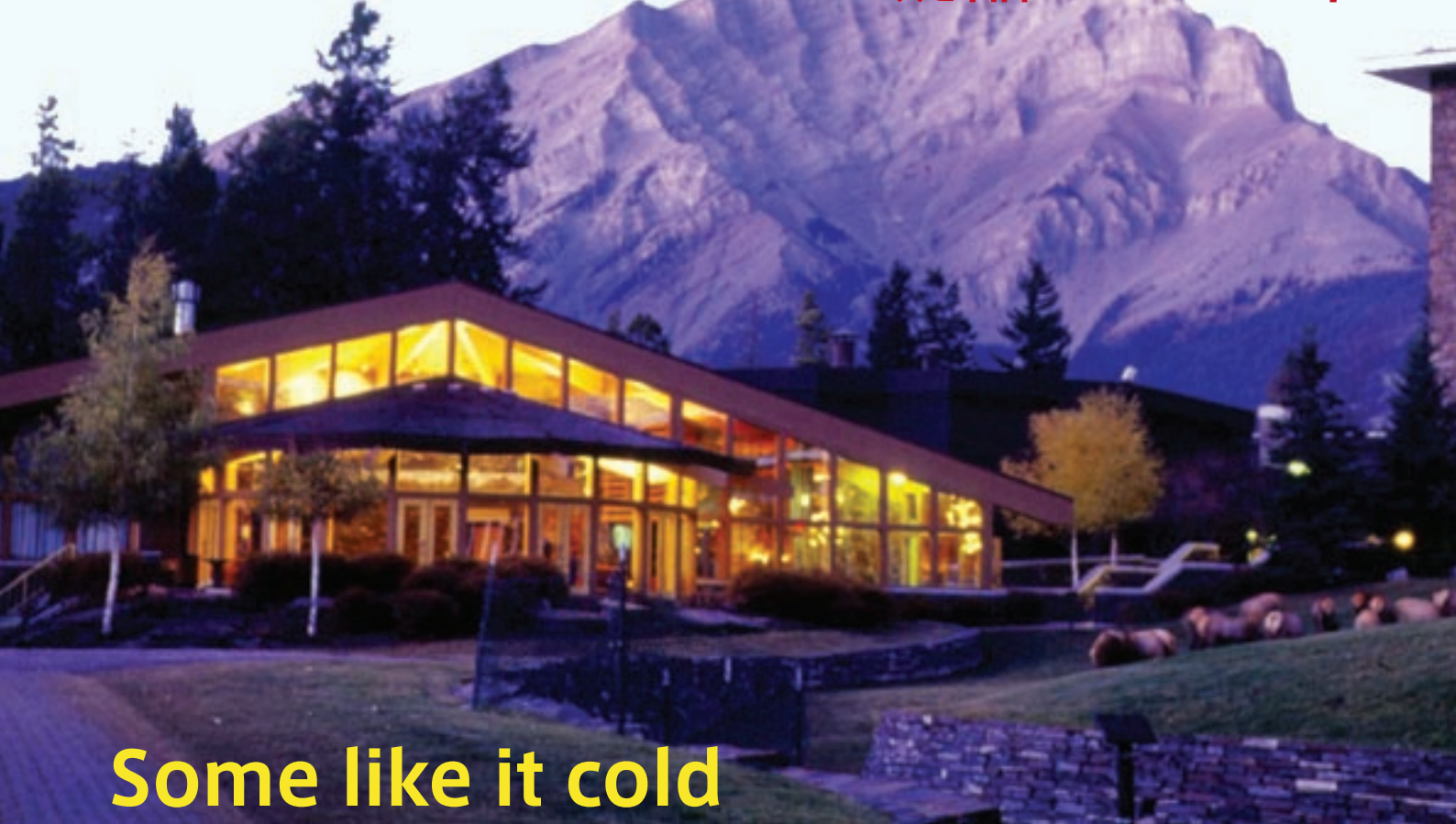


# ボース・アインシュタイン凝縮から 10 年



## Some like it cold

Nature Vol.434(430-431)/24 March 2005

Karen Fox

D. LEE

1995年、超低温で気体が量子力学的ふるまいを示す現象、「ボース・アインシュタイン凝縮」が初めて実現された。以降、この研究は新分野を切り開いてきた。それから10年。ボース・アインシュタイン凝縮にひきつけられる物理学者の数は増え続けている。この誕生10周年を祝うパーティーにKaren Foxが参加した。

