


供五年制放射医学专业、七年制临床医学专业（放射医学方向）用

高等院校放射医学专业系列教材

# 电离辐射 剂量学基础

李士骏 主编

 苏州大学出版社

责任编辑 陈林华 装帧设计 吴钰

$^{144}\text{Ce}$

$^{89}\text{Sr}$

$^{239}\text{Pu}$

$^{210}\text{Po}$

$^{233}\text{U}$

$^{241}\text{Am}$

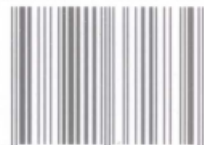
$^{140}\text{La}$

$^3\text{H}$

$^{95}\text{Zr}$

$^{91}\text{Y}$

ISBN 978-7-81137-173-4



9 787811 371734 >

定价：28.00元

书号(91)目录编号

高等院校放射医学专业系列教材  
供五年制放射医学专业、七年制临床医学专业(放射医学方向)用

# 电离辐射剂量学基础

李士骏 主编

内容简介

本书为高等院校放射医学专业、临床医学专业(放射医学方向)五年制、七年制教材。本书共分五章,主要介绍电离辐射剂量学的基本概念、辐射剂量学的发展、辐射剂量学的应用、辐射剂量学的评价、辐射剂量学的防护等。本书可作为高等院校放射医学专业、临床医学专业(放射医学方向)五年制、七年制教材,也可供从事放射医学工作的医务人员参考。

江苏卫生出版社

主编 李士骏

李林毅 副主编

江苏卫生出版社

地址:苏州市平江路200号 邮编:215001  
苏州市平江路200号 邮编:215001  
苏州市平江路200号 邮编:215001

ISBN 7-81181-113-1 定价:28.00元

苏州大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

电离辐射剂量学基础/李士骏主编. —苏州: 苏州大学出版社, 2008. 12

(高等院校放射医学专业系列教材) 第五册

供五年制放射医学专业、七年制临床医学专业(放射医学方向)用

ISBN 978-7-81137-173-4

I. 电… II. 李… III. 电离辐射—辐射剂量学—高等学校—教材 IV. R144.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 213028 号

主 编 李士骏

## 内 容 简 介

本书系放射医学专业本科系列教材之一,内容包括:电离辐射场、电离辐射能量在物质中的转移过程、基本的剂量学量、放射防护量、外照射情况下的监测量、肿瘤放射治疗中外照射剂量计算的基本方法、放射性药物内照射剂量的估算方法。全书力求取材反映知识更新,概念正确清晰,文字简明扼要,图文相得益彰。本书亦可供放射防护、环境保护、肿瘤放疗、核医学等领域的专业人员参考。

## 电离辐射剂量学基础

李士骏 主编

责任编辑 陈林华

---

苏州大学出版社出版发行

(地址:苏州市干将东路200号 邮编:215021)

如皋市永盛印刷有限公司印装

(地址:如皋市环城南路56号 邮编:226500)

---

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 14.75 字数 368 千

2008年12月第1版 2008年12月第1次印刷

ISBN 978-7-81137-173-4 定价:28.00 元

---

苏州大学版图书若有印装错误,本社负责调换  
苏州大学出版社营销部 电话:0512-67258835

## 前 言

电离辐射是自然环境固有的特征之一；它来自宇宙空间，也来自人类居住的地球。然而，直到 19 世纪，人们才开始认识电离辐射。1895 年，伦琴发现了 X 射线。1896 年，贝克勒尔发现了天然放射性。1932 年，查德威克发现了中子。1939 年，哈恩发现了重核裂变。20 世纪 40 年代，随着原子核裂变反应堆、粒子加速器的先后建成，人类不仅可以利用核能，而且还能生产、应用人工的放射性同位素，世界开始步入全新的原子能时代。至今，放射源、电离辐射已广泛应用于社会生产、医疗卫生、科学研究，为社会创造财富，给人类带来福祉。同时，也对人类和环境附加了一定的危害。

辐射效应系电离辐射引起的受照射物体性质的变化。这种变化，有的对人类有益，成为电离辐射应用的基础；有的则对人类有害，需要防护，甚至医疗救治。

为合理地应用放射源、电离辐射，有效地保护人类和环境，都需了解受照对象的辐射剂量——反映电离辐射对受照物体诱发的真实效应、潜在影响程度的客观指标。

电离辐射剂量学就是研究辐射效应程度预测原理、指标、方法的一门学科。它的研究内容包括：电离辐射能量在物质中转移、吸收的规律，剂量分布与辐射场的关系，辐射剂量与辐射效应的联系以及辐射剂量的测量、计算方法。电离辐射剂量学已成为放射源、电离辐射应用、放射防护、放射医学的基础，依其应用的领域，目前已派生出一系列分支学科，如辐照加工剂量学、放射防护剂量学、放射治疗剂量学等。

