

电离辐射探测器

安继刚 编著



原子能出版社

电离辐射探测器

ISBN 7-5022-1332-5



9 787502 213329 >

ISBN-7-5022-1332-5

TL81 定价:19.95 元

电离辐射探测器

安继刚 编著

原子能出版社
1995

图书在版编目(CIP)数据

电离辐射探测器/安继刚编著. 北京:原子能出版社,1995.5

ISBN 7-5022-1332-5

I. 电... II. 安... III. 辐射探测器(电离辐射) N. TL81

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95) 第 01736 号

内容简介

本书著者是清华大学教授。本书是著者在 60、70 年代及 90 年代讲授“辐射测量”时所编写的讲义基础上,结合著者多年来在核探测器研制方面的科研成果与经验而写成的。

本书第一部分内容是基础知识,主要说明射线与物质的相互作用以及电离辐射探测学中的主要统计概率问题。

第二部分各章中分别详细阐述了气体电离探测器、闪烁探测器及半导体探测器等应用最广泛的探测器件,系统地阐明这些探测器的工作机制、输出信号、主要性能及典型的应用实例。书中还另列一章介绍了其它各类探测器件与装置。

本书可供研制和应用各类电离辐射探测器的科技人员及大专院校有关专业的师生参考。



原子能出版社出版发行

责任编辑:袁祖伟

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

北京通县滨河印刷厂印刷 新华书店经销

开本:787×1092mm 1/16 印张 19.25 字数 468 千字

1995 年 5 月北京第 1 版 1995 年 5 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000

定价:19.95 元

目 录

序言	(1)
第1章 射线与物质的相互作用	(4)
§1 重带电粒子与物质的相互作用	(4)
I. 相互作用的特点	(5)
II. 阻止本领与 Bethe 公式	(5)
III. Bragg 曲线与能量歧离	(10)
IV. 粒子的射程	(10)
V. 在薄吸收体中的能量损失	(13)
VI. 定比定律	(15)
VII. 裂变碎片的特性	(15)
§2 快电子与物质的相互作用	(16)
I. 能量损失率(比能损失)	(16)
II. 电子的射程和透射曲线(吸收曲线)	(17)
III. 正电子与物质的相互作用	(19)
§3 γ (或 X)射线与物质的相互作用	(20)
I. 相互作用的特点	(20)
II. 相互作用机制	(21)
III. γ (或 X)射线束的吸收	(31)
§4 中子与物质的相互作用	(33)
I. 中子与物质相互作用的一般特性	(33)
II. 中子的散射	(33)
III. 中子的俘获	(37)
习题	(41)
参考文献	(42)
第2章 辐射探测中的统计概率问题	(43)
§1 概率论基础知识	(43)
I. 随机事件、概率和随机变量	(43)
II. 随机变量的分布函数与数字表征	(45)
III. 几种典型的概率分布	(47)
IV. 随机变量的运算与组合	(51)
§2 核衰变数与探测器计数的涨落分布	(53)
I. 核衰变数的涨落	(53)
II. 探测器计数的涨落	(54)
III. 辐射探测数据的统计误差	(56)
§3 电离过程的涨落	(57)

§ 4 累计信号的涨落	(58)
I. 粒子束脉冲的总电离电荷量	(59)
II. 稳定粒子束流累计信号的涨落	(59)
§ 5 辐射粒子与信号的时间分布	(62)
I. 相邻信号脉冲(或粒子)的时间间隔	(62)
II. 相邻“进位脉冲”的时间间隔	(63)
§ 6 倍增过程的统计涨落	(64)
习题	(64)
参考文献	(64)
第 3 章 气体电离探测器	(65)
§ 1 气体中离子与电子的运动规律	(65)
I. 气体的电离与激发	(65)
II. 气体中离子、电子的漂移与扩散运动	(67)
III. 离子、电子的复合与负离子的形成	(71)
IV. 决定气体中离子、电子运动的方程组	(72)
§ 2 电离室的工作机制与输出信号	(73)
I. 电离室的工作机制——输出信号产生的物理过程	(74)
II. 电离室的输出回路	(76)
III. 电离室输出信号的计算方法	(77)
§ 3 脉冲电离室	(84)
I. 脉冲电离室的输出信号	(84)
II. 脉冲电离室输出信号的测量	(89)
III. 脉冲电离室的性能	(91)
IV. 圆柱形电子脉冲电离室与屏栅电离室	(97)
§ 4 累计电离室	(102)
I. 累计电离室的输出信号	(102)
II. 累计电离室输出信号的涨落	(105)
III. 累计电离室的主要性能	(106)
IV. 累计电离室的应用	(109)
§ 5 脉冲束电离室	(110)
§ 6 电离室应用实例	(111)
I. 硼电离室与裂变室	(111)
II. 工业核仪表电离室	(113)
III. 阵列电离室	(113)
§ 7 正比计数器的放电机制与输出信号	(114)
I. 正比计数器的放电机制	(115)
II. 正比计数器的输出信号	(122)

