

「原子衝突のキーワード」

オージェ過程 (Auger process)

光電離・電子衝撃などにより原子の内殻軌道に空孔が生成した後, その脱励起にて電子を放出する無輻射緩和を Auger 過程と呼んでいる[1]. 1 電子軌道近似の範囲では, 電子が空孔を埋めるよう落ちてくると, そのエネルギーが別の電子に与えられ放出される過程と考えることができる. ネオンの 1s 空孔状態 ($1s^1 2s^2 2p^6$) からの Auger 過程の例として, $2s \rightarrow 1s$ と同時に $2p$ の放出が起き, $1s^2 2s^1 2p^5$ の終状態電子配置になる過程がある.

内殻に空孔が生成された状態は, 不安定な励起状態であり, 10 fs オーダーの寿命しか持たない. その寿命は, 内殻空孔状態が直接関与する X 線光電子分光スペクトルなどの線幅から決定されている. 最近では, 高強度極短パルスレーザーによる時間変化電場と電子との相互作用を利用し, これをストリークカメラ[2]における偏向電極部と見立てたような解析[3]により, 光電子と Auger 電子の放出時間差から寿命が測定されている[4].

内殻空孔生成後の脱励起過程は, X 線放出過程 (輻射) と Auger 過程 (無輻射) に大別でき, これら 2 つの過程は競合する. Auger 過程の遷移速度は原子番号 (Z) 依存性が小さいのに対して, X 線放出の速さは Z^4 に比例する. $Z \leq 20$ の元素の 1s 空孔状態からの X 線放出過程の分岐比は 0.2 以下であり, Auger 過程が支配的である. 一方, Z が大きくなり外殻電子数が増えると, 遷移に関与する軌道の組み合わせの数が増大する.

Auger 過程は, 関与する 2 つの電子間の Coulomb 相互作用により引き起こされる. 遷移速度 W_{ba}^A は, 関与する原子軌道の電子の位置座標を r_1 と r_2 , それらの 2 つの軌道関数をまとめて表して空孔状態 Ψ_a と Auger 終状態 Ψ_b とすると,

$$W_{ba}^A \propto \left| \langle \Psi_b | |r_1 - r_2|^{-1} | \Psi_a \rangle \right|^2$$

と近似的に表すことができる[5].

X 線分光で用いられる記述と類似の方法により, 原子軌道の主殻の量子数に英大文字 K, L, M, ... を対応させ, 副殻は ℓ と j の値により, ℓ の小

い順, j の小さい順に数字 (ローマ数字が用いられることもある) を対応させ, 3 つの記号により K-L₁L₃ Auger 過程などと表される. 最初の記号は空孔準位, 2 番目と 3 番目の記号は終状態での空孔準位を深い方から示す. つまり, K-L₁L₃ 遷移は, 1s 空孔状態が, 2s および 2p_{3/2} 軌道にそれぞれ 1 つの空孔を持った状態に遷移したことを表わす.

Auger 遷移の中には別の名前が付けられている遷移もある. 最初の空孔とそれを埋める軌道の主量子数が同じ(最初と 2 番目のアルファベットが同じ)場合の遷移は, Coster-Kronig 遷移と呼ばれている[6]. このような遷移では, 通常の Auger 過程よりもさらに寿命が短くなり, 線幅の増大を引き起こすことや, 多段階の Auger 過程・輻射緩和過程の出発点になるため, 解析の上で重要であり, 異なる名前により区別されて記述される. また, Auger 過程に関与する軌道がすべて同じ主量子数に属している(3 つのアルファベットがすべて同じ)ときは, super-Coster-Kronig 過程と呼ばれ, キセノンの N_{2,3}-N_{4,5}N_{4,5} 遷移が知られている[7].

Auger 過程は 1920 年代から研究され, 物質科学研究にも, 広く応用されている. 最近の話題としては, 短時間に起きる Auger 過程の性質が, アト秒物理計測の実証実験[8]に積極的に利用されていることが挙げられる.

(高エネ機構 足立純一)

参考文献および註

- [1] この過程を最初 (1923 年) に報告したとされており, 研究を続けその成果を 1925 年から 1926 年に論文発表した, P. V. Auger の名前から採られている. R. Sietmann [*Phys. Bull.* **39**, 316 (1988).] により, 1923 年の論文 [*Comptes Rendus* **177**, 169 (1923). 仏語] では Auger 効果については言及されておらず, それを最も早く報告しているのは, L. Meitner [*Z. Physik* **9**, 131 (1922). 独語] であり, その発見に対する功績を正確に認めるべきとの主張がなされた. これを受けて, その功績の再検討が報告されている [O. H. Duparc, *Int. J. Mat. Res.* **100**, 1162 (2009).].
- [2] 例えば, 岸本俊二, 田中義人 編, 『放射光ユーザーのための検出器ガイド』(講談社, 東京, 2011).
- [3] J. Itatani *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 173903 (2002).
- [4] M. Drescher *et al.*, *Nature* **419**, 803 (2002).
- [5] B. H. Bransden and C. J. Joachain, “*Physics of Atoms and Molecules*” 2nd ed., Pearson Education Ltd. (2003) Subsection 9.7.
- [6] D. Coster and R. Kronig, *Physica* **2**, 13 (1935).
- [7] E. J. McGuire, *Phys. Rev. A* **5**, 1043 (1972).
- [8] 例えば, F. Krausz and M. Ivanov, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 163 (2009).