



工业和信息化部“十二五”规划教材

# 辐射剂量与防护

霍雷 刘剑利 马永和 © 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

工业和信息化部“十二五”规划教材

# 辐射剂量与防护

霍 雷 刘剑利 马永和 编著

电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书以基础知识、基础理论和基本概念为主,参照国家辐射防护标准、相关法规、条例及规定,吸收了ICRP的新建议、新概念。全书共分12章,主要内容包括:电离辐射与物质的相互作用、辐射防护中常用的辐射物理量及单位、外照射剂量的计算、辐射的生物效应、辐射防护与标准、 $\gamma$ 射线与X射线的防护、带电粒子的防护、中子的防护、核技术装置的防护、内照射及防护、辐射剂量测量仪器、辐射的监督与管理等。本书提供配套电子课件。

本书可用作高等学校核物理等相关专业的辐射防护课程的教材,也可供相关工程领域人员学习、参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

辐射剂量与防护/霍雷,刘剑利,马永和编著. —北京:电子工业出版社,2015.7

工业和信息化部“十二五”规划教材

ISBN 978-7-121-26029-2

I. ①辐… II. ①霍…②刘…③马… III. ①辐射剂量学—高等学校—教材②辐射防护—高等学校—教材 IV. ①R144.1②TL7

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第097809号

策划编辑:王晓庆

责任编辑:王晓庆

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:16 字数:410千字

版 次:2015年7月第1版

印 次:2015年7月第1次印刷

定 价:45.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线:(010)88258888。

# 前 言

原子能科学技术的开发和利用在科学技术的发展史上具有划时代的历史意义，原子能科学技术在工业、农业、国防、能源、医学等领域获得了广泛的应用，并展现出美好的前景。但是任何新技术的发展和应用，在给人类带来方便和效益的同时也伴随着某些危害。人们在发展和利用新的科学技术为人类造福的同时，也总是在努力避免和减少其可能带来的不利影响。

辐射防护是人类在发展利用核辐射、放射性物质、核武器及核能过程中产生和发展起来的。早在 1895 年伦琴发现 X 射线后不久，人们就认识到了 X 射线对人体的损伤作用，随后在 1898 年居里发现镭后不久，也发现了  $\gamma$  射线对人体的损伤作用。这些发现引起了人们对核辐射危害的重视，人们开始采取各种防护措施。随着加速器、反应堆、核武器、核电站及放射性核素的发展和日趋广泛的应用，产生了大量的放射性物质和废弃物，构成了潜在的危害。特别是 1945 年，美国向日本投放了两颗原子弹，造成了大量的人员伤亡和严重的环境污染。核科学与技术的发展面临一系列棘手的问题：辐射防护标准的制定、各种放射性核素的最大容许浓度或摄入量限值、辐射屏蔽、反应堆与核电站的安全、环境污染、辐射的生物效应等。这些问题的提出和解决不仅促进了辐射防护领域的发展，也促进了放射生物学、放射医学、放射化学、放射生态学等边缘学科的产生和发展。

辐射防护现已成为原子能科学技术的一个重要分支学科，它是研究辐射现象进而使人类免受或少受辐射危害的一门综合性的交叉学科。辐射防护涉及原子核物理、放射化学、放射医学、放射生物学、放射生态学、辐射剂量学、核电子学等学科。辐射防护体系的基本原则是：实践正当化，辐射防护最优化，个人剂量限值。辐射防护的基本内容包括：制定辐射防护标准和监测方法，进行辐射防护监测并对其评价，研究辐射防护方法和采取可靠的防护措施，实施有效的辐射防护管理和医学监护。辐射防护的基本目的是：防止有害的确定性效应，并限制随机性效应的发生概率，使之达到可以接受的水平。辐射防护的基本任务是：保护环境，保障从事放射性工作人员和社会公众的健康与安全，保护他们的后代，促进原子能事业的健康发展。

辐射防护标准是为控制电离辐射的照射和放射性物质的污染，以保护职业性工作人员和居民的健康与安全，所制定的各类人员的各种剂量限值。辐射防护标准是辐射防护的核心内容，是实施辐射防护的法定依据。世界各国的辐射防护标准都是根据国际放射防护委员会（International Commission on Radiological Protection, ICRP）的建议并结合本国的具体情况制定的，并随着科学技术的发展和资料的积累而不断地修改和完善。国际放射防护委员会（简称 ICRP）是建立和推荐电离辐射防护标准的国际性权威学术团体，它于 1928 年第二届国际放射学大会上正式设立，原名为“国际 X 射线和镭防护委员会”，1950 年起采用现名。ICRP 对辐射防护提供指导性服务，并成为世界卫生组织（World Health Organization, WHO）的咨询机构。ICRP 于 1928 年公布了关于辐射防护的第一份（号）出版物（建议书），1934 年第一次规定了剂量限值，之后对剂量限值进行了多次修订和完善。人们对辐射损伤从表浅认识到逐渐深化认识的过程体现了辐射防护标准的历史演变过程，即剂量限值逐渐减小、更趋于安全的过程。1977 年第 26 号出版物与过去的防护标准相比，其基本标准和原则有了较大的改革，提出了许多新的概念。1990 年

第 60 号出版物进一步降低了剂量限值。我国 1984 年颁布的《放射卫生防护基本标准》(GB4792—84) 是以 ICRP 第 26 号出版物为基础制定的, 2002 年颁布的《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871—2002) 是以 ICRP 第 60 号出版物为基础制定的。

