

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月20日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03976

研究課題名(和文)超高速・高解像顕微鏡による暗黒物質探索用超微粒子原子核乾板の読み出しの開発研究

研究課題名(英文) Study of readout system of ultrafine grain nuclear emulsion for dark matter search with ultra-fast high-resolution microscope

研究代表者

中野 敏行 (Nakano, Toshiyuki)

名古屋大学・理学研究科・講師

研究者番号：50345849

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙の暗黒物質問題は物理学上の最も重要な課題であり、「原子核乾板を用いた暗黒物質探索実験」は到来方向に感度を持つことから、その解明に重要な役割を果たせると考えている。一方で、その実現には超微粒子原子核乳剤を読み取ることのできる高速かつ高解像度な顕微鏡システムを開発しなければならない。本研究では、キログラム級の原子核乳剤検出器による原型実験の解析に必要な解析システム技術を開発した。具体的には、GPUを使用した飛跡画像処理の高速化、飛跡認識の劣化をもたらす画像取得における振動の抑制のための光源開発、新しい画像処理アルゴリズムによる方向感度の改善、乳剤に起因する背景事象識別方法の研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超微粒子原子核乾板による暗黒物質探索は、反跳原子核の方向を捉えることができるという点で、他の多くの実験とは本質的に異なる検証が可能となる。また、原子核乳剤は分解能に比して密度が3.2g/ccと大きいことから、標的質量を大きくすることができ、将来はトン級の観測実験の実現を目標としている。中性子検出についてもNITの利用価値は高く、MeV程度の高速中性子では反跳陽子の角度および飛程によるエネルギー測定が同時にできる利点から中性子イメージングへの応用も期待され、またホウ素やリチウムを添加した原子核乳剤においては、熱中性子や冷中性子検出器としてもサブミクロンの分解能での中性子イメージングが可能となる。

研究成果の概要(英文)：The dark matter problem in the universe is the most important subject in physics, and "dark matter search experiment using nuclear emulsion detector" has sensitivity in the direction of arrival, so it is considered to play an important role in the elucidation. On the other hand, in order to realize this, it is necessary to develop a high-speed and high-resolution microscope system capable of reading an ultrafine grain nuclear emulsion. In this study, we developed the analysis system technology required for analysis of the pilot experiments using kilogram-scale nuclear emulsion detectors. Specifically, we carried out acceleration of image processing using GPU, development of light source for suppression of vibration in image acquisition leading to deterioration of track recognition, improved direction sensitivity by new image processing algorithm, study of identification method of background event caused by contamination.

研究分野：素粒子物理学(実験)

キーワード：暗黒物質 原子核乾板 顕微鏡 中性子 ニュートリノ イメージング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

銀河回転運動の観測等からその存在が予想される暗黒物質問題は、宇宙および物理学上、最大の謎の一つとされる。暗黒物質の探索は、その候補のひとつである WIMP と原子核の弾性散乱を期待し、反跳した原子核を捉えることで行う。これまでに推進されているほとんどの暗黒物質探索実験は、その反跳エネルギーをとらえるものであり、スペクトルの観測や季節による事象数変動の測定によって信頼性を高める。そのような実験の一つである NaI シンチレーターを検出器に用いた DAMA 実験では、地球の公転による速度変化によって生じる事象数の季節変動を 9 以上の有意性で捉えたと主張している。CoGeNT とも若干の差があるものの同様な報告をしていた。一方、XMASS 実験グループは DAMA 実験が主張する領域を同じ季節変動観測において、ほぼすべての質量領域で可能性を排除し、スペクトル観測で結果を出している XENON100 実験や LUX 実験も否定するなど、暗黒物質探索実験は混沌とした状況にある。この現状に対し、異なる実験手法で暗黒物質探索に挑むのが、原子核乾板による暗黒物質方向探索実験である。

2. 研究の目的

名古屋大学で開発した超微粒子原子核乾板(NIT)に、暗黒物質が反跳した原子核と同程度の運動エネルギー(数 100 keV)をもったイオンを照射すると、イオンの検出とその方向を測定できることが明らかになった[1]。これは原子核乾板で WIMP 暗黒物質の方向情報をもとにした観測を可能とすることを意味する。天の川銀河の中心に対して地球は太陽とともに回転していることから、暗黒物質は銀河座標に対して速度異方性を持っていると考えられている。暗黒物質による飛跡は異方性をもっているが、背景事象になりうる環境中性子等は等方的であると考えられることから識別が可能となる。DAMA 実験等が報告する WIMP 質量及び散乱断面積の領域を探索するには、観測期間を 1 年とした場合では標的質量として約 25 kg の原子核乳剤が必要になると見積もられた。(図 1)

