

令和 6 年 度

京 都 大 学 大 学 院 理 学 研 究 科

修 士 論 文 発 表 会

修 士 論 文 要 旨 集

2 0 2 5 年 1 月 2 7 日 (月)、1 月 2 8 日 (火)

物 理 学 第 一 分 野

物理学第一分野修士論文発表会

場所：理学研究科 5 号館 5 階・第四講義室（一部オンライン）
発表：15 分（別に質問時間 5 分程度）

2025 年 1 月 27 日（月） 9：20～17：50

目 次

1. カゴメ超伝導体 CsV_3Sb_5 の超伝導状態での新奇磁気ゆらぎ
柴田 真咲（ 9：20）・・・ 1
2. 部分空間に保護されたトポロジカル現象の解明
高見 凌央（ 9：40）・・・ 2
3. アモルファス固体に対する一般化された安定性解析
能登 滉太（10：00）・・・ 3
4. 超重い電子系 YbCu_4Ni における核磁気共鳴および核四重極共鳴
松平 広康（10：20）・・・ 4

10：40～10：50 休憩

5. ツイスト積層による単層超伝導特性の制御理論
浅野 舜（10：50）・・・ 5
6. カゴメ量子スピン液体候補物質 $\text{YCu}_3(\text{OH})_{6.5}\text{Br}_{2.5}$ におけるギャップレススピン励起
池森 駿（11：10）・・・ 6
7. 超流動 ^3He の異方的量子渦構造の研究を目指した回転断熱消磁冷凍機の開発
石川 颯人（11：30）・・・ 7
8. 磁性金属ナノ粒子におけるサイズ効果の研究
井原 大志（11：50）・・・ 8

12：10～13：30 昼休み

9. キタエフスピン液体候補物質 $\alpha\text{-RuCl}_3$ 原子層膜における非整合振動の分光イメージング測定
岩道 悠希（13：30）・・・ 9
10. 格子模型における一般化対称性
大石 翼（13：50）・・・ 10
11. ^{171}Yb 原子核スピン量子ビットのコヒーレント操作
岡本 一生（14：10）・・・ 11

12. 冷却イッテルビウム原子の超精密時計遷移測定:
光周波数コムによる周波数安定化と精密同位体シフト測定
川瀬 北斗 (14:30)・・・12

14:50～15:00 休憩

13. 構造の冗長性を取り入れた寿命に関する確率過程の研究
小橋 陸弥 (15:00)・・・13
14. 微小管をエージェントとした物質輸送能力の系統評価
佐々木 望 (15:20)・・・14
15. アゾ混合リオトロピック液晶における光誘起相転移の励起光強度・濃度依存性
池田 智之 (15:40)・・・15◆
16. 超高純度ダイヤモンドにおける光キャリアの生成と輸送
池邊 凌 (16:00)・・・16◆

16:20～16:30 休憩

17. ネマチック液晶ゲルの歪みに対する応答
米澤 和真 (16:30)・・・17◆
18. 均一な局所密度場を持つガラスの体積変形に対する応答
浦野 航 (16:50)・・・18◆
19. 一軸延伸下における液晶ゲルの動的粘弾性測定
加茂 英敏 (17:10)・・・19◆
20. グライド対称性下における非エルミート $\mathbb{Z}_4$ 表皮効果
石川 星 (17:30)・・・20◆

2025年1月28日 (火) 9:00～15:10

21. 円盤積み上げにおける力の記憶制御の定式化
鈴木 隆人 (9:00)・・・21
22. ホール抵抗測定による CsV_3Sb_5 の時間反転対称性の破れの観測
関野 雄輝 (9:20)・・・22
23. スピン三重項超伝導体 UTe_2 純良単結晶における超伝導状態のスピン磁化率の磁場依存性
高橋 侑希 (9:40)・・・23
24. シアノバクテリアの概日振動の外部環境に対する挙動とシステム堅牢性の起源
坂本 璃月 (10:00)・・・24
25. 周期境界系におけるエンタングルメントスペクトルダイナミクスによる非エルミート
バルク・エッジ対応の検出

Juan Pablo Bayona Pena (10:20)・・・25

10 : 40 ~ 10 : 50 休憩

26. 多重相超伝導体における相反・非相反電荷輸送
松本 亜巳 (10 : 50) 26
27. 局所的に空間反転対称性の破れた超伝導体における渦糸状態の理論
南出 晃宏 (11 : 10) 27
28. デュアルイッテルビウム光トラップアレイの実現：
量子操作・測定用光源の開発およびリドベルグ状態へのコヒーレント励起
横山 怜 (11 : 30) 28
29. 傾角反強磁性体 $\text{Sm}_{0.7}\text{Er}_{0.3}\text{FeO}_3$ 中の磁化ゆらぎの時空間分解測定
古川 貴也 (11 : 50) 29
30. リドベルグ励起子の非線形光学効果の観測に向けた極低温マイクロ波-光実験系の構築
中本 景大 (12 : 10) 30

12 : 30 ~ 13 : 30 昼休み

31. 予測不能性に基づく量子暗号
山田 匠梧 (13 : 30) 31
32. 自発的異方性を持つ渦格子の異常な電磁応答
横田 悠斗 (13 : 50) 32
33. $\beta\text{-RuCl}_3$ 量子細線および単層膜表面の長周期構造
吉本 宗由 (14 : 10) 33
34. 金融市場の数理モデルの平均場理論に基づく金融市場の流動性の解析
若月 大暉 (14 : 30) 34

◆ハイブリッド形式

カゴメ超伝導体 CsV_3Sb_5 の超伝導状態での新奇磁気ゆらぎ

固体量子物性研究室 柴田真咲

Abstract We conducted ^{121}Sb nuclear quadrupole resonance and ^{51}V nuclear magnetic resonance measurements on the kagomé superconductor CsV_3Sb_5 . We identified the superlattice structure in the charge density wave state, observed a coherence peak just below the superconducting transition temperature, and detected novel spin fluctuations at low temperatures in the superconducting state.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

CsV_3Sb_5 は室温では V イオンが理想的なカゴメ構造を構成しており [1]、van Hove 特異点などカゴメ金属に期待される特徴的なバンド構造を持つ。 CsV_3Sb_5 は約 94 K で電荷密度波(CDW)相に相転移し、さらに約 3 K 以下で CDW と共存する超伝導状態を示す [1]。カゴメ系で超伝導がみられる物質は希少であり、盛んに研究が行われている。CDW 転移後の結晶構造(超格子)は Star of David 型と Tri-Hexagonal 型を示唆する結果が共に報告されており、特定されていない。また超伝導ギャップ構造に関しては、 ^{121}Sb -核四重極共鳴(NQR)からはスピン一重項 s 波 [2] が報告されている一方、比熱による上部臨界磁場の磁場角度依存性からは 2 成分超伝導 [3] が示唆されている。さらに、不純物の導入によるギャップ構造の異方性の変化 [4] が報告されるなど、未だ解明には至っていない。

本研究では微視的な実験手法である核磁気共鳴(NMR)及び NQR 測定を用いて、CDW 転移後の超格子構造がどちらであるか、超伝導対称性が何であるかについて調べた [5]。 ^{121}Sb -NQR スペクトルは CDW 転移前では結晶構造に Sb が 2 サイトあることと対応して 2 本のピークが観測された。CDW 転移後には 6 本に分裂し (Figure) [5]、 $2\times 2\times 2$ の Tri-Hexagonal 型のシミュレーション結果 [6] と非常に似た形となった。このことから Tri-Hexagonal 型の超格子の実現が示唆される。また、超伝導対称性の情報を得るために核スピン-格子緩和率 $1/T_1$ を測定した。 ^{121}Sb -NQR の $1/T_1$ では超伝導転移温度直下に明瞭なコヒーレンスピークが観測され、さらに低温では指数関数的な減衰が見られた。このデータに対して s 波とカイラル d 波超伝導の場合のフィッティングを行った。両モデルにおいてコヒーレンスピークは説明されるものの、低温まで含めた $1/T_1$ の振る舞いから s 波超伝導が実現していることを明らかにした。一方、カゴメ面内方向に 0.5 T の磁場を印加した ^{51}V -NMR では 0.3 K 以下の温度領域で $1/T_1T$ が上昇した。この振る舞いは既存のどの超伝導ギャップ構造によっても説明することができず、Sb 核の $1/T_1$ では捉えられていないことから、カゴメ構造を形成する V サイト上で新奇な磁気揺らぎが発達している可能性を示唆する。

References

- [1] B. R. Ortiz *et al.*, Phys. Rev. Lett. **125**, 247002 (2020).
- [2] C. Mu *et al.*, Chin. Phys. Lett. **38**, 077402 (2021).
- [3] K. Fukushima *et al.*, Nat. Commun. **15**, 2888 (2024).
- [4] M. Roppongi *et al.*, Nat. Commun. **14**, 667 (2023).
- [5] M. Shibata *et al.* submitted.
- [6] Y. Wang *et al.*, Phys. Rev. B **107**, 184106 (2023).

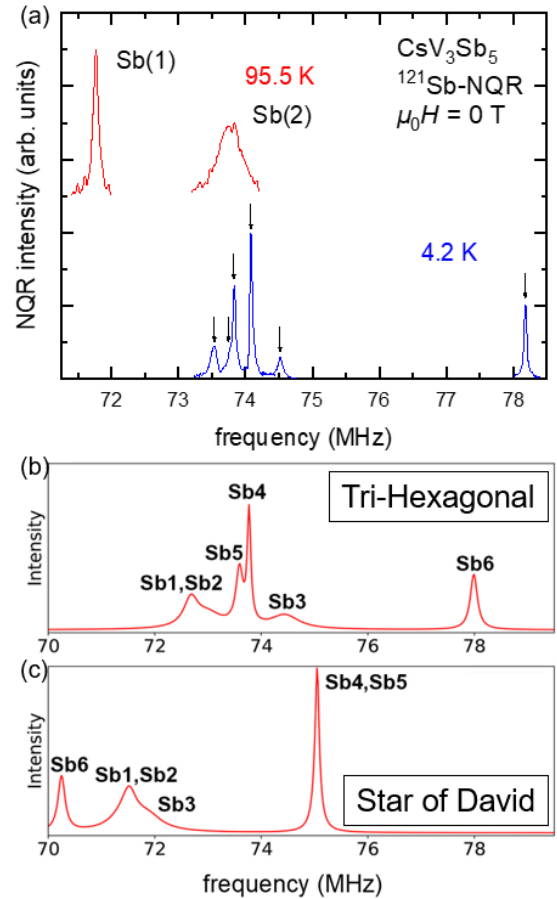


Figure: (a) NQR spectra of ^{121}Sb measured at 95.5 K ($> T_{\text{CDW}}$) and 4.2 K ($< T_{\text{CDW}}$). Arrows indicate the peak positions in the CDW state [5]. (b) Simulated spectra for the Tri-Hexagonal pattern [6]. (c) Simulated spectra for the Star of David pattern [6].

部分空間に保護されたトポロジカル現象の解明

基礎物理学研究所物性基礎論凝縮系 高見凌央

Abstract For block triangular Hamiltonians, we define invariant-subspace-protected topological numbers. In this presentation, we show the topological phenomena in block triangular matrices characterized by the topological numbers. We also discuss the effects of perturbation that breaks the triangularity of the Hamiltonian.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

ハミルトニアンがユニタリ行列でブロック対角化できる場合、そのトポロジカル相はハミルトニアンの各ブロックのトポロジカル数で定義できる[1]。一方で、通常、ブロック対角化が不可能な場合は、系全体のトポロジカル数で特徴付けられる。しかし、ブロック三角行列の場合、固有値は対角にある各ブロックにのみ依存するため、これらの対角ブロックによって、トポロジカルな特徴付けが可能であると考えられる。

本研究では、ブロック三角行列のハミルトニアンに対して対角ブロックを用いて、トポロジカル数を定義した。ブロック三角行列のハミルトニアン $H(\mathbf{k})$ はヒルベルト空間 $\mathcal{H}$ の部分空間 $\mathcal{M}$ に対して、

$$H(\mathbf{k})\mathcal{M} \subseteq \mathcal{M} \quad (1)$$

が成立し、不変部分空間 $\mathcal{M}$ を持つ (Fig. 1.)。

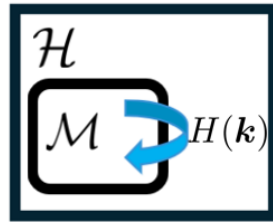


Fig. 1. The schematic diagram of a Hamiltonian $H(\mathbf{k})$ with an invariant subspace $\mathcal{M}$.

そこで、ハミルトニアンに対して、不変部分空間 $\mathcal{M}$ や不変部分空間による商空間 $\mathcal{H}/\mathcal{M}$ による制限することによって、ハミルトニアンの対角ブロックを抽出する。すると、それぞれの対角ブロックに基づいてトポロジカル数を定義できる。このようなトポロジカル数で特徴付けられる相を、不変部分空間によって保護されるトポロジカル相と定義する。

本発表では、非エルミート表皮効果[2, 3]やトポロジカルゼロモードが現れる場合について、ブロック三角行列のハミルトニアンを構成し、その固有状態のふるまいを調べることで、新たに導入したトポロジカル数によって特徴付けられるトポロジカル現象を述べる。さらに、ハミルトニアンの三角性を破る摂動が与える影響についても検討する。

References

- [1] S. Ryu *et al.*, New J. Phys. 12, 065010 (2010).
- [2] N. Okuma *et al.*, Phys. Rev. Lett. 124, 086801 (2020).
- [3] K. Zhang *et al.*, Phys. Rev. Lett. 125, 126402 (2020).

アモルファス固体に対する一般化された安定性解析

物性基礎論：統計動力学研究室 能登 滉太

Abstract Amorphous solids lack long-range structural order, making Hessian matrix analysis crucial for assessing stability. By introducing wave numbers, negative eigenvalues in the phonon modes are identified. This study examines the system's response to negative modes under quasistatic conditions, demonstrating that these modes dominate the behavior without necessarily resulting in avalanches.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

アモルファス固体とは、結晶などと異なり、規則性のない無秩序な固体のことである。特に分散粒子系を高密度に充填した場合にアモルファス固体になることが知られ、近年盛んに研究されている。微視的な観点からの理論解析には粒子配置という情報が必要であり、粒子配置を用いたヘッセ行列解析が行われている。この固有値解析によって弾塑性応答や比熱や、ガラス系特有のボゾンピークなど様々な情報を得ることができる[1]。

ヘッセ行列の固有値は、ポテンシャル形状の曲率を反映しており、安定した初期配置での非ゼロ固有値は全て正となる。非熱系の粉体などのシステムでは、熱揺らぎがないため、系がポテンシャルの局所極小値から他の極小値へと移動するような遷移が起こる場合には、固有値がゼロまたは負になる状態を経由しているはずである。しかしヘッセ行列を用いた解析正の固有値のみがある場合にしか適用できない。

一方、内部構造が無秩序な単位セルを周期的に配置することによって、波数を組み込んだ一般化されたヘッセ行列解析を行うことが提案されている [2]。この方法によって図1に示すように、粒子配置によっては有限の波数を持つフォノンモードが負の固有値を持ち得ることが示された。

本論文では、波数を組み込んだ一般化されたヘッセ行列を用いた解析により負の固有値を求め、準静的な手法の枠内で固有値の正と負に対応した摂動を加えた。これにより、負の固有値を持つ振動モードに対する直接的な応答を調べ、負の固有値の振動モードの応答が他のモードを卓越すること、および負の固有値のモードがあったとしても必ずしもアバランチのような大規模変形が起こるわけではないということを発見した。

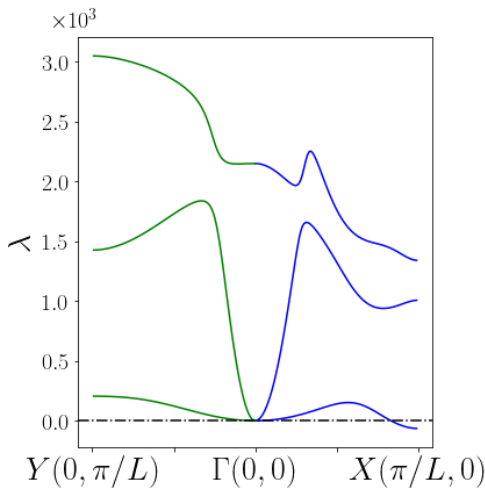


Fig. 1. 負の固有値を持つ分散関係の例。

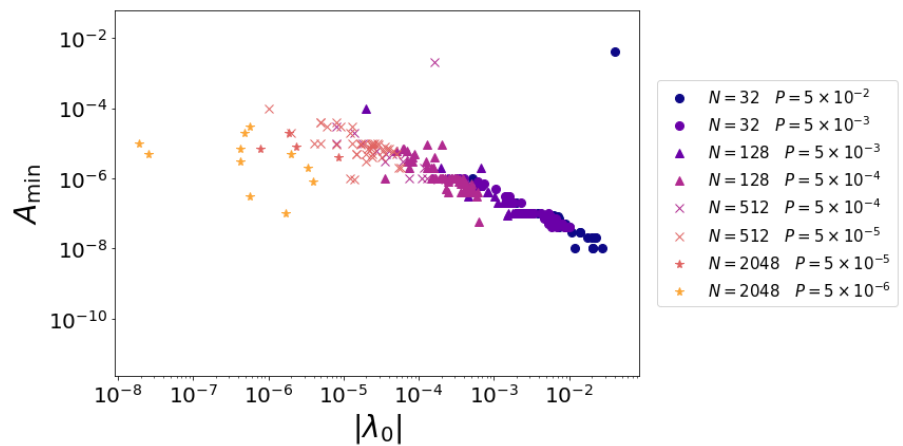


Fig. 2. 固有値の絶対値および接触点変化を誘起するのに必要な振幅の関係。N はセル内の粒子数、P は無次元化された圧力。

[1] C. Maloney, and A. Lemaitre, Phys. Rev. E. **74**, 016118 (2006)

[2] S. Schoenholz *et al.*, Soft Matter, **9**, 11000 (2013)

超重い電子系 YbCu₄Ni における 核磁気共鳴および核四重極共鳴

固体量子物性研究室 松平広康

Abstract The super-heavy fermion compound YbCu₄Ni exhibits large specific heat (7.5 J/mol K²). NMR revealed an MgCu₄Sn-type structure without site mixing. Low-temperature NQR studies showed fluctuation enhances below 1.6 K, which is consistent with the μ SR result. This fluctuation might be the primary origin of the super-heavy fermion in YbCu₄Ni.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

