

# 基于 CSNS Back-n 的天然锂中子全截面测量\*

张江林<sup>1)2)3)</sup> 姜炳<sup>1)2)3)</sup> 陈永浩<sup>4)5)</sup> 郭子安<sup>1)2)3)</sup> 王小鹤<sup>1)2)</sup>

蒋伟<sup>4)5)</sup> 易晗<sup>4)5)</sup> 韩建龙<sup>1)2)3)†</sup> 胡继峰<sup>1)2)†</sup> 唐靖宇<sup>4)5)</sup>

陈金根<sup>1)2)3)</sup> 蔡翔舟<sup>1)2)3)</sup>

1) (中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

2) (中国科学院先进核能创新研究院, 上海 201800)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

4) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

5) (散裂中子源科学中心, 东莞 523803)

## 摘要

锂是熔盐堆燃料载体盐的主要材料之一, 其中子核反应截面数据是熔盐堆芯中子物理设计及堆芯长期安全运行中的重要基础数据。本工作基于中国散裂中子源反角白光中子束线 (CSNS Back-n) 飞行时间谱仪, 利用中子全截面测量谱仪 (NTOX), 采用透射法测量了天然锂中子全截面。实验中, 中子飞行距离约为 76.0 m, 采用 15.0 mm 和 8.00 mm 两种厚度的天然锂金属样品, 在 0.4 eV~20 MeV 中子能量范围内测得了统计计数较好的中子总截面。特别是在 keV 及以下能区增补了实验数据, 为锂的核数据评价工作提供了更加丰富和可靠的实验数据。在此基础上, 采用  $1/v$  律和 R 矩阵理论对 MeV 以下能区的新测量数据进行了理论分析, 获得了  $^7\text{Li}$  和  $^6\text{Li}$  在 260 keV 能量附近的中子共振参数。

**关键词:** 中子全截面, 天然锂, CSNS, Back-n

**PACS:** 13.85.Lg, 29.25.Dz, 28.20.-v, 01.52.+r

**\*基金:** 中国科学院战略性先导科技专项资助项目 (批准号: XDA02010000); 中国科学院前沿科学重点研究项目资助 (批准号: QYZDY-SSW-JSC016); 国家自然科学基金重大项目 (批准号: 11790321)

† 通讯作者. E-mail: hanjianlong@sinap.ac.cn

† 通讯作者. E-mail: hujifeng@sinap.ac.cn

第一作者. E-mail: zhangjianglin@sinap.ac.cn

# 1 引言

中子全截面是中子核反应数据库的重要组成部分。在核能领域，精确的核数据是核反应堆物理设计的基础。熔盐堆作为六种第四代核能系统的候选堆型之一，多国都在开展相关技术研究，我国的熔盐堆物理研究和技术研发能力位于世界前列<sup>[1]</sup>。熔盐堆的 FLiBe 熔盐燃料中含有大量的锂。另外，聚变堆中也使用锂来生产聚变所需的氚<sup>[2]</sup>。因此，锂的中子核数据在核工程物理设计中具有重要作用。

天然锂中含  ${}^6\text{Li}$  和  ${}^7\text{Li}$  两种同位素，其对应丰度分别为 7.5% 和 92.5%。由于  ${}^6\text{Li}$  的热中子吸收截面非常大，在熔盐堆中，为了降低  ${}^6\text{Li}$  对中子的吸收，提高堆芯中子经济性，需要使用富集锂，所用锂的  ${}^7\text{Li}$  丰度一般在 99.9% 以上。在钍基熔盐堆中，裂变释放的中子能量在 MeV 能区，中子经过慢化后达到热中子能区。除了堆芯石墨等慢化剂外，熔盐中的 Li 等轻核素在 MeV 及以下能区的中子散射反应也起到一定的中子慢化作用。另外， ${}^7\text{Li}$  的中子吸收反应也会影响  ${}^7\text{Li}$  在堆芯内的燃耗和动态平衡。胡继峰等<sup>[3,4]</sup>利用 SCALE 程序对钍增殖熔盐堆不同燃耗时期核数据引起的  $k_{\text{eff}}$  不确定度进行了分析。结果表明，随着燃耗的增加，核数据引起的  $k_{\text{eff}}$  不确定度由 0.49% 增大到 0.55%，其中 Li 中子截面数据的影响较大。在氘氚聚变堆中，聚变产生的中子能量约 14 MeV，这些中子与产氚层中的锂反应，生产聚变所需的氚<sup>[2]</sup>。高能中子与 Li 反应，打开了更多的反应道<sup>[2]</sup>，其关系到聚变堆中氚的消耗与生产自持<sup>[2]</sup>。测量高能中子与 Li 反应的总截面，可以为聚变堆产氚层的物理设计提供基础实验数据。

针对天然锂和  ${}^7\text{Li}$  的中子反应数据，从上世纪三十年代就开展了实验测量。采用的中子源主要是基于  ${}^7\text{Li}(\text{p}, \text{n})$ 、 ${}^9\text{Be}(\alpha, \text{n})$ 、 ${}^{13}\text{C}(\alpha, \text{n})$ 、 $\text{T}(\text{p}, \text{n}){}^3\text{He}$  等核反应的单能中子源，实验数据集中在快中子能区，而慢中子能区的天然锂中子全截面数据相对较少。在 EXFOR (Experimental nuclear reaction data) 实验数据库<sup>[5]</sup>中收录的

