

文章编号: 1007-4627(2019)04-0414-05

## 首次使用核反应法鉴别JUNA深地加速器 $A/q=2$ 的束流种类

陈涵<sup>1,2</sup>, 许世伟<sup>1,2</sup>, 武启<sup>1,2</sup>, 李云居<sup>3</sup>, 陈立华<sup>3</sup>, 高丙水<sup>1,2</sup>, 孙良亭<sup>1,2</sup>, 唐晓东<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;  
2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049;  
3. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

**摘要:** JUNA 团队计划利用 CJPL 所提供的极低本底条件和 400 kV 高压平台上 2.45 GHz ECR 离子源产生的毫安量级束流首次在天体物理能区对关键核反应进行直接测量。实验需要 10 emA 的质子束流和 He<sup>+</sup> 束流以及 2 emA 的 He<sup>2+</sup> 束流。使用 2.45 GHz 离子源产生毫安量级的 He<sup>2+</sup> 束流是离子源制造的难点。由于离子源分析磁铁分辨能力有限, 无法区分 He<sup>2+</sup> 和 H<sub>2</sub><sup>+</sup> 离子, 本文首次使用核反应法对离子源产生的  $A/q=2$  的束流进行了鉴别, 结果显示, JUNA 项目 2.45 GHz ECR 离子源无法产生毫安量级的 He<sup>2+</sup> 束流。该研究成果为 JUNA 项目离子源的设计提供了重要的参考依据。JUNA 团队另外研制了一台微波频率为 14.5 GHz 的 ECR 离子源并成功产生 2 emA 的 He<sup>2+</sup> 束流来满足实验需求。

**关键词:** 锦屏地下核天体物理实验; 核反应法; 2.45 GHz ECR 离子源; He<sup>2+</sup> 束流; 束流鉴别

**中图分类号:** O571.53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.04.414

### 1 引言

原子核天体物理是一门由研究宏观天体现象的天体物理与研究微观粒子规律的核物理相结合而形成的一门交叉学科, 其主要目标是利用核物理来解释宇宙中各种天体环境中发生的复杂现象。原子核反应在恒星演化过程和元素合成过程中扮演着重要角色, 因此对于它们的研究十分重要。然而在天体物理能区中, 相关核反应的截面极低, 由于宇宙射线的影响, 地面条件下的直接测量实验只能在高能区进行。地下实验室对宇宙射线具有良好的屏蔽能力, 因此对此类反应的研究往往需要在地下实验室开展。中国锦屏地下实验室<sup>[1]</sup>(China JinPing underground Laboratory, CJPL) 是目前世界上最深的地下实验室, 垂直岩石覆盖厚度为 2400 m (等效水深 6720 m), 有着最低的宇宙线  $\mu$  子通量水平  $(2 \pm 0.4) \times 10^{-10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ <sup>[2]</sup>。

CJPL 核天体物理团队<sup>[3]</sup> (Jinping Underground laboratory for Nuclear Astrophysics, JUNA) 计划利用锦屏地下实验室极低的本底条件和 400 kV 高压加速器提供的高流强质子束和氦束 (见图 1), 在天体物理能区对四个核天体物理中的关键核反应 ( $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ ,  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ ,  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  和  $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$ ) 开展直接测量实验。为了提高实验中待测粒子产额, 必须在实验中使用毫安量级的束流, JUNA 项目对束流的要求见表 1<sup>[4]</sup>。

2.45 GHz 的电子回旋共振 (ECR) 离子源在国际上被广泛用于产生毫安量级的单电荷态离子束流<sup>[5-6]</sup>, 完全满足 JUNA 项目对于 H<sup>+</sup> 和 He<sup>+</sup> 束流的需求。对于使用此类离子源产生多电荷态离子束流的研究也一直在进行, 国外研究人员成功地使用此类离子源产生了 15 nA 的 He<sup>2+</sup> 束流<sup>[7]</sup>, 北京大学的研究人员也使用此类离子源在脉冲模式下产生了 4.4 mA 的 He<sup>2+</sup> 束流<sup>[8]</sup>。

