

文章编号: 1007-4627(2021)01-0107-09

核反应实验数据库 (EXFOR)

王记民¹, 陶曦¹, 金永利¹, 刘丽乐¹, 陈国长², 葛智刚¹, 大塚直彦³

(1. 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;

2. 国家自然科学基金委员会, 北京 100085;

3. 国际原子能机构核数据科, 奥地利维也纳 A-1400)

摘要: 核反应实验数据库 (EXFOR) 及其检索系统提供了丰富的中低能核反应物理信息和数据, 已经成为国际上最全面的核反应实验数据汇编。目前, 由国际原子能机构核数据科 (IAEA/NDS) 协调管理, 国际核反应数据中心协作网 (NRDC) 13 个成员进行全球性合作, 旨在协调国际范围内核反应实验数据的收集、编纂和传播。中国核数据中心 (CNDC) 作为 NRDC 成员之一, 多年来开展了大量的中子和带电粒子引起的核反应实验测量和建库技术研究。本文介绍了 EXFOR 数据库的形成、发展和现状, 以及数据格式、数据编纂和检索系统, 并简要总结了我国核反应实验数据建库及技术研究等方面的工作, 如国内期刊检索、EXFOR 数据库文档建设、程序开发、国内数据服务及国际合作等。

关键词: 核反应; 实验数据; 数据库; EXFOR

中图分类号: O571.53

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.38.2020040

1 引言

核数据是重要的科学数据, 在基础科研、国防建设、国民经济等诸多方面发挥着重要作用, 特别在核反应堆设计和运行、核装置研制和储存管理、核医学等领域有着广泛应用, 是不可或缺的基础数据。核数据包括描述单个原子核基本性质的核质量、结构和放射性衰变数据, 如半衰期、同位素丰度、衰变分支比等, 以及描述粒子(中子、带电粒子、光子等)与原子核相互作用的核反应数据, 如反应截面、角分布、裂变产额等。国际原子能机构核数据科 (IAEA/NDS) 组织协调建立核结构和衰变数据库 (即评价核结构数据库 ENSDF^[1]) 和核反应实验数据库 (即 EXFOR 数据库^[2])。实验测量数据往往存在一定分歧甚至错误, 因此实际应用中还需要对核数据进行评价, 国际上没有统一的评价核反应数据库, 目前国际公认的五大中子评价核数据库有: 美国的 ENDF/B^[3], 日本的 JENDL^[4], 欧洲的 JEFF^[5], 俄罗斯的 BROND^[6] 和中国的 CENDL^[7]。

核物理基础研究、核工程设计、核数据评价与测量均对实验测量数据提出迫切的需求, 特别要求能便捷、高效、全面地获取相关核反应数据。但很多时候实验测量结束后, 实验信息和数据得不到有效的保存和管理, 相关文章中也经常只给出图形, 如不及时联系作者获取

实验信息和数据, 多年后原始测量结果将无法找到。因此, 核反应实验测量关键信息和数据的收集和 EXFOR 数据库的建设就显得尤为重要, 可以满足科研工作者对最全且最新的实验测量数据的需求, 推进核数据的长期保存和资源管理, 推动核数据的开放和共享。科研人员可以直接通过 EXFOR 数据库检索所需实验测量信息和数据, 大大提高工作效率。

2 EXFOR 数据库

早在 1951 年, 美国布鲁克海文 (Brookhaven) 实验室 (BNL) 就开始了中子反应截面数据的编纂^[8], 收集和整理数据的工作组被称为西格玛中心 (Sigma Center)。1962 年, 该中心程序系统中存贮的信息量达到了 50 万个穿孔数据卡, 并且数据量增速很快。为了处理大量的数据, 1964 年建立了磁带系统——西格玛中心信息存贮和检索系统 (SCISRS), 将穿孔卡片上的所有数据移至磁带。由于 SCISRS 系统最初设计没有考虑计算机兼容问题, 因此 1971 年发布了改进的程序系统——截面信息存贮和检索系统 (CSISRS) 及用户手册, 数据点达到百万以上。

1963 年, 前苏联国家原子能应用委员会在奥布宁斯克 (Obninsk) 的物理与动力工程研究院建立了核数据

收稿日期: 2020-06-23; 修改日期: 2020-07-30

作者简介: 王记民 (1976-), 男, 河北邢台人, 研究员, 博士, 从事核数据评价研究; E-mail: jmwang@ciae.ac.cn。

中心(CJD),任务是收集前苏联的所有实验室的中子核反应数据。1964年,经济合作与发展组织(OECD)核能机构数据中心(NEA-DB)在法国萨克莱(Saclay)成立,收集OECD成员国(美国除外)测量的中子核反应数据。同年,IAEA/NDS在奥地利维也纳的IAEA总部成立,其目的是启动和促进国际上核数据系统地进行交换,为世界上尚未进行中子核数据编纂的地区建立一个编纂中心。1967年,Brookhaven实验室的数据编纂工作组和截面评价工作组合并为美国中子截面中心(NNCSC),由于70年代中期NNCSC开始编纂和评价核结构数据,因此在1977年更名为美国核数据中心(NNDC)。国际上把这四个中子数据中心统称为四中心,其中NEA-DB和NNDC之间以SCISRS格式进行数据交换,而IAEA/NDS和CJD之间以数据存贮和检索系统(DASTAR)的格式进行数据交换。

