

# 博士論文審査報告書

## 論文題目

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

Masato	KIMURA
木村	眞人

物理学及応用物理学専攻 素粒子実験研究

2021年3月

暗黒物質は、様々な宇宙論および天文学観測の統一的な解釈のために不可欠な未知の物質である。一方で、素粒子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ことができる確立された理論体系ではあるが、その中に暗黒物質になりうる候補はない。したがって暗黒物質の正体解明は、宇宙構造形成等のマクロな現象の理解だけでなく、素粒子論的なアプローチで初期宇宙を解明するためにも極めて重要な指針となっている。様々な候補が提唱されているが、なかでも **Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)** は、多くの物理学者が最有力視する暗黒物質候補である。WIMP は銀河内を一様に非相対論的な速度で運動する  $\text{GeV}/c^2$  から  $\text{TeV}/c^2$  の質量の粒子であり、極稀に検出媒質中の核子と相互作用すると考えられている。その散乱断面積は  $10^{-41}\text{cm}^2$  以下、また、典型的な WIMP 質量の場合の原子核の反跳エネルギーは  $10\text{keV}$  程度である。多種多様な手法でこの信号の検出を試みる実験（直接探索）が世界各地で活発に行われている。このような微小かつ希少な事象を観測するためには、低エネルギー信号に高い感度を持つこと（高感度化）、十分な標的核種量を有すること（大型化）、背景事象が十分に少ないこと（低バックグラウンド化）等、検出器開発として非常に難しい課題を同時に解決する必要がある。

申請者は、液体アルゴン (Ar) 光検出器を用いた暗黒物質探索を行うために、検出器の実機開発からデータ解析までの全てに深く関わり研究を行ってきた。液体 Ar は、大きな信号生成量と高い粒子識別能力を持つため放射線検出に優れた媒質であり、かつ入手が容易であるため大型化にも適している。液体 Ar 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) のいずれか、もしくは両方を観測することができる検出器である。S1 は反応エネルギー情報だけでなく、時間波形によって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、S1 との光量比を用いた弁別能力の補強に役立つだけでなく、単一電子信号も検出可能なほどの発光量を得ることができるため、より低エネルギー事象の探索を可能にする。これらの観測量から再構成される観測事象の中から WIMP 由来の原子核反跳事象を特定する。一方で、一般に Ar 中には宇宙線によって生成される長寿命放射性同位体  $^{39}\text{Ar}$  が  $1\text{Bq}/\text{kg}$  で存在し、電子反跳事象を引き起こすため、原子核反跳と電子反跳の双方に対する検出器応答を定量的に評価し、解析的に分離することが実験の鍵となる。本論文は、複数の条件下で較正データを取得し、液体 Ar の応答特性を系統的に定式化し、新しい知見を与えることを 1 つ目の主旨としている。またこれらの成果に基づき、現段階で最良の液体 Ar 光検出器を構築し、エネルギー閾値を下げたうえで、複数の実験間で存在是非の矛盾が存在する軽い WIMP (質量  $10\text{GeV}/c^2$ ) の探索を行った結果と課題、将来展望についても包括的にまとめている。

世界的にも、液体 Ar 光検出器は WIMP 探索を牽引する検出技術の 1 つであり、近い将来、巨大な国際共同実験も計画されている。本論文で記述される一

連の液体 Ar 応答の測定と体系的なモデル化の研究成果は、暗黒物質の発見を目指す将来 Ar 実験の最適な設計や実験環境変数の決定、また、物理的解釈の信頼性の強化に対しても非常に有用な成果であり、1つの実験や成果に閉じない、普遍的な貢献をもたらすものと評価する。