表 1 JUNA 项目对束流的需求参数

反应	束流	流强/emA	最低测量质心系能量/keV	最低所需束流能量/keV
$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$	He <sup>2+</sup>	2	450	600
$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$	He <sup>+</sup>	10	200	262
$^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$	H <sup>+</sup>	10	58	60
$^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$	H <sup>+</sup>	0.1	100	105

收稿日期: 2019-11-10; 修改日期: 2019-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11490564, 11021504, 11321064, 11475228, 11490564); 中国科学院科研装备研制项目 (28Y-531040)

作者简介: 陈涵(1992-), 男, 湖北十堰人, 博士研究生, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: hchen@impcas.ac.cn.

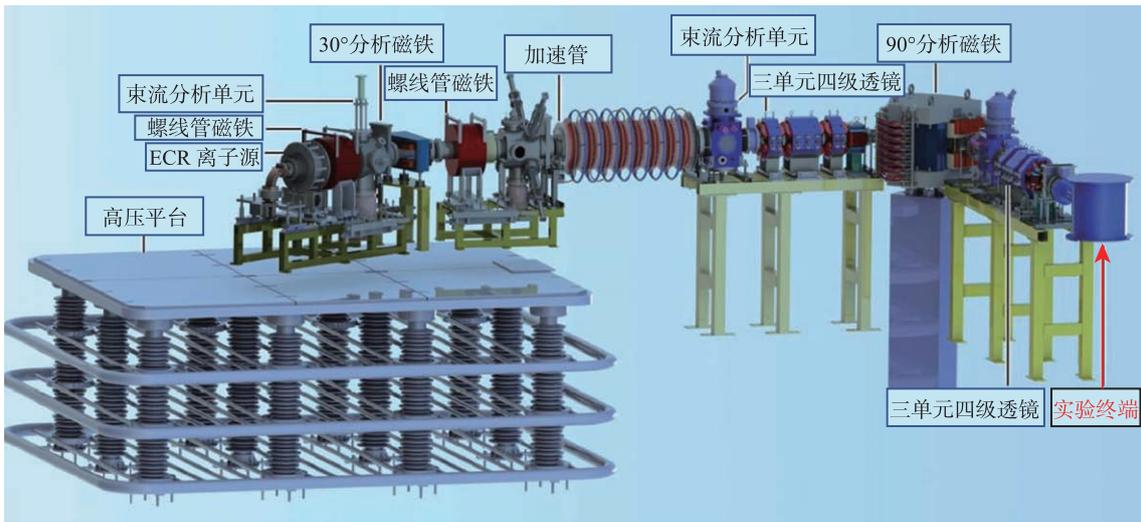


图1 (在线彩图) JUNA 400 kV 高压平台示意图

对于JUNA项目,如果能够成功研发出一台产生毫安量级直流 $\text{He}^{2+}$ 束流的ECR离子源来匹配400 kV高压加速器,那么氦束最高能量将从400 keV提升至800 keV,从而满足 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的实验需求。此外,利用800 keV的氦束可以将 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应的测量能区拓展到 $E_{c.m.} = 612$  keV,覆盖到目前地面实验对此反应的测量能区,检验地下实验与地面实验的系统误差,因此产生毫安量级 $\text{He}^{2+}$ 束流意义重大。

JUNA项目尝试使用2.45 GHz的ECR离子源产生毫安量级的 $\text{He}^{2+}$ 束流,该离子源已经于2017年8月在中国原子能科学研究院完成了安装,成功产生了10 emA的质子束流和10 emA的 $\text{He}^+$ 束流<sup>[4]</sup>。对于该离子源能否产生毫安量级的 $\text{He}^{2+}$ 束流需要进行束流鉴定。

