

# 非束缚核 $^{11}\text{N}$ 共振能级研究\*

王宏伟<sup>1)</sup> 段利敏 袁小华 付芬

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 简要回顾了目前有关非束缚态核 $^{11}\text{N}$ 的实验研究现状,并根据GANIL和MSU的逆运动学弹性共振散射实验的结果,用多能级 $R$ 矩阵理论拟合了散射质子的激发函数共振峰.拟合结果表明,新的 $^{11}\text{N}$ 能级顺序应为:  $1/2^+$ ,  $1/2^-$ ,  $5/2^+$ ,  $3/2^+$ ,  $3/2^-$ ,  $5/2^+$ ,  $7/2^-$ ,同镜像核 $^{11}\text{Be}$ 的实验测量结果和GCM理论计算 $^{11}\text{N}$ 的能级顺序相一致.

**关键词** 非束缚核 共振能级 共振弹性散射  $R$ 矩阵理论

## 1 引言

放射性束物理的发展推动了核物理的研究向着同位旋自由度方向进一步拓展,因此奇异核的研究成为当前最活跃的研究热点之一.这一区域的研究,已经揭示出了许多独特的现象,如晕核系统、能级翻转(或称为侵入态)、软模巨共振激发模式、 $\beta$ 缓发粒子发射、滴线附近 $N=8$ 幻数的消失和新幻数的出现等,其中基态能级翻转现象是对传统壳结构的挑战,它首先在研究 $^{11}\text{Be}$ 核时就已经被发现.理论研究认为,必须引入组态混合才能再现 $^{11}\text{Be}$ 的能级翻转现象<sup>[1]</sup>,一些理论研究也预言了同中子的核素 $^9\text{He}$ ,  $^{10}\text{Li}$ 以及 $^{11}\text{Be}$ 的镜像核 $^{11}\text{N}$ 等也存在着能级翻转现象<sup>[2, 3]</sup>.目前已经有转移反应、末态相互作用、逆运动学弹性共振散射等实验方法的测量结果,但是不同的实验结果之间还是存在差异,因此精确的实验验证对于检验理论计算的可靠性,拓展现有的核结构模型具有重要作用.有多个实验组对 $^{11}\text{N}$ 进行了研究,已经从实验上验证了它的基态是自旋翻转,但是其4MeV以上的共振能级的能量和自旋宇称等还没有定论.

## 2 $^{11}\text{N}$ 的理论和实验研究现状

$^{11}\text{N}$ 作为 $^{11}\text{Be}$ 的镜像核,也被认为存在着能级翻

转现象,即基态的自旋宇称为 $1/2^+(1s_{1/2})$ ,而不是经典壳模型所预言的 $1/2^-(1p_{1/2})$ . $^{11}\text{N}$ 的第1次实验数据是由Benenson等<sup>[4]</sup>人在 $^{14}\text{N}(^3\text{He}, ^6\text{He})^{11}\text{N}$ 反应中得到的,在 $^{10}\text{C}+p$ 阈上2.24MeV的地方测量到一个共振态,其宽度为0.74MeV,经过讨论解释为 $1/2^-$ 第1激发态,而非 $1/2^+$ 基态,基态是从同位旋多重态质量公式(IMME, Isobaric Multiplet Mass equation)推导出的,能量为1.9MeV.1995年Fortune等<sup>[5]</sup>认为IMME不能应用到轻的束缚(或者非束缚) $2s_{1/2}$ 态,他们用势模型计算后得到 $^{11}\text{N}$ 基态的能量为 $E_{\text{decay}} = 1.60 \pm 0.22\text{MeV}$ ,  $\Gamma = 1.58_{-0.52}^{+0.75}\text{MeV}$ .Barker<sup>[6]</sup>试图用同样的模型去分析时却没有得到同样的结论,他认为Fortune等的势模型只能用于谱因子接近1.0的单粒子态,因此用了不同方法来计算 $^{11}\text{N}$ 的基态能级,但得到的结论却同Fortune的一致( $E_{\text{decay}} = 1.60\text{MeV}$ ,  $\Gamma = 1.39\text{MeV}$ ).1995年Guimaraes等<sup>[7]</sup>测量相同的反应 $^{14}\text{N}(^3\text{He}, ^6\text{He})^{11}\text{N}$ 时发现,这个能级实际上可以分解为两个能级,新的能级在1.2MeV(质子阈以上).Thoennesen等人<sup>[8]</sup>在研究 $^{12}\text{N}$ 的碎片时也发现了这一低激发能级.1996年L.Axelsson等人<sup>[9]</sup>采用弹性共振散射方法首次对 $^{11}\text{N}$ 进行了直接测量,他们的结果为 $1.3 \pm 0.04\text{MeV}$  ( $1/2^+$ ),  $2.04 \pm 0.04\text{MeV}$  ( $1/2^-$ ),  $3.72 \pm 0.04\text{MeV}$  ( $5/2^+$ ),  $4.32\text{MeV}$  ( $3/2^-$ ),  $5.1\text{MeV}$  ( $3/2^+$ )和 $5.5\text{MeV}$  ( $5/2^+$ ).1997年P.Descouvemont<sup>[10]</sup>用产生坐

