

185218

电离辐射剂量学基础

赠阅请交换

苏州医学院图书馆

苏州医学院

一九七五年九月

电离辐射剂量学基础

目 录

前 言	人借出
第一章 致电离辐射与物质的相互作用	
一、带电粒子与物质的相互作用	
§ 1. 带电粒子与物质的相互作用过程	
1.1.1. 弹性散射	
1.1.2. 激发和电离	
1.1.3. 韧致辐射	
1.1.4. 带电粒子的能量在物质中的转	
二、 γ 射线与物质的相互作用	
§ 2. 窄束 γ 射线的衰减	
1.2.1. 窄束 γ 射线的衰减规律	7
1.2.2. 质量衰减系数 μ_m	8
1.2.3. 半价层 $\Delta^{1/2}$	8
§ 3. γ 射线与物质的相互作用过程	8
1.3.1. 光电效应	9
1.3.2. 康普顿效应	10
1.3.3. 电子对效应	11
1.3.4. 总衰减系数 μ	12
1.3.5. 能量转移系数 μ_{tr}	13
1.3.6. 能量吸收系数 μ_{ea}	14
三、中子与物质的相互作用	15
§ 4. 中子与物质的相互作用过程	15
第二章 辐射量和单位	18
§ 1. 描述辐射场的物理量	18
2.1.1. 能量注量 Ψ	18
2.1.2. 能量通量密度或能量注量率 ψ	19
2.1.3. 粒子的注量 Φ	19
2.1.4. 粒子的通量密度或注量率 ϕ	20
§ 2. 放射性核素的放射性强度及其单位——居里 (Ci)	20
2.2.1. 一定数量的某种放射性核素的放射性强度 A	20
2.2.2. 放射性强度的单位	20
2.2.3. 放射性核素的 γ 当量单位——克镭当量	21

2.2.4.	放射性物质的重量(克)与放射性强度(居里)的关系	21
§ 3.	X或 γ 射线的照射量及单位——伦琴(R)	22
2.3.1.	照射量 X	22
2.3.2.	照射量的单位	22
2.3.3.	“伦琴”单位的等值定义	23
2.3.4.	照射量 X (伦琴)与能量注量 Ψ (尔格/厘米 ²)的关系	24
§ 4.	吸收剂量及其单位——拉德(rad)	25
2.4.1.	授予能量 ϵ	26
2.4.2.	吸收剂量 D 及其单位	27
2.4.3.	吸收剂量 D (拉德)与照射量 X (伦琴)的区别	27
§ 5.	比释动能及其单位——拉德(rad)	28
2.5.1.	比释动能 K 及其单位	28
2.5.2.	比释动能 K (拉德)与能量注量 Ψ (尔格/厘米 ²)的关系	29
2.5.3.	带电粒子平衡	29
2.5.4.	比释动能 K 与吸收剂量 D 的关系	30
2.5.5.	γ 射线的吸收剂量	30
§ 6.	辐射防护中应用的量及其单位	33
2.6.1.	传能线密度 L	33
2.6.2.	品质因数 Q	35
2.6.3.	剂量当量 H 及其单位——雷姆(rem)	36
2.6.4.	周围辐射水平的表述方法——吸收剂量指数 D_i 和剂量当量指数 H_i	37
第三章	辐射剂量的计算方法	38
§ 1.	γ 外照射剂量的计算	38
3.1.1.	点状源	38
3.1.2.	照射量率常数 Γ	38
3.1.3.	点状 γ 辐射源的照射量率	39
3.1.4.	非点状 γ 辐射源的照射量率	42
§ 2.	皮肤表面 β 射线吸收剂量的计算	43
§ 3.	中子剂量的计算	45
第四章	剂量测量的基本方法	47
一、	照射量的标准测量方法	47
§ 1.	自由空气电离室	47
4.1.1.	自由空气电离室	47
4.1.2.	电离室收集的电荷与照射量的关系	49
§ 2.	壁式电离室	49
4.2.1.	空气壁电离室	49
4.2.2.	空气等效壁电离室	50
二、	吸收剂量的标准测量方法	51

§ 3.	测量吸收剂量的电离方法	51
4.3.1.	空腔电离理论	51
4.3.2.	空气中吸收剂量 $D_{\text{空气}}$ 与照射量 X 的关系	52
4.3.3.	介质中吸收剂量 $D_{\text{介质}}$ 与照射量 X 的关系	53
§ 4.	测量吸收剂量的化学方法	54
§ 5.	测量吸收剂量的量热方法	55
三、	剂量测量中的其他方法	56
§ 6.	$G-M$ 计数管和闪烁计数器在剂量测量中的应用	56
4.6.1.	$G-M$ 计数管在剂量测量中的应用	56
4.6.2.	闪烁计数器在剂量测量中的应用	57
§ 7.	胶片、荧光玻璃及热致发光材料在剂量测量中的应用	57
第五章	内照射剂量的估算方法	60
§ 1.	基本概念	60
5.1.1.	放射性核素进入体内的途径及其代谢过程	60
5.1.2.	标准人	65
5.1.3.	有效半衰期	68
5.1.4.	滞留分数和排出分数	69
5.1.5.	一次核蜕变对器官产生的剂量 有效能量	72
5.1.6.	放射性核素全身含量 q 对身体各器官产生的剂量率 紧要器官	74
5.1.7.	放射性核素对器官产生的总剂量 剂量负担 照射量	76
5.1.8.	体内污染的几种摄入模式	79
一、	长期均匀摄入情况下内照射剂量的估算及其控制标准——	
	最大容许体负荷和最大容许浓度	81
§ 2.	长期均匀摄入情况下内照射剂量的估算方法	81
5.2.1.	长期均匀摄入放射性核素时器官内的滞留量	81
5.2.2.	连续从空气和水中摄入放射性核素时对器官(胃肠道除外) 产生的剂量率	82
5.2.3.	连续摄入放射性核素时对胃肠道产生的剂量率	87
§ 3.	最大容许全身负荷量和最大容许浓度	88
5.3.1.	电离辐射剂量限制的基本标准	88
5.3.2.	最大容许全身负荷量 (q_m) 和最大容许浓度 (MPC)	89
5.3.3.	确定最大容许全身负荷量的两个标准	90
5.3.4.	最大容许全身负荷量的制定	91
5.3.5.	最大容许浓度 (MPC) 的制定——对于单一放射性核素	92
二、	单次摄入情况下内照射剂量的估算及其控制标准——	
	调查水平和导出调查水平	97
§ 4.	单次摄入情况下内照射剂量的估算方法	98

