

高等学校教学参考书

辐射探测与测量

〔美〕格伦 F. 诺尔 著

原子能出版社

高等学校教学参考书

辐射探测与测量

〔美〕 格伦 F. 诺尔 著

李 旭 张瑞增 徐海珊 陈进贵 译

原子能出版社

内 容 简 介

本书是作者在为密执安大学高年级学生及研究生讲授核仪器课程的基础上写成的。首先介绍辐射源、射线相互作用、统计误差等基础知识；重点介绍了最常用的核辐射探测器的工作原理、特性、结构及应用，这些探测器包括气体探测器、闪烁探测器、半导体探测器、中子探测器以及一些新型探测器；还介绍了有关的核电子学技术；最后讨论了使用核仪器常遇到的问题，如本底与屏蔽等；每章末尾列有参考文献和习题。本书内容全面，取材新，阐述精辟。

本书可作为高等院校核物理及有关放射性测量专业的学生和研究生参考书，也可供从事有关专业的科研、生产、应用的工程技术人员阅读。

RADIATION DETECTION AND MEASUREMENT

GLENN F. KNOLL

JOHN WILEY & SONS, 1979

高等学校教学参考书

辐射探测与测量

〔美〕格伦 F. 诺尔 著

李 旭 张瑞增 徐海珊 陈进贵 译

原子能出版社出版

（北京2108信箱）

北京昊海印刷厂排版印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092¹/₁₆·印张33.625·字数826千字

1988年5月北京第一版·1988年5月北京第一次印刷

印数 1—1300

统一书号：15175·892 定价5.50元

ISBN 7-5022-0038-X/TL·16(课)

前 言

本书有两个用途。首先，它可以用作核仪器和辐射测量基础课程的教材，供大学高年级学生和研究生学习。这两门课程是核工程专业和辐射物理专业的主要课程。保健物理、放射生物学和核化学专业的学生往往也要学习这类课程。但是，本书包括的材料远远多于通常一学期所能讲授的内容。我是有意这样编排的，为的是使本书对学完这门课程的学生仍然有用。也就是说，作为辐射探测技术手册，供正在从事辐射测量工作的科学技术人员查阅；这也就是本书的第二个用途。因此，采用此书作教材的教师需要选择最切合其课程要求的章节。我认为，由于本书的内容广泛和使用期限较长，增加这点麻烦是值得的。几乎各章末尾都有供学生练习的习题。

阅读本书的读者须具备放射性、辐射特性和基本电子学线路方面的基础知识。在前两章中回顾了这方面的一些问题，不过仅限于实验室辐射源和主要相互作用机制等内容。读者若需要本书范围以外的资料可参考列于每章末尾的科学文献。这些参考文献大多数是近期发表的。在此我预先向同行们表示歉意，他们的早期工作虽然重要也可能未予引用。

本书各章包括了能量在大约 20MeV 以下的电离辐射的主要探测技术。这个能区的辐射在裂变和聚变能系以及放射性同位素在医学、环境保护和工业中的应用等方面都很重要。我主要关注的是大多数使用者最常用的基本探测器，舍去了许多研究实验室专用的和比较复杂的探测系统，也未涉及主要用于高能粒子物理研究的气泡室、火花室和量能器等仪器。电子学部件和探测器信号的脉冲处理部分只限于功能描述，而不进行详细的线路分析。这样处理适合探测器使用人员的需要，而不适应线路设计人员的要求。

本书中虽然也有典型应用示例，但主要还是着重于描述各种探测器系统的工作原理和基本特性。若读者需要更详细地了解这些仪器的具体应用，可以参阅其他出版物。例如，1978 年美国国家辐射防护和测量委员会出版的 NCRP 58 号报告《放射性测量方法手册》就是一本较好的参考资料。

本书中采用了国际单位制。经验丰富的工作者所熟悉的许多惯用辐射单位势必被取代。因此，对放射性活度、 γ 射线照射量、吸收剂量和剂量当量的国际单位制单位不熟悉的工作人员应该翻阅一下第一、二两章所介绍的定义。