物質中の電子の有効質量は電子比熱係数 γ によって特徴づけられる。 γ は通常の金属において数 mJ/mol K² 程度の大きさであるが、様々な要因により γ の値は 0.1 J/mol K² から 1 J/mol K² 程度まで増大する。こうした系は「重い電子系」と呼ばれ、非従来型超伝導などとの関連から 80 年代より精力的に研究されてきた。しかし、近年いくつかの物質は 5 J/mol K² 以上の非常に大きな残留比熱を持ち、「超重い電子系 (Super heavy fermion)」と呼ばれる物質も報告されている。このような超重い電子系物質は非常に大きな残留エントロピーを持つことから、磁気冷凍材料への応用が試みられている[1]。ただし、超重い電子系の起源については未解明の点も多い。

2018 年に発見された YbCu₄Ni もこの超重い電子系に属する物質である。YbCu₄Ni の磁気比熱は冷却に伴い単調に増加し、200 mK 以下で 7.5 J/mol K² の一定値を取る[2]。YbCu₄Ni の結晶構造は図 1 に示すように 4c サイトの Cu の有無を巡って、サイトミキシングが生じている AuBe₅ 型構造[3]と生じていない MgCu₄Sn 型構造[2]の二つの構造が提唱されている。

我々は異なる手法で作成された YbCu₄Ni について結晶構造を決定するために Cu 核の核磁気共鳴測定 (Cu-NMR) を行った。Cu-NMR 測定は 16e サイトの Cu に由来するブロードなスペクトルと、4c サイトの Cu に由来するシャープなスペクトルを観測できるので、二つのサイトの Cu 原子核を区別できる。Cu-NMR により、YbCu₄Ni にはサイトミキシングが生じていない試料とサイトミキシングが生じている可能性がある 2 種類の試料が存在することが明らかになった。

さらに、YbCu₄Ni における超重い電子の起源を解明するため、1 K 以下まで核四重極共鳴測定 (NQR) を行い、磁気ゆらぎを調べた。測定はサイトミキシングを起こしている試料で行った。この試料では、核スピン-格子緩和率 $1/T_1$ は 1.6 K 以上の温度域では典型的な重い電子系の振る舞いを示し、1.6 K 以下の低温では磁気ゆらぎが急速に増大した (図 2)。この増大に伴って 0.3 K 以下で NQR 信号強度は消失し最低温まで信号は再び観測されなかった。この結果は μ SR 測定[3]とスケールし、低温で非常に大きな磁気ゆらぎが存在していることを示唆している。このような低温での磁気ゆらぎの急速な増大は本物質が量子臨界点近傍に位置し、超重い電子は量子臨界点近傍で急速に発達するゆらぎによって形成されていることが分かった。今後磁気ゆらぎの試料依存性や YbCu_{4+x}Ni_{1-x} の系から、量子臨界点の物性を明らかにしてゆく予定である。

References

- [1] Y. Shimura *et. al.*, J. Appl. Phys. **131**, 013903 (2022).
- [2] J. G. Sereni *et. al.*, Phys. Rev. B **98**, 094420 (2018).
- [3] K. Osato *et. al.*, Phys Rev. B **109**, 024435 (2024).

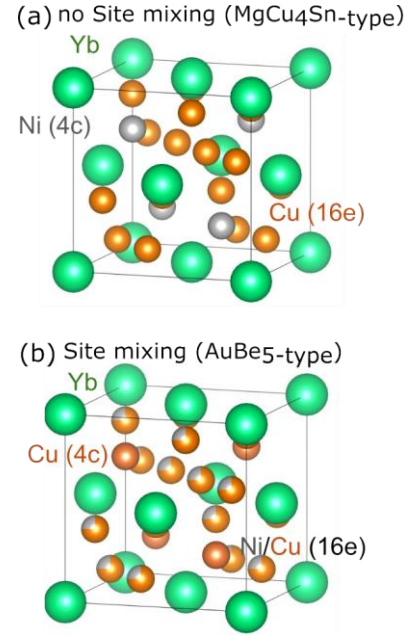


図 1. Two proposed crystal structures for YbCu₄Ni

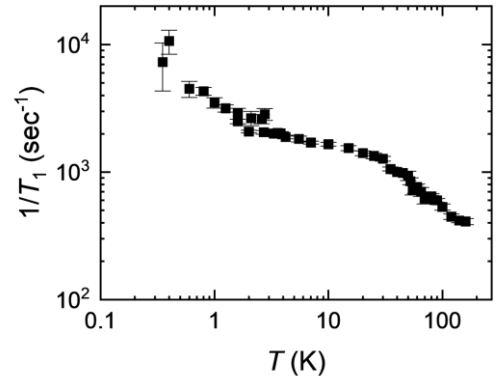


図 2. Temperature dependence of spin-lattice relaxation rate ($1/T_1$) observed by NQR.

ツイスト積層による単層超伝導特性の制御理論

凝縮系理論 浅野 舜

Abstract In this paper, we investigate the superconducting properties of twisted graphene/ NbSe₂ heterostructures. In this system, the superconducting (SC) monolayer NbSe₂ is modulated by band hybridization via the twist stacking and graphene substrate. In addition, we show the possibility of momentum-selective SC gap modulation from both experimental and theoretical viewpoint.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

二次元物質の物理学は、魅惑的な現象の宝庫である。近年、van der Waals (vdW) 物質の登場により、この分野の研究はより一層活発化している。例えば、NbSe₂ や TaS₂ のような遷移金属ダイカルコゲナイドは、バルク結晶から単層に至るまで超伝導を示すことが知られており、多くの研究者の注目を集めている。加えて、超伝導体に限らず、磁性体や誘電体など多岐にわたる物性を研究する舞台を提供している。一方、vdW 物質のもう一つのユニークな側面として、その高い機能性がある。これにより、原子層精度で定義されたブロックを組み合わせて人工的なヘテロ構造を作成することが可能となる。モアレ超格子に代表されるように、このアプローチは新しい電子状態と興味深い現象を引き起こすことができる。特に、魔法角ツイスト二層グラフェンにおける超伝導の発見[1]は、この分野の重要なマイルストーンとなり、ツイストによって初めて創発する超伝導現象に大きな注目を集めることとなった。にもかかわらず、単層超伝導体と他の材料とのツイストヘテロ構造において、単層超伝導特性がどのように変調されるかは、まだ十分には理解されていない。このような系では、ツイスト角の存在により、これまで不可能だった物性設計が可能となり、単層超伝導体における非従来の超伝導状態の設計が期待できる。

本論文では、特に、ドーパした基板グラフェン上にツイスト積層された単層 NbSe₂ における単層超伝導特性を探索する。先行研究[2]により、この二層系では、グラフェン上に超伝導が誘起されることがわかっているものの、NbSe₂ 層における超伝導状態がどのように変質するかは未解明であった。そこでまずは、超伝導秩序変数のツイスト角依存性等、NbSe₂ 層の超伝導特性を理論パートで明らかにする(図 a)。一方で、実験パートは、共同研究者によって行われた SI-STM 測定に基づき展開される。ここでは、理論研究で得られた知見をもとに、実験で観測された NbSe₂ 層のキラルな準粒子干渉と数値計算によって得られる結果を比較することで(図 b, c)、波数選択的な単層超伝導秩序変数の設計が可能であることを示す。

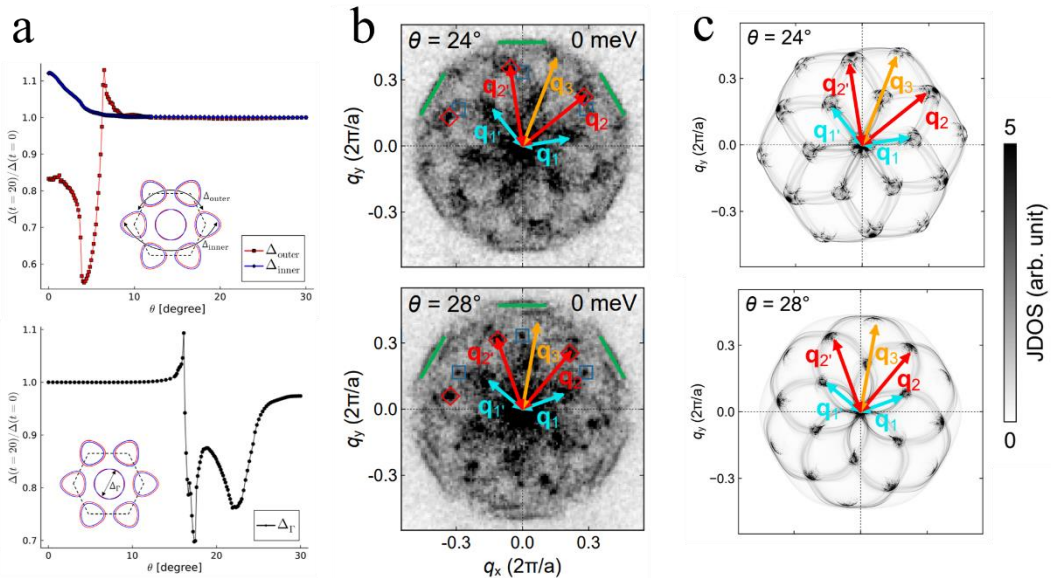


図 a. 超伝導のツイスト角 θ 依存性 図 b. 観測されるキラル QPI 図 c. 数値計算で予測される QPI

References

- [1] Y. Cao *et al.*, Nature **556**, 43-50 (2018).
- [2] Yohanes S. Gani *et al.*, Phys. Rev. B **99**, 235404 (2019)

カゴメ量子スピン液体候補物質 $\text{YCu}_3(\text{OH})_{6.5}\text{Br}_{2.5}$ における ギャップレススピン励起

量子凝縮物性研究室 池森駿

Abstract To clarify the ground state of the kagome antiferromagnet $\text{YCu}_3(\text{OH})_{6.5}\text{Br}_{2.5}$, we performed magnet torque and specific heat measurements. Torque measurements demonstrate the magnetic susceptibility remains finite at $T = 0$. The specific heat shows a T^2 -dependence. These results suggest gapless magnetic excitations with a bosonic nature.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

量子スピン液体では幾何学的フラストレーションと量子ゆらぎにより長距離秩序が抑制され、スピン励起の分数化をはじめとするエキゾチックな性質が現れる。特に、 $S = 1/2$ のカゴメ反強磁性体はその有力な舞台であるが、スピン励起のギャップの有無など基底状態の性質は長きに渡り未解決の問題となっている。これまで候補物質として最も研究されてきたハーバースミサイト $\text{ZnCu}_3(\text{OH})_6\text{Cl}_2$ は、50 mK まで磁気秩序を示さず、中性子散乱によってスピノンの連続励起が観測されている。しかし、 Cu^{2+} と Zn^{2+} のサイト間混成の影響により低エネルギースピン励起の性質が大きく変化するため、カゴメ量子スピン液体の基底状態は不明瞭なままであった。

最近発見されたカゴメ量子スピン液体の候補物質 $\text{YCu}_3(\text{OH})_{6.5}\text{Br}_{2.5}$ (YCOB) は Cu^{2+} と Y^{3+} のサイト間混成がほとんど無く、歪みの無いカゴメ格子を持つ。約 80 K の大きな反強磁性相互作用 J が存在するにもかかわらず、50 mK まで磁気秩序が確認されていない[1]。さらに、高磁場下では $1/9$ および $1/3$ 磁化プラトーが観測されており[2]、不純物の影響が小さいことが示されている。中性子散乱実験[3]では、線形分散を持つ連続励起が観測され、比熱測定の結果[1, 4]と併せて、YCOB は線形分散のスピノン励起を持つディラックスピン液体であると報告されている。しかしながら、基底状態の性質を決定づけるためにはより低エネルギー領域のスピン励起の解明が必要である。

本研究では極低温における YCOB の磁気トルク測定および比熱測定を行った。磁気トルク測定では不純物に起因する等方的な寄与が打ち消されるため、カゴメ量子スピン液体由来の本質的な磁化を測定できる。本測定により、スピンギャップが存在するとしてもその値は $J/500$ 以下であることが明らかになり、さらに磁化率は低温で温度依存性を示さず有限の値が残ることが判明した。この結果は金属のパウリ常磁性に類似しており、一見ギャップレスなフェルミオン励起の存在を示唆しているように見える。一方、比熱測定では C/T が温度に比例し残留項が存在しないという、トルク測定とは対照的な結果が得られた。フェルミ統計に従うスピノンの枠組みではこれらの観測結果を同時に説明できない。スピノンがボゾンである場合、極小磁場下における基底状態は超流動状態となり、ギャップレスな線形分散を持つゴールドストーンモードの励起が現れ[5]、 C/T は温度に比例する。さらに、超流動状態へと凝縮した $\uparrow$ スピノンが温度に依存しない有限の磁化率を担うと考えられる。このモデルに基づき、本研究で観測された磁気励起はボーズ統計に従うスピノンによるギャップレススピン励起であると示唆される。

References

- [1] Z. Zeng *et al.*, Phys. Rev. B **105**, L121109 (2022).
- [2] S. Suetsugu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **132**, 226701 (2024).
- [3] Z. Zeng *et al.*, Nat. Phys. **20**, 1097-1102 (2024).
- [4] J. Liu *et al.*, Phys. Rev. B **105**, 024418 (2022).
- [5] S. Sachdev *et al.*, Phys. Rev. B **50**, 258-272 (1994).

超流動 ^3He の異方的量子渦構造の研究を目指した 回転断熱消磁冷凍機の開発

低温物理学研究室 石川颯人

Abstract In order to study the vortex structure of superfluid ^3He , we have constructed a rotating adiabatic demagnetization refrigerator and have succeeded in cooling nuclear stage to a temperature well below the superfluid transition temperature. Then we discussed the design of the sample cell for the experiment under rotation.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

液体 ^3He は、フェルミ粒子である ^3He 原子同士が極低温下でクーパー対を組んで凝縮することで超流動性を示す。このクーパー対は、スピン三重項状態を取り p 波対称性を持つために、スピン部分と軌道部分でそれぞれ 3 つの内部自由度を持つ。この内部自由度の多さによって超流動 ^3He は、異方的なオーダーパラメータを持ち、この異方性に起因して超流動 ^3He には三つの安定な相 (A 相、B 相、A1 相) が存在する。また、このオーダーパラメータの内部自由度は境界条件や外場に支配される各種エネルギーを最小にするように空間変化し、この空間変化を texture と呼ぶ。超流動 ^3He を回転させると、量子渦構造が生じ、この渦構造も texture の一種ととらえることができる。特に ^3He -A 相では、複数の異なる渦構造が理論的研究によって解析されており、NMR 測定による共鳴周波数のシフト量を理論値と比較することで、渦構造を区別することが行われてきた[1]。

一方で、超流動 ^4He や超伝導状態の電子においては渦格子が可視化されているのに対し、超流動 ^3He においては、渦構造が直接可視化された例はなく、その観測は長年にわたる課題であった。これまでの研究として、当研究室の笠井らが平行平板内の静止した超流動 ^3He を MR I 測定することで、異なる texture をつなぐ欠陥構造の可視化に成功した例があるのみである[2][3]。

本研究では、将来的に回転超流動 ^3He の渦格子構造を MR I 測定によって可視化することを目指し、その基盤となる装置の開発を行った。まず、回転可能な核断熱消磁冷凍機を新たに設計・作成した。さらに ^3He の融解圧曲線上の温度と圧力との対応関係を利用した MCT (Melting Curve Thermometer) を用いて核断熱消磁段 (核ステージ) の冷却特性を検証した。7.5T、12mK 程度まで予冷した結果、核断熱消磁後に核ステージを約 1mK まで冷却することに成功し、核断熱消磁冷凍機の冷却特性の評価を行うことができた。核断熱消磁中のマグネットに流れる電流と MCT で測定した核ステージの温度との関係を Fig. 1 に示す。

本研究により、液体 ^3He が超流動転移を起こす極低温環境を実現する準備が整った。回転超流動 ^3He の測定に向けた具体的な準備として、固定型核断熱消磁冷凍機を用いた先行実験、予備実験の結果を参考にしつつ、MR I 測定に向けたサンプルセルの設計についても議論を進めた。

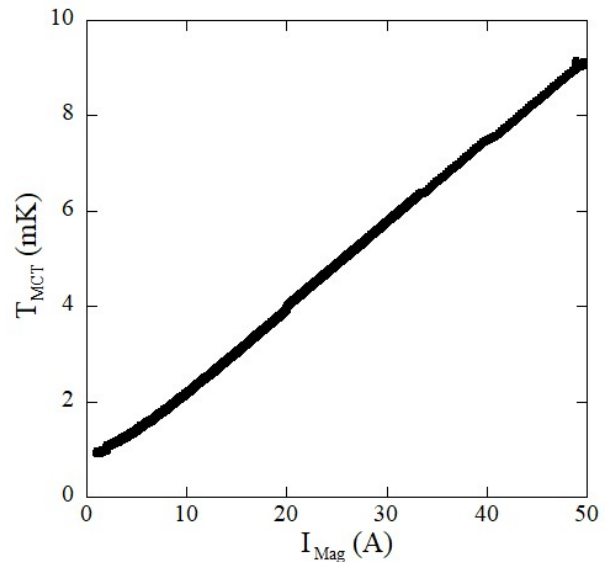


Fig. 1 MCT temperature of adiabatic demagnetization stage as a function of magnet current.

References

- [1] Ruutu, V. M., Parts, Ü. and Krusius, M. *J. Low Temp. Phys.* **103**, 331–343 (1996).
- [2] J. Kasai, D. Sc. Thesis, Department of Physics, Kyoto University (2018).
- [3] J. Kasai *et al. Phys. Rev. Lett.* **120**, 205301 (2018).