5.4.1. 利用放射性核素的有效滞留分数估算单次摄入时的内照射剂量	98
5.4.2. 单次吸入放射性核素时内照射剂量估算的简便方法	100
§ 5. 单次体内污染的控制标准	102
5.5.1. 调查水平和导出调查水平	103
5.5.2. 调查水平和导出调查水平的计算	104
三、短期内多次摄入情况下内照射剂量的估算及其控制标准——	
调查水平和导出调查水平	115
§ 6. 短期内多次摄入情况下内照射剂量的估算方法	116
5.6.1. 多次摄入时估算体内污染量的基本方程	116
5.6.2. 应用均匀吸收模型估算短期内多次吸收时的内照射剂量	117
§ 7. 短期内多次吸收情况下体内污染的控制标准	120
5.7.1. “偶而反复摄入”的体内污染的控制标准	121
5.7.2. “经常反复摄入”的体内污染的控制标准	123
§ 8. 体内污染的监测	127
5.8.1. 监测方法	127
5.8.2. 根据尿中排出量估算体内负荷量	130
附录1. 生物常数和有关物理常数	140
附录2. 关于单个放射性核素的滞留分数方程和排出分数方程	144
附录3. 有效能量	152
附录4. 国际放射防护委员会对职业性照射计算的最大容许全身负荷量和放射性核素在空气和水中的最大容许浓度（部分摘引）	156
附录5. 我国规定的最大容许浓度和限制浓度（部分摘引）	164
附录6. e^{-x} 函数表	165
第六章 超临界事故及事故剂量的测量方法	166
§ 1. 基本概念	166
6.1.1. 原子核裂变	166
6.1.2. 链式反应	167
6.1.3. 临界	168
§ 2. 超临界事故及其特点	169
6.2.1. 超临界事故	169
6.2.2. 超临界事故的特点	171
§ 3. 超临界事故的剂量测量方法	173
6.3.1. 测定事故剂量的中子活化原理	173
6.3.2. 用激活探测器测定超临界事故辐射场的中子能谱和中子剂量	174
6.3.3. 由人体钠的活化测量估算超临界事故的中子剂量	176
6.3.4. 利用毛发等物含有的硫估算快中子剂量	179
6.3.5. 超临界事故辐射场的 γ 剂量的测定方法	180

前 言

电离辐射剂量学的研究对象和任务

在毛主席革命路线指引下，战斗在原子能事业的我国广大工人、革命干部、科学技术人员，独立自主，自力更生，走自己工业发展的道路，我国原子能工业以超过帝国主义和社会帝国主义的速度，迅猛向前发展。放射性同位素在国民经济的各个领域日益广泛地得到应用，越来越多的人员参加到生产、研究和应用放射性物质的工作中来。

原子能事业的发展，对于巩固国防，发展国民经济起着十分巨大的作用。但是从放射性矿石的开采、冶炼，核燃料的制备，同位素的生产，直到放射性物质在各个领域里的应用，都会遇到电离辐射对人体引起的有害影响。为了使操作人员一般情况下免受超容许的过量照射，保证安全的劳动条件，必须采取有效的防护措施。因此，为厂矿广大职工健康服务的职业病医护人员应该对电离辐射的特性及其测量、防护的办法有所了解。

电离辐射通过物质时，与物质相互作用，产生各种效应，诸如引起物质电离、发光、发热等物理变化；被照射物质固体晶格改变而导致材料物理性质的变化；自由基的产生及各种辐射化学的变化；对生物体，则会产生各种生物效应，等等。

为了研究、利用和防止辐射的某种效应，须要了解辐射对被照射物质的作用情况和程度，要有一个量来描述它的大小。辐射剂量就是电离辐射与物质相互作用的物理度量，它在一定程度上反映了电离辐射对被照射物质的作用的大小。

电离辐射剂量学的中心问题就是，确定由 α 射线、 β 射线、X和 γ 射线及其他各种致电离辐射对被照射物体的剂量。它的主要任务就在于研究辐射与物质相互作用的基本规律；被照射物质内的剂量分布及其与辐射场的关系；以及辐射剂量的基本测量方法。从而，为实行辐射剂量的安全监督，采取有效的防护措施，保证安全的劳动条件，提供可靠的科学依据。

鉴于本讲义的阅读对象，按照删繁就简的原则，编写中试图用通俗的语言、形象的图表帮助阐明某些基本的剂量学概念。由于水平有限，时间仓促，未能广泛征求意见，缺点错误在所难免。希望工农兵学员和有关方面提出宝贵意见。编印过程中得到有关部门的大力支持，部分内容曾受到吴德昌、李德平、李树德等同志的有益指教，在此一并表示感谢。

