

## $^{10}\text{C}$ 次级束的产生

苏俊,李志宏,连刚,王友宝,郭冰,曾晟,  
颜胜权,王宝祥,白希祥,柳卫平

(中国原子能科学研究院核物理研究所,北京 102413)

**摘要:**在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器次级束流线上通过 $^1\text{H}(^{10}\text{B},^{10}\text{C})\text{n}$  反应产生了能量为 $(55.9 \pm 0.9)$  MeV 的 $^{10}\text{C}$  放射性次级束。经过磁刚度和速度选择,准直后的 $^{10}\text{C}$  束流纯度达到 90% 以上,强度约为 $6 \text{ s}^{-1} \cdot \text{pnA}^{-1}$ 。

**关键词:**次级束;磁刚度;速度选择器

中图分类号:O571.423

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2006)05-0513-04

## Production of $^{10}\text{C}$ Secondary Beam

SU Jun, LI Zhi-hong, LIAN Gang, WANG You-bao, GUO Bing, ZENG Sheng,  
YAN Sheng-quan, WANG Bao-xiang, BAI Xi-xiang, LIU Wei-ping  
(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-46, Beijing 102413, China)

**Abstract:** A  $^{10}\text{C}$  beam with the energy of  $(55.9 \pm 0.9)$  MeV was produced via the  $^1\text{H}(^{10}\text{B},^{10}\text{C})\text{n}$  reaction on the secondary beam line of the HI-13 tandem accelerator at China Institute of Atomic Energy. The purity of the collimated  $^{10}\text{C}$  beam is better than 90% after the magnetic and velocity selection. The beam intensity is about  $6 \text{ s}^{-1} \cdot \text{pnA}^{-1}$ .

**Key words:** secondary beam; magnetic rigidity; wien filter

大爆炸原初核合成标准模型预言的“金属”元素丰度只有太阳系的 $10^{-12}$ ,与对最古老贫金属恒星观测的结果 $10^{-4}$ 相距甚远。根据重子密度不均匀的非标准模型,核合成可以在相对丰质子的高密度区和相对丰中子的低密度区中进行,许多不稳定核引起的反应变得非常重要,其中,包含了几个与不稳定核 $^{10}\text{C}$ 相关的反应<sup>[1]</sup>。因此,涉及 $^{10}\text{C}$ 的核反应对原初核合成模型的研究具有重要意义。

现代核物理对奇异核的研究发现了许多新的现象,如晕核、 $\beta$ 延迟粒子发射等。目前,在实验上,滴线附近的奇异核主要靠稳定核之间的多次反应产生,无法预设反应末态的自旋宇称,对核谱学研究具有很大的限制。利用放射性核反应产生滴线附近的核素则不存在这一问题。其中,1个典型的例子是用 $^{10}\text{C}$ 次级束轰击厚氢靶,利用 $^{10}\text{C}$ 与质子的弹性共振散射研究非束缚核 $^{11}\text{N}$ 的性质<sup>[2,3]</sup>。此外, $^{10}\text{C}$ 的同位旋

$T=1$ ,研究它的  $0^+ \rightarrow 0^+$  超容许  $\beta$  跃迁  $ft$  值,对检验矢量流守恒假设具有重要意义<sup>[4,5]</sup>。

$^{10}\text{C}$  次级束在核天体、核结构及核理论等领域具有许多应用价值。本工作在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器次级束流线上产生  $^{10}\text{C}$  束流,对放射性次级束流线未来的研究工作、研究领域的拓宽具有重要意义。

## 1 $^{10}\text{C}$ 次级束的产生和纯化

在次级束流线<sup>[6]</sup>上利用 HI-13 串列加速器提供的 72 MeV  $^{10}\text{B}$  初级束轰击长度为 4.8 cm 的氢气靶,通过  $^1\text{H}(^{10}\text{B},^{10}\text{C})\text{n}$  反应产生  $^{10}\text{C}$  次级束流。氢气靶前后窗均为厚度 1.9 mg/cm<sup>2</sup> 的 Havar 膜,氢气的气压约为  $1.6 \times 10^5$  Pa。由于反应是逆运动学的, $^{10}\text{C}$  集中出射在最大角度为  $3.2^\circ$  的小角锥内,便于收集、分离和传输。

