

中子反应核数据研究综述

姚立山

(兰州大学, 原子核研究所)

摘要: 本文综述了中子引起的核反应数据研究概况, 实验测量方法, 核数据的评价等; 其中还包括国内核数据工作的一些情况。最后提出了目前存在的一些问题及解决办法。

一、概 况

核数据的研究一般包括三个方面的内容: 核结构数据, 核衰变数据和核反应数据。本文仅涉及中子引起的核反应数据。

自从1932年发现中子至今已有50余年的历史。其间, 中子物理, 中子探测技术都有了很大的发展。核数据的研究工作也取得了显著的进展。据估计, 目前世界上核物理实验测量和核数据评价的实验室有500多个, 核数据正以每年12万个实验点的速度递增着, 各国存储的核数据的总数已达250—300万个。从这些数字不难看出, 核数据的发展速

度是十分惊人的。

众所周知, 核数据的研究主要目的是为反应堆及核武器的研究、设计提供依据, 因此评价核数据的精度(可信程度)直接影响着工程设计的经济效益。如美国由于精确测定了 ^{239}Pu 的 α 值, 据说使某项反应堆的建造费用一下子就节省了几亿美元。可见核数据的研究工作也是相当重要的。

为此, 当前世界各国对核数据的研究工作都非常重视。核数据的研究工作最早可以追溯到1941年美国建造第一颗原子弹时的曼哈顿计划, 当时这项工作是由著名物理学家费米等主持进行的。1960年前后, 世界各国都先后成立了自己的核数据中心, 如美

-
- Conf. Low Temperature Physics, London, 1962, p.324
 - 2) Pierce, J. M. et al, Proc. 9th Conf. Low Temperature Physics, Ohio, 1964, p.396
 - 3) Bollinger, L. M. IEEE Trans. Vol. NS-30, No.4 (1983) 2065
 - 4) Bollinger, L. M. IEEE Trans. Vol. NS-24, No.3 (1977) 1076
 - 5) Brennan, J. M., Chen, C. E. et al, Bulletin of American Physical Society Vol. 28,2 (1983) 91
 - 6) Ben-Zvi, I IEEE Trans. Vol. NS-28, No.3 (1981) 2488
 - 7) Comptes Rendus de l'Académie des Sciences et des Universités de Paris, Division De La Physique CEN Saclay ISSN 0750-6678
 - 8) Lapostolle, P., IEEE Trans. Vol. NS-30, 4 (1983) 1957
 - 9) Chapman, K.H., N.I.M. 184 (1981) 239
 - 10) "Applied Superconducting, Inc." 707 West Woodbury Road, Altadena, California, 91001
 - 11) Tigner, M. et al, AIP Conf. Proceedings No.105 p.801
 - 13) Paul, P. et al, Comments Nucl. Part. Phys. Vol. 11,5 (1983) 217
 - 14) Bollinger, L. M. et al, IEEE Trans. NS-22,3 (1975) 1148
 - 15) Brennan, J.M. Chen, C.E. et al, IEEE Trans. NS-30,4 (1983) 2798
 - 16) Lynch, F.J. et al, N.I.M. 159 (1979) 245

(LRL, BNL), 英 (Winfrich), 德 (Karlsruhe), 苏 (Obnisk), 法 (Saclay) 及瑞典, 日本等发达国家。为了加强国际间的交流, 又相继建立了一些国际间的组织: 英美加三国截面委员会 (TNCC), 欧美核数据委员会 (EANDC) 以及四区域国际中子数据中心。四区域中心包括: 欧洲核子能机构中子数据编纂中心 (CCDN), 苏联核数据中心 (CJD), 美国国家中子截面中心 (NNCSC) 和国际原子能机构核数据部 (NDS)。它们分别负责世界不同地区的数据收集和编纂工作, 各中心之间的数据交换采用统一的计算机交换格式—EXFOR格式。

