

第一章 物质结构及其性质

第一节 原子核及核外结构

一、原子

物质是由原子组成的，一个经典的原子模型是由包含中子和质子的原子核以及它周围处于特定轨道或壳层中的电子所构成。每一个原子均由核及电子组成，其核小而紧密，半径约为 10^{-12} cm，核周围是按轨道运动的电子，电子在半径约为 10^{-8} cm 的轨道上运动。

与核相比，电子的质量很小，但是由于它们的弥散性，所以占据着很大的空间。可这样比喻：假如一个原子扩大到“占据”一个房间那么大，则其核处于房间的中心约针尖那么小的一点空间。由于物质的这种空虚性，一个高能电子或原子核就很容易穿过许多原子后与一个原子的任何部分相碰撞。

原子间的差别在于它们核的结构和电子数量及其排列上的不同，原子中的电子数被称为原子序数，以 Z 代表。它也表示原子核内的质子数。原子序数决定着各元素的性质，原子的化学性质决定于质子数或最外层轨道电子数。

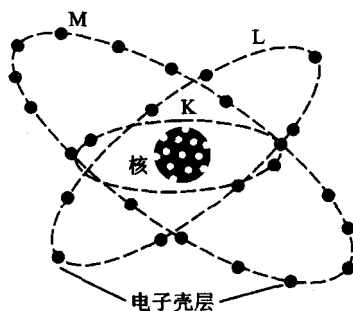


图 1-1 原子结构

二、原子核

任何原子核都由两种基本粒子——中子和质子所组成。中子和质子的大小和质量差不多相等。中子不带电荷，质子带一个正电荷，大小与一个电子所带的负电荷相等。一种物质的大多数物理和化学性质与核的中子和质子组成有关，核内的质子数就是原子序数 (Z) 决定原子的化学本性。

由于核和原子内的粒子都很小，惯用千克单位来表示它们的质量是不方便的。较为合适的单位是原子质量单位 (u) 它参照的基准是质量数为 12 的碳原子，其质量定为 12 000 u 。原子质量单位和千克间的关系是：

$$1 u = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

一个中子和一个质子的质量差别相当小，约只差 0.1% 而比电子质量大 1 900 倍。

三、核外结构

讨论 x 射线对原子的作用时，首先要了解原子的核外结构，电子位于围绕核空间中的轨道或壳层上，在多种放射性转变中，轨道电子也介入原子实际发射能量的过程中。当辐射物质相互

作用时，如与人体组织作用时，通常是与电子相互作用，而不是与原子核起作用。

(一) 电子数

正常原子中所含的电子数等于核内的质子数，这个数目就是某个化学元素的原子序 (Z)。每个电子带有负电荷，其大小等于一个质子的正电荷。在正常情况下，一个原子中的电子和质子数目相同，正、负电荷平衡。因此，原子无净电荷。如果一个电子离开原子，那就是说原子被电离，带了一个正电荷。电离结果是原子为正离子，电子为负离子。

电子的电量 e 为 $16.0 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，电子的质量 m 为 $9.1 \times 10^{-28} \text{ kg}$ 。

(二) 能级

电子处于绕核的不连续壳层中，壳层用字母来识别。

从靠近核的壳层开始，按照玻尔理论，核外电子由于离核远近不同，而具有不同壳层，每壳层中都含有一定电子数目的可能轨道。每一壳层均可近似地看作是原子核的同心圆球。半径最小的壳层叫做 K 壳层 最多只能容纳 2 个电子；第二壳层叫做 L 层，最多只能容纳 8 个电子；第三壳层叫做 M 层，最多只能容纳 18 个电子，随着原子序数的增加，还可能有 N、O、P、Q 等壳层。愈到外面的壳层可容纳的电子数就愈多，一般每层上的电子最多可能数目是 $2n^2$ 个。但最外层的电子数有严格的限制，最多不能超过 8 个。一般规律是，电子先将内层填满，然后逐层向外填。

根据量子理论，电子以极高的速度绕核做复杂运动，可把它的电荷看成为一层笼罩在核外的带负电荷的“电子云”。电子的核外运动很难说出某一时刻处在何处，只能用统计学去认识，即用概率的大小来表示。电子出现多的地方，概率大，也就是电子云密度最大的地方。

带负电荷的电子受原子带正电荷的核的束缚。它们之间具有很强的吸引力，即结合力。这种结合强度可用能量来表示。迫使电子脱离原子，所获得的能量叫结合能。一个电子的结合能等于使电子脱离原子所需要的能量。结合能是电子势能的一种形式，与任何形式的势能一样，必须将某个地方规定为零能量级。电子在原子外的一个位置，电子已不再受到核的影响，将它定为零点。

电子能级是结合能的负值，其概念可用图 1-3 来说明。靠近底部的电子处于最低能级，具有最大结合能。电子在原子内处于确定层或壳层中，每个壳层有不同的能级，最靠近核的 K 壳层处于最低能级。

图 1-3 是原子序数为 74 的钨，只画了它的 K、L 和 M 电子能级。外加电子位于 N 和 O 壳层 这两

$$n=3 \quad r_3=0.53 \times 3^2 \text{ \AA}=4.77 \text{ \AA}$$

$$n=4 \quad r_4=0.53 \times 4^2 \text{ \AA}=8.43 \text{ \AA}$$

$$n=\dots \quad r=\dots$$

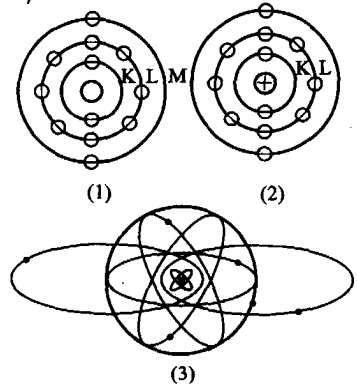


图 1-2 元素壳层结构示意图

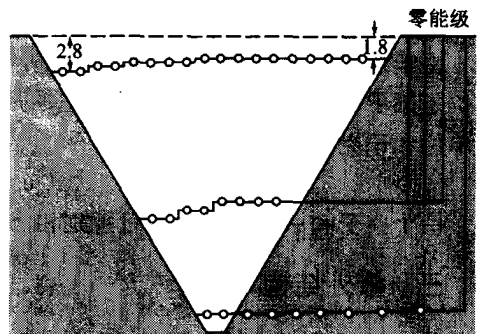


图 1-3 钨原子中电子的能级

个壳层位于 M 壳层之上并略低于零级，不同壳层之间具有显著的能量差。除 K 壳层外 其他壳层再分成另外的能级。例如，L 壳层分成 L I、L II 和 L III 三个能级。