为尽量避开透射的初级束,次级束流线的接收角设置在  $3^\circ$ 。进入次级束流线的离子包括  $^{10}\text{C}$  等反应产物和初级束在气体靶室散射的  $^{10}\text{B}$ 。 $^{10}\text{C}$  与杂质离子经过一最大磁刚度为 1.4 Tm 的二极磁铁偏转而实现第 1 步分离。离子在磁场中运动时,磁刚度与其质量、能量和电荷态的关系可表示为:

$$B\rho = \frac{0.003\ 335\ 6}{q} \sqrt{2Mc^2 E_k + E_k^2} \quad (1)$$

其中: $B\rho$  为离子的磁刚度; $q$  为电荷态; $M$  和  $E_k$  分别为离子的静止质量和动能; $c$  为光速。

计算得到  $\theta_{\text{lab}} = 3^\circ$  出射的  $^{10}\text{C}^{6+}$  的能量为 55.84 MeV,磁刚度为 0.568 4 Tm。按照目标核  $^{10}\text{C}^{6+}$  的磁刚度设置二极磁铁的磁场,其它杂质若混入  $^{10}\text{C}$  次级束中,能量需要与磁刚度设置相匹配。表 1 列出了这些离子进入二极磁铁的实际能量和与目标核  $^{10}\text{C}^{6+}$  的磁刚度相匹配的能量。

由表 1 可见,除目标核  $^{10}\text{C}^{6+}$  外,绝大多数出射离子实际能量显著高于匹配能量。选取适当的二极磁铁磁场设置可将它们有效排除,但它们的低能拖尾会部分与磁刚度匹配而成为少量杂质。实际上,初级束在靶窗、气体上的卢瑟福散射截面远大于各反应道的截面,次级束的主要杂质是从靶窗、气体以及管壁上多重散射过来的  $^{10}\text{B}$ 。为了进一步纯化次级束流,在次级束流线下游安装了速度选择器,将次级束中的杂质进行第 2 步分离。

速度为  $v$  的离子在速度选择器中运动时受到的力可表示为:

$$F = q(E - \beta cB) \quad (2)$$

其中: $E$  和  $B$  分别为速度选择器的电场强度和磁感应强度; $\beta=v/c$ , $c$  为光速。

假设速度为  $v_0$  的被选择离子在速度选择器中受到的电力和磁力刚好相等时,速度为  $v_c$  的杂质离子所受到的力为:

$$F = q_c E(\beta_0 - \beta_c)/\beta_0 \quad (3)$$

其中: $q_c$  为杂质离子的电荷; $\beta_0$  和  $\beta_c$  分别为目标离子和杂质离子的  $\beta$  值。

表 1 不同产物在  $3^\circ$  的实际能量和匹配能量

Table 1 Energies of different reaction products at  $\theta_{\text{lab}} = 3^\circ$  and their needed energies to match magnetic rigidity of  $^{10}\text{C}^{6+}$

离子	质量/MeV	实际能量/MeV	电荷态	匹配能量/MeV
$^{10}\text{C}$	9 330.64	55.84	6+	55.84
$^{10}\text{C}$	9 330.64	55.84	5+	38.78
$^{10}\text{B}$	9 326.99	65.27	5+	38.79
$^{10}\text{B}$	9 326.99	65.27	4+	24.83
$^7\text{Be}$	6 536.23	62.13	4+	35.43
$^7\text{Be}$	6 536.23	62.13	3+	19.93
$^4\text{He}$	3 728.43	48.23	2+	15.53
$^4\text{He}$	3 728.43	48.23	1+	3.88
$^2\text{H}$	1 876.14	14.04	1+	7.72
$^1\text{H}$	938.79	23.06	1+	15.42

杂质离子在速度选择器终端的位移和发散角分别为：

$$y = (q_c E l^2 / 2 p_0 c) (\beta_0^{-1} - \beta_c^{-1}) \quad (4)$$

$$\theta = (q_c E l / p_0 c) (\beta_0^{-1} - \beta_c^{-1}) \quad (5)$$

其中： $l$  为速度选择器长度； $p_0$  为目标离子的动量。

根据目标离子<sup>10</sup>C<sup>6+</sup>的能量和电荷态，速度选择器电场和磁场分别设置为 18 kV/cm 和 55.08 mT。速度选择器长度为 103.2 cm，次级靶室距离速度选择器终端 420 cm。根据各种离子经磁刚度选择后的能量，计算得到它们在次级靶室前的偏转距离。计算结果列于表 2。

