

近质子滴线核 ^{28}S 的延迟衰变研究

高祺锐 徐新星 周小红 孙立杰 梁鹏飞 刘嘉健 林承键 李晓菁 李智焕 吴鸿毅 杨彦云 王建松 王东玺 蓝乙华 马朋 段芳芳 高志浩 胡强 白真 马军兵 王建国 钟福鹏 武晨光 罗迪雯 蒋颖 刘洋 侯东升 李忍 马南茹 马维虎 石国柱 余功明 D. Patel 金树亚 王煜峰 余悦超 周清武 王鹏 胡力元 王翔 臧宏亮 李朋杰 朱浩钊 林喆阳 赵青青 杨磊 温培威 杨峰 贾会明 张高龙 潘敏 汪小雨 孙浩瀚 胡正国 陈若富 柳敏良 杨维青

 β -delayed γ Decay of the Nucleus ^{28}S Near the Proton Drip-line

GAO Qirui, XU Xinxing, ZHOU Xiaohong, SUN Lijie, LIANG Pengfei, LIU Jiajian, LIN Chengjian, Jenny Lee, LI Zhihuan, WU Hongyi, YANG Yanyun, WANG Jiansong, WANG Dongxi, LAN Yihua, MA Peng, DUAN Fangfang, GAO Zhihao, HU Qiang, BAI Zhen, MA Junbing, WANG Jianguo, ZHONG Fupeng, WU Chenguang, LUO Diwen, JIANG Yin, LIU Yang, HOU Dongsheng, LI Ren, MA Nanru, MA Weihui, SHI Guozhu, YU Gongming, Patel Dipika, JIN Shuya, WANG Yufeng, YU Yuechao, ZHOU Qingwu, WANG Peng, HU Liyuan, WANG Xiang, ZANG Hongliang, LI Pengjie, ZHU Haofan, LIN Zheyang, ZHAO Qingqing, YANG Lei, WEN Peiwei, YANG Feng, JIA Huiming, ZHANG Gaolong, PAN Min, WANG Xiaoyu, SUN Haohan, HU Zhengguo, CHEN Ruofu, LIU Minliang, YANG Weiqing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2020084>

引用格式:

高祺锐, 徐新星, 周小红, 孙立杰, 梁鹏飞, 刘嘉健, 林承键, 李晓菁, 李智焕, 吴鸿毅, 杨彦云, 王建松, 王东玺, 蓝乙华, 马朋, 段芳芳, 高志浩, 胡强, 白真, 马军兵, 王建国, 钟福鹏, 武晨光, 罗迪雯, 蒋颖, 刘洋, 侯东升, 李忍, 马南茹, 马维虎, 石国柱, 余功明, D. Patel, 金树亚, 王煜峰, 余悦超, 周清武, 王鹏, 胡力元, 王翔, 臧宏亮, 李朋杰, 朱浩钊, 林喆阳, 赵青青, 杨磊, 温培威, 杨峰, 贾会明, 张高龙, 潘敏, 汪小雨, 孙浩瀚, 胡正国, 陈若富, 柳敏良, 杨维青. 近质子滴线核 ^{28}S 的延迟衰变研究[J]. 原子核物理评论, 2021, 38(2):117–122. doi: 10.11804/NuclPhysRev.38.2020084

GAO Qirui, XU Xinxing, ZHOU Xiaohong, SUN Lijie, LIANG Pengfei, LIU Jiajian, LIN Chengjian, Jenny Lee, LI Zhihuan, WU Hongyi, YANG Yanyun, WANG Jiansong, WANG Dongxi, LAN Yihua, MA Peng, DUAN Fangfang, GAO Zhihao, HU Qiang, BAI Zhen, MA Junbing, WANG Jianguo, ZHONG Fupeng, WU Chenguang, LUO Diwen, JIANG Yin, LIU Yang, HOU Dongsheng, LI Ren, MA Nanru, MA Weihui, SHI Guozhu, YU Gongming, Patel Dipika, JIN Shuya, WANG Yufeng, YU Yuechao, ZHOU Qingwu, WANG Peng, HU Liyuan, WANG Xiang, ZANG Hongliang, LI Pengjie, ZHU Haofan, LIN Zheyang, ZHAO Qingqing, YANG Lei, WEN Peiwei, YANG Feng, JIA Huiming, ZHANG Gaolong, PAN Min, WANG Xiaoyu, SUN Haohan, HU Zhengguo, CHEN Ruofu, LIU Minliang, YANG Weiqing. β -delayed γ Decay of the Nucleus ^{28}S Near the Proton Drip-line[J]. Nuclear Physics Review, 2021, 38(2):117–122. doi: 10.11804/NuclPhysRev.38.2020084

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

GeV能区碰撞中正反质子椭圆流劈裂的研究

Investigation of the Splitting in Elliptic Flow Between Protons and Anti-protons in $+$ Collisions at
原子核物理评论. 2020, 37(3): 660–667 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC04>