天然锂慢中子能区实验数据有三家,分别是 1935 年 Dunning 等人<sup>[6]</sup>基于 Rn-Be 放射性中子源测量的天然锂 0.025 eV 的中子全截面; 1946 年 Havens 等人<sup>[7]</sup>基于哥伦比亚大学回旋加速器中子谱仪测量的 0.0169 ~60.5 eV LiF 样品中子全截面; 1950 年 Hibdon<sup>[8]</sup>等人基于 Argonne 重水反应堆中子源测量的天然锂 120 eV 和 345 eV 的中子全截面。但是 Dunning 等人和 Havens 等人的测量结果在热中子能区相差约 57%。EXFOR 中收录的 <sup>7</sup>Li 全截面实验数据集中在 keV 以上能区, keV 以下能区实验数据缺少。在 keV 以上能区,实验数据与评价数据最大相差约 50 %。已有实验数据不能满足第四代核能系统对核数据精度的要求,需开展宽能区锂的中子全截面测量。

本工作基于中国散裂中子源反角白光中子束线(CSNS Back-n)<sup>[9-12]</sup>,利用中子全截面测量谱仪(NTOX)<sup>[13]</sup>,使用透射法在较宽的中子能量范围内测量了天然锂中子全截面。在实验数据基础上,对 0.1 MeV 以下能区和 260 keV 能量附近的共振反应分别采用 1/ $\nu$  律和 R 矩阵理论进行了理论分析。

## 2 实验测量

### 2.1 全截面测量方法

中子全截面测量一般采用透射法。这种方法是相对测量,不需要刻度探测器的绝对中子探测效率,测量精度相对较高。实验中需分别记录有靶(被测靶样品位于中子束流线上)与空靶时探测器测得的不同能量的中子计数。在离线数据分析时,将有靶、空靶数据分别扣除本底计数,并采用监测探测器进行计数归一,消除测量时间内束流“晃动”所带来的系统误差,然后做比值即获得被测样品的中子透射率 $T(E_i)$ ,如式(1)所示; $T(E_i)$ 与中子全截面之间的关系如式(2)所示:

$$T(E_i) = \frac{(N_I(E_i) - B_I(E_i))/M_I(E_i)}{(N_O(E_i) - B_O(E_i))/M_O(E_i)} \quad (1)$$

$$\sigma(E_i) = -\frac{1}{Nd} \ln T(E_i) \quad (2)$$

式(1)、(2)中： $E_i$ 为中子能量，其中下标*i*表示第*i*个能群； $T(E_i)$ 为中子透射率； $N_I(E_i)$ 和 $N_O(E_i)$ 为有靶、空靶时探测器中子计数； $B_I(E_i)$ 和 $B_O(E_i)$ 为有靶、空靶时探测器本底计数； $M_I(E_i)$ 和 $M_O(E_i)$ 为有靶、空靶时监测探测器的计数； $N$ 为单位体积内的靶核数； $d$ 为样品靶厚度； $\sigma(E_i)$ 为所测样品的中子全截面。

在CSNS Back-n上，中子能量采用飞行时间法测量。测量时以质子束团信号作为数据获取系统的起始触发信号，质子束团打靶产生的中子飞行一段距离后被中子探测器所记录，探测器的输出信号作为中子飞行的终止信号。中子能量与中子飞行时间和中子飞行距离之间的关系如式(3)、(4)所示：

$$E_n = m_n c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta_n^2}} - 1 \right); \quad \beta_n = \frac{v_n}{c} = \frac{L}{c \cdot ToF} \quad (3)$$

$$E_n = \frac{1}{2} m_n v_n^2 = (72.3 \times \frac{L}{ToF - t_0}) \quad (4)$$

式(3)、(4)中： $E_n$ 为中子能量； $m_n$ 为中子质量； $L$ 为中子等效飞行距离； $c$ 为光速； $ToF$ 表示中子飞行时间； $v_n$ 为中子飞行速度； $t_0$ 为自由参数，表示中子飞行的相对零时刻。式(3)考虑了相对论效应，一般用于高能中子，式(4)则可用于无需考虑相对论效应的低能中子。公式(3)、(4)中的参数根据实际计算需要，分别取不同的量纲。

## 2.2 实验装置及探测系统

CSNS质子束流的平均打靶功率为100 kW，束流频率为25 Hz，中子产额约 $2 \times 10^{16}$  /s<sup>[12]</sup>，可提供0.4 eV~200 MeV的连续能量中子。CSNS Back-n在距离中子靶站55.0 m和76.0 m处有两个实验大厅，即实验厅-1 (ES#1) 和实验厅-2 (ES#2)<sup>[14]</sup>。本次实验测量的实验布局如图1所示，ES#1用于放置待测样品，ES#2用于放

置探测器。

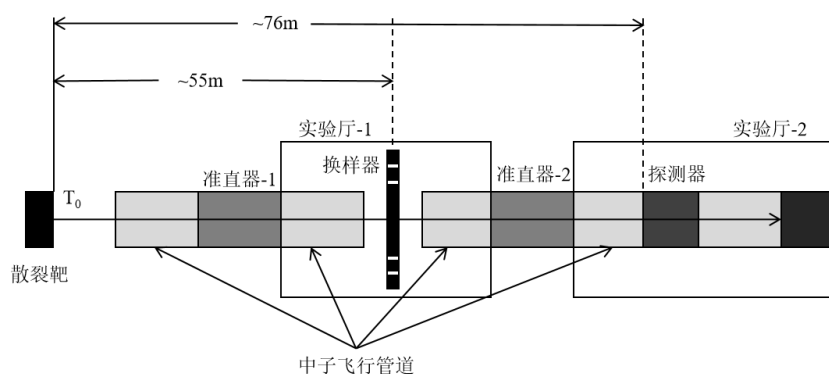


图 1 实验布局示意图

Fig. 1. Schematic drawing of the layout of the measurement

CSNS质子加速器有单束团和双束团两种工作模式。对于双束团模式，在100 kW运行功率下单个束团的半高宽约为60 ns，两个束团时间间隔为410 ns<sup>[15]</sup>。本次实验测量中，质子束流为双束团模式，质子平均打靶功率为100 kW。实验共开展测量225小时。