第一章 致电离辐射与物质的相互作用

由放射性核素放出的和从反应堆、加速器等装置发出的各种致电离辐射，就其与物质相互作用的性质而言，可分为两类：

1. **直接致电离粒子：**指那些具有足够动能借助于碰撞直接引起物质电离的带电粒子，如电子、质子、 α 粒子等都属于这一类；

2. **间接致电离粒子：**指那些不能直接使物质电离，而要通过它与物质作用释出次级的直接致电离粒子来使物质电离的非带电粒子。如X射线和 γ 射线的光子，它们通过次级电子使物质电离；中子则通过次级粒子（如质子、 α 粒子及重反冲核）使物质电离。

辐射剂量学所关心的是，电离辐射的能量在物质中将怎样地转化，因此，这里讨论致电离辐射与物质相互作用，其重心也就在于研究致电离辐射的能量在物质中转化的形式。

下面将分别讨论带电粒子、X和 γ 射线以及中子与物质的相互作用过程。

一、带电粒子与物质的相互作用

§1. 带电粒子与物质的相互作用过程

1.1.1. 弹性散射

运动着的带电粒子贯穿物质时，因受到物质中原子核的电场的相互作用而改变运动的方向，但是带电粒子与原子核的总动能保持不变，这种现象就叫做弹性散射或叫弹性碰撞。由于电子较轻，它在原子核上散射时常作大角度的偏折，电子能量越小，其偏折就越大。 α 粒子因其质量较重，受原子核的散射作用不大，所以当它经过物质时，绝大部分 α 粒子的运动方向没有改变，因而它们在物质中的径迹是相当直的。

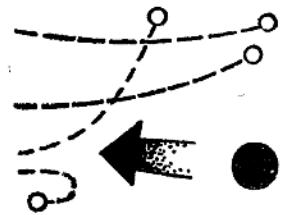


图1.1. 带电粒子的弹性散射

1.1.2. 激发和电离

激发和电离是带电粒子和物质中原子壳层的束缚电子发生非弹性碰撞的结果。由于运动着的带电粒子和束缚电子间的静电作用，使束缚电子获得足够的能量，摆脱原子的束缚而变成自由电子。这样就产生了由一个自由电子和一个正离子（失去了电子的原子）所组成的离子对。这种现象叫

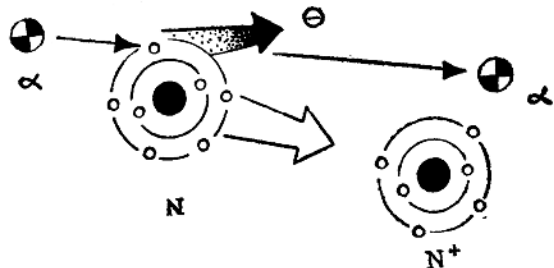


图1.2. 氮原子被 α 粒子电离而形成离子对

做原子的电离。在电离过程中由带电粒子撞出的某些自由电子具有足够的动能，它还能进一步使其他的原子电离，这种电离称做次电离。

如果束缚电子所获得的能量还不够使它变成自由电子，而只能跳到较高能级的轨道上去，这种现象称为原子的激发。由于原子的内层轨道缺少电子，故原子的激发状态是不稳定的，电子很快就会从外层跳到内层去补缺，同时以标识辐射的形式放出多余的能量，激发态的原子回到基态。

常常还有这种情况：被激发的电子所在的能级较高，当它退激时并不一下子跳到内层去补缺，而是先到一个中间状态（有时称亚稳态）放出一个光子，然后再从中间状态跳回到内层的空位上，再放出一个光子。

最便于观察的物理效应是电离，因此，对于剂量学来说，着重讨论一下物质对带电粒子的碰撞阻止本领和在气体中每形成一个离子对所消耗的平均能量是有必要的。

(1) **碰撞阻止本领** 由于非弹性碰撞，带电粒子的能量消耗在使物质电离和激发上，它们的运动受到物质的阻滞。通常把由物质的电离和由物质的激发所引起的带电粒子的能量损失称做该物质对带电粒子的**碰撞阻止本领**。

线碰撞阻止本领 (Linear collision stopping power) $S_{碰撞}$ 就是指一定能量的带电粒子在物质中穿行单位长度（1厘米）距离上由于电离激发所损失的能量：

$$S_{碰撞} = \left(\frac{dE}{dl} \right)_{碰撞} \quad (1.1)$$

若物质的密度为 ρ ，则

$$\frac{S_{碰撞}}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{碰撞} \quad (1.2)$$

称为**质量碰撞阻止本领**。

物质对带电粒子的碰撞阻止本领与物质的原子序数、密度及带电粒子的能量有关。图1.4.画出了各种物质对电子的碰撞阻止本领。由图可见，碰撞阻止本领开始随能量的增加而减小，当能量等于 $2m_0c^2$ （对电子为1兆电子伏）时达到极小值，此后随着能量再进一步增加时，碰撞阻止本领便又缓慢地增加。此外，图1.4.还告诉我们，以兆电子伏/厘米²为单位的质量碰撞阻止本领正比于 $\frac{Z}{A}$ ，这里 Z 和 A 分别为物质的原子序数和质量数。因为随着 Z 的增加，比值 $\frac{Z}{A}$ 由轻物质的0.5变到铅的0.4，所以轻物质的质量碰撞阻止本领比重物质来得大，比如在图1.4中，铅对电子的质量碰撞阻止本领只有水的一半。

