

中子诱发 ^{12}C 反应的理论计算与分析*

曹李刚 孙秀泉 周锦锋

(西北大学物理系 西安 710069)

韩银录 张竞上

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 利用统一的 Hauser-Feshbach 理论和角动量相关的激子模型,以中子诱发 ^{12}C 反应为例,研究了轻核反应的反应机制和轻核反应的特点,并进行了理论计算,同时与实验数据进行了比较.

关键词 Hauser-Feshbach 理论 角动量相关的激子模型 分立能级 双微分截面 反冲核

1 引言

中子与轻核反应的研究到目前为止,国际上都是采用蒙特卡罗模拟方法进行模拟计算,还没有适合于1P壳核反应的理论模型.基于统一的 Hauser-Feshbach 理论^[1]、角动量相关的激子模型^[2]和复杂粒子发射的拾取机制^[3,4],来研究 $n + ^{12}\text{C}$ 反应,并进行了理论计算.

轻核反应机制很复杂,在其反应过程中,预平衡发射占主导地位,分立能级之间的发射占主要部分.在反应过程中,剩余核会自发衰变为两个或者三个集团,甚至发生多体崩裂过程,这些都是轻核反应的特点.由于轻核质量较轻,反冲核效应很明显,为了保持核反应过程中能量守恒,考虑反冲核效应^[5]是很有必要的.在 $E_n = 14.4\text{MeV}$ 时, $n + ^{12}\text{C} \rightarrow n + 3\alpha$ 反应中粒子同时崩裂过程已经被实验验证^[6],通过分析,显示出在该反应过程中没有证据可以证明有三体崩裂过程存在,因此,在理论计算中没有考虑多体崩裂过程.

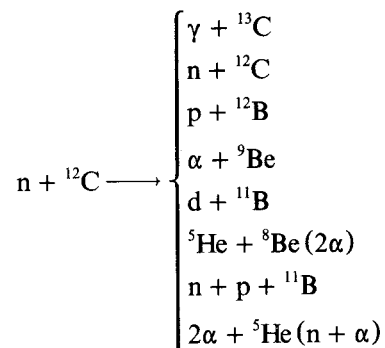
在 $E_n < 20\text{MeV}$ 的情况下, $n + ^{12}\text{C}$ 反应都是通过由分立能级之间的几次衰变过程来进行,这些能级的能量、自旋、宇称和宽度都取自最新的“Table of Isotopes”(1996)^[7].

1998-07-13收稿

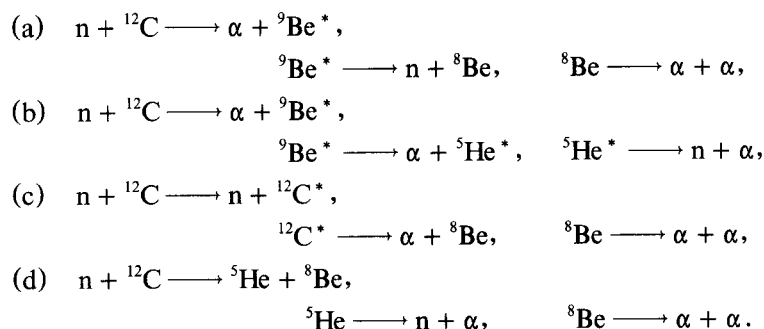
* 核工业科学基金资助项目

2 $n+^{12}\text{C}$ 反应的反应道

由于阈能大于 20MeV, 在 $E_n \leq 20\text{MeV}$ 时 (n, t) , $(n, ^3\text{He})$, $(n, 2n)$ 反应道没有开放. 中子引起 ^{12}C 反应的反应道如下:



在 $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ 反应中, ^{13}C 通过发射一个 α 粒子退激到 ^9Be 基态, 而处于激发态的 ^9Be 则会发射一个中子和两个 α 粒子. 在 $n + ^{12}\text{C}$ 体系中, ^{13}C 衰变为一个中子和三个 α 粒子, 可经由一系列不同的反应道, 类似连续两体反应或者两体崩裂过程, 在不同的分支中, 中子与 α 粒子具有各自的能量与角度分布. 在计算中, $^{12}\text{C}(n, n)3\alpha$ 反应道如下:



3 光学模型势参数

建立在相关的实验数据基础上, 利用 APOM 程序调节光学势参数, 中子光学势参数被获得:

$$\begin{aligned} V_r(E) &= 55.54834 - 0.06025E - 0.01207E^2 - 24(N - Z)/A + 0.00330Z/A^{1/3}, \\ W_s(E) &= 11.01819 - 0.51725E - 12(N - Z)/A, \\ W_v(E) &= -1.32329 + 0.28308E - 0.00206E^2, \\ V_{so} &= 6.2, \\ r_r &= 1.26692, \quad r_s = 0.91257, \quad r_v = 1.72740, \quad r_{so} = 1.26692, \\ a_r &= 0.45181, \quad a_s = 0.63908, \quad a_v = 0.65688, \quad a_{so} = 0.45181. \end{aligned}$$

