

令和元年6月24日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05455

研究課題名(和文)毛細管を用いた超流動ヘリウム3のポーラー相探索

研究課題名(英文) Search for the polar state of superfluid ^3He in narrow cylinder

研究代表者

小原 顕 (OBARA, Ken)

大阪市立大学・大学院理学研究科・講師

研究者番号：50347481

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：毛細管中に超流動 ^3He を閉じ込めると、本来自由に回転しうる ^3He 原子のクーパー対が円筒壁によって回転を阻害され、新しい相が出現する可能性があると考えられている。過去にも2例の実験報告があるが、直径が同一の毛細管を多数集積すること、極めて少数のスピンを検出しなければならないという技術的な困難さのために明確な結論がくたせていなかった。本研究では毛細管の積層と微小信号計測のための低温プリアンプの作成に成功し、それらを用いた常流動状態でのNMR実験に成功した。しかし、計画最終年において国内のヘリウムガス供給がストップしたため、大型の希釈冷凍機を用いる本実験はスタンバイ状態のまま終了した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自由に回転できるクーパー対に関する研究は多数あり、理論・実験ともに多くの成功を収めているが、擬1次元的に回転運動を抑制された状態についての研究は理論が完全に先行している。その理由は、実験が難しかったからである。本研究では、フォトニック結晶ファイバが超流動 ^3He を閉じ込める円筒容器としてふさわしいことをしめし今後の研究の糧となった。また、微小信号測定方法の一つとして安価かつ簡単に製作可能な低温プリアンプの実用化に成功した。特に、今回作成した低温プリアンプは各国の低温技術者の好奇心を刺激し、さらに付加価値をつけるなど技術的発展を遂げる原動力となった。

研究成果の概要(英文)：When superfluid ^3He is confined in a capillary, the rotational motion of the Cooper's pair should be suppressed by the wall of the capillary and the new superfluid phases are expected to be appear. Two experimental results have been reported, which could not distinguish the new phases because of the difficulty of making a bundle of the regular capillary and of observing a small amount of ^3He spins in the capillary. I have succeeded in making the capillary-bundle and the cryogenic preamplifier to detect the signal and succeeded in observing such a small NMR signal from the He using the preamplifier. Unfortunately in the final year of this project, the domestic helium gas supply has been stopped for a year, unexpectedly, therefore, I could not operate the large dilution-refrigerator, and the experiments for exploring the new superfluid-state has been suspended.

研究分野：超流動・低温工学

キーワード：超流動 流体力学 磁性 低温工学 超低温技術

様式 C-19, F-19-1, Z-19, CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究の目的は、細い円筒容器に閉じ込めた超流動 ^3He で、理論的に予想されているが、未だ観測されていない polar 相を観測し、基礎的物性諸量を確定させることであった。バルクの超流動 ^3He は、内部自由度が大きいため豊かな相が実現されると期待されている。中でも、polar 相はクーパ対の相対運動を1次元的に制限させた最も自由度の少ない系で、理論的な取り扱いがシンプルである。それにもかかわらず、これまで実験的検証が行われてこなかったのは、純粋に、コヒーレンス長程度の狭い隙間をつくることができず、また、たとえできたとしても、閉じ込められる粒子数が極端に少なく、相の同定に必要な NMR 実験を行うための信号強度が足りないと思われていたからである。