本次实验测量所用的NTOX谱仪的中子探测器是多层快裂变电离室<sup>[14]</sup>。谱仪的换样装置安装于ES#1，可远程控制换样或进行有靶、空靶切换。多层快裂变电离室布置在ES#2，提供中子飞行的终止信号。

多层快裂变电离室主体结构主要包括高纯度裂变层阵列、前后中子窗和圆桶腔体<sup>[14]</sup>。其探测中子的基本原理是利用中子与镀层裂变材料发生裂变反应产生裂变碎片，引起裂变室工作气体发生电离，从而输出有效的中子信号。在多层快裂变电离室中分别布置了2层<sup>235</sup>U, 3层<sup>232</sup>Th以及2层<sup>238</sup>U, 电离室时间分辨好于35 ns。信号收集极通过前置放大器与数据获取系统（DAQ）相连。质子束流触发信号，直接输入DAQ，作为系统的起始触发信号<sup>[13]</sup>。

### 2.3 样品

本实验测量采用的是高纯度天然锂样品。为了在较宽的能区内获得较好的统

计测量计数，制作了厚度为8.00 mm和15.0 mm两块样品，直径均为50.0 mm。实验测量时，样品安装在换样器上（见图1）。为避免天然锂样品在空气中被氧化，在样品外包裹一层Al膜。为了扣除Al膜的影响，用同厚度的Al膜作为“空靶”开展测量。两块样品靶测量的时间分别为90小时（15.0 mm靶）、49小时（8.00 mm靶）。空靶测量63小时。

### 3 实验数据分析

在进行数据分析时，需开展探测器本底信号扣除、中子飞行距离及中子能量刻度，最终得到全截面实验数据。

#### 3.1 探测器本底信号扣除

NTOX多层快裂变电离室的本底信号主要有裂变层衰变产生的 $\alpha$ 本底、电子学噪声、束内 $\gamma$ 本底和环境 neutron 本底等。通过对比空靶中子束流，停机无束流（ $\alpha$ 和电子学噪声信号测量，共23小时）条件下探测器输出信号，对各个探测单元层进行信号幅度统计可以得到时间-幅度二维谱，如图2所示。基于时间-幅度二维谱，通过设置不同的幅度甄别阈值（七层裂变层从220~280不等）扣除本底信号。

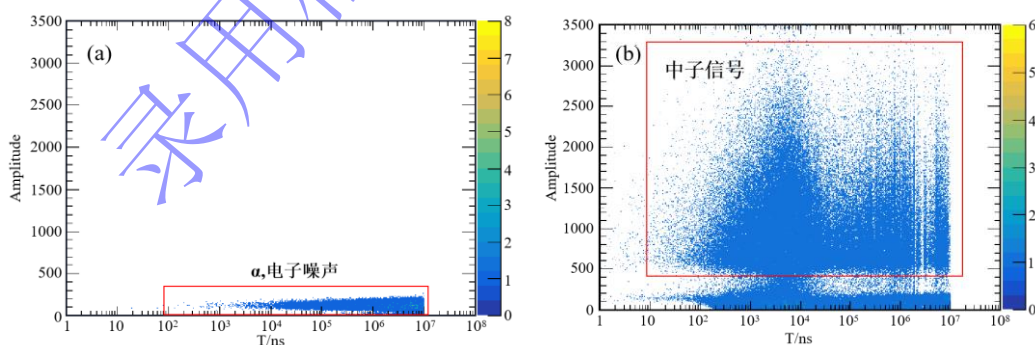


图2 第一层  $^{235}\text{U}$  裂变层时间-幅度二维谱 (a) 无束流空靶; (b) 有束流空靶

Fig. 2. Amplitude-energy distribution in the first  $^{235}\text{U}$  cell:

(a) Empty target without beam; (b) Empty target with beam

#### 3.2 中子飞行时间及中子能谱

CSNS质子束团打散裂靶的瞬间会产生大量的 $\gamma$ 射线，即 $\gamma$ -flash。 $\gamma$ 射线将以光速传输到多层快裂变电离室。因此可使用裂变电离室测得 $\gamma$ -flash的时间计算式(3)、(4)中的中子飞行时间 $ToF$ ，表达式如下：

$$ToF = T_{ff} - T_{\gamma\text{-flash}} = T_{ff} - T_{\gamma} + ToF_{\gamma} \quad (5)$$

式中， $T_{ff}$ 为多层快裂变电离室探测到中子的时间； $T_{\gamma\text{-flash}}$ 表示 $\gamma$ -flash的起飞时间； $T_{\gamma}$ 为多层快裂变电离室探测到 $\gamma$ -flash的时间； $ToF_{\gamma}$ 为 $\gamma$ -flash的飞行时间， $ToF_{\gamma} = L'/c$ ， $c$ 为光速， $L'$ 为 $\gamma$ 的飞行距离，这里取 $L' = 76.0$  m。对于高能中子，其起飞位置及慢化过程所带来的中子飞行时间起始时刻的变化较小<sup>[16]</sup>，式(5)算得的 $ToF$ 可直接代入式(3)，用于计算中子能量。对于能量较低的中子，慢化过程所带来的飞行时间起始时刻的变化较大<sup>[16]</sup>，需要进行修正，将式(5)算得的 $ToF$ 代入式(4)，并利用“标准共振吸收峰”刻度中子能量。

