

科学ニュース コラム 《超分子》通信

科学ニュース

磁性超流動体におけるスーパーノヴァ

齋藤弘樹 さいとう ひろき*¹

川口由紀 かわぐち ゆき*²

上田正仁 うへだ まさひと*²

*¹ 電気通信大学量子・物質工学科

*² 東京大学大学院理学系研究科

スーパーノヴァ(超新星爆発)とは、恒星が自らの重力で内側に潰れ(重力崩壊)その反動で大爆発を起こす現象である。このように自らの引力で崩壊し一転して爆発するという特異な現象は、これまで天体でしか見ることができなかったが、近年、気体のボース-アインシュタイン凝縮体(BEC)⁽¹⁾を崩壊させ爆発を観測するという実験が実現された⁽²⁾。この現象はスーパーノヴァに類似していることから「ボースノヴァ」と呼ばれている。

従来のボースノヴァは等方的な相互作用によって生じている。すなわち、気体原子の間に働くファン・デル・ワールス力は距離のみに依存し方向には依存しない力である。これに対して最近、クロム原子気体の BEC を用いて磁氣的相互作用でボースノヴァを発生させるという実験がドイツのシュトゥットガルト大学のグループによって実現された⁽³⁾。磁力は非等方的な力である。たとえば、棒磁石を二つ平行に置くと反発するが、縦に並べると互いに引き合う。この非等方性によって、磁化の向きに依存した非等方的な崩壊が発生し、その後続く爆発も非等方的に生じることが観測された。さらに爆発後に拡散してゆく気体の形状も、磁氣的相互作用の対称性と BEC の超流動性を反映したユニークなものになることがわかった。非

等方的な力による崩壊と爆発、それに伴う超流動体特有の現象(量子渦輪)の出現が、この研究で見出された新しい物理である。

磁性気体のボース-アインシュタイン凝縮体

すべての原子はボース粒子またはフェルミ粒子の2種類に大別される。このうち、ボース粒子に属する同種の原子からなる気体を考える。温度を下げると原子の速度が遅くなり、個々の原子の量子力学的なド・ブロイ波の広がりが大きくなる。さらに低温になると、突然、個々のド・ブロイ波が位相を揃えて重なり合い、巨大な物質の波として振る舞うようになる。その結果、さまざまな量子力学的効果がマクロに増幅されて文字通り目で見えるようになる。これが BEC と呼ばれる状態で、その有名な例は液体ヘリウムの超流動である。1995年には、アルカリ原子を使って気体相で BEC が初めて実現された。その温度はナノケルビンという超低温であり、宇宙で最も冷たい物質である。

原子間に働く力は BEC の性質を決める重要な要素である。よく使われるナトリウムやルビジウムといったアルカリ金属原子では等方的なファン・デル・ワールス力が支配的である。一方、クロム原子では磁氣的相互作用の強さがアルカリ金属原子の144倍もあり、原子間の磁力はファン・デル・ワールス力に匹敵する影響をもつ。磁力は非等方的であり、しかも遠方にまで影響を及ぼす。このようにクロム原子気体の BEC は、非等方的で長距離の相互作用をする「磁性超流動体」であ



り、最近になってシュトゥットガルト大学のグループによって実現された⁽⁴⁾。

崩壊、爆発、パターン形成

物体が自ら潰れるという現象を研究するためには、押し潰す力あるいはそれを支える力を時間的に変化させなければならない。なぜなら、もし押し潰す力が最初から勝っていると準備している途中で系が崩壊してしまうからである。実験では、系を崩壊に対して支えている短距離型の斥力を、フェッシュバッハ共鳴⁽⁵⁾という現象を利用して時間的に減少させることで崩壊の起こるタイミングをコントロールしている。このように粒子間力を変化させるというような他に類を見ない制御性の高さは原子気体 BEC の特長である。斥力が系を支えきれなくなると、磁力による崩壊が起こる。

図 1(a) 上段は、斥力を減少させて表記の時間だけ待った後、撮影を行ったものである。斥力を減少させた直後の写真は崩壊直前の BEC の形を反映しているが、時間がたつに従い上下に広がる

成分が現われ、四葉のクローバー状の形へと自発的に変形する。これは BEC の中心付近で崩壊が起こり、それに続いて爆発が起こったためである。四葉のクローバー状のパターン形成は、崩壊および爆発が非等方的に起こっていることを示している。もし等方的な爆発であれば円状のパターンが撮影されたであろう。図 1(a) 下段は筆者らが行った数値計算の結果であり、フィッティングパラメータなしで実験との一致が得られた。

量子渦輪の出現

数値計算は実験結果を説明しただけでなく、実験では直接観測されていない超流動特有の現象を明らかにした。

超流動体が回転すると「量子渦」と呼ばれる量子力学特有の渦が現れ、その中心では原子密度がゼロになる。この量子渦をさらにリング状にしたものが爆発後の BEC に生成されていることがわかった。図 1(b) は爆発後の等密度面と量子渦の位置を表すが、中心付近でえぐられたように密度

