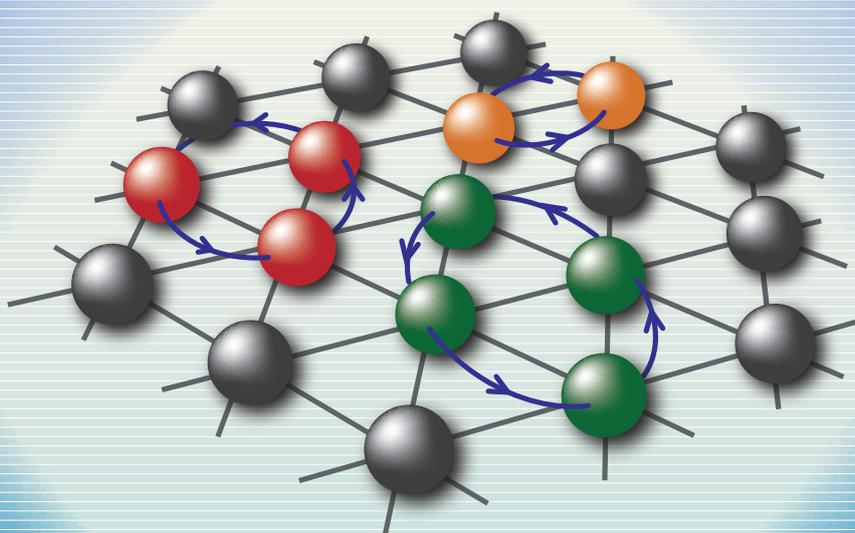


# News Letter Superclean



Vol.2 ( April / 2006 )

科学研究費補助金「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

# 目 次

○ 巻頭言	領域代表者：福山 寛	-----	i
○ 評価委員より	評価委員：河野 公俊	-----	ii

## ● トピックス

・ 超流動ヘリウム $3A_1$ 相の磁気スピン緩和と少数スピン対			
	石本 英彦 (東大)	-----	1
・ 層状ペロブスカイト超伝導体 $Sr_2RuO_4$ における超伝導対のスピン状態の研究			
	村川 寛 (京大), 石田 憲二, 前野 悦輝	-----	3
・ 三角格子系のスピンネマティック状態			
	常次 宏一 (東大)	-----	5
・ イッテルビウム原子気体の多様な量子縮退			
	福原 武 (京大), 山口 敦史, 北川 昌明, 榎本 勝成, 植竹 智, 高橋 義朗	-----	7
・ 「クリーン」な $NiS_2$ パイライトにおける異常な量子臨界挙動と乱れ効果			
	高木 英典 (東大)	-----	9

## ● 研究会報告

・ 平成 18 年度淡路島領域研究成果報告会報告			
	今田 正俊 (東大)	-----	11
・ A03、A04 班 合同研究会報告			
	石田 憲二 (京大)	-----	12
・ A01–A05 班合同ワークショップ報告			
	桃井 勉 (理研)	-----	13

## ● 研究紹介

・ A02 班：N次元ヘリウム量子流体の実現			
	戸田 亮 (名大)、松下 雄樹、檜枝 光憲、松下 琢、 和田 信雄	-----	14
・ A03 班：ボース・アインシュタイン凝縮における対称性の破れ、 スピントクスチャー、新しい量子相			
	川口 由紀 (東工大)、斉藤 弘樹 (慶大)、 上田 正仁 (東工大)	-----	16

● 研究会・ワークショップの紹介		-----	18
------------------	--	-------	----

○ 編集後記			
--------	--	--	--

## ニュースレター第2号に寄せて

領域代表者 福山 寛  
東京大学理学系研究科

Supersolid は、固体としての並進対称性の破れと、超流動としてのゲージ対称性の破れが共存する特異な物質状態です。この“超流動する固体”という摩訶不思議な状態は、1969年に Andreev と Lifshitz [1]が初めてその可能性を理論的に指摘しました。もしこの状態が実現するとしたら、それは固体ヘリウム4しかないであろうと彼らは述べています。この supersolid という概念を私が初めて知ったのは、もう30年近く前の大学院生時代に長岡洋介先生の講義ノート「量子固体」[2]を読んだときでした。それ以来、「いつかその実現に挑戦してみたい」という夢を密かに持ち続けてきました。

おそらく、このニュースレターを手にしていらっしゃる皆さんにも、胸に抱いている研究上の「夢」があるのではないのでしょうか？その夢を実現できそうな系、それが「スーパークリーン物質」の定義と言えるかも知れません。

私の太平の夢は、ちょうど3年前に発表されたペンシルベニア州立大学の Kim と Chan のねじり振り子実験[4]によって、とつぜん喧噪の世界に引き出されることになりました。彼らの実験をめぐっては、その後、多くの実験、理論グループによってさまざまな解釈がなされ、転位など結晶の不完全さの影響を指摘する声も少なくありません。Supersolid 状態が実現しているかどうかを実験的に確認することはもちろん焦眉の急ですが、私には固体ヘリウムという美しい量子結晶における空格子点や転位の量子力学的な運動をより深く理解することこそ、一見地味かも知れませんが、それと同じくらい重要な基礎研究に思えます。そして、その着実な積み重ねの先に真の聖杯が待っているような気がします。この4月に慶應義塾大学の日吉キャンパスで開かれる supersolid に関する国際シンポジウムでは、そうした基礎研究の立場から腰の据わった議論が展開されるはずで

ところで、ごく一部の領域メンバーしか知らないある事実を、この場を借りて公表しておきたいと思います。それは当初より、本特定領域研究が終了する時点で、新時代の低温物理学の教科書を皆で執筆しよう、という計画になっていることです。これは領域発足申請時の計画書にも明記してあるので、公の約束です。それがどんな厚さの、そしてどんな内容の教科書になるのか、今から楽しみではありますが、「教科書に載るような研究を標榜する」、これもスーパークリーン物質研究の一つの定義に違いありません。

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

[2] 「物性研究」1979年1月号から7月号に連載され、その後、物理学最前線3(共立出版、1983年)にも収められた。

[3] E. Kim and M. H. W. Chan, *Nature* **427**, 225 (2004).

## 特定領域「スーパークリーン」に望む

評価委員 河野 公俊  
理化学研究所

12月の淡路夢舞台での研究会は、とても楽しませていただきました。すばらしい会場のことは言うまでもなく、固体電子系のお話をまとめて伺う、またとない機会でした。ルテネイトや空間反転対称性をもたない超伝導体など、風変わりな超伝導、強相関係の話など、とても勉強になりました。すぐには合点のいかないこともたくさんありましたが、これから何度かお聞きするうちには、消化が進むことと期待しています。スーパークリーン特定は、ヘリウム、固体電子系、アルカリ原子気体の合同で、大きな広がりをもつ特定領域でしたが、公募研究が加わったことで、さらに大きな広がりを持ったのではないかと思います。審査段階で求められたコメントに、おおきな広がりを持つ領域を統合して共通の基盤を構築することの難しさを指摘したことを思い出します。しかし、まさに按ずるより産むがやすしということを実感させられた研究会でした。次回の成果発表会は国際シンポジウムということですので、楽しみにしています。

私ごとになりますが、1月にアメリカを訪問する機会がありました。私は、大学院に入るころからヘリウム液面電子の研究に関わっています。30年ほど前のことです。ちょうど、ベル研究所の Grimes が、IBM での半導体2次元電子系の目覚ましい研究に、対抗するかのようにこの系の研究を進めていた時期でしたが、そのころのアメリカを訪れることができなかつたのは残念でした。超流動ヘリウム3が発見された直後でもあり、アメリカのヘリウム研究が世界を凌駕していた時期と言えます。ところが現在、アメリカにはヘリウム液面電子の研究は殆ど残っていません。超流動ヘリウム3研究のおかれた状況も、液面電子ほどではないかも知れませんが、似ています。

プリンストン大学も今回の訪問先の一つでしたが、そこにはベル研究所の残照が色濃く残っているような気がします。超流動ヘリウム3表面上のウィグナー結晶の話をした時には、アンダーソン教授とブリンクマン教授も出席してくださいました。実は、講演直前に、とんでもなく時代遅れの話をしようとしているのではないかという不安が胸を過りました。しかし、ヘリウムの物理が日本で生き活きと生き続けていることに、アンダーソン教授をはじめとして、多くのアメリカ人が同慶と憧憬を強く感じていたように思います。日本のヘリウム研究の活発さに比べて、アメリカの状況をなげく人が多かったのも印象的でした。特定領域「スーパークリーン」は、日本におけるヘリウム研究の活況を世界に強く印象付けることに一役かっていることは間違いないことです。福山領域代表をはじめとして、領域運営に携わる方々の今後ますますの尽力によってその存在感をさらに高めることを望みたいと思います。国家の品格を問うのならば、スーパークリーン特定領域のような真の基礎研究が文化として栄えることこそが大切なのではないかと思います。

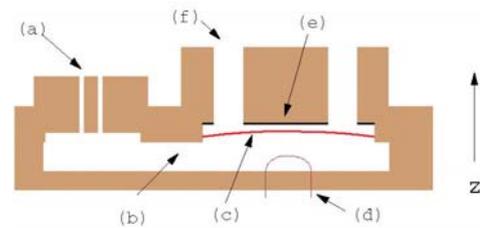
超流動ヘリウム3 A<sub>1</sub>相の磁気スピン緩和と少数スピン対

石本英彦  
東京大学物性研究所

液体ヘリウム3は、スーパークリーンで強い相関を持つ中性フェルミ流体である。常流動相は約0.1 K以下で強くフェルミ縮退し、圧力によりフェルミ温度やヘリウム3準粒子間の相互作用を容易に制御することができる特異な系である。さらに数 mK 以下で存在する超流動ヘリウム3はスピン角運動量(S)及び軌道角運動量(L)が1のP波超流動体で、内部自由度の存在によりA相、B相のほかに磁場中でのみ存在するA<sub>1</sub>相がある。このA<sub>1</sub>相の超流動成分はヘリウム3核磁気モーメントが磁場に平行なクーパー対のみであるため、超流動の質量流はスピン流と同一となる。この様なA<sub>1</sub>相をスーパーリークに通すと常流動成分が除去され、完全偏極した強磁性超流動体が得られる筈である(スピンフィルター法)。これを実現するには、強磁場中でのA<sub>1</sub>相自身のスピン緩和の情報が必要である。しかしA<sub>1</sub>相の

