

$^{11}\text{C}(\text{d},\text{n})^{12}\text{N}$ 反应角分布的测量和 虚衰变 $^{12}\text{N} \rightarrow ^{11}\text{C} + \text{p}$ 渐近归一化系数的确定

郭冰^{1,2}, 柳卫平¹, 李志宏¹, 白希祥¹, 曾晟¹, 陈永寿¹,
颜胜权¹, 王宝祥¹, 连钢¹, 陆昀¹, 吴开谔¹, 舒能川¹, 陆中道¹

(1. 中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413;
2. 山西师范大学现代物理研究所, 山西 临汾 041004)

摘要: 利用 HF13 串列加速器次级束流线产生的 ^{11}C 束测量了质心系能量为 9.8 MeV 的 $^{11}\text{C}(\text{d},\text{n})^{12}\text{N}$ 反应的角分布。通过改变 DWUCK4 程序中径向积分的下限, 验证了该反应的周边性。比较了实验结果与扭曲波玻恩近似 (DWBA) 计算, 得出虚衰变 $^{12}\text{N} \rightarrow ^{11}\text{C} + \text{p}$ 的渐近归一化系数 (ANC) 平方为 $(2.86 \pm 0.91) \text{fm}^{-1}$ 。结果表明: 直接俘获对 $^{11}\text{C}(\text{p}, \text{n})^{12}\text{N}$ 反应有重要贡献。

关键词: $^2\text{H}({}^{11}\text{C}, {}^{12}\text{N})\text{n}$ 逆运动学反应; 角分布; 扭曲波玻恩近似; 渐近归一化系数方法

中图分类号: O571.423

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2005)02-0118-06

Measurement of Angular Distribution for $^{11}\text{C}(\text{d},\text{n})^{12}\text{N}$ Reaction and Determination of Asymptotic Normalization Coefficient for the Virtual Decay $^{12}\text{N} \rightarrow ^{11}\text{C} + \text{p}$

GUO Bing^{1,2}, LIU Wei-ping¹, LI Zhi-hong¹, BAI Xi-xiang¹, ZENG Sheng¹,
CHEN Yong-shou¹, YAN Sheng-quan¹, WANG Bao-xiang¹, LIAN Gang¹,
LU Yun¹, WU Kai-su¹, SHU Neng-chuan¹, LU Zhong-dao¹

(1. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-46, Beijing 102413, China;

2. Department of Modern Physics, Shanxi Normal University, Linfen 041004, China)

Abstract: Angular distribution of the $^{11}\text{C}(\text{d},\text{n})^{12}\text{N}$ reaction at $E_{\text{c.m.}} = 9.8 \text{ MeV}$ was measured in inverse kinematics with the secondary ^{11}C beam. The peripherality of this reaction was also verified by changing the radial parameter limit in distorted wave Born approximation (DWBA) calculations. The experimental data were analyzed with DWBA calculations and thereby the square of asymptotic normalization coefficient (ANC) was extracted to be $(2.86 \pm 0.91) \text{fm}^{-1}$ for the virtual decay $^{12}\text{N} \rightarrow ^{11}\text{C} + \text{p}$. The present work shows that the direct capture contribution in the $^{11}\text{C}(\text{p}, \text{n})^{12}\text{N}$ reaction is of importance.

收稿日期: 2004-02-26; 修回日期: 2004-10-10

基金项目: 国家重点基础研究发展规划“973”项目 (G200077400); 国家自然科学基金资助项目 (19735010, 19935030, 10025524, 10045002, 10075078)

作者简介: 郭冰 (1978—), 男, 山西太原人, 硕士研究生, 粒子物理和原子核物理专业

Key words: $^2\text{H} (^{11}\text{C}, ^{12}\text{N}) \text{n}$ reaction in inverse kinematics; angular distribution; distorted-wave Born approximation; asymptotic normalization coefficient method