これ以上に「クール」な誕生パーティーはありえないだろう。超低温にとりつかれた研究者が、冬の山頂で行う集いである。今年2月、最初のボース・アインシュタイン凝縮の実現から10周年を記念してカナダのバンフに集まった物理学者たちは、午前中は超低温原子について議論し、午後はスキーを楽しんだ。外の空気は身が引き締まるほど冷たいが、建物の内側の雰囲気は和やかで暖かった。騒々しい大学院生たちの隣にノーベル物理学賞受賞者が座っていると、居心地のよい会だった。講演者たちの話には気さくな質問が飛ん

だ。シカゴ大学の理論研究者Kathy Levinは講演の初めにこう話した。「ここには他の分野ではみられないすばらしい団結心と仲間意識があります。この分野が成功している秘密はここにあるのだと私は思います」

Levinは最近になって超低温原子の研究に移ってきた。元々は物性物理学の別の分野である高温超伝導を研究していたが、知られているようにこれは非常に競争が激しい分野だ。しかし、Levinのような研究分野の変更は珍しいことではない。この2年間、高温超伝導の研究が行き詰まる中で、大勢の物性物理

学者が低温原子の研究に鞍替えした。バンフの会合で、あるセッションの議長を務めたブリティッシュコロンビア大学のFei Zhouもその1人だ。1年半前に研究分野を変えて以来、後悔することはまったくなかった、それまではシンポジウムに出席するたび、同じ分野の研究者は年を追うごとに減っていたとZhouは言う。対照的に、超低温原子を研究する研究室はおよそ100にまで増え、まだ増加し続けている。この分野には勢いと研究資金があるし、それに何より、魅力的な新しい科学を行うチャンスがある。

ボース・アインシュタイン凝縮の基礎にある概念は、この生まれて間もない研究分野の活気とは対照的に歴史あるものだ。アインシュタインとボースは1924年、気体の原子の雲が、その運動が止まってしまうほど冷却されたときに何が起こるかを、量子力学を使って記述した。圧力を加えると原子雲はひとつかたまりになり、巨大な「超原子」という単一の存在になる。そしてこの原子の凝縮物は、互いに固定され、一団となって動き、固体とも液体とも気体とも異なる物質の新しい相を示すはずだとされた。

この考えは、1938年までは思考実験にすぎなかった。この年、ヘリウム4が2.2ケルビン未満に冷却され、摩擦なしに流れる新しい種類の流体である「超流動体」が発見される。しかし、超流動になる温度以下に冷却されたヘリウムは気体というよりは液体であり、「本物」のボース・アインシュタイン凝縮とはみなされなかった。当時、気体の凝縮を達成するのに必要なさらに低い温度を作り出すことは不可能に思われた。

1995年になって、2つの研究グループがほぼ同時にそれを達成する。米国立標準・技術研究所(NIST)のEric Cornellとコロラド大学ボルダー校のCarl Wiemanは、2,000個のルビジウム原子を冷却し、ひとつかたまりにした。また、マサチューセッツ工科大学(MIT)の物理学者Wolfgang Ketterleは、50万個のナトリウム原子で凝縮物を作った。これらの業績には2001年のノーベル物理学賞が授与されたが、それが新しい世代の物理学者にどれだけのインスピレーションを与えるかはまだ誰にも分かっていなかった。

「この10年の進展はまさに爆発が起きたみたいだった」。バンフの会合には参加できなかったKetterleはこう話す。「とにかく驚きの連続だった。ボース・アインシュタイン凝縮を実現したとき、今後は何が重要となりそうかをリストアップしていったが、そんなにもたくさんにはならなかった。でも実際この10

年になされたことは、私たちの予想をはるかに超えていた。どんなに大胆に夢を描いたとしても、これほど多くの興味深い研究を思いつくことはできなかった」

Ketterleの驚きは理解できる。初期の研究は、ボース・アインシュタイン凝縮を実現する原子の数を増やし、また、別種の原子で凝縮を起こすことに焦点を絞っていた。それはいつでも骨の折れる仕事で、凝縮の実現それ自体が達成目標だった。しかし、過去5年間でこの分野は規模が大きくなっただけでなく、その目指す目標も高くなった。いまでもボース・アインシュタイン凝縮そのものを研究し続ける研究者もいるが、これを他分野に応用しようとする研究者もいるし、さらには、フェルミ粒子という基本粒子のグループで作られた、かなり新しい凝縮物を研究している研究者もいる。

初期の疑問のひとつは、ボース・アインシュタイン凝縮はヘリウムのように超流動体なのか、ということだった。理論的には、超流動体が渦を形成するとそれは永遠に存続するはずだ。CornellとWiemanは1999年、そのような永遠に続く渦を最初に作った<sup>1</sup>。今日、ほとんどの人がボース・アインシュタイン凝縮は超流動体だと認めている。ハーバード大学の物理学者Lene Hauは最近、ひとつのボース・アインシュタイン凝縮の中で、音波に似た「ストレート密度波」と渦の両方を作ることに成功した<sup>2</sup>。Hauは、それらが衝突し、裏返しになる過程で回転する傘に似た様子になるのを観察した。

