

【学位論文審査の要旨】

1 研究の目的

原子の冷却技術の大幅な進展により、ボーズ・アインシュタイン凝縮の観測など、冷却原子を対象にさまざまな実験が行われてきた。とくにレーザーの定在波を用いた周期ポテンシャルが実現されてからは、固体中の電子との類似性が指摘されるようになり、冷却原子系と電子系との対比や、電子系に類似した環境を冷却原子系に構築するなどの研究も盛んに行われている。さらに、フェッシュバハ共鳴を利用した技術で原子間相互作用を人為的に変えることができる点や不純物が入らない点など、電子系にはない冷却原子系特有の性質もいくつか存在する。

一方で、電子と異なり原子は電氣的に中性であることから、電子系で見られる電荷に起因する現象は、本来であれば冷却原子系では観測されない。たとえば磁場中において、原子の軌道と磁場が結合することはなく、同様の理由で原子のスピンと軌道が結合することもない。すなわち冷却原子系にはスピン軌道相互作用が存在しない。これに対し、人工的に原子に電荷があるかのような振る舞いをさせる実験が行われてきた。原子の軌道と結合するような人工磁場や、見かけ上原子のスピンと軌道が結合したような状態を作り出す人工スピン軌道相互作用の作成にすでに成功している。これらの実験的進展により、電子系と冷却原子系との対比は一層進んでいる。

さらに冷却原子系はアトムチップと呼ばれるチップ上でも実現されており、電子系のエレクトロニクスに対して原子系のアトムトロンクスと呼ばれる分野も形成されている。エレクトロニクスからスピンが関与したスピントロニクスが生まれたように、アトムトロンクスからアトムスピントロニクスが生まれると期待されている。

このような状況を背景とした本研究の目的は、人工的に作成されたスピン軌道相互作用を持つ冷却原子系において原子のスピン流が生じることを示し、冷却原子系の実験パラメータの制御容易性を利用したスピン流の実験的制御の可能性を理論的に検討することにある。原子スピン流の実験制御方法が明らかになれば、アトムスピントロニクスの分野に大きな貢献をすることになり、一層の分野発展につながると期待される。

2 研究の方法と結果

人工的なスピン軌道相互作用をもつ冷却原子系として、ボーズ原子系とボーズ・フェルミ混合系の2つの系を対象とした。ボーズ原子間およびボーズ原子とフェルミ原子との間の相互作用を考慮に入れ（フェルミ原子間はパウリの排他律により相互作用の影響は小さいとして無視した）、ボーズ原子については変分波動関数を用いて基底状態を議論した。フェルミ原子は、相互作用を無視しているので単独で存在するかぎりは基底状態を厳密に導出することが可能であるが、実際の計算では変分計算を容易にするため、強結合近似を適用した。

スピン軌道相互作用を持つボーズ原子は、相互作用がなければそのエネルギーを解析的

に求めることができる。基底状態はパラメタによって、有限の波数 k_0 と $-k_0$ の2つの状態にボーズ・アインシュタイン凝縮する場合と、波数 0 に凝縮する場合の2通りがある。この点から、先行研究では変分波動関数を波数 k_1 と $-k_1$ の2つの状態の重ね合わせで表現し、その比率や波数 k_1 、スピン成分比を変分パラメタとして構築していた (k_1 を 0 とみなせば波数 0 のみに凝縮した状態も表現できる)。本研究でも同様の変分波動関数を採用することとした。

はじめにスピン軌道相互作用を持つボーズ原子系に対してこれらの計算を行い、実験パラメタ空間における相図を完成させた。また、現れる相の特徴（密度分布や磁氣的構造など）を調べ、各層が出現する物理的背景を明らかにした。その結果、相の一部でスパイラル型の磁氣構造が現れることが明らかになった。スピントロニクスの見解により、これはスピン流の発生源となり得るものである。実際にスピン流を計算したところ、十分な大きさのスピン流が発生することがわかり、さらに人工スピン軌道相互作用を起こすレーザーの波長の関数としてピーク構造を持つことを見出した。すなわち最大のスピン流を起こすのに最適なレーザー波長が存在することがわかった。

