

# 研究室だより

## 押川研究室

物性理論研究部門 押川 正毅

2006年4月に物性研に着任してから、早いもので既に6年以上が経過した。個人的な話になるが、私が物性研に着任したときに娘がちょうど小学校に入学し、今春卒業した。また、物性研着任当初に研究室にいた東工大所属の学生さんも一人ずつ研究室を卒業していき、物性研着任後の東大所属の学生さんに次第に入れ替わっていった。東大で最初に修士課程の学生として研究室に加入した古谷峻介氏も今春博士課程を修了した。従って、物性研に着任してから研究室の学生さんもちょうど一巡入れ替わったことになる。小学生は6年間で目に見えて大きく成長し、また大学院の学生さんも5年間で研究者として大きく成長する。それに比べると自分自身は進歩がないように思えてしまうが、常に若い人達といっしょに研究することができるのは大学にいるものの特権であろう。

以下、物性研での6年間の研究室のアクティビティをいくつか抜粋して紹介する。

### ハルデン相と20年来の宿題

研究者として永遠の課題は、どのような研究テーマを設定するか、ということである。研究者にはそれぞれ専門分野や得意な手法があり、それらを活用することで研究を進展させることができる。まずは得意な手法を確立することが研究者としての第一歩となるが、常に同じ題材で研究しては発展性がなくなってしまうおそれもある。ただし、古い題材から思わぬ発展がもたらされることもある。結局、当然ながら、研究テーマの設定に一般論として正解があるわけではないだろう。

私にとって最初の研究は、修士1年のときに「物性若手夏の学校」に出席し田崎晴明氏の講義[1]に出席したことがきっかけで、量子スピン系のハルデンギャップに関連する問題に取り組んだものである。当時から残っていた疑問が、最近意外な進展があつて解決をみたのでこれについて簡単に述べてみたい。

磁性の基本的な模型である、1次元量子ハイゼンベルグ反強磁性体を考える。スピン1/2の場合、この系はギャップレスの連続的な励起状態を持ち、スピン相関関数はべき的に減衰する。ところが、このような性質は同じハミルトニアンでもスピンの半奇数の場合に限られ、スピンの整数の場合には励起スペクトルにギャップがあり、スピン相関関数が指数関数的に減少するという、当時としては驚くべき「予想」をハルデンが1981年に行った。アフレックら(Affleck-Kennedy-Lieb-Tasaki, AKLT)による厳密に解ける模型の構築など、その後の研究でハルデンの「予想」はほぼ確立し、整数スピンの場合の基底状態は「ハルデン(ギャップ)相」と呼ばれるようになった。ハルデン相は、反強磁性秩序などの秩序を持たない、「乱れた」相のようにみえる。しかし、ハルデン相は単に秩序を持たない相ではないことも認識されてきた。たとえば、1次元量子ハイゼンベルグ反強磁性体に一軸異方性を付け加えた、次のような模型を考える。

$$H = \sum_j \vec{S}_j \cdot \vec{S}_{j+1} + D(S_j^z)^2.$$

$S = 1/2$  の場合、 $D$  に比例する異方性項は定数となって意味がない。しかし、 $S \geq 1$  の場合には異方性項として意味を持つ。 $D = 0$  の場合、通常のハイゼンベルグ模型に帰着し、基底状態はハルデン相にある。一方、 $D$  が無限大の極限では、

基底状態は各サイトが  $S_z = 0$  を持つ、自明な状態となる。この 2 つの状態は、どちらも秩序を持たないように見える。しかし、 $D$  を変化させると、臨界点  $D_c - 1$  で量子相転移が起きる。この量子相転移の存在は、2 つの相が異なることを示唆している。実際、 $S = 1$  のハルデン相は、端状態とストリング秩序の 2 つの特徴を持つ。これら 2 つの特徴は、隠れた対称性の自発的破れとして統一的に理解できることがケネディと田崎によって指摘された。[2]

**However, since our hidden symmetry is always  $Z_2 \times Z_2$ , the ground states which break the hidden symmetry can be divided into only four classes. For  $S = 1$ , the fourfold degeneracy implied by hidden  $Z_2 \times Z_2$  symmetry breaking just corresponds to the fourfold degeneracy of the VBS states on a finite open chain. In contrast, for  $S > 1$ , the hidden  $Z_2 \times Z_2$  symmetry cannot completely specify each of the  $(S + 1)^2$ -fold degenerate ground states of the VBS model. This fact suggests the possibility that there is another hidden symmetry, but we still do not know any such extended symmetries.**

図 1: 私の 1992 年の論文[3]の p. 7475 から引用。  $S = 2$  のハルデン相では隠れた対称性が自発的に破れていないため、 $S > 1$  では未発見の隠れた対称性が存在しそれが破れているものと予想していた。結局そのような対称性はその後も見つからず、最近になって思わぬ形で解決した。すなわち、偶数スピンのハルデン相は自明な相と本質的に区別がつかず、従って、当時私が予想したような隠れた対称性はおそらく存在しない。