温度幅  $\Delta T$  ( $= T_{c1} - T_{c2}$  :  $T_{c1}$ は常流動相からA<sub>1</sub>相、 $T_{c2}$ はA<sub>1</sub>相からA<sub>2</sub>相への転移温度)は非常に狭く(34 barで60  $\mu$ K/Tesla)、この相の生成には超低温と強磁場を必要とし実験結果は非常に限られている。低磁場におけるKojima らのスピン緩和の結果[1]もA<sub>1</sub>相に接する境界相(A<sub>2</sub>相や常流動相)の存在に大きく影響されていると考えられている。そこで、物性研核冷凍機の広い強磁場空間を生かして試料セル中に境界面のないA<sub>1</sub>相のみの試料を生成し、磁気噴水効果の測定が行われた。図1に示す様な二つの

空間(b), (f)を隔てるスーパーリーク(a)にわたり0.1秒で磁場勾配を生成すると、磁気噴水効果により超流動成分のみがスーパーリークを流れ二つの空間に圧力差( $\delta P$ )が生ずる。この $\delta P$ はスピン密度の差( $\delta S$ )と磁場の差( $\delta H$ )を用いて次式で表される。 $\delta P = (\rho \hbar / 2m)(\delta H - \gamma \delta S / \chi)$  ( $m$ はヘリウム3の質量、 $\gamma$ ,  $\rho$ ,  $\chi$ は磁気回転比、密度、帯磁率、 $\hbar$ はPlanck定数)。従って $\delta P$ を高感度の容量型差圧計(c)(e)で測ると、減衰からスピン緩和時間( $\tau$ )が求められる。図2は、21 bar, 8 Tにおける磁場勾配印加直後の可動



(a) スーパーリーク (b) 検出室  
(c) 可動電極 (d) 振動ワイヤー  
(e) 固定電極 (f) 外部ヘリウム室

図 1

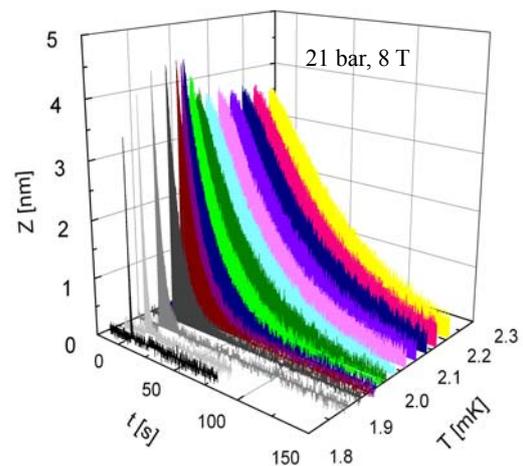


図 2

電極(c)の変位の時間変化である。こうして強い磁場(<8 T)、広い圧力範囲(<29 bar)にわたりスピン緩和が初めて測定された。図3には21 barにおける結果が  $r=(T_{c1}-T)/(T_{c1}-T_{c2})$  を横軸として与えられている。スピン緩和時間は予想以上に長く、強い温度・磁場依存性を持ち、中間温度領域でキックのような急激な変化を示す。この緩和時間は、可動電極(c)をDC電圧で駆動させたときに観測されたスピンポンピング効果から得られるものと一致することも確かめられた。さらに特徴的なことは、 $A_2$ 相に近付くと緩和時間が急速に短くなることである。この緩和時間の振舞は、容器の表面を非磁性の固体ヘリウム4で被覆してもほとんど変化はなく、表面緩和によらない $A_1$ 相固有の緩和によるものと考えられる。この見かけの緩和時間を用いて可動電極のバネ定数やスーパーレークの常流体抵抗を考慮すると、 $A_1$

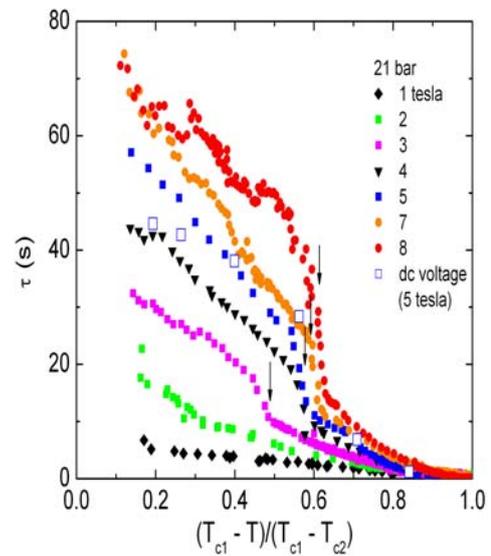


図 3

相での真のスピン緩和時間 ( $T_1$ ) が求められる。図4には、理論との比較のために2 Tでの緩和率 ( $T_1^{-1}$ ) が、 $(T-T_{c2})/T_{c2}$  の関数として示されている。このような  $T_{c2}$  に向かってくる緩和率の増加は、 $A_1$  相の超流動成分が磁場に平行なクーパー対のみから形成されているという従来の定説では説明できない。しかし、ヘリウム3核スピン間の双極子・双極子相互作用により、磁場に反平行なクーパー対 (minority spin pair) が  $10^{-4}/H$  ( $H$ :Tesla) 程度存在することが理論的に予想され、それに対応した縦共鳴周波数も2 Tの場合に求められている[2]。この場合、A相のスピン緩和機構として提案されているLeggett-Takagiの機構が働くことが予想される[3]。その緩和率の計算結果が図4に実線で示されているが、minority spin pairの大きさの不確かさを考慮すると、定性的な一致はかなり良いものといえる。また緩和率の磁場や圧力依存性についても、計算値は測定

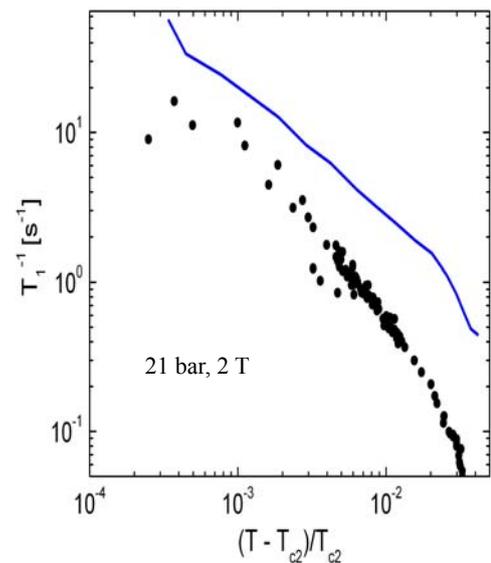


図 4

結果の傾向を良く再現する。以上の結果は、 $A_1$ 相において minority spin pair が存在することを強く示しており、従来信じられていた $A_1$ を相におけるクーパー対の認識の変更するものである。なお本研究は、山口明、小林聡、小島東生 (Rutgers 大学) との共同研究である[4]。

- [1] L.Jiang and H.Kojima, Phys.Rev.Lett. **62**, 1639 (1989).  
 [2] H.Monien and L.Tewordt, J. Low Temp. Phys. **60**, 323 (1985).  
 [3] A.J.Leggett and S.Takagi, Ann. Phys. **106**, 79 (1977).  
 [4] A.Yamaguchi, S.Kobayashi, H.Ishimoto and H.Kojima, Nature **444**, 909 (2006).

層状ペロブスカイト超伝導体  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  における超伝導対のスピンの状態の研究村川 寛<sup>A</sup>, 石田憲二<sup>AB</sup>, 前野悦輝<sup>A</sup><sup>A</sup>京都大学大学院理学研究科物理学第一教室 <sup>B</sup>京都大学国際融合創造センター

層状ペロブスカイト  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  (図 1 参照) の超伝導は '94 年に前野 *et al.* によって報告され、既に 12 年が経ようとしている。これまでにこの超伝導体について膨大な研究がなされ、常伝導、超伝導状態の性質についてある程度理解された [1]。その結果、様々な実験結果が  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  においてスピン三重項超伝導の実現を示唆している。 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の超伝導対の対称性を同定する研究は超伝導発見直後からなされた。超伝導転移温度 ( $T_c$ ) 直下に核スピン-格子緩和率  $1/T_1$  にピークが見られないことや、 $T_c$  が試料の質に非常に敏感なことから、非  $s$  波の異方的超伝導体であることは早くから示された。超伝導対のスピンの状態を知るにはスピン帯磁率の測定が必要となるが、超伝導反磁性の効果のため通常の磁化測定では超伝導状態のスピン帯磁率は測れない。これに対し原子核スピンをプローブとする核磁気共鳴 (NMR) によるナイトシフト測定では、電子スピンの位置に作る磁場が測定でき、ナイトシフトの温度依存性から超伝導状態でのスピン帯磁率の変化を知ることが出来る。実際、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  において超伝導が起こっていると考えられる  $\text{RuO}_2$  面の O と Ru サイトのナイトシフトが磁場を面内に印加した下で測定され、3–10kOe の磁場範囲でスピン帯磁率が超伝導状態で変化しないことが報告された。この結果は超伝導対のスピンの状態が  $S=1$  のスピン三重項状態を示唆する結果である。またミュオンスピン回転 ( $\mu\text{SR}$ ) の実験から超伝導状態で微弱な自発磁化が観測され、時間反転対称性の破れた超伝導体であることが示された。この微弱な自発磁化は、超伝導対の軌道成分からの寄与と考えられる。これら二つの実験結果から、超伝導対は  $^3\text{He}$  超流動状態を特徴付ける  $\mathbf{d}$  ベクトルを用いて  $\mathbf{d} = \mathbf{z}(k_x + ik_y)$  と表せ、フェルミ面の形状を考え合わせれば  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の超伝導状態は  $^3\text{He}$  超流動の 2 次元 A 相の状態と類似した状態と考えることが出来る。(図 2 参照)

スピン三重項超伝導体では、スピン一重項超伝導体とは異なり超伝導状態でもスピンの自由度が残り、超伝導対のスピンはゼロ磁場で結晶中のある特定の方向に向いていると考えられる。 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の超伝導対では、電荷を持っていることや結晶格子の中に実現するという点で超流動  $^3\text{He}$  と異なる。超流動  $^3\text{He}$  ではクーパー対のスピン間に働く磁気双極子相互作用がスピンの異方性を生む主要な要因と考えられるのに対し、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  では  $\text{Ru}-4d$  軌道でのスピン-軌道相互作用が重要であると考えられている。我々は、電子系のクーパー対のゼロ磁場におけるスピンの方向や、その異方性エネルギーの大きさ