§ 8 正比计数器的性能与应用	(124)
I. 气体放大倍数与工作电压的关系	(124)
II. 脉冲幅度分布及其与工作电压的关系	(124)
III. 探测效率与坪特性	(125)
IV. 分辨时间	(127)
V. 时滞	(128)
§ 9 正比计数器的应用	(128)
I. 在能量测量方面的应用——正比谱仪	(128)
II. 在强度测量方面的应用	(129)
III. 在中子测量方面的应用	(129)
IV. 在位置测量方面的应用	(134)
§ 10 G-M 计数管的放电机制与输出信号	(137)
I. 非自熄 G-M 计数管的放电机制	(137)
II. 有机自熄 G-M 计数管的放电机制	(140)
III. 卤素管的工作原理	(143)
IV. 强流管的工作原理	(145)
V. 自熄 G-M 管的输出信号	(145)
§ 11 自熄 G-M 计数管的性能与应用	(147)
I. 自熄 G-M 计数管的性能	(147)
II. 自熄 G-M 管的典型结构与应用	(154)
§ 12 自熄流光管(SQS 计数管)	(157)
I. SQS 放电机制	(158)
II. SQS 计数管(室)的性能与应用	(159)
习题	(160)
参考文献	(162)
第 4 章 闪烁探测器	(164)
§ 1 闪烁探测器的基本原理	(164)
§ 2 闪烁体	(165)
I. 闪烁体的发光机制	(165)
II. 闪烁体的物理特性	(169)
III. 几种常用闪烁体的特性	(172)
§ 3 光的收集与光导	(176)
I. 闪烁体的包装	(177)
II. 光学耦合剂	(177)
III. 光导	(178)
§ 4 光电倍增管	(179)
I. 光电倍增管的构造和工作原理	(179)

Ⅱ. 光电倍增管的“分压器”	(183)
Ⅲ. 光电倍增管的主要性能	(185)
§ 5 闪烁探测器的输出信号	(190)
Ⅰ. 闪烁探测器输出电信号的物理过程	(190)
Ⅱ. 输出脉冲信号的电荷量	(192)
Ⅲ. 闪烁探测器的电流脉冲信号	(193)
Ⅳ. 电压脉冲信号	(195)
Ⅴ. 闪烁探测器输出信号的涨落	(196)
§ 6 闪烁探测器的主要性能	(197)
Ⅰ. 脉冲幅度分布与能量分辨率	(198)
Ⅱ. 探测效率与“坪特性”	(199)
Ⅲ. 分辨时间	(199)
Ⅳ. 时滞与时间分辨本领	(199)
Ⅴ. 闪烁探测器的稳定性	(200)
§ 7 单晶 γ 闪烁谱仪	(200)
Ⅰ. γ 闪烁谱仪的组成与工作原理	(201)
Ⅱ. 单能 γ 射线的输出脉冲幅度谱	(201)
Ⅲ. NaI(Tl) 单晶闪烁谱仪的性能	(204)
§ 8 全吸收反符合谱仪、康普顿谱仪及电子对谱仪	(207)
Ⅰ. 全吸收反符合谱仪	(207)
Ⅱ. 康普顿谱仪(双晶谱仪)	(209)
Ⅲ. 电子对谱仪(三晶谱仪)	(210)
§ 9 闪烁探测器在中子测量中的应用	(211)
Ⅰ. 含硼、锂的无机闪烁晶体	(211)
Ⅱ. 含氢闪烁体——有机闪烁体	(213)
习题	(215)
参考文献	(216)
第 5 章 半导体探测器	(217)
§ 1 半导体的基本性质	(217)
Ⅰ. 半导体的晶格结构	(218)
Ⅱ. 能带理论介绍	(219)
Ⅲ. 本征半导体与杂质半导体	(221)
Ⅳ. 载流子的特性与运动规律	(222)
§ 2 均匀型半导体探测器	(225)
Ⅰ. 带电粒子与晶体的相互作用	(225)
Ⅱ. 均匀型半导体探测器的工作原理及性能	(226)
§ 3 势垒区的形成及其性质	(228)