私が学生時代の 1992 年に書いた(私にとって最初の)論文[3]では、まず隠れた対称性の概念が一般の整数スピンの拡張できることを示した。ところが、この隠れた対称性はスピンの奇数のハルデン相の場合は破れているが偶数スピンの場合には破れていないこともわかった。このことから、2 つの可能性が考えられる。

- a) 偶数スピンのハルデン相は、実は自明な相と本質的に区別がつかない
- b) 偶数スピンのハルデン相も非自明な相であるが、それを特徴付ける隠れた対称性がまだ見出されていない

当時の私は、偶数スピンのハルデン相も端状態を持つ以上、a)は考え難く、おそらく b)だろうと考えてその後もときどき未発見の隠れた対称性を見つけようとしていたが、うまく行かなかった。

それから 20 年近く経過して 2009 年となっても、この問題については特に進歩は得られなかった。一方、トポロジカル絶縁体が流行のテーマとなりセミナーや研究会で良く話を聞くようになった。ある講演のイントロダクションで、2 次元のトポロジカル絶縁体の端状態が時間反転対称性の存在下でクラマースの定理によって保護される、という話があった。この話はそれ以前にも何度も聞いたはずだが、その日はふと学生時代のハルデン相の問題を思い出した。ハルデン相の端状態の話もこれと同じなのではないか? スピン  $S$  のハルデン相は、端状態としてスピン  $S/2$  を持つ。 $S$  が奇数の場合は端状態のスピンは半奇数、 $S$  が偶数の場合は端状態のスピンは整数となる。時間反転対称性のもとでは、前者の半奇数スピン端状態の縮退(の一部)はクラマースの定理によって保護される。しかし、時間反転対称性が存在しても、偶数スピンのハルデン相が持つ整数スピンの端状態を一般的に保護する機構は存在しない。そうだとすれば、学生時代にはあまり可能性がなさそうに思えた上記のシナリオ a)が成立し、スピン 2 の AKLT 状態と  $D = \infty$  の自明な相が、相転移なしに連続的につながっていても良いように思える。これを実際に示してやろうと思い、それまでさぼっていた行列積状態(Matrix Product State, MPS)の勉強をはじめた。MPS はハルデン相の研究でおなじみの AKLT 状態の一般化であるが、近年は量子情報科学にも応用され、数理的にも大きく発展した分野である。そのぶん、最近のレビューを読んで計算をフォローするのはなかなか骨が折れたが、ついに、時間反転対称性を守りつつスピン 2 の AKLT 状態と  $D = \infty$  の自明な相を断熱的に接続する経路(ハミルトニアンは極めて人工的で複雑なものとなるが)の存在を示すことができた。

これで学生時代からの宿題が一つ片付いたか、と思って喜んでいたら、ちょうどドレスデンのマックス・プランク研究所でワークショップに参加した。ドレスデンで学位を取得し、当時バークレイでポスドクをしていたポールマン(Frank Pollmann)氏と再会し、近況を話し合ったところ、実は彼らも共通する問題について研究していたことがわかった。彼らは奇数スピンと偶数スピンの差異などについては考えていなかったが、スピン 1 の系については MPS を基にか

なり進んだ知見を得ていた。それ以前に、当時 MIT のグー(Zhencheng Gu)とウェン(Xiao-Gang Wen)両氏が  $S = 1$  のハルデン相は時間反転対称性がなくともリンクに関する空間反転対称性があれば非自明な相として保護されることを指摘していたことについても、私は知らなかったのだがポールマン氏に教えてもらった。いろいろ議論するうちに、彼らと共著で論文を書くことになった。[4] ポールマン氏と会う直前に MPS の勉強をしていたことは、大いに議論の助けになった。

これら最近の研究によれば、奇数スピンのハルデン相は「対称性によって保護されたトポロジカル相」(Symmetry-Protected Topological Phase, STP)の一例であり、ハルデン相を保護する対称性としては i) 時間反転対称性 ii)  $x, y, z$  軸まわりの回転対称性( $Z_2 \times Z_2$  対称性) iii) リンクに関する空間反転対称性の 3 つがある。ハルデン相の特徴として指摘されていたストリング秩序パラメータ、あるいは端状態は完全に一般的なものではなく、iii) の空間反転対称性のみが存在して他の対称性がない場合には指標にならない。全ての場合について統一的にハルデン相を特徴付けるのはエンタングルメントスペクトルの二重縮退である。トポロジカル絶縁体も、一般的な見地からは STP の一例である。トポロジカル絶縁体の理解は相互作用のない電子系がベースになっているが、相互作用の強い系でも、対称性によって保護されたトポロジカル相が生じ得る。ハルデン相は、相互作用が本質的に重要な系における STP の例として新たな意義を獲得したことになる。

