

高等学校试用教材

# 核辐射探测

凌 球  
郭 兰 英  
刘 继 才  
编 著  
审

原子能出版社

ISBN 7-5022-0529-2

---

TL·292(课)定价:5.10元

高等学校试用教材

# 核 辐 射 探 测

(初 版)

凌 球 郭兰英 编著  
刘继才 审

原 子 能 出 版 社

(京)新登字077号

## 内 容 简 介

本书内容包括：核辐射及其探测原理，气体探测器，半导体探测器，闪烁探测器，其他类型探测器，放射性测量的误差和数据处理。各章末尾附有参考文献和习题。本书内容充实，取材新颖。

本书可作为高等院校核技术专业的教材，也可供从事实验核物理、核工程和核技术应用等方面工作的工程技术人员参考。

☆ ☆ ☆

本书由刘继才审阅，经原子核物理教材委员会核物理实验与方法课程组于1989年7月由齐卉荃主持召开的审稿会审定，同意作为高等学校试用教材。

高等学校试用教材

核辐射探测

(初版)

凌 球 郭兰英 编著

刘继才 审

责任编辑 袁祖伟

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京地质印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本850×1168 1/32 ·印张 16·字数 513 千字

1992年6月北京第一版·1992年6月北京第一次印刷

印数1—1000

ISBN7-5022-0529-2

71.292 (课) 定价：5.10元

## 前 言

本书是根据原核工业部教育司原子核物理教材委员会于1985年召开的核辐射探测教材会议审定的编写提纲编写的。本书可作为高等学校核技术专业的教材。

本书叙述了各种核辐射探测器的工作原理、结构、性能和应用，着重从基本概念、基本理论和基本方法讲述。书中叙述的各种核辐射探测器的典型应用，不仅着眼于描述各种探测器系统的工作原理和基本特性，而且详细叙述了各种核辐射的特性参量的测量技术。这种编排结构避免了篇幅冗长，使全书结构紧凑，便于学生学习。

本书所涉及的是能量大约在20MeV以下的核辐射的探测技术，这是核技术应用所涉及的能量范围。因此书中把重点放在常用核辐射探测器如气体探测器、半导体探测器和闪烁探测器的原理、性能和应用上，而对主要用于高能物理的探测器如气泡室和量能器等以及重粒子物理中广泛使用的探测设备如磁谱仪等则未涉及。对最近几年发展起来的一些新型探测器，也只作一般介绍。

数据处理是核辐射探测技术的一个重要组成部分。因此，本书专门用一章的篇幅介绍核辐射测量的误差及数据处理方法。

本书为核技术专业的一门专业基础课的教材。学习本门课程时需要具备放射性、核辐射特性和核电子学基本线路方面的知识。为便于学生学习，在第一章简要叙述了放射性基本知识和各种核辐射的特性，作为核辐射探测的基础。

全书需要讲授70学时，重点讲授第二、三、四章所叙述的几种常用核辐射探测器及其应用。

本书第一、二、六章由郭兰英编写，第三、四、五章的编写及

全书结构安排等由凌球负责完成。本书在编写过程中得到了许多同志的支持和帮助。刘继才审阅了全稿，齐卉荃、吴治华、邸绍良、袁蓉芳等参加了审稿会并提出了宝贵意见。本书初稿已在衡阳工学院核电子学及核技术应用专业使用了几届，吸取了各届学生的许多宝贵意见，在此一并表示衷心的感谢。由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请批评指正。

编者

1990年8月

# 目 录

## 前 言

第一章 核辐射及其探测原理 .....	1
第一节 核辐射的基本特性 .....	1
一、几种主要粒子的性质 .....	1
二、放射性衰变的基本规律 .....	3
第二节 探测带电粒子的物理基础 .....	5
一、带电粒子与物质的相互作用机制 .....	5
二、带电粒子的能量损失 .....	6
三、带电粒子在物质中的射程 .....	14
四、正电子与物质的相互作用 .....	20
第三节 $\alpha$ 和 $\gamma$ 射线的探测原理 .....	22
一、光电效应 .....	22
二、康普顿散射 .....	25
三、电子对产生效应 .....	30
四、 $\alpha$ 和 $\gamma$ 射线的吸收 .....	32
第四节 中子的探测方法 .....	35
一、核反应法 .....	36
二、核反冲法 .....	37
三、核裂变法 .....	38
四、活化法 .....	39
第二章 气体探测器 .....	44
第一节 基本原理 .....	45
一、气体的电离 .....	45
二、电子和离子在气体中的运动 .....	46
三、被收集的离子对数与外加电场的关系 .....	50
第二节 电离室 .....	52
一、概述 .....	52

