

物性研だより

第41巻
第6号

2002年3月

目 1 物性研に着任して 森 初果

3 電磁濃縮法の進展 三浦 登

次 12 物性研究所ISSPワークショップ報告

○「重い電子化合物CeTIn₅の新しい超伝導状態」

○「量子ホール系の新展開」

53 物性研究所談話会

物性研ニュース

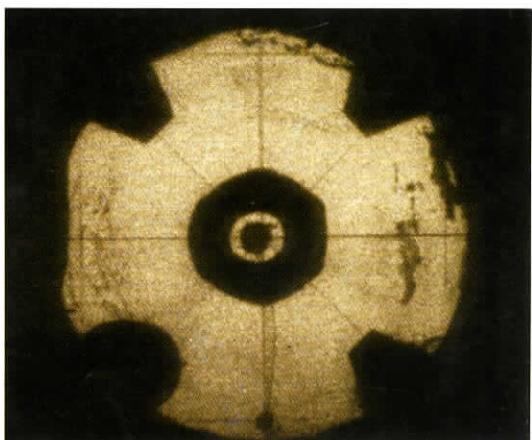
58 ○人事異動

59 ○テクニカル・レポート 新刊リスト

60 ○物性研だより第41巻目録（第1号～第6号）

編集後記

ライナーの運動の
高速度写真



東京大学物性研究所

ISSN 0385-9843

物性研に着任して

新物質科学研究部門 森 初果

物性研の新物質科学研究部門に昨年9月に着任致しました。12月初めに前職場（（財）超電導工学研究所—東京都江東区）から、一緒に研究をしている学生さん3人と実験装置の移転を完了させたので、それからちょうど3ヶ月経ちます。（平成14年3月7日現在）いろいろな方々のご支援をいただいて、やっと物質開発とその評価ができる基礎体制ができつつあります。

物性研には13年前に、凝縮系物性部門の斎藤軍治研究室の文部技官として3年間お世話になりました。そのころは有機超電導体開発の発展途上期にあたっており、欧米ばかりでなく日本でも超電導が開発され始めた良い時代で、私達も $T_c=10K$ の有機超電導体を発見して研究の楽しさを十分に味わせていただきました。六本木の実験棟4階ばかりでなく、地下から6階まで研究及び課外活動を通じてたくさんの方々と知り合いになることができ、その方々と共同研究もさせていただきました。現在でも“浦山さん”（旧姓）で呼んでいただき、今回の立ち上げでは有形無形のご援助をいただいております。柏の葉の建物は六本木に比べて実験スペースが格段に広くなり、その満足度は非常に高いのですが、研究室間でワイワイガヤガヤと交流する機会は心してもたなければと思っております。

斎藤先生が京都大学に転出される1年前に、縁あって（財）超電導工学研究所の基礎部門に移り、平成元年から12年半在籍しました。超工研は1986年の酸化物超電導ファイバーを受けて1987年に10兆円超電導産業創出のために設立された通商産業省下の財團法人の研究所です。所長は田中昭二先生で、“室温超電導は有機しかない”という理念の下で、“有機超電導体の開発と評価”をテーマに自由に研究させていただきました。部門内では酸化物超電導機構解明を目指す実験物理屋さんに囲まれて、別の角度から有機電導体の面白さを味わうことができたと思います。

物理と化学の境界は我々の分子性導体の分野でもブロードになってきて、物理学会の第7領域と化学会の物理・有機化学セッションの両方をかけもちする研究者も増えています。化学と物理では、使うボキャブラリーの違い（たとえば電荷分離（化学）、電荷整列（物理））もありますが、やはり何を面白いと思うかというところで、感性に響くポイントに決定的な“ずれ”があります。この異差は譲ることなく今後も大切にしていきたいと思います。

物質開発を行うのにあたって、たとえば“化学的負圧をかけてるために・・・”、“局在・遍歴電子共存系で相互作用をもたらせるために・・・”といつも目的をもって研究を始めるのですが、物質を作り、そのキャラクタリゼーションをするうちに違う面白さに気がついて目的が変わってしまうことがあります。このような人間の思いを遥かに越えた自然の大きさや神秘性に取付かれて研究生活が続いてきました。すべて結論までの過程を思考し尽くして研究を始める方からみれば思慮が浅く見えるでしょうが、物質開発途上で面白いものを見逃さない心意気で、化学的物質探索のチャネルは持とうと思います。有機物は分子が単位ですので、分子に個性を導入することが可能で、分子集団（固体）

になった時その個性が電子状態に生かされる物質を作りたいと思っています。赴任が決まってから、まずは広い意味での水素結合的相互作用を分子間にもたせ固体物性に反映させるために、ソフトおよびハードな塩基及び酸となる官能基をもつ新しいモレキュールの合成をスタートしています。また一方、分子間は緩いファンデルワールス結合ですので、外場でそれぞれの分子が自由度をもって応答し、それが固体物性にどう繋がるかも見ていきたいと思っております。

前職場では物理屋さんに囲まれていたので、物理の方に理解していただけるような目標で物質開発をする必要にも迫られて、電子相図を作るような探索や、バンドフィリングなどのキーワードを中心とした物理的探索も新たに試み、いくつかの仕事をすることができました。これも興味深い探索なので、物質を理解するためにも続けていきたいと考えております。

気をつけて取り扱わなければ傷ついてしまい、冷却、加圧も配慮しなければ割れてしまう程華奢な有機単結晶ではありますが、一筋縄ではない（色々なパラメーターが関与する）系で、無機物とは異なる独特な味わいがあります。この楽しさは関与した者でなければ味わえないので、物性研内では非分子性結晶も物性研究していただけるよう、精進していきたいと思っております。

最後に、“女性で初の所員として頑張ってください”と物性研で初めてお会いする先生方には声をかけていただきましたが、新物質科学研究部門の6人の先生方とは旧知の間柄なので私の素性も割れており、本人もあまり意識せずにこれまできたように思います。物性研の方々は世間一般に比べると非常にフェアで、物事の本質で良否を判断すると感じております。次の世代の女性の活躍にプラスになれるよう、このすばらしい研究環境の中で力を尽くしたいと思っておりますので、よろしくお願ひ申し上げます。

電磁濃縮法の進展

—世界最強磁場における物性の探索—

極限環境物性研究部門 三浦 登

1. はじめに

当研究室では超強磁場極限で発現する新しい現象の発見を目指して、超強磁場の発生技術の開発とその下での物性研究を行ってきた。六本木キャンパスで開発してきた電磁濃縮法、一巻きコイル法、非破壊型長時間パルスマグネットの3種類の磁場発生装置は柏移転に伴いそのほとんどが更新されたが、現在までにこれらの立ち上げはほぼ完了し、各施設は所定の性能を発揮し始めた。更新の際の装置設計の改良により、発生し得る最高磁場、使い易さなど、その性能は六本木時代に比べ大幅に向上了した。本稿では上記3種類の超強磁場装置のうち、最大の規模をもち最高の磁場を発生できる電磁濃縮法の最近の進展について報告したい。

電磁濃縮法は室内で超強磁場を発生するもっとも強力な方法である。超強磁場の発生法としては、古くから爆縮法が知られている。現在でも爆縮法は最高の磁場を発生する手段である。爆縮法では磁束の濃縮を行うために爆薬を用いる。したがって破壊力が非常に大きく、実験は人里離れた地域で屋外の実験場で行う必要がある。また実験を頻繁に繰り返し行うことには困難がある。これらは物性測定などへの応用にはきわめて不都合な点である。これに対して電磁濃縮法はエネルギーの変換効率が高く、破壊の程度は爆縮法に比べて遙かに小さい。そのため室内で実験を行うことができ、実験の繰り返しも爆縮法に比べると比較的容易であるので物性研究には非常に適しているということができる。我々は六本木時代に電磁濃縮法によって550 Tに及ぶ超強磁場を発生することに成功し、これを用いて各種の物質についての実験において多くの興味深い現象を見出してきた[1]。柏の新しい装置では、いくつかの改良を行うことにより最近、最高で622Tに及ぶ磁場が得られるようになった[2]。これは爆縮法で発生される1000 Tを越える磁場には及ばないが、実験室内で発生される磁場として世界最高の磁場である。また実際の物性測定に使える磁場としては、爆縮法と比べてあまり遜色のない強さである。このような新施設による磁場を用い、磁性体、半導体、低次元電子系、超伝導体、半金属、有機伝導体などについての実験が開始されている。

2. 電磁濃縮法の問題点と改良

はじめに電磁濃縮法による超強磁場発生技術の最近の進展について紹介しよう。図1は我々が電磁濃縮法で使っている一次コイルとライナー（銅リング）の写真である。一次コイルに大電流(4.5 MA)を流すとライナーに一次コイルによる磁場を遮蔽するように逆向きに電流が誘導され、これによってライナーが内側に加速され、初期磁束を濃縮する。得られる磁場の強さはライナーの内径がどこまで減少して磁束を圧縮できるかによって決まる。磁束が濃縮されてライナー内部の磁場が非常に強くなると、内側から外側に向かうマクスウェル応力が大きくなり、ライナーの内側に向かう運動を減速し、

ついにはライナーの運動は折り返して外側に向かうようになる。このようなライナーの運動の折り返しをターンアラウンドとよんでいる。ターンアラウンドが起こると、磁場はライナーの内径が最小値をとるときに最大になり、それ以降は減少してしまう。ターンアラウンドがライナーの内径が十分小さくなるまで起こらないようにするために、ライナーの速度をできるだけ速くする必要がある。

ライナーの速度を速くする必要性にはもう一つの理由がある。超強磁場がライナーの内側に成長していくと、ライナーの金属内には磁気圧によって内側から外側に向かう衝撃波が生じる。この衝撃波に乗って金属の物質は内側から外側に向かって流れ出す。流れ出す速度は粒子速度とよばれるが、ライナーが収縮して磁束を濃縮するためにはライナーの収縮速度が粒子速度よりも速くなければならぬ [3]。粒子速度はライナーの材質と磁場で決まる。たとえば物性研究所で用いているような銅のライナーの場合には、この速度は 100 T では 120 m/s、200 T では 410 m/s、500 T では 1.8 km/s、700 T では 2.9 km/s となる。したがってある磁場を得ようとする場合にはライナーの速度は磁場で決まるこれらの値よりも速くする必要がある。ライナーの速度は一次コイルに流す一次電流の立ち上がり速度による。そこで六本木の時代からライナーの速度を速くするようなパラメータを探求し [4]、種々の技術開発の結果、550 T の超強磁場が得られた [5]。

柏の新施設ではより速い電流の立ち上がりを実現するために、コンデンサーバンクとコイルをつなぐケーブルの数を六本木のときの 2 倍の 480 本に増やすなどして電源の残留インピーダンスの減少に努めた。その結果一次コイルの直前までの電源残留インダクタンス、残留抵抗を大きく減らすことができた。これによって一次電流の立ち上がり時間は短縮され、一次電流の絶対値も増大した。

しかしながらライナーの速度を速くしていくと、困難な問題が生じることが明らかとなってきた。それは一次コイルに不可欠な電流の出入り口の存在である。図 1、図 2 (a) にみられるように一次コイルには 2-4 mm の電流の出入り口のためのギャップ(feed gap)がある。ギャップの近くでは一次電流がつくる磁場は他の部分に比べて小さく、磁場の分布はギャップのないときに期待される円筒対称からずれたものになってしまう。そのためライナーが加速される際、ギャップ付近の運動が遅れ、ギャップ付近には図 2(c) のような突起部が生じる。そしてライナーの重心の位置も僅かながらコイルの中心からずれる。このような効果をフィードギャップ効果とよんでいる。フィードギャップ効果はライナーの径がまだあまり小さくなっていない初期の段階ではそれほど顕著ではないが、次第に成長し、図 2 (c) に示される段階ではライナーの形状は円筒形からかなりずれてくる。フィードギャップ効果があると、最大磁場の得られる前に磁場プローブや試料が破壊されてしまう。さらにライナーの突起部からは放電が起こったり、プラズマジェットが飛び出したりしてこれも試料を破壊する原因となる。フィードギャップ効果は電磁濃縮法の実験を始めた当初から認識されていたが、ライナーの速度が速くなるにつれ顕著となり、磁場の最大値を制限する主要な要素となる。一方フィードギャップは電磁濃縮法には不可欠なものなので、これをいかに解決するかが大きな問題であった。

そこで、フィードギャップ効果を抑制するために考案されたのがフィードギャップ・コンペンセータである。コンペンセータは図 2 (b) のように厚肉 (14.6mm) の銅の円筒にスリットを入れて作製した 6 枚のブロックから成る。これを一次コイルとライナーの間に挿入すると、一次電流が流れた際、

ブロックの表面には渦電流が流れブロックの材料内には磁場は浸入しないが、ブロックとライナーの間には磁場が伝達されるので、ライナーはコンペンセータがないときと同様にマクスウェル応力によって、押し縮められる。コンペンセータは、ちょうど Flux concentrator としての役割を果たすのである。フィードギャップに相当するギャップは 6 回対称に配置した 6 個のスリットとなるので、対称性は改善され、フィードギャップの影響を大幅に減少することが出来る。一次電流によって磁場の生じる空間が若干増し、ブロック内の電流によるジュール損失のために、ライナーの加速の効率は多少減少するが、その影響はそれほど大きくはない。こうしてライナーの変形の対称性は図 2 (d) に示すように、非常に改善された。スリットが 6 個あることを反映してライナーが正六角形の形状に変形していることがわかる。図 2(e) は変形の様子を連続的に捉えた高速度写真である。フィードギャップ効果による放電もかなり小さくなっていることがわかる。こうして得られるピーク磁場のばらつきが減少し、ピーク磁場の絶対値が上昇した [2]。

図 3 は磁場と電流の波形をプロットしたものである。少し異なる位置においていた 2 つのプローブによる磁場の信号がピーク付近までよく一致し、このことは磁場測定の精度の高さを示している。このときの最高磁場は 622 T に達し、これが現在までの物性研究所における最高磁場である [2]。1970 年代始めに物性研究所の超強磁場プロジェクトが開始されてから現在までの最高磁場の推移を図 4 に示す。新しい装置の導入や何らかの新しい技術開発を行う度に最高磁場が上昇してきたが、今回の柏移転でも施設更新による大きな成果が得られたといえる。622 T という磁場は非破壊的なパルスマグネットによって現在得られている磁場よりも遙かに高く、一巻きコイル法によって得られる磁場よりも数倍高い。爆縮法では 1000 T を越える磁場が発生されているが、物性測定に使える磁場範囲はこれよりかなり低くなる。したがって物性研究所の電磁濃縮法による 600 T を越える磁場は、室内で発生できる磁場として、また精密な物性測定に応用できる磁場として世界最高の磁場ということができる。

ブラックスコンペニセータを用いることによって得られたもう一つの興味ある成果は、ライナーのターンアラウンド現象が直接観測できたことである。磁場が最高値に達したところでライナーの運動が折り返すというターンアラウンドが現れることは、理論的にはよく分かっていることであり、また磁場の波形がピークをとった後に減少し始める現象は多くの場合に観測されていた。しかし高速度写真によって直接観測されたことはかつてなかった。今回の実験でコンペニセータによってライナーの変形の対称性が増したことにより、図 2(e) のように内径がいったん小さくなった後に増加を始めるという現象がみられるようになった。高速度写真から得られたライナーの半径の時間変化を図 5 に示す。これはターンアラウンド現象を直接に見た最初のデータである。ターンアラウンドが観測できるということは、磁場のピーク値が、プローブがライナーの衝突によって破壊されることによって決まるのではなく、磁場濃縮が最後まで行われていることを示すものである。すなわち実験条件で決まる最高磁場が実際に測定されているということができる。この

図1 電磁濃縮法に用いる一次コイルとライナー

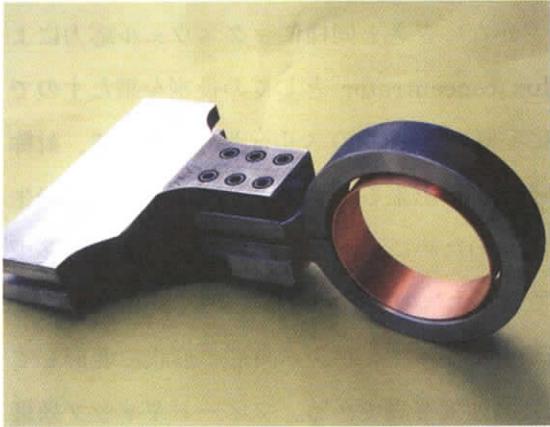
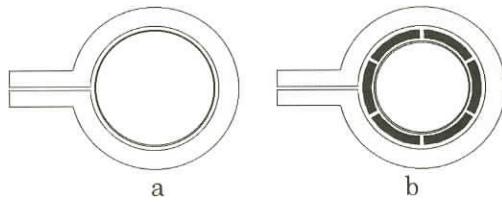
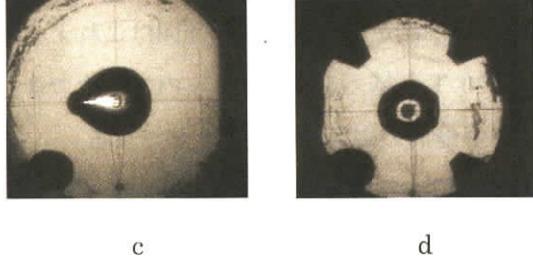


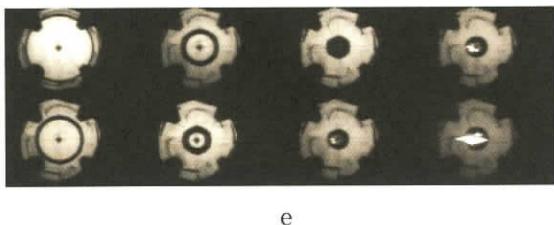
図2 フィードギャップコンペニセータ



(a) コンペニセータがないときの一次コイルとライナー
(b) 一次コイルとライナーの間にフィードギャップコンペニセータを入れた配置



(c) コンペニセータがないときのライナーの変形の高速度写真。時間は一次電流スタート後 53.36 μs。
(d) コンペニセータを入れたときのライナーの変形の高速度写真。時間は一次電流スタート後 44.74 μs。



(e) コンペニセータを入れたときのライナーの変形を連続的に記録した高速度写真。各駒は左上から右下に向かって一次電流スタート後 24.1、34.1、39.1、43.1、46.1、48.1、49.1、50.09 μs の瞬間を捉えている。

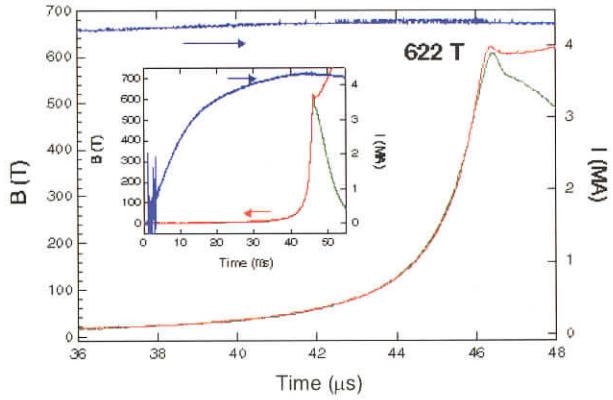


図3 磁場と電流の波形。2つの磁場プローブで測定されたグラフはほとんど一致している。室内において発生された磁場としては世界最高の 622 T が得られた。

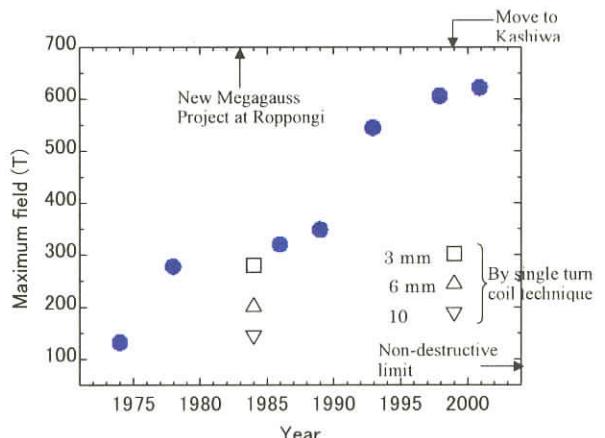


図4 物性研究所において電磁濃縮法（青丸点）と一巻きコイル法（白抜きの点）によって発生された超強磁場最大値の推移。一巻きコイル法については、コイルの内径によって最大磁場が異なるので、代表的な内径値についてのデータが示してある。

3. 超強磁場下での物性研究

数 100 T におよぶ超強磁場は物質中の電子の状態を極端に変えるために多くの興味深い研究を可能にする。現在は柏移転に伴い更新された装置の立ち上げと上記のような磁場発生技術の改良がほぼ完了した段階であり、本格的な物性研究が行われるのはこれからであるが、ここで現在行っている研究の中からいくつかの例を以下に示そう。

図 5 は GaAs/AlAs 量子井戸において磁場を井戸層に垂直に加えたときの磁気光吸収のスペクトルである。ストリークカメラを用いると、このような連続スペクトルを 1 回のパルス磁場下で測定することができる。もっとも低いエネルギーの励起子吸収線の他、多数のランダウ準位間の遷移による吸収線がみられている。各吸収線が成長、消滅、分裂、ブロードニングなどの興味深い振る舞いを示しているが、注目すべきことは励起子吸収線が 240 T 付近で不連続的な変化を示していることである。我々はこれを量子井戸の中の 2 次元的励起子が 3 次元的励起子に移行する次元クロスオーバーのためではないかと考えている。励起子の波動関数は磁場を加えると磁場に垂直な面内でその広がりが縮むことが知られている。これが励起子エネルギーの反磁性シフトの起源となっており、比較的弱磁場領域でもすでによく知られたことである。超強磁場領域で特徴的なことは、波動関数は磁場と平行な面内でも縮むことである。磁場を層に垂直に加えたときに、磁場が十分に強くなると励起子の波動関数の広がりが井戸層幅よりも小さくなり、2 次元—3 次元のクロスオーバーが起こると考えられるのである。

量子井戸の中で励起子は負の電荷をもつ電子と正の電荷をもつ正孔が束縛状態をつくったものであるという点で、水素原子に類似している。したがって超強磁場中でのこのような励起子状態の問題は、超強磁場中の水素原子という、非常に基礎的な問題と類似しており、古くから関心を集めてきた。特に 10^8 T という地上では実現し得ないような超強磁場が存在していると考えられている中性子星とよばれる天体の表面付近にある水素原子の問題は興味深い。上述のように磁場と平行方向にも波動関数が収縮するような超強磁場下では、水素原子が磁場方向に並んだ 1 次元的な H_n 分子をつくるといわれている。さらに磁場が強くなるとこの H_n 分子の 1 次元鎖が平行に並び、水素原子の 3 次元結晶ができると考えられる。中性星の上では実際にこのような状態が実現していると考えられている。我々の磁場 6×10^2 T は中性子星の磁場 10^8 T に比べまだ数桁低いが、物質中では電子や正孔の有効質量 m^* が自由電子質量 m_0 に比べて小さく、また電子・正孔間のクーロン引力が誘電率 κ によって遮蔽されるので、磁場の効果は有効的に因子 $[(m_0/m^*)\kappa]^2$ だけ増強される。そのために現在の磁場はちょうど中性子星における磁場に匹敵し、その中の状態が調べられると期待される。図 5 のデータ自身は六本木時代に得られていたものであるが、超強磁場中の励起子については、ボーズ凝縮の実現や分数量子ホール状態の関連した現象などが興味ある分野であり、今後さらに研究を続けたいと考えている。