本书以基础知识、基础理论和基本概念为主, 参照国家辐射防护标准、相关法规、条例及规定, 吸收了 ICRP 的新建议、新概念。本书共 12 章, 内容包括电离辐射与物质的相互作用(第 1 章)、辐射防护中常用的辐射物理量及单位(第 2 章)、外照射剂量的计算(第 3 章)、辐射的生物效应(第 4 章)、辐射防护与标准(第 5 章)、电离辐射的防护(第 6、7、8 章)、核技术装置的防护(第 9 章)、内照射及防护(第 10 章)、辐射剂量测量仪器(第 11 章)、辐射的监督与管理(第 12 章)。辐射防护是按照国际权威机构 ICRP 等的建议不断发展、不断更新、不断完善的学科。每当提出新建议、新概念、新物理量时, 人们都要有一个接受、适应、理顺、习惯的过程。一个简单例子, 放射性活度单位早在 1910 年就以居里为单位来表示, 1975 年第 15 届国际剂量大会通过决议以国际单位制(SIU) 专名贝可为单位来表示, 国际单位与历史专用单位不仅暂时并行使用, 还可能长期并行使用。另一个例子是辐射防护量, 1962 年国际辐射单位与测量委员会(ICRU) 与 ICRP 共同商定提出剂量当量(Dose Equivalent) 这一概念作为辐射防护量, 1990 年 ICRP 第 60 号出版物则推出了当量剂量(Equivalent Dose) 这一新的物理量作为辐射防护量。这两个术语虽然只是“剂量”和“当量”前后排列次序不同, 但却是有本质区别的两个不同的物理量。早期的研究成果难以用新的概念、新的术语来表述, 剂量当量又是一个保留量, 这样短时间内难免会造成概念上的混乱。我国的辐射防护标准都是在 ICRP 公布新建议后 10 年左右才制定或修订的。

各国颁布的辐射防护标准总是落后于 ICRP 的新建议。ICRP 每次基本建议书的更迭都需要接着更新一些旧的专题出版物, 2007 年 103 号出版物作为最新的放射防护基本建议书, 使过去发表的一大批 ICRP 出版物需要更新甚至淘汰。103 号出版物与 60 号出版物相比, 在防护体系的基本概念和个人剂量限值方面没有变化。

本书可用作高等学校核物理等相关专业的辐射防护课程的教材, 通过教学实践, 学生可了解和掌握辐射防护的基础理论知识, 辐射防护标准、原则和规律; 明确原子能的和平利用与核武器的区别, 消除核恐惧感; 了解和掌握电离辐射损伤机理, 提高对辐射危害的科学认识, 从而明确辐射损伤是可防可控制的; 掌握辐射防护的基本方法和实用措施, 提高辐射安全的自我保护能力和环境保护意识; 了解辐射事件或事故处理的一般规则。在实践中, 只要严格执行和遵守辐射防护规定, 就可实现辐射防护的目标, 达到辐射安全的目的。

参加本书编写工作的有霍雷、刘剑利、马永和、冯启春、任延宇、王清尚等, 由霍雷、马永和负责统稿工作。本书正式出版前, 曾在哈尔滨工业大学物理系四届本科生的教学中试用过, 学生指出了其中的一些疏漏并提出了一些有益的建议, 编者在此表示衷心的感谢。本书在出版过程中得到了电子工业出版社的大力支持和帮助, 编者在此表示诚挚的谢意。

教学中, 可根据教学对象及学时等情况对本书内容进行适当删减或组合。为适应教学方法、教学手段的改革, 本书提供配套电子课件, 请登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>) 注册下载。本书在编写过程中力图理论联系实际, 与时俱进, 力图能反映出国、内外的新进展, 从而使读者获益。但是, 限于编者水平有限, 错误与不当之处在所难免, 欢迎读者批评指正。

编者

2015 年 6 月于哈尔滨工业大学

# 目 录

第 1 章 电离辐射与物质的相互作用	1	2.4.3 照射量与吸收剂量的关系	33
1.1 带电粒子与物质的相互作用	1	2.5 剂量当量及应用	34
1.1.1 带电粒子与物质相互作用的主要过程	1	2.5.1 剂量当量	34
1.1.2 带电粒子在物质中的射程	6	2.5.2 集体剂量当量	36
1.1.3 比电离	9	2.5.3 剂量当量负担	36
1.2 X、 $\gamma$ 射线与物质的相互作用	10	2.6 剂量当量与有效剂量	37
1.2.1 X、 $\gamma$ 射线与物质的相互作用	10	2.6.1 剂量当量	37
1.2.2 质量衰减系数、质能转移系数和质能吸收系数	15	2.6.2 集体剂量当量	38
1.3 中子与物质的相互作用	17	2.6.3 待积剂量当量	38
1.3.1 弹性散射	18	2.6.4 有效剂量	38
1.3.2 非弹性散射	19	2.6.5 集体有效剂量	39
1.3.3 辐射俘获	19	2.6.6 待积有效剂量	40
1.3.4 其他核反应	20	2.6.7 剂量负担	40
习题 1	21	习题 2	42
第 2 章 辐射防护中常用的辐射物理量及单位	22	第 3 章 外照射剂量的计算	43
2.1 描述辐射场的物理量和单位	22	3.1 $\gamma$ 射线剂量的计算	43
2.1.1 度量放射性强弱的物理量	22	3.1.1 $\gamma$ 光子注量率与吸收剂量率的关系	43
2.1.2 辐射能量的单位	24	3.1.2 源的活度与照射量率的关系	44
2.1.3 粒子注量	24	3.1.3 克镭当量与照射量率的关系	45
2.1.4 能量注量	25	3.2 X 射线剂量的计算	45
2.2 吸收剂量	26	3.2.1 X 射线的产生	45
2.2.1 吸收剂量及单位	27	3.2.2 X 射线剂量的计算	47
2.2.2 吸收剂量率	27	3.3 带电粒子剂量的计算	47
2.3 比释动能	27	3.3.1 单能电子及 $\beta$ 射线的注量率与吸收剂量率的关系	48
2.3.1 比释动能及单位	28	3.3.2 重带电粒子剂量的计算	49
2.3.2 比释动能率	28	3.4 中子剂量的计算	55
2.3.3 比释动能与粒子注量的关系	28	3.4.1 用比释动能计算	56
2.3.4 比释动能与吸收剂量的关系	29	3.4.2 用剂量换算因子计算	56
2.4 照射量	31	习题 3	57
2.4.1 照射量及其单位	31	第 4 章 辐射的生物效应	59
2.4.2 照射(量)率	32	4.1 细胞的辐射效应	59
		4.1.1 细胞的活性与细胞周期	59

