

高等教育教材

# 原子核物理实验方法

复旦大学  
清华大学 合编  
北京大学

原子能出版社

PDFG



高等 教育 教材

# 原子核物理实验方法

修订第三版

编 者

复旦大学 吴治华 (主编)

赵国庆

陆福全

许志正

吴松茂

清华大学 齐卉荃 (主审)

朱胜江

北京大学 沈能学

陈 坚

吴名枋

原 子 能 出 版 社

北 京

## 图书在版编目(CIP)数据

原子核物理实验方法/复旦大学等编. —3版(修订本). 北京:原子能出版社,1997.6  
高等教育教材  
ISBN 7-5022-1512-3

I. 原… II. 复… III. 原子核-物理实验-实验方法-高等学校-教材 IV. O571.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 08565 号

## 内 容 简 介

本书内容包括:放射性测量的统计学,射线与物质相互作用,气体、闪烁、半导体等探测器, $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 和中子的强度与能谱测量,截面测量,核寿命测量和粒子甄别技术。

本书作为高等学校原子核物理等专业的教科书,也可供从事实验核物理,放射性测量,核技术应用,辐射防护等方面的工作人员参考。

©原子能出版社,1996

原子能出版社出版发行

责任编辑:陈进贵

社址:北京市海淀区阜成路43号 邮政编码:100037

中国文联印刷厂印刷 新华书店经销

开本:787×1092mm 1/16 印张31 字数771千字

1997年6月北京第三版 1997年6月北京第1次印刷

印数:1901—3400

定价:24.00元

### 第三版修订本序言

本书第二版修订出版后,又经历了近10年。核物理教材委员会于1992年7月在上海复旦大学召开了本教材的教学经验交流和修订大纲审定会。到会的有复旦大学,清华大学,北京大学,南京大学,兰州大学,中国科技大学,四川大学,吉林大学,苏州医学院,衡阳工学院及核工业研究生部等19位任课教师和学者。与会者认为,近年来核物理实验方法和核技术应用方面都有许多新发展,新型探测元件不断出现,教材内容极需更新充实,同时经过多年的讲授和教学实践,以及随着各院校有关专业教学计划的变动,要求本教材的篇幅有较大删减,而内容则要更切合实用,并反映最新动态。考虑到有些章节的内容已另有专著出版,因而可不列入本书内容。这样原来上下两册可压缩为一册,有利于教学和使用。根据上述修订原则确定了各章的具体修改意见。所以这次作了较大的修改,增加了必要的新内容。

第三版修订本的编著者是:朱胜江(第一章、第十章),赵国庆(第二章),沈能学(第六章),陆福全(第四章),齐卉荃(第五章、第十四章),陈坚(第三章、第七章、第十五章),许志正(第八章、第十二章),吴名枋(第九章),吴治华(第十一章,附录),吴松茂(第十三章)。本次修订仍由吴治华任主编,齐卉荃任主审,陈进贵任责任编辑。

编者

1994年4月

## 修订版序言

本书(上、下册)出版发行以后,经各校使用,普遍反映良好。一九八三年六月,核工业部教育司约请了复旦大学、清华大学、北京大学、南京大学、吉林大学、四川大学、兰州大学、中国科技大学、国防科技大学、原子能科学研究院、北京核仪器厂等单位的代表讨论了本书的修订再版工作。我们根据教材要适于教学、取材要适当更新的精神,对各章内容进行了修改、调整和补充,删去一些不宜在本课程中讲授的内容,增补了近年来发展较快的某些实验方法,也充实了若干习题。

本书的修订工作仍由复旦大学、清华大学、北京大学三校共同承担。各章的修订者是:吴学超(第一、十、十八章),赵国庆(第二、十六章),沈能学(第三、六章),陆福全(第四、八章),齐卉荃(第五、十四章),赖初喜(第七章),吴名枋(第九章),吴治华(第十一、十二、十七章),吴松茂(第十三章),陈坚(第十五章)。这次修订由吴治华任主编,齐卉荃任主审,陈进贵任责任编辑。

