

# 核数据:核基础研究与工程应用的桥梁

葛智刚,陈永静

中国原子能科学研究院,中国核数据中心,北京 102413

**摘要** 核数据特别是中子核数据是核物理基础研究、核能开发与利用以及核技术发展的基础数据,是连接核物理基础研究与核技术应用的重要桥梁,其质量直接关系到与核相关产品的有效性、安全性与经济性。概述了核数据、核数据用途以及国内外核数据发展动态,分析了国内核数据工作发展的差距,总结了国外相关核数据工作经验以及给中国核数据工作带来的启示,提出了在现有基础上如何发展中国的核数据研究工作的建议。

**关键词** 核数据;核数据需求;评价核数据库

核数据是用于描述入射粒子(如中子、质子、伽马等)与原子核发生相互作用概率的核反应数据(如反应截面、弹性散射角分布、双微分截面、能谱等)及原子核自身基本性质,如原子核的质量、结构及发射粒子方式与强度等数据的统称<sup>[1]</sup>。

核数据的获取需要利用相关的大型实验设施,如核反应堆、加速器、散裂中子源等产生“炮弹”(入射粒子)去轰击“靶核”,然后利用各种探测器和实验方法记录“炮弹”与“靶核”发生反应的各种相关信息。由于在实际应用中核数据涉及的核素(靶核)很多,涵盖了核素图上的数千个核素,入射粒子能量范围从 $10^{-5}$  eV至GeV,能区跨越10多个数量级,同时也需要众多不同反应道的数据信息,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、有限能点、有限反应道的测量数据,

且实验测量成本极为高昂。另外,由于一些核素的寿命非常短,人类还不能通过开展实验测量去获取它们的相关核数据。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核反应与核结构数据。

核数据实验测量结果是理论模型计算和评价最重要的基础。通常依据实验测量数据,理论模型才可获得可靠的模型参数,然后通过理论计算并结合实验数据评价给出物理上自洽的、成套的核数据。将这些数据信息按照目前国际统一的ENDF-6格式(现在国际核数据界正在设计、开发新的核数据库格式 general nuclear database structure, GNDS<sup>[2]</sup>)进行检查、存储,形成评价核数据库(evaluated nuclear data file, ENDF),也称为微观评价核数据库。以中子诱发核反应为例,ENDF-6库格式

收稿日期:2020-03-30;修回日期:2020-04-25

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

作者简介:葛智刚,研究员,研究方向为核数据,电子信箱:gezg@ciae.ac.cn

引用格式:葛智刚,陈永静.核数据:核基础研究与工程应用的桥梁[J].科技导报,2021,39(19):9-17;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.

2021.19.001

主要包括的数据类型有:中子反应截面、出射粒子角分布以及能谱数据,中子反应产生的光子数据,中子反应产生的带电粒子数据,光原子相互作用核反应数据,热中子散射数据,放射性核素产生和衰变数据以及裂变产额数据等。此外,还包括相应的协方差数据等。ENDF-6库格式还可按照数据的类型将ENDF库划分为各种子库,如衰变数据子库、裂变产额子库、热散射数据子库等。

基于上述这些微观评价核数据库,经过核数据加工,制成用户可直接使用的多群常数库,亦可称为宏观数据库,然后利用一些宏观基准实验对这些数据库的质量与可靠性进行检验,通过检验后的数据库才能提供给用户使用。同时在宏观基准检验及用户使用过程中发现的新问题及时反馈给核数据测量与评价者,为核数据进一步实验测量、理论模型评价提供建议与参考。如此循环(图1),使核数据库的质量、可靠性与规模不断提升和完善,使其能更好地满足各领域的发展对核数据需求。

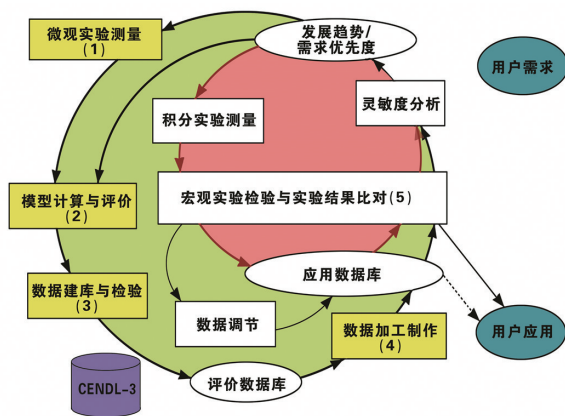


图1 核数据工作主要内容及流程(据文献[3]修改)