实验数据分析时，在每个质子束团打靶周期内，按时间顺序提取 $\gamma$ -flash信号和有效的中子信号，如图3所示。其中，一个 $\gamma$ -flash信号一般会跟随多个中子信号。提取 $\gamma$ -flash信号的时间 $T_{\gamma}$ ，同时分别提取探测器探测到每个中子的时间 $T_{ff}$ ，根据式(5)即可计算出每一个中子对应的 $ToF$ 。分别利用式(3)（MeV以上能区）、(4)（MeV以下能区）即可将中子飞行时间谱转换为中子能谱。

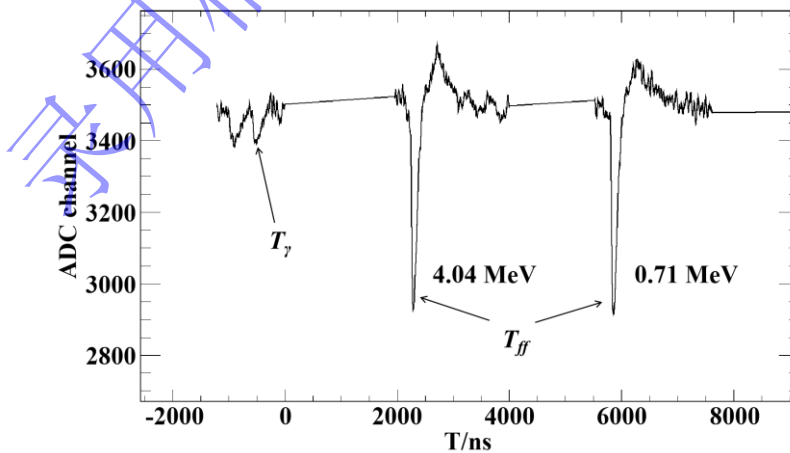


图3 裂变室输出的时间信号示例

Fig. 3. Signal of flight time in the fission chamber

对于MeV以下能区，实验中采用多层裂变室第一层 $^{235}\text{U}$ 在8.77 eV，12.40 eV和19.30 eV<sup>[17]</sup>位置的三个共振裂变峰，结合式（4）来刻度中子的能量。通过高斯拟合分别得到三个共振峰对应的 $T_{ff}$ ，如图4、表1所示。使用公式（4）拟合表1所列数据得到 $L=77.64\text{ m}$ ， $t_0=-1.69\mu\text{s}$ 。由于裂变电离室每层裂变层间隔19.0 mm，所以后端裂变层所对应的飞行距离依次增加19.0 mm。

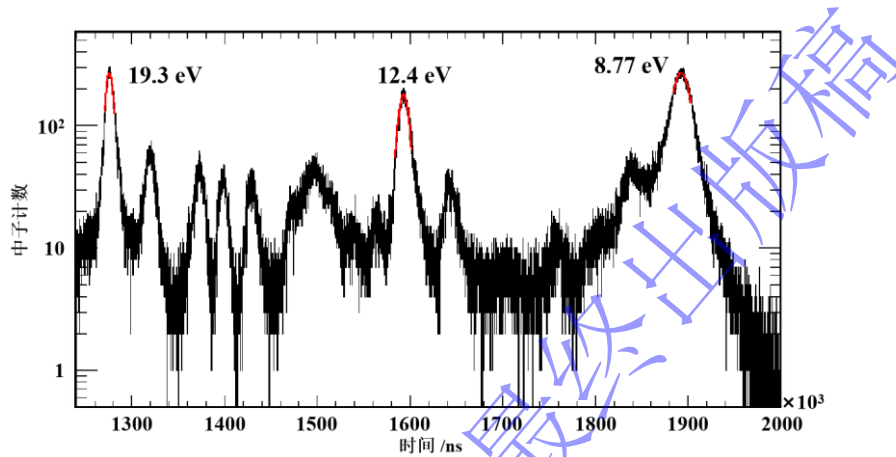


图 4 裂变层第一层  $^{235}\text{U}$  共振裂变峰的高斯拟合

Fig. 4. Gaussian fit of the resonance peaks in the first  $^{235}\text{U}$  cell

表 1 裂变层第一层  $^{235}\text{U}$  共振峰高斯拟合峰值结果

Table 1. Parameters of the Gaussian fit of the resonance peaks of the first  $^{235}\text{U}$

共振峰	裂变峰中心值对应的 信号输出时间*/ns	$ToF/\text{ns}$
8.77 eV	$1892730 \pm 34$	1893569
12.40 eV	$1592672 \pm 56$	1593511
19.3 eV	$1276160 \pm 46$	1276999

\*对应的误差为高斯拟合的误差，即标准差。

实验测量中，使用一套在线 $^6\text{Li-Si}$ 探测器监测中子束流。 $^6\text{Li-Si}$ 探测器安装于ES#1位于被测样品上游，可实时记录中子束流的相对强度，用于归一化多层裂变电离室测量的中子能谱。即用裂变室测得的空靶、有靶计数分别除以空靶、有靶