二、脉冲电离室 .....	54
三、电流电离室和累计电离室 .....	67
四、应用 .....	72
第三节 正比计数管 .....	76
一、气体放大机制 .....	77
二、输出脉冲 .....	80
三、特性参量 .....	83
四、几种常用的正比计数管及其应用 .....	86
第四节 G-M计数管 .....	92
一、工作原理 .....	93
二、几种常用G-M计数管的构造 .....	96
三、输出脉冲 .....	98
四、特性参量 .....	99
第五节 气体多丝室 .....	106
一、多丝正比室 .....	106
二、漂移室 .....	121
第六节 气体探测器的应用实例 .....	127
一、测量 $\beta$ 放射性活度的小立体角法 .....	128
二、测量放射源活度的 $4\pi$ $\beta$ - $\gamma$ 符合法 .....	134
第三章 半导体探测器 .....	144
第一节 半导体的基本知识和半导体探测器的工作原理 .....	144
一、半导体材料的电特性 .....	144
二、本征半导体 .....	145
三、P型和N型半导体 .....	147
四、载流子的产生和复合 .....	150
五、半导体探测器的基本原理 .....	152
第二节 PN结型半导体探测器 .....	153
一、PN结的形成和结区的电场分布 .....	153
二、工作原理 .....	156
三、种类和结构 .....	156
四、特性参量 .....	158
五、输出脉冲 .....	168
第三节 锂漂移型半导体探测器 .....	171



一、灵敏区的形成 .....	171
二、输出脉冲 .....	174
三、分类 .....	177
四、特性参量 .....	179
第四节 高纯锗探测器 .....	182
一、基本结构 .....	182
二、电场和电容 .....	185
三、特性参量 .....	186
第五节 化合物半导体探测器 .....	188
一、化合物半导体材料的特性 .....	188
二、几种化合物半导体探测器 .....	189
第六节 特殊类型半导体探测器 .....	193
一、全耗尽探测器 .....	193
二、位置灵敏探测器 .....	193
三、内放大探测器 .....	196
四、电流型探测器 .....	199
第七节 半导体探测器的应用 .....	200
一、金硅面垒探测器的应用 .....	200
二、锂漂移型探测器和HPGe探测器的应用 .....	205
三、金硅面垒 $\alpha$ 谱仪 .....	206
四、HPGe $\gamma$ 谱仪 .....	208
五、Si(Li)X射线能谱仪 .....	222
第四章 闪烁探测器 .....	234
第一节 构成和工作原理 .....	234
一、构成 .....	234
二、工作原理 .....	235
第二节 闪烁体 .....	236
一、发光机制 .....	236
二、特性参量 .....	241
三、常用闪烁体的种类和性能 .....	246
第三节 光学收集系统 .....	257
一、反射层 .....	258
二、光学耦合剂 .....	259

三、光导 .....	259
第四节 光电倍增管的结构、工作原理和性能 .....	260
一、结构 .....	260
二、工作原理和分类 .....	262
三、特性参量 .....	271
四、高压供电和分压器 .....	280
五、其他光电器件 .....	285
第五节 闪烁探测器的工作特性 .....	288
一、输出脉冲 .....	288
二、探测效率 .....	294
三、能量分辨率 .....	297
四、时间分辨 .....	300
第六节 闪烁探测器的应用 .....	302
一、测量 $\gamma$ 能谱的NaI(Tl)单晶谱仪 .....	302
二、鉴别中子和 $\gamma$ 射线的 $n$ 、 $\gamma$ 甄别方法 .....	309
三、测量核激发态寿命的多道时间分析谱仪 .....	313
第七节 通道电子倍增器 .....	323
一、工作原理和构造 .....	323
二、主要特性 .....	325
三、微通道板 .....	326
第五章 其他探测器 .....	330
第一节 切伦科夫探测器 .....	330
一、切伦科夫辐射 .....	330
二、切伦科夫辐射的产生、收集和记录 .....	334
三、切伦科夫探测器的种类及应用 .....	340
第二节 热释光探测器 .....	344
一、基本原理 .....	344
二、热释光磷光体 .....	346
三、热释光的测量装置 .....	348
第三节 径迹探测器 .....	349
一、原子核乳胶 .....	350
二、固体核径迹探测器 .....	360
三、脉冲径迹室 .....	371

