

内22-84

早稲田大学審査学位論文(博士)の要旨
早稲田大学大学院理工学研究 3566-2

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

Excitations in Bose-Condensed Gas
(ボーズ気体中における素励起)

申 請 者

大 塚 晋 吾

Shingo Ohtsuka

物理学及応用物理学専攻・低温量子物性研究

2003 年 1 月



1995年、Bose-Einstein凝縮がルビジウムやナトリウムなどのアルカリ金属原子を用いて実験的に観測された。実験において試料となる原子は磁気トラップ中に気体状にして閉じ込められ、 10^{-6} K という極低温の状態におかれている。この系は通常の気体、液体、個体とは多くの点で異なっており、その幾つかを以下に列挙する。磁気トラップ中央部分における原子気体の粒子密度は、 10^{13} – 10^{15} cm^{-3} である。室温、大気圧中の空気分子の密度が 10^{19} cm^{-3} 程度、液体や個体の原子の密度が 10^{22} cm^{-3} 程度、原子核内の核子の密度が 10^{38} cm^{-3} 程度であることを考えると、非常に希薄な気体であることがわかる。このような希薄な系で量子現象を観測するためには、温度を 10^{-5} K 以下にしなければならないが、この温度は他の系の量子効果が観測される温度と比べると非常に低温である。個体において、金属中の電子による量子効果は 10^4 – 10^5 K 程度の Fermi 温度以下で観測され、フォノンによる量子効果は 10^2 K 程度の Debye 温度以下で観測される。液体ヘリウムでは 1 K 程度以下で量子効果が観測され、原子核における粒子密度の大きな系では、 10^{11} K 程度以下となる。

アルカリ金属原子による Bose-Einstein 凝縮に関して現在までに多くの研究がなされており、実験的および理論的な研究の論文が提出され続けている。本論文は、既に提出された幾つかの実験的な研究を基にして理論的な側面から行った研究をまとめたものである。主に Bose 凝縮体における素励起についての研究であり、以下基にした各実験および本論文の研究内容について概説する。

最初に 1997 年 MIT のグループにより、2つの Bose 凝縮体間の干渉効果が観測されたという実験を取り上げる。この実験により Bose 凝縮体を形成する原子はレーザーのようなコヒーレントな状態になっており、凝縮体内部には長距離相関があることが示されたことになる。実験結果は、原子レーザーの実現可能性や原子による Josephson 効果も示唆している。本論文において我々は、原子や分子の大きさに比べて巨視的な物体による干渉効果が観測されたことに着目して、残留気体などの微視的な環境自由度による巨視的な物体のもつ干渉性の消失に関して議論する。巨視的な物体の量子現象を研究することについて次のような問題意識が存在する。量子力学には大きさに関する適用限界を持たないことから巨視的な物体に関しても微視的な物体と同様に量子力学的法則が適用されるべきである。したがって、巨視的に区別され得る二つの状態の重ね合わせの状態が実現されることになる。その一方で巨視的な物体は、その外部あるいは内部に存在する微視的な環境自由度と相互作用している。巨視的な物体が環境自由度と相互作用する系の一例ともいえるべきブラウン運動は、ランジュバン方程式に従っており、量子的なコヒーレンスを示すことはない。しかし、環境自由度の相互作用のすべてが量子効果を破壊するわけではなく、環境と相互作用しつつも量子効果を観測することは可能である。我々は MIT のグループが行った実験と同様の境界条件のもと、環境自由度による干渉効果の消失度合を調べた。手法には influence-functional 法を

用い、環境自由度に関する経路積分をあらかじめ行うことで環境自由度の中で運動する巨視的自由度の作用を算出し、干渉図を計算する。また干渉性消失の度合いが量子力学的な拡散と熱拡散の比で表すことができることを示す。量子力学的な拡散は不確定性関係による波束の広がりであり、熱拡散は環境自由度の熱振動による拡散で環境自由度の温度や摩擦係数に依存する。量子力学的な運動の古典的な極限として $\hbar \rightarrow 0$ をとることがあるが、温度あるいは摩擦係数を増大させたときに起こる干渉性消失の過程は、前者の極限とは異なる。この違いは干渉図から読みとることができ、 $\hbar \rightarrow 0$ の極限が干渉縞の間隔が狭まっていくのに対して、温度あるいは摩擦係数を増大させると干渉縞の濃淡がなくなっていくという傾向をとる。