我从 1962 年起在密执安大学主讲核仪器课程。本书的部分手稿就是出自这时期的教学笔记。本书的初稿已使用了几个学期，因而这本书吸取了很多学生的意见，使许多部分的论述更为清晰。我特别感谢历届学生 George Baldwin, Hadi Bozorgmanesh, John Engdahl, Dan Grady, Bill Halsey, Bill Martin, Warren Snapp 和 Jay Williams，他们以各种形式做出了有益的贡献。我也感谢审阅过部分手稿并提出许多有益评论和建议的本校同事们：David Bach, Chihiro Kikuchi, John Lee, Craig Robertson, Dieter Vincent 以及美国国家标准局的 Lou Costrell 和 Ron Fleming。Pam Hale 以极大的耐心

和熟练的技巧完成了手稿打字的艰巨任务。

我特别感谢 Jim Duderstadt, 他首先鼓励我把写书的美好愿望变为现实行动。我的妻子 Gladys 和儿子 Tom, John 和 Peter 几年来给予的坚定支持、谅解和帮助对完成这部著作来说都是必不可少的, 为此我要永远感谢他们。

格伦 F. 诺尔

中译本前言

本书作者格伦 F. 诺尔教授自 1962 年起在美国密执安大学执教，自 1977 年起担任美国电气和电子工程师协会 (IEEE) 核医学技术委员会主席。

本书是作者在多年讲授核物理实验方法课程的讲义的基础上，充实了大量资料编写成的。作者在繁多的核辐射探测技术中，着重系统介绍应用广泛的知识。书中精练地阐述了核辐射探测与测量的基本技术，还概括了近二十年的发展情况，汇集了大量的很有实用价值的资料。本书层次清晰，系统性强，对物理概念的阐述透彻，避免了较繁杂的数学运算，在各类知识相互衔接部分的阐述方面颇具特色。在各章末尾，还列出了精选的大量近期文献，为深入探讨提供了有益的线索。本书既是一本很好的教学参考书，又是一本可供从事核技术工作的科学技术人员查阅的核辐射探测技术手册。多年来，此书一直被美国 EG&G ORTEC 公司选为培训技术人员的参考书。本书日文译本已于 1982 年出版。

在当今核技术应用范围不断扩大的时代，这门新兴技术在我国具有广阔的发展前景。我们很高兴能有机会将本书译成中文献给读者。

赵文彦同志参加了部分翻译工作。

因水平所限，译文和术语选择难免有不当之处，敬请读者不吝指正。

译者 1984 年 5 月

目 录

第一篇 绪论

第一章 辐射源

1.1 单位和定义	3
1.2 快电子源	5
1.3 重带电粒子源	7
1.4 电磁辐射源	12
1.5 中子源	19

第二章 辐射与物质的相互作用

2.1 重带电粒子与物质的相互作用	27
2.2 快电子与物质的相互作用	36
2.3 γ 射线与物质的相互作用	40
2.4 中子与物质的相互作用	45
2.5 辐射照射量和剂量	47

第三章 辐射探测器的一般特性

3.1 探测器的简化模型	51
3.2 电流工作方式与脉冲工作方式	52
3.3 脉冲幅度谱	54
3.4 计数曲线和坪	55
3.5 能量分辨率	57
3.6 探测效率	59
3.7 死时间	61

第四章 计数统计学和误差预测

4.1 数据的特征	68
4.2 统计模型	72
4.3 统计模型的应用	79
4.4 误差传递	85
4.5 计数实验条件的优选	91
4.6 时间间隔分布	92

