

快中子在 Li 核上的弹性散射微分截面

张坤 曹建华 万代蓉 戴运生 吴小华

(四川大学原子核科学技术研究所 成都 610064)

1994-08-29 收稿

摘 要

用伴随粒子飞行时间法测量了 14.7 MeV 中子在 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li}$ 核上的弹性散射截面,并用蒙特卡罗方法对中子在样品中的通量衰减、多次散射作了修正。本文工作与他人工作以及理论数据作了比较。给出了截面的勒让德系数;截面实验点总误差在 10% 到 15% 之间,其中统计误差为 1%—5%。

关键词 快中子,弹性散射,微分截面。

1 引 言

快中子反应截面在聚变堆第一壁、包层结构和屏蔽材料的设计中具有十分重要的意义。 ${}^6\text{Li}(n,t)$ 和 ${}^7\text{Li}(n,n't)$ 反应的造氚过程可以使反应堆的氚消耗得到补偿; ${}^6\text{Li}, {}^7\text{Li}$ 的其它反应,如 $(n,n), (n,n'), (n,2n), (n,x), (n,\gamma)$ 等都是核加热的主要来源, ${}^6\text{Li}, {}^7\text{Li}$ 作为聚变堆主要增殖剂和冷却剂,研究它们的中子散射截面具有重要意义。 ${}^6\text{Li}, {}^7\text{Li}$ 是轻元素,目前的理论模型难以给出满意的结果,这就使通过实验测量其中子参数显得十分必要^[1-3]。弹性散射截面的准确测量是测好其非弹性反应的基础^[4]。

2 实验装置和测量方法

本文采用伴随粒子飞行时间法 (TOF) 测量中子反应截面。我们的实验由 $T(d,n)$ ${}^4\text{He}$ 反应提供初级中子。在 400kV 倍加器上,用平均能量为 250keV 氘束轰击氘靶,由 $T(d,n){}^4\text{He}$ 反应在 39.82° 出射角产生 14.7MeV 中子。伴随产生的 α 粒子用耦合在 56 AVP 光电倍增管上的 $50\mu\text{m}$ 厚的塑料闪烁体 α 探测器记录, α 探测器置于相对于入射氘束 135° 方向上,其闪烁体前有 $\varphi 10\text{mm}$ 和 $\varphi 15\text{mm}$ 两个限制立体角的光阑,中子探测器是 $\varphi 100\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的 ST451 液体闪烁体探测器。为了尽量降低本底,中子探测器置于 Li_2CO_3 和 Pb, Fe 组成的大屏蔽体中。在样品附近置放由铁砖和石蜡组成的影锥,用以遮挡直接束中子。关联束方向的苣晶体探测器用于检测关联束的漂移。样品离中子探测器的距离是 254cm,离靶 10cm。

样品做成圆柱形,其参数如下:

金属 Li 样品: $\phi 50\text{mm} \times 57.8\text{mm}$, 重 60g, 含 ${}^7\text{Li}$ 96%, ${}^6\text{Li}$ 4%;

浓缩 Li 样品: $\phi 49.6\text{mm} \times 56.4\text{mm}$, 重 60.6g, 含 ${}^6\text{Li}$ 90%。另含有 Fe, Ni, Cr, Cu 等杂质元素。

$T(d, n){}^4\text{He}$ 反应产生的中子伴有一个带电粒子, 使得在一个特别小立体角内的中子与所记录的 α 粒子相关联, 其余方向的占靶产额绝大部分的中子只对偶然符合本底有贡献。为了降低时幅变换器的负荷, 用计数率低的中子定时信号作起始信号, α 定时信号的延时量使得所要测量的最低能量的中子先于 α 信号到达时幅变换器。

由 α 探测器引出的快信号, 利用定时单道, 选择适当的阈和窗宽, 选出需要的 α 粒子, 作为关联中子束的通量监测。中子路的阳极信号, 经脉冲形状甄别, 作 $n-\gamma$ 分辨, 甄别掉 γ 本底。 α 的阳极信号, 中子路的线性信号及阳极信号经三重符合后作为微机多道的门信号。

谱仪的积分线性优于 1%, 微分线性好于 2%。其时间道宽为 0.205ns; 能阈为 0.75 MeV, 有效能量范围 1—14.7MeV。

用聚乙烯样品 (CH_2) 和碳样品 (C) 测量了中子探测器的探测效率。在同一角度分别测量 CH_2 和 C 样品的散射中子谱, 经处理得到 $n-p$ 散射峰记录数。由已知 $H(n, n)H$ 散射截面计算出中子探测器效率。效率的实验点误差小于 7.5%, 其中统计误差小于 3.5%

