

辐射剂量学

〔美〕

F.H.阿蒂克斯
W.C.罗奇

主编

第一卷 基本原理



原子能出版社

辐 射 剂 量 学

第一卷 基本原理

〔美〕 F.H.阿蒂克斯

W.C.罗奇

施学勤 陈常茂 于耀明 译

沈 恂 徐海超 校

原子能出版社

内 容 简 介

《辐射剂量学》共分四卷：第一卷——基本原理；第二卷——仪器；第三卷——辐射源、辐射场、辐射测量和应用；第四卷——辐射剂量学 补编 1。全书较系统地论述了辐射剂量学的物理基础、测量仪器及其在工业、医疗等领域的实际应用。

本卷主要论述剂量学的概念和单位，被照物质中的微观能量分布，X、 γ 射线、带电粒子和中子等与物质的相互作用，辐射场的数学理论，电离和空腔电离理论。

本书可供从事原子核物理、辐射防护、放射性同位素应用、放射医学和放射生物学的科技人员以及大专院校有关专业师生参考。

Radiation Dosimetry

Vol. I Fundamentals

〔美〕 F. H. 阿蒂克斯

W. C. 罗奇

辐射剂量学

第一卷 基本原理

施学勤 陈常茂 于耀明 译

沈 恂 徐海超 校

原子能出版社出版

（北京 2108 信箱）

沈阳新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $13 \frac{1}{4}$ · 字数 354 千字

1981年9月第一版 1981年9月第一次印刷

印数 001—2,100 · 统一书号：15175·259

定价：1.95元

序 言

1956年学术出版社出版了由 G.J. Hine 博士和 G.L. Brownell 博士主编的《辐射剂量学》初版。当时出版该书的目的是为满足医学、工业和研究部门中辐射工作人员在开始应用辐射时了解辐射剂量学方面的新的、重要知识的需要。编者和作者们很成功地达到了这个目的，这一点可以从下述事实得到证明，即在这一领域中工作的大多数人们的书桌或书架上都有这样一本翻旧了的书。

该书出版十年来，无论在了解辐射剂量学的基础方面还是在建立新的和改进的测量方法方面，都已取得了许多进展。编写第二版时，再次搜集了当前这一领域中的大部分最新知识，以满足人们对综合性专著的需要。本书主要是作为辐射工作者的参考书而编写的，为此，书中附有许多有用的数据和曲线图表、公式以及参考文献。另一方面，本书内容的叙述力求清楚，以至本书对刚刚跨入这一领域的人们也是有用的。

我们特别注意做到全书中所用剂量学术语的一致性。国际辐射单位与测量委员会 (ICRU) 是这一方面的最高权威，第一卷的第一章对这一方面作了广泛的讨论。看来，有些读者最初可能会对近来所建议的一些术语（例如，注量和比释动能）感到有点陌生，但他们很快就会熟悉起来。在本书中，分别用 gm、mg 和 kg 作为 gram、milligram 和 kilogram 的缩写，这与现时 ICRU 和制定物理学术语的其他权威组织的建议不完全一致。他们喜欢用“g”来作为 gram 的缩写，显然，这与 mg 和 kg 更为一致，但是，学术出版社的长期方针是使 gram 的两个字母缩写最终得到普遍使用。

本书虽然称为第二版，但增添了许多内容。由于有其他的工作，Hine 博士和 Brownell 博士不能再次担任本书的主编工作，因此邀请 F.H. Attix (美国海军科学研究所)、W.C. Roesch

(太平洋西北研究所) 和 E. Tochilin (美国海军放射防护研究所) 担任这一版的主编, 而 Hine 博士则以编辑顾问的身份予以协助。原书为一卷本共十八章, 现在扩充为三卷本共三十三章, 内容包括许多新题材; 作者均为本学科方面的著名权威。

第一卷(共八章, 由 Attix 和 Roesch 编) 的标题是《基本原理》。这一卷论述剂量学的概念和单位; 微观范围(例如单个细胞) 中能量沉积的一些特殊问题; X 和 γ 射线、带电粒子及中子与物质的相互作用; 辐射场的数学理论; 电离以及空腔室理论。

第二卷(共八章, 由 Attix 和 Roesch 编) 的标题是《仪器》。本卷包括电离室的原理和设计; 盖革-弥勒计数器和正比计数器、闪烁探测器, 化学剂量计、积分型和电导型固体剂量计、胶片剂量计和量热计。

