

特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」

## スーパークリーン特定・若手夏の学校

2008年8月31日(日) - 9月2日(火)

熱川ハイツ 〒413-0302 静岡県賀茂郡東伊豆町奈良本 1240-14

### 講演概要集

## プログラム

### 8月31日(日)

12:15-		受付	
13:00-13:10		はじめに	
			座長 柴山 義行 (慶応大理工)
13:10-14:10	A01	<b>谷口 淳子</b> (電通大量子物質工) 1次元ナノ多孔体中ヘリウム量子流体	
14:10-14:40	A02	<b>戸田 亮</b> (京大低温セ) ナノ多孔体中 $^4\text{He}$ 薄膜の次元性と超流動	
14:40-15:10	A03	<b>段下 一平</b> (東理大理) 光格子中における低次元ボース気体	
15:10-15:40		休憩	
			座長 松本 洋介 (東大物性研)
15:40-16:10	A04	<b>古賀 昌久</b> (京大理) 光格子中の超固体状態	
16:10-17:10	A05	<b>野村 竜司</b> (東工大理工) ヘリウムの結晶成長; その普遍性と特異性	
17:10-18:10	A06	<b>桃井 勉</b> (理研) リング交換相互作用とその磁性	
18:30-		夕食	
19:30-21:30		ポスター発表	

## 9月1日(月)

座長 高橋 大輔 (理研)

- 8:30-9:10 A07 **小林 未知数** (東大理)  
量子渦、および量子乱流研究とその発展
- 9:10-10:10 A08 **川口 由紀** (東大理)  
内部自由度を持った凝縮体におけるトポロジカル励起
- 10:10-10:30  
休憩

座長 斎藤 政通 (理研)

- 10:30-11:30 A09 **石黒 亮輔** (東理大理)  
回転下の超流動ヘリウム3の織目構造と量子渦
- 11:30-12:30 A10 **村川 智** (東工大理工)  
グラファイト上に吸着した単原子層2次元ヘリウム3
- 12:30-14:00  
昼食

座長 大橋 琢磨 (阪大理)

- 14:00-15:00 A11 **渡辺 真仁** (東大工)  
量子スピン液体、量子臨界点近傍の新奇量子現象
- 15:00-15:30 A12 **富田 崇弘** (東大物性研)  
重い電子系 YbAlB<sub>4</sub>における量子臨界性と超伝導
- 15:30-16:00 A13 **山地 洋平** (東大工)  
フェルミ面トポロジーの変化による量子相転移
- 16:00-16:30  
休憩

座長 檜枝 光憲 (名大理)

- 16:30-17:30 A14 **青木 悠樹** (東工大理工)  
超固体ヘリウム4 ~ 捻り振子で観測される非古典回転慣性~
- 17:30-18:00 A15 **柴山 義行** (慶応大理工)  
グラファイト基盤上に形成された2次元<sup>4</sup>He固体における固体の超流動
- 18:00-18:30 A16 **鈴木 隆史** (東大物性研)  
面心立方格子上の超流動固体状態
- 19:30-21:30  
懇親会

## 9月2日(火)

座長 橘高 俊一郎 (京大理)

8:30-9:30	A17	<b>柳瀬 陽一</b> (東大理) スピン三重項超伝導体の d ベクトルを決めるのは何か?
9:30-10:00	A18	<b>横山 毅人</b> (名大工) p 波超伝導体の近接効果
10:00-10:20		休憩

座長 野村 竜司 (東工大理工)

10:20-11:00	A19	<b>小原 顕</b> (阪市大理) エアロジェルとその液体ヘリウムへの応用
11:00-12:00	A20	<b>水島 健</b> (岡山大自然) フェッシュバツハ共鳴制御で実現する新しい超流動状態
12:00-12:10		終わりに

## ポスター発表 (8月31日 19:30-21:30)

- P01 手塚 真樹 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻  
粒子数不均衡な冷却フェルミオン気体の凝縮状態
- P02 高橋 雅裕 岡山大学大学院自然科学研究科  
F = 1 スピナーBEC におけるコアレス量子渦状態の動的安定性
- P03 内垣内 洋 東京大学物理工  
三角格子系  $\text{ANiO}_2$  (A=Na, Li, Ag) におけるフラストレーションと電荷・スピン・軌道自由度の競合
- P04 藤山 将士 大阪市立大学  
Numerical simulation on quantum turbulence created by an oscillating object
- P05 上野 健一 東京工業大学理工学研究科物性物理学専攻  
Aerogel 中における  $^4\text{He}$  の固化
- P06 沼里 龍 大阪市立大学大学院理学研究科数物系専攻  
Numerical Analysis of Two-Dimensional Quantum Turbulence
- P07 高橋 拓也 東京工業大学理工学研究科  
微小重力中におけるヘリウム 4 の可視化
- P08 鈴木 健太 岡山大学自然科学研究科  
粒子数インバランス下のフェルミ超流体における高次量子化渦の構造とその観測について
- P09 桐山 肇 電気通信大学電気通信学部量子・物質工学科  
FSM16 中ヘリウム 4 の超音波測定と融解曲線測定
- P10 斉藤 順倫 電気通信大学電気通信学部量子・物質工学科  
Effect of heat treatment of nano-porous glass on superfluidity for confined  $^4\text{He}$
- P11 佐藤 正寛 理化学研究所  
1次元多バンドボーズガスの自発回転機構
- P12 山下 耕平 名古屋大学大学院理学研究科物質理学専攻  
準1次元ヘリウム4系の超流動密度
- P13 藤井 里奈 電気通信大学電気通信学部量子・物質工学科  
1次元細孔中液体ヘリウム 4 の超流動の孔径依存
- P14 安永 昌司 大阪市立大学  
スピノールダイポール BEC におけるスピンエコー
- P15 和才 将大 東京工業大学物性物理学専攻  
超流動  $^3\text{He}$  の表面アンドレーエフ束縛状態の研究
- P16 井口 光治 東京工業大学理工学研究科物性物理学専攻  
量子クラスター展開法による BEC-BCS クロスオーバー
- P17 加藤 千秋 大阪市立大学  
Motion of  $^3\text{He}$  Quasiparticles in Aerogel Driven by Fourth Sound
- P18 塚本 光昭 大阪市立大学大学院理学研究科  
ランダムポテンシャル中でのボーズ系のシミュレーション

- P19 棚谷 翔 筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻  
リング交換相互作用を持つスピン梯子系のエンタングルメントエントロピー
- P20 高橋 大輔 理化学研究所  
超流動ヘリウム表面下の二次元イオンによる超流動乱流の研究
- P21 三浦 幸恵 大阪市立大学大学院理学研究科  
Critical Velocity of Quantum Turbulence Generated by a Vibrating Wire in Superfluid  $^4\text{He}$
- P22 東 秀憲 大阪市立大学大学院理学研究科  
表面波乱流の統計
- P23 橘高 俊一郎 京都大学理学研究科物理学・宇宙物理学専攻  
スピン三重項超伝導体  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  で観測される異常な上部臨界磁場の振る舞い
- P24 米澤 進吾 京都大学理学研究科物理学・宇宙物理学専攻  
有機物超伝導体  $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$  の純良単結晶において観測される異常な高磁場超伝導状態
- P25 渡辺 匡洋 名古屋大学大学院理学研究科  
Adsorption of  $^4\text{He}$  and  $\text{N}_2$  in 1D nanopores of FSM-16(1.5nm)
- P26 湊 祐輔 名古屋大学大学院理学研究科  
Superfluid Onset in  $^4\text{He}$  Film Adsorbed on 1D Nanopores
- P27 根間 裕史 東京大学物性研究所  
Magnetization curve of two-dimensional antiferromagnetic solid  $^3\text{He}$  in high magnetic fields
- P28 品岡 寛 東京大学工学系研究科物理工学科  
乱れたハバード模型におけるソフトクーロンギャップと波及効果
- P29 福島 慎也 大阪市立大学大学院理学研究科  
量子乱流の Bottleneck effect
- P30 高橋 大介 東京大学総合文化研究科  
ボース凝縮体における異常トンネル効果
- P31 齋藤 広大 慶應義塾大学大学院理工学研究科基礎理工学専攻  
Development of a low temperature scanning probe microscope using a quartz tuning fork
- P32 近藤 剛史 慶應義塾大学大学院理工学研究科基礎理工学専攻  
Superfluid Properties of  $^4\text{He}$  Confined in a Regular Nanoporous Structure
- P33 林 賢一 慶應義塾大学大学院理工学研究科基礎理工学専攻  
A Current-to-Voltage Converter for Cryogenics Using a CMOS
- P34 吉村 仁美 慶應義塾大学大学院理工学研究科基礎理工学専攻  
Search for Supersolidity of  $^4\text{He}$  Confined in Nano-Porous Media
- P35 大池 広志 東京大学工学系研究科物理工学専攻  
有機三角格子モット絶縁体にドーピングした系、 $\kappa-(\text{BEDT-TTF})_4\text{Hg}_{2.89}\text{Br}_8$ 、における超伝導
- P36 堤 康雅 岡山大学大学院自然科学研究科  
p 波超流動体の 3 次元構造
- P37 齋藤 政通 理化学研究所  
超流動  $^3\text{He}$  薄膜における異方的超流体の境界効果