从1966年开始,在IAEA/NDS的倡议和组织下,四中心每年召开一次技术交流会议,数据交换格式一直是讨论的焦点。1969年,在莫斯科召开的四中心第五次会议上达成协议,采用EXFOR格式在四个中子数据中心之间进行数据交换。1970年6月被确定为四中心以EXFOR格式正式进行数据交换的开始时间,随后各中心将其之前的数据格式统一转换为EXFOR格式。

1976年,国际核反应数据中心协作网(NRDC)成

立^[9-11],由IAEA/NDS协调管理,全世界的核数据中心进行全球性合作。NRDC的成立是为了协调全世界核反应数据的收集和编纂,向用户提供核反应数据和相关文件,包括核反应计算机索引数据库(CINDA)^[12]、评价核反应数据库(ENDF)和EXFOR数据库的数据收集和编纂,以及对数据格式、数据质量、数据服务等方面进行控制、研讨和交流。

从1986年开始,CINDA数据库在NNDC可以通过网络在线访问。1988年,实验和评价的中子数据文档也添加到了在线访问列表,自此EXFOR数据库和CSISRS数据库完全一致。

当前,EXFOR数据库由IAEA/NDS统一协调管理,NRDC的13个成员(核数据中心)合作建设,这13个核数据中心分别是奥地利的IAEA/NDS、法国的NEA-DB、美国的NNDC、俄罗斯的CJD、俄罗斯光核实验数据中心(CDFE)、俄罗斯核物理数据中心(CNPD)、匈牙利核数据工作组(ATOMKI)、日本核数据中心(JAEA/NDC)、日本北海道大学核反应数据中心(JCPRG)、韩国核数据中心(KNDC)、印度核数据物理中心(NDPCI)、乌克兰核数据中心(UkrNDC)和中国核数据中心(CNDC)。每个核数据中心负责相应区域的核反应实验测量工作的编纂,如表1所列。

表1 NRDC13个成员负责的相应区域和数据类型^[2]

序号	数据中心	编纂范围
1	ATOMKI	ATOMKI测量的带电粒子数据
2	CDFE	CDPE测量的光核数据
3	CJD	前苏联国家(除乌克兰外)测量的中子数据
4	CNDC	中国测量的中子和带电粒子数据
5	CNPD	前苏联国家(除乌克兰外)测量的带电粒子数据
6	JAEA/NDC	JENDL评价库的发布,计划编纂日本测量的中子数据
7	JCPRG	日本测量的带电粒子和光核数据
8	KNDC	韩国测量的中子、带电粒子和光核数据
9	NDPCI	印度测量的中子、带电粒子和光核数据
10	NDS	其他国家测量的中子和带电粒子数据
11	NEA-DB	NEA-DB成员国测量的中子和带电粒子数据(除 $A > 12$ 重离子数据和日本测量的带电粒子数据之外)
12	NNDC	美国和加拿大测量的中子、带电粒子和光核数据
13	UkrNDC	乌克兰测量的中子、带电粒子和光核数据

截至2020年5月,EXFOR数据库共存贮了23500多个核反应实验测量工作的相关物理信息和数据。最初,EXFOR数据库只收录中子引起的核反应数据,随着核医学诊断和治疗对医用放射性同位素需求的快速增长,人们对医用放射性同位素生产用的带电粒子核反应数据

提出迫切需求,因此各国加强了带电粒子核反应数据测量,同时各数据中心也加强了对带电粒子核反应数据的编纂。目前EXFOR数据库中带电粒子核反应数据所占比例已接近中子核反应数据,中子、带电粒子和光子引起的核反应数据所占比例分别为47.9%,45.9%和6.2%。

图 1 给出了从开始建库到现在 EXFOR 数据库中实验测量工作数量的增加情况。

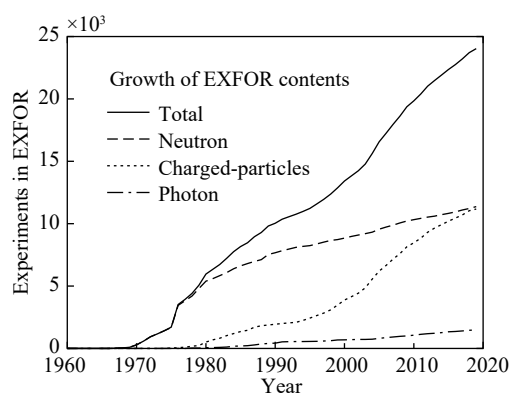


图 1 EXFOR 库中实验测量工作的累计数量

目前, EXFOR 数据库是国际上最大的中低能 (入射能量 $< 1 \text{ GeV}$) 核反应实验数据库。表 2 列出了 EXFOR 数据库中相关物理量的统计, 可以看出反应截面

表 2 EXFOR 库中的物理量

序号	代码	物理量	数量	百分比/%
1	CS	反应截面	11 737	51.20
2	DAP	角分布(部分)	4 428	19.30
3	DA	角分布	4 411	19.20
4	RP	共振参数	2 036	8.88
5	CSP	反应截面(部分)	1 953	8.52
6	FY	裂变产额	1 199	5.23
7	POL	极化数据	1 121	4.89
8	DAE	双微分截面	1 107	4.83
9	MFQ	裂变中子数	561	2.44
10	RI	共振积分	479	2.09
11	SP	伽马谱	474	2.06
12	DE	能谱	390	1.70
13	E	动能	356	1.55
14	TT	厚靶产额	311	1.35
15	L	散射幅	224	0.97
16	INT	积分截面	202	0.88
17	PY	产额	185	0.80
18	NQ	核量	115	0.50
19	MLT	出射粒子多重数	112	0.48
20	RR	反应率	106	0.46
21	TTD	厚靶产额(微分)	45	0.19
22	CST	温度相关反应截面	44	0.19
23	SQ	特殊量	19	0.082
24	DEP	能谱(部分)	12	0.052
25	TTP	厚靶产额(部分)	3	0.013

