

基礎講座 4 X線ビームの強度を測る

SPring-8/JASRI・安全管理室 多田順一郎

1. X線と物質の相互作用について

本講座では、放射光利用研究で使用するX線（光子）のうち比較的エネルギーの高いものを対象とします。具体的なエネルギー範囲は、10 keV前後から数百 keVに相当します。このエネルギー範囲の光子は、物質と(1) 光電効果 (2) コンプトン散乱 (3) レーリー散乱の三種類の相互作用をします。

1.1 光電効果

光電効果は、物質を構成する原子の軌道電子が光子のエネルギーをすべて吸収し、原子核の束縛を逃れて“光電子”として飛び出す現象です。この現象が起こるには、光子のエネルギーが、軌道電子の電離エネルギーより大きいことが条件です。その場合、光電子は、光子のエネルギーと軌道電子の電離エネルギーの差に相当する（初期）運動エネルギーを持って、放出されることになります。

軌道電子のひとつを光電子として放出した原子では、空になった軌道に、よりエネルギーの高い（電離エネルギーの小さい）軌道から電子が遷移してきます。このとき、両軌道の電離エネルギーの差に等しいエネルギーを持った光子（特性X線）や、そのエネルギーを受け取った電離エネルギーの小さい軌道の電子が放出されます（オージェ電子）。

光電効果を起こす確率は、物質の原子番号の4~5乗に比例し、光子のエネルギーの3~4乗に反比例します。また、特性X線の放出とオージェ電子の放出は互いに競合する現象ですが、一般に軽元素ほどオージェ電子の放出される割合が増えます。

特性X線やオージェ電子の初期運動エネルギーと、入射したX線のエネルギーと光電子の初期運動エネルギーの差は、何れも元素に固有の値であり、これらのエネルギーを測定することで、X線に照射された物質の性質を調べることができます。

1.2 コンプトン散乱とレーリー散乱

コンプトン散乱とレーリー散乱は、共に光子が電子によって弾性散乱される現象です。コンプトン散乱の場合には、光子の運動量（したがってエネルギー）の一部を受け取った電子が飛び出し、その分エネルギーを失った光子が散乱されます。一方、レーリー散乱の場合には、現象を古典的に描写すると、光子の振動電場で変位した軌道電子が同じ振動数の光子を双極放射する過程であるため、電子が放出されることはなく、散乱された光子の

エネルギーも入射した光子と変わりません。

コンプトン散乱もレーリー散乱も、散乱を起こす確率は物質の原子番号に比例します。

2. X線ビームの強度とは

放射光利用実験をするとき、観測する event の数を規格化するものは、標的に入射する X 線ビームの強度（またはその積分値）になります。したがって、放射光実験の結果に定量的な意味を持たせるためには、放射光ビームの強度（またはその積分値）を適切な精度で把握することが重要になります。

2.1 ビーム強度の意味

X 線のビーム強度という言葉は、通常二つの意味で使われます。第一は、単位時間に単位面積を通過する光子の数（photon flux）であり、第二は単位時間に単位面積を通過する光子のエネルギー（energy flux）です。単色 X 線であれば、photon flux に光子のエネルギー（ $h\nu$ ）を乗じれば energy flux となります。

本項の以下の議論では、簡単のため単色の X 線ビームに関する説明をします。多くの放射光実験は単色 X 線を用いますから、この制限は放射光実験に限り、過度に理想化した状況設定とはなりません。

2.2 X線の減弱

X 線ビームを構成する光子は、物質中で光電効果を起こすたびに吸収（消滅）され、コンプトン散乱やレーリー散乱を起こすたびにビームの進行方向から逸らされます。つまり、物質の中でこれらの相互作用が起こるたびに、X 線ビームの強度は弱まってゆきます。1 個の光子が物質中でこれらの相互作用をする“確率”は、その光子が通り抜ける物質の量に比例しますから、同じ量の物質は X 線ビームを（その強度によらず）同じ“割合”で減弱することになります。

X 線ビームが（単位面積当たり）単位質量の物質を通過したときに減弱される割合を、“質量減弱係数”といい、ふつう記号 μ/ρ で表します（単位は、習慣的に cgs 系の cm^2/g が使われます。なお、記号 ρ は物質の密度を表します）。質量減弱係数は、光子のエネルギーの函数であり、物質に固有の量です。距離 $1/\mu$ は、そのエネルギーの X 線ビームを $1/e$ に減弱するのに必要な物質の厚さを意味します。

なお、光子のエネルギー 20 keV 、 15 keV 、および 10 keV に相当する空気の質量減弱係数は、それぞれ約 $7.779 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{g}$ 、 $1.614 \times 10^0 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、および $5.120 \times 10^0 \text{ cm}^2/\text{g}$ ですから（表

