

20 世紀・21 世紀の固体物理学

学習院大学 川畑 有郷

遠山 : それでは 2 番目の「物性」のご講演を始めたいと思います。講演していただく先生は、川畑有郷先生、学習院大学です。川畑先生は、先ほど山田先生がおっしゃられた電子相関のところにもお名前が出てきていらっしゃるように、電子相関の問題に取り組まれまして、その他、アンダーソン局在やメゾスコピック系の量子輸送現象に関して、非常に精力的に研究をされています。いま、「ナノ」という言葉が流行っているわけですが、それとの関連というのは、個人的には先生がどのようにコメントされるか、非常に興味深く、楽しみにしています。

先生が書かれた文章が、予稿集といたしますか、こちらに載っています。個人的には非常に刺激的な話もしていただけるだろうと期待しています。タイトルは「20 世紀・21 世紀の固体物理学」です。先生、よろしくお願いします。

私がここにいましたのは 1972 年から 76 年で、1 年は外国に行っていたので、実際にいたのは 3 年間ということになります。30 年前ですから、ほとんどのことを忘れてしまったのですが、みなさんのお顔を見たりすると、いろいろなことを思い出しまして、亀淵先生にピンポンで負けたとか、勝ったことがあるかどうか覚えていないのですけど。

亀淵 : 弱いから。

このシンポジウムが「湯川・朝永をうけて」という題ですので、私と両先生の関係について、ちょっと申し上げますと、朝永先生に関しては、1 次元系の 1950 年の論文、亀淵先生のお話によると、あれは最後の論文なんですか、朝永先生の。それをいろいろと応用したりして、そういう意味ではずいぶんお世話になってはいますが、残念ながら直接お話したことはないのです。

それから湯川先生は、逆に物理に関しては全然無関係ですが、私がいました頃は、先生はよく出ていらっしやいまして、何度かお目にかかりました。特に『Progress』の編集委員会でのことを覚えているのですけど、先生がいらっしやると会議が早く終わってよかった。話がもめてきますと、ひと声「ほな、こうしたらええやないの」、一同「ははー」というので決まってしまうのです。そういうことをよく覚えています。

20 世紀・21 世紀の固体物理学

川畑有郷

学習院大学理学部

2006 年 11 月 16 日

[Slide 1]

● 20 世紀の固体物理学 (~ 1980)

新現象の発見

現象	発見	理論的説明
◇ 超伝導	1911	1957
◇ 近藤効果	1933	1964
◇ 負磁気抵抗	1955	1980

普遍的、明解な理論

$$\text{超伝導} \quad T_c \propto M^{-1/2}, \quad 2\Delta = 3.5k_B T_c$$

$$\text{近藤効果} \quad R = \frac{2\pi Dmc}{ze^2\hbar} J^2 S(S+1) \left\{ 1 + 4DJ \log \left(\frac{k_B T}{D} \right) \right\}$$

$$\text{負磁気抵抗} \quad \Delta\sigma(B) = 0.605 \frac{e^2}{2\pi^2\hbar} \sqrt{\frac{eB}{\hbar}}$$

[Slide 2]

[Slide 1] 題は、大きく出たのですけれど、これもなんとなく括弧でもつけたほうが、それこそ格好がついてよかったのかもしれないのですが、私も結構歳を取りまして、昔からの話をずっと見ていますと、20 世紀と 21 世紀でだいぶ研究のやり方が様変わりしているように思ひまして、それ

が望ましい方向にいつているのかということ、ちょっと疑問であるということです。ただし 21 世紀はまだ 6 年しかありませんので、正確に言うと 1980 年から 90 年ぐらいを境にして、結構研究のやり方というのは変わっているような気がします。

[Slide 2] 1980 年ぐらいまでは、いろいろな現象が発見されたわけでありまして、これは超伝導ですね。超伝導というのはみなさんご存じで、理論的解明、これは山田さんの見たら 1956 年になっていたのですけれども、間違えたかもしれない。すみません。

[会場 1957 年です。] え？ 57 年？ ああ。こういうのは自信がない。

それから近藤効果も山田さんが説明してくださいましたので、だいぶ手間が省けました。この理論的解明が近藤先生の論文で、1964 年。

負の磁気抵抗というのは何だかみなさんご存じない方も多いと思うのですが、これは佐々木亘先生らが 1956 年に発見した現象でありまして、こういうものに比べると、あまり大きな発見とは言えないかもしれないのですけれども、実はこれが将来のメゾスコピックとか現在のナノテクノロジーに繋がっているのです、あえて足したわけです。

抵抗が負になるような書き方で、これはよろしくないのですが、磁気抵抗とは何かというと、不純物をたくさんドーピングした半導体というのは、金属的な電導を示しますから、そういうものに磁場をかけると、抵抗が減ります。そういう現象です。つまり磁気抵抗というのは、磁場による抵抗の変化という意味でありまして、それが負だということは、磁場によって抵抗が減るんだということです。

このへんの現象の特徴というのは、まず普遍的で、いろいろな物質で起こるということです。それから、発見されてから理論的に解明するまでに、みんな、何十年もかかっているということなのですが、理論が出る寸前まで、全くそのメカニズムに関して見当がつかなかったのが、一つの論文でずばっと解決されたというところが、非常に特徴的なのです。

普遍的というのは、例えば超伝導で言うと、これはアイントロップ効果ですね。臨界温度が原子の重さの $-1/2$ 乗に比例するとか、物質の定数によらない、これはエネルギーギャップと臨界温度の関係、物質によらないような、非常に普遍的な関係がいっぱい出てくる。それから近藤効果も、これは山田さんが言っておられた $\log T$ ですが、もちろん多少は物質の定数によるわけですが、これはバンド幅でありまして、近藤効果というのは、もちろん繰り返すと、金属のなかに磁性を含んだ不純物を入れると、低温で抵抗が逆に上がってくるという、resistance minimum という現象ですね。これは上がるほうだけを取り出して、これに本当はプラス T の何乗という電子格子相互作用による項がついてこうなるわけですが、比較的簡単な式が得られているということです。そういう意味でユニバーサルです。

これは電気伝導率ですが、抵抗が減るということは、磁場をかけると電気伝導率が増えるということでありまして、これは理論なのですが、まったく物質に関する定数を含んでいないわけです。磁場と e と $\hbar$ しか含んでいません。と言うとちょっといんちきでありまして、例えばシリコンとかゲルマニウムみたいに、有効質量に異方性がある場合は、ちょっと補正を加えなければいけないのですけれども、基本的には物質の性質を何も含んでいないということでありまして、実はこれは不肖私がつくった式なのですが、Mott 先生はこれに非常に買ってくれて、川畑 formula とあちこちで言ってくれたんですけど、なかなか普及しない。困ったものです。それはさておき。私がやったというより、実は氷上さんがある研究をしまして、その応用ということではあるのですが、

[Slide 3] その後の発展というと、超伝導は高温超伝導にいきまして、近藤効果は一時、近藤効果自身はわかっていったという風潮になったのですが、実は今、ナノテクノロジーで復活しています。負の磁気抵抗はさっき言ったようにメゾスコピック系、ナノテクノロジーへと発展していった

