

# 第2章 放射線

## 2. 1 放射線の分類

### 2. 1. 1 電離放射線と非電離放射線

放射線が物質内へ入射したとき、この放射線は物質を構成している原子の軌道電子と衝突して、電子を軌道から追い出す。これを電離といい、この電離能力のある放射線を**電離放射線** (ionizing radiation) という(図2・1)。そして電離する能力を持たない放射線を**非電離放射線** (non-ionizing radiation) といい、これには電磁波の仲間である電波や可視光が属する(図2・2)。

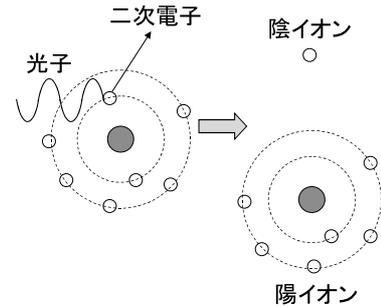


図2・1 放射線の電離作用

### 2. 1. 2 電磁波と粒子線

電離放射線は**電磁波** (electromagnetic wave) と**粒子線** (particle beam) に分類され、電磁波にはX線やγ線が、粒子線には電子線(electrons)、β<sup>-</sup>線(β<sup>-</sup>-rays)、陽電子線(positrons)、α線(α-rays)、陽子線(protons)、中性子線(neutrons)、重陽子線(deutrons)などが属する(図2・2)。

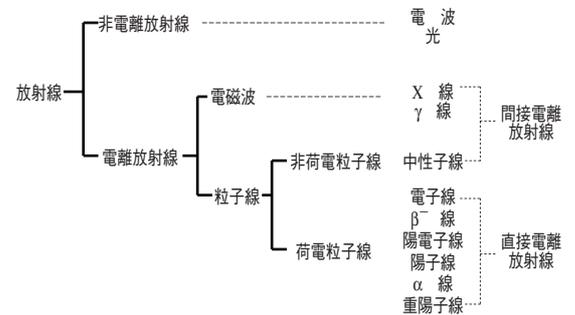


図2・2 放射線の分類

### 2. 1. 3 荷電粒子線と非荷電粒子線

**非荷電粒子線** (uncharged particles) は電荷を持っていない粒子線で中性子線がこれに属する。**荷電粒子** (charged particles) は正か負のいずれかの電荷を持った粒子線で、中性子線を除いた電子、陽電子、陽子などの粒子線がこれに属する(図2・2)。また、これらの粒子線はいずれも質量を有する(表2・1)。

### 2. 1. 4 直接電離放射線と間接電離放射線

**直接電離放射線** (directly ionizing radiation) は物質内で物質を構成する原子の軌道電子と衝突により放射線自身が電離を生じるに十分な運動エネルギーを持った荷電粒子線がこれに属する。**間接電離放射線** (indirectly ionizing radiation) はこの放射線が軌道電子との衝突により電離する量よりも、電離により生じた二次電子の方がはるかに多く電離作用をする電荷を持たない放射線で、X線、γ線、中性子線がこれに属する(図2・2)。

### 2. 1. 5 宇宙線

かつて、気球を用いて高度5000[m]で放射線による電離強度を測定した際、放射線強度が高度とともに増加することから、はるか遠くの宇宙から放射線が飛来していることがわかり、これを

表2・1 主な放射線の電荷と静止質量

種類	電荷	静止質量[amu]	備考
X線	0	0	原子核外より放出される電磁波
γ線	0	0	原子核より放出される電磁波
電子線	-1	0.00054858	加速器より放出される電子
β <sup>-</sup> 線	-1	0.00054858	原子核より放出される電子
β <sup>+</sup> 線	+1	0.00054858	電子の反粒子である陽電子
陽子	+1	1.0072764	水素の原子核
重陽子	+1	2.013553	重水素の原子核
α線	+2	4.0015061	ヘリウムの原子核
中性子	0	1.0086649	β <sup>-</sup> 壊変して陽子になる

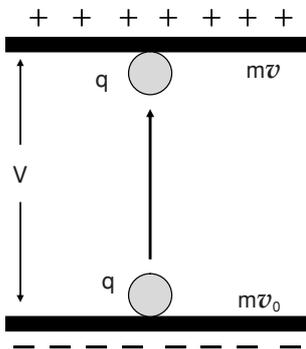


図2・3 電界と荷電粒子

宇宙線 (cosmic ray) と名付けた。

宇宙線は約10[cm]の厚さの鉛板を透過する硬エネルギー成分と、これを透過しない軟エネルギー成分に分類され、前者にはミューオン(>0.22ギガ電子ボルト [GeV]), パイオン(>0.4[GeV]), 陽子(>3[GeV]), 中性子(>0.3[GeV])などに、後者には電子, ミューオン(<0.22[GeV]), 陽子(<3[GeV])などに分類されている。