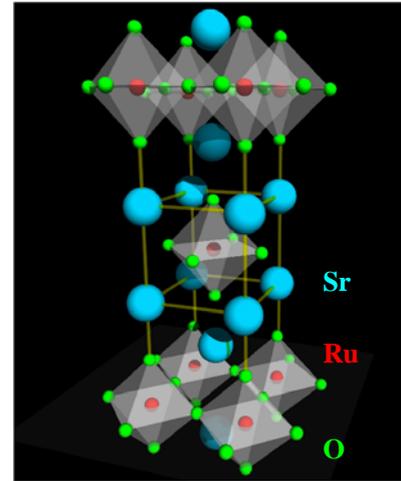


図 1:  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の結晶構造 高温超伝導の母物質  $\text{La}_2\text{CuO}_4$  と同構造を取る

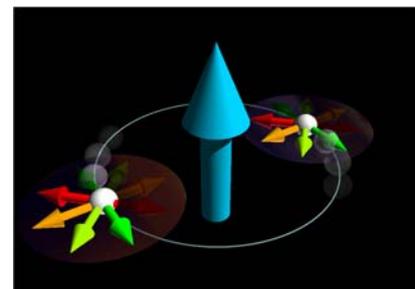


図 2:  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  で考えられている  $\mathbf{d} = \mathbf{z}(k_x + ik_y)$  の状態。青い大きな矢印は orbital moment、スピンはそれに垂直に配置している。

について調べることを目的として、低磁場で結晶の異なる方向( $\text{RuO}_2$ 面に平行と垂直)についてスピン磁化率をナイトシフトの測定から調べた[2,3]。

低磁場ナイトシフトの測定は、シフトの大きな Ru サイトで行う必要がある。しかし NMR 可能な Ru の同位体( $^{99}\text{Ru}$ 、 $^{101}\text{Ru}$ )は、天然存在比は少なく磁気回転比も小さいので、 $1\text{kOe}$ 以下で NMR 信号を観測するのは大変難しい。我々は  $^{101}\text{Ru}$  核の核四重極共鳴(NQR)信号が  $3.28\text{MHz}$  に観測できることを利用して、単結晶試料に精度よく磁場を印加することにより、数百 Oe の低磁場で信号の観測に成功し、ナイトシフトの測定を行った。

$\text{RuO}_2$ 面に平行に  $1.5\text{kOe}$  と  $550\text{Oe}$  の低磁場下でナイトシフトを測定し、超伝導状態で見られないことを確認した[2]。更に以前測定されていなかった、 $\text{RuO}_2$ 面に垂直方向のナイトシフトの測定も同様に行った。この方向は超伝導上部臨界磁場が  $750\text{Oe}$  と小さくかつ、 $\kappa \equiv \lambda/\xi \sim 2.6$  と小さいため超伝導領域のナイトシフトの測定に曖昧さが残るが、 $440\text{Oe}$ の磁場下の温度変化(図 3)と、 $80\text{mK}$ での磁場変化の測定からは、超伝導転移に伴って実験誤差を超えるナイトシフトの減少は観測できなかった[3]。

これらの実験結果の解釈として、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ のスピン三重項超伝導対は印加磁場に対し容易にスピンの方向を変え(図 4 参照)、超伝導スピンを結晶に固定する相互作用は印加磁場に比べ小さいと考えられる。 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ のスピン三重項超伝導対では、Ru-4d 軌道によるスピン-軌道相互作用のため結晶の特定の方向に強く固定されていると考えられていた。しかし最近の理論的考察では、適当なスピン-軌道相互作用の大きさをとっても異なるスピン状態をもつ超伝導状態とのエネルギーは  $T_c$ の約 1%程度であり、超伝導対の異方性は非常に小さいことが指摘されている[4]。これは、常伝導状態のスピン成分の異方性は約 2%程度でスピンの異方性が小さいこととも関係しているようにも思われる。今回の実験結果は、スピンの異方性エネルギーは測定磁場( $\sim 200\text{Oe}$ )よりも小さいと考えるならば矛盾なく理解できる。

残念ながら、ナイトシフトの測定は  $200\text{Oe}$ 以下の  $H_{c1}$ と同程度になる弱磁場では NMR 信号が急激に弱くなるために行えない。弱磁場での測定は Josephson Junction の実験等に期待がかかる。

今後、スピン-軌道相互作用の大きな系である重い電子超伝導体のスピン三重項超伝導体と比較してみれば、スピン三重項対の異方性等の知見が深まると考えられる。

本研究は、理論面では京大理の池田浩章氏に議論頂いた。また高磁場のナイトシフトの測定は、阪大基礎工の椋田秀和氏、北岡良雄氏との共同実験である。

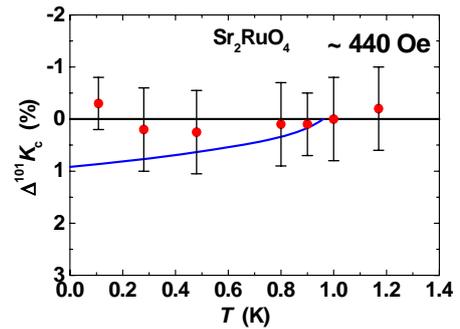


図 3: c 軸に  $440\text{Oe}$  印加した( $H//c$ )時に測定したナイトシフトの温度依存性。青の曲線は面内にスピン成分を持つ時( $d//z$ )の温度依存性。ナイトシフトの減少は観測されなかった

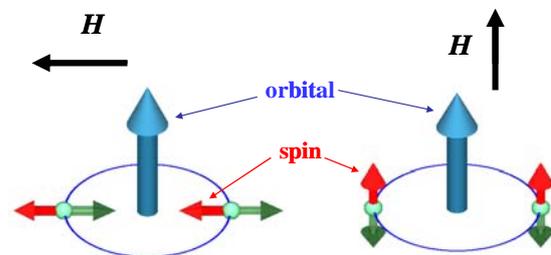


図 4: ナイトシフトの測定から提案される、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ での磁場中のスピンの状態

[1] A. P. Mackenzie and Y. Maeno: Rev. Mod. Phys. **75**, 657 (2003).

[2] H. Murakawa *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **76**, No.2 (2007).

[3] H. Murakawa *et al.*: Phys. Rev. Lett. **93**, 167004 (2004).

[4] Y. Yanase and M. Ogata.: J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 673 (2003).

## 三角格子系のスピネマティック状態

常次 宏一  
 東京大学物性研究所

計画研究 A05 班「量子結晶とリング交換」（代表：桃井勉）では、磁性体中のリング交換相互作用および格子の幾何学的フラストレーションが引き起こす新奇な磁性状態の探査を行っている。vol.1 の桃井の記事に引き続き、スピネマティック相という興味深い新しい秩序相に関する我々の最近の理論研究の成果を紹介する。

—昨年秋、本特定領域計画研究 A01 班の中辻知のグループによって、ニッケル化合物  $\text{NiGa}_2\text{S}_4$  が圧縮性スピン液体を示唆する物性を示すことが報告された[1]。この物質は積層三角格子構造をもつ  $\text{S}=1$  の局在スピン系であり、面間の結合が極めて弱く 2 次元性の高いことに特徴がある。この系の示す物性の中でも大事なポイントは(1) 比熱は温度  $0.35\text{K}$  まで異常がなく低温で温度の自乗に比例する、(2) 帯磁率が  $10\text{K}$  以下ではほぼ一定の有限値をとりスピギャップの兆候がない、(3) 中性子散乱実験で  $1.5\text{K}$  まで磁気秩序が観測されずスピン相関長も  $25\text{\AA}$  と短い値に飽和している、という 3 点である。中性子実験が長距離磁気秩序が存在しないことを示す一方で、比熱と帯磁率の振る舞いからギャップレスの磁氣的な励起が存在することが分かる。これらの実験結果は圧縮性スピン液体相において期待される性質であるが、最近常次と有川晃弘（京大基研）は現象論的アプローチによる理論研究を行い、スピネマティック状態が実現している可能性を指摘した[2]。

今回、 $\text{NiGa}_2\text{S}_4$  を記述するために、三角格子上で最近接反強磁性交換相互作用  $\mathcal{J}(\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j)$  を持つ  $\text{S}=1$  ハイゼンベルグ模型に双 2 次結合  $K(\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j)^2$  を付加したものを現象論的モデルとして採用した。平均場近似によると  $0 < \mathcal{J} < K$  の場合には  $120$  度構造反強磁性秩序が不安定になり、新秩序相が出現する。スピンの揺らぎの異方性を示すスピン四重極子  $\mathbf{Q}_{\mu\nu} = \langle \mathbf{S}_\mu \mathbf{S}_\nu \rangle$  の異方性  $Q_{\mu\nu} - \delta_{\mu\nu} \text{S}(\text{S}+1)/3$  がこの相の秩序変数であり、通常の磁気秩序を表す磁気双極子  $\langle \mathbf{S}_i \rangle$  は揺らいでどこでも零となっている。特に  $\text{S}=1$  の場合には各 Ni スピンの四重極はある軸（ディレクター）方向の主値が零でかつ一軸性対称性があるので、円盤として記述される。新秩序相においては、三角格子の 3 つの副格子の各々でディレクターが整列し、しかも 3 つのディレクターは直交する。液晶高分子の配向とのアナロジーから、磁気秩序がなくディレクターが整列した秩序はスピネマティック状態と呼ばれる。三角格子系の特徴の一つは、ディレクターの 3 副格子の反強秩序が安定なことであり、磁気秩序の場合と逆に、基底状態が縮退している正方格子の場合より安定とも言えるのが興味深い。

