

# 光電子分光の分解能はどこまであがるか

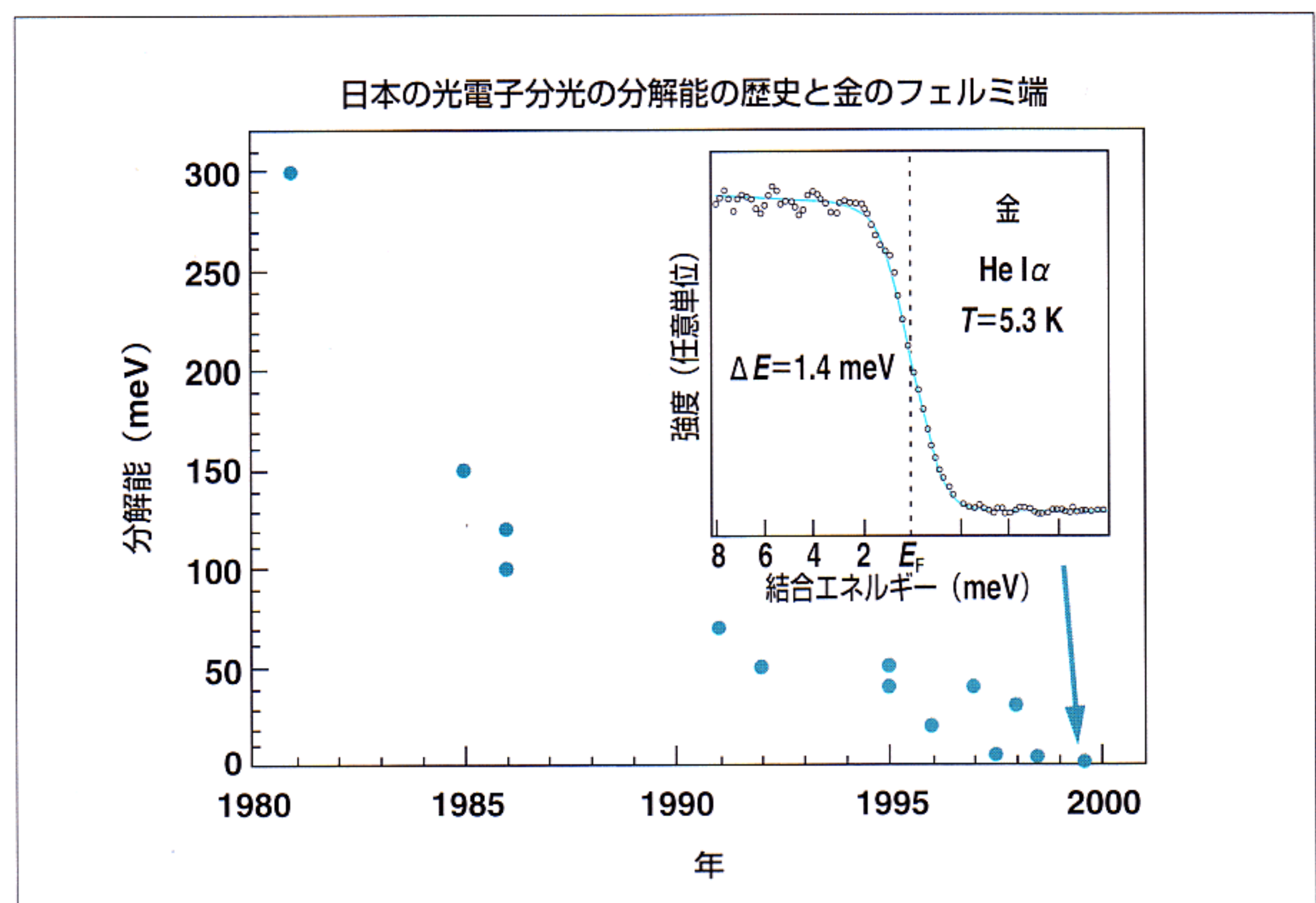
辛 埴

光電子分光は、紫外光や軟X線を入射することによって、固体中から飛び出してくる電子の運動エネルギーや運動量を測定し、固体の電子状態を直接知る実験方法である。固体中の電子をエネルギーだけでなく波数ベクトルまで知る実験方法はほかにほとんど類がないため、物性研究にとって非常に有用である。しかし、分解能が悪いことが、これまで最大の欠点であった。私事で恐縮であるが、私が光電子分光を始めた25年くらい前では分解能はせいぜい0.3eVがよいところであった。固体物理学をめざしていながら、実際は化学分析に近いことしかできないので、毎日歯がゆい思いをしていた覚えがある。そのころは華やかで、洗練された輸送現象実験が盛んであった。しかし、ごく最近の超高分解能光電子分光が物性研究に与える成果はめざましいものがあることがしだいに明らかになってきている。特に、分解能が2桁以上も上がったために輸送