2. 研究の目的

極低温における液体 ^3He は極めて純粋なフェルミ粒子系であり、 ^4He 以外の不純物を全く含まない。その ^4He さえも極低温においてはファンデルワールス力によって容器壁に吸着されてしまうため、完全に純粋なフェルミ粒子系が実現する。さらに、極低温における液体 ^3He は粒子間の強い相関と量子性を反映して超流動相に転移する。この状態は、一般の金属中の電子の超伝導と同じく二つのフェルミ粒子がクーパ対を組むことによって起こる現象であるが、 ^3He の場合は核スピンの揺らぎに起源を持つ相互作用を持ち、また対を作る粒子が強い斥力をもつ原子そのものであるためにP波状態となる特徴がある。内部自由度が大きいため、理論的には複数の熱力学的に安定な相が存在する。実際、バルクの超流動 ^3He では温度 T ・圧力 P ・磁場 H をパラメータとして3つの相 (A相・B相・A1相) が観測されている。B相は広い温度圧力範囲で存在するもっとも対称性の良い相で、理論的にも実験的にもよく理解されている。この安定なB相をコヒーレンス長程度の狭い空間 (以下、制限空間と呼ぶ) に閉じ込められると、熱力学的に不安定になり、他の相に転換してしまうという理論的な予測がある。ここで、コヒーレンス長とは、超流動 ^3He のクーパ対の空間的サイズであり、圧力に依存する。制限空間として実験的に実現できるのは以下の3つの種類である: 最も単純なものは平行平板型で、空間的な並進対称性は1方向にのみ破れる。さらに、クーパ対の角運動量が壁に対して垂直にならなければならないという制約により、理論的にはA相と planer 相が発現することが期待されている[A. Vorontsov, Phys. Rev. B **68**, 064508]。しかし、実際には 600 nm 程度の間隙中でも planer 相は観測されず、A相とB相が、そのエネルギーギャップがやや変形された形で観測されているのみである[Levitin, Science **340**, 841 (2013)]。2つ目は、エアロジェルなどの多孔質体中に超流動 ^3He をしみ込ませるという方法がある。この場合、巨大な信号強度が約束されるが隙間の特徴的長さのランダム性と長距離秩序の制限が本質的役割を果たすため、理論的な取扱いに困難な点が多い。実験的に観測された相も様々で、低温低圧におけるB相以外に状態が実験的に確定した相はない。ただし、1 nm 程度の太さの紐が強く配向したエアロジェル中の超流動 ^3He では、polar 相の存在を強く示唆する結果が得られている

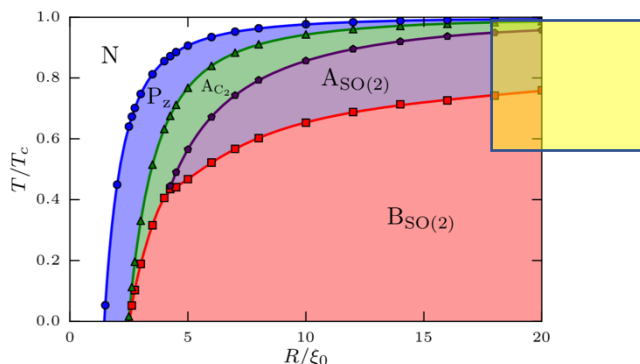


図1: Wimann の提案する相図
Pz が polar 相, Ac2, Aso(2)および Bso(2)
は秩序変数の歪んだ A 相 B 相

[Dmitriev, arXiv:1507.04275v1]。3つ目は、半径が数 μm 以下の細い円筒容器を用意し、その中に超流動 ^3He を閉じ込める方法である。古くは 1978 年に Sussex 大において直径 $2 \mu\text{m}$ の容器の中で実験が行われたが、残念な事に当時は新奇相という意識がなく、A相としての異常な性質という着眼点でしか研究されていなかったため、現在からみれば不十分なまま終了してしまっていた[Saunders, Phys. Rev. Lett. **40**, 1278 (1978)]。その後は理論的な研究が先行し、2014 年には、青山らによって相図の予言がなされているものの、それを検証した実験はまだない[Phys. Rev. B **89**, 140502(R) (2014)]。これまで実験が行われてこなかったのは、単に、現在の技術では技術的に困難だったからである。したがって、純粋 ^3He の polar 相探索は微小信号計測技術の開発と表裏一体であるといえる。本計画で狙うのは図1中の黄色で囲われた領域である。

