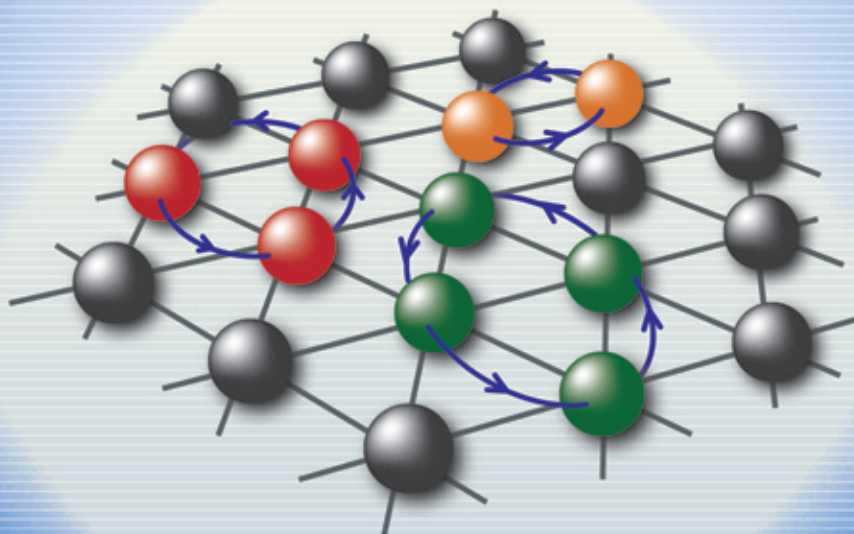


News Letter Superclean



Vol.1 (July / 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：福山 秀敏	-----	ii

● トピックス

・ 2次元有機導体のモット転移での新しいタイプの臨界現象			
	今田 正俊 (東大)	-----	1
・ 超音波で駆動する固体ヘリウム4の結晶成長			
	野村 竜司、阿部 陽香、奥田 雄一 (東工大)	----	3
・ 固体ヘリウム4の超流動(KITP ワークショップ報告)			
	白浜 圭也 (慶大)	-----	5
・ 領域発足研究会報告			
	坪田 誠 (阪市大)	-----	7

● 研究紹介

・ A03 班：量子渦の物理と新しい超流動乱流の研究			
	坪田 誠 (阪市大)	-----	8
・ A05 班：フラストレート磁性体における磁気多重極秩序状態			
	桃井 勉 (理研)	-----	10

● 研究会・ワークショップの紹介		-----	12
------------------	--	-------	----

○ 編集後記			
--------	--	--	--

「スーパークリーン」の言葉に託したもの

領域代表者 福山 寛 (東京大学大学院理学系研究科)

私共の科研費特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」(略称:「新量子相の物理」)もこの4月でいよいよ二年度目に入りました。今年度からは計画研究10課題に加えて、公募研究26課題が参加して質量ともに一段と強化した本格的な研究体制が整いました。

「スーパークリーン物質」って何のこと? これがこの特定領域の課題名を最初に聞いたほとんどの人が発したであろう疑問(あるいは疑念?)だと思います。実際、スーパークリーン物質というのは私共の造語であり、何かインパクトのある言葉はないか、と苦し紛れに絞り出した感も若干はなきにしもあらずですが、しかし、まさしく私共の目指す新しい低温物理研究の方向性を表した言葉だと、本当はかなり気に入っています。

物性物理学、なかんずく低温物理学から「新しい物理概念」が誕生するとき、実験と理論が車の両輪のように連携して研究が爆発的に進展することが常です。私のバックグラウンドであるヘリウム研究でも、1972年から1980年代にかけて超流動 ^3He の研究でそれが見られました。その後も、1987年以降の銅酸化物高温超伝導、そして最近では1995年以降のアルカリ原子気体のボース・アインシュタイン凝縮(BEC)でやはり実験と理論の幸せな相乗効果が続いています。量子ホール効果のことを忘れてもらっては困るという声も聞こえてきそうです。高温超伝導を除けばこれらに共通するキーワードが浮かんできます。それは、「低温極限」であり、「系の純粋さ」であり、そして「新しい量子相」といった低温物理学ならではのキーワードです。そうしたepoch-makingな出来事が起こると、必ず既存の研究分野を超えた研究者(主に理論家)の大移動あるいは再編成が起こります。そしてここで少々残念な事実は、これらの最初の実験的発見はすべて外国でなされたということです。

さて本特定領域ですが、そのカバーする研究領域は、低次元ヘリウムの新奇な量子相、強相関電子系の量子臨界現象、量子渦と超流動乱流、内部自由度をもつBEC、異方的超伝導・超流動、リング交換と量子結晶、2次元電子系、...と一見非常に多岐に渡ります。しかし、上記のキーワードに照らしてみればその目指す方向は決してバラバラではありません。それぞれの背後にある共通の物理概念を掘り下げ、新たな実験と理論の爆発的なコラボレーションを一つといわず二つ三つと日本から産み出してゆきたい、これが私共の意気込みです。そしてそれこそが、研究対象をその名に冠しないほとんど唯一ともいえる学問分野「低温物理学」の正しい方法論だと思っています。

こうした私共の取り組みを厳しくも期待をもって見守って下さるお役目の領域評価者の先生方ですが、幸い当代一流の方々に引き受けていただけました。初年度12月に東大本郷で開いた領域発足研究会も、延べ参加人数176名という熱気のうちにスタートさせることができました。今年度は特定領域のサブセットで、若手の育成にも配慮したより小回りの利くワークショップが5月末と7月末にそれぞれ実行・計画されています。12月の領域全体の成果報告会までの研究進展が楽しみです。

