



Development of a low-background particle detector for a direction sensitive dark matter search

橋本, 隆

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2019-03-25

(Date of Publication)

2021-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7439号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007439>

※ 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。



論文内容の要旨

氏 名 橋本 隆

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。)

Development of a low-background particle detector for a direction sensitive dark matter search

(方向に感度を持つ暗黒物質探索実験のための低バックグラウンド検出器の開発)

指導教員 身内 賢太郎

宇宙の構成要素のうち既知の物質は約 5%である。約 27%が未知の物質である「暗黒物質」と言われており、この正体解明は 21 世紀の宇宙・素粒子物理に課せられた大きな課題である。暗黒物質の正体や性質を知るために、暗黒物質と弾性散乱した原子核を直接捉える(直接探索)実験が世界中で行われている。暗黒物質は銀河ハローの中を等方的に運動していると考えられている。暗黒物質特有の信号として地球と暗黒物質との相対速度の夏と冬での差(図 1)による計数率の年較差(季節変動)の検出がある。DAMA/LIBLA グループが季節変動を検出し暗黒物質を直接探索できたと主張した[1]。しかし、この主張を否定する実験結果もあり、季節変動とは違った手法でより確かな暗黒物質の証拠を得る必要がある。季節変動以外の暗黒物質特有の信号に、暗黒物質と弾性散乱した原子核の方向を測定する手法がある。太陽系は銀河ハローの中を運動している。そのため暗黒物質による原子核の反跳方向には偏りがあると考えられ、原子核の反跳方向の観測は暗黒物質存在の強い証拠となる。申請者の所属する実験グループ NEWAGE は、方向に感度をもつ暗黒物質直接探索を行っており、この手法では世界最高感度の結果(図 2 中 NEWAGE2015)を得ている[2]。一方で、DAMA/LIBLA グループによって暗黒物質の存在が示唆されている領域(DAMA 領域: 図 2 中 DAMA allowed)には感度が至っておらず(図 2)、感度の向上が急務である。

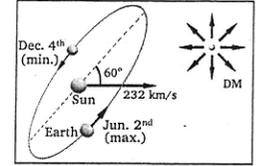


図 1: 銀河に対する暗黒物質に対する地球の運動の様子

本論文の目的は DAMA 領域探索ができる検出器の開発である。本研究が完成すれば、世界初の方向に感度をもつ手法での DAMA 領域探索を開始することができる。DAMA 領域に暗黒物質が

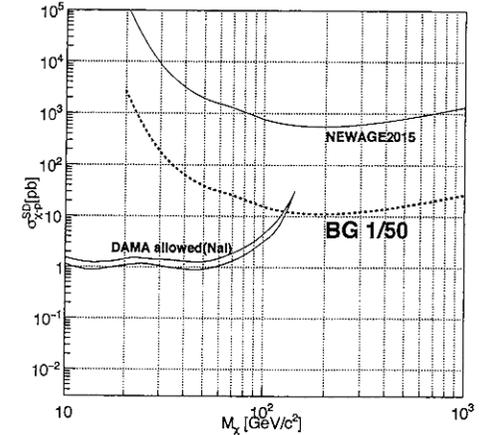


図 2: 暗黒物質の反応断面積の制限曲線

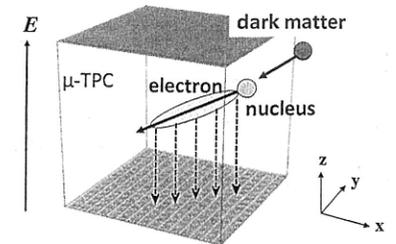


図 3: μ -TPC の検出原理

存在すれば発見となる。これは物理学上極めて重要な発見となり、暗黒物質の性質解明という新たな学問領域を拓くことができる。存在しなかった場合、DAMA 領域に確度の高い制限を与えることができる。

橋本隆：NO.2

NEWAGE では原子核の反跳方向測定は、読み出しに 30cm 角の二次元画像検出器『 μ -PIC』と 30cm 角の補助増幅器『GEM』を使用した $30 \times 30 \times 41 \text{cm}^3$ の三次元ガス飛跡検出器『 μ -TPC』で行っている。検出原理を図 3 に示す。 μ -TPC を用いることで方向に感度をもつ手法では世界最高の検出感度を有している。 μ -TPC を製作し方向に感度をもつ手法で DAMA 領域探索を開始することができれば世界初となる