ということです。

その後の発展

超伝導 → 応用, 高温超伝導

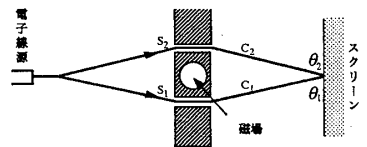
近藤効果 → ナノテクノロジーでの復活

負磁気抵抗 → メソスコピック, ナノテクノロジー

[Slide 3]

負の磁気抵抗

◇ アハラノフ・ボーム効果



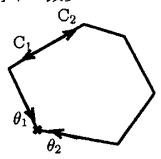
$$\theta_1 - \theta_2 = \frac{e\Phi}{\hbar}, \quad \Phi \dots \text{磁束}$$

[Slide 4]

[Slide 4] 私はやっぱり、三つ挙げたこの中で、一番関係していたのは、メソスコピック, ナノテクノロジーというところですので、それを中心にして、どういうふうに研究が変わっていったかということを説明します。結局、負の磁気抵抗というのは、基本的にはアハラノフ・ボーム効果なのです。アハラノフ・ボーム効果というのはみなさんご存じのとおり、電子線を二つに分けて、ここでスリットを通してここで干渉させるということです。この中に磁場を通しますと、この中を通る磁束によって、こっちとこっちの電子波の位相が変わります。難しいのは磁場が外へ漏れちゃいけない事です。つまり磁場が外へ漏れて、この軌道が磁場で曲がって干渉パターンが変わるのは、全然面白くなくて、電子が通るところには磁場はないけど、この電子波の位相の modification だけで干渉パターンが変わるといところがミソなわけです。これは非常に難しい実験なわけです。

◇ 負磁気抵抗

電子波の干渉による電気伝導率の減少

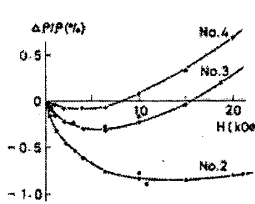


磁場なしのとき $\theta_1 = \theta_2$ (時間反転対称性による)
元の場所に帰る確率 $1 + 1 = 4$
不純物等による弾性散乱は、coherenceをこわさない!

$\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma$
 $\sigma_0 \dots$ 干渉効果を無視した値 (Boltzmann conductivity)
 $\Delta\sigma \dots$ 干渉効果による補正 < 0
磁場中では $\theta_1 - \theta_2 = 2e\Phi/\hbar$ ($\Phi \dots$ 磁束)
 $|\Delta\sigma|$ の減少 $\rightarrow \sigma$ の増加

[Slide 5]

◇ 実験 (Emeli'nenko & Nasledov, 1958)



理論値 $\Delta\sigma(B) = 0.605 \frac{e^2}{2\pi^2\hbar} \sqrt{\frac{eB}{\hbar}}$ の約半分

[Slide 6]

[Slide 5] じゃあ負の磁気抵抗というのが、どういうふうにして起こるかという、電子波の干渉による電気抵抗の現象というのがありまして、実は電気伝導というのは、大抵の話は古典力学で説明できてしまうのです。電子がこういって格子振動と散乱してとかいう、あまり量子学的な側面というのは出てこないのです。だから量子力学的な、波の干渉というのを考慮しない、そういうものを Boltzman conductivity と言っているのですが、そういう電気伝導率によくよく見ると、干渉効果による補正というものがある。それはどういうものかという、例えば電子をここにぽんと置いたとしますと、電子の波は不純物にぽんぽんぽんとぶつかりながら、ある確率で元へ戻ってくる。磁場がないと、時間反転対称性があるので、こういく波と、それから逆にこのパスを辿ってく

る波というのは、時間反転対称性により、まったく同位相で、同じ振幅で帰ってきます。だからこう帰って帰ののと、こう帰って帰る確率は、古典的に勘定すると2倍なのですけれども、干渉を考慮すると、実は4倍になるということで、古典的に勘定をしたのに比べて、干渉効果を入れますと、電気伝導率に対する干渉効果による補正というのはマイナスになるということです。

もう一つのミソは、不純物にぼこぼこ当たってくるわけですが、弾性散乱というのは、波動関数の coherence を壊さないわけです。何度行っても同じ位相で、同じ振幅で帰ってくるというところ。そこがミソです。

磁場をかけたらどうなるかという、このパスを貫く時速、 ϕ によって、こういったときの位相と同じ径路を逆向きに辿ったときの位相にずれが出ます。そうすると、ここでの干渉効果は4倍にはならないので、干渉効果がだんだん減ります。ということは、これの絶対値が減ってくるというわけです。しかもこれはもちろん、いろいろなパスがあるわけですから、いろいろな磁束があるので、そういうものをいろいろと考えますと、干渉効果が smear out されて、結局、磁場をかけるとどんどん減っていくと、絶対値が減るわけです。だから負のやつ絶対値が減るからこれが増える、そういう仕掛けです。

[Slide 6] 実験がありまして、これはロシアの『ウスベヒ』という雑誌に載っているやつなのですが、べつにこれは線が理論ということではなくて、向こうの人が勝手に線を引いたのですが、このへんの入り方を見ると、なんとなくルートのですね。昔の人の悪い癖で、これはまさにこれが磁気抵抗ですね。磁場による抵抗の変化を、元の、磁場がなしのときの抵抗で割ったものです。大雑把に言うとこれにマイナスをつけたようなものでして、これを conductivity、電気伝導率に換算すると、ほとんど同じ大きさになりまして、だいたいこいつの半分ぐらいの大きさになるというわけで、no parameter ですから、半分ぐらいならよしとしようということです。この頃ですから試料もあまり良くないし、温度も結構高いので、温度が結構高くても、これがちゃんとルートで入っているというところが本当かなと思わないところもないのですけれども。

こういう負の磁気抵抗というのは、1960 年前後は、半導体ではものすごく流行ったのです。私が理論を作って論文をいろいろと、実験データを調べたのですけれども、『Physical Review』なんて山ほど載って、本当に百ぐらい調べましたけれども、『Physical Review Letters』のは、ほとんど役に立たないいいかげんなデータばかりでした。一つだけ役に立つのがありましたね、このカーブを仔細に解析して、 $\sqrt{B}$ のコンポーネントがあるというのが一つだけありました。役に立ったのはこれと、それから佐々木亘先生のジャーナルに出ていた論文ですね。これは試料の基礎的な性質なんかがびしっと書いてありまして、さっき言った、ゲルマニウムですから異方性のあるときの補正を入れなくちゃいけないで、磁場を回転させたときに、これが異方的になるのですけど、それがびしっと合って、大いに感激いたしました。

坂東：すみません、そうするとそれが先生が出された理論ですか。

川畑：これが理論です。

坂東：「約半分」というのは、どういうことですか。

川畑：これは抵抗の変化でやっていますので、抵抗をこれに。

坂東：それに直すと。

川畑：conductivity に換算するのです。正確に言うと $\delta\rho$ を ρ の二乗で、つまり磁場なしのときの抵抗で割ってマイナスをつけるということです。

