

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800132

研究課題名(和文)重力による超冷中性子の量子効果の測定のための分解能数十ナノメートルの検出器の開発

研究課題名(英文) Development of ultra-cold neutron detectors with spatial resolution of several ten nanometers for the measurement of quantum effect of ultra-cold neutrons in the earth's gravitational field

研究代表者

長縄 直崇 (Naganawa, Naotaka)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・研究員

研究者番号：60402434

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：重力の逆二乗則および等価原理の検証に向け、地球重力場中で量子化した超冷中性子の位置分布の測定のための極めて高い位置分解能を持つ中性子検出器の開発を行って来た。

LiNO₃を微粒子原子核乳剤中に添加した検出器を試作し、熱・冷中性子を照射し、⁶Liによる中性子吸収反応を実際に確認できた。位置分解能は既存の検出器よりも一桁近く良い約0.5μmと判明した。そして期待した検出効率が得られた。次に10nmの10B膜に微粒子原子核乳剤を塗布した検出器を試作した。この検出器では原理的に数10nmの位置分解能が得られる。試作した検出器に冷中性子を照射し、実際に吸収反応を確認した。現在10B膜の安定化を行っている。

研究成果の概要(英文)：Neutron detectors with extremely high spatial resolution are having been developed for the measurement of position distribution of ultra-cold neutrons in quantized states in the earth's gravitational field as tests of gravitational invers-square law and equality of gravitational and inertial mass.

A detector made by loading LiNO₃ into fine-grained nuclear emulsion was exposed to thermal and cold neutrons and absorption events were detected. Its spatial resolution turned out to be about 0.5 micron, which is higher than other detectors by an order of magnitude. Its detection efficiency turned out to be as expected.

Another detector was made by coating 10B layer of 10nm-thick with fine-grained nuclear emulsion. Its spatial resolution should be several 10nm. It was exposed to cold neutrons, and absorption events were detected. Stabilization of 10B layer is proceeding.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：中性子検出器 高分解能 原子核乾板 重力 超冷中性子

1. 研究開始当初の背景

重力の本質は未だ解明されていない。そして、中性子は重力に対する非常に良いプローブである。現在、地球重力場中で量子化した超冷中性子の位置分布を利用して、重力の逆二乗則および等価原理の検証が試みられている。Nesvizhevsky等は数ミクロンの精度で中性子の位置分布を測定した(引用文献)。そこでは逆二乗則からのずれは検出されず、未知の湯川型相互作用の存在に制限が与えられた。市川等は、超冷中性子に対して凸面鏡として機能する反射体を利用して超冷中性子の位置分布の拡大を試み、0.7ミクロンの分解能相当にまで拡大した(引用文献)。

これらの実験からは、Nesvizhevsky等による、ミクロンの精度での測定による逆二乗則の検証から、未知の湯川型相互作用への制限が一つ与えられたが、等価原理の検証はなされていない。

原子核乳剤を用いれば、検出器単体での位置分解能を従来の検出器に比べて一桁から二桁高分解能化することが可能であり、超冷中性子の量子化状態を用いた重力の測定精度を飛躍的に向上することが可能である。

近年、所属研究室において素粒子実験のために原子核乳剤の開発と製造を行っている。この中で、ダークマター探索用に臭化銀結晶の直径が数10nmの微粒子原子核乳剤が開発された(引用文献)。この乳剤は高分解能であると同時に、線に対する感度が極めて低い。この乳剤と中性子吸収断面積の大きな核種を用いて極めて高分解能な中性子検出器を製作することが可能であると着想した。

2. 研究の目的

最終目的は地球重力場中で量子化した超冷中性子の位置分布を飛躍的に高い位置分解能で測定して、中性子に働く重力の逆二乗則および等価原理をより高精度で検証することである。

そのために、既存の検出器よりも位置分解能が一桁から二桁高い(サブミクロンから数10nm)超冷中性子検出器を開発することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

