

氏名	はたけ やま あつし 鳥 山 温
学位(専攻分野)	博士(理学)
学位記番号	理博第2278号
学位授与の日付	平成13年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
学位論文題目	飽和ヘリウムバッファガスを封入した低温アルカリ原子気体セルの実現と光ポンピング

論文調査委員 (主査) 教授 藪崎 努 教授 水崎隆雄 教授 大見哲巨

論文内容の要旨

冷却スピンを偏極した中性の気体原子は様々な基礎研究で重要になってきた。原子に熱速度を小さくし、長いスピン緩和時間を与える環境を与えることができれば、同一原子のスピンを長時間観測することができる。このような原子を用いれば、物理学の基礎研究、例えば原子の永久双極子モーメントの測定精度を格段の向上をもたらす、それを通して、理論的に極めて小さいことが予言されている時間反転対称性の破れの検証も可能になることが予想される。近年、中性原子にそのような環境を与える幾つかの方法が考案され、研究されている。その一つは研究の対象とする原子を直接レーザー光により冷却・トラッピングする方法であり、他の一つは対象原子に対して低温ヘリウム原子を利用して冷却する方法である。申請論文は、後者に属するものであるが、従来の方法とは原理、方法を全く異にした、液体ヘリウム温度(約2K)でアルカリ気体セルを実現する方法の提案と、その実現のための基礎研究に関するものである。

低温ヘリウムを利用した研究は、研究の対象とするアルカリ原子等を超流動状態の液体ヘリウムに注入する研究が端緒となった。液体ヘリウム中に原子を注入する方法として、固体試料をパルスレーザー光でスパッターする方法が有力で、原子の種類を選ばずに、大量の原子を生成できるといった長所をもっており、世界的にもこの方法が広く利用されてきた。しかし、この液体ヘリウム中で原子生成は、クラスターも大量に生成され、これが液体ヘリウムに大きな対流をもたらすという大きな欠点を持っている。更に、生成された原子のスピンの緩和時間が1秒以下で、当初予想していたようには長くないことが最近わかってきた。

本研究では、低温ヘリウムを利用して、低温下でアルカリ気体原子を長時間ガラスセル中に閉じ込めておくという従来にない斬新な方法の提案と、この低温アルカリ原子気体セルの実現に向けた基礎研究に関するものである。この研究で使用するセルは、アルカリ金属と高密度のヘリウムガスで(室温で数気圧)を封入し、それをクライオスタットで液体ヘリウム温度(2K以下)にまで冷却させたものである。このような低温ではアルカリ原子は壁面に吸着し、セルの中には気体原子は全く存在していない。申請者がまず行なった研究は、ヘリウムガスに大きな擾乱を与えずに気体アルカリ原子をセル内に生成する方法の開発である。光学的に原子を生成する幾つかの方法を実験的に調べてみた結果、ヘリウムへの擾乱も非常に小さい最良の、全く新しい現象を見出している。セルの殆ど透明な部分に連続光を与えると、たとえ光強度が低くても壁面から原子が大量に放出される現象である。更に、原子生成の温度依存性を調べた結果、原子の生成がセルの壁面が超流動ヘリウム膜で覆われていることが必要であることを見出した。彼はこの特異的な現象がどのようなメカニズムで生じるかの研究を行なっている。原子生成の光の波長依存性から、原子は壁面に存在するアルカリクラスターの表面プラズモン共鳴による非熱的な脱離過程によるものであることを明らかにした。また壁面における超流動ヘリウムの存在は、クラスターから光により脱離したアルカリ原子をセルの内部に連続的に輸送する重要な役割をしていることを見出している。光の照射によりアルカリ原子の生成と同時にヘリウム膜も熱せられ、壁をつたっての超流動流による供給を受けながら連続的な蒸発し、ヘリウムガスの流れ(超流動駆動ヘリウムガス流)を引き起こす。この流れによって、脱離したRb原子は高密度のヘリウム

ガス中へ効率良く輸送される。アルカリ原子がいったんセル中に輸送されると、この高密度のヘリウムガスのために Rb 原子の壁への移動が抑えられ、気体 Rb 原子の長い寿命が達成されるのである。このようにして光学的にセル内に作られてアルカリ気体原子の密度はおおよそ 10^8cm^{-3} で比較的高く、また原子の寿命は10秒以上で、この寿命はヘリウムガス中での拡散と壁面での凝縮によることを示している。

申請者は低温セル内で生成されたアルカリ原子に円偏光のレーザー光を用いた光ポンピングの実験を行なっている。光ポンピングにより作られたスピン偏極の時間変化から、電子スピンに対する緩和時間の詳細な測定を行い、それがおおよそ10秒程度あるいはそれ以上であり、スピン緩和時間がほとんど原子の寿命で決まるという結果を得ている。また、原子衝突による緩和時間はヘリウム原子が高密度で（おおよそ 10^{19}cm^{-3} ）存在するにも拘らず60秒以上という極めて長いことが示されている。

以上のように本研究では新しい原理方法により、いわゆる液体ヘリウム温度でアルカリガスセルを実現するという斬新な研究である。その結果、従来のガスセルでは実現不可能な、気体原子の寿命、電子スピンの緩和時間も10秒以上が得られるようになった。同一原子を長時間観測でき、磁気共鳴の分解能も飛躍的に高分解能となり、スピンに関連する基礎物理学に最適な環境を原子に与えることに成功している。

