

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2017

課題番号：25707015

研究課題名（和文）液体キセノン中の電荷増幅を用いた暗黒物質探索

研究課題名（英文）Dark matter search using charge amplification signal in liquid xenon

## 研究代表者

関谷 洋之（Sekiya, Hiroyuki）

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：90402768

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 18,700,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙には暗黒物質と呼ばれる未知の素粒子があることが数多くの観測から示唆されているが、その正体は全く分かっていない。暗黒物質を捉えるにはキセノンを用いると有利であり、世界最高感度で暗黒物質探索を行っている実験はすべて液体キセノンを用い、そこで発生する電子を上部のガスキセノンの領域まで電場によりドリフトさせ増幅して捉える方式を採用している。本研究は液体キセノンだけを用いて、発生した電子も液体キセノン中で信号増幅して捉えることで、暗黒物質探索の一層の高感度化を図るものである。実際に研究期間内の開発で、実液体キセノン中での電子増幅の発生に成功し、将来の大型化のため特殊な電極の開発を開始した。

研究成果の概要（英文）：Many observations suggest that elementary particles called dark matter exist in the universe, but their identities are completely unknown. It is advantageous to use xenon to detect dark matter, and all the world leading experiments that are searching for dark matter use dual phase xenon detectors. In such detectors, electrons generated by elementary particles there are drifted by the electric field to the region of the upper gas xenon, and are amplified. While, this study aims at further increasing the sensitivity of dark matter search by using only liquid xenon. We succeeded in generating electron amplification in liquid xenon during the research period and has begun developing special electrodes for future large scale detector.

研究分野：宇宙素粒子実験

キーワード：暗黒物質 キセノン 電荷増幅 素粒子実験 宇宙線

## 1. 研究開始当初の背景

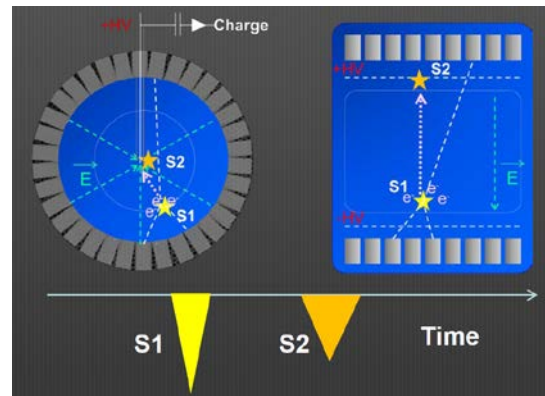
(1) 宇宙のエネルギー密度の 22% を占める暗黒物質の存在は、宇宙観測によって明白になっている。そのため検出器中の原子核反跳によって暗黒物質を直接捕えようとする実験が数多く行われ、激しい国際競争がなされている。特に DAMA/LIBRA グループが GeV 程度の低質量領域での暗黒物質検出の可能性を報告する一方、XENON、LUX 等のグループがほぼ否定する結果を報告しており、これらを検証することが非常に重要になっている。

(2) キセノンは発光量の多い液体シンチレーターとして大質量用意できるだけでなく、暗黒物質との断面積が大きいことから、暗黒物質探索に有利である。さらに電離が原子核反跳による場合とバックグラウンドとなる  $\gamma$  線や  $\beta$  線による場合で、液体中で発生する電子の量が異なることから、粒子識別によるバックグラウンド除去ができる。これには右図のように、液相に加えガス相の二相からなるキセノンを用意し、液中でシンチレーション光(S1)を発生した電子を電場によりガス相までドリフトさせて、ガス中の高い電場による電荷増幅で二次シンチレーション光(S2)を発生させ、S1/S2 の比から粒子識別する手法が広く用いられている。