第二篇 气体探测器

第五章 电离室

5.1 气体中的电离过程	101
5.2 电荷的迁移与收集	103
5.3 电流电离室的设计和运用	106
5.4 用电离室测量辐射剂量	108

5.5	直流电离室的应用	111
5.6	脉冲工作方式	114
第六章 正比计数管		
6.1	气体倍增	120
6.2	正比计数管的设计特征	122
6.3	正比计数管的性能	125
6.4	探测效率和计数曲线	135
6.5	正比计数管的几种变体设计	137
第七章 盖革-弥勒计数管		
7.1	盖革放电	143
7.2	填充气体	145
7.3	猝灭	145
7.4	时间特性	147
7.5	盖革计数坪	148
7.6	设计特征	150
7.7	计数效率	151
7.8	G-M监测仪	153

第三篇 闪烁计数器

第八章 闪烁探测器的原理		
8.1	有机闪烁体	157
8.2	无机闪烁体	167
8.3	光的收集和闪烁体的安装	172
第九章 光电倍增管		
9.1	引言	179
9.2	光阴极	180
9.3	电子倍增	182
9.4	光电倍增管的特性	186
9.5	光电倍增管所要求的辅助设备	192
9.6	闪烁脉冲形状分析	195
第十章 用闪烁体的辐射能谱学		
10.1	γ 射线能谱学的一般原理	201
10.2	γ 射线相互作用	202
10.3	预计的响应函数	206
10.4	NaI(Tl)闪烁谱仪的特性	215
10.5	用闪烁体的电子谱仪	230
10.6	以闪烁现象为基础的特殊探测器结构	231

第四篇 半导体探测器

第十一章 半导体二极管探测器		
11.1	半导体的性质	239
11.2	电离辐射在半导体中的作用	246

11.3	作为辐射探测器的半导体	248
11.4	半导体探测器的各种结构	255
11.5	工作特性	258
11.6	面垒探测器与扩散结探测器的应用	264
第十二章 锂漂移锗探测器		
12.1	离子漂移探测器的制造	274
12.2	漂移探测器的基本性质	276
12.3	Ge (Li) 探测器的工作特性	277
12.4	用Ge (Li) 探测器的 γ 射线谱学	285
第十三章 其它固体探测器		
13.1	锂漂移硅探测器	312
13.2	高纯锗探测器	326
13.3	硅、锗以外的其它半导体材料	331
13.4	雪崩探测器	334
13.5	位置灵敏半导体探测器	335

第五篇 中子探测器和能谱学

第十四章 慢中子探测方法

14.1	与中子探测有关的核反应	343
14.2	以硼反应为基础的探测器	347
14.3	根据其它转换反应制成的探测器	351
14.4	反应堆仪表	354

第十五章 快中子探测和快中子谱学

15.1	以中子慢化为基础的计数器	366
15.2	以快中子诱发反应为基础的探测器	372
15.3	利用快中子散射的探测器	377

第六篇 探测器电子学和脉冲处理

第十六章 脉冲的处理与成形

16.1	器件阻抗	397
16.2	同轴电缆	398
16.3	脉冲成形	407

第十七章 线性脉冲和逻辑脉冲功能

17.1	线性脉冲和逻辑脉冲	420
17.2	仪器标准	421
17.3	脉冲处理单元一览	427
17.4	通用部件	429
17.5	脉冲计数系统	435
17.6	脉冲幅度分析系统	441
17.7	脉冲定时系统	448
17.8	脉冲波形甄别	463

第十八章 多道脉冲分析器

18.1 单道测量法	467
18.2 多道分析器的一般特性	469
18.3 多道分析器	472
18.4 能谱的稳定	478
18.5 用计算机作能谱分析	479

第七篇 其它辐射探测器及应用

第十九章 其它类型的探测器

19.1 切伦科夫探测器	489
19.2 液体电离室和正比计数管	490
19.3 照相乳胶	491
19.4 热释光剂量计	494
19.5 径迹蚀刻探测器	497
19.6 活化箔探测中子	501

第二十章 本底和探测器屏蔽

20.1 本底来源	507
20.2 γ 射线谱中的本底	510
20.3 其它探测器的本底	514
20.4 屏蔽材料	515
20.5 降低本底的现行方法	518