在特定的高温、高密度天体物理环境中, A 13丰质子核的(p,)和(,)辐射俘获反应速率超过 衰变或光致分裂速率, 高温 pp 反应链成为替代 $3\ ^{12}\text{C}$ 过程的另一种合成 CNO 核的机制^[1-3]。这些连接 pp 链和 CNO 核的应对大质量、贫金属星体的演化可能有重大影响。 $^{11}\text{C}(\text{p},)^{12}\text{N}$ 是高温 pp 反应链 $^3\text{He}(\text{ , })^7\text{Be}(\text{ , })^{11}\text{C}(\text{p},)^{12}\text{N}(\text{e}^+)^{12}\text{C}$ 中的关键反应之一。由于该反应的 Q 值较低, 天体物理感兴趣能区的反应截面取决于末态为 ^{12}N 基态的直接俘获过程和末态为第 1 激发态 (2^+ , 0.960 MeV) 及第 2 激发态 (2^- , 1.191 MeV) 的共振俘获过程。受截面小和 ^{11}C 束流强度低的限制, 目前尚无这一反应的直接测量。GANIL 和 RIKEN^[4,5] 通过库仑离解实验测量过共振俘获的贡献; N. K. Timofeyuk 和 S. B. Igamov^[6] 用两种不同的理论方法计算了直接俘获的贡献; 最近, Texas A & M 回旋加速器实验室^[7] 利用 $^{14}\text{N} (^{11}\text{C}, ^{12}\text{N})^{13}\text{C}$ 周边转移反应的角分布和渐近归一化系数(ANC)方法确定了直接俘获的贡献。

ANC 方法通过单核子转移反应的测量, 确定直接俘获对(p,)或(n,)反应的贡献, 它的可靠性已经得到验证^[7-12]。在本工作中, 使用 63.4 MeV 的 ^{11}C 次级束测量单核子转移反应 $^{11}\text{C}(\text{d},\text{n})^{12}\text{N}$ 的角分布, 研究虚衰变 ^{12}N $^{11}\text{C}+\text{p}$ 的 ANC。

1 实验

实验在 HF13 串联加速器次级束流线^[13,14] 上进行, 实验装置与以前的类似^[9,15]。利用 78.2 MeV ^{11}B 初级束轰击前后窗为 1.9 mg/cm² 的 Havar 膜, 长度为 4.8 cm、气压为 1.5×10^5 Pa 的氢气靶, 通过 $^1\text{H} (^{11}\text{B}, ^{11}\text{C}) \text{n}$ 反应产生 ^{11}C 。仔细调节次级束流线的 D-Q-Q 磁分离聚焦系统, 得到能量为 63.4 MeV、纯度为 70%~85% 的 ^{11}C 次级束。次级束中的主要杂质是 ^{11}B , 来自初级束在靶窗和束流管道上的卢瑟福散射。 ^{11}C 次级束经过两个 $\phi 3$ mm 准直孔后入射到厚度为 1.5 mg/cm² 的 $(\text{CD}_2)_n$ 次级

靶上。用一套 E-E 探测器望远镜记录 and 鉴别反应产物, E 是厚度为 21.7 μm 的硅探测器; E 探测器由 300 μm 厚的 11 环空心位置灵敏硅探测器和中心硅探测器构成。11 环位置灵敏硅探测器与 $(\text{CD}_2)_n$ 靶的距离为 270 mm, 覆盖的实验室系出射角度范围为 $0^\circ \sim 8.7^\circ$, 可保证反应产物 ^{12}N (最大出射角为 6.5°) 的全立体角测量。反应产物 ^{12}N 第 5 环的粒子鉴别谱示于图 1。图 1 中表示 ^{12}N 事例的二维门由蒙特卡罗模拟确定。模拟考虑了束流本身的角度歧离与能散、束斑大小以及靶厚的影响。厚度为 1.8 mg/cm² 的 C 靶用于测量本底。 $(\text{CD}_2)_n$ 靶的测量累积用了 1.26×10^8 个 ^{11}C 入射粒子, C 靶的测量累积用了 5.0×10^7 个 ^{11}C 入射粒子。同样以第 5 环为例, 图 2 示出了来自 $(\text{CD}_2)_n$ 靶和 C 靶事例的比较。图 2 中虚线表示的 ^{12}N 事例能量范围由蒙特卡罗模拟确定。