第三卷(共十七章, 由 Attix 和 Tochilin 编) 的标题是《辐射源、辐射场、辐射的测量和应用》。主要内容包括: X 射线和远距同位素的 γ 射线剂量学; α 、 β 和 γ 的分立源和分布源; 电子束; 重带电粒子束; 反应堆; 中子和 $n-\gamma$ 混合场; 加速器和放射源产生的中子; 核武器产生的初始和剩余电离辐射; 天然的和人为的本底辐射; 宇宙空间辐射; 超高能辐射和不常见类型粒子; 保健物理; 放射生物学; 放射治疗学; 植入管和体腔疗法; “过渡区”(特别是在骨-组织的界面处) 以及辐射加工。

为了减少各章之间的重复, 放手采用了前后参照的方法, 从而适当地压缩了整部书的篇幅。第三卷特别依赖于第二卷提供的对仪器的基本论述, 它本身则把重点主要放在适合于不同类型辐射场的剂量测量方法和对这些辐射场及其辐射源的描述方面。

F.H. Attix

W.C. Roesch

E. Tochilin

1967年10月

目 录

第一章 剂量学的基本概念	1
I. 引言	1
A. 对象	1
B. 辐射测量	1
C. 辐射仪器	2
D. 电离辐射	5
II. 剂量学的发展史	6
A. 早期的发展	6
B. 国际辐射单位与测量委员会 (ICRU) 的建立	7
C. 伦琴单位	7
D. 1937年对伦琴定义的修改	8
E. 吸收剂量	11
F. 照射剂量	13
G. 剂量当量	14
H. 1962年对有关定义的普遍修订	16
III. 辐射场的基本描述	18
A. 统计涨落	18
B. 辐射场	22
C. 分布	25
D. 源和放射性	27
IV. 辐射与物质的相互作用	29
A. 相互作用系数和截面	29
B. 光子和中子与物质的相互作用	33
C. 带电粒子与物质的相互作用	33
V. 辐射剂量学	34
A. 吸收剂量	34
B. 辐射平衡	37
C. 不存在带电粒子平衡时的情况	43
参考文献	43
第二章 辐照物质内的微观能量分布	45

I. 基本考虑	45
A. 宏观能量分布和微观能量分布	45
B. 传能线密度 (LET)	47
C. 事件大小 (Y)	53
D. 定域能量密度 (Z)	59
II. LET 分布	63
A. 计算	63
B. 测量	69
III. Y 分布	83
A. 测量原理	83
B. 实验测定的分布	85
IV. Z 分布	86
A. 计算	86
B. 测量	87
V. 当前状况的总结和对未来发展的建议	90
参考文献	92
第三章 X射线和 γ 射线与物质的相互作用	96
I. 引言	96
II. X射线和 γ 射线的衰减	96
A. 光子	96
B. 竞争的相互作用	97
C. 衰减、散射和吸收的含义	98
D. 康普顿效应、光电效应和电子对效应的竞争	99
E. 10兆电子伏以上的相互作用	99
III. 康普顿效应	102
A. 能量与角度之间的关系	102
B. 克莱因-仁科碰撞微分截面	103
C. 克莱因-仁科散射微分截面	106
D. 电子束缚的效应	107
E. 散射光子数的角分布	108
F. 散射光子能量的角分布	108
G. 康普顿反冲电子的角分布	109
H. 康普顿反冲电子的能量分布	109

I. 康普顿散射光子的能量分布	110
J. 平均碰撞截面	111
K. 平均散射截面	111
L. 平均吸收截面	113
IV. 光电效应	114
V. 由光子产生的电子对	115
VI. 在窄射束几何条件下光子的质量衰减系数和质量吸收系数	116
A. 质量衰减系数	116
B. 质量吸收系数	129
C. 混合物和化合物	147
D. 插值公式	147
VII. 闪烁谱仪的脉冲高度谱的解释	148
A. 全能量峰	148
B. 逃逸峰	149
C. 分辨率	150
D. 康普顿边	150
E. 反散射峰	150
F. 固有效率	151
VIII. γ 射线放射源中的自吸收	152
IX. 光子在宽射束衰减中的积累因子	153
X. 放射性核素的 γ 射线输出量	156
参考文献	158
第四章 带电粒子与物质的相互作用	162
I. 引言	162
A. 带电粒子的类别	162
B. 与物质的相互作用	163
II. 阻止本领	169
A. 主要相互作用	169
B. 阻止本领的基本公式	171
C. 阻止本领值的实际计算	181
D. 平均激发能	197
E. 壳层修正	200
F. 化合物	202

