

# 物性研だより

第29卷  
第6号  
1990年3月

## 目 次

○ SRLに移って .....	中尾公一 .....	1
物性研短期研究会報告		
○ 「超低温における液体および固体ヘリウム」 .....		3
世話人 平井 章, 永井 克彦, 石本 英彦, 久保田 実		
○ 「高輝度放射光による新しい分光科学」 .....		12
世話人 塙 賢二郎, 国府田 隆夫, 池沢 幹彦, 会田 修, 福山 秀敏, 松岡 正浩, 石井 武比古		
物性研究所談話会 .....		49
物性研ニュース		
○ 東京大学物性研究所 教官公募 .....		50
○ 東京大学物性研究所 助手公募 .....		52
○ 人事異動 .....		54
○ 平成元年度 主要納入設備の紹介 .....		54
○ テクニカル・レポート 新刊リスト .....		55
編集後記		

東京大学物性研究所

ISSN 0385-9843

## S R L に移って

超電導工学研究所・中尾公一

超電導工学研究所（S R L）に移って、もうすぐ一年になります。自宅の引っ越ししかなかったので、気分一新とはいかなかったのですが、やはり研究環境は大いに変わり、それにともなって生活習慣も変更を受けざるを得ず、最近やっと慣れてきたところです。最初に驚いたのが、小田急電車の混雑です。物性研時代に比べて、約一時間半早く代々木上原に到着する小田急電車に乗る必要があるのですが、その混みぶりは相当のものです。しかし、いずれにしても、これ以上の人人が一つの車両に乗り込むことは、物理的に不可能なので、これに耐えられれば、もう恐いものはないのだと思っていたところ、先日の雪の日には、さらに一段とぎゅうぎゅうづめで、人の努力には限界がないのだと感心しました。

S R Lは、（財）国際超電導産業技術研究センター（I S T E C）の付属研究所で、80名程の研究員の大部分は企業からの出向者です。物性研等と比較したときのS R Lの特徴としては、第一に、S R Lが超電導専門の研究所であること、第二に、組織のこと、即ち大部分の研究者が企業からの出向者であって、三年たつと帰ってしまう（十年たつと研究所自体がなくなってしまう）ことがあります。

S R Lの第一の特徴の結果として、当然のことながら全員の研究テーマが超電導です。（尤も、超電導体を作るつもりで、半導体や、絶縁体や、場合によっては強磁性体などが、はからずも出来てしまうことは、よくあるようです）これは、物理の研究所として考えるなら異常なことです。昨今の超電導さわぎは一時的なことであって、超電導体が、固体物理の対象のごく一部を占めるにすぎないことは言うまでもないのですが、逆に超電導研究に占める物理の領分もごく一部にすぎないという、考えてみれば当り前のことにして、S R Lに来て、しみじみと思い当たりました。S R Lの研究員の中に占める物理屋の割合も、物理屋の定義によりますが、かなりの少数派であることは間違ひありません。超電導に関して、私がこれまで聞いた事もなかったような、学会、研究会、専門用語などがたくさんありました。従って、私にとっては、昨年四月以来超電導以外の物理を視野の外に投げ捨てた変わりに、物理以外の超電導研究の諸分野を視野に取り入れたことによって、差引、研究者としての視野は、少しほとんど広がったような気がしています。尤もこれは、私が物性研で超強磁場グループに属していたという特殊な事情にもよるのかも知れません。超強磁場の仕事と言うのは、たとえは悪いのですが、強磁場という砦を守りながら、近くを手ごろな獲物が通らないかと待ちかまえている山賊のようなところがあります。一方、現在の仕事と言うのは、とらわれのお姫様又は、ヨーロッパの神話にててくるような怪物を求めて、超電導という牙城に攻めかかるに例えられます。つまり籠城作戦から野戦に転じたわけです。しかし、敵の城のつもりで攻めかかったら、実は粉引きの風車であったということもありそうなことです。ともかく随分長い間山賊をや

ったので、しばらくはドンキホーテをやってみても悪くはなかろうと思っています。

S R L の第二の特徴は、先にも述べた組織のことです。最初に少し驚いたのは、企業の人達は基本的に、業務命令によって動いているということです。これも考えてみれば当たり前のことですが、人々が、直接の上司の命令以外では動かない、又は、動いてはいけないと思っているらしいことに気付いて、「エッ」と虚をつかれた感じになったことが何回かあります。しかし、同じ事を逆にみれば、企業から出向してきた人達にとっては、本来の上司は身近にいないわけです。もっとはっきり言えば、日常の働きぶりが、ボーナスの査定に反映しないわけです。この事は、彼ら一人ひとりが研究者としての姿勢を日々問われていることでもあります。大企業に勤める研究者の身分は、物性研の助手などに比べるとはるかに保証されています。また彼らは、大学院の学生のように、修士論文や、博士論文を何年の内に仕上げなければならないという、期限付きの目標ももっていません。つまり、企業から出向している S R L の研究者は、研究がやりたいからやるという以外の動機付けが出来にくい状態におかれてしまっているわけです。但し、私の立場は、幸か不幸か全然違っていますが。

東雲橋の上から、新木場に曳かれていく、巨大な筏を見送りながら、研究者はなんのために研究するのか、研究は人生の目的か手段か、研究の自由とは何か、研究者の社会的意義は何か、超電導研究における物理屋の役割はなにかというような事を考える昨今です。

念のために言いますと、大部分の研究者の、大部分の状況における行動は、物性研でも S R L でもたぶん企業の研究所でも、彼または彼女が物理屋であろうとなかろうと共通であることは、日々再確認しています。但し、そのことは改めて述べるまでもないことでしょう。

## 物性研短期研究会

### 超低温における液体および固体ヘリウム 平成元年12月25、26日

司会者 京大・理 平井 章

山口大・理 永井 克彦

東大・物性研 石本 英彦

東大・物性研 久保田 実

液体および固体ヘリウムの研究は物性物理のなかで最も典型的な量子多体系に関する基礎研究の位置を占める。約10年前から超低温実験設備の整備が我が国でも行われた結果、 $mK$ ~ $\mu K$  温度域での実験が多くの大学で可能となり、固体 $^3He$ 、液体 $^3He$ および $^4He$ 、 $^3He$ - $^4He$ 混合液に関する実験データーが得られる様になった。最近の実験結果を基に実験と理論の研究者が一同に会して突っ込んだ討議を行うことを目的として、上記短期研究会が平成元年12月25、26日の両日にわたって物性研究所講義室において開催された。参加者は80名を越え、26日の研究会終了後も20~30人が控室に残って討論を続けるなど大変熱心な討論が行われ、有意義な研究会であった。また今回の研究会では一つの試みとして、講演の他にポスター発表を物性研究所講義室の控室で行った。昼休み、休憩時間を使って発表、質疑応答が行われた。その題目、発表者は以下の通りである。

1. 「Nb超薄膜の超伝導」 東工大・理 西田 信彦、朝光 敦、大熊 哲
2. 「蒸着水素膜上の2次元電子」 筑波大・物理 河野 公俊  
Konstanz大 Leiderer
3. 「回転する細管での超流動 $^3He$ -A相」 福井大・工 高木 丈夫
4. 「Developement of a Compact Type Dilution Refrigerator」 東大・物性研 沢野 成民、五十嵐 武、久保田 実、  
理学電機 秋山 皖史  
鈴木商館 鰯崎 有  
岡山理大 信貴豊一郎
5. 「クーパーペア凝縮とボーズ凝縮のクロスオーバーにおけるペア間斥力相互作用の効果」 名大・教養 徳光 昭夫、三宅 和正、山田 一雄
6. 「 $^3He$ 融解圧の磁場効果」 東北大・理 伊藤 渉、篠崎 淳、稻田 佳彦、  
須賀 三雄、鳥塚 潔、鈴木 治彦、澤田 安樹、佐藤 武郎、小松原武美
7. 「固体 $^3He$ におけるSHモデルのモンテカルロシミュレーション」 日歯大新潟歯 松本 和幸

プ　ロ　グ　ラ　ム

日 時 平成元年12月25日（月）(午後), 26日（火）(午前, 午後)

場 所 東京大学物性研究所 旧棟1階 講義室

12月25日（月）

開会挨拶

平井 章（京大）

固体ヘリウム3

bcc<sup>3</sup>Heの実験（40分）

福山 寛（名大）

bcc<sup>3</sup>Heの理論（30分）

岩橋 克聰（名大）

コメント（5分）

宗田 敏雄（筑波大）

hcp<sup>3</sup>Heの実験（20分）

馬宮 孝好（名大）

2D-<sup>3</sup>Heの実験（30分）

奥田 雄一（東工大）

ヘリュウム薄膜のコステリツツ・サウレス転移

Introduction（30分）

長岡 洋介（名大）

実験（30分）

白浜 圭也（東大物性研）

理論（30分）

蓑口 友紀（東大）

12月26日（火）

液体ヘリウム3

液体<sup>3</sup>Heと境界面（40分）

永井 克彦（山口大）

Vibrating Wireによる準粒子の生成と検出（20分）

佐藤 武郎（東北大）

Restricted Geometry 表面のヘリュウム

細孔中のヘリュウム（30分）

和田 信雄（東大）

細孔中の<sup>3</sup>Heの表面緩和（20分）

平井 章（京大）

ヘリュウムの量子モンテカルロ計算（40分）

高 橋 実（東大物性研）

ヘリュウム3-4混合液の冷却とKapitza抵抗

実験（30分）

児玉 隆夫（阪市大）

理論（20分）

中山 恒義（北大）

コメント（10分）

石本 英彦（東大物性研）

おわりに

恒藤 敏彦（京大）

### bcc<sup>3</sup>Heの実験 -bcc<sup>3</sup>Heの磁気相図の決定-

東大・物性研 福山 寛

物性研の超低温グループで現在、大型核断熱消磁冷凍機を用いて行なっているbcc固体<sup>3</sup>Heの磁気相図の完成を目指す実験の現状を報告した。固体<sup>3</sup>Heの核スピン間には原子の直接位置交換のもたらす多体(2, 3, 4体, ...)の交換相互作用が働くと考えられており、数mK以下の超低温度で特異な2種類の核スピン系の反強磁性秩序相が出現する。我々は核スピンをほぼ完全に偏極させ得る超低温、高磁場下( $T = 0.36\text{mK}$ ,  $B = 7.2\text{T}$ )まで磁気圧力、NMR測定を行い、磁気相図の全体像、特に高磁場側の反強磁性相の上部臨界磁場 $B_{C_2}$ を初めて実験的に決めることができた。又、観測された下部臨界磁場 $B_{C_1}$ のモル体積依存性は他の物理量に比べ異常に弱く、種々の交換相互作用のモル体積依存性にかなりの相違があるのではないかと思われる。

### bcc<sup>3</sup>He の理論

名大・理 岩橋克聰

最近のbcc<sup>3</sup>Heに関する注目すべき理論をいくつか紹介した。

Ceperley達は規格化した座標標示の密度行列、

$$F_P(\beta) = \rho(Z, PZ; \beta) / \rho(Z, Z; \beta)$$
$$= \frac{\int \cdots \int dR_1 \cdots dR_{M-1} \rho(Z, R_1; \beta/M) \rho(R_1, R_2; \beta/M) \cdots \rho(R_{M-1}, PZ; \beta/M)}{\int \cdots \int dR_1 \cdots dR_{M-1} \rho(Z, R_1; \beta/M) \rho(R_1, R_2; \beta/M) \cdots \rho(R_{M-1}, Z; \beta/M)}$$

をモンテカルロ法で計算することにより交換相互作用の値を求めた。低温では $F = \tanh [J_P(\beta - \beta_p)]$ と云う主張には疑問がのこるが、 $\beta J_p \ll 1$ で、 $F \approx -J_p(\beta - \beta_p)$ になるのは正しいらしい。

我々はグリーン関数法で磁気相図を計算し低温で $H_{C_2} \approx H_{C_2}(0) - \alpha T^{2/3}$ となることを示した。又、Roger等は自由エネルギーの高温展開係数を計算した他、基底状態のエネルギーを求める新しい方法、C.C.A.を提案している。

### BCC固体<sup>3</sup>Heの高磁場相でのグリーン関数の取り扱いへのコメント

筑波大 宗田敏雄

グリーン関数の切断の方法は、どの程度近似が正しいかと云う事が正確に判らないもので、秩序パラメータ $\langle S^z \rangle$ の温度依存性を求める為に止むを得ず用いるものです。しかも、グリーン関数の標示をうまく選ばないと、その切断が数学的に矛盾し低温でのスピン波理論に合わなくなります。具体的に述べると、副格子AとBでi-siteに属するスピン $S_{i,y}^A$ と $S_{i,x}^B$ に対する遅延グリーン関数を運動方程式より解き、スペクトル定理

$$\langle S_{i_y}^A S_{i_y}^A \rangle = 1/4 \quad (1)$$

$$\langle S_{i_x}^A S_{i_x}^A \rangle = 1/4 \quad (2)$$

$$\langle S_{i_y}^A S_{i_z}^A \rangle = (i/2) \langle S_{i_x}^A \rangle = 0 \quad (3)$$

に代入すると、(3)式よりスピン波でなく平均場の自由エネルギー  $F^{MF}$  を磁場と副格子の量子化軸とのなす角  $\theta$  の余弦で極小にする条件が出てスピン波理論と合わない他に、何よりも  $\langle S^z \rangle$  と  $\theta$  の2物理量を決めるのに、その従う3方程式が(1), (2)と(3)から出てきて redundantとなり決められません。

### h c p 固体 ${}^3\text{He}$ の実験

名大・理 馬 宮 孝 好

固体 ${}^3\text{He}$ の核磁性においては原子の直接交換相互作用が支配的である。bcc に比べて hcp では交換相互作用がきわめて小さくその大きさは  $\mu\text{K}$  の程度であり、超低温の実験としてはこれまで高野らの磁化測定しかなかった。ここでは名古屋大のグループの最近の実験結果を中心にレビューした。

名古屋大での  $38\ \mu\text{K}$  までの磁化測定から  $19.3\text{cc/mol}$  のサンプルについてキュリー温度  $\theta = 22\ \mu\text{K}$ , 2次の係数  $B = 200\ \mu\text{K}^2$  程度を得た。これから hcp では3体交換相互作用が支配的な強磁性であるが、反強磁性的な4体交換相互作用も存在することが考えられる。また  $\theta$  のモル体積依存性は bcc の場合の  $V^{1/8}$  に非常に近い。これらの結果から hcp での核磁気相転移は  $10\ \mu\text{K}$  台で起こると予想され、その実現の方法がのべられた。また帯磁率測定からスピン緩和時間も導出された。一方、 $0.2\text{T}$  までの磁場中での微小な圧力変化の測定からも強磁性的振舞いを示すことが報告されている。

### 2 D ${}^3\text{He}$ の磁性

東工大・理 奥 田 雄 一

固体の表面に吸着した ${}^3\text{He}$  は、mKの超低温領域で強磁性相互作用を示し、量子固体、液体の新しい系として注目を浴びている。特に、基盤がグラフォイルである場合、その相互作用が大きいことも有利な点であるが、幾何学的形状がはっきりしているので吸着した ${}^3\text{He}$  膜の構造の詳細が明らかにされ、強磁性のメカニズム解明のための重要な情報が得られつつある。本研究会では、最近のグラフォイルを基盤にした比熱の実験結果を中心に、現在までの実験のレビューを行った。吸着した液体 ${}^3\text{He}$  の  $m^*$  がバルク液体の  $m^*$  よりも広い範囲に亘って変化し得ること、吸着第二層ではある密度で吸着第一層に対する registered phase が形成され、その磁性に大きな影響を与えること、交換相互作用が最も大きくなるのは液相である第三層がほぼ完結するところであること、比熱の温度変化は 2DHeisenberg ではうまく記述できないこと、等、何がどこまで分かった、何が残された問題なのかを議論した。

### **$^4\text{He}$ 薄膜の Kosterlitz-Thouless 転移 - Introduction**

名大・長岡洋介

多孔質媒質に吸着した $^4\text{He}$ 薄膜の超流動転移に関する蓑口らの理論と白浜らの実験へのイントロダクションとして、相転移の Kosterlitz-Thouless 理論とそのダイナミックスに関する Ambegaokar らの理論を概観した。

薄膜上に励起された量子渦間には長距離の相互作用が働く。渦を正負の点電荷に対応させると、二つの系と 2 次元の静電場の問題の間にアナロジーが成り立つ。低温では正負の電荷が結合して対をなした絶縁体になり、これは超流動状態に対応する。高温では自由電荷が出現して金属状態になり、これはノーマル状態に当る。Kosterlitz-Thouless 転移は電荷間の長距離引力が熱的に励起された電荷対で遮蔽されることで生じる絶縁体-金属転移 (Mott 転移) に当り 1 次転移になる。

転移をねじれ振子の実験でみると、有限の振動数の電場に対する応答を測定することになり、転移点の近くで電荷対の運動に伴うエネルギー吸収のピークが現れる。

### **$^4\text{He}$ 薄膜の KT 転移 - 実験 -**

#### **- 多孔質ガラスに吸着した $^4\text{He}$ 薄膜の超流動 -**

東大・物性研・白浜圭也

多孔性物質に吸着した $^4\text{He}$ 薄膜の超流動転移の機構については、未だ統一的見解が得られていない。我々は、細孔径のスケールでの薄膜の 2 次元性が転移の性質にどの様に影響するかに興味を持ち、異なる細孔径の多孔質ガラス（細孔直径 50-10000 Å）を装着した 2 台のねじれ振子を 1 本の $^4\text{He}$ 導入ラインで結び、同じ膜厚での転移温度  $T_c$  は細孔に $^4\text{He}$ をいっぱいに満たした場合とは逆に細孔径が小さくなるほど上昇することを見いだした。また、 $T_c$  で渦対の解離によるとみられるエネルギー吸収ピークが観測された。これらの事実は、多孔質ガラス中 $^4\text{He}$ 薄膜では  $T_c$  が細孔径程度のスケールでの渦対の解離によって決まる事を明確に示している。また、蓑口と長岡の理論に基づいた解析から、薄膜での渦芯の直径が 25 Å と見積られた。この値はバルクな $^4\text{He}$ でのそれに比べ 1 衍大きい。