次に1997年にJILAのグループにより行われ、励起スペクトルの温度依存性が測定された実験を取り上げる。 ^{87}Rb 原子を用いた実験であり、磁気トラップの形状効果をもたらした2つの異なる集団励起が観測された。またそれぞれの集団励起に関して、音速と減衰率の温度依存性を測定している。集団励起に関する研究は、Bose凝縮体の物性を理解する上で重要であり、多くの研究報告がなされている。例えば温度効果を見捨てた議論に関しては、Gross-Pitaevskii方程式を用いた平均場理論で実験結果を説明することができる。我々は、集団励起の有限温度の効果に着目し研究を進める。温度が励起スペクトルにもたらす効果をより詳しく解析するために、簡単のために磁気トラップの効果を見捨てて一様な系を考えた。有限温度における場の理論を適用し、自己エネルギーを計算することで平均場理論からの粒子間相互作用に関する高次の補正を求める。温度依存性は平均場理論には含まれないために高次の補正を求めることは必要となる。二粒子間相互作用の分散関係に与える影響を、長波長側の曲率に着目しつつ調べた。曲率に着目する理由は、正ならば励起は不安定で、負ならば励起は安定で減衰が起こらないことになるからである。我々は絶対零度において気体パラメータを変化させることで曲率が変わり、ある気体パラメータの値を境に曲率が負になる領域が存在することを示す。また有限温度において曲率は温度とともに変化することを示し、気体パラメータが大きくても温度が高ければ励起は不安定になることを示す。分散関係を導出すれば、Bose凝縮体の臨界速度を求めることができる。Bogoliubov理論の範囲では、長波長領域における分散曲線の曲率が常に正になっていることから音速が臨界速度に一致する。以前の議論で示されたとおり、曲率が負のときは分散曲線からも分かるとおり、臨界速度が音速を下回る。臨界速度の温度および気体パラメータに関する依存性を数値的に計算する。

最後に1998年にMITのグループによって行われた、光トラップを用いてBose-Einstein凝縮を成功させた実験を取り上げる。最後の冷却過程で磁場と原子基底状態の磁気双極子モーメントの相互作用を用いて原子をトラップする磁気トラップとは異なり、光トラップを用いればトラップされた原子のスピン自由度を残し

た状態で、Bose凝縮体を作ることができる。また最外殻軌道に不対電子を持たない磁場とは相互作用しない原子についてもトラップすることは可能である。光トラップは、BEC生成のより一般的な手法であり、磁気モーメントを持たない原子、分子、そして同種原子の複数スピン状態の凝縮体を形成する可能性を開いたといえる。我々は現時点では観測はされていないが、将来的に観測されるであろうスピン自由度を持つ Bose凝縮体の集団励起についての研究を進める。スピン自由度を持った凝縮体は、2粒子間接触型相互作用の他にスピン交換相互作用をするので、この2つの相互作用の大きさの大小関係により複雑な基底状態が形成される。実験的に成功した ^{87}Rb の凝縮体が、基底状態の超微細準位 $F=1$ に $m_F=-1$ 、 0 、 1 のスピン状態を持つことから、 $F=1$ の系を調べることに限定する。このとき平均場理論により、基底状態は'ferromagnetic'状態と'polar'状態の二つの状態を持つ。簡単のためにトラップの効果を考えずに一様な系を仮定して計算を進める。ここでは $F=1$ の場合を考えているが、スピン自由度を持たない Bose凝縮体が密度揺らぎによる音波的な励起しか持たなかったのに対して、スピン自由度があることによって引き起こされる幾つかの種類の励起が存在する。温度による効果も調べるために、有限温度における場の理論を適用し、相互作用に関する高次の補正を求める形式を構築した。この形式は、スピン自由度を持たない Bose凝縮体における場の理論の自然な拡張となっている。低温領域では長波長領域の励起が重要になるので、その領域での励起スペクトルを解析的に導出した。また化学ポテンシャルや基底状態のエネルギーについても同様に導出した。