1975年, 我国也成立了自己的核数据机构—中国核数据中心 (CNDC)。1983年我国已正式成为国际原子能机构 (IAEA) 的成员国并派有常驻代表。这样我国同国际间的数据交换就变得十分方便和直接。

核数据的应用除了核工程的研究、设计需求外, 在其它科学技术领域也有着广泛的用途。诸如天体物理, 核物理, 固体物理, 核医学, 同位素生产, 中子活化分析, 中子探矿, 测水, 冶癌……等方面。

然而在核数据的研究中, 最基本、最困难的仍是实验测量工作。早在50年代, 中子的探测主要靠BF₃正比计数管和电离室等, 中子源也多是同位素中子源和简单的单能中子源。现在除了各类单能加速器(中子发生器, 倍加器, 静电、回旋和串列加速器)外, 还有能够产生连续中子谱的白光中子源(电子直线加速器); 测量技术也由单能的测量发展到飞行时间技术 (TOF), 使测量能区扩展, 精度也有所提高, 如全截面的测量可提高差不多一个数量级 (~1%)。

现在飞行时间技术与白光中子源的配合, 再加上数据获取和处理计算机化已成为核数据测量中一个重要的手段。这是70年代以来核数据测量技术的重大发展之一。

总之, 随着中子物理, 实验测量技术和计算机技术的发展及核技术应用的要求, 为

核数据的研究创造了极为有利的条件, 同时也大大地促进了核数据研究工作的发展。

二、核数据的实验测量

中子与靶核的相互作用可形成复合核, 其衰变方式, 在能量不太高的情况下可能发生的反应是: 弹性散射, 非弹性散射, (n, 2n), (n, 3n), (n, γ), (n, p), (n, d), (n, t), (n, α), …… (n, f) 等。反应截面的大小可以由实验测定, 各分截面与总截面之间的关系可表示如下:

$$\sigma_t = \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{s,e} \\ \sigma_{n,n} \\ \sigma_{ce} \\ \sigma_{n,n'} \\ \sigma_{n,r} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{n,2n} \\ \sigma_{n,3n} \\ \sigma_{n,\gamma} \\ \sigma_{n,p} \\ \vdots \\ \sigma_{n,f} \end{array} \right.$$

1. 全截面测量(σ_t) 测量方法是简单的透射原理, 测量量是中子通过样品时的透射率 ($T = I/I_0$), 其测量的全截面的计算公式是:

$$\sigma_t = -\frac{1}{nX} \ln \frac{1}{T} \quad \dots\dots (1)$$

该方法的优点是不需要进行中子通量的绝对测量, 设备简单, 易于操作, 测量精度高。目前发展趋势是由单能点测量逐渐向白光中子源和飞行时间法测量过渡以达到继续扩充核素, 扩展能区的目的。目前实验测量最具有代表性的工作是Foster^[1]和Poenitz^[2]的工作。Foster利用白光源和飞行时间技术测量了许多核素的全截面, 精度1—2%, 散入效应的修正仅为0.3%。该工作的最大特点在于测量能区宽 $E_n = 2 \sim 15 \text{ MeV}$, 填补了一直无法获得数据的 $8 \sim 13 \text{ MeV}$ 的缺数据能区。

2. 散射截面的测量 弹性散射截面的测量 ($\sigma_{n,n}$): 早期工作都是单能点逐个角度测量微分截面的办法, 然后对角度求和得到总

的弹性散射截面。某一个角度 θ 的弹性散射截面的计算公式如下：

$$\sigma_{n,n}(\theta) = \frac{C(\theta) - B(\theta)}{D(\theta)} \cdot \frac{r^2 d^2}{N(r+d)^2} \dots \dots (2)$$

1968年Smith^[8]用8路飞行时间角分布测量系统开始了弹性散射截面测量的新局面。这一技术可同时测量多个角度的截面，误差 $\leq 7\%$ ，其中包括5%的标准截面误差。