### **液体 $^3\text{He}$ での境界効果**

山口大・理・永井克彦

超低温の液体 $^3\text{He}$ において準粒子の平均自由行程が長くなり、流体力学的領域からのずれや、体系のサイズ効果が現れてくる状況の理論実験にかんするレビューを行った。流体力学的領域からのずれは、境界の速度と流体の平均速度との間に違いが生じることに現れ、それは第一近似としてはスリップ長で記述される。スリップ長は準粒子の境界による散乱の様子に依存するが、ノーマル相の実験は乱雑な散乱でよく記述される一方超流動相の実験は鏡映的散乱成分が増えているとしなけ

れば解釈されず統一的な理解は得られていない。超流動相では、境界付近で生じる Andreev散乱が鏡映的散乱を強めるとの解釈があるが、必ずしも同意できない。性格のよく知れた境界面を用いた実験が望まれる。境界を数層の<sup>4</sup>Heで覆った系では鏡映的散乱がより強くなっていることを示唆する実験が報告されているが、理論実験の両面から今後調べるべき問題である。

### Vibrating Wireによる準粒子の生成と検出

東北大 佐藤 武郎

直径 5~100 μm の超伝導線を直径 2~10mm の半円状に曲げたvibrating wireは、その単純さゆえに超低温向きの probe である。検出系に S Q U I D を用いれば、単位長さ当たり  $10^{-9}$  dyne の力を検出できる。従って、超流体のballistic領域において準粒子を直接検出し得るものとして独自の領域を開拓する可能性をもつ。また Landau の臨界速度以上で振動させ、準粒子を生成することも可能である。検出 probe として大きな障害になっているのは、準粒子の数が少くなり ( $\rho_n / \rho \sim 10^{-5} \sim -6$ ) 線幅が狭くなってくると、非線形性が現れるという点である。この非線形性の原因は未だ完全には明らかではないが、一部は線材固有のものである。我々は、Nbの50 μm wireを  $10^{-8}$  torr 中 2000°C で熱処理したものについて、従来のNb-Ti wireに比して可成り良好な結果（真空中で 10 mKにおいて非線形性は見られずまた線幅も1/3 程度狭い）を得た。線形領域においては直接的温度計としても有用である。

### 細孔中のヘリュウム

東大・教養 和田信雄

これまで研究を行ってきたゼオライトなどの直径10 Å程度の細孔中ヘリュウムの状態について明らかにしたことを中心に報告した。比熱や吸着圧力測定による等量吸着熱から、K, L およびYゼオライトの10 Å級の細孔中でも低温でHeは層形成していると理解できる。そして飽和吸着量の70%程度の吸着量では、固層をなす第1層の上にガスまたは液体状態の2層目のHeが存在し、更に2層目のHeの量子凝縮を強く示唆する比熱の実験結果を得た。また10 Å級の細孔より大きな孔径を持つヘクトライトなどについて、吸着Heの量子凝縮を見出す試みを紹介した。

### 細孔中の<sup>3</sup>He の表面緩和

京大・理 平井 章

細孔 (Grafoil, Fluorocarbon, Vycor等) 中に液体<sup>3</sup>Heが充たされている時の<sup>3</sup>Heスピノの緩和時間について考える。実験結果は

$$1/T_1 = A \cdot M_2 \cdot \left( \frac{f \chi_s}{f \chi_s + (1-f) \chi_F} \right) \cdot \frac{1}{\omega}$$

の形にまとめられる。ここで、 $A$ は0.1から1程度の定数、 $M_2$ は ${}^3\text{He}$ スピン間の双極子相互作用の二次モーメント、 $f$ は細孔内の全 ${}^3\text{He}$ のうち表面固体相にいる割合、 $\chi_s$ は表面固体相の常磁性帶磁率、 $\chi_F$ はフェルミ縮退する液体 ${}^3\text{He}$ の帶磁率、 $\omega/2\pi$ は測定周波数である。この実験事実を統一的に理解する簡単なモデルについて説明した。要点は、 ${}^3\text{He}$ のスピンが液相と表面固体相の間を動き回っており、表面相に滞在する時間が約 $10^{-5}$ 秒から $10^{-10}$ 秒程度の範囲で広く分布していることである。詳細は既に公表済みである。

J. Low Temp. Phys. 75(1989) 289.

### ヘリウムの量子モンテカルロ計算

東大・物性研 高橋 実

二体力で相互作用をする多体系として希ガス元素があるが、そのなかでもヘリウム3とヘリウム4は質量が軽いために量子性が強くなる。ネオンやアルゴンの熱力学的性質は古典系のモンテカルロ法や分子動力学法で計算でき、実験と大変よく一致することがわかっている。ヘリウムについては量子性が大変強く、古典的方法は役に立たない。量子性を考慮にいれた数値計算で最初に行われたのは基底状態に対するものである。マクミランは波動関数としてジャストロウ型の変分波動関数を用い、エネルギーの期待値をモンテカルロ法で求めた。圧力ゼロに於ける密度と内部エネルギーはほぼ1-2割の誤差で実験結果と一致した。これを更に精密なものにするためにグリーン関数モンテカルロ法が考えだされた。また原子間に働く二体力としてレナルド・ジョーンズ二体ポテンシャルに代わってアジズポテンシャルとよばれるポテンシャル関数も使われるようになり、基底状態に対する計算はより精密なものになってきている。

有限温度の場合はファインマンの経路積分を行えば物理量が計算できる。経路積分は非常に多重度が高い積分であるので通常の数値積分法はまず役に立たない。しかしモンテカルロ法を使えばこの多重積分も不可能ではない。またモンテカルロ法のなかでも通常のランダムサンプリング法ではなくて、重みサンプリング法を使えばさらに大きい系を扱うことが可能になる。通常の経路積分は実時間の方向で実行されるが、この場合経路の重みは複素数になり、重みサンプリング法にとって大変都合が悪い。しかし虚数時間方向の経路積分ではボーズ粒子系に対して経路の重みが常に正の実数になり、重みサンプリング法の適用が可能になる。また虚数時間方向の経路積分が系の分配関数を与えることから、エネルギーや圧力などの熱力学的量の計算が可能になる。液体Heや固体Heのモンテカルロ計算について述べた。

### $^3\text{He}-^4\text{He}$ 混合液の冷却と Kapitza 抵抗 一実験一

大阪市大・理 呂 玉 隆 夫

$^3\text{He}-^4\text{He}$ 混合液の冷却を核断熱消磁冷却で行う場合、混合液の到達温度は、Kapitza 抵抗値と直接液に侵入してくるヒートリークによって定まり、寒剤の格子温度は決め手にならない。このため銀の微粉末を使って液との接触面積を大きくすることや、ヒートリークを小さくすることに努力が向けられている。我々は寒剤自身の微粉末を直接液につけて冷却し、 $100\mu\text{K}$ 以下を目指している。

これまで寒剤としては銅が用いられてきたが銅の微粉末は酸化され易く、また四重極モーメントを持つので、微粒子ではその影響を無視できないので、我々は白金を用いることにした。このため予冷温度を $2\sim 3\text{mK}$ にする必要があり 2段の核断熱が必要である。

ヒートリークと Kapitza 抵抗の振舞いを調べる目的で行われた従来方式の銅を用いた結果では表面積 $450\text{m}^2$ 、ヒートリーク $50\text{pW}$ で到達温度 $202\mu\text{K}$ であった。現在、これらのDataをもとに、白金を用いて表面積を数倍大きく、またヒートリークをさらに小さくする試みを加えたセルの制作を進めているところである。

### $^3\text{He}-^4\text{He}$ 混合液のカピツツア抵抗

北大・工 中山 恒 義

液体 $^3\text{He}$ と金属微粒子シンターの系で測定したカピツツア抵抗が $\text{mK}$ 領域でバルクに対する理論値と 2 枝以上違う事が発見されて以来、15年以上過ぎた。1980年代に入り、 $^3\text{He}-^4\text{He}$ 混合液の $^3\text{He}$ 準粒子の超流動転移の探索にからめて、カピツツア抵抗 $R_k$ の測定が行なわれ、温度依存性は $T^{-2}$ に、濃度依存性は $T_F^{-1}$ に依存する事がわかった。講演では、以上の 2 つが同じ線上の問題である事を強調した。特に $^3\text{He}-^4\text{He}$ 混合液は液体 $^3\text{He}$ の場合と比べて金属シンターのソフトモードと零音波の結合によるエネルギー伝達がないため、理想的な系でもある事を指摘した。

$^3\text{He}-^4\text{He}$ 混合液は、世界の主要研究所のいずれでも、 $200\mu\text{K}$ 前後までしか冷却に成功していない。従ってこれまでのような正攻法ではこれ以上冷却できないかも知れない。講演では、多孔媒質を用いたスピン偏極系生成を利用し、これを連鎖させる事により、断熱消磁的な冷却が可能な事を示唆した。

### $^3\text{He}-^4\text{He}$ 混合液の冷却 一コメント一

東大・物性研 石本 英彦

物性研に於ける $^3\text{He}-^4\text{He}$ 混合液中の $^3\text{He}$ 超流動探索に関する経験と今後について話した。溶液の最低温度は、液に直接入ってくる熱流入( $Q$ )と熱交換器の熱抵抗によって決っている。このうち $Q$ の原因はよくわかっていない。ここでは我々の他の実験から、熱交換器中での $^3\text{He}$ 準粒子の運

動による粘性発熱の可能性が指摘された。また直接冷却の試みの他に、転移温度を評価する上で高圧下での情報が不足しており、<sup>3</sup>He準粒子の有効質量など精密な測定の必要性が述べられた。

## 論文題目

### 多孔質媒質中 <sup>4</sup>He 薄膜の超流動転移

著者名  
藤井 伸也・山本 勝彦  
大島 雄一・川上 伸也

東大・教養 萩口 友紀  
名大・理 長岡 洋介

<sup>4</sup>He は二次元の膜の場合には、いわゆる Kosterlitz-Thouless 転移を起こす。すなわち、熱的揺らぎによって生じた渦対（互いに逆向きの回転を持った一対の渦）がある温度  $T_{KT}$  以上で解離し、それに伴って超流動密度  $\rho_s$  は突然消失する。近年、多孔質媒質中 <sup>4</sup>He 薄膜の超流動転移について精力的に実験がなされ、二次元系にみられる  $\rho_s$  のジャンプがぼやけすることが指摘されている。このことが、系の三次元性によるものか、膜の多連結性によるものか現在論争の中心になっている。我々は渦の相互作用について調べ、渦と反渦は孔を巻く超流動流を介して引き合い、超流動流の循環の量子化を考えると、渦-反渦間には、ある道筋に沿う孔の回りにのみ超流動流が巻き（ストリング）、相互作用エネルギーはストリングの長さに比例することを見出した。渦対の解離はストリングの消失にともなっておこる。この事情は膜の巨視的な次元性によらない。一般に渦対の解離する温度と、位相の長距離秩序の消失する温度が異なることが示され、観測の振動数や孔径によって  $\rho_s$  のジャンプのぼやけは三次元性によったり、膜の多連結性によったりする。

## 「高輝度放射光による新しい分光科学」

世話人 摂南大・工 塩 賢二郎  
東大・工 国府田 隆夫  
東北大・科研 池沢 幹彦  
大阪府大・工 会田 修  
東大・物性研 福山 秀敏  
東大・物性研 松岡 正浩  
東大・物性研 石井 武比古

最近数年間に、放射光の科学研究・技術開発への応用は極めて急速に一般化してきた。世界中の多くの国々で、放射光光源が稼動しており、また、新たに建設されている。その中にあって、我国は放射光研究の最も盛んな国である。既に10基以上の光源用ストーリジリングが稼動中であり、更に数基が建設中である。それに加えて、新しい光源計画の提案も数多くなされている。これらの放射光光源は、大きく分けると、工業用ないしそのための技術開発用と基礎研究用に分類できる。前者においては、光源用ストーリジリングの小型化が目論まれており、コストパフォーマンスを改善するための技術開発が研究の中心的課題である。後者、すなわち、基礎科学・応用科学研究用の放射光光源には、汎用型のものと低エミッタンス高輝度光源がある。汎用型の光源用ストーリジリングは、遠赤外線からX線領域に至る広い光エネルギー領域の放射光を提供できるように設計され、多彩な需要に応ずるようにしたものである。高輝度光源は、アンジュレータを主体とした光源で、小さい光源サイズと光の発散の極小化を計るため、低エミッタンスになるように設計される。高輝度光源では、複雑な光学系を通過して試料に到達する光の強度を著しく高めることができるので、高分解能で高精度の、そして、先端的な研究を行うことができる。それらは第三世代の光源と呼ばれる。光輝度光源は、一般に、X線用の大型リングと真空紫外線および軟X線用の中型リングに分かれる。いずれの場合も、汎用光源に比べて、サイズが大きく建設費が高い。

X線用の高輝度リングは、ヨーロッパの十数ヶ国が共同で建設しているもののほか、米国のアルゴンヌと我国の兵庫県に建設が予定されている。真空紫外線・軟X線用の高輝度光源は、米国のバークレーとイタリヤのトリエステで建設が進められているほか、ドイツのベルリン放射光研究所はじめ世界のいくつかの研究機関より建設計画の提案がなされている。

このような状況の中において、東京大学物性研究所は、かねてより、新しい光源計画の検討をすすめてきた。よく知られているように、東京大学物性研究所は、我国ではじめての、そして、物性研究専用に設計されたものとしては世界でもはじめての電子ストーリジリングを有し、その設備を全国共同利用研究のために提供し、多大の業績をあげ、この研究分野の発展に多大な貢献をしてきた。現在もなお活発な研究活動が続けられているのは言うまでもない。この実績と経験の上に立つ

て立案された新しい光源計画は、光物性・分光学研究の画期的発展と自由電子レーザーを頂点とする新型光源の発展促進を主目的として、真空紫外線および軟X線波長領域の高輝度ストーリジングとそれに適合した先端的測定系を建設することを骨子とするものである。現在我国で稼動中ないし計画中の光源は、X線用大型高輝度リングを除いて、工業用または汎用のものである。従って、東京大学物性研究所の計画は、世界の潮流からみても、必ず実現しなければならないものであると信ずる。

しかし、このような、経費の上からは大型にならざるを得ない先端的研究計画については、それを遂行することの意義が、多くの研究者の間に、十分に理解されていなくてはならない。一方、多くの研究者の間の討論を経て、斬新な研究のアイディアが生まれる。本研究会は、このようなことを背景にして企画され、平成2年2月7日（水）、8日（木）の両日に実行された。場所は東京大学生産技術研究所大会議室であった。物性研究所短期研究会は物性研究所講義室において行われるのが普通であるが、参加者が多数にのぼるため、大きな会場を用意した。

研究会の構成は後出のプログラムに示される通りであり、また、各講演の内容は講演者によって書かれたアブストラクトに見られる通りであるので、ここでは、このような構成を選択した理由について簡単に述べる。プログラムにおける講演の配列によらずに記述することにすると、まず、従来積み上げられてきた知識の延長上にあって、高輝度光源によってもたらされる高分解能化・高精度化を通して、得られるデータの質が向上する類の研究がある。気体の分光研究では、数百eVの光領域での分光性能が飛躍的に向上することが見込まれるため、内殻電子の吸収スペクトルに関する研究が重要になる。とくに、光励起によって生ずる諸々の緩和過程が興味のあるところである。この分野においては、研究の幅が大変に広く、実験も極めて活発に行われている。時間の制限により、ここでは、二つの広い領域にまたがるテーマが選ばれた。固体の分光研究については、現在とくに活発に研究が行われている磁性にかかる物質のうちから高温超伝導体を含めて4テーマを選んだ。イオン結晶や半導体に対しては、光物性研究の対象として、古くから数多くの研究がなされている。最近になって蛍光実験について新しい発展があり、その先に大きな分野が拓けるという期待がある。本研究会では、それらのすべてを取上げることはせず、夫々について、限られたテーマで将来を見通すこととした。この事情は有機固体についても同じである。固体表面の研究は放射光による研究が最も活発に行われてきた分野であり、その発展もまた日進月歩である。ここでは、基礎的な電子構造解析から二つのテーマ、応用につながる二つのテーマ、それに光刺激脱離を加えて、合計5テーマをとりあげた。放射光の生物学への応用のうち、照射効果の研究は、光励起に始って最終的な生物学的効果の発生に至る複雑な機構の解明を目指すものであるが、その初期過程は、一種の光化学変化の追跡に相当し、分光学的にも興味のあるところである。従って、本研究会では、そのような研究分野における将来の展望を行うことにした。

高輝度光源が出現すると、これまで実験されていなかった新しい研究をすすめることが可能に

なる。それらには、実験方法に根ざしたものと研究対象物質に根ざしたものとがある。前者の中からレーザーとの2重照射による実験と試料に対する外的条件を変える実験を取り上げた。後者では、以前からよく研究されてきた気体と固体のほかに、液体やクラスターのような今後発展が予想される物質についてもサーベイすることにした。

