

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20348

研究課題名（和文）実空間と波数空間の創発磁場を用いた新奇量子輸送現象の探索

研究課題名（英文）Exploration of quantum transport induced by emergent magnetic field in real and momentum space

研究代表者

山田 林介 (Yamada, Rinsuke)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：80962133

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、実空間のスピン構造と波数空間における電子構造の協奏効果による新奇量子現象の探索を目標として設定した。具体的には空間反転対称性の破れた磁性ワイル半金属であるRAISi (R=希土類)に着目し、フェルミ面の近傍の電子状態に敏感なプローブとして知られている熱電効果を用いた。NdAlSiのネルンスト効果は低温に向かって増大し、磁気転移温度より少し高温において極大を示した。半古典モデルを用いた解析と第一原理計算によるバンド構造を組み合わせることで、磁気転移温度近傍での増大がフェルミ面のネスティングに関連した散乱時間の異常に由来していることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の熱電効果は物質のキャリア数が少なくなるほど増大するため、候補物質の探索領域が希薄キャリア半導体を中心としたものに限られることが多かった。本研究では、磁気的な周期構造を有する物質の磁気転移温度付近で、散乱時間の揺らぎによって熱電効果が増大する可能性を明らかにした。この効果は、キャリア数の多い金属的な試料でも発現することから、より幅広い物質において発現すると考えられ、熱電効果の探索領域が拡大することが期待される。今後は、磁気的な周期構造にとどまらず、電荷の周期構造（電荷密度波）に起因した熱電効果の探索が興味深い研究方針と考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aim to search for novel quantum phenomena due to the interplay of spin structure in real space and electronic structure in momentum space. Specifically, we focused on RAISi (R = rare earth), a magnetic Weyl semimetal with broken spatial inversion symmetry. Here, we used the thermoelectric effect, which is known to be a sensitive probe of the electronic state near the Fermi surface. The Nernst effect in NdAlSi increases toward lower temperatures and reaches a maximum at slightly higher temperatures than the magnetic transition temperature. Combining the semiclassical model analysis with first-principles calculations of the band structure, it is found that the enhancement near the magnetic transition temperature is due to an anomaly in the scattering time associated with the Fermi surface nesting.

研究分野：物性物理学

キーワード：トポロジカル物質 強相関電子系 熱電効果 量子輸送

## 1. 研究開始当初の背景

本研究では、実空間のスピ構造と波数空間における電子構造の協奏効果による新奇量子現象の探索を目標としている。これまで空間反転対称性の破れた磁性ワイル半金属である  $R\text{AlSi}$  ( $R$ =希土類)に着目して研究を進めてきた (図 1(a))。磁性ワイル半金属  $R\text{AlSi}$  においては、波数空間における電子構造であるワイル分散と実空間における磁気構造が密接に関連していることが近年の研究により明らかになってきた。特に、ワイル電子がスピン間の相互作用を媒介することで、螺旋磁性が生じる可能性が指摘されている (図 1(b))。

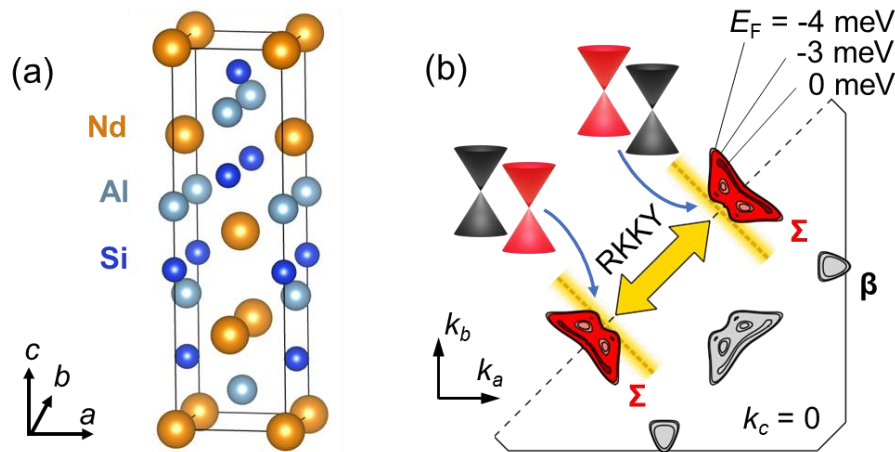


図 1 (a)  $\text{NdAlSi}$  の結晶構造。(b)  $\text{NdAlSi}$  のフェルミ面とフェルミ準位近傍に位置するワイル点。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、実空間のスピ構造と波数空間における電子構造が絡み合った新規な量子現象を探索することである。特に、フェルミ準位の近傍の電子状態に敏感なプローブとして知られている熱電効果を用いた。対象物質の  $\text{NdAlSi}$  は磁性ワイル半金属として知られており、フェルミ準位近傍にワイル点と呼ばれる創発磁場が増大するバンド構造を有する。このような点から、磁性ワイル半金属  $\text{NdAlSi}$  の熱電効果を測定することで、新規な量子輸送現象を探索した。

## 3. 研究の方法

まず、アルミニウムフラックス法を用いてミリメートルサイズの高品質単結晶  $\text{NdAlSi}$  を合成した。続いて、ラウエ X 線回折法やエネルギー分散型 X 線 (EDX) 分析、抵抗測定を用いて、育成した  $\text{NdAlSi}$  の品質評価を行った。さらに、抵抗測定によりキャリア数と移動度の関係を明らかにし、ワイル電子の寄与が明瞭に観測可能な高品質試料を選出し、熱電効果の測定を行った。