4 理论计算结果与分析

利用建立起来的处理轻核反应的新理论,对所有开放的反应道进行了反应截面的理论计算. 计算结果显示, $n + {}^{12}\text{C}$ 反应的粒子发射基本上是在分立能级上进行的,而且预平衡反应在整个反应过程中占主导地位,例如在 $E_n = 14.1\text{MeV}$ 时,预平衡发射占了 85.12%,而平衡态仅占 14.88%. 在计算中取激子模型参数 $K = 200\text{MeV}^3$. 表 1 中给出了 ${}^{13}\text{C}^*$ 的分立能级到剩余核的分立能级之间发射粒子的跃迁情况 ($E_n = 20\text{MeV}$).

表 1 在 $(n, 2\alpha)$, $(n, n\alpha)$, $(n, \alpha n)$ 反应中,从复合核 ${}^{13}\text{C}^*$ 的分立能级到剩余核分立能级之间发射粒子的跃迁情况

	E_n/MeV	k_1	k_2		E_n/MeV	k_1	k_2
$(n, n\alpha)$	10.452	4	$g \cdot s$	$(n, \alpha n)$	8.006	2	$g \cdot s$
$(n, n\alpha)$	11.166	5	$g \cdot s$	$(n, \alpha n)$	8.813	3	$g \cdot s$
$(n, n\alpha)$	11.755	6	$g \cdot s-1$	$(n, \alpha n)$	9.193	4	$g \cdot s$
$(n, n\alpha)$	12.098	7	$g \cdot s-1$	$(n, \alpha n)$	9.484	5	$g \cdot s$
$(n, n\alpha)$	12.822	8	$g \cdot s-1$	$(n, \alpha n)$	11.279	6	$g \cdot s$
$(n, n\alpha)$	13.778	9	$g \cdot s-1$	$(n, \alpha n)$	13.507	7	$g \cdot s-1$
$(n, n\alpha)$	14.472	10	$g \cdot s-1$	$(n, \alpha n)$	14.787	8	$g \cdot s-1$
$(n, n\alpha)$	15.267	11	$g \cdot s-1$	$(n, \alpha n)$	18.411	9	$g \cdot s-1$
$(n, n\alpha)$	16.380	12	$g \cdot s-1$	$(n, \alpha n)$	18.982	10	$g \cdot s-1$
$(n, n\alpha)$	16.738	13	$g \cdot s-1$	$(n, \alpha\alpha)$	9.193	4	$g \cdot s$
$(n, n\alpha)$	17.460	14	$g \cdot s-1$	$(n, \alpha\alpha)$	9.484	5	$g \cdot s$
$(n, n\alpha)$	17.963	15	$g \cdot s-1$	$(n, \alpha\alpha)$	11.279	6	$g \cdot s$
$(n, n\alpha)$	18.678	16	$g \cdot s-1$	$(n, \alpha\alpha)$	13.507	7	$g \cdot s-1$
$(n, n\alpha)$	19.253	17	$g \cdot s-1$	$(n, \alpha\alpha)$	14.787	8	$g \cdot s-1$
$(n, n\alpha)$	19.686	18	$g \cdot s-1$	$(n, \alpha\alpha)$	18.411	9	$g \cdot s-1$
$(n, n\alpha)$	19.892	19	$g \cdot s-1$	$(n, \alpha\alpha)$	18.982	10	$g \cdot s-1$

在计算过程中,有实验数据的反应道有 ${}^{12}\text{C}(n, \alpha_0){}^9\text{Be}$ 、 ${}^{12}\text{C}(n, p){}^{12}\text{B}$ 、 ${}^{12}\text{C}(n, n2\alpha)\alpha$.

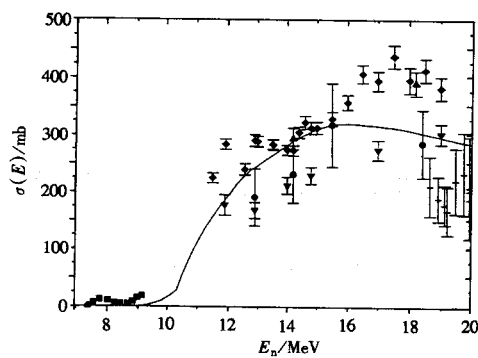


图 1 ${}^{12}\text{C}(n, n2\alpha)\alpha$ 反应的理论计算值与实验值的比较

● Ref.[8], ▲ Ref.[9], ■ Ref.[10], ▼ Ref.[11],
◆ Ref.[12], + Ref.[13], — Theo.