3 数据处理

测量时, 样品的中心轴垂直于入射中子束, 且入射中子束是在一个小的立体角内。不同入射角的中子在样品中的穿透距离不一致, 以 (θ, φ) 方向入射的中子 ($0 \leq \theta, \varphi \leq \Delta$; $\Delta < 0.282$), 在半径为 R 的圆柱形样品中的穿透距离为:

$$\gamma = 2 \sqrt{R^2 - d^2 \sin^2 \theta} / \cos \varphi, \quad (1)$$

等效厚度

$$\begin{aligned} \bar{\gamma} &= \iint \gamma d\theta d\varphi / \iint d\theta d\varphi \\ &= \left(\iint 2 \sqrt{R^2 - d^2 \sin^2 \theta} / \cos \varphi d\theta d\varphi \right) / \Delta^2 \\ &\approx [1 - (d^2 - R^2) \cdot \Delta^2 / 6R^2] \cdot 2R, \end{aligned} \quad (2)$$

式中, d 为样品中心到靶点距离, R 为样品半径。

中子的弹性散射微分截面为:

$$\sigma(\theta) = N(\theta) / \varepsilon(\theta) N_a \cdot \Omega \cdot \bar{\gamma} \cdot n, \quad (3)$$

式中, $N(\theta)$ 为散射中子计数; $\varepsilon(\theta)$ 为中子探测器探测效率; N_a 为对应于关联中子数的 α 监视计数; Ω 为探测器对样品立体角; $\bar{\gamma}$ 为样品的等效厚度; n 为样品核数密度。

天然锂和浓缩锂样品的弹性峰计数 $N_1(\theta)$ 和 $N_2(\theta)$ 中包含了 ${}^6\text{Li}$ 核和 ${}^7\text{Li}$ 核的弹性散射计数。由上式有:

$$\begin{aligned} N_1 &= \sigma_7(\theta) \cdot \varepsilon_7(\theta) \cdot N_{a1} \cdot \Omega \cdot \bar{\gamma}_1 \cdot n_{17} + \sigma_6(\theta) \cdot \varepsilon_6(\theta) \cdot N_{a1} \cdot \Omega \cdot \bar{\gamma}_1 \cdot n_{16}, \\ N_2 &= \sigma_7(\theta) \cdot \varepsilon_7(\theta) \cdot N_{a2} \cdot \Omega \cdot \bar{\gamma}_2 \cdot n_{27} + \sigma_6(\theta) \cdot \varepsilon_6(\theta) \cdot N_{a2} \cdot \Omega \cdot \bar{\gamma}_2 \cdot n_{26}. \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\sigma_7(\theta)$ 和 $\sigma_6(\theta)$ 分别为 ${}^7\text{Li}$ 和 ${}^6\text{Li}$ 的微分截面; $\varepsilon_7(\theta)$ 和 $\varepsilon_6(\theta)$ 分别为探测器对 ${}^7\text{Li}$ 和 ${}^6\text{Li}$ 核在 θ 角散射中子能量的探测效率; $\bar{\gamma}_1$ 和 $\bar{\gamma}_2$ 分别为天然锂和浓缩锂的等效厚度; $N_{\alpha 1}$ 和 $N_{\alpha 2}$ 分别为对天然锂和浓缩锂样品对应于关联束中子计数的 α 监视计数; n_{17} 和 n_{16} 及 n_{27} 及 n_{26} 分别为天然锂和浓缩锂样品中 ${}^7\text{Li}$ 和 ${}^6\text{Li}$ 的核数体密度。

令

$$\begin{aligned} K_{11} &= \varepsilon_7(\theta) \cdot N_{\alpha 1} \cdot Q \cdot \bar{\gamma}_1 \cdot n_{17}, \\ K_{12} &= \varepsilon_6(\theta) \cdot N_{\alpha 1} \cdot Q \cdot \bar{\gamma}_1 \cdot n_{16}, \\ K_{21} &= \varepsilon_7(\theta) \cdot N_{\alpha 2} \cdot Q \cdot \bar{\gamma}_2 \cdot n_{27} \\ K_{22} &= \varepsilon_6(\theta) \cdot N_{\alpha 2} \cdot Q \cdot \bar{\gamma}_2 \cdot n_{26}. \end{aligned} \quad (5)$$

