

半金属研究の面白味

九州大学理学部物理学教室

間瀬 正一

1. はじめに

ある件で川崎恭治氏から御電話を頂いた際、終りぎわにお前のところの研究に関する紹介を「物性研究」に投稿せよと言われた。物性基礎論中の基礎論をやっておられる川崎さんが外交辞令を交えずに仰っしゃったのであるから素直に受け取るべきであったが、とっさに感じたのは日頃難しい理論に耽溺しておられる基礎論の研究者を相手に書くかには余程 epochmaking な実験結果の持ち合わせでもなければ気が引けるのが自然であり、その種の仕事とはおよそ縁のない仕事しか出来ない現状の下では残念ながら即座にお断りせざるを得なかった、ところが暫らくして受け取った「物性研究」編集部からの書面を読ませて頂くと、物性基礎論研究者も日本の実験研究者の泥臭い実験結果もしくはその意図するところから何らかの閃きを求めようとなさっていることを知り、大変親近感を抱くことができた。

あまり親近感に気を許して駄文を弄することの愚を充分承知しながらも、再度求められればお答えするのが筋であると考え、思いつくまま書いてみた。研究室の責任者としては、たとえ結果は芳しくなくても、研究計画を立てるのに人並みには苦慮しているということを理解して頂ければ望外の喜びである。

2. 何故に半金属に興味を抱くか

人それぞれ必然的もしくは偶然に種々の問題に興味を抱く。理論家であれば、種々の現象の背後にある一般法則を探ぐり出し、定式化し、それから逆に演繹的に新しい現象を予見し実験家に示唆することができれば喜びは最高であろう。実験家の場合には扱う現象はきわめて具体的であるから、外見上はすべて個別的であるけれども、おそらくは人人により意図するところは千差万別であり、それは各人の趣味と力量により決まるのであろう。

私は半金属しか手掛けてこなかった。このカテゴリーに属する単体金属の種類は大変少なく（周期律表で Bi, Sb, As, グラファイト, Yb 等）、応用上の価値は過去においては（多分将来も）あまり大きいとは言いがたく、一方、理論上は多くの理論家が興味を抱く相転移現象とはこれまでのところはおおよそ縁のない代物であった。にもかかわらずこれに興味を抱く理由は何故か、少し金属のフェルミ面構造を通して説明したい。

フェルミ面構造を類型化すると次のように分けられる、私はその中から将来の発展性を考えて(IV)を選んだ。

(i) 一つの球形フェルミ面だけの系、アルカリ金属がこれに属する、技術に自信があれば私はこれを選んだかもしれない。

(ii) 一つの球形電子フェルミ面と一つの球形正孔フェルミ面だけからなる系、現在でも多くの教科書のみならず論文も主として(i), (ii)のカテゴリーに限定して議論しており、それで本質の少なからずを衝いているように思える、しかし現実にはこのカテゴリーに入れてよい物質は存在せず、それに(i)と(ii)の二大別では充分ではない。

(iii) 適度に複雑なフェルミ面がもたらす新しい概念、詳しくは述べられないが、ただ一つ申せば、磁性研究には伝統的に強い日本で、Ni, Fe 等の強磁性、Cr 等の反強磁性等をフェルミ面の側から取り組む研究が出遅れてしまったことは大変残念である。実際、1950年代には日本ではフェルミ面研究はほとんど関心が持たれなかった。

(iv) フェルミ面の大きさを自由に制御できる単体金属、Bi を例に取れば、伝導帯と価電子帯の間の direct band gap は約 15 meV, indirect overlapping は約 40 meV の小ささであり、実現可能な強度の磁場あるいは圧力でもってこれらを消したり発生させたりバンド構造を自由に制御できる、即ち金属 $\leftrightarrow$ gapless 状態 $\leftrightarrow$ 真性半導体の間の任意の転移を結晶形と化学的純度を同一に保ったまま行こなわせることができるのである。たとえば異常に高い誘電率 ($\epsilon_0 \sim 100$)、きわめて大きい反磁性帯磁率（ランダウ反磁性では決して説明されない）が定性的にはこの小さい direct band gap に結びついていることは良く知られているが、より極端な状況への自由な制御がなお豊かな概念を生み出すに至るものと予想したい。即ち外的条件による制御に妙を得れば、これまでの成果からは外挿できないほどの豊かな稔りを与えてくれるに違いないと私は信ずる。