如上所述,核数据研究是一个系统工程,涵盖了核数据实验测量、核反应与结构理论模型、核数据评价建库、核数据加工处理和宏观基准检验等一系列研究过程,也覆盖了核物理基础研究到应用的完整链条。

## 1 核数据的应用

核数据是核事业发展的重要基础数据,一切与

原子核自身特性、粒子与核反应过程相关的核科学研究、核设施建设以及核技术应用都离不开核数据。因此核数据的质量与可靠性直接关系到相关产品的有效性、安全性及经济性。

核数据在基础科学研究中也扮演着重要的角色,如:目前核物理理论大多是基于“唯像”模型,而这些唯像模型通常需要用一些实验数据来约束模型参数,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探索其合成过程需要用到大量的低能中子以及带电粒子(如p、d、t、 $^3\text{He}$ 等)的核反应截面数据进行网络计算<sup>[4-5]</sup>,这些数据可靠与否会影响天体核合成过程的正确与否。

目前,核能发展对核数据种类以及精度也有着越来越高的要求。如在反应堆设计中,20 MeV以下的中子与不同核的反应截面、角分布、能谱数据和其不确定度等是各种反应堆的堆芯物理、屏蔽计算、燃耗分析等关键输入数据。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,这对中子反应核数据的准确性提出了很高的要求。表1<sup>[6]</sup>是第四代反应堆堆型之一的快中子反应堆(简称快堆)对核数据的精度需求,从表1中可以看出,快堆要求大部分截面数据的不确定度需减小到现有数据的1/2,一些甚至要求有数量级的减小。

此外,核数据在国民经济发展的其他领域也有着广泛的应用。如不同能量的各类带电粒子核反应数据是人类进行太空探索时,研究宇宙射线对人体、仪器及材料活化和辐射损伤的基础输入数据;又如,一些核素的衰变数据等是辐照育种、产品杀菌、工业探伤、资源勘探、环境监测和同位素生产以及医疗检测、核医学与射线治疗等医学应用的重要输入参数等<sup>[7-10]</sup>。

总之,核数据有着极其广泛的工程和基础应

表1 新一代快中子核反应堆对核数据精度的需求

核素	物理量	能区	目前精度/%	目标精度/%
<sup>238</sup> U	$\sigma_{inel}$	0.498~6.07 MeV	10~20	2~3
	$\sigma_{capt}$	2.04~24.8 keV	3~9	1.5~2
<sup>241</sup> Pu	$\sigma_{fiss}$	454 eV~1.35 MeV	8~20	2~3(SFR, GFR, LFR)
				5~8(ABTR, EFR)
<sup>239</sup> Pu	$\sigma_{capt}$	2.04~498 keV	7~15	4~7
<sup>240</sup> Pu	$\sigma_{fiss}$	0.498~1.35 MeV	6	1.5~2
	$\nu$	0.498~1.35 MeV	4	1~3
<sup>242</sup> Pu	$\sigma_{fiss}$	0.498~2.23 MeV	19~20	3~5
<sup>242m</sup> Am	$\sigma_{fiss}$	67.4 keV~1.35 MeV	17	3~4
<sup>241</sup> Am	$\sigma_{fiss}$	6.07~2.23 MeV	12	3
<sup>244</sup> Cm	$\sigma_{fiss}$	0.498~1.35 MeV	50	5
<sup>245</sup> Cm	$\sigma_{fiss}$	67.4~183 keV	47	7
<sup>56</sup> Fe	$\sigma_{inel}$	0.498~2.23 MeV	16~25	3~6
<sup>23</sup> Na	$\sigma_{inel}$	0.498~1.35 MeV	28	4~10
<sup>206</sup> Pb	$\sigma_{inel}$	1.35~2.23 MeV	14	3
<sup>207</sup> Pb	$\sigma_{inel}$	0.498~1.35 MeV	11	3
<sup>28</sup> Si	$\sigma_{inel}$	1.35~6.07 MeV	14~50	3~6
	$\sigma_{capt}$	6.07~19.6 MeV	53	6

