

論文の内容の要旨

論文題目

Observation of Gravitationally Bound Quantum States of Ultracold Neutrons Using a Pixelated Detector

(ピクセル検出器を用いた

超冷中性子の重力によって束縛された量子状態の観測)

氏名 市川 豪

非常に低速な中性子は、原子核ポテンシャルの及ぶ領域より非常に長い波長を持っているため、物質からは実効的なフェルミポテンシャルのみを感じるようになる。一般的な物質のフェルミポテンシャルは、およそ 200 neV である。フェルミポテンシャルよりも小さい運動エネルギーを持つ中性子は、あらゆる入射角に対して物質表面で全反射することになる。このような、速度数 m/s 程度の中性子は超冷中性子と呼ばれており、この特徴を使った様々な実験に利用されている。

粒子が、重力ポテンシャルと粒子を反射する床からなる系に置かれると、古典的にはバウンドを繰り返すことになる。このポテンシャルをシュレディンガー方程式に代入し、量子力学で扱うと、束縛状態の波動関数は Airy 関数を用いて表すことが出来る。存在確率分布は、周期が粒子質量の $-1/3$ 乗に比例した特徴的な濃淡を持つ。超冷中性子は、物質表面で全反射し、電荷を持たず、寿命が長く、

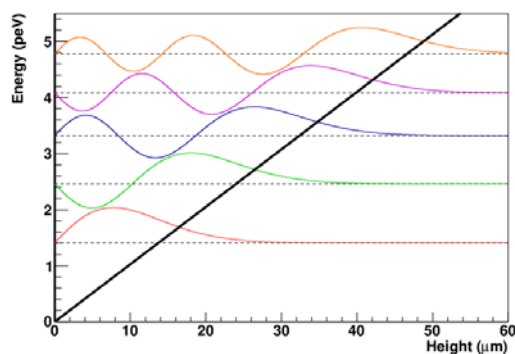


図 1 中性子の重力による束縛状態の固有エネルギーと固有関数。

質量が小さいため、この束縛状態の存在確率分布を測定するために非常に適している。存在確率分布の濃淡の周期は、中性子に対して約 $6\ \mu\text{m}$ と求められる。中性子の重力による束縛状態の固有エネルギーと固有関数を、図 1 に示す。

2002 年、世界最高強度の超冷中性子源を持つフランスのラウエ-ランジュバン研究所 (ILL) において、V.V. Nesvizhevsky らのグループによって重力による束縛状態がはじめて観測された。超冷中性子を床と天井にはさまれた狭いガイドに通し、その中で天井に当たるような中性子は取り除かれ、生き残ってガイドから出てきた中性子のイベント数を数える実験であった。古典的には、中性子の直径より大きくガイドが開いていれば中性子が出てくるはずだが、およそ $12\ \mu\text{m}$ 以上開かなければカウントが増えないという結果だった。これは、閾値以下のガイドの幅では、基底状態の中性子も吸収されることを意味し、重力による束縛状態の存在の証拠と言える。また、彼らはガイドの幅を固定し、中性子の高さ分布を測定する実験も行った。検出器の位置分解能の不足から、そのままでは決定的な結果が得られず、後にマイナスの段差を使って障害となる基底状態の中性子数を減らすことで、分布の濃淡を観測していた。

この研究の目的は、基底状態の中性子数について恣意的な操作を加えることなく、高い位置分解能によって、直接的な方法で位置分布を測定することである。そのために、サブミクロンの位置分解能を持つ測定器システムを開発した。このシステムは、3つの主要な装置から構成されている (図 2)。

1. 高い主量子数を持つ量子状態を取り除く、平滑な床面と粗い天井で作られたガイド。超冷中性子は、床面の上で重力による束縛状態に落ち着く。ガイド内を通る中性子は鉛直方向に比べて水平方向に 1000 倍程度高い運動エネルギーを持っているため、天井 (高さ $100\ \mu\text{m}$) に衝突するほど高いエネルギーを持つ準位は、粗い天井面にあたると鉛直方向に運動エネルギーを受け取る。鉛直方向に大きな速度を持った中性子は多数回ガラス面に衝突することで、吸収・散乱によって取り除かれる。
 2. 高さ分布を拡大する、中性子拡大ロッド。超冷中性子は、物体表面で全反射するため、円柱面によって凸面鏡のように分布を拡大することが出来る。この拡大ロッドによって、分布を 20 倍程度に拡大する。不規則な散乱を起こさないため、中性子の波長に比べ十分に精密に研磨されたガラスロッドを製作した。さらに、その表面に高いフェルミポテンシャルを持つニッケルを蒸着することで、超冷中性子ビームに含まれるほとんどの速度の中性子を反射することを可能にした。
 3. 超冷中性子を μm オーダーの分解能で検出するピクセル検出器。裏面入射型 CCD 検出器をベースにした超冷中性子用のピクセル検出器を開発した。電荷を持たない中性子を検出するために、検出面の上に中性子を荷電粒子に変換する $200\ \text{nm}$ の ^{10}B 薄膜を蒸着した。中性子は ^{10}B 薄膜の中で ^7Li や α 粒子に変換され、その荷電粒子が CCD によって検出される。ピクセル検出器の位置分解能は、約 $3\ \mu\text{m}$ と確認された。
- 以上の装置によって、超冷中性子の重力による束縛状態の高さ分布を、サブミクロンの精

