

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 14 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610060

研究課題名(和文)暗黒物質探索のための真空紫外光および近赤外光の直接検出法の確立

研究課題名(英文)Direct detection of VUV and IR lights for dark matter search

研究代表者

寄田 浩平 (YORITA, Kohei)

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号：60530590

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：Arを媒質に用いた次世代の高感度暗黒物質探索実験に向けて、Ar蛍光中の赤外波長成分の特性調査と真空紫外光(128nm)に直接感度をもつMPPCの開発試験を行った。線源による常温・1気圧のガスAr蛍光には650nm～850nmの赤外成分が存在し、また真空紫外成分との相対光量も約50%～70%程度あることを確認した。一方、Ar液体温度(-186℃)でも正常に動作し、真空紫外光(128nm)に直接感度のある新型MPPCの低温試験を行い、Ar蛍光に対して約7%を超えるPDEを有することがわかった。これらの研究成果をベースにし、新しい暗黒物質探索実験手法の検討も行うことができた。

研究成果の概要(英文)：For next-generation of direct matter search with argon, we investigated properties of near infrared light (IR) in gaseous Argon scintillation and also developed/tested the new type of MPPC, directly sensitive to vacuum ultra-violet (VUV) light (128nm) under cryogenic environment. Using alpha-ray source in the gaseous Ar of 1atm at room temperature, we observed the near-IR light in the range of 650nm-850nm from the Ar scintillation light to be about 50-60% relative to VUV light component. On the other hand a new type of MPPC has been developed by Hamamatsu Photonics and tested under cryogenic temperature (liquid Ar, 87K) at Waseda university. The direct photon detection efficiency (PDE) at 128nm is measured to be about 7% at over-voltage of 3V. Based on these new R&D results, a possible application to liquid Ar detector for dark matter search is investigated.

研究分野：素粒子実験

キーワード：アルゴン蛍光 真空紫外光 赤外光 VUV-MPPC 暗黒物質探索

1. 研究開始当初の背景

“暗黒物質(Dark Matter:DM)”の直接観測は、素粒子・宇宙物理学の最重要課題の一つである。そのため、DMの代表的な候補であるWIMP探索競争が国際的に熾烈化している。特にWIMP質量10GeV付近をターゲットとした異なる実験間で、「発見」と「棄却」という矛盾した探索結果が混在している状況である。現段階では、キセノン(Xe)を用いた2相型光TPC検出器(XENON100/LUX)が世界最高感度を誇るが、今後「断面積が小さい領域での探索能力を向上させる」にも「本質的な発見を主張する」にもXeとArの両方で矛盾のない検証結果を早急に得ることが極めて重要な状況といえる。

ArはXeと比べて非常に安価のため、大型化もしやすいが、液体Ar温度(-186℃)でVUV光(128nm)の蛍光を直接検出する技術が確立していないため、高感度化が難しく、Xe実験と比べても探索感度が劣る。この弱点を克服するには、極低温でも真空紫外蛍光(VUV)を直接検出できる光検出器を開発する必要がある。一方、気体Ar蛍光中には赤外光蛍光(IR)成分が存在することが知られているが、その詳細は未検証である。本研究ではこの赤外成分の波長や光量を測定することも課題としている。Ar蛍光中のIRとVUV検出に関してそれぞれの研究開始当初の状況を以下にまとめる。

IR光：研究開始時は、Ar蛍光に含まれていることは示唆されているが、Ar蛍光の光検出をベースにした研究はほぼ皆無であり、波長分布、時定数、相対光量などの発光特性の詳細は不明な状況であった。

VUV光：研究開始時は、極低温で稼働する2 or 3インチPMTの受光面に波長変換材(TPB)を蒸着させ、128nmを420nmに変換して検出する方法しか確立しておらず、128nmに直接感度をもつ低温光検出器は存在しなかった。(常温ではMgF₂を窓材に用いるPMTが存在するが極低温では稼働不可能である)。

最終的には、これらの蛍光の直接検出法を確立したうえで、気体相、液体相での実装可能性を考察し、この技術を最大限生かした新しい「高感度2相型ArTPC検出器」を構築することが重要な状況であった。

2. 研究の目的

世界最高感度の暗黒物質(DM)探索実験を“アルゴン検出器”で達成するために、液体Ar温度「-186℃」で動作し、Arからの2成分蛍光を直接観測できる光センサーを開発・創出することが重要である。そのために、まず以下の2項目を研究目的とした。

