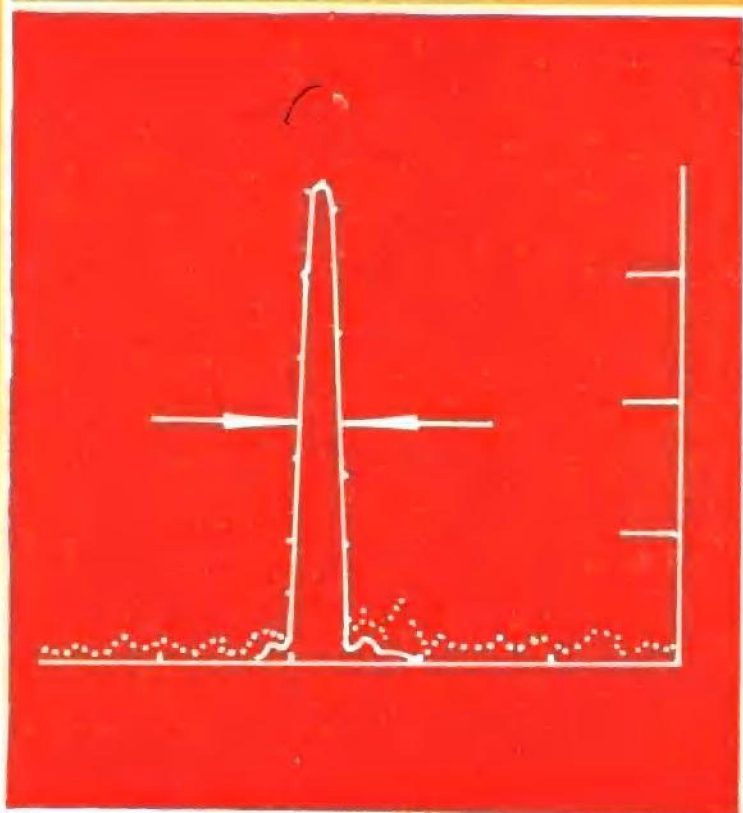


实验物理学丛书

实验核物理应用方法

夏元复 倪新伯 彭郁卿 编著



科学出版社

实验物理学丛书

实验核物理应用方法

夏元复 倪新伯 彭郁卿 编著

科学出版社

1989

内 容 简 介

本书系统地介绍了实验核物理的原理及其在材料科学、生物学、医学等领域中的应用。全书共分五章：第一章引言；第二章 γ 射线谱学；第三章穆斯堡尔谱学；第四章扰动角关联；第五章正电子湮没谱学及其应用。本书文字简洁、内容广泛、通俗易懂，是应用实验核技术的非核专业人员的一本很好的参考书。

实验物理学丛书

实验核物理应用方法

夏元复、倪新伯、彭郁卿 编著

责任编辑 王昌泰

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 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

*

1989 年 4 月第一版 开本：850×1168 1/32

1989 年 4 月第一次印刷 印张：7 7/8

平 1—650

插页：精 2

印数：精 1—530

字数：202,000

ISBN 7-03-000874-X/O·219 (平)

ISBN 7-03-000978-9/O·235 (精)

定价：平 装 9.50 元
布脊精装 11.20 元

序 言

实验是物理学发展的基础,又是检验物理理论的唯一标准.回顾物理学发展的历史,正是实验技术的发展,推动着整个物理学向前发展.因此,实验是物理学和一切科学技术发展的基础.

为了适应我国科技事业发展的需要,强调实验物理学的重要性,并总结我国物理学工作者在实验工作中的创新和实践经验,我们特编辑出版《实验物理学丛书》.

本丛书的编辑方针是: 1. 密切联系当前科研、教学、生产的实际需要,介绍各种物理实验的基本原理、技术、设备及其在各方面的应用. 2. 反映国内外最新的实验水平和发展动向,并注意实用性. 3. 以科技工作者和高等院校师生为对象,坚持理论联系实际,贯彻百家争鸣的方针,力求使丛书具有我国的特色和风格.

