

核辐射探测器入门

P. J. 奥塞夫 著

科学出版社

核辐射探测器入门

P. J. 奥塞夫 著

姬成周 译

科学出版社

1980

内 容 简 介

本书主要介绍核辐射探测器的基本知识。对于几种常用的探测器,例如气体探测器、闪烁计数、半导体探测器作了较为详细的介绍。对于技术要求,使用条件讲得比较清楚,便于实际使用者参考。全书共分六章:绪论,核辐射及其与物质的相互作用,气体计数器,闪烁计数器,半导体探测器,辐射计数的校正。

本书适合于使用核辐射探测器的科技人员、医务人员以及大中专院校有关专业师生参考。

P. J. Ouseph
INTRODUCTION TO NUCLEAR
RADIATION DETECTORS
Plenum Press, 1975

核辐射探测器入门

P. J. 奥塞夫 著

姬成周 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1980年4月第一版 开本:787×1092 1/32
1980年4月第一次印刷 印张:5 3/4
印数:0001—3,480 字数:128,000

统一书号:13031·1232

本社书号:1713·13—3

定价: 0.90 元

前 言

在核辐射探测器领域内,尤其使用半导体材料的探测器,已经有了许多重大的发展。本书的目的是:介绍气体计数器、闪烁计数器和半导体探测器发展的概况。这些内容完全是针对探测器的使用人员而写的,他们通常是在化学、地质学、生物化学和医学等不同领域中工作的科学家和技术人员。第一章介绍探测器的基本特性。全书根据这些基本特性,例如效率、能量分辨率和分辨时间,讨论了这几类探测器的运用,并指出它们之间在基本特性方面的差别。第二章讲述辐射与物质的相互作用,讨论了各种辐射在物质中怎样损失其能量,以及它们在物质中行为的差异如何影响探测器的设计和使用。虽然全书把重点放在基础部分,但也经常使读者了解辐射探测领域中的新发展。

几年来,作者给科学、工程、医学和口腔外科等专业的大学生教授放射性同位素课程。为了满足学生们的不同兴趣,课程侧重点不断改变。但是,本书的内容是这门课程的核心。在讲这门课时,还要做大约十个关于探测器的实验。由于学生们的热情反应,促进了这本书的写作。

在本书写作过程中,我得到了几个人的帮助,特别值得提及。曼纽尔·施瓦茨教授在我们大学引进并发展了“放射性同位素和辐射探测”这门课程。如上所述,这本书就是由这门课程开始的,经过几年教学实践修改而成。特别在开始阶段,在阅读、校对和修改手稿方面,没有他的帮助,完成这本书将是不可能的。我深深感谢施瓦茨教授的帮助,感谢他在我写

有关探测器的两篇论文时给予的合作，这给我写这本书增添了动力。

(下略)

P. J. 奥塞夫

1975年5月于肯塔基州路易斯维尔

目 录

第一章	绪论	1
第二章	核辐射及其与物质的相互作用	6
2.1	放射现象	6
2.2	放射性强度的计算	9
2.3	核反应所产生的放射性强度的计算	13
2.4	带电重粒子与物质的相互作用	18
2.5	电子与物质的相互作用	28
2.6	电子的反散射	32
2.7	γ 射线和X射线与物质的相互作用	34
2.8	中子与物质的相互作用	40
2.9	宇宙射线	42
	参考文献	42
	参考书目	43
第三章	气体计数器	44
3.1	气体计数器的一般特性	44
3.2	电离计数器	48
3.3	空气壁电离室	49
3.4	袖珍剂量计	50
3.5	脉冲型电离计数器	51
3.6	正比计数器	56
3.7	位置灵敏正比计数器	62
3.8	中子计数器	63
3.9	盖革-弥勒计数管	65
3.10	计数管气体	70
3.11	用盖革计数管探测 α 射线和 β 射线	72