一方、この二相検出器は構造が複雑になり、検出器自体に含まれる放射性不純物を極限まで低減するという暗黒物質探索の基本を追及しにくい。そこで研究代表者らは液相を光電子増倍管(PMT)で覆うだけの単純な一相検出器にして粒子識別を行わない代わりに検出器構成要素の低バックグラウンド化を推し進めた「XMASS」実験を行っている。そしてキセノン自体を遮蔽材として検出器中心部分のみを選ぶ自己遮蔽の手法により感度向上を目指してきた。しかし、PMT の情報(光量、タイミング)だけからの三次元位置再構成では、PMT 付近の検出器表面で起きた低エネルギーイベントを中心部分に誤って再構成されてしまうイベントが残ってしまうことが判明した。したがって原理的に大幅な感度向上は難しく、次世代の最高感度競争を戦うには、さらなる工夫が必須な状況である。

## 2. 研究の目的

XMASS 検出器に電荷増幅機能を付加することにより、電子のドリフト時間情報からハードウェア的に事象位置を決定できるようにすると同時に、 $\beta$ 、 $\gamma$  線事象と原子核反跳事象を弁別できるようにする。このことにより、暗黒物質の探索感度の飛躍的な向上を図る。液相でも高電場で電子増幅に伴うシンチレーション光が発生することに着目し、XMASS でこれを実現させる。形状は図の



ように、球状や円筒等を検討する。本研究により、外部からの放射性バックグラウンドを自己遮蔽するという XMASS の強みを生かし、スピンの依存しない相互作用の核子との断面積  $10^{-46} \text{cm}^2$  へ迫る感度での暗黒物質探索を目指す。

## 3. 研究の方法

(1) まずワイヤー電極および液中 HV 印加の準備を行う。名古屋大学において、重力マイクロレンズ効果による宇宙観測プロジェクト MOA の大面積 CCD クライオスタットを転用し、液体窒素でキセノンを液化するのに必要な  $-100^\circ\text{C}$  以下まで冷却できる装置の開発を実施する。また、本研究の検出器開発には電場計算、熱計算など、有限要素法を用いたシミュレーションが欠かせないため、Femtet を用いたシミュレーションを効果的に使用して検出器デザインを進める。

(2) パルスチューブ冷凍機を用いたキセノン液化システムの構築を行う。キセノン回収システムおよびゲッターポンプによるキセノンの純化システムの構築も同時に行い、繰り返し実験を行うテストベンチ環境を整える。また低温でキセノンの発光波長を捉えられる光電子増倍管の開発を行う。

(3) 液体キセノン中での電子ドリフトの基礎特性を調べるため、容易に高電圧を印加するための電極としてガラス製の Gas Electron Multiplier (GEM) を新規に開発し検出器へ導入する。電場シミュレーションを行っており、上記 GEM 周辺の電場構造を確認する。

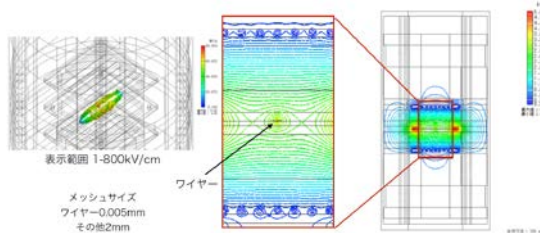
(4) S2 の発生を検証するために、ワイヤー電極による高電圧印加を行う。シミュレーションを元に製作し、アルゴンガス中で動作させ、パラメーターの最適化をシミュレーションの検証とともに行ったのち、液体キセノンテストベンチへ導入する。

(5) XMASS へ導入するために電極を設計し、テストベンチへ導入して S2 の検証を行う。実機導入のために必要なシミュレーションを進め、実際に必要な電極を実現する。