I. 平衡 P-N 结	(229)
II. 在外加电压下的结	(230)
III. 势垒区的性质	(231)
§ 4 P-N 结半导体探测器的工作原理	(235)
I. P-N 结探测器的基本原理	(235)
II. 扩散结型探测器	(236)
III. 面垒型探测器	(236)
IV. 两种 P-N 结探测器的比较	(237)
§ 5 P-N 结探测器的输出信号及主要性能	(237)
I. 输出信号	(238)
II. 主要性能	(241)
§ 6 P-N 结探测器的应用	(245)
I. α 及其它重带电粒子能量的测量	(246)
II. dE/dx 探测器	(246)
III. 半导体夹层谱仪	(247)
IV. 在剂量监测方面的应用实例	(249)
§ 7 P-I-N 结探测器的工作原理与封装	(250)
I. P-I-N 结	(250)
II. 锂漂移技术	(251)
III. 探测器的封装	(254)
§ 8 锂漂移探测器的输出信号与主要性能	(255)
I. 锂漂移探测器的输出信号	(255)
II. 锂漂移探测器的主要性能	(256)
§ 9 锂漂移探测器的应用	(261)
I. 锂漂移探测器的使用技术	(261)
II. 锂漂移探测器与其它 γ 射线谱仪的比较	(262)
III. 半导体 γ 谱仪在核物理实验中的应用	(264)
IV. 半导体 γ 谱仪在核工程技术中的应用	(265)
§ 10 高纯锗探测器	(266)
I. 高纯锗探测器的原理与结构	(266)
II. 高纯锗探测器的输出信号与性能	(267)
III. 高纯锗探测器的应用	(269)
§ 11 其它半导体探测器	(269)
I. 化合物半导体探测器	(269)
II. “雪崩”半导体探测器	(270)
III. 位置灵敏半导体探测器	(270)
习题	(272)

参考文献	(273)
第 6 章 电离辐射的其它探测器件与装置	(274)
§ 1 切伦科夫探测器	(274)
§ 2 液体电离室和液体正比计数器	(277)
§ 3 热释光探测器	(278)
§ 4 “自给能”探测器	(281)
§ 5 测量中子的激活片探测器	(282)
I. 激活片中放射性核素的生长和衰变	(283)
II. 激活材料的选择	(284)
III. 激活片的制备	(285)
IV. 镅差法	(285)
§ 6 照相乳胶	(287)
I. 射线照相胶片	(287)
II. 核乳胶	(288)
§ 7 固体径迹探测器	(289)
§ 8 云室与气泡室	(291)
I. 威尔逊云室	(291)
II. 扩散云室	(293)
III. 气泡室	(293)
§ 9 磁谱仪	(294)
I. 磁谱仪的工作原理	(295)
II. β 磁谱仪	(296)
III. 重离子磁谱仪	(297)
参考文献	(299)

序 言

“电离辐射探测学”是一门主要阐述探测电离辐射的各种器件、系统、技术以及方法的学科。自发现放射性现象以来,人类所有涉及原子核、基本粒子以及电离辐射的科学实验与工程实践都离不开这方面的科学技术。可以说,这是人类籍以深入微观世界的一种主要途径与手段。

在初始阶段,电离辐射探测器与技术是依照实验核物理的需要而发展起来的。但是,核武器的研制和近年来蓬勃发展的核能工业与核技术在国民经济各部门中的应用,以及近代粒子物理实验等方面的需求,促使这一学科有了更飞速的发展。同时,新的探测器件与技术的出现也反过来推动了上述领域的进展。1992年 Charpak 教授就由于他发明的多丝正比室在粒子物理实验中发挥的重大作用而荣获诺贝尔物理学奖。可以说,现代的电离辐射探测学早已超出低能实验核物理的范围,而同所有的核科学与工程(包括粒子物理)紧密联系在一起。

