

Graduate School of Advanced Science and Engineering
Waseda University

博士論文概要

Doctoral Thesis Synopsis

論文題目

Thesis Theme

Measurement of Liquid Argon Response and
Direct Dark Matter Search at Surface
with A Liquid Argon Scintillation Detector

液体アルゴン光検出器を用いたアルゴン応答の測定と
地上実験室における暗黒物質直接探索

申請者
(Applicant Name)

Masato	KIMURA
木村	真人

Department of Pure and Applied Physics,
Research on Experimental Particle Physics

November, 2020

暗黒物質は、種々の宇宙論および天文学観測を統一的に説明するために導入される、重力相互作用に関わる未知の物質である。現在までの観測によると、宇宙の全エネルギー密度のおよそ4分の1を担い、電磁相互作用は極めて小さく、宇宙年齢程度に寿命は長く、少なくとも主要な暗黒物質はバリオンではない。そして、宇宙の晴れ上がり時には非相対論的であったとする「冷たい」暗黒物質シナリオが支持されている。現代素粒子物理学をまとめる標準模型は電弱スケール程度までの現象を正確に記述する確立された理論体系であるが、その中に暗黒物質となりうる候補はない。従って、暗黒物質の正体解明は、電弱スケールを超え宇宙初期へ迫る基礎物理を探求する上で極めて重要な指針である。

Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) は、多くの物理学者が現在最も有力視する暗黒物質の候補である。WIMPは銀河内を一様に非相対論的な速度で運動する GeV/c^2 から TeV/c^2 の質量を持つ粒子であり、極稀にバリオン物質（原子核中の核子）と相互作用するとされる。予想される散乱断面積は 10^{-40}cm^2 以下、原子核の反跳エネルギーは 10keV 程度である。この信号の検出を試みる実験が、世界各所で多種多様な検出器を用いて行われている。WIMPの発見とその性質測定は、現代物理学を確実に新しい局面へ発展させる。実験技術としては、低エネルギー信号を捉えうる高い感度を持つこと、信号を擬似する背景事象量を極めて低いレベルへ抑えること、そして多量の標的核種を持つ大型検出器を構築することの並立が求められる。

液体アルゴンは、大きな信号生成量と高い粒子弁別能力を持ち、放射線検出器として優れた媒質である。同時に、入手が容易で検出器としてのスケールビリティもある。液体アルゴン光検出器は、液相での荷電粒子のエネルギー損失を、即座に発生するシンチレーション信号 (S1) と、検出器内に印加した電場によって電離電子を気相へ取り出して発生するエレクトロルミネッセンス信号 (S2) の何れかもしくは双方によって観測する。S1の波形は主要な背景事象である電子反跳事象を強力に弁別する。S2は、そのS1との光量比が弁別能力を補強するだけでなく、単一電子信号をも検出可能なほどの発光量があるため、低エネルギー事象への感度を増す。液体アルゴン光検出器を用いたWIMPsの探索では、これらの信号から原子核反跳事象を特定し、反跳エネルギーを再構成する。一般にアルゴン中には宇宙線によって生成される長寿命放射性同位体 ^{39}Ar が $1 \text{Bq}/\text{kg}$ で存在し、電子反跳事象を引き起こす。 ^{39}Ar の分離は難しく、解析的に除去する他ない。従って、原子核反跳事象と電子反跳事象の双方に対する検出器応答を理解することが非常に重要な課題である。本研究では、高感度アルゴン光検出器を用いて取得した較正データからアルゴン応答を実験的に決定し、系統的な理解を与えた。

一部の暗黒物質直接探索実験は、質量 $10 \text{ GeV} / c^2$ 程度の軽い WIMP の存在を示唆している。質量の小さな WIMPs の発見には、対応して小さくなる反跳エネルギーへも感度を持つ検出器と、そのエネルギー領域における十分な電子反跳事象除去能力の獲得が必須である。本研究では、世界最高の液体アルゴン光収集効率を持つ検出器と S1 波形弁別法を用いて、早稲田大学構内において WIMPs を探索した。そして、質量 $10 \text{ GeV} / c^2$ の WIMPs の散乱断面積に対する制限（下限値）を与えた。また、探索感度が宇宙線由来の事象に制限されることを明らかにした。

本論文の構成は次のとおりである。

第一章では、暗黒物質の導入の背景並びに歴史を紹介し、暗黒物質の正体解明に向けた様々な研究の現状について述べる。

第二章では、まず素粒子標準模型を紹介した後、宇宙論および天文学観測を通じた暗黒物質の存在証拠を概観し、要請を満たす物質候補が標準模型内に無いことを示す。そして、有力な候補として WIMP を導入し、その理論背景並びに探索実験手法を説明する。特に本論文の主題である直接探索に関してその原理を詳説し、これまでの状況及び世界的な今後の計画について整理する。

第三章では、液体アルゴン光検出器について記述する。まず、液体アルゴンの基礎物理特性を概観する。荷電粒子に対する液体アルゴンの応答は、粒子の線エネルギー付与や検出器内に印加される外部電場に依存した励起並びに電離過程として理解され、粒子弁別能力とも密接に関係している。これらの現象論による理解についても解説する。それらを受けた上で、本研究で用いる2種の検出器（液体1相型と気液2相型）の動作原理を示す。最後に、 WIMP 探索における様々な背景事象源について、それぞれの特徴や有効な対応策を詳解する。

