

平成 2 4 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 1 3 年 1 月 2 9 日 (火)、1 月 3 0 日 (水)

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
発表：15 分（別に質問時間 5 分程度）

2013 年 1 月 29 日（火）9：00～ 開始

目 次

1. 遅延フィードバック制御によるチューリングパターンのダイナミクス
入 亮介（9：00）・・・・・・・・ 1
2. 高分子電解質準希薄溶液の電気浸透流
植松 祐輝（9：20）・・・・・・・・ 2
3. パウリ常磁性の強い超伝導相における電磁応答
小形 悠（9：40）・・・・・・・・ 3
4. 末端水酸基を有する液晶に発現する新奇なフラストレートスメクチック相
木本 泰裕（10：00）・・・・・・・・ 4
5. 振動場におけるダンベル物体の自発運動と運動モード分岐
久保 善嗣（10：20）・・・・・・・・ 5

10：40～10：50 休憩

6. 直流電場によって駆動されるマイクロ液滴の運動：空間スケール依存性
栗村 朋（10：50）・・・・・・・・ 6
7. 冷却イッテルビウム-リチウム原子混合系の光格子の開発
小西 秀樹（11：10）・・・・・・・・ 7
8. 二成分フェルミ粒子系における s 波超流動と乱れの競合
阪井田 賢（11：30）・・・・・・・・ 8
9. Numerical Analysis of Granular Jet Impacts
佐野 友彦（11：50）・・・・・・・・ 9
10. 一様せん段下での引力を持つ散逸粒子のパターン形成
高田 智史（12：10）・・・・・・・・ 10

12：30～13：30 昼休み

11. 空間局在構造に対応する非線形モードによる乱流の解析
寺村 俊紀（13：30）・・・・・・・・ 11
12. 重い電子系超伝導体 CeCoIn_5 の薄膜を用いたトンネル接合の作製と評価
中村 昌幸（13：50）・・・・・・・・ 12

1 3. アルカリ金属流体のコンプトン散乱測定	福丸 貴行 (1 4 : 1 0)	1 3
1 4. 液晶ナノエマルション系における相転移挙動及び配向揺らぎに対する閉じ込めのサイズ効果	坊野 慎治 (1 4 : 3 0)	1 4
1 5. 量子ホール状態 $\nu=2/3$ における磁気抵抗増大現象の占有率依存性	三谷 昌平 (1 4 : 5 0)	1 5
1 6. 重い電子系超伝導体 CeCoIn_5 の Yb 希釈による Kondo hole の研究	安元 智司 (1 5 : 1 0)	1 6

1 5 : 3 0 ~ 1 5 : 4 0 休憩

1 7. 局所密度依存速度をもつ自己推進粒子の集団ダイナミクス	山中 貞人 (1 5 : 4 0)	1 7
1 8. カゴ状超伝導体 $A_xV_2Al_{20}$ におけるラットリング現象	山中 隆義 (1 6 : 0 0)	1 8
1 9. 量子スピン液体の磁気励起の研究	渡邊 大樹 (1 6 : 2 0)	1 9
2 0. Conformation and Dynamics of Confined Circular DNA Molecules	LEE Yo ju (1 6 : 4 0)	2 0
2 1. グラフェン電界効果トランジスタにおけるテラヘルツキャリアダイナミクス	浅井 岳 (1 7 : 0 0)	2 1

1 7 : 2 0 ~ 1 7 : 3 0 休憩

2 2. 荷電リン脂質膜界面における動的なひも状マイクロパターン形成	伊藤 弘明 (1 7 : 3 0)	2 2
2 3. エアロジェル中液体 ^3He の熱輸送についての研究	伊藤 良介 (1 7 : 5 0)	2 3
2 4. 異方性の強いエアロジェル中のヘリウム 3 の超流動相図についての研究	大石 良祐 (1 8 : 1 0)	2 4
2 5. 熱磁効果および比熱の測定による Sr_2RuO_4 の特異な超伝導相図の研究	梶川 知宏 (1 8 : 3 0)	2 5
2 6. イッテルビウム量子気体を用いた基底状態分子の解離限界近傍における高精度光会合分光	菊池 悠 (1 8 : 5 0)	2 6

2 0 1 3 年 1 月 3 0 日 (水) 9 : 0 0 ~

2 7. 高次 Rydberg 状態の発光分光による亜酸化銅励起子の緩和ダイナミクスの研究	北村 達矢 (9 : 0 0)	2 7
---	----------------------------	-----

28. ホールドープしたカーボンナノチューブの励起子構造の研究	樹本 好央 (9 : 20) 28
29. ゲノム DNA 二重鎖切断の定量的計測と解析	下林 俊典 (9 : 40) 29
30. 乱れたスピン・パイエルス系におけるスピン励起の動的密度行列繰り込み群法による研究	新城 一矢 (10 : 00) 30
31. 点事象発生率変動の検出限界	新谷 俊了 (10 : 20) 31

10 : 40 ~ 10 : 50 休憩

32. フロー式液体薄膜生成装置を用いたテラヘルツ時間領域分光	周藤 睦人 (10 : 50) 32
33. レーザー干渉縞を用いた分子マニピュレーション	辻井 哲夫 (11 : 10) 33
34. 量子気体 Yb 原子の超狭線幅光学遷移を用いたスピン軌道相互作用	中村 悠介 (11 : 30) 34
35. 1次元量子ウォークにおけるトポロジカル相とアンダーソン局在	西村 勇希 (11 : 50) 35
36. 細孔中の超流動ヘリウム 3 の探索	人見 純司 (12 : 10) 36

12 : 30 ~ 13 : 30 昼休み

37. 鉄系超伝導体における超伝導と反強磁性の共存に関する理論的研究	松井 楽徳 (13 : 30) 37
38. 超伝導体 Sr_2RuO_4 微小結晶素子の作製方法の開発と磁気輸送特性	山岡 義史 (13 : 50) 38

遅延フィードバック制御による チューリングパターンのダイナミクス

非線形動力学研究室 入 亮介

Abstract We have carried out numerical simulations of feedback control of Turing pattern in one dimension and found various pattern dynamics depending on the strength of the feedback and the magnitude of the delay time. Some of the results can be understood by deriving the amplitude equation for the dynamic patterns.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

遅延フィードバックは、カオス軌道の周りにある不安定周期軌道を安定化させるときに用いられることで有名である[1]。他に外力を用いて不安定周期軌道を安定化させる方法もあるが、フィードバックは状態が安定した後にその効果が自然と消えるため、実際の制御として有用である。さらに、遅延フィードバック制御は非線形光学の分野においても研究されている。その一つとして、暗いバックグラウンド中に光の強いピークをもつ Cavity Soliton と呼ばれる局在構造[2, 3]へもたらす効果についても調べられている[4]。この研究では、遅延フィードバックは、本来静止安定な Cavity Soliton を不安定化させて自発的な運動を誘起するという、安定化とは逆の作用をすることが明らかにされた。

そこで、Cavity Soliton 同様、遅延フィードバックの無いとき静止安定であるチューリングパターンの遅延フィードバック下での振る舞いについて私たちは調べた。まず、チューリングパターンのモデルとして有名な Lengyel-Epstein モデル[5]に遅延フィードバックの効果を加えた

$$\partial_t u = a - cu - 4uv / (1 + u^2) - \phi_0 - \varepsilon(u(t) - u(t - \tau)) + \partial_{xx} u$$

$$\partial_t v = \sigma[cu - uv / (1 + u^2) + \phi_0 + \varepsilon(u(t) - u(t - \tau))] + d \partial_{xx} v$$

の数値シミュレーションを一次元空間で行った。その結果、空間的な周期構造を保ったまま一定速度で伝播する状態や、空間的に一様に振動する状態などが時間の遅れとフィードバック強度の大きさに従って出現することがわかった。フィードバック強度と遅延時間を変数とした相図を図1に示す。

この現象のいくつかの分岐を明らかにするため、遅延フィードバックの大きさが十分に弱いところでのチューリングパターンの振幅方程式の理論解析を行い、その理論曲線を引いた。図1の実線は静止安定なチューリングパターンが不安定化するライン、破線は空間一様な振動解が得られるラインである。

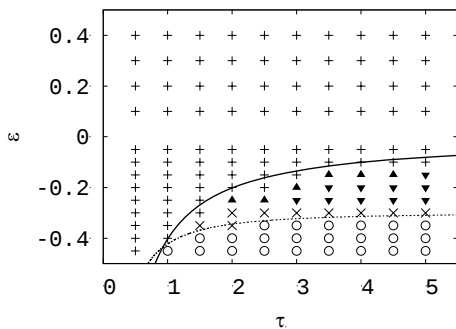


Fig. 1: Phase diagram in the space of the feedback strength and the magnitude of the time delay.

+ : motionless state, ▲ : steady propagation, ▼ : sink and source, x : divergent, ○ : spatially uniform oscillation. The solid and broken lines are the theoretical result.

References

- [1] K. Pyragas, Phys. Lett. A, **170**, 421 (1992).
- [2] S. Barland et al., Nature, **419**, 699 (2002).
- [3] F. Pedaci et al., Appl. Phys. Lett. **92**, 011101 (2008).
- [4] M. Tildi et al., Phys. Rev. Lett., **103**, 103904 (2009).
- [5] I. Lengyel, and I.R. Epstein, Science, **251**, 650 (1991).

高分子電解質準希薄溶液の電気浸透流

相転移動力学研究室 植松 祐輝

Abstract: We investigate electro-osmotic flow in solutions of positively charged polyelectrolytes by means of a mean-field approach. The solutions are confined in negatively charged slits. We focus on the dependence of electro-osmotic properties on viscosity inhomogeneity. When the polyelectrolytes are strongly adsorptive and salts are dilute, the electro-osmotic flow is inverted.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

負に帯電した平板スリットに挟まれた正に帯電した高分子電解質溶液の電気浸透流について調べた。高分子電解質がスリット界面の静的構造を大きく変えるときに溶液の粘性の濃度不均一性が及ぼす影響に着目した。具体的なモデルは以下である。厚さ $2L$ の平板スリットに囲まれたマイクロ流路を x 方向に流れる、高分子電解質溶液を考える (Fig. 1.)。静的なプロファイルは文献[1]の平均場方程式 (1, 2) を用いて計算し、動的な性質は力の釣り合い式 (3) によって計算した。高粘度の吸着層が形成されるとき電気浸透流は弱まり、枯渇が起きるときは純溶媒のときの強さに近くなることが明らかになった。塩濃度が小さく、静電引力が強いときには電気浸透流の向きが逆になる現象も見られた (Fig. 2.)。

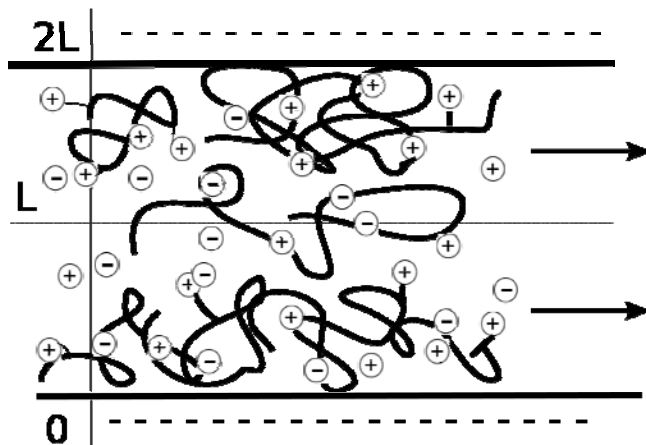


Fig. 1. 系の図式的な描写。正に帯電した 高分子電解質が負に帯電した界面に吸着している。

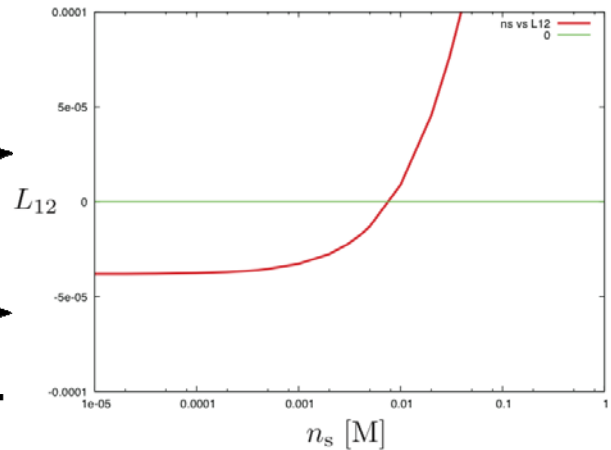


Fig. 2. 塩濃度 n_s に対する、電気浸透係数 L_{12} 。希薄になると電気浸透係数が負になる。

$$\frac{\alpha^2}{6} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = v(\phi^3 - \phi_b^2 \phi) + p\phi\beta e\psi \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\frac{4\pi e}{\epsilon} p(\phi^2 - \phi_b^2 \exp[\beta e\psi]) + \frac{8\pi e}{\epsilon} n_s \sinh(\beta e\psi) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\eta(c) \frac{\partial v_x}{\partial y} \right] + \rho E + P = 0 \quad (3)$$

References

- [1] A. Shafir and D. Andelman, Phys. Rev. E **70**, 061804 (2004).

パウリ常磁性の強い超伝導相における電磁応答

凝縮系理論研究グループ 小形悠

Abstract We study the electromagnetic response in the superconducting phase with antiferromagnetic fluctuations induced by Pauli paramagnetic effect. We find that this effect leads to a remarkable increase of flux flow resistivity.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

重い電子系超伝導体 CeCoIn_5 では、 c 軸に垂直方向に磁場をかけた場合、低温高磁場領域に付加的な超伝導相が生じる。この相は、超音波音速測定や不純物ドーピング実験の結果から、超伝導秩序変数が空間変調した FFL0 相だと考えられている。この低温高磁場相においては中性子散乱実験により反強磁性秩序が観測されている[1]が、これはこの系に特徴的な強いパウリ常磁性効果によるものだと考えられている[2]。

一方、 c 軸に平行方向の磁場下では高磁場反強磁性秩序は見出されていない。しかし、 $H_{c2}(0)$ 直下に量子臨界点があるかのような強い反強磁性揺らぎが存在するため、定性的には垂直磁場下と状況は似ている。

この c 軸平行磁場下の実験において、渦糸格子相内で渦糸フロー抵抗率が磁場の減少とともに増大するという異常な振る舞いが報告されている[3]。通常の第 2 種超伝導体では、電気抵抗は渦糸フローによるものであり、磁場の減少とともに抵抗は減少し、低磁場においては抵抗は磁場に比例する。したがって、この物質では通常とは全く異なる磁場依存性を持っているということになる。

そこで本研究では、パウリ常磁性効果により誘起される強い反強磁性揺らぎを持った超伝導体における電磁輸送現象を調べた。パウリ常磁性の強い状況を考えるため、ゼーマン項と反強磁性揺らぎの項を含めたハミルトニアンを用い、磁場の軌道項については摂動的に取り入れた。以上のモデルから時間依存 GL 方程式を求め、それを用いて渦糸フロー抵抗を計算した。

その結果、Fig. 1 のような結果を得た。ここで、横軸は磁場 H を臨界磁場で規格化したもの、縦軸は次の式で表される渦糸フロー抵抗 ρ_{ff} における γ^{-1} であり、磁場依存性をもたらす本質的な部分であると考えられる。

$$\rho_{ff} = \left(\left\langle |\Delta|^2 \right\rangle_s \frac{2\pi c^2}{\phi_0 B} \gamma \right)^{-1} \quad (1)$$

これにより、磁場の減少とともに渦糸フロー抵抗が増大することが確認された。また、軌道効果により抵抗が抑えられること、及び反強磁性揺らぎの効果も加えると抵抗の増大する磁場領域が広がることが分かった。

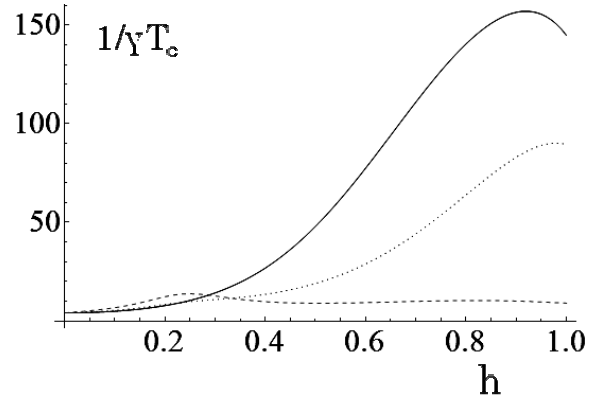


Fig. 1. Magnetic field dependence of γ^{-1} at $T=0.1T_c$. A solid line corresponds to γ^{-1} without orbital effect; a dotted line to one with orbital effect; a dashed line to one with the vertices of antiferromagnetic fluctuations.

References

- [1] M. Kenzelman *et al.*, Science **321**, 1652 (2008).
- [2] R. Ikeda *et al.*, Phys. Rev. B **82**, 060510(R) (2010).
- [3] T. Hu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 056401 (2012).

末端水酸基を有する液晶に発現する 新奇なフラストレートスメクチック相

ソフトマター物理学研究室 木本泰裕

Abstract It has been reported that the molecules with a hydroxyl end group exhibit three types of the Smectic C phases (SmC, SmC', SmC'') [1]. We analyzed these phases' detailed structures using XRD and found that the SmC'' has a conventional bilayer structure and the SmC' has a frustrated bilayer structure.

液晶相には配向秩序のみを持つネマチック (N) 相や、分子長軸方向に一次元層構造を形成したスメクチック A (SmA) 相、更に分子が層法線方向から傾いたスメクチック C (SmC) 相などがある。末端水酸基を有する液晶 I-7 は、相系列中に 3 つの SmC 相が存在することが吉澤らによって報告されている[1]。これは通常の液晶には見られない特徴である。最も高温側に発現する SmC 相は、一分子ごとの層構造(モノレイヤー)を形成し、低温側に現れる SmC' 相, SmC'' 相は二分子ごとの層構造(バイレイヤー)が形成されていることが初期の X 線回折測定より指摘されているが、SmC' 相と SmC'' 相にどのような違いがあるのかについては分かっていなかった。

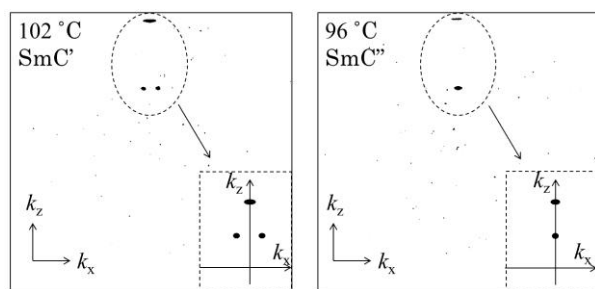


図 1 SmC'相, SmC''相における小角 X 線回折像

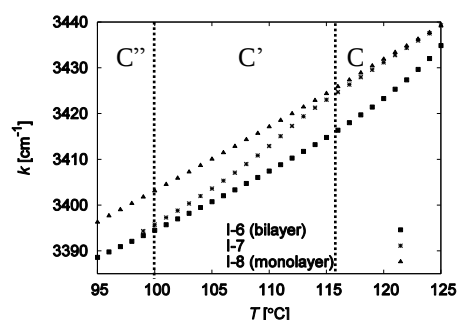


図 2 IR 吸収ピーク波数の温度依存性の比較

本研究ではこれらの相の構造を明らかにするため、小角 X 線回折測定により配向試料で SmC' 相と SmC'' 相を詳細に調べた。その結果、SmC'' 相においては単純なバイレイヤー構造を示す回折像(図 1 右)を得た。一方、SmC' 相ではバイレイヤーに対応する小角側の回折ピークが分裂していることを発見した(図 1 左)。これはモノレイヤー SmA 相とバイレイヤー SmA 相のフラストレーションから生じる二次元変調構造 $\text{Sm}\tilde{\text{A}}$ 相に類似な結果である。よって SmC' 相は $\text{Sm}\tilde{\text{A}}$ 相と類似の SmC (モノレイヤー) 相と SmC'' (バイレイヤー) 相の秩序の競合により発現する新奇なフラストレートスメクチック相だと結論される。

更にバイレイヤーの起源が末端水酸基の分子間水素結合であるという推測に基づき、水酸基の水素結合状態を赤外分光で評価した。水酸基の吸収波数は水素結合が強くなるほど低波数側へシフトする[2]。I-7 と、炭素鎖の長さが異なる同族体 I-6(バイレイヤー Sm 相のみを示す), I-8(モノレイヤー Sm 相のみを示す)の吸収波数を測定し、水素結合の強さを比較した。その結果、I-7 の水素結合は SmC-SmC' 転移点で強くなり始め、SmC'' 相に至って I-6 と同程度の結合が達成されていることが分かった(図 2)。このことから、SmC' 相は一様なバイレイヤーが作られる過程に発現する過渡的な相であることが分かる。