Arからの近赤外領域(IR:900nm)の蛍光の発光特性の検証と直接検出法の確立：

本研究では、まず波長分布、発光量、時定数を常温で評価し、特性を理解することを主題とする。

Arからの真空紫外領域(VUV:128nm)の蛍光に直接感度を持ち、極低温中で稼働可能な光検出器の確立：

本研究では、極低温で128nmを直接検出できるPPD(Pixelated Photon Detector)を開発し、1光子検出効率(PDE)を最低でも10%以上にできる技術を確立することを目的とする。

これらIRとVUVを相補的に利用した新しい高感度の気体・液体2相型ArTPC検出器(100kg級)を構築し、実際の暗黒物質探索につなげるのが本研究の最終目的である。

3. 研究の方法

大学構内に構成した実験設備で、「常温・気体Arの実験」と「低温での液体Arの実験」を段階的かつ系統的に行うことで、検出効率や低温特性を検証し、現行の波長変換材を用いる方法と比べてどの程度改善するかを定量的に評価する。VUVは検出効率の最大化を図る一方、IRについては、まずその発光特性を精査し、DM探索への応用有効性を検証する。実際に気体・液体2相型ArTPC検出器を構築するには、光検出以外のテクニカルな課題が山積している。例えば不純物(主にO₂/H₂O)濃度ppb以下の高純度液体Ar精製、高電圧印加装置、温度・圧力制御と液面管理、純度維持のための循環システムやデータ収集システムの構築である。これら全ての課題は、75L(重量100kg)の容器を用いて基礎構築を行い、解決した。まず、-186℃でも動作する2inchのPMT(浜松ホトニクス社製)の受光表面に波長変換材としてTPBを真空蒸着し、宇宙線源での1次蛍光(S1)と2次蛍光(S2)信号の取得をすることから開始する。本研究は、微小な光の検出を目標にしているため、比較的高い増幅機構(>10⁵)をもつ以下の2つの光検出デバイスを検証する。

1) PMT(Photo-Multiplier Tube): 一般に低温で構造物として破損するが、動作可能にするために加工されたものも数種類存在する。一方、光電面素材/受光部窓材の適切な組み合わせが重要である。現行では、128nmにはC₃I/MgF₂が、赤外領域にはInGaAs/硼硅酸ガラスの組み合わせ等で“ギリギリ”観測が可能であるが、双方とも極低温での動作保証がされていない。窓材MgF₂をまず常温ガスArで評価し、TPB蒸着した場合と比較する。さらに-186℃でも使用可能なように改造し、実際に液体Ar温度での特性を検証する。近赤外についても同様のプロセスを進め、VUVとIRの同時観測を達成し、IRについての発光特性を調べる。

2) PPD(Pixelated Photon Detector): 多数の微細なAPDピクセルを持ち、これを

Geiger-mode で動作させることで「光子を感知したピクセルの数によって入射した光子総数を数える」という新しい計測原理を持つ光検出素子である。一般的な波長感度は300nm~900nmと本研究に不適合だが、低電圧(70V程度)で動作し、増幅率が高く、低温になるにつれノイズが顕著に減るという特性は、本研究目的に非常によく適合する上、小型(数mm)素子なので、もしVUV/IRが観測可能になれば、容器側面に並べてDM信号からの集光率を上げることができる可能性が高い。これまでに開発されていた低温で動作可能なメタルパッケージを軸に、表面保護膜をできるだけ除去しVUV光に感度のある素子を開発・テストし、TPBを蒸着した場合と比較、定量的に改善度を評価する。またPPDは低温で時定数が延びる問題があることが判明している(約30ns 約500ns:学会発表済)。実際の実験では、数nsと1 μ sの減衰時間を利用した光パルス波形解析を行うため、これも改善する必要がある。クエンチング抵抗の温度依存性を考慮しながら、雪崩増幅を制御できるような適度な抵抗値を持つメタル抵抗等を用いて、低温で時定数100ns程度以下のものを構築、安定性等の評価を行う必要がある。

なお、機動性と再現性を考え、常温テストは10L簡易テスト容器でArガスを用いて行い、液体テストは75L真空断熱容器で行う。さらに安定性やノイズ解析などの実証検査を行い、VUV/IR双方の結果を総合的に考察し、シミュレーションを駆使して、DM探索用のAr容器内でのPMT/PPDの最適な配置やDM探索感度評価を行う。