磁性金属ナノ粒子におけるサイズ効果の研究

固体量子物性研究室 井原大志

Abstract We conducted ^{195}Pt -NMR measurements on $\text{Pt}_{1-x}\text{Ni}_x$ nanoparticles to investigate substitution effect of magnetic element Ni on the quantum size effect. Our results revealed that the energy gap is suppressed by Ni substitution, which can be attributed to the enhancement of the density of states.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

金属ナノ粒子では、電子のエネルギー準位が離散的になることに起因して、低温においてバルク物質と異なる物性を示すことが期待されており、量子サイズ効果と呼ばれている。金属ナノ粒子ではエネルギーギャップが存在し、その大きさは久保亮五によって理論的に議論され、状態密度と1ナノ粒子当たりの原子数に反比例すると考えられている[1]。半導体量子ドットにおける量子サイズ効果の研究は進展しているが、金属ナノ粒子ではこの効果の影響が小さく、長年実験的観測が困難だった。

近年、 d 電子が物性を支配するPtナノ粒子におけるNMR測定により、核スピン-格子緩和率 $1/T_1$ が、 T^* 以下の低温で、バルクと異なる異常な増大を見せることが観測された[2]。この温度 T^* は久保の理論から予想されるエネルギーギャップの大きさを温度に換算した値と概ね一致している。さらに、Ptに s 電子が伝導を担うCuを混ぜると T^* は変わらないが、Ptで見られた $1/T_1$ の異常な増大が大きく抑制された[3]。この結果は、低温で観測される $1/T_1$ の異常は、フェルミエネルギー近傍の状態密度に d 電子の寄与を持つナノ粒子特有の現象であることを示している。

Niは d 電子を伝導電子に持つ磁性元素であり、PtにNiを混ぜることで状態密度が増大することが知られている[4]。そこで、 d 電子が物性を支配するナノ粒子において T^* の状態密度依存性を調べるために、Niを最大30%まで置換した $\text{Pt}_{1-x}\text{Ni}_x$ ナノ粒子において ^{195}Pt -NMR測定を行った。

Ni30%置換までのナノ粒子における磁化測定では、最低温度まで強磁性転移を示すヒステリシスループは観測されなかった。しかし、 ^{195}Pt -NMRスペクトルはNiの置換割合を増やすほどナイトシフトの絶対値が大きい方向に広がりを見せ、局所的な磁化率の増大を観測した(Fig. 1)。さらに電子相関を表すパラメーターである $\kappa(\alpha)$ の値はNi置換によって小さくなっており、強磁性的な電子相関が強まっていることも分かった。よって、Niを30%まで置換しても常磁性体のままであるが、強磁性に近づいたことを明らかにした。また、 $1/T_1$ 測定では、Ni置換の増加に伴い、 T^* の低下が観測された(Fig. 2)。久保の理論によれば、状態密度が増大するとエネルギーギャップは小さくなることが予想される[1]。したがって、温度 T^* の低下はNi置換による状態密度の増大が要因であると考えられる。一方、状態密度の変化しないPd置換では温度 T^* は変化しない[5]。これらの結果から、 d 電子が物性を支配するナノ粒子においては、 T^* は粒径だけでなく[2]、状態密度に強く依存しており、久保によって指摘された理論とよく一致していることを明らかにした。

References

- [1] R. Kubo, J. Phys. Soc. Jpn. **17**, 975 (1962).
- [2] T. Okuno *et al.*, Phys. Rev. B. **101**, 121406(R) (2020).
- [3] S. Kitagawa *et al.*, Phys. Rev. B **109**, L041408 (2024).
- [4] J. Inoue and M. Shimizu, J. Phys. Soc. Jpn. **42**, 1547 (1977).
- [5] 木下他 日本物理学会 第75回年次大会(2020) 14aF201-3.

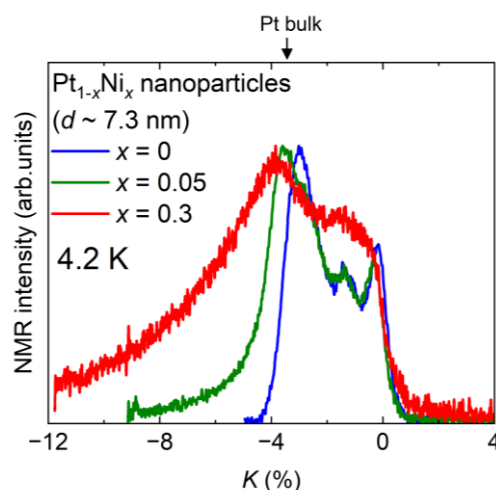


Fig. 1. NMR spectra measured against Knight shift in $\text{Pt}_{1-x}\text{Ni}_x$ nanoparticles.

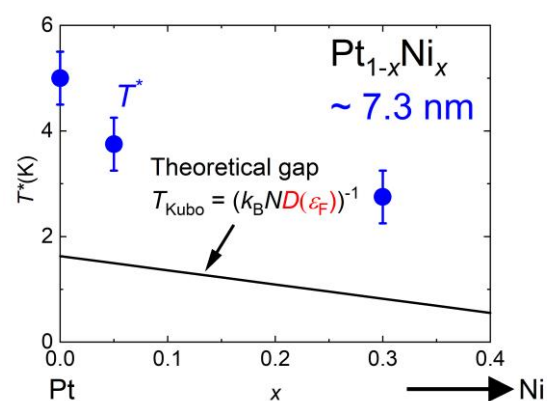


Fig. 2. x dependence of T^* in $\text{Pt}_{1-x}\text{Ni}_x$ nanoparticles.

キタエフスピン液体候補物質 α - RuCl_3 原子層膜における 非整合振動の分光イメージング測定

量子凝縮物性研究室 岩道悠希

Abstract We investigated a monolayer of α - RuCl_3 , a candidate material for the Kitaev quantum spin liquid, using STM/STS measurements. We observed incommensurate oscillations around atomic defects. The bias dependence of these oscillations cannot be explained by existing phenomena.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

量子スピン液体は強い量子揺らぎによって絶対零度でもスピンの凍結しない状態であり、分数化した励起が存在するという特徴がある。二次元ハニカム格子上にイジングスピンの定義されたモデルであるキタエフ模型は、基底状態で厳密に量子スピン液体を実現し、その励起はマヨラナ粒子で記述される[1]。マヨラナ粒子は外乱に強いトポロジカル量子計算の演算要素として注目を集めている。キタエフスピン液体の有力な候補物質としてスピン軌道モット絶縁体 α - RuCl_3 が挙げられる。 α - RuCl_3 のバルク測定では、ラマン散乱[2]、非弾性中性子散乱[3]、熱ホール測定[4]などで分数励起の兆候が報告されているものの、その解釈には依然として議論がある。理想的な二次元キタエフ模型に近い系を実現し電子状態を詳細に解明するためには、薄膜測定が必要である。そのための有効な手法が、走査型トンネル顕微鏡 (STM) を用いた局所状態密度の測定である。

α - RuCl_3 薄膜の STM 測定に関しては、剥離法によって得られたサンプルに関するいくつかの先行研究が存在する[5][6]が、分数励起の兆候を示す決定的な結果はこれまで得られていない。X. Zheng らの先行研究[5]では微分コンダクタンスが空間的に不均一であり、場所によっては金属化している。この結果は局所状態密度の測定が試料の変形の影響を大きく受けることを示すのと同時に、剥離法による純良な薄膜作製の限界を示唆している。

そこで、本研究ではパルスレーザー堆積 (PLD) 法を用いて高配向性熱分解グラファイト (HOPG) 基板上に α - RuCl_3 単層膜を作製し、STM 測定を行った。空間の各点で取得した微分コンダクタンスは一様であり、膜が平坦かつ清浄であることが確認できる。STM 像では、格子欠陥周辺に長周期の変調を観測した。この変調の波数は格子と非整合であるため、電荷密度波や格子のひずみによるものではない。波数はバイアスの極性に依存するが、各極性においては一定値であることから、準粒子干渉によるものではない。また、HOPG 基板と α - RuCl_3 単層膜の相対角を調べたところ、非対称な角度を示し、複数の相対角が存在することが分かった。これは基板との結合が弱いことを示唆し、振動現象が α - RuCl_3 特有の性質に由来する可能性を示している。他のモット絶縁体や単層膜では同様の振動はみられず、温度依存性からバルクで観測されたジグザグ反強磁性秩序の影響は否定される。以上のことから、本研究で観測された非整合振動は、キタエフスピン液体に由来する現象であると考えられる。

References

- [1] A. Kitaev, Ann. Phys., **321**(1), 2–111 (2006).
- [2] L. J. Sandilands, et al., Phys. Rev. Lett., **114**, 14, 147201 (2015).
- [3] A. Banerjee, et al., NPJ Quantum Mater., **3**, 1, 8 (2018).
- [4] Y. Kasahara, et al., Nature, **559**, 7713, 227–231 (2018).
- [5] X. Zheng, et al., Phys. Rev. B, **107**, 19, 195107 (2023).
- [6] Z. Qiu, et al., Nature Materials, **23**, 8, 1055–1062, (2024).

格子模型における一般化対称性

基礎物理学研究所・凝縮系 大石 翼

Abstract. We study generalized global symmetries in lattice models. We can construct generalized global symmetries by gauging finite subgroups on a lattice. As an application, we construct SPT phases with non-invertible symmetry in (1+1)-dimension.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

量子多体系の物理を理解する上で、系の対称性は非常に強力なツールとなり得る。例えば、対称性に誘起されるトポロジカル相などが挙げられる。そこで近年、対称性の概念が拡張され（一般化対称性）[1]、そのような一般化対称性に誘起されるトポロジカル相の研究が現在盛んに研究されている。一般化対称性とは、対称性をトポロジカル演算子の代数構造として捉え直したものである。本発表では、一般化対称性の中でも特に、非可逆対称性に着目する。非可逆対称性とは、通常の対称性とは異なり、一般に逆元が存在しない対称性のことである。クラマース・ワニエ双対は非可逆対称性の最も簡単な例の1つである。特に空間1次元系における非可逆対称性は、数学的にはフュージョン圏と呼ばれるもので記述される[2]。

一方で SPT(symmetry protected topological)相はトポロジカル相の中でも最も簡単な相であるが、高エネルギー物理学や量子情報分野と深く関連しており、重要な研究対象である。SPT 相とは、unique かつ gapped な基底状態に対する断熱的な操作に対称性による制限を課すことによって発現するトポロジカル相のことである。通常の対称性の場合、SPT 相の分類やそれを実現する格子模型の構成法が知られている[3]。しかし、非可逆対称性の場合、格子模型の例がいくつか知られているが[4]、未だ発展途上である。

本研究では、ゲージ化の議論を用いることによって、空間1次元系における非可逆対称性に守られたトポロジカル相(Non-invertible SPT)を構成する。この非可逆対称性は、ゲージ化を含む双対変換で生成され、 $\mathbb{Z}_N$ -graded なフュージョン圏で記述されることをみる。また、数学的に Non-invertible SPT は、その対称性を記述するフュージョン圏におけるファイバー関手 (fiber functor)により分類されることが知られている[5]が、この結果に物理的な考察を与える。本研究は、[4]のより一般の対称性への拡張である。

References

- [1] D. Gaiotto, A. Kapustin, N. Seiberg, and B. Willett, *Generalized Global Symmetries*, JHEP **02** (2015) 172.
- [2] L. Bhardwaj, Y. Tachikawa, *On finite symmetries and their gauging in two dimensions*, JHEP**03** (2018) 189
- [3] X.Chen, ZC. Gu, ZX. Liu, XG. Wen, *Symmetry protected topological orders and the group cohomology of their symmetry group*, Phys. Rev. B 87, 155114
- [4] S. Seifnashri, SH, Shao, *Cluster state as a noninvertible symmetry protected topological phases*, Phys. Rev. Lett 133 (11), 116601
- [5] R. Thorngren, Y. Wang, *Fusion Category Symmetry I*, arXiv:1912.02817v1 [hep-th]

^{171}Yb 原子核スピン量子ビットのコヒーレント操作

量子光学研究室 岡本一生

Abstract We investigated several important possibilities towards a fully-programable-quantum computing with cold atoms. Those include the beam-pointing stabilization for a free-space-tweezer beam instead of an optical fiber, single-site addressing by using three-dimensional-magnetic-field gradients, and a sequencer for Randomized Benchmarking to evaluate the fidelity of quantum gate.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

光ピンセットアレイは中性冷却原子の観測と制御を個別に行うことが可能な技術である. 主量子数の大きい電子軌道状態であるリドベルグ状態の原子をそのアレイに数ミクロン間隔でトラップすると, 原子間でリドベルグブロックードとよばれる相互作用がはたらき, 量子もつれ状態の生成が可能となる. こうした利点から, この系は量子シミュレーションや量子計算, 精密測定に対して有力なプラットフォームとして注目されている[1]. 特に量子計算の文脈では, この量子もつれ状態は2量子ビットゲート操作に活用される[2].

我々の研究室ではアルカリ土類様原子であるイッテルビウム (Yb) 原子を用いた量子計算機の開発を行っている. 従来量子計算によく用いられているルビジウムのようなアルカリ原子と違い, 価電子を2個持つ原子である Yb 原子には寿命の長い準安定状態 3P_0 , 3P_2 が存在することとリドベルグ状態のトラップが可能であるという利点がある. しかし, 量子ビットの数はまだ少なく, 量子計算機としての実用化にはまだ遠い. そこで, 量子ビット数増大につながるように, 光強度ロスの少ない光のファイバーレスな輸送と3次元アレイにおける単一サイトアドレスを可能にする磁場勾配の条件探索とゲート操作の精度評価の指標となる Randomized Benchmarking (RB) [3]にむけて取り組んだ.

本研究では, 自由空間輸送のネックとなる, 光源の出射角度不安定さの改善に pointing stabilizer を用い, 角度の寛容さを2地点でのビームを観測することで評価した. また, 遷移波長が分離するほどにゼーマンシフトが十分な大きさをもつのに必要なバイアス磁場とヘルムホルツ型のコイル電流の大きさについて考察した (Fig. 1(a)).

最後に, ゲート操作の評価指標となる RB の実装に向けて, クリフォードゲート群を $X(\pi/2)$ と $Z(\pi/2)$ に変換して2種類のゲート操作用のパルスを送るようなシーケンスを組み立てた (Fig. 1(b)) のち, 将来的な実験における実装に向けて考察した.



Fig.1 (a) z 軸方向のバイアス磁場が 2G のときの 7×7 が 10 層な原子アレイの各 mF のゼーマンシフト分布. (b) クリフォードゲートを $X(\pi/2)$, $Z(\pi/2)$ ゲートに変換した場合のパルス波形を示す実際の vi の様子. 赤が Z ゲート, 青が X ゲートのパルス.

References

- [1] A. Kaufman and K-K. Ni, Nature Physics **17**, 12, 1324-1333(2021).
- [2] M. Saffman et. al., Rev. Mod. Phys. **82**, 2313 (2010).
- [3] E. Magesan et. al., Phys. Rev. Lett. **106**, 180504(2011).

冷却イッテルビウム原子の超精密時計遷移測定： 光周波数コムによる周波数安定化と精密同位体シフト測定

量子光学研究室 川瀬北斗

Abstract By developing a highly stable laser system based on an optical frequency comb, we successfully conducted high-resolution spectroscopy on two ultranarrow clock transitions, $4f^{14}6s^2\ ^1S_0 \leftrightarrow 4f^{13}5d6s^2\ (J=2)$ and $4f^{14}6s^2\ ^1S_0 \leftrightarrow 4f^{14}6s6p\ ^3P_2$ in neutral ytterbium, which enables us to search for new physics beyond the Standard Model through precise measurement of isotope shifts of these transitions. © 2025 Department of Physics, Kyoto University

標準模型は素粒子物理学における現象のほとんどを説明できるモデルである。一方で標準模型では説明できない現象があることも知られている。このような新物理は高エネルギー加速器実験[1]等の手法で探索が行われてきた。これらの手法とは相補的なアプローチとして、原子・分子・イオンを用いて新物理を通じた量子状態の微小な変化を精密測定により検証する研究が盛んに行われている。特に近年 King の線形性と呼ばれる、異なる光学遷移間における同位体シフトの線形関係を検証することで電子・中性子間に力を媒介する新粒子を探索する手法に注目が集まっている[2]。これは新粒子が存在する場合、各同位体で中性子の数が異なることで新粒子による相互作用の差が同位体シフトを引き起こすためである。この新粒子は標準模型・一般相対論で記述される 4 つの力(電磁力、重力、強い力、弱い力)の枠におさまらない新規の相互作用である。

そのような背景のもと、本研究室ではイッテルビウム (Ytterbium, Yb) 原子を用いた超精密同位体シフト測定を行っている。Yb 原子は超狭線幅光学遷移 (Fig. 1) を複数持ち、安定同位体が豊富に存在するという点で極めて重要な利点を持っている。これまでに本研究室では $4f^{14}6s^2\ ^1S_0 \leftrightarrow ^3P_0$ 遷移の同位体シフト測定を行った[3]。この測定で使用した励起レーザーの周波数安定化には ULE (Ultra Low Expansion) 共振器に安定化したレーザーを使用した。

本研究では、異なる波長の時計遷移の分光のための高安定な光源を得るために、光周波数コムによる周波数安定化システム[4]を開発し、超狭線幅遷移波長の基本波である 862 nm, 1014 nm の周波数安定化に成功した。これは等間隔な周波数成分を持つ光周波数コムの性質を利用し、高安定なマスターレーザーの周波数安定度を他のレーザーに移行するシステムである (Fig. 2)。これにより、高い周波数安定度を持つ ULE 共振器を複数準備する必要がなく、拡張性があるという利点がある。また、この開発した光源を用いて超狭線幅遷移である $4f^{14}6s^2\ ^1S_0 \leftrightarrow 4f^{13}5d6s^2\ (J=2)$ 遷移と $4f^{14}6s^2\ ^1S_0 \leftrightarrow 4f^{14}6s6p\ ^3P_2$ 遷移について分光実験を行った。

我々が新たに直接励起に成功した $4f^{14}6s^2\ ^1S_0 \leftrightarrow 4f^{13}5d6s^2\ (J=2)$ 遷移[5]については特に、基本的な性質を明らかにするためにラビ振動の観測、励起状態の寿命の測定を行った。また、基底状態・励起状態間の原子間相互作用に着目し、フェッシュバハ共鳴の観測に成功した。そして線幅 100 Hz 未満の励起スペクトルの測定に成功し、魔法波長である 797.2 nm の光格子[5]を用いて不確かさ 10 Hz 未満で超精密同位体シフト測定に成功した。

$4f^{14}6s^2\ ^1S_0 \leftrightarrow 4f^{14}6s6p\ ^3P_2$ 遷移については、まず基底状態と励起状態の分極率の差を波長を変えて測定することにより魔法波長を決定した。また同位体シフト測定に向けて、決定した魔法波長で 3 次元光格子を構成し狭線幅分光に成功した。

本研究は、超精密同位体シフト測定による新物理探索に向けた重要な一歩である。

References

- [1] P. A. Zyla *et al.*, Review of Particle Physics 2020, 083C01 (2020).
- [2] J. C. Berengut *et al.*, Phys. Rev. Lett. 120, 091801 (2018).
- [3] K. Ono *et al.*, Phys. Rev. X 12, 021033 (2022).
- [4] A. Yamaguchi *et al.*, Applied Physics Express 5, 022701 (2012).
- [5] T. Ishiyama *et al.*, Phys. Rev. Lett. 130, 153402 (2023).