特定「スーパークリーン」への期待

評価委員 福山秀敏（東京理科大学）

2002年夏、広島で「低温物理国際会議」LT23が開催されました。この会議では「物性物理学」のさまざまな重要テーマについて、活発な意見交換がされ、大変印象的でした。「低温物理」が「物性物理」そのものであるということを実感しました。あらゆる物質が原子・分子の「凝縮系」であり、そこでは超伝導・超流動を始めとする「相転移」など物理学上の重要な概念が形成されてきました。多様な物性は物質が膨大な数の原子・分子集合体でありそれに伴って連続的なスペクトルをもつことに起因しています。孤立した原子・分子とは全く異なった様相が出現します。この連続スペクトルの低エネルギー部分には物質が持つあらゆる可能性が隠されていますが、それを究明してきたのが「低温物理学」の歴史です。したがって「低温物理学」は物質が持つあらゆる可能性に科学としての目を注いできたと言えます。「高温超伝導」研究では相転移温度自体は高温ですが、その背後にあるサイエンスの究明にはやはり低温実験が必須です。「低温物理学」の歴史は「物理学」の歴史そのものといっても良いくらいです。本特定がその歴史に新しい項目を加えることを期待します。

低温での実験は一般的には大変困難であり、それを推進するためには極めて高度の忍耐と技量が求められることと思います。また実験の具体的な成果を出すまでに大きな努力が要求されるために実験を始める前にその意味を「深く」考える習慣がついているのだと思います。このことを反映して「低温」で訓練を積んだ若い実験家はその後どのような状況においても見事な実験活動を展開するという事実は洋の東西を問いません。このような人材育成も本特定に期待されます。

しかし「低温」の先端での実験はますます難しくなっています。大変な集中力を要求されるために「視野」ないし「コミュニティ」が狭くなるおそれも大きくなります。この危険性を回避するためには、研究テーマを広く求め、更にさまざまな異なった視点からの意見に耳を傾ける姿勢が求められます。その際に理論家の果たす役割は大変大きいはずですが。「深く」かつ「広く」を同時に期待するというの是一見矛盾していますが、物性物理の本道を進む本領域に敢えて期待します。

皆様のご活躍を期待します。

2次元有機導体のモット転移での新しいタイプの臨界現象

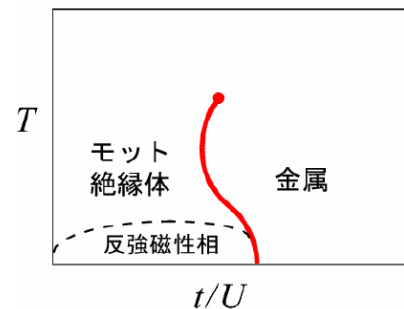
今田 正俊

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻

本特定領域 A01 班に属する計画研究「量子臨界点近傍に現れる新奇量子現象の解明」グループで、興味深い研究が急速に進行しているので紹介する。

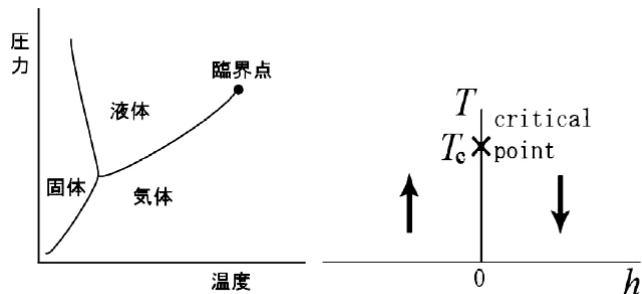
電子相関（特に短距離のクーロン斥力）が強いことを主因として、電子濃度が単位格子あたりちょうど奇数となっているときに生じる絶縁体はモット絶縁体として知られている。モット絶縁体に対して、電子濃度を奇数からずらしたり（キャリアドーピング）、あるいはクーロン斥力の大きさに対してバンド幅を増大させる（バンド幅制御）ことにより金属や超伝導への金属絶縁体転移を引き起こすことができる。これはモット転移と総称される。モット転移は熱力学的な相転移であるが、その本性は何十年にもわたって未解明であった。困難の原因には、モット転移が電子状態を根本的に変えてしまうために波及効果が大きくて、他の自由度の相転移を同時に伴うことも多く、モット転移だけを純粋に取り出して初めて見える本質を見極めるのが難しかったことなどがある。

しかし、右図の典型例に見られるように、クーロン斥力に対するバンド幅（左図の横軸 t/U ）を制御して生じるモット転移では、温度 T を変えて得られる有限温度相図内の赤い線で表される一次相転移の相境界のように、低温で生じる反強磁性相（AF）などへの相転移に邪魔されずにモット転移だけを取り出すことができる場合がある。低温からこの赤い相境界を辿っていくと赤丸で示されている臨界点に達する。



モット絶縁体はそれ自身としては対称性の破れを伴っていないので、有限温度では臨界温度以上の温度を経由してモット絶縁体相から金属相に連続的に（断熱的に）回り込むことができる。このような事情が下左図のような液体と気体の間の相転移（気相液相転移）のときに似ていることに読者も気づかれるであろう。

気相液相転移の場合には右図に示されている磁場 (h) 中でのイジング模型の相転移（磁場下向き ($h > 0$) のためにスピンの下向きに揃う相から $h < 0$ のためにスピンの上向きに揃う相への一次転移）と同型であることが知られている。ではモット転移の臨界点ではどう



なっているのかという疑問が当然生じるが、この特定には長い年月を要した。Limelette ら[1]は2003年に V_2O_3 のモット転移の 450K 付近の臨界温度近傍で、電気伝導度の特異性から、確かにイジング模型と同じ臨界指数が得られることを示した。今の場合の臨界指数は、圧力 p を変化させたときの伝導度 σ の臨界値 σ_c から測った特異性 $|\sigma - \sigma_c| \propto |p - p_c|^{1/\delta}$ で決まる δ や、臨

界温度以下での 1 次転移での伝導度のとび $\Delta\sigma \propto |T - T_c|^\beta$ から決まる β 、感受率の発散の仕方を決める γ (すなわち $d\sigma/dp \propto |T - T_c|^\gamma$ から決まる γ) などがある。Limelette らは臨界指数が 3 次元イジング模型で知られている厳密な値 $\beta \sim 0.32$, $\delta \sim 4.8$ などで矛盾なく説明できることを示したのである。