4. 研究成果

2年の研究期間を前半・後半に分け、1年目の2013年度は主にIR光の測定に注力する一方、新しい極低温VUV検出のための素子開発を浜松ホトニクス社と議論し、基礎を固めた。2年目は実際に開発された新しいMPPCの試験を最重要課題とした。

常温・1気圧のガスArの赤外発光特性：真空紫外成分(128nm)の蛍光をリファレンスに用いるため、直接感度のあるMgF₂ PMT(R6836)を用いた。一方、赤外成分検出のために光電面が赤感度増強型マルチアルカリのPMT(R2228)を準備し、線源を用いたAr蛍光信号を様々な波長の光学フィルターを通して観測した。その結果、ガスAr蛍光には650nm~850nmの赤外成分が存在し、また真空紫外成分との相対光量も約50%~70%程度あることを確認することができた。この赤外波長に直接検出感度のあるMPPCを用いて赤外信号を確認した(ただし常温・1気圧)。また、発光時定数はVUVに比べて非常に短いことがわかった。

低温動作可能なMPPCの開発・試験：

実際にAr暗黒物質探索に使用するためには、Ar液体温度(-186)でも正常に動作する光検出器が必要であるが、真空紫外or赤外に有感かつ低温動作可能なものは存在しない。そこで、低温における破損原因となる表面保護材を除去し、クエンチング抵抗の温度依存性を最小化するためにメタル抵抗に変更したサンプルMPPCを浜松ホトニクス社から提供してもらい低温試験を行ったところ、破損せずに動作し、常温低温の繰返し再現性も確認できた。また波形の時定数も温度によらず40ns程度で安定していることがわかった。これによって、極低温での運用に関するメカニカルな課題を解決することができた。

2014年度は、-186(液体Ar温度)の極低温下でAr蛍光の主成分である128nmを直接検出することに焦点をあて、研究開発を行った。Arをターゲットとした暗黒物質探索においては、検出光量の増加とともに精度のよい発光位置同定による背景事象の分離が非常に重要となる。精度の高い発光位置特定には、波長変換後(128nm 420nm)の間接光よりも発光位置情報を有している128nmの直接光の検出の方がより重要となる。そのため、VUVが直接観測できれば、Arを用いた新しいタイプの暗黒物質探索実験が可能となる可能性がある。そこで、極低温で128nmに直接感度のあるVUV-MPPC開発試験を浜松ホトニクス社と協力して行った。浜松ホトニクスが独自に製作したサンプルMPPC(3x3MM-50UM VUV2)の試験を早稲田大学キャンパス内に構築した極低温装置を用いて行ったところ、cross-talk等の影響を取り除いたPDE(Photon Detection Efficiency)はおおよそ7%程度(Over-voltage=3V)であることがわかった。また期待通り低温ではdark count rateが顕著に下がり、-150以下では1Hz以下に抑えられ(今回のセットアップの検出限界以下)、波形時定数もほぼ変化しないことを確かめることができた。これらの結果は全て論文(arXiv:1505.00091)にまとめた。2014年度末には、さらにcross-talkを抑制した新しいVUV-MPPC(3x3MM-50UM VUV3)のサンプルが提供され、基礎特性試験を行い、現在その結果をまとめている。高いPDEと極低温下で運用を考えた場合、50Uタイプよりも暗黒物質探索に適している100UタイプのサンプルMPPCも同時に開発されたため、従来品からの性能向上がさらに見込める。これらの結果と古いサンプルとの比較等は2015年度にフォローアップ成果として論文にまとめる予定である。

最後に、探索実験への利用検討として、MPPCを検出器側面に配置し、ガス中で発生する比例蛍光(S₂信号)を直接検出する方法を試みた。簡易シミュレーションとLEDを用いた実験結果によると、特に壁際での分解能が上下面PMTだけのときに比べ、相補的に改善する

ことがわかった。これは、壁面での発光、内部バックグラウンドの除去に非常に有用であるとともに、検出光量の最大化にもつながる新しい結果といえる。

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)

[雑誌論文](計2件)