3. 何故に現在の研究手段を選んだか

私は遅くから実験の道に入り、先輩から手を取って教えられる機会を殆ど持ち得なかったもので、研究のスタートにおいて技術的な面で勝負するという道はきわめて不得策であると考えた。そこで私が選んだ方針はこれまでの歴史では進歩が比較的遅かった技術を選び、用いる一つ一つの技術は在来のものであっても、それを総合した形はなるべくユニークなものになるよう種々と考えた末、パルス強磁場・低温・超音波の組合せを選んだ。素人的な工夫ながら超音波測定器も Bi という特殊な物質に対して特に好都合に働くように試作してもらった。

日本の GNP の進歩が早くて、今や日本国内でも 120 ~ 150 kOe 級の超電導マグネットが 2 台以上は可動するようになると、上の組合せもユニークでも何でもなくなってしまったが、しかしエキシトニック相に関してこれまで私どもがやってきた程度の実験でも超電導マグネットでやるとするときわめて多量の液体 He を要するのであり、今度はその経費の裏付けにたとえ大研究所といえども多少は頭を悩ますことになるだろう。そんな訳で、この方針は多少の共感を勝ち得たのであろう、幸い過去 5 ~ 6 年の間に各種の科研費・奨励金をを頂いて設備を充実することができた。

過去 7 ~ 8 年間は教室内経常費を借金して実験室内での He ガス排気・回収のためのポンプ・配管設備から始めて、さらに上記の科研費・奨励金を含め集められるだけお金を集めて必要最少限度の実験装置を購入し、可能なところは自作して、早急にある水準以上の仕事ができる体制づくりに全力を傾けた。ところがそれが成功すればする程装置は大型化し、実験を遂行するために要する消耗品費は増大し、経常費ではもはや現状を維持することさへできなくなってきたのが実状である。

これからの充実期にいかなる方針をとったらこの財政危機を乗り越えられるのか、それが最も頭の痛い問題である、この点は理論家が実感として理解し難いところではなかろうかと思う。

4. 研究の重点をどこにおくか

これまでのところは主として過去において何を感じどのような行動してきたかを述べた。語ることが要求されているのはむしろ近将来に向けていかなる方面にいかなる手段

で立ち向かおうとしているのかについてであろう。

意識としてはいくらでも ambitious でありたいが、一つの期待を実験的に証明するには、いかなる実験手段（装置）をいかなる技術と財政手腕を用いて組立て、何箇年の間に研究を一応完了するのが、己と協同組研究者の力およびおかれた条件から割り出して大体的見当をつけなくてはならない、ところが見体的に計画が実現するのはその計画の何分の一かであるか、実現するまでに予定の何倍かの年月がかかるのが常であったので、この紙上でとても得々と将来計画を語る気にはなれない。それにごく莫然とは、エキシトニック相研究でこれから探りたい方向に関して最近「科学」と「固体物理」（2月号）に小文を載せたので、ここに重複することは避けたいと思う、私としては結果はどうであれこの問題に全力を傾ける積りでいるし、そして研究室員の少なからずはこれに共感を覚え、協力して発展させてくれるであろうと期待している。

5. 現状における二三の問題点

エキシトニック相転移という大変魅力的な問題に関する実験的証拠を万人が納得するような美しい形ですでに示すことができたなら、私どもの気持ちも大変華やいだものになっていたであろう。しかし当初に予感していた通り、この現象はそれほど甘い相手ではなく、これからじっくり長期戦で取っ組みなくてはならないと感じている。

差し当り私どもが改善しなくてはならないと考えている点を以下に述べるが、参考になる御意見が頂ければ大変有難く思う。

(i) 超音波のパワー、我々の扱う系では、 10^{-5} 個/原子しかない電子が極端に長い平均自由行程を持ち、一旦もらったエネルギーを散逸する機会がきわめて乏しいという状況にある。超音波は発見的なプローブとしては大変勝れていることはこれまでの経験でわかったが、このパワーの軽減を計らなくては真に T_c に迫ることは難しいかもしれない。

(ii) 試料について、単原子金属の単結晶の純度の目安として最も良く使われているのは室温と液体 He 温度の抵抗比である。我々の用いている Bi は $\rho_{\text{room}}/\rho_{4.2\text{K}} \sim 250$ であり、この大きさは標準的であると言える。参考までに申せば、特別な目的で使用するため熔融ビスマスから単結晶を細く引き上げれば 500 ~ 600 程度まで上昇できることが報告されている。

