

文章编号: 1007-4627(2015)03-0368-07

20 MeV以下n+⁶Li反应的理论计算

陶曦¹, 蔡崇海², 申庆彪¹

(1. 中国原子能科学研究院核数据重点实验室, 北京 102413;
2. 南开大学, 天津 300071)

摘要: 核反应 R 矩阵理论是研究轻核反应以及中重和重核共振能区核反应的重要理论方法。包含能级矩阵非对角元贡献的完全 R 矩阵理论在理论上比较严格。根据不同的假定和近似得到不同的 R 矩阵计算方法。新编的 R 矩阵程序 FDRR 包含了 4 种计算方法, 包括约化道多能级 Breit-Wigner 方法、完全约化 R 矩阵方法、非对角化能级位移约化 R 矩阵方法及对角化能级位移约化 R 矩阵方法。可计算轻核各种两体反应道的截面、角分布。利用 FDRR 程序对 $n+{}^6\text{Li}$ 反应 20 MeV 以下能区进行理论分析和计算, 理论计算结果与实验数据进行比较分析, 理论计算得到的截面和角分布与实验数据符合得很好。

关键词: R 矩阵; FDRR; ${}^6\text{Li}$

中图分类号: O571.42 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.03.368

1 引言

R 矩阵理论是研究轻核反应的重要计算和评价方法。轻核、中重和重核, 核反应过程都存在着共振现象, 核反应的共振现象的研究, 具有很强的学术意义和应用价值。统计理论是无法表述这一现象的, R 矩阵理论可以用来描述这一现象。 R 矩阵方法也经历了从提出到确立, 再到发展这样一个过程。1936 年 Breit 等^[1] 提出了 R 矩阵理论。该理论从量子力学的薛定谔方程出发, 运用原子核的组态空间和道表面等重要概念, 在道表面上使内区和外区波函数的对数导数衔接, 从而引出 R 矩阵。1958 年 Lane 和 Thomas 发表了文章《 R -Matrix Theory of Nuclear Reactions》^[2], 这是 R 矩阵理论上的经典著作。在此基础上, 根据不同的假设, 发展了不同的 R 矩阵理论计算方法, 包括完全 R 矩阵方法、Breit-Wigner 多能级公式以及约化 R 矩阵方法等。在约化 R 矩阵方法中, 比较有代表性的是 Reich-Moore 方法。

在核数据领域, 利用上述 R 矩阵计算方法, 国际上展开了很多利用 R 矩阵方法来分析核反应的工作。美国人 Hale^[3] 用 R 矩阵理论分析了 $n+{}^6\text{Li}$ 反应, 给出了 2 MeV 以下能区的全截面、弹性散射截面、 $\text{He}(t)$ 出射截面、弹性散射角分布以及 t 出射角分布的结果。2009 年 Hale 用 R 矩阵理论分析的 $n+{}^6\text{Li}$ 反应结

果编入了最新的美国评价库 ENDF/B-VII.1, 同时他也分析了 ${}^{10}\text{B}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{13}\text{C}$ 等核素的中子数据。加拿大人 Azuma^[4] 和日本人 Kunieda^[5] 也都在 R 矩阵方法方面做了大量的工作。国内, 朱诚久^[6]、陈振鹏^[7]、申庆彪^[8] 等都在 R 矩阵方法上做了一些研究。目前国际上, 应用于轻核核数据评价的 R 矩阵程序有 EDA^[9]、AZURE^[4]、AMUR^[5] 等。

Li 广泛用于反应堆以及聚变装置中, 用中子照射可以产生氚, 氚可以用来进行热核反应, ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 反应截面是小于 1.7 MeV 能区的一个重要的标准截面。 n 与 ${}^6\text{Li}$ 反应的反应道、反应过程比较复杂, 但共振峰比较少, 结构比较简单, 所以本文选取 ${}^6\text{Li}$ 作为 R 矩阵方法的研究实例。

2 R 矩阵计算方法

R 矩阵方法重要的是求解公式(1)中的 S 矩阵元,

$$S_{c'c} = e^{-i(\phi_{c'} + \phi_c)} W_{c'c}, \quad (1)$$

求得 S 矩阵元就可以计算出反应截面^[8]。这里 $\phi_c = \arctan(F_c/G_c)$ 为硬球散射相移, F_c 和 G_c 为正则和反正则库仑波函数, 与能量 E 有关。其中

$$W_{c'c} = \delta_{c'c} + 2ip_{c'}^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{\lambda\mu} \gamma_{\lambda c'} \gamma_{\mu c} A_{\lambda\mu} \right) p_c^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

收稿日期: 2014-09-22; 修改日期: 2014-11-09

作者简介: 陶曦(1982-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 助理研究员, 理学硕士, 从事核数据评价研究; E-mail: taoxixishi@ciae.ac.cn.

