

励起子系の BEC 研究の現状と将来

長澤 信方* (東大・理)

1995年のアルカリ原子の BEC の成功は、この課題に興味を抱く広い分野の研究者に大きな刺激を与えた。物性物理の分野もその例外ではない。

低温の半導体や絶縁体に、バンドギャップ付近の光子エネルギーをもった光を照射すると、伝導電子と価電子正孔がクーロン引力によって水素原子様に束縛した励起子 (Exciton) という電子励起状態の素励起が生成される。この準粒子は低密度ではボソンとみなせる。光子密度が高いレーザーという光源が作られて以来、この軽いボソンを高密度に作ることによって BEC を作るという課題は、理論と実験の両面から興味を持たれてきた。しかしながら、今もって原子系の BEC 程に万人がそれと実感できる実験的証拠は得られていない。この講演では、これまで励起子の BEC を目指して研究された亜酸化銅 (Cu_2O) における実験結果を振り返り、その現状と問題点を考察した。また、励起子系の BEC 研究へのアプローチは、アルカリ原子よりもむしろ偏極水素原子の BEC のものと似ているため、それを引用しつつ論じることにした。

励起子は電子系の基底状態ではなく、励起状態である。従って、有限の寿命をもつ。このため BEC を論じるためにはこの寿命に比べて早い時間に励起子系が準熱平衡になることが前提である。そのためには長寿命の励起子系を探す必要がある。低温に冷却した良質な亜酸化銅の単結晶の励起子は、あらゆる意味でこの目的にあった性質を備えている。

励起子の BEC の観測方法としては、通常ゼロ波数の粒子の占有数がある臨界条件で巨視的に増える様子を、光学スペクトルによって観測する方法がとられてきた。また、有限波数をもつ粒子の分布も、対応するスペクトルの形状解析からえられる。これまでの研究では、全角運動量がゼロのパラ励起子で BEC が実現したとされる実験結果が報告されている。しかし、まだ第三者による確認はされていない。筆者らの実験では、化学ポテンシャルがほぼゼロを示す状況は実現できるが、BEC によるとされる δ 関数的な鋭い構造は観測できていない。一方、全角運動量が1のオルソ励起子では、その密度を増すことによって、BEC 相の境界への漸近的な接近が観測できるが、その境界を越えることはない。この原因はまだ解明されていないが、光照射領域から励起子が超流動的に流出するためとの説もあり、これが励起子の超流動とソリトン形成などの研究や解釈につながっている。しかし、この解釈には反論も多い。

筆者らは、熱い励起子を有限時間内に冷却して BEC 実現するのは困難との判断から、2光子励起によって始めから冷たい励起子を高密度に作る方法をとってきた。このアプローチは以前に塩化銅 (CuCl) の励起子分子の BEC 研究で有

効であった。しかし、この方法の問題点は、2光子で励起子準位を共鳴励起するため、それに伴う鋭い共鳴散乱線が、BECから期待される鋭い構造と共存する可能性があり、実際、この散乱線が観測されている。一方、時間分解スペクトルでは散乱線より遥かに遅い時定数をもった構造があるとの仙台グループによる報告があり、彼等はそれがオルソ励起子のBECによるものと解釈した。筆者らの最近の高分解レーザー分光の結果によると、完全な共鳴では関係する発光の強度が著しく低下し、その場合は結晶が全体的に光るという現象が見ついている。今後これらがどのような機構によるものかを探ることはおもしろい。

ところで、MITにおける偏極水素原子の研究では、2光子分光によって水素原子の1S状態の占有数とその化学ポテンシャルの濃度に依存するシフトからBECを実証した。この手法は筆者らの励起子や励起子分子のBECへのアプローチと原理的には同じである。彼等は基底状態のBECを2光子吸収分光で観測し、筆者らは励起状態のBECを2光子吸収で作成し、それを発光過程を利用して探査している。いずれも高精度の2光子分光の利点を利用したものである。

水素原子の場合の決定的な利点は、原子間の相互作用を理論的に正確に評価できることである。これによって実験的に観測される化学ポテンシャルの変化から粒子の密度も評価できる。励起子系では、励起子と電子や正孔との相互作用といった多体の効果を本質的に考慮しなければならないため、散乱長を正しく評価することが困難である。これは励起子のBEC研究の進歩を妨げている一つの大きな障害である。にもかかわらず、励起子のBECの研究はなお意義がある。現在原子系のBECは、一つはコヒーレントな原子源として、いま一つは多体問題を探る新しい舞台として関心を集めている。励起子系のBECの研究も後者の意味で価値がある。特に、励起子では電磁場との相互作用が本質的な意味を持つため、その角運動量の自由度を含めた多彩な性質は原子系のBECの研究にとっても有用なものとなろう。今後色々なボソン系でBECの実現が期待できるだろう。恐らくそれぞれは独自の個性を示しつつも、ボソン系のもつ意外性に富んだ新しい形態の発見へと我々を導くものと思われる。その流れの中で、半導体の励起子のBEC研究も改めて興味深い対象となるだろう。

最後に、S.A.MoskalenkoとD.Snokoの著書 *Bose-Einstein Condensation of Excitons and Biexcitons* が今年 Cambridge Univ.Press より出版されることを付記する。

* nagasawa@exciton.phys.s.u-tokyo.ac.jp