电离辐射探测学中,除了射线与物质相互作用等基础性内容外,主要包括“电离辐射探测器”以及“探测系统与方法”这二部分内容。前者主要阐述探测各类电离辐射的器件与装置,说明它们的工作机制、输出信号以及主要性能和使用方法等;后者则主要阐述在核科学与工程及其它领域中应用探测器、电子仪器及其它设备组建的电离辐射测量系统和完成测量任务的方法。本书主要阐述电离辐射探测学的前一部分——电离辐射探测器。“测量系统与方法”方面的内容极其广泛,而且与各应用领域的测量任务密切相关,故难以在一、二本书中充分地阐述,而另需要有一系列结合各种测量专题的著作。清华大学核研院正和有关单位共同致力于完成此项工作。

所有的电离辐射都是人类用肉眼所无法观测到的。为了能探测(测量)电离辐射,人们首先要用各种特殊的器件(或装置)使被测辐射粒子能产生相应的可观测信号。这种特殊的器件称作“电离辐射探测器”(ionizing radiation detector),简称作“探测器”。在绝大部分实际情况中,探测器输出的都是电信号。这时,辐射测量系统将主要由输出电信号的探测器以及对电信号进行处理、分析与测量的电子仪器等构成。有的情况下,某些探测器输出的不是电信号,而是“径迹”、“颜色”等。这时探测系统将用其它手段(如光学方法)来观测这些“非电信号”。本书将主要涉及应用面最广的输出电信号的探测器,对输出其它类信号的探测器也有一定的介绍。

在电离辐射探测过程中,探测器的作用是至关重要的,因为它决定着信号的产生过程。测量系统的其它部分都是用来对探测器输出信号进行处理、分析与测量的。显然,产生信号的探测器具有首要的意义,而其它的信号处理与测量仪器则是第二位的。探测器性能的优劣

对整个辐射测量结果有决定性的影响。

从本质上说,探测器的作用就是将入射粒子的全部或部分能量转化为可观测的信号(如电流、电压信号)。探测器产生信号的过程一般可归纳为以下几步:1)电离辐射粒子射入探测器的“灵敏体积”;2)全部或部分入射粒子与探测器灵敏体积内的工作介质发生相互作用,在其中损失能量并产生电离或激发(在固体中则是产生“电子-空穴对”或“激子”等);3)探测器通过自身特有的工作机制将入射粒子的电离或激发效果(在固体中产生的“电子-空穴对”及“激子”等)变换成某种形式(电、光或其它形式)的输出信号。输出信号在形成过程中,同时也受到探测器外接回路(“输出回路”)输入阻抗的影响。

依据探测器的工作介质、作用机制以及输出信号等可将它们分成许多类别。输出电信号的探测器可区分为:1)气体电离探测器,2)闪烁探测器以及3)半导体探测器等。第一类均以气体为工作介质,而且其输出信号均由入射粒子在其中产生的电离效应引起。第二类是由闪烁体与光电转换器件联合构成的。闪烁体可有固态、液态或气态,均可将入射粒子的能量转换成一定量的光子(可见光或紫外光区域的)。光电转换器件则将闪烁体的输出光信号转换成电信号后输出。因此,这二者联合组成的“闪烁探测器”仍属“输出电信号”之列。第三类是以硅、锗等半导体为工作介质,而其输出信号均由入射粒子在其中产生电子-空穴对的效应引起。这三类探测器是当今应用最广泛的,将在本书内作为重点。

本书包括6章,主要分二个部分。第一部分阐述探测器的基础知识,由第1、2章组成。第1章说明辐射(射线)与物质的相互作用,这是一切探测器件工作机制中的第一步作用过程,是学习“辐射探测学”所必须首先掌握的基础知识。第2章在复述概率论的基本知识后,主要说明对探测学中若干主要统计概率问题的分析方法及常用到的一些分析结果。鉴于辐射测量从本质上讲是对随机变量的测量,因而这一章的内容也是学好全书的重要基础。第二部分由第3、4、5、6章组成,主要讲述各种常用的电离辐射探测器件。在第3、4、5章中分别详细地阐述了气体电离探测器、闪烁探测器以及半导体探测器这三大类应用最广的探测器件。第6章则扼要叙述了当今仍有重要应用的其它几类辐射探测器件与装置,使读者能够有一个基本的了解,并列出可供进一步深入学习的参考文献与书籍。

