

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：32606

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01840

研究課題名（和文）準粒子間相互作用がもたらす準粒子粘性流体

研究課題名（英文）Quasiparticle viscous hydrodynamics induced by quasiparticle interaction

研究代表者

町田 洋（Machida, Yo）

学習院大学・理学部・教授

研究者番号：40514740

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：グラファイトおよびサファイヤにおけるフォノンの流体的熱輸送の観測を通じて、同現象が固体結晶に普遍的に現れ得ることを示した。またグラファイトでは試料の厚さを薄くすることで熱伝導率が向上することを見出した。この現象の背後には構造の僅かな違いが起源となっている可能性が示された。今後僅かな構造変化によってフォノン分散が変更を受け、フォノン-フォノン散乱における正常散乱の散乱位相空間が増大していることを第一原理計算を通じて実証し、ミクロな視点からの現象の解明を目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フォノンの流体的熱輸送が特定の純良物質や特定の温度域に限定されず、固体結晶に広く見出し得ること示し、我々の固体の熱輸送についての基礎的理解を促進した。結晶構造の僅かな違いがフォノンの流体的性質ならびに熱伝導率の大きさに多大なる影響を与え得ることを見出した。この結果はフォノンの流体的性質を積極的に活用することにより固体の熱伝導率が自在に制御でき得ることを示しており、従来の方法とは一線を画す熱伝導制御技術の礎となる可能性を提供している。

研究成果の概要（英文）：By observing the hydrodynamic heat transport of phonons in graphite and sapphire, it is shown that the phenomenon is not restricted to materials with exceptional purity. The superior thermal conductivity has been found in thin graphite. The slight difference in crystal structure can give rise to the enhancement of thermal conductivity by thinning. The quantitative understanding of our observation remains as future work.

研究分野：固体物性

キーワード：熱輸送

1. 研究開始当初の背景

固体結晶中のフォノンや電子に代表される準粒子の輸送現象において、電気抵抗および熱抵抗は準粒子の運動量が、準粒子とその他の準粒子、または準粒子と欠陥、不純物、試料境界との衝突を通じて緩和することにより生じる。準粒子同士の衝突においてはウムクラップ散乱が運動量損失の起源であり、衝突に伴って準粒子は逆格子ベクトル分運動量を失う。一方、準粒子同士の衝突において、運動量が衝突前後で保存される正常散乱によって散乱機構が支配される場合、準粒子があたかも粘性をもつ流体、準粒子粘性流体として振る舞う可能性が、古くに Gurzhi によって提唱された。準粒子粘性流体における抵抗は、通常の流体におけるそれと同様に粘性によって決まる。また正常散乱が支配的な場合、既存の輸送理論では考えられない電気・熱伝導率の試料サイズ依存性や Wiedemann-Franz 則の破れなど特異な輸送現象が発現することが予測されている。

Gurzhi の予測は、不純物と結晶欠陥を含まない超純良な固体ヘリウムを用いた熱輸送測定実験から、熱伝導率が低温の特定の温度域で向上する現象の観測を通して確かめられた。固体ヘリウムに引き続いて幾つかの超純良固体結晶でフォノンの流体的熱輸送が見出されたが、純良ではない試料で同現象が見出されたことはなく、試料の純良性が必須条件であるということが定説化している状況にあった。

2. 研究の目的

このような状況のもと我々は結晶中に格子欠陥が多数含まれているため純良ではない半導体の黒リンにおいてフォノン流体の存在を熱伝導率測定から明らかにした。このことからフォノン流体には必ずしも試料の純良性は必須ではなく、固体に普遍的に現れ得る現象であることが示唆される。これを踏まえフォノン流体における正常散乱の高頻度化に関わる因子の特定とフォノン流体が固体に普遍的に存在し得ることの検証を目的として研究を行った。加えて電子流体の存在を半金属において Wiedemann-Franz 則の検証からあぶりだすことを試みた。

3. 研究の方法

フォノン流体の固体結晶における普遍性を検証することを目的として、黒リンと同じく 2 次元層状構造をもつグラファイトと 3 次元のコランダム構造をとるサファイヤを対象に熱伝導率測定からその可能性を探った。掃引温度範囲が 2 K から 400 K に限られるヘリウム冷凍機よりも測定範囲を広げるべく、0.1 K 以下まで冷却可能な希釈冷凍機の製作と 1000 K に至る高温まで熱損失の少ない状況下で熱伝導率測定が可能な測定手法の開発も行った。また電子流体については半金属物質を対象にその純良単結晶を用いた熱伝導率および電気抵抗率測定からその存在の有無を追求した。

