

放射線と物質との相互作用 filename=interaction131121.tex

放射線と物質の相互作用を注目する階層を区別して解説する。

1. 放射線と物質を構成する微視的な（ミクロな）粒子，すなわち原子・分子系との相互作用
2. 放射線とミクロな粒子との相互作用の莫大な個数の過程の集積効果としての、放射線と巨視的な物質（マクロな物質）との相互作用。

1 放射線と原子・分子系との相互作用

放射線が物質粒子に与える影響は原子への影響と原子核への影響に大別される。原子への影響としては原子と非弾性的に衝突し、その原子を励起状態にするか電離する。励起状態になった原子は電子を再配列する際に1個またはそれ以上の光子を放出する。ある粒子は原子核と非弾性的に衝突し、原子核を励起状態にする。励起状態になった原子核は基底状態にもどる際に γ 線領域の光子を放出する。 α 粒子は原子核と衝突しにくく、中性子は原子核に衝突しやすい。

1.1 アルファ線と原子・分子系との相互作用

アルファ線（ α 線）はヘリウム4原子核であり、他の放射線よりもはるかに重く、正の電気を持っているので、重荷電粒子という。重荷電粒子には他に陽子、重陽子、重イオンなどがあり、これらによる放射線はそれぞれ陽子線、重陽子線、重イオン線と呼ばれる。ここでは α 線を中心に議論する。 α 線と物質粒子との相互作用は主として次の三つである。

1. 励起作用

α 粒子のもつ運動エネルギーの少量を物質中の原子の軌道電子に与えて、相手の電子の軌道を変化させてしまう。原子は励起状態になり、不安定な状態となる。 α 粒子はわずかなエネルギーを失うだけで、そのまま直進する。これを励起作用という。

2. 電離作用（イオン化作用）

α 粒子のもつ運動エネルギーの少量を物質中の原子の軌道電子に与える点では励起作用と同じであるが、その分与するエネルギーが大きいと相手の電子の軌道を変化させるだけにとどまらず、原子の外にたたき出してしまう。この結果、原子間の化学的な結合が壊され、もともと電気を伝えない性質をもつ物質を電気伝導性にしたりする原因となる。この作用を電離作用（イオン化作用）という。

3. 散乱現象

α 線は通過する物質中の原子と衝突しながら、少し進路が変わる。これは α 粒子の持つ正電気と通過物質の原子の軌道電子との電氣的引力、原子核との電氣的反発力の

合力の結果である。この散乱現象によっても α 粒子のもっているエネルギーは失われるが、励起作用、電離作用に比べてほとんど問題にならない。

4. まとめ

α 線などの重荷電粒子線は物質中の原子と衝突して、運動エネルギーの約半分を励起作用で失い、残りの半分を電離作用で失う。電離作用で相手の原子から電子をたたき出すと、残りの原子は正の電気を帯びたもの（正イオン）になる。たたき出された電子と正イオンの一組をイオン対という。一組のイオン対を作るのに必要なエネルギーは通過する物質により異なるが、ほぼ30–40eV（電子ボルト）である。例えば、 α 線により空気中では1cm当たり20,000–70,000イオン対が作られる。

1.2 ベータ線と原子・分子系との相互作用

1. 電子の弾性散乱

高速の電子は物質を通過する際、原子（核）に接近するとクーロン力に運動エネルギー変えずに方向だけを変化させる場合がある。弾性散乱が起こる確率は電子の運動エネルギーにほぼ反比例し、散乱体の原子番号 Z の2乗に比例する。

2. 電子の非弾性散乱

ベータ線の本質は高速の電子（または陽電子）であるから、 α 線と同様に、物質中を通過すると励起作用と電離作用を起こし、エネルギー損失を受ける。1回の非弾性散乱による失われるエネルギーは非常に小さく、数eVから数10eVである。

3. 電子の制動放射

高速の電子は原子核付近を通過する際、電氣的引力で曲げられ、電磁波を放出してエネルギーを失う。この電磁波を制動X線といい、連続スペクトルを示す。（軌道電子の状態遷移の際に放出されるX線は特性X線と呼ばれ、線スペクトルを示す。）