ところで、イジング模型の場合は横磁場をかけるとスピン上向きの状態と下向きの状態との間の量子トンネリングが誘起され、この量子ゆらぎのために転移温度が下がる。モット転移のときにも何らかの方法で量子効果を増大させて、モット転移の臨界温度を低くしたらどうなるであろうか？ 特に臨界温度が絶対零度になったときは量子臨界現象が生じるはずであるが、このとき転移の様相はどうなると予想されるだろうか？

この量子相転移の問題は量子モンテカルロ計算などの理論計算が行なわれた結果、イジング模型の相転移とは全く異なる新奇な臨界現象とスケーリング則が予想された[2]。特に最近の我々のグループの理論研究は、この考察をさらに進め、イジング模型も従う標準的な相転移の枠組みであるギンツブルグ・ランダウ・ウィルソン型の相転移とは異なる、新しいタイプの相転移をモット転移の普遍性クラスとして導いた[3,4]。この普遍性クラスではゆらぎの効果が重要でなくなる上部臨界次元であるにもかかわらず、 $\beta = d/2$, $\delta = 4/d$, $\gamma = 2 - d/2$ のように系の空間次元に依存する大変異常な臨界指数が得られる。

一方、本研究グループに属する賀川、宮川、鹿野田は擬 2 次元的な有機導体 κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Cl に生じる 40K 付近のモット臨界点に注目した。詳細かつ徹底した実験により電気伝導度の特異性を調べ、 $\beta \sim 1$, $\delta \sim 2$, $\gamma \sim 1$ という値を得た[5]。この値は、どんな空間次元のイジング模型の臨界指数とも一致しないし、その他のよく知られている模型の臨界指数とも一致しない。また上述の V₂O₃ の結果と異なる驚くべき結果である。一方この一連の指数は上に述べた量子モット転移で空間次元 $d=2$ において期待される値と一致し、通常のスケーリング則を満たす。

モット転移の研究の歴史が 70 年近くにおよぶにもかかわらず、この相転移や臨界現象の性格が実験的に定量的な評価の対象となってきたのはわずかここ数年のことであることに驚くかもしれない。一方この転移がイジング模型や気相液相転移の普遍性と一致したり、多くの相転移が満足するギンツブルグ・ランダウ・ウィルソンの枠組みに従わなかったりして、基礎物理学的に見て新しい概念を生み出す舞台であることもはっきりしてきた。一連の研究から明らかとなってきたこともまたびっくりするような出来事の連続である。モット転移や相関絶縁体からの転移はもとのギャップが eV のオーダーの大きさに及ぶ場合もあるから大変エネルギースケールの大きな相転移である。この相転移の近傍には銅酸化物に見られる高温超伝導をはじめとして、未解明の現象が多く見出される。この機構を解明するためにはモット転移それ自身の機構と本質の解明が必須であることは、銅酸化物超伝導発見以来繰り返し強調されてきた。このモット転移のメカニズムがようやくわかりかけてきているといえる。モット転移の臨界性の異常さが未解明のドラマティックな現象を生み出す根底にあると予想されるが、その関連性の追究もこれから本領域での実験、理論研究の協力を通じて大きく進むと期待される。

[1] P. Limelette et al. : Science **302** (2003) 89.

[2] M. Imada: J. Phys. Soc. Jpn. **64** (1995) 2954.

[3] M. Imada: J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 859.

[4] M. Imada: Phys. Rev. B **72** (2005) 075113.

[5] F. Kagawa, K. Miyagawa and K. Kanoda: Nature **436** (2005) 534.

超音波で駆動する固体ヘリウム 4 の結晶成長

野村 竜司、阿部 陽香、奥田 雄一
東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻

極低温での固体ヘリウム 4 の結晶成長はきわめて速く進行する。これは液体が超流動状態にあり、通常物質で律速となる潜熱や物質輸送の過程が無視できるためである。低温のため不純物は全て壁に吸着されて影響せず、結晶成長の基本的物理を研究する上で理想的なスパークリーン物質である。この系では結晶成長係数は界面に衝突する準粒子（フォノンとロトン）の数によって決まる。低温では準粒子数が減少し、結晶成長係数が極めて大きくなるのである。成長にかかる時間や平衡形への緩和時間が短いために精密実験が可能であり、結晶成長の普遍的現象（ラフニング転移、2次元核生成、螺旋成長など）の多くがこの系で確かめられた歴史がある。一方、大きな結晶成長係数は通常物質では無視されている、あるいは定量的測定が困難な、界面に働く小さな擾乱の影響が観測できることを意味する。古典世界では粘性によって隠れていた新現象が量子固体の結晶成長動力学に姿を見せるのである。

我々はヘリウム 4 の固液界面に超音波を入射すると、結晶成長や融解、結晶核形成などが駆動できることを発見した[1]。これは 2 次の音響効果である音響放射圧によって固液界面が駆動されたと考えている。放射圧とは音響的性質の異なる物質の境界面に作用する一軸性応力であり、ヘリウムの場合フォノンが界面に与える運動量によると考えてよい。放射圧は非接触で物体を動かすのに用いることが出来る。しかしこれが一次相転移を駆動できるかどうかという問題意識はこれまでに無く、結晶成長に応用されることも無かった。微小な擾乱が重要であるヘリウムの結晶成長においてさえも考慮されて来なかった。

図 1 は低温域において固液界面に下(固体側)から超音波を入射したときの結晶成長を高速カメラで撮影したものであり、図 2 は上(超流体側)から入射したときの融解の様子である。超音波の方向に界面が押されており、その変位は 5mm 程である。通常の熱力学的駆動力では一つの安定相のみが成長するのが普通である。例えば圧力を上げると固体が成長する、温度を上げれば固体が解けるなどである。しかし放射圧はその向きに応じて成長と融解を駆動することが出来る力学的な力であり、また超音波を当てた特定の面のみ動かすことが出来る。自由度と機動性に優れた音響放射圧という新しい駆動力を用いて異方的量子界面の新奇な運動を観測した。