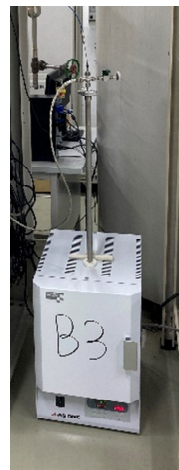
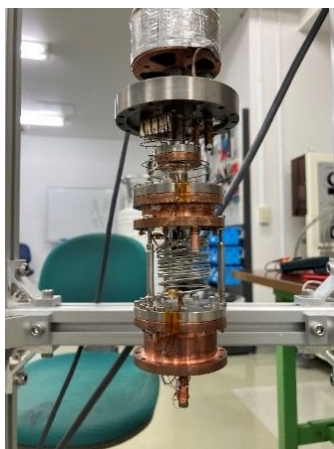


図 1 (左) 本研究で製作した希釈冷凍機のユニット部分の写真。(右) 高温での熱伝導率測定のためのプローブが挿入された電気炉の写真。

4. 研究成果

グラファイトにおけるフォノンの流体的熱輸送

天然に存在する同位体 ^{13}C を含む一般的な純良性をもつ高配向性熱分解グラファイト (HOPG) において、流体的熱輸送を熱伝導率測定から観測した。この結果は熱伝導率が極大をとる温度以下でフォノンの弾道的輸送の特徴として現れる T^3 よりも早い温度依存性を熱伝導率が示し、散乱前後でフォノンの運動量が保存される正常散乱によって熱輸送が支配され熱伝導率が向上していることから証拠付けられる。またグラファイト試料の c 軸方向の厚さを薄くしていくと、室温付近の熱伝導率が著しく向上し、数ミクロンの厚さのグラファイトではこれまでに知られているどのバルク物質よりも大きな熱伝導率をもつことを見出した。この発見は高い熱伝導率をもつ固体物質の開発に新しい指針を与えるものと期待される。この成果は Science 誌で公表した。

次に試料の厚さを減ずることにより熱伝導率向上の機構を探るべく、様々な条件下で試料の厚さを変え、それらの熱伝導率測定を行った。その結果、測定を行った試料の中には従来のように薄くすることで熱伝導率が上昇するだけでなく、熱伝導率が室温から温度を下げると発散的に増大し、100K 程度で極めて大きな値をとる試料が存在することが分かった。このような異常な振る舞いを示す試料と示さない試料の間にどのような違いがあるのかラマン分光を用いて調べたところ、特定のラマンシフトに明確な違いがあることが分かった。このことから両者に結晶の構造的な違いとそれによるフォノンの振動数に違いが存在することが明らかになった。構造の僅かな違いが熱伝導率に極めて大きな違いをもたらすことは驚くべきことである。今後は第一原理計算による実験結果の定量的な再現と、よりミクロな機構の解明が求められる。

サファイヤにおけるフォノンの流体的熱輸送

フォノンの流体的熱輸送の発現条件は、励起されるフォノンの波数ベクトルが小さくウムクラップ散乱の頻度が十分に低いことに加え、ウムクラップ散乱の頻度よりも高頻度に正常散乱が起こることである。この条件はフォノン流体の実現を必ずしも低温に限定するものではないが、同現象が固体ヘリウムやピスマスなどにおいて 10K 以下の低温で多く観測されていることから、低温でのみ実現し得る現象であるとの認識が広がっている。そこでフォノン流体現象が低温に限定されないこと、さらには上記の黒リンやグラファイトなどの 2 次元層状物質に限定されないことを実証することを目的として、デバイ温度が高いために比較的高温でウムクラップ散乱が凍結することが期待されるサファイヤに着目して研究を行った。サファイヤは Al 元素の同位体が安定同位体の ^{27}Al のみであるために純良性の観点から申し分がない。実験の結果、フォノン流体に特徴的な熱伝導率の T^3 よりも早い上昇が 50 K に至る比較的高温まで観測され、フォノン流体現象が低温に限定されないことを 3 次元物質では初めて確認した。