4. チェレンコフ放射

荷電粒子が物質中において一様な運動をする際、その速度が物質中の光の速度（真空中の高速をその物質の屈折率で割ったもの）より大きい場合、放射エネルギーを出す現象。

5. 陽電子の消滅

β プラス崩壊などで生じた陽電子が速度を失い、電子と結合して”消滅”し、ガンマ線が発生する。電子と陽電子は質量が同じ（ m_e ）で電荷が同じ大きさで逆符号である。電子と陽電子の運動量をそれぞれ p_-, p_+ とすると、相対論的エネルギー E_{\pm} は $E_{\pm} = \sqrt{(m_e c^2)^2 + (c p_{\pm})^2}$ と表わされる。この過程の前後で、相対論的エネルギーとともに運動量も保存されなければならないので、同じエネルギー（同じ振動数 ν ）

の2本の γ 線がお互いに反対方向に放出される。プランク定数を h として次のように表わされる。

$$\begin{aligned} 2h\nu &= E_+ + E_- \\ &\approx \left(m_e c^2 + \frac{p_-^2}{2m_e}\right) + \left(m_e c^2 + \frac{p_+^2}{2m_e}\right). \end{aligned} \quad (1.1)$$

電子と陽電子の運動エネルギーの和が結合前に無視できるほど小さいとすれば、

$$\begin{aligned} h\nu &\approx m_e c^2 \\ &= 0.511\text{MeV} = 511\text{keV}. \end{aligned} \quad (1.2)$$

1.3 ガンマ線およびX線と原子・分子系との相互作用

ガンマ線（ γ 線）は原子と1回衝突すると、そのエネルギーのほとんどを失う。 γ 線が相互作用するのは大部分が物質中の電子であって、この相互作用の主なものは光電効果、コンプトン効果、電子陽電子対生成である。

1. 光電効果,photoelectric effect

光電効果は微視的には $h\nu$ なるエネルギーをもつ光子1個が物質（金属）中の電子の完全に吸収され、その電子を物質中からたたきだすことである。この過程で放出される電子を光電子（photo electron）という。ここで、光電子の最大速度を v_{\max} 、質量を m 、物質への結合エネルギー（仕事関数、または電離エネルギー）を W とすると

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 - W. \quad (1.3)$$

原子核に近いK殻の電子が最も影響を受けやすいが、これは原子核が運動量保存則に関与するからである。この過程の起こりやすさ（マイクロ断面積） σ_{photo} は、標的原子の原子番号 Z により、次のように表わされる。

$$\sigma_{\text{photo}} \propto \frac{Z^5}{(h\nu)^{3.5}}. \quad (1.4)$$

すなわち、原子番号が大きいほど、そして光子のエネルギーが小さいほどこの過程は起こりやすい。

2. コンプトン効果,Compton effect コンプトン効果は微視的には $h\nu$ なるエネルギーをもつ光子1個と物質中の電子の非弾性衝突であり、光はエネルギーを失い、波長が長くなる。エネルギーを受け取って跳ばされる電子を反跳電子とよぶ。入射光の波長を λ 、散乱光の波長を λ' 、光子の散乱角を θ とすれば

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta). \quad (1.5)$$

となる。この過程の起こりやすさ（マイクロ断面積） σ_{compton} は、標的原子の原子番号 Z により、次のように表わされる。

$$\sigma_{\text{compton}} \propto \frac{Z}{(h\nu)}. \quad (1.6)$$

すなわち、原子番号が大きいほど、そして光子のエネルギーが小さいほどこの過程は起こりやすい。

3. 電子陽電子対生成, pair creation γ 線の光子が原子核の近傍で消滅し、電子と正の電気をもつ陽電子の一对が生成される現象である。振動数 ν の γ 線が電子と陽電子対に転換するとすれば次のように表わされる。

$$\begin{aligned} h\nu &= E_+ + E_- \\ &\approx \left(m_e c^2 + \frac{p_-^2}{2m_e}\right) + \left(m_e c^2 + \frac{p_+^2}{2m_e}\right). \end{aligned} \quad (1.7)$$

したがって、この過程が起こるためには γ 線のエネルギーは

$$\begin{aligned} h\nu &= E_+ + E_- \\ &> 2 \times m_e c^2 = 1.022 \text{MeV} \end{aligned} \quad (1.8)$$