#### 4. 研究成果

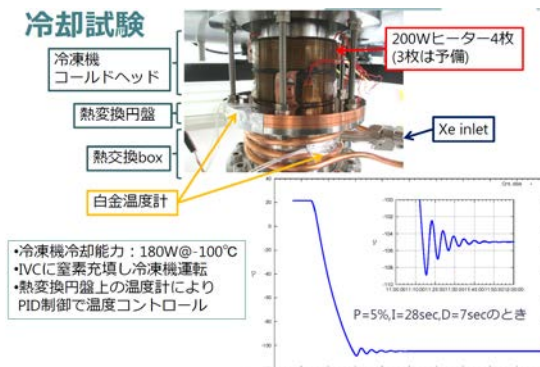
##### (1) シミュレーションによる電極および電場設計手法の確立

液中に高電場を印加するためには放電対策と共に、電場構造を把握しデザインすることが必須であり、そのために Femtet を用いた電場構造計算の手法を確立した。また、MOA クライオスタットを転用したセットアップを用いてワイヤー電極の実装を行い、 $10\mu\text{m}$ 以下のワイヤーは扱わず、液体キセノン中でも使用可能な高真空用半田で固定することが難しいことを確認した。そのため、以降  $10\mu\text{m}$  のアノードワイヤーを用いることとした。下図は真空チェンバー中で  $10\mu\text{m}$  ワイヤーに  $5\text{kV}$  印加した際の電場を示す。



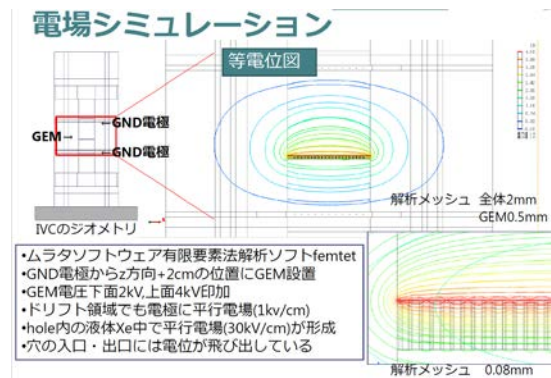
##### (2) パルスチューブ冷凍機を用いた液体キセノンテストベンチの構築

神岡の地上実験施設においてキセノン液化、キセノン回収システムおよびゲッターポンプによるキセノンの純化システムの構築も同時に行い、繰り返し実験を行う環境を整えた。光電子増倍管による S1・S2 が観測できる検出器を完成させた。光電子増倍管自体は、MEG 実験で用いられていたものをベースに +HV 仕様のブリーダー回路と合わせて新規に開発した。下図に作成したテストベンチにおいて PID 制御を行い  $-105^\circ\text{C}$  でキセノンを液化して検出器を安定に運転した際の温度データを示す。約  $500\text{cc}$  の液体キセノンを検出器に導入し、 $0.016\text{MPa}$ 、 $-106.1^\circ\text{C}$  で 2 日間以上保持することができた。このキセノンの状態で  $^{241}\text{Am}$  線源からの  $59.5\text{keV}$   $\gamma$  線を用いて S1 光量を測定したところ、 $8\text{p.e./keV}$  と求められた。これは XMASS 検出器とほぼ同等な値である



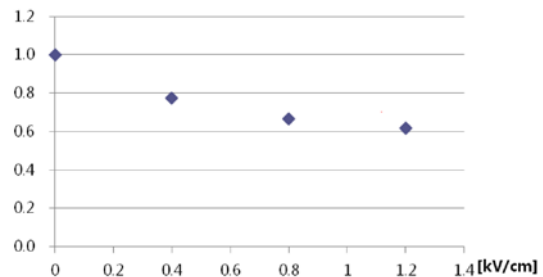
##### (3) GlassGEM 導入による電子ドリフトの検証

液体キセノンで発光量を低減させる不純物の溶出を気にせず高電場を印加できる電極として、ガラス製の GEM (Gas Electron Multiplier) を HOYA 株式会社の協力で開発した。 $30\text{mm}$  角で  $170\mu\text{m}$  の穴が  $280\mu\text{m}$  のピッチで開いている。厚みは  $680\mu\text{m}$  であり、いわゆる Thick GEM の範疇に含まれるものである。まず電子をドリフトさせ、TPC (Time Projection Chamber) として動作の検証としてテストベンチに導入した。 $2\text{kV}$  の電圧を印加する場合のシミュレーション結果を以下に示す。



