

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 6 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800140

研究課題名(和文)超微粒子原子核乾板による方向感度を持った暗黒物質探索実験

研究課題名(英文)Directional Dark Matter Search with Fine-Grained Nuclear Emulsion

研究代表者

中 竜大(Naka, Tatsuhiro)

名古屋大学・学内共同利用施設等・助教

研究者番号：00608888

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、固体検出器である超高分解能原子核乾板による方向感度を持った暗黒物質探索実験を目的にしたものである。

国際共同実験の体制の構築を行い、日本とイタリアに独自の解析システムを構築した。このシステムを用いて、疑似的な暗黒物質シグナルを低速イオン照射で作出し、検出効率および角度分解能の定量的な評価を行った。同時に独自シミュレータによる性能の定量的理解を進めた。並行して、精密事象解析法をプラズモン共鳴を用いて行えることを実証した。さらに、デバイス内部の微量放射性同位体の測定によって、内部バックグラウンドの定量的推定を行った。これら一連の研究により、本研究における基盤技術を構築した。

研究成果の概要(英文)：This research aim the directional dark matter search with super-high resolution nuclear emulsions which is solid detector with scalability.

In this term, international collaboration(LNGS, Napoli etc.) was constructed, and developed new systems for this research. By using those, directional efficiency and angular resolution was evaluated by using lon-implant system, and original simulator was developed. These study was progress to understand the detector. In parallel, high precision analysis method using Plasmon resonance effect was proposed and demonstrated that feasibility. In addition, intrinsic radioactivity in our device was measured quantitatively by collaboration with Gran Sasso Laboratory. These study became generic technologies for this project.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：暗黒物質 超微粒子原子核乾板 方向感度測定

1. 研究開始当初の背景

本研究は、自然科学における最大の問題の一つである暗黒物質の直接探索実験を目的にしており、特に、世界で未だ実現できていない大質量検出器による方向感度を持った探索実験を目指したものである。世界的には、カウンターによる事象数とエネルギースペクトルから事象選別し、最終的にはその季節変動によって暗黒物質の存在証拠を示すことを目指しているが、中性子などの背景事象も季節変動を引き起こす可能性と、期待される季節変動が数%と非常に小さいこと、さらにいくつかのポジティブな結果を主張する実験と否定する実験が混在することから、異なる情報による探索が必要とされている。方向感度を持った探索実験は、そのための重要な手法の一つであるが、未だに大質量化を可能としている検出器は存在せず、新たな技術開発が必要な状況であり、本研究は、そのような状況に対して一石を投じるものである。

2. 研究の目的

ここで用いる検出器は、独自に開発した超微粒子原子核乾板 (Nano Imaging Tracker: NIT) であり、サブミクロンの飛跡検出性能を持った世界で最も空間分解能の高い検出器である。一方で、これだけの高い分解能を生かすための読み取りシステムの開発、また、その検出性能の理解は、検出器として実装させるために極めて重要な課題である。本研究では、NIT を用いた暗黒物質探索実験を行うための事象解析システムの開発と検出性能の理解、および、実際の実験において問題となるバックグラウンドの定量的な理解を目的として、 $\text{kg} \cdot \text{day}$ レベルの実験が可能となる技術の開発と実験立案を進めることを目的とする。また同時に、国際共同実験の推進行う。

3. 研究の方法

まず、代表者が中心となったプロジェクトの推進と国際共同実験の構築を行い、大学院生や海外の研究者(特に、イタリアグループ)との連携を強化することで、下記の研究を推進し、暗黒物質実験として実装可能な技術の開発と性能の理解を進めた。

3.1 検出原理と現像処理

まず、検出器の検出原理における現象論は、これまで十分な理解がなく進められていた。この問題点に関して、富士フィルムの元研究者や千葉大学の研究者との共同研究の強化を行い、これまで十分に理解されてこなかった、原子核乾板における粒子線の検出原理の理解を進めるための体制を整えた。その中の一つとして、検出器が持つ検出原理を現象論的に理解することを試み、そこから、現像処理における温度および酸化還元電位の重要な特性を見出し、感度を落とさずノイズレベルの低減を図り、その後の基本的な現像処方として確立させた。

3.2 独自シミュレーションの開発

NIT における結晶の量子化を考慮した独自のシミュレータを開発することによって、デバイスそのものの検出能力を定量的に理解することを試み、実際の実験で検出された事象の理解、および、より現実的な実験感度の推定を行うことを可能にした。このシミュレーションによって、デバイス本来の持つ性能の理解、また、より現実的な暗黒物質探索感度を推定と、最適なデバイスデザインの推定を定量的に行うことができる体制の構築を行った。

3.3 光学解析システムの実用化

名古屋とイタリアグループ (LNGS, Napoli など) が独自に、光学顕微鏡をベースにしたサブミクロンの事象選別システムを開発し、定量的な解析を可能にしたシステムの開発を行った。このシステムを用い

て、疑似暗黒物質シグナルとして、名古屋大学におけるイオン注入装置を用いた単色低速イオンによる較正実験体制を構築し、直接的な方向検出効率と角度分解能を評価した。さらに、それらの結果は、上記シミュレーションとの比較により結晶感度の推定や、暗黒物質探索実験感度への焼き直しを行うための一連の評価手法の確立を行った。