本論文は9つの章で構成されている。第1章では、暗黒物質の導入背景並びに歴史を簡潔に紹介し、その正体解明に向けた様々な研究の現状が述べられている。第2章では、素粒子標準模型が紹介された後、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が示されている。そして有力な候補として WIMP が導入され、その理論背景と探索実験手法が説明されている。第3章は液体 Ar 光検出器について詳解している。荷電粒子に対する液体 Ar の応答は、粒子の線エネルギー付与や検出器内の電場に依存した励起・電離過程を通じて理解でき、粒子弁別能力とも密接に関係している。この応答についての現象論やこれまでの測定結果に基づく描像が述べられている。また、本論文で用いられる2種類の検出器（液体1相型と気液2相型）の動作原理が説明されている。さらに WIMP 探索における様々な背景事象源の特徴と削減のための有効な対策法が述べられている。第4章では、西早稲田キャンパス内に構築した液体 Ar 実験装置群が概説されている。液体 Ar を保持する低温装置や、検出器の要である光検出部、データ取得系が説明される。また、次章以降で用いられる光検出器の詳細についても記述されている。第5章は、本論文の1つ目の骨子である「原子核反跳に対する液体 Ar 応答測定と定式化」について記述されている。中性子線源と飛行時間法を利用した実験装置や、データ解析で用いるモンテカルロ・シミュレーション (MC) を説明した後、実データに対してフィッティングを行い、第3章で説明した液体 Ar 応答の現象論モデル中の5個の未知変数を決定している。異なる電場下で取得したデータを、飛行時間法を用いて入射中性子運動量を選別し、それぞれの後方散乱ピークを同時にフィットすることで検証感度と高い信頼性を得ている。最終的には、原子核反跳に対するシンチレーション光・電離電子生成量を電場及びエネルギーの関数を適切な系統誤差とともに与えることに成功している。この成果は、1kV/cm 以上の高電場下での初測定であると同時に、液体 Ar では初めて、信号生成量が任意の電場やエネルギーにおける関数として与えられたという意味で特筆に値する。他実験グループによる測定結果とも比較され、今回の測定結果と誤差の範囲内で一致することも示されている。また測定手法に残る潜在的な不定性や精度向上の実現可能性についても考察されている。第6章は2つ目の骨子である「電子反跳に対する液体 Ar 応答測定」である。この測定は、シンチレーション発光量のエネルギー依存性に主眼を置いたものであり、無電場下で 2.8keV から 1.3MeV までの8つのエネルギー点を測定した結果をまとめている。まず、各データ点で用いた較正線源やノイズ事象の抑制のための検出器および解析の工夫が詳解される。そして、

検出光量とエネルギー分解能を電子反跳エネルギーの関数として導出している。特に 2.8keV という非常に低いエネルギー点の測定に成功している点が、この研究を前例のないユニークなものにしている。その結果、2.8keV ではそれよりも高い (60keV 以上の) 点と比べ、検出光量が 3 割減少することが示されている。この結果に対する検証や背景にある物理過程の解釈が詳しく記述されている。Ar と同じ貴ガスである液体キセノンとのアナロジーから、拡散する電離電子数の増大に起因するものであると考察している。第 5 章の信号事象の応答に加え、本章で背景事象に対する応答を測定することで WIMP 探索における検出器応答の総合的な理解が達成されたといえる。第 7 章では、獲得した液体 Ar 応答の理解に基づいて行われた地上実験室における WIMP 探索実験が記述されている。今回は液体 1 相式大光量検出器が採用されており、波形弁別により電子反跳と原子核反跳の強い分離能力を達成している。計 24 時間の物理ランを行い、観測された全原子核反跳事象が WIMP 起因であると仮定して、 $10\text{GeV}/c^2$  の WIMP と核子の散乱断面積に  $4 \times 10^{-37} \text{ cm}^2$  の上限値を与えている。第 8 章では、この不定性を抑えるための発展的な研究や、観測した原子核反跳事象の源の特定とその抑制方法に関して議論されている。そして、大深度地下施設で実験を遂行することで、 $10^{-40} \text{ cm}^2$  の探索感度が期待されることが示されている。最後に、第 9 章では本論文を簡潔に結論付け、今後の液体 Ar による WIMP 探索の展望が述べられている。

以上を要約すると、以下のようにまとめられる。本論文は液体 Ar 光検出器による WIMP の直接探索と発見を念頭に置き、種々の測定から粒子検出過程の源である液体 Ar 応答の包括的モデル化に成功している。液体 Ar 検出器に不変な量として定式化を行い、検出器デザイン、データ解析、物理解釈等のあらゆる段階で、個別の実験に依らずに用いることができる結果が示されている。その難しさから、液体 Ar に対してこのような評価がなされた先例はないため、本論文は Ar 応答の系統的な描像の構築と今後の発展の礎を築いたといえる。また液体 Ar 応答の測定と定式化にとどまらず、得られた知見をもとに自ら WIMP 探索実験を遂行し、潜在的な探索能力を実証した点も評価に値する。今後の暗黒物質の正体解明に向けて、宇宙・素粒子物理学分野に貢献する重要な研究成果と認められる。

以上のように、本論文は高い学術的・理学的価値を有しており、博士(理学)の授与に相応しいものとして認められる。

2021 年 3 月

審査員

主査	早稲田大学教授	博士(理学) 早稲田大学	寄田浩平
副査	早稲田大学教授	理学博士(東京大学)	駒宮幸男
	早稲田大学教授	工学博士(東京大学)	鷲尾方一
	神戸大学准教授	博士(理学) 東京大学	身内賢太郎