坂東：それで合っているということを言われたわけですか。

川畑：そうすると、ほとんどこれがみんな同じ大きさになりまして、それでこれの半分ぐらいになると。

坂東：そうですか。わかりました。でも理論値は半分しか説明できない。

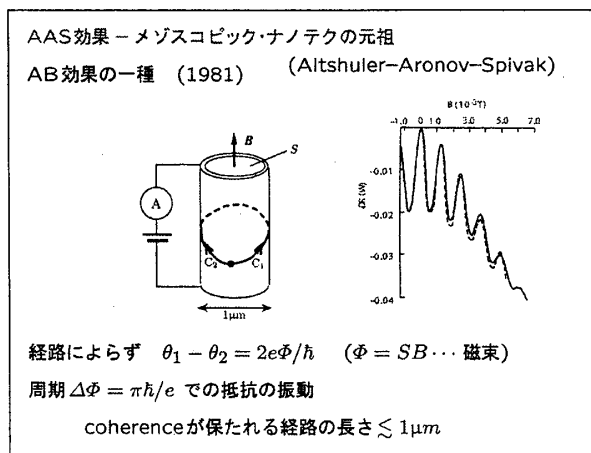
川畑: まあ, そうなんですけど.

坂東: いいですけど, そういうことなんですね. わかりました.

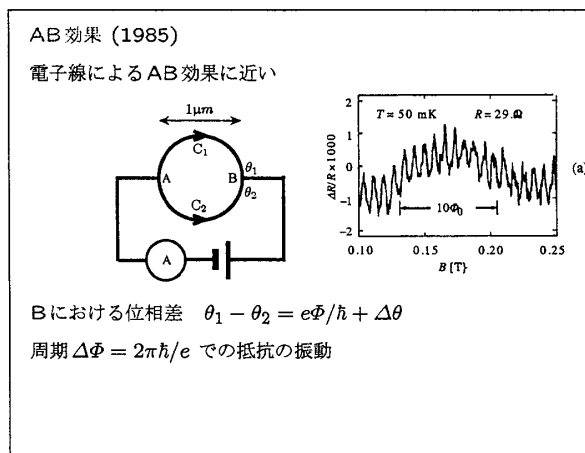
川畑: あんまり試料も良くなさそうですし, 温度が結構高いので.

坂東: それなら理論値の方が合っているはずだということですね.

川畑: まあ, そのへんは, 物性というのはそのぐらいのもので, no parameter ですから, そのぐらいあればご勘弁という所です.



[Slide 7]



[Slide 8]

[Slide 7] これから発展したのに, AAS効果というのがあります。「Altshuler-Aronov-Spivak」って, これは理論的に提案した人でありまして, 実験をやったのは別の人なんですけど, やっぱりこれもアハラノフ・ボーム効果の一種なんです. 試料はどういうものかという, 薄い金属の円筒を使いまして, その中に, 軸に平行に磁場を通します. そうしますと, さっきみたいに二つのパスをこうやってこう帰ってくるというのを考えますと, これはどう回っても, このパスの中を貫く磁束というのは, この面積と磁場をかけたものになるので, 全部共通なんです. ですからさっきはパスによって磁束の値が違いましたけれども, 全部同じですから, これが 2π の整数倍になる磁場の周期で, 電気抵抗が振動するということになります.

実験をやりますと, これは抵抗の変化分ですけれども, 見事に振動します. この点線は理論値なのですが, 理想的にはこれは本当にサイン的に振動するはずなのですが, そうなっていないのは, 円筒の肉の厚さが有限だからです. 理論はそれも考慮に入れてやって, ずばり合っているということです.

これは1ミクロンぐらいなのですが, なぜ短くなきゃいけないかというと, さっき言ったように弾性散乱は構わないのです. 非弾性散乱が起こると coherence が破れます. 例えば非弾性散乱が起こるとエネルギーが変わるわけです. そうすると波数が変わっちゃいますから, ここへ来たときの位相が変わってしまうということで, 干渉性がなくなっちゃう. 非弾性散乱というのは電子格子相互作用とか, 電子電子相互作用ですから, 温度を下げれば原理的にいくらでも押さえられるのですが, この実験の範囲では1ミクロンぐらいよりこれが小さくないといけないということです.

本当は, この中だけに磁場を通したいのですが, そんな曲芸はできませんので, 電子の通るところにも磁場をかけちゃうわけです. ただしこの肉も充分薄ければ, 電子の軌道というのはこの面に平行ですので, そうすると Lorentz force は面に垂直ですから, 電子の運動に影響を与えないと. そこがうまくいいます.

[Slide 8] 次にあらわれたのが, AB効果という. 著者たちはAAS効果もアハラノフ・ボーム効果と言っていたのですが, あれと区別するために, こっちをAB効果と我々は普通, 言っています

が、これは電子線による AB 効果にもほとんど近いので、こういう非常に細い回路を、普通は金の蒸着でやるのですけれども、作ります。こう流れる電流を計って、ここに磁場を入れるわけです。ここに磁場を通して、全体にかけちゃうのですが、さっきと同じでんで、これが非常に細ければ、電子はこれに沿って走りますから、Lorenz force はこれに直角なので、この中へ閉じ込められていれば、電子の軌道は変わらないと。そこがミソです。やっぱり同じく 1 ミクロンぐらいでないと、干渉効果は出てこないというわけで、これはまさにさっきの電子線のとほとんど同じで、こっちから電子がきて、波が二つに分かれてここで干渉すると。ここで干渉して例えば、この差が π であって、山と谷が打ち消し合って、ここでの波の振幅がゼロになるというのはどういうことであるかという、要するに定在波ができちゃうのです。定在波は電流を運びませんので、そういう条件では抵抗が増えるということになりまして、まさにアハラノフ・ボームと同じで、この電子線の場合と同じように、この中を通る磁束がこれだけの単位で抵抗が振動するということです。これは抵抗と、横軸が磁場ですが、この間というのは、このリングの直径、大きさから計算しまして、10 回振動するはずの磁場の範囲であると。数えるとちゃんと 10 回振動しているので、確かにそうなっているということです。

AAS 効果, AB 効果の意味

- ◇ 微小試料の抵抗の測定
- ◇ 手軽な AB 効果の測定
- ◇ 電子波の干渉効果の電気伝導による測定
- ◇ 微細加工技術の進歩

試料制作法

AAS 効果 … 超ローテク … 追従研究ほとんどなし

AB 効果 … 超ハイテク … 多数の追従研究 … 制作装置による限界

種切れ (~1990) … メゾスコピック系も終わりか?

干渉効果によるデバイス … すべて失敗

[Slide 9]

● 過渡期の研究 (1980~ 1990)

メゾスコピック系の他に

現象 発見? 理論的解明

◇ 量子ホール効果 1980 ?

◇ 高温超伝導 1986 ?

