

原子核心与化学环境

梅镇岳 编著



科学出版社

原子核心与化学环境

梅镇岳 编著

科学出版社

1977

内 容 简 介

本书主要论述原子核受化学环境影响而产生的一些现象,介绍原子核物理学在化学和固体结构方面的应用。全书分为五章:原子核放射性和化学环境,穆斯堡尔效应,核磁共振和外界环境、电子能谱方法,原子内层电子结合能。

本书可供高等学校原子核专业师生及从事物质结构研究工作的科技人员参考。

原子核与化学环境

梅镇岳 编著

*

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

*

1977 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1977 年 5 月第一次印刷 印张: 8 1/4

印数: 0001—4,010 字数: 186,000

统一书号: 13031·525

本社书号: 771·13—3

定价: 0.85 元

序 言

原子核和原子内层电子要受到外层电子和更外围电子组态的影响,我们通常把这种外层电子和更外围电子的组态称为原子核和原子内层电子的化学环境。大家知道,原子核的放射性衰变很少受到外界环境的影响,早期的测量表明,天然放射性物质在各种不同条件下衰变寿命都不改变。卢瑟福曾根据实验数据指出:“任何(放射性)物质的衰变常数 λ 是一个特征常数,与所有的物理和化学条件无关”。这是因为放射性衰变所涉及的能量远远超过外界化学、物理条件所涉及的能量。

原子内层电子对确定原子在周期表内的位置起着一定的作用,但对化学结合、分子结构、固体特性等似乎没有什么影响,而这些则主要取决于外层电子和更外围电子。一般说来,由于内层电子和外层电子的结合能有很大差别,因此曾经认为,外层或更外围电子的组态对内层电子的结合不可能产生值得注意的影响。

但是分子或原子是由原子核、内层电子、外层轨道电子和外围电子所组成的,它们是一个整体,互相联系,互相影响。原来探测不到的效应,由于实验技术的改进,往往发现有重要影响。事实正是如此。过去认为是微弱的不值得注意的影响,今天不但已明确地观察到,定量地测量出来,而且还发现有着重要意义。

本书主要介绍一些已知的测量方法,并说明如何根据测得数据来阐明化学环境,从而为化学分析和确定分子结构提

供一些精密测量方法。本书重点是叙述利用电子能谱方法测定原子内层电子的结合能。现在运用近代高分辨的电子能谱技术，已观察到处于不同化学环境的原子内层电子结合能存在不同的位移和劈裂。根据这种位移和劈裂，不但可以确定分子结构和固体的特性，而且能够改进早先采用的吸收限方法所测得的内层电子结合能数据的精确度。采用这种方法进行化学分析的优点是：灵敏度高，可以区分元素的氧化态，基本上是一种非破坏性的分析。它和其它方法，例如：红外光谱、喇曼效应、质谱分析、核磁共振、顺磁共振、穆斯堡尔谱等方法，可以相互补充。

大家知道，内层电子结合能谱的一个特点是它的电子特征，结合能位移和劈裂主要来源于不同化学环境的不同电荷分布。结合能谱法的分辨率，和穆斯堡尔谱法、高分辨核磁共振谱法相比虽然要差一些，但它的解释更为直接，而且不受原子核特性，例如自旋和磁矩等的限制，这些是它的优点。但是目前分子结构理论还不完善，要广泛应用内层电子结合能谱法研究分子结构，还必须进行许多理论和实验研究工作。

为了便于对内层电子结合能谱进行探讨和对比，为讨论原子内层电子组态提供背景材料，本书还简略地介绍了化学环境对原子核现象的干扰，以便于读者加深理解。

目前内层电子结合能谱法在化学分析、研究分子结构和固体物理等方面得到了日益广泛的应用。本书目的在为这方面的工作人员提供参考材料。限于作者水平，书中一定会有不少错误和不当之处，希望读者批评指正。