Polar 相とは何か？

3P 状態である超流動 ^3He は、通常、秩序変数の行列 d_{ui} であらわされる。ここで、 u, i はそれぞれ軌道とスピンを表す指標である。もっとも対称性の良い BW 状態(B 相)は $d_{ui} = \Delta_B \delta_{ui}$ の対角行列になり、クーパー対をなす粒子のスピンは $\uparrow\uparrow, \uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow, \downarrow\downarrow$ となり、また、エネルギーギャップはフェルミ球上で等方的に開く。一方、polar 相は極めて細い円筒容器に入れることで回転の自由度を制限し、 $d_{ui} = \Delta_p \delta_{u3} \delta_{i3}$ のように、秩序変数行列の右下の 1 要素だけが有限になる。その結果、円筒容器の対象軸を z としたとき、角運動量 $l_z = 0$ となる。そのため、クーパー対をなす粒子のスピンは $\uparrow\uparrow + \downarrow\downarrow$ のみとなり、結果として A 相とよく似た性質が期待される。ただし、エネルギーギャップは赤道面上に開く。ここで重要なことは、polar 相は B 相 (および A 相) の秩序変数行列の要素を連続的に小さくして行くことによって得られる相であるから、実験的には、容器である円筒直径とコヒーレンス長の比を変化させることにより、B 相あるいは A 相から polar 相に変化させることが可能である。

3. 研究の方法

利用する試料セルのうち、もっとも重要な部分は、超流動 ^3He のコヒーレンス長程度の半径をもつ細い円筒容器である。本計画では、円筒容器として「フォトニック結晶光中空ファイバ(PCF-H)」を採用した。この光ファイバは高強度光の長距離搬送を目的として作られた光ファイバで、その内側には 100 個程度の細い穴が開いている。超流動 ^3He のコヒーレンス長は 50 nm 程度なので、フォトニック結晶ファイバの穴でも Wimann と青山らの予言する相図を確かめることは可能である (具体的には図 1 中の黄色い四角およびその右側に限定される)。

NMR 実験で相を同定するには、以下のような作業を行えば良い：まず第 1 に、polar 相と A 相は対のスピンが $\uparrow\uparrow + \downarrow\downarrow$ だけであるから帯磁率は温度依存性を示さずパウリの常磁性帯磁率と同一値をとるが、周波数シフトの温度依存性が異なり、polar-A 相転移においては不連続性が生じると予想される (Wimann)。ただし、その飛びは非常に小さい。そこで、Wimann らによる指摘のとおり、パルス NMR (シングルパルス法) の周波数シフトのチップ角依存性を調べる必要がある。B 相は polar 相、A 相と異なり温度低下にともない帯磁率が減少するので、円筒容器が冷えさえすれば問題なく観測できるはずである。したがって、実験は 30 mT 前後で行われるため、1 MHz 前後で NMR 実験が行える装置を開発する必要がある。

4. 研究成果

(1) 低温プリアンプ

そもそも、低温プリアンプが低温実験において必要なのはなぜか？ それは、極低温の実験セル (主に NMR コイル等のセンサ) は極低温に置かれるのが通例であり、セルに至る同軸ケーブルは 3 m を超えることも稀ではない。このような長さのケーブルは必然的に GND に対して大きな静電容量 (400 pF 以上) をもつため、高周波領域において著しい信号劣化を引き起こす。特に、NMR では 100 kHz 程度から Q 値の低下が顕著になる。これらは熱雑音による信号劣化とくらべても無視できない。従って、ケーブルを短くするという意味でもアンプはセルの直近という意味で低温部に置く必要がある。さらに、cw-NMR 実験においてはバランス回路 (ゼロ検出回路) を室温部に設置するが、本実験のような超微弱信号検出においては、アンプとフィルタ回路のゲインが室温変化に同調してドリフトする。これもハイインピーダンス入力・ローインピーダンス出力の低温プリアンプを用いれば解決できる。

本研究の最大の成果は、4.2 K の液体ヘリウム中で動作する低温プリアンプの作成に成功したことである [J. of Low Temp. Phys., **187**, (2017)]. この回路は、当時大量生産状態にあった pHEMT 素子のうち、C-MOS 型

