我国核数据发展现状与未来发展的思考

葛智刚*, 陈永静

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

* 联系人, E-mail: gezg@ciae.ac.cn

2015-06-24 收稿, 2015-07-22 接受, 2015-09-17 网络版发表

摘要 核数据是核事业发展的基础数据, 在国防建设、国民经济建设以及基础科学研究领域起着重要的作用. 核数据是联系核物理基础研究和核工程以及核技术应用的重要桥梁, 是核物理研究的一个重要分支学科. 我国核数据工作经过近50年的发展, 取得了众多的研究成果, 也在一定程度上满足了国内用户对核数据的需求. 目前, 随着我国国防建设、核能及核技术应用研究的不断深入发展, 对核数据提出了更高、更急迫的需求. 但是我国核数据现有的研究能力在相关理论、实验和队伍方面逐渐呈现出无法适应目前核数据需求的趋势. 本文简要介绍了核数据的种类和用途; 评述了国际核数据发展动态、我国核数据工作发展历程、取得的成果以及核物理基础研究对核数据的重要性; 此外还介绍了新形势下我国核数据工作面临的新需求、新问题以及新机遇; 最后我们探讨了未来几年我国核数据工作应该需要重点关注的几个重要问题.

关键词

核数据
核数据库
核数据测量
核数据评价
核反应模型

核数据作为连接核物理基础研究与核工程及核技术应用的桥梁, 其准确性和可靠性直接关系到核工程产品及核技术应用的质量, 甚至成败. 经过众多核物理学家数十年的不懈努力, 我国在核数据相关的实验和理论研究方面取得了大量成就, 支撑了我国国防和国民经济建设的发展.

随着新时期我国国防建设与核能应用的不断发展, 以新一代核能系统和核装置研发为代表的核科技发展对核数据的质量、数量和种类等都提出了更高水平的要求. 而我国核数据现有的研究能力与需求之间存在巨大差距, 在相关理论、实验和队伍方面都无法适应目前我国核科技的发展需求, 迫切需要在核数据测量和评价方法等核物理基础研究课题上取得突破, 解决制约我国核数据质量的关键科学问题, 大幅度提高我国核数据质量和数量, 推动我国核科学技术的基础研究水平和国家需求牵引的应用研究的发展.

1 核数据发展现状

1.1 核数据简介

核数据是用于描述入射粒子与原子核相互作用性质的核反应数据及描述单个原子核基本性质的核结构数据的统称, 它表征了核物理基础研究中的核结构、核衰变和核反应等特征信息, 其应用领域不仅包括国防建设, 而且还涵盖了核能源、核医学、核不扩散、军备控制、核安全以及基础核物理等几乎所有重要的核科学与核技术领域. 因此可以说核数据是联系核物理基础研究和核工程、核技术应用的重要桥梁, 是核物理研究的一个重要分支学科.

核数据主要研究内容包括: 利用核物理相关实验方法测量部分核反应与核结构数据(微观实验测量); 利用核反应、核结构理论模型程序计算部分核数据(理论模型计算与评价); 为各种核装置、核工程及核技术应用提供配套的评价核数据库与多群常数

引用格式: 葛智刚, 陈永静. 我国核数据发展现状与未来发展的思考. 科学通报, 2015, 60: 3087–3098

Ge Z G, Chen Y J. Status and prospects of nuclear data development in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 3087–3098, doi: 10.1360/N972015-00694

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972015-00694>

库(数据库). 常用的核数据主要包括核反应数据和核结构及放射性衰变数据. 核反应数据主要包括全套数据(1个粒子入射到1个靶核上, 所有可能发生的核反应的各种数据, 如反应截面、出射粒子角分布、双微分截面、伽马产生数据等)、激发函数(核反应截面随入射粒子能量变化曲线)、裂变产额(原子核裂变产生某种裂变产物核素的几率)、群常数(在特定的能量间隔内, 对随能量连续变化的核参数如截面、角分布、能谱等进行适当的加权平均后的核参数)等以及上述各类数据根据不同应用目的而形成的集合-核数据库. 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.

核反应数据可以按照不同的方式进行分类, 大体见表1.

上述不同种类的核数据根据不同需求组合并按不同的格式存储而形成通用核数据库与专用核数据库. 通用核数据库一般指全套数据; 专用核数据库是指具有专门用途的数据, 例如核结构和衰变数据、裂变产物产额数据、活化和剂量学反应数据、光核反应和光致裂变截面数据以及缓发中子数据等.

目前国际上核数据的产生过程均是以微观实验测量数据为基础, 经过评价推荐后结合核反应理论模型计算给出物理上自洽的、成套的和唯一的评价核

数据, 经过核数据加工制作并进行宏观基准检验, 同时把宏观检验结果和用户使用的反馈意见及需求返回给核数据评价者, 并反映到新的评价中去, 最终满足用户的需求. 图1给出了国际上通行的核数据产生过程示意图.

核数据是核工程和核技术应用的基础数据, 在国防建设中发挥着重要的作用. 核武器设计的3个主要因素是物理模型、模型参数和计算方法, 而核数据在模型参数中占有重要的地位. 同样在核武器测试中, 需要利用各种测量手段获得爆炸当量、裂变/聚变威力、燃耗深度、中子/伽马强度及能谱、燃烧过程等重要信息, 以验证及改进核武器设计. 在各种测试手段中, 核测试方法是重要的一环, 主要有: 利用核爆炸时产生的中子/伽马与燃料核、核武器部件结构材料核、添加的指示剂核及周围环境中的核发生的

表 1 核数据分类
Table 1 Classification of nuclear data

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	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
按数据的获取方式	测量数据和评价数据

图 1 (网络版彩色) 核数据产生过程示意图(在文献[1]图的基础上做了修改)

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of the nuclear data generation process (based on the figure of ref. [1])

各种反应来诊断;利用中子及伽马的直接测量来诊断等.这些方法都离不开精确的核数据的支持,所用到的核数据的精度将直接影响测试结果的精度.通常是多种方法同时使用,互相校验.