在本书编写过程中，曾得到各方面大力支持，作者在此表示衷心感谢。

梅镇岳

1975年6月

目 录

序言

第一章 原子核放射性和化学环境	1
§ 1. 原子核放射性衰变和化学环境	2
§ 2. 内转换电子谱和化学环境	13
§ 3. γ - γ 角关联和原子核的环境	20
第二章 穆斯堡尔谱	65
§ 4. 穆斯堡尔效应	65
§ 5. ^{57}Fe 的穆斯堡尔谱和化学环境	73
§ 6. ^{119}Sn 的穆斯堡尔谱和化学环境	94
§ 7. 其它原子核的穆斯堡尔谱	99
第三章 核磁共振和外界环境	109
§ 8. 原子核磁矩和核磁共振	109
§ 9. 核磁共振的实验方法	131
§ 10. 核磁共振谱测量	139
§ 11. 核磁共振谱的一般情况	145
§ 12. 质子核磁共振谱	153
第四章 电子能谱方法	165
§ 13. 静电场聚焦电子能谱仪	165
§ 14. 磁场聚焦电子能谱仪	178
§ 15. 电子能谱仪的其它设备	197
§ 16. 原子内层电子结合能的测量	211
第五章 原子内层电子结合能	216
§ 17. 原子内层电子结合能位移	217
§ 18. 原子内层电子结合能谱和化学参数	233
§ 19. 原子内层电子结合能谱线的劈裂	240

第一章 原子核放射性和化学环境

本章准备讨论原子核衰变寿命、内转换电子能谱以及 γ - γ 角关联等在不同化合物和晶体结构中或在电磁场直接作用下所受到的干扰，并探讨由这些干扰来确定原子核所在原子或分子的化学结构的可能性。显然，这里需要考虑价电子或更外围电子的干扰作用，不过从和原子核的相互作用来看，内层轨道电子的作用更强一些。综合这两方面，我们应该主要考虑轻原子核的轨道电子俘获和内转换跃迁，因为轻原子核的轨道电子几乎没有内外层的区别，而轨道电子俘获和内转换又是唯一牵涉到轨道电子的两种原子核跃迁。

原子核和它外围的电子是一个整体，两者相互联系，相互影响。原子核跃迁会影响价电子的组态，而衰变后原子核的反冲也会引起化学变化^[1]。但价电子组态涉及到的能量变化只有几个电子伏，它们对于原子核跃迁和辐射的影响是很微弱的，一般很难探测到。随着探测和分析技术的改进，现在已能明确地观察到原子核外层电子组态对于原子核电磁特性和电磁跃迁的微弱影响了。

γ - γ 角关联受到原子核外界电磁场影响所产生的效果，实质上是和原子核 γ 射线的角分布受外界电磁场影响的情况是一样的。在原子核接连放射 γ 光子的短暂时间间隙内，原子核的取向或极化随着外界电磁场的影响而改变，这样就会引起 γ - γ 角关联的变更。 γ 射线的发射是以原子核磁矩和角动量转轴的方向作为参考系统的，事实上， γ - γ 角关联的变更是由参考系统发生变化所引起的。因此，从 γ - γ 角关联

的观察中应该也能了解到原子核所处的电磁场或化学环境。

§1. 原子核放射性衰变和化学环境

轨道电子俘获 原子核(Z)跃迁到原子核($Z - 1$)的过程,一般可由轨道电子俘获,或由阳电子放射和轨道电子俘获分支来进行. 探测轨道电子俘获过程,一般是观察衰变原子核所放射的X射线,实际上也就是观察有关轨道电子的跃迁.

轨道电子俘获可以在衰变能量所允许范围内的各轨道中出现. 总的衰变几率 λ 可以近似地写成^[2]

$$\lambda = \frac{g^2}{4\pi} C \sum_x q_x^2 n_x \beta_x^2, \quad x = s_{1/2}, p_{1/2}, \quad (1.1)$$

这里 g 是弱相互作用耦合常数;如果略去其它轨道电子的微弱影响,对于 $s_{1/2}$ 和 $p_{1/2}$,形状因子 C 是一个常数; q_x 是当轨道 x 中出现一个电子空穴时所放射的中微子的能量; n_x 是轨道 x 的占有几率; β_x 是 x 轨道电子的波函数幅度,因此, $n_x \beta_x^2$ 代表 x 轨道电子在原子核区域的密度.

