

# 「相対論的」粒子と共に歩む

## My research career along with “relativistic” particles

**荒木 康史** スピン・エネルギー変換材料科学研究グループ／先端理論物理研究グループ  
 ARAKI Yasufumi Research Group for Spin-energy Transformation Science /  
 Research Group for Advanced Theoretical Physics



2018年12月から卓越研究員として原子力機構の先端基礎研究センター(ASRC)に所属しております、荒木康史と申します。スピン・エネルギー変換材料研究グループ(スピンGr)と、先端理論物理研究グループ(理論Gr)の兼務として研究に当たらせていただいております。

私は2013年に東京大学の大学院理学系研究科・物理学専攻にて博士号を取得した後、2年間を米国テキサス大学オースティン校にて学振海外特別研究員として過ごしました。その後2015年4月から、原子力機構に着任するまでの約3年半、東北大学の金属材料研究所および学際科学フロンティア研究所の助教として、研究及び学生指導に当たっていました。

私の現在の研究分野は(大まかに言えば)理論物性物理学ですが、中でも特に、物質中における「ディラック・ワイル電子系」の物理[1]に興味の中心に据えています。元々ディラック方程式やワイル方程式は、相対論に従う素粒子の運動を記述する基本的な方程式として、1920年代に提案されたものでした。一方で21世紀に入ってから、相対論からかけ離れた低エネルギーの領域であるにもかかわらず、結晶中の電子(準粒子)の伝播がディラック・ワイル方程式で記述される物質が、次々と提案および実現されています。おそらく最も有名なのは炭素原子の単層で構成されるグラフェンで、その導電性や構造の安定性に基づき、基礎物理の面だけでなく工業・化学・バイオテクノロジーに至るまで、様々な面で注目される物質となっています。また、3次元でディラック・ワイル電子を示す「ディラック・ワイル半金属」の探索も、ここ数年で急速に進展しています。結晶構造の対称性に基づく数学的な分類、第一原理計算による具体的なバンド構造の決定、そして実験室における合成した試料の測定—これらの研究が緊密に結びつき、ディラック・ワイル電子を示す多くの新しい物質が創出されています。

このように多種多様なディラック・ワイル電子系が生まれ出される中で、私はこれらの電子系で特徴的に現れうる物理現象を理論面から探索しています。ディラック・ワイル粒子はスピンと運動量の相関(ヘリシティ)、量子異常(カイラルアノマリー)等の特性を持つことが、素粒子論を含む相対論的量子力学の観点から長らく調べられてきました。これらの特性が実験室で観測可能なスケールの現象として発現しうるのが、ディラック・ワイル電子系の興味深いところです。特に私が最近重点的に

In December 2018, I joined Advanced Science Research Center (ASRC) of JAEA by the Leading Initiative for Excellent Young Researchers (LEADER) program of Japan Society for the Promotion of Science (JSPS). I am a member of the Research Group for Spin-energy transformation Science and the Research Group for Advanced Theoretical Physics at ASRC.

I obtained my PhD at the Department of Physics in the University of Tokyo in 2013. After that, I moved to the University of Texas, Austin in the United States, and worked as an Overseas Research Fellow of JSPS for two years. From April 2015 to November 2018, I worked as an assistant professor at the Institute for Materials Research and the Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences in Tohoku University, and was in charge of research and teaching students.

My current research area is, generally speaking, theoretical condensed matter physics. In particular, my central interest is the physics of “Dirac/Weyl electrons” in materials [1]. Originally in the 1920s, Dirac and Weyl equations were invented as fundamental equations for elementary particles obeying relativity. Now in the 21st century, there have been proposed and realized various crystalline materials that show electron (quasiparticle) propagation obeying the Dirac or Weyl equations, although they are at low energy far from the relativistic regime. Perhaps the most famous material among them is graphene, which is the monolayer of carbon atoms. Search of three-dimensional materials hosting Dirac/Weyl electrons, namely “Dirac/Weyl semimetals”, is also rapidly growing over the last half decade. Mathematical classification based on crystal symmetries, determination of band structures using first-principles calculation, and experimental measurement of synthesized samples, are closely related together to design various novel Dirac/Weyl electron systems.