ポールマン氏との論文での他の共著者であるバーグ(Erez Berg)、ターナー(Ari Turner)両氏とは電子メールのやりとりのみで、論文を投稿した後もしばらく会う機会がなかった。ターナー氏とは 2011 年になってサンタバーバラで、バーグ氏とは 2012 年になってアスペンで初めて会う機会を得た。面識のないまま共同研究ができて論文が出せるのはインターネット時代のおかげ(昔もあったのかもしれないが、より困難だっただろう)であるが、研究がはじまるきっかけとしていわゆる face-to-face の議論が重要であることを示す一例でもあった。いずれにせよ、これら 3 人の素晴らしい若手研究者と共同研究ができたことは大変有り難いことだった。

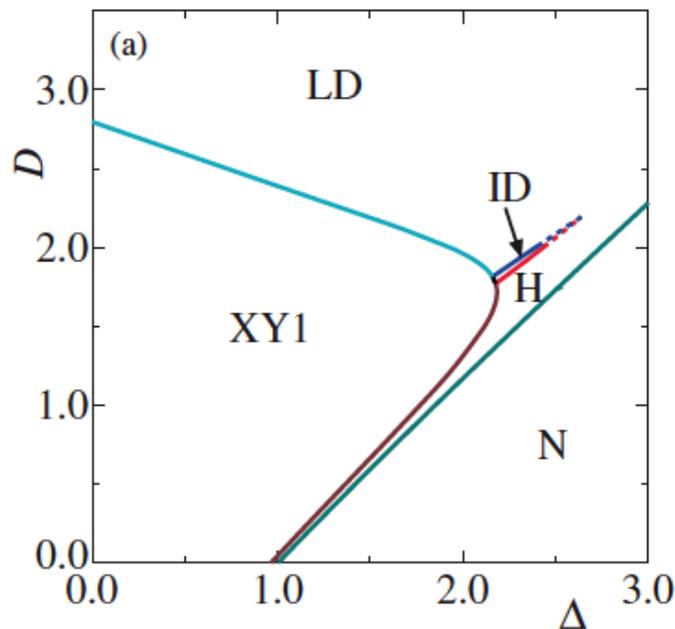


図 2  $S = 2$  の異方的ハイゼンベルグ反強磁性鎖の相図 T. Tonegawa et al., J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 043001 (2011) [5] Fig. 3 より引用。  $\Delta$  は  $XXZ$  型異方性のパラメータであり、等方的なハイゼンベルグ反強磁性鎖は  $\Delta = 1, D = 0$  に対応する。等方的なハイゼンベルグ反強磁性鎖は非常に細いハルデン相(H)に含まれるが、このハルデン相は  $D = \infty$  を含む自明な相(D)と相転移なしにつながっている。一方、 $S = 1$  のハルデン相と類似した中間層(ID)も狭い領域に出現している。

その後、我々の議論は数値計算によっても検証されている。神戸大学を定年退職され、その後移った福井工大も定年退職された利根川孝先生は今もお元気に研究に取り組んでおられるが、利根川先生にも興味を持って頂いた。利根川先生らの研究によって、特殊な模型によらずとも、一軸異方性を持つ自然な模型の中でスピン 2 のハルデン相が  $D = \infty$  の自明な相と断熱的につながっていることが示された。[5]さらに、私の 1992 年の論文で予想したが数値的にはそれまで否定されていた中間相の存在も(私の当初の予想とは異なる相図の中ではあるが)見出された。利根川先生らの研究は、厳密対角化と、岡本・野村によるレベルスペクトロスコピー法を組み合わせたものである。レベルスペクトロスコピーは強力な手法であり今まで多くの問題でその有効性が示されているが、対角化ではスピン 2 の系は最大 12 サイト程度の系しか扱えず、そのデータの解析からの結論には疑問が残るかもしれない。しかし、最近の論文[6]では、密度行列くりこみ群とレベルスペクトロスコピーの組み合わせによるより大きな系の計算によって、文献[5]の結果を支持する結論が得られている。

今から振り返ってみると、エンタングルメントスペクトルの話は別にして、時間反転対称性のもとで半奇数スピンの端状態のクラマース縮退(のみ)が保護される、ということは特に高度な理論が必要なわけではなく、1992 年の当時に気づいても良かったような気がしなくもない。そうしていればトポロジカル絶縁体と類似の構造を先んじて見出したことになるが、まったく思い至らなかった。単に自分がうかつだったと言う面もあるかもしれないが、ハルデン相の研究にはかなりの数の優れた研究者が取り組んだにもかかわらず、長年見過ごされていたのは不思議な気もする。研究に限らず発見というものはそういうもので、重要で簡単なことが意外と見過ごされやすいのかもしれない。