附录 辐射效应和照射极限

1. 辐射效应	525
2. 剂量的定量化	525
3. 照射类型	527

第一篇

绪论

第一章 辐射源

本书主要涉及原子或核过程中产生的辐射，习惯上，将它们归为如下四大类：

带电粒子辐射	{	快电子
		重带电粒子
非带电辐射	{	电磁辐射
		中子

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的、具有相当能量的所有离子，例如 α 粒子、质子、裂变产物和许多核反应的产物。这里所关注的电磁辐射包括原子的壳层电子重新排列时发射的 X 射线和原子核能级跃迁时发射的 γ 射线。各种核过程中产生的中子组成最后一类，通常它又分为慢中子和快中子（参见第十四章）。

本书所关注的能区从大约 10eV 到 20MeV，跨越六个量级（慢中子作为例外被包括在内，因为慢中子在技术上很重要）。这个能量下限是辐射或辐射与物质相互作用的次级产物使典型材料发生电离所需的最低能量。能量大于这个最低能量的辐射归为电离辐射。这个能量上限的选择，为的是使本书的课题限于核科学和技术的主要范围之内。

本章的重点是实验室级的辐射源，无论是刻度或检验以后各章所述的辐射探测器，还是作为测量对象，它们都可能是重要的。天然本底辐射是一种重要的附加源，将在第二十章中单独予以讨论。

我们关注的辐射的“硬度”或穿透物质的能力各不相同。虽然这个特性属于第二章详细讨论的内容，但是也与确定辐射源的物理形式有密切关系。像 α 粒子或低能 X 射线这样一些软辐射，只能穿透很薄的物质。因此，若要求大部分辐射都能从源中逸出，放射性同位素源必须沉积成很薄的一层。较厚的源会遇到“自吸收”问题，这很可能影响从源表面逸出的辐射的数量和能谱。因此，这种源的厚度一般以微米量度。 β 粒子的穿透能力一般是比较强的，通常 β 源的厚度可达零点几毫米。 γ 射线和中子这样一些硬辐射受自吸收的影响很小，这种源的尺寸可达几毫米或几厘米，而对辐射特性没有严重影响。

1.1 单位和定义

1.1.1 放射性活度

放射性同位素源的活度定义为它的衰变率，由放射性衰变的基本规律给出：

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1-1)$$

式中 N 是放射性核数, λ 为衰变常数。以前的放射性活度单位是居里 (Ci), 其定义为 3.7×10^{10} 衰变/秒, 这是出自对 1g 纯 ^{226}Ra 的活度的最可取的估计。一般对实验室级辐射源更适用的单位是居里的十进分数单位——毫居里 (mCi) 和微居里 (μCi)。

虽然文献中仍在广泛使用居里, 但它势必逐渐被国际单位制的相应单位——贝可勒尔 (Bq) 所取代。在 1975 年国际计量大会 (GCPM) 会议上通过了决议, 宣布贝可勒尔作为放射性活度的标准单位, 其定义为每秒钟一次衰变。因此

$$1\text{Bq} = 2.703 \times 10^{-11}\text{Ci}$$

实验室用的放射性同位素源用千贝可勒尔 (kBq) 或兆贝可勒尔 (MBq) 量度更为合适。

应该强调指出, 放射性活度是量度辐射源衰变率的, 与辐射源衰变中产生的辐射的发射率不同。经常, 发射某种辐射的只是所有衰变之中的一部分, 因此, 为了从放射性活度推算辐射发射率, 必须知道该种同位素的衰变纲图。再者, 某种放射性同位素衰变可能产生子体产物, 子体的活度也会对源的辐射产额有所贡献。参考文献[1]中有详尽的放射性同位素衰变纲图。

