§7.4 内 转 换

1. 内转换现象

原子核从激发态到较低的能态或基态的跃迁，除发射γ光子外，还可以通过发射电子来完成。这种电子通常不是来自原子核，而是来自原子的电子壳层，即跃迁时可以把核的激发能直接交给原子的壳层电子而发射出来。这种现象称为内转换。内转换过程放出来的电子称为内转换电子。

不能把内转换过程认作为内光电效应，即认为原子核先放出光子，然后光子把能量交给核外的壳层电子而放出电子来。因为发生内转换的概率，可以比光电效应的概率大很多。内转换电子是通过原子核的电磁场与壳层电子相互作用直接把激发能交给壳层电子而产生的，这同时并不产生γ光子。如对$0\to0$跃迁，不能放射γ光子。但实验表明，$0\to0$跃迁能放出内转换电子。这也提供了内转换过程不是内光电效应的一个证明。

内转换电子是在早期研究β能谱时发现的，用磁谱仪测量β放射源的能谱时，发现有些放射源除具有β连续谱外，还出现一些单能电子峰。

2．内转换电子的能量

$$E_e = E_\gamma - W$$

对于 K 层内转换电子的能量 E_K 有

$$E_K = E_\gamma - W_K$$

L 层内转换电子的能量 E_L 有

$$E_L = E_\gamma - W_L$$

M 层内转换电子的能量 E_M 有

$$E_M = E_\gamma - W_M$$

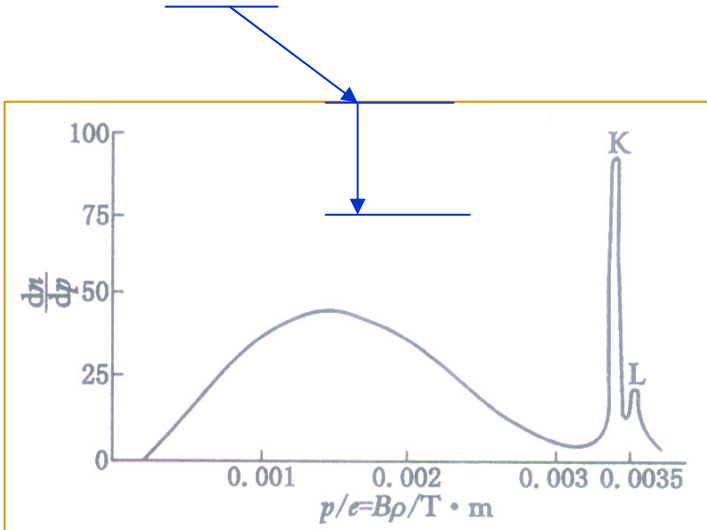

图 7-5 ^{137}Cs 的电子谱

式中 W_K，W_L，W_M 分别表示 K，L，M 层电子的结合能

由于 L 层有三个支壳层：$L_{Ⅰ}$，$L_{Ⅱ}$，$L_{Ⅲ}$，则相应的电子结合能也有三个：$W_{LⅠ}$，$W_{LⅡ}$，$W_{LⅢ}$，从而 L 层的内转换电子也有三种能量：$E_{LⅠ}$，$E_{LⅡ}$，$E_{LⅢ}$，显然有以下等式：

$$\left.\begin{aligned} E_{LI} &= E_\gamma - W_{LI} \\ E_{LII} &= E_\gamma - W_{LII} \\ E_{LIII} &= E_\gamma - W_{LIII} \end{aligned}\right\}$$

