

学 位 審 査 報 告 書

(ふりがな)	うえだ ひろあき
氏 名	植田 浩明
学位 (専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 年 月 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻
(学位論文題目)	
Study on various phases emerging from magnon Bose-Einstein condensation (マグノンボーズアインシュタイン凝縮により現われる多様な秩序相)	
論 文 調 査 委 員	(主査) 戸塚 圭介 准教授 川上 則雄 教授 松田 祐司 教授

理 学 研 究 科

(続紙 1)

京都大学	博士（理学）	氏名	植田 浩明
論文題目	Study on various phases emerging from magnon Bose-Einstein condensation （マグノンボーズアインシュタイン凝縮により現われる多様な秩序相）		
(論文内容の要旨)			
絶縁体の磁性を取り扱う標準的な手法は、絶縁化して結晶中の磁性イオンに局在した電子のスピン自由度のみを取り出し、これに対する有効ハミルトニアン（量子スピンハミルトニアン）を考察することである。その基本的自由度である「スピン」は、ある種の状況下では古典的に振る舞うが、そのスピン量子数 S が小さく、系の次元が低い時などには、本来の量子性が顕著になると考えられている。 さまざまな新物質の示す新たな物性に触発されて、ここ 10 年ほど、いわゆる「フラストレーション系」が再び脚光を浴びている。その最大の特徴は、さまざまな（古典的）磁気秩序状態がフラストレーションのために競合し、十分な低温でもまだ磁気秩序を示さないことである。そのような場合、たくさんの状態の競合と、量子ゆらぎ、熱ゆらぎが絡み合うことで、創発的自由度の発現など興味深い物性が期待される。しかるに、理論的観点からは、さまざまな技術的問題から大規模数値計算が難しい、量子性と状態の競合をうまく取り扱うよくコントロールされた近似法があまりない、などの理由から、困難な問題であり続けている。 このような系にアプローチする一つの手法として、量子磁性体を一種の（相互作用する）ボゾンの体系として書き直し、そのボゾン多体系に対して、電子系、超流動系などで開発されてきたいわゆる多体問題のテクニックを適用する、というものが考えられる。実際、量子磁性体は多くの場合、そのスピンのボゾンの統計性からボゾ的な素励起を持つので、これが可能である。このような立場に立つと、磁気秩序の発生は、ボゾ的な素励起のボーズ・アインシュタイン凝縮の結果であると捉えることができる。 植田浩明氏は、このような立場から、まず、三次元量子らせん磁性体の強磁場下での磁気構造を量子力学的に正確に決定することを試みた。らせん磁性体は、電気・磁気の交差相関効果のひとつである「マルチフェロイクス」への興味から理論、実験ともに再注目を集めており、電気分極を磁場で操作するという観点からその強磁場磁気構造を正確に理解することが重要であるが、上で述べたように、それを理論的に正確に決定するのは、数值的、解析的に容易でない。植田氏は、飽和磁場近傍の量子らせん磁性体が（強く相互作用する）希薄ボーズ気体（マグノン気体）として取り扱えることに着目し、そこに梯子近似など Beliaev 以来蓄積されてきたボーズ気体の解析手法を援用することで、強磁場磁気構造を、バイアスされていない近似で（漸近的に）量子力学的に厳密に決定することに成功した。また、三次元量子らせん磁性体の強磁場磁気相図を完成させ、吉森、永宮以来の古典的な解析では異方性がない限り実現しないとされてきた「扇構造」が、量子ゆらぎの結果、異方性のない系でも出現することを示した。 この研究の過程で、ボゾン励起間の有効相互作用が引力になり発散的に増大する領域があることがわかったが、実際、このような領域では、ボゾンの束縛状態が形成されることをベーテ・サルピーター方程式を用いた解析で示した。このような場合、理論			

的には、1. 強い引力相互作用のため、ボゾンが相分離を起こし、基底状態一次転移が起こる、2. ボゾン束縛状態（マグノン分子）がボーズ・アインシュタイン凝縮を起こして新しいタイプの秩序状態が発現する、という二つの可能性が考えられる。後者では、一種のスピンの多極子秩序であり、磁場に垂直な方向の磁気モーメントが消失する、「スピンネマティック状態」が実現すると期待される。どちらが実現するかを決定するには、マグノン自体ではなく、マグノン分子の間の相互作用を評価する必要がある。植田氏は、この問題に対し、考察している量子磁性体でもっとも重要であると考えられる散乱過程を取り込んで、マグノン分子間相互作用を具体的に評価する方法を提案した。また実際にこの手法を用いて、三次元量子らせん磁性体のあるパラメータ領域で、マグノン分子がボーズ凝縮してネマティック秩序が発生すると考えられることを示した。

このような手法は他のさまざまな系にも適用できる。植田氏は、上で確立した手法を三次元体心立方（b c c）格子上的フラストレート磁性体にも適用し、三次元 b c c 格子でもマグノン分子によるボーズ凝縮とそれに伴うネマティック秩序が可能であることを示した。

植田氏は、続いて、三次元フラストレート磁性体の「スピン超固体」の問題を、上で述べたようなボゾン多体系からアプローチで考察した。2004年のキムとチャンによるヘリウム4での「超固体」の観測の報告以来、「超固体」の実験の解釈から、どのような系で超固体が実現するか、という理論的問題まで、理論、実験ともに多くの考察がなされてきた。一方、本来連続空間上にあるヘリウム4を格子の上に載せて、格子ボゾン系、あるいは松原・松田のマッピングにより等価なスピン系として考察する「格子ガス模型」の立場では、1970年代にフィッシャー等が古典極限に対する分子場近似に基づき、現実のヘリウム4に対する最適パラメータでは、超固体状態が実現していると結論した。しかるに、この解析ではヘリウムのような軽元素では重要と思われるボゾンの量子性が無視されており、その妥当性は明らかでない。今回、植田氏は、体心立方格子上的スピン模型に対し、スピン量子数の逆数 $1/S$ と一軸（イジング）異方性という2つのコントロールパラメータを導入することで、ヘリウム格子ガス模型の超固体相への量子ゆらぎの効果を考察した。植田氏の出発点は、体心立方格子のスピン模型に古典極限で存在するプラトー相（ボゾンの言葉では、固体相）であり、ここにスピン波としてのボゾン（超固体の発現機構で重要と考えられる「欠陥」のスピンによる表現）がボーズ凝縮すると、プラトー構造を保ったまま磁化の垂直成分（超流動成分）が発生する超固体となることに注目した。この時、凝縮相でのボゾン間有効相互作用が斥力であれば、超固体は安定であると考えられる。再び、希薄ボーズ気体の手法を用いることで有効相互作用を評価し、フィッシャー等の提案したパラメータでは、そもそも出発点として仮定されたプラトー（固体）状態が量子ゆらぎのために不安定化し、超固体が発生しない可能性を示唆する結果を得た。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文でなされた研究は当該分野において十分オリジナルで価値あるものであり、内容については特に問題はないという意見で審査員全員が一致した。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成22年1月14日論文内容とそれに関連した口答試問を行った。その結果合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降