

# 中子诱发 $^{16}\text{O}$ 双微分截面的理论分析

范晓丽 孙秀泉

(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** 应用已经发展的轻核反应新模型理论,计算和分析了中子诱发 $^{16}\text{O}$  反应截面,比较和分析了出射中子双微分截面的理论计算结果和实验数据.从理论计算结果与实验的符合情况看,这一理论和方法对于计算轻核的双微分截面是成功的.

**关键词** 双微分截面 豪泽-费许巴赫理论 激子模型 分离能级 反冲核效应 轻核反应

## 1 引言

中子诱发的轻核反应,在核科学和工程的应用以及在理论方法的研究中都是很有意义的.对于轻核,在入射能量小于 20MeV 时,反应截面有很强的共振效应,R-矩阵理论<sup>[1]</sup>可以成功的分析这一问题,但出射粒子双微分截面的理论计算及分析仍是一个问题,至今,在国际上还没有一个合适的理论和方法计算出射粒子的双微分截面.为解决这一问题,在统一的豪泽-费许巴赫理论与激子模型的基础上,文献[2]中发展了一个新的轻核反应理论模型,并且用这一理论模型对中子诱发 $^{12}\text{C}$  反应出射粒子双微分截面进行了计算和分析,结果表明这一新的理论模型可以相当成功地再现实验数据.而中子诱发 $^{16}\text{O}$  的反应,除与  $n+^{12}\text{C}$  反应有相似的特征外,还有其特殊的性质.对于  $n+^{16}\text{O}$  反应,在入射能量小于 20MeV 时,有很多反应道开放,除了连续粒子发射外,还包括两体分裂;同时第一次粒子发射后,剩余核全都处于分立能级,因而二次粒子的发射都是从分立能级到分立能级.考虑了所有可能的反应及性质后,本文第一次给出了中子诱发 $^{16}\text{O}$  双微分截面的理论计算结果.

本文应用了新的轻核反应理论模型,其中一次粒子的发射率用预平衡和平衡机制来描述.在预平衡反应过程中,与角动量和宇称有关的激子模型<sup>[3]</sup>被应用以保证角动量和宇

称守恒,而且因为靶核的质量轻,为了保证能量守恒,反冲核效应也被严格的考虑.

在计算中,能谱公式为:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sum_{J\pi} \sigma_a^{J\pi} \sum_n P^{J\pi}(n) \frac{W_b^{J\pi}(n, E^*, \varepsilon)}{W_T^{J\pi}(n, E^*)}$$

$\sigma_a^{J\pi}$  表示吸收截面;  $P^{J\pi}(n)$  为  $J\pi$  道  $n$  激子态占据率,通过解描述预平衡反应的与角动量有关的激子模型<sup>[4]</sup>主方程可以求得它;  $W_b^{J\pi}(n, E^*, \varepsilon)$  是  $n$  激子态出射能量为  $\varepsilon$  的  $b$  粒子发射率. 当入射能量小于 20MeV 时,对于预平衡机制,只考虑了  $n=3$  的激子态,因此实际的能谱公式可以表示为下面的形式:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sum_{J\pi} \sigma_a^{J\pi} \left\{ P^{J\pi}(3) \frac{W_b^{J\pi}(3, E^*, \varepsilon)}{W_T^{J\pi}(3, E^*)} + Q^{J\pi}(3) \frac{W_b^{J\pi}(E^*, \varepsilon)}{W_T^{J\pi}(E^*)} \right\}$$

$Q^{J\pi}(3) = 1 - P^{J\pi}(3)$  是  $J\pi$  道达到平衡态的几率,  $W_b^{J\pi}(E^*, \varepsilon)$  表示豪泽 - 费许巴赫理论模型里的发射率. 对于两体和三体反应以及其他较为具体的理论方法和公式,可查阅文献 [2].

本文在第二部分,给出和分析了中子诱发  $^{16}\text{O}$  反应所有可能的反应道;第三部分给出了计算结果,并着重分析了入射能量为 14.1MeV 时出射中子的双微分截面,最后给出简单的小结.

