

高等学校教学用书

游离辐射剂量学

YOU LI FUSHE JILIANGXUE

B. И. 伊万诺夫著

益群译

人民教育出版社

高等学校数学用书



游离辐射剂量学

(讲义)

YOU LI FUSHE JILIANGXUE

B. H. 伊万诺夫著

益群译

人民教育出版社



本书是根据苏联专家 В. И. 伊万諾夫(В. И. Иванов)于1959年在我国讲授“游离輻射剂量学”(Дозиметрия понизирующих излучений)課程时所編著的讲义譯出的。书中主要闡述游离輻射剂量学的基本理論和輻射剂量的主要測量方法。

本书可作为高等学校有关专业的“游离輻射剂量学”課程的教材。

游 离 輻 射 剂 量 学

В. И. 伊万諾夫著

益 群 譯

北京市书刊出版业营业許可證出字第2号

人民教育出版社出版(北京景山东街)

人民教育印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

各地新华书店經售

统一书号K13010·1077 开本850×1108¹/₃₂ 印张5⁹/₁₆。

字数121,000 印数0,001—1,000 定价(7)¥0.65

1962年12月第1版 1962年12月北京第1次印刷

序

本讲义是游离辐射剂量学课程的讲授提纲。在编写本讲义时,广泛地利用了已发表的资料,其中有: R. R. 阿格林切夫的专著“游离辐射剂量学”, 维克斯列尔、格罗谢夫和伊萨耶夫的专著“研究辐射的游离方法”, 由 J. 海因和 L. 布罗内耳所编辑的“辐射剂量学”, 第一次和第二次和平利用原子能国际会议的资料, 以及发表在期刊上, 主要是“原子能”杂志上的有关剂量学方面的文章。

全体听课的人, 在学习本课程的过程中所提出的意见, 无疑地对编写本讲义给予了帮助。

B. II. 伊万诺夫

1959. 8. 北京

目 录

序.....	v
緒論.....	1
第一章 倫琴射綫和 γ 輻射劑量学的物理基础	3
§ 1 基本定义·点源輻射.....	3
§ 2 电子轉換系数.....	5
§ 3 电子能量在物质中的轉化·平均游离功.....	9
§ 4 物质的有效原子序数.....	11
§ 5 剂量和剂量率·剂量率与射綫强度的关系.....	16
§ 6 輻射单位.....	20
第二章 倫琴射綫和 γ 輻射劑量学的游离方法.....	22
§ 1 基本关系.....	22
§ 2 电离室的基本規律性.....	23
§ 3 倫琴的绝对測量·标准电离室.....	31
§ 4 用于軟輻射和硬輻射的标准电离室的特点·饱和电流与剂量率之間的 定量关系.....	35
§ 5 頂針形电离室·格雷理論.....	37
§ 6 頂針形电离室的基本規律性.....	41
§ 7 电离室的“硬度特性”·頂針形电离室的电流与剂量率之間的定量关系.....	49
§ 8 頂針形电离室的实际应用·結構特点.....	51
§ 9 正比計数管和气体放电計数管在 γ 剂量測量中的应用.....	52
§ 10 带有游离探测器的现代剂量仪器的概述·使用的基本原则	57
第三章 倫琴射綫和 γ 輻射劑量学的閃爍方法.....	63
§ 1 概述.....	63
§ 2 閃爍計数器的“硬度特性”.....	65
§ 3 发光磷光体在測量 γ 射綫剂量中的应用.....	67
§ 4 結束語.....	69
第四章 倫琴射綫和 γ 輻射劑量学的感光方法.....	71
§ 1 基本概念.....	71
§ 2 x 光片在劑量学中的应用·“硬度特性”.....	74