一般说来,当原子核发生跃迁时,原子的核心部分有带电粒子发射出来,或者它的电荷分布发生变化. 这种突然的静电场变化往往可能把原子的结合电子从一定的轨道摔出而激发到未被电子占有的较高能级,或脱离原子成为自由态. 从整个原子来看,在原子核跃迁过程中,初始的原子波函数和每一个能量上够得上最终摔激或摔离态的波函数(包括最终基态在内)的叠合,总是不会完善的. 此外,由于 β^- 粒子和轨道电子以及自由电子都是电子,它们之间完全可能发生交换, β^- 粒子和轨道电子以及轨道电子之间的综合波函数具有反对称交换特性. 这些效应对原子核衰变的总几率有影响,但是很

微弱的。据估计,在 ${}^7\text{Be}$ 轨道电子俘获的情形,对原子核衰变几率的影响大约是 $1\%^{[3]}$ 。不过,它和典型的化学效应影响相比,大小也差不多,我们应该设法分辨它们。

如果在自由电子密度非常大的环境里,俘获自由电子的可能性就会增大,甚至成为主要的。

值得注意的是, $p_{1/2}$ 电子在原子核处的密度比 $s_{1/2}$ 电子的密度要小得多,因此它对于轨道电子俘获衰变率的贡献也要小得多。再则,和化学组态密切相关的外层 s 电子对于衰变率的贡献比内层 s 电子相应地要小。在重元素中,轨道电子的主量子数每增加1,电子密度的数值就要减少大约一个数量级。因此,要观察到化学组态对于轨道电子俘获衰变率的影响,首先得选择轻元素;另外也得考虑能量低的跃迁,使得在化学组态中起作用的、结合得不很紧密的那些电子能起主要的俘获作用。所以 ${}^7\text{Be}$ 轨道电子俘获衰变率在不同化合物中的变化一直是人们研究的课题。

实验方法 比较衰变几率 λ_1 和 λ 一般采用差分测量。对要比较的两个样品同时进行测量,而且互相对换,以减少系统误差。对于衰变率相差很小的两种样品来说,在数据处理上,差分电离室的数据比单个放射性测量的数据要容易处理,并能节省观察时间,而且可以采用强得多的放射源。

如两个放射源的放射性强度分别是 S_1 和 S ,它们的起始值 $s_1(0)$ 和 $s(0)$ 非常接近,取一次近似

$$\delta = S(t) - S_1(t) = [S(0) - S_1(0)]e^{-\lambda t} + S_1(0)t\Delta\lambda e^{-\lambda t}. \quad (1.2)$$

上式也可以写成

$$\delta e^{\lambda t} = S(0) - S_1(0) + S_1(0)(\Delta\lambda/\lambda)(t/\tau), \quad (1.3)$$

这里 $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda$, $\tau = 1/\lambda$ 是平均寿命。

我们可以利用(1.3)来测定 $\Delta\lambda/\lambda$ 。在理想的情况 $S(0) - S_1(0) = 0$, $t = \tau$ 时, δ 值为极大。最佳测量时间是 $t = 2\tau$,