时<sup>6</sup>Li-Si监测探测器的积分计数。归一化后的中子能谱如图5所示。

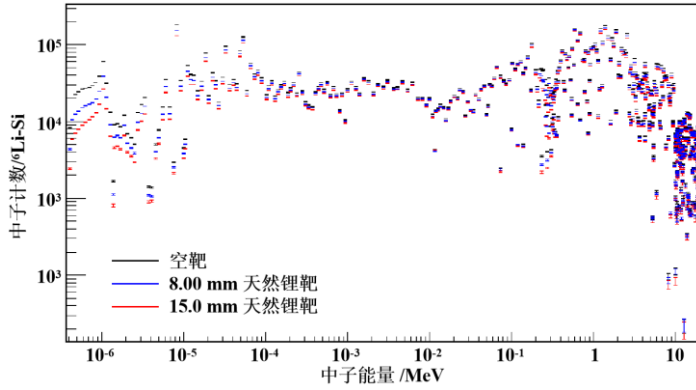


图 5 裂变室测得的归一后的中子能谱

Fig. 5. Normalized neutron energy spectrum measured by the fission chamber

### 3.3 全截面计算

基于图（5）所示数据即可计算中子透射率。中子透射率计算公式如式（1）所示。本实验中，由于采用了多层裂变室探测器，式（1）变为式（6），即将所有裂变层测量到的相同能量的中子计数相加，其中本底计数已在计算中子飞行时间谱时扣除。

$$T(E_i) = \frac{(N_I(E_i)_{51} + N_I(E_i)_{52} + N_I(E_i)_{21} + N_I(E_i)_{22} + N_I(E_i)_{23} + N_I(E_i)_{81} + N_I(E_i)_{82})/M_I}{(N_O(E_i)_{51} + N_O(E_i)_{52} + N_O(E_i)_{21} + N_O(E_i)_{22} + N_O(E_i)_{23} + N_O(E_i)_{81} + N_O(E_i)_{82})/M_O} \quad (6)$$

式中： $N_I(E_i)_{51}$ 、 $N_I(E_i)_{52}$ 、 $N_O(E_i)_{51}$ 、 $N_O(E_i)_{52}$ 是<sup>235</sup>U-1和<sup>235</sup>U-2（-1、-2分别表示第1层、第2层<sup>235</sup>U裂变层）有靶、空靶中子计数； $N_I(E_i)_{21}$ 、 $N_I(E_i)_{22}$ 、 $N_I(E_i)_{23}$ 、 $N_O(E_i)_{21}$ 、 $N_O(E_i)_{22}$ 、 $N_O(E_i)_{23}$ 为<sup>232</sup>Th-1、<sup>232</sup>Th-2和<sup>232</sup>Th-3（-1、-2、-3分别表示第1层、第2层、第3层<sup>232</sup>Th）有靶、空靶中子计数； $N_I(E_i)_{81}$ 、 $N_I(E_i)_{82}$ 、 $N_O(E_i)_{81}$ 、 $N_O(E_i)_{82}$ 为<sup>238</sup>U-1和<sup>238</sup>U-2（-1、-2分别表示第1层、第2层<sup>238</sup>U裂变层）有靶、空靶中子计数； $M_I$ 和 $M_O$ 是<sup>6</sup>Li-Si监测探测器有靶、空靶中子计数。

将图5所示数据转为透射率后的结果如图6所示。再使用公式（2）即可得到天然锂全截面数据，如图7所示。由图7可见，本实验测量结果与IRDFF（International

Reactor Dosimetry and Fusion File) [18] 评价数据库中的数据基本一致。在1 keV以下能区本实验所测数据质量较高, 丰富了该能区的实验数据。

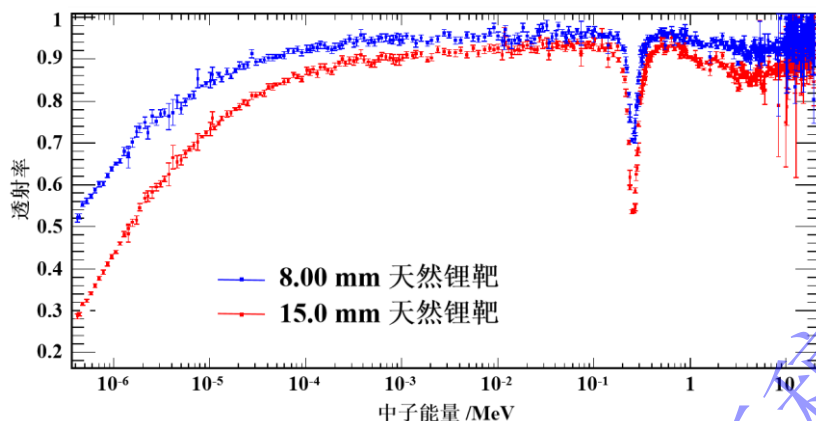


图 6 测得的天然锂样品的中子透射率

Fig. 6. Measured transmission of the natural lithium samples

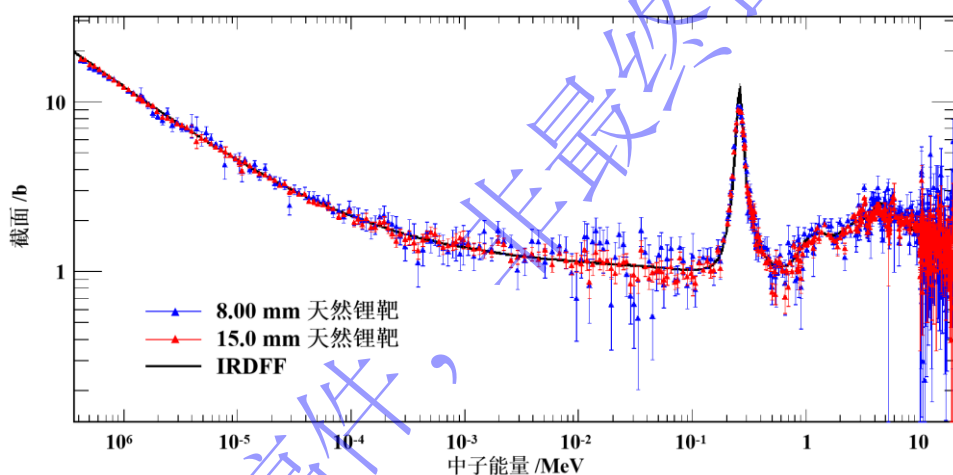


图 7 实验测得的天然锂中子全截面数据与 IRDFF 评价数据库中的数据

Fig. 7. The measured neutron total cross section of the natural lithium and the data from IRDFF