Motivated by such an intense search of Dirac/Weyl electron systems, I am trying to find phenomena characteristic to these materials from theoretical aspect. In Dirac/Weyl electron systems, it is possible

扱っているのは、磁性を持つワイル半金属中の、非一様な磁気構造に関する理論です。非一様な磁気構造 — 磁壁やらせん磁気構造など — の性質は様々な磁性体において調べられており、物質の基礎物性だけでなく、磁性体を情報素子等の応用に用いる「スピントロニクス」においても重要な研究対象となっています。その中でも私は、磁気構造がワイル電子に及ぼす効果が、上述したスピンと運動量の相関に基づけば、相対論的場の理論で発展してきた「軸性ゲージ場」の概念を用いて解釈することに着目しました。この対応関係を用いる事により、ワイル電子の運ぶ電流と磁気構造のダイナミクス間の相互変換が、通常の金属磁性体よりも高いエネルギー効率で起こることを、簡潔な形で記述することができました [2]。磁性を持つワイル半金属は近年いくつかの物質で実現されており、ここで述べた現象の実験的観測に向けて議論を重ねているところです。

このような、普通の金属や半導体とは少し変わった「ディラック・ワイル電子系」の物理に最初に触れたのは、大学院修士課程の頃に遡ります。当時私は、東京大学で原子核・ハドロン理論の研究室に所属していました。ハドロンを構成するクォークの間に働く強い相互作用を扱う手法としては、粒子の場を格子上で離散化して扱う「格子ゲージ理論」が広く用いられているのですが、その基礎知識として格子上でのディラック粒子の定式化を学んでいました。その過程で、「格子上で実際にディラック粒子が実現される物質」としてグラフェンのことを知り、格子ゲージ理論で用いられていた手法をグラフェンに適用して、電子間相互作用を扱う研究を始めた — という経緯があります [3]。当時（2010年前後）はグラフェン研究が爆発的に広まった時期であり、グラフェンの理論の論文を格子ゲージ理論の知識をベースに理解しようと、手探りで勉強しました。自分にとってはまだ異分野だった物性の研究会・国際会議に参加した際、グラフェンだけでも幅広い研究があることに圧倒されたのを思い出します。

その当時から約10年が過ぎ、物性物理の研究者を名乗り始めて久しいですが、ASRCで再び原子核・ハドロン分野の研究者の皆さんと議論できる機会をいただき、深く感謝しております。直近ではこのような議論から生まれた研究プロジェクトとして、「相対論的粒子と非相対論的粒子の混在」という観点から、固体電子とクォークの物理の垣根を超えた理論研究が進行中です [4]。今後も皆様との議論を重ね、直接的に研究に繋がるトピックばかりでなく、議論を通して理論物理の視点を広げていけることを楽しみにしております。今後とも、どうぞよろしくお願いたします。

## 参考文献 References

- [1] N. P. Armitage, E. J. Mele, and A. Vishwanath, *Rev. Mod. Phys.* 90, 015001 (2018).
- [2] Reviewed in Y. Araki, *Ann. Phys. (Berlin)* 532, 1900287 (2020).
- [3] Y. Araki and T. Hatsuda, *Phys. Rev. B* 82, 121403 (2010).
- [4] Y. Araki, D. Suenaga, K. Suzuki, and S. Yasui, arXiv: 2011.00882[cond-mat.mes-hall].

that the characteristics of Dirac/Weyl particles established in the context of relativistic quantum mechanics, such as the correlation between spin and momentum (helicity) and the quantum (chiral) anomaly, can result in measurable phenomena in materials that are available in laboratories. In particular, recently I have been focusing on the theory of nonuniform magnetic textures in magnetic Weyl semimetals. Nonuniform magnetic textures, such as magnetic domain walls and spirals, have been studied in various magnetic materials, in the context of fundamental science as well as spintronics aiming for industrial applications of magnetic materials. In magnetic Weyl semimetals, the effect of magnetic textures on the Weyl electrons can be described as the “axial gauge field”, which is the idea developed in the studies of relativistic quantum field theory and is derived from the helicity structure mentioned above. Based on this correspondence, I have given simple description about the interplay between charge and spin currents carried by the Weyl electrons and dynamics of magnetic textures, which occurs more efficiently than in ordinary magnetic metals [2]. I am now engaged in discussion for experimental measurement of such phenomena in magnetic Weyl semimetals.

It was during my master course when I first encountered the physics of Dirac/Weyl electron systems. At that time, I was in the group for theoretical nuclear and hadron physics in the University of Tokyo, and was learning lattice gauge theory, which is widely used for analyzing the effect of strong interaction among quarks forming hadrons by defining particle fields on lattice with space-time discretization. In that process, I had a chance to learn graphene as a “material realization of Dirac particles on lattice”, and thus I started my theoretical research on electron-electron interaction in graphene by applying the techniques of lattice gauge theory to graphene [3]. The number of graphene studies was growing explosively in those days around 2010, and I was struggling to understand theoretical papers on graphene from the idea of lattice gauge theory. When I attended an international conference on graphene, I was so overwhelmed by the diverse research topics treated in the context of graphene.

Now it is about 10 years from those days. While I am currently working as a researcher of condensed matter physics, I am grateful for the opportunity to interact with the researchers from nuclear and hadron physics again at ASRC. Inspired by such an interdisciplinary discussion, I have recently been involved in a theoretical research project about mixtures of relativistic and nonrelativistic particles, which is related to both electrons in solid states and quark matter in accelerators [4]. It will be my great pleasure to expand my perspective on theoretical physics, and to launch new research idea if possible, through such discussions.