References

- [1] A. Yoshizawa, A. Nishizawa, K. Takeuchi, Y. Takanishi, and J. Yamamoto, *J. Phys. Chem. B*, **114**, pp.13304-13311, (2010)
- [2] 尾崎幸洋・河田聡 編: "近赤外分光法", 学会出版センター (1996)

振動場におけるダンベル物体の自発運動と運動モード分岐

時空間秩序・生命物理研究室

久保善嗣

Abstract It is known that an asymmetric particle such as a screw can move directionally when it is placed on vertically oscillated plate [1]. Even a symmetric dimer displays spontaneous ballistic motion without any anisotropic external field [2]. We investigate a bifurcation between spin+random walk and spin+orbital motion of a dimer by introducing chiral-asymmetry.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

自己推進粒子については多くの関心もたれ、生物・非生物含めてさまざまな実験が行われている[3][4]。例えば、アルコール液滴の自発運動がある。これは、非平衡開放系でのエネルギー変換の一例として注目されている。また、これらの駆動力に応じて運動モードが分岐するなどの非線形な現象も発見されており、自己推進粒子の一般論によって細胞運動などの特殊な個別例の一端が明らかに出来ないかという事にも興味を持たれている。今回の発表では加振機を用いた実験系について発表する。この系では、運動モードに関係するパラメータを連続的に変化させることが可能であり、分岐前後での運動の状態を詳しく調べることができる。

実験の詳細は以下のとおりである。重心位置を中心からずらした円盤を棒の両端につけ、ダンベル状の物体を作り、水平な板の上に置き、鉛直方向に加振する実験を行った。変化させるパラメータは、台の最大加速度を重力加速度で規格化したパラメータ $\Gamma=A\omega^2/g$ (ω は台の角振動数、 A は台の振幅、 g は重力加速度)である。今回は角振動数を一定にし、振幅を変化させた。振動数 50Hz で固定して、振幅を変化させた時の運動の様相を、Fig. 1

に示した。Fig. 1(a)は振幅 0.13mm の場合で物体の中心はランダムに動き、物体自体は回転している。Fig. 1(b)は振幅 0.135mm の場合で自転の周期と一致した公転運動が起こっていることが分かる。角振動数を一定にして、振幅を徐々に大きくすると、(パラメータ Γ が制御変数)ランダムな運動から、公転運動(秩序運動)への運動モードの分岐が観測された。角振動数が 50Hz の時、この分岐が起きるのは $\Gamma=1.4$ の時であり平均二乗変位を求めることで、水平面内における並進運動のゆらぎ成分が、分岐前に比べ分岐後は小さくなることを見出した。分岐前後で衝突の様子を高速カメラで観察すると、衝突のモードが変化することがわかった。これらのことからこの分岐は $\Gamma=1.4$ の時に起きるサブクリティカル分岐であることが分かった。

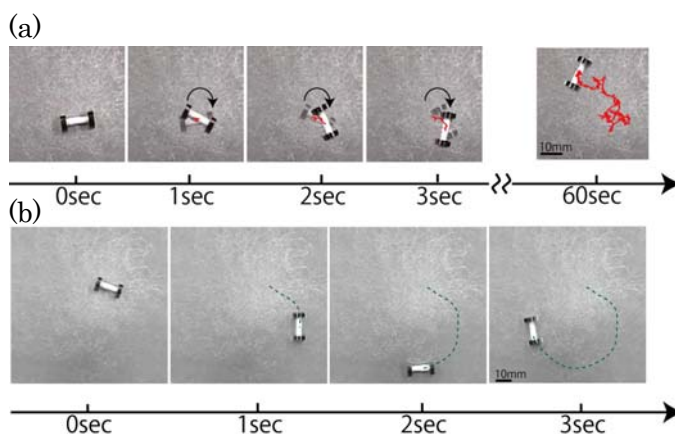


Fig. 1. Trajectory of center of mass. (a)The amplitude of vibrated plate, $A=0.13\text{mm}$. The angular velocity, $\omega=50\cdot 2\pi$. The dimer itself spins and the center of mass moves randomly. (b) The amplitude of vibrated plate, $A=0.135\text{mm}$. The angular velocity, $\omega=50\cdot 2\pi$. The dimer itself spins and the center of mass moves in orbit.

References

- [1] S. Dorbolo. *et al.* "Dynamics of a Bouncing Dimer", *PRL*, 95, 044101 (2005).
- [2] Daizou Yamada. *et al.* "Coherent dynamics of an asymmetric particle in a vertically vibrating bed", *PRE*, 67, 040301 (2003).
- [3] Fumi Takabatake. *et al.* "Spontaneous mode-selection in the self-propelled motion of a solid/liquid composite driven by interfacial instability", *JCP*, 134, 114704 (2011).
- [4] Ken H. nagai. *et al.* "Mode selection in the spontaneous motion of an alcohol droplet", *PRE*, 71(6), 065301/1-4 (2005).

直流電場によって駆動されるマイクロ液滴の運動： 空間スケール依存性

時空間秩序・生命物理研究室 栗村 朋

Abstract Recently, it was found that rhythmic motion is generated on an aqueous droplet in an oil phase under stationary DC voltage. Through the down-sizing of the experimental system, we found the threshold voltage to induce the oscillation decreased. And we derive a simple theoretical model to interpret the size dependence.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

油相中に界面活性剤で安定化した μm スケールの水滴を作成して、直流電場の中での振る舞いを調べた (Fig. 1)。このような液滴は一直線上に配置された電極間において振動運動を示すことが知られている。[1] また、電極を対角線上に配置すると、液滴は回転運動を示す。[2] このような現象はマイクロサイズのモーターやアクチュエータへの応用という点でも興味深い。

今回の研究においては、前者の実験系のサイズダウンによる効果を調べた。電極間距離 L を固定して電圧を上昇させると、静止していた液滴は電極間を往復運動する (Fig. 2)。電極間距離 L を変化させて系統的な実験を進めた結果、 L が $20\text{--}50\ \mu\text{m}$ 程度の時には、 10V 程度の直流電圧印加で、電極間の往復運動が生じることを明らかにした。静止状態と往復運動の間の分岐が、電極間距離 L と印加電圧 V にどのように依存するのかといった点に注目して相図をとると Fig. 3 のようになった。

また、これらの実験結果を説明するために、常微分方程式を用いた往復運動のモデルを作成し、検討をおこなった。モデルにおいては実験で見られた振動転移の依存が再現され、この振動が実空間上の limit cycle 運動である事が明らかになった。

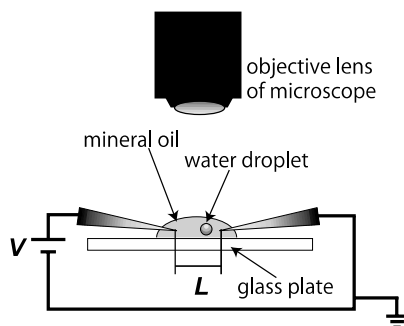


Fig. 1 Schematic representation of the experimental setup.

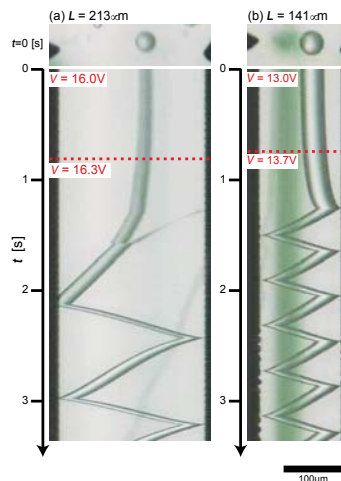


Fig. 2 Spatio-temporal diagram of the motion of a droplet with a diameter of $34\ \mu\text{m}$ at (a) $L=213\ \mu\text{m}$ and (b) $L=141\ \mu\text{m}$.

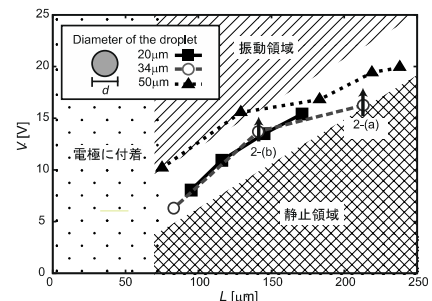


Fig. 3 Phase diagram for mode bifurcation between rhythmic motion and a stationary state.

References

- [1] Hase, et al., PRE **74**, 046301(2006),
- [2] Takinoue, et al. Appl. Phys. Lett. **96**, 104105 (2010)

冷却イッテルビウム-リチウム原子混合系の光格子の開発

量子光学・レーザー分光学研究室 小西秀樹

Abstract We construct a new setup for optical lattice experiments for ytterbium(Yb) and lithium(Li) mixture. We succeeded in reproducing quantum degenerate Yb-Li mixture and introducing 1D optical lattice in the new setup. Spectroscopy of a metastable 3P_2 state of Yb in 1064nm optical trap is also performed.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

光格子中の極低温原子気体系は、制御性に優れ、不純物や格子欠陥を持たない理想的な量子多体系であり、光格子系を用いた固体中の電子の量子シミュレーションに向けた研究が現在盛んに行われている。我々は光格子中のイッテルビウム(Yb)とリチウム(Li)の混合系に着目し、新たな量子多体シミュレータの実現を目的として研究を行なっている。この系の特徴は Yb と Li が巨大な質量比 ($m_{Yb}/m_{Li} \sim 29$) を持つ点である。この巨大な質量比のために Yb と Li は同一光格子に対するトンネル確率が大きく異なり、Yb は局在、Li は遍歴しやすい。この性質を利用して、Yb を局在する不純物、Li を遍歴する Fermi 粒子(電子)とみなした系を構成することができ、不純物の存在によって現れる物性の量子シミュレーションができると考えている。

本研究では、光格子導入のための新たな光学系の組み上げを行った。これまでに我々は $^{174}\text{Yb}-^6\text{Li}$ (Boson-Fermion) と $^{173}\text{Yb}-^6\text{Li}$ (Fermion-Fermion) の同時量子縮退を実現していた[1]。今回、より多くの原子を量子縮退させるために、交差型光トラップ(FORT)のビーム径を上げ、トラップ体積を増やすことにした。しかし、ただビーム径を上げただけでは、蒸発冷却の最終段で重力サグによって Yb と Li の空間的なオーバーラップがなくなってしまう、蒸発冷却によって冷えた Yb との衝突によって Li を冷やす協同冷却の機構がうまく働かなくなってしまう。そこで、水平方向の FORT のビーム径を鉛直方向に絞られた楕円形にすることで鉛直方向の閉じ込めをきつくし、重力サグの影響を補正した。実際に水平 FORT のビーム径を、水平方向に $90\mu\text{m}$ 、鉛直方向に $24\mu\text{m}$ とすることにより、この新たな光学系で、以前より多くの原子数で $^{174}\text{Yb}-^6\text{Li}$ 同時縮退を生成することに成功している(Fig. 1)。さらに光格子についても、Yb 原子と Li 原子をともにトラップすることのできる波長 1064nm で光格子を実装することに成功し、いわゆる pulsed lattice 法により光格子のポテンシャル深さを評価し、Yb 原子が Mott 絶縁体領域に達するまでの十分深いポテンシャルができていることを確認した(Fig. 2)。

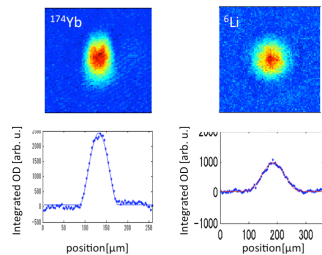


Fig. 1. Momentum distribution of quantum degenerate ^{174}Yb (left) and ^6Li (right).

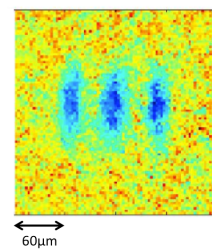


Fig. 2. Interference pattern of Yb by pulsed lattice.

また、Yb 原子の準安定 3P_2 状態と Li 原子の基底状態間の磁氣的 Feshbach 共鳴が存在することが最近の研究から示唆されており[2]、本量子シミュレーション研究においても重要なツールとなりうる。それに向けた第一歩として、Yb の準安定 3P_2 状態への超狭線幅遷移を用いた分光のための光学系を組み上げ、現在、波長 $1\mu\text{m}$ の光トラップ中での分光実験を行っている。

References

- [1] Hideaki Hara *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 205304 (2011).
- [2] Shinya Kato *et al.*, arXiv 1210.2483v3 (2012).

二成分フェルミ粒子系における s 波超流動と乱れの競合

凝縮系理論グループ 阪井田賢

Abstract We systematically analyze the attractive Hubbard model with disorder within the statistical dynamical-mean-field theory, and establish the ground-state phase diagram. We discuss how the attractive interaction and the disorder compete with each other. Also, we discuss the difference between binary disorder and box disorder.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

相互作用と乱れが共存する系の解析は固体物理の世界において長く研究されており、今なお注目を集め続けている問題である。近年、レーザー技術の発展により、冷却原子を用いた実験において乱れた光格子系が実現されている[1]。この系では、結晶中に一様に分布した不純物に起因する乱れ(box disorder)や二元合金型の乱れ(binary disorder)など様々な乱れた光格子を実現することが可能となっており、実験的に乱れの効果や種類による違いを精査する準備は整っている。このため、このような系に対する理論的解析を行うことが急務となっている。

今までの相互作用と乱れが共存する系に対する理論的な解析では、相互作用による量子揺らぎの効果まで取り入れ、かつAnderson局在まで記述することができる手法が開発されておらず、十分な解析が行われていなかった。最近、これを可能とするstatistical動的平均場理論という手法が開発され、様々な成果を上げている[2]。

このような背景の下、本研究では引力ハバードモデルに格子ポテンシャルの乱れの項を加えたモデルにおいて乱れの強さと相互作用に対して系統的な解析を行った。解析手法として、statistical動的平均場理論を引力系においても適用可能であるように拡張し、反復摂動法を援用した手法を用いた。また、乱れの種類による系の応答の変化を調べるために、box disorderとbinary disorderの二つの場合を仮定して解析を行った。これらの解析により明らかとなった基底状態の相図をFig. 1、Fig. 2に示す。Fig. 1から分かるように、ある臨界乱れにおいて超流動が破壊され、乱れが強い領域にはAnderson絶縁体相が現れるということを明らかにした。また、これらの転移点が引力が大きくなるにつれて低下するということを明らかにした。Fig. 2に示すbinary disorderの場合においても超流動転移点に関しては同様の振る舞いが見られたが、binary disorderの場合に特有の相であるBand絶縁体相が確認された。

ここで示した相図で用いられたパラメータ以外での解析を行い、それらの結果から乱れの種類による違いや、種類によらない普遍的な効果について議論する。

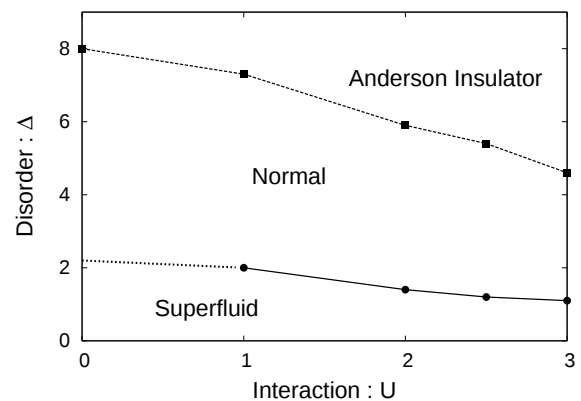


Fig. 1. U - Δ ground-state phase diagram of attractive Hubbard model with box disorder.

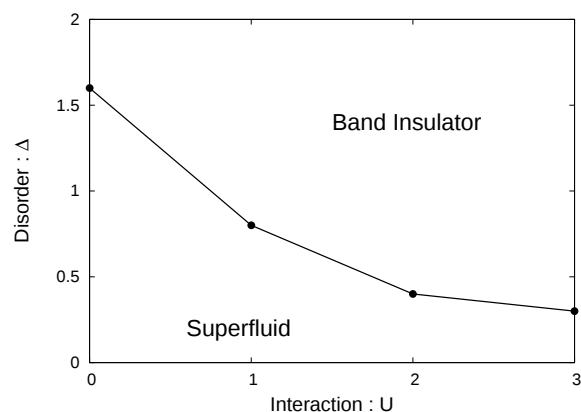


Fig. 2. U - Δ ground-state phase diagram of attractive Hubbard model with binary disorder

References

- [1]Laurent Sanchez-Palencia *et al.*, Nature Physics **6**,87-95 (2010)
- [2]D.Semmler *et al.*, Phys. Rev. B **84**,115113 (2011)

Numerical Analysis of Granular Jet Impacts

Advanced Statistical Dynamics Group

Tomohiko Sano

Abstract We numerically investigate impact processes of granular jets. In three dimensions, the shear viscosity is consistent with the kinetic-theoretical prediction, in contrast to the experimentally-suggested “perfect fluidity,” while the shear stress is small. In two dimensions, because grains are well packed, the critical behavior near the jamming transition is observed.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

Non-equilibrium phenomena induced by impacts have been extensively studied in various contexts, such as nuclear reactions, nanotechnology and granular flows. Recent experimental and numerical studies revealed interesting aspects of impact processes of a granular flow. An experimental paper on dense granular jets [1] has reported that the fluid state after the impact is similar to that for Quark Gluon Plasma (QGP) achieved in heavy ion colliders, where QGP behaves as a fluid with very small viscosity. Quite recently, Ellowitz et al. demonstrated that the solution of inviscid Euler equation is almost identical to that obtained from their molecular dynamics simulation for inelastic hard core particles, at least, for two dimensional frictionless grains [2]. These results are counter intuitive because in a usual setup the dense granular fluid has a large viscosity.

In this study, we investigate impact of granular jets on a fixed wall, in both two (2D) and three dimensions (3D) numerically, by using Discrete Element Method, to study the fluid state after the impacts. Figure. 1 is a snapshot of our simulation on the impact of a granular jet in 3D. We found the following properties of the impact processes of granular jets.

- (i) In 3D, the equation of states and the shear viscosity are consistent with the kinetic theory, while the shear stress is much smaller than normal stresses, due to the small strain rate [3,4].
- (ii) In 2D, because grains are well packed, the asymptotic divergence of the pressure or the shear viscosity similar to the jamming transition, appears [5].
- (iii) In 2D, for bidispersed systems, the effective friction constant defined as the ratio between shear stress and normal stress, monotonically increases from near zero, as the increment of the strain rate. On the other hand, the friction constant has two metastable branches for mono-disperse system because of the coexistence of a crystallized state and a liquid state [5].
- (iv) Both in 2D and 3D, there exist large normal stress differences, which cannot be observed in the perfect fluid [3,5].

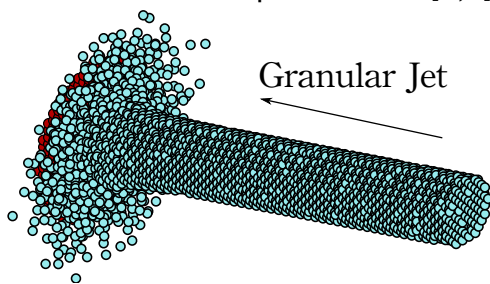


Fig. 1. Snapshot of a 3D simulation.

These results (i)–(iv) may be in contrast to the experimental suggestion of the similarity between granular jets and “perfect fluid.” In particular, the result (i) provides a theoretical explanation of the similarity between granular flow and perfect fluid, which has been reported in an experiment [1] and a 2D study [2]. Through the investigation of the rheological properties, we may conclude that the similarity between the granular flow and the perfect fluid, which comes from a small strain rate, is superficial.

References

- [1] X. Cheng, G. Varas, D. Citron, H. M. Jaeger, and S. R. Nagel, Phys. Rev. Lett. **99**, 188001 (2007).
- [2] J. Ellowitz, N. Guttenberg, and W. W. Zhang, arXiv:1201.5562.
- [3] T. G. Sano and H. Hayakawa, Phys. Rev. E **86**, 041308 (2012).
- [4] T. G. Sano and H. Hayakawa, arXiv:1211.3533, submitted to Powders & Grains 2013.
- [5] T. G. Sano and H. Hayakawa, in preparation.

