

論文審査の結果の要旨

氏名 鳥井寿夫

この論文は、ルビジウム原子気体のボース・アインシュタイン (BE) 凝縮体の生成とその原子波干渉計への応用の実験について報告・議論したものである。原子気体のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) は、1995年に米国の2つの研究グループがレーザー冷却技術を駆使して初めて実現した。その後、関連する実験的並びに理論的研究が世界的に展開されている。論文提出者は、原子気体の BEC を日本で初めて実現し、研究の活性化に大きな貢献をした。更に、光定在波による原子波のブラッグ反射を用いてマッハ・ツェンダー干渉計を構成することに成功し、BE 凝縮体の干渉効果について重要な知見を得た。この技術は、BEC の研究に広く応用され、いくつかの重要な発見を生む礎となっている。

本論文は、この BE 凝縮体の生成と干渉計の実験について述べたもので、6章と付録からなる。第1章で、本論文に関係する研究の歴史的な背景を説き、第2章で BEC の理論的基礎を準備する。第3章で BE 凝縮体の生成実験について詳述し、第4章ではその物理諸量の測定結果が与えられる。第5章で原子波干渉計の実験について、第6章で今後の発展について述べている。以下各章の内容を紹介する。

第1章は、BEC の研究の歴史についてのレビューであり、簡潔で要点を衝いたものになっている。本研究の位置付けと論文全体の構造も明確に示されている。

第2章は、BEC の一般的な理論についてレビューし、実験についての議論に備えている。初歩的な理論・計算の多くは付録に回されている。BE 凝縮体の巨視的波動関数がグロス・ピタエフスキー方程式で記述できること、それを用いてのアスペクト比の時間発展、等について議論している。

第3章では、前半でレーザー冷却の手法を用いた BE 凝縮体の生成法について一般的なレビューを行った後、実際のルビジウム原子気体の BEC 実験について、原子輸送に重力のみを使うという、本研究の独創的な点も含めて詳述している。BE 凝縮体を干渉計に応用して実験を行うには、その物理的諸特性を抑えておく必要があるが、そのための測定法についてもここで記述される。

測定結果は第4章に与えられ、第2章で議論した理論との比較を行っている。特に、トラップからの凝縮体の開放後、十分長時間経過後のアスペクト比の時間発展の実験結果が、運動エネルギーを無視したトーマス・フェルミ近似で良く記述されることを示している。比較の結果、干渉計の実験に進むために、BE 凝縮体の物理的な性質が十分に把握されていることを明確にしている。特に、拡散開始から 5ms 後、拡散前の凝縮体の相互作用平均場エネルギーの 96% が運動エネルギーに変換されると見積っている。

第5章は、本論文の中心部分で、原子波干渉計についての小レビューの後、この論文が解答を与えようとする2つの問題：(1) 粒子間相互作用が弱いながら無視できない BE 凝縮体での干渉の有無、(2) 干渉があったとすると、干渉計のフリンジパターンに 100% のコントラ

ストが得られるか、が提示される。続いて、本研究の最もオリジナルな部分である、干渉計を構成するための実験的なアイデアについて説明される。具体的には、光定在波を用いて原子波に対する回折格子を構成し、ブラッグ回折を起こす。これは運動量空間におけるラビ振動であり、回折格子を形成する時間、すなわち光パルスの照射時間を制御することで、凝縮体の一部を別の運動量状態へ移送して一旦空間的に分離し、再度運動量を移送して合体させる。実験結果として、凝縮体の空間的分離の距離が $2.2\mu\text{m}$ と小さい場合は、100%のコントラストを持つ干渉計が構成可能であること、しかし、分離を $35\mu\text{m}$ と大きくすると干渉出力が得られないことを報告している。分離開始時の相互作用エネルギーは、第4章で見積ったようにトラップされていた時の相互作用エネルギーの4%である。分離が大きい場合に干渉が消えたように見える原因について、光学系の不安定性にあるということを議論している。最後に、2つの問題について(1)については、相互作用が弱い(相互作用の96%が運動エネルギーに変換された)場合という限定付きの解答(有)、(2)については空間分離が上記のように小さい場合について、yesという解答を与える。

第6章で、この実験を基礎としてどのような発展が可能かについて述べられる。

本論文の重要性は、冒頭に述べた通りであり、この仕事を基礎に、BE凝縮体の位相構造の研究、物質波増幅の検証など、多くの重要な研究が現れたことから明らかである。より相互作用の強い場合の実験など、今後委ねられる部分も多いものの、以上より、実験手法・結果ともに、学位論文として十分な水準にあることが審査員全員によって認められ、博士論文として合格であると判定された。

論文提出者は、本研究に必要なノウハウを自分の実験と米国のグループとの連絡とから蓄積し、使用した装置のデザイン、立ち上げについても中心となって行った。実験のアイデアも論文提出者と共同研究者との議論から得られたものであり、実験そのものはほとんど論文提出者一人で行っている。本論文の内容は、すでに学術雑誌(Physical Review A)に発表済みであり、これを本学位論文に使用することについては共同研究者から同意が得られている。論文の内容は上記の通り、提出者が主体となつての研究で、その寄与が十分であると判断された。

以上より、博士(理学)の学位を授与できると認める。