

高等学校教材

原子核物理实验方法

第二版修订本

上册

复旦大大学
清华京大大学
北 京 大 学
合 编

原子能出版社

高等学校教材

原子核物理实验方法

上册

复旦大学
清华大学
北京大学

合编

原子能出版社

内 容 简 介

本书是《原子核物理实验方法》上册，分为十章，内容包括：放射性测量中的统计性、射线和物质的相互作用、气体探测器、闪烁探测器、半导体探测器、其它探测器、核物理实验中的符合法、 α 、 β 源活度测量、带电粒子的能量及能谱测量、 γ 射线强度和能量测量。

本书可作为高等院校原子核物理等专业的教科书，也可供从事核物理研究、放射性测量、放射性核素应用、辐射防护等方面的工作人员参考。

高 等 学 校 教 材

原子核物理实验方法 上册

复旦大学 清华大学 北京大学 合编

(第二版修订本)

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16·印张26 1/4·字数611千字

1985年4月第二版·1985年4月第一次印刷

印数1—5000·统一书号：15175·594

定价：3.75元

修 订 版 序 言

本书（上、下两册）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和取材要适当更新的原则，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。上册各章的修订者是：第一、十章吴学超，第二章赵国庆，第三、六章沈能学，第四、八章陆福全，第九章吴名枋。这次修订由吴治华任主编，齐卉荃任主审，陈进贵担任责任编辑，傅跃宗同志增写了第八章第二节，在此一并致谢。

编者

1984年4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、 γ 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、计量科学研究所的王征华、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(上册)部分通用符号如下

符 号	名 称
α	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, 蜕变率(贝可或居里) 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_c	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
$d_{\frac{1}{2}}$	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, σ^2
ϵ	介电常数
ϵ	探测效率
$\epsilon_{1,2}$	本征效率

$\bar{\varepsilon}_p$	峰探测效率
ε_s	源探测效率
ε_{sp}	源峰探测效率
ε_{isp}	峰本征探测效率
ε_{pr}	相对峰探测效率
ε_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_β	β 射线能量
$E_{\beta, \max}$	β 射线最大能量
E_c	光电子能量
E_g	禁带宽度
E_n	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
$h\nu$	光子能量
η	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	波耳兹曼常数
	自由度
L	有效亮度
λ	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
μ	线衰减系数, 线性吸收系数
μ_m	质量衰减系数, 质量吸收系数
μ^+	离子迁移率
μ_e	电子迁移率
μ_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
$n_{c,c}$	偶然符合计数率
$n_{c,b}$	符合道本底计数率
$n_{c,0}$	真符合计数率
n^+	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、几率、动量
P	气体压强
ρ	密度
	电阻率
Q	电荷
	反应能
R	核半径
	射程
R_β	β 粒子射程
R_L	负载电阻
R_i	输入电阻
R_∞	里德伯常数
S_s	光电倍增管阳极灵敏度

S_k	光电倍增管阴极灵敏度
σ	截面
	空间电荷密度
	均方根差, 标准偏差, 标准误差
σ_γ	γ 总截面
σ_{ph}	光电效应截面
σ_z	康普顿散射效应截面
σ_p	电子对效应截面
σ_T	汤姆逊散射截面
t	靶厚度
t_b	本底计数时间
t_s	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
$t_{0.5}$	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^+	离子收集时间
$T_{1/2}$	半衰期
τ	分辨时间, 脉冲宽度
	光电倍增管渡越时间
	表面张力
τ_0	发光衰减时间常数
τ_f	发光衰减时间常数快成分
τ_s	发光衰减时间常数慢成分
v	粒子速度
V	电压、电势、电位
	体积
	脉冲幅度
V_+	外加电压, 工作电压
V_c	收集极电位
V_k	阴极电位
V_0	起始工作电压
V_p	计数管坪开始电压, 全能峰脉冲幅度