- 1) これらのエネルギーのX線ビームは、空気中をそれぞれ約 1 m、50 cm、および 15 cm 通過すると、1/eに減弱します。

現在、質量減弱係数は各元素のほか、種々の化合物や混合物の値もデータ化されています（例えば：日本アイソトープ協会編集“アイソトープ手帳”丸善）。

2.3 散乱線

X線ビームは、物質を通過する際に減弱を受ける一方、コンプトン散乱やレーリー散乱によって、ビームの進行方向とは別の方向に進む光子（散乱線）を発生させます。散乱線には、これらの散乱過程で発生した光子のほか、X線によって励起こされた原子から放出される特性X線も含まれます。

散乱線は、放射線計測のS/Nを低下させる要因のひとつです。放射光ビームと異なり、散乱線の強度は発生源からの距離の二乗に反比例して減少しますから、ターゲット以外の散乱体（例えば減弱フィルターなど）をできるだけ検出器から遠ざけることで、散乱線によるS/Nの低下を押さえることができます。

なお、2.2項に値を示したように、放射光実験で利用されるエネルギー範囲では、空気も無視できない散乱体となります。したがって、X線ビームを空気中で長距離走らせる、S/Nの低下を招く可能性があります。

3. X線による気体の電離

X線ビームの強度は、光子の個数とエネルギーを全吸収型の検出器で観測すれば、原理的に測定可能であるはずですが、そうした測定法は、検出器の応答時間内に複数の光子が入射しない程度にX線ビームの強度が弱い場合にしか適用できない上、放射光実験の*in situ*強度モニターとして利用することもできません。

そこで、放射光実験では、X線ビームと“わずかな”相互作用をする透過型の検出器を用い、通過する光子数に比例して起こる相互作用で生成するものの量を計測してX線ビームの強度をモニターする、という方法が採用されます。

計測の対象となり得る“相互作用で生成するもの”にはさまざまな実体が考えられますが、気体は相互作用によるビームの擾乱が比較的少なく、そこに生じる電離の電荷量は精密測定に適しています。さまざまな気体のうち常温常圧の空気は、気体を閉じ込めるための容器壁なしに測定系（free air chamber）を組める、という利点があります。

気体中に生じる電離量を測定してX線ビームの強度を知るためには、X線による気体の

電離過程を定量的に評価できなければなりません。

3.1 気体の電離過程

X線が空気中を通過すると、その一部が、窒素、酸素、およびアルゴン原子と、光電効果、コンプトン散乱、およびレーリー散乱を起こし、その結果、光電子、オージェ電子、およびコンプトン電子（これらを総称して“二次電子”という）が空気中に放出されます。二次電子は、その運動エネルギーを熱運動レベルまで失う間に、空気中の中性原子の軌道電子とクーロン散乱を繰り返し、それらの中性原子を励起したり電離したりします。

ここで注意すべきことは、X線の相互作用の結果空気中に作られる電離電荷の圧倒的大部分は、二次電子が空気中を走る間に、その経路にあった中性原子から軌道電子をクーロン散乱で弾き出した結果である、という点です。例えば、20 keVの光子が酸素原子のK軌道の電子と光電効果を起こす場合、光電効果そのものではただ一对の酸素イオンと自由電子とを作るだけですが、放出された光電子とオージェ電子は、空気中に600対近い電離を生成することになります。気体が空気以外である場合も、気体の電離の大部分が二次電子によって作られる点は変わりません。

したがって、一般に気体の電離を指標としてX線ビームの強度を観測する際、X線ビームとそれが作り出す二次電子の空間分布の相違に注意する必要があります。なぜならば、二次電子はその発生場所から伝播しながら物質を電離するため、ある点に電離を生成する二次電子は、その点とは別の場所で（場合によっては別の物質と相互作用して）X線が作り出したものであるからです。

3.2 電離に使われるエネルギー

X線による気体の電離を定量的に捉えるためには、どれだけのエネルギーがX線ビームから二次電子に受け渡され、それがどのように気体の電離に使われたかを辿る必要があります。

X線ビームのenergy fluxは、物質を通過する間に、質量減弱係数で表される割合ずつビームから失われて行きます。しかし、その失われたエネルギーのうち、励起原子から特性X線として放出されたり、コンプトン散乱やレーリー散乱で散乱線として飛び去るエネルギーは、着目している系内で二次電子に受け渡されません。

また、二次電子に受け渡されたエネルギーも、すべてが気体の電離（および励起）に使われる訳ではなく、（低エネルギーX線の場合ほとんど無視できますが）一部は制動輻射として系外に散逸してしまいます。