辐射源的比放射性活度定义为单位质量放射性同位素样品的放射性活度。对于纯的或“无载体”样品, 即未混入其它任何核素的样品, 比放射性活度可由下式计算:

$$\begin{aligned} \text{比放射性活度} &= \frac{\text{放射性活度}}{\text{质量}} = \\ &= \frac{\lambda N}{NM/A_v} = \frac{\lambda A_v}{M} \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中 M ——样品的分子量; A_v ——阿伏伽德罗常数 ($=6.02 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$); λ ——放射性同位素衰变常数 ($=\ln 2/\text{半衰期}$)。但是, 无载体放射性同位素是很难得到的, 通常是被浓度大得多的相同元素的稳定核所稀释。同样, 如果不用纯元素制备, 源中就可能含有与辐射源元素相化合的其它元素的一些稳定核。对于存在自吸收问题的辐射源, 应力求得到高比放射性活度的样品, 使一定厚度内的放射性核数达到最大。从 (1-2) 式可见, λ 大 (或半衰期短) 的放射性核素最容易达到高比放射性活度。

1.1.2 能量

量度辐射能量的惯用单位是电子伏 (eV), 其定义为一个电子经过 1 伏电位差加速所得到的动能。千电子伏 (keV) 和兆电子伏 (MeV) 是更常用的量度电离辐射能量的单位。在量度粒子辐射能量时使用电子伏这个单位是很方便的, 因为粒子从电场获得的能量很容易由粒子所带电荷乘以电位差求得。例如一个 α 粒子带有两个正电荷, 在 1000V 电位差下加速时得到的能量为 2keV。

国际单位制的能量单位是焦耳 (J)。量度辐射能量时, 用飞焦耳 (fJ) 更为方便。飞焦耳与电子伏的互换关系由下式表示:

$$1\text{fJ} (=10^{-15}\text{J}) = 6.241 \times 10^8 \text{eV}$$

目前还不清楚, 在今后使用中电子伏这个单位将被取代到什么程度, 因为电子伏的物理基础和文献中的广泛使用都是支持在辐射测量中继续使用这个单位的有力论据。

X 射线或 γ 射线光子的能量与辐射频率的关系为

$$E = h\nu \quad (1-3)$$

式中 h 表示普朗克常数 ($6.626 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ 或 $4.135 \times 10^{-15} \text{eV}\cdot\text{s}$)； ν 表示频率。波长 λ 与光子能量的关系为

$$\lambda = \frac{1.240 \times 10^{-6}}{E}$$

式中 λ 以 m 为单位, E 以 eV 为单位。

1.2 快电子源

1.2.1 β 衰变

辐射测量中最常用的快电子源是发射 β^- 粒子的放射性同位素。这个过程可表示为



式中 X 和 Y 分别为初始核素和终核素, $\bar{\nu}$ 是反中微子。中微子和反中微子与物质相互作用的几率极小, 实际上是不可探测的。反冲核 Y 的反冲能量很小, 一般低于电离阈能, 用通常方法不能探测。因此 β 衰变所产生的唯一值得注意的电离辐射是快电子, 即 β 粒子。

用中子照射稳定物质所产生的大多数放射性核素是 β 放射性的, 所以用反应堆中子照射很容易得到多种 β 放射性物质。从几千年到可以实际应用那么短寿命的各种不同半衰期的核素都可以得到。大多数 β 衰变产生处于受激态的子核, 因此许多普通 β 源在发射 β 粒子之后随即发射退激发 γ 射线。有些核素直接衰变到子体的基态, 因此是“纯 β 发射体”, 如表 1-1 所示。

表 1-1 一些“纯” β -源^[1]

核素	半衰期	端点能量, MeV
${}^3\text{H}$	12.26a	0.0186
${}^{14}\text{C}$	5730a	0.156
${}^{32}\text{P}$	14.28d	1.710
${}^{33}\text{P}$	24.4d	0.248
${}^{35}\text{S}$	87.9d	0.167
${}^{36}\text{Cl}$	$3.08 \times 10^5 \text{a}$	0.714
${}^{45}\text{Ca}$	165d	0.252
${}^{63}\text{Ni}$	92a	0.067
${}^{90}\text{Sr}/{}^{90}\text{Y}$	27.7a/64h	0.546/2.27
${}^{99}\text{Tc}$	$2.12 \times 10^5 \text{a}$	0.292
${}^{147}\text{Pm}$	2.62a	0.224
${}^{204}\text{Tl}$	3.81a	0.766