まずラフな面における成長量の温度依存性について説明しよう。図 3 の黒丸が固体側から、白丸が液体側から 1msec の長さの超音波を入れたときの変位で、プラスが成長、マイナスが融解を表す。低温では前述のように超音波の方向に界面が移動したが、ある温度(逆転温度と呼ぶ、図 3 では 800mK)以上の高温域では音波の向きによらず融解のみを引き起こした。これは固液界面での超音波反射率の特異な温度依存性によって定性的に説明できる。低温で結晶成長係数が大きくなると、超音波の一次の圧力振動が界面での高速の成長融解によって吸収され、超音波が完全に反射されてしまうことが知られている。このとき音響放射圧は超音波の方向に働く。高温では超音波はほとんど透過するが、音速は固体よりは液体の方が小さいために超音波は液体側で圧縮され、超音波のエネルギー密度(あるいは運動量流密度)が固体より液体で大きくなる。このとき超音波と放射圧が逆向きになるのである。ただしこの音響放射圧モデルで逆転温度を見積もると実験

結果より数 100mK 高くなってしまい、定量的に合わすことには成功していない。なにか高温で融解を引き起こす機構があるはずであるが、その原因は分かっていない。

次に超音波によるファセット面の高速結晶成長について説明しよう [2,3]。図 1 にあるように超音波で結晶を大きく成長させるとその上部にファセットが出現した。これはファセット面の成長速度が、そこから少し傾いた微斜面より遅く追いつかれたためである。通常の物質でも成長中にファセットが現れることは珍しくない。ファセット面の成長は表面で終端した螺旋転位によって作られるステップに原子が付着することによって進行し、螺旋成長と呼ばれる。ヘリウム螺旋成長もこれまでに詳しく調べられており、ステップの易動度の温度依存性は良く分かっている。このステップ易動度を用いて、音響放射圧を駆動力にして螺旋成長したとしたときのファセット成長速度は実験より 3 桁近くも遅くなった。また螺旋成長では駆動力の 2 乗に比例した速度で成長するはずであるが、実験では駆動力に比例した。これまでに知られていない機構でファセットは成長しているようである。

ステップ同士が衝突するとステップは消滅するのが普通であり、これは螺旋成長モデルの仮定になっている。最近 Parshin と Tsymbalenko は高速のステップが衝突するとお互いに乗り上げて、新たな層を作りステップが増殖するという理論を発表した [4]。超流体の慣性によって急には止まれないためである。我々が用いた超音波の一次の圧力振幅はステップの速度を音速程度まで加速するのに十分な大きさであり、このステップ増殖が起こっている可能性がある。ステップ増殖が進み定常状態に達したときのステップ密度を見積もってファセット面の成長速度を計算したところ、温度依存性、駆動力依存性ともに実験結果と妥当な一致を示した。高速ステップと超流動流の運動が結合した新しい結晶成長を観測したと思われる。

超音波を切った後の高速緩和過程では針状構造や不規則構造など、超流体の運動が関与していると思われる興味深い形状を最近観測した。液体表面など等方的な媒質表面での平衡から大きくずれたときの高速ダイナミクスは、いわゆるミルククラウンのような美しい振る舞いを見せるものがある。放射圧を用いれば結晶表面を簡単に大変形することが可能になり、このような異方的表面の高速ダイナミクスを研究する道が開けた。

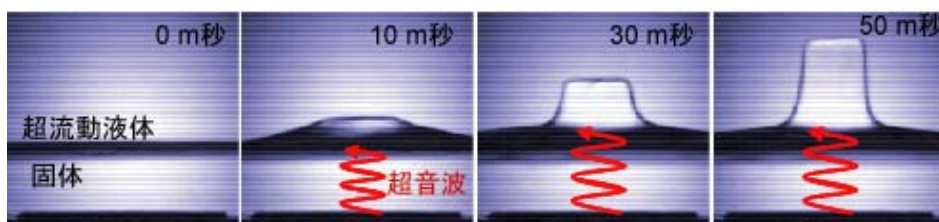


図 1

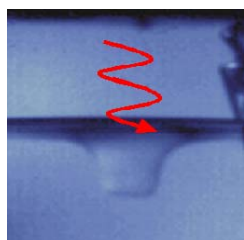


図 2

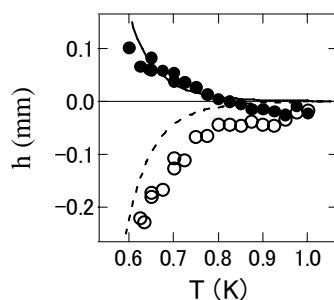


図 3

- [1] R. Nomura *et al.*, Phys. Rev. Lett. **90**, 075301 (2003)
 [2] H. Abe *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 023601 (2006)
 [3] M. Uwaha, JPSJ Online-News and Comments [Feb. 10, 2006]
 [4] A. Ya. Parshin and L. V. Tsymbalenko, JETP Lett. **77**, 321 (2003)

固体ヘリウムの超流動(KITP ワークショップ報告)

白浜 圭也

慶應義塾大学理工学部物理学科

“The Supersolid State of Matter” という題のワークショップが、2006年2月と5月末の2回にわたり、それぞれ Kavli Institute for Theoretical Physics (KITP(UCSB)) と Aspen Center for Physics において開催された。本特定領域の A02 班では多孔体中ヘリウムの超流動—絶縁体(固体)転移や超流動固体状態の研究も進めており、両方のワークショップに白浜が参加したので、その内容を研究の背景や現状も含めて報告したい。

「液体と固体(結晶)はどう違うのか?」という問に対する物理学の答えは明白で、並進対称性の問題に帰着される。あるいは単純に硬さを持つのが固体で、流動性があるのが液体ということもできる。だが実際には流れることのできる固体もあるし、硬さを持つ液体も存在するわけで、固体と液体の境目はどのような現象に着目するかで変わってくる。このような事情は極低温での量子流体・固体においても同じで、たとえばボース粒子系である固体 ^4He が超流動(ボース・アインシュタイン凝縮)を示すかもしれない。このような「超流動固体」(“Supersolid”)の可能性は Andreev, Chester, Leggett らが 1970 年頃から予言してきた。それを受けて固体 ^4He で超流動や BEC の探索実験も数多く行われたが、明確な証拠は得られなかった。しかし 2004 年になって、Penn State University の Kim と Chan が、固体 ^4He に対してねじれ振子の実験を行い、回転慣性モーメントが 0.2K 以下で減少する(すなわち固体の一部が容器の回転に追随せず、あたかも超流動状態のように見える)ことを見いだした。この発見は、これまで理論家の想像の産物にすぎなかった「超流動固体」が、初めてその明確な姿を現したのではないかということで、大変な注目を集めている。