3.12	用气体计数器探测 X 射线和 γ 射线	73
3.13	内计数法的应用	76
	参考文献	77
	参考书目	78
第四章 闪烁计数器		79
4.1	闪烁计数装置的一般特性	79
4.2	闪烁材料和闪烁机理	81
4.3	光电倍增管	89
4.4	脉冲的形状	94
4.5	闪烁计数器组件	95
4.6	脉冲幅度与核辐射能量的关系	96
4.7	用闪烁计数器探测 γ 射线	98
4.8	积分计数法	102
4.9	微分计数法和 γ 射线能量的测定	104
4.10	闪烁计数器探测 γ 射线的效率	108
4.11	闪烁探测器的能量分辨率	111
4.12	用闪烁计数器探测带电粒子	113
4.13	中子的探测	114
4.14	使用脉冲形状甄别的粒子鉴别法	117
4.15	用于粒子鉴别和甄别的其他方法	117
	参考文献	119
	参考书目	120
第五章 半导体探测器		121
5.1	半导体探测器的工作原理	121
5.2	杂质半导体	125
5.3	探测器类型	132
5.4	脉冲形状和上升时间	139
5.5	影响能量分辨率的因素	140
5.6	辐射损伤	145
5.7	带电粒子的探测	145

5.8	X射线和 γ 射线的探测	148
5.9	中子探测器	151
5.10	其他应用	151
5.11	专用方法	154
5.12	结论	156
	参考文献	157
	参考书目	157
第六章 辐射计数的校正		158
6.1	引言	158
6.2	绝对放射性强度的测定	166
6.3	衰变过程的随机特性	168
6.4	频谱分布	169
6.5	核粒子计数方法的统计误差	173
	参考文献	175
	参考书目	175
附录: 精选的物理常数和变换系数		176

第一章 绪 论

核辐射探测器的历史和我们的原子物理、亚原子物理知识的增长是同时发展的。一个实例是 1895 年伦琴使用照像乳胶发现了 X 射线。从那时候起，乳胶就广泛地用来作为辐射探测器。第二年，贝克勒耳利用照像底片发现了放射性现象。卢瑟福在他有名的 α 散射实验中，使用荧光屏和望远镜观察 α 粒子在屏上产生的闪光。正是根据这些实验结果，他发现了原子核。类似的探测器称为“闪烁镜”，是威廉·克鲁克斯在 1903 年研制的。它是现代闪烁探测器的先驱。

人们也认识到，辐射在空气中会引起电离现象。验电器和静电计被用来探测辐射产生的电离，并且使用这类仪器发现了宇宙线。玛丽·居里使用静电计研究各种物质的放射性现象。利用这些简单的仪器，她得出了这样的结论：放射性强度与放射性物质的数量成比例。

由于要数出荧光体闪光的次数有极大的困难，这就促使卢瑟福和盖革去寻找更好的探测器。他们把辐射产生离子以及离子在足够强的电场中的倍增现象用来设计新型的探测器。1908 年，他们宣布制成了一个可以使用的核辐射探测器。从那时起，在核辐射探测方法方面已经有了若干重要的进展。

表 1.1 列举出目前通用的各类探测器。该表着重指出麦凯 (McKay) 在 1953 年的说法是对的：“每当核物理学家观察到一种由原子粒子引起的新效应，他都试图利用这种新效应制成一种探测器。”^[1]“径迹型”探测器对于高能粒子物理学家

表 1.1 核辐射探测器

名称	类型	主要的相互作用	介质
电离计数器	信号型	电离	气体
正比计数器	信号型	电离	气体
盖革计数器	信号型	电离	气体
闪烁计数器	信号型	电子能级的激发和伴生光子的产生	气体, 液体, 固体
半导体计数器	信号型	电子和空穴的产生	固体
契伦科夫计数器	信号型	由契伦科夫效应产生光子	气体, 液体, 固体
照像乳胶	径迹型	电离	固体
云室(扩散型和膨胀型)	径迹型	电离	气体
气泡室	径迹型	电离	液体
火花室	径迹型	电离	气体和固体
电介质粒子探测器	径迹型	电离	固体, 经腐蚀产生径迹
光色探测器 ⁽²⁾	径迹型	铁(Fe)离子氧化状态的变化	固体

光色探测器是用光色晶体制成的,用于高能粒子的探测。例如,把0.1%铁掺入钽铈单晶体(SrTiO₃)制成的探测器,可以探测40MeV的 α 粒子和宇宙射线中的 π 介子。在辐射作用下,铁离子由Fe³⁺变为Fe⁴⁺,于是在入射粒子径迹区域,晶体的颜色由黄变黑。这种探测器在900°C高温下使铁的价态还原(晶体由黑色变黄色)后,可以重复使用。——译者注