こういった実験は、研究者たちがボース・アインシュタイン凝縮を制御できるようになったことを示している。研究者たちは、凝縮の中の原子間の引力を微調整する方法を手にした。うまく応用すれば、原子を一定間隔に並べて整然とした格子にすることから、凝縮体全体を小さな超新星のようなものにするまで、いろいろな可能性を実現できる。「本当に驚いています。10年前にはとんでもなく難しく思えた実験が、今で



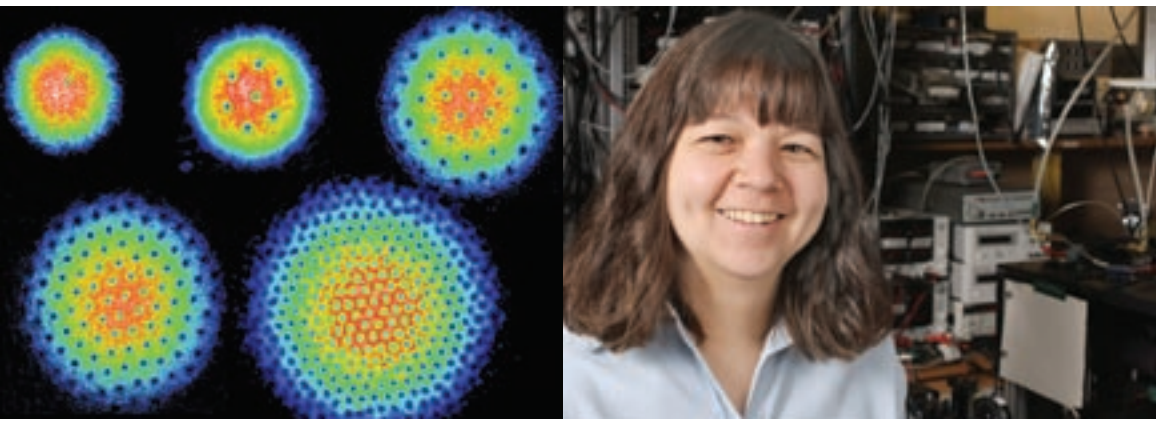
ボース・アインシュタイン凝縮の誕生10周年を祝うために物理学者たちはカナダのバンフに集まった。

は洗練された方法でいろんな条件を制御しながら、ごくふつうに行われているのです」とKetterleは話す。

もちろん理論研究者にも同じ10年という歳月が流れたわけだが、この分野を推し進めているのは今も実験だ。新しい理論が現れたとたん、それを実験で試す研究者が現れるといった格好だ。イリノイ大学アーバナ・シャンペン校のGordon Baymは「この分野で実験家はすばらしい活躍をしている。実験家たちは優れた実験をするだけでなく、1週間に1つのペースで実験を行っているのだ」と話す。この分野に新しい研究者を歓迎するようなムードがある要因のひとつはこのスピードだろう。そこには誰にでもチャンスがあるという雰囲気がある。

超低温原子の研究でもっとも進展が速い研究には、フェルミ粒子に関するものがある。すべての物質は、基本的なレベルでは2種類に分けられる。陽子などのフェルミ粒子と光子などのボース粒子だ。ボース粒子の代わりにフェルミ粒子で凝縮体を作り出したのは、ここ2年間の非常に大きな成果だった。フェルミ粒子物理学のスターの1人が、NISTボルダー研究所の物理学者Deborah Jinで、彼女は自身の最新の研究成果についてバンフの会議で話した。そこでも説明されたように、フェルミ粒子とボース粒子の大きな違いの1つは、交差する光のビームのように2個のボース粒子は同じ場所に存在できるのに、フェルミ粒子にはそれができないことだ。この違いのため、本来はフェルミ粒子の凝縮体はありえない。

しかし、フェルミ粒子も低温では奇妙



この分野では、ボース・アインシュタイン凝縮渦格子 (左) のような大きな成果が続いている。推し進めているのは、Deborah Jin ら若い物理学者たちだ。

UNIV. COLORADO

なふるまいをする。ある種の固体が十分に冷却されると、その伝導電子 (フェルミ粒子) はペアになってボース粒子となることができる。これが超伝導理論の要となっている現象だ。1957年に発表されたバーディーン・クーパー・シュリーファー (BCS) 理論によると、2個の電子が対になって「クーパー対」を作ると、この新しいボース粒子は超伝導体の中を抵抗なしにすいすいと駆け抜けることができる。