此外,核数据在国民经济建设的很多领域起着重要的作用.在核能应用领域,核数据的精确度关系到中子输运、反应率、人工放射性核素生成、放射性活度、剂量率、衰变热等参数计算的准确性,核数据的精确度关系到反应堆的临界安全、乏燃料储存及处理等一系列问题;在核医学领域,中子治癌要求精确的中子与碳、氮、氧等元素的各种反应截面和阻止本领数据;在核安全、材料分析领域,保障核安全、防止核走私已成为当今世界各国面临的重大问题,各种核查与检测技术的发展都离不开精确的核数据的支撑.

核数据在基础科学研究领域也扮演着重要的作用,是高水平理论模型发展的基础,可为理论模型的发展提供关键参数和实验验证.

现今国际上的几个主要的评价核数据库都已经广泛地应用到核能开发、核技术应用、核医学以及基础科学研究等领域.

1.2 国际核数据发展动态

核数据是核事业发展的基础数据,一直受到发达国家的高度重视,系统性的核数据研究起始于核武器研制的需求.国际核数据研究始于20世纪40年代,为当时的核武器研制与测试起到了强大的支撑作用.1965年前后,国际上4个中子核数据中心先后成立,包括美国、苏联、欧洲和国际原子能机构核数据科(International Atomic Energy Agency/nuclear data section, IAEA/NDS),他们均建立和发展了各自的评价核数据库.继而,日本、德国、英国、荷兰、法国、意大利等国也相继建立了自己的评价核数据库,特别是与中子相关的核数据,而且不断扩展内容,改进提高,更新再版,以满足本国国防与核能发展对核数据的需要.进入21世纪后,国外核数据呈现新的发展态势,核数据工作规模不断扩大;关键核数据精确度不断提高;新型测量装置不断涌现;中子源强度更高、能区更广;不稳定核研究比重不断地加强;同时

加强国际合作,如CIELO(Collaborative International Evaluated Library Organization)计划(<https://www.oecd-neo.org/globalsearch>)、经合组织核能局(Organization for Economic Co-operation and Development/the Nuclear Energy Agency, OECD/NEA)的国际核数据评价工作组(Working Party on International Nuclear Data Evaluation Co-operation, WPEC) (<https://www.oecd-neo.org/science/wpec/>)、IAEA的CRP(Coordinated Research Project) (<http://www-naweb.iaea.org/napc/nd/crps.asp>)项目等.下面从核数据测量与评价建库以及需求对国际核数据发展动态进行阐述.

1.2.1 核数据测量

核数据测量有3个关键因素:中子源、探测器和实验方法.在中子源方面,国际上已经发展到第3代,第1代是基于反应堆和各种经典及高压加速器的中子源、第2代是基于电子直线加速器的共振区白光中子源、第3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).目前上述3代中子源仍在中子核数据测量方面发挥重要作用,但散裂中子源已成为目前核数据测量最为先进的平台,其中最具代表性的是美国洛斯阿拉莫斯实验室的LANSCE/WNR^[2]和欧洲的CERN n-TOF装置^{a)}.在探测器方面,各种新型探测器及相关的技术不断出现,极大提高了探测效率及信号处理能力.在实验方法方面,出现了如替代反应法^[3]、渐进归一化系数法^[4]、质谱法^[5~7]等新方法,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.

1.2.2 核数据评价建库

美国、日本、欧洲等主要核数据大国一直在积极提高自己的评价核数据库的水平,包括核素范围、数据种类、数据质量以及数据库的更新频率等.他们已经建立了完整的核数据评价体系(图1),包括用于核数据评价的先进的理论模型与计算程序、完整的核数据建库与检验技术、面向用户的完善的数据加工与制作技术、核数据灵敏度分析与数据调整技术等.总体发展动向是关键核数据精确化、核数据种类系统化、核数据运用多样化、核数据库编制专业化、关键核数据不确定度量化等.

此外,基于国防安全研究及核能发展的需要,美

a) Rubbia C. European Laboratory for Particle Physics Report. 1998, CERN/LHC/98-02/, unpublished; Abramovich S. European Laboratory for Particle Physics Report. 1999, CERN/SPSC/99-8/, unpublished

国近年来加大了对裂变的研究. 理论方面, 大力发展描述裂变过程的理论方法和程序, 以获得裂变碎片的质量和电荷分布、产额-能量关系等重要物理量. 实验方面, 他们花大力气对裂变的相关数据(如裂变截面、裂变瞬发中子谱、裂变产物产额等)进行重新测量和评价^[8].

在协方差数据与灵敏度分析研究方面, 美国、日本正积极不断地完善其评价数据库的协方差文档. 截至2010年底, 美国4个国家实验室合作, 用他们的协方差程序系统(Empire+KALMAN, McGNASH+KALMAN)^[9]完成了393个核素的低可信度协方差数据评价和110个核素的高可信度协方差数据评价.