数据大约占数据库内容的一半以上, 除此之外还有角分布、共振参数、裂变产额、裂变中子数和双微分截面以及分 (Partial) 反应截面、裂变产额等方面的实验测量数据。

2.1 EXFOR 格式

EXFOR(EXchange FORmat) 是一种计算机化的核反应实验数据交换格式, 含有文献目录和说明信息 (BIB) 以及数据 (COMMON 和 DATA), 以机器可读格式和人工可读格式传递数据, 每行记录长度为 80 个字符。每个实验测量工作记录在一个条目 (Entry) 里, 每个条目由两个或多个分条目 (Subentry) 组成, 每个分条目包含两类信息: 说明信息和数据。每条说明信息由相应关键词识别, 关键词之后的括号内显示相应代码, 如关键词 “METHOD” 之后紧跟 “(TOF)”, 表示该工作采用的测量方法是飞行时间法。大多数说明信息有具体代码识别, 有些代码的意义在其后以自由文字给出, 有些则仅仅给出代码, 有些没有具体代码识别的则以自由文字给出。为了避免一些信息的重复, 将所有分条目中相同的说明信息 (BIB) 和公共数据 (COMMON) 放置于第 1 个分条目中, 因此第 1 个分条目中的信息适用于其它所有分条目。除第 1 个分条目外, 其它分条目的说明信息 (BIB) 和公共数据 (COMMON) 仅适用于对应的分条目。EXFOR 数据库文档格式如图 2 所示, 其中公共数据 (COMMON) 和数据 (DATA) 的格式是相同的。

EXFOR 数据格式比较灵活, 以描述各种核反应数据类型, 其关键词和代码的含义均可在 EXFOR 字典中查询。按照规定, 字典中关键词或代码的增加或删除、使用说明或功能的变化等均需要由编纂者提出建议, 由技术会议和数据中心协作网会议讨论并达成一致后才能进行相应的修改和更新。随着时间的变化, EXFOR 字典亦会发生很大的变化, 因此科研工作者需要及时了解字典的变化情况, 才能正确编纂和检索 EXFOR 数据文档。

2.2 数据编纂

在核数据领域, 编纂是指收集、整理和存贮相关核反应实验测量工作的文献、物理信息和数据。需要对相关实验特征作详细记录和准确判定, 例如实验装置、粒子源类型、样品制备及成份分析、探测器、实验方法、采用的标准、数据分析方法、各种修正项、能量分辨和角度分辨、所考虑的误差来源及误差计算方法等等。应尽可能包含完整的实验信息, 抓住关键所在, 做到准确而简洁, 以便使用时仅凭 EXFOR 数据库文档而不读原文进行分析比较, 做出正确的评价。

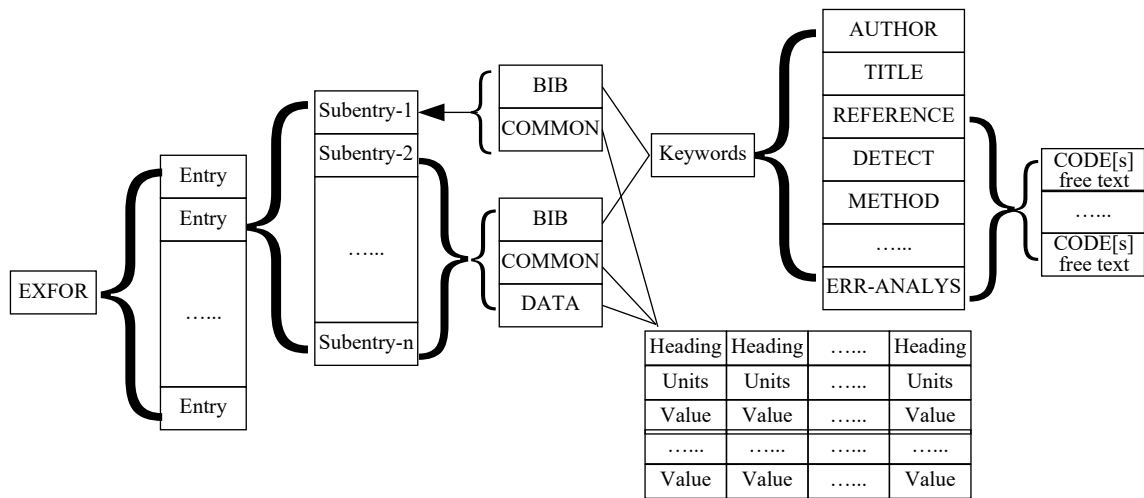


图 2 EXFOR 数据文档基本结构

图 3 给出了 EXFOR 数据库文档编纂的一般过程。主要包含 4 个关键点：(1) 检索有关核反应实验测量的文章，最新发表的文章一般有电子版，检索较容易，早期发表的文章大部分都是纸质版，需要逐篇翻阅，比较耗时耗力；(2) 分析实验测量信息，需要查阅大量同类

型文献，或与测量人员讨论，以确保入库的相关物理量准确无误；(3) 获取实验测量数据，如果文章中没有给出数据列表，对于新发表的文章需要联系作者，对于早期发表的文章则需要通过读图软件识别图中数据点；(4) 数据库文档编纂及格式检查，由专用软件来完成。

