

Title	極低温における光学測定
Author(s)	中田, 博保
Citation	大阪大学低温センターだより. 90 p.23-p.27
Issue Date	1995-04
oaire:version	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/10447
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

極低温における光学測定

理学部 中田博保 (内線5756)

1. はじめに

道端の自動販売機で遠赤外コーヒーが売られ、通信販売でも遠赤外線ヒーターの広告が見られる。遠赤外と言う言葉は人々に暖かさを授ける不思議なものというような印象を与えている。遠赤外は赤外とマイクロ波の間の領域の電磁波だが、これまであまり日常生活でお目にかかることはなかった。

この2月に宇宙科学研究所のロケットが打ち上げられ、宇宙からの遠赤外光、特に波長0.1 mmから1 mmのサブミリ波を観測する予定である[1]。宇宙から遠赤外光が地球へと降り注いでいると言う話を聞けば、ますます遠赤外光の神秘性を確信する人がでてくるかもしれない。この宇宙からの遠赤外光は、星の誕生の過程を調べるのに重要で、今回はオリオン座が観測の対象となった。このように遠く離れた宇宙からの微弱な遠赤外光を検出するには、極端に高感度な検出器を用意する必要がある。名前は悪いがボロメーターがよく使われる。ボロメーターは遠赤外光の吸収による素子の抵抗変化を利用する。宇宙からの遠赤外光を検出するのに使われているのはコンポジット型と言われるもので、サファイヤ基板の上に蒸着されたBiの薄膜により遠赤外光を吸収しその温度変化を中性子を照射したGeの薄膜により測定するといった2段階構えになっている。Geの抵抗の温度変化が低温ほど大きいので、0.3 Kという極低温で作動するようになっている。0.3 Kの温度は活性炭吸着ポンプを用いた³He冷凍機で作られる。

2. 遠赤外光検出器

このように微弱な遠赤外光をとらえるには1 K以下の温度が必要であり、現在4.2 Kや2 K付近で動作させている検出器よりは格段に感度が上がり、非常に詳細な測定が可能になると考えられる。我々の研究室では種々の遠赤外レーザーを用いて半導体の研究を行っており、また現在遠赤外域のフーリエ分光器 (FT-FIR) を製作中であるが、いずれの実験にも³Heを利用した極低温ボロメーターは大きな武器となると考えられる。現在用いている検出器はいずれも光伝導型のものでSbやAsをドーピングしたGeや磁場中で作動させるInSb等である[2]。それぞれ特徴があり、用いる遠赤外光の波長域や要求される応答速度により使いわける。Geの光伝導型検出器は波長0.150 mm以下で感度は良いが、素子の抵抗が高いため、応答速度は、低温でインピーダンス変換しない限り遅い。一方InSbは感度を上げるために、不純物サイクロトロン共鳴の磁場位置で用いるが、感度はGe程よくない。しかしながら素子の抵抗が低いので応答速度は速い。

InPやGaAsも波長域によっては感度の良い光伝導型の遠赤外検出器となる。実用としては使っていないが、D⁻センターやA⁺センターを用いた検出器も可能である。D⁻センターは中性ドナーにもう一つ電子が束縛されたものであり、300 Kの黒体放射を用いて中性ドナーをイオン化し、出てきた電子を他の中性ドナーに束縛させることにより作ることができる。この余分の電子の束縛エネルギーは1 meV

程度と非常に小さいため、このセンターが存在するのは極低温においてのみである。結果として300 Kの黒体輻射をSi:P等に照射してかなり長波長の検出器として使える[3]。この場合も ^3He を用いた1 K以下の温度が有効な時もある。A⁺センターはD⁻センターでドナーをアクセプターに電子を正孔に置き換えたものである[4]。

我々の研究室では最近図1に示すような光検知遠赤外サイクロtron共鳴の測定システムを組み上げて観測が可能となった。これはサイクロtron共鳴によって遠赤外光が吸収され、それによるフォトルミネッセンスの変化を見ようとするもので、いわば遠赤外から可視または近赤外への波長変換となっている。可視または近赤外では感度の良い光電子増倍管があるので、これはシステム全体として新しいタイプの遠赤外光検出器である。