编者

1985年3月

## 序 言

近十几年,核物理实验技术发展很快,六十年代初由北大、清华、复旦等校合编,署名于群的《原子核物理实验方法》一书的许多内容已经过时了。虽然国外有一些参考书,但不适用于教学。因此,三校根据多年来的教学实践,重新联合编写了本书,供各高等学校核物理等专业作试用教材,也供从事核物理研究、放射性测量、放射性核素应用(通称同位素应用)、剂量防护等方面的工作人员参考。

本书主要内容可概括为三个部分:

一、各种核辐射探测器。第三、四、五、六、十一章主要讲它们的原理、性能及应用。其中,对气体、闪烁、半导体探测器作了较详细的叙述。对中子探测器和其它高能探测器只作一般性的介绍。在第二章中,专门讨论了各种探测器的物理基础——射线与物质的相互作用。

二、各种射线的能量和强度的测量方法。这是核物理实验及放射性测量中最基本也是最常遇到的问题。第八、九、十、十一和十二等章节分别讨论了轻重带电粒子、 $\gamma$ 射线和X射线、中子的能量和强度的测量问题。第七章专门讨论了各种精确测量中用得较多的符合方法。

三、现代核物理实验和核技术的发展与应用的情况。第十三、十四、十五、十六各章分别介绍了核反应截面测量、粒子甄别技术、核寿命测量,以及核技术在元素痕量分析中的应用等内容。

另外,在第一章及第十八章中,专门讨论了核物理测量中的统计性和数据处理问题。

高能物理和低能核物理早已分道扬镳,各树一帜。虽然,在实验仪器设备上还有些共用的器件和线路,但是,实验思想、原理、设计规模都已相差很大。本书主要叙述低能核物理的实验方法,对高能探测器只作简单介绍。至于近年来重离子物理实验方面的发展情况,尽可能在第七、九、十四、十五等章节中有所反映。

本书作为教材使用时,可主要讲述第一与第二部分,第三部分则根据各学校情况适当选择讲授,次序上也可作适当调整。例如,第一章、第十章中有关数据处理部分,与第十八章的内容是有联系的,可组合成两个单元连续讲授。

本书内容涉及到专业知识的面很广,而各章又由各个作者分别编写,为求各章节的内容叙述完整,某些内容难免有重复,符号、术语等也可能不尽相同。

本书是由复旦大学、清华大学、北京大学有关教师联合编写的。吴治华同志审订了全部稿件,陈坚同志和齐卉荃同志也做了大量工作。本书的作者是:复旦大学的赵国庆(第2,16章)、陆福全(第4章)、许志正(第8,12章)、吴治华(第11,17章)、吴松茂(第13章);清华大学的吴学超(第1,10,18章)、齐卉荃(第5,14章);北京大学的陈坚(第3,7,15章)、沈能学(第6章)、吴名枋(第9章)。由于作者学识水平所限和缺少经验,书中错误难免,希望读者指正。

在编写本书过程中,吉林大学、南京大学、四川大学、中国科技大学、北京师范大学、兰州大学、原子能研究所、近代物理研究所等单位的老师和科学工作者审阅过初稿,原子能研究所、高能物理研究所、计量科学研究院的王征华、李忠珍、朱善根等同志审阅了有关部分,他们都提出了不少宝贵意见,作者特此一并致谢。