有

$$\begin{aligned} N_1(\theta) &= K_{11}(\theta)\sigma_7(\theta) + K_{12}(\theta)\sigma_6(\theta), \\ N_2(\theta) &= K_{21}(\theta)\sigma_7(\theta) + K_{22}(\theta)\sigma_6(\theta). \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \sigma_6(\theta) &= [K_{21}N_1(\theta) - K_{11}N_2(\theta)]/[K_{12}K_{21} - K_{22}K_{11}], \\ \sigma_7(\theta) &= [K_{22}N_1(\theta) - K_{12}N_2(\theta)]/[K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}]. \end{aligned} \quad (7)$$

浓缩锂样品中含有其它较重的杂质元素(其主要成份是 Fe), 它们的面密度不到 ${}^6\text{Li}$ 核数面密度的 1%。在较大散射角度, 中子对杂质元素的弹性散射峰可以很好地与对 ${}^6\text{Li}$ 核的弹性散射峰分开, 计算时, 可以不考虑杂质对弹性峰的影响; 在小散射角, 两者的弹性散射中子峰很接近, 则需扣除杂质对峰面积的贡献。

偶然符合在时间上是随机的, 为此, 我们以弹性峰右端计数(这些计数完全是由于偶然符合造成)的平均值为标准, 同本底谱比较, 扣除样品时间谱上的偶然符合本底。这样做避免了由于有样品时的偶然符合本底与无样品时的本底不同带来的误差。

对相应的 α 监视计数进行了电子学死时间修正, 把实验得到的截面值转换到质心系, 用蒙特卡罗方法对通量衰减、多次散射进行修正。

4 结果与讨论

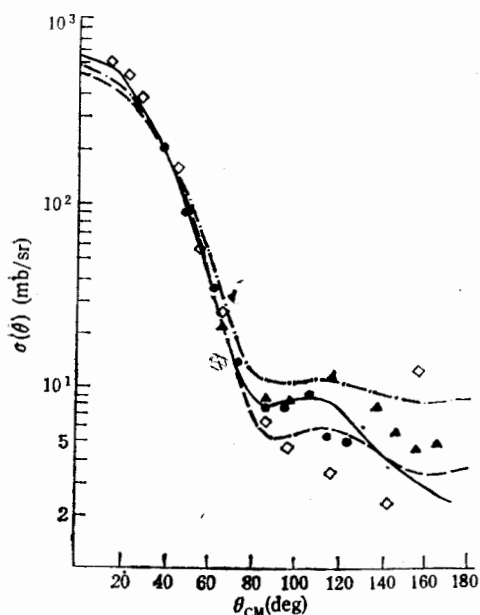
本工作分别测量了 14.7MeV 中子在 ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^7\text{Li}$ 核上从 35° 到 115° (实验室系) 共 9 个实验点。实验数据的总误差在 10% 到 15%, 其中统计误差在 1% 到 5% 之间; 中子探测器效率误差在 6% 到 7.5% 之间; 本底修正带来的误差在 0.8% 到 1.1% 之间; 样品杂质带来的误差在小于 45° 角度时小于 1.0%, 大于 45° 角度时小于 0.5%; 样品核数误差为 0.9%; 其它误差(多次散射, 通量衰减等)小于 0.5%。统计误差和探测器效率误差是实验误差最重要的来源, 由于是通过实验获得中子探测器的效率, 其测量误差传递到截面测量中。

本实验的勒让德多项式拟合系数列于表 1, 微分截面的勒让德 (Legendre) 展开式如下:

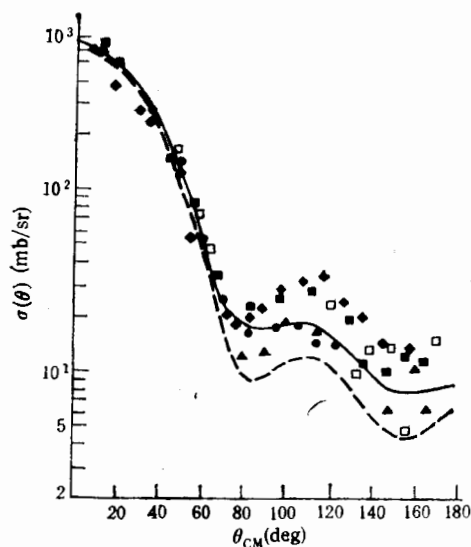
$$\begin{aligned} \sigma(E, \theta) &= [\sigma_{e1}/4\pi] \cdot \sum (2l+1) f_l P_l(\mu) \\ \sigma_{e1}(E) &= 2\pi \int \sigma(E, \theta) d\mu \end{aligned} \quad (8)$$