地球の大気外から入射する宇宙線を一次宇宙線と呼び、大気と一次宇宙線の相互作用により発生する粒子を二次宇宙線と呼ぶ。一次宇宙線が地球に入射するとき、エネルギーが小さい粒子は地磁気に捕獲され、磁力線に沿って北極・南極に向かうため、宇宙線の強度は高緯度地方が大きくなる。

一次宇宙線は陽子やヘリウム (He) 原子が多く、二次宇宙線はμ粒子(ニューオン)や電子が多く、これら粒子の多くは大気と相互作用により電子や光子となって地上に到達する。この現象をカスケード・シャワー (cascade shower) という。

## 2. 2 電場と荷電粒子

図2・3に示すように、真空中の正と負の電極間に電圧Vボルト [V]が印加されていて、電荷qクーロン [C]を持った電子が負から正の電極へ移動したとき、電子の行った仕事量Wジュール [J]を下式に示す。

$$W[J] = V[V] \times q[C] \dots\dots\dots(2 \cdot 1)$$

このとき、電極間が1[V]の電位差で、この電極間を電子が負から正の電極へ移動したとき、電子の得るエネルギーを1電子ボルト [eV]という。このエネルギーの単位にジュール (joule : J) がよく用られるが、ジュールは放射線にかかわる単位としては大きいきらいがあり、そのためにこの電子ボルト (electron volt : eV) が使われる。また、1[eV]の10<sup>6</sup>倍を1[MeV] (ミリオン・エレクトロンボルト) といって、原子核反応は大体この桁でエネルギーの授受が行われる。

2・1式より、1[C]の電荷量を持った荷電粒子が真空中で1[V]の電位差を移動するときに得る運動エネルギーは1[J]で、電子が1[V]の電位差を移動したときに得るエネルギーは1[eV]で、電子の電荷量が1.602189 × 10<sup>-19</sup>[C]であるから1[eV]と1[J]の関係を下式に示す。

$$\begin{aligned} 1[eV] &= 1.602189 \times 10^{-19} [C] \times 1[V] \\ &= 1.602189 \times 10^{-19} [J] \end{aligned}$$

物質に放射線が照射され、物質内で吸収された放射線のエネルギーは最終的には熱になる。熱量の単位にはカロリー [cal] が用いられ、1[cal] = 4.184[J]である。物質の温度は原子や分子の運動によるものであり、エネルギーEと温度Tとの関係を次式に示す。

[問題2-1] 1[MeV]を[cal]に換算しなさい。  
(答)

$$\begin{aligned} 10^6 [eV] &= 10^6 \times 1.602 \times 10^{-19} [J] \\ &= 1.602 \times 10^{-13} [J] \\ 1[cal] &= 4.2[J] \text{なので} \\ &= (1.602 \times 10^{-13}) / 4.2 \\ &= 3.8 \times 10^{-14} [cal] \end{aligned}$$

$$E = k \cdot T \dots\dots\dots (2 \cdot 2)$$

$$T : 273 + \text{℃}$$

$$k : 1.380662 \times 10^{-23} [\text{J} \cdot \text{K}^{-1}] (\text{ボルツマン定数})$$

図2・3に示すように、負の電極に位置する質量  $m$ 、電荷量  $q$  の静止した荷電粒子が、電圧  $V[\text{V}]$  で真空の電極間を加速され、正の電極へ到達したときの速度を  $v [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$  とすると、荷電粒子の運動エネルギーと静電気が行った仕事量が等しいことから1・18式と2・1式より下式が成り立つ。

$$\frac{1}{2} mv^2 = q \cdot V \dots\dots\dots (2 \cdot 3)$$

上式より荷電粒子が正の電極へ到達するときの速度  $v$  を下式に示す。

$$v = \sqrt{\frac{2q \cdot V}{m}}$$

陽子が真空の電極間  $V[\text{V}]$  にて加速された場合、陽子の電荷量は電子と同じであることから陽子の得られる運動エネルギー  $qV$  は電子と同じである。しかし、陽子の静止質量が電子に比べて約1840倍も重いので、陽子の速度は上式より