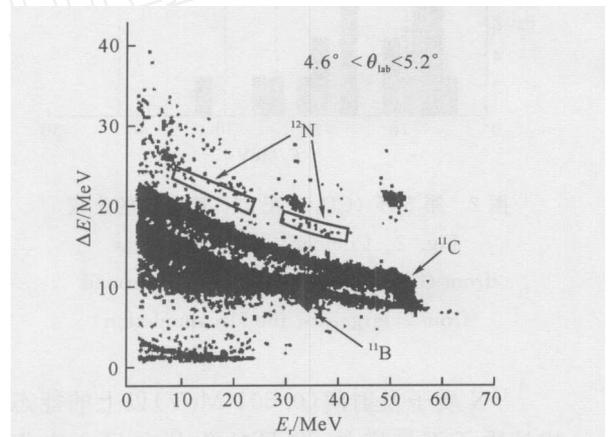


图 1 11 环探测器第 5 环 E-E 散点图

Fig. 1 Scatter plot of E vs E_r corresponding to the 5th annulation of the 10-annular detector

经扣除本底和束流归一, 得到 $^{11}\text{C}(\text{d},\text{n})^{12}\text{N}$ 反应的角分布, 结果示于图 3。图 3 中微分截面的误差主要来自统计的不确定性和利用蒙特卡罗模拟确定 ^{12}N 事例在 E-E 散点图上的二维分布时带来的不确定性。角度的不确定性来自以下 5 个因素: 束流本身的角度离散, 束斑大小, 次级靶和 E 探测器造成的角度歧离以及各环的宽度。实验室系角度的标准偏差列于表 1。

表 1 实验室系角度不确定性分析

Table 1 Analysis of angular uncertainties in laboratory frame

区域	环号	束流的 角度离散/°	束斑大小带来的 角度离散/°	靶中的 角度歧离/°	E 中的 角度歧离/°	各环宽度带来的 角度离散/°	总的角度 误差/°
前角区	0	0.3	0.13	0.12	0.53	0.32	0.70
	1	0.3	0.13	0.12	0.53	0.28	0.69
	2	0.3	0.13	0.12	0.53	0.32	0.71
	3	0.3	0.13	0.12	0.54	0.28	0.70
	4	0.3	0.13	0.13	0.55	0.30	0.72
5	0.3	0.13	0.13	0.57	0.28	0.73	
中间角区	6,7,8,9	0.3	0.13	0.15	0.66	0.51	0.91
反角区	0,1	0.3	0.13	0.19	0.83	0.82	1.23
	2,3	0.3	0.13	0.18	0.81	0.65	1.11
	4,5	0.3	0.13	0.18	0.78	0.64	1.07

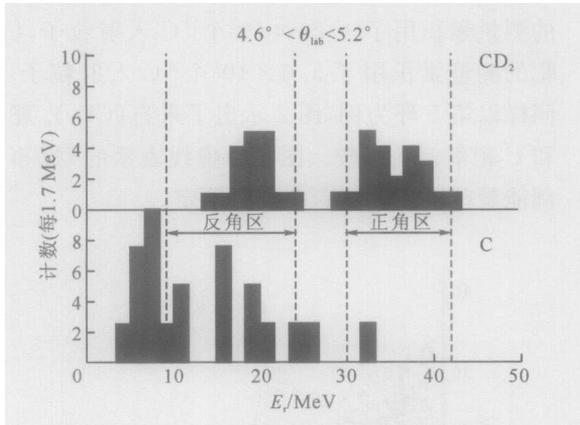


图 2 第 5 环 (CD₂)_n 靶和 C 靶事例的比较

Fig. 2 Comparison of the events from (CD₂)_n target with the background from C target for the 5th annulation

¹²N 质子发射阈 (0.601 MeV) 以上的能态均是质子不稳定的,测量的角分布只含末态为 ¹²N 基态的直接俘获过程的贡献。

2 理论分析

ANC 法仅在周边过程中才有效。为了验证所测反应的周边性,改变 DWUCK4 程序 (Kunz PD 编写) 中径向积分的下限 (半径 R_{cut}), 计算了碰撞中心度不同时角分布的变化, 结果示于图 4。由图 4 可看出, 当 R_{cut} 在 0 ~ 5 fm 范围内变化时, 前角区的微分截面变化很小。这表明在感兴趣的角度范围 (c.m. = 33.8°)