高輝度光源を利用する際には、新しい技術をこれに結合させて研究をすすめるのが有効である。分光性能が高くなつて、光吸収スペクトルのエネルギー分解幅が小さくなつたとき、何が見えてくるのか、あるいは、今見たいスペクトル構造を分解するには、光学系はどのようになつて必要があるのか。そのような問題が次に取り上げられた。対象となつた個々のテーマは、高分解能分光のほかに、円偏光の利用、スピンド極光電子分光実験、遠赤外分光、自由電子レーザーであった。最後に、高輝度光源を用いる実験につきものの重大な困難とその克服の仕方、その見通しについての問題が取り上げられた。まず、光源の高輝度化を達成するために越えねばならぬストーリジング設計上の諸問題を概観する。次に、高輝度光による光学素子の熱負荷とそれによる素子の変形や劣化の問題、高分解能化を達成するために必要な光学系への配慮と設計の指針などの問題が取り上げられた。それから、広いエネルギー範囲で動作する自由電子レーザーの実現は、高輝度光源計画の背後にあって、これを駆動するもう一つの力になつてゐる。一方で自由電子レーザーを応用して何がわかるかを見たので、ここでは、技術上の諸問題が取り上げられた。

以上がプログラムの概要である。実際の講演は、講師の都合等により、若干、順不動にならざるを得なかつた。2月7日、8日の2日間の平均の参加者数は100名程度であった。各講師のすばらしい講演につづいて、活発な討論がおこなわれた。講演者によって書かれた講演の要旨は、以下に示すプログラムに統いて掲載されている。なお、この研究会の報告集は、別な一巻にまとめて、7月末頃印刷する予定である。最後に、多忙中にもかかわらず快く講演をお引受け下さつた講演者の先生方、同じく遠方よりお出かけ下さつて討論に御参加下さつた諸先生方、研究会の準備と運営に御援助下さつた物性研究所事務部の方々および物性研究所軌道放射物性部門および同研究施設の諸君に心から感謝の意を表します。

## プロ グ ラ ム

日 時 : 平成 2 年 2 月 7 日(9:45-17:40) 8 日(10:00-17:25)

場 所 : 東京大学生産技術研究所 3 F 会議室

2 月 7 日(水)

1. 研究会の経緯(9:45-10:10)

世話人挨拶

塘 賢二郎(摂南大・工)

新しい光源計画

石井武比古(東大・物性研)

2. 技術上の諸問題と実現の可能性(10:00-10:30)

高輝度光源

宮原 義一(東大・物性研)

3. 凝縮系の新しい分光(10:30-13:00)

極限レーザーと組み合わせた実験

松岡 正浩(東大・物性研)

高圧下での実験

毛利 信男(東大・物性研)

パルス強磁場下での実験

後藤 恒昭(東大・物性研)

スペクトルの温度依存性

菅 滋正(阪大・基礎工)

液体金属の電子状態

藤原 育夫(東大・工)

クラスターの電子状態

塚田 捷(東大・理)

### 昼 食

4. 気体の分光(14:00-14:50)

原子・分子の光吸收スペクトル

伊藤 健二(高エネ研・PF)

解離とダイナミックス

佐藤 幸紀(東北大・科研)

5. 固体分光(14:50-18:30)

d電子系と共に鳴励起

五十嵐潤一(阪大・理)

f電子系と重いフェルミ粒子

藤森 淳(東大・理)

### 休憩 15分

高温超伝導体の電子状態

小谷 章雄(東北大・理)

半導体の光励起

谷口 雅樹(広島大・理)

アルカリハライドの発光と励起緩和・光化学の最新の研究

中川 英之(福井大・工)

有機固体の電子状態

渡辺 誠(分子研・UV-SOR)

希土類化合物における価数混合と内殻励起スペクトル

関 一彦(広島大・理)

城 健雄(阪大・理)

2月8日(木)

6. 新技術の利用(10:00-12:30)

PFにおける円偏光ビームラインの建設の現状と利用研究計画	宮原 恒昱(高エネ研・PF)
スピニ偏極光電子分光実験	菅原 英直(群馬大・教育)
高分解能分光とXANES	中井 俊一(宇都宮大・工)
遠赤外とミリ波分光	池沢 幹彦(東北大・科研)
UCSBのFEL	本河 光博(神戸大・理)
遠赤外分光に関するコメント	難波 孝夫(神戸大・理)
パルス光の利用	三谷 忠興(分子研)

昼 食

7. 技術上の諸問題と実現の可能性(13:30-14:30)

ビームラインと光学素子	柿崎 明人(東大・物性研)
自由電子レーザー	鈴木 章二(東北大・理)
金属表面の電子状態と吸着	佐藤 繁(東北大・理)
半導体表面	山崎 鉄夫(電総研)

8. 表面科学(14:30-17:25)

金属表面の電子状態と吸着	太田 俊明(広島大・理)
半導体表面	張 紀久夫(阪大・基礎工)

休憩 15分

ヘテロ界面の制御と電子構造の解明	小間 篤(東大・理)
光CVDと光エッチングの基礎	宇理須恒雄(NTT厚木)
光刺激脱離	村田 好正(東大・物性研)

9. 照射効果(17:25-17:55)

生体分子の照射効果	檜枝光太郎(立教大・理)
-----------	--------------

新しい光源計画

東大・物性研 石井 武比古

東京大学物性研究所は、かねてより、放射光による物性研究の将来計画を検討してきた。それは、分光科学および光物性学の画期的発展を目指して、挿入型光源を主体にした高輝度放射光光源とそれに適合した測定系の建設を行なうというものである。具体的には、最大エネルギーが1.5GeVの低エミッタリングとそれに付属の高分解能分光系、特別実験室、固体表面研究センター、生物照射効果実験室などを作ることになる。

この計画では、いくつかの特徴ある光物性研究・分光研究が行われることになる。二・三を例示すると、まず高分解能・精密分光では、 $100\text{eV}$ の励起エネルギーに対して全体的エネルギー分解幅を $-10\text{meV}$ 以下におさえたい。 $S/N$ 比は標準で1000以上となる計測系を備えたい。新しい計測手段として、光電子分光においては、角度とスピンの両方を分解した実験を行うほか、蛍光・光散乱の実験、時間分解した計測、変調分光、円偏光の利用、極低温での測定などを考える。これらは部分的には現在でも既に行われているが、高分解能・高精度でルーチンとしてやれるようにすることを目指すものである。次に、超高压や超強磁場などの極端条件下での実験を考える。また、レーザーとの2重照射の実験も重要なテーマとして取り上げる。そこでは、大出力レーザー照射によって、高密度励起状態を作り出し、それを高輝度放射光で検出するというような実験とか、それらを光と光のコインシデンスをとって計測する実験などが行われる。発光と光電子放出の同時計測なども考えられる方法である。そのほかに、高エネルギー光領域で作動する自由電子レーザーの開発を目指して、それに必要な諸々の基礎研究が行われる。

このような研究を可能にする高輝度放射光光源は、ストーリジリング自体としても、できるだけ低エミッタンスに設計され、それによって、小さいビームサイズと小さい光の発散を保証する。高い光束密度はアンジュレータにより保証する。ストーリジリングの周長は250m程度、12個の直線部をもち、エミッタンスは $5 \times 10^{-9} \pi \cdot \text{m} \cdot \text{rad}$ よりは小さくしたい。アンジュレータは、円偏光用のものは別にして、リボルバー型が中心になる。磁極の周期長は5cmから20cm程度、磁極数は100程度のものを考えている。

期待される成果は以下に述べる3種のものに大別されるだろう。その一つは、従来の研究において既に予想されているデータの質を向上させる類のものである。最近の良く知られた例では、2正孔束縛状態、重いフェルミ粒子系、高温超伝導体の研究などがこれに該当する。二番に、イヴェント数が小さくて計測が不可能であった実験があげられる。光の散乱、蛍光、固体表面の原子にかかる高次の過程、光と粒子の同時計測を必要とする現象などは、ここに分類されよう。最後に、技術上の問題として、計測時間が短縮されるため、試料の劣化が少なくなり、データの質が向上する類の実験がある。固体表面の研究はその典型であろう。

### 高 輝 度 光 源

東大・物性研 宮 原 義 一

VUV帯域高輝度光源としての電子貯蔵リングの設計を行い、ラティス（磁石の配列）に関する問題点について検討した。高輝度光源の条件として次のことを考慮した。

- 1) ビームエネルギーは $1.5\text{ GeV}$ とする。これによりウィグラー光の第3高調波で $10\text{\AA}$ 以上の波長が得られる。

- 2) 高いビーム電流(500mA)をめざす。但しこれは色々なビーム不安定性を誘起する可能性があるので、十分対策を検討する必要がある。
- 3) ウィグラーを10~12個設置する。
- 4) 長さ5m程度のウィグラーの性能を最も高く発揮させるために、ビームのエミッタスを2nm rad程度まで下げることが望ましい。

リングの見本例として、14回対称のTBA(triple bend achromat)と12回対称のDBA(double bend achromat)について検討した。外国の計画とパラメータを比較する。

	A L S	B E S S Y I I	E L E T T R A	T B A	D B A
対称性数	12	10	12	14	12
周長(m)	196.8	194.4	259.2	241.4	230.2
エネルギー(GeV)	1~2	0.9~1.9	1.5~2	1.5	1.5
エミッタス(nmrad)	4.1	4.8	4.2	3.5	7.0
長直線部長(m)	6.75	5.8	6.0	6.0	6.59
動力学的口径(mm)					
水 平	23	-26/32	26	-40/34	±42
垂 直	±10	±22	±18	±20	±23

高輝度光源では色収差(chromaticity)補正用の六極磁場の為に、ビームが安定に回る領域：動力学的口径(dynamic aperture)が小さい。しかし分散関数がゼロになる領域に六極磁石を追加すると動力学的口径を拡大できる。こうしてビーム寿命、ビーム入射に関して十分な広さの動力学的口径が得られた。

ウィグラーによって電子軌道がかなり影響を受けて、チューン(ベータトロン振動数)のシフトやベータ関数(ベータトロン振動の振幅の包絡線)の乱れが生じる。これをウィグラー近傍の四極磁石で補正する。この補正はウィグラー毎に行うので、ウィグラー磁場は各々独立にかつ自由に変えられる。TBAの場合、12台のウィグラーに対してこのような補正を施すと、動力学的口径は( $\pm 20$ ) $\times$ ( $\pm 12$ )mm<sup>2</sup>が得られ、十分に長いビーム寿命が期待できる。

しかしこのような補正をしても、ウィグラー光の光軸がわずかに変化することは避けられない。そこで更にウィグラー光の光軸をモニターして、他のビームラインに影響を与えないように、電子軌道を修正する。

それでもなおウィグラー光軸の微妙な動きは避けられない。そこで、①ウィグラー磁場の変化、②四極磁石による補正、③ウィグラー光軸の修正はウィグラー12台について順次一斉に(又は同時に)行い、最終的に光軸の再調整をして、全ての磁場が静止状態になってから、④光強度の較正と、⑤物性計測を行う。そしてこの一連の作業は時間を区切って周期的に行う必要がある。

## 極限レーザーと組合せた実験

東大・物性研 松岡正浩

放射光とレーザー光を組合せた実験は、これまでのところ意外に少いように思われる。このことは、逆に、このような実験が今後に期待される課題であることを意味しているものとも考えられる。この講演では、物性研の“極限レーザー”と組合せた、あるいは“極限レーザー”と組合せてしかできない実験について若干の提案を行った。

これまでに行われた組合せ実験を見ると、レーザー光は専ら外殻電子を励起するのに用いられているようである。これに対して、物性研の極限レザーグループでは、レーザーの短波長化と短パルスの極限を追求している。ガラスレーザー（黒田研）ではテラワット級の波長 $1.06\mu\text{m}$ の光によって、約4nmの軟X線の增幅実験をつづけている。また、エキシマーレーザー（渡部研）では、同じくテラワット級の248nmの光によって、最近25次までの高次高調波発生の観測に成功した。これは9.9nm(125eV)の軟X線である。つまり、これらのレーザーからの光を用いて内殻励起が可能になったわけである。そこで、レーザー光を外殻電子を励起するばかりでなく、内殻電子も励起する光源として、放射光と組合せて実験することを提案することができる。この場合、レーザー光は波長が連続的に変えられないこと、また（現在のところ）短いパルスであること、しかも繰返しが遅いことなどが短所である（あるいは短所となりうる）が、しかし、レーザー光の高輝度性と超高速性、コヒーレンス性を長所とした実験を考えることができる。

具体的には、放射光とレーザー光の2波長による内殻励起の実験、および放射光1波長とレーザー光2波長による内殻励起状態におけるフェムト秒超高速時間分解分光を提案した。ここでは、放射光は連続スペクトルを測るのに用いられ、レーザー光は束縛準位間、またはそれとイオン化連続準位間の励起に用いられる。

なお、放射光グループと極限レザーグループがかわって来る問題として重要な、自由電子レーザーや加速電子とレーザー光の相互作用による短波長コヒーレント光の発生などに関しては、昨年6月の研究会で報告があったので触れなかった。

## 高輝度放射光による新しい分光科学

東大・物性研 毛利信男

### 高圧下での実験

超高压下の物性研究は超高压力の発生技術とそこでの物性測定技術の双方が可能となって初めて達成され、発展してきた。この数年来、高輝度X線光源を利用した超高压下の物性研究が世界的に盛んとなり、高圧下での結晶構造相転移に関する新しい研究成果が次々と提出されている。日本に

おいても高エネルギー物理学研究所のフォトン・ファクトリーでは強度が従来の光源に比べて $10^2$ ～ $10^3$ 倍にもなるため、これまで不可能であった構造転移のその場観察が可能となっている。一例をあげると、白金のカプセルに密封された試料でもX線回折実験が可能となり、ガス雰囲気を制御した結晶構造解析が超高压下で行い得る。この技術は物性測定のみならず新物質の合成を含む材料科学の研究分野に多大な発展をもたらすものと期待される。

一方、この短期研究会のテーマである高輝度放射光光源は軟X線から遠赤外線までの低エネルギー領域に特徴があり、超高压下での分光や散乱実験で固体の電子状態や格子振動の研究に新しい成果が期待される。衆知のように高圧下の光学実験にはダイアモンド・アンビルを用いるのが最適である。ダイアモンドは0.2eV～5eV, 0.3 keV～の光を通す。しかし、ダイアモンド・アンビルで用いる試料サイズは10～200μmと、極めて小さい。さらに発生圧力が高くなればなるほど圧力勾配も大きくなり、微少領域での分光技術が要求される。この意味において、超高压下の分光実験には発散の少ない高輝度光源が不可欠である。従来の反射、吸収、ラマン散乱技術はすぐ適応出来、超高压で誘起した新しい相での研究は格段に進展することが期待される。また、電子構造の研究に重要な光電子分光の実験はダイアモンド・アンビルを用いているので従来の方式では不可能であるが、放射された電子を観測する新しい手段の開発を積極的に推し進めることが大切である。超高压と高輝度X線源の組合せで、超高压下で誘起された物質の結晶構造が次々と明らかにされつつあり、これらの物性を究明するには高輝度放射光による電子構造及び電子状態の研究が急務である。さらに超高压を手段として考える時、加圧や減圧過程で得られる非平衡又は準安定相における物性の研究は全くなされておらず、高輝度光源によるその場観察の分光が可能になると格段に進展することが期待される。

### パルス強磁場下での実験

東大・物性研 後藤恒昭

30T以上の強磁場はふつうパルス的に発生されるため、無磁場又は定常磁場下の光学測定に比較して非常に高輝度の光源を必要とする。新しい高輝度光源の開発はパルス強磁場下の分光研究の更なる発展を促すものと期待される。

50T以下の強磁場（パルス幅10～20ms）は比較的小型の多層型のパルスマグネットにより非破壊的に発生することができるが、50Tを超えると強い電磁力によってマグネットが破壊されるので、非破壊的発生は困難となる。我々は試料ホルダーや試料を破壊することなしに150Tにおよぶ超強磁場を発生する方法として、一巻コイル直接放電法を開発した。この方法を用いると一巻きコイルは毎回破壊されるが、試料および試料ホルダーはくり返し使用できるので、再現性の良い実験が可能である。上記2種類の磁場発生装置は、比較的コンパクトな可搬型のコンテナーに納めることができる。

できるので、高輝度放射光を利用した 150T におよぶ強磁場分光に、新たな道を開くものと考えられる。

我々超強磁場グループでは、遠赤外レーザーを光源とするサイクロトロン共鳴、 ESR 等の実験の他に、 Xe フラッシュ光源を用いて、 150T におよぶ磁場下で、可視～近赤外領域の磁気光学吸収の実験が行われている。

遠赤外レーザーとしては  $H_2O$ , HCN,  $CO_2$  および CO を用いた放電型励起ガスレーザーの他に、  $CO_2$  レーザー光励起によるサブミリ波レーザーが使用され、多くの発振線がえられている。しかしこれらの発振線の波長は固定で、それぞれの発振強度がまちまちなものもあり、遠赤外線の光源として万能とは言いがたい。数  $\mu m$  ~ 1 mm の波長をカバーする強力な遠赤外領域の自由電子レーザーが開発されれば、この領域の分光を飛躍的に進歩させるものと考えられ、その開発を強く希望したい。遠赤外領域の自由電子レーザーと 150T におよぶ強磁場を組合せることにより、サイクロトロン共鳴を手段とする半導体、半金属の電子構造の研究、超格子やアモルファス半導体の研究等が更に進展するものと考えられる。また遠赤外吸収測定による、まだ発見されていない電子相転移（エキシトニック相、ウィグナー結晶等）の検出や、 ESR, AFR による磁気相転移の研究に威力を発揮するものと思われる。

一方磁気光学吸収（又は反射）測定の光源には主に Xe フラッシュ光源が使用され、 50T 以下の実験では OMA を、それ以上の超強磁場下の実験ではストリークカメラを用いてスペクトルの磁場変化が測定されている。Xe フラッシュ光源は数多くのスペクトル線を含み、これが実験に影響を与える場合もあり、問題が多い。放射光源は良好な白色性を有し、高輝度の特徴を利用すると、 150T におよぶ高分解能の磁気光学吸収（又は反射）測定が可能となる。最近ではストリークカメラの測定波長領域も広がり、放射光源と組合せて 115nm ~ 1.1  $\mu m$  におよぶ測定が可能になるものと考えられ、エキシトンの電子状態、マグノンサイドバンドの研究の他に、半導体やイオン結晶の磁気光学効果の研究に有効と思われる。

