

SU(N) ハバードモデルを光格子中の冷却原子で実現する

田家慎太郎 〈京都大学理学研究科〉

高橋義朗 〈京都大学理学研究科〉

強く相互作用する固体中の電子は、磁性や超伝導など多体系に特有の多彩な物理現象を生み出し、その理解のために膨大な努力が費やされてきた。その中で、ハバードモデルと呼ばれる理論モデルは相関電子系を記述する最もシンプルなモデルとして広く研究されている。モデルには隣接格子点へ電子が飛び移るときの運動エネルギーの利得 t 、同じ格子点に電子が2つ存在するときの相互作用 U の2つのパラメータのみが含まれている(右下図参照)。異なる格子点間の相互作用や複数の電子軌道の存在といった多くの要素が無視されており、ハバードモデルは現実の物性の定量的な予言には単純すぎるが、金属-絶縁体転移から d 波超伝導まで重要な物理現象のエッセンスを含んでおり、このモデルの研究が物性のより深い理解につながると信じられている。

しかしながら、そのシンプルさにもかかわらずハバードモデルを解くことは非常に難しく、2次元以上では厳密解が得られていない。数値計算についても、厳密対角化は20サイト前後が限界であり、2次元以上では近似的な計算法に頼らざるを得ないのが現状である。一方で、レーザー冷却によって極低温に冷却された原子集団をレーザー光の定在波がつくる周期ポテンシャル(光格子)に導入した系が、非常に良い精度でハバードモデルを再現することが明らかになった。これにより、ハバードモデルの含む未知の物理を実験の側から明らかにする「量子シミュレーション」の考え方が現実的なものとなった。

ハバードモデルの中でも、スピン1/2の電子を記述する通常のSU(2)ハバードモデルではなく、 $N(>2)$ 成分のカラー自由度を持つ粒子を記述するSU(N)ハバードモデルは、 N の値に応じて基底状態の性質

が大きく異なることが予想されている。例えば、2次元以上のSU(2)モデルでは half-filling (1サイトに $N/2$ 個の粒子)における基底状態として反強磁性の長距離秩序が予想されているが、 N の大きいモデルでは長距離秩序が失われ、より乱雑な状態が好まれる傾向にある。また、単にSU(2)モデルの数学的な拡張というだけでなく、軌道縮退がある系(の対称性の高い場合)を記述する点でも一般のSU(N)モデルを研究する意義は大きい。通常物質ではSU(N)対称性は近似的にしか成り立たないことがほとんどであるが、光格子に特定の原子種を用いればこの対称性を非常に精密に実現できることが示され、SU(N)ハバードモデルの実験的な研究の可能性が開けた。

ハバードモデルで説明される物理現象の代表例として金属-モット絶縁体転移が挙げられる。モット絶縁体とは、電子間の斥力によって電気伝導が妨げられることに由来する絶縁体の一種で、一般のバンド絶縁体と異なりスピン自由度が生き残るために多様な磁気的現象の舞台となる。ここでは、イッテルビウム原子を用いたSU(6)ハバードモデルの実現とモット絶縁体の形成、SU(N)ハバードモデルの熱力学性質の N 依存性を報告する。特に、スピン自由度が担うエントロピーが、 N の大きな系について効果的な断熱冷却(ポメラチュク冷却)の手段を提供することと、その冷却原子系における意義について議論する。

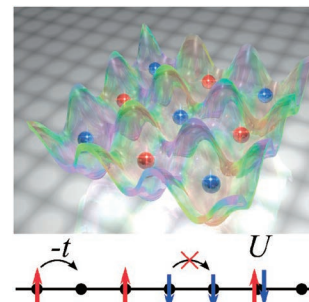
—Keywords—

モット絶縁体:

ハバード模型などの強相関電子系の模型で、クーロン相互作用が大きくなったときに現れるバンド理論で記述できない絶縁体。各格子あたりに整数個の電子があるような電子密度において、強いクーロン斥力のために電子が動きがとれなくなることによって生じる。銅酸化物高温超伝導体はモット絶縁体にキャリアを導入した系と考えられるため、その発見以降モット絶縁体の研究が活発に行われている。

ポメラチュク冷却:

Pomeranchukが1950年に開発した ^3He の冷却法。数100ミリケルビン以下の温度では、量子揺らぎによって ^3He の液体状態よりも固体状態のほうがエントロピーが高くなり、温度圧力相図における固体と液体の境界線が通常とは反対の傾きを持つ。この特性を活かして ^3He を数ミリケルビン程度まで冷却することができる。冷却能力に優れ、 ^3He 超流動の実現にも大きな役割を果たした。



光格子に導入された原子集団のイメージ。光の定在波がつくる「人工結晶」中を相互作用する原子が動き回ることによって、多様な多体現象が再現される。