スピネマティック状態においては、磁気双極子は揺らいで零になっているが、その 2 次の揺らぎが

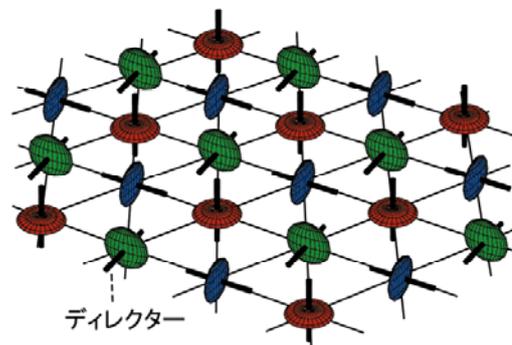


図 1: 三角格子上の 3 副格子スピネマティック状態。3 つのディレクターが互いに直交している反強秩序。

スピン空間で異方的になっていることが特徴である。このスピン空間の回転対称性は破れに伴って、音響型エネルギー分散関係をもつボーズ励起がゴールドストーンモードとして現れる。他に有限ギャップのボーズ励起も1つあり、我々は、実験結果と比較するため、これらのボーズ励起による低温物理量への寄与を計算した。まず、低温比熱は速度  $v$  を持つギャップレスのボーズ励起の寄与が支配的であり、 $(Tv)^2$  に比例する。

重要なポイントは、基底状態は磁気秩序をもたないが、2種のボーズ励起は磁気双極子の揺らぎの成分も持ち磁性へ寄与ですることである。動的スピン構造因子には1粒子励起のデルタ関数ピークと2粒子励起の連続部分が現れ、磁気秩序相と似た振る舞いを示すが、当然、零エネルギーの磁気ブラッグピークは現れない。また励起エネルギーが零に向かうと同時にコヒーレントなデルタ関数部分の強度も零に向かう点も磁気秩序相との相違点である。絶対零度の一様帯磁率もこのボーズ励起の寄与により有限であり、その値から交換相互作用  $J$  の値が良い近似で見積もることができる。また、静的スピン相関関数は距離の3乗に反比例すると同時に3副格子構造に対応した空間振動を示す。そのフーリエ変換は対応する有限の波数ベクトルの点で発散することなく、キック的特異性を示すだけである。

このように、新しい秩序相であるスピนนematic状態が実現していると考え、 $\text{NiGa}_2\text{S}_4$  の比熱、帯磁率、中性子散乱の実験結果を統一的に説明することが可能であることがわかった。また、核磁気緩和率の温度依存性を計算し、やはりギャップレス励起の寄与としてスピนนematic状態においては  $1/T^3$  に比例することがわかった。通常の反強磁性秩序の2次元温度領域においては  $1/T$  であり、べきが異なるため核磁気緩和率は磁気秩序状態とスピนนematic状態を区別する測定手段となりうる。他の興味深い特性としては、有限磁場下の誘起された磁化の空間分布である。ネマティック状態が有限波数ベクトル  $Q$  の反強秩序となっている場合には、誘起された磁化は一様成分の他に、同じ有限波数ベクトル  $Q$  で空間変調された成分を持つ。この成分を中性子散乱実験で直接観測することも興味深い実験である。

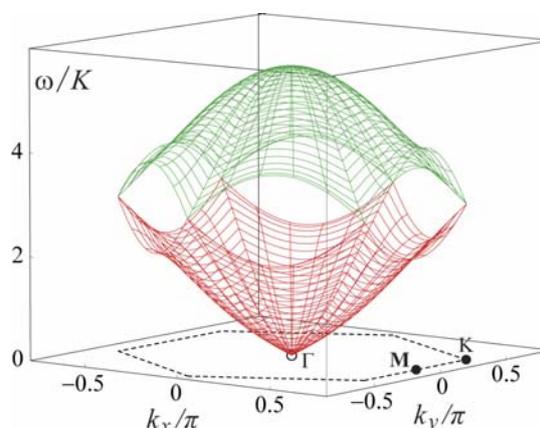


図2：スピนนematic状態のボーズ素励起のエネルギー分散関係。2つのモードの内、1つがギャップレス。 $J/K=0.5$

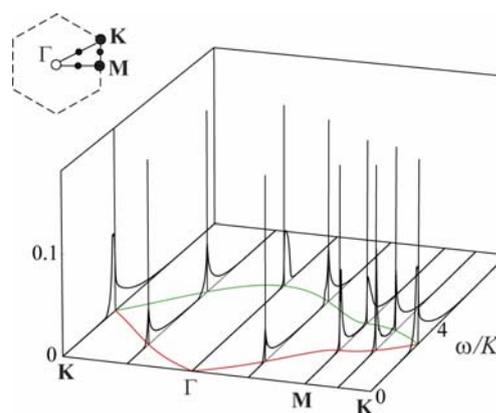


図3：スピนนematic状態の動的スピン構造因子  $S(\mathbf{q}, \omega)$ 。 $J/K=0.5$ 。

・[1] S. Nakatsuji et al., Science **309**, 1697 (2005)

・[2] H. Tsunetsugu and M. Arikawa, J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 083701 (2006)

## イッテルビウム原子気体の多様な量子縮退

福原武、山口敦史、北川昌明、榎本勝成、植竹智、高橋義朗  
 京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻

レーザー冷却された超低温の希薄原子量子気体の研究は、12年前にアルカリ金属原子のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) が実現されて以来非常に盛んに行われている。最近ではアルカリ金属のフェルミ原子系の研究へ展開し、さらに急進展を遂げている。この進展著しい超低温希薄原子気体の研究分野において、我々は、これまで主に研究の対象とされてきたアルカリ原子系と大きく異なる、ユニークな特徴のある原子系にしか実現できない現象こそ今後の重要な研究課題となるとの認識のもと、数年前から2電子系である希土類金属のイッテルビウム原子 (Yb) を対象として選び、その研究を展開してきた。本稿では、我々の研究の最近の進展状況と本特定領域 A03 班公募研究「光格子中イッテルビウム原子量子気体を用いた量子シミュレーション」における研究計画について紹介したい。

まず、Yb 原子系の特筆すべき特徴として、1) 豊富な同位体の存在 (5 種類のボソンと 2 種類のフェルミオン) が挙げられる (右下表参照)。これにより、多様な相互作用をする BEC やフェルミ縮退、およびその混合系の実現が可能になる。アルカリ金属原子系ではこれまでに、同位体も含めて 6 種類の BEC と 2 種類のフェルミ縮退が実現されて、またいくつかの組み合わせの量子縮退の混合系が報告され、多様な研究が展開されてきた。Yb 原子の場合は、5 種類の BEC と 2 種類のフェルミ縮退、そして 10 種類の BEC-BEC 混合と 10 種類の BEC-フェルミ縮退混合、さらにフェルミ縮退-フェルミ縮退混合と、実にさまざまな系が考えられる。ただし、原子間相互作用が系によって違ってこそ、本当の意味での多様性であるといえる。最近、我々は、2 光子光会合分光法およびそれに基づく理論的考察により、全ての組み合わせの原子間相互作用を極めて良い精度で決定することに成功した。超低温原子間の相互作用は、s-波散乱長で特徴付けられ、引力の場合は負の値をとり、斥力の場合は正の値をとる。右図に全ての同位体の組み合わせについて、決定した散乱長を示したが、これから、確かに多様な相互作用をすることが見てとれる。特に、 $^{171}\text{Yb}$ - $^{173}\text{Yb}$  の異種フェルミ原子の混合の場合、散乱長はスピン成分に関係なく -29 nm で、強い引力相互作用をすることが予想されているが、新たなペアリングの超流動の可能性として興味深い系であると考えている。

このように我々は散乱長を決定することができたのであるが、アルカリ原子の場合は、フェッシュバッハ共鳴法という極めて有力な方法が知られており、外部印加磁場を変化させることにより散乱長を連続的に大きく変化させることが可能である。これにより、BEC の引力崩壊現象 (Bosenova) や、最近のフェルミ原子対の BCS-BEC クロスオーバーの研究が可能になった。一方、Yb 原子は、2 電子系であり、基底状態には電子スピンが存在しない。そのために、アルカリ原子のようなフェッシュバッハ共鳴法は適用できない。そこで、最近我々は、磁場ではなく、レーザー光により散乱長を変化させる、いわゆる光フェッシュバッハ共鳴法の開発に取り組んだ。特に、基底状態と 3 重項状態との間の異重項間遷移を用いることにより、非常に大きな効果が期待できることが理論的に指摘されている。極最近の我々の実験においても、大きな散乱長の変化を示唆する有望な結果が得られている。

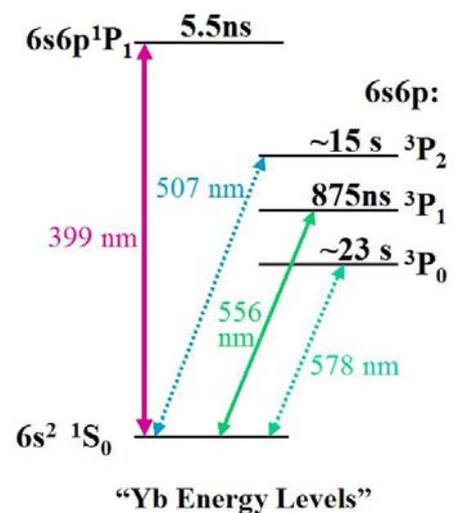
$^{168}\text{Yb}$ (0.13%)	$^{170}\text{Yb}$ (3.05%)	$^{171}\text{Yb}$ (14.3%)	$^{172}\text{Yb}$ (21.9%)	$^{173}\text{Yb}$ (16.2%)	$^{174}\text{Yb}$ (31.8%)	$^{176}\text{Yb}$ (12.7%)
Boson I=0	Boson I=0	Fermion I=1/2	Boson I=0	Fermion I=5/2	Boson I=0	Boson I=0

Mass number	168	170	171	172	173	174	176
168	13						
170	6.2	3.4					
171	4.7	1.9	-0.1				
172	3.4	-0.1	-4.3	-30			
173	2.0	-4.2	-29	22	11		
174	0.2	-26	23	11	7.3	5.5	
176	-18	11	7.5	5.6	4.2	2.9	-1.2

(nm)

