

中子俘获瞬发 γ 射线数据评价系统

周春梅

(中国原子能科学研究院核物理研究所 中国核数据中心 北京 102413)

摘要 简要地介绍了中子俘获瞬发 γ 射线及其衰变纲图的评价方法技术、主要程序及其功能、工作流程、数据自治检验和具体应用等。

关键词 中子, (n, γ) 反应, 评价程序, 数据评价

中图分类号 0571.323

热中子俘获瞬发 γ 射线能量、强度及其衰变纲图是原子核物理研究、核技术应用和核工程设计的基本数据, 具有广泛的应用价值。今天, 随着核科学技术的发展, 热中子俘获瞬发 γ 射线活化分析 (Prompt γ -ray activation analysis, PGAA) 技术已广泛地应用于材料科学、化学、地质、探矿、农业、食品分析、环境科学和医学等方面。世界上许多国家都先后建立了中等中子通量或高中子通量的研究性核反应堆, 有的还配套地建立了高质量的中子导管或过滤中子束装置、热或冷中子束装置, 这些设备为中子俘获瞬发 γ 射线活化分析技术的发展和應用提供了必要和重要的条件。

PGAA 是非破坏性的辐射分析技术, 具有快速并能同时进行多元素 (包括元素周期表从氢至铀) 分析的特点。PGAA 技术需要准确的热中子俘获瞬发 γ 射线数据和衰变纲图。但是, 目前的数据还不够完全和准确, 为此, 国际原子能机构核数据科专门

组织了中子俘获瞬发 γ 射线活化分析数据库研制的合作研究项目^[1-3]。该项目的主要任务之一是进行中子俘获瞬发 γ 射线数据的评价和更新, 特别是质量数 $A < 45$ 核素的热中子俘获瞬发 γ 射线数据和衰变纲图的评价, 因为国际评价核结构数据库 (Evaluated nuclear structure data file, ENSDF) 中还没有该范围的热中子俘获瞬发 γ 射线数据。

本文就中子俘获瞬发 γ 射线数据评价的方法技术、主要程序及其功能、评价工作流程、评价数据自治检验与具体应用等进行了简要介绍。

1 主要评价程序及其功能

表 1 列出了中子俘获瞬发 γ 射线数据与衰变纲图评价的主要程序及其功能简况。这些程序主要是由核结构和衰变数据评价国际协作网提供的, 数据评价时, 采用了国际通用的 ENSDF 数据格式。

表 1 中子俘获瞬发 γ 射线数据评价的主要程序及其功能简况

Table 1 Main codes and their functions of prompt γ -ray data evaluation for neutron capture

程序	Code name	主要功能	Main functions
	GTOL	拟合 E_γ 得到 E_L	Level energy calculation by fitting to γ -energies
	GTOL	强度平衡计算与检验	Intensities balance calculation and checking
	LWA	测量数据的限权平均与不加权平均	Limit-weighted and unweighted average of measured data
	HSICC	内转换系数计算	Internal conversion coefficients calculation
	HSMRG	自由格式转为	Format conversion from free format to ENSDF format
	RADLST	能量平衡计算与检验	Energy balance calculation and checking
	FMTCHK	ENSDF 格式检验	ENSDF data format checking
	PANDOR	ENSDF 物理检验	ENSDF physics checking
	ENS DAT	绘制衰变纲图与数据列表	Drawing decay schemes and listing data tables

国际原子能机构 (IAEA No. 10693/CPR) 资助

第一作者: 周春梅, 男, 1938 年出生, 1964 年毕业于北京大学, 核物理专业, 研究员

收稿日期: 2002-01-29, 修回日期: 2002-03-28

2 中子俘获瞬发 γ 射线数据评价工作流程

中子俘获瞬发 γ 射线数据评价工作流程见图 1，主要步骤如下：

(1) 测量数据的收集。评价是以一个核素的中子俘获瞬发 γ 射线数据和衰变纲图为一组进行的。首先从保存在美国的 Brookhaven 国家实验室国家核数据中心的核科学参考文献库 (Nuclear science references file, NSRF) 检索有关参考文献，然后根据文献，从有关杂志、报告和私人通讯等资料中收集所有有关数据和信息。

(2) 实验数据的评价与最好数据的推荐。对所收集的实验数据进行比较分析和数据处理 (例如对

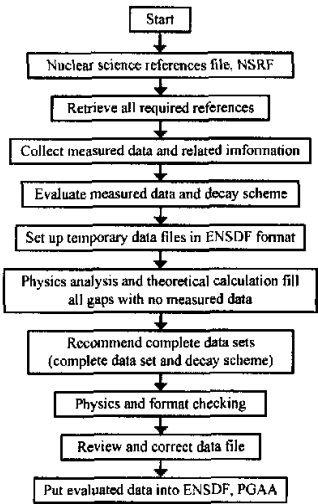


图 1 中子俘获瞬发 γ 射线数据评价流程图

Fig. 1 Flow chart of prompt γ -ray data evaluation for neutron capture

多家测量数据进行加权或非加权求平均值);再根据评价推荐出“最好”的测量数据和衰变纲图。

(3) 建立 ENSDF 格式的临时数据文件。在评价推荐“最好”的测量数据的基础上，将有关数据输入计算机，并按 ENSDF 格式建立临时数据文件。

(4) 物理分析和理论计算。对所建立的临时数据文件进行 ENSDF 格式检验，并作适当修改，然后进行有关物理分析和理论计算，并填补实验数据的空缺。

(5) 检验。对数据文件进行 ENSDF 数据格式检验和物理自洽检验。物理自洽检验主要是进行各条能级的衰变强度平衡检验计算和衰变能 (包括 γ 和内转换电子、核反冲能量) 平衡计算， γ 跃迁相连能级的自旋宇称与跃迁 γ 射线多极性等的自洽检验。

(6) 完整数据的推荐。上述评价完成后的评价数据组可推荐为完整的评价数据组。

(7) 评价推荐数据的入库、出版和散发。评价推荐 ENSDF 格式的数据文件经审评 (必要时作适当修改) 后，存入有关评价数据库供有关方面使用。

3 应用

应用该评价系统对 $A < 45$ 的所有稳定核素和 $A > 190$ 的部分核素的热中子俘获瞬发 γ 射线数据及其衰变纲图先后分别进行了评价、更新与修订，并推荐相应的有关数据和衰变纲图^[4-7]。本文以 $^{13}\text{C}(\text{n}, \gamma)$ 热中子辐射俘获反应为例^[8]，说明其具体应用。表 2 和表 3 分别列出了热中子的 $^{13}\text{C}(\text{n}, \gamma)$ 反应的 ^{14}C 能级数据和 γ 射线数据。图 2 给出了热中子 $^{13}\text{C}(\text{n}, \gamma)$ 反应的瞬发 γ 射线的衰变纲图。表 4 给出了热中子 $^{13}\text{C}(\text{n}, \gamma)$ 反应的 ^{14}C 各条能级的 γ 射线强度平衡，由表 4 可以看出在误差范围内 ^{14}C 各条能级的 γ 射线强度是平衡的。表 2—4 中括号内数值表示误差值。

表 2 热中子的 $^{13}\text{C}(\text{n}, \gamma)$ 反应评价能级数据

Table 2 ^{14}C level listing of evaluated data for $^{13}\text{C}(\text{n}, \gamma)$ reaction($E=\text{thermal}$)

能级能量 ¹⁾ Level energy / keV	自旋宇称 ²⁾ Spin parity	半衰期 ²⁾ Half-life	说明 Comments
0	0 +	5730 a (40)	% β^- =100
6093.82 (20)	1 -	< 7 fs	
6589.5 (3)	0 +	3.0 fs (4)	
6902.7 (3)	0 -	25 fs (3)	
8176.44 (1)	0 -, 1 -		J π : s 波中子俘获 From s-wave neutron capture

1) 用最小二乘法拟合 E_γ 得到 From E_γ using least-squares fit to data
2) 除已注明外，均取自参考文献[9] From ref.[9], except as noted

表 3 热中子的 $^{13}\text{C}(\text{n}, \gamma)$ 反应评价 γ 射线数据

Table 3 ^{14}C γ -ray listing of evaluated data for $^{13}\text{C}(\text{n}, \gamma)$ reaction($E=\text{thermal}$)

γ 射线能量 ¹⁾ γ -ray energy / keV	能级能量 Level energy / keV	γ 射线强度 ^{3),4)} γ -ray energy intensity	说明 Comments
495.4 (3)	6589.5	8.0 (3)	
808.9 (2)	6902.7	3.6 (3)	
1273.81 ²⁾ (17)	8176.44	4.9 (10)	$E_{\gamma}=1273.9\ 2$ (Ref.8)
1586.92 ²⁾ (18)	8176.44	8.5 (5)	$E_{\gamma}=1586.8\ 2$ (Ref.8)
2082.53 ²⁾ (18)	8176.44	2.5 (5)	$E_{\gamma}=2082.6\ 3$ (Ref.8)
6092.4 (2)	6093.82	16.3 (8)	
8174.0 ²⁾ (3)	8176.44	84.0 (23)	$E_{\gamma}=8173.9\ 2$ (Ref.8)

- 1) 除已注明外均取自参考文献[9] From Ref.[9] except as noted
2) 能级能量差 From level energy differences
3) 取自参考文献[8]的 100 中子俘获强度 Intensities per 100 neutron captures from Ref.[8]
4) 乘于 1 得到 100 中子俘获强度 For intensity per 100 neutron captures, multiply by 1

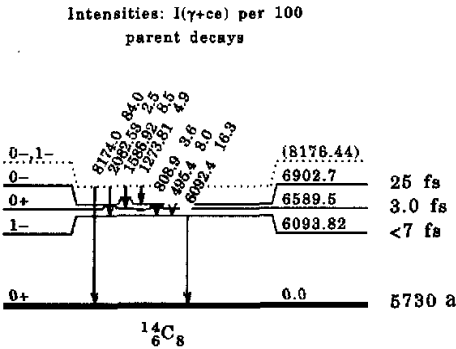


图 2 热中子 $^{13}\text{C}(\text{n}, \gamma)$ 反应评价衰变纲图

Fig. 2 Decay scheme of evaluated data for $^{13}\text{C}(\text{n}, \gamma)$ reaction($E=\text{thermal}$)

表 4 热中子 $^{13}\text{C}(\text{n}, \gamma)$ 反应 γ 射线强度平衡

Table 4 Intensities balance listing of evaluated data for $^{13}\text{C}(\text{n}, \gamma)$ reaction($E=\text{thermal}$)

能级能量 Level energy / keV	输出 相对强度 Output relative intensity	输入 相对强度 Input relative intensity	输出与输入 相对强度差 Difference of output and input relative intensity	输出相对 总强度 Output relative total intensity	输入相对 总强度 Input relative total intensity	输出与输入 相对总强度差 Difference of output and input relative total intensity	计算的 强度平衡 Intensity balance of calculation
0	0	100.3 (25)	- 100.3 (25)	0	100.3 (25)	- 100.3 (25)	- 0.3 (25)
6093.82 (20)	16.3 (8)	14.1 (7)	2.2 (11)	16.3 (8)	14.1 (7)	2.2 (11)	2.2 (11)
6589.5 (3)	8.0 (3)	8.5 (5)	- 0.5 (6)	8.0 (3)	8.5 (5)	- 0.5 (6)	- 0.5 (6)
6902.7 (3)	3.6 (3)	4.9 (10)	- 1.3 (11)	3.6 (3)	4.9 (10)	- 1.3 (11)	- 1.3 (11)
8176.44 (1)	100 (3)	0	100 (3)	100 (3)	0	100 (3)	100 (3)

4 讨论

就热中子俘获瞬发 γ 射线数据的强度平衡条件作简要分析:

原子核俘获一个中子后, 形成复合核, 然后以发射 γ 射线的方式进行退激发衰变。假定第 i 条能级, 并有 j (或 k) 条 γ 射线, 即

$i = 0, 1, \dots, m$ (其中 0 是其基态, m 是俘获态)
 $j, k = 1, 2, \dots, n$ 是衰变 γ 射线,

$$\sum_j I_{\gamma ij}(\text{输出}) \approx \sum_k I_{\gamma ki}(\text{输入}) \quad i \neq 0, m \quad (1)$$

$$\sum_j I_{\gamma mj}(\text{输出}) \approx \sum_k I_{\gamma k0}(\text{输入}) \quad (2)$$

$$I_{\gamma ij} = I_{ij}(1 + \alpha_{ij}) \quad (3)$$

$$I_{\gamma ki} = I_{ki}(1 + \alpha_{ki}) \quad (4)$$

其中, $I_{\gamma ij}$ 、 $I_{\gamma ki}$ 、 I_{ij} 和 I_{ki} 分别是 ij 和 ki γ 射线的总跃迁强度和 γ 射线强度。 α_{ij} 和 α_{ki} 分别是 ij 和 ki γ 射线的内转换系数。表 4 有关数据就是由上述公式进行计算的。由于实验测量不确定性, 它们只能在其不确定度范围内符合。

参考文献

- 1 Paviotti-Corcuera R, Linstrom R M. INDC(NDS)-411, Vienna: IAEA Nuclear Data Section, 2000, 1—76
- 2 Paviotti-Corcuera R, Linstrom R M. INDC(NDS)-424, Vienna: IAEA Nuclear Data Section, 2001.1—81
- 3 Paviotti-Corcuera R, Linstrom R M, Firestone R B. INDC(NDS)-443, Vienna: IAEA Nuclear Data Section 2003. 1—75
- 4 ZHOU Chunmei. INDC(CPR)-051, Vienna: IAEA Nuclear Data Section, 2000. 1—47
- 5 ZHOU Chunmei, Firestone R B. INDC(CPR)-054, Vienna: IAEA Nuclear Data Section, 2001.1—79
- 6 ZHOU Chunmei, Firestone R B. INDC(CPR)-057, Vienna: IAEA Nuclear Data Section, 2003.1—86
- 7 ZHOU Chunmei. INDC(CPR)-055, Vienna: IAEA Nuclear Data Section, 2001. 1—108
- 8 Mughabghab M A, Lone A, Robertson B C. Phys Rev, 1982, 26(6): 2698—2701
- 9 Firestone R B, Shirley V S, Baglin C M, *et al.* Table of isotopes (Vol 1), 8th edition. New York: a wiley-interscience publication, John Wiley and Sons Inc Press, 1996. 14—15

Prompt γ -ray data evaluation system of neutron capture

ZHOU Chunmei

(China Nuclear Data Center, Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract The evaluation method of prompt γ -ray data and schemes for neutron capture, main evaluation codes and their functions, flow chart of data evaluation, data self-consistent check and their application were briefly presented in the paper.

Key words Neutron, (n, γ)reaction, Evaluation code, Data evaluation

CLC 0571.323