

核天体反应直接测量中的  $\gamma$  加和谱解析方法\*王砾欢<sup>1)</sup> 盛耀德<sup>1)</sup> 苏俊<sup>1)†</sup> 何建军<sup>1)</sup> 张立勇<sup>1)</sup> 李子铭<sup>1)</sup> 张昊<sup>1)</sup>  
谌阳平<sup>2)</sup> 李志宏<sup>2)</sup> 郭冰<sup>2)</sup> 连刚<sup>2)</sup> 柳卫平<sup>2)</sup>

(1)射线束技术教育部重点实验室,北京师范大学核科学与技术学院,100875,北京;

2)中国原子能科学研究院,102413,北京)

**摘要** 带电粒子辐射俘获反应是核天体物理的主要研究内容之一,对了解恒星核合成过程具有重要意义.由于恒星温度(伽莫夫窗口)下这些反应的截面极小, $\gamma$ 射线产额非常低,实验需要结合高效率的 $\gamma$ 加和探测技术进行测量.本文基于贝叶斯理论和相关分析程序,发展了一种对加和型 $\gamma$ 探测阵列能谱的解析方法,并利用该方法对锦屏深地核天体物理实验项目测量的实验数据进行分析,验证了该解析方法的有效性,并显著减小了 $\gamma$ 加和峰探测效率的误差,进一步提高了 $\gamma$ 加和探测技术的测量精度.

**关键词** 带电粒子辐射俘获反应;深地核天体反应直接测量; $\gamma$ 加和探测技术;贝叶斯分析方法;首次 $\gamma$ 跃迁分支比; $\gamma$ 加和峰探测效率

中图分类号 O571.42+2

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022156

## 0 引言

以 $(p, \gamma)$ 和 $(\alpha, \gamma)$ 为代表的带电粒子辐射俘获反应在大爆炸原初核合成和恒星演化过程中具有关键性的作用,是核天体物理研究的主要对象之一.但由于库仑势垒的影响,带电粒子辐射俘获反应在天体物理感兴趣的低能区(伽莫夫窗口)内的截面极小,因此 $(p, \gamma)$ 和 $(\alpha, \gamma)$ 反应的直接测量一直是核天体物理实验的挑战之一.近年来发展的地下核天体物理实验技术<sup>[1-2]</sup>和 $\gamma$ 加和探测技术<sup>[3-5]</sup>逐步成为解决这一问题的主要途径,前者利用地下实验室的极低宇宙射线环境,极大减小了 $\gamma$ 探测的本底,后者显著提高了 $\gamma$ 探测效率.目前,在地下核天体物理实验室已经完成了许多核天体物理关键 $(p, \gamma)$ 反应测量<sup>[6-12]</sup>,为研究宇宙大爆炸和恒星演化提供了一系列关键的核反应率数据.在我国,锦屏深地核天体物理实验(JUNA)装置<sup>[2]</sup>,得到国家自然科学基金委重大项目支持,它于2020年成功运行并取得一批国际先进水平的核天体物理成果<sup>[12-13]</sup>.JUNA位于中国锦屏深地实验室(CJPL)<sup>[14]</sup>,是我国首批地下核天体反应研究设施,为我国在深地直接测量重要的核天体物理辐射俘获反应提供了基础条件.

由于大多数辐射俘获反应的复合核通过级联过

程退激,即一次反应出射多条 $\gamma$ 射线,因此需要已知复合核退激 $\gamma$ 分支比才能准确计算反应截面.以往实验<sup>[14-18]</sup>大多采用高纯锗探测器测量得到高分辨的 $\gamma$ 能谱,结合已知的复合核能级,从 $\gamma$ 能谱中甄别出反应出射的第一条 $\gamma$ 射线,从而得到其首次 $\gamma$ 跃迁分支比.但高纯锗探测效率较低,很难将 $(p, \gamma)$ 和 $(\alpha, \gamma)$ 反应截面测量推进到伽莫夫窗口.而且,高纯锗探测器一般覆盖角度有限,需要多次测量得到不同角度的微分截面并进行角分布修正,增加了实验难度.

针对以上问题,近年来发展了 $\gamma$ 加和探测技术.该技术用多个闪烁体组成的近 $4\pi$ 探测阵列代替高纯锗,理想情况下,可以将一次反应出射的所有 $\gamma$ 射线完全吸收.因此,将各探测单元的能量进行加和后,可得到反应产生的 $\gamma$ 射线总能量 $E_{\text{sum}}$ ,称之为 $\gamma$ 加和峰.根据辐射俘获反应的运动学公式, $E_{\text{sum}}$ 约等于反应质心系相对运动能( $E_{\text{cm}}$ )与反应能( $Q$ )之和.