一様せん断下での引力を持つ散逸粒子のパターン形成

物性基礎論：統計動力学研究室 高田智史

Abstract We have performed three-dimensional molecular dynamics simulation of cohesive granular particles under a plane shear. From this simulation, we found the existence of three distinct phases in steady states. We also found that there exist a variety types of clusters depending on the initial density and the dissipation rate.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

サブミクロンオーダーの微細粒子ではマクロな粉体粒子とは異なり、粒子間に斥力・散逸力だけでなく引力相互作用が働く。この系では引力の存在により、気液相転移[1]と散逸構造[2]の競合が起きる。平衡近傍系での核生成過程についてはよく調べられているが[1]、せん断下ではまだ十分に理解されていない。そこで本研究では粒子間相互作用が Lennard-Jones ポテンシャルとダッシュポットで記述できる粒子系を考え、3次元分子動力学シミュレーションによって非平衡パターン形成について調べた。

まず、x軸方向にせん断をかけ、せん断速度がy軸方向に線形であり、せん断平面に広く奥行きが狭い擬二次元系を考え、せん断率と散逸率を変化させた場合の定常パターンについて調べた。その結果、(I) 一様せん断相、(II) せん断方向に平行に粒子が集積したシアバンドと呼ばれる相と気相の共存状態、(III) 結晶相という3つの異なる定常相が得られた。また、シミュレーションより相 (II) と (III) の境界は近似的に $\zeta = \alpha \exp(\beta \dot{\gamma} L_y)$ と表すことができ、またこのメカニズムが現象論的に説明できることも示した。ここで ζ , $\dot{\gamma}$, L_y はそれぞれ散逸率、せん断率、y軸方向のシステムサイズであり、 α , β は定数である。

次に立方体の系を考え、密度を変化させたときに粒子が集積したクラスターの概形がどのように変化するかを調べた。その結果、(a)液滴、(b)2次元プラグ、(c)2次元平面、(d)逆2次元平面、(e)逆2次元プラグ、(f)一様状態という6つの異なるクラスターの形が得られた。また密度が稀薄な系において、散逸率 ζ がある臨界散逸率 ζ_{cr} より大きい場合には、ある時刻において粉体温度が急減少を始め、この時刻 t_{cl} と散逸率との間に

$t_{cl} = \alpha' (\zeta - \zeta_{cr})^{-\beta'}$ (α', β' は定数) という関係が成り

立つことが分かった。

また、一様せん断相が不安定化する条件について、Lennard-Jones 流体[5]の線形安定性解析が適用可能かについても調べた。

References

- [1] K. Yasuoka, and M. Matsumoto, J. Chem. Phys., **109**, 8451-8462 (1998).
- [2] K. Saitoh, and H. Hayakawa, Phys. Rev. E, **75**, 021302 (2007).
- [3] S. Takada, and H. Hayakawa, submitted to the proceedings of Slow Dynamics in Complex Systems, edited by M. Tokuyama, and I. Oppenheim (AIP Publ., New York), arXiv:1211.3806.
- [4] S. Takada, and H. Hayakawa, submitted to Powders & Grains 2013, arXiv:1211.3801.
- [5] B. C. Eu, "Transport Coefficients of Fluids" (Springer, New York, 2006).

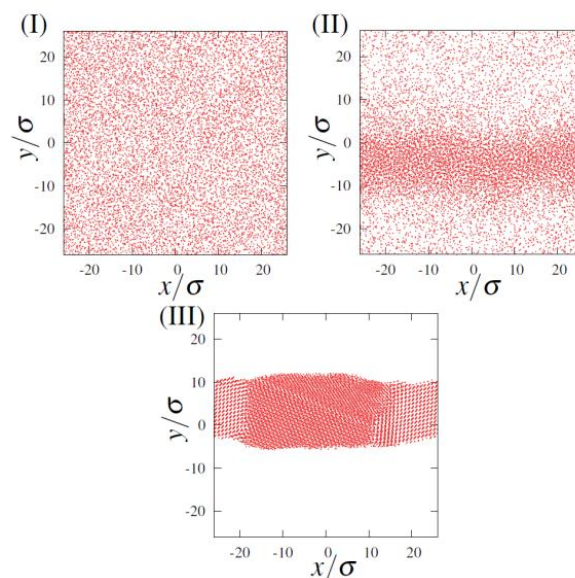


Fig.1. Three typical patterns corresponding three phases: (I) uniform sheared phase, (II) coexistent phases of shear band and gas, and (III) crystal phases.

空間局在構造に対応する非線形モードによる乱流の解析

流体物理学研究室 寺村俊紀

Abstract Turbulence is one of the most familiar nonlinear and nonequilibrium systems. To analyse turbulence from dynamical system point of view, a filtering method for obtaining spatially-localized numerically exact solutions is introduced, and applied to typical one-dimensional equations reproducing the nature of coherent structures observed in turbulence. ©2013 Department of Physics, Kyoto University

乱流状態では層流状態に比べ流体の混合が顕著になるため、各種物理量(熱量、物質、運動量)の輸送の効率が飛躍的に向上する。このため乱流現象の研究は応用的に重要であるが、一方で乱流は最も身近な非線形非平衡現象の一つとして基礎的な重要性も持つ。特にその強い非線形性のため、従来の解析的な手法は役に立たず長らく理論の現象論的な側面を中心として発達してきた。速度場の低次のモーメントで乱流の特性を理解しようとするこの現象論的取り組みは対称性が高い一様等方な乱流に対して一定の成功を得たが、二つの構造、即ち渦の実空間構造と相空間構造を無視している点で不十分であった。実空間の構造を考慮できていないため壁近傍等の簡単な非一様性が入るだけで十分に議論を展開できなくなり、また相空間の構造を無視しているため層流-乱流間の転移やバーストと呼ばれる稀に生じる急激な乱れに対してほとんど無力であった。

一方で近年計算機的能力が飛躍的に向上した事により流体方程式の直接数値計算(DNS)が試みられ、実験よりはるかに詳細な情報を得ることが可能になり、流体中の渦の構造とそのダイナミクスについて理解が深まった。しかしながら、DNSで得られるのはある初期値に対する各時刻での速度場であり、普遍的な渦の構造とダイナミクスを切り出すには別の方法が必要となる。Proper Orthogonal Decompositionや共変Lyapunovベクトル等の手法によりダイナミクスと付随した構造をDNSのデータから切り出す方法が試みられたが、いずれもアトラクターの線形解析にすぎず相空間の構造を十分表現するには至らなかった。

他方、相空間の構造を理解する試みはローレンツアトラクターやミニマル乱流(壁近傍の乱流の統計則を再現する最小の計算領域でのDNS)において数値的になされ、層流と乱流の丁度中間に存在し転移を司るサドル解(定常進行波解,TWS)[1]やバーストに対応する不安定周期解(UPO)[2]、カオス状態の時間相関関数を再現するUPO等の成功を収めている。このように数値的厳密解は系の運動を記述する基本的な解(非線形モード)の候補として期待されるが、現実的なサイズの系に応用するためには大きな困難がある。系のサイズが大きくなると小さいスケールの運動が多数埋め込まれるため運動の自由度が増大する。すると単に厳密解を求める事が難しくなるだけでなく、解は個々の小スケール運動の状態を記述するため膨大な数の厳密解が必要となる。この困難を回避するため、埋め込まれた一つの小スケール運動を表現する厳密解が必要となる。

本論文の目的は上記の様な背景の下、非線形モードとしての空間局在数値的厳密解(spatially localized solutions,SLS)を求める汎用な手法を確立する事である。現在SLSを求める有効な数値手法が存在しないため、本論文では新たな手法を導入する。フィルター法と名づけられたこの手法では人工的に小スケール運動のみを強調する方程式を導入し、その方程式の解を元の方程式の解に接続する事で元の方程式の厳密解を得る事を試みる。本論文ではこの手法の有効性を示すため、流体中に見られる局在構造と同様の構造を持つ方程式、Swift-Hohenberg方程式(SHE)、蔵本-Sivashinsky方程式(KSE)に対してフィルターを適用する。SHEに対して定常SLSが求められ、さらに異なる種類のSLSがフィルター法により接続し得ることを示す。KSEに対しては進行方向に局在したTWSが実際に求まる事を示す。KSEはNavier-Stokes方程式と同様に並進対称性、ガリレイ不変性を持つがこの対称性がもたらす困難とその解決方法についても述べる。これらの結果はフィルター法をより具体的な系に適用する際に必要なノウハウを提供する。

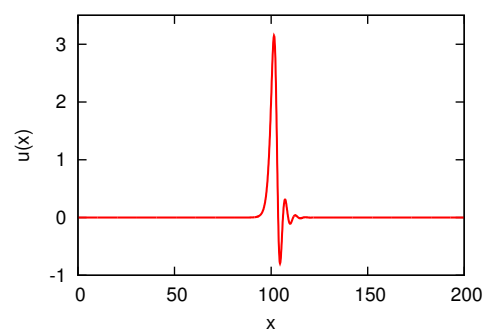


Fig.1 A spatially localized traveling-wave solution to KSE obtained by the filtering method.

References

- [1] T. Itano, S. Toh, JPSJ, **70**, 703-716 (2001)
- [2] G. Kawahara, S. Kida, J.Fluid Mech. **449**, 291-300 (2001)

重い電子系超伝導体 CeCoIn_5 の薄膜を用いた トンネル接合の作製と評価

ナノ量子物性研究室 中村昌幸

Abstract We fabricate the superconductor-insulator-normal metal tunnel junctions of CeCoIn_5 using epitaxial thin films. We measured current voltage characteristics, which shows gap-like features below superconducting transition temperature. We estimate that superconducting gap of CeCoIn_5 is $180\mu\text{eV}$ at 1.53K .

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

重い電子系超伝導体である CeCoIn_5 は $T_c = 2.3\text{ K}$ で超伝導転移を示し、低温高磁場領域で、超伝導相内部に2次相転移が観測されている。 CeCoIn_5 はパウリ常磁性効果が非常に強く、かつクリーンな系であることからFFLO状態が実現している可能性が指摘されている。FFLO状態では、ゼーマン分裂したフェルミ面間でクーパー対が形成されるため、クーパー対が有限の重心運動量を持ち、実空間において周期的にノードが現れることが理論的に指摘されている。このような特異な超伝導状態を持つ物質を理解する上で、その状態密度を直接測定することは極めて重要である。

超伝導-常伝導体で作製されたトンネル接合では、その電流-電圧特性から状態密度のエネルギー依存性を直接的に知ることができ、超伝導ギャップ構造やボゾン励起などの重要な情報を得ることができる[1]。これまでに、バルク試料を用いた CeCoIn_5 のトンネル接合が作られ、その特性が調べられたが[2]、トンネル接合は試料の表面状態に大きく影響を受けるため、再現性ある結果は得られていない。我々のグループでは、 10^{-7}Pa 程度の高真空中での CeCoIn_5 のエピタキシャル薄膜作製に成功しており[3]、微細加工技術を確認することにより、様々な接合が可能になることが期待される。

今回、重い電子系超伝導体 CeCoIn_5 のエピタキシャル薄膜を加工し、面内方向の $\text{CeCoIn}_5/\text{MgO}/\text{MgF}_2/\text{Ag}$ のトンネル接合(Fig.1)を作製した。Fig.2はその電流-電圧特性を示したものである。 1.53K で $180\mu\text{V}$ 付近に超伝導ギャップが確認された。故に、 CeCoIn_5 は 1.53K で $2\Delta \sim 360\mu\text{eV}$ の超伝導ギャップを持つと考えられる。これによりトンネル接合の作製方法が確立されたため、今後低温高磁場領域のFFLO相の状態密度を測定することが可能となった。

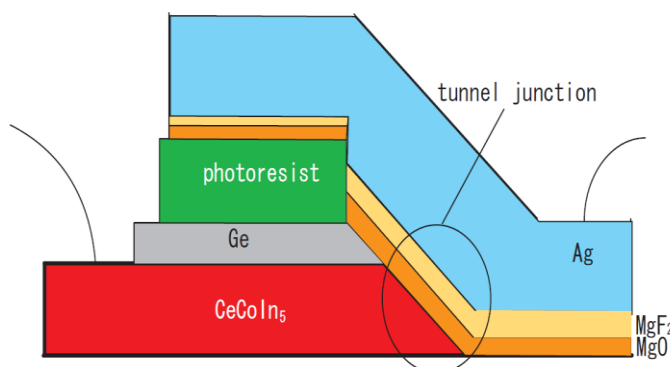


Fig.1: Schematic of a ramp-type tunnel junction. The thickness of CeCoIn_5 , Ge, MgO, MgF_2 and Ag is 120nm , 100nm , 3nm , 7nm and 100nm . Photoresist prevents leak current through In grain on the surface of CeCoIn_5 . The junction size is $50 \times 2\mu\text{m}^2$.

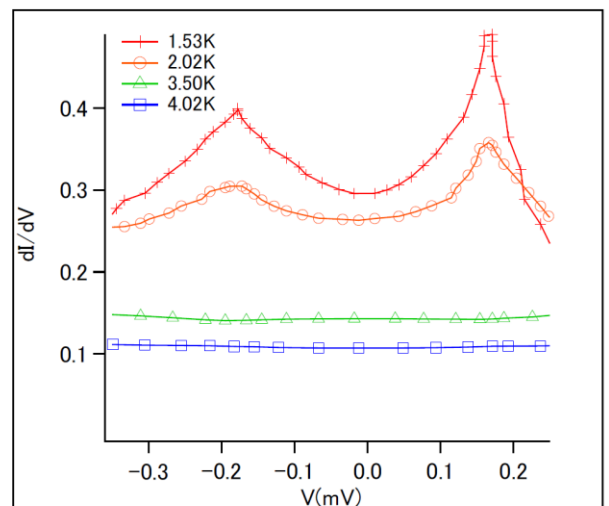


Fig.2: Current voltage characteristics of tunnel junction. Superconducting gap appeared below T_c .

- [1] M. Jourdan *et al.*, Nature **398**, 47 (1999).
- [2] I. P. Nevirkovets *et al.*, Physica C **469**, 293 (2009).
- [3] Y. Mizukami *et al.*, Nature Phys. **7**, 849 (2011).

アルカリ金属流体のコンプトン散乱測定

不規則系物理学研究室 福丸 貴行

Abstract Compton scattering measurements have been carried out for three fluid alkali metals (K, Rb, and Cs) under various thermodynamic conditions, namely in a wide range of electron density. We investigate the behavior of valence electrons and find out the deviation from the electron gas model, which is probably closely related to the metal–nonmetal transition of alkali fluids.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

アルカリ金属は固相および融点近傍の液相では典型的な金属元素として振る舞い、その価電子は電子間相互作用の影響をほとんど受けず自由電子ガス(FEG)模型によく従う。一方、この電子ガスを低密度化すると電子間相互作用の寄与が支配的になり、その過程では圧縮率が負に発散し電子ガスが不安定化するなど電子系が特異な挙動を示すことが理論的に予測されている[1]。

我々はこの低密度電子ガスを実験的に研究するために、アルカリ金属流体の低密度化という手法をとっている。気液共存線を迂回しながら温度・圧力を制御し超臨界状態を経由することにより、液体金属を連続的に膨張させ、任意の密度の電子ガスを実験的に実現することができる[2]。これまでにX線回折実験などから、低密度化の過程では $2\rho_c \sim 3\rho_c$ 前後で最近接原子間距離の低下や密度揺らぎの増加といった構造の不均質化が起きるという結果が得られている[3]。これは低密度化に伴って伝導電子系の挙動がFEG描像から逸脱し、イオン間の有効相互作用が変化するためであると推測されている。

本研究ではこのような伝導電子の挙動やその背景にある低密度電子ガスの性質を探るため、3種類のアルカリ金属(K, Rb, Cs)に対して、三重点近傍から超臨界状態までの広範囲にわたってコンプトン散乱実験を行い、電子の運動量密度分布を測定した。コンプトン散乱では散乱X線のエネルギー分布から直接、電子の運動量密度の散乱ベクトル方向への射影 $J(p_z) \equiv \iint dp_x dp_y \rho(\mathbf{p})$ (コンプトンプロファイル) が得られる。得られたプロファイルから内殻電子の寄与を差し引くことにより、価電子すなわち電子ガスの運動量密度分布、運動エネルギー (図1)、フェルミ運動量などを求めた。

このようにして各密度の金属流体について価電子系の挙動を調べたところ、比較的高密度では電子ガスに相互作用の効果を取り入れた理論計算の結果と定性的に一致した。しかし、低密度側で一様電子ガスとの大きな齟齬が見られ、実験値はより高密度の電子ガスに対する理論値と一致した。これは、この領域で電子ガスが不均一化していることを示唆している。そして、理論計算からの乖離が原子配置の不均一化と同じ密度領域で観測されたことから、電子ガスの不均一化と原子配置の不均一化が相まって進行しているものと考えられる。

また、実験値が低密度側でほぼ一定値に漸近し、その値が電子ガスの不安定化が予測される電子密度に対する理論値と概ね一致することから、原子配置の不均一化が電子ガスの不安定化と深く関連していることが示唆される。本研究で得られた伝導電子の挙動は、アルカリ金属流体の金属–非金属転移に電子ガス不安定化の立場から迫るものであると言える。

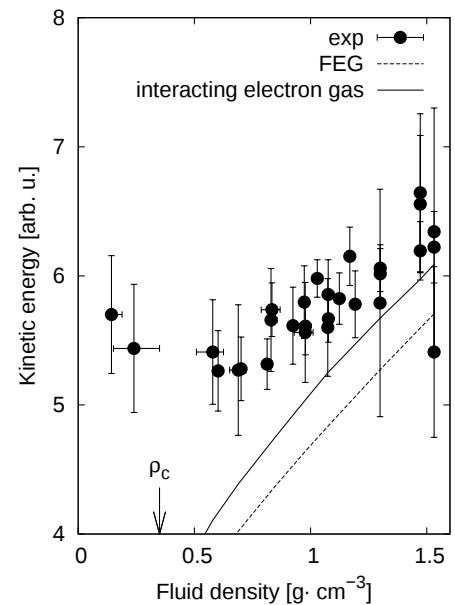


Fig. 1. Kinetic energy of Rb.

References

- [1] S. Ichimaru, Rev. Mod. Phys. **54**, 1017 (1982)
- [2] F. Hensel and W. W. Warren, Jr., “Fluid metals” (Princeton Univ. Press, 1999)
- [3] K. Matsuda, K. Tamura, and M. Inui, Phys. Rev. Lett. **98**, 096401 (2007)

液晶ナノエマルション系における相転移挙動及び配向揺らぎに対する閉じ込めのサイズ効果

ソフトマター物理学研究室 坊野慎治

Abstract We controlled the size of the liquid crystalline nano-emulsions composed of surfactants and thermotropic liquid crystals dispersed in the water. Using the light scattering measurement, we found the size effects of the confinement on the isotropic-nematic phase transition and the orientation fluctuations of nematic confined in the core of nano-emulsions.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

サーモトロピック液晶相を狭小領域に閉じ込めると、そのネマチック - 等方相転移^[1]や配向揺らぎ^[2]がバルクとは異なることが報告されている。しかしこれまでの研究では、空間拘束の次元性は2次元に留まり、少なくとも残る1次元方向には液晶秩序が連続的に広がっている。我々は、両親媒性液晶高分子と低分子液晶から成る液晶ナノエマルションを作成した。液晶ナノエマルションにおいて、低分子液晶は3次的に半径数100nmの疎水コア中に閉じ込められ、水中に分散している。そして、このコア領域の大きさは低分子液晶(LC)と界面活性剤(Surf)の濃度比 $\phi(\text{LC}/\text{Surf})$ を変えることによって制御することができると明らかになった(Fig.1)。そこで液晶ナノエマルションを用いて、疎水コア領域の大きさを変化させ、コア中に閉じ込められた低分子液晶のネマチック - 等方相転移挙動と、配向揺らぎに対する閉じ込め効果を、光散乱実験により研究した。

Fig.2 に、規格化された偏光解消散乱光強度の温度依存性を示す。この偏光解消散乱光強度は、疎水コア中の低分子液晶の配向秩序を反映している。閉じ込め(コア)領域が大きい($\sim 480\text{nm}$)場合には、昇温に伴ってバルクでのネマチック - 等方相転移温度($T_{\text{IN}} \sim 42.8^\circ\text{C}$)とほぼ同じ温度で、散乱光強度は急激に減少する。これは低分子液晶が、バルクと同様に1次転移的にネマチック相から等方相に転移したためと理解できる。一方、閉じ込め領域が小さい($\sim 150\text{nm}$)場合には、バルクの相転移温度 T_{IN} 以上においても、散乱光強度は連続的(2次転移的)に減少する。この相転移挙動の変化は、ランダウの自由エネルギーに界面効果に由来する項を取り入れた、KKLZ モデル^[3]により、定性的に説明できる。つまり、閉じ込め領域の減少に伴って界面効果が支配的になったため、相転移挙動が連続的なふるまいに変化したと考えられる。また、バルクにおける液晶の配向揺らぎの緩和時間は、拡散モードの分散関係を満たし、散乱ベクトルの大きさ q_{ob} の-2乗に比例して加速することが知られている。しかし、エマルション半径を小さくすると q_{ob} に対する依存性を失い、代わりに閉じ込め領域の大きさ R から見積もられる波数($q_{\text{con}} \sim 2\pi/R > q_{\text{ob}}$)に依存して変化することが明らかになった。これは3次的な閉じ込めにより、 q_{con} よりも小さな波数の配向揺らぎが、存在できなくなったためと理解できる。

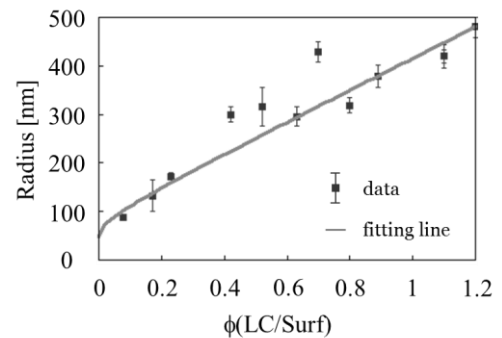


Fig.1 Radius of liquid crystalline nano-emulsions as a function of the concentration of liquid crystals.