それら電離や励起に寄与しない分を差し引いた質量減弱係数は、X線ビームの運ぶ単位面積当たりのエネルギーが、生成する二次電子（およびそのクーロン散乱によって中性原子から放出される“三次”以上の電子）を介して単位質量の物質を電離・励起するために使われる割合を表し、“質量エネルギー吸収係数”と呼ばれ、記号 μ_{en}/ρ で表します。

3.3 W 値

W 値は、荷電粒子が気体中に 1 対の電離を作り出すのに“消費”したエネルギーの平均値で、1 対の電離を生成する間に励起のため消費した平均エネルギーの分だけ、物質の電離エネルギーより大きな値を持ちます（例えば、表 4 に示すように、電離エネルギーが 13.6 eV の水素の W 値は 36.5 eV）。W 値は、気体の種類や密度と荷電粒子の種類やエネルギーなどに依存します。

もし、電子の W 値が既知である気体中に生成する電離電荷密度を測定することができれば、その測定値に W 値を乗じることで、その電離を引き起こした二次電子の“初期”運動エネルギーの総和（単位質量の気体あたり）を求めることができます。

4. 電離箱による X 線ビーム強度の測定

4.1 電離箱の仕組みと測定上の注意

電離箱は空気コンデンサ（あるいは他の気体を充填したコンデンサ）を検出器とする電離電荷測定系です。検出部には電荷捕集のための電圧（ V_{bias} ）を印加し、直列する高抵抗またはコンデンサの端子電圧を測定することにより、電荷の生成率または生成電荷の積分値を測定します。何れの場合も高入力インピーダンスの測定系であるため、外界の影響を受け易いことに配慮して使用する必要があります。

電離箱の印加電圧 V_{bias} は、ガス増幅が起きない範囲で、電荷再結合の影響が少なくなるレベルに設定する必要があります。ガス増幅とは、電場が電子を気体の電離エネルギー以上に加速できるほど強くなり、気体が電子の衝突で更に電離されて、X線の作用で生成したよりも多くの電離電荷を捕集する状態を言います。

気体中に作られた電離（イオンと自由電子）は、再結合して中性原子に戻れば消滅してしまいます。放射光のように強いX線ビームの場合、気体中に生成するイオンと電子の密度が高いため、再結合の確率が高くなります。しかし、再結合の影響は、複数の印加電圧で測定し、 $1/V_{bias} \rightarrow 0$ に外挿することで補正することができます。

同軸ケーブルは信号線がアース線で遮蔽され、ノイズを拾い難い構造になっていますが、アース線と信号線を隔てる絶縁体には圧電性がありますので、ケーブルの曲げ伸ばしをす

ると、暫くの間絶縁体の圧電に起因するノイズが測定に影響を与えることがあります。とくに、積分電荷量の測定の場合、ケーブルの敷設から測定開始まで、十分な時間をおくことが望まれます。

電離箱に接続されたケーブルやコネクタを X 線に曝すと、その部分が X 線に対して感度を持つ場合があります（STEM 効果）。これは、信号線とアースとの間に微小な空隙があり、その中の気体に生じた電離電荷が移動するため生じる擬信号です。したがって、ケーブルやコネクタは極力 X 線ビームに曝さないよう配慮する必要があります。

4.2 開放電離箱の測定値から X 線の強度への変換

開放電離箱で測定される量は、電荷生成率 (C/sec) または生成電荷量 (C) です。これを X 線強度に変換するためには、X 線が作用した空気の種類が必要で、この空気の質量は、コリメータの開口面積と捕集電極の面積とで決まる空間（有効体積）に含まれる空気の質量です。

電荷生成率密度または電荷生成密度が求めれば、空気の W 値を用いて、X 線から単位質量の空気に電離や励起の形で受け渡された（散乱線や特性 X 線の形で失われたものを除く）エネルギーの移行率密度または移行量密度が評価できます。これらの量は、X 線ビームの光子のエネルギーに対応する空気の質量エネルギー吸収係数を用いて、energy flux またはその積分値に換算できます。

このようにして測定・評価された X 線ビームの強度には、幾つかの注意点があります。第一に、2.2 項で述べたように、X 線ビームは空気中ですら減弱を受けます。したがって、開放電離箱（の実効中心）と放射光実験のターゲットとの間の空気による減弱の補正が必要になります。また、とくに低いエネルギー領域では、有効体積内で X 線ビームの減弱が無視できなくなり、その補正も必要になります。前者は、電離箱を移動させたときの測定値によって補正し、後者は、質量減弱係数を用いて、開放電離箱の実効中心の位置を補正します。