## 2 束流种类鉴别方法

在离子源的束流种类鉴别实验中,通常使用束流线上的分析磁铁来对不同质荷比的离子进行区分,该方法主要利用磁刚度进行束流种类鉴别,因此本文称这种方法为“磁刚度法”,其原理可用下式描述:

$$B\rho = \frac{m}{q}\gamma v,$$

式中: $B$ 为磁铁的磁场; $\rho$ 为离子轨道半径; $m/q$ 为离子的质荷比; $\gamma$ 为洛伦兹因子; $v$ 为离子的速度。具体做法是在离子源后加上一个分析磁铁和法拉第筒,由于实验设备的几何位置固定,也就是 $\rho$ 固定,对于相同能量的离子,可以通过调节电流改变分析磁铁磁场来选择对应磁刚度( $B\rho$ )的离子入射到法拉第筒上。通过记录分析磁铁的电流和法拉第筒上的电流,就可以通过磁刚度来对束流中的离子进行鉴别。通常加速器离子源的后

端都会配置一个分析磁铁用于选择引出束流,因此使用磁刚度法鉴别束流种类简单便捷。

根据磁刚度法的原理可知,该方法对束流种类的鉴别能力主要依赖于分析磁铁的分析能力。JUNA项目离子源能够使用氢气或氦气作为工作气体分别产生质子束和氦束,在将工作气体由氢气切换为氦气时,即使经过充分洗气也难免会有一部分氢气残余在离子源中,另外管道真空内和管壁上也会存在一定量的氢化物,两者都会在离子源中产生 $\text{H}_2^+$ 离子。 $\text{H}_2^+$ 和 $\text{He}^{2+}$ 具有十分相近的质荷比,分别为2.016 199和2.000 753,离子源段的 $30^\circ$ 分析铁无法将其分开。另外,本次实验高压平台上的 $90^\circ$ 分析铁狭缝完全打开,用于传输 $A/q=2$ 的束流,没有区分 $\text{H}_2^+$ 和 $\text{He}^{2+}$ ,因此磁刚度法在本次束流鉴别实验中并不适用,为此本文选择使用“核反应法”对束流进行鉴别。

核反应法主要利用束流打靶产生的核反应来进行束流种类鉴别。例如对于本文中需要鉴别的氦束和氢束,可以选择一个核反应只对氦核或氢核敏感,通过测量反应产物去估算束流中的氦核或氢核的含量,由于束流中的成分主要是氦和氢,因此只需要测量其中一种成分即可以达到束流鉴别的目的。

核反应法与磁刚度法的对比如下:

- (1) **原理** 核反应法利用原子核的反应鉴别束流。磁刚度法利用不同质荷比的离子磁刚度不同鉴别束流;
- (2) **复杂度** 核反应法鉴别束流涉及到探测器、靶等相关设备,比较复杂。磁刚度法只需要通过改变分析磁铁的电流和记录法拉第筒的电流即可,相对简单;
- (3) **主要受限因素** 核反应法主要受限于相关核反应的截面大小以及产物测量难易度等因素。磁刚度法主