### スペクトルの温度変化

阪大・基礎工 菅 滋 正

高輝度放射光を用いて初めて可能になる種々の測定の中で、高分解能光電子分光測定によってスペクトルの微妙な温度変化を検出することで多くの興味ある議論ができる。温度変化に対して最も顕著な電子状態の変化は構造相転移に伴うものである。結晶型が変わる場合には電子帯のエネルギー分散全体が大きく変化すると期待できる。一方、磁気、整合電荷密度波、パインエルス転移などに伴って結晶のユニットセルサイズが変化するとブリルアンゾールの大きさが変わりゾーン端で電子帯が折り返される。そのためこの領域で状態密度が増加するだけでなく角度分解測定をすれば異なる

るエネルギー分散を持つ新しい電子帯が観測される。さらに温度を変える事によって電子状態のダイナミカルな変化を観測する事も興味深い。

物性研軌道放射物性研究施設ではP FのアンジュレータビームラインB L19Bに非等間隔平面回折格子分光器と低温から温度を変えられる光電子分光用クライオスタットおよび角度分解光電子分光装置を整備中であるがここでは10Kから数百度Kにわたって±2度の角度分解能で光電子分光を行なうことを予定している。この機会に英和を集めて今後の新しい研究の方向を検討したい。

電荷密度波(CDW)による内殻準位シフトは1T-TaS<sub>2</sub>の例にはっきりとみられる<sup>1)</sup>。不整合相から準整合相、整合相になるにつれて角度積分測定したスペクトルで Ta 4f<sub>7/2</sub>内殻がはっきりと2本に分裂する。この時フェルミ順位(E<sub>F</sub>)付近の状態密度は顕著に減少し絶縁体への転移を示す。E<sub>F</sub>よりのギャップは0.12 eV程度である。ブルーブロンズ K<sub>0.30</sub>MoO<sub>3</sub>の積分測定では180KでのPeierls転移に伴って束縛エネルギー(E<sub>B</sub>)の小さな領域に状態密度の盛り上がりが見られる。0.1eVの構造はPeierls gapによるものと思われる。V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>の金属-絶縁体転移(T<sub>c</sub>=340K, Mott転移)においてもE<sub>F</sub>近くにgapが明確に観測される<sup>2)</sup>。最近の話題としてはBi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub>高温超伝導体における超伝導gapの観測が上げられる<sup>3)</sup>。この種の研究には高エネルギー分解能の測定が必須でありその解釈においては角度分解測定の結果が重要である。

次に温度変化に対して一次的な価数転移を示すYb<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>Cu<sub>2</sub>について室温、液体窒素温度及び液体ヘリウム温度でUPSとXPS光電子分光測定を行なった。帯磁率測定からは約50KでYb<sup>3+</sup>からYb<sup>2+</sup>なる価数転移が見られる。ところがUPSやXPSの測定からは温度と80Kの間で価数転移が起こっている事が明かである。XPSで評価した平均価数は転移の高温側で2.6、低温側で2.4となり母体の2.9、2.8より遙かに小さい。この物質の表面付近では格子が膨脹しておりそのためYb<sup>2+</sup>成分が多くなるだけでなく転移温度も上昇しているとして理解出来る<sup>4)</sup>。

磁気相転移についてはキュリー温度T<sub>c</sub>付近でのスペクトル変化の議論がある。UPSで観測したスピニ偏極バンドの分裂や偏極度自身の温度変化はバルクの振舞いとは異なる。表面磁性という観点ではW(110)やFe(100)上にエピタキシャル成長したGd薄膜についてのスピニ偏極光電子スペクトルの例が興味深い<sup>5)</sup>。これらの例では表面Gdのスピニはバルクのスピニと反平行に結合している。温度をT<sub>c</sub>付近で変えたSPEED測定において観測される二つの転移温度は<sup>6)</sup>バルクと表面におけるスピニ交換相互作用の違いを明示している。

- 1) R.A.Pollack et al., Phys. Rev. B24, 7435(1981)
- 2) S.Shin et al., Phys. Rev. B in press
- 3) J.M.Imer et al., Phys. Rev. Lett. 62, 336 (1989)
- 4) S.Ogawa et al., S.S.Commun. 67, 1093 (1988)
- 5) C.Carbone et al., Phys. Rev. B36, 1280 (1987)
- 6) Phys. Rev. Lett. 54, 1555 (1985)

## 液体金属及びアモルファス・準結晶の電子構造

東大・工 藤原毅夫

液体金属およびアモルファス金属・準結晶の電子構造について、最近の研究を概観する。

液体金属の電子構造については、(1)清浄表面 (2)合金系の表面組成 (3)蒸気圧等の問題が有る。最近、Basel の Oelhafen のグループが UPS・XPS・シンクロトロン放射光を用い、多くの1価 (Li, Na) および多価金属 (Al, Ga, Ge, In, Sn, Hg, Tl, Pb, Bi) とその合金系で系統的に価電子帯構造を調べた。その結果をまとめると次のようになる。

- (i) BiGa, BiTlに於ける表面組成の変化。
- (ii) Li, NaのバンドのFEM から減少。
- (iii) Bi, Pb, Tlのs, p バンド・ギャップ。
- (iv) PbBi, PbSiのメルティングの効果と強い局所環境依存性。
- (v) AuSn, AgCuGeにおける構造安定化に伴うフェルミ・エネルギー近傍での状態密度の変化。

理論的には最近LMT0・スーパーセル法により液体金属の電子構造が計算されている。(Hafner et al) まず擬ポテンシャル法で作られた2体原子間ポテンシャルを用いたMDシミュレーションにより原子系を構成する。この系を用い、LMT0法で ab initio に電子構造を計算したものである。その意味で Car-Parrinello のMDシミュレーション法とは違うことに注意する必要はある。電子濃度とコンシスティントな Friedel Wavelength により2体ポテンシャルが決まっている。計算結果は、Oelhafenらの実験結果の多くを説明している。またParrinelloのグループでは Si, Ge, GaAs などの液体状態の計算が行なわれている。

最後に筆者のグループによる準結晶の電子構造の計算を紹介する。一般に準結晶では、フェルミ・エネルギー近傍に格子による強い電子散乱に起因する擬ギャップが存在し、それにより構造が安定化されていることを示す。その意味で、準結晶とそれに近い結晶との構造の違いはストイキオメトリーの違いに起因すると考えられる。同一物質の液体および（温度または組成変化による）アモルファス・準結晶・結晶の構造変化に伴う電子構造変化が期待される。分光実験が大いに待たれるところである。

## クラスターの電子状態

東大・理 塚田捷

クラスターは数10～数1000個の原子の塊りで、その大きさは原子・分子系と巨視的凝縮系の中間に有るが、その両者と異なる著しい性質を示す。例えば(1)系の安定性や物性が著しいサイズ依存性を示す。(2)凝縮系とは異なる独特の結合様式や電子状態が現れる。(3)非常に多くの準安定構造が存

在する。(4)長周期・大振幅の劇的な構造揺動が観察される。(5)連続スペクトル系と離散スペクトル系の中間にあり、これを反映して興味深い緩和効果や多電子効果が出現する。本講演ではSR光源による光電子分光や光誘起反応の実験が、クラスターの物性の解明にいかに重要であるかを中心に、クラスター研究の最近のトピックスを紹介した。

2, 8, 20, 40, …などという魔法数はアルカリ金属や貴金属(Cu, Ag, Au)クラスターの質量スペクトルで観察され、電子状態の殻構造によって説明されていた。最近、サイズを特定したクラスターの誘電率、光吸収、イオン化ポテンシャルが測定され、より詳細な殻構造の知見が得られ始めている。誘電率のサイズ依存性は上記の魔法数で極小を示し、理論とよく対応している。銅の負イオンクラスター  $Cu_N^-$  光電子分光のデータも、様々な電子状態の特徴を明らかにした。たとえば偶サイズクラスターではHOMO-LUMO 差が大きいのに、奇サイズクラスターではごく小さい。これは金属の準粒子的描像では説明できない効果であって、 $N \lesssim 100$ 個程度のクラスターの電子状態はバルクとは著しく異なることを意味している。 $Al_N^-$  クラスターイオンの光電子分光では、質量スペクトルにはそれ程明瞭でない魔法数サイズにおける閉殻構造の形成が、もっと直接的に現れている。

(G. Ganteför et al., Phys. Rev. B37 (1988) 2716)

Si や C など半導体クラスターでは、結合形態・電子状態などバルクと著しく異なることが予測される。サイズを特定した  $C_N^-$  クラスターの光電子分光は、その構造と電子状態の解明に決定的な手がかりをもたらした。すなわち、 $N \lesssim 11$ までは線形鎖構造を、 $11 \lesssim N \lesssim 30$ ではリング構造をとることが、価電子状態密度の特徴的なサイズ依存性から明らかになった。(Yang et al., Chem. Phys. Lett., 144 (1988) 431)

半導体クラスターの光誘起分解反応は、破片クラスターの大きさ分布に著しい特徴を示した。すなわち  $C_N^+$  クラスターでは  $C_3$  クラスターの生成確率が、 $Si_N^+$  クラスターでは  $Si_6^+$  や  $Si_{10}^+$  クラスターの生成確率が大きい。このような分解過程のメカニズムは、これから興味ある問題であろう。化合物や合金クラスターの構造と物性もバルクと異なる面白い問題であるが、その解明についても SR光源による電子状態や EXAFS などの研究が重要な情報をもたらすと思われる。

### 原子・分子の光吸収スペクトル

K E K • P F 伊藤 健二

光吸収スペクトルは古くから物質の構造を解明する方法として用いられてきている。ところで、物質の光吸収を原子・分子の立場から研究を行う原子分子分光学では、シンクロトロン放射光(SR)の登場以来、電子遷移が伴う真空紫外領域の研究に重点がおかれていている。さて、光吸収スペクトルの測定によって得られる生のデータは、吸収係数(吸収断面積)と吸収線の波長(エネルギー準位)であるが、低分解能分光と高分解能分光(分解能10万以上)とでは目的の狙いに微妙な違い

がある。従って、以下ではこの二つを分けた上で、その動向を述べてみる。

低分解能分光の長所は、広い波長範囲の吸収をグローバルにみることができる点であり、主として、吸収係数（吸収断面積）を求めることを目的としている。低分解能測定の大きな興味は、

$$S(p) = \frac{(4\pi a_0 / \alpha_0)^p}{\pi \alpha_0^2} \int_0^{\lambda_0} \frac{\sigma(\lambda)}{\lambda^{2+p}} d\lambda$$

で定義される  $S(0)$ ，  $S(-1)$  及び  $S(-2)$  である。ここで、 $a_0$  はボーア半径、 $\alpha_0$  は微細構造定数、 $\sigma(\lambda)$  は波長  $\lambda$  における吸収断面積を表す。理論的には、これらの量はそれぞれ原子（分子）の全電子数、イオン化の遷移行列、及び分極率と簡単な関係で結ばれている。SRの登場により、従来の放電光源では困難であった60nm以下の測定が行われ、精度の高い  $S(P)$  が求められてきている。

さて、吸収断面積の代わりに振動子強度  $f$  を用いると、

$$\int \frac{df}{d\nu} d\nu = N$$

の関係が得られる。ここで  $\nu$  は振動数、 $N$  は全電子数である。吸収断面積則ち振動子強度分布を精度よく測定することの他に、PFにおいては有機分子異性体間の分布の系統的測定が行われている。

高分解能分光では、専ら放電光源が用いられてきており、SRによる測定は1980年以降に始めた。光源強度の増大に伴い、最近では10万以上の分解能での断面積測定が行われている。理論との比較では、エネルギー準位に留まっていたが、強度的観点が加わり、理論に一層の精度が要求されている。SRと高分解能分光器の組合せでは、100nm 近辺で分解能はせいぜい60-70万が極限になるであろう。これを越えるものとしては、110nm 以上の波長領域に限られるがフーリエ変換分光が挙げられる。マイケルソン干渉計に石英製半透明鏡を用い、180nm で約 200万の分解能が得られている。更にMgF<sub>2</sub>製半透明鏡を用いより短波長の測定が計画されている。

高分解能測定で注目されるのは、真空紫外領域でのレーザーである。現在、レーザーの安定性からイオン電流の測定が主であり、装置幅もせいぜい 1 cm<sup>-1</sup> 程度である。しかし、将来はCW発振の可能性を考慮すると、0.01cm<sup>-1</sup>の装置幅での吸収スペクトル測定が可能となるであろう。ところで、装置幅 1.2cm<sup>-1</sup> の真空紫外レーザーを用い、Xeの自動イオン化領域のStark スペクトルが報告されているが、これは、原子・分子の光イオン化しきい値領域の高分解能分光の今後の指針を与えると考えられる。

気体の分光-光イオン化質量分析法による内殻励起状態のダイナミクスの研究-  
(4d → εf 巨大共鳴領域における希土類原子の多重イオン化)

東北大・科研 佐藤 幸紀

光吸収によって内殻電子の励起・電離状態におかれた原子（気体中の孤立電子）がたどる自動崩壊過程（電子緩和過程）には電子相関の様々な様相が含まれているが、その中でも重要なのはオージェ過程を中心とする自動イオン化過程である。深い内殻準位から電子が励起された場合には一連の段階的な自動イオン化やシェイク・オフ効果の結果、原子から複数個の電子が放出されて多価イオンが生成する。そこで、一価あるいは多価イオンの生成を入射励起光の波長の関数として観測すると、内殻励起状態の電子相関に関する貴重な情報が得られる。この方法（PIS；Photoion Spectroscopy）は、光電子分光法やオージェ電子分光法と相補的な役割を果たす有力な分光法である。

我々は高工研P.F.の放射光を励起光源とし、飛行時間型質量分析器を用いたPIS法によって、一連の金属原子（アルカリ原子、アルカリ土類原子、希土類原子）および希ガス原子を対象にして、その内殻励起に引き続く一価および多価イオン生成の機構を研究している。

本研究会では、Xe, Cs, Ba, Sm, Eu, およびYb原子の4d → εf 巨大共鳴を励起した場合のイオン生成に関して、次のような観測結果について議論する。

- 1)これらの原子の4d → εf 巨大共鳴領域においては一価から四価までのイオンが成長するが、各イオンの光生成断面積の励起光波長に対する依存はそれぞれ異なっている。
- 2) Xe, Cs, Baにおいては二価以上の多価イオン生成が主であるが、Sm, Eu, Ybにおいては一価イオンの生成が主である。
- 3) 4d → εf 巨大共鳴は、Xe, Cs, Baにおける形状共鳴的性格から、SmおよびEuにおけるFano型共鳴へ移行するが、後者のFano型共鳴は、一価イオンの生成においてのみ出現する。
- 4)以上のこととは、SmとEuにおいては、4f波動関数の「collapse」が進んでいるために4f電子と4d-holeとの再結合が強くなり、従って4d → εf 巨大共鳴の崩壊が(4d-4f, 4f)共鳴オージェ型崩壊に支配されているためであると解釈される。
- 5) Ybにおいては、4d → εf 巨大共鳴は形成されず、4f電子の直接の光イオン化による一価イオンの生成が支配的である。

今後の研究においては、光生成イオンと光電子・オージェ電子とのコインシデンス測定の方法を発展させることが必要であり、それには高輝度放射光の利用が不可欠である。

### d電子系と共に鳴励起

阪大・理 五十嵐 潤一

共鳴光電子放出(RPE)は、入射光エネルギーが内殻励起に対応するエネルギーに近づくと光電子が共鳴的に増大する現象で、局所的励起状態の有用な情報が得られるため、多くの実験がなされている。はじめに、絶縁体におけるRPEを、二バンド・ハバード模型に基づき、弱相関から強相関まで統一的に記述する理論について議論する。〔1〕特に、三体束縛状態の形成と強相関系の記述によく用いられる不純物アンダーソン模型の妥当性を議論する。

次に、強相関系に属すると思われる、銅ハライド、 $\text{La}_2\text{CuO}_4$ について、不純物模型に基づいてくわしい計算を行ったので、その結果を議論する。〔2,3〕この計算の特徴は、種々の遷移行列要素(コスター・クローニヒ遷移を含む)を、パラメータとしてではなく、Herman-Skillmanポテンシャルに基づく原子での計算により求め、スペクトルの計算に用いている点にある。銅ハライド系においては、ハライドの種類によるスペクトル形状の違い等、石井等の実験結果〔4〕をよく説明することができた。また  $\text{La}_2\text{CuO}_4$ に対しても、サテライトの共鳴増大の様子をうまく説明する。

議論を銅化合物に限ったが、Ni系、Fe系に対してRPEの実験は数多くなされている。この種の計算を行ない実験と比較することは、不純物模型の妥当性ともからんで、今後の問題である。

〔1〕 J. Igarashi : J. Phys. Soc. Jpn. 54(1985)2762 ; 57(1988)4066(Erratum)

〔2〕 J. Igarashi : J. Phys. Soc. Jpn. 59(1990)348

〔3〕 J. Igarashi : submitted to J. Phys. Soc. Jpn.