非弹性散射截面的测量($\sigma_{n,n'}$)：除使用通常的飞行时间技术外，不少工作还用分立能级截面求和的方法。此时测量量是样品退激时放出的 γ 射线，误差10~15%。

去弹性散射截面的测量($\sigma_{n,n''}$)：一般都使用球壳透射法。但是一方面由于样品用量大，代价昂贵；另一方面实验结果的修正量大，所以误差较大，约15~20%，因此实验数据较少。

在散射截面测量中，误差的主要来源是：中子通量在样品中的衰减和样品内多次散射的影响。这两项修正通常都是用Monte-Carlo法进行计算，修正量在2%左右。

目前由于中子源的限制，测量能区仅限于 $E_n \leq 7\text{MeV}$ 及 $E_n = 14\text{MeV}$ 附近能点。能量趋势仍是扩展能区，提高精度。

3. (n, 2n), (n, 3n), (n, p), (n, γ) 等反应截面的测量 一般地可分为两类即：相对测量和绝对测量。相对测量的方法一般多采用活化法。这类反应的生成核有可能是不稳定的放射性核，只要半衰期适当，就可通过活化方法进行测量。测量时往往采用与某一标准反应的截面进行比较，求得相对的激发曲线；然后在某一能点作绝对测量再求其归一后待测样品的绝对截面^[4,5,6,7]。可作为标准截面的反应有：²³⁵U(n, f)，¹⁹⁷Au(n, γ)，¹¹⁵In(n, γ)和⁵⁶Fe(n, p)等反应。对(n, 2n)，(n, 3n)等反应常用的标准截面是²³⁸U(n, f)，⁶³Cu(n, 2n)，²⁷Al(n, α)和⁵⁶Fe(n, p)等反应。常用的绝对测量能点，对(n, γ)反应是⁷Li(p, n)⁷Be

反应的阈能中子能点， $E_n = 30\text{KeV}$ ；对(n, 2n)反应常用的是14.7MeV能点。在这一方面代表性的工作是1975年Bayhurst的测量^[43]，用²⁷Al(n, α)²⁴Na作标准反应，测量了13个核素的(n, 2n)，(n, 3n)截面，能区7.5~28MeV，精度4~5%。

直接测量(n, γ)反应放射出的瞬发 γ 射线的方法叫瞬发 γ 射线法。该法不受生成核是否放射性核的限制，因此应用比较广泛。早期测量瞬发 γ 射线是用4 π 几何的大液体闪烁探测器，虽然效率高达70—80%，但定时分辨率差(20ns)。60年代中出现的Moxon—Rae探测器设计成效率与 γ 射线能量成正比的关系，但其非线性误差较大。60年代后期又出现了全能探测器，利用输出脉冲幅度加权的办法使探测效率正比于 γ 射线的能量。选取适当的权函数可使这种探测器有足够小的非线性误差，较高的效率，好的定时分辨率及低的本底。从发展趋势看，这种探测器是一种比较好的“全能”探测器。

直接测量(n, 2n)，(n, 3n)反应放出的2n或3n个中子的方法是用载钷大液体闪烁技术^[8,9]，方法的详细叙述可参见文献^[10]。这种方法原则上可测任何核的(n, 2n)，(n, 3n)反应截面，但是最大的困难是使用D(d, n)中子源时有极强的次级中子本底存在。为此，Frehut^[8]采用双脉冲调制的方法，用 μs 调制测(n, 2n)，(n, 3n)事件，ns调制测次级中子能谱，借以扣除极强的中子本底；这样，较好的解决了三体反应中子和其它本底中子的影响。随后在1977年Vesser^[9]用同样的方法测量了15~28MeV一些核素的(n, 2n)，(n, 3n)反应截面。这是迄今为止公开报道的仅有的两家用载钷大液体闪烁探测技术测量(n, 2n)，(n, 3n)反应截面的工作。我们把其结果和Bayhurst^[4]活化法测量结果进行比较，可以发现两者符合很好。说明两种方法的一致性及方法本身测量的可靠性。然而由于这种方法不受剩余核是放射性与否的限制，为(n,