$\gamma$ 加和探测技术在辐射俘获反应测量上具有4个优点:1)探测效率高.近 $4\pi$ 的立体角覆盖,闪烁体较高的本征探测效率,以及能量加和对康普顿和电子对效应的修正大大提高了 $\gamma$ 加和峰探测效率,使得极小截面测量成为可能.2) $\gamma$ 能量特征明显.每种辐射俘获反应的 $\gamma$ 加和峰只有1个,因此在能谱上很容易找到感兴趣能区(ROI).3)本底低.由于大多数辐射俘

\* 国家自然科学基金资助项目(U1867211, 11490563, 11490560)

† 通信作者:苏俊(1983—),男,教授,博士生导师.研究方向:核天体物理. E-mail: sujun@bnu.edu.cn

收稿日期:2022-05-07

获反应的反应能  $Q$  值比较高,  $E_{\text{sum}}$  超过天然本底的主要区域(0~4 MeV), 避开了主要天然本底的干扰. 4) 误差小. 近  $4\pi$  的立体角覆盖使得测量基本不受反应角分布的影响, 减小了角分布修正带来的误差.

$\gamma$  加和探测技术目前的主要难点是如何确定  $\gamma$  加和峰的探测效率( $\epsilon_{\text{sum}}$ ). 对于级联退激过程,  $\epsilon_{\text{sum}}$  不但与  $E_{\text{sum}}$  相关, 还和具体的级联过程有关, 或者说与级联多重度  $M$  以及各条  $\gamma$  射线的能量分配相关. 而在伽莫夫窗口, 大多辐射俘获反应的  $\gamma$  首次跃迁分支比是未知的. 为解决这一问题, Simon 等<sup>[4]</sup>进行了研究, 发现探测阵列的点火数  $N$  (即探测到  $\gamma$  能量的单元个数) 和反应  $\gamma$  跃迁的级联多重度呈正相关, 因此可以通过平均点火数  $\langle N \rangle$  推导出平均级联多重度  $\langle M \rangle$ . 然后将  $\langle M \rangle$  和  $E_{\text{sum}}$  作为蒙特卡罗模拟的输入量模拟得到  $\epsilon_{\text{sum}}$ . Reingold 等<sup>[5]</sup>的工作也采用了这一方法, 但该方法只能解决级联多重度对  $\gamma$  加和峰探测效率的影响, 无法解决级联中各条  $\gamma$  能量分配带来的效率误差, 因此这 2 个工作<sup>[4-5]</sup>的蒙特卡罗模拟中对级联  $\gamma$  跃迁采用了随机能量分配, 而结果显示给出的  $\gamma$  加和峰探测效率误差明显随  $E_{\text{sum}}$  增加而增大, 如  $\langle M \rangle \approx 4.4$ ,  $E_{\text{sum}} \approx 14$  MeV 条件下  $\epsilon_{\text{sum}}$  的相对误差约为 10%<sup>[5]</sup>. 近期, Dermigny 等<sup>[19]</sup>采用最大似然法对高纯锗-碘化钠复合谱仪的能谱进行拟合, 得到了  $\gamma$  首次跃迁分支比, 从而精确计算反应产额, 并利用数个辐射俘获反应测量进行了验证, 取得了较好的效果, 因此本文尝

试进一步将该方法推广到  $\gamma$  加和探测技术中.

本文介绍了一种新型  $\gamma$  加和探测技术的能谱解析方法, 该方法以  $\gamma$  首次跃迁分支比为拟合参数, 利用贝叶斯分析程序 BAT<sup>[20]</sup> 对  $\gamma$  加和能谱以及  $\gamma$  加和峰开门后得到的单元能谱进行拟合, 得到  $\gamma$  首次跃迁分支比. 利用该方法对 JUNA 装置<sup>[2]</sup>上完成的  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  和  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  共振反应测量数据进行了分析, 结果表明该方法可以将  $\gamma$  加和峰探测效率误差减小到 1% 左右, 明显优于点火数方法.

## 1 分析方法

图 1-a 显示了利用  $\gamma$  加和探测技术得到的  $^{60}\text{Co}$  放射源  $\gamma$  能谱. 图 1-a 为  $\gamma$  加和能谱, 由探测阵列各单元能量加和得到, 可以看出在 2500 keV 附近有明显的  $\gamma$  加和峰, 对应  $^{60}\text{Co}$  衰变布居的  $^{60}\text{Ni}$  的 2506 keV 能级,  $\gamma$  加和峰内的数据代表  $^{60}\text{Ni}$  2506 keV 能级退激发射的 2 条  $\gamma$  射线均被探测到. 图 1-b 是单元能谱, 该能谱由图 1-a 的加和峰 ( $2300 \text{ keV} < E_{\text{sum}} < 2700 \text{ keV}$ ) 开门, 并将所有探测单元得到的能谱计数叠加得到. 在图 1-a 上明显能看到级联出射的 1173 和 1333 keV 2 个独立  $\gamma$  峰. 这是因为每个探测单元覆盖的立体角较小, 一般只会探测到级联过程的单条  $\gamma$  射线, 因此单元能谱上的特征峰在很大程度上表征了级联退激中的各条  $\gamma$  能量. 此外, 由于单元能谱为  $\gamma$  加和峰开门得到, 效应本底比较高.

