

研究種目：基盤研究 (B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18340056
 研究課題名 (和文) 位置・時間分解能に優れた超冷中性子検出器の開発と未知短距離力の探索
 研究課題名 (英文) Development of a UCN detector with good spatial and temporal resolution and a search for short-range forces

研究代表者
 佐貫 智行 (SANUKI TOMOYUKI)
 東北大学・大学院理学研究科・准教授
 研究者番号：70323491

研究成果の概要：

超冷中性子と呼ばれる、運動エネルギーが極めて小さい中性子が入射する位置を、入射した時刻とともに測定できる検出器を開発した。市販の CCD センサをもとに開発した測定器を用い、中性子の位置を $3\mu\text{m}$ の精度で決定することに成功した。また、精密に研磨した円柱を用いて、 $10\mu\text{m}$ ほどの微細な像を 100 倍以上に拡大できることを示した。これらの測定器と拡大機構は、ごく近距離でのみ働く未知の力を探索する実験の要素技術となる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2007年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2008年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
年度			
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：素粒子実験

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：中性子、精密測定、中性子光学、微少重力

1. 研究開始当初の背景

運動エネルギーが十分に小さい超冷中性子は重力場中に束縛される。束縛された中性子は、原子核に束縛された電子と同様に、量子力学に従って離散的なエネルギー状態をとる。その結果、鉛直方向の空間分布は非一様となり、そのスケールは $10\mu\text{m}$ 程度と計算できる。

重力場中で中性子のエネルギーが量子化される様子を観察する先駆的な実験が、フラ

ンスのラウエ-ランジュヴァン研究所において実施された。古典的に考えると、中性子の大きさより大きな間隔のスリットを空けておけば中性子はスリットを通過するはずである。しかし、量子化された系で中性子は不連続なエネルギー固有値をもち、対応する高さの期待値よりも高さの低いスリットを通過することはできない。スリットの高さを徐々に高くしていくと、通過する中性子の数は高さの固有地に対応するところで不連続

が増加することが確認された[1]。

この実験では、超冷中性子の検出には ^3He のガス検出器が用いられた。ガス検出器ではガスを取める容器の大きさ程度の位置分解能しかなく、また、中性子の分布を拡大して観測するような機構を持たないので、個々の中性子の高さは測定できない。スリットのは幅が狭いときには、通過する中性子の数が極めて少なく、統計精度を上げることが難しい。その後、同じ実験グループは、スリットの幅を固定して、通過してきた中性子の高さ分布を写真フィルムに記録した[2]。写真フィルムを用いると中性子の高さを記録することは可能であるが、事象発生の時刻情報を記録できないために、バックグラウンドのふらつきの影響を受けやすい。また、 $10\mu\text{m}$ 程度のスケールを持つ分布を詳細に測定するには、写真フィルムによる実験では明瞭さに欠ける。

中性子の鉛直方向分布の測定結果を量子力学による予測と詳細に比較すると、中性子に作用する重力以外の未知の相互作用を探索することができる。測定結果が予測とずれた場合、到達距離が数 μm の未知なる短距離力の存在を示唆する。ここ数年、超弦理論に登場する Large Extra Dimension が注目を集め、様々な現象論が研究された。その中で、短距離力が予言されている。最も直接的な未知短距離力の探索手段は、マクロな2つの物体を近づけて、両者の間に働く力をねじり秤等で精密に測る方法である。ところが、この方法では、物体が僅かに帯電しただけで電気力による大きなバックグラウンドの影響を受けてしまう。一方、運動エネルギーが小さく、したがって速度が遅い中性子を用いると、電磁力の影響を無視できるので非常に有利である。地球重力場中に束縛された超冷中性子を用いると、力の到達距離が $1\text{-}10\mu\text{m}$ の力に対して、非常に高感度の探索が可能になる。

素粒子世界の未知相互作用の研究には、大型加速器実験が強力な研究手段であるが、未知の短距離力の探索によって超高エネルギーの世界の間接的に探ることも非常に興味深い実験手段である。

以上のような背景のもとで、中性子の位置を μm の精度で明瞭に測定できるような実験装置の開発を目指した。

[1] V. V. Nesvizhevsky et al.,
” Quantum states of neutrons in the Earths gravitational field”
Nature **415** (2002) 297-299.

