Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-02

Directional dark matter search with a low-background gaseous detector

Ikeda, Tomonori

(Degree)
博士（理学）

(Date of Degree)
2020-03-25

(Date of Publication)
2021-03-01

(Resource Type)
doctoral thesis

(Report Number)
甲第7698号

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007698

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

（別紙様式 3）

論 文 内 容 の 要 旨

氏　　名　　池田 智法

専　　攻　　物理学

論文題目（外国語の場合は，その和訳を併記すること。）

Directional dark matter search with a low-background gaseous detector

(低バックグラウンドガス検出器を用いた方向に感度を持った暗黒物質探索実験)

指導教員　　身内 賢太朗

銀河の回転曲線や銀河団衝突、Planck 衛星による宇宙背景放射の観測などから暗黒物質の存在が示唆されてきた。暗黒物質の正体や性質を解明するためには、暗黒物質と既知の物質である核子との弾性散乱を捉える実験、「直接探索実験」が必要である。

これまで米国の LUX 実験や伊国の XENON 実験などの数々の実験グループが大質量大型検出器を用いた直接探索実験を行ってきた。しかし、暗黒物質の発見には至っていない。これらの実験で暗黒物質の信号を裏付けるためには、数%の計数率の季節変動を観測する必要がある。季節変動は天の川銀河に分布する暗黒物質に対する地球の相対速度が夏と冬で変化することに起因している。現在、伊国の DAMA/LIBRA 実験が 12.9 σ の信頼度で季節変動の観測を主張しているが、他の実験グループによる追実験では観測が認められていない。そのため、DAMA 実験の結果については今も論争が続いている。

季節変動とは別の暗黒物質特有の信号は、暗黒物質との弾性散乱によって反跳した原子核の反跳角度分布に現れる。暗黒物質は銀河ハロー中を等方的に運動していると考えられており、太陽系はその中をはくちょう座の方向に向かって運動しているため、暗黒物質の到来方向には偏りがあると考えられる。暗黒物質による原子核反跳方向にも偏りが生じ、反跳原子核の運動方向とはくちょう座の方向のなす角度分布は前方散乱事象が多くなり、前後非対称性を持つ。この信号は季節変動を用いた手法のわずか数%の計数率の変動に対し、最大 10 倍以上の非対称度を持つ。そのため、非対称度が検出されれば暗黒物質の観測に強い証拠を与えることができる。この暗黒物質探索手法は「方向に感度を持った手法」と呼ばれている。

暗黒物質探索実験プロジェクト、NEWAGE 実験では方向に感度を持った手法によって、DAMA 実験が暗黒物質の存在を示唆する領域の探索及び、暗黒物質の直接観測を目的としている。暗黒物質との散乱によって反跳された原子核は、物質量の小さなガス中であっても数ミリ程度しか走らないため反跳方向を決定することが難しい。しかし、NEWAGE 実験では独自に開発した 2 次元ガス画像装置「μ-PIC (MICRO PIxel Chamber)」を読み出しとする 3 次元ガス飛跡検出器によって、サブミリの高位置分解能で飛跡検出が可能となっている。また、エネルギー損失の情報から背景事象である電子反跳事象を選別できるため、他の検出器より高い S/N を実現している。

これまでにガス飛跡検出器 NEWAGE-0.3b'が開発され、神岡地下実験施設にて方向に感度を持った暗黒物質探索が行われた。その結果、暗黒物質と陽子のスピンに依存する散乱断面積に対して世界最高感度を達成し、2015 年に論文として発表した。しかし、DAMA 領域の探索を行うには感度が不十分であった。その後に背景事象に関する研究がなされ、感度を制限する主な原因が μ-PIC に含まれる放射性不純物であることが示唆された。放射性不純物が崩壊して生成されたアルファ線が検出領域内に染み出し、さらにアルファ線は原子核事象と判別がつかないため、解析で除去することができなかっ

たと考えられる。

この結果を受け、不純物の含有量を削減した低放射能 2 次元ガス画像装置「LAμ-PIC（Low Alpha-ray emitting μ-PIC)」が開発された。LAμ-PIC の電極構造は μ-PIC と同じであるが、検出器表面に不純物の含有量が 1/100 の素材が使われた。2017 年末までに LAμ-PIC の性能評価が行われ、従来の μ-PIC と同等の性能であることが確認された。2017 年に 30×30 cm^2 の検出面積を持つ LAμ-PIC を神岡地下実験施設の検出器に組み込むことで、低バックグラウンドガス検出器 NEWAGE-0.3b"が開発された。本論文の主要な結果は NEWAGE-0.3b"を用いて暗黒物質探索を行い、方向に感度を持った手法で世界最高感度を更新したことである。

2018 年 6 月から 2018 年 11 月にかけて、神岡地下実験施設にて NEWAGE-0.3b"を用いた暗黒物質探索が行われた。検出器の有効体積は 28×24×41 cm^3(28 L)であり、観測時間は 108 日に相当する。その間約 2 週間ごとに検出器の校正が行われ、検出器の安定性が確認された。方向に感度を持った手法において、検出器の角度分解能は暗黒物質の発見感度に大きく影響する。測定された角度分解能は、50-60 keV のエネルギー帯域で $48^{+6.8}_{-2.2}$ 度であり、暗黒物質から期待される反跳角度の絶対値分布の前後非対称度は 31%であった。事象選別を行った後、50-60 keV のエネルギー帯域に原子核反跳事象の候補として残ったのは 2 事象であった。これらが暗黒物質由来の信号であるかを確かめるため、観測された事象の反跳角度の絶対値分布を作成し、検定を行ったが、統計的に有意な発見には至らなかった。そのため、暗黒物質と陽子のスピンに依存する散乱断面積に 90%の信頼度の上限値を与えた。典型的な上限値は 100 GeV の暗黒物質に対して 50 pb である。この制限値は 2015 年の結果の 15 倍良いものであり、方向に感度を持った手法では最も厳しい制限を与えている。

