

レーザーで作る光の結晶格子で平坦バンドを実現

～難解な磁性の問題の解明へ新たな道を拓く～

国立大学法人京都大学（以下、京都大学）の、田家慎太郎 理学研究科特定助教と高橋義朗 同教授のグループは、レーザー光を組み合わせて作る光格子^{*1}（**図 1**）においてリーブ(Lieb)格子^{*2}と呼ばれる特殊な結晶構造を実現し、そこに極低温の原子気体^{*3}を導入した系で、物理学の難問である遍歴強磁性^{*4}の解明に役立つと信じられている「平坦バンド」の性質を観測することに世界で初めて成功しました。

平坦バンドとは、運動エネルギーが運動量によらず一定の値をとるエネルギーバンド^{*5}のことで、そのバンドにいる粒子^{*6}の間には相互作用の効果が強く現れることから、超流動と固体の性質を合わせ持つ超固体^{*7}など、大変興味深い物質の状態が現れることが予想されています。また、「鉄が磁石に引き付けられる」という古くから馴染みのある現象は遍歴強磁性と呼ばれ、今なお完全な理解には至っていない難しい問題の一つです。平坦バンドを持つ結晶格子は遍歴強磁性が発現することが厳密に証明された数少ない例であり、これまでは理論上のモデルとしてのみ研究されてきました。今回の成果は、これらの性質を実験で検証し、現実存在する遍歴強磁性体のメカニズムを解明する可能性を開いたと言えます。

本研究で用いられた光格子は、非常にシンプルで、従来にない自由度と精度で実験条件を設定可能であり、固体物質における複雑な物理過程の本質を抽出して研究する量子シミュレーター^{*8}として機能し、現象のより深い理解に寄与することが期待されます。

なお、本研究成果は、米国科学雑誌 Science Advances（サイエンス・アドバンセズ）^{*9}に11月20日（米国東部時間）に掲載されましたのでお知らせします。

【研究の背景】

近年、光格子と呼ばれる人工の結晶をレーザー光で作る技術が確立し、物質が低温で示す特異な性質を極低温の原子気体を使って調べようとする研究が注目を集めています。光格子中の原子気体は大掛かりな真空装置の中のごく小さな領域でしか存在できず、直接見たり触れたりできないものですが、「普通の」物質が示す磁性・超流動などの重要な性質をより理想化された環境で研究できる格好の舞台となっています。固体結晶が低温で示す物性には、その結晶が持つ空間構造が色濃く反映されています。光格子研究の初期段階では容易に作成できる単純立方格子^{*10}を用いた実験がほとんどでしたが、最近ではより興味深い物理現象を研究するためにレーザー光を複雑に組み合わせて多様な光格子が実現されてきました（**図 2**）。京都大学の研究グループでは、リーブ格子と呼ばれる格子に着目し、光格子系の持つ高い制御性を最大限に生かした量子状態制御を行うことで世界に先駆けた研究が実現しました。

【研究の成果】

まず、波長 532nm(ナノメートル=10 億分の 1 メートル)と 1064nm を持つ 2 種類のレーザー計 6 本を数ミクロン(=100 万分の 1 メートル)の精度で重ね合わせて光リーブ格子の作成に世界で初めて成功しました（**図 3**）。リーブ格子中にボース・アインシュタイン凝縮^{*11}した極低温のイッテルビウム^{*12}原子を導入することで、そのユニークな性質を調べることができるようになりました。

平坦バンドを形成するメカニズムとなっているのが、量子力学的干渉効果と呼ばれるものです。量子力学によれば、粒子は粒であると同時に波の性質を持ち、「波動関数」（確率の波）として空間の広がった領域に存在することができます。波の持つ基本的な性質に干渉効果（2つの波が場所や時間によって強め合ったり打ち消しあったりすること）がありますが、リーブ格子ではこの波動関数が絶妙に干渉しあうことで、「動かない波」が無数に形成されます。この動かない波こそが平坦バンドを形