1.2.3 国际核数据需求发展

国际上对核数据的需求也在不断发展. 近年来, 各个核数据国家都在花大力气发展核数据协方差和灵敏度分析技术, 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, 深入地分析不同核素、不同反应道及不同能区的数据对装置设计的影响, 进而反过来给数据提出明确的需求. 由IAEA组织的国际核数据委员会(International Nuclear Data Committee, INDC)每2年讨论其所有成员国提出

的核数据需求, 并制定IAEA核数据工作计划. 由OECD/NEA的WPEC的工作组(Subgroup C), 每年根据所有国家用户在使用核数据过程中反馈的信息, 给出核数据需求优先度报告(High Priority Nuclear Data Request List, HPRL). 该工作组经过分析、评估, 将需求分为高优先度需求和普通需求2类, 这些需求为各国的核数据实验测量、理论评价以及宏观检验等工作提供非常清晰有用的指导. 例如WPEC通过国际核数据界的合作, 总结出各种先进核能系统(如快堆、ADS系统等)对核数据的新需求(见文献[1]), 表2为该总结对快堆系统对核数据需求的目标精度与现有精度的比较. 可以看出, 许多现有核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.

1.2.4 我国核数据工作介绍

我国核数据研究起步相对较晚. 从20世纪60年代开始, 根据核武器设计、核试验诊断的要求, 开展了包括铀-235热中子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武器初期的发展. 其后, 我国核数据研究一直紧紧围绕核武器、核动力发展的需要. 特别是1975年中国核数据中心成立后, 在朱光亚先生提出的“小规模、高水平、有特

表 2 快堆对核数据目标精度的最高有限度需求表
Table 2 Summary of the highest priority target accuracies for fast reactors

		Energy range	Current accuracy (%)	Target accuracy (%)
U238	σ_{inel}	6.07~0.498 MeV	10~20	2~3
	σ_{capt}	24.8~2.04 keV	3~9	1.5~2
Pu241	σ_{fiss}	1.35 MeV~454 eV	8~20	2~3(SFR,GFR,LFR) 5~8(ABTR,EFR)
Pu239	σ_{capt}	498~2.04 keV	7~15	4~7
Pu240	σ_{fiss}	1.35~0.498 MeV	6	1.5~2
	ν	1.35~0.498 MeV	4	1~3
Pu242	σ_{fiss}	2.23~0.498 MeV	19~21	3~5
Pu238	σ_{fiss}	1.35~0.183 MeV	17	3~5
Am242m	σ_{fiss}	1.35~67.4 MeV	17	3~4
Am241	σ_{fiss}	6.07~2.23 MeV	12	3
Cm244	σ_{fiss}	1.35~0.498 MeV	50	5
Cm245	σ_{fiss}	183~67.4 keV	47	7
Fe56	σ_{inel}	2.23~0.498 MeV	16~25	3~6
Na23	σ_{inel}	1.35~0.498 MeV	28	4~10
Pb206	σ_{inel}	2.23~1.35 MeV	14	3
Pb207	σ_{inel}	1.35~0.498 MeV	11	3
Si28	σ_{inel}	6.07~1.35 MeV	14~50	3~6
	σ_{capt}	19.6~6.07 MeV	53	6

点”方针的指导下,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、理论计算和评价等构成的核数据研究能力,建立了3个版本的《中国评价核数据库》(CENDL)和几个重要的专用数据库,不仅有力地支持了核武器研究和军用核动力技术的发展,也奠定了我国作为国际上主要核数据大国的地位。到目前为止,我国核数据研究工作已经走过50多年,大体上可以分为以下3个阶段。

第1阶段是从1960年到1980年,这个阶段主要应我国核武器研制、改进以及核动力发展的迫切需要而解决了关键核数据的有无问题,完成了37个重点核素的全套中子数据(CENDL-1)和一些重要专用核数据的评价(激发函数、裂变产额和衰变数据);实验测量了热中子引起铀-235裂变截面数据;铀-235、钚-239的裂变平均瞬发中子数以及中子数的分布测量;建立了中重核统一的模型计算程序MUP系列,初步建立了计算机化的评价系统。这一阶段的核数据工作满足了国防急需,初步建立了核数据评价系统的框架,一些研究成果接近国际水平。

第2阶段是从1980年到2000年,这个阶段主要是建立了核数据评价的相关方法和手段。不仅是国防需要,而且也强调了核电建设和国民经济发展所需要的核数据,注意了测量、评价、建库、检验等方面的协调发展,建立了全套数据库和各种专用数据库,完成了全套中子数据库(CENDL-2)(包含161个核素);各种专用核数据库(激发函数、裂变产额、衰变数据等);多群常数库。这一阶段的部分核数据工作成果具有国际水平,在国际上率先给出了结构材料相互自洽的天然元素及其同位素的全套中子数据;与国际上其他数据相比我国的核数据较好地解决了核反应过程中的能量平衡问题;我们还建立了具有自主知识产权的核模型计算程序UNF^[10]。

第3阶段是从2000年到2010年,这个阶段主要任务是提高核数据质量,大幅增加核素数目,增加核数据的种类。完成了全套中子数据库(CENDL-3.1)(包含246个核素);各种专用数据库(包含裂变产物核产额及产额能量关系评价数据;重要核素和指示剂核素及邻近核素($n, 2n$)和(n, γ)激发函数评价数据;衰变数据);群常数数据库(包含200个核素群常数)。这一阶段的核数据工作整体国际先进、部分成果国际领先;轻核数据是国际上各家数据库中唯一具有的;

