

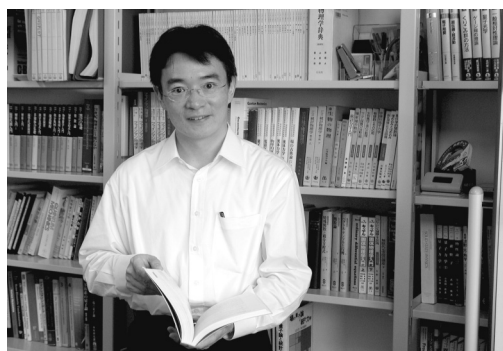


In Laboratory Now

## 研究室訪問 1

# 時をこえて、よみがえる物理学

## 上田 正仁 研究室～物性物理学専攻



上田 正仁 教授

1924年、アインシュタインがある現象を予言した。その現象は絶対零度に近い超低温で起こるものであり、長い間実現不可能とされてきた。しかし、1995年に $10^{-7}$  Kという超低温を実現することによって初めて予言された現象が実現された。この現象は予言者の名前を取ってボース・アインシュタイン凝縮とよばれている。

現在このテーマは物性物理学の中では最もホットな分野であり、今回ご紹介する上田先生もこのボース・アインシュタイン凝縮に関する研究を行っている。



## はじまりは一通の手紙から

1924年、20世紀史上最も偉大な天才物理学者アインシュタインにある論文が送られてきた。それはインドの物理学者ボースによって書かれたものであった。その論文は全く新しい考えを提唱していたため審査員には理解されず、学会誌への掲載を拒否されていた。しかし論文の内容の正しさに自信を持っていたボースは、当時既に名のあったアインシュタインに意見を求めた。この論文は、新しい光子の統計についてのもので、個々の光子が同じ量子状態をとることができると考えたものである。量子状態とは、スピンや運動量のような粒子がとる物理的な状態のことであり、一般

には波動関数を用いて表現される。そして、この同じ量子状態をとることができる粒子をボースの名前にちなんで、ボース粒子とよんでいる。

アインシュタインはボースの論文の内容の正当性を認め、さらにその理論を発展させて、絶対零度に近い超低温においてボース粒子が起こす特異な凝縮現象を予言した。この現象こそがボース・アインシュタイン凝縮である。

ボース・アインシュタイン凝縮とは、無数の粒子が全く同じ状態をとり、一つの巨視的な波となる現象である。アインシュタインはこの考えに基づき、ボース粒子の系(集まり)からなる理想的