§ 3 感光剂量计硬度特性的补偿	76
§ 4 感光方法的实际应用	79
第五章 测量剂量的特殊方法	81
§ 1 测量剂量的化学方法	81
§ 2 测量剂量的热方法	87
第六章 γ 剂量学中的实际问题	90
§ 1 一般概念	90
§ 2 伦琴射线的连续谱	91
§ 3 测定在被照射介质内能量吸收的平均值	95
§ 4 脉冲辐射剂量学	96
§ 5 超硬辐射剂量学	102
§ 6 深部剂量	107
第七章 中子剂量学	110
§ 1 一般概念·中子与物质的相互作用过程	110
§ 2 中子的组织剂量	113
§ 3 快中子的游离作用	115
§ 4 在 γ 和中子的混合辐射场内测量快中子剂量的方法	118
§ 5 热中子剂量测量	126
第八章 α, β 辐射和带电粒子束的剂量学	131
§ 1 β 辐射剂量的计算原理	131
§ 2 β 辐射和电子束的剂量测量	136
§ 3 α 辐射剂量学	140
第九章 气溶胶和气体的剂量测量	141
§ 1 放射性气溶胶的形成和特性	141
§ 2 气溶胶颗粒的沉积	144
§ 3 过滤器上放射性的积累	153
§ 4 大气放射性的监察	156
第十章 α 和 β 辐射源的放射性测量	160
§ 1 β 放射性强度的绝对测量(用铈罩形计数管)	160
§ 2 α 放射性强度的测量	164
第十一章(补充) γ 辐射的剂量场	169

緒 論

游离輻射劑量學是應用原子核物理學的一個獨立部分。劑量學研究的對象是確定由放射性物質發射的和由現代物理裝置所發出的 α 粒子、 β 射綫、電子、質子、中子、倫琴射綫和 γ 輻射的劑量。

劑量學作為一門獨立的學科來說，它的發展是比較晚的。在發現倫琴射綫(1895年)以後，不久就發現了它对生物器官(包括對人體)的傷害作用。這就迫使人們去尋求確定輻射“最大容許”劑量的途徑。以後，倫琴射綫在醫學上的應用，要求測定在器官組織內所吸收的倫琴射綫的能量。

在1942年以前，劑量學主要為輻射醫學工作者的需要服務。1942年第一個原子核反應堆開始運行。從這個時候起，開始加緊了原子能方面的工作，廣泛地進行了放射性同位素的生产。這樣一來，無論是對於成千的原子能工業中的工人，還是對於上萬的普通居民，輻射安全的問題就成為具有重要的意義問題了。

利用貫穿輻射照射各種物質的科學研究已經廣泛開展起來了。這就要求確定不同介質所吸收的不同類型輻射的能量。劑量學所面臨的任務範圍擴大了。開始發展了新的測量方法。

隨著強加速裝置的運轉，提出了與測量極高能輻射劑量有關的新的劑量學問題。

與實驗技術發展的同時，劑量學的計算方法也日趨完善。

近來，由於原子彈和氫彈的試驗，給劑量學又提出了測定大氣的放射性污染和監察放射性物質在自然界遷徙的任務。為了解決這些問題，必須能夠測定極低濃度的放射性物質。劑量學的一個分支學科——輻射測量學便是研究如何測量放射性樣品的放射性

强度的学科。

目前剂量学所要解决的问题,范围是非常广泛的,在这简短的緒論中不可能一一列举。

在剂量学的发展中,苏联物理学家起了很大的作用。И. И. 卢吉尔斯基,Д. И. 納斯列多夫,И. В. 波罗伊科夫的工作对辐射测量学作出了宝贵的贡献。К. К. 阿格林切夫的许多工作大大地丰富了剂量学这门学科。И. Г. 古謝夫和 А. И. 克隆高茲对剂量学的发展也做了很多工作。最近,О. И. 列伊彭斯基关于核武器試驗的危險性的很多著作又丰富了剂量学的内容。

作为独立的物理部門,剂量学正在不断地发展着。原子核技术的发展給剂量学提出了新的任务,其中保証使用放射性物質的安全操作問題占有重要的地位。剂量学研究方法得以完善就可以使得在原子能的和平利用中,任何人不致受到伤害。

