

量子臨界現象—秩序と無秩序の狭間に現れる面白い物理

Keyword: 量子臨界現象

1. はじめに

一般に、温度を変化させると、物質は相転移を起こすことが知られている。身近な例として、氷が融けて水になったり、水が気化して水蒸気になったりする現象があげられる。また、磁石の温度を上げると磁性を失ってしまうことがあるが、これも相転移現象の一例である。マクロな物質を構成するミクロな構成要素が相互作用によって秩序化している状態が、その構成要素の熱揺らぎによって壊されてしまう、というのが相転移の簡単な理解である。

磁石を例にとって考えてみよう。この場合、ミクロな構成要素とは電子のスピンであり、スピンは上向きと下向きの自由度をもっている。図1にあるように、絶対零度付近では、スピン間の相互作用によってスピンの整列し、スピン秩序状態、たとえば反強磁性状態が生じる。縦軸に沿って温度を上げていくと、次第に、熱揺らぎによってスピンの向きが頻繁に入れ替わるようになり、ある温度でついに秩序が壊され、非磁性状態に転移してしまう。この温度が臨界温度であり、反強磁性状態から非磁性状態への転移の場合は、ネール温度と呼ばれる。

ところで、上記の議論だと、熱揺らぎの効果で秩序が破壊されることになるので、熱揺らぎのない絶対零度では、相転移は起こらないことになってしまう。しかし、実際には、図1に示すように、絶対零度近傍で磁性体に圧力を加えるとある臨界圧力で磁気秩序が壊され、相転移を起こすことがある。これは、通常の相転移とは区別して、量子相転移と呼ばれている。熱揺らぎは抑えられているのに、なぜ秩序が壊されるのだろうか。

2. 量子揺らぎ

大学で新しく学ぶ物理の一つとして、量子力学がある。これは、原子サイズのスケールにおける物体の運動を記述するものであり、電子の運動も、当然、量子力学によって理解されることになる。量子力学を学ぶと、いくつか不思議なことに会う。その代表例の一つが、不確定性原理である。電子のようなミクロなサイズの物体の運動量と位置は、同時に正確には決めることができない、というのである。この不確定性原理から、面白いことがわかる。絶対零度でも物体は静止しないのである。

古典的には、温度は系の構成要素の運動エネルギーの尺度であり、絶対零度は運動が停止することを意味するが、量子力学では、絶対零度でも運動が停止する（位置が確定する）ことはなく、いわゆる零点振動が残る。量子力学的

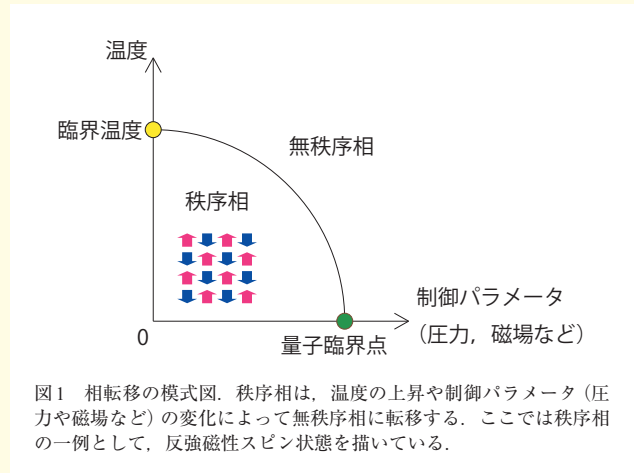


図1 相転移の模式図。秩序相は、温度の上昇や制御パラメータ（圧力や磁場など）の変化によって無秩序相に転移する。ここでは秩序相の一例として、反強磁性スピン状態を描いている。

な粒子は、波動（遍歴）と粒子（局在）の2つの「顔」（二重性）を持つ。遍歴性、すなわち運動エネルギーを得する効果と、局在性、すなわちポテンシャルエネルギーを得する効果のせめぎ合いの結果、両者の顔をほどほどに立てるところで折り合いをつけようとして、零点振動が生じることになる。これは、運動量の演算子と位置の演算子が非可換であることに起因する。零点振動があるために、絶対零度における揺らぎ、すなわち量子揺らぎが生じるのである。

絶対零度近傍において、磁場や圧力などの制御パラメータを変化させたとき、量子揺らぎによって秩序状態が壊されるパラメータの値を量子臨界点と呼ぶ。量子臨界点近傍において、強い量子揺らぎによって新奇な基底状態および低エネルギー励起状態が生じることが期待され、それらを量子臨界現象と総称している。量子臨界点近傍で新奇な物性を探索することが、現代の物性物理学における研究トレンドの一つになっている。

3. 量子スピン系

量子揺らぎの効果をもう少し具体的に見てみよう。簡単な例として、2つの原子に電子が1つずつ存在しているとす。電子は、量子力学的な効果により、時折、隣の原子に跳び移ることができる。跳び移りのエネルギー t は、電子の波動関数を用いて計算することができる。同じ原子サイト上に、上向きスピンと下向きスピンを持つ電子が存在するとき、 U という短距離クーロン斥力が発生するとしよう。この系を t についての2次摂動で解析すると、隣合う電子スピンに対するハイゼンベルグモデルが得られる。

$$H = JS_1 \cdot S_2 = JS_1^x S_2^x + JS_1^y S_2^y + J(S_1^z S_2^z + S_1^- S_2^+ + S_1^+ S_2^-)/2. \quad (1)$$