成する状態であり、その特異な性質の鍵となっています（図4）。

リーブ格子中のボース・アインシュタイン凝縮体は通常の状態では平坦バンドに入りませんが、本研究では光格子の形状を巧みに変化させることで凝縮体を平坦バンドに移し、その変化を調べることで、格子中を運動しない「凍った物質波」を確かに観測することに成功しました。また、リーブ格子の構造のバランスをあえて崩すことで干渉を不完全にすると再び物質波が動けるようになることも観測することができました。このように平坦バンドの完全性を操作できることは、理論の中でのみ存在する完全な平坦バンドと、歪みを含む現実的なエネルギーバンドで起こる物理現象を繋ぐ重要な役割を果たすと期待されます。

【今後の展開・波及効果】

人工的な環境下での平坦バンドの実現として、ごく最近にフォトニック結晶や励起子ポラリトンの例が相次いで報告されましたが、これまでに興味を持たれてきた平坦バンドの物理現象を再現できるものとして光格子の系は現状で最も有望であると考えられます。ボース粒子^{*13}とフェルミ粒子^{*14}という本質的に異なる二種の粒子を扱えることは大きなメリットで、ボース粒子で実現の可能性がある超固体の探索や、フェルミ粒子の遍歴強磁性の問題に取り組む第一歩を踏み出したと言えます。これらの状態が光格子で実現されれば、その結果を物性物理にフィードバックすることで有用な物質開発に役立つと期待されます。光格子で研究可能な物性物理学の対象は非常に多岐にわたっており、今後は原子気体を冷却する技術をさらに発展させ、物質の性質を決める原理の解明に向けた量子シミュレーターの実現を目指します。

【論文名】

Coherent driving and freezing of bosonic matter wave in an optical Lieb lattice,
by Shintaro Taie, Hideki Ozawa, Tomohiro Ichinose, Takuei Nishio, Shuta Nakajima and
Yoshiro Takahashi

(DOI : 10.1126/sciadv.1500854)

光リーブ格子中におけるボソン物質波のコヒーレントな駆動と凍結
田家慎太郎、小沢秀樹、一ノ瀬友宏、西尾卓衛、中島秀太、高橋義朗

【用語解説】

※1 光格子

レーザー光で作成された周期的な構造をもつ人工結晶。図2に示されるように、原子を光格子の中に閉じ込めることで、あたかも電子が物質の中を動きまわるような状況を仮想的に作ることができる。

※2 リーブ格子

正方格子の各辺の中央に一つずつ格子点を追加した格子構造（図2）。多体物理、特に磁性の分野で多くの著名な業績を持つ数理物理学者 Elliot H. Lieb の名に因む。

※3 極低温原子気体

レーザー冷却、蒸発冷却などの技術を用いることで、真空容器内の気体を絶対温度でナノケルビン（ナノは10億分の1）の温度にまで冷却することが可能になっている。このような温度をここでは極低温と呼ぶ。

※4 遍歴強磁性

強磁性とは、外部の磁場が無い状態で大きな磁気モーメントを持つことで、「磁石にくっつく」性質である。鉄などにおいては、結晶中を動き回る（遍歴する）電子が強磁性を担っており、その

ような強磁性を遍歴強磁性とよぶ。

※5 エネルギーバンド

自由空間の粒子は任意の運動エネルギーを持つことができ、その大きさは運動量の2乗に比例する。に、結晶のような周期構造中を運動する粒子は量子力学の効果の制約を受け、エネルギーバンドと呼ばれる帯状の範囲内の運動エネルギーしか持つことができない。平坦バンドは、粒子の運動量によらず一定のエネルギーのみが許されるバンドである。

※6 粒子

ここでは量子力学が対象とする電子や原子などの微視的な大きさの粒子を指す。

※7 超固体

固体(結晶)は空間的に規則正しい構造を持ち、外から加わる力に抗ってその形状を保つことができる。一方で超流動状態にある液体は粘性無しにどんな小さな隙間も自由に流れることができる。その両者の性質を合わせ持つ奇妙な物質の形態が提唱され、超固体と名付けられた。固体ヘリウムが超固体の性質を示すとする報告が脚光を浴びたが、最新の研究結果は否定的である。

※8 量子シミュレーター

物質などで起きる複雑な量子力学的な多体現象を、人為的に作成した単純で制御しやすい別のシステムを使ってシミュレーションすることを量子シミュレーションと呼び、この制御しやすい別のシステムを量子シミュレーターとよぶ。