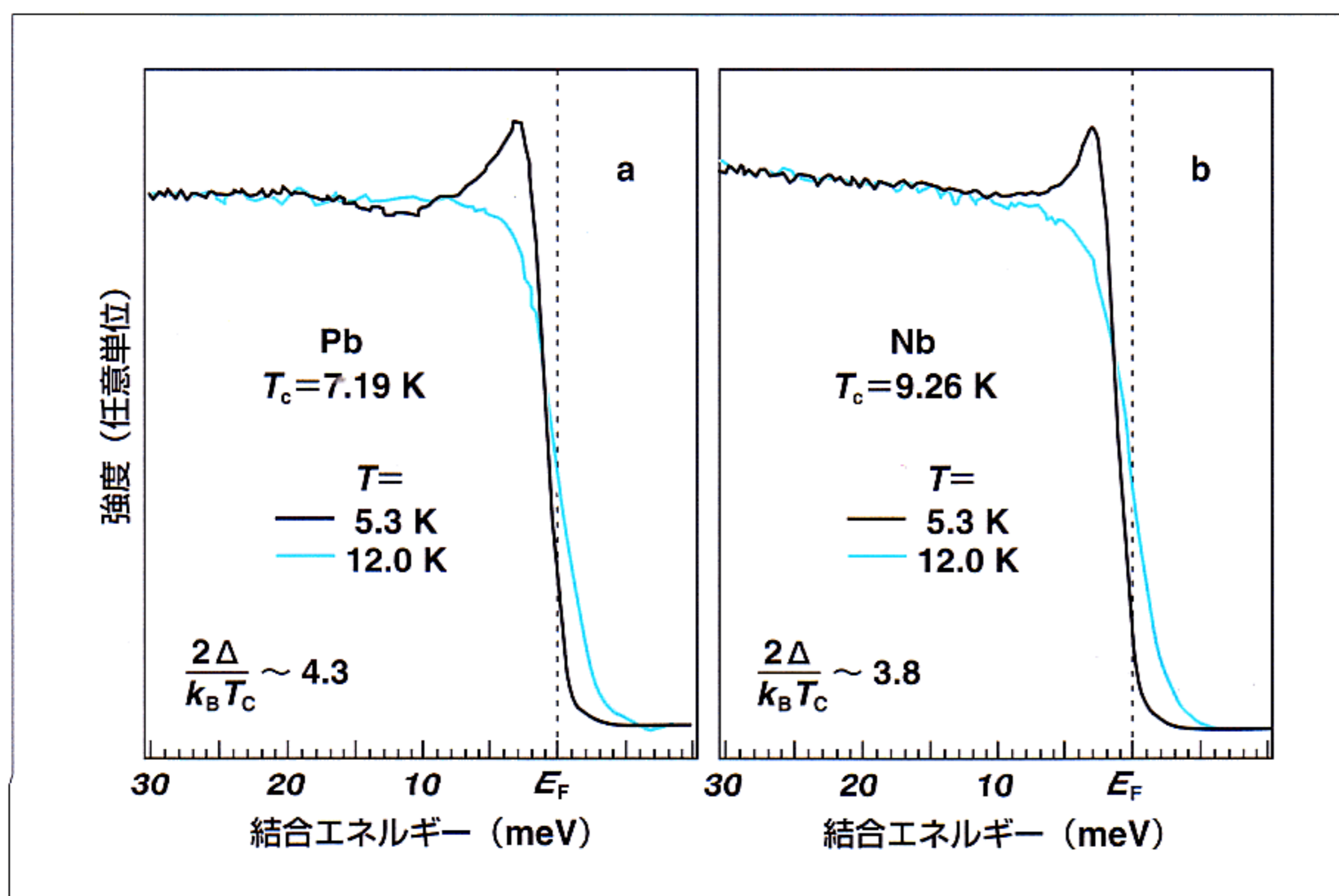
現象との対比が直接できるようになりだした<sup>1)</sup>。現在のところ固体の最高分解能は約1.4meVに達しており、近いうちに1meVは切ることも夢ではない