2005-04-11 收稿, 2005-07-10 收修改稿

\*国家自然科学基金(10175081, 10205020, 10475100, 10505026),国家重点基础研究发展规划项目(G2000077401),中国科学院知识创新工程重要方向项目(KTCX2-SW-N07)和中国科学院百人计划基金资助

1) E-mail: wanghw@impcas.ac.cn

标法(GCM, Generator Coordinate Method)研究了奇异性核  $^{11}\text{Be}$  和  $^{11}\text{N}$  的能级, 给出的结果如图 1 所示. 图中虚线为粒子发射阈值,  $^{11}\text{Be}$  的测量结果取自文献 [11],  $^{11}\text{N}$  的测量结果取自文献 [9], 对于前 3 个能级,  $^{11}\text{Be}$  和  $^{11}\text{N}$  具有相同的能级顺序.

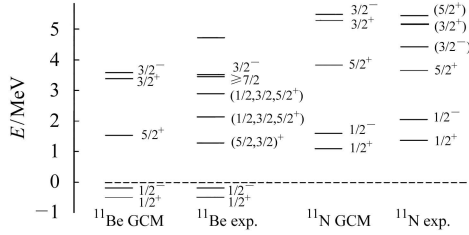


图 1 GCM 理论计算  $^{11}\text{Be}$ ,  $^{11}\text{N}$  的能级顺序, 并与当时实验测量结果的比较 (取自文献[10])

1998 年, A.Lepine-Szilny 等人<sup>[12]</sup>利用多核子转移反应  $^{12}\text{C}(^{14}\text{N}, ^{15}\text{C})^{11}\text{N}$ , 测量到 5 个共振能级为 2.18(5), 3.63(5), 4.39(5), 5.12(8), 5.87(15), 其自旋宇称分别指定为  $1/2^-$ ,  $5/2^+$ ,  $(3/2)^-$ ,  $(5/2)^-$ ,  $(7/2)^-$ , 他们没有测量到理论预言的  $1/2^+$  基态. 同年, A.Azhari 等人<sup>[13]</sup>利用  $^9\text{Be}(^{12}\text{N}, ^{10}\text{Be})^{11}\text{N}$  反应, 测量了  $^{11}\text{N}$  的质子发射谱, 除了能量为 2.24MeV ( $1/2^-$ ) 的能级外, 还测量到能量为 1.45MeV 的共振态, 当