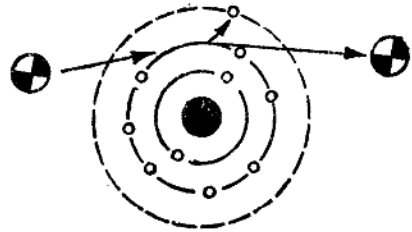


图1.3.A. 氮原子被 α 粒子激发，电子跳到较高能级的轨道上

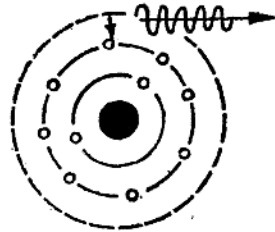


图1.3.B. 原子的激发状态是不稳定的，当它回到基态时，电子又从外层跳回内层，同时发出标识辐射。

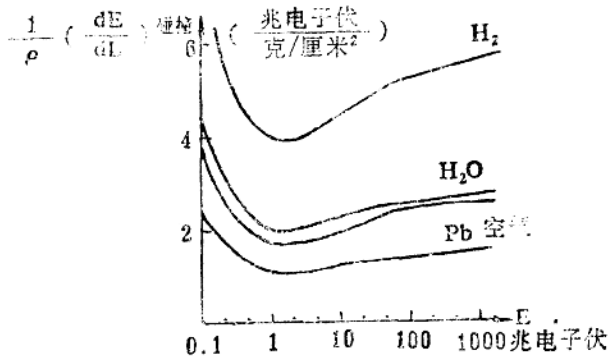


图1.4. 各种物质对电子的碰撞阻止本领

(2) 在气体中每形成一个离子对所消耗的平均能量 \bar{W} 带电粒子经过物质时, 沿着它的路径将产生许多离子对。带电粒子每形成一个离子对所消耗的平均能量 \bar{W} , 对于不同的气体有不同的数值, 其范围在26—44电子伏之间。但是对于一定的气体, \bar{W} 却几乎是一个常数。根据精确的资料确定, 对于空气, 采用 $\bar{W} = (33.73 \pm 0.15)$ 电子伏。

1.1.3. 韧致辐射

运动着的带电粒子与物质相互作用的第三种过程是, 与原子核发生非弹性碰撞。带电粒子在原子核的电场中运动受到突然阻止, 运动方向发生大的偏折, 此时带电粒子的一部分动能会以X射线的形式辐射出来, 这就是韧致辐射。带电粒子在物质中由于韧致辐射的产生而耗损的能量称做该物质对它的辐射阻止本领, 符号 $(\frac{dE}{dl})_{\text{辐射}}$ 表示线辐射阻止本领:

$$S_{\text{辐射}} = (\frac{dE}{dl})_{\text{辐射}} \quad (1.3)$$

而

$$\frac{S_{\text{辐射}}}{\rho} = \frac{1}{\rho} (\frac{dE}{dl})_{\text{辐射}} \quad (1.4)$$

则叫做质量辐射阻止本领, 其中 ρ 为物质的密度。辐射阻止本领与带电粒子的静止质量 m_0 、动能 E 及物质的原子序数 Z 有关:

$$(\frac{dE}{dl})_{\text{辐射}} \sim \frac{NZ^2E}{m_0^2} \quad (1.5)$$

式中 N 为单位体积中物质的原子数。由式(1.5)可见, 高能 β 射线通过重物质时以辐射形式放出的能量是很大的。同时, 因为辐射阻止本领与粒子的静止质量的平方成反比, 所以较重的粒子(如质子、 α 粒子)的韧致辐射的几率就非常小。

1.1.4. 带电粒子的能量在物质中的转化

运动着的带电粒子与物质相互作用, 导致了能量的转化:

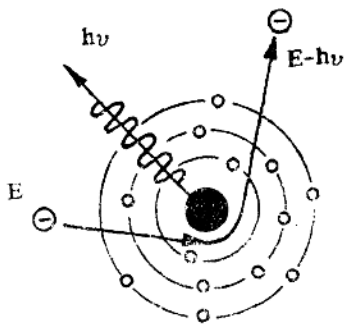


图1.5. 韧致辐射

快速电子被原子核阻止, 突然减低其速度, 一部分动能转变为X射线而放出。

(1) 由于带电粒子与物质的原子、分子发生弹性碰撞的结果，导致被碰撞粒子间动能的重新分配，增加了分子不规则运动的动能，使物质变热，因此，带电粒子能量的一部分直接转化为热能 $E_{热}$ 。

(2) 由于非弹性碰撞，使物质电离，带电粒子能量的一部分 $E_{电离}$ 直接用来引起电离。

(3) 带电粒子还由于韧致辐射的产生，它的能量的一部分又转化为辐射能 $E_{辐射}$ 。

(4) 由于非弹性碰撞的结果，带电粒子的能量的一部分消耗在激发物质的原子上。当激发的原子回到基态时将把那部分激发能以辐射的形式放出来。

因此，总起来说，在物质中带电粒子的能量 E 将转化为电离能、辐射能和热能：

$$E = E_{电离} + E_{辐射} + E_{热} \quad (1.6)$$

下面具体讨论一下电子和 α 粒子在物质中能量的转化情况：

(1) 电 子

对于剂量学最有意义的电子能量值约为 $10^4 - 10^6$ 电子伏，在这个能量范围内，弹性碰撞的几率是很小的（仅占 5%），因此，当电子通过物质时，物质对电子的总质量阻止本领可认为是由质量碰撞阻止本领和质量辐射阻止本领所组成：

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{碰撞} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{辐射} \quad (1.7)$$

当电子能量为 E ，物质的原子序数为 Z 时，损失于辐射的能量与损失于电离的能量之比近似地等于：

$$\left(\frac{dE}{dl} \right)_{辐射} : \left(\frac{dE}{dl} \right)_{碰撞} = \frac{EZ}{1600m_0c^2} \quad (1.8)$$

式中 m_0 是电子的静止质量。由 (1.8) 式可导出这样一个能量值 $E_{临界}$ ，当电子能量 $E = E_{临界}$ 时，辐射阻止本领便等于碰撞阻止本领。下表给出了不同物质的 $E_{临界}$ 值。