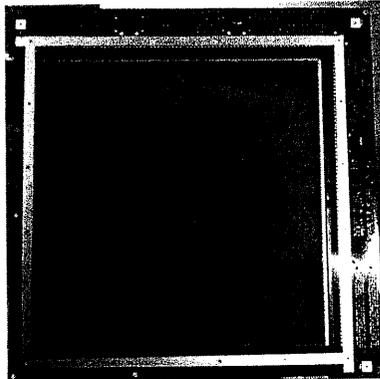


図 4：30cm 角 Low-alpha μ -PIC

現在検出器の感度を制限しているのは、暗黒物質以外による事象（バックグラウンド、以下 BG）である。本研究目的は DAMA 領域の探索を開始するために BG を 1/50 以下に低減した検出器を製作することである。

これまでの研究[2]から BG は μ -PIC 補強材のガラス繊維に含まれる U/Th 系由来の表面 α 線であることがわかった。本研究では BG 源を取り除いた新検出器『Low-alpha μ -PIC』が開発された。開発された Low-alpha μ -PIC の外観を図 4 に示す。

本研究では、Low-alpha μ -PIC の性能評価を行った。性能評価はガスゲインの位置依存性、ガスゲインの印加電圧依存性、 μ -PIC 由来の表面 α 線量の確認である。またこれらが投稿論文の内容である。

ガスゲインの位置依存性は試作機である 10cm 角の Low-alpha μ -PIC と 30cm 角の Low-alpha μ -PIC 実機が測定された。10cm 角の Low-alpha μ -PIC は要請値を満たす結果を得ることが出来、30cm 角の Low-alpha μ -PIC 実機は上限値で要請値と同程度の結果を示すことが出来た。

次にガスゲインの印加電圧依存性が確認された。結果を図 5 に示す。10cm 角の Low-alpha μ -PIC 試作機、30cm 角の Low-alpha μ -PIC 実機ともに要請を満たしていることが確認出来た。

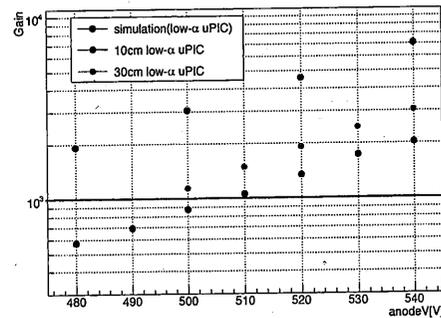


図 5：Low-alpha μ -PIC におけるガスゲインの印加電圧依存性。緑線は要請値を表す。

Low-alpha μ -PIC 実機の表面 α 線の確認は神岡地下実験施設で行われた。結果は、統計量の少なさと他の BG の影響で要請地である表面 α 線量 1/50 の確認には至らなかったが上限値で 1/24 が確認された。1/50 を確認するためには、統計を増やし、必要となれば他の BG の影響を考慮に入れる必要がある。

橋本隆：NO.3

本論文の Discussion として Low-alpha μ -PIC の実測値が Garfield++ による Simulation と一致しなかった原因がある。ガスゲインをけることのできるパラメータを調査し Simulation を用いて一致しなかった原因について言及した。対象となったパラメータは μ -PIC アノード電極とカソード電極の高さ、アノード電極の直径、カソード電極の直径、絶縁層の厚さである。これらのパラメータの変化によるガスゲイン影響が Simulation を用いて調査されたが実測値を simulation のガスゲインの差を説明できるパラメータは発見されなかった。このことから、本論文では未知のガスゲインに影響を与えるパラメータの存在が示唆された。

本論文のもう一つの Discussion の内容に検出感度が DAMA 領域に到達しているかの確認が行われた。表面 α 線の確認のために行った地下実験のデータに暗黒物質探索と同様のカットをかけることで比較された。カットパラメータは μ -PIC が異なるため新たに設定し直された。前回の暗黒物質探索 RUN(NEWAGE2015)と比較され、検出感度が上限値で 1/30 になっていることが確認された。検出感度は統計で制限されているため、更に統計を貯めることでより良い検出感度を確認できることが期待される。