电离辐射剂量学正式成为一门学科的历史不到百年，尚属“年轻”；随着人类认识水平的提高，辐射剂量的基本概念仍在深化和更新，辐射剂量的测量、计算技术还在发展和完善。

本教材旨在向放射医学专业学生介绍电离辐射剂量学的基本概念以及肿瘤远距离放射治疗和核医学中剂量计算的基本方法。全书分 7 章：电离辐射场、电离辐射能量在物质中的转移过程、基本的剂量学量、放射防护量、外照射情况下的监测量、肿瘤放射治疗中外照射剂量计算的基本方法和放射性药物内照射剂量估算的基本方法。其内容也可供相关领域的专业人员参考。

教材成稿，除注意文字简明扼要、图文相得益彰，内容也力求反映学科的知识更新。无疑，对于新的内容，编者也属初学，虽经着力理解，犹恐不得要领，以致谬误迭出。编者以不安的心情推出这本教材，意在抛砖引玉，企望专家、读者批评、斧正，赐以真知灼见，以释编者重负。

编 者

2008 年 1 月

目 录

第一章 电离辐射场	
第一节 粒子注量、能量注量	(1)
第二节 粒子注量率、能量注量率	(2)
第三节 粒子辐射度、能量辐射度	(2)
第四节 谱分布与平均值	(4)
一、谱分布	(4)
二、平均值	(4)
第二章 电离辐射能量在物质中的转移过程	
第一节 带电粒子能量在物质中的转移	(7)
一、阻止本领	(8)
二、传能线密度	(9)
三、电子在干燥空气中每产生一个离子对所需消耗的平均能量( $W_a$ )	(13)
第二节 X、 $\gamma$ 射线的光子能量在物质中的转移	(14)
一、衰减系数	(15)
二、能量转移系数	(17)
三、能量吸收系数	(17)
第三节 中子能量在物质中的转移	(19)
第三章 基本的剂量学量	
第一节 物质中电离辐射能量的递减过程	(22)
第二节 与能量转移关联的剂量学量	(25)
一、比释动能( $K$ )	(25)
二、比转换能( $C$ )	(32)
三、受约束的比转换能( $C_s$ )	(33)
第三节 与能量吸收关联的剂量学量	(35)
一、吸收剂量( $D$ )	(35)
二、辐射平衡	(37)
三、吸收剂量的比释动能近似	(41)
四、吸收剂量的比转换能近似	(45)
五、吸收剂量的受约束的比转换能近似	(47)

## 第四章 放射防护量

第一节 电离辐射对人体健康的有害效应 .....	(52)
一、确定性效应的量-效关系 .....	(52)
二、随机性效应的量-效关系 .....	(54)
第二节 器官剂量( $D_T$ ) .....	(55)
第三节 当量剂量( $H_T$ ) .....	(56)
第四节 有效剂量( $E$ ) .....	(58)
第五节 待积量[ $H_T(\tau)$ 和 $E(\tau)$ ] .....	(61)
第六节 集体量( $S_T$ 和 $S_E$ ) .....	(62)
第七节 剂量负担( $H_{c,T}$ 和 $E_c$ ) .....	(63)
一、器官当量剂量负担( $H_{c,T}$ )、有效剂量负担( $E_c$ ) .....	(63)
二、截尾的器官当量剂量负担[ $H_{c,T}(\tau)$ ]、截尾的有效剂量负担[ $E_c(\tau)$ ] .....	(63)
三、单位实践的截尾器官当量剂量负担[ $h_{c,T}(\tau)$ ]、截尾有效剂量负担[ $e_c(\tau)$ ] .....	(63)

## 第五章 外照射情况下的监测量

第一节 辐射监测仪的响应 .....	(66)
第二节 强贯穿辐射和弱贯穿辐射 .....	(67)
一、放射防护原则和个人剂量限值 .....	(67)
二、弱贯穿辐射、强贯穿辐射的界定 .....	(68)
第三节 品质因子( $Q$ )和剂量当量( $H$ ) .....	(68)
一、品质因子( $Q$ ) .....	(68)
二、剂量当量( $H$ ) .....	(69)
第四节 扩展场和齐向扩展场 .....	(69)
第五节 用于场所监测的实用量 .....	(70)
一、ICRU 球 .....	(70)
二、周围剂量当量[ $H^*(d)$ ] .....	(71)
三、定向剂量当量[ $H'(d,\Omega)$ ] .....	(73)
第六节 用于个人监测的实用量 .....	(75)

## 第六章 肿瘤放射治疗中外照射剂量计算的基本方法

第一节 辐射场 .....	(79)
第二节 辐射源 .....	(80)
一、X 辐射源 .....	(80)
二、 $\gamma$ 辐射源 .....	(84)
第三节 X、 $\gamma$ 辐射人体组织吸收剂量的计算 .....	(91)
一、发散射线束内参考点上的吸收剂量 .....	(92)
二、发散射线束垂直入射时的深部剂量参数 .....	(94)

三、发散射线束垂直入射时人体组织剂量的计算 ..... (106)

**第七章 放射性药物内照射剂量估算的基本方法**

第一节 摄入物质体内滞留的描述方法 ..... (111)