## 制限された空間中での液体ヘリウム 4 の超流動

先ほどの研究とは逆に、全く(少なくとも題材としては)畑違いの分野に取り組むことになった例をあげる。2008 年秋の物理学会(岩手大)で「ボースグラスの物理」というシンポジウムがあり、世話人の田中秀数氏(東工大)に量子スピン系におけるボースグラスについてのレビュー講演を依頼された。私はずっと以前に、量子スピン系  $\text{TlCuCl}_3$  における磁場誘起相転移がマグノンのボース凝縮という描像で理解できると提案したことがあった。このテーマは、その後、田中研究室でこの系のイオンをランダムに置換しボースグラス相を実現する研究に発展していた。私はボースグラス相の研究に直接関わったわけではないので当初辞退したのだが、結局講演を引き受けることになった。シンポジウムの中に、白濱圭也氏(慶応大)の講演「ナノ多孔体に閉じこめた  $^4\text{He}$  の量子相転移と局在 BEC 状態」があった。それまで液体ヘリウムについては全く手がけたことはなかったのだが、白濱氏の講演に興味を持ち考えてみることになった。ちょうど、学会直後の 10 月から、スイスからの留学生エッゲル(Thomas Eggel)氏が研究室に加入したので聞いてみたところ興味を持ってもらえたのでいっしょに研究することになった。

ナノ多孔体に閉じ込められた  $^4\text{He}$  自体は歴史のある研究テーマで、70 年代にはバイコール(Vycor)と呼ばれるガラス多孔体に閉じ込めたヘリウム 4 の研究が盛んに行われた。これがきっかけとなって、フィッシャー(Matthew P. A. Fisher)らの理論研究[7]が行われ、ボースグラス相の概念の提唱に至った。しかし、バイコールの系では実験的にはボースグラス相や量子相転移は確認されなかったようである。近年になって、白濱氏らのグループでジェルシル(Gelsil)という新しいガラス多孔体を用いた実験が行われ、圧力下での量子相転移を示す結果が得られていた。[8] この量子相転移を理論的に理解することが目標となった。ヘリウム 4 はクリーンな物質であるが、多孔体に閉じ込めた系は量子ゆらぎとランダムネスの両方の寄与により理論的には難しい問題となる。フィッシャーらの有名な論文の後にも、さまざまな理論研究が続けられてきた。

しかし、我々は(当初は多分に無知によって)3次元の多孔体に閉じ込めたヘリウム 4 を、単純に 4次元古典 XY 模型の臨界現象にマップすると実験結果とよく適合することに気づいた。多孔体中のヘリウム 4 をボースハバード模型で記述することはフィッシャーらの研究の頃から良く行われてきたが、(ランダムネスのない)ボースハバード模型では動的臨界指数  $z$  が 1 になるのはモット絶縁体相の頂点に相当する多重臨界点のみで、それ以外の点では超流動・絶縁体転移では動的臨界指数は 2 になることが知られている。このとき、系を 4次元古典 XY 模型の臨界現象にマップすることはできな

いはずである。原理的には、系の化学ポテンシャルを調節すれば多重臨界点に到達することができるが、今回考察している系では化学ポテンシャルは制御していないので、特に偶然によらなければ多重臨界点に対応する 4 次元古典 XY 普遍クラスの臨界現象は観測されないことになる。さらに、実際の多孔体中の系にはランダムネスが存在し、系の性質を支配するはずである。なぜ、実験結果が単純な 4 次元古典 XY 普遍クラスの量子臨界現象と良く一致するのだろうか。

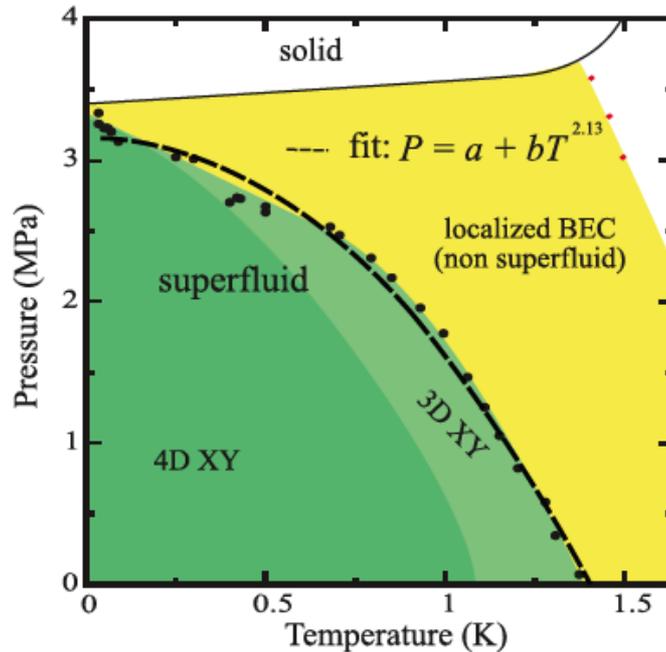


図 3 多孔体ジェルシル中に閉じ込めたヘリウム 4 の相図についての、実験と理論の比較。(9)より引用) 超流動/非超流動相の境界は、4 次元 XY 普遍クラスから導かれる  $T^2$  則とよく適合している。0.1 K 以下の極低温でずれが顕著になるのは、ランダムネスの効果と解釈できる。