每种 β 跃迁都有其固定的特征衰变能量或 Q 值。由于反冲核能量实际上是零, 衰变能量分配给 β 粒子和“看不见的”中微子。每次衰变的 β 粒子能量各不相同, 从零一直延续到“ β 粒子端点能量”——其数值等于 Q 值。典型的 β 能谱如图 1-1 所示。衰变涉及

不同的初核态或终核态时，其能谱可能由几种成分组成。

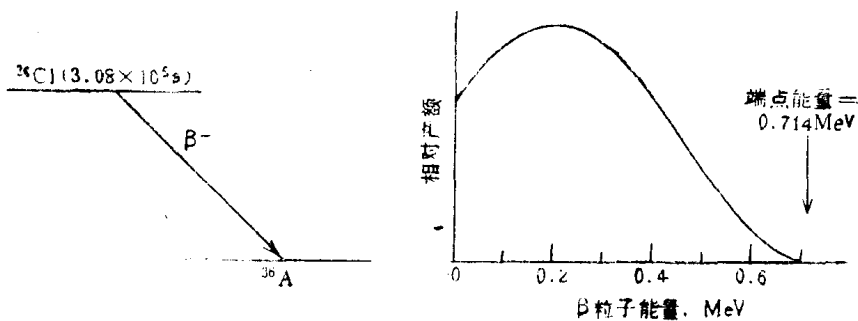


图1-1 ³⁶Cl 的衰变纲图及 β 粒子能量分布

1.2.2 内转换

所有 β 源的粒子能量都是连续分布的，这对某些应用不适宜。例如，对电子探测器进行能量刻度时，用单能电子源就方便得多。核的内转换过程可以作为转换电子源，在某些情况下，它差不多是单能的。

内转换过程通常是由母体经 β 衰变生成核受激态开始的。退激发的一般途径是发射 γ 光子。对某些受激态来说，γ 发射可能受到轻微禁戒，从而退激发的另一种途径——内转换可能成为主要的。这时，把核激发能 E_{γ} 直接传递给原子的某一轨道电子。这个电子的能量由下式给出：

$$E_e = E_{\gamma} - E_b \tag{1-5}$$

式中 E_b ——电子在原来电子壳层中的结合能。

图 1-2 给出一个内转换电子能谱的例子。由于内转换电子可以出自原子中不同的电子壳层的任一壳层，通常单一核激发能级就产生几组不同能量的电子。当核内多个受激态被转换时，能谱可能更加复杂。而且，内转换电子能谱还可能叠加在导致受激态的母核的连续 β 谱之上。尽管有这些缺点，转换电子还是在 keV 到 MeV 能量范围内唯一实用的实验室级单能电子源。