注： $\sigma_{inel}$ 、 $\sigma_{capt}$ 、 $\sigma_{fiss}$ 、 $\nu$ 分别为非弹性散射截面、俘获截面、裂变截面和裂变中子数；SFR、GFR和LFR分别为液态钠冷却快堆、气冷快堆、铅合金液态金属冷却快堆；ABTR、EFR分别表示先进增殖实验堆、欧洲快堆。

用,并随着人类对核的认识不断加深,核数据的应用正在不断地拓展、延伸。同时核数据也是紧密联系核基础研究与技术应用的重要纽带,它的广泛应用会产生巨大的经济效益与社会影响,并不断牵引推动核基础研究的发展。

视。在核数据测量方面,国际上的中子源已经发展到第三代,即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,散裂中子源已成为核数据测量最为先进的平台,其中最具代表性的如美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)的800 MeV质子直线加速器上的洛斯阿拉莫斯中子科学中心(LANSCE)<sup>[11]</sup>和欧洲核子研究中心(CERN)的n\_TOF装置(图2)<sup>[12]</sup>。在探测器方面,随着科学技术的不断发展,国际上用于高精度核数据测量的探

## 2 国际核数据研究发展趋势

国际上主要发达国家对核数据的研究非常重

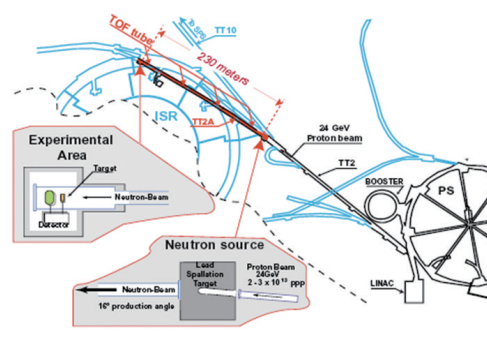
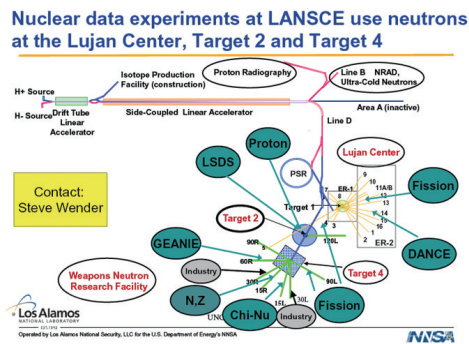


图2 LANL的LANSCE示意(a)<sup>[11]</sup>和CERN n\_TOF装置示意(b)<sup>[12]</sup>

探测器与探测技术也在不断涌现,如全空间高效率探测器阵列以及高分辨的组合探测技术等。国际上这些新发展的探测器技术为核数据的精确测量提供了技术支撑。

在核数据评价方面,美国、日本、欧洲等主要核数据大国一直在不断提高自己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更新频率等。其已经建立了完整的核数据评价体系,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。

核数据基础研究对提高核数据库的质量有重要作用。随着计算机计算能力的大幅提高,近年美国在裂变基础研究方面取得了重要的进展。例如,实现了五维集体变形坐标下的位能曲面的真实计算(图3)<sup>[13]</sup>,定性再现了裂变后的相关实验可观测量。

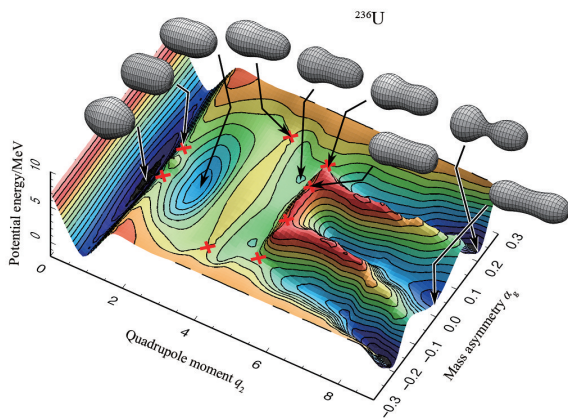


图3  $^{236}\text{U}$ 模型计算裂变位能曲面<sup>[13]</sup>

总之,欧美发达国家凭借其众多的核物理实验设施(先进加速器、反应堆和散裂中子源等大科学装置)、高水平的基础研究和人才队伍及高强度经费投入和数十年的积累,已经建立了完整的核数据研究体系和发展计划,如美国的核数据计划(USNDP)、截面工作组(CSWG)以及欧洲的核数据评价合作工作组(WPEC)等。这些支撑了其对各种通用及专用数据库不断完善和改进,以满足其国家战略、核能开发及核技术发展等方面的需求。目前,国外核数据研究呈现出以下4方面趋势。