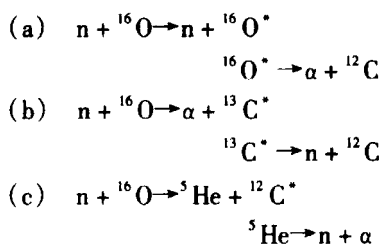
## 2 反应道分析

对于反应  $n + ^{16}\text{O}$ , 当入射中子的能量小于 20MeV 时,开放的反应道有: ( $Q$  代表反应能,  $E_{\text{th}}$  代表反应的阈能,  $Q$  和  $E_{\text{th}}$  的单位是 MeV)

n + $^{16}\text{O}$	$\gamma + ^{17}\text{O}$	$Q = 4.1430$	$E_{\text{th}} = 0.0$
	$n + ^{16}\text{O}$	$Q = 0.0$	$E_{\text{th}} = 0.0$
	$p + ^{16}\text{N}$	$Q = -9.6370$	$E_{\text{th}} = 10.2447$
	$\alpha + ^{13}\text{C}$	$Q = -2.2156$	$E_{\text{th}} = 2.3547$
	$^5\text{He} + ^{12}\text{C}$	$Q = 8.0560$	$E_{\text{th}} = 8.5640$
	$d + ^{15}\text{N}$	$Q = -9.9030$	$E_{\text{th}} = 10.5275$
	$t + ^{14}\text{N}$	$Q = -14.4790$	$E_{\text{th}} = 15.3921$
	$2n + ^{15}\text{O}$	$Q = -15.6630$	$E_{\text{th}} = 16.6507$
	$n, p + ^{15}\text{N}$	$Q = -12.1270$	$E_{\text{th}} = 12.8917$
	$n, \alpha + ^{12}\text{C}$	$Q = -7.1610$	$E_{\text{th}} = 7.6126$
	$2\alpha + ^9\text{Be}$	$Q = -12.1270$	$E_{\text{th}} = 13.6742$
	$2\alpha, n + ^8\text{Be}$	$Q = -7.1610$	$E_{\text{th}} = 15.3474$
$2\alpha, \alpha + ^5\text{He}$	$Q = -12.8610$	$E_{\text{th}} = 15.3474$	

反应道  $^{16}\text{O}(n, 2\alpha)^9\text{Be}$  来自于复合核连续发射两个  $\alpha$  粒子并到达剩余核  $^9\text{Be}$  的基态,如果是  $^9\text{Be}$  的激发态则贡献给反应道  $^{16}\text{O}(n, n)4\alpha$ . 而计算显示反应道  $^{16}\text{O}(n, n)4\alpha$  的截面在

20MeV 以下很小,可以忽略,20MeV 以下主要的反应道是  $^{16}\text{O}(n, n\alpha)^{12}\text{C}$ , 计算中包含在反应道  $^{16}\text{O}(n, n\alpha)^{12}\text{C}$  里的有以下几种反应道:



从复合核  $^{17}\text{O}^*$  到剩余核分立能级的反应情况可以用下表来说明:

表 1 从复合核  $^{17}\text{O}^*$  通过能级 K1 到达剩余核分立能级 K2 的反应情况

反应道	K1	K2	反应道	K1	K2
$(n, 2n)^{15}\text{O}$	39—73	gs	$(n, n\alpha)^{12}\text{C}$	5—15	gs
$(n, np)^{15}\text{N}$	16—53	gs	$(n, n\alpha)^{12}\text{C}$	16—37	1
$(n, np)^{15}\text{N}$	54	1	$(n, n\alpha)^{12}\text{C}$	38—53	2
$(n, np)^{15}\text{N}$	55—68	2	$(n, n\alpha)^{12}\text{C}$	54—60	3
$(n, np)^{15}\text{N}$	69—73	3	$(n, n\alpha)^{12}\text{C}$	61—68	4
$(n, pn)^{15}\text{N}$	4—27	gs	$(n, n\alpha)^{12}\text{C}$	69—73	5
$(n, 2\alpha)^9\text{Be}$	15—24	gs	$(n, n\alpha)^{12}\text{C}$	4—9	gs
$(n, 2\alpha)^9\text{Be}$	25	1	$(n, n\alpha)^{12}\text{C}$	10—24	1
$(n, 2\alpha)^9\text{Be}$	26—29	5	$(n, n\alpha)^{12}\text{C}$	25—29	2