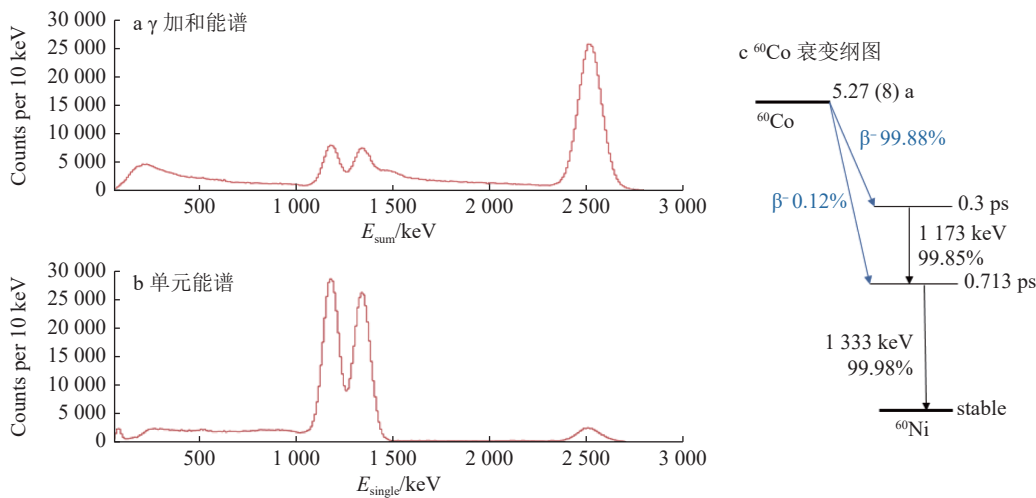


图 1 利用  $\gamma$  加和探测技术得到的  $^{60}\text{Co}$  放射源  $\gamma$  能谱

由于  $^{60}\text{Ni}$  的 2506 keV 能级通过 1173 ~ 1333 keV 级联退激的分支比为 99.8%, 因此可以近似认为图 1 中的  $\gamma$  能谱为一种  $\gamma$  级联过程产生, 非常简单. 而实际上大多辐射俘获反应是通过很多种  $\gamma$  级联路径退激, 因此可以认为其  $\gamma$  能谱是由各级联过程的贡献组成, 设  $\gamma$  能谱的总道数为  $i$ , 则有

$$D_i = N \sum_{j=0}^m b_j F_{ij}, \quad (1)$$

式中:  $D_i$  代表了  $\gamma$  加和能谱或  $\gamma$  单元能谱第  $i$  道的实验计数;  $m$  为级联种类的总数;  $b_j$  为各级联过程的分支比;  $F_{ij}$  代表单级第  $j$  个级联过程在能谱第  $i$  道引起的计数;  $N$  代表反应总数;  $F_{ij}$  又被称为探测阵列的响

应函数,如果级联过程已知, $F_{ij}$ 可以通过蒙特卡罗模拟得到.对式(1)进行求解,即可得到各级联过程的分支比,从而得到 $\gamma$ 全能峰探测效率.

由于大部分的辐射俘获反应 $\gamma$ 退激路径复杂,往往有数百种甚至上千种级联过程,造成式(1)求解极为复杂,因此需要进行进一步的简化.核天体物理主要关心低能区反应截面,因此反应布居的能级离 $p$ 或 $\alpha$ 阈值很近,通常首次 $\gamma$ 跃迁就退激到阈下能级,而这些阈下能级继续往下退激的路径基本上都有较好的实验数据.因此可以将退激过程的级联路径按首次 $\gamma$ 跃迁分组,对每组进行蒙特卡罗模拟得到其响应函数,这样就求解全部级联路径分支比简化为求解首次 $\gamma$ 跃迁分支比,大大减少了拟合计算量,式(1)转化为

$$D_i = N \sum_{k=0}^n b_k F_{ik}, \quad (2)$$

式中: $n$ 为首次 $\gamma$ 跃迁种类的总数; $b_k$ 为第 $k$ 个首次 $\gamma$ 跃迁的分支比; $F_{ik}$ 代表单次第 $k$ 个首次跃迁及后续跃迁的响应函数.

本文采用贝叶斯分析方法对式(2)进行求解,使用的程序是Caldwell等<sup>[20]</sup>开发的BAT.该程序基于贝叶斯理论,利用马尔科夫链蒙特卡罗(MCMC)技术实现.该方法将复杂的抽样问题转化为一系列简单抽样的问题,通过将模拟数据和实验数据结合的方法进一步提高了拟合结果的精度.

贝叶斯定理假设任何未知量都可看作随机变量,可根据Jeffreys准则确定事件 $A$ 的先验密度函数,即先验分布 $P(A)$ ,其似然函数为 $P(B|A)$ ,利用贝叶斯公式得到后验分布

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{\sum_j P(B|A)P(A)}, \quad (3)$$

式中 $\sum_j P(B|A)P(A)$ 为样本的边缘分布.首先,基于后验分布信息,利用Metropolis-Hastings算法对联合密度函数 $P(B|A)P(A)$ 进行抽样,选取不同的初值,同时产生多条马尔科夫链.然后经若干次迭代后,散点折线图基本稳定,说明算法收敛.

具体的分析过程如下:

1)确定实验能谱 $D_i$ .对实验测量数据进行分道,道宽视探测器能量分辨和数据统计量决定,得到 $\gamma$ 加和能谱和单元能谱,以及对应的本底谱.本底谱一般通过本底靶或者是共振能区外的测量得到.将本底从 $\gamma$ 加和能谱和单元能谱中扣除后得到净效应能谱 $D_i^{\text{sum}}$ 和 $D_i^{\text{single}}$ .

