

电离辐射剂量学 (第二版)

高等学校教材

电离辐射剂量学

(第二版)

李士骏 编
史元明 审

R81
LSZ
12200

出版社

原子能出版社

高等学校教材

电离辐射剂量学

(第二版)

李士骏 编

史元明 审

原子能出版社

内 容 简 介

本书是1981年出版的《电离辐射剂量学》的修订本。修订中,对电离辐射剂量学的基本概念和剂量测量的基本原理作了大幅度的改写,并补充了辐射防护领域近年提出的若干新的辐射量。修订后,全书共分七章:电离辐射场、电离辐射与物质相互作用程度的定量描述、辐射效应的物理量度、辐射防护中使用的辐射量、剂量测量的基本方法、人体外照射剂量的计算方法和内照射剂量的估算方法。修订本保留了第一版中大部分实用的图表资料,可供实际工作查用。

本书系放射医学专业基础课教材,也可供从事辐射剂量、辐射防护、放射生物学等领域工作的专业人员以及高等院校有关专业的师生参考。

电 离 辐 射 剂 量 学

(第二版)

李士骏 编

史元明 审

责任编辑 崔朝晖

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

重庆印制一厂印刷

(枇杷山后街79号)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本850×1168 $1/32$ ·印张16.625·字数 440 千字

1986年11月北京第一版·1986年11月北京第一次印刷

印数 1—2700·统一书号: 15175·781

定价: 2.70元

第一版前言

电离辐射源的广泛应用和核能领域的迅速发展,给人类带来巨大裨益,但也伴有一定危害,主要是辐射对人体健康的影响。因之,需要进行辐射防护——既保护受到辐射照射的个人、他们的后代以及全体人类,又允许进行那些可能产生辐射照射的必要活动。为此,必须培养熟练的专业人员从事这方面的工作。本书旨在向放射医学专业学生系统介绍与辐射防护有关的电离辐射剂量学的基本概念、常用的辐射量与单位、剂量测量的基本原理和剂量的计算方法。

电离辐射剂量,实质是电离辐射与物质相互作用的物理量度。电离辐射剂量学,主要研究电离辐射的能量在物质中的转移、吸收规律,受照射物质内的剂量分布及其与辐射场的关系;辐射剂量与有关辐射效应之间的联系以及辐射剂量的测量、计算方法等。它们为研究辐射效应的作用机制,实施辐射防护的剂量监测和评价,进行放射治疗和人体辐射损伤的医学诊断和治疗提供可靠的科学依据。

然而,电离辐射剂量学还是一门比较年轻的学科,至今仍在不断发展和深化。五十年代末崛起的微剂量学,把电离辐射剂量学的研究推向细胞、分子水平,为探索辐射的作用机理开辟了新的途径,它的某些研究成果已直接在辐射防护和放射治疗的实践中得到应用。对微剂量学的若干基本概念,本书也扼要作了介绍,用小号字排印,供读者深入研究时参考。

全书蒙史元明同志悉心审校,且从素材搜集直至最后定稿,始终得到他富有建设性的指教和极其有力的帮助,谨此表示由衷的感谢。

由于本书取材较新,编者水平有限,书中缺点错误定然不少,恳请各界专家和读者不吝指正。

编者 1980年10月

1206

修订再版前言

电离辐射源的广泛应用和核能领域的迅速发展，给人类带来巨大裨益，但也伴有一定危害，主要是辐射对人体健康的影响。因之，需要进行辐射防护——既保护受到辐射照射的个人、他们的后代以及全体人类，又允许进行那些可能产生辐射照射的必要活动。为此，必须培养熟练的专业人员从事这方面的工作。本书旨在向放射医学专业学生系统介绍与辐射防护有关的电离辐射剂量学的基本概念、常用的电离辐射量和单位、剂量测量的基本原理和剂量的计算方法。

电离辐射剂量，实质是电离辐射对受照射物质造成的真实效应或潜在影响的一种物理量度。电离辐射剂量学，主要研究电离辐射的能量在物质中的转移、吸收规律；受照射物质内的剂量分布及其与辐射场的关系；辐射剂量与有关辐射效应之间的联系以及辐射剂量的测量、计算方法等。它们为研究辐射效应的作用机制，实施辐射防护的剂量监测和评价，进行放射治疗以及人体辐射损伤的医学诊断和治疗提供了可靠的科学依据。

