

中重核中子辐射俘获 γ 射线强度函数研究*

刘建峰¹ 赵维娟¹ 苏宗涤

1 (郑州大学物理系 郑州 450052)

2 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 假设退激过程中除包含巨偶极共振模式外还存在⁶He, ⁶Li, ⁶Be, ⁷Li 和 ⁷Be 等粒子集团激发态的退激过程. 本文对这一物理假定作了进一步分析. 利用据此建立的包括这些过程在内的 γ 射线强度函数, 计算了在核素⁹³Nb, ¹⁸¹Ta 和天然元素 Ag 上入射中子能量在 0.01—5MeV 能区以及在核素¹⁹⁷Au 上入射中子能量在 0.01—10MeV 能区的中子辐射俘获反应截面和 γ 能谱, 得到了与实验数据较好符合的结果. 特别是可以较好地解释 γ 能谱中 5.5MeV 之后的反常突起. 这表明, 上述物理假定适用于中重核中子辐射俘获反应.

关键词 中子辐射俘获 γ 射线强度函数 (n, γ) 反应截面 γ 能谱

1 引言

γ 射线强度函数的研究对核反应中 γ 产生数据的理论计算是至关重要的. 无论对粒子入射后形成的复合系统, 还是复合系统发射粒子后的剩余核, 只要处于激发状态, 就在级联 γ 退激过程, γ 射线强度函数的形式对这种级联 γ 退激过程的计算是非常重要的.

关于 γ 射线强度函数的形式, 目前基本上仍按照著名的 Brink^[1,2] 假定, 利用光核反应巨偶极共振数据表示, 称为巨偶极共振模型, 以下用 GDR 表示. GDR 模型包括两点基本假设: (1) 在 (n, γ) 反应中剩余核可处于一系列不同激发态上, 而光核反应的靶核总是处于基态, 为利用后一反应的数据, 必需假定对应剩余核的每一激发态的光核反应之巨偶极共振峰与靶核在基态产生的巨偶极共振峰是相同的. (2) 在光核反应巨偶极共振的激发曲线的主要部分用经典的洛仑兹曲线拟合后, 它的低能尾巴部分可用来描述低能 (n, γ) 反应的光子强度. 以上两条基本假设虽然在过去 40 多年中一直被沿用, 但都没有得到直接的实验证明. 在 20 世纪 80—90 年代, γ 射线强度函数受到更多实验的检验, Brink 提出的传统 γ 射线强度函数也不断作出某些修正, 有的文献为符合相关实验数据而将强度函数中所含巨偶极共振参数取为能量相关的, 或是在原来强度函数公式基础上作修正. 有关工作可参看 Kopecky 和 Uhl 等人的评述性文献[3—5].

2002-01-19 收稿

* 中国核工业总公司核数据经费资助

大量实验事实表明^[6],在质量数 A 约为 110—140 和 180—210 核区,低能中子辐射俘获 γ 能谱在 5.5MeV 之后有反常突起,通常称为 γ 能谱的 5.5MeV 反常峰.这一反常峰,即不能用中子辐射俘获的非统计效应来解释^[7-9],也不可能用 γ 射线强度函数由 GDR 模型描述的复合核统计理论来计算^[1].为了解释这一反常峰,有的文献唯象地引入“光子强度函数矮共振”^[10]、“自旋共振态”^[11]以及光子强度函数的“特殊分布”^[12]等,但对了解反常峰的本质,并进行定量计算,使之同时符合 (n, γ) 反应截面和 γ 能谱的实验结果,还存在相当的困难和问题.

在文献[12]中,假定在复合核首次及级联 γ 退激过程中,除通过 GDR 模式外,还存在⁶He, ⁶Li, ⁹Be 及⁷Li 和⁷Be 等轻粒子集团的激发态的退激过程,建立了包括这些过程的 γ 射线强度函数,应用复合核统计理论,在 0.01—3 MeV 能区对¹⁹⁷Au 的中子辐射俘获截面和 γ 能谱进行了数值计算,得到了与实验较好符合的结果,尤其是很好地解释了 γ 能谱中 5.5MeV 之后的反常突起,以下简称此模型为 GDR-LPC 模型.本文在中子入射能量为 0.01—5 MeV 对⁹³Nb、天然元素 Ag(¹⁰⁷Ag, 丰度 51.82%; ¹⁰⁹Ag, 丰度 48.18%) 和¹⁸¹Ta, 在 0.01—10 MeV 对¹⁹⁷Au, 就 (n, γ) 截面和 γ 能谱进行了计算.目的在于考察 GDR-LPC 模型能否在 $110 \leq A \leq 140$ 和 $180 \leq A \leq 210$ 两个核质量区均能解释 γ 能谱 5.5MeV 反常峰,能否应用于其他中、重核的 γ 产生数据的理论计算.为了清楚的看出 GDR-LPC 模型的优点,同时采用 GDR 模型进行了计算,并与用 GDR-LPC 模型的计算结果进行了比较.因选取的能区超过了 3MeV,对中、重核,直接-半直接俘获过程^[13]对 (n, γ) 反应截面的贡献已不可忽略,同时,当中子入射能量大于 5 MeV 之后,粒子的预平衡发射的影响也应当考虑,故计算中,除在 $E_n > 3\text{MeV}$ 后考虑了直接-半直接俘获过程外,还采用激子模型对 $E_n > 5\text{MeV}$ 之后的复合核统计过程作了预平衡修正^[14].

