早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文審査報告書

論　文　題　目

Dark Matter Search Experiment
with Double Phase Xe Detector

二相型キセノン検出器による
暗黒物質探索実験

申　請　者

氏　名　山下　雅樹

専攻・研究指導
(課程内のみ)　物理学及応用物理学専攻　原子核工学研究

２００３年７月

暗黒物質(ダークマター)はその存在を重力の効果でのみ知ることのできる、目に見えない物質を意味しているがそれが何であるかは分かっていない。 1933 年 Zwicki が最初に示唆してからおよそ 60 年間様々な観測から非常に多量の暗黒物質が宇宙に存在する強い証拠が示されてきた。最も有力な証拠は、渦巻き銀河の回転速度の観測である。その速度は銀河中心から離れたところでも一定という驚くべき事実を示しており、それはケプラーの法則からそこに多くの目に見えない（電磁波を発しない）質量が存在しなければならないことを意味している。その質量は宇宙にある物質の大半を占める量に匹敵している。現在でも世界中で様々な観測が暗黒物質の正体を突き止めるべく行われている。暗黒物質の正体はおおきく分けると普通の物質か否か、つまり陽子や中性子などでできたバリオンまたは、非バリオンかのいずれかになる。バリオンの暗黒物質探索は、重力レンズを用いた実験で行われている。MACHO と呼ばれる白色矮星や中性子星の観測がなされたが、これらの物質の観測量だけでは暗黒物質の説明には不足する結果が報告された。非バリオンである可能性を考えるとニュートリノやニュートラリーノ、アクシオンなどがあげられる。スーパーカミオカンデの観測やトリチウムのβ崩壊探索からニュートリノ質量の上限値から、これらが暗黒物質としての役割を果たし得ないことが分かっている現在、ニュートラリーノに大きな注目が集まっている。本研究はこのニュートラリーノの直接探索を目的とした実験であり、この論文はこれを達成するための新しいアイディアに基づく検出器の開発と基礎特性およびその結果について述べている。本論分は 10 章で構成されている。

第１章では、ダークマター探索についての歴史的な推移が述べられている。

第２章では、ダークマターの有力候補であるニュートラリーノとその探索実験について述べられている。ニュートラリーノは WIMPs(Weakly Interacting Massive Particles) とも呼ばれ、素粒子の標準理論を超えた超対称性理論で予言される粒子である。この観点からすると WIMPs 探索は宇宙論の分野にも素粒子論の分野にも魅力的な研究対象である。WIMPs 探索は物質がニュートラリーノによって弾性散乱されたときのわずかなエネルギーをとらえるもので、世界中で１０以上もの実験が計画され行われている。1996 年にダマグループ（イタリア）によって WINPs 発見の報告がなされたがその後の他の実験によって否定されている。現在の状況は混沌としており検出器の感度がさらに飛躍することが期待されている。既存の検出器で WIMP-nucleon 断面積にもっとも厳しい制限を付けているのはアメリカのグループで Ge 検出器を用いフォノンと電荷を同時に測定するものである。その理由は両信号を得ることでバックグラウンドであるガンマ線、β線と暗黒物質の信号である原子核の弾性散乱のイベントを識別することで感度を大きく上げたものである。しかし、この検出器にも欠点がある。今後の探索には非常に大きな質量が必要となるが（＞１００kg)、検出器の測定原理上、その様な単体としての使用は不可能で、大型化も非常に難しく、またコストも莫大となる。したがって他のタイプで、このような識別能力をもった大型化可能な検出器の出現が待ち望まれている。

第３章では、WIMPs 探索の原理すなわち、弾性散乱反応によるエネルギースペクトルと、反応断面積が原子核のスピンに依存しない場合 A^2（A は原子質量）に比例し、またスピンに依存する場合にはスピンファクターに比例すること、したがって、検出器にはこれらの値が大きいものを選ぶ必要があること、期待されるイベント頻度はおおよそ＜１

event/day/kg であるがことが述べられている。

第４章では、以上をふまえて著者が液体キセノン検出器に着目したことについて述べている。液体キセノンシンチレーターはエネルギーあたりの発光量が多く（NaI(Tl) と同程度)、エネルギーしきい値を下げ得ることが期待される。キセノンは約－110℃で液体となるが、液体であるがゆえに形状も自由にでき、また大質量化も可能である。WIMPs との反応断面積を考えるとキセノンは原子質量１３１と非常に大きく既存の検出器の中では最も大きい値を持ちこれはスピンに依存しない検出に最適である。また、キセノンには奇数のアイソトープがおよそ半分を占めており、中でも ^{129}Xe はスピンファクターが比較的大きく遠心分離機などでこの原子を集め感度の高いものをつくれる可能性がある。液体キセノンはシンチレーション信号だけでなく電離信号も利用可能である。この両信号を利用することによって原子核の弾性散乱を電子散乱から識別することができる。これについては、次章に詳しく説明されている。

