

# 串列加速器次级束流线上的核结构研究\*

李志宏<sup>1)</sup> 柳卫平 白希祥 连钢 王友宝 郭冰  
曾晟 颜胜权 王宝祥 苏俊

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要** 利用北京串列加速器次级束流线产生的放射性离子束开展了核结构和核天体物理的实验研究,在晕核、核谱因子和辐射俘获反应等领域取得了一些重要的研究成果. 本文简要概述了基于该束流线的核结构实验研究.

**关键词** 放射性离子束 核结构 晕核 核谱因子

## 1 引言

放射性离子束拓宽了核反应实验中炮弹的同位旋自由度和弹靶组合的多样性,为研究远离稳定线的原子核结构提供了新的机遇. 国际核物理学界普遍认为:放射性离子束的产生及其在核物理,核天体物理和其它相关学科中的应用,是今后一个较长时期内核物理研究最重要的前沿领域之一.

利用北京串列加速器提供的稳定离子束轰击次级束流线上的氢、氘和<sup>3</sup>He气体靶,通过逆运动学的电荷交换或转移反应产生了<sup>6</sup>He, <sup>7</sup>Be, <sup>8</sup>Li, <sup>10</sup>C, <sup>11</sup>C, <sup>13</sup>N, <sup>15</sup>O, <sup>17</sup>F和<sup>18</sup>F 9种品质较好的放射性离子束,并利用这些离子束开展了核结构和核天体物理的实验研究. 核结构方面的研究工作主要有:通过测量<sup>6</sup>He(p, n)<sup>6</sup>Li反应布居<sup>6</sup>Li第二激发态的角分布,结合核物质密度分布的微观理论分析,在国际上首次证实了<sup>6</sup>Li第二激发态是一个以 $\alpha$ 为核芯的中子-质子晕态的理论预言<sup>[1]</sup>;采取轻重反应产物符合测量的实验方案,测定了<sup>8</sup>Li(d, p)<sup>9</sup>Li反应的角分布<sup>[2]</sup>,导出了<sup>9</sup>Li基态中子虚衰变的ANC,利用镜像核的电荷对称性计算了<sup>9</sup>C质子虚衰变的ANC<sup>[3]</sup>,进而导出了<sup>9</sup>C价质子的密度分布和均方根半径,证实了<sup>9</sup>C的质子晕结构<sup>[4]</sup>;核谱因子是单粒子模型中关键的核结构参数之一,对不稳定核的壳结构和幻数研究有重要意义,采用逆运动学的实验方法,测量了<sup>7</sup>Be(d, n)<sup>8</sup>B, <sup>8</sup>Li(d, n)<sup>9</sup>Be, <sup>8</sup>Li

(d, p)<sup>9</sup>Li, <sup>11</sup>C(d, n)<sup>12</sup>N和<sup>13</sup>N(d, n)<sup>14</sup>O反应的角分布,比较DWBA计算的结果,导出了<sup>8</sup>B, <sup>9</sup>Li, <sup>9</sup>Be, <sup>12</sup>N和<sup>14</sup>O基态的核谱因子<sup>[5-9]</sup>.

## 2 放射性离子束的产生

利用串列加速器提供的稳定核离子束轰击初级反应靶室中的气体靶,通过逆运动学的电荷交换或转移反应产生感兴趣的不稳定核束. 气体靶的长度为4.8cm,前后窗均采用厚度为1.9mg/cm<sup>2</sup>的Havar膜,可承受至少1.8atm的压差. 靶室的密封性良好,使用束流强度为300enA的<sup>7</sup>Li离子束照射200h,气体靶中的气压变化不超过4%. 气体靶的工作气体通常采用氢、氘和<sup>3</sup>He等原子量较小的气体,由于入射离子比靶核的质量数大,感兴趣的反应产物被运动学压缩到前向一个很小的角锥内,自然形成一种便于收集、分离、聚焦和传输的离子束. 反应产物的分离和聚焦由一个二极偏转磁铁和一对四极透镜实现.

该D-Q-Q系统在相对于初级束3°的方向接收反应产物,有效地降低了初级束卢瑟福散射对次级束的影响. 2005年初,又在D-Q-Q系统的下游安装了Danfysik公司生产的速度选择器,次级束纯度较以前有了大幅的提升. 迄今为止,串列加速器次级束流线上已经产生了<sup>6</sup>He, <sup>7</sup>Be, <sup>8</sup>Li, <sup>10</sup>C, <sup>11</sup>C, <sup>13</sup>N, <sup>15</sup>O, <sup>17</sup>F和<sup>18</sup>F 9种品质较好的放射性离子束,它们的性能指标见表1.