この問題にはしばらく悩まされたが、次のように解決をみた。動的臨界指数が 2 になるのは、ボースハバード模型では一般に「粒子」と「ホール」の対称性が破れていることによる。上記のように多重臨界点で動的臨界指数が 1 になるのは、そこで粒子とホールの対称性が回復することによる。さて、多孔体中のヘリウム 4 は、多数の空孔の間に粒子のトンネル経路が存在するとして(ランダムな)ボースハバード模型で記述できる。このとき、それぞれの空孔がボースハバード模型のサイトに対応する。それぞれの空孔のサイズは異なるので、サイトごとに化学ポテンシャルと相互作用がランダムに変化することになる。空孔のサイズの分布はある程度実験的にわかっているため、これから推測すると、それぞれの空孔には平均して 20~30 個程度のヘリウム原子が入るが、個数の分布には数個のオーダーの幅があることになる。すると、空孔ごとに粒子とホールの対称性の破れ方は異なるため、平均としては粒子とホールの対称性はほぼ回復する。(厳密には破れはゼロにはならないが、実験的に到達不可能な極低温にならないとその効果は現れない。)このように、ランダムネスのおかげでむしろ有効理論が簡単になる。ただし、十分に低温では、4 次元 XY 模型におけるランダムネスの効果が重要になるため、臨界現象は 4 次元 XY 普遍クラスから離れていくことになる。実験結果にもその兆候が見えているが、ランダムネスの効果が見えるよりも高温側のかなり広い温度範囲の結果が 4 次元 XY 普遍クラスの量子臨界現象として理解できる、というのが我々の指摘である。

この議論の副産物として、以前のバイコールを用いた実験で量子臨界現象が観測されなかった理由も理解できた。バイコールとジェルシルは基本的には似た系であるが、孔径が異なる。バイコールの空孔の典型的な直径は約 6nm(60Å)であるのに対し、ジェルシルは約 2.5nm(25Å)である。2 倍程度の違いしかないが、まず、実際にはガラス表面は厚さ約 0.6nm のヘリウムの固体層で覆われていると考えられるため、その分を差し引いた有効的な直径は約 4 倍異なる。これは体積にすれば 60 倍程度の差になる。ボースハバード模型において、位相の量子ゆらぎをもたらすのはオンサイトの相

相互作用である。電子系のハバード模型の場合にはオンサイトの相互作用は電子間のクーロン斥力に起因するが、電氣的に中性なヘリウム 4 の場合にはヘリウムの原子間ポテンシャルが短距離では斥力であることに起因するはずである。原理的には、微視的な計算によりこれを定めることもできるだろうが、簡便に考えて空孔中の液体ヘリウムの物性がバルクのものとはほぼ同じと簡便に考えると、オンサイトの相互作用の大きさは液体ヘリウムの圧縮率に反比例し、空孔の体積に反比例する。これより、バイコールの場合はオンサイトの相互作用が 0.02 K 程度であるのに対し、ジェルシルの場合は 1.4K 程度と見積もられる。

オンサイト相互作用の大きさは量子ゆらぎが重要となる温度スケールを与えるので、バイコールの場合には、量子ゆらぎの効果を観測するには 0.02K 以下の極低温を見なくてはならないことになる。一方、ジェルシルの場合にはバルクの超流動転移温度 2.14K の少し下から量子ゆらぎが重要となり、このために実験で量子臨界現象が観測できたものと思われる。上記のように、歴史的にはバイコールの系の実験が量子臨界現象の理論の発展を大いに刺激したが、実は「古典的」な系であったようである。(ただし、これは系の量子力学的な位相の自由度が古典スピンのようにふるまうと言う意味なので、もちろん量子力学と無関係なわけではない。)

これらの結果は[9]の論文にまとめた。これをきっかけに、ヘリウム 4 の超流動に関連する別の現象にも取り組むことになった。超流動はしばしば、非対角長距離秩序、すなわち量子力学的な位相の長距離秩序と関連づけられる。しかし、非対角長距離秩序と超流動は等価ではない。この 2 つの非等価性を示す典型的な例として、ヘリウム 4 の薄膜、すなわち 2 次元系の超流動が知られている。超流動密度は、位相ひねりに対する系の剛性を表すヘリシティモジュラスに比例する。2 次元のヘリウム 4 は(位相の量子ゆらぎを無視できる範囲で)古典 2 次元 XY 模型によって記述できるが、この模型は低温で長距離秩序を持たないもののベレジンスキー・コスタリッツ・サウレス (Berezinskii-Kosterlitz-Thouless, BKT) 転移を起こし、それより低温側では相関関数がベキ的に減衰する。この低温相では、ヘリシティモジュラスが正の値を持つ。従って、超流動密度とヘリシティモジュラスの比例関係から、2 次元のヘリウム 4 は低温相では正の超流動密度を持つ超流体であることになる。さらに、理論的には BKT 転移において超流動密度が普遍的な飛びを持つことも導かれ、これに対する動的な補正とともに 1970 年代に既に実験で見事に確認されている。[10]