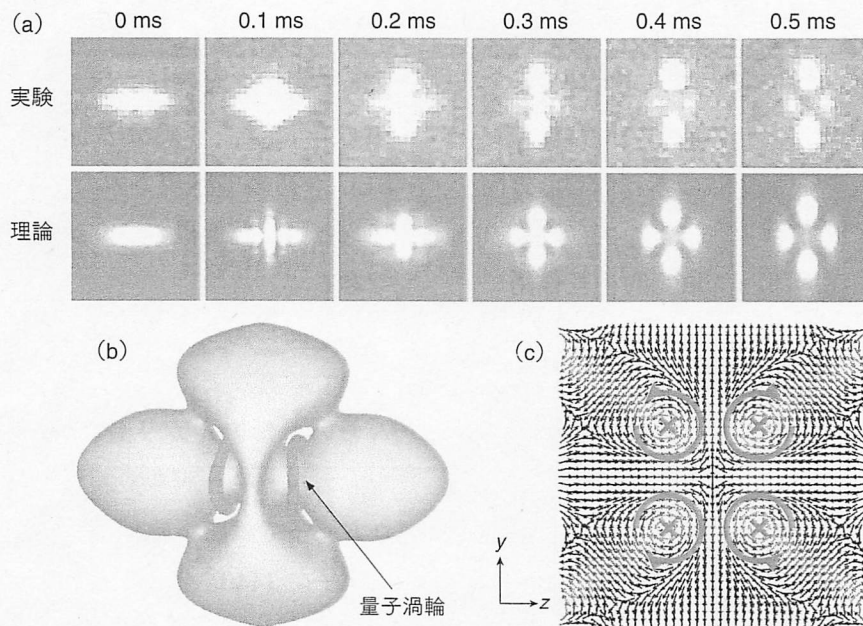


図 1 — (a) BEC が磁力により崩壊・爆発する様子(上段は実験結果, 下段は理論計算)。それぞれの原子の磁気双極子は常に紙面右方向を向いている。(b) 数値計算によって得られた爆発後の等密度面。中央付近の二つの輪は量子渦輪の位置を表す。(c) 図 (b) の紙面に沿った断面上の原子の流れ。×印は量子渦の位置を表す。文献(3)より転載。



が小さくなっており、四葉のうちの2枚を取り巻くように量子渦ができています。量子渦はリング状になっているが、これは口から出た煙草の煙がリング状になっている様子と類似している。図1(c)は原子の流れの断面図を示しており、×印が量子渦の位置を表している。原子は双極子の方向に沿って左右の方向から中心へと流れ、爆発によってそれと垂直方向に外側へと流れ出ており、その結果流れが×印を囲む渦状になっている(図1(c)の矢印参照)。

* *

非等方的な磁力による崩壊・爆発はこれまでの物理系にはなかった現象であり、それに伴う量子渦輪の生成も非等方性によって生じる新しい現象である。相互作用が非等方的になることによって出現する現象の好例として、クーパー対がd波という非等方な対称性をもつ銅酸化物高温超伝導が挙げられる。クロムのBECのような磁性超流動体には、まだまだ新しい物理が隠れているものと期待される。

文献

- (1) たとえば、久我隆弘: レーザー冷却とボーズ凝縮, 岩波書店(2002)
- (2) E. A. Donley et al.: Nature, **412**, 295(2001)
- (3) T. Lahaye et al.: Phys. Rev. Lett., **101**, 080401(2008)
- (4) A. Griesmaier et al.: Phys. Rev. Lett., **94**, 160401(2005)
- (5) S. Inouye et al.: Nature, **392**, 151(1998)

コラム《超分子》通信

マクロで操るナノテク: 手で分子を捕まえるには?

有賀克彦 ありが かつひこ

物質・材料研究機構, WPIセンター国際ナノアーキテクトニクス研究拠点&超分子グループ

ナノテクノロジーの最先端に機能の究極の微細化があるのは確かである。その例として前回(2008年11月号), ナノの世界で動き回る分子の車を紹介した。しかし同時に、ナノテクをわれわ

れの生活に役立つ技術とするためには、手で触れるようなごく簡単な方法で、ナノの仕組みを駆動できることが必要なのではないかと私は考える。そのために必要なことは、われわれの生活空間とナノの世界を橋渡しする手法の開発であり、そこでは超分子が重要な役割を果たすことになる。今回は、大きな(マクロやバルクといわれる)世界と分子の世界をつなぐ技術について紹介しよう。

まず、分子の作用や動きを大きな現象に反映させる試みについて紹介する。吸着単分子膜の表面で液体の濡れやすさをコントロールすることにより、バルクの物体である液滴を動かすという試みがある。Whitesidesらは、さまざまな官能基を末端にもつアルカンチオール化合物の吸着単分子膜を液体が濡れやすくなる順に表面エネルギーの勾配をつけて板上に作製し、液滴がその勾配に従って動くことを実証した⁽¹⁾。液体に濡れやすい側を高く持ち上げて傾けたところ、液体は重力に逆らって上方に移動した。

市村らは、この考え方をさらに発展させて、光照射によって液体を動かす術を報告した⁽²⁾。彼らは、アゾベンゼン基を側鎖にもつ環状化合物の単分子膜を作製し、光照射によって分子が異性化する動きを巧みに利用して、望みの方向に液滴を動かしてみせた。これは、分子の動きをバルクの物体の運動に反映させたものである。

Stoddartらは分子シャトルという超分子に関して世界的な研究を行っている。分子シャトルとは、環状分子がシャトルのように直線状分子の上の決まった部分(ステーション)の間を行き来するものである。この環状分子の部分をおおきく表面に結びつけておき、刺激を与えてシャトルを動かすと、分子にひずみが生ずる(図1)。無数の分子シャトル構造を表面に単分子膜として固定すると、分子の動きとそれによって引き起こされる分子ひずみによって、固定基板そのものがマクロレベルで湾曲することが確かめられた⁽³⁾。この例でも、分子の動きによって可視レベルの大きさの物