\* 国家自然科学基金(10375096)资助

1) E-mail: zhli@iric.ciae.ac.cn

表 1 放射性离子束的性能指标

次级束	产生反应	能量/MeV	纯度(%)	强度/pps
${}^6\text{He}$	${}^2\text{H}({}^7\text{Li}, {}^6\text{He}){}^3\text{He}$	35.7	92	500
${}^7\text{Be}$	${}^1\text{H}({}^7\text{Li}, {}^7\text{Be})\text{n}$	30.8	99	900
${}^8\text{Li}$	${}^2\text{H}({}^7\text{Li}, {}^8\text{Li}){}^1\text{H}$	40.0	82	2000
${}^{10}\text{C}$	${}^1\text{H}({}^{10}\text{B}, {}^{10}\text{C})\text{n}$	55.9	96	200
${}^{11}\text{C}$	${}^1\text{H}({}^{11}\text{B}, {}^{11}\text{C})\text{n}$	63.4	80	1000
${}^{13}\text{N}$	${}^2\text{H}({}^{12}\text{C}, {}^{13}\text{N})\text{n}$	57.8	92	1200
${}^{15}\text{O}$	${}^2\text{H}({}^{14}\text{N}, {}^{15}\text{O})\text{n}$	66.0	91	1500
${}^{17}\text{F}$	${}^2\text{H}({}^{16}\text{O}, {}^{17}\text{F})\text{n}$	76.1	90	3000
${}^{18}\text{F}$	${}^3\text{He}({}^{16}\text{O}, {}^{18}\text{F}){}^1\text{H}$	75.7	85	600

### 3 晕核的实验研究

晕核的发现引起人们极大的兴趣, 开辟了利用放射性离子束进行核物理研究的新篇章. 通过实验和理论上的不断开拓, 不仅发现了一系列丰中子轻核的中子晕结构, 还观察到若干丰质子轻核具有质子晕的迹象. 我们利用北京串列加速器次级束流线产生的放射性离子束也进行了晕结构的实验研究. 主要包括:  ${}^6\text{Li}$  第二激发态中子-质子晕<sup>[1]</sup>和 ${}^9\text{C}$ 的质子晕<sup>[4]</sup>结构的实验研究.

#### 3.1 ${}^6\text{Li}$ 第二激发态中子-质子晕

20世纪90年代有人预言稳定核的高同位旋激发态也可能具有晕结构,  ${}^{13}\text{C}$ 第一激发态和 ${}^6\text{Li}$ 第二激发态被列为首选的研究对象. 前者的中子晕结构已为实验所证实, 后者是中子晕核 ${}^6\text{He}$ 的同位旋相似态, 其中子-质子晕结构以前尚未被实验证实.

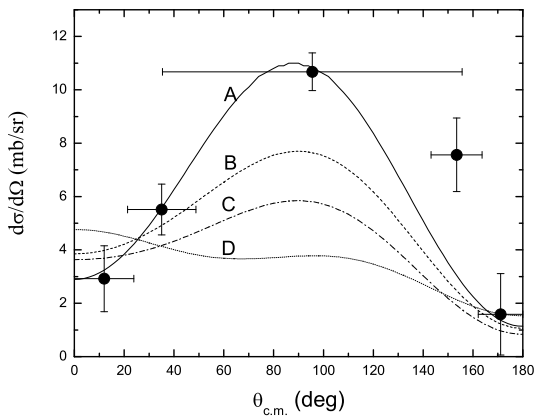


图 1 实验和理论计算的 ${}^1\text{H}({}^6\text{He}, {}^6\text{Li})\text{n}$ 反应布居 ${}^6\text{Li}$ 第二激发态的角分布

A:  ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^6\text{He}$ 都具有晕结构; B:  ${}^6\text{Li}$ 有晕,  ${}^6\text{He}$ 无晕;  
C:  ${}^6\text{He}$ 有晕,  ${}^6\text{Li}$ 无晕; D:  ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^6\text{He}$ 均无晕.