是非常重要的。“信号型”探测器则对使用放射性同位素技术的几类科学家,例如辐射化学家、低能核物理学家、生物学家、生物化学家和地质学家是重要的。这类探测器将在第三章至第五章中详细论述。

图 1.1 表示一个典型的脉冲计数器的简化工作原理。核辐射(带电粒子)进入探测器产生一个信号(输出脉冲)。信号幅度(脉冲幅度)和辐射能量之间的比例关系以及计数器的效率、能量分辨率和输出脉冲的时间宽度,这些因素是我们选择探测器时要考虑的。下面讨论对选择探测器有影响的几个特性。

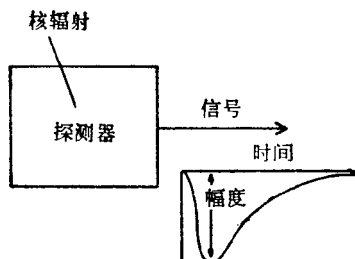


图 1.1 脉冲计数器的工作原理图。绘出了输出电压(电脉冲)变化与辐射进入探测器后的时间的函数关系

如果信号幅度正比于辐射在探测器中损耗的能量,那么测定信号的幅度,我们就能够测出辐射的能量。

效率可以定义为探测器中产生的可探测信号数与入射辐射数的比值。有时,尤其对于低能辐射,所产生的信号幅度可能比噪声小,以致不能探测它们。影响探测器效率的另一因素是,分析信号所用的电子学设备可能有灵敏度的限制,也就是说,低于下限的脉冲将探测不出来。因此,探测器效率是随着探测器后面电子学设备的下限而变化的。

探测器的能量分辨率是探测器对于能量很接近的辐射加

以区别的能力的量度。能量分辨率取决于相同能量的辐射所产生的脉冲幅度的展宽程度。图 1.2 表示一种典型的脉冲幅度分布。以百分比表示的能量分辨率 R , 定义如下:

$$R = \frac{\text{最大计数一半处的全宽度}}{\text{峰位置的脉冲幅度}} \times 100. \quad (1.1)$$

最大计数一半处的宽度是峰的一半高度处脉冲分布的宽度, 如图 1.2 所示。探测器分辨 γ 射线的能力随 R 值的减小而增大。

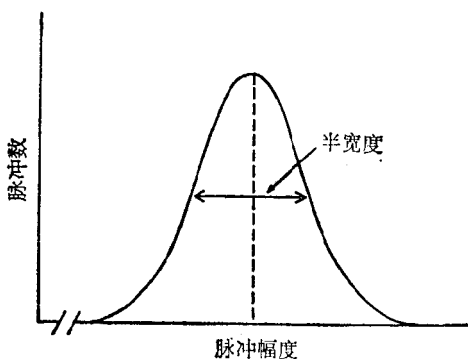


图 1.2 具有相同能量的核辐射的典型脉冲幅度分布(输出信号的数量与脉冲幅度的函数关系)。对于大多数探测器, 峰的位置与能量成正比关系。在最大计数一半处, 分布的全宽度取决于探测器的类型

脉冲的时间宽度通常是选用探测器时要考虑的另一重要因素。如果总宽度过大, 就会发生脉冲的重叠现象, 并会有计数损失。脉冲包含两个部分: (1) 上升部分和 (2) 下降部分。第一部分是由探测器的特性(例如离子收集时间)决定。第二部分取决于测量系统的时间常数 RC 。减小时间常数可以把总宽度减小。但是, 收集时间和衰减时间之间应该维持适当关系, 以便保持辐射能量和脉冲幅度之间的比例。时间分辨

率好的符合实验要求脉冲的上升时间快。

在研究探测器之前，先讲述一些常见核辐射的性质，接着介绍放射性衰变的计算并讨论核辐射与物质的相互作用。这些内容将作为本书其余部分研究探测器的基础。

参 考 文 献

- [1] M. G. McKay, *Phys. Today* **6**, 10(1953).
- [2] P. J. Ouseph, *Phys. Rev. Lett.* **30**, 1162(1973).