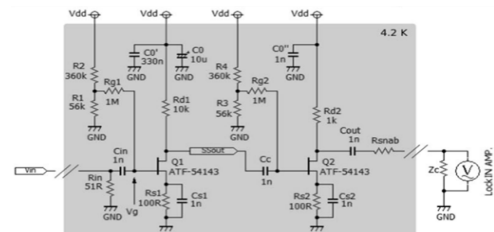


図 2：低温プリアンプ回路図

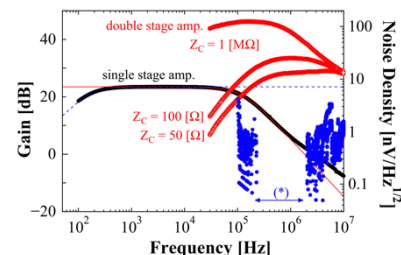


図 3：低温プリアンプゲイン

FET と同様の特性を持ったものを利用し、単一電源で、 ^3He NMR では代表的な周波数 1 MHz においても 30-40 dB のゲインを有する。その回路図と低温におけるゲインの周波数特性を図 2 と図 3 に示す。この研究は各国の実験技術者の好奇心を刺激し、Aalto 大学（フィンランド）のグループが差動増幅器タイプの作成につながった [J. Low Temp. Phys., 195, 72-80, (2019)]。また、他国からも今後の研究に用いたいという問い合わせもあった。また、研究期間の最終段階において、申請者は Aalto 大学版低温プリアンプにフィードバック回路を増設することにより、周波数範囲の拡大と入出力特性の線型性を向上させることに成功した。この結果については、2019 年夏の国際会議にて発表予定である。また、信号の劣化が熱雑音に由来するものだけでないなら、取り扱いの難しい pHEMT 素子を用いることはない[学会発表 2]。申請者は Analog Devices 社の full C-MOS オペアンプの一部 (AD864x ファミリ) は 4.2 K でも動作することを見出した。外付けのコンデンサは低温環境に適応したものを用意しなければならないが、その他はゲイン特性も含め、とくに何の処置も必要とすることなく室温と同様の回路で動作し、異常発振等の心配もない。ただし、MOSFET 由来のノイズは低温でも消えないこと、さらに 3 MHz 以上でのゲインの急速な減少も温度によらないので、必ずしも万能ではない。学会発表ののち、実際に Bulk ^3He の NMR 実験においてもその有用性は確認できた（後述）。以上のように、本研究で開発・実証された低温プリアンプは、特に、超微弱信号を取り扱う極低温実験の発展に大きく貢献することが期待できる。

(2) 極小 NMR セルの開発

本実験のセル設計の難しさは、毛細管の軸に対して垂直の振動磁場を高密度でかけなければならないことにある。ただし、PCF-H ファイバには ^3He が入らない無駄なガラス部分が非常に大きな空間率を占めており（図 4 左）、単純に積層・集約しただけでは充填率の向上は見込めないから信号強度は増加しない。そこで、PCF-H ファイバの外装部分をフッ酸エッチングで除去し、さらに 25 x 5 に積層することにした（図 4 左：総本数 15875 本）。低温においても 30 bar 以上の耐圧と、不純物による閉塞がないことが確認できた。