\bar{V}_d	阈电压
$V_{n.s}$	噪声幅度
ω	平均电离能
W^{\pm}	正、负离子漂移速度
X	照射量
Z	原子序数、质子数
Ω	立体角
θ	散射角
ϕ	反冲角

目 录

修订版序言

序言

符号表

第一章 放射性测量中的统计学

第一节 核衰变数和计数的统计分布	1
一、二项式分布	1
二、泊松分布	2
三、高斯分布	3
四、计数的统计分布	5
五、合成分布	6
第二节 放射性测量的统计误差	9
一、统计误差的概念和表示方法	9
二、函数统计误差的计算	11
三、测量条件的选择	14
四、平均效应的统计误差	15
第三节 测量数据的检验	16
一、两次测量计数值差异的检验	17
二、分布类型的检验	17
三、 χ^2 检验法	18
四、可疑测量值的舍弃	21
第四节 脉冲幅度分辨率	23
一、电离的统计涨落	24
二、倍增过程统计学	28
第五节 核辐射事件的时间分布	29
一、核辐射脉冲的时间间隔分布	30
二、包括多个脉冲的时间分布	31
三、分辨时间和漏计数校正	32
四、脉冲重迭数的计算	34
习题	35
参考文献	36

第二章 射线与物质的相互作用

第一节 射线在物质中的穿透	37
一、带电粒子在物质中的慢化	38
二、带电粒子与靶物质原子的碰撞过程	39

第二节 重带电粒子与物质的相互作用	40
一、重带电粒子的能量损失	41
二、重离子的能量损失	48
三、带电粒子在物质中的射程	54
第三节 β 射线与物质的相互作用	60
一、电子的能量损失	60
二、电子的散射	63
三、 β 射线的射程和吸收	64
四、正电子与物质的相互作用	67
第四节 γ 射线与物质的相互作用	67
一、 γ 射线与物质相互作用的一般特性	67
二、光电效应	69
三、康普顿效应	72
四、电子对效应	77
五、 γ 射线的吸收	79
习题	82
参考文献	83

第三章 气体探测器

第一节 气体中电子和离子的运动规律	84
一、气体的电离	84
二、电子和离子的漂移和扩散	86
三、负离子的形成和离子的复合	89
第二节 电离室	91
一、概述	91
二、脉冲电离室	92
三、电流电离室和累计电离室	104
第三节 正比计数器	108
一、概述	108
二、气体放大机制	109
三、脉冲的波形	114
四、影响气体放大系数的因素和能量分辨率	116
五、正比计数器的坪特性	119
六、流气式正比计数器	119
第四节 G-M 计数器	120
一、概述	120
二、放电与猝熄的机制	121
三、脉冲幅度和波形	124
四、G-M 计数管的特性	125

五、G-M 计数管的类型和应用	131
气体探测器小结	132
习题	133
参考文献	135

第四章 闪烁探测器

第一节 概述	136
第二节 闪烁体	137
一、闪烁体种类和发光机制	137
二、闪烁体的物理特性	141
三、几种主要闪烁体介绍	143
四、闪烁体的选择	149
五、光的收集与光导	149
第三节 光电倍增管	151
一、基本原理和构造	151
二、分压器	153
三、主要指标	155
第四节 闪烁计数器	162
一、闪烁探测器的脉冲输出	162
二、闪烁探测器应用举例——NaI (Tl) 单晶 γ 谱仪	165
三、时间特性	169
四、能量分辨率	173
习题	175
参考文献	176

第五章 半导体探测器

第一节 半导体探测器的基本原理	177
第二节 PN 结的性质	179
一、结区的电场分布	179
二、结区的宽度	180
三、PN 结电容	181
四、PN 结的反向电流	183
第三节 金硅面垒半导体探测器	185
一、金硅面垒谱仪装置	185
二、能量分辨率	186
三、电荷收集和时间特性	190
四、辐射损伤	192
第四节 锂漂移探测器的工作原理	193
第五节 锂漂移探测器的主要性能	195