さきほど、液体ヘリウムの研究は全く手がけたことがなかった、と書いたが、学生時代に勉強して最も感動したことのひとつがこの 2 次元の超流動の話であった。当時よくわからぬままに読んだ素粒子理論家のポリヤコフ (Alexander M. Polyakov) の奇書(?) ”Gauge Fields and Strings” に、超流動密度とヘリシティモジュラスの比例関係の導出が載っていたことも印象的であった。ただ、今になってみると、超流動密度とヘリシティモジュラスの関係について、自分の中で完全には理解できていなくて常にあやふやなところが残っていた。自分の大学院の講義でも何度かこの関係に触れたことがあるが、偉そうに教えておきながらどうもモヤモヤするところがあった。

さて、ヘリウム 4 の 1 次元系はどうなるだろうか? 理論的には、1 次元系ではヘリシティモジュラスは有限温度(かつ熱力学的極限)でゼロになるので、上記の対応からすると 1 次元系では超流動は起こり得ないように思われる。もし私が実験家に事前に相談されていたらそう答えたかもしれないが、何ごとでもやってみるのは大切なことで、最近のいくつかの実験で 1 次元に閉じ込められたヘリウム 4 が超流動転移(少なくともそのように見えるもの)を起こすことが示されている。たとえば、谷口淳子氏・鈴木勝氏(電通大)らの実験では、1 次元細孔を持つガラス多孔体中にヘリウム 4 を満たし、捻れ振り子を用いた測定により「超流動転移」を観測している。[11]これは上記の理論的な結果と矛盾するようだが、どう理解すれば良いだろうか?

実は、当初この問題は簡単に解決できるのではないかと考えていた。というのも、1 次元系でもヘリシティモジュラスがゼロになるのは熱力学的極限(無限に長い系の極限)であって、有限の長さの系であればヘリシティモジュラスは有限温度でもゼロにならない。実験の系では長さは当然有限なので、この有限サイズ効果で理解できるのではないかと思ったのだ。ちょうどこの頃、外国人客員所員としてカザリラ (Miguel A. Cazalilla) [12] 氏が着任したので、エッゲル氏と一緒に

に議論することになった。カザリラ氏は、冷却原子系、特に1次元ポテンシャルに閉じ込めたボース凝縮体のエキスパートなので、彼の着任は非常にタイミングが良かった。議論してみるとすぐに、私が当初予想した有限サイズ効果では「転移温度」が観測値よりもかなり低くなってしまい、明らかに実験の説明ができないことがわかった。(このことは、我々が考える以前から指摘されていた。[13])そこで何か別の機構を考える必要がある。

これは動的な現象ではないかという結論には比較的早期に達したように思うが、これを具体的な理論として実現するにはかなりの労力と時間を要した。また、先に触れたように超流動の議論に良く用いられるヘリシティモジュラスとの関係はどうなっているのだろうか？ここで、昔から超流動とヘリシティモジュラスの関係について理解したような気がして実はよくわかっていなかったということに直面し、再考する必要に迫られた。(理解していなかったのは私だけなのかもしれないが、この機会にいろいろな論文や教科書を読み漁ったがクリアな説明を見つけることができなかった。)そもそも、ヘリシティモジュラスは自由エネルギーにより定義される静的な量であり、超流動は本質的に動的な現象である。これらの間の関係は決して自明ではない。議論を進めるうちに、ヘリシティモジュラスと超流動密度の間の等価性の背後には、ハミルトニアンの変容の後(十分な時間が経過すれば)系が熱平衡に達するという仮定があるということに気づいた。しかし、1次元系には多くの可積分系が存在し、これらは無限個の保存量を持つためにいくら時間が経過しても熱平衡には達しない。現実的な系では可積分性が破れており、最終的には熱平衡に達すると考えられるが、可積分系に小さな摂動が加わった系では熱平衡に達する緩和時間が異常に長いことになる。これらは、量子ダイナミクスの最近の中心的な課題と密接な関係がある。

ヘリウム4の1次元系も、有効模型である朝永・ラッティンジャー液体は可積分であり、これに壁面との相互作用による小さな摂動が加わったものとみなせる。従って、熱平衡に達する緩和時間が異常に長くなり、振動数が2kHz程度で微視的なエネルギースケールに比べ非常に小さい捻れ振子の実験でも有限周波数の(熱平衡に達しない)効果が見えることになる。これが、ヘリシティモジュラスがゼロであるにも関わらず実験で「超流動性」が観測された理由だと考えられる。一方、これはあくまでも有限周波数の効果なので、周波数をゼロに近づければ、「超流動転移」(厳密にはクロスオーバー)の温度は(周波数のべき関数として)ゼロに漸近することになる。これが我々の理論[14]の最も重要な予言であろう。具体的な計算を行うには、記憶関数の方法に基づくかなり骨の折れる計算が必要だったが、カザリラ氏とエッゲル氏が協力して遂行してくれた。この研究については、物性研の外国人客員制度がなければまとめることはできなかったように思う。

この問題については今後もさらなる実験的および理論的研究が必要であり、我々の理論が確立したと言える状況では全くない。しかし、実験に触発されて理論物理の最も基本的な概念の再検討に至ることができた点でも、自分としてはかなりの手ごたえを得られた研究だった。全く新しい分野に取り組む場合、予備知識の欠如に加え、違う分野のコミュニティとのカルチャーギャップが問題となることもあるだろう。しかし、極低温の方々には突然乱入した奇妙な理論屋を温かく受け入れて頂いて感謝している。