电子在辐射过程中的作用通常涉及两个基本原理之一： ① 要使一个电子移至更高壳层（如从 K 至 L）或脱离原子，必须从某些能源取得能量；② 如果一个电子移至更低的壳层（如从 L 至 K），电子必须放出能量，通常会出现某种形式的辐射。能量大小决定于电子移动的壳层之间的能级差。

在一具体壳层中 如 K 层中，对于电子的结合能，与原子序数有关。只有较高原子序数的 K 壳层电子所有的结合能是在诊断用的 γ 和 X 射线光子的相同能量范围内。L 壳层电子的结合能比 K 层的小得多，但它也随原子序数的增大而增大。对于大多数物质，最外面电子的结合能在 5 eV 至 20 eV 范围内。显然，这些电子最容易脱离原子。

一个电子脱离一个原子的过程称为电离。由于 X 射线和 γ 光子具有足够的能量使电子脱离原子 故可认为 X 射线和 γ 射线是具有电离作用的辐射。核外电子接受的能量不足使其从原子逸出，只能使它升到较高的能级上，在其恢复到正常状态时，释放出能量，这种过程称为激发。可见光的光子能量低于大多数原子中的最小结合能，不会产生辐射。

（三）浓度

当光子与电子碰撞时，光子被吸收。光子通过物质时，它被吸收的机会决定于材料内可用的电子浓度。浓度或每立方厘米的电子数，可用以下公式计算：

$$\text{每立方厘米的电子数} = PN_A(Z/A) \quad (1-1)$$

这个关系式就是每立方厘米的原子数乘以原子序数（即每个原子内的电子数）。此关系式中的一些解释按序说明如下：阿伏伽德罗量 N_A 始终是不变值， N_A 每立方厘米的电子数仅与 Z 对 A 的比值有关。较低原子序数的元素在原子核中几乎是每个质子一个中子。 Z/A 的值近乎 0.5。随着原子序数和原子质量数的增加，核内的中子数也增大，导致 N/A 比值的减小，这种变化是相当小的。铅的原子序数是 82，原子质量 207， Z/A 比值是 0.4。在 X 射线应用中遇到的大多数材料 Z/A 比值的的变化都小于 20%。唯一例外的是氢，其比值等于 1。

因阿伏伽德罗数是常量， Z/A 比值也基本上是个常数，能明显改变电子浓度的唯一因素是材料的密度。大多数材料是纯元素，都有或高或低的唯一密度值。混合物和复合物的密度决定于各种元素的相对浓度。

电子浓度并不明显地随原子序数而变化的事实，可能暗示原子序数在电子 - X 射线相互作用中作用不大。X 射线光子通过物质时，相互作用的机会不仅决定于电子浓度，还与电子在原子结构内被束缚的牢固程度有关。电子结合能随原子序数而增加，高度束缚的电子浓度也随原子序数的增大而有效地增加。

原子序数是原子的一个重要特征，对任一种化学元素都有唯一的值。许多材料，如人体组织不是单一的化学元素，而是一种混合物的密集体。它与 X 射线的相互作用，可能对混合物定义一个有效原子序数 Z_{eff} 。

$$Z_{\text{eff}} = \sqrt[2.94]{f_1 z_1^{2.94} + f_2 z_2^{2.94} + f_3 z_3^{2.94} + \dots} \quad (1-2)$$

在此关系式中 f 是与每种元素有关系的电子总数目的分数。指数 2.94 是从 X 射线相互作用和原子序数间的关系导出的。水是人体的主要组成部分，可用于说明有效原子序数的概念。

水分子包含 2 个氢原子和 1 个氧原子，每个氢原子有 1 个电子，一个氧原子有 8 个电子。因此，电子分数 f 对氢是 0.2 对氧是 0.8。将这些值代入上面关系式，可得水的有效原子序数：

$$Z = \sqrt[2.94]{0.2 \times 1^{2.94} + 0.8 \times 8^{2.94}} = 7.42 \quad (1-3)$$

第二节 原子能级

根据玻尔的假设，电子在不连续的轨道上绕核旋转，而且在每个可能轨道上电子也都具有一定的能量（动能和势能的代数和）。因而电子在各个可能轨道上所具有的能量是不连续的。这些不连续的能量值叫做原子能级。

原子能级通常是以电子伏特来表示的。定义为一个电子通过 1 伏特电位差所释放出的能量。其功即为电荷与它通过的电位差的乘积。

电子在各个可能轨道上运动时所具有的能量，即能量公式：

$$E = -\frac{2\pi^2 me^4 Z^2}{h^2 n^2} \quad (1-4)$$

式中 $n = 1, 2, 3, \dots$, E 代表轨道电子所具有的能量，单位为焦耳。因原子能级常用电子伏特来表示， $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ 若把单位焦耳化为电子伏特 则除以 $1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ 即

$$E = -\frac{2\pi^2 me^4 Z^2}{1.6 \times 10^{-19} \times h^2 n^2} \quad (1-5)$$

随着原子序数 Z 的增加，即核外电子数增多，其原子结构也更为复杂。核外某电子除受核的吸引力外，还受其他核外电子的排斥作用。

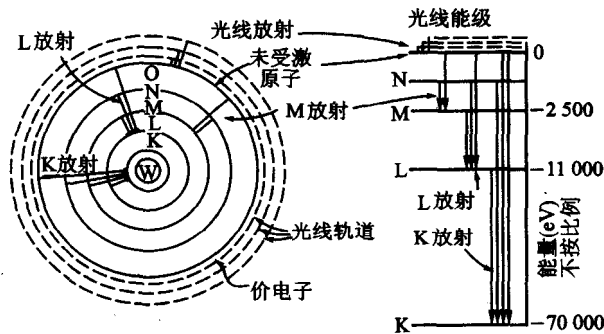


图 1-4 左侧是钨原子的电子轨道示意图，右侧示其能级以 eV 数表示的能量标度并没有按比例。X 射线通过电子向 K、L 及 M 层跃迁而引起。光线放射是由价电子从光线轨道向 O 层跃迁而引起的

以钨为例（图 1-4），K、L 和 M 层上电子结合能分别约为 70 000 eV，11 000 eV 及 2 500 eV。这意味着要除去此原子中 -K 层电子，必须供给它 70 000 eV 能量，或者必须以 70 000 e 伏特电位差的电子轰击它。要除去 -L 层电子大概需要 11 000 eV 的能量。

用电子伏特为单位来测定的结合能已在图 1-3 中表明。能量标度的零点是任意命定的，它

与非激发状态的原子相对应，并在简图的近顶部以零标记的水平线代表之。正常态的钨原子，其最外层价电子占 0 层，原子的能量用简图顶部附近的粗黑线代表之。如果该电子得到能量，将会向外逸出到轨道上，原子能级被提高。这些能级之间仅仅相差几个电子伏特。然而，原子不能保持这种能量状态，或电子不能停留在任一光线轨道中。当它降回到正常位置，就放射能量，这叫做光线辐射。