$$p_c(E) = \frac{\rho_c}{G_c^2 + F_c^2}, \quad (3)$$

其中 p_c 是穿透因子, $\gamma_{\lambda c}$ 是 λ 能级、 c 反应道的约化宽度。

对于 R 矩阵存在着求逆困难, 为了克服这个困难, 引入了能级矩阵的概念, C 是能级矩阵 A 的逆矩阵

$$A_{\lambda\mu} = C_{\lambda\mu}^{-1}, \quad (4)$$

完全 R 矩阵方法的能级逆矩阵的表达式是

$$C_{\lambda\mu} = (E_\lambda - E)\delta_{\lambda\mu} + \Delta_{\lambda\mu} - \frac{i}{2}\Gamma_{\lambda\mu}, \quad (5)$$

这里 E_λ 是共振能级, $\Delta_{\lambda\mu}$ 是能级位移, $\Gamma_{\lambda\mu}$ 是能级宽度。

如果假设能级之间不相干, 能级矩阵 A 便是对角的, 这样便得到多能级 Breit-Wigner 方法, 能级逆矩阵的具体表达式为

$$C_{\lambda\mu} = \left(E_\lambda - E + \Delta_\lambda - \frac{i}{2}\Gamma_\lambda \right) \delta_{\lambda\mu}. \quad (6)$$

R 矩阵方法在实际应用中, 要拟合所有反应道的实验数据, 但是往往实验数据不够全面, 存在没有实验数据的反应道。约化 R 矩阵方法引入保留道和约化道的概念, 有实验数据的反应道称作保留道, 没有实验数据的反应道称作约化道。针对保留道和约化道的能级位移和能级宽度的不同假设, 给出了不同的约化道 R 矩阵计算方法。

假设约化道的能级平均宽度远小于能级平均间距, 即能级之间不相干, 得到完全约化 R 矩阵方法, 能级矩阵可以表示为

$$C_{\lambda\mu} = \left(E_\lambda - E + \Delta_{\lambda e} - \frac{i}{2}\Gamma_{\lambda e} \right) \delta_{\lambda\mu} + \Delta_{\lambda\mu} - \frac{i}{2}\Gamma_{\lambda\mu}, \quad (7)$$

其中 e 表示约化道。

假定保留道的能级宽度的贡献为0, 忽略约化道能级位移的贡献, 得到非对角化能级位移约化 R 矩阵方法

$$C_{\lambda\mu} = \left(E_\lambda - E - \frac{i}{2}\Gamma_{\lambda e} \right) \delta_{\lambda\mu} + \Delta_{\lambda\mu}. \quad (8)$$

使保留道的能级位移对角化, 约化道的能级位移为0, 非对角元的能级宽度也为0, 得到对角化的能级位移约化 R 矩阵方法

$$C_{\lambda\mu} = \left(E_\lambda - E + \Delta_\lambda - \frac{i}{2}\Gamma_{\lambda e} \right) \delta_{\lambda\mu}. \quad (9)$$

考虑到保留道的约化宽度的涨落性和随机性, 能级之间无关联, 假设保留道的非对角项宽度和能级位移都为0,

得到一般约化 R 矩阵方法

$$C_{\lambda\mu} = \left(E_\lambda - E + \Delta_{\lambda e} - \frac{i}{2}\Gamma_{\lambda e} \right) \delta_{\lambda\mu}, \quad (10)$$

将辐射俘获道当作约化道来处理, 就可以得到 Reich-Moore 方法

$$C_{\lambda\mu} = \left(E_\lambda - E - \frac{i}{2}\Gamma_{\lambda e} \right) \delta_{\lambda\mu}. \quad (11)$$

3 FDRR程序介绍

新编程序 FDRR (Full and Diagonal Reduced R-matrix) 是建立在 R 矩阵理论上, 应用 FORTRAN 语言编写的核理论模型程序。主要用于计算 $1p$ 壳轻核的两体反应的截面和角分布。

程序包括4种 R 矩阵计算方法:

- (1) 约化道多能级 Breit-Wigner 方法, 用式 (6);
- (2) 完全约化 R 矩阵方法, 用式 (7);
- (3) 非对角化能级位移约化 R 矩阵方法, 用式 (8);
- (4) 对角化能级位移约化 R 矩阵方法, 用式 (9)。

4 n+⁶Li反应分析

⁶Li 是 $1p$ 壳核素中最轻的稳定核, 广泛用于反应堆以及聚变装置中, 是重要的产氦核素。中子(n)与⁶Li反应的反应道、反应过程比较复杂, 如图1所示。n与⁶Li反应, 形成复合核⁷Li*, 通过发射各种粒子进行反应。(n, γ)反应道的截面很小, 没有相关测量, 可以忽略。(n, d)反应道的剩余核⁵He不稳定, 会继续发射中子, 衰变成 α 粒子, 可以归类到三体道(n, nd α)中。非弹散射第一激发态的阈能高于三体道(n, nd α)的阈能, 所以⁶Li的第一激发态还会继续发射氦(d), 剩余核是 α 粒子。计算过程中, 保留第一激发态。

