

令和 2 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18777

研究課題名(和文)ガス検出器における陽イオン検出で目指す稀事象探索のブレークスルー

研究課題名(英文)Detection of positive ions in the gas detector to be applied for rare-events searches

研究代表者

市川 温子 (ICHIKAWA, Atsuko)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：50353371

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：荷電粒子がガス中を通過すると電離作用により多数の電子と陽イオンが発生する。この陽イオンを検出することができれば、空間分解能に秀でたキセノンガス・タイムプロジェクション・チェンバーを実現することができる。陽イオンは、そのままでは増幅過程がないため検出されない。しかし、陽イオン電極に到達した際に、電極の仕事関数が陽イオンのイオン化エネルギーよりも小さい場合には数%の確率でガス中に電子が放出されることが知られている。本研究では、電極にワイヤを用い、陽イオン到着の際に放出された電子がエレクトロルミネッセンス光を放出するのを検出することで、陽イオンの検出に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙や素粒子の未解明の問題を解くため、暗黒物質の直接検出やニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊などの探索が行われている。いずれも起きるとしても極端にまれな事象で、今後感度を上げるには背景事象を劇的に抑えることが必須である。背景事象を抑制するために我々は高いエネルギー分解能を持つキセノンガスによる検出器を開発した。さらに、感度を上げるためにはエネルギーの情報に加えて、さらに事象の情報を抽出することが必要である。本研究では、荷電粒子の通過に伴い発生する陽イオンを検出することに成功した。これにより、事象の飛跡パターンを高い分解能で検出することが可能になる。

研究成果の概要(英文)：By detecting positive ions together with electrons produced via ionization by radiation, it becomes possible to realize a xenon gas time projection chamber which has high resolution both for energy and position. Usually positive ions are not detectable because their signal cannot be amplified unlike the case of electrons. We succeeded to detect positive ions by detecting electroluminescence light generated by secondary electrons which are emitted when positive ion arrived at a wire electrode made of low work function metal.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：希ガス検出器 陽イオンの検出

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙や素粒子の未解明の問題を解くため、暗黒物質の直接検出やニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) などの探索が行われている。暗黒物質が何かを理解するためには、その直接検出が切望される。ニュートリノの極端に軽い質量を、ニュートリノが自身の反粒子であるマヨラナ粒子であることを仮定して説明する有力な理論があるが、検証のためには、まずニュートリノがマヨラナ粒子であるかどうかを実験的に決定しなければならず、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊を高い感度で探索することが重要である。いずれも起きるとしても極端にまれな事象で、現行の探索実験では背景事象の混入が深刻な問題となっており、今後感度を上げるには統計を増やすだけでなく背景事象を劇的に抑えることが必須である。

背景事象を抑制するためには高いエネルギー分解能を持つことが有効であり、我々は高いエネルギー分解能を持つキセノンガスによる検出器を開発した。しかし、現存の世界最高レベルの測定感度を超えてさらに一桁以上先を探索するには、背景事象の削減においても突破口が必要である。そのため、エネルギーの情報に加えて、さらに事象の情報を抽出することが必要である。

2. 研究の目的

本研究では $0\nu\beta\beta$ や、暗黒物質による原子核反跳により発生する電離電子とともに陽イオンも検出することでエネルギー分解能に加え空間分解能においても秀でたキセノンガス・タイムプロジェクトン・チェンバーを開発することを目的とする。

$0\nu\beta\beta$ 崩壊では2本の電子が放出され、それぞれ止まりがけに大きな電離信号を出す、という特徴がある。暗黒物質による原子核反跳では、反跳の方向を測ることが有効である。暗黒物質と太陽系の相対運動のため、原子核の反跳方向にバイアスが現れるためである。しかし、キセノンガス中で、電離電子は大きく拡散しながらドリフトしていくため、電離電子の検出により再構成される飛跡のパターンはぼやけたものとなる。一方、電離で生じた陽イオンは、ガス中での拡散は桁違いに小さいと予想され、信号として検出することができれば、暗黒物質探索での原子核反跳の方向の測定や、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊での2本の電子の特徴的な信号を効率よく取り出すことが可能となる。本研究では、通常検出することのできない陽イオンを検出する原理を確立し、電離電子によりエネルギーを高分解能で、陽イオンにより飛跡を高位置分解能で測定することのできる検出器を開発することを目指す。

3. 研究の方法

ガス検出器においては、電離で生成する陽イオンは、通常、電離電子の数百分の一の速さで陰電極までドリフトしていく。増幅過程がないため、信号としては誘起電圧を読み出すしかないが、ドリフト速度が遅いため電気雑音と区別がつかない。しかし、電極の仕事関数が陽イオンのイオン化エネルギーよりも小さい場合には、陽イオンが電極に到達した際に数%の確率でガス中に電子が放出されることが知られている。その際に、電場が十分に大きければ放出された電子が、雪崩増幅や原子の励起等を引き起こすはずである。本研究では、図1のようにキセノンガス中で、ワイヤ電極に負の高電圧をかけることで、陽イオンが電極に到達した際に放出される電子が逆方向に加速され原子を励起、脱励起光を発生する、すなわちエレクトロルミネッセンス過程を起こすと予想し、そのエレクトロルミネッセンス光を信号として読み出す。