表 1.1. 不 同 物 质 的 $E_{临界}$ 值

物 质	水	空 气	铝	铅
$E_{临界}$ (兆电子伏)	150	150	60	10

从表列的 $E_{临界}$ 值可见，要使辐射阻止本领等于碰撞阻止本领，对于水和空气，电子能量要达 150 兆电子伏，这是一个很高的能量，因此可以得到结论：

在低能范围内，辐射阻止本领很小，电子能量主要消耗在电离上：

$$\left(\frac{dE}{dl} \right)_{碰撞} \gg \left(\frac{dE}{dl} \right)_{辐射}$$

在高能范围内，电子能量的辐射损失起主要作用：

$$\left(\frac{dE}{dl} \right)_{碰撞} \ll \left(\frac{dE}{dl} \right)_{辐射}$$

图 1.6 表示了在水和铅中电子能量的电离损失和辐射损失随电子能量变化的情况。由图可见，在低能时，辐射损失比电离损失小两个数量级，而当电子能量趋向高能时，辐射损失则逐渐起主要作用。

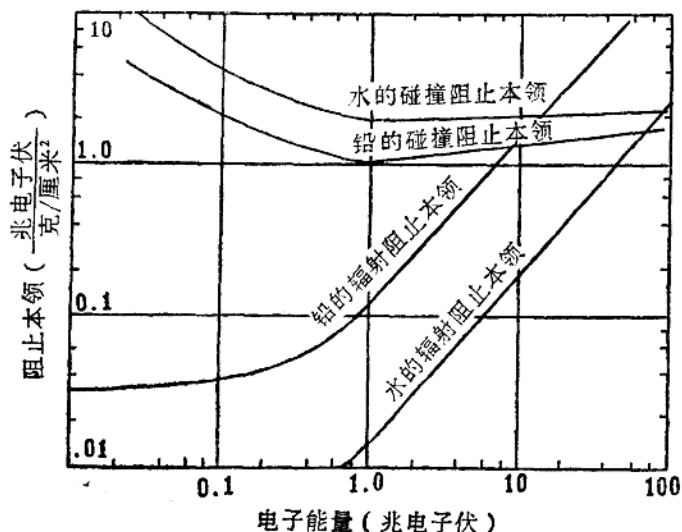


图1.6. 水和铅对电子的碰撞阻止本领和辐射阻止本领

在图1.7中还描述了空气、水和铅对电子的总质量阻止本领与电子能量间的关系。

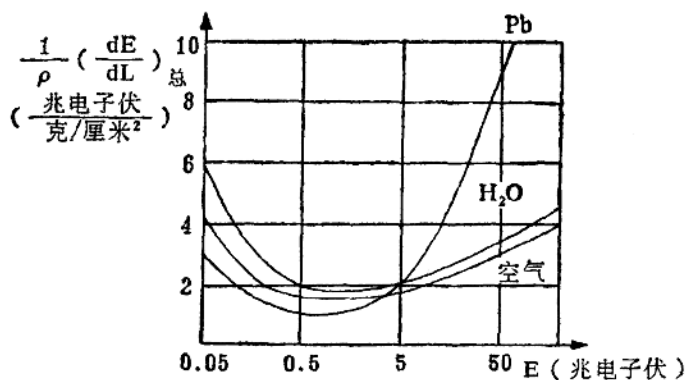


图1.7. 空气、水和铅对电子的总质量阻止本领

(2) α 粒子

因为物质对带电粒子的辐射阻止本领与粒子的静止质量的平方成反比， α 粒子的静止质量比电子的静止质量大7440倍，因此在粒子能量相同的情况下， α 粒子的辐射阻止本领却要比电子小 $(7440)^2 = 5.5 \times 10^7$ 倍。因此，物质对 α 粒子的阻止本领主要是碰撞阻止本领，也就是说 α 粒子的能量损失主要是电离损失。

二、 γ 射线与物质的相互作用

从原子核里放射出的 γ 射线实际上是一种光子流，它在本质上与X射线一样，都是一种电磁辐射。不过，医疗上所用的X射线，波长较长，能量较小，而 γ 射线则波长较短，能量较强，因此贯穿本领也大。

由于X射线与 γ 射线有相同的本质，决定着它们与物质相互作用有相同的过程。因而在以下的讨论中将只提及 γ 射线与物质的相互作用过程，对于X射线只须按 γ 射线的情况类推过来就是了。

γ 射线在物质中损失能量的方式，不象带电粒子那样通过多次碰撞逐步地丢失自己的能量，而是在有些作用中 γ 光子有可能被整个地丢失。在物质中由于相互作用， γ 射线的能量一部分将转化为电子的能量，一部分被散射的光子及标识辐射、质湮辐射所带走，还有一部分则被没有和物质发生作用的初级光子所带走。下面我们就将研究这种能量的转换及其转换的方式，以及有关的各种系数。

§2. 窄束 γ 射线的衰减

为了确定 γ 射线与物质相互作用过程的几率，必须测量 γ 射线穿过物质时的强度衰减的程度。在实验上是借助于图1.8所示的几何装置中进行的。一束很好准直了的窄束 γ 射线穿过吸收体后被探测器所记录。由于 γ 射线与物质的相互作用，其强度随着吸收层厚度的增加而逐渐衰减。