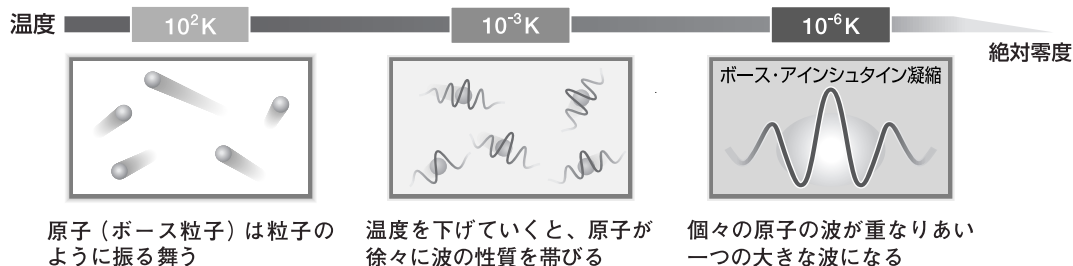


図1 波動性とボース・アインシュタイン凝縮

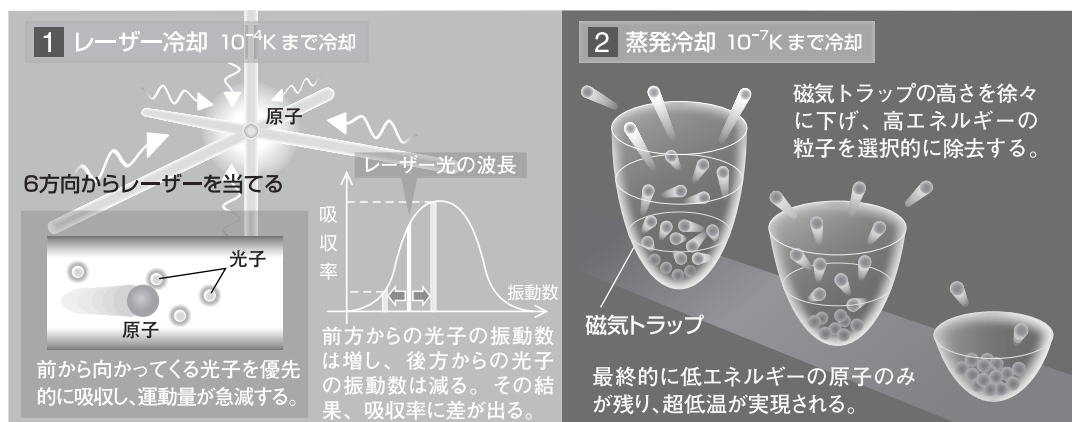


図2 レーザー冷却と蒸発冷却

な気体を考え、その性質を研究した。

温度を下げていった場合、個々のエネルギーは低くなっていく。そして、ある温度以下になるとその系のほとんどの粒子が一つの量子状態(最低エネルギー状態)をとる。また、粒子は温度が下がれば下がるほど、波としての性質が顕著になる。粒子が最低エネルギー状態に達すると全ての粒子が一つの状態に集まるので、それぞれの粒子の波は互いに重なり合い、一つの巨視的な波となる(図1)。絶対零度付近で起こるこの現象をボース・アインシュタイン凝縮といい、ボース・アインシュタイン凝縮した粒子集団を凝縮体という。

アインシュタインは凝縮体の存在を予言したものの、この現象の実現は不可能に近いと考えていた。なぜなら、アインシュタインがボース・アインシュタイン凝縮を予言した1924年当時の科学技術では、希薄な気体がボース・アインシュタイン凝縮を起こすほどの超低温を実現することが極めて困難であったからである。

しかし、アインシュタインの予言から約70年を経た1995年に3人の物理学者によってボース・アインシュタイン凝縮は実現されたのである。この3人が行った実験では、超低温を実現するためにレーザー冷却と蒸発冷却の二つの冷却法が用いられた(図2)。レーザー冷却とは、6方向から粒子のガスにレーザー(光子)を当てることによって粒子の運動を抑えて、冷やす方法である。運動する粒子からみるとドップラー効果により前方から来る光子の波長と後方から来る光子の波長が異なる。粒子は光子との衝突の際に強く影響を受ける

光子の波長が決まっている。それを利用してレーザーの周波数を制御することで粒子は前方から来る光子の影響のみを強く受けるようにすることができる。このようにして粒子に光子を衝突させ、運動量を急激に減少させて冷却する。しかし、これだけではボース・アインシュタイン凝縮が起きるほどの超低温は実現できない。ここでさらに蒸発冷却という方法を用いる。まずレーザー冷却により運動がほぼ止まった粒子は、そのままでは重力によって落下してしまう。そこで磁場によって作られたコップ(磁気トラップ)でレーザー冷却された粒子を受け止め、その内部にためていく。次に、コップの縁の高さを急激に低くすることで、運動量が比較的大きい粒子をコップの外へ飛ばし、蒸発冷却により磁気トラップ内に残った粒子の超低温を実現する。この結果、磁気トラップの中に最後まで残っている粒子がボース・アインシュタイン凝縮を起こすのである。

この二つの冷却法を用いた実験の成功を機に、ボース・アインシュタイン凝縮は、肉眼で量子力学的な現象が観測できる非常に珍しい現象としてより一層注目を集めるようになった。一般には、量子力学的な振る舞いが観測できるスケールは非常に小さく、 $10^{-10}$  m 程度(原子の大きさ)である。それに対し、実験で作られた凝縮体は0.1 mm ( $10^{-4}$  m)という巨視的な大きさでありながらも、量子力学的な振る舞いをする。今日ではボース・アインシュタイン凝縮は巨視的な世界で起こる量子力学的な現象として物理学において重要な意義をもつようになった。



## ボース・ノヴァ、その真理に迫る

凝縮体は肉眼で確認できる大きさで量子力学的に振る舞うだけではない。凝縮体の特異的な性質の一つとして、凝縮体にかかる磁場の強さを変えることで凝縮体内の粒子間に働く力を制御することができるという性質がある。凝縮体にかかる磁場の強さを強くしていくと、凝縮体内の粒子間に働く力をすべて引力にすることができ、さらにその力の強さを自由に変えられる。では凝縮体に磁場をかけ、粒子間の力を引力にするとどのようなことが起こるであろうか？ 直感的には、凝縮体は単にある大きさに収縮していくように思われる。しかし実際の実験では、凝縮体を収縮させていくと、一定の大きさでとどまらずに自発的に飛散する(凝縮体の崩壊)。この現象は星の重力崩壊に伴う超新星(スーパー・ノヴァ)の爆発に似ていることから、ボース・ノヴァとよばれている。

