

放射性同位素剂量学

E. A. 利貝尔曼 著

兰州医学院物理教研組 譯

341
2
人民卫生出版社

放射性同位素剂量学

E. A. 利貝爾曼 著

兰州医学院物理学教研組 譯

人民卫生出版社

1964年·北京

內 容 提 要

書中在探討放射性同位素的劑量學時概括了三個部分：第一部分是闡明 α -、 β -、 γ -射線的基本物理特征以及電離輻射生物學作用的劑量學特征；第二部分是探討顯示 α -、 β -、 γ -射線的方法；第三部分是說明不同同位素分布情況下有關劑量的計算方法。本書可供放射科醫師、放射劑量測量工程師以及研究放射性同位素的科學工作者參考應用。

Е. А. ЛИБЕРМАН
ДОЗИМЕТРИЯ
РАДИОАКТИВНЫХ
ИЗОТОПОВ

МЕДГИЗ—1958—МОСКВА

放射性同位素劑量學

開本：787×1092/32 印張：6 字數：126 千字

蘭州醫學院物理學教研組 譯

人 民 衛 生 出 版 社 出 版

(北京書刊出版登記證出字第〇四六號)

• 北京崇文區錢子胡同三十六號 •

長春新華印刷廠印刷

新華書店北京發行所發行 • 各地新華書店經售

統一書號：14048·2514 1962年5月第1版—第1次印刷
定價：(科八) 0.85 元 1964年2月第1版—第2次印刷。
印 數：3,001—4,100

序 言

物理現象是要用物理特征(物理量)來闡述的。這些特征的基本特点就是它們的可測量性以及它們與測量方法的嚴格連系。為了確定物理特征，必須充分說明它的測量方法。

劑量學的任务就是要嚴格地表示出電離輻射與物質的相互作用，這只有借助於特殊的物理量才能進行。

在實用核子物理學中，有一部門專門研究電離輻射與物質相互作用特征的計算和測量工作方法，以及研究電離輻射本身的物理特征。這一部門稱為劑量學。但是，劑量學並不是對電離輻射的任何物理特征都感興趣。屬於劑量學範圍內的有：與物質分子和原子的激發及電離有本質關係的電離輻射的特征；在電離輻射作用下，物質內所出現的電離和激發原子的分布情況；電離輻射源。

在測量劑量特征時，不僅利用劑量學儀器，而且還利用化學系統，甚至利用生物體。不過，化學的、尤其是生物學的“劑量計”必須用物理儀器來校準，並且它們只有在校準後能測量物理特性的情況下才能被認為是劑量計。某些化學方法可以作為劑量計使用，但是以同樣準確度來校準生物學“劑量計”的嘗試還沒有得到成功。

本書討論放射性同位素 α -、 β -和 γ -射線的劑量學。它包括三個基本部分：(1)討論 α -、 β -、 γ -射線基本物理特征以及電離輻射的生物學作用的劑量學特征；(2)闡明顯示 α -、 β -和 γ -射線的基本方法，測量這些電離輻射的物理特征和物質與射線相互作用特征的方法；(3)說明在不同的同位素分布情

况下，这些特征的計算方法和結果。在附录里有苏联工业目前生产的 α -、 β -和 γ -射綫測量仪器的簡短描述，以及国际放射学单位委员会建議的放射学单位。虽然这书的对象不仅是工程人員而且还有医师們，我們认为作出一个剂量学基本概念の严格物理定义还是必要的。

本书可供科学工作者、放射剂量測量工程师以及使用放射性物質的电离輻射的医师們閱讀。

在著名的 К. К. Аглинцев 的“电离輻射剂量学”和 И. В. Поройков 的“倫琴射綫測量学”两书中，讀者可以找到更全面和深入的有关剂量学問題的討論。