昨年初め、Jin のチームは大きな進展を発表した。フェルミ粒子からボース粒子を作り、それを凝縮体にしたというのだ<sup>3</sup>。当初から、フェルミ粒子の凝縮体を研究すれば、BCS 理論のより深い理解が得られるだろうという期待があった。BCS 理論が超伝導を説明できるのは、極低温においてだけだ。1980年代に発見された高温超伝導物質は、多数の理論と激しい論争を生んだが、確固たる説明は得られなかった。これほど多くの物性物理学者をボース・アインシュタイン凝縮の研究に引きつけたのは、ほかの何よりも、このためかもしれない。ライス大学 (テキサス州ヒューストン) の物理学者 Randy Hulet は「ボース・アインシュタイン凝縮を使うと、実際の物性系ではとてもできないような方法で、きわめてきれいなモデルを得ることができる」と説明する。

Jin は今、ボース・アインシュタイン凝縮の中のクーパー対を「見たい」と考えている。クーパー対を観察できるのは、超伝導体での間接的な方法に限られている。今のところ、このなぞめいたダンスカップルの姿は隠れたままだが、Jin は、クーパー対を暗示するフェ

ルミ粒子の位置の相関を観察できた。この研究は決定的なものではないが、ボース・アインシュタイン凝縮と BCS 理論のふるまいの関連を研究すれば、新しい理解にたどりつけるだろうという期待を与えた。Levin は「BCS 理論は、物性系の中ではきわめて強固な理論だ。BCS 理論はすべての理論のもととなる理論だと思う。もし、BCS 理論がさらに大きな理論の一部であることが分かれば、私はそう信じているのだがそれはとてもすごいことだ」と話す。

低温原子研究のベテランである Hulet は、ボース・アインシュタイン凝縮が他分野にどのように影響するかにも興味を持っている。彼は、ボース・アインシュタイン凝縮ソリトン (つまり、決して消散しない波) を最初に作った1人だった。この強い波は将来、重力や加速度の変化を検出する慣性センサーに応用されるかもしれない。現在の慣性センサーは光学装置を使っている。Hulet は、低温原子を使えば検出精度が上がるかもしれないと考えている。しかし、「今のところ自分たちが作れるソリトンは小さすぎる」ことを彼は認めている。

原子を使った系の信頼性は光学系と比較して高く、米軍も関心を持っている。低温原子研究に研究資金を出している、米国の国防高等研究計画局 (DARPA) の Jay Lowell 少佐は「5年から10年以内に、ボース・アインシュタイン凝縮にもとづいた慣性航法システムを実現させたい」と言う。DARPA の計画には、Ketterle の研究室などが先駆けた原子干渉計技術が含まれている。原子干渉計は、2つのコヒーレントな原子波 (つまり2つの原子レーザー) を必要とし、

この原子波が重なり合って干渉パターンを生じる。

DARPA は、ボース・アインシュタイン凝縮を量子コンピューターに応用する可能性も検討している。もっとも、Lowell に言わせると、その実現にはまだ10年かかるとも50年かかるとも分からない。ドイツのゲーティングにあるマックスプランク量子光学研究所の Ignacio Cirac は、ボース・アインシュタイン凝縮をどうやってキュービット (量子コンピューターの基本構成要素) としてふるまわせるかについて、バンフで魅力的な講演をした。しかし、このアイデアは今のところ、理論的検討にとどまっている。

どの研究 (フェルミ粒子、ソリトン、あるいは何か未知のもの) でもっとも大きな成果が得られるかを予測するのは簡単ではないが、内部の研究者でさえ深遠だというこの分野には、なおも活気が続いている。最初のボース・アインシュタイン凝縮が作られたときに大学院生だった若い物理学者たちは今、この分野は自分たちのものだと言っている。そして、もっと年上の科学者たちが多数、将来性を見込んでこの分野に転向している。10年がたっても減速はみられない。「この知性の金脈につまずかせてくれた幸運の女神に感謝しています」と Hulet は語ってくれた。 ■

**Karen Fox はワシントン DC を拠点とするフリーランスライター。**

1. Matthews, M. R. *et al. Phys. Rev. Lett.* **83**, 2498–2501 (1999).
2. Ginsberg, N. S., Brand, J. & Hau, L.V. *Phys. Rev. Lett.* **94**, 040403 (2005).
3. Regal, C. A., Greiner, M. & Jin, D. S. *Phys. Rev. Lett.* **92**, 040403 (2004).