

文章编号: 1007-1627(2002)01-0076-05

中国评价核参数库和 IAEA 之推荐输入参数库*

苏宗祯¹, 黄忠甫², 刘建峰³, 左义欣⁴, 余自强⁴, 陈振鹏⁵,
马功桂⁶, 朱耀银⁷, 李支文⁷, 张其欣¹, 龚惠莉¹, 周建明¹,
曹小二¹, 卢兆启¹, 史淑梅¹, 戴能雄⁸, 王豫生⁸

(1) 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

(2) 广西大学物理系, 广西 南宁 530004;

(3) 郑州大学物理系, 河南 郑州 450004;

(4) 南开大学数学系, 天津 300071;

(5) 清华大学物理系, 北京 100084;

(6) 四川大学原子核科学技术研究所, 四川 成都 610064;

(7) 吉林大学物理系, 吉林 长春 130023;

(8) 韶关大学物理系, 广东 韶关 512005

摘要: 概述了为核反应模型计算用的“中国评价核参数库”的发展和结构, 指出了该数据库在国际核反应数据模型计算的“推荐输入参数库”中的作用和地位. 目前正研制更新的 CENPL, 一方面将检验、更新和扩充数据, 特别注重研究适用于更高能区和非稳定核区的模型参数; 另一方面发展其检索软件和网络软件, 实现网络在线服务.

关键词: 核反应数据; 模型参数; 核参数库

中图分类号: O571 **文献标识码:** A

1 引言

许多研究领域都提出了对核反应数据的需要, 特别是近年来核天体物理、放射性束核反应、洁净核能源等方面的研究提出了对非稳定核素和更高入射能区核反应数据的需要. 由于实验数据资源匮乏, 应用模型计算获取核反应数据是一重要途径, 而实现这样的计算, 需要输入大量的各种核参数. 为了满足核反应模型计算的需要, 第一步是将已有的各类模型参数经过分析、比较和遴选, 建立中国评价核参数库(CENPL), 已于1990—1996年完成了第一版(CENPL-1); 第二步是研制更新的和网络在线服务的 CENPL(CENPL-2).

几乎同时, 国际原子能机构(IAEA)提出高优先度发展为核数据模型计算用的推荐输入参数库(RIPL), 中国(Beijing)、匈亚利、印度(Bombay)、

意大利(Bologna)、日本(JAERI)、俄罗斯(Obninsk)、美国(CHADWICK/Los Alamos)和(YOUNG/Los Alamos)、奥地利/荷兰以及白俄罗斯共10个国家的10个小组参加了RIPL协调研究计划, 1997年完成RIPL初始数据文档的推荐^[1]. 次年开始对RIPL的数据进行检验、改进和扩充, 发展其检索系统.

2 中国评价核参数库(CENPL)

在低能核反应模型及核反应数据的计算中, 输入的基本参数可概括在图1中, 分别是: (1)原子质量和基态特征常数(MCC); (2)分离能级和 γ 衰变分支比(DLS); (3)平均中子共振参数(ARP); (4)核能级密度参数(LDP); (5) γ 辐射强度函数巨共振参数(GRP); (6)裂变位垒参数(FBP); (7)光学模

收稿日期: 2001-07-05; 修改日期: 2001-10-25

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19445005, 1945007, 19975072); 中国工程物理研究院基金资助项目(97021); 国际原子能机构研究合同资助项目(7431/RB)

作者简介: 苏宗祯(1940—), 男, 汉族, 天津人, 研究员, 从事低能核反应模型理论, 模型参数及核数据库的研究.

型参数(OMP), 每一部分都由同名之数据文档、管理-检索程序及 README 文件等组成。

CENPL 是通用的评价数据库, 力求覆盖尽可能宽的核区和选用评价数据。MCC 和 DLS 的数据

是由 IAEA 专家咨询会推荐, 或取自国际协作网的评价数据, 并注意追踪和更新。而其它模型参数包括本组多年估算和推荐各类模型参数, 在模型计算和国际模型参数比对中得到检验。