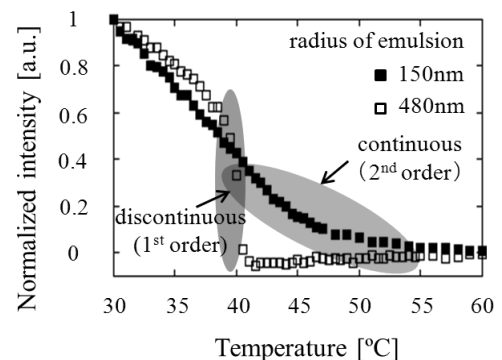


Fig. 2. Temperature dependence of normalized depolarized light scattering intensity of nano-emulsions.

References

- [1] A. V. Kityk, et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 187801 (2008)
- [2] J. Yamamoto, et al., Nature **409**, 321 (2001)
- [3] Z. Kutnjak, et al., Phys. Rev. E **68**, 021705 (2003)

量子ホール状態 $\nu=2/3$ における 磁気抵抗増大現象の占有率依存性

ナノ量子物性研究室 三谷昌平

Abstract We have measured the current and filling factor dependences of the longitudinal resistance enhanced by large current around $\nu=2/3$ quantum Hall state. From the experimental results, we find out that the temperature dependence of the longitudinal resistance changes from insulating behavior to metallic behavior depending to the filling factor.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

半導体界面に形成される2次元電子系は、量子ホール効果など次元性特有の興味深い物理現象を示す。量子ホール状態 $\nu=2/3$ は電子スピン偏極状態と非偏極状態が存在する特徴を持ち、1998年にこの量子ホール状態で磁気抵抗の増大現象が観測された[1]。大電流を流してゆっくり磁場掃引を行うことにより、磁気抵抗が数倍に増加したのである。その後、核磁気共鳴周波数の交流磁場を加える実験が行われ、磁気抵抗の増大には核スピンが関与していることが明らかとなった。その結果、 $\nu=2/3$ 量子ホール状態においては異なる電子スピンドメインが存在し、ドメイン間を電子が移動する際に電子スピンと核スピンの交換が起こり核偏極を進め、そして偏極した核スピンにより電子が局所磁場を受け電子スピンドメインが成長すると理解されている。しかしなぜ大きな磁気抵抗が発生するのか、現象の発見以来メカニズムは謎のままであった。最近津田らは測定電流を変えて磁気抵抗の温度依存性を測定する方法により、核偏極が不純物の役割をして金属-絶縁体転移が生じていることを確認した[2]。この測定方法には電流の増大が温度の増大になることを利用している。

我々はこの実験をさらに進め、30分間60nAの大電流を流して核スピン偏極を引き起こし、さらに $0.45 < \nu < 0.75$ の範囲で、核スピン緩和時間よりも早く、30秒間で占有率を変化させて磁気抵抗を測定した。これは、ある占有率で偏極を受けた核スピンが別の占有率の電子状態に与える影響を調べることを意味する。さらに測定電流を変えることで、それらのすべての測定点について金属的か、絶縁体的かを判別することができる。高電流における抵抗が低電流における抵抗よりも小さければ温度依存性は負であり、絶縁体を意味する。[Fig. 1]は測定結果の一例であり、核スピン偏極の位置Fは $\nu=0.64$ (偏極相) とし、測定電流を流す際の占有率依存性、および電流値の2つの因子を変数としてプロットした抵抗増大の様子である。この場合は偏極相で抵抗が大きく増大して絶縁体となり、非偏極相では逆に金属的な温度依存性を示す量子ホール状態のままである。点線は核偏極前の測定であり、 $\nu=2/3$ の位置が偏極相と非偏極相の転移点となり抵抗のピークが現れている。

結論として、我々は抵抗増大状態を作ったのち、占有率依存性を調べる手法を開発し、偏極状態では絶縁体状態、非偏極状態では量子ホール状態となることが分かった。従って偏極状態で「不純物」となった核偏極は、非偏極状態では全く「不純物」とならないことが明らかになった。さらに核スピン偏極位置Fを変える測定も行ったので、その結果も発表する。

References

- [1] S. Kronmüller, W. Dietsche, J. Weis, and K. von Klitzing, Phys. Rev. Lett. **81**, 2526 (1998).
- [2] S. Tsuda, M. H. Nguyen, D. Terasawa, A. Fukuda, and A. Sawada, submitted to J. Phys. Soc. Jpn.

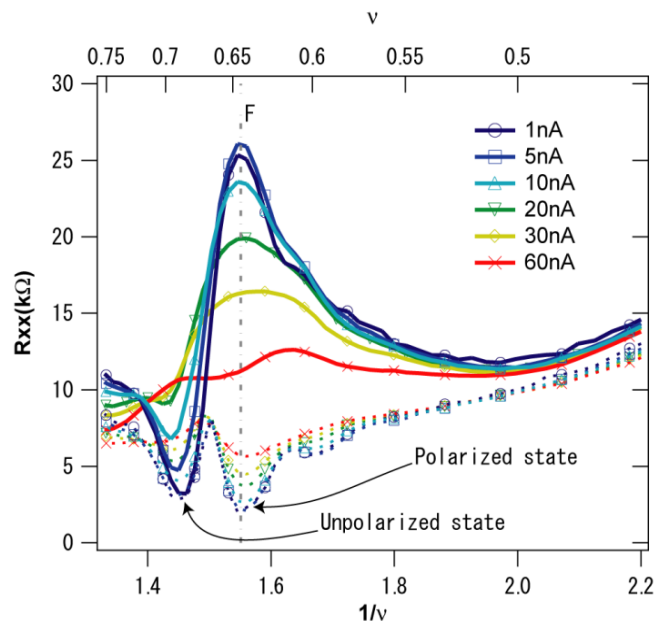


Fig. 1. Longitudinal resistance before (dotted lines) and after (solid lines) pumping as a function of the inverse of filling factor $1/\nu$.

重い電子系超伝導体 CeCoIn_5 の Yb 希釈による Kondo hole の研究

固体電子物性研究室 安元 智司

Abstract We fabricate homogeneous $\text{Ce}_{1-x}\text{Yb}_x\text{CoIn}_5$ thin films by using MBE. In sharp contrast to bulk samples, lattice constant decreases with x . In addition, the superconducting transition temperature is much strongly suppressed with Yb doping. These provide evidence that valence fluctuation does not play an important role in electronic properties of $\text{Ce}_{1-x}\text{Yb}_x\text{CoIn}_5$.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

Ce や U などを含んだ多くの化合物においては、低温で f 電子が格子を組んで近藤格子を作り、その強い電子相関から重い電子系が形成される。さらにその重い電子系物質の中には、重い電子が対を組んだ超伝導状態が実現する物質があり、 CeCoIn_5 はそうした物質の代表格である。 CeCoIn_5 は反強磁性量子臨界点近傍に位置するとともに、2.3 K という重い電子系としては極めて高い超伝導転移温度を示す物質で、近藤格子と超伝導状態の関連の研究には最適な対象である。こうした近藤格子系に不純物を導入したとき、不純物が系の超伝導状態、及び常伝導状態にどのような影響を及ぼすかについてはいまだ不明な点も多く、活発な研究が行われている。

CeCoIn_5 の Ce サイトの一部を希土類元素 R で置換したとき、超伝導転移温度 T_c 及び重い電子が伝導し始めるコヒーレント温度 T_{coh} は強く抑制されることが報告されている [1]。しかし Yb を導入したバルク結晶 $\text{Ce}_{1-x}\text{Yb}_x\text{CoIn}_5$ においては、固溶体合金の格子定数は組成とともに直線的に変化するという Vegard 則を破る (Fig. 1) とともに、 T_c の弱い抑制と T_{coh} の不変が報告されている [2]。このような振る舞いをする原因としては、 CeCoIn_5 への Yb 希釈系では Yb の価数に 2 価から 3 価の間で不安定性が発生し、そうして発生した価数揺らぎにより超伝導が安定化するという可能性が指摘されている。しかし試料の不均一性がこうした振る舞いの原因になっている可能性も否定できない。

そこで我々は分子線エピタキシー法 (MBE 法) により高品質な $\text{Ce}_{1-x}\text{Yb}_x\text{CoIn}_5$ のエピタキシャル薄膜の作製を行った。MBE 法は比較的低温の非平衡状態で希釈系の結晶を成長させるため、均一な結晶の生成が期待できる。実際、作製した薄膜の結晶格子の c 軸長は Vegard 則に従っており (Fig. 1)、Yb が 2 価の状態を保ちながら均一に希釈されていることを示唆している。

さらに、得られた試料について低温での電子輸送係数測定を行った。その結果、J. Paglione ら [1] が R 希釈系で報告したような T_c の強い抑制が観測され、L. Shu らのバルク結晶 $\text{Ce}_{1-x}\text{Yb}_x\text{CoIn}_5$ の結果 [2] とは大きく異なる結果が得られた (Fig. 2)。

他にも T_{coh} の抑制などバルク $\text{Ce}_{1-x}\text{Yb}_x\text{CoIn}_5$ とは異なる振る舞いが現れており、このことは MBE 法によるエピタキシャル膜の作製が希釈系での不純物効果の研究に有用であることを示すとともに、 $\text{Ce}_{1-x}\text{Yb}_x\text{CoIn}_5$ で価数揺らぎがもし存在したとしても、常伝導、超伝導状態に大きな影響を及ぼさないことを示唆している [3]。

References

- [1] J. Paglione *et al.*, Nat. Phys. **3**, 703 (2007).
- [2] L. Shu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 156403 (2011).
- [3] M. Shimozawa *et al.*, Phys. Rev. B. **86**, 144526 (2012).

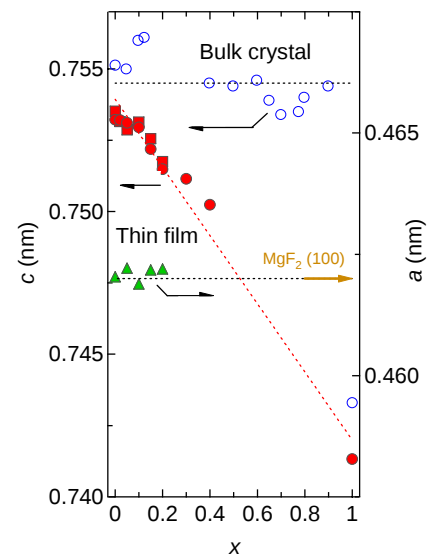


Fig. 1. Lattice constants of bulk and thin film $\text{Ce}_{1-x}\text{Yb}_x\text{CoIn}_5$.

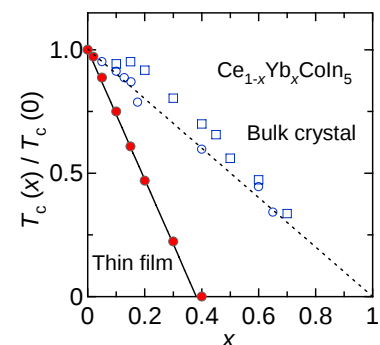


Fig. 2. Suppression of T_c of bulk and thin film $\text{Ce}_{1-x}\text{Yb}_x\text{CoIn}_5$.

局所密度依存速度をもつ自己推進粒子の 集団ダイナミクス

非線形動力学研究室 山中貞人

Abstract The dynamics of deformable self-propelled particles where the migration velocity is increased depending on the local density is investigated numerically in two dimensions, and it was found that traveling solitary waves appear when the influence of the density dependence is fairly strong.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

外力を受けず自発的に運動する能力を持つ粒子を自己推進粒子として共通の枠組みで捉えることは、鳥や魚といったマクロな動物から、バクテリアや分子モーター、あるいは加振により駆動された粉体などのミクロな系にいたるまで、非平衡な集団のダイナミクスを解明するのに有用な概念である。これまでに、alignment効果や排除体積相互作用など粒子間の近接相互作用を考慮することで、秩序無秩序相転移や多様なパターンを理解するために数多くの研究がなされてきた。

ところが近年、特に魚やバクテリアの群れにおいては周囲の流体を媒介とした長距離の粒子間相互作用が、集団ダイナミクスに対して重要な役割を果たしているという可能性が示唆されている[1,2]。例えば、Sokolovらによるバクテリアの一種を用いた実験では、溶液中を運動するバクテリアの運動速度がその密度とともに増加するという結果が得られている[3]。これは多数のバクテリアが集まったときに、そのまわりの流体ゆらぎが増幅され各粒子の運動速度の変化にフィードバックされるためであると考えられている。本研究では、こうした流体を介した長距離相互作用が自己推進粒子系のダイナミクスに及ぼす影響を調べるため、変形可能な自己推進粒子のモデルを応用し[4]、粒子の局所密度が高い環境では速度が大きく、局所密度が低い環境では速度が小さくなる自己推進粒子のモデルを用いて2次元数値シミュレーションを行った。

その結果、粒子速度の局所密度依存性が十分強いときに、密度の高いソリトン状の秩序相が低密度の無秩序相の中を進行してゆく現象を見いだした。この孤立密度波が生じる原因として、運動速度の局所密度依存性が密度ゆらぎを増大させて均一な空間分布が不安定化するため、高密度な領域でネマティックな秩序化が起こるためであると考えられる。さらに、孤立密度波のメカニズムを探るために、ノイズ強度および系全体の粒子数密度の変化に対する振る舞いを調べた。なお、孤立密度波は異なるモデルでChatéらによっても見つけられている[5]。これらの非自明な自己推進粒子系のダイナミクスは、非平衡な相転移現象を理解する上での一つの興味深い例であると考えられる。

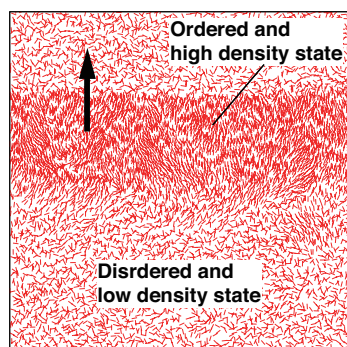


Fig. 1. A typical snapshot of the traveling solitary wave. A high density band region, in which particles are nematicallly ordered, travels in the direction of a black arrow.

References

- [1] A. Sokolov *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109**, 248109 (2012).
- [2] H. P. Zhang *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **107**, 13626 (2010).
- [3] A. Sokolov *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 158102 (2007).
- [4] T. Ohta *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 154101 (2009).
- [5] H. Chaté *et al.*, Phys. Rev. E **77**, 046113 (2008).

カゴ状超伝導体 $A_xV_2Al_{20}$ におけるラットリング現象

固体量子物性研究室 山中 隆義

Abstract : We have studied rattling motion and superconductivity in cage-structured compounds $A_xV_2Al_{20}$ ($A = Ga, Al, La$) with NMR/NQR measurements. We found that the $Al_{0.3}$ sample exhibits conventional s-wave superconducting behaviors. Moreover, in $Ga_{0.5}V_2Al_{20}$, we found the enhancement of spin-lattice relaxation rate $1/T_1$ below 10K, ascribed to the Ga rattling motion.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

ラットリングは局所的な非調和振動に特徴づけられるイオンや原子の巨大振動で、これによって生じるフォノンが様々な物性に影響を与えると考えられている。特にβパイロクロア酸化物の KOs_2O_6 ($T_c = 9.6K$) では K イオンのラットリングにより超伝導転移温度が高くなっていることが強く示唆され[1], 注目を集めている。しかしラットリングによる超伝導発現機構の解明には至っておらず、両者の相関を突き止めるためにもラットリングの特性を理解することは重要である。

KOs_2O_6 と同様にラットリングと超伝導の関係が指摘される物質に $A_xV_2Al_{20}$ ($A = Ga, Al, Y, La$) がある。 $A_xV_2Al_{20}$ は空間群 $Fd-3m$ に属し、Fig.1 のように 16 個の Al 原子からなるカゴに A イオン（ゲストイオン）が内包された構造を持つ。電気抵抗や比熱の測定がすでに行われており、半径の大きな La, Y がゲストイオンの場合は通常金属の温度依存性を示すのに対して、小さな Ga, Al がゲストイオンの場合は低温域の一部で電気抵抗・比熱の増大が見られ、ラットリングの存在を示唆する低エネルギー励起の報告がなされている。さらにこの異常が大きいほど超伝導転移温度が高いことから[2], $A_xV_2Al_{20}$ におけるラットリングと超伝導の関係に興味が集まっている。

我々は $A_xV_2Al_{20}$ におけるラットリングの動的な性質と超伝導特性を調べるために様々な A_x について NMR/NQR 測定を行った。核スピン-格子緩和率を温度で割った $1/T_1T$ の温度依存性を Fig.2 に示す。まず $A_x = Al_{0.3}$ の試料では超伝導転移温度（約 1.5K）以下で顕著なコヒーレンスピークと指数関数的な減少を見出した。これは超伝導が等方的なギャップを持つ s 波であることを示唆している。またイオン半径のもっとも小さな $A_x = Ga_{0.5}$ では 10K 以下の温度から増大し、3K 付近にブロードなピークが見られる。これは低温域に現れるラットリングフォノンによる緩和と考えられる。このピークの大きさには周波数依存性が見られる。この周波数依存性に適合するモデルとして BPP (Bloembergen – Purcell – Pound) モデルを用いて、ラットリングフォノンの揺らぎを特徴付ける時間 τ_c を求めた。その逆数 $1/\tau_c$ は通常のアレニウス則ではなく T^2 に比例することが分かった。この温度依存性よりラットリングが通常の格子振動よりはるかに低温まで振動していることを明らかにした。

References

- [1] J. Yamaura *et al.*, J. Solid State Chem. **179**, 336 (2006).
- [2] A. Onosaka *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 023703 (2012).

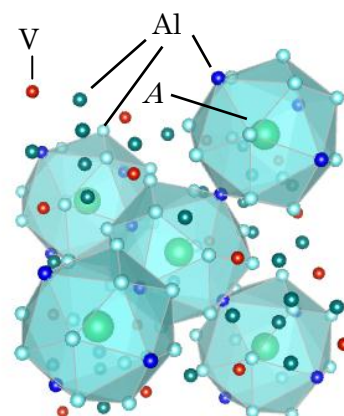


Fig. 1. A part of the crystal structure of $A_xV_2Al_{20}$.

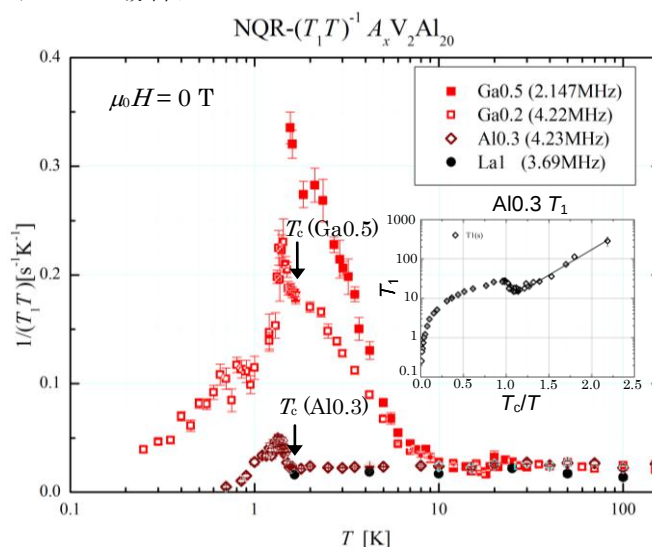


Fig. 2. Spin-lattice relaxation rate divided by T of $A_xV_2Al_{20}$.