第二章 核辐射及其与物质的相互作用

核辐射的探测之所以可能，是因为在辐射与物质的相互作用中能够产生光子、电子-离子对或者电子-空穴对。气体计数器(电离室、正比计数器和盖革计数管)、云室、气泡室和火花计数器之所以能工作，是因为辐射在其内产生离子。在闪烁计数器中，辐射所引起的激发产生光量子(光子)。在半导体计数器中，辐射产生电子-空穴对。离子、光子或电子-空穴对的数量取决于辐射在探测器灵敏体积内消耗的那部分能量所占的比例和探测器材料的特性，有时还取决于辐射的种类。在设计探测器和分析由探测器获得的数据时，重要的是要知道辐射在介质中消耗能量的快慢程度；有多少能量用于产生离子、光子或电子-空穴对；离子数量和核辐射能量间的关系是什么；为阻止已知能量的辐射必需多少物质。本章论述其中的几个问题。中性辐射，像 γ 射线和中子，不直接产生这些效应。因此它们的探测取决于能产生带电粒子的中间相互作用。中性辐射与物质的相互作用在本章末加以讨论。然而在这里需要适当地熟悉核放射现象、核反应以及一些术语，例如衰变常数、半衰期和反应截面等。现在就介绍这些内容。

2.1 放射现象

一些原子核经历自发的衰变即蜕变。这种过程称为放射现象。在放射性衰变中，作为产物的子核内每个核子的能量小于母核内每个核子的能量。衰变过程中发射的辐射通常带走该能量差的一大部分。根据释放出的辐射的类型，有三种主

要的放射现象：(1) α 衰变释放 α 粒子， α 粒子是由两个质子和两个中子组成的，因此，它就是氦原子核。(2) β 衰变。在这里核衰变涉及电子的发射（电子衰变）或正电子的发射（正电子衰变），有时涉及电子的俘获（电子俘获）。在这三种 β 衰变中，均能释放出称为中微子或者反中微子的粒子。(3) 裂变。原子核分裂为两个较轻的核，同时释放两个或多个中子和大约 200MeV 的能量。

重要的是要注意到 α 粒子和 β 粒子在能量分布上的主要差别。正如前边指出的，所发射的辐射带走蜕变能的一大部分，剩余能量以子核的动能形式出现。子核以这种方式反冲，以便使整个过程动量守恒。 α 衰变只有两种反应产物，子核和 α 粒子。蜕变能只能以唯一的一种方式分配给两个反应产物。因此，对导致发射 α 粒子的特定的核跃迁来说， α 粒子的能量总是相同的。可以用下式表示：

$$E_{\alpha} = (A - 4) \times Q/A, \quad (2.1)$$

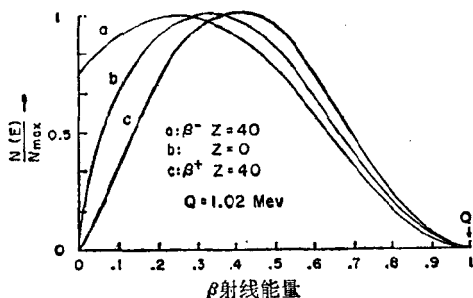


图 2.1 β 射线的能量分布。

E_{\max} 取为 1.02MeV, 它等于 Q 。应注意, 在谱的低能端, 曲线的差别是由 β 射线和原子核之间的静电吸引作用引起的。曲线 a 是电子的曲线。在这里电子和原子核之间的相互作用减小了电子的能量。曲线 b 是假定 β 粒子与原子核没有相互作用的情况。曲线 c 是正电子的曲线。