- P38 岡田 明久 大阪大学基礎工学研究科  
Zero-Point Motion of Oxygen and Anomalous Isotope effect in  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$
- P39 佐橋 一裕 名古屋大学理学研究科  
Heat Capacities of  $^4\text{He}$  and  $^3\text{He}$  Adsorbed in Nanocages of Na-Y Zeolite
- P40 木下 裕介 名古屋大学理学研究科  
Search for superfluidity of  $^4\text{He}$  film in 3D nanopores (1.2nm) of ZTC
- P41 清田 修一郎 名古屋大学理学研究科  
QCM Study of Superfluid  $^4\text{He}$  Adsorbed on SBA-15
- P42 是常 隆 東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻  
フラストレーション系の高温からのアプローチ
- P43 中川 竜司 京都大学大学院理学研究科物理学宇宙物理学専攻  
近接効果を用いた  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の超伝導パリティの研究
- P44 宮崎 亮一 首都大東京大学院理工学研究科  
充填スクツテルダイト超伝導体  $\text{Pr}(\text{Os}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{Sb}_{12}$  の高温比熱測定
- P45 久我 健太郎 東京大学新領域創成科学研究科物質系専攻  
重い電子系化合物  $\beta\text{-YbAlB}_4$  の超伝導特性
- P46 松本 洋介 東大物性研  
重い電子系化合物  $\beta\text{-YbAlB}_4$  の量子臨界性
- P47 堀江 直樹 東大物性研  
Yb 化合物における重い電子系新物質探索と物性評価
- P48 田原 大資 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻  
多変数変分波動関数を用いたモット転移の研究
- P49 大橋 琢磨 大阪大学大学院理学研究科物理学専攻  
フラストレート系モット転移のクラスタ動的平均場理論
- P50 吉村 真悟 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻  
Adiabatic loading of ultracold bosons in three-dimensional Optical Lattice
- P51 有村 恭平 京都大学大学院理学研究科  
MRI 顕微鏡の開発
- P52 蜂矢 真弘 京都大学大学院理学研究科  
MRI 顕微鏡の開発

# 1次元ナノ多孔体中ヘリウム量子流体

電気通信大学 電気通信学部 量子・物質工学科 谷口 淳子

バルク液体  $^4\text{He}$  はボーズアインシュタイン凝縮(BEC)により超流動転移を起こす。 $^4\text{He}$  を極めて限られた空間に閉じ込めると、超流動に代表される物性がバルクのものから劇的に変化し、その変化は空間の次元性、連結性、外部ポテンシャルなどに強く依存することが期待される。最近、3次元的に連結した孔径 2.5 nm の細孔を持つ多孔質ガラス(Gelsil)に閉じ込めた  $^4\text{He}$  において超流動の非常に強い抑制が報告され[1]、その抑制はポテンシャルのランダムネスによる BEC の局在という観点から議論がなされている[2]。

BEC が盛んに研究されているもうひとつの舞台は冷却原子気体である。1次元トラップ中原子気体においては、原子間の斥力相互作用が増加するにつれて、BEC のような状態から、フェルミオンの性質を示す Tonks-Girardeau ガスの状態へ変化することが予想されていた[3]。近年、1次元トラップ中原子気体のエネルギーや運動量分布が測定され、フェルミオン化したガスの理論とのよい一致が報告されている[4]。

液体  $^4\text{He}$  は原子気体に比べ非常に高密度なため、1次元細孔中液体  $^4\text{He}$  における超流動と BEC は、原子気体以上に粒子間相互作用に大きな影響を受けることが期待される。また、3次元的に連結した系との比較対象としても興味深い。

我々は孔径 2.8 nm、長さ 300 nm 程度の1次元細孔を持つ多孔体 FSM16 に  $^4\text{He}$  を閉じ込めた系において、ねじれ振り子、超音波、圧力等の多様な測定手段を用い、その物性を調べている。図にこれまでに明らかになった圧力-温度相図を示す。細孔中  $^4\text{He}$  は十分低温で超流動になり、量子渦による散逸が観測された。超流動転移温度は加圧によって強く抑制され、2.1 MPa 付近で絶対零度で超流動は消失するように見える。細孔中で  $^4\text{He}$  が固化するのは約 2.9 MPa 以上であることから、2.1 MPa では、超流動相から非超流動液体相への量子相転移が起きていると考えられる。また、1.6 MPa 以上で弾性定数の異常が観測された。この異常の大きさが超流動密度によらないこと、及び  $T_c$  より高温の 1.3 K まで観測されていることから、超流動転移に起因するものではないと考えられる。

広範な圧力領域にわたる非超流動液体相、及び超流動転移や固化に起因しない相の出現は3次元の連結を持つ系では観測されなかった現象である。これらの新しい現象が系の1次元性に由来するものなのかさらに調べていく必要がある。

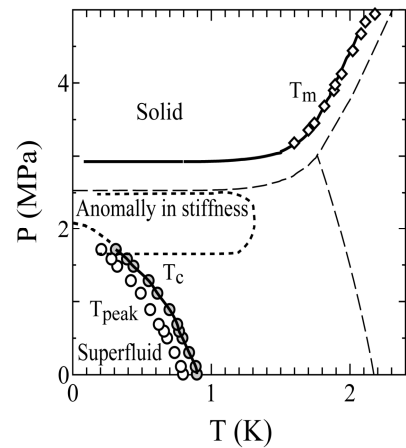


図: FSM16 中  $^4\text{He}$  の相図。  $T_c$ : 超流動転移温度、  $T_{\text{peak}}$ : 散逸のピークが観測される温度、  $T_m$ : 融点。点線はバルクの融解曲線と  $\lambda$  線。

[1] K. Yamamoto et al., *Phys. Review. Lett.* **93**, 075302 (2004).

[2] M. Kobayashi et al. *cond-mat/0510335*.

[3] L. Tonks, *Phys. Rev.* **130**, 1605 (1963).

[4] T. Kinoshita et al., *Science* **305**, 1125, (2004); B. Paredes et al. *Nature* **429**, 277 (2004).



# ナノ多孔体中 $^4\text{He}$ 薄膜の次元性と超流動

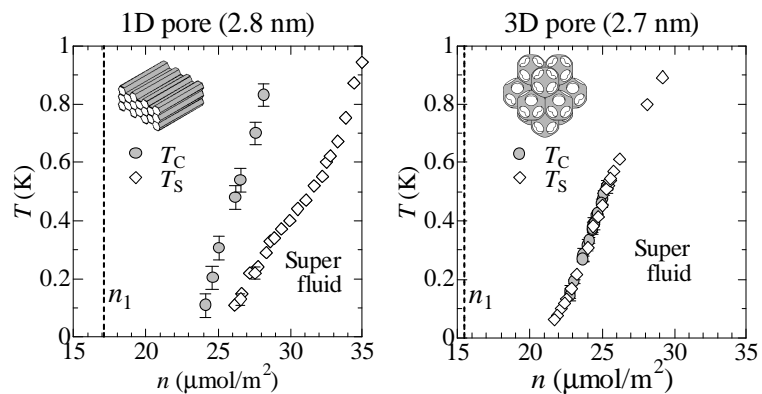
京都大学 低温物質科学研究センター

戸田 亮

ヘリウム原子の系は、低温で量子効果が重要な役割を果たす量子液体の系を形成する。 $^4\text{He}$  液体の場合、ボース・アインシュタイン凝縮や超流動を示すことが期待されるが、超流動転移や超流動密度の温度依存性、その発生機構などは密度や次元性によって異なっている。飽和蒸気圧下にあるバルク(3次元) $^4\text{He}$ 液体は、約2.17 Kで超流動状態へと転移する。超流動転移温度では、同時に長距離秩序の形成を示す比熱のピークが観測される。一方、平面上の吸着薄膜として実現される2次元 $^4\text{He}$ 液体は、Kosterlitz-Thouless (KT)超流動状態となる。KT転移では、比熱は超流動が観測され始める温度で異常を示さず、より高温に極大を持つ。1次元の場合は、2次元と同様長距離秩序は無いといわれているが、超流動性などはまだ分かっていない。

多孔体に吸着された薄膜の系は、孔径以下の長さスケールでは2次元系であるが、より大きな長さスケールでは、吸着薄膜は細孔の接続の次元性を持つことが期待される。一般に、温度ドロイ波長やフォノン波長は低温になるに伴い長くなっていくので、低温では細孔接続の次元性が重要な役割を果たすと予想される。接続の次元性が超流動性にもたらす効果を実験的に調べるため、孔径がほぼ等しく(~3 nm)、接続の次元性が異なる2種類のナノ多孔体FSM-16(300 nm程度の長さの1次元トンネル状細孔)とHMM-2(5.5 nmで3次元的な接続をもつ細孔)に $^4\text{He}$ を吸着させ、熱容量測定とねじれ振り子による超流動密度測定を行った。2つのナノ多孔体中で $^4\text{He}$ は約2層目まで一様に薄膜を形成する。また、2つのナノ多孔体中で $^4\text{He}$ が感じる吸着ポテンシャルの大きさはほぼ同じである[1]。

図は1および3次元多孔体中 $^4\text{He}$ 流体薄膜の相図である。3次元ナノ多孔体の場合(右側の図)、超流動転移温度( $T_S$ )と実験的に同じ温度 $T_C$ で熱容量の小さいがシャープなピークを観測した。これは3次元長距離秩序の特徴を示しており、細孔



の3次元接続を反映していると理解できる。一方の1次元ナノ多孔体の場合(左)、 $T_C$ で緩やかな極大を伴う比熱異常を観測したが、超流動( $T_S$ )はそれよりも1/3程度の低温で観測された[2]。この研究により、ナノ細孔の繋がり次元性によって超流動転移が異なること、3次元多孔体中では3次元性が現れることが明らかになった。しかし、1次元細孔中で観測された超流動転移はKT転移の特徴に類似しており、現時点でははっきりと1次元の特徴を示しているとはいえない。さらに1次元性が強くなる低温での振る舞いを調べる必要があると考えられる。

## 参考文献

[1] R. Toda et al., *J. Low Temp. Phys.* **138**, (2005) 177.