図 6 は希薄磁性半導体 CdMnTe における σ^+ 円偏光に対する磁気光吸収のスペクトルである [6]。励起子の吸収線 X_1 、 X_2 はそれぞれ価電子帯 (J, J_z) = (3/2, -3/2) および (3/2, -1/2) から伝導帯 (1/2, -1/2) および (1/2, 1/2) への遷移に伴う励起子線である。価電子帯の磁性イオンの磁化を反映した特有の振る舞いを示しており、これから電子、正孔の磁性イオンとの交換相互作用についての情報を得ることができる。150 T 以上の強磁場では、励起子線よりも低エネルギー側に非常に強度の小さい 2 本の吸収線 L_1 、 L_2 がみられる。このラインの磁場依存性はあまり大きくなないことから、これらは Mn イオンに関連した電子遷移に対応したものと考えられる。この遷移の詳細はまだ明らかではないが、150 T 以上の強

磁場では正孔の磁場に垂直な面内のサイクロトロン半径は約 20 Å となり、Mn イオン間の平均距離と同程度になる。そのため Mn イオンに束縛された正孔の遷移が L₁, L₂ の起源の候補として考えられる。

図 7 は種々の半導体試料におけるサイクロトロン共鳴のデータである。サイクロトロン共鳴は、超強磁場下での測定法としてはもっとも容易なもの一つである。希薄磁性半導体 CdFeS, InMnAs, ワイドギャップ半導体として注目を集めている GaN, ZnO などについて、それぞれ興味深い結果が得られている [7]。

上で述べたように、可視域、赤外域の光学的測定は現在では非常に高い精度、S/N 比で行うことができるが、これに比べると電気的測定、磁気的測定はその実験的な困難さの度合いが桁違いに大きい。磁場の時間変化が非常に大きいことからリード線に誘導される電圧が極度に高くなるからである。しかしながら磁場によって誘起される種々の相転移を観測するためには、これらの測定を行うことが是非必要である。電気伝導の測定については、我々はこれまでにいろいろな方法を開発してきた。試料に電極を付けて直流や交流のバイアス電流を用いた普通の伝導測定を改良した直接法 [8, 9] や、電極を付けずに試料の両側にコイルをおき、AC 電流による AC 磁束の透過を測定する渦電流法 [8]、トランスマッショントリップラインを用いてマイクロ波の透過を測定するストリップライン法 [11]、遠赤外域のストリップラインとレーザーを用いて反射を測定する遠赤外反射法 [12]、遠赤外光透過を測定する遠赤外透過法 [13] などである。これらは一巻きコイル法によるメガガウス領域で用いられてある程度の成功を収め、種々の物質についての測定についての有意義な結果が得られた。上記の 600 T 級超強磁場でもこれらの方法を試みつつある。

図 8 は酸化物高温超伝導体 YBa₂Cu₃O_{7-d} について渦電流法で測定した磁気抵抗のデータである。磁場を c 軸に垂直に加えた場合 (B ⊥ c) のものである。磁場を c 軸に平行に加えたとき (B // c) には直接法によって、超伝導相図が従来の超伝導体のように WHH 理論によるグラフによく合うことや、T_c 以下の温度において磁場で超伝導を壊したときの常伝導抵抗の温度依存性が金属的な振る舞いを示すことがすでに見出されている [7]。B ⊥ c の場合には、これまでの測定によれば、相図は WHH 理論からはかなりずれたものになり、また T = 0 での H_{c2} が Pauli 極限を超えるなどの特異な振る舞いを示すことが見出されている [14, 15]。磁場を加えたときの状態が FFLO 状態 [16] をとっていることも考えられ、超強磁場における測定に興味がもたれる。渦電流法による測定は、磁場による超伝導—常伝導転移が明瞭に観測されるのでこのような目的には適している。250 T 付近までは、転移を反映した信号がみられていることがわかる。今後さらに詳細な実験を続けることによって、転移磁場の温度依存性を明らかにしたいと考えている。

図 9 は長田研究室と共同で直接法 (AC 電流) によって測定したグラファイトの磁気抵抗の測定結果である。電極をつけた試料を用いた測定であるにも拘わらず 200 T における磁場下での結果が得られている。グラファイトは低温・強磁場下で磁場誘起電荷密度波による電子相転移が起こることで知られている [8, 12]。より強磁場では、さらに新しい形の相転移が起こると期待されている。データは弱磁場領域で長時間パルス磁場で得られている磁気抵抗曲線をよく再現し、さらに 65 T, 125 T 付近で何らかの相転移によると思われる抵抗の急激な変化が見られている。詳細についてはさらに実験が必要であるが、このように磁気抵抗測定が電磁濃縮法磁場においてもいろいろな物質において可能になり始めたことは非常に明るい期待がもたれるところである。有機伝導体 TMTSF 塩、BEDT-TTF 塩な

どは低温・強磁場下で多くの電子相転移を示すことで知られているが、これらについても測定が始まっている。

以上に柏新キャンパスにおける電磁濃縮法による超強磁場発生技術の最近の進展とその下での物性測定について述べてきたが、数 100T の領域での物性研究は、物性研究所の研究を除けば世界でもほとんど未開拓の分野である。新設備の立ち上げがほぼ完成して収穫期を迎えた今、その下での物性への新たな興味は尽きない。国内外の研究者の方々にも有意義な研究に大いに利用していただきたいと願っている。

最後に、特に上述の電磁濃縮法装置の建設と物性測定技術の開発にご尽力いただいた当研究室の松田康弘助手、内田和人技官、池田悟技官の諸氏、長田俊人所員と研究室の方々に厚く感謝したい。

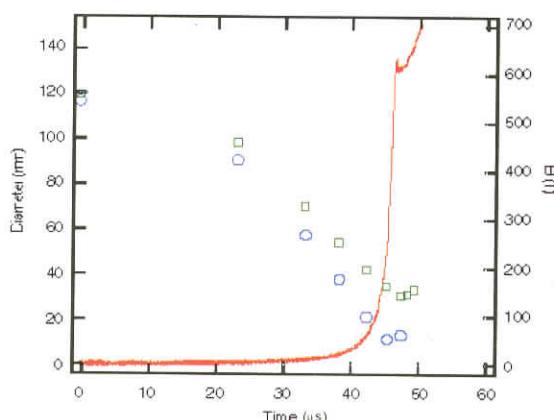


図5 ライナーの運動と磁場波形。測定点はライナーの内径と外形の時間変化を示す。

ライナーの内径、磁場の値とともにターンアラウンド現象を示している。

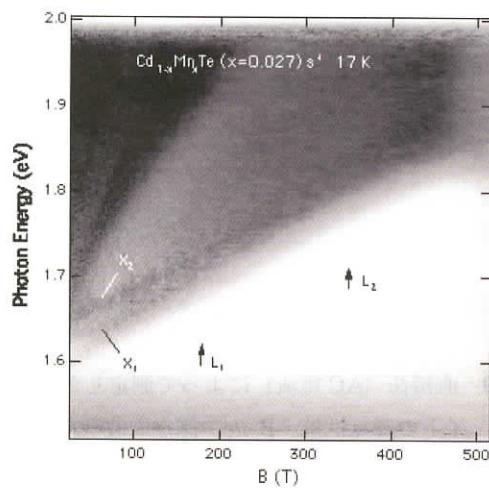


図7 Cd_{1-x}Mn_xTe (x= 0.027) における磁気光吸收。

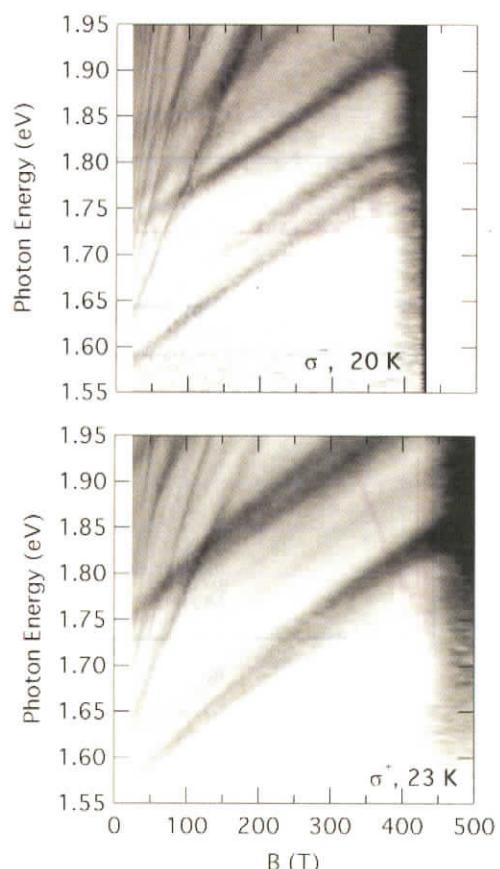


図6 GaAs/AlAs 量子井戸における磁気光吸収スペクトル。ストリーカカメラで測定したもの。井戸層の厚さは GaAs 層 9.0 nm, AlAs 層 5.0 nm。
上図は σ^- 円偏光、温度 20K、下図は σ^+ 円偏光、温度 23K のスペクトル。

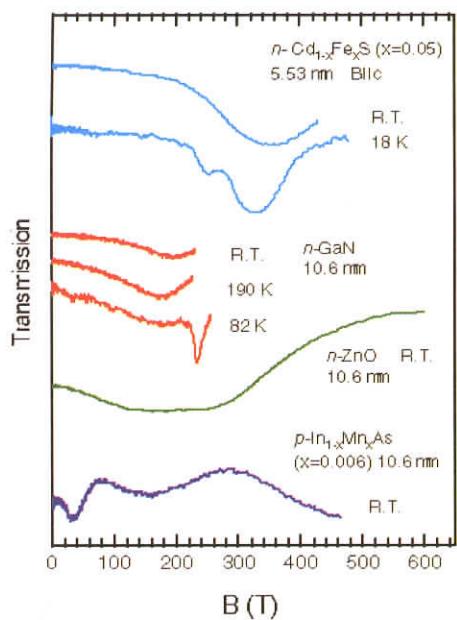


図 8 種々の半導体におけるサイクロトロン共鳴スペクトル。
物質名、測定波長、温度を各グラフの右に示す。

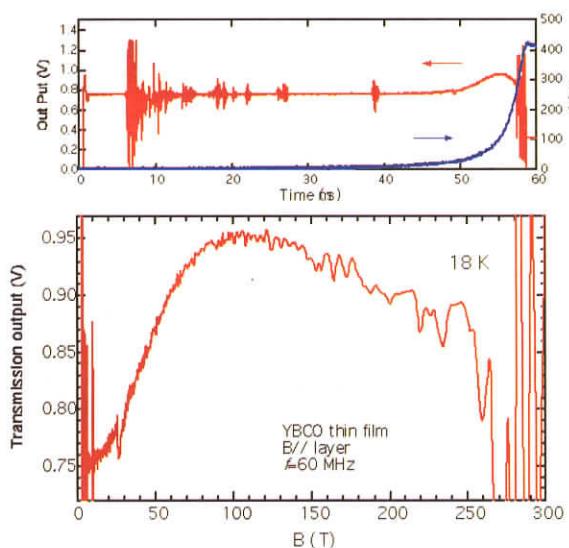


図 9 潜電流法によって測定した $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ の磁気抵抗。 $\mathbf{B} \perp \mathbf{c}$ 。 \mathbf{c} 軸が膜面に垂直に配向した単結晶膜。試料の膜厚 300 nm。 $T_c \sim 84\text{K}$ 。測定周波数 60 MHz。

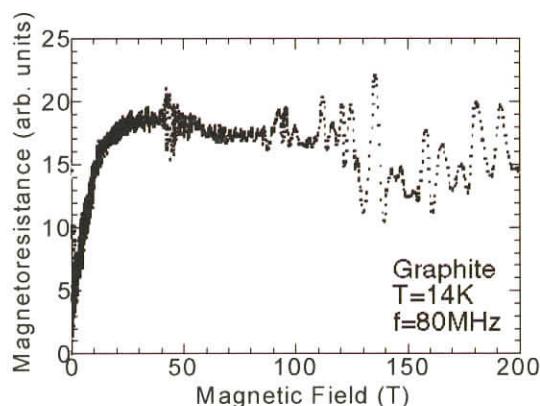


図 10 直接法 (AC 電流) によって測定したグラファイトの磁気抵抗。 $\mathbf{B} \parallel \mathbf{c}$ 。測定周波数 80 MHz。温度 14 K。

参考文献

1. N. Miura, Y. H. Matsuda, K. Uchida and H. Arimoto, J. Phys. : Condens. Matter **11** (1999) 5917.
2. N. Miura, Y. H. Matsuda, K. Uchida, S. Ikeda and F. Herlach, to be published in *Proc. 4th Int. Conf. Physical Phenomena in High Magnetic Fields* (World Scientific. 2002)
3. N. Miura and F. Herlach, in *Strong and Ultrastrong Magnetic Fields and Their Applications*, ed. F. Herlach (Springer-Verlag, 1985), Chap. 6 p. 247-350
4. N. Miura and K. Nakao, Jpn. J. Appl. Phys. **29** (1990) 1580.
5. H. Nojiri, T. Takamasu, S. Todo, K. Uchida, T. Haruyama, T. Goto, H. A. Katori, and N. Miura, Physica B **201** (1994) 579.
6. Y. H. Matsuda, T. Yasuhira, K. Uchida, N. Miura, S. Kuroda and K. Takita, Physica B **298** (2001) 416.
7. Y. H. Matsuda, T. Ikaida, N. Miura, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, J. Kono, M. A. Zudov and H. Munekata, *Proc. 10th Int. Conf. Narrow Gap Semiconductors and Related Small Energy Phenomena, Physics and Application*, (IPAP Conference Series 2), eds. N. Miura, S. Yamada and S. Takeyama (IPAP, 2001) 93
8. N. Miura, T. Osada and T. Goto, *Proc. 17th Int. Conf. Physics of Semiconductors*, eds. J. D. Chadi and W. A. Harrison (Springer-Verlag, 1985) 973.
9. H. Nakagawa, T. Takamasu, N. Miura and Y. Enomoto Physica B **246-247** (1998) 429.
10. T. Sakakibara, T. Goto and N. Miura, Rev. Sci. Instrum. **60** (1989) 444.
11. B. E. Kane, A. S. Dzurak, G. R. Facer, R. G. Clark, R. P. Starrett, A. Skougarevsky, N. E. Lumpkin, J. S. Brooks, L. W. Engel, N. Miura, H. Yokoi, T. Takamasu, H. Nakagawa, J. D. Goettee and D. G. Rickel, Rev. Sci. Instr. **68** (1997) 3843.
12. Y. Shimamoto, N. Miura and H. Nojiri, J. Phys. : Condens. Matter **10** (1998) 11289.
13. Y. Shimamoto, T. Takamasu, N. Miura, M. Kubota and Y. Shiohara, Jpn. J. Appl. Phys. **33** (1994) 112.
14. A. S. Dzurak, B. E. Kane, R. G. Clark, N. E. Lumpkin, J. O'Brien, G. R. Facer, R. P. Starrett, A. Slougarevsky, H. Nakagawa, N. Miura, Y. Enomoto, D. G. Rickel, J. D. Goettee, L. J. Campbell, C. M. Fowler, C. Mielke, J. C. King, W. D. Zerwekh, D. Clark, B. D. Bartram, A. I. Bykov, O. M. Tatsenko, V. V. Plantonov, E. E. Mitchel, J. Herrmann and K. H. MullerPhys. Rev B **57** (1998) R14084.
15. J. L. O'Brien, H. Nakagawa, A. S. Dzurak, R. G. Clark, B. E. Kane, N. E. Lumpkin, R. P. Starrett, N. Miura, E. E. Mitchell, J. D. Goettee, D. G. Rickel, and J. S. Brooks, Phys. Rev. B **61** (2000) 1584.
16. 福山秀敏著 大学院物性物理2 「強相関電子系」(講談社サイエンティフィック) 第2章

物性研究所ISSPワークショップ

重い電子化合物CeTIn₅の新しい超伝導状態

日時 2001年12月7日(金)～12月8日(土)

場所 東京大学柏キャンパス物性研究所 6階大講義室

司会 榊原 俊郎(東大物性研)
大貫 悅睦(阪大院理)

UGe₂およびCeTIn₅(T=Co, Ir, Rh)はいずれも最近注目を集めている重い電子系超伝導物質である。UGe₂は常圧では強磁性体であり加圧によって約1GPa付近で超伝導が出現するが、この超伝導が強磁性と共に存しているらしいことが特徴である。一方、CeTIn₅(T=Co, Ir)はCe系重い電子化合物としてはCeCu₂Si₂以来の常圧超伝導体であることに加え、その特異な超伝導状態に关心が持たれている。これらの物質に関する最新の研究成果の報告ならびに討論を行うために、新たに発足したISSPワークショップの第1回として企画した。当初の予想を超える数の参加者となつたが、大阪大学COE(代表:三宅和正教授)からも支援を得て内容の濃い研究会を開催することができた。

プログラム

12月7日

司会 榊原 俊郎(東大物性研)

13:00～13:15	CeTIn ₅ とUGe ₂ の磁性と超伝導	阪大理	大貫 悅睦
13:15～13:25	CeTIn ₅ の光電子分光	Spring - 8	藤森 伸一
13:25～13:40	CeRhIn ₅ の高圧下電気抵抗	阪大基礎工	村松 孝樹
13:40～14:00	CeRhIn ₅ における反強磁性磁気秩序と超伝導の相図	阪大基礎工	水戸 耕
14:00～14:20	CeTIn ₅ (T=Co, Rh, Ir)のNMR/NQRによる研究	姫工大理	小堀 洋
14:20～14:40	重い電子系化合物 CeTIn ₅ (T=Rh, Ir, Co)のスピノの 揺らぎと超伝導	阪大基礎工	鄭 国慶
14:40～15:00	圧力誘起超伝導体 CeRhIn ₅ での臨界値数揺動の役割	阪大基礎工	三宅 和正

15:00～15:25 休憩

司会 小原 孝夫(姫工大理)

15:25～15:40	μ SRでみたCeTIn ₅ の超伝導状態	高エネ・物質構造科学研	髭本 亘
15:40～15:55	CeIrIn ₅ のジョセフソン効果	姫工大理	住山 昭彦
15:55～16:15	熱伝導率による異方的超伝導体の超伝導ギャップ構造の 決定	東大物性研	井澤 公一

16 : 15～16 : 35	CeTIn ₅ (T = Co, Ir) の低温磁化	東大物性研	田山 孝
16 : 35～16 : 50	CeCoIn ₅ の低温磁歪と熱膨張	阪大低温センター	竹内 徹也
16 : 50～17 : 05	バンド計算と軌道縮退のある強束縛モデルの構成 原研先端基礎研		眞榮平孝裕
17 : 05～17 : 25	軌道ゆらぎによって制御される超伝導 －Ce115 の磁性と超伝導の理論－	原研先端基礎研	瀧本 哲也
17 : 25～17 : 40	UTGa ₅ (T : Ni, Pt) の磁気構造	原研先端基礎研	目時 直人
17 : 40～17 : 50	UPtGa ₅ の秩序状態の NMR/NQRによる研究	原研先端基礎研	加藤 治一
17 : 50～18 : 10	CeTIn ₅ の超伝導に関するまとめと問題点	阪大基礎工	北岡 良雄

18 : 30～20 : 00 懇親会

12月8日

司会 松田 祐司（東大物性研）

9 : 00～9 : 15	UGe ₂ の電子構造とフェルミ面	京産大理	山上 浩志
9 : 15～9 : 35	UGe ₂ の相転移とフェルミ面	物材機構	寺嶋 太一
9 : 35～9 : 50	UGe ₂ の加圧下でのドハース・ファンアルフェン効果	阪大理	摂待 力生
9 : 50～10 : 00	UGe ₂ と URhGe の純良単結晶育成と物性	原研先端研	芳賀 芳範
10 : 00～10 : 15	UGe ₂ の電気抵抗とP-T相図 (U ₃ P ₄ との比較も含めて)	阪大極限	小林 達生
10 : 15～10 : 30	UGe ₂ の比熱、磁化	阪大基礎工	立岩 尚之
10 : 30～10 : 50	UGe ₂ における磁性と超伝導	名大理	佐藤 憲昭

10 : 50～11 : 15 休憩

司会 神木 正史（都立大理）

11 : 15～11 : 35	種々の超伝導体の磁場中相転移について	岡山大自然	町田 一成
11 : 35～11 : 55	強磁性超伝導体 UGe ₂ における異常な物性とその起源 としての結合したCDWとSDW揺らぎ	東大物性研	渡辺 真仁
11 : 55～12 : 10	トリプレット超伝導体中の近藤効果	静岡大教育	古賀 幹人
12 : 10～12 : 30	UGe ₂ の超伝導に関するまとめと問題点	東大物性研	上田 和夫

CeTIn₅とUGe₂の磁性と超伝導

阪大院理 大貫 悅睦

異方的超伝導の物理がCeTIn₅ (T=Co, Rh, Ir) と UGe₂に集約されている。この物質系の大筋をお話しし、研究会のスタートとする。反強磁性体 CeRhIn₅ は1.7 GPaから超伝導が出現するが、ネール点の温度変化は電気抵抗測定からではなく、北岡グループのNMRが正確な情報を与えている。超伝導の T_C は2.5 GPaで最大値2.3 Kを持ち、常圧の CeCoIn₅ より重い電子系の超伝導体となる。CeCoIn₅は加圧とともに T_C は増大し、1.2 GPaで最大値2.6 Kとなる。加圧とともにCeCoIn₅ は量子臨界点近傍から離れてゆくのか、それとも近づくのか、まだはっきりしない。ただし、常圧の CeCoIn₅の性質は非常に興味深い実験結果が明らかになったと思う。100m₀ のサイクロトロン質量のキャリアを持つ準2次元的フェルミ面、超伝導ギャップのノードの位置が決定されたこと、Hc₂での超伝導と常伝導での転移が1次であることなどである。我々のグループとしては、今後 CeRhIn₅ の2.5 GPaとCeCoIn₅ の1.2 GPaでの電子状態をドハース・ファンアルフェン効果の測定から明らかにしたいと思う。強磁性体 UGe₂では、これまでの温度、圧力による(1)弱い強磁性相、(2)SDW/CDWが関与している可能性のある強い強磁性相、(3)常磁性相及び(4) $p_c^* \approx 1.2$ GPaを中心とする超伝導相の4つの相の性質が議論の中心である。興味深いのは、磁場を磁化の容易軸報告に加えると、これらの相がからみ合い、例えば常磁性であっても(1)や(2)の相がメタ磁性転移で出現することである。

CeTIn₅ (T=Rh, In)の光電子分光

原研放射光^A、東大新領域^B、阪大産研^C、CEA^D、阪大理^E、原研先端研^F
藤森 伸一^A、岡本 淳^A、間宮 一敏^A、岡根 哲夫^A、藤森 淳^{AB}、播磨 尚朝^C、
青木 大^D、池田 修悟^E、宍戸 寛明^E、芳賀 芳範^F、常盤 欣文^{EF}、大貫 悅睦^{EF}

CeTIn₅(T=Rh, Ir)に対する、実験室紫外線光源を用いた角度分解光電子分光実験と、放射光を用いた共鳴光電子分光実験を行った。角度分解光電子分光実験の結果、どちらの化合物においても、数 eV の範囲の大まかなバンド分散は Ce4f 電子を遍歴として取り扱ったバンド計算結果とよく対応するものの、Ce4f 電子の寄与が特に大きいと考えられるとフェルミ準位近傍については、実験と計算の一致が良くないことが分かった。さらに Ce 4f 電子状態を選択的に観測できる Ce 3d-4f 共鳴光電子分光実験を行ったところ、どちらの化合物においても、局在的な性格を反映する f_0 ピーク強度が、遍歴的な性格を反映する f_1 ピーク強度よりも強く、Ce4f 電子は比較的局在的な状態にあることが明らかになった。また、CeIrIn₅ の f_1 ピーク強度は CeRhIn₅ の f_1 ピーク強度よりも強く、CeIrIn₅においては CeRhIn₅ に比べてより Ce 4f の遍歴性が比較的大きいことが明らかになった。

CeRhIn₅ の高压下電気抵抗

阪大極限セ^A、阪大基礎工^B、阪大理^C、原研先端研^D、名大工^E、
SPring - 8/原研^F、SPring - 8/JASRI^G

村松 孝樹^A、小林 達生^A、鷹尾大五郎^B、日高 宏之^B、石川 洋人^B、田中 雅士^B、
風呂本滋行^B、中川 洋平^B、武田 圭生^B、立岩 尚之^B、清水 克哉^B、天谷 喜一^B、
宍戸 寛明^C、青木 大^C、大貫 悅睦^C、芳賀 芳範^D、西堀 英治^E、高田 昌樹^E、
坂田 誠^E、綿貫 徹^F、下村 理^F、大石 泰生^G

現在、圧力下における CeRhIn₅ の研究は主にピストンシリンダー型の圧力セルにおいて3GPa付近の圧力領域までの実験が行われている。現研究ではダイヤモンドアンビルセル(DAC)を用いて3GPaより高い圧力領域をめざして CeRhIn₅ の電気抵抗の測定及びX線測定を行った。

電気抵抗の測定において、高压領域での超伝導相を調べた結果、超伝導相は1.5～5.4GPaの圧力領域に存在することを確認した。また、1～2.5GPaの圧力領域では10K以下の低温においても大きな電気抵抗が残っており、 T_C 直上の温度での電気抵抗の圧力依存性を調べると2.5GPaでピークをとることも判明した。このピークをとる圧力において T_C が最大になっており、この低温での大きな電気抵抗と超伝導が関連していることも考えられる。また、1.8GPaにおいて3.2K付近に電気抵抗の異常が観測された。降温するにつれて、この温度で大きな電気抵抗が減少するふるまい、反強磁性転移の振る舞いと似ている。この異常を調べるために2.0GPaと2.5GPaにおいて磁場中の電気抵抗の測定を行った結果、磁場で超伝導を壊すと同様の異常が発見された。

CeRhIn₅では 2.5GPaにおいて T_C と T_C 直上の温度での電気抵抗が最大値をとるが、このような振る舞いは CeCu₂Ge₂ の圧力中において T_C が最大になる圧力においても観測されており[2][3]、その圧力において単位胞の体積が準不連続に変化するとの報告がある。このような体積の変化をCeRhIn₅においてもX線構造解析によって調べた。その結果、2.5GPaにおいて体積変化は観測されなかった。

- [1] T. Muramatsu, N. Tateiwa, T. C. Kobayashi, K. Shimizu, K. Amaya, D. Aoki, H. Shishido, Y. Haga and Y. Onuki: J. Phys. Soc. Jpn. **70** (2001) 336 2.
- [2] D. Jaccard et al: Physica, B 259 - 261 (1999) 1.
- [3] K. Miyake, O. Narikiyo and Y. Onishi: Physica B 259 - 261 (1999) 676.

