

高等学校试用教材

原子核物理实验方法

上册

复旦大学
清华大学 合编
北京大学

原子能出版社

257

53.23057
480

高等学校试用教材

原子核物理实验方法

上册

复旦大学
清华大学 合编
北京大学



原子能出版社

1981·北京

1109449

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。

DT87/02

高等学校试用教材

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787×1092¹/₁₆·印张24·字数568千字

1981年4月第一版·1981年4月第一次印刷

印数001—4000·统一书号：15175·306

定价：2.70元

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)部份通用符号如下

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_d	结电容
C_f	反馈电容
C_i	输入电容
C_s	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
ϵ_{in}	本征效率
ϵ_p	峰探测效率
ϵ_s	源探测效率
$\epsilon_{s,p}$	源峰探测效率
ϵ_{inp}	峰本征探测效率
ϵ_{pr}	相对峰探测效率
ϵ_e	符合探测效率

1109449

符 号	名 称
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_{ns}	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^\pm	离子迁移率
μ_n	电子迁移率
μ_p	空穴迁移率
n	粒子数
	计数率

符 号

名 称

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
$n_{r.c}$	偶然符合计数率
$n_{c.b}$	符合道本底计数率
$n_{c.o}$	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、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_a	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_e	康普顿散射效应截面
σ_e	电子对效应截面
σ_T	汤姆逊散射截面
t	靶厚度

符 号	名 称
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_{P_m}	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
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_0	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_n	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

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	13
四、平均效应的统计误差	14
第三节 测量数据的检验	16
一、两次测量计算值差异的检验	16
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	23
二、倍增过程统计学	27
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	29
二、包括多个脉冲的时间分布	30
三、分辨时间和漏计数校正	32
四、脉冲重迭数的计算	33
习题	34
参考文献	35

第二章 射线与物质的相互作用

第一节 带电粒子与物质相互作用的一般特征	36
一、与核外电子的非弹性碰撞	36
二、与原子核的非弹性碰撞	37

三、与原子核的弹性碰撞	37
四、与核外电子的弹性碰撞	37
第二节 重带电粒子与物质的相互作用	38
一、重带电粒子的能量损失	38
二、重离子的能量损失	44
三、带电粒子在物质中的射程	48
第三节 β 射线与物质的相互作用	52
一、电子的能量损失	52
二、电子的散射	55
三、 β 射线的射程和吸收	55
四、正电子与物质的相互作用	58
第四节 γ 射线与物质的相互作用	58
一、 γ 射线与物质相互作用的一般特性	58
二、光电效应	60
三、康普顿效应	63
四、电子对效应	69
五、 γ 射线的吸收	71
习题	74
参考文献	74

第三章 气体探测器

第一节 气体中电子和离子的运动规律	75
一、气体的电离	75
二、电子和离子的漂移和扩散	77
三、负离子的形成和离子的复合	80
四、离子的收集和电压电流曲线	82
第二节 电离室	83
一、概述	83
二、脉冲电离室	84
三、电流电离室和累计电离室	94
第三节 正比计数器	100
一、概述	100
二、气体放大机制	101
三、脉冲的波形	106
四、影响气体放大系数的因素和能量分辨率	108
第四节 G-M计数器	111
一、概述	111
二、放电与猝熄的机制	113
三、脉冲幅度和波形	116

四、G-M计数管的特性	117
五、G-M计数管的类型和应用	123
习题	124
参考文献	125

第四章 闪烁探测器

第一节 概述	126
第二节 闪烁体	127
一、闪烁体种类和发光机制	127
二、闪烁体的物理特性	129
三、几种主要闪烁体介绍	132
四、闪烁体的选择	135
五、光的收集与光导	137
第三节 光电倍增管	138
一、基本原理和构造	138
二、分压器	141
三、主要指标	142
第四节 闪烁计数器	148
一、闪烁探测器的脉冲输出	148
二、闪烁探测器应用举例——NaI(Tl)单晶 γ 谱仪	150
三、能量分辨率	156
四、时间特性	157
习题	159
参考文献	159