然而，电离辐射剂量学还是一门比较年轻的学科，至今仍在不断发展和深化。五十年代末崛起的微剂量学，把电离辐射剂量学的研究推向了细胞、分子

水平，为探索辐射的作用机理开辟了新的途径，它的某些研究成果已直接在辐射防护和放射治疗的实践中得到应用。对微剂量学的若干基本概念，本书也扼要作了介绍。

本书是1981年《电离辐射剂量学》第一版的修订本。修订中，对电离辐射剂量学的基本概念和剂量测量的基本原理作了大幅度的改写，并补充了辐射防护领域内近年提出的某些新的电离辐射量。

本书蒙史元明同志悉心审校，修订中得到他富有建设性的指教和有力的帮助，谨此表示深切的感谢。同时，向曾对本书第一版提出过宝贵意见的各位专家、同行和读者表示由衷的谢意。

由于编者水平有限，本书部分内容虽经改写，难免仍有许多缺点和错误，恳请各界专家和读者，一如以往，不吝指教。

编者 1985年6月

目 录

第一章 电离辐射场.....	1
第一节 粒子数、辐射能和谱分布.....	2
一、粒子数 N 和辐射能 R	2
二、粒子通量 $\dot{N}$ 和能量通量 $\dot{R}$	3
三、谱分布和平均值.....	3
第二节 粒子注量、粒子注量率和粒子辐射度.....	6
一、粒子注量 ϕ	6
二、粒子注量率 $\dot{\phi}$	6
三、粒子辐射度 p ——粒子注量率的角分布.....	7
第三节 能量注量、能量注量率和能量辐射度.....	8
一、能量注量 ψ	9
二、能量注量率 $\dot{\psi}$	9
三、能量辐射度 r ——能量注量率的角分布.....	9
四、能量辐射度 r 和粒子辐射度 p 的关系.....	10
第四节 辐射场的完整描述.....	11
第二章 电离辐射与物质相互作用程度的定量描述.....	13
第一节 相互作用程度的描述方法.....	13
一、截面 σ	14
二、衰减系数 μ 和 μ/ρ	15
第二节 带电粒子能量在物质中的转移.....	18
一、碰撞阻止本领 S_{coi} 和 S_{coi}/ρ	19
二、辐射阻止本领 S_{rad} 和 S_{rad}/ρ	24
三、总阻止本领.....	26
四、在气体中每形成一个离子对所消耗的平均能量 W	28
第三节 X或 γ 射线的能量在物质中的转移.....	31
一、 γ 射线与物质的相互作用过程.....	32
1. 光电效应.....	32
2. 康普顿散射.....	34
3. 电子对产生.....	36

二、 γ 射线的衰减系数	37
三、能量转移系数	38
四、能量吸收系数	39
第四节 中子的能量在物质中的转移	43
一、中子与物质的相互作用过程	43
二、中子的能量转移系数	48
第三章 辐射效应的物理量度	50
第一节 吸收剂量	50
一、授与能, ϵ	50
二、吸收剂量及其单位	56
1. 吸收剂量, D	56
2. 吸收剂量单位	56
3. 吸收剂量率, $\dot{D}$	57
三、辐射平衡概念和吸收剂量方程	57
1. 吸收剂量的一般方程	57
2. 辐射平衡概念	59
3. 各种平衡条件下的吸收剂量方程	62
(1) 带电粒子平衡——介质受到不带电粒子外部照射时的 吸收剂量方程	62
(2) δ 粒子平衡——介质受到重带电粒子束外部照射时的 吸收剂量方程	63
(3) 部分 δ 粒子平衡——介质受到电子束外部照射时的吸 收剂量方程	64
第二节 比释动能	65
一、转移能, ϵ_t ,	65
二、比释动能, K	67
三、比释动能和能量注量的关系	68
四、比释动能和吸收剂量的关系	71
五、比释动能和吸收剂量随物质深度的变化	72
第三节 X或 γ 射线的照射量	75
一、照射量及其单位	75
1. 照射量, X	75