此外在这一阶段我国核数据工作初步建成了评价数据库宏观系统检验的平台,开始了系统宏观检验。

总之,经过50多年的发展,我国完成了大量的核数据测量与评价工作,满足了国防急需,填补了大量核数据空白,澄清了部分关键核数据的分歧;完成了一些重要的通用和专用核数据库的评价和建库工作,形成了自己的特色;研究和发展了核反应理论(包括光学模型、带宽度涨落修正的H-F统计理论、预平衡发射理论、直接反应理论等),研制了中子和带电粒子核反应理论的标准计算程序(如中重核数据计算程序、裂变核数据计算程序及一些轻核数据计算程序等)。此外,我国核数据研究国际地位得到显著提升,研究成果《中国评价核数据库-CENDL》已成为国际上公认的五大评价核数据库之一(另外4个评价核数据库分别是美国的ENDF/B库、欧洲的JEFF库、日本的JENDL库和俄罗斯的BROND库)。

截止到2014年,我国核数据工作获得国家及省部级以上科技成果奖100余项。

2 我国核数据研究面临的新需求与问题

核物理研究及核能与核技术应用的发展促进了核数据的发展,我国核数据研究从20世纪60年代开始,取得了巨大的进展,支撑了国防及国民经济建设的发展。但随着我国国民经济和国防建设的不断深入发展,特别是在国际上“禁产、禁试”的新形势下,我国核装置的研发进入了一个新的阶段,对核数据提出了新的、更高的要求。同时,随着我国经济建设的不断发展,能源问题也变得越来越严峻,急需发展核电等清洁能源来弥补能源的缺口。核能的发展(尤其是新型核能系统的研发)对核数据也提出大量的新需求。

2.1 新形势下国防建设和先进核能系统研发对核数据的需求

1996年全面禁止核试验条约签订后,核国家在核武器领域的较量并未停止,只是由过去主要依赖核试验转向以“科学为基础”。为了确保我国核力量的持续有效,继续发展核武器科学技术,必须进一步深入研究核武器内在的物理规律。这样,就对核数据工作,特别是中子核数据工作提出了更高的要求,远不是当初解决有无问题时的数据能够满足的。归纳起来,这些需求主要包括:提高重要核素关键数据的

精准度,如重要裂变核的裂变截面、裂变瞬发中子谱以及准确的裂变产物质量分布、电荷分布、产额能量关系、一系列重要裂变产物核的衰变数据等;扩充核数据的核素版图,填补重要核数据空白,如增加不稳定核素的数据,包括在核爆过程中生成的次锕系核素、级联反应生成的不稳定核素、短寿命裂变产物相关核数据等;补充重要反应道的协方差数据文档、发展灵敏度分析技术以支撑不确定度量化技术在核装置认证、核能开发中的应用;扩大核数据库规模、拓展核数据种类和能区,如中子评价核数据库规模向国际先进水平看齐,激发函数向30 MeV的高能端拓展,补充中高能、高能全套核反应数据等。

为了解决能源与空气污染问题,我国已把核能作为未来能源发展的重要方向,大力发展核电事业。而新一代核能的发展离不开铀、钍资源的利用,为了提高我国的铀、钍资源的利用率,发展新一代先进的核能系统是必然的选择。目前,我国的实验快堆已经建成,高温气冷示范堆也已经在建,钍基熔岩堆已经立项。国内外的一些最新研究成果表明在这些新型第四代反应堆中(快堆、高温气冷堆、钍基熔岩堆等),现有相关核素的核数据的精度远不能满足要求,需要我们逐步解决^[11,12]。我国是国际热核聚变实验堆(ITER)项目的主要参与国,而且也已经把聚变研究列为重点,聚变堆第一壁材料的中子辐照损伤、结构材料的活化、聚变堆的屏蔽、氦增殖系统等等,都与中子核数据密切相关^[13,14]。同时,随着我国核电事业的大力发展,核废料的处理和储存将成为越来越突出的问题,ADS(加速器驱动的洁净核能系统)被认为是最有希望的可以用于进行核废料嬗变的系统,作为一个世界上并无先例的装置,涉及到了更多的核数据问题,如靶物理相关的数据、嬗变率等^[1,15~18]。

综上所述,新形势下核数据的新需求有如下特点。

(i) 精度高。核数据研究已进入高精度时代,如上述新的先进核能源系统的研发,对可裂变核数据的需求主要是:关键裂变燃料核的裂变截面精度达到1%~3%,而现有数据精度是3%~8%;中子俘获截面精度好于5%,非弹性散射截面精度是5%,而现有数据精度是10%~20%; $(n, 2n)$ 反应截面精度是5%,而现有数据精度是8%~20%;裂变中子谱精度是5%,而现有数据精度是15%。

(ii) 核素多。核素范围从锕系核扩展到次锕系

核,从稳定核扩展到不稳定核。第4代核反应堆、ADS的研究除了需要精确的锕系核的各种反应截面,还需要精确的次锕系核的中子数据。核废料的嬗变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。

(iii) 能区宽。之前我国的核数据研究工作中中子能量一般只到20 MeV,目前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以下扩展到150 MeV甚至更高。

然而现有的很多核数据在种类、能区及可靠性方面远不能满足这些新需求,这对核数据的实验和评价研究提出了极大的挑战,因此急需在核数据的基础研究、测量手段以及评价方法等方面开展深入的研究,积累更多用于核数据测量与评价的基础,这样才能逐步地满足核数据快速增长的需求,为我国科学研究、能源发展、国防建设和核技术应用的可持续发展奠定基础。核工程对核数据精密化需求正是核物理发展的源动力。

2.2 我国核数据面临的问题

尽管我国在核数据测量与评价建库和原子核基础研究方面已经取得了众多的研究成果(前面部分3个阶段中取得成果),也在一定程度上满足了国内用户对核数据的需求,但是随着我国国民经济和国防建设的不断深入发展,对核数据的需求不断地提高,我国的核数据工作面临着一些问题。特别是与国外日益蓬勃发展的核数据工作相比,我国的核数据工作与国际先进水平相比在下述几个方面有着较大差距。

