

ボーズ粒子からなる理想気体を冷却し、そのド・ブロイ波長 $\lambda_T = \sqrt{\frac{2\pi\hbar^2}{mk_B T}}$ と粒子密度 $n = \frac{N}{V}$ が $\lambda_T^3 n \leq 2.612$ なる条件を満たすと、基底状態の粒子数は急速に増加し、ついには全ての粒子が基底状態を占有するようになる。ここで、Tは気体の温度、mは粒子の質量、Nは全粒子数、Vは気体の体積である。この現象は、1925年アインシュタインにより予言され、今日、ボーズ・アインシュタイン凝縮という名前と呼ばれている。アインシュタインの論文は、初めの10年以上人々から無視されていたが、1937年にKapitsaにより液体ヘリウムの超流動現象が発見されると、その翌年にはLondonとTiszaは独立して、この新現象はボーズ・アインシュタイン凝縮の結果であるとの理論を展開し、人々の注目するところとなった。アインシュタインの理論は、相互作用のない理想気体に対するものであったが、液体ヘリウムは原子間に強く相互作用が存在することが予想される。相互作用を取り入れた現象論によって、液体ヘリウムの超流動現象を説明することに最初に成功したのはLandauであった（1941年）。これを量子論として定式化したのがBogoliubovである（1947年）。Bogoliubov理論は、今日ボーズ・アインシュタイン凝縮とそれに伴う超流動、超伝導などの現象を理解する上で最も基本となる理論である。しかし、液体ヘリウムは原子間の相互作用が非常に強く、相互作用を摂動として扱うBogoliubov理論の検証には適さなかった。この理論の定量的な検証は、1995年に原子気体でのボーズ・アインシュタイン凝縮が実現されて初めて可能となった。

一方、固体中の素励起である電子・正孔対（励起子）のボーズ・アインシュタイン凝縮は、Keldyshにより1962年に提案された。しかし、固体結晶の不完全さによる励起子の局在、高密度下でのオージェ再結合、電荷遮蔽などによる励起子の崩壊、など様々な要因を克服できず、提案から40年を経た今日も、その実現に至っていない。これに対して、励起子をマイクロ共振器中の光子と強結合させることにより生成される励起子ポラリトンは、その質量が励起子の1/10000と軽く（水素原子の質量の 10^{-8} ）、このため結晶の不完全さによる局在の問題を克服できると期待される。また、小さな質量のため、同じ温度でもド・ブロイ波長が長くなるので、ボーズ・アインシュタイン凝縮に必要な粒子密度は小さくてすむ。このような利点を活かして、励起子ポラリトンの量子凝縮現象（励起子ポラリトンは寿命が短く、熱平衡状態には到達できないので、ボーズ・アインシュタイン凝縮という言葉は適当ではない。）が複数のグループにより実現された。本博士研究（2005～2008年）に先立つ関連研究の状況は以上のようなものであった。

本博士研究の成果は2つあり、その第1は励起子ポラリトンの量子凝縮相がBogoliubov理論で記述されることを実験により初めて検証したことである。励起子ポラリトンは、原子のボーズ・アインシュタイン凝縮体よりもずっと相互作用が強く、また寿命の短いダイナミックな系であることから、Bogoliubov理論の検証には適さないであろうというのが、この分野の常識であった。候補者は、この実験を行なうため、電子ビーム露光技術を使って励起子ポラリトンの単一モードトラップを作製し、位置と運動量の最小不確定状態（ハイゼンベルグ限界）に近い励起子ポラリトンの量子凝縮相を実現することにまず成功した。続いて、励起子ポラリトン間の相互作用の大きさを凝縮相のエネルギーのブルーシフトから測定し、これが非線形モデルにより説明されることを見出した。測定された相互作用エネルギーU（ $\sim 1\text{meV}$ ）は $k_B T_c$ （ $\sim 10\text{meV}$ 、 T_c は臨界温度）に比べて十分小さく、Bogoliubov理論を適用するために必要な希薄気体の条件を満たしていることが確認された。引き続き、励起スペクトルの測定を行ない、これがBogoliubov理論に定量的に一致することを見出した。特に、小さな運動量領域（ $\frac{P^2}{2m} \leq U$ ）では、エネルギーE対運動量PはE=CPなる線形なフォノン型分数を示し、音速Cは、 $\sim 10^8\text{cm/s}$ のオーダーであった。この値は、原子のボーズ・アインシュタイン凝縮のC $\sim 1\text{cm/s}$ 、超流動液体ヘリウムのC $\sim 10^4\text{cm/s}$ と比較して非常に大きな値であり、光速の1/100に達する。このように極めて大きな音速が測定されたことにより、短い寿命にもかかわらず励起子ポラリトンの超流動現象を測定できる可能性が示唆された。

本研究の第2の成果は、励起子ポラリトンの2つの超流動状態を実験的に発見したことである。超流動状態は、摩擦を伴わない液体の流れや量子渦の発見など様々な現象により、これを確認することができる。その1つに、多数の凝縮体が相互に位相同期され、これを干渉縞の観測から確認することができる。候補者はこの実験を行なうため、一次元の励起子ポラリトンアレイを実現する周期構造を作製し、相互に位相同期された励起子ポラリトンの凝縮体アレイを実現し、その干渉効果を実験により調べた。その結果、位相が揃った基底状態と位相が逆転する準安定状態の2つの超流動状態があることを見出された。量子凝縮はこれまで基底状態でのみ起こる現象と考えられてきたが、準安定状態でも量子凝縮が起こることが初めて発見された。

候補者は、これら2つの重要な発見に至るデバイス作製、光学測定、理論解析を中心的に行なってきた。よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。