度で観測する測定器を開発した。

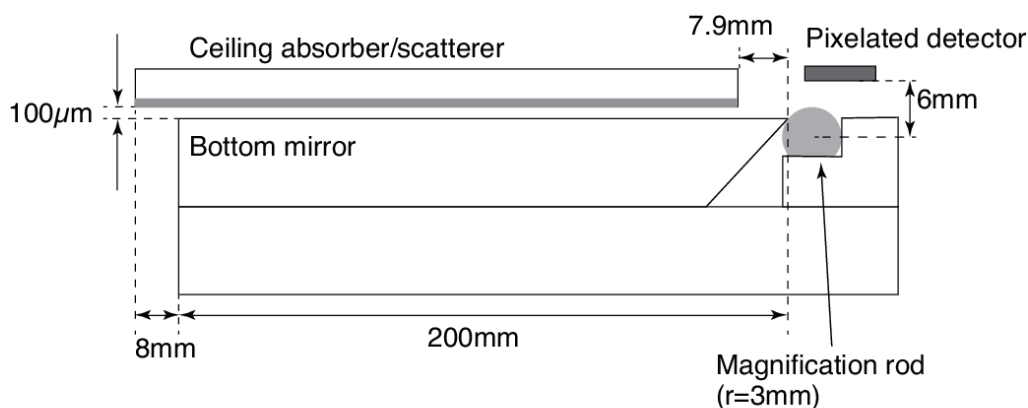


図 2 実験装置の概略図。

2011 年、ILL において、上記実験装置を用いて重力による束縛状態の高さ分布を観測する実験を行った。拡大ロッドを使って 17 日間の測定を行った。拡大機構の有効性を確認するために、拡大ロッドを使わない測定も 3 日間行った。

取得されたデータ分布を、量子力学に基づいたモンテカルロシミュレーションを用いて取得されたイベント分布と比較した。最尤法によって、シミュレーションのパラメータの最尤推定量を求めた。パラメータは、測定器の設置に対するものの他、ガイド内での量子準位の時間変化に対する現象論的なものを取り入れた。ロッドによる拡大の部分すべてを量子力学的に取り扱うのは非常に困難であるため、半古典的な計算を行った。そのために、量子力学の位相空間上の正確率分布を与える、ウィグナー関数を使った。ガイド出口での超冷中性子の位相空間上での重みをウィグナー関数で与え、各位相空間上の点と拡大後のピクセル検出器への入射位置との対応を、古典的な粒子描像による計算で与えた。最も尤度の高いパラメータを使って計算されたカイ二乗の値は、量子力学とデータの一致を示しており、また、パラメータの値は、拡大ロッドを使わないデータから得られたパラメータと矛盾しない結果を示した。データとモンテカルロのイベント分布を図 3 に示す。量子力学に特有の存在確率分布の濃淡も、データと量子力学によるモンテカルロでよく一致しており、これは古典力学に基づいたモンテカルロシミュレーションでは得られない結果である。この実験で、重力による束縛状態の高さ分布を、段差によって基底状態の占める割合を操作することなくサブミクロンの精度で観測することに、世界で初めて成功した。

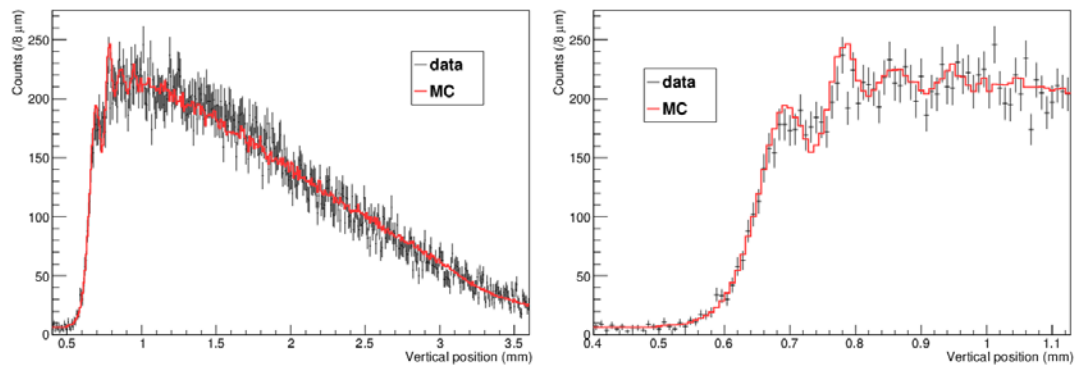


図 3 データとモンテカルロの分布の比較。分布全体（左）と立ち上がり部分（右）。