[2] V. V. Nesvizhevsky et al.,
” Study of the neutron quantum states in the gravity field”
Eur. Phys. J. **C40** (2005) 479-491.

2. 研究の目的

重力場に束縛された超冷中性子のエネルギーが量子化される様子を明確に捉え、未知短距離力の探索することを目指して、位置と時間分解能に優れた超冷中性子検出器と、超精密加工を駆使して作った微細な“凸面鏡”を用いて中性子の分布を100倍程度に拡大する中性子光学系を開発する。以上を組み合わせ、超冷中性子の位置を μm 程度の実効的な分解能でリアルタイムに観測できる高効率の超冷中性子用検出器を製作する。

3. 研究の方法

(1) 中性子用ピクセル検出器の開発

中性子検出器は、市販されている CCD センサを元にして開発した。CCD は電気的に中性子の中性子を検出することはできないので、中性子を荷電粒子に変換するためのコンバータを用いる。中性子の入射位置を正確に測定するために、コンバータは CCD 上に形成することとした。コンバータとしては、高い変換効率を期待できる ^6Li と ^{10}B を候補として、CCD 上に実際に形成した。中性子に対する位置分解能や検出効率の観点から、中性子検出器としてどちらが優れているか比較検討した。

(2) 拡大光学系

精密に磨き上げた金属製の円柱棒を凸面鏡として使うこととした。設計通りに拡大していることを確認するために、レーザー光で作った干渉縞を円柱棒の上に投影し、拡大された様子を同型の CCD で観測できるか調べた。また、超冷中性子が、理論から期待されるような反射を物質表面ですることを実際の超冷中性子を用いて調べた。

4. 研究成果

(1) CCD 表面への蒸着

市販されている CCD を選び、受光面上に ^6Li と ^{10}B の薄膜を蒸着によって形成した。蒸着後の CCD の様子を図1に示す。金属膜を直に形成しても、CCD は2年以上にわたって安定して動作することを確認した。



図1：金属薄膜を蒸着した CCD

(2) CCD を用いた中性子の検出

蒸着膜を付けた CCD に原子力科学研究所において熱中性子を入射し、図 2 に示すような明瞭な信号を得た。CCD によって中性子を検出できることを確認した。

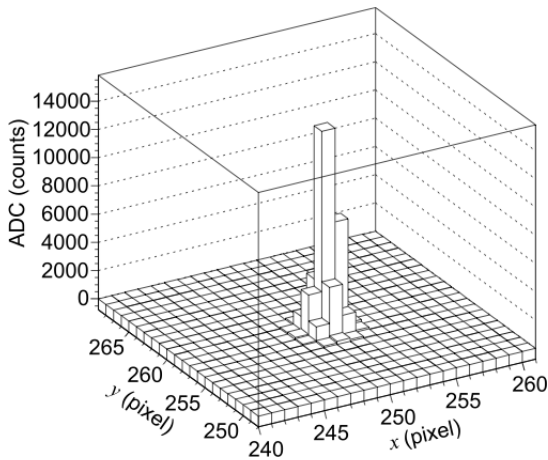


図 2：中性子を入射して得た CCD からの信号の例

(3) 中性子に対する位置精度の測定

中性子が CCD に入射した位置をどの程度の精度で決定できるか調べるため、中性子吸収剤であるガドリニウムの箔に、図 2 に示すような「基準パターン」をレーザ加工によって製作した。この基準パターンをコンバータ付の CCD の直前に設置して熱中性子を照射し、パターンを CCD 上に投影した。CCD が検出する中性子の位置が、基準パターンをどの程度正確に再現しているか調べると、位置の決定精度を評価することができる。