此时 δ 与由放射性衰变的统计特性而引起的涨落之比为极大。

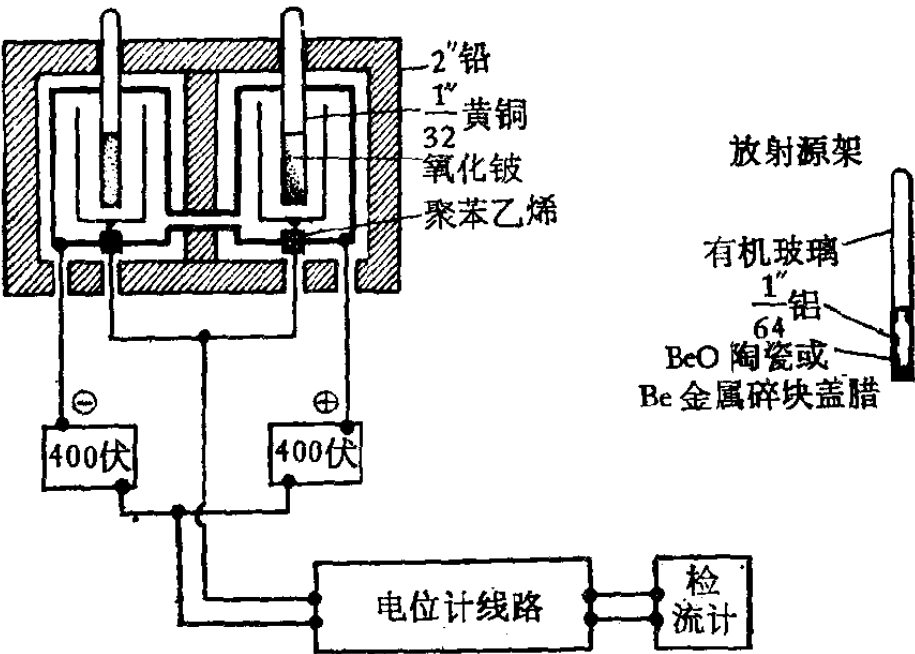


图 1.1 差分电离室装置示意图

图 1.1 为测量设备的示意图。它是两个等同的充氩电离室，气体密度的变化不得超过千分之一。两室用一小铜管连通，使它们压力相等。压力一般为 135.6 托 (23℃)。电离室最好能保持恒温，至少实验室应有良好的热屏蔽。电离室的收集电极连在一起，并和通常的静电计线路的输入端相连。可以采用漂移率方法来安排线路。收集极电压可以由几百伏的乾电池来供给。收集电压的连结法是使一个电离室的电离电流和另一个的相反。如果在两个电离室内放置放射性强度相等的样品，静电计线路中的电流计指示将不出现漂移。样品托牢固地安在电离室中央，几何安排略有变化时不至于影响实验结果。这种差分测量能测定两个样品间的微小放射性强度差别。

具体的测量方法是：先把样品分别放置在两个电离室中，得到电流计的漂移率为

$$p = E_1 S - E_2 S_1, \quad (1.4)$$

其中 E_1 和 E_2 分别是电离室 1 和 2 的灵敏度, 它们相差很小. 然后把样品对调, 电流计的漂移率将是

$$q = E_1 S_1 - E_2 S, \quad (1.5)$$

因此

$$p + q = (S + S_1)(E_1 - E_2), \quad (1.6)$$

$$p - q = (S - S_1)(E_1 + E_2) \cong 2\delta E_1. \quad (1.7)$$

如果仪器本身有一漂移, 这将是非常小的, 而且将在 (1.7) 中互相抵消. 可以先用单个样品安放在电离室 1, 以求得 $E_1 S_1$. 利用 (1.7) 我们就能得到 $\delta/S_1(0)$ 和 $[S(0) - S_1(0)]/S_1(0)$, 如果已测定 t , 并且把已知的 λ 代入, 我们就能从 (1.3) 得到 $\Delta\lambda/\lambda$.

对于 ^7Be 轨道电子俘获衰变率在不同样品中的变化曾进行过许多工作. ^7Be 轨道电子俘获衰变的半衰期大约是 53.5 天. 衰变的 90% 左右是到达 ^7Li 的基态, 衰变过程中放射 LiX 射线和中微子. 其它大约 10% 跃迁到 ^7Li 的 478 电子伏激发态. 两个轨道电子俘获分支都是超级容许型, 形状因子 C 和原子核态无关. Be 原子的组态是 $1s^2 2s^2$, 屏蔽效应使得在原子核处的 $2s$ 对 $1s$ 电子密度比从类氢值 $1/8$ 减少到大约为 0.04. 关于 ^7Be 轨道电子俘获衰变率在不同化学环境中的变化列表如下:

$\lambda(\text{Be}) - \lambda(\text{BeO})$	$= 0.15 \pm 0.09 \times 10^{-3}\lambda$
	0.131 ± 0.05
$\lambda(\text{BeO}) - \lambda(\text{BeF}_2)$	$0.69 \pm 0.03^*$
	$0.609 \pm 0.055^*$
	1.130 ± 0.058

* BeF_2 成六角晶, 其它 BeF_2 是无定形. 数据取自: Emery, G. T., *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, 22, (1972), 177.