4.1.2	电离辐射与细胞的相互作用	60	6.1.2	宽束 $\gamma$ 射线在物质中的衰减规律	100
4.1.3	辐射的细胞效应	61	6.1.3	累积因子	100
4.2	辐射生物效应	64	6.2	$\gamma$ 点源的屏蔽计算	104
4.2.1	辐射对水分子的作用	64	6.3	X 射线的防护	114
4.2.2	辐射对生物活性大分子的作用	65	6.3.1	X 射线的屏蔽计算	114
4.2.3	生物效应的过程	66	6.3.2	机房的设计	120
4.3	核辐射对人体的损伤	67	6.3.3	对病人的防护	122
4.3.1	辐射的躯体效应	67	习题 6		125
4.3.2	辐射的遗传效应	71	第 7 章	带电粒子的防护	126
4.3.3	影响辐射损伤的因素	73	7.1	$\beta$ 射线的屏蔽防护	126
4.4	核辐射危险度评估	75	7.1.1	$\beta$ 射线防护的特点	126
4.4.1	危险度	75	7.1.2	$\beta$ 射线的屏蔽计算	126
4.4.2	有效剂量	76	7.1.3	韧致辐射的屏蔽计算	130
4.4.3	集体剂量当量	77	7.2	重带电粒子的防护	131
4.4.4	行业比较	78	7.2.1	重带电粒子防护的特点	131
习题 4		79	7.2.2	屏蔽防护计算	133
第 5 章	辐射防护与标准	80	习题 7		137
5.1	辐射防护的任务和目的	80	第 8 章	中子的防护	138
5.2	辐射防护的主要内容	81	8.1	概述	138
5.2.1	辐射防护标准	81	8.1.1	中子源	138
5.2.2	辐射剂量学	82	8.1.2	中子探测器	138
5.2.3	辐射监测	82	8.1.3	中子的辐射损伤	139
5.2.4	辐射防护技术	82	8.2	快中子屏蔽计算的方法	140
5.2.5	辐射防护评价	83	8.2.1	分出截面	140
5.3	辐射防护标准	83	8.2.2	快中子屏蔽计算的分出截面法	142
5.3.1	辐射防护标准的发展历史	83	8.2.3	快中子屏蔽计算的张弛长度法	144
5.3.2	辐射防护的三项基本原则	84	8.3	同位素中子源的屏蔽	147
5.3.3	我国现行的辐射防护标准	85	8.3.1	常用同位素中子源的种类和特性	147
5.3.4	ICRP 的新建议与 GB18871—2002	90	8.3.2	同位素中子源的屏蔽计算	147
5.4	作用于人体的电离辐射	91	8.4	中子发生器及防护	149
5.4.1	天然本底照射	91	8.4.1	中子发生器的原理	150
5.4.2	人为放射性照射	93	8.4.2	中子发生器的辐射危害	151
5.5	外照射防护的一般方法	94	8.4.3	中子发生器的屏蔽计算	152
习题 5		96	习题 8		154
第 6 章	$\gamma$ 射线与 X 射线的防护	98			
6.1	$\gamma$ 射线在物质中的衰减规律	98			
6.1.1	单能窄束 $\gamma$ 射线在物质中的衰减规律	98			

第 9 章 核技术装置的防护 .....	155	10.2.5 约定剂量当量 .....	191
9.1 核辐射装置 .....	155	10.2.6 最大容许浓度与年摄入量 限值 .....	192
9.1.1 核辐射在工程技术中的应用 .....	155	10.2.7 最大容许全身负荷量 MPBB .....	193
9.1.2 放射性同位素 $\gamma$ 射线源 .....	157	10.3 内照射防护的基本原则和基本 措施 .....	193
9.1.3 辐射源的倒装 .....	162	10.3.1 防止放射性物质经呼吸道 进入体内 .....	194
9.1.4 辐射源的储藏 .....	163	10.3.2 防止放射性物质经消化道 进入体内 .....	194
9.1.5 辐射源的升降系统 .....	165	10.3.3 污染监测与管理 .....	195
9.1.6 控制系统 .....	165	习题 10 .....	196
9.1.7 辐照室的通风换气 .....	167	第 11 章 辐射剂量测量仪器 .....	197
9.1.8 封闭式辐射装置的基本结构 .....	169	11.1 辐射探测方法概述 .....	197
9.2 加速器的防护 .....	169	11.2 $\gamma$ 射线剂量的测量 .....	198
9.2.1 加速器概述 .....	169	11.2.1 用特种电离室测量 $\gamma$ 射线 的吸收剂量 .....	198
9.2.2 加速器屏蔽防护的特点 .....	171	11.2.2 气体正比计数管 .....	203
9.2.3 小型加速器的辐射安全防护 .....	171	11.2.3 G-M 计数管 .....	204
9.3 反应堆的防护 .....	172	11.2.4 闪烁探测器 .....	205
9.3.1 反应堆概述 .....	172	11.2.5 半导体探测器 .....	206
9.3.2 反应堆屏蔽概述 .....	174	11.2.6 $\gamma$ 剂量仪器的标定 .....	207
9.4 载人航天飞行器的辐射防护 .....	176	11.2.7 $\gamma$ 剂量仪器的主要技术 指标 .....	211
9.4.1 宇宙空间的主要电离辐射 危险源 .....	176	11.3 $\beta$ 射线和电子束的剂量测量 .....	212
9.4.2 宇宙飞行中辐射防护的特点 .....	179	11.3.1 外推电离室测量 $\beta$ 射线 的吸收剂量 .....	212
9.4.3 宇宙飞行的辐射安全及额定 辐射水平 .....	180	11.3.2 电子束吸收剂量的测量 .....	214
习题 9 .....	181	11.4 中子剂量的测量 .....	215
第 10 章 内照射及防护 .....	183	11.4.1 中子剂量测量的特点 .....	215
10.1 内照射 .....	183	11.4.2 中子吸收剂量的测量 .....	215
10.1.1 操作开放源的放射化学 实验室 .....	183	11.4.3 中子剂量当量率仪 .....	216
10.1.2 产生内照射的途径和放射性 核素在体内的代谢 .....	184	11.4.4 混合辐射场剂量当量的测量 .....	218
10.1.3 内照射的特点与内照射 放射病 .....	185	11.4.5 中子剂量仪器的刻度源 .....	218
10.1.4 内照射剂量的估算 .....	185	11.5 个人剂量计 .....	220
10.2 内照射剂量估算的基本概念 和基本参数 .....	186	11.5.1 概述 .....	220
10.2.1 有效半减期与生物半排期 .....	186	11.5.2 热释光剂量计 .....	220
10.2.2 有效能量和比有效能量 .....	187	习题 11 .....	223
10.2.3 参考人 .....	188		
10.2.4 肺模型 .....	189		