时这一能级被认为是预期的  $1/2^+$  基态或者是由  $^{11}\text{N}$  的  $3/2^-$  态到  $^{10}\text{C}$  的第 1 激发态的衰变. 2000 年 J.M.Oliveira 等<sup>[14]</sup>利用多核子转移反应  $^{10}\text{B}(^{14}\text{N}, ^{13}\text{B})^{11}\text{N}$ , 发现了 1.63(5), 2.16(5), 3.06(8), 3.61(5), 4.33(5), 5.98(10) 和 6.54(10)MeV 共振能级 (相对于  $^{10}\text{C}+p$  阈), 其自旋宇称指定为  $1/2^+$ ,  $1/2^-$ ,  $5/2^+$ ,  $(3/2)^-$  和  $(5/2)^-$ , 其中 3.06(8) 和 6.54(10) 没有指定自旋宇称, 基态共振的质量剩余为 24.618(50)MeV, 实验宽度要小于理论的计算值. 以上的几个实验均是利用复杂的反应道来得到  $^{11}\text{N}$  核的高激发能级. 2000 年 Markenroth<sup>[15]</sup>详细地分析了 L.Axelsson 等人的实验数据, 给出的新参数为 1.45( $1/2^+$ ), 2.13( $1/2^-$ ), 3.74( $5/2^+$ ), 3.94( $3/2^+$ ), 4.33( $3/2^-$ ), 4.81( $5/2^+$ ) 和 5.4( $7/2^-$ ). 2003 年 V.Guimaraes 等<sup>[16]</sup>在日本东京大学 CNS 再次利用  $^{14}\text{N}(^3\text{He}, ^6\text{He})^{11}\text{N}$  反应测量了  $^{11}\text{N}$  的基态以及低激发态能级, 并第一次测量了反应的角分布, 用扭曲波波恩近似 (DWBA) 分析后确认了对低激发态自旋的认定是正确的 (这一反应的基态共振峰不是非常明显, 这是由于反应可以直接布居到 Cohen-Kurath 态, 即  $1/2^-$ ,  $3/2^-$  和  $5/2^-$ , 因此共振峰较强, 而布居到  $1/2^+$ ,  $3/2^+$  和  $5/2^+$  态需要两步过程, 因此其共振峰较弱). 表 1 给出了  $^{11}\text{N}$  的测量和计算结果.

表 1 主要的实验结果和理论计算给出的  $^{11}\text{N}$  共振能量 (MeV) 和能级顺序, 宇称等

$^{11}\text{N}$ 的主要实验测量结果										
$J^\pi$	Guimaraes <sup>[16]</sup>		Oliveira <sup>[14]</sup>		Lepine-Szilny <sup>[12]</sup>		Markenroth <sup>[15]</sup>		Axelsson <sup>[9]</sup>	
	$E_{\text{decay}}$	$\Gamma$	$E_{\text{decay}}$	$\Gamma$	$E_{\text{decay}}$	$\Gamma$	$E_{\text{decay}}$	$\Gamma$	$E_{\text{decay}}$	$\Gamma$
$1/2^+$	1.31	0.24	1.63	0.4			1.27	1.44	1.30	0.99
$1/2^-$	2.31	0.73	2.16	0.25	2.18	0.44	2.01	0.84	2.04	0.69
$5/2^+$	3.78	0.56	3.61	0.50	3.63	0.40	3.75	0.60	3.72	0.60
$3/2^+$							3.94	0.58		
$3/2^-$	4.56	0.30	4.33	0.45	4.39	$\leq 0.2$	4.33	0.27	4.32	0.07
$5/2^+$							4.81	0.40		
$7/2^-$							5.4	0.25		
$5/2^-$	5.91	1.30	5.98	0.10	5.87	0.7			5.50	1.5
$3/2^-$	6.80	0.00	6.54	0.10						
2										
$^{11}\text{N}$ 的主要理论计算结果										
$J^\pi$	Fortune <sup>[5]</sup>		Barker <sup>[6]</sup>		Descouvemont <sup>[10]</sup>		Grevy <sup>[17]</sup>		Barker <sup>[18]a</sup>	
	$E_{\text{decay}}$	$\Gamma$	$E_{\text{decay}}$	$\Gamma$	$E_{\text{decay}}$	$\Gamma$	$E_{\text{decay}}$	$\Gamma$	$E_{\text{decay}}$	$\Gamma$
$1/2^+$	1.60	1.58	1.4	1.01	1.1	0.9	1.2	1.2	1.636	1.37
$1/2^-$	2.49	1.45	2.21	0.91	1.6	0.3	2.1	1.0	2.357	0.93
$5/2^+$	3.90	0.88	3.88	0.72	3.8	0.6	3.7	1.0	3.773	0.62
$3/2^+$					5.3	1.7				
$3/2^-$					5.5	1.3				

a: 考虑到组态混合  $^{10}\text{C}(0^+)+p$  和  $^{10}\text{C}(2^+)+p$  的计算结果.