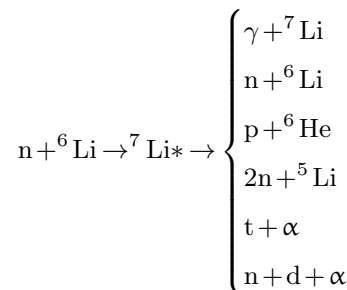


图1 n+⁶Li的反应道开放途径

用于n与⁶Li反应的共振能级如表1所列。表的第1列是⁷Li能级对应的自旋宇称, 第2列是⁷Li的能级, 第3列是质心系下⁶Li的共振能级, 第4列是实验室系下的⁶Li的共振能级。质心系下, ⁷Li的能级与⁶Li的共振能级相差一个中子的结合能(7.25 MeV)。

表 1 ${}^7\text{Li}$ 能级纲图及 ${}^6\text{Li}$ 共振能级

${}^7\text{Li}$		${}^6\text{Li}$	
I^π	$E_{\text{cm}}^*/\text{MeV}$	E_λ/MeV	$E_{\text{L}\lambda}/\text{MeV}$
$\frac{3}{2}^-$	0.00	-7.25	-8.46
$\frac{1}{2}^-$	0.48	-6.77	-7.91
$\frac{7}{2}^-$	4.63	-2.62	-3.06
$\frac{5}{2}^-$	6.68	-0.57	-0.67
$\frac{5}{2}^-$	7.46	0.21	0.24
$\frac{7}{2}^-$	9.67	2.42	2.82
$\frac{3}{2}^-$	9.97	2.72	3.18
$\frac{3}{2}^-$	10.25	3.00	3.50
$\frac{1}{2}^-$	10.31	3.06	3.57

5 计算结果与讨论

通过分析确定了 $n+{}^6\text{Li}$ 的反应道和共振能级，应用 R 矩阵模型程序FDRR，调节能级宽度拟合实验数据，得到一组同时满足所有截面和角分布的一组参数，计算了 $n+{}^6\text{Li}$ 反应的截面和角分布。在我们的理论计算过程中，采用的 R 矩阵计算方法是约化道多能级Breit-Wigner方法。

R 矩阵理论只能计算两体反应道的截面和角分布，对于三体反应只能做近似处理。所以我们在计算程序中应用假二体道代替三体道，但是应用三体道的真实阈能，认为除去剩余核以外的两个粒子在空间坐标中尚未分开，看成是一个粒子集团，并合理地推断其自旋和宇称。用这种方法通过调节可以给出合理的三体道截面，但是计算出的角分布没有实际意义，更无法给出三体反应道的出射粒子能谱。

如果只采用实验上已知的能级，计算结果并不能完全符合实验数据，假能级的引入是为了让计算结果更好地符合实验数据。假能级有两种：一是能级的能量大小在计算能区以外，其作用是贡献本底；另一种是计算能区以内，实验测量没有给出的，为了使较高能区的截面计算结果能较好地符合实验数据而加入的假能级。拟合计算过程给定假能级的方法是，先假定存在某一条能级，然后通过程序计算自动调节该能级的约化宽度参数，使计算结果更好符合实验数据。若约化宽度参数不为0，则保留该条假能级。再同时调节假能级的能量大小和约化宽度参数，拟合实验数据。经过不断的假设和调节，得到较合适的假能级能量大小和约化宽度参数。FDRR程序计算 $n+{}^6\text{Li}$ 反应的中子约化道宽度参数见表2，表中带括号的能级为假能级，共采用了5条假能级。(0.00)和(0.48)MeV两条能级，对应 ${}^6\text{Li}$ 的共振能级是负共振，提供热能区 $1/\nu$ 截面的贡

献，(32.25)和(37.25)MeV两条能级贡献了较高能量区域的本底截面。这4条能级的能量大小在计算的能区范围以外，对应的约化宽度参数由程序根据实验数据来调整。(12.00)MeV能级的大小在计算能区范围内，是为了更好地拟合截面，给定的一条假能级。该能级的宽度很大，实际也是一条本底能级。

表 2 $n+{}^6\text{Li}$ 反应中子道约化宽度参数*

I^π	$E_{\text{cm}}^*({}^7\text{Li})$	l	$\gamma_{\lambda n}$	l	$\gamma_{\lambda n}$
$\frac{3}{2}^+$	(0.00)	0	0.715 229	2	3.209 175
$\frac{3}{2}^-$	0.00	1	0.309 026	3	2.056 890
$\frac{1}{2}^+$	(0.48)	0	0.092 039	2	0.587 185
$\frac{1}{2}^-$	0.48	1	0.003 299		
$\frac{7}{2}^-$	4.63	1	0	3	2.419 326
$\frac{5}{2}^-$	6.68	1	0.498 682		
$\frac{5}{2}^-$	7.46	1	0.000 245	3	0.004 176
$\frac{7}{2}^-$	9.67	1	0.304 142	3	0.934 483
$\frac{3}{2}^-$	9.97	3	0.030 042	5	2.218 661
$\frac{3}{2}^-$	10.25	1	0.470 205	3	1.249 939
$\frac{1}{2}^-$	10.31	1	0.230 904	3	0.912 314
$\frac{3}{2}^-$	(12.00)	3	0.000 309	5	8.715 098
$\frac{1}{2}^+$	(32.25)	0	3.910 037	2	0.017 718
$\frac{3}{2}^+$	(37.25)	0	0.360 732	2	3.485 467

