

氏 名	あ べ ゆたか 安 部 豊
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	論 工 博 第 3851 号
学位授与の日付	平 成 17 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	液体ヘリウムの中性子散乱断面積と超冷中性子源の核特性に関する研究

論文調査委員 (主 査) 教 授 森 島 信 弘 教 授 福 永 俊 晴 教 授 川 端 祐 司

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、液体ヘリウム (^4He) を利用した超冷中性子源の開発を目指して、低エネルギー中性子と超流動状態にある液体ヘリウムとの散乱過程と、高密度の超冷中性子を生成する物理的条件に関して理論的および数値解析的に研究した結果をまとめたものであり、以下の5章からなっている。

第1章は序論であり、始めに、本研究の背景を述べている。すなわち、運動エネルギーが $0.1\mu\text{eV}$ 程度およびそれ以下の超冷中性子は、中性子自体の素粒子的性質 (β 崩壊寿命や電気双極子モーメントなど) を調べるために基礎物理学分野で注目されつつあるが、こうした研究の動向と主要な結果を要約して記述している。物質科学研究分野への将来の応用にも言及したうえで、超冷中性子の利用を促進するには高密度・高輝度生成が不可欠であること、そして大強度陽子加速器や高中性子束研究炉に適した超冷中性子源を開発する必要性を指摘している。そこで、本論文の目的としては、超流動液体ヘリウムの中性子散乱断面積モデルの開発を行い、超冷中性子源の基本的な核特性を解明することにあると述べている。

第2章では、液体ヘリウムの中性子散乱断面積モデルを導出している。超流動状態にある液体ヘリウムの時空密度相関関数をボーズ凝縮割合を重みとした凝縮成分と非凝縮成分の線形結合として構成することにより、準粒子生成や密度励起による中性子減速散乱過程を液体温度の関数として定式化することに成功している。さらに、この断面積モデルは次の諸特性を満たすことを数理的に証明している。すなわち、入射中性子エネルギーの増加に伴ってフォノン・ロトン励起から自由原子散乱へと漸近的に遷移すること、素励起状態に関する詳細釣り合いが成立すること、そして0次および1次の sum rule を満足することである。この結果、得られた断面積モデルは 0.1K より沸点 4.2K までのヘリウム温度と $0.1\mu\text{eV}$ より 10eV までの入射中性子エネルギーに対して適用できることが、散乱則や全散乱断面積に関する最近の実験結果との良い一致とともに示されている。さらに、液体温度の低下に伴う生成フォノンの減少により、超冷中性子の上方散乱が極端に抑制される様子を定量的に評価しており、関連する微分散乱断面積と全散乱断面積の大きさも求めている。この結果は、超流動状態にある液体ヘリウムを適切に利用すれば、高密度の超冷中性子を生成し蓄積できる可能性を示唆している。

第3章では、超冷中性子の生成断面積と生成量を評価している。液体ヘリウムのフォノン・ロトン分散関係は自由中性子の分散曲線と交点を有することから、約 1meV の中性子はその運動エネルギーと運動量のほぼ全てを液体ヘリウムに与えて超冷中性子となることに注目している。特に、 1meV 中性子の散乱自由行路は 10m 程度の大きさになることを考慮して、液体ヘリウム中での超冷中性子生成が空間的に一様に起こるものとして生成量の見積もりを行っている。この結果、約 1meV の冷中性子の入射に対して約 $1/1000$ の確率で超冷中性子を生成すること、 0.5K 以下の温度ではフォノン消滅による上方散乱が抑制されるため中性子 β 崩壊で消滅するまで超冷中性子は存在し続けること、そして個数密度実測値 (ILL) の約500倍に相当する約 $4\text{万個}/\text{cm}^3$ の超冷中性子が蓄積する可能性を明らかにしている。

第4章では、液体ヘリウムを用いた超冷中性子源の基本的核特性を中性子輸送解析により調べている。始めに、超冷中性子源の設計と開発に必要な不可欠である散乱断面積データ (群定数) を構築して、いくつかの代表的温度と広い入射中性子エネルギーに関する主要な散乱特性を適切に再現することを確認している。次に、比較的単純な形状の超冷中性子源体系につ

いて多群中性子輸送解析を行い、数 meV の中性子の外部入射に対する超冷中性子生成を個数密度として求めている。この解析により、超冷中性子源の核特性に関する多くの基本的かつ有用な知見を得ている。すなわち、数 meV 付近にエネルギー Spektrum を有する中性子の入射は多重散乱による減速効果を伴って超冷中性子生成量をほぼ倍増すること、液体ヘリウム格納容器の超冷中性子に対する表面反射率はかなり高くする必要があること (0.9999 以上)、液体温度の 0.5K 以下への低下により超冷中性子個数密度は最大となり飽和を示すこと、そして超冷中性子源体系の全表面からの中性子入射と体系寸法の最適化により生成量の更なる増加が期待できることである。

第 5 章は結論であり、本論文で得られた成果を要約するとともに、超冷中性子源開発に関する今後の展望を述べている。なお、付録 A および B には、本理論解析に必要な散乱の量子論と多群中性子輸送理論をまとめてあり、併せて本研究で新たに構築した液体ヘリウム群定数セットとその主要な特性を紹介している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、液体ヘリウム (^4He) を利用した超冷中性子源の開発を目指して、超流動状態にある液体ヘリウムの散乱則と、高密度の超冷中性子を生成する物理的条件を理論的に研究した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 液体ヘリウムの中性子散乱断面積モデルを導出して、0.1K より沸点 4.2K までの温度と 0.1 μeV より 10eV までの入射中性子エネルギーに対して適用できることを最近の実験結果と比較して確認した。特に、超流動状態にある液体ヘリウムの時空密度相関関数が凝縮成分と非凝縮成分の和で構成できるものとして、準粒子生成や密度励起による中性子の減速過程を定式化することに成功した。さらに、断面積モデルは次の諸特性を表現できることを証明した。すなわち、入射中性子エネルギーの増加に伴うフォノン・ロトン励起から自由原子散乱への漸近的遷移、詳細釣り合いの成立、そして 0 次および 1 次 sum rule の満足である。
2. 超流動液体ヘリウムでのフォノン励起による超冷中性子生成を検討し、液体温度の低下に伴う高密度生成の可能性を定量的に評価した。この結果、約 1meV の冷中性子が入射すると約 1/1000 の確率で超冷中性子を生成し、0.5K 以下の温度ではフォノン消滅による上方散乱が抑制されるために中性子 β 崩壊で消滅するまで存在し続けること、そして個数密度実測値 (ILL) の約 500 倍に相当する約 4 万個/cm³ の超冷中性子が蓄積する可能性を明らかにした。
3. 超冷中性子源の設計・開発に必要不可欠である散乱断面積データ (群定数) を構築した。いくつかの温度と広い入射中性子エネルギーに関する主要な散乱特性を適切に再現することを確認したのち、比較的単純な形状の超冷中性子源体系について多群中性子輸送解析を行った。この結果、数 meV の冷中性子の入射による多重散乱減速効果、最適寸法の存在、液体ヘリウム格納容器の表面反射率の影響などを明らかにしており、超冷中性子源の核特性に関する有用な知見を得た。

以上要するに、本論文は、超冷中性子源の開発のために、液体ヘリウムの中性子散乱断面積モデルを導出して設計用断面積データを構築し、併せて超冷中性子の高密度生成の可能性とその必要条件を明らかにしたものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 17 年 2 月 17 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。