第四节	康普顿二极管 .....	380
一、	工作原理 .....	381
二、	结构 .....	382
第五节	自给能探测器 .....	385
一、	工作原理和结构 .....	386
二、	主要特性参量 .....	387
第六节	液体电离室 .....	388
一、	工作原理和结构 .....	388
二、	主要特性参量 .....	390
第七节	气体正比闪烁探测器 .....	391
一、	工作原理和结构 .....	391
二、	主要特性参量 .....	392
第八节	穿越辐射探测器 .....	394
一、	穿越辐射及其特性 .....	394
二、	穿越辐射探测器 .....	397
第六章	放射性测量的误差和数据处理 .....	401
第一节	误差的基本概念 .....	401
一、	误差的表示形式 .....	402
二、	误差的分类 .....	403
三、	准确度和精确度 .....	404
第二节	基本统计概念 .....	405
一、	随机现象和随机变量 .....	405
二、	基本统计量 .....	406
三、	概率的意义及概率分布的描述 .....	408
第三节	统计分布 .....	411
一、	二项式分布 .....	411
二、	泊松分布 .....	412
三、	高斯分布 .....	414
四、	负二项式分布 .....	418
五、	$\chi^2$ 分布 .....	420
六、	$t$ 分布 .....	421
第四节	放射性测量的统计误差 .....	423
一、	计数的统计误差 .....	423

二、测量条件的选择 .....	425
三、非等精度观测的误差处理 .....	427
第五节 误差传递和最小二乘法 .....	429
一、误差传递 .....	429
二、最小二乘法 .....	433
第六节 测量数据的检验 .....	442
一、两次测量计数值差异的检验 .....	442
二、分布类型的检验 .....	443
三、可疑测量值的舍弃 .....	449
四、误差的分配与合成 .....	451
第七节 核辐射事件的时间间隔分布 .....	453
一、相继发生的核事件之间的时间间隔分布 .....	454
二、定标事件的时间间隔分布 .....	455
附录 1 常用物理常数 .....	459
附录 2 常用放射性同位素中子源 .....	460
附录 3 常用 $\alpha$ 放射性核素表 .....	461
附录 4 常用 $\beta$ 和 $\gamma$ 放射性核素表 .....	462
附录 5 元素的特征 X 射线能量和荧光产额 .....	465
附录 6 一些常用物质对窄束光子的质量吸收系数 $\mu_m(\text{cm}^2/\text{g})$ .....	477
附录 7 宽束 $\gamma$ 射线在某些物质中的积累因子 $B$ $(h\nu, x, Z)$ .....	489
附录 8 高斯(正态)分布数值表 .....	491
附录 9 相应于某些自由度下几种概率的 $\chi^2$ 值 .....	495
附录 10 某些自由度下 $t$ 分布的 $t_{1-\alpha}$ 数值表 .....	496
附录 11 圆形面探测器对面源(或样品)所张平均立体角 的计算值 .....	498

# 第一章 核辐射及其探测原理

各种核辐射的探测原理跟它们与物质的相互作用密切相关。本章将较详细地叙述这些相互作用的基本特性，着重于讲清物理概念和作用机制，为以后讲述各种核辐射探测器打下物理基础。

## 第一节 核辐射的基本特性

在各种核跃迁中，从原子核中释放出来的辐射，包括 $\gamma$ 辐射、中子辐射、 $\alpha$ 和 $\beta$ 辐射等称为核辐射。本书所涉及的探测对象除核辐射外，还包括X射线、质子和其他重带电粒子。由于它们本身是粒子或具有粒子性质，本书中也将它们称为粒子。本节着重介绍几种主要粒子的性质和放射性衰变的基本规律。

### 一、几种主要粒子的性质

#### 1. 中子和质子

组成原子核的中子和质子统称为核子。质子(用符号P表示)是氢原子核，也是组成所有其他原子核的基本粒子之一。其自旋为 $1/2$ ，带一个正电荷( $1.6021892 \times 10^{-19} \text{ C}$ )，静止质量为 $1.6726485 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。用加速器可以得到各种能量的质子。中子是一种不带电荷、与质子一起组成除氢以外所有其他原子核的基本粒子，其自旋也为 $1/2$ ，静止质量为 $1.6749543 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。中子在自由状态下是不稳定的(束缚在原子核内的中子是稳定的)，会衰变成质子、电子和反中微子，其半衰期为 $10.6 \text{ min}$ 。大量的中子是由反应堆和加速器产生的，实验室内也常利用放射性同位素中子源的中子。附录2给出了常用放射性同位素中子源。