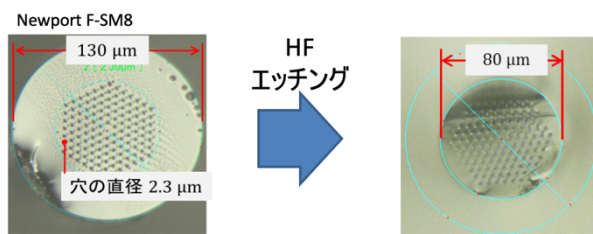


図 4：PCF-H ファイバの断面とそのエッチング結果

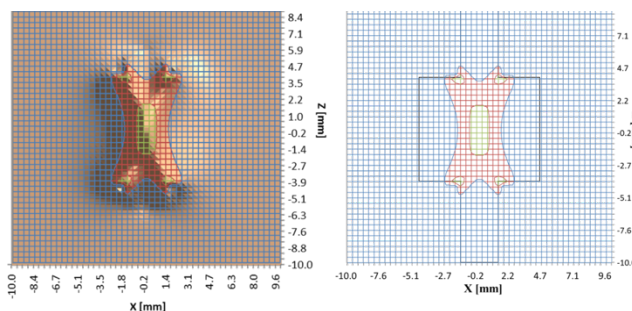


図 5：センサコイルの磁場分布直接数値計算

次に、NMR センサコイルについて

だが、通常は均一度を向上させるためにヘルムホルツ型を採用するところである。しかし、ヘルムホルツコイルの磁場分布はコイルの真下であるから ^3He の集中する円筒軸上での磁場は弱い。そこで、本実験では実際に用いる積層 PCF-H の構造に巻きうるコイル形状をいくつか想定して磁場分布の直接数値計算を行い、最適化を行った（図 5）。その最適コイル形状を実際に作成し、直径 1 mm のバルク円筒中の ^3He を用いて NMR 信号観測試験を行った。

(3) 低温プリアンプと極小 NMR コイルを用いた液体 ^3He の NMR 信号観測の見積もり

図 6 は、直径 1 mm の円筒容器に閉じ込められた常流動 ^3He の NMR 吸収スペクトルである。図 6 左 は低温プリアンプなし磁場最適化なしの場合で、室温部の静電容量およびゼロ検出回路のゲインの室温依存性ともなう大きな振動（ドリフト）のなかに、 ^3He の NMR 信号が埋もれている。これに対し、図 6 右は磁場最適化後のスペクトルで、ドリフトが消失し、非常に Q 値の高い信号が観測されたことがわかる。すなわち、磁場設計と低温プリアンプは、この種の微小信号計測においては極めて重要な効果をもたらすことがわかった。さらに、この観測された Bulk ^3He の信号の S/N と充填率から PCF-H 円筒中で予想される ^3He の NMR 信号の強度の見積もりを行うと、S/N 比で 120 程度となった。本番で用いる断熱消磁冷凍機は温度管理された電波暗室で行うため、さらなる精度の向上が期待できる。したがって、細い円筒容器中の超流動 ^3He の信号は図 1 の黄色の四角の領域において観測できると結論できた。

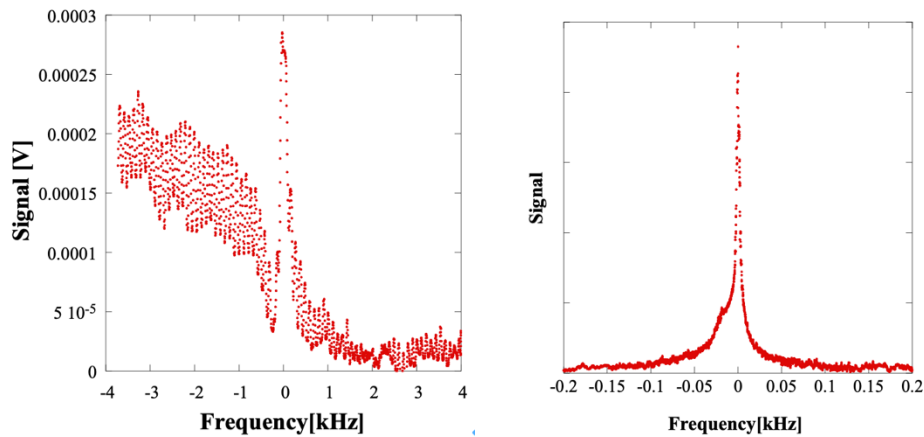


図6：バルク常流動 ^3He NMR スペクトル (左：アンプ無し, 右：アンプあり)