CeRhIn₅ における反強磁性磁気秩序と超伝導の相図

阪大院基礎工、阪大院理^A、原研先端研^B

水戸 肇(現神戸大理)、川崎 健司、川崎 祐、鄭 国慶、
北岡 良雄、青木 大(現CEA)^A、常盤 欣文^A、大貫 悅陸^A、芳賀芳範^B

CeRhIn₅において、高圧下($0 < P < 2.55 \text{ GPa}$)での ¹¹⁵In - 核四重極共鳴測定(NQR)と交流磁化測定(ac - χ)を系統的に行った。以下にその報告内容を記す。

- (1) CeRhIn₅におけるネール温度 T_N と超伝導転移温度 T_C の圧力依存性を詳細に求めた。その結果、臨界圧力領域($1.2 \text{ GPa} < P < 1.9 \text{ GPa}$)では T_N 、 T_C ともに強い圧力依存性を示すことが分かった。この物質における温度 - 圧力相図を作成し報告した。
- (2) $P = 1.75 \text{ GPa}$ では反強磁性磁気秩序と超伝導が共存していることが明らかになった。この共存の状態は、圧力などの不均一性を原因として空間的に別々に分布しているものではなく、両相が一様に共存している、つまり同一の $4f$ 電子が反強磁性磁気秩序と超伝導に貢献している状態であると考えられる。
- (3) 臨界圧力領域では T_N 、 T_C より高い温度で、低エネルギーのスピン相関の強さを反映した物理量 $1/T_1 T$ が減少する擬ギャップ的振る舞いが観測された。
- (4) $P = 2.1 \text{ GPa}$ において、 T_C 以下のスピン - 格子緩和率 $1/T_1$ の温度依存性から、超伝導は異方的な超伝導ギャップを持つ、非従来型の性質を持つものであることが分かった。また、 T_C 以上では $1/T_1$ が T_C 直上まで増大し続ける、非フェルミ流体的な振る舞いが観測された。

[1] T. Mito et al. Phys. Rev. B **63** (2001) 220507(R).

[2] S. Kawasaki et al. Rapid Communications of Phys. Rev. B (in press).

CeTIn₅(T = Co, Rh, Ir)のNMR/NQRによる研究

姫工大理 小堀 洋

CeRhIn₅ は常圧において反強磁性、また 1.7 GPa 以上の圧力で磁気秩序が消失した状態で超伝導が生じる。これらの超伝導体のNMRによる研究について報告する。

常磁性状態で得られた核スピン格子緩和時間 (T_1) は、常圧及び 2.7 GPa の加圧下とも、ほぼ温度 (T) の $1/2$ 乗に比例する。この結果は、超伝導が発生している領域で反強磁性のスピンの揺らぎが大きい事を意味する。NQRにより零磁場で超伝導状態での In 核の T_1 測定を行う事ができた。 $1/T_1$ の温度変化は T_C 直下にコヒーレントピークを持たず急激に減少し、また十分低温では指数関数的ではなく、温度の 3 乗に近い温度変化が観測される。この結果は超伝導エネルギーギャップに線上のノードが存在する事を示している。超伝導の対称性をさらに詳しく調べるために、引き続き見つかった CeCoIn₅ においてナイトシフトの測定を行った。その結果シフトの減少が観測され、発生している超伝導がスピニンに関して一重項である事を見つけた。以上の結果より CeTIn₅(T = Co, Rh, Ir) では d -波の超伝導が発生していると考えられる。

CeMIn₅(M=Ir,Rh,Co)における磁気ゆらぎと超伝導

阪大基礎工^A、阪大理^B、原研^C、Los Alamos N'tl Lab^D

鄭 国慶^A、田辺 憲志^A、川崎 慎司^A、川崎 祐^A、水戸 肢^A、北岡 良雄^A、
青木 大^B、宍戸 寛明^B、大貫 悅睦^B、芳賀 芳範^C、J.Sarrao^D、J.D.Thompson^D

本講演では Ce115 系の磁気ゆらぎと超伝導について議論する。まず、NQR 測定から明らかになった CeIrIn₅ の物性について紹介する。この系の *f* 電子は極めて遍歴的で、磁気ゆらぎが異方的（準二次元的）である。また、超伝導は *s* 波ではなく、ギャップにノードが存在する[1]。この系に Rh をまぜると *T_c* が倍以上上昇し、また、CeCoIn₅ では *T_c* が 2.3K と重い電子系としては最高の値を持つ。NQR 測定の結果、Ce(Rh-Ir)In₅ や CeCoIn₅ は CeIrIn₅ の持つ基本的な性質を共有するが、CeIrIn₅ よりも磁気臨界点に近いことが判明した。この特性が *T_c* の上昇と密接に関係していると思われる。

[1] G.-q. Zheng et al, Phys. Rev. Lett. **86**, 4664 (2001).

圧力誘起超伝導体 CeRhIn₅ での臨界価数揺動の役割

阪大基礎工 三宅 和正

圧力誘起超伝導体 CeRhIn₅ の転移温度は、圧力を変化させると、 $P=P_p=2.5\text{GPa}$ 付近に顕著なピークをもつ [1]。この振る舞いは磁性（反強磁性）が消失する圧力 $P_c=1.8\text{GPa}$ が P_p に比較的近いことを別にすれば、CeCu₂Ge₂ や CeCu₂Si₂ と非常によく似ている [2]。それは残留抵抗 [CeRhIn₅] の場合は、 $(\rho(T=T_c))$ が $P=P_p$ 付近の圧力でやはり鋭いピークを示す点、 $T>T_c \sim 2\text{K}$ での電気抵抗が 10 数 K までの広い温度範囲にわたって温度 T の 1 乗に比例する点でも同じである [3]。CeCu₂Ge₂ や CeCu₂Ge₂ の場合にこのような顕著な振る舞いが臨界価数揺動機構によりどのように理解されているか紹介しつつ [4-6]、CeRhIn₅ の超伝導転移温度のピーク形成において果たす臨界価数揺動の役割について議論する。

- [1] T. Muramatsu, N. Tateiwa, T. C. Kobayashi, K. Shimizu, K. Amaya, D. Aoki, H. Shishido, Y. Haga and Y. Onuki: J. Phys. Soc. Jpn. **70** (2001) 3362.
- [2] D. Jaccard, H. Wilhelm, K. Alami-Yadri and E. Vargo: Physica B **259-261** (1999) 1.
- [3] 村松孝樹：本研究会の報告
- [4] K. Miyake, O. Narikiyo and Y. Onishi: Physica B **259-261** (1999) 676.
- [5] Y. Onishi and K. Miyake: J. Phys. Soc. Jpn. **69** (2000) 3955.
- [6] K. Miyake and H. Maebashi: submitted to J. Phys. Soc. Jpn., cond-mat/0111578.

μ SRで見た CeTIn₅ の超伝導状態

高エネ・物質構造科学研 髙本 亘

μ SR法は外から試料中に打ち込んだスピニン偏極したミュオンをプローブとする実験手法であり、磁性に対して最も高感度の測定法である。また零磁場中での測定が可能であることや、独自のタイムスケールで動的現象を見ることが可能であるため他の手法では観測することが難しい現象を容易に捉える場合がある。特に量子臨界点近傍にある CeCoIn₅のような物質においては μ SRによる情報は基底状態を決める上で重要である。それと共に磁場中では磁場侵入長やナイトシフトシフトなどから超伝導状態に関する情報を得ることができる。

我々はこれまで CeTIn₅における μ SR実験を行ってきた。まず基底状態を知る目的で零磁場中におけるミュオンスピニン緩和測定を行った。ここでは CeIrIn₅、CeCoIn₅の両物質で 20mKまで緩和率の有意な変化がないことを見出した。この結果はこれらの物質においては約 10^{-9} 秒より遅い相関時間を持った磁性がないことを明確に示すと共に初期に実験的に提唱されていた時間反転対称性を破った超伝導状態が実現していないことを表している。

次に 0.3T($//c$)中の μ SR実験で、磁場侵入長の温度依存性を求めた。磁場侵入長は最低温度で約 5500 Å 程度であり、また低温で温度依存性があまり見られなくなる。1.7Tの磁場中では超伝導状態で緩和率の増大が見られなくなり磁場侵入長が 10000 Å を大きく越えていることを表す。このような磁場侵入長の大きな磁場依存性は YBCO などでも見られている。この場合はナイトシフトが観測にかかることになり、 μ SRにおいても超伝導状態では NMR と同様にナイトシフトの減少が観測された。

CeIrIn₅ のジョセフソン効果

姫路工大理、阪大理^A、原研先端研^B

住山 昭彦、小田 祺景、中川 雅仁、片山 大介、大貫 悅睦^A、
稻田 佳彦^A、青木 大^A、常磐 欣文^A、芳賀 芳範^B

最近発見された重い電子系超伝導体 CeIrIn₅においては、バルクの熱力学的転移温度 T_c よりも高い温度 T_0 で電気抵抗が消失することが観察されている。我々は、この T_c 以上での超伝導性を調べるために、CeIrIn₅ 単結晶の(110)面と(001)面上に CeIrIn₅-Cu-Nb(SNS) 素子を作成し、そのジョセフソン効果について調べた。その結果、素子を作成した結晶面や間に挟んだ Cu の厚み d_N が異なるいずれの素子でも、 $T_c=0.3\text{K}$ よりもはるかに高い $T_0=0.8\text{K}$ 付近からジョセフソン効果が観察された。これは、超伝導体の Nb との間の位相コヒーレンスが生じるという意味での超伝導状態が、 T_0 以下で、少なくとも CeIrIn₅ 表面に生じていることを意味している。ただ、ジョセフソン臨界電流の大きさについては、 d_N や電流方向に対する系統的な依存性は見られず、素子によって大きく異なっている。ジョセフソン効果が素子近傍の超伝導秩序変数のみを反映することを考慮すると、この結果は、試料表面の局所的な転移温度が場所によって揺らいでいると考えると説明できる。また、単結晶の電気抵抗や帶磁率の測定で、広い超伝導転移幅が観察されたこととも合致している。さらに、 $T_c=0.3\text{K}$ においてジョセフソン臨界電流の温度依存性に顕著な変化が見られないことは、バルクの転移が表面の超伝導状態に影響を与えないことを示唆している。以上のように、CeIrIn₅ の T_c 以上での超伝導性は、試料の不均一性で説明できることが明らかになった。

熱伝導率による異方的超伝導体の超伝導ギャップ構造の決定

東大物性研、阪大理^A

山口 英正、井澤 公一、松田 祐司、宍戸 寛明^A、摂待 力生^A、大貫 悅睦^A

重い電子系超伝導体 CeCoIn_5 の超伝導状態は、これまで核格子緩和率 $1/T_1$ 、比熱、熱伝導率の結果より異方的であることが報告されているが、その具体的な対称性、ギャップ構造は明らかにされていなかった。ギャップ構造は引力の起源と密接に関わっており、超伝導発現機構を知る上で非常に重要な情報を与える。そこで我々は、 CeCoIn_5 に対し面内で精密に磁場方向を変化させたときの熱伝導率の面内異方性を測定した。その結果、 $T < 1\text{K}$ において熱伝導率の角度依存性に明確な4回対称性が見られた。この4回対称性は、その振幅の絶対値や極大値をもつ方向を考えると H_{c2} やバンドの異方性からは説明困難であり、 d 波的なノードが存在していることの強い証拠を与える。さらに熱伝導率の磁場依存性などを考慮すると、ノードは($\pm \pi, \pm \pi$)方向にあり、超伝導対称性は $d(x^2 - y^2)$ であることが分かった。この結果は異方的な反強磁性揺らぎが超伝導形成に重要であるということを示している。このように異方的超伝導体の超伝導の対称性が決まったのは高温超伝導体に次いで2番目の例である。

一方、磁場を強くしてゆくと H_{c2} 直下で熱伝導率に1次転移的な飛びがあることがわかった。この系では常磁性効果が大きいことから、その原因として、①パウリ極限、②FFLO状態、③ランダウ準位のゼーマン分裂の効果、④ボルテックスの量子化におけるスピン磁化の効果、などが考えられるがまだそのメカニズムは分かってはいない。しかしながらこの1次転移は CeCoIn_5 における混合状態が非常に特異である可能性を示唆している。

CeTIn_5 ($T=\text{Co,Ir}$)の低温磁化

物性研、阪大理^A、原研先端研^B

田山 孝、針田 亮、榎原 俊郎、宍戸 寛明^A、
摂待 力生^A、大貫 悅睦^A、芳賀 芳範^B

重い電子系超伝導体 CeTIn_5 ($T=\text{Co,Ir}$) の超伝導状態を調べるために、単結晶試料を用いたDC磁化測定を最低温度 50mK 、最大磁場 12.5T まで詳細に行なった。

CeCoIn_5 ($T_c=2.3\text{K}$) では約 0.8K 以下の温度領域において磁化が H_{c2} (a 軸方向 11.5T 、 c 軸方向 4.8T) で不連続な磁化の飛びを示す(下図)、常磁性相への転移が1次であることが明らかになった。この結果はこの系の常磁性効果が強く働いていることを示しており、一重項超伝導体のパウリ・リミットによる H_{c2} での1次相転移の理論的予測と一致する。しかし CeCoIn_5 の1次相転移がパウリ・リミットによるもので本当に説明できるのかまだわかっていない。なお多くの理論において常磁性状態へ転移する直前で超伝導ギャップが空間的に変調したいわゆる FFLO 状態への転移が予測されているが、今回の測定では H_{c2} 近傍で新たな相転移は見出されなかった。

150mK以下では c 軸方向の磁化過程において、 H_{c2} よりもかなり低い磁場で特異なピーク効果が観測された(下図)。このピーク効果の起源もまだ明らかになっておらず、相転移の可能性もある。

さらに超伝導相近傍の常磁性相で磁化の温度変化に非フェルミ液体的な振舞いが見出された。この温度依存性はキュリー・ワイス則的な関係式 $\chi(T) = a_0 + a_1/(T+a_2)$ でよく再現できる。比熱や電気抵抗でも同じ温度磁場領域で非フェルミ液体的な振舞いが観測されており、この振舞いは磁気的揺らぎによるものと考えられ、異方的超伝導との関連が示唆される。

一方CeIrIn₅ ($T_c=0.4\text{K}$)ではCo系とは対照的に顕著な異常は観測されず、 H_{c2} での転移は2次で、ピーク効果は観測されなかった。

CeCoIn₅ の低温磁歪と熱膨張

阪大低温センター、阪大院理^A、原研先端基礎研^B
竹内 徹也、大貫 悅睦^A、摂待 力生^A
宍戸 寛明^A、池田 修悟^A、芳賀 芳範^B

CeCoIn₅ は常圧下で超伝導を示し、その転移温度 $T_c(=2.25\text{K})$ はこれまで報告されている重い電子系超伝導体の中で最も高い。電気抵抗や磁場下での比熱測定では低温で非フェルミ液体的振る舞いが観測され、磁気臨界点の非常に近くに位置すると考えられており、磁気臨界点近傍で観測される超伝導のメカニズムを理解する上で非常に参考になる物質である。熱伝導度や磁化測定などで H_{c2} 付近に一次転移的な変化が観測されておりFFLO状態の実現と絡み非常に興味深い。本研究では上記の一次転移的な物理量の振る舞いが、弾性的性質にも反映されるか否かを調べる目的で、超伝導相ならびに常伝導相での磁歪、熱膨張測定を行ったので報告する。(磁場中) 熱膨張では T_c 以下で降温と共に a 軸に縮み、 c 軸方向には膨張する異方的振る舞いが観測された。熱膨張と比熱の結果から見積もられた T_c の圧力変化は圧力下の電気抵抗測定の結果とコンシスティントである。 T_c 以上では降温と共に特に c 軸方向で格子が直線的に大きく収縮しており、磁場で超伝導を押さえるとこの振る舞いは最低温まで連続する。 c 軸方向の磁歪測定では H_{c2} 付近で異常が観測され、約0.7K以下では熱伝導度や磁化測定で見られるように非常にシャープなステップ状の変化を示す。また高温の熱膨張は軸によって異なる特性温度を反映しているように見え興味深いため、それらの起源については現在検討中である。

バンド計算と軌道縮退のある強束縛モデルの構成

原研先端基礎研究センター 多体電子系理論研究グループ 真榮平孝裕

最近、重い電子系物質群に属し超伝導を示す化合物 CeTIn₅(T=Rh, Ir and Co)が発見されたが、大貫グループ(阪大院理)により、CeIrIn₅、CeCoIn₅ の純良な単結晶育成が行われ、明瞭なde Haas van Alphen(dHvA)プランチが観測されている。観測されたdHvAプランチは円柱形状の2次元的フェルミ面によってよく説明される。

さて、帯磁率や比熱、dHvA効果などの実験結果を理論的に説明する場合、アプローチは、大きく2種類に分けられる。一方は、多体効果を簡単化するかわりに、結晶の対称性や構成原子を忠実に考慮して取り扱う方法(バンド計算など)であり、他方は、結晶の対称性や構成原子を簡単化するかわり

に、簡単化されたモデルハミルトニアンに基づいて、多体効果を重視する方法である。従来、これら2種類の方法は、独立に論じられることが多かった。そこで、これらの2種類のアプローチの間の橋渡しとして、相対論的バンド計算の計算結果をもとにして強束縛模型を構築し、*f*電子系における磁性や超伝導を議論するための微視的多体電子模型の導出を試みた。

今回、CeIrIn₅を例にとり、強束縛模型の導出を行った。モデルの構築を行う過程として、次のような2段階の解析をおこなう。(1)相対論的線形化Augmented Plane Wave法を用いたバンド計算によりフェルミ面を決定する。得られたフェルミ面のうち、特にdHvA角度依存の実験によって観測されている2次元的フェルミ面に着目して詳細な解析をする。(2)フェルミレベル近傍のエネルギー・バンド構造を、簡単化された強束縛模型を用いて解析をする。最近接Ceイオン間の*f*電子のホッピングの大きさや結晶場パラメーターは、(1)のバンド計算において得られたバンド分散と比較・検討して決定する。

軌道ゆらぎによって制御される超伝導—Ce115の磁性と超伝導の理論—

原研先端基礎研究センター 多体電子系理論研究グループ 潤本 哲也

1979年のCeCu₂Si₂における超伝導の発見以来、重い電子系における超伝導発現機構に関する研究が実験、理論を問わずに続けられてきた。最近、常圧で強磁性を示すUGe₂が加圧によって量子臨界点近傍の強磁性相内で超伝導になることや、一連の新しい重い電子系超伝導物質CeTIn₅(T=Rh, Ir, and Co)が発見され、*f*-電子系超伝導に更なる注目が集まっている。一方、理論に関しては、*f*-電子系の複雑さのために主に現象論的な研究が中心であり、より微視的な立場からのアプローチが望まれている。

本研究ではまず、バンド計算結果と比較しながら、*f*-電子の最近接ホッピングのみを考慮した強束縛模型を構築する。準粒子のホッピング行列を求める際には、*d*-電子系に対して通常使われるSlater-Kosterの手法に従って*f*-電子のホッピング行列を求め、非常に大きいスピン-軌道相互作用を考慮して、その中から全角運動量*j*=5/2を持つ成分のみを抜き出す。このホッピング項に、*f*-電子間のクーロン相互作用項と結晶場項を加えて、*f*-電子系に対するmodel Hamiltonianとする。Ce³⁺-イオンが4*f*¹の構造を取ることを考慮してサイト当たりの電子数を1個に固定する。このHamiltonianをRPAの範囲内で取り扱って、磁気秩序相周辺の超伝導について調べた。結晶場分裂が大きい場合には軌道自由度が凍ってしまい、反強磁性スピンゆらぎが発達してd(x²-y²)波の超伝導が得られる。一方、結晶場分裂が小さい場合には軌道ゆらぎもスピンゆらぎと同程度に発達している。この時、スピン一重項ペアリングにおいてはスピンゆらぎと軌道ゆらぎが相殺するのに対して、スピン三重項ペアリングにおいてはこれらが協力するため、結果としてスピン三重項超伝導が出現する。このシナリオに従ってCeTIn₅の超伝導について議論する。