一、隔室 ..... (111)

二、隔室模型 ..... (112)

第二节 摄入物质体内转移的描述方法 ..... (114)

一、隔室链 ..... (114)

二、隔室链模型 ..... (114)

三、隔室链的动力学方程和它的解 ..... (114)

第三节 参考人 ..... (117)

一、源器官和靶器官 ..... (117)

二、参考人 ..... (118)

第四节 内照射剂量估算的基本公式 ..... (119)

一、内照射剂量估算的两个要素 ..... (119)

二、源器官(S)中放射性核素的累积活度 $[\tilde{A}_s(\tau)]$  ..... (119)

三、源器官(S)对靶器官(T)的比有效能量 $[SEE(T \leftarrow S)]$  ..... (121)

四、靶器官(T)总的待积当量剂量 ..... (122)

五、内照射危害的评价指标 ..... (122)

第五节 内照射剂量估算中用到的一些剂量学模型 ..... (122)

一、胃肠道剂量学模型 ..... (122)

二、肾-膀胱排泄的剂量学模型 ..... (123)

三、肝-胆排泄的剂量学模型 ..... (124)

四、脑脊髓液腔的剂量学模型 ..... (125)

五、肝、脾、红骨髓优先吸收的胶体模型 ..... (126)

第六节 核医学诊断检查中放射性药物的指导水平 ..... (128)

**附 录**

附录 1 电离辐射与物质的相互作用系数值 ..... (129)

附录 1-1 物质对质子的质量碰撞阻止本领 $(S_{col}/\rho, \text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$  ..... (129)

附录 1-2 物质对电子的质量阻止本领 $(S/\rho, \text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$  ..... (131)

附录 1-3 物质对光子的质量衰减系数 $(\mu/\rho, \text{cm}^2/\text{g})$ 和能量吸收系数 $(\mu_{en}/\rho, \text{cm}^2/\text{g})$  ..... (138)

附录 1-4 中子在物质中的比释动能系数 $(f_K, \text{fGy} \cdot \text{m}^2)$  ..... (143)

附录 2 各种照射条件下,宽束单能光子的成人器官剂量 ..... (151)

附录 2-1 各种照射条件下,宽束单能光子入射到成人体模时,与自由空气中单位空气比释动能对应的睾丸剂量 ..... (151)

附录 2-2 各种照射条件下,宽束单能光子入射到成人体模时,与自由空气中单位空气比释动能对应的卵巢剂量 ..... (152)



附录 2-3	各种照射条件下,宽束单能光子入射到成人体模时,与自由空气中单位空气比释动能对应的红骨髓剂量 .....	(153)
附录 2-4	各种照射条件下,宽束单能光子入射到成人体模时,与自由空气中单位空气比释动能对应的眼晶体剂量 .....	(154)
附录 2-5	各种照射条件下,宽束单能光子入射到成人体模时,与自由空气中单位空气比释动能对应的皮肤剂量 .....	(155)
附录 2-6	各种照射条件下,宽束单能光子入射到成人体模时,与自由空气中单位空气比释动能对应的有效剂量 .....	(156)
附录 3	各种照射条件下,宽束单能中子的成人器官剂量 .....	(157)
附录 3-1	各种照射条件下,宽束单能中子入射到成人体模时,与单位中子注量对应的睾丸剂量 .....	(157)
附录 3-2	各种照射条件下,宽束单能中子入射到成人体模时,与单位中子注量对应的卵巢剂量 .....	(158)
附录 3-3	各种照射条件下,宽束单能中子入射到成人体模时,与单位中子注量对应的红骨髓剂量 .....	(159)
附录 3-4	各种照射条件下,宽束单能中子入射到成人体模时,与单位中子注量对应的皮肤剂量 .....	(160)
附录 3-5	单能中子以各种几何条件入射到成人体模时,与单位中子注量对应的有效剂量 .....	(161)
附录 4	深部剂量参数表 .....	(162)
附录 4-1	百分深度剂量 .....	(162)
附录 4-2	组织-空气比 .....	(195)
附录 4-3	组织-最大比 .....	(201)
附录 5	$^{99m}\text{Tc}$ 在成年参考人中的 $S(T \leftarrow S)$ 值( $\text{nGy}/\text{衰变}$ ) .....	(207)
附录 6	放射性药物单位给药量对应的有效剂量( $E$ )和受照最甚的器官或组织 .....	(212)
附录 7	成年患者核医学检查中相关药物放射性活度的指导水平 .....	(218)
索引	.....	(220)
主要参考文献	.....	(227)

## 第一章 电离辐射场

电离(ionization)是从原子、分子或物质的其他束缚状态释出一个或多个电子的过程。激发(excitation)则是使原子、分子或物质的其他束缚状态向高能态转变的过程。

电离辐射(ionizing radiation)是能通过直接过程、间接过程,导致物质电离的带电粒子、不带电粒子组成的辐射。“辐射”一词,内涵甚广。不过,电离辐射领域的辐射,一般就是电离辐射的简称。电离辐射在物质中以电离、激发方式沉积的能量,称为授予能量(energy imparted)。