$\lambda(\text{Be}) - \lambda(\text{BeF}_2)$	$0.741 \pm 0.047^*$
	1.2 ± 0.1
$\lambda(\text{BeS}) - \lambda(\text{Be})$	0.53 ± 0.06
$\lambda(\text{BeO}) - \lambda(\text{BeBr}_2)$	1.472 ± 0.063
$\lambda(\text{BeO}) - \lambda(\text{Be}(\text{C}_5\text{H}_5)_2)$	0.795 ± 0.074
$\lambda(\text{Be}^{2+}(\text{OH}_2)_4) - \lambda(\text{BeO})$	0.374 ± 0.077
$\lambda(\text{Be}_4\text{O}(\text{CH}_3\text{COO})_6) - \lambda(\text{BeO})$	0.724 ± 0.057
$\lambda(\text{Be}^{2+}(\text{OH}_2)_4) - \lambda(\text{Be}(\text{C}_5\text{H}_5)_2)$	1.169 ± 0.106
$\lambda(\text{Be}_4\text{O}(\text{CH}_3\text{COO})_6) - \lambda(\text{BeF}_2)$	1.852 ± 0.082

从数据上可以见到,半衰期的排列次序(也就是在原子核处的电子密度排列次序)和电负性的排列并不一致.由K电子结合能谱结果所得到的在原子核处的电子密度变化次序和这里所得到的是一致的,但是不成比例.据估计^[4]气态和金属态之间的衰变率变化可以达到3.5%左右.

在⁸⁹Zr和⁸⁵Sr的轨道电子俘获衰变中也观察到,在不同化合物中有不同的衰变寿命.⁸⁹Zr的半衰期是78.4小时,自旋和宇称是 $\frac{9}{2}^+$.衰变的99%跃迁到⁸⁹Y的 $\frac{9}{2}^+$ (909千电子伏)能级,其中76.6%是轨道电子俘获,22.3%是 β^+ 放射.其余1%是由轨道电子俘获跃迁到较高的激发态.由于⁸⁹Zr中成对质子占有 $g \frac{9}{2}$ 态比较少,主要的轨道电子俘获跃迁有些受阻碍,log ft值是6.1.形状因子C应该和原子轨道无关.锆的原子组态是氩壳层外再加 $4d^25s^2$.

钛酸钡在120℃有一铁电相转换.在这温度以上它有一个钙钛矿型的立方结构,这温度以下结构发生畸变,出现大的内电场.我们可以把放射源⁸⁹Zr掺杂在钛酸钡中替换部分钛

* 同上页注.

离子^[5]。把配成对的 $\text{BaTi}(^{89}\text{Zr})\text{O}_3$ 放射源交换地安排在碘化钠探测器前,放射源安装有加热的设备,测量计数率比随时间的变化.也在一个比较短的周期内,把温度在居里点上下变动时,记录计数率随着温度的改变.实验结果表明在有铁电性的 BaTiO_3 中 ^{89}Zr 的衰变比在立方晶体中来得慢.总衰变率变化是 $\Delta\lambda/\lambda = (6.2 \pm 0.2) \times 10^{-4}$, 轨道电子俘获部分 $\Delta\lambda/\lambda = (8.0 \pm 0.3) \times 10^{-4}$. 内电场本身可能对轨道电子俘获的影响很小,主要的影响可能是由于 ^{89}Zr 离开晶格的对称位置,引起原子核处的电子密度发生变化.

也可以把 ^{85}Sr 掺杂在 BaTiO_3 中进行类似的测量^[6]. ^{85}Sr 的半衰期是 65.2 天,衰变全部是由于轨道电子俘获.衰变率变化的趋向和 ^{89}Zr 一样,不过数值要小得多, $\Delta\lambda/\lambda = (0.49 \pm 0.29) \times 10^{-4}$.

同质异能跃迁 原子核电磁跃迁是通过放射 γ 光子或内转换电子来进行的.这种跃迁不牵涉到原子核的 Z 值和质量数的改变,在衰变寿命长到足以能被观察到时,习惯上称为同质异能跃迁.原子核把电磁跃迁所引起的能量,角动量,和宇称的变化转移给轨道电子,从而实现原子核跃迁的过程称为内转换.内转换电子一般以结合能稍小于跃迁能量的轨道电子为主.它们的能量等于原子核跃迁能量减去电子的结合能.在跃迁能量低和高度禁戒的情况下,内转换几率比较大.电磁跃迁总衰变几率是 γ 放射衰变几率和内转换衰变几率之和.所谓内转换系数就是内转换电子放射几率和 γ 放射几率之比.如果 γ 放射衰变率是 λ_γ , 内转换系数是 α , 总的衰变率 λ 将是

$$\lambda = \lambda_\gamma(1 + \alpha). \quad (1.8)$$

事实上内转换可以在能量允许范围内的各层中进行, α 是各层内转换系数 $\alpha_{x'}$ 的和,这里 x' 代表原子轨道.