在HI-13串列加速器次级束流线上使用能量为4.17A MeV的 ${}^6\text{He}$ 次级束轰击 $(\text{CH}_2)_n$ 靶, 测量了 ${}^1\text{H}({}^6\text{He}, {}^6\text{Li})\text{n}$ 反应布居 ${}^6\text{Li}$ 基态和第二激发态的角分布. 然后利用假定的 ${}^6\text{He}$ 基态和 ${}^6\text{Li}$ 第二激发态有晕和无晕的各种核子密度分布的组合, 分别计算了入射道和出射道的微观光学势, 并将其输入通用的DWBA核反应程序计算了 ${}^1\text{H}({}^6\text{He}, {}^6\text{Li})\text{n}$ 反应布居 ${}^6\text{Li}$ 第二激发态的角分布, 计算结果示于图1. 可以看出, 只有假定 ${}^6\text{He}$ 基态和 ${}^6\text{Li}$ 第二激发态均具有三体模型预言的晕结构才能得到与实验相符的角分布. 本工作第一次从实验上证实了 ${}^6\text{Li}$ 第二激发态是一个以 $\alpha$ 为核芯的中子-质子晕态.

#### 3.2 ${}^9\text{C}$ 质子晕

${}^9\text{C}$ 位于质子滴线附近, 它的质子分离能较小, 只有1.298MeV, 一些理论计算表明其可能具有质子晕结构. 然而, 对 ${}^9\text{C}$ 在不同靶核上相互作用截面的理论分析却给出了相互矛盾的结果, 使用独立的实验方法对 ${}^9\text{C}$ 的晕效应进行进一步的研究非常必要.

使用 ${}^8\text{Li}$ 次级束轰击 $(\text{CD}_2)_n$ 靶, 采用对反应产物 ${}^9\text{Li}$ 和质子的符合测量方案, 得到了 ${}^2\text{H}({}^8\text{Li}, {}^9\text{Li}){}^1\text{H}$ 反应的角分布, 通过与DWBA的计算结果的比较, 导出了 ${}^9\text{Li} \rightarrow {}^8\text{Li} + \text{n}$ 虚衰变的渐近归一化系数(ANC)为 $1.15\text{fm}^{-1/2}$ .

${}^9\text{C}$ 和 ${}^9\text{Li}$ 是镜像核,  ${}^9\text{C}$ 的质子ANC和 ${}^9\text{Li}$ 的中子ANC有如下关系,

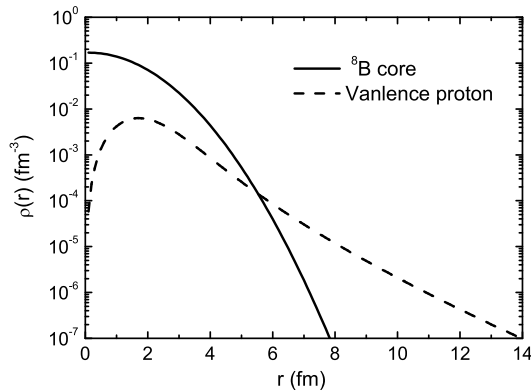
$$\frac{C_{1,3/2}^{9\text{C}}}{C_{1,3/2}^{9\text{Li}}} = \left| \frac{F_l(ik_p R_N)}{k_p R_N j_l(ik_n R_N)} \right|, \quad (1)$$

其中 $F_l$ 和 $j_l$ 分别为正则库仑波函数和Bessel波函数,  $k_p$ 和 $k_n$ 为束缚态价核子的波数,  $R_N$ 为核芯与核子的相互作用半径. 把 ${}^9\text{Li}$ 的ANC代入(1)式, 可以计算出 ${}^9\text{C}$ 的质子ANC为 $1.08\text{fm}^{-1/2}$ .

${}^9\text{C}$ 价质子的均方根半径可以表示为

$$\langle r^2 \rangle^{1/2} = \left[ S_{A,p}^B \int_0^{R_N} r^4 \Phi^2(r) dr + (C_{A,p}^B)^2 \times \int_{R_N}^{\infty} r^2 W_{\eta, l+1/2}^2(2k_B r) dr \right]^{1/2}, \quad (2)$$

其中 $S_{A,p}^B$ 为核谱因子,  $\Phi(r)$ 为价质子的束缚态波函数,  $W_{\eta, l+1/2}(2k_B r)$ 为Whittaker波函数. 通过计算, 得到了 ${}^9\text{C}$ 价质子的均方根半径为3.61fm. 它的密度分布见图2. 对价质子在相互作用半径外的几率以及核外部分对均方根半径的贡献的分析表明,  ${}^9\text{C}$ 具有质子晕的特征.