つぎに、同様の計算をボーズ・フェルミ混合原子系に対しても行った。ただしフェルミ原子の数はボーズ原子よりも圧倒的に少ないと仮定し、変分波動関数で表現されるボーズ原子の定性的な側面はフェルミ原子の存在によって大きく変わらないとした。もちろん、混合原子系では両方の原子のエネルギーを下げる必要があるため、フェルミ原子の存在によってボーズ原子の基底状態の相図は修正を受けるが、計算の結果、両原子の数密度が十分に低いときはこの修正は小さいことを見出した。すなわち低密度のボーズ原子系にさらに低密度のフェルミ原子を加えた場合は、ボーズ原子の基底状態の相図はボーズ原子単独の系と本質的に変わらず、一部のパラメタ領域でスパイラル型の磁氣構造を持つことがわかった。したがってボーズ原子とフェルミ原子がスピン相互作用している場合は、フェルミ原子のスピン流が生じることが想定される。実際に計算からスピン流が求められ、ボーズ原子系での計算結果と同じく、最大のスピン流を起こすのに最適なレーザー波長が存在することが明らかになった。ボーズ原子系の場合は、スピン流を発生させる磁氣構造も、スピン流自体もボーズ原子が担うが、ボーズ・フェルミ混合原子系の場合は、ボーズ原子が磁氣構造を担い、フェルミ原子がスピン流を担っている。すなわちフェルミ原子のスピン流（固体中の電子のスピン流に対比させるべきもの）は、実験パラメタの調整によりボーズ原子の磁氣構造を変化させることで、間接的に制御が可能であることを示した。

3 審査の結果

中性の原子に対して人工的にスピン軌道相互作用を生じさせる実験に成功して以来、多くの理論研究が行われてきたが、原子のスピン流が生じる可能性に着目した研究はほとんど行われてこなかった。人工スピン軌道相互作用を生み出す実験では、本来の実験状況を表現したハミルトニアンは、原子のスピンに対してスパイラルな外部磁場を印可した形に

なる。これをユニタリ変換することでスピン軌道相互作用項が現れるのだが、本来のハミルトニアンで考えれば、スパイラルな外部磁場がかかることで原子系にスパイラルな磁気構造が生じるのは当然ともいえ、スピン流は当然想定されるべきものである。しかしスピン軌道相互作用が実験的に実現されてから歴史が浅いため、その点が指摘されることはほとんどなく、原子スピン流は未開拓の分野であった。一方、冷却原子系と固体物理との対比から、さまざまな固体中の電子に類似した現象を冷却原子系に求める向きもあり、その観点からすれば固体物理で一つの分野を形成するまでに成長したスピントロニクスに対比させて原子のスピン流に目を向けるのは必然的であったともいえる。本研究はその先鞭をつけるものであり、原子スピン流に関する先駆的研究であると評価できる。

さらに冷却原子は、相互作用などさまざまな物性に関係したパラメタが人工的に制御できるという特殊性を持つことで知られる。したがってその原子が生むスピン流も、実験的にコントロール可能なことが予想される。本研究ではその予想に基づいて代表的な実験パラメタを変化させたときのスピン流を計算し、ピーク構造（すなわち大きなスピン流を生じさせる最適なパラメタ値の存在）があることを明らかにした。これは原子のスピン流を観測する上で、実験パラメタをどのように設定すべきかを教示するものであり、現時点で未観測の原子のスピン流を今後実験的に観測する上で、大きな指針となることが期待される。アトムトロンクスと呼ばれる原子制御分野において、原子スピン流の制御という新たな側面を加えることとなる本研究は、高く評価できるものである。

以上により、本論文は博士（理学）の学位に十分値するものと判定した。

4 最終試験の結果

本学の学位規定にしたがって、最終試験を行った。公開の席上で論文内容の発表を行い、物理学専攻教員による質疑応答を行った。また、論文審査委員による本論文および関連分野の試問を行った。これらの結果を総合的に審査した結果、合格と判定した。