

原子気体の BEC : 何が新しいか ?

東京工業大学大学院理工学研究科

上田正仁

レーザー冷却された BEC は、原子間相互作用の強さを含む系を記述するパラメーターのほとんどすべてを非常に高い精度で変調できるという驚くべき自由度・柔軟性を持っている。その結果、これまでは純粋にアカデミックな興味の対象にとどまっていた多くの興味深い「思考実験」が検証可能となっている。たとえば、原子を閉じ込める磁気ポテンシャルは微視的なラフネスや不純物・欠陥を含まない、しかも形状を意のままに制御できる理想的な容器である。このような系で同位体のフェルミオンとボゾンのミクスチャー (たとえば、 ${}^6\text{Li}$ と ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^{39}\text{K}$ と ${}^{40}\text{K}$ 、 ${}^{87}\text{Sr}$ と ${}^{88}\text{Sr}$) を作り、量子核形成の研究ができないだろうか。あるいは、BEC を二重井戸ポテンシャルに閉じ込め、ポテンシャル障壁の幅や高さを自由に制御することで、弱結合から強結合までの中性原子のジョセフソン効果を同一のサンプルで研究できよう。井戸のエネルギーレベルは量子化されており、しかも、エネルギー散逸はほとんどないので、collapse-revival のような現象が起らないだろうか。また、原子間の斥力相互作用は粒子数揺らぎを抑圧するので、障壁の高さと相互作用の強さを調節することによってモット転移やスクイズドスピン状態の研究することも可能はずである。他方、ポテンシャルの形状を時間的に変化させることによって、非平衡なダイナミクスを研究することもできるはずである。

原子の BEC のもう一つの著しい長は、内部自由度を持つことである。例えば、 ${}^{87}\text{Rb}$ は、電子スピン $S = 1/2$ と核スピン $I = 3/2$ を持つ。電子スピンと核スピン間の相対論的なスピン-スピン相互作用により、 ${}^{87}\text{Rb}$ 原子の基底状態は、合成スピンの $F = 1$ と $F = 2$ の超微細準位へと分裂する。 $F = 1$ の状態のエネルギーは $F = 2$ のそれよりも温度に換算して約 30 mK 低いだけであるが、BEC が起こる温度はそれよりも 4 桁も低いので BEC は超微細準位 $F = 1$ に生成される (これを、 $F = 2$ へポンプしたり、両者を共存させてそのダイナミクスを調べることも可能である)。磁気トラップ中では、原子のスピンは局所磁場の方向に固定され、スピンの自由度はいわば死んでおり、磁気トラップ中の BEC の秩序パラメーターはスカラーとなる。しかし、光学トラップ中の原子スピンは固定されておらず、秩序パラメーターはベクトルとなる。このような、BEC を複数の微細構造準位に分布させることで、ヘリウム 3 の超流動の場合ように内部自由度空間におけるジョセフソン効果やさまざまなスピントクスチャー (秩序変数の空間分布) が生成される

だろう。実際、内部自由度を持った BEC の研究は、最近急速に展開しており、BEC と磁石という大変興味深いテーマに発展していくものと予想される。

これらに加えて、有限温度・非一様な多体系を原子物理学の精度で系統的に研究する手段を得たことで、相互作用をするボーズ粒子系の理解が一段と深まることが期待される。特に、引力相互作用をするボーズ粒子系の場合は、空間的な閉じ込めのおかげで準安定な BEC が実現できたのであり、新しい物質相として注目される。この他にも、低次元中性原子系の性質及びその光学的応答や新しいフェルミ超流動体、位相標準、非線型原子光学といった、レーザー冷却された原子系において現実味を帯びてきたさまざまな興味深いトピックスがある。

最近成功した実験の中で、最も特筆すべきものは、JILA による相互作用のスイッチによる BEC 崩壊の実験であろう。これは Feshbach 共鳴という現象を利用して原子間相互作用の強さや符号を制御するというものである。Feshbach 共鳴というのは共鳴散乱の一種で、原子同士が衝突した際に一時的に束縛状態が形成される現象である。Feshbach 共鳴近傍で印加する磁場の強さを変えることにより、相互作用の強さや符号を制御することができる。JILA のグループはまず原子間相互作用を斥力にしておいて BEC を生成し、その後引力に変化させるという実験を行なっている。以前の引力系の実験と比較して、この方法は斥力で BEC を準備できるため崩壊させる直前の BEC の原子数に上限がなく、原理的にはいくらかでも大きな原子数の BEC が準備でき、また、純粋な BEC が生成できるという利点がある。以上の方法を用いて引力 BEC の崩壊に関していくつかの実験がなされている。一つは、臨界原子数よりもはるかに大きな BEC を崩壊させるという実験である。その結果、臨界原子数よりもはるかに大きい状態から崩壊させても BEC 成分が残ることが確かめられた。失われた原子は、上記 3 のように周囲に拡散するバーストとして観測されるか、あるいは非弾性散乱(双極子相互作用によって別の超微細状態に移るか、三体衝突によって分子が形成される)によってトラップから飛び去り観測にかからない。BEC 崩壊は非常に面白い現象であるが、それが平均場の枠内でどの程度まで理解できるのか等の物理的詳細については現在活発な論争が繰り広げられている。

参考文献

このテーマに関するレビュー記事としては、上田正仁「レーザー冷却された中性原子気体の Bose-Einstein 凝縮」(日本物理学会誌. Vol. 53 (1998) p.663) および、パリティ特集号「打ち寄せる原子のさざなみ」(パリティ1999年9月号)を参照してください。また、引力系 BEC に関しては、斎藤弘樹、上田正仁「レーザー冷却された中性原子気体のボース・アインシュタイン凝縮—引力系を中心として—」(固体物理 Vol. 36, p. 1(2001))をご覧ください。