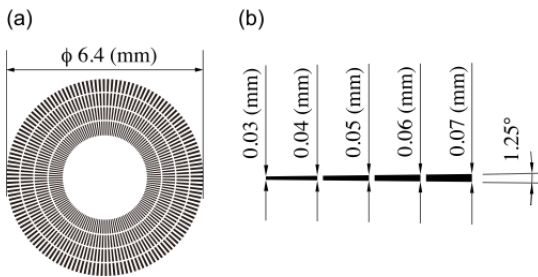


図 2：ガドリニウム箔で作った「基準パターン」
(a) 全形 (b) 1 本のパターンの拡大図

${}^6\text{Li}$ を蒸着した CCD によって得られた中性子の入射位置分布を図 3 に示す。 ${}^6\text{Li}$ は中性子と反応してアルファ粒子 (α) とトリチウム (T) を放出するので、各々の二次粒子についてプロットしてある。また、基準パターンの様子が明瞭に見えるように、全てのデータを 1/8 の領域に重ねて示した。この図から、トリチウムでは基準パターンの詳細がぼやけてしまっているが、アルファ粒子では幅 $30\mu\text{m}$ のパターンまで綺麗に分離されていることが分かった。アルファ粒子の方がトリチ

ウムよりも飛程が短いので、放出された位置、すなわち、中性子が入射した位置を正確に再現していると理解できる。

図 3 を詳細に解析することにより、 ${}^6\text{Li}$ を蒸着した CCD では、中性子の位置を $5.3\mu\text{m}$ の精度で決定できることが分かった。 ${}^{10}\text{B}$ を蒸着した CCD についても同様の解析を行ったところ、位置分解能は $2.9\mu\text{m}$ まで到達できることが分かった。

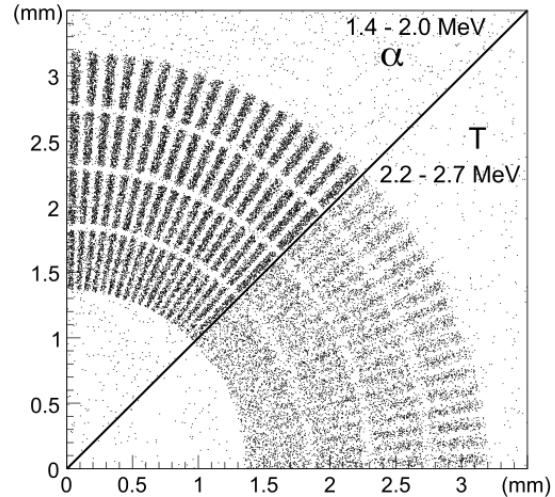


図 3：CCD 上に投影された「基準パターン」

これほど高い精度で中性子の位置を検出できる検出器は、世界的に見ても前例がない。最近になって急速に発展している動画処理技術を応用すれば、高速のオンライン処理・オフライン処理も容易である。このような測定器は、中性子を用いた物性や生物等の他分野の研究においても、広く一般的に応用される可能性がある。

(4) 拡大機構

地球重力場中に束縛された中性子の高さ方向分布の濃淡は、 $10\mu\text{m}$ ほどのスケールを持つ。この濃淡分布を模擬するために、レーザ光の干渉縞を用いた。干渉縞を円筒上に投影し、拡大した像を CCD によって観測した。実験装置の概略を図 4 に示す。波長が 532nm の緑色レーザを用いて、交叉角を 4.14 度としたので、干渉縞の間隔は $7.37\mu\text{m}$ である。