如果原子核电磁跃迁能量是 k , σ 代表电 (E) 或磁 (M), L 是多极级数, 则有:

$$\alpha_{x'}(\sigma L, k) = \frac{\pi k (e^2/\hbar c)}{L(L+1)(2L+1)} \times \sum_{\kappa} B_{\kappa\kappa'}(\sigma L) |R_{\kappa x'}(\sigma L, k)|^2, \quad (1.9)$$

这里 κ 是描述连续电子的角量子数. $B_{\kappa\kappa'}(\sigma L)$ 系数见文献 [7]. 如果轨道 x' 的结合能是 $b_{x'}$, 径向积分

$$R_{\kappa x'}(ML, k) = \int_0^\infty r^2 dr [g_\kappa(k - b_{x'}, r) f_{x'}(r) + f_\kappa(k - b_{x'}, r) g_{x'}(r)] h_L^{(1)}(kr), \quad (1.10)$$

$$R_{\kappa x'}(EL, k) = \int_0^\infty r^2 dr \left\{ [g_\kappa(r) f_{x'}(r) - f_\kappa(r) g_{x'}(r)] k - [f_\kappa(r) f_{x'}(r) + g_\kappa(r) g_{x'}(r)] \frac{d}{dr} \right\} r h_L^{(1)}(kr), \quad (1.11)$$

这里 $h_L^{(1)}(kr)$ 是第一类球汉格耳 (Hankel) 函数, g_κ 和 f_κ 是外射电子的狄拉克径向波函数, $g_{x'}$ 和 $f_{x'}$ 是初始占有轨道的电子的狄拉克径向波函数. 文献中列出的 B 系数是轨道完全占有的情况下的数值, 电子数是 $2|\kappa'|$. 如果不是这样, 必须乘以占有几率. 连续波函数是以每单位能量间隔来归一化的.

关于内转换系数的计算和讨论除文献 [7] 外, 还可以参阅有关文献, 例如文献 [8]. 值得提一下的是: 对于低能跃迁, 在一壳层中各分层的内转换, 不同的多极具有不同的特征. 跃迁的多极性除利用经验比 K/L 来确定外, 还可以利用 $L_I/L_{II}/L_{III}$ 比的多极特征. 这种特征不仅是非常明显的, 而且在各层中保持同样的特征. 图 1.2 是对于 $Z = 72$, $k \approx 0.1$ 的计算结果. 图形随着原子序数和跃迁能量缓慢而有规则地改变, 直到高能量才与多极性无关. 计算表明这个极限在重

元素中, $k \approx 20$ ($E_\gamma \approx 10$ 兆电子伏)时还没有到达。

计算还表明对于径向积分唯一可观的贡献来自原子内部, 能量不太高的磁多极内转换主要是在奇数分壳层中进行, 也就是 $\kappa' = -1, \dots, -L$ 取负数值的情况。这是径向积分中表面项所引起的。表面项和原子核处轨道电子的密度成正比。由于它对于结合态波函数归一化的影响, 因此屏蔽显得很重要。在电多极内转换情形, 当然没有表面项。但是在计算主要的径向积分过程中, 不论是磁或电的情形, 当积分到达半径值 r_{eff} 时, 积分接近于它的最后值, r_{eff} 小于或大致等于 $(l' + 1) \times (l' + 2)$ 倍原子的 K 层玻尔半径, l' 是转换电子的轨道量子数。因此, 即使是电多极内转换, 最起作用的转换还是和原子内部结合电子密度成正比的那一部分。