### 3 对逆运动学弹性共振散射实验测量结果的 $R$ 矩阵理论分析

经过多核子转移反应和Markenroth等人的共振弹性散射实验测量,  $^{11}\text{N}$  最低的3个能级的能量和自旋宇称已经基本确定, 即  $E_x = 1.45\text{MeV}$  ( $1/2^+$ ),  $E_x = 2.13\text{MeV}$ , ( $1/2^-$ ) 和  $E_x = 3.74\text{MeV}$  ( $5/2^+$ ). 实验上确认了  $^{11}\text{N}$  同  $^{11}\text{Be}$  一样存在基态的自旋翻转现象, 但是对  $3.8\text{MeV}$  以上能级的测量及其自旋宇称的指定还没有一个定论. 2003年5月我们在GANIL用  $R$  矩阵理论来检验Markenroth等的实验结果时发现, 如果采用Markenroth给出的共振能级参数(见表2)计算  $^{10}\text{C}+\text{p}$  弹性共振散射激发函数时, 不能完全重复其拟合的结果, 如图2(点划线)所示. 同实验数据相比, 他们给出的能级参数不能再现能量为  $4.33\text{MeV}$  处的共振峰, 而粗实线为我们的拟合结果(拟合参数见表2). 比较我们的拟合结果和Markenroth给出的参数及其所用的公式, 发现他们利用了简化的  $R$  矩阵公式拟合了前3个能级的共振, 然后在处理能量大于  $4\text{MeV}$  的能级的共振时, 采用了势模型加共振的形式, 经过这样处理的公式, 忽略了  $3/2^+$  ( $3.94\text{MeV}$ ) 和  $3/2^-$  ( $4.33\text{MeV}$ ) 之间的干涉效应, 因此, 当我们用完全的  $R$  矩阵理论进行分析时, 就会发现由于这两个能级间干涉效应, 使得实际的微分截面在  $4-5\text{MeV}$  之间降低, 所以其指定的这几个高共振能量能级的自旋和宇称是

不准确的. 另外为了拟合测量结果, 他们还引入了一个能级  $3.94\text{MeV}$ ,  $J^\pi = 3/2^+$ , 这个能级在其他的转移反应实验中并没有对应的结果, 而  $4.33$  和  $4.81\text{MeV}$  的能级被认为是对应于  $^{11}\text{Be}$  的  $2.69$  和  $3.41\text{MeV}$  的镜像态,  $5.4\text{MeV}$  的引入则没有任何的依据, 仅仅是为了拟合实验结果, 因为在  $5\text{MeV}$  以上的实验数据点不可靠, 它的引入是非常可疑的, 其能量和自旋宇称都是不准确的. 从我们的  $R$  矩阵拟合结果来看, 应该存在这个能量为  $3.99\text{MeV}$  的共振态, 其自旋宇称为  $3/2^+$ , 另外, 在  $4.81\text{MeV}$  处的共振态的自旋宇称应该为  $7/2^-$ , 这一指定值同  $^{11}\text{Be}$  的测量结果以及理论计算结果是一致的(见表2).

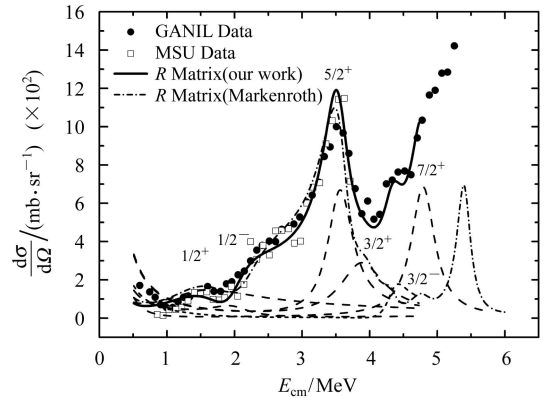


图2  $R$  矩阵拟合的  $^{10}\text{C}+\text{p}$  弹性共振散射激发函数实验点取自文献[15], ----- 为各个分波的贡献, —— 为所有分波的贡献, -·-·-· 为Markenroth等采用的能级参数计算的结果.