2)模拟.响应函数 $F_{ik}$ . $F_{ik}$ 由蒙特卡罗模拟得到,本工作采用欧洲核子研究中心(CERN)主导开发的Geant4程序<sup>[21]</sup>进行模拟.根据探测阵列的几何尺寸和物质材料进行探测阵列的Geant4建模,建模完成后对 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 等标准 $\gamma$ 源进行模拟,并将模拟能谱与实验能谱进行比较,对Geant4建模进行校正.然后根据现有的复合核能级及衰变数据,将反应首次 $\gamma$ 跃迁到每一个阈下能级以及后续的跃迁过程整理归类,并输入到Geant4程序中模拟得到 $\gamma$ 加和能谱及单元能谱,归一后得到相应的响应函数 $F_{ik}^{\text{sum}}$ 和 $F_{ik}^{\text{single}}$ .模拟量设定为每组分支 $10^6$ 个事件.

3)计算探测效率.将得到的 $D_i^{\text{sum}}$ 、 $D_i^{\text{single}}$ 以及 $F_{ik}^{\text{sum}}$ 和 $F_{ik}^{\text{single}}$ 输入BAT程序中进行双通道拟合,得到首次 $\gamma$ 跃迁分支比 $b_k$ ,并结合响应函数计算出 $\gamma$ 加和峰探测效率.

## 2 实验设置

本文对JUNA测量的辐射俘获反应 $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ 和 $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 的数据进行了分析.在2400 m的锦屏山山体覆盖下,CJPL具有极低的宇宙射线本底,为极低核反应截面测量提供了绝佳的本底条件<sup>[22]</sup>.JUNA装置专注于核天体物理研究,拥有一台400 kV强流高压倍加器,可以提供最大10 mA的 $\text{H}^+$ 束流和最大2 mA的 $\text{He}^{2+}$ 束流.

实验终端如图2所示.加速器产生的H或He束流经过2个准直孔准直后轰击在靶上.在靶前设置有液氮冷却的铜冷阱,用于吸附靶室内的残余有机气体,防止靶上碳沉积.靶和真空管道作为法拉第筒对束流电荷进行积分,用于统计入射粒子数.在靶和冷阱的中间设有外加-300 V的环形电极,抑制溅射电子对束流电荷积分的干扰. $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ 实验所用的靶为天然氮化铝厚靶. $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 实验采用了 $^{25}\text{Mg}$

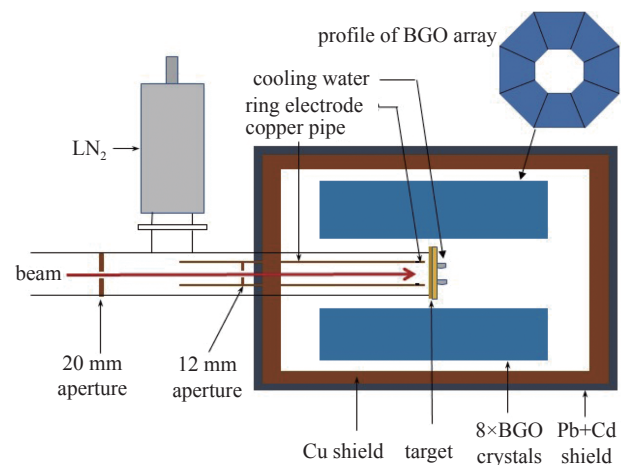
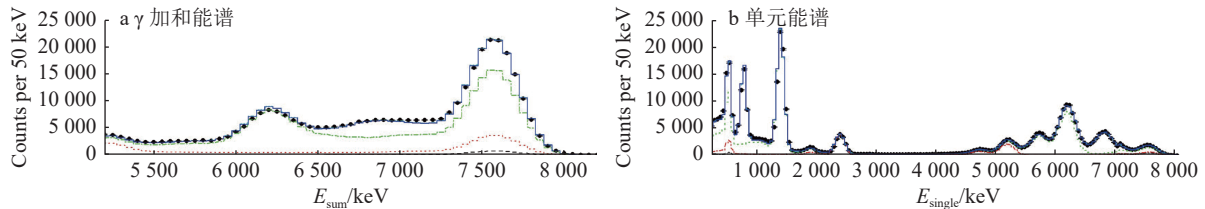


图2 实验装置示意

同位素靶, 是将  $^{25}\text{Mg}$  富集的镁金属蒸镀到铜衬底上得到. 为了使靶更好地耐受高流强质子束的轰击, 采用磁控溅射技术分别在靶材表面溅射了一层 Cr 保护层. 实验时靶采用水冷系统冷却, 防止束流引起的高温熔化靶材料.

实验采用 BGO 加和型  $\gamma$  探测阵列, 阵列由形状一致、沿束流方向完全对称的 8 个探测单元组成, 如图 2 所示. 实验时将 BGO 晶体冷却至  $-10\text{ }^\circ\text{C}$  以提高阵列的能量分辨率. 另外, 为了进一步抑制实验室岩石及其他材料中天然放射性核素和加速器前端产生的  $\gamma$  和中子本底, 整个探测阵列放置在由 5 mm 铜、100 mm 铅及 1 mm 镉组成的屏蔽体中. 该实验终端已经成功应用于  $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应 92 keV (本文共振能均为质心系能量) 共振强度测量<sup>[12]</sup> 和  $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  反应截面测量<sup>[13]</sup>.