(4) その他の波及効果

本研究のうち、技術的側面は本質的に低温環境で得られる微小信号の計測である。本研究で得られた知識と技術を生かしていくつかの実験に共同研究で参加した。その結果、特に超流動 ^4He の作る量子乱流の観測にいくつかの貢献をした。

最後に、本計画の第2年度の終盤から第3年度にかけて、日本国内においてヘリウムガスの供給がストップするという事態が発生した。これは計画段階では予期できなかった事由で、研究者の努力で解決できるものではない。原因については、全世界的に新興国の大量消費にともなう需要供給バランスの崩壊と、天然ガス田におけるヘリウムガス分離装置の定期点検の影響などの複合的原因であるとされる。価格の高騰では済まず、学術研究拠点に対してもガスの供給が停止した。本学においても2018年度はヘリウムのリサイクル施設の在庫を消費するのみの状況にあり、数ヶ月にわたり週200L程度の液体ヘリウムの安定供給を必要とする大型の断熱消磁・希釈冷凍機システムの運用は断念せざるを得なかった。このような中でも学術研究は止めるべきではないので、本学のヘリウム供給担当の部署と協議の上、小型の希釈冷凍機を数日間を連続運転させてもらい、最低限の基礎データを蓄積することだけは認めてもらった。ただし、希釈冷凍機の最低到達温度は ^3He の超流動転移温度よりも一桁以上高温であるため、実際に超流動相の信号を観測することはできなかった。ただし、実験セルおよび冷凍システム、熱交換器はすでに完成しているため、液体ヘリウムの供給が安定化されれば、ただちに本来の研究が再開できる状況にある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計6件)

1. “Observation of Second Sound Attenuation Across a Superfluid Suction Vortex”, *Journal of Low Temperature Physics*, 2019, DOI:10.1007/s10909-019-02164-z
I. Matsumura, K. Ohyama, K. Sato, K. Obara*, H. Yano, O. Ishikawa
2. “Vortex Emission from Quantum Turbulence Generated by Vibrating Wire in Superfluid ^4He ”, *Journal of Low Temperature Physics*, 2019, DOI:10.1007/s10909-019-02143-4, H. Yano*, K. Sato, K. Hamazaki, R. Mushiake, K. Obara, O. Ishikawa
3. “Observation of the spiral flow and vortex induced by a suction pump in superfluid ^4He ”, *Journal of Physics: Conference Series*, **969**, (2018), 012002
doi:10.1088/1742-6596/969/1/01200, H Yano*, K Ohyama, K Obara and O Ishikawa
4. “Development of Cryogenic Enhancement-Mode Pseudomorphic High-Electron-Mobility Transistor Amplifier”, *Journal of Low Temperature Physics*, **187**, (2017), pp. 596–601, DOI: 10.1007/s10909-017-1763-5, T. Hirata, T. Okazaki, K. Obara*, H. Yano, O. Ishikawa
5. “Anisotropic Formation of Quantum Turbulence Generated by a Vibrating Wire in Superfluid ^4He ”, *Journal of Low Temperature Physics*, **187**, (2017) pp. 515–522, DOI: 10.1007/s10909-016-1729-z, H. Yano*, K. Ogawa, Y. Chiba, K. Obara, O. Ishikawa

6. “Control of ^4He Crystal Wetting Properties in Superfluid”,
T. Takahashi, H. Minezaki, A. Suzuki, K. Obara, K. Itaka, R. Nomura, Y. Okuda, *Phys. Rev. E*
93, 052806(1–6) (2016)

[学会発表] (計 30 件)

International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2018), Ito International Research Center,
University of Tokyo (July 25-31, 2018)

1. 小原 (野村) : Wetting Property of ^4He Crystals on a Rough Wall
2. 小原 : Development of cryogenic C-MOS and pHEMT amplifiers
3. 小原 (矢野) : Vortex Emission from Quantum Turbulence Generated in Superfluid ^4He
4. 小原 : Vorticity of suction vortex observed by second sound in superfluid ^4He
5. 小原 (矢野) : Vortex Emission from Turbulence Produced by Counterflow in Superfluid ^4He
6. 小原 (矢野) : Power dependence of vortex emission generated by vibrating wire in He-II