G. 对低速正离子的阻止本领和电荷态的修正	204
H. 阻止本领解析表示的近似方法	205
I. 实验数据	207
II. 射程	209
A. 射程的一般定义	209
B. 核相互作用	215
C. 电子-光子级联簇射	216
D. 重粒子射程的测量方法	217
E. 电子射程	219
IV. 重粒子束	222
A. 能量歧离	222
B. 射程歧离	224
C. 布喇格曲线	225
D. 散射	226
参考文献	231
第五章 辐射场的数学理论	237
I. 引言	237
II. 迁移方程	238
A. 单类型辐射	238
B. 多类型辐射	240
C. 带电粒子	241
D. 积分迁移方程	242
E. 迁移方程的解	242
III. 剂量学原理	245
A. 吸收剂量	245
B. 单辐射近似	247
C. 两辐射近似	248
IV. 伴随	251
A. 伴随的问题	251
B. 一般的伴随问题	253
C. 变分原理	254
V. 均匀的无限大介质	256
A. 均匀分布的源	256

B. 非均匀分布的源	263
Ⅵ. 非均匀系统	272
A. 非均匀密度	272
B. 近似方法	274
C. 蒙特卡罗法	276
D. 空腔理论	278
符号表	280
参考文献	283
第六章 中子在组织中的相互作用和贯穿	287
I. 引言	287
Ⅰ. 中子与组织元素的相互作用	288
A. 弹性散射	289
B. 俘获过程	291
C. 非弹性散射	292
D. 无弹性散射	294
E. 散裂	297
Ⅱ. 剂量的单位与计算	297
Ⅳ. 大物体中子剂量的计算	303
A. 一般考虑	303
B. 对圆柱形模型所作的计算	305
C. 与板模型的计算比较	325
D. 与深部-剂量的实验研究比较	327
参考文献	327
第七章 电离	331
I. 气体的电离	331
A. 电离电位	331
B. 每个离子对的平均能量 W	332
C. 纯气体的 W 的实验值	333
D. 低能和比 α 粒子重的粒子的 W 值	335
E. 混合气体的 W 值	338
Ⅰ. 液体的电离	339
Ⅱ. 固体的电离	339
参考文献	342

第八章 空腔理论	346
I. 引言	346
II. 比电子射程小的空腔尺寸	349
A. 理论的先决条件	349
B. 布喇格-格雷理论	354
C. Laurence 理论	356
D. Spencer-Attix 理论	364
E. Burch 理论	374
F. 经验方法	375
III. 比电子射程大的空腔尺寸	377
IV. 可与电子射程比拟的空腔尺寸	379
A. 经验方法	379
B. Spencer-Attix 理论的修正	380
V. 气体与壁材料“匹配”的特殊情形	385
A. Fano 定理	385
B. Fano 定理的实际应用	386
VI. 阻止本领比的绝对测量	387
VII. 空腔理论的实验验证	389
A. 实验工作评述	389
B. 理论所适用的空腔尺寸的范围	394
VIII. 吸收剂量与照射量的测量	395
A. 吸收剂量	395
B. 照射量	398
IX. X 和 γ 射线以外的辐射	400
A. 电子	400
B. 中子	402
X. 空腔理论对电离室以外的器件的应用	403
参考文献	406

第一章 剂量学的基本概念

William C. Roesch和Frank H. Attix

I. 引 言

A. 对 象

本章的目的是介绍辐射剂量学中使用的主要概念和量，并给它们下定义。由于这些概念和量在本书中要经常用到，因而有必要在这里首先把它们加以介绍。我们将通过对历史的回顾和着重对各个量之间的重要关系的逻辑上的发展来介绍它们。本章还介绍本书所使用的术语体系，并说明选择这种术语体系的理由。

B. 辐射测量

从字面上看，剂量学就是用剂量计测量剂量。这种说法基本上是正确的。在辐射剂量学中，剂量这一术语目前唯一确切的使用是作为吸收剂量的简称。吸收剂量的定义是电离辐射给与单位质量物质的能量（参阅第Ⅰ节E）。但在文献中，“剂量”这一术语曾有过多种含义（这点将在第Ⅰ节讨论），这一事实反映了：在研究和控制电离辐射对物质的效应时，有各种可能的和有效的测量方法。主要的测量方法有以下几种：

（1）测量物质内有关点的吸收剂量。

（2）测量间接致电离粒子（即光子和中子）在某一参考物质有关点的单位质量中所释放的能量。这种测量给该点处的辐射

提供了方便的简略的描述。参考物质可以是实际上存在于所研究点处的物质，也可以是其他物质，例如空气、石墨和组织等。

（参阅第Ⅰ节“照射量”和“比释动能”。）

（3）测量投射到某一点的粒子和量子的数目或能量。（参阅第Ⅰ节“通量密度”、“注量”、“强度”和“能量注量”。）

（4）测量投射到某一点的粒子以及量子的数目和能量的某一函数，例如，吸收剂量与不同传能线密度（LET）的辐射的线质因数的乘积可以选为这样的函数。（参阅第Ⅰ节。）

“辐射剂量学”不只是应用于吸收剂量的测量，而且普遍应用于所有上述各种量的测量。

C. 辐射仪器

由于“剂量”一词过去有过多种含义，所以目前在使用“剂量计”（dosimeter）一词时也有含糊不清的情况。在美国，“剂量计”一词的使用范围已受到了限制，往往只指“袖珍剂量计”