原子核对电子有很强的吸引力，这种吸引力称为结合力。最靠近原子核的壳层电子结合力最大，距离越远的电子结合力越小。另外，结合力还与原子序数 Z 相关， Z 越高，核内正电荷就越多，对电子的吸引力也就越大，从原子内移走电子所需要的能量也就越大。可见，移走原子中某轨道电子所需要的最小能量，就叫做这个电子的结合能。

第三节 能量和辐射

一、概述

物理世界有两个组成部分：能量和物质。在大多数物理过程中，能量和物质间不断地相互作用和转换。医学成像也不例外，在成像方法中，图像都是由能量和人体组织（物质）的相互作用形成的。对体内结构成像，要求能量源传递到人体，再从人体传递到适当的接收器。基本要求是能量必须能穿透物体。可见光是日常生活中用于传递图像信息的能量的主要形式，但它不能穿透人体，对人体内成像必须采用其他形式的能量。

各种成像方法中的一个普遍问题是，使用能量的一大部分会积存在人体内，它并不以相同形式的能量停留在体内，而是转换为其他形式的能量，如热和化学变化。积存能量也会产生不希望的生物效应。

在医学成像过程中，有两大类能量。一类是聚集形式的能量，其存在必须有一种媒质材料，能量存在于媒质中；另一类是在一种物质材料内产生的能量，并不断地运动，将能量从一个地方转送至另一个地方，这种能量就是辐射。用于医学成像的各种形式的能量，除超声和核磁共振外，基本是辐射形式。

二、能量

在医学成像中，与物质有关的能量形式的重要特征是它的供出能量形成辐射，当辐射被吸收时，能量又被重新取回。宇宙间一个基本物理定律是能量既不能创造也不会消灭，它是从一种形式转换为另一种形式。成像系统的各种部件，可将能量从一种形式转换为另一种形式。1 个电子质量是 9.1×10^{-28} g 这意味着 10.9×10^{26} 个电子的质量等于 1 cm^3 水的重量。

一个电子既有质量又有电荷，它可占有多种形式的能量，这就是电子取得、运输和放出能量的能力 致使它在 X 射线系统中成为有用的物质。

（一）静止质量能量

一个电子即使处于静止状态，但仍具有能量。根据物理学定律，一物质只要具有质量就具有一定的能量，在一定条件下，质量可转换为能量，或相反。下面是爱因斯坦方程式：

$$E = mc^2 \quad (1-6)$$

在此关系式中 c 是光速。根据爱因斯坦关系式，每个电子给出 510 keV，这个能量表现为一个光子。

(二) 动能与势能

1. 动能 动能是与运动有关的能量。运动着的汽车或棒球所具有的能量就是这种形式的能量。当电子运动时，它们也具有动能。

一个物体所具有的动能大小与它的质量和速度有关。对于大的物体（如汽车和棒球），动能与物质的质量和速度的平方成正比。物体速度加倍，它们的动能要增加为原来的 4 倍。在很多情况中，电子以接近于光速的速度在运动，这时能量与速度间不再保持上述关系。相对论理论之一指出，一个物体（如电子）的质量在高速情况下要发生变化，能量与速度的关系变得复杂。在典型 X 射线管内的电子具有的能量可能超 100 keV，并以大于光速一半的速度运动。

2. 势能 势能是一个物体因它的位置或构形所占有的一种能量，从本质上说，这是一个有相对意义的量。即一个物体在一个位置或处于某种构形时会比处于另一种状态具有更多或更少的势能。

电子具有两种形式的势能。一种形式与在电路内的位置有关，另一种形式与原子的位置有关。电子势能的一个重要的特征是电子升高至更高势能级水平时，需从某些源中得到能量，而当它移至更低势能位置时要放出能量。X 射线管内阴极的电子获得能量后以高速撞击阳极靶面，以产生热能和 X 射线能，就是这个机理。

(三) 能量交换与转移

1. 能量交换 电子小得看不见，往往很难想像电子能量的不同形式。图 1-5 所示的石块，用它来引证能量的不同形式，也适用于电子。

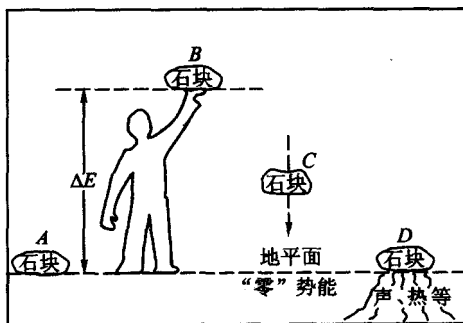


图 1-5 能量从一种形式转换为另一种形式

势能是相对意义的量。如图 1-5，水平地面设置为零势能位置。当石块高于地面之上时，它就处于更高的势水平。如果石块处于地面下的一洞内，它的势能相对于水平地面具有负值。然而，它的势能相对于更深的洞底部位置仍是正值。石块在位置 A 具有零势能（相对地说）因为它不运动，动能为零，静止质量能量与它的质量成正比。当人拾起这石块并将它举高至位置 B 时相对于位置 A 来说，它增高了石块的势能。石块所得能量来之于人，与电子靠电源装置可升高势能一样。

如果人在位置 *B* 释放石块使它落至地面，它的势能就转换为动能。随着石块往下运动，它的势能不断减少，且正比于它在地平面上的距离，不断地增加它的速度和动能。在即将撞击地面之前，它获得的动能正好等于人所提供的势能。（在 X 射线管内的电子经历着相似的过程，管内电子的热能变换为动能）。石块正好到达地面时，它比静止在地面 *A* 时具有更多的能量。然而，当它静止在地面 *D* 处时，它的能量与在 *A* 处时的相同。这部分能量转换为其他形式，如声音、少量热和使地面形状改变的机械能。当高速电子碰撞某种材料时，电子也失去它的动能，这能量转换为热和 X 射线辐射。

2. 能量转移 电子的主要功能之一是从一个位置输运能量至另一个位置。电子能量输运的原则是，电子从一位置获取能量，再运动到另一处将能量传递给某些其他材料，电子再回到能源，如此不断反复。

电子运动从一点将能量转移至另一点所经过的通道就是电路。任何电路至少有两个部件，一是电源，它能将能量从一种形式转换为另一种形式，并将它传输给电子。电池就是电子能源的例子；二是负载，当电子通过此器件时，它的能量转换为某些其他形式的能量。灯泡就是负载的例子，它将电能转换成光和热。