作者 1980年3月28日

## 符 号 表

本书部分通用符号如下

符 号	名 称
$\alpha$	显著度, 歧离参数, 复合系数, 内转换系数
$a$	计数管阳极半径
$A$	活度, 衰变率(贝可), 质量数, 原子量, 面积, 安培
ADC	模拟数字转换器
$b$	碰撞参量, 计数管阴极半径
$B_i$	$i$ 层电子结合能
cpm	每分钟计数
cps	每秒钟计数
$C'$	杂散电容, 分布电容
$C_d$	结电容
$C_f$	反馈电容
$C_i$	输入电容
$C_0$	探测器固有电容
$d$	探测器灵敏区厚度, 晶面间距
$d_{\frac{1}{2}}$	半减弱层厚度, 半吸收厚度
$D$	扩散常数, 扩散系数, 吸收剂量, 色散
$D(x)$	方差, $\sigma^2$
$\epsilon$	介电常数
$\epsilon$	探测效率
$\epsilon_{in}$	本征效率
$\epsilon_p$	峰探测效率
$\epsilon_s$	源探测效率
$\epsilon_{sp}$	源峰探测效率
$\epsilon_{imp}$	峰本征探测效率
$\epsilon_{pr}$	相对峰探测效率
$\epsilon_c$	符合探测效率
$E$	能量, 电场强度
$E_0$	入射粒子能量, 粒子初始能量
$E_\beta$	$\beta$ 射线能量
$E_{\beta max}$	$\beta$ 射线最大能量
$E_c$	光电子能量
$E_g$	禁带宽度



$E_{ne}$	等效噪声能量
ENC	等效噪声电荷
$E(x)$	数学期望,平均值
$F$	光通量,法诺因子
FWHM	半极大值处全宽度,半宽度(eV)
FWTM	1/10 极大值处全宽度(eV)
$g$	光电倍增管中打拿极间电子传递效率
$g_c$	光电倍增管第一打拿极电子收集效率
$\Gamma$	能级半宽度
$h\nu$	光子能量
$\eta$	能量分辨率(%)
$i_a$	光电倍增管阳极电流
$i_k$	光电倍增管光阴极光电子流
$I$	入射(或出射)粒子强度,平均激发能
$I_0$	最低电离电位
$I_c(t)$	电流脉冲波形
$k$	玻耳兹曼常数,自由度
$L$	有效亮度
$\lambda$	衰变常数,平均自由程
$m$	原子质量,核素质量,平均值
$m_0$	电子静止质量
$M$	放大倍数,倍增系数,增益
MCA	多道脉冲分析器
$\mu$	线衰减系数,线性吸收系数
$\mu_m$	质量衰减系数,质量吸收系数
$\mu^\pm$	离子迁移率
$\mu_n$	电子迁移率
$\mu_p$	空穴迁移率
$n$	粒子数,计数率
$n_b$	本底计数率
$n_s$	样品计数率
$n_0$	净计数率
$n_c$	总符合计数率
$nr_c$	偶然符合计数率
$n_{cb}$	符合道本底计数率
$n_{co}$	真符合计数率
$n^\pm$	正、负离子密度
$N$	中子数,靶物质原子数,总电离,计数,单位时间内源放出粒子数

$N_A$	阿伏加德罗常数
$N_d$	施主杂质浓度
$N_a$	受主杂质浓度
$v$	相对标准偏差
$v^2$	相对方差
$p$	概率、动量
$P$	气体压强
$\rho$	密度,电阻率
$Q$	电荷,反应能优质因子
$R$	核半径,射程
$R_\beta$	$\beta$ 粒子射程
$R_L$	负载电阻
$R_i$	输入电阻
$R_\infty$	里德伯常数
$S$	比活度
$S_a$	光电倍增管阳极灵敏度
$S_k$	光电倍增管阴极灵敏度
$\sigma$	截面,空间电荷密度,均方根差,标准偏差,标准误差
$\sigma_\gamma$	$\gamma$ 总截面
$\sigma_{ph}$	光电效应截面
$\sigma_c$	康普顿散射效应截面
$\sigma_p$	电子对效应截面
$\sigma_T$	汤姆逊散射截面
TAC	时幅变换器
$t$	靶厚度
$t_b$	本底计数时间
$t_i$	样品计数时间
$t_d$	延迟时间
$t_D$	死时间
$t_R$	恢复时间
$t_r$	上升时间
$t_{pm}$	光电倍增管响应宽度,半宽度
$t_m$	质量厚度
$T$	温度,计数总时间,传射率
$T^\pm$	离子收集时间
$T_{\frac{1}{2}}$	半衰期
$\tau$	分辨时间,脉冲宽度,光电倍增管渡越时间,表面张力
$\tau_0$	发光衰减时间常数

