

## 量子制御技術の進展

上田正仁 (東京大学大学院理学系研究科 ueda@phys.s.u-tokyo.ac.jp)

過去30年間の量子制御技術の進展を一言で形容すれば、パラダイムシフトが起きたといえよう。量子もつれ、波束の収縮、シュレーディンガーの猫状態など量子論固有の特異な性質は、アインシュタインやシュレーディンガーなど量子論の創始者がそれを最終理論として受け入れられない根拠として挙げたものである。しかし、今やそれらを実証するという段階が終わり、量子情報処理や量子センサーなどの新たなデバイス原理の中心に据えようという大きな潮流が生まれつつある。量子制御技術は、次世代テクノロジーのブレークスルーの中核技術をもたらし鍵であると期待されており、その実現を目指して、米国・欧州・中国・シンガポールなどが国家レベルで巨額投資を行っている。我が国においてもそのようなフラッグシッププログラム(Q-LEAP)が始まった。

1980年以降、光やイオンを1量子のレベルで精密に操作する技術が大きく進展し、エンタングルメントや非局所相関が実証され、さらに、光の波束の連続的収縮が観測され、<sup>1)</sup> 2012年度のノーベル物理学賞(S. Haroche, D. Wineland)につながった。その一方で、固体物理学においては微細加工技術の進展を背景として、サブミクロンスケールの電子デバイスが作られ、そのような系でアハラノフ・ボーム効果を含む電子の波動性が支配する量子伝導現象を研究するメソスコピック系の物理が大きく発展した。メソスコピック系では電子1個の帯電効果が背景熱雑音よりも大きくなるために、トンネル電流を1電子のレベルでの制御が可能になるクーロンブロック効果の研究が進展した。これにより周波数、電圧、電流の間の無矛盾性を物理原理(量子ホール効果、ジョセフソン効果、クーロンブロック効果)のみに依拠して検証することが可能になった。トンネル接合に超伝導材料を用いることによって帯電効果とジョセフソン効果が競合する効果が観測され、巨視的量子効果を含むマクロな波動関数の量子振動が実現された。<sup>2)</sup> これが今日の超伝導キュービットの基礎となった。

中性粒子の量子制御は、1980年代半ばにレーザーを用いて微粒子を捕獲したAshkinによる光ピンセット(2018年ノーベル物理学賞)の研究に始まる。この研究はその後、中性原子の量子制御を可能にしたレーザー冷却法(S. Chu, C. Cohen-Tannoudji, W. D. Phillips, 1997年ノーベル物理学賞)へと大きく発展した。イオンと異なり中性原子は電荷を持たないために磁場や光ポテンシャルで捕獲しなければならず、そのためには系をミリケルビン以下に冷却しなければならない。この課題がレーザー冷却法により解決され、

原子の並進運動を制御する道が開かれた。捕獲された原子集団をさらに冷却する蒸発冷却法の発明により、原子波が重なり合ってマクロな波へと増幅されたボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)が実現された(2001年ノーベル物理学賞)。<sup>3)</sup> 中性原子気体のBECは原子間相互作用を外部磁場で制御できる(フェッシュバハ効果)という著しい特長があり、原子間相互作用を斥力から引力へと連続的に変化させることでフェルミ超流動のBCS-BECクロスオーバーが実現された。さらに、光ポテンシャルに閉じ込めることで原子のスピン自由度が解放されたスピノールBECが実現された。これは超流動ヘリウム3と類似の磁性超流動であるが、磁気モーメントが電子スピンを起源とするために外部磁場に対する応答が前者に比べて3桁も大きく、スピンの織目構造の局所制御が可能になった。これにより、モノポールやノットなどのトポロジカル励起が人工ゲージ場を使って実現された。<sup>4)</sup>