第二の注意点は、散乱線の影響です。有効体積に飛び込む X 線は、入射ビームであれ散乱線であれ、同様に電離を引き起こします。散乱線の影響を補正しなければ、正しい X 線ビームの強度は得られません。コリメータ自体（コリメータの内壁）も散乱源であることは、しばしば見落とされがちです。コリメータによる散乱線の測定値への影響は、有効体積とコリメータの距離を変えて測定することなどで評価できます。

表 - 1 乾燥空気 (~ 1 気圧) の質量減弱係数と 質量エネルギー吸収係数		
hν (keV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
5.0E+00	4.027E+01	3.931E+01
6.0E+00	2.341E+01	2.270E+01
8.0E+00	9.921E+00	9.446E+00
1.0E+01	5.120E+00	4.742E+00
1.5E+01	1.614E+00	1.334E+00
2.0E+01	7.779E-01	5.389E-01
3.0E+01	3.538E-01	1.537E-01
4.0E+01	2.485E-01	6.833E-02
5.0E+01	2.080E-01	4.098E-02
6.0E+01	1.875E-01	3.041E-02
8.0E+01	1.662E-01	2.407E-02
1.0E+02	1.541E-01	2.325E-02
1.5E+02	1.356E-01	2.496E-02
2.0E+02	1.233E-01	2.672E-02
3.0E+02	1.067E-01	2.872E-02
4.0E+02	9.549E-02	2.949E-02

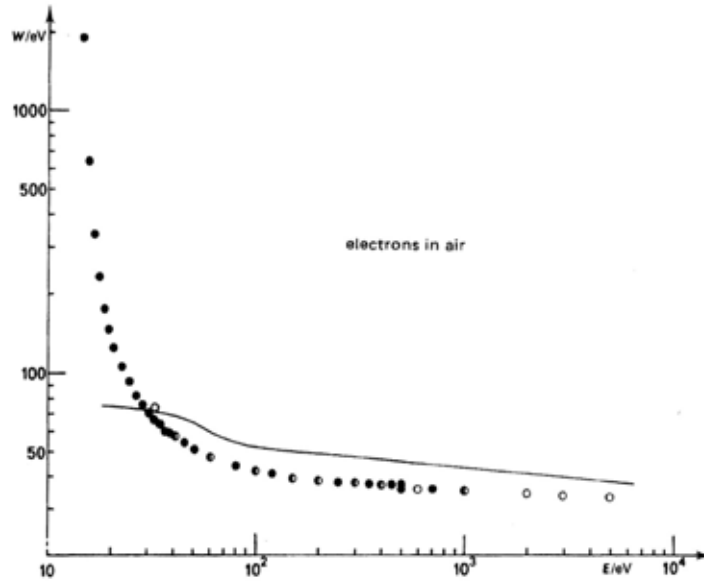
S. M. Seltzer: Radiation Research **136**, 147 (1993)

J. H. Hubbell: J. Appl. Radiat. Isotope **33**, 1269 (1992)

なお、標準状態の乾燥空気の密度は、 $1.293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ である。

表 - 2 乾燥空気 (~ 1 気圧) 中の電子の飛程		
T_{el} (keV)	R_{CSDA} (g/cm ²)	d_{normal} (cm)
1.0E+01	2.883E-04	2.230E-01
1.5E+01	5.886E-04	4.552E-01
2.0E+01	9.781E-04	7.565E-01
3.0E+01	2.001E-03	1.548E+00
4.0E+01	3.322E-03	2.569E+00
5.0E+01	4.912E-03	3.799E+00
6.0E+01	6.750E-03	5.220E+00
8.0E+01	1.110E-02	8.585E+00
1.0E+02	1.623E-02	1.255E+01
1.5E+02	3.193E-02	2.469E+01
2.0E+02	5.082E-02	3.930E+01
3.0E+02	9.527E-02	7.368E+01
4.0E+02	1.456E-01	1.126E+02

ICRU Report 37 (1984)



空気に対する電子の W 値の実験値 ICRU Report 31 (1979)

表 - 3 空気に対する電子の W 値	
相対湿度 (%)	W_{air} (J/C)
0	33.97
10	33.85
20	33.82
30	33.78
40	33.76
50	33.74
60	33.73
70	33.71
80	33.70
90	33.68

D. W. O. Rogers and C. K. Rose: Medical Physics 15, 40 (1988)

表 - 4 種々の気体に対する電子の W 値	
	W (J/C)
He	41.3 ± 1.0
Ne	35.4 ± 0.9
Ar	26.4 ± 0.5
Kr	24.4 ± 0.3
Xe	22.1 ± 0.1
H ₂	36.5 ± 0.3
CH ₄	27.3 ± 0.3

ICRU Report 31 (1979)