在比较宽的能区 (6—20MeV) 内, 对于 ${}^{12}\text{C}(n, \alpha_0){}^9\text{Be}$ 和 ${}^{12}\text{C}(n, n2\alpha)\alpha$ 反应道, 理论计算结果与实验测量值符合得相当好; 而在 $E_n < 16.5\text{MeV}$ 时, 对于 ${}^{12}\text{C}(n, p){}^{12}\text{B}$ 反应截面, 其结果与实验测量值也符合得很好; 在 $E_n > 16.5\text{MeV}$ 时, 对于 ${}^{12}\text{C}(n, p){}^{12}\text{B}$ 反应截面, 由于获得的三家实验数据有很大分歧, 计算值处于三家实验数据中间, 其结果还有待于以后实验的进一步验证. 作为一个例子, 将 ${}^{12}\text{C}(n, n2\alpha)\alpha$ 反应的计算结果与实验数据^[8, 12] 的比较, 在图 1 中给出.

本理论最重要的部分是对出射粒子双微分截面的理论计算, 在确定好 $n + {}^{12}\text{C}$ 反应的

总截面、弹性散射截面、去弹截面和弹性散射角分布以及各个反应道的反应截面后,就可以对出射粒子双微分截面进行计算. 这里,中子的弹性散射双微分截面没有包括在计算过程中. 表 2 中给出了有实验数据的入射中子的能量及出射粒子的出射角度,其中第二行的 α 粒子数据是由 R.C.Haight 等人在 1984 年测得;第三,四行所示的中子数据是由 M. Baba 等人分别在 1985、1987、1990 年测得.

表 2 入射中子能量与出射粒子角度

E_n/MeV	$\theta_L/(\text{^\circ})$
14.1	19.3, 30.0, 45.0, 70.0, 90.0, 110.0, 130.0(α 粒子数据)
14.1	30.0, 37.5, 45.0, 52.5, 60.0, 120.0, 135.0, 150.0
18.0 ± 0.2	25.0, 30.0, 45.0, 52.0, 60.0, 75.0, 85.0, 100.0, 105.0, 120.0, 135.0, 150.0

在所计算的能量点上,结果与实验数据符合得很好. 双微分截面的形状与能量分辨率有很大关系,若能量分辨率取值较小(例如取 0.20MeV),则峰值比较尖锐,一般能量分辨率取 0.40MeV. 计算结果显示,在出射粒子的整个出射角度内,双微分截面的形状具有三个明显的分立峰,基本不随出射角度的变化而变化,仅随出射角度的增加,双微分截面值逐渐减小,并向出射粒子能量减小的方向偏移. 这是由于轻核反应中预平衡发射占主导地位,还未达到统计平衡,就会有有