* 注：()中的能级为假能级

图2给出了 $n+{}^6\text{Li}$ 反应总截面的计算结果与实验数据的对比。 $n+{}^6\text{Li}$ 反应总截面的计算结果在10 eV到20 MeV能区都能较好地符合实验数据。

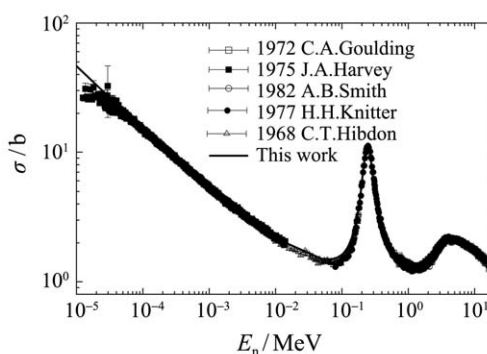


图 2 $n+{}^6\text{Li}$ 反应全截面计算结果与实验数据^[10-14]的比较

$n+{}^6\text{Li}$ 反应弹性散射截面的计算结果与实验数据的对比如图3所示。低于0.1 MeV的能区，硬球散射截面与Alfimenkov^[20]在1982年给出的实验数据符合较好。在0.1~1 MeV的能区，第一个共振峰的计算结果也符合实验数据，高于1 MeV能区的平滑区，理论计算结果与实验数据一致。

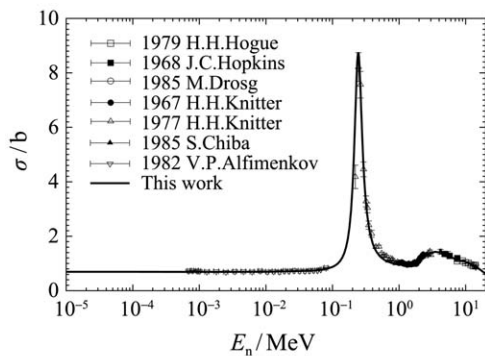


图 3 $n+{}^6\text{Li}$ 反应弹性散射截面计算结果与实验数据^[13, 15-20]的比较

$n+{}^6\text{Li}$ 反应的 t 出射截面是重要的产氚截面, 2 MeV 以下能区也是重要的标准截面。FDRR 程序计算的结果与实验数据的走势一致, 大体符合实验数据(见图 4)。

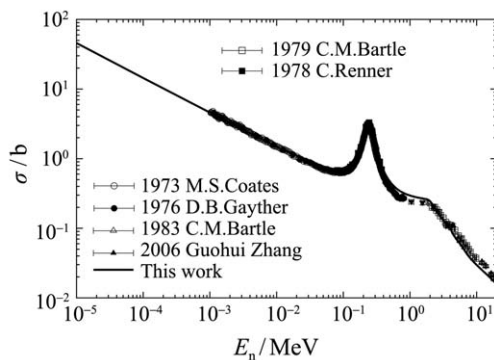


图 4 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 截面计算结果与实验数据^[21-26]的比较

对于 $n+{}^6\text{Li}$ 这个反应来说, 第一激发态的阈能低于三体道 $(n, nd\alpha)$ 的阈能, 复合核 ${}^7\text{Li}^*$ 发射一个中子以后的处于第一激发态的剩余核 ${}^6\text{Li}$ 还会继续发射 d 粒子, 剩余一个 α 粒子。利用 FDRR 程序计算 $n+{}^6\text{Li}$ 的时候, 第一激发态独立计算, 计算结果与实验数据在走向上大体一致。图 5 是 $n+{}^6\text{Li}$ 反应第一激发态非弹散射截面计

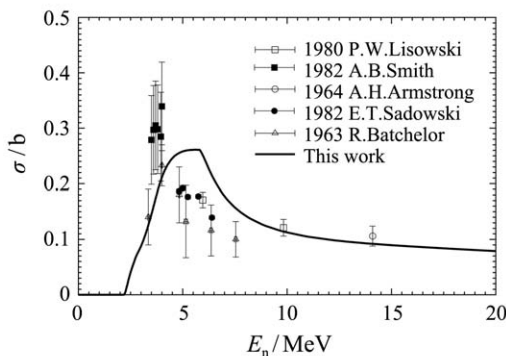


图 5 $n+{}^6\text{Li}$ 反应第一激发态非弹散射截面计算结果与实验数据^[12, 27-30]的比较

算结果与实验数据比较。

对于 ${}^6\text{Li}$ 的第二激发态, 虽然能量上可以发射 d , 但是由于自选宇称的限制, 不能开放 $(n, nd\alpha)$ 道。第二激发态只能通过发射 γ 退激到它的基态。从图 6 中可以看到 FDRR 的计算结果与第二激发态的实验数据相符合。