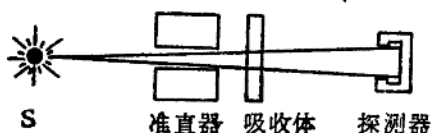


图1.8. 窄束 γ 射线减弱的几何装置

1.2.1. 窄束 γ 射线的衰减规律

γ 射线经过一厚度为 Δx 的吸收层后，强度的衰减 ΔI 应该与入射强度 I 及物质的厚度 Δx 成正比，即：

$$\Delta I = -\mu I \Delta x \quad (1.9)$$

式中比例常数 μ 叫做线衰减系数 (Linear attenuation coefficient)，等式右边的“-”号表示强度的减弱。

将(1.9)式稍稍改写一下：

$$\mu = -\frac{\Delta I}{I} \cdot \frac{1}{\Delta x} \quad (1.10)$$

令 $\Delta x = 1$ 厘米， $\mu = 0.01$ ，则由(1.10)式得：

$$\frac{\Delta I}{I} = 0.01 = 1\%$$

这就是说：当 $\mu = 0.01$ 的情况下， γ 射线穿过1厘米厚的物质层后，其强度衰减了1%。

因此，线衰减系数 μ 就表示 γ 射线穿过单位厚度(1厘米)的物质层后，强度衰减的百分数。

实验结果表明, γ 射线的强度 I 与物质层的厚度 d 的关系, 服从一种指数衰减的规律:

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (1.11)$$

式中 I 、 I_0 ——分别为 γ 射线贯穿物质前、后的强度, μ ——线衰减系数, 以厘米⁻¹为单位, d ——物质层厚度, 以厘米为单位。

1.2.2. 质量衰减系数 μ_m

(1.11)式还可以表示成:

$$I = I_0 e^{-\mu_m d_m} \quad (1.12)$$

式中: $d_m = d \cdot \rho$, 叫做质量厚度, 以克/厘米²为单位,

$\mu_m = \mu / \rho$, 叫做质量衰减系数, 以厘米²/克为单位。质量衰减系数 μ_m 表示 γ 射线穿过厚度为 1 克/厘米² 的物质层后, 强度衰减的百分数。因为质量衰减系数 μ_m 以每克面积 (即厘米²/克) 为单位, 因而常给它一个特殊的名称——“截面”, 它反映着 γ 射线与物质相互作用的几率。

1.2.3. 半价层 $\Delta_{1/2}$

在应用中还有用半价层 $\Delta_{1/2}$ 来表征窄束 γ 射线在特定材料中的吸收特性。半价层就是把 γ 射线减弱到原来一半时的吸收物质的厚度。半价层 $\Delta_{1/2}$ 与衰减系数 μ 的关系为:

$$\Delta_{1/2} = 0.693 / \mu \quad (1.13)$$

例如, 在铅中, 2兆电子伏的 γ 射线的线衰减系数 $\mu = 0.12$ 厘米⁻¹, 则: $\Delta_{1/2} = 0.693 / 0.12 = 5.8$ 厘米, 即 2兆电子伏的 γ 射线被 5.8 厘米厚的铅 (一个半价层) 减弱一半 (参看图 1.9), 被 11.6 厘米的铅 (二个半价层) 减弱到原来的四分之一, 被 17.4 厘米的铅 (三个半价层) 减弱到原来的八分之一, 依次类推。当 γ 射线穿过 10 个半价层的吸收物质后, 其强度已减弱到原来的千分之一。

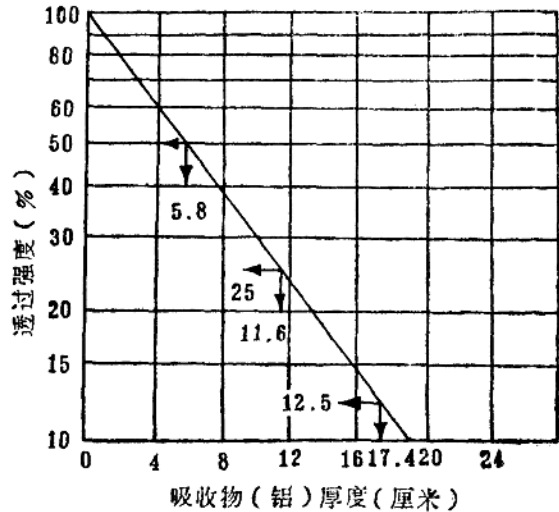


图 1.9. 2兆电子伏的 γ 射线在铅中的减弱

- $d = 5.8$ 厘米 = $1 \Delta_{1/2}$ 减弱到 50%
- $d = 11.6$ 厘米 = $2 \Delta_{1/2}$ 减弱到 25%
- $d = 17.4$ 厘米 = $3 \Delta_{1/2}$ 减弱到 12.5%

§ 3. γ 射线与物质的相互作用过程

γ 射线与物质的相互作用过程主要有三种: 光电效应、康普顿效应、电子对效应。此外还有象汤姆森散射、光致核反应等相互作用过程, 但是由于发生这些相互作用的几率比起三个主要作用过程来要小得多, 以至于可以忽略不计, 因而以下就将着重讨论上述的三个主要的作用过程。

1.3.1. 光电效应

γ 射线的一个光子和物质原子中的一个电子相互作用，光子的能量全部交给了电子，

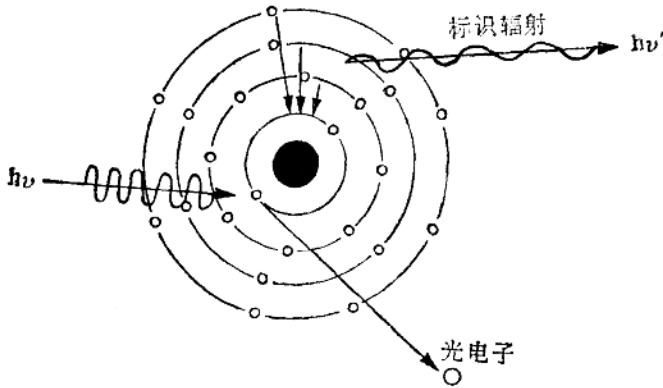


图1.10. 光电效应

一个 γ 光子被原子全部吸收而从原子内壳层击出一个光电子。内壳层空穴被外层电子补充时，产生标识辐射。

使它脱离原子而运动，而光子本身则整个地被原子吸收。这样的效应就叫做光电效应。脱离原子而运动的电子叫做**光电子**。光电子的动能 E_e 等于：

$$E_e = h\nu - E_p \quad (1.14)$$

式中 $h\nu$ 为光子的能量， E_p 是将电子从原子中击出所需的能量（在数值上等于壳层电子的结合能，也就是从电子壳层移去一个电子所做的功。）原则上光子可以从原子的所有电子壳层上击出电子，但是对于通常能量较高的 γ 光子来说，最靠近原子核的内层电子被击出的机会最大。因此可以认为在**光电效应中， γ 光子主要与原子内壳层（K层、L层）电子发生相互作用。**