発展

量子ホール効果 → 多体効果 (分数量子ホール効果)

高温超伝導 → より高い T_c 30K → 130K, 種々の理論

怪しげな理論の横行 → 物性理論に悪影響

[Slide 10]

[Slide 9] この二つの意味というのは、アハラノフ・ボームの振動を利用することによって、ものすごく小さい、1 ミクロンぐらいの試料の抵抗を、ちゃんと計れているんだぞということを確認したということです。試料より外についているリード線なんかのほうのはるかに大きいわけですが、それでも 1 ミクロンぐらいの試料の抵抗をちゃんと計れたと。それから手軽な AB 効果、アハラノフ・ボーム効果の測定ということですね。さっきも言いましたように、電子線の AB 効果というのは、磁場を外に漏らさないようにするのが難しく、まともにちゃんとできていると認められているのは、外村さんの実験ぐらいしかないということなのです。

手軽というのは、あと、電子波の干渉効果を電気伝導によってちゃんと測定したこと。さっきも言ったように、電気伝導というのは意外に古典力学で済んじゃうので、電子の波の干渉効果というのは、全く観測例がなかったということです。これは「手軽」と言いますけれど、何が手軽かというと、あとの AB 効果のほうですけれども、細い回路を書くというのは、そういう装置がちゃんとありまして、それを買ってくればできちゃうのです。ですからみんなこの装置を買って、一家に一台という感じで、すごい二番煎じ、三番煎じが出たのですけれども、もうちょっと、装置よりも頭を使ったらどうかと言いたいぐらい。ちょっと頭を使ってリングを二つにして、干渉効果を見るとかというのもあるのですけれども、essential にそんなに変わるわけじゃない。1987 年に私とか小林俊一先生と一緒に国際会議をやったのですけれども、同じようなものがうわっときまして、小林先生なんて、「これは種切れや、メゾもおしまいや」とおっしゃっていたのですけれども、実はそのあと続くのです。ただ、物理として続くのではなくて、要するに非常に小さい試料の電気伝導を計る

事です。その技術が継承されて、現象としては全然違う、いろいろなものが出てくると、そういう意味です。

それから干渉効果によるデバイスというものが、いろいろと考えられたのですが、全て失敗しました。というのは、一つは電子波の coherence, 位相というのは非常に弱いのです。ちょっとしたことですぐに coherence がなくなっちゃう。それから coherence が保たれても、干渉効果というのは非常に小さいのです。先ほどの AB 効果の振動の振幅でも、実は、磁場なしのときの抵抗の 1000 分の 1 ぐらいしかないのです。だからそういうものは、例えばスイッチングとか、そういうものにはとても使えないので、全て失敗ということです。

最初の AAS 効果、これは「超ローテク」と書いてありますけれども、これはつまり、こっちの細い回路を書くというのは、そういう装置があるのですけれども、ああいう 1 ミクロンぐらいのシリンダーのような、立体的なものをつくる既成の装置というのはいないのです。彼らはどうやったかという、要するにガラスの棒に金属を蒸着したのですけれども、1 ミクロンの太さのガラス棒をどうやって作るかという、これがローテクなので、要するにガラス棒を熱して、びゃっと引っ張る。そうすると切れます。切れるときに条件をうまくやると、1 ミクロンぐらいの太さのものがちぎれて、ひらひらとどこかへ飛ぶのだそうです。飛ぶのですが、もちろどこへ飛ぶかなんて見えないのです。まあこのへんかなというのはわかる。そこで、床の上に黒い紙を敷いておきまして、斜めから強い光を当てて、床の上に這いつくばって、このへんかなというところを虫眼鏡で探すという。本当にそれをやったらいいです。私が聞いたのではなくて、小林俊一先生が本人に聞いたものの又聞きなのですけど、それでできると思ってしまう楽観的な精神が素晴らしいと思うのですが、それをやってみようという人はいないのです。もうちょっと何か工夫をして、自分たち独特のものをやったらどうかと思うのですけれども、同じ装置を買って、それでやるというのはみんなやるのですけれども、このへんからどうも、本当に研究が完全に装置によって支配されてしまうと、どうもそういう傾向になって、面白くないのです。

[Slide 10] 私に言わせると過渡期というのはこの間なののですが、メゾスコピック系は何やかんやで続いているのですが、この間の重要な発見という、何と言っても量子ホール効果と高温超伝導ということです。量子ホール効果の観測は 1980 年なのなのですが、これも発見というかどうかというのは、ちょっと異論があります。人によってはもう 1975 年ぐらいに、安藤さんによって予言されていたということなのなのですが、しかしそれは本当に exact だとは言っていなかったという言い方もできるので、1981 年ぐらいかな、Laughlin の理論によって、exact ということは言えんだという人もいます。結局は両方とも k クーロン相互作用を含んでいないのです。現実の物質はクーロン相互作用はもちろんありますから、クーロン相互作用を含んだ、ちゃんとした理論じゃないと、exact とは言えないという人もいまして、だから理論的に本当にびしっと説明されているかどうかというのは、ちょっと曖昧です。それが先ほどの 1980 年より前の一つの論文でびしゅと決まったというのと違うところです。

高温超伝導もそうなのです。いろんな理論が提案されましたけれども、結構怪しげなのがあって、私は加わっていなかったのですが、科学の土俵の上で本当に Scientist として議論をすればいいだろうと思うのですけれども、何かちょっと、場外乱闘的なところがありまして、Science 以外のところで勝負をつけちゃおうというような傾向がありました。ああいうのは若い人に悪影響を与えるのではないかなあと思っていたのです。そういう意味でやっぱり、なかなか収束しなかったのです。

[Slide 11] 1990 年以降になると、量子ホール効果もまだ続いていますけれど、だんだん話が細かくなってきて、磁場をスイープしますと、抵抗が細かく振動するところがあるので、そういうものを説明する理論として、composite Fermion などという、これは一つの仮説です。このへん

にくると、ちょっと私なんかはこういうのにあまり参加する気がしないのですが。

●21世紀の固体物理学 (1990~)

量子ホール効果 → 多体効果 (composite Fermion)

高温超伝導 → 基本的にはBCS (スピンの揺らぎによる引力)

メソスコピック系の復活 種々の現象

◇ コンダクタンス量子化

◇ SET (単電子トンネル効果)

◇ クーロン・ブロッケイド (近藤効果)

C₆₀, Carbon Nanotube については省略

[Slide 11]

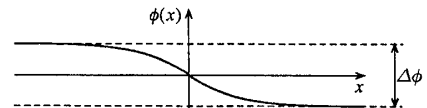
コンダクタンス量子化

Landauer 理論

1次元系のコンダクタンス $e^2/(\pi\hbar)$ (散乱なし)

$$I = 2e \frac{dE(k)}{\hbar dk} \frac{dk}{2\pi dE(k)} e\Delta\phi = \frac{e^2}{\pi\hbar} \Delta\phi$$

(spin degeneracy) × charge × (group velocity)
× (state density) × (energy difference)



[Slide 12]