## 国際ワークショップ

近年の、特に理論研究の一つの流れとして、滞在型のワークショップが各地で盛んになっている。私自身いろいろところで滞在型ワークショップのお世話になっており、たとえば最初にあげたポールマン氏らとの共同研究の発端はドレスデンでの滞在型ワークショップだった。最近では、素粒子理論の大栗博司氏との共同研究[15]はアスペンでの滞在型ワークショップがきっかけだった。(この原稿も、カリフォルニア大学サンタバーバラ校カブリ理論物理学研究所の滞在型ワークショップに参加中に書いている。)

物性研でも2006年から滞在型ワークショップの開催を開始し、2008年には甲元眞人所員と私が世話人となって“Topological Aspects of Solid State Physics”を開催した。これは、2008年6月2日から22日の3週間を滞在型ワー

クショップとして物性研で開催し、その翌週 6 月 23 日から 27 日に同テーマのコンファレンスを京都大学基礎物理学研究所で開催したものである。柏と京都、そして 2 つの研究機関をまたいで開催となったこと、また海外からも多数の参加者があったこと、により担当秘書、国際交流室、および事務の方々には多大の負担をおかけした。しかし、そのぶん、内容的にはかなり充実したワークショップとなったように思う。このワークショップの一つの特徴として、海外からシニアな有名研究者だけでなく、若手研究者の参加が多かったことがある。甲元先生には残念ながら体調を崩されてワークショップ期間中には御出席頂けなかったのだが、計画段階で推薦して頂いた若手研究者は今振り返っても非常に素晴らしかったと思う。海外からの若手(その時点で学生もしくはポストドクだった)参加者をあげると、Jason Alicea, Gregory Fiete, Ribhu Kaul, Eun-Ah Kim, Michael Lawler, Mikko Mottonen, Xiaoliang Qi, Rahul Roy となる。彼らのその後の活躍はめざましく、まだ若手のうちに物性研に来てもらうことができた意義は大きいと思う。また、当時甲元研究室の助教としてワークショップの運営にも御尽力頂いた佐藤昌利氏(現・名古屋大学准教授)の研究が発展する一つのきっかけとなったらしいことは大変喜ばしく思う。佐藤氏の物性研究所所長賞学術奨励賞所感[16]より、以下引用させて頂く：

2008 年の 6 月には、物性研で、滞在型ワークショップ「Topological Aspect of Solid State Physics」が行われました。これは、非常に良いワークショップで、この当時、この分野で話題になっていたトピックがほとんど網羅されていました。また、京都大学大学院理学研究科の藤本聡さんとの共同研究をはじめ、今回受賞することになった研究は、ほとんどがこのワークショップをきっかけにして始まっています。

このワークショップは物性研の滞在型ワークショップの一貫として行われたが、テーマとしては単発で開催された。しかし、物性研でのワークショップにも参加したウィーグマン(Paul Wiegmann)氏らが世話人となって「後継」のワークショップが 2009 年に香港で、また 2011 年にトリエステで開催されている。(ウィーグマン氏が、開会のあいさつで物性研でのワークショップがきっかけとなり企画したことを述べられている。)これも、このワークショップが好評で国際的にもインパクトを与えた一つの証拠になるかと思われる。



図 4 2008 年 6 月に開催した滞在型ワークショップ“Topological Aspects of Solid State Physics”より。物性研での滞在型ワークショップ期間は、講演は 1 日 2 件程度にとどめ、写真にあるようなインフォーマルな議論の促進を主眼とした。

上記の他にも、2007 年には国際ワークショップ “New Developments of ESR in Strongly Correlated Systems” および “Physics and Mathematics of Interacting Quantum Systems in Low Dimensions” を、また 2010 年には物性研の隣にできた数物連携宇宙研究機構(IPMU)との共催で “Condensed Matter Physics Meets High Energy Physics”を開催した。

これらも好評のうちに終了したが、紙面の関係で詳細は省略する。個人的に残念なのは、自分が世話人になったこれらのワークショップでは企画に精一杯であり科学的な議論をする余裕がなく、それをきっかけに自分自身の研究が発展したということはあまりないことである。おそらくこれは私のキャパシティが小さいため世話人と研究が両立できていないということなのだろうが、日頃いろいろなワークショップに大変お世話になっているので時々世話人をしてコミュニティに貢献せよということだと納得することにする。

## おわりに

物性研で行った研究も多岐にわたるため、本稿ではいろいろな意味で対照的な 2 つの研究トピックスに限って紹介させて頂いた。ところで、この 6 年間の物性物理の大きな流れとして、トポロジカル絶縁体とそれに関連する物理の興隆があげられるだろう。トポロジカル絶縁体の概念を確立したケーンとメレの有名な論文の出版が 2005 年だったので、ちょうど私が物性研に着任する頃からこの分野の急速な発展が始まったことになる。自分は分野的に近いところにも関わらず、いまのところトポロジカル絶縁体の物理の発展にあまり貢献したとは言えない。このことは残念でもあるが、物性研のスタッフには既に流行となったテーマに乗って成果を挙げるより、新しい潮流を作り出すことが期待されているのだと理解している。これからトポロジカル絶縁体に匹敵する、あるいはそれを超える何かを見いだせるかどうかはもちろん定かではないが、新たな物理を常に目指していきたい。