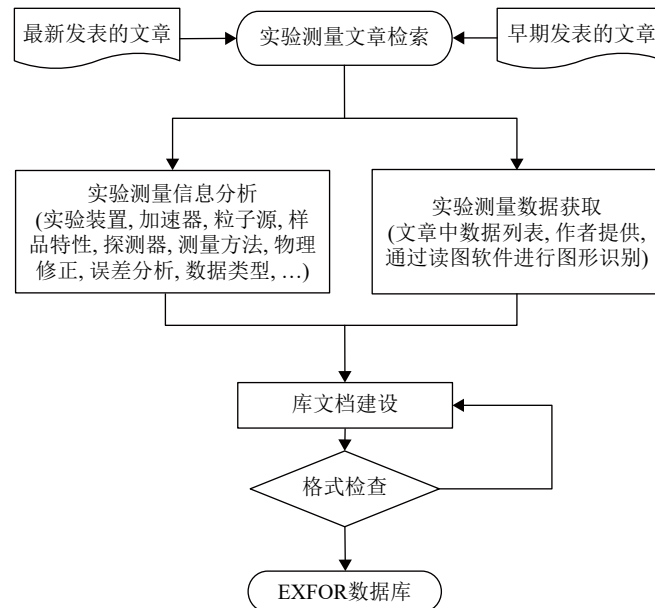


图 3 EXFOR 数据库文档编纂过程

2.3 EXFOR 检索系统

EXFOR 检索系统是一个高效的处理平台，网址为 <http://www-nds.iaea.org/exfor/>。用户可以通过靶核、反应类型、物理量、剩余核、能量范围、作者、参考文献和条目号等关键词进行数据检索。该检索系统提供了 EXFOR 数据的初始格式 (X4) 和多种满足用户不同需求的格式。其中“注释”格式 (X4+, X4±, X4XML) 对 EXFOR 内部代码和缩写进行解释说明，同时提供便

于用户使用的实验数据格式；“计算”格式 (C4, C5, C5M) 采用便于软件开发的简单形式。数据可以通过静态或交互式图形进行显示，为了方便比对，提供了用户上传数据的选项。可对图形进行拖拽缩放、线性/对数坐标变换、复制/粘贴等操作，也可以将图形以 PS、PDF、GIF、HTML、ENDF-6、Fortran 等数据格式输出。除了数据检索，还可以在线进行截面和角分布等的逆反应计算、归一、修正和构建协方差矩阵等。

EXFOR 数据库是国际上唯一一个贮存大量核反应实验测量信息和数据的核物理数据库, 其检索系统方便用户查询所需实验测量信息和数据。图 4 给出了简单的

检索 $^{232}\text{Th}(n, 2n)$ 反应截面数据的实例, 输入参数分别为靶核 (Target) = Th-232、反应类型 (Reaction) = n, 2n 和物理量 (Quantity) = CS(截面)。

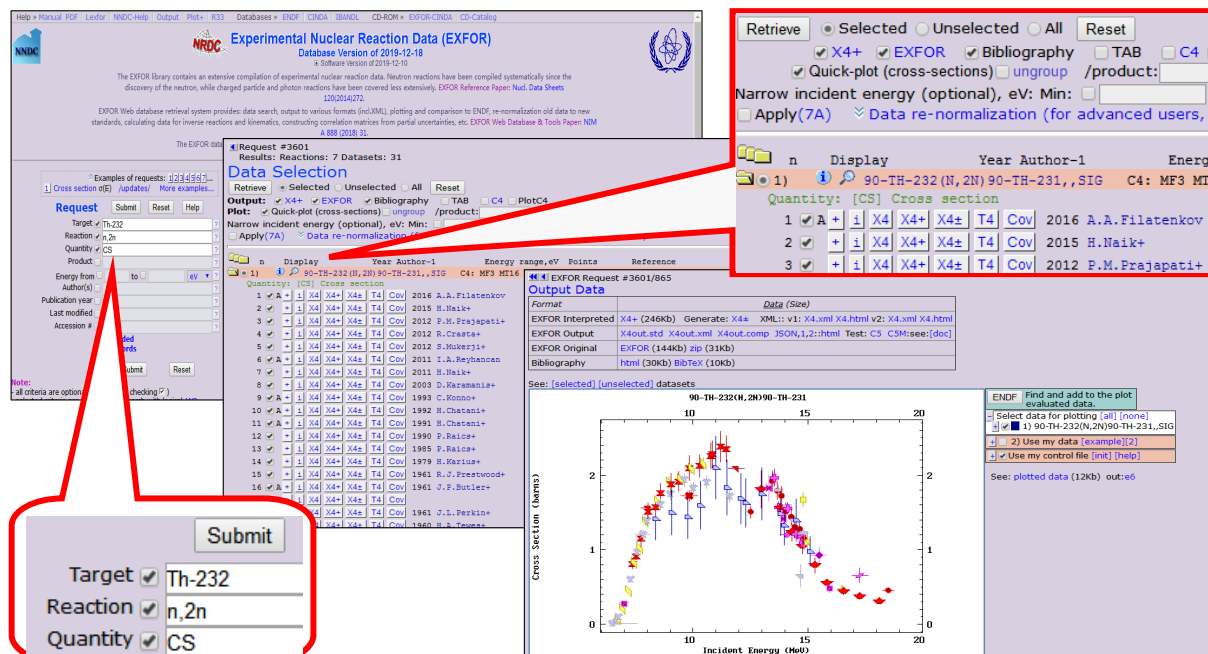


图 4 (在线彩图) $^{232}\text{Th}(n, 2n)$ 反应截面实验数据检索实例

3 中国核反应实验数据建库进展

从 20 世纪 50 年代开始, 为了满足国防建设中的核装置研制和测试的急需, 我国开始了关键核数据的测量与编评。在我国著名核物理学家钱三强先生的领导下, 建立了核物理实验必需的仪器设备及其相关技术, 为核数据测量准备了前提条件。为了适应我国原子能事业发展对核数据的需要, 根据国内相关用户的要求, 1975 年第二机械工业部组建“第二机械工业部核数据中心”, 在国内开展和组织核数据评价和建库研究工作。