我国科技事业的发展已进入一个新的时期,实现科学技术现代化是我国广大科技工作者肩负的光荣而艰巨的任务.我们诚恳地希望广大物理学工作者发挥为社会主义事业著述的积极性,不断总结实践经验,总结研究成果,积极支持丛书的出版工作,共同为出好该丛书而努力.

《实验物理学丛书》编委会

《实验物理学丛书》编委会

主 编	钱临照					
副主编	王淦昌	王大珩	柯 俊	洪朝生	管惟炎	
编 委	王之江	王业宁	王守觉	王华馥	王祝翔	许顺生
	华中一	苟清泉	何寿安	吴自勤	张志三	汤定元
	杨 桢	杨顺华	项志遴	姜承烈	徐其昌	徐叙瑭
	章 综	郭可信	龚祖同	黄兰友	梅镇岳	程晓伍
	薛鸣球	魏荣爵	王昌泰			

目 录

第一章 引言	1
§ 1.1 实验核物理的应用	1
§ 1.2 原子核物理的一些概念和定义	3
第二章 γ 射线谱学	5
§ 2.1 γ 射线	5
§ 2.2 γ 射线与物质的相互作用	7
2.2.1 光电过程	10
2.2.2 康普顿过程	12
2.2.3 电子偶过程	19
§ 2.3 γ 射线探测器	23
2.3.1 闪烁探测器	24
2.3.2 半导体射线探测器	31
2.3.3 探测器的效率和分辨本领	37
§ 2.4 γ 能谱测量	41
2.4.1 γ 谱仪	41
2.4.2 谱仪刻度	44
2.4.3 本底	45
§ 2.5 符合技术	49
2.5.1 总和符合谱仪	51
2.5.2 康普顿谱仪	53
2.5.3 电子偶谱仪	54
§ 2.6 活化分析	55
第三章 穆斯堡尔谱学	59
§ 3.1 穆斯堡尔谱学的基本原理	59
3.1.1 穆斯堡尔效应	59
3.1.2 无反冲分数	69
3.1.3 同质异能移(化学能移)	73

3.1.4	四极分裂	79
3.1.5	磁超精细分裂	84
3.1.6	二次多谱勒能移(温度能移)	90
3.1.7	谱线宽度	91
§ 3.2	穆斯堡尔谱学的实验技术.....	92
3.2.1	穆斯堡尔源	94
3.2.2	探测器	98
3.2.3	速度驱动装置	100
3.2.4	速度的标定	105
3.2.5	样品制备	107
3.2.6	在不同温度、不同压力和外加磁场下的测量	111
3.2.7	数据处理	115
§ 3.3	穆斯堡尔谱学应用.....	119
3.3.1	在物理学基础研究方面的应用	119
3.3.2	在固体物质微观结构研究方面的应用	122
第四章	扰动角关联.....	133
§ 4.1	扰动角关联的基本原理.....	133
4.1.1	角关联及扰动角关联	133
4.1.2	扰动角关联理论的一般描述	135
4.1.3	静态电磁场的扰动	138
4.1.4	依赖于时间的扰动	144
§ 4.2	扰动角关联的基本实验方法.....	152
4.2.1	积分扰动角关联	152
4.2.2	时间微分扰动角关联	156
4.2.3	核磁共振扰动角关联	160
4.2.4	频闪观测扰动角分布	163
§ 4.3	扰动角关联方法在核物理研究中的应用.....	168
4.3.1	测量原子核激发态的磁矩	168
4.3.2	测量原子核激发态的电四极矩	169
4.3.3	研究原子在真空中自由飞行的超精细相互作用	172
4.3.4	测量短寿命核态的时间	173
§ 4.4	扰动角关联方法在固体物理及生物学中的应用...	174