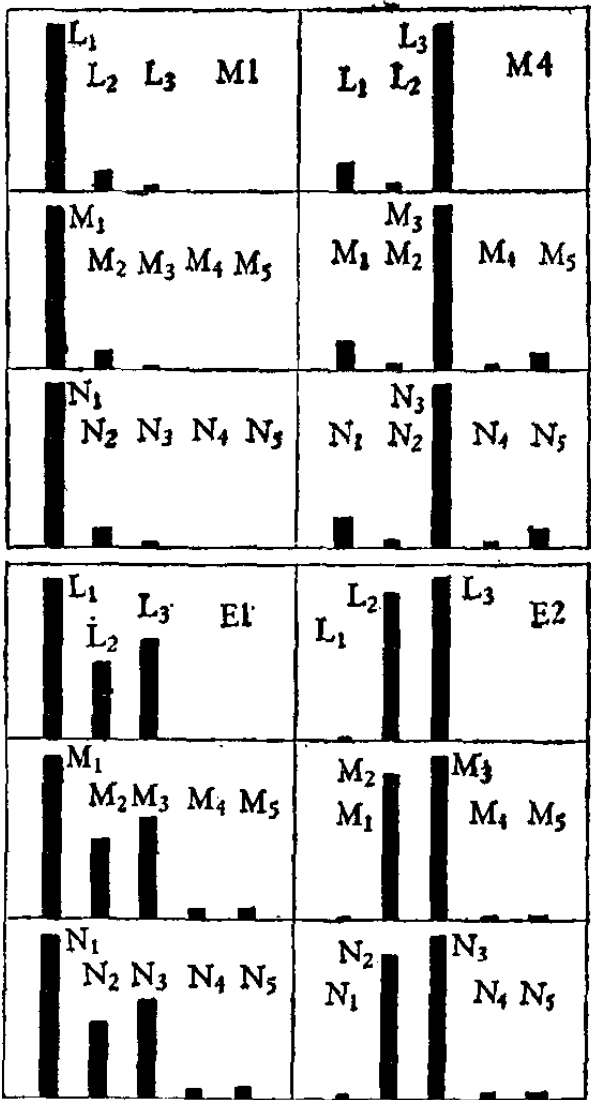


图 1.2 对于不同多极性在各壳层的相对内转换系数

在同一原子核电磁跃迁中, 两个角量子数 κ' 相同, 径向量子数 n_1' 和 n_2' 不同的原子轨道的相对内转换率是

$$\alpha_{n_1', \kappa'}(\sigma L, k) / \alpha_{n_2', \kappa'}(\sigma L, k) \approx |\phi_{n_1', \kappa'}(0) / \phi_{n_2', \kappa'}(0)|^2, \quad (1.12)$$

这里 ϕ 是结合电子的波函数。

根据 (1.12) 和 (1.8) 就不难看到同质异能跃迁或电磁跃

迁的总衰变率将受到化学环境的影响。这方面比较熟悉的例子是 ^{99m}Tc 的同质异能跃迁。它是 ^{99}Mo (半衰期 67 小时) 的子核, 半衰期是 6.0 小时。自旋和宇称态是 $1/2^-$ 。大约 0.8% 直接由 142.7 千电子伏的 M4 跃迁到 ^{99}Tc 的基态 $9/2^+$ 。其余以低能 E3 跃迁到 140.5 千电子伏的 $7/2^+$ 态, 后者以 M1 衰变到基态。主要的同质异能跃迁能量是 2.17 ± 0.01 千电子伏, 内转换系数比: $M_2/M_3/M_{45}/N = (56.4 \pm 2)/100/(47.6 \pm 2)/(28.6 \pm 5)$ 。总的内转换系数大约是 1.4×10^{16} 。铊的组态是 $4d^5 5s^2$ 。最早得到的关于 ^{99m}Tc 衰变率随着不同化学环境而改变的结果是 $\lambda(\text{KTcO}_4) - \lambda(\text{Tc}_2\text{S}_7) = (2.70 \pm 0.10) \times 10^{-3} \lambda(\text{Tc}_2\text{S}_7)^{[9]}$ 。不论过铊酸盐是乾盐还是在碱性水溶液中, 所得到的结果都是一样的。采用不同的制备方法, 由 Tc 金属做成的 ^{99m}Tc 放射源的衰变寿命可以有 $\sim 0.3 \times 10^{-3}$ 的变化。用电镀再还原的方法制备的放射源能得到可重复的结果。得到 $\lambda(\text{Tc}) - \lambda(\text{Tc}_2\text{S}_7) = (0.31 \pm 0.12) \times 10^{-3} \lambda(\text{Tc}_2\text{S}_7)$ 。由大块 Tc_2S_7 还原得到的部分是无定形的 Tc 放射源比未还原的 Tc_2S_7 中的 ^{99m}Tc 衰变率要慢千分之一左右。理论上认为可能主要是 KTcO_4 中的原子间的距离较小, $4p$ 电子受挤所造成。