サファイヤでは熱伝導率の極大温度より高温で試料の純良性を反映した指数関数的な温度変化が現れることが知られ実際に本研究でも確認された。測定温度範囲を 1000 K に至る高温まで拡張すると 300 K より高温ではフォノンどうしのウムクラップ散乱が支配的な場合に期待される $1/T$ に従う熱伝導率の温度変化が観測された。これに加え希釈冷凍機を用いた 0.1 K までの測定から熱伝導率が T^3 に従う弾道領域、 T^3 より速い増加を示す流体領域、指数関数にしたがう Ziman 領域、 $1/T$ に従う Kinetic 領域の 4 つの領域を単一の物質で観測することに成功した。

半金属における電子の流体的熱輸送

電子流体については極めて高純度な試料が得られる半金属に着目した。同物質の熱伝導率と電気伝導度の比を温度で割ったローレンツ比を測定したところ有限温度において比が 1 から逸脱する、すなわちヴィーデマン・フランツ則からのずれを観測した。これは電子 - フォノン散乱が凍結した低温で、フェルミ面の大きさが第一ブリルアンゾーンよりも十分に小さいために電子どうしのウムクラップ散乱の頻度が低く、替わって正常散乱が支配的であることに由来して電子の流体的熱輸送が露わとなった可能性がある。今後より低温での輸送測定を通してこの可能性を追求する必要がある

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Machida Yo, Matsumoto Nayuta, Isono Takayuki, Behnia Kamran	4. 巻 367
2. 論文標題 Phonon hydrodynamics and ultrahigh-temperature thermal conductivity in thin graphite	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 309 ~ 312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aaz8043	査読の有無 有
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 該当する
1. 著者名 Isono Takayuki, Machida Yo, Fujita Wataru	4. 巻 89
2. 論文標題 Low-Temperature Magnetism in a Triangular-Lattice Antiferromagnet, Cu ₃ (OH) ₄ (HCO ₂) ₂ , Studied by Calorimetry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 073707 ~ 073707
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.073707	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 町田洋	4. 巻 76
2. 論文標題 固体におけるフォノンの流体力学	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 444-449
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11316/butsuri.76.7_444	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 Uehara Taiki, Ohtsuki Takumi, Udagawa Masafumi, Nakatsuji Satoru, Machida Yo	4. 巻 13
2. 論文標題 Phonon thermal Hall effect in a metallic spin ice	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-32375-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Li Xiaokang, Machida Yo, Subedi Alaska, Zhu Zengwei, Li Liang, Behnia Kamran	4. 巻 14
2. 論文標題 The phonon thermal Hall angle in black phosphorus	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-023-36750-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計9件(うち招待講演 2件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 上原大毅, 紺野羽亜人, 磯野貴之, 町田洋, 大槻匠, Mayukh Kumar Ray, 中辻知
2. 発表標題 Pr2Ir2O7の低温熱輸送係数測定
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島優奈, 大西嵐, 磯野貴之, 町田洋, 赤浜裕一
2. 発表標題 黒リンの金属絶縁体転移近傍における熱電応答
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 町田洋, 松本那由他, 磯野貴之
2. 発表標題 グラファイトにおけるフォノンの流体的熱輸送
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上原大毅, 磯野貴之, 町田洋, 大槻匠, Mayukh Kumar Ray, 中辻知
2. 発表標題 パイロクロア型金属磁性体Pr ₂ Ir ₂ O ₇ における熱ホール効果
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 町田洋
2. 発表標題 固体におけるフォノン流体による熱輸送
3. 学会等名 応用物理学会応用電子物性分科会研究例会「ナノ材料・構造による高度な熱制御と新展開」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川畑拓也、町田洋
2. 発表標題 純良な絶縁体結晶におけるフォノン流体現象
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 町田洋
2. 発表標題 金属スピニアイスPr ₂ Ir ₂ O ₇ におけるフォノンによる熱ホール効果
3. 学会等名 東大物性研量子物質セミナー(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小池美夏, 横井滉平, 大槻匠, 中辻知, 町田洋
2. 発表標題 金属磁性体Pr ₂ Ir ₂ O ₇ の熱電現象
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 横井滉平, 駒田盛是, 村川寛, 酒井英明, 町田洋, 花咲徳亮
2. 発表標題 超高純度半金属NbAs ₂ 単結晶における巨大ネルンスト効果
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022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