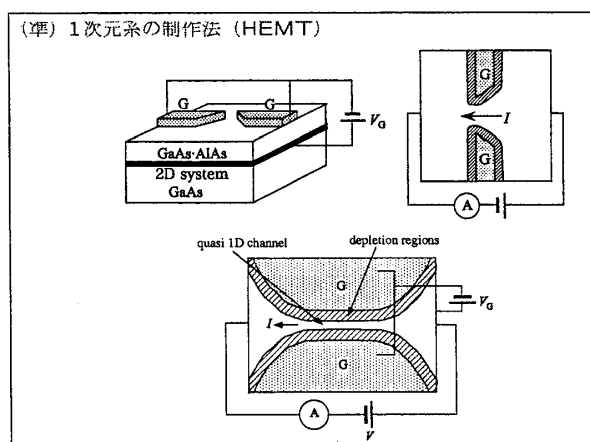
高温超伝導に関しては、山田さんもおっしゃったように、本質的にはBCSで、BCSのギャップ方程式をmodifyして、引力は電子格子相互作用じゃなくて、スピンの揺らぎによるのだということに落ち着いたようです。だからこれもいつ誰がびしゃっと決めたというのではなくて、だんだんコンセンサスが固まってきたということです。だから昔の、さっき挙げた三つに比べると、やはり問題が難しい。確かに難しいですね。いまの人間のほうが頭が悪くなっているわけじゃないんだと思うのです。やっぱり昔の問題というのはやさしかったのかなと思います。

メソスコピック系もなんとか復活しまして、こういう現象がいろいろと見られています。あと、新しい物質の発見というのがあるのですけれども、私はあくまでも現象を中心にして話をしたいと思っています。

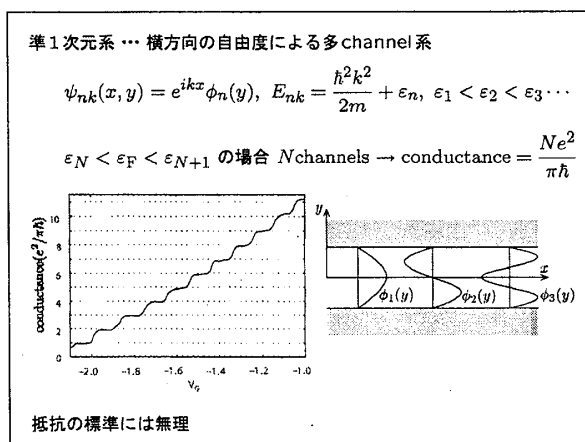
[Slide 12] コンダクタンス量子化というのはどういうものかということ、これはLandauerという人の理論なのですけれども、1次元系のconductanceで、散乱がなければ、1次元系のconductanceは物質のparameterによらず、これだけであるという、まことにユニバーサルな理論なのです。これがLandauerの理論でありまして、だいたい散乱がないのにconductanceが有限というのは変じゃないのかという話もあるのですけれども、つまり散乱がなければ抵抗ゼロでconductance無限大なんじゃないかと。conductanceは抵抗の逆数ですから、そういう話もあるのですけれども、いろいろと考えると、どうもこれは良さそうだといいことです。

この説明はいろいろな説明があり得ますけれども、簡単に言うと、1次元系中にこういう電子ポテンシャルを加えると。これで電子を加速するわけです。そうすると、流れる電流はどれだけかというと、spin degeneracyがあつて、電荷があつて、これは電子のgroup velocityですね。で、どれだけの電子が流れることができるかというと、ここから下の電子はだめで、こちらはすでに電子が詰まっていますから、この間のエネルギーを持った電子だけがこっちへぼんと流れて来られるということです。これが状態密度、それからこれがこことこのエネルギー差ですね。それを全部かけるとこうなりまして、要するにこれが電位差でありますから、電流を電位差で割るとconductanceだと、そういうことです。

[Slide 13] 1次元系をどうやってつくるかということなのですが、当然、本当の1次元系はないので、準1次元系です。例として「HEMT」、これは「High Electron Mobility Transistor」というのですが、ガリウム砒素とアルミニウム砒素の混晶を貼り合わせます。これもこれも基本的には絶縁体ですから、こことここには電流が流れない。電気は流れないのですけれども、境目のところにいわば電子がにじみ出てきてまして、ここの境目のところに閉じ込められていますので、この面に沿ってだけ動けるという2次元電子系が出来ます。



[Slide 13]



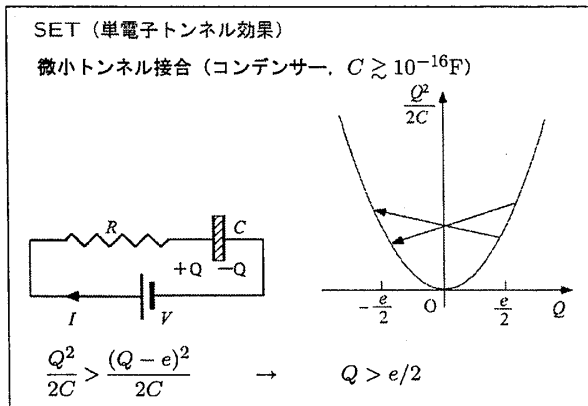
[Slide 14]

その2次元からどうやって1次元をつくるかという、ここにゲート電極という金属の電極を貼りまして、上から見るとこういう感じです。そこに、この2次元電子系に対して、マイナスの電圧をかけます。そうするとここに負の電荷が出ますので、負の電荷のつくるポテンシャルによって、これの下、この2次元電子系から電子を追い出すのです。上から見ると、例えばこの斜線部分から電子が追い出されたら、この狭い隙間が出来ますので、そこを電流を通すというので、最初はこれでも準1次元系だと言って威張っていたのです。長さと同幅と同じぐらいなのですが、本当はこういうものを作りたいわけです。ここが電子の入れないところで、幅に比べて充分長いchannelを作りたい。だけど初期のうちは、こういうところに揺らぎがどうしても出まして、細く長くしようと思うと、どこかがくっついちゃって、うまく通らないということがあったわけです。

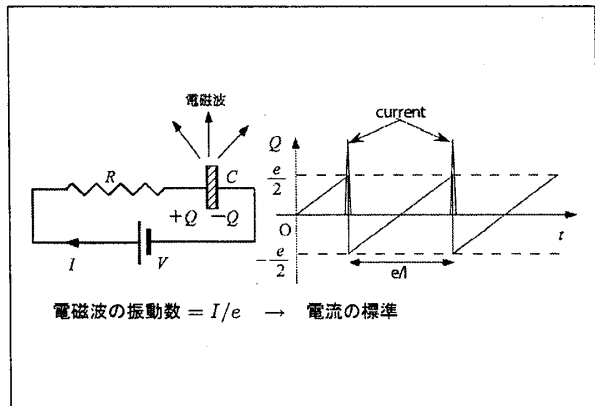
[Slide 14] Landauer の理論を確かめるにはどうするかという、もちろん本当の1次元系ではなくて、準1次元系ですから、横方向の自由度もあるわけで、これが準1次元チャンネルですね。だから固有関数は、縦方向は自由に飛べるので exponential, それから横方向はこういう束縛状態の波動関数というわけで、エネルギーはx方向の運動エネルギーと横方向の束縛状態ということですね。