今回の2つのワークショップは、Ceperley と Chan により企画された。おそらく“Supersolid”のみをテーマとする会議というのは初めてではないかと思われる。Kim らの発見を受けていくつかのグループが実験を行っているが、固体ヘリウムという試料の特殊性もあり、実験を行っているグループはそれほど多くない。これに対し理論的には、Supersolid が凝縮系の基底状態の一つとして普遍的に存在するであろうとの認識がある。そのため、理論家の参加者は Anderson を筆頭に様々な分野からに及び、“Supersolid Physics”への関心が非常に高いことを伺わせた。

理論家の皆さんにはよく知られていることと思うが、KITP・アспенでのワークショップの進め方はとてもフレキシブルで、プログラムもその場で臨機応変に決めたりすることが多い。そのためワークショップはとてもゆったりした雰囲気で行われたが、Supersolid の存否を巡ってはとても活発な議論がなされた。最大の関心は、観測された回転慣性モーメントの減少が真の「固体の超流動(BEC)」に起因するのか、さらにはバルク固体 ^4He に intrinsic な現象なのか、それとも結晶の転位や粒界、界面が関与した(余り面白くない?)現象なのか、という点にある。Kim らの発見から2年以上を経た現在も、これはまだ決着していない。「超流動」という解釈に疑問を投げかける実験結果として、Beamish らの精緻な DC 流動の測定で、超流動は観測されなかったことが挙げられる。また KITP では Reppy が、結晶をアニール(昇温)することで「超流動性」が消失す

ると報告して我々を驚かせた。このアニール効果が本当ならば、バルク現象としての BEC や超流動の可能性はおそらく否定されることになるだけに、その存否について結論を出すことが急務となっている。しかしアニール効果は Chan グループや我々の(より注意深い)実験では観測されておらず、その存在には疑問も持たれている。非常に大きな ^3He 不純物効果の存在を含めて、超流動性と「結晶の質」の関連を解明することが今後の最重要課題であることは間違いない。

理論では、超流動固体の機構として様々なアイデアが提案されていて興味深い。2 つのワークショップを通じて、最も重要な課題は「絶対零度での固体ヘリウムは commensurate(ヘリウム原子数が格子点の数と等しい)か否か?」(換言すると、絶対零度でも vacancy や interstitial が存在するか?) という問題の解決にあるとの認識が定着した。この問題に対する理論家の見解は様々で、やはり決着は付いていない。(ちなみに最も強烈に zero point vacaicies の存在を主張しているのが Anderson である。) 量子固体では零点振動と粒子相関の両方の効果が重要であり、このことが理論的解明への難しさを改めて浮き彫りにしている。

固体 ^4He で起きている事の本質が明らかになるまでには、もう少し時間がかかりそうである。現時点では Chan グループの実験が質量共に他を凌駕しているが、我々のグループも新しい結果を出し貢献してきている。また今年になっていくつかのグループが音波や DC 流動などの新たな実験を開始し、その中には超流動を示唆する結果を得たところもあると聞く。今後も地道に実験事実を積み重ねていく必要がある。

なお白浜は KITP ワークショップには本特定領域総括班の海外研究動向調査として、Aspen には A02 班の研究成果発表として出席した。前者への出席を勧めてくださった福山領域代表に感謝する。

写真: アспен物理学センターのパティオで議論する Moses Chan、David Ceperley ら。



領域発足研究会報告

坪田 誠

大阪市立大学大学院理学研究科

領域発足研究会が、2005年12月15日、16日の二日間、東京大学本郷キャンパス小柴ホールで行われた。本特定領域の発足に相応しく、二日間で延べ176名が参加して、活発な議論が行われた。ここにプログラム担当として、研究会の報告をさせていただく。

本特定領域研究の大きな特徴は、低温という極限環境のスーパークリーン物質を研究することにより、新しい物理概念を創出することにある。そのため、領域全体で研究対象とする共通物質はなく、むしろ対象物質は液体および固体ヘリウム、分子性結晶、酸化物、中性原子気体と多岐にわたり、日本物理学会では日頃異なる領域に属して必ずしも顔を会わさない研究者が協力することになる。

そこでこの領域発足研究会では、計画研究班メンバーの相互理解を目指し、領域全体および各計画班が目指す物理を明確にすることを目標とした。原則として計画班の全メンバーが口頭発表を行うこととし、代表者は30分、分担者は20分（いずれも5分の質疑応答を含む）の持ち時間で、計30件の口頭発表が行われた。また広く一般からポスター発表を募集し、本特定領域研究に深く関係する74件の発表が行われた。評価委員のお一人である、東大物性研の家泰弘先生からは、本特定領域に対する期待のコメントをいただいた。全発表のアブストラクト、および全口頭発表の内容は領域ウェブで御覧いただける。

口頭発表、ポスター発表いずれにおいても活発な議論が行われ、会場はいつも熱気に包まれていた。本特定領域研究は、領域発足時の審査に係る意見によれば「世界をリードする若手研究者により構成されており」、それが十分にうかがえるほどクオリティの高い発表と議論が行われた（そのような感想を、会場の複数の参加者から聞いた）。15日の夜には、山上会館地階食堂「御殿」で懇親会が行われ、100名以上の参加者がワイングラス片手に物理の熱い議論と情報交換を行った。

本研究会の運営に関しては、会場担当を東大院理の福山寛氏、参加受付とウェブに関する業務を慶応大理工の白濱圭也氏、プログラム作成を坪田が担当した。本研究会の開催のためにご尽力頂いた方々に厚くお礼申し上げます。

