

## 1. まえがき

### ボース凝縮体の崩壊のダイナミックスの研究 Collapsing Dynamics of Bose-Einstein Condensates

代表研究者 東京工業大学 上田 正仁 Tokyo Institute of Technology Masahito Ueda

## 2. 英文サマリー (200語)

An attractive Bose-Einstein condensate with a vortex splits into two pieces via the quadrupole dynamical instability, which arises at a weaker strength of interaction than the monopole and the dipole instabilities. The split pieces subsequently unite to restore the original vortex or collapse. The dynamical instabilities and ensuing dynamics of singly- and doubly-quantized vortex states of Bose-Einstein condensates with attractive interactions are also investigated using full 3D numerical simulations of the Gross-Pitaevskii equation. With increasing the strength of attractive interactions, a series of dynamical instabilities such as quadrupole, dipole, octupole, and monopole instabilities emerge. The most prominent instability depends on the strength of interactions, the geometry of the trapping potential, and deviations from the axisymmetry due to external perturbations. Doubly-quantized vortices are always unstable to disintegration of the vortex core. If we suddenly change the strength of interaction to within a certain range, the vortex splits into three clusters, and one of the clusters collapses after a few split-merge cycles. The vortex split can be observed using a current experimental setup of the MIT group.

## 3. 本文:

研究目的: 近年、原子気体のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) の原子間相互作用の強さとその符号をフェッシュバッハ効果に変調する実験に成功した。これにより、斥力相互作用の状態で作られた BEC を突然引力相互作用する状態へとスイッチすることにより巨視的な物質が崩壊するダイナミックスというこれまでは宇宙において間接的にしかみられなかった現象を地上で直接研究することが可能になった (tabletop astrophysics)。我々は、この問題を、崩壊の過程で起こる原子の非弾性散乱の効果を取り込んだ拡張されたグロス・ピタエフスキー方程式を数値的及び解析的手法で解くことにより解明する。特に、引力系では存在できない量子渦を、斥力相互作用する初期状態で作っておき、それを崩壊させることで、トポロジカルな制約が BEC をダイナミカルに安定させることができるかどうかを解明する。

経 過：

・量子渦が1個存在する場合のBECの崩壊のダイナミクスの研究

量子渦が一個ボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) に形成されている状況を考える。我々は、この状況下でフェッシュバハ効果を使って相互作用の強さを斥力から引力へ変化させた場合のその後のBECのダイナミクスについて考察した。その結果、引力の強さがある臨界値を越えると系は4重極不安定性を示して渦が2個のBECクラスターに分裂することを見出した。分裂したクラスターは、系のエネルギーと全角運動量が保存されるという冷却BEC特有の性質のために系の重心の周りに回転運動を行い (角運動量の保存)、ついには元の渦が復元されるという興味深い現象を見出した。その後、系は分裂と復元を繰り返す。このダイナミクスの様子を示す図は *Physical Review Letters* の表紙に取り上げられた (文献1)。

・渦度が2以上の場合の崩壊ダイナミクスの研究

渦度が2以上のBECが最近MITと京都大学のグループによって実現された。我々は、この系の崩壊のダイナミクスを3次元グロス・ピタエフスキー方程式を用いて研究した。その結果、相互作用の強さを強くするに従って、4重極、ダイポール、単極モードの不安定性が次々と現れることを見出した。渦度が1の通常の量子渦の場合と異なり、渦度が2の場合は、常に不安定であり、さらに、系を閉じ込めるトラップが軸対象からわずかにずれることによって、3個のクラスターに分裂する場合もあることがわかった (文献11)。今のところ、実験では崩壊時間が余りに早いために渦崩壊のダイナミクスは観測できていないが、実験状況の改善により上記の予言が確認されることが期待される。

・2次元系でのブライトソリトンの安定化

引力BECは1次元系では高密度領域が安定に存在・伝播できるブライトソリトンが理論的に予言され、また、観測されているが、2次元系ではブライトソリトンは崩壊するか拡散してしまうために安定には存在できないことが知られている。我々は、逆さ振り子の原理を応用してフェッシュバハ効果によって相互作用の強さを平均値の周りに大きく振動させることにより、ブライトソリトンを安定化させることが可能なことを理論的に予言した (文献2)。

考察：

ヘリウムや超伝導系に比較した場合の、レーザー冷却されたボース・アインシュタイン凝縮のユニークな点は、その制御性の高さと同様にレーザープローブによる系の可視化である。とりわけ、フェッシュバハ効果による相互作用の変調はこの系独自の点であり、それを使ったBEC崩壊のダイナミクスの研究は新しい研究領域といえよう。我々は今回、量子渦という系を

トポロジカルに安定化される機構と引力不安定性の競合により、ダイナミカルな不安定性が発生し、それが様々な非線形効果を生むことを明らかにした。渦が格子を組んでいる場合の崩壊の問題にも取り組んだが、現在我々が使っている計算機の能力の限界のために十分信頼できる結果を得るには至っていない。しかし、渦格子は実験的にすでに実現されており、これとフェッシュバハ効果を組み合わせることも実験的には可能である。この問題を含め、BEC 崩壊の研究は今後も多くの現象の発見につながることを期待される。

## 2. 研究発表

1. "Split Instability of a Vortex in an Attractive Bose-Einstein Condensate"

H. Saito and M. Ueda,

Phys. Rev. Lett. vol. 89, 190402(1)-190402(4) (2002)

2. "Dynamically Stabilized Bright Solitons in a Two-Dimensional Bose-Einstein Condensate"

H. Saito and M. Ueda,

Phys. Rev. Lett. vol. 90, 040403(1)-040403(4) (2003)

3. "Quantum phase transition in one-dimensional Bose-Einstein condensates with attractive interactions"

R. Kanamoto, H. Saito, and M. Ueda

Phys. Rev. A vol. 67, 013608(1)-013608(7) (2003)

4. "Nonlinear dynamics of vortex lattice formation in a rotating Bose-Einstein condensate"

K. Kasamatsu, M. Tsubota, and M. Ueda

Phys. Rev. A vol. 67, 033610(1)-033610(14) (2003)

5. "Einstein-Podolsky-Rosen correlation seen from moving observers"

H. Terashima and M. Ueda

Quantum Inf. Comput. vol. 3, 224-228 (2003)

6. "Relativistic Einstein-Podolsky-Rosen correlation and Bell's inequality"

H. Terashima and M. Ueda

International Journal of Quantum Information (IJQI) vol. 1, 93-114 (2003)

7. "Energy gaps and roton structure above the

Laughlin state of a rotating dilute Bose-Einstein condensate"

T. Nakajima and M. Ueda

Phys. Rev. Lett. vol. 91, 140401(1)-140401(4) (2003)

8. "Vortex phase diagram in rotating two-component Bose-Einstein condensates"

K. Kasamatsu, M. Tsubota, and M. Ueda

Phys. Rev. Lett. vol. 91, 150406(1)-150406(4) (2003)

9. "Stability of the quantized circulation of an attractive Bose-Einstein condensates in a rotating torus"

R. Kanamoto, H. Saito, and M. Ueda

Phys. Rev. A vol. 68, 043619(1)-043619(12) (2003)

10. "Measurement-induced spin squeezing in a cavity"

H. Saito and M. Ueda

Phys. Rev. A vol. 68, 043820(1)-043820(9) (2003)

11. "Split-merge cycle, fragmented collapse, and vortex disintegration in rotating Bose-Einstein condensates with attractive interactions"

H. Saito and M. Ueda

Phys. Rev. A 69, 013604(1)-013604(10) (2004)