であろう。このようなエネルギースケールは温度のエネルギースケールにほとんど等しく、長年の夢であった輸送現象に参与している電子を、光で取り出して直接観測できるようになった。このような超高分解能の光電子分光を行っている、よくなされる質問に、物性研究にはそのような超高分解能はいらぬのではないかという質問がある。しかし、そのような世界をわれわれはこれまで知らなただけであることがしだいに明らかになる。

〈図1〉は日本における光電子分光の分解能の発展の歴史を書いたものである。1986年頃から急に分解能が上がりだしているのがわかる。このころは高温超伝導体が発見された時期と一致している。高温超伝導体にフェルミ面(Fermi surface)が存在しているかどうかを、あるいは少し時代は下がるが超伝導ギャップの対称性を明らかにす



〈図1〉日本の光電子分光の分解能の歴史  
挿入図は東京大学物性研究所において世界最高分解能1.4meVで測定された金のフェルミ端のスペクトル。



〈図2〉超伝導転移温度  $T_c$  が(a)7.19Kの鉛と、(b)9.26Kのニオブの超高分解能光電子分光スペクトル

青線が12Kで測定された金属相のスペクトル。黒線が超伝導相のスペクトル。金属相ではフェルミ端が観測されるのに対し、超伝導相では超伝導ギャップとともに準粒子ピークが観測される。鉛においてはフォノンの構造が観測されている。このスペクトルは高温超伝導体などで観測される peak-dip-hump 構造とよく似ている。

るのに光電子分光の高分解能化の必要性が生じた。ラッキーなことに高温超伝導体のエネルギースケールは数十ミリ電子ボルトと大きく、このころの装置開発の目標にはピッタリであった。また、このころはフォトンファクトリーという当時世界最高の放射光光源が完成した時期とも一致している。多くの科学の発展と同じように、物性科学の必要性が装置開発の急激な発展を生じさせただけでなく、逆に高性能の実験装置が物性研究を進展させたよい例でもある。一方、光電子分光器の性能向上は主として外国メーカーを中心として着々として開発が進み、つい4年ほど前からHeの共鳴線を光源として分解能は4~5meVに達している。海外で先行したが、日本においても近年この分解能に達するグループが出だした。この分解能を用いて、準結晶における擬ギャップの観測、高温超伝導体における超伝導ギャップ・擬ギャップの観測、相転移にともなう電子構造の変化、重い電子

系における近藤状態の観測など、輝かしい実験が世界中で得られつつある。

光電子分光器の分解能は何によって決まっているのだろうか。光源としてヘリウム放電管を用いた場合、ヘリウムI共鳴線のエネルギーは約21eVである。光電子の運動エネルギーはきわめて低いために、地磁気や残留磁気によって簡単に軌道が曲がってしまう。そのため計算された磁気シールドで覆われている。また、当然のことながら、アースや電源のリップルは分解能以下でなくてはならない。高分解能を達成するためには、そのほか、周辺技術の開発がきわめて重要である。たとえば、熱によるフェルミ面のボケを防ぐためには、サンプルを極低温にする必要がある。また、極低温にすると、水素などのあらゆるガスが表面に吸着するために、真空度を特に上げる必要がある。これらの周辺技術の開発は不可欠なものであり、これまで、光電子分光屋が直面したことのない世界になりつつある。

〈図1〉の挿入図の点は超高分解能装置で観測した金のフェルミ面の光電子分光スペクトルである。フェルミ粒子である電子は、温度によって広がったフェルミ-ディラック関数に従っていることが知られているので、装置の分解能の幅をつけて実験のスペクトルを再現するようにすると、総合分解能は1.4meVであることがわかった。この分解能は固体の光電子分光では世界最高記録である。ヘリウム共鳴線の発振幅が約1.1meV程度なので、光電子分光器単独の分解能は約0.8meVであり、1meVを切っていることがわかる。