以上でなければならない。この過程の起こりやすさ（マイクロ断面積） σ_{pair} は、標的原子の原子番号 Z により、次のように表わされる。

$$\sigma_{\text{pair}} \propto Z^2 (h\nu - 2m_e), \quad (1.9)$$

となり、この過程が起こるためには $h\nu > 2m_e c^2 = 1.02 \text{MeV}$ でなければならない。

4. メスバウアー効果

これは γ 線の運動量を固体の全体で受けとめることにより、反跳エネルギー（反跳運動量）を近似的にゼロにし、共鳴吸収を起こさせることである。

1.4 中性子の原子核による減速と吸収

中性子は電荷をもたないので、物質中の電子との相互作用はごく小さく（中性子は小さい磁気双極子モーメントをもっていつが、その影響は実際上無視できる）、物質中の原子核による散乱を含む核反応だけが問題となる。

1. 速い中性子の減速 ($2 \text{MeV} \rightarrow 0.5 \text{MeV}$)

物質中の原子核との弾性散乱および非弾性散乱によってエネルギーを失う（＝減速される）。軽い核との弾性散乱の中性子減速効果は大きいですが、弾性散乱のマイクロ断面積は高エネルギーでは小さくなる。鉛や鉄などの重い核との非弾性散乱のマイクロ断面積は高エネルギーでは大きくなる。したがって、高速中性子の減速には重い核との非弾性散乱が重要である。

2. 中速中性子の減速 (0.5MeV → 0.025eV)

エネルギーを 0.5MeV 以下に減速された中性子は軽い核との弾性散乱により遅い中性子（熱中性子, エネルギー 0.025eV）に減速される。中性子の質量に近い水やパラフィンなど水素原子のような軽い原子（核）が中性子のエネルギーを速く減少させる。

3. 熱中性子の吸収

中性子が遅い中性子になると、多くの元素（原子核）は低エネルギー領域で大きな熱中性子吸収断面積をもっているため、中性子は直ちに吸収されてしまう。熱中性子を吸収するとほとんどの原子核が高エネルギーのガンマ線を二次的に放出する。しかし、ホウ素 $10(^{10}\text{B})$ は熱中性子吸収に対して非常に大きい断面積を持ち、反応により荷電粒子のみが生成される。またウラン $235(^{235}\text{U})$ やプルトニウム $239(^{239}\text{Pu})$ など熱中性子を吸収すると核分裂する場合もある。

2 放射線のマクロな物質中の透過と遮蔽

2.1 アルファ線のマクロな物質中の透過と遮蔽

α 線は、その経路に沿って非常に多くのイオン対をつくり、エネルギーを失っていく。経路 1cm あたりのイオン対の総数を比電離という。この値が大きいほど、 α 線のエネルギー損失が大きい。 α 粒子の経路距離と比電離の関係を表わす曲線をブラッグ曲線という。停止直前は α 粒子のエネルギーが低くなり、単位長さあたりのエネルギー損失は大きくなるので、比電離が急増する。(図参照)。励起にせよ電離にせよ、電子との一回の衝突によって失うエネルギーは、最初に持っているエネルギーに比べて非常に小さいが、衝突回数が非常に多いために、停止するまでに走行する距離は短く、空気中で高々 3cm くらいである。空気以外の物質では原子の数密度が高いため、衝突回数がさらに多くなるので、エネルギーの損失が早く、紙 1 枚でも停止する。

しかし、 α 線は励起作用や電離作用があるために、人間や生物の細胞を破壊するなどの害があるので、 α 線を出す物質を人間が飲み込んだりすると危険である。

2.2 β 線の物質透過と遮蔽

β 線により空気中では 1cm 当たり 20 – 40 イオン対が作られる。しかし、その質量は α 粒子の約 7360 分の 1 程度であるため、運動エネルギーは一般に α より低いが高速度に近く、光速に近い。 β 線はその質量が小さいために、原子や原子核と衝突する割合が少なく、電離作用を起こす割合も比較的少ない。したがって、物質中を走行中に失われるエネルギーも α 粒子ほど大きくない。また物質中の原子核は電子に比べてはるかに重いので、電子は通過する物質の原子核および電子との衝突のたびに、はじきとばされて（散乱されて）ジグザグ運動をしながら進行する。電子の飛程は α 線のそれに比べて大きく、0.1 – 1MeV の電子の飛程は空気中で約 330cm で、水中では 0.4cm 程度である。電子は通過する物質の原