放出了光电子的原子所处的状态是不稳定的，内壳层电子的空位很快地被外层电子跳进来补充，这时原子伴随着发出标识辐射，释放多余的能量 E_p ，回到正常的状态。

光电效应的原子衰减系数大致与物质的原子序数四次方成正比，且随光子能量的增加而迅速减小：

$$\tau_a = C \frac{Z^4}{(h\nu)^3} \quad (1.15)$$

式中 C 为比例常数。因此，在 γ 光子能量较低的范围，在 γ 射线与物质的相互作用中，光电效应起着主导的作用，特别对于原子序数较高的重物质，低能 γ 射线的光电效应尤其显著。

正如以上所述，在发生光电效应过程中，光子能量的一部分转化为电子的动能 E_e ，一部分转化为标识辐射的能量 E_p ，因此光电效应的衰减系数 τ 可以分为两部分：

$$\tau = \frac{E_e}{h\nu} \tau_a + \frac{E_p}{h\nu} \tau_a = \tau_e + \tau_p \quad (1.16)$$

τ_e 称为光电效应的能量转移系数，它表示光电效应中光子能量转化为电子能量的几率。 τ_p

称为光电效应的辐射转换系数，它表示光电效应中光子能量转化为标识辐射能量的几率。

1.3.2. 康普顿效应

随着 γ 光子能量的增加，光电效应的作用越来越弱，直到 γ 光子的能量增大到比原子外层电子的结合能大很多倍，以至可以把外层电子当作不受原子束缚的自由电子时， γ 射线与物质的相互作用便由第二种主要的作用过程——康普顿效应代替光电效应而起主要的作用。

康普顿效应可以看作是 γ 光子与自由电子的一种弹性碰撞的过程。此时，一个能量为 $h\nu$ 的入射光子击中一个外层电子（见图1.11），光子的一部分能量传给电子，使电子向着与入射光子成 θ 角的方向弹出，同时，减低了能量的 γ 光子向着与自己原来运动方向成 φ 角的方向散射出去，这就是康普顿效应，被 γ 光子碰撞而得到能量的电子叫做反冲电子。

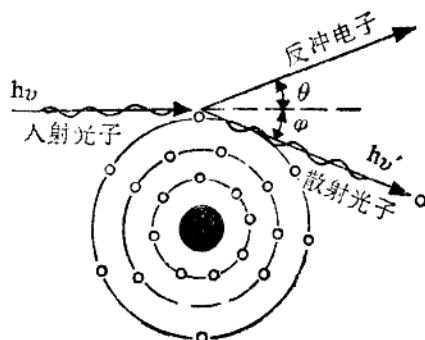


图1.11. 康普顿效应

入射光子与自由电子的弹性碰撞，碰撞后电子得到动能，向与入射光子成 θ 角方向飞出，而减低了能量的光子向与入射方向成 φ 角的方向飞出。

在康普顿效应中，我们看到 γ 光子的能量一部分被反冲电子所带走，另一部分则被散射光子所带走。因此，康普顿效应的衰减系数 σ 可以分为两部分：转移给电子的部分 σ_e 和散射的部分 σ_s ：

$$\sigma = \frac{E_e}{h\nu} \sigma + \frac{h\nu'}{h\nu} \sigma = \sigma_e + \sigma_s \quad (1.17)$$

图1.12画出了每个电子的康普顿效应的总衰减系数 σ_e 及能量转移系数 σ_e 和散射衰减

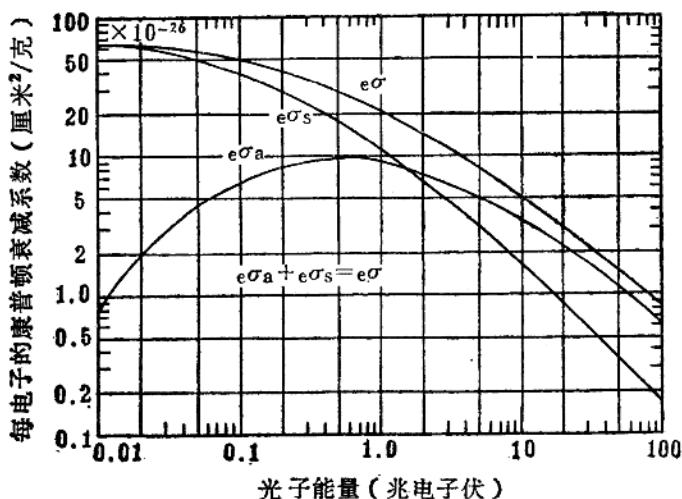


图1.12. 康普顿效应的衰减系数 σ 及 σ_e 和 σ_s 随光子能量的变化曲线

系数 σ_s 随着光子能量的变化曲线。由图可见，康普顿效应的总衰减系数 σ 随着 γ 光子能量的增加而减小。同时，在 γ 光子能量较低时，能量转移系数 σ_e 非常小，散射衰减系数 σ_s 几乎与总衰减系数 σ 相同，也就是在低能光子与电子的碰撞中，散射光子可有与入射光子几乎相同的能量，而反冲电子得到的能量是很小的。但是，当 γ 光子能量较高时($h\nu \gg m_0c^2$)，能量转移系数 σ_e 非常接近总衰减系数 σ ，而散射衰减系数 σ_s 是小的，这就是说，在能时，反冲电子将带走入射光子的大部分能量，散射光子得到的能量很少。