それでは光源の幅を1meV以下にすると、光電子分光の総合分解能は

1meVを切ることができるであろうか？ 答は単純ではない。Yesともいえるし、Noともいえる。われわれはまだこの分解能を得たことがないので、本当かどうかは実験を試みるしかないが、計算機によるシミュレーションはできる<sup>2)</sup>。それによると光源の幅などの実験技術をすべてクリアーしたとしてもなおかつ越えなければならない別の壁があることが判明しつつある。それはいわゆるスペースチャージ(space charge, 空間電荷)という問題である。固体表面から飛び出した光電子が、隣接する光電子からクーロン力による反発を受けてしまうことである。クーロン力は長距離力なので、よほど、電子密度が薄くないと隣接電子の影響を受けてしまうことになる。この効果はパルス光を用いた場合、光電子が同時期に放出されるために特に深刻な問題になる。たとえば、これまで、世界中の放射光施設で、分解能を5meV以下にするのが難しいことが経験的に知られていたが、この結果はシミュレーションによる結果と一致していることがわかってきた<sup>2)</sup>。また、光電子分光器のスリットを絞ろうとして、サンプル上で光ビーム径を絞ってしまうと、電子密度が上がるために光電子分光の分解能は逆に上がらなくなる。ステレオタイプに答えると、放射光を用いれば5meV、ヘリウム放電管のような連続光を用いれば、1.5meV程度が限界であろう。それ以下にしようと思えば、光源と、光電子分光器に新しいブレークスルーが必要となりそうである。

さて、このような光電子分光の分解能で、どのような新しい物性がわかるであろうか。例として、超伝導につい

て考えてみる。〈図2〉は単純金属である鉛とニオブの超伝導転移を表している<sup>3)</sup>。青線が金属相、黒線が超伝導相を表している。光電子分光で、単純金属の超伝導転移が観測されたのは今回が初めてである。常伝導金属相においては金と同じようなスペクトルが観測されるのに対して、超伝導相では、フェルミ準位直下に超伝導ギャップが開き、準粒子ピークが観測される。超伝導ギャップはBCS理論によると電子とフォノンの引力の大きさを現している。本来反発するはずの電子どうしはフォノンを介した引力によって電子対をつくって、ボース凝縮を起こす。これが準粒子ピークの原因になる。ところで、ニオブは通常のBCS理論に従うことはよく知られているが、鉛は少し違っている。格子との相互作用が特に強いいわゆる強結合超伝導体とよばれている。この特徴は、鉛の超伝導ギャップスペクトルに微細構造になって現れる。このような構造はトンネル分光で観測されているフォノンの構造と一致している。このようなフォノンと結合された電子状態を観測できるようになったのはごく最近である。今後は、電子状態と結合した、固体中の素励起(フォノンや、マグノンなど)の研究など新しい研究分野が、超高分解能光電子分光で開かれるであろう。鉛などの超伝導ギャップの大きさは1meVくらいであるから、この程度の分解能で十分であったが、実際はもっと低い転移温度をもつ物質に興味深い物質群があるので、さらに高分解能が必要である。このような物質の解明が進めば、BCS理論を越える物性が解明され、銅酸化物高温超伝導体を越えるような新しい物質群が発見されるかも

しれない。超伝導以外にも、エネルギースケールが極端に小さい物質群は、多彩な電子物性を示すために物質開発の新しい可能性を秘めている。超高分解能光電子分光によって、これまで人類にとって未知の世界であったフェルミ面近傍の微細構造を明らかにし、新しい物質開発の指針を得ることができよう。

### ★ ★ ★

この研究は、東京大学物性研究所の研究室で行われました。横谷尚陸氏をはじめ学生諸氏に感謝します。また、光電子分光の分解能に関するシミュレーションに関してはP. Balzar氏との共同研究です。

#### 参考文献

- 1) 最近の、超高分解能光電子分光の解説は、たとえば、木須孝幸、横谷尚陸、辛埴：固体物理, **36**, 83(2001)；高橋隆、佐藤宇史、組頭広志：固体物理, **35**, 346(2000)。
- 2) P. Balzar *et. al.*: unpublished.
- 3) A. Chainani, T. Yokoya, T. Kiss and S. Shin: Phys. Rev. Lett. **85**, 1966(2000)。