$\tau_f$	发光衰减时间常数快成分
$\tau_s$	发光衰减时间常数慢成分
$u$	粒子速度
$V$	电压、电势、电位, 体积, 脉冲幅度
$V_s$	外加电压, 工作电压
$V_c$	收集极电位
$V_k$	阴极电位
$V_a$	起始工作电压
$V_p$	计数管坪开始电压, 全能峰脉冲幅度
$V_d$	阈电压
$V_{ns}$	噪声幅度
$\omega$	平均电离能
$W^\pm$	正、负离子漂移速度
$X$	照射量
$Y$	反应产额
$Z$	原子序数、质子数
$\Omega$	立体角
$\theta$	散射角
$\phi$	反冲角



# 目 录

第一章 放射性测量中的统计学 .....	(1)
第一节 核衰变数和计数的统计分布 .....	(1)
一、核衰变的统计分布 .....	(1)
二、计数的统计分布 .....	(4)
三、合成分布 .....	(5)
第二节 放射性测量的统计误差 .....	(6)
一、统计误差的产生和表示方法 .....	(6)
二、计数统计误差的计算 .....	(8)
三、平均效应的统计误差 .....	(12)
第三节 测量数据的检验 .....	(13)
一、两次测量计数值差异的检验 .....	(13)
二、一组测量数据的检验 .....	(14)
三、可疑测量值的舍弃 .....	(16)
* 第四节 脉冲幅度分辨率 .....	(18)
一、电离的统计涨落 .....	(18)
二、倍增过程统计学 .....	(20)
* 第五节 核辐射事件的时间分布 .....	(22)
一、核辐射事件的时间间隔分布 .....	(22)
二、包括多个脉冲的时间分布 .....	(23)
三、分辨时间和漏计数校正 .....	(23)
四、脉冲重迭数的计算 .....	(25)
习题 .....	(25)
参考文献 .....	(26)
第二章 射线与物质的相互作用 .....	(27)
第一节 带电粒子与靶物质原子的碰撞 .....	(28)
一、带电粒子在靶物质中的慢化 .....	(28)
二、带电粒子与靶物质原子的碰撞过程 .....	(29)
第二节 重带电粒子与物质的相互作用 .....	(30)
一、重带电粒子在物质中的能量损失 .....	(30)
二、重带电粒子在物质中的射程 .....	(39)
第三节 重离子与物质的相互作用 .....	(42)
一、电荷交换 .....	(42)
二、重离子的电子阻止本领 .....	(44)
三、重离子的核阻止本领 .....	(45)
四、重离子的射程 .....	(47)
第四节 $\beta$ 射线与物质的相互作用 .....	(48)
一、电子的能量损失 .....	(48)