ひろば

確かにこの抵抗比が大きければ大きい程試料は良いと言えるが、私どもの経験則によれば、強磁場内の電子の振舞いに関する限り抵抗比は試料の良否を決めるための必ずしも十分な目安にならないということである。具体的な例をあげれば、同じく抵抗比が250程度の試料でも、ある場合には（それは異なる装置で引き上げた単結晶であった）幸運にも巨大量子減衰の峰值にきわめて異常な温度依存性が現われ、またある場合にはその異常性はそれほど顕著でないことを見出したからである。

そのような異常温度依存性を除外して正常な振舞に限ってみた場合、試料によって減衰の峰值に大小を生ずるのは主として試料純度（化学的不純物よりはむしろ物理的不純物）の違いに起因するランダウ準位幅の相異による。われわれの得た印象（断定する前にもう少し研究してみたい）によれば、転位等の物理的不純物は磁場零もしくは弱磁場領域の電気抵抗には小角散乱のセンターとして働き、ほとんど抵抗に寄与しないが、強磁場ではそのような低密度の転位も軌道の量子化に対して、Pippardの言葉を借りれば、havocを与えることになる。実際、ごく最近の一二の例を除いて、誰がどんなに注意して試料を作っても、de Haas-van Alphen効果の振幅の解析から得た電子緩和時間 τ はどの金属の場合でも $\sim 10^{-12}$ sec と大変短いのであるが、電気抵抗からは約2桁大きい $\tau \sim 10^{-10}$ sec が得られているのである。この転位はBiにおける巨大量子減衰そのものにはde Haas-von Alphen効果ほど著しい効果を与えないが（前者からは後者の値の約100倍すなわち $\tau \sim 10^{-10}$ sec が得られ、この事実自体がまだ解けていない興味ある問題である）、エキシトニック相には恐ろしく悪い影響を与えるように強く感じられるのである。例えばたった数回の室温・液体He温度間の熱的循環は相転移の観測を不能にしてしまうのに充分であるように思われる。このことは何もエキシトニック相の現象が試料純度に敏感に依存する特殊な現象であることを意味しているのではなく、普遍性を示すには現在の結晶作成技術があまりに拙劣である（必ずしも我々の所だけではない）ことを意味していると私は考えたい。

6. 実験家と理論家の間の交流について

今回のアンケートは一部には理論と実験とのより盛んな交流を目指してなされたものと思われる。私の実験研究の歴史はそれほど長くはないけれども、協力者とともに九大で始めたBiにおける巨大量子減衰の研究（発表が1年早ければこの種の実験的研究に

関する最初の論文となったのにちょっと残念)は直ちに九大の理論グループが関心を示して deformation potential の異方性その他の論文として稔らせ、また電子-正孔系の異常吸収に対しては東北大学・九州大学の理論グループが直に取り上げ強磁場中のエキシトニック相の理論として展開された。特に後者の場合、福山秀敏氏ははるばる九大まで来られこちらの長井達三氏と協同して仕事を完成された。その間私も協力者である坂井武君も福山さんから教えられる点がずい分多かったことを大変有難く思っている。自国の理論家がまず関心を示して下さるということは実験結果を生み出す側としては大変嬉しいことであり、私は常にそうした理論家に巡り合わせてきた幸運に感謝している。

なおついでに申せば、私自身もまたできるだけ理論の方が興味を抱いてくれるよう折に触れ計画を再検討しているのである。と言うのは、実験結果もしくは計画の対象となるように整理することは自己評価をする上で大変有用であると常々思っているからである。来るべき数年間は現在の課題に傾倒する積りでおり、理論の方にとって多分興味のある事実を生み出すことができるかと信じている(初めに述べたこととは裏腹なことを述べていることになるが)。そんな訳で、これからもこれまでと同様に理論家のどなたかが関心をもって下さるものと私は期待しているのであり、はるばるこちらに出向いて下さる方があれば最大限の歓迎をしたいと思っている。

7. おわりに

日頃感じている今後にかける期待とその実現を計るにあたっての当面の問題、それに過去の反省等を雑然と並べたので、主尾一貫していない面があったかもしれない。

重ねて強調したいのは、私どもとしてはアイディアの貧困に悩む以前に、try するための液体 He の代金・工作代金にも泣かされているのであり、着実に発展させるための確実に入る経常費がもう少し何とかならないものかと、「物性研究」の読者には全く予想外のことをも考えていることも御理解頂ければ幸いである。