4.4.1 扰动角关联方法在固体物理中的应用	174
4.4.2 扰动角关联方法在生物学研究中的应用	183
第五章 正电子湮没谱学及其应用	189
前言	189
§ 5.1 正电子湮没谱学的基本原理	190
5.1.1 正电子与自由正电子湮没	190
5.1.2 正电子的捕获态湮没	195
5.1.3 正电子的束缚态——正电子素及其湮没	199
§ 5.2 基本实验方法	203
5.2.1 放射源和样品的制备	203
5.2.2 正电子寿命的测量	206
5.2.3 2π 角关联测量	212
5.2.4 多普勒展宽谱测量	214
5.2.5 其它实验方法	216
(一) 双参量技术——寿命和动量的关联测量	217
(二) 慢正电子束分析	218
§ 5.3 正电子湮没谱学的应用	219
5.3.1 固体材料缺陷的研究	220
(一) 晶体材料中的缺陷	220
(二) 通过缺陷研究探讨非晶合金的结构	224
5.3.2 相变的研究	226
5.3.3 辐射损伤、碱卤晶体中的色心研究	230
5.3.4 金属和合金中电子动量分布的测定, 费密面形状的研究	234
5.3.5 正电子断层照相 (PET)	236
结束语	238

第一章 引言

§ 1.1 实验核物理的应用

原子核物理是一门实验科学。

1896年贝克勒耳发现天然放射性，揭开了核物理的序幕，1911年卢瑟福根据散射实验提出原子的行星模型，明确了原子核的存在，几十年来，实验核物理得到了迅速的发展。

今天，人们对于原子核的组成及其基本性质、放射性及其规律，以及原子核相互转化的情况都已有了基本的了解，而对原子核结构以及核子之间相互作用的认识也正在逐步深化。人们对原子核的认识是对自然的认识的一次飞跃，是本世纪最重要的科学成就之一。

随着人类对原子核认识的深入，今天核科学的应用已经涉及极其广阔的领域，它们从各个方面深刻地影响着人类的 life 和技术的发展。

大体可以将应用分为三个方面：

第一个方面是核军事科学和核能技术，它涉及核能的释放和利用。军事上利用裂变和聚变能量的瞬时释放，制成了核武器。当然，也可以有控制地逐渐释放核能，以用于发电或者作为动力。

第二个方面通常被称为放射性应用。它是利用射线的基本性质，进行同位素示踪、辐射改性、射线照相、射线探伤、放射治疗，以及利用同位素测厚、测密度、测料位、测水分等等，应用十分广泛。

近年来尤其受人注意的是第三方面的应用，有些核物理学家称它为“狭义的实验核物理应用”，这是直接由实验核物理的发展扩展而成的边缘领域，其中包括应用 γ 射线谱学、穆斯堡尔谱学、

正电子湮没谱学、受扰角关联技术、中子衍射、核四极矩共振、 μ 子自旋旋转方法等,在近二、三十年来发展很快。

这三方面应用的迅速发展和不断深化,使它们逐渐相对独立。但是,相对来说,人们对核科学的前二方面的应用已经比较熟悉,已有不少专著叙述这些内容。但是,对正在迅速发展的第三方面的应用,著述却比较少。本书打算尽量弥补这一缺陷。

γ 射线谱学曾在实验核物理的发展中起过重要的作用。将这种方法应用于活化分析、核医学等领域,正对冶金学、地质学、化学、医学和药物学、乃至法医学和考古学等都产生着重要的影响。

正电子湮没谱学利用正电子-电子对的湮没过程探测物质微观结构,常用的方法是测量寿命、测量双 γ 光子的角关联,以及测量谱线的多普勒展宽。在固体物理方面可以研究结构和缺陷、位错、传导电子密度等,在化学方面可以研究溶液中络合物配位结构、化学反应的动力学、高分子聚合机制等,在分子生物学方面研究生物活性、自由基等,是近二十余年来发展很快的一个新兴领域。

