

$p-^{11}\text{B}$ 三体级联衰变连续能谱测量与 干净聚变核能源*

袁 坚 刘晓东 许国基 宋鸿陟 孟秋英 孙祖训

(中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京, 102413)

林尔康 王建万 余岳仲 刘东元

(中研院物理研究所, 台北, 11529)

借助 PIPS 新型探测器和 ΔE 穿透型探测器, 首次得到 $^{11}\text{B}(p, 2\alpha)^8\text{He}$ 级联衰变连续能谱, 为准确获得 $p-^{11}\text{B}$ 截面测量提供了实验依据。同时利用系统能量分辨率达 13.9 keV 的带电粒子谱仪对另一影响截面精确度的因素——靶成份进行了实验分析。

关键词 干净核能源 反应能谱 级联衰变

中图分类号 O 571.422

目前正在开发的核能, 其强放射性污染是环境问题专家高度警惕的对象, 而最受人们关注的 $\text{D} + \text{T}$ 受控聚变热核反应, 仍有放射性污染的危险。另外, 由于 14.1 MeV 强中子对材料的破坏, 工程上困难不小, 以致人们不得不重新研究商业实用性。从长远看, 探索干净新核燃料势在必行^[1-4]。氢硼聚变是干净聚变核能源的理想选择。它的优点是有较大的核能释放, 有较大的核反应率, 不产生强流中子, 是 1 种新型的不致造成环境污染的干净核能。氢硼聚变功率密度设计的关键参数是热核反应率 $\langle \sigma \cdot v \rangle$, 它是核反应截面对两种离子相对速度分布的平均值。由于它与核性质密切相关, 至今仅 $p-p$ 质子核反应率可以从理论上严格计算, 其它核反应率都需由实验在一定能量范围内的截面测量得到。

在热核反应能区, 氢硼核反应一般包括以下核反应道:

$$p + ^{11}\text{B} \rightarrow \alpha + \alpha + \alpha + 8.7 \text{ MeV} \quad (1)$$

$$\alpha_{01} + ^8\text{Be} + 8.6 \text{ MeV} \quad (2)$$

$$\left| \begin{array}{l} \alpha_{02} + \alpha_{03} + 0.093 \text{ MeV} \\ \alpha_{04} + \alpha_{05} + 0.093 \text{ MeV} \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\alpha + ^8\text{Be}^* + (8.6 - 3.04) \text{ MeV} \quad (4)$$

$$\left| \begin{array}{l} \alpha_6 + \alpha_7 + 0.093 \text{ MeV} \end{array} \right. \quad (5)$$

* 国家自然科学基金、核工业基金和中华发展基金(台湾)省资助项目

袁 坚: 男, 58 岁, 核物理专业, 研究员

收稿日期: 1997-04-30 收到修改稿日期: 1997-09-15

$$p + {}^{11}\text{B} \rightarrow p + {}^{11}\text{B} \quad (6)$$

$$p + X \rightarrow p + X \quad (7)$$

式(1)是直接三体崩裂核反应道,它导致1个连续 α 粒子能谱。现有实验数据表明:直接三体崩裂反应道截面只占全部 α 出射道截面的5%。另一方面, $p\text{-}^{11}\text{B}$ 反应通过 ${}^8\text{Be}$ 核级联衰变进行,由于角动量守恒,通过 ${}^8\text{Be}$ 第一激发态的截面比通过 ${}^8\text{Be}$ 基态截面约大2个数量级。所谓与干净聚变核能源相关核反应,主要指通过 ${}^8\text{Be}$ 第一激发态的三体级联衰变核反应道。该反应道截面数据已有许多报道^[5-11],然而这些截面数据存在较大的系统偏差,不确定性在30%至300%。计算表明,只有真值落在较高数值上的反应截面, $p\text{-}^{11}\text{B}$ 聚变才有商业核能源的前景,因而氢硼聚变截面的重新测量是本工作的研究目的。