实验前用  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  放射源和  $^{27}\text{Al}(\text{p}, \gamma)^{28}\text{Si}$  反应 283 keV 共振产生的  $\gamma$  射线对探测器进行了刻度.



黑点表示实验数据, 蓝色实线代表总拟合结果, 其他颜色虚线代表各个首次  $\gamma$  跃迁分支的贡献.

图 3  $^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{15}\text{O}$  反应 259 keV 共振能谱

利用 BAT 程序对  $\gamma$  加和能谱和单元能谱进行双通道拟合, 并将拟合结果与实验数据进行对比, 如图 3 所示. 由图 3 可以看出拟合结果很好地重现了实验数据. 表 1 列出了拟合得到的首次  $\gamma$  跃迁分支比, 并与现有实验结果进行了对比, 可以看出, 本工作得到的结果和现有数据符合较好. 另外, 利用本工作得到的分支比数据对  $\gamma$  加和峰探测效率进行了计算, 结果为  $(63.9 \pm 0.3)\%$ , 和利用现有分支比数据<sup>[23-26]</sup> 计算

利用 Geant4 程序对 BGO 加和型探测器阵列进行建模和蒙特卡罗模拟, 结果很好地再现了刻度数据.

### 3 结果与讨论

**3.1  $^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{15}\text{O}$  反应 259 keV 共振数据分析**  $^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{15}\text{O}$  反应的 259 keV 对应复合核  $^{15}\text{O}$  的 7556 keV 能级, 其首次  $\gamma$  跃迁分支比国际上已有数个工作进行了研究<sup>[23-26]</sup>.  $^{15}\text{O}$  质子阈下能级较少, 因此该共振跃迁过程相对简单.

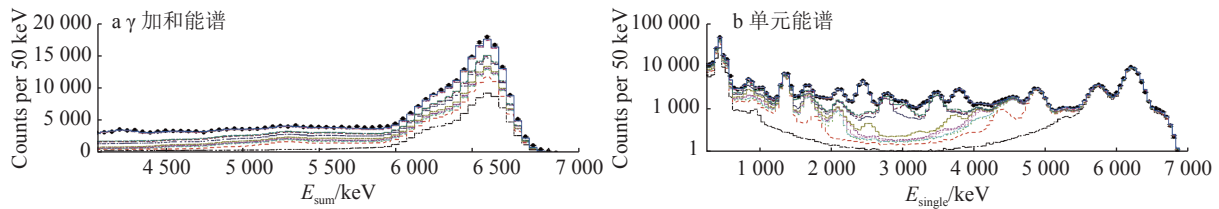
图 3 中黑色圆点显示了实验测量得到的  $\gamma$  能谱: 图 3-a 为  $\gamma$  加和能谱, 可以明显看出能量为 7555 keV 的  $\gamma$  加和峰; 图 3-b 为利用  $\gamma$  加和峰 (ROI 为 7050~8050 keV) 开门得到的单元能谱. 根据 1.2 小节中描述的方法进行了分析, 选择所有之前实验观测到的首次  $\gamma$  跃迁分支纳入分析, 利用 Geant4 程序模拟得到这些首次  $\gamma$  跃迁及后续  $\gamma$  跃迁的响应函数, 其中后续  $\gamma$  跃迁过程及分支比信息采用现有测量数据<sup>[27]</sup>.

结果在误差范围内一致, 如表 1 所列.

**3.2  $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应 304 keV 共振数据分析**  $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应 304 keV 共振对应复合核  $^{26}\text{Al}$  的 6610 keV 能级, 其首次  $\gamma$  跃迁分支比目前有 3 家较完整的实验数据<sup>[14, 28-29]</sup>. 图 4 显示了实验给出的  $\gamma$  能谱, 可以看出,  $\gamma$  加和峰低能处受到一定的干扰, 该干扰来自于共振能级跃迁到 417 keV 能级产生的 6193 keV  $\gamma$  射线.  $\gamma$  加和峰的 ROI 设置为 6110~7110 keV.

表 1  $^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{15}\text{O}$  反应 259 keV 共振首次  $\gamma$  跃迁分支比

$E_\gamma/\text{keV}$	$J^\pi$	首次 $\gamma$ 跃迁分支比/%				
		本工作	Ref.[23]	Ref.[24]	Ref.[25]	Ref.[26]
0	1/2 <sup>-</sup>	2.2±0.1	1.50±0.03	1.70±0.07	1.6±0.1	1.49±0.04
5181	1/2 <sup>+</sup>	15.4±0.1	16.9±0.40	17.3±0.20	17.1±0.2	17.30±0.20
5240	5/2 <sup>+</sup>	—	0.22±0.07	—	0.6±0.3	0.15±0.03
6172	3/2 <sup>-</sup>	58.1±0.2	58.3±0.30	58.3±0.50	57.8±0.3	58.30±0.40
6792	3/2 <sup>+</sup>	23.6±0.1	23.0±0.30	22.7±0.30	22.9±0.3	22.60±0.30
6859	5/2 <sup>+</sup>	0.8±0.1	0.14±0.04	—	—	—
$\epsilon_{\text{sum}}/\%$	—	63.9±0.3	64.50±0.60	63.70±0.60	63.7±0.6	63.50±0.60



黑点表示实验数据, 蓝色实线代表总拟合结果, 其他颜色虚线代表各个首次 $\gamma$ 跃迁分支的贡献.