第５章では、二相型キセノン検出器の開発について述べている。液体キセノンシンチレーション光のための PTFE 反射材のテスト、およびプロトタイプ二相型キセノン検出器の開発を行った。液体キセノンの発光波長は 174nm を中心とした真空紫外光領域にありこれに対応する反射材はそれほど知られていない。そこで、長波長から 200nm まで反射率の良い PTFE 反射材を選択した。これはまた電場のある環境では都合のよいものである。その反射率は液体キセノンの光の吸収長に依存するがそれを１m とすると 95%という高い結果が得られた。二相型キセノン検出器では、ガンマ線からの弁別に使用される電離信号を直接計測するのではなくガス中で比例蛍光を起こさせ何百倍もの増幅を行うことが出来る。これまでは、液体中で起こる比例蛍光を利用していたが、この二相方式の採用で、以前に比べてエネルギーの閾値をおよそ 2 桁も落とすことが出来た。このプロトタイプの地上実験では、電子反跳のイベントと原子核反跳（中性子線源を用いた）のイベントを９９％識別することに成功した。

第６章では、バックグラウンドを減らす方法について述べている。その対策の一つは神岡鉱山地下１０００m の実験施設への移設である。また更に検出器や周りの材料の放射性不純物が実験結果に影響するため、著者は HPGe 検出器を用いて、これらの選別を慎重に行った。また、環境ガンマ線、中性子を遮蔽するシールドの設計についても入念な考慮がなされた。これらの対策を通じて、プロトタイプによるバックグラウンドの精密測定を実施し、その起源をつきとめることに成功した。

第７章では、神岡鉱山内のラドン濃度が高いために検出器の周りを密閉して、スーパーラドンフリーエアを流してラドンをパージしながら実験を行った結果について述べている。さらに、プロトタイプの検出器で得た WIMPs 断面積の上限値は、ダマグループの得た上限値より１桁大きいだけであることを示し、筆者らの検出器の原理的な有利さを強調している。

第８章では、シミュレーションを用いてバックグラウンドの起源を詳細に検討している。バックグラウンドの起源は主にステンレス容器、光電子増倍管、ワイヤーであった。これらの結果は次期検出器にいかされることになる。また、低エネルギー部分でバックグラウンドの除去が不十分であった。この理由は、外部バックグランドからでは説明できず、検

出器内部の表面に付着したものと考えられる。

第９章では、今後の計画について述べている。著者たちの研究グループは現在１５kg 液体キセノン検出器を製作中である。検出器内の材料は酸で表面を溶かして洗浄し、さらにバックグラウンドを減らすようにつとめる。ステンレス容器は無酸素銅に換え中性子に対しても十分なシールドを用意する。この新たに作られる検出器を使用すればプロトタイプよりもすくなくとも２桁以上良い結果が得られよう。これによって従来までの実験より３桁以上の厳しい断面積の制限をつけ得ることが期待され、現在、世界的に達成されているレベルを少なくとも一桁以上下げることになる。またこれによって、WIMPs の季節変動の観測も可能となろう。

第１０章は結論である。まず暗黒物質探索にキセノン検出器が適していることが述べられている。ついで、作成した二相型キセノン検出器は既存の液体キセノンのなかで最もよいエネルギー分解能を持ち、また純度も最も高いことが示されている。さらに、これまでの地下実験室におけるテスト実験を活かし､さらなる探策が予定されていることに言及し、それが世界でもっとも感度のよい検出器になると期待されることを示唆している。

以上を要約すると、本研究は暗黒物質探索という長年の懸案に取り組み、新しい検出器を開発して、そのプロトタイプを使用した実験を遂行した。そしてその実験で得た結果に基づき、プロトタイプを大型化した製作中の検出器の性能を解析し、新検出器は現在計画中のどの検出器よりも優れた検出限界を達成することが可能であり、また現在理論的に推測されている限界を越えた検証が可能であることを示した。これらの成果によって暗黒物質探索実験に新しい局面が開かれた。よって本論文は博士（理学）の学位論文としてふさわしいものと認める。

2003 年 6 月

審査員	早稲田大学教授	理学博士（早大)	菊池　順
	早稲田大学教授	理学博士（早大)	大場一郎
	早稲田大学教授	工学博士（東大)	鷲尾方一
	早稲田大学名誉教授	理学博士	道家忠義
	埼玉県立大学教授	理学博士（早大)	柴村英道