子核および電子との衝突のたびに、はじきとばされて（散乱されて）ジグザグ運動をしながら進行するので、電子の飛程の測定は α 粒子の飛程と比べて難しい。

2.3 γ 線のマクロな物質中の透過と遮蔽

1. 光子のビームが細い場合

γ 線の減衰は次のようにして求まる。ある物質に入射する強度（＝単位時間あたり、単位面積当たりの光子数）を I_0 とし、物質中を長さ x だけ通過したときの強度を $I(x)$ 、さらに dx だけ通過したときの強度 $I(x+dx)$ とすれば、強度の減衰($dI \equiv I(x+dx) - I(x)$)は dx 、 $I(x)$ に比例する。この比例係数（＝吸収係数、吸収率）を μ とすれば

$$\begin{aligned} -dI &= \mu I(x) dx \\ \rightarrow I(x) &= I_0 e^{-\mu x}. \end{aligned} \quad (2.1)$$

μ は線吸収係数 (linear absorption coefficient) または線減弱係数 (linear attenuation coefficient) とも呼ばれる [1]。また、 $I(x)/I_0$ を(厚さ x における)透過率という。

ここで、吸収係数には光電効果、コンプトン効果、電子対創生によるものがある。

$$\mu = \mu_{\text{photo}} + \mu_{\text{compton}} + \mu_{\text{pair}}. \quad (2.2)$$

さらに、吸収係数はマクロ断面積と物理的に同じ意味になることに注意すべきである。吸収係数 μ を相手の物質の密度 ρ で割ったものを質量吸収係数 (μ_m) とよび、

$$\mu_m \equiv \frac{\mu}{\rho} \quad (2.3)$$

γ 線のエネルギー領域0.1 – 数 MeV においては、物質によらずほぼ一定の値をもつことが実験によりわかっている。

2. 光子のビームが幅広い場合

実際の光子ビームは、物質中で散乱を起こして、単純な指数関数的な減衰を示さない。ビームの幅を広くした実験を行うと光子ビームの強度の減衰は次のような経験式で表せる。

$$I(x) = I_0 B(\mu x) \exp(-\mu x). \quad (2.4)$$

$B(\mu x)$ はビルドアップ係数と呼ばれ、非常に粗い近似では $B(\mu x) \cong 1 + \mu x$ と考えてよい

2.4 中性子のマクロな物質中の透過と遮蔽

中性子は電荷をもたないので、主として原子核との反応を行いながら物質中を透過する.. そのために、中性子の遮蔽には多段階の過程と方法が必要である。まず、高速中性子を減速させるには、重い核による非弾性散乱が有効である。しかし、放射線の遮蔽という目的には、これでは十分ではない。というのは、非弾性散乱のために、相手の原子核は励起状態になるために、安定な状態（基底状態）になるまでに、 γ 線を放出する。この二次的な γ 線の効果が中性子の効果よりも大きい場合があるので、 γ 線の減衰、吸収も考慮しなければならない。光子と物質粒子の相互作用の性質から原子番号Zの大きい物質が遮蔽（減衰）効果は大きい。次に、中速中性子を水素など軽い元素を多く含む物質との弾性散乱で熱中性子まで減速する。熱中性子はボロン (^{10}B) により吸収させる。その核反応では荷電粒子が放出されるが、荷電粒子の遮蔽は一般には容易である。

2.4.1 中性子の物質による吸収と拡散

細い中性子束に対しては、ガンマ線の場合と同様に、入射時の強度 I_0 で、物質の厚さ x における強度 $I(x)$ は $I(x) = I_0 e^{-\mu x} = I_0 e^{-N\sigma x}$ と与えられる。

実際には、散乱中性子が再び検出器に到達するなどのことがあって複雑である。約 10 MeV の中性子を発生しているサイクロトロンを、水槽、またはコンクリート壁で囲み、その厚さを増したときに得られた線吸収係数は

$$\mu(\text{水}) = 0.105 \text{ cm}^{-1}, \mu(\text{コンクリート}) = 0.072 \text{ cm}^{-1} \quad (2.5)$$

である [2]。これから強度を 1/10 に減らすに必要な厚さは、水で 22 \square 、コンクリートで 32 \square となる。

原子炉内の中性子集団は原子核により捕獲されたり、核分裂により新しく追加された t り、他の場所に拡散したりする。（詳しくは原子炉内の拡散方程式により記述される。）

参考文献

- [1] 兵藤知典「放射線遮蔽入門」産業図書，1966 年。
- [2] 真田順平「原子核・放射線の基礎」共立出版，1994 年。
- [3] 成田正邦，小澤保知「原子工学の基礎」現代工学社，1998 年。