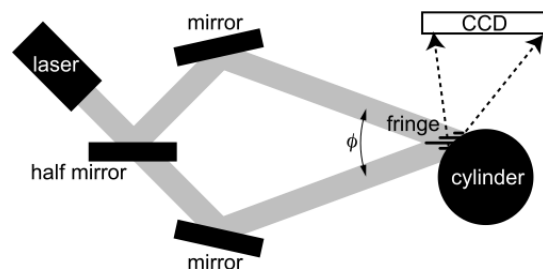


図 4：実験装置の配置

CCD で観測した拡大された干渉縞の像を図 5(a)に示す。計算によって予測される光量分布は図中の曲線の通りである。観測結果は予測と非常に良く一致していることがわかる。図 5(b)には、この観測結果から得られた拡大率を示した。40 倍～200 倍の拡大率を実現できた。これらの結果から、拡大機構は設計通りに機能し、 $10\mu\text{m}$ 以下の微細な像を正確に拡大していると結論できる。

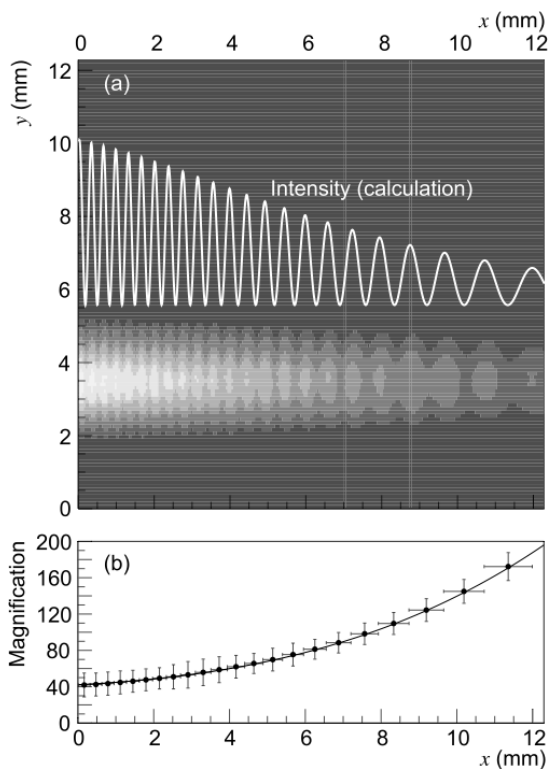


図 5 : CCD によって得られた結果

また、フランスのラウエ-ランジュヴァン研究所において、超冷中性子が物質表面で反射の様子を調べた。その結果、物質の中性子に対するポテンシャルエネルギーから期待される反射をすることが確認できた。

レーザー光の干渉縞を用いた拡大の実験と、超冷中性子を用いた反射の実験から得られた結果を合わせて考えると、円筒を用いた拡大機構によって、超冷中性子の分布の様子を二桁ほど拡大できると予測できる。

(5) 今後の展望

(3) (4) で述べたように、 $3\mu\text{m}$ の分解能で中性子の入射位置をリアルタイムに測定できる検出器と、二桁の拡大率を実現できる中性子光学系を、当初の計画通りに開発できた。この 2 つの要素技術を組み合わせて、地球重力場中に束縛された超冷中性子の量子化状態を精密に観測するための実験装置を組み立てた。実験装置の主要部を図 6 に示す。中央に丸く見えるものが拡大用に用いる円柱

の断面、上に見えるのが CCD である。地球重力場中に束縛された超冷中性子は左側から円筒に入射し、円筒で反射・拡大されて CCD に到達する。

現状では、十分な統計精度を得られるような強力な超冷中性子源を持つ施設が、世界に 1 つしかないために、本研究課題の研究期間内は実験の機会に恵まれなかった。しかし、2009 年夏には、フランスのラウエ-ランジュヴァン研究所において、超冷中性子を用いた実験を行う予定である。中性子のエネルギーが量子化されている様子を明瞭に捉え、詳しい解析によって未知の短距離力の探索を行う予定である。