电子是以势能的形式携带能量的。当电子通过自由空间运动时，它带有动能。但通过固体导体运动时，就不是这样。一般电路中，一段导体比另一段导体具有更高的势能。从原则上讲，能源使电子升至更高的势能水平，一直维持到它通过负载器件时放出能量。在较低势能水平的电子回到能源，再重复此过程。

（四）能量单位

在实际应用中经常会碰到能量的量值，能量的单位很多，在此仅介绍一些与放射医学成像相关的能量单位。

1. 焦耳 焦耳 (J) 是米制国际单位制 (System International, SI) 中能量的基本单位。一般来说，涉及比较大的能量时，用焦耳作单位。

2. 热单位 热单位是在放射中为表示 X 射线管所产生的热能量而提出来的一个方便单位。一个热单位是焦耳的 71%，它逐渐为焦耳所替代。

3. 克拉德 克拉德是在放射学中为表示人体吸收的总辐射能量所提出的，但应用总趋势是用焦耳为单位。

4. 尔格 尔格是能量的米制单位，不是 SI 单位。它比焦耳小得多。它在放射学中的主要应用是，表示组织内吸收辐射能量的大小。

5. 电子伏特 电子伏 (eV) 是能量的电子单位。千电子伏 (keV) 和百万电子伏 (MeV) 都用于表示单个电子和光子的能量，单个可见光子的能量在几个电子伏范围内。在成像过程中用的 X 射线，它们的能量范围从 15 至数百千电子伏。

三个基本能量单位的关系是：

$$1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg} = 6.24 \times 10^{18} \text{ eV}$$

6. 功率 功率表示具体过程中能量转移的速率。瓦特 (W) 是用于表示功率的单位，1 W 等于能量以 1 J/s 的速率转移或转换。在医学成像中，功率用于描述 X 射线发生器的能力、X 射线管的极限值等。

7. 强度 强度是功率的空间浓度，它表示能量通过单位面积的速率。一般用每平方米或每

平方厘米的瓦数来表示。强度也用于表示 X 射线照射率，光强度等。

三、辐射

(一) 概述

辐射就是能量的空间运动。根据玻尔的研究，当电子在某一轨道上运动时，它处于稳定状态，并不向四周辐射能量，但它吸收了一定大小的能量后，就可以跃迁到能量较大的轨道上去。但并不是任何大小的能量都可被电子吸收，只有能量等于某两个可能轨道的能量差时才被电子吸收。吸收能量的电子跳到能量较高的轨道上去后，处于激发状态，不稳定，还要跃迁到能量较低的轨道上去，并发出光子。其光子所具有的能量 E 等于电子跳跃前后所具有的能量差，即

$$E = h\nu = E_2 - E_1 \quad (1-7)$$

式中 h 是普朗克常量， $h = 6.61 \times 10^{-27}$ erg/s， ν 是光子的频率 E_2 、 E_1 分别表示电子跃迁前后所在轨道上的能量。

外面壳层上轨道的电子，只要内壳层轨道上有空，就要跳到内壳层轨道上去。原子外层电子与核联系较弱，激发外层电子比激发内层电子容易。较外层电子受激发后，壳层上面有空位，这一壳层外的其他壳层上的电子就跃迁到这个空位上来补充，这时就有可见光、红外线或紫外线放出来。最内层电子受激发后，外面壳层上的电子跃迁到内层空位上来，将发射出波长更短，频率更高的电磁波 (X 射线)。例如原子序数较高的钨，假若有一个高速电子撞击到钨原子上，并激发出一个 K 层电子，在一个很短的时间内，另一 L 层上的电子可能会跳到 K 层上去，占据其空位，此过程将放出 59 000 eV 的 X 射线光子。若 K 层电子被撞击出去，则 L、M、N、O 等壳层上的电子都可能跳到 L 的空位上去，并放出一定频率的 X 射线。

(二) 电磁辐射

辐射可分两种类型，即电磁辐射和粒子辐射。前者只含有能量，不含有物质，穿透性强；后者既含物质，也含能量，穿透性差。在电磁辐射族内有几种具体辐射形式用于不同目的，如无线电 (射频线) 信号、可见光、紫外线、X 射线辐射和 γ 射线辐射。

电磁辐射在真空中运行的速度 c 为 3.0×10^{10} cm/s。各种波都具有一定的波长 λ 及频率 n ，其速度等于 $n\lambda$ 。即 $c = n\lambda = 3.0 \times 10^{10}$ cm/s。

电磁波的波长非常短，用埃 (Å) 作单位，即 $1 \text{ Å} = 10^{-8}$ cm。电磁波的波长决定物质的性质。绿光为 5 000 Å，蓝光为 4 000 Å，红光为 7 000 Å。如果波长超过 7 000 Å，人类肉眼不可见，称之为红外线。如果短于 4 000 Å，此辐射也不能为肉眼所见，称之为紫外线。0.1 Å 的辐射称为 X 射线。

当波长变得很短而相应频率变得很高时，就要考虑辐射的量子性质。

(三) 辐射的量子性

电磁辐射具有速度，且带有一定能量，此种能量束称为量子或光子。

原子内的电子都处于一定的能级而不是任意能级，电子可以从一能级移至另一能级，但这种能级之间转移不是任意的。这种能级不连续正是物质所具有的量子特性。简单地说，物质按确

① γ 射线惯称 γ 线；本书中均称 γ 射线。

定的量进行能量交换，而不是任意的。辐射通过空间时，正是单个光子的簇射。

光子最终在转移过程中被吸收，它的能量重新回到一个电子上。如果光子碰到的是电子能级接近于它的能量的材料，吸收的机会就大大提高。辐射光子的产生和吸收都是在某些材料内通过能量交换完成的。

虽然辐射光子是按某些物理量来区分的，但所有电磁辐射都以相同速度在真空中传播。光是电磁辐射最常见的形式，在自由空间，光速约为 3×10^8 m/s。假如 X 射线光子在它产生时间到被吸收时间内平均传播 1 m 那么 X 射线光子的平均寿命将是 3.3×10^{-9} s。一旦一个光子从能源产生并射出，它就以非常高的速度传播直至与某些物质相互作用，直到被吸收为止。在它非常短的寿命中，光子从辐射源带走小量的能量而传给吸收材料。

图 1-6 中对三个量的标度用辐射的不同类型的互相关系来表示。可以用光子能量、波长或频率来表征任何辐射。

1. 光子能量 光子只不过是能量的一个单元，它最重要的特征是它所包含的能量的多少。光子能量一般用电子伏或其适当的倍数为单位来说明。例如，计算辐射光子所带的能量，其波长是 1.0 \AA 或 10^{-8} cm ，相应的频率 $\nu = c/\lambda = 3 \times 10^{10}/10^{-8} = 3 \times 10^{18}$ ，即每秒振动数。所以，一辐射光子所带的能量 $E = h\nu = 6.61 \times 10^{-27} \times 3 \times 10^{18} = 19.83 \times 10^{-9} \text{ erg}$ 。