表2  $R$  矩阵拟合的  $^{11}\text{N}$  能级参数表

Markenroth等的数据 <sup>[15]</sup>				我们的 $R$ 矩阵拟合结果				$^{11}\text{Be}$ exp. <sup>[11]</sup>		GCM theory <sup>[10]</sup>	
$J^\pi$	$L$	$E_r$	$\Gamma_r$	$J^\pi$	$L$	$E_r$	$\Gamma_r$	$J^\pi$	$E_x$	$^{11}\text{Be}$	$^{11}\text{N}$
$1/2^+$	0	1.45	1.56	$1/2^+$	0	1.42	1.56	$1/2^+$	0.00	$1/2^+$	$1/2^+$
$1/2^-$	1	2.13	0.89	$1/2^-$	1	1.98	0.69	$1/2^-$	0.32	$1/2^-$	$1/2^-$
$5/2^+$	2	3.74	0.45	$5/2^+$	2	3.55	0.45	$(5/2, 3/2)^+$	1.78	$5/2^+$	$5/2^+$
$3/2^+$	2	3.94	0.58	$(3/2^+)$	2	3.86	0.78	$(1/2, 3/2, 5/2^+)$	2.69	$3/2^+$	$3/2^+$
$3/2^-$	1	4.33	0.27	$3/2^-$	1	4.34	0.37	$(1/2, 3/2, 5/2^+)$	3.41	$3/2^-$	$3/2^-$
$(5/2^+)$	3	4.81	0.40	$(7/2^-)$	3	4.79	0.42	$\geq 7/2$	3.89		
$(7/2^-)$	3	5.4	0.25	?				$3/2^-$	3.96		
?				?							

注:  $E_r$  和  $\Gamma_r$  分别为共振能量和质子衰变分支宽度, 其单位均为 MeV.

图3给出了各种可能的自旋宇称的指定情况, 如果不引入能量为  $3.99\text{MeV}$  ( $3/2^+$ ) 的共振能级, 则理论不能拟合实验结果(图3中点划线所示), 如果采用Guimaraes等人<sup>[16]</sup>认定的  $5.91\text{MeV}$  作为第6个共振态 ( $5/2^-$  或  $7/2^-$ ), 则拟合的结果如图中虚线与点线所示, 没有再出现激发函数在能量大于  $4.8\text{MeV}$  以后的上升趋势. 因此在Guimaraes等人结果中的  $4.5$  和  $5.9\text{MeV}$

之间可能还会有其他的能级没有被测量到. 从表格数据的对比和  $R$  矩阵的拟合结果中我们可以发现, 利用  $R$  矩阵理论给出的低共振态的自旋宇称的指定同GCM理论(generate coordinate model)<sup>[10]</sup>的计算结果是一致的, 同  $^{11}\text{Be}$  的实验测量结果也有很好的对应, 对于第6和第7个共振态来说, 目前的测量结果还有较大的差异, GCM理论也没有给出相应的计算结果, 在

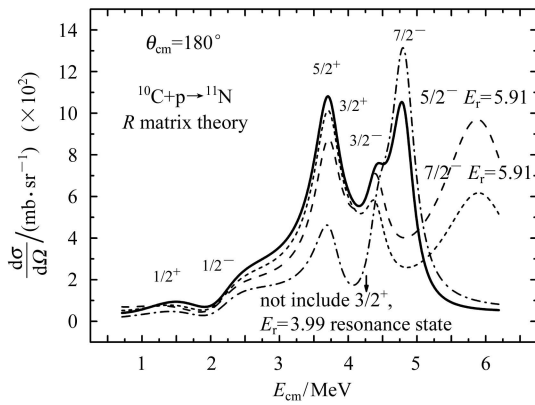


图 3  $^{11}\text{N}$  共振能级的几种可能的指定情况

MSU 和 GANIL 进行的两次  $^{11}\text{N}$  的弹性共振散射实验中, 因为  $^{10}\text{C}$  束流的能量限制, 没有能够测到能量高于 5MeV 以上的激发函数, 所以进一步的精确实验和理

论计算将会有助于我们对  $^{11}\text{N}$  激发能级的研究.

