

光と原子が織り成す 人工物質の顕微観測

東京工業大学 大学院理工学研究科 教授

上妻 幹旺



研究の背景

真空中の原子にレーザーを照射し、温度を低下させる技術を「レーザー冷却」と呼びます。レーザー冷却を利用して100nK（ナノケルビン）オーダーの超低温状態にすると、原子気体をボース凝縮、あるいはフェルミ縮退させることができます。さらに、量子縮退した原子気体を、光定在波ポテンシャル（光格子）に導入すれば、一種の人工物質を生み出すことが可能となります。「不純物0」、「原子間相互作用が可変」、「任意形状の光格子が生成可能」といった際立った特徴ゆえに、光格子系は、固体物性のシミュレーター、量子情報処理のプラットフォームとして、多大な期待をよせられています。

光格子中で発現した物性は、これまで吸収撮像法と呼ばれる手法を用いて解析されてきました。光格子を構成するレーザーを遮断し、原子気体を自由拡散後に撮像することで初期の運動量分布を測定するのですが、この方法には限界があります。例えば、光格子中の超流動-Mott絶縁転移は、「原子波干渉の消失」という間接的な形でしかとらえられません。近年になり、光格子中の各サイトを直接に顕微観測する技術が登場しました。Mott絶縁転移であれば、各サイトに原子が1個ずつ整然と並ぶ様子が観測できます。残念なことに、光格子顕微鏡は、ボソンであるルビジウム（Rb）に対してしか成功していませんでした。そこで、物性研究を進める上では、フェルミオンに対する光格子顕微鏡を開発することが急務とされてきました。

研究の成果

私たちは、アルカリ原子であるRbではなく、ランタノイドであるイッテルビウム（Yb）を用いて光格子顕微鏡を構築することを考えました（図1）。Ybはボソン、フェルミオンともに十分な自然存在比をもっています。実はYbの基底状態は電子性のスピンをもたず、核スピンだけをもっています。核スピンは電子性のスピンに比べて磁場による擾乱を2000分の1しか受けないので、量子情報処理を行う上でも理想的です。しかし、

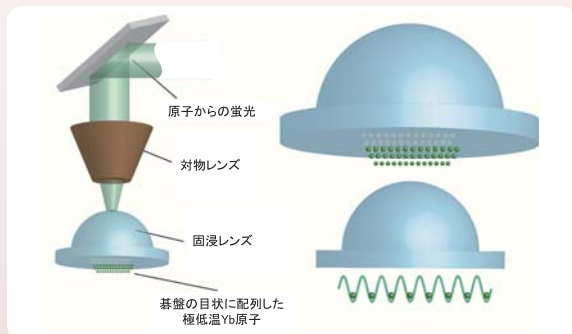


図1 光格子原子顕微鏡の概念図

固定レンズの直下、約 $1\mu\text{m}$ の場所に光格子を生成し、ボース凝縮をおこしたYb原子を閉じ込める。原子からの蛍光をCCD上に結像し、各サイトの原子を画像化する。

利点は欠点として跳ね返ってくるものです。電子性のスピンのなく磁気モーメントが小さいため、Rbのように磁場トラップを使って原子の輸送・操作を行うことができないのです。そのため顕微鏡の分解能を向上させるために設置した固定レンズ（図1）の表面近くで、冷却原子2次元光格子系を形成することは至難の業となります。私たちは、光ベルトコンベア、光アコーディオンといった最先端技術を活用することで、ボース凝縮したYb原子集団を固定レンズの直下で2次元光格子中にトラップし、各サイトを分解して原子を撮影することに成功しました（図2）。

今後の展望

固体物性の主役は電子ですので、フェルミオン同位体をもつYbに対して、光格子顕微鏡を実現した意義は大きいといえます。今後、複数のレーザーを干渉させ、蜂の巣型光格子、あるいは回転対称性のみをもつポテンシャルを構成し、ディラック電子が織り成す物性や準結晶の物理を探索することができるようになるでしょう。さらに、バンド絶縁状態を誘起すれば、各サイトに原子を1個ずつ配置することができるので、核スピンをベースとした大規模な量子情報処理を行うこともできるようになるでしょう。あるいは、人工ゲージ場を利用して量子ホール系を実現し、エッジ状態を観測する、Heでは難しいとされた超固体を実現する、さらにはトポロジカル絶縁体を生成するなど、様々な応用が期待できると考えています。

関連する科研費

平成22-23年度 新学術領域研究（研究領域提案型）
「縮退イッテルビウム原子集団を用いたクラスター量子計算の実現」

平成26-27年度 新学術領域研究（研究領域提案型）
「光格子原子顕微鏡で探索する人工ゲージ場が織り成す非平衡現象」

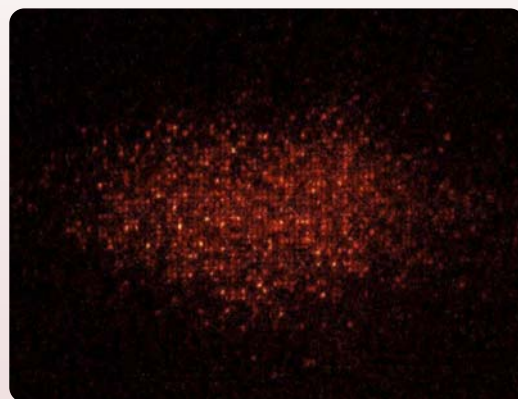


図2 光格子中の原子の蛍光顕微画像
周期543nmの光格子にトラップされたYb原子を、各サイトを分解して観測することに成功した。