

内合22-79

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文審査報告書

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 3 月

Planck 分布の理論的導出に関する Bose の研究を高く評価した Einstein が、boson の量子統計法則を確立し、その直接の帰結として Bose-Einstein 凝縮現象(BEC) --- 相互作用なしの凝縮 --- を予言したのは、1925 年のことであった。この現象がその全き姿で観測にかかったのは、実に 70 年後の 1995 年であり、実験で指導的な役割を果たした E. Cornell, W. Ketterle, C. Wieman の 3 人が 21 世紀最初のノーベル物理学賞を受賞したことは記憶に新しい。70 年間に BEC の研究が進展しなかったわけではない。London は ^4He 液体で発見された超流動現象の背後に Bose-Einstein 凝縮があると考えたが、このアイデアはその後の超流動、超伝導の理論的解明における理論的イマジネーションの源泉として低温物理に絶大な影響力をもち続けた。理論面では 1947 年に Bogoliubov が弱い斥力相互作用をもつボース気体の理論を提出し、斥力から超流動が出てくる微視的機構を明らかにした。それから 10 年後には Bardeen, Cooper, Schrieffer(BCS)がクーパー対のボース・アインシュタイン凝縮というアイデアに導かれて超伝導の微視的理論を完成させている。

しかし 1995 年以前には、言葉の正確な意味で Bose-Einstein 凝縮が観測されたことはなかった。超流動 ^4He に対する中性子散乱実験によって、この系には確かに凝縮体が存在することが確認されたが、凝縮体密度は 10%に満たないことも明らかになった。この結果は、超流動に対する二つの極端な立場 --- 凝縮体が本質的とする London-Bogoliubov 理論と、凝縮体は本質的ではなく量子流体力学が本質とする Landau 理論 --- の中間を指し示しているようで、問題の困難さを示唆している。 ^4He 系はボソン間の斥力相互作用があまりに強くて、微視的理論による記述法が未だに見いだされていないのである。もうひとつの超伝導も、クーパー対の理想ボース気体という描像で書ききれほど単純でないことは、BCS 以前から明らかであった。従って、超流動を説明する Bogoliubov の理論は、明快で堅固な理論ではあったが、実験的対象をもたない、いわば絵に描いた餅のような存在であった。

アルカリ原子気体におけるボース・アインシュタイン凝縮実験(1995 年)が、たちまちにして世界的注目を浴びたのは、上記のような事情が長く続いた後だったからである。この系はまさに Bose-Einstein, London-Bogoliubov の意味での凝縮体であることが判明し、凝縮体の波動性による見事な干渉縞さえ観測された。物理学者達は微視的計算の可能な凝縮体を初めて手に入れたことになる。実験・理論ともに怒濤のような研究の流れがわき起こり、現在も留まるところを知らない。

本論文の申請者は、このような状況のなかで、凝縮体の秩序パラメーターの運動、および巨視的スケールにおける量子コヒーレンスなどの問題に着目した。凝縮体の素励起は古くから研究されており、その成果は専門書籍にも掲載されているほどである。しかし、上記の事情で理論と実験の比較ができない時代が長かったため、見過ごされていた理論的課題も数多い。申請者は、凝縮体の素励起スペクトルやその安定性、巨視的量子系のデコヒーレンスなどの具体的問題に取り組むことで、

新しい光の当たった巨視的量子系に迫ろうとしている。

本論文は 5 つの章と 1 つの付録から構成されている。第 1 章では物理学全体のなかでの BEC の位置づけ、BEC 研究の歴史、トラップ中のアルカリ原子気体の実験結果のまとめなどが論じられている。特に巨視系における量子力学的コヒーレンスとその破壊(デコヒーレンス)の観点から、研究の動機がまとめられている。

第 2 章では、弱い斥力をもつ BEC 系の素励起スペクトルが、その温度依存性、相互作用依存性、2 つの素励起に分解する過程に対する安定性などの観点から詳細に論じられている。申請者は、有限温度における場の理論の方法を忠実に実行し、素励起のスペクトル --- 運動量・エネルギー関係 --- のみならず、スペクトル強度をも、長く丹念な解析計算を実行して、求めている。スペクトル強度に関する実験的データは未だあまりないが、将来の実験ではきわめて重要な情報を与えると予測される。特に Beliaev 型と Landau 型の減衰機構を詳細に調べ、温度の上昇とともに後者の機構が重要になることを予言している。さらに、この章で注目されるのは、素励起の安定性に関する分析である。Bogoliubov の得たフォノン型のスペクトルは短波長側に向かって下に凸の分散曲線をもつが、このことは、素励起が二つの素励起に分解するという素過程を自発的に起こしうることを、すなわち、素励起の不安定性を示唆している。申請者は、温度および斥力相互作用の効果で、素励起が安定性を獲得するという、ユニークで注目すべき結論を得ている。特に、相互作用があまり強くないときには、絶対零度と BEC 転移温度の間の有限温度区間のみで素励起の安定化が起こる、という興味深い結果も得られている。これは素励起の減衰を精密測定する将来の実験によって確認される可能性があり、この意味で実験家にもインパクトのある予言になっている。