1 实验原理及装置

$p\text{-}^{11}\text{B}$ 聚变微分截面 $\sigma(\Omega)$ 与实验上可直接测量的物理量有如下关系:

$$\sigma(\Omega) = N_{\alpha} / (\Phi_p N_t \Omega)$$

其中: Φ_p 为入射质子束流注量, N_t 为靶面密度, Ω 为带电粒子产物探测器对束流靶点所张的立体角, N_{α} 为感兴趣核反应道的产额,它可以从核反应能谱得到。与干净聚变核能源相关的氢硼核反应能谱是一全同粒子的、能量彼此重叠并延伸到零的级联衰变连续谱。低能区连续谱的测量通常是1个棘手问题,排除弹性散射及其他辐射的严重干扰、降低本底、弄清反应机制,是获得准确截面的关键。

实验是在中研院物理研究所 $3 \times 2\text{MV}$ NEC9SDH-2 串列加速器上进行的。加速器引出质子束流经可变孔径的双准直系统进入靶室,在靶上形成的束斑控制在 $1\text{mm} \times 2\text{mm}$ 范围内,束流强度控制在30 nA左右,以便在弹性散射粒子与感兴趣的反应产物 α 粒子的测量中死时间 $< 3\%$ 。束流通过靶后由1.5 m远的法拉第筒收集,1个负压环用于抑制次级电子。通常位于靶室中心的靶面与束流方向成45或135夹角,以便在角分布测量中保持最佳几何条件。浓缩度为99.9%的 ${}^{11}\text{B}$ 和天然硼靶由电子轰击技术制备成约 $74\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 厚度的自撑薄靶。

带电粒子核反应产物分别为PIPS硅探测器和 ΔE 穿透型探测器组成的带电粒子谱仪探测。两类探测器分别安装在靶室中可转动盘上和90°的固定盲板上,转动盘上的探测器可以绕靶中心在0—174°范围内转动,与作为监督器的固定探测器一起完成角分布测量。通常,探测器前放置直径为3 mm的准直孔。PIPS探测器是1种新型硅探测器,在常温下有极好的能量分辨率及低噪声水平,是靶样品各种成份和核反应谱形细致分析的最有效的工具。 ΔE 探测器主要用来实现质子与 α 粒子的鉴别。

该谱仪电子学线路的特点是:1)由于PIPS的漏电流工作在 10^{-8} — 10^{-9}A ,ORTEC-142A前置放大器工作在高阻偏置状态,噪声水平低;2)采用ORTEC-672型谱放大器,由于PIPS探测器噪声小,实验上可观测到ORTEC-672与ORTEC-572两者对能量分辨率的贡献之差异。例如,ORTEC-672脉冲信号的Peak,FWHM,FWTM分别为1662,2.55,4.86道;而ORTEC-572脉冲信号的Peak,FWHM,FWTM则分别为1775,3.35,7.91道。前者FWTM值有明显改善,这一特点特别适合强弹性散射质子本底干扰下的 α 连续能谱的测量;3)谱仪系统的稳定性很好。实验中,同时利用高精度的脉冲产生器(ORTEC-448)作监督信号,在20 h实验期间,1840道的脉冲产生器信号变化小于1道,相应的系统漂移小于3.8 keV;4)利用束流信号作为门控脉冲信号启动多道分析器,四路ADC与束流积分器同时开启;5)获取数据形成

适合 PC 微机分析的文件,有利于在线或离线对数据作图进行能谱分析。

2 实验结果与分析

实验之初,采用传统的 ΔE - E 望远镜系统来鉴别不同类型带电粒子。然而,在低能区该系统丢失计数严重。例如,对 $E_p = 1 \text{ MeV}$ 的质子,当 ΔE 和 E 探测器之间相距为 10 mm 时,相应于质子弹性散射的粒子在 E 探测器的计数比 ΔE 探测器的计数少 9% ; 在 5 mm 时,为 4% ; 在 3 mm 时为 2% 。显然,采用符合谱仪的方法,不能实现有效的粒子鉴别。基于质子能量刚穿过 ΔE 探测器时其粒子能谱峰位有较大位移特性的实验方案解决了这一难题。