要受限于分析磁铁的分辨能力；

(4) **推荐使用范围** 核反应法鉴别质荷比近似的束流(分析磁铁分辨能力能力不足)；磁刚度法鉴别质荷比差异较大的束流。

### 3 实验原理、装置及流程

本次实验在中国原子能科学研究所的 JUNA 项目 400 kV 高压平台的实验终端上开展的(见图 1)。实验通过反应：



测量束流中的质子含量，从而实现对束流的鉴别，该反应的激发函数见图 2，数据来源于文献[9]。测量装置示意图见图 3，待测束流由一个 2.45 GHz 的 ECR 离子源产生，使用离子源后的 30° 偏转磁铁对束流进行选择后进入加速管加速至所需能量，加速完成后经过一个 90° 的分析磁铁，然后通过一个三单元四极磁铁聚焦后导入至实验终端打靶。实验中使用一块靶厚为 20 μg/cm<sup>2</sup> 的 LiF 靶作为实验用靶，一块有效厚度为 300 μm 的硅探测器被用来测量反应产生的 α 粒子，硅探测器距离靶中心为 20 cm 并被放置在与束流方向呈 135° 的角度上，实验中束流的能量为 175 keV/q。实验中硅探测器上加有一个直径为 10 mm 的光阑作为准直器，通过 LISE++ 程序计算可知使用 H<sub>2</sub><sup>+</sup> 束流打靶时被散射至硅探测器上的质子最高能量约为 52 keV，因此在光阑前覆盖一层厚度为 7 μg/cm<sup>2</sup> 的铝箔用来阻止被散射的束流损坏硅探测器，同时也保证了不影响反应产物 α 粒子(能量约为 8.4 MeV)的探测。实验过程中由 <sup>7</sup>Li(p, α)α 产生的 α 被清晰地探测到(见图 4)。整个反应靶室与探测装置通过一个绝缘法兰与前面的束流管道绝缘，整个测量靶室作为一个法拉第筒与一个束流积分器配合来记录入射束流的总电荷量。

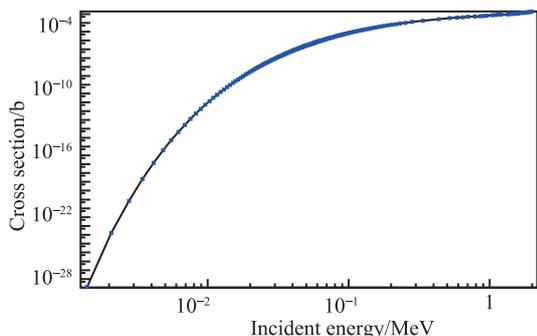


图 2 (在线彩图) <sup>7</sup>Li(p, α)α 反应的激发函数

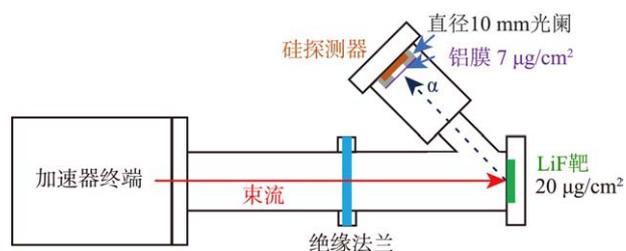


图 3 (在线彩图) 实验终端示意图

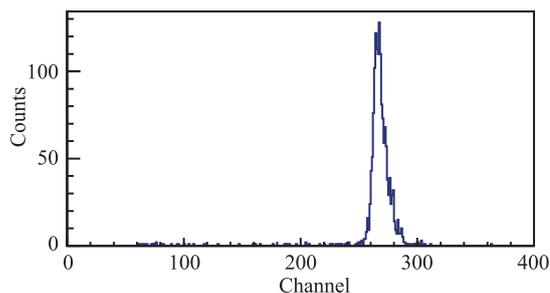


图 4 (在线彩图) α 粒子能谱图

理论上可以通过硅探测器上的 α 粒子总计数直接计算得到质子束流强度，但是这种方法依赖于 <sup>7</sup>Li(p, α)α 反应截面、硅探测器效率和靶厚等信息，误差较大。为了减小整个实验过程中的系统误差，本次实验使用相对测量法对束流种类进行鉴别，整个实验分为如下两个步骤进行：

(1) 使用氦气作为离子源的工作气体，通过 30° 偏转磁铁，导出质荷比为 2 的束流打靶，记录硅探测器内的 α 总计数 C<sub>1</sub> 和入射束流的总电荷量 Q<sub>1</sub>；

(2) 将离子源的工作气体换为氢气，导出 H<sub>2</sub><sup>+</sup> 束流打靶，与上一步骤相同，记录硅探测器内的 α 总计数 C<sub>2</sub> 和束流积分器内的总电荷量 Q<sub>2</sub>。