〔4〕 T. Ishii et al. : Phys. Rev. B33(1986)5664

### f電子系と重いフェルミ粒子

東大・理 藤森 淳

4f電子・5f電子系の電子状態の研究の現状を、放射光を用いた実験、とくに光電子分光の立場から概観した。

Ce・Yb化合物のf電子状態の单一不純物的な側面については、理論的にアンダーソン・モデルを用いて、高エネルギー(サテライト構造)から低エネルギー(フェルミ準位からkT以内)領域まで統一的に解明されており、実験結果もこれを支持するものが得られている。一方、Sm・Eu・Tmを含む価数振動物質は、f電子スペクトルが多重項構造を示し、これによってフェルミ準位近傍の電子状態がどう影響されているのかは、まだ明らかでなく、今後の研究課題となるであろう。

fイオン間の相互作用まで考慮に入れた電子状態は、現在未解決の問題である。f電子と伝導電子との混成を媒介にしたfバンド、あるいは重いフェルミ粒子の形成については、光電子分光から

は、はっきりした情報は得られていない。例えば、 $\text{CeRh}_3\text{B}_2$ について、最近接Ce原子間のf軌道の重なりの重要性(fバンドの形成、巨大な結晶場)が指摘されているが、光電子スペクトルは单一Ce不純物の範囲内で解釈可能である。f電子がf軌道の重なりによって  $m_f = 0$  の基底状態に落ち込んでいるという説に対しては、 $\text{Ce } 4d \rightarrow 4d$  内殻吸収スペクトルの多重項構造の解析が有効であるかもしれない。

单一不純物モデルがよいのか、バンド・モデルがよいのか議論のあったU化合物の光電子及び逆光電子スペクトルについては、現在、前者のモデルが(0.5eV程度のエネルギー分解能でみれば)優勢である。5fイオン間の相互作用は、より低いエネルギー・スケールでフェルミ準位近傍のスペクトルに反映されているのであろう。但し、最近の高分解能光電子分光(分解能20meV以下)の結果は、Ce化合物にみられた様な近藤ピークに関連した微細構造は示しておらず、異常な物性との関連は明らかにされていない。

光電子分光の分解能の限界は10meV程度と思われ、さらに低エネルギー・スケールでの電子状態の研究には遠赤外分光が威力を発揮する。価数揺動物質・重いフェルミ粒子系の遠赤外スペクトルの特徴は、狭いfバンド間の遷移によると思われる構造と、温度やエネルギーで質量が大きく変化する自由キャリヤー吸収であり、両方ともfバンドの本質的な性質を示しているものと思われる。ただし、光電子分光と赤外分光は相補的なもので、両者を組み合わせることによって、電子状態の統一的な描像が得られる。

### 高溫超伝導体の電子状態

東北大・理 小谷章雄

酸化物高温超伝導体のXPS、XASおよびXESについて、主な実験データとその解析から得られる電子状態の知見を紹介し、また、シンクロトロン放射光による分光研究上、興味のある新しい現象の予言を行う。

Cu 2p-XPSの実験ではメインピークとサテライトが観測されているが、これらを不純物アンダーソン模型を用いて解析することにより、電子状態を特徴づける電荷移動エネルギー、混成相互作用強度等の物理量が推定できる。また、サテライトの形状は、原子内のクーロン・交換相互作用と原子間の混成相互作用の間の微妙なバランスによって決まっていて、混成相互作用の異方性の効果を強く反映する。通常、XPSに関する内殻電子と光電子は異方性を持たないので、XPSには入射X線の偏光方向依存性は現れないものと考えられている。しかし、高温超伝導体のように異方性の強い物質では、上記の混成相互作用の異方性がサテライトの形状に反映されるために、偏光依存性が期待される。特に、Cu 3p-XPSを $3p \rightarrow \epsilon d$ 励起のケーパー・ミニマム近傍の入射X線エネルギーで観測すればサテライトが顕著な偏光依存性を示す筈であることを予言する。

Cu 2p-XAS および O 1s-XAS の偏光特性は、ドープされた正孔の位置と波動関数についての直接的な一知見を与える。解析は、不純物アンダーソン模型、クラスター模型またはそれらを組み合わせた模型によって行う。その結果  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  では、正孔は各 2 次元  $\text{CuO}_2$  面と  $\text{CuO}$  面(1 次元鎖と頂点酸素)にはほぼ等量ドープされているものと推定される。また、Bi-Sr-Ca-Cu-O 系の Cu 2p-XAS で c 軸方向の偏光に対して観測されている異常な吸収強度は  $\text{CuO}_2$  面内でのひし形歪みを考慮することにより説明できる可能性がある。なお、これらのドープされた正孔がフェルミ液体状態にあるかどうかに関しては、価電子帯の角度分解 PES、BIS の高分解能実験が一つの鍵を握っている。

X 線発光スペクトル (XES) は、高輝度放射光源による新しい分光科学の一つの興味ある分野である。高温超伝導体の Cu 2p-XES の理論は、2 次光学過程として定式化され、不純物アンダーソン模型を用いて求められているが、更に、XPS-XES 同時測定、 $2p \rightarrow 3d$  共鳴励起における XES とその偏光特性等の実験が可能になることを期待したい。

## 半導体の光励起

広島大・理 谷 口 雅 樹

### [I] 半導体中の内殻励起子

- ・発光測定：内殻準位を励起すると shake up 過程により伝導帯の底に電子が励起される。この電子が励起子状態に捕獲されその状態から内殻準位に緩和する際に発光する。発光線の幅や強度は、内殻励起の寿命や envelope function のサイズを反映する。現在、電子線(3keV)を用いた研究が報告されているが、試料の昇温等実験上の問題が多い。

実験条件を単純化するために価電子と一番浅い内殻準位のみを励起しようとすると、VUV-SX 領域で強力で波長可変な励起源（アンジュレータ）が必要となる。

- ・精密光分光・光電子分光実験：いま、内殻励起子吸収線の幅を  $\Gamma$ 、内殻準位光電子スペクトルの幅を  $\gamma$  とした時、例えば Si 2p 内殻励起子の束縛エネルギーを 0.3eV として  $\gamma - \Gamma = 30 \sim 80 \text{ meV}$  が見積られている。励起された内殻ホールのオージェ過程による寿命が、ホールの周りに電子軌道がある場合とない場合で異なるためとされている。もしこのオーダーが適当だとすると約 30 meV 程度の分解能で吸収スペクトルと光電子スペクトルを測定する事により  $\gamma - \Gamma$  を評価する事が出来るであろう。

研究対象として層状半導体 GeS, GeSe, SnS, SnSe 中の cation 内殻励起子や III-V 化合物半導体(110) 表面内殻励起子が考えられる。

### [II] 磁性半導体の電子帯構造

- ・スピニ偏極光電子分光実験：アンジュレータを用いて従来より高分解能の実験を行う。これまで、Fe 等単体の強磁性体でキューリー温度が高く、磁化が容易な物質のみが研究対象となっている。

低温(10K), 剥開, 磁化( $\sim 2$  T)の操作を可能にする事により対象物質を拡大する必要がある。層間化合物  $M_xTiS_2$  ( $M=V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni : 0 \leq x \leq 0.5$ ), 例えば  $Fe_{0.33}TiS_2$  は 50K 以下で強磁性, 4.2K, 2T で磁化が飽和する。層状構造を持つため剥開は非常に簡単である。

### [III] 遠赤外域での研究

・パルス性の利用: 遠赤外域で連続スペクトル分布を持つナノ秒程度のパルス光源は放射光を除いて他にはない。パルス光の性質を有効利用するために, GeやSi中の  $D^-$  を用いた高感度超高速検知器(エネルギー範囲: 0.5-30meV, 感度:  $10^{-12} \sim 10^{-13} W/\sqrt{Hz}$ , 応答速度:  $10^{-9}$  sec)の実用化を行う。この開発自体が深い捕獲中心の励起・緩和過程を調べる新しい研究となる。遠赤外で時間構造の関与する研究分野は暗黒大陸の状態にある。

## アルカリハライドの発光と励起緩和・光化学

分子研, 福井大工\* 渡辺誠, 中川英之\*

分子研UVSOR に於けるアルカリハライド(A. H.)関係の最近の研究について述べる。

### 1) A. H. 結晶の自己束縛励起子(STE) 発光<sup>1)</sup>

A. H. のSTE 発光は従来寿命の短い  $\sigma$  と長寿命の  $\pi$  に分類され夫々スピニ重項(S), 三重項(T)が始状態であるとされてきた。SRパルス(0.4 ns)を用いて紫外光選択励起による NaCl, KBr, RbBr, KI, RbI系での  $\sigma$  の寿命を確定し, 又従来  $\pi$  とされてきた NaBr, NaIの発光に短寿命成分(夫々 1.5, 1.0ns)の存在を確認した。(図1) 更に, 従来  $\sigma$  とされてきた発光にも長寿命成分が観測されている。これらの結果は “ $V_K + e^-$ ” 型のSTEモデルに電荷分離型のoff 中心モデル導入しSTE 発光を分類し直すことにより説明される。

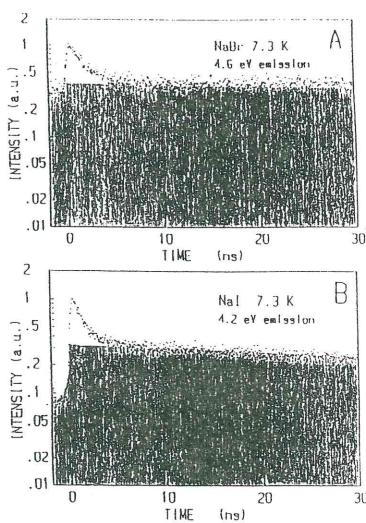


図 1

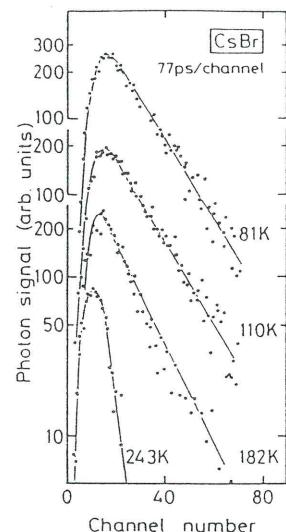


図 2

2) Auger-Free発光<sup>2)</sup>

価電子帯・伝導帯間エネルギー( $E_g$ )より価電子帯・内殻間エネルギー( $E_{vc}$ )が小さい系では価電子帯から内殻への電子遷移に伴う発光(Auger-Free, AF発光)が観測される。A. H. では CsBr, CsCl, CsF, RbF, KFがこの系になる。極紫外SRを用いてこれらの系でのAF発光, 励起スペクトル及び寿命の測定がされ ① AF 発光は内殻から伝導帯への帯間遷移の結果生ずる, ② 寿命は数ns以下, ③400Kまで熱的安定, ④発光エネルギーはバンド間エネルギー, バンド幅できるが正孔の格子緩和も問題になる等が判明した。温度上昇による  $E_g$  減少で部分的に Auger過程が生ずることによる寿命の変化を図2に示す。

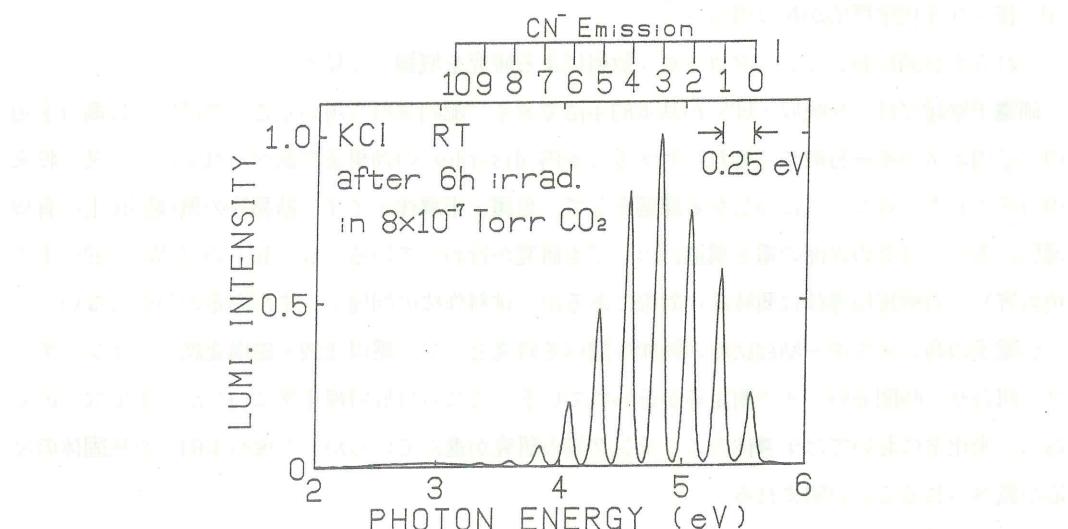


図3

3) 結晶表面層でのCN- の光生成<sup>3, 4)</sup>

Undulator 光照射による雰囲気ガス( $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $CH_4$ )からA. H. 結晶(RbCl, KCl, NaCl)表面層への CN- 生成実験の結果、生成過程は①ガス中での光解離・合成、②結晶表面での光(酸化還元)反応からなることが判った。表面 CN- 中心の発光スペクトル(図3)、強度・寿命の温度依存性は CN- が結晶表面層内に生成されていることを示している。こうした極紫外光化学反応過程の解明は、多様な気体分子の光解離、結晶表面での光脱離の研究と相俟って表面分子制御への道を開くものと考えられる。

1) K. Kan'no et al. : Proc. 9th VUV (1989) (Physica Scripta)

2) 伊藤稔：放射光 Vol. 2, No.3 (1989) 41

3) H. Nakagawa et al. : J. Phys. Soc. Jpn. 58 (1989) 2605

4) M. Watanabe et al. : Proc. 9th VUV (1989) (Physica Scripta)

## 有機固体の電子状態

広島大・理 関 一彦

有機固体の特徴として次の様な事が挙げられる。

- (1) 原子→分子→固体という階層的秩序がある。
- (2) 異方性が大きく、配向試料と偏光の組合せにより電子状態についての詳細な知見が得られる。  
逆に電子状態の分っている物では偏光依存性から配向を調べられる。
- (3) 原子→分子の段階ではかなり設計・合成が可能である。
- (4) 様々な光化学反応が起り得る。

これらを念頭においてシンクロトロン放射による研究を概観して見る。

価電子励起では、光吸収・UPS が基本的手法である。配向試料を用いることでUPS では高分子鎖の分子内エネルギー分散や、それに対する分子内 disorder の効果まで調べられている。又、将来の分子エレクトロニクスにつながる課題として、金属・半導体・イオン結晶等の無機固体上の有機薄膜、あるいはその界面の電子構造についても研究が行われている(Ag, Au上の TCNQ, AgBr 上の色素等)。有機超伝導体は興味深い対象であるが、試料作成の問題からまだ測定の報告はない。

価電子の高エネルギー励起状態の緩和を調べる研究として、電場変調・磁場変調とコインシデンスの組合せ、時間分解ケイ光測定等が行われている。これらは放射線化学につながる重要なものである。光化学においては半導体のエッチング等の研究が進んでいるが、今後基本的な有機固体の反応が調べられることが望まれる。

一方、内殻励起領域では近年の進歩が大きい。XANES が多くの有機分子について研究され、シンクロトロン放射の偏光性を活かして吸着分子の配向研究に用いられているが、有機固体でも配向試料を用いることで電子状態の帰属に役立つと共にLB膜、金属上のTCNQなど種々の系の分子配向の研究が行われている。また、XANES の構造は必ずしも空準位の状態密度とは一対一対応せず、内殻空孔生成の効果を示しており、これ自体が興味深い研究対象である。XPS の分野ではNSLSのドラゴン分光器を用いて巾 0.25eV の CISピークがグラファイトについて得られており、共鳴エネルギー準位等への励起の可能性と併せて今後の発展が期待される。

では新型光源では何ができるであろうか。まず、高輝度を活かして、従来強度の問題のあった吸着種、超薄膜での測定、光化学反応、発光等の測定が容易になる。また、小さな単結晶しか得られない有機超伝導体等の測定にも可能性が出てこよう。また、高輝度に伴う高分解能の可能性を活かすことにより、高分解能内殻励起、共鳴を含めた高分解能 XPS等が行なえる。この際ハードウェアに望みたいのは、アンジュレータの波長を頻繁に、かつ自由に変えられるようにして欲しいということである。有機分子では1分子の内にC, N, O, S, Clなど多くの元素を含むものがあるのである。また、有機物は試料作成室と測定室を分離し、試料室をクリーニングさえすれば系を汚すも

のではない。多くの興味深い有機物に門戸を広く開いていただきたい。

## 希土類化合物における価数混合と内殻励起スペクトル

阪大・理 城 健 男

内殻電子を光励起する光電子放出(XPS)・光吸収(XAS)等の高エネルギー分光が、希土類化合物の4f電子状態を明らかにする上で、重要な役割を果す事はよく知られている。現在まで、Ce化合物を中心とする系に対し、不純物アンダーソン模型に基づき、スペクトルの出現機構の解明、その解析による多くの化合物の4f状態に関する情報の読み取りが行われてきた。これにより、4f軌道と価電子帯(或いは伝導帯)の状態間の混成が4f電子状態に及ぼす影響が明らかになりつつある。一方、混成を無視した「原子」のスペクトルに対しては、古くから電子間相互作用に由来する多重項構造の計算がなされていた。しかし原子の多重項の計算とアンダーソン模型を統一した取扱いにより初めて解明が期待できる現象が多数存在するにもかかわらず、それらは放置されていた。ここでは、両者を統一的に取扱う事により、固体中の電子状態を特定する「指紋」とも言うべきスペクトルの多重項構造を武器として行ったLa・Ce化合物の3d・4d内殻XPS・XAS、強磁性体のXASで期待できる円二色性の理論研究を紹介する。

