

第2章

現代物理学の基礎

本書の主題となる核と放射線の科学的理解に必要な現代物理学を学習する。特に、相対性理論におけるエネルギー、基本粒子の量子論と相対論、光子と電子との相互作用、気体のエネルギー分布などである。光子や電子などの基本粒子のエネルギーの数値的理解が人体との相互作用を理解するための基礎となる。前提となる知識は高等学校教育での物理学である。

- 2-1 質量とエネルギーの等価性
- 2-2 基本粒子
- 2-3 基本粒子の波長
- 2-4 水素原子の量子論
- 2-5 基本粒子の相対論
- 2-6 光子と電子との相互作用
- 2-7 気体のエネルギー分布

2-1 質量とエネルギーの等価性

アインシュタインは特殊相対性理論で、質量とエネルギーとが等価であることを導いた。これが、核と放射線の物理を理解するための、基本理論のひとつである。静止している物体の質量を m_0 とすれば、それは次式のエネルギー E_0 と等価である。

$$E_0 = m_0 c^2 \quad (2-1)$$

ここで、 c は真空中での光速である。この式は、質量 m_0 が消滅するならば、上記のエネルギー E が発生することを意味する。この理論は、その後まもなく、核科学の実験で検証されるとともに、20世紀の世界に大きな衝撃を与えることになった。もちろん、アインシュタインが予言した物理に基づいたエネルギー生成が、宇宙の至るところで起きていることが判明している。

特殊相対性理論では、速さ v で運動する粒子の質量 m は、静止質量 m_0 に比べ、次式に従って大きくなる。

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (2-2)$$

粒子の速さが光速に近づくと、その質量は限りなく増大することが、上式からわかる。

運動している粒子のエネルギーは次式となる。

$$= mc^2 \quad (2-3)$$

上式に、2-2式を代入し、 $v/c < 1$ の条件で式を展開し、第3項以後を無視する。

$$= m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2 \quad (2-4)$$

すなわち、非相対論的な速さ ($v/c < 1$) の粒子のエネルギーは、静止質量エネルギーと古典的な運動エネルギーの和となることが理解できる。

例題2.1 1.0gの質量が消滅した場合に生成されるエネルギーはいくらか。

解 $E = m_0 c^2 = 1.0 \times 10^{-3} \times (3.0 \times 10^8)^2 = 9.0 \times 10^{13} \text{ J}$

例題2.2 日本の年間1次エネルギー消費量は2001年度で、 $2.2 \times 10^{19} \text{ J}$ である。これに相当する質量はいくらか。

解 $m_0 = \frac{2.2 \times 10^{19} \text{ J}}{9.0 \times 10^{13} \text{ J}} = 2.4 \times 10^5 \text{ g} = 240 \text{ kg}$

原子や核の物理では、エネルギーを通常、エレクトロンボルト (eV) という単位で表現すると便利である。1eVのエネルギーとは、1ボルト (V) の電位にある電子の位置エネルギーに等しい。すなわち、

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (2-5)$$

特に核の物理では、1eVの百万倍の大きさであるMeVのエネルギー単位で表現すると、より便利になる。

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-13} \text{ J}$$

例題 2.3 電子の静止質量エネルギーを MeV 単位で求めよ。

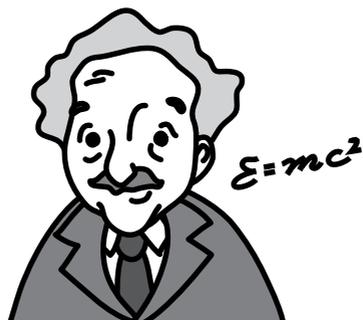
解

$$E = m_e c^2 = \frac{9.10 \times 10^{-31} \text{ kg} \times (3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2}{1.60 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}}$$

$$= 0.511 \text{ MeV}$$

この電子の値は、記憶していると役に立つことが多い。

コラム



アルバート・アインシュタイン(1879. 3. 14-1955. 4. 18)