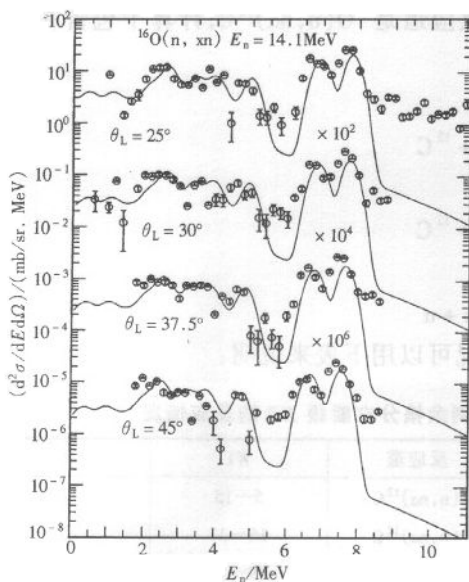
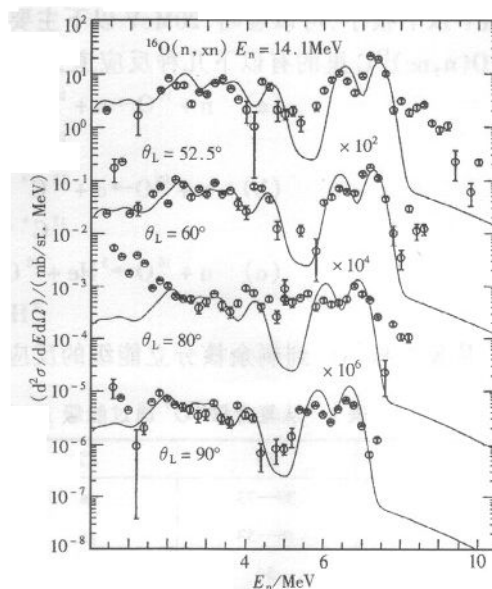
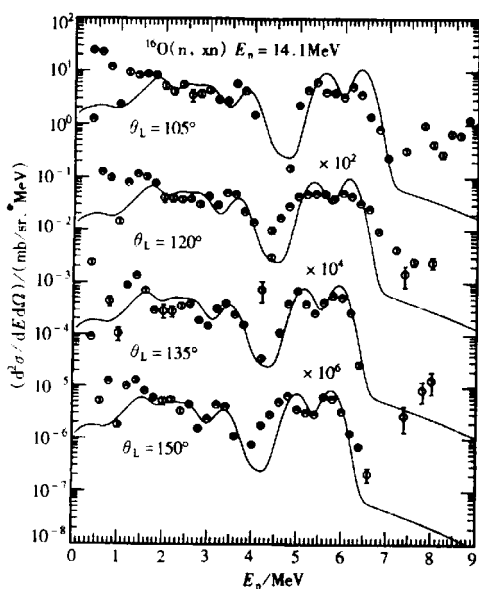
注:表中的 gs 代表基态