確認された検出感度から予想される感度曲線を図 6 に示す。予想された感度では本論文の目的であった DAMA 領域到達が達成できることが予想された。検出感度は現在統計で制限されているので統計を貯めることでより DAMA 領域の探索範囲が広がることが期待される。

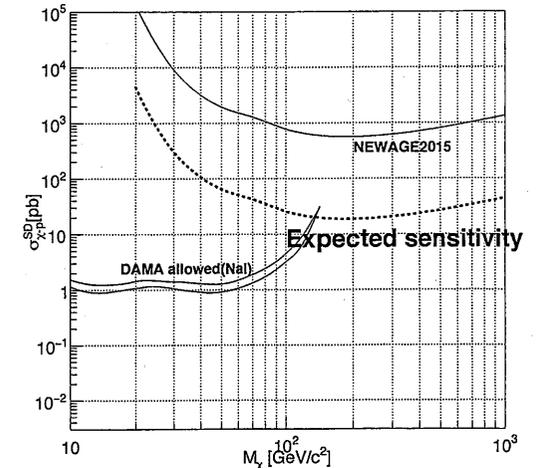


図 6：本研究で開発した Low-alpha μ -PIC を用いた暗黒物質探索で期待される感度曲線。

[1] DAMA/LIBRA Collaborations, Eur. Phys. J. C (2010) 67: 39-49
 [2] 橋本隆修士論文 2014 年神戸大

氏名	橋本 隆		
論文 題目	Development of a low-background particle detector for a direction sensitive dark matter search (方向に感度を持つ暗黒物質探索実験のための低バックグラウンド検出器の開発)		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	准教授	身内 賢太郎
	副査	教授	竹内 康雄
	副査	教授	播磨 尚朝
	副査		
	副査		

印

要 旨

宇宙の構成要素のうち既知の物質は約5%である。約27%が未知の物質である「暗黒物質」と言われており、この正体解明は21世紀の宇宙・素粒子物理に課せられた大きな課題である。暗黒物質の正体や性質を知るために、暗黒物質と弾性散乱した原子核を直接捉える(直接探索)実験が世界中で行われている。本論文は、こうした直接探索実験のうち、暗黒物質発見の強い証拠を与えると言われている方向に感度を持った暗黒物質探索実験のための、低バックグラウンド検出器の開発について論じられている。全6章からなる本学位論文は、暗黒物質および粒子検出器の概論から始まり、本論文の動機について詳説され、低バックグラウンド検出器の開発・性能評価、議論が述べられている。論文の内容に関して以下に概要を述べ、最後に審査結果を述べる

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。銀河の回転曲線(銀河スケール)、銀河団衝突(銀河団スケール)、宇宙マイクロ波背景放射などの宇宙観測(全宇宙スケール)などによって、宇宙の各スケールにおける暗黒物質存在の証拠が例示され、宇宙のエネルギー組成の約27%が暗黒物質であることが解説されている。この暗黒物質は未知素粒子であると考えられており、暗黒物質の候補粒子、特に本論文の対象としている弱い相互作用をする粒子、その中でも超対称性粒子について述べられている。その後、暗黒物質と通常の物質との相互作用を直接観測することを目的とする、「直接探索実験」について詳しく論じられている。銀河中での暗黒物質の運動と銀河に対する太陽系の運動からはじまり、暗黒物質が原子核を反跳するエネルギーのスペクトルが導かれている。また、太陽系での地球の公転に起因する計数率の季節変動に関しても、その原理から期待される信号までが説明されている。第1章の最後には、本論文で開発する検出器の用途である、方向に感度を持つ暗黒物質探索で期待される信号について論じられ、代表的な実験が紹介されている。

第2章では本論文で扱うガスを用いた粒子検出器についての概説がなされている。まず、ガス検出器の原理について、粒子とガスとの相互作用、ガス中での電子の挙動が論じられ、ガス検出器としての重要な要素である雪崩増幅について解説されている。次にガス検出器の種類について、現在広く使われているGEM、マイクロメガス、 μ -PICという3種類のMPGD(Micro Patterned Gaseous Detector; 微細加工技術を用いたガス検出器)を例示して述べられている。さらに、こうしたMPGDについて、暗黒物質探索実験などの稀事象探索実験で使用する際に問題となる放射性不純物由来のバックグラウンドについて、バックグラウンド源となる放射性同位体および、既存のMPGDのバックグラウンドレベルが紹介されている。