光の定在波が作る光格子に原子をロードすることによって、冷却原子気体を固体物理のシミュレータとして用いることが可能になった。このような系ではハバード模型が文字通りシミュレートでき、超流動-モット絶縁体転移が実現された。また、2次元フェルミ粒子系において反強磁性秩序形成が実空間で観測された。<sup>5)</sup> この系ではドーピングの度合いも調節でき、数値計算が困難な領域での量子シミュレーションが可能になる。この系でさらに温度を下げることで高温超伝導体の量子シミュレータの実現への期待が高まっている。

上記の反強磁性秩序形成の観測には量子気体顕微鏡が用いられた。これは、光格子にトラップされた原子集団の直上に対物レンズを置くことで高い開口数を実現し、これにより光格子中の多数の原子を個別に識別できる分解能で観測する顕微技術である。複数の粒子を同時に観測できる量子気体顕微鏡は、エンタングルメントエントロピーの測定を可能にし、<sup>6)</sup> 光格子のポテンシャルをサイトごとにランダムに変調することで非局在(エルゴード)相から多体局在相への転移が観測された。<sup>7)</sup> 光格子は応用面でも重要であり、各光子点に捕獲された原子を独立な時計とみなすことで百億年に1秒もずれない光格子時計が実現された。<sup>8)</sup> 量子気体顕微鏡は多体波動関数のスナップショットを撮影することを可能にする。位置測定の精度を1原子レベルに高めると、測定の反作用によって系の量子状態は破壊されるが、分解能を数格子程度に下げると、多体系のダイナミクスを実時間で観測できるという画期的な測定法に発展す

る可能性がある。ここではダイナミクスは必然的に非ユニタリーになり、多体物理および統計力学のフロンティアの拡大が期待される。

中性原子は電荷を持たないためにゲージ場と直接結合しない。このため、従来は量子ホール効果のような磁場特有の効果を得るためには、系を力学的に回転させることで得られる（ローレンツ力と等価な）コリオリ力が用いられた。しかし、量子論ではゲージ場の効果は波動関数の位相を通じて現れる。したがって、レーザーを用いて原子に同等の位相変化を与えることによってゲージ場をシミュレートすることができる。さらに、位相変化を内部自由度に依存させることによってスピン-軌道相互作用と同等の効果を引き起こすことができる。これら人工ゲージ場<sup>9)</sup>を用いて系を回転させることなく量子渦が生成され、さらに、スピンホール効果が実現された。ゲージ場をさらに強くすることで、分数量子ホール効果の実現も期待されている。スピンの各成分は互いに非可換なので、内部自由度を人工ゲージ場と結合させることによって非可換ゲージ理論をシミュレートする可能性が注目を集めている。ただ、レーザー光により誘起された人工ゲージ場はダイナミカルな自由度を持たず、BECを用いるなどしてゲージ場をダイナミカルにする方法が検討されている。

超高真空中に電磁ポテンシャルによってトラップされたイオンや中性原子は外界から孤立しており、粒子やエネルギーを交換する熱浴を持たない。にもかかわらず、非平衡な初期状態から出発した系は非可積分系（可積分系）では（一般化された）ギブス分布へと緩和することが実験や数値シミュレーションで確かめられている。この問題は、熱統計力学（特に、熱力学の第二法則）が量子力学から導ける可能性を示唆している。多体量子状態のエネルギー固有状態の各々が熱平衡状態にあるという固有状態熱平衡化仮説がこの問題を解決する答えとして注目を集めている。<sup>10)</sup>

外界から孤立した系が実現できると、コントロールした状況下で散逸を導入することが可能になる。また、孤立系を観測することでフィードバック制御することもできる。このように冷却された中性原子やイオンは広い意味で非平衡開放系を研究する格好のプラットフォームとなっている。非平衡開放系を制御することで強相関系に新たな機能が発現したり、超流動の転移温度を上げることができるかなど、多くの未開拓な興味深い問題が存在する。非平衡開放系の重要なクラスとして非エルミート系が注目を浴びている。ハミルトニアンのようなオブザーバブルにエルミート性を課すのは、固有値が実数であることを保証するための十分条件であるが必要条件ではない。実際、パリティと時間反転操作を同時に行うことによってハミルトニアンが不変に保たれる系では、散逸が閾値以下でエネルギー固有値が実数となることが知られている。<sup>11)</sup> そのような系は、損失と