※9 Science Advances

Science誌を発行する米国科学振興協会が2015年に新たに創刊したオープンアクセス誌。自然科学の全領域において重要となる最新の研究結果が掲載される。

※10 単純立方格子

サイコロのような立方体を整列させて敷き詰めた格子構造。

※11 ボース・アインシュタイン凝縮

アインシュタインが予言した現象で、ボース粒子(後述)の集団を極低温に冷やすことで起こる。マクロな数の粒子が一つの量子状態に落ち込み、粒子の集団が一つの巨大な波(物質波)として振舞う。

※12 イッテルビウム

原子番号70の元素であり、希土類元素に属する。元素記号はYb。7種類の安定な同位体が存在する。

※13 ボース粒子(ボソン)

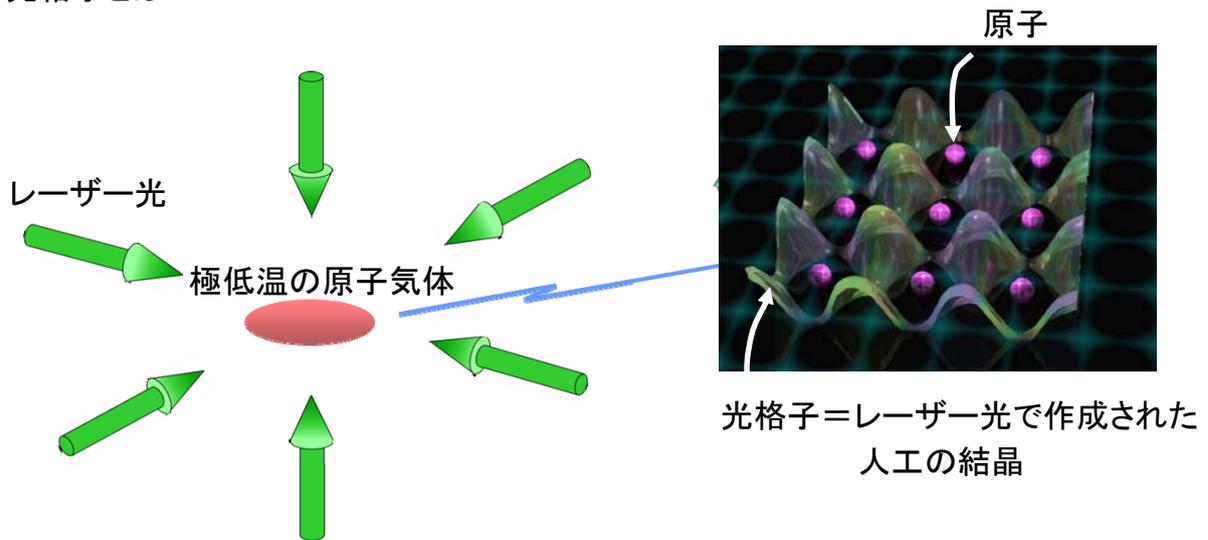
量子力学によって記述される粒子の一つであり、量子力学的な自由度を示すスピンの値が1、2、3、…と整数の値をとり、一つの量子状態に任意の数の粒子が存在できるという性質を持ちます。光子や質量数4のヘリウム原子などがボソンに属することが知られています。

※14 フェルミ粒子(フェルミオン)

スピンの値が1/2、3/2、5/2、…と半整数の値をとり、一つの量子状態に複数の粒子は存在できないという性質を持つ。電子、陽子、中性子などがフェルミオンに属することが知られている。

図1

●光格子とは



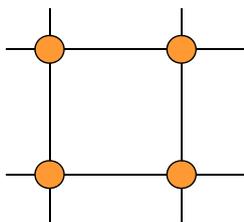
極低温の原子気体に対向的にレーザー光を照射させ、光の干渉により光格子と呼ばれる周期的な構造を作成します。