### 1) 内殻XPS・XASにおける多重項構造と混成<sup>1)</sup>

La, Ceの3d・4d内殻XPSの終状態で、スペクトルに寄与するのは  $d^9 f^0$ ,  $d^9 f^1 v$ ,  $d^9 f^2 v^2$ (vは価電帯の正孔を表わす)配置である。3d XPSの場合、多重項構造のエネルギー幅は、 $d^9 f^1 v$ に対しては4~5 eV,  $d^9 f^2 v^2$ に対しては7~8 eVである。La化合物の3d XPSの計算の結果、 $d^9 f^0$ と $d^9 f^1 v$ の間の混成により両者の結合・反結合状態のみが主にスペクトルに寄与し、多重項を無視した解析がある程度成功した理由が導き出せる。Ce化合物のうちCeO<sub>2</sub>についても、 $d^9 f^1 v^2$ と $d^9 f^2 v^2$ の間の強い混成により、多重項構造が目立たなくなる領域を見い出した。一方4d XPSはLa, Ce化合物共に、多重項構造のエネルギー幅は大きく、この方法により初めて3d XPSの解析とコンシスティントな解析が可能となる事を確かめた。XASについては文献<sup>1)</sup>に譲る。

### 2) 強磁性体における軟X線領域での磁気円二色性<sup>2)</sup>

内殻XASの線二色性がTbIGで観測され、一方X線領域での円二色性がFeの1s XAS、Fe中のPt 2p XASで観測されている。まだ観測されていないが関心が寄せられている軟X線領域での円二色性の利点は i)スペクトルの複雑な多重項構造が占有軌道の対称性の破れを敏感に反映する事 ii)内殻正孔の強いスピントラック相互作用により、スピントラックの対称性の破れも二色性に大きく寄与するという事である。全希土類元素原子に対し、微小磁場下の基底状態で期待できる円二色性を3d・4d XASで調べ、上記の利点 i), ii)を確認した。又、顕著な円二色性は、混成が存在しても見られる事、対称性の破れ方に敏感である事をCe化合物について示した。

- 1) 城健男, 今田真 :日本物理学会誌44巻, (1989)584  
S. Imada and T. Jo : J. Phys. Soc. Jpn. 58 (1989) 2665
- 2) T. Jo and S. Imada : J. Phys. Soc. Jpn. 58 (1989)1922 ; J. Phys. Soc. Jpn. 59 (1990) No.4  
に掲載予定

## P Fにおける円偏光ビームラインの建設の現状と利用研究計画

KEK・PF 宮原恒昱

PFのBL28およびARのNE1は、山本、北村らによって設計・建設された、円偏光発生用のヘリカル・アンジュレータ／多極ウィグラーからの放射を利用するビームラインである。BL28は300eV以下、ARのNE1は240～1500eVをカバーする分光器が設置されており、後者はすでに試運転を完了し、アンジュレータスペクトルの測定値と計算値とのよい一致が確認されている。

山本・北村円偏光アンジュレータ／多極ウィグラー（以下、YKUWと省す）の特長の一つは、 $K_x$ と $K_y$ がかなり広範囲に可変であって、ミラーの熱負荷の問題さえ解決すれば、多極ウィグラーに近い運転モードで安定した円偏光を供給できる点にある。実際に、ARのNE1のX線ラインで経験されているように、 $K_x$ 、 $K_y$ が1に比べてはるかに大きい場合（実際には $K_x \leq 3$ 、 $K_y \leq 15$ という制限はある）は、ビームのCODのわずかな変化に対して、円偏光度はあまり影響を受けない。その意味ではBL28でもなるべくK値を大きくして用いるべきであるが、現状では第一ミラーの熱変形を許容範囲におさえるべく、 $K_x \leq 3$ 、 $K_y \leq 7.5$ という条件で運転している。この時のミラーの最大熱負荷は300mAの蓄積電流に対して約500Wである。

しかしながら、実験によっては比較的小さいK値で単色性をよくして用いる場合がありその場合はYKUWのギャップを開閉した時のCODの変化をいかに小さくおさえるかが重要な問題になる。

円偏光度の測定はそれ自身が一つの重要テーマとなるほど難しい問題である。しかし100eV程度以下では多層膜鏡面を用いた偏光子が試作され、それを用いたストークス・パラメターの決定がかなりの高精度でなされているので、BL28の偏光度測定には利用できそうである。

そのほか、双極子遷移の範囲内で円二色性が生ずるためには、

- ①構造がらせん的になっているか
- ②電子軌道が磁気的に偏極（磁気量子数M\_Jの偏り）しているか

のどちらかの条件が必要である。後者の場合、スピンのみが偏極している場合でも、スピン軌道相互作用があれば、軌道もなにがしかの偏極を生ずることになる。

さらに、対象を磁気的に偏極させるには、

- a)別の単色円偏光源を用いて標的の特定の電子軌道を偏極させるか
- b)磁場をかける（磁化させる）

ことが必要である。前者の場合、うまく対象を選ぶと、系の波動関数によらず、対象性のみ（ラカーラー係数など）で円二色性が決ってしまうという利点がある。後者の場合は、磁場勾場を利用して  $M_J$  セレクターを利用しないとすれば、よほど低温・強磁場にしない限り、円二色性は系の波動関数にも依存するので、あらかじめ高精度な理論計算が要求される。逆に、系の電子状態を知りたいと思えば、通常の磁気円二色性の測定は利用価値が大きい。

### スピン偏極光電子分光実験

群馬大・教育 菅原英直

スピン偏極光電子分光実験では、従来の光電子分光法に加えて、光電子のスピン偏極度の測定も合せて行なう。その研究対象は磁性体の電子状態に関するものが主であるが、そのほかに固体及び薄膜の表面磁性の研究、Auger線のスピン偏極や光電子スペクトルに現われる低エネルギー二次電子のスピン偏極の問題などがある。照射光として円偏光を使えば、試料が非磁性体でも、円偏光に対する双極子遷移の選択則の結果、スピン軌道相互作用で分裂した特定のバンドから励起された電子を観測することができる。これは気体試料にもすでに応用されている。

光電子のスピン偏極度は、 $P = (N \uparrow - N \downarrow) / (N \uparrow + N \downarrow)$  によって決定される。ここで  $N \uparrow$  ( $N \downarrow$ ) は majority (minority) スピンをもつ電子数である。一般には、入射光エネルギー  $h\nu$  の関数として  $P(h\nu)$  を、または特定の  $h\nu$  で放出された光電子のエネルギー  $E$  の関数として  $P(E)$  が測定される。 $P(E)$  と同時に、光電子のスピンを分析しない通常のエネルギー分布  $N(E)$  も測定すれば、 $N(E) = N \uparrow(E) + N \downarrow(E)$  であるから、 $N \uparrow(E)$  と  $N \downarrow(E)$  を別々に決定することができる。 $P$ だけを測定しても、これは  $\uparrow$  スpin電子と  $\downarrow$  spin電子の状態密度の差の情報を含んでいるし、光電子がプローブする領域の磁化の強さに対する知識を与えることにもなる。このようなわけで、特定の  $h\nu$  で光電子を放出させ、外部磁場  $H$  の関数として  $P(H)$  を測ったり、温度  $T$  を変えて  $P(T)$  を観測して、試料の磁性を研究することができる。

$P(E)$  を測定するには、光電子のスピン偏極度を測定すると同時に、エネルギー分析も行なわねばならない。従って光電子の信号はかなり弱くなり、S/N比のよいデータが得にくく。そのためスピン偏極光電子分光がはじめてなされた頃は、スピン偏極した光電子の収量スペクトル  $P(h\nu)$  の測定が主であった。しかしその後、安定で強度の大きいシンクロトロン放射が使えるようになって、光電子のスピン分析、エネルギー分解、角度分解を同時に行う実験が可能になってきた。それでも最終の信号強度は十分とは言えず、最近ではアンジュレータ等の挿入型光源との併用が、西ドイツ、米国で進められている。東大物性研究所軌道放射物性研究施設でもスピン偏極光電子分光実験の計画が進められており、高エネルギー物理学研究所放射光実験施設の物性研究所ビームラインBL-19A (アンジュレータ使用) に装置が設置される。この装置は、-160~1000°Cの範囲で試

料温度を変えられるマニピュレータ, LEED/AUGER, CMA, イオン銃を備えた試料準備室, 光電子の角度分解可能な, 軌道半径40mmの半球型エネルギー分析器, 全電極数43個からなる輸送レンズ系, 100kV 加速管を含む, 電子スピン偏極度を測定するためのMott型電子スピン検出器から構成されている。現在この装置は, 高電圧部の昇圧テスト, 電子銃による分析器・レンズ系のテスト等が進められており, 来年度の比較的早い時期に, スピン偏極光電子が観測される予定である。

## 高 分 解 能 分 光 と X A N E S

宇都宮大・工学部 中井俊一

XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure) からは良く知られているように, 非占有バンドの電子状態についての情報が得られる。従って得られたスペクトルをバンド計算と対比して解決することが行われてきた。しかし吸収過程の終状態では内殻にホールが形成されるので, この内殻ホールが外殻電子の電子状態を変化させることが期待される。(いわゆる終状態効果) さらに3d遷移金属や4f希土類元素のスペクトルでは, 3dあるいは4f電子と内殻ホール間での多重項分裂が観測される。一方XANES の解釈には EXAFS(Extended X-ray Absorption Fine Structure)と同じ散乱問題の立場に立って解析する方法もある。ただこの場合, XANES の領域ではEXAFS 領域と異なり, 吸収原子から放出される光電子の運動エネルギーは小さいので, 光電子は吸収原子近傍の原子により多重散乱される。特に価電子により強く散乱されるので, XANES の解析から吸収原子近傍の原子の結合状態, 電子状態(電荷分布)についての情報が得られる。

次に高分解能でのXANES 測定が要求される例の1つとして, HT<sub>x</sub>物質の内殻吸収スペクトルを示す。La系, Bi系, Y系等酸化物 HT<sub>x</sub>物質の共通の特徴として, いずれも CuO<sub>2</sub>面を持つことが知られている。局所的に見るとCu原子はまわりを6コのO電子でかこまれた8面体配位をとっている。これらCuとO原子の結合状態はどうなっているのか, O site, Cu siteのホールの対称性はどうなっているのかを知ることは, いろいろな理論のモデルを検証する上で重要なことである。このような観点からFinkらはBi系についてO-Kの偏光測定をEELS(Electron Energy Loss Spectroscopy)で行い, ドープされたホールがO 2p<sub>x,y</sub>軌道に存在することを, またCu-L<sub>3</sub>の偏光測定から, ホールの一部は Cu3d<sub>x<sup>2</sup>-y<sup>2</sup></sub>軌道に更に Cu3d<sub>z<sup>2</sup>-r<sup>2</sup></sub>軌道にも約10%存在することを示している。同様のスペクトルはBianconiらもX線吸収の偏光実験から得ている。彼らは CuL<sub>3</sub>吸収ピークが E//a, bの場合に比しE//cでは強度が弱くなり低エネルギー側にシフトすること, さらにその強度比, エネルギーシフトがT<sub>c</sub>と関連することから, d-d励起を含むペアリングメカニズムを提案している。我々はこの結果を確認すべく, PFの10m斜入射分光器を用いて CuL<sub>3</sub>吸収の偏光実験を行った。その結果E//cスペクトルはE//a, bに比し約0.25eV低エネルギー側にシフトすることを確認した。この際の分解能は0.4eVであった。

従来は内殻準位の寿命中のため高分解能でスペクトルを測定してもあまり意味がないと言われてきていたが、上にあげた例のように、スペクトルに現れる多体効果を確認したり、HT。物質の偏光スペクトルの研究のような場合には、XANES測定でも分解能が0.1eV以下の高分解能が要求されることになる。高分解能での測定は必然的に強力な光源を必要とし、アンジュレータ光の利用が必要となる。アンジュレータ光の特性として基本波のピークでは100%の偏光特性を持ちかつ強度も一番強い。従って偏光実験を行うため、分光器の波長スキャンと連動してアンジュレータのギャップ駆動を行ない、基本波のピークで常に自動追尾するシステムを開発することが今後の課題である。

### 遠赤外とミリ波分光

東北大・科研 池沢 幹彦

遠赤外線からミリ波領域において、シンクロトロン放射光(SR)は、従来の光源であった高圧水銀灯からの黒体輻射より、輝度の点で優れているのは、今では広く知られているようになった。遠赤外・ミリ波では、現存のストーリジリングの発光点の寸法は、すでに波長程度である。これに由来する利点、わけても、微小光束で測定可能な利点は、ダイアモンド・アンヴィル・セルによる超高压下での分光研究等で、今後ますます利用されるであろう。微小光束の特性は、赤外域寄りの短波長では、回折の影響が少なくなるので、益々有効なものになる。また、高輝度なSRを光源とすれば良質な平行光束が得られるので、高精度の光学測定や、表面観測の場合に行われているような極端な斜入射測定にも、有用であろう。

SRのスペクトルの強度は、長波長域では、ほぼ波長の $1/3$ 乗に比例して減少する。このことから、長波長側には、検出器の種類によらず、測定限界がある。それより長波長側では、コヒーレントSRが有用になろう。ただし、この将来有望な光源については、その発生法のみならず、基礎的性質についても、今後更に、研究を要するのが現状である。

SRはサブナノ秒の、コヒーレントSRはピコ秒程度のパルス光である。従来の高分解・低速観測のみならず、低分解・高速観測にも利用されて良い。

今後の遠赤外・ミリ波の研究課題に、生物体なども加えて良いと思われる。但し、その際、これまでの、例えば微生物の増殖率に対するミリ波の影響の実験の研究のように、いきなり生命現象に直接迫ろうとするような大胆かつ荒々しい実験の前に、生物体の低エネルギーレベルの詳細な観測等の、基礎的研究の積み重ねをすべきであると思われる。

U C S B の F E L

神戸大・理 本 河 光 博

UCSB( カリフォルニア大サンタバーバラ校) のFEL(自由電子レーザー) は世界で只一つ実際に物理実験に供されている装置であり、建設のために相当の年月がかかったとはいえ現在それを用いた研究が活発に行われている。この装置の特性は、カバーするエネルギー域が $10\text{--}100\text{cm}^{-1}$ 、出力パワーは 1 kW peak、直線偏光でコヒーレント、パルス幅は $1.5\mu\text{ sec}$ で 0.3Hzの繰り返しである。また FEL からなる遠赤外光の振動数 $\omega$ は加速器の電圧変動によりパルス毎に若干ふらつくが、その偏差 $\delta\omega$ は $\delta\omega/\omega < 1 \times 10^{-3}$ であり、パルス一つのスペクトル幅 $\Delta\omega$ は $\Delta\omega/\omega \sim 10^{-7}$ である。FEL の波長可変という特徴を生かして吸収スペクトルをとることは可能であり、そのようなデータも報告されているが、6 MeV のバンデグラーフの加速電圧の調整だけでチューニングできる振動数範囲が 2 % であるので、広い範囲にわたってスペクトルをとるためには加速器、光学系共にチューニングを取り直しながら掃引しなければならない。これらはすべてコンピュータで制御されているが、回折格子を回転するだけでよい通常の分光よりはるかに複雑である。当初はディレクターであるジャッカリーノ教授の専門の磁性の研究に使われる計画が主であったが、実際に動いてみるとむしろ生物物理や半導体の研究に成果があがっているようである。

この FEL を用いて、価数搖動物質であり、半導体的性質を持つ SmB<sub>6</sub> を励起してその緩和を観測することを試みた。この物質はc-f 混合によるハイブリダイゼーションまたはウィグナー格子生成のためにフェルミエネルギーのところにギャップを持つ。その大きさに関して從来 $30\text{cm}^{-1}$ という説と $100\text{cm}^{-1}$ という説があったが、我々は遠赤外分光により  $100\text{cm}^{-1}$  と結合づけ、 $30\text{cm}^{-1}$  と  $100\text{cm}^{-1}$  の間の吸収は不純物によるものと考えている。このような系で下の準位から上のバンドに励起して電気抵抗の変化から緩和の様子を見るのは面白いのではないかと思いその実験を行った。またこのFEL がどの様にオペレートされ、どの程度使い易いかを見るのも目的であった。最初は  $100\text{cm}^{-1}$  以上のエネルギーでギャップ間の遷移について調べたかったが、利用できるエネルギーが $50\text{cm}^{-1}$ だけであったので結局不純物準位からの遷移を見ることになった。利用できた最大パワーは 1.3kW、パルス幅は  $1.2\mu\text{ sec}$  で、そのときには完全に試料はヒートアップし熱的な緩和しか見られなかった。パワーを落としてゆくと抵抗はレーザーパルスの後 2 段の指數関数的に msec のオーダーで減衰するのがみられ、短時間のものは本質的なものではないかと思われた。

実験室、マンパワーとも充実しており、プロポーザルさえあれば日本からのユーザーも大歓迎のことである。

## 高輝度放射光による超高压遠赤外分光研究の展望

神戸大・理 難波 孝夫

一般に、GPa領域の圧力を発生するにはダイヤモンド・アンビル・セルを使用することが要求される。ダイヤモンドが光に対して透明な領域はX線、可視・紫外・遠赤外の3つの領域に大別されるが、前の2つの領域では既に100GPaの圧力下での分光研究が実施されている。問題は赤外・遠赤外領域である。この波長領域では利用できる高輝度光源が無いことや波長がアンビルを構成するガスケットの口径に近づくため圧力セル中で生ずる回折効果によって著しく光量が減衰するという本質的な問題もあって通常発生できる圧力は10GPa以下に制限されている。この到達圧力を数10GPaに高めるにはダイヤモンドのアンビル面を小さくすること。このことによって生ずる光量減衰を補うため高輝度な赤外光源を採用することである。これにふさわしい光源は放射光であろう。

長波長（赤外、遠赤外、ミリ波）域では“第一世代的”な利用形態をとっているが高圧力下の遠赤外分光への放射光の利用が分子科学研究所のUVSORで行われ、絶縁体の圧力誘起構造相転移の研究等が実施されている。しかし、文字どおり、数10GPa下での遠赤外分光を行うためには更に長波長域での放射光の高輝度化をはからねばならない。長波長域での放射光の高輝度化をはかるのに最も容易な方法は電子蓄積リングの一部に従来のものよりその曲率半径を1桁程度大きくした偏向電磁石部を設置することと思われる。これにより得られる高輝度放射光により、10GPaを越えた圧力下での赤外・遠赤外分光が可能と期待できる。その場合には、より高圧力が要求される研究、例えばある種の磁性化合物が発現するフェルミ準位での微小エネルギーギャップの形成機構等の解明にも遠赤外分光法が有力な手段になると思われる。