电离辐射场(ionizing radiation field)是电离辐射在其中通过、传播,以及其与物质相互作用、发生能量传递的整个空间范围。

电离辐射场的性质有诸多内涵,如辐射场内出现的辐射类型、粒子的能量及其运动方向。因此,可以利用这些内涵描述辐射场的性质。例如,以辐射类型描述辐射场,则有光子辐射场、中子辐射场、 $\alpha$ 粒子辐射场、 $\beta$ 粒子辐射场、光子、中子混合辐射场等;以粒子能量描述辐射场,则有单能辐射场和具有能量分布(多能)的辐射场;以粒子运动方向描述辐射场,则有单向辐射场和多向辐射场。

有一种特殊的辐射场——各向同性辐射场,即从四面八方到达辐射场某点的,具有特定类型、特定能量的粒子数都相同的辐射场。

辐射场的性质具有时、空相关性,即辐射场的性质会因时间、空间位置的变迁而改变。

因此,为完整描述辐射场的性质,宜把握5个要素,即须了解任一时刻、沿任一方向,到达辐射场任一点的,任一辐射类型、任一能量的粒子的数目,或由这些粒子带来的辐射能量。所以,用于描述辐射场性质的辐射量,不是涉及粒子数目,便是与粒子带来的能量相关。

### 第一节 粒子注量、能量注量

为标志一段时间  $T$  内,到达辐射场某一位置  $r$  的粒子数目或其能量的密集程度,引用了“粒子注量(particle fluence,符号  $\Phi$ )”和“能量注量(energy fluence,符号  $\Psi$ )”。

粒子注量  $[\Phi(T, r)]$ 、能量注量  $[\Psi(T, r)]$  的定义分别是:  $T$  时间内,进入到辐射场以  $r$  点为球心的单位截面积小球的累计粒子数或由这些粒子带来的辐射能量。

原来,对于单向辐射场,粒子注量或能量注量的定义分别是:穿过与辐射入射方向垂直的单位面积的累计粒子数或辐射能。

然而,对于多向辐射场,如此定义便不敷应用。好在,无论辐射从何而来,总能找到通过球体球心、且与入射方向垂直的圆截面。所以,无论是单向辐射场还是多向辐射场,采用小

球定义注量总是合适的。

若用数学语言表示,则粒子注量、能量注量的定义分别为:

$$\Phi(T, r) = dN(T, r)/da \quad (1.1)$$

$$\Psi(T, r) = dR(T, r)/da \quad (1.2)$$

其中  $dN(T, r)$ 、 $dR(T, r)$  分别是  $T$  时间内,进入以辐射场  $r$  点为球心、截面积为  $da$  的小球的累计粒子数或由它们带来的辐射能。

粒子注量、能量注量的单位分别为  $m^{-2}$  和  $J/m^2$ , 不过在实际工作中常分别用  $cm^{-2}$  和  $MeV/cm^2$ 。

## 第二节 粒子注量率、能量注量率

由于辐射源(如放射源)的性质可能随时会变。因此,一段时间  $T$  内,到达辐射场某一位置  $r$  的累计粒子数或辐射能,并非以恒定速率递增。为了解粒子注量、能量注量递增速率的变化趋势,需要用到特定时刻  $t$  的“粒子注量率[particle fluence rate, 符号  $\dot{\Phi}(t, r)$ ]”和“能量注量率[energy fluence rate, 符号  $\dot{\Psi}(t, r)$ ]”。

$t$  时刻,辐射场  $r$  点处的粒子注量率、能量注量率的定义分别为:

$$\dot{\Phi}(t, r) = d\Phi(t, r)/dt \quad (1.3)$$

$$\dot{\Psi}(t, r) = d\Psi(t, r)/dt \quad (1.4)$$

其中,  $d\Phi(t, r)$ 、 $d\Psi(t, r)$  分别是  $t$  时刻,  $dt$  时间内,辐射场  $r$  点处粒子注量、能量注量的增量。

简言之,粒子注量率、能量注量率就是粒子注量、能量注量在单位时间内的增量。

粒子注量率、能量注量率的单位分别是  $m^{-2}/s$  和  $W/m^2$ , 也可分别用  $cm^{-2}/s$  和  $MeV \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ , 或者其他的分数、倍数单位。

值得提醒的是,粒子注量、能量注量是与一段时间  $T$  相关的;而粒子注量率、能量注量率则是与一个时间点(时刻)相关的。如果已经了解 0 至  $T$  时间内粒子注量率、能量注量率随时刻变迁的变化趋势(连续函数),那么,0 至  $T$  时间内累计的粒子注量、能量注量即可按下列公式计算:

$$\Phi(T, r) = \int_0^T \dot{\Phi}(t, r) \cdot dt \quad (1.5)$$

$$\Psi(T, r) = \int_0^T \dot{\Psi}(t, r) \cdot dt \quad (1.6)$$

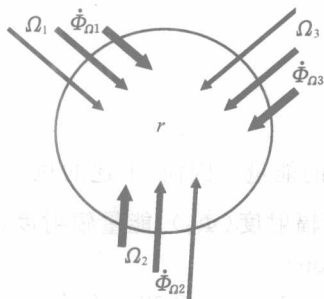
(1.5)、(1.6)式中,对连续函数的积分运算,其实就相当于对离散数值的累加。