1984 年我国正式加入 IAEA, 当时的国家科委、外交部和核工业部共同会签决定, “第二机械工业部核数据中心”以“中国核数据中心”的名义对外进行交流和作, 执行国家核数据中心的职能。在中国核数据中心的牵头下, 形成了包括北京大学、清华大学等 20 余所高校和科研院所组成的全国核数据工作协作网。

1984 年 11 月, 全国带电粒子核数据工作组第一次会议在上海召开, 参会代表来自中国核数据中心、四川大学和中国科学院上海应用物理研究所, 根据 IAEA/NDS 的建议, 讨论并制定了带电粒子核反应实验数据建库计划。1985 年 5 月, 全国带电粒子核数据工作组第二次会议在黄山召开, 讨论并校正了 15 个带电粒子核

反应实验数据文档, 提交给了 IAEA/NDS。

1987 年, 中国核数据中心加入 NRDC, 作为正式代表参加了 1987 年 11 月在美国布鲁克海文实验室召开的第 9 届 NRDC 顾问会议^[13]。

中国核数据中心长期以来致力于国内期刊上核反应实验测量文章的检索、EXFOR 数据库文档的建设、相关程序开发、为国内用户提供数据服务和加强与 NRDC 的合作交流。

3.1 国内期刊检索

EXFOR 数据库文档建设的第 1 步就是对有关核反应实验测量的文章进行检索。中国核数据中心负责发表在中国发行的学术期刊和会议文集上的有关核反应实验测量的文章的检索工作, 表 3 列出了所涵盖的主要核物理学术期刊。其中, 《原子核物理评论》近年来刊登有核反应实验测量的文章, 但数量不多。以后随着我国新一代核物理研究装置的陆续建成和投入使用, 这种情况会得到改变, 核反应实验测量的文章会逐渐增加。《中国物理 B》改版后不再刊登核反应实验测量的文章。《核数据进展通讯》从 2006 年的第 30 期之后一直没有再发行。《原子核物理》最后一期为 1997 年第 19 卷第 4 期, 从 1998 年停刊。因此目前我们检索的期刊为序号 1~7 这 7 个主要核物理学术期刊。

表 3 主要核物理期刊

序号	期刊名称	曾用名称	EXFOR 中的缩写	语种	创刊/ 更名时间
1	中国物理C		CPH/C	英文	2008
		高能物理与核物理	PHE	中文	1977
2	原子能科学技术		CST	中文	1959
3	核化学与放射化学		HFH	中文	1979
4	核技术		NTC	中文	1978
5	核技术(英文版)		CNST	英文	1989
6	中国物理快报		CPL	英文	1984
7	物理学报		ASI	中文	1953
		中国物理学报		英、法、 德文	1933
8	原子核物理评论	核物理动态	CNPR	中文	1984
9	中国物理B		CPH/B	英文	2008
		中国物理	CPH	英文	2000
		物理学报(海外版)	ASI/OE	英文	1992
10	核数据进展通讯		CNDP	英文	1989
11	原子核物理		CNP	英文	1989
				中文	1979

3.2 EXFOR 数据库文档的建设

中国核数据中心负责我国的中子和带电粒子核反应实验测量工作的收集和编纂。国际上按区域进行了条目号的分配，分配于我国的中子核反应数据条目号有 500 个，从 32501 到 33000；带电粒子核反应数据条目号有 10000 个，从 S0000 到 S9999。我国第一个 EXFOR 数据库文档是 1985 年庄友祥研究员编纂的带电粒子核反应数据 S0001；第一个中子核反应数据的 EXFOR 数据库文档 32501 是 1989 年梁祺昌研究员编纂的。2004 年之前，我国的 EXFOR 数据库建设工作由庄友

祥和梁祺昌负责；2004 到 2009 年由于宏伟研究员负责；2010 年我们成立了编纂小组，先后由陈国长研究员和王记民研究员负责。

2009 年之前，共有 135 个文档收入 EXFOR 数据库。自 2010 年起，编纂小组完成了 250 多个核反应实验测量工作的收集和编纂，中子引起的核反应数据文档有 126 个，带电粒子引起的核反应数据文档 125 个，占总数的 65% 以上。图 5 给出了自 2010 年起每年编纂的数据文档统计，统计时间节点是每年的 5 月即 NRDC 的年会时间。

所编纂的核反应实验测量工作的所有作者及工作单位都会在 EXFOR 数据库文档中显示，表 4 列出了我国各大学或研究院所在 EXFOR 数据库中出现的次数。出现次数较多的单位一般都拥有重要的科研设施和实验装置，例如中国原子能科学研究院先后建成有重水反应堆、回旋加速器、2.5 MV 静电加速器、600 kV 高压倍加器和 HI-13 串列加速器等科学装置，开展了大量的激发函

