

施設だより

ディフレクターを用いた新しい角度分解光電子分光

UVSOR 施設 田中 清尚

角度分解光電子分光とは、その名の通り固体から放出された（光）電子を、そのエネルギーだけでなく固体からの放出角度に分解して分光する実験手法である。固体の平坦な清浄表面が得られる場合に、放出される光電子と固体中の電子の運動量の表面に平行な成分が保存されることを利用して固体中の電子バンド分散を直接測定することができる。特に運動量空間で電子状態を直接観測できることは、他の実験手法にはない大きな特徴であり、近年の物性研究になくはならないものになりつつある。

光電子分光実験では一般に半球型の電子アナライザーを利用する。これは固体から放出された電子を電子レンズと呼ばれる部分で加速あるいは減速し、半球の入り口に設置されたスリットに導く。半球部分では内側に+、外側に-に帯電した二つの半球が取り付けられており、特定の運動エネルギーをもった電子のみが半球の出口に設置された検出器に到達することができる。電子

レンズ部分でスリットに導く電子の運動エネルギーを掃引し、電子の数を観測することで固体中の電子状態密度の情報を得ることができる。

角度分解光電子分光法は1990年代に大きくその技術が進歩した。それまでは固体と電子レンズの間にアパーチャーと呼ばれる穴の開いた板を置くことで、固体から放出される電子のうち、ある特定の角度から飛び出してきた電子のみを取り出し検出していた。そのため、固体試料を回転させることで実効的に異なる放出角度の電子を測定する必要があり、運動量空間を一点一点測定するこの方法は非常に時間のかかるものであった。1990年代の終わりに、より複雑な電子レンズと2次元検出器を取り入れた新しい装置が開発された。この新しい装置では半球の入り口にあるスリットが長方形に成形され、固体から長方形の長辺に平行方向に異なる角度で放出された電子が、スリット上で異なる位置に集光するように電子レンズが調整されている。スリットを通過した電子は、半球で特定のエネルギーの電子のみが通過するよう分光され、スリットでの位置関係を保持したまま2次元検出器に導かれる。異

なる放出角度の電子を一度に検出することで検出効率が格段に上昇したことに加えて、電子レンズで連続的に異なる角度の電子を取り込むことで角度分解能も飛躍的に向上した（ $\sim 0.2^\circ$ ）。

このように大きく性能が向上した角度分解光電子分光装置であるが、それ以降はエネルギー分解能の向上に焦点が向けられ、基本性能に大きな変化はなかった。しかし近年、電子レンズ中のディフレクターと呼ばれる、従来は電子軌道の微調整に用いていた部分を使って、スリットの短辺方向に放出された電子を取り込むという新しい試みが行われはじめています。

我々のグループではスウェーデンのMB Scientific AB社と協力して、この新しい角度分解光電子分光装置の開発を行ってきた。開発をはじめてすぐに気付いたのは、放出角度が大きい電子が歪んで検出されてしまうということである。そこで、電子放出角度を校正するための角度デバイスを開発することで歪みの効果を評価できるシステムを構築した後（図1）、従来よりも電子レンズの数を増やし、その配置も大きく変えることによって歪みのない検出をすることに成功した（図2）。この開



図1 開発した角度デバイス。広範囲に電子を放出し、アナライザーとの間に電子源から立体角 1° の間隔で無数の穴の開いたスリットを配置している。スリットはモーターで位置を調整することができる。

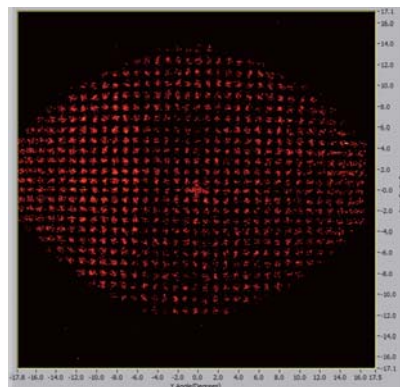


図2 角度デバイスによる電子像。開発当初の歪みのある電子像（左）と歪みのない像（右）。

発の成功により、これまでスリットの短辺方向は固体試料を回転させる必要があったため角度分解能が悪かったが、長辺方向と同程度まで角度分解能が向上した。これは同時に、試料を回転させることなく運動量空間を高角度分解能で測定できるようになったことを意味する。同様の装置は他社も販売をはじめているが、歪みの効果をソフトウェア上で修正したものとなっている。この修正の詳細はブラックボックスとなっているため、トポロジカル絶縁体やグラフェンで観測されるディラックコーンのような運動量空間上で狭い範囲に存在する電子状態を測定するときには問題になる可能性がある。

このディフレクターを用いた新しい角度分解光電子分光装置は、UVSOR

のビームラインBL5Uに取り付けられ、2016年よりユーザー利用を開始する(図3)。将来はこれまでにない2次元スピ検出器を取り付けることを計画しており、今回のディフレクターを利用した装置と組み合わせることで3次元スピ分解光電子分光測定を目標としている。興味のある方は田中まで問い合わせさせていただきたい。

角度デバイスの開発・製作には研究力強化戦略室技術担当専門員の堀米利夫氏にご協力いただいた。また角度デバイスに用いる多数の微小穴のあいたスリット製作については、装置開発室技術職員の矢野隆行氏にご協力いただいた。両氏にはこの場を借りて御礼申し上げたい。



図3 UVSOR BL5Uに取り付けられた新しい角度分解光電子アナライザー。

覧古考新03 | 1971年

分子科学とは一体、何だ。というと、はっきりした分子から、途方もなく大きい分子まで、ともかく「分子的」な観点からの物質の科学的追求だ、というよりしかたがない。そもそも学問の定義などしてみてもつまらない。枠をきめようときめまいと、発展するところに発展する。しかし、分子科学に何を期待するか、という問ならば主観的に答えてよいだろう。

分子ががくの「か」は化に通ずる。実際、分子科学研究所の推進力は化学者で、大変、御苦労様である。私たちは大いに応援は辞さないが、是非御努力をお願いしたいと思っている。化学と物理には今日、本質的なちがいは何にもないが、伝統的なアプローチのちがいは依然根強い。このようなちがいはむしろ大事で、喧嘩などは以っての外であるが、ちがうアプローチをもつものが協力してゆくことがきわめて有効である。化学者を主力として、物理学者がこれを支援してぜひ次代を担う強力な研究所をここに創ってほしいものである。

私の勝手な考えかもしれないが、化学の本領は化学反応にあると思う。

.....

反応の機構といっても、いくつもの段階、いくつもの層がある。近頃の発展はあまり知らないなので、いい加減なことを申しては相すまないが、簡単な分子の反応でも徹底的に解明されている例は少ない。反応機構も、どれだけ体系的に理解されているのだろうか。おそらく、きりが無いといえないかも知れないが、一段一段そういう方向に掘り下げてゆくことは、自然というものの本質に迫る一つの方向であろうし、生命科学の礎石を一つ一つ据えてゆくことにもなるだろう。

特定研究分子科学研究班『分子科学によせて』1971年
久保亮五(東京大学教授 物理学)