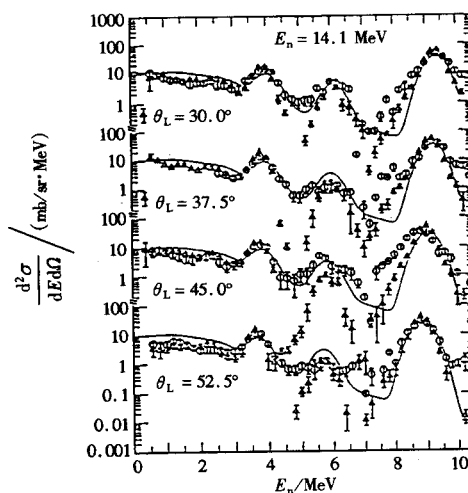


图 2 出射中子双微分截面的计算值与实验值的比较

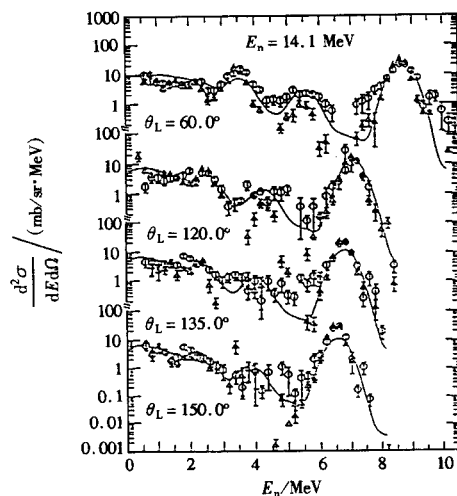


图 3 出射中子双微分截面计算值与实验值的比较

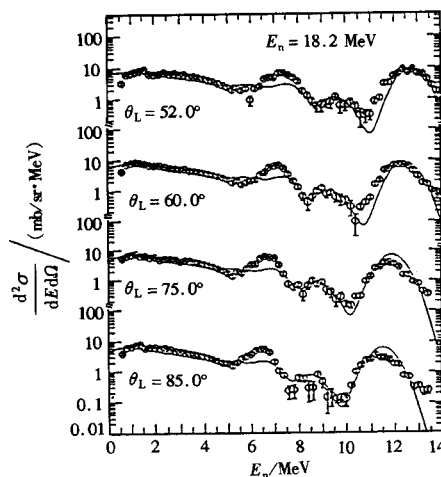


图 4 出射中子双微分截面计算值与实验值的比较

大几率发射粒子,并保持前冲趋势;考虑到能量、宇称守恒以及反冲核效应,在小角度时,出射粒子的能量较大,其双微分截面值也较大;随着出射角度的增加,出射粒子的能量必然会逐渐减小,其双微分截面值下降,并向着出射粒子能量减小的趋势偏移.

在图 2—4 中,给出了出射中子双微分截面计算结果与实验数据^[13,14]的比较,其中入射中子能量分别为 14.1、18.2MeV. 计算结果表明,出射中子的双微分截面全部是分立能级的贡献,以 $E_n = 14.1\text{MeV}$, $\theta_L = 45.0^\circ$ 时出射中子的双微分截面为例,在出射中子能量大于 3MeV 时主要为第一次发射中子的贡献,此时复合核¹³C 的激发能比较高,有很大几率发射能量较高的中子,图中从右到左三个峰的形成,主要为处于激发态的¹³C 发射一个中子后,退激到¹²C 第一、第二和第三激发态所作的贡献;在出射中子能量小于 3MeV 时主要为第二次发射中子的贡献,其中包括 (n, 2n), (n, 3 α n) 反应.

5 结论

在统一的 Hauser-Feshbach 理论和角动量相关的激子模型基础上,建立了轻核反应的新理论,并用以研究了入射能量 $E_n < 20.0\text{MeV}$ 时中子引起¹²C 的反应,计算结果表明:预平衡反应机制在整个反应过程中占主导地位,且粒子发射过程都是从分立能级到分立能级之间的发射. 各个反应道截面与出射粒子的双微分截面计算结果与实验数据符合得很好,可以看出,所应用的理论方法处理轻核反应已相当成功.

参 考 文 献

- 1 Zhang Jingshang. Nucl. Sci. Eng., 1994, **114**:55—58
- 2 Zhang Jingshang, Wen Yuanqi. Chin. J. of Nucl. Phys., 1994, **16**:153—160
- 3 Zhang Jingshang. Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Basic Science and Technology. Gatlinburg, Tennessee. 1994, **May9-13**:932—943
- 4 Zhang Jingshang, Zhou Suijiang. Chin. J. of Nucl. Phys., 1996, **18**:28—32
- 5 Zhang Jingshang. Fast Neutron Physics, 1996, 201—213
- 6 Antolkovic B, Dolenc Z. Nucl. Phys., 1975, **A237**:235—243
- 7 Firestone R B, Shirley V S. Table of Isotopes 1996 Eighth Edition, A Wiley-interscience Publication John Wiley and Sonc. Sci.
- 8 Frye Gr G M et al. Phys. Rev., 1955, **99**:1375—1380
- 9 Baba M et al. Conf. on Nuclear Data for Basic & Applied Sci., Santa Fe, 1985, **1**:223—229
- 10 Brede H J et al. Nucl. Sci. Eng., 1991, **107**:22—27
- 11 Antolkovic B et al. Nucl. Sci. Eng., 1991, **107**:1—14
- 12 Stevens A P. 1976, **INIS-MF-3596**
- 13 Baba M. 1987, **NETU-49**
- 14 Baba M et al. **JAERI-M-90-025**, Tokai Reports, 1990, 383—34
- 15 Baba M et al. Conf. on Nuclear Data for Basic & Applied Sci., Santa Fe, 1985, **223**

Theoretic Calculation and Analysis for Neutron Induced Reaction on ^{12}C Below 20MeV *

Cao Ligang Sun Xiuquan Zhou Jinfeng

(Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069)

Han Yinlu Zhang Jingshang

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract A new method for light nucleus reaction has been developed based on the unified Hauser-Feshbach and exciton model. The nuclear data calculation for $n + ^{12}\text{C}$ reaction, as example, has been performed in order to study the mechanism and the characteristic. The comparisons of total outgoing neutron and alpha particle with the measured experimental data indicate that the way of calculation for light nucleus reaction are successful.

Key words Hauser-Feshbach theory, angular momentum dependent exciton model, discrete level, double differential cross section, recoil nuclei

Received 13 July 1998

* Project Supported by the Science Foundation of Chinese Nuclear Industry