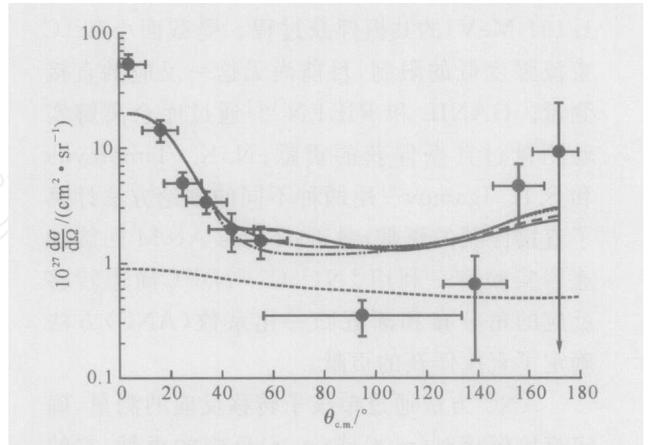


图 3 质心系能量为 9.8 MeV 时

¹¹C(d, n) ¹²N 反应的角分布

Fig. 3 Angular distributions of ¹¹C(d, n) ¹²N reaction at E_{c.m.} = 9.8 MeV

实线——DWBA1 + CN; 长虚线——DWBA2 + CN;
 ——DWBA3 + CN; - · - ——DWBA4 + CN;
 - · · - ——DWBA5 + CN; 虚线——CN

内, 周边碰撞起决定性作用。

用 DWBA 计算的角分布和用 UNF 程序^[16]计算的复合核过程的贡献示于图 3。两者均考虑了有限角分辨修正。修正前后 DWBA 角分布的对比示于图 5。UNF 程序中考虑了预平衡发射的贡献, 故复合核过程不是严格 c.m. = 90° 对称, 前角区的微分截面会略微偏高。DWBA 计算中选用的 5 套光学势参数和相应的谱因子列于表 2。

表2 DWBA 计算中选用的5套光学势参数和相应的谱因子

Table 2 Optical potential parameters used in DWBA calculations and the corresponding spectroscopic factors

套数	反应道	V_T/MeV	R_T/fm	a_T/fm	W/MeV	R_w/fm	a_w/fm	$4W_s/\text{MeV}$
1	in	108.7	1	0.8	5.01	1	0.8	20.04
	out	49.9	1.2	0.65				18.96
2	in	110.4	1	0.8	4.43	1	0.8	17.72
	out	49.9	1.2	0.65				18.96
3	in	110.4	1	0.8	4.43	1	0.8	17.72
	out	50.9	1.2	0.65				17.48
4	in	110.4	1	0.8	4.43	1	0.8	17.72
	out	46.5	1.4	0.4				26
5	in	110.4	1	0.8	4.43	1	0.8	17.72
	out	62.8	1.14	0.57				26.7

套数	反应道	R_s/fm	a_s/fm	$4V_{s0}/\text{MeV}$	R_{s0}/fm	a_{s0}/fm	R_c/fm	$S_{j=1/2}$	$S_{j=3/2}$
1	in	2	0.6	28.6	1	0.8	1.5	1.19 ± 0.37	0.21 ± 0.08
	out	1.2	0.47	28	1.2	0.65			
2	in	2	0.6	29.04	1	0.8	1.5	1.15 ± 0.37	0.21 ± 0.08
	out	1.2	0.47	28	1.2	0.65			
3	in	2	0.6	29.04	1	0.8	1.5	1.14 ± 0.36	0.21 ± 0.08
	out	1.2	0.47	28	1.2	0.65			
4	in	2	0.6	29.04	1	0.8	1.5	0.96 ± 0.30	0.17 ± 0.06
	out	1.05	0.4	22	1.2	0.4			
5	in	2	0.6	29.04	1	0.8	1.5	1.09 ± 0.33	0.20 ± 0.07
	out	1.14	0.5	22	1.14	0.57			