表 1 14.7MeV 中子在 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li}$ 核上的弹性散射截面的勒让德多项式拟合系数

散射样品	$\sigma_{el}(E)$ (mb)	勒 让 德 系 数							
		f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7
${}^6\text{Li}$	830.09	1.0	0.75901	0.51488	0.30366	0.13524	$4.4264E-2$	$1.2272E-2$	$2.9498E-3$
${}^7\text{Li}$	1002.79	1.0	0.69045	0.45303	0.25774	0.10442	$2.6061E-2$	$5.2014E-3$	

图 1 14.7MeV 中子在 ${}^6\text{Li}$ 核上的弹性散射微分截面

● 本工作；——本工作勒让德多项式拟合曲线；
▲ 文献[5]；◇ 文献[6]；- · - · 文献[7]，
体吸收势；-----文献[7]，面吸收势。

图 2 14.7MeV 中子在 ${}^7\text{Li}$ 核上的弹性散射微分截面

● 本工作；——本工作勒让德多项式拟合曲线；□ 文献[6]；▲ 文献[9]；◆ 文献[8]；■ 文献[10]；
-----文献[11]，光学模型理论曲线。

$$\mu = \cos\theta, \quad -1 \leq \mu \leq 1.$$

${}^6\text{Li}$ 核的测量数据与 Armstrongy 等^[5]和 D. Miljanic 等^[6]的数据进行了比较,我们的数据介于两者之间,并也处于由文献[7]给出的分别用体吸收势和面吸收势的光学模型计算结果之间。比较结果见图 1。

从图 2 可以看出, ${}^7\text{Li}$ 核的测量数据与 Mercher 等^[8]、Hyakutake 等^[9]、D. Miljanic 等^[6]及沈冠仁等^[10]的数据较好地符合,比文献[6, 8, 10]约小一点,而比文献[11]给出的光学模型计算结果约大。

在本测量工作进行期间得到我所 K-400 高压倍加器组全体同志的大力支持和帮助,在此表示衷心地感谢。

参 考 文 献

- [1] 姚立山,核物理动态,9(1992)56.
[2] M. Ahmad et al., *Nucl. Sci. Eng.*, **95**(1987)296.
[3] S. L. Graham et al., *Nucl. Sci. Eng.*, **95**(1987)60.
[4] H. Grappeloar, Draft Paper, IAEA AGM, Chengdu 1990.
[5] A. H. Armstrong et al., *Nucl. Phys.*, **52**(1964)505.
[6] D. Miljanic et al., *Nucl. Phys.*, **A334**(1980)189.
[7] F. E. Bjerklund, S. Fwenbach, *Phys. Rev.*, **109**(1958)1295.
[8] F. Merchez et al., *Nucl. Data for Reactors*, **109**(1958)1295.
[9] M. Hyakutake et al., *J. Nucl. Sci. Tech.*, **11**(1974) 407.
[10] 沈冠仁等,原子核物理 **3**(1981)520.
[11] J. P. Schiffer et al., *Phys. Rev.*, **164**(1967)1274.

The Differential Cross Section of Elastic Scattering of Fast Neutrons on Li

Zhang Kun Cao Jianhua Wan Dairong
Dai Yunsheng Wu Xiaohua

(*Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064*)

Received 29 August 1994

Abstract

The differential cross section of fast neutrons on ${}^6\text{Li}$ and ${}^7\text{Li}$ has been measured at 14.7 MeV using associated particle time-of-flight technique. Scattered neutrons are detected at 9 angles from 35 to 115 deg in massively shielded ST451 liquid scintillator located 254 cm from the scattering sample. The efficiency curve of neutron detector was determined by measuring the n-p scattering in polyethylene. The total error of the differential cross section is from 10% to 15% including the statistical error of 1.0—5.0% and the measurement error of efficiency curve of 6.0%—7.5%.

Key words differential cross section, fast neutron, elastic scattering.