第 12 章 辐射的监督与管理 .....	225	12.3 放射性物质的安全管理 .....	233
12.1 放射性工作单位 .....	225	12.3.1 放射源的运输管理 .....	233
12.1.1 放射性工作单位或工作场所 的界定与分类 .....	225	12.3.2 放射源的储存管理 .....	236
12.1.2 预防卫生监督 .....	227	12.3.3 放射性废物的处理 .....	237
12.1.3 放射性工作单位的申请 许可登记 .....	229	12.4 放射事故 .....	238
12.2 放射性工作人员的健康管理 .....	229	12.4.1 放射事故概况 .....	238
12.2.1 健康管理的目的和范围 .....	229	12.4.2 放射事故的原因分析 .....	241
12.2.2 个人剂量监测 .....	229	12.4.3 放射事故的管理 .....	242
12.2.3 健康管理 .....	232	习题 12 .....	243
12.2.4 岗位培训与放射工作人员证 .....	232	附录 辐射防护相关标准目录 .....	244
		参考文献 .....	248

# 第1章 电离辐射与物质的相互作用

辐射可分为电离辐射和非电离辐射。频率在 $3 \times 10^{16}$  Hz 以下的辐射，如红外线、可见光、紫外线等，其光子能量  $h\nu$  很低，不能引起物质电离，这类辐射叫非电离辐射；凡是能直接或间接使物质电离的一切辐射，统称为电离辐射 (Ionizing Radiation)。电离辐射是由带电的电离粒子，或者不带电的电离粒子，或者前两者的混合组成的任何辐射。电离辐射包括能使物质直接电离的带电粒子（如  $\alpha$  粒子、质子、电子等）和能使物质间接电离的非带电粒子（如频率大于  $3 \times 10^{16}$  Hz 的光子、中子等）。

辐射剂量学、辐射屏蔽、辐射生物效应等都涉及电离辐射与物质的相互作用，电离辐射与物质相互作用时所引起的物理、化学、生物变化都是通过能量转移和吸收过程实现的。

## 1.1 带电粒子与物质的相互作用

带电粒子的种类很多，最常见的有电子（指核外电子）、 $\beta$  射线（核衰变发射的高速电子）、质子（氢核）、 $\alpha$  粒子（氦核），此外还有  $\mu$  子、 $\pi$  介子、K 介子、 $\Sigma$  介子及其他原子核等。在辐射防护领域，凡是静止质量大于电子的带电粒子，习惯上都称作重带电粒子。最轻的重带电粒子是  $\mu$  子，其质量为电子质量的 206.9 倍（表 1-1）。

表 1-1 一些常见粒子的基本特性

粒子种类	符号	电荷/e	质量/ $m_0$	平均寿命/s	
轻子	(负) 电子	$e^- (\beta^-)$	-1	1	稳定
	正电子	$e^+ (\beta^+)$	+1	1	稳定
	$\mu$ 子	$\mu^\pm$	$\pm 1$	206.9	$2.26 \times 10^{-6}$
	中微子	$\nu$	0	$\approx 0$	稳定
介子	$\pi$ 介子	$\pi^\pm$	$\pm 1$	273.1	$2.56 \times 10^{-8}$
		$\pi^0$	0	264.3	$< 4 \times 10^{-6}$
	K 介子	$K^\pm$	$\pm 1$	967	$1.22 \times 10^{-8}$
		$K^0$	0	975	$1.00 \times 10^{-8}$
核子	质子	P	+1	1836.12	稳定
	中子	n	0	1838.65	$1.04 \times 10^{-3}$
重粒子	氘核	d(D)	$\pm 1$	3670	稳定
	氚核	t(T)	$\pm 1$	5497	$10^9$
	$\alpha$ 粒子	$\alpha$	$\pm 2$	7294	稳定
光子	紫外线		0	0	
	$\gamma$ 射线	$\gamma$	0	0	
	X 射线	X	0	0	

### 1.1.1 带电粒子与物质相互作用的主要过程

带电粒子与物质相互作用的过程是很复杂的，主要过程有：弹性散射、电离和激发、韧致辐射、湮没辐射、契伦科夫辐射、核反应（ $(\alpha, n)$ 、 $(p, n)$ 、 $(d, n)$  等）、化学变化（价态、分解、聚合）等。

带电粒子主要通过电离和激发过程损失能量，其次是韧致辐射，这两种过程是带电粒子在物质中能量损失的主要途径。

### 1. 电离和激发与碰撞阻止本领

电离 (Ionization) 是中性原子或分子获得或失去电子而形成离子的现象。电离过程中形成的带正电或带负电的电子、原子、分子等，分别称为正离子或负离子。从一个中性原子或分子产生的具有相等电荷量的正、负离子，称为离子对。电离可在许多情况下发生，如电离辐射、高温、强电场等。

具有一定动能的带电粒子通过物质时，带电粒子通过与轨道电子库仑场静电相互作用或与电子直接碰撞，将部分能量传递给轨道电子。如果轨道电子获得足够的能量，就能摆脱原子核的束缚，逃离原子壳层而成为自由电子，失去电子的原子带正电荷，自由电子与带正电的原子形成一个离子对，这个相互作用过程叫电离。电离作用是带电粒子与轨道电子之间的非弹性碰撞。如果轨道电子获得的能量不足以摆脱原子核的束缚，没有逃离原子，而是从低能级跃迁到高能级，从而使整个原子处于激发态，这个相互作用过程叫激发。处于激发态的原子是不稳定的，它会自发地跃迁到低能级而回到基态，并将获得的多余能量以电磁波的形式放出。这样释放出的高频电磁波称为 X 射线，它的能量是不连续的，X 射线光子的能量等于电子跃迁的两个能级之差，因此这种 X 射线也叫标识 X 射线或特征 X 射线。