由于前后两次束流的质荷比相同，束流能量一致，因此加速器上偏转磁铁的各项参数在实验期间保持不变，最大可能地减小了实验的系统误差。

### 4 实验结果与分析

本次实验结果见表 2，从表中可以看到，使用氦气作为工作气体时，质荷比为 2 的束流平均流强达不到毫安量级水平。以氢气作为工作气体时，A/q=2 的束流成分主要为 H<sub>2</sub><sup>+</sup>，由于质荷比相似，束流中也有微量的 D<sup>+</sup> 离子被导入至实验终端，两者的比例可由下式计算<sup>[11]</sup>：

$$\frac{I_{D^+}}{I_{H_2^+}} = \frac{I_{D^+}}{I_{H^+}} \frac{I_{H^+}}{I_{H_2^+}}, \quad (2)$$

式中：I<sub>D<sup>+</sup></sub>/I<sub>H<sup>+</sup></sub> 为氘的天然丰度比，其值为 1.5×10<sup>-4</sup>；I<sub>H<sup>+</sup></sub>/I<sub>H<sub>2</sub><sup>+</sup></sub> 为离子源中 I<sub>H<sup>+</sup></sub> 与 I<sub>H<sub>2</sub><sup>+</sup></sub> 的比例，由分析磁铁扫

表2 实验中的设置与结果

工作气体	束流总电荷量 $Q/\mu\text{C}$	平均流强 $I/\mu\text{A}$	$\alpha$ 粒子总计数	$\alpha$ 粒子计数率 $R/\text{cps}$	$R/I$	测量时间/s
He	449.55	0.239 2	131 (11)	0.07 (1)	0.29 (2)	1879
H <sub>2</sub>	2 341.89	16.97	784 (30)	5.68 (22)	0.33 (1)	138
H <sub>2</sub>	3 635.68	64.92	1 111 (34)	19.84 (61)	0.31 (1)	56

描得到, 其值为 $9.2^{[12]}$ 。最终可以得到 $I_{D^+}/I_{H_2^+}=1.6\times 10^{-5}$ 。D<sup>+</sup>所占比例极小, 由D<sup>+</sup>束流在实验过程产生的误差与统计误差相比可以忽略不计, 可以认为此时实验测量得到硅探测器上 $\alpha$ 粒子计数率 $R$ 与入射离子平均流强 $I$ 的比值 $R/I$ 反映了入射质子数目和探测器上记录的 $\alpha$ 粒子(全部由质子打靶产生)数目之间的关系, 合并两次测量结果, 其值为0.32(1)。当使用氦气作为工作气体时,  $A/q=2$ 的束流中的H<sub>2</sub><sup>+</sup>含量 $I_{H_2^+}$ 可以由下式计算:

$$I_{H_2^+} = (I/R)_{H_2} \cdot R_{He}, \quad (3)$$

式中:  $(I/R)_{H_2}$ 为使用氢气作为工作气体时, 硅探测器上的 $\alpha$ 粒子计数率与入射H<sub>2</sub><sup>+</sup>流强之间的关系, 其值为0.32(1);  $R_{He}$ 为使用氦气作为工作气体时, 硅探测器上的 $\alpha$ 粒子计数率, 其值为0.07(1) cps, 最终可以得到束流中H<sub>2</sub><sup>+</sup>流强为 $I_{H_2^+}=0.07(1)/0.32(1)=219(32)$  enA。束流中的主要成分为H<sub>2</sub><sup>+</sup>和He<sup>2+</sup>, 由总流强239.2 enA可得, 束流中的He<sup>2+</sup>流强 $I_{He^{2+}}=20(32)$  enA, 所给误差为统计误差。

本次实验结果表明, JUNA项目2.45 GHz离子源产生的 $A/q=2$ 的束流中主要成分为H<sub>2</sub><sup>+</sup>, 无法产生毫安量级的He<sup>2+</sup>束流, 不能满足JUNA项目对He<sup>2+</sup>束流的需求, 该研究成果为JUNA项目离子源的设计提供了重要的参考依据。由于微波频率为14.5 GHz的ECR离子源<sup>[13]</sup>主要用于产生高电荷态粒子束流, 因此JUNA团队另外研制了一台此类型的ECR离子源, 最终使用该离子源成功产生了2 emA的He<sup>2+</sup>束流来满足项目需求。