微粒子原子核乳剤と、中性子吸収断面積が大きく、中性子の吸収後に荷電粒子を放出する核種を組み合わせ高分解能中性子検出器を試作する。中性子吸収核種としては、 ${}^6\text{Li}$ および ${}^{10}\text{B}$ を用いた。

検出器の構造として以下の二通りを考えた。第一の構造は、中性子吸収核種を添加した微粒子原子核乳剤を基材に塗布したものである(吸収核種添加型)。第二の構造は、中性子吸収核種を含む薄膜をスパッター等によって基材上に形成し、その上に微粒子原子核乳剤を直接塗布したものである(吸収核種薄膜型)。

吸収核種添加型では微粒子原子核乳剤中に LiNO_3 を添加することで ${}^6\text{Li}$ を導入した。そして熱中性子および冷中性子の照射試験を行った。そして、検出原理として用いる吸収反応を実際に確認し、位置分解能を見積もり、検出効率を求めた。

吸収核種薄膜型では主に ${}^{10}\text{B}$ のスパッター膜に微粒子原子核乳剤を直接塗布した検出器を試作し、冷中性子を照射し、検出原理として用いる吸収反応を確認した。

4. 研究成果

(1) 吸収核種添加型検出器

この検出器では、 ${}^6\text{Li}$ による以下の中性子吸収反応(式1)を用いることにした。



${}^6\text{Li}$ が中性子を吸収すると、三重水素(t)と粒子()が中性子吸収点から互いに反対方向に飛ぶ。それらの飛跡が原子核乳剤中で検出される。飛跡の長さはそれぞれ44 μm と

7.8 μm である。これらの飛跡は、飛跡を構成する現像銀粒子の線密度 (GD) および飛程から区別できる。GDは荷電粒子の電離損失に依存する量である。

検出器の試作・検出原理の確認

微粒子原子核乳剤を湯煎し、融解したところに LiNO_3 水溶液をマイクロピペットで添加し、攪拌した。攪拌後の乳剤をガラスベース上に塗布し、乾燥した。乾燥後の乳剤層中の ${}^6\text{Li}$ の体積密度は $1.2 \times 10^{-3} \text{mol/cm}^3$ となった。乳剤層の厚みは27 μm となった。乳剤の塗布、乾燥後の検出器をアルミの薄膜とポリエチレンから成る遮光袋に封入し、京都大学原子炉研究所CN-3ビームラインにて熱中性子を照射した。

現像後、光学顕微鏡 (落射光学系) によって試料の中性子が照射された部分を観察し、下図(図1)のような飛跡の存在を確認した。

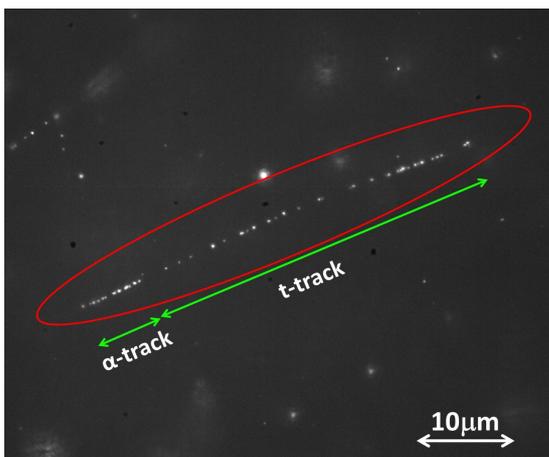


図1. ${}^6\text{Li}$ による中性子吸収反応からの飛跡 (赤い楕円内)。線および三重水素の飛跡の下にそれぞれ「 α -track」、 t -track」と記した。