[2] R. Toda et al., *Phys. Rev. Lett.* **99**, (2007) 255301.

\*この一連の研究は名古屋大学 理学部超低温物理実験室において行ったものです。

# 光格子中における低次元ボース気体

東京理科大学 理学部物理学科 段下 一平

近年、冷たい原子気体の系において低次元の多体量子物理現象の研究が盛んに行われている。一般に平均場近似でよく記述される三次元系とは異なり、低次元系においては位相の量子揺らぎ及び熱揺らぎが重要な役割を果たす。原子気体系の実験ではその究極的ともいえる制御性をいかして、一次元系におけるTonks-Girardeau気体[1]、二次元系におけるBerezinsky-Kosterlitz-Thouless転移[2]などの低次元系に特有な興味深い現象が観測されている。

本発表では、光格子中の一次元ボース気体の輸送現象を議論する。一次元ボース気体は、磁気トラップに閉じ込められたボース凝縮体に対して非常に強度の大きい光格子を二方向(y方向とz方向)に印加することで作られる。近年の実験では、軸方向(x方向)にも光格子を加えて、このような一次元ボース気体の輸送特性が調べられている。なかでも、NISTの実験グループは一次元ボース気体の二重極振動が光格子の深さに依存してどのように変化するかを調べた[3]。彼らは、格子が低いときでも二重極振動の減衰が顕著であり、格子を深くしていくにつれてボース気体の重心運動が減衰振動から過減衰に転移することを報告した。一次元性からくる非常に強い量子揺らぎのため、この実験結果は平均場理論からの予測とは合致せず、量子揺らぎの効果を考慮した理論研究の必要性が高まっている。

本研究では、Time-evolving block decimation法[4]をボース・ハバードモデルに適用することでこのBose気体の二重極振動をシミュレーションする[5]。この手法では一次元格子系のダイナミクスを厳密に極めて近い精度で記述できるので、量子揺らぎの効果を殺すことなく計算を実行できる。重心運動の減衰率を光格子の深さの関数として計算し、実験結果と定量的な一致を得た。我々は、過減衰への転移が起こるのは強い量子揺らぎによって超流動流が崩壊しているためであることを明らかにした。

- [1] B. Paredes, A. Widera, V. Murg, O. Mandel, S. Fölling, I. Cirac, G. V. Shlyapnikov, T. W. Hänsch, and I. Bloch, *Nature (London)* **429**, 281 (2004); T. Kinoshita, T. Wenger, and D. S. Weiss, *Science* **305**, 1125 (2004).
- [2] Z. Hadzibabic, P. Krüger, M. Cheneau, B. Battelier, and J. Dalibard, *Nature (London)* **441**, 1118 (2006); P. Cladé, C. Ryu, A. Ramanathan, K. Helmerson, and W. D. Phillips, *arXiv:0805.3519* (2008).
- [3] C. D. Fertig, K. M. O'Hara, J. H. Huckans, S. L. Rolston, W. D. Phillips, and J. V. Porto, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 120403 (2005).
- [4] G. Vidal, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 147902 (2003); **93**, 040502 (2004).
- [5] I. Danshita and C. W. Clark, *arXiv:0807.2898* (2008).

# 光格子中の超固体状態

京都大学 大学院理学研究科 古賀 昌久

ルビジウム原子系における超流動状態の観測以来、冷却原子系に関する研究が精力的になされている。中でも、冷却原子を周期ポテンシャルに閉じ込めた光格子系は最近注目されている系のひとつである。この系では、ポテンシャルの大きさ、形状だけではなく、相互作用の大きさについても自由にコントロールすることができるため、BCS-BEC クロスオーバーやモット転移などの物性が低温において観測されている。

この光格子系における興味深い量子状態の一つに、フェルミ粒子系における超固体状態がある。これは、超流動状態と粒子密度波状態(固体状態)が共存した状態であり、最近のホットトピックスの一つである。これまでの引力ハバードモデルによる解析によると、二次元以上における Bipartite の格子モデルにおいて、これら二つの相のエネルギーがハーフフィリングにおいて縮退し、超固体状態が実現可能であることが示されている。しかしながら、この共存状態は他の摂動に対して安定ではなく、例えばホールドープにより、電荷秩序状態は消失し、超固体状態のかわりに純粋な超流動状態が出現することが知られている。一方、光格子系においては、閉じ込めポテンシャルの存在により粒子密度に偏りが生じるため、超固体状態が実現する可能性がある。

本研究では、引力相互作用を持つフェルミ粒子光格子系を取り上げ、密度波状態、s 波超流動状態がどのように競合、共存するのかについて調べる。ハミルトニアンは以下の通りである。

$$H = -t \sum_{\langle ij \rangle \sigma} c_{i\sigma}^\dagger c_{j\sigma} - U \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow} + V_0 \sum_{i\sigma} r_i^2 n_{i\sigma}$$

ここで、 $t$ ,  $U$ ,  $V_0$  はそれぞれ、ホッピング、オンサイトの引力相互作用、調和ポテンシャルの曲率であり、 $r_i$  はポテンシャル中心からサイト  $i$  までの距離である。本研究では、局所相関効果について取り込むことのできる動的平均場近似を用いて、低温における系の振る舞いについて解析を行い、あるパラメタ領域において超固体状態が実現することを示す。また、粒子数を変化させることにより、相図がどのように変化するかについても議論する予定である。

# ヘリウムの結晶成長; その普遍性と特異性

東京工業大学 大学院理工学研究科 野村 竜司

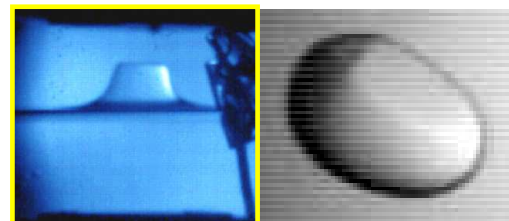
結晶成長が進行するには通常、①界面への物質輸送②結晶格子への原子の取り込み③潜熱の輸送、の3つの過程が介在する。しかし超流動体から生じるヘリウム4の結晶化では、①③は非常に速やかに進行するので無視でき、②の結晶化カイネティクスに関わる過程を調べることができる。界面の易動度は衝突するフォノンとロトンの数で決まり、低温で非常に大きくなる。金属の融液成長の場合と比較すると $10^{10}$ 倍も速く成長することが出来る。速い成長は二つの意味で重要となる。一つは緩和が非常に速くなるため、精密な実験が可能となることである。ある物質の結晶平衡形を議論するとき、その緩和時間が何百年もかかるようでは、実験を行うのは不可能である。しかしヘリウムでは1秒もかからず緩和し、結晶形の基礎的な物理を調べるのに適している。もう一つは通常の結晶成長では目にすることが無いような特異な現象を示すことである。粘性や拡散によって隠れていた新現象が、量子固体の成長に現れることがある。

ラフニング転移は結晶平衡形の相転移であり、転移温度以下で特定の結晶面（ファセットと呼ぶ）が表れる。この相転移はKT転移と同じ普遍性クラスに属するとされており、ヘリウムを用いた実験で検証された。ファセット面の2次元核生成による成長、螺旋成長や下で述べる結晶化波などの測定により、結晶表面のステップエネルギーが決定され、またステップ間の相互作用も測定された。表面の基礎的物理量が測定可能で、各種の理論的予想の検証に役立ってきた歴史がある。

ヘリウムに特有な現象としては、表面の成長融解が波として伝わる結晶化波が知られている。あるいは表面に超音波を照射したとき、成長融解が超音波の周波数に追従するために起こる、超音波の完全反射がある。その他にも、熱流による成長、異常な界面熱抵抗、一軸応力下での表面不安定性、超流動流の影響、電場の影響、量子核生成などが調べられてきた。