读者将会看到,本书在阐述各种探测器时主要说明以下几方面的内容:1)探测器的工作机制——将入射粒子能量转换成输出信号的物理过程;2)探测器的输出信号,包括对信号的估算及涨落分析等;3)探测器的主要性能;4)探测器的典型应用实例。这四部分基本内容是十分重要的,特别是前二部分——探测器的工作机制与输出信号,更是后二部分内容的基础,也是整个“电离辐射探测学”的基本内容之一。

本书是作者依据在60、70年代及90年代历次讲授这门课程的讲稿,并结合多年来在探测器研究、核技术应用研究等方面的成果与经验而写成的。部分内容引自本人编著的清华大学各类内部出版的资料:《203讲义》(1962年)、《核辐射探测仪器与方法讲义》(1965年)以及在《原子核辐射及其探测讲义》(1977年)中由本人撰写的第3章、第5章与第9章。部分数据、曲线及插图则引自复旦大学、清华大学和北京大学合编的《原子核物理实验方法》(1985年)以及格伦·F·诺尔著的《辐射探测与测量》(中译本,1985年出版)。引用的其它

书籍与文献均将在各章的末尾列出。

本书不是“手册”，而是一本专业参考书。作者力求首先要使读者掌握探测器的基本原理、概念和理论，再进一步了解主要探测器的性能与使用技术。因为只有在深刻理解的基础上才会有创造性，才能促进探测器的发展，也才能真正地用好探测器。基于此种考虑，本书保留了原资料中的习题，以帮助读者更好地掌握基本内容。

作者在写作本书的过程中，得到清华大学核研院院部及所在核技术研究室的大力支持，并受到刘以思、金光宇、邬海峰、王立强、王敬欣及李秀荣等同志的热心帮助，谨在此表示由衷的感谢。

清华大学核能技术设计研究院

安继刚

1995. 2. 10

第 1 章 射线与物质的相互作用

本书主要涉及原子或核转变过程中产生的辐射。在核物理类书籍中均比较详尽地阐述了各类辐射粒子的特征与性质。归纳起来,辐射可分为以下四大类:

$$\begin{array}{l} \text{带电粒子辐射} \left\{ \begin{array}{l} \text{快电子} \\ \text{重带电粒子} \end{array} \right. \\ \text{非带电(粒子)辐射} \left\{ \begin{array}{l} \text{电磁辐射} \\ \text{中子} \end{array} \right. \end{array}$$

快电子包括核衰变中发射的 β 粒子(正或负),以及其它过程产生的具有相当能量的电子。重带电粒子包括质量为一个或多个原子质量单位并具有相当能量的各种离子,如 α 粒子、质子、裂变产物和核反应产物等。所涉及的电磁辐射包括原子的壳层电子重新排列时发射的X射线、高速带电粒子(电子)轰击靶物质而产生的韧致辐射以及原子核能级跃迁时发射的 γ 射线。它们都是静止质量为零的光量子,但韧致辐射具有连续的能量分布,而特征X射线与 γ 射线则具有分立的、与原子及原子核能级差对应的能量。各种核转变过程(如核反应、核裂变等)中产生的中子不带电,但具有与质子相似的静止质量。中子通常按能量分为快中子、慢中子及热中子等。

一般说来,我们只关注能量在10eV量级以上的辐射粒子。这个能量下限是辐射或辐射与物质相互作用的次级产物能使空气等典型材料发生电离所需的最低能量。能量大于这个最低能值的辐射称作“电离辐射”(“ionizing radiation”)。本书以后提到的“辐射”或“射线”,均指“电离辐射”。慢中子本身的能量可能低于上述能量下限,但由于其特殊重要性以及它们引发的核反应(包括核裂变)产物具有相当大的能量,因而也归入这一范畴。

各种电离辐射穿过物质时,都将与物质发生相互作用。这种辐射与物质的相互作用——又称作射线与物质相互作用,与各种辐射研究、辐射应用以及辐射探测密切相关。因此,研究射线与物质相互作用对于原子和原子核物理、防护、核能与核技术应用以及H辐射探测等都有很重要的意义。

正如序言所述,本书主要阐述探测辐射的器件(探测器)与装置。讨论任何探测器的工作机制首先就涉及被探测辐射与探测器工作介质的相互作用。在辐射测量系统与方法的理论与实践也都要用到这方面的原理与技术。可以说,辐射与物质的相互作用乃是“电离辐射探测学”一项重要的物理基础。