在电离过程中产生的某些自由电子如果具有足够的动能，它会进一步引起物质电离。具有较高能量并能进一步引起物质电离的这些自由电子叫作次级电子或  $\delta$  电子 ( $\delta$ -ray)。由次级电子产生的电离叫次级电离 (Secondary Ionization) 或间接电离；而由入射带电粒子在其运动过程中直接与物质相互作用所产生的电离叫初级电离 (Primary Ionization) 或直接电离。

带电粒子与原子轨道电子通过库仑碰撞不断产生电离和激发而传递能量，其本身的能量就会不断地损失，这种能量损失叫碰撞过程的能量损失或电离损失 (Ionization Loss)。

阻止本领 (Stopping Power) 表示带电粒子通过物质时在单位路程上损失的能量。阻止本领通常用  $S=dE/dx$  来表示，其中， $E$  为带电粒子的动能， $x$  为粒子在物质中通过的距离。阻止本领表示物质使通过它的带电粒子动能减少的本领，它与带电粒子的性质 (电荷、质量、能量等) 和物质的性质 (原子序数、密度等) 有关。物质对带电粒子的阻止本领又有线性阻止本领 (Linear Stopping Power)、质量阻止本领 (Mass Stopping Power) 和相对阻止本领 (Relative Stopping Power) 之分。根据带电粒子在物质中损失能量的方式，阻止本领又分为电离阻止本领 (Ionization Stopping Power) 和辐射阻止本领 (Radiation Stopping Power) 两种。

线性碰撞阻止本领定义为入射带电粒子在介质中每单位路径长度上由于电离损失的平均能量，并记作  $(dE/dx)_{col}$ ，脚标 col 表示库仑作用。为消除物质密度  $\rho$  的影响，常用线性碰撞阻止本领除以密度的商来描写能量损失，并称之为质量碰撞阻止本领，记作  $(dE/dx)/\rho_{col}$ 。质量碰撞阻止本领可粗略地表示为

$$\frac{1}{\rho} \left( \frac{dE}{dx} \right)_{col} \propto \frac{nz^2}{\beta^2} \quad (1.1)$$

式中， $n$  为单位体积中的电子数； $z$  为带电粒子的电荷数，以电子电荷的倍数表示； $\beta$  为以光速为单位的带电粒子的运动速度， $\beta=v/c$ ， $v$  为带电粒子的运动速度， $c$  为光速。由式 (1.1) 可以看出：(1) 电离损失与带电粒子的电荷数  $z$  的平方成正比，带电粒子的电荷数  $z$  越大，与

轨道电子的库仑作用力就越大，因而传递给电子的能量也越多；(2) 电离损失与物质中电子的密度成正比，即电子的密度越大，入射带电粒子与电子发生库仑散射的几率越大，传递给电子能量的机会就越多；(3) 电离损失与带电粒子的运动速度的平方成反比，即带电粒子传递给轨道电子的能量与相互作用的时间有关，速度越慢，作用时间越长，传递给轨道电子的能量也越大，因此，带电粒子在停止运动之前的某一段路径上，电离损失将会达到最大值。

## 2. 轫致辐射与辐射阻止本领

轫致辐射 (Bremsstrahlung) 是高速运动的带电粒子受原子核或其他带电粒子的电场 (库仑场) 作用，突然改变其运动速率或运动方向时产生的电磁辐射。这时带电粒子将部分动能转变为电磁辐射能。轫致辐射的能量是连续分布的，其最大能量等于带电粒子的初始能量。轫致辐射的产生与带电粒子的运动速度有关，只有在粒子运动速度很高时才有明显的效应。轫致辐射的强度与带电粒子的质量平方成反比，与阻滞物质的原子序数的平方成正比。因此快速运动的电子被物质阻滞而突然减低其速度时，则有一部分能量转变为连续能量的轫致辐射，辐射强度大于同速度的重带电粒子的辐射。从  $\beta$  放射源发出的  $\beta$  粒子打到原子序数较高的靶材料时，可发射轫致辐射和特征辐射。轫致辐射的强度和能谱主要与  $\beta$  粒子的能量和阻滞物质的原子序数有关。 $\beta$  粒子的能量越高，阻滞物质的原子序数越高，轫致辐射的强度就越大。 $\beta$  粒子轫致辐射的平均能量约为  $\beta$  粒子最大能量的  $1/3$ 。轫致辐射是带电粒子与原子核之间的非弹性碰撞，也叫辐射碰撞。

高能带电粒子由于轫致辐射而引起的能量损失称为辐射损失 (Radiation Loss)。这种能量损失通常只是对电子 ( $\beta$  粒子) 才是重要的，对重带电粒子可以忽略不计。

带电粒子的辐射损失正比于  $(Zz)^2/m^2$ ，式中， $Z$  为阻滞物质的原子序数， $z$  为带电粒子的电荷数， $m$  为带电粒子的质量。这个关系表明，带电粒子质量越大，辐射损失越小，在同一物质中和相同的能量条件下， $\alpha$  粒子的辐射损失比电子的辐射损失小得多。因此，重带电粒子的辐射损失可忽略不计，主要是考虑电子的辐射损失。

在辐射防护中，更多关心的是电子产生轫致辐射的份额 ( $F$ )：

$$F = KZE \quad (1.2)$$

式中， $E$  为电子的能量，单位为 MeV； $Z$  为物质的原子序数； $K$  为比例常数，一般为  $(0.4 \sim 1.1) \times 10^{-3} / \text{MeV}$ 。

对单能电子束入射在厚靶上的轫致辐射份额，可用式 (1.3) 计算

$$F = 5.8 \times 10^{-4} ZE \quad (1.3)$$

对  $\beta$  射线入射在厚靶上的轫致辐射份额，可用式 (1.4) 计算

$$F \approx 3.33 \times 10^{-4} ZE_{\beta_{\max}} \quad (1.4)$$

式中， $E_{\beta_{\max}}$  为  $\beta$  射线的最大能量，单位为 MeV。

线性辐射阻止本领表示入射带电粒子在介质中每单位路径长度上因辐射而损失的平均能量，并记作  $(dE/dx)_{\text{rad}}$ ，脚标 rad 表示辐射。为消除介质密度  $\rho$  的影响，常用线性辐射阻止本领除以密度的商来描述相应的能量损失，称为质量辐射阻止本领，记作  $(dE/dx)/\rho_{\text{rad}}$ 。质量辐射阻止本领可表示为

$$\frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)}{\rho_{\text{rad}}} \propto \frac{EZ^2}{m^2} \quad (1.5)$$