T. Igarashi, S. Naka, M. Tanaka, T. Washimi, K. Yorita, "Performance of VUV-sensitive MPPC for Liquid Argon Scintillation Light", arXiv1505.00091, 査読無, <http://arxiv.org/abs/1505.00091>
M. Tanaka, K. Yorita et al., "Status of R&D on double phase Argon detector: the ANKOK project", J. Phys. Conf. Ser., 査読有, 469 (2013) 012012.
doi:10.1088/1742-6596/469/1/012012

[学会発表](計26件)

藤崎薫、寄田浩平他「ANKOK 実験 1: 気液 2 相型アルゴン光検出器による暗黒物質探索」、日本物理学会年次大会、2015 年 3 月、早稲田大学
加地俊瑛、寄田浩平他「ANKOK 実験 2: 原子核・電子反跳事象の分離能力評価」、日本物理学会年次大会、2015 年 3 月、早稲田大学
川村将城、寄田浩平他「ANKOK 実験 3: 背景事象の理解と低減」、日本物理学会年次大会、2015 年 3 月、早稲田大学
木村真人、寄田浩平他「ANKOK 実験 4: 現状の課題と今後の展望」、日本物理学会年次大会、2015 年 3 月、早稲田大学
鈴木優飛、寄田浩平他「アルゴンを用いた検出器の方向感度化に関する基礎研究」、日本物理学会年次大会、2015 年 3 月、早稲田大学
鷲見貴生、寄田浩平他「アルゴン蛍光 128nm に感度のある MPPC の性能評価」、日本物理学会年次大会、2015 年 3 月、早稲田大学
寄田浩平「気液 2 相型アルゴン光検出器を用いた暗黒物質探索」、東大宇宙線研共同利用研究成果発表会、2014 年 12 月、東京大学柏キャンパス
藤崎薫、寄田浩平他「気液 2 相型アルゴン光検出器による暗黒物質探索 (ANKOK 実験)」、日本物理学会秋季大会、2014 年 9 月、佐賀大学
加地俊瑛、寄田浩平他「気液 2 相型アルゴン光検出器の蛍光(S1・S2)基礎特性」、日本物理学会秋季大会、2014 年 9 月、佐賀大学
川村将城、寄田浩平他「気液 2 相型アルゴン光検出器における背景事象評価」、

日本物理学会秋季大会、2014 年 9 月、佐賀大学

鷲見貴生、寄田浩平他「ANKOK 実験 本検出器製作に向けた現状の課題と今後の展望」、日本物理学会秋季大会、2014 年 9 月、佐賀大学

寄田浩平「気液 2 相型アルゴン光検出器を用いた暗黒物質探索」、地下素粒子原子核研究会、2014 年 8 月、大阪大学

田中雅士、寄田浩平他「気液 2 相型アルゴン光検出器を用いた暗黒物質探索

(ANKOK 実験)」、日本物理学会年次大会、2014 年 3 月、東海大学

鷲見貴生、寄田浩平他「ANKOK 実験の光検出効率」、日本物理学会年次大会、2014 年 3 月、東海大学

橋場裕之介、寄田浩平他「ANKOK 実験における背景事象の理解とその分離能力の評価」、日本物理学会年次大会、2014 年 3 月、東海大学

五十嵐貴弘、寄田浩平他「アルゴン蛍光の赤外成分の詳細研究」、日本物理学会年次大会、2014 年 3 月、東海大学

藤崎薫、寄田浩平他「気液 2 相型アルゴン光 TPC 検出器を用いた暗黒物質探索

(ANKOK 実験)」、日本物理学会秋季大会、2013 年 9 月、高知大学

加地俊瑛、寄田浩平他「ANKOK 実験のための光検出効率の最適化」、日本物理学会秋季大会、2013 年 9 月、高知大学

川村将城、寄田浩平他「ANKOK 実験における背景事象評価の現状」、日本物理学会秋季大会、2013 年 9 月、高知大学

鷲見貴生、寄田浩平他「MPPC や赤外光を用いたアルゴン蛍光の新しい検出方法の開発」、日本物理学会秋季大会、2013 年 9 月、高知大学

② M. Tanaka, K. Yorita, for the ANKOK group "Status of R&D on double phase Argon detector: the ANKOK project", 4th Workshop on Directional Detection of Dark Matter : Cygnus 2013, 2013.6, Toyama, Japan
他 5 件

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www2.kylab.sci.waseda.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寄田浩平 (YORITA, Kohei)

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号: 60530590