1) 高精度:随着实验装置水平的不断提升及实验技术的不断进步,实验测量数据的精度越来越高,评价数据精度也随之提升。图4比较了国际原子能机构推荐的中子标准截面评价更新结果,可以看出2015年国际原子能机构推荐的参考截面( $^{238}\text{U}$ 中子反应裂变截面)不确定度比2006年推荐结果的不确定度在40 MeV之上能区大幅降低<sup>[14]</sup>。

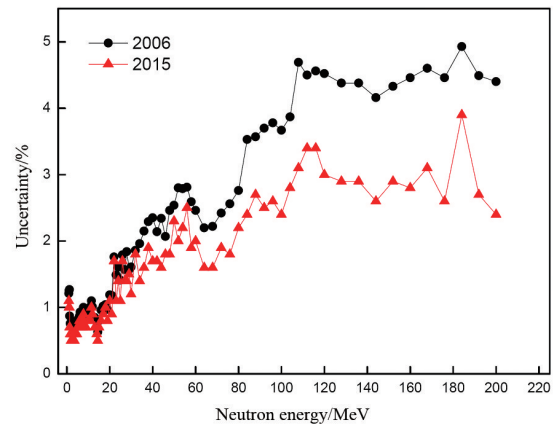


图4 标准截面 $^{238}\text{U}(n, f)$ 裂变截面评价不确定度更新比较

2) 宽能区:之前的核数据研究工作中子能量一般只到20 MeV,但ADS、核医学、空间辐射、航天及航空电子器件的抗辐射加固研究需要更高能量的核数据,从原先的20 MeV扩展到150 MeV甚至更高。利用各类实验装置,发达国家已经开展从热中子到GeV能区跨越10多个量级的核数据测量,因而可为全能区的核数据评价提供可靠的实验数据支撑。比如欧洲核子研究中心(CERN)的n\_TOF装置可以产生的中子能量从 $10^{-5}\sim 10^8$  eV<sup>[15]</sup>(图5)。

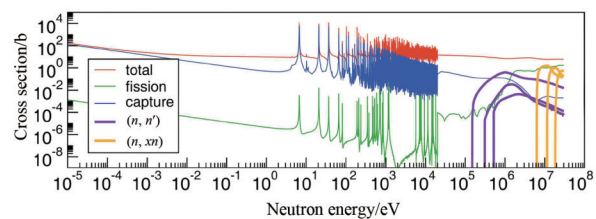


图5 典型重核中子诱发反应截面随入射中子能量( $10^{-5}\sim 10^8$  eV)的变化<sup>[15]</sup>

3) 大规模:目前发达国家核数据研究不仅在拓展能区,核素种类也从稳定核延伸到不稳定核区,核数据类型越来越全,因此数据规模越来越大,以满足不同应用领域对核数据的需求。表2列出

表2 国际上五大核数据库主要参数比较

参数	ENDF/B-VIII.0 (美国)	JEFF-3.3 (欧洲)	JENDL-4.0 (日本)	ROSFOND* (俄罗斯)	CENDL-3.1 (中国)
核素数量	557	562	406	686	240
中子能区/MeV	0~30	0~30	0~20	0~20	0~20
协方差数据(反应截面)	221	442	99	128	6

注:\* ,该数据库是基于国际上相关评价核数据库进行的集成,包括俄罗斯完成的BROND库数据、欧洲TALYS<sup>[3]</sup>程序系统产生的TENDL库的数据,不是完全自主评价产生的数据库。

了国际上5个主要中子评价核数据库的关键数据比较。由表2可以看出中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。

4) 高普适:核数据发展的终极目标是一套高质量的数据可以满足所有相关用户的需求,这就需要高普适性的数据库。

总之,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;用于核数据测量的中子源种类更多、强度更高、能区更广;不稳定核研究比重不断地加强;同时,国际间、地区间合作更加紧密。