图2  ${}^9\text{C}$ 的价质子及核芯 ${}^8\text{B}$ 的密度分布

## 4 核谱因子

核谱因子是单粒子模型中关键的核结构参数之一,对不稳定核的壳结构和幻数研究有重要意义.我们利用北京串列加速器次级束流线上产生的放射性离子束,测量了 ${}^7\text{Be}(d, n){}^8\text{B}$ ,  ${}^8\text{Li}(d, p){}^9\text{Li}$ ,  ${}^8\text{Li}(d, n){}^9\text{Be}$ ,  ${}^{11}\text{C}(d, n){}^{12}\text{N}$ 和 ${}^{13}\text{N}(d, n){}^{14}\text{O}$ 等转移反应的角分布,结合DWBA计算,导出了 ${}^8\text{B}$ ,  ${}^9\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{12}\text{N}$ 和 ${}^{14}\text{O}$ 基态

的核谱因子,结果列于表2中.

表2 实验提取的核谱因子与理论计算的比较

转移反应	实验值	理论值
${}^7\text{Be}(d, n){}^8\text{B}$	$1.18 \pm 0.10$	1.09
${}^8\text{Li}(d, p){}^9\text{Li}$	$0.68 \pm 0.14$	0.81
${}^8\text{Li}(d, n){}^9\text{Be}$	$0.64 \pm 0.21$	-
${}^{11}\text{C}(d, n){}^{12}\text{N}$	$1.1 \pm 0.4$	0.83
${}^{13}\text{N}(d, n){}^{14}\text{O}$	$1.88 \pm 0.34$	1.73

利用辐射俘获理论,使用上述实验得到的核谱因子计算了 ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$ ,  ${}^8\text{Li}(n, \gamma){}^9\text{Li}$ ,  ${}^8\text{Li}(p, \gamma){}^9\text{Be}$ ,  ${}^{11}\text{C}(p, \gamma){}^{12}\text{N}$ 和 ${}^{13}\text{N}(p, \gamma){}^{14}\text{O}$ 等辐射俘获反应的天体物理S因子和反应率<sup>[5-9]</sup>.

## 5 结论

使用北京串列加速器次级束流线产生的 ${}^6\text{He}$ ,  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^8\text{Li}$ ,  ${}^{11}\text{C}$ ,  ${}^{13}\text{N}$ 等放射性离子束开展了晕核、核谱因子等核结构实验研究,证实了 ${}^6\text{Li}$ 第二激发态具有中子-质子晕结构, ${}^9\text{C}$ 是一个质子晕核,测定了 ${}^8\text{B}$ ,  ${}^9\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{12}\text{N}$ 和 ${}^{14}\text{O}$ 基态的核谱因子.

## 参考文献(References)

- LI Zhi-Hong, LIU Wei-Ping, BAI Xi-Xiang et al. Phys. Lett., 2002, **B527**: 50—54
- LI Zhi-Hong, LIU Wei-Ping, BAI Xi-Xiang et al. Phys. Rev., 2005, **C71** 052801(R): 1—5
- GUO Bing, LI Zhi-Hong, LIU Wei-Ping et al. Nucl. Phys., 2005, **A761**: 162—172
- LI Zhi-Hong, GUO Bing, LIU Wei-Ping et al. Chin. Phys. Lett., 2005, **22**: 1870—1872
- LIU Wei-Ping, BAI Xi-Xiang, ZHOU Shu-Hua et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**: 611—614
- SU Jun, LI Zhi-Hong, LIU Wei-Ping et al. 2006, **23**: 55—57
- LIU Wei-Ping, LI Zhi-Hong, BAI Xi-Xiang et al. Nucl. Phys., 2003, **A728**: 275—284
- LI Zhi-Hong, GUO Bing, YAN Sheng-Quan et al. Phys. Rev., 2006, **C035801**: 1—7
- LIU Wei-Ping, LI Zhi-Hong, BAI Xi-Xiang et al. Nucl. Phys., 2005, **A758**: 110c—113c

# Nuclear Structure Studies on the Secondary Beam Facility of Beijing Tandem Accelerator\*

LI Zhi-Hong<sup>1)</sup> LIU Wei-Ping BAI Xi-Xiang LIAN Gang WANG You-Bao GUO Bing  
ZENG Sheng YAN Sheng-Quan WANG Bao-Xiang SU Jun  
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract** The radioactive ion beams produced on the secondary beam facility of Beijing tandem accelerator have been used in the experimental studies of nuclear structure and nuclear astrophysics. The results for the nuclear structure studies are introduced briefly in the present paper.

**Key words** radioactive ion beam, nuclear structure, halo nucleus, spectroscopic factor

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (10375096)

1) E-mail: zhli@irie.ciae.ac.cn