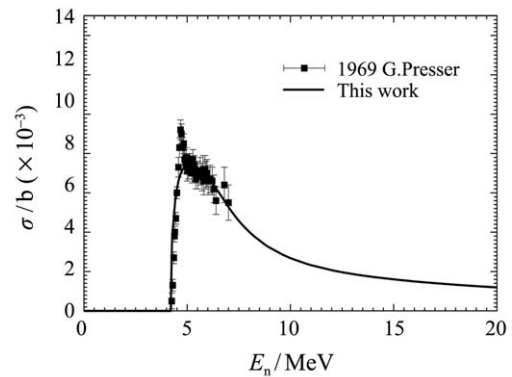


图 6 $n+{}^6\text{Li}$ 反应第二激发态非弹散射截面计算结果与实验数据^[31]的比较

R 矩阵理论只能处理两体反应的截面和角分布, 所以处理三体道 $(n, nd\alpha)$ 的时候, 假定一个两体道 $(n, d){}^5\text{He}^*$ 来代替三体道。剩余核 ${}^5\text{He}^*$ 的质量等于 $(n+\alpha)$ 的质量。通过这样的代替, FDRR 程序可以计算三体道的截面。实验上的测量数据是氘(d) 出射出的实验数据, 而 ${}^6\text{Li}$ 的第一激发态也会发射 d 粒子, 所以将第一激发态与三体道的计算结果相加和与 d 出射的实验数据进行比较。如图 7 所示, 图中标注 (n, n_1) 是第一激发态的结果, 标注 $(n, nd\alpha)$ 的是三体道的计算结果, 实线是前面两个反应道计算结果的和, 与实验测量的 d 出射的数据符合较好。

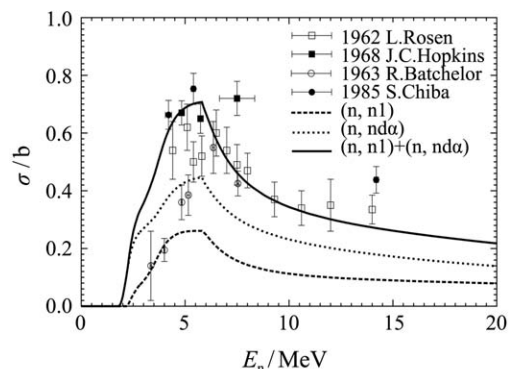


图 7 $n+{}^6\text{Li}$ 反应氘出射计算结果与实验数据^[16, 19, 38-39]的比较

图 8 是 $n+{}^6\text{Li}$ 反应 (n, p) 截面的计算结果与实验数据的比较。理论计算的结果与实验数据基本一致, 5~7 MeV 之间略高于实验数据。

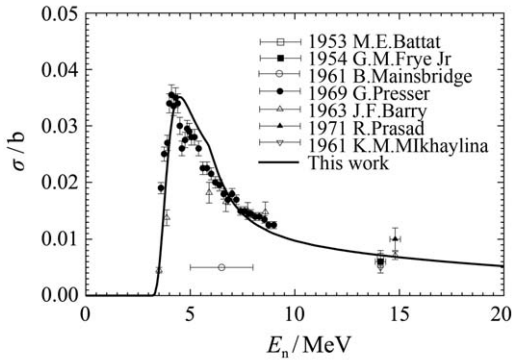


图 8 ${}^6\text{Li}(n,p){}^6\text{He}$ 截面计算结果与实验数据^[31-37]的比较

图 9 是 $n+{}^6\text{Li}$ 反应 $(n, 2n)$ 截面的计算结果与实验数据的比较情况。将两个中子看成一个整体, $(n, 2n)$ 反应道也可以假设成一个等效两体反应来进行计算。14 MeV 能点的理论计算结果与 Mikhaylina^[37] 给出的实验数据符合。

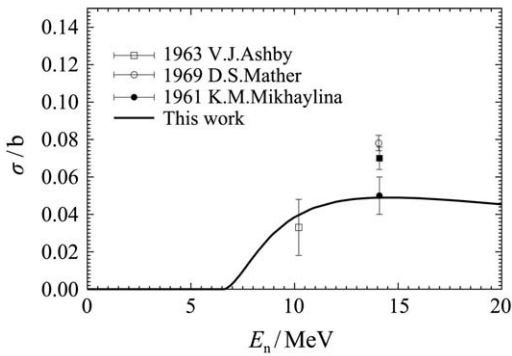


图 9 ${}^6\text{Li}(n,2n){}^5\text{Li}$ 截面计算结果与实验数据^[37, 40-41]的比较

为了使所有分反应道都能更好地拟合实验数据, 与总截面归一, 定义了一个没有实验数据的连续能级非弹反应道为约化道。约化道的计算结果如图 10 所示。

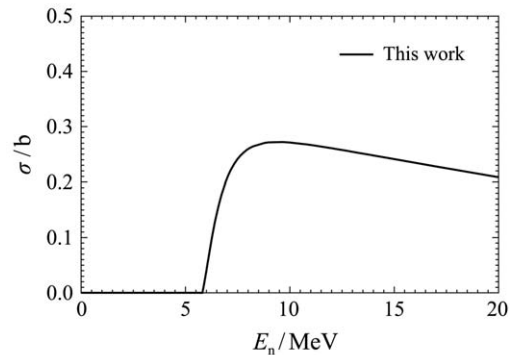


图 10 $n+{}^6\text{Li}$ 反应约化道截面的计算结果

图 11 和图 12 是入射能量分别为 0.050, 0.070, 0.085, 0.100, 0.120, 0.207, 0.225, 0.235, 0.245 MeV 和 5.74, 6.05, 6.37, 6.66, 6.94, 7.32, 7.50, 7.47, 8.96, 9.96 MeV