2 计算公式

根据前面的讨论,中子辐射俘获 (n, γ) 反应截面可由下式计算

$$\sigma_{\gamma} = \sigma_1 = \sigma_{10} + \sum_{j=2}^N \sigma_j \cdot S^j + \int_{E_c}^{E_m} \sum_{J\pi} \sigma_c(E, J, \pi) \cdot \frac{T_{\gamma, E, J, \pi}^{E_j, J_j, \pi_j}}{T^{E, J, \pi}} dE, \quad (1)$$

其中 σ_j 示复合核第 j 条分立能级在整个 γ 跃迁过程中被激发的总截面, $j=1$ 表示基态,假定包括基态共有 N 条分立能级. σ_{j0} 示首次 γ 跃迁对第 j 条分立能级的激发截面, S^j 为第 j 条分立能级向第 i 条分立能级的 γ 跃迁分支比, $\sigma_c(E, J, \pi)$ 为能级连续区内能量、自旋、宇称分别为 E, J 和 π 的单位能量间隔内的能级在整个 γ 跃迁过程中被激发的总截面, $\sigma_{c0}(E, J, \pi)$ 示其首次激发截面, $T^{E, J, \pi}$ 系能级 E, J, π 的总穿透系数, $T_{\gamma, E, J, \pi}^{E_j, J_j, \pi_j}$ 系能级 E, J, π 到分立能级 E_j, J_j, π_j 的光子穿透系数, E_c 是能级连续区下限, E_m 是复合系统的最高激发态能量. σ_j 和 $\sigma_c(E, J, \pi)$ 满足下列积分方程:

$$\sigma_j = \sigma_{j0} + \sum_{k=j+1}^N \sigma_k \cdot S^k + \int_{E_c}^{E_m} \sum_{J'\pi'} \sigma_c(E', J', \pi') \cdot \frac{T_{\gamma, E, J, \pi}^{E_j, J_j, \pi_j}}{T^{E, J, \pi}} dE',$$

$$\sigma_c(E, J, \pi) = \sigma_{c0}(E, J, \pi) + \int_E^{E_m} \sum_{J'\pi'} \sigma_c(E', J', \pi') \cdot \frac{T_{\gamma, E, J, \pi}^{E', J', \pi'}}{T^{E, J, \pi}} \cdot \rho(E', J', \pi') dE'$$

其中 $\rho(E, J, \pi)$ 为能级连续区内能量、自旋、宇称分别为 E, J, π 的能级密度. γ 能谱可表示为

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma^\gamma}{dE_\gamma} = & \sum_{i=1}^N \sigma_{i0} \cdot \delta(E_\gamma - E_m + E_i) + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \sigma_j \cdot S^{\eta} \cdot \delta(E_\gamma - E_j + E_i) + \\ & \sum_{J\pi} \sigma_{\infty} (E_m - E_\gamma, J, \pi) + \sum_{i=1}^N \sum_{J'\pi'} \sigma_c (E_\gamma + E_i, J', \pi') \cdot \frac{T_{\gamma, E_i, J, \pi}^{E_\gamma + E_i, J', \pi'}}{T_{E_\gamma + E_i, J', \pi'}^{E_\gamma + E_i, J, \pi}} + \\ & \int_{E_c + E_\gamma}^{E_m} \sum_{J'\pi'} \sigma_c (E', J', \pi') \cdot \frac{T_{\gamma, E' - E_\gamma, J, \pi}^{E', J', \pi'}}{T_{E' - E_\gamma, J, \pi}^{E', J', \pi'}} \cdot \rho(E' - E_\gamma, J, \pi) dE', \end{aligned} \quad (4)$$

其中第一项为首次向分立能级的跃迁,第二项为分立能级间的跃迁,在实际计算中,两者均按一定宽度展宽,第三项为首次向能级连续区的跃迁,第四、五项分别为能级连续区向分立能级及连续区能级的跃迁.应当指出,第一、二两项对应的谱线高度与所取宽度有关.