第一章 倫琴射綫和 γ 輻射 劑量學的物理基礎

§1 基本定義·點源輻射

輻射的性質可以用不同的物理量加以說明。可以指出源在單位時間內所放出的 γ 光子數，也可以指出輻射所帶走的能量，還可以指出單個光子的能量等等。現在我們給出劑量學中某些重要名詞的定義。

通過垂直於射綫方向的平面，單位時間內輻射所帶走的能量稱為輻射率。

單位面積上的輻射率稱為輻射強度。換句話說，輻射強度是指通過垂直於射綫方向的單位面積上單位時間內輻射所帶走的能量。

令 N 表示輻射率， S 表示射綫所穿過的平面的面積，則給定點的輻射強度可由下式決定：

$$I = \frac{dN}{dS}. \quad (1)$$

對於某些特殊情況，當整個面積上的輻射強度完全相同時，可以寫成

$$I = \frac{N}{S}. \quad (1a)$$

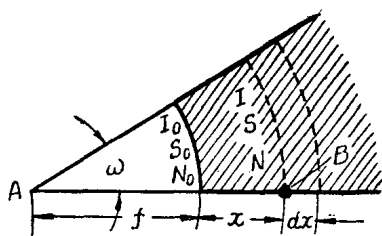


圖1 點源輻射。

現在我們來研究位於 A 點(圖1)的點源輻射。假定源的輻射被限定在立體角 ω 的範圍內。在距源 f 處是面積為 S_0 的減弱介質的表面，該表面垂直於射綫的傳播方向。假定在 S_0 表面前面是真

空,因而輻射率並不減弱。

註 I_0 和 N_0 分別表示在減弱介質表面上的輻射強度和輻射率。 S , N 和 I 分別表示距減弱介質前表面為 x 處的介質面積、輻射率和輻射強度。輻射率的減弱是由于輻射與物質發生相互物理作用的結果。在厚為 dx 的吸收體內,輻射率的变化是正比於這個厚度和在 x 處的輻射率,也就是

$$dN = -\mu N dx, \quad (2)$$

負號表示輻射率的減少。由(2)式可以得到熟知的輻射指數減弱規律:

$$N = N_0 e^{-\mu x}, \quad (3)$$

式中 μ 是對一定能量的 γ 光子和一定吸收介質來說的減弱系數。(3)式成立的前提是系數 μ 不隨吸收體厚度 x 發生變化。嚴格地講,這只有對於單能輻射才是如此。

利用表示式(1a), (3)式可以改寫為

$$I = I_0 \frac{S_0}{S} e^{-\mu x}. \quad (4)$$

由幾何關係很容易得到 $S_0/S = f^2/(f+x)^2$, 把它代入(4)式, 我們便最後得到了在吸收介質中點源輻射強度的變化規律:

$$I = I_0 \frac{f^2}{(f+x)^2} e^{-\mu x}, \quad (5)$$

量 f 稱為焦距。因此, 焦距就是指源到吸收體的距離。隨着 f 的增加, 系數 $f^2/(f+x)^2$ 趨近於 1, 對於大的 f 值, 可以近似地採用

$$\frac{f^2}{(f+x)^2} \approx 1,$$

這樣就得到

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

公式(5a)表示平行射綫束的減弱規律。實際上, 在離源很大距離

的地方,可以把射綫束看作平行束。

如果沒有吸收体存在,那么 $\mu=0$, 則

$$I = I_0 \frac{f^2}{(f+x)^2} \quad (56)$$

公式(56)表示熟知的輻射强度几何減弱的平方反比規律。

因此公式(5)是单能点源 γ 輻射强度減弱的最一般的表示式。

由輻射与物质相互作用的物理过程可以知道,强度的減弱是由于 γ 光子的真吸收和散射的結果。公式(5)中的系数 μ ,是既考虑了吸收,也考虑了散射。这意味着,只有在每一个散射光子都离开了射綫束,对輻射强度不再有貢獻的情况下,公式(5)才是正确的。实际上存在着这种可能性,即离开初始射綫束的散射光子再一次遭受到散射,由于第二次散射的結果,該光子又入射到按(5)式計算强度的 B 点(参考图1)。因此, B 点的輻射强度实际上是直接輻射的强度和散射光子强度的叠加。