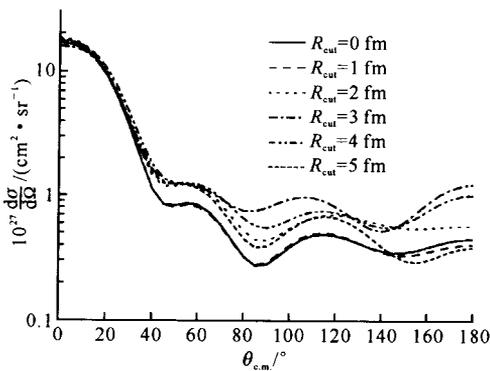


图4 碰撞中心度不同时角分布的变化

Fig. 4 Variation for DWBA angular distribution with different collision centralities

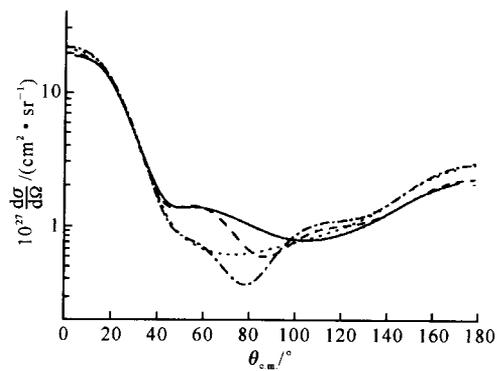


图5 考虑有限角分辨率修正前后 DWBA 计算的 $^{11}\text{C}(d,n)^{12}\text{N}$ 反应角分布的对比

Fig. 5 Comparisons of original and smeared DWBA angular distributions for the $^{11}\text{C}(d,n)^{12}\text{N}$ reaction

虚线——DWBA2; 实线——smeared DWBA2;
- · - ——DWBA5; ... ——smeared DWBA5

利用角分布前4点 ($\theta_{c.m.} = 33.8^\circ$) 的微分截面, 可通过如下关系式^[17] 得出虚衰变 ^{12}N $^{11}\text{C}+p$ 的 ANC:

$$\left(\frac{d}{d}\right)_{\text{exp}} - \left(\frac{d}{d}\right)_{\text{CN}} = \sum_{l_i j_i} (C_{l_i j_i}^d)^2 (C_{l_i j_i}^{12\text{N}})^2 \frac{d_{l_i j_i}^{\text{DW}}/d}{b_{l_i j_i}^2 b_{l_i j_i}^2} \quad (1)$$

式中: $C_{l_i j_i}^d$ 和 $C_{l_i j_i}^{12\text{N}}$ 分别指虚衰变 $d + p + n$ 和 $^{12}\text{N} + ^{11}\text{C} + p$ 的 ANC; $(d/d)_{\text{exp}}$ 、 $(d/d)_{\text{CN}}$ 和 $d_{l_i j_i}^{\text{DW}}/d$ 分别指测量的、复合核的和 DWBA 计算的微分截面; l_i, j_i 和 l_i, j_i 分别指 d 和 ^{12}N 中转移质子的轨道角动量和总角动量; $b_{l_i j_i}$ 和 $b_{l_i j_i}$ 分别指 d 和 ^{12}N 中束缚态质子的单粒子 ANC。

在具体计算中,式(1)可转化为:

$$\left(\frac{d}{d}\right)_{\text{exp}} - \left(\frac{d}{d}\right)_{\text{CN}} = \left(\frac{C_{l_i j_i}^d}{b_{l_i j_i}}\right)^2 \times \left[\left(\frac{C_{3/2}^{12\text{N}}}{b_{3/2}}\right)^2 \frac{d_{3/2}^{\text{DW}}}{d} + \left(\frac{C_{1/2}^{12\text{N}}}{b_{1/2}}\right)^2 \frac{d_{1/2}^{\text{DW}}}{d} \right] \quad (2)$$