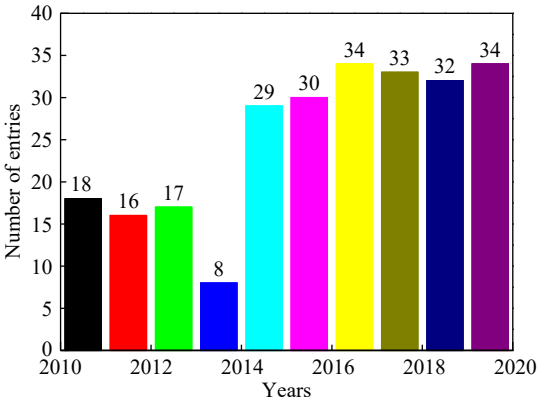


图 5 (在线彩图) 每年完成的 EXFOR 文档统计

表 4 我国各大学或研究院所在 EXFOR 数据库中出现的次数

EXFOR 中的缩写	单位名称	出现次数	EXFOR 中的缩写	单位名称	出现次数
3CPRAEP	中国原子能科学研究院	318	3CPRPDU	平顶山大学	7
3CPRIMP	中国科学院近代物理研究所	128	3CPRHST	中国科技大学	6
3CPRBJG	北京大学	110	3CPRNAN	南京大学	5
3CPRLNZ	兰州大学	82	3CPRUCA	中国科学院大学	5
3CPRSIU	四川大学	48	3CPRZHN	郑州大学	4
3CPRNPC	中国工程物理研究院	39	3CPRUPD	中国石油大学	3
3CPRNRS	中国科学院上海应用物理研究所	34	3CPRJIL	吉林大学	3
3CPRHXU	河西大学	26	3CPRNIX	西北核技术研究所	3
3CPRFUD	复旦大学	26	3CPRCNI	中国核情报中心	2
3CPRTSI	清华大学	22	3CPRSHN	陕西师范大学	2
3CPRBNU	北京师范大学	16	3CPRSST	上海大学	1
3CPRBHN	北京航空航天大学	13	3CPRCPR	其他大学或研究所	83
3CPRIHP	中国科学院高能物理研究所	10			

数、裂变产额和伽马产生截面等测量工作。中国科学院近代物理研究所先后建成有 1.5 m 回旋加速器、大型分离扇回旋加速器、兰州放射性束流线 (RIBLL)、兰州重离子加速器冷却储存环 (HIRFL-CSR) 等大科学装置, 开展了大量的弹核碎裂和熔合反应激发函数等测量工作。北京大学的 4.5 MV 静电加速器上分别用固体氘靶 $T(p, n)$ 反应以及氘气体靶 $D(d, n)$ 反应产生 1~4 MeV 和 4~7 MeV 准单能中子, 开展了大量的 (n, x) 反应截面的测量工作。兰州大学在 ZF-300-II 强流中子发生器上进行样品辐照实验, 以 $T(d, n)$ 反应作为中子源, 开展了大量的 $(n, 2n)$ 、 (n, p) 等激发函数的测量。四川大学拥有 1.2 m 回旋加速器、400 kV 高压倍加器和 2.5 兆伏静电加速器, 开展了很多弹性散射截面和俘获辐射截面的测量。中国工程物理研究院在 K-400 强流中子发生器和 Pd-300 中子发生器上以 $T(d, n)$ 反应作为中子源, 近年来开展了大量的 $(n, 2n)$ 、 (n, α) 等激发函数的测量。

中国科学院上海应用物理研究所成功研制出我国第一台自行设计建造的 1.2 m 回旋加速器, 后改建为 1.4 m 等时性回旋加速器, 开展了一些带电粒子核数据的测量。其他大学或研究院所有些也拥有实验装置, 但开展核数据测量较少; 有些没有实验装置, 测量工作通常是与上述单位进行合作。

为了有效地收集、归类、分配、归档、进度检查, 建立了我国的 EXFOR 建库管理平台, 如图 6 所示。管理平台包括实验测量工作的作者、发表刊物及日期、实验室、分配的文档号、编纂入库负责人、EXFOR 字典、文档编纂和入库进度说明等信息。当完成一个 EXFOR 文档的编纂后, 负责人将其上传到管理平台, 并指定人员对文档进行检查, 然后与 IAEA 相关人员交流, 最终完成该文档入库, 并同时上传到我国的 EXFOR 建库管理平台存档。目前, 该平台存有 385 个 EXFOR 文档, 以及 80 多个待归档的实验测量工作。

CNDC

中国核数据中心

<

图 6 (在线彩图)EXFOR 建库管理平台

3.3 程序开发

30 多年来, 中国核数据中心不仅进行 EXFOR 数据库文档的建设, 还组织人员进行相关程序的开发。1993 年联合南开大学开发了 EXFOR 格式数据库文档的编纂软件 ERES^[14], 但是由于种种原因, 该程序目前已不再使用。

很多文章中往往仅以图形方式给出实验测量结果。对于最近发表的文章可以联系作者提供数据, 但对于较早发表的文章很难联系到作者, 即使联系上作者有时也

很难找到原始测量数据。这不仅给 EXFOR 数据编纂工作带来一定的困难, 还影响了很多科研工作地开展, 很多科研人员甚至用很原始的方法从图中量出数据, 带来了很大的误差。因此科研工作者迫切需要对图形进行数字化, 提高读取数据的精度。2000 年, 中国核数据中心采用 VC++ 语言开发了图形数字化程序 GDGraph^[15] 第一版, 可以直接读取图形而获得数据以及误差。随后在 2006, 2011, 2012, 2013 和 2016 年分别对其进行了升级, 读取数据的精度不断提高, 目前最新版本为 5.1 版,