图6中, 横轴所示中子能量的能群结构, 采用ENDF (Evaluated Neutron Data File) [19] 数据库中 $^7\text{Li}$ 中子总截面评价数据对应的能群结构, 所示透射率的不确定度来自对应能群中子的统计误差。由于裂变电离室对低能中子的探测器效率较高, 对高能中子的探测效率较低。因此, 高能区每个能群内的中子统计计数较低, 对应不确定度相对较大, 而低能区相对较小。在MeV以下能区, 不同能群的的相对不确定度介于0.34%~3.94%之间, 在MeV以上能区介于0.34%~6.47%之间。

依据公式（2），全截面数据的相对不确定度主要来自于样品厚度和透射率的不确定度，可通过公式（7）计算得到：

$$\frac{S_{\sigma(E_i)}}{\sigma(E_i)} = \sqrt{RSD_d^2 + \left[ \frac{1}{\ln(N_I(E_i)M_o) - \ln(N_o(E_i)M_I)} \right]^2 \left( \frac{1}{N_I(E_i)} + \frac{1}{N_o(E_i)} \right)} \quad (7)$$

式中 $N_I(E_i)$ 、 $N_o(E_i)$ 为有靶、空靶所有裂变层的中子总计数； $RSD_d$ 表示靶厚的相对标准偏差。计算得到不同中子能群的全截面相对不确定度在MeV以下能区介于0.89%~22.5%之间，在MeV以上能区介于2.47%~35.4%之间。在keV以下能区，全截面的相对不确定度好于8.81%。

#### 4 理论分析

在0.1 MeV以下能区，天然锂中 $^7\text{Li}$ 和 $^6\text{Li}$ 存在的反应道主要为 $^7\text{Li}(n,\text{el})$ 、 $^7\text{Li}(n,\gamma)$ 、 $^6\text{Li}(n,\text{el})$ 、 $^6\text{Li}(n,\text{T})$ 、 $^6\text{Li}(n,\gamma)$ 。其中 $^7\text{Li}(n,\text{el})$ 和 $^6\text{Li}(n,\text{el})$ 近似为常数； $^6\text{Li}(n,\text{T})$ ， $^6\text{Li}(n,\gamma)$ ， $^7\text{Li}(n,\gamma)$ 服从 $1/v$ 律<sup>[19]</sup>；采用 $1/v$ 律对实验数据进行拟合，拟合的结果如式8、图8所示：

$$\sigma_t = 1.0 + 11.2(E)^{-1/2} \text{ barn.} \quad (8)$$

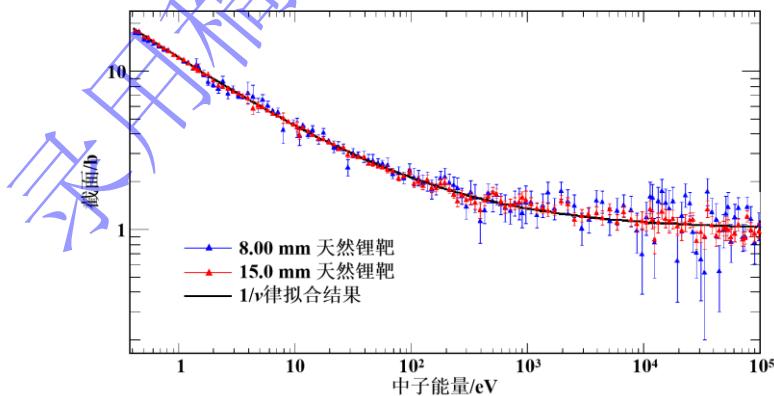


图 8  $1/v$  律拟合天然锂在 0.4 eV~0.1 MeV 中子能区全截面测量结果

Fig. 8. Fitting results of the measured neutron total cross section of the natural lithium

with  $1/v$  law in the energy range of neutron from 0.4 eV to 0.1 MeV

在0.1 MeV以上能区， $^6\text{Li}$ 和 $^7\text{Li}$ 的中子全截面在260 keV附近均存在一个明显

的共振峰。 ${}^7\text{Li}(n,\text{tot})$ 在260 keV附近的共振峰与 ${}^8\text{Li}$ 自旋宇称为 $J^\pi = 3^+$ 的2.55 MeV激发能级相关<sup>[2, 20]</sup>； ${}^6\text{Li}(n,\text{tot})$ 在255 keV附近的共振峰与 ${}^7\text{Li}$ 自旋宇称为 $J^\pi = \frac{5}{2}^-$ 的7.48 MeV的激发能级相关<sup>[2, 21]</sup>。