由于 M 层有五个支壳层，则 M 层的内转换电子有五种能量，依此类推。

如实验测得 ^{137}Ba 的 E_K=624.2 keV，查表得 W_K=37.4 keV，则得：

E_γ＝624.2＋37.4＝661.6 keV。

内转换过程要伴随特征 X 射线或俄歇电子的发射。

3．内转换系数

$$\lambda = \lambda_\gamma + \lambda_e$$

式中λ_γ和λ_e分别为发射γ 光子和内转换电子时的跃迁概率。

定义λ_e与λ_γ之比为内转换系数，一般以α表示，即

$$\alpha \equiv \lambda_e / \lambda_\gamma = N_e / N_\gamma$$

式中 N_e和 N_γ分别为单位时间内发射的内转换电子数和γ 光子数。

定义相应于各个壳层的内转换系数为：

$$\alpha_K \equiv N_K / N_\gamma , \alpha_L \equiv N_L / N_\gamma , \alpha_M \equiv N_M / N_\gamma , \cdots$$

显然，

$$\alpha = \alpha_K + \alpha_L + \alpha_M + \cdots$$

根据内转换系数的定义知道，它可以由实验测定，即测量同一时间间隔内原子核所放射的内转换电子数和相应的γ 光子数。另一方面，内转换系数可以由理论计算而得，因而可以进行实验值和理论值的比较，从中获得有关能级特性的重要知识。目前有关核衰变能级特性的大部分知识是从研究内转换而得的。

理论上对内转换系数$\alpha = \lambda_e / \lambda_\gamma$ 的计算，不同于λ_γ的计算，它与原子核的矩阵元无关。这是由于λ_e和λ_γ都正比于原子核矩阵元的平方，后者同时出现于内转换系数的分子与分母中，因而相消了，所以对内转换系数可以进行比较精确的计算。

当 $W_K \ll E_K \ll m_e c^2$ 时，理论上可得 *EL* 和 *ML* 跃迁的 K 层内转换系数分别为

$$\alpha_K(EL) \approx Z^3 \left(\frac{1}{137}\right)^4 \frac{L}{L+1} \left(\frac{2m_e c^2}{E_\gamma}\right)^{L+5/2}$$

$$\alpha_K(ML) \approx Z^3 \left(\frac{1}{137}\right)^4 \left(\frac{2m_e c^2}{E_\gamma}\right)^{L+3/2}$$

内转换系数随原子核的电荷数 *Z* 和γ 辐射的角动量 *L* 的增加而很快增加，随跃迁能量 E_γ的增加而减小。因此，重核中跃迁前后能级的角动量之差很大而能量之差很小时，内转换系数是很大的($\alpha \gg 1$)，以致于很难观察到γ 辐射。这时可以利用不同壳层或支壳层的内转换系数分支比，例如 *K/L* 比及 $L_{\mathrm{I}}:L_{\mathrm{II}}:L_{\mathrm{III}}$等。其定义为

$$K/L \equiv N_K/N_L$$

$$L_{\mathrm{I}} : L_{\mathrm{II}} : L_{\mathrm{III}} \equiv N_{\mathrm{LI}} : N_{\mathrm{LII}} : N_{\mathrm{LIII}}$$

即使内转换系数α 值不大，通常也是通过测量内转换系数分支比来与理论作比较。这是因为在分支比的测量中，所测的都是能量相近的内转换电子，仪器引起的系统误差可以互相抵消，从而转换系数分支比的测量常常比转换系数α 的测量要精确得多。