图 1 是相应于 $17, 31, 54 \mu\text{m}$ 3 种不同厚度 Si 材料计算的质子和 α 粒子的能量阻止曲线。横坐标表示粒子的能量,纵坐标表示质子(或 α 粒子)阻止在 ΔE 探测器中的实际能量。例如, $31 \mu\text{m}$ 厚的 ΔE 探测器将能量小于 1534 keV 的质子全部阻止在 ΔE 探测器内。质子能量超过 1534 keV , 例如 2000 keV , 质子被阻止在 ΔE 内的实际能量为 985 keV , 即在能谱上, 2000 keV 的质子峰位转移至 985 keV 处, 移位了 1015 keV 。这样, 985 keV 以上的能谱全部是 α 粒子的贡献, 有利于散射干扰下的 α 粒子谱的观测。

图 2 是 p - ^{11}B 核反应能谱。图中右侧窄峰是 p - ^{11}B 系统衰变到 ^8Be 基态的初级 α_0 贡献, 与它分得很开的强峰是 p - ^{11}B 系统衰变到 ^8Be 第一级激发态初级 α_1 的贡献, 能谱以 $^{11}\text{B}(p, \alpha_1)^8\text{Be}$ 标记。由于这一态的能级宽度为 1.5 MeV , 这一峰为宽峰, 它重叠在由 ^8Be 衰变成 2 个 α 粒子的连续谱上, ^8Be 衰变能谱以 $^{11}\text{B}(p, 2\alpha)^4\text{He}$ 标记。该连续谱的低能部分延伸到零值, 其高能部分与 p - ^{11}B 系统初级 α 衰变宽峰重叠。由于反应产物全为 α 粒子, 是全同粒子, 通常的带电粒子鉴别方法无法区分各自的贡献。另外, 如图 2 所示, $^{11}\text{B}(p, 2\alpha)^4\text{He}$ 连续谱区存在质子与靶物质弹性散射的严重干扰, 弹性散射计数往往比 α 计数大 3 至 5 个数量级。为避免如此强的散射计数率造成的计数死时间, 不少作者采用 Ni 吸收片来剔除弹性散射的粒子。然而, 吸收片不仅使 α 能谱形状畸变, 相应于约 4 倍质子能量的 α 粒子也被吸收片阻挡。为弥补这一部分产额, 采用变形的 $^{11}\text{B}(p, 2\alpha)^4\text{He}$ 能谱外推, 往往又带来总产额偏离真值。更重要的是, 刚好穿过吸收片的 α 粒子散射几率大, 也将丢失计数。显然, 采用吸收片剔除弹性散射质子不是好的实验方法。

为了弄清 $^{11}\text{B}(p, 2\alpha)^4\text{He}$ 谱形, 以便在数据处理上利用 Peakfit 程序, 将 $^{11}\text{B}(p, 2\alpha)^4\text{He}$ 与 $^{11}\text{B}(p, \alpha)^8\text{Be}$ 谱的两部分贡献区分开。为此, 将质子束能量推向较高能量值, 既测量 α 粒子也测量质子, 并且尽可能降低质子束流强度。这样, 不仅减少了弹性散射质子的严重干扰, p - ^{11}B 反应能谱形状也不至于畸变, 有利于 $^{11}\text{B}(p, 2\alpha)^4\text{He}$ 能谱的观测。实验上, 首先利用 PIPS 探测器观测 p - ^{11}B 核反应能谱, 然后利用 ΔE 探测器在同一测量角度测量同一核反应能谱。

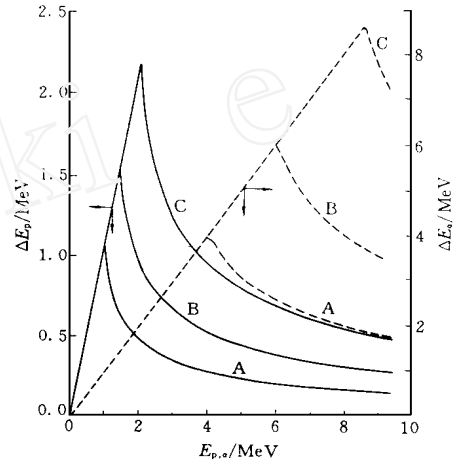


图 1 p 和 α 粒子在 Si 中能量阻止曲线
Fig 1 Energy loss of p and α particle in Si
实线——质子; 虚线—— α 粒子
 ΔE 探测器耗尽层厚度:
A—— $17 \mu\text{m}$; B—— $31 \mu\text{m}$; C—— $54 \mu\text{m}$