## 5 总结和展望

本次实验首次使用核反应法对2.45 GHz ECR离子源的束流种类进行鉴别, 核反应鉴别束流法借助于不同束流粒子原子核自身的性质, 不依赖于束流线上分析磁铁的分辨能力, 因此在对具有相似质荷比的束流的鉴别方面比传统的磁刚度方法更具有优势。由于束流中具有相似质荷比的离子也可能由于分析磁铁的分辨率不足而被混在一起导出至实验终端。例如He<sup>2+</sup>与H<sub>2</sub><sup>+</sup>的质荷比差别非常小(约为0.76%), 可以使用核反应法作为辅助手段确认束流种类。采用核反应的方法也可以精确测

量束流中的杂质成分, 修正束流流强, 从而减小实验结果的误差。另外, 文中使用的相对测量方法, 不改变实验过程中的终端磁铁上的设置, 不依赖相关核反应截面数据的精度, 能够极大程度地避免实验过程中引入的系统误差, 增强实验结果的可靠性。根据实验结果可以断定, JUNA项目2.45 GHz ECR离子源无法产生毫安量级的He<sup>2+</sup>束流。

最终得到的He<sup>2+</sup>流强相对误差较大, 主要误差来源为统计误差, 今后的相关实验可以从如下几个方面增加目标粒子统计数目, 以提高核反应法在束流鉴别中的灵敏度。

(1) 提高入射束流能量。由于入射能量与反应截面直接相关, 因此较高的束流能量可以产生更多的目标粒子, 减小统计误差;

(2) 使用厚靶。厚靶一方面可以消除高功率束流对靶产生的破坏对实验结果所造成的影响, 降低了系统误差; 另一方面也加大了目标粒子的产额, 减小了统计误差;

(3) 提高探测器效率。使用效率更高的探测器, 记录更多的目标粒子从而减小统计误差。

如果直接在离子源引出的束流能量下进行鉴别实验, 通过本文数据也可以对此类实验进行估计。假如使用本次实验装置(包括探测器、靶等)选择<sup>7</sup>Li(p,  $\alpha$ ) $\alpha$ 反应测量束流强度为1  $\mu\text{A}$ 的H<sub>2</sub><sup>+</sup>束流, 在入射质子能量为40 keV(对应引出电压为80 kV, 反应截面约为0.68  $\mu\text{b}$ , 见图2)时, 束流照射一天后, 硅探测器上得到的 $\alpha$ 粒子总计数为400, 最终测量得到的H<sub>2</sub><sup>+</sup>束流强度结果能达到5%的统计误差。通常离子源引出电压难以达到80 kV, 例如JUNA 2.45 GHz ECR离子源的引出电压为50 kV, 文献[8]内北京大学离子源的引出电压为40 kV。当入射质子能量为25 keV时<sup>7</sup>Li(p,  $\alpha$ ) $\alpha$ 反应截面为20.8 nb, 硅探测器上 $\alpha$ 粒子的计数率约为12个/d, 因此无法使用本文的探测设备进行研究, 相关实验需要提高探测器效率以减小所需束流时长。

本文提出的核反应方法, 不仅可以用来测量束流中的氢含量, 根据实验目的, 使用不同的核反应也可以被广泛用来测量束流中的其它种类离子含量。在极低截面的测量实验中(例如核天体物理中, 天体物

能区附近的截面测量实验), 束流中微量的杂质对实验也会具有潜在威胁, 使用此方法能够精确分析束流成分, 有效减小相关实验的系统误差, 对于未来 JUNA 团队在 CJPL 开展的直接测量实验来说也十分重要。