我々が見出した新現象として、2次の音響効果である音響放射圧によってヘリウム結晶が成長や融解することを紹介する<sup>1</sup>。この方法を使うと界面を自由に大変形することが可能になり、変形後の緩和過程に特異な界面形状が現れることも見出した。異方的界面の非線形運動を調べる道が開けたことを意味する。また核生成も駆動できた<sup>2</sup>。その他に、固体中の超流動液胞（負結晶）の特異な形態と運動<sup>3</sup>や、空間的な乱れの下で成長するヘリウム結晶の動的相転移など

1. PRL 90 075301 (2003),  
PRB 70 054516 (2004)
2. PRB 71 214506 (2005)
3. PRE 70 021606 (2004)



放射圧による成長

負結晶

# リング交換相互作用とその磁性

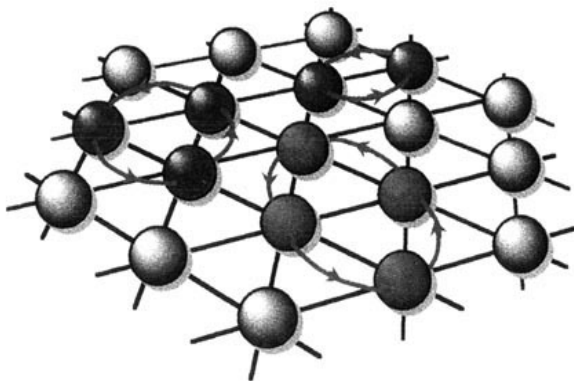
理化学研究所 古崎物性理論研究室 桃井 勉

リング交換相互作用は、モット絶縁体や（固体ヘリウム3、電子ウィグナー結晶等の）量子固体に広く存在する一般的なスピン相互作用であるが、誘起される特徴的な磁性はまだよく理解されていない。一方で、リング交換相互作用が強いと思われる固体ヘリウム3薄膜では、量子スピン液体的振る舞いが観測されており、この相互作用との関連性に興味を持たれている。

講演では、リング交換相互作用の起源と導出を説明したい。また、リング交換相互作用が引き起こす磁性に関する最近の研究について少しだけ紹介する予定です。

講演内容：

1. 量子固体における多体リング交換相互作用の導出
2. モット絶縁体における多体スピン交換相互作用の導出
3. リング交換相互作用が引き起こす磁性 ——三角格子の場合——



図：リング交換相互作用を生む2粒子、3粒子、4粒子リング交換プロセス

# 量子渦、および量子乱流研究とその発展

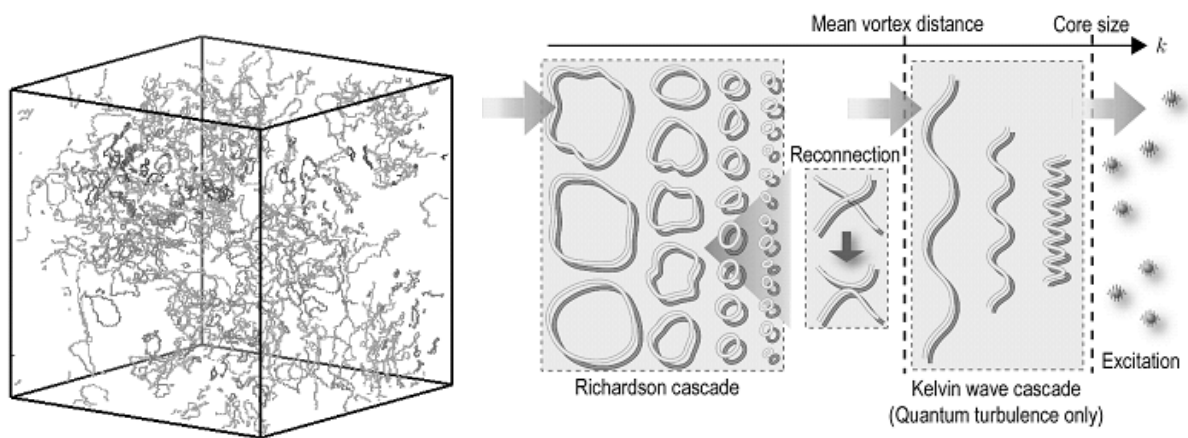
東京大学 大学院理学系研究科 小林 未知数

超流動ヘリウムにおいて現れる量子渦とその量子渦の複雑な絡まりによって構成される超流動乱流、量子乱流（図）は1950年代に発見されて以来非常に長い研究の歴史を持っています。しかし量子乱流の研究は特に1990年代後半に通常の粘性流体との対比および類似性を指摘されて以来、その研究のモチベーションは徐々に変化し、現在の量子乱流研究は急速に新しい舞台へと突入しています。

講演ではこの新しい量子乱流研究に特に焦点を当て、今までの実験・理論研究、そして現在何が問題となっているのかをレビューしたいと思います。話題として

- ・ 量子乱流と古典乱流の類似性
- ・ エネルギースペクトルにおける量子乱流の統計性
- ・ 量子乱流における量子渦のカスケード（図）
- ・ 量子乱流転移
- ・ 量子乱流の可視化

といったような内容で講演します。



図：シミュレーションにおける量子乱流中の量子渦（左）と量子乱流における量子渦のカスケード（右）

# 内部自由度を持った凝縮体におけるトポロジカル励起

東京大学 大学院理学系研究科 川口 由紀

超流動  $^3\text{He}$  やスピン自由度を持った原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体（スピノル BEC）のように内部自由度を持った凝縮体の特徴として、渦やモノポール等のトポロジカル励起にさまざまな種類が存在するという点が挙げられる。ここでいう内部自由度とは、凝縮体を構成する単位粒子のもつ自由度で、超流動  $^3\text{He}$  は p 波のクーパー対を形成するためスピン角運動量 1、軌道角運動量 1 の自由度を持つ。一方、原子気体 BEC では原子の持つ電子スピンと核スピンの合成として整数スピンを持つ。現在までにスピン 1、および 2 のスピノル BEC が実現されている。特に、スピン 1 のスピノル BEC では秩序変数が超流動  $^3\text{He}$  と類似した構造をとり、渦やモノポールの構造にも類似点が多い。そこで本講演では、超流動  $^3\text{He}$  とスピノル BEC を比較しながら内部自由度を持った系における様々なトポロジカル励起について説明する。

通常、超流動  $^4\text{He}$  のように内部自由度のない場合の量子渦では、秩序変数の位相が渦系の回りに  $2\pi$  の整数倍だけ変化する。それに対し内部自由度を持った系では、一般に秩序変数が複素ベクトルとして表現されるため複数の位相を持つ。例えば、スピン 1 のスピノル BEC の場合、秩序変数は磁気副準位に対応した 3 成分の複素ベクトルで定義され、一般的な渦構造は実関数  $f_m$  と整数  $n_m$  を用いて

$$\begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_0 \\ \psi_{-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(r) \exp(in_1\theta) \\ f_0(r) \exp(in_0\theta) \\ f_{-1}(r) \exp(in_{-1}\theta) \end{pmatrix}$$

と書かれる。ここで  $(r, \theta)$  は渦芯周りの極座標である。 $n_m$  の組み合わせによって渦の種類が異なり、どのような渦が安定になるかはスピン間の相互作用で決まる。スピノル BEC の場合、各スピン成分の位相差はスピンの方向に対応するので、 $n_m$  の組み合わせによってスピンの空間構造を決めることになる。一例として、右下図に  $(n_1, n_0, n_{-1}) = (0, 1, 2)$  の場合のスピン構造を示した。スピンの方位と超流動の速度場を作る位相は独立ではない（スピン - ゲージ対称性）ため、このようなスピンの空間変化により超流動の循環流が生じる。同様の構造は超流動  $^3\text{He}$  の A 相でも Mermin-Ho (MH) 渦として知られており、軌道の自由度を現す  $l$  ベクトルが右図のような構造をとる。 $^3\text{He}$  A 相の場合には、軌道 - ゲージ対称性を持ち、やはり循環流が存在する。MH 渦は容器の境界条件により安定化することが知られていたが、スピノル BEC では磁気双極子 - 双極子相互作用により安定化することが最近の研究でわかった。この他、内部自由度を利用した新奇な渦構造やモノポールについても紹介する。

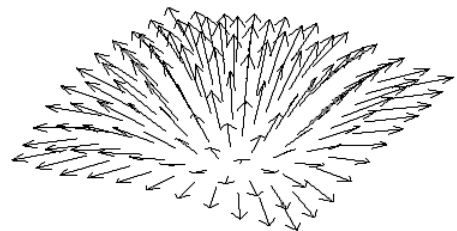


図 :  $(n_1, n_0, n_{-1}) = (0, 1, 2)$  の場合のスピン構造

# 回転下の超流動ヘリウム 3 の織目構造と量子渦

東京理科大学 理学部応用物理学科 石黒 亮輔

超流動ヘリウム 3 は P 波 3 重項 の超流動で内部自由度を持ち、その超流動相も対称性の違う A 相と B 相の 2 つの相が存在することが広く知られている。さらに同じ相の中でも秩序変数が実空間で構造を持つため「texture (織目構造)」と呼ばれる構造が存在する。