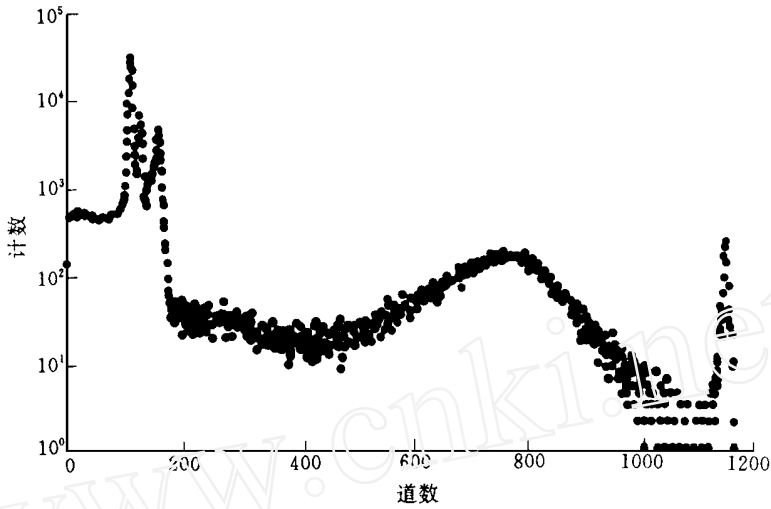


图 2 $p-^{11}\text{B}$ 核反应能谱

Fig 2 Spectrum of $p-^{11}\text{B}$ reaction

图 3(a) 是利用 PIPS 探测器测量的 $p-^{11}\text{B}$ 反应能谱。 $^{11}\text{B}(p, 2\alpha)^4\text{He}$ 与 $^{11}\text{B}(p, \alpha)^8\text{Be}$ 重叠部分, 由于弹性散射质子群的影响分辨不清。图 3(b) 是利用 $31\ \mu\text{m}$ 厚 ΔE 探测器得到的 $p-^{11}\text{B}$ 反应能谱。在 500 至 700 道之间的弹性散射质子群全部位移至 250 道以下, 能谱的凹谷明显(大约在 500 道)。利用 Peakfit 软件图形处理可以分别得到 $^{11}\text{B}(p, 2\alpha)^4\text{He}$ 和 $^{11}\text{B}(p, \alpha)^8\text{Be}$ 能谱形状和总计数, 前者能谱呈马鞍形连续能谱分布, 后者能谱呈高斯形分布。因而, 可以从实验上选择 $^{11}\text{B}(p, \alpha)^8\text{Be}$ 总计数作为 N_α 值获得可信截面数据。

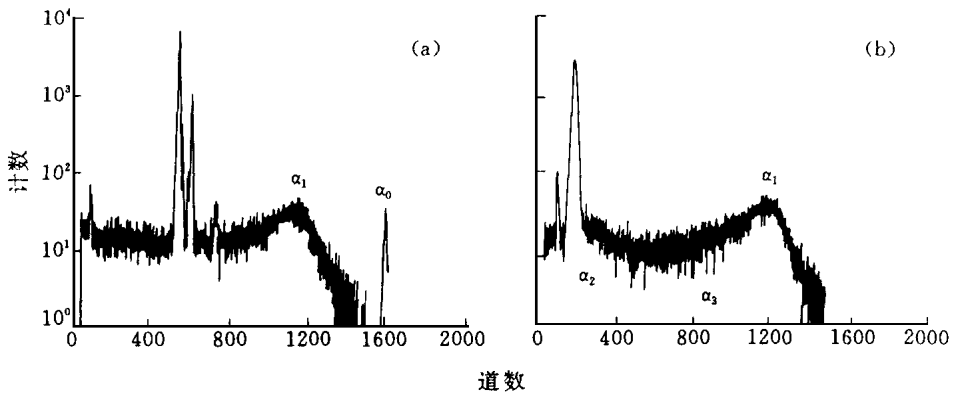


图 3 $p-^{11}\text{B}$ 核反应能谱

Fig 3 Spectra of the $^{11}\text{B}(p, 2\alpha)^4\text{He}$ reaction with ΔE and PIPS detectors