2.2.1 我国核数据测量缺乏先进的实验设施

当今的核物理实验研究强烈依赖于大型的科学装置(如:加速器、反应堆、散裂中子源等设施)以及各种新型探测器及相关的技术,而我国在这方面与发达国家存在非常大的差距。就中子源这一项,我国目前可用的中子源只相当于发达国家20世纪60、70年代的水平,即只有第1代中子源,而国外已经发展到第3代中子源。中子源性能的提高可以促进相关探测与实验技术的发展,不断地把核数据研究推向更高的精度、更广的核素范围以及更宽的能区。我国中子源建设的严重滞后制约了我国核数据实验研究水平的提高。即便将国内现有实验室条件全都利用起来,也只能给核数据测量提供热中子束(由反应堆提供)

和1~40 MeV能区间若干单能点的中子束(由原子能院串列加速器、600 kV中子发生器、北京大学4.5 MV静电加速器、兰州大学300 kV中子发生器等提供),不仅能区不配套,而且中子流强均较弱。图2显示了中子与 ^{56}Fe 反应的全截面随中子能量变化的关系及目前我国拥有和空缺的中子源能区范围,从图中可以看出中子反应截面的典型特点,在热中子以下能区呈中子反应截面反比于入射中子的速度即所谓的 $1/v$ 规律;在大约eV至1 MeV能区是共振区,中子反应截面有强烈的共振结构;MeV以上能区是平滑区,反应截面随能量的变化比较平滑。到目前为止,我国的共振区中子源还是空白,因此这个能区的测量数据也是空白,目前我国评价核数据库共振区的数据均直接采用国外的评价结果。

由于我国核物理实验设施长期投入不足,中子核数据工作只能采取以评价国外实验数据为主,只对最必要的数据进行补充或验证性实验测量的策略,其中共振区中子核数据更是空白,因此这一能区的数据只能采用国际上公开发表的数据;还有一些关键的、高精度的核数据,如主铜系核素截面测量、裂变参数高精度测量等由于缺乏合适的中子源以及相应的测量手段,仍然无法满足用户的急需。这种情况不仅严重影响了中子核数据实验测量技术和方法的发展,也制约了相关理论研究的深入和评价水平的提升。

2.2.2 我国核数据相关的基础研究缺乏关键性突破

核数据是描述原子核自身特性与入射粒子与原子核发生相互作用规律的重要表征,核数据的准确

图2 (网络版彩色)我国目前具备的和空缺的中子能区示意图

Figure 2 (Color online) Schematic view of available and vacant neutron energy region in China

性、可靠性完全依赖于核结构、核裂变与核反应的基础研究,这些研究成果体现在核数据产生过程中的关键环节(见图1中的“核数据微观测量”、“模型计算与评价”和“积分实验测量”等),没有这些关键技术和理论支撑,将无法向用户提供可靠、准确的核数据。因此,核物理基础研究成果将会给核数据的研究与发展带来直接的影响。图3是美国洛斯阿拉莫斯国家实验室关于核数据产生的过程描述^[19],他们同样把核反应与核结构理论和基础实验测量数据作为核数据产生的基础。

核数据相关的核物理基础研究涵盖了核裂变、核反应与核结构的实验测量和理论研究领域,核物理基础研究中研发的实验方法和技术可为核数据实验研究提供强有力的技术支撑。此外,一些对核能发展及国防科技发展具有重要意义的核数据,我们目前无法从实验上解决,因此就需要发展更先进的核裂变、核反应和核结构理论模型,以期望从理论上获得可靠的数据,这些都凸显了基础研究对核数据工作的重要性。

事实上,国内外核数据研究的发展过程也正是核裂变、核反应与核结构基础研究历程的体现,目前国际上用于核数据测量与评价的方法手段均是基于这些基础研究的成果,如国际上著名的核数据模型程序系统TALYS^[20],EMPIRE^[21]以及我国自主研制的UNF程序系统等,都集成了大量最新的核反应、核结构理论的基础研究成果。

尽管我国长期以来已经在核反应和核结构等基础理论方面开展了相关研究,取得了不少重要成果,并在此基础上建立了自己的核数据计算程序,但是

图3 (网络版彩色)美国洛斯阿拉莫斯国家实验室关于核数据产生的过程示意图

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of nuclear data production in Los Alamos National Laboratory (USA)

随着核物理理论与实验的不断发展,目前我们国内的核数据计算程序与国际上著名的核数据程序系统(如TALYS, EMPIRE等)相比在模型理论和适用性方面(如程序可以计算的能区、可以给出的核数据种类以及可以计算的核素范围)等都存在较大的差距.近年来我国的核数据基础研究缺乏新的突破,早期发展的核数据程序模型已经显示出不能完全满足新形势下我国对核数据的需求.此外,目前我国核数据基础研究方面缺乏人力,难以继承和可持续发展,特别是在可裂变核、放射性裂变产物核与轻核以及少体反应的理论研究方面,这将严重制约我国核数据的长远发展,极大影响我国核数据的实际应用,也将直接影响到我国在国际核数据界的地位.

2.2.3 高水平核物理基础研究人才队伍需要重新凝聚

我国核数据发展的初期凝聚了一大批核物理基础研究领域的高水平人才队伍,包括众多著名的科学家,他们为我国核数据及基础研究做出了重要的贡献,如在轻核反应理论、核反应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,为我国研制具有我国特色的核数据评价模型系统MUP系列和UNF系列奠定了理论基础,为后来我国核数据工作在国内外取得应有的地位奠定了基础,同时也培养了一大批研究骨干.但是经过近50年的时间,这批骨干已逐渐离开了这些基础研究领域.因此,我国需要再次凝聚、整合与核数据紧密相关的核物理基础研究领域的人才队伍,为我国核数据的可持续发展

提供支撑.