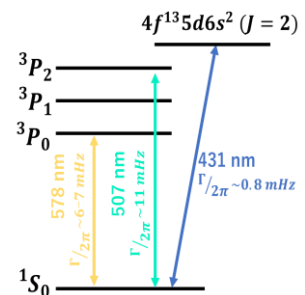


Fig.1. Energy level diagram of Yb atom.

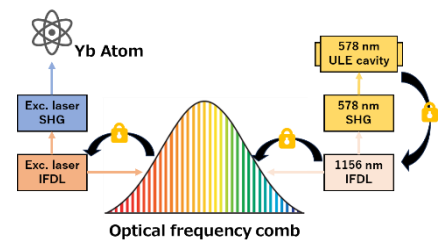


Fig.2. Frequency stabilization system using an optical frequency comb.

構造の冗長性を取り入れた寿命に関する確率過程の研究

統計物理・動力学研究室 小橋陸弥

Abstract This study demonstrates the emergence of non-analytic behavior in the probability of system functionality within the dynamics of two-state systems in reliability theory. Furthermore, it confirms that similar results are obtained even when the assumption of independent and identical distributions of component failure times is relaxed.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

身の回りにある電化製品や建物といったシステムは、様々な部品から構成されている。システムが機能する確率を、構成部品や構造の知識から解析する分野を信頼性理論[1]という。信頼性理論の発展により、システムの故障と各種故障の関係を木構造で説明する故障木解析などの工学的に重要な手法が確立され、今日の安全な製品が実現している。特に貢献した理論的基盤として、2状態システムの枠組みがある[2]。2状態システムの数学的構造は、順序が定義された論理値と論理代数だけで与えられている為、部品・構造・システムという関係を表す体系として非常に一般的なものとなっている。よって、2状態システムの枠組みのもつ普遍的な性質の研究は、これまで物理学であまり扱われなかった物の構造に対して基礎的考察を与えられる。

相転移をはじめとして、システムサイズ無限大の極限で物理量に非解析的な振る舞いが現れる現象は、統計物理において重要な考察対象とされてきた。2状態システムにおいても、部品数無限大極限でシステムが機能する確率が非解析的になることが知られている[3]。特にこの先行研究では、各部品が機能する確率を与えたときの静的な振る舞いを考察している。本研究では2状態システム上のダイナミクスを考え、その場合においてもシステムが機能している確率に非解析的な振る舞いが出現することを示す。また先行研究にある各部品の故障時間分布が独立同一性であるという仮定を外した場合のダイナミクスにおいても同様の振る舞いが得られることも確認した。

References

- [1] R.E.Barlow and F.Proshan, Society for Industrial and Applied Mathematics (1996)
- [2] 大鑄史男, "システム信頼性の数理.", コロナ社 (2019)
- [3] Moore et al., Journal of the Franklin Institute 262.3, 191-208 (1956)

微小管をエージェントとした 物質輸送能力の系統評価

時空間秩序・生命物理研究室 佐々木望

Abstract Nature organisms construct collective motion and improve their abilities non-linearly. In this study, we constructed the collective motion of microtubules transporting tracer particles. By observing both microtubules and particles, we confirmed a non-linear effect of diffusion ability by the collective motion. This result pioneers a new diffusion model.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

自然界に存在する自律的に動く生物の中には集団を形成して非線形的に能力を創発するものが存在する。このような集団形成のメカニズムや集団の相互作用によって創発される能力の機構解明は、アクティブマター分野の重要な研究課題の一つである。アクティブマター分野は自律的に動く個体と個体同士の相互作用が生む非平衡構造や非平衡ゆらぎを明かすことで、集団運動による生物の生存・繁殖といった生命現象の解明や、細胞内の非平衡現象を扱った医療分野への応用も期待される。非平衡現象を物理の枠組みで解釈することで、非平衡現象の発生機構を明らかにすることができる[1]。集団運動が生む非線形な能力の一つとして物質の輸送・拡散能力がある。例えば、蟻は群れることで単体では輸送不可能な荷物を輸送する能力を得る [2] ことや、細胞集団が正規分布に従わない変位分布を持った粒子の拡散を行う実験系の構築ができる[3]ことが示されている。しかしながら、実験室系で相互作用の制御された集団運動を構築し、拡散能力の向上や新奇な拡散モデルの創発を行うことは重要だが、相互作用の制御と拡散能力の付与を同時に達成した実験系の構築は困難であった。

本研究では、細胞骨格の微小管(MTs)と微小管を分子スケールで駆動する分子モーターのキネシンからなる微小管滑走系を用い、滑走系中にメチルセルロース(MC)を導入することで枯渇力を用いた微小管の集団運動を構築した(図1)。微小管濃度やメチルセルロース濃度を調整することで枯渇力の制御を行い、微小管の配向を揃える相互作用や集団運動の制御も可能となる。制御された集団が持つ拡散能力を明らかにするために、相補的なDNAを微小管とトレーサー粒子のビーズに修飾し、微小管の運動とビーズの拡散の様子を蛍光顕微鏡で観察した。ビーズは微小管の力をDNA相互作用を介して受けることで拡散を始め、微小管とのDNA相互作用を失うとビーズは待機状態になるが、再び微小管から力を受けることで拡散を再開する(図2)。実験結果の解析により、メチルセルロース濃度 0.0 % の場合ビーズは短い緩和時間では超拡散を示すが、長い緩和時間ではブラウン運動を示す。一方で、メチルセルロース濃度 0.3 % の場合には、緩和時間に関わらずビーズは超拡散を示すことがビーズと微小管の解析よりわかった(図3)。本研究より、自律的に動く個体同士の配向を揃える相互作用は拡散を制御するパラメーターの一つであることが示され、非平衡ゆらぎとゆらぎの制御をもとにした拡散モデル構築への貢献が待される。

References

- [1] Popkin, G., Nature **529**, 16-18 (2016).
- [2] Feinerman, O., Pinkovitzky, I., Gelblum, A. et al. Nature Phys. **14**, 683-693 (2018).
- [3] Großmann, R., Bort, L.S., Moldenhawer, T., et al. Phys. Rev. Lett. **132**, 088301 (2024).

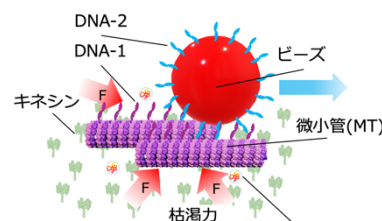


図 1. 実験の模式図

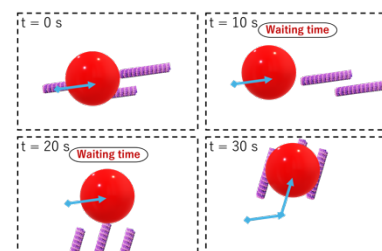


図 2. ビーズの拡散の模式図

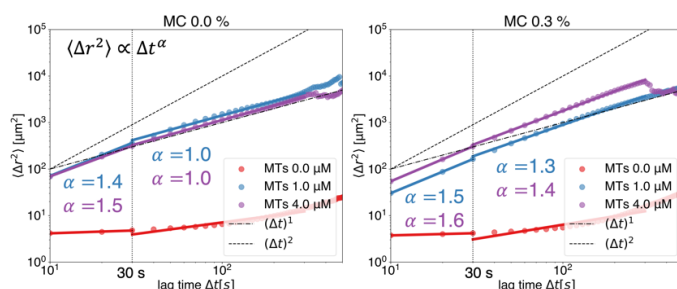


図 3. ビーズの平均二乗変位(MSD)。微小管(MTs)濃度ごとに色を分けてプロットした。(左)メチルセルロース(MC)濃度 0.0 %。(右)MC 濃度 0.3 %。

アゾ混合リオトロピック液晶における光誘起相転移の 励起光強度・濃度依存性

ソフトマター物理学研究室 池田智之

Abstract We study the photo-induced nematic-isotropic transition of azo-doped lyotropic liquid crystal. We measure the effect on the transition when the intensity of the excitation light or the electric charge of the surface of micelles is altered, and discuss the origin of the effect.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

【序】アニオン性界面活性剤SDS(sodium dodecyl sulfate)とカチオン性界面活性剤

DTAB(Dodecyltrimethylammonium Bromide)の混合水溶液は、低濃度でもネマティック(N)相を発現し、温度上昇により等方(I)相に転移する。この相転移はミセルの大きさの変化で駆動される。また、この混合水溶液にアゾ化合物を添加しUV光を照射すると、ミセルに取り込まれたアゾ分子がトランス-シス光異性化を起こすことでミセル表面の自発曲率が変化し、温度上昇時と類似のミセル形状変化やN-I相転移が起こる。

【研究目標】本研究では、励起光照射によるN-I相転移は光強度やミセル表面の電荷密度にどのように依存するのか明らかにし、その起源を探ることを目標とする。

【実験手法】本研究では、主要な実験手法として動的光散乱法(DLS)を用いた。試料として、SDS/DTAB水溶液および同溶液にアゾ化合物Disperse red 1を添加したものを使用した。まず、一定強度のUV光を十分な時間照射しながらミセルの流体力学半径の温度依存性および相転移温度を調べた。また、ミセル表面の電荷密度を変化させるためにSDS/DTAB混合比の異なる試料について、アゾ分子添加や光異性化による相転移温度の変化を偏光顕微鏡で確認した。

【結果】励起光が強くなるにつれて、ミセルの形状変化が起こる温度域や相転移温度が最大1-2℃程度下がることを確認した。Fig.1で確認できる相転移点近傍での緩和時間の増加は、ミセルの大きさの増大を示すもので、UV強度によってミセルの形状変化の温度依存性が異なることがわかる。また、光強度が閾値に達しない場合は温度域や転移温度の変化が小さいことが分かった(Fig.2)。また、電荷密度の小さい試料において、アゾ分子無添加のSDS/DTAB水溶液の状態では二次転移する一方でアゾ分子を添加することで一次転移が見られるようになり、光照射によって転移開始点が大きく(3-4℃程度)下がった。

【考察】相転移温度の励起光強度依存性については、ミセル中のシス異性体アゾ分子の数量や割合に閾値があり、閾値を超えない場合はアゾ分子が異性化してもミセルの形状変化には至らないと考えられる。ただし、そもそも閾値以下の光強度に対して異性化過程の平衡がトランス異性体側で安定したままである可能性もあり、結論には光強度と異性体の存在比の関係を検証する実験を要する。

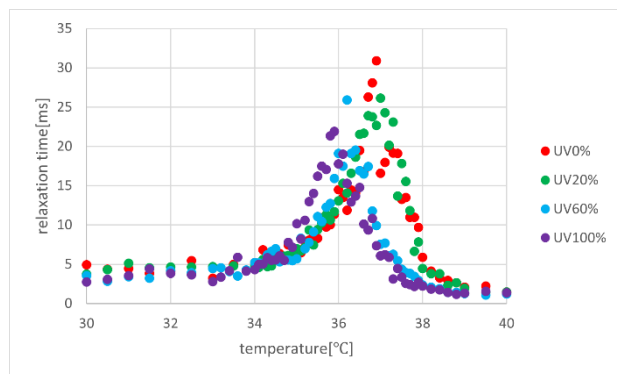


Fig.1: Temperature dependence of relaxation time.
Percentages mean the intensities of UV excitation light.

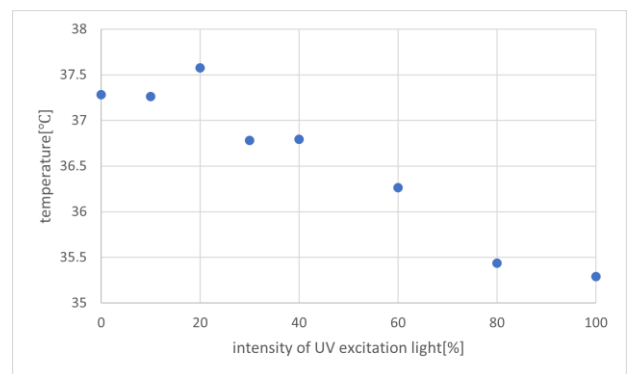


Fig.2: UV intensity dependence of the critical point.

超高純度ダイヤモンドにおける光キャリアの生成と輸送

光物性研究室 池邊 凌

Abstract We have successfully obtained absorption spectra of diamond beyond the band edge by using a self-standing film of 12 μm thickness, fabricated by the lift-off method. The production ratio of excitons to free carriers and the deformation potential for excitons are extracted, which explains the exceptionally high carrier mobility limited by the acoustic-phonon scattering mechanism in diamond.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

真性ダイヤモンドは 5.5 eV のワイドギャップを持つ間接半導体であり、また、バルク半導体の中で最高の移動度[1]を持つことから、深紫外検出器としての応用が期待されている[2, 3]。深紫外光による光励起のもとでは、自由キャリア対だけでなく電子と正孔の束縛対である励起子が生成される。ダイヤモンドの励起子束縛エネルギーは 93 meV [4]と室温のエネルギー尺度に比べて大きいため、室温においても自由キャリアと励起子が共存する。そのため、自由キャリア対と励起子の生成比や輸送過程に関わる変形ポテンシャルの大きさを決定することには意義があり、これらの値は吸収スペクトルを通して決定できると考えた。しかし、ダイヤモンド単結晶を厚さ 50 μm 未満に機械研磨することが困難なことから、真性ダイヤモンドにおいて自由キャリア対を生成する領域(光子エネルギー 5.61 eV 以上)の吸収スペクトルは計測例が無かった。

本研究では、リフトオフ法を用いて作製された厚さ 12 μm の高純度 CVD ダイヤモンド自立膜(北海道大学金子研究室より提供)を用いた。重水素ランプを光源として温度 7.5 K で得られた吸収スペクトルを Fig. 1 に、黒破線で囲まれた横波光学(TO)フォノン側線の立ち上がり付近の微分スペクトルを Fig. 2 に示す。光子エネルギーを E として、 $E^{1/2}$ に依存する励起子由来の吸収(図中の破線)と $E^{3/2}$ に依存する自由キャリア由来の吸収(一点鎖線)の和(赤点線)は、実測したスペクトル(実線)とよく合っている。このように、間接ギャップ端を超える 5.9 eV までの吸収スペクトルを観測し、励起子による吸収成分と切り分けて、真性ダイヤモンドでの自由キャリア由来の吸収強度を決定することに初めて成功した。Fig. 2 では、電子バンドの異方性等による生じる励起子の微細構造分裂と均一広がりが確認できる。この均一広がり温度依存性を解析することで、励起子の変形ポテンシャルとして 17.5 eV の値を得た。さらに、自由キャリアの変形ポテンシャルの値と比較することで、移動度の起源となる励起子のバンド間散乱とバンド内散乱の比率がおおよそ 1 : 2 であることを見積もった。

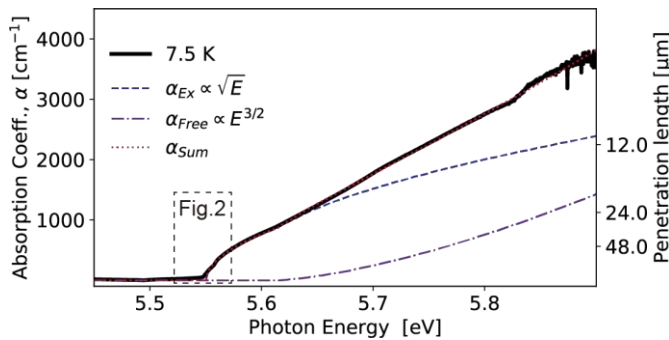


Fig. 1. Absorption spectrum of 12 μm -thick self-standing diamond film at 7.5 K.

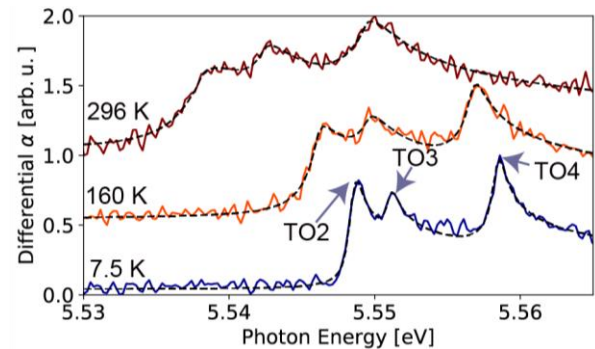


Fig. 2. Energy derivative of absorption spectra measured and fitted for different temperatures.

References

- [1] K. Konishi, I. Akimoto, H. Matsuoka, J. Isberg, and N. Naka, Phys. Rev. Appl. **17**, L031001 (2022).
- [2] M. Liao, Functional Diamond **1**, 29 (2021).
- [3] F. Mendoza, V. Makarov, B. R. Weiner, and G. Morell, Appl. Phys. Lett. **107**, 201605 (2015).
- [4] T. Ichii, N. Naka, and K. Tanaka, Phys. Rev. B **104**, 205201 (2021).