南ドイツ・ウルムで生まれる。チューリッヒ工科大学で学ぶ。1905年に、特殊相対性理論を発表し、哲学思想にも大きな影響を与えた。チューリッヒ工科大学教授、ベルリン大学教授、カイザー・ウィルヘルム物理学研究所長となる。1916年に一般相対性理論を発表した。この理論が予測した太陽付近での光線屈曲が、1919年の日食観測により実証された。1933年、ナチスに追われ米国へ亡命し、プリンストン高級研究所の研究者となる。ドイツがポーランドへ侵攻し第二次世界大戦が勃発した1939年に、ルーズベルト米国大統領へ、ドイツの核兵器開発の可能性を知らせ、米国の開発を進言する手紙をアインシュタインの署名で送った。なお、この文面は核の連鎖反応の可能性を最初に考えたハンガリーの物理学者レオ・シラードにより用意された。

2-2 基本粒子

20世紀の前半までに、光の実体である光子(フォトン; photon)に加え、原子を構成する基本粒子である電子(エレクトロン; electron)、陽子(プロトン; proton)、中性子(ニュートロン; neutron)が発見された。この基本粒子は、当時これ以上分割できない粒子として素粒子と考えられていた。しかし、これら基本粒子のなかには、さらにクォーク(quark)から構成されている粒子があることがわかった。

本書の対象とする医学における核と放射線の物理では、クォークについてまでは言及しない。上記の基本粒子にニュートリノ(neutrino)を加えた範囲で、放射線医学を十分理解できる。

光子：電磁波に付随する基本粒子で、静止質量および電荷はゼロである。ひとつの光子は特定のエネルギーを有する。ただし、真空中ではいかなる光子も同じ速さを有する。すなわち光速は一定であり、その値 c は $2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ である。ただし、本書の例題や演習ではしばし $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ の値で計算する。なお、光速は、光源が運動していても観測者が運動していても、普遍の c と観測されることが特殊相対性理論の原理のひとつになっている。光子は、こうした特別な存在である。

光子のエネルギー E と周波数 ν には、次の関係がある。

$$E = h\nu \quad (2-6)$$

ここで、 h はプランク定数であり、 $4.14 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$ の値である。

波長 λ は、 $\lambda = c/\nu$ の関係から、

$$= \frac{1.240 \times 10^{-6}}{E} \quad (2-7)$$

ここで、 λ はm単位であり、 E はeV単位である。

さらに、光子の運動量 p は次式で与えられる。

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (2-8)$$

こうして、光も光子と認識することで、通常の粒子のように、エネルギーおよび運動量を有する粒子のごとく扱うことが可能となる。

例題2.4 炭酸ガスレーザーはレーザーメスとして、広く手術に利用されている。その光の波長は10600 nmである。対応する光子のエネルギーを求めよ。

解

$$E = \frac{1.240 \times 10^{-6}}{10600 \times 10^{-9}} = 0.117 \text{ eV}$$

電子：電子の静止質量は $m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$ である。電荷の値は -1.602×10^{-19} クーロン(coulomb)である。この電子の値を、 $-e$ と表示する。一方、質量が電子と同じで、電荷の大きさが $+e$ の粒子が存在し、それを陽電子(ポジトロン; positron)という。この陽電子は、現在の放射線医学では有用である。

陽子：陽子の静止質量は $m_p c^2 = 938.28 \text{ MeV}$ で、電荷の大きさが陽電子と同じ $+e$ である。電荷の符号のみが異なる反陽子も存在する。

中性子：中性子の静止質量は $m_p c^2 = 939.57 \text{ MeV}$ とわずかに陽子よりも大きく、電荷を有しない。核外へ放射された中性子は安定していない。半減期10.24分で、電子およびニュートリノを放射し陽子へ崩壊する。

ニュートリノ：電荷はゼロで、静止質量は電子の1000分の1よりも小さい。物質との相互作用はほとんどなく、それ自身崩壊せず安定している。

2-3 基本粒子の波長

光の実体を粒子として扱うことが可能となったが、一方、光子以外の基本粒子にも波動性があるとして扱うことができる。光子と同様に考えて、運動量 p を有する粒子の波長 λ はプランク定数 h を用いて、次式で定義される。

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (2-9)$$

光子の静止質量はゼロであるが、静止質量がゼロではない粒子の波長を考察する。静止質量がゼロではない粒子の運動量 p は次式で定義される。

$$p = mv \quad (2-10)$$

m は速さ v で運動中の粒子の質量で、2-2式で与えられる。この運動量の値を、2-9式へ代入すれば、波長が求められる。

光速に比べて無視できるほど遅い粒子の場合、すなわち非相対論的速さでは、2-4式第2項の運動エネルギーを K とすれば、 p は