А. Н. Кронгауз 审閱了本书的初稿，并提出了很多宝贵意見，作者謹向他表示謝意。

第一章 放射性輻射的物理特征

放射性輻射与物質的相互作用

由放射性物質放出的电离輻射，就其与物質相互作用的性質來說，可分为兩类。

1. α 射綫和 β 射綫：是帶电的粒子流，在貫穿物質时直接使原子和分子电离和激发。

2. γ 射綫：不直接引起电离。在貫穿物質时， γ 射綫与原子的电子壳层相互作用，引起由高速帶电粒子（电子）所組成的輻射。后者經過物質时，把自己的能量消耗在电离作用上。

由此可見，在任何电离輻射作用下的物質，其原子和分子的电离和激发总是主要靠原始的或次級的高速帶电粒子来产生的。

讓我們簡短地說明一下 α 射綫和 β 射綫与物質相互作用的情况。

α 射綫是氦核流。 α 粒子的正电荷等于 2 个单位电荷，质量是 4 个原子质量单位。

β 射綫是电子或正电子流。 β 粒子的电荷等于 +1 或 -1 个电荷，质量等于 $1/1850$ 原子质量单位。帶正电的 α^- 和 β^+ 粒子穿过物質时，把原子壳层的电子引向自己，而 β^- 粒子則将原子壳层的电子推开。距粒子途徑相当近的电子会脱离原子壳层或跳到較高的軌道上。这时 α 粒子仅将自己能量的一小部分傳遞給电子， β 粒子能給出自己能量的任意部分。失

掉电子的原子是正离子。次级电子^①也能够引起若干电离，然后再和另外的中性原子结合而成负离子。伴随着每一对离子的形成都出现若干被激发的原子。

原子和分子的电离和激发在一般的情况下只存在很短的时间。然后，正负离子相互碰撞形成被激发的中性原子或分子。被激发的原子和分子通过辐射或通过形成化学活性化合物和基(原子状态的氢、不带电的 OH 等)的方式放出多余的能量。所有这些过程都是在百万分之一秒或更短的时间内发生的。

经过这个时间以后，被照射的物质里面只剩下自由基和新的化学化合物并呈稳定的受激状态。

电子从原子脱出以及在各种物质中激发原子时，要消耗大小不等的能量。这个能量的数值决定于物质组成元素的原子序数，还要看是和哪一个电子壳层(靠近核的或远离核的)发生相互作用的。形成一对离子和使原子激发所消耗的平均能量称为电离功，以 w 来表示。对于气体，这个数值不难以确定。计算出形成离子的数目 n 和测定出电离粒子的能量 E ，电离功 w 的数值即可用下式表示：

$$w = \frac{E}{n} \quad (1-1)$$

在表 1 中列出了各种气体的 w 数值^[14]。

有趣的实验事实是：电离功与 α -和 β -粒子的能量几乎完全无关，而与气体的种类的关系也不大。

空气在 α 粒子作用下的电离功平均为 35 电子伏，而在 β -

① 在 β -粒子(就是快速电子)的情况下，把粒子区分为原始的和次级的完全是假定的，因为这些粒子在与原子的电子发生作用以后，原则上就再不可能把它们区别开了。可以假定次级粒子的能量少些。

表1 各种气体的平均电离功 w 的数值

气 体	β -粒子的 w , 电子伏	α -粒子的 w , 电子伏
空气	33 ± 1	35 ± 1
N_2	34.1 ± 1	36.8 ± 1
O_2	30.2 ± 1	32.5 ± 1
CO_2	32 ± 1	34 ± 1
C_2H_2	25.8 ± 1	27.3 ± 1
C_2H_4	25.7 ± 1	28 ± 1
CH_4	27 ± 1	29 ± 1