物质中的原子核总是处在核外环境所引起的电磁场之中。原子核有一定的电荷分布,并具有核矩,而这些电磁场或者由核外电子产生,或者是由近邻电荷引起。因此,它们引起超精细相互作用,造成核能级的移动和分裂。超精细相互作用的哈密顿量 $\mathcal{H}_I$ 可以分解为 $\mathcal{H}_I = \mathcal{H}(E0) + \mathcal{H}(M1) + \mathcal{H}(E2) + \dots$,其中 $\mathcal{H}(E0)$ 由电单极相互作用引起, $\mathcal{H}(M1)$ 由磁偶极相互作用引起, $\mathcal{H}(E2)$ 由电四极相互作用引起。每项都是核矩与核外电磁场的相应项的乘积。所以,研究超精细相互作用既可以得到关于核矩的信息,也可以得到关于核外环境的信息。穆斯堡尔谱学和受扰角关联技术主要就是通过探测超精细相互作用来研究物质微观结构的。

在本书以下各章中我们将介绍上述实验核物理的应用,并着重介绍方法。这些应用方法都在近年来得到迅速发展,而且已构成引人注目的边缘领域。限于篇幅,本书将不叙述其它一些方法。

看来,实验核物理应用方法将在自然科学和技术的各领域中发挥越来越大的作用,我们希望将来能有机会介绍更多的方法。

§ 1.2 原子核物理的一些概念和定义

为了方便非核物理专业的读者阅读,本节简要地介绍一些原子核物理的概念和定义。

1. 原子核的自旋,即原子核的角动量,自旋 P_I 的大小为

$$P_I = \frac{h}{2\pi} \sqrt{I(I+1)}, \quad (1.1)$$

其中 I 称为自旋量子数,是整数或半整数.它在空间给定 z 方向上的投影

$$P_{Iz} = \frac{h}{2\pi} m_I, \quad (1.2)$$

其中 $m_I = I, I-1, \dots, -I$, 称为磁量子数。

2. 原子核的磁矩 μ_I 为

$$\mu_I = g_N \left(\frac{e}{2m_p c} \right) P_I, \quad (1.3)$$

其中 g_N 称为原子核的 g 因子, m_p 是质子质量.相应 z 方向上的投影

$$\mu_{Iz} = g_N \mu_N m_I, \quad (1.4)$$

其中 $\mu_N = \frac{eh}{2m_p c}$ 称为核磁子.显然,核磁子比玻尔磁子约小 1840 倍。

3. 原子核的电四极矩表示核电荷分布偏离球对称的程度.简单说来,对于核电荷呈旋转椭球分布的原子核,设椭球对称轴方向上的半轴为 c , 垂直于对称轴的半轴为 a , 那么电四极矩

$$Q = \frac{2}{5} Z(c^2 - a^2), \quad (1.5)$$

其中 Z 是核电荷数。

4. 原子核的字称表征其状态波函数的空间反演性质.原子核

所处状态不同, 宇称也会变化。通常在自旋量子数的右上角标以正号或负号来表示核态的宇称。在弱相互作用过程中, 宇称并不守恒。

5. 核衰变服从指数衰减规律, 即放射性原子核的数目 N 随时间 t 指数衰减:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1.6)$$

其中 N_0 是起始时刻 ($t = 0$ 时) 放射性原子核的数目, λ 称为衰变常数, $T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ 称为半衰期, $\tau = \frac{1}{\lambda}$ 称为平均寿命。放射性强度的单位是居里和贝克勒耳。每秒发生 3.7×10^{10} 次衰变的放射性强度定为 1 居里, 1 居里等于 3.7×10^{10} 贝克勒耳。

6. γ 光子的角动量 L 取决于跃迁前后原子核的角动量 I_i 和 I_f , 根据角动量守恒,

$$L = I_i - I_f. \quad (1.7)$$

由于 L 越大, γ 跃迁的几率越小, 所以除了 $L = |I_i - I_f|$ 以外, 其它 L 值的相应跃迁均可忽略。跃迁极次用 2^L 表示; 宇称 $\pi_\gamma = (-1)^L$ 的辐射称为电多极辐射, 用 EL 表示; 宇称 $\pi_\gamma = (-1)^{L+1}$ 的称为磁多极辐射, 用 ML 表示。