ここで、交換相互作用 $J=4U/t^2$, $\mathbf{S}_j=(S_j^x, S_j^y, S_j^z)$ は原子サイト j における電子スピン, $S_j^\pm=S_j^x \pm iS_j^y$ である。

式(1)の右辺第1項は、隣合うスピンを反対方向に整列させる、つまり反強磁性秩序を作る効果であるのに対し、第2項は、隣合うスピンの向きを反転させる、つまり秩序を壊す効果であり、これが量子揺らぎの源泉となる。第1項のみであれば、反強磁性状態が基底状態となるが、そこに第2項が加わると、反強磁性状態は量子揺らぎの影響を受ける。低次元では量子揺らぎの効果が強く効き、特に1次元では、第1項から生じる秩序は壊されてしまう。¹⁾

圧力を加えると、原子間距離は小さくなるので、一般に t は大きくなる。電子は局在するよりも遍歴して系のエネルギーを下げようとするため、圧力を加えることで絶縁体的な磁性状態(秩序相)から金属的な非磁性状態(無秩序相)に転移することがしばしば起こる。特に、反強磁性体に圧力を加えて金属化した場合、量子臨界点近傍で異方的超伝導が生じることが知られており、高温超伝導体とも関連して、活発に研究が行われている。

4. 重い電子系

量子揺らぎによって生じる面白い現象の典型例として、重い電子がある。²⁾ これは、新しい素粒子というわけではなく、希土類化合物やアクチノイド化合物において、電子の有効質量が、裸の電子質量の百倍から時には千倍にも大きくなるように見えるという現象である。実験的には、温度を T として、低温における電子比熱 $C=\gamma T$ や電気抵抗 $R=AT^2$ の係数 γ や A の増強として観測される。

重い電子の出現は、量子力学的には遍歴と局在のせめぎ合い、ということになるが、もう少し具体的に考えてみよう。まず、遍歴性については、近藤効果が重要なカギになる。近藤効果とは、もともと、極微量の磁性不純物を含む金属における電気抵抗極小現象に端を発する問題であったが、その本質は、局在磁気モーメントと伝導電子の混成による非磁性基底状態の形成であることがわかっている。近藤効果と名付けられていることからわかるように、その解明には日本人の研究者が大きく貢献し、その結果、現在では金属中の孤立磁性原子の振る舞い(いわゆる不純物近藤効果)は、ほぼ完全に理解されている。³⁾

一方、希土類やアクチノイド化合物における磁気モーメントの振る舞いは複雑である。伝導電子のスピン分極を介した Ruderman-Kittel-槽谷-芳田 (RKKY) 相互作用によって、磁気モーメントは秩序化しようとする。しかし、近藤効果による磁気モーメントと伝導電子の混成は、磁気モー

メントの消失をもたらす。セリウムやウランを含む金属間化合物では、伝導電子と局在 f 電子の間の混成強度 V の増大とともに近藤効果が優勢になって、基底状態は磁気秩序状態から非磁性のフェルミ液体状態へと移り変わる、すなわち、量子相転移することがある。セリウム化合物やウラン化合物では、 V は t と同様、圧力の印可とともに増加するので、ちょうど図1の横軸を左から右に動いていく変化となる。

局在性をもたらす RKKY 相互作用と遍歴性をもたらす近藤効果が拮抗する量子臨界点付近において、有効質量の大きいフェルミ液体状態が実現することが知られており、これが重い電子系である。重い電子系では、遍歴と局在の狭間で顕在化する量子臨界揺らぎが非フェルミ液体状態や異方的超伝導などの現象を生み出すと考えられており、現在盛んに研究されている。

5. 新しい量子臨界現象を目指して

秩序・無秩序状態の間の量子相転移点の近傍で面白い物理が生じることを簡単に紹介してきた。これまでは、磁気秩序状態、特に、反強磁性絶縁体状態の近傍の量子臨界現象がよく調べられてきたが、その秩序状態が強磁性である場合も興味深い。これは、強磁性ウラン化合物において、強磁性相の近くで超伝導状態が見つかったことで研究が活発化したという経緯がある。⁴⁾ また、イッテルビウム化合物においては、量子臨界点がゼロ磁場近傍に存在するという議論がなされるとともに、⁵⁾ 価数揺らぎによる重い電子状態とその性質が議論されている。⁶⁾

さらに、非磁性秩序相近傍の量子臨界現象にも研究の手が伸びている。特に、プラセオジウム化合物における四極子秩序状態近傍の超伝導に対して、四極子揺らぎの影響が議論されている。^{7,8)} 今後、八極子秩序相やさらに高次の多極子秩序相近傍の量子臨界現象に研究が展開され、風変りな超伝導や基底状態が発見されることを期待している。

参考文献

- 1) 川上則雄, 梁 成吉:『共形場理論と1次元量子系』(岩波書店, 1997年).
- 2) 上田和夫, 大貫惇睦:『重い電子系の物理』(裳華房, 1998年).
- 3) 近藤 淳:『金属電子論』(裳華房, 1983年).
- 4) 青木 大, J. Flouquet: 固体物理 **47** (2012) 115.
- 5) 中辻 知: 固体物理 **47** (2012) 13.
- 6) 渡辺真仁, 三宅和正: 固体物理 **47** (2012) 3.
- 7) 鬼丸孝博, 榊原俊郎: 固体物理 **47** (2012) 57.
- 8) K. Matsubayashi, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **109** (2012).

堀田貴嗣<首都大学東京理工学研究科 hotta@tmu.ac.jp>
(2015年9月14日原稿受付)