

引力相互作用するボース凝縮体の崩壊のダイナミクス

東京工業大学大学院理工学研究科 上田 正仁

Collapsing dynamics of a Bose-Einstein condensate with attractive interaction

Masahito Ueda

Graduate School of Science and Engineering Tokyo Institute of Technology

ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)が実空間で起こるのか、運動量空間で起こるのか、あるいは両者の中間領域で起こるのかは、相互作用の性質と境界条件による。斥力相互作用は密度揺らぎを抑圧するので、空間的に一様な系では BEC は運動量空間で起こる。他方、引力相互作用は密度の高い領域を作ろうとするので、一様な系では BEC は起こらないと信じられている。最近、ライス大学のグループが磁気ポテンシャルに閉じ込められた Li7 の原子気体が準安定な BEC を形成することを実験的に見出した。気体相にある BEC と真の基底状態(金属)を隔てるポテンシャル障壁の物理的起源は(ゼロ点)運動エネルギーなので、準安定な BEC が存在できる条件が、零点エネルギーが一粒子あたりの(平均場)引力相互作用エネルギーの大きさよりも大きいことであることが理解できる。この条件から準安定な BEC が存在するためには、BEC の原子数に上限 N_c が存在することが分かる。BEC の原子数が N_c になると、準安定な状態と真の基底状態である高密度相とを隔てるエネルギー障壁は消え、BEC は崩壊する。理論的に予言されている N_c の値は、ライス大学の実験系の場合は 1200 程度であり、実験結果も同程度の値を示している。

準安定状態にある系の零点振動は、等方的な膨張と収縮を繰り返すモード(breathing mode) である。これは、系が極小点の周りで振動するフォノンモードである。しかし、引力相互作用をする原子集団の長波長モードは不安定で、ひとたび大きな揺らぎが起こると全体がいきなり崩壊してしまう可能性がある。我々はこの系が崩壊するメカニズムを研究し、臨界点近傍で原子集団が巨視的量子トンネリング(MQT)を起こして崩壊することを理論的に予言した[1]。この現象の本質は、臨界点近傍における密度揺らぎの不安定さにあり、そのために臨界点近傍で MQT レートが観測にかかるほど大きくなるのである。蒸発冷却が完了した直後には、磁気トラップには10万個以上の原子がロードされているが、BEC になりうるのはこのうちたった1000個程度なので、ほとんどの原子は非凝縮相にあると考えられる。従って、巨視的なトンネリングによって BEC が消滅しても、非凝縮相からの補給を受けて BEC が再生されるもと考えらる。従って、BEC の原子数が時間的に成長と崩壊を繰り返すという興味深い現象が期待できる。

それでは、ひとたび崩壊しはじめた BEC の運命はどのようになるのだろうか。崩壊前の BEC は気体相にあり、数ミクロンの大きさを持っている。しかし、ひとたび崩壊しはじめると、原子集団は数オングストロームのオーダーの反発芯が見えるまで収縮していくものと一見すると予想される。では、BEC は崩壊して高密度なりチウム金属になるかといえば、そうはならないと考えられる。その理由は崩壊の過程で原子密度が高くなると 3 体衝突が起こりはじめ、束縛状態の形成にともなって、系の温度に比べて巨大な潜熱が放出されるからである。放出された潜熱は原子の運動エネルギーに転化され、原子集団は大爆発を起こして飛び散ってしまうと考えられる。また、崩壊のプロセスにおいて、密度揺らぎが非線形効果によって増幅された結果、様々な原子密度のパターンが生成されることを見出した[2]。

引力相互作用をする BEC は、このほかにも斥力相互作用をする BEC には見られないユニークな特長がいくつかある。例えば、斥力相互作用の BEC が角運動量をもつと量子渦が発生するが、引力相互作用の BEC の場合は、全角運動量が重心運動に食われてしまい量子渦にならない。これは、引力相互作用のためにすべての粒子がかたまつて量子化軸の周りを回ったほうがエネルギー的に得になるからである。我々はまた、斥力系で確立されている循環の量子化が引力系では部分的にしか起こらないことを理論的に明らかにした[3]。循環の量子化は超流動性現象の極印として認識されており、それが引力系においては部分的に破れていることを明らかにしたことは、超流動現象の本質の理解に新たな洞察を加えたといえる。引力相互作用は、原子の内部自由度においても現れる。例えば、Na23 の場合、原子は衝突の際、スピンシングレット対を作ったほうがエネルギーが得である。従って、外部磁場を弱くしていくと、BEC は強磁性的な性質から”反強磁性”的な性質へと変化することが期待できる[4]。

[1] M. Ueda and K. Huang, Phys. Rev. A vol. 60, 3317 (1999)

[2] H. Saito and M. Ueda, cond-mat/cond-mat/0002393

[3] M. Ueda and A. J. Leggett, Phys. Rev. Lett. vol. 83, pp. 1489-1493 (1999)

[4] M. Koashi and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. vol. 84, 1066 (2000)