物性研にしばらく勤めてみて感じることは、やはり物性研は非常に恵まれた環境だということである。たとえば、前任地では海外から招聘するためにビザが必要なとき自分で品川の入国管理局まで行って行列に並んでビザを取った記憶がある(今は違うのかもしれない)が、物性研では国際交流室などのサポートが非常に充実している。このような素晴らしい環境に恥じないように精進したい。

物性研の重要な機能として、若手の育成もあげられる。幸い、最初の助教として東北大学から大久保潤氏という優秀な研究者を迎えることができた。大久保氏はもともとネットワークの統計力学の研究を行っていたが、物性研では量子多体系の技法を確率過程に応用する新しい手法を応用し、在職 3 年で京都大学に栄転した。こちらとしてはもう少し頂いて一緒に研究したかったような気もするが、喜ばしいことだった。その間、高橋實研究室の助手だった城石正弘氏にも 1 年間だけであるが研究室にいて頂く有り難い機会を得た。その後も、2011 年度には京都大学から多田靖啓氏に来て頂くことができ、今後が楽しみである。研究員・学生についても、いろいろなところから優秀な方に来て頂き、活発に研究してくれた。本稿で個々の業績に触れられないのは申し訳ないが、物性研での 6 年間のうちに(東工大所属を含め)学位取得または転出した方々のリストをあげておきたい。(敬称略)

客員所員：田仲由喜夫、Miguel A. Cazalilla

助教：城石正弘、大久保潤

博士研究員：Chyh-Hong Chern, Wei-Feng Tsai, 島田悠彦

共同利用研究員・技術補佐員：佐藤純、中村正明、古谷峻介

博士課程修了：古川俊輔、得能光行、Thomas Eggel、古谷峻介、高吉慎太郎

修士課程修了：石川陽平、三田村陽平、小野友也、平澤梨良、古谷峻介、貝沼稔夫、熊野裕太

学部修了：Sungbin Lee

最後になるが、研究室の秘書として大変お世話になった辻淳子さん、羽部なおみさんをはじめ、理論系研究室秘書、国際交流室、事務の皆さんに日頃の研究活動を支えて頂いていることについて感謝したい。また、上田前所長、家現所長、物性理論研究部門の皆さんをはじめ、所内外で様々な形でお世話になった方々に御礼申し上げる。

## 参考文献

- [1] 田崎晴明、物性研究 **58**(2), 121 (1992).
- [2] T. Kennedy and H. Tasaki, Phys. Rev. B **45**, 304 (1992).
- [3] M. Oshikawa, J. Phys.: Condens. Matter **4**, 7469 (1992).
- [4] F. Pollmann, A. M. Turner, E. Berg and M. Oshikawa, Phys. Rev. B **81**, 064439 (2010); F. Pollmann, E. Berg, A. M. Turner and M. Oshikawa, Phys. Rev. B **85**, 075125 (2012).
- [5] T. Tonegawa, K. Okamoto, H. Nakano, T. Sakai, K. Nomura, and M. Kaburagi, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 043001 (2011).
- [6] Y.-C. Tzeng, Phys. Rev. B **86**, 024403 (2012).
- [7] M. P. A. Fisher, P. B. Weichman, G. Grinstein, and D. S. Fisher, Phys. Rev. B **40**, 546 (1989).
- [8] K. Yamamoto, Y. Shibayama, and K. Shirahama, Phys. Rev. Lett. **100**, 195301 (2008).
- [9] T. Eggel, M. Oshikawa, and K. Shirahama, Phys. Rev. B **84**, 020515(R) (2011).
- [10] D. J. Bishop and J. D. Reppy, Phys. Rev. Lett. **40**, 1727 (1978).
- [11] J. Taniguchi, Y. Aoki, and M. Suzuki, Phys. Rev. B **82**, 104509 (2010); J. Taniguchi, R. Fujii, and M. Suzuki, Phys. Rev. B **84**, 134511 (2011).
- [12] 実は本来のスペイン語の発音はカタカナでは「カザリヤ」に近いそうだが、ここではこれまでの物性研の刊行物での表記にあわせて「カザリラ」とする。
- [13] K. Yamashita and D. S. Hirashima, Phys. Rev. B **79**, 014501 (2009).
- [14] T. Eggel, M. A. Cazalilla, and M. Oshikawa, Phys. Rev. Lett. **107**, 275302 (2011).
- [15] H. Ooguri and M. Oshikawa, Phys. Rev. Lett. **108**, 161803 (2012).
- [16] 佐藤昌利、物性研だより **51**(2), 19 (2011).