第五章 半导体探测器

第一节 半导体探测器的基本原理	160
第二节 PN结的性质	162
一、结区的电场分布	162
二、结区的宽度	163
三、PN结电容	164
四、PN结的反向电流	166
第三节 金硅面垒半导体探测器	167
一、金硅面垒谱仪装置	167
二、能量分辨率	170
三、电荷收集和时间特性	173
四、辐射损伤	175
第四节 锂漂移探测器的工作原理	176
第五节 锂漂移探测器的主要性能及使用技术	179

IV

一、能量分辨率	179
二、探测效率	181
三、峰康比	183
四、电荷收集和时间特性	183
五、辐射损伤	185
六、Ge(Li)探测器的使用技术	185
第六节 新型半导体探测器介绍	186
一、高纯锗探测器	186
二、化合物半导体探测器	187
三、位置灵敏探测器	189
习题	190
参考文献	191

第六章 其它探测器

第一节 原子核乳胶	192
一、原子核乳胶的作用原理	192
二、原子核乳胶的特性	194
三、原子核乳胶的应用	195
第二节 固体径迹探测器	196
一、固体径迹探测器的工作原理	196
二、固体径迹探测器的特性	197
三、固体径迹探测器的优缺点	198
四、固体径迹探测器的应用	198
第三节 威尔逊云室和气泡室	199
一、威尔逊云室的工作原理	199
二、威尔逊云室的构造	201
三、扩散云室	202
四、气泡室	203
第四节 火花放电室	205
一、火花放电室的工作原理	205
二、火花放电室的结构	206
三、火花放电室的特性及应用	207
第五节 多丝正比室	208
一、多丝正比室的工作原理	208
二、多丝正比室的结构	209
三、多丝正比室的主要性能和应用	210
四、漂移室	211
第六节 切伦科夫计数器	211
一、切伦科夫辐射的原理	211

二、切伦科夫辐射的产生和收集	214
三、切伦科夫计数器的应用	216
第七节 热释光探测器	217
一、热释光探测器基本原理	218
二、对热释光磷光体的要求	218
三、加热发光测量装置的主要部分	219
四、热释光探测器的应用	220
参考文献	220

第七章 核物理实验中的符合法

第一节 符合法的基本原理	221
一、符合法的基本概念	221
二、符合测量的基本关系式	223
三、快慢符合原理	225
第二节 符合装置的主要参量和测量数据的分析	227
一、符合装置的主要参量	227
二、延迟符合测量数据的分析	233
第三节 符合测量装置	237
一、定时信号的拾取	237
二、符合能谱仪	242
三、时间分析谱仪	244
习题	246
参考文献	246

第八章 α , β 源活度测量

第一节 概述	247
一、放射性活度的单位	247
二、相对测量和绝对测量	248
第二节 α 放射源活度的测量	248
一、薄 α 源活度的绝对测量——小立体角法	248
二、厚样品的相对测量	250
第三节 β 放射源活度的测量	251
一、小立体角法测 β 放射源活度	252
二、 4π 计数法	257
三、符合法测源活度	259
第四节 低能 β 源活度的测量	264
一、内充气法	264
二、液体闪烁计数法	265
参考文献	271

第九章 带电粒子的能量及能谱测量

第一节 射程测量方法	272
第二节 能量灵敏探测器	275
一、电离室	275
二、正比计数器	275
三、闪烁计数器	276
四、半导体探测器	278
第三节 β 磁谱仪	280
一、引言	280
二、基本工作原理	281
三、描述谱仪性能的几个量	282
四、半圆聚焦谱仪	284
五、双聚焦谱仪	286
六、环状谱仪	291
七、谱仪性能的比较	293
八、磁谱仪的应用	293
第四节 重离子磁谱仪	295
一、 α 磁谱仪	296
二、扇形均匀磁场重离子谱仪	297
三、均匀场双聚焦重离子谱仪	300
四、Q3D 重离子谱仪	302
五、若干有关的实验技术	304
习题	305
参考文献	306