(a) — PIPS 探测器, (b) — ΔE 探测器

$^{11}\text{B}(p, 2\alpha)^4\text{He}$ 反应, $E_p = 3\ \text{MeV}$

在绝对截面测量中, 由于制备了自撑的硼靶, 采用称重法测量靶厚带来的误差小。靶中杂质成份的分析不容忽视。市购的硼材料, 大多因为标称杂质含量极少, 往往忽略了靶制备过程中一定量的氧和碳的沉积, 这一点在电子轰击制靶方式中更明显。因而, 分析靶中各种杂质的贡献是获得准确截面的又一关键。

采用常温下极高能量分辨率的 PIPS 探测器探测带电粒子谱仪, 利用背散射技术直接获得质子在硼靶上的散射能谱, 在 $E_p = 3 \text{ MeV}$ 能量上测量该带电粒子能谱仪系统的能量分辨率为 13.9 keV , 它包括束流能量展宽、靶厚离歧、探测器固有能量分辨率和电子学噪声的总贡献, 因而靶中 ^{10}B 、 ^{11}B 、 ^{12}C 、 ^{13}C 、 ^{14}N 、 ^{16}O 、 ^{23}Na 、 ^{35}Cl 、 ^{52}Cr 等都能从能谱上区分开。图 4 是 $\theta = 173^\circ$ 质子在天然硼靶上散射谱。除了 ^{10}B 、 ^{11}B 外, ^{12}C 、 ^{16}O 的含量不少。同时可看到 NaCl 及其它重元素的存在, 它们分布在一定能区, 干扰 α 能谱分析。对质子在浓缩硼靶上的散射谱, 靶中重元素杂质明显减少, 但 ^{12}C 、 ^{16}O 的含量仍不少, 它们是靶制备过程中产生的。在绝对截面测量中, 杂质含量可从靶的总质量中剔除。在天然硼靶中, ^{11}B 占总含量的 65.5% 。而浓缩同位素靶中 ^{11}B 则占 84.4% 。

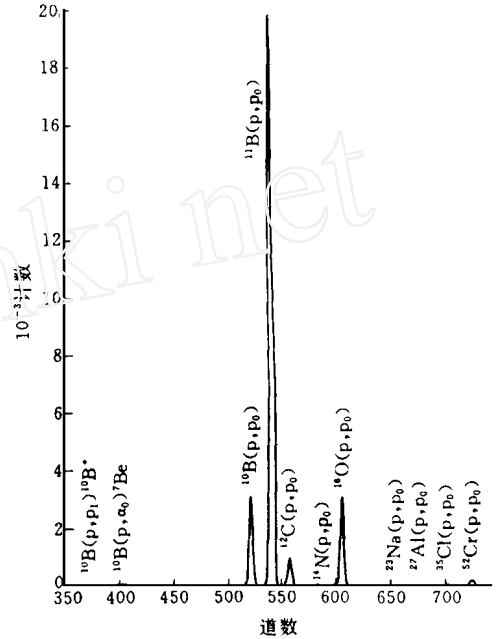


图 4 质子在天然硼靶上散射能谱

Fig 4 RBS Spectra of p on natural B target

3 结论

借助 PIPS 新型探测器与 ΔE 穿透型探测器组合的带电粒子能谱仪, 首次从实验上获得 $^{11}\text{B}(p, 2\alpha)^4\text{He}$ 级联衰变能谱, 它显示 ^8Be 衰变的 α 粒子呈马鞍形连续能谱, 其高能部分与 $p-^{11}\text{B}$ 系统衰变的初级 α 粒子宽峰重叠。用 Peakfit 图形处理软件可以分别得到 $^{11}\text{B}(p, 2\alpha)$ 与 $^{11}\text{B}(p, \alpha)$ 的能谱总计数, 这不仅为导出 $p-^{11}\text{B}$ 反应截面提供可信的实验数据, 也将为进一步分析过去数据系统偏差来源和其衰变物理机理提供重要实验信息。运用 Monte Carlo 模拟计算得出的 ^8Be 趋向飞行方向分裂的各向异性特征是这一实验结果的 1 个可能解释。