按照公式(5)只能計算直接輻射的强度。实验上可以造成这样的条件,在这种条件下多次散射的射綫对总强度的貢獻可以忽略不計。对射綫束进行很好地准直,便可以得到这样的条件。如果散射射綫的作用小到可以忽略的程度,則可以称为“窄”束 γ 輻射。相反地,如果散射光子的作用很大,則叫做“宽”束輻射。

现在可以指出,公式(5)仅仅对窄束单能 γ 光子才是正确的。

应该指出,物理意义上的“窄”束在几何上可以是宽束。这取决于消除散射 γ 光子影响的方法。

任何形状的輻射源,都可以看作为一定数目的点輻射源的叠加。因此,这里所研究的点源輻射对剂量学是非常重要的。

§2 电子轉換系数

当輻射与物质相互作用时,入射能量的一部分轉化为电子的

动能,一部分为散射光子和標識螢光輻射所帶走,还有一部分能量被沒有和物質发生作用的初級 γ 光子所帶走。对于劑量学重要的是确定輻射能量的电子轉換,因为,最后在物質中实际被吸收的是这部分能量。

我們简单地研究一下能量小于3兆电子伏的射綫与物質相互作用的形式。

光电效应

光电效应就是:当 γ 光子与物質原子发生相互作用时,光子能量完全为这些原子所吸收。所吸收的光子能量,轉化为使电子由原子的电子壳层中跑出来所消耗的功和該电子的动能。如果电子是由原子的內壳层打出来的,那么外壳层的电子可以跳到所空出的能級上,这个时候将以標識輻射的形式釋放出能量。標識輻射的光子也可以由本身原子壳层中打出电子,在这种情况下,便形成了俄歇电子。

这样,在光电效应的情况下, γ 光子的能量轉化为光电子和俄歇电子的动能以及標識輻射的能量。

假定 E_a 表示由于发生光电效应的結果,单位時間內由单个原子所引起的能量轉換。 I 表示輻射强度,那么

$$\frac{E_a}{I} = \tau_a$$

就是光电效应的有效截面,或者叫原子光电吸收系数。現在提一下,在原子、电子、质量、綫性吸收系数之間存在的簡單关系,也就是

$$\tau = \tau_m \rho = \tau_a \frac{L_0}{A} \rho = \tau_e \rho \frac{Z}{A} L_0. \quad (6)$$

式中 τ 为綫性吸收系数, τ_m 为质量吸收系数, τ_a 为原子吸收系数, τ_e 为电子吸收系数, ρ 为吸收体的密度, A 为吸收体的原子量,

Z 为吸收体的原子序数, L_0 为阿佛加德罗常数。

让 u_e 表示电子的能量产额, u_s 表示标识辐射的能量产额。 u_e 是所形成的电子的能量对被吸收的光子能量的比值, u_s 是标识辐射的能量对被吸收的光子能量的比值。显然, $u_e + u_s = 1$ 。

现在可以把綫性吸收系数写成

$$\tau = u_e \tau + u_s \tau. \quad (7)$$

第一項决定辐射能量的电子轉換, 而第二項决定射綫轉換。

在光电效应的情况下, 如果从短波方面远离吸收带, 那么 $u_s = 0$, 而 $u_e = 1$ 。因此, 常常认为在发生光电效应时, 起作用的 γ 光子的全部能量都轉化为电子的动能。但是, 必須記住, 在接近吸收带边缘时, 光子产额 u_s 将要增加。

康普頓效应

在发生康普頓效应时, 入射光子与那些可以看作是自由的壳层电子发生作用。在这种作用下, 入射光子能量的一部分交给了由原子中飞出的电子, 其余的能量为散射光子所带走。因此, 对于康普頓效应, 也可以分为入射光子能量的电子轉換和射綫轉換。相应于康普頓效应的綫性减弱系数可以写成:

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_s, \quad (8)$$

式中 σ_e 是表示电子轉換部分的系数, σ_s 是表示入射光子能量射綫轉換部分的系数。 σ 、 σ_e 和 σ_s 的数值由熟知的克莱因-仁科公式给出, 該数值依赖于入射光子的能量和吸收体的原子序数。

电子对效应

在形成电子对的情况下(光子能量大于 1.02 兆电子伏), 可以认为作用光子的全部能量都轉化为正电子和电子的能量。相应于

电子对效应的綫性减弱系数用 κ 表示^①。

由前面的討論可以看出，总的减弱系数 μ 可以表示为两个系数和的形式：

$$\mu = \gamma + \xi. \quad (9)$$

其中 γ 表征由于所有作用过程，入射光子的能量轉化为电子的动能。 γ 叫做电子轉換系数。显然：

$$\gamma = \tau_e + \sigma_e + \kappa. \quad (10)$$

可以有綫性电子轉換系数、質量电子轉換系数、原子或电子的

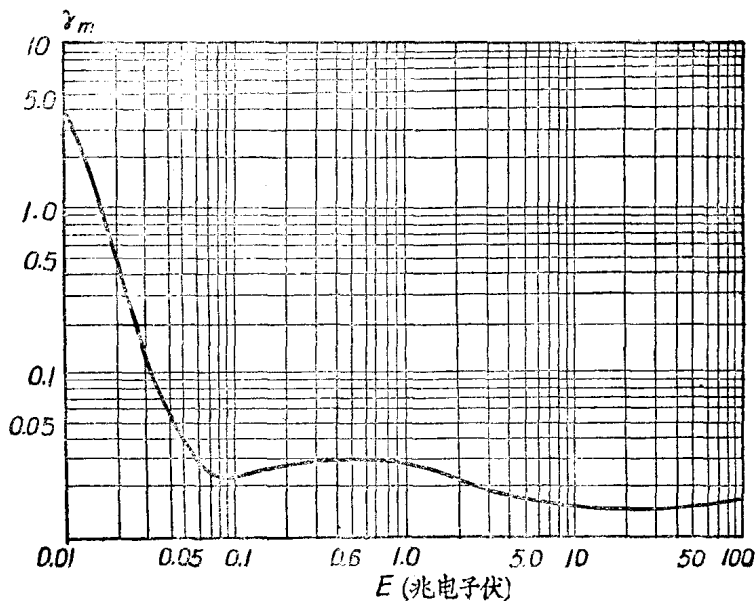


图2 空气的电子轉換系数与光子能量的关系：

E 为 γ 光子的能量； γ_m 为質量电子轉換系数。

① 在形成电子对的情况下，光子的一部分能量要轉化为电子和正电子的静止能量。因此，严格地讲，相应于电子对作用的电子轉換系数應該等于

$$\kappa_0 = \kappa \cdot [(h\nu - 1.02)/h\nu],$$

其中 $h\nu$ 为入射光子的能量，以兆电子伏为单位。——譯者注

电子转换系数。数值 ξ 叫做射线转换系数，它在剂量学中沒有多大意义。

在图2中给出了空气的电子转换系数与 γ 光子能量的关系曲线。

该曲线的特点是，在比較寬的能量范围内，空气的电子转换系数变化不大。以后我们将会看到，这一点是很有用的。

§3 电子的能量在物质中的转化·平均游离功

到现在为止，我們只談到了 γ 光子的能量转化为电子的能量。而所形成的电子，在与吸收体的原子和分子发生作用的时候，也会損失自己的能量。

电子的能量将以下述的形式进行转化。

1. 由于电子与介质原子和分子发生弹性碰撞的结果，增加了分子不规则运动的能量，因而使物体变热。因此，由于弹性碰撞的结果，电子能量的一部分直接转化为热能。

2. 由于非弹性碰撞，使一些分子和原子游离。因此，电子能量的一部分就直接用来引起游离。

3. 还可以产生韧致辐射。如果韧致辐射光子的能量不是非常小，那么，它们也可以再与介质的原子发生作用而打出次级电子，这些电子再为介质所吸收。因此，初级电子能量的一部分转化为次级电子的能量，一部分转化为非游离辐射的能量。

