

冷却原子気体で解き明かす量子現象

Unraveling quantum phenomena with ultracold atomic gases

内野 瞬 先端理論物理研究グループ
UCHINO Shun Research Group for Advanced Theoretical Physics



先端理論物理研究グループの内野瞬と申します。私は東京大学で学位取得後、ポスドクとして京都大学、ジュネーブ大学、理化学研究所で研究を行い、その後、講師として早稲田大学で研究・教育活動を行なってきました。2020年11月に卓越研究員として先端基礎研究センター(ASRC)に着任して以降、研究に集中できる環境を提供していただいた原子力機構と文科省に感謝しながら、日々、自分の研究に励んでいます。

私は元々、原子核物理畑の出身であり、学生時代に原子力機構で研究を行なった経験もあります。しかしその後、ひょんなことから分野を変え、エネルギースケールが17桁以上も小さな冷却原子気体を研究するようになりました。このような経緯を持つ私が現在、先端理論物理研究グループの一員となり研究を行なっているのは不思議なものです。何はともあれ、ASRCのメンバーと積極的に相互作用し、新しい研究を開拓していきたいと思っています。

さて、私の研究する冷却原子気体では、真空中に捕獲された極低温の原子集団が対象となります。冷却原子気体は操作性の高い人工量子系であり、原子間相互作用をはじめとした量子系の様々なパラメーターを自在に制御することができます。冷却原子気体のこのような長所を用いることで、未解決の量子現象の本質を理解する研究(量子シミュレーション)が現在、盛んに行われています。例えば、高温超伝導で重要と思われる2次元Hubbardモデルや、核力の本質を理解するのに有用な格子ゲージモデルは、冷却原子気体においてすでに実現されています。冷却原子気体を用いた量子シミュレーションに関する研究は、今後も様々な分野を巻き込んだものになっていくでしょう。

特に私が最近、興味を持って進めているのは冷却原子

I am Shun Uchino who is a member of the advanced theoretical physics group. After receiving my Ph. D at the University of Tokyo, I worked at Kyoto University, University of Geneva, and RIKEN as a postdoc, and then at Waseda University as an assistant professor. In November 2020, I started to work at Advanced Science Research Center (ASRC) as an Excellent Young Researcher. Since then, I have been pursuing my research with gratitude to JAEA and MEXT that offer a wonderful environment for me.

Actually, I had originally studied nuclear physics and had spent some time at JAEA in my master course study. Just after that, however, I happened to change my research subject and have come to work at ultracold atomic gases whose energy scale is more than 17 orders of magnitude smaller than nuclear physics. It is intriguing for me who has such a background to come back to JAEA and to conduct my research in the advanced theoretical physics group that mainly consists of nuclear physicists. Anyway, I wish to explore new research through active discussions with members in ASRC.

In ultracold atomic gases, an atomic cloud at low temperature trapped in the vacuum is concerned. Such gases are known to be controllable artificial quantum systems that allow us to control a variety of parameters in quantum systems including an interatomic interaction. By using this advantage, people in ultracold atoms including me now focus on research to understand the essentials of unsolved quantum phenomena, i.e., quantum simulation. For instance, two-dimensional Hubbard model expected to be a key ingredient in high-T_c superconductivity and lattice gauge theory that plays a crucial role in nuclear physics

気体を用いたメゾスコピック系の研究です。メゾスコピック系は元来、固体物理で議論されてきた系で、半導体などの微細加工技術の進歩により、1980年代以降大きく発展した分野です。例えば、アハラノフ・ボーム効果や分数量子ホール効果における分数電荷は、メゾスコピック系においてはじめて検証されました。一方、冷却原子気体でメゾスコピック系をシミュレートする研究は、スイス連邦工科大学 (ETH) の Tilman Esslinger グループによる 2 端子輸送系の実現以降、急速に発展しています。現在、冷却原子気体におけるこのような研究はエレクトロニクスを振ってアトムトロンクスと呼ばれています [1]。

アトムトロンクス研究の面白さは、電子系で見つからない量子輸送を検証できることにあります。Esslinger グループが観測した量子ポイントコンタクト系における異常輸送現象 [2] は、その典型例といえるでしょう。彼らは、2 端子の量子細線系で期待されるコンダクタンスの量子化が、原子間引力相互作用を増幅させることで、量子化値を超えて破れることを発見しました。手前味噌ですが、私は東京大学の上田正仁教授と共同で、この現象が超流動ゆらぎに起因する対 (preformed pair) の輸送によって説明できることを示しました [3]。このように、非常にチャレンジングな実験結果が続々登場し、それを実験家と理論家が非常に密に連携することで解決していくというプロセスはこの分野の醍醐味といえます。

他にも冷却原子気体では、原子のスピン自由度 (多くの場合、超微細スピン) を制御することができます。この技術により、バルク系でのスピン輸送やメゾスコピック系でのスピン輸送が冷却原子気体で行われるようになっており、スピントロニクスとの接点が生まれています。今後は、ASRC に多数在籍するスピントロニクスの専門家と議論することで、アトムトロンクスにおけるこの新たな可能性にも着目していきたいと思えます。

参考文献 References

- [1] 内野瞬、日本物理学会誌 76, 4 (2021).
- [2] S. Krinner et al., Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 113, 8144 (2016).
- [3] S. Uchino and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. 118, 105303 (2017).

have already been realized in ultracold atomic gases. I do believe that research on quantum simulation with ultracold atomic gases is developing further through interactions with different fields in physics.

In recent years, I have focused on research on mesoscopic systems with ultracold atomic gases. Mesoscopic systems were originally discussed in solid-state physics and have been developed owing to the progress of microfabrication technology in semiconductors since 1980s. For instance, Aharonov-Bohm effect and fractional charge in the fractional quantum Hall effect have been measured in mesoscopic systems in solids. On the other hand, mesoscopic systems with ultracold atomic gases have rapidly been developed since first realization of a two-terminal transport system done by the Tilman Esslinger group at ETH. Nowadays, mesoscopic physics research with ultracold atomic gases is also known as atomtronics being a cold-atom analog of electronics [1].

I feel that atomtronics is quite interesting, since one can examine quantum transport that has yet to be found in solid-state physics. A good example is an anomalous transport phenomenon occurring in a quantum point contact system found by the Esslinger group [2]. More specifically, they found that by increasing an attractive interaction between atoms, conductance quantization expected in a two-terminal system attached to a quantum wire is broken in such a way that the conductance exceeds the quantized value. Later on, I, together with Prof. Masahito Ueda at the University of Tokyo, showed that the anomalous transport phenomenon can be explained with transport of preformed pairs that originate from superfluid fluctuations [3]. In this way, atomtronics is an exciting subfield that provides challenging quantum problems, and experimentalists go hand in hand with theorists to solve such problems.

Last but not least, spin degrees of freedom such as hyperfine spins are controllable in ultracold atomic gases. By using this technique, spin transport in both bulk and mesoscopic systems has been done. So now, atomtronics meets spintronics. Hopefully, I would also like to explore such a direction in atomtronics through discussions with experts of spintronics in ASRC.