

ボース・アインシュタイン凝縮と磁性体の臨界現象

ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)は、ヘリウム(^4He)など、ゼロを含む整数スピンを持つ粒子(ボース粒子)の集団が示す巨視的な量子力学的現象で、摩擦なしの流れ(超流動)を伴う。一方、各原子に局在したスピンが巨視的な整列をする磁性体の性質は、各原子スピンの向きが変わるだけで、原子が物質内を動き回るわけではない。そう考えると、ボース粒子系の BEC とは何の関連もないと思われるが、実は、ある種の磁性体の相転移現象に BEC 描像が当てはまるであろうことが理論的に指摘されていた。自然現象の普遍性の一旦を示すものであるが、最近、東京工業大学、東京大学、およびフランスのサクレーCEA 研究所の研究者からなる研究グループは、現実の磁性体に関して解析を進め、BEC 理論どおりの磁性臨界現象の存在を見事に示すことに成功した。この研究は、日本物理学会発行の英文の学術誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の 2008 年 1 月号に掲載される。

大きさが $1/2$ の2つのスピンを合わせる(これをスピンドイマー状態とよぶ)と、その合成スピンの大きさが S がゼロの非磁性スピン一重項状態と、 S が 1 の、磁性を担うスピン三重項状態が生じる。もともとの2つのスピンに反強磁性的相互作用が存在すると、スピン一重項の方がエネルギーが低く(基底状態)、励起状態のスピン三重項との間にエネルギーギャップが存在する。隣接するダイマーを構成するもともとの2つのスピン間に(比較的弱い)交換相互作用があると、2つのスピンの向きを同時に反転させる交換相互作用の横成分は一重項状態と三重項状態の入れ替わり、すなわち、三重項状態の移動をもたらす(図 1 参照)。このようにして、スピンドイマー磁性体に整数スピンをもつ、「マグノン」と呼ばれる磁気ボース粒子が導入される。この系に磁場をかけるとゼーマン効果によってスピン三重項が3つに分裂し、エネルギーの低いマグノンと基底状態の間のエネルギーギャップが減少する。磁場を増加させて行くと、ある臨界磁場でエネルギーギャップがゼロとなり、ギャップレスマグノンの BEC (=磁気相転移)が生じる。このとき、磁化の値はマグノンの密度に、外部磁場はマグノンの化学ポテンシャルに対応している。

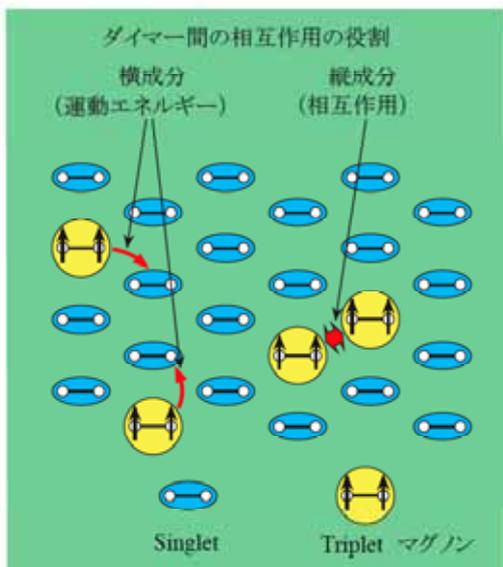


図 1: 磁場で誘起されたマグノンの運動と相互作用を表す模式図。マグノンはダイマー間の交換相互作用の磁場に垂直な成分によって隣接するダイマー上に運動し、また、磁場に平行な成分によって互いに相互作用をする。

TlCuCl_3 は本研究の研究グループによって初めて合成された磁性体である。この結晶を構成

する化学的ダイマー Cu_2Cl_6 のCuのスピンドイマーを形成する。一重項・三重項間のエネルギーギャップは超伝導磁石で容易に到達できる5T程度のゼーマンエネルギーに対応し、スピンドイマー間には等方的な交換相互作用が存在する。マグノンの分散関係も中性子非弾性散乱によって既によく分かっているため、マグノンのBECを研究するには格好な磁性体である。本研究ではSQUID磁束計及びファラデー法を用いた TlCuCl_3 の磁化測定がなされ、マグノンの臨界密度、相互作用定数及び磁気相図が求められた。相転移点での磁化の絶対値に対応するマグノンの臨界密度と相転移温度の関係はマグノンのBEC理論と一致している。さらに、77mKの極低温領域まで磁化測定を行うことにより、図2にあるような磁場と相転移温度関係を表す磁気相図が得られた。実験結果はマグノンのBEC理論による計算結果と大変良く一致している。また、マグノンのBEC理論によれば、相転移が起こる磁場は温度のべき乗則で表され、そのべき(臨界指数)は $3/2$ であるが、本研究ではこの臨界指数も詳しく調べられ、臨界指数がフィッティング範囲を低温側に狭めて行くことにより 1.5 に収束することを確認した。

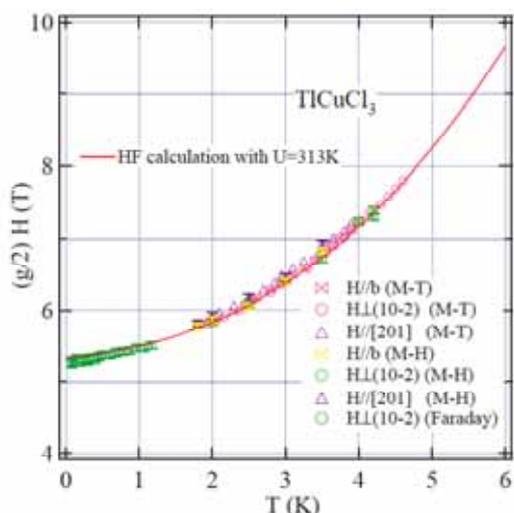


図2: 常磁性状態からBEC状態に相転移するときの磁場と温度の関係を表す相図。種々の記号は実験結果を表し、実線はBEC理論による計算結果である。

本研究によって、スピンドイマー磁性体 TlCuCl_3 における磁場誘起相転移が、ボース粒子マグノンのボース・アインシュタイン凝縮の典型であることが示された。これらの実験結果は TlCuCl_3 のみならず、一般のスピンギャップ磁性体(基底状態が非磁性の一重項状態で構成され、磁性を担う励起状態を伴う磁性体)の磁場誘起相転移がマグノンのBECであることを強く支持するものであり、それらの検証を含めた、今後の展開が期待される。

論文掲載誌: J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008), No. 1, p. 013701

電子版 : <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/77/013701/>

<情報提供: 田中秀数 (東京工業大学)>