超流動の渦はその循環が量子化されており量子渦と呼ばれている。通常、量子渦の渦芯は特異点となっている。しかし超流動ヘリウム 3 においては織目構造によって特異点のない量子渦など、多彩な量子渦構造がヘルシンキ大のグループなどの研究によって明らかにされてきた。特に A 相の特異点のない渦の渦芯の大きさは織目構造の特徴的な長さと同様  $10 \mu\text{m}$  程度で、NMR によって渦芯の直接観測が可能である。

ただしバルク液体の A 相では織目構造に自由度がありすぎるため、織目構造や量子渦を制御するという事は難しい。そこで我々は織目構造の自由度を適度に絞ることの出来る半径  $100 \mu\text{m}$  程度の円筒容器を使った実験を用意し A 相の織目構造や量子渦の研究を行ってきた。このような大きさの系では渦芯の大きさが無視できず、量子渦の運動に渦糸近似が成り立たなく、また超流動ヘリウム 3A 相に特徴的な織目構造が量子渦の物理に影響する。

超流動を回転させるためには核断熱消磁冷凍機を回転させる必要があるため、我々は東大物性研久保田研に毎秒 2 回転での回転速度を持ち 1mK 以下の温度を定常的に保つ冷凍機を建設し実験を行った。

今回は東大物性研で行った細い円筒容器を用いた研究によって明らかになった静止下でも巨視的な角運動量を持った織目構造やその制御、毎秒 2 回転までの回転実験、量子渦の運動などについて発表する。



# グラファイト上に吸着した単原子層 2 次元ヘリウム 3

東京工業大学 大学院理工学研究科 村川 智

擬 2 次元伝導性を持つ銅酸化物超伝導体などに代表される強く相互作用する 2 次元フェルミ粒子系は非常に興味深い系である。この系を理解するには大きく分けて 2 つの道筋がある。一つはフェルミ液体論に基づく相互作用のない系から連続的に変化させていく考え方と、各粒子が局在しモット絶縁体からの量子相転移として考える方法である。しかしながら、どちらも決定的な理解には至っていない。

グラファイトは原子レベルで平坦な領域が 10nm 以上にもわたり、その上に物理吸着したヘリウム  $^3\text{He}$  は層状構造を持つことが知られている。このように作成された単原子および数原子層の  $^3\text{He}$  の運動はほぼ 2 次元に限定され、吸着量をコントロールすることにより幅広い粒子密度を実現することができる。これらのことより、この単原子層  $^3\text{He}$  は強く相互作用する 2 次元フェルミ粒子系の量子物性を研究する上で理想的な系であるといえる。また、2 次元  $^3\text{He}$  は電荷を持たないため、長距離相互作用であるクーロン相互作用はなく、大きなハードコア斥力の影響であらわれる高次の多体交換が重要であるため、超低温で興味深い量子多体現象が現れることが知られている。

この系は特に吸着第 2 層が注目を集めている。第 2 層は吸着基板の不均一性の影響を低減させることができ、さらに第 1 層に吸着させる原子種を変更させることにより、下地のポテンシャルの間隔を変更することができるからである。

この吸着第 2 層は面密度が小さいと理想的な 2 次元フェルミ流体として振る舞い、面密度の増加とともに有効質量や飽和磁化が発散的に増大する。さらに面密度を増加させると中間的な領域を経て下地に整合相が現れる。この相は下地の面密度に対して  $4/7$  の密度で現れるため、 $4/7$  整合相と呼ばれている。 $4/7$  整合相は三角格子であることによる不安定性と多体交換の競合によって、非常に興味深い性質を含む。熱容量は低温でダブルピーク構造をとり、最低温度付近では線型に減少し、磁化は反強磁性的であるが、数十  $\mu\text{K}$  まで緩やかな成長を示す。これらの振る舞いから  $4/7$  整合相の基底状態はギャップレスのスピン液体状態と考えられている。さらに面密度を上げていくと吸着第 3 層が新たに作成されつつ、第 2 層の面密度が増大することにより、多体交換の競合のバランスが変わり、反強磁性から強磁性的なものに変化する。

近年、明らかになってきた興味深い面密度はフェルミ流体と  $4/7$  整合相との中間領域である。この領域は  $4/7$  整合相をモット局在層とみなし、それにホールをドーピングした相であることが指摘されている。この系が Mott-Hubbard 型の量子相転移ならば、擬 2 次元である超伝導体の対比よりこの強相関 2 次元フェルミ系の理解が深まると考えられる。

# 量子スピン液体、量子臨界点近傍の新奇量子現象

東京大学 大学院工学系研究科 渡辺 真仁

三角格子などの磁氣的に強いフラストレーションをもつ格子系において、絶対零度まで磁気秩序を示さない絶縁体、すなわち量子スピン液体状態が実現するのではないかという提案が1973年にP. W. Andersonによりなされたが、そのような状態が存在するか否かについては最近に至るまで理論的・実験的に未解決の問題であった。近年、数値計算方法の発展により、幾何学的にフラストレートした格子をもつ2次元ハバード模型の基底状態において、ギャップレスのスピン液体状態が存在することが見出された。さらに、三角格子系の有機化合物 $\kappa$ -(ET)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub>やグラファイト基盤に吸着されたヘリウム3の系において、極低温まで磁気秩序を示さない、ギャップレスのスピン液体状態の実現を示唆する実験結果が近年相次いで報告され、注目を集めている。講演では、量子スピン液体の物理的意義を述べた後、スピン液体的振る舞いを示す物質を概観し、理論研究の最近までの進展を紹介する。

磁気秩序や電荷秩序などの秩序相への連続相転移温度が、絶対零度まで抑制されたときに実現する量子臨界点の近傍では、非フェルミ液体や超伝導などの興味深い現象が実現する場合がある。これまで弱い反強磁性や強磁性体の量子臨界現象については、スピン揺らぎの理論に基づく解析が盛んに行われてきたが、近年、このような従来型の対称性の破れに基づく量子臨界現象とは異なる現象が複数の物質で観測され、理論的な進展がみられている。量子臨界点近傍に出現する超伝導機構についても、従来議論されてきたスピンの揺らぎとは異なるメカニズムの存在が、複数の物質における実験によって示唆されている。講演では、量子臨界点近傍の量子現象の実験と理論を概観し、最近の新しい進展を紹介する。

# 重い電子系 $\text{YbAlB}_4$ における量子臨界性と超伝導

東京大学 物性研究所 富田 崇弘

重い電子系 Ce 化合物と Yb 化合物は、それぞれ  $f$  電子 1 つとホール 1 つを含む典型的強相関電子系で、それぞれ特徴ある量子臨界性を見せることで知られている。しかし、今まで Yb 化合物の量子臨界点近傍では、20 年以上の探索にもかかわらず超伝導が発見されてこなかった。今回、我々のグループは  $\beta$  型  $\text{YbAlB}_4$  が重い電子系 Yb 化合物の中で初めて超伝導 ( $T_c=80$  mK) を示す物質であることを発見した[1, 2] この転移直上の温度域においては非フェルミ液体性を示し、(1)低磁場印加により非フェルミ液体からフェルミ液体へのクロスオーバーが現れること(図 1 参照)、(2)2 GPa と低圧で、25 K 程の転移温度を持つ磁気秩序が現れることから、 $\beta$  型  $\text{YbAlB}_4$  は量子臨界点近傍に位置していると考えられる。しかも、試料の純度を示す残留抵抗比は  $\text{RRR}=300$  と非常に高く、重い電子系 Yb 化合物において、これほどクリーンな試料は例がない。今回、この物質の最近の研究状況と、私が主に取り組んでいる高圧下での振る舞いについて講演を行う予定である。

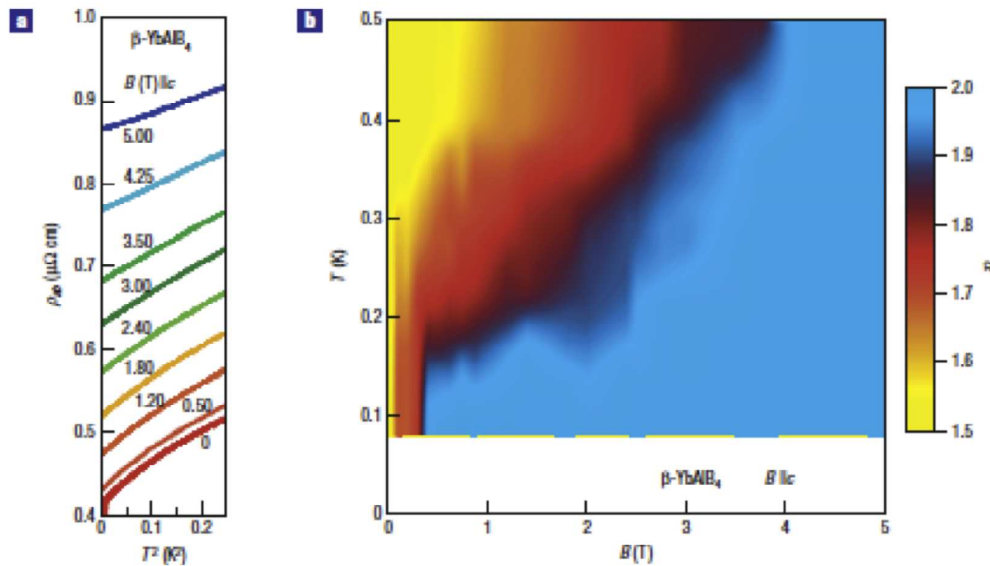


図 1. 低温での電気抵抗と非 Fermi 液体性[1]

[1] S. Nakatsuji, K. Kuga, Y. Machida, T. Sakakibara, Y. Karaki, H. Ishimoto, S. Yonezawa, Y. Maeno, E. Pearson, G. G. Lonzarich, L. Balicas, H. Lee and Z. Fisk, to appear in Nature Physics (2008).