## 入射波形の影響によるパルス光の利用

分子研 三谷 洋興

SORが周期性をもつ速いパルス光（パルス幅；数百ピコ秒）であることを重要視して、いま一度SORを見直すと、SORの優れたSORの性質をさらに有効に活用することができるであろう。SORを時間分解蛍光測定用の光源としての利用する方法の他に、SORとパルスレーザーを同期させ、レーザーの強いピーク・パワーとSORの広いエネルギー分布の特徴を利用した強励起下での過渡分光測定法は注目に値する（図1参照）。この方式では、SORのもつ小さい光源スポット・サイズといき指向性、つまりSORを試料面で小さなスポット・サイズに集光できることを基本としていることに注意しておく必要がある。この測定技術は光学反射、吸収測定法のみならず光電子分光法にも適用できる可能性がある。このような測定法において、SORを他の光源と比較して見た場合、赤外や遠赤外光領域あるいはX線領域ではこれに代わるものはない。ただ、赤外、遠赤外領域では、その光

強度は必ずしも充分ではなく、検出器等の測定技術の改良が要求される。現在、分子科学研究所では、FTIR分光法の導入等の工夫が進行中である。

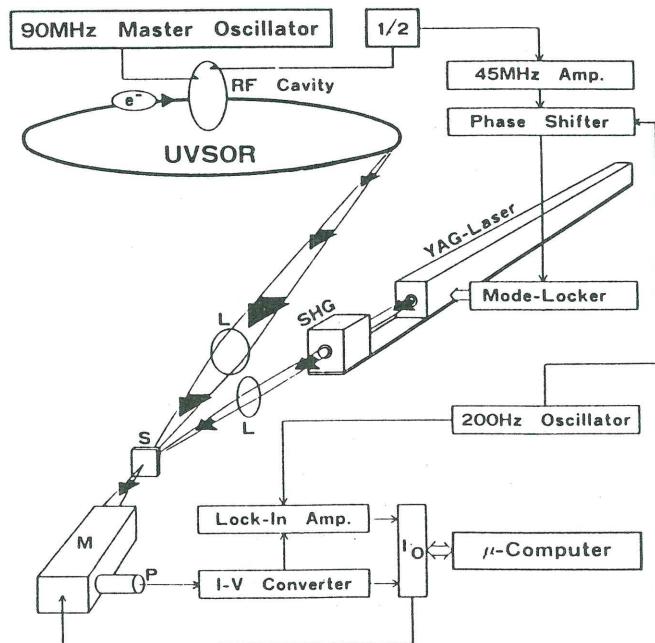


図1 レーザー励起過渡光吸収測定

#### アンジュレータ放射利用の問題点

東大・物性研 柿崎明人

東北大・理 鈴木章二, 佐藤繁

アンジュレータは、光速に近いスピードで運動している電子あるいは陽電子を周期磁場中で蛇行させ、それによって指向性のすぐれたシンクロトロン放射を得ようとして開発された挿入型光源である。とくに、磁場の強さと蛇行の周期を変えることによって、光子エネルギーを自由に選べる準単色光源となることも可能で、次世代の真空紫外高輝度光源の主流をなすといわれている。アンジュレータ放射は、すぐれた指向性のために、照射される光学素子の面積も小さく、従来以上に高分解能である光学系を作ることも期待できるほかに、分光系とアンジュレータの磁場の強さ（実際には磁極間距離）を同期させることにより、広い光子エネルギー領域で強度の大きい真空紫外光を利用できると考えられる。

一方、指向性がいいために、シンクロトロン放射に含まれる不要な熱負荷が光学素子の狭い領域に集中し、光学素子の熱膨張による分解能の劣化、強度の減少も大きく、素子の破壊もおこりうる。

また、分光系とアンジュレータの磁極間距離を同時に動かすためには、光源加速器の他の部分への影響を最小限にしなくてはならないなど、アンジュレータ放射を利用する上での問題も多い。

高エネルギー研フォトンファクトリーBL-19アンジュレータビームラインの性能評価を行った結果をもとに、問題点と解決法をさぐる。BL-19の性能評価の結果、アンジュレータ放射が指向性にきわめてすぐれていること、磁極間距離を変えることによって強度の大きい真空紫外光を広い光子エネルギー範囲に渡ってほぼ連続的に得ることが可能であることがわかった。しかし、熱負荷の光学系に及ぼす影響は予想以上に大きく、光子素子を熱膨張率が小さく、熱伝導率の大きい素材のものに見える必要があること、今後さらに高い分解能を得るために、光学系に対するPF-RING のビーム変動の影響を小さくしなくてはならないことが明らかになった。

放射光を利用するためのビームラインの問題点について述べる。ビームラインの優劣は単に分光器本体のみの性能だけではなく、光源から試料面に至るすべての集光系、分光系の適否にかかっている。先ず、強力な光を最初に受ける安定した材質の鏡を選択し、さらに集光系を出来るだけ収差の小さいものとすることによって、分光器の性能が十分引き出せる。これらのことと検討する一つの例として物性研がPFに建設したBL-18Aをとり上げる。

このビームラインは前置集光系として水平、垂直2つの方向の集光を別々の鏡で行ない、分光器の入射スリットにはほぼ点になるように集束させた。分光方式は定偏角分光器で、入射スリットと回折格子との距離を変え、固定した出射スリット上で最適の像を得るようにしている。エネルギー範囲 7eV～250eV の間を4格の回折格子を変えカバーする。又角度分解光電子分光に用いるため、試料上での光のスポットを1 $\phi$ 以下におさえた。

現在、このビームラインの評価を行っている。金の光電子収量スペクトルから見積ると試料上の光子数は $3 \sim 5 \times 10^{10}$  photons/secとなる。光源から受ける全光子数が $3 \sim 5 \times 10^{13}$  photons/secなので、このビームラインの効率は約1/1000である。鏡の反射ロスやレイトレースによる幾何学的スループットを考えるとこの分光器の回折格子効率は2%となる。0次光で見た試料上での光の大きさは0.8 $\phi$ であり、全波長域で1 $\phi$ 以下になっている。この光で角度分解光電子分光を行ったが、He放電管とほぼ同じ強度が得られ、分解能も計算通りの値になっている。

### 自由電子レーザー

電総研 山寄 鉄夫

相対論的に加速された電子ビームを周期的な磁場で蛇行させて、共に走る光との相互作用を誘起すると、ミクロな領域での電子のバンチングが強まり、光を增幅させ得る。このコヒーレントな出力光、自由電子レーザー (free electron laser, FEL) は、波長可変性、高いピーク・パワー、高効率、短波長化の可能性等により、次世代のレーザーとして期待されており、現在では広い波長域

にわたって非常に多数のFEL計画がある。

FELにおいては、アンジュレータ、加速器、光共振器が3大要素技術であり、これらのどれもある水準以上でなくてはならない。

アンジュレータとしては、最近は高磁場が得易く、フレキシビリティの大きな平面アンジュレータが多用されており、中でも小型で強い磁場が得られる永久磁石アンジュレータは至るところで使われるようになった。効率を上げるために匀配付、電子のバンチングを強める光クライストロン、磁場強度を稼ぐためのハイブリッド型、目的に適合させるための複合型等、種々の工夫がなされている。光ガイディングの発見により、長いアンジュレータも可能になったようである。

発振型 FELでは光共振器が重要で、特に低ゲインの場合は共振器損失がそれを下回る必要がある。可視域では現在1枚当たりの損失 40ppm程度のミラーが得られているが、誘電体多層膜ミラーは高調波の紫外光による損傷が激しいので注意を要する。より短波長域では60nmの光に対して反射率約40%程度が現状である。逆に大出力FELの場合は、熱によるミラーの損傷が問題になり、斜入射リング光共振器等が考案されている。

FEL一般に電子ビームには大電流、小エネルギー幅、低エミッタンスが要求されるが、これら全てを満たすことは困難で、ある程度妥協を強いられる。蓄積リング、良質な高エネルギービームが得られるので短波長 FELに適しているが、ビーム・ヒーティングのために出力は比較的低い。RFリニアックでは比較的高エネルギーで大電流ビームが得られ、特に電子銃の最近の進歩によって短波長域でも有望視されている。FEL小型化のための候補としてマイクロトロン、サブミリ波領域では van de Graaf型加速器等も用いられている。ミリ波領域では誘導リニアックやパルスライン等の低エネルギー・大電流用加速器が用いられているが、ビームの質は良くない。

今後の FELは、 $10\text{ }\mu\text{m}$  近辺での大出力・高効率化と高度化、未踏短波長領域での研究が焦点になる。高度化とは、目的にかなったパルス特性、出力の安定化、高調波発生やガス封入型等による波長範囲の拡大、サイドバンドの抑制等を指す。短波長域では、Novosibirsk で蓄積リングを用いて 240nm で発振に成功した。RFリニアックも最近急速に進歩して短波長化の期待が大きく、楽観的な予測では、100nmあたりでアンジュレータの  $10^6$ 倍程度のターゲット位置での平均光子束が得られるとされているが、そのためにはまだ多くの障害を乗り越える必要がある。蓄積リングとRFリニアックによる FELは相補的であり、特にそのパルス特性によって用途が分れる。研究用にはおそらく蓄積リングの方が優れているであろう。

### 金属表面の電子状態と吸着

広島大・理 太田俊明

金属表面の電子状態、及びこれに原子・分子が吸着した系の電子状態は主として光電子分光法に

よって調べられてきた。特に、放射光を光源にした光電子分光は、波長可変性、高い指向性、直線偏光性（または、楕円偏光）を活用することによって、従来困難であった実験を容易にし、また、新しい実験法を産みだした。これによって、金属表面、及び吸着系の電子状態の研究も飛躍的に発展した。

ここでは、いくつかの例を挙げ、更に放射光が高輝度化するとどのような研究が可能になるかについて言及する。

#### (1) 金属表面の内殻準位シフト

放射光を用いた高分解能光電子分光によっていくつかの金属の内殻電子の光電子ピークはバルク原子のものからズレが観測されている。このズレの大きさや方向はまちまちで、この現象は表面価電子帯の幅が狭くなること、価電子帯に対するフェルミ準位の位置がd電子数によって異なることによって説明されている。更に、ピーク形をガウス形とロレンツ形に分解することによって、前者からフォノンによる幅の広がり、後者から寿命による幅の広がりの情報が得られる。表面原子の寿命がやはり表面価電子帯の局在化によって短くなり、幅が広くなることが観測されている。しかし、これまで限られた金属だけについて測定されているだけである。高輝度化によって、反応性の高い金属についても短時間でかつ高分解能で測定することによって金属表面原子の情報をより詳細に調べることが出来よう。

#### (2) 金属表面のバンド構造

角度分解光電子分光法によって、飛び出す光電子の取り込み角度を変えたり、入射光のエネルギーを変えることによって、金属の三次元的なバンド構造を記述できる。特に、放射光の高い指向性によって、高い角度分解光電子分光 ( $\Delta\theta = 0.5^\circ$ ) が可能になり、詳細なエネルギー・バンド構造が明らかになってきた。このバンド構造には分散の無い金属表面準位が観測され、表面状態を知る一つの手がかりになっている。また、表面の再配列やCDW生成に伴う超格子構造を観測するためには角度分解能を更に上げる必要がある。このためにも高輝度化が必要になってくる。

#### (3) 分子吸着系

光電子の脱出深度、金属の光イオン化断面積に電子の運動エネルギー依存性があることを利用し、入射光エネルギーを変えることによって、表面感度を上げたり、基板金属の Cooper の極小値に合わせて、吸着原子・分子の光電子ピークを抽出することができる。金属への吸着による分子の電子状態の変化、基板金属の変化は光電子分光で詳細に調べられているが、内殻吸収端の構造 (NEXAFS) も吸着分子の構造や電子状態について相補的な情報を与える。単分子層以下の分子吸着の NEXAFS 測定は現状の放射光でも難しく、高輝度化による実質強度の増大が望まれる。

## 半導体表面

阪大・基礎工 張 紀久夫

シンクロトロン放射を用いた表面研究の中から

- (a) III-V族半導体(110)表面の内殻準位のずれについての一連の測定結果とその解釈
- (b) Si(100)およびGe(100)再構成表面のダイマーモデルと表面内殻準位
- (c) 励起子状態におけるスピントラクトル相互作用  $H_s$  と電子正孔交換相互作用の競合 (小野寺・豊沢理論) の共鳴光電子放出における現われ方
- (d) 非磁性物質からの角度分解光電子放出におけるスピントラクトル

に関する話題を取り上げる。(a)ではこれらの表面で起る緩和に対応してIII(V)族原子の内殻準位が深い(浅い)方向へずれるが、その解釈や測定データの解析についての問題点を述べる。(b)の系では種々の異なる実験から、表面の隣接する二原子が互に近づいてダイマーを形成すると考えられているが、そのダイマーが対称か非対称かという点で議論が分かれている。対称ダイマーを主張する側の有力な実験データは表面内殻からの直接放出スペクトルに一本の表面成分しか現われないことがある。これに関連して、放出の終状態における電子間の相互作用を考慮すると、非対称ダイマーの場合でも、表面成分が一本にみえる場合があるのではないかという、クラスターに対するハートリー・フォック計算による試みを紹介する。(c)は励起子の光吸収スペクトルについてよく知られた理論で、スピントラクトル成分の間で交換相互作用による強度のやりとりがあって、 $H_s$  だけから期待される吸収強度比が逆転することもあるというものであるが、内殻励起子を中間状態とする共鳴光電子放出に対しては、この機構が2重に働くことになり、 $H_s$  による分裂成分間の強度逆転の傾向は更に強められるということを理論的に示す。(d)では GaAs(110)面の共鳴光電子放出の計算において、角度分解スペクトルにスピントラクトルが現われ、共鳴過程により偏極度も共鳴増大することを示す。また Tamura ら [1] による「直線偏光励起の垂直放出スペクトルで、バルクからの放出ではスピントラクトルが期待されない系でも、表面からの放出ではスピントラクトルが生じ得る」という理論の群論的考察を、「スピントラクトルと電場ベクトルの成分から作られる不变形」という観点から再構築し、そこから彼らの得た結果のみならず、別の入射光条件に対する結果も得られることを示す。

Ref.

[1] E. Tamura, W. Piepke and R. Feder: Phys. Res. Lett. 59 (1987) 934

## ヘテロ界面の制御と電子構造の解明

東大・理 小間 篤

最近、分子線エピタキシー(MBE)法や有機金属気相成長(MOCVD)法が開発され、単原子層膜を交互に積み重ねた超格子の作成も実際に可能になりつつある。原子層レベルで厚みを制御した超薄膜へテロ構造の作成の成功は、超格子素子、量子井戸形半導体レーザ等の新しい素子の実現を可能とする一方、分数量子ホール効果のような、純粹科学の面から大変興味深い新現象の発見の糸口ともなっている。しかしながら、良質の超薄膜へテロ構造の作成は、格子整合条件を満たす、ごく限られた組合せの物質面でしか実現されていなかった。これは、通常の物質の清浄表面上にはダングリングボンドが存在し、このため格子整合条件を十分満たすことなしには、良質の超薄膜をへテロ成長できないためである。我々は、層状物質のように、その表面にダングリングボンドが現われないような物質の表面では、ファンデアワールス力のみを介してへテロ成長が進むため、格子整合条件を満たさなくても、十分良質の超薄膜単結晶をへテロ成長できることに着目し、その実証を行い、これをファンデアワールス・エピタキシーと名付けた。この成功により、絶縁物から超伝導体に及ぶ瓦る種々の層状物質を、格子整合条件に関する制約を離れて自由に組合せて、多種多様な超薄膜へテロ構造を作成する道が拓かれた。

界面形成に本質的に重要な役割を果たすダングリングボンドを適切に処理することにより、界面の制御を行う見通しは立ったが、今後重要なことは、形成されつつある界面ないし形成後の界面の評価手法の確立である。今までに開発された種々の表面手法は固体表面の諸物性の評価には威力を発揮するが、ここで期待されているのは、表面下に埋もれた界面に関する評価手法である。有力な手法の1つは、低速電子エネルギー損失分光法で、入射電子エネルギーを数10eVないし2000eVの範囲内で変えることにより、プロービング深さを0.2nmから1.2nmの間で自由に変えて、電子構造の深さ方向変化を、0.1nm程度の深さ分解能での測定に成功している。今後高輝度放射光源が開発されれば、入射光の波長を種々変えた光電子分光法により、同様な測定が可能になるであろう。とくに角度分解測定、偏光依存性の測定などにより、界面の電子構造の詳細な解明が進むものと期待される。界面電子構造の解明には、界面の原子構造に関する知見も不可欠であるが、これに関しては、最近試料表面すれすれに入射させた放射光の回折手法により、界面における原子の再配列の模様が観測された報告がなされている。今後高輝度放射光の普及とともに、この方法を駆使した界面の原子配列の理解も大幅に進展するであろう。

これらの手法の確立により、ヘテロ界面の制御は更に精密なものとなり、超薄膜へテロ構造をベースとする新人工物質の創製、およびそれらが示す新物性の発見に大きく寄与できるものと思われる。