$$v = \sqrt{\frac{1}{1840}} = \frac{1}{43}$$

と、電子に比べて1/43遅くなる。

次に図2・4に示すように電圧  $V[\text{V}]$  で真空の電極間を質量  $m$  [kg]、電荷量  $q[\text{C}]$  を持つ荷電粒子が点Aを時刻0秒[s]で、右方向へ速度  $v [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$  で、点Cを時刻  $t[\text{s}]$  で通過したとすると、このとき、点AB間の距離を  $r[\text{m}]$ 、電界の強さを  $E$ 、加速度を  $\alpha$  とすると、これらの関係を下式に示す。

$$\text{電界の強さ} : E = V/r [\text{V} \cdot \text{m}^{-1}] \dots\dots\dots (2 \cdot 4)$$

$$\text{加速度} : \alpha = q \cdot E/m \dots\dots\dots (2 \cdot 5)$$

$$t \text{秒後の速度は} \quad v_x = v \quad v_y = \alpha t$$

$$t \text{秒後の荷電粒子の位置は} \quad x = vt \quad y = (1/2) \alpha t^2$$

$$y = \frac{1}{2} \left[ \frac{q \cdot E}{m} \right] \left( \frac{r}{v} \right)$$

### 2. 3 磁場と荷電粒子

図2・5に示すように磁束密度  $B[\text{Wb} \cdot \text{m}^{-2}]$  の一様な磁場が鉛直上向きにある。この真空の水平面内を質量  $m[\text{kg}]$ 、電荷量  $q[\text{C}]$  の荷電粒子が速さ  $v[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$  で動くとき、進行方向の右手の方向にローレンツ力(Lorentz force :  $L$ )が働き、その大きさを次式に

**[問題2-2]** 温度が20[℃]のとき、物質と平衡状態にある熱中性子のエネルギー[eV]を求めなさい。

(答)

2・2式より

$$E = 1.381 \times 10^{-23} \times (273 + 20) = 4.05 \times 10^{-21} [\text{J}]$$

$$1[\text{eV}] = 1.602 \times 10^{-19} [\text{J}] \text{であるから}$$

$$E = (4.05 \times 10^{-21}) / (1.6 \times 10^{-19}) = 2.5 \times 10^{-2} [\text{eV}]$$

**[問題2-3]** 10[cm]離れた真空の電極間に電圧1[kV]が負荷されている。このとき、電界の強さ、電子の受ける力、電子の加速度を求めなさい。ただし、電子の電荷量： $1.6 \times 10^{-19}[\text{C}]$ 、電子質量： $9.1 \times 10^{-31}[\text{kg}]$ とする。

(答)

電界の強さ：

$$2 \cdot 4 \text{式より } 1000/0.1 = 10^4 [\text{V} \cdot \text{m}^{-1}]$$

電子の受ける力：

$$F = qV = (1.6 \times 10^{-19} [\text{C}]) (10^4 [\text{V} \cdot \text{m}^{-1}]) = 1.6 \times 10^{-15} [\text{N}]$$

電界の加速度：2・5式より

$$\alpha = (1.6 \times 10^{-15}) / (9.1 \times 10^{-31}) = 1.76 \times 10^{15} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$$

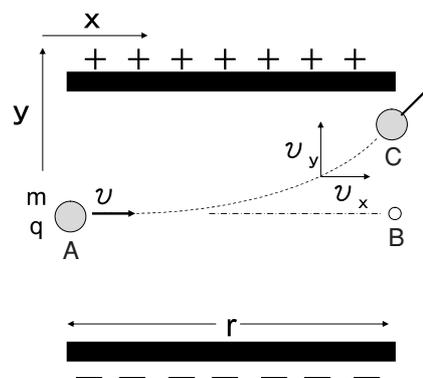


図2・4 電界に垂直に入射する荷電粒子

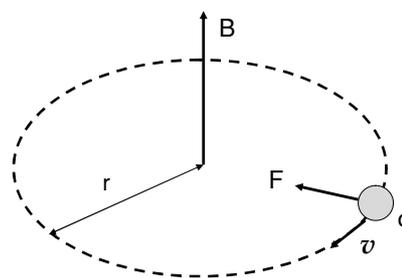


図2・5 磁場の中の荷電粒子

[問題2-4] 磁束密度が  $B = 5.5 \times 10^{-2} [\text{Wb} \cdot \text{m}^{-2}]$  の真空の磁場内を陽子が  $v = 4 \times 10^6 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$  で等速円運動を行っている。円運動の半径と周期を求めなさい。ただし、陽子質量 :  $m = 1.67 \times 10^{-27} [\text{kg}]$ 、陽子電荷量 :  $q = 1.6 \times 10^{-19} [\text{C}]$  とする。