换算为电子伏特，即 $E = 19.83 \times 10^{-9}/1.60 \times 10^{-12} = 124\ 000 \text{ eV} = 12.4 \text{ keV}$ 即 1.0 \AA 波长带有 $12\ 400 \text{ eV}$ 能量。如果波长是 0.01 \AA 则频率将会扩大 100 倍，量子或光子的能量将是 $1\ 240\ 000 \text{ eV}$ 。光子的能量及辐射波长 λ 间的一般关系可从 $E = h\nu = hc/\lambda$ 确定 显然 波长愈短 光子所具有的能量愈大。

光子能量决定辐射的穿透能力。较低能量的 X 射线光子通常称为软辐射，而在波谱较高能量端的光子称为硬辐射，较高能量 X 射线辐射比较低的辐射穿透性大。

如果光子或粒子所具有的能量，超过辐射所通过的物质内的电子结合能，辐射就能起作用，使电子移位，并使物质电离。能产生电离的最小辐射能量因材料不同而不同，这取决于具体电子的结合能。在组织中许多元素的电离能量在 5 eV 至 20 eV 的范围内。因此，凡能量超过这些值的辐射都是电离辐射，光子能量值一般用于描述较高光子能量的辐射，如 X 射线、 γ 射线和宇宙射线的辐射。

2. 频率 频率就是波传播时振动或振荡的速率。应用于电磁辐射的物理学定律之一是光子能量 (E) 和频率 (ν) 成正比，它们的关系是 $E = h\nu$ 。

此关系式中， h 是普朗克常量，其量为 $6.625 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$ 而 ν 是频率，以赫兹 Hz 为单位 (周期每秒)。

频率是表征电磁波谱常用的量。理论上讲，X 射线辐射也有相应的频率。

3. 波长 用电磁辐射观察到的各种物理现象提示辐射具有某些波动性。波动的一个特征是两个相继峰值间的距离，亦即波长。这也是在一个振荡期间辐射向前传播的距离。

波长可用长度单位来表示。无线电和电视信号具有较长的波长，一般用 m 来表示。对较高

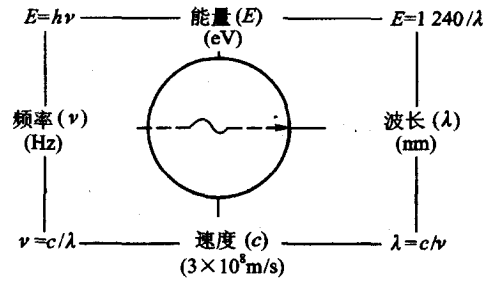


图 1-6 光子的物理特性

能量的光子，如可见光和 X 射线，则采用两种较小的长度单位：

$$1 \text{ 埃} (\text{Å}) = 10^{-10} \text{ m} \quad 1 \text{ 纳米} (\text{nm}) = 10^{-9} \text{ m}$$

光子能量与波长间的关系是：

$$E(\text{keV}) = 1.24 / \lambda(\text{nm})$$

能量与波长成反比关系，谱上最高能量处相当于最短波长处。

X 射线的波长（或频率）与被击出的电子所在壳层有关。在同种元素的原子中，按照轨道 K、L、M、N … 来分 L 层电子被击出时产生的 X 射线比 M 层电子被击出时所产生的 X 射线波长要短，M 层电子被击出就比 N 层电子被击所产生的 X 射线波长短，…，以此类推。内层轨道电子被激发所产生的 X 射线波长较短，外层轨道电子被激发产生的 X 射线波长较长。另外，某层轨道电子被击出后，来补充的电子所属的壳层不同而产生的 X 射线波长也不同。如 K 层电子被击出，L 层或 M 层上电子都可以跳入到 K 层中去补充，但 M 层电子跳入补充时产生的 X 射线波长要比 L 层电子跳入产生的 X 射线波长要短。

四、电磁波谱

电磁波谱包括所有电磁辐射，从长的无线电波到非常短而有穿透性的 γ 射线。根据光的电磁学说，光波与电磁波本质是一样的，只是频率（或波长）不同。

表 1-1 电磁线谱

频率/(周/s)	波长	光子能量	性质
1.0×10^5 3×10^{10}	$3 \times 10^5 \text{ cm}$ 1.0 cm	$4.13 \times 10^{-10} \text{ eV}$ $1.24 \times 10^{-4} \text{ eV}$	从广播范围的长波至短波及雷达超短波范围内的无线电波。这些波是由电振荡而产生的，能为电子装置所探知。它们会通过非导电物质层，但却为电导体所反射。
3×10^{12} 3×10^{14}	0.01 cm 0.0001 cm ($10\,000 \text{ Å}$)	0.0124 eV 1.24 eV	红外线辐射。它们是由于分子振荡原子较外层电子激发而产生。它们由火炉、散热器的热发生出来，且能为热机械及胶片所检出。红外线不透过大多数固态物。
4.3×10^{14} 7.5×10^{14}	$7\,000 \text{ Å}$ (0.00007 cm) $4\,000 \text{ Å}$	1.77 eV 3.1 eV	从红外线由黄、绿及蓝到紫范围内之可见光。由于原子的较外层电子激发而产生，由灯及含气管中放电而发生出来。能为胶片、光电管及肉眼察知。被物质如玻璃所传导。
7.5×10^{14} 3.0×10^{16}	$4\,000 \text{ Å}$ 100 Å	3.1 eV 124 eV	紫外光。由于原子的较外层电子激发而产生。能为胶片、盖革计数器及电离室检出。产生皮肤红斑；杀菌并为产生维生素 D 的因素之一。
3.0×10^{16} 3.0×10^{18}	100 Å 1 Å	124 eV $12\,400 \text{ eV}$	软性 X 射线。由于原子的较内层电子激发而产生。能为胶片，盖革计数器及电离室检出。有穿过很薄的物质层的能力。由于其穿透力有限，在放射学中无甚价值。

续表

频率/(周/s)	波长	光子能量	性质
3.0×10^{18} 3.0×10^{19}	1 Å 0.1 Å	12 400 eV 124 000 eV	诊断用 X 射线及浅部治疗。
3.0×10^{19} 3.0×10^{20}	0.1 Å 0.01 Å	124 keV 1.24 MeV	深部治疗用 X 射线及镭蜕变产物中来的 γ 射线。
3.0×10^{21}	0.001 Å	12.4 MeV	小电子加速中产生的放射线。
3.0×10^{22}	0.000 1 Å	124 MeV	大电子加速中产生的放射线。
3.0×10^{23}	0.000 01 Å	1 240 MeV	大的质子同步加速器如百万电子伏特加速器或宇宙线加速器 (cosmotron) 中产生。