#### 2. $\alpha$ 粒子

$\alpha$  粒子是核衰变时放出的重粒子。它由两个中子和两个质子组成，带两个正电荷，质量为电子质量（用  $m_e$  表示）的 7296.03 倍。它与 He 的原子核相同，习惯上称之为  $\alpha$  射线。其能量一般在 4~9MeV 范围内。常用的  $\alpha$  放射性核素及其特性见附录 3。

### 3. 电子和中微子

电子是一种稳定的亚原子粒子，其电荷量为  $\pm 1.6021892 \times 10^{-19} \text{C}$ ，静止质量为  $9.109534 \times 10^{-31} \text{kg}$ 。不加说明时，它通常指带负电荷的电子，也叫负电子。它的反粒子是带正电荷的电子，称为正电子。 $\beta$  衰变中放出的电子 ( $\beta^-$ ) 或正电子 ( $\beta^+$ ) 称为  $\beta$  粒子。原子核由质子和中子组成，核内不存在电子，因此  $\beta$  衰变实质上是中子和质子互相转化的过程。中子转变成质子放出  $\beta^-$  粒子，质子转变成中子则放出  $\beta^+$  粒子。

$\beta$  射线的能量是连续的，一般小于 2MeV，虽然比  $\alpha$  射线的能量低，但电子的质量小，因此它的速度比  $\alpha$  粒子快得多。单能电子由加速器产生，能量可根据实验要求调节。

中微子 ( $\nu$ ) 是不带电荷、自旋为 1/2、首先在  $\beta$  衰变理论中被预言的质量极小的粒子。目前已发现有与电子有关的和与  $\mu$  子有关的两类中微子，分别用  $\nu_e$  和  $\nu_\mu$  表示。每类中微子有正反两种。

### 4. $\gamma$ 辐射 ( $\gamma$ 射线) 和 X 辐射 (X 射线)

$\gamma$  辐射和 X 辐射都是电磁辐射。 $\gamma$  辐射是核跃迁或粒子湮没过程中发出的电磁辐射。它们具有明显的粒子性，因此通常也称之为光子。其自旋为 1，静止质量为 0，不带电荷。由量子力学知道，光子的能量为：

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

式中： $h$  是普朗克常数，其值为  $6.626196 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ ； $\nu$  是振动频率； $c$  是光速； $\lambda$  为波长，单位用 nm。能量  $E$  的单位相应为 eV。

通常应用的  $\gamma$  射线是由  $\gamma$  放射性核素发射的，附录 4 列出了一些常用  $\gamma$  放射性核素。 $\gamma$  辐射大都是母核进行  $\alpha$  或  $\beta$  衰变后，子核

处于较高激发态，退激到较低激发态或基态时发出的。其能量为与跃迁有关的两个能级间的能量差，通常在几十 keV 与几 MeV 之间。

X 辐射是核外电子跃迁过程中产生的电磁辐射。原子内特定轨道的电子从高能级跃迁到低能级时发射的辐射称为特征 X 射线。

## 5. 重离子

重离子是原子序数等于或大于 2 的核素的带电原子或原子核，它们存在于宇宙线中。供实验用的则主要是用重离子加速器人工产生的。核裂片（重核分裂的产物）也包括在重离子之中。质子、 $\alpha$ 粒子和重离子等统称为重带电粒子，以与电子等质量小的带电粒子和不带电粒子相区别。

## 二、放射性衰变的基本规律

上面介绍的  $\alpha$  粒子、 $\beta$  粒子和  $\gamma$  光子等都是从原子核内放出来的。某些核素具有自发地放出粒子或  $\gamma$  射线，或在发生轨道电子俘获之后放出 X 射线或发生自发裂变的性质，这种性质称为放射性。具有放射性的核素称为放射性核素。