[2] K. Kuga, Y. Karaki, Y. Matsumoto, Y. Machida and S. Nakatsuji, preprint (2008).

# フェルミ面トポロジーの変化による量子相転移

東京大学 大学院工学系研究科物理工学専攻 山地 洋平

遍歴電子磁性体では、圧力や磁場、化学組成を制御することで、しばしば絶対零度での相転移、量子相転移が観測されます。磁気転移のような対称性の破れによる相転移は、一般に有限温度に転移点を持つため、量子揺らぎが相転移点の温度を抑制し、絶対零度に落ち込んだ結果、量子相転移が生じるともいえます。特に量子臨界点の近傍では、秩序変数の臨界揺らぎとフェルミ面近傍の低エネルギー励起構造とが絡み合い『非フェルミ液体的振る舞い』や、異方的超伝導等の新奇な量子相を引き起こす可能性があることから、大変注目を集めてきました[1]。

一方で有限温度での古典的な相転移とは関係しない量子相転移のクラスが存在します。量子ホール液体やスピン液体間の転移などの、絶対零度でのみ区別できる基底状態間の量子相転移です。このような量子相転移(とくに連続転移)の中で最古参のものに、フェルミ面のつながり方(フェルミ面トポロジー)の変化があります。遍歴電子系をはじめとする多体フェルミ粒子系では、圧力・磁場の印可、ドーピングによってフェルミ面トポロジーが変化することは避けられません。相互作用の無い多体フェルミ粒子系について I.M.Lifshitz が初めて提案して以来[2]、トポロジー変化による量子相転移は実験・理論の双方から研究されてきました[3]。しかし、研究の端緒で無視された多体相互作用は、この相転移に定性的な変更を与えないと長い間考えられてきました。

しかし近年、電子間相互作用とフェルミ面トポロジーの変化が絡み合うことで、非従来型の量子臨界現象が現われることが明らかになってきました。この新しい臨界性が、強相関電子系特有の『対称の破れに基づく従来の枠組み』に従わない量子臨界現象を説明する可能性が指摘されています。本講演では、我々が近年議論してきた、金属絶縁体転移[4]や遍歴電子メタ磁性転移[5]の量子臨界性とフェルミ面トポロジーとの関係を紹介するとともに、最近注目を集めている、重い電子系を記述する近藤格子模型でのフェルミ面トポロジーの変化など、国内外の理論的な話題を紹介します。また、近年のフェルミ面トポロジーにまつわる実験的研究についてもふれる予定です。

[1] 量子相転移を示す d, f-電子系のレビューとして、G. R. Stewart: Rev. Mod. Phys. **73** (2001) 797.

[2] I. M. Lifshitz: Sov. Phys. -JETP **11** (1960) 1130.

[3] 例えば、V. V. Struzhkin *et al.*: Phys. Rev. Lett. **79** (1997) 4262.

[4] T. Misawa, Y. Yamaji, and M. Imada: J. Phys. Soc. Jpn. **75** (2006) 083705.

[5] Y. Yamaji, T. Misawa, and M. Imada: J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 063702.

# 超固体ヘリウム4 ～捻り振りで観測される非古典回転慣性～

東京工業大学 大学院総合理工学研究科 青木 悠樹

2004年にPennstateのグループが行った、捻り振子法による固体ヘリウム4の回転慣性測定では、200 mK以下での低温において振りの共振周波数  $f$  がわずかに増加するという結果が得られた。共振周波数は振りのバネ定数  $K$  と回転慣性  $I$  を用い  $f = 2\pi\sqrt{K/I}$  のように書き表せるが、低温で観測された  $f$  の増加量は1%程度の固体ヘリウム4の  $I$  の減少に相当し、非古典的回転慣性(NCRI)と呼ばれている。この実験事実から固体ヘリウム4が低温で超流動(超固体)状態に転移している可能性が考えられ、大きな反響を呼んでいる。今までこの現象が観測されなかった理由の一つとしてNCRIのシグナルは、捻り振りの振幅が極めて小さい( $<10^2 \mu\text{m/sec}$ )時にしか観測されないという特徴が挙げられるが、これは超固体の臨界速度効果に相当するとも考えられている。このPennstateによる実験結果に刺激され、現在では捻り振子法による固体ヘリウム4の実験がコーネル大学、ラトガース大学、慶応大学、物性研の各グループにより行われているが、そのメカニズムは未だ明らかでない。

ラトガース大学では同一固体中において二つの異なる周波数 ( $f_1=495.8, f_2=1172.8 \text{ Hz}$ ) で超固体の信号を観測することができる、円柱空洞状の二重共振捻り振子を作成し、29-42気圧までのいくつかの固体試料中で測定を行った。最低温度( $\sim 10\text{mK}$ )、低振幅( $\sim 10 \mu\text{m/sec}$ )で観測されたNCRI成分は、いずれの固体試料中においても0.1%程度であった。我々の実験で観測されたNCRIシグナルの特徴は以下のようである。1)低振幅でNCRIとQの温度変化を二つの異なる周波数で測定を行った所、周波数に依存するシグナルが観測された。2)“臨界速度”と考えられていた効果を検証するために温度を固定し、振りの振幅を変化させた所、40 mK以下での低温においてヒステリシス的な振る舞いが観測された。3)ヒステリシス的な振る舞いが観測される低温領域において、振りの励起電圧を減少させることによりNCRIを増加させた時、振りの振幅の時間変化は単調に減少するのではなくオーバーダンプして $\sim 10^3$ 秒程度の時定数で平衡状態に向かう事が観測された。

ラトガース大学の実験で見つかったこれらの新奇な現象は、当初考えられていたような単純な超流動転移モデルでは説明することができない。超固体シグナルの周波数依存性を予測する理論としては、固体ヘリウム4の超流動転移に起因する渦糸液体モデル、固体の超流動転移ではなくその“堅さ”が変化したことによるものであるというガラス転移モデルなどがあるが、講演ではこれらの理論モデルとの比較について議論する。

# グラファイト基盤上に形成された2次元<sup>4</sup>He 固体における固体の超流動

慶應義塾大学 理工学部 柴山 義行

液体ヘリウム(He)の超流動現象を調べる実験手法の1つとしてねじれ振子法が知られている。ねじれ振子法では、試料であるHeの入ったセルをベリリウム銅(BeCu)等で作られた細く硬い金属ロッドの先に吊り下げ、金属ロッドのねじれ弾性定数 $\kappa$ とサンプルセルの慣性モーメント $I$ とで決まる固有振動数 $f = (2\pi)^{-1}\sqrt{\kappa/I}$ でサンプルセルをねじれ振動させる。セル内のHeが超流動状態になると超流動成分はその非古典的回転慣性(nonclassical rotational inertia; NCRI)のためサンプルセルの慣性モーメントに寄与しなくなり、振子の振動数は上昇する。この振動数の変化量は超流動密度に比例することから、固有振動数の温度変化を測定することで超流動転移温度や超流動密度の温度変化を測定することができる。

2004年KimとChanはねじれ振り子法の測定で、固体<sup>4</sup>Heにおいて約300 mK以下で有限のNCRIを観測した。理論的には量子固体において、その量子性のため固体でありながら超流動性を示す『**固体の超流動**』の可能性が指摘されてきたが、これまで実験的な報告はなされておらず、彼らの報告はその『量子固体における固体の超流動』によるものと期待された。しかしながら、その後の固体<sup>4</sup>He試料の作成条件やアニール効果の実験<sup>[2-4]</sup>から、KimとChanに見出された『固体の超流動』的な挙動は量子固体の量子性そのものに起因するというより、固体<sup>4</sup>He試料中の格子欠陥や転位といった固体試料のもつ結晶の不完全性と密接に関連した現象であり、完全結晶では生じない可能性が指摘されている。

固体<sup>4</sup>Heにおける『固体の超流動』のモデルの1つとして、『**零点空格子(zero-point vacancy)**のBose-Einstein凝縮(BEC)』によるものがある<sup>[5]</sup>。古典的な結晶では、結晶中に空格子点が存在する状態は最隣接原子との結合エネルギーの分完全結晶よりエネルギーが高い状態であり、0 Kでの基底状態にはなり得ない。一方、量子固体ではその大きな零点振動のため0 Kでも結晶中で頻繁な原子交換が生ずる。空格子点が存在する場合にはこの原子交換に伴い空格子点も結晶中を自由に運動することとなり、結晶中で空格子点がバンドを形成する。バンド幅が充分大きくなると空格子点が存在する場合の方が完全結晶よりもエネルギーが低くなり、空格子点が存在する状態が0 Kでの基底状態となり得る。このような機構で形成される量子固体中の空格子点を**零点空格子**とよぶ。固体<sup>4</sup>Heにおける零点空格子はBose粒子であるから、低温において**零点空格子がBECを起こし、超流動的な挙動を示す**と考えられる。