图 4  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应 304 keV 共振 $\gamma$ 能谱

$^{26}\text{Al}$  的 6 610 keV 能级跃迁比较复杂, 同样将所有之前实验观测到的首次 $\gamma$ 跃迁分支纳入拟合分析并进行了相应的蒙特卡罗模拟. 将实验数据和模拟得到的响应函数输入 BAT 程序中进行拟合, 得到的拟合结果如图 4 所示, 同样拟合结果很好地重现了实验数据. 将得到的首次 $\gamma$ 跃迁分支比结果列于表 2 中. 从表 2 中可以看出, 本工作结果和现有数据<sup>[14]</sup> 整体符

合较好, 但对于一些能级接近的情况有一定差别. 如共振能级向 3 596、3 675、3 681、3 750 keV 4 个能级跃迁, 各跃迁分支比和现有数据相差较大, 但 4 个分支的总分支比符合较好. 其原因是 BGO 阵列能量分辨较差, 当这些能级跃迁方式和 $\gamma$ 能量接近时, 它们的响应函数区分度很低, 导致各分支拟合结果相差较大, 但总和较为一致.

表 2  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应 304 keV 共振首次 $\gamma$ 跃迁分支比

$E_x$	$J^\pi$	首次 $\gamma$ 跃迁分支比/%			
		本工作	Ref.[14]	Ref.[28]	Ref.[29]
0	$5^+$	—	—	0.058±0.004	—
417	$3^+$	31.2±0.2	31.71±0.40	31.80±0.50	24.00±1.40
1 759	$2^+$	15.0±0.2	15.80±0.30	16.10±0.30	22.70±1.30
2 069	( $4^+$ )	6.2±0.2	6.30±0.10	6.00±0.10	6.50±0.40
2 365	$3^+$	0.9±0.2	0.37±0.05	0.47±0.02	0.27±0.07
2 545	$3^+$	2.1±0.4	1.45±0.03	1.46±0.03	0.90±0.10
2 661	$2^+$	1.1±0.2	1.06±0.06	1.00±0.02	1.60±0.10
2 913	$2^+$	3.3±0.3	3.07±0.14	3.04±0.05	4.20±0.30
3 073	$3^+$	—	0.13±0.05	0.11±0.04	0.08±0.05
3 160	$2^+$	10.8±0.3	11.3±0.05	11.40±0.20	15.60±0.90
3 596	$3^+$	5.5±0.3	4.31±0.20	4.29±0.07	3.30±0.20
3 675	$4^+$	0.2±0.2	0.92±0.13	0.86±0.03	0.59±0.06
3 681	$3^+$	—	1.05±0.05	1.09±0.03	0.71±0.08
3 750	$2^+$	1.9±0.3	0.90±0.05	0.92±0.02	1.50±0.10
3 963	( $3^+$ )	0.4±0.3	0.18±0.03	0.17±0.01	0.12±0.05
4 192	( $3^+$ )	19.0±0.3	18.90±0.30	19.10±0.30	14.70±0.80
4 206	( $4^+$ )	—	0.18±0.04	0.25±0.02	0.25±0.05
4 349	$3^+$	—	—	0.03±0.01	—
4 548	$2^+$	0.5±0.3	1.26±0.08	1.30±0.07	2.00±0.10
4 599	( $3^+$ )	—	0.11±0.03	0.12±0.01	0.13±0.04
4 622	( $2^-$ )	0.4±0.3	0.27±0.11	0.28±0.07	0.38±0.06
4 940	( $1^-$ )	0.2±0.1	0.12±0.07	0.08±0.01	—
5 396	( $4^-$ )	—	0.24±0.03	0.22±0.02	0.35±0.05
5 457	( $3^-$ )	0.2±0.2	0.15±0.06	—	—
5 726	( $4^+$ )	0.6±0.2	0.09±0.02	0.10±0.01	0.12±0.03
5 916	( $2^-$ )	0.4±0.2	0.07±0.02	0.09±0.02	—
$\epsilon_{\text{sum}}/\%$	—	80.4±1.1	80.90±0.70	81.20±0.70	79.50±2.30

同样, 利用本工作数据得到的分支比数据对 $\gamma$ 加和峰探测效率进行计算, 结果为(80.4±1.1)%, 与用现有数据<sup>[14]</sup> 计算得到的结果在误差范围内一致, 如表 2 所列.

此外, 在前面的分析中, 本文采用的拟合输入参数限定了现有实验已观测到的首次 $\gamma$ 跃迁, 但实际上大多数目标反应的首次跃迁 $\gamma$ 分支比是没有实验数据的, 即共振能级或直接过程会向复合核的哪些能级

跃迁是未知的. 因此本工作尝试不参考现有数据, 将复合核所有质子阈下能级都纳入拟合中, 对  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  反应 259 keV 共振和  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应 304 keV 共振进行分析.