UTGa₅ (T: Ni, Pt)の磁気構造

原研先端基礎研 目時 直人

重い電子系超伝導体 CeTIn₅ と同じ結晶構造を持つ遍歴 5f 反強磁性体 UNiGa₅ 及び UPtGa₅ の磁気構造を中性子散乱実験によって決定した。これらの化合物ではウラン原子は単純正方格子上に存在する。UNiGa₅ の反強磁性ベクトルは $Q = [1/2 \ 1/2 \ 1/2]$ であり、互いに隣り合うウランの磁気モーメントが反対方向を向く構造を持つ。一方 UPtGa₅ では $Q = [0 \ 0 \ 1/2]$ であり、c 面内で強磁的に並んだスピンが反強磁的に積層している事を明らかにした。どちらの化合物でもウランの磁気モーメントは c 軸に平行であり、その大きさは UNiGa₅ では 0.90 ボア磁子、UPtGa₅ では 0.24 ボア磁子と大きく異なる結論が得られた。山上らのバンド計算によれば、U-5f と Ga-4p の混成バンドが磁性を担い、4i サイトでの混成は、その原子座標 z に強く依存する。中性子粉末回折の結果、二つの化合物で z が顕著に違う事が明らかになった。この構造の違いが、磁気モーメントが大きく異なる理由と考えられる。決定された磁気構造から、c 面内の 5f スピン間の最近接相互作用が、UPtGa₅ の場合は強磁性的、UNiGa₅ では反強磁性的と異なっていることが判明した。Ni と Pt の d 電子数はどちらも等しく、ほぼ同じ電子状態が期待されるため、相互作用の違いを単純には説明できない。5f 電子系の磁気構造及びその安定性に関しては、ミクロな視点から説明する試みはほとんどなされていないのが現状である。今回研究された遍歴 5f 反強磁性体 UTGa₅ (T: Ni, Pt) に関しては、磁気転移に伴う 5f 電子の軌道配列と、正方晶の歪みに伴う U-5f と Ga-4p バンドの混成強度の変化が、磁気構造に重要な役割を持っていると考えられる。

UPtGa₅ の秩序状態のNMR/NQRによる研究

原研先端研^A、阪大理^B

加藤 治一^A、酒井 宏典^A、常盤 欣文^{A,B}、神戸 振作^A、R..E. Walstedt^A、大貫 悅睦^{A,B}

UTGa₅ (T : iron group) は、重い電子超伝導体 CeTIn₅ と同じ結晶構造 (HoCoGa₅型) をとり、ウラン 5f 電子が物性の主役を担う。この中で UPtGa₅ は 5f 電子が遍歴しており低温で反強磁性に秩序化する。我々は、UPtGa₅ のウランの 5f 電子の物性および磁性を微視的な観点から明らかにするために^{69,71}Ga-NMR 実験を行った。なお、この系において Ga 核は結晶学的に二つのサイトが存在し、(1/2, 1/2, 0) にあるものを Ga(1)、(0, 1/2, 0.292) にあるものを Ga(2) と呼ぶことにする。

まず、常磁性相において磁場掃引スペクトルを測定した。共鳴線の位置から Ga(1) および Ga(2) それについて、ナイトシフト K 、核位置での電場勾配を表すパラメータ ν_Q, η の大きさおよびその方向を決定した。また、 K の温度変化より常磁性相での超微細相互作用係数 A_{hf} を見積もった。次に、磁気秩序相において、零磁場中で周波数掃引によりスペクトルを得た。このスペクトルは複雑な形になるが、Ga 核位置で電気的な相互作用（電気四重極相互作用）および周りのウラン磁気モーメントから来る磁気的相互作用が拮抗しているとして、^{69,71}Ga 核（それぞれ $I=3/2$ ）のマトリックスを数値的に解くことによって定量的に理解でき、同時に Ga(2) の感じる内部磁場 H_{int} を評価することができる。 H_{int} の温度変化は、ウランサイトにある磁気モーメントの温度変化と一致しており、 H_{int} はウランの磁気モーメントから来る transferred hyperfine field によるものと考えられる。また、

H_{int} の値と中性子回折実験から見積もられた磁気モーメントの値から磁気秩序相における A_{hf} が算出されるが、この値は常磁性相における A_{hf} にくらべて~10倍程度大きい。これは、Ga(2)位置における transferred hyperfine field を考える際に、最隣接ウランからの寄与だけを考えていたのでは説明がつかず、Tイオンをはさんだ方向にあるウランからの影響が重要であることを示唆していると思われる。

CeMIn₅ (M=Ir,Rh,Co)の超伝導に関するまとめと問題点

阪大院基礎工 北岡 良雄

本講演ではCe115系の超伝導に関する纏めと問題点を指摘した。超伝導転移温度 T_c 、電子比熱係数 γ を以下に示す。

	γ (mJ/mol · K ²)	T_c (K)
CeIrIn ₅	720	0.4
CeIr _{0.5} Rh _{0.5} In ₅		0.8
CeRhIn ₅ (1.7 GPa)	400	2.1
CeCoIn ₅	1000	2.3

1. 超伝導対称性について

井沢（物性研）らは、CeCoIn₅ 混合状態での熱伝導率の磁場方位依存性から正方対称の $d(x^2 - y^2)$ 型のノードを持つことを明らかにした。また小堀（姫路工大）らは、⁵⁹Co 核のナイトシフトの温度依存性から、スピニ重項対であることを示した。他の系については今後の課題となっている。

2. ギャップ構造

鄭（阪大基礎工）らは核スピン格子緩和率の温度変化からIr系は、ラインノードギャップモデルで説明でき、ギャップの大きさを $\Delta = 2.5k_B T_c$ と見積もった。また小堀らは、Co系では、ラインノードモデルで説明可能と示唆した。磁場誘起常伝導状態で γ が低温に向かって増加することが報告されており、単純な温度べき依存性で説明可能かどうか議論が必要との印象をもった。

Rh系の圧力誘起超伝導状態については、水戸（阪大基礎工、現神戸大）ら、小堀（姫路工大）らは、異なる圧力で $1/T_1$ の測定を行い T^3 則を観測し、ラインノードギャップが115系超伝導体に共通していることが明かとなった。比熱の結果とも合せて、(115)系は、異方的超伝導体であると結論できそうである。

3. 異方的スピン揺らぎ

鄭らは、Ir系で異方的スピン揺らぎが支配的であることを示した。

このようなスピン揺らぎの異方的特性は、重い電子系超伝導体ではじめてのものである。結晶構造の擬2次元性を反映して反強磁性的スピン揺らぎの面内の相関長(ξ_a)に比べて軸方向の相関長(ξ_c)が短いこと($\xi_a >> \xi_c$)が示された。また、交番磁化率がキュリーワイス則、 $\chi_Q(T) \propto 1/(T + \theta)$ に従い、 $\theta = 9$ Kとなることを見出し、反強磁性磁気臨界点 ($\theta = 0$) に近いと結論した。この特

徴は、 $\text{Ce}(\text{Rh}_{0.5}\text{Ir}_{0.5})\text{In}_5$ 混晶系およびCo系でも共通にみられ、それぞれ $\theta = 1 \text{ K}, 0.5 \text{ K}$ と評価でき、磁気臨界点に極めて近接していることを見出した。この磁気揺らぎの増大に対応した、 $T_c=0.8 \text{ K}$ 、 2.1 K の顕著な増大は、超伝導発現と磁気臨界性あるいは非フェルミ液体的な振舞いとの相関を強く示唆するものである。一方で、電子構造の2次元性と多バンド構造の系統的な変化を取り込んだモデルが滝本ら（原研）によって議論された。それぞれの特徴を明確にして、超伝導発現との相互の関わりを明らかにすることが今後の課題である。

4. Co系での磁場誘起超伝導一常伝導一次転移について

Co系では、スピンの揺らぎが極めて磁気臨界点に近接する「磁気臨界特性」、磁場誘起常伝導状態で、 γ が温度低下とともに増大し続ける「非フェルミ液体特性」、また超伝導転移温度での比熱の飛びが極めて大きな、「スーパー強結合特性」を示す。さらなる特異性として、田山(物性研)ら、井沢(物性研)らは、磁場誘起超伝導一常伝導転移が一次転移であることを示した。今のところ原因は良く分かっていないが、一連の特異性が相互に関連している印象を持った。また滝本らが理論的に議論した軌道縮退効果との関連がキーポイントとなるとの印象を持った。今後の混晶系、圧力効果などの系統的、組織的な研究によって、重い電子系超伝導発現機構の核心に迫れる研究成果が得られるものと期待できる。

5. CeRhIn_5 における磁場誘起超伝導について

温度一圧力相図について、電気抵抗とIn-NQRによる研究によって大きな進展があった。村松らは、超伝導転移温度が極大値をとる圧力近傍で T_c 直上の電気抵抗値が最大をもつことを示した。また、この異常と価数転移との関連がX線構造解析の結果を踏まえて議論された。水戸らは、高圧下($0 < P < 2.55 \text{ GPa}$)での ^{115}In -核四重極共鳴測定(NQR)と交流磁化の測定(ac- χ)を行い、圧力(P)に対するネール温度 T_N と超伝導転移温度 T_c の詳細な相図を決定し、 $P=1.75 \text{ GPa}$ において「反強磁性磁気秩序と超伝導の共存」を結論した。しかも、その共存は圧力などの不均一性を原因として空間的に別々に分布しているものではなく、両相が空間的に一様に共存している、つまり同一の4f電子が反強磁性磁気秩序と超伝導に関与している状態であると示唆した。さらに、この圧力領域では T_N 、 T_c より高い温度で、低エネルギーのスピン相関の強さを反映した物理量 $1/T_1T$ が減少する擬ギャップ的振る舞いを報告した。

UGe₂ の電子構造とフェルミ面

京産大理 山上 浩志

UGe₂ の常磁性(非磁性)状態と強磁性状態におけるバンド計算の最近の結果を報告する。UGe₂ の結晶構造は底面心斜方晶を単位胞にもち、UGe₂ の2分子の単位構造から成り立つ。容易軸を a 軸方向にもつキュリー温度52Kの異方性の強い強磁性体であり、ウラン原子あたり $1.4 \mu_B$ の磁気モーメントをもつ。U原子は相対論的效果が大きいことが知られている。ディラックの4成分型の相対論的1電子方程式を基にして局所スピン密度近似における内部磁場の効果を考慮した相対論的スピン分極LAPW法により強磁性状態のUGe₂ のバンド構造を計算した。この相対論的バンド理論では、磁気異方性はスピン・軌道相互作用から由来し、磁気モーメントの向きを a 軸、 b 軸、 c 軸に置いたときの全エネルギーの比較から a 軸で最小の全エネルギーを与え、実験の容易軸と一致する。ウランの軌道モーメントが $2.56 \mu_B$ 、スピンモーメントが $-1.52 \mu_B$ と計算され、その磁気モーメントは $1.16 \mu_B$ と実験値よりも少し小さい。最近の中性子による構造因子から軌道モーメントとスピンモーメントが

それぞれ $2.37\mu_B$ と $-0.91\mu_B$ と見積もられ、軌道モーメントが小さいのではなく、むしろスピンモーメントが大きすぎることを示唆している。フェルミ準位近傍のバンドは $5f$ 軌道から由来し、主にマジョリティ・スピン状態からフェルミ面が構成される。強磁性状態から超伝導状態に転移した場合、フェルミ面のスピン状態から超伝導状態はスピン三重項状態であることが示唆できる。

UGe₂の相転移とフェルミ面

物・材機構、東北大極低セ^A、富山県立大^B

寺嶋 太一、松本 武彦、寺倉千恵子、宇治 進也

木村 憲彰^A、遠藤 元気^A、小松原武美^A、青木 晴善^A、前沢 邦彦^B

UGe₂のフェルミ面、準粒子有効質量の圧力変化を、ドハース・ファンアルフェン効果の測定により調べている。磁化困難軸である b 軸に磁場を加えて測定を行った場合、臨界圧力 P_x （ T_x 異常の消失する圧力）において準粒子有効質量が急激に増大し、臨界圧力 P_c （強磁性転移が消失する圧力）においてフェルミ面が不連続に変化する。また、 P_x 近傍から P_c に至る圧力域で、dHvA振動の強度が異常に減衰する。一方、磁場を磁化容易軸である a 軸方向に加えた場合、二つの磁場誘起異常が磁場 $B_x(P)$ 、 $B_m(P)$ において観測される（ P は圧力）。これらの異常は、それぞれ T_x 異常、強磁性転移の「復活」に対応している。 P - B 面内で（相）境界線 $B_x(P)$ 、 $B_m(P)$ を横切らないように測定を行う限りでは、フェルミ面、準粒子有効質量とも、圧力に対し連続的に変化する。境界線 $B_x(P)$ を高圧・低磁場側へ越えると、有効質量は増大し、これは b 軸方向の測定で圧力 P_x 近傍で有効質量が増大するとの呼応する。

参考文献：Terashima et al., Phys. Rev. Lett. 87, 166401 (2001)

UGe₂の圧力下ドハース・ファンアルフェン効果

阪大院理、原研先端基礎^A、阪大極限科学^B、阪大基礎工^C、京産大理^D

摺待 力生、中島 美帆、荒木 新吾、池田 修悟、大久保智幸、

大貫 悅睦、芳賀 芳範^A、小林 達生^B、立岩 尚之^C、山上 浩志^D

UGe₂はキュリー温度 $T_C=52\text{ K}$ の強磁性体であるが、加圧によって出現する超伝導が強磁性と共存しており、さらには、強磁性が消失する臨界圧力 p_c （ $\sim 1.5\text{ GPa}$ ）で超伝導も消失することから、その超伝導機構の解明に興味が持たれている。また、電気抵抗からもう一つの相転移の存在が示唆されているが、その転移温度 T^* （常圧で 30 K ）が消失する臨界圧力 p_{c^*} （ $\sim 1.2\text{ GPa}$ ）で超伝導転移温度 T_{SC} が最も高くなる（ $T_{SC}=0.7\text{ K}$ ）ことから、このもう一つの相転移が超伝導と強く関係しているとされる。CDW/SDWが起きているとする説もあるが、実験的証拠は得られていない。これらの相転移でフェルミ面や、有効質量、散乱緩和時間がどう変化するかを明らかにすることは、超伝導機構を考える上でも非常に重要であるので、我々は圧力下でのドハース・ファンアルフェン(dHvA)効果の実験をおこなった。

UGe_2 は b 軸方向に長い結晶構造をもつて、主要フェルミ面は b 軸に伸びた円筒状フェルミ面となる。 $p < p_c^*$ および $p > p_c$ で観測されるプランチはそれぞれ強磁性状態と常磁性状態の主要フェルミ面に対応する。興味深いことに、 $p_c^* < p < p_c$ の圧力範囲では振動が観測されなかった。このことは（1）フェルミ面の極値軌道が消失してしまったか、あるいは（2）サイクロトロン質量が大きくなり、かつ散乱確率（ディングル温度）が増大していることを示している。容易軸である a 軸に磁場を印可した場合は、 p_c^* を越える圧力では T^* に対応したメタ磁性転移 H^* が現れ、さらに p_c より高い圧力では T_C に対応したメタ磁性転移 H_C が観測される。 H^* は Weakly Polarized (WP) Phase と Strongly Polarized (SP) の転移磁場に対応する。 H^* 前後でのdHvA 振動は、WP相とSP相ではフェルミ面は大きく異なっていることを示唆する結果であった。

UGe₂ 及びURhGe の単結晶育成と物性

原研先端研、阪大院理^A

芳賀 芳範、山本 悅嗣、松田 達磨、常磐 欣文、大久保智幸^A、大貫 悅睦^A

昨年の UGe_2 の圧力誘起超伝導に続き、今年に入ってURhGeで常圧で強磁性と超伝導との共存が報告された。 UGe_2 は、純良な試料が比較的容易に作製できるため、この一年で多くのデータが蓄積された。これに対してURhGeでは、これまでのところ多結晶でしか超伝導が観測されていない。我々はこれまでに UGe_2 の純良単結晶 ($\text{RRR}=750$) の作製に成功し、圧力誘起超伝導を確認している。一方 URhGe については、これまでのところ超伝導発現の条件といわれる $\text{RRR}=100$ には達していない。現在、これを改善するために超高真空アニールを行っている。下図は、URhGe単結晶の電気抵抗の温度依存性である。約 10 Kで明瞭な強磁性転移が観測された。また、U、GeとともにNMR核種の存在比が少ないために、強力な微視的手段であるNMR測定が難しい。そのため、⁷³Geを用いた UGe_2 及び URhGe を作製し、これまでに、 UGe_2 では Ge NMR の観測に成功した。

UGe₂の電気抵抗と $P-T-H$ 相図

阪大極限・阪大基礎工^A、阪大理^B、原研先端基礎^C

小林 達生、花園 勝巳^A、立岩 尚之^A、摂待 力生^B、大貫 悅睦^B、芳賀 芳範^C

UGe_2 の高圧下における電気抵抗測定から $P-T-H$ 相図を明らかにした^{1,2)}。またキュリー点やもう一つの転移 T^* が消失する圧力 p_C 、 p_C^* に圧力をチューニングすることにより、その臨界挙動を明らかにした。 p_C 、 p_C^* 近傍では T_C 、 T^* がブロードになり観測しにくいため電気抵抗の磁場変化からチューニングを行った。その結果、低温での電気抵抗の温度依存性は p_C 、 p_C^* 近傍においても T_2 にしたがい、量子臨界点で期待される非フェルミ液体的振舞いは観測されなかった。 p_C 近傍では強磁性転移が一次転移的であることをグルノーブルグループは指摘しており、これとコンシスティントである。また同様の理由から残留抵抗の増大も観測されない。 p_C^* よりわずかに高い圧力では特徴的な H_{C2} の増大が見られる。 H_{C2} は T^* が誘起される磁場に敏感で²⁾、この転移に関連するゆらぎが超伝導機構に重要であることはまちがいない。

- 1) N. Tateiwa, T. C. Kobayashi, K. Hanazono, K. Amaya, Y. Haga, R. Settai, Y. Onuki, J. Phys.: Condens. Matter **13** (2001) L17 - L23.
- 2) T. C. Kobayashi, K. Hanazono, N. Tateiwa, K. Amaya, Y. Haga, R. Settai, Y. Onuki, cond-mat/0107584.

UGe₂ の磁化・比熱

阪大院基礎工、阪大極限セ^A、阪大院理^B、原研先端基礎研^C
立岩 尚之、天谷 喜一、小林 達生^A、摂待 力生^B、大貫 悅睦^B、芳賀 芳範^C

昨年、イギリスのLonzarichとフランスのFlouquetの両グループは UGe₂ の高压相 (1.0 - 1.6 GPa) で強磁性状態と超伝導状態が共存することを発見した[1,2]。同じウラン 5f 電子が両秩序状態を担うと考えられ大変興味深い。本研究会では私達のグループが行ってきた比熱・磁化測定について報告する[3-6]。

我々は超伝導転移による比熱異常を観測するため残留抵抗比 (RRR) 600の大変純良な単結晶試料を用いて比熱測定を行った。1.15 GPaにおける測定結果を図1に示す。0.6 K近辺に超伝導転移に対応する比熱のピークが現れ、交流磁化率には遮蔽効果に伴う急激な変化が観測された。以上の結果から、UGe₂ の超伝導転移はバルクの相転移であることが確認された。比熱の飛びは小さく $\Delta C/\gamma_N T_{SC}$ (T_{SC} :超伝導転移温度、 γ_N : T_{SC} 直上の電子比熱係数) は0.2程度であり、 C/T を0Kまで外挿すると 65 mJ/moleK² もの大きな残留電子比熱係数が存在する。測定に用いた試料のRRRが600であることを考慮すると UGe₂ の超伝導は不純物に大変敏感であると考えられる。図2は超伝導転移のピークの圧力依存性を調べた結果である。 T^* が消滅する臨界圧力 P_C^* (1.20 GPa) 以上の1.25 GPa, 1.35 GPaでは、ピークは弱くなり $\Delta C/\gamma_N T_{SC}$ は0.1以下となる

ことが分かった。

図3は圧力相図と電子比熱係数 γ の圧力依存性をプロットしたものである。1.0GPa以下の低圧側では電子比熱係数はほぼ一定であるが、超伝導が現れる圧力領域で急激に増加し、 T^* が消滅する臨界点 $P_C^* = 1.2$ GPa近辺で約 100 mJ/moleK² まで増大することが明らかとなった。有効質量の増大は最近高圧下dHvA効果の実験でも確認された[7,8]。超伝導が出現する圧力領域(1.0~1.5 GPa)では低温で重い電子状態が形成され、超伝導は重い準粒子により担われていると考えられる。

λ が急激に増大する P_C^* 近傍で超伝導転移温度も最大値を示すことから、 T^* が消滅する臨界点 P_C^* 近傍の磁気的相互作用

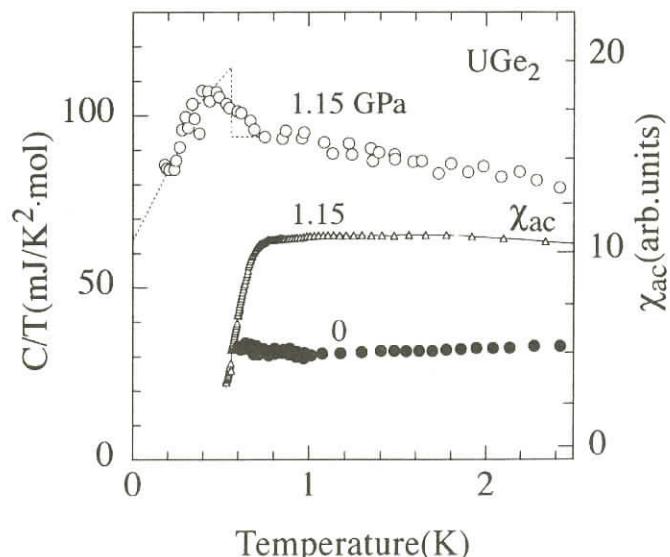


図1 UGe₂の比熱と交流磁化率

用が超伝導出現に関係していることが示唆される。
 T^* における磁化の変化を調べるため高圧下磁化測定を行った。実験結果を図4に示す[9]。 T^* における磁化の異常は1.0GPa近辺で明確になり、1.18 GPaでは約30%もの磁化の増大が観測された。現時点では T^* の起源はよくわかっていないが、CDW/SDW転移との関係も指摘されている[1,2]。渡辺・三宅らはこの立場に上でUGe₂の超伝導を理解する微視的理論モデルを提案している[10]。現時点ではCDW/SDW転移の直接的な実験的証拠はないが今後、中性子・X線散乱実験などによる詳細な追求が望まれる。

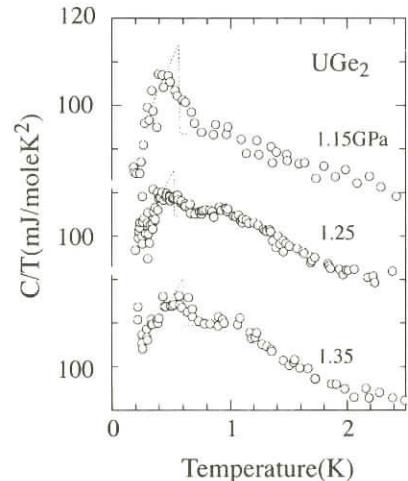


図2 UGe₂の比熱 (1.15 1.25 1.35GPa)

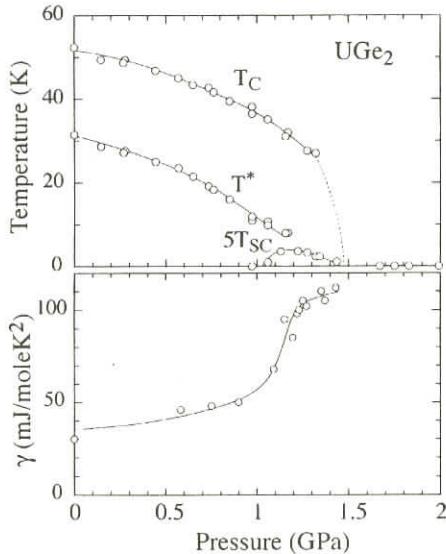


図3 UGe₂の圧力相図と γ の圧力依存性

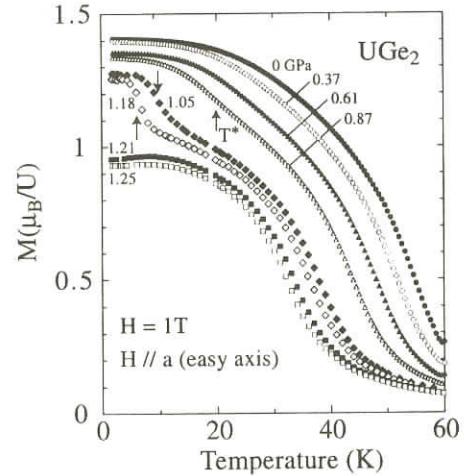


図4 UGe₂の磁化

- [1] S. S. Saxena et al: Nature 604 (2000) 587.
- [2] A. Huxley et al: Phys. Rev. B 63 (2001) 144519.
- [3] N. Tateiwa et al: J. Phys.:Condense. Matter 13 (2001) L17.
- [4] N. Tateiwa et al: to be published in Physica B, cond - mat/0107132.
- [5] N. Tateiwa et al: J. Phys. Soc. Jpn. 70 (2001) 2876.
- [6] N. Tateiwa et al: to be published in the proceeding of "ACTINIDE 2001"
- [7] T. Terashima et al: Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 166401. (寺嶋太一：本研究会)
- [8] R. Settai et al: to be published in Journal of Physics; Condens. Matter. (摂待力生:本研究会)
- [9] 同様の測定は名古屋大グループによっても行われている (佐藤憲昭：本研究会)
- [10] S. Watanabe and K. Miyake: submitted to J. Phys. Soc. Jpn, cond - mat/0110492
 (渡辺真仁：本研究会)

UGe₂ における磁性と超伝導

名大院理 本山 岳、中村 説志、牛田 泰久、西岡 孝、佐藤 憲昭

UGe₂ に関するこれまでの研究を見ると、実験的にも理論的にも、強磁性と超伝導の共存は空間的に homogenous であるということが前提になっているように思われる。これに対し私達はinhomogenous であろうと考えている。その根拠となる実験結果を報告し、議論したい。尚、詳細は、Phys. Rev. B (Rapid communication) (2002) に間もなく掲載予定である（下記のabstract参照）。

We have measured magnetizations of the ferromagnet UGe₂ which shows superconductivity in a narrow external pressure range, $P_1 \leq P \leq P_2$ in the ferromagnetic state. When P is close to P_1 in the superconducting phase, the ac magnetic susceptibility indicates a peak - anomaly associated with the ferromagnetic transition and an imperfect superconducting shielding effect. As P increases away from P_1 , the peak - anomaly becomes substantially broad and obscure, while the diamagnetic susceptibility approaches a perfect superconducting shielding. We have also observed that a saturation magnetization at low temperature shows a steep decrease with increasing P in the superconducting state. From these observations, we suggest that the superconductivity coexists in a competitive way with the ferromagnetism; as P increases, a volume fraction of the superconducting state grows over the system, while the ferromagnetic ordering possibly becomes spatially inhomogeneous.