3.4 精密事象解析法の開発

これまで進めていた精密解析システムの一つである X 線顕微鏡システムは、SPring-8 の X 線光学の専門家との共同研究により、完全な実用化を達成させると同時に、ピクセル分解能を向上させるための広視野・高分解能光学系を SPring-8 の BL37XU に構築し、事象解析態勢を構築した。

新たな精密事象解析法として、NIT において、飛跡を構成しているのは銀のナノ粒子であり、そのナノ構造は粒子のエネルギー損失やノイズ特有の構造などを反映していることに目をつけ、ナノスケールの情報を引き出す手法を考案した。これは、プラズモン共鳴効果を用いるものであり、10nm 以下の情報(特に偏光特性)を引き出すための実証研究を行った。

3.5 内部放射性同位体の理解

グランサツソ研究所と共同で、デバイス内部における微量放射性同位体測定を進め、ICP-MS および Ge 検出器による測定によって、微量放射性同位体量を計測した。この結果は定量的な γ 線バックグラウンドの理解と除去効率の目標値を設定において極めて重要である。また、内部の Th・U による α 線から内部中性子発生量も推定を行った。

3.6 バックグラウンド除去手法開発

結晶の量子感度を調整し、特に γ 線のようなエネルギー損失の小さな粒子に対して、高い除去効率を示すデバイス開発も進めている。特に、Rh 化合物およびテトラゾリウム化合物の結晶内部への添加および表面吸着により、劇的に γ 線感度を低減させることができることが実証され、シグナルに対する検出効率の評価と合わせて、最適手法の開発を進めた。

4. 研究成果

検出原理の現象論研究の強化により、現象論をベースにした現像処理法が開発され、感度を維持したままノイズレベルを 1/20 に低減させた。さらに、残りのノイズに関しても、これまで気づくことができなかった異常な応答で発生するノイズであることを明らかにした。このノイズは、解析において重要な問題を引き起こすものであるが、明らかな輝度の違いと反応速度の違いが見られ、ハード・ソフトの両面からこれらの除去が可能であることを示すことができた。

光学顕微鏡ベースの事象選別システムの実用化が成され、画像処理による自動の事象解析態勢を構築した。低速イオンにおける事象解析によって、60keV の炭素イオンにおいて、イオン照射系で 30%(暗黒物質実験系で 50%)の飛跡検出効率であることを評価し、このときの角度分解能は 25° であることを評価した(図1)の事象解析これらの結果は、上記シミュレーションとの比較も行われ、おおむね良い一致が見られており、検出性能の理解を飛躍的に向上させた。このシミュレーションによって、検出器本来が持つ検出性能を推定することができ、NIT は反跳エネルギーが 10keV においても方向感度を持っており、これまで不可能だと思われていた低エネルギー領域での方向感度測定が原理的には可能であるという、非常に高いポテンシャルを持ったデバイス

であることが実証された。それに対して、現状での検出性能は、光学分解能で制限されていることが理解され、さらなるエネルギー閾値の向上が可能であることが明らかとなった。例えばピクセル分解能を2倍に向上することで30%~50%まで向上することが実証され、これは暗黒物質実験系で60%以上の検出効率に相当し、これにより、エネルギー閾値をさらに下げることが可能であることが理解された。

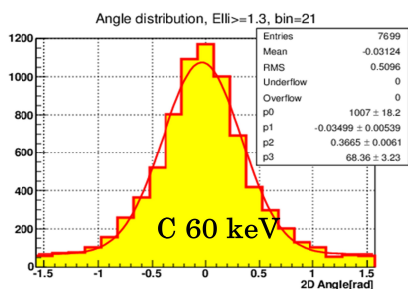


図 1. C 60 keV の飛跡方向分布

さらなる精密解析として、X線顕微鏡は、ピクセル分解能を12nmまで向上することで、事象認識効率を向上させるとともに、事象の選び出しのシーケンスを構築することで、1000 events/dayの事象撮像を可能にした。また、プラズモン共鳴を用いた解析法において、二つの並んだ銀粒子の偏光特性の違いを用いた新たな超解像顕微鏡を提案・実証し、光学顕微鏡システム化で10-20nm程度の解像度を示し、これまで光学では認識できなかった事象に対して、方向測定が可能であることを明らかにした(図2参照)。これらの一連の実証研究は、本研究におけるバックグラウンド事象の識別・除去において極めて重要な技術になる。

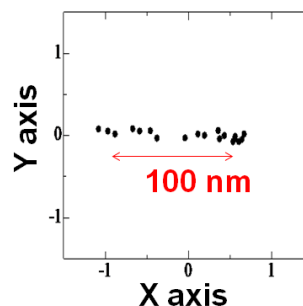


図 2. プラズモン解析による方向測定

バックグラウンドの研究も進め、イタリア・グランサッソ研究所におけるICP-MSおよびGe検出器によって、内部の微量放射性同位体の測定を行い、Th・Uに関しては、約1ppbレベルであること、また、現在持ちうる高脱イオンゼラチン、および、KBr→NaBrでの結晶生成にすることで、K-40のバックグラウンドを1/2000にできることが示され、mBq/kgオーダーに抑えることができることが分かった。ただし、Ag-110mがBq/kgオーダー検出され、その生成の原因を現在特定中である。最終的に、必要な電子バックグラウンド除去効率の目標値を設定することができた。