7. 粒子和反粒子有相同的质量、自旋和半衰期, 但它们的电荷、重子数、轻子数、奇异数大小相等符号相反。一种粒子和它的反粒子相遇时, 二个粒子同时“消失”而转化为其它粒子的现象称为湮没。电子和正电子相遇将会湮没而转化为二个光子。

参 考 文 献

- [1.1] J. Christiansen (Ed.), *Hyperfine Interactions of Radioactive Nuclei*, Springer-Verlag, Berlin, 1983.
- [1.2] 卢希庭主编, 原子核物理, 原子能出版社, 北京, 1981.

第二章 γ 射线谱学

§ 2.1 γ 射线

不稳定的原子核会自发通过一定方式(例如 α, β, γ 衰变等)发生转变。通过衰变图集^[例如, 1]或核素数据表^[例如 2, 3]可以得到关于衰变方式、辐射能量、分支比、半衰期等必要的数数据。

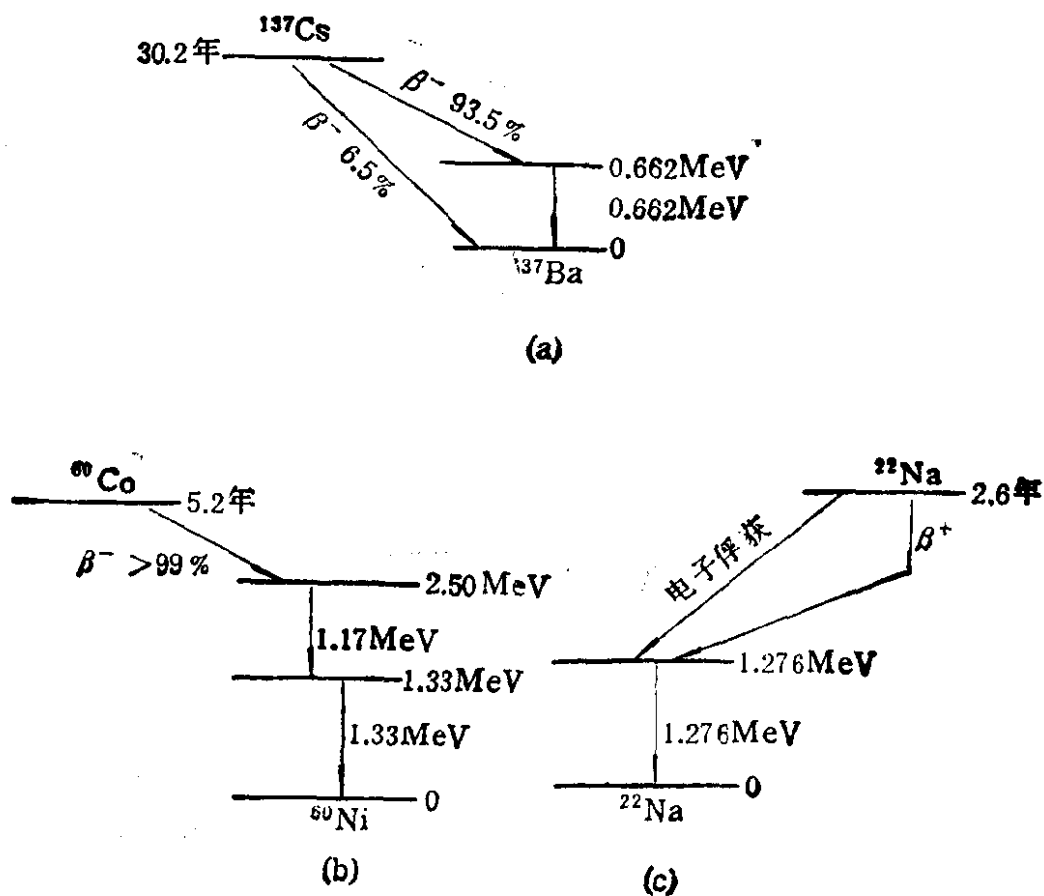


图 2.1 几个典型的衰变纲图。

图 2.1 所示即为衰变纲图。如图所示,在原子核物理中,用能级来标志原子核的能量状态。能量最低的状态称为基态,基态以

上有一系列能量较高的激发态。通过核衰变或核反应形成的原子核，往往处于不稳定的高激发态。由这些高激发态跃迁到较低的激发态或基态，而不改变原子核的组分，这样的消激发过程称为 γ 跃迁。 γ 跃迁时，原子核发出 γ 射线或者放出内转换电子。因此， γ 射线能量 E_γ 取决于与跃迁有关的二个能级间的能量差。放射性原子核放出的 γ 射线的能量通常在几千电子伏¹⁾与几兆电子伏之间。

γ 射线是波长极短的电磁波。其波长 $\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{E_\gamma}$ ，通常小

于 10^{-8} 厘米。上式中 ν 为频率， c 为光速， h 为普朗克常数，等于 6.62×10^{-27} 尔格·秒。 γ 射线由 γ 光子组成， γ 光子不带电，静止质量为零。