世界中の物理学者がこの不可解な崩壊現象の解明に躍起になった。この現象の理論的説明として初め考えられたのは、磁場による引力を強くしていくと、原子が互いに近づき分子が形成される。その際に放出されるエネルギーを利用してボース・ノヴァが起こるというものであった。しかしこの考えに基づき理論的に計算すると、分子の放出するエネルギーによって爆発は瞬間的になってしまう。実験では非常に緩やかな爆発になることが分かっていたため大きな矛盾があった。

その後もいろいろな研究者たちが独自の理論を展開していった。激しい理論解明の競争の中で、世界で初めてボース・ノヴァの理論的な解明に成功したのは、上田先生の研究グループであった。

上田先生の研究グループは、ハイゼンベルグの不確定性関係(\*注)を崩壊の理論に組み込み、

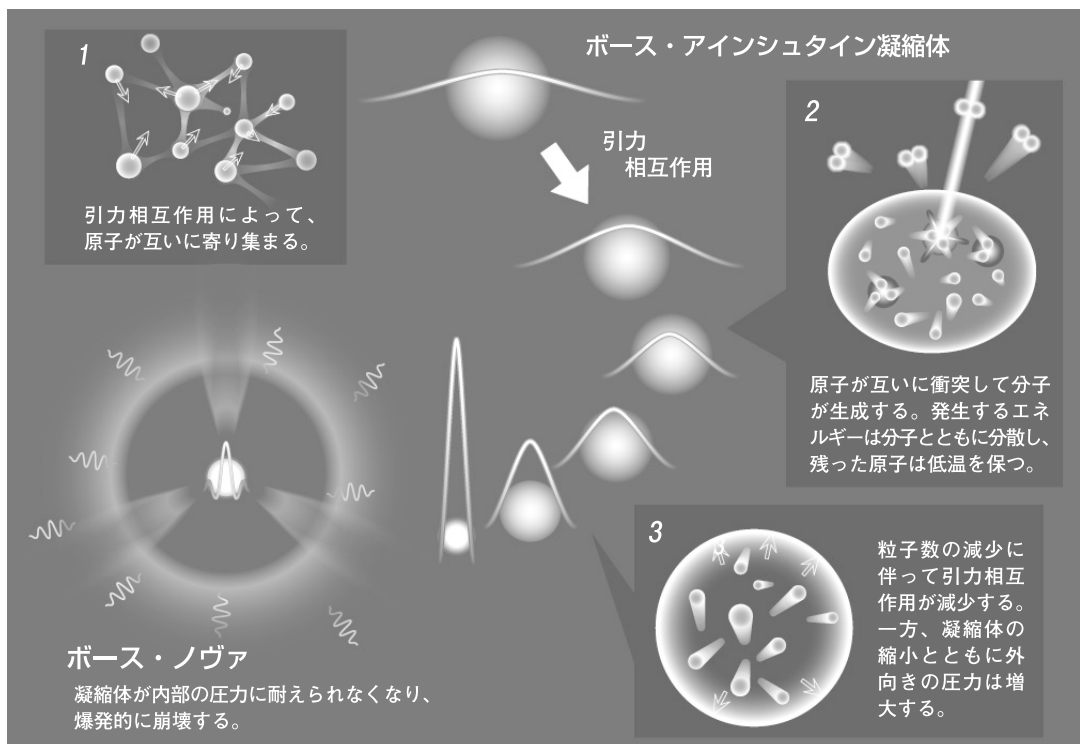


図3 ボース・ノヴァはどのようにして起こるか～理論的解釈

\*注 位置を正確に決めると運動量が正確には定まらず、逆に運動量が決まると位置が定まらなくなるという関係。

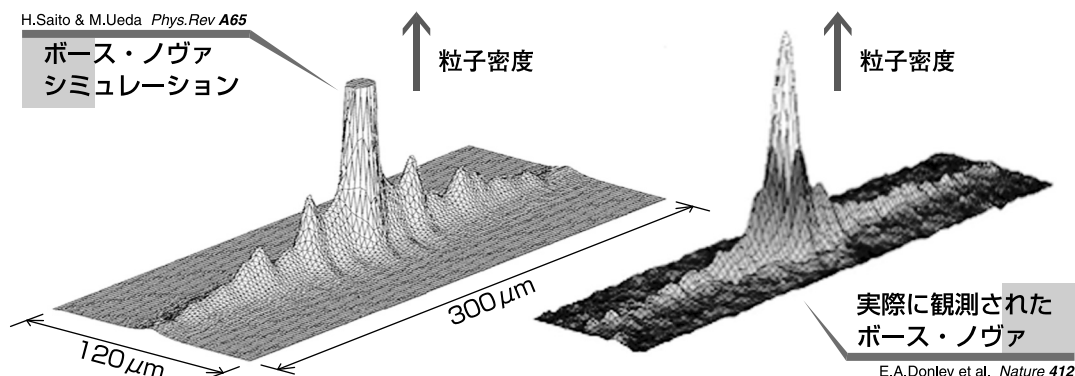


図4 実験と上田先生の研究グループが行ったシミュレーションの比較

ボース・ノヴァの発生理由を説明する新たな理論を展開した。

ではボース・ノヴァはどのようにして起きるのだろうか。磁場を調節して引力の強さを強くしていくと、凝縮体は収縮していき、凝縮体内の粒子間の距離が次第に小さくなっていき中心部分の密度が高くなる。このために中心部分では粒子の位置の分布がせばまる。ハイゼンベルグの不確定性関係により、運動量の分布は広くなり激しく運動する粒子が増えてくる。その結果、中心部分では粒子どうしが激しく衝突しあい、粒子が互いに結合し分子が次々に構成されていく。分子はそれ自身がもっているエネルギーが高いために、磁気トラップ中に閉じ込めておくことはできずに、そこから抜け出ていく。そのために、磁気トラップ中の凝縮体を構成する粒子の数は次第に減少していく。粒子の数が減少すると、互いに引き合う粒子が少なくなるので凝縮体全体の引力は弱くなる。一方で、中心部分での粒子の運動は激しくなり、外向きの圧力が高くなる。高まった圧力が弱まった引力に打ち勝ったときに崩壊、すなわちボース・ノヴァが起きる(図3)。