実際に式1の反応からの三重水素および線の飛跡を認識することができ、検出原理を確認することができた。

吸収点の位置分解能

実際の飛跡を分析し、既存の検出器よりも約一桁高い位置分解能を持つことが判明した。

中性子吸収点を決定するための方法として、一つ目の方法は、線の飛跡を構成する現像銀粒子の線密度 (GD) から、実際に見えている最初の銀粒子の位置を基に真の出発点を推定する方法である。吸収反応からの線の飛跡のGDを測定したところ、線の飛び始めの部分 (線部分の最初の現像銀粒子から飛程の半分の点まで) のGDは $=1.4$ 銀粒子/ $1 \mu\text{m}$ であった。この値から、飛跡の出発点の推定精度を確率的に見積もり、約0.5 μm となった。

二つ目の方法は、線の飛跡の終点の現像銀粒子を決定し、そこから飛程の分だけ上流に戻り、出発点を決定する方法である。この方法では、飛程のストラグリングが不定性の要因となる。式1の反応によって生じた線の飛程のストラグリングはSRIMによると0.45 μm である。

従って、これらの二つの方法共に、中性子吸収点の位置分解能は約0.5 μm となり、既存の検出器よりも約一桁高い位置分解能を得た。

検出効率の測定

試作した検出器に対し、J-PARC MLFのBL05において平均約10meVの中性子を照射した。カドミウム製のピンホールスリットを通して、直径1mmの領域に 4.1×10^5 個の中性子を照射した。検出器上の照射された領域のうち、 $2.5 \times 10^{-3} \text{cm}^2$ 中に存在する吸収反応を光学顕微鏡下で計数した結果、52反応を得た。添加した LiNO_3 の量から期待した発生反応数と矛盾しない結果を得た。

検出された吸収反応の数から、平均10meVの中性子に対しては約0.047%の検出効率であることが判明した。単純に5m/sの超冷中性子に外挿すると、約9%となった。

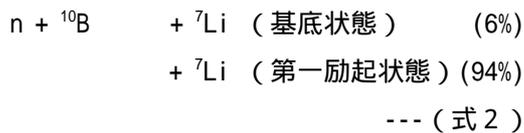
今後、検出器の現像時の変形および添加された LiNO_3 の均一性を評価する。

(2) 吸収核種薄膜型

次に、更に高い位置分解能の実現を目指し、

^{10}B の薄膜に微粒子原子核乳剤を直接塗布した検出器を試作した。

この検出器の場合、以下の ^{10}B の中性子吸収反応(式2)を用いる。



この反応から放出される線および ^7Li 原子核は、 ^{10}B 膜表面から発生する飛跡を乳剤層中に形成する。式2の反応において、多くの場合、粒子と第一励起状態の ^7Li が放出される。その場合、粒子と ^7Li の飛跡の長さはそれぞれ $5.1\mu\text{m}$ および $2.6\mu\text{m}$ である。この飛跡を ^{10}B 膜中へ外挿することで中性子吸収点を決定する。その不定性は ^{10}B 膜の厚みによって決まり、 10nm の ^{10}B 膜を用いれば、数 10nm の位置分解能が得られる。

検出器の試作・検出原理の確認

Si基盤上に 10nm の ^{10}B 膜をスパッタリングにより形成し、その上に微粒子原子核乳剤を直接塗布した試料を試作した。スパッタリングは京都大学原子炉研究所の日野正裕准教授に依頼した。

J-PARC MLFのBL05において平均 10meV の冷中性子を照射した。現像後、 ^{10}B 膜表面付近を光学顕微鏡(落射光学系)で確認すると、 ^{10}B による中性子吸収からの飛跡が図2のように見られた。