γ 射线谱学测量 γ 射线的能量分布，主要应用于二个研究领域。一，在核物理中用于决定原子核结构；二，作为示踪、活化分析、低水平测量等技术的基础，是实验核物理最广泛的应用之一，在自然科学的许多领域，乃至环境监测、法医学方面都具有重要意义。

γ 射线能谱的测量方法很多。有闪烁法、半导体探测器法、次级电子法、内转换电子法、晶体衍射法等。以前二者为常用。对于一台好的 γ 谱仪，性能指标首先应该是：高的能量和时间分辨本领、高的探测效率以及高的数据积累速度。只有有了高的能量分辨本领才能分辨开复杂谱中尽可能多的 γ 射线；有了高的时间分辨本领才可测量 γ 射线相互间的时间关系，有利于研究关联事件以及亚稳态的跃迁，等等；高的探测效率使得可以采用较弱的源和较短的测量时间；高的数据积累速度不仅能缩短对样品的测试时间，而且对于测量半衰期较短的同位素尤为重要。但是，以上三个性能有时是互相牵制的，在这种情况下必须根据测试目的优先考虑某个性能指标而适当牺牲别的指标。近年来，由于直接采用微处理机积累和分析数据，以及计算机的应用，从而大大地提高了 γ 谱仪的分辨本领和测量精度。

1) 电子伏(eV)是能量单位。1eV = 1.602×10^{-19} 焦耳。

§ 2.2 γ 射线与物质的相互作用

射线与物质的相互作用是射线探测和射线应用的物理基础。 γ 光子通过物质时,会在一次碰撞中整个地丢失能量,这是与带电粒子通过逐次碰撞逐渐丢失能量的方式不同的。在物质中,它主要发生三种效应:

(1) 光电效应: 光子把它的全部能量交给核外束缚电子,使之脱离原子而成为光电子。在 γ 射线能量低,吸收物质原子序数 Z 高的情况下这种效应占主要地位。

(2) 康普顿效应: 光子被原子中的束缚电子或自由电子所散射,飞行方向发生偏转,同时电子受到反冲。这是一种非相干散射,它在中等 γ 射线能量(几个 MeV)的范围内占主要地位。