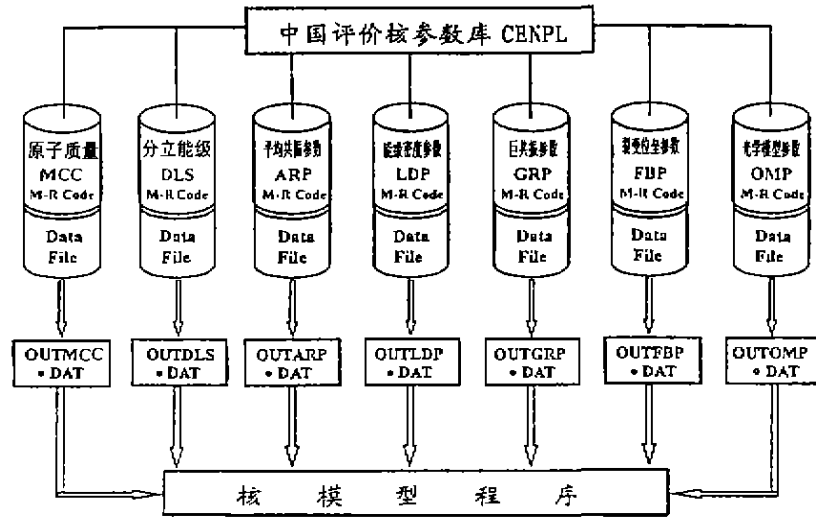


图1 中国评价核参数库

CENPL 的管理检索程序包括单核(或单反应道)及中子反应计算两类检索方式。

3 CENPL的7个子库和 RIPL的推荐

(1) MCC 数据文档是由 Audi 等^[1]的最新评价和 Moller 等^[2]的最新理论计算的质量亏损数据整合而成, 其检索程序不仅直接检索数据文档中的数据, 而且还可利用不同核素的质量组合派生出一些粒子和粒子团的分离能、 β -衰变能和中子反应阈能等数据。RIPL 的原子质量数据直接推荐文献^[2]和^[3]的数据, 同时也收入了 MCC 文档及 JAERI 文档作为 RIPL 的起始文档^[1]。

(2) DLS 包括了1 910个核素的79 561条能级和93 377条 γ 射线的信息, 并配有选取能级的检索程序。数据主要来自国际核结构数据评价协作网编纂的“评价核结构数据库(ENSDF)”。除 DLS 文档外, 匈牙利、意大利、俄罗斯、日本及美国小组也有类似的数据文档, 都取自 ENSDF。由于应用目的和建立时间的不同, 包括的核素及能级也不全同, 均被收入 RIPL 的起始文档^[1]。

(3) ARP 文档包括平均 S 波中子能级间距 D_0 、强度函数和辐射俘获宽度等平均中子共振参数(ANRP), 它们是表征共振区平均性质和计算平均

共振截面的重要参量。 D_0 和低能分离能级累积数 N_0 又是获取能级密度参数最直接的基础数据。各类能级密度参数通常都是符合它们抽取的。过去20年里通过对各中子反应数据库及其它数据的分析和检验, 我们推荐一组可分辨共振参数作为估算 ANRP 的样本数据; 此外, 发展了一些统计方法, 例如, 矩方法、最大似然法、Bayes 方法和 Monte-Carlo 方法等, 对推荐的可分辨共振参数(不完全统计样本)作共振能级丢失的修正, 估算和推荐出 ANRP。本组、Bologna、Obninsk 和美国 BNL 的 ANRP 是国际上公认的4组 ANRP^[1]。文献^[1]对各组的 ANRP 进行比较(见图2)后指出: Beijing 和 Obninsk 组的结果“非常一致”, Beijing 的 ARPL 覆盖的核区稍宽。“Obninsk 的评价是选用了 Beijing 组分析的最新实验数据之后给出的, 选为推荐参数, Beijing 的 ARPL 作为有用的可替换参数包括在 RIPL 中”。

(4) LDP 文档包括利用我们自己评估的 D_0 和 N_0 值得到的常温-费米气组合公式(GC)、后移费米气公式(BS)及推广超流模型(GSM)3种通用能级密度公式参数^[5-7]和其它常用的共计8组能级密度参数。我们的参数具有覆盖核素广、符合新的实验数据和精度高的特点, 并广泛应用于中子反应数据评

价、核模型计算、天体核物理及国际模型参数比对等。文献[1]推荐：“Beijing 的 GC 模型参数基于较新的中子共振和分离能级的编篡、选为 RIPL 的推荐参数”；“提出了可调的壳、对修正，参数 α 的系统学公式及形变修正也和原公式不同，作为最新的可靠参数推荐”。图3给出了3个组 GC 能级密度参数的比较。Beijing 的 BS 参数选择为推荐参数，而 Obninsk 的 GSM 参数是基于更新的中子共振参数，选作推荐参数，Beijing 的参数作为可替换参数收入 RIPL。