例えばN番目の ϵ_N と、N+1番目の ϵ_{N+1} の間にFermi energyがあると、こういうものを「channel」というわけですが、 ϵ_N のchannelまでは、電子が入るので、要するにお互いに無関係にN個の1次元系があるようなものです。お互いに無関係に平行に電流を運ぶので、電流がN倍になって、conductanceはこういう値をとるはずだということです。これは実験でして、横軸は実質的にFermi energyで、Fermi energyを上げていきますと、この単位でぽこぽこ階段状にconductanceが増えていくはずなんです。これはLandauerの公式の証明であるということです。これは実は、こんなきれいなものではなくて、さっきのこれ[Slide 13]で発見されたのです。この発見はちょっと偶然なのですけども、ただしすぐ説明はつきまして、さっきの超伝導とか何とかみたいに何十年もわからなかったと言っているのではなくて、すでにその論文にLandauerの公式による解釈が出ています。そうすると、量子ホール効果みたいに抵抗の標準で使えないかと思うのですけど、そのへんはとても精度が足りなくて無理ですね。

[Slide 15] それから単電子トンネル効果というのがありまして、これもなかなか面白いのです。仕掛けは簡単、これだけなのですが、これが非常に小さなコンデンサーで、ここの絶縁体を充分薄くして、電池がトンネル効果で通れるようにします。このくらい簡単なら自分でもできるというのでやってみても、まあだめですけど。抵抗とコンデンサーを買ってきて、ハンダ付けをしてもうまくいかないのですけれども。



[Slide 15]

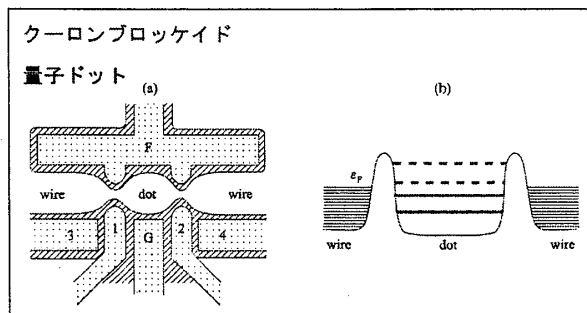


[Slide 16]

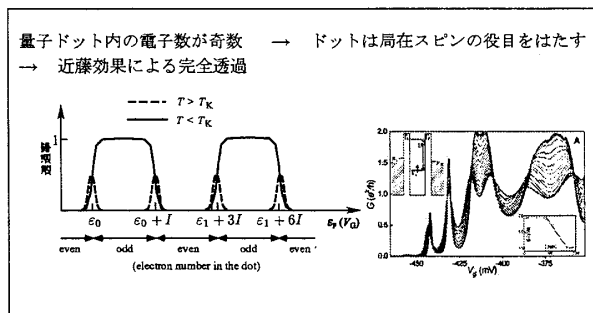
こうやると何が起きるかという、電流が流れて、ここに電荷が溜まりますね。電荷が溜まると当然、このエネルギーは $Q^2/2C$ で上がっていきますけれど、電荷が $e/2$ を超えまると、電子が一個ここからこっちへぽんとトンネルしたほうがエネルギーが下がるというので、ぽんとトンネルすることになります。

[Slide 16] だから電荷の時間依存を見ますと、ずっと増えていって $e/2$ になるとぽんとトンネルが起こって、 $-e/2$ になる。またずっと増えていって、ぽんとトンネルして電荷が減るということ、周期的に繰り返すわけです。

ミソはこの間隔が電流と電荷にしかよらないわけです。要するに e だけの電荷を補給する時間というのは、 e/I です。 I は電流ですね。だからこういうコンデンサーの形とか容量とかに一切よらない。で、こここのところはぱっと、この周期で電子が移動しますから、当然この振動数の電磁波が出ます。だから電磁波の振動数を計れば電流がわかると、そういう仕掛けです。これを電流の標準にしようということです。実際はちょっと違うので、むしろ電磁波を当てて強引にトンネルをさせちゃってやるということなのですが、原理はこれでよろしいです。これも電流の標準にしようと思って、一所懸命やっていますが、なかなか難しいです。



[Slide 17]



[Slide 18]

[Slide 17] それからもう一つ、クーロンブロッケイドという現象があって、これで近藤効果が復活したのですけれども、さっきの、同じく2次元系の上に、こういう電極を張りまして、適当なマイナスの電圧をかけます。そうするとさっきの準1次元のところをさらにこういう電極で絞ります。そうすると、電子の入れないところがこういうふうにぐっと絞られて、こここのところが通りにくくなるので、それを「量子ドット」といいます。だからモデル的には1次元系の中にこういうポテンシャルができたのと同じですね。そうすると、ここに準共鳴状態がいろいろとできるわけで、単純に言う、Fermi energy がこの準共鳴状態に一致したときに透過率が非常に高くなるということなのです。

[Slide 18] ですからこれが ϵ_0 とか ϵ_1 とかいうのは、さっきの準束縛状態ですね。この横軸は Fermi energy です。Fermi energy が準束縛状態に一致しますと、大きな透過率が得られるということですが、透過率が半分になっているのは、要するに量子ドットというのは小さいので、中でのクーロンエネルギーが非常に大きいのです。だからスピンアップのやつが入っちゃうと、ダウンのやつは入れないという状況があるので、お互いに無関係にすかすか通れないというので、透過率は半分なのです。

それから例えば、Fermi 面を上げてもう一つ入れようとする、要するにこの準束縛状態に、アップかダウンかどっちかが入ってしまいますので、この準束縛状態からクーロンエネルギー、これは二つの電子の間のクーロンエネルギーですね。それより Fermi energy を高くしないと、共鳴透過が起きないということです。Fermi energy を上げていきますと、 ϵ_0 はもうアップダウンが入っていますから、2 番目の共鳴エネルギーのところに行くわけですが、すでに電子が二つ入っていますので、それプラス $3I$ だけのエネルギーを高くしないと入らないという状況です。

ただしこれは、高温の場合で、これは説明するのはなかなか難しいんですけど、こういうところは電子数が奇数なのです。奇数だと、例えばここは 1 個ですから、電子のスピンが 1 個余ります。だから量子ドットがスピンを持つわけです。そのスピンはアップ、ダウン、どちらでもいけるといって、要するにそれが近藤効果の磁性不純物のスピンの役目をします。そこから先は難しいけど、いわゆる近藤温度より低くなると、その間は透過率が近藤効果による共鳴によって 1 になる。この現象のメカニズムを一口では言えないので、興味の有る方は、いま『Reports on Progress in Physics』というのにレポートを書いています、もうすぐ完成しますので、それを読んでいただきたいです。

これは実験で、樽茶さんとかオランダのファンデアヴィールという人たちがやったんですけど、これは非常にきれいにできていまして、赤いのが高温です。この 2 というのが単位が違うので、2 というのはこの 1 に相当します。こういうふうに、これほどきれいではないのですが、高温では二つに割れたピークがあるのが、低温にいくとだんだん一つにくっついてきて、高さが 2 倍になるのが、非常にきれいに出来ます。これもそうです。これとこれかがと伸びていって、こっちほどきれいではないんですが、ほぼ高さが 2 倍の一つのピークになっている。