第 3 章では、スピン自由度をもつ超流動体へ研究対象を広げている。これは単なる理論的興味による拡張ではなく、 ^{87}Rb や ^{23}Na などの BEC 実験を理解する上で必須の理論である。これらの原子の基底状態では、電子の軌道角運動量、スピン及び、原子核のスピン合計としての全角運動量が 1 になっており、その結果、これらの原子のつくる BEC は 3 成分をもつベクトル型秩序パラメーターをもつことになるからである。この型の凝縮体は、純粋な光トラップ(MIT group, 1998 年)によって初めて実現されたものできわめて新しいため、斬新な研究テーマに富んだ魅力的な系である。申請者はスカラーの BEC において既に十分複雑な有限温度版場の理論を、このベクトル型 BEC に拡張した。理論の拡張はある意味でストレートであるとも言えるが、これをきちんと実行した理論的構成力と計算力は大いに評価できる。理論は、途中に膨大な解析計算を含むものの、最終的にはスピンに依存しない散乱チャンネルとスピン交換相互作用チャンネルの両方を含む、エレガントな結果を与えている。この章の主な成果は、拡張理論の構成という純理論的なものの他に、励起スペクトル、基底状態のエネルギー、有限温度における自由エネルギーなどに対する解析的表式を、気体パラメーターに関する展開式の形で具体的に与

えたことである。非常に骨の折れる計算であるが、他にあまり例のないものであり、将来の理論研究にも役に立つと思われる。

第4章で申請者は巨視系の量子力学におけるもう一つの問題に視点を移す。ここで取り扱うのは、環境体との相互作用が無視できないという意味で巨視性を帯びた物体が Young 型の二重スリットを通り抜ける際のデコヒーレンスの問題である。光子や電子の二重スリット実験は、量子力学的粒子のもつ不可思議な波・粒子二重性を象徴するものとして、古くから研究されてきた。最近になってヘリウム原子などの重い複合粒子も同様な性質を示すことが示されたが、炭素原子 60 個からなる巨大なサッカーボール分子 C60 が素粒子と同様の干渉性を示すという実験の報告は、驚愕、興奮、懐疑など大きな反応を物理学界に巻き起こした。量子力学自身に巨視的世界への適用限界が含まれていないとはいえ、これほど巨大で重い(電子の 100 万倍)物体が電子と同じ素朴な量子力学に従うだろうか、というのが問題意識である。このようにして、環境体によるデコヒーレンス効果のもとで可干渉性がどの程度生き残れるものか、定量的に評価する必要性が出てきた。Feynman-Vernon, Caldeira-Leggett 流の経路積分の手法を用いた申請者の研究を要約したのが本章の中身である。ここで扱っている環境体との結合を C60 など現実の系と直接結びつけるのは難しいが、得られた干渉パターン及びその消失の様子は BEC 等を用いた将来の干渉実験に適用可能なものである。ここで研究されたデコヒーレンス効果は、BEC のマクロな運動が準粒子との避けがたい相互作用によってどう変化するかという第3章までの問題と密接に結びついている。

以上述べてきたように、申請者は巨視的量子力学系の弱励起状態を、素励起スペクトル、相互作用効果と素励起の安定性、素励起ガスの存在による凝縮体の抑制・デコヒーレンスなどの観点から徹底的に解析的手法によって分析し、これまでほとんど知られていなかった有限温度の効果を明らかにした。特に素励起の安定性とスピンをもった凝縮体の温度効果に関する結果は独自性の高いもので、今後の研究に資するところ大である。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。

2003 年 3 月

| | | | |
|--------|----------|--------------|------|
| 審査員 主査 | 早稲田大学教授 | 工学博士 (東京大学) | 栗原 進 |
| | 早稲田大学教授 | 理学博士 (早稲田大学) | 中里弘道 |
| | 早稲田大学教授 | 理学博士 (京都大学) | 田崎秀一 |
| | 早稲田大学助教授 | 博士(工学)(東京大学) | 寺崎一郎 |