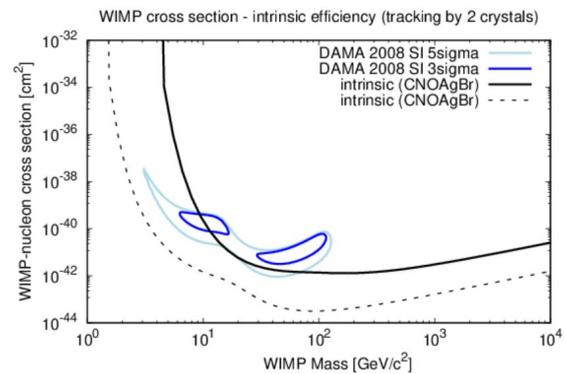


図 1. 標的質量が 10kg での感度。実線はエネルギー閾値を考慮した場合、破線は原理的な感度。

3. 研究の方法

本研究では超微粒子原子核乾板(NIT)に記録された、飛跡長が 100 nm 程度の原子核の反跳飛跡と単独の銀粒子を識別できる。超微粒子原子核乾板を解析可能な高速な光学顕微鏡システムを開発し、キログラム級の原子核乳剤検出器を解析する手法を確立することを目標とする。

原子核乾板はゼラチン中に荷電粒子に感度のある臭化銀(AgBr)結晶を分散させた検出器であり、現像すると AgBr 結晶のあった場所に銀粒子が残る。NIT は AgBr 結晶のサイズが 30 - 40 nm であり、暗黒物質による反跳原子核の飛程のうち 100 nm 程度までは複数の結晶が現像された銀粒子となり、飛跡として検出が可能である。

これは、長く原子核乾板の解析対象であった最少電離粒子の飛跡よりも桁違いに飛程が短く、質量が 10 GeV/c² の暗黒物質であればその飛程は 200 nm 以下であり、回折限界による光学顕微鏡の分解能と同程度である。原子核乾板には fog と呼ばれる自然発生する銀粒子が含まれるため、複数の粒子からなる飛跡が単独の銀粒子の fog かを識別する必要がある。最終的な詳細解析は、より高分解能な X 線顕微鏡を用いて行えることを実証できているが[2]、キログラム級の原子核乾板を網羅的に X 線顕微鏡で観察することは時間的制約から全く不可能である。従って、本研究で開発する暗黒物質探索用の高速高解像度光学顕微鏡システムにより複数銀粒子からなる飛跡の候補事象の抽出を行うことが必須となる。これまでも光学像の形状解析による飛跡事象抽出の原理的な実証が行われてきたが、本研究では、これまでの方法の問題点を明らかにし、より高度なものとすることで目標を達成する。(図 2)



図 2. 本研究で開発した超微粒子原子核乾板解析用顕微鏡システム

4. 研究成果

(1)画像処理の高速化

暗黒物質探索のための超微粒子原子核乾板 (NIT) での原子核反跳による飛跡認識では、1 視野あたり 96 枚の画像を処理する必要がある。事象の認識および飛跡の角度および長さに対応する長軸、短軸を決定する、飛跡画像処理の高速化を行った。画像処理は GPU 上で行う処理と CPU 上で行う処理の 2 種類があるが、その両方の高速化を行った。GPU の共有メモリを有効に使用し、アクセス時間の短縮やメモリへのアクセス回数を削減した。当初 1 視野あたり GPU 処理部分が 1.35 秒、CPU 部が 0.48 秒合計 1.83 秒かかっていたものが GPU 部 0.1 秒、CPU 部で 0.15 秒の計 0.25 秒と約 1/7 まで短縮でき、GPU を複数使用や CPU のコア数を増やすなどをすれば、さらなる並列化による高速化が可能である。その結果画像処理の時間において、現有の 2 台の装置によって年間 240g の解析可能量の目処がたったといえる。

(2) 無効時間の削減と振動抑制

画像の撮像速度の向上及びステージの移動時間の短縮が重要な課題となったが、ステージの移動および環境における振動がもたらす画像のブレが飛跡認識へ影響与えることが判明し、振動の影響を低減するために短パルス光源を開発した。波長 450nm の 20 個のマルチモードレーザーダイオードからなる LD アレイの駆動回路および照明光学系を設計・製作した。本光源のパルス幅は最短で 2 マイクロ秒であり、100kHz の振動源であれば 1/5、1kHz では 1/500 に振動を低減することができ、例えば、秒速 1mm で乾板を駆動しながらの撮影においても、飛跡像に顕著な影響を与えないものと考えられる。