超伝導体の磁場中の振舞い

岡山大学院自然、岡山大学理^A 町田 一成、瀧川 光明、中井 宣之、市岡 優典^A

種々の超伝導体の混合状態における渦の理論的研究をおこなっている。渦糸まわりの低励起の空間構造はクーパー対の対称性を敏感に反映するので対関数の同定等に有用な情報を与える。そのための実験手段は現在の所、非常に限られており実験方法の開発が焦眉の問題である。ここでは核磁気共鳴法による新しい渦研究のためのスペクトロスコピーを提案し、その手段を用いてなされた最近の実験例をまじえて有効性を紹介した。基本的なアイデアは核磁気共鳴スペクトル—Redfield Patternとよばれることもある—の各周波数（あるいは磁場）が渦格子の場所の情報をもっていることを利用する。共鳴周波数をチューニングすることによって緩緩和時間 T_1 を測定すると場所ごとの電子励起を知ることができる。最近、国内外の実験グループによって実験がなされ、この理論的提案の有効なことが実証された。

研究会ではこの話題に加えて、電子比熱係数の磁場依存性の問題、磁場中一次相転移の話題等にもふれた。

- 1) M. Takigawa, et al, Phys. Rev. Lett., 83 (1999) 3057.
- 2) M. Takigawa, et al, J. Phys. Soc. Jpn., 69 (2000) 3943.
- 3) N. Nakai, et al, J. Phys. Soc. Jpn., 71 (2002) No. 1.

強磁性超伝導体 UGe_2 における異常な物性と その起源としての結合したCDWとSDW揺らぎ

東大物性研^A、阪大基礎工^B 渡辺 真仁^A、三宅 和正^B

昨年、圧力下の強磁性相中で超伝導が発見された UGe_2 は、同じ 5f 電子が磁性と超伝導に共に寄与する最初の物質として注目を集めている[1]。興味深いことに、強磁性相中に電気抵抗がカスプ的な異常を示す温度 T_x が存在することが報告されており[1-3]、圧力下での上部臨界磁場 $H_{\text{c}2}$ の異常な振る舞いも観測されている[2]。

一方、磁化容易軸を正しく考慮した最近のバンド計算によれば、 UGe_2 は majority spin のフェルミ面がネスティングし易い構造をもつことが示唆されている [4,5]。また、大きな格子比熱の存在、及び電荷密度波(CDW)の存在が実験的に確認されている α -ウラニウムの結晶構造との類似性から、 UGe_2 では T_x で majority spin のフェルミ面の不完全ネスティングにより、CDWゆらぎ（と同時にSDWゆらぎ）が増大していると考えられる。また、温度、圧力相図中で T_x が超伝導転移温度の最大値付近に接続することから、majority spin のCDWゆらぎが超伝導の driving force になっていると考えられる。

講演では、上記の描像を仮定すると、 $T < T_x$ での一様磁化の増加、及び格子比熱の増大、そして圧力下の $H_{\text{c}2}(T)$ の交差といった、この物質の異常な振る舞いを自然に説明できることを示す[6]。具体的には、CDW - SDW のモード結合の効果によって $T < T_x$ での一様磁化が増加し、そのゆらぎによって triplet ペア間に引力が働くことを示す。さらに、この機構に圧力と磁場の効果を取り入れた強結合超伝導の枠組みに基づいて $P=11.4 \text{ kbar}$ と $P=13.5 \text{ kbar}$ の $H_{\text{c}2}(T)$ が交差することを示す。また、 T_x での CDW と結合したフォノンのソフト化により、格子比熱が増大することを示す。

- [1] S. S. Saxena, *et al.*, Nature 406, 587 (2000).
- [2] A. Huxley, *et al.*, Phys. Rev. B 63, 144519 (2001).
- [3] N. Tateiwa, *et al.*, J. Phys. C. 13, L17 (2001).
- [4] H. Yamagami, preprint.
- [5] A. B. Shick and W. E. Pickett, Phys. Rev. Lett. 86, 300 (2001).
- [6] S. Watanabe and K. Miyake, submitted to J. Phys. Soc. Jpn. (2001) (cond-mat/0110492).

トリプレット超伝導体中の近藤効果

静大教育、静大理^A 古賀 幹人、松本 正茂^A

異方的超伝導体では、クーパー対の軌道自由度が重要な役割を果たす。最近発見された、高圧下で強磁性相と共に存する UGe_2 や、自発的に時間反転を破る Sr_2RuO_4 などの超伝導体で実現されていると考えられるスピン三重項超伝導体の磁気的性質には軌道自由度が関係する。

これまでの超伝導体中の近藤効果についての理論的研究では、s 波超伝導体に局在スピノン ($S_{\text{imp}}=1/2$) がある場合がよく知られている。この場合、一重項クーパー対と近藤効果の競合が起

き、基底状態について一重項と二重項の間で移り変わりがあることが分かっている。我々の研究では、 p_x+ip_y の対称性をもつスピン三重項超伝導体中の局在スピン($S_{\text{imp}}=1/2$)による近藤効果で、基底状態は全てのパラメータ領域でスピン二重項であることが示された。[1-3] 局在スピンによる束縛状態のエネルギーの振舞いが T_K/Δ (T_K は近藤温度、 Δ はエネルギー・ギャップ)でスケールされる、ということは s 波超伝導体の場合と同様であるが、近藤一重項が実現不可能であることはそれとは全く異なる結果である。

上述の場合は全て単純な s 波的な近藤結合だけを考慮したときである。 p 波的な近藤結合も導入すると、近藤効果が不純物スピンの構造に強く依存する。[4] このように、電子系の方の内部自由度によっても多種多様な近藤効果が考えられる。以上の結果は、超伝導と磁気秩序の共存を理解するのにも重要であると考える。

[1] M. Matsumoto and M. Koga, J. Phys. Soc. Jpn. 70 (2001) 2860.

[2] M. Matsumoto and M. Koga, printed in Phys. Rev. B.

[3] M. Koga and M. Matsumoto, cond-mat/0109510.

[4] M. Koga and M. Matsumoto, cond-mat/0109513.

UGe₂ の超伝導に関するまとめと問題点

東京大学物性研究所 原子力研究所先端基礎研究センター 上田 和夫

与えられたテーマは、強磁性と超伝導の共存がいわれている UGe₂ について、その研究の焦点と今後の問題点をまとめよ、ということである。UGe₂ に対して私自身が何か仕事をしたわけではないので、この興味深い現象に対して抱く素朴な疑問と考察すべき点を列挙し、参加者による議論のきっかけとする。

1) 超伝導相は強磁性相の内部でのみ存在するのか？

圧力下の強磁性転移は一次転移か？

2) 超伝導と強磁性相の共存

強磁性モーメントが空間変調を受けた cryptomagnetism か self-induced vortexstate か、いずれにしても長周期構造が形成されている必要性がある。

3) T^* の存在と超伝導機構。

4) spin triplet の超伝導。

結晶が反転対称性を持つことの重要性。

5) multi-band system であることの意味。

spin triplet の超伝導が議論されている代表例である Sr₂RuO₄, UPt₃ では、フェルミ面に多くのバンドが顔を出している。これは、spin triplet の超伝導に対して軌道縮退がどのような役割を果たしているか、という基本的問題と関連していると考えられる。

物性研究所ISSPワークショップ

量子ホール系の新展開

日時 2002年2月15日(金)～2月16日(土)

場所 東京大学柏キャンパス物性研究所 6階大講義室

東京大学物性研究所 家 泰弘

量子ホール系（低温強磁場下の半導体2次元電子系）は良く制御された強相関物理の実験舞台として確立したものであるが、最近、2層系における層間コヒーレンス、高次ランダウ准位におけるストライプ用（電荷密度波相）、核スピンが関与する長時間緩和現象、エッジ状態および多層量子ホール系におけるカイラル表面状態、など、数々の興味深い展開がある。この状況を踏まえて、関係分野の実験・理論家が比較的少人数で突っ込んだ討論を行うワークショップを開催する企画を、平成13年度後期客員所員江澤潤一教授とともに立案した。ISSPワークショップとして採択され、平成14年2月15日(金)、16日(土)の両日にわたって開催した。約40名の参加を得て、2層系やスピン自由度などextraの自由度をもつ量子ホール系の多体状態、ストライプ相と外部ポテンシャル変調との関係、量子ホール状態のブレークダウン機構、アンチドット・多層系における輸送現象などのテーマに関して、活発かつ率直な議論が戦わされ、大変有意義な研究会であった。

プログラム

2月15日(金)

【Introduction 座長: 家 泰弘】

9:30～9:35 家 泰弘（東大物性研）はじめに

9:35～10:20 青木 秀夫（東大理）量子ホール効果の理論（review）

10:20～10:40 ——休憩——

【2層量子ホール系：座長：石川 健三】

10:40～11:20 江澤 潤一（東北大理・東大物性研）

2層量子ホール系におけるスカーミオンの重複励起

11:20～11:40 熊田 優雄（東北大理）2層系 $\nu = 2/3$ 量子ホール状態の相図

11:40～12:00 澤田 安樹（東北大理）2層系 $\nu = 1$ 量子ホール状態における励起エネルギー

12:00～13:30 ——昼食——

【2層量子ホール系：座長：青木 秀夫】

13:30～13:50 静谷 謙一（京大基研）二層量子ホール系の電磁特性と実効ゲージ理論

13:50～14:10 岩崎 愛一（二松学舎大）Effects of pseudo Skyrmion excitations on tunneling conductance in bilayer quantum Hall states at $\nu = 1$

14:10～14:30 中島 龍也（東北大理）二層量子ホール系における励起スペクトル

14:30~14:50 野村健太郎（東大総文） 2層量子ホール系の数値的研究
14:50~15:00 Discussion
15:00~15:20 —— 休憩 ——
【ストライプ相】：座長：明楽 浩史
15:20~15:50 遠藤 彰（東大物性研） 高次ランダウ準位における抵抗異方性（実験）
15:50~16:20 石川 健三（北大理） 量子ストライプ状態の電気伝導と整数量子ホール効果
16:20~16:50 吉岡大二郎（東大総文） 高次のランダウ準位におけるストライプの配向
16:50~17:10 —— 休憩 ——
【ストライプ相】：座長：遠藤 彰
17:10~17:30 青山 尚広（北大理） 周期ポテンシャル中のストライプの方向
17:30~17:50 前田 展希（北大理） ストライプホール状態における低エネルギー励起状態
17:50~18:10 柴田 尚和（東大総文） 高次ランダウ準位の基底状態
18:10~18:20 Discussion

18:30~20:00 —— 懇親会 ——

2月16日（土）

【エッジ状態・ブレークダウン現象】：座長：長田 俊人

9:30~10:30 河野 行雄（東大理） 量子ホール系における非平衡電子分布とポテンシャル分布の観測
10:00~10:20 音 賢一（阪大理） サイドゲート試料の閉じこめたポテンシャルと量子ホール効果のブレークダウン
10:20~10:40 新井宏一郎（阪大理） 細線ゲートで調べたエッジチャネルの分布
10:40~11:00 —— 休憩 ——
【エッジ状態・ブレークダウン現象】：座長：岡本 徹
11:00~11:30 明楽 浩史（北大工） 量子ホール効果のブレークダウンの電子過程と空間変動
11:30~11:50 川口 康（東大総文） 整数量子ホール効果breakdown現象
11:50~12:10 町田 友樹（科技団／東大総文） 分数量子ホール端状態における電子一核スピン相互作用
12:10~12:20 discussion

12:20~13:30 —— 昼食 ——

【アンチドット・多層系】：座長：家 泰弘

13:30~14:00 瓜生 誠司（理研） アンチドット格子における磁気輸送
14:00~14:30 長田 俊人（東大物性研） 多層系の層間コヒーレンス角度依存磁気抵抗振動効果
14:30~14:50 蔵口 雅彦（東大物性研） 多層量子ホールにおける端状態とバルク状態の混成
14:50~15:00 discussion
15:00 —— 閉会 ——

*閉会後、希望者に実験室等見学ツアー

量子ホール効果の理論（review）

東京大学大学院理学系研究科 青木 秀夫

量子ホール系の最近の理論的発展をoverviewする；

• スピン状態

分子量子ホール系は、特徴ある強関係であるが、その顕著な表れとしてスピン状態（強磁性、非偏極、部分偏極）が多彩であり，“exchange engineering”的観を呈している。最近では、高いランダウ準位、 $\nu = 1/2$ 近傍、2層系などに理論・実験とも発展している。

• 複合粒子描像

ここでも様々な発展があり、複合粒子が励起にも適用できるか、励起から定義した有効質量(m^*)の値は如何、複合フェルミオン間の相互作用は強いか、Landauのフェルミ液体論は成り立つか、等についての最近の結果を紹介する。注意すべきことは、 m^* の定義には様々ある（transport mass, Kohn 定理を破ることにより観測されたと最近主張されたcyclotron mass等）。

また、ゲージ論としても様々な版があり、統一的理解が試みられ始めている。

• フエルミ液体・BCS状態・stripe

$\nu = 1/2 \rightarrow 5/2 \rightarrow 9/2 \cdots$ につれてフエルミ液体→BCS状態→stripeと考えられており、実験でも stripeが観測されている。d波、p波ペアリング超伝導との形式的関連も議論されている。量子ホール系は元々ゲージ対称性破れ状態であるが、このように、様々な相との間の量子相転移のユニークな舞台を開きつつある。

• 2層量子ホール系

2層間の電子相関により層間相関状態（≈excitonic相）をとる場合は一つの位相が決まり、層間トンネルリングの大きさも重要である。様々な $\nu_{上層}$ 、 $\nu_{下層}$ における擬スピンの容易軸方向や安定性・履歴が東北大-NTTにより調べられており、2層の電荷再配分、層間輸送もkeywordsとなる。これらに対する理論（回避されたAnderson直交定理、等）も様々に開発されている。

• その他、重要なテーマとして、光学的性質（磁気ルミネンス、励起子、FIR、光の非弾性散乱）、原子核スピン・電子相互作用、量子ホール効果のbreakdown、Wigner solid状態、強磁場中量子ドットなどの理論的理解、3次元における量子ホール効果（分数および整数、磁場誘起SDUとの絡み）の提案、原子のBose-Einstein凝縮におけるcomposite boson描像など他の数値的方法がある。詳細は以下も参照。

- [1] H. Aoki in *Dynamics of Gauge Fields* ed. by A. Chodos et al. (Universal Academy Press, 2000), p. 371.
- [2] 青木秀夫：固体物理 **36**, 607(2001); **37**, 110(2002).

二層量子ホール系におけるスカーミオン重複励起

東北大大学院理学研究科・東京大物性研究所 江澤 潤一

量子ホール系の最近の発展として、交換相互作用による量子コヒーレンスに関連した諸現象がある[1]。一層系では特異な位相的励起であるスカーミオンの存在が顕著である。二層系では層間にもコヒーレンスが発生し、その結果、層間にジョセフソン電流が流れる[2]。

この講演では、二層量子ホール系にSU(4)スカーミオンが存在することを論証し[3]、この観点から、最近の東北大NTT共同研究による実験結果を解析する。

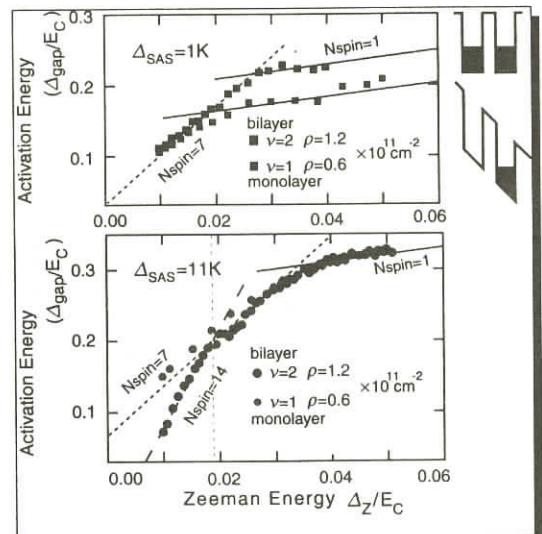
二層系のスカーミオンは CP^3 場で記述され、占有率 $\nu = 1$ では、3つのスケールパラメーターを持つ。そのうち、エネルギー的に、スピンの反転パラメーターと擬スピンの反転パラメーターの二つが重要である。これらのパラメーターは活性化エネルギーが最小になるように決まる。端的にいうなら、スピン・スカーミオンと擬スピン・スカーミオンのコヒーレントな重ね合わせが実際に励起される二層系の準粒子である。

スカーミオンの性質を実験的に調べるには、(A) 活性化エネルギーの二層間の電子密度差依存性と(B) 横磁場依存性を測定するのがよい。

(A) 二層系のスカーミオンは、両層での電荷の励起を生み、層間に密度差をつけるとキャパシタンス効果による静電エネルギー(charging energy)が増大する[4]。この分析からスpin・スカーミオンと擬スpin・スカーミオンの混ざり具合が分かる。

(B) 二層系での活性化エネルギーの横磁場依存性は、整合相・非整合相転移を生む。横磁場が増大すると、整合相では活性化エネルギーは急速に減少し、非整合相ではほぼ変化しない。これを説明する試みとしてMoon達によってメロン励起が提唱されたが、このような励起のエネルギーは大きすぎて正しいとは考えられない。この講演で、「横磁場の侵入による層間交換エネルギーの減少」という新しい機構を提唱する。

$\nu = 2$ でのスカーミオン励起は更に面白い現象である。スpin 3重項セクターでのスpin反転数を一層系でのスpin反転数と比較すると、トンネル・ギャップが2ケルビンより大きいと、反転数は一層系の2倍で、2ケルビンより小さいと一層系と同じになる[5]。この現象を、トンネル・ギャップが小さいとこの系は実質的に2枚の一層系に等しく、大きいと純二層系になる、ということにより説明する。純正二層系では、最低ランダウ準位以内の励起は、両層に励起した二つの CP^3 スカーミオンからなるのである。即ち、 $\nu = 2$ ではスカーミオンの重複励起が起こる。



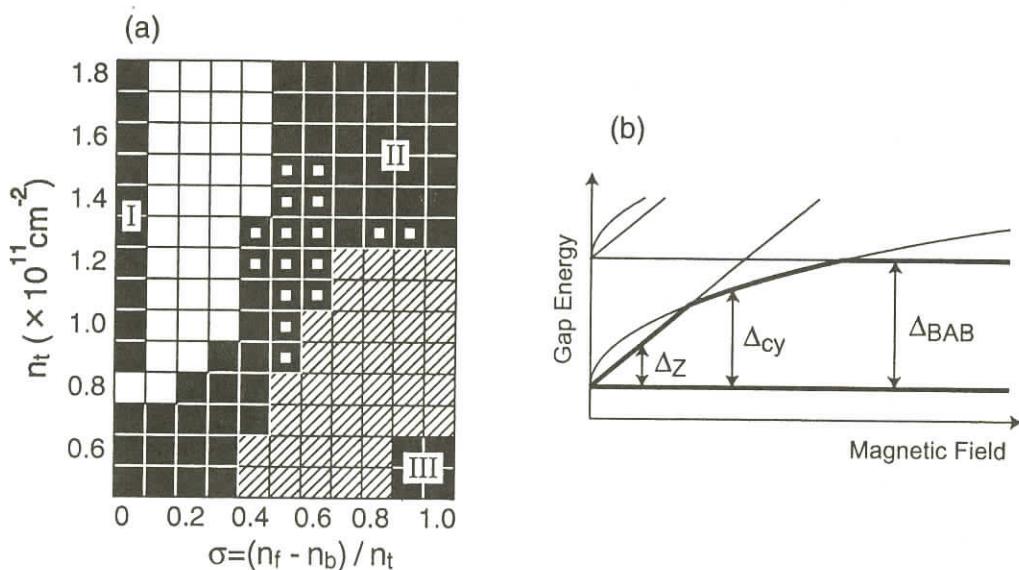
- [1] Z.F.Ezawa, *Quantum Hall Effects*, World Scientific 2000.
- [2] Z.F.Ezawa, and A. Iwazaki, IJMP B6(1992)3205; PRB47(1993)7295.
- [3] Z.F.Ezawa, PRL 82(1999)3512.
- [4] A.Sawada et al., PRL 80(1998)4534; PRB59(1999)14888.
- [5] N.Kumada et al., JPSJ 69(2000)3178.