**致谢** 感谢中国原子能科学研究院崔保群研究员等在研究过程中的相关讨论。感谢中国原子能科学研究院 400 kV 高压平台工作人员提供的技术支持。

#### 参考文献:

- [1] CHENG J P, KANG K J, LI J M, *et al.* *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 2017, **67**: 231.
- [2] Yu-CHENG W, XI-QING H, QIAN Y, *et al.* *Chinese physics C*, 2013, **37**(8): 086001.
- [3] LIU Weiping, LI Zhihong, HE Jianjun, *et al.* *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2016, **59**(4): 642001.
- [4] LIU Weiping, LI Zhihong, HE Jianjun, *et al.* *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, **53**(10): 1729. (in Chinese) (柳卫平, 李志宏, 何建军, 等. 原子能科学技术, 2019, **53**(10): 1729.)
- [5] WU Q, ZHANG Z, SUN L, *et al.* *Review of Scientific Instruments*, 2014, **85**(2): 02A703.
- [6] MENG Z, SHI X P, ZHI Z S, *et al.* *Chinese Physics C*, 2008, **32**(S1): 220.
- [7] MELCHERTY F, MEUSERY S, KRUDENERY S, *et al.* *J Phys B-At Mol Opt Phys*, 1997, **30**: L697.
- [8] REN H, PENG S, XU Y, *et al.* *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2013, **56**(10): 2016.
- [9] BROWN D A, CHADWICK M B, CAPOTE R, *et al.* *Nuclear Data Sheets*, 2018, **148**: 1.
- [10] WU Q, SUN L T, CUI B Q, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2016, **830**: 214.
- [11] CHEN Han, XU Shiwei, ZHANG Ningtao, *et al.* *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2018, **61**(5): 052021.
- [12] WU Qi. Progress Report on High Current Ion Sources and Low Energy Beam Lines in JUNA[R]. JUNA Group Meeting, 2016-10-18, unpublished. (in Chinese) (武启. 锦屏强流离子源及低能束运线进展报告[R]. JUNA组会, 2016-10-18.)
- [13] SUN Liangting, ZHAO Hongwei, ZHANG Zimin, *et al.* *Nuclear Techniques*, 2006, **29**(2): 85. (in Chinese) (孙良亭, 赵红卫, 张子民, 等. 核技术, 2006, **29**(2): 85.)

## Identification of the $A/q=2$ Beam Species from the JUNA Deep Underground Accelerator by Nuclear Reaction Method for the First Time

CHEN Han<sup>1,2,1)</sup>, XU Shiwei<sup>1,2</sup>, WU Qi<sup>1,2</sup>, LI Yunju<sup>3</sup>, CHEN Lihua<sup>3</sup>, GAO Bingshui<sup>1,2</sup>,  
SUN Liangting<sup>1,2</sup>, TANG Xiaodong<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** The Jinping Underground laboratory for Nuclear Astrophysics(JUNA) group is planing to take the advantage of the ultra-low background of China Jinping Underground Laboartory(CJPL) and a high current accelerator based on an 2.45 GHz ECR ion source to study some key reactions of the nuclear astrophysics at their stellar energies for the first time. The experiments in JUNA project need proton,  $\text{He}^+$  and  $\text{He}^{2+}$  beams with intensities of 10, 10 and 2 emA, respectively. The most challenging part of the design and fabrication of ECR ion source is the production of the  $\text{He}^{2+}$  beam with intensities at the level of milliamperes. The traditional particle identification method based on magnetic rigidity is difficult to distinguish the  $\text{He}^{2+}$  and  $\text{H}^+$  ions because of their similar mass-to-charge ratios. Therefore, a novel method using nuclear reactions has been developed in this work for the identification of  $A/q=2$  beam species from the ion source. The result shows that the 2.45 GHz ECR ion source can't produce the  $\text{He}^{2+}$  beam with a intensity of milliampere. Based on this result, a 14.5 GHz ECR ion source has been developed which has produced 2 emA  $\text{He}^{2+}$  beam successfully.

**Key words:** JUNA; nuclear reaction method; 2.45 GHz ECR ion souce;  $\text{He}^{2+}$  beam; beam identificiation

**Received date:** 10 Nov. 2019; **Revised date:** 27 Nov. 2019

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(11490564, 11021504, 11321064, 11475228, 11490564); Equipment Research and Development Project of Chinese Academy of Sciences(28Y531040)

1) E-mail: [hchen@impcas.ac.cn](mailto:hchen@impcas.ac.cn).