以上の現象の特徴

- ◇ 理論主導 → 人間の頭脳による限界
- ◇ 試料制作装置による限界
- ◇ プロジェクト主義による限界

[Slide 19]

●まとめ

～1980 新しい現象の発見（全くの偶然） 明確な理論的説明

超伝導、近藤効果、負の磁気抵抗 … 必要な装置：低温

1980～1990 新しい現象の発見（狙った発見）理論的説明はやや不明確（いつ、どの論文で？）

量子ホール効果 … 必要な試料：MOS、HEMT

高温超伝導 … 必要な装置：すり鉢、炉

1990～ 新しい現象の観察 理論先行 頭と装置による限界

メソスコピック系、ナノテクノロジー … 特別な試料、高度の技術

BEC … 特別な環境、高度の技術

[Slide 20]

[Slide 19] こんなことがあるのですが、結局、こういう現象というのは、理論主導なのです。ですから、やっぱり人間の頭で考えることには限界があるので、ちょっと浅いというか、あれができて、それがまたどんどん発展していくというふうになかなかならないのです。これは観測できたよ、これは観測できたよと言うのですけれど、やっぱり神さまと勝負するとかなわないのだと思うのです。例えば超伝導がいままで発見されていなかったとしたら、誰かが超伝導を予言できたかという、多分それは無理だと思うのです。近藤効果にしても、実験がなかったら近藤効果を誰か予言したかと。あれは実験があったからこそできたのです。負の磁気抵抗だってそうだと思います。

だからあまりこういうやり方をしていると、大発見というのはできないのではないかという気がします。

それからいまは何でもプロジェクトで、科研費でも CREST でも NEDO でも、やっぱり理論主導でこういう effect を観測しますと、proposal を書くと、それが出たら安心してレポートを書いて、評価 A というので安心して次の科研費をもらおうということになるので、いまの人を見ていると、わかるところをどんどん深く追求していくというのか、わからないところは捨ててしまうのです。昔の川路先生とか佐々木先生を見ていると、わからないところが出てくると、それをどんどん追求するところがあって、そうじゃないと思わぬ発見というのは出てこないんじゃないかと思うのです。

● 結論

- ◇ 新しい現象の発見を追求すべし
- ◇ のんびりやるべし
- ◇ 評価を気にしない

[Slide 21]

[Slide 20,21] まとめですけれども、ごちゃごちゃ書いてありますが、やっぱり研究のスタイルが全く変わってきているので、これはまったくの偶然の発見です、超伝導、近藤効果、量子ホール効果です。高温超伝導というのは、ある程度狙ってやったものです。つまりこれ以前にある程度予言されていたというので、発見というか確認というか、そこが微妙なところですね。高温超伝導も、まったくの偶然ではなくて、 T_c の高い超伝導体をつくらうという意図はもちろんあったわけですが、但し高温超伝導を発見した Muller とか Bednorz というのは、当然その頃は超伝導の理論というと BCS しかありませんので、BCS の理論の範囲内で臨界温度が高くなりそうな物質をつくったのです。そうしたら、うんと T_c の高いのができたのですけれども、それは実はメカニズムが違うもので、そういう意味では発見ではあるのですけれども、純粋な発見とは言い難いです。しかしこのへんはまだ素朴で、非常に特殊な装置とかというのは必要ないわけです。みなさん、すり鉢と炉があれば参加できたのですけれども、いまのメゾ、ナノとなると、本当に特別な試料を特別な装置でつくって、ものすごく精度のいい技術がないとだめなので、なかなか思わぬ現象が出てきそうな気がします。非常に特別な環境だけでやっていますから。

突如出てきましたが、Bose-Einstein condensation (BEC) などというのも、これこそものすごく特別な環境で、特別な技術でやっていますので、あまり狙った以上のことが出てきそうな気がしないし、こういうふうにしり鉢と炉さえあれば、みんな参加できるというようなものではないので、やっぱり物性全体を引っ張っていくという原動力にはなりません。やっぱりある程度余裕を持って、プロジェクトの proposal に書いたことができちゃったら、もうそれでおしまいというのじゃなくて、もっとわからないところも追求してほしいと。そうすると新しい現象が発見できるのではないかと思います。もちろんそんなのは、超伝導にしる高温超伝導にしる、何十年に一回ですよね。自分がそれに当たる可能性というのは非常に少ないのですけど、やっぱり全部の人がそれをやめちゃったらだめなので、常になんか新発見してやるぞという気構えでやってほしいと思うのです。ここにいる方はほとんど理論家でしょうから、言ってもしょうがないのですけれども。

やっぱりそれには、時間をかけてのんびりやらなければいけないと思います。それから私はいま

の科学の世界で最悪なのは、評価というやつだと思うのです。評価を気にするから proposal に書いたことができると、はい、それでおしまいになっちゃうのです。だいたい評価で一番ひどいと思うのは、お金をたくさん取るほどいい研究をしているとみなすというのがあるのですね。科研費でも NEDO でも何でも、申請書に必ずお金をいくら取ったかというのを書くのですけれども、AAS 効果のガラス棒をつくるなんていうのは、ただですから、それでいくとあれはいい研究ではないということになってしまいます。やっぱり何か新しい現象があつて、誰かが発見して、それが何十年もわからないというのが望ましいと思います。理論家はいつかあれを説明してやるぞということを目指して、それもできるのは何千人に一人、何十年に一回なんでしょうけど、やっぱり物理屋というのは、そういうものがないとだめだと思うので、やっぱりこれは非常に大事であるという、願望ですね。以上です。

遠山 : たいへん exciting なお話、どうもありがとうございました。それでは。

早川 : 例えば conductance の量子化のときに、結局、抵抗がなぜ出るかというのがよくわからないという気がしたんです。試料とかを置けば、もちろんそこで散乱されていって、抵抗ができるのだけれども、あの最近の装置だと、ガリウム砒素の台の上にガリウムのゲートがあつて、そこを通るだけなので、結局 ballistic にしゃっと抜けそうな気もするんですけれども、そういうふうに考えると、川畑先生が書かれたようなポテンシャルというか電位がなめらかに下がるという picture は、ちょっと結び付かないので、そのへんを教えていただきたいのですけれども。

川畑 : そうなのですが、あっちのほうが簡単なのでごまかしたところなののですが。

早川 : それはわかりますけど。

川畑 : ごまかしの説明ではあるのですが。

坂東 : 大きな質問はあとにして、ドットというのは、どのぐらいの大きさですか。原子ぐらいの大きさなんですか？

川畑 : 原子ですか？ いやいや、それよりははるかに大きいですね。

坂東 : ああ、そうなんですか。いや、まだ電子の軌道がありますよね。電子が回っている軌道。そこに入れるというのと、そういうのを人工的に原子のレベルというか、そういうものをつくったのかなと思ったんですが、そうでもないんですか。

川畑 : ある意味で言えば人工原子ですね。樽茶さんなんかは「人工原子」と言っていますけど、大きさはだいたい 1 ミクロンから 0.1 ミクロンぐらい。というのは、半導体ですので、電子の波長がだいたいそのぐらいなのです。