ネマチック液晶ゲルの歪みに対する応答

ソフトマター物理学研究室 米澤 和真

Abstract. We measured the relaxation rate of a nematic liquid crystal gel film as a function of deformation using dynamic light scattering (DLS) at various scattering vectors. At all scattering vectors, the relaxation rate increases with deformation. At small deformation, the relaxation rate depends on the scattering vector, but at large deformation, it is constant.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

【序】UV 硬化性モノマーと液晶の混合溶液を光重合し、ゲルネットワーク中にネマチック液晶が一様に内包されたネマチック液晶ゲルフィルムを作製した。フィルムにダイレクタに垂直な一軸変形 λ を与え、動的光散乱法 (DLS) により液晶の配向揺らぎの緩和時間 τ を測定した。各 λ において DLS の散乱角を変化させて緩和周波数 $1/\tau$ の分散関係も測定した。

【試料】液晶膨潤溶媒の 7CB (85 mol%)、液晶アクリレートモノマー A6OCB (6.5 mol%)、架橋剤の RM257 (1.5 mol%)、高分子鎖の柔軟性を高めるための butyl acrylate (6.5 mol%)、光重合開始剤の DMPAP (少量) を混合した溶液 (以下、試料と呼ぶ) を用いた。試料はフィルム作製用セル(125 μm)に封入し、23 $^{\circ}\text{C}$ で2時間紫外線(365nm) を当て重合した。

【結果】Fig.2 に純粋な 7CB、重合前の混合試料 (sol)、変形印加前の重合試料 (gel) の緩和周波数の分散関係を示す。いずれも緩和周波数($1/\tau$)が q^2 に比例していた。一方、Fig.3 の各 λ における重合後試料の分散関係では λ が大きくなるにつれて $1/\tau$ の波数依存性はなくなっていった。Fig.4 に各散乱角での λ と $1/\tau$ の関係を示す。いずれの散乱角でも λ の増加とともに $1/\tau$ は上昇し、 $\lambda \sim 1.11$ より大きい領域では一定となった。

【考察】配向揺らぎの緩和周波数 $1/\tau$ と散乱ベクトルの波数 q には配向弾性定数を K 、回転粘性定数を η として $1/\tau \propto (K/\eta)q^2$ の分散関係がある。Fig.2 において試料に依存して分散関係の傾きが変化していることから、架橋剤やモノマー、ゲルネットワークが液晶の配向弾性や回転粘性に影響を与えていると考えられる。また、Fig.3、4 から λ と $1/\tau$ には結合があると考えられる。この結合には以下の2つが考えられる。一つは λ と液晶の配向弾性や回転粘性との結合である。 λ の増加に伴い K や η が変化し分散関係の傾きが小さくなった可能性がある。先行研究によると分散関係における切片の増加はゲルネットワークによる復元力により説明できる。しかしこの場合、本実験の結果ではゲルネットワークからの復元力が波数依存することになるため、より詳しい実験による確認が必要である。もう一つの結合機構は、液晶の配向揺らぎの閉じ込め効果である。 λ が大きくなるにつれてネットワークが配向秩序の長距離連続性を切断した結果、波数に依存しない高い周波数の配向揺らぎが観測されたと考えられる。

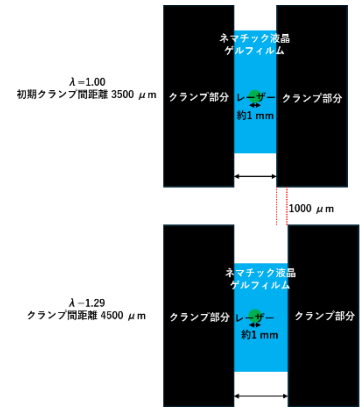


Fig. 1 Schematic diagram of deformation λ

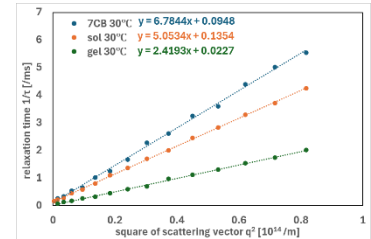


Fig. 2 Relaxation rate of 7CB, sol, gel at 30 $^{\circ}\text{C}$ as a function of q^2

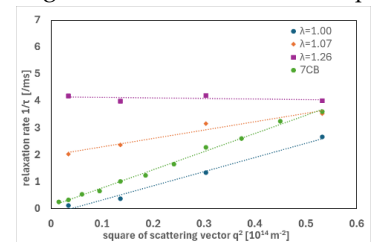


Fig. 3 Relaxation rate as a function of the q^2 at various deformation

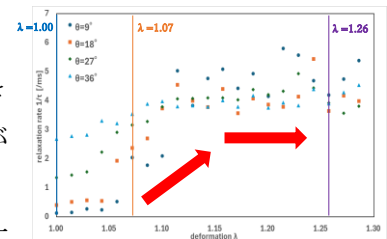


Fig. 4 Relaxation rate as a function of deformation λ at various scattering vectors

均一な局所密度場を持つガラスの体積変形に対する応答

ソフトマター物理学研究室 浦野 航

Abstract In colloidal glasses, a uniform density is known to suppress ageing. Here, we deformed density uniform glasses to study the relationship between deformation-imposed structural inhomogeneities and particle displacements. Non-affine displacements occurred collectively in high virial pressure regions, while thermal displacements were suppressed up to higher strains than conventional glasses.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

ガラスとは、無秩序な内部構造をもつ非平衡な固体の総称である。時間の経過とともにエイジングと呼ばれる粒子変位を起こし元々期待された物性は次第に損なわれていく為、エイジングのメカニズムや材料安定性に関わる構造特性の解明が求められている。その重要な手掛かりとして「超安定ガラス」[1]（物理蒸着等により通常の過冷却より安定性が優れたガラス）の存在が挙げられるが、構造緩和を阻止するメカニズムは未だ解明されていない。我々の研究グループでは、数値計算上で密度場を人工的に均一化した剛体球ガラス（Uniform Glass、以後 UG）で粒子変位が強く抑制されることを見出した[2]。本研究では UG を機械的に変形した際の挙動に着目する。変形後のエネルギー緩和に伴う non-affine 変位、また緩和後の低温での粒子変位を解析することで、変形により付与される構造的な不均一性と粒子変位・緩和の相関を求め、ガラスの安定性メカニズムに言及することが目的である。

単分散準剛体球粒子を急冷し作成したガラス（Conventional Glass、以後 CG）に対し、粒径の微調整を施す先行研究に準じた手法[2]で、均一密度場かつ弱多分散な UG 相を生成した。比較対象として同一粒径分布を持つ CG（reCG）も用意した。本研究では体積一定の剪断変形（Shear）を考えた。変形後の残留応力を緩和し、non-affine 成分とガラス転移点より低い温度での粒子変位を測定した。

まず、UG と reCG の変形後緩和時の粒子変位の non-affine 成分を比較した。reCG においては先行研究[3]と同様に変形量に対し線形に non-affine 成分が増加するのに対して、UG では 0.1%以下の shear まで non-affine 成分量は一定の値を示し、reCG より大きな歪みで上昇が確認された。更に熱浴に結合させると CG では比較的小さな歪みでも断続的な変位が見られたのに対し、UG では 5%未満の shear まで変位がほとんど観測されなかった。隣接粒子間との応力のバランスといった、安定性の原因となる局所空間構造の特徴が変形の構造緩和を経ても維持されていると考えられる。

更に変形により誘起される non-affine 変位と局所構造の関係を検証した。[4]では局所密度と変位の相関が示唆されるなか、変形下での緩和時の non-affine 変位と局所密度の間に相関はなかった。一方で、non-affine 変位は局所ビリアル圧力と相関をもち、reCG より空間的に局在していることがわかった。以上より、ネットワーク構造などを一切持たないにも関わらず UG は低変形率領域において弾性体のような挙動を示し、より大きな変形に対しては、局所応力の大きな箇所から内部構造変化が起こることが判明した。局在化した圧力上昇する箇所の構造的な特徴から「安定なガラス」の条件を再度研究することが今後の課題となる。

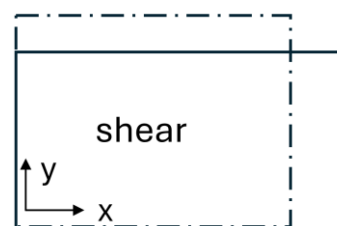


Fig. 1 Image of deformation

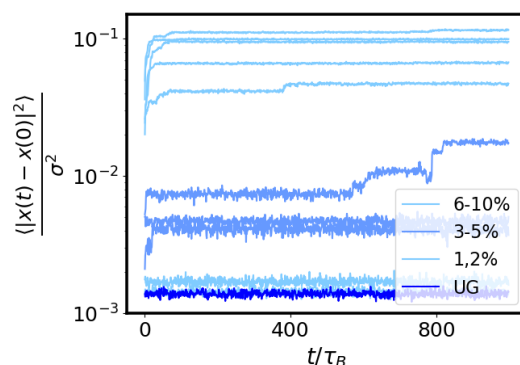


Fig. 2 Thermal displacements in sheared UG

References

- [1] C. Rodriguez-Tinoco, et al. , 2022, Riv. Nuova Cimento, 45, 325-406
- [2] T. Yanagishima, J. Russo, R. P. A. Dullens, H. Tanaka, 2021, Phys. Rev. Lett., 127, 215501
- [3] C. E. Maloney, M. O. Robbins., 2008, J. Phys.: Condens. Matter, 20, 244128
- [4] T. Yanagishima, J. Russo, H. Tanaka, 2017, Nat.Comm., 8, 15964

一軸延伸下における液晶ゲルの動的粘弾性測定

ソフトマター物理学研究室 加茂 英敏

Abstract. We studied the viscoelastic properties of liquid crystal gel produced by the linear elasticity of polymer networks coupled with the Frank elasticity of the mesogens and swollen liquid crystal under uniaxial tensile extension. First, we constructed a handmade measuring apparatus of the dynamic viscoelasticity of the film under uniaxial static strain. Next, we investigate the increase of storage modulus and loss modulus under uniaxial static tensile extension.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

【序】メソゲンを側鎖に有する高分子液晶エラストマー(LCE)では、高分子ネットワークの線形弾性に対して、側鎖のメソゲンが形成するネマティック配向秩序の配向弾性が結合することで、非線形な弾性が発現することが広く知られている。そこで、LCE を低分子液晶で膨潤させた液晶ゲル(LCG)を作製し、メソゲンおよび低分子液晶の配向弾性が高分子ネットワークの粘弾性に与える効果について、研究を行った。本研究では、動的歪み印加装置を自作し、静的歪み印加下での動的粘弾性測定を行った。

【試料】低分子液晶溶媒 E44、メソゲン側鎖を形成するアクリレート A6OCB、架橋剤ジアクリレート RM257、メソゲン側鎖をもたないアクリレート Lauryl Acrylate、光重合開始剤 DMPAP の計 5 種の化合物を混合した。架橋剤(RM257)濃度、膨潤度(E44)を変化させた計 6 サンプルを作製した。

【実験装置】本研究では、動的歪み印加装置を自作した。装置図を Fig.1 に示す。この装置では、静的延伸を加えながらの粘弾性測定が可能になり、ポリマーネットワーク構造の変形にともなう粘弾性変化をとらえることができるようになった。

【結果】Fig. 3 に E44 60wt%、RM257 3mol% における貯蔵弾性率・損失弾性率の静的歪み・周波数依存性を示す。静的歪みを加えていくにつれ、貯蔵弾性率・損失弾性率ともに増加していく。また、周波数依存性は測定周波数の範囲で見られない。

【考察】静的歪みの増加に応じて貯蔵弾性率の増加が見られることより、ネットワーク変形に対する応力硬化が発現していることが示唆される。また、損失弾性率の増加より、ネットワーク変形に対する粘性の増加も発現する。その原因として、高分子ネットワーク弾性と液晶の配向弾性の結合が考えられる。

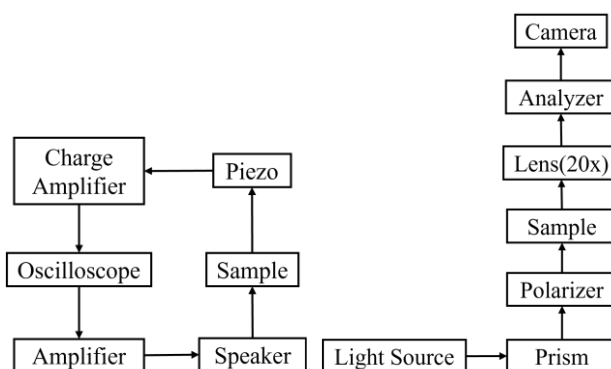


Fig. 1 The scheme of handmade measuring apparatus

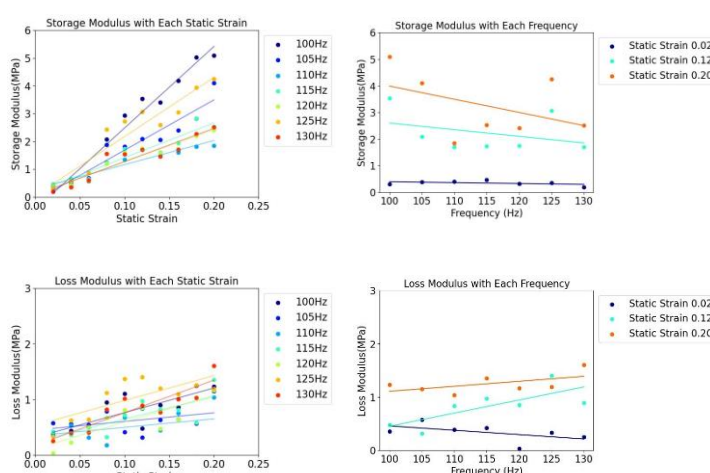


Fig. 2 Storage modulus with (a) each static strain and (b) each frequency, loss modulus with (c) each static strain and (d) each frequency (E44 60wt%, RM257 3mol%)

グライド対称性下における非エルミート $\mathbb{Z}_4$ 表皮効果

凝縮系理論研究室 石川星

Abstract We investigate what kind of topological phenomena $\mathbb{Z}_4$ topology induces in non-Hermitian systems. In this presentation, we numerically demonstrate the presence of non-Hermitian skin effect characterized by $\mathbb{Z}_4$ topological invariant in systems with glide symmetry.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

量子ホール系に代表されるように、トポロジカル絶縁体・超伝導体は、バルクの非自明なトポロジーに誘起されたギャップレスな境界状態を示す。特に、半並進を含む対称操作で記述されるノンシンモルフィック対称性の下では、 $\mathbb{Z}_4$ トポロジーによってメビウスの帯のようにねじれた特有の境界状態が出現することが知られている[1]。その一方で、非エルミート系においては、エルミート系では見られない新奇なトポロジカル現象が見られる。非エルミート表皮効果はその典型例である[2]。また元来、非エルミート表皮効果は対称性の無い系で議論されてきたが、時間反転対称性[2]や鏡映対称性[3]に保護された非エルミート表皮効果の発現も報告されている。しかしながら、非エルミート系において、上記の $\mathbb{Z}_4$ トポロジーがどのようなトポロジカル現象を誘起するのかについては未解明である。

以上の背景のもと、本研究では、ノンシンモルフィック対称性の一種であるグライド対称性を持つ非エルミート系を、数値計算により解析した[4]。 $\mathbb{Z}_4$ トポロジカル不変量 ν で特徴づけられる2次元のモデルを解析した結果、 $\nu=1$ および2の非自明なトポロジーを持つ系では表皮効果が出現し（図1）、 $\nu=4$ の自明な系では対称性を破ることなく表皮効果が消失することを明らかにした。また、 $\nu=2$ の系において、表皮効果はグライド対称性が閉じている境界に対してのみ現れ、その系の1次元トポロジーは自明になっていることを確認した。これらの結果から、解析で現れた表皮効果は $\mathbb{Z}_4$ トポロジーによって誘起されており、かつ、グライド対称性に保護されていることが明らかになった。

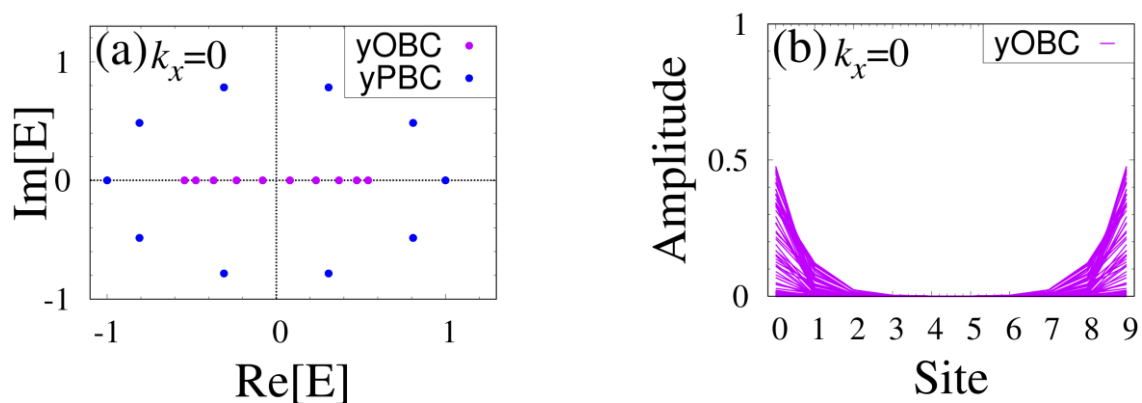


Fig. 1. Non-Hermitian skin effect for the $\mathbb{Z}_4$ invariant ν equals to 2. (a) Energy spectrum. (b) Amplitude of right eigenstates.

References

- [1] K. Shiozaki, M. Sato, and K. Gomi, Phys. Rev. B **93**, 195413 (2016).
- [2] N. Okuma, K. Kawabata, K. Shiozaki, and M. Sato, Phys. Rev. Lett. **124**, 086801 (2020).
- [3] T. Yoshida, T. Mizoguchi, and Y. Hatsugai, Phys. Rev. Res. **2**, 022062 (2020).
- [4] S. Ishikawa and T. Yoshida, Phys. Rev. B **110**, 115301 (2024).