其它方面的影响也能改变 ^{99m}Tc 的衰变寿命。例如超导, $\lambda(4.2\text{K}, \text{超导}) - \lambda(293\text{K}) = (0.64 \pm 0.04) \times 10^{-3} \lambda(293\text{K})$, $\lambda(4.2\text{K}, \text{正常}) - \lambda(293\text{K}) = (0.13 \pm 0.04) \times 10^{-3} \lambda(393\text{K})$ 。此外加高压和高压电场 ($\sim 2 \times 10^4$ 伏/厘米) 也能使 ^{99m}Tc 源衰变率发生变化, $\Delta\lambda/\lambda \approx 10^{-4}$ 。

^{90}Nb 是 ^{90}Mo (半衰期 5.7 小时) 的衰变产物。大约 90% 的 ^{90}Mo 跃迁到 ^{90}Nb 的 124.8 千电子伏的 4^- 态。这个态的半衰期是 18.82 ± 0.09 秒, 以低能量跃迁到 122.4 千电子伏的 6^+ 态, 然后再以 E2 衰变到 8^+ 基态。同质异能跃迁的能量

是 2.38 ± 0.36 千电子伏, 几乎可以肯定是 M2. 低能 M2 跃迁主要在 $s_{1/2}$ 和 $p_{3/2}$ 轨道转换. 铌原子的组态是 $4d^4 5s$.

^{90m}Nb 同质异能跃迁的衰变率的改变可以根据 122 千电子伏跃迁相对于 ^{90}Nb 基态衰变 (14.6 小时) 的强度变化来观察. 122 千电子伏跃迁紧接同质异能跃迁, 半衰期只有 $(61 \pm 4) \times 10^{-6}$ 秒. 它的强度以同质异能体的半衰期弛豫到达平衡. 先用 50 兆电子伏的质子束轰击铌箔, $(p, 4n)$ 反应产生 ^{90}Mo . 把箔溶解在热的浓硝酸和氢氟酸混合液体中, 铌的化学态就成为氟化合物的复盐. 实验结果^[10]是 $\lambda(\text{Nb 金属}) - \lambda(\text{氟复盐}) = (3.6 \pm 0.4) \times 10^{-2} \lambda(\text{氟复盐})$. 另一个结果^[11]是 $\lambda(\text{Nb}_2\text{O}_5) - \lambda(\text{Nb 金属}) = (1.87 \pm 0.50) \times 10^{-2} \lambda(\text{Nb 金属})$. 值得注意的是 L_{III} 电子结合能正在同质异能跃迁附近. 如 L_{III} 内转换能够充分进行, 总衰变率的 2/3 将是它的作用. 如果在铌金属中的 L_{III} 结合能略低于结合能, 而在复盐中略高, 衰变率将减少. 因此能精确地测定同质异能跃迁能量, L_{III} 内转换部分比, 和铌的结合能化学位移对于说明衰变率变化将是很重要的.

超导和加压实验的结果是: $\lambda(\text{正常}) - \lambda(\text{超导}) = (0.195 \pm 0.55) \times 10^{-2} \lambda(\text{正常})$, $\lambda(0.1 \text{ 兆巴}) - \lambda(0) = (6.3 \pm 7) \times 10^{-3} \lambda(0)$.

^{125m}Te 的半衰期大约是 58 天. 自旋和宇称态是 $11/2^-$. 以 109.4 千电子伏 M4 跃迁到达第一激发态 $3/2^+$ (半衰期 1.5 毫微秒), 然后以 35.6 千电子伏 M1 跃迁到达基态 $1/2^+$. 35.6 千电子伏跃迁的总内转换系数是 13.2, 只有混入 $(0.035 \pm 0.020)\%$ 的 E2. 两种跃迁都在 K, L, M, N 和 O 层中转换. M4 跃迁在 p 态中的转换是 s 态中的两倍. 碲原子的组态是 $4d^{10} 5s^2 5p^4$.

碲金属, 碲氧化物和碲化银中 ^{125m}Te 衰变率的改变是^[12]

$$\lambda(\text{Te}) - \lambda(\text{Ag}_2\text{Te}) = (2.59 \pm 0.18) \times 10^{-4} \lambda(\text{Te}),$$