## 4 结束语

利用多能级的  $R$  矩阵理论分析了逆运动学弹性共振散射的实验结果, 给出了新的  $^{11}\text{N}$  共振态的能级顺序为  $1/2^+$ ,  $1/2^-$ ,  $5/2^+$ ,  $3/2^+$ ,  $3/2^-$ ,  $5/2^+$  和  $7/2^-$ , 同镜像核  $^{11}\text{Be}$  的实验测量结果和 GCM 理论计算的  $^{11}\text{N}$  的能级顺序相一致, 而目前壳模型的计算结果只给出了前 3 个能级的计算数据. 转移反应实验的测量表明,  $^{11}\text{N}$  可能还存在更高能量的共振态, 但是其共振的能量和自旋宇称的认定还没有完全的确定, 因此进一步的精确的实验, 对于我们系统地研究  $^{11}\text{N}$  的谱学和结构等具有重要的作用.

## 参考文献(References)

- Nigoita F, Borcea C, Carstoiu F et al. Physics Review, 1999, **C59**: 2082
- Hansen P G, Sherrill B M. Nucl. Phys., 2001, **A693**: 133
- Jonson Bjorn. Physics Report, 2004, **389**: 1
- Benenson W, Kashy E, Kong-A-Siou D H et al. Physics Review, 1974, **C9**: 2130
- Fortune H T, Koltenuk D, Lau C K. Physics Review, 1995, **C51**: 3023
- Barker F C. Physics Review, 1996, **C53**: 1449
- Guimaraes V, Kubono S, Hosaka M et al. Nuclear Physics, 1995, **A588**: 161C
- Thoennessen M. In: Proceedings of the International Conference on exotic Nuclei and Atomic masses ENAM-95. Edited de.Saint Simon M et al. Arles, France: Editions Frontiers, Gif-surYvette, 1995. 237
- Axelsson L, Borge M J G, Fayans S et al. Physics Review, 1996, **C54**: R1511
- Descouvemont P. Nuclear Physics, 1997, **A615**: 261
- Ajzenberg-Selov A. Nuclear Physics, 1990, **A506**: 1
- Lepine-Szilay A, Oliveira J M, Ostrowski A N et al. Physics Review Letters, 1998, **80**: 1601
- Azhari A, Baumann T, Brown J A et al. Physics Review, 1998, **C57**: 628
- Oliveira Jr J M, Lepine-Szilay A, Bohlen H G et al. Physics Review Letters, 2000, **84**(18): 4056
- Markenroth K, Axelsson L, Baxter S et al. Physics Review, 2000, **C62**: 034308-1
- Guimaraes V, Kubono S, Barker F C et al. Physics Review, 2003, **C67**: 064601-1
- Grevy S, Sorlin O, Vinh Mau N. Physics Review, 1997, **C56**(5): 2885
- Sherr R, Fortune H T. Physics Review, 2001, **C64**: 064307-1

## Study of Unbound Nuclei $^{11}\text{N}$ Resonance Energy Level\*

WANG Hong-Wei<sup>1)</sup> DUAN Li-Min YUAN Xiao-Hua FU Fen

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract** The excitation functions of elastic scattering proton which were measured with inverse kinematics of elastic resonance scattering reactions in GANIL and MSU have been fitted by the multi-energy level  $R$ -matrix theory. The final result shows that the new energy levels order for nucleus  $^{11}\text{N}$  should be  $1/2^+$ ,  $1/2^-$ ,  $5/2^+$ ,  $3/2^+$ ,  $3/2^-$ ,  $5/2^+$ ,  $7/2^-$ , which is consistent with the experimental results of  $^{11}\text{Be}$  (the mirror nucleus of  $^{11}\text{N}$ ) and the theoretical calculation of  $^{11}\text{N}$  with GCM theory.

**Key words** unbound nucleus, resonance energy level, resonance elastic scattering,  $R$ -matrix theory

Received 11 April 2005, Revised 10 July 2005

\*Supported by NSFC (10175081, 10205020, 10475100, 10505026), Major State Basic Research Development Program (G2000077401), Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-SW-N07) and One Hundred Person Projects of Chinese Academy of Sciences

1) E-mail: wanghw@impcas.ac.cn