从上表可以看出,复合核连续发射两个  $\alpha$  粒子后,剩余核是  $^9\text{Be}$ ,而  $^9\text{Be}$  的激发态不稳定,会接着发射一个中子同时剩余核  $^8\text{Be}$  两体分裂( $^8\text{Be} \rightarrow \alpha + \alpha$ ),当  $^9\text{Be}$  处于第 2 激发态以上时,它还会接着发射第三个  $\alpha$  粒子,剩余核是  $^5\text{He}$ , $^5\text{He}$  自发衰变为一个中子和一个  $\alpha$  粒子( $^5\text{He} \rightarrow n + \alpha$ ). 既然  $^8\text{Be}$  和  $^5\text{He}$  都不稳定,反应道  $^{16}\text{O}(n, 2\alpha n)^8\text{Be}$  和反应道  $^{16}\text{O}(n, 3\alpha)^5\text{He}$  都归于反应道  $^{16}\text{O}(n, n)4\alpha$ . 因为反应道  $^{16}\text{O}(n, n)4\alpha$  的截面很小,所以表中没有列出.

### 3 计算结果及分析

应用已经发展的轻核反应理论模型,对于入射能量在 20MeV 以下的反应  $n + ^{16}\text{O}$  进行了理论计算. 首先通过调节中子光学势参数计算了反应总截面,弹性散射截面,去弹截面,以及弹性散射角分布,计算结果与实验数据符合很好. 然后再通过调节带电粒子光学势参数来确定出射带电粒子各反应道截面,在此基础上利用光学模型计算出各种粒子的发射率,并将发射率用于双微分截面的计算. 由于篇幅有限,在这里不给出各反应截面的计算结果,只给出双微分截面的计算结果及分析.

从我们的计算结果发现,在整个反应过程中,既有预平衡态发射,又有平衡态发射,且预平衡态发射占主要部分,当入射能量为 14.1MeV 时,预平衡态占 65.05%,而平衡态只占 34.95%. 在图 1, 2, 3 中给出了入射中子能量为 14.1MeV, 出射角度为: 25.0°, 30.0°,

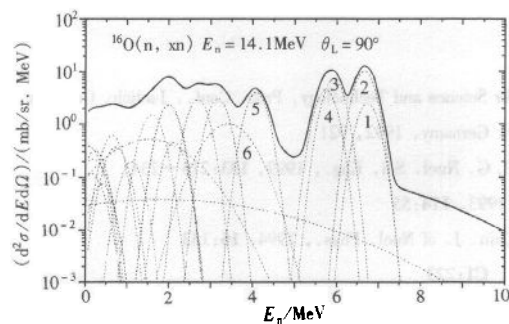
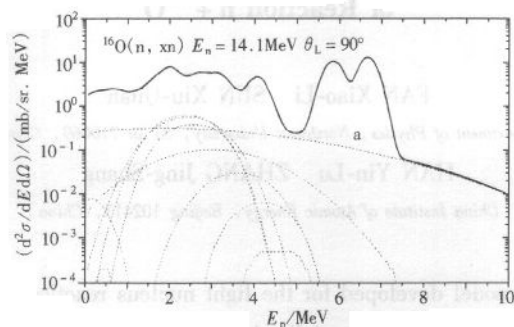
图1  $n + {}^{16}\text{O}$  反应的双微分截面图2  $n + {}^{16}\text{O}$  反应的双微分截面图3  $n + {}^{16}\text{O}$  反应的双微分截面

37.5°, 45.0°, 52.5°, 60.0°, 80.0°, 90.0°, 105.0°, 120.0°, 135.0°和 150.0°时出射中子双微分截面的理论计算结果与实验数据的比较, 图中的实验数据是 M. Baba 在 1988 年时测量的<sup>[5]</sup>, 从图中可以看出理论计算结果与实验数据符合的很好.

对每一个角度来说, 总出射中子的能量-角度谱包括了许多反应道出射中子的贡献, 它们各不相同, 作为一个例子, 在图 4, 5 中给出  $E_n = 14.1\text{MeV}$ , 出射角度为 90° 的出射中子分立谱. (图中只给出截面值大于  $10^{-4}$  (mb/sr.MeV) 的分立谱)

第一次发射中子的分立谱在图 4 中给出. 当入射能量为 14.1MeV 时, 一次中子的分立谱分别是复合核  ${}^{17}\text{O}^*$  到剩余核  ${}^{16}\text{O}$  的第 1 至第 22 激发能级发射的, 总出射中子能量-角度谱右边的 3 个峰主要是从复合核  ${}^{17}\text{O}^*$  到剩余核  ${}^{16}\text{O}$  的第 1 至第 5 激发态的发射. 因为一次中子的分立谱太多了, 所以剩余核  ${}^{16}\text{O}$  的第 6 激发态以上的分立谱没有标明, 它们都贡献给了总中子谱的低能区.