粒子作用下则为 33 电子伏。

在电离粒子单位途径上的离子对数目称为电离线性密度(ЛПН)。电离线性密度随着粒子电量的增加和粒子速度的减小而增大。

α 粒子比 β 粒子具有大两倍的电量和较小的平均速度。因此, 沿 α 粒子途径上的电离线性密度将大于沿 β 粒子途径上的电离线性密度。

α 粒子或 β 粒子在物质中产生电离的途径称为射程。由于沿 α 粒子途径的 ЛПН 大于沿 β 粒子(或电子)途径的 ЛПН, α 粒子在物质中的射程将小于 β 粒子的射程。

表 2 中指出了 α 粒子和电子(β 粒子)在肌肉组织中的射程[12]。

在通过物质的时候, α 粒子和 β 粒子不仅能与原子的电子相互作用, 而且也与原子核相互作用。这时候它们可以改变自己的运动方向。 α 粒子以及高能电子还可以引起核反应。但是, 发生这种相互作用过程的几率是非常小的, 在研究放射性物质放射出的 α 粒子和 β 粒子的吸收定律时, 这种现

表2 α -粒子和电子在肌肉組織中的射程

粒子的解量, 兆电子伏	α 粒子的射程, 毫克/厘米 ²	电子的射程, 毫克/厘米 ²
0.1兆电子伏	0.1	16
0.5兆电子伏	0.3	180
1兆电子伏	0.6	480
2兆电子伏	1.2	1100
4兆电子伏	3	2400
5兆电子伏	4	3000
7兆电子伏	7	4200
10兆电子伏	13	6100

象并不重要。

当 β -粒子被吸收时,除了产生次级电子以外,还产生X射线,即所谓轫致辐射(这种辐射是电子在核电场中受到迅速遏阻时所产生的)以及被激原子的标识X射线。组成物质原子的原子序数愈大,则 β 射线能量转变为轫致X射线能量的成数愈高。在由较轻原子组成的生物体内,只有很少一部分电子的能量消耗于形成X射线,因此,在计算时对它可以不予注意。

当 γ 射线(即光子或量子流)穿过物质时,量子(光子)的能量向原子的电子传递。电子可以获得 γ 量子的全部能量或其能量的一部分。在第一种情况下,这过程叫做光电效应;而在第二种情况下,叫做康普顿效应。在这两种情况下都产生快速的次级电子。正如前面所提到的,它们与物质发生相互作用。次级电子能够引起电离并使大量的其他原子激发。因此在 γ 射线的作用下,在物质中所形成的激发原子和离子,基本上就是由这些次级电子所产生的。在发生康普顿效应时,

除电子而外，还形成能量較低的次級光子。这个光子与物质間的相互作用，原則上和原始的 γ 量子是一样的。

能量超过 1.02 兆电子伏的 γ 射綫，不仅可以由于康普頓效应和光电效应而被吸收，而且也可以通过光子轉变为电子-正电子对的方法被吸收。但是在这种情况下，大部分离子和激发原子还是在次級带电粒子的作用下产生的。大能量的量子甚至能够与原子核相互作用，引起核反应。出現这种相互作用的几率非常小，所以它在我們关心的情况中并没有什么实际意义。

因为当 γ -射綫貫穿物质时次級电子会产生电离，所以在空气中的电离功 w 也和 β 粒子一样，等于 33 电子伏(1,2,6,10, 19,21,23)。

关于輻射的衰減規律

我們已經简单地討論了电离輻射与物质間的相互作用过程。但是这样半定性地来描述这种过程是完全不够的。原則上，輻射的吸收和散射过程的数量特征可以根据已知的电离輻射的物理性質来計算。这种計算非常复杂，直至目前为止，甚至在最簡單的情况下也沒有得出結果。因此，表示輻射衰減的物理量必須用实验方法来測定。在叙述物质中輻射衰減規律的实验数据以前，有必要先把那些我們感兴趣的各種輻射的物理特征搞清楚。实际上，輻射的各种物理特征(如粒子的数目、粒子的能量、粒子的类型等等)一般說来是变化多端的。象通常那样籠統地說到某种輻射的衰減規律而不指明說的是哪一种物理特征，那是完全不能容許的。籠統地說任何类型輻射的衰減規律那就更难容忍了。