2層 $\nu = 2/3$ 量子ホール系状態の相図

東北大院理 熊田 倫雄、森野 正行、下田 雄一、澤田 安樹、江澤 潤一
NTT物性科学基礎研 村木 康二、佐久 規、平山 祥郎

2層系では1層系の自由度に層の自由度が加わる。この自由度が重要な役割を果たす現象として、2層系 $\nu = 2$ 量子ホール状態がある。この状態では層間トンネリングエネルギー Δ_{SAS} とゼーマンエネルギーの競合で、スピン偏極状態と非偏極状態の間で相転移が起きる。このように多彩な状態が2層系整量子ホール状態では観測されているが、2層系分数量子ホール状態の測定はほとんど行われていない。

本研究では複合フェルミオン (CF) の $\nu = 2$ である $\nu = 2/3$ 量子ホール状態の総電子密度 n_t 、両層の電子密度 σ 依存性を測定した相図を作成した(図(a))。その結果、3つの量子ホール状態と2種類のヒステリシスが存在することが分かった。層の自由度を扱うのに擬スピンを用いるが、擬ゼーマンエネルギーは $\Delta_{BAB} = (\Delta_{SAS}^2 + (eV)^2)^{-1/2}$ と表され、電子密度差を大きくするバイアスボテンシャル eV によって増加する。 n_t が大きく σ が小さい領域Iではゼーマンエネルギーが大きく、擬ゼーマンエネルギーが小さいのでスピン偏極 - 擬スピン非偏極状態が、 n_t が小さく σ が大きい領域IIIではスピン非偏極 - 擬スピン偏極状態が実現する。中間の領域IIではスpin偏極 - 擬スpin偏極状態が実現する。この様に3つの量子ホール状態は2層系に拡張したCFエネルギー準位の交差でよく説明できた(図(b))。また、ヒステリシスはスpin状態の異なる準位が交差する時発生している(図(a)斜線部)。この領域ではスpin偏極状態と非偏極状態のドメイン構造が出来るが、磁気抵抗の温度依存性から磁場をゆっくり(0.006T/min.)上げた時だけその履歴を反映したドメイン構造をとることが分かった。



(a) 2層系 $\nu = 2$ の相図。横軸は両層の電子密度差、縦軸は総電子密度である。黒色は量子ホール状態、白色は非量子ホール状態、斜線部はヒステリシス領域を表している。白抜きの領域では $\nu = 2/3$ 量子ホール状態は形成されるが、それより僅かに低磁場側ではヒステリシスが発生する。(b)複合フェルミオンのエネルギー準位。サイクロトロンエネルギー Δ_{cy} はクーロンエネルギー ($\propto B^{1/2}$) に比例する。ゼーマンエネルギー Δ_z 、擬ゼーマンエネルギー Δ_{BAB} を変える事により、3種類の量子ホール状態が出現する。

2層系 $\nu = 1$ 量子ホール状態における励起エネルギー

東北大学大学院理学研究科

澤田 安樹、寺澤 大樹、熊田 倫雄、森野 正行、下田 雄一、江澤 潤一
NTT物性科学基礎研究所 村木 康二、佐久 規、平山 祥郎

2層系 $\nu = 1$ 量子ホール状態は全ての電子密度差 $\sigma = (n_f - n_b)n_t$ に対して安定である。ここで、 n_f は前面層の電子密度、 n_b は背面層の密度、 n_t は総電子密度である。両層の電子密度差が等しい時 ($\sigma = 0$) における励起ギャップの横磁場依存性は、整合・非整合転移を伴った特異な振る舞いを示す。また 1 層化した時 ($\sigma = 1$) における励起ギャップの横磁場依存性もスピンの集団励起であるスカーミオンで説明される特異な振る舞いを示す。従って、励起エネルギーの横磁場依存性が整合・非整合からスカーミオン的振る舞いに変わる密度差 σ_c の存在が期待できる。そこで電子密度差を変えて活性化エネルギーの横磁場依存性を測定して 2 層系 $\nu = 1$ 量子ホール状態の励起ギャップの振る舞いが整合・非整合からスカーミオンに変貌する過程を調べた。

図 1(a) はトンネルギャップの異なる試料の活性化エネルギーの電子密度差依存性である。どちらの試料においても極大値（矢印で示した箇所）が現れるが、その電子密度差 σ_{\max} は試料のトンネリングエネルギーが大きいほど小さくなることがわかった。図 1(b) はトンネルギャップ $\Delta_{SAS} = 10.9\text{K}$ の試料の活性化エネルギーの回転角度依存性の測定結果である。以前の測定と同様に $\sigma = 0$ では活性化エネルギーが試料の回転とともに減少し、 $\sigma = 1$ では増加している。また $\sigma = 0.6$ と 0.7 で回転角 50° 以上から活性化エネルギーが増加し始め、 $\sigma = 0$ から 1 へ連続的に変化している。従って特別な σ_c は存在しなかった。

σ に依存した活性化エネルギーの変化は、 $\sigma = 0$ および 1 の両端の活性化エネルギーを $\Delta_0(\theta)$ 、 $\Delta_1(\theta)$ とすると $\Delta_\sigma(\theta) = (1 - \sigma)\Delta_0(\theta) + \sigma\Delta_1(\theta)$ としてほぼ振る舞いを説明できる。このことはスピンと擬スピンの両方の多重反転を含んだ素励起が発生していることを意味していると思われる。

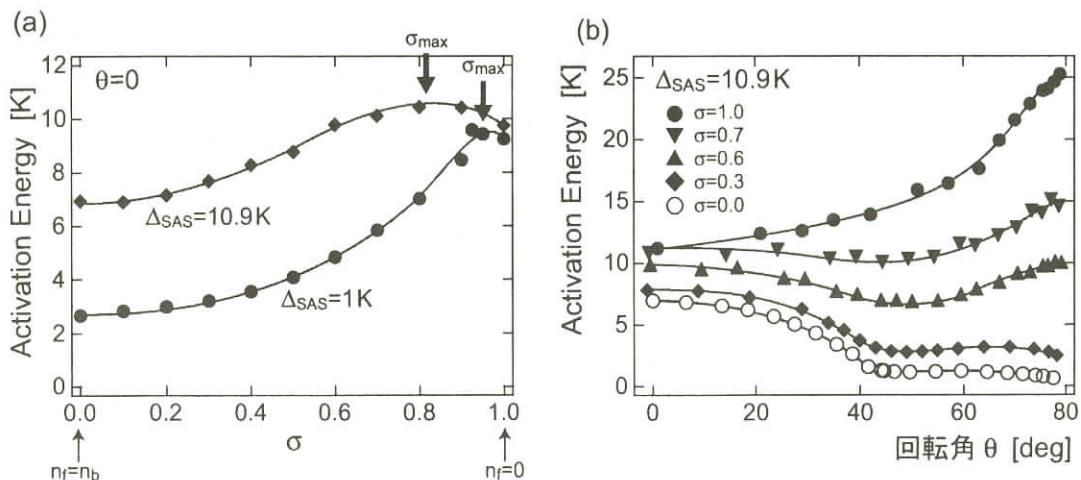


図 1 : (a) トンネリングギャップの異なる試料の活性化エネルギーの電子密度差依存性。

(b) $\Delta_{SAS} = 10.9\text{K}$ の試料における活性化エネルギーの回転角依存性。

二層量子ホール系の電磁特性と実効ゲージ理論

基礎物理学研究所 静谷 謙一

この講演では、汎関数ボゾン[1]の手法を用い、非圧縮性状態の電磁応答から分数量子ホール効果の長波長実効理論を構築するアプローチについて報告しました。このアプローチでは通常の複合ボゾン／複合フェルミオン描像を想定せずに、量子ホール状態が非圧縮性状態であるという特徴と、非圧縮性状態の電磁応答は（ランダウ準位への射影を用いると）明確に決まるという点に着目して実効理論を構成します。その意味で、通常のChern - Simons 理論と相補的な観点と理論をもっています。このボゾン化を用いた理論は一層ホール電子系についてはChern - Simons 理論の結果を再現します。その結果、複合ボゾン描像と複合フェルミオン描像の関係、さらに分数量子ホール効果の長波長域における普遍性を統一的に理解することができました。

このアプローチの真価は二層ホール系に進むと顕著になります。液体ヘリウムの記述で成功を収めた単一モード近似に基づく集団励起の一般論から、二層ホール系には固有な集団励起が現れることが知られています。一方で、二層系のChern - Simons 理論では、この（ランダウ準位内）集団励起が（RPA 近似の範囲では）準位間相当の大きな励起エネルギーをもってしまうという困難が指摘されています[2]。そこで単一モード近似で二層系の電磁応答を考察してみたところ、ダイポール活性な集団励起が出現する結果として、二層系の電磁特性が大きく変更を受けることが分かり、問題の集団励起スペクトルを正しく実現する実効ゲージ理論を導くことができました。詳細については原論文と最近のプレプリント[3]をご参照下さい。

[1] E.Fradkin and F. A. Schaposnik, Phys. Lett. B 338, 253(1995).

[2] A. H. MacDonald and S. - C. Zhang, Phys. Rev. B 49, 10 208(1994).

[3] K. Shizuya, Phys. Rev. B 63, 245301 (2001) and preprint cond - mat/0112449.

Effect of pseudSkyrmion excitations on tunneling conductance in bilayer quantum Hall states at $\nu = 1$

Nishogakusha University A. Iwazaki

I would like to discuss that tunneling conductance in bilayer quantum Hall states at $\nu=1$ performed by Eisenstein, et al., does not show DC Josephson effect owing to existence of pseudoSkyrmion excitations, unless we adjust filling factor correctly, at least, in the accuracy of the order of 10^{-4} . This is because the Skyrmion excitations disturb the coherence of the tunneling electrons, in other words, the coherence of condensation of electron - hole pairs.

As we have shown in my recent paper, relevant excitations in the quantum Hall states with $l \approx d$ are pseudoSkyrmions, whose spatial extention is determined by the parameters, tunneling energy, Δ_{sas} and imbalance of electron densities, $(\rho_1 - \rho_2)/(\rho_1 + \rho_2)$ between two layers.

The actual scale in the experiment is order of $10l$, which can be obtained by looking at the decay rate of the conductance against parallel magnetic field. Thus, even if we adjust the filling factor in the accuracy of the order 10^{-2} , where number density of the Skyrmions becomes $10^{-2}\rho$, almost of whole plane is occupied by the Skyrmions. This implies that the coherence of the condensate is disturbed completely so that the Josephson effect disappears.

Therefore, in order to observe dissipation less tunneling current we need to diminish the effects of the Skyrmions, especially, make small their density and spatial extenstion. The density becomes small by adjusting the filling factor accurately and the spatial extenstion becomes small by choosing large imbalance parameter, for example, 0.5.

二層量子ホール系における励起スペクトル

東北大理 中島 龍也

二重量子井戸構造などで実現される二層量子ホール系には、層間隔と層間トンネリングの強さが制御可能なパラメータとして存在し、その層自由度は擬スピンを用いてしばしば表される。こうした二層系で実現される量子ホール状態の中でも、擬スピン三重項ペアリング状態として議論されている二層 $\nu=1/2$ 状態は、液体 ^3He やルテニウム酸化物における物理との関連からも興味深い。層間トンネリングが強くなる際に二層 $\nu=1/2$ 状態が Ψ_{331} 状態からPfaffian状態へ連続的に発展するというHoらの主張に対して、我々は基底状態の擬スピン揺らぎや励起スペクトルの変化を調べたが、その結果を見る限りにおいては、有限の層間隔を持つ二重 $\nu=1/2$ 状態の変化は彼らの主張ほど単純ではないようである。本講演では、密度励起や擬スピン S_y, S_z の揺らぎに起因する励起に重きをおき、その強さや励起エネルギーの変化について報告する。

2層量子ホール系の数値的研究

Evolution of Ground State in Double - Layer Quantum Hall System

東大総合文化研究科相関基礎科学系 野村健太郎、吉岡大二郎

2つの2次元電子系を近接させて強磁場をかけた2層量子Hall系は帶電体としての静電エネルギーを与える層間距離 d 、層間のトンネリング Δ_{SAS} 、占有率 ν など多くの可変なパラメーターがあり、これらによって強相関効果が反映した量子相転移が起こりうる非常に興味深い系である。

全占有率が1のとき $\Delta_{SAS}=0$ でも擬スピンがすべて揃った擬強磁性量子ホール状態になっており、層間距離を増加させると非量子ホール状態に転移する。後者は二つの独立なフェルミ液体状態と考えられる。最近、層間共鳴トンネリングやクーロンドラッグの実験などの輸送現象にも注目が集まっている。これらの領域の基底状態および量子相転移に関して理論的にはいくつかのシナリオが現象論的に議論されているが、詳しい理解は未だなされておらず重要な課題として残されている。

我々はトーラス上の厳密対角化法を用いてこの系の基底状態、および底エネルギー励起を層間間隔

d を変えつつ調べた。励起スペクトルの計算からは d/l が1.4付近で擬スピン波の消失が見られた。これは層間コヒーレンスの消失を意味する。一方、層間の相関は対分布関数を計算することで直接見ることができる。講演ではこれらの計算結果を紹介し、電子ホール - 非量子ホール転移のメカニズムと転移点近傍の基底状態について議論したい。後半は占有率が3の2層量子ホール系の磁気的異方転移に対する研究を紹介する。この系では層間間隔が小さいときはイジング的異方性をもち、層間間隔が大きくなるにつれ capacitative charging energy が大きくなってドメインウォールを形成する。この系の相図を数値的アプローチを紹介する。

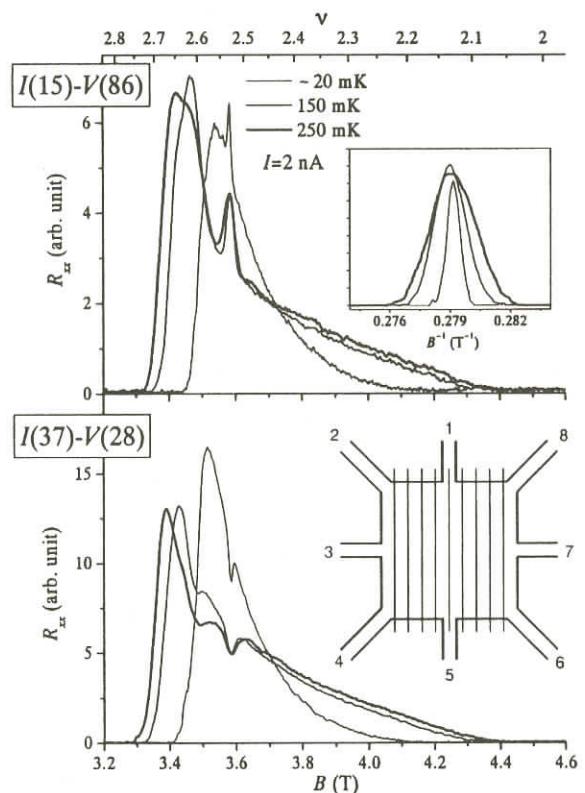
高次ランダウ準位における抵抗異方性（実験）

東京大学物性研究所 遠藤 彰

近年、移動度 $\mu \geq 1000 \text{ m}^2/\text{Vs}$ の超高移動度2次元電子系（2 DEG）では、高次のランダウ準位が半充填される磁場（充填率 $\nu = 9/2, 11/2, 13/3, \dots$ ）近傍で、 $T \leq 150 \text{ mK}$ の極低温において、半導体基板の結晶軸に固定された顕著な抵抗異方性が見られることが報告されてきている[1]。ごく最近、同様の抵抗異方性は強い面内磁場中の整数量子ホール効果においても報告された[2]。これらの実験結果は、理論的に予言されている電荷密度状態（ストライプ状態）[3]と密接に関連しているものと考えられている。

一方、我々は理論的に予言されているストライプの周期（100nm程度）と同程度の1次元周期的変調を2DEGに外部から導入してやることにより、移動度が中程度の2DEGにおいてストライプ状態の痕跡を実験的に顕在化させる可能性を探る実験を行ってきた。その結果、 $\nu = 9/2$ 付近でごく小さいものではあるが、ストライプの外部変調への応答である可能性のある構造を観測した[4]。

$\nu = 5/2$ 付近では、より明瞭な抵抗異方性が見られた（図）[5]。本来、偶数分母分数量子ホール状態が基底状態である $\nu = 5/2$ において、外部変調により、元々近いエネルギーを持つ異方的状態が現れたものと考えている。電流が変調に沿った方向である場合ピークが、変調を横切る方向である場合ディップが現れる。この実験結果をストライプ状態で説明するためには、直観的に予想される、(1)外部変調とストライプが向きを揃える、(2)ストライプを横切る場合に高抵抗になる、のいずれかが間違っていることになる。磁場を傾け面内磁場を導入する実験からは(1)が正しいことを示唆される結果が得られたが、これを確認するためにはより詳細な実験が必要である。電子濃度を変えた実験では $\nu = 5/2$ の顕著な異方性は $2.1 - 2.3 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ のきわめて狭い範囲でのみ観測された。ピーク、



ディップが最も顕著になった時の周期と磁気長の比は6.7であった。異方性、特にピークは、最大 $\nu=25/2$ の高次ランダウ準位まで見られた。

- [1] J.P.Eisenstein *et al.*, Physica E9 (2001)1, and references therein.
- [2] U. Zeitler *et al.*, PRL 86 (2001) 866; W. Pan *et al.*, PRB 64 (2001) 64.
- [3] M.Fogler *et al.*, cond - mat/0111001, and references therein.
- [4] A. Endo & Y. Iye, SSC 117(2001)249.
- [5] A. Endo & Y. Iye, in preparation.

Unusual Properties of Hall Gas: Implication to Metrology of the Integer Quantum Hall Effect

*Department of Physics, Hokkaido University,
K.Ishikawa and N. Maeda*

Physical properties of anisotropic compressible quantum Hall states and their implications to integer quantum Hall effect are studied based on a mean field theory on the von Neumann lattice. It is found that the Hall gas has unusual thermodynamic properties such as negative pressure, negative compressibility, and unusual transport properties. Transport properties and density profile of Hall gas states at half fillings agree with those of anisotropic states discovered experimentally in higher Landau levels. Hall gas formed in the bulk does not spread but shrinks, owing to negative pressure, and a strip of Hall gas gives abnormal electric transport at finite temperature. Conductances at finite temperature and finite injected current agree with recent experiments on collapse and breakdown phenomena of the integer quantum Hall effect. As a byproduct, an existence of new quantum Hall regime, dissipative quantum Hall regime, in which Hall resistance is quantized exactly even in the system of small longitudinal resistance is derived.

高次ランダウ準位におけるストライプの配向

東大総合文化 吉岡大二郎

下から 3 番目以上のランダウ準位では分数量子ホール効果状態は実現されず、最高被占有ランダウ準位の占有率が $1/2$ 近辺では低温で異方的な電気伝導が観測され、ストライプ相（CDW 相）が実現しているものと考えられている。電気抵抗の異方性は母体の GaAs の結晶軸によって決まっており、ストライプの配向が常に結晶軸により決まることを示しているが、その原因は確立しているわけではない。一方 GaAs の表面にはミクロン程度の周期の凸凹が存在することが知られている。私はこの凸凹により長周期の外場により、より短周期のストライプが配向する可能性を調べるために、外場が存在する状況での CDW 相のエネルギーを Hartree - Fock 近似で調べ、基底状態では CDW の波数ベクトルと外場の波数ベクトルが直交するという結果を得た。このことは観測事実と整合している。

次に配向の原因を考察した。ストライプ相の有効理論では、外場とストライプの波数ベクトルは平行になるという結果が得られる。これは平行の場合にはストライプの太さの変化のほかに位置の変化、つまり周期の変化も起こり得るのに対して、垂直配置では太さの変化しか起こり得ないからである。上記の結果はこれとは異なる。この有効理論との違いの原因是ストライプには基底状態において既に短周期の太さの modulation あるためである。この modulation は 1 次元系での $2k_F$ instability と同じ物であり、今の場合には Wigner 結晶化への傾向、即ち各ストライプで電子が一列に並ぶことの現れである。隣り合ったストライプの間の相互作用はこの modulation を隣同士揃えるように働く。外場の波数ベクトルが垂直の場合にはストライプの幅が外場にあわせて変化する。このとき本来の modulation の周期は幅に反比例して伸縮するが、隣同士の modulation がずれることはない。一方外場の波数ベクトルが平行の場合には、幅の変化は隣同士の modulation の不整合をもたらすため抑制され、ストライプの周期の変化で外場に応答することになる。ところが電子間のクーロン相互作用により最適の周期が決まっているので、この配置では外場中での energy gain がより小さくなるのである。ストライプ相の有効理論はこのストライプに内在する短周期の modulation の効果により圧縮率の異方性を考慮していないために、本研究とは逆の結果をもたらすのである。

結論として、ストライプの外場中での配向にはストライプが単純な Unidirectional CDW ではなく、Wigner 結晶的要素をもったものであることを正しく取り入れる必要があり、その結果ストライプ長周期の外場中では、外場と CDW の波数ベクトルが互いに直行するように配向することを明らかにした。

参考文献

D. Yoshioka: J. Phys. Soc. Jpn. **70**(2001)2836.

周期ポテンシャル中のストライプの方向

北海道大学大学院理学研究科 青山 尚広

近年、高いランダウレベルにおける半整数の充填率の量子ホール系は、縦と横の抵抗が大きくなる異方的状態であるということが確認されている。異方的状態は電子密度が帯状（ストライプ状態）になっていることが原因であると考えられている。実験では抵抗が試料の結晶軸のある方向に対して必ず大きくなることが知られているが、異方性の原因となる帯の方向を決める要因は分かっていない。帯の方向と回転対称性を陽に破った周期ポテンシャルの相関をみることで、対称性を自発的に破る帯の方向が対称性を陽に破った非常に小さな摂動できることを見る。磁場中でも自由電子ガスと同等の物理的描像を得やすいフォン・ノイマン格子の場の理論を用いてHartree-Fock近似及び摂動論の範囲で解析した。

直観的には周期ポテンシャルの谷間に電子が束縛されて周期ポテンシャルと平行に帯状電荷密度が生じると考えられる。ところが帯の方向と周期ポテンシャルの向きが、周期ポテンシャルの振幅及び周波数に依存して平行な場合と直交した場合があるということがわかった。直交した相ではクーロン相互作用と磁場が効いた相になっている。我々はストライプの状態として、ストライプと平行な方向にギャップレスで、垂直な方向にギャップをもつ状態が本質的だと考えている。ストライプを作る一粒子のスペクトルが帯状のフェルミ海を形成し、その帯と座標表示での周期ポテンシャルの方向が平行になっているときに、直交した相が実現すると考えている。周期ポテンシャルの方向と磁場の向きに垂直に電子が運動しやすいこの状況は、Hall効果を想起させる。

各ランダウレベルにおける周期ポテンシャルとストライプの向きの相図と、ランダウレベルによるその移り変わりを紹介し、最後に試料の表面に周期的ポテンシャルをかけた遠藤、家らの実験の結果と今回の結果を比較し議論する。

参照：cond-mat/0106484

ストライプホール状態における低エネルギー励起状態

北海道大学大学院理学研究科物理学専攻素粒子論研究室 前田 展希

強磁場中の二次元電子系において、高いランダウレベルで充填率が半分の時に抵抗に極度の異方性を持つ状態が最近観測された。本講演では、この異方的な状態が、並進と回転対称性が自発的に破れた状態、ストライプホール状態[1, 2, 3]と考えられることを示し、その励起状態の性質を理論的に調べた結果を報告する。

一般に無限自由度を持つ物理系は、自発的対称性の破れのパターンによって相構造を分類することができ、それに伴う低エネルギー励起状態の性質を知ることができる。そのためには対称性の破れを特徴づける量、オーダーパラメーターを知ることが重要である。有名な例では、超伝導状態におけるクーパー対や分数量子ホール効果における複合ボソンが知られている。

量子ホール系は磁気並進対称性の保存電荷 Q_X と Q_Y を持ちこれらは非可換となる。ストライプ

ホール状態はこの二つの対称性のうち一つが自発的に破れた状態であり、電子密度がストライプ状に分布する。この状態のオーバーパラメーターは電子密度である。保存電荷を用いるとGoldstone theorem を証明することができて、励起状態として南部 - Goldstone モードの存在が示される。

また、集団励起状態のスペクトルを单一モード近似で求めた結果を示す[4]。

この計算によるとGoldstone theorem で保証される南部 - Goldstoneモード以外にもgapless の励起状態が現れることが示唆される。また、スペクトルは異方的性質を持ち、一方向は分数量子ホール状態におけるスペクトルと似ていて、他方向は液体ヘリウム的な振る舞いをすることがわかった。これらの結果がストライプホール状態に対する低エネルギー理論の手がかりになることが期待される。

参考文献

- [1] K. Ishikawa, N. Maeda, T. Ochiai, Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 4292.
- [2] N. Maeda, Phys. Rev. B61 (2000) 4766.
- [3] T. Aoyama, K. Ishikawa, N. Maeda, cond-mat/0106484.
- [4] T. Aoyama, K. Ishikawa, Y. Ishizuka, N. Maeda, preprint EPHOU - 2002.