在截面绝对测量中, 影响截面准确度的靶的厚度, 本工作采用称重法确定。在许多实验条件下, 由于带电粒子谱仪系统能量分辨不够高, 加之碳氧杂质是在靶的制备过程中引入的, 往往容易被忽略。本工作采取了一系列实验方法和降低本底的措施, 对 $E_p = 3 \text{ MeV}$ 获得质子在硼靶上散射的系统能量分辨率为 13.9 keV , 这是目前所看到的最好分辨水平。采用如此探测系统可以获得硼靶中的杂质成份含量, 因而本工作测量得到的 $p-^{11}\text{B}$ 级联衰变反应截面更为准确可信。

参 考 文 献

1 何祚庥, 庆承瑞 一种新型的干净的核能源 中国科学基金, 1993: 163

- 2 王乃彦 有关惯性约束聚变和磁约束在技术上所遇到的难点 中国科学基金, 1993: 166
- 3 Rieruschka P, Cicchitelli L, Bakhsh R. Volume Ignition of Inertial Confinement Fusion of Deuterium-Helium 3 and $p-^{11}\text{B}$ Clean Fusion Fuel Laser and Particle Beams, 1992, 10: 145
- 4 Miley GH, Hora H, Cicchitelli L, et al An Advanced Fuel Laser Fusion and Volume Compression of $p-^{11}\text{B}$ Laser-driven Targets Fusion Technology, 1991, 19: 43
- 5 Yuan Jian, Li Hui, Sun Zuxun, et al Study of $p-^{11}\text{B}$ Reaction Associated With Clean Fusion Fuel Chin J Nucl Phys, 1996, 18: 21
- 6 袁 坚, 宋鸿陟, 刘晓东, 等 $^{11}\text{B}(p, 2\alpha)^4\text{He}$ 级联三体核反应连续能谱测量与干净聚变核能源 中国学术期刊文摘“科技快报”, 1997, 3: 367
- 7 Becker HW, Rofls C, Trautvetter HP. Low-energy Cross Section for $^{11}\text{B}(p, 3\alpha)$. Z Phys, 1987, A 327: 341
- 8 Davidson JM, Berg HL, Lowry MM, et al Low Energy Cross Sections for $^{11}\text{B}(p, 3\alpha)$. Nucl Phys, 1979, A 315: 253
- 9 Weaver T, Zimmernan G, Wood L. Prospects for Exotic Fuel Usage in CTR systems (1) $^{11}\text{B}(p, 2\alpha)^4\text{He}$: A Clean, High Performance CTR Fuel: VCRL-74191, 74352
- 10 Anderson BD, Dw arakanath MR, Schweitzer JS, et al A New Determination of the Partial Widths of the 16.11 MeV State in ^{12}C . Nucl Phys, 1974, A 233: 286
- 11 Yamashita Y, Kudo Y. Reaction Mechanism of $^{11}\text{B}(p, \alpha)^8\text{Be}$ Reaction at Astrophysically Relevant Energies Nucl Phys, 1995, A 589: 460

EXPERIMENTAL SPECTRA OF $p-^{11}\text{B}$ SUBSEQUENTIAL DECAY ASSOCIATED WITH CLEAN FUSION FUEL

Yuan Jian Liu Xiaodong Xu Guoji Sun Zuxun
(China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413)

Lin Erh kang Wang Changwan Yu Yuhchung Liu Tongyuan
(Institute of Physics, Academia Sinica, Taipei, 11529)

ABSTRACT

Spectra of $^{11}\text{B}(p, 2\alpha)^4\text{He}$ subsequential decay via the first excited state of ^8Be were measured by using PIPS and ΔE detector system. In the measurement of absolute cross sections the content analysis of boron target was also performed by charged particle spectrometer with 13.9 keV systematic energy resolution

Key words Clear fusion fuel Reaction spectrum Subsequential decay