中子与 ${}^6\text{Li}$ 反应弹性散射角分布理论计算结果与实验数据的比较。低能共振区的实验数据取自 1961 年 Lane^[42] 发表的数据。图中可以看到计算结果与实验数据符合得较好, 理论计算的角分布的峰谷的位置与实验数据一致, 振幅的大小也与实验数据符合。

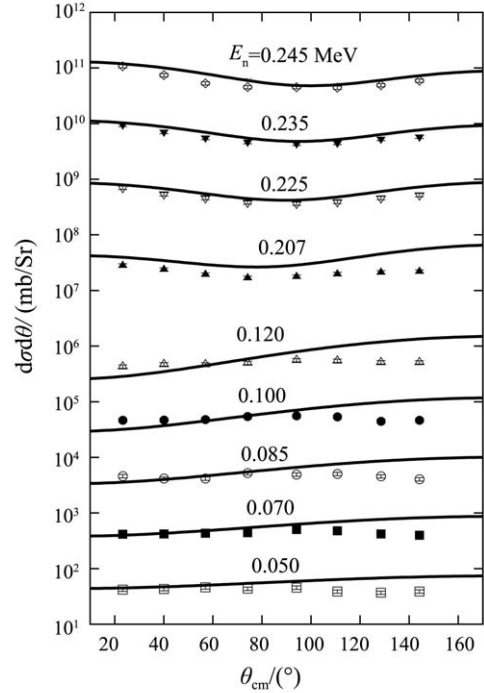


图 11 ${}^6\text{Li}$ 的中子弹性散射角分布与实验数据^[42]的比较
从下至上每条理论曲线和实验数据分别乘以 $10^0, 10^1, 10^2, \dots, 10^8$ 。

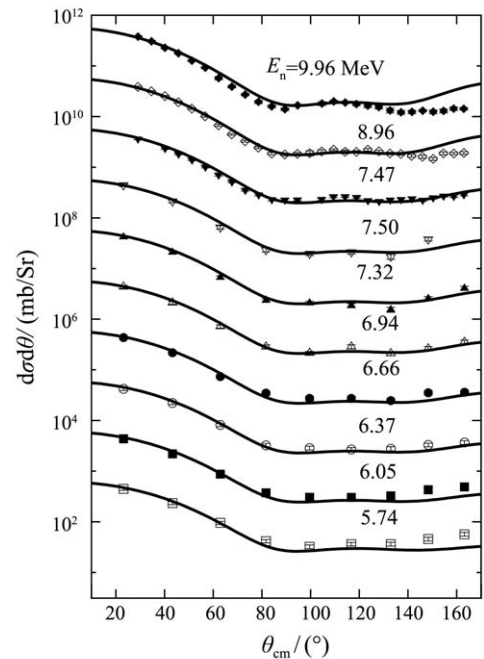


图 12 ${}^6\text{Li}$ 的中子弹性散射角分布与实验数据^[15, 43]的比较
从下至上每条理论曲线和实验数据分别乘以 $10^0, 10^1, 10^2, \dots, 10^9$ 。

图 13 是中子能量分别为 0.10, 0.15, 0.20, 0.22, 0.24, 0.26, 0.28, 0.30, 0.35 和 0.40 MeV, 中子与 ${}^6\text{Li}$ 反应的 t 出射角分布与实验数据比较, 实验数据取自 1974 年 Overlay^[44] 给出的。图中可以看到理论计算结果的峰谷与实验数据一致, 理论计算的结果是合理的。多数能点的理论计算结果的振幅与实验数据符合, 能量较低的几个能点的小角度理论计算结果小于实验数据。

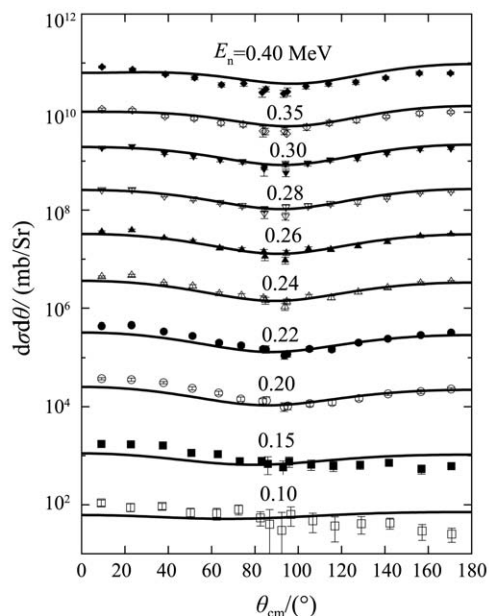


图 13 $n+{}^6\text{Li}$ 反应的 t 出射角分布与实验数据^[44] 的比较
 从下至上每条理论曲线和实验数据分别乘以 $10^0, 10^1, 10^2, \dots, 10^9$ 。