将全部线谱的频率、波长、光子能量与性质总结于表 1-1 上。应该强调，线谱区域是互相重叠的，当从无线电波区域移行到红外线区域，或从紫外线区域移行到 X 射线区域时，并不发生性质上的突然改变。表中光子的能量也就是产生相应波长辐射所需要的能量。例如，X 射线管产生波长为 0.01 Å 的 X 射线需要 1.24 MeV。1.24 MeV 能量不能产生比比更短的波长，但能产生比比较长的波。

第四节 能量放射

为了理解原子放射能量的机制，再来复习一下钨的能级（图 1-3）。假定有一高速电子撞击在一钨原子上，并撞出一个 K 层电子，这至少需要 70 000 eV 能量。在很短时间内，另一 L 层上的电子可能会降落到 K 层上去，占据其位。此过程发生时就有 70 000 - 11 000 = 59 000 eV 能量作为 X 射线被放射出来，而此放射线的波长将是 $12.4/59 = 0.210 \text{ Å}$ 。

高速电子击出 L、M 或 N 层电子，而不触犯 K 层电子这种情况，也是可能出现的。假定 L 层电子（结合能 11 000 eV）被击出而其空穴被 M 层电子（结合能 2 500 eV）所填充，则发射的放射线能量为 11 000 - 2 500 = 8 500 eV，波长 $12.4/8.5 = 1.46 \text{ Å}$ 。在这种情况下，被发射电子以电子伏特表示的能量，刚好是两种结合能的差数。虽然某一些电子比另一些电子被发射的概率高，但原子中任何电子都有被高速电子撞击而发射出去的可能性。

要从钨上产生可见光，必须使光激发价电子到一处层光学轨道上去，当它回降时，能量会放射出来，但是其数量只有几个电子伏特相当于可见光的波长。

任何一个轨道上的空穴都可有几种方式来填补。如 K 层电子被除去，则 L 层、M 层或其他层上的电子会降落到此空穴中去，此时，将会产生相应的放射线。实际上能级图谱更复杂，因为 L 层分为 3 个支层，M 层分为 5 个支层，N 层分为 7 个支层。

低原子序数元素的 K 层结合能小，碳为 285 eV，氧为 528 eV。对于人体有机组织可取其平均能量 500 eV。“组织”的标识 K 层放射线的波长 $(12.4/0.500) = 24.8 \text{ Å}$ ，这种射线很软，会在组织中很短时间内被吸收。

第二章 电磁辐射与粒子辐射

第一节 辐射的种类

辐射就是一种能量的空间传递。从能量传递和变化的不同角度出發，辐射又可以有多种不同的分类方法。根据辐射的来源可以将辐射分为天然辐射和人工辐射，根据辐射的性质可以将辐射分为非电离辐射和电离辐射。

一、天然辐射和人工辐射

(一)天然辐射

天然辐射通常是指来自外太空的宇宙射线及存在于食物、空气及居住环境中的天然放射性物质所产生的各种辐射。

辐射是一种能量的空间传递，它无处不在，甚至连人体本身都无法避开。几乎每一时刻人类都会接触到各种各样的辐射，特别是天然辐射。统计表明，在世界各地平均每人受到的天然辐射剂量一般都是由每年 1 毫希沃特到 10 毫希沃特。

地球在它诞生的时候，同时诞生了如铀 - 235、铀 - 238、钍 - 232 等多种天然放射性核素。从某种意义上说，地球的诞生就是核转变及辐射的结果。目前已知的元素有 107 种而核素却有 2 000 多种，其中近 90% 是放射性核素。它们因衰变而产生的子体也同样具有放射性和辐射性，同时又表现出不稳定性。这些子体放射性核素会继续衰变，直至到达相对稳定的状态。它们在衰变期间会放出 α 粒子、 β 粒子或 γ 射线。

铀 - 235、铀 - 238、钍 - 232 的半衰期分别为 7 亿年、45 亿年、140 亿年。

这些放射性核素直到今天仍然存在于人类的生活环境中。地壳、土壤及建筑材料内都含有这些天然的放射性核素，人们吸收到的天然辐射剂量必然与所在地区的土质成分有关，也与其居所的建筑物料有关。

氡(特别是氡 - 222)是一种主要的天然辐射源。氡 - 222 主要由泥土及岩石中的铀 - 238 衰变产生，并从地表散发至大气中。如室内空气不流通，散发出来的氡气会积聚在室内。氡气在衰变过程中会放出 α 粒子，当吸入氡气时，肺部便会受 α 粒子影响。保持室内空气流通，可以避免氡气的聚集。

另一种天然辐射是来自于太空的宇宙射线。由于大气层有阻挡宇宙射线的作用，因此离地面越高，宇宙射线的强度就越强。宇宙射线的主要成分是高能量的质子，其次是氢原子核及少量原子序数 3 或以上的重粒子和离子。宇宙射线进入地球大气层后，会与大气高层的氮、氧等原子核发生反应，产生氦、碳 - 14 等放射性核素及中子、质子、电子、 μ 介子、 π 介子等次级粒子。

另外，人体内也含有放射性核素，例如钾 - 40、铀、钍、镭、碳 - 14、氡、钋等。人们日常吃的食物也含有少量放射性物质，食物被消化后会被身体吸收，这些放射性物质自然的成为了身体的一

部分。放射性物质会自行衰变、减少或排出体外。当食入和排出的放射性物质达到平衡时，体内便会维持在一个相对稳定的水平上。

（二）人工辐射

人工辐射以医疗诊断的 X 射线所占比例最多，其余的来源于大气中。由于核试验产生的放射性尘埃、夜光表、电离室、烟雾探测器等。

人工辐射在医学上和工业上都有广泛用途，由于辐射对人体可能有害，人们在辐射的应用和防护上都进行了很多研究，以期在应用过程中能够保护使用者的安全。一般地说，人们吸收的人工辐射远比天然辐射小。而当中以医疗诊断和治疗时所引致的辐射剂量占绝大部分。

在医疗诊断的辐射检查和治疗过程中，患者必然接触到辐射。如在进行 X 光检查时，患者需要直接暴露在 X 射线下。又如在进行某些器官的造影时，可能需要将放射性物质注入或食人体内，对于放射治疗更是如此。

核能发电也是人工辐射来源之一。核电站在运作过程中排放出带有微量放射性的废气和废水，同时核废料在运送或处理过程中也会放出微量放射性物质，这些都是人工辐射的来源之一。

