

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	イッテルビウム量子気体顕微鏡
Title(English)	Quantum gas microscope for ytterbium atoms
著者(和文)	ミランダ マルティン
Author(English)	Martin Miranda
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10063号, 授与年月日:2016年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:上妻 幹旺,金森 英人,古賀 昌久,西田 祐介,相川 清隆
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10063号, Conferred date:2016/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第		号	学位申請者氏名	Martin Santiago Miranda	
論文審査 審査員		氏名		職名	氏名	職名
	主査	上妻 幹旺		教授	相川 清隆	准教授
	審査員	金森 英人		准教授		
		古賀 昌久		准教授		
西田 祐介			准教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

量子縮退した中性原子気体を光格子に捕捉した系は、ポテンシャル形状から原子間相互作用に至るまで、種々のパラメーターを自在に制御できる大自由度量子多体系であり、強相関物性を量子的にシミュレートするための理想的な舞台として注目を浴びている。近年になり、2次元光格子中に捕捉された原子を、各サイトを分解して観測できる「量子気体顕微鏡」が開発され、発現した物性現象を詳細に調査するだけでなく、系を微視的に制御することさえもが可能となった。しかし量子気体顕微鏡はフェルミオン同位体をもたないルビジウム (Rb) 原子に対してしか実現されておらず、銅酸化物高温超伝導体を始めとする強相関電子系を量子的にシミュレートするためには、フェルミオン同位体を有する新しい原子種に対して量子気体顕微鏡を実現することが必要であった。本論文は、ボソン、フェルミオン双方の同位体を有するイッテルビウム (Yb) 原子に着目をし、量子気体顕微鏡を実現する上で障壁となる問題点を物理的に議論した上で、問題を解決するための新規手法を提案し、Yb 量子気体顕微鏡を実装することを主題としている。論文は、「Quantum gas microscope for ytterbium atoms」と題し、全7章から構成されている。

第1章「Introduction」では、レーザー冷却技術の発展とその応用に関する歴史的背景から始め、本研究の目的、位置づけ、特色、意義を明確化している。銅酸化物高温超伝導体に深い関係をもつ Fermi-Hubbard 模型を、光格子を使って量子シミュレートする上での問題点は「系の温度」である。現時点で到達可能な温度が $T/T_F \sim 0.1$ (T_F : フェルミ温度) であるのに対し、要求される温度は $T/T_F \sim 0.01$ とかなり低い。蒸発冷却に代表される既存の手法でこうした超低温を実現することは難しく、また飛行時間法等の従来手法でこうした超低温状態を測定すること自体が困難だといえる。フェルミオンを使った量子気体顕微鏡を実現することで、これら二つの問題を解決できることを記載した上で、本論文が、ボソン・フェルミオン双方の同位体を有する Yb 原子に対する量子気体顕微鏡の構築を目指すことが記述されている。

第2章「Ytterbium」では、ランタノイド系の原子種である Yb について、その物理的基礎特性を述べるとともに、本研究で起用する各種エネルギー状態とそれらの間の光学遷移の特徴について記述している。

第3章「Quantum gas microscope」では、Yb 原子が発する蛍光を使って顕微画像を得る具体的手法を提案し、その実現可能性をシミュレーションによって評価している。Rb を対象とした量子気体顕微鏡の場合、光格子中の原子に Sub-Doppler 冷却を施すことで、蛍光放出に伴う加熱を抑え、原子を一つのサイト中に留まらせている。Sub-Doppler 冷却法としては、偏光勾配冷却、ラマン冷却、電磁誘起透明化冷却等が挙げられるが、Yb 原子の場合、基底状態 (1S_0) が超微細構造をもたず、ボソン同位体である ^{174}Yb 、 ^{176}Yb に至っては核スピンすらもたないため、上記のいずれの冷却法も適用出来ない。申請者は、十分に深いポテンシャルを原子の励起状態に、浅いポテンシャルを基底状態に形成することで問題を解決する「deep potential approach」を提案している。励起光を照射し基底状態と励起状態とを結合させると、原子は平均的に深いポテンシャルを経験する。本章では、具体的な実験パラメーターを設定し、サイト内における原子の寿命を半古典的にシミュレートし、deep potential approach によって量子気体顕微鏡が実現可能であることを示している。