論文審査の結果の要旨

中性気体原子を低温にまで冷却し、熱速度を大きく低減させることは種々の基礎科学において重要になってきた。更に、冷却された原子にそのスピン緩和時間を長くする環境を与えることは、極めて高い精度でスピンの観測が可能となり、原子の永久電気双極子モーメントの精密測定等、基礎物理学にとって重要である。本研究は、中性原子にそのような環境を与えるために低温ヘリウムを利用して、低温（約2K）にいてもアルカリ原子を比較的長い時間気体のままで存在させる、いわば低温アルカリ原子気体セルを初めて実現させる研究である。この研究は、近年盛んに行なわれている液体や固体ヘリウム中へ注入した原子・分子の研究の延長線にあると言えるが、実現された低温セルは、中性原子にこれまでにない全く新しい環境を与えるものであると言える。原子物理学の種々の基礎研究において従来利用されてきたアルカリ気体セルは室温以上の温度で用いられているが、液体ヘリウム温度にし、さらにこれらの原子のスピン緩和時間を従来に比べ大幅に向上させた点が本研究の特徴である。

申請者が提案し、実験を行った低温気体セルは、壁が超流動のヘリウム膜で覆われており、気相には高密度の飽和ヘリウムガスが液体ヘリウムとの平衡状態で存在している。そのヘリウムガスの中にいかにアルカリ原子（実験では主として Rb 原子）を生成させるかが大きな問題であった。本研究では、申請者が見出した、10nm サイズのクラスターから光誘起原子脱離によって Rb 原子（典型的密度 10^8cm^{-3} ）生成した。この現象は熱的な過程でないため、原子生成時にヘリウム気体に大きな流れ誘起させないという利点を持っている。生成された気体 Rb 原子は、2cm 程度の大きさのセル中で、10秒程度の寿命をもって存在させるものである。このセルの実現により、液体ヘリウム温度のヘリウムガス中でのさまざまな新しい実験が可能になる。

申請者は、低温セル中で生成された Rb 原子に対して光ポンピング実験を行っている。円偏光レーザー光により Rb 原子を偏極し、その電子スピン緩和時間の精密測定を行っている。その結果、Rb 原子のスピン緩和時間は原子のほぼ寿命（10秒以上）であること、ヘリウムガス中での衝突緩和時間は高密度（おおよそ 10^{19}cm^{-3} ）であるにも関わらず60秒以上に達していることを明らかになった。これはこれまで実現されていたアルカリ原子の緩和時間が1秒以下であったことを考えると、革新的な成果であるといえる。

低温セル実現のかぎとなった光誘起原子脱離ローディング法は、注目すべき特徴がある。比較的弱い CW レーザー光の照射で、透明なガラスセルの壁面から、多くの Rb 原子が脱離する。さらにこの方法は、セル中のヘリウムが超流動になる温度以下で非常に効率が良い。こうした現象も含めたこの低温セルの物理、つまりどのようなメカニズムで気体 Rb 原子がローディングされ、どのような機構で失われていくのか、を本研究で明らかにした。セルに光が照射することによって、セル壁面上の Rb クラスターから Rb 原子は脱離し、壁際のヘリウムガス中に放出される。一方、この壁での凝縮が気体 Rb 原子の最大の損失原因であり、このままでは Rb 原子はすぐに失われてしまう。しかし、光の照射によりヘリウム膜が熱せ

られ、壁面上の超流動流による供給を受けながら連続的な蒸発をすることによって、ヘリウムガスの流れ（超流動駆動ヘリウムガス流）を引き起こす。この流れにより、脱離した Rb 原子は高密度のヘリウムガス中へ効率良く輸送される。そして Rb 原子がいったんセル中に輸送されると、この高密度のヘリウムガスのために Rb 原子の壁への移動が抑えられ、気体 Rb 原子の長い寿命が達成されるのである。

以上の申請者は、新しい原理・方法により、いわゆる液体ヘリウム温度でアルカリガスセルを実現するという独創的な研究を行っている。この研究の中では、弱い光による表面プラズモン共鳴によりクラスターから高効率で原子生成現象や、セルの壁面に存在する超流動ヘリウム膜の存在による原子輸送現象など新たに見出した。これらの現象を利用して、従来のガスセルでは不可能であった、気体原子の寿命、電子スピンの緩和時間も10秒以上が得られるようになった。同一原子を長時間観測でき、磁気共鳴の分解能も飛躍的に高分解能となり、スピンに関連する基礎物理学に最適な環境を原子に与えることに成功している。また、原子分子に新しい環境を与えるという面で、今後、原子・分子物理学、低温物理学、量子エレクトロニクスなど多くの研究分野への貢献も大きいと思われ、高く評価できる。この研究は既に学術誌や国際会議などを通して世界的にも注目されている。

よって、本申請、論文は博士（理学）の学位論文として十分な価値を持つものと認める。

なお、主論文に報告されている研究業績を中心とし、これに関連した研究分野にていて試問した結果、合格と認めた。