次回の全体研究会は、2006年12月に関西で行われる予定である。

A03 班: 量子渦の物理と新しい超流動乱流の研究

坪田 誠

大阪市立大学大学院理学研究科

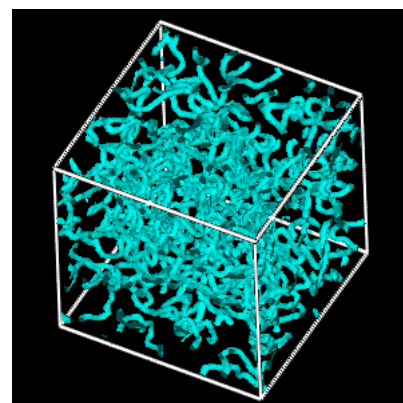
計画研究 A03 班「ボース超流体と量子渦」は、「量子渦の物理と新しい超流動乱流の研究」（代表：坪田誠）と「内部自由度をもつ原子気体の超流動性」（代表：上田正仁）の二グループから成る。この二グループはこれまでも多数の共著論文を発表しており、有機的に A03 班を構成しているが、ここでは前者のグループの内容について紹介する。

量子流体力学とは？

広義には「量子効果が顕著な流体力学」であるが、「量子渦を構成要素とする超流動流体力学」がより正確な定義である。ボース凝縮により巨視的波動関数（秩序変数）が形成された系では、全ての回転的流れは、量子化された循環をもつ量子渦によってのみ作られる。

なぜ、今「超流動乱流」なのか？

低温物理学の初等的教科書を開いて、超流動ヘリウムの章を見ると、必ず二流体モデルが述べられている。そしてその特徴的な流れとして「熱カウンター流」が説明されている。超流動ヘリウムを封入した菅の一端を閉じ、そこからヒーターで加熱して温度勾配を作ると、常流体は高温側から低温側へ、超流体はその逆に流れるという、独特の対向流（カウンター流）が実現する。超流体と常流体の相対流速が十分低いとき両者は独立に流れるが、相対流速がある臨界値を超えると両者は独立でなくなり超流動に散逸が発生する。この事実は 1940 年代から知られていたが、50 年代の Feynman の考察と Hall-Vinen の記念碑的な実験研究により、量子渦が 3 次元的に複雑に絡み合って生じる（右図）超流動乱流が発生していることが明らかになった。



1950 年代以降、超流動ヘリウムの流れに関して膨大な研究が行われたが、そのほとんど全ては熱カウンター流を対象としていた。1955 年に発表された Feynman の歴史的論文を読むと、彼は明らかに超流動乱流と古典乱流の対比を意識していた節があるが、熱カウンター流は普通の流体力学との対応が無く、両者の関係は長く謎のままであった。

こうした状況は、1990 年代の後半に一変した。熱カウンター流から離れた状況（格子乱流など）の超流動乱流の実験が行われ、古典乱流の最も重要な統計則であるコルモゴロフの $-5/3$ 則が観測されたのである。この後世界的に、再び超流動乱流の研究が盛んになり、この研究は新世代に突入したのであった。

新しい超流動乱流研究の意義

乱流は、古典物理学における最終問題の一つであるが、あまりに複雑すぎてアプローチが容易でない。古典乱流も渦から構成されていると考えられているが、その渦は安定でなく様々な循環を持ったものが絶えず生成消滅を繰り返している。乱流の本質的な統計則と渦との関係は昔から

の大問題で（古くは Kolmogorov と Landau の論争などがある）、よくわかっていない。ところが超流動乱流（量子乱流）は、安定で循環がそろった量子渦により構成されるのである。そのため量子乱流では要素還元的な流体の記述が可能になる。事実、常流体が存在しない超流動乱流で、コルモゴロフ則が成立することが数値的研究により示された[1]。こうした背景の元、現在の世界的な主な研究動機は以下の二つである。

1)量子乱流と古典乱流はどのような関係にあるのか？

私は、量子乱流は古典乱流よりもはるかに簡単な乱流の雛形を与えうると考えており、そのような視点はレオナルド・ダ・ヴィンチ以来何世紀にもわたり難問であった乱流研究にブレイクスルーを起こすことができるかもしれない。

2)常流体が存在しない極低温領域で、超流動および超流動乱流に散逸機構はあるのか？

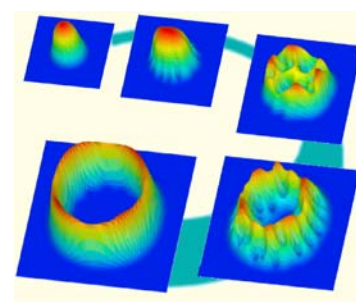
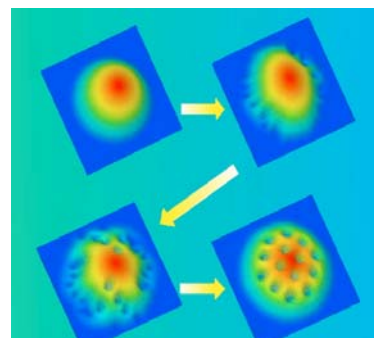
皆さんも学部で二流体モデルを習われた時に、このようなことを漠然と思われたのではなからか？ 私もそうであったが、そのような疑問は長年封印していた。しかし、今この問題が露に問われており、これは「超流動」という現象の本質にかかわるものである。そして 1)にも深く関係することは言うまでもない。

本グループの構成と目指す物理

本グループは、坪田誠と、大阪市大の畑徹、矢野英雄の 3 人から成る。坪田が理論的および数値的研究を担当し、畑と矢野は実験研究を行う。実験研究は、超流動 ^4He および ^3He 中での振動細線によって起こされる超流動乱流をターゲットにしている。細線を振動させる力を増してゆくと、ある臨界速度から細線の応答が大きく変化する。これは細線回りの量子渦の挙動が変化し、層流から乱流へ遷移したものと考えられている。この物理は上記の研究動機に関連するとともに、交流流れ場中の超流動乱流という新たな側面を提供する。理論研究は、上記のような動機の一般的かつ本質的な量子乱流の研究を進めるとともに、畑達の実験研究の数値シミュレーションを行い、その理解を目指す。理論と実験の有機的な協力により、新しい量子流体力学および量子乱流力学の構築を行う。