## 光 C V D と 光 エ ッ チ ン グ の 基 础

NTT LSI研 宇理須 恒 雄

真空紫外領域の光化学反応の研究は、学術的意義のみではなく、光化学反応の持つ、低温、低損傷、低汚染のほか、短波長であることによる超微細加工性などのため、将来の半導体プロセス技術への応用の観点からも興味が持たれている。我々はこのような応用の立場から、放射光による光CVD、光エッチングなどの研究を進めている。まだ、反応機構の詳細を解明するに至ってはいないが、従来のプラズマ励起プロセスや、レーザ励起プロセスにみられない、反応の材料選択性、加工異方性、特有なドーピング特性などがみいだされている。本報告では、励起機構に関する既知の知見をもとに、これらの現象の素過程を考察する。

電子励起が反応座標軸上の移動（脱離、吸着、欠陥生成、化学反応など）を誘起する現象は、結合電子の励起と内殻電子の励起とに大別される。通常、前者については、1 h（ホール）1 e（電子）・あるいは1 hなどの励起状態を経由し、反応断面積 $\sigma_r$ は励起断面積 $\sigma_v$ と、その励起状態が着目する反応座標軸上の終点にたどり着く確率 $P_v$ との積、 $\sigma_r = \sum \sigma_v P_v$ で表せる。

一方、後者については、オージェ過程を経て、2 hなど、多電子励起状態を経由するのが特徴である。したがって、反応断面積に $\sigma_r$ は内殻励起の断面積 $\sigma_c$ と励起後2 h状態に至る確率 $f$ 。および2 h状態が着目する反応座標上の終点に到達する確率 $P_c$ との積、 $\sigma_r = \sum \sigma_c f_c P_c$ で表される。

具体的な反応の例として、SF<sub>6</sub>ガスによる光励起エッチングについて考察する。この場合、①SiO<sub>2</sub>、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>などの絶縁物はエッチングされやすいのに対し、単結晶Siはほとんどエッチングされない。またポリシリコンについては、アニールあるいはドーピングにより抵抗を小さくすると、エッチング速度が大幅に低下するなど材料選択性が見られる。②SiO<sub>2</sub>のエッチング速度は光強度の一次に比例する。③SiO<sub>2</sub>、ポリシリコンにおいては、エッチング速度は基板温度の増大とともに減少する。

などの特徴が見られる。電子ビーム照射の場合はSiO<sub>2</sub>は損傷を受けるのに対し、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>は損傷を受けにくく、2 h状態の寿命の違いによって説明されている。SF<sub>6</sub>を用いた放射光エッチングにおいてはSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>もSiO<sub>2</sub>と同程度の早さでエッチングされること、表面層のフッ素化反応がSiO<sub>2</sub>単体の光刺激脱離とは異なる機構であることをしめしている。Fと反応センターR'の放射光励起による生成を考えると、上記の反応の特徴を統一的に説明することができる。R'の実体は、欠陥あるいは励起子と考えられるが、単結晶Siや自由キャリアー濃度の高い材料では生成しにくいか、生成しても寿命が短い。また、温度の増大によりこれらの寿命は短くなり、エッチング速度が低下する。

脱離や欠陥生成などの表面励起反応については、電子ビーム励起の知見もあわせて、ある程度反応機構が推測できる状況にある。本例のように、化学反応を伴う系については未知の点が多く、励起エネルギー依存性を調べられる波長可変な高輝度光源の実現を望む。

## 光 刺 激 脱 離

東大・物性研 村田好正

励起源として放射光とレーザーがある。両者を対比させながら述べる。表面でのエネルギーの授受がある場合、下地という巨大な熱浴が関与して、観測したい現象が常に脱励起過程と競合してくれる。例えば、レーザー刺激脱離の場合、従来の研究の大多数は下地の局部過熱による熱脱離の測定である。ここでは光をフォトンとして利用する、電子励起に限ることにする。また表面での測定は上記のことなどもあり、高感度検出が望ましい。その点からはイオン脱離であると高感度検出が容易である。

イオン脱離の機構として、core hole の生成と原子間オージェ遷移による Knotek-Feibelman 模型がよく知られているが、放射光による光刺激脱離はこの種の研究が主である。最近東大理の難波・黒田は Ge(001) 上に H<sub>2</sub>O が吸着した表面からの H<sup>+</sup> の脱離で、core hole と valence hole の 2hole の局在が関係する興味ある現象を観測している。

一方、価電子励起に伴う光刺激脱離を我々は、Pt(001) 上に吸着した N<sub>2</sub>O で観測した。これは、ArF の紫外レーザー(6.41eV)を励起に用いている。中性分子として脱離してくる N<sub>2</sub>O を色素レーザーを用いた共鳴多光子イオン化法により、脱離分子の内部自由度、すなわち振動、回転、並進状態を識別した検出を可能にした。まだ脱離機構を論じるだけのデータは得られていないが、試料温度(80K) およびレーザー照射による温度上昇(2K) よりはるかに高い並進、回転温度になっている。例えば、振動の量子数 v = 0、回転の量子数 J = 23/2 の脱離分子の並進温度は 540K である。そして古くから価電子励起で言われている Menzel-Gormer-Rehead 模型のような単純な脱離機構で起きていないことだけは確かであり、近く脱離機構の解明ができると思っている。

このレーザー刺激脱離では励起光の ArF レーザーの強度は 0.4mJ/cm<sup>2</sup>、ビーム径 3 mm で測定している。従って、 $3 \times 10^{13}$  photons/pulse である。放射光の利用を考えると、波長の可変性は脱離の閾値を決めるのに重要である。しかし、飛行時間法を検出系に用いる必要があり、パルス光として利用したい。高輝度光源の強度は  $10^{13} \sim 10^{14}$  photons/sec とすると、 $10^4 \sim 10^5$  photons/pulse となり、レーザーで行っているような内部状態を弁別した検出は不可能なようである。しかし、速度分布の測定に飛行時間法を用いなければ、色素レーザーに他のシステムを用いることが可能で、放射光による core hole の生成が初期過程の脱離も、内部状態を弁別した測定が可能になると思う。その結果 Knotek-Feibelman 模型によらない脱離機構を見出し、明らかにすることが可能になる。

## 生体高分子の照射効果

立教大・理 檜枝光太郎

X線は、1895年11月にレントゲンによって発見された直後から、生物・医学分野と深く関係している。レントゲンは自分の手を、X線管と蛍光板の間に入れて、骨のシルエットを観察した。非破壊で人体内部が観察できる革命的手法として、当時としては驚くほどの速さで、世界中に紹介された。日本に初めて、X線が紹介されたのは、X線発見のわずか3ヵ月後の1896年2月29日発行の「東京医事新報」であった。今日、X線診断学なくしては、医学は成り立たないであろう。現在、SRから得られる強力単色X線を利用したangiographyが、PFをはじめとしたSR施設で活発に研究されている。

ここで、本題の放射線効果に話を戻そう。X線に曝した皮膚に脱毛や火傷が生じる事が、1896年前半に報告されている。X線が生物に障害を与える事も、放射線発見の直後から気づかれていたことになる。では、どの様にして放射線が生物効果を生じるのか？放射線エネルギーの生物体による吸収を出発点として、複雑な物理的・化学的過程を経て生体高分子のキズ（損傷）として固定される。このキズが原因で生化学的・生物的過程が起こり、最終的に生物効果が誘発される。この一連の因果関係を、明らかにしようというのが放射線生物学である。

最近、放射線生物効果研究にSRを光源とした強力な単色真空紫外線・X線が利用されるようになってきた。これらを使えば、最初のエネルギー吸収過程を、特定準位の励起・電離に限定することが出来るからである。放射線エネルギーの吸収過程と生物効果の関連を調べる第一段階として、最も重要な中間段階である生体高分子およびその構成低分子レベルの損傷が、研究されている。

放射線作用の研究のためには、何はともあれ検出可能な量の分子損傷が生成される必要がある。つまり、それだけの光子数を短時間に得られることが必要になる。生物にとって最も大切な分子であるDNAの構成分子であるジヌクレオチド(dTpdT)-DNAを梯子に例えれば梯子の片側2段に相当する一を例にとろう。微量で定量できる高速液体クロマトグラフィー(HPLC)を用いても、照射時間は数時間の程度必要になる。さらに、真空紫外線はあらゆる物質に強く吸収されるので、試料は非常に薄くする必要があり、 $1\text{ }\mu\text{g}$ 程度しか一度に照射できない。したがって、放射線損傷の化学的性質の研究はほとんどできない。また、損傷生成の中間段階であるラジカルな研究も、現在得られる光子数の制限のためほとんど手がついていない。現在の光強度の10-100倍程度あれば、特定準位の励起・電離と生体分子損傷の化学的性質の関係を明らかにできるであろう。高輝度光源に我々が期待する第一の事は、大強度である。

## 物性研究所談話会

日 時 1990年1月22日(月)午後4時~5時

場 所 物性研究所 Q棟1階 講義室

講 師 Prof. V. J. Emery

(所属) (Brookhaven National Laboratory)

題 目 Implications of Recent Experiments for the Theory of High Temperature Superconductors

要 旨 :

The talk will discuss the consequences of several experiments for models of high-temperature superconductors and for the mechanism of superconductivity. In particular, low hole-doping of  $\text{La}_2\text{CuO}_4$ , properties of electron doped superconductors, and experiments using NMR, uSR and neutron scattering to investigate hole-doped materials will be considered.

## 物性研ニュース

### 東京大学物性研究所の教官公募の通知

下記により教授の公募をいたします。適任者の推薦、希望者の応募をお願いいたします。

(1) 研究部門名及び公募人員数

理論部門教授ないし助教授 1名

(2) 研究分野

物性理論。

広い意味の固体分光に関する理論的研究の経験をお持ちの方。

(3) 公募締切

平成2年5月19日（土）必着

(4) 就任時期

平成2年度中のなるべく早い時期を希望する。

(5) 提出書類

(i) 推薦の場合

- 推薦書（健康に関する所見を含む）
- 履歴書（略歴で結構です）
- 主要業績リスト（必ずタイプすること）
- 主要論文の別刷（うち、とくに重要な論文5編程度に印をつける）
- 研究業績の概要（2000字以内）
- 研究計画書（2000字以内）

(ii) 公募の場合

- 履歴書
- 業績リスト（必ずタイプすること）
- 主要論文の別刷（うち、とくに重要な論文5編程度に印をつける）
- 研究業績の概要（2000字以内）
- 研究計画書（2000字以内）
- 健康診断書
- 本人に関する意見書

(6) 宛 先

〒106 東京都港区六本木 7 丁目22番 1号

東京大学物性研究所 総務課 人事掛

電話 03 (478) 6811 内線 5004, 5022

(7) 注意事項

理論部門応募書類在中の旨を朱書きし、書留で郵送のこと。

(8) 選考方法

東京大学物性研究所教授会で審査決定いたします。ただし、適任者のない場合は、決定を保留いたします。

平成 2 年 1 月 25 日

東京大学物性研究所長

守 谷 亨

## 東京大学物性研究所の助手公募の通知

下記により助手の公募をいたします。適任者の推薦、希望者の応募をお願いいたします。

### 1. 研究部門名等及び公募人員数

凝縮系物性部門（木下研究室）助手 1名

### 2. 研究内容

木下研究室では、有機物質固体の電子物性の研究を磁性に視点を置いて行っている。この分野に関心をもち、実験を通してその研究を進めるに意欲をもつ研究者であれば特に経験は問わない。

### 3. 資 格

修士課程修了、またはこれと同等以上の能力をもつ人。

### 4. 任 期

5年以内を原則とする。

### 5. 公募締切

平成2年5月12日（土）必着

### 6. 就任時期

決定後なるべく早い時期を希望する。

### 7. 提出書類

#### (イ) 推薦の場合

- 推薦書（健康に関する所見を含む）
- 履歴書（略歴で結構です）
- 主要業績リスト（必ずタイプすること）
- 主要論文の別刷

#### (ロ) 公募の場合

- 履歴書
- 業績リスト（必ずタイプすること）
- 主要論文の別刷
- 所属の長又は指導教授等の本人についての意見書（宛先へ直送のこと）
- 健康診断書

### 8. 宛 先

〒106 東京都港区六本木7丁目22番1号

東京大学物性研究所 総務課 人事掛

電話 03(478)6811 内線 5004, 5022

(7) 注意事項

凝縮系物性部門（木下研究室）助手応募書類在中、又は意見書在中の旨を朱書きし、書留で郵送のこと。

(8) 選考方法

東京大学物性研究所教授会で審査決定いたします。ただし、適任者のない場合は、決定を保留いたします。

平成2年1月25日

東京大学物性研究所長

守 谷 亨

## 人 事 異 動

(転 出)

所 属	職 ・ 氏 名	発令日	異 動 内 容
極限物性部門 超 強 磁 場	技 官 菊 池 隆	2. 1. 1	電気通信大学へ

(昇 任)

理 論 部 門	教 授 寺 倉 清 之	2. 1. 1	助教授より
理 論 部 門	教 授 安 藤 恒 也	2. 1. 1	助教授より

## 平成元年度 主要納入設備の紹介

### ◇精密超高压発生装置

本装置は、試料に超高压高温をかけたままの状態で粉末X線回折実験を行なう装置であり、推力500トンの油圧プレス、立方体加压型超高压発生器、精密油圧制御装置、および既設のX線回折装置などから構成されている。焼結ダイヤモンドをアンビルとして用いることにより、20万気圧以上、1500°CでのX線回折実験を目標としている。

### ◇熱・質量分析複合システム

平成元年度の特別設備費で、島津製作所の熱分析計（熱重量計）とガスクロマトグラフ質量分析計を合体したシステムが購入された。本装置は、例えばガスの発生を伴う酸化物合成のプロセスの詳細を調べるのに役立ち、酸化物の合成に使用されている。

### ◇4 G水平実験孔に汎用三軸型中性子分光器

従来型の汎用中性子分光器で、物性物理研究主体の中性子散乱装置である。特に高いS/N比達成と、ユーザーが使いやすいようにソフト及び遠隔監視に留意してある。

## ◇ 5 G 水平実験孔に高性能偏極中性子散乱装置

中性子の偏極の向きの変化を利用して、磁気散乱と核散乱の分離、また干渉性散乱と非干渉性散乱の分離を行い、測定精度の格段の向上をはかる多目的型分光器である。特に強度の向上をはかり、全体にコンパクトに作られている。ユーザーの要望を満たすように、多種な試料環境の変化に対応できるよう留意してある。

## Technical Report of ISSP 新刊リスト

Ser. A

- No. 2221 Magneto-Optical Effects of Excitons in  $\text{BiI}_3$  Crystals under Pulsed High Magnetic Fields II. Excitons Localized at 2D Defects. by Teruo Komatsu, Kazuyoshi Koike, Yozo Kaifu, Shojiro Takeyama, Katsuyoshi Watanabe and Noboru Miura.
- No. 2222 On the Role Apical Oxygens in High-Tc Cu-Oxides. by Hiroshi Matsukawa and Hidetoshi Fukuyama.
- No. 2223 Electrical Resistance of Screw-fastened Thermal Joints for Ultra-low Temperatures. by Tohru Okamoto, Hiroshi Fukuyama, Hidehiko Ishimoto and Shinji Ogawa.
- No. 2224 Pressure Effects on Tc of Superconductor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ . by Yuh Yamada, Takehiko Matsumoto, Yoshinari Kaieda and Nobuo Mori.
- No. 2225 Cu NMR and NQR in High Tc Oxides  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  ( $6.0 < x < 6.98$ ) and Related Materials CuO. by Tadashi Shimizu, Hiroshi Yasuoka, Toshinobu Tsuda, Keiichiro Koga and Yutaka Ueda.
- No. 2226 Comment on Finite 2D Quantum Heisenberg Ferromagnet.. by Minoru Takahashi.
- No. 2227 Photostimulated Desorption of NO Chemisorbed on Pt(100) Induced by Valence Electron Excitation. by Kazuhiko Mase, Seigi Mizuno, Yohji Achiba and Yoshitada Murata.
- No. 2228 Interaction of Reactive Ions with Pt(100). I. Neutralization and Surface Trapping. by Housei Akazawa and Yoshitada Murata.
- No. 2229 Interaction of Reactive Ions with Pt(100). II. Dissociative Scattering of Molecular Ions near the Threshold Energy Region. by Housei Akazawa and Yoshitada Murata.
- No. 2230 Anyons in Extended t-J Model. by Hidetoshi Fukuyama, Osamu Narikiyo and

Kazuhiro Kuboki.

- No. 2231 First-Principles Calculation of  $L_{10}$ -Disorder Transition Temperature for Au-Pd Alloy. by T. Mohri, S. Takizawa and K. Terakura.
- No. 2232 Anomalous Lattice Dynamical Properties of Quenched Diffuse  $\omega$ -phase in ZrNb Alloy. by Yasusada Yamada and Kazuhiro Fuchizaki.
- No. 2233 Anyons in Commensurate Flux Phase. by Yasumasa Hasegawa, Osamu Narikiyo.  
Kazuhiro Kuboki and Hidetoshi Fukuyama.
- No. 2234 Differences in Light-Induced Photoluminescence Fatigue in a-Si:H between 300K and 7K. by Mihoko Yoshida and Kazuo Morigaki.
- No. 2235 Theory of the Hall Effect in Quantum Wires -Effects of Scatterings-. by Hiroshi Akera and Tsuneya Ando.
- No. 2236 Nature of Self-Trapped Holes and Their Role in Photo-Insuced Phenomena in a-Si:H. by Kazuo Morigaki and Michio Kondo.

## 編 集 後 記

強磁場部門から超電導工学研究所に移られた中尾公一氏の感想をいただきました。物性研強磁場グループの「牙城」を打って出て、怪物的な超伝導工学に雄々しく挑戦されている由、ご健斗を祈ります。

短期研究会「高輝度放射光による新しい分光科学」は物性研究所の大型将来計画とも関連していることから、かなりの紙数を割いて内容を掲載しました。

又、本年度、本所に設置される新設備を、共同利用される方々に充分活用していただく趣旨から、まとめてご紹介しました。

山 田 安 定

爲 ケ 井 強