このような量子固体における零点空格子の存在は、グラファイト基板上の2次元<sup>3</sup>He系において既に実験的に見出されている。Matsumotoらの熱容量の測定により<sup>[6]</sup>、4/7相と呼ばれる整合相直下の面密度で、2次元<sup>3</sup>He系にドーブされた**零点空格子の量子トンネルホッピング**に起因する新奇な量子相が見出されている。同様な系を<sup>4</sup>Heで構築すればBose粒子系である2次元<sup>4</sup>He固体に零点空格子を作り出せ、低温において『**零点空格子の超流動状態**』を実現できると期待される。ねじれ振り子法によるグラファイト基板上の<sup>4</sup>He薄膜の研究は既にCrowellとReppyにより行われており<sup>[7]</sup>、2層吸着完了直前の面密度において特異なNCRIが観測されている。この特異な振舞の現れる面密度は2次元<sup>3</sup>He系において新奇な量子相が出現する面密度と一致しており、CrowellとReppyに見出された特異なNCRIが実は2次元<sup>4</sup>He固体にドーブされた零点空格子の超流動によるものであった可能性が考えられる。

以上のような背景の下、グラファイト表面上に形成された2次元<sup>4</sup>He薄膜のねじれ振り子法によるNCRIの測定を行い、(1) CrowellとReppyの結果を再現するか、(2)すでにバルクの固体<sup>4</sup>Heで見出されているNCRIの振動速度依存性が観測されるか検討した。当日はこれまでの測定結果とその解釈、及び現在進行中のより高感度な測定の結果についても紹介したい。本研究は福山寛教授(東京大院理)、白浜圭也准教授(慶応大理工)との共同研究で行われた。

[1] E. Kim and M. H. W. Chan, *Nature*, **427**, 225 (2004); *Science*, **305**, 1941 (2004).

[2] A. S. C. Rittner and J. D. Reppy, *Phys. Rev. Lett.*, **97**, 165301 (2006).

[3] S. Sasaki, F. Caupin, and S. Balibar, *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 205302 (2007).

[4] M. Kondo, S. Takada, Y. Shibayama, and K. Sirahama, *J. Low Temp. Phys.*, **148**, 695 (2007).

[5] A. F. Andreev and I. M. Lifshitz, *Sov. Phys. JETP*, **29**, 1107 (1969).

[6] Y. Matsumoto, D. Tsuji, S. Murakawa, C. Bäuerle, H. Kambara, and H. Fukuyama, *J. Low Temp. Phys.*, **138**, 271 (2005).

[7] P. A. Crowell and J. Reppy, *Phys. Rev. B*, **53**, 2701 (1996).

# 面心立方格子上的超流動固体状態

東京大学 物性研究所 鈴木 隆史

超流動固体とは粒子が周期的な配列を組んで固体を形成しているにもかかわらず超流動性を示す状態を指す。近年 E. Kim と M. H. W. Chan が行った  $\text{He}^4$  に対するねじれ振りの実験で、固体  $\text{He}^4$  の回転慣性モーメントが極低温、高圧下において減少する振る舞いが観測されて以来、理論、実験の両面から盛んに研究が行われている。

超流動固体に対する理論的アプローチの一つに格子モデルを用いる方法があり、これまで平均場近似等の手法を用いて格子モデルに対する超流動固体相の探索が行われてきた。とりわけ 2 次元格子系の場合、三角格子上で現れる超流動固体相について、その秩序状態や臨界現象が数値計算によって詳しく調べられている [2]。しかし格子形状と超流動固体状態の関係は未だ不明な点が多い。

我々は、3 次元格子を運動するボーズ粒子系に対して超流動固体相の探索を行った [3]。その結果、面心立方格子をハードコアのボーズ粒子が運動する場合、 $1/2$ -filling と  $3/4$ -filling に現れる固体相の間に 2 種類の超流動固体相が現れることがわかった。本講演では、面心立方格子で現れる超流動固体状態のミクロスコピックな描像とそのメカニズムについて紹介する。

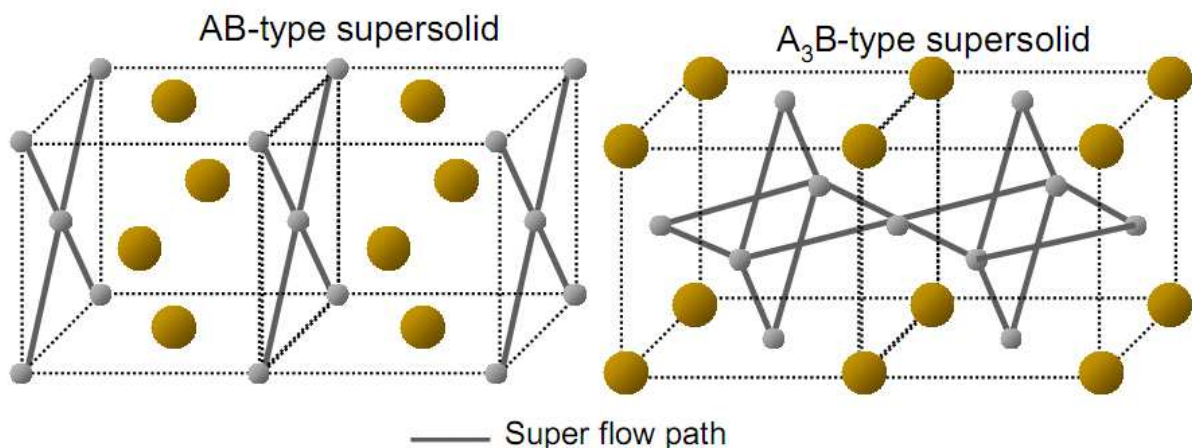


図1 : FCC 格子上的で現れる 2 種類の超流動固体状態[模式図]。黄色の丸はボーズ粒子を表す。

[1] E. Kim and M. H. W. Chan, Science 305, 1941 (2004); Nature 427, 225 (2004). [2] S. Wessel and M. Troyer, PRL 95, 127205 (2005); D. Heidarian and K. Damle, PRL 95, 127206 (2005); R. G. Melko, et al., PRL 95, 127207 (2005); M. Boninsegni and N. Prokof'ev, PRL 95, 237204 (2005). [3] T. Suzuki and N Kawashima, Phys. Rev. B 75, R180502, (2007).

# スピン三重項超伝導の d ベクトルを決めるのは何か？

東京大学 大学院理学系研究科 柳瀬 陽一

スピン三重項超伝導・超流動をはじめとする多成分秩序変数の物理には長い研究の歴史がある。最も古くは<sup>3</sup>He のスピン三重項超流動であろう。超伝導体としては、重い電子系である UBe<sub>13</sub>、UPt<sub>3</sub> 等が 80 年代から研究され、最近では PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> や Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の研究が行われている。また、空間反転対称性のない超伝導として最近注目を集めている CePt<sub>3</sub>Si にも多成分秩序変数の物理が存在する。さらに、中性原子気体においても P 波超流動の可能性が議論され、大変興味深い研究対象となっているようである。

本講演では、私がこれまで専門としてきた強相関電子系を主な対象とし、スピン三重項の内部自由度を決めるのが何であるか、ということに集中して徹底的な議論を行いたい。もちろん、それらとヘリウムや中性原子気体の間にある接点を見つけることには積極的でありたい。これらの低温量子凝縮相を幅広く議論することは本特定領域の趣旨とも合致していると思われる。

上述のように、スピン三重項超伝導の研究には長い歴史がある。しかし、それらの微視的研究は困難であるとされ、これまでの理論研究は GL 理論をはじめとする現象論に依っていた。スピン三重項超伝導の内部自由度を決定づけるのはスピン軌道相互作用の役割である。しかし、現象論ではスピン軌道相互作用の効果は仮定として入るので、その成否は実験結果との比較から判断するしかなかった。そして、実験結果のみから内部自由度の構造がユニークに決まった例は未だないというのが現状である。その点、d 電子系である Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> においてスピン三重項超伝導が発見された意義は大きい。重い電子系に比べ、d 電子系は電子状態が圧倒的に簡単である。高温超伝導の研究などを通じて発展した微視的超伝導理論研究の対象となりうるのである。

それでも難しいと思う人が多いかもしれないが、我々が行ったスピン軌道相互作用を含む多軌道ハバードモデルの解析によると、少なくとも d 電子系では、電子相関の強さによらないほぼ厳密な結果が得られる。それらについてまとめたのが下の表である。これらの結果の他、磁場による軌道効果、パウリ効果、スピン編極効果についても基本的なことからレビューし、磁場中で d ベクトルを決める要因について議論したい。