### 3. 总质量阻止本领

总质量阻止本领  $S/\rho$  定义为带电粒子在密度为  $\rho$  的介质中, 穿过路径  $dx$  时, 所损失的所有能量  $dE$  除以  $\rho dx$  的商

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx} \quad (1.6)$$

这里的所有能量损失, 是指带电粒子与物质相互作用的一切过程中能量损失之和, 在  $E < 10\text{MeV}$  的能量范围内, 主要能量损失通常是电离损失和辐射损失, 而其他过程的能量损失可忽略不计。因此, 总质量阻止本领等于质量碰撞阻止本领  $(S/\rho)_{\text{col}}$  与质量辐射阻止本领  $(S/\rho)_{\text{rad}}$  之和, 并表示为

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{col}} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{rad}} = \left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{col}} + \left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{rad}} \quad (1.7)$$

总质量阻止本领与带电粒子的类型和能量有关。对于重带电粒子, 质量辐射阻止本领  $(S/\rho)_{\text{rad}}$  可忽略。对于电子, 质量辐射阻止本领与质量碰撞阻止本领之比有以下关系:

$$\frac{\left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{rad}}}{\left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{col}}} \approx \frac{ZE}{1600mc^2} = \frac{ZE}{800} \quad (1.8)$$

式中,  $E$  为电子的能量, 单位为  $\text{MeV}$ ;  $Z$  为物质的原子序数。由式 (1.8) 可以看出,  $(S/\rho)_{\text{rad}}$  随入射电子能量的增大而增大。当  $(S/\rho)_{\text{rad}} = (S/\rho)_{\text{col}}$  时, 电子的能量叫临界能量  $E_{\text{cri}}$ 。电子在水、空气、铝、铅等物质中的临界能量  $E_{\text{cri}}$  分别为  $150\text{MeV}$ 、 $150\text{MeV}$ 、 $60\text{MeV}$ 、 $10\text{MeV}$ 。

### 4. 总质量阻止本领的换算

初速度相同的两种不同带电粒子 1 和 2 在同一种物质中的碰撞阻止本领之比可表示为

$$\frac{\left(\frac{S}{\rho}\right)_1}{\left(\frac{S}{\rho}\right)_2} = \frac{z_1^2}{z_2^2} \quad (1.9)$$

此式表明, 对以一定初速度射入某种物质中的带电粒子, 粒子在物质中的碰撞阻止本领与其所带电荷数的平方成正比。

初速度相同的同一种带电粒子在两种不同物质 a 和 b 中的阻止本领之比可表示为

$$\frac{\left(\frac{S}{\rho}\right)_a}{\left(\frac{S}{\rho}\right)_b} = \frac{\left(\frac{Z}{M}\right)_a}{\left(\frac{Z}{M}\right)_b} \quad (1.10)$$

式中,  $Z$ 、 $M$  为物质的原子序数和原子质量数。当  $Z/M \approx 0.5$  时, 则在两种物质中的质量碰撞阻止本领近似相等

$$\left(\frac{S}{\rho}\right)_a \approx \left(\frac{S}{\rho}\right)_b \quad (1.11)$$

## 5. 弹性散射

具有一定动能的带电粒子与原子核发生库仑相互作用时, 如果作用前后系统的动能与动量不变, 这个相互作用过程就称为弹性散射。

重带电粒子由于质量大, 只有当它从非常靠近原子核的地方掠过时才会发生明显的散射, 因此重带电粒子发生弹性散射的几率较小。所以像  $\alpha$  这样的重带电粒子在物质中的运动径迹是比较直的。

轻带电粒子, 如单能电子或  $\beta$  射线, 由于质量小, 它即使从离原子核较远的地方掠过, 也会受到原子核的散射, 同时还会受到核外轨道电子的散射。经多次弹性散射, 电子在物质中的运动方向会发生多次改变, 运动径迹是曲折的。

电子在物质中弹性散射的角分布与电子的速度、散射物质的原子序数有关。散射到某一角度的几率与散射物质的原子序数的平方  $Z^2$  成正比, 与电子速度  $v$  成反比。小角度散射几率远远大于大角度的散射几率。散射角  $\theta > 90^\circ$  时的散射叫反散射。

当某一能量的电子穿过某一厚度的物质时, 由于多次散射, 穿过物质后的净偏转角  $\theta$  也是变化的, 其分布服从高斯分布。

## 6. 湮没辐射

湮没辐射是正、反粒子相遇发生湮没, 产生新粒子的辐射。正、反两个碰撞粒子之间的湮灭辐射遵循动量守恒定律和能量守恒定律。例如, 电子的静止质量  $mc^2 = 0.511\text{MeV}$ , 当一个正电子与一个负电子相碰撞时, 正、负电子湮没, 产生两个能量各为  $0.511\text{MeV}$  的  $\gamma$  光子。这就是最早发现的正、负电子对湮没为两个光子的湮没辐射。再如, 正、反质子对通过强相互作用湮没成其他种类的强子等。

## 7. 契伦科夫辐射

当高速带电粒子在透明介质中以大于光在该介质中的速度运动时, 所产生的电磁辐射叫契伦科夫辐射。契伦科夫辐射具有连续光谱, 其频带范围主要在可见光区, 峰值为蓝光。辐射光的波阵面与粒子运动方向成  $\theta$  角, 形成一个圆锥面,  $\theta$  角的大小与粒子的速度  $v$  及介质的折射率  $n$  的关系为

$$\cos\theta = (\beta n)^{-1} \quad (1.12)$$

式中,  $\beta = v/c$  为相对速度,  $c$  是光在真空中的速度。对于水  $n=1.33$ , 当  $\beta=1$  时,  $\theta=41.15^\circ$ 。