## 第三节 粒子辐射度、能量辐射度

无论是粒子注量、能量注量还是粒子注量率、能量注量率,涉及到的粒子数、辐射能都是

与从四面八方入射的粒子总数关联的。

实际上,从各个方向到达辐射场任一点的粒子数未必都相同,因此,无论粒子注量率、能量注量率,抑或粒子注量、能量注量,都存在按粒子入射方向的分布(见图 1-1)。



对于给定时刻  $t$ , 辐射场  $r$  点处的  $\dot{\Phi}$  就是沿各个  $\Omega$  方向(如  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3 \dots$ )入射的粒子注量率(即粒子辐射度)的总和:

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_{\Omega_1} + \dot{\Phi}_{\Omega_2} + \dot{\Phi}_{\Omega_3} + \dots$$

$\dot{\Phi}_{\Omega}$  是  $t$  时刻,沿  $\Omega$  方向(如  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$  等)的单位立体角入射到辐射场  $r$  点处的粒子注量率

图 1-1 粒子辐射度(粒子注量率的角分布)的概念示意图

粒子辐射度 [particle radiance, 符号  $\dot{\Phi}_{\Omega}(t, r)$ ]、能量辐射度 [energy radiance, 符号  $\dot{\Psi}_{\Omega}(t, r)$ ] 其实是粒子注量率 [ $\dot{\Phi}(t, r)$ ]、能量注量率 [ $\dot{\Psi}(t, r)$ ] 的方向分布,简称角分布 (directional distribution), 它们的含意分别是:  $t$  时刻单位时间内,沿  $\Omega$  方向的单位立体角,进入到辐射场以  $r$  点为球心的单位截面积小球的粒子数或由它们带来的辐射能。

简言之,粒子辐射度 [ $\dot{\Phi}_{\Omega}(t, r)$ ]、能量辐射度 [ $\dot{\Psi}_{\Omega}(t, r)$ ] 就是:沿  $\Omega$  方向入射的那部分粒子构成的粒子注量率或能量注量率。

以数学语言表达,它们的定义分别为:

$$\dot{\Phi}_{\Omega}(t, r) = d\dot{\Phi}(t, r)/d\Omega \quad (1.7)$$

$$\dot{\Psi}_{\Omega}(t, r) = d\dot{\Psi}(t, r)/d\Omega \quad (1.8)$$

其中,  $d\dot{\Phi}(t, r)$ 、 $d\dot{\Psi}(t, r)$  分别是在与  $\Omega$  方向关联的立体  $d\Omega$  范围内入射的那部分粒子注量率、能量注量率。

粒子辐射度 [ $\dot{\Phi}_{\Omega}(t, r)$ ]、能量辐射度 [ $\dot{\Psi}_{\Omega}(t, r)$ ] 的单位分别是:  $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  和  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ , 也可分别用  $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  和  $\text{MeV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

知道了粒子辐射度 [ $\dot{\Phi}_{\Omega}(t, r)$ ]、能量辐射度 [ $\dot{\Psi}_{\Omega}(t, r)$ ] 随辐射入射方向的变化规律,那么,对所有方向上的粒子辐射度 [ $\dot{\Phi}_{\Omega}(t, r)$ ]、能量辐射度 [ $\dot{\Psi}_{\Omega}(t, r)$ ] 求和,其结果就是:  $t$  时刻,辐射场同一点处的粒子注量率 [ $\dot{\Phi}(t, r)$ ] 或能量注量率 [ $\dot{\Psi}(t, r)$ ]:

$$\dot{\Phi}(t, r) = \int_0^{4\pi} \dot{\Phi}_{\Omega}(t, r) \cdot d\Omega \quad (1.9)$$

$$\dot{\Psi}(t, r) = \int_0^{4\pi} \dot{\Psi}_{\Omega}(t, r) \cdot d\Omega \quad (1.10)$$

## 第四节 谱分布与平均值

### 一、谱分布

实际上,到达辐射场任一点的粒子,未必都有相同的能量。因而,上述的粒子注量( $\Phi$ )、粒子注量率( $\dot{\Phi}$ )、能量注量( $\Psi$ )、能量注量率( $\dot{\Psi}$ )、粒子辐射度( $\dot{\Phi}_0$ )、能量辐射度( $\dot{\Psi}_0$ )都存在按粒子能量的分布,简称谱分布(spectrum distribution)。

谱分布有两种表述方式:微分分布(differential distribution)和积分分布(integral distribution)。以粒子注量、能量注量的谱分布为例:

在特定位置上,粒子注量、能量注量按粒子能量的微分分布( $\Phi_E$ 、 $\Psi_E$ ),意指单位能量间隔内,能量为  $E$  的那些粒子构成的粒子注量或能量注量:

$$\Phi_E = d\Phi(E) / dE \quad (1.11)$$

$$\Psi_E = d\Psi(E) / dE \quad (1.12)$$

其中,  $d\Phi(E) = \Phi_E \cdot dE$  和  $d\Psi(E) = \Psi_E \cdot dE$  分别是能量在  $E$  至  $E + dE$  之间的粒子构成的粒子注量或能量注量。

粒子注量、能量注量按粒子能量的积分分布 [ $\Phi(E)$ 、 $\Psi(E)$ ],意指能量从最小值到特定能量  $E$  (即累加终点)为止的那些粒子累计构成的部分粒子注量或部分能量注量:

$$\Phi(E) = \int_0^E d\Phi(E) = \int_0^E \Phi_E \cdot dE \quad (1.13)$$

$$\Psi(E) = \int_0^E d\Psi(E) = \int_0^E \Psi_E \cdot dE \quad (1.14)$$

显然,如果(1.13)、(1.14)式中的累加终点扩大到  $\infty$ ,即可得到相关位置上由各种能量的粒子构成的全部粒子注量或全部能量注量:

$$\Phi = \int_0^{\infty} d\Phi(E) = \int_0^{\infty} \Phi_E \cdot dE \quad (1.15)$$

$$\Psi = \int_0^{\infty} d\Psi(E) = \int_0^{\infty} \Psi_E \cdot dE \quad (1.16)$$

### 二、平均值

诚如上述,  $\Phi_E$  代表单位能量间隔内进入单位面积小球的能量为  $E$  的粒子数,由这些粒子带来的能量为  $E \cdot \Phi_E$ 。于是,到达相关位置上粒子的平均能量 [ $(\bar{E})_0$ ] 便为:

$$(\bar{E})_0 = \frac{\int_0^{\infty} E \cdot \Phi_E \cdot dE}{\int_0^{\infty} \Phi_E \cdot dE} \quad (1.17)$$

(1.17)式中,分子代表由各种能量的粒子带到相关位置上的总能量;由(1.15)式可知,分母

就是到达相关位置的粒子总数。

这里,平均值 $(\bar{E})_{\Phi}$ 中的下标 $\Phi$ ,旨在强调该平均值计算中,用到的权重是粒子注量的谱分布。

以后会了解,光子的能量吸收系数 $[\mu_{en}(E)]$ 表示能量为 $E$ 的光子能量被物质吸收的份额。显然,该份额大小与光子能量有关。

如果关注的是光子,则由(1.12)式可知, $\Psi_E$ 代表单位能量间隔内由能量为 $E$ 的光子带到相关位置上的辐射能量,这些能量中被物质吸收的有 $\mu_{en}(E) \cdot \Psi_E$ 。就整体而言,相关位置上光子能量被物质吸收的平均份额 $(\bar{\mu}_{en})_{\Psi}$ 应该是:

$$(\bar{\mu}_{en})_{\Psi} = \int_0^{\infty} \mu_{en}(E) \cdot \Psi_E \cdot dE / \int_0^{\infty} \Psi_E \cdot dE \quad (1.18)$$

(1.18)式中,分子代表相关位置上被物质吸收的光子能量的总和;分母则是到达该位置的光子的全部能量。

同样,此处平均值 $(\bar{\mu}_{en})_{\Psi}$ 中的下标 $\Psi$ ,旨在强调该平均值计算中,用到的权重是能量注量的谱分布。

### 思考题:

1. 完整描述电离辐射场性质,需把握哪些要素?为什么?
2. 简述下列辐射场量的含义:
  - (1) 粒子注量率按粒子能量的微分分布 $(\dot{\Phi}_E)$ 。
  - (2) 粒子辐射度按粒子能量的积分分布 $[\dot{\Phi}_{\Omega}(E)]$ 。
3. 辐射场同一点,能量辐射度的谱分布 $(\dot{\Psi}_{\Omega,E})$ 与粒子辐射度的谱分布 $(\dot{\Phi}_{\Omega,E})$ 有何关系?列出数学表达式。
4. 列出辐射场同一点处粒子注量的谱分布 $[\Phi(T, E)]$ 与粒子辐射度谱分布 $[\dot{\Phi}_{\Omega,E}(t)]$ 的数学关系式。

## 第二章 电离辐射能量在物质中的转移过程

电离辐射能量在物质中的转移,是通过辐射与物质原子、原子核、电子的相互作用实现的。所谓“相互作用(interaction)”,其实是在物质中,电离辐射类型、能量、运动方向发生变化的随机过程。

相互作用的结果会产生一个或多个次级粒子,导致“能量载体(energy carrier)”的转变。例如,不带电粒子的能量,可变成带电粒子的能量;带电粒子能量又可能变成  $\delta$  粒子或光子(韧致辐射)的能量,等等。