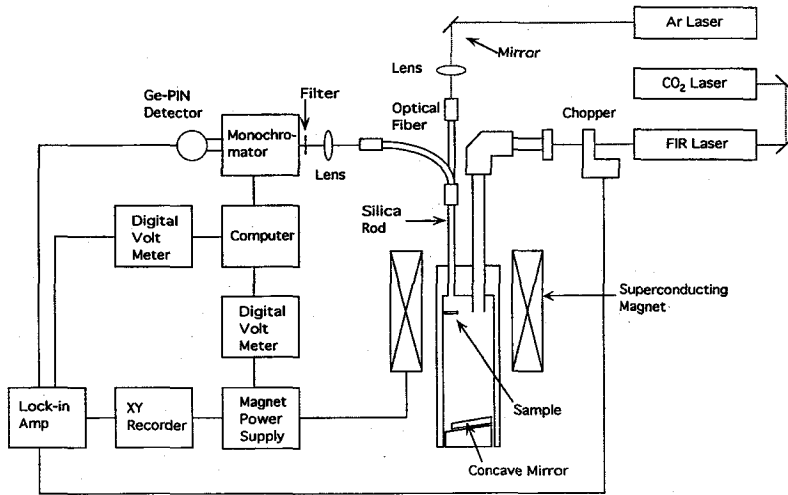


図1 光検知サイクロtron共鳴の装置図。

3. 励起子のBose-Einstein凝縮

検出器でなく、半導体の試料の方を1 K以下の極低温にした時、数多くの興味深い現象が観測される。日本での測定は抵抗測定等のDC測定に限られているが、海外では種々の光学的測定が行われている。1 K以下の半導体の光学的測定については日本の立ち後れが目だっている。例を上げると、2次元励起子のBose-Einstein凝縮*、分数量子ホール効果状態からWigner結晶への相転移等である[5,6]。その内励起子のBose-Einstein凝縮の問題を以下で取り上げる。この問題は超伝導や超流動の現象を想起こすとそれが物性物理の中心的な課題であることがよくわかる。

固体中の電子や正孔はFermi粒子であるが、電子と正孔がお互いに束縛しあった状態である励起子(エキシトン)はBose粒子である。この励起子がBose-Einstein凝縮を起こすのではないかという議論は70年代からあったが、90年代に入ってから二つの報告があり、その内の一つは1 K以下の低温まで測定を行ったものである[5,7]。Bose-Einstein凝縮の実現にはいくつかの条件がある。まず凝縮が起こるには十分低温で粒子が最低のエネルギーに存在する必要がある。低温にした時に、粒子間に引力が働くと複合粒子ができるためBose-Einstein凝縮は起こらない。引力が働く典型的な例はGeやSi中の

電子正孔液滴である。これは励起子が実空間で凝縮して液体となったもので、Fermi流体である。このようにGe中の励起子はBose-Einstein凝縮を起こすのは困難であるが、もう一つの理由は励起子の有効Bohr半径が大きいことである。有効Bohr半径が大きいと高密度にした時、Mott転移が起り、プラズマ状態となる。しかしながらGe中で励起子がBose-Einstein統計に従うことは報告されている。Geと対照的にCu₂Oでは励起子の有効ボーア半径は10 Å以下と小さく、高密度励起下でも励起子が存在し、Bose-Einstein統計に従うことが報告されている[8]。

一方Snoke等はCu₂O中の励起子のBose-Einstein凝縮を観測したと発表した⁷⁾。Cu₂O中の励起子には2種類ありオルソ励起子、パラ励起子と呼ばれている。オルソ励起子はスピン3重項でパラ励起子は1重項である。2つの励起子の単位は交換相互作用により分離しており、パラ励起子の単位の方が下にある。

フォトルミネッセンスのスペクトルを比較するとパラ励起子の方が幅が狭く、より凝縮の進んでいることがわかる。励起強度を上げていくとオルソ励起子の方はスペクトルはあまり変わらず、有効温度が上昇したBose-Einstein分布でフットイングできるが、パラ励起子の方はある励起強度以上で台形のようなスペクトルとなる。基底状態より1 meV程度上のエネルギーで凝縮が起っていると考えられた。彼らはさらに時間、空間分解の実験を行い、非常に速い励起子の拡散を観測した。このように励起子の超流動を想わせる現象を報告した。

この報告の後、昨年になって2次元系において励起子のBose-Einstein凝縮がドイツのグループから発表された[5]。この測定には1 K以下の低温が不可欠であり、彼らは350 mKで測定を行った。極低温とともに重要なのは強磁場であり、14 Tまでの磁場を用いた。試料はGaAs/AlAs量子井戸でn⁺-i-n⁺構造を持ち量子井戸に電場をかけられるようになっている。測定はフォトルミネッセンスであるが、量子井戸の厚さによっては、2種類の信号が得られる。厚さの薄い試料では電子はAlAs層に正孔はGaAs層に存在し、間接ギャップ型の半導体となる。厚さが13原子層より厚い試料では、電子、正孔ともにGaAs層に存在する直接ギャップ型の半導体となる[9]。この場合の間接ギャップ型半導体はGaAsの価電子帯の頂上がΓ点にあり、AlAsの伝導帯の底がX点にあるため、実空間でもk空間でも間接型で、そのため励起子の寿命は長く4.2 Kでマイクロ秒オーダーにもなる。この系は井戸幅がどの程度で直接ギャップから間接ギャップへ変わるかが問題となり、Γ-Xの間の励起子波動関数の混成の問題も非常に興味深い。その上Bose-Einstein凝縮の話ができたので宝の山のような系である。