円盤積み上げにおける力の記憶制御の定式化

統計物理・動力学研究室 鈴木隆人

Abstract This study investigates memory phenomena in granular materials, focusing on a simplified 3-disk system. We demonstrate that loading history is stored in the disk configuration and can be retrieved by measuring a yielding force. We also explore more physically grounded friction models and analyze the disk system's failure behavior under compression.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

私たちは日常生活で過去の出来事や情報を記憶するが、物質もまた多様な形で記憶する現象が知られている。このような物質の記憶現象を体系的に理解しようとする研究が近年進展している[1]。本研究では、このような現象の一例として砂や米などの粉体が示す記憶現象を対象とした。

1999年にL. Vanelらは、砂山が形成履歴を記憶することを報告した[2]。彼らは漏斗を用いて一点から砂を落とす方法と、ザルを用いて一様に砂を落とす方法で砂山を作成し、それぞれの底面の応力分布が異なることを示した。この結果は、砂山が積み上げ履歴を記憶し、その記憶を応力分布として読み取れることを示している。本研究では、この砂山の記憶現象を単純化し、「摩擦のある3つの2次元円盤を重力下で積み上げたシステム」を対象に研究を行った。

まず、3つの円盤を積み上げたシステムにおいて、「記憶の書き込み」と「記憶の読み出し」が可能であるかを検討するために、離散要素法(DEM)[3]を用いたシミュレーションを行った。剛体極限において、3つの円盤を積み上げた系では力の釣り合い条件を満たす状態が一意に定まらず、一次元のパラメータ族を形成する。つまり、最終的な力の釣り合い状態は初期条件や外部操作の時間依存プロトコルに依存する。その結果として、具体的な積み上げプロトコルを構成することで、このパラメータ族すべてを実現可能であり、積み上げ操作の履歴が力の釣り合い状態として記憶されることを示した。さらに、積み上げられた円盤を上から準静的に圧縮する操作において破壊に必要な力(降伏力)を測定することで、異なる力の釣り合い状態を区別できることがわかった。以上から、3つの円盤を積み上げたシステムにおける記憶の書き込み・読み出しが可能であることが示された。

次に、摩擦モデルの再検討を行った。前述の通り、摩擦モデルとして広く用いられているDEMを採用した。しかし、DEMは工学的応用を目的に提案されたモデルであり、物理的基盤が曖昧であることが指摘されている[4]。そこで、詳細釣り合い条件を満たす物理的な摩擦モデルを構築することを試みた。DEMを修正することで詳細釣り合い条件を満たす方法を検討したが、StickとSlipの条件分岐に伴う力の不連続性を解消するには至らなかった。そのため、条件分岐を排除したLuGreモデル[5]を用いて1次元の摩擦モデルを修正した結果、詳細釣り合い条件を満たすことが可能であることを確認した。ただし、2次元系への拡張には課題が残り、詳細釣り合いを満たす摩擦モデルの完全な構築には至らなかった。

最後に、3つの円盤積み上げの読み出し操作（上からの圧縮）による破壊現象を詳しく解析した。その結果、破壊に必要な降伏力が円盤と床の摩擦係数に大きく依存することが明らかになった。摩擦係数が閾値以下の場合には有限の降伏力で破壊可能である一方、閾値を超えると降伏力が無限大となり破壊が起こらないことが剛体極限の解析により確認された。この結果をDEMシミュレーションと比較し、さらに有限サイズスケーリングを行った。得られたスケーリング指数の解釈は課題として残った。

References

- [1] N. Keim et al., Rev. Mod. Phys. 91, 035002 (2019).
- [2] L. Vanel et al., Phys. Rev. E 60, 5040 (1999).
- [3] P.A. Cundall and O.D.L. Strack, Géotechnique 29, 47 (1979).
- [4] 早川尚男, 散逸粒子系の力学, 岩波書店 (2003).
- [5] C. Canudas de Wit et al., IEEE Trans. Autom. Control 40, 419-425 (1995).

ホール抵抗測定による CsV_3Sb_5 の時間反転対称性の破れの観測

量子凝縮物性研究室 関野雄輝

Abstract Time reversal symmetry breaking (TRSB) in CsV_3Sb_5 has been extensively studied both experimentally and theoretically, where loop current (LC) order is proposed as its origin. Through Hall resistance measurements, we demonstrate direct evidence of TRSB in CsV_3Sb_5 and discuss its relationship with the LC order. © 2025 Department of Physics, Kyoto University

原子が籠の目状に配置されたカゴメ格子系では、幾何学的フラストレーションやトポロジカルに非自明なバンド構造に由来したエキゾチックな電子状態が実現していると考えられており精力的な研究が続けられてきた。近年発見されたカゴメ格子金属 CsV_3Sb_5 では、電荷密度波(CDW)転移や超伝導転移を起こすだけではなく、時間反転対称性の破れ(TRSB)や回転対称性の破れが発現することが示唆されており、大きな注目を集めている。しかし、これらの対称性が破れる温度は測定手法により異なるだけではなく、対称性の破れは存在しないとする報告もあり、 CsV_3Sb_5 の秩序状態については議論が続けられている。TRSB の起源として、格子間に散逸なく電流が流れるループカレント(LC)秩序が有力視されている[1]。最近、サンプル表面の磁気異方性に敏感な磁気トルク測定を用いて CsV_3Sb_5 における奇パリティネマティック相の出現と時間反転対称性の破れを観測し、LC 相の熱力学的な証拠を得たとする報告が存在する[2]が、バルクにおける TRSB の存在はいまだ議論が続けられており、また LC 相を直接観測したという例は存在しない。そのため、バルクの TRSB を直接検出可能なプローブによる測定を通して LC 相の検証を行うことが必要である。

本研究では CsV_3Sb_5 に対してホール抵抗測定を行った。ホール抵抗測定は、測定系における TRSB を輸送量の観点から直接検出可能である強力なプローブである。試料面内で磁場を回転させ測定を行ったところ、回転に伴いホール抵抗に明瞭な跳びが現れた。またこの跳びは磁場角度に対してヒステリシスループを伴うことから、磁気的な性質に由来した時間反転対称性の破れを伴う一次相転移の証拠を得られたと考えられる。更に、面内磁場のみを変化させても明確な跳びが観測され、面内磁場による一次相転移を確認できた。転移が発生する磁場の大きさの温度依存性を調べると、60K 前後にキंक構造が認められた。これは、60K 前後で対称性の変化を伴う相転移が起きたことを示唆している。またホール抵抗の跳びは 200K 以上の高温においても観測され、これまで報告がされなかった広い温度範囲で CsV_3Sb_5 の TRSB が認められた。このような面内磁場角度と面内磁場の大きさに依存した一次相転移は、時間反転対称性と回転対称性が同時に破れている秩序相の存在を示唆しており、LC 相とのつながりが示唆される。一方、先行研究では TRSB や LC 相は面直方向の磁場と強く結びつくことが報告されている[1,2]。そのため、本研究で得られた成果は CsV_3Sb_5 における LC 相の起源について新たな知見を提供するものであると言える。

[1] Tazai, R., Yamakawa, Y., Kontani, H. Charge-loop current order and Z3 nematicity mediated by bond order fluctuations in kagome metals. *Nat Commun* **14**, 7845 (2023).

[2] Asaba, T., Onishi, A., Kageyama, Y. *et al.* Evidence for an odd-parity nematic phase above the charge-density-wave transition in a kagome metal. *Nat. Phys.* **20**, 40–46 (2024).

スピン三重項超伝導体 UTe_2 純良単結晶における 超伝導状態のスピン磁化率の磁場依存性

固体量子物性研究室 高橋侑希

Abstract UTe_2 is a strong candidate for a spin-triplet superconductor. We have performed ^{125}Te -nuclear magnetic resonance measurements on the single crystal with the transition temperature $T_c = 2.1$ K. We determined spin components of Knight shift depending on magnetic field, and found d -vector has all three components in low field.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

超伝導は二つの電子からなるクーパ対によって形成される状態であり、大別してスピン自由度を持たないスピン一重項とスピン自由度を持つスピン三重項の二種類が存在する。スピン三重項超伝導体では、その内部自由度に起因した超伝導多重相や新奇な量子状態が期待されているが、候補物質の少なさからその研究は十分に進んでいない。

2018年に超伝導が報告された UTe_2 [1]は、 b 軸高磁場下および圧力下で超伝導多重相を示すことから、スピン三重項状態の実現が有力視されている[2]。2022年には試料の合成方法に大きな進展が見られ、超伝導転移温度 T_c が初期の 1.6 K から 2.1 K にまで上昇した[3]。この $T_c = 2.1$ K の試料は、ほぼゼロである残留比熱から高純度な試料であることが確認され、2.1 K がこの物質の本来持つ超伝導転移温度であることがわかった。そこで我々はこの 2.1 K の純良単結晶試料を用い、 ^{125}Te 核の核磁気共鳴(NMR)測定から UTe_2 の超伝導の本質的な振る舞いを調べた。

NMR によるナイトシフト測定は、超伝導状態のスピン磁化率を測定することができる数少ない測定手法の一つである。スピン三重項超伝導体において超伝導対称性は d ベクトルによって分類される。一般に d ベクトルは超伝導スピンに直交するように定義されているため、ナイトシフトが超伝導転移によって減少する方向に d ベクトル成分が存在する。

低磁場での 2.1 K 試料のナイトシフトは、減少量の大きい a 軸に対して、 b, c 軸の減少量は一桁以上小さく[4]、また超伝導反磁性の影響も無視できないため、超伝導状態でスピン磁化率の減少が実際に起きているのかは議論の対象となっていた。我々は UTe_2 に存在する結晶学的に非等価な Te1 と Te2 サイトの b, c 軸のナイトシフトを精度よく測定した。そしてそれぞれのナイトシフトの差 ΔK を取ることで、サイトに依存しないマクロ量である超伝導反磁性による寄与を取り除いた。その結果、 b, c 軸においてもスピン磁化率が超伝導状態で減少していることを明らかにし、このことから a 軸に加えて、 b, c 軸においても d ベクトル成分が存在することを示した。また磁場を印可した際、上部臨界磁場 H_{c2} に比べて小さな磁場で、スピン磁化率の減少量が小さくなることから、 b 軸では 15 T、 c 軸では 5 T 付近で d ベクトルの回転が起きていることを明らかにした。興味深いことに c 軸では、この磁場付近で H_{c2} の傾きに変化が見出された(Figure)。これは b 軸で観測された 15 T 付近での H_{c2} の上昇と同様[5]に、超伝導状態のスピンが磁場方向へ向くと、超伝導が磁場に対して強固になることを示している。

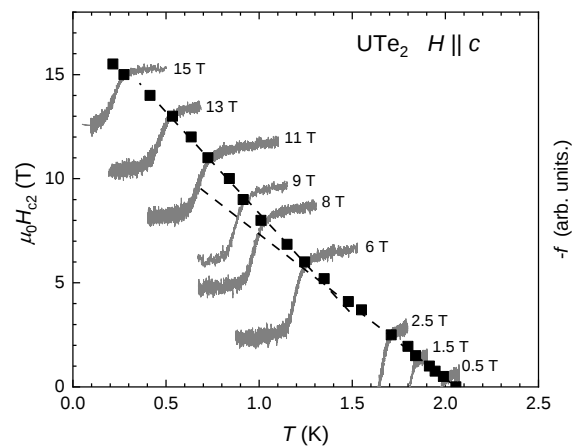


Figure: Temperature dependence of upper critical field H_{c2} along the c axis

References

- [1] S. Ran *et al.*, Science **365**, 684 (2019).
- [2] D. Aoki *et al.*, J. Phys. Condens. Matter **34**, 243002 (2022).
- [3] H. Sakai *et al.*, Phys. Rev. Materials **6**, 073401 (2022).
- [4] H. Matsumura *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 063701 (2023).
- [5] G. Knebel *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 053707 (2020).

シアノバクテリアの概日振動の外部環境に対する挙動とシステム堅牢性の起源

生体分子構造研究室 坂本璃月

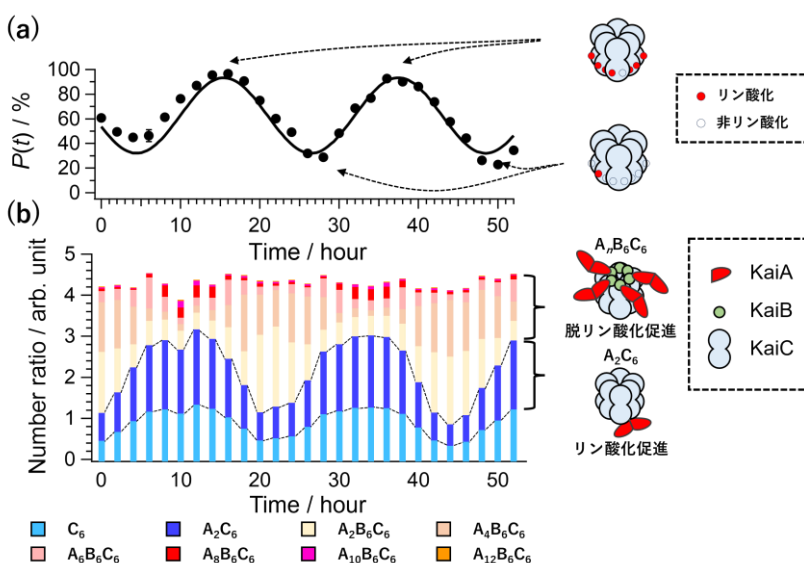
Abstract. Cyanobacterial circadian clock consisting of three proteins (KaiA, KaiB, KaiC) exhibits circadian oscillation of phosphorylation of KaiC. In this thesis, I elucidated the relationship between the oscillation of phosphorylation and protein complex distribution. Based on the relationship, I revealed the origin of the robustness of the oscillation against external environment.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

多くの生物は1日の環境の変化に順応するため、24時間周期の概日時計システムを有している。その中でシアノバクテリアが有する概日時計システムは、3種類のタンパク質 KaiA、KaiB、KaiC から構成され、その時間情報は KaiC のリン酸化度の概日振動 (Fig.1(a)) により規定される。また、KaiC のリン酸化は、タンパク質の会合・解離と関連しており、KaiA-KaiC 複合体 (A_2C_6) は KaiC のリン酸化、KaiB-KaiC 複合体 (B_6C_6) 及び KaiA-KaiB-KaiC 複合体 ($A_nB_6C_6$, $n = 2 \sim 12$) は KaiC の脱リン酸化にそれぞれ寄与する。一般的にタンパク質間の会合・解離動態は反応物の濃度や温度等の外部環境に影響を受けるが、KaiC のリン酸化度の振動ではそのような外部環境変化に対し周期を一定に保つ堅牢性を有することが知られている。しかし、タンパク質間の会合・解離動態に関する知見が十分ではないため、この概日振動の堅牢性の起源は解明されていない。そこで本修士論文では、X線・中性子小角散乱測定及び超遠心分析 (AUC) を統合的に用いてタンパク質複合体の分布を定量的に解析し、KaiC のリン酸化度の振動との関連の解明を目的とした。また、KaiC のリン酸化の促進に寄与する KaiA の濃度と温度をパラメータとして KaiC のリン酸化度振動の挙動を調べ、複合体分布の知見を基に概日振動の堅牢性の起源を考察した。

Fig.1 (a) は KaiA、KaiB、KaiC 混合溶液中の KaiC のリン酸化度の時間変化を示し、(b) は AUC 測定で得られた KaiC を含む複合体の存在比率の時間変化を示す。先行研究[1]では $C_6 \rightarrow A_2C_6 \rightarrow B_6C_6 \rightarrow A_nB_6C_6$ ($2 \leq n \leq 12$) $\rightarrow C_6 \rightarrow \dots$ のように、複合体が順次組み変わると考えられていたが、本研究により様々な複合体が共存し、 A_2C_6 と $A_nB_6C_6$ の存在比率が互い違いに増減することが分かった。更に、リン酸化度の増減速度と A_2C_6 の存在比率 (Fig.1(b)青)がほぼ同位相で振動することが示された。

次に、KaiA 濃度を様々に変化させて複合体分布を解析したところ、リン酸化に寄与する A_2C_6 の存在比率の時間平均は KaiA 濃度に殆ど依存しなかった。一方、 $A_nB_6C_6$ 中の KaiA 会合数 n の時間平均は、KaiA 濃度が高くなるにつれ増大することを見出した。つまり、 A_2C_6 と C_6 の存在比率を最適に保つために、 $A_nB_6C_6$ が KaiA 濃度増加の影響を打ち消すことが示唆された。この仕組みが概日振動の堅牢性に寄与していると考えられる。



Reference

[1] J. Snijder *et al.*, *Science* **355**, 1181 (2017).

Fig.1. Time courses of (a) KaiC-phosphorylation degree $P(t)$ and (b) complex distribution in KaiA (0.50 mg/mL) + KaiB (0.36 mg/mL) + KaiC (1.80 mg/mL) mix solution at 30°C.

周期境界系におけるエンタングルメントスペクトルダイナミクスによる非エルミートバルク・エッジ対応の検出

物性基礎論：統計動力学研究室 Juan Pablo Bayona Pena

Abstract We demonstrate that topological phase transitions in open quantum systems can be observed in entanglement spectrum (ES) dynamics under periodic boundary conditions, even with Liouvillian Skin Effect. Using a 1D fermionic system, we show ES zero-crossings occur only when quenching from a trivial to a non-trivial phase as defined by the open boundary conditioned Liouvillian.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

The exploration of phases of matter in the non-Hermitian realm has significantly expanded our understanding of free fermionic systems [1]. Non-Hermiticity, which arises from the exchange of energy and/or particles between a system and its environment, introduces exotic phenomena such as extreme spectral sensitivity to boundary conditions, commonly referred to as the non-Hermitian skin effect (NHSE) [2]. In open quantum systems, this phenomenon is similarly known as the Liouvillian skin effect (LSE) [3]. In systems exhibiting NHSE or LSE, eigenstates localize exponentially near boundaries, posing a fundamental challenge to the conventional bulk-boundary correspondence: the presence of topological edge states under open boundary conditions (OBC) cannot be predicted using the topological invariant of the Bloch Hamiltonian [2]. To resolve this, the conventional Bloch band theory must be extended to incorporate complex-valued wave vectors, enabling the identification of topological invariants under OBC. This framework is known as the non-Hermitian bulk-boundary correspondence.

Notably, under periodic boundary conditions (PBC), the topological transition point is still determined by the Bloch Hamiltonian, and its associated topological invariant retains relevance, particularly for predicting localization transitions of topological edge states. One might expect, therefore, that PBC systems provide no information about topological invariants defined in the OBC spectrum.

In sharp contrast to this expectation, we demonstrate that topological invariants associated with OBC can, in fact, be extracted from the dynamics of PBC systems [4]. Specifically, we examine the quench dynamics of the entanglement spectrum (ES), which has been a powerful tool for understanding topological phases both in and out of equilibrium [5, 6].

Using an open quantum fermionic lattice that exhibits LSE, we show that the ES dynamics can serve as a probe for topological phases defined by the OBC spectrum, even when the system itself is in PBC [4]. To substantiate this, we numerically analyze an open quantum model governed by a dynamical matrix identical to the non-Hermitian Su-Schrieffer-Heeger (SSH) model [3]. Our results demonstrate that topological phases defined by the OBC spectrum of Liouvillians manifest in the PBC system through mode crossings in the ES during quench dynamics. Importantly, our method for detecting the non-Hermitian bulk-boundary correspondence does not rely on post-selection.

