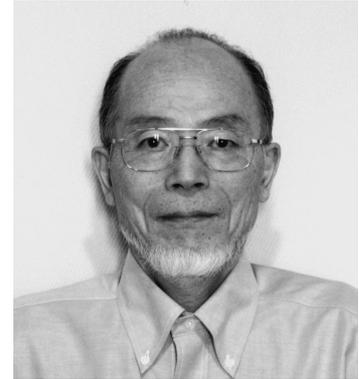


### インパルス近似考

坂井信彦 (兵庫県立大学名誉教授)



X線自由電子レーザー SAKULA で、生きた細胞の回折画像が得られたと、1月号のトピックスにあった。X線の照射で細胞が破壊される前に回折現象が起こるので画像が得られるのだという。究極の瞬間写真だろうか。このニュースを聴いて、コンプトン散乱でのインパルス近似を思った。コンプトン散乱では、X線と電子の間でエネルギーのやりとりがあるが、散乱X線が飛び出す時点では、まだ相手の電子は始状態のポテンシャル場に残っていて、結果として散乱X線のエネルギーには相手の電子のポテンシャルエネルギーが差し引かれない現象が起こる。本当にそうなのかと疑問に思われるかもしれないが、コンプトン散乱したX線のエネルギーを精密測定した実験事実である。この説明に、いわゆるインパルス近似、当事者以外には瞬間の変化に気が付かないとする近似、が使われる。コンプトン散乱ならばすべてこの近似が通用するのと言え、もちろん条件付で、やりとりされるエネルギー  $\Delta E$  が始状態の電子のポテンシャルエネルギーより十分に大きな場合に、より良い近似となる。 $\Delta E$  が小さくなるにつれて、コンプトン散乱はラマン散乱に近づく。それは同時に、X線の衝突相手が1個の電子の電荷密度から、多電子原子の電荷密度分布という空間の広がりに移行することにもなる。

ところで、こうした散乱の衝突時間はどれほどなのだろうか。そもそも衝突時間  $\Delta t$  はどのように定量化されるのだろうか。ふたつの物体が衝突している間は、 $\Delta E$  は両者のいずれの側にあるかは不確定なのだから、 $\Delta t$  は不確定性原理、 $\Delta E \cdot \Delta t \sim h$ 、で評価できると考える。これは独自の定義で教科書に書いてあるわけではない。 $h$  はプランク定数で、この式から、 $\Delta t(\text{fs}) \sim 4.13/\Delta E(\text{eV})$ 、となる。通常のコンプトン散乱では  $\Delta E$  は keV 領域なので、衝突時間はおおよそ  $10^{-3}$  fs、すなわち as (アト秒) が衝突の最短時間になり、この時間では電子は終状態に移る暇も無いということである。仏教の最短時間である“刹那”の時間はせいぜい数十 ms というのが通説らしいので、お釈迦様でも気がつかない一瞬の出来事である。

ところが、この式でブラッグ散乱の回折が起こる時間を評価しようとする、妙なことになる。ブラッグ散乱ではX線にエネルギー変化はない、即ち  $\Delta E=0$  なのである。とすると、 $\Delta t$  は無限大になってしまう。 $\Delta E$  の扱いに問題ありと睨んだ。エネルギーではなく、回折での散乱ベクトル  $K$  をX線の運動量変化  $\Delta p$  として使うべきではないか。そこで  $\Delta E = c\Delta p = \hbar cK$  で評価すれば  $\Delta t$  の発散はない。keV 領域のX線の回折では、この  $\Delta E$  は優に数 keV になるから、コンプトン散乱と同程度に極めて短い時間内で回折現象が起こると見なせる。SAKULA ではX線がコヒーレントであるから、 $n$  個の光子が同時にブラッグ散乱に関与するとすれば、 $\Delta t$  はさらに  $1/n$  に短くなるのであろうか。遷移確率が光子数に比例する光子の誘導放射に似ている。また、前方散乱のような場合は  $K$  が小さいから  $\Delta t$  が長くなると予想されるが、果たしてそうなのであろうか。

今ひとつ衝突時間で考える事がある。観測する X 線のエネルギーをどの精度で測定するかに依存するはずではないか。たとえば、1 eV の精度で散乱 X 線を測定しようとするならば、その X 線は“じっくり”衝突して出て来た成分であろう。この場合には衝突時間は fs になりそうである。類似の話は、放射性同位元素を  $\gamma$  線源とするメスバウア効果の観測例がある。寿命の長い  $\gamma$  線の成分を選択してスペクトルを観測すると、たしかに分解能が上がるのである。

不確定性原理はマイクロ世界の法則であるが、インパルス近似はマクロ世界でも似たような現象はあり得る。銃弾に撃たれたり、日本刀でばっさりやられた経験はないが、マンガ映画によくある場面で、やられた瞬間に痛みはなく、直後に痛みが襲ってくるなど、インパルス近似の好例であろう。しかし、この痛みのずれが定量的に正しいのか気になる。マクロな物理の話で衝突時間がでてくるのは撃力の場合である。物体に  $p$  なる運動量が外から加えられたとき、 $p$  を衝突時間  $\Delta t$  で割った量が、衝撃力  $F=p/\Delta t$  として物体におよぶ。衝突時間が短いほど、衝撃力が強い。ゴルフボールとクラブ、鋼鉄同士、あるいは鋼鉄とゴム板が衝突したときの衝突時間の実測値（物体が接触してから離れるまでの時間）はどの場合でも、100  $\mu$ s のオーダーのことである。これに対して、神経の伝達速度は40~65 m/s だそうなので、手か足に局所的な破壊が生じて、それが痛みとして脳が感ずるまでに、およそ10 ms を要する。たしかに定量的にも、やられた瞬間にインパルス近似が立派に成立することが判る。

撃力の話が強引に拡張すると、情報伝達でも、同じ量の情報（運動量）を伝言する際は、できるだけ手短かに述べる方が、相手はより迫力（衝撃）を感じ、より正確に理解することになる。やはり、だらだらした長話は効果が薄いのである。