この Yb 原子について、これまでに我々は、全光学的方法により  $^{174}\text{Yb}$  原子 BEC を実現し[1]、さらに、極最近では、 $^{170}\text{Yb}$  原子について同様の方法により BEC を実現した。 $^{176}\text{Yb}$  原子についても  $^{174}\text{Yb}$  原子との BEC 混合を生成することに成功した。引力相互作用をする BEC は、トラップの閉じ込めの強さと散乱長の大きさできまる臨界原子数以下でしか安定に存在し得ないが、これは我々が観測した  $^{176}\text{Yb}$  原子 BEC の振舞いと一致している。さらに、この系は、引力 BEC( $^{176}\text{Yb}$ ) と斥力 BEC( $^{174}\text{Yb}$ ) の混合という特異な例となっており、大変興味深い。またフェルミ原子についても実験を行い、最近  $^{173}\text{Yb}$  原子のフェルミ縮退の実現に成功した[2]。特に、6 成分のスピン成分が同時にフェルミ縮退していることを示唆しており、これはこれまでにない特徴で、多成分のクラスター状態での新量子凝縮状態など新しい可能性が注目されている。また、 $^{173}\text{Yb}$  原子や  $^{171}\text{Yb}$  原子と  $^{174}\text{Yb}$  原子との混合系についても、超低温までの冷却に成功している。

また、Yb 原子の系のもう一つの大きな特徴として、2)狭線幅光学遷移による超高分解能分光の可能性が挙げられる。右下のエネルギー準位図に示した  $1\text{S}_0 \rightarrow 3\text{P}_0$  遷移 (578 nm) および  $1\text{S}_0 \rightarrow 3\text{P}_2$  遷移 (507 nm) は、ともに 10mHz 台の非常に狭い線幅の光学遷移である。たとえば、1kHz の線幅の光源を準備することができたならば、50nK に相当する微弱な相互作用を検出することが可能となり、この程度である平均場エネルギーや超流動ギャップの観測に有効であると期待できる。これまでに、 $1\text{S}_0 \rightarrow 3\text{P}_0$  遷移および  $1\text{S}_0 \rightarrow 3\text{P}_2$  遷移ともに 1kHz 以下の線幅の光源を開発することに成功し、特に  $1\text{S}_0 \rightarrow 3\text{P}_0$  遷移については、フェルミ温度  $T_F$  の 0.5 倍程度の温度の  $^{173}\text{Yb}$  原子の分光に成功しており、理論的に期待される狭線幅のスペクトルを観測している。さらに  $3\text{P}_2$  状態においては、電子状態が軌道角運動量 1 の p 状態であるため、原子間には異方的な長距離相互作用が働くことになる。このような p 状態での BEC は未だ例がなく、大変特異な振舞いをすることが予想される。基底状態  $1\text{S}_0$  において生成した BEC を、我々の開発した 507 nm の安定な光源によりコヒーレントに励起することにより、この特異な BEC を生成することを計画している。



こうした研究経緯を経て、我々のグループは、本特定領域 A03 班において公募研究を行っている。この公募研究の目的は、「スーパークリーン」な系と思われる、Yb 原子のフェルミ縮退や BEC を、3 次元光格子に導入した系を用いて、強相関電子系の「量子シミュレーション」を行い、そこで発現される量子相の物理を様々な原子物理学的手法で研究することである。銅酸化物の高温超伝導のモデルとされる 2 次元ハバードモデルや、三角格子の系、さらには、これまでの固体の凝縮系では実現されていないボソン-フェルミオン系などの多成分量子縮退系を対象として考え、凝縮系の未解決問題や重要問題を、実験的に明らかにしたいと考えている。この系では、光格子ポテンシャルや散乱長を変えることにより、格子間の原子のホッピングレートやオンサイト相互作用を連続的に変化させることができる。特に、2 次元ハバードモデルについては、フェルミオンを光格子中で  $T/T_F=0.1$  程度まで冷却することにより反強磁性相が出現することが予想され、さらに、 $T/T_F=0.01$  程度まで冷却することにより d 波超伝導が発現することが予想されているが、Yb 原子に特有の狭線幅な光学遷移を用いて、サイドバンド冷却と呼ばれる冷却法を行うことによりこのような超低温を達成することができると考えている。さらに、 $3\text{P}_2$  状態の  $3\mu_B$  という大きい磁気モーメントと  $1\text{S}_0 \rightarrow 3\text{P}_2$  遷移の狭線幅という特徴を利用することにより、適当な磁場勾配下で、磁気共鳴イメージングと同様の原理で、2 次元平面内での各格子点へのアドレッシングが可能になり、たとえば、長岡問題などの遍歴磁性の問題にも取り組めるのではないかと考えている。

[1]Y. Takasu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 040404(2003)

[2]T. Fukuhara *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 030401(2007)

## 「クリーン」な $\text{NiS}_2$ パイライトにおける異常な量子臨界挙動と乱れ効果

高木 英典

東京大学大学院新領域創成科学研究科

話は 10 年ほど前、小生が物性研にお世話になっていた頃に遡る。高温超伝導体の研究が進み、モット転移近傍の異常金属相という認識が共有されるようになった頃のことである。「異常」というからには「普通」とは何か？といった疑問から、銅酸化物以外の遷移金属酸化物・硫化物にも目が向き始めていた。我々も、典型的なバンド幅制御型のモット転移の系である  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  を調べていた。[1]  $\text{NiS}_2$  は  $\text{Ni}3d$  軌道の強い電子相関効果により反強磁性絶縁体である。Se 置換とともにバンド幅が増加し、反強磁性絶縁体から反強磁性金属へ、さらには常磁性金属へと転移する。モット転移、反強磁性-常磁性金属転移の二つの臨界点での臨界挙動が興味の対象であった。

反強磁性臨界点では、輸送現象、特に電気抵抗の温度依存性にまさに教科書的とも言うべき臨界挙動が Se 濃度の関数としてきれいに見えた。常磁性金属相では系がフェルミ液体であることを反映して、低温で温度の二乗  $T^2$  に比例する電気抵抗が観測されるが、反強磁性臨界点に近づくと低エネルギーのスピン揺らぎの存在によってコヒーレントな準粒子の構築が著しく妨げられ、 $T^2$  の電気抵抗が出現する温度は低下する。三次元系の反強磁性の臨界点では、 $T^2$  の電気抵抗は出現せず、SCR(守谷)理論の予測するとおりの非フェルミ液体的な  $T^{1.5}$  に比例する温度依存性が最低温度まで続く。臨界点を越えて反強磁性金属になると再び  $T^2$  の電気抵抗が復活する。

教科書どおりの答が出て満足していたことを反省すべきかもしれない。すぐに、いくつかの点が気になりだした。「何故、お前の系はそんなにきれいに理論通りになるのだ?」、特に重い電子系で臨界挙動を調べる研究者からしばしば問いかけられた。重い電子系の磁氣的臨界点では SCR 理論には従わない奇妙な温度依存性のべきがあちこちで観測され始めていた。重い電子系の反強磁性臨界点で異方的超伝導が次々と発見されだした頃でもある。d 電子の磁氣的量子臨界点での初の超伝導の可能性も頭をよぎりだした。重い電子系のサンプルと比べると、遷移金属硫化物のサンプルは固溶系で残留抵抗が  $50\mu\Omega\text{cm}$  近くある。乱れの影響が大きく異方的超伝導は姿を消し、さらには反強磁性臨界挙動が大きくその姿を変えているのではないかと。面白い問題であるが、調べるには、クリーンな系で量子臨界点を実現しなければならない。

バンド幅を拓けるという意味で圧力印加は Se 置換とほぼ等価である。「純粹」 $\text{NiS}_2$  のバンド幅を圧力で物理的に制御すれば、乱れの寄与を相当に抑えることができる。ところが、当時、最高の圧力技術を誇っていた物性研の毛利研でも、1K 以下の低温まできちんと電気抵抗測定ができるのはせいぜい 6GPa に限られていた。純粹  $\text{NiS}_2$  の反強磁性臨界点に到達するには圧力が足りなかった。ところが、最近、竹下直氏が産総研でブリッジマン型の高圧力セルの改良を進め、希釈冷凍機温度までの測定が 10GPa くらいまで可能となった。夢よ再びと、本特定領域に入れていただいたのを機会に、乱れない臨界点の実現を狙うことにした。

幸いなことに 7.5GPa 程度の圧力印加で直接量子臨界点に到達することができた。一番抵抗の

低い試料では、量子臨界点での残留抵抗 $\sim 0.2\mu\Omega\text{cm}$ に達する。「スーパー」と呼ぶのはまだ気が引けるが、相当にクリーンな臨界点を創成できたことは間違いない。まずは超伝導であるが、残念ながら $180\text{mK}$ までの測定では観測されなかった。もはや超伝導の欠如を乱れのせいであるとするには難しく、クリーンな磁氣的量子臨界点の創成は超伝導発現にとって十分条件ではないことを示唆している。誰もが認めるd電子系の量子臨界点超伝導はいまだに見出されていない。

超伝導が発現せずにはがっかりした後、気を取り直して抵抗の量子臨界挙動を整理していて驚いた。図には電気抵抗温度依存部分の対数プロットの傾きから決めたべきを、温度-圧力二次元面上でカラープロットとして視覚的に示したものである。反強磁性転移の以下の温度ではFermi液体挙動( $T^2$ )が観測されるが、常磁性領域ではフェルミ液体挙動は抑えられたまま一向に回復する気配を示さない。電気抵抗でプローブする限り、 $T^{1.5}$ に近い非フェルミ液体挙動が極めて安定に存在し(青)、相図上の広い領域を支配している。 $1\text{K}$ 以下の低温で $T^2$ の抵抗が復活しているようにも見えるが、極端に抑えられたコヒーレンスは回復する気配すらない。比較のためにSeを0.3置換し、乱れを導入してから、圧力印加した場合の(昔の文献[1])のデータを同じようにプロットしてみた。乱れの入ったSe  $x=0.7$ の試料では、臨界点が $2\text{GPa}$ に存在することがはっきりと読み取れる。フェルミ液体挙動( $T^2$ )を示す領域(黄緑)がきれいにV字型になって現われ、谷に当たる $2\text{GPa}$ では最低温度まで $T^{1.5}$ の温度依存性となる。また、磁気転移が圧力に対して臨界点付近で急速に抑制される様子が読み取れる。

これらのデータは、磁氣的量子臨界点の臨界挙動が乱れに敏感できわめて敏感であることを疑いなく示すとともに、なぜ非常にクリーンな系では非フェルミ液体挙動が極めて安定に存在し、臨界点がぼやけてしまうのかという物理的に面白い問題を投げかけている。Fermi面上での散乱異方性や電子相分離の可能性などいろいろな議論がありうるが、紙面が尽きてしまったので、今回は問題提起させていただいて、稿を閉じることにしたい。本研究は竹下直、高島信也、西久保英郎、寺倉千恵子、野原実、宮坂茂樹、十倉好紀各氏との共同研究である。