中性原子気体ボース・アインシュタイン凝縮

A03 班は、中性原子気体ボース凝縮系の量子渦、テクスチャー、集団励起なども重要な標的としている。坪田は、ここ数年、東工大の上田正仁氏と共同研究を行い、回転するボース凝縮体中の渦格子形成のダイナミクス（右上図）、非調和ポテンシャル中での巨大渦の形成（右下図）、二成分ボース凝縮体で実現する特異な渦格子構造などを明らかにしてきた。しかし紙面が尽きてしまったので、その物理は別の機会にゆずることとする。渦格子形成については[2]、二成分ボース凝縮系については[3]を参照されたい。



[1] M. Kobayashi and M. Tsubota, Phys. Rev. Lett. **94**, 065302 (2005); J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 3248 (2005).

[2] 坪田誠, 固体物理, 第 38 巻, 325 (2003).

[3] K. Kasamatsu, M. Tsubota, M. Ueda, Int. J. Mod. Phys. B**19**, 1835

A05 班: フラストレート磁性体における磁気多重極秩序状態

桃井 勉

理化学研究所物性理論研究室

A05 班 (研究課題「量子結晶とリング交換」) の我々のグループでは、磁性体中のリング交換相互作用および格子の幾何学的構造が作る磁気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。当グループにおける最近の理論研究の成果を紹介する。

これまでのフラストレート磁性体の研究は、反強磁性相互作用の競合により磁気フラストレーションが生じ様々なスピン配位のエネルギーが縮退した場合に量子揺らぎが効いて新奇な量子磁性状態を実現させようというものであった。一方で、近年、量子スピン液体状態が観測された固体ヘリウム 3 薄膜磁性体では、強い強磁性相互作用と競合する反強磁性的リング交換相互作用が存在し磁気フラストレーションを引き起こしている。今回、桃井と Shannon (Bristol 大、UK) らは、このような強磁性揺らぎの強いフラストレート磁性体を理論的に調べ、強磁性相が競合する反強磁性相互作用により壊された時に、新たにスピนนematic相が出現することを見出した[1]。(図 1 参照。) この状態は、スピンの秩序がない一種の“量子スピン液体状態”である。

今回、フラストレートした強磁性体を記述するモデルとして正方格子上的スピン 1/2 の拡張型ハイゼンベルグ模型の磁氣的性質を理論的に調べた。この模型は、支配的な最近接強磁性相互作用 ($J_1 < 0$) と、競合する次近接反強磁性相互作用 ($J_2 > 0$) あるいは反強磁性的 4 スピンリング

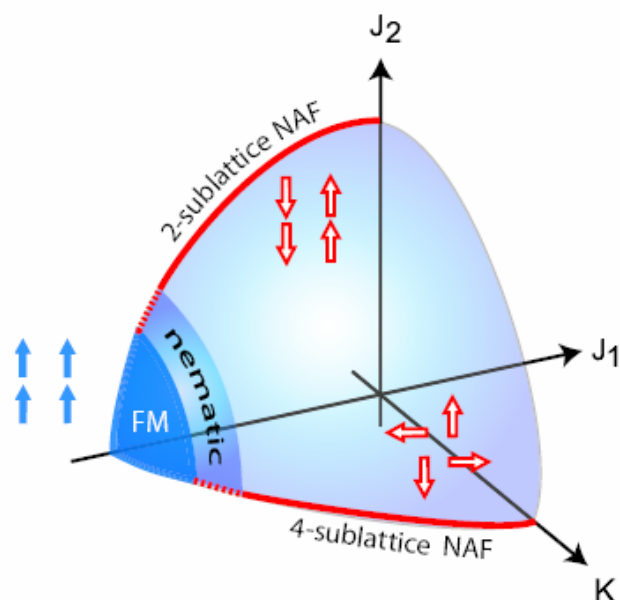


図 1 : 正方格子上的スピン 1/2 J_1 - J_2 - K ハイゼンベルグ模型の相図。パラメータは $J_1 < 0$ (強磁性的)、 $J_2 > 0$ 、 $K > 0$ (共に反強磁性的) とする。 J_1 - J_2 と J_1 - K 面上の実線 (赤) は既知のネール相である。一つのネマティック相が、強磁性 (FM) 相と反強磁性 (AF) 相の間に挟まって広がって存在する。

交換相互作用 ($K > 0$) を持つ。平均場近似では、強磁性相互作用が支配的な系において反強磁性相互作用が強くなると、強磁性相から反強磁性相への直接転移が起こる。ところがスピン $1/2$ が持つ量子効果を取り込んで考察すると、図 1 のように、強磁性相と反強磁性相の間に新しい量子相であるネマティック相が現れることがわかった。このネマティック相は、マグノン対の凝縮状態として理解することができ、スピンの通常の秩序はないが、スピン回転対称性が破れ、ギャップレスのスピン励起を持っている。

このネマティック相の出現のメカニズムは磁場中で理解しやすい。通常、反強磁性体において飽和磁場近傍のスピン状態は、磁化飽和状態にマグノンが凝縮することによりスピンが磁場方向から傾いた *canted AF* 状態になる。ところが今回、強磁性揺らぎの強い J_1 - J_2 - K 模型を解析すると、強磁性相と反強磁性相の境界周辺領域に単一のマグノンよりも d 波マグノン対の束縛状態のほうが安定化する領域がある。磁場中では、図 2 のように臨界磁場 B_{c2} においてマグノン対の生成により磁化飽和状態が壊され、それ以下の磁場中のスピン状態が d 波マグノン対の凝縮状態となることがわかった。このマグノン対の凝縮状態こそが、スピンネマティック状態である。このネマティック相が飽和磁場から磁場ゼロの領域まで連続的に広がっていることを有限系の数値計算結果は示している。このマグノン対の安定化は、内在する強磁性揺らぎとフラストレーションおよび量子揺らぎの協力現象である。