表 3 列出了得到的  $\gamma$  加和峰探测效率, 可以看

出, 即使开放所有阈下能级进行拟合, 得到的  $\gamma$  加和峰探测效率仍和限定拟合参量时一致. 证明了本方法在首次  $\gamma$  跃迁分支完全未知情况下, 也能得到较高精度的  $\gamma$  加和峰探测效率, 明显优于点火数方法得到的数据精度.

表 3 利用所有质子阈下能级拟合得到的  $\gamma$  加和峰探测效率

探测效率	$^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ $E_{\text{c.m.}}=259$ keV		$^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ $E_{\text{c.m.}}=304$ keV	
	已知首次 $\gamma$ 跃迁	未知首次 $\gamma$ 跃迁	已知首次 $\gamma$ 跃迁	未知首次 $\gamma$ 跃迁
$\varepsilon_{\text{sum}}/\%$	63.9 $\pm$ 0.3	63.9 $\pm$ 0.3	80.4 $\pm$ 1.1	80.2 $\pm$ 1.1

## 4 结论

本文展示了对  $\gamma$  加和探测技术实验进行解谱的一种新方法. 该方法基于贝叶斯理论, 将蒙特卡罗模拟得到的各首次  $\gamma$  跃迁响应函数作为输入量, 采用 BAT 程序对实验测量得到的  $\gamma$  加和能谱和单元能谱进行双通道拟合, 得到首次  $\gamma$  跃迁分支比, 并最终确定  $\gamma$  加和峰探测效率. 利用该方法对 JUNA 测量得到的  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  和  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  实验数据进行了分析, 结果和现有数据得到的  $\gamma$  加和峰探测效率符合得很好, 证明了该方法的有效性. 同时, 本工作还讨论了在首次  $\gamma$  跃迁没有任何实验数据的情况下, 可将复合核所有阈下能级都作为拟合输入参数进行计算, 得到分支比及  $\gamma$  加和峰探测效率. 将其应用到  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  和  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  实验数据分析中, 同样得到了很好的结果. 这一方法大大提高了  $\gamma$  加和探测技术的加和峰效率计算精度, 攻克了极小截面核天体反应测量的一个技术难题. 以上工作支持了 JUNA 装置上的  $^{19}\text{F}(p, \gamma)^{16}\text{O}$ 、 $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  和  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  等重要核天体物理反应的数据分析.

## 5 参考文献

- [1] COSTANTINI H, FORMICOLA A, IMBRIANI G, et al. LUNA: a laboratory for underground nuclear astrophysics [J]. Reports on Progress in Physics, 2009, 72(8): 086301
- [2] LIU W P, LI Z H, HE J J, et al. Progress of Jinping underground laboratory for nuclear astrophysics (JUNA)[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2016, 59(4): 1
- [3] CASELLA C, COSTANTINI H, LEMUT A, et al. A new setup for the underground study of capture reactions[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2002, 489(1/2/3): 160
- [4] SIMON A, QUINN S J, SPYROU A, et al. SuN: Summing NaI(Tl) gamma-ray detector for capture reaction measurements[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2013, 703: 16
- [5] REINGOLD C S, OLIVAS-GOMEZ O, SIMON A, et al. High efficiency total absorption spectrometer HECTOR for capture reaction measurements[J]. The European Physical Journal A, 2019, 55(5): 77
- [6] ANANNA C, BARILE F, BOELTZIG A, et al. Underground measurements of nuclear reaction cross-sections relevant to AGB stars[J]. Universe, 2021, 8(1): 4
- [7] LEMUT A, BEMMERER D, et al. First measurement of the  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  cross section down to 70 keV[J]. Physics Letters B, 2006, 634(5/6): 483
- [8] DI LEVA A, SCOTT D A, CACIOLLI A, et al. Underground study of the  $^{17}\text{O}(p, \gamma)^{18}\text{F}$  reaction relevant for explosive hydrogen burning[J]. Physical Review C, 2014, 89: 015803
- [9] BEMMERER D, CACIOLLI A, BONETTI R, et al. Direct measurement of the  $^{15}\text{N}(p, \gamma)^{16}\text{O}$  total cross section at novae energies[J]. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2009, 36(4): 045202
- [10] PIATTI D, CHILLERY T, DEPALO R, et al. Underground experimental study finds no evidence of low-energy resonance in the  $^6\text{Li}(p, \gamma)^7\text{Be}$  reaction[J]. Physical Review C, 2020, 102(5): 052802
- [11] BOELTZIG A, BEST A, PANTALEO F R, et al. Direct measurements of low-energy resonance strengths of the  $^{23}\text{Na}(p, \gamma)^{24}\text{Mg}$  reaction for astrophysics[J]. Physics Letters B, 2019, 795: 122
- [12] SU J, ZHANG H, LI Z H, et al. First result from the Jinping underground nuclear astrophysics experiment JUNA: precise measurement of the 92 keV  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  resonance[J]. Science Bulletin, 2022, 67(2): 125
- [13] ZHANG L Y, SU J, HE J J, et al. Direct measurement of the astrophysical  $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  reaction in the deepest operational underground laboratory[J]. Physical Review Letters, 2021, 127(15): 152702
- [14] ZHANG H, LI Z H, SU J, et al. Direct measurement of the resonance strengths and branching ratios of low-energy (p,  $\gamma$ ) reactions on Mg isotopes[J]. Chinese Physics C, 2021, 45(8): 084108