γ 产生截面为

$$\sigma^\gamma = \int_0^{E_m} \frac{d\sigma^\gamma}{dE_\gamma} dE_\gamma, \quad (5)$$

其与 (n, γ) 反应截面的关系为

$$\sigma^\gamma = N_\gamma \sigma_\gamma,$$

其中 N_γ 为每发生一次 (n, γ) 反应产生的光子数,它与 γ 射线强度函数的选取密切相关.不同的 γ 射线强度函数,可以计算出基本一致的 (n, γ) 反应截面激发曲线,但难以得到大体一致的 γ 能谱. N_γ 称为 γ 多重性或 γ 多重数,是重要的 γ 产生数据之一.

σ_{i0} 和 $\sigma_{\infty}(E, J, \pi)$ 在所考虑的能区内均可表示为两项之和

$$\sigma_{i0} = \sigma_{i0}^{\text{non}} + \sigma_{i0}^{\text{EQ}}, \quad (6)$$

$$\sigma_{\infty}(E, J, \pi) = \sigma_{\infty}^{\text{non}} + \sigma_{\infty}^{\text{EQ}}(E, J, \pi), \quad (7)$$

其中上标 non 表示 $E_n > 3\text{MeV}$ 之后,直接-半直接俘获这一中子辐射俘获的非统计效应对复合核能级的初始激发. EQ 表示达到统计平衡的复合核首次 γ 发射对复合核能级的初始激发,且

$$\sigma_{i0}^{\text{EQ}} = \sum_{J\pi} \sigma^{J\pi} \cdot \frac{T_{\gamma, E_i, J, \pi}^{E_m, J\pi}}{T_{E_m, J\pi}^{E_m, J\pi}}, \quad (8)$$

$$\sigma_{\infty}^{\text{EQ}}(E', J', \pi') = \sum_{J\pi} \sigma^{J\pi} \cdot \frac{T_{\gamma, E' - E_\gamma, J, \pi}^{E', J', \pi'}}{T_{E' - E_\gamma, J, \pi}^{E', J', \pi'}} \cdot \rho(E', J', \pi'), \quad (9)$$

其中 $\sigma^{J\pi}$ 为达到统计平衡的复合核自旋、宇称分别为 J, π 的最高激发态发射粒子 (n, p, α 等) 和 γ 光子的总截面,在本文所考虑反应机制的框架中,有^[15]

$$\sigma^{J\pi} = \left[\prod_{\substack{i=1 \\ \Delta i=2}}^3 \frac{\lambda_{i+2}^{J\pi}(i)}{\lambda_{i+2}^{J\pi}(i) + L^{J\pi}(i)} \right] \sigma_i^{J\pi} \quad (10)$$

其中 $\lambda_{i+2}^{J\pi}(i)$ 为由 i 个激子态向 $i+2$ 个激子态跃迁的几率. $L^{J\pi}(i)$ 为由 i 个激子态平衡前发射粒子的几率. $\sigma_i^{J\pi}$ 为复合系统 J, π 态的全截面,在上式中, $L^{J\pi}(i)$ 包括形状弹性散射. (10) 式表示当 $E_n > 3-5\text{MeV}$ 后,只考虑 1 个及 3 个激子态的预平衡粒子发射, γ 光子的预

平衡发射用直接 - 半直接俘获描述. 5 个及 5 个以上激子态即假定达到统计平衡. 而

$$\sigma_{i0}^{\text{non}} = \sum_f \sigma_{\gamma f} \cdot \frac{S_{\text{dpfi}}}{S_{\text{dpf}}}, \quad (11)$$

$$\sigma_c^{\text{non}}(E, J, \pi) = \sum_f \sigma_{\gamma f} \cdot \frac{S_{\text{dpfEJ}\pi}}{S_{\text{dpf}}} \cdot \rho(E, J, \pi), \quad (12)$$

其中 S_{dpfi} 及 $S_{\text{dpfEJ}\pi}$ 为分立能级和连续区能级的 (d, p) 反应谱因子, S_{dpf} 为一条单粒子束缚态的 (d, p) 反应谱因子, 且有

$$S_{\text{dpf}} = \sum_i S_{\text{dpfi}} + \sum_{J_c} \int_{E_c}^{B_N} S_{\text{dpfEJ}\pi} \cdot \rho(E, J, \pi) dE, \quad (13)$$

其中 B_N 为中子结果能, 表示直接 - 半直接俘获只考虑到束缚态的跃迁. $\sigma_{\gamma f}$ 为其到一条单粒子态 (E_f, l_f, j_f) 的俘获截面^[16,17]

$$\begin{aligned} \sigma_{\gamma f} = & \frac{2\pi m e^2 Z^2 K^3}{3\hbar^2 \bar{K}^2 A^2} \cdot S_{\text{dpf}} \cdot \sum_{l_j} \frac{(2l+1)(2j_f+1)(2J+1)}{2l+1} \cdot \left[C_{i0i0}^{l_0} \cdot W(l_j l_f j_f; \frac{1}{2} 1) \right]^2 \cdot \\ & \left\{ \left| \int r^2 U_{l_f j_f}(r) \langle U_{l_j}^i(r) \rangle dr \right|^2 + \left| (\alpha - i\beta) \int r U_{l_f j_f}(r) h(r) \langle U_{l_j}^i(r) \rangle dr \right|^2 + \right. \\ & \left. 2\text{Re} \left[\left(\int r^2 U_{l_f j_f}(r) \langle U_{l_j}^i(r) \rangle dr \right) (\alpha + i\beta) \left(\int r U_{l_f j_f}(r) h(r) \langle U_{l_j}^i(r) \rangle dr \right)^* \right] \right\}, \quad (14) \end{aligned}$$

式中各符号的意义请参看所列文献. 公式中包括三项: 第一项为直接俘获, 第二项为半直接俘获, 最后为直接与半直接俘获的相干项.

最后给出两种模型的 γ 射线强度函数^[12], 对 E1 跃迁, γ 射线穿透系数用 γ 射线强度函数表示为

$$T_{\gamma, E J \pi}^{E' J' \pi'} = 2\pi (E' - E)^3 f^{E' J' \pi', E J \pi}, \quad (15)$$

其 γ 射线强度函数 $f^{E' J' \pi', E J \pi}$ 的 GDR 模型为

$$f^{E' J' \pi', E J \pi} = \frac{1}{6\pi^2 \hbar^2 C^2} \cdot H(J', J; \pi', \pi) \cdot \sum_{g=1}^2 \frac{\sigma_g (E' - E) \Gamma_g^2}{[E_g^2 - (E' - E)^2]^2 + (E' - E)^2 \Gamma_g^2}, \quad (16)$$

而其 GDR - LPC 模型为

$$\begin{aligned} f^{E' J' \pi', E J \pi} = & \frac{1}{6\pi^2 \hbar^2 C^2} \cdot H(J', J; \pi', \pi) \cdot \left\{ \sum_{g=1}^2 \frac{\alpha \cdot \sigma_g (E' - E) \Gamma_g^2}{[E_g^2 - (E' - E)^2]^2 + (E' - E)^2 \Gamma_g^2} + \right. \\ & \left. \sum_p \frac{\beta_p (E' - E) \Gamma_p^2}{[E_p^2 - (E' - E)^2]^2 + (E' - E)^2 \Gamma_p^2} \right\}, \end{aligned}$$

有关(16)和(17)式中各符号的意义可参见文献[12].

3 数值计算结果

应用上述公式, 在中子入射能量 0.01—5 MeV 对 ⁹³Nb、天然 Ag 和 ¹⁸¹Ta、在 0.01—10MeV 对 ¹⁹⁷Au, 就 (n, γ) 反应截面和 γ 能谱进行了数值计算. 采用普适光学位^[18] 计算中子和带电粒子的穿透系数, 同时计算出中子的直接 - 半直接俘获初态波函数, 应用上述位实部计算单粒子束缚态的本征态能量和波函数, 能级密度的计算采用 Gilbert-Cameron^[19] 公

式,巨偶极共振参数尽量采用实验评价值^[20],并用系统学公式的计算作补充.直接-半直接俘获截面计算中的粒子-靶核巨偶极振动相互作用势 $h(r)$ 采用了具有体型实部和表面型虚部的复数位^[21].分立能级数据、 γ 跃迁分支比及所有的截面实验数据均取自 EXFOR^[22], γ 能谱实验值取自 ORNL,由中国核数据中心提供.

计算的大体步骤是:首先调整入射道中子光学位参数,使全截面及弹性散射截面的计算结果与实验值较好符合.然后,通过调整带电粒子光学位参数及各种出射粒子剩余核的能级密度参数,使其截面计算值与实验值较好符合,最后通过调整复合核能级密度参数、巨偶极共振参数、公式(17)中的 α 及 β_p 值,计算中子辐射俘获过程低能区的反应截面和 γ 能谱.当中子入射能量大于 3MeV 和 5MeV 后,还应对与公式(14)及(10)相关的参数作调整,使 (n, γ) 反应截面的计算结果与实验尽可能好地相符合.

表 1 列出了 GDR 模型(表中 I)和 GDR-LPC 模型(表中 II)计算中采用的能级密度参数、巨偶极共振参数和 α 值.表 2 列出了 ${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^6\text{Be}$ 及 ${}^7\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Be}$ 的激发能 E_p 和衰变宽度 Γ_p 实验值^[23] 及 β_p 的取值.

表 1 复合核能级密度参数和巨偶极共振参数及 α 取值(I 示 GDR 模型, II 示 GDR-LPC 模型)

核素	参数	能级密度参数					巨偶极共振参数及 α 值			
		E_x/MeV	T/MeV	E_0/MeV	$\frac{P(N)+P(Z)}{P(Z)}/\text{MeV}$	a/MeV^{-1}	σ_g/b	Γ_g/MeV	E_g/MeV	α
${}^{94}\text{Nb}$	I	4.0973	0.7653	-1.4089	0.0	11.7085	0.3313	4.5	15.266	1.0
	II	4.0973	0.7876	-1.4089	0.0	10.9085	0.3313	4.5	15.266	0.97
${}^{108}\text{Ag}$	I	3.8901	0.6061	-1.2737	0.0	16.3679	0.3717	4.5	14.869	1.0
	II	3.8901	0.6340	-1.2737	0.0	14.9679	0.3717	4.5	14.869	0.67
${}^{110}\text{Ag}$	I	3.8648	0.5890	-1.3033	0.0	16.8008	0.3775	4.5	14.820	1.0
	II	3.8648	0.6150	-1.3033	0.0	15.7408	0.3775	4.5	14.820	0.67
${}^{182}\text{Ta}$	I	3.3244	0.4695	-0.9900	0.0	20.4527	0.5256	4.5	13.799	1.0
	II	3.3244	0.4695	-0.9900	0.0	20.4527	0.5256	4.5	13.799	0.39
${}^{198}\text{Au}$	I	4.08758	0.6050	-1.7500	0.23	18.0000	0.5119	4.5	13.692	1.0
	II	4.08758	0.5950	-1.7500	0.23	17.9000	0.5119	4.5	13.692	0.30

表 2 轻粒子激发能 E_p 、衰变宽度 Γ_p 的实验值和 β_p 取值

轻粒子	参数	E_p/MeV	Γ_p/MeV	β_p/b				
				${}^{93}\text{Nb}$	${}^{107}\text{Ag}$	${}^{109}\text{Ag}$	${}^{181}\text{Ta}$	${}^{197}\text{Au}$
${}^6\text{He}$		1.80	0.113	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
		4.31	1.70	0.000025	0.00001	0.00001	0.00001	0.000005
${}^6\text{Li}$		5.37	0.54	0.0012	0.0034	0.0034	0.0019	0.0059
		5.65	1.50	0.0022	0.0109	0.0109	0.0269	0.0209
${}^7\text{Be}$		6.73	1.20	0.004	0.02	0.02	0.02	0.015
		7.21	0.50	0.010	0.05	0.05	0.04	0.040
${}^7\text{Li}$		6.68	0.80	0.005	0.015	0.015	0.018	0.010
		7.46	0.10	0.0002	0.025	0.025	0.015	0.015
${}^6\text{Be}$		9.85	1.80	0.0035	0.010	0.010	0.010	0.010
		1.67	1.16	0.0006	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002

图 1—3 分别给出了天然元素 Ag, ^{197}Au 和 ^{93}Nb 的 (n, γ) 截面计算结果及与实验的比较. 由图 2 可以看出, 当 E_n 在 4—7MeV 区间, GDR 模型的计算值明显低于实验值, 尽管在计算中, 直接—半直接俘获在 GDR 及 GDR-LPC 模型中的贡献取相同的值. 图 4—6 分别给出了天然元素 Ag 当 $E_n = 1.4\text{MeV}$, ^{181}Ta 当 $E_n = 0.6\text{MeV}$ 和 ^{93}Nb 当 $E_n = 0.85\text{MeV}$ 时的 γ 能谱计算结果. 由图 4, 5 可以看出, 与 ^{197}Au 的计算结果一样^[12], GDR-LPC 模型的计算结果能够较好地解释上述两个核质量区 γ 能谱 5.5MeV 之后的反常突起. 图 6 表明, 对于远

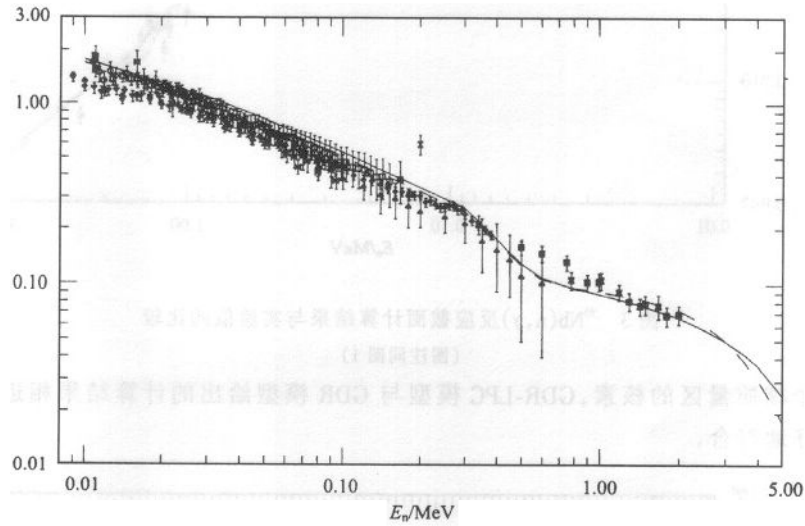


图 1 天然元素 Ag (n, γ) 反应截面计算结果与实验值的比较

— GDR-LPC 模型计算结果, ----- GDR 模型计算结果, 实验值取自 EXFOR.

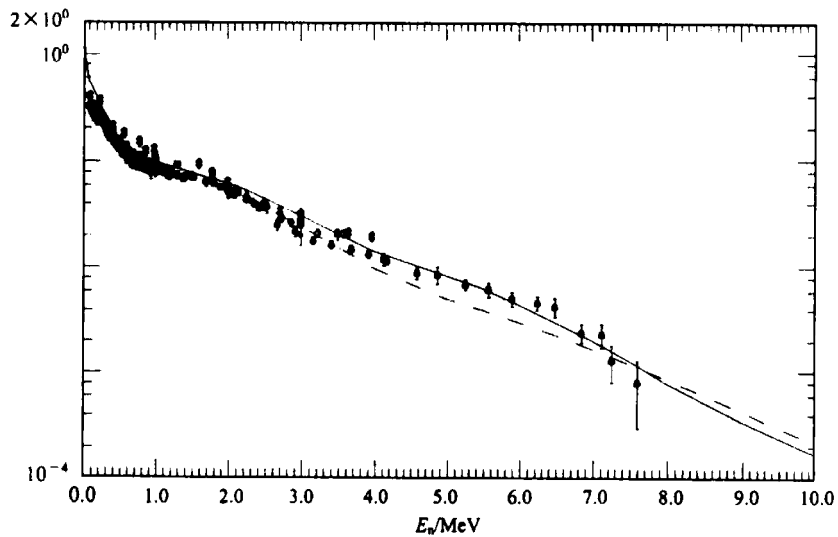


图 2 ^{197}Au (n, γ) 反应截面计算结果与实验值的比较

(图注同图 1)

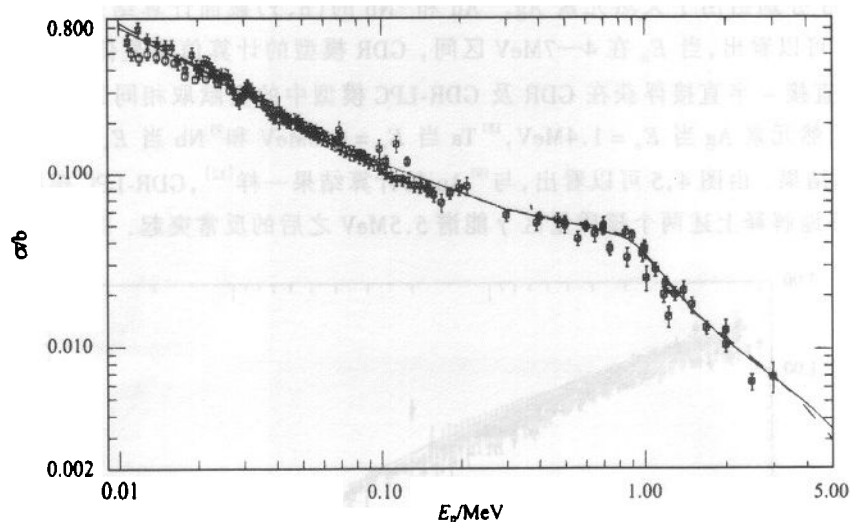


图 3 $^{93}\text{Nb}(n, \gamma)$ 反应截面计算结果与实验值的比较

(图注同图 1)

离上述两个核质量区的核素, GDR-LPC 模型与 GDR 模型给出的计算结果相近, 且均与实验结果较好地符合.

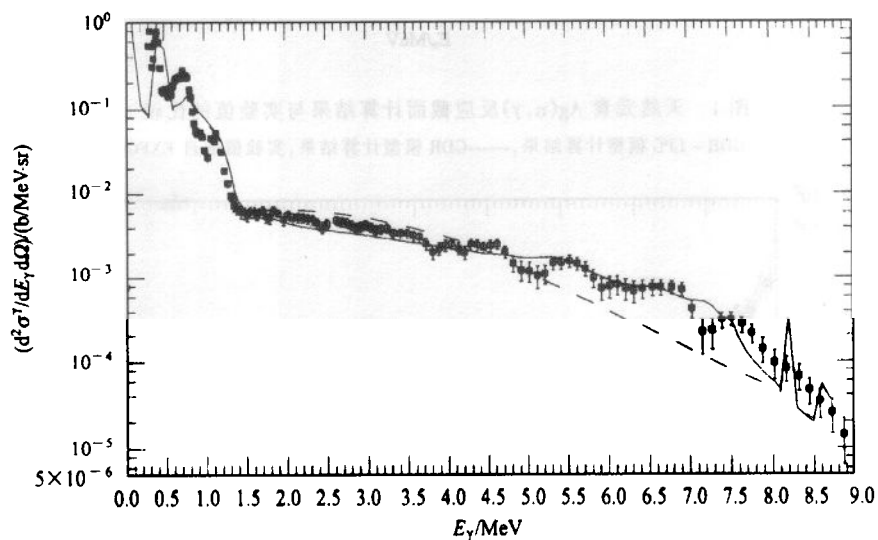


图 4 天然元素 Ag 中子入射能量 1.4 MeV 的 γ 能谱计算结果与实验值的比较

——GDR-LPC 模型计算结果, -----GDR 模型计算结果, 实验值取自 ORNL, $\theta = 125^\circ$;
由中国核数据中心提供.

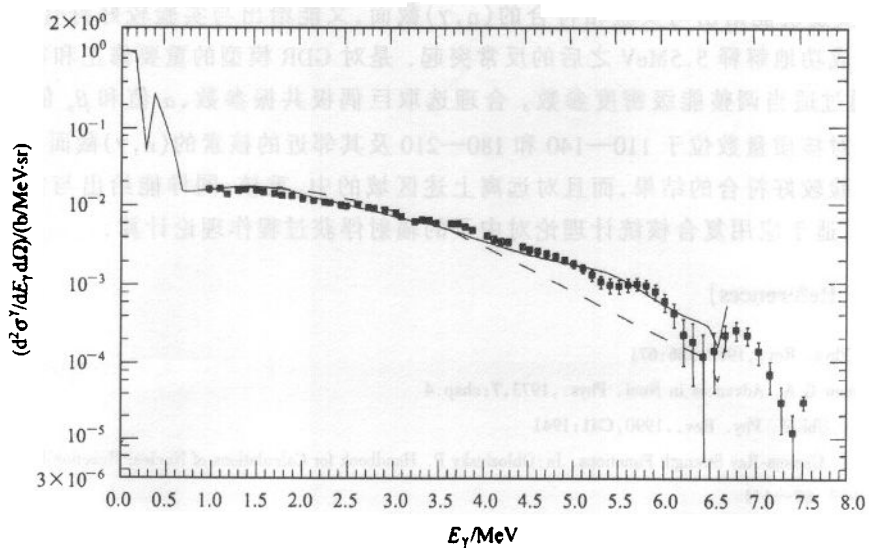


图 5 ^{181}Ta 中子入射能量 0.6MeV 的 γ 能谱计算结果与实验值的比较
(图注同图 4)

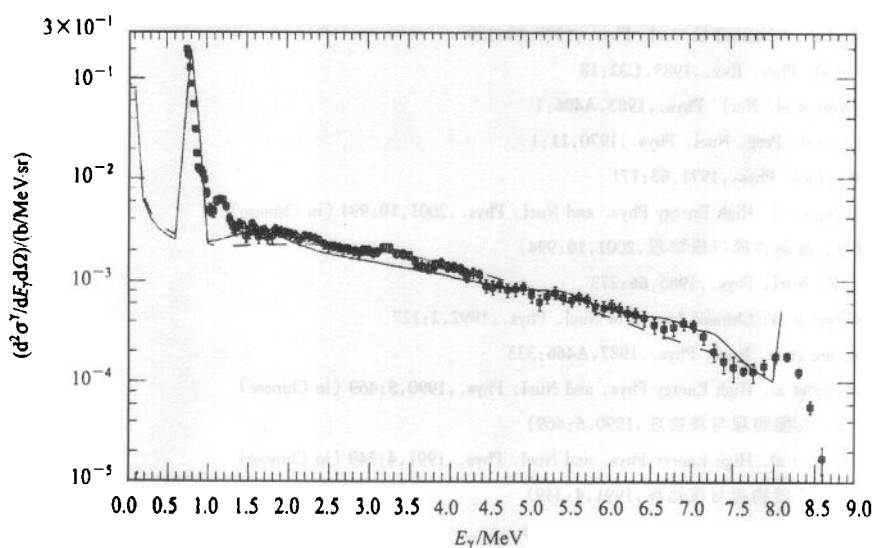


图 6 ^{93}Nb 中子入射能量 0.85MeV 的 γ 能谱计算结果与实验值的比较
(图注同图 4)

4 讨论

根据上述计算结果,结合文献[12],可得出如下结论:

1) 中子辐射俘获 γ 能谱的形状对 γ 射线强度函数的选取比 (n, γ) 反应截面对 γ 射线强度函数的选取更敏感. 对核质量数位于 110—140 和 180—210 及邻近的核素,只有

GDR-LPC模型既能给出与实验相符合的 (n, γ) 截面,又能给出与实验较好符合的 γ 能谱,尤其是能成功地解释 5.5MeV 之后的反常突起. 是对 GDR 模型的重要修正和补充.

2) 通过适当调整能级密度参数,合理选取巨偶极共振参数、 α 值和 β_0 值, GDR-LPC 模型不但对核质量数位于 110—140 和 180—210 及其邻近的核素的 (n, γ) 截面及 γ 能谱能给出与实验较好符合的结果,而且对远离上述区域的中、重核,同样能给出与实验较好符合的结果,适于应用复合核统计理论对中子的辐射俘获过程作理论计算.

参考文献 (References)

- 1 Axel P. Phys. Rev., 1962, **126**:671
- 2 Barthelomew G A. Advances in Nucl. Phys., 1973, **7**:chap.4
- 3 Kopecky J, Uhl M. Phys. Rev., 1990, **C41**:1941
- 4 Kopecky J. Gamma-Ray Strength Functions. In: Oblozinsky P. Handbook for Calculations of Nuclear Reaction Data. Vienna: the IAEA, 1998. 97—111
- 5 Uhl M, Kopecky J. Gamma-Ray Strength Function Model and Their Parameterization. In: Oblozinsky P. Development of Reference Input Parameter Library for Nuclear Model Calculations. Vienna: the IAEA, 1995. 157—166
- 6 DING Da-Zhao. Progress in Neutron Radiative Capture Study. In: Nuclear Physics. Material Compilation of the Conference in 1978. Beijing: Atomic Energy Press, 1979, 292—306 (in Chinese)
(丁大钊. 中子辐射俘获研究进展. 见: 原子核物理, 1978 年会议资料选编. 北京: 原子能出版社, 1979, 292—306)
- 7 Allen B J et al. Advanced in Nucl. Phys., 1978, **10**:129
- 8 Raman S et al. Phys. Rev., 1985, **C32**:18
- 9 HUO Yu-Kun et al. Nucl. Phys., 1983, **A406**:1
- 10 Bergqvist I et al. Prog. Nucl. Phys., 1970, **11**:1
- 11 Lane A M. Nucl. Phys., 1971, **63**:171
- 12 LIU Jian-Feng et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2001, **10**:994 (in Chinese)
(刘建峰等. 高能物理与核物理, 2001, **10**:994)
- 13 Clement C F. Nucl. Phys., 1965, **66**:273
- 14 LIU Jian-Feng et al. Chinese Journal of Nucl. Phys., 1992, **2**:127
- 15 SHI Xiang-Jun et al. Nucl. Phys., 1987, **A466**:333
- 16 LIU Jian-Feng et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1990, **5**:469 (in Chinese)
(刘建峰等. 高能物理与核物理, 1990, **5**:469)
- 17 LIU Jian-Feng et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1991, **4**:349 (in Chinese)
(刘建峰等. 高能物理与核物理, 1991, **4**:349)
- 18 Becchetti F D et al. Phys. Rev., 1969, **182**:1190
- 19 Gilbert A, Cameron A G W. Can. J. Phys., 1965, **43**:1446
- 20 Dietrich S S et al. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1988, **38**:199
- 21 Potokar M et al. Nucl. Phys., 1977, **A277**:29
- 22 EXFOR (EXchange FORmat). Computerized System for the Storage, Retrieval and International Exchange of Experimental Nuclear Reaction Data, Coordinated by the IAEA Nuclear Data Section
- 23 Ajzenberg-selove F. Nucl. Phys., 1984, **A413**:1

Study on γ -Ray Strength Function of Neutron Radiative Capture for Middle and Heavy Nuclei *

LIU Jian-Feng¹ ZHAO Wei-Juan¹ SU Zong-Di²

¹ (Department of Physics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

² (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract Using the hypothesis as well as the γ -ray strength function proposed by us, the neutron radiative capture reaction cross sections and the γ energy spectra have been calculated for ^{93}Nb , natural Ag and ^{181}Ta in the neutron incident energy region from 0.01 to 5MeV as well as for ^{197}Au in the neutron incident energy region from 0.01 to 10MeV. The results which are coincident better with the experimental values were obtained. The comparisons with the experimental values have shown that, not only the abnormal protuberances near and after 5.5MeV of the γ spectra in the nuclear mass regions about $110 < A < 140$ and $180 < A < 210$ are explained better, but also the γ production data can be theoretically calculated for the middle and heavy nuclei by means of this hypothesis and the γ -ray strength function deduced from this hypothesis.

Key words neutron radiative capture, γ -ray strength function, (n, γ) reaction cross section, γ energy spectrum

Received 19 January 2002

* Supported by Nuclear Data Fund from Nuclear Industry General Company of China