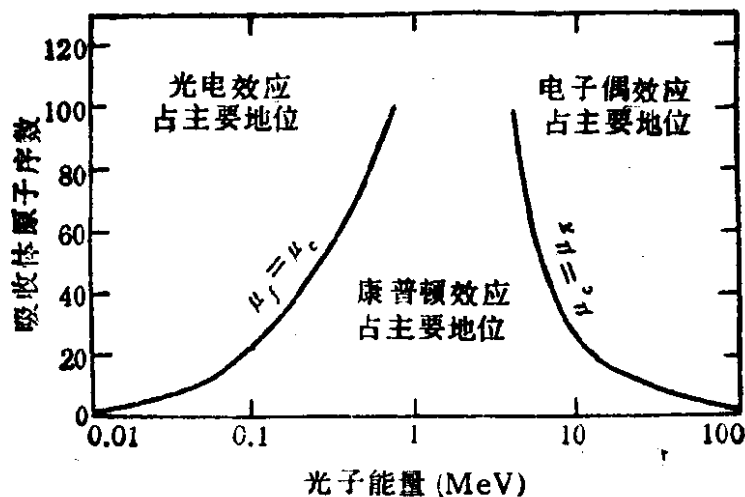


图 2.2 三种主要效应在不同吸收物质中所占的地位。 μ_f , μ_c , μ_e 分别为由于光电效应、康普顿效应和电子偶效应引起的线性吸收系数。

(3) 电子偶效应: 能量大于 $2m_e c^2$ 的光子 ($m_e c^2$ 为电子静止质量,即 0.511MeV) 在原子核或电子库仑场中产生电子-正电子对:

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^-$$

在 γ 射线能量高,吸收物质原子序数 Z 也高的区域内占主要地位(图 2.2)。

实际上,除了以上三种主要过程外,还可能有其它很多次要的过程。光子与物质的相互作用可能有十二种,可以列表如下:

相互作用对象	相互作用形式
1. 与核外束缚电子相互作用	1. 光子完全被吸收
2. 与自由电子的相互作用	
3. 与原子核或核外电子库仑场的相互作用	2. 弹性(相干)散射
4. 与核子的相互作用	3. 非弹性(非相干)散射

例如,低能 γ 光子(E_γ 在几十 keV 以下)也可能与核外电子发生相干弹性散射,这种相干散射是 X 射线结晶学的物理基础。特别是重元素的内层电子,它们有较大的弹性散射相干截面。高能 γ 光子(E_γ 大于 10 MeV)也可能与原子核相互作用产生光核反应等。但是,所有这些过程的几率一般不会超过总几率的 1%。因此,对 γ 能谱测量而言,只有上述三种主要过程是有意义的。

由于上述效应, γ 射线通过物质时,强度就会减弱。实验证明,一束经准直的窄束 γ 射线通过厚度为 d 的物质吸收层后,其强度减弱可以表示为

$$I = I_0 e^{-\mu d}, \quad (2.1)$$

其中 I_0 和 I 分别为通过吸收层前后的强度。总线性吸收系数 μ 等于上述三种效应引起的吸收系数 μ_1 , μ_c 和 μ_x 之和:

$$\mu = \mu_1 + \mu_c + \mu_x, \quad (2.2)$$

线性吸收系数 μ 的单位是 1/厘米。如果 ρ 是吸收物质的密度,则可以定义质量总吸收系数 μ_m 为

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho},$$

其单位为厘米²/克。质量吸收系数与吸收物质的密度和物理状态无关。这样,式(2.1)也可以改写为

$$I = I_0 e^{-\mu_m d_m}, \quad (2.3)$$

式中质量厚度 $d_m = \rho d$, 表示每平方厘米吸收物质所包含的质量。

各种元素和某些化合物在不同能量下的线性吸收系数和质量

吸收系数可从有关的表中查到^[例如4,5]。图 2.3 所示为在碘化钠、锗和
 蒽这三种射线探测材料中上述三种相互作用的线性吸收系数与光

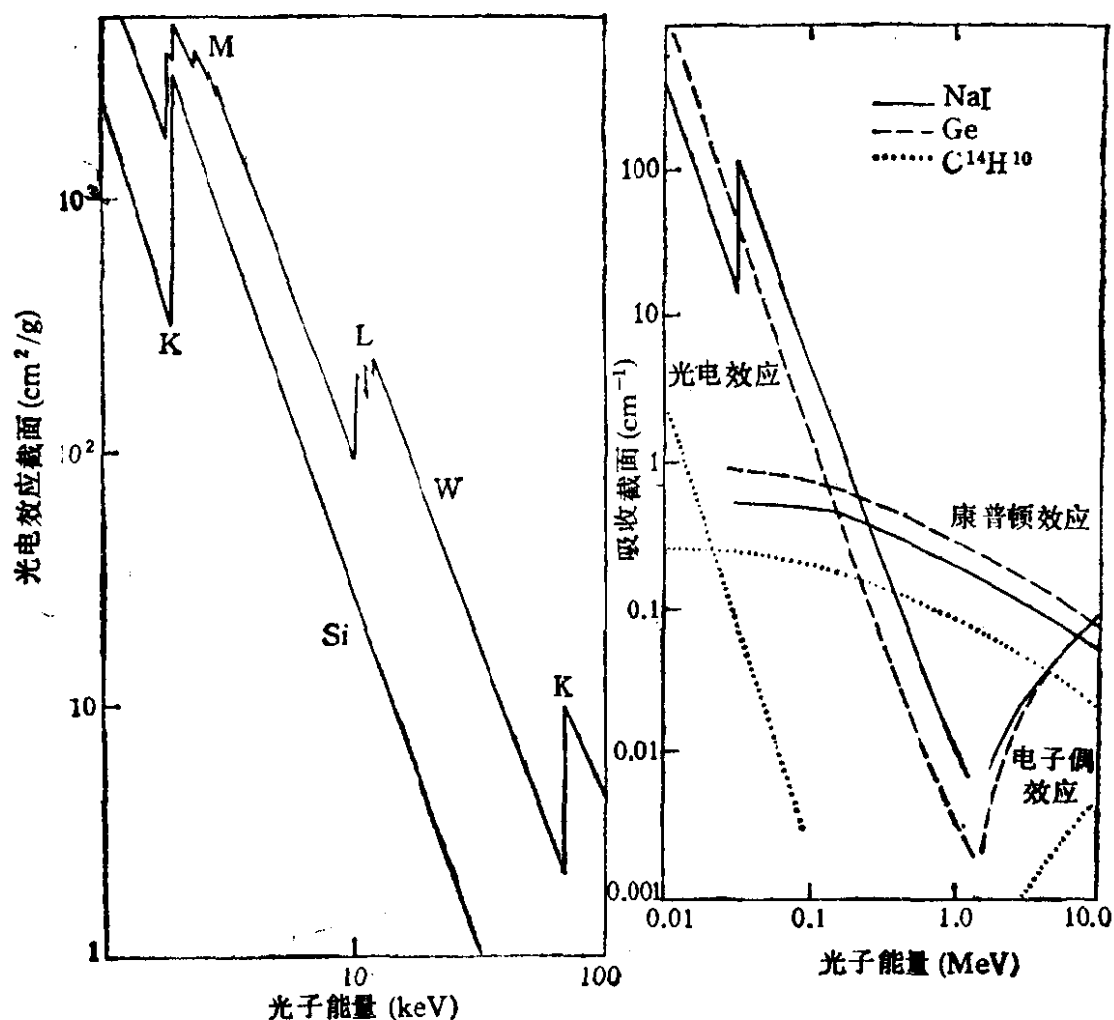


图 2.3 在碘化钠、锗和蒽中三种相互作用效应的线性吸收系数与光子能量的关系。

子能量的关系。可以看到,不同物质的曲线的形状是类似的。但是,某种能量的光子在不同介质中可能是起主要作用的吸收效应也不同。例如,在轻金属铝中,对 $E_\gamma < 0.05\text{MeV}$ 的光子,以光电效应为主要;对 E_γ 为 $0.05 \sim 15\text{MeV}$ 的光子,以康普顿效应为主要;而对 $E_\gamma > 15\text{MeV}$ 的光子,则以电子偶效应为主要。但是,在重金属铅中,对 $E_\gamma < 0.5\text{MeV}$ 的光子,以光电效应为主要;对 E_γ 为 $0.5 \sim 5\text{MeV}$ 的光子,以康普顿效应为主要;而对 $E_\gamma > 5\text{MeV}$ 的光子,则以电子偶效应为主要。

由以上可见,关于 γ 射线的“射程”的含意是和带电粒子不同