第四章では、早稲田大学構内に構築された液体アルゴン実験装置群の概要を説明する。本論文で扱う全ての実験はこの装置群を用いて行った。第一に、高純度の液体アルゴンを生成し維持する低温装置を説明する。第二に、検出器の要である光検出部に関して述べる。液体アルゴン光は真空紫外光である。この光信号を低温下で高効率に検出するために用いられる光電子増倍管や波長変換技術に関して説明する。第三に、データ取得系及びトリガーを紹介する。最後に、次章以降の測定で用いる波形データ解析手法を説明する。

第五章では、本研究の主題のひとつである原子核反跳に対する液体アルゴン応答測定を詳説する。実験では、 ^{252}Cf 線源と飛行時間法を用いてエネルギー幅を絞った中性子を検出器に入射させた。検出器内には最大で $3 \text{ kV} / \text{cm}$ の高電場印加に成功している。モンテカルロ・シミュレーションによって算出したエネルギー分布と現象論から導かれるアルゴン応答モデルで観測光量分布をフィットし、 $0 - 3 \text{ kV} / \text{cm}$ の電場下において $30 - 200 \text{ keV}$ の原子核反跳が誘起

された際の蛍光および電離信号生成量を決定する。これらの値は、WIMP s による反跳エネルギーを再構成する際に不可欠な物理量である。また、得られる系統的な理解から測定領域外の応答の予測も与え、将来的な検出器デザインや達成しうる探索感度に関しても議論する。

第六章では、ふたつ目の主題である電子反跳に対する液体アルゴン応答測定を詳説する。高光収集効率を持つ液体1相検出器の詳細と、この測定の要である低エネルギー較正手法を紹介する。そして、 $2.8 - 1285 \text{ keV}$ のエネルギー領域で電子反跳に対する生成光量を測定する。単位エネルギー当たりの生成光量にエネルギー依存性があることを示し、その背景の物理解釈を与える。特に 40 keV 以下のエネルギー領域は、質量 $10 \text{ GeV}/c^2$ のWIMP sの信号領域でありながらこれまで測定された先行研究はなく、次章で示すWIMP s探索等における背景事象量の推定に対して貴重な情報を与える。

第七章では、地上実験室における液体1相検出器を用いたWIMP探索を行う。まず実験セットアップ、特に環境放射線由来の背景事象の遮蔽に注目して述べる。続いて、光収集効率等の検出器較正及び基礎パラメータを決定した後、背景事象量を推定する。最も深刻な背景事象源は宇宙線ミューオンと検出器部材の相互作用によって生じる高速中性子である。モンテカルロ・シミュレーションや液体シンチレータを用いた補助実験からこれらの背景事象を定量評価する。最後に、2020年8月に取得した地上実験を解析し、系統誤差を評価する。地上実験の結果としてWIMPの散乱断面積に対する制限を与える。

第八章では、地上実験の結果を受け、 $10 \text{ GeV}/c^2$ のWIMP s探索感度の向上及び発見を念頭に議論を行う。前述の宇宙線起因の背景事象の削減方法を提案する。加えて、検出器のアップグレードを含めたその他の背景事象のさらなる抑制手法を考察する。一般にWIMP直接探索実験には宇宙線量が劇的に減少する大深度地下実験施設が適している。最後に、このような環境下で実験を遂行した場合に期待される探索感度を提示する。