(3) 新しい飛跡画像処理アルゴリズムの開発と実証

原子核の反跳飛跡の識別には、2 個以上の銀粒子を形成した事象を検出する。これまでこのような極短飛跡の再構成手法には、その光学像がほぼ回折限界に近いことから、銀粒子の分離は行わずに像の形状を楕円曲線によるフィッティングによって行ってきた。しかしながら、問題点として、撮像素子による光学像のデジタル化によって画素の形状や格子配列に起因する 2 次元空間周波数特性の異方性が生じ、検出効率や飛跡角度測定の方法依存性が発生していることが明らかになった。特に検出効率の異方性は、背景事象においても同様の効果をもたらすため、本来等方的な背景事象であっても異方性が検出されることになりうる。角度毎の検出効率で補正したとしても系統誤差の観点から、できるだけ平坦であることが望ましい。

本研究では、画像処理方法を抜本的に見直した。事象の周辺 51×51 画素を抽出し、離散フーリエ変換し周波数空間に変換する。その後計算精度を高めるため正規化周波数空間で倍に拡張し、等方的な強度マップでフィルタリングした後逆フーリエ変換した。この時に低周波数域も同時に抑制している。その後、重心回りの 2 次モーメントテンソルを算出し、対角化することで主対角成分が長軸および短軸に相当する値、対角化に用いた回転行列が方位角に相当する値を得る。その結果、40nm の球形銀粒子像では長軸短軸比が 1.3 以上まで分布したのに対して、新方式では 1.05 以下となった。(図 3) また炭素イオンビームでの疑似信号事象においては、検出効率が、概ね 2% 以内のばらつきにおさまった。(図 4)

(4) 背景事象と飛跡事象の識別能の向上

現在の NIT 中の背景事象の要因として NIT 製

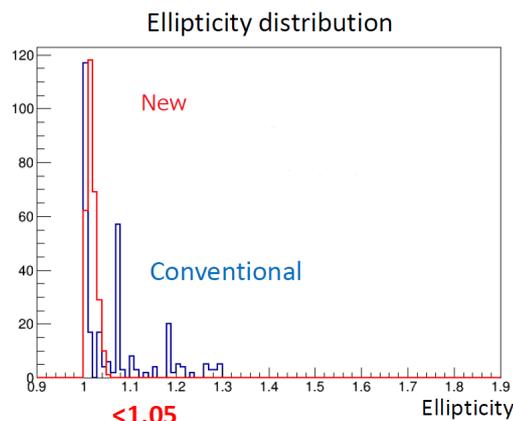


図 3. 40nm 球形銀粒子の長軸短軸比の分布。青：従来型画像解析、赤：本研究によるもの。

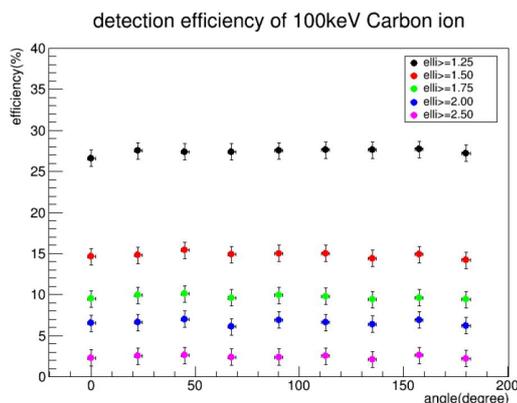


図 4. 炭素イオンビームによる疑似信号を入射した場合の方位角毎の検出効率。長軸短軸比別に表示している。

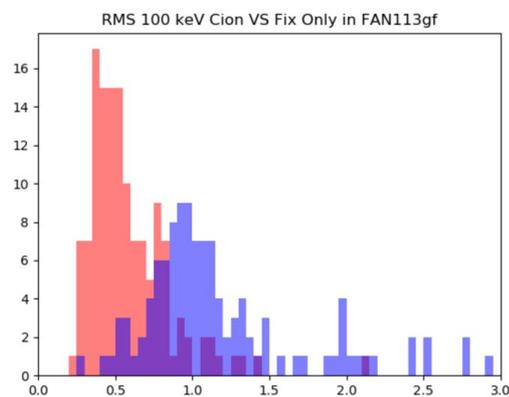


図 5. 位相差法による飛跡事象とダスト事象の識別。赤：飛跡事象、青：ダスト事象を示す。

造中の混入物(ダスト事象)や現像処理を行う際に生じる事象が挙げられる。これらの組成は現時点では不明であるが、乳剤製造中に生成される酸化物などが考えられる。この背景事象と主に銀で構成された飛跡事象を区別するために新しく位相差光学系を導入することでシグナル事象との識別を試みた。位相差光学系では位相情報を取得できることから、構成物質や形状の違いが反映されており、ダスト事象を識別する有力な情報となりえる。実際に 100keV の炭素イオンと、定着処理のみをした NIT 中に含まれるダスト事象について比較を行った結果、炭素イオン事象が 86%の生き残る条件で、位相差光学系ではダスト事象が 95%排除できることを確認した。(図5)

<引用文献>

Low-velocity ion tracks in ne grain emulsion. M. Natsume et al., Nucl. Instrum. Meth. A575: 439-443,2007.