## 4. 研究成果

合成した  $\text{NdAlSi}$  単結晶について、精密な抵抗測定と熱電効果測定を組み合わせることで、新規な熱電効果を探索した。 $\text{NdAlSi}$  のネルンスト効果は低温に向かって増大し、磁気転移温度より少し高温において最大を示し、さらに低温では減少した。高温および低温におけるネルンスト効果は、半古典的なモデルによって定量的によく説明されることを明らかにした (図 2(a))。ここでの解析には、ネルンスト効果の磁場依存性をフィット可能なマルチキャリアモデルを考案し、用いた。さらに、磁気転移温度近傍での増大は、フェルミ面のネスティングに関連した散乱時間の異常に由来していることを明らかにした (図 2(b))。以上の結果は論文にまとめ、投稿論文は *Physical Review X* 誌に掲載された [1]。

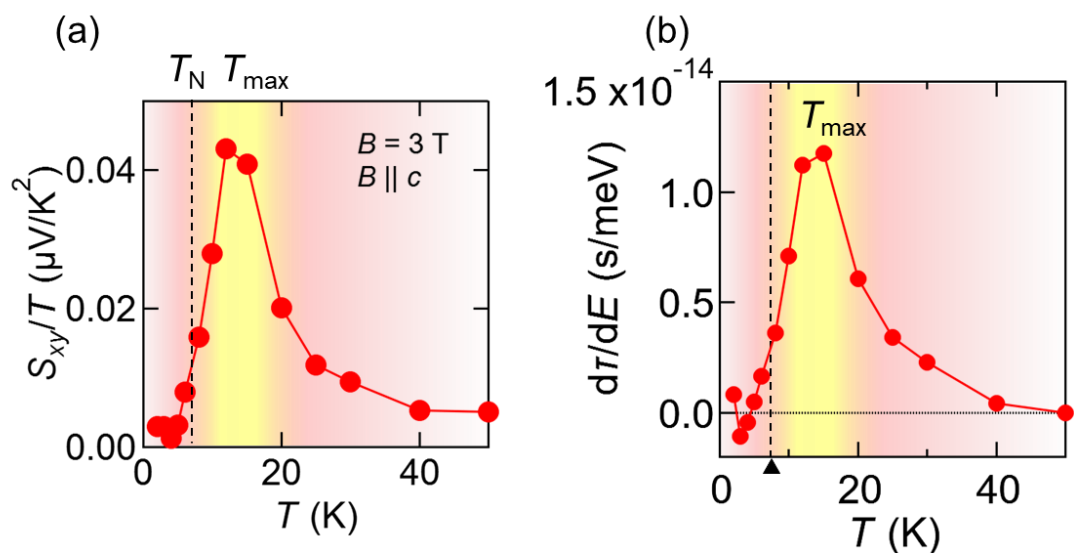


図 2(a) 磁気転移温度 ( $T_N$ ) 近傍におけるネルンスト効果の増大。(b) 半古典モデルを用いた解析により算出した転移温度近傍における散乱時間の異常。

[1] R. Yamada *et al.*, “Nernst Effect of High-Mobility Weyl Electrons in NdAlSi Enhanced by a Fermi Surface Nesting Instability”, *Physical Review X* **14**, 021012 (2024)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yamada Rinsuke, Nomoto Takuya, Miyake Atsushi, Terakawa Toshihiro, Kikkawa Akiko, Arita Ryotaro, Tokunaga Masashi, Taguchi Yasujiro, Tokura Yoshinori, Hirschberger Max	4. 巻 14
2. 論文標題 Nernst Effect of High-Mobility Weyl Electrons in NdAlSi Enhanced by a Fermi Surface Nesting Instability	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 1, 12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevX.14.021012	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 R. Yamada, M. Hirschberger, T. Nomoto, R. Arita, A. Kikkawa, Y. Taguchi, Y. Tokura
2. 発表標題 Giant anomalous Hall effect due to skew scattering in magnetic Weyl semimetal NdAlSi
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田林介, 野本拓也, 有田亮太郎, 吉川明子, 田口康二郎, 三宅厚志, 徳永将司, 十倉好紀, Max Hirschberger
2. 発表標題 磁性ワイル半金属NdAlSiにおけるネルンスト効果の増大
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Yamada, J. Fujioka, M. Kawamura, D. Hashizume, S. Sakai, M. Hirayama, T. Nomoto, R. Arita, A. Kikkawa, R. Kurihara, A. Miyake, M. Tokunaga, Y. Taguchi, Y. Tokura, M. Hirschberger
2. 発表標題 Quantum transport phenomena in correlated topological semimetals
3. 学会等名 Quantum Magnetism and Topology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山田林介, 野本拓也, 有田亮太郎, 吉川明子, 田口康二郎, 三宅厚志, 徳永将司, 十倉好紀, Max Hirschberger
2. 発表標題 ワイル半金属NdAlSiにおけるフェルミ面のネスティングに起因したネルンスト効果の増大
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Yamada, T. Nomoto, R. Arita, A. Kikkawa, Y. Taguchi, A. Miyake, M. Tokunaga, Y. Tokura, M. Hirschberger
2. 発表標題 Nernst effect of high-mobility Weyl electrons in NdAlSi enhanced by a Fermi surface nesting instability
3. 学会等名 The IEEE Around-the-Clock Around-the-Globe Magnetism Conference
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------