4．内转换系数应用举例

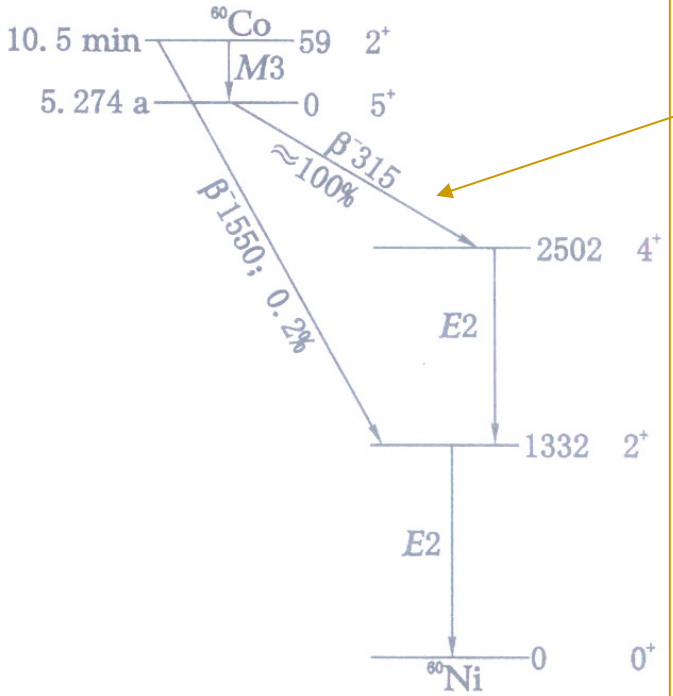

图 7-6 ^{60}Co 的衰变纲图

纯GT型容许跃迁

表 7-3 α_K 的理论值(10^{-4})

跃迁类型 / E_γ	$E1$	$E2$	$E3$	$M1$	$M2$
1.17 MeV	0.72	1.55	3.01	1.38	2.87
1.33 MeV	0.58	1.17	2.07	1.03	2.07

§7.5 同 核 异 能 态

1．同核异能态和同核异能素（新的储能方式？）

寿命比较长的激发态称为同核异能态。

寿命大于 0.1s 的同核异能态称为长寿命的同核异能态。长寿命的同核异能态通常在质量数后面加上 m 来表示，例如 ^{60}Co 的同核异能态可表示为 ^{60m}Co。

由于有长寿命的同核异能态的存在，就可能存在这样的原子核，它们的电荷数和质量数完全一样，即核的组成完全相同，但放射性衰变的半衰期却不相同，这样的核素称为同核异能素。例如 ^{60m}Co 与 ^{60}Co 的电荷数和质量数都相同，但它们的半衰期却不同，前者为 10.5min，后者为 5.27a。

同核异能素最早是在 **1921** 年发现的，发现 $^{234}_{90}\mathrm{Th}$ 的 β^- 衰变所形成的子体 $^{234}_{91}\mathrm{Pa}$ 有两种半衰期，如下式所示：

$$^{234}_{90}\mathrm{Th} \xrightarrow{\beta^-} \begin{cases} ^{234m}_{91}\mathrm{Pa} \xrightarrow[1.22\mathrm{min}]{\beta^-} \\ ^{234}_{91}\mathrm{Pa} \xrightarrow[6.7\mathrm{h}]{\beta^-} \end{cases}$$

$^{234m}_{91}\mathrm{Pa}$ **的半衰期为 1.22 min，** $^{234}_{91}\mathrm{Pa}$ **的半衰期为 6.7h，但它们的电荷数都是 91，质量数都是 234。^{234m}Pa 是 ^{234}Pa 的一个亚稳的激发态。这是在很长期间内唯一知道的同核异能素的例子。自 1934 年发现人工放射性后，新的同核异能素才不断地被人们所发现。**

处于同核异能态的原子核，和处于一般激发态的原子核一样，通常可以通过γ跃迁或发射内转换电子退激到基态，只是跃迁概率较小而已。除此而外，有些同核异能态可以直接发生β衰变，例如^{234m}Pa和^{60m}Co；还有的同核异能态甚至可以发生α衰变，例如$^{211m}_{84}$Po。

2．同核异能态和γ跃迁的关系

同核异能态的角动量和基态（或相邻的较低激发态）的角动量之差ΔI较大，能量之差ΔE一般较小。γ跃迁概率随ΔI的增加和ΔE减小而急剧地下降，因而这时跃迁概率就小，半衰期就长。例如，^{234m}Pa的角动量$I_m=0$，而^{234}Pa基态的角动量$I_0=4$，$\Delta I=4$；^{60m}Co的$I_m=2$，^{60}Co的$I_0=5$，$\Delta I=3$；^{211m}Po的$I_m=25/2$，^{211}Po的$I_0=9/2$，$\Delta I=8$，可见它们的ΔI都比较大，因而γ跃迁概率比较小。同核异能跃迁的内转换系数比较大。