在物质中,相关粒子损失动能的位置,称为“能量转移点(energy transfer point)”。

如上所述,对于单向辐射,粒子注量( $\Phi$ )表示穿过与辐射入射方向垂直的单位面积( $1\text{ cm}^2$ )的粒子数。因此,当  $1\text{ cm}^2$  内这  $\Phi$  个粒子在物质中穿行一段  $dL$  (cm) 路程时,它们涉及到的物质体积  $dV$  将为:

$$dV = 1\text{ cm}^2 \times dL (\text{cm}) = dL\text{ cm}^3 \quad (2.1)$$

若物质的密度为  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3, \text{下同})$ ,则入射辐射在物质中穿行  $dL$  (cm) 路程时,它在单位面积( $1\text{ cm}^2$ )内涉及到的物质质量  $dm$  可按下式计算:

$$dm = [1\text{ cm}^2 \times dL (\text{cm})] \cdot \rho (\text{g}/\text{cm}^3) = \rho dL (\text{g}) \quad (2.2)$$

$\rho dL$  为入射辐射在物质中穿行的“质量厚度(mass thickness)”,其含意是:入射辐射在物质中穿行  $dL$  路程时,在单位面积内涉及到的物质质量。

若上述物质的原子序数为  $Z$ ,摩尔质量为  $M$ , $N_A$  为阿佛加德罗常数(以下,出现类似符号,含意同此,除非另有说明),则其单位质量中含有的原子数( ${}_a N$ )、电子数( ${}_e N$ )便分别为:

$${}_a N = N_A / M \quad (2.3)$$

$${}_e N = Z \cdot N_A / M \quad (2.4)$$

由此可见,给定质量的物质中,原子(核)数、电子数与物质的密度(即物理状态)无关。这就是讨论辐射在物质中的能量转移时,乐于用“质量厚度”的原因所在。

同时,也可看到,单位质量中的电子数( ${}_e N$ )与因子( $Z/M$ )相关;对于诸如水、软组织之类的低  $Z$  物质,相应的( $Z/M$ )几乎都是 0.5。所以,凡是在物质中主要与电子相互作用的辐射(如光子、电子),它们向低  $Z$  物质转移的能量,几无明显差别。

为标志辐射在物质中穿行单位路程,辐射能量的转移程度,根据关注的焦点不同,带电粒子采用碰撞阻止本领、辐射阻止本领和总的阻止本领,不带电粒子则用能量转移系数、能量吸收系数等指标。根据辐射在物质中穿行的路程是以单位长度表示的还是以单位质量厚度表示的,这些指标的名称将分别冠以前缀“线”或“质量”。例如,带电粒子的碰撞阻止本领,可分别称为线碰撞阻止本领和质量碰撞阻止本领。

因为相互作用的程度与辐射的类型、能量及物质的性质有关,所以,上列指标的数值,都是与特定辐射类型、特定辐射能量和特定物质关联的。

## 第一节 带电粒子能量在物质中的转移

一般,带电粒子贯穿物质时,主要受到物质中原子核和核外电子的电磁作用。这种作用会使运动着的带电粒子改变方向、损失能量。这一过程前、后,若无能量形式改变,则称该过程是“弹性的(elastic)”。否则,损失的能量,主要表现为物质的“电离”、“激发”,或者变成了“轫致辐射(bremsstrahlen)”。此外,甚高能量的带电粒子还能引起核反应。

在物质中,电子与质量比它重的带电粒子(如质子、 $\alpha$ 粒子)的行为稍有差异,因此,常把静止质量大于电子的带电粒子归为一类,统称“重带电粒子(heavy charged particle)”。

带电粒子与物质的相互作用方式、损失能量多寡,取决于带电粒子的电荷、质量和能量,同时也依赖物质的原子序数。

除非引起核反应,整个带电粒子会被相遇的原子核吸收。一般情形下,由于与物质持续的相互作用,带电粒子将不断地发生能量转移:

(1) 与物质原子、分子的弹性碰撞,导致相碰粒子间的动能交换,增加了物质分子不规则运动的动能,使物质变热,温度升高。带电粒子的部分能量直接变成了热能。

(2) 与束缚电子的非弹性碰撞,使物质原子电离、激发。为使物质原子释出一个电子,带电粒子应有起码的能量  $E_{\text{cut}}$ ,对于生物组织,这个能量约为 10 eV。电离过程释出的电子,如果动能超过 100 eV,会明显偏离原来的粒子运动方向,且穿越一段路程,进一步引起其他原子的电离和激发,此类电子称为  $\delta$  粒子( $\delta$  particle)或  $\delta$  射线( $\delta$ -rays)。被电离、激发的原子,退激时还会释出“俄歇电子(Auger electron)”、“特征 X 射线(characteristic X-rays)”的光子。注意:电离过程中,带电粒子损失的能量,并非会在发生电离的那个“部位(site)”被物质局部吸收,而有相当部分被  $\delta$  粒子带到了其他位置。