2n), (n, 3n) 反应截面的测量开辟了一条新的测量途径。

国内关于快中子激发曲线的测量主要是用活化法,使用的设备有倍加器,静电及回旋加速器等。例如卢涵林等^[11]先后用80"×80"NaI (Tl), 75"×75"阱型 NaI (Tl) 和 36cm³Ge(Li)探测器等测量30多个核素(n, 2n), (n, 3n), (n, p), (n, α), (n, γ), (n, d) 和 (n, n') 等七类反应的激发函数。实验结果达到了国外同类工作的水平^[12] (见表1)。

表1 14MeV中子通量测量精度比较

实验室	原子能所 (北京)	LRL	NPL	GEL	IRK
φ(%)	1.0	~1.2	1.0	~2.5	0.5
σ(%)	2.5	3	2.5	3	1.0

表2 各国核数据库简况

机构	库名	计算机	主要文献
美国NNCSC	CSISRS ENDF	IBM360/50	BNL-883(1964), AIAEC-12994(1971) CONF-710301, I, (1971), ENDF-102(1975)
美国LLL	ECSIL ENDL	CDC-7600	UCRL-50400, vol. 1-16, (1976)
苏联	USSR ENDL (SOKRATOR)	M-220	INDC(CCP)-13/L(1970) IAEA STI/PUB/343(1973)
英国	UKNDL		AWRE-0-70/63(1963), AEEW-T-1208(1973) ORNL-TM-2880(1973)
西德	KEDAK	IBM370/165,168	KFK 2387, vol. I-IV(1977)
日本	NESTOR JENDL	FACOM230/60	日本原子力学会志, vol. 15(1973)
澳大利亚	AFPL	NOVA, PDP11 IBM-360	AAEC-E-214(1971), AAEC-TM-587(1971)
瑞典	SPENG		AE-RFN-279(1967)
意大利	IFPL		CCDA-NW10(1969)
中国	CENDL	ACOS-500 PDP11/70	CENDL-1

另据报道,国内其它单位也利用倍加器和中子发生器正在或即将进行激发函数的测量工作。正在研制的 $1\sim 2 \times 10^{12}$ n/s中子发生器建成后,将为这方面工作提供更为有利的条件。

三、核数据的评价

1. 中子截面数据的系统编纂起源于1951年休斯的工作,1958年豪尔顿又系统地收集和编评了中子截面数据。接着英、德、苏等国也先后开展了核数据的评价工作。现在核数据的国际组织主要是四区域国际中子数据中心: CCDN, CJD, NNCSC和NDS。中心的联合出版物主要有两种: 中子数据计算机索引(CINDA), 世界核数据要求目录(WRENDA)。CINDA每年一期, 由IAEA

出版。评价者从中可查到任何一个靶核的中子反应截面或其它微观数据的参考资料。CINDA所引用实验数据的文献都记入EXFOR格式的磁带上。WREND由NDS出版，它详细地给出对某个材料和能量范围需要测量的中子数据。

关于各国核数据库的情况可以参看表2。

2.核数据的编评和评价 编评的目的就是以最有效的方法尽快地把所有实验数据进行编纂、评价，把推荐数据以方便形式提供用户。对于一个评价工作者要求进行的工作是：

①收集、整理、存贮实验数据。存贮数据必须严格按照EXFOR格式进行，包括题目，作者，文献，设备，中子源，探测器及样品的制备、分析。此外还须给出数据的分析、处理及误差说明等。