量子スピン液体の磁気励起の研究

固体電子物性研究室 渡邊大樹

Abstract We report the magnetic torque measurements of $\text{EtMe}_3\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$, a promising candidate of quantum spin liquid with 2D triangular lattice. A finite magnetic susceptibility is observed in the zero-temperature limit, indicating the presence of gapless “magnetic” excitations. The results suggest a novel quantum critical phase in the frustrated Mott insulators.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

絶対零度においても量子ゆらぎによってスピンの磁気秩序を起こさず融解した量子スピン液体状態は、過去数十年にわたって興味を持たれ理論面を中心に研究されてきた。一方で、現実のバルクの物質では量子スピン液体状態の実現例がなく、量子スピン液体の理解における大きな妨げとなっていた。最近、三角格子をもつ二種類の2次元有機モット絶縁体において量子スピン液体状態を持つ候補物質が発見され、非常に注目を浴びている。

その一つである $\text{EtMe}_3\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ はスピン 1/2 をもつ $\text{Pd}(\text{dmit})_2$ 二量体が2次元反強磁性三角格子をなす結晶構造をもつ。この物質は 250 K 程度の大きな交換相互作用 J をもつにもかかわらず、10 mK の極低温においても磁気的秩序を示さない量子スピン液体となっていることがいくつかの実験によって示されている。これまでに $\text{EtMe}_3\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ の極低温熱伝導率測定が行われ、この系のスピン液体状態はエネルギーギャップをもたない準粒子励起があることが明らかになっている[1]。しかし、この励起が磁気的な励起 ($S \geq 1/2$) か、非磁気的な励起 ($S = 0$) については明らかではなかった。励起が磁気的かどうかを明らかにすることは、この系の基底状態の性質を明らかにする上で極めて重要である。

そこで、低エネルギー励起の磁気的性質に敏感な物理量である極低温での磁化率を求めるために、不純物スピンの影響を受けにくい磁気トルクを $\text{EtMe}_3\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ とその重水素置換体について極低温 (30 mK $\sim J/10,000k_B$)、超強磁場 (32 T) まで測定した[2]。その結果、どちらの試料でも絶対零度極限において磁気トルクから見積もったスピン磁化率が有限に残ること (Fig. 1.) と、17 T まで磁化が磁場にほぼ比例して増加することを見出した。このことは熱伝導率測定によって見つかったギャップレス励起は磁気的な励起 ($S \geq 1/2$) を含むことを直接的に示している。

ギャップレスな磁気的励起の存在は、この量子スピン液体状態が、スピン相関が漸近的に距離のべきで減衰する臨界的な状態にあることを示す。さらに重水素置換によってフラストレーションの度合いが変化するが、我々はこの系でも同様のギャップレス磁気励起の存在を観測した。これらの結果はギャップレススピン液体が相図において量子臨界点ではなく、有限の広さを持つ安定な相として存在すること示唆している (Fig. 2.)。このことはモット絶縁体の中に新奇量子相が存在することを意味する。

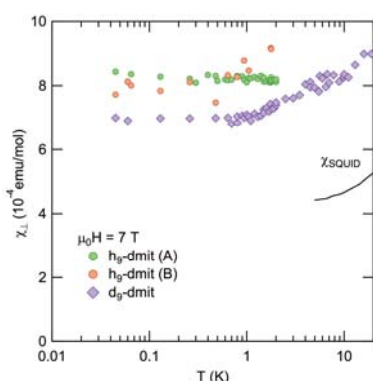


Fig. 1. Temperature dependences of magnetic susceptibility of $\text{EtMe}_3\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ (h_9 -dmit) and its deuterated compound (d_9 -dmit).

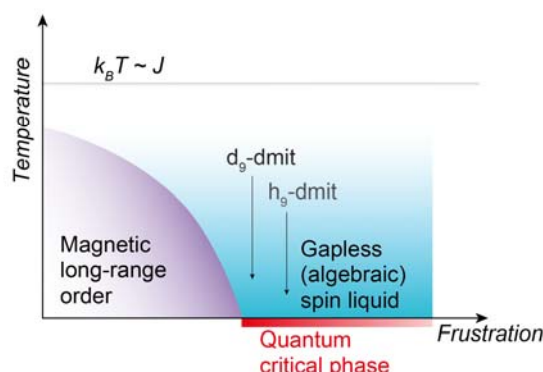


Fig. 2. Schematic phase diagram of temperature versus frustration for Mott insulating antiferromagnets with 2D triangular lattice.

References

- [1] M. Yamashita *et al.*, Science **328**, 1246 (2010). [2] D. Watanabe *et al.*, Nat. Commun. **3**, 1090 (2012).

Conformation and Dynamics of Confined Circular DNA Molecules

時空間秩序・生命物理 LEE Yoju

Abstract We report here conformation and dynamics of a circular DNA molecule in a thin slit by use of fluorescent microscopy. The length of the major axis, diffusion coefficient and relaxation time were directly measured.

Polymer is ubiquitous in nature and widely used in industrials because of their remarkable properties. The physical properties of materials composed of these macromolecules show completely different from those of small molecules. This can be understood by the configuration or the connectivity of polymers. As for experimental studies on polymers, ensemble experiments such as rheological measurements, light, X-ray and neutron scattering measurements have been applied on the polymer materials. However, it is difficult to identify single molecule dynamics of the polymer through the experiments.^[1]

DNA, which contains genetic information, is also a polymer. Besides its important role in living cells, the relatively large size enables us to observe the Brownian motion and fluctuation in the real time and space using fluorescent microscope.^[2] Also, in the case of linear DNA, it is possible to get a narrow length distribution. For this reason, linear DNA has been well-studied and theoretically established. On the other hand, the experiments on circular DNA are not enough due to the difficulty of synthesizing, although cyclic DNA is found in prokaryotic and most cloned DNA constructs are circular.^[3] Not only those biological importance, circular DNA would be a appropriate experimental model of a circular chain in polymer physics.

Here we report a fluorescent microscopic observation on circular DNA in confined condition. The dilute solution of fluorescent labeled DNA was sandwiched between two cover glasses, and their separation was controlled from 1.25 μm to 10 μm . The typical image is shown in Fig. (A). Based on the movie data, the length of the major axis L , diffusion coefficient D and the relaxation time τ were directly estimated. Figure (B), (C) and (D) respectively show D , τ and L as a function of the slit distance d .

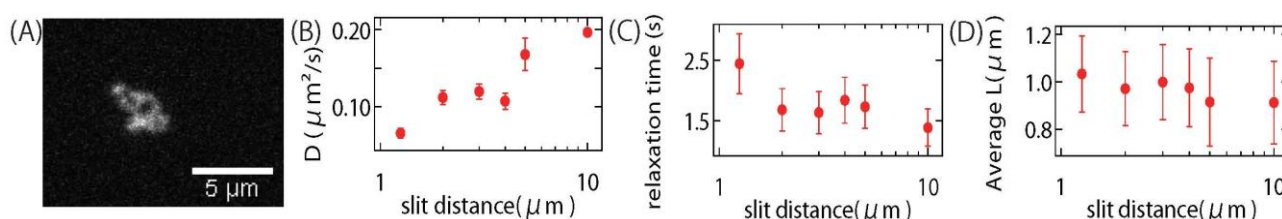


Fig. (A) Typical fluorescent microscopic image of a circular DNA. This is taken the slit distance is 1.25 μm . (B) Dependence of diffusion coefficient on the thickness of a slit. (C) Dependence of relaxation time on the thickness of a slit. (D) Dependence of the average major length of a DNA molecule on the thickness of a slit.

References

- [1] Masao Doi, *Introduction to Polymer Physics* (Oxford University Press, 1996).
- [2] M. Yanagida, Y. Hiraoka, I. Katsura, *Cold Spring Harb Symp Quant Biol* 1983 47: 177-187
- [3] Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K. & Walter, P. *Molecular Biology of the Cell* (Garland, New York, 2002)

グラフェン電界効果トランジスタにおける テラヘルツキャリアダイナミクス

光物性研究室 浅井岳

Abstract We have fabricated a millimeter-scale single-layer graphene field effect transistor device and electrically controlled the Fermi energy. Fermi energy dependence of the terahertz carrier dynamics is discussed.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

グラフェンは炭素原子 1 層の六角格子構造をした 2 次元物質で、その構造のために低エネルギーでのエネルギー分散関係は、一般的な放物線型のバンド構造と違ってギャップがゼロの直線的なバンド構造を形成する。そのため、バンド間光吸収が周波数によらず一定となり、その吸収率が $\pi \alpha \sim 2.3\%$ と微細構造定数で決まっているなど、光学特性に関して特異な点が明らかになっている[1]。本研究ではディラックフェルミオンの高周波輸送特性に興味を持ち、バンド内でのテラヘルツキャリアダイナミクスに着目した。先行研究によると、グラフェン中のキャリアのテラヘルツ帯域から赤外帯域の伝導度がドルーデ型を示すことが報告されている[2]が、不純物散乱や電子間散乱の影響については実験的に明らかになっていない。そこで、フェルミエネルギーを変化させることでキャリア密度のテラヘルツキャリアダイナミクスに対する影響について、テラヘルツ光技術を用いて解明することを目的とした。

グラフェンは電界効果トランジスタ (FET) 構造を用いて電氣的に電荷をドーピングし、フェルミエネルギー E_F を操作することで、伝導特性を簡単に変化させることができることから、図 1 のような構造をしたグラフェン FET デバイスを作製した。基板は高ドーピング Si、絶縁体として Si の酸化膜 (300 nm 厚) を用いており、グラフェンと基板の高ドーピング Si が平行平板コンデンサとして働き、グラフェンに電荷を注入することができる。また、2つの電極 (ソース、ドレイン電極) 間に定電圧 V_{ds} を印加し電流値を測定することによって、グラフェンのシート抵抗を観測できる。ゲート電圧 V_g を変化させ、グラフェンのシート抵抗を測定した結果を図 2 に示す。 $V_g = 18\text{ V}$ の位置に抵抗値のピークが見られる。これは挿入図のようにフェルミエネルギーが線形分散の交点 (ディラックポイント) に一致し、電荷中性点となっていることを示している。このグラフェン FET デバイスを用いて、テラヘルツ時間領域分光法による動的伝導率測定や、光励起キャリアからのテラヘルツ光放射測定を行い、テラヘルツキャリアダイナミクスについて議論する予定である。

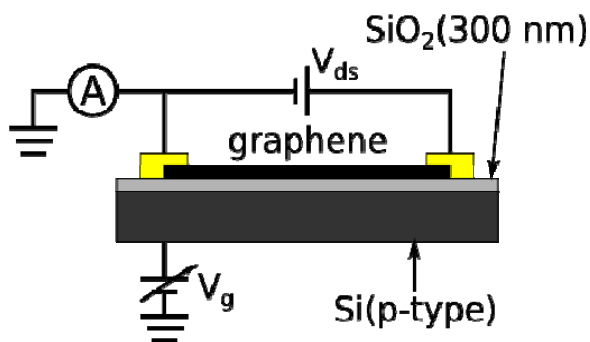


Fig. 1. The illustration of graphene field effect transistor fabricated.

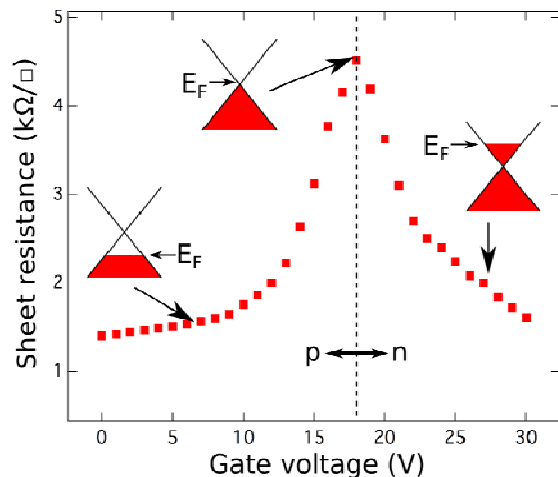


Fig. 2. Sheet resistance of a graphene FET device as a function of gate voltage. The insets show its conical low-energy spectrum $E(k)$, indicating changes in the position of the Fermi energy E_F with changing gate voltage.

References

- [1] A. B. Kuzmenko et al., Physical Review Letters **100**, 117401 (2008).
- [2] J. Horng et al., Physical Review B, **83**, 165113 (2011).

荷電リン脂質膜界面における 動的なひも状ミクロパターン形成

時空間秩序・生命物理研究室 伊藤弘明

Abstract This paper reports on non-equilibrium pattern formation of charged phospholipids on a cell-sized phospholipid monolayer. The pattern grew from thread-like structure to network structure accompanied by adsorption of charged lipid micelles from bulk onto the monolayer. The results indicate that charged phospholipids play crucial roles in mesoscopic interfacial phenomena.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

生命は細胞というマイクロメートルスケールの最小単位から構成され、細胞の内外はリン脂質を主成分とする膜構造により隔てられている。このような生体膜は、膜内外の物質濃度や力学的な変化に応答し、膜変形や分裂、タンパク質の発現といった動的な生命現象を発現する場であることが知られている。また、生体膜は荷電脂質を含む他成分脂質膜であり、荷電効果もカップルすることで生命現象はより複雑で興味深いものとなっている[1]。言い換えると、「生きている」という状態は、荷電を有する生体膜における、非平衡な界面現象を通して保持されていると考えられる。現在までに、細胞サイズのリン脂質膜小胞を用いた膜界面の研究は数多く行われてきているが、それらの大部分は、中性脂質のみを用い、自由エネルギー最小の熱力学的平衡論を基盤として解釈するものであり、荷電に着目した物理学・物理化学的な研究や非平衡過程の理論的な取り扱いは見ても非常に少ない。したがって、メゾスケールのリン脂質膜界面の、荷電効果とカップルした動的特性を調べることは、非平衡条件下での界面現象という物理学の重要な課題となっているだけでなく、生命現象の解明にも寄与すると期待できる。

本発表では、細胞サイズのリン脂質膜を用いた非平衡な界面現象として、油中水滴表面に並ぶリン脂質単分子膜上での荷電脂質のひも状パターン形成を報告する[2]。本研究の目的は、荷電効果に強く依存したメゾスケールのソフトマターの動的な非平衡現象を、実時間・実空間観察により捉えることである。

右図 1 に油中水滴表面に並ぶ脂質単分子膜の模式図と共焦点顕微鏡像を示す。脂質組成は荷電脂質 DOPS、中性脂質 DOPC 及び Cholesterol の混合系を用いている。荷電リン脂質 DOPS の存在下で、膜界面にひも状のパターンが現れ、衝突・連結を経てネットワークに成長する現象が観察された。蛍光画像の経時解析から、このネットワークは約 $10\ \mu\text{m}$ の均一な網目サイズをもつことがわかった。特性長の存在は、本パターン形成がフラクタル構造を生む純動力学的なパターン形成ではないことを示している。加えて、パターン成長は、バルク油相からの、荷電脂質から成る逆ミセルの吸着供給を伴う非平衡過程であることも顕微鏡観察及びその経時解析によりわかった。荷電逆ミセルは、油中を 3 次元拡散して油水界面に吸着した後、界面上を 2 次元拡散しながら凝集する動的なパターン形成プロセスを辿る。そこで、ミセルの供給と静電相互作用を取り入れた数理モデルを構築して修正モンテカルロ・シミュレーションを行ったところ、実験とよく対応する動的パターン形成が再現された (図 2)。

Reference

- [1] T. Yeung *et al.*, Science **319**, 210-213 (2008).
- [2] Hiroaki Ito *et al.*, J. Chem. Phys. **136**, 204903 (2012).

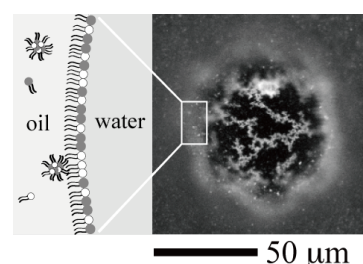


Fig. 1. Thread-like pattern of charged phospholipids DOPS on the lipid monolayer.

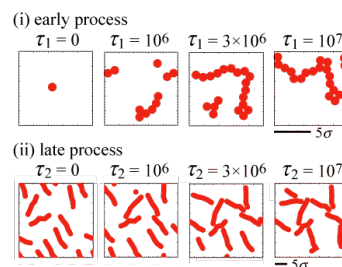


Fig.2. Time development of the thread-like pattern obtained from biased Monte Carlo simulation on two-dimensional surface.

エアロジェル中液体 ^3He の熱輸送についての研究

低温物理学研究室 伊藤 良介

Abstract We study transport properties of quasi-particle of liquid ^3He in aerogel. Aerogel modifies the scattering of ^3He quasi-particles that play an important role in transport of heat or spin. To study the effect of aerogel on the scattering we measured thermal conductivity of liquid ^3He in aerogel with NMR technique.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

液体 ^3He は固体中の電子系などと比べ高い純度が実現でき、また液体のため格子欠陥なども存在しないので非常にクリーンなフェルミ量子系の一つであるといえる。また、バルク液体 ^3He については理論と実験とがよく一致し理解が進んでいるため、不純物の存在によって物理的性質がどのような影響を受けるのか研究するのに良い系である。

エアロジェルはシリカの細い糸が複雑に絡まりあった構造を持つ非常に空孔率の大きな物質で、シリカの糸によって熱やスピンの輸送を担う液体 ^3He の準粒子は散乱されるため、液体 ^3He に対する不純物としてよく研究されている。シリカの糸間の典型的な大きさ(構造長)が数 10~100nm と、温度低下とともに T^{-2} で発散するバルク液体 ^3He の平均自由行程長と 10mK 付近で同程度の大きさを持つ。このため、バルクの平均自由行程長が構造長を超える低温ではエアロジェル- ^3He 準粒子間の散乱が支配的となり、有効的な平均自由行程長が温度に依存しなくなることがスピン拡散係数の測定で確認されている[1]。スピンと熱の輸送では準粒子の散乱振幅異方性の違いがあるので、同一ではないが同様の平均自由行程長に依存する熱伝導率においても温度依存性の変化が期待される[2]。また、バルク-エアロジェル界面での準粒子の散乱による界面熱抵抗の効果なども期待される。

本実験では NMR を用いて空孔率 98% のエアロジェル中の液体 ^3He に対して熱伝導率の測定を行い、エアロジェルが準粒子の散乱に与える影響を調べることを目的とした。超流動転移温度の測定などから、エアロジェル内部は完全に均一というわけではなく局所的な構造長が分布している構造であり、そのため輸送に関する物理量も局所的な分布を持つと考えられる。エアロジェル中の液体 ^3He の熱伝導実験は他の方法によっても行われているが、得られているものはエアロジェル全体で平均された熱伝導率であり、バルク-エアロジェル界面の熱抵抗は無視されている。加えて、支配的な散乱過程が変化する温度を含む 20mK 以上の領域では、サンプルの構造上エアロジェル中を通る以外の熱伝導の経路の影響

が大きくなっているがその補正もモデルを仮定しており直接測定できているわけではない[3]。

我々はエアロジェル表面に生成する固体 ^3He の信号強度を温度計として利用した。固体 ^3He の磁化率は Curie-Weiss 則に従って温度変化するため NMR の信号強度から温度情報を得ることができる。また、位置情報を得るために静磁場に加えて磁場勾配を熱流方向に加えた状態で NMR を行った。この方法を用いてバルク-エアロジェル界面の熱抵抗の補正なしでエアロジェル中液体 ^3He の局所的な温度分布情報を直接得ることができた(Fig. 1)。

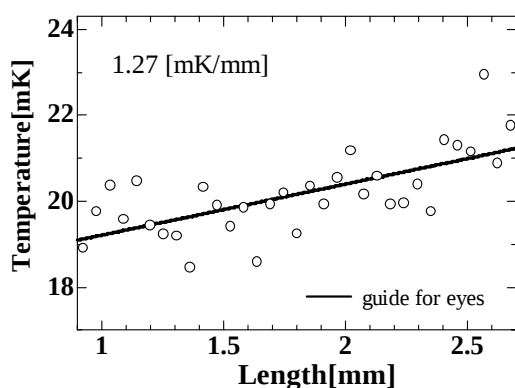


Fig. 1. Temperature gradient of liquid ^3He in aerogel.

References

- [1] J. A. Sauls, Yu. M. Bunkov, E. Collin, H. Godfrin, and P. Sharma, Phys. Rev. B **65** 024501 (2002)
- [2] J. A. Sauls and P. Sharma, New Journal of Physics **12** 083056 (2010)
- [3] P. A. Reeves, G. Tvalashvili, S. N. Fisher, A. M. Guenault, and G. R. Pickett, J. Low Temp. Phys. **126** 673 (2002)

異方性の強いエアロジェル中のヘリウム3の 超流動相図についての研究

凝縮系理論研究グループ 大石良祐

Abstract An experiment of superfluid ^3He in aerogel with global anisotropy shows there exists a 2nd-order phase transition from BW phase to pure polar phase at low pressure. However, previous theories didn't predict presence of such a direct transition. I search possibilities of this transition by extending the anisotropic scattering model[1].