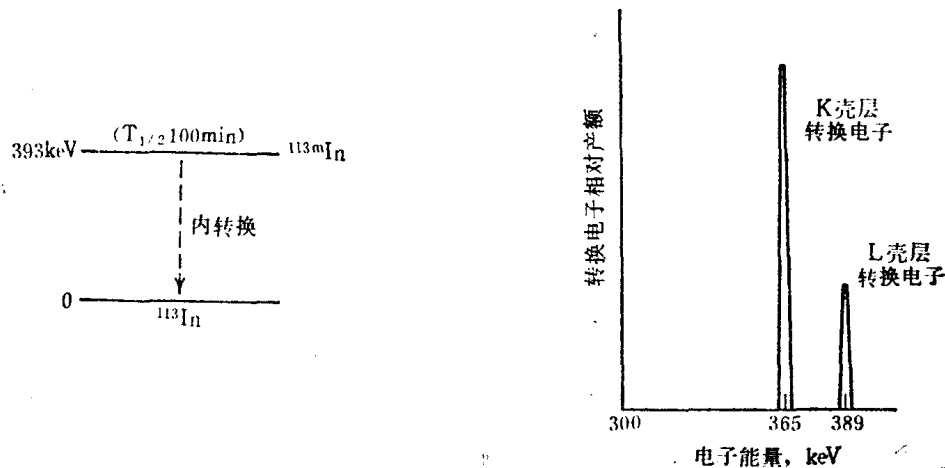


图1-2 预计的 ^{113m}In 的 393keV 同质异能态能级内转换过程的转换电子能谱

1.2.3 俄歇电子

俄歇电子与内转换电子有些类似,只是其激发能量来自原子而不是来自原子核。前导过程(如电子俘获)可能使原子中通常完整的电子壳层产生空位。这个空位常常被该原子的外层电子所填充,同时发射特征 X 射线光子。或者,原子的激发能直接传递给它的一个外层电子,使其脱离原子。这种电子称为俄歇电子,其能量为原子原有的激发能与该俄歇电子原来所在电子壳层的结合能之差。因此俄歇电子能谱是与各初态和终态相对应的几组分立谱。在任何情况下,俄歇电子的能量都比 β 粒子和内转换电子的能量低,这主要是因为只有在电子结合能较小的低 Z 元素中才有利于俄歇电子发射。初始能量为几 keV 的典型俄歇电子在源中的自吸收很明显,而且容易被很薄的源覆盖层或探测器入射窗所阻挡。

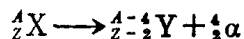
1.2.4 电子加速器

加热的灯丝是一种丰富的电子源,电子从其表面逸出时,通常只有小于 1eV 的特征热能。当这些电子经过较大的电位差时,它们可能被加速到前述核过程中所发射的电子具有的能量。电子经过每一伏电位差获得 1eV 的能量,所以使用小型的实验室电源可使电子能量达到 $\sim 10\text{keV}$ 。但是大多数应用中需要能量高得多的电子,所以需要较复杂的大型加速器作为电子源。电子直线加速器是一种最常用的高能电子加速器,可以很容易地产生几 MeV 动能的电子。直线加速器至少要占据一座房子的地方并需要大量投资,因而只有在比较复杂的研究设施中才使用直线加速器。

1.3 重带电粒子源

1.3.1 α 衰变

重核很容易自然发射 α 粒子(${}^4\text{He}$ 核)。其衰变几率服从许多核物理教科书中都讲到的“位垒穿透”理论。常用的 α 源的半衰期从几天到几千年不等。衰变过程可以描写为



其中 X 和 Y 为初始核素和终核素。典型的 α 衰变纲图如图 1-3 所示,图中还给出了衰变中发射的相应 α 粒子的能谱。

辐射源的 α 粒子具有一个或几个能量组,实际上每组都是单能的。对初始核到终核的每种不同的跃迁(例如从基态到基态的跃迁),都有一定的能量差值或 Q 值表征这种衰变。这个能量以一定的方式分配给 α 粒子和反冲核,因此每个 α 粒子具有同样的能量 $Q(A-4)/A$ 。有许多只有一种这样跃迁的实例,因而只发射一种单能 α 粒子。而像图 1-3 所示的其他例子中,可能有几种跃迁能量,因此出现几组相对强度不同的 α 粒子。

表 1-2 列出了较常用的 α 放射性同位素源的一些特性。大多数 α 粒子的能量居于大约 4—6MeV 之间并非偶然。 α 粒子能量与母体同位素的半衰期具有很密切的关系, α 粒子的能量越高其母体半衰期越短。在大约 6.5MeV 以上,半衰期可能小于几天,因此这种源的用途极其有限。另一方面,如果能量低于 4MeV,则位垒穿透几率很小,而该同位素的半衰期很长。如果半衰期非常长,由这种同位素制成的实际样品可达到的比放射性活度就很小,以致这种源因强度太低而无实用意义。最常用的 α 粒子刻度源是 ${}^{241}\text{Am}$,图 11-10 给出用 ${}^{241}\text{Am}$ 刻度硅固体探测器的一个实例。