- [15] CHENG J P, KANG K J, LI J M, et al. The China Jinping underground laboratory and its early science[EB/OL]. [2022-04-25]. <https://arxiv.org/abs/1801.00587>
- [16] SAUERWEIN A, ENDRES J, NETTERDON L, et al. Investigation of the reaction  $^{74}\text{Ge}(p, \gamma)^{75}\text{As}$  using the in-beam method to improve reaction network predictions for p nuclei[J]. *Physical Review C*, 2012, 86(3): 035802
- [17] GALANOPOULOS S, DEMETRIOU P, KOKKORIS M, et al. The  $^{88}\text{Sr}(p, \gamma)^{89}\text{Y}$  reaction at astrophysically relevant energies[J]. *Physical Review C*, 2003, 67: 015801
- [18] HARISSOPULOS S, SPYROU A, LAGOYANNIS A, et al. Cross section measurements of proton capture reactions relevant to the p process: the case of  $^{89}\text{Y}(p, \gamma)^{90}\text{Zr}$  and  $^{121, 123}\text{Sb}(p, \gamma)^{122, 124}\text{Te}$ [J]. *Physical Review C*, 2013, 87(2): 25806
- [19] DERMIGNY J R, ILIADIS C, BUCKNER M Q, et al.  $\gamma$ -Ray spectroscopy using a binned likelihood approach[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2016, 830: 427
- [20] CALDWELL A, KOLLÁR D, KRÖNINGER K. BAT-the Bayesian analysis toolkit[J]. *Computer Physics Communications*, 2009, 180(11): 2197
- [21] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, et al. Geant4: a simulation toolkit[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, 506(3): 250
- [22] SHEN Y P, SU J, LIU W P, et al. Measurement of  $\gamma$  detector backgrounds in the energy range of 38 MeV at Jinping underground laboratory for nuclear astrophysics[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2017, 60(10): 1
- [23] DAIGLE S, KELLY K J, CHAMPAGNE A E, et al. Measurement of the  $E_r^{\text{c.m.}} = 259$  keV resonance in the  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  reaction[J]. *Physical Review C*, 2016, 94(2): 025803
- [24] RUNKLE R C, CHAMPAGNE A E, ANGULO C, et al. Direct measurement of the  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  S-factor[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(8): 082503
- [25] IMBRIANI G, COSTANTINI H, FORMICOLA A, et al. S-factor of  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  at astrophysical energies[J]. *The European Physical Journal A*, 2005, 25(3): 455
- [26] MARTA M, FORMICOLA A, GYÜRKY G, et al. Precision study of ground state capture in the  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  reaction[J]. *Physical Review C*, 2008, 78(2): 022802
- [27] AJZENBERG SELOVE F. Energy levels of light nuclei  $A = 13-15$ [J]. *Nuclear Physics A*, 1970, 152(1): 1
- [28] LIMATA B, STRIEDER F, FORMICOLA A, et al. New experimental study of low-energy (p,  $\gamma$ ) resonances in magnesium isotopes[J]. *Physical Review C*, 2010, 82: 015801
- [29] ILIADIS C, SCHANGÉ T, ROLFS C, et al. Low-energy resonances in  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ ,  $^{26}\text{Mg}(p, \gamma)^{27}\text{Al}$  and  $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ [J]. *Nuclear Physics A*, 1990, 512(3): 509

## $\gamma$ spectrum analysis in direct measurements of nuclear astrophysical reaction

WANG Luohuan<sup>1)</sup> SHENG Yaode<sup>1)</sup> SU Jun<sup>1)</sup> HE Jianjun<sup>1)</sup> ZHANG Liyong<sup>1)</sup> LI Ziming<sup>1)</sup>  
ZHANG Hao<sup>1)</sup> SHEN Yangping<sup>2)</sup> LI Zhihong<sup>2)</sup> GUO Bing<sup>2)</sup> LIAN Gang<sup>2)</sup> LIU Weiping<sup>2)</sup>

(1)Key Laboratory of Beam Technology of Ministry of Education, College of Nuclear Science and Technology,

Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2)China Institute of Atomic Energy, 102413, Beijing, China)

**Abstract** Charged particle-induced radioactive capture reaction is a major topic in nuclear astrophysics, significant to understand stellar nucleosynthesis. At astrophysical temperature (Gamow window), the cross area of these reactions is small,  $\gamma$  ray yields are extremely low, therefore high-efficiency summing  $\gamma$  detection array is needed in cross section measurements. Bayesian analysis was used here to develop an analytical method for  $\gamma$  spectrum of  $4\pi$  detection array. The method was applied to analyze data of 259 keV resonance of  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  and 304 keV resonance of  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  measured at Jinping Underground Nuclear Astrophysics experimental facility. The new method was found to reduce significantly uncertainty in  $\gamma$  summing peak efficiency.

**Keywords** charged particle-induced radioactive capture reaction; underground direct measurement of the nuclear astrophysical reaction;  $\gamma$  summing detection; Bayesian analysis method; primary  $\gamma$  branching ratio;  $\gamma$  sum peak efficiency

【责任编辑: 武 佳】