第3章では本論文の動機となる、方向に感度を持つ暗黒物質探索実験「NEWAGE」の概説およびバックグラウンド研究が論じられている。NEWAGE検出器はMPGDの一種である μ -PICを読み出しに持ち、微細な三次元飛跡を検出するために、独自の読み出し回路を用いている。先行研究として、東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設(以降 神岡地下実験施設)で2013年に行われた方向感度を持つ暗黒物質探索実験の結果が示されている。この実験の結果に対するバックグラウンド源の調査は、橋本氏自身による先行研究として行われた(橋本隆 修士論文 2016年2月 神戸大学)。ゲルマニウム半導体検出器を用いて μ -PICの材料中の放射性不純物の測定を行ったところ、材料の中でも補強材として使用されているガラス布に多くの放射性不純物が含まれていることが確認された。その結果をもとにして、シミュレーションを行ったところ、暗黒物質探索実験で観測されたエネルギースペクトルを定性的に説明できることが分かった。

氏名	橋本 隆		
<p>第4章では、低バックグラウンド検出器の開発及びその性能評価が論じられている。まず、放射性不純物の含有量の少ない材料の選択が行われた。ガラス布を含まない材料の放射性不純物の含有量を測定したところ、十分に低いことが判明したため、この材料を用いた検出器が製作された。実際に暗黒物質探索実験で使用する検出器のサイズは30 cm角であるが、加工方法の確立などの目的のために、まず10 cm角の検出器を製作、ついで30 cm角の検出器が製作された。加工前の材料、加工途中のサンプル、完成品についてそれぞれ放射性不純物の測定が行われ、加工中での放射性不純物の混入はないことが確認された。橋本氏によって、顕微鏡をもちいた外観試験が行われ、10 cm角の試作機、30 cm角の実機ともに十分な精度で製作されていることが確認された。外観試験で測定された検出器の形状を用いて、ガス増幅のシミュレーションが行われ、従来検出器と同等以上のガス増幅が期待できると述べられている。10 cm角試作機および30 cm角実機に対して検出器の動作試験が行われ、ガス利得1000以上という要請値を満たすことが確認された。また、検出面内でのガス利得の一様性の測定も行われ、暗黒物質探索に使用するために十分な一様性を有することが確認された。ガス検出器としての性能が確認された30 cm角の実機について、バックグラウンドの測定が橋本氏主導のもと、神岡地下実験施設で行われた。約50日の測定の結果、バックグラウンド量が1/30以下になっていることが確認された。</p>			
<p>第5章では、得られた実験結果に関する議論がなされている。一点目は、製作した検出器のガス利得について、シミュレーションと実測が一致しなかった点である。ガス利得の実測値は、シミュレーションの予想する値を3倍程度下回っており、考える原因が定量的に議論されている。ガス利得に対して、いくつかの検出器の構造パラメータへの依存性が評価された。こうした評価の結果、3倍程度の違いを説明するパラメータはないということが判明、我々の予期せぬ何かしらの要因があることを示唆している。二点目として、製作した検出器を用いた場合の暗黒物質探索実験への感度見積もりが行われた。十分な統計量を稼ぐことで、季節変動を観測した先行実験(DAMA実験)が示唆する領域の探索開始可能性を持つことを示した。</p>			
<p>第6章は本学位論文の結論が述べられている。方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験NEWAGEの感度を向上させるために、放射不純物の含有量の少ない検出器が製作された。製作された検出器について性能評価が行われ、ガス利得およびその一様性について十分に性能を有することが確認された。また、一定の低バックグラウンド化が実測され、今後の長期測定によって、季節変動を観測した先行実験(DAMA実験)が示唆する領域の探索開始可能性を持つことを示した。</p>			
<p>本研究は方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験のための低バックグラウンド検出器の開発について、開発・性能評価・暗黒物質実験に用いた場合の感度評価に関して研究したものであり、暗黒物質研究に対し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、学位申請者の橋本隆は、博士(理学)の学位を得る資格があると認める。</p>			