

京都大学	博士（人間・環境学）	氏名	山下和也
論文題目	Experimental studies of phase coherence of Bose gases in a two-dimensional optical anti-dot lattice（二次元アンチドット光格子中におけるボース気体の位相コヒーレンスに関する実験的研究）		
（論文内容の要旨） 本論文は、2次元アンチドット光格子という特異な幾何学的構造をもつ周期ポテンシャル中に誘導された、ボース気体に関する実験的研究の成果を詳述している。具体的には、アンチドットの高さの上昇によるボース気体の低次元化と、それに伴う位相コヒーレンスの変化を実験的に探索し、それらの物理的機構を考察したものである。 序章では、ポテンシャル極小が多重連結した2次元アンチドット光格子の構造の特異性と冷却原子が有する量子性と制御性のよさを組み合わせることにより、量子輸送現象など新しい研究展開が可能になることを指摘している。一方、ポテンシャル極小が孤立していなくても、量子力学的には原子が局在しうること、それに伴って気体の低次元化と位相コヒーレンスの低下が起こる可能性など、今後、アンチドット光格子中のボース気体を研究していくうえで、重要となる基礎的情報が欠落していることを指摘し、本研究の目的と意義を明確化している。 第2章では、実験結果の理解に必要な理論的枠組みについて説明している。ポテンシャル極小は連結して平坦であるものの、アンチドットによるピンチ効果は原子のホッピングの低下を引き起こす。本論文では、このホッピングの評価のために、原子が実際に感じる1次元有効ポテンシャルを、ドットに挟まれた狭い領域で増大する原子のゼロ点エネルギーの上昇分として定式化している。そして、この有効ポテンシャルを取り込んだ2次元ボース・ハバードモデルに基づくモデル計算を行い、従来の局在型光格子とアンチドット光格子内のボース気体では、実現する相に本質的な差が生じることを指摘している。両者の違いは光強度が高い領域で顕著になり、前者では強い局在による1次元性の効果が支配的になること、後者では極めて緩やかに低次元化が進み、ポテンシャル極小線が交差する領域に気体は集まるものの、隣接気体どうしは依然として弱く結合し、2次元ジョセフソン接合系が形成されることを明らかにしている。 第3章では、実験の基盤となる10^6個の^{87}Rb原子のボース・アインシュタイン凝縮体の全光学的高速生成について説明している。難点とされていた光トラップ中での蒸発冷却効率の低下は、独自に開発したトラップ体積が大きく異なる2つの圧縮型光トラップシステムによって解決できることを実証している。また、周波数性能の劣る高出力のファイバーレーザーでも、トラップサイズをうまく設定すれば、初期の原子数を大幅に改善でき、しかも蒸発冷却を進めながら、もう1つのよりタイトな光トラップの中心部に、原子を高効率で誘導できることを明らかにしている。さらに、圧縮型光トラップの前段階の予備冷却として、3次元光格子中での偏光勾配冷却の重要性も指摘している。 第4章では、アンチドット光格子のセットアップ、相対位相の調整法および温度の測定法などの実験手法を詳述している。さらに、実験の不完全性により生じる理想的なア			

ンチドット光格子からのずれの影響をすべて調べあげ、得られた実験結果が十分信頼に足るものであることを明らかにしている。

第5章では、本論文の主題である位相コヒーレンスに関する一連の実験結果を示し、その物理的機構が考察されている。連結したポテンシャル極小を反映して高い位相コヒーレンスが、広範囲のパラメーター領域で維持されていることをまず確認している。次に、ドットが極めて高くなると、原子のホッピングレートと位相コヒーレンスの低下が始まり、事実上局在が起ることを定量的解析によって示している。そして、これらの結果を第2章で導入した有効ポテンシャルとボース・ハバードモデルの計算結果と関連づけ、ホッピングレートが低下しても位相コヒーレンスが維持できている事実は、気体がジョセフソン接合系とみなせる結果と合致すると結論づけている。さらに、通常の局在型光格子でおこるデコヒーレンスとの差異も明らかにしている。最も重要な指摘は、アンチドット光格子では局在が起る少し前から、2次元光格子面内で位相ゆらぎが誘起されている点である。その実験的証拠として、気体を混ぜ合わせて位相の情報を気体の密度分布にやきつけると、明瞭な位相欠陥（量子渦）が、時として検出される観測結果を提示している。

第6章では、位相欠陥の物理的機構に焦点を絞った議論を展開している。最初にほぼ局在した1次元気体の位相ゆらぎについて考察している。アンチドット光格子内の1次元気体は、通常の局在型光格子内で孤立した1次元気体とは対照的に相関が弱く、気体内の位相ゆらぎは比較的小さい範囲内に抑えられうると指摘している。その結果、局在型光格子では、個々の1次元気体の位相の乱れが全体のコヒーレンスを低下させるが、アンチドット光格子の場合は、2次元面内の横方向の位相ゆらぎ、特に熱的な位相ゆらぎの影響が、1次元性の効果よりも先に現れることを指摘している。そして、観測された位相欠陥の検出確率の急激な上昇は、ベレジンスキー・コステリッツ・サウレス転移として解釈できると結論づけている。