表 2 各种离子在次级靶室前的偏转距离  
Table 2 Deflected distance of different ions before secondary reaction chamber

离子	偏转距离/mm	离子	偏转距离/mm
<sup>10</sup> C <sup>6+</sup>	0	<sup>7</sup> Be <sup>3+</sup>	-188
<sup>10</sup> C <sup>5+</sup>	-94	<sup>4</sup> He <sup>2+</sup>	-93
<sup>10</sup> B <sup>5+</sup>	-93	<sup>4</sup> He <sup>+</sup>	-660
<sup>10</sup> B <sup>4+</sup>	-234	<sup>2</sup> H <sup>+</sup>	-97
<sup>7</sup> Be <sup>4+</sup>	-24	<sup>1</sup> H <sup>+</sup>	184

次级靶室前安装了孔径分别为 5 和 3 mm 的准直光阑。由表 2 可看出，各种杂质离子在次级靶室前的偏转距离均远大于准直光阑孔径，无法进入次级靶室。使用速度选择器可进一步排除束流中的杂质，从而得到纯度较高的<sup>10</sup>C 次级束流。同时，准直光阑还可降低次级束的固有角散。

与以前的实验<sup>[7,8]</sup>类似，在次级靶室内使用 1 套  $\Delta E$ -E 计数器望远镜收集和鉴别次级束流。 $\Delta E$  探测器选用厚度 19.3  $\mu\text{m}$  的穿透型硅探测器，E 探测器为厚度 300  $\mu\text{m}$  的阻止型硅探测器。

## 2 结果与讨论

利用 72 MeV <sup>10</sup>B 初级束轰击氢气体靶，经过次级束流线优化后，得到能量为 55.9 MeV、纯度约为 92%、能散约为 2.14 MeV(FWHM) 的<sup>10</sup>C 次级束。<sup>10</sup>C 次级束能谱和  $\Delta E$ -E<sub>1</sub> 二维谱分别示于图 1、2。