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

エアロジェル中の超流動ヘリウム3は研究が盛んに行われており、等方的なエアロジェル中のヘリウム3の超流動は不純物散乱の効果によって超流動転移温度がバルクの場合より下がり、現れる対状態はバルクの場合と同じく BW(Balian-Werthamer)状態と ABM(Anderson-Brinkman-Morel)状態の2種類のみであることがよく知られている。

近年は BW 状態や ABM 状態とは異なる対状態が現れる可能性のあるものとして、一軸的な圧縮や伸張を加えることで一様な異方性をもったエアロジェル中での超流動ヘリウム3が注目されており、過去に行われた理論研究[1]において、(1) 超流動転移点直下で polar 状態の安定な領域が現れること、(2) バルクや等方的なエアロジェル中の超流動ヘリウム3とは異なり、ABM 状態の安定な領域が低圧にも広がっていること、が報告されている(Fig. 1 参照)。このとき ABM-polar 転移線近傍ではバルクの ABM 状態とは異なり、歪みをもった ABM 状態が実現している。

一方最近行われた実験[2]では、高圧においては BW 状態から ABM 状態への一次転移のみを示しているのに対して、低圧においては BW 状態から ABM 状態を介さず二次転移で直接 polar 状態へと転移することが報告されている。この低圧での振る舞いは、前述の研究[1]の(2)の特徴とは異なっている。

本研究では、研究[1]で行われた近似を弱めて Ginzburg-Landau 自由エネルギーを導出し、低圧における BW 状態から polar 状態への直接の二次転移が起こる可能性があるかを調べた。

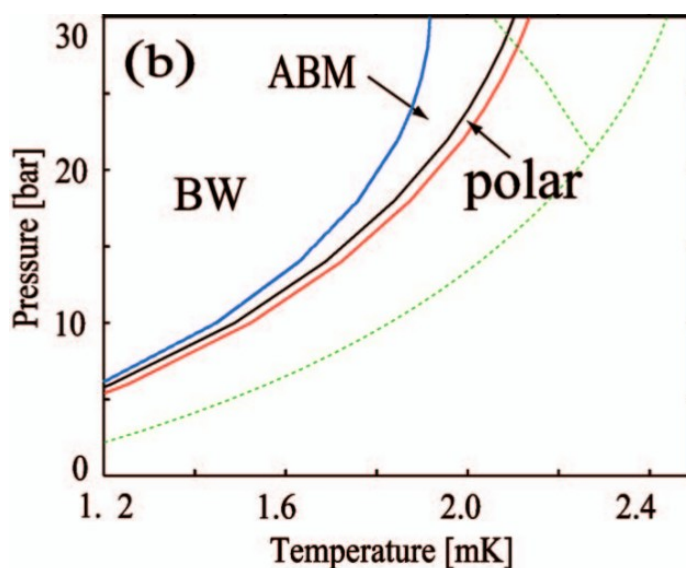


Fig. 1. Phase diagram of superfluid ^3He in uniaxially stretched aerogel in Ref. [1]. The solid curves are transition lines in aerogel, while dotted curves are those of bulk liquid.

References

- [1] Kazushi Aoyama and Ryusuke Ikeda, Phys. Rev. B 73, 060504(R) (2006).
- [2] R.Sh.Askhadullin *et al.*, JETP Lett. **95**, 326(2012).

熱磁効果および比熱の測定による Sr_2RuO_4 の特異な超伝導相図の研究

固体量子物性研究室 梶川 知宏

Abstract We have studied the magnetocaloric effect and specific heat of Sr_2RuO_4 using an extremely clean crystal in order to investigate its superconducting phase diagram. As a result, we for the first time revealed that the superconducting phase transition is of 1st order at low temperature and for field parallel to the ab plane.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

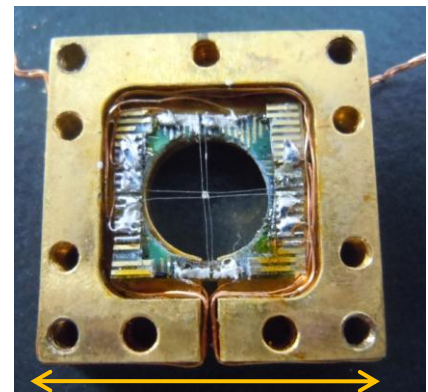
Sr_2RuO_4 は層状ペロブスカイト構造を持つ超伝導転移温度 T_c が 1.5 K の超伝導体である。核磁気共鳴[1]や偏極中性子散乱[2]によるナイトシフトの測定からスピン磁化率が超伝導状態になっても変化しないことが示されたため、スピン三重項超伝導体であることが有力である。この Sr_2RuO_4 には他にも様々な興味深い性質が知られている。その中で超伝導相図に関するものとして、比熱[3]や磁化[4]などの実験から結晶の ab 面方向に磁場をかけたときに、(1)超伝導二段転移、(2)従来の軌道効果から予測される上部臨界磁場 H_{c2} よりも実際の H_{c2} が抑制される現象、(3) H_{c2} 付近で物理量が急激に回復する現象が報告されている。しかし、これらの現象の起源はまだ解決されていない。そこで、これらの現象を新たな観点から研究するために熱磁効果測定と比熱測定を非常に純度の高い Sr_2RuO_4 の単結晶を用いて行った。

熱磁効果と比熱を同じ装置で測定できるように新たに Fig. 1 のような装置を開発した。中央にそれぞれ二本の導線 (Pt-W 線) で吊られた温度計とヒーターを設置し、試料は温度計とヒーターの間に挟んでグリースで固定する構造になっている。この装置の特徴は、非常に小さな温度計とヒーターを用いているため 1 mg 以下の試料を用いることができる点である。そのため、結晶のうち純度の高い部分だけを使って測定することができる。

この装置を用いて二つの単結晶試料の測定を行ったが、そのうちのより純度の高い試料 Sample2 に対して磁場を a 軸方向にかけたときの熱磁効果の測定結果が Fig. 2 である。縦軸の温度変化はエントロピーの磁場微分に比例する。この結果は H_{c2} において過冷却とエントロピーの飛びが生じることが示している。すなわち、低温の超伝導転移が一次相転移であるという明確な証拠を初めて確認した[5]。超伝導一次相転移の起源として Zeeman エネルギーによって超伝導が壊される Pauli 効果が知られている。しかし、最初に述べたように Sr_2RuO_4 では超伝導状態と常伝導状態のスピン磁化率が同じであることから Pauli 効果は起こらないと考えられる。即ち、現在のスピン三重項のシナリオではこの一次相転移の起源を説明できず、超伝導と磁場の新たな相互作用の存在が示唆される。また、比熱の測定でもこの一次相転移が観測され、さらに二段転移の兆候も観測できた。

References

- [1] K. Ishida *et al.*, Nature **396**, 658 (1998).
- [2] J. A. Duffy *et al.*, Phys. Rev. Lett. **85**, 5412 (2000).
- [3] K. Deguchi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **71**, 2839 (2002).
- [4] K. Tenya *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 023702 (2006).
- [5] S. Yonezawa, T. Kajikawa, Y. Maeno, to be published in Phys. Rev. Lett. (2013).



2 cm

Fig.1: Equipment for magnetocaloric effect and specific heat measurements.

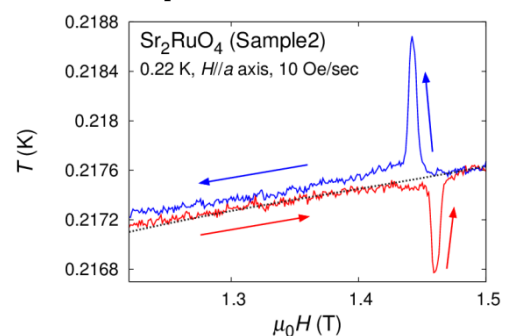


Fig.2: Result of the magnetocaloric effect measurement of an extremely pure crystal. The peak structure at $\mu_0 H_{c2} \sim 1.45$ T, as well as the difference in the onset of the peaks between the up and down-sweep curves, indicates a 1st order transition.

イッテルビウム量子気体を用いた基底状態分子の 解離限界近傍における高精度光会合分光

量子光学・レーザー分光光学研究室 菊地 悠

Abstract We performed two-color photoassociation spectroscopy on quantum degenerated Yb atoms to measure binding energies of ground state rovibrational levels with high precision. These values were utilized to determine inter-atomic potential. From this potential, correction of Born-Oppenheimer approximation and possible effect of quantum gravity can, in principle, be revealed.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

中性 2 原子間のポテンシャルを精度よく決定することは、原子分子物理学のみならず量子化学においても基本的かつ重要な問題である。特に重い原子からなる 2 原子分子では相対論的效果や多体電子相関効果が重要になり理論計算が極めて困難となり、高精度の測定によってポテンシャルを実験的に決定することが重要である。

本研究ではイッテルビウム (Yb) 原子に着目した。Yb 原子は量子縮退が達成されている原子種の中で最も原子番号が大きい。また最外殻電子が 2 個だけなので基底状態での電子スピンの 0 となり、基底状態のポテンシャルが一つしか存在しないため計算と実験の比較が容易である。さらに安定同位体がボソン 5 種、フェルミオン 2 種と豊富に存在するため、Born-Oppenheimer 近似の補正や原子核の有限体積効果、さらには近距離重力項の探索[1] など、質量に依存する効果の検証に有利である。これまでこのポテンシャルを決定するために量子縮退に達していない Yb の原子集団を用いて各同位体の最浅準位への 2 光子光会合 (2PA) が行われ[2]、その測定結果をもとに Lenard-Jones 型の原子間ポテンシャルが求められていた[2, 3]。

本研究では量子縮退した Yb の原子集団を用いて 2 光子光会合を行った。ボソンである ^{170}Yb と ^{174}Yb の 5 つの準位に関しては kHz オーダーの実験誤差で束縛エネルギーを決定した。またフェルミオンである ^{173}Yb についてフェルミ縮退した気体を用いて初めて 2 光子光会合を行い、2 つの準位の束縛エネルギーを決定した。Fig. 1 に典型的な 2 光子光会合のスペクトルを示す。

これらの実験で求められたデータをもとに、束縛エネルギーが 5 つ以上測られている ^{170}Yb と ^{174}Yb のそれぞれについてフィッティングを行い、各同位体のポテンシャルの質量依存性を調べた。その結果、Lenard-Jones 型モデルポテンシャルや *ab initio* 計算のポテンシャルでは実験結果と合わないことが明らかになった。現在、それに代わる新しいモデルを考察している。また、今後、この同位体依存性から Born-Oppenheimer 近似の補正項の寄与や短距離重力の効果の検証ができると考えている。

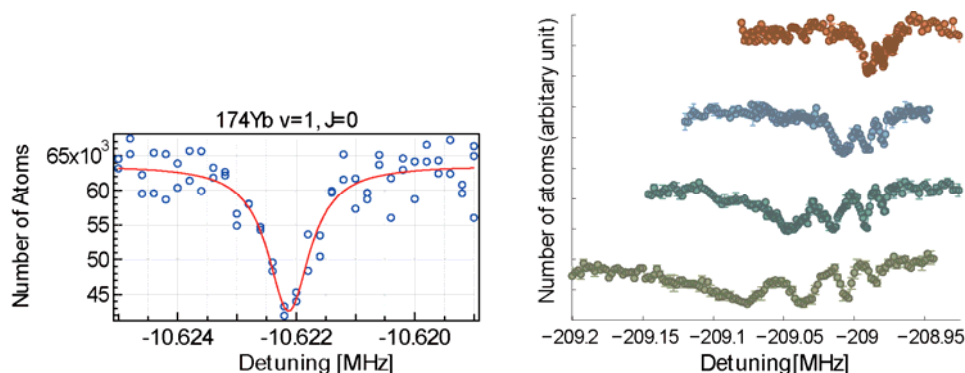


Fig. 1. Typical spectrum of 2PA. (Left) Spectrum of ^{174}Yb . (right) Spectrum of ^{173}Yb .

References

- [1] V. V. Nesvizhevsky, *et al.*, Phys. Rev. D **77**, 034020 (2008)
- [2] M. Kitagawa, *et al.*, Phys. Rev. A **77**, 012719 (2008).
- [3] M. Borkowski, *et al.*, Phys. Rev. A **80**, 012715 (2009).

高次 Rydberg 状態の発光分光による 亜酸化銅励起子の緩和ダイナミクスの研究

光物性研究室 北村達矢

Abstract We have investigated relaxation dynamics of excitons in cuprous oxide by measuring photoluminescence spectra of Rydberg states. We find that both the relative intensity and the linewidth of photoluminescence increase with increasing exciton density. This result indicates that the exciton-exciton scattering plays an important role in the intra-excitonic relaxation processes.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

半導体中の電子と正孔がクーロン束縛した励起子は、水素原子の Rydberg 状態に類似したエネルギー構造を持つ。高次の Rydberg 状態からの励起子発光(以下、高次励起子発光と呼ぶ)は、最低エネルギー状態である 1s 励起子への速い冷却により輻射確率が低くなるなどの理由から、物性研究においてほとんどの場合に無視されてきた。しかし、光励起によって高温に生成された励起子は、高次の励起子状態を経て 1s 励起子状態に達するため、その発光は励起子の緩和ダイナミクスと強い相関を持つものであると考えられる。励起子の緩和ダイナミクスを理解することは、半導体と光の相互作用を理解する上で極めて重要な課題であり、高次励起子発光を利用することで、これまで理解が不十分であった励起子準位間のエネルギー緩和過程の解明につながる可能性がある。

そこで、明瞭なワニア励起子系列を持つことで知られる酸化物半導体、亜酸化銅のバルク結晶並びにナノ薄膜試料を用いて、高次励起子の発光分光による励起子緩和ダイナミクスの研究を行った。本研究では、最大で主量子数 $n=7$ までの励起子系列の発光ピークを観測することに成功した。亜酸化銅における高次励起子発光は $n=5$ までの励起子系列が観測されているが詳しい報告はなく[1]、他物質を含め、今回最も高次の Rydberg 状態を観測することが出来た。図 1(a)に、1s 励起子発光の強度で規格化した高次励起子発光スペクトルの励起光強度の違いによる変化の様子を示す。励起光強度が強いほど、高次励起子発光の相対的増強が観測された。これは励起子-励起子非弾性散乱である Auger 過程による熱化の影響で、励起子準位間の実効的な冷却レートが低下していることに由来すると考えられる。図 1(b)に、3p、4p、5p 励起子発光の線幅の励起子密度依存性を示す。発光ピークの線幅は高次励起子の緩和によって決まり、フォノン散乱による励起子密度に依存しない緩和成分と、Auger 過程による励起子密度に比例して増加する緩和成分に分けることが出来る。実験結果は、高次の励起子準位であるほど、励起子-励起子散乱の緩和に対する寄与が大きくなることを示唆している。本研究ではさらに、格子温度依存性や試料依存性の結果をまとめるとともに、ナノ薄膜試料で観測された高次励起子の寄与が非常に大きい発光スペクトルについても、励起子緩和ダイナミクスとの関係性を議論する。

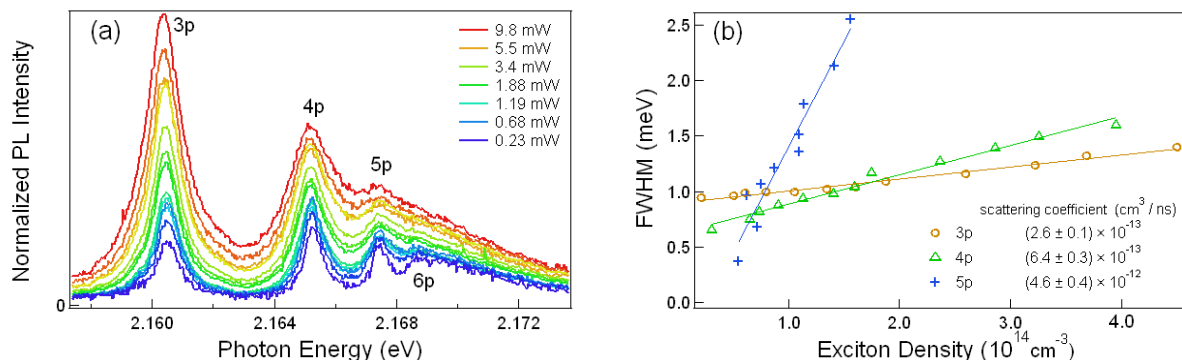


Fig. 1. (a) Photoluminescence spectra of Rydberg excited states of excitons in cuprous oxide at 4 K, under various excitation densities. The intensity is normalized at the 1s peak. (b) Linewidth of 3p, 4p, and 5p peaks as a function of exciton density. The solid lines represent fitting results with linear functions giving the scattering coefficient.

Reference

[1] A. Compaan and H. Z. Cummins, Phys. Rev. B, **6**, 4753 (1972).

ホールドーピングしたカーボンナノチューブの 励起子構造の研究

ナノ構造光物性研究室 樹本好央

Abstract We have studied the exciton structures of undoped and hole-doped single-walled carbon nanotubes using one- and two-photon photoluminescence excitation spectroscopy. The energy of the first excited $2g$ state of the E_{11} exciton is redshifted, while that of the ground $1u$ state is blueshifted, as the hole-dopant concentration increases. These findings indicate that reduction in the band-gap energy is induced by hole doping.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

単層カーボンナノチューブ(SWCNT)は、直径 1 nm 程度、長さが数 100 nm から数 μm の円筒状の 1 次元物質である。強い量子閉じ込め効果により、電子とホールの束縛状態である励起子の束縛エネルギーは数 100 meV と非常に大きく、励起子は室温でも安定に存在する。そのため励起子が SWCNT の光学特性を支配する。近年、ホールドーピングされた半導体 SWCNT において、1 個の電子と 2 個のホールの 3 体束縛状態である荷電励起子が室温で観測され[1]、ドーピングされた SWCNT の物性に注目が集まっている。また高密度にキャリアドーピングした半導体においては、励起子準位やバンドギャップエネルギー(E_g)が変化することが知られている。しかし 1 次元系では振動子強度が励起子の基底準位に集中するために、通常の吸収及び発光の測定から励起子の高エネルギー準位や E_g を決定することは困難である。そこで本研究では、1 光子吸収測定と 2 光子発光励起測定を行い、ホールドーピングによる SWCNT の励起子準位の変化を明らかにすることを試みた。1 光子吸収ピークは励起子基底準位である $1u$ 準位に対応し、2 光子吸収のピークは励起子励起準位である $2g$ 準位に対応する[2]。さらに、 $1u$ 準位と $2g$ 準位から E_g を見積もった。

CoMoCAT 法により作製された SWCNT をポリフルオレンを用いてトルエン中に分散した溶液試料を用いた。ホールドーピングは、有機物 p 型ドーパントである $F_4\text{TCNQ}$ のトルエン溶液を試料に加えていくことで行った。Figure 1(a)に 2 光子励起による発光と 1 光子吸収スペクトル及び 2 光子発光励起スペクトルを示す。2 光子吸収により励起子が $2g$ 準位に生成された後、 $1u$ 準位に緩和し発光する。励起波長を変えながら発光強度を測定し、 $2g$ 準位を決定した。

Figure 1(b)に $1u$ 準位と $2g$ 準位のドーパント濃度依存性を示す。ドーパント濃度の増加に伴い $1u$ 準位はブルーシフト、 $2g$ 準位はレッドシフトを示した。これらの結果から、ホールドーピングにより E_g は減少することが明らかになった。見積られたホール数は、100 nm あたりに数個程度であった。これは、少数のホールをドーピングすることにより、励起子準位やバンドギャップエネルギーが変化することを示している。

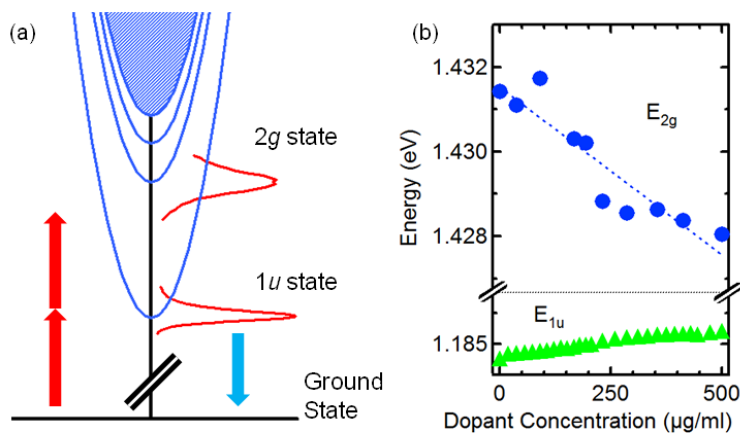


Figure 1(a) Schematic diagram of the exciton states in SWCNTs. The lowest and first excited exciton states correspond to the $1u$ and $2g$ states, respectively. (b) Dopant concentration dependence of the first excited exciton energy (E_{2g}) and the lowest exciton energy (E_{1u}).