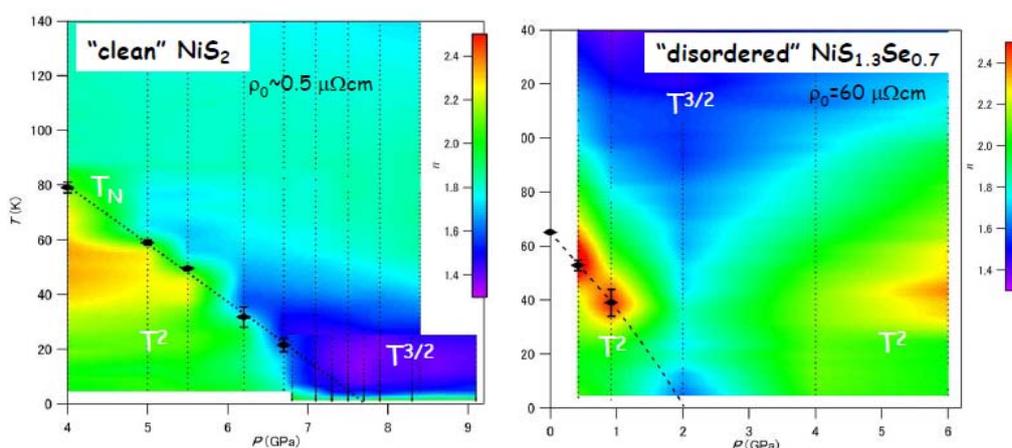


図 NiS<sub>2</sub> と NiS<sub>1.7</sub>Se<sub>0.3</sub> の電気抵抗の温度べき圧力相図

[1] S.Miyasaka, H.Takagi, H.Takahashi, Y.Sekine, N.Mori & R.J.Cava, J. Phys. Soc. Jpn.69, 3166 (2000).

## 平成 18 年度淡路島領域研究成果報告会報告

今田 正俊  
東京大学工学系研究科

平成 18 年度領域研究成果報告会が 2006 年 12 月 14 日より 16 日まで、穏やかで例年になく暖かな初冬の瀬戸内海と島々を見霽かす淡路島国際会議場で行なわれた。領域外を含めて 200 名近い参加者により活発な研究討論が行なわれた。プログラム担当より、簡単な報告を以下に述べる。

本領域はさまざまな凝縮系物理分野の最前線の研究者を糾合し、分野を横断する研究討論の中からその中に共通する新量子相の物理と概念を明らかにする目的で、昨年度に発足した。研究グループはヘリウム、分子性結晶、遷移金属酸化物、中性原子気体と多岐に亘り、共通する普遍概念を抽出する研究が進められつつある。計画研究グループについてはすでに本格的な研究が展開されている。一方公募研究は今年度に発足し、この報告会が研究計画と始動体制を領域全体にアピールする初めての機会であった。

成果発表は領域内から 20 分の口頭講演 44 件と Manfred Sigrist 氏による招待講演 1 件、および領域内外からのポスター発表 115 件であった。また初めての試みとして、各ポスター講演に 1 分ずつのプレビューの時間を設けたが、これはポスター講演の全貌を理解するうえで有益であると好評であった。口頭講演、ポスター講演ともに本領域の高い研究のアクティビティと質の高さを示すものであり、個々の現象を超えた普遍概念の抽出もすでに始まっていることが随所で見受けられた。大きな関心を集め、その普遍性についての議論が沸騰していたテーマには異方的超伝導超流動、多孔質など幾何学的拘束条件下での超流動、量子液体、量子渦などのテーマに加えて、中性原子気体、ヘリウム、電子系に共通する相関効果、量子スピン液体の本質、量子臨界現象などがある。今後の研究の展開と飛躍的な進展を予感させる熱心な討論が続いた。議論は 2 日目夕刻の懇親会の間でも盃を片手に大いに盛り上がっていた。

また初日のナイトセッションではパネルディスカッションが企画された。各研究実施グループを牽引する 8 名から各研究グループの目指すところと目標、班間の研究交流についての考えが披露され、研究プロジェクト終了までに達成を目指す夢についてざくばらんな討論が行なわれた。さらに評価グループから河野公俊氏より忌憚のないコメントが寄せられた。異なる分野の研究者が集まって結成されている本領域では、それぞれの分野の直面する基本問題、解明すべき重要問題が何であるのか？それらを共通して流れる普遍的な概念はないのか？について共通の理解を持つことは大切であり、パネルディスカッションという公開の場での突っ込んだ討論によって認識の深まった点が多かったように見受けられる。またこの討論の場は、若手研究者や専門外の研究者に問題点の所在を浮き彫りにし、今後の研究の動機付けを深める上でも意義深かったと信ずる。

本研究会の運営は、会場を京都大学の前野悦輝氏が担当し、プログラム編成を今田が受け持った。ポスタープレビューの準備を京都大学の佐々木豊氏に、またウェブページ作成について白浜昌子氏にお世話になった。研究会を成功に導いてくださった多くの方に厚くお礼申し上げる。

## A03、A04 班 合同研究会報告

石田憲二

京都大学国際融合創造センター、大学院理学研究科物理学第一教室

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」A03 班(ボース超流体と量子渦)、A04 班(異方的超伝導、超流動)の合同研究会が、平成 18 年 5 月 25 日(木)から 27 日(土)の二泊三日で、(財)日本クリスチャンアカデミー関西セミナーハウス(<http://www.academy-kansai.com>)にて行われました。本研究会の主な目的は、1) 「低温極限での新量子相・新量子現象」というキーワードで括り、分野の異なる研究者間の有機的な議論と協力を深める。2) 公募研究の円滑な開始に当たり、公募研究の代表者と計画班のメンバーと議論および情報交換の場を設ける、ことを念頭におき、GW 以降のさわやかな時期に研究会を企画しました。

今回試験的に、研究会のプログラムも従来の枠組みに捉われない、上記の 1) の目的従い、各セッションは共通の物理問題と考えられる内容で構成してみました。具体的には  
セッション 1 : Intrinsic angular moments、セッション 2 : 量子渦、  
セッション 3 : BEC-BCS 関係、セッション 4 : スピン三重項超伝導、超流動多重相、  
セッション 5 : 超流動、量子渦 (公募)、セッション 6 : スピン三重項超伝導 (公募)、  
セッション 7 : 各班に分かれての Discussion という構成で、  
例えば量子渦のセッションは、液体ヘリウムの量子渦、超伝導の Vortex、ボース凝縮体の量子渦の内容を話し合いました。

また、特定領域研究の最初の小規模研究会ということもあり、他分野の大学院生にもわかりやすく現状と問題点を解説していただくため、講師は比較的シニアの研究者(各班の班長や分担者)の先生にお願いいたしました。

研究会のプログラムと講演アブストラクトは、

[http://www.superclean-materials.org/conference\\_H180525.htm](http://www.superclean-materials.org/conference_H180525.htm) 及び、参加者の写真は

[http://www.superclean-materials.org/conference\\_H180525\\_photo.htm](http://www.superclean-materials.org/conference_H180525_photo.htm)

に掲載していますので、御興味をお持ちの方は是非御覧になってください。

上述のように本研究会は、他分野の物理を世話人の判断で同じセッションにまとめたきらいもありますが、本特定領域の概要にある、「背後にある新たな物理概念を創出」にはこういった“型破り”の研究会があってもいいのかもしれない。参加者は 2 泊 3 日、同じセミナーハウスに“缶詰”状態であったため、目的の一つである、“研究者間の交流”は十分はかれたと思います。(セミナーハウスの御好意により、サロンを一晚中お貸頂け、そこで連日多分野にまたがる“深夜のセッション”が開かれました。) 今後、参加者が他分野の研究にも興味を持ち、分野間の交流がより深まることを期待しています。

最後に研究会の開催された関西セミナーハウスについて紹介いたします。当ハウスは、比叡山の麓、曼殊院と修学院離宮の間にはさまれた洛北の景勝地に位置します。(曼殊院は今年の JR 東海のポスターに使われていたお寺です。[http://jr-central.co.jp/museum/kyoto/autumn\\_2006\\_02.html](http://jr-central.co.jp/museum/kyoto/autumn_2006_02.html)) 施設には日本庭園やお茶室もあり、普段の忙しい日常から解放される場所として世話人で話し合っただけで決まりました。ただ、参加者の皆様に関西セミナーハウスの周りの雰囲気を楽しめる時間が十分持て頂けなかったことが世話人として残念なことでした。

本研究会の発起人は、A03 班研究代表者、坪田誠、上田正仁、A04 班研究代表者、前野悦輝、石川修六で、世話人は A03 班、斎藤弘樹、小林未知数、A04 班、石田憲二、矢口宏、小原 顕 で開催いたしました。お忙しいところお越しくくださった参加者の皆様、会場、出張のお世話くださった、村田佳美さん、平岩利恵さん、研究会の全般に御尽力くださった福山寛先生に感謝いたします。

## A01－A05 班合同ワークショップ報告

桃井 勉

理化学研究所 古崎物性理論研究室

本領域の A01 班と A05 班合同によるワークショップが、2006 年 7 月 27 日～29 日の 3 日間にわたり、那須高原の那須ビューホテルで開催されました。二つの班の計画班メンバーと今回が初めての参加となる公募班メンバーに加え、海外からの招待講演者（J. Saunders 教授）、大学院生を含む多くの若手研究者が参加し、合計 74 名による情報交換および活発な討論が行なわれました。

今回のワークショップでは、A01 班と A05 班の研究テーマの中でも He3 系と強相関電子系に共通に現れる 3 つのテーマ（「スピン液体」、「モット転移」、「リング交換」）に絞って講演プログラムを組みました。電子系、ヘリウム系という物質の枠を超えて、2 つの分野に共通して現れる概念についてお互いの情報交換を行い、かなり密度の濃い議論が出来たのではないかと思います。

また、今回のワークショップのもう一つの特徴として、サマースクールの側面を持たせました。大学院生およびポストドク等の若手研究者あるいは他分野の研究者を対象に、これら 3 つのテーマについての最近の研究についての講義を 4 人の先生が行いました。これを機会に多くの若い人がこの分野の研究に興味を持ち、将来、この分野に参入することになれば大変うれしいかぎりです。