高次ランダウ準位の基底状態

東大総合文化 柴田 尚和

高次のランダウ準位 ($N > 1$) における電子状態は、Koulakovらによって Hartree - Fock 近似の範囲で調べられ、ストライプ状態やバブル状態と呼ばれるCDW 状態が基底状態になると考えられている。Koulakovらの予想したストライプ状態は $N > 1$ で観測される異方的電気抵抗により実験的に支持されているが、このCDW 相の詳細な性質や基底状態の相図を知るために十分大きな系において量子効果を正確に評価する必要がある。我々はそのために量子一元化系に対する数値計算法として知られているDMRGの方法をこの系に応用した。この方法では基底状態の精度をコントロールしながら系を大きくしていくことが可能であり、厳密対角化では調べることのできない大きな系の基底状態を高い精度で得ることができる。

この方法を用いて基底状態の対相関関数を系統的に調べた結果、 $N = 2$ のランダウ準位における基底状態にはストライプ相、バブル相、Wigner 結晶の三つのCDW 相が存在し、それらの相の間の転移が一次転移であることがわかった[1]。また、得られた相図とHartree - Fock 近似により得られる相図と比較すると 3 つの電子がクラスターを組む 3 電子バブル相が $N = 2$ のランダウ準位では量子効果により不安定になっていることがわかった。

このことは実験的にリエントラント相が 1 つだけ確認されていることと整合し、2 電子バブル相がリエントラント相であることを示している。

また、さらに高次の $N = 3$ のランダウレベルにおける基底状態の相図にはストライプ相、2 電子バブル相、Wigner結晶に加え、3 電子バブル相が存在し、高次のランダウ準位における多様なCDW 相の存在が確認された。

- [1] N.Shibata and D. Yoshioka, PRL Vol.86 (2001) 5755.

量子ホール系における非平衡電子分布とポテンシャル分布の観測

東大理 河野 行雄

近年、電場増大による量子ホール効果のブレークダウン現象において、励起電子がホールバー全体に一様に分布するのではなく、ある特徴的な空間変動を伴って出現することが明らかにされており、注目を集めている。ところが、その空間分布は、試料長さ方向に沿った指數関数的分布、ストライプ状の分布、試料端に偏った分布など、研究者によって異なる指摘がなされており、統一的な理解にまで至っていない。この混乱の背景には、ブレークダウン領域を可視化するための観測手段が存在しなかったことがある。

ブレークダウン領域を特徴付ける物理量としては、(1) 非平衡電子の密度分布(電子温度分布)、(2) 静電ポテンシャル分布の2種類が考えられる。我々は、最近、これら2つを観測するための新奇な実験手段を開発した。(1)については、非平衡電子がランダウ準位間でエネルギー緩和するのに伴って生じるサイクロトロン発光を空間分解測定し、その強度分布を観測するという手法を確立した。この測定では、図1に示すように、半球レンズを基板裏面に密着させたまま、試料を2次元的に移動させることにより、発光分布が観測される。一方、(2)については、図2に描いたように、表面をフォトレジストでコーティングした2つのホール素子(電位計と試料)をお互い密着させ、2つの2次元電子層間のキャパシタンス結合による電子密度の変化を、縦電圧変化として読み出すという実験手段を開発した。この測定は、(i) 電子密度の変化がその地点での電位に比例するため、電位計となる微小なホール素子を2次元方向に移動させることにより、ポテンシャル分布の測定が可能となる(ii) 状態密度が離散化される磁場中では、電子密度のわずかな変化でも、縦抵抗が劇的に変化する(つまり検出電位の感度が非常に高い)という特徴を有している。

(2)については、ごく最近実験を開始したばかりであるため、本講演では、測定原理についての説明に止め、実験結果は、主に(1)によるものを中心報告する。観測結果からは、ブレークダウンによって発生する縦抵抗の分布は、量子ホール効果状態間遷移領域で出現する(フェルミ準位近傍での非局在状態の電子がもたらす)縦抵抗分布とは全く異なる様相を呈しており、そこでは、古典的な電場分布に単純に従わないノンローカルな伝導特性を示すことが明らかにされた。

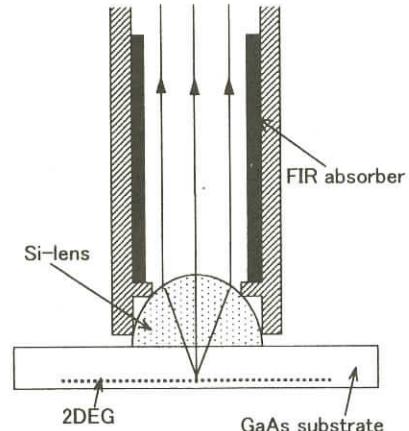


図1：サイクロトロン発光空間分解測定のための光学系。GaAs、Si結晶の高い誘電率により、結晶中を伝出播する電磁波の波長が減るため、高分解能が実現される。

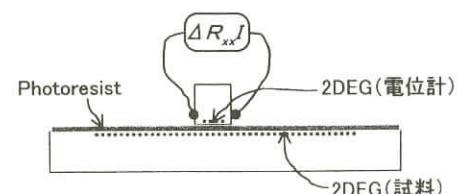


図2：ポテンシャル分布測定のための実験方法。電位計となる微小なホール素子を、フォトレジストでコーティングした試料表面上に直接乗せている。電位計値下の(試料の)電位が、(電位計測の)縦電圧変化として読み出される。

サイドゲート試料端の閉じこめポテンシャルと量子ホール効果のブレークダウン

阪大理 音 賢一、坪田 泰輔、西田 聰佑、鷹岡 貞夫

量子ホール効果のブレークダウン電流は、試料端に沿って流れるエッジチャネルの影響を受けるのであろうか。特に試料線幅にブレークダウン臨界電流が比例しない試料では、電流が試料端に集中しているとも考えられるが、試料端での閉じこめポテンシャルを変えることでブレークダウンに変化が出るか興味が持たれる。本研究では2次元電子系の試料端での閉じ込めポテンシャルを試料端部分だけに付けた「サイドゲート」により変化させて、量子ホール効果のブレークダウン電流 I_c がどのような影響を受けるかを調べた。図1上の試料略図のように、幅 $100 \mu\text{m}$ のホールバー型 GaAs/Al-GaAs 2次元電子系の端を Al ゲートで $25 \mu\text{m}$ 覆いサイドゲートとした。サイドゲートに負の電圧を加えると図1のように I_c 値は減少する。サイドゲートが 0V では、試料の有効線幅は $100 \mu\text{m}$ 、 -0.5V では $50 \mu\text{m}$ となるが、 I_c は半減せず、線幅に比例していないことがわかる。また、サイドゲート電圧を負に強くかけると I_c は $1/10$ 程度にまで激減した。

さらに、サイドゲートによる閉じ込めポテンシャルの詳細を調べるために、図2のような試料で電気容量の測定を行い、エッジチャネル幅とサイドゲート電圧の関係を調べた。図2下はサイドゲート電圧 -1V および -3V における占有数 2 付近でのエッジチャネル幅である。サイドゲートの負バイアスを強くするとともにエッジチャネルは幅を広げ試料内部に広がっていることがわかる。この実験からサイドゲートによる閉じ込めポテンシャルの空間分布を調べた結果を報告する。

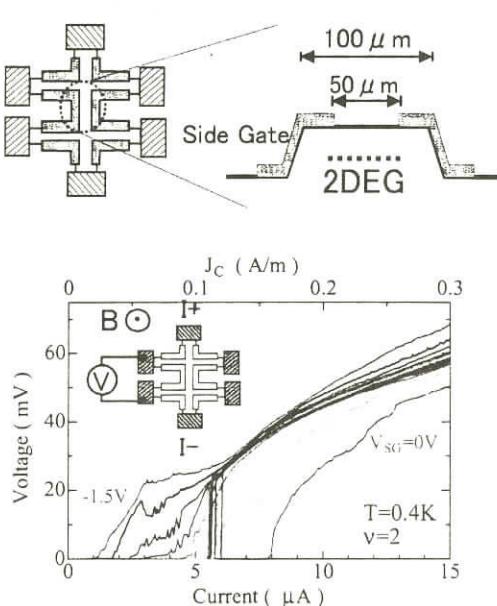


図1：サイドゲート電圧とブレークダウン電流

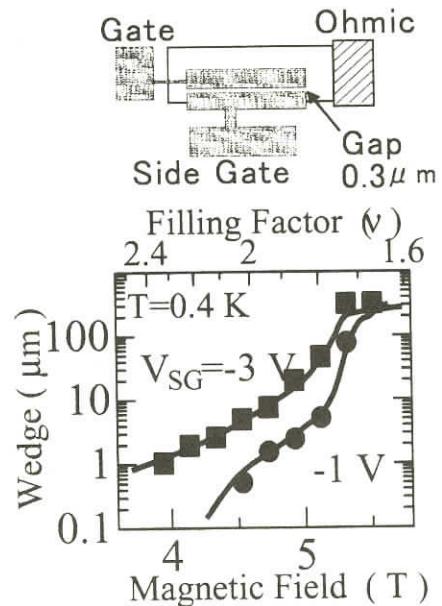


図2：サイドゲート電圧とエッジチャネル幅

細線ゲートで調べたエッジチャネルの分布

阪大院理 新井宏一郎、音 賢一、鷹岡 貞夫

GaAs/AlGaAs ヘテロ接合の 2 次元電子系における量子ホール効果において、試料端につけた細線ゲートを使用した磁気電気容量測定により、エッジチャネルの位置と拡がりについて調べた

図 1 は今回の測定に用いた試料の概念図である。2 次元電子系の境界付近に幅 $1.0 \mu\text{m}$ の測定用細線ゲートを 4 本、間隔 $1.0 \mu\text{m}$ で長さ 1 mm に渡って配置している。一番外側の細線ゲートがちょうど 2 次元電子系の境界上に配置し、境界に対する平行合わせは、角度精度が 10^{-3} 度内の高精度で行った。これにより 2 次元電子系全面に覆い被せていました従来のゲートとは異なり、測定用細線ゲートの真下の 2 次元電子系の様子を $1 \mu\text{m}$ 程度の分解能で調べることができるものと期待される。

図 2 は占有数 2 の量子ホール状態付近で測定した 2 次元電子系の境界に近いものから順に 1 番目、2 番目、3 番目、4 番目の細線ゲートにおける測定結果を示した。使用したゲートによって電気容量の磁場依存性が異なることが分かる。このデータからエッジ状態の位置と拡がりを決めることが出来る。たとえば占有数 2 の電気容量が極小値を取る磁場領域の解析から（図 2 の矢印で示した部分）、エッジ状態は試料端から $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 以内の部分に、拡がり $1 \mu\text{m}$ 以内で存在していることが分かる。

また一番外側のゲートをサイドゲートとして使用した場合の電気容量も測定した。サイドゲートの負電圧を大きくすると、エッジ状態は 2 次元電子系の境界から離れて内側へ移動すると共に、その幅が広がる様子を観測した。

講演では、各細線ゲートにおける電気容量の磁場依存性について調べた結果を報告する。

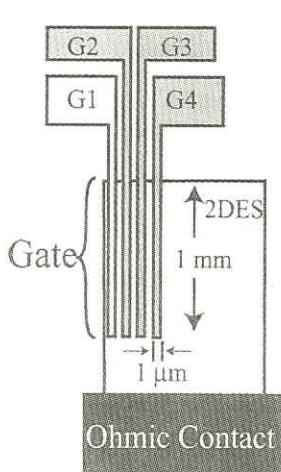


図 1 : 試料模式図

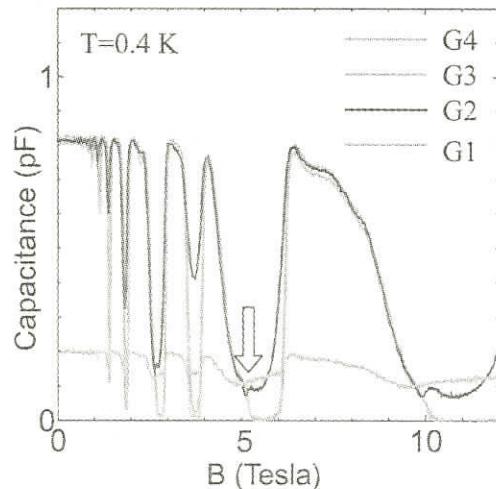


図 2 : 細線ゲートを用いて測定した電気容量の磁場依存性。

量子ホール効果のブレークダウンの電子過程と空間変動

北大工 明楽 浩史

電流方向の電場 E_x が極めて小さいという量子ホール効果の特徴は、ある電流値 J_c において消失する。この現象は量子ホール効果のブレークダウンと呼ばれ、 J_c は臨界電流と呼ばれる。このブレークダウン現象は量子ホール系の示す非平行相転移の代表格である。最近の実験の進展[1,2]により、この相転移に伴って抵抗率の顕著な空間変動が現れることが明らかにされ、新しい展開が期待されている。

我々は、ブレークダウン領域における量子ホール系の空間時間変動を記述する方程式の確立とそれによる空間時間変動の解明を目指している。Hot-Electronモデル[3,4]に基づき系を特徴づける変数として電子温度と化学ポテンシャルを選び、それらの時間空間変動を記述する方程式（量子ホール系の流体力学方程式）を導出した[5]。導出に用いた主な仮定は局所平衡で、抵抗率が大きくしたがって電子温度の高い領域においては成り立つと考えられる。電子過程のモデルとしては、緩やかにゆらぐポテンシャルでの電子のドリフト運動と電子・電子および電子・フォノン散乱を取り入れた[6]。導出された方程式の特徴は、磁場中のドリフト運動のため電場に垂直なエネルギー流の項をもつことである。

最も簡単な空間変動として、十分に幅の広い試料（y 方向に一様）の長さ方向（x 方向）の空間変動[7]と十分長い試料（x 方向に一様）の幅方向（y 方向）の空間変動[5]を取り上げた。ここでは、後者について述べる。ドリフトによるエネルギー流のため、電流方向の電場 E_x がゼロでないときには試料端で温度勾配が生じ、その結果電子温度に空間変動が現れる。この空間変動の特徴は、電子温度が一方の端で高く他方で低くなるという点である。最近のサイクロトロン発光の実験[8]で観測された発光強度の空間分布が同じ傾向を示している。

- [1] S. Komiyama, Y. Kawaguchi, T. Osada and Y. Shiraki: Phys. Rev. Lett. 77 (1996) 558.
- [2] I. I. Kaya, G. Nachtwei, K. von Kitzing and K. Eberl: Phys. Rev. B58 (1998) R7536.
- [3] A. Vl. Gurevich and R. G. Mints: JETP Lett. 39, 381 (1984).
- [4] S. Komiyama, T. Takamasu, S. Hiyamizu, and S. Sasa : Solid State Commun. 54, 479 (1985).
- [5] H. Akera: J. Phys. Soc. Jpn. 71 (2002) 228.
- [6] H. Akera: J. Phys. Soc. Jpn. 69 (2000) 3174.
- [7] H. Akera: J. Phys. Soc. Jpn. 70 (2001) 1468.
- [8] Y. Kawano and S. Komiyama: Phys. Rev. B61 (2000) 2931.

整数量子ホール効果 Breakdown 現象 ～Breakdown の空間発展を理解するために～

東京大学大学院総合文化研究科 川口 康、小宮山 進

量子ホール効果状態はデバイスに流す電流値を増大させていくとある臨界電流密度で崩壊し、ホール抵抗は量子化抵抗値からずれ、縦抵抗値はゼロから有限な値に急増大する。この現象を量子ホール効果 Breakdown 現象とよび、整数量子ホール効果、分数量子ホール効果いずれの場合でもこの現象の存在が知られている。

整数量子ホール効果現象の発見された直後から知られていたこの Breakdown 現象については多くの実験的、理論的研究がなされてきたが、そのメカニズムは完全には明らかになっていたいなかった。近年、臨界電場を越えた状態でも、電子がある程度の距離（数ミクロンから数百ミクロン）走らないと Breakdown 現象は生じないということが実験的に明らかになった。^[1,2]。この結果は Bootstrap 式の電子加熱モデル(BSEH)におけるAvalanche タイプの電子増大描像で定性的に説明できる。Breakdown のメカニズムについてさらに明確な知見を得るために我々のグループをはじめ、いくつかのグループはBreakdown がどのように空間的に発展していくかを測定する実験をおこない、冷たい電子を注入したところから徐々にBreakdown が発展していく様相を実験的に明らかにした^[3]。

今回我々は、このBSEHを拡張することにより、このBreakdown 現象の空間発展も定量的に説明が可能であることを示唆する結果を得たので実験結果と併せてそれを報告する。

[1] Y. Kawaguchi, F. Hayashi, S. Komiyama, T. Osada, and Y. Shiraki; JJAP34, 4309 (1995)

[2] S. Komiyama and Y. Kawaguchi; Phys. Rev. B 61, 2014 (2000)

[3] I. I. Kaya, G. Nachtwei, B. E. Sagol, K. von Klitzing, K. Eberl; Physica E 6 128 (2000)

分数量子ホール端状態における電子 - 核スピン相互作用

科学技術進行事業団^A、東大院総合^B、NTT 物性基礎研^C
町田 友樹^{A,B}、山崎 智幸^B、小宮山 進^{A,B}、村木 康二^C、平山 祥郎^{A,C}

分数量子ホール端状態における電子スピン-核スピン相互作用を利用して、端状態のスピン偏極を調べる。ホールバー型試料を用いて、端状態間に非平衡分布を導入した状況でホール抵抗の測定を行った。非平衡分布に起因する、量子化ホール抵抗値からずれが観測され、端状態の存在を示している。さらにホール抵抗の非線形性において、緩和時間が数分～数十分にわたるヒステリシスを観測した。これは端状態間散乱に伴う電子スピン反転によって、核スピン偏極が誘起され、実効的なゼーマンエネルギーが増大／減少することによって端状態間散乱が促進／抑制されるためであると考えられている。この描像はホール抵抗値変化による核磁気共鳴の観測で確認されている。端状態間散乱に伴う核スピン偏極の誘起は、関与する端状態間のスピン偏極が異なっていることを示しており、核スピン偏極の極性から、分数量子ホール端状態のスピン偏極を決定する。

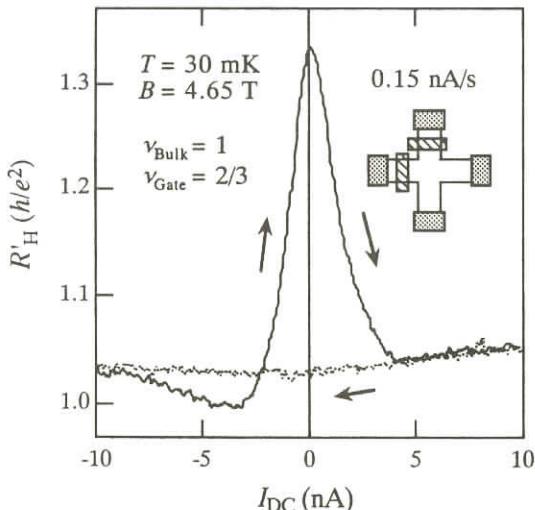


図1：ホール抵抗の直流電流依存性及び試料形状
(挿入図)

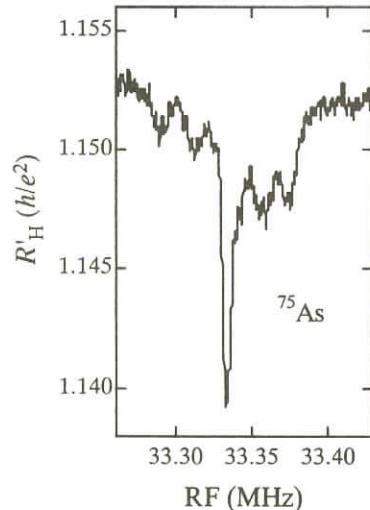


図2：核磁気共鳴スペクトル

アンチドット格子における磁気輸送

理化学研究所 瓜生 誠二
東京大学物性研究所 安藤 恒也

アンチドット格子はアンチドットと呼ばれる斥力ポテンシャルが格子状に配列された二次元電子系である。興味深い磁気輸送現象がいくつか観測されているが、本講演では量子干渉効果が重要である Aharonov - Bohm(AB) 効果型振動、Altshuler - Aronov - Spivak(AAS) 振動、及び絶縁体 - 量子ホール転移を概観し、絶縁体 - 量子ホール転移に関する我々の研究を紹介する。

AB効果振動型は $2R_c = a(R_c : \text{サイクロトロン半径}, a : \text{格子定数})$ が成り立つ磁場付近で観測される抵抗の振動であり、その周期は単位胞当たりの磁束の関数として $\Phi_0 = h/e$ である。Weissらはアンチドット格子がカオス系であることに注目し、量子カオス理論に基づき特定の周期軌道による状態密度の振動を反映したものと示唆した。数値計算によって、抵抗の振動は周期軌道の量子化と相関があることが示された。

AAS振動はゼロ磁場付近に現れる $\Phi_0/2$ 周期の振動であり、閉じ込めの強い三角格子で顕著に観測される。高移動度の試料に作成される典型的な系では、不純物よりもむしろアンチドットポテンシャルの乱れによって電子は散乱されることが数値計算によって明らかにされた。

アンチドット三角格子において絶縁体 - 量子ホール転移が観測された[1]。抵抗はホッピング伝導の温度依存性を示し、電子は完全に局在している。強局在領域にもかかわらず、先の二つの振動と類似の $\Phi_0, \Phi_0/2$ 周期の振動が抵抗に現れるのが興味深い。

我々は、アンチドット三角格子におけるアンダーソン局在の磁場依存性を有限サイズスケーリングの方法を用いて数値的に調べた[2]。その結果、局在長が転移磁場及びゼロ磁場付近でそれぞれ $\Phi_0, \Phi_0/2$ 周期で振動することがわかった。前者は、磁気ブリルアン域の形成によるバンド幅の振動として、後者は、系の時間反転に関する対称性の実効的な変化として説明される。これらは実験結果をよく説明する。また、転移磁場を与える非局在状態の振舞いについても報告する。

参考文献

- [1] F. Nihey, M. A. Kastner, and K. Nakamura, Phys. Rev. B **55**, 4085 (1997).
- [2] S. Uryu and T. Ando, Phys. Rev. B **65** 035322 (2002).