References

- [1] Z. Gong Y. Ashida, K. Kawabata, K. Takasan, S. Higashikawa, and M. Ueda, Phys. Rev. X **8**, 031079 (2018).
- [2] K. Yokomizo and S. Murakami, Phys. Rev. Lett. **123**, 066404 (2019).
- [3] S. Yao, F. Song, and Z. Wang, Phys. Rev. Lett. **123**, 170401 (2019).
- [4] P. Bayona-Pena, R. Hanai, T. Mori, H. Hayakawa, arXiv:2409.07279.
- [5] L. Fidkowski, Phys. Rev. Lett. **104**, 130502 (2010).
- [6] Z. Gong and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **121**, 250601 (2018).

多重相超伝導体における相反・非相反電荷輸送

凝縮系理論研究室 松本亜巳

Abstract Nonreciprocal charge transport in superconductors is attracting much attention. In our study, we reveal the enhancement of reciprocal and nonreciprocal paraconductivity and its mechanism in bilayer multiphase superconductors. We thereby propose reciprocal and nonreciprocal paraconductivity as a new probe of multiphase superconductors particularly useful in low-dimensional systems.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

近年、 CeRh_2As_2 [1]のような多重相超伝導体への関心が高まっており、エキゾチック超伝導の候補物質として研究が進められている。中でも、 CeCoIn_5 人工超格子[2]のように2次元超伝導体にも多くの多重相超伝導体の候補物質が存在しているが、それらの超伝導状態の微視的な詳細はまだ完全には解明されていない。さらに、3次元のバルク物質で通常用いられる熱力学測定は、そのまま2次元超伝導体に適用することは難しい。したがって、特に二次元の多重相超伝導体のマイクロ情報のプローブ法を開拓することが重要な課題となっている。

そこで本研究では、薄膜系でも測定可能な物理量として超伝導転移線近傍でのゆらぎ伝導度に注目し、多重相超伝導体に特有な振る舞いについて議論する。2次元多重相超伝導体の最も簡単なモデルの一つとして、スタaggerドな Rashba 型スピン軌道相互作用を持つ局所的に空間反転対称性の破れた二層系を考える[3]。この系に面直磁場を印加することで、低磁場では BCS 相が安定であり高磁場では PDW 相が安定となる多重相超伝導が、面内磁場を印加することで、低磁場では BCS 相が安定であり高磁場では FFLO 相が安定となる多重相超伝導が実現される。また、面直電場が有限の場合を考慮することで、空間反転対称性の破れの効果、特に非相反ゆらぎ伝導度についても議論する。具体的な解析には Ginzburg-Landau 理論と時間依存 Ginzburg-Landau 方程式から導かれる相反・非相反ゆらぎ伝導度の一般式[4]を利用する。Ginzburg-Landau 自由エネルギーを用いて超伝導転移線を決定し、相反・非相反ゆらぎ伝導度を計算することで異なる超伝導相間の転移に伴うゆらぎ伝導度の特徴的な振る舞い[5]について議論する。

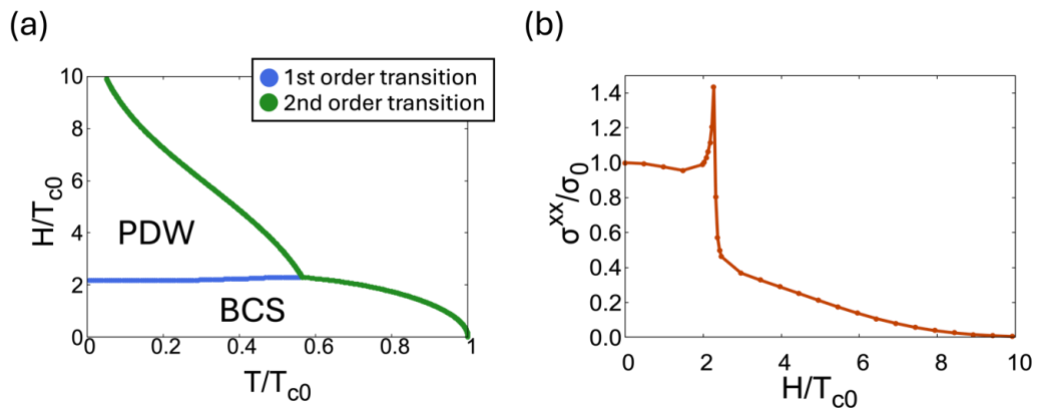


Fig. 1. (a) Phase diagram with perpendicular Zeeman field.
(b) Reciprocal paraconductivity in the system with perpendicular Zeeman field.

References

- [1] S. Khim, *et al.*, Science **373**, 1012 (2021).
- [2] T. Asaba, *et al.*, Nat Commun **15**, 3861 (2024).
- [3] T. Yoshida, M. Sigrist and Y. Yanase, PRB **86**, 134514 (2012).
- [4] A. Daido and Y. Yanase, PRR **6**, L022009 (2023).
- [5] T. Matsumoto, Y. Yanase and A. Daido, arXiv: 2405.14350.

局所的に空間反転対称性の破れた超伝導体における渦糸状態の理論

凝縮系理論研究室 南出晃宏

Abstract We investigate the vortex state in locally noncentrosymmetric superconductors using the bilayer Rashba model. Our analysis quantitatively reproduces the phase diagram of the heavy-fermion superconductor CeRh_2As_2 under a c -axis magnetic field. Additionally, we predict the emergence of a novel superconducting state characterized by the meron-like topological defect.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

局所的に空間反転対称性の破れた結晶における超伝導では、Cooper 対が運動量とスピンに加えて副格子の自由度により記述される。この結果、オリジナルの BCS 理論[1]では許されなかった奇パリティスピナー重項超伝導状態を考えることができる。いくつかの局所的に空間反転対称性の破れた系において、低磁場領域では通常の偶パリティスピナー重項状態が実現する一方、高磁場領域において奇パリティスピナー重項状態が安定化する可能性が理論的に示されている[2, 3, 4]。この磁場誘起相転移は、「超伝導パリティ転移」と呼ばれている。

CeRh_2As_2 は、2021 年に発見された重い電子系超伝導体である[5]。その結晶構造は、全体としての空間反転中心は有するが、超伝導を担う Ce 原子層には局所的な空間反転対称性が欠如している。この物質に c 軸方向の磁場を印加するとおよそ 4 T で 2 つの異なる超伝導相間の相転移が見られ、上述の超伝導パリティ転移が観測された最初の例であると考えられている。

ところで、超伝導に対する磁場の影響には Zeeman 分裂に起因する常磁性対破壊効果と量子渦の形成による軌道対破壊効果の 2 つがある。しかし、これまでの局所的に空間反転対称性の破れた超伝導体に関する理論研究は前者が支配的な状況に焦点を当てたものがほとんどであった。一方で、超伝導パリティ転移は磁場下の現象であるため、実験結果との定量的な比較には後者も考慮した解析が不可欠である。そこで我々は、局所的な空間反転対称性の破れを反映した非一様な Rashba 型スピン軌道相互作用を有する 2 層系超伝導体のハミルトニアンから、量子渦の自由度を含んだ Ginzburg-Landau 自由エネルギーを導出した。このモデルを用いて偶・奇パリティスピナー重項状態それぞれの上部臨界磁場を計算することで超伝導パリティ転移を確認し、 CeRh_2As_2 の c 軸磁場下における超伝導相図を定量的に再現した。さらに、超伝導パリティ転移の多重臨界点近傍における渦糸格子構造を詳細に調べ、meron 格子[6]状のトポロジカル欠陥によって特徴付けられる新奇超伝導相が実現するという結果を得た[7] (Fig. 1)。

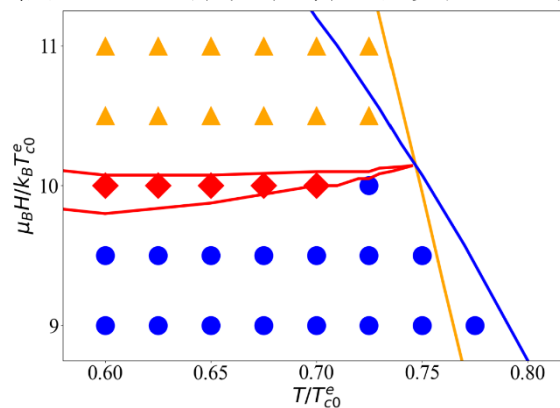


Fig. 1. H - T phase diagram near the multicritical point. In addition to even (blue circle) and odd (orange triangle) parity spin-singlet states, a novel superconducting state (red diamond) is realized.

References

- [1] J. Bardeen *et al.*, Phys. Rev. **106**, 162 (1957)
- [2] T. Yoshida *et al.*, Phys. Rev. B **86**, 134514 (2012).
- [3] S. Sumita *et al.*, Phys. Rev. B **93**, 224507 (2016).
- [4] Y. Nakamura *et al.*, Phys. Rev. B **96**, 054501 (2017).
- [5] S. Khim *et al.*, Science **373**, 1012 (2021).
- [6] B. Göbel *et al.*, Phys. Rep. **895**, 1 (2021).
- [7] A. Minamide and Y. Yanase, To appear in Phys. Rev. Lett.

デュアルイッテルビウム光トラップアレイの実現： 量子操作・測定用光源の開発および リドベルグ状態へのコヒーレント励起

量子光学研究室 横山 怜

Abstract By developing stable laser sources, we successfully realized a dual-isotope ^{174}Yb - ^{171}Yb atom tweezer array system and especially evaluated crosstalk between the isotopes for state readout. By also developing a high-power UV laser, we observed coherent Rydberg excitation and long-range Rydberg interactions.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

量子計算において量子誤り訂正は鍵となる技術であり、その実現には補助量子ビットとデータ量子ビットという2種類の量子ビットを用いることが有効であるとされている。光トラップアレイ系は、その拡張性の高さ[1]や高忠実度な量子ゲートの実現[2]により、近年大きな注目を集めている。この系では、量子ビットの損失や隣接するデータ量子ビットとの間のクロストークを最小化しつつ、補助量子ビットの状態の正確に制御・読み出しすることが重要である。

この課題に対する解決策として、別々の同位体を使用する方法が有効であることがアルカリ原子系において示唆されている[3]。一方、今回我々が実現したデュアルイッテルビウム系では、 ^{174}Yb 準安定状態を用いた非破壊的な読み出しが可能な光学遷移量子ビットを補助量子ビットとして用い、データ量子ビットとして長いコヒーレンス時間を持つ ^{171}Yb の基底状態核スピンを活用することができる。本研究では、2種類の同位体に必要なレーザー光源を開発し、同位体間クロストークの評価を行った。結果として、忠実度0.9992、生存率0.988の高精度な補助量子ビットの状態読み出しを行った場合でもデータ量子ビットのラムゼー信号振幅が99.1(1.8)%は保持されることを観測し、最先端の局所測定実験に匹敵する性能を達成した[4]。

さらに、2量子ビットゲートおよび量子誤り訂正を実現するには量子エンタングルメントの生成が不可欠であり、これにはリドベルグ相互作用と呼ばれる、高励起状態であるリドベルグ状態の原子間で生じる長距離相互作用が利用される[5]。

本研究では、ハイパワーUVレーザーを開発し、それを用いて準安定状態($6s6p$) $^3\text{P}_2$ から($6s71s$) $^3\text{S}_1$ 状態へのコヒーレントなリドベルグ励起に成功した。加えて、リドベルグペア状態への励起により長距離相互作用を観測することに成功した(Fig. 1)。これらの結果は、今後同位体間のリドベルグ相互作用を調査し、最終的には同位体間の2量子ビットゲートの実現を目指す上で基盤をなす技術が確立できたことを示す。

以上の成果は、デュアルイッテルビウム系量子計算の実現に向けた研究として、重要な進展である。

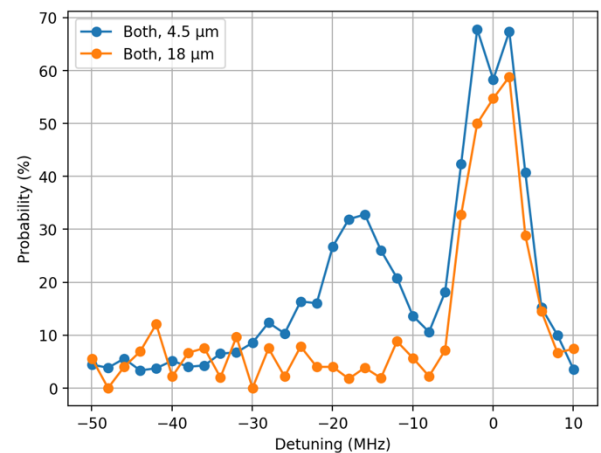


Fig. 1. Experimentally observed spectra of Rydberg pair states for atomic pairs at distances of 4.5 μm and 18 μm . The side peak in the 4.5 μm spectrum at the detuning of 18 MHz indicates the excitation to the Rydberg pair state.

References

- [1] H. J. Manetsch *et al.*, arXiv:2403.12021 (2024).
- [2] M. Peper *et al.*, arXiv:2406.01482 (2024).
- [3] K. Singh *et al.*, Science 380, 1265 (2023).
- [4] Y. Zeng *et al.*, Phys. Rev. Lett. **119**, 160502 (2017).
- [5] D. Jaksch *et al.*, Phys. Rev. Lett. **85**, 2208–2211, (2000)

傾角反強磁性体 $\text{Sm}_{0.7}\text{Er}_{0.3}\text{FeO}_3$ 中の 磁化ゆらぎの時空間分解測定

光物性研究室 古川貴也

Abstract We constructed a femto-second noise correlation spectroscopy system and measured the spatial variation of the correlation functions of magnetization fluctuations in a $\text{Sm}_{0.7}\text{Er}_{0.3}\text{FeO}_3$ crystal. We found that there are two contributions to the fluctuations, one is spatially uniform and the other is enhanced at domain walls. © 2025 Department of Physics, Kyoto University

連続相転移・臨界現象を起こす物質において、ゆらぎは転移点近傍で著しく増大する[1]。この領域では平均場近似のような簡単な描像が破れるため、相転移機構の理解にはゆらぎの時空間特性を実験的に明らかにすることが重要となる。

本研究では、相転移点近傍での物質中のゆらぎをピコ秒 ($\text{ps} = 10^{-12} \text{ s}$) スケールで観測することを目的として、傾角反強磁性体 $\text{Sm}_{0.7}\text{Er}_{0.3}\text{FeO}_3$ (SEFO) に着目した。SEFO は反強磁性的なスピン秩序とともに弱い正味の磁化を持ち、その磁化が室温近傍で温度 $T_L < T < T_U$ に依存して a 軸から c 軸へ回転する、回転型のスピン再配位相転移(SRT)を示す[2, 3]。SEFO は SRT 転移点近傍において、高強度な THz (10^{12} Hz) 帯の電磁波や近赤外光を用いることで、磁化のピコ秒スケールでの高速制御が可能であることが報告されている[2, 3]。この高速磁化制御技術を発展させるためには、SRT 転移点近傍での平衡状態の磁化ゆらぎ特性を理解することが重要である。SEFO においては、フェムト秒ノイズ相関分光という新しい実験手法により、SRT 転移点近傍でのピコ秒磁化ゆらぎの増大が観測され、その起源が擬強磁性マグノンのソフトニングと磁化の自発的な超高速スイッチング(RSS)であることが示唆されている[4]。しかし、先行研究では磁区・磁壁といった磁化の空間構造の影響は明らかになっていない。希土類オルソフェライトにおいては、磁区・磁壁が SRT の特性に大きく影響を与えることが指摘されている[5]。そこで本研究では、空間特性が取得可能なフェムト秒ノイズ相関分光装置を新たに構築し、SEFO 中の磁化ゆらぎの時空間特性を調べた。

構築した実験装置の概要は以下のとおりである。直線偏光の 2 色の超短光パルスに対して、時間差 τ をつけて試料に入射させると、それぞれ試料中の磁化に比例した偏光面の回転を起こす。プローブ光の偏光回転をそれぞれ独立した検出器で測定し、高速な信号処理をすることによって、磁化ゆらぎの時間相関関数 $\langle \Delta M(t) \Delta M(t + \tau) \rangle$ を測定できる。また本研究では、新たに試料位置を移動できる自動ステージを実装し、空間分解測定を可能にした。結果として空間分解能 $3.5 \mu\text{m}$ 、時間分解能 0.7 ps 、偏光回転分解能 $4 \times 10^{-7} \text{ rad}$ (150 秒積算時) を持つ、磁化ゆらぎ計測装置の構築に成功した。

試料には、厚さ $50 \mu\text{m}$ で面直方向に c 軸を持ち、 $T_L \sim 310 \text{ K}$ 、 $T_U \sim 340 \text{ K}$ である SEFO 結晶を用いた。ファラデー回転と磁化ゆらぎを組み合わせた空間分解測定 (Fig.1) と、磁化ゆらぎの時間相関測定により、先行研究で示唆されたマグノンソフトニングによる磁化ゆらぎの増大は空間的に一様に生じることが分かった。一方、転移温度 T_L より高温での RSS による磁化ゆらぎは磁壁上でのみ生じることが明らかになった。観測された磁化ゆらぎの時空間特性については、磁区を考慮したランダウの擬似自由エネルギーによっておおよそ説明できるものの、実験と食い違う部分もあり、単純な描像では説明できない磁化ゆらぎ特性が存在することが示唆された。

References

- [1] 西森秀稔,『相転移・臨界現象の統計物理学』(培風館, 2005).
- [2] G. Fitzky *et al.*, Phys. Rev. Lett. **127**, 107401 (2021).
- [3] Z. Zhang *et al.*, Nat. Mater. (2024).
- [4] M. A. Weiss *et al.*, Nat. Commun. **14**, 7651 (2023).
- [5] E. E. Zubov *et al.*, Phys. Rev. B **110**, 134404 (2024).

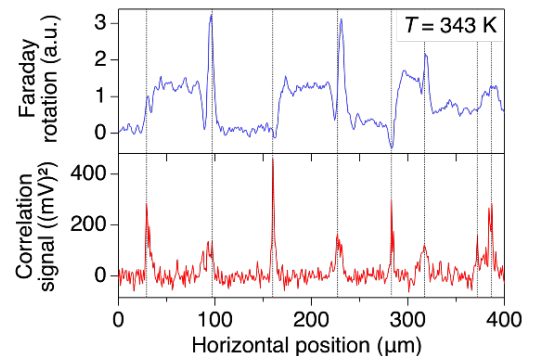


Fig. 1. The spatial variance of (top) the Faraday rotation and (bottom) the fluctuations measured at $T = 343 \text{ K}$.

