

# 論文審査の結果の要旨

氏名 川崎 真介

論文提出者は、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において、現在世界最大の強度をもった超冷中性子源を用いて重力場中での超冷中性子の量子状態観測実験を行った。超冷中性子とは運動エネルギーが 100neV 程度、速度が 5m/s 程度の超低エネルギーの中性子である。そのドブロイ波長は数 10nm と十分に長いため、物質に超冷中性子が入射すると、超冷中性子は物質の核ポテンシャルを空間平均した擬フェルミポテンシャルを感じるようになる。一般的な物質の擬フェルミポテンシャルは数 100neV であり、超冷中性子は物質表面で全反射する。このような超冷中性子の特徴を利用して、重力場中における超冷中性子の量子状態を観測する実験が行われた。

本論文は全 7 章からなる。第 1 章ではこれまでに行われた関連実験の紹介を含む序論となっている。第 2 章では、超冷中性子の重力場中の運動を量子論的に取り扱っている。水平に広がる物質床の上を超冷中性子が飛行している系を考え、シュレディンガー方程式を解くと解は量子化し離散的なエネルギー固有状態となる。その解であるエアリー関数は準位に応じて複数の節・腹を持つ。そのため固有関数の二乗である存在確率分布は高さ方向に濃淡を持つことになる。第 3 章では、実験のセットアップが述べられ、今回開発した量子状態を明瞭に観測するための装置について説明されている。主な測定器は超冷中性子を観測可能な量子状態に落ち着かせるための超冷中性子ガイド、超冷中性子の高さ分布を拡大するための拡大機構、超冷中性子用ピクセル検出器からなる。特に拡大機構は、位置の分解能を上げて観測するためのものであり、超冷中性子の高さ方向の分布をおよそ 20 倍に拡大することができた。その位置分解能は  $2.9 \pm 0.1 \mu\text{m}$  である。この測定器は超冷中性子の飛来位置を高位置分解能で記録できるだけでなく、その時間情報も記録できるというこれまでの中性子検出器にない特徴を持っている。次に第 4 章では、実験で得られたデータの解析が行われている。第 5 章では得られたデータをもとに、短距離における重力法則の検証が行われている。近年、ストリング理論などをもとにして短距離における重力法則の逆二乗則からの破れが示唆されている。本研究は  $\mu\text{m}$  レンジにおける重力の破れについて一定の限界を与えることに成功した。重力相互作用は電磁相互作用やその他の相互作用に比べ桁違いに小さいため、 $10 \mu\text{m}$  程度より短い距離での検証が難しく、実験データも少ない。しかし、本実験で用いている系は中性子が中性子ガイドを形成する物質の近傍に位置するので、このような近距離力の検証には大きな力を発揮する。未知短距離力の存在を予測する理論には様々なものがあるが、2 つのモデルについて未知短距離力の検証が行われた。1 つは一般的な重力ポテンシャルのほかに次式のような湯川型のポテンシャルが存在する場合であり、

$$V(r) = -\frac{Gm_1m_2}{r}(1 + \alpha e^{-r/\lambda})$$

その上限として  $\lambda = 10 \mu\text{m}$  のとき  $|\alpha| < 2.0 \times 10^{11}$ 、 $\lambda = 5 \mu\text{m}$  のとき  $|\alpha| < 1.5 \times 10^{12}$  (90% C.L.) の制限を加えることができた。また、重力のスピン依存性も調べられ、新たな上限が得られている。第 6 章では、将来的に可能な装置の改善と、それに伴う結果改善の予測が述べられている。第 7 章は結論である。

以上のように、本論文は超冷中性子の重力場中での量子状態を観測する実験について述べたものである。観測装置においては、超冷中性子の高さ分布を拡大するための拡大機構および超冷中性子用ピクセル検出器の新規開発は高く評価できる。また、未知短距離力の存在を予測する理論に対して制限を与えたことは新しい知見である。特にこれまで実験の少なかった  $\mu\text{m}$  レンジで、湯川型の付加ポテンシャルおよびスピン依存力の上限について制限を与えたことは興味深い結果であり高く評価できる。これらは今後の超冷中性子および重力研究に大きく貢献する成果であるといえる。

なお本論文は共同研究として進められたが、論文提出者が主体となって開発、研究を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断される。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。