6 总结与讨论

本工作利用新编 R 矩阵理论程序 FDRR 分析和计算了 20 MeV 以下能区 $n+{}^6\text{Li}$ 反应。通过调节共振能级的约化能级宽度, 得到较好的理论计算结果。理论计算得到的全截面、弹性散射截面、 t 出射截面等与实验数据进行比较和分析, 理论结果与实验数据的符合很一致。计算得到的角分布, 峰谷与实验数据一致, 振幅符合实验数据, 也证明理论计算的合理。

FDRR 程序的研制为轻核的截面和角分布的评价提供了一种理论计算方法手段。此项工作也参与到国际中子标准截面合作中, 与国外专家进行交流^[45]。

参考文献:

[1] BREIT G, WIGNER E P. Phys Rev, 1936, **49**: 519.
 [2] LANE A M, THOMAS R G. Rev Mod Phys, 1952, **87**: 123.
 [3] HALE G M. R-matrix Analysis of the ${}^7\text{Li}$ System[C]. National Bureau of Standards NBS-SPEC. Publ, 1977, **30**: 493;

CHADWICK M B, HERMAN M, OBLOŽINSKÝ P, *et al.* Nuclear Data Sheets, 2011, **112**: 2887.
 [4] AZUMA R E, UBERSEDER E, SIMPSON E C, *et al.* Phys Rev, 2010, **C81**: 045805.
 [5] PRONYAEV V G, CARLSON A D, CAPOTE NOY R. Toward a New Evaluation of Neutron Standards[C]. INDC(NDS)-0641, 2013: 12.
 [6] ZHU Chengjiu, JING Xiaogong, WU Chengli. The R-Matrix Analysis of $n+{}^6\text{Li}$ System below 1.7 MeV[C]. Collection of Nuclear Reaction Theory and Application. Beijing: Atomic Energy Press, 1980: 180. (in Chinese)
 (朱诚久, 井孝功, 吴成礼. $E_n < 1.7$ MeV 的 $n+{}^6\text{Li}$ 体系下的 R 矩阵分析[C]. 核反应理论方法及其应用文集. 北京: 原子能出版社, 1980: 180.)
 [7] CHEN Zhenpeng, QI Huiquan. Atomic Energy Science and Technology, 1984, **18**: 139. (in Chinese)
 (陈振鹏, 齐卉荃. 原子能科学与技术, 1984, **18**: 139.)
 [8] SHEN Qingbiao. Nuclear Reaction Theory in Low and Medium Energy[M]. Beijing: Science Press, 2005: 101. (in Chinese)
 (申庆彪. 低能和中能核反应理论(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 101.)
 [9] HALE G M. Use of R-matrix Methods for Light Element Evaluations[C]. BNL-NCS-51363, 1981: 509.
 [10] GOULDING C A, CLEMENT J M, STOLER P. Total Neutron Cross Section on Helium and ${}^6\text{Li}$ [C]. Chicago Operations Office, A E C, Contract rept, 1972, **21**: 2.
 [11] HARVEY J A, HILL N W. Neutron Total Cross Section of ${}^6\text{Li}$ from 10 eV to 10 MeV[C]. Washington: Conf on Nucl Cross-Sect and Techn, 1975, **1**: 244.
 [12] SMITH A B, GUENTHER P T, WHALEN J F. Nuclear Physics, Section A, 1982, **373**: 305.
 [13] KNITTER H H, BUDTZ-JORGENSEN C, MAILLY N, *et al.* Neutron Total and Elastic Scattering Cross Sections of Li-6 in the Energy Range from 0.1 to 3.0 MeV[C]. Euratom Reports, 1977, 5726E: 1.
 [14] HIBDON C T, MOORING F P. Total Neutron Cross Sections of Li-6, Li-7 and Lithium From 10 to 1236 keV[C]. Washington: Nuclear Cross-Sections Techn Conf, 1968, **1**: 159.
 [15] HOGUE H H, BEHREN P L VON, GLASGOW D W, *et al.* Nuclear Science and Engineering, 1979, **69**: 22.
 [16] HOPKINS J C, DRAKE D M, CONDE H. Nuclear Physics, Section A, 1968, **107**: 139.
 [17] DROSG M, LISOWSKI P W, HARDEKOPF R A, *et al.* Double Differential Neutron Emission Cross Sections of ${}^{10}\text{B}$ and ${}^{11}\text{B}$ at 6, 10 and 14 MeV and of ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ and ${}^{12}\text{C}$ at 14 MeV[C]. Santa Fe: Conf on Nucl Data f Basic a Appl Sci, 1985, **1**: 145.
 [18] KNITTER H H, COPPOLA M. Elastic Scattering of Neutrons from Li-6[C]. Euratom Reports, 1967, 3454E.
 [19] CHIBA S, BABA M, NAKASHIMA H, *et al.* Jour of Nuclear Science and Technology, 1985, **22**(10): 771.
 [20] ALFIMENKOV V P, BORZAKOV S B, TKHUAN VO VAN,