3 我国核数据工作面临的机遇

新时期国防科技与国民经济建设虽然对核数据提出了更高的要求,但是同时也给核数据工作提供了一些新的机遇.

3.1 我国对核数据的需求日益强烈

随着我国国防科技及核能研究的发展,尤其是近几年来新型核能系统的研究对核数据的需求越来越强烈,因此相关单位对核数据研究的兴趣也逐渐加强,纷纷投入人力、物力开展核数据研究,以满足工程建设的需要.依托这些需求背景,必将促进我国的核数据研究工作进一步发展,使我国的核数据研究早日跃上一个新的台阶.

3.2 我国核数据测量平台的建设

在以裂变或聚变反应为能量来源的装置中,大量的核反应涉及到中子与核的相互作用,因而中子核数据是核数据的核心组成部分.中子核数据测量的发展总是伴随着中子源及相应的探测器与实验技术的发展而发展的.中子源性能的提高促进了相关探测与实验技术的发展,不断地把核数据研究推向更高的精度、更广的核素范围以及更宽的能区.

3.2.1 新的中子源建设

近年来,我国的中子源建设出现了一些可喜的势头,图4是正在建造的中国散裂中子源(CSNS),为

图4 (网络版彩色)中国散裂中子源核数据测量专用管道布局图^[22]

Figure 4 (Color online) Layout of nuclear data measurement beamline at the China Spallation Neutron Source (CSNS)^[22]

我国建设具有较高水平的白光中子源提供了很好的机会和条件。中国原子能科学研究院与中国科学院高能物理研究所相关人员紧密合作,近几年来也一直研究在CSNS上建设白光中子源的可能性,并提出了建设反角白光中子实验终端的方案。目前的研究结果表明,如果这台反角白光中子实验终端能顺利建成,将能够填补我国白光中子源的空白,大幅度提高我国的核数据实验研究能力,尤其是满足比较急需的共振区以及能量连续到达200 MeV宽能区的中子核数据测量的需要。

另外,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新的强流高压倍加器,以获得更高强度的14及2.5 MeV中子源;中国原子能科学研究院的串行升级工程即将完成,届时将有一台100 MeV的强流质子回旋加速器,可以用于产生白光中子或中能准单能中子;中国原子能科学研究院的中国先进研究堆(CARR)也已投入运行,可为核数据测量提供高注量率的热中子束;中国科学院上海应用物理研究所也已建成一台电子直线加速器中子源装置。这些先进的中子源装置(尤其是CSNS)将为我国的核数据实验研究提供优异的平台。基于这些中子源平台,发展相应的物理测量设备和实验方法,对提高我国的核数据实验研究水平,满足我国的核物理基础研究、核能发展及国防科技对核数据的需求将有极大的促进作用。

3.2.2 探测器技术的发展

随着科学技术的不断发展,国际上用于高精度数据测量的探测器与探测技术也在不断涌现:全空间高效率探测器阵列(如主要用于辐射俘获截面测量的美国LANL的DANCE和欧洲CERN nTOF的 4π 氟化钡球装置);对出射粒子径迹跟踪技术(如用于裂变截面测量的时间投影室(TPC));高分辨的组合探测技术(如美国LANL正在发展的用于裂变初始产额测量的SPIDER装置)等。国际上这些新发展的探测器技术已经为核数据的精确测量提供了技术支撑。国内相关单位在发展新的探测技术方面也做了许多工作,如中国科学院兰州近代物理研究所和中国原子能科学研究院都发展了HPGe探测器阵列;中国原子能科学研究院已经完成了 4π 氟化钡球及相应的全数字化数据获取装置的研制,并已用于中子俘获截面的实验研究;在粒子跟踪径迹探测技术研究方面,中国科学院高能物理研究所和近代物理研究所都在发展TPC探测器技

术,有望在不远的将来用于核数据测量工作。

3.2.3 新型核数据测量方法

基于实验核物理的发展与新型探测技术的出现,一些新的核数据测量方法也不断地丰富了核数据的测量手段:如核数据测量的替代反应法和加速器质谱法。中国原子能科学研究院开展过利用 $^{236}\text{U}(\alpha, 2n)$ 反应测量来获得 $^{239}\text{Pu}(n, 2n)$ 反应截面的尝试,取得了初步的成功;也开展过利用加速器质谱法尝试测量了 ^{94}Nb 基态的半衰期测量^[23]和 ^{238}U 的 $(n, 3n)$ 反应截面测量^[24],获得较好的结果。利用这些新方法可以测量一些传统方法不能测量的核数据,以及对一些不稳定核的核数据进行测量等。这些新型核数据测量结果对填补关键核数据的空白,提高核数据可靠性都有重要的意义。

3.3 我国核数据工作国际交流和合作的拓展

我国的核数据国际交往始于20世纪70年代末,经过将近40年的交流与合作,我国核数据工作参与国际流的渠道已越来越顺畅并卓有成效。目前我国核数据工作和国外的核数据工作已相互结合、相互渗透、相互促进,已经和国际上主要的核数据研究水平领先的国家或实验室建立了良好的合作关系,如:国际原子能机构核数据科(IAEA/NDS)、美国布鲁克海文国家实验室(Brookhaven National Laboratory)、日本原子力研究所(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)、欧洲标准物质与测量研究所(Institute for Reference Materials and Measurements, IRMM)、欧洲核子研究中心(European Organization of Nuclear Research, CERN)以及意大利国际理论物理中心(International Centre for Theoretical Physics, ICTP)等,这给我国核数据研究提供了很好的人员交流与培训渠道,使我们以及及时获悉掌握国际发展动态,充分借鉴和吸取国际先进经验和有价值的成果。