2. 照射量的单位	76
3. 照射量率, $\dot{X}$	77
二、照射量与能量注量的关系	78
三、照射量与比释动能、吸收剂量的关系	79
四、照射量、比释动能和吸收剂量的区别	84
五、照射量、比释动能与吸收剂量的数值近似关系	88
第四节 表述辐射品质的辐射量	89
一、带电粒子能量损失的空间分布	90
二、在描述能量损失微观分布上吸收剂量的局限性	94
三、传能线密度	96
1. 传能线密度, L_{Δ}	96
2. 传能线密度 L_{Δ} 与相对生物效应系数 RBE	98
四、线能及其分布	100
五、比能及其分布	103
六、随机量在微剂量学中的应用	108
1. 线能的频率平均值 $\bar{y}_F$ 与平均致死剂量 D_0	108
2. 线能的剂量平均值 $\bar{y}_D$ 和相对生物效应系数 RBE	110
3. 双重辐射作用理论	111
七、小结	116
第四章 辐射防护中使用的辐射量	118
第一节 辐射对人体健康的有害效应	118
一、辐射对人体健康的有害效应	118
二、基本假设	120
第二节 与个人相关的防护辐射量	120
一、剂量当量, H	120
1. 对影响辐射有害效应的某些因素的计权修正	121
2. 剂量当量及其单位	122
3. 剂量当量率, $\dot{H}$	125
二、有效剂量当量, H_E	126
1. 辐射效应的危险度, r_T	126
2. 有效剂量当量, H_E	129
三、待积剂量当量, H_{50}	131

四、描述周围辐射水平的指数量	132
1. 广义指数量——吸收剂量指数 D_I 和剂量当量指数 H_I	133
2. 狭义指数量——深部剂量当量指数 $H_{I,d}$ 和浅表剂量当量指数 $H_{I,s}$	134
五、个人监测和环境监测中用到的剂量当量	136
1. 个人监测中用到的剂量当量	137
2. 环境监测中用到的剂量当量	138
第三节 与群体相关的防护辐射量	139
一、集体量	139
二、人均量	141
1. 人均剂量当量 $\bar{H}$ 和人均有效剂量当量 $\bar{H}_e$	141
2. 有遗传意义的剂量当量 H_{GS} 、有躯体效应意义的剂量当量 H_{SS} 和有白血病意义的剂量当量 H_{LS}	141
三、负担量	144
第五章 剂量测量的基本方法	153
第一节 照射量的标准测量方法	154
一、自由空气电离室	154
1. 自由空气电离室	154
2. 收集的电荷量与照射量的关系	156
二、空腔电离室	160
1. 空腔电离理论	160
2. 质量碰撞阻止本领比, $\bar{S}_{m,g}$	161
3. 空腔电离室	166
4. 能量依赖性	170
第二节 吸收剂量的标准测量方法	172
一、测定吸收剂量的一般原理	172
1. 电子辐射场	174
2. 不带电粒子辐射场	175
二、测量吸收剂量的量热方法	181
三、测量吸收剂量的电离方法	183
1. 用空腔电离室测量介质中X或 γ 射线的吸收剂量	183
2. 用空腔电离室测量介质中电子束和 β 射线的吸收剂量	185

3. 空腔电离室在中子吸收剂量测量中的应用	189
四、测量吸收剂量的化学方法	193
五、小结	196
第三节 剂量测量中的其他方法	196
一、气体正比计数器在剂量测量中的应用	196
二、盖革计数管在剂量测量中的应用	199
三、闪烁计数器在剂量测量中的应用	202
四、胶片剂量计	203
五、热释光剂量计	205
六、剂量测量方法的选择	208
第四节 中子- γ 混合场中吸收剂量的测定方法	211
第六章 人体外照射剂量的计算方法	214
第一节 人体照射条件的分类及相应的剂量学指标	214
第二节 各种辐射量之间的相互联系	215
第三节 辐射场和辐射源	217
一、辐射场的形成	217
二、X辐射源	220
1. X射线的发生	220
2. X射线的线质	221
3. X射线发生器的照射量率	221
三、 γ 辐射源	224
1. 点状源的照射量率 照射量率常数	224
2. 非点状 γ 辐射源的照射量率	228
四、中子辐射源	231
1. 加速器中子源	231
2. 放射性中子源和自发裂变中子源	231
3. 裂变反应中子源	232
五、 β 辐射源	235
第四节 X、 γ 辐射人体组织吸收剂量的计算	236
一、窄束垂直入射时X、 γ 辐射的剂量计算	237
1. 表面反散射因子, $b(W_{\text{a}}, Q)$	237
2. 百分深度剂量, $P(d, W_{\text{a}}, Q)$	241