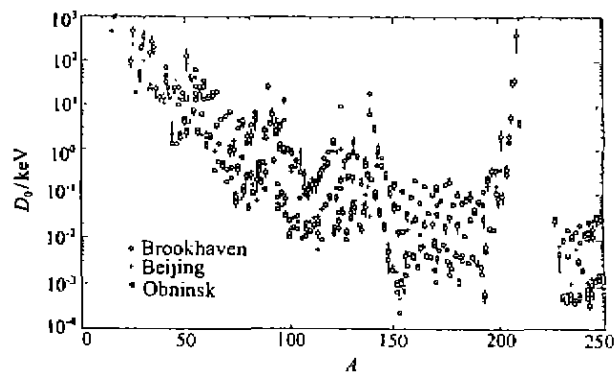


图2 Beijing, Brookhaven 和 Obninsk 的平均 S 波中子能级间距 D_0

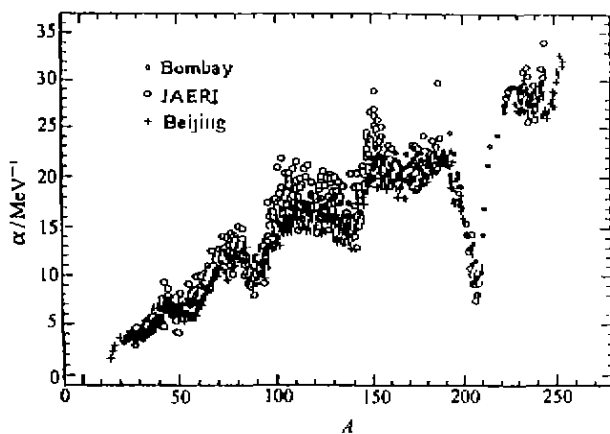


图3 Beijing, Bombay 和 JAERI 的 GC 模型能级密度参数的比较

(5) GDP 包括由光核反应实验数据抽取的 γ 辐射强度函数巨偶极共振参数(GDRP)，分别是单(或双)峰巨偶极共振峰位、半宽度及峰截面。但仅有 102 个 $A > 50$ 的核素的 GDRP，远不能满足实际应用和系统学研究的需要。为此，首先利用 Lorentz 曲线符合收集的光核反应实验数据，抽取了延伸至 ^{12}C 的 GDRP；其次，为补充 GDRP 的空缺和研究

GDRP 的系统学行为，提出了用插值、替代及系统学公式计算等系统学方法增补 GDRP。比较峰位、峰宽及峰截面的系统学公式后，推荐了一组公式作为增补之用，及基于单峰峰位系统学公式，引入形变参数 δ 得到半经验双峰峰位公式：

$$E_{c_1} = \frac{E_c}{1 + 2\delta/3}, \quad E_{c_2} = \frac{E_c}{1 - \delta/3},$$

其中 E_c 选用曾-杨单峰峰位系统学公式^[4]。本公式计算的 GDRP 与实验抽取的符合尚好。

GDP 检索系统利用插值、代替、系统学公式计算在内的一套系统学方法能有效地增补空缺的 GDRP，扩充了库中的数据。这一“很有价值”的系统学方法被编入 RIPL 手册，基于实验数据编篡的巨偶极共振参数，并将延伸至轻核的 GDP 选作 RIPL 的推荐的文档^[1]。

(6) FBP 子库包括铀系核裂变位垒的全高和曲率等位垒参数，通常由符合与裂变现象有关的实验结果得到，因此是模型相关的，并与鞍点态密度有关。FBP 收集了分别用统计模型计算裂变截面，分析实验测量裂变几率和裂变截面的方法推荐的 3 组裂变位垒参数。1997 年白俄罗斯组利用统计模型和 GSM 能级密度分析了 U 和 Pu 等同位素的中子裂变截面，推荐了鞍点分离跃迁态谱及裂变位垒参数，选作 RIPL 的推荐参数，而 FBP 和 Obninsk 的文档也收入 RIPL^[1]。

(7) OMP 子库收集和编篡了中子数据计算中应用最优化方法得到的 75 组单核优化中子光学势参数。此类势参数对指定核有较高精度，但外推应用有局限性。为此，OMP 还收集了中子、质子、氘、氚、 ^4He 和 α 6 类入射粒子的普适性和区域性光学势参数。一般地说，这类势参数有一定的外推可信性，常应用于无实验测量情况下的模型计算和选作优化法寻求最佳光学势参数的初始参数。OMP 库的检索程序能从上述两类势参数中检索适合的光学势参数，并用于计算光学模型截面。

美国 Los Alamos 的光学势参数文档包含了更多类型的光学势和有较多(6 类轻粒子共计 293 组)势参数组。选用美国 Los Alamos 的光学势参数文档作为 RIPL 之首选文档。同时，也将 OMP 及其它组的光学势参数库选入 RIPL，并要求与 Los Alamos 文档整合^[1]。

除上述7部分之外, RIPL 还比 CENPL 多了态密度和连续区角分布两部分. 前者态密度应用于预平衡反应表述粒子-空穴激发态的统计性质. 目前应用最广的是 Williams 的均匀单粒子模型^[1], 一个重要修正是限制空穴激发能小于核势阱深度. 文献[1]推荐包括多种模型使用的 Williams 公式计算态密度的程序 Avrigeanu. for^[11]. 连续区出射粒子角分布反映出核反应向完全平衡演化过程中反应机制的变化信息. 此外, 出射粒子角分布又是重要的评价核反应数据. 但实验仅在有限的能点作不完全的测量, 连续区出射粒子角分布数据很少, 只能由计算得到. 经典的和量子的预平衡反应理论分析个别反应角分布实验数据取得了进展, 但真正用以预言大片核质量区, 直到超过100 MeV 的全套反应数据计算还有困难. Kalbach 系统学^[12]相当成功地再现核子反应角分布的特征, 并应用于核子和光子反应数据评价. 程序 Kalbach-systematics. for 选作 RIPL 核子和光子反应角分布计算程序^[11].

4 更新的 CENPL

发展更新的 CENPL 的主要目标是检验、更新和扩充 CENPL 的数据文档, 实现网络在线服务.

(1) 利用新的评估参数更新和扩充 CENPL. 例如 MCC 的核素已延伸至中子和质子滴线, 和直到 $A \leq 329$ 的超重核; 应用2001年公布的最新 ENSDF 数据更新了 DLS, 并扩充了核素.

(2) 利用 RIPL 的推荐参数补充 CENPL. ARP, LDP 和 FBP 都直接从 RIPL 中增补了来自

其它组的参数; γ 辐射强度函数部分增补了 E2 和 M1 巨共振参数化的普适系统学公式; OMP 将 Los Alamos, Beijing 和 JAERI 的光学模型参数按照 RIPL 协调研究会商议的统一格式整合为统一的数据文档.

(3) 在模型参数的研究方面, 以长远发展和应用需要为目的. 一方面为提高模型参数的精度建立用于模型参数估算的基础实验数据库, 另一方面改进模型, 发展适用于较高能区和非稳定核区模型计算用的模型参数.

(4) 发展 CENPL 的库软件, 进一步扩充和完善其功能, 实现 CENPL 的网络在线服务.

5 结束语

在过去10年里研制了用于核模型计算的 CENPL, 并向国内外提供了大量核参数. 应用最多的是稳定核及稳定线邻近的非稳定核的核反应数据的计算、核反应模型分析、核天体物理的计算和穆斯堡尔谱等方面的研究, 均得到很好的评价. 在国际合作中受到了 RIPL 协调研究计划很高的评价和推荐. 在1997年国际核数据大会上, IAEA 核数据科和欧共体核能局 Data Bank 的大会邀请报告指出: "RIPL 的发展极大地受益于来自 CENPL^[12] 的成果".

致谢 孙正军、张丽敏、葛智刚、马丽珍等参加了 CENPL-1 的检索程序工作, 感谢 IAEA 核数据科和欧共体核能局 Data Bank 对本研究计划的支持和帮助.

参 考 文 献:

- [1] Oblozinsky P., Chadwick M. B., Ignatyuk A. V., *et al.* Handbook for Calculations of Nuclear Reaction Data—Reference Input Parameter Library (IAEA-TECDOC-1034) [R]. Vienna: Nuclear Data Section, IAEA, 1998, 1—168.
- [2] Audi G., Wapstra A. H. The 1993 Update to Atomic Mass Evaluation [J]. Nucl Phys, 1995, **A595**: 469—480.
- [3] Moller P., Nilz J. R., Myers W. D., *et al.* Nuclear Ground State Masses and Deformations [J]. Atomic Data Nucl Data Tables, 1995, **59**: 185—412.
- [4] Reffo G., Bersillon D., Muir D. W. Reference Nuclear Parameter Library for Nuclear Data Computations [INDC (NDS)-266] [R]. Vienna: Nuclear Data Section, the IAEA, 1993, 1—9.
- [5] Oblozinsky P. Development of Reference Input Parameter Library for Nuclear Model Calculations [INDC (NDS)-266] [R]. Vienna: Nuclear Data Section, the IAEA, 1994, 1—17.
- [6] Su Zongdi, Wang Cuihan, Zhuang Youxiang, *et al.* Level Density Parameters for the Fermi Gas Model [J]. Chinese Phys, 1988, **8**: 721—727.
- [7] Huang Zhonglu, He Ping, Su Zongdi, *et al.* A New Set of Back-shifted Level Density Parameters [J]. Chin J Nucl Phys, 1991, **13**: 147—156.
- [8] 吕国雄, 董燎原, 黄忠甫等. 超流模型能级密度公式及其参数研究 [J]. 原子核物理评论, 1999, **16**(4): 246—250.

- [8] 曹瑾言, 杨福家. 原子核巨共振能量的 $Z^{-1/3}$ 律[J]. 原子核物理. 1980, 2: 245—252.
- [9] Williams F G. Particle-hole State Density in Uniform Model [J]. Nucl Phys, 1971, A166: 231—240.
- [10] Avrigeanu M, Harangozo A, Avrigeanu V. Development of Data Files with Partial Level Densities for Nuclear Data Calculations. IAEA Report (to be published).
- [11] Kalbach C. Systematics of Continuum Angular Distributions [J]. Phys Rev. 1988, C37: 2 350—2 370.
- [12] Muir D M, Nagel P, Sartori E. *et al.* Enhanced Nuclear Data Center Services in Support of Theory-based Evaluation[C]. In: Reffo G ed. Proceedings of International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 1. Trieste Italy, 1997. Italian Physical Society, 1997, 84—90.

Chinese Evaluated Nuclear Parameter Library and Reference Input Parameter Library of IAEA*

SU Zong-di¹, HUANG Zhong-fu², LIU Jian-feng³, ZUO Yi-xin⁴, YU Zi-qiang⁴, CHEN Zhen-peng⁵, MA Gong-gui⁶, ZHU Yao-yin⁷, LI Zhi-wen⁷, ZHANG Qi-xin¹, GONG Hui-li¹, ZHOU Jian-ming¹, CAO Xiao-ping¹,

LU Zhao-qi¹, SHI Shu-mer¹, DAI Neng-xiong⁸, WANG Yu-sheng⁸

(1 *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;*

2 *Department of Physics, Guangxi University, Nanning 530004, China;*

3 *Department of Physics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450004, China;*

4 *Department of Mathematics, Nankai University, Tianjin 300071, China;*

5 *Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

6 *Institute of Nuclear Science and Technology of Sichuan University, Chengdu 610064, China;*

7 *Department of Physics, Jilin University, Changchun 130023, China;*

8 *Department of Physics, Shaoguan University, Shaoguan 512005, China)*

Abstract: The Chinese Evaluated Nuclear Parameter Library (CENPL) for the model calculations of nuclear reactions was developed in the past ten years. The International Atomic Energy Agency has constructed a Reference Input Parameter Library (RIPL) for the calculations of nuclear reaction data in the meantime. All data files of CENPL are adopted as the RIPL Starter Files. The model parameters estimated and recommended by our group are specially selected as recommended files. The updated CENPL is being developed at present. The data of CENPL are tested, updated and expanded. We follow with especial interest the studies on model parameters, which can suit the nuclear data calculations of higher energy range and unstable nuclide range. The retrieval code and net software of CENPL are developed, the Web services will be carried out.

Key words: nuclear reaction data; model parameter; nuclear parameter library

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (13435005, 13475067, 19975072); Foundation of China Academy of Engineering Physics (97021); Research Contract of the International Atomic Energy Agency(7431/RB)