4 总结与展望

多年来我国核数据测量与评价建库工作一直认真贯彻朱光亚先生为我国核数据工作制定了“小规模、高水平、有特点”的指导方针,取得了众多的研究成果,也在一定程度上满足了国家安全、核能开发及核技术应用对核数据的需求。虽然目前我国核数据工作面临一定的困境,但是我国不断深入发展的国防科技以及日益蓬勃发展的核能研究对核数据日

益增长的需求给我国核数据发展提供了一个较好的发展机遇, 我们应该抓住这个机遇, 进一步推动我国核数据工作的发展. 为了适应新形势下我国国防和国民经济建设对核数据的需求, 这里对未来一个时期内的我国核数据工作提出几方面的展望.

4.1 加强核数据基础研究, 突破核数据关键问题

核数据相关的基础研究涵盖了核裂变、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, 核物理理论研究领域取得的优秀的成果可以大大提高对核反应与核结构数据理论预言的可靠性, 特别是对裂变、轻核与不稳定核等当今世界核工程设计中广泛关注的数据, 由于实验测量数据较少, 必将通过前沿理论研究找到解决办法. 但是与国外相比, 近10年来我国核数据研究对核物理基础研究工作的新成果应用显得非常不足, 因此需积极促进这方面的工作, 需要充分利用核物理前沿研究与基础研究中取得的成果、方法与手段, 开展核数据关键基础科学问题研究, 做好核数据工作与核物理基础研究的结合. 未来一个时期内我国核数据基础研究的重点主要集中在裂变相关核数据、裂变系统中不稳定过程核的核数据、轻核数据与少体反应核数据的测量与评价中的一些基础科学问题, 以及核数据实验测量、评价与宏观检验本身的基础科学问题. 亟需解决的关键科学问题主要体现为: 铀系核性质、裂变过程中断点、裂变后现象研究; 不稳定过程核反应与结构研究; 基于少体反应与R矩阵理论的轻核数据评价方法研究以及关键核数据精确测量与高可信度评价技术研究等.

4.2 建设先进的核数据实验测量平台, 开展关键核数据精确测量工作

中子源、探测器和实验方法的升级是提高核数据测量能力必不可少的要素, 先进的加速器、反应堆等核物理基础设施是开展高水平核数据测量的基础, 目前我国的中子源水平仍处在第1代, 与发达国家相比存在非常大的差距. 因此, 在未来核数据实验测量发展规划中我们需要重点关注先进核数据测量平台的建设, 例如: 利用我国正在建设的散裂中子源发展

第3代中子源, 建立适合开展共振能区及快中子能区中子核数据测量的高性能白光中子源、用于关键核数据精确测量的强流高压倍加器等. 此外, 部分在核物理基础研究中已经得到应用的新探测设备和新实验方法, 也需要进一步推广到核数据测量中.

高精度的实验数据不仅能够直接应用于国家安全、核能开发及核技术应用中, 也是发展高水平核模型理论的基础, 对提升我国核数据的整体研究能力将有极大的帮助. 随着中国散裂中子源以及国内一些其它高性能中子源的陆续建成, 我国的核数据研究平台条件将得到较大的改善, 因此今后一个时期内应重点依托这些条件, 发展相应的核数据探测系统和核数据测量技术与方法, 配合即将运行的中子源, 开展重要核数据的高精度测量, 如裂变核关键数据、结构材料核及轻核的一些重要参数、共振区核反应截面及重要短寿命核中子反应与核结构数据的测量等, 以满足我国核能发展和国防科研对高精度核数据的需求.

4.3 加强高水平核数据人才队伍建设

相对于近年来我国核事业的蓬勃发展, 现有核数据研究人才队伍无法满足需求, 表现为整个核数据队伍逐渐缩小, 年轻的骨干力量缺乏, 特别是国内少体核反应研究队伍断层问题表现非常突出. 因此, 亟需培养更多与核数据紧密相关的高水平研究人才, 培养一支高水平的核数据研究团队, 为我国核数据研究工作的持续发展奠定基础, 同时力争将我国核数据研究推向国际先进行列.

总之, 为了满足国防以及国民经济建设对高精度、大规模、系统化和支撑不确定度量化技术的核数据需求, 我们需要整合国内核物理基础研究和核数据工作队伍, 集中力量、协同攻关. 我们预期在未来5~10年里, 核数据工作有望在下述几个方面有所突破: 描述裂变现象的裂变势能曲面和裂变唯象模型; 关键裂变核数据测量; 不稳定过程核光学势、能级密度和反应截面系统学; 不稳定过程核重点核数据的直接与间接测量方法研究; R矩阵方法应用于重要轻核数据的评价; 法捷耶夫方程应用于轻核三体反应数据的评价; 轻核双微分截面等精确测量; 高精度核数据测量方法的建立以及核数据评价可靠性分析及应用技术研究等.