其滤镜功能可以使数据读取精度提高 8 倍, 如图 7 所示。图形数字化程序 GDGraph 解决了科研工作者面临的实际问题, 使年代久远的文章中的图形可以数据重现, 满足了核物理基础研究和工程设计的需求。

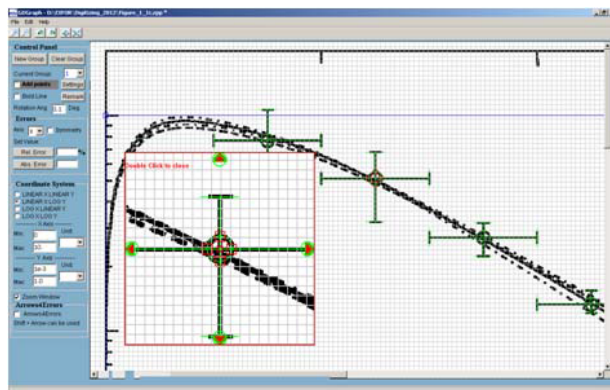


图 7 (在线彩图)GDGraph 滤镜功能

考虑到我国用户的数据检索习惯, 基于 EXFOR 数据库源数据开发了实验核数据库检索系统, 网址为 <http://www.nuclear.csdb.cn/shiyan.html>。为了高效、专业地进行处理、绘图、分析和比对核数据, 开发了核数据处理绘图客户端软件(简称 NDPlot)^[16], 它是一个处理复杂的 EXFOR 格式、ENDF 格式和自由格式核反应数据的软件系统。

3.4 数据服务

在国内, 中国核数据中心为来自大学和科研院所的科研人员提供核数据服务。我们参加了“中国基础数据库开发”项目研究, 创建了核物理主题数据库网站^[17]。通过该网站可以访问 EXFOR 数据库、评价核数据库、ENSDF 数据库、核天体数据库和医用同位素数据库等, 可以下载 GDGraph 等相关核数据处理软件。与 IAEA/NDS 合作, 建立了 IAEA/NDS 在中国的镜像网站, 网址为 www-nds.ciae.ac.cn, 国内用户可以直接访问获取同步的数据。

中国核数据中心提供核数据服务的同时, 还建立了用户反馈机制。用户在使用相关核数据时遇到任何问题都可以直接反馈给中国核数据中心。如广西师范大学的孙小军教授在进行中子诱发氘出射中子双微分截面计算时, 发现 EXFOR 数据库中 Entry 号为 30997 的数据^[18]与其计算结果及另一家测量数据差异较大, 如图 8(a) 所示。经过原文比对和格式检查, 发现原因是 30997 在最初编纂时数据的量级输入错误, 修正后的结果见图 8(b)。

3.5 国际合作

1987 年, 中国核数据中心加入 NRDC, 从而加强了我国在核数据方面的国际交流与合作。自此, 作为正

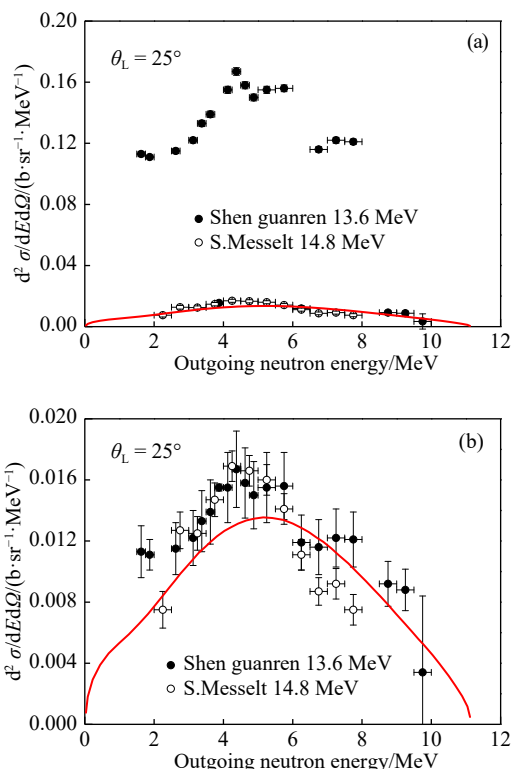


图 8 (在线彩图)14 MeV 附近 $D(n, 2n)$ 反应中子出射角度为 25° 的双微分截面

式代表受邀参加每年一次的 NRDC 技术会议和两年一次的 EXFOR 数据库编纂研讨会, 并于 2016 年 6 月首次在北京成功主办了“2016 年国际核反应数据中心协作网会议(NRDC2016)”。

2010 年中国、日本、韩国和印度共同发起了“亚洲核反应数据库发展研讨会”, 顾问委员会由四国核数据中心负责人组成, 旨在加强亚洲地区核数据中心之间学术交流, 增进各国在核数据研究方面的合作。研讨会每年举办一次, 主题包括各国核数据测量及评价研究工作和核反应实验数据 EXFOR 建库技术研究等的进展情况。2011 年 9 月和 2016 年 11 月在北京成功举办了第二届和第七届“亚洲核反应数据库发展研讨会”。