②对所摘取文献的数据进行分析，比较，筛选出可靠的数据并给出参加拟合时的权重。

③对缺能区数据，要用理论模型或系统学经验公式计算补齐。

④评价过的数据必须是一套完整的和自洽的数据表列或EXFOR格式记入磁带。所谓完整性指一定的能区，反应道，截面，角分布，能谱等齐全。所谓自洽性指分截面和应等于全截面，分立能级截面和应等于总的非弹性散射截面：

$$\sigma_t = \sigma_{n,n} + \sigma_{n,n'} + \sigma_{n,2n} + \sigma_{n,3n} + \sigma_{n,\gamma} + \sigma_{n,p} + \dots \quad (3)$$

$$\sigma_{n,n'} = \sum \sigma_{nni'} + \sigma_c \text{ 或 } \sigma_{n0,n} = \sigma_t - \sigma_{n,n} \dots \quad (4)$$

⑤评价数据在使用前还经过一系列宏观检验以确信数据的可靠性和准确性。

我国核数据中心(CNDC)成立以来已完成了一批核的中子数据联合评价，实验测量及理论计算等工作，同时还建立了计算机评价系统及评价核数据库并且出版以ENDF/B为标准格式的中国核数据库第一版(CE-NDL-1)^[13]。

3.核数据中的理论工作 包括核反应机制的研究及选取一定的理论模型进行数据计算。涉及到的模型有：光学模型，蒸发模型，统计模型，预平衡发射及直接相互作用模型，这些模型分别适用于不同的中子入射能量范围。目前CNDC在协作单位共同努力下已编制出自动调参数光学模型计算程序及中重、重核理论计算用的统一程序并投入实际使用。

4.核数据中的系统学研究 它是把实验数据按质量数A，原子序数Z，能量E等参数排列，从中找出规律性—经验公式。用系统学公式可以计算出靶核的反应截面或其它参数，尽快计算结果偏差较大些，但仍是核数据研究中必不可少的一种手段。这因为它具有简单、直观等特点。以(n, 2n)反应系统学为例，Pearlstein^[14]从复合核统计理论出发得到 $\sigma_{n,2n}$ 与总的中子发射截面 $\sigma_{n,M}$ 之比为：

$$\frac{\sigma_{n,2n}}{\sigma_{n,M}} = \frac{\int_0^{E_n - S_n} \varepsilon \sigma_c(\varepsilon) \exp[4a(E_n - \varepsilon)]^{1/2} d\varepsilon}{\int_0^{E_n} \varepsilon \sigma_c(\varepsilon) \exp[4a(E_n - \varepsilon)]^{1/2} d\varepsilon} \dots \quad (5)$$

另外，从系统学研究可得到下述经验公式：

$$\sigma_{n,M}/\sigma_{n,e} = 1 - k \exp \left[-m \frac{N-Z}{A} \right] \dots \quad (6)$$

于是(n, 2n)反应截面的系统学计算可表示成如下形式：

$$\sigma_{n,2n} = \sigma_{n,e} \cdot \left(\frac{\sigma_{n,M}}{\sigma_{n,e}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{n,2n}}{\sigma_{n,M}} \right) \dots \quad (7)$$

类似的方法也可以求得(n, 3n)，(n, p)，(n,t)和(n,α)等的系统学计算公式^[15]。

四、存在的问题及解决办法

核数据研究中目前存在的主要问题是：

1. 8—13MeV的数据长期缺乏。原因是中子源本身及测量技术的限制。如 $E_n < 100$ KeV，加速器中子源很不理想，致使测量数

表3 中子源简况

核 反 应	入射能区 (MeV)	中子能区 (MeV)	备 注
${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$	1.92—2.3	0.12—0.6	
$\text{T}(p,n){}^3\text{He}$	1.25—10	0.3—0.9	$E_p \geq 8.35\text{MeV}$ 有 $\text{T}(p,np)\text{D}$ 本底中子
$\text{D}(d,n){}^3\text{He}$	0.1—5	2.4—8.2	$E_d \geq 4.45\text{MeV}$ 有 $\text{D}(d,np)\text{D}$ 本底中子
$\text{T}(d,n){}^4\text{He}$	0.1—4	14—21	$E_d \geq 3.71\text{MeV}$ 有 $\text{T}(d,np)\text{T}$ 本底中子
$\text{H}(t,n){}^3\text{He}$	3.06—25	0.575—18	$E_t \geq 25.03\text{MeV}$ 有 $\text{H}(t,np)\text{D}$ 本底中子