第4章「Experiment: Transport of atoms to the SIL surface」では、顕微鏡の分解能を増大させる効果をもつ固浸レンズの直下において、原子気体を鉛直方向に圧縮し、2次元系を生成する実験手順について述べている。この操作により、原子気体を光学顕微鏡の焦点深度に比べて十分薄くすると

もに、2次元光格子に導入するための準備が整う。具体的には、1) $20\mu\text{K}$ の Yb 原子気体を磁気光学トラップによって生成し、2) 波長 532nm のレーザーで構築された複数の光ピンセットによって、原子を 450mm 離れた固浸レンズの直下 $20\mu\text{m}$ の位置に輸送し、3) 固浸レンズ表面に形成された「光アコーディオン」ポテンシャル中でボース凝縮体を生成し、4) ポテンシャルの空間周期を縮め、2次元系を生成している。光アコーディオン技術は、磁場による操作が出来ない Yb 原子を空間的に圧縮するために、申請者が新規に提案・開発した手法であり、本章ではその原理、並びに得られた実験結果について詳細が述べられている。

第5章「Experiment: Fluorescence imaging」では、圧縮された原子気体を2次元光格子に導入し、deep potential approach によって原子の蛍光画像を取得した結果について述べている。光格子の周期 544nm に対し、分解能 318nm が得られている。また、蛍光画像と点拡がり関数とから、原子の初期位置を再構築するアルゴリズムについて述べた上で、蛍光撮像時に原子が同一サイトに留まる寿命が推定されている。再構築された原子分布が、実際の分布にどの程度忠実であるかについての議論が行われており、原子ロス率は 8% 、隣接サイト間ホッピングは 0% と結論付けている。

第6章「Extension to fermionic isotopes」では、ボソン同位体である ^{174}Yb に対して実現した量子気体顕微鏡を、フェルミオン同位体である ^{173}Yb に適用可能か否かについての議論がなされている。 ^{173}Yb は ^{174}Yb とは異なり、励起状態が、核スピンの由来した超微細構造を有している。本章では、AC シュタルク効果、ならびに超微細相互作用の双方を含めたハミルトニアンに対し、エネルギー固有状態を数値的に計算している。 ^{174}Yb を用いた実験と同程度の強度を有するレーザーを使った場合、AC シュタルク効果が超微細相互作用に比べて支配的となるため、顕微観測に必要な deep potential を得ることができ、 ^{173}Yb に対しても量子気体顕微鏡を実装可能であることが示されている。

第7章「Conclusions」では、本研究の実験結果を端的にまとめ、本論文と時を同じくして実現された他の原子種 (Li, K) に対する量子気体顕微鏡と性能の比較を行っている。冷却を使った手法とは異なり、Deep potential approach を用いることで、蛍光撮像時における隣接サイト間のホッピングが回避できることが述べられている。Yb 量子気体顕微鏡の性能を向上させるための提言をするとともに、Fermi-Hubbard 模型における d 波超伝導相の実現にむけた今後の展望について記述をしている。

このように学位申請者は、磁場による操作が出来ない Yb 原子気体を、2次元量子縮退気体にする光アコーディオン技術を新規に開発し、また deep potential approach という新しい着想のもとに、Yb 原子に対する量子気体顕微鏡を世界で初めて実現することに成功している。新規性の高い研究が数多くなされており、実験技術、実験データ解析能力、理論的考察力、その全てにおいて卓越した能力をもっており、博士（理学）の学位に十分値するものと考えられる。