References

- [1] R. Matsunaga *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 037404 (2011).
- [2] F. Wang *et al.*, Science **308**, 838 (2005).

ゲノム DNA 二重鎖切断の定量的計測と解析

時空間秩序・生命物理学研究室 下林俊典

Abstract By use of the single-molecule observation, we count the actual number of DNA double-strand breaks (DSBs) caused by gamma-ray irradiation with genome-sized DNA molecules. We find that the probability of double-strand breaks decreases markedly as the DNA concentration increases, and give a theoretical interpretation on the experimental observation.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

放射線による DNA 二重鎖切断(DSBs)は生命にとって非常に重篤な損傷である。それ故にここ半世紀の間、生体内・試験管内の双方で二重鎖切断についての多くの研究がなされてきた。しかしながら、ゲノムサイズ DNA の二重鎖切断を定量的に計測できる手法は未確立であった。更に、得られた統計データを説明する理論モデルも十分とは言えない。その原因として、従来の免疫蛍光抗体法やパルスフィールド電気泳動といった生化学的手法は、定量化の信頼性に各々問題があり、理論モデル構築に利用できる定量的データが現在の所ほぼ皆無であることが挙げられる。近年、我々の研究室では単一分子観察手法 (Figure. 1.) が二重鎖切断定量化において有用である事を示しつつある[1,2]。本研究では、単一分子観察手法 (Figure. 1.) を活用し、 γ 線照射によって T4DNA(166 kbp)に生成された二重鎖切断数の線量依存性、DNA 塩基濃度依存性を調べ、以下の結果を得た。1,単位塩基対当たり二重鎖切断数 (P_0) は 200 Gy 以下では線量に対して線形に増加する (Figure. 2.)。2,単位塩基対当たり単位 Gy 当たり二重鎖切断数 (P_1) は或る閾値 DNA 塩基濃度を超えると DNA 濃度にほぼ逆比例する (Figure. 3.)。加えて、 γ 線照射によって生じた活性種が DNA 分子の二重鎖切断を引き起こすという機構に基づく理論モデルを構築し、実験結果を説明できることを明らかにした。これらの結果より、二重鎖切断確率において DNA の半屈曲性高分子鎖としての性質が本質的に重要であることを明確にした。

これらの成果は、持続長より十分長いゲノムサイズ DNA の一分子観察による定量的計測手法を確立したことによって初めて明らかになったことである。

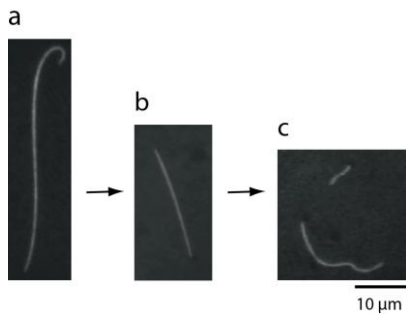


FIG. 1. Representative fluorescence images of DSBs for T4 DNA (57 μm). (a) 0 Gy. (b) 50 Gy. (c) 100 Gy.

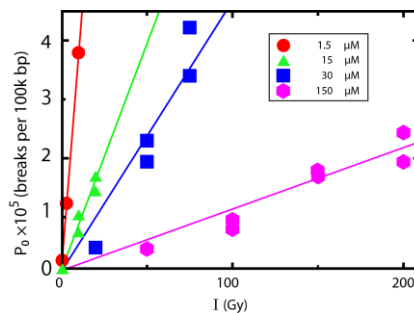


FIG.2. Number of DSBs per base pair, P_0 , as a function of the irradiation dose I . The concentrations given in the box are base-pair concentration of T4DNA.

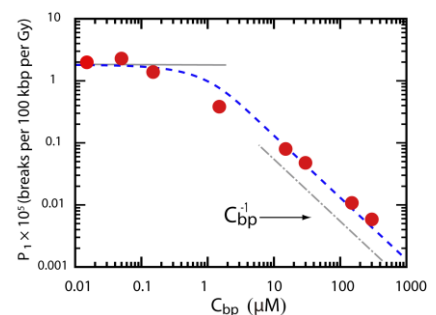


FIG.3. Log-log plot of the number of DSBs per base pair per unit Gy, P_1 , as a function of the DNA base-pair concentration, C_{bp} . The blue dashed line represents a least-squares fit with model equation deduced in the present study.

References

- [1] Y. Yoshikawa *et al.*, Biophys. J. **90**, 993 (2006).
- [2] Y. Yoshikawa *et al.*, Chem. Phys. Lett. **456**, 80 (2008).
- [3] S. Shimobayashi *et al.*, submitted.

乱れたスピン・パイエルス系におけるスピン励起の動的密度行列繰り込み群法による研究

物性基礎論：凝縮系物理研究室 新城一矢

Abstract Motivated by recent inelastic neutron scattering experiments in J-PARC, we investigate spin excitations in an inorganic spin-Peierls compound CuGeO_3 with disorder caused by non-magnetic impurities. Using dynamical density-matrix renormalization group method, we find impurity-induced antiferromagnetic gapless excitation that depends on the distribution of impurities.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

スピン・パイエルス転移はフォノンと結合したスピン $1/2$ の 1 次元スピン鎖が低温でスピン・シングレット状態に移る転移である。1992 年に実際にこの転移を示す無機物質 CuGeO_3 が見つかって注目を集めている。 CuGeO_3 は不純物置換実験が可能であり、スピン・パイエルス状態への乱れの影響が理論・実験の両面から研究されて、ダイマーと反強磁性の長距離秩序状態の共存という興味深い現象が発見された[1][2]。最近、J-PARC で非弾性中性子散乱実験によってスピン励起を強度も含めて正確に測定できるようになり、この系の性質がさらに明らかになると期待されている。しかし、励起強度を正確に計算した理論的研究はない。そのため、我々は動的スピン相関関数を幅広い運動量・エネルギー領域で正確に計算できる動的密度行列繰り込み群法[3]を用いてこの系を研究した。

スピン・パイエルス秩序状態では、 CuGeO_3 は 1 次元のダイマライズした J_1 - J_2 ハイゼンベルグモデルで記述される。ここで、 J_1 (J_2) は最近接 (次近接) 反強磁性相互作用で、 CuGeO_3 の場合は $J_2/J_1=0.36$ [4] である。このままでもダイマーは生じるが、エネルギーギャップが実験値よりも小さいため、さらに J_1 のボンド交替が導入される。乱れた状態では、いくつかの非磁性不純物がこのモデルに導入される。その際、 CuGeO_3 という物質特有のスピン・パイエルス転移機構に注意を払ってモデル化を行った。

不純物をドーピングするとスピン・パイエルス秩序状態のエネルギーギャップが変化し、そのギャップの中に反強磁性ギャップレスモードが現れる様子が見られた。これは先行研究[1][2]と一致する。ただし、励起構造は不純物配置の仕方・不純物間距離・不純物による相互作用の変化（不純物強度とよぶ）によって大きく異なり、ギャップレス励起は不純物強度が強くないと現れないことがわかった。実際の実験ではギャップレス励起が現れていることから、不純物強度は現実の物質中でも強いと考えられる。最近接相関関数の計算から、不純物が強く入るほど不純物によってペアを組めなくなった有効自由スピン（ソリトン）が不純物から離れた位置で拘束され、大きな磁気モーメントが生じることがわかった。これは、解析計算の結果得られていた磁気モーメントが不純物サイトのすぐ近くに現れるという主張と異なる。これに対し、NMR による研究[5]で、ソリトンが不純物から離れた位置にあることが観測された。ゆえに、我々のモデルの不純物が強い場合が現実の物質に即した状態と考えられ、この不純物が強い場合についてさらに計算を進めた。不純物によって生じるソリトンが不純物に邪魔されずに相関できるときに反強磁性ギャップレスモードが最も強いことがわかった。そして、可能な限り多様な不純物配置で動的相関関数を計算し、その平均を取ることで実際の非弾性中性子散乱実験で得られる結果と比較可能な結果を得た。さらに、ギャップレス励起ピークの運動量依存性も計算した結果、運動量が π からずれるにつれて、そのピークが高エネルギー側に移動し、大きさがほぼ単調に減少していくことがわかった。こうして本研究で計算した動的相関関数は J-PARC で行われる非磁性不純物置換した CuGeO_3 の非弾性中性子散乱実験を行う上で有用な指針になると期待される。

References

- [1] M. Saito, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **66**, 3259 (1997)
- [2] M. C. Martin, *et al.*, Phys. Rev. B **56**, 3173 (1997)
- [3] E. Jeckelmann, Phys. Rev. B **66**, 045114 (2002)
- [4] J. Riera, *et al.*, Phys. Rev. B **51**, 16098 (1995)
- [5] J. Kikuchi, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **88**, 037603 (2002)

点事象発生率変動の検出限界

非線形動力学教室 新谷俊了

Abstract The estimation of event rate from time series data is an important matter. Our study revealed that some estimating methods, histogram, Bayesian estimation and hidden Markov model, cannot detect the rate fluctuation under comparable conditions. It suggests the presence of a theoretical limit for detecting rate fluctuations.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

ランダムに発生する点事象をモデル化する Poisson 過程はインターネットアクセス、交通事故や神経スパイクなどのモデルに用いられている。時系列データが時間的に非一様な Poisson 過程に従うとモデル化し、モデルを通して点事象発生率（レート）の変化を検出できれば、データを出力した系の変化に関する情報を得られる。しかし、確率過程に従って生成される時系列では発生時刻が確率的に揺らぐため、レート推定法はレートの微小な変化を揺らぎと区別できなくなると考えられる。我々は、神経科学で用いられるレート推定法、ヒストグラム法、ベイズ推定、および Hidden Markov Model (HMM) による推定の 3 手法が同程度の条件下でレートの変化を検出できなくなることを明らかにした[1]。

一般に点事象発生レートが確率過程に従い遷移する非一様 Poisson 過程を Cox 過程と呼ぶ。我々は 2 状態間を Markov 過程に従い遷移する場合と一次元ブラウン粒子の速度モデルである Ornstein-Uhlenbeck 過程に従い遷移する場合の 2 種類の Cox 過程についてレート変化の検出限界を調べた。

ヒストグラム法では Mean Integrated Squared Error (MISE) を最小にするビン幅を選ぶ基準を用いた。ベイズ推定ではレートにランダムウォーク型の事前分布を与え、この事前分布のパラメータを経験ベイズ法により決定した[2]。その結果、これら 2 手法においては、レート変動の自己相関 $\sigma^2 \phi$ の時間積分が平均レート μ に比べて小さい、

$$\frac{\sigma^2}{\mu} = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(s) ds < 1$$

という条件の下で、上記 2 種の Cox 過程に対してレート変動が検出できなくなることを解析的に示した。さらに、上記条件は 2 種の Cox 過程に限らず、一般的な検出限界を与えることを示した。

内部状態が Markov 過程に従い離散的に遷移し、各状態はそれぞれ独立な確率に従い観測値を出力するモデルが HMM である[3]。HMM では状態は観測されない変数であり、観測値から系の状態を推定することをひとつの目的としている。状態がそれぞれ異なるレートを持ち、各状態が有する確率分布が Poisson 分布であると考え、状態を推定することがレートの変動を検出することになる。この仮定に従う HMM を用いた数値計算実験により、上記 2 種の Cox 過程に対し、HMM によるレート推定がヒストグラム法とベイズ推定の推定限界とほぼ同程度の限界を持つことを示した。

3 手法はそれぞれ異なる基準に従いモデルをデータに対して最適化している。これらの推定法がほぼ同一のレート変動検出限界を有することから、推定手法によらない理論的なレート変動検出限界が存在すると考えられる。

References

- [1] T. Shintani and S. Shinomoto, Phys. Rev. E 85, 041139 (2012).
- [2] S. Koyama, T. Shimokawa, and S. Shinomoto, J. Phys. A 40, F383 (2007).
- [3] L. R. Rabiner, Proc. IEEE 77, 257 (1989).

フロー式液体薄膜生成装置を用いた テラヘルツ時間領域分光

光物性研究室 周藤睦人

Abstract To make the pump-probe spectroscopy experiment of liquid water using terahertz light, thin film flow system has been developed for terahertz time-domain spectroscopy. Thickness of water film is evaluated by two ways of measurements using optical laser and terahertz pulses. Optical pump-THz probe spectroscopy is designed using this system.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

テラヘルツ光は近年になって急速にその発生・検出方法の発展が見られている[1]。テラヘルツ領域とは周波数で主に0.1THz～10THzの領域を差し、ミリ波と赤外線の中間の領域にあたる。このテラヘルツ領域には様々な分子の分子間振動が存在しているため、テラヘルツ分光は物理学のみならず生物学・化学など幅広い分野において注目されている。

このようなテラヘルツ領域の光には水によって非常に強い吸収を受けるという特徴がある。1THzにおける水の吸収係数はおよそ 200cm^{-1} であるため、1THzの光は約 $50\mu\text{m}$ で $1/e$ の強度にまで減衰してしまう。そこで、テラヘルツ光による水や水溶液系の透過型分光実験が行えるようにするためのフロー式液体薄膜生成装置を構築した[2]。Fig. 1にその概略を示す。

この装置で生成された水の薄膜の厚みや時間的な安定性を可視光の透過率変化の測定を行うことで評価した。その結果、時間平均での膜厚が $21.05 \pm 0.6\mu\text{m}$ という、テラヘルツ領域の光が透過するには十分薄く、時間的にも安定した水の薄膜の生成が確認された。さらに、この装置を用いてテラヘルツ領域の水の複素誘電率を計算するためにテラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)による測定を行った。THz-TDSによれば、テラヘルツ電場波形そのものが測定できる分光法で、これにより複素誘電率などの物理量が直接的に得られる。今回の結果から得られた水の複素誘電率は、過去にテラヘルツ時間領域全反射減衰分光法によって得られたもの[3]と非常に良い一致を示すことが確認された(Fig. 2)。

そして、この装置のテラヘルツ分光への応用として可視ポンプ-テラヘルツプローブの分光実験を行った。この測定結果から、色素分子の電子励起による水分子へのエネルギー移動に関する研究への応用についても述べる予定である。

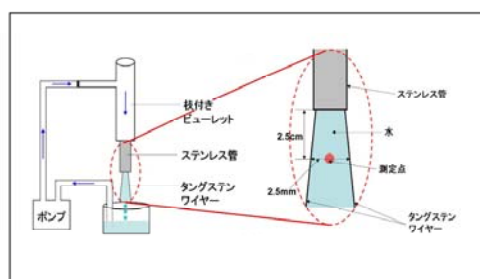


Fig.1. Conceptual diagram of the system to make very thin flow liquid film.

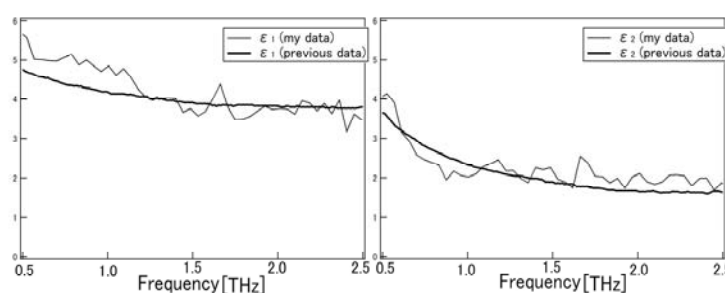


Fig. 2. Complex dielectric constants of water in THz region measured by me(thin line) and Yada[3](thick line).

References

- [1] K.Sakai ed., Terahertz Optoelectronics (Springer Verlag Berlin Heidelberg) (2003)
- [2] M.J. Tauber et al., Rev. Sci. Instrum. 74, 4958 (2003)
- [3] 矢田裕之, 京都大学大学院理学研究科, 博士論文(2008)

レーザー干渉縞を用いた分子マニピュレーション

ソフトマター物理学研究室 辻井哲夫

Abstract For the novel fabrication of the photonic crystal, we intended to improve the spatial resolution of the molecular manipulation with the interference fringe of UV laser. We have evaluated the manipulating efficiency and operating time by changing the grating width.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

液晶中の混合物は、そのサイズが $1\mu\text{m}$ より大きい場合は、ダイレクター場と結合して複雑な力を生み出す。一方で混合物のサイズが $1\mu\text{m}$ よりも小さいと、ダイレクター場の歪弾性エネルギーが大きくなる為、ダイレクター場との結合が解消されてスカラーオーダーパラメータ S との結合が支配的になる。一方、液晶中の欠陥に混合物が自発的に凝集する効果 [1] から、佐光らはネマチック液晶の S の空間変化を人為的に作成することで、混合物の濃度の空間分布を自在に操作する分子マニピュレーションの原理を考案した [2]。液晶に混合したアゾベンゼン分子の Trans-Cis 異性化を紫外線で局所的に励起することで、 S の空間変化を等温的に作成する。さらに、アゾベンゼン分子の並進拡散により生じる解像度の低下を、アゾベンゼン分子を高分子鎖に結合させることで $15\mu\text{m}$ の領域の S の変化まで狭めることに成功している [3]。

本論文では、既存の顕微光学系では実現できなかった解像度 $15\mu\text{m}$ 以下の領域でのマニピュレーションを可能にするため、紫外レーザーの干渉縞を用いた光学系を作成した (Fig.1)。分岐した2本のレーザー光をレンズで集光することで干渉縞を作成する。またレンズに入射する2本の平行光の間隔を直角プリズムを動かすことで調整し、試料に書き込む干渉縞間隔を変えることができる。現在 $5\sim 50\mu\text{m}$ で間隔を変えることに成功している。Fig.2 は試料上に照射しているレーザー干渉縞の強度プロファイルを蛍光分子を用いて可視化した写真と、その空間変化を解析したグラフである。

約 $40\mu\text{m}$ 幅の干渉縞が試料上に形成されているのが分かる。本論文では、この干渉縞を用いて同等の空間分解能での S の空間変化の作成とそれによる分子マニピュレーションを実現する予定である。

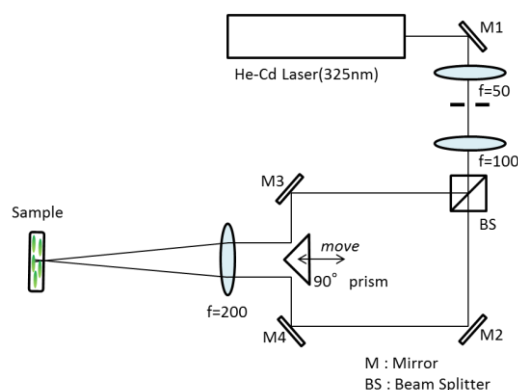


Fig.1. Optical set up of Molecular manipulator

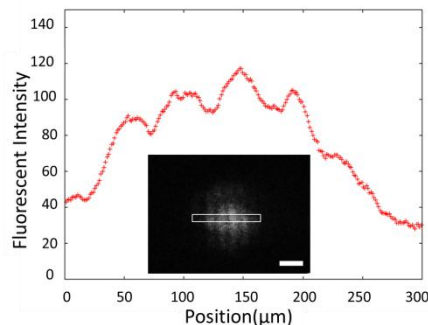


Fig.2. Profile of fluorescence intensity excited by fringe pattern of UV laser (scale bar= $100\mu\text{m}$)

References

- [1] H.Kikuchi, et al, Nature Materials, 1,64(2004)
- [2] S.Samitsu, et al., Nature Materials, 9, 816 (2010)
- [3] 瀧口達矢 京都大学修士論文(2010)

量子気体 Yb 原子の超狭線幅光学遷移を用いた スピン軌道相互作用

量子光学・レーザー分光学研究室 中村悠介

Abstract Spin-orbit-coupling (SOC) plays a crucial rule in topological properties of solid. We implement SOC in a quantum gas of ytterbium atoms by using the ultra-narrow optical transition. Spin-orbit-coupled atomic gas is detected with time-of-flight imaging. We also observe the relaxation of metastable states.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

電子のスピンと運動量のカップリングであるスピン軌道相互作用は、トポロジカル絶縁体といった固体のトポロジカルな物性において重要な役割を果たしている。固体におけるスピン軌道相互作用には、Rashba 型と Dresselhaus 型という 2 つの相互作用があり、一般にはその和で記述される。

中性原子は、電荷を持たないため、スピン軌道相互作用を持つことはできないと考えられていたが、近年、冷却アルカリ原子気体の 2 つの超微細構造準位をラマン遷移でカップルさせ、人工的にスピン軌道相互作用を実装できるようになった[1]。

