

(論文内容の要旨)

近年、レーザー光により中性原子を冷却する技術が飛躍的に進歩し、この技術を利用して、原子の電子基底状態においてボース・アインシュタイン凝縮体を生成することが可能になり、様々な研究が行われている。申請者は、これとは性質が大きく異なる、イッテルビウム原子の準安定な電子励起状態に着目し、いくつかの研究を行った。

まず、準安定な電子励起状態での、超低温下での原子間衝突の振舞いを詳細に調べた。これまでの先行研究として、この準安定な電子励起状態にある原子を、磁場を用いたトラップ、いわゆる磁気トラップに捕獲する研究が行われていた。磁気トラップは特定のスピン成分のみがトラップ可能であり、原子衝突によってスピンが変わってしまう場合は、著しいトラップロスを引き起こすことが、実験、理論両面から研究されてきていた。これは、この状態でボース・アインシュタイン凝縮体を生成するという観点からは極めて都合が悪い。そこで、申請者は、新たに、光を用いて全てのスピン成分をトラップすることを行った。この光トラップ中では、原子衝突によってスピンが変わってしまう場合でも、依然として光トラップされたままであり、原子ロスには寄与しないことが期待される。実験を行ったところ、光トラップ中でも、非常に大きな原子ロスが観測された。申請者はこの原因を綿密に調べ、電子スピンと電子軌道運動の結合の仕方、すなわち微細構造を変えるような原子衝突が大きく寄与していることを見出した。これは、全く新しい知見であり、今後の理論的発展を促す重要な実験結果であるといえる。

次に、申請者は、イッテルビウム原子の準安定な電子励起状態と基底状態との間に、非常に狭い光学遷移が存在することに着目し、この超狭線幅光学遷移を用いたイッテルビウム原子ボース・アインシュタイン凝縮体の高分解能分光の実験を行った。そのために申請者は、まず、共鳴波長の **507nm** の非常に安定な光源の開発を行った。**1014nm** の波長の半導体レーザーを回折格子により安定化し、それを半導体を用いて増幅し、さらにそれを非線型結晶を用いて波長変換することにより **507nm** の光源を得ることに成功した。この周波数安定化は、真空中で温度安定化された超低膨張ガラスの基準光共振器に周波数フィードバックすることにより行い、**1kHz** 以下の線幅の極めて安定な光源を得ることに成功した。そして、これを用いて、調和型トラップおよび1次元の光格子トラップにトラップされたボース・アインシュタイン凝縮体の高分解能分光を行なうことに成功した。その結果、ボース・アインシュタイン凝縮相転移の前後で、そのスペクトル形状が劇的に変化することを観測した。申請者は、それが原子間相互作用によってきまるトラップ中での不均一な密度分布を反映している、ということで説明できることを示した。以上の結果は、イッテルビウム原子ボース・アインシュタイン凝縮体の新しい極めて有効な観測手段の開発に成功したことを意味し、重要な意義があると言える。

さらに、申請者は、イッテルビウム原子の準安定な電子励起状態と基底状態との間の非常に狭い光学遷移の、将来の光周波数標準としての可能性に着目し、その遷移周波数を、光周波数コムと呼ばれる装置を用いて、精度よく測定することに成功した。この結果は、今後の光周波数標準等の研究において重要な結果であると言える。

(論文審査の結果の要旨)

申請者は、イッテルビウム原子の準安定な電子励起状態に着目し、いくつかの重要な研究を行った。

まず第一に、準安定な電子励起状態での、超低温下での原子間衝突の振舞いを詳細に調べた。申請者は、新たに、光を用いて全てのスピン成分をトラップすることを行った。この光トラップ中では、原子衝突によってスピンが変わってしまう場合でも、依然として光トラップされたままであり、原子ロスには寄与しないことが期待される。実験を行ったところ、光トラップ中でも、非常に大きな原子ロスが観測された。申請者はこの原因を綿密に調べ、電子スピンと電子軌道運動の結合の仕方、すなわち微細構造を変えるような、原子衝突が大きく寄与していることを見出した。これは、全く新しい知見であり、今後の理論的発展を促す重要な実験結果であるといえる。

第2に、申請者は、イッテルビウム原子の準安定な電子励起状態と基底状態との間に、非常に狭い光学遷移が存在することに着目し、この超狭線幅光学遷移を用いたイッテルビウム原子ボース・アインシュタイン凝縮体の高分解能分光の実験を行った。その実験を行う準備として、申請者は、まず、共鳴波長の 507nm の非常に安定な光源の開発を行った。1014nm の波長の半導体レーザーを回折格子により安定化し、それを半導体を用いて増幅し、さらにそれを非線型結晶を用いて波長変換することにより 507nm の光源を得ることに成功した。この周波数安定化は、真空中で温度安定化された超低膨張ガラスの基準光共振器に周波数フィードバックすることにより行い、1kHz 以下の線幅の極めて安定な光源を得ることに成功した。そして、これを用いて、調和型トラップおよび1次元の光格子トラップにトラップされたボース・アインシュタイン凝縮体の高分解能分光を行なうことに成功した。その結果、ボース・アインシュタイン凝縮相転移の前後で、そのスペクトル形状が劇的に変化することを観測した。申請者は、それが原子間相互作用によってきまるトラップ中での不均一な密度分布を反映している、ということで説明できることを示した。以上の結果は、イッテルビウム原子ボース・アインシュタイン凝縮体の新しい極めて有効な観測手段の開発に成功したことを意味し、重要な意義があると言える。

第3に、申請者は、イッテルビウム原子の準安定な電子励起状態と基底状態との間の非常に狭い光学遷移の、将来の光周波数標準としての可能性に着目し、その遷移周波数を、光周波数コムと呼ばれる装置を用いて、精度よく測定することに成功した。この結果は、今後の光周波数標準等の研究において重要な結果であると言える。

以上のように、申請者の研究によって、低温衝突およびボース・アインシュタイン凝縮の研究において、新しい知見が得られた。これらの研究は、世界に先駆けた極めて独創的なもので、すでに学術雑誌や国内・国際会議などを通して、国の内外を問わず脚光を浴びている。これらの研究は、今後、光・原子・分子物理学、量子情報処理、量子エレクトロニクス、など、多くの研究分野への貢献も多大であり、高く評価できる。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、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。