§ 1 重带电粒子与物质的相互作用

I. 相互作用的特点

重带电粒子(如 α 、 p 、 d ...)与物质相互作用主要是通过其正电荷与物质原子中轨道电子间的库仑作用力而实现的。即,这种相互作用主要是重带电粒子与物质原子核外电子的库仑相互作用。虽然重带电粒子与物质的原子核也可能发生相互作用(如卢瑟福散射及带电粒子引起的核反应),但这类相互作用很少发生,在辐射探测机制中并不重要。因此,下面将只讨论重带电粒子与物质的核外电子间发生的作用。

带电粒子进入任何一种介质后,将立即与许多电子(原子内的轨道电子)相互作用,通过库仑力而使这些电子获得能量。电子从由其附近通过的带电粒子获得的能量可能使它升至原子内的较高能级(称作“激发”),而当这能量足够大时也可能使之完全脱离原子(称作“电离”)。这些电子从带电粒子获得能量,也就使带电粒子的速度降低下来。带电粒子正是通过与核外电子的很多次“碰撞”而不断损失能量,直到被阻止下来。这种方式的能量损失称作“电离损失”。

可以估计一下在碰撞中电子可能从带电粒子获得的最大能量。由于重带电粒子的能量显著大于电子在原子内的结合能,则可以把电子看成是自由电子。由此,重带电粒子与物质原子中轨道电子的相互作用可看成是与自由电子间的弹性碰撞。按照弹性碰撞理论,质量为 M 的重粒子与质量为 m_0 的电子发生碰撞后,电子所能得到的最大能量为 $4E \cdot \frac{m_0}{M}$ (这里, E 是重粒子的动能)。当重粒子质量数为 1 时,这个值为 $\frac{1}{500}E$ 。当重粒子的质量数更大时,这个数值将更小。可见,在与电子的每次碰撞中,重带电粒子的能量损失是非常小的,需要经过大量的碰撞,其动能才逐渐降低至零。

由电磁辐射理论可知,当一电荷具有加速度时将会发出电磁辐射(韧致辐射)。带电粒子在与物质相互作用过程中,速度不断地变慢,也应产生韧致辐射,并相应地损失能量。但重带电粒子的质量大,这种形式的能量损失(称作“辐射损失”)与通过碰撞使原子内电子激发或电离的方式相比是微不足道的。因此,对重带电粒子,只须考虑其“电离损失”。

II. 阻止本领与 Bethe 公式

某种吸收物质对带电粒子的线性阻止本领(简称阻止本领) S 定义为,该粒子在材料中的微分能量损失除以相应的微分路径:

$$S = - \frac{dE}{dx}$$

$\left(- \frac{dE}{dx} \right)$ 也称作粒子的“比能损失”或“能量损失率”。

前面已经讲过,带电粒子的能量损失有“电离损失”及“辐射损失”两种。因而上式可相应地化为

$$\begin{aligned} S &= S_{\text{ion}} + S_{\text{rad}} \\ &= \left(- \frac{dE}{dx} \right)_{\text{ion}} + \left(- \frac{dE}{dx} \right)_{\text{rad}} \end{aligned}$$

这里, $S_{\text{ion}} = \left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{ion}}$ 为“电离损失率”, 而 $S_{\text{rad}} = \left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{rad}}$ 为“辐射损失率”。对重带电粒子, $S \cong S_{\text{ion}} = \left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{ion}}$

描写 $\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{ion}}$ 与带电粒子速度、电荷等关系的经典公式称作 Bethe 公式。以下对 Bethe 公式作一简化的推导证明, 其详尽证明可参看文献[1]。

如前所述, 在与入射带电粒子的作用过程中, 物质原子的电子可看成是自由的。此外, 由于入射带电粒子速度要显著大于靶物质原子内电子的轨道运动速度, 因而可近似把电子看成是“静止”的。

设重带电粒子质量为 M , 电荷为 Ze , 能量为 E , 速度是 v (v 要比原子内电子的轨道速度大得多), 用 m_0 代表电子质量, 其电荷为 $-e$ 。

以下, 我们将首先考虑带电粒子与单个电子的碰撞情况。

当重带电粒子在离电子的垂直距离为 b (b 称作碰撞参量) 的 ox 方向射入靶物质 (如图 1.1 所示), 物质中电子受到库仑力作用而获得能量。由于碰撞中入射粒子传给电子的能量要比其自身能量小得多, 故可认为在碰撞后入射重带电粒子仍按原方向直线运动^①。