上記、一連の研究開発により、これまで理解されていなかった検出器の性能とポテンシャルを定量的に理解されたと共に、サブミクロン以下の事象解析の実用化によって、暗黒物質探索実験のベースの技術が確立してきた。これをもとに、国際共同実験として、イタリア・グランサッソ研究所へのプロジェクト申請を準備する段階にまで発展させることができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)
 . Tatsuhiro Naka, Ken'ichi Kuge, Mitsuhiro Nakamura, JJAP 52(2013)112601、査読有
 Doi:107567/JJAP.52.112601

. T.Asada, T. Naka, K. Kuwabara, T.

Katsuragawa, M. Yoshimoto, K. Hakamata, M. Ishikawa, M. Nakamura, O. Sato and T. Nakano, IoP Publishing: J. of Physics, 469(2013)012010, 査読無
Doi:10.1088/1742-6659/469/1/012010

. T. Katsuragawa, T. Naka, T. Asada, M. Yoshimoto, K. Hakamata and M. Ishikawa, IoP Publishing: J. of Physics, 469(2013)012004, 査読無
Doi:10.1088/1742-6596/469/1/012004

. N. D' Ambrossio et al. (T. Naka 9 番目), JINST 9(2014) C1043, 査読無
doi:10.1088/1748-0221/9/01/C01043

. H. Kawahara, T. Asada, T. Naka, N. Naganawa, K. Kuwabara, M. Nakamura, Nucl. Phys B(Proc. Suppl), 253(2014), 査読無

〔学会発表〕(計 15 件)

. 中 竜大、日本物理学会秋季大会、2013 年 9 月、高知大

. Tatsuhiro Naka, The 12th Symposium on X-ray Imaging Optics, 2014 年 11 月、大阪大学

. T. Naka, KMI2013 International Symposium, 2013 年 12 月、名古屋大学

. Tatsuhiro Naka, Invited Seminar, 2014 年 2 月、GSSI, Italy

. 中竜大、浅田貴志、桂川貴義、吉本雅浩、梅本篤宏、古屋駿二、待井翔吾、田中阿由菜、中村光廣、中野敏行、佐藤修、桑原謙一、田原讓、久下謙一、日本物理学会秋季大会、2014 年 9 月、佐賀大学

. 桂川貴義、中竜大、浅田貴志、吉本雅浩、梅本篤宏、古屋駿二、待井翔吾、田中阿由菜、中村光廣、中野敏行、佐藤修、桑原謙一、田原讓、久下謙一、日本物理学会秋季大会、2014 年 9 月、佐賀大学

. 梅本篤宏、中竜大、浅田貴志、桂川貴義、吉本雅浩、中村光廣、日本物理学会秋季大会、2014 年 9 月、佐賀大学

. 古屋駿二、中竜大、浅田貴志、久下謙一、日本物理学会秋季大会、2014 年 9 月、佐賀大学

. 古屋駿二、中竜大、浅田貴志、桑原謙一、久下謙一、画像関連学会連合会第一回秋季合同大会、2014 年 11 月、京都工芸繊維大

. 浅田貴志、中竜大、桂川貴義、古屋駿二、

吉本雅浩、桑原謙一、久下謙一、中村光廣、画像関連学会連合会第一回秋季合同大会、2014 年 11 月、京都工芸繊維大

. 梅本篤宏、中竜大、浅田貴志、桂川貴義、吉本雅浩、中村光廣、画像関連学会連合会第一回秋季合同大会、2014 年 11 月、京都工芸繊維大

. 桂川貴義、中竜大、浅田貴志、吉本雅浩、梅本篤宏、古屋駿二、待井翔吾、田中阿由菜、中村光廣、中野敏行、佐藤修、桑原謙一、田原讓、久下謙一、日本物理学会年次大会、2015 年 3 月、早稲田大

. 梅本篤宏、中竜大、浅田貴志、桂川貴義、吉本雅浩、古屋駿二、待井翔吾、田中阿由菜、中村光廣、中野敏行、佐藤修、桑原謙一、田原讓、久下謙一、日本物理学会年次大会、2015 年 3 月、早稲田大

. 浅田貴志、中竜大、桂川貴義、吉本雅浩、梅本篤宏、古屋駿二、待井翔吾、田中阿由菜、中村光廣、中野敏行、佐藤修、桑原謙一、田原讓、久下謙一、日本物理学会年次大会、2015 年 3 月、早稲田大

. 中竜大、早稲田大学セミナー(招待講演)、2014 年 8 月 6 日、早稲田大

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://flab.phys.nagoya-u.ac.jp/2011/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中 竜大 (NAKA, Tatsuhiro)
名古屋大学・高等研究院 (現象解析研究センター)・助教
研究者番号 : 00608888

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :