



核数据研究及应用的进展与展望

葛智刚 陈永静

Progress and Prospects of Nuclear Data Research and Its Application

GE Zhigang, CHEN Yongjing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC42>

引用格式:

葛智刚, 陈永静. 核数据研究及应用的进展与展望[J]. 原子核物理评论, 2020, 37(3):309–316. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC42

GE Zhigang, CHEN Yongjing. Progress and Prospects of Nuclear Data Research and Its Application[J]. Nuclear Physics Review, 2020, 37(3):309–316. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC42

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一维快装置中心反应率模拟计算的灵敏度和不确定度分析

Sensitivity and Uncertainty Analysis of Reaction Rates Ratio for 1-D Fast Critical Benchmarking Facilities

原子核物理评论. 2017, 34(3): 598–603 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.598>

20MeV以下快中子与⁵⁶Fe非弹性散射截面的分歧研究

Research on Discrepancy of Inelastic Cross Section for ⁵⁶Fe in Fast Neutron Range

原子核物理评论. 2017, 34(3): 514–519 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.514>

原子核质量的测量和评估

Nuclear Mass Measurement and Evaluation

原子核物理评论. 2017, 34(3): 380–386 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.380>

用于CBM-TOF超级模块质量评估的SoC数据读出方法

SoC Data Readout Method for CBM-TOF Super Module Quality Evaluation

原子核物理评论. 2019, 36(3): 336–342 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.03.336>

^{50,52,53,54}Cr光核反应数据评价

Evaluations of Gamma Induced ^{50,52,53,54}Cr Reactions

原子核物理评论. 2020, 37(2): 233–239 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2020003>

我国核天体物理前沿研究进展

Progress of Nuclear Astrophysics in China

原子核物理评论. 2017, 34(3): 284–289 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.284>

文章编号: 1007-4627(2020)03-0309-08

核数据研究及应用的进展与展望

葛智刚, 陈永静

(中国原子能科学研究院, 核数据重点实验室, 中国核数据中心, 北京 102413)

摘要: 核数据包括核反应数据与核结构及放射性衰变数据。核反应数据是描述入射粒子与原子核发生相互作用的数据, 核结构数据是反映核素自身基本性质方面的数据。核数据是核能利用、核工程建设、核技术应用以及核物理基础研究等方面不可缺少的基础数据, 在核医学、材料分析、资源勘探、环境监测、宇航技术以及核天体物理研究领域也有着广泛的应用。本文简要介绍了核数据的种类、产生及应用, 评述了国际核数据研究与应用现状以及发展动态、我国核数据研究现状及存在的问题, 并对我国核数据工作未来发展方向提出了几点建议。

关键词: 核数据; 核数据测量; 核数据评价

中图分类号: O571.53

文献标志码: A

DOI: [10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC42](https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC42)

1 核数据简介与应用

核数据是用来描述原子核基本性质、核衰变以及入射粒子与原子核发生反应过程等方面信息的统称, 是核科学与核工程应用所需的重要基础数据, 其精度和可靠性直接关系着核工程产品的可靠性、安全性和经济性。核数据主要包括核反应截面、出射粒子角分布、能谱、双微分截面、伽马产生截面、裂变产额(原子核裂变产生某种特定裂变产物核的几率)等。核结构及放射性衰变数据主要包括原子核质量、自旋、宇称、能级纲图、寿命以及衰变模式等重要信息。

核反应数据有很多分类方式, 表1列出了常用的几种分类方式^[1]。

表1 核反应数据分类表

分类方式	核数据种类
按核数据用途	通用核数据和专用核数据
按入射粒子种类分	中子、带电粒子、光核等数据
按靶核质量	轻核、中重核、易裂变核数据
按入射粒子能量	低能、中能和高能数据
按数据获取方式	测量数据和评价数据

目前, 实际应用中最重要的是中子与核发生反应的核数据, 简称中子核数据, 本文描述的核数据主要指中子核数据。通常关注中子引起核反应的入射中子能量一般在20 MeV以下。历史上中子核数据的测量与评价在国防安全、基础科研、核能和核技术应用等领域做出了

非常重要的贡献。

实际应用中需要的核数据核素种类很多, 涵盖了核素图上的几千个核素, 核反应数据的入射粒子能区从 10^{-5} eV至GeV, 能区跨越10多个数量级, 同时也需要各种反应道的核数据, 因此涉及的数据量很大。但是人类目前通过实验测量只能给出部分核素、部分反应道和有限能点的实验测量数据, 而且测量成本也极为昂贵, 需依托大型实验设施, 如反应堆、加速器、散裂中子源等。另外由于一些核素的寿命非常短, 人类利用目前所掌握的技术还不能通过实验测量去获取它们相关核数据。因此, 在开展实验测量的基础上, 科学家们还需通过理论模型计算和实验数据评价产生用户需要的完整的核反应与核结构数据。

核数据的产生是以实验测量数据为基础, 经过评价后结合核反应理论模型计算给出结果, 并经过合理的调整, 形成物理上自洽、成套的评价核数据。评价核数据经过加工, 便可制作成工程可用的数据库, 经过宏观检验后, 才能提供给用户使用。同时, 宏观检验结果以及用户使用过程中发现的新问题也会及时反馈给核数据测量和评价者, 为进一步开展实验测量及评价提供反馈意见。如此循环, 不断提高核数据的质量, 最终能更好地满足各领域发展对核数据的需求。图1给出了目前国际上通行的核数据产生过程示意图。

如上所述, 核数据研究是一个系统工程, 包括了核数据实验测量、核反应与核结构理论模型计算、核数据

收稿日期: 2020-01-08; 修改日期: 2020-05-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11790320, 11790321, 11790325); 国家财政部稳定支持研究经费(WDJC-2019-09)

作者简介: 葛智刚(1962-), 男, 浙江宁波人, 研究员, 博士, 从事核数据评价与建库研究; E-mail: gezg@ciae.ac.cn。

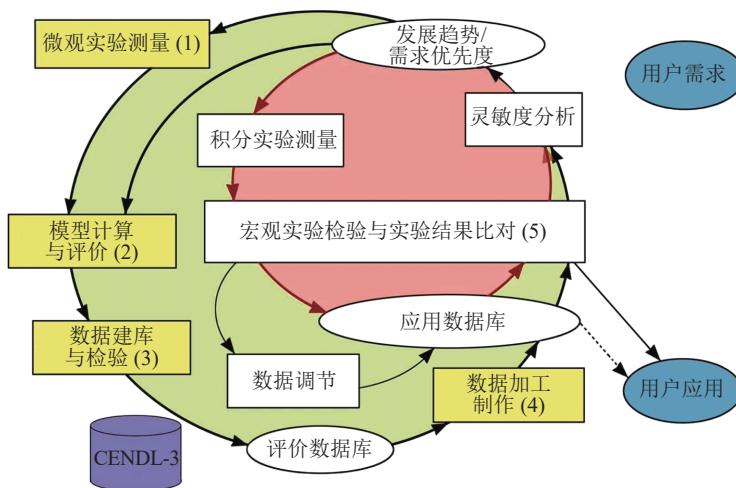


图 1 (在线彩图) 核数据产生过程示意图(在文献[2]图的基础上做了修改)

评价与建库、核数据加工处理及宏观检验等一系列工作, 是从核物理基础研究到应用的完整链条。

核数据是核事业发展的基础数据, 在国防建设中发挥着重要的作用。核装置设计的三要素是物理模型、计算方法和输入参数, 核数据是输入参数的重要组成部分。核装置小型化、核爆的计算机模拟及库存装置性能认证都需要用到大量的核数据。在核爆测试中, 也会利用各种核测量方法获得爆炸当量、燃耗深度、燃烧过程等信息, 这些测量都需要精确核数据的支撑。

随着核科学与核技术的发展, 核数据应用领域不仅包括核装置、核动力、核保障和核核查等国家安全领域, 还涵盖了基础研究以及国民经济发展中所有重要的核科学与核技术领域^[3-4]。例如国民经济发展中的能源发展(裂变能和聚变能)对核数据有着迫切的需求。在核电站设计、运行和升级中, 核数据是最基础的输入数据^[5]。近年来各种新型核能系统的研发对核数据提出了新的、更高的要求。新型核能系统主要包括第四代反应堆、聚变堆、加速器驱动的洁净核能系统等, 追求的是更高的核燃料利用率、更少的核废料产生率、更高的安全性及更好的经济性等。

其次, 核数据在国民经济其他发展中也有着广泛的应用: 如辐照育种、产品杀菌等农业应用; 工业无损探伤、集装箱检测、资源勘探、环境监测和同位素生产等工业应用^[6-7]以及医疗检测、放射性同位素诊断和治疗等核医学应用等^[8-9], 这些核技术开发都需要核数据的支撑。

最后, 核数据在基础科学的研究中扮演着重要的角色^[10]。现今的核物理理论大多是唯像模型, 通常需要用一些实验数据来约束这些模型参数, 因此精确的核数据对核理论模型的检验与发展具有重要的意义。又如,

在宇宙学研究中, 目前科学家普遍认为宇宙中的各种元素是通过核反应产生的, 因此深入理解宇宙中各种元素的丰度及合成过程必然需要用到大量的核数据。

因此, 核数据, 特别是中子核数据是核科学研究与应用的重要基础数据, 是核物理基础研究与核工程及核技术应用之间的重要桥梁。

2 国际核数据研究及需求现状

国际上核数据研究始于 20 世纪 40 年代, 当时的核数据研究主要为核武器研制与测试服务, 此后核数据研究一直受到发达国家的高度重视。美国、俄罗斯、日本、欧洲以及中国等都先后建立了各自的评价核数据库, 特别是中子核数据库, 并且不断更新版本, 以满足各国国防、核能开发以及核技术应用对核数据的需要。进入 21 世纪后, 国际核数据呈现新的发展态势: 新型测量装置与方法不断涌现; 中子源能区更广、强度更高; 关键核数据测量精度不断提高; 核数据规模不断扩大。下面分别从核数据测量、核数据评价建库、核数据宏观检验以及核数据需求等方面对国际核数据发展动态进行阐述。

2.1 核数据测量

核数据实验测量的三要素是中子源、探测器和测量方法。这三个要素直接决定了核数据的实验测量水平。

在中子源方面, 国际上已经发展到第三代。第一代是基于反应堆和各种静电及高压型加速器的中子源; 第二代是基于电子直线加速器的共振区白光中子源; 第三代是基于高能、高功率质子加速器的散裂中子源(宽能区白光中子源)。散裂中子源已成为目前核数据测量最先进的平台, 其中最具代表性的是美国洛斯阿拉莫斯

实验室(LANL)的LANSCE/WNR^[11]和欧洲核子中心n_TOF装置^[12], 其中子能区可覆盖热中子至GeV。人们利用这些装置在共振区、快中子区和中高能区测量了大量的核数据, 包括一系列放射性核素(如^{241,242}Am、²⁴⁰Pu、^{233,234,236}U、²³⁷Np、²³⁸U、²³²Th和⁹⁹Tc等)和少样品量核素(如^{90,91,92,94,96}Zr和^{186,187,188}Os等)的(n, γ)截面和一系列锕系核及次锕系核的裂变截面^[13]。图2是欧洲核子研究中心n_TOF装置可以产生的中子能量范围示意图, 从 $10^{-5} \sim 10^8$ eV^[13]。

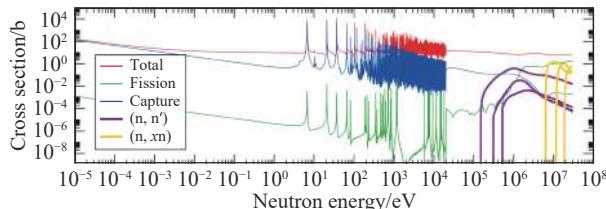


图2 (在线彩图) 中子诱发重核反应截面随入射中子能量($10^{-5} \sim 10^8$ eV)^[13]

在探测器方面, 各种新型探测器及相关探测技术不断出现, 有效提高了探测效率及信号处理能力。如全空间高效率探测器与高性能的中子源配合, 使得中子反应截面测量精度得到极大提高, 反应截面测量的下限也不断突破, 这对于一些稀有核素的核数据测量显得尤为重要。如美国LANL建立了用于中子辐射俘获截面测量的伽马探测器阵列DANCE^[14], 用于伽马产生截面测量的GEANIE^[15]探测器阵列以及用于裂变瞬发中子谱测量的Chi-Nu^[16]装置等, 这些装置大大提高了探测效率和测量精度。基于全数字化波形的数据采集技术可完全消除系统的死时间, 并保留完整的原始实验信息, 提高了信号的识别能力。LANL的DANCE和欧洲n_TOF的 4π 氟化钡球装置, 都采用了全数字化波形数据采集方式。出射粒子径迹跟踪技术通过径迹跟踪记录和离线分析, 提高对干扰信号的剔除能力, 可将裂变截面测量不确定度降低到1%左右, 如: 用于裂变截面测量的时间投影室(TPC)^[17]。此外还发展了高分辨的组合探测技术, 如LANL已发展了用于初始裂变产物产额测量的SPIDER装置^[18], 对裂变碎片进行飞行时间和能量的高分辨组合测量, 实现裂变产物核A-Z分布的精确测量。

在测量方法方面, 随着实验核物理发展与新探测技术的出现, 一些新的核数据测量方法也不断地丰富核数据的测量手段。除了直接测量方法外, 20世纪70年代初, LANL的Cramer^[19]和Britt^[20]开创性地用替代反应测量了当时还难以直接测量的Th、U、Np和Am等同位素的裂变截面, 首次实现了用替代反应法实现反应

截面的测量^[21]。此后这一方法得到了快速发展并得了大量应用。此外, 基于加速器质谱的核数据测量方法也得到了很好的发展^[22-23], 该方法由于具有很高的核素测量灵敏度, 因此在核数据测量方面得到了重要的应用。这些新方法的出现, 使得原先无法实现的一些不稳定核的核数据测量成为现实。这对填补关键核数据的空白, 提高数据可靠性都有重要的意义。

2.2 核数据评价

在核反应理论和核数据评价方面, 尽管国际上各核大国已建立了种类齐全、核素丰富、入射粒子能区范围广的各类核数据库, 但由于核数据的应用领域不断拓展和需求的不断提高, 国际核数据评价工作也呈现新的趋势。

在全套中子数据方面, 进一步提高全套中子评价数据库中关键核素的数据质量; 积极拓展中子入射能区范围, 由原来最高到20 MeV往150 MeV甚至更高拓展; 不断增加不稳定核素的核数据; 增加包括核数据协方差在内的文档等是目前国际核数据发展的主要趋势。核数据工作的最终目标是建立一套高普适性的核数据库, 可以满足各种应用的需求, 而不是象现在这样需要针对特定的装置研制专门的核数据库。

具体来说, 在理论模型方面, 虽然没有新的理论模型出现, 但在理论模型完善、输入参数优化、建立普适的输入参数库等方面取得了很大的进展, 使得理论计算程序的功能越来越强大, 使用也越来越方便。这方面最具代表性的是欧洲发展的Talys程序^[24], 该程序可以计算的能量范围从1 keV至200 MeV, 可以计算几乎所有核素($12 < A < 339$)和反应道的数据, 而且使用极其方便, 基本上只要输入入射粒子及能量、靶核等简单的信息就可以进行计算。

在裂变数据研究方面, 基于国家安全及核能发展的需要, 美国和欧洲近年来加大了对裂变理论的研究。欧洲发展了以GEF程序为代表的唯像模型^[25], 可计算裂变碎片产额、裂变瞬发中子谱、裂变碎片动能分布等重要裂变后数据, 并已用于欧洲核数据库JEFF-3.2库中裂变产额子库的评价工作。美国几个国家实验室大力发展描述裂变后物理量计算的理论方法和程序, 如Randrup等^[26]的宏观-微观模型和Schunck等^[27]发展的微观模型在描述裂变碎片质量和电荷分布等方面均取得了重要的进展。

此外, 核数据的不确定度即协方差也是近年来的研究热点。核数据协方差的研究目的就是通过评价或者计算核数据制作各环节的误差与关联, 从而精确量化核数据可信度范围。由于实验测量的局限性, 大多数核数据

都来源于核反应模型程序计算,因此研究模型计算核数据的协方差评价方法是重点。目前国际上针对模型依赖型核数据协方差的评价方法仍没有统一的定论,给核数据研究人员带来了挑战。就研究方法来分,协方差评价可分为确定论(即简单和推广型的最小二乘法)、随机抽样法(即基于参数蒙特卡罗抽样法)以及混合法(包含确定论和随机抽样理论的双重特性)三种类型。这三种方法在国际上都有所发展,各有优缺点。

2.3 核数据宏观检验

基准实验是核数据宏观检验的基础。为了系统、全面地检验核数据,国际上开展了大量的积分实验工作,包括屏蔽积分实验、临界实验等多种实验类型。为了充分利用这些实验,国际上已经完成或仍在持续开展大量宏观实验的整理、评价工作,并形成基准实验。国际核临界安全手册(ICSBEP)^[28]是当前国际上最为权威的核临界安全实验数据库。该手册收集、整理和评价了世界范围内在各种核临界设施上开展的临界实验、近临界实验和次临界实验。目前,最新版的核临界安全手册包含了558个评价实验,共计4798个实验布置。此外还有一系列的屏蔽基准实验在屏蔽积分基准实验档案和数据库(SINBAD)中收录。

受益于积分实验系统的整理工作和计算机技术的发展,近十年来评价核数据宏观检验工作实现了向系统化、大规模方向发展。如日本发布的JENDL-4.0,除了选用ICSBEP中930个临界基准实验方案开展宏观检验,另外还增加了压水堆和快堆辐照后检验实验来验证燃耗计算所需核数据。

此外,近年来随着计算机水平的提升,核数据灵敏度-不确定度分析技术、核数据调整方法也得到了迅猛发展,目前的各主要核大国都发展了自己的灵敏度与不确定度(S/U)分析方法,并形成了成熟的程序系统,如美国的SCALE6.0^[29]和MCNP6^[30],欧洲的SUSD3D^[31]等。灵敏度分析有助于提高核数据库的整体质量,并为微观数据评价提供合理的反馈意见。

2.4 核数据需求

国际上对核数据应用的需求也在不断发展。过去十年,各个核数据大国都在大力发展核数据协方差研究方法和灵敏度分析技术,这样他们在进行各种核装置设计时,可利用协方差数据和灵敏度分析技术,分析不同核素、不同反应道及不同能区的核数据对核装置设计的影响,进而反过来给核数据提出明确的需求。经合组织(OECD)核能局(NEA)的核数据评价工作组(WPEC)有一个长期的工作组,每年会根据核数据用户在使用核

数据过程中反馈的信息列出一个核数据需求优先度列表(HPRL)。任何国家的核数据使用者都可以提出需求,每一个需求都需要包含非常详细的信息,包括需求的提出背景、核素、反应类型、能区及精度需求等。工作组经过评估,将需求分为两类:高优先度需求和普通需求,这些需求对国际核数据的测量、理论评价以及宏观检验等工作提供非常清晰有用的指导。文献[2, 5]即是在WPEC的组织框架下,通过国际核数据界的合作,总结了各种先进核能系统对核数据的新需求。[表2](#)和[表3](#)为文献[5]中给出的超高温气冷堆(VHTR)和压水堆(PWR)对核数据需求的目标精度与现有数据精度的比较。可以看出,许多数据的精度需要大幅度提高才能满足新一代核能系统研发的需求。这对核数据实验测量、微观评价和理论研究都提出了新的极大的挑战。

表 2 超高温气冷堆(VHTR)需求的核数据目标精度表

核素	物理量	能区	不确定度/%	现有精度	目标精度
^{238}U	σ_{capt}	454.0~22.6 eV	1.7	1.2	
^{235}U	σ_{inel}	19.6~6.07 MeV	30.0	7.1	
^{235}U	σ_{capt}	19.60~6.07 MeV	20.0	7.1	
^{235}U	σ_{capt}	4.00~0.54 eV	20.0	5.0	
^{239}Pu	σ_{capt}	0.54~0.10 eV	1.4	0.9	
^{241}Pu	σ_{fiss}	454.0~22.6 eV	19.4	6.4	
^{241}Pu	σ_{fiss}	4.00~0.54 eV	26.8	9.4	
^{241}Pu	σ_{fiss}	0.54~0.10 eV	2.9	1.5	
^{241}Pu	σ_{capt}	0.54~0.10 eV	6.8	2.4	

表中 ^{235}U 表示天然核素,下表同。

表 3 压水堆(PWR)需求的核数据目标精度表

核素	物理量	能区	不确定度/%	现有精度	目标精度
^{235}O	σ_{capt}	19.60~6.07 MeV	100	12.1	
^{235}O	σ_{capt}	6.07~2.23 MeV	100	9.9	
^{241}Pu	σ_{fiss}	454.0~22.6 eV	19.4	4.7	
^{241}Pu	σ_{fiss}	4.00~0.54 eV	26.8	7.7	
^{241}Pu	σ_{fiss}	0.54~0.10 eV	2.9	1.7	
^{241}Pu	σ_{fiss}	4.00~0.54 eV	26.8	9.4	
^{241}Pu	σ_{fiss}	0.1 eV~thermal	3.3	1.9	
^{239}Pu	σ_{capt}	0.54~0.10 eV	1.4	1.0	
^{238}U	σ_{capt}	24.80~9.12 keV	9.4	4.6	
^{238}U	σ_{capt}	454.0~22.6 keV	1.7	1.4	
^{238}U	σ_{inel}	6.07~2.23 MeV	14.6	5.1	
^{241}Pu	σ_{capt}	0.54~0.10 eV	6.8	3.0	
^{240}Pu	σ_{capt}	0.1 eV~thermal	4.8	3.1	
^{235}O	σ_{inel}	6.07~2.23 MeV	54.9	12.6	
^{235}O	σ_{inel}	19.60~6.07 MeV	84.6	15.6	

此外,核数据应用所需的能区也在不断扩展。之前核数据中子能量一般只到20 MeV,目前加速器驱动的次临界系统(ADS)研究、核医学研究、空间辐射研究、航天及航空电子器件的抗辐射加固研究等都需要更高能量的核数据,需要从原先的20 MeV扩展到150 MeV甚至更高。

最后,核数据应用需要的核素规模也在增加,从锕系核扩展到次锕系核,从稳定核扩展到不稳定核。第四代核反应堆、ADS研究除了需要锕系核的各种反应截面,还需要次锕系核的中子数据。核废料嬗变研究也需要反应堆里生成的各种长寿命产物核的中子反应截面数据。

3 我国核数据研究现状及面临的问题

国际核数据研究工作起步于20世纪40年代,我国核数据研究起步较晚。从20世纪60年代开始,根据国防核装置设计、核试验诊断的要求,我国开展了包括热中子诱发²³⁵U裂变反应和轻核反应截面的实验测量工作,有力地支持了我国核装置初期的发展。其后,我国核数据研究一直紧紧围绕核装置、核动力发展的需要进行,到1975年才系统开展核数据评价建库工作。特别是1975年中国核数据中心成立后,通过全国核数据工作协作网各成员单位的共同努力,先后完成了多期核数据任务,取得了许多重要成果,形成了由实验测量、理论模型计算与评价以及核数据基准检验构成的较为完整的核数据研究能力。我国评价核数据库经历了CENDL-1(37个核素)、CENDL-2(54个核素)、CENDL-2.1(69个核素)、CENDL-3.1(240个核素)和CENDL-3.2(272

个核素)的长足发展,并建立了多个重要的专用数据库,满足了我国原子能工业发展的急需,也建立了具有自主知识产权的核数据评价、建库和检验系统。这些成果不仅有力地支持了我国国防和国民经济建设的发展,也奠定了我国作为国际上主要核数据大国的地位。目前,中国核数据中心和中国评价核数据库已分别成为国际公认核数据中心和五大核数据库之一。

3.1 我国核数据研究现状

经过几十年的努力,我国核数据工作已经在测量、理论、评价、宏观检验等方面建立了自己的体系,我国的核数据工作也在一定程度上满足了国内用户对核数据的需求。但是随着我国国防安全、基础科研、能源发展等领域研究的不断深入,我国目前现有的很多核数据在种类、能区及不确定度等方面远不能满足新需求,这对核数据的测量和评价研究提出了极大的挑战,推动人们在新的形势下开展核数据相关的测量方法以及评价手段的深入研究。

针对我国核数据工作的薄弱环节,我国相关科研院所也进行了一些重点布局,在核数据基础研究、核数据测量和核数据评价等方面均开展了深入研究,也出现了一些可喜的势头。

在中子源技术方面,中国原子能科学研究院、兰州大学和中国科学院核能安全技术研究所都正在建设或已经建好新的强流高压倍加器;中国先进研究堆(CARR)已经投入运行^[32]。同时,随着中国散裂中子源(CSNS)^[33]以及国内一些其他高性能中子源的陆续建成,我国的核数据实验研究平台得到较大改善。图3是中国散裂中子源核数据测量专用管道布局示意图。

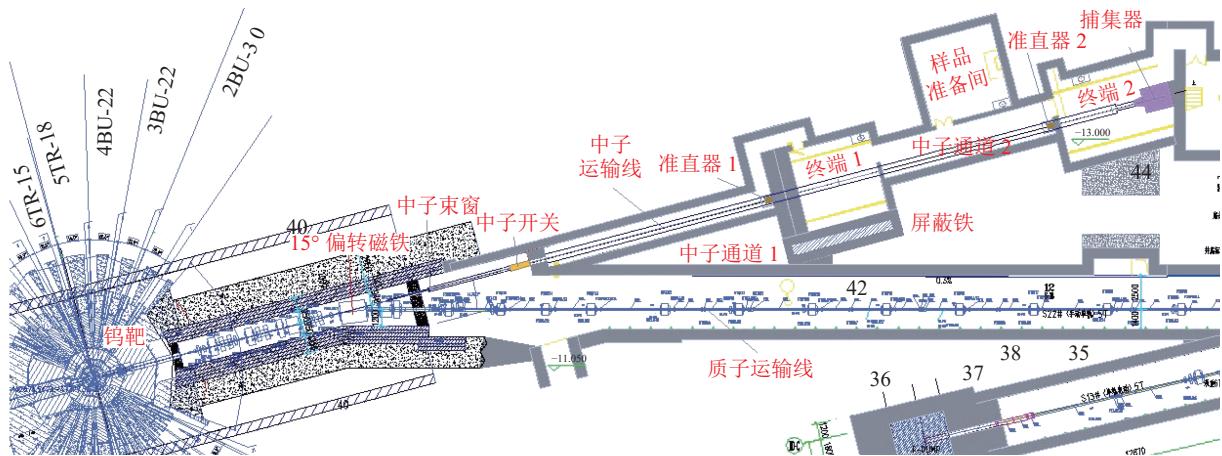


图3 (在线彩图)中国散裂中子源核数据测量专用管道布局图^[33]

在探测技术发展方面,国内也逐步建成了一些核数据测量用的高效率探测系统,如中国科学院近代物理研

究所和中国原子能科学研究院都发展了用于核结构相关数据测量和研究的HPGe探测器阵列;中国原子能科学

研究院已经完成了 4π 氟化钡球等高效率阵列谱仪研制，并已用于中子俘获截面的实验研究。全波形数字化的数据获取技术已得到广泛使用。一些新型探测技术也在不断发展。

在核数据测量方法方面，我国核数据测量除传统的中子飞行时间、中子活化等测量手段以外，也积极开展替代反应法、加速器质谱法^[22-23]等技术研究，初步获得较好的效果。

在核数据评价技术方面，我们引入了国外的同时评价技术提高锕系核素的评价核数据质量；增加了不稳定核素的核反应数据以及给评价核数据添加不确定度(协方差数据)；积极拓展能区范围，计划由原来的最高到20 MeV往30 MeV甚至更高能区拓展。

在核数据评价模型理论研究方面，我们通过改进核反应理论模型，提高锕系核核反应评价数据的质量；积极发展裂变后理论，为裂变产额数据计算提供方法和程序^[34]。

此外，我国发展了协方差数据评价方法。我国从20世纪八九十年代开始，在核数据协方差评价方法研究中做了许多工作，为中国评价核数据库协方差研究打下了技术基础。目前我国在核反应截面实验数据协方差以及模型依赖型协方差评价方法上取得了显著进展，该工作结合我国自主研制的核反应程序-UNF^[35]，根据不同的反应截面类型建立了整套系统的评价方法与程序—COVAC^[36]。2020年6月发布的CENDL-3.2库中给出了70个核素的重要反应截面协方差文档^[37]。在核数据宏观检验方面，中国核数据中心利用屏蔽基准实验、临界基准实验和俘获截面积分实验构建了一套系统化的宏观检验体系。利用该系统中的基准实验，对铀、钚、结构材料核、轻核、裂变产物核等多个核区的数据进行了检验。在中国评价核数据库CENDL-3.1库中铜的评价数据检验和改进中，将有效增殖因子(k_{eff})趋势分析、灵敏度分析以及微观数据评价相结合，确定了评价数据需要改进的反应道和能区。

3.2 我国核数据研究面临的问题

经过几十年的发展，我国已建立了相对完善的包括核数据测量、微观数据评价、理论计算以及宏观检验技术在内的核数据技术体系，基本满足了我国国防建设、

核能开发与核技术发展对核数据的急需。新形势下国防建设与国民经济的发展对核数据的需求也给我国核数据工作提供了新的机遇，核数据工作也出现了可喜的发展趋势。但是与国际先进水平相比，我们也要认识到自己的薄弱环节，我国核数据实验研究能力以及核数据库不管在核素数量、数据类型、中子能区等方面都有较大差距，主要体现在：

(1) 核数据实验研究平台总体比较落后。核数据测量强烈依赖于大型加速器、反应堆等核科学装置，而这方面我国与美欧相比具有较大的差距，这限制了我国核数据测量技术的高水平发展。如对可用于核数据测量的中子源这一项，我国在2018年之前的中子源水平只相当于发达国家20世纪六七十年代的水平，即只有部分基于反应堆和各种静电及高压加速器的第一代中子源，而国外已经发展到第三代中子源。2018年虽然我国建成了基于中国散裂中子源的反角白光中子源束线^[33]，解决了我国白光中子源有无的问题，但由于是非核数据测量专用中子源，其脉冲性能及相应的实验室条件尚无法与国外相比。此外，国外基于第二代及第三代中子源的核数据测量技术已积累了几十年，而我国也才刚刚起步，因此在测量技术上与国际先进水平的差距是显而易见的。

(2) 我国的评价核数据库与国外比有差距。我国虽然发展了以UNF程序为代表的具有自主知识产权的核数据理论计算体系，建立了中国评价核数据库CENDL(目前的版本为3.2)，但我国的数据库能区只覆盖0~20 MeV，核素约272个，其中共振区数据全部取自国外，只有70个核素有反应截面协方差文档，除截面以外的其他种类核数据(如角分布、能谱、裂变 ν 值等)协方差的系统研究工作还处于起步阶段。

表4列出了国际上五个主要核数据库的几个关键参数比较。由表4可以看出我国的核数据库不管在核素数量、数据类型、中子能区等方面与国际领先水平仍有较大差距。此外我国在轻核反应数据、不稳定核反应数据计算方面，相关的模型程序仍有待进一步发展。

(3) 在核数据宏观检验方面，我国的核数据加工、粒子输运等程序自主化程度较低，仍然主要依赖美国的NJOY^[38]及MCNP程序；我国核数据调整方法学方

表4 国际上五大核数据库主要参数比较

	ENDF/B-VIII.0(美国)	JEFF-3.3(欧洲)	JENDL-4.0(日本)	ROSFOND(俄罗斯)	CENDL-3.2(中国)
核素数量	557	562	406	686	272
中子能区/MeV	0~30	0~30	0~20	0~20	0~20
协方差数据	221	442	99	128	70

面也有待进一步提高。此外, 我国虽然做了诸多积分实验, 但是这些实验一直没有得到很好的整理, 无法应用到我国评价核数据库的宏观检验中。

(4) 高水平人才储备不足。我国核数据研究初期凝聚了国内高校和科研院所一大批高水平的人才, 他们为我国核数据的基础研究做出了重要的贡献, 在一些核数据测量平台、方法、核反应理论、特别是轻核、统计理论以及裂变理论等方面做出了具有国际水平的研究成果, 同时也培养了一大批研究骨干。但近20年来, 由于核数据工作的性质属于应用基础研究, 既不属于纯基础研究也不属于应用研究, 国家对应用基础研究的重视不够, 投入较少, 导致大量人才流失。

4 我国核数据未来发展建议

随着我国国防科技及核能与核技术研究的发展, 尤其是近几年来新型核能系统的研发对核数据的需求越来越强烈, 国内相关单位对核数据研究的关注度也逐渐加强, 纷纷投入人力、物力开展核数据相关研究, 这也将促进我国的核数据研究工作进一步发展。为了使我国的核数据工作在新的历史时期更上一个台阶, 更好地服务于我国国防与国民经济建设, 我们从发展战略层面对我国核数据工作的发展提出下面几点建议:

(1) 高度重视我国核数据研究现状与国家安全和核能发展对核数据工作提出的新要求; 联合国内核数据相关研究队伍, 发扬我国核数据工作大力协作、共同攻关的优良传统, 组织力量攻克核数据研究关键难点问题, 满足国家安全与国民经济建设对核数据的急需, 巩固我国核数据工作的国际地位。

(2) 凝聚核数据需求方、核数据研究以及核物理基础研究等方面力量, 从国家需求全局出发, 布置一些与核物理基础研究紧密相关的核数据关键基础问题并进行攻关, 以期尽快获得一批突破性的成果, 进一步提升我国核数据研究的国际地位。

(3) 考虑核数据与核物理基础研究特点。核数据相关的基础研究涵盖了核反应与核结构的实验测量和理论研究领域, 核物理实验研究中研发的实验方法和技术可为核数据实验测量提供强有力的技术支撑。因此加强核物理基础研究是核数据长远发展的基础。因此, 我们需要结合核数据基础研究重要性和长期性, 争取相关项目持续支持, 获取一批高水平研究成果, 培养一支高水平核数据研究团队, 形成完整的核数据研究体系。

(4) 建立有效的交流与合作机制。交流与合作是推动核数据发展的加速器, 虽然国际交流与合作有时会受

到一定的限制, 但也需要尽可能创造条件, 鼓励国际合作与交流。同时在国内, 依托已有的核数据协作网, 建立更加紧密的合作机制, 促进我国核数据事业的又好又快发展。

综上所述, 我国核数据研究工作已经取得了长足的进步, 建立了具有自主知识产权的核数据研究体系, 满足了我国国防与国民经济建设以及基础科学发展对核数据的急需。当前我们正面临一个极好的发展机遇, 我们仍需积极传承我国核数据工作的“大力协作、共同攻关”优良传统, 坚持“严谨求实、敢为人先”的工作作风。为使我国核数据研究工作实现全面自主可控、整体工作在未来全面达到国际领先水平而坚持不懈。

参考文献:

- [1] GE Zhigang, CHEN Yongjing. *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 3087. (in Chinese)
(葛智刚, 陈永静. *科学通报*, 2015, 60: 3087.)
- [2] KONING A J, BLOMGREN J, JACQMIN R, et al. JRC Scientific and Technical Reports[R]. 2009, EUR 23977, En. ISBN: 978-92-79-13343-5.
- [3] BERNSTEIN L, ROMANO C, BROWN D A, et al. Workshop for Applied Nuclear Data Activities, 2019 Final Report, LLNL-PROC-769849[R]. Washington DC: George Washington University, 2019.
- [4] ROMANO C, AULT T, BERNSTEIN L, et al. Nuclear Data Roadmapping and Enhancement Workshop for Nonproliferation, ORNL/LTR-2018/510[R]. State of Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 2018.
- [5] HARADA H, PLOMPEN A, SHIBATA K, et al. Meeting Nuclear Data Needs for Advanced Reactor Systems, Report Number: NEA/WPEC-31, International Evaluation Cooperation. Affiliation: OECD Nuclear Energy Agency, 2014.
- [6] ENRICO S. *Annals of Nuclear Energy*, 2013, 62: 579.
- [7] BENLLIURE J, SCHMIDT K H. *Nucl Phys A*, 2004, 746: 281c.
- [8] QAIM S M. *Radiochim Acta*, 2001, 89: 189.
- [9] ABYAD M AL, SPAHNA S I, SUDAR, et al. *Applied Radiation and Isotopes*, 2006, 64: 717.
- [10] MICHAEL S. *Nuclear Physics A*, 2003, 718: 339c.
- [11] LISOWSKI P W, BOWMAN C D, RUSSELL G J, et al. *Nucl Sci Eng*, 1990, 106: 208.
- [12] RUBBIA C. European Laboratory for Particle Physics Report. 1998, CERN/LHC/98-02/; ABRAMOVICH S. European Laboratory for Particle Physics Report. 1999, CERN/SPSC/99-8/.
- [13] The n_TOF Collaboration. *Eur Phys J Plus*, 2016, 131: 371(1-13).
- [14] REIFARTH R, ESCH E I, ALPIZAR-VICENTE A, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 2005, 241: 176.
- [15] NELSON R O. *J Korean Phy Soc*, 2011, 59: 1558.
- [16] HAIGHT R C, WU C Y, LEE H Y, et al. *Nucl Data Sheets*, 2015, 123: 130.

- [17] HEFFNER M, ASNER D M, BAKER R G, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2014, 759: 50.
- [18] MEIERBACHTOL K, TOVESON F, SHIELDS D, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2015, 788: 59.
- [19] CRAMER J D, BRIT H C. *Phys Rev C*, 1970, 2(6): 2350.
- [20] BRIT H C, CRAMER J D. *Phys Rev C*, 1970, 2(5): 1758.
- [21] ESCHER J E, BURKE J T, DIETRICH F S, et al. *Reviews of Modern Physics*, 2012, 84: 353.
- [22] HE Guouozhu, JIANG Shan, ZHOU Zhuying, et al. *Phys Rev C*, 2012, 86: 01460.
- [23] WANG Xianggao, JIANG Shan, HE Ming, et al. *Phys Rev C*, 2013, 87: 014612.
- [24] KONING A J, ROCHMAN D. *Nuclear Data Sheets*, 2012, 113: 2841.
- [25] SCHMIDT K H, JURADO B, AMOUROUX C, et al. *Nucl Data Sheets*, 2016, 131: 107.
- [26] PETER MÖLLER, JØRGEN RANDRUP. *Phys Rev C*, 2015, 91: 044316.
- [27] SCHUNCK N, ROBLEDO L M. *Rep Prog Phys*, 2016, 79: 116301.
- [28] HUNTER H T, INGERSOLL D T, ROUSSIN R W, et al. SINBAD-A shielding Integral Benchmark Archive and Database for PCs[R]. Arlington, Texas: American Nuclear Society, 1994: 2.
- [29] SCALE Code System. ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.3, 2018.
- [30] GOORLEY J T, JAMES M R, BOOTH T E, et al. Initial MCNP6 Release Overview - MCNP6 version 1.0, LA-UR-13-22934, 2013.
- [31] KODELI I: SUSD3D: A Multi-Dimensional, Discrete Ordinates based Cross Section Sensitivity and Uncertainty Code. 2008
- [32] YE Chuntang. *Physica B*, 1998, 241-243: 48.
- [33] JING Hantao, TANG Jingyu, TANG hongqing, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2010, 621: 91.
- [34] LIU Lile, WU Xizhen, CHEN Yongjing, et al. *Phys Rev C*, 2019, 99: 044614(1-10).
- [35] ZHANG Jingshang. *Nucl Sci Eng*, 2002, 142: 207.
- [36] Proceedings of the 8th International Conference on Radiation Shielding[EB/OL].[2019-12-25]. <https://www.oecd-nea.org/science/wpec/meeting2019/documents/5.1-Ge.pdf>.
- [37] GE Zhigang, XU Ruirui, WU Haicheng, et al. EPJ Web of Conf, 2020, 239: 09001.
- [38] MACFARLANE R E, MUIR D W. The NJOY Nuclear Data Processing System Version 91, LA-12704-M, 1994.

Progress and Prospects of Nuclear Data Research and Its Application

GE Zhigang¹⁾, CHEN Yongjing

(*China Institute of Atomic Energy, Key Laboratory of Nuclear Data, China Nuclear Data Center, Beijing 102413, China*)

Abstract: All data related to nucleus are referred to as nuclear data, which include nuclear reaction data describing the interaction between incident particle and nucleus, nuclear structure data and radioactive decay data characterizing the properties of nucleus. Nuclear data are the basic data for nuclear physics fundamental research, nuclear energy utilization, nuclear facilities construction and nuclear technology application. Nuclear data are also widely applied in nuclear medicine, material analysis, resource exploration, environmental monitoring, aerospace technology and nuclear astrophysics research fields. This paper briefly introduces the types of nuclear data, the generation process and application of nuclear data, then reviews the development of international nuclear data and the current status of nuclear data research in China. Finally some suggestions for the future development of nuclear data in China are given.

Key words: nuclear data; nuclear data measurement; nuclear data evaluation

Received date: 08 Jan. 2020; Revised date: 26 May 2020

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11790320, 11790321, 11790325); Continuous Basic Scientific Research Project(WDJC-2019-09)

1) E-mail: gezg@ciae.ac.cn.