采用R矩阵理论对该能区实验数据进行分析。在对共振峰进行分析的过程中，须考虑实验条件的修正，主要包括温度多普勒效应、实验仪器的中子能量分辨率、样品自身多重散射效应等因素对共振峰的展宽。采用蒙特卡洛方法对样品多重散射效应进行模拟，结果显示其影响相对较小。实际计算中，温度多普勒效应采用标准的自由气体模型展宽。实验仪器的中子能量分辨率函数采用RPI（RPI resolution function）分辨率函数形式<sup>[16, 22]</sup>。对中子透射谱的分析结果如图9所示，所得共振参数列于表2。表2中同时列出了部分前人文献中的结果。

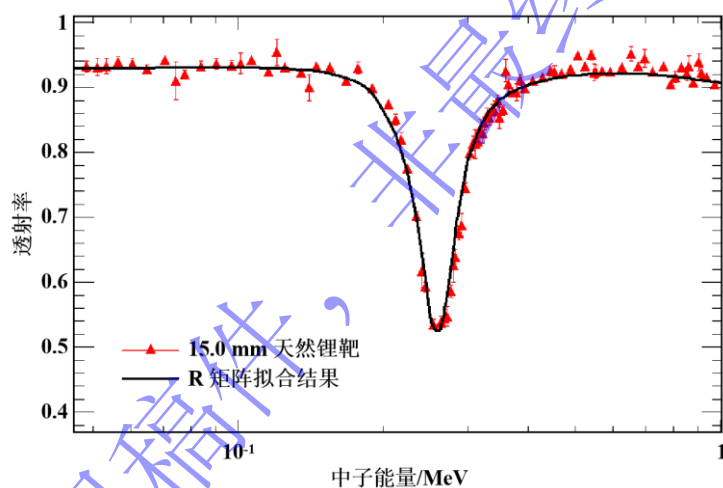


图9 R 矩阵理论拟合 15.0 mm 样品靶中子透射率结果

Fig. 9. R-matrix analysis of the measured transmission of 15.0 mm natural lithium sample

表 2 Li 同位素中子核反应共振参数

Table 2. Resonance parameters of neutron reaction for  ${}^7\text{Li}$  and  ${}^6\text{Li}$ .

Isotope	$J^\pi$	$\ell$	Reference	$E_{\text{res}}/\text{keV}$	$\Gamma_\gamma/\text{eV}$	$\Gamma_n/\text{eV}$	$\Gamma_a/\text{eV}$
${}^7\text{Li}$	$3^+$	1	Ajzenberg-Selove (1974) <sup>[23]</sup>	261.2	$0.07\pm 0.03$	36.5	--
			D.R.Tilley(2004) <sup>[24]</sup>	$254\pm 3$	$0.07\pm 0.03$	$31\pm 7$	--
			TENDL(2014) <sup>[25]</sup>	259	0.12	32	--
			本工作	261.56	0.07	34.44	--
			Willaid(1956) <sup>[26]</sup>	255	--	82	43
${}^6\text{Li}$	$\frac{5^-}{2}$	1	D.R.Tilley(2002) <sup>[27]</sup>	262	--	118	36
			TENDL(2014) <sup>[25]</sup>	254	--	92	--
			本工作	255.50	--	110.30	31.53

## 5 总结

本工作采用透射法, 基于中国散裂中子源反角白光中子束线 (CSNS Back-n) 飞行时间谱仪, 利用  ${}^{235}\text{U}$ 、 ${}^{238}\text{U}$ 、 ${}^{232}\text{Th}$  多层快裂变电离室和  ${}^6\text{Li}$ -Si 束流监测探测器测量了天然锂 0.4 eV~20 MeV 能区中子全截面。对实验数据进行离线数据处理, 扣除实验本底、计算中子飞行时间、刻度中子能量、得到了中子全截面。所测截面数据与 IRDFF 库评价数据基本一致。在 keV 以下能区数据质量较高, 该能区全截面相对不确定度小于 8.81%, 增补了该能区的实验数据, 为锂的中子核数据评价提供了更加丰富的实验数据。在此基础上, 分别采用  $1/v$  律和 R 矩阵理论对 0.1 MeV 以下能区和 0.4 MeV~1 MeV 能区的实验数据进行了理论分析, 结果与实验数据符合, 并获得了  ${}^7\text{Li}$  和  ${}^6\text{Li}$  在 260 keV 附近的中子共振参数。