Analysis system of submicron particle tracks in the ne-grained nuclear emulsion by a combination of hard x-ray and optical microscopy, T. Naka et al., Rev.Sci.Instrum. 86 (2015) 073701.

5. 主な発表論文等

[学会発表](計10件)

Ryuta Kobayashi, Toshiyuki Nakano, Tatsuhiro Naka, Yoshimoto Masahiro, Atsuhiko Umemoto and NEWSdm collaboration, "Development of high speed scanning machine for directional WIMP search", ISVHECRI, 名古屋大学, 2018年5月

Ryuta Kobayashi, Toshiyuki Nakano, Tatsuhiro Naka, Masahiro Yoshimoto and Atsuhiko Umemoto, "Development of next high-speed scanning system for Nano tracks in fine-grained nuclear emulsion", ICMaSS,名古屋大学, 2017年9月

Ryuta Kobayashi, Toshiyuki Nakano, Tatsuhiro Naka, Yoshimoto Masahiro, Atsuhiko Umemoto and NEWSdm collaboration, "Development of high speed scanning machine for directional WIMP search", ISVHECRI, 名古屋大学, 2018年5月

小林龍太, 中竜大, 中野敏行, 吉本雅浩, 梅本篤宏, 市来浩勝, 多田智美, 福澤佑哉, 白石卓也, 轟祈, 佐藤修, 久下謙一, 浅田貴志, 他 NEWSdm コラボレーション, 「エマルジョン暗黒物質探索実験 NEWSdm(2) ~ 高速飛跡読み取り装置開発の現状報告 ~」, 日本物理学会第73回年次大会, 東京理科大学, 2018年3月

小林龍太, 中竜大, 中野敏行, 梅本篤宏, 市来浩勝, 多田智美, 福澤佑哉, 白石卓也, 轟祈, 佐藤修, 久下謙一, 浅田貴志, 吉本雅弘, 他 NEWSdm コラボレーション, 「エマルジョン暗黒物質探索実験 NEWSdm(3) ~ 微粒子原子核乾板のための次世代型高速飛跡読み取り装置PTSの開発状況 ~」, 日本物理学会第2018年秋季大会, 信州大学, 2018年9月

小林龍太, 中竜大, 中野敏行, 梅本篤宏, 白石卓也, 多田智美, 福澤佑哉, 轟祈, 濱野風海, 佐藤修, 久下謙一, 浅田貴志, 吉本雅浩, 他 NEWSdm コラボレーション, 「エマルジョン暗黒物質探索実験 NEWSdm(1) ~ 解析速度向上及び新解析手法の開発 ~」, 日本物理学会第74回年次大会, 九州大学, 2019年3月

小林龍太, 中野敏行, 中竜大, 吉本雅浩, 梅本篤宏, 「超微粒子原子核乾板読み取りのための高速自動飛跡読み取り装置の開発」, 日本写真学会, 2017年12月

小林龍太, 中竜大, 中野敏行, 吉本雅浩, 梅本篤宏, 市来浩勝, 多田智美, 福澤佑哉, 白石卓也, 轟祈, 佐藤修, 久下謙一, 浅田貴志, 他 NEWSdm コラボレーション, 「エマルジョン暗黒物質探索実験 NEWSdm(2) ~ 高速飛跡読み取り装置開発の現状報告 ~」, 日本物理学会第73回年次大会, 東京理科大学, 2018年3月

小林龍太, 中竜大, 中野敏行, 梅本篤宏, 市来浩勝, 多田智美, 福澤佑哉, 白石卓也, 轟祈, 佐藤修, 久下謙一, 浅田貴志, 吉本雅弘, 他 NEWSdm コラボレーション, 「エマルジョン暗黒物質探索実験 NEWSdm(3) ~ 微粒子原子核乾板のための次世代型高速飛跡読み取り装置PTSの開発状況 ~」, 日本物理学会第2018年秋季大会, 信州大学, 2018年9月

小林龍太, 中竜大, 中野敏行, 梅本篤宏, 白石卓也, 多田智美, 福澤佑哉, 轟祈, 濱野風海, 佐藤修, 久下謙一, 浅田貴志, 吉本雅浩, 他 NEWSdm コラボレーション, 「エマルジョン暗黒物質探索実験 NEWSdm(1) ~ 解析速度向上及び新解析手法の開発 ~」, 日本物理学会第74回年次大会, 九州大学, 2019年3月

6. 研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名: 小林龍太

ローマ字氏名: Ryuta Kobayashi

研究協力者氏名：梅本篤宏
ローマ字氏名： Atsuhiko Umemoto

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。