坂東 : そうすると、その応用といいますか、実用価値というのはどういうところにあるんでしょう。

川畑 : それは試みられてはいますが、なかなかやっぱり超低温でないと動かないので、そこが問題なんです。簡単に言うと、例えば [Slide 17] この電極にかかる電圧を操作して、ちょうどこれがフェルミ面に合っていると、すばんと通ると。ちょっと外すと通らないというスイッチング。

坂東 : 抵抗をうまくコントロールする。

川畑 : オン・オフですね。ただこれも。

坂東 : だけど、えらく高くつく抵抗ですね。いやいや。

川畑 : 超低温じゃないと動かないので。

坂東 : 高くつきますよね。

川畑 : ええ。

遠山 : すみません、一つ。先にいいですか？

坂東：どうぞ。

遠山：座長の権限で、ここには若い人もけっこういますので、少しお聞きしたいことがあるのですが、例えばBCS理論が出たときは、それまでに同位体効果があり、そのクーパーペアというものがわかっていたと。そのもとでばっと、多分シュリーファー先生がひらめいて、波動関数を作ったんですね。川畑先生の場合は、先ほどおっしゃったように非常にたくさん、百ぐらい実験があったと。多分、いろいろなことが議論されていたと思うんです。そこで先生がぱっとひらめいた、何か、そういうところのポイントを教えていただくと、若い人に非常に役に立つ。

川畑：ひらめいたというか、電気伝導の磁場の効果に対しては、実は氷上さんの理論がありまして、それは2次元系なんですけれど、それを3次元系に応用したと。簡単に言っちゃうとそうなんですけど、根本的なところがちょっと違って、2次元系というのは、基本的に絶縁体なのです。実は2次元系で非常にいい電気伝導率を持つものというのはあるんですけれど、根本的には試料をものすごく、宇宙的に大きくすると、すべての2次元系は絶縁体です。だからいわゆる固有状態は全部局在しているのです。系全体に広がっていない。それが結局、どうしてかという、さっき言ったこう回ったのとかう回ったのが干渉して、遠くへ行きにくいと。ここに帰って来る確率が減るから、遠くに行きにくくて、2次元系だと本当に散乱体がいくら少なくても、結局、遠くにいかなくなっちゃうということなので、3次元系はそうじゃないんですけれど、要するにアンダーソン局在の前駆現象によって、電気伝導率が減るというところ。

遠山：そのへんが出发点というか、ポイントだったわけですか。

川畑：ええ。

遠山：じゃあ最後に坂東先生、大きな質問を。

坂東：さっきからまた、志といいますか、そういうことは関連しているのですが…。要するに、私なんかでも、ボーズ・アインシュタイン凝縮というのはいくら騒がれたけど、あんなものは当たり前。そう言ったら悪いですけども、理論がわかっていて、その上でpredictionするという、それでそれを実験で確かめるといふ、そういうことですね。でも本来、理論というのは、新しいことをpredictionするというのが一つの大きな特徴だと思うんです。例えばDiracが陽電子をpredictしたとかですね。

川畑：あのくらいになると…

坂東：湯川先生のpionでもそうですけども、この世の中にないものを、こういうものがあるはずだということを言って、見つけたわけですね。それとそのいまの物性の志の低い実験と言ったらおかしいですけど、そこはやっぱり理論の基礎といいますか、そこがわかっているものとわかっていないものとの違いなんではないでしょうか。

川畑：やっぱりそれは理論家のレベルの違いで、Diracとか湯川先生は神さまと勝負できる理論家だと思うんですけれどね。

坂東：でも、いままでない現象をともかく見つけてみようという、そういうところ是一緒ですね。

川畑：そうなんですけれど、やっぱり底が浅いというか。

坂東：まだ物性実験は底が浅い。

川畑：いやいや。少なくともいまのメゾスコピック、ナノテクノロジーというのは、こういうことを考えついたという、要するに、Diracの陽電子なんていうのは、それを示されても、俺もできたとは思わないんですけど、メゾとかなんとか、ああいう現象というのは、それはそうだろうよということなんですね。そのぐらいのもので。

坂東：それでもね、やっぱり例えば分子の場合でも、Carbon Nanotubeのように、思いもかけな

い構造というのは出てきますよね。それから、多分明日の話の実験、原子核でも、ちょっとエキゾチックな原子核があるかもしれない。そういうようなこととか、*neutrino* の実験をどうするかということも、明日、出てくると思うんですけども、そういうものの場合、やはりもとの理論はすでにあるわけですね。ですので先生のいわえるようないまの志の低い実験との間、それは何があるかなと思って。さっきから。

川畑：まさに C_{60} とか Carbon Nanotube っていうのは発見ですよ。理論によってこういうものがありそうだというのではないので、それはだから、私の言うところの「発見」なのかな。

坂東：志の高いですね？

川畑：そうだと思うんですね。なぜああいうものを発見したかというのは、なんだかよくわからない。あれは何かこう、煤（すす）の中からより分けたのですから。

坂東：あんまりお金を使っていませんよね。

川畑：そうですね。多分。

坂東：数人のチームだって、どこかにいてありました。

川畑：まあ、そうですね。要するに、志というのはやっぱり、研究の制度の問題で、これをやりますっていうと、それができたら報告書を書いておしまいと、評価 A か何かで、そのところはなんとも。多分、思うんですけど、それ以上のことはやらない。

坂東：やっぱりサラリーマン研究者になっているということですかね。

川畑：サラリーマンというか、やっぱりみんな、次のお金を取らなきゃという、そこばかりなんですね。いまは金余りなので、一度失敗しても又、取れると思いますが。

坂東：それはそっちナノ分野の話です。

川畑：僕は実験じゃないから、お金はいらないですけど、いまは金余りで。

坂東：ナノはそうだと思いますけど、ほかはそんなことはない。

川畑：そうですか。はい。

坂東：すみません。

遠山：他にも何かありますか。

田中：まず、Carbon nanotube のことですが、大沢という人は、計算機が大学で使われ始めた頃から、それをにらんで一所懸命理論的計算をやってこられたんじゃないでしょうか。そのことが伝わったということは、聞いたことがあるんですけど。

川畑：どなたがですか？

田中：大沢。それは、確か化学の実験の研究室だったと思うんですけども、その方は助教授だったんです。だけど教授の先生には睨まれながら、半分干されながら、とにかくコンピュータ計算で、そのことが可能かどうかということを、一所懸命長い間やっておられたということは聞きました。その方は僕もよく知っている方なんです。

坂東：そうですか。知りませんでした。

藤井：いつ頃ですか？

坂東：知っている方っていうんだから、そんなに古い方じゃない。

田中：昭和 40 年ぐらいかな。

川畑：40 年。それは古いな。発見されたのは、確か 1994 年ですよ。それが影響しているかどうかっていうのは、ちょっと知りませんけれど。

遠山：すみません、そろそろ時間ですので。どうも、川畑先生、ありがとうございました。

坂東：今日はどうも遅くなりました。明日は懇親会があります。懇親会では、ただの飲み食いではなくて、今日とかの議論の続きがありますので、ぜひご参加くださるようお願いいたします。今日はどうもありがとうございました。