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	307
一、累计效应等作用过程的影响	307
二、一些干扰辐射的影响	310
第二节 γ 射线强度和能量测量的一般考虑	312
一、NaI(Tl)和 Ge(Li)谱仪的比较和选择	312
二、测量条件的选择	315
三、能量刻度和能量确定	317
第三节 低能 γ 和 X 射线的测量	319
一、NaI(Tl)薄片闪烁计数器	319
二、气体正比计数器	320
三、Si(Li)半导体探测器	323
第四节 特殊谱仪装置	325

一、全吸收反符合谱仪·····	325
二、康普顿谱仪·····	327
三、电子对谱仪·····	328
四、符合能谱测量·····	329
第五节 NaI(Tl)闪烁谱仪的效率刻度·····	331
一、全能峰法确定 γ 射线强度·····	331
二、由本征效率和峰总比来确定源峰探测效率·····	332
三、源峰探测效率的直接测定·····	335
四、影响峰探测效率的特殊效应·····	336
第六节 Ge(Li)谱仪的效率刻度·····	337
一、全能峰效率和双逃逸峰效率·····	337
二、探测效率的刻度方法·····	339
三、峰探测效率的半经验公式·····	340
第七节 峰面积的确定·····	341
一、计数相加法·····	341
二、函数拟合法·····	345
第八节 复杂 γ 谱的解析·····	347
一、剥谱法·····	347
二、逆矩阵法·····	348
三、最小二乘法·····	350
四、曲线拟合法·····	353
第九节 利用计算机处理 γ 谱数据·····	356
一、数据的光滑·····	356
二、零截和增益变化的校正·····	357
三、找峰·····	360
第十节 γ 谱的自动分析·····	362
一、NaI(Tl)标准响应谱丛的自动产生·····	362
二、零截和增益的自动调整·····	365
三、漏失或可疑成分的自动寻找和确定·····	366
习题·····	367
参考文献·····	367

第一章 放射性测量中的统计学

核事件的发生数目，例如在一定时间内放射性原子核的衰变数、带电粒子在介质中损耗能量所产生的离子对数，都具有随机性，即统计涨落。在探测器中所得到的关于入射粒子的时间信息也具有统计涨落。了解核事件随机性方面的知识，对于合理地安排放射性测量实验、正确地处理测量数据和分析探测器的某些性能指标，如分辨率和死时间等，是很有必要的。本章着重讨论在放射性测量中常遇到的一些统计涨落问题。

第一节 核衰变数和计数的统计分布

在任何一种放射性强度的测量中，即使所有的测量条件都是稳定的，如源的放射性活度、源的位置、源与探测器间的距离、探测器的工作电压等都保持不变，若多次记录探测器在相同时间 t 中所测到的粒子数目，我们会发现，每次测到的计数并不完全相同而是围绕某个平均数值上下涨落。这种现象称为放射性计数的统计涨落。这种涨落绝不是测量条件上有什么变化引起的，而是微观粒子运动过程中的一种规律性现象，是放射性原子核衰变的随机性引起的。它的规律性即它的统计分布可根据数理统计的理论导出。下面，我们从二项式分布说起^[1-4]。

一、二项式分布

数理统计中有一个所谓伯努里试验问题：假定有许多相同的客体，其数目为 N_0 ，它们之中每一个都可以随机地归于A类或B类。设归于A类的概率为 p ，归于B类的概率为 q ， p 和 q 的关系为 $p + q = 1$ 。考察试验后归于A类的客体数目为 ξ ，可以证明， ξ 是一个随机变数，它服从二项式分布。 ξ 取值为 n 的概率即从 N_0 个客体中观察到 n 个客体处于A类的概率 $P(n)$ 为

$$P(n) = C_{N_0}^n p^n q^{N_0 - n} = \frac{N_0!}{(N_0 - n)! n!} p^n (1 - p)^{N_0 - n} \quad (1.1)$$