最後に、従来の光格子系では難しかった、次元のクロスオーバー領域での量子気体の物性研究が、アンチドット光格子では可能になることや、広範囲なパラメーター領域で気体の位相コヒーレンスが保たれるという特質が、光格子系の研究に理論と実験の両面で新たな展開をもたらすことを強調して本論文をまとめている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、2次元アンチドット光格子内に注入されたボース気体の位相コヒーレンスに関する実験的研究である。具体的には、アンチドット内でのボース気体の局在化に伴う低次元系への移行と、その結果引き起こされる位相コヒーレンスの変化を実験的に探索し、それらの物理的機構について考察したものである。

光の定在波で作られた周期ポテンシャルである光格子と量子縮退した気体を組み合わせた系は、世界的にも活発な研究対象となっている。これまでの研究対象は、ほとんどの場合、ポテンシャル極小が孤立した局在型光格子であり、極小が多重連結した2次元アンチドット光格子は全く注目されてこなかった。特異な幾何学的構造をもつ光格子系に着目し、従来の局在型光格子では見られない新規現象の探索とその物理的機構の解明が本論文の主題であり、そこに本研究の新規性と独自性がある。

論文では、実験に先立ち理論モデルの説明を第2章で展開している。アンチドットが原子のホッピングに与える効果を計算する方法は種々考えられるが、本論文では原子が感じる1次元有効ポテンシャルを独自に導入している。近似的なポテンシャルであるが、これによりアンチドットによるピンチ効果の数値的評価が可能となり、さらに、連結した平坦なポテンシャルの下でも、原子の局在が起こりうることを視覚的に明示できる。引き続く2次元ボース・ハバードモデルの計算は、実験状況を理想化しすぎているため、実験結果との定量的な比較に問題が生じることは否めない。しかし、新しい系への最初のアプローチとしての機能は十分果たしていると言える。特に、通常の光格子では局在化が急速に進み、1次元性の効果が発現しやすいのと対照的に、アンチドット光格子では低次元化は緩やかに進行し、系の状態としては2次元のジョセフソン領域にとどまり続けるなど、両者の本質的な相違点を見出せたことには大きな意義がある。

ボース・アインシュタイン凝縮体の生成に関する研究では、光トラップ中で蒸発冷却を行う上で避けられない原理的な課題と、安価な高出力ファイバーレーザーを利用する際にしばしば直面する技術的問題が、独自に開発した圧縮可能な2つの光トラップシステムにより、同時にかつ見事に解決されている。解決につながった物理的な機構についても深い考察がなされ、一見、複雑に見える本手法の各冷却プロセスをいかにして最適化すればよいか、その決定方法も詳しく記述されている。本手法は他の原子種にも適用できる汎用性の高い優れたものであり、結果として得られる凝縮原子数や生成までの時間も、光トラップによる手法としては、論文発表時、世界最高記録であった。この点は高く評価してよい。また、新しい光格子系を構築する際にカギとなる技術的なポイントも提示されており、この系を再現しようとする他グループに、必要な情報はすべて提供されている。

通常型の光格子と対照的な結果をいくつも見出し、物理的な考察を展開していることは学術的に高く評価できる。アンチドット光格子では、きわめて広範囲のパラメータ領域にわたって気体の位相コヒーレンスが維持されている。この結果に対して、極小線の交差領域に集まり、チューブ状に伸びた気体が隣どうしで弱く結合しあっ

て、ジョセフソン接合の集合体を形成しているという基本的な描像を与えたことは、これからの研究展開にとって重要である。この性質は、今後、様々な実験にも応用されていくであろう。アンチドットの高さが極めて高くなると、最終的には孤立した1次元気体の集まりへと変遷するが、この次元のクロスオーバー領域において、位相のゆらぎが時として位相欠陥の形で現れるという、通常の光格子では観測例がない新しい現象を見出したことには、大きな意義がある。局在型とアンチドット光格子内では、位相ゆらぎの大きさに違いがあり、それが系全体のデコヒーレンス機構に本質的な差異を生み出しているという考え方は、新しく興味深いものである。今後の理論的な研究課題となりうる。アンチドット光格子でのデコヒーレンスは、2次元光格子面内の横方向の熱的な位相ゆらぎに起因し、ベレジンスキー・コステリッツ・サウレス転移として解釈できるという視点は、現時点では実験結果を説明しうる最も合理的な考え方である。今後、さらなる実験的証拠によって補強され、確認されることが期待される。

このように本論文は、今後の展開が期待できる新規で興味深い実験結果や研究課題を数多く有しており、実験・理論の両面で当該分野の研究フィールドを大きく広げる基礎的研究として高く評価できる。よって、本論文は博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、令和2年1月29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。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものとし、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 令和 年 月 日以降