結晶対称性	正方格子		三角格子			反転対称性がない系
	d <sub>xy</sub>	d <sub>yz</sub> d <sub>zx</sub>	E <sub>g</sub>	A <sub>1g</sub>		
局所軌道	d <sub>xy</sub>	d <sub>yz</sub> d <sub>zx</sub>	E <sub>g</sub>	A <sub>1g</sub>		
超伝導対称性	P-wave		P-wave	F-wave	P, F	
d-vector	d//c	d//ab	d//ab	both	both	d//ab
異方性	弱い	多少強い	強い	弱い	弱い	非常に強い



# p 波超伝導体の近接効果

名古屋大学 大学院工学研究科 横山 毅人

近接効果とは金属/超伝導体接合において、金属中にクーパー対が染み出す効果のことである。p 波超伝導体はスピントリプレット奇パリティの対称性をもっているが、ペアポテンシャルの異方性に起因して表面あるいは界面に共鳴状態を形成することが知られている。金属/p 波超伝導体接合においては、この共鳴状態と近接効果との相互作用が多彩な現象を引き起こすことが最近の研究により明らかになった。

本講演では、金属/p 波超伝導体接合におけるコンダクタンス、金属中の状態密度[1]、金属の示すマイルスナー効果[2]、ジョセフソン効果[3]について紹介する。

## References

- [1]Y. Tanaka and S. Kashiwaya, Phys. Rev. B 70, 012507 (2004); Y. Tanaka, S. Kashiwaya, and T. Yokoyama, Phys. Rev. B 71, 094513 (2005)
- [2]Y. Tanaka, Y. Asano, A. A. Golubov, and S. Kashiwaya, Phys. Rev. B 72, 140503(R) (2005)
- [3]Y. Asano, Y. Tanaka, and S. Kashiwaya, Phys. Rev. Lett. 96, 097007 (2006); T. Yokoyama, Y. Tanaka, and A. A. Golubov, Phys. Rev. B 75, 094514 (2007)

# エアロジェルとその液体ヘリウムへの応用

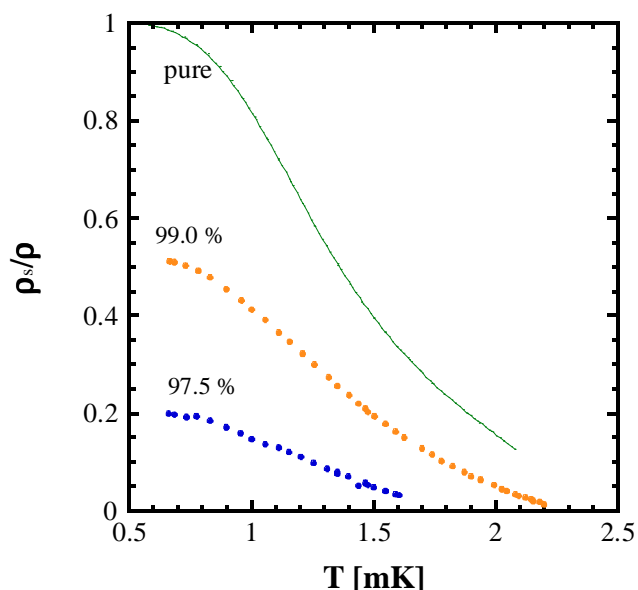
大阪市立大学 大学院理学研究科 小原 顕

ヘリウム3の系が持つ性質を調べようとするとき、人為的に変えることの出来るパラメタは多くの場合、温度 (T)・圧力あるいは密度 (P)・磁場 (H) しかない。熱力学・統計力学を構築する上で T P H という変数空間は十分であるから、T P H を引数に持つ基礎物性諸量が精力的かつ網羅的に測定されてきた。そのおかげで、現在は状態方程式と相図、比熱・帯磁率・圧縮率・粘性率・表面張力、そしてある種の相互作用などがかなりの精度で確定している。これは、新しいテーマに取り組むときに大きな武器となることは言うまでもなく、また、他の物理分野に例を見ない特徴であるといえる。

さて、超低温に於ける超流動ヘリウムは非常に排他的な物質であり、不純物を導入することは殆ど不可能であると考えられてきた。ところが、最近、エアロジェルという多孔質物質が注目を集めている。エアロジェルとはナノスケールの二酸化珪素の玉が文字通り数珠つなぎになり、かつ数珠が絡まり合った非常に空孔率の高い物質である。玉の直径はヘリウム3準粒子のフェルミ波長よりも大きいがクーパー対のサイズであるコヒーレンス長よりも小さい。また、数珠と数珠の間隔はコヒーレンス長と同程度かやや広い。エアロジェルの中にヘリウムをしみこませれば、超流動ヘリウム3内で線状の不純物と見なすことができるという訳である。事実、超流動転移温度や超流動密度の抑制はエアロジェルの空孔率に対して強い負の相関がある (下図)。

エアロジェルはその構造が特定されており、かつ制作時にその空孔率をほぼ完全に制御できる。ヘリウム3もそれ自身の性質は T P H を決定すれば殆ど決まる。超低温という極めて熱揺らぎの少ない環境でこの二つの物質を組み合わせることで、理論的にクリーンな環境で、不純物効果を研究することが出来る。

本発表では、まずエアロジェルそのものの製法、物性、応用について解説した後、エアロジェル中での液体ヘリウム3の相図について解説し、様々な実験技法によってえられた新奇な物理について概観する。



# フェッシュバツハ共鳴制御で実現する 新しい超流動状態

岡山大学 大学院自然科学研究科 水島 健

2 原子散乱における L 波散乱振幅は L 波束縛状態への共鳴を介して劇的に増幅される。1998 年にボース原子間の s 波散乱長制御が実現されて以来、同種原子間だけでなく異種原子間の s 波散乱長も自由に制御可能となっている。中でも特筆すべき事柄は、フェルミ原子間の s 波散乱長制御による BCS-BEC クロスオーバーの実現であろう。外部磁場を制御することで、散乱状態に対して 2 原子束縛状態を安定化することができる。この結果、長寿命を持つ分子ボソンがボース-アインシュタイン凝縮を起こす。外部磁場をさらにスイープすることで束縛状態は不安定化し、分子ボソンは原子間の弱い引力相互作用を介したクーパ一対へと連続的に変化していく。

本講演では、フェッシュバツハ共鳴とそれにより実現される超流動状態について、近年の研究の展開をふまえながら紹介する。講演の前半では s 波共鳴に重点を置き、BCS-BEC クロスオーバーの基礎的な事柄から出発し、それに関連した話題の紹介を行なう。特に、2 つの超微細スピン状態にある原子数比を自由に制御することで、パウリ常磁性効果が顕著な超伝導状態と類似した状況を作り出すことができる。この結果として、相分離状態、FFLO 状態や Sarma 状態等を含む多彩な超流動相図が理論的に提案されており、その一部の超流動相が実験的に実現されている。

さらには、フェッシュバツハ共鳴により p 波散乱振幅の制御も可能になっており、軌道自由度を持つ異方的超流動状態の実現が期待される。未だに p 波超流動相転移は確認されていないが、講演ではこの系の示す多彩な物理について紹介したい。具体的には、(i)量子渦に束縛された準粒子がマヨラナ粒子として振る舞うことや、(ii)エッジ状態に起因した自発的な質量流の存在等を紹介する。これらのマヨラナ状態やエッジ状態は系の超流動性を実証する際に非常に重要な役割を担う。様々な可能性を秘めたこの超流動状態を実現する上で、解決されるべき課題等についてもコメントしたい。

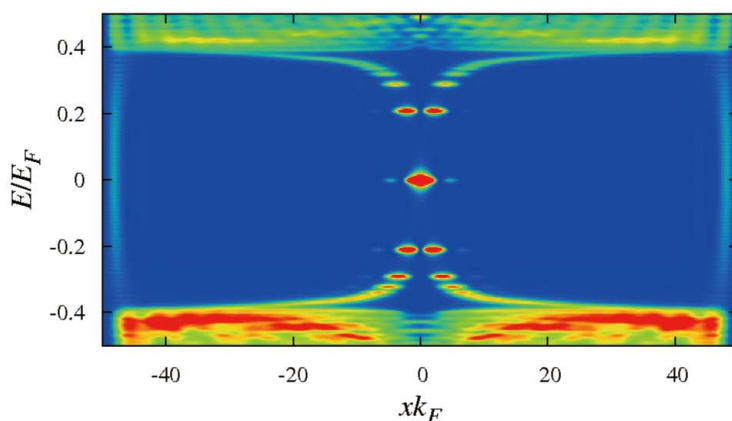


図: 渦糸を横切る経路上での局所状態密度。原点 ( $x=0$ ) に置かれた渦芯近傍で低エネルギー状態が出現している。零エネルギーにあるピークがマヨラナ状態に対応する。

## スーパークリーン特定・若手夏の学校 世話人

代表	野村 竜司	(東工大, A04 班)
会場	松本 洋介	(東大, A01 班 )
会場	渡辺 真仁	(東大, A01 班)
庶務	谷口 淳子	(電通大, A02 班)
会計	川口 由紀	(東大, A03 班)
会場	橘高 俊一郎	(京大, A04 班)
会場	大橋 琢磨	(阪大, A05 班)