式中， $p^n q^{N_0 - n}$ 表示从 N_0 个客体中对特定的 n 个客体观察到归于A类的概率， $C_{N_0}^n$ 表示从 N_0 个中取 n 个的组合数。

对任何一种分布，有两个最重要的数字特征。一个是数学期望 $E(\xi)$ (简称期望值，在物理中有时也称平均值，用 m 表示)，它表示随机变数取值的平均位置；另一个是方差 $D(\xi)$ ，又常用 σ^2 表示，它表示随机变数取值相对于期望值的离散程度。方差的开方根值称均方根差，用 σ 表示。对二项式分布来说，这两个特征量为 (证明见本节后的附录)

$$m = E(\xi) = \sum_{n=0}^{N_0} n P(n) = N_0 p \quad (1.2)$$

$$\sigma = D(\xi) = \left[\sum_{n=0}^{N_0} (n-m)^2 P(n) \right]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{N_0 p q} = \sqrt{m(1-p)} \quad (1.3)$$

放射性原子核的衰变恰可看成是这一种伯努里试验问题。设在 $t = 0$ 时，放射性核总数为 N_0 ，在 t 时间内将有一部分核发生衰变。任何一个核在 t 时间内衰变的概率为 $p = (1 - e^{-\lambda t})$ ，不衰变的概率为 $q = 1 - p = e^{-\lambda t}$ ， λ 是该核素的放射性衰变常数。代入公式(1.1)，得到在 t 时间内有 n 个核发生衰变的概率 $P(n)$ 为

$$P(n) = \frac{N_0!}{(N_0 - n)! n!} (1 - e^{-\lambda t})^n (e^{-\lambda t})^{N_0 - n} \quad (1.4)$$

相应的期望值和均方根差为

$$m = N_0 p = N_0 (1 - e^{-\lambda t})$$

$$\sigma = \sqrt{m(1-p)} = (m e^{-\lambda t})^{\frac{1}{2}} \quad (1.5)$$

假如 $\lambda t \ll 1$ ，即时间 t 远小于半衰期，可不考虑源活度的变化时，上式可简化为

$$\sigma = \sqrt{m} \quad (1.6)$$

在 m 数值较大的情况下，由于 n 值出现在 m 值附近的概率较大，即涨落 $|m - n| \ll m$ ，所以上式还可简化为

$$\sigma = \sqrt{(m-n) + n} \approx \sqrt{n} \quad (1.7)$$

即 σ 可用任意一次观测到的衰变核数代替其平均值来进行计算。

实际使用起来，二项式分布是很不便于计算的。由于对放射性核数来说， N_0 总是个很大的数目，在这种情况下，二项式分布可简化为泊松分布或高斯分布。

二、泊松分布

在二项式分布中，当 N_0 很大而 p 又很小时，这时作为二项式分布的一种极限情况就是泊松分布。因为当满足 N_0 很大而 p 又很小的条件时， $m = N_0 p \ll N_0$ 。对于在 m 值附近的 n 值，可得到

$$\frac{N_0!}{(N_0 - n)!} = N_0(N_0 - 1)(N_0 - 2) \cdots (N_0 - n + 1) \approx N_0^n$$

$$(1-p)^{N_0 - n} \approx (e^{-p})^{N_0 - n} \approx e^{-p N_0} \quad (1.8)$$

代入(1.1)式，并注意到 $m = N_0 p$ ，就得到

$$P(n) \approx \frac{N_0^n}{n!} p^n e^{-p N_0}$$

$$= \frac{m^n}{n!} e^{-m} \quad (1.9)$$