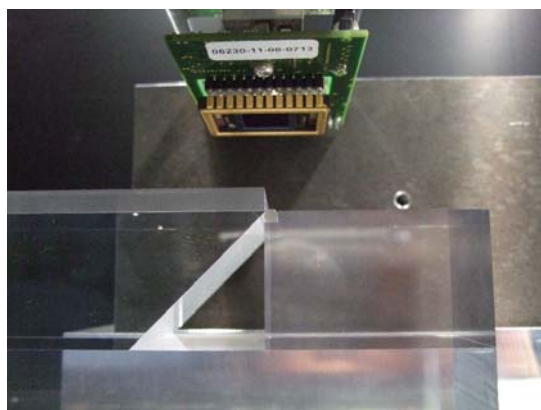


図 6 : 超冷中性子の量子化状態を観測する実験装置

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 1 件)

T. Sanuki, S. Komamiya, S. Kawasaki, S. Sonoda

“Proposal for measuring the quantum states of neutrons in the gravitational field with a CCD-based pixel sensor”

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 600 (2009) 657 - 600

査読有り

〔学会発表〕 (計 1 1 件)

①市川豪

「重力に束縛された超冷中性子の量子状態観測実験 - ILL での実験に向けて」

日本物理学会第 64 会年次大会

(2009 年 3 月 27 日)

立教大学

②川崎真介

「重力による量子力学的効果の検証実験計画」

中性子デバイスとその応用 II

(2009 年 2 月 27 日)

京都大学原子炉実験所

③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-」
日本物理学会秋季大会
(2008年9月23日)

山形大学

④市川豪

「重力場による超冷中性子の量子状態観測
-冷中性子を用いた測定器の性能評価-」
日本物理学会秋季大会
(2008年9月23日)

山形大学

⑤川崎真介

「超冷中性子用ピクセル検出器の開発」
日本物理学会
(2008年3月26日)

近畿大学, 大阪

⑥園田真也

「CCD型中性子検出器の性能評価」
日本物理学会
(2008年3月26日)

近畿大学, 大阪

⑦川崎真介

「中性子用ピクセル検出器の開発-重力による
量子力学効果の検証実験に向けて-」
中性子制御デバイスとその応用ワークショップ
(2008年1月17日)

京都大学原子炉実験所, 大阪

⑧川崎真介

「超冷中性子を用いた短距離における重力
相互作用の精密検証」
第一回NOPワークショップ
(2007年9月7日)

KEK, つくば

(2007年9月7日)

KEK, つくば

⑨園田真也

「超冷中性子用CCD検出器の耐久性能評価」
日本物理学会
(2007年3月27日)

首都大学東京, 東京

⑩園田真也

「半導体の薄膜蒸着試験」
京都大学原子炉実験所学術講演会
(2007年1月22日)

京都大学原子炉実験所, 大阪

⑪S. Kawasaki, T. Sanuki, S. Sonoda, M. Hino,
M. Kitagich

“Development of a pixel detector for
ultra cold neutrons”

Joint Meeting of Pacific Region Particle
Physics Communities

(31 Oct. 2006)

[その他]

①川崎真介

「超冷中性子用ピクセル検出器の開発」
修士論文(東京大学大学院理学系研究科)

2007年3月

②園田真也

「超冷中性子用CCD検出器の耐久性能評価」
修士論文(東京大学大学院理学系研究科),
2007年3月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐貫 智行 (SANUKI TOMOYUKI)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 70323491

(2) 研究分担者

(なし)

(3) 連携研究者

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: 20234883

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

日野 正裕 (HINO MASAHIRO)

京都大学・原子炉実験所・准教授

研究者番号: 70314292

(2) 研究協力者

川崎 真介 (KAWASAKI SHINSUKE)

東京大学・大学院理学系研究科・D2

園田 真也 (SONODA SHINYA)

東京大学・大学院理学系研究科・D2

鈴木 善明 (SUZUKI ZENMEI)

東北大学・大学院理学研究科・M1