利得の制御が容易な光の分野を中心に様々な研究がなされてきたが、今後は中性原子やイオン系のような強相関効果が重要な系においても大きな発展が期待される。

量子制御技術は、光、イオン、中性原子・分子、固体の各分野で大きく進展し、それぞれの分野で何ができ、何が本質的な課題であるかが明らかになりつつある。今後もこれらの困難を克服しようとする努力は継続される一方で、各分野で個別に発展した技術を組み合わせることで、強みを活かし弱点を補完するハイブリッド型の研究が多くのブレークスルーをもたらすものと期待される。とりわけ、系を周期的に駆動することによって非平衡定常状態を作るフロケエンジニアリングが大きな関心を集めている。<sup>12)</sup> 実際、この技術を中性原子気体へ適用することでHaldane模型が実現された。<sup>13)</sup> また、イオンやNVセンターに適用することで離散時間結晶が実現された。<sup>14)</sup> ハイブリッド技術のもう1つの応用例として、光ピンセットを駆使することで自在に配列された多数のリュードベリ原子を観測・操作することで、多体相互作用する量子シミュレータを構築した最近の実験も注目に値する。<sup>15)</sup>

量子制御技術の今後の研究戦略を考える上で、AI技術と半導体テクノロジーの急速な進展を念頭に置くことが重要だと思われる。量子制御技術はこれらの技術を置き換えるものではなく、補完するパーツとして威力を発揮するだろう。量子情報処理技術のメインストリームとして世界中で熾烈な研究が進行しているゲート型並びにトポロジカル量子計算機の開発に加えて、様々な量子制御技術を組み合わせることで実現される量子センサーは大きな付加価値をもたらす次世代テクノロジーの中核となる量子デバイスとして成長するだろう。

有益なコメントをいただいた古川俊輔氏、蘆田祐人氏、龔宗平氏、川畑幸平氏、藤本和也氏に感謝します。

#### 参考文献

- 1) C. Guerlin et al., *Nature* **448**, 889 (2007).
- 2) Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, and J. S. Tsai, *Nature* **398**, 736 (1999).
- 3) M. Ueda, *Fundamentals and New Frontiers of Bose-Einstein Condensation* (World Scientific, 2010).
- 4) M. W. Ray et al., *Nature* **505**, 657 (2014); M. W. Ray et al., *Science* **348**, 544 (2015); D. S. Hall, *Nat. Phys.* **12**, 478 (2016).
- 5) A. Mazurenko et al., *Nature* **545**, 462 (2017).
- 6) R. Islam et al., *Nature* **528**, 77 (2015).
- 7) M. Schreiber et al., *Science* **349**, 842 (2015); J.-y. Choi et al., *ibid.* **352**, 1547 (2016).
- 8) M. Takamoto et al., *Nature* **435**, 321 (2005).
- 9) J. Dalibard et al., *Rev. Mod. Phys.* **83**, 1523 (2011).
- 10) L. D'Alessio et al., *Adv. Phys.* **65**, 239 (2016).
- 11) R. El-Ganainy et al., *Nature Phys.* **14**, 11 (2018).
- 12) A. Eckardt, *Rev. Mod. Phys.* **89**, 011004 (2017).
- 13) G. Jotzu et al., *Nature* **515**, 237 (2014).
- 14) J. Zhang et al., *Nature* **543**, 217 (2017); S. Choi et al., *ibid.* **543**, 221 (2017).
- 15) H. Bernien et al., *Nature* **551**, 579 (2017).

(2018年10月18日原稿受付)