

X線コンプトン散乱を用いた電子状態測定の新たな展開



山瀬 博之

物質・材料研究機構
国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点
yamase.hiroyuki@nims.go.jp



櫻井 吉晴

高輝度光科学研究センター
放射光利用研究基盤センター
sakurai@spring8.or.jp

コンプトン散乱という言葉は高校物理ですぐに出てくるが、コンプトン散乱による物質測定を学ぶ機会があったであろうか。コンプトン散乱は、空港での手荷物検査において樹脂などの有機物の検出に大きな威力を発揮しており意外に身近な手法である。

コンプトン散乱は、1923年にコンプトン(A. H. Compton)が黒鉛にX線を照射した時、散乱X線が長波長方向に変化することを解明したことに由来する。コンプトンは、アインシュタインの光量子仮説に従って、粒子としてのX線が黒鉛の中の「静止」した電子によって散乱されると考えることで、波長変化を見事に説明できることを示した。この実験は光の粒子性の証明として位置づけられ、コンプトンは1927年にノーベル物理学賞を受賞した。もちろん、物質中で「静止」した電子という描像は正確ではない。電子が運動している、つまり運動量を持つことは、散乱されるX線のピーク幅に反映される。したがって、ピーク幅を考察することで、物質中の電子の運動量分布を明らかにすることができる。1929年、デュモンド(J. W. M. Du Mond)は、ベリリウム金属に対するコンプトン散乱実験を行い、電子が実際に**フェルミ統計**に従って分布していることを示した。このようにコンプトン散乱は、現代物理学の基礎を形成する上で非常に重要な役割を果たしてきた。

物質中の電子の運動量分布が分かれば**フェルミ面**を決めることができる。コンプトン散乱によるフェルミ面の測定例は、量子振動(QO)や角度分解光電子分光(ARPES)などの他の手法に比べて圧倒的に少ないが、1) **ブリュアン帯域**全体でフェルミ面の形状をマップできる、2) 一電子

状態にギャップが形成された状態であっても背後にあるフェルミ面の形状を同定できる、という点でQOやARPESにはない特徴を有する。

コンプトン散乱が持つこれらの特徴が、最近、銅酸化物高温超伝導体のフェルミ面測定で威力を発揮した。過去36年にわたる膨大な量の研究によって、銅酸化物のフェルミ面の形状は二次元的であると広く信じられてきた。実際、キャリアが過剰に入った組成一銅酸化物の超伝導転移温度はキャリア濃度で制御される一ではその通りである。問題は、最高の転移温度を示す組成を含めて、キャリア濃度が少ない領域である。そこでは、**擬ギャップ**という未解明の現象によってフェルミ面の一部しか観測されておらず、それは背後にある二次元的なフェルミ面の一部であると考えられてきた。しかし、キャリア濃度が少ない組成領域でのコンプトン散乱実験の結果は、二次元的なフェルミ面では理解できないことが分かった。むしろ、**電子ネマチック不安定性**によって、各CuO₂面内の電子が方向指向性を持って運動しており、その結果として各CuO₂面内で擬一次元的なフェルミ面が実現していることが示唆された。

コンプトン散乱は、フェルミ面の測定以外にも電子論的手法として多岐にわたる研究分野で活用されている。2023年はコンプトン散乱の発見から100周年にあたる。これを機に、技術面のさらなる高度化とともに、QOやARPESなどの他の実験手法との相補的活用も通じて、コンプトン散乱実験を用いた研究が大きく発展することを期待したい。

用語解説

フェルミ統計：

電子などの半奇数のスピンを持つ粒子が従う統計で、1粒子状態を占有する粒子数は0か1に制限される。

フェルミ面：

絶対零度において金属中の電子が占めている状態を波数空間で表したときの境界面。フェルミ面は金属物性を理解する上で基本となる概念である。

ブリュアン帯域：

結晶内の電子は結晶の周期ポテンシャルの影響を受ける。この時、電子の量子状態を指定する波数の基本となる領域。

擬ギャップ：

金属ではフェルミ面があるためエネルギーギャップは存在しない。しかし、銅酸化物超伝導体は金属的であるにも拘らず、超伝導転移温度よりはるか高温からギャップ的振る舞い、つまり擬ギャップが観測される。

電子ネマチック不安定性：

電子系が電子間の相互作用によって自発的に方向指向性をもつようになる現象。ネマチック液晶との類似性に由来する呼称。