

コンプトン散乱の概要とコンプトン散乱イメージングの応用事例

櫻井浩（群馬大学）、辻成希（JASRI）

1923年 A. H. Compton によって発見されたコンプトン効果[1, 2]は 2023 年で発見から 100 年になる。波動性を有する光は粒子性も有しており、光子が $h\nu/c$ の運動量を有することを示す量子力学の基礎となる現象として多くの量子力学の教科書、高校物理の教科書等で説明されている。実際には、コンプトン散乱 X 線エネルギースペクトルは幅の広いピークであり、物質の電子運動量を反映している。散乱過程の運動量保存則・エネルギー保存則を用いれば、コンプトン散乱 X 線のエネルギーを物質の電子運動量に換算することができる(電子運動量分布)。コンプトン散乱 X 線エネルギースペクトルから求めた電子運動量分布をコンプトンプロファイルとよんでいる。さらに円偏光 X 線を用いればスピンの依存した磁気コンプトンプロファイルを測定することができる。

コンプトンプロファイルは波動関数のフーリエ変換 (Dirac Transformation)、換言すれば運動量空間の波動関数を反映する。簡単に言えば高エネルギー X 線で化学結合を調べることができる手法である。高い透過能を有する 100 keV 以上 (115.56 keV あるいは 182.6 keV) の高エネルギー X 線を利用するため、表面酸化等の影響がなく電池の内部などの情報を調べることができる。本講演では最近のリチウムイオン電池等を対象としたコンプトン散乱・磁気コンプトン散乱の研究成果を紹介する。

前半では、いくつかのリチウムイオン電池正極材料の酸化還元に参加する電子状態を明らかにしたので報告する。コンプトン散乱の測定から、スピネル LiMn_2O_4 系の酸化還元軌道は従来考えられていた Mn 3d ではなく、O 2p 軌道であることを初めて明らかにした[3]。また、磁気コンプトン散乱の測定から Mn 3d- t_{2g} 軌道が結晶構造の安定化に参加することを見出した[4]。

後半は、コンプトン散乱 X 線スペクトルを 2次元検出器で計測し、イメージングする手法を開発しているので紹介する。100 keV 以上の高エネルギー X 線と軽元素の相互作用は、光電効果、レーリー散乱、コンプトン散乱の中でコンプトン散乱の寄与が支配的になる。したがって、コンプトン散乱で軽元素を検出することができる。例えば、CR2032 電池内の金属 Li 負極が明瞭に観測される[5]。なお、 MnO_2 正極内の微小な空孔なども観測されている。また、燃料電池を想定したグラファイト内の水の分布なども観測できる[6]。

SPring-8 は高輝度高エネルギー (円偏光) X 線を利用できる施設である。高い透過能を有する高エネルギー X 線を用いた元素や化学状態のイメージング技術が開発されつつある。

[1] A. H. Compton, Phys. Rev. 22, 409 (1923)

[2] A. H. Compton, Phys. Rev. 21, 483 (1923)

[3] K. Suzuki et al. Phys. Rev. Lett. 114, 087401(2015)

[4] H. Hafiz et al., Phys. Rev. B 100, 205104(2019)

[5] N. Tsuji et al, J. Synchrotron Rad. 28, 1174(2021).

[6] N. Tsuji et al., Appl. Sci. 11(9), 3851 (2021).