リドベルグ励起子の非線形光学効果の観測に向けた 極低温マイクロ波-光実験系の構築

光物性研究室 中本景大

Cuprous oxide (Cu_2O) is an important material in the exciton research. We design an experimental system to observe the microwave-optical cross-Kerr effect at cryogenic temperatures. We evaluate the characteristics of the microwave transmission lines and estimate the microwave resonance between Rydberg exciton states observed in optical absorption spectra.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

半導体と光の相互作用の研究において励起子は古くから重要な位置を占めてきた。励起子の研究は励起子ポラリトン、励起子分子など様々な励起状態が研究されてきた。その中で主量子数の大きな励起状態であるリドベルグ励起子が亜酸化銅を用いて観測された[1]。リドベルグ励起子は巨大な双極子モーメントをもつことから、リドベルグ励起子を用いた非線形光学応答が注目を集めるようになった。二光子励起などの非線形分光やカー効果を用いた自己位相変調などが研究されたなかでマイクロ波光子2光子と可視光子1光子を用いた3次の非線形光学効果であるマイクロ波-光クロスカー効果が観測された[2]。マイクロ波-光クロスカー効果は軌道角運動量の異なる励起子間のエネルギー差にマイクロ波が共鳴することを利用しており、マイクロ波による状態混合が起こり、可視光域の励起子吸収スペクトルに変化が現れる。本研究ではマイクロ波-光クロスカー効果の観測を目指し亜酸化銅リドベルグ励起子の観測可能な極低温環境にマイクロ波を伝送するマイクロ波-光実験系の構築を行った。

まず光学系構築の前に亜酸化銅試料に対する可視透過試料評価測定を行った。7.5 K で測定を行い、軌道角運動量が P である励起子系列が主量子数 $n=13$ まで観測することができた。そこで主量子数が 10 で軌道角運動量が S と P の励起子の間で 9.7 GHz のマイクロ波が共鳴すると見積もった。光学系でも数 10 GHz のマイクロ波を伝送することを目指した。

マイクロ波の伝送路は、ジェネレーターからクライオスタット内部を通るケーブル伝送路と、亜酸化銅試料を乗せるマイクロストリップライン伝送路によって構成されている。このうち全体の伝送効率に大きく影響するケーブル伝送路に対する伝送特性の評価を行った。測定結果を図 1 に示す。ベクトルネットワークアナライザーを用いた測定によって 7.5 K では 6.3 GHz で反射を表す S_{11} は -20 dB 程度で、伝送効率を表す S_{21} が -6.5 dB である事がわかり、リドベルグ励起子が観測可能な極低温環境にマイクロ波を伝送できることが確認できた。

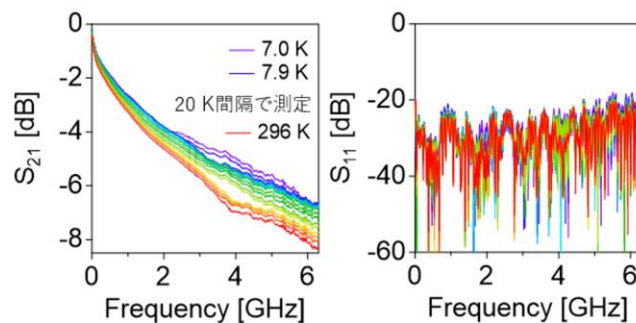


Fig. 1. The results of cable transmission lines evaluation

References

- [1] T. Kazimierczuk, D. Fröhlich, S. Scheel, H. Stolz, and M. Bayer, *Nature* **514**, 343–347 (2014).
- [2] L. A. P. Gallagher, J. P. Rogers, J. D. Pritchett, R. A. Mistry, D. Pizzey, C. S. Adams, *et al.*, *Physical Review Research* **4**, 013031 (2022).

予測不能性に基づく量子暗号

物性基礎論：量子情報研究室 山田匠悟

Abstract Pseudorandomness and unpredictability play an essential role in complexity theory and cryptography. Although many variants of quantum pseudorandomness have been studied, no one considers unpredictability in the quantum world. In this work, we formalize quantum unpredictability and construct many cryptographic primitives from that.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

予測不可能関数 (UPFs) [1]は、メッセージ認証コード (MAC) やデジタル署名を含む古典的暗号において重要な役割を果たすものである。本論文では、その量子対応物として「Unpredictable states generators (UPSGs)」を導入する。

UPSGs は、疑似乱数関数 (PRFs) の量子版である pseudorandom function-like states generators (PRFSGs) [2] から構成できる。ゆえに、UPSGs は近年導入された他のプリミティブ、例えば pseudorandom states generators (PRSGs)、one-way states generators (OWSGs)、および EFI pair と同様に、量子計算機に対して安全な古典暗号が存在しない場合でも存在しうる量子暗号プリミティブである。

古典暗号において、UPFs は PRFs と等価であるが、量子的場合、その等価性は明確ではなく、UPSGs の存在は PRFSGs の存在よりも弱い仮定である可能性がある。それにもかかわらず、既知の PRFSGs のすべての応用は UPSGs によっても実現可能であることを本論文では示した。具体的には、IND-CPA 安全な秘密鍵暗号やクローン不可能なタグを持つ EUF-CMA 安全な MAC が含まれる。

これらの結果は、多くの応用において、量子的疑似ランダム性ではなく、量子的予測不可能性が十分であることを示唆するものである。

本発表は[3]に基づく。

References

- [1] Moni Naor and Omer Reingold. From unpredictability to indistinguishability: A simple construction of pseudo-random functions from macs (extended abstract). In Hugo Krawczyk, editor, CRYPTO'98, volume 1462 of LNCS, pages 267–282. Springer, Heidelberg, 1998.
- [2] Prabhanjan Ananth, Luowen Qian, and Henry Yuen. Cryptography from pseudorandom quantum states. In Yevgeniy Dodis and Thomas Shrimpton, editors, CRYPTO 2022, Part I, volume 13507 of LNCS, pages 208–236. Springer, Heidelberg, 2022.
- [3] Tomoyuki Morimae, **Shogo Yamada** and Takashi Yamakawa. (2025). Quantum Unpredictability. In: Chung, KM., Sasaki, Y. (eds) Advances in Cryptology – ASIACRYPT 2024. ASIACRYPT 2024. Lecture Notes in Computer Science, vol 15492. Springer, Singapore. (preprint: arXiv:2405.04072)

自発的異方性を持つ渦格子の異常な電磁応答

凝縮系理論研究室 横田悠斗

Abstract It is pointed out by examining the superfluid rigidity (or, the helicity modulus) that most of the vortex lattices with a *spontaneously* formed anisotropy occurring in some types of superconductors may not show the conventional vortex flow under an applied current.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

第二種超伝導体は磁場下で量子渦が生じ、渦フローにより超伝導体内に電気抵抗が発生する。そのため、通常は渦をピン止めして電気抵抗が生じない状況の可能性を検討する。しかしそこで、ピン止めのないクリーンな超伝導体ではいかなる場合でも磁場に垂直な電流下で渦フローしない（電気抵抗が発生しない）、つまり超伝導応答をすることはないのかという問いが生まれる。

単一の渦やピン止めのない s 波超伝導体における渦の三角格子の渦 (Abrikosov Lattice) では渦フローを引き起こし、そのメカニズムは十分に解明されている。しかし、一般的な秩序化した渦格子全てで同様の現象を引き起こすかについては明らかにされていない。

渦フローを引き起こさないと予想される渦格子に第 2 ランダウ準位 (LL) 渦格子がある [3]。この格子は実際には鉄セレン (FeSe) の高磁場・低温相 [1] がそれに相当すると考えられている。また、この格子は当グループの未発表調査 [2] により、渦と半渦が交互に列を成したチェーン構造を含んでいるとされるが、もし渦フローを引き起こすのであれば渦と反渦は同様電流に対して反対方向に動き格子構造の崩壊を招くことになる (図 1)。そのためこの構造は超伝導応答をすると予想できる。そこで、まず第 2 LL 渦格子が安定となるようなギンツブルク - ランダウ (GL) ハミルトニアンを用い、どのような電磁応答を引き起こすのか分析するため超流動剛性 (helicity modulus) Υ を調査した。その結果、渦格子構造の対称性に依らない寄与からは渦フローを阻害する要素は出てこないが、渦格子構造 (回転対称性) に依存する寄与から渦フローを阻害する要素が出現することがわかった。

回転対称性の低さが渦フローを阻害する起源であるという知見から、次に、様々な対称性の渦格子構造が出現する系として、スピン三重項超伝導の GL ハミルトニアンのモデルを分析した。その結果、4, 6 回対称性をもつ格子では、渦格子構造に依存せず渦フローを阻害する要素は出てこないことがわかった。一方で 2 回対称性しか持たない渦格子構造においては、例外を除き渦フローを阻害する要素が出現し、同様電流をかける方向によって Υ が正にも負にもなることがわかった (図 2)。ピン止めのある渦糸格子では、後者の状況は異常に弱いピンニング効果を有した渦格子として実験では観測されると期待される。

関連する実験として、スピン三重項を持つ超伝導体である UTe_2 の中間磁場域で電流が誘起する電気抵抗の奇妙な磁場依存性 [4] がある。本研究内容の範囲で説明できると考えられるため、可能な説明について議論する。

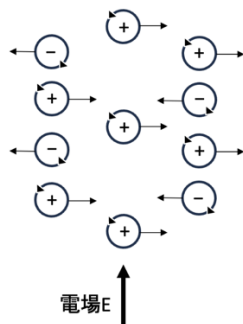


図1

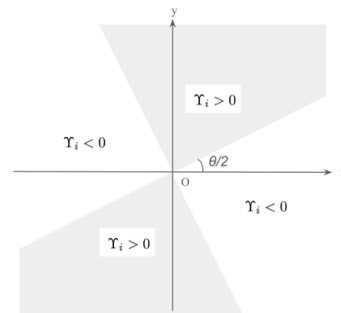


図2

References

- [1] N. Nunchot, D. Nakashima, R. Ikeda, Phys. Rev. B 105, 174510 (2022). [2] 佐伯太朗, 修士論文(2009).
[3] S. Kasahara et al., Phys. Rev. Lett. 124, 107001 (2020). [4] Y. Tokiwa et al., Phys. Rev. B 109, L140502 (2023).

β -RuCl₃ 量子細線および単層膜表面の長周期構造

量子凝縮物性研究室 吉本 宗由

Abstract We report the results of STM measurements of β -RuCl₃ monolayers and quantum wires. In contrast to the dimerization of the bulk, we discovered odd-fold periodic structures, suggesting that the spin degrees of freedom are preserved. This is promising for the appearance of Majorana quasiparticles at the Y-junction.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

粒子と反粒子が同一であるマヨラナ粒子は、素粒子としてその存在は確認されていないが、物質中の励起状態を記述する準粒子として創発する可能性が理論的に提案されている。マヨラナ準粒子はトポロジカル量子計算に応用できることから注目されているが、その実現には特殊な物質系が必要である。その一例として、3つの1次元イジング鎖のジャンクション構造が提案されている[1]。

その舞台となり得る物質として、本研究では β -RuCl₃の量子細線に注目した。原子一層に満たない量の β -RuCl₃をグラファイト基板上に蒸着すると、幅が数ナノメートルの量子細線がほぼ等間隔に並ぶパターンを形成することが知られている[2]。特筆すべきは、この量子細線が原子レベルで精密なY字のジャンクション構造を形成する点である。また、 β -RuCl₃はモット絶縁体であり、各Ruサイトにスピンの局在する。そのため、このYジャンクションはマヨラナ粒子創発の舞台となり得る。

しかし、バルクの β -RuCl₃は隣接するRu原子が二量化してスピン自由度が消失し、磁気モーメントが大幅に抑制されることが報告されている[3][4]。量子細線においても同様に二量化が起こる場合、1次元イジング鎖としての描像は成り立たない。このような背景から、量子細線における二量化の有無を明らかにすることが重要な研究課題となる。

本研究では、パルスレーザー堆積法(PLD)でグラファイト基板上に蒸着した β -RuCl₃を、走査型トンネル顕微鏡(STM)を用いて測定した。その結果、 β -RuCl₃の量子細線および単層膜表面に長周期構造が存在することを発見した。特に、 β -RuCl₃量子細線において鎖に沿う方向にCl原子間隔の5倍周期を持つ長周期構造が観測された。この周期性はバルクにおける二量化とは異なる特徴を示している。この結果は量子細線においてスピン自由度が保持されている可能性を示唆するものであり、 β -RuCl₃がマヨラナ粒子創発の舞台として有望であることを示している。

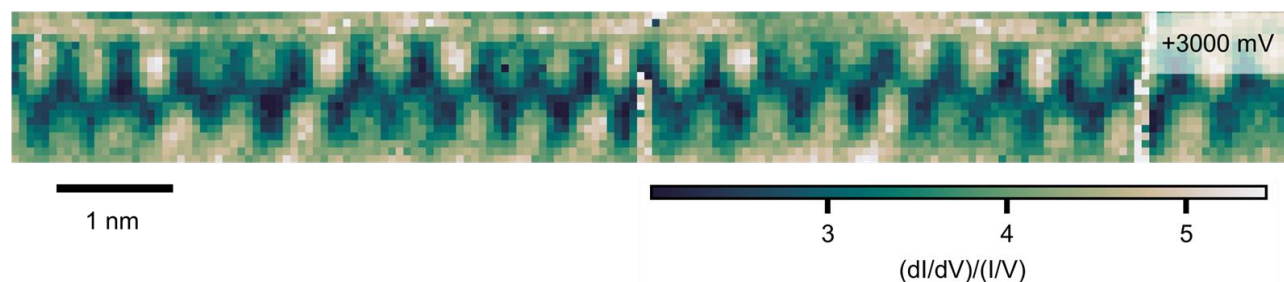


Fig. 1. Normalized conductance map of β -RuCl₃ quantum wire consisting of two single-crystalline chains. $V = 3$ V, $V_{\text{mod}} = 10$ mV, $I = 100$ pA, $T = 4$ K. Five-fold periodic structure is observed.

References

- [1] A. M. Tsvelik, Phys. Rev. Lett. **110**, 147202 (2013).
- [2] T. Asaba *et al.*, Sci. Adv. **9**, eabq5561 (2023).
- [3] Y. Kobayashi *et al.*, Inorg. Chem. **31**, 4570 (1992).
- [4] H. Hillebrecht *et al.*, Z. anorg. allg. Chem. **630**, 2199 (2004).

金融市場の数理モデルの平均場理論に基づく 金融市場の流動性の解析

統計物理・動力学研究室

若月大暉

Abstract Financial markets are characterized by various statistical quantities obtained from data analysis. Among these, liquidity has been used as an indicator reflecting the ability to trade without incurring significant transaction costs. Although the relationship between liquidity and the order-book dynamics has been explored through simulations of the Santa Fe model, its theoretical analysis has been limited due to its model complexity. In this study I analytically investigates the liquidity of the Santa Fe model using a mean-field theory in statistical physics.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

大量の質の良いデータを用いることで、金融市場の詳細な性質が明らかになっている。金融市場では電子取引によって取引が行われ、トレーダーの注文行動が電子的に正確に記録される。また、様々な銘柄が日々取引されているため、豊富なデータを利用できる。そのため、金融市場はデータ解析に基づき実証的に研究が可能な社会システムとして知られている。このようなデータ解析の結果、様々な統計量によって金融市場は特徴づけられ、実務へ応用されてきた。

本研究では、金融市場の流動性という指標に関する特徴量について注目した理論解析を行う。流動性とは「大きなコストが発生せずに取引できるかどうか」の指標である。流動性は抽象的で多面的な指標であるため、複数の統計量を用いて議論される。例えば、取引時のコストに相当する bid-ask spread や取引が価格に与える影響を示す price impact などがある。データから得られるこれらの流動性の統計量に、トレーダーの注文行動はどのように影響を与えるかは関心が寄せられている。

流動性などの統計量と微視的なトレーダーの注文行動との関係を理解する上で、金融市場の数理モデルが活用されてきた。本研究では、Santa Fe モデル[1-3]と呼ばれる数理モデルを取り扱う。Santa Fe モデルはトレーダーの注文行動が定常ポアソン過程に従って確率的に発生するモデルである。Santa Fe モデルでシミュレーションを行うと、現実の流動性のある程度適切に推定可能であることが知られている。

一方で、Santa Fe モデルは複雑に相互作用しあう開放系であり、理論解析が困難であるため、その理論的性質は十分に解明されていないという問題点があった。例えば、一様な注文分布（トレーダーが新規に提示する価格に関する分布）に従う特殊ケースの限られたパラメータ領域に限れば、スケーリングに関する平均場理論が提案されているが、現実で観測される非一様な注文分布を取り込んだ Santa Fe モデルにおいては解析解を導出することが難しく、その結果として一般的な Santa Fe モデルの流動性の性質は十分に解明されていない。

そこで本研究では統計力学の平均場理論を用いて Santa Fe モデルの流動性の解析を行う。Santa Fe モデルを一般化し、なおかつ孤立系に修正した孤立系 Santa Fe モデルを提案する。モデルを孤立系に改変することで、モデル内の注文を粒子と対応づけることができ、多体粒子系の縮約手法と知られている統計物理学の平均場理論（ボルツマン方程式の理論）を適用することで、理論的に流動性のスケーリング則を導く。結果、一般の注文分布と一般のパラメータ領域で流動性の解析的性質が明らかになった。

References

- [1] J.-P. Bouchaud, J. Bonart, J. Donier, and M. Gould, Trades, Quotes and Prices (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2018).
- [2] M. G. Daniels, J. D. Farmer, L. Gillemot, G. Iori, and E. Smith, Phys. Rev. Lett. **90**, 108102 (2003).
- [3] E. Smith, J. D. Farmer, L. Gillemot, and S. Krishnamurthy, Quantitative Finance **3**, 481 (2003).

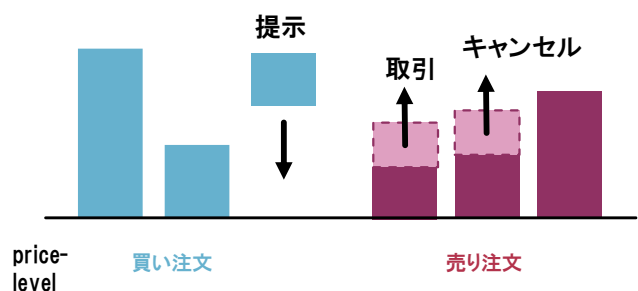


Fig. 1. Santa Fe model.