契伦科夫辐射强度与带电粒子静止质量无关, 仅取决于粒子的电荷和速度。

产生契伦科夫辐射的条件是

$$v = \beta \cdot c > \frac{c}{n} \quad (1.13)$$

### 1.1.2 带电粒子在物质中的射程

带电粒子在物质中通过相互作用逐渐消耗能量，其动能逐渐减少，最后阻留在物质中被吸收。带电粒子在物质中沿着入射方向从进入到最后被吸收所经过的最大直线距离叫射程 (Range)。射程的大小与带电粒子的种类、初始能量和吸收物质的性质有关。

#### 1. $\alpha$ 粒子的射程

按照射程的定义，射程是指粒子通过的直线距离，因此射程和路程的概念是不同的。但是，对于  $\alpha$  粒子，其散射几率小，它的运动径迹近似是直线，在空气中  $\alpha$  粒子的射程和路程是近似相等的。由于能量损失是随机的，因此能量相同的同种粒子在物质中的实际射程并不完全相同，而是围绕平均射程  $R$  呈高斯型随机分布的。射程都是指平均射程。

(1) 用  $\alpha$  粒子计数率-距离关系曲线求  $\alpha$  粒子在空气中的射程  $R$

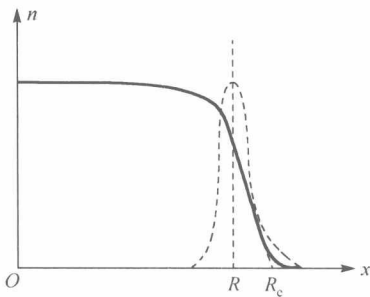


图 1-1  $\alpha$  粒子计数率-距离曲线

改变  $\alpha$  源和  $\alpha$  探测器的距离，测量  $\alpha$  计数率  $n$  与距离  $x$  的关系曲线，结果如图 1-1 所示。由于  $\alpha$  粒子的能量是逐渐损失的，曲线的平坦部分表明计数率没有降低，但  $\alpha$  粒子的能量实际上降低了。由于  $\alpha$  粒子能量损失是随机的，曲线的末段变化较陡，计数率变化很大，这表明入射  $\alpha$  粒子初始能量虽然相同，但每个  $\alpha$  粒子的实际射程并不相同。

平均射程可由计数率  $n$ -距离  $x$  关系曲线确定。由于粒子的射程满足高斯型分布，高斯型分布的峰值所在位置即定义为  $\alpha$  粒子的平均射程。将测得的  $n-x$  关系曲线对  $x$  求导，可得出单位距离上粒子数的减少量  $-dn/dx$  随  $x$  的变化曲线，如图 1-1 中虚线所示， $-dn/dx-x$  曲线的峰值所对应的  $x$  值即为平均射程  $R$ 。将  $\alpha$  粒子的  $n-x$  关系曲线的最陡部分的切线外推，与横轴的交点所对应的距离称为外推射程  $R_0$ ，一般来说  $R < R_0$ 。

(2) 利用经验公式计算  $\alpha$  粒子在空气中的射程

重带电粒子的射程与能量的关系通常用经验公式来表示。

$\alpha$  粒子在标准状态空气中的射程随着能量  $E$  的增大而增大，按能量分段可表示为

$$R(\text{cm}) = 0.56E_{\alpha} \quad (E_{\alpha} < 4\text{MeV}) \quad (1.14.1)$$

$$R(\text{cm}) = 0.318E_{\alpha}^{3/2} \quad (4\text{MeV} < E_{\alpha} < 7\text{MeV}) \quad (1.14.2)$$

$$R(\text{cm}) = (0.285 - 0.005E_{\alpha})E_{\alpha}^{3/2} \quad (4\text{MeV} < E_{\alpha} < 15\text{MeV}) \quad (1.14.3)$$

式中， $R$  为  $\alpha$  粒子在标准状态空气中的射程，单位为  $\text{cm}$ ； $E_{\alpha}$  为  $\alpha$  粒子的初始能量，单位为  $\text{MeV}$ 。

经验公式 (1.14.3) 在  $4\text{MeV} < E_{\alpha} < 11\text{MeV}$  时，精度约为 1%；在  $11\text{MeV} < E_{\alpha} < 15\text{MeV}$  时，精度约为 4%。

(3)  $\alpha$  粒子在其他物质中的射程

实验表明，在不同物质中， $R\rho/\sqrt{A}$  近似为常数，其中， $\rho$  和  $A$  分别为物质的密度和原子量。因此，已知粒子在一种物质 ( $\rho_0, A_0$ ) 中的射程  $R_0$ ，则它在其他物质 ( $\rho, A$ ) 中的射程  $R$  为

$$R = \frac{\rho_0 \sqrt{A}}{\rho \sqrt{A_0}} \cdot R_0 \quad (1.15.1)$$

若已知 $\alpha$ 粒子在空气中的射程为 $R_a$ ，则它在密度为 $\rho$ 、原子量为 $A$ 的物质中的射程 $R$ 为

$$R(\text{cm}) = 3.2 \times 10^{-4} \frac{R_a \sqrt{A}}{\rho} \quad (1.15.2)$$

$$R(\text{g/cm}^2) = 3.2 \times 10^{-4} R_a \sqrt{A} \quad (1.15.3)$$

式中， $R_a$ 为 $\alpha$ 粒子在空气中的射程，单位为 $\text{cm}$ ； $\rho$ 为物质的密度，单位为 $\text{g/cm}^3$ ； $A$ 为（单质）物质的原子量或（混合物或化合物）的有效原子量。

同样若已知 $\alpha$ 粒子在空气的射程为 $R_a$ ，利用 $R_a \rho_a = R_t \rho_t$ 可换算出 $\alpha$ 粒子在组织（Tissue）中的射程 $R_t$ ，

$$R_t = 0.00122 R_a \quad (1.16)$$

式中， $\rho_t$ 为组织的密度，在 $15^\circ\text{C}$ 和一个大气压下取 $\rho_t = 1\text{g/cm}^3$ ； $\rho_a = 0.001293\text{g/cm}^3$ 为空气的密度。计算 $R_t$ 在生物学、医学、防护等方面是很有用的。