この上田先生の研究グループのボース・ノヴァを説明する理論の正しさを証明するには、ミクロな領域で粒子の状態を表す波動関数が従う方程式、つまり、シュレーディンガー方程式を解かなければならない。たくさんの粒子が存在する場合は、粒子どうしが互いに相互作用をするために、方程式に非線形な項が含まれる。この非線形の項を付加した方程式を非線形シュレーディンガー方程式という。

ボース・ノヴァの理論的な解析を行う際には、100万個近い粒子の一つ一つについて非線形シュレーディンガー方程式をたてなければならないように思われる。ところが、ボース・アインシュタイン凝縮の場合には粒子の状態が完全に同じであり、個々の粒子を区別できないので、一個の波動関数だけで表すことができる。このために方程式を数値的に解析することが可能となる。上田先生は、この方程式に分子が形成され磁気トラップから抜け出すという効果(現象論的な損失項)を付加してシミュレーションを行った。図4はボース・ノヴァの実験の結果と上田先生の研究グループが行ったシミュレーションの結果とを比較したものである。図中では、垂直軸が凝縮体の粒子密度を表している。中心のピークはボース・ノヴァ後の残った凝縮体を表し、周囲の部分は飛散している粒子集団を表している。図4左は、数値計算によるシミュレーションの結果をプロットしたものであり、図4右は実際のボース・ノヴァの実験結果を表したものである。この二つの結果を比較すると、両者が良く似ていて、理論によるシミュレーション結果が実験の結果と見事に一致していることがわかる。

その後も、磁気トラップの形に対してボース・ノヴァがどのように変化するかを調べる実験や、完全にボース・ノヴァを起こさせずに途中で斥力に変えて拡散させる実験、またボース・アインシュタイン凝縮を起こす粒子を変えた実験に対しても上田先生の研究グループの理論は見事に実際の現象と一致していた。このことは、先生の理論が正しいことを証明している。