式(2)中方括号内的两项分别对应于转移质子的总角动量为 $3/2$ 和 $1/2$ 的情形。在 DWBA 分析中, $\left(\frac{C_{l_i j_i}^d}{b_{l_i j_i}}\right)^2$ 的值已知, 为 0.859 , $b_{3/2}^2 = b_{1/2}^2 = 1.48 \text{ fm}^{-1}$ 。根据壳模型计算^[6], 两个 ANC 组分的比值 $\left(\frac{C_{3/2}^{12\text{N}}}{b_{3/2}}\right)^2 \left(\frac{C_{1/2}^{12\text{N}}}{b_{1/2}}\right)^2 = 0.18$ 。然后代入角分布前 4 点的微分截面数据, 可得 $(C_{1/2}^{12\text{N}})^2 = (2.43 \pm 0.77) \text{ fm}^{-1}$, $(C_{3/2}^{12\text{N}})^2 = (0.44 \pm 0.16) \text{ fm}^{-1}$, 总 ANC 的平方 $(C_{\text{total}}^{12\text{N}})^2 = (C_{1/2}^{12\text{N}})^2 + (C_{3/2}^{12\text{N}})^2 = (2.86 \pm 0.91) \text{ fm}^{-1}$ 。误差来自以下因素: 统计误差 (18%)、入射道和出射道光学势^[18]的不确定性 (6%)、两个 ANC 组分比值的不确定性 (3%) 和谱因子拟合带来的误差 (25%)。谱因子拟合带来的误差来自于 DWBA 计算的角分布与实验测量的角分布在前角区 (尤其是第 1 点) 的偏差, 该偏差主要是由于所选取的相近反应道的光学势参数与实际反应道 ($d + ^{11}\text{C}$ 和 $n + ^{12}\text{N}$) 的光学势参数有差别造成的。因为实际反应道包含有不稳定核 (^{11}C 和 ^{12}N), 所以, 没有该反应道的光学势参数, 只能选取最相近道的参数。

3 结论

利用 HF13 串列加速器次级束流线产生的 $63.4 \text{ MeV } ^{11}\text{C}$ 次级束, 测量了 $^2\text{H} (^{11}\text{C}, ^{12}\text{N}) n$ 反应的角分布, 导出虚衰变过程 $^{12}\text{N} + ^{11}\text{C} + p$

的 ANC, 间接确定了直接俘获对 $^{11}\text{C}(p,)^{12}\text{N}$ 反应的贡献。与 P. Descouvemont 的预言^[3]相反, 本工作的结果表明: 直接俘获过程对 $^{11}\text{C}(p,)^{12}\text{N}$ 反应有重要贡献。国外近期的实验研究^[7]利用不同的反应系统 $^{14}\text{N} (^{11}\text{C}, ^{12}\text{N}) ^{13}\text{C}$ 也得出了虚衰变 $^{12}\text{N} + ^{11}\text{C} + p$ 的 ANC, 其平方值为 $(1.73 \pm 0.25) \text{ fm}^{-1}$ 。该实验研究和近期的理论计算^[6]均得出与本工作相同的结论。

对韩银录研究员在复合核计算和 HF13 串列加速器运行人员在实验中所给与的帮助表示感谢。

参考文献:

- [1] Wiescher M, Görres J, Graff S, et al. The Hot Proton-proton Chains in Low Metallicity Objects [J]. *Astrophys J*, 1989, 343:352 ~ 364.
- [2] Descouvemont P, Baraffe I. Microscopic Cluster Study of the ^{12}B and ^{12}N Systems and Application to a Hot pp Chain in Zero-metal Stars [J]. *Nucl Phys*, 1990, A514:66 ~ 86.
- [3] Descouvemont P. Microscopic Study of Proton-capture Reactions on Unstable Nuclei [J]. *Nucl Phys*, 1999, A646:261 ~ 273.
- [4] Lefebvre A, Aguer P, Kiener J, et al. Astrophysical Rate of the $^{11}\text{C} + p$ Reaction From the Coulomb Break-up of a ^{12}N Radioactive Beam [J]. *Nucl Phys*, 1995, A592:69 ~ 88.
- [5] Minemura T, Motobayashi T, Shimoura S, et al. Coulomb Dissociation of ^{12}N and ^{13}O [A]. *Proceedings of the Third International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses* [C]. Berlin: Springer Verlag, 2003. 183.
- [6] Timofeyuk N K, Igamov S B. Direct Capture Contribution to the $^{11}\text{C}(p,)^{12}\text{N}$ Reaction at Astrophysical Energies [J]. *Nucl Phys*, 2003, A713:217 ~ 228.
- [7] Tang X, Azhari A, Gagliardi CA, et al. Determination of the Astrophysical S Factor for $^{11}\text{C}(p,)^{12}\text{N}$ From the $^{12}\text{N} + ^{11}\text{C} + p$ Asymptotic Normalization Coefficient [J]. *Phys Rev*, 2003, C67:015804-1 ~ 015804-10.
- [8] Xu H M, Gagliardi CA, Tribble R E. Overall Normalization of the Astrophysical S Factor and the Nuclear Vertex Constant for $^7\text{Be}(p,)^8\text{B}$ Reactions [J]. *Phys Rev Lett*, 1994, 73:2027 ~ 2030.