(1) 发散射线束的百分深度剂量表	243
(2) 平面平行射线束在水体模中的深度剂量分布	245
(3) 利用深度剂量分布资料计算人体组织吸收剂量	247
3. 组织-空气比, $T(d, W_d, Q)$	249
(1) 组织-空气比值表	250
(2) 组织-空气比的经验公式	250
(3) 组织-空气比和百分深度剂量的关系	259
(4) 利用组织-空气比计算人体组织吸收剂量	259
4. 人体非均匀性对剂量分布的影响	260
二、宽的平行辐射束垂直入射时X、 γ 辐射的剂量计算	262
第五节 中子人体组织吸收剂量的计算	267
一、小块组织内的比释动能	274
二、大体积介质内中子比释动能的分布	280
三、宽的平行中子束垂直入射时人体组织剂量的计算	282
第六节 任意谱角分布时中子、 γ 人体组织吸收剂量的计算	289
一、无限圆柱体模	289
二、单能单向辐射下剂量分布的计算结果	290
三、任意谱、角分布时人体组织剂量的计算	299
1. 中子吸收剂量, D_{CK}^n	299
2. 中子剂量当量, H_{CK}^n	300
3. γ 吸收剂量, D_{CK}^γ	300
第七节 人体器官剂量的估计	302
一、体积较小的器官剂量	302
二、分布较广的器官剂量	304
1. 窄的或发散辐射束照射下器官剂量的加权平均	304
(1) 骨骼	304
(2) 红骨髓	304
(3) 小肠	307
2. 宽的平面平行辐射束照射下器官剂量的加权平均	318
第八节 人体内最大剂量当量的估计	323
第九节 多次照射的剂量归一	329

第十节 β 外照射剂量的计算	331
一、 β 点源剂量率	331
二、平面 β 源的剂量率	334
三、无限 β 体源中的剂量率	335
第十一节 皮肤表面放射性污染的吸收剂量估计	335
一、 β 表面放射性污染造成的皮肤剂量率	335
二、 α 表面放射性污染造成的皮肤剂量率	336
第十二节 人体外照射剂量的表示方法	338
一、本底照射	338
二、职业性照射	340
三、一般性事故照射	343
四、大剂量的急性照射	344
第七章 内照射剂量的估算方法	347
第一节 放射性核素进入体内的途径及其代谢过程	348
一、放射性核素进入人体的途径	348
二、移位和沉积	350
三、排出	351
第二节 参考人	351
第三节 放射性核素在人体内的分布和滞留	355
一、有效半减期	355
二、滞留分数方程和排出分数方程	356
第四节 源器官内一次核转变对靶器官产生的剂量当量	361
一、源器官 (S) 和靶器官 (T)	361
二、源器官内一次核转变对靶器官产生的剂量当量	362
1. 比有效能量 $SEE(T \leftarrow S)$	362
2. 吸收分数 $AF(T \leftarrow S)$	364
3. $SEE(T \leftarrow S)$ 的计算范例	365
第五节 源器官内分布的放射性核素对靶器官产生的剂 量当量负担	370
一、源器官内分布的单一核素对靶器官产生的待积剂量当量	370
二、源器官内分布多种核素对靶器官产生的待积剂量当量	375
三、多个源器官对一个靶器官产生的待积剂量当量	377

第六节 放射性核素体内分布的剂量学模式	378
一、区间模型	378
二、体内放射性核素转归的动力学方程	379
三、转移区间和组织区间50年内的核转变数 U	379
四、对靶器官产生的待积剂量当量 $H_{50,T}$	380
第七节 放射性核素骨内分布的剂量学模式	381
一、骨构造简述	381
二、用于剂量计算的骨模型	382
三、靶组织对源组织辐射的吸收分数	383
四、源组织(小梁骨和皮质骨)内核转变数的估计	384
五、靶组织(骨表面细胞和活性红骨髓)剂量的计算	385
第八节 胃肠道的剂量学模式	388
一、胃肠道模型及放射性核素转移的动力学方程	388
二、从呼吸系统向胃肠道转移的放射性活度	391
三、从胃肠道转移到体液的放射性活度	391
四、胃肠道各段的待积剂量当量计算	392
1. 胃肠道壁作为靶器官时的 $SEE(T \leftarrow S)$ 的计算	393
2. 胃肠道内容物作为源器官时的核转变数 U 的计算	395
五、食入情况下内照射剂量的计算范例	395
第九节 呼吸系统的剂量学模式	402
一、肺模型	403
二、吸入物质的廓清动力学方程	406
三、由呼吸系统向体液和胃肠道转移的放射性核素	409
四、肺的待积剂量当量计算	409
五、吸入情况下内照射剂量的计算范例	411
第十节 由放射性核素的摄入量估算内照射剂量	423
一、放射性核素的几种摄入模式	423
二、由放射性核素的摄入量估算内照射剂量	429
第十一节 控制内照射的次级限值和推定限值	433
一、职业性工作人员的剂量当量限值	433
二、控制内照射的次级限值和推定限值	435
1. 单一放射性核素的年摄入量限值, ALI	436