## 2. 单能电子的射程

单能电子束射入某一物质时，有的电子经几次碰撞后在离入射点很近处停下来，有的电子要穿行很长一段路程才停下来，不同电子的能量损失过程相差很大，它们的射程有很宽的分布范围。通常采用实验测量吸收曲线的方法来求单能电子的射程，如图 1-2 所示。从吸收曲线可以看出，计数率 $n$ 随物质厚度 $d$ 的增加有近似线性下降的趋势。将吸收曲线线性部分外推，与横轴交点所对应的物质厚度称为单能电子的外推射程 $R$ 。

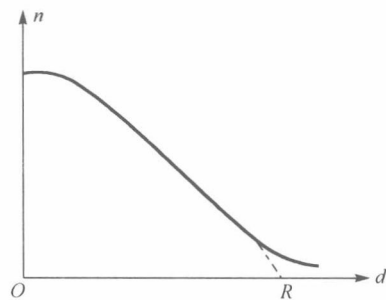


图 1-2 单能电子的吸收曲线

## 3. $\beta$ 射线的射程

$\beta$ 射线实际是高速运动的电子流，但射线中电子的能量是连续分布的。由于 $\beta$ 射线与轨道电子的碰撞次数和每次碰撞的能量损失都具有统计性质，有的可能通过一次碰撞就损失掉一半的能量，有的需经多次碰撞才能损耗全部能量； $\beta$ 射线还会与物质产生弹性散射，多次改变运动方向，使其运动径迹弯弯曲曲； $\beta$ 射线还会由于与物质的相互作用产生韧致辐射，即使吸收体的厚度大于最大射程时，仍会有很高的本底计数。因此 $\beta$ 射线的射程问题是很复杂的。

$\beta$ 射线的射程通常定义为几乎完全被吸收时的介质（吸收物质）厚度。有时也用 $\beta$ 射线强度降低到千分之一的吸收厚度作为射程，它相当于 10 个半吸收厚度；有时也用 $\beta$ 射线强度降低到万分之一的吸收厚度作为射程。

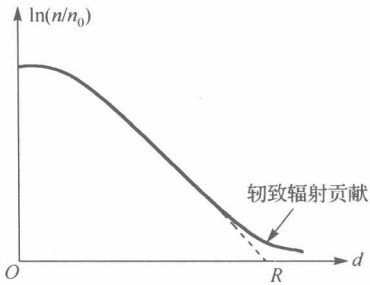
### (1) 利用吸收曲线求射程

单能窄束射线穿过物质后，其强度遵循指数衰减规律，可表示为

$$I = I_0 \exp(-\mu \rho d) \quad (1.17)$$

式中， $I_0$ 和 $I$ 分别为射线穿过物质前、后的强度； $\rho$ 为物质的密度； $d$ 为物质的厚度； $\mu$ 为该物质的质量吸收系数，它与射线的能量有关，与物质的原子序数 $Z$ ，即物质的成分有关。



图 1-3  $\beta$  射线的吸收曲线

当射线的能量和物质成分确定后,  $\mu$  为一常数。 $\beta$  射线的能量谱是连续谱,  $\beta$  射线的吸收曲线可以视为由大量的不同能量的单能  $\beta$  射线吸收曲线叠加而成。因此,  $\beta$  射线的相对计数率  $n/n_0$  的对数与厚度  $d$  有近似的线性关系 (如图 1-3 所示)。将线性部分外推, 与横轴的交点所对应的厚度即为  $\beta$  射线的射程。实际应用中为了精确测量, 还应对本底计数进行修正。

### (2) 利用费梭比较法求射程

费梭比较法的原理是: 在相同条件下测量并比较在同一坐标下的两条吸收曲线: 一条是单一能量且已知最大射程的标准  $\beta$  源的吸收曲线; 另一条是待测  $\beta$  源的吸收曲线。如果两条曲线形状相似, 在不同的相对计数率 ( $n/n_0$ , 也称衰减分数) 下, 则有射程之比等于吸收厚度之比。

费梭比较法的具体做法是: ①作费梭比较图; ②计算不同衰减分数 ( $n/n_0$ ) 下的表观射程, 即待测源在不同衰减分数下的射程  $R_i$ ; ③作表观射程与射程分数 (如十等分) 曲线, 求出对应射程分数为 1.0 处所对应的表观射程, 即为所求。

### (3) 用经验公式计算 $\beta$ 射线的最大射程

$\beta$  射线的最大射程  $R(\text{g}/\text{cm}^2)$  与最大能量  $E_{\beta\text{max}}(\text{MeV})$  之间有一些经验计算公式, 这些计算公式都是针对金属材料铝 (Al) 的。

当  $E_{\beta\text{max}} < 0.2\text{MeV}$  时,

$$\begin{cases} R = 0.685E_{\beta\text{max}}^{1.67} \\ E_{\beta\text{max}} = 1.253R^{0.599} \end{cases} \quad (1.18)$$

当  $0.15\text{MeV} < E_{\beta\text{max}} < 0.8\text{MeV}$  时,

$$\begin{cases} R = 0.407E_{\beta\text{max}}^{1.38} \\ E_{\beta\text{max}} = 1.92R^{0.725} \quad (0.03\text{g}/\text{cm}^2 < R < 0.3\text{g}/\text{cm}^2) \end{cases} \quad (1.19)$$

当  $E_{\beta\text{max}} < 3\text{MeV}$  时,

$$\begin{cases} R = 0.543E_{\beta\text{max}} - 0.16 \\ E_{\beta\text{max}} = 1.84R + 0.294 \end{cases} \quad (1.20)$$

当  $E_{\beta\text{max}} < 2.5\text{MeV}$  时, 可用统一公式:

$$R = 0.412E_{\beta\text{max}}^{(1.265-0.094\ln E_{\beta\text{max}})} \quad (1.21)$$

以上为经验公式, 若  $\beta$  射线的最大能量位于这些经验公式的重叠区域, 则使用哪个公式都可以, 计算结果的误差小于 10%。

## 4. 射程的换算

(1) 初速度相同而种类不同的两种带电粒子 1 和 2 在同一物质中的射程比  $R_1/R_2$  可表示为

$$\frac{R_1}{R_2} = \left( \frac{m_1}{m_2} \right) \left( \frac{z_2}{z_1} \right)^2 \quad (1.22)$$

式中,  $m$  和  $z$  分别为带电粒子的质量数和电荷数。