The 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), Swedish Exhibition
Centre/Gothia Towers, Gothenburg, Sweden (9–16 Aug. 2017)

7. 小原 (矢野) : Growth and formation of vortex tangle by vibrating wire in superfluid ^4He
8. 小原 (矢野) : Observation of spiral flow and vortex induced by suction pump in superfluid ^4He

International Conference on Ultra Low Temperature Physics (ULT2017), Heidelberg University,
Heidelberg, Germany (17–21 Aug. 2017)

9. 小原 (矢野) : Observation of vortex emission generated by counter flow in superfluid ^4He
 10. 小原 (矢野) : Growth and formation of vortex tangle by vibrating wire in superfluid ^4He
 11. 小原 (矢野) : Observation of spiral flow and vortex induced by suction pump in superfluid ^4He
 12. 小原・木村 (石川) : Rotation speed dependent NMR frequency in superfluid ^3He -A in parallel plates
- International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2016)**, Clarion Congress Hotel, Prague,
Czech Republic (10–16 Aug. 2016)
13. 小原 (矢野) : Formation of Quantum Turbulence Produced by Vibrating Wire in Superfluid ^4He
 14. 小原 (矢野) : Observation of Axial Flow and Vortex Produced by Cryogenic Motor in Superfluid ^4He
 15. 小原 : Development of Cryogenic Enhancement-Mode Pseudomorphic High-Electron-Mobility Transistor Amplifier.

Osaka City University and National Taiwan Normal University Mini-Workshop, National Taiwan ,
Normal University, Taipei City, Taiwan (23 Sep. 2016)

16. 小原・木村 (石川) : Half-quantum Vortex between Parallel Plates in Superfluid ^3He -A
 17. 小原 (矢野) : Observation of Spiral Flow and Vortex Produced by Cryogenic Motor in Superfluid ^4He
- 日本物理学会 第 74 回年次大会 (九州大学 2019 年 3 月 14~17 日)
18. 浜崎・小原 (矢野) : 超流動 ^4He 中の振動ワイヤーが生成する量子乱流の渦構造と異方性
- 日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大 2018 年 9 月 9 ~ 12 日)
19. 佐藤・小原 (矢野) : 超流動ヘリウム 4 中の振動ワイヤーが作る量子乱流の渦構造 II
 20. 浜崎・小原 (矢野) : 超流動 ^4He 熱対向流による乱流生成と渦環放出
 21. 松村 (小原) : 第二音波で観測する吸い込み渦の渦糸長密度
- 日本物理学会 第 73 回年次大会 (東京理科大学, 2018 年 3 月 22 日~25 日)
22. 木村・小原 (石川) : 平行平板中超流動ヘリウム 3-A 相における半整数量子渦の観測
 23. 佐藤・小原 (矢野) : 超流動ヘリウム 4 中の振動ワイヤーが作る量子乱流の渦構造
- 日本物理学会 2017 年秋季大会 (岩手大学, 2017 年 9 月 21~24 日)
24. 木村・小原 (石川) : 平行平板中超流動ヘリウム 3-A 相での半整数量子渦
 25. 佐藤・小原 (矢野) : 超流動ヘリウム 4 中の振動ワイヤーによる渦放出の異方性 II
 26. 浜崎・小原 (矢野) : 超流動ヘリウム 4 熱対向流が生成する渦環の検出
 27. 小原 (野村) : ^4He 結晶の濡れ特性の制御 II
- 日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学, 2016 年 9 月 13~16 日)
28. 平田・小原 : 毛細管中 ^3He の核磁気共鳴実験に向けた極小コイルと低温アンプの開発 (I)
 29. 大山・小原 (矢野) : 超流動 ^4He 回転流による渦の生成
 30. 小川・小原 (矢野) : 振動ワイヤーによる超流動 ^4He 量子乱流の生成機構

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者 なし

(2) 研究協力者 なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。