最終章では、本論文で得られた成果を纏め、液体アルゴン検出器を用いたWIMP s探索の展望を述べる。

早稲田大学 博士 (理学) 学位申請 研究業績書

氏名 木村真人 印

(2021年 2月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者 (申請者含む)
論文 査読あり	T. Washimi, <u>M. Kimura</u> , M. Tanaka, K. Yorita, "Scintillation and ionization ratio of liquid argon for electronic and nuclear recoils at drift-fields up to 3 kV/cm", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A910, 22-25 (2018)
○論文 査読あり	<u>M. Kimura</u> , M. Tanaka, K. Yorita, T. Washimi, "Measurement of the scintillation efficiency for nuclear recoils in liquid argon under electric fields up to 3 kV/cm", Physical Review D 100, 032002 (2019)
○論文 査読あり	<u>M. Kimura</u> , K. Aoyama, M. Tanaka, K. Yorita, "Liquid argon scintillation response to electronic recoils between 2.8-1275 keV in a high light yield single-phase detector", Physical Review D 102, 092008 (2020)
論文 査読あり	<u>Masato Kimura</u> , Masashi Tanaka, Kohei Yorita, "Low Energy Response on Liquid Argon Scintillation and Ionization Process for Dark Matter Search", JPS Conf. Proc. 11, ISRD2016, 040003 (2016)
論文 査読あり	<u>M. Kimura</u> , K. Yorita, M. Tanaka, "Status and prospect of the ANKOK project: Low mass WIMP dark matter search using double phase argon detector", J. Phys. Conf. Ser. 1342, TAUP2017, no.1, 012069 (2020)
論文 査読あり	<u>M. Kimura</u> , "Measurement of liquid argon scintillation and ionization response on nuclear recoils under electric fields up to 3 kV/cm", J. Phys. Conf. Ser. 1468, TAUP2019, 012055 (2020)
論文 査読あり	<u>M. Kimura</u> , M. Tanaka, K. Yorita, T. Washimi, "Measurement of liquid argon scintillation and ionization response on nuclear recoils under electric fields up to 3 kV/cm", J. Instrum. 15, LIDINE2019, C03042 (2020)
論文 査読あり	<u>M. Kimura</u> , K. Aoyama, T. Takeda, M. Tanaka, K. Yorita, "Measurements of argon-scintillation and -electroluminescence properties for low mass WIMP dark matter search", J. Instrum. 15, INSTR20, C08012 (2020)
講演 国際会議	<u>Masato Kimura</u> , Masashi Tanaka, Kohei Yorita, "Low Energy Response on Liquid Argon Scintillation and Ionization Process for Dark Matter Search", ISRD2016, つくば・日本, 2016年1月
講演 国際会議	<u>M. Kimura</u> , M. Tanaka, K. Yorita, "Status and prospect of the ANKOK project: Low mass WIMP dark matter search using double phase argon detector", TAUP2017, サドバリー・カナダ, 2017年7月

早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
ポスター 国際会議	<u>M. Kimura</u> , "Measurement of the Scintillation Efficiency for Nuclear Recoils in Double-Phase Argon Detector for Low Mass WIMP Search", UGND2019, 仙台・日本, 2019年3月
講演 国際会議	<u>M. Kimura</u> , M. Tanaka, T. Washimi, K. Yorita, "Measurement of liquid argon scintillation and ionization response on nuclear recoils under electric fields up to 3 kV/cm", LIDINE2019, マンチェスター・イギリス, 2019年8月
ポスター 国際会議	<u>M. Kimura</u> , "Measurement of liquid argon scintillation and ionization response on nuclear recoils under electric fields up to 3 kV/cm", TAUP2019, 富山・大阪, 2019年9月
講演 国際会議	M. Kimura, K. Aoyama, T. Takeda, M. Tanaka, K. Yorita, "Measurements of argon-scintillation and -electroluminescence properties for low mass WIMP dark matter search", INSTR2020, ノヴォシビルスク・ロシア, 2020年2月【招待講演】
講演 学会	<u>木村真人</u> 他, "ANKOK 実験 20: 電子反跳事象分離能力の理解", 日本物理学会 2017年秋季大会, 宇都宮大学, 2017年9月
講演 学会	<u>木村真人</u> 他, "ANKOK 実験 26: 高電場下における電子反跳/原子核反跳事象の分離", 日本物理学会第73回年次大会, 東京理科大学, 2018年3月
講演 研究会	<u>木村真人</u> , "液体アルゴンによる軽い宇宙暗黒物質探索", SMART2018, 沖縄科学技術大学院大学, 2018年5月【招待講演】
講演 学会	<u>木村真人</u> 他, "ANKOK 実験 31: 電離信号(電子比例蛍光; S2)の基礎特性と利用可能性", 日本物理学会 2018年秋季大会, 信州大学, 2018年9月
講演 学会	<u>木村真人</u> 他, "ANKOK 実験 32: 低エネルギー領域の電離電子信号の特性評価", 日本物理学会第74回年次大会, 九州大学, 2019年3月
講演 研究会	<u>木村真人</u> , "高電場印加と電場下での Ar 応答", アクティブ媒質 TPC 座談会, 神戸大学, 2019年3月
講演 学会	<u>木村真人</u> 他, "ANKOK 実験 33: ^{37}Ar 事象等を利用した低エネルギー電子反跳事象の発光特性", 日本物理学会 2019年秋季大会, 山形大学, 2019年9月
講演 研究会	<u>木村真人</u> , "気液 2 相形アルゴン光 TPC の研究開発", MPGD&TPC 合同研究会, 理研, 2019年12月
講演 研究会	<u>木村真人</u> , "液体アルゴンによる Non-WIMP 暗黒物質探索に関する考察", ダークマターの懇談会 2020, オンライン, 2020年9月

早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 学会	木村真人 他 “ANKOK 実験 34: 地上での取得データを用いた暗黒物質探索結果と背景事象の理解”, 日本物理学会第 76 回年次大会, オンライン, 2021 年 3 月
講演 セミナー	木村真人, “Measurement of Liquid Argon Response and Direct Dark Matter Search at Surface with A Liquid Argon Scintillation Detector”, J-PARC 素核セミナー, KEK 東海キャンパス, 2020 年 10 月 【招待講演】
その他 総説	寄田浩平, 田中雅士, 鷺見貴生, 木村真人, 矢口徹磨, “気液 2 相型アルゴン光 TPC 検出器による 暗黒物質探索実験(ANKOK)”, 高エネルギーニュース, Vol. 36 (2019), No. 4, 2018/1.2.3