

氏名	坂本 良平
所属	理工学研究科 物理学専攻
学位の種類	博士 (理学)
学位記番号	理工博 第 290 号
学位授与の日付	平成 31 年 3 月 25 日
課程・論文の別	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題名	<b>Theoretical analysis of spin current induced in cold atoms with artificial spin-orbit coupling</b> 人工スピン軌道相互作用を持つ冷却原子系で誘起されるスピン流に対する理論的解析 (英文)
論文審査委員	主査 教授 森 弘之 委員 教授 荒畑 恵美子 委員 教授 服部 一匡

### 【論文の内容の要旨】

極低温まで冷却した原子気体を一定空間内に閉じ込めた多原子系のことを冷却原子系と呼ぶ。この系は実験で作り出すことができるため、多体原子が引き起こす多彩な量子現象を観測することが可能になっている。また、冷却原子系では原子間相互作用を含めた多様なパラメータを実験的に制御することが可能であり、これらの制御性を利用することで様々な興味深い物理系が作り出されている。特に 2011 年以降、2 本の Raman レーザーと磁場を巧みに制御することによってスピン軌道相互作用(SOC)を持つ冷却原子系を作り出すことが可能になっている。この系では、原子の内部自由度と運動量の間に関連を持たせることで人工的に SOC を作り出しているため、これは「人工 SOC」と呼ばれている。人工 SOC は Bose 原子と Fermi 原子の両方で実現しており、人工 SOC を持つ Bose 原子系は固体物理では対比する系のない新奇な系として、人工 SOC を持つ Fermi 原子系は固体物理における SOC を持つ電子系のシミュレータなどとしてもそれぞれ期待できることから、これらの系に対する幅広い研究が現在でも盛んに行われている。また、冷却原子系では Bose 原子と Fermi 原子を混合した Bose-Fermi 混合原子系を作り出すことも可能になっており、統計性の異なる 2 種類の原子が相互作用することで引き起こされる興味深い現象の発現が報告されている。

一方、原子を用いたデバイスの実現方法を研究する「アトムトロンクス」の分野も活発に研究が行われている。エレクトロニクスの主役である電子は電荷をもった Fermi 粒子であるのに対し、アトムトロンクスの主役である原子は中性であり、Fermi 粒子と Bose

粒子の両方を考えることができるため、エレクトロニクスとは異なる新奇なデバイスの実現が期待されている。ただし、この実現のためには当然エレクトロニクスとは異なる手法による原子の制御が必要になる。そこで、本論文では原子系で誘起される「スピン流」に注目する。スピン流とは一般に、異なるスピン成分を持つ粒子の逆方向の流れとして定義される量であり、このスピン流を用いた電子の制御技術はスピントロニクスと呼ばれている。冷却原子系では原子の有効的な内部準位を擬似的なスピン(擬スピン)とみなすことができるため、スピントロニクスの知識を応用することで原子の(擬)スピン流の制御方法を考えることができる。特にスピン流は SOC によって誘起されることが知られているため、人工 SOC を持つ冷却原子系ではスピン流が誘起されると考えられ、このスピン流を用いた原子の制御も期待できる。

本論文の目的は、アトムトロンクスへの応用を目指す基礎研究として、人工 SOC を持つ冷却原子系で誘起されるスピン流の制御可能性を明らかにすることである。結果として、未開拓な研究領域であった人工 SOC を持つ冷却原子系で誘起されるスピン流と人工 SOC を持つ Bose-Fermi 混合原子系の性質を明らかにすることができ、新奇な系における原子の新たな制御可能性を示すことができた。本論文ではこれらの結果を示すために、まず 2, 3 章でスピン流と人工 SOC を持つ冷却原子系について議論し、続く 4, 5, 6 章で人工 SOC を持つ Bose 原子系, Fermi 原子系, Bose-Fermi 混合原子系で誘起されるスピン流の実験的な制御可能性について議論する。以下、各章の詳細を示す。

スピン流について議論するための準備として、2 章では任意の磁場と SOC が作用したスピン自由度をもつ原子系で誘起される流れの性質について議論する。まず、系のラグランジアンから粒子とスピンの保存則を導き、自由粒子系における粒子流とスピン流を定義する。その後、この保存則に対する磁場と SOC の効果を考えることで粒子流やスピン流と磁場や SOC の関係を明らかにする。また、後半では解析で有用な波動関数のユニタリー変換と粒子流やスピン流の定義式の間を解析し、最後に粒子流やスピン流が誘起されるために必要な、系の波動関数が満たすべき条件について示す。

次に 3 章では、人工 SOC が作用した冷却原子系を実験的に実現する方法について示す。前半では、人工 SOC を作用させるための基となる人工ゲージ場を冷却原子系に作用させる方法についてまとめ、その後で人工 SOC を実現する方法を示す。ただし、これらの人工ゲージ場や人工 SOC を記述する系の有効ハミルトニアンは実験系のハミルトニアンを変形(ユニタリー変換)することで得られたものであるため、実際の実験系を記述するハミルトニアンについても章の最後で示す。

以上の 2, 3 章を踏まえ、4 章では人工 SOC を持つ Bose 原子系の基底状態の性質とスピン流の制御可能性について議論する。Bose 原子は絶対零度において全て基底状態に凝縮するため、原子間に相互作用がないときは 1 原子の性質と多原子の性質が同じになる。そこでまずは 1 原子の性質を解析し、原子間に相互作用のない人工 SOC を持つ Bose 原子系の性質について明らかにする。その後、Bose 原子間に相互作用がある場合の基底

状態を先行研究でもよく用いられている変分法を用いて解析し、基底状態の相図を示す。章の後半では、これらの基底状態における Bose 原子の密度、スピン密度、粒子流、スピン流の実験的に制御可能なパラメータに対する変化を解析し、スピン流による原子の制御可能性を明らかにする。

次に5章では、人工 SOC を持つ Fermi 原子系について議論する。まずは原子間に相互作用がない場合の基底状態の性質について議論し、Fermi 面の性質の違いで分類した基底状態の相図を示す。その後、この時のスピン密度やスピン流のパラメータ依存性を示し、スピン流の制御可能性を示す。最後に、原子間の弱い斥力相互作用が物理量に与える影響を摂動論を用いて解析し、実験的なパラメータ領域では相互作用が系に与える影響が十分小さいことを示す。

6章では Fermi 原子と人工 SOC を持つ Bose 原子が混合した、人工 SOC を持つ Bose-Fermi 混合原子系について議論する。まず前半では、4章で議論した人工 SOC を持つ Bose 原子系に Fermi 原子が加わることによる Bose 原子の基底状態の変化について解析する。ここで、解析は主に変分法と Tight-binding 近似を用いて行い、Bose-Fermi 原子間に働く相互作用としてスピン間相互作用項がない場合とある場合についてそれぞれ議論した。後半では、この系で誘起される Fermi 原子のスピン流について解析を行い、人工 SOC を持つ Bose 原子系で制御可能なパラメータによるスピン流の制御可能性について明らかにした。また、全体の総括として7章で以上の議論についてまとめる。

本研究で明らかにした新しい研究成果は、人工 SOC を持つ冷却原子系で誘起されるスピン流の制御可能性及び SOC を持つ Bose-Fermi 混合原子系の基底状態の性質の解明である。これらのことから、新奇な系における原子の新たな制御可能性を示すことができ、冷却原子系とアトムトロンクス分野の可能性を広げることができた。