相关资料显示，1945 年至 1980 年期间，世界各地进行了多次大气核试爆，所产生的放射性尘埃随风扩散，部分沉降到地面上。显然，这些放射性沉积物为人们生存的自然环境增加了额外的人工辐射。

其他人工辐射来源包括电视机及显示器等，它们的真空管会发出 X 射线。夜光手表和烟火感应器等消费品中也含有放射性物质。

应用于工业、医疗及教育的放射性物质，虽然经过长时间使用后，会失去原有的功能，变成废料，但仍含有部分残余辐射。

二、非电离辐射及电离辐射

（一）非电离辐射

非电离辐射一般是低能量的电磁辐射。经常接触到的有紫外线、光线、红外线、微波及无线电波等。

相对而言，它们的能量不高，只会使物质内的粒子产生振动，使温度上升。事实上，非电离辐射在生活中已被广泛应用。例如煮食用的微波炉及通讯用的无线电波等。

同时，我们要小心紫外线，虽然它不是电离辐射，但从太阳发出的紫外线亦足够灼伤皮肤。在云量较少的日子，应该采取防晒措施，避免被太阳的紫外线灼伤。非电离辐射亦包括超声波。超声波是很高频率的声波。超声波可以形成超声波影像，用于某些疾病的诊断。

（二）电离辐射

电离辐射包括高速粒子及高能量电磁波。它们的高能量可把其他原子内的电子撞出原子之外，产生带正电荷的离子及带负电荷的电子。如图 2-1 所示。

三、电磁辐射和粒子辐射

将辐射分为电磁辐射和粒子辐射是放射物理学常用的分类方法。

电磁辐射的实质是仅含有能量而没有静止质量的电磁波，具有相对强的穿透性。粒子辐射是既有运动能量又有静止质量的高速运动的粒子，穿透性能相对较差。

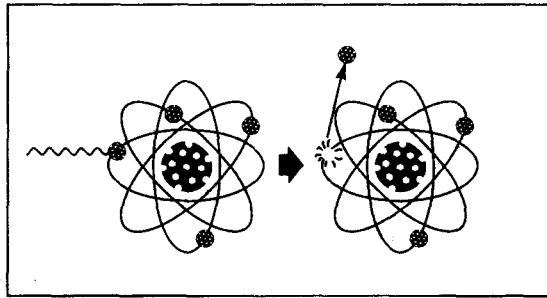


图 2-1 电离辐射

第二节 电磁辐射

电磁辐射是一种可以在相垂直的电场和磁场中随时间变化而交变震荡形成向前运动的电磁波，是能量以电磁波的形式通过空间传播的现象。

在电磁辐射族内有几种具体辐射形式用于不同的目的，如无线电（射频辐射）信号、红外线、可见光、紫外线和目前得到广泛应用的 X 射线和 γ 射线（图 2-2）。

各类电磁辐射就其本质来说是相同的，它们都有波动和微粒的双重特性。其波动性主要表现在电磁辐射以一定的波长和频率在空间传播，并会在传播中发生反射、折射等现象；其微粒性主要表现在电磁辐射以量子的形式进行辐射和吸收，同时在辐射和吸收时具有一定的能量和动量。

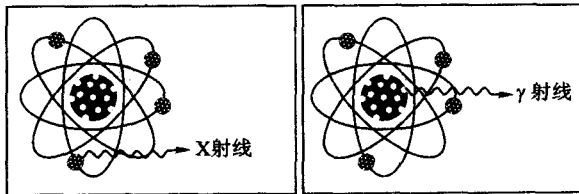


图 2-2 X 射线和 γ 射线

在医学诊疗中选用的 X 射线通常是以光电效应为主的射线能量范围，以保证所摄取的 X 射线片对骨组织、软组织有较高的分辨率。而在放射治疗中则选用康普顿效应占绝对优势的高能量范围（ $0.2 \sim 10 \text{ MeV}$ ），这样可以保证骨组织、软组织的吸收剂量相近，组织内剂量分布均匀。

电磁辐射在真空中传播的速度为 $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。几乎所有电磁辐射，不论其频率和波长是多少，在真空中均以此速度传播。因为速度是固定的，所以频率和波长成反比。波长长者则频率低。可见光和 X 射线的波长很短，通常使用单位为纳米（ nm ）也就是 10^{-9} m 。

电磁辐射包括一个波长和频率范围较广的波谱。当波长减小时则频率增大（图 2-3）。

用来运载无线电、电视及雷达信号的属于波长较长的范围，也就是在波谱的这一区域的电磁波，被用来产生和接受磁共振成像信号。电磁波谱的可见光区域较狭窄，属于波长 $400 \sim 750 \text{ nm}$

范围。

X 射线和 γ 射线 (图 2-2) 都是电磁辐射, 均由光子组成, 它们在电磁辐射能谱中所占的范围基本相同。X 射线是从核外产生的, 而 γ 射线是从核内产生的。它们主要通过光电效应、康普顿效应和电子对产生等三种方式将能量转移给被碰撞的物质。

X 射线和 γ 射线都是由光子组成的。它们在电磁辐射能谱中所占的范围基本相同, 故仅能从它们的来源加以区分。 γ 射线来自核的转变, 而 X 射线则来自核外电子的相互作用。在放射性衰变过程中所形成的子核处于激发和不稳定的状态, 由高激发态跃迁回到低激发态或基态时释出 γ 射线。没有一个放射性核素的衰变仅发射 γ 射线 每当 γ 转变之前, 必先有电子俘获, 或 α 粒子、负电子或正电子的发射, 例如, ^{60}Co 原子核衰变时放出 β 和 1.17 MeV、1.33 MeV 两种能量的 γ 射线:



X 射线由两种原子核外的物理过程产生: ① 高速电子在物质中受阻而减速, 其能量以电磁辐射的形式放出叫做韧致辐射; ② 高速电子与靶原子碰撞, 把内壳层某一能级上的电子击出原子, 然后外壳层某一能级上的电子去填补内壳层留下的空位, 放出的能量等于这两个能级之差的光量子 产生了特征 X 射线。因此, X 射线实际上包括了韧致辐射和特征 X 射线两个部分。前者的能量为连续谱, 最大能量等于轰击靶的电子的动能; 后者为几种单能的光子, 能量取决于靶原子的电子壳层结构。轰击电子的能量越高, 特征 X 射线所占的比例越小。

X 射线被吸收的过程决定于 X 射线本身的能量和吸收质的化学成分。当能量较高时, 治疗用的 ^{60}Co 和直线加速器、康普顿过程为主要形式; 而在能量较低时, 如放射诊断用的 X 射线、光电吸收过程占主要比例。表 2-1 列举了几种人们感兴趣的 X 射线和 γ 射线的电磁辐射的光子能量、电磁波频率和波长。