据不多, $\text{D}(d,n)$, $\text{T}(d,n)$ 中子源在其能区范围内由于三体反应存在使中子单色性很差(见表3), 致使这些能点数据长期空缺。

2. 短寿命测量数据长期缺乏。主要原因是样品制备困难, 测量难度较高。

3. 一些核的数据精度不高, 各家分歧较大。主要反映在 $(n, 2n)$ 反应激发曲线的测量中, 有的甚至相差3倍左右。

4. 一些测量有困难的数据长期缺乏。主要指不能用活化法测量的 (n, x) 反应, 根本原因在于 (n, x) 反应截面很小(几 mb —几十 mb), 本底又大。

可能解决的办法:

1. 8—13 MeV 缺能区数据的填补:

①采用大液体闪烁技术双脉冲调制的方法, 可有效扣除三体反应次级中子影响, 扩展能区到15 MeV ^[6]。

②采用超低本底, 高分辨率快中子谱仪可以测量6—15 MeV 散射截面, 误差 $\sim 5\%$ ^[16]。

③采用一些特定实验技术及仔细的误差分析及修正可扩展能区到15 MeV ^[1]。

④采用粒子分辨技术, 伴随粒子法可从实验中扣除三体反应中子的影响^[17]。

⑤使用 $\text{H}(t,n){}^3\text{He}$ 中子源可直接获得8—18 MeV 能区的单色中子。

2. 扩展能区, 提高精度: 电子直线加速器是产生连续谱的白光中子源, 从 KeV 一直延伸到 MeV 量级。配合飞行时间技术可达到降低本底, 提高分辨率, 提高测量精度的目的。如对 σ_t 可达 $\sim 1\%$ 。

3. 对反应截面很小 (mb 级) 的 (n, x) 反应除使用强流中子源外, 还必须用超低本底的实验测量技术。

参 考 文 献

1. D.G. Forst et al., Phys.Rev., C3, 576 (1971) .
2. W. P. Poczitz et al., Nucl.Sci.Eng., 78, 333 (1981) .
3. A. B. Smith et al., Phys. Rev., 168, 1344 (1968) .
4. F. D. Bayhurst et al., Phys.Rev., C12, 451 (1975) .
5. J. Seikai et al., Proc.Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, ANWERP, P414,6-10, Sep. (1982) .
6. 陈英等., Proc. of the Antwerp Conf.5, (1982) .
7. 卢涵林., 原子核物理, 4, 310 (1982) .
8. J. Frehut et al., 4th Conf. on Nuclear Cross Sections and Technology, Washington D. C., 2, 855, 3-7 March 1975.
9. L. E. Veaser et al., Phys.Rev., C16, 1792 (1977) .
10. J. Frehut et al., Nucl. Instr. Methods, 135, 511 (1976) .
11. 卢涵林等., 原子核物理, 3, 289 (1981). Proc. of the Antwerp Conf.5, P411(1982).
12. 卢涵林, 第四次全国核数据会议文集, 北京 (1983).
13. 核工业部中国核数据中心, 中国核数据库第一版 (CENDL-1) (1983).
14. S. Pearlstein, Nucl. Sci. Eng., 23, 238 (1965). J. Nucl. Energy, 27, 81(1973).
15. S. M. Qaim et al., J. Inorg. Nucl. Chem., 35, 19 (1973). Nucl. Phys., A283, 269 (1977).
16. D. W. Glasgaw et al., Nuclear Cross-Sections and Technology, 1, 99 (1975).
17. C. W. Bartle et al., Nucl. Instr. Methods, 144, 437 (1977).