具体的には、図2のようにキセノンガス容器中で、ワイヤ電極の上部に電離を起こすためのアルファ線源を設置し、下部にアルファ線によるシンチレーション光および陽イオンが発生する脱励起光を検出するための光電子増倍管を設置する。ワイヤとしては仕事関数の比較的小さいタングステンを用いる。シンチレーション光から遅れてエレクトロルミネッセンス光が観測されるかどうかで、陽イオンによる信号が検出されたかどうかを判断する。

4. 研究成果

図3に示すように、ワイヤに-1500Vをかけた際に

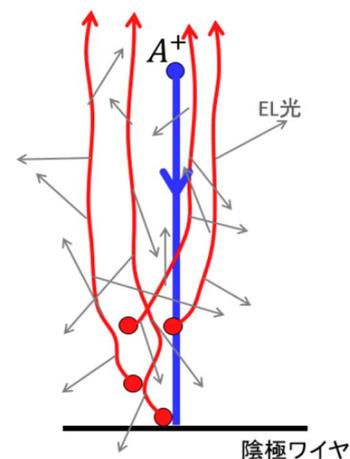


図1 本研究で用いる陽イオンの検出の概念図

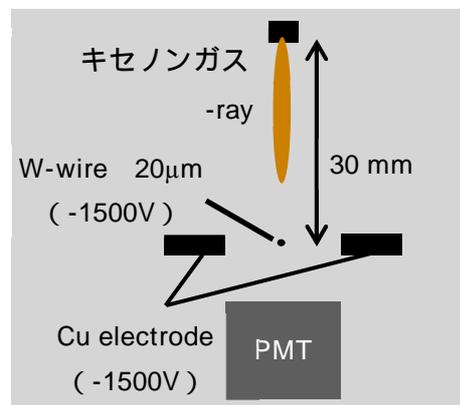


図2: 測定のセットアップ

シンチレーション光から 10 ミリ秒ほど遅れてエレクトロルミネッセンス光が観測された。一方、ワイヤに電圧をかけないときにはこれらの信号は観測されなかった。この光が陽イオンによるものであることを確かめるために、一つのアルファ線で発生する陽イオンができるだけ同時にワイヤ電極に到達するように、アルファ線がワイヤ電極に平行に飛ぶように変更したセットアップで測定を行った。線源とワイヤ電極の距離を変えた測定結果より、陽イオンのドリフト速度は 250 センチメートル/秒であると求められた。キセノンガス中では、電離で生じた Xe^+ は、直ちに二量体 Xe_2^+ になると考えられている。文献値[1]によると、今回のセットアップの電場におけるこの二量体のドリフト速度は約 240 センチメートル/秒であり、本研究で測定されたドリフト速度と合致している。これにより、アルファ線の電離で生成した陽イオンがワイヤに到達した際の信号を検出することに成功したと考えられる。

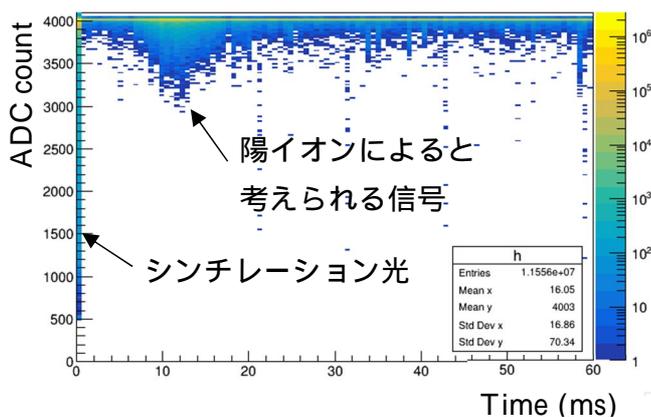


図 3: 再構成された波形を重ね描きしたもの

[1] G.W. C. Kaye and T. H. Laby, Tables of Physical and Chemical Constants, 16th ed., Longman Sc & Tech, 1995

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Obara S., Ban S., Hirose M., Ichikawa A.K., Kikawa T., Nakamura K.Z., Nakaya T., Tanaka S., Yoshida M., Iwashita Y., Sekiya H., Nakajima Y., Ueshima K., Miuchi K., Nakamura K.D., Minamino A., Nakadaira T., Sakashita K.	4. 巻 958
2. 論文標題 AXEL: High-pressure Xe gas TPC for BG-free 0 2 decay search	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 162803 ~ 162803
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.162803	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 S.Obara
2. 発表標題 Basic Study of Positive Ion Detection at TPC for 0v2b search AXEL
3. 学会等名 Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S.Obara
2. 発表標題 Basic Study of Positive Ion Detection at TPC for 0v2b search AXEL
3. 学会等名 15th Vienna conference on instrumentation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村和広
2. 発表標題 AXEL実験 BG free化のための陽イオン飛跡検出の研究
3. 学会等名 アクティブ媒質TPC開発座談会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小原 脩平
2. 発表標題 高圧希ガスにおける陽イオン検出のための基礎研究と二重ベータ崩壊探索への応用
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 市川 温子
2. 発表標題 高圧キセノンガスTPC
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田 将
2. 発表標題 0 崩壊探索に向けた高圧XeガスTPC AXELのフィールドケージ構造の検討
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>AXEL https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/Neutrino/AXEL/index.html</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	中村 和広 (Nakamura Kazuhiro)		
連携研究者	小原 脩平 (Obara Shuhei) (70834711)	東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教 (11301)	
連携研究者	中村 輝石 (Nakamura Kiseki) (80750463)	東京大学・宇宙線研究所・特任研究員 (12601)	