(3) 与原子核、束缚电子电场发生的轫致辐射过程,带电粒子部分能量又变成了辐射(光子)能量;轫致辐射的光子则会到比  $\delta$  粒子射程更远的位置,继续消耗其得到的能量。不过,因发生轫致辐射而损失能量的可能性,与带电粒子本身静止质量的平方成反比。例如,在同一种物质内,质子、电子原来的能量相同,那么,质子在轫致辐射中损失的能量,大约是电子的 1/300 万。所以,常可忽略重带电粒子在轫致辐射过程中损失的能量。

若以发生的过程名称标志,总括起来,在物质中,带电粒子能量( $E$ )最后将变成 3 种类型的能量损失:

$$E = E_{\text{弹性碰撞}} + E_{\text{电离、激发}} + E_{\text{轫致辐射}} \quad (2.5)$$

不过,对于通常遇到的带电粒子,因弹性碰撞过程损失的能量常可忽略,尤其是重带电粒子,即使对于一般常见的、初始能量介于  $10^4 \sim 10^6$  eV 间的电子,弹性碰撞中损失的能量,充其量也不过其初始动能的 0.15%。随着电子初始能量的增高,这一份额会变得更小。

所以,造成带电粒子能量损失的,主要是电离、激发和轫致辐射。



## 一、阻止本领

带电粒子在电离、激发或韧致辐射过程中损失的能量,分别称为带电粒子能量的“碰撞损失(collision energy loss)”或“辐射损失(radiative energy loss)”,可分别用“碰撞阻止本领(collision stopping power)”或“辐射阻止本领(radiative stopping power)”定量。

带电粒子在物质中的“线碰撞阻止本领( $S_{\text{col}}$ )”或“质量碰撞阻止本领( $S_{\text{col}}/\rho$ )”表示:带电粒子在物质中穿行单位路程时,因电离、激发过程所损失的能量。显然,上述单位路程,若是单位长度,那就是“线碰撞阻止本领”,若是单位质量厚度,指的便是“质量碰撞阻止本领”。以后,遇到类似情况,均可照此理解,不再一一赘述。

若用数学语言表述,则有:

$$S_{\text{col}} = dE_{\text{col}}/dl \quad (2.6)$$

$$(S/\rho)_{\text{col}} = dE_{\text{col}}/(\rho dl) \quad (2.7)$$

其中, $dE_{\text{col}}$ 就是带电粒子在物质中穿行  $dl$  路程时,因电离、激发所损失的能量。

可见, $S_{\text{col}}$ 、 $(S/\rho)_{\text{col}}$ 的单位分别是  $\text{J/m}$  或  $\text{J} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,也可用诸如  $\text{MeV/cm}$  或  $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  之类的分数、倍数单位表示。

同样,带电粒子在物质中的“线辐射阻止本领( $S_{\text{rad}}$ )”或“质量辐射阻止本领( $S_{\text{rad}}/\rho$ )”表示:带电粒子在物质中穿行单位路程时,因韧致辐射过程所损失的能量,或者:

$$S_{\text{rad}} = dE_{\text{rad}}/dl \quad (2.8)$$

$$(S/\rho)_{\text{rad}} = dE_{\text{rad}}/(\rho dl) \quad (2.9)$$

其中, $dE_{\text{rad}}$ 就是带电粒子在物质中穿行  $dl$  路程时,因韧致辐射所损失的能量。

可见, $S_{\text{rad}}$ 、 $(S/\rho)_{\text{rad}}$ 的单位也分别是  $\text{J/m}$  或  $\text{J} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,自然,也可用诸如  $\text{MeV/cm}$  或  $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  之类的分数、倍数单位表示。

实际上,受照射物质中,任一个位置上出现的带电粒子,总同时存在其能量的碰撞损失和辐射损失。所以,为定量标志在物质中穿行单位路程时,带电粒子总的能量损失,就会用到“总的阻止本领(total stopping power)”。以“总的质量阻止本领( $S/\rho$ )”为例,它应等于:

$$S/\rho = (S/\rho)_{\text{col}} + (S/\rho)_{\text{rad}} \quad (2.10)$$

至于这两部分能量损失的份额,则随带电粒子类型、能量及物质的种类而异。下面,分别对电子和重带电粒子作进一步讨论。

### (一) 重带电粒子

重带电粒子能量的辐射损失几可忽略。因此,重带电粒子总的阻止本领即为:

$$(S/\rho)_{\text{重带电粒子}} \approx (S/\rho)_{\text{col}} \quad (2.11)$$

就是说,除非发生核反应,重带电粒子的能量几乎全部是在电离、激发过程中损失的。

表 2-1 列出了肌肉、骨骼及它们的替代物对质子的质量阻止本领( $S_{\text{质子}}/\rho$ )值(更多物质的  $S_{\text{质子}}/\rho$  值可见附录 1)。

对于动能为  $E$ 、电荷为  $z$ 、静止质量能为  $Mc^2$  的其他重粒子,它们的质量阻止本领