そして、GlassGEM 電極に電圧を印加し、 $^{241}\text{Am}$  からの  $5.5\text{MeV}$   $\alpha$  線による S1 光量のドリフト

##### S1光量変化

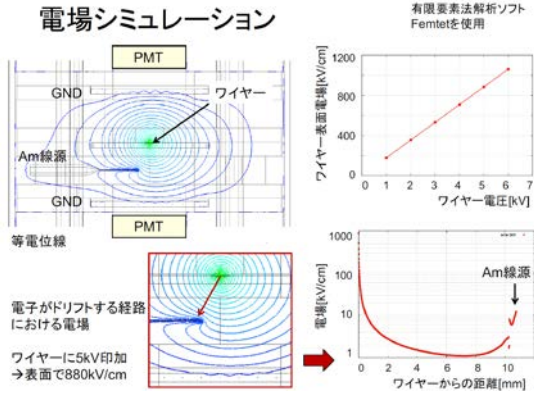


電場依存性を調べた。その結果、を下図に示す。 $1.2\text{kV/cm}$  のドリフト電場に対して、 $40\%$  の S1 光量の低下が観測された。これは先行研究と矛盾のない数値であり、GlassGEM 電極によって液体キセノン中に期待通りのドリフト電場を形成できていることを示す。一方、ドリフト電場を  $0.4\text{kV/cm}$ 、GlassGEM 電極両面間に  $2.5\text{kV}$  の電位差をかけて S2 発光のための電場として  $37\text{kV/cm}$  を形成した状態で S2 発光の測定を試みた。しかしながら S2 の発光は確認できなかった。A. Breskin たちが ThickGEM 電極を用いて電荷増幅を報告していたが、ローカルに存在するガス中で起きていると思われる。液体キセノンの S2 発生のためには一桁程度高い電場が必要であることが改めて確認された。

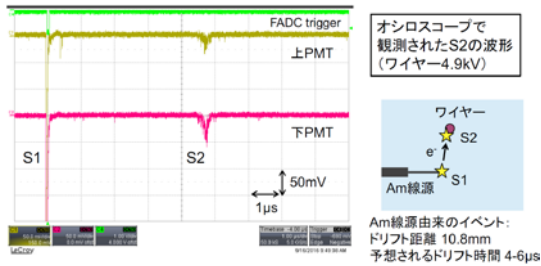


(4)ワイヤー電極による S2 発生の定量的理解

GlassGEM を用いた実験で TPC としての動作は検証できたが、S2 発生のためには更なる高電場を作成する必要があることが判明した。そこで当初の予定通り  $10\mu\text{m}$  の金メッキしたタングステンワイヤーの導入をすすめた。まずシミュレーションにより印加電圧と生成される電場の関係を求めた。

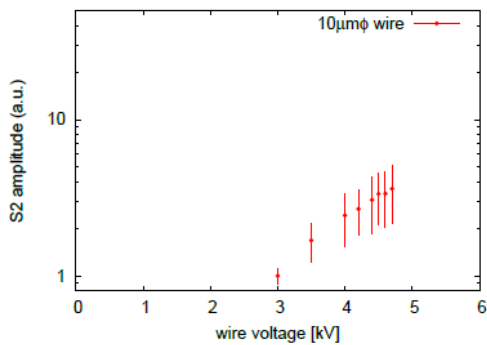


そして、 $^{241}\text{Am}$  線源からの  $\alpha$  線を照射させながら、実際にワイヤーに HV を印加していった。4.9kV を印加した際に観測に成功した S2 のオシロスコープ画面を以下に示す。