表 2-1 几种 X 射线和 γ 射线的能量范围及频率和波长

(eV)	光子能量/J	频率/Hz	波长/nm	性质
124 eV ~ 12.4 keV	$2.0 \times 10^{-17} \sim$ 2.0×10^{-15}	$3.0 \times 10^{16} \sim$ 3.0×10^{18}	10 ~ 0.1	内层电子激发产生的软 X 射线; 穿透力很小
12.4 ~ 124 keV	$2.0 \times 10^{-15} \sim$ 2.0×10^{-14}	$3.0 \times 10^{18} \sim$ 3.0×10^{19}	0.1 ~ 0.01	诊断用 X 射线和表浅 X 射线治疗
124 keV ~ 1.24 MeV	$2.0 \times 10^{-14} \sim$ 2.0×10^{-13}	$3.0 \times 10^{19} \sim$ 3.0×10^{20}	0.01 ~ 0.001	深部治疗的 X 射线, 和许多放射性同位素如 ^{60}Co 释出的 γ 射线
12.4 MeV 124 MeV	2.0×10^{-12} 2.0×10^{-11}	3.0×10^{21} 3.0×10^{22}	0.000 1 0.000 01	从小型电子回旋加速器产生的射线 从大型电子回旋加速器产生的射线
1.24 eV	2.0×10^{-10}	3.0×10^{23}	0.000 001	从大型同步加速器产生

按照波长的不同, 紫外线可分为三类: 近紫外线, 远紫外线和真空紫外线。在放射生物学中, 近紫外线和远紫外线具有不同的生物学效应。真空紫外线几乎只能在真空或氮气中传播, 即使

很薄的空气层也能将真空紫外线全部吸收，因此这类紫外线无放射生物学的实际意义。

紫外线光子的能量 E (以 eV 为单位) 与它的波长 λ (以 nm 为单位) 之间有如下关系：

$$E = \frac{1240}{\lambda} (\text{eV}) \quad (2-2)$$

所以远紫外线的生物效应要强于近紫外线。紫外线的照射剂量常用每单位面积的焦耳 (J) 数表示。由于紫外线的能量比 X 射线和 γ 射线低得多，在核酸中能造成比较单一的损伤，如形成 DNA 链中的胸腺嘧啶二聚体，所以在 DNA 的损伤与修复的研究中，紫外线也具有一定的重要性。如图 2-3。

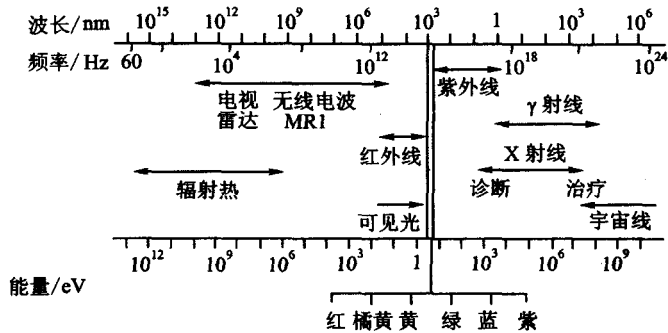


图 2-3 电磁辐射波谱

第三节 粒子辐射

粒子辐射是指一些组成物质的基本粒子，或者由这些基本粒子构成的原子核，这些粒子具有运动能量和静止质量，它们通过消耗自己的动能把能量传递给其他物质。

主要的粒子辐射有重带电粒子、高能电子和中子等。

电子、质子、中子、光子、 π 介子等被称为基本粒子，被认为是物质结构的基本单元。表 2-2 列出了一些放射物理学中涉及到的基本粒子。

表 2-2 重要基本粒子的特性

名称	质量	电荷	特性
质子 p	1.007 277 u	+1	构成原子核的基本单元, 质子束用于放疗
中子	1.008 665 u	0	构成原子核的基本单元, 中子束用于放疗
电子	0.000 548 u	-1	电子质量与核子相比很小, 医用加速器产生的电子束广泛应用于放疗
正电子	0.000 548 u	+1	正电子质量和电荷均与电子相同, 但电性相反, 用于核医学
光子	0	0	光子束是放疗中应用最广泛的一种射线

名称	质量	电荷	特 性
中微子	小于电子质量的	0	因中微子不带电,并且质量和磁矩几乎为零,科学界为证明其存在曾进行了大量实验
反中微子	1/8 000		
μ 子	$207 m_e$	+1	μ 子不稳定,会自发衰减为电子和中微子
π 介子			π 介子是高能光子束或质子束或中子束轰击靶物质的产物,很不稳定,会发生衰变反应
π^+	$273 m_e$	+1	
π^-	$273 m_e$	-1	负 π 介子可用于放疗
π^0	$265 m_e$	0	

(m_e 为电子的静止质量)

一、带电粒子

常见的带电粒子有质子、氦核(重氢,氢的同位素之一)、 α 粒子、裂变碎片等,它们带有不同数量的正电荷,质量比电子大得多。

α 粒子即氦原子核,由放射性核素放射出来的高速飞行的两个带正电荷的质子和两个不带电的中子组成,质量较大,比电子重 500 倍。由于带正电荷,它会受电磁场影响。在自然界内大部分的重元素(原子序数为 82 或以上)都会在衰变时释放它,例如铀、镭、钍、钷等。由于 α 粒子的体积比较大,又带两个正电荷,很容易就可以电离其他物质。因此,它的能量也散失得较快,穿透能力在众多辐射中是最弱的,皮肤或一张纸都能阻隔 α 粒子。

不过如果人类吸入或进食具有 α 粒子放射性的物质,譬如吸入了辐射烟雾, α 粒子就可能直接破坏内脏细胞。它的穿透能力虽然弱,但由于它的电离能力很强,它对生物所造成的危害并不下于其他辐射。

质子是氢原子核 ^1H ,带正电,质量约为电子的 2 000 倍,需要比较复杂的设备才能将质子加速到有用的能量范围来治疗肿瘤。宇宙射线中含有相当大比例的质子。

二、高能电子

高能电子包括放射性核素核转变时释放的 β 射线(电子或正电子)及电子加速器产生的能量接近单一的电子束。

β 粒子是一种高速运动的电子,由于带负电荷,会受电磁场影响。它的体积比 α 粒子小得多,穿透能力则比 α 粒子强,需要一块几毫米厚的铝片才可以阻挡它。很多放射性物质都会在衰变时放出 β 粒子。

高能电子本质上都是电子,带有单位电荷,静止质量约为氢原子质量的 1/1 840。在介质中容易被介质原子的轨道电子所偏转,形成曲折的径迹。它们通过物质时主要与电子相碰撞而损失能量,从而引起物质中分子或原子的激发与电离。

高能电子主要在组织深部产生电离作用。