感谢中国散裂中子源 Back-n 工作人员的辛苦工作和技术支持。

## 参考文献

- [1] Jiang M H, Xu H J, Dai Z M 2012 *Bull. Chin. Acad. Sci.* **27** 366 (in Chinese) [江绵恒, 徐洪杰, 戴志敏 2012 中国科学院院刊 **27** 366]
- [2] Egorov M V 2019 *Nucl. Phys. A* **986** 175
- [3] Hu J F, Yu C G, Zou C Y, Cai X Z, Han J L, Chen J G 2017 *J. Atom. Ener.* **51** 2013 (in Chinese) [胡继峰, 余呈刚, 邹春燕, 蔡翔舟, 韩建龙, 陈金根 2017 原子能科学技术 **51** 2013]
- [4] Hu J F, Wang X H, Li W J, Li X X, Han J L 2019 *J. Nucl. Tech.* **42** 030601 (in Chinese) [胡继峰, 王小鹤, 李文江, 李晓晓, 韩建龙 2019 核技术 **42** 030601]
- [5] Otuka N, Dupont E, Semkova V, Pritychenko B, Blokhin A I, et al. 2014 *Nucl. Data Sheets* **120** 272
- [6] Dunning J R, Pegram G B, Fink G A, Mitchell D P 1935 *Phys. Rev.* **48** 265
- [7] Havens W W, Rainwater J 1946 *Phys. Rev.* **70** 154
- [8] Hibdon C T 1950 *Phys. Rev.* **79** 747
- [9] Jing H T, Tang J Y, Tang H Q, Xia H H, Liang T J, Zhou Z Y, Zhong Q P, Ruan X C 2010 *Nucl. Instr. Meth. A* **621** 91
- [10] Chen H S, Wang X L 2016 *Nat. Mater.* **15** 689
- [11] An Q, Bai H Y, Bao J, et al. 2017 *J. Instr.* **12** 07022
- [12] Tang J Y, Jing H T, Xia H H, Tang H Q, Zhang C, Zhou Z Y, Ruan X C, Zhang Q W, Yang Z 2013 *J. Atom. Ener.* **47** 1089 (in Chinese) [唐靖宇, 敬罕涛, 夏海鸿, 唐洪庆, 张闯, 周祖英, 阮锡超, 张奇玮, 杨征 2013 原子能科学技术 **47** 1089]
- [13] Liu X Y, Yang Y W, Liu R, et al. 2019 *Nucl. Sci. Tech.* **30** 139
- [14] Bao J, Chen Y H, Zhang X P, Luan G Y, Ren J, Wang Q, et al. 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 38 (in Chinese) [鲍杰, 陈永浩, 张显彭, 栾广源, 任杰, 王奇, 等. 2019 物理学报 **68** 38]
- [15] Yi H, Wang T F, Li Y, et al. 2020 *J. Instr.* **15** 03026
- [16] Jiang B, Han L J, Jiang W, Hu J F, Wang X H, Chen J G, Cai X Z 2021 *Nucl. Instr. Meth. A* **1013** 165677
- [17] Reich C W, Moore M S 1958 *Phys. Rev.* **111** 929
- [18] Trkov A, Griffin P J, Simakov S P, et al. 2020 *Nucl. Data Sheets* **163** 1
- [19] Brown D A, Chadwick M B, Capote R, et al. 2018 *Nucl. Data Sheets* **148** 1
- [20] Stelson P H, Preston W M 1951 *Phys. Rev.* **84** 162
- [21] Johnson C H, Willard H B, Bair J K 1954 *Phys. Rev.* **96** 985

- [22] Jiang B, Wang X H, Han J L, Hu J F, Chen J G, Cai X Z 2021 *J. Atom. Ener.* **55** 8 (in Chinese)  
[姜炳, 王小鹤, 韩建龙, 胡继峰, 陈金根, 蔡翔舟 2021 原子能科学技术 **55** 8]
- [23] Ajzenberg-Selove F, Lauritsen T 1974 *Nucl. Phys. A* **227** 1
- [24] Tilley D R, Kelley J H, Godwin J L, Millener D J, Purcell J E, Sheu C G, Weller H R 2004 *Nucl. Phys. A* **754** 155
- [25] Koning A J, Rochman D, Sublet J C, Dzysiuk N, Fleming M, Van der marck S 2019 *Nucl. Data Sheets* **155** 1
- [26] Willard H B, Bair J K, Kington J D, Cohn H O 1956 *Phys. Rev.* **101** 765
- [27] Tilley D R, Cheves C M, Godwin J L, Hale G M, Hofmann H M, Kelley J H, Sheu C G, Weller H R 2002 *Nucl. Phys. A* **708** 3

# Measurement of the Neutron Total Cross Section of Natural Lithium at the CSNS Back-n Facility\*

Zhang Jiang-Lin<sup>1)2)3)</sup> Jiang Bing<sup>1)2)3)</sup> Chen Yong-Hao<sup>4)5)</sup> Guo Zi-An<sup>1)2)3)</sup> Wang Xiao-He<sup>1)2)</sup>

Jiang Wei<sup>4)5)</sup> Yi Han<sup>4)5)</sup> Han Jian-Long<sup>1)2)3)†</sup> Hu Ji-Feng<sup>1)2)†</sup> Tang Jing-Yu<sup>4)5)</sup>

Chen Jin-Gen<sup>1)2)3)</sup> Cai Xiang-Zhou<sup>1)2)3)</sup>

1) (Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2) (Innovative Academy in TMSR Energy System, Chinese Academy of Sciences, Shanghai  
201800, China)

3) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

4) (Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

5) (Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China)

## Abstract

Lithium is one of the main materials of fuel carrier salt in molten salt reactors. Its neutron cross sections provide an important basic for physical design of molten salt reactor core and for evaluating the safety of the core during operation. The neutron total cross section of natural lithium samples with thicknesses of 8.00 mm and 15.0 mm was measured, respectively, in the energy region from 0.4 eV to 20 MeV by using a neutron total cross section spectrometer (NTOX) with transmission method at the Back-n white neutron source of China Spallation Neutron Source (CSNS Back-n) with a 76.0 m time-of-flight path. High quality experimental data were obtained, especially in the energy region of keV and below, which supplies a significative supplement of the data. It provides more abundant and

reliable experimental data for nuclear data evaluation of lithium. Additionally, a theoretical analysis was carried out under the guidance of  $1/\sqrt{E}$  law and the multilevel R-matrix theory. And the resonance parameters of  $n+{}^6,7\text{Li}$  reaction around energy of 260 keV were extracted from the measured data.

Keywords: Neutron total cross section, Natural Lithium, CSNS, Back-n

PACS: 13.85.Lg, 29.25.Dz, 28.20.-v, 01.52.+r

\* Project supported by the Chinese TMSR Strategic Pioneer Science and Technology Project (Grant No. XDA02010000), the Frontier Science Key Program of Chinese Academy of Sciences (Grant No. QYZDY-SSW-JSC016) and Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11790321).