光格子ではレーザー光の強さにより、原子の動きを制御できます。

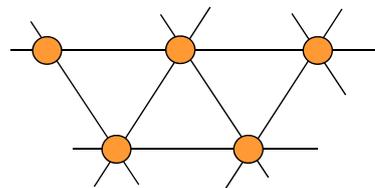
図2

●代表的な結晶格子構造

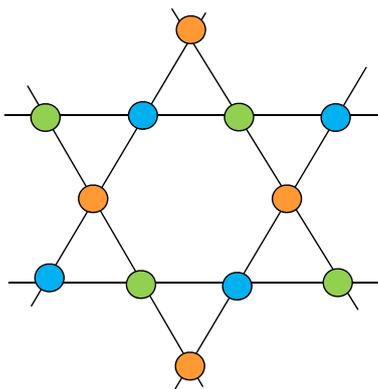
正方格子



三角格子



カゴメ(籠目)格子



リーブ格子

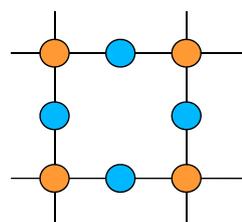
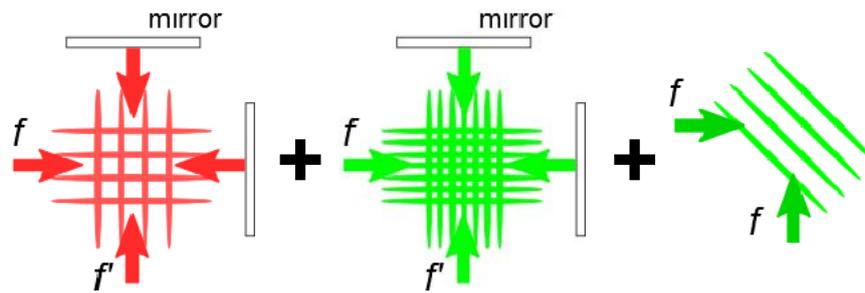


図3

●レーザー光でリープ格子を作る



波長1064nm(赤)と532nm(緑)のレーザーを6本組み合わせる

$$V(x, y) = -V_{long} [\cos^2(k_L x) + \cos^2(k_L z)] \\ -V_{short} [\cos^2(2k_L x) + \cos^2(2k_L z)] \\ -V_{diag} [\cos^2(k_L(x-z) + \pi/2)]$$

形成される格子構造(青い領域に原子が捕獲される)

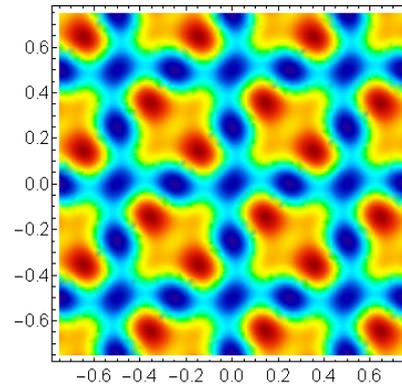
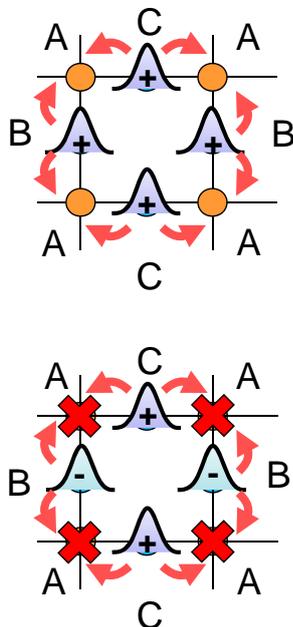


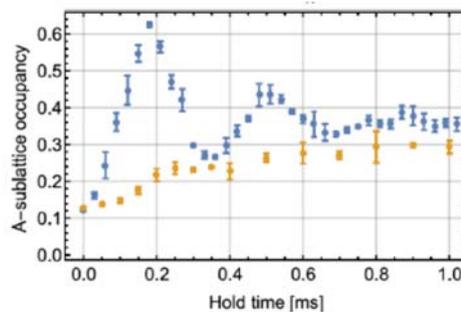
図4

●平坦バンドの物理

波の状態は振幅(波の高さ)と位相(波の山から谷までのどの段階にいるかを表す量)で特徴づけられます。2つの波がある点で強め合うか打ち消しあうかはそれぞれの位相の間で決まります。



リープ格子のB, Cと書かれた点に同じ位相(+)で物質波を置くとこれらはA点で強め合う(=粒子はA点に動くことができる)



2つの状態の違いを観測

一方、B点とC点で逆位相(+と-)にするとA点で打ち消しあう(=粒子はA点に移動できず、B点とC点にとどまって動かない)