 2017年9月、日本物理学会2017年秋季大会

Hiroshi Ogawa ” Search for WIMPs with background evaluation in a fiducial volume by XMASS-I”, 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017) July 12-20, 2017 BEXCO, BUSAN, KOREA

小川 洋 “XMASS実験：有効体積解析による暗黒物質探索の為の系統誤差の評価” 2017年3月、日本物理学会第72回年次大会

## 6 . 研究組織

該当なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。