一般說来，为了表示輻射衰減的性質，只知道粒子或量子

的数目是完全不够的。因为在射线通过物质时，不仅粒子和量子的数目在改变，而且它们的能量也在改变。此外，还会出现次级粒子。粒子在穿越物质的过程中，其数目还可能增加。

辐射的最重要特征就是它的能量。因此，在大多数情况下，说到辐射的衰减时，就是指辐射强度的降低。但是，正如下面将要指出的，这种物理量也常常显得无用，因为它们不是经常都可以被测量出来的。

电离辐射的强度

在单位时间内通过垂直于射线传播方向的单位面积的电离辐射能量，称为强度 I 。

这一强度的定义同样适用于电磁辐射和微粒辐射。在这里，没有把与粒子静止质量相联系的能量考虑在内。

首先让我们探讨一下在真空中传播的射线流。在这种情况下，射线流中发生的所有变化都可以用强度来很好地说明。如果射线流是均匀而且是不分散的，则强度在任何地方都是不变的。在这种情况下测定强度，只要量出在任何一段时间内通过位于射线流内并且垂直于射线流传播方向的任一块面积的射线能量，然后把所得的数值用时间和面积来除就行了。

辐射强度通常用尔格/厘米²秒作单位。

如果射线流不是均匀的，辐射强度将沿着垂直截面发生变化。这时，我们用点强度的概念来描述射线流的性质。在单位时间内通过垂直于射线流的平面的辐射能量 $E(S)$ 与这块平面面积 S 的比值，当这一面积无限缩小（趋近于零）时，比值的极限称为辐射的点强度：

$$I = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{E(S)}{S}$$

这定义当然也适用于均匀射线流的情形。在实践中通常遇到的都是不均匀和分散的射束。

点源(点状射源)

我们来讨论一下这样的射源，它的线度 α 比起从射源到我们要测定强度 I_R 的地方的距离 R 要小得多，这种射源可以认为是点状的。

让我们探究一下在真空中点源所发出的辐射强度是如何沿着射束变化的。如果磁场、电场及其他的场都不存在或者很弱，同时组成射线的粒子之间的相互作用可以忽略不计(对够快的粒子这是永远可以做到的)，那么所有粒子都将依直线进行。

从图1很容易看出：在这种情况下，根据单纯的几何推理，沿射线流的强度将与到射源的距离平方成反比地变化。

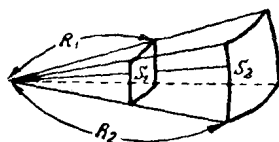


图1 发散的射束

事实上，

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{R_1^2}{R_2^2}$$

所以，

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_1^2}{R_2^2} \quad (1-2)$$

辐射强度的概念适用于描述在真空中的平行射线流和点源周围的射线分布情况。但是，在两个点源同时存在时，用强

度(如果根据前面的定义来理解)来描述射线就不适当了。事实上,垂直于第一个射源射线流的平面可能并不垂直于经过同一地方的从第二个射源发出的射线流(图2)①。

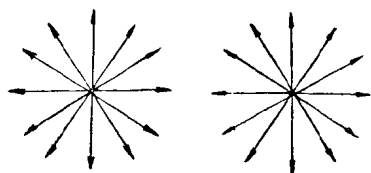


图2 从两个点源发出的交叉射线

如果已知辐射强度和
一个粒子或一个量子的平均能量,那就可以决定在单位时间内通过给定表面的粒子或量子的数目。在单位时间内通过垂直于射线进行方向的单位面积的

粒子或量子数目称为辐射通量。

在某些情况下,辐射强度的概念也适用于描述射线在物质内的分布情况。事实上,如果物质的密度很小,或者射线的穿透力很大时,在离开射源不太远的距离内,射线的散射和吸收是可以忽略的。这时候强度的概念和真空中同样的情况下一样也可以适用,并且电离辐射强度与离开点源的距离关系也是和在真空时完全相同。例如,在离开点源不太远的地方,强度与距离的关系可以用下式表示:

$$I_R = \frac{I_0}{R^2} \quad (1-3)$$

不过,在物质中 R 的值太大时,这定律就不正确了。这一定律在离开点源多远才开始失效,则决定于粒子的性质、射线的穿透力以及物质的密度。但是对 β -射线来说,由于强烈的散射,即使在离开点源的距离不太远处,“强度”的概念即已不适用了。因此,这概念一般只用于 X 射线或 γ -射线,而且仅仅

① 为了说明交叉的射线流,可以引入综合点强度 $I_{\Sigma} = \Sigma(I)$ 的概念。但是由于在实践中并无好处(它不能测出来),我们将不采用这概念。

把强度理解为在单位時間內通过单位面积的原始射束能量。通过同一面积的散射射綫和次級电子能量这时候是不考虑在內的。今后这一物理量仅用于表示X射綫或 γ 射綫的原始射束。

单色X射綫或 γ 射綫的原始射束在物質中輻射强度的衰减規律是容易推出的。在实践中，可以用闌孔使原始射綫束与散射射綫分离，也就是說可以測定窄几何射綫束的强度。

窄X射綫及 γ 射綫束的强度衰减規律

讓我們研究一下单色X射綫或 γ 射綫的原始平行射綫束。这种射綫束是由同一种能量的光子組成的；光子在穿过物質的时候可以被吸收或被散射。光子在通过物質时，单位途徑上的吸收及散射几率有一定数值，且与所通过的途徑无关。这几率通常用希腊字母 μ 来表示。原始单色射綫束的强度是和单位時間內通过单位面积的光子数目成正比的。在飞行光子数目不变的平行射綫束中，整个射綫束的强度是不变的。但是，由于每个光子在单位途徑中都有一定相同的吸收或散射几率^①，它們的数目 N 将沿射綫束按指数規律减少：

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad (1-4)$$

与此相应，强度也将逐漸降低。因此，X射綫及 γ 射綫原始单色射綫束强度的衰减規律可以表示如下：

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1-5)$$

式中： I_0 ——开始計算地点的射綫束强度； I ——在物質

^① 在兩種情况中光子都离开原始射綫束，因此在測量强度时就不再考虑在內。注意，在測量强度时，如果散射射綫不落入記錄儀器內，这种測量称为“在狹窄几何射綫束內的測量”。

中通过途径 x 后的强度; μ —— 辐射强度的衰减系数, 等于光子在单位途径上离开射线束的几率(如果 x 的单位是厘米, 则 μ 的量纲是厘米⁻¹)。 μ 的值决定于射线所穿过的物质以及光子的能量, 但和 x 无关。表 3 列出一些物质在不同能量时的 μ 值^[12]。

为了表示单色射线束的衰减性质, 可引入半价层 $d_{1/2}$ 的概念。半价层就是射线通过后强度降低一半的层厚:

$$I = I_0 e^{-\frac{0.693}{d_{1/2}}}$$

容易得出:

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu}$$

表 3 窄单色 γ 射线束的线性衰减系数 μ (厘米⁻¹)

辐射能量, 兆电子伏	μ , 厘米 ⁻¹				
	铅 ($\rho = 11.34$ 克/厘米 ³)	铸铁 ($\rho = 7.2$ 克/厘米 ³)	铝 ($\rho = 2.7$ 克/厘米 ³)	混凝土 ($\rho = 2.3$ 克/厘米 ³)	水($\rho =$ 1.0克/ 厘米 ³)
0.1	60.0	2.57	0.444	0.378	0.171
0.125	35.0	1.78	0.388	0.330	0.159
0.15	24.4	1.44	0.362	0.308	0.151
0.175	15.4	1.16	0.336	0.286	0.143
0.2	11.8	1.03	0.323	0.275	0.137
0.25	6.58	0.85	0.295	0.252	0.127
0.3	4.76	0.78	0.278	0.236	0.119
0.35	3.31	0.71	0.265	0.226	0.112
0.4	2.51	0.67	0.251	0.214	0.106
0.5	1.72	0.60	0.228	0.194	0.0967