（佩带在身上的、内装有静电计的电离室）。由于这些原因，“剂量计”是一个不严格的术语，我们必须给它加上修饰语酌情使用。一些从事标准化的团体通过用带有“meter”一词的双词术语来解决这个问题，如：“dose meter”、“exposure meter”

（请慎勿与照相术中的同词相混）、“exposure-rate meter”、“flux (density) meter”等。

本书着重在叙述仪器对辐射如何响应和如何解释这些响应以给出所需要的量，如剂量、照射量等。对仪器本身往往只作简短的说明。这是本书所选择的范围，但并非轻视下列因素的重要性，如设计中注意避免各种因素（电场、磁场、电磁场、光、振动、温度、压力、湿度等）的干扰、响应快、无阻塞、积分型仪器中的永久性响应、经久耐用等。

仪器的精密密度指仪器在恒定辐射场中作重复测量时能获得相同结果的性能。对一给定量的辐射的响应的随机变化降低了仪器

的精密度。将一组测得响应值对照其平均值所得出的标准偏差，是用来表示仪器精密度的便当方法。

从原则上说，只要测量的读数足够多，所测量的平均值可以达到所要求的精密度。不过，这样得出的结果并不一定准确。由于仪器有系统误差，平均值与被测量的量的真值就可能不同。例如，标准自由空气电离室的实际灵敏体积，可能与根据入口处光阑和收集板极的尺寸推算出来的灵敏体积不尽相同。试用一组假定相同的仪器进行相同的测量，往往得出不同的值，这是由于，即使每台仪器的精密度很高，但它们的系统误差却是不一样的。

在报告测量结果时，应该写明精密度，如果可能的话，并写明准确度，以便对测量结果有一正确的估计，这点是很重要的。当说明仪器的精密度时，应特别注意精密度是与仪器的量程有关的；靠近仪器低量程一端，一般精密度较低。例如，我们不应当说某剂量计在整个 0—200 毫伦间的精密密度为 $\pm 5\%$ （标准偏差）；除非它实际上在测量微小的照射量（如 1 毫伦）时不会超过这样的误差限度。因此，我们宁可用全标度的百分数，或者用某段量程内的标准偏差（如从 20—200 毫伦间的标准偏差为 5%）来表示仪器的精密度，这样作会更恰当些。

有关精密度、准确度、标准偏差，可几误差和一些有关概念的一般论述，可参阅 Beers (1953)。

辐射仪器制成后，如果不需要在已知的辐射场中校准它的响应就能进行测量，则可以把这种仪器看作是“绝对的”。这种所谓“绝对的”仪器不一定非要很准确。只需要在特定的准确度范围内，无需刻度，它的固有的准确度就足以给出可靠的结果。然而，一级辐射剂量测量标准（如标准自由空气电离室）不仅是绝对的，而且通常也是相当准确的（可几误差小于 $\pm 1\%$ ）。目前只有三种仪器是绝对的，并且被公认为准确到可以作剂量测量标准。这三种仪器是：电离室（自由空气电离室和空腔电离室）、量热计和 Fricke 化学剂量计。

经过精心制作，可以制造出上述两种电离室中任何一种，它

们都能以约 1 % 的准确度测量出照射量。这种测量涉及少量电荷、电离室的某些尺寸、压强、温度和空气的相对湿度的测量以及对产生误差的某些小效应的校正（如在空腔电离室的室壁中 X 射线的衰减）等。假若我们需要测量空气中的吸收剂量，则还必须知道空气的 W 值（参阅第七章）。

量热计通常用来绝对地测量辐射而不测量热量（参阅第二卷第十六章）。为了提高准确度，量热计带有一个欧姆律加热器或珀耳帖加热器。通过观测已知的电功率输入所产生的温升，用电学方法校准仪器。然后用辐射场产生热效应，由此将辐射场测量出来。