## ボース・ノヴァ、その最先端研究をみる

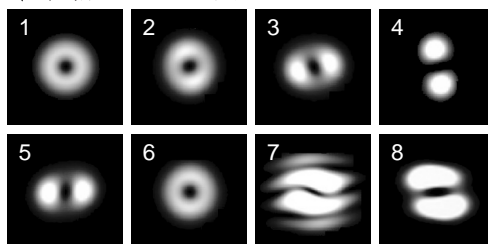
ボース・ノヴァでは凝縮体の中心の密度が高くなるので、粒子間の衝突が活発になる。このことが凝縮体の崩壊につながっていた。では中心の密度を下げていって、密度が0の凝縮体を収縮させていった場合にはどのようなことが起きるのであろうか。中心部分の密度が0となるのは、例えば、コップに水を入れて回転させた場合である。このとき、コップを回転させることで、中心付近の水位は下降し、中心部分の密度は0になる。これと同様に凝縮体を回転させると中心の密度を0にすることができる。ここで凝縮体を回転させながら収縮させていくとどのようなことが起きるのであろうかという疑問が生まれる。

上田先生の研究グループは、渦がある凝縮体を収縮させたときにその凝縮体がどのような振る舞いをするのかを、方程式を立てて数値的なシミュレーションを行った。凝縮体を回転させながら収縮させていくと、あるところで凝縮体が二つに分かれ、二連星のごとく回転する。分裂しても角運動量が保存されるので、凝縮体全体の回転と生じる渦の回転の角運動量の和が、二つに分かれた凝縮体の連星的な回転の角運動量に受け継がれる。

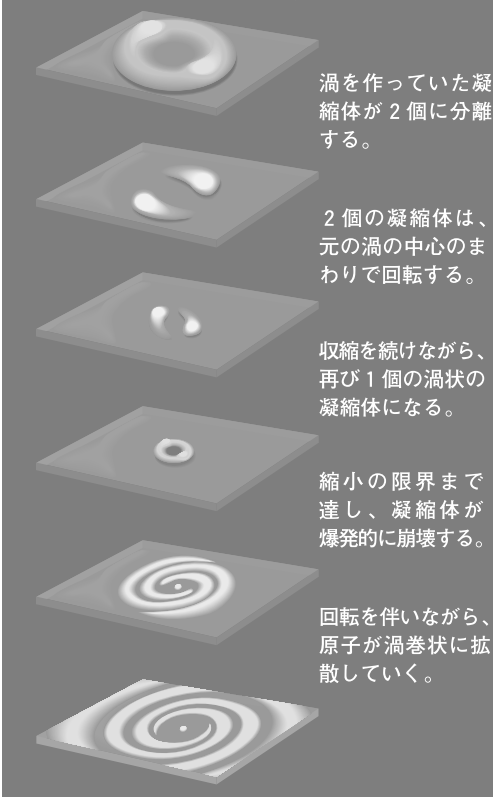
さらに引力を強めていくと二つの凝縮体がまた一つになる。このとき再び作られる凝縮体の渦は、分かれる前の渦に比べてかなり小さくなる。シミュレーションを続けていくと、この行程が繰り返され、臨界点を超えると凝縮体が一つになった状態でボース・ノヴァが起こってしまう。そして崩壊後も角運動量は保存されているので、中心に小さな凝縮体を残し、崩れた部分は回転しながら広がっていくと予想される(図5)。

回転している凝縮体のボース・ノヴァの実験はまだ行なわれていない。この理論が実験的に証明されることは、今後の期待するところである。

### ▼ 回転ボース・ノヴァのシミュレーション



### 回転ボース・アインシュタイン凝縮体のボース・ノヴァ



渦を作っていた凝縮体が2個に分離する。

2個の凝縮体は、元の渦の中心のまわりで回転する。

収縮を続けながら、再び1個の渦状の凝縮体になる。

縮小の限界まで達し、凝縮体が爆発的に崩壊する。

回転を伴いながら、原子が渦巻状に拡散していく。

図5 回転ボース・ノヴァ

上田先生から伺ったお話のうち、ここでは紹介できなかったものがありました。ボース・アインシュタイン凝縮を用いた量子情報理論についての研究を割愛しました。紙幅の都合で紹介できずに、非常に残念です。

最後になりましたが、お忙しい中快く取材に応じて下さった上田先生に心からお礼を申し上げるとともに、これからのさらなるご活躍を心よりお祈りいたします。

(工藤 啓朗)