輻射能量, 兆电子伏	μ , 厘米 ⁻¹				
	鉛 ($\rho = 11.34$ 克/厘米 ³)	鑄鉄 ($\rho = 7.2$ 克/厘米 ³)	鋁 ($\rho = 2.7$ 克/厘米 ³)	混凝土 ($\rho = 2.3$ 克/厘米 ³)	水($\rho =$ 1.0克/ 厘米 ³)
0.6	1.37	0.55	0.210	0.179	0.0894
0.7	1.12	0.51	0.196	0.167	0.0835
0.8	0.99	0.47	0.184	0.156	0.0786
0.9	0.86	0.46	0.176	0.150	0.0743
1.0	0.79	0.43	0.166	0.141	0.0706
1.1	0.72	0.41	0.158	0.134	0.0673
1.2	0.68	0.39	0.152	0.129	0.0644
1.3	0.64	0.37	0.146	0.124	0.0620
1.4	0.60	0.36	0.141	0.120	0.0597
1.5	0.58	0.35	0.137	0.116	0.0576
1.6	0.55	0.34	0.131	0.111	0.0555
1.7	0.54	0.33	0.128	0.109	0.0538
1.8	0.53	0.32	0.124	0.106	0.0521
1.9	0.52	0.31	0.120	0.102	0.0507
2.0	0.51	0.30	0.117	0.100	0.0493
2.5	0.48	0.28	0.106	0.090	0.0438
3.0	0.46	0.26	0.094	0.080	0.0396
4.0	0.47	0.24	0.084	0.071	0.0339
5.0	0.49	0.23	0.075	0.064	0.0302
6.0	0.51	0.22	0.072	0.061	0.0277
7	0.53	0.23	0.070	0.060	0.0256
8	0.55	0.23	0.068	0.058	0.0242
9	0.58	0.23	0.063	0.054	0.0231
10	0.60	0.23	0.062	0.053	0.0221

輻 射 量

根据国际委员会(哥本哈根, 1953)的推荐, 輻射强度的時間积分叫做輻射量。

因此, 把任意時間內通过垂直于射綫流的单位面积的全部輻射能量称为輻射量。

和射綫强度一样, 这一物理量也可用来表示电磁輻射和微粒輻射。輻射量通常用尔格/厘米²作为度量单位。輻射量也和輻射强度一样, 不适用于表示交叉輻射流^①。輻射量的衰减規律和同一輻射的强度衰减規律具有相同的形式。

在介质中, 用实验方法測定X射綫和 γ 射綫的輻射量和强度是十分困难的, 因此我們利用另一种物理特征来表示这类射綫。这一物理特征叫做“剂量”。

X射綫或 γ 射綫剂量

根据国际放射学单位委员会(哥本哈根, 1955年7月)的推荐, 剂量是一个以侖作为度量单位的物理量。同一委员会給侖所下的定义为: 侖是X射綫或 γ -射綫的量, 在1侖射綫照射下, 在0.001293克空气中发生的微粒发射, 将在空气中产生总电量为1CGSE的正离子或負离子。

常常提出以下問題: 上述剂量定义是否正确和完整。給物理量下定义的意思也就是給它指出测量的方法。在侖的定义中指出了测量方法。为了测量这一物理量, 就要測定质量为0.001293克的空气在X射綫或 γ 射綫作用下所发生的微粒发射(即次級电子)在空气中所形成的离子电量。但是在同一定义中, 又說侖是X射綫或 γ 射綫的輻射量单位, 这就互相

① 如果不引入新概念綜合点輻射量的話。