令和7年度 9月修了

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

2025年7月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 4階・401号室(一部オンライン) 発表:15分(別に質問時間5分程度)

2025年7月8日(火)10:30~11:10

目 次

1. 細管中の超流動³He-B相におけるスピン波

TANG BOYI $(10:30) \cdot \cdot \cdot \cdot 1$

2. 単層 MoSe₂における低強度非線形分光に向けた量子もつれ光源の開発
池田 一輝(10:50)・・・・ 2◆

◆ハイブリッド形式

細管中の超流動³He-B相におけるスピン波

低温物理学研究室 TANG BOYI

Abstract We observed characteristic NMR spectra arising from spin waves in superfluid ³He-B confined in a 1 mm-diameter capillary. Under a transverse static magnetic field, a spin-wave potential is formed due to dipole and gradient energies originating from the texture, allowing the excitation and confinement of spin waves.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

超流動³He-B 相においては、オーダーパラメーターを記述する*î*と*θ*の空間配置は、系の自由エネル ギーを最小にするように決定され、この空間配置がテクスチャーと呼ばれる。テクスチャーは主に外部 磁場、双極子相互作用、容器壁による境界条件など複数の自由エネルギー項の競合によって定まる。

³He-B 相のスピンダイナミクスは、Leggett の非線形スピン運動方程式によって記述される。この方程 式には、テクスチャーによる空間変化の効果が含まれており、空間変化する*n*に起因するポテンシャル がスピン運動に作用し、スピン定在波が形成される[1]。スピン波の安定性や空間的広がりは、磁化の伝 播を担うスピンスーパー流によって決められる。B 相での高温領域ではスピンスーパー流の効果が弱く、 スピンは局所的に歳差運動を行い、空間的に不均一な歳差運動分布が形成され、磁場勾配をかける NMR 測定において、局所磁場近似に基づいたスペクトルとして観測される。一方、低温領域ではスピンスー パー流の効果が強くなり、ポテンシャルの中に、スピン波が束縛されて定在波モードを形成することが 可能となる。この場合、磁場勾配をかける NMR スペクトルには、異なるスピン波モードに対応した周 波数に強い信号が現れるという局在スピン波効果が期待される。

本研究では、直径 1mm の細管中に閉じ込めた超流動³He-B 相において、スピン波に起因する特徴的な NMR スペクトルを観測した。軸方向と直交する静磁場を印加した条件下で、テクスチャーが形成する ポテンシャル内でスピン波が励起された。温度 0.98mK から 1.97mK の B 相領域において、複数の磁場 勾配条件下で NMR 測定を行ったところ、温度が高い領域では局所磁場近似が有効であり、温度を下げ るにつれて局在スピン波近似が次第に有効となる過程が観測された(Fig.1、Fig.2)。さらに、磁場勾配 の方向を反転させた場合でも、得られたスペクトルの周波数軸を反転して空間位置と対応させると、2 つのスペクトルはお互いにほぼ対称になり、局在スピン波近似が有効であることが示唆された。加えて、 磁場勾配の方向を少しずつ変化させることで、ポテンシャルに束縛されたスピン定在波の分布もスペク トル上に反映されることが観測された。本研究では、これらのスペクトルの変化を通じて、スピン波の 局在化とその温度依存性に関する物理的機構について議論を行う。



Fig. 1. NMR Spectra with magnetic field gradient in z direction from 1.97mK to $0.98mK_{\circ}$

Fig. 2. NMR Spectra with magnetic field gradient in x direction from 1.97mK to $0.98mK_{\circ}$

References

[1] D. Vollhardt and P. Wölfle, "The Superfluid Phases of Helium 3", Taylor & Francis , London, 2002.

単層 MoSe₂ における低強度非線形分光に向けた 量子もつれ光源の開発

光物性研究室 池田一輝

Abstract Monolayer transition metal dichalcogenides (monolayer TMDs) are promising materials for next-generation semiconductor devices and an ideal platform for investigating exciton physics. We are developing a new entangled-photon light source for low-intensity spectroscopy of biexcitons, where excitonic many-body effects will be suppressed. © 2025 Department of Physics, Kyoto University

単層遷移金属ダイカルコゲナイド(単層TMD)は直接遷移型のバンドギャップを持つ半導体であり、反 転対称性の破れと強いスピン軌道相互作用に由来するスピン・バレー結合や、他の二次元半導体とのヘ テロ接合が可能なことなどから次世代半導体材料として注目を集めている[1]。また、二次元的な形状 に起因する強いクーロン相互作用のために、励起子のみならずトリオンや励起子分子の存在も確認され ている[1]。従来、単層TMDにおいて励起子分子は古典的な光を用いて光励起されてきた[2]。古典的な2 光子吸収過程の吸収断面積は励起強度の自乗に比例するため、励起子分子の他に大量の励起子が生成さ れ、複雑な多体効果が生じてしまう[3-5]。こうした多体効果なしに励起子分子を観測することは、その 励起・緩和過程を理解する上で重要である。

本研究では単層TMDの1つである単層MoSe2中の励起子分子の低強度分光に向けた量子もつれ光源の開発を目指した。古典的な光の場合とは異なり、時間相関を持つもつれ光子対の2光子吸収断面積は励起強度に比例する[5,6]。したがって、弱い励起光でも励起子分子が生成されることが期待される。もつれ光源のスペクトルの理論シミュレーションをFig.1に示す。第二高調波発生(SHG)と自発的パラメトリック下方変換(SPDC)を組み合わせることで、光子の偏光状態とエネルギーとを同時に制御できる。



Fig. 1: Simulation of spectrum of entangled-photon light source.

References

[1] Mueller, T. & Malic, E., Exciton physics and device application of two-dimensional transition metal dichalcogenide semiconductors, npj 2D Mater. Appl. <u>2</u>, 29 (2018).

[2] Hao, K. et al., Neutral and charged inter-valley biexcitons in monolayer MoSe₂, Nat. Commun. 8, 15552 (2017).

[3] Katsch, F., Selig, M. & Knorr, A., Exciton-Scattering-Induced Dephasing in Two-Dimensional Semiconductors, Preprint at http://arxiv.org/abs/2006.13783 (2020).

[4] Yong, C.-K. *et al.*, Biexcitonic optical Stark effects in monolayer molybdenum diselenide. Nature Phys. <u>14</u>, 1092 (2018).

[5] Tabakaev, D. et al., Spatial Properties of Entangled Two-Photon Absorption, Phys. Rev. Lett. 129, 183601 (2022).

[6] Varnavski, O. & Goodson, T., Two-Photon Fluorescence Microscopy at Extremely Low Excitation Intensity: The Power of Quantum Correlations, J. Am. Chem. Soc. <u>142</u>, 12966 (2020).