4. 由于非弹性碰撞的结果，电子能量的一部分将消耗于激发介质原子。当激发的原子回到正常状态时，将放出非游离辐射的光子。

这样，在物质中，初级电子的能量将转化为游离能、热能和非游离辐射能。

最便于观察的物理效应是游离。对于剂量学来说，重要的是

確定形成一個離子對所需的平均能量消耗。如果認為，所有被吸收的 γ 輻射的能量都轉化為所發射的電子能量，那麼，形成一個離子對的平均能量消耗對於 γ 光子和對於電子將是相等的。實驗証實了這一點。形成一個離子對所消耗的平均能量叫做平均游離功，用 s 表示。

現在我們更明確地確定一下平均游離功的概念。假定光子的吸收是發生在空氣中，並且認為所有被吸收的輻射能量都轉化為電子的動能。我們來研究這樣一塊空氣體積，在這一体積中，足以實現電子能量的完全轉化。在這種情況下，可以寫出

$$W_a = W_i + W_g + W_s. \quad (11)$$

其中 W_a 是被空氣吸收的全部的射綫能量， W_i 表示消耗於氣體游離上的能量， W_g 表示轉化為熱能的能量， W_s 表示轉化為非游離輻射的能量。

設 N 表示，由於吸收能量的結果，在空氣中所形成的總離子對數。現在就可以寫出

$$W_i = Neu_i, \quad (12)$$

其中 e ——一個離子的電荷；

u_i ——原子的游離電位。

eu_i 是由原子中打出一個電子也就是游離所必須消耗的能量。對於空氣， eu_i 大約為15電子伏。 eu_i 稱為游離功。

平均游離功定義為，所吸收的全部射綫能量對形成的總離子對數的比值，也就是

$$s = \frac{W_a}{N}. \quad (13)$$

利用表示式(11)和(12)可以寫出

$$s = eu_i \left(1 + \frac{W_g + W_s}{W_i} \right). \quad (14)$$

对于不同的气体有不同的 ε 值, 其数值由 26 电子伏到 35 电子伏。对于一定的气体, 在相当宽的 γ 光子能量范围内, 平均游离功几乎保持常数。这一点对剂量学非常重要。 ε 值保持常数表明: 损失于热和非游离辐射的能量与消耗在游离上的能量的比值保持不变。

对于空气来说, ε 与 γ 光子能量的关系如图 3 上的曲线所示。

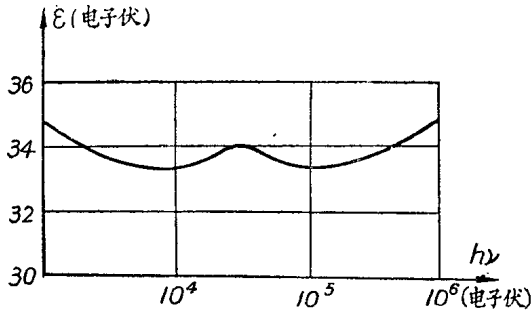


图3 空气的平均游离功与 γ 光子能量的关系。

对于低能和相当高能量范围内的 γ 光子, 平均游离功略有增加。严格地讲, ε 与 $h\nu$ 有关。但是在实际应用中, 在 10—15% 的精确度范围内, 直到 $h\nu=3$ 兆电子伏为止都可以认为 ε 保持常数。以前对空气曾通用 32.5 电子伏的数值。国际辐射学单位和测量委员会根据更精确的资料, 在其 1956 年的决议中, 建议对空气采用 $\varepsilon=34$ 电子伏。如果采用这一数值, 那么由表示式(14)中可以看出, 对于空气来说, 较小部分的能量是用于游离, 而较大部分能量则是用于非游离辐射和发热上。

§4 物质的有效原子序数

对辐射的真正吸收是用电子转换系数来表示的。如果两种物质的质量电子转换系数 γ_m 相同, 并在相同的条件下进行照射, 那么这两种物质每一克所吸收的能量也将是相同的。在一般情况