ネマティック相では、スピンの磁気双極子としての秩序は存在せず、スピンの複合自由度から成る磁気 4 重極自由度が現れ秩序化している。最近、三角格子上の強磁性揺らぎを持つリング交換系を調べたところ、さらに複雑な磁気多重極秩序が現れていることを示唆する結果が得られた [2]。この系は、“量子スピン液体” が観測されている固体 ^3He 薄膜の磁性の理論モデルと考えられており、今後のさらなる解明が待たれる。

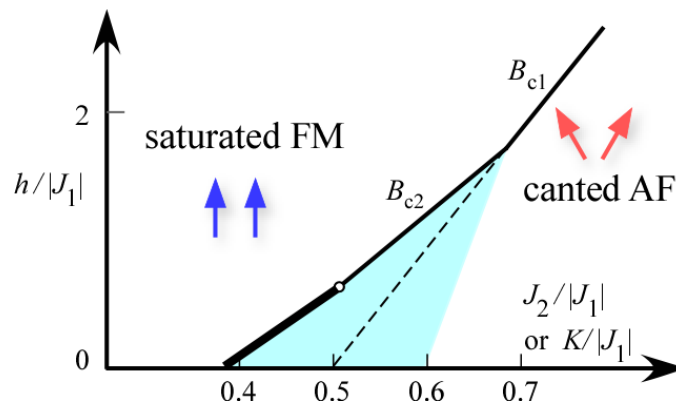


図 2 : J_1 - J_2 - K ハイゼンベルグ模型の磁場中相図。十分に反強磁性的な領域（横軸右側）では、磁化飽和状態は臨界磁場 B_{c1} においてマグノンにより壊され *canted AF* 相に入る。反強磁性と強磁性の中間領域では、マグノン対による不安定化が臨界磁場 B_{c2} で起こり、その下にスピンネマティック相（水色部分）が現れる。

[1] N. Shannon, T. Momoi, and P. Sindzingre, Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 027213.

[2] T. Momoi, P. Sindzingre, and N. Shannon, in preparation.

研究会・ワークショップの紹介

1. 領域発足研究会（終了）

日 時： 2005 年 12 月 15 日～16 日
会 場： 東京大学本郷キャンパス小柴ホール
講演者： 31 名、 ポスター参加者： 74 名

2. A03・A04 班合同研究会（終了）

日 時： 2006 年 5 月 25 日～27 日
会 場： 関西セミナーハウス（京都市左京区一乗寺）
講演者： 27 名

本研究領域の 5 つの計画班の中で、特に関連が深い A03 班「ボース超流体と量子渦」と A04 班「異方的超伝導・超流動」による合同研究会が開催されました。

プログラムは、領域ウェブサイトに掲載されております。詳細についてはニュースレター一次号に掲載の予定です。

<http://www.superclean-materials.org/>

3. A01&A05 研究項目合同ワークショップ

日 時： 2006 年 7 月 27 日～29 日
会 場： 那須ビューホテル（栃木県那須郡那須町湯本）
講演者： 25 名、 ポスター参加者： 25 名

この研究会は、2 次元 ^3He 系と強相関電子系に共通に現れる「スピン液体」「モット転移」「リング交換」のテーマについて話し合い、お互いの研究をよく理解することを目的としています。また、若い研究者のために、各々のテーマについて講義形式のレビュートークを行い、サマースクールの側面も持たせるつもりです。

プログラムは、領域ウェブサイトに掲載されております。

http://www.viewhotels.co.jp/nasu/annai_nvh/index.html

4. 研究成果報告会

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）

本研究領域のメンバー全員が一同に会しての研究成果報告会が、上記の日程で開催されます。詳細については領域ウェブサイト随時掲載する予定です。

<http://www.yumebutai.org/>

編集後記

おかげさまで本特定領域最初のニュースレターがようやく完成の運びとなりました。お忙しい中ご執筆いただいた皆様には厚く御礼申し上げます◆この 5 月に固体超流動のワークショップに参加するため、初めてアスペン物理学センターに滞在する機会を得た。すばらしい自然と気候のもとで、何にもじゃまされずに物理の議論ができる。30 年以上も続くこのセンターからどれだけの新しい物理が生まれたのだろうか。アメリカの懐の深さを感じずにはいられなかった◆アスペンを離れた後、東海岸のラトガース大学を訪れた。ラトガースには **Eva Andrei** 教授の研究室で 2 次元電子系の研究をするために 2 ヶ月ほど滞在したことがあり、今回は 10 年ぶりの訪問であった。10 年前にはなかったバイオサイエンスの研究棟がいくつも立ち並んでいて、新しい分野に積極的に参入する大学の姿勢が印象に残る◆一方で **Andrei** 教授や今回の訪問先の **Harry Kojima** 教授からは、アメリカでの研究費獲得の難しさをしきりに聞かされた。当たり前なことだが、アメリカでは外部研究費が得られなければその研究はストップしてしまう。研究室の維持イコール研究費獲得であり、研究費獲得のためには時宜を得た研究テーマを選ぶことが極めて重要で、そのため流行の研究に研究者が集まるという傾向はさけられない◆しかしこのような研究費獲得競争の激しさが、アメリカのサイエンス研究に活力を与えてきたことは紛れもない事実であり、何の競争もしない研究者が低迷してしまうことは、失礼ながら多くの人が証明している。日本でも競争的研究資金額は増加する一方で大学での校費はどんどん減らされており、アメリカと大差ない状況になりつつある◆自分の好きなテーマを思う存分研究して、なおかつその重要性をどれだけ世の中にアピールできるか。私にとってはこの特定領域がそれを実現する一つの端緒となるだろう。多くのことを考えさせられた今回の訪米であった。

(白浜 圭也)

News Letter Superclean Vol. 1

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：2006 年 7 月 25 日

発行者：福山 寛（領域代表：東京大学大学院理学系研究科）

〒113-0033 東京都文京区本郷 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

構成・デザイン：白浜 昌子

©2006 禁無断転載