(答)  
 2・7式と2・8式より  

$$r = \frac{(1.67 \times 10^{-27})(4 \times 10^6)}{(5.5 \times 10^{-2})(1.6 \times 10^{-19})} = 0.76 [\text{m}]$$

$$T = \frac{2 \times 3.14 \times (1.67 \times 10^{-27})}{(5.5 \times 10^{-2})(1.6 \times 10^{-19})} = 1.19 [\mu\text{s}]$$

示す。

$$L = q \cdot v \cdot B \dots\dots\dots (2 \cdot 6)$$

質量  $m [\text{kg}]$  の荷電粒子が速度  $v [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$  で、半径  $r [\text{m}]$  を等速円運動をすると、そのときの遠心力を1・12式と1・15式より下式に示す。

$$F = mv^2/r$$

ローレンツ力と遠心力は等しいことから

$$q \cdot v \cdot B = mv^2/r$$

$$r = mv/qB \dots\dots\dots (2 \cdot 7)$$

この円運動で一周するのに要する時間、すなわち周期  $T$  を1・13式より、下式に示す。

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB} \dots\dots\dots (2 \cdot 8)$$

上式より荷電粒子が一周するのに要する時間は速度  $v$  に関係しない。したがって、速度の速い(エネルギーの大きい)荷電粒子は大きい半径で、遅い(エネルギーの小さい)粒子は小さい半径で回転する(6章4節参照)。また、このときの加速度を下式に示す。

$$\alpha = qE/m$$

## 2. 4 電磁波

第1章で学んだようにコイルに電流が流れるとその周辺に**磁界**(magnetic field)が発生し、磁界が変化すると周辺コイルに起電力が誘導される。この場合、コイルがない空間においても変化する磁界の周りには電界が存在する。このように電界が磁界を産み、磁界は電界を産み、電界と磁界がお互いに関連し合いながら空間を波の動きのように伝わってゆくのが**電磁波**(electromagnetic wave)である。このとき電界と磁界の方向は互いに垂直であり、その進行方向もこれらの振動方向と直角である(図2・6)。

電磁波には電波(長波, 中波, 短波, マイクロ波), 光(赤外線, 可視光線, 紫外線), X線,  $\gamma$ 線が属し、これらは電磁波の持つエネルギー(振動数や波長)により分類されている(図2・7)。ここで、X線と $\gamma$ 線は発生方法が互いに異なっているが、物理的性質ではほかの電磁波と同じである。

この電磁波の有する物理学的性質を次に示す。

- ①電磁波は質量, 電荷を持たない(表2・1)。
- ②電磁波の伝播速度はすべて同じで、真空中では光速と同じである。
- ③電磁波の波長は  $10^8 \sim 10^{-14} [\text{m}]$  の広範囲にわたる。

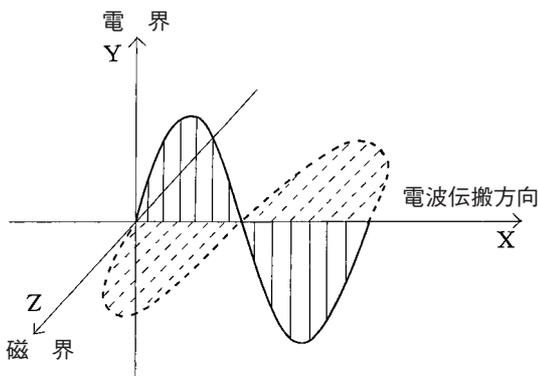


図2・6 電磁波の磁場成分と電場成分

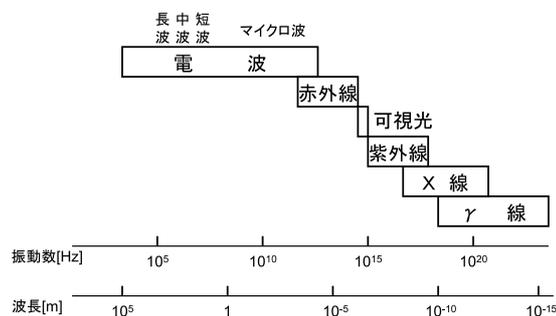


図2・7 電磁波の分類