

機関番号：12601

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20340050

研究課題名 (和文) CCD型中性子検出器の開発と中性子を用いた量子効果の精密測定

研究課題名 (英文) Development of position sensitive CCD based detectors for neutrons and measurement of quantization effects using neutrons

## 研究代表者

駒宮 幸男 (KOMAMIYA SACHIO)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：80126060

## 研究成果の概要 (和文)：

超冷中性子を用いて地球重力による量子効果を測定するために、CCDを基礎とした中性子の高精度な位置測定器を開発した。CCDには中性子を荷電粒子に変換するために硼素 ( $^{10}\text{B}$ ) を蒸着した。この測定器の性能評価のために、日本原子力研究開発機構の東海村原子炉からの冷中性子やフランスのラウエ・ランジュバン研究所 (ILL) の超冷中性子を用いて照射試験実験を行ない、検出効率と位置の精度が重力の量子効果を測定するのに十分であることを示した。重力による量子効果は明確には観測できなかったが、未知短距離力の探索を行ない理論に制限をつけた。

## 研究成果の概要 (英文)：

We developed a precise position detector for neutrons based on CCD in order to investigate quantum effects of terrestrial gravity. To convert neutrons to charged particles  $^{10}\text{B}$  is attached to the CCD surface by a vacuum deposition. To test the performance of the detector we exposed the detector to cold neutrons from JAEA reactor at Tokai-mura and ultracold neutrons from a reactor at Institute Laue-Langevin (ILL) France. Successful results were obtained for detection efficiency and position resolution to investigate the quantum effects. Although we could not clearly observe quantum effects of gravity, we searched for and set limits to new short-range forces.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2009年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2010年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：超冷中性子・CCD・地球重力・量子力学・ILL

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 中性子を用いた様々な過去に行われた干渉実験を研究し、本質的な物理の解明や発見につながる中性子の干

渉実験を考案すべく研究を重ねた。  
(2) フランスのラウエ・ランジュバン研究所で、V.V.Nesvizhevski 達が超冷中性子を用いて重力の量子効果の測

定を世界に先駆けて行なったが、満足のいく測定精度が得られず、我々は測定器の画期的な改良が必要であることを認識し、CCDを基盤とした測定器の開発を系統的に行なうことにした。

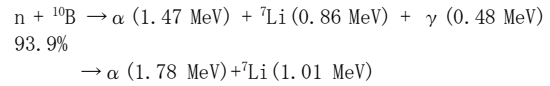
- (3) CCDを基盤とした測定器の CCD 表面に  $^{10}\text{B}$  や  $^7\text{Li}$  を蒸着してもそれらの分子が CCD に染み込んで CCD としての機能を破壊することがないことを先ず確かめた。
- (4) CCDの測定精度は  $3\ \mu\text{m}$  程度が限界であり、中性子が地球重力によって鉛直方向に形成する中性子の高さ方向の分布の粗密な層の厚さは  $10\ \mu\text{m}$  程度なので  $1\ \mu\text{m}$  以下の精度で高さを測定する必要があり、中性子の高さ分布を拡大する機構を東大の助教だった佐貫氏が考案した。
- (5) これらの測定器開発研究やシミュレーションによる研究によって本実験が可能となる基盤ができ、本研究費を申請した。

## 2. 研究の目的

- (1) 超冷中性子の地球の重力による鉛直分布の量子化を精度よく測定することが第一の目的である。
- (2) この第一の目的のために中性子の位置を精度よく測定する測定器の開発を行う。
  - ① 中性子の位置を測定する CCD を基盤とした測定器の開発
  - ② 超冷中性子の鉛直分布を拡大する拡大鏡を含めた実験システムの開発。
- (3) 中性子の鉛直方向の量子化された分布を測定することで慣性質量と重力質量の等価原理をミクロのスケール（量子状態）で検証できると考える。また、重力以外の中短距離力の効果の探索を行う。

## 3. 研究の方法

- (1) CCD を基盤にした中性子の位置測定装置において、中性子を荷電粒子へ変換して CCD で観測可能にするために  $^{10}\text{B}$  を蒸着した。次の反応で中性子は Back-to-back の荷電原子核に変換され、放出されたいずれかの原子核が CCD び観測される。



6.1%

CCD には  $^{10}\text{B}$  を  $200\text{nm}$  の厚さで蒸着した。この際、負のポテンシャルを持つ Ti を  $^{10}\text{B}$  の前後に  $20\text{nm}$  ずつ蒸着した。蒸着は京都大学原子炉研究所の電気炉でおこなった。

