

第2章 光子と検出器の相互作用および波高スペクトルとの関係

光子(γ 線)は、検出器に入射して相互作用をした結果生ずる高速電子を検出することによって、間接的に測定される。そのため、光子と物質(検出器およびその周辺物質)との相互作用は γ 線スペクトロメトリーの基礎であり、とくに後に述べる3種類の相互作用が重要である。実際に観測される γ 線波高スペクトル(以下、単にスペクトルと言う)は、主として検出器の有感部内における単一あるいは多重の相互作用によってつくられるが、その他に遮蔽体などの周辺物質における相互作用によって生ずる他の放射線(散乱線やX線)によるものが含まれる。

γ 線スペクトルのうち、光電ピーク(全エネルギーピークともいわれる)は γ 線の正確なエネルギー情報と線源の放射能に関する情報をもっているため、スペクトル解析は主として光電ピークを用いて行われる。

2. 1 相互作用の種類および性質

2. 1. 1 光電効果

γ 線はGe検出器の有感部内に入射して全エネルギー(E_γ)をGe原子の軌道電子(KまたはL軌道電子、結合エネルギーI)に与えて、 $E_\gamma - I$ なる運動エネルギーをもつ高速電子(光電子ともいう)を生成する。この現象は光電効果といわれる。 E_γ がK軌道電子の結合エネルギー(I_K)より大きいときは、約80%がK軌道電子との相互作用で、20%が他の軌道電子との相互作用である。

光電効果の確率(全ての軌道電子を含む)は γ 線エネルギーのほぼ -3.2 乗に比例するので、比較的低エネルギーの γ 線において顕著な相互作用である。

— スペクトルとの関係 —

(1) 光電効果に続いて発生する全てのGe特性X線または競合的に発生するオージェ電子のエネルギーの合計はIに等しく、それらが全て検出器有感部内に吸収されるなら、その合計のエネルギーと光電子のエネルギーとの和は入射 γ 線のエネルギー(E_γ)に等しい。ほとんどの場合、光電効果では γ 線の全エネルギーが検出器に吸収されるので、発生する出力信号は γ 線の正確なエネルギー情報をもつ。これは単一エネルギー分布を作り、スペクトル中の光電ピーク(図2-1のピークPP)として観測される。

(2) γ 線エネルギーが低い(およそ100 keV以下)場合は、検出器有感部の入射面近傍での光電効果の確率が高いため、発生したX線が検出器に吸収されずに外に出る確率が高まる。その場合には、 γ 線のエネルギーからGe-X線(主として、KX線; 9.9 keV)のエネルギー(E_X)を差し引いた値($E_\gamma - E_X$)に相当する出力信号が発生する。この現象はスペクトル中にX線エスケープ・ピークとして観測される。

(3) 鉛遮蔽体など原子番号の高い周辺物質において γ 線による光電効果が生ずると、その物質表面近傍で発生した特性X線(鉛の場合、KX:72.85keV, LX:約10keV)が検出器に入射して検出される(図2-1のピークKX)。それを除くには鉛遮蔽体の内側表面を厚さ1mm程度のカドミウム板で覆い、さらに厚さ数mmの銅板で覆う。

2. 1. 2 コンプトン散乱

γ 線はエネルギーの一部を検出器有感部内の電子に与えて高速電子(コンプトン電子ともいう)を生成し、より低いエネルギーの散乱 γ 線($E_{\gamma'}$)となる。生成する高速電子のエネルギー($E_e = E_\gamma - E_{\gamma'}$)は散乱 γ 線の散乱角に依存して相互作用のたびごとに異なるので、結果としてエネルギー分布は連続分布となる。散乱角が180度の場合、コンプトン電子は最大のエネルギーをもち、連続分布の端(コンプトン・エッジという)に相当する。

Geにおけるコンプトン散乱の確率は γ 線エネルギーが数10keVから100keVぐらいまではほぼ一定であり、それ以上ではエネルギーに対して緩やかな減少関数となる。150keVより低いエネルギーでは光電効果の確率が高いが、それ以上ではコンプトン散乱の確率が高くなるので、数100keV以上のエネルギーの γ 線において顕著な相互作用である。

なお、エネルギーが変わらない散乱であるコヒーレント散乱は検出器内で信号をつくらないので、ここでは取り上げないこととする。

— スペクトルとの関係 —

連続スペクトル(図2-1の連続部分)は γ 線エネルギーの情報をほとんどもたないので、スペクトル解析には使われない。

(1) しかし、散乱 γ 線が続いて検出器有感部内で光電効果を起こした場合、はじめに生じたコンプトン電子のエネルギーと次に生じた光電子のエネルギーの和は入射 γ 線のエネルギーに等しく、結果として入射 γ 線エネルギーに相当する出力信号を生ずる。実際のGe検出器では、数100keV以上の γ 線に対しては、この多重の相互作用が光電ピーク(図2-1のピークPP)をつくる主たる過程である。検出器の有感部容積が大きいかほど上記の多重相互作用の確率が高くなるため、スペクトル中の光電ピークはコンプトン連続部に比べて相対的に増大する結果となる。

(2) 鉛遮蔽体など周辺物質において γ 線によるコンプトン散乱が生ずると、発生した散乱 γ 線が検出器に入射して検出される。散乱 γ 線の最小エネルギーは散乱角180度の場合に相当し(図2-1のピークBS)、入射 γ 線のエネルギーまで続く連続分布となる。その形状は γ 線源・検出器・遮蔽体間の幾何学的条件に依存するが、散乱角が90度以上の後方散乱が多い。検出器遮蔽体の内容積を大きくするほど、多重散乱(2回以上の散乱)も含めて後方散乱による連続スペクトル部分を減少させることができる。