第三种标准仪器，即 Fricke 硫酸亚铁化学剂量计，近年来已发展成为一种广为使用和众所熟习、重复性好以及性能可靠的仪器。如果能够解决对剂量率和 LET 的依赖问题，对于误差为 1—2 % 的绝对测量来说，它是具备上述绝对剂量计的条件。这种体系将在第二卷第十二章中详细论述。溶液中的吸收剂量作为溶液中光密度的函数，可用分光光度计测量出来。目前可以相信，对一些指定的硫酸亚铁溶液的光密度与吸收剂量的关系所发表的数据，用于能量为 1 兆电子伏左右的 γ 射线的测量，其误差约在 1—2 % 以内。

现有的其他仪器，都需要在已知的辐射场中校准后，方可获得小于 5 % 的准确度。

值得指出，对于那些无意建立一级标准，仅一般使用仪器的人来说，“绝对性”这个概念是无关紧要的。他们所需要的，不过是要获得能达到一定准确度的仪器，而不管它们是否要事先校准。例如，厂商可以供应标明 $\pm 3\%$ γ 射线准确度的剂量计。使用者如果有理由相信该仪器指标是可靠的，就不会计较它是作为绝对仪器而制作出来的，还是通过在标准化的 γ 射线场中校准而得出的。当然随着时日的迁移，仪器可能损坏或者准确度降低，这就需要重新进行校准。

第二卷第十三章里讨论了对于固体器件“绝对性”的特殊考

虑。

D. 电离辐射

电离辐射的定义通常是指那些能够直接地或通过某些次级辐射使物质电离的辐射。当足够的能量以适当的形式转移给物质时，可以从原子或分子内打出电子，从而发生电离过程。为什么要把电离辐射与物质中的其他沉积能量方式区分开来单独加以研究呢？“以适当的形式”这个短语是解答这个问题的指南。这些辐射所沉积的能量集中在如此少的原子中，而且能量又是如此之大，以致能够断裂使原子或分子结合在一起，并决定其特征的能键。物质中这些改变了的原子和分子的出现可能有严重的后果，生物系统对这类事件尤其敏感。

应当注意，尽管我们讲辐射是“电离的”，但电离并不是辐射能量转移给物质的唯一过程，也不一定是主要过程。第二种重要的现象是激发，在激发中，原子或分子由于辐射的作用上升到较高能态，但该能量还够不上允许电子逃逸出去。这种过程也会有重要的物理、化学或生物的后果。因此，我们应当记住，在提到电离辐射时，并不意味着仅关心辐射的电离能力，它只不过是能量上足以电离或激发物质的辐射进行分类的简便方法。这两种过程所需的能量大致上是相差无几的，对最外层电子一般约为1—10电子伏。

我们可以想象介于两者之间的情况：某种辐射可以激发某一物质，但不能电离；或者某种辐射可以电离某一物质，但不能电离另一电离势较高的物质。在这些例子中，用“电离”这一术语已因其描述不尽周全而不敷适用了。要确立剂量学中某些量（如吸收剂量）的严格定义，是一件比较困难的事，但它对实际应用却影响不大。通常涉及的初始辐射，其能量比电离或激发任何物质的原子或分子所需要的能量大好多倍。可是，在穿过物质时，这些辐射的能量下降，同时形成了较低能量的次级辐射。在这样

形成的混合辐射中仍能使物质电离或激发的辐射所占的比例多大，这乃是一个困难的问题。一般说来，那些没有足够的能量激发或电离物质的辐射所沉积的能量相当微小，不需要特别加以考虑。

高能的带电粒子通过与所穿过的物质中的电子的直接库仑力相互作用而产生电离和激发。X射线和 γ 射线光子的作用一般有两个过程：首先产生高能的次级带电粒子（通常为电子），然后电子产生大部分激发和电离。动能在零以上的所有中子都能通过各种过程产生高能次级带电粒子，因而中子也是电离辐射。在大多数物质中，由于紫外光量子不能贯穿物质以及它们的能量相对来讲又比较低，对剂量学来说，一般不把紫外光看作电离辐射，因而本书不予论述。

II. 剂量学的发展史

在介绍剂量学的概念和量的逻辑发展之前，我们要回顾一下导致这一领域目前状态的事件，并论述 ICRU（国际辐射单位与测量委员会）在建立现今最为广泛接受的概念和单位方面所起的作用。^①

A. 早期的发展

剂量学一直是与放射学的实践密切相关的，直到最近几年，放射学工作者一直是使用辐射源的唯一大团体。放射学工作者的主要任务不外是控制X光机随时给出的辐射的数量。对于早期的充气X射线管来说，控制并不是一件容易的事。这些X射线管不可能做得一模一样，而且它们工作时并不稳定。1913年，由于采用了比较稳定的库利吉（Coolidge）热灯丝、高真空X射线管，

① Parker和 Roesch(1962)作了更完整的历史回顾。