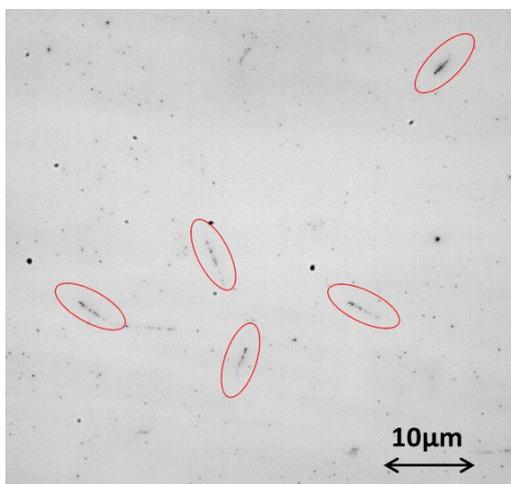


図2. ^{10}B による中性子吸収反応からの飛跡(赤い楕円内)。

しかし、検出した ^{10}B 膜表面からの飛跡の本数は、期待よりも優位に少なかった。そして、その少なかった分と同程度の本数の飛跡が乳剤層中に発生していることが判明した。この結果から、 ^{10}B 膜に原子核乳剤を直接塗布すると、 ^{10}B が乳剤層中に移動することが判明した。 ^{10}B 膜の安定化が必要である。

^{10}B 膜の安定化の試み

^{10}B 膜の安定化のために、 ^{10}B 膜上に厚さ 60nm のNiC膜を形成し、その上に微粒子原子核乳剤を塗布した検出器の試作を行った。

京都大学KUANSにおいて熱中性子の照射試験を行った。現像の結果、原子核乳剤層中に化学的原因により、飛跡と無関係なノイズである現像銀粒子(フォグ)が発生した。また、現像時に乳剤層が部分的に剥離するという問題も発生した。しかし、剥離せず、フォグの発生量が少ない領域において、光学顕微鏡下で中性子吸収反応を計数したところ、期待に近い反応数が得られた。このことからNiC膜にカバー層としての一定の効果があることが判明したが、フォグの発生、乳剤の剥離という観点から使用が困難であることも判明した。

現在、フォグの増加や乳剤の剥離が起きない ^{10}B 膜の安定化法の開発を進めている。

<引用文献>

- (1) V. V. Nesvizhevsky et al., NATURE |VOL415 | 17 JANUARY 2002 |
- (2) V. V. Nesvizhevsky and K. V. Protasov, Class. Quantum Grav. 21 (2004) 4557-4566
- (3) V. V. Nesvizhevsky et al., Eur. Phys. J. C 40, 479-491 (2005)
- (1) G. Ichikawa et al., PhysRevLett. 112.071101 (2014)

(2) 市川豪、高エネルギーニュース 2013年8月 93-100

(1) T. Naka and M. Natsume, Nuclear Instruments and Methods A 581 (2007) 761-764

(2) T. Naka, T. Asada, et al., Nuclear Instruments and Methods A 718 (2013) 519-521

5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕（計5件）

長縄直崇、超微粒子原子核乳剤を用いた高分解能の超冷中性子検出器の開発、日本物理学会 2014年秋季大会、2014年9月18日、佐賀大学 本庄キャンパス(佐賀県・佐賀市)

長縄直崇、超微粒子原子核乾板を用いた高分解能冷/超冷中性子検出器の開発、日本物理学会 第70回年次大会(2015年)、2015年3月22日、早稲田大学 早稲田キャンパス(東京都・新宿区)

長縄直崇、超微粒子原子核乳剤を用いた高分解能冷/超冷中性子検出器の開発、日本物理学会 2015年秋季大会、2015年9月25日、大阪市立大学 杉本キャンパス(大阪府・大阪市)

Naotaka Naganawa, Development of High Position Resolution Ultra-cold Neutron Detector by Using Nuclear Emulsion, ISETS' 15(国際会議), 2015年11月28日, 名古屋大学 東山キャンパス(愛知県・名古屋市)

Naotaka Naganawa, Development of High Position Resolution Neutron Detector Using Nuclear Emulsion, International Workshop: Probing Fundamental Symmetries and Interactions with UCN (国

際会議), 2016年4月12日, Mainz (Germany)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

長縄 直崇 (NAGANAWA, Naotaka)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・研究員

研究者番号： 6 0 4 0 2 4 3 4