

フラストレートした量子磁性体におけるベリー位相とその拡張

Berry phases and their generalization for frustrated quantum magnets

筑波大物理・初貝 安弘

Institute of Physics, Univ. of Tsukuba, Y. Hatsugai

磁性体におけるフラストレーションとは、古典的かつ局所的で、さらには唯一のスピンの配置が自明に存在しないことと考えられよう。この直接の帰結として、古典的な局所秩序変数の非存在と多数の近似的な局所安定状態の存在による特異な低エネルギーの励起ならびに低温での大きなエントロピーの存在が示唆される。一方、量子磁性体においては量子効果によりこの古典的フラストレーションと大きな残留エントロピーも解放されることが可能であり、ギャップを持つ縮退のない基底状態が実現し得ることとなる。局所的な幾何学的フラストレーションにより古典的反強磁性秩序形成が強く妨げられるのに対して、量子効果による局所的なシングレット形成に伴うダイマー液体、固体としての励起ギャップが有限である量子スピン液体相の形成はこの典型例である。このように量子スピン液体を考えたとき、系を特徴づけるものは局所的なスピン配置としての秩序変数ではなく、局所的なフラストレーションを解放する量子的な局所オブジェクトである。隣接する量子スピンからなる局所的なシングレット対や4スピンからなるプラケットシングレットがその代表例である。これらの局所的な量子オブジェクトを基本とするある種の秩序相を「量子秩序」と呼んだとき、これらの相は物理系のパラメータの連続変形により、これらの量子オブジェクトを孤立させた自明な系と断熱的につながることが期待される。これは通常の臨界点の物理が繰り込み操作により固定点の物理によって普遍的に記述されることに対比できよう。励起にギャップをもつ量子スピン液体相においては繰り込み操作の代わりに断熱変形を対応させ、多種多彩な物質相における量子液体相を、孤立シングレット対からなるシングレットカバリング状態などのある種自明な量子相により普遍的に理解しようというわけである(図1)。通常の繰り込み操作では、臨界指数が繰り込み操作での不変量、特徴的な物理量であったのに対して、ここでの断熱過程においては、M.V.Berryの発見以来のベリー位相、特に時間反転対称性等により2つの値しか取り得ない Z_2 ベリー位相が不変量となり、局所的量子オブジェクトを特徴づけるある種の量子秩序変数となる [1]

また量子液体相の典型例である量子ホール相はバルクにはギャップがあり局所秩序変数の存在しないまさに量子液体相であるが、系の境界、不純物近傍においてはエッジ状態とよばれる局在した低エネルギー励起がそのギャップ中に存在し、その存在自体がバルクの量子液体相を特徴づける。これは「バルク・エッジ対応」とよばれる旧くは、整数スピンを持つ Haldane スピン鎖から最近話題の量子スピンホール相に至るまでひろく量子液体相における普遍的概念と考えられる。磁性体において上記の Z_2 ベリー位相はバルクの情報をあたえ、エッジ状態としての局在励起は境界のある系の情報をあたえるがこの2つの現象は「バルク・エッジ対応」によると相補的にお互いを規定することとなる。フラストレートした量子磁性体においてこの「バルクエッジ対応」の有効性を実証することも本研究の目標とするところである [2, 3]。

この一般論のもとに、本年度は、リング交換相互作用をもつ $S=1/2$ はしご系を簡単なフラストレート磁性体の典型例として具体的に検討する研究をさらに発展させるとともに、現在、2次元系に対する拡張した研究成果も行い、現在公表準備中である。また、最近、局所量子オブジェクトとして奇数スピンを基本とする場合に本質的となるクラマース縮退のある場合のベリー接続の一般論を公表したが [4]、そのフラストレート磁性体における有効性も今後明らかとする予定である。

以上、本特定領域の研究は研究分担者 丸山勲氏、有川晃弘氏、並びに大学院学生の棚谷翔氏との共同研究である。

[1] Y. Hatsugai, J. Phys. Soc. Jpn. 75, 123601 (2006), T. Hirano, H. Katsura and Y. Hatsugai, Phys. Rev. B 77, 094431 (2008).

[2] I. Maruyama, T. Hirano and Y. Hatsugai, Phys. Rev. B 79, 115107 (2009).

[3] M. Arikawa, S. Tanaya, I. Maruyama and Y. Hatsugai, Phys. Rev. B 79, 205107 (2009).

[4] Y. Hatsugai, "Symmetry protected Z_2 -quantization and quaternionic Berry connection with Kramers degeneracy", arXiv:0909.4831.

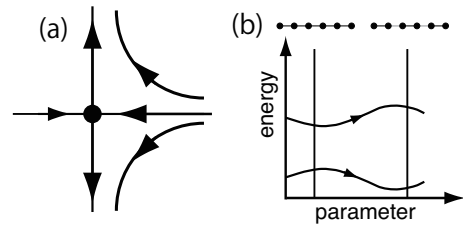


図 1: (a) ギャップレスな系での繰り込み操作と (b) 励起ギャップが有限の系での断熱操作