我々は、上述のラマン遷移の方法とは異なる方法、すなわち、イッテルビウム (Yb) 原子の超狭線幅光学遷移を用いた方法を考案した。この方法では、基底状態と励起状態を実効的なスピン 2 準位系とみなすことで、1 次元 Rashba+Dresselhaus 型のスピン軌道相互作用を得ることができる[2]。

本研究では、time-of-flight (TOF) イメージングにより、基底状態と励起状態の運動量分布の測定を行った。その結果、原子が励起光の反跳を受けることにより、基底状態と励起状態の間で、反跳エネルギーだけ、運動量がやり取りされることを明らかにした。また、原子の共鳴から、励起光の離調を変化させた場合、ドップラー効果により励起される原子の運動量がシフトすることを確認した (Fig. 1)。

この系で、特に注意すべき点は、励起状態の衝突による寿命である。ボソンの場合、準安定状態の原子間には、速い非弾性衝突があり、実験に十分な寿命を得られない[3]。一方、フェルミオンの場合は、パウリの排他律により、この衝突を回避することができる。

そこで、フェルミ原子である ^{173}Yb の励起状態 ($^3\text{P}_2$ 状態) の磁気副準位のうち、エネルギー最低状態である $|F, m_F\rangle = |9/2, -9/2\rangle$ の緩和を測定し、 $^3\text{P}_2$ 状態間の 2 体衝突ロスレートを求めた。また比較のため、他の磁気副準位についても緩和の測定を行った。

一方、最近の研究から、 ^{170}Yb や ^{174}Yb の $^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_2$ 状態間に、フェッシュバハ共鳴が存在することが明らかになった。そこで、 ^{173}Yb についても、フェッシュバハ共鳴を探索した。今後の課題として、フェッシュバハ共鳴を用いて BCS 状態に、スピン軌道相互作用を実装することが挙げられる。

また、このような超狭線幅分光に必要な、良く周波数制御されたレーザー光源の開発を行った。基準光共振器で周波数安定化された外部共振器型半導体レーザー (ECLD) をテーパアンプ (TA) で増幅し、分光に十分な出力を得ている。

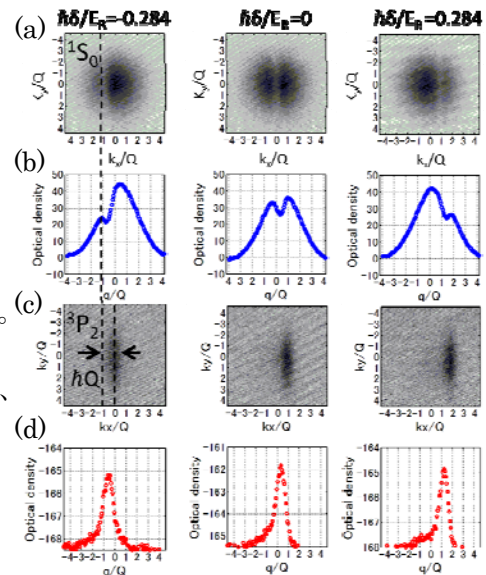


Fig.1. (a)(c) TOF images of ground and excited states. (b)(d) TOF images are integrated along the k_y axis to produce quasi-momentum distribution. δ : detuning, q : quasi-momentum, E_R : recoil energy, $Q = \sqrt{2mE_R}/\hbar$: wavenumber of irradiated laser.

References

- [1] Y. J. -Lin, *et al.* nature **471**, 83 (2011); L. W. Cheuk, *et al.* PRL **109**, 095302 (2012).
- [2] 中村他、日本物理学会 2012 年秋季大会 19pAL-2 (2012); Qi Zhang, *et al.* arxiv: 1208, 3005 (2012).
- [3] S. Uetake, *et al.* PRA **86**, 032712 (2012).

1次元量子ウォークにおけるトポロジカル相とアンダーソン局在

凝縮系理論グループ 西村勇希

Abstract Time evolution of particles described by quantum walks is reduced to that of random walks in classical limit. We have investigated topological phases and Anderson localization in one-dimensional quantum walks. We have revealed that topological phases can be realized in our quantum walks classified into the class D or AIII.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

1次元量子ウォークとは、古典極限でランダムウォークとなるような量子状態の時間発展現象である。量子コンピュータへの応用が期待され、近年盛んに実験的にも理論的にも研究されている。最近の研究で、1次元量子ウォークに非自明な量子状態であるトポロジカル相が存在することが明らかにされた[1]。また、トポロジカル相の有無に関して、系の満たす対称性や次元との関係について研究されている[2]。この研究では、系の次元と系がTime Reversal Symmetry(以下 TRS), Particle-Hole Symmetry(以下 PHS), Chiral Symmetryを満たすかどうか(少し詳しくいうと、少なくとも PHS, Chiral Symmetry は満たさない A, AI, AII、少なくとも Chiral Symmetry は満たす AIII, BDI, CII、少なくとも PHS は満たす C, CI, D, DIII の10グループのうちのどれに系が分類されるのか)に応じて、トポロジカル相が出現し得るのかどうか判別できることが明らかにされた。

先行研究では、原点に境界がある1次元量子ウォークにおけるトポロジカル相とアンダーソン局在について研究された[3]。先行研究では、ウォーカーが例えばスピンのような2つの内部自由度を持つとし、スピンの回転に対応する変化と内部自由度に応じて右または左に1格子点だけ移動する変化をウォーカーが繰り返すような量子ウォークを考えている。先行研究で考察された量子ウォークはBDIに属することが明らかにされた。また、トポロジカル状態が存在することが明らかにされた。さらに、系に乱れがあると、アンダーソン局在を起こすが、非局在状態も存在することが明らかにされた。

本研究では、位相変化が付随するスピンの回転に対応する変化と内部自由度に応じて右または左に1格子点だけ移動する変化をウォーカーが繰り返すような量子ウォークについて考察した。位相の変化を加えることで、A, AI, AIII, BDI, Dに属する量子ウォークを実現できることを明らかにした。また、状態密度を計算し、対称性によって安定性が保証されたデルタ関数的状態密度がギャップの中に現れることを明らかにした(Fig 1)。このことから、本研究で考察したAIII, Dに属する量子ウォークにおいてトポロジカル状態が現れることがわかる。さらに、乱れがあるとき、Dに属する量子ウォークにおいて、分散 $v(t) = \langle \phi(t) | n^2 | \phi(t) \rangle - [\langle \phi(t) | n | \phi(t) \rangle]^2$ ($|\phi(t)\rangle$ は時刻 t の波動関数)を計算し、時間が十分に経過した後も冪的に増加しつづけることを明らかにした。このことから、考察した系がPHSを満たすために、アンダーソン局在を起こすが、非局在状態も存在することがわかる。

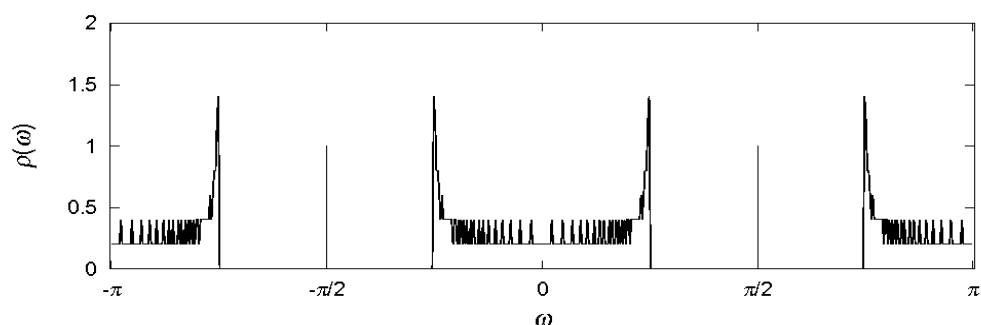


Fig. 1. The density of states of the quantum walk classified into D. Edge states exist at $\omega = \pm\pi/2$.

References

- [1] T. Oka *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 100602 (2005)
- [2] A. P. Schnyder *et al.*, Phys. Rev. B **78**, 195125 (2008)
- [3] H. Obuse, and N. Kawakami, Phys. Rev. B **84**, 195139 (2011)

細孔中の超流動ヘリウム 3 の探索

低温物理学研究室 人見純司

Abstract We investigated superfluid ^3He in a porous material, the size of which was comparable to coherence length of superfluid ^3He . NMR frequency shift indicated that the superfluid transition in the porous material might have occurred at higher temperature than in bulk © 2013 Department of Physics, Kyoto University

超流動 ^3He はバルクでのコヒーレンス長が 20~100nm と長く、このサイズの構造物を準備することは困難であった。そのため、このようなサイズの制限空間中での研究はほとんど行われてこなかった。今回我々は SPG と呼ばれる多孔質物質を入手し、この中に閉じ込めた液体 ^3He の超流動相を探索した。

我々が用意した SPG は、コヒーレンス長程度の径を持つ細孔空間が複雑なネットワーク状に絡み合ったもので、転移温度の低下といったサイズ効果のほかにネットワーク構造であることによって引き起こされる効果を期待した。具体的には、ネットワーク中の任意の経路を一周した時に秩序変数の位相は 2π の整数倍しか変化できないという条件により、位相に対して強い制限がかかる。この整合性をとるため SPG 中に秩序変数が急激に変化している部分、もしくは波動関数がつぶれたノーマルの部分が存在し、局所的なコヒーレンスしか持たない、いわば局在化したクーパー対ができないかと期待した。

本実験では、主に孔径が 100nm の SPG を使用した。試料空間が適切に確保されていることの確認として BET 法による SPG の表面積測定を行った。測定の結果、SPG の表面積は 2.5m^2 程度であった。SPG の体積は約 0.1cc なので試料空間は適切に確保されていたといえる。次に、磁場勾配のもとでスピンエコーを測定した際の信号の減衰を解析し、スピン拡散係数を求めた。結果、バルクの状態とは異なる拡散係数が測定された (Fig. 1)。さらに、スピンエコーの一部に磁場勾配に依存しない速い減衰を示すものが確認された。一方、SPG 表面を ^4He でコートした場合ではこの速い減衰は見られなかった。表面に固体 ^3He が固着するだけではこれほど速い信号の減衰は起こらないため、この速い減衰は表面に固着した固体 ^3He を通じ SPG 中の不純物の影響が液体 ^3He におよんだ結果だと考えられる。測定結果は①SPG 中で速い減衰をしている成分②SPG 中で拡散的にふるまっている成分③SPG 外部でバルクのふるまっている成分の三種類が足し合わさったものであると考えると説明することが出来た。それぞれの成分については①の成分が 47%、②の成分が 14%、③の成分が 39%であった。また②の成分の拡散係数を解析することで、バルクの成分ではない成分は 300~500nm 程度の空間に閉じ込められていることが確認された。これは使用している SPG の孔径と同程度であり、本実験において細孔中の液体 ^3He は確かに観測できているといえる。

本実験では、この SPG 中の液体 ^3He に対して NMR 測定を行い、スペクトルの周波数シフトを測定した。我々は、この測定においてバルクの転移温度より高い温度で NMR スペクトルが超流動転移を示す周波数シフトを始める様子を観測した。

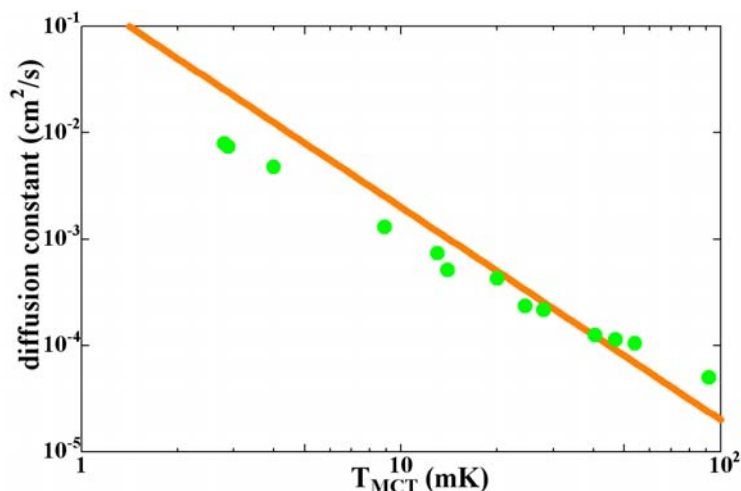


Fig.1. Measured diffusion constant in SPG (solid circle) and diffusion constant in bulk (solid line).

鉄系超伝導体における超伝導と反強磁性の共存 に関する理論的研究

物性基礎論:凝縮系物理 松井 楽徳

Abstract: In iron pnictides superconductors, there is a phase where antiferromagnetism and superconductivity coexist. We investigated theoretically the coexistence phase by taking into account Dirac dispersions in the antiferromagnetic phase and by assuming both s_{+-} and s_{++} pairing waves in the superconducting phase. We found the coexistence for the s_{+-} pairing.

© 2012 *Department of Physics, Kyoto University*

2008年に鉄とニクトゲンを含む新たな高温超伝導体(鉄系超伝導体)が発見され、これを契機に実験・理論の両面から盛んに研究がなされている。これまでに銅酸化物超伝導体に次ぐ高い転移温度や鉄原子の3d軌道がフェルミ面を構成するマルチバンド的な系であることなど興味深い特徴が知られている。このような物質群の中には低温で反強磁性と超伝導の微視的な共存相をもつものが存在し、大きな注目を集めている。そして鉄系超伝導体の共存相に関する理論的な研究も既にいくつか存在しており Fernandes らはバンド表示を出発点とする反強磁性と超伝導の相互作用を両方取り入れたハミルトニアンを構成し、平均場近似を用いた解析によって共存相を求めている [1]。彼らのバンド表示を出発点にした場合には系が反強磁性状態になったときにバンド分散のフェルミ準位近傍でバンドギャップが開く。しかし、軌道表示を出発点としたときに系の反強磁性状態を記述すると、フェルミ準位近傍のバンド分散の中には線形分散(ディラック分散)が存在することが知られている [2, 3]。また角度分光電子分光による実験からもこのようなディラック分散は観測されている [4]。

本研究では鉄系超伝導体の反強磁性相で現れるディラック分散の状態を取り入れた上で反強磁性と超伝導の共存相が実現するかどうかについて調べた。まず出発点として鉄原子の5つある軌道のうち、主要な2つの軌道間だけのホッピングを考えた強束縛模型 [3] を採用し、そこに反強磁性と超伝導の相互作用を取り入れた。超伝導相互作用のペアリング対称性としては鉄系超伝導体において最も有力なペアリング対称性とされている s_{+-} 波、あるいは s_{++} 波対称性を仮定する。ここで s_{+-} 波対称性は、鉄系超伝導体の非連結なフェルミ面であるホール面と電子面上において超伝導ギャップ関数の符号が異符号である。一方、 s_{++} 波対称性は同符号である。このような反強磁性と超伝導の両方を含んだハミルトニアンを平均場近似を用いて解析し、反強磁性と超伝導の秩序パラメータのキャリア数依存性と温度依存性を求めた。そしてディラック分散を考慮したとしても s_{+-} 波対称性において超伝導と反強磁性の共存相が実現し、 s_{++} 波対称性の場合には共存相は実現しないという Fernandes らと同様な結果が得られた。

References

- [1] R. M. Fernandes and J. Schmalian: Phys. Rev. B **82**, 014521 (2010)
- [2] T. Morinari *et al.*: Phys. Rev. Lett **105**, 037203 (2010)
- [3] Y. Ran *et al.*: Phys. Rev. B **79**, 014505 (2009)
- [4] P. Richard *et al.*: Phys. Rev. Lett **104**, 137001 (2010)

超伝導体 Sr_2RuO_4 微小結晶素子の 作製方法の開発と磁気輸送特性

固体量子物性研究室 山岡義史

Abstract We have fabricated micro-bridges of Sr_2RuO_4 and examined transport properties to search for fractionally quantized fluxoid, which is characteristic of its spin-triplet superconductivity. By using silver paste cured at high temperature as terminals, we succeeded in observing zero-resistance. Also, we observed oscillations in magnetoresistance attributable to quantization of fluxoid.

© 2013 Department of Physics, Kyoto University

超伝導転移温度 T_c が 1.5K である Sr_2RuO_4 は核磁気共鳴や偏極中性子散乱の実験からスピン三重項超伝導体であることが確実視されており、そのクーパー対のスピン状態は $|\uparrow\uparrow\rangle$ と $|\downarrow\downarrow\rangle$ の重ね合わせで表現できる equal spin pairing (ESP) 状態であると考えられている[1]。一般的に、超伝導体のリングを貫くフラクソイドは秩序パラメーターの一価性のために量子化される。ESP 状態にあるスピン三重項超伝導体の場合、秩序パラメーターがスピン自由度を持つのでスピン位相と通常の軌道位相の両方が一価性の要請を担うことができる。このため通常の半分の磁束を伴う half-quantum fluxoid (HQF) が現れる可能性があり、その観測はスピン三重項超伝導状態の証拠の一つとなるため重要である。近年、ミクロンサイズの環状 Sr_2RuO_4 結晶の磁気モーメントを磁場中で測定した実験で、整数量子フラクソイドの場合の半分の高さのステップが観測され、HQF が存在する証拠ではないかと考えられている[2]。この結果をより確かなものとするために、別の手法による HQF の検証が望まれる。

そこで我々は HQF を輸送特性から見出すために Sr_2RuO_4 単結晶を Fig.1(a)や(b)のようなブリッジ状に加工し、磁気抵抗測定を試みた。整数量子フラクソイドに伴う磁気抵抗の振動は Little-Parks 振動として知られるが、HQF が実現するとこの振動のピークが分裂することが予測される。マイクロブリッジの作製の過程で、我々は Sr_2RuO_4 微小結晶の端子として Dupont 社製の銀ペースト 6838 を用いた。一般的には、端子として蒸着された金を用いられるが、前述の銀ペーストを用いて 500℃で 10 分熱硬化させると、接触抵抗を劇的に下げることができ、ゼロ抵抗が観測できる事を見出した。その後、まず Fig.1(a)のように穴の開いていないブリッジの特性を調べ、Fig.2 のように、磁気抵抗の測定においてバルクの T_c よりも高温で約 20G の周期をもつ振動を観測した。 Sr_2RuO_4 では歪みで T_c が 1.5K から 3K に上昇する事が知られており[3]、本実験ではブリッジの縁に沿って 3-K 相超伝導のループができ、その中央に残った非超伝導領域に磁束がトラップされたため Little-Parks 振動が観測できたのではないかと考えている。この他、Fig.1(b)のような穴が 1 つ開いたマイクロブリッジの作製にも成功しており、現在 HQF の検出を目指して低温での測定を進めている。

References

- [1] Y. Maeno *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 011009 (2012).
- [2] J. Jang *et al.*, Science **331**, 186 (2011).
- [3] S. Kittaka, *et al.*, Phys. Rev. B **81**, 180510 (2010).

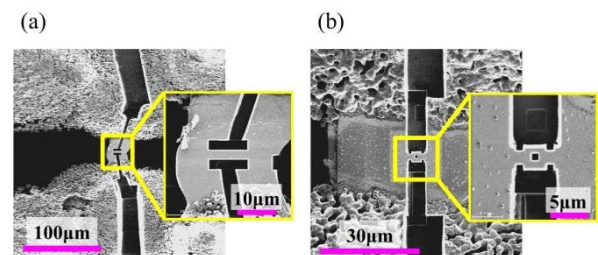


Fig. 1. (a) Scanning Electron Microscope (SEM) picture of a micro-bridge: sample yy054. Single crystals of Sr_2RuO_4 in the center and upper and lower parts of silver paste 6838 were cut by the focused ion beam (FIB) technique.

(b) SEM picture of another micron-bridge: sample yy055. The size of the hole is $0.9\mu\text{m} \times 0.9\mu\text{m}$.

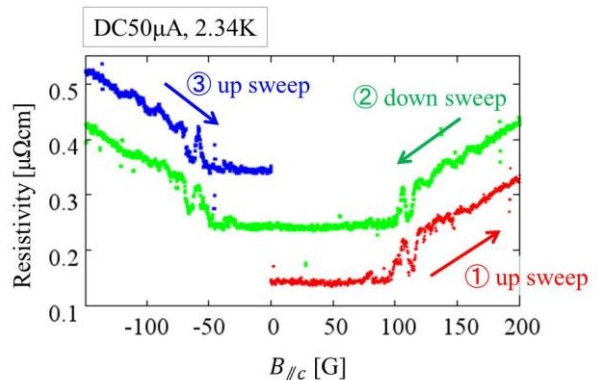


Fig. 2. Magnetoresistance of the sample yy054. At the edges of the plateau, oscillations with the period of approximately 20 G appear. These oscillations suggest realization of quantization of fluxoid.