1.3.3. 电子对效应

当入射 γ 光子的能量大于1.02兆电子伏（即大于电子静止能量的2倍）时， γ 光子与物质相互作用的第三种过程——电子对效应便发生了：在 γ 光子行近原子核而受到强的核力场的影响时， γ 光子在原子核中突然消失，而变成一对正电子和电子（见图1.13）。光子

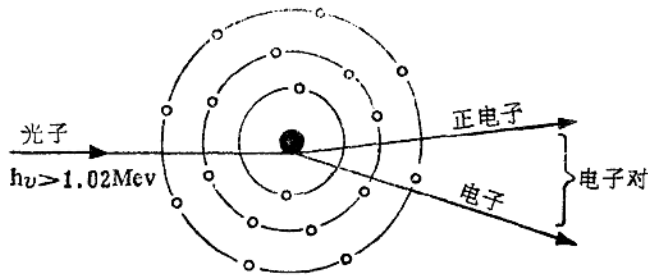


图1.13 电子对效应

能量 $h\nu > 2m_0c^2$ 时，光子在行近原子核时，与强的核力场相互作用，结果光子突然消失而产生一对正电子和电子。

的能量一部分转化为两个电子的静止质量，剩余的部分能量则变为两个电子的动能：

$$h\nu - 2m_0c^2 = E_{e^+} + E_{e^-} \quad (1.18)$$

显然当 $h\nu < 2m_0c^2$ 时，不可能发生电子对效应。

正电子和电子的质量相等，它们所带的电荷量也相等，但符号相反，正电子是带正电的。一个运动着的正电子，和带负电荷的电子一样，在物质中由于电离作用而逐渐失去它的动能，速度渐渐变慢。我们知道，负电子在耗尽其动能之后，最后将在物质中停止下来。然而慢化了的正电子却在它停止前的一霎那，很快地和物质中的自由电子复合（在物质中自由电子是很多的），随即在相反的方向上放出两个能量各为 0.511 兆电子伏的光子——我们把正、负电子复合然后发射两个光子的现象叫做质湮辐射（图1.14）。

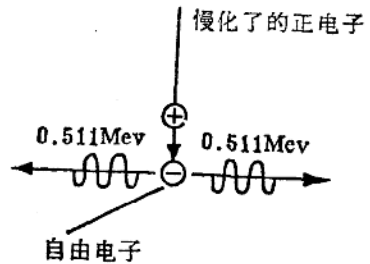


图1.14. 质湮辐射

慢化了的正电子一旦碰上自由电子，两者立即湮灭，形成两个光子，各有能量0.511兆电子伏

由上所述，象康普顿效应一样，可以把电子对效应对 γ 射线的总衰减系数 κ 分成两部

分：转变为电子能量的部分 κ_e 和转变为质湮辐射能量的部分 κ_p ：

$$\kappa = \kappa_e + \kappa_p \quad (1.19)$$

在电子对效应中，转变成质湮辐射的能量是一定的： $E_p = 1.02$ 兆电子伏，因此能量被电子带走的部分是 $(h\nu - 1.02)$ 兆电子伏。故而，在电子对效应中，由于电子带走能量而造成的能量转移系数为：

$$\kappa_e = \kappa \cdot \frac{h\nu - 1.02}{h\nu} = \kappa \left(1 - \frac{1.02}{h\nu}\right) \quad (1.20)$$

电子对效应与光电效应及康普顿效应不同，它的衰减系数 κ 是随光子能量增高而增大的，同时，衰减系数 κ 随物质的原子序数 Z 的增大而迅速增加。因此，高能 γ 射线在穿过重物时，电子对效应起着主要的作用。

1.3.4. 总衰减系数 μ

从以上对 γ 射线与物质相互作用三个主要过程的较为详细的讨论中，可以看到，随着 γ 光子能量的变化， γ 射线与物质的相互作用过程也不断地由一种主要作用过程转化为另一种主要的作用过程（见图1.15）。在能量低时， γ 射线的衰减以光电效应为主，而在高

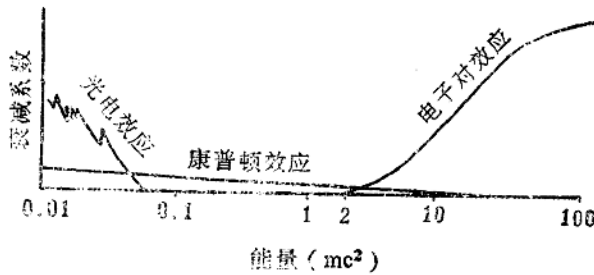


图1.15. 在一般情况下 γ 射线的衰减随能量的变化

能时， γ 射线的衰减却几乎全部是由电子对效应所造成，在中等能量部分，则以康普顿效应为主。从图1.15上可以看出，在 γ 射线能量相当大的范围内，对很多元素（除了非常重的元素外）康普顿效应的衰减系数都超过光电效应和电子对效应的衰减系数。

我们已经知道， γ 射线在物质中强度的减弱服从于指数衰减的规律：

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

由于 γ 射线贯穿物质时，光子与物质的原子发生着上述三种主要的作用过程，因此总的衰减系数 μ 就等于这三种过程的衰减系数的总和：

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (1.21)$$

总 光电 康普顿 电子对

图1.16画出了 γ 射线在水、铜、铅中的总质量衰减系数随 γ 光子能量的变化曲线。