### 3 中国核数据研究现状与面临的问题

中国核数据研究工作开始于20世纪60年代,最初根据原子能工业发展的紧急需要,开展了包括<sup>235</sup>U热中子裂变反应和轻核反应截面的实验测量工作,澄清了当时国外数据分歧,对中国原子能

工业与核科学的发展起到了重大作用。其后,中国核数据研究一直紧紧围绕国防建设、核动力发展的需求开展研究。1975年,为了更好地为国防与国民经济建设服务,正式成立了中国核数据中心,并在全国核数据工作协作网的支持下,全面开展了核数据测量与评价研究工作。在朱光亚先生为中国核数据研究工作制定的“小规模、高水平、有特点”方针指导下,通过全国核数据工作协作网各成员单位的共同努力,先后完成了多期全国性核数据研究任务,取得了众多重要研究成果;形成了由实验测量、理论计算和评价建库体系等构成的较为完整的自主的核数据研究能力。基于这些技术能力完成了中国评价核数据库(CENDL)系列的建设,经历了CENDL-1(37个核素)、CENDL-2(54个核素)、CENDL-2.1(69个核素)到CENDL-3.1(240个核素,图6)<sup>[6]</sup>的发展过程,并建立了多个重要的专用数据库,满足了中国原子能工业发展的需求。也发展了具有自主知识产权的核数据评价、建库和检验系统,如模型计算程序MUP、UNF系列等<sup>[7]</sup>。不仅

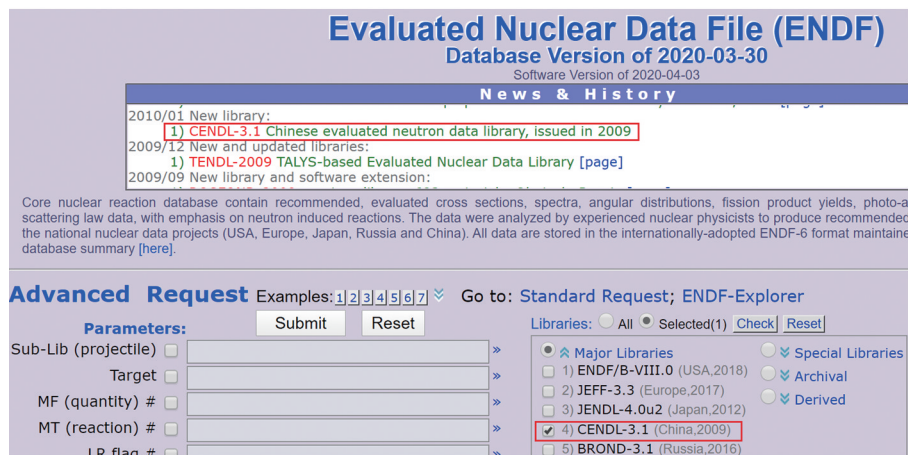


图6 国际原子能机构网站的主流核数据库

有力地支持了中国国防建设与国民经济建设的发展,也奠定了中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的核数据中心和五大核数据库之一。

尽管中国在核数据测量与评价建库研究工作在过去几十年取得了众多研究成果,也在一定程度上满足了国内用户对核数据的需求,但是随着国民经济和国防建设的不断发展,对核数据的需求不断提高,因此中国核数据工作也面临着一些新的问题,特别是与国外日益蓬勃发展的核数据工作相比,与国际先进水平相比,中国的核数据工作在下述3方面有着较大差距。

### 3.1 先进高性能中子源及核数据测量探测器系统短缺

当今核物理实验研究强烈依赖于大型科学装置(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,中国在这些方面与发达国家存在非常大的差距。如:对可用于核数据测量的中子源这一项,中国在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年虽然建成了基于中国散裂中子源的反角白光中子源束线<sup>[18]</sup>,解决了中国白光中子源有无的问题,但由于是非专用中子源,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,而国内也才刚刚起步,因此在测量技术上与国际先进水平的差距是显而易见的。

中国中子源建设的严重滞后也制约了相关实验方法及探测器技术的发展,影响了中国核数据实验研究水平的提高,也制约了相关理论研究的深入和评价水平的提升。如中国主铀系核素的中子反应截面、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,仍然无法满足相关用户的急需。

### 3.2 核数据相关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,核数据的准确性、可靠性依赖于核结构与核反应的基础研究。因此,核物理基础研究成果会给核数据的研究与发展带来直接的影响。