長梅雨・冷夏のため天候にはあまり恵まれなかったため、高原のさわやかな気候の中で物理の議論をしようというもくろみ通りには行きませんでした。その分ホテルに籠り 3 日間寝食を共にして合宿形のワークショップを満喫していただけたのではないのでしょうか。



左：唯一晴れた最終日にホテルの庭で撮った集合写真



下：講演中の会場の様子

A02 班：N次元ヘリウム量子流体の実現

戸田亮、松下雄樹、檜枝光憲、松下琢、和田信雄  
名古屋大学大学院理学研究科

ボース量子流体であるバルク  $^4\text{He}$  液体は、シャープな比熱ピークと同時に、超流動転移を起こす典型的な 3 次元相転移を示す。この超流動の永久流はジャイロの実験で証明された。2 次元の  $^4\text{He}$  は、平らな固体表面上に吸着した  $^4\text{He}$  液体薄膜で実現される。2 次元の場合、フォノンなどのゆらぎが長距離秩序を壊すので、永久流を示す 2 次元超流動は存在しないと言われている。しかしねじれ振子の実験などでは、特徴のある超流動オンセットが観測される。これは Kosterlitz-Thouless らにより、超流動渦が本質的な役割を果たす 2 次元超流動転移として理解された。1 次元の場合については、これまで実際に 1 次元  $^4\text{He}$  流体を実現できなかつただけでなく、理論的な理解も、3 次元や 2 次元のように進んでいないと思われる。そこで我々は様々なつながりの次元性を持つナノ多孔体の壁面に吸着した  $^4\text{He}$  薄膜で、次元性を任意に制御した  $^4\text{He}$  量子流体を実現する研究を行っている。

HMM-2 は直径 2.7 nm の細孔が 5.5 nm の間隔で規則的に 3 次元接続したナノ多孔体である。一方、ほぼ同じ孔径(2.8 nm)を持つ FSM-16 の場合は、まっすぐに伸びた 1 次元トンネルの構造を持つ。これらのナノ多孔体に  $^4\text{He}$  原子がどのように吸着するかは、吸着圧力の測定から明らかになった。ナノ細孔壁面からの吸着ポテンシャルは、2 つの基盤で定量的にほぼ同様であり、 $^4\text{He}$  が 1 層完了する吸着量( $n_1$ )や、一様な膜が約 2 層( $n_f$ )まで形成されることが分かった。 $^4\text{He}$  と  $^3\text{He}$  の比熱測定からは、約 1.3 層(1.3  $n_1$ )以上で固層の上に液体層が現れ、それぞれの量子統計性を反映する低温比熱を示すことがわかった。 $^4\text{He}$  については図 1 に示すような相図を得て、局在状態にある相((L)-相とよぶことにする)と、ボース凝縮あるいは超流動が期待される相((B)-相)が、実験的にもとまった。

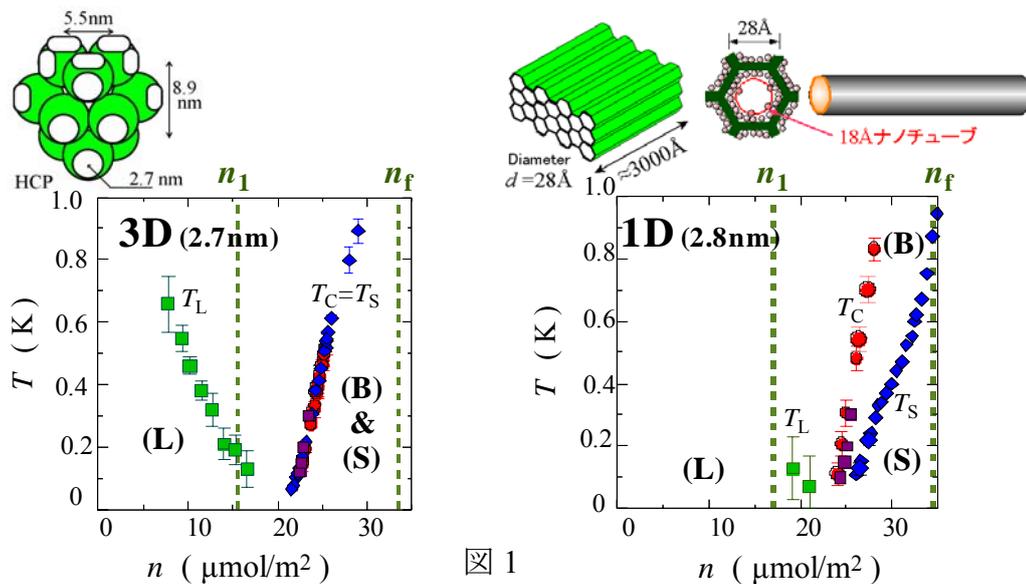


図 1

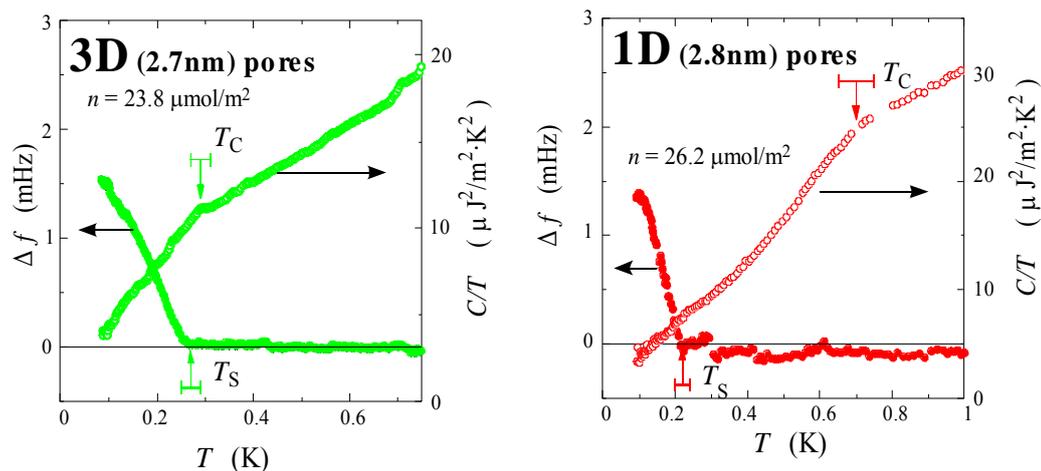


図 2

比熱から得られた相図のどの領域で超流動が観測されるかを、ねじれ振り子と比熱の同時測定により、全く同じ吸着量  $n$  で調べた。図 2 には比熱  $C$  と超流動による振り子周波数変化  $\Delta f$  の実験結果を示している。いずれの基盤でも、図 1 の(B)-相を横切る温度( $T_C$ )以下で、 $C/T$  は大きく減少している。3次元ナノ多孔体の場合は、小さくはあるがはっきりとした比熱ピークが  $T_C$  で観測された。更に、実験上全く同じ温度で超流動オンセット( $T_S$ )が観測され、比熱で決めた(B)-相と超流動相((S)-相)は重なっている(図 1 左)。これは 3次元の相転移を明瞭に示す特徴である。一方 1次元多孔体の場合には、 $C/T$  は  $T_C$  付近で緩やかに変化する(図 2 右)。このとき超流動は観測されず、 $T_C$  よりもはるか低温の  $T_S$  以下で初めて観測され、超流動相((S)-相)は(B)-相の低温側にのみ存在する(図 1 右)。

このように、ナノ多孔体の細孔壁面に吸着した  $^4\text{He}$  薄膜は、細孔のつながりが 3次元と 1次元ナノ多孔体で、それぞれ定性的に異なる超流動転移を示した。前者は 3次元相転移の特徴があるといえるが、1次元ナノ多孔体中  $^4\text{He}$  で観測された超流動は、何らかの 1次元性を反映しているのか、2次元的なのか、今のところ理論的には解明されていないと思われる。

もう一方の量子粒子である  $^3\text{He}$  については、逆に 1次元ガスの状態が実現できたと考えられる。1次元ナノ多孔体の細孔壁面を 1層程度の  $^4\text{He}$  で前もって覆ってから希薄な密度の  $^3\text{He}$  を吸着すると、フェルミ温度以上では、気体定数  $R$  程度の  $^3\text{He}$  の比熱が観測され、ボルツマンガスの状態と考えられる。直径 2.8 nm の 1次元ナノ多孔体では、厚さが 0.5 nm 程度の  $^4\text{He}$  層の上に、直径 1.8 nm 程度の  $^3\text{He}$  薄膜のナノチューブが作られた。チューブ断面内の  $^3\text{He}$  の運動は離散的なエネルギー準位を持ち、基底状態からのギャップエネルギー  $\Delta$  は約 0.3 K と見積もられる。計算によると、1 K 程度の温度では断面内の熱励起で 2次元のボルツマンガスのモル比熱  $R$  を示すが、温度を下げると  $\Delta/3$  の温度でショットキー比熱を示した後 0.1 $\Delta$  以下の温度で、断面内が基底状態でチューブ方向の自由度のみ残った 1次元ガスが実現する。この計算は実験結果を半定量的に再現している[1]。3次元ナノ多孔体でも、 $^4\text{He}$  で覆ったあと吸着した希薄な密度の  $^3\text{He}$  の比熱を測定したところ、 $R$  程度のモル比熱を観測した。この場合もボルツマンガスが実現したものと考えられ、少なくとも十分に希薄で低温にして温度ドブロイ波長が 3次元つながりの長さを超える場合は、3次元ガスになると予想される。しかし、どのような具体的条件で 3次元ガスが実現するかは、1次元の場合と比べて判然としていないので、理論的な解決を期待したい。

[1] J. Taniguchi, et. al, Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 065301.