放射性核素的原子核自发地放出  $\alpha$ 、 $\beta$  等粒子而转变为另一种核素的过程称为核衰变。对某一个原子核来说，在何时衰变，完全是偶然的。但是就大量这种原子核作为整体来说，在  $t$  到  $t + dt$  时间内衰变的原子核数  $dN$  应当和时间间隔  $dt$  及  $t$  时刻的放射性原子核数  $N$  成正比：

$$-dN = \lambda N dt \quad (1.2)$$

负号表示  $N$  随时间减少。式中的常数  $\lambda$  称为衰变常数，它的量纲是时间量纲的倒数。它表示某种放射性核素的一个核在单位时间内进行衰变的概率。

显然， $\lambda$  的大小决定了衰变的快慢，每种放射性核素都有一个特定的  $\lambda$  值。因此，它是放射性原子核的特征量。设  $t = 0$  时放射性原子核数为  $N_0$ ，将 (1.2) 式积分就可得到  $t$  时刻的放射性原子

核数目：

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.3)$$

可见，放射性核的数目随时间按指数规律减少。这是放射性核衰变的基本规律。

对于实际工作来说，某个时刻放射源中还存在多少个放射性原子核没有衰变并不重要，重要的是单位时间内有多少个核发生衰变。在给定时刻  $t$ ，一定量的放射性核素在一个很短的时间间隔  $dt$  内发生的核衰变数  $dN$  除以  $dt$  的商，称为放射性活度，用  $A$  表示：

$$A = -\frac{dN}{dt}$$

由 (1.2) 和 (1.3) 式，放射性活度可以表示为：

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.4)$$

式中  $A_0 = \lambda N_0$  是  $t=0$  时的放射性活度。(1.4) 式表明放射性活度随时间成指数规律衰减。

放射性活度的国际单位制单位是“贝可勒尔”，符号为“Bq”。1Bq 为一次衰变每秒。以前习惯用“居里 (Ci)”及其导出单位“毫居里 (mCi)”和“微居里 ( $\mu$ Ci)”作放射性活度的单位。它们与贝可之间的关系为  $1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$ 。

直接测量放射性原子核数目的减少是很困难的。但探测放射性原子核衰变时放出的粒子数是比较容易的。测定单位时间内放射源放出某种粒子的数目，再由放射性核素的衰变纲图知道其分支比，就可以求得放射源的活度，或放射性原子核数的减少率。

描述放射性原子核衰变除了用“ $\lambda$ ”外，还可用半衰期、平均寿命等常数。在单一的放射性衰变过程中，放射性活度降至其原有值的一半时所需的时间称为半衰期，符号为  $T_{1/2}$ 。将  $A = A_0/2$ ， $t = T_{1/2}$  代入 (1.4) 式，可得到  $T_{1/2}$  为：

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1.5)$$



平均寿命是指在某特定状态下放射性核数减少到原来的  $1/e$  的平均时间, 符号为  $\tau$ 。将  $A/A_0 = \frac{1}{e}$  代入 (1.3) 式, 可得:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (1.6)$$

从 (1.5) 式和 (1.6) 式, 可以得到  $\tau$  与  $T_{1/2}$  的关系为:

$$T_{1/2} = 0.693\tau \quad (1.7)$$

不同的放射性核素或粒子有不同的  $T_{1/2}$  和  $\tau$ , 见附录2、附录3和附录4。

## 第二节 探测带电粒子的物理基础

探测核辐射主要是用各种类型和规格的核辐射探测器记录粒子数目, 测定放射源的活度, 确定粒子的质量、电荷、寿命、能量以及动量等。为最佳选择或正确使用探测器以得出好的测量结果, 必须深入了解核辐射粒子与物质的相互作用机制和它们穿过物质时发生的有关现象。这是核辐射探测的物理基础。

在核辐射探测原理中, 最基本的是利用带电粒子在物质中对物质原子产生的电离和激发效应或快速轻带电粒子穿过物质时的电磁辐射效应。

本节就带电粒子探测的物理基础加以讨论。

### 一、带电粒子与物质的相互作用机制

探测带电粒子的依据是它们射入物质后, 与物质原子发生的三种主要相互作用。

① 电离和激发。带电粒子与核外轨道电子之间存在库仑相互作用, 发生非弹性碰撞, 导致带电粒子损失能量, 物质原子被电离或激发。这是带电粒子与物质相互作用的主要方式。绝大多数探测器都是利用这种电离和激发效应来探测入射粒子的。

② 非弹性碰撞。带电粒子与物质原子核之间存在库仑相互