次级中子的分立谱在图 5 中给出, 次级中子来自于反应道  ${}^{16}\text{O}(n, \alpha n){}^{12}\text{C}$  和反应道  ${}^{16}\text{O}(n, \text{pn}){}^{15}\text{N}$ , 因为反应道  ${}^{16}\text{O}(n, \text{pn}){}^{15}\text{N}$  的截面值都小于  $10^{-4}$  (mb/sr.MeV), 所以图中所有

图4  $n + ^{16}\text{O}$  一次出射中子分立谱图5  $n + ^{16}\text{O}$  次级出射中子分立谱

的次级中子分立谱都来自于反应道 $^{16}\text{O}(n, \alpha n)^{12}\text{C}$ 。图中各分立谱的中子是分别从剩余核 $^{13}\text{C}^*$ 的第4到第11激发态发射的,全部的次级谱都贡献给了总中子谱的低能区。 $^{13}\text{C}^*$ 第四能级的宽度为1.47 MeV,对应于这条能级的分立谱也很宽,在图中以字母“a”标明,这条分立谱是从 $^{13}\text{C}^*$ 的第4激发态到余核 $^{12}\text{C}$ 基态的发射。

## 4 小结

应用新的轻核反应理论模型,对 $n + ^{16}\text{O}$ 反应的各种反应截面进行了计算和分析,并且着重分析了出射中子的双微分截面。在计算过程中,严格考虑了预平衡过程的角动量耦合效应,并且因为靶核的质量轻,为了保证能量守恒,还考虑了反冲核效应,另外为了更好的符合双微分截面的实验数据,测量中能级宽度的影响也被加以考虑。

通过计算发现,在整个反应过程中,二次粒子的发射都是从分立能级到分立能级,预平衡反应占主要部分,而平衡态发射只占次要部分。从整个计算情况看,理论计算是成功的,也证明了这一新的理论模型<sup>[2]</sup>能够很好的再现和分析轻核反应的实验数据。

**参考文献 (References)**

- 1 Hale G M et al. Nuclear Data for Science and Technology, Proc. Conf., Juelich, Germany, 1991, May (LA-UR-91-1516), Ed S M, Qain, I. Springer-Verlay, Germany, 1992, 921
- 2 ZHANG J S, HAN Y L, CAO L G. Nucl. Sci. Eng., 1999, **133**:218—234
- 3 ZHANG J S. Nucl. Sci. Eng. 1993, **114**:55
- 4 ZHANG J S, WEN Yuan-Qi. Chin. J. of Nucl. Phys., 1994, **16**:153
- 5 Baba M et al. 85SANTA, 1985, **C1**:223

**Theoretical Analysis for the Double Differential Cross Section  
of Reaction  $n + {}^{16}\text{O}$** 

FAN Xiao-Li SUN Xiu-Quan

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

HAN Yin-Lu ZHANG Jing-Shang

*(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)*

**Abstract** Using the new model developed for the light nucleus reactions, the cross sections of the reaction  $n + {}^{16}\text{O}$  have been calculated, especially the double differential cross sections of the outgoing neutrons have been calculated. To conserve the angular momentum, the angular momentum coupling effect is taken into account in the preequilibrium emission process. Because of the lightness of target mass, the recoil effect is also taken into account to maintain the energy balance. The fitting of the calculated results and the experimental data shows that this method is successful in calculating the double-differential cross section of the light nucleus.

**Key words** double differential cross section, Hauser-Feshbach theory, exciton model, discrete level, recoil nucleus effect, light nuclear reaction