二、电子的散射 .....	(50)
三、 $\beta$ 射线的射程和吸收 .....	(51)
四、正电子与物质的相互作用 .....	(54)
第五节 $\gamma$ 射线与物质的相互作用 .....	(64)
一、 $\gamma$ 射线与物质相互作用的一般特性 .....	(54)
二、光电效应 .....	(55)
三、康普顿效应 .....	(58)
四、电子对效应 .....	(62)
五、 $\gamma$ 射线的吸收 .....	(65)
习题 .....	(66)
参考文献 .....	(67)
第三章 气体探测器 .....	(69)
第一节 气体中电子和离子的运动规律 .....	(69)
一、气体的电离 .....	(69)
二、电子和离子的漂移与扩散 .....	(70)
三、负离子的形成和离子的复合 .....	(72)
四、离子的收集和电压电流曲线 .....	(73)
第二节 电离室 .....	(74)
一、概述 .....	(74)
二、脉冲电离室 .....	(75)
三、电流电离室和累计电离室 .....	(80)
第三节 正比计数器 .....	(82)
一、概述 .....	(82)
二、气体放大机制 .....	(83)
三、脉冲的波形 .....	(87)
第四节 G-M 计数器 .....	(88)
一、概述 .....	(88)
二、放电与猝熄的机制 .....	(90)
三、脉冲幅度和波形 .....	(92)
四、G-M 计数管的特性 .....	(93)
习题 .....	(98)
参考文献 .....	(98)
第四章 闪烁探测器 .....	(99)
第一节 概述 .....	(99)
第二节 闪烁体 .....	(100)
一、闪烁体种类 .....	(100)
二、闪烁体的物理特性 .....	(101)
三、几种主要闪烁体介绍 .....	(103)
四、闪烁体的选择 .....	(107)
五、光的收集与光导 .....	(107)
第三节 电子倍增器件 .....	(109)
一、光电倍增管 .....	(109)
二、通道型电子倍增器件 .....	(117)

第四节  闪烁计数器 .....	(123)
一、闪烁探测器的脉冲输出 .....	(123)
二、闪烁探测器应用举例——NaI(Tl)单晶 $\gamma$ 谱仪 .....	(125)
三、时间特性 .....	(128)
四、能量分辨率 .....	(131)
习题 .....	(133)
参考文献 .....	(133)
第五章  半导体探测器 .....	(135)
第一节  半导体探测器的基本原理 .....	(135)
第二节  PN结的性质 .....	(136)
一、结区的电场分布 .....	(137)
二、结区的宽度 .....	(137)
三、PN结的反向偏压 .....	(138)
四、PN结的电容 .....	(138)
五、PN结的漏电流 .....	(139)
第三节  金硅面垒半导体探测器 .....	(140)
一、金硅面垒谱仪装置 .....	(140)
二、能量分辨率 .....	(140)
三、电荷的收集和时间特性 .....	(143)
四、辐射损伤 .....	(144)
五、全耗尽探测器 .....	(145)
第四节  高纯锗探测器 .....	(146)
一、HPGe探测器的结构 .....	(146)
二、同轴型HPGe探测器的电场和电容 .....	(148)
三、HPGe探测器的主要性能 .....	(149)
第五节  其它半导体探测器 .....	(152)
一、锂漂移硅探测器 .....	(152)
二、化合物半导体探测器 .....	(153)
三、位置灵敏探测器 .....	(155)
习题 .....	(158)
参考文献 .....	(158)
脉冲探测器性能小结 .....	(159)
第六章  其它探测器 .....	(165)
第一节  原子核乳胶 .....	(165)
一、原子核乳胶的作用原理 .....	(165)
二、原子核乳胶的特性 .....	(167)
三、原子核乳胶的应用 .....	(168)
第二节  固体径迹探测器 .....	(169)
一、固体径迹探测器的工作原理 .....	(169)
二、固体径迹探测器的特性 .....	(170)
三、固体径迹探测器的优缺点 .....	(171)
四、固体径迹探测器的应用 .....	(171)
第三节  气泡室 .....	(172)