実験結果は二つあり、一つは磁場の印加に伴い、フォトルミネッセンスの強度と寿命が大きく変化した点ともう一つは大きなバンド幅の広いノイズが出現した点である。フォトルミネッセンスの強度と寿命はともに磁場の印加に伴い増大した後減少する。強度と寿命の減少は非輻射過程の増加を意味しており、励起子が非輻射再結合中心へ移動する速度が増加している。このことは局在状態が磁場により非局在化する過程が関連しているとしている。一方ノイズの出現であるが、これは数の少ないものが原因であると考えられ、その原因が励起子の凝縮であると結論している。

まだ真偽の程ははっきりしないが、低温、強磁場下の光学測定において興味深い現象が観測される可能性が高いように思われる。我々の研究室では70年代から、強励起下の半導体の物性について研究を進めており、特にGeやSi中の電子正孔液滴について数多くの実験を行った。電子正孔液滴は低温で存在

する励起子の凝縮相であり、縮退したFermi流体である。Bose-Einstein凝縮が運動量空間の凝縮であるとする、電子正孔液滴は実空間の凝縮である。全エネルギーがある電子正孔濃度において極小値を持つと液滴となるが、Bose-Einstein凝縮では全エネルギーが電子正孔濃度の単調な関数である必要がある。先程のGaAs/AlAsの系は後者の状態となっている。

4. まとめ

このように励起子のBose-Einstein凝縮の証拠となっている実験結果は速い拡散速度、スペクトル形状、ノイズ等であるが、まだ決め手にかける状況だと考えられ、今後とも実験を進める必要があると思う。その時に必要なのは1 K以下の光学測定装置である。現在4.2 Kまでは液体ヘリウムを用いずに達成できるが、1 K以下の低温でもヘリウム冷凍機のような装置で簡単に達成できる日が来ることを夢みながら遠赤外コーヒーを飲む毎日である。

光検知サイクロトロン共鳴の装置を組上げた岩尾達基君に感謝します。

参考文献

- [1] 春日 隆、応用物理、63巻、455 (1994).
- [2] P. R. Bratt, Semiconductors and Semimetals 12, R. K. Willardson and A. C. Beer Eds.; Academic Press: London, 39 (1977).
- [3] P. Norton, J. Appl. Phys., 47, 308 (1976).
- [4] H. Nakata, Y. Ichikawa, E. Otsuka and M. Kobayashi, J. Phys. Soc. Jpn., 55, 2859 (1986).
- [5] L. V. Butov, A. Zrenner, G. Abstreiter, G. Bohm and G. Weimann, Phys. Rev. Lett. 73, 304 (1994).
- [6] G. M. Summers, R. J. Warburton, J. G. Michels, R. J. Nicholas, J. J. Harris and C. T. Foxon, Phys. Rev. Lett., 70, 2150 (1993).
- [7] D. W. Snoke, J. P. Wolfe and A. Mysyrowicz, Phys. Rev. Lett., 64, 2543 (1990).
- [8] D. Hulin, A. Mysyrowicz and C. Benoit a la Guillaume, Phys. Rev. Lett., 45, 1970 (1980).
- [9] M. Nakayama, I. Tanaka, I. Kimura and H. Nishimura, Jpn. J. Appl. Phys. 29, 41 (1990).

用語説明

Bose-Einstein凝縮

スピンの半整数の粒子はFermi粒子、スピンの整数の粒子はBose粒子と呼ばれるが、それぞれ異なった量子統計に従い、Fermi粒子はFermi-Dirac統計、Bose粒子はBose-Einstein統計で扱う必要がある。Fermi粒子はPauliの排他律により一つの状態を多くの粒子が占有することはできないが、Bose粒子は一つの状態を多くの粒子が占有することができる。温度が高ければ二つの統計はいずれも古典統計であ

るMaxwell-Boltzmann統計となる。低温ではFermi粒子の場合、Fermi準位よりエネルギーの低い状態が占有されるが、Bose粒子では最低エネルギーの状態にすべての粒子が凝縮するBose-Einstein凝縮が起こる。これの典型的な例が ^4He の超流動相である。