致谢 本文的完成得到了全国核数据工作协作网成员单位的专家、学者的大力支持与帮助；特别感谢原子能院周祖英研究员和阮锡超研究员给予的建议。文章中引用了相关人员整理的一些材料，在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- 1 Koning A J, Blomgren J, Jacqmin R, et al. Nuclear Data for Sustainable Nuclear Energy. JRC Scientific and Technical Reports, 2009, EUR 23977
- 2 Lisowski P W, Bowman C D, Russell G J, et al. The Los Alamos National Laboratory spallation neutron sources. Nucl Sci Eng, 1990, 106: 208–218
- 3 Escher J E, Burke J T, Dietrich F S, et al. Compound-nuclear reaction cross sections from surrogate measurements. Rev Mod Phys, 2012, 84: 353–397
- 4 Mukhamedzhanov A M, Bém P, Burjan V, et al. New astrophysical S factor for the $^{15}\text{N}(p, \gamma)^{16}\text{O}$ reaction via the asymptotic normalization coefficient (ANC) method. Phys Rev C, 2008, 78: 015804
- 5 Richter S, Alonso A, Bolle W D, et al. Isotopic “fingerprints” for natural uranium ore samples. Int J Mass Spectrom, 1999, 193: 9–14
- 6 Richter S, Alonso A, Bolle W D, et al. Preparation and certification of synthetic uranium isotope mixtures with $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$ ratios of 10^{-6} , 10^{-7} , 10^{-8} . J Anal At Spectrom, 2005, 20: 1381–1385
- 7 Boulyga S F, Klotzli U, Prohaska T, et al. Improved abundance sensitivity in MC-ICP-MS for determination of $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$ isotope ratios in the 10^{-7} to 10^{-8} range. J Anal At Spectrom, 2006, 21: 1427–1430
- 8 Chadwick M B. Future challenge for nuclear data research in fission. J Korean Phys Soc, 2011, 59: 752–754
- 9 Kawano T, Shibata K. Covariance evaluation system. JAERI-Data/Code, 1997, 96: 97–137
- 10 Zhang J S. UNF code for fast neutron reaction calculations. Nucl Sci Eng, 2002, 142: 207–219
- 11 Artisuyk V, Broeders C, Gonzalez-Romero E, et al. Challenge of nuclear data for innovative nuclear energy. Progr Nuclear Energy, 2008, 50: 341–346
- 12 Harada H, Plompen A, Shibata K, et al. Meeting Nuclear Data Needs for Advanced Reactor Systems. Report number: NEA/WPEC-31, International Evaluation Cooperation, Vol. 31 (2014), Affiliation: OECD Nuclear Energy Agency
- 13 Fischer U, Batistoni P, Cheng E, et al. Nuclear data for fusion energy technologies: Requests, status and development needs. In: Proceedings for The International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, 2004, 769: 1478–1485
- 14 Mann F M, Cheng E T. Nuclear data for fusion: A view from two meetings. Fusion Eng Des, 1995, 28: 446–448
- 15 Benlliure J, Schmidt K H. Basic nuclear data for nuclear waste transmutation and radioactive beam production. Nuclear Phys A, 2004, 746: 281c–287c
- 16 Ohsaki I M. Neutron economy and nuclear data for transmutation of long-lived fission products. Progr Nuclear Energy, 2002, 40: 555–560
- 17 Chadwick M B, Hughes H G, Little R C, et al. Nuclear data for Accelerator-Driven Systems. Progr Nuclear Energy, 2001, 38: 179–219
- 18 Koning A J, Rochman D. Nuclear data for accelerator driven systems: Nuclear models, experiments and data libraries. Nuclear Instruments and Methods A, 1998, 414: 49–67
- 19 Macfarlane B L. Los Alamos Nuclear Data Needs and Activities-From Experiment Through Application. Presented at: RPI Nuclear Data 2011 Symposium for Criticality Safety and Reactor Applications, 2011, April 27
- 20 Koning A J, Rochman D. Modern nuclear data evaluation with the talys code system. Nuclear Data Sheets, 2012, 113: 2841–2934
- 21 Herman M, Capote R, Carlson B V, et al. EMPIRE: Nuclear reaction model code system for data evaluation. Nuclear Data Sheets, 2007, 108: 2655–2715
- 22 Jing H T, Tang J Y, Tang H Q, et al. Studies of back-streaming white neutrons at CSN. Nuclear Instruments Methods Phys Res A, 2010, 621: 91–96
- 23 He G Z, Jiang S, Zhou Z Y, et al. Precise half-life measurement for the ground state of ^{94}Nb . Phys Rev C, 2012, 86: 01460
- 24 Wang X G, Jiang S, He M, et al. Determination of cross sections for the $^{238}\text{U}(n, 3n)^{236}\text{U}$ reaction induced by 14-MeV neutrons with accelerator mass spectrometry. Phys Rev C, 2013, 87: 014612

Status and prospects of nuclear data development in China

GE ZhiGang & CHEN YongJing

China Nuclear Data Center, Key Laboratory of Science and Technology on Nuclear Data, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

Nuclear data are fundamental data for nuclear science and technology. They play important roles in national defense, security, nuclear energy and nuclear technology, basic nuclear science development etc. Nuclear data connect basic nuclear science and nuclear applications. Research on nuclear data is a branch of nuclear physics. Many nuclear data works have been accomplished to feed the needs for various applications in the past 50 years in China. However, more and more attention has been paid to nuclear data in China according to the rapidly rising needs from nuclear energy and nuclear technology applications. To feed these needs, more experimental and theoretical basic works on nuclear data must be carried out. The nuclear data and their applications, review and frontier of nuclear data development in the world and also in China, the importance of basic research for nuclear data development are briefly described in this paper. Finally, the challenges, opportunities and proposals for nuclear data work in China in the near future are presented.

nuclear data, nuclear data library, nuclear data measurement, nuclear data evaluation, nuclear reaction model

doi: 10.1360/N972015-00694