多層系の層間コヒーレンス角度依存磁気抵抗効果

東京大学物性研究所 長田 俊人・藏口 雅彦

半導体超格子、層状有機導体、層状酸化物など層状物質の層間磁気抵抗は、磁場方位の関数として振動的な振舞いを示すことがある。この角度依存磁気抵抗振動（AMRO）現象は、従来擬2次元電子系の柱状Fermi面の形状効果として半古典輸送理論により説明されてきた。層間トンネル時間が層内散乱時間より長く電子が層内散乱なしには隣接層に移動できないという意味で「インコヒーレント」な層間結合を持つ系では、積層方向の波数が良い量子数ではなくなりFermi面が定義できない。McKenzieらはこうしたインコヒーレント系においてもAMROが観測されると主張した[PRL81,4492(1998)]。以後、層状物質の層間コヒーレンストと磁気抵抗の角度依存性の関係に興味が持たれるようになった。

本研究ではMcKenzieらの主張を確認することを目的として、半導体超格子を用いて層間結合がコヒーレントな系とインコヒーレントな系を設計・作製し、両者の磁気抵抗の角度依存性を調べた。層間トンネル頻度を与える層間トランスマッパーは超格子の構造からKronig-Penneyモデルを用いて評価し、層内散乱時間は層内伝導の Shubnikov-de Haas 振動から見積もった。実験の結果、以下の事実が明らかになった。

- ①インコヒーレント系でもコヒーレント系同様にAMROが観測されること
 - ②インコヒーレント系でもコヒーレント系で見られた「ピーク効果」が消失すること。
 - ③インコヒーレント系でもコヒーレント系では磁気抵抗の角度依存性の概形が逆転すること。
- ①と②はMcKenzie理論を支持する結果である。③は有機導体の分野で予想されていた事実であるが、その起源については分かっていない。

結局、層状物質の層間伝導の角度依存性に現れるAMROは、フェルミ面形状効果ではなく、磁場方位に対する隣接2層間のトンネル確率の変動に起因する現象である。このトンネル描像により、(1)フェルミ面が考えられない強電場中におかれた超格子の磁場中層間伝導に現れるAMRO、(2)各伝導層が極めて強い異方性を持った擬1次元層状物質の各種AMROも同様に説明される。

多層量子ホール系における端状態とバルク状態の混成

東大物性研 蔵口 雅彦、長田 傑人、白木 靖寛

半導体超格子は、低温・強磁場下で各々の電子層が量子ホール効果を示し、層間がトンネル結合した多層量子ホール系をなす。このような多層量子ホール系の試料の端面において、端状態が結合した特異な表面状態が実現する。この表面状態は二次元電子系であるにも関わらず、端状態の後方散乱が起こらないという性質のため、低温でも局在せず、温度に対して一定のコンダクタンスをもつと理論的に予想されている。しかし、電気伝導には、表面状態の他に試料内部のバルク状態の寄与も存在するため、表面伝導だけの電気伝導特性を幅広い温度領域で得ることはできなかった。

本研究では、断面積が同じながら、周長が異なる試料を作製し、それぞれの試料のコンダクタンスを測定した。これにより、試料間の磁気抵抗の振舞が、量子ホール領域以外では一致するが、量子ホール領域では異なることが分かった。この磁気抵抗の差を表面伝導の違いと考え、試料間のコンダクタンスを引き算することにより、表面伝導のコンダクタンスを幅広い温度・磁場領域で求める成功した。

その結果、表面伝導は、低温で量子ホール領域の中心磁場付近では、理論的予測通りに温度に依存しない振舞を見せることが分かった。しかし、量子ホール領域の境界付近では、表面伝導が増大するという特異な振る舞いを見出した。量子ホール領域の境界付近では、局在長が大きくなるため、端状態がバルク状態と混成し、端状態が試料内部に広がると考えられる。このため、表面伝導が増大する。また、温度を上げると、局在長が大きい準位まで電子が分布するため、表面伝導が増大すると考えられる。このように、端状態の広がりと分布関数のぼけを考慮することで、量子ホール領域の境界付近における表面伝導の増大が説明できる。逆に、表面伝導を観測することにより、端状態がバルク状態と混成する様子を観測できることを示す。

物性研究所談話会

日時: 2002年1月21日(月) 午後1時30分~2時30分

場所: 物性研究所6階 A615号室

講師: Prof. Mikk Lippmaa

(東京大学物性研究所)

題目: Strain control in epitaxial oxide thin films

要旨:

Lattice strain can have a dramatic effect on the properties of oxide thin films, inducing complete phase transitions in some cases. Strain is nearly always present in epitaxial thin films to some degree due to lattice mismatch between the film and substrate materials. Analyzing the physical properties of thin films must therefore be done while keeping possible strain - related effects in mind. This seminar reviews some of the effects that lattice strain can have on oxides and discusses ways of controlling in-plane strain. Recent developments towards the development of compliant or at least tunable lattice constant substrates for oxides are discussed.

日時: 2002年1月31日(木) 午後1時30分~3時

場所: 物性研究所6階 A612号室

講師: Dr. S. Paschen

(MPI for Chemical Physics of Solids, Dresden, Germany)

題目: Towards new strongly correlated low-carrier-density systems

要旨:

Heavy fermion semiconductors or semimetals, usually referred to as 'Kondo insulators'[1], are an intriguing set of materials. A narrow gap or pseudogap at the Fermi energy develops at low temperatures but the origin of the gap formation is unclear.

In this talk, I shall present results of transport, magnetic, and calorimetric measurements on two f-electron based compounds: U₂Ru₂Sn and Eu₈Ga₁₆Ge₃₀. I show that U₂Ru₂Sn [2-4] shares several properties with the strongly correlated semimetal CeNiSn[5]. These analogies suggest [6] that in U₂Ru₂Sn a narrow energy gap (or pseudogap) opens which is one order of magnitude larger than the one of CeNiSn. The two modifications of the clathrate Eu₈Ga₁₆Ge₃₀[7] behave as local-moment ferromagnets with relatively low Curie temperatures and small charge-carrier concentrations.

The thermal conductivity is low and glass-like, as expected for 'filled-cage' systems [8]. If, by modification of the Ga-Ge cages, a 'Kondo insulating' ground state could be realized, a high thermoelectric figure of merit associated with the (pseudo) gap opening would be expected.

- [1] G. Aeppli and Z. Fisk, *Comments Cond. Mat. Phys.* 16, 155 (1992).
- [2] L. Havela et al., *J. Appl. Phys.* 76, 6214 (1995).
- [3] L. Menon et al., *Solid State Commun.* 106, 519 (1998).
- [4] V. H. Tran et al., *Physica B* (in press).
- [5] T. Takabatake et al., *Physica B* 223&224, 413 (1996).
- [6] S. Paschen et al., to appear in *J. Phys. Chem. Solids*.
- [7] S. Paschen et al., *Phys. Rev. B*. 64, 214404 (2001).
- [8] G. A. Slack, in *CRC Handbook of Thermoelectrics* (ed. D. M. Rowe, Chemical Rubber, Boca Raton, FL, 1995), Chap. 34.

日時: 2002年3月1日(金) 午後1時30分～2時30分

場所: 物性研究所6階 A615号室

講師: 中辻 知

(National High Magnetic Field Laboratory, Tallahassee)

題目: Magnetic frustration and criticality at the structural instability in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$:the role of the orbital degree of freedom

要旨:

In strongly correlated multi - band systems, the deformation of lattice, which strongly couples with orbital degrees of freedom, often dramatically alters the ground state. Among them, the single layered ruthenate $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ gives a unique example, connecting two distinct ground states: the Mott insulator Ca_2RuO_4 and the spin - triplet superconductor Sr_2RuO_4 . The isovalent Sr substitution changes the crystal distortions to induce the Mott transition and rich evolution of itinerant magnetism. This talk will review the phase diagram and feature the role of Ru 4d orbitals.

日時: 2002年3月7日(木) 午後1時30分～2時30分

場所: 物性研究所6階 A612号室

講師: Prof. Thierry Martin

(Université de la Méditerranée)

題目: Partition Noise and Statistics in the Fractional Quantum Hall Effect

要旨:

A microscopic theory of current partition in fractional quantum Hall liquids, described by chiral Luttinger liquids, is developed to compute the noise correlations, using the Keldysh technique. In this Hanbury - Brown and Twiss geometry, at Laughlin filling factors $\nu = 1/3$, the real time noise correlator exhibits oscillations which persist over larger time scales than that of an uncorrelated Hall fluid. The zero frequency noise correlations are negative at filling factor 1/3 as for bare electrons (antibunching), but are strongly reduced in amplitude. These correlations become positive(bunching)for $\nu \leq 1/5$, suggesting a tendency towards bosonic behavior.

1. Safi, P. Devillard, and T. Martin, *Phys. Rev. Lett.* 86, 4628(2001)

日時: 2002年3月8日(金) 午後1時30分～3時

場所: 物性研究所6階 A615号室

講師: Prof. Gerard Martinez

(グルノーブル CNRS 強磁場研究所)

題目: Cyclotron Resonance and Polaronic Effects in 2 Dimensional Electron Gas at High Densities

要旨:

Magneto infra-red absorption measurements have been performed in highly doped GaAs quantum wells, lifted off and bonded to a silicon substrate, in order to study the resonant polaron interaction. It is found that the pinning of the cyclotron energy occurs at an energy close to that of the transverse optical phonon of GaAs. This "unexpected" result raised the question of the validity of the concept of the polaron mass in doped semiconductors. Anomalies in the cyclotron resonance (CR) results are tentatively attribute to the manifestation of electron-electron interactions in the CR response of the 2D gas.

日時: 2002年3月13日(水) 午後2～3時30分

場所: 物性研究所6階 A615号室

講師: Prof. Hartmut Monien

(Physikalisches Institut, Universitaet Bonn)

題目: The Mott Transition in Bosonic Systems

要旨:

The recent experimental realization of a Mott transition in a gas of ultracold atoms [Nature 415, 39(2002)] is probably one the cleanest example of a phase transition driven by quantum fluctuations. Ultracold atomic gases might provide an exciting new lab for testing some of the questions which have been discussed in other condensed matter systems. In my talk I will give a general overview of the physics of the bosonic Mott - superfluid transition in bulk systems and present some recent theoretical results on the phasediagram and the excitation spectra in the mesoscopic system. In particular we found a new mode which might explain the unusual second resonance in the recoil spectrum.

日時: 2002年3月13日(水) 午後4時～5時30分

場所: 物性研究所6階 A615号室

講師: Prof. F. Mila

(Université de Lausanne, Switzerland)

題目: Reconciling spin 1 and orbital degeneracy in V₂O₃

要旨:

More than 30 years after its first serious investigation, V₂O₃ is again attracting a lot of attention after a number of recent experiments have challenged the description of its electronic properties that had emerged in the seventies. In this talk I will review the recent theoretical de-

velopments which have opened the way to a completely new picture of the electronic properties of V₂O₃, in particular regarding the interplay between orbital and spin degrees of freedom. The crucial step was to revisit the electronic structure of a vertical V - V pair within a model that includes realistic values of Coulomb interaction parameters. Within this description, the low energy manifold only contains states originating from the S = 1 sector of individual V ions, and the ground state of a pair is an S = 2 state with an additional twofold degeneracy coming from the orbitals. This state involves a resonance between (a_{1g} e_g) and (e_g e_g) atomic configurations. All these basic facts agree with several recent non - resonant X - ray experiments. The next step is to understand how the degeneracy of this low - energy manifold is lifted in V₂O₃. Three types of residual interactions have been considered: i) Hopping of electrons between V - V pairs; ii)Spin - orbit interaction; iii) Coupling to the lattice. Accordingly several ground states have been proposed. While they all have the real spin structure, they differ in the orbital structure. Merits and drawbacks of these proposals with respects to various experiments, in particular resonant X - ray scattering, will be discussed.

日時: 2002年3月18日(月) 午後2時～3時

場所: 物性研究所6階 A615号室

講師: 住 齊

(筑波大学 物質工学系)

題目: 「光合成は量子力学コヒーレンスで始まる」

要旨:

緑色植物が酸素発生することが発見されたのは1771年である。それ以来、光合成研究は膨大に蓄積されてきたが、機能とミクロな構造の関連が研究されるようになったのはこの15年余りに過ぎない。紅色光合成細菌の反応中心を構成する蛋白質・色素複合体の立体構造が84年に解明されたことに始まる。生体膜貫通型蛋白質構造解明の最初の例でもあった。その後95年、同じく紅色光合成細菌のアンテナ系構造が解明された。遂に01年、高等植物の光合成初期過程を司る光化学系ⅠおよびⅡの構造が解明されるに至った。

アンテナ系は太陽光を捕獲し、色素の励起エネルギーの形で反応中心に伝達する。反応中心はこのエネルギーを使って電子を膜電位差に逆らってポンプし、高還元物質を生成する。これら初期電子過程は物性物理学で蓄積された諸概念の格好の活躍場となり、もって地球上全生命のエネルギー源たる光合成に秘められた生命の神秘の解明に貢献しつつある。

日時: 2002年3月22日(金) 午後1時30分~2時30分

場所: 物性研究所6階 A615号室

講師: Dr. F. U. Hillebrecht

(Max - Planck - Institut für Mikrostrukturphysik, Halle, Germany.)

題目: SURFACE ANTIFERROMAGNETISM OF NiO(100) AND COUPLING TO THIN
FERROMAGNETIC METAL FILMS

要旨:

Antiferromagnetic (AF) oxides are important constituents in novel read heads based on spin dependent transport which are used in state of the art data storage devices. Their role is to provide an exchange bias in exchange coupled magnetic multilayers. We studied NiO AF oxide surfaces employing magnetic dichroism in photoemission electron microscopy. For cleaved NiO surfaces we find a bulk like termination of the magnetic structure at the surface[1,2]. The domain pattern shows stripes running along [100] directions in the surface, with typical widths on the scale of $10 \mu m$. For the first time, AF domain walls have been imaged directly, showing widths of the order of 100 nm [3]. The evolution of the domain pattern of ferromagnetic Co films deposited on NiO is found to be governed by the underlying AF domain pattern[1]. The Co films show a strong uniaxial anisotropy parallel to the antiferromagnetic axis. Both findings are explained by magnetoelectric effects generated by the distortion of the NiO in the anti-ferromagnetic state. Furthermore, the antiferromagnet spins reorient and align parallel to the Co spin direction. We show that uncompensated interfacial spins created by chemical processes at the interface are the cause of the exchange coupling. Further characterization of the interface by surface x-ray scattering and other techniques is under way. The results demonstrate a strong mutual influence between ferro- and antiferromagnetic spins at the interface and the importance of chemical reactions at the interface for the magnetic properties of the system.

- [1] F. U. Hillebrecht, H. Ohldag, N. Weber, C. Bethke, U. Mick, M. Weiss, and J. Bahrdt, Phys. Rev. Lett. 86, 3419(2001).
- [2] H. Ohldag, A. Scholl, F. Nolting, S. Anders, F. U. Hillebrecht, J. Stohr, Phys. Rev. Lett. 86, 2878(2001).
- [3] N. B. Weber, H. Ohldag, H. Gomonaj, and F. U. Hillebrecht, submitted.

人事異動

【研究部門等】

○ 平成14年3月1日付け

(採用)

氏名	所属	職名	異動内容
宮島延吉	新物質科学研究所	助手	新規採用

Technical Report of ISSP 新刊リスト

Ser. A

- No. 3651** Thermoelectric Properties of Valence-Fluctuating Eu Compound with a Clathrate-like Structure, $Eu_3Pd_{20}Ge_6$, by J.Kitagawa, T.Sasakawa, T.Suemitsu, T.Takabatake, and M.Ishikawa.
- No. 3652** Transport in Two-Dimensional Electron Gas with Isolated Magnetic Barriers, by Masahiro Hara, Akira Endo, Shingo Katsumoto and Yasuhiro Iye.
- No. 3653** Photoluminescence in Integer Quantum Hall Systems, by Kenichi Asano and Tsuneya Ando.
- No. 3654** Berry Phase and Quantized Hall Effect in Three-Dimension, by Jun Goryo and Mahito Kohmoto.
- No. 3655** Copper-Related Information from the Oxygen ls Resonant X-Ray Emission in Low-Dimensional Cuprates, by Kozo Okada and Akio Kotani.
- No. 3656** Polarization of Bloch Electrons and Berry Phase in the Presence of Electromagnetic Fields, by Jun Goryo and Mahito Kohmoto.
- No. 3657** Volume Effect on the Valence Transition in $Yb_{1-x}R_xInCu_4$ ($R=Y$, La, Ce, Lu) Compounds, by N.V.Mushnikov, T.Goto, F.Ishikawa, W.Zhang, K.Yoshimura, V.S.Gaviko.
- No. 3658** An Extrapolation Method for Shell Model Calculations, by Takahiro Mizusaki and Masatoshi Imada.
- No. 3659** Dynamical Conductivity and Zero-Mode Anomaly in Honeycomb Lattices, by Tsuneya Ando, Yisong Zheng, and Hidekatsu Suzuura.
- No. 3660** Heterogeneous Mixed-Valence States in RPd_3S_4 ($R=Eu$ and Yb) Viewed from Thermopower, Electrical Resistivity and Specific Heat, by J.Kitagawa, T.Takabatake, E.Matsuoka, F.Takahashi, K.Abe and M.Ishikawa.

物性研だより第41巻目録（第1号～第6号）

第41巻第1号 2001年5月

研究会シリーズ「物性研究の展望」の講評にお応えして	1
物性研究所研究会シリーズ「物性研究の展望」報告	9
○「物質探索と物性研究」	
物性研究所研究会報告	33
○「大学・研究所の研究支援体制における液化室業務の現状と展望」	
物性研究所談話会	37
物性研ニュース	
○人事異動	40
○東京大学物性研究所の助手公募の通知	43
○平成13年度物性研究所協議会委員名簿	45
○平成13年度共同利用施設専門委員会委員名簿	45
○平成13年度外来研究員等委員会委員名簿	46
○平成13年度人事選考協議会委員名簿	46
○平成13年度高輝度光源計画推進委員会委員名簿	46
○平成13年度軌道放射物性研究施設運営委員会委員名簿	47
○平成13年度中性子散乱研究施設運営委員会委員名簿	47
○平成13年度中性子散乱実験審査委員会委員名簿	48
○平成13年度物質設計評価施設運営委員会委員名簿	48
○平成13年度スーパーコンピュータ共同利用委員会委員名簿	49
○平成13年度スーパーコンピュータ共同利用課題審査委員会委員名簿	49
○平成13年度物質合成・評価設備共同利用委員会委員名簿	50
○平成13年度前期外来研究員一覧	51
○平成13年度中性子回折装置共同利用採択課題一覧	61
○平成13年度前期スーパーコンピュータ共同利用採択課題一覧	69
○平成13年度後期共同利用の公募について	72
○平成13年度前期短期研究会一覧	86
○第8回ISSP国際シンポジウム開催のお知らせ	86
○平成12年度外部資金の受入状況について	87
○テクニカルレポート 新刊リスト	88
第46回物性若手夏の学校	89
編集後記	

第41卷第2号 2001年7月

パイロニア酸化物 Cd ₂ Re ₂ O ₇ における超伝導	廣井 善二	1
物性研究所研究会報告会		
○「物性研究拠点整備計画等に関する物性研究所研究会」		8
○「高圧物性セミナー21」		26
○「強磁場研究の現状と将来」		29
○「磁場が誘起する磁性体の新量子現象」		41
物性研究所談話会		57
物性研ニュース		
○人事異動		58
○東京大学物性研究所の助教授・助手公募の通知		59
○テクニカルレポート 新刊リスト		62
編集後記		

第41卷第3号 2001年9月

再び物性研で働くことになって	柿崎 明人	1
研究会シリーズ「物質探索と物性研究」の講評にお応えして		
物性研究所研究会シリーズ「物性研究の展望」報告		5
○「中性子散乱と物性科学」		
物性研究所談話会		81
物性研ニュース		
○東京大学物性研究所の客員教授（助教授）公募のご案内		84
○人事異動		86
○2002年度日米協力「中性子散乱」研究計画の公募		87
○テクニカルレポート 新刊リスト		88
編集後記		

第41卷第4号 2001年11月

物性研に着任して	上床 美也	1
「法人化」を前に	毛利 信男	3
物性研究所短期研究会報告		
○「遷移金属酸化物の化学」		4
○「量子凝縮系の超流動と量子渦－超流動ヘリウムと中性原子気体B E C－」		21
物性研究所談話会		46
物性研ニュース		

○人事異動	48
○平成13年度後期短期研究会一覧	49
○平成13年度後期外来研究員一覧	50
○平成13年度後期スーパーコンピュータ共同利用採択課題一覧	61
○平成14年度前期共同利用の公募について	63
○平成13年度外部資金の受入れについて	76
○テクニカル・レポート 新刊リスト	77

編集後記

第41巻第5号 2002年1月

物性研に着任して	Mikk Lippmaa	1
PONTAとの10年間、それから？	加倉井和久	3
物性研究所短期研究会報告		6
○「新しいコヒーレント光源の利用研究と将来の展望」		
物性研究所ISSPワークショップ報告		29
○「強磁場技術と物性研究」		
物性研究所談話会		59
物性研ニュース		
○東京大学物性研究所の助手公募の通知		64
○人事異動		65
○テクニカル・レポート 新刊リスト		66

編集後記

第41巻第6号 2002年3月

物性研に着任して	森 初果	1
電磁濃縮法の進展	三浦 登	3
物性研究所ISSPワークショップ報告		
○「重い電子化合物 CeTIn ₅ の新しい超伝導状態」		12
○「量子ホール系の新展開」		32
物性研究所談話会		53
物性研ニュース		
○人事異動		58
○テクニカル・レポート 新刊リスト		59
○物性研だより第41巻目録（第1号～第6号）		60

編集後記

編集後記

今年は暖かく、今年度最終号の編集後記を書く時点で、もう桜の開花だよ
りが聞こえています。ここ柏キャンパス前の柏の葉公園内の桜も、ちらほら
とほころんできています。今月号は、この桜の季節に相応しく、物性研始
まって以来の女性所員となられた森初果氏に着任しての感想を書いていただき
ました。他に、移転により設備が充実し、最高磁場を更新中の極限環境物性
研究部門三浦所員に、電磁濃縮法の進展について書いていただきました。さら
に、昨年度から改正された共同利用活動の一環である ISSP ワークショップ
2 件についての報告をしていただきました。ISSP ワークショップは、以前
からの短期研究会よりも規模の小さい、しかも緊急でかつ機動的な研究会
のために設置されたもので、今後多くの活用が期待されます。

ところで、最近所用で六本木に行く機会があり、旧六本木キャンパスがど
うなったか見てきました。生研の建物は、物性研が使用していた区画を除い
てすでに取り壊され、粉塵が舞いあがっていました。そのそばで、旧物性研
の建物が次は自分の番かと佇んでいるようで、少し悲しくもあり、懐かしく
もありました。正門のそばで、いつもいち早く春を告げてくれていた“えど
ひがん桜”が、誰に春を告げるでもなく満開で、哀れであり、まだ移転から
2 年しか経っていないにもかかわらず、ずっと昔のように思われ、六本木は
遠くなりにけりと感じた次第です。

なお、次号の原稿締切りは、4月19日です。

所属又は住所変更の場合等は事務部共同利用掛までご連絡願います。

上田 寛
陰山 洋