一、气泡室径迹形成的初步理论 .....	(172)
二、气泡室的构造 .....	(173)
三、气泡室的特性和径迹测量 .....	(173)
四、气泡室的应用 .....	(174)
第四节 火花放电室 .....	(174)
一、火花放电室的工作原理 .....	(174)
二、火花放电室的结构 .....	(175)
三、火花放电室的特性及应用 .....	(176)
四、流光室 .....	(177)
第五节 多丝正比室 .....	(177)
一、多丝正比室的工作原理 .....	(177)
二、多丝正比室的结构 .....	(178)
三、多丝正比室的主要性能和应用 .....	(179)
四、漂移室 .....	(179)
第六节 切伦科夫计数器 .....	(181)
一、切伦科夫辐射的原理 .....	(181)
二、切伦科夫辐射的产生和收集 .....	(184)
三、切伦科夫计数器的应用 .....	(185)
第七节 热释光探测器 .....	(186)
一、热释光探测器基本原理 .....	(186)
二、对热释光磷光体的要求 .....	(187)
三、加热发光测量装置的主要部分 .....	(188)
四、热释光探测器的应用 .....	(188)
参考文献 .....	(189)
第七章 核物理实验中的符合法 .....	(190)
第一节 符合法的基本原理 .....	(190)
一、符合法的基本概念 .....	(190)
二、符合测量的基本关系式 .....	(192)
三、快慢符合原理 .....	(194)
第二节 符合装置的主要参量和测量数据的分析 .....	(195)
一、符合装置的主要参量 .....	(195)
二、延迟符合测量数据的分析 .....	(198)
第三节 符合测量装置 .....	(201)
一、定时信号的拾取 .....	(201)
二、符合能谱仪 .....	(205)
三、时间分析谱仪 .....	(207)
习题 .....	(208)
参考文献 .....	(209)
第八章 $\alpha$ 、 $\beta$ 源活度测量 .....	(210)
第一节 概述 .....	(210)
第二节 $\alpha$ 放射源活度的测量 .....	(210)
一、小立体角法测薄 $\alpha$ 源活度 .....	(210)
二、厚样品的放射性比活度测量 .....	(212)



第三节 $\beta$ 放射源活度的测量 .....	(213)
一、小立体角法测 $\beta$ 放射源活度 .....	(213)
二、 $4\pi$ 计数法 .....	(217)
三、符合法测源活度 .....	(218)
第四节 液体闪烁计数器测源活度 .....	(225)
参考文献 .....	(233)
第九章 带电粒子的能量及能谱测量 .....	(234)
第一节 射程测量方法 .....	(234)
第二节 能量灵敏探测器方法 .....	(236)
一、电离室 .....	(237)
二、正比计数器 .....	(237)
三、闪烁计数器 .....	(238)
四、半导体探测器 .....	(239)
第三节 磁分析法 .....	(241)
一、引言 .....	(241)
二、基本工作原理 .....	(242)
三、描述谱仪性能的几个量 .....	(243)
四、半圆聚焦谱仪 .....	(245)
五、谱仪性能的比较 .....	(247)
六、磁谱仪的应用 .....	(248)
第四节 重离子磁谱仪 .....	(249)
一、 $\alpha$ 磁谱仪 .....	(250)
二、Q3D磁谱仪 .....	(251)
三、若干有关的实验技术 .....	(254)
习题 .....	(256)
参考文献 .....	(256)
第十章 $\gamma$ 射线强度和能量的测量 .....	(257)
第一节 $\gamma$ 射线测量的一般考虑 .....	(257)
第二节 $\gamma$ 射线能谱分析与能量刻度 .....	(259)
一、 $\gamma$ 射线的谱形及影响因素 .....	(259)
二、能量刻度 .....	(264)
第三节 $\gamma$ 射线强度测量与效率刻度 .....	(265)
一、全能峰法确定 $\gamma$ 射线强度 .....	(265)
二、NaI(Tl)闪烁谱仪的效率刻度 .....	(266)
三、HPGe[或Ge(Li)]谱仪的效率刻度 .....	(270)
第四节 低能 $\gamma$ 与X射线的测量 .....	(273)
一、NaI(Tl)薄片闪烁计数器 .....	(273)
二、气体正比计数器 .....	(274)
三、Si(Li)半导体探测器 .....	(275)
第五节 符合反符合谱仪 .....	(278)
一、全吸收反符合谱仪 .....	(278)
二、康谱顿谱仪 .....	(279)
三、电子对谱仪 .....	(281)