一、能量分辨率	196
二、探测效率	197
三、峰康比	199
四、电荷收集和时间特性	200
五、辐射损伤	201
第六节 新型半导体探测器介绍	201
一、高纯锗探测器	201
二、化合物半导体探测器	203
三、位置灵敏探测器	204
脉冲探测器性能小结	206
习题	212
参考文献	212

第六章 其它探测器

第一节 原子核乳胶	214
一、原子核乳胶的作用原理	214
二、原子核乳胶的特性	216
三、原子核乳胶的应用	217
第二节 固体径迹探测器	218
一、固体径迹探测器的工作原理	218
二、固体径迹探测器的特性	219
三、固体径迹探测器的优缺点	220
四、固体径迹探测器的应用	220
第三节 威尔逊云室和气泡室	221
一、威尔逊云室的工作原理	221
二、威尔逊云室的构造	223
三、扩散云室	224
四、气泡室	225
第四节 火花放电室	227
一、火花放电室的工作原理	227
二、火花放电室的结构	228
三、火花放电室的特性及应用	229
四、流光室	230
第五节 多丝正比室	231
一、多丝正比室的工作原理	231
二、多丝正比室的结构	232
三、多丝正比室的主要性能和应用	233
四、漂移室	233
第六节 切伦科夫计数器	234

一、切伦科夫辐射的原理	234
二、切伦科夫辐射的产生和收集	237
三、切伦科夫计数器的应用	239
第七节 热释光探测器	241
一、热释光探测器基本原理	241
二、对热释光磷光体的要求	242
三、加热发光测量装置的主要部分	242
四、热释光探测器的应用	243
参考文献	243

第七章 核物理实验中的符合法

第一节 符合法的基本原理	245
一、符合法概述	245
二、符合测量的基本参量和关系式	246
三、符合装置	252
第二节 延迟符合	253
一、延迟符合原理	254
二、时间分析谱仪	254
三、时间分辨本领	255
四、核激发态寿命测量数据分析	261
第三节 符合法在核物理中的应用	265
一、角关联函数测量	265
二、研究核衰变图	266
三、正电子湮没寿命测量	267
习题	268
参考文献	269

第八章 α , β 源活度测量

第一节 概述	270
一、放射性活度的单位	270
二、相对测量和绝对测量	271
第二节 α 放射源活度的测量	271
一、薄 α 源活度的绝对测量——小立体角法	271
二、厚样品的相对测量	274
三、空气中放射性的测量	275
第三节 β 放射源活度的测量	280
一、小立体角法测 β 放射源活度	280
二、 4π 计数法	287
三、符合法测源活度	289

第四节 低能 β 源活度的测量	297
一、内充气法	297
二、液体闪烁计数法	298
参考文献	305

第九章 带电粒子的能量及能谱测量

第一节 射程测量方法	306
第二节 能量灵敏探测器	309
一、电离室	309
二、正比计数器	309
三、闪烁计数器	310
四、半导体探测器	312
第三节 β 磁谱仪	314
一、引言	314
二、基本工作原理	315
三、描述谱仪性能的几个量	316
四、半圆聚焦谱仪	318
五、谱仪性能的比较	321
六、磁谱仪的应用	321
第四节 重离子磁谱仪	323
一、 α 磁谱仪	324
二、扇形均匀磁场重离子谱仪	325
三、均匀场双聚焦重离子谱仪	328
四、Q3D重离子谱仪	330
五、若干有关的实验技术	332
习题	333
参考文献	334

第十章 γ 射线强度和能量的测量

第一节 γ 射线能谱的分析	335
一、累计效应等作用过程的影响	335
二、一些干扰辐射的影响	338
第二节 γ 射线强度和能量测量的一般考虑	340
一、NaI(Tl) 和 Ge(Li) 谱仪的比较和选择	340
二、测量条件的选择	344
三、能量刻度和能量确定	345
第三节 低能 γ 和 X 射线的测量	347
一、NaI(Tl) 薄片闪烁计数器	347
二、气体正比计数器	349