## A03 班: ボース・アインシュタイン凝縮における対称性の破れ、 スピントクスチャー、新しい量子相

川口由紀<sup>1</sup>、斉藤弘樹<sup>2</sup>、上田正仁<sup>1</sup>  
東京工業大学<sup>1</sup>、電気通信大学<sup>2</sup>

計画研究A03 班「ボース超流体と量子渦」は、「量子渦の物理と新しい超流動乱流の研究」(代表: 坪田誠)と「内部自由度をもつ原子気体の超流動性」(代表: 上田正仁)の2グループから成る。この2グループはこれまで多数の共同研究を行い有機的に研究を展開しているが、ここでは後者のグループの内容について紹介する。

原子気体のボース・アインシュタイン凝縮(BEC)は自発的対称性の破れを研究する格好の舞台であると考えられる。その主な理由は次の3点である。(1)相互作用の時間スケールが数ミリ秒と極めて長く、相転移も同程度の時間が必要であると考えられる。(2)相互作用の強さを含む外部パラメーターを自由に变化させることができ、相転移をコントロールすることができる。(3)系がメゾスコピック領域にあるために、熱力学的極限への漸近的振る舞いが研究でき、通常は理論的な補助道具として導入される対称性を破る“無限小”の摂動項さえもがコントロール可能である。ここでは、最近の我々の研究グループの成果から3つのトピックスを紹介する。

1次元系の引力ボース気体の基底状態は、並進対称性を破ったソリトン状態である。しかし、系の長さが有限系である場合は、閉じ込めによる零点エネルギーが引力相互作用と競合する。したがって、引力が弱い場合は基底状態は並進対称性をもち、引力がある臨界値(図1では、 $gN=1$ )を超えると、並進対称性が自発的に破れソリトンが形成される。図1(a)は、対称性が破れる前後における厳密対角化により得られた多体スペクトルである[1]。対称性が自発的に破れる  $gN > 1$  の領域では、励起エネルギーが  $1/N$  のオーダー(図1(c))の励起が現れるが、これはボゴリウボフスペクトル(図1(b))には現れない多体的な励起であり、これらが自然界に存在する“無限小”の摂動により重ね合わされて、並進対称性を自発的に破るものと考えられる。熱力学的極限では、これら  $1/N$  のオーダーの励起エネルギーはゼロになり、無限に縮退したゴールドストーンモードへと転化する。同様の機構は、量子渦の生成においても見ることができる[2]。この場合は、渦が侵入する過程で連続的な軸対称性が自発的に破れる。

アルカリ原子は、超微細スピン  $F$  という内部自由度を持っており、パラメーターによりさまざまな量子相を発現する。例えば、スピン1の

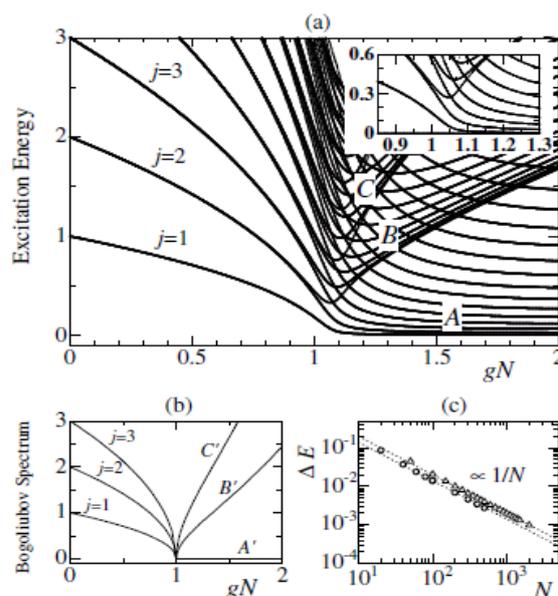


図1：1次元引力系における(a)厳密対角化スペクトル、(b)ボゴリウボフスペクトル、(c)励起エネルギーの粒子数依存性 [1]。

BEC は、強磁性相、ポーラー相のほかに、磁化の方向が磁場に対して傾いている軸対称性が破れた相が存在する[3]。最近、バークレーのグループは、ポーラー相に用意された BEC をこの軸対称性が破れた相へと外部パラメーター（磁場）を突然変化させ、ポーラーコア量子渦が自発的に生成されるダイナミクスを観測した[4]。このトポロジカルな励起はカイラル対称性が自発的に破れており[5]、また、外部パラメーターを挿引する時間を変化させることで、発生する渦の数が変化する[6]。この系は、絶対零度における Kibble-Zurek 機構を研究する格好の舞台を提供している。

BEC 研究の最近の大きな成果は  $^{52}\text{Cr}$  BEC の実現である[7]。この原子は電子スピンの 3 であり、磁氣的ダイポール相互作用がアルカリ原子に比べて 144 倍も大きく、テンソル力であるダイポール相互作用がハートリー相互作用に比べてさえ無視できなくなる。実験は強い磁場をかけてスピン偏極した状態でなされているが、外部磁場を減少させることでダイポール相互作用によるスピン-軌道間の結合が有効になり、アインシュタイン・ドハース効果を生じるものと期待される[8]。アルカリ原子では、ダイポール相互作用はハートリー相互作用に比べると無視できるが、スピン交換相互作用に比べると無視できない。特に、閉じ込めが緩やかなトラップ中では、ダイポール相互作用は閉じ込めの零点エネルギーと同程度かそれよりも大きくなる。したがって、100mG 程度の磁場でもスピントクスチャーがダイポール相互作用を介して発生することが予想される[9]。

更に、外部磁場を mG 以下に抑えることができれば、ダイポール相互作用はアルカリ原子において新たな基底状態を生み出す。例えば、 $F=1$  の  $^{87}\text{Rb}$  BEC の場合は、ダイポール相互作用を介してスピントクスチャーが自発的に形成され、それがスピン-ゲージ対称性により超流動を生む。図 2 はこの系の基底状態を横軸にスピン交換相互作用の強さ、縦軸にダイポール相互作用の強さをとって示したものである[10]。ここで、CSV (chiral spin vortex) 相では、スピнкаイラリティが自発的に破れた相であり、 $^{87}\text{Rb}$  原子の場合、循環値が最大で  $0.4\hbar$  程度の値をとる。スピンを  $l$  ベクトルとみなせば、この現象は Mermin-Ho テクスチャーが循環を生んだものと解釈することもできる。 $^3\text{He}$  超流動との違いは、スピントクスチャーがハードウォールのような外的要因ではなく、ダイポール相互作用という内的要因により自発的に発生したという点である。

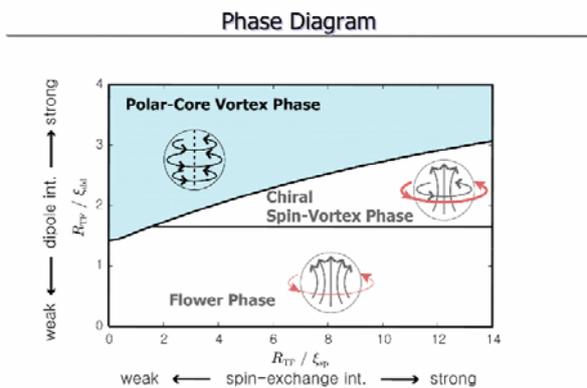


図 2: 強磁性相互作用するスピノル-ダイポール BEC の基底状態。図中の PCV, CSV, FL はそれぞれ、polar core vortex 相、chiral spin vortex 相、flower 相を示している [10]。

- [1] R. Kanamoto, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 090404 (2005).
- [2] M. Ueda and T. Nakajima, Phys. Rev. A **73**, 043603 (2006).
- [3] K. Murata, *et al.*, Phys. Rev. A **75**, 013605 (2007).
- [4] L. E. Sadler, *et al.*, Nature **443**, 312 (2006).
- [5] H. Saito, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 065302 (2006).
- [6] H. Saito, *et al.*, Phys. Rev. A **75**, 013621 (2007).

- [7] A. Griesmaier, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 160401 (2005).
- [8] Y. Kawaguchi, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 080405 (2006).
- [9] Y. Kawaguchi, *et al.*, Phys. Rev. Lett. (in press), cond-mat/0611131.
- [10] Y. Kawaguchi, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 130404 (2006).

## 研究会・ワークショップの紹介

### 1. 研究成果報告会（終了）

日 時： 2006 年 12 月 14 日～16 日

会 場： 淡路夢舞台国際会議場 （兵庫県淡路市）

参加者： 183 名，招待講演 1 件，口頭講演 44 件，ポスター発表 115 件

### 2. International Workshop on Physics of Supersolids and Related Topics

日 時： 2007 年 4 月 2 日～4 日

会 場： 慶応大学理工学部 （神奈川県横浜市）

「超流動固体」に関する国際ワークショップです。詳細については以下をご参照下さい。

<http://www.superclean-materials.org/supersolid/index.htm>

### 3. 国際シンポジウム（兼研究成果報告会）

日 時： 2007 年 10 月 29 日～11 月 1 日

会 場： 長良川国際会議場 （岐阜県岐阜市）

本特定領域のメンバーが一堂に会しての国際シンポジウムが開催されます。詳細は領域ウェブサイト随時掲載する予定です。

## 編集後記

本特定領域研究ニュースレター第2号を皆様のお手元にお届けできる運びとなりました。お忙しい中原稿をご執筆いただいた皆様に厚く御礼申し上げます◆本特定領域研究も、2005年夏の発足から、約1年半が経過しました。2006年度からは26件の公募研究者にも加わっていただき、5月のA03-04合同研究会、7月のA01-05合同研究会、そして2007年4月の「超流動固体」に関する国際ワークショップと、重要な活動を積み上げてきております。2007年10月末には、本特定領域研究の前半の総括として、岐阜市の長良川国際会議場で、国際シンポジウムを行います。このような活動を振り返りますと、福山寛領域代表がさまざまな場で話されているとおり、本特定は「新しい低温物理学」を目指して着実に進んでいると感じられます◆しかし、その一方で、もう1年半が経過したのか、もう前半の総括を企画する時期なのかという思いもいたします。その意味で2007年は本特定領域研究にとって、節目となる重要な年であることは明らかです。様々な会議の活動も重要ですが、最も重要なのは、何と言っても物理の成果です◆ただ、その点では、私自身は楽観しております。計画研究および公募研究の皆様がたの顔ぶれを拝見しますと、よくこれだけ当該分野の第一線の方々が参加して下さったものだという思いを強くします。これだけ実績のある方々が既存の分野の枠を越えて有機的に協力していただければ、本特定領域を代表するような、さらなる優れた成果が出るに違いないと確信しております◆今後ともどうぞよろしくお願い申し上げます。

(坪田 誠)

---

### News Letter Superclean Vol. 2

文部科学省科学研究費補助金特定領域研究  
「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」

*Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials*

発行：2007年3月26日

発行者：福山 寛 (研究代表：東京大学大学院理学系研究科)  
〒113-0033 文京区本郷7-3-1

編集者：白浜 圭也 (事務局：慶應義塾大学理工学部)  
〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1

©2007 禁無断転載

---