電場から予想されるドリフト時間  $5\mu\text{s}$  程度のところにて電荷増幅に伴う比例蛍光が現れていることが確認できる。

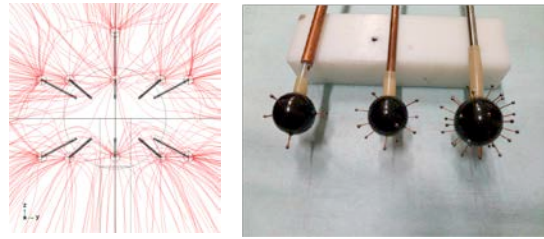
つぎに、電圧を変化させながら S2 の大きさを測定した結果を示す。



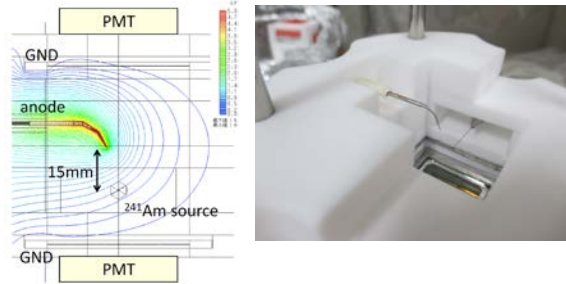
上図から印加電圧 2kV と 3kV の間で S2 が発生し始めることを確認し、ワイヤーの電圧 4.8kV では、S2 閾値での 10 倍以上の光量増加を確認できた。以上から S2 の発生に必要な電場の閾値が約  $400\text{kV/cm}$  であることが確認できた。

(5)針状電極およびウニ針電極の開発

比例蛍光の発生閾値  $400\text{kV/cm}$  を XMASS で実現すること自体は容易であるが、球状の検出器で、40cm の電子のドリフトをさせるだけの電場を作り出すのが難しい。すでに球状のガス検出器でこれを実現している CEA Saclay の Ioannis Giomataris と共同で開発を行うことにした。Saclay では実際の XMASS 検出器と同じ 1m サイズの球状検出器に「ウニ針」電極を導入し、ガス中での電荷増幅と、電場の一様性の最適化を確認している。



研究代表者と I. Giomataris が双方に実験室を訪問して R&D を行った。まず、神岡にて、先端  $150\mu\text{m}$  の針電極を製作し、液体キセノンへ導入し高電圧を印加する実験を行った。



$400\text{kV/cm}$  を実現できる 6kV の高電圧を印加することには成功したが、フィードスルでの放電が発生し安定に測定を継続できなかった。また現状のジオメトリでは針への電子の収集効率が 1%程度しかないことも理解したので、まずは Saclay にてガス中でウニ電極による電子収集の最適化を行うことにした。Saclay では実際の XMASS 検出器と同じ 1m サイズの球状検出器にウニ針電極を試し、ガス中での電荷増幅と、電場の一様性の最適化を確認した。それを神岡の 10cm サイズのテストベンチへスケールして導入するため、先端  $50\mu\text{m}$  と  $80\mu\text{m}$  の針電極を新たに設計、製作した。一方、テストベンチへ外部から  $^{137}\text{Cs}$  などのガンマ線を照射した際の S1 発光での検出器を理解するために XMASS の検出器シミュレーターを応用した photon tracking シミュレーションを行った。その結果液体キセノンの使用量を抑えるためのテフロンスペーサーに存在する空隙に存在するキセノンとのエネルギー損失が大きく、S1 で光電吸収ピークが見えていないことが分かった。今後、テフロンスペーサーを改良し、 $50\mu\text{m}$  のウニ針電極を導入して実験を行う予定である。

## 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 20 件)

①関谷洋之「キセノン TPC、気液 2 相型と液体球状型」日本物理学会第 73 回年次大会 2018 年

②石井瞭「XMASS 実験：暗黒物質探索へ向けた 1 相式液体キセノン TPC テストベンチのシミュレーション」日本物理学会第 73 回年次大会 2018 年

③Kayo Kanzawa “Development of single phase liquid xenon TPCs for future dark matter search” KMI School Nagoya University 2018