- [9] Liu WP, Bai XX, Zhou SH, et al. Angular Distribution for the $^7\text{Be}(\text{d},\text{n})^8\text{B}$ Reaction at $E_{\text{c.m.}} = 5.8$ MeV and the $S_{17}(0)$ Factor for the $^7\text{Be}(\text{p}, \text{)}^8\text{B}$ Reaction [J]. Phys Rev Lett, 1996, 77: 611 ~ 614.
- [10] Azhari A, Burjan V, Carstoiu F, et al. The $^{10}\text{B}(^7\text{Be}, ^8\text{B})^9\text{Be}$ Reaction and the $^7\text{Be}(\text{p}, \text{)}^8\text{B}$ S Factor [J]. Phys Rev Lett, 1999, 82: 3 960 ~ 3 963.
- [11] Azhari A, Burjan V, Carstoiu F, et al. The $^{14}\text{N}(^7\text{Be}, ^8\text{B})^{13}\text{C}$ Reaction and the $^7\text{Be}(\text{p}, \text{)}^8\text{B}$ S Factor [J]. Phys Rev, 1999, C60: 055803-1 ~ 055803-5.
- [12] Imai N, Aoi N, Kubono S, et al. Test of the ANC Method via (d, p) Reaction [J]. Nucl Phys, 2001, A688: 281c ~ 284c.
- [13] Bai XX, Liu WP, Qin JC, et al. A Facility for Production and Utilization of Radioactive Beams [J]. Nucl Phys, 1995, A588: 273c ~ 276c.
- [14] Liu WP, Li ZH, Bai XX, et al. Current Progress of Nuclear Astrophysics Study and BRNBF at CIAE [J]. Nucl Instrum Methods, 2003, B204: 62 ~ 70.
- [15] Li ZH, Liu WP, Bai XX, et al. First Observation of Neutron-proton Halo Structure for the 3.563 MeV 0^+ State in ^6Li via $^1\text{H}(^6\text{He}, ^6\text{Li})\text{n}$ Reaction [J]. Phys Lett, 2002, B527: 50 ~ 54.
- [16] Zhang J. UNF Code for Fast Neutron Reaction Data Calculations [J]. Nucl Sci Eng, 2002, 142: 207 ~ 219.
- [17] Mukhamedzhanov AM, Clark HL, Gagliardi CA, et al. Asymptotic Normalization Coefficients for $^{10}\text{B} \ ^9\text{Be} + \text{p}$ [J]. Phys Rev, 1997, C56: 1 302 ~ 1 312.
- [18] Perey CM, Perey FG. Optical Model Parameters [J]. At Data Nucl Data Tables, 1976, 17: 10 ~ 45.

用于六氟化铀运输的改进式容器

【公开日】2004. 09. 22

【分类号】G21F5/002

【公开号】1531735

【申请号】02810814. 0

【申请日】2002. 04. 23

【申请人】西屋电气有限责任公司

【文摘】一种用于装运六氟化铀的容器包括一个圆筒形壁,上述圆筒形壁通过将一对近似半椭圆形的头部焊接进行封闭以便形成一个密封式容器。在一端中设置一个操作阀。阀用一个可拆卸式不漏水的阀保护盖组件覆盖。容器还包括一个测试口,利用上述测试口可以在容器装有六氟化铀和安装好阀保护组件之后,测试阀保护盖组件的完好性。阀保护组件加工成一定形状,以便它装配在标准 30B 圆筒的外壳之内。阀保护组件的远端从一个平面凹进至少半英寸,上述平面由围绕筒边的开口端限定。因此,组件装配在已通过 NRC 批准的一个外包装内,并由六氟化铀货主使用。

摘自中国原子能科学研究院《核科技信息》