感度が 15 倍向上した主な理由は、低放射能な LAμ-PIC に変更したことで μ-PIC 表面から放出されるアルファ線が期待通りに削減できたことにある。しかしながら、未だ背景事象は残存しており、これによって DAMA 領域の探索が制限された。Geant4 シミュレーションを用いて背景事象数を見積もったところ、環境ガンマ線、ガス中のラドンの崩壊由来のアルファ線、LAμ-PIC 表面に付着する ^{210}Pb、^{210}Po の崩壊由来のアルファ線が支配的だと考えられる。見積もられた背景事象数は観測事象数を誤差の範囲でうまく説明した。

（別紙１）　　論文審査の結果の要旨

氏名	池田　智法		
論文題目	Directional dark matter search with a low-background gaseous detector (低バックグラウンドガス検出器を用いた方向に感度を持った暗黒物質探索実験)		
審査委員	区　分	職　名	氏　　名
	主　査	准教授	身内　賢太朗
	副　査	教授	竹内　康雄
	副　査	教授	早田　次郎
	副　査		印
	副　査		印

要　　旨

本論文は、神岡地下実験室で NEWAGE-0.3b" 検出器を用いて 2018 年 6 月から 2018 年 11 月の間に取得した 1.1kg/days の観測データを用いて方向に感度を持つ暗黒物質探索を行い、方向に感度を持つ手法によって暗黒物質と核子との散乱断面積に制限を与えた結果が論じられている。本論文の骨子は、第 1 章に理論・実験的背景、第 2 章から第 4 章で実験的研究結果が論じられ、第 5 章で結論が述べられている。

第 1 章では導入として、現代物理学の大きな問題であり本論文の主題でもある暗黒物質の概説がなされている。宇宙の各階層における暗黒物質存在証拠の例示に始まり(1.1 節)、未知素粒子としての暗黒物質の候補粒子が概説されている(1.2 節)。さらに暗黒物質の有力な候補で本論文の研究対象でもある、Weakly Interacting Massive Particle(WIMP)について述べられている(1.3 節)。

その後、WIMP 暗黒物質の実験的直接探索手法に関しての原理が詳細に解説されている(1.4 節)。直接探索実験によって検出が期待されるエネルギースペクトル、暗黒物質と原子核との散乱断面積の理論的背景、原子核の構造の散乱断面積に与える影響について順に述べられ、それらを統合して期待されるエネルギースペクトルが導出されている。それに基づいて暗黒物質特有の信号が論じられている。

さらに、世界中で行われている直接探索実験について、従来型の大質量検出器を用いた手法、本論文の手法である方向に感度を持った手法の順で概説されている(1.5 節)。方向に感度を持った手法としては、本実験の手法である低圧力のガスを用いた手法に加えて、原子核乾板を用いた手法について述べられている。1 章の最後に方向に感度を持った暗黒物質探索で、本論文の主題となる NEWAGE 実験に関する先行研究が述べられている(1.6 節)。

第 2 章では本研究で用いた 3 次元飛跡ガス検出器「NEWAGE-0.3b"」検出器について詳説されている。検出器の概要(2.1 節)ののち、構成についての説明が行われ(2.2 節)、データ取得システムが紹介されている(2.3 節)。、最後に検出器の性能評価について詳しく述べられている(2.4 節)。ドリフト速度、エネルギー応答などの基礎的な性能評価の後、本研究の重要な要素である三次元飛跡の角度分解能について議論されている。

第 3 章では、NEWAGE-0.3b"検出器を用いた方向に感度を持つ暗黒物質探索実験について述べられている。この実験では、2018 年 6 月から 2018 年 11 月までの間に 107.6 日の有効観測時間の観測を行い、1.12kg・days の観測量を得た(3.1 節)。次に、事象選別が行われ、最終的なエネルギースペクトル、方向分布が得られている(3.2 節)。これらの実験データの解釈のために、系統誤差が議論されている(3.3 節)。その後、期待される暗黒物質の方向分布と実測を比較することで、方向に感度を持った暗黒物質探索を行い、暗黒物質と陽子との散乱断面積に制限を与えている。本研究の結果、100GeV の質量をもつ暗黒物質に対して、陽子との散乱断面積に 50pb の制限を与えた(3.4 節)。

第 4 章で本論文の結果に対する議論が述べられている。本研究の感度を制限したバックグラウンドについて概要が述べられている(4.1 節)。その後、検出器外部からのバックグラウンド(4.2 節)、検出器内部からのバックグラウンド(4.3 節)の順に議論がすすめられて、バックグラウンドについてまとめられている(4.4 節)。最後に将来の展望が述べられている(4.5 節)。

第 5 章で結論が述べられている。

本研究は宇宙・素粒子物理学の大問題である暗黒物質について，特徴ある手法によって直接探索を試み、制限を得たものである。この実験的探索によって、重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって，学位申請者の池田智法は，博士（理学）の学位を得る資格があると認める。

・特記事項　　なし
・特許登録数　　0 件
・発表論文数　　査読付き 1 編（投稿予定）