从 2012 年开始, 中国核数据中心多次邀请 IAEA/NDS 的物理学家大塚直彦(Naihiko Otsuka)博士来访进行学术交流, 他在 IAEA/NDS 负责管理 EXFOR 数据库, 同时负责协调 NRDC, 因此进一步加强了 EXFOR 数据库文档建设的合作。访问期间, 共完成了 80 多个 EXFOR 数据库文档建设, 内容包括裂变产额和反应截面等。对《原子核物理评论》和《原子能科学技术》所有文章进行了检索, 讨论并确定了需要入库的实验测量工作。除了 EXFOR 数据库相关工作外, 近年来核数据测量、评价和建库等方面的进展和前景也是交流重点, 从而进一步提高我国核数据评价水平。

4 结论

EXFOR 数据库是目前国际上最大的存贮中低能核反应实验测量相关物理信息和数据的数据库, 备受国际重视, 由 IAEA/NDS 统一管理和 NRDC 共同建设。截至 2020 年 5 月, EXFOR 数据库共存贮了 23 500 多个核反应实验测量工作的相关物理信息和数据, 并且以每月更新一次的速度继续扩展。中国核数据中心具有多年的数据库建库、开发、管理和维护经验, 参加建设 EXFOR 数据库, 与国内外同行进行充分的交流与合作, 做出了很大贡献, 使我国的核反应实验测量工作更广泛地被国际同行了解。中国核数据中心将继续为我国的国防建设、核能和平利用、环境保护等方面的研究和应用提供全面可靠的核数据和相关信息。

参考文献:

- [1] From ENSDF Database as of 2019-11-26 [EB/OL].[2020-06-05]. <http://www.nndc.bnl.gov/ensarchivals/>.
- [2] OTUKA N, DUPONT E, SEMKOVA V, et al. Nucl Data Sheets, 2014, 120: 272.
- [3] CHADWICK M B, HERMAN M, OBLOZINSKY P, et al. Nucl Data Sheets, 2011, 112: 2887.
- [4] SHIBATA K, KAWANO T, NAKAGAWA T, et al. J Nucl Sci Technol, 2011, 48: 1.
- [5] KONING A J, BAUGE E, DEAN C J, et al. J Korean Phys Soc, 2011, 59(2): 1057.
- [6] BLOKHIN A, GAI E, IQNATYUK A, et al. Vopr Atom Nauki i Tech, Ser Nuclear Constants, 2016, 2: 62.
- [7] GE Zhigang, ZHAO Zhixiang, XIA Haihong, et al. J Korean Phys Soc, 2011, 59(2): 1052.
- [8] HOLDEN N.[EB/OL].[2020-06-05].<http://www.nndc.bnl.gov/exfor/compilations/CSISRSHistory.pdf>.
- [9] Report on the Second Consultants' Meeting on Charged Particle Nuclear Data (CPND) Compilation, INDC(NDS)-0077[R].Vienna: IAEA, 1976.
- [10] Report on the Twelfth Four-Centre Meeting, INDC(NDS)-0078[R]. Vienna: IAEA, 1976.
- [11] Network of Nuclear Reaction Data Centres (NRDC) Network[EB/OL].[2020-06-05]. <https://www.nds.iaea.org/nrdc/>.
- [12] Computer Index of Nuclear Reaction Data[EB/OL].[2020-06-05]. <http://www.nds.iaea.org/cinda>.
- [13] Report on the 9th IAEA Consultants' Meeting of the Nuclear Reaction Data Centres, INDC(NDS)-0204[R]. Vienna: IAEA, 1988.
- [14] LI Shubing, LIANG Qichang, LIU Tingjin. IAEA-NDS-0151[R]. Vienna: IAEA, 1988.
- [15] JIN Yongli, CHEN Guochang. IAEA-NDS-216[R]. Vienna: IAEA, 2016.
- [16] JIN Yongli, TAO Xi, WANG Jimin, et al. INDC(MGL)-0001[R]. Vienna: IAEA, 2018.
- [17] [2020-06-05].<http://www.nuclear.csdb.cn/>.
- [18] SHEN Guanren, SA Jun, TANG Hongqing, et al. Chinese Nucl Phys, 1990, 12: 241.

The Experimental Nuclear Reaction Data(EXFOR)

WANG Jimin^{1,1)}, TAO Xi¹, JIN Yongli¹, LIU Lile¹, CHEN Guochang², GE Zhigang¹, OTUKA Naohiko³

(1. China Nuclear Data Center, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China;

3. Nuclear Data Section, International Atomic Energy Agency, A-1400 Vienna, Austria)

Abstract: The EXchange FOrmat (EXFOR) experimental nuclear reaction database and the retrieval system provide access to the wealth of low- and intermediate-energy nuclear reaction physics data, and become the most comprehensive compilation of experimental nuclear reaction data. Currently, there are 13 participants (nuclear data centers) of the International Network of Nuclear Reaction Data Centers(NRDC) which has been organized under the auspices of the International Atomic Energy Agency(IAEA) to coordinate the collection, compilation, and dissemination of nuclear data on an international scale. As the participant of NRDC, China Nuclear Data Center(CNDC) does its best for measurement of nuclear reaction quantities induced by neutron and charged-particle and research on the technique of database construction. The formation, development and current situation of EXFOR library, and its format, compilation and retrieval system were introduced. The work on compilation of experimental nuclear reaction data and study of the database construction technique in China was briefly summarized, such as scanning Chinese journals, compiling EXFOR entries, developing software, providing nuclear data service in China, collaborating with NRDC and so on.

Key words: nuclear reaction; experimental data; library; EXFOR

Received date: 23 Jun. 2020; Revised date: 30 Jul. 2020

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