2. 1. 3 電子対生成

γ 線エネルギーが $2m_0c^2$ (2個の電子の静止質量エネルギー=1.022MeV) 以上の場合には次のような相互作用が生ずる確率がある。主として原子核の近傍のクーロン場において、 γ 線は1対の陰陽電子を生成して全エネルギーを失う。発生した両方の電子の運動エネルギーの和は、 γ 線のエネルギーから2個の電子の静止質量エネルギーを差し引いた値 ($E_\gamma - 2m_0c^2$) となる。

電子対生成は γ 線エネルギーが $2m_0c^2$ 以上の場合に起こる相互作用であり、その確率は γ 線エネルギーが高いほど大きくなる。しかし、1.5MeVにおける確率は全相互作用の確率の100分の1程度であり、さらに高いエネルギーにおいて顕著な相互作用である。

発生した高速陽電子は検出器内で運動エネルギーを失うと近傍の電子と結合して消滅し(陽電子消滅)、2個の陽電子消滅光子 ($E = m_0c^2$) に変換される。

— スペクトルとの関係 —

陽電子消滅光子が続いて光電効果やコンプトン散乱を起こすか否かによって、次のようなエネルギーに相当する出力信号を生ずる。

- (1) 2個の消滅光子が相互作用をせずに検出器外にでる。この現象はダブルエスケープといわれ、出力信号は次の値に相当する。

$$E = E_\gamma - 2m_0c^2 \quad (\text{図2-1のピークDE})$$

- (2) 1個の消滅光子が光電効果を起こし、他の1個は検出器外にでる。この現象はシングルエスケープといわれ、出力信号は次の値に相当する。

$$E = E_\gamma - m_0c^2 \quad (\text{図2-1のピークSE})$$

- (3) 2個の消滅光子が両方とも検出器内で光電効果を起こす。この現象は全エネルギー吸収に等しく、出力信号は次の値に相当する。

$$E = E_\gamma \quad (\text{図2-1のピークPP})$$

- (4) 1個または2個の消滅光子が検出器内でコンプトン散乱を起こす。出力信号は連続分布となる。(図2-1の連続スペクトル部分)

検出器の有感部容積が大きいかほど上記(3)の確率は高くなるため、スペクトル中のピークPPは大きくなり、ピークDEとSEおよび連続部分は相対的に減少する結果となる。

鉛遮蔽体など周辺物質において γ 線による電子対生成が生ずると、そこで発生した消滅光子が検出器に入射して511keVのピークになる(図2-1のピーク511)。陰陽電子対が検出器内で消滅する時の運動量は0ではないので、生成する陽電子消滅放射線はドップラー効果をうけてエネルギーは $511 \pm 1\text{keV}$ 程度以下の範囲で増減する。したがって、消滅光子の光電ピークあるいはシングルエスケープピークは、同じエネルギーの γ 線の作るピークにくらべて多少広い半値幅をもつので、スペクトル解析の際に注意する必要がある。

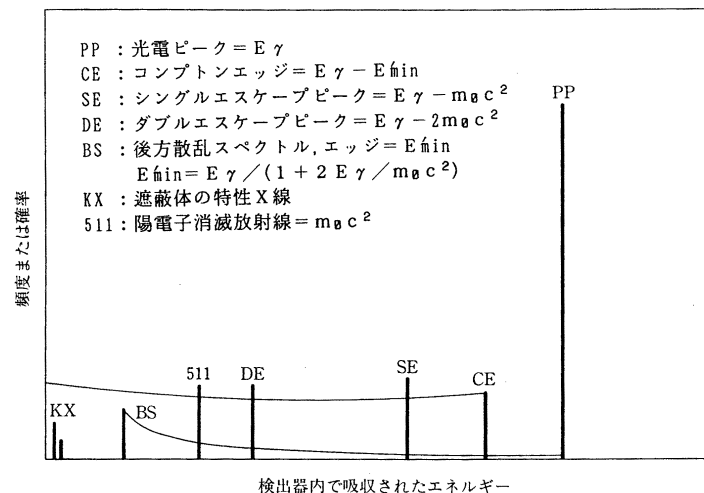


図2-1 γ 線の相互作用によってつくられるエネルギー分布

2. 1. 4 サム・コインシデンス効果

もし、線源から複数個の光子が同時に放出されるならば、それらの光子が同時に検出されてそれらの和の出力信号を生ずる確率がある。これはサム・コインシデンス効果あるいはサム効果と呼ばれる。2個の光子が同時に放出される場合を仮定すると、

- (1) 両方の光子が全エネルギーを検出器有感部内で失うと、両方の光子のエネルギーの和に相当する出力信号(サム・ピークと呼ばれる)を生ずる。
- (2) 一方あるいは両方の光子がコンプトン散乱をするとスペクトルの連続部分に相当する出力信号を生ずる。
- (3) 検出器の入射窓が薄いときには、高エネルギーの β 線あるいはEC壊変や内部転換に伴う特性X線とのサム効果が生じることがある。

このようなサム効果の現象が生じると、測定対象とするエネルギーのピークの計数率は減少するので、スペクトルの定量解析においてはその補正が必要となる。サム・コインシデンスの確率は両方の放射線の効率の積に比例するから、効率の高い測定ほどサム効果は顕著に現れる。また、 γ - γ サム効果の場合、測定対象のピーク計数率は他方の γ 線の全効率(ピークと連続部を含む全計数効率)に比例して減少する。

サム効果に関する補正法の詳細は6.5を参照されたい。