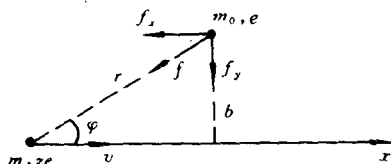


图 1.1 带电粒子与自由电子的弹性碰撞

当带电粒子与电子相距 r 时, 电子受到的库仑力为

$$f = \frac{ze(-e)}{r^2} = -\frac{ze^2}{r^2} \quad (1.1)$$

作用过程的时间是从 $t = -\infty$ 到 $t = +\infty$ 。

在 Δt 时间内, 带电粒子传给电子的动量 ΔP 为

$$\Delta P = f \cdot \Delta t$$

则整个作用过程中, 传给电子的总动量是

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} f \cdot dt \quad (1.2)$$

由于带电粒子从电子边上掠过时, 在通过最近点 O 之前与之后, 库仑力的 x 方向分量 f_x 大小相等、方向相反, 因而电子所得总动量的 x 方向分量 P_x 等于零。由此, 电子总动量

$$P = P_y = \int_{-\infty}^{+\infty} f_y \cdot dt \quad (1.3)$$

这里 f_y 是库仑力 f 的 y 向分量。由图 1.1 可见

$$f_y = f \cdot \frac{b}{r} = \frac{ze^2 b}{r^3}$$

由此

$$P = P_y = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{ze^2 b}{r^3} dt$$

^① 这里作了简化假设。在文献[1]的详细论证中未作此简化。

又知

$$dt = \frac{dx}{v}$$

且在与单个电子碰撞中, v 可看成不变的常数,

则

$$\begin{aligned} P &= P_y = \frac{ze^2b}{v} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dx}{r^3} \\ &= \frac{ze^2b}{v} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dx}{(x^2 + b^2)^{3/2}} \\ &= \frac{2ze^2}{bv} \end{aligned} \quad (1.4)$$

由此, 碰撞参量为 b 时, 单个电子所得动能(即入射重带电粒子损失的能量)应当是

$$\begin{aligned} \Delta E_b &= \frac{P^2}{2m_0} \\ &= \frac{2z^2e^4}{m_0v^2b^2} \end{aligned} \quad (1.5)$$

为了计算电离损失率 $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ion}}$, 必须先对单位距离内碰撞参量为 b 的所有电子求和, 再对所有的碰撞参量 b 求和。

设单位体积内靶物质原子数为 N , 其原子序数为 Z , 单位体积内的电子数为 $N \cdot Z$, 则沿粒子入射方向, 半径为 b , 厚度为 db , 长度为 dx 的圆筒体内的电子数是 $2\pi b \cdot db \cdot dx \cdot N \cdot Z$ 。如图 1.2 所示入射粒子经过 dx 距离后, 所有碰撞参数在 b 与 $b+db$ 范围内的电子所得到的能量为

$$(dE)_{b \sim b+db} = 2\pi b \cdot db \cdot dx \cdot NZ \cdot \Delta E_b$$

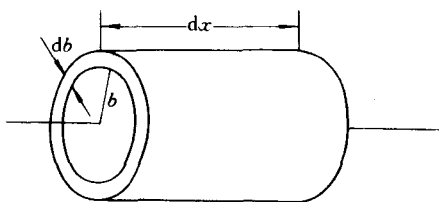


图 1.2 碰撞参量为 $b \sim b+db$, 长度为 dx 的体积元

再对所有可能的 b 值(从 $b_{\min}$ 到 $b_{\max}$)积分, 就得到 dx 距离内物质中所有电子从入射粒子得到的能量, 这也就是入射粒子在 dx 距离内损失的能量 $(-dE)_{\text{ion}}$ 。由此可得

$$\begin{aligned} \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ion}} &= \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} (dE)_{b \sim b+db} \\ &= \frac{4\pi z^2 e^4 NZ}{m_0 v^2} \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} \frac{db}{b} \\ &= \frac{4\pi z^2 e^4 NZ}{m_0 v^2} \ln \frac{b_{\max}}{b_{\min}} \end{aligned} \quad (1.6)$$

显然, (1.6) 式中的 $b_{\min}$ 不能为零, $b_{\max}$ 也不能为“ ∞ ”, 否则 $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ion}}$ 将为“ ∞ ”, 是不合理的。