④菅澤佳世「暗黒物質探索のための 1 相式液体キセノン TPC の開発, 第 14 回 MPGD 研究会(MPGD2017) 2017 年

⑤菅澤佳世「ワイヤー電極用いた比例蛍光読み出しによる XMASS 実験感度向上のための研究 3, 日本物理学会大会 2017 年秋季大会 2017 年

⑥関谷洋之「XMASS 高度化 液キセノン TPC プロジェクト」, アクティブ媒質 TPC 開発座談会 2017 年

⑦菅澤佳世「XMASS 高度化 液キセノン TPC 技術開発, アクティブ媒質 TPC 開発座談会 2017 年

⑧菅澤佳世「ワイヤー電極用いた比例蛍光読み出しによる XMASS 実験感度向上のための研究 2, 日本物理学会 第 72 回年次大会 2017 年

⑨菅澤佳世「比例蛍光読み出しによる 1 相式液体キセノン TPC の開発」第 13 回 Micro Pattern Gas Detector 研究会 2016 年

⑩Hiroyuki Sekiya “R&D towards spherical LXe TPC”, The 8th international symposium on large TPCs for low-energy rare event detection 2016

⑪菅澤佳世「ワイヤー電極用いた比例蛍光読み出しによる XMASS 実験感度向上のための研究」日本物理学会大会 2016 年秋季大会 2016 年

⑫菅澤佳世「比例蛍光読み出しによる XMASS 実験テストベンチの開発—電極の開発」日本物理学会大会第 70 回年次大会 2016 年

⑬毛笠莉沙子「比例蛍光読み出しによる XMASS 実験テストベンチの開発—GEM による

液相増幅」日本物理学会大会第 70 回年次大会 2016 年

⑭関谷洋之「1 相型液体キセノン TPC による暗黒物質検出器の開発 第 12 回 MPGD 研究会(MPGD2015) 2015 年

⑮毛笠莉沙子「XMASS 実験感度向上のためのテストベンチの開発 2」日本物理学会 2015 年秋季大会 2015 年

⑯関谷洋之「XMASS 高度化 液キセノン TPC」液体 TPC 座談会 KEK 2015 年

⑰毛笠莉沙子「XMASS 実験感度向上のためのテストベンチの開発」日本物理学会第 70 回年次大会 2015 年

⑱関谷洋之「液体キセノン中での電荷増幅を用いた TPC による暗黒物質検出器の開発」日本物理学会第 69 回年次大会 2014 年

⑲Hiroyuki Sekiya “Review of Dark Matter Search with Noble Liquid Detectors and Recent Results from XMASS” Kavli IPMU ACP Seminar 2014

⑳Hiroyuki Sekiya “Quest for dark matter by direct detection experiments with noble liquids” KMI International Symposium 2013

[その他]

学位論文 (計 2 件)

①毛笠莉沙子 修士論文「比例蛍光読み出しによる 1 相式液体キセノン TPC の開発」, 名古屋大学大学院 理学研究科 2016 年 1 月 26 日

②菅澤佳世 修士論文「ワイヤー電極を用いた比例蛍光読み出しによる 1 相式液体キセノン TPC の研究」, 名古屋大学大学院 理学研究科 2017 年 1 月 25 日

ホームページ等

[http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/~sekiya\\_a\\_s/SinglePhaseXeTPC/](http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/~sekiya_a_s/SinglePhaseXeTPC/)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

関谷 洋之 (SEKIYA, Hiroyuki)  
東京大学・宇宙線研究所・准教授  
研究者番号： 90402768

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

伊藤 好孝 (ITOW, Yoshitaka)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授  
研究者番号： 50272521

(4) 研究協力者

毛笠 莉沙子 (KEGASA, Risako)  
菅澤 佳世 (KANZAWA, Kayo)  
石井 瞭 (ISHII, Ryo)