3．同核异能素岛

长寿命同核异能素（相应同核异能跃迁的$\Delta I\geq 3$）不是在元素周期表的全部范围内都有可能出现，它的分布随核子数的变化具有一定的规律性，形成所谓同核异能素岛，如图 7-7 所示。由图可见，它们几乎都集中在紧靠Z或$N=50$，82，126 等所谓幻数前面的区域。这种规律性能用下一章要讨论的核结构的壳模型理论得到成功的解释。

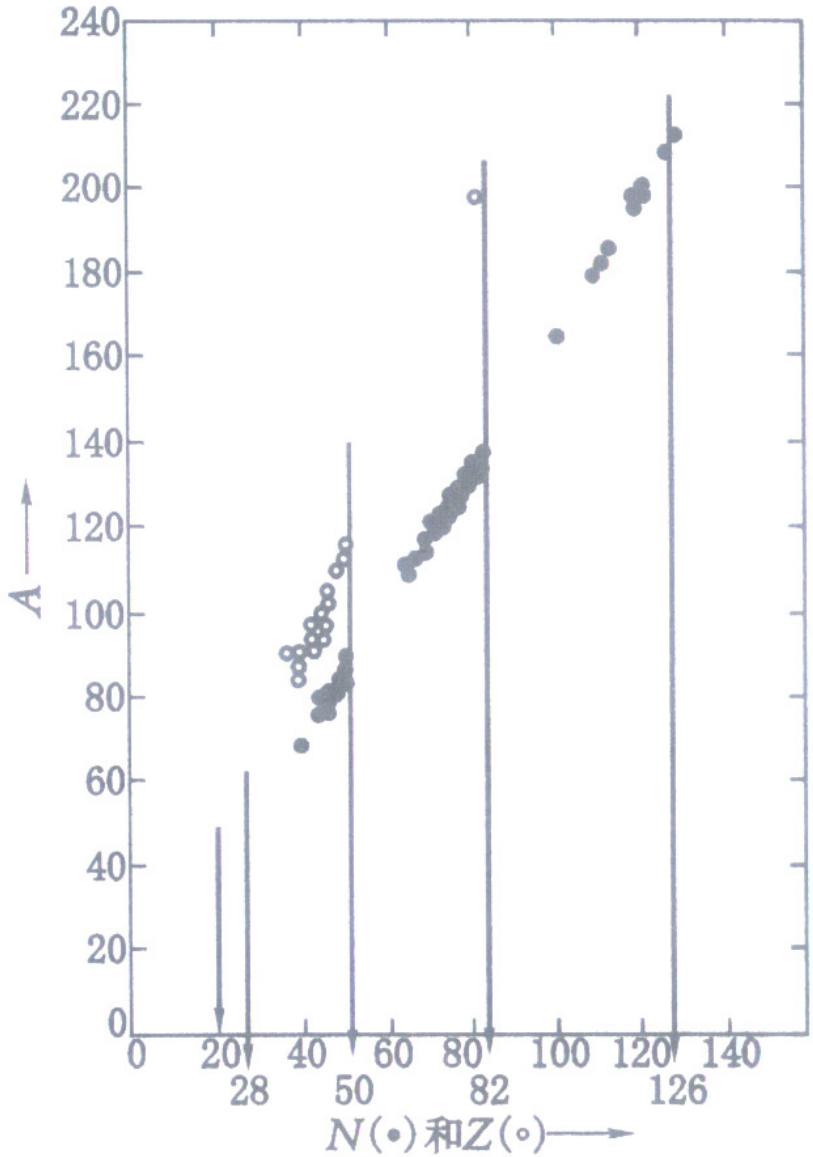
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
A
0
20
40
60
80
100
120
140
28
50
82
126
N(•)和Z(◦)

图 7-7　同核异能素岛