- et al.* Yadernaya Fizika, 1982, **36**(5): 1089.
- [21] BARTLE C M. Nuclear Physics, Section A, 1979, **330**: 1.
- [22] RENNER C, HARVEY J A, HILL N W, *et al.* Bulletin of the American Physical Society, 1978, **23**: 526(BI3).
- [23] COATES M S, HUNT G J, UTTLEY C A. Measurements of Standard Cross-Sections Using the Harwell Black Detector, Li-6(n, α) with Thin Sample[C]. UK: UK report to EANDC, 1973, **151**: 10.
- [24] GAYTHER D B. A Measurement of the 6-Li(n, α) Cross-Section[C]. Priv Comm: Gayther, 1976.
- [25] BARTLE C M, GEBBIE D W, HOLLAS C L. Nuclear Physics, Section A, 1983, **397**: 21.
- [26] ZHANG Guohui, CAO Rongtai, CHEN Jinxiang, *et al.* Nuclear Science and Engineering, 2006, **153**: 41.
- [27] LISOWSKI P W, AUCHAMPAUGH G F, DRAKE D M, *et al.* Cross Sections for Neutron Induced, Neutron Producing Reactions in Li-6 and Li-7 at 5.96 and 9.83 MeV[C]. Los Alamos Scientific Lab Reports, 1980, 8342.
- [28] ARMSTRONG A H, GAMMEL J, ROSEN L. Nuclear Physics, 1964 **52**: 505.
- [29] SADOWSKI E T, KNOX H, RESLER D A, *et al.* Bulletin of the American Physical Society, 1982, **27**: 624(C5).
- [30] BATCHELOR R, TOWLE J H. Nuclear Physics, 1963, **47**: 385.
- [31] PRESSER G, BASS R, KRUGER K. Nuclear Physics, Section A, 1969, **131**: 679.
- [32] BATTAT M E, RIBE F L. Physical Review, 1953, **89**: 80.
- [33] FRYE JR G M. Physical Review, 1954, **93**: 1086.
- [34] MAINSBRIDGE B, BONNER T W. Disintegration of Lithium Six By Fast Neutrons[C]. USA: Washington AEC Office Reports, 1961, **1034**: 29.
- [35] BARRY J F. Nuclear Energy, Part A+B (Reactor Sci Technol), 1963, **17**: 273.
- [36] PRASAD R, SARKAR D C. Measured (n,p) Reaction Cross-Sections and Their Predicted Values at 14.8 MeV[C]. Nuovo Cimento A, 1971, **3**(3): 467.
- [37] MIKHAYLINA K M, NOMOFILOV A A, ROMANOVA T A, *et al.* The Interaction of 14.1 MeV Neutrons with Lithium-6 and Lithium-7[C]. Moskva: Neitronnaya Fizika, 1961: 249.
- [38] ROSEN L, STEWART L. Physical Review, 1962, **126**: 1150.
- [39] BATCHELOR R, TOWLE J H. Nuclear Physics, 1963, **47**: 385.
- [40] ASHBY V J, CATRON H C, GOLDBERG M D, *et al.* Physical Review, 1963, **129**: 1771.
- [41] MATHER D S, PAIN L F. Measurement of (n,2n) and (n,3n) Cross Sections at 14 MeV Incident Energy[C]. A W R E Aldermaston Reports, 1969, 47/69.
- [42] LANE R O, LANGSDORF JR A S, MONAHAN J E, *et al.* The Interaction of 14.1 MeV Neutrons with Lithium-6 and Lithium-7[C]. Annals of Physics (New York), 1961, **12**: 135.
- [43] KNOX H D, WHITE R M, LANE R O. Nuclear Science and Engineering, 1979, **69**: 223.
- [44] OVERLEY J C, SEALOCK R M, EHLERS D H. Nuclear Physics, Section A, 1974, **221**: 573.
- [45] CARLSON A D, PRONYAEV V G, CAPOTE R, *et al.* Nuclear Data Sheets, 2015, **123**: 27.

Theoretical Calculations of n+⁶Li Reaction below 20 MeV

TAO Xi¹, CAI Chonghai², SHEN Qingbiao¹

(1. Science and Technology on Nuclear Data Laboratory, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. Naikai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: *R*-matrix theory is an important theory of light, medium and heavy mass nuclide nuclear reaction in the resonance energy range. Full *R*-matrix formalism contains the un-diagonal element of energy levels matrix and it is rigorous in theory. Because of different assumptions and approximations, many kinds of *R*-matrix methods are obtained. The new *R*-matrix code FDRR is presented and includes 4 kinds of *R*-matrix methods, reduced multi-level Breit-Wigner *R*-matrix method, full reduced *R*-matrix method, un-diagonal energy shift reduced *R*-matrix method, and diagonal energy shift reduced *R*-matrix method. It can be used for calculating integral cross sections and angular distributions of 2-bodies reactions. The cross sections and angular distributions of n+⁶Li reaction are calculated and analyzed by FDRR code below 20 MeV. The calculation results are compared with the experimental data, and the cross sections and angular distributions are in good agreement with experimental data.

Key words: *R*-matrix; FDRR; ⁶Li

Received date: 2 Sep. 2014; Revised date: 9 Nov. 2014

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

<http://www.npr.ac.cn>