尽管中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,但是随着核物理理论与实验的不断发展,目前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<sup>[3]</sup>、EMPIRE<sup>[19]</sup>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。中国早期发展的核数据程序模型已不能完全满足新形势下对核数据的需求,如轻核、少体反应理论停滞近20余年;重核裂变反应基础研究人才缺失,与国际最新进展差距增大。这也极大影响了中国核数据质量的提高,将严重制约中国核数据的长远发展。

### 3.3 高水平核物理基础研究人才队伍需要重新凝聚

在中国核数据发展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,包括众多国内著名的核物理学家,为中国核数据及基础研究做出了重要的贡献,为研制具有中国特色的核数据评价模型系统MUP系列和UNF系列奠定了坚实的理论基础<sup>[7]</sup>,为中国核数据工作在国际上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。但目前,这批骨干已逐渐离开了这些基础研究领域,核数据研究人才出现了严重的断档。因此,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队伍,加快高水平人才的培养,为中国核数据的可持续发展提供支撑。

## 4 中国核数据未来发展的建议

总结对比国际上核数据发展趋势及中国核数据发展现状,可以为中国核数据未来发展带来一些启示。同时随着近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也日益加强,纷纷投入人力及物力开展核



研究中,神经网络方法、贝叶斯蒙特卡洛方法、随机森林算法、AdaBoost算法等的应用尝试都显示出机器学习技术为改进核数据评价方法提供了新的工具。

#### 4.4 建立高效的国内外交流与合作机制

由于核数据工作涵盖了基础研究到应用的领域,因此,开展高水平的交流与合作是推动核数据发展的加速器。这方面欧洲主要国家之间建立了非常有效的机制,值得借鉴。如:由经合组织核署(OECD-NEA)牵头的核数据评价合作工作组(WPEC)以及由国际原子能机构(IAEA)主导的协调研究项目(CRP)都极大地推动了核数据研究的发展。虽然中国核数据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,依托已有的全国核数据工作协作网,根据各协作单位的设施与研究特长,建立更加紧密的合作机制,如:基于中国原子能科学研究的先进研究堆(CARR)、中国实验快堆(CEFR)、中国散裂源(CSNS)反角白光中子源等,建设相关配套终端开展高水平的实验测量工作。又如根据北京大学裂变理论研究、吉林大学原子核结构研究的特长,分别开展裂变模型研究和核结构数据评价。积极牵引相关基础理论的发展,为中国核数据研究的持续发展奠定基础支撑。

#### 4.5 加强高水平核数据人才队伍建设

人才队伍是核数据发展的根本动力。发达国家特别是美国和欧洲,拥有众多的、国际知名的核物理国家实验室,聚集了大量高水平研究队伍,这是其取得高水平成果的关键。由于20世纪70年代中国在核物理等基础研究领域人才培养方面出现了明显的空缺,且老一辈高水平的核物理基础与核数据研究人才已基本离开了一线研究,这使得目前核数据高水平研究人才极为匮乏,与欧美核大国的高水平研究团队有很大的差距,因此,必须尽快在这方面加大投入,吸引优秀的年轻人才参与到核数据研究工作中来,并通过承担重要研究工作的方式,使其尽快成长为骨干研究力量,为中国核数据研究实现全面领先打好人才基础。

## 5 结论

中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,满足了国防与国民经济建设以及基础科学发展对核数据的急需,在国际上取得了与中国国际地位相适应的核数据大国的地位,并为国际核数据做出了应有的贡献。当前,中国核数据研究正面临极好的发展机遇,需积极传承中国核数据工作的“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。进一步动员全国优势研究力量,不断引入新技术、新方法,加快研究队伍的培养,为使中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进入国际领先水平而坚持不懈。