2. 推定空气浓度, DAC.....	437
三、内、外混合照射时的剂量限制	438
附录1 SI单位制简介	439
附录2 X、 γ 射线在水体模内的百分深度剂量表	444
附录3 某些元素的代谢资料.....	471
附录4 常见放射性核素的内照射剂量学数据	491

第一章 电离辐射场

电离是指从一个原子、分子或其它束缚状态释放一个或多个电子的过程。

电离过程，主要是由具有足够动能的带电粒子与原子中电子的碰撞引起的。物质不同，原子的壳层电子受原子核束缚的程度不同，因此，为了使它们挣脱原子核的束缚，带电粒子必须具备的最小能量，对于不同的物质是不同的。一定能量的带电粒子能在一种物质中引起电离，未必能在另一种物质中引起电离。

光子也能借助碰撞引起物质电离，例如，在光电吸收和康普顿散射过程中，光子能从原子的壳层中击出电子。中子与原子核相碰撞，形成反冲核，也能造成原子的电离。只是，由不带电的光子或中子本身引起的电离，与由它们产生的次级带电粒子随后引起物质的电离相比，可以忽略不计。与带电粒子一样，不带电粒子欲产生次级带电粒子，也须具有一个最小能量。显然，对于不同的物质，这个截止能量也不一样。

不带电粒子还能引起核转变，例如，光核反应和中子俘获过程。核转变的结果产生出带电粒子，这些带电粒子能直接或间接地引起物质的电离。核转变本身也能引起相关的原子的电离。例如，在中子俘获过程发生后，当受激的产物核退激发射光子时，产物核受到反冲，也能造成电离。

低能带电粒子 ($v/c < 10^{-3}$)，虽然已不能通过碰撞直接引起电离，但它可能引起核或基本粒子的转变。例如， π^- 介子在其径迹末端，动能已经很低，不能再直接引起电离，但它与热中子一样，会被原子核俘获，使核中的一个质子变成中子；同时，与 π^- 介子静止质量相连系的能量 (140 MeV) 几乎全部在原子核内释出，这些能量为核内的许多粒子所分享，最后导致原子核的星裂。又如，在物质中慢化了的正电子，在其停下的一刹那，与负电子湮灭而产生光子。由低能带电粒子引起的核或基本粒子的转变

所产生的次级粒子,也都能进一步间接或直接地引起物质的电离。

电离辐射,就是由能通过初级过程或次级过程引起电离的带电粒子或不带电粒子组成的,或者由两者混合组成的辐射。

无论在空间,还是在介质内部,凡电离辐射在其中通过、传播以至经由相互作用发生能量传递的整个空间范围,称之为电离辐射场。

电离辐射有许多物理特性,诸如粒子类型、粒子数目、粒子能量以及它们的运动方向,因此,可以用辐射的这些特性对辐射场进行描述。例如,有用形成辐射场的初级辐射类型描述辐射场的,因而依初级辐射类型不同,辐射场有 α 辐射场、 β 辐射场、 γ 辐射场、中子辐射场甚至中子- γ 辐射场等等。有用粒子运动方向描述辐射场的,譬如,辐射场电离粒子全部沿一个方向运动的,称为单向辐射场;电离粒子沿几个方向运动的,则称多向辐射场;特别把在四面八方各个方向上运动的粒子数都相同的辐射场,称为各向同性辐射场,等等。

电离辐射场的性质还常随空间位置和时间的改变而变化。因而,为了完整地描述辐射场,需要知道任一时刻沿任一特定方向进入辐射场任一点的,具有任一特定能量的粒子数目或者粒子的能量。所以,描述辐射场性质的辐射量,不是涉及粒子的数目,就是涉及粒子的能量,因所研究的具体对象不同而不同,这里所述的粒子,可以是电子、光子、中子或其它的任何一种粒子。

第一节 粒子数、辐射能和谱分布

一、粒子数 N 和辐射能 R

这里,把由辐射源发出的,或在辐射场内传播的,或被有关物质接受的粒子数目和粒子的能量(不包括静止质量能)分别称作粒子数 N 和辐射能 R 。

辐射能 R 的SI单位是“J”(焦耳),而粒子数 N 的SI单位