在调束过程中，为进一步确认次级束流

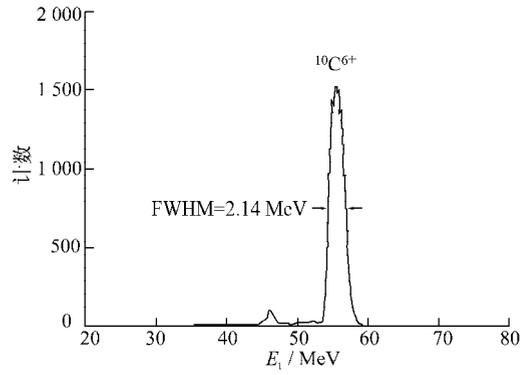


图 1 <sup>10</sup>C 次级束能谱

Fig. 1 Energy spectrum of <sup>10</sup>C secondary beam

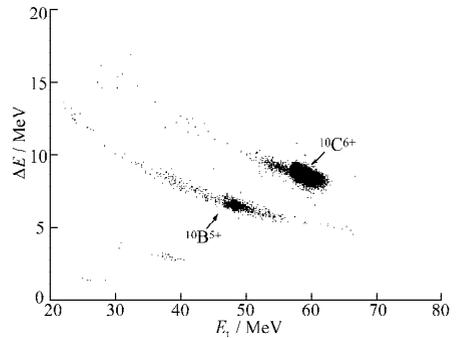


图 2  $\Delta E$ -E<sub>1</sub> 二维谱

Fig. 2 Scatter plot of  $\Delta E$  vs. E<sub>1</sub>

为<sup>10</sup>C，还进行了空靶实验，即不改变实验条件，抽出初级靶室中的氢气，以期确认此时次级束流不含有<sup>10</sup>C。由图 2 可以看出，次级束流中的杂质主要还是多重散射过来的初级束流<sup>10</sup>B，能量约为 46 MeV。经速度选择器偏转后，<sup>10</sup>B 以及其它一些较轻离子在次级束流中所占的比例已很小(<10%)，对次级反应实验影响不大。在调束时，使用了天然硼作为离子源，其中的<sup>10</sup>B 含量为 19.8%，<sup>10</sup>B 初级束的最大强度为 30 pA，准直后得到的<sup>10</sup>C 次级束强度约为 170 s<sup>-1</sup>。如果使用纯<sup>10</sup>B 作为离子源，<sup>10</sup>B 初级束的最大强度可达 15 pA，<sup>10</sup>C 次级束的最大强度能够达到 850 s<sup>-1</sup>，可满足在本次级束流线上进行核反应实验的要求。

作者对 HI-13 串列加速器运行人员给予的帮助表示感谢。

## 参考文献：

[1] KAJINO T, BOYD R N. Production of the light

- elements in primordial nucleosynthesis[J]. The Astrophysical Journal, 1990, 359: 267-276.
- [2] AXELSSON L, BORGE M J G, FAYANS S, et al. Study of the unbound nucleus  $^{11}\text{N}$  by elastic resonance scattering[J]. Physical Review, 1996, C54:R1 511-R1 514.
- [3] MARKENROTH K, AXELSSON L, BAXTER S, et al. Crossing the dripline to  $^{11}\text{N}$  using elastic resonance scattering[J]. Physical Review, 2000, C62:034 308.
- [4] SAVARD G, GALINDO-URIBARRI A, HAGERBERG E, et al.  $^{10}\text{C}$  superallowed branching ratio and the cabibbo-kobayashi-maskawa matrix unitarity[J]. Physical Review Letters, 1995, 74: 1 521-1 524.
- [5] FUJIKAWA B K, ASZTALOS S J, CLARK R M, et al. A new measurement of the strength of the superallowed Fermi branch in the beta decay of  $^{10}\text{C}$  with GAMMASPHERE[J]. Physics Letters, 1999, B449:6-11.
- [6] BAI Xixiang, LIU Weiping, QIN Jiuchang, et al. A facility for production and utilization of radioactive beams[J]. Nucl Phys, 1995, A588: 273c-276c.
- [7] 曾晟, 柳卫平, 李志宏, 等.  $^8\text{Li}$  次级束的产生[J]. 原子能科学技术, 2002, 36(3):227-229.  
ZENG Sheng, LIU Weiping, LI Zhihong, et al. Production of  $^8\text{Li}$  secondary beam[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2002, 36(3): 227-229(in Chinese).
- [8] 王宝祥, 李志宏, 曾晟, 等.  $^{15}\text{O}$  次级束的产生[J]. 原子能科学技术, 2005, 39(4):289-292.  
WANG Baoxiang, LI Zhihong, ZENG Sheng, et al. Production of  $^{15}\text{O}$  secondary beam for measurements of reactions of nuclear astrophysical interests [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2005, 39(4):289-292(in Chinese).

## 存储式放射性能谱测量仪

【公开日】2006. 04. 19

【分类号】G01V5/04

【公开号】CN1760695

【申请号】CN200510044014.4

【申请日】2005. 07. 07

【申请人】中国石化集团胜利石油管理局测井公司

【文摘】本发明涉及一种存储式放射性能谱测量仪, 适合在产液井长期监测其产出液体的放射性。采用的技术方案是: 由存储式放射性能谱探测器、仪器电缆、电源组成。存储式放射性能谱探测器由放射性传感器、存储式放射性能谱测量电路板、铅屏蔽、高压电源、电路板支架、仪器外壳、指示灯、仪器插座组成。存储式放射性能谱测量电路板由前置电路、放大电路、脉冲鉴别电路、峰值检测电路、A/D、CPU、高压检测、温度检测、电源检测、实时时钟、时钟电池、主机电源、测量电源管理、测量电源、数据存储器等组成。存储式放射性能谱探测器采用一体化、低功耗设计, 这种设计能使仪器结构紧凑, 便于施工和长期作业。配以专用对话软件, 计算机通过专用通讯电缆与存储式放射性能谱测量仪连接, 用于下载数据和工作程序, 具有仪器对话、编程、数据回放、绘图、检测、维修与标定等功能。

摘自中国原子能科学研究院《核科技信息》