### 参考文献(References)

- [1] 核物理与等离子体物理发展战略研究编写组. 核物理与等离子体物理[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [2] Expert group on the recommended definition of a general nuclear database structure (GNDS) [EB/OL]. [2019-12-31]. <https://www.oecd-nea.org/science/wpec/gnds/>.
- [3] Koning A J, Blomgren J, Jacqmin R, et al. Nuclear data for sustainable nuclear energy: EUR 23977[R]. League City: JRC, 2009.
- [4] Rolfs C E, Rodney W S. Cauldrons in the cosmos[M]. Chicago: The University of Chicago Press, 1988.
- [5] Smith M S. Nuclear data for astrophysics[J]. Nuclear Physics A, 2003, 718: 339-346.
- [6] Harada H, Plompen A. Meeting nuclear data needs for advanced reactor systems[R]. Paris: NEA/NSC/WPEC/DOC, 2014: 11-45.
- [7] Enrico S. Nuclear data for radioactive waste management [J]. Annals of Nuclear Energy, 2013, 62: 579-589.
- [8] Benlliure J, Schmidt K H. Basic nuclear data for nuclear waste transmutation and radioactive nuclear beam production[J]. Nuclear Physics A, 2004, 746: 281-287.
- [9] Qaim S M. Nuclear data for medical applications: An overview[J]. Radiochim Acta, 2001, 89: 189-196.
- [10] Abyad M A L, Spahn L, Sudar S, et al. Nuclear data for production of the therapeutic radionuclides  $^{32}\text{P}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{67}\text{Cu}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Y}$  and  $^{153}\text{Sm}$  via the  $(n,p)$  reaction: Evaluation

- of excitation function and its validation via integral cross-section measurement using a 14 MeV d(Be) neutron source[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2006, 64: 717–724.
- [11] Lisowski P W, Bowman C D, Russell G J, et al. The Los Alamos National Laboratory spallation neutron sources [J]. *Nuclear Science and Engineering*, 1990, 106: 208–218.
- [12] Rubbia C. European laboratory for particle physics report: CERN/LHC/98–02[R]. Geneva: CERN, 1998.
- [13] Randrup J. Brownian shape evolution in nuclear fission [R]. Beijing: China Institute of Atomic Energy(CIAE), 2014.
- [14] Neutron cross-section standards (2006) and references (2015) [R/OL]. [2019–12–31]. <https://www-nds.iaea.org/standards/>.
- [15] Nuclear data activities at the n\_TOF facility at CERN[J]. *European Physical Journal Plus*, 2016, 131(10): 371.
- [16] Ge Z G, Zhuang Y X, Liu T J, et al. The updated version of Chinese Evaluated Nuclear Data Library[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2011, 59: 1052–1056.
- [17] Zhang J S. UNF code for fast neutron reaction data calculations[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2002, 142: 207–219.
- [18] Jing H T, Tang J Y, Tang H Q, et al. Studies of back-streaming white neutrons at CSN[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2010, 621: 91–96.
- [19] Herman M, Capote R, Carlson B V, et al. EMPIRE: Nuclear reaction model code system for data evaluation[J]. *Nuclear Data Sheets*, 2007, 108: 2655–2715.
- [20] Tao H, Zhao L J, Li Z P, et al. Microscopic study of induced fission dynamics of  $^{226}\text{Th}$  with covariant energy density functionals[J]. *Physical Review C*, 2017, 96: 024319.
- [21] Liu L L, Wu X Z, Chen Y J, et al. Study of fission dynamics with a three-dimensional Langevin approach[J]. *Physical Review C*, 2019, 99: 044614.
- [22] 我国核数据研究领域首个国家自然科学基金重大项目启动[N]. *中国企业报*, 2018–02–13.
- [23] Wang Z A, Pei J C, Liu Y, et al. Bayesian evaluation of incomplete fission yields[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123: 122501.

## Nuclear data: A bridge connecting the fundamental nuclear physics research and engineering application

GE Zhigang, CHEN Yongjing

China Nuclear Data Center, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

**Abstract** Nuclear data, especially neutron nuclear data, is the basic data for fundamental research of nuclear physics, utilization of nuclear energy, and development of nuclear technology. It is also an important bridge to connect nuclear physics fundamental research and nuclear technology application. The quality of nuclear data will directly impact on the effectiveness, safety and economy of nuclear devices. This paper briefly introduces the application of nuclear data, the trend of nuclear data research in the world, and reviews the experience of international nuclear data work as well as its enlightenment to nuclear data work in China. Finally, opportunities and challenges brought by machine learning and other new technologies to the development of nuclear data in China are introduced, and some proposals on how to develop the nuclear data work in China are presented.

**Keywords** nuclear data; nuclear data needs; evaluated nuclear data library ●



(责任编辑 刘志远)