- (2) CCD を基盤とした測定器の中性子検出効率は、超冷中性子だけでなく原子力研究開発機構の原子力研究開発機構の JRR-3 原子炉にある冷中性子源 MINE2 原子炉から来る様々なエネルギーの中性子を用いて行なった。吸収断面積がおよそ (速度) $^{-1}$  であることを踏まえて、測ら超冷中性子では  $44.1 \pm 1.1\%$  以上あることがわかった。また測定位置の精度は  $2.9 \pm 0.1\ \mu\text{m}$  であることが測られた。
- (3) CCD の読み出し中には中性子を CCD に照射させると位置が測定できないので、読み出し中には中性子フラックスを遮断するために中性子シャッターが必要となりこれを作成した。シャッターは実験中は長期間に渡って開閉を続けるため、東京大学において耐久試験を行なった。
- (4) 実験装置を実験室の床面の振動から守るために、常盤の上に固定し更にアクティブな防振台の上に固定した。
- (5) 主量子数  $n$  が大きい（鉛直方向の力学的エネルギーの大きい）UCN は量子状態の測定の邪魔になる。即ち、低い主量子数だけの UCN の存在確率分布は明確な山と谷が見えるが、大きな主量子数の UCN の分布が重なるとこれらが不鮮明になる。上面吸収体は、ここに衝突するほどの大きな鉛直方向の力学的エネルギーを持った UCN ( $100\ \mu\text{m}$  の高さでは  $n > 16$ ) を吸収する。但し、1回の衝突では吸収せずに反射される可能性があるため、表面を量子効果を乱さぬ程度、作為的に粗くして ( $0.4\ \mu\text{m}$  (rms) 程度) UCN を乱反射させて水平方向の速度を鉛直方向の速度に転換させ吸収しやすくする。吸収体としては Ti:Gd:Zr = 35:54:11 の合金を蒸着する。Gd は中性子捕獲断面積が非常に大きく、負のポテンシャルを持つ Ti と正のポテンシャルを持つ Zr を用いて表面ポテンシャルを調整している。吸収体の長さは、十分な吸収

効果が上がるために UCN の進行方向に対して約 20 cm と長くなっている。即ち、 $100\mu\text{m}$  の高さを持つ UCN のガイドの長さも 20 cm である。

- (6) これらの装置は東京大学で作成して一度組み上げ、耐久試験をしてから大きな部分に分解して、実験を遂行するフランス・グルノーブルにあるラウエ・ランジュバン研究所 (ILL) に送り、最終的には現地で組み立てた。
- (7) ILL の原子炉で発生して冷却した超冷中性子を用いてテスト実験を行うことを、ILL に申請し数ヶ月あとに申請が通った。
- (8) 2009 年に 4 ヶ月間 ILL に 3～4 人のグループで滞在し、テスト実験を遂行した。測定器のインストールには ILL のスタッフの協力が本質的に重要であり、彼らを実験グループに加えて、国際共同実験の枠組みを作った。

#### 4. 研究成果

- (1) CCD を基盤にした世界で最も精度のよい中性子の位置測定装置を開発した。位置精度  $2.9\pm 0.1\mu\text{m}$  であり、超冷中性子に対して十分に大きくかつ均一な 40%以上の検出効率をもつ。物質構造の研究などでは速度の比較的速い中性子を用いるために重力によるサグがないため、測定器を遠くに置いて位置を測定するため、測定器の位置分解能はそれほど本質的ではなかったが、超冷中性子の場合には重力によるサグが大きいため近くで位置を測定することが本質的に重要であり、位置の分解能を極限まで良くする必要がある。また、物質構造などの実験でも測定器を小型化するためには、我々が開発した中性子位置測定器は有用である。
- (2) 超冷中性子を高さ  $100\mu\text{m}$  の高さ、長さ 20cm のガイドのなかに送り込み、ガイドの終端に中性子の鉛直分布を拡大する円筒において、拡大された鉛直分布を CCD を基盤とした測定器ではかることによって、高さ方向で  $1\mu\text{m}$  以下の超冷中性子の位置精度をもつ測定器システムを構築した
- (3) この実験装置を用いて ILL において

テスト実験を行なった。残念ながら統計が十分でなく、重力による量子効果は明瞭には観測されなかったが、未知短距離力の効果の探索を行い、軽いスピンの粒子が媒介するある種の湯川型に対しては、最も厳しい制限を付けることができた。湯川型のポテンシャルの形は以下のものを仮定した。

$$V(r) = -GM_1M_2/r (1-\alpha \exp(-r/\lambda))$$

但し、 $M_1$  は中性子の質量、 $M_2$  は相互作用する物質の質量、 $\alpha$ 、 $\lambda$  はパラメータ。

- (4) 次期実験においてテスト実験よりも 1桁以上大きな統計を稼ぐことができるように現行の測定器の改良点を研究した。次にその改良点を示す。
  - ① 拡大用の円筒の表面に対して低い角度で中性子を入射させて円筒物質への中性子の吸収を減らす。このような測定器の幾何学的な配置は可能である。
  - ② 有効面積が 2 倍の CCD が存在するのでそれを用いる。
  - ③ 超冷中性子は空気中を通ると数が減衰する。中性子の軌道で空気中に出ている箇所は全てヘリウムガスに置き換える。このためには中性子シャッターの構造などを改良する。

#### 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 2 件)

- ① S. Kawasaki, Y. Kamiya, S. Komamiya et al., “Development of a Pixel Detector for Ultra-Cold Neutrons”, Nuclear Instrument and Method, A615, 42-47, 2011, 査読有
- ② T. Sanuki, S. Komamiya, S. Kawasaki and S. Sonoda, “Proposal for measuring the quantum states of neutrons in the gravitational field with a CCD-based pixel sensor”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 600, 657-660, 2009, 査読有

〔学会発表〕（計 2 件）

- ① 南雄人, “重力場による超冷中性子の量子状態の観測: 実験装置の概要と改良点”, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 28 日, WEB 上発表
- ② 川崎真介, “重力場による超冷中性子の量子状態観測-ILLでの超冷中性子照射試験について”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 23 日, 山形大学

〔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：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

駒宮 幸男 (KOMAMIYA SACHIO)  
東京大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号：80126060

### (2) 研究分担者

神谷 好郎 (KAMIYA YOSHIO)  
東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教  
研究者番号：90434323

### (3) 連携研究者

清水 裕彦 (SHIMIZU HIROHIKO)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授  
研究者番号：50249900