排斥力增大了大多数正电子的能量

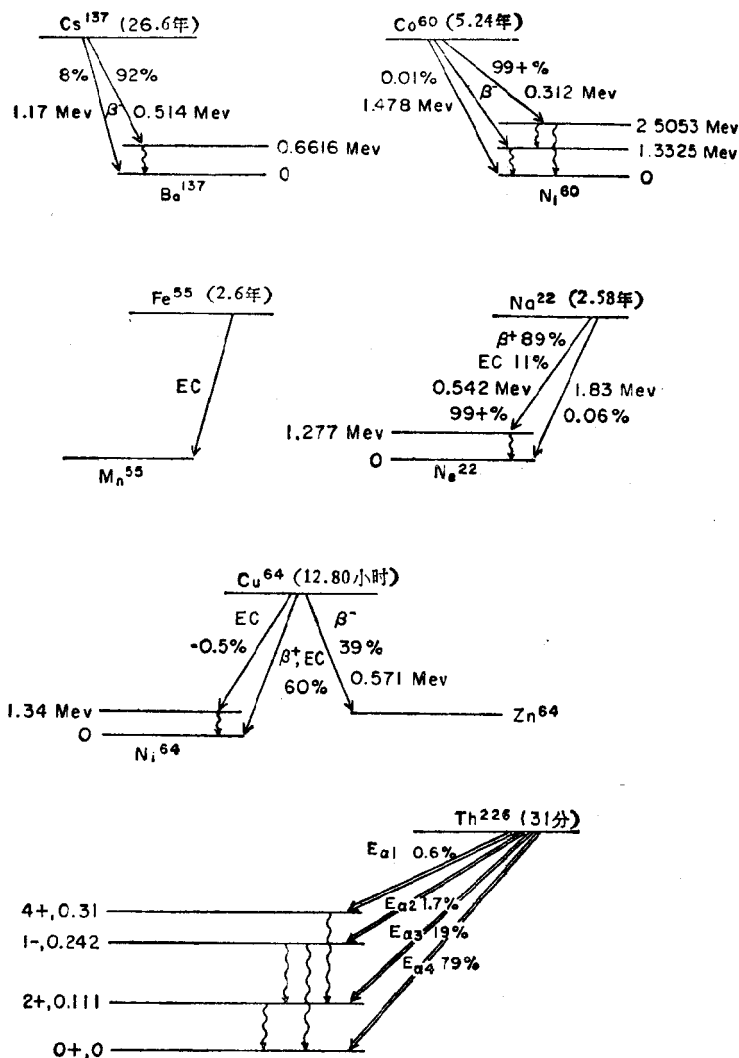


图 2.2 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{55}Fe 、 ^{22}Na 、 ^{64}Cu 和 ^{226}Th 的衰变图。

^{226}Th 衰变过程中放出四组 α 粒子 (6.03、6.1、6.22 和 6.3 MeV)。 β^- 、 β^+ 和 EC 分别代替电子衰变、正电子衰变和电子俘获引起的衰变。波纹箭头表示 γ 射线

式中 E_α 是 α 粒子的能量, A 是母核的原子序数, Q 是蜕变能。

在电子衰变和正电子衰变中,能量可以在三个粒子,即原子核、电子或正电子和反中微子或中微子之间分配。这有无限多种分配方式,均能满足动量守恒原理。因此 β 粒子具有从零到最大值 Q 的连续能量分布, Q 表示蜕变能(图 2.1)。用 MeV 单位表示的蜕变能 Q 根据 (2.2) 式计算:

$$Q = [M_p - (M_d + \sum m_r)] \times 931, \quad (2.2)$$

式中 M_p 是母核的质量,以原子质量单位表示; M_d 是子核的质量; $\sum m_r$ 是所有已发射的辐射的质量总和; 931 是从原子质量单位换算为 MeV 单位时的变换系数。

图 2.2 中,用图解说明 α 衰变和 β 衰变的几个实例。这些衰变的大多数,其衰变产物是处在激发态,在反应产物由激发态跃迁到基态的过程中发射出 γ 射线。有几种原子核(例如 ^{64}Cu) 通过 β 衰变的全部三种方式进行放射性衰变。 ^{137}Cs 放射源的 0.66MeV γ 射线和 ^{60}Co 放射源的 1.173 MeV 和 1.33MeV γ 射线可用于 γ 射线谱仪的校准。

电子俘获只有两种产物(中微子和子核),因此,中微子的能量分布是不连续的。但是由于电子处在不同的原子壳层时电子的束缚能会有变化,对应于每个束缚能,将发射出具有不同能量的中微子。因此中微子具有分立能谱。电子俘获在原子壳层中产生一个空位。当这个空位被重新填满时,将释放表征生成物原子的特征的 X 射线。探测生成物原子的特征 X 射线是观察电子俘获的一种方法。

2.2 放射性强度的计算

放射性衰变是一种统计性的一次完成的过程。一群原子核中某一个核在有限时间间隔内衰变的概率是与时间无关