A~80核区在束谱学研究进展

Progress on the Spectroscopy in the A~80 Mass Region
原子核物理评论. 2020, 37(1): 11–17 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2020001>

s-/r-过程及0能区锗同位素链中子俘获截面高精度测量方案

Precision Measurement Proposal of Neutron Capture Reaction in Ge Isotopes for s-/r-process and Neutrino-less Double-beta Decay

Within Its Relevant Energy Range

原子核物理评论. 2020, 37(3): 643–649 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC71>

基于SiPM双端读出的 γ 射线探测器研究

Study of the γ -Ray Detector of Dual-ended Readout Based on SiPM

原子核物理评论. 2020, 37(3): 757–764 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC03>

$N=127$ 同中子素 ^{219}U 和 ^{216}Ac 的 α 衰变研究

α -decay Studies of the $N=127$ Isotones ^{219}U and ^{216}Ac

原子核物理评论. 2020, 37(3): 536–541 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC49>

利用改进的Gamow-like模型研究原子核的 α 衰变和质子放射性

Study of α Decay and Proton Radioactivity Half-lives Based on Improved Gamow-like Model

原子核物理评论. 2020, 37(3): 554–562 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC08>

文章编号: 1007-4627(2021)02-0117-06

近质子滴线核 ^{28}S 的 β 延迟 γ 衰变研究

高祺锐^{1,2}, 徐新星^{2,3,4,5,6,†}, 周小红^{2,3,6,†}, 孙立杰^{4,5,7}, 梁鹏飞⁴, 刘嘉健^{2,4}, 林承键^{5,8}, 李晓菁⁴, 李智焕⁹, 吴鸿毅⁹, 杨彦云², 王建松^{2,10}, 王东玺⁵, 蓝乙华², 马朋², 段芳芳^{2,11}, 高志浩^{2,11}, 胡强², 白真², 马军兵², 王建国², 钟福鹏^{5,8}, 武晨光⁹, 罗迪雯⁹, 蒋颖⁹, 刘洋⁹, 侯东升^{2,3}, 李忍^{2,3}, 马南茹⁵, 马维虎^{2,12}, 石国柱², 余功明², D. Patel², 金树亚^{2,3}, 王煜峰^{2,13}, 余悦超^{2,13}, 周清武^{2,14}, 王鹏^{2,14}, 胡力元¹⁵, 王翔⁹, 臧宏亮⁹, 李朋杰⁴, 朱浩钒^{2,16}, 林喆阳^{2,11}, 赵青青⁴, 杨磊⁵, 温培威⁵, 杨峰⁵, 贾会明⁵, 张高龙¹⁷, 潘敏^{5,17}, 汪小雨¹⁷, 孙浩瀚⁵, 胡正国^{2,3,6}, 陈若富^{2,3}, 柳敏良^{2,3}, 杨维青²

- (1. 华南师范大学量子物质研究院, 广州 510631;
2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
3. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049;
4. 香港大学物理学系, 香港 999077;
5. 中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413;
6. 先进能源科学与技术广东省实验室, 广东 惠州 516003;
7. 上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240;
8. 广西师范大学物理科学与技术学院, 广西 桂林 541004;
9. 北京大学物理学院, 北京 100871;
10. 湖州师范学院理学院, 浙江 湖州 313000;
11. 兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000;
12. 复旦大学现代物理研究所, 上海 200433;
13. 云南大学物理与天文学院, 昆明 650091;
14. 西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400044;
15. 哈尔滨工程大学核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 哈尔滨 150001;
16. 郑州大学物理学院(微电子学院), 郑州 450001;
17. 北京航空航天大学物理科学与核能工程学院, 北京 100191)

摘要: 在兰州重离子研究装置上, 依托兰州放射性束流线, 产生、分离和鉴别了同位旋第三分量 $T_z = -2$ 的近质子滴线核 ^{28}S , 并通过使用包括双面硅条探测器和高纯锗探测器在内的探测阵列, 开展了 ^{28}S 的 β 延迟 γ 衰变测量。实验准确测量了 ^{28}S 衰变中的5条 β 延迟 γ 射线, 得到了子核 ^{28}P 相应能级的能量。首次提取出了 β 衰变布居到 ^{28}P 低激发态的衰变分支比, 并构筑了 ^{28}S 的全新部分衰变纲图。本工作为将来进一步比较 ^{28}S 和 ^{28}Mg 间的镜像不对称性提供了精确的实验数据。

关键词: β 衰变; 双面硅条探测器; γ 射线谱; β 衰变分支比

中图分类号: O571.32

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.38.2020084

1 引言

远离 β 稳定线的奇特核性质研究是近几十年来国际核物理研究的一个前沿领域^[1-3]。近滴线核具有奇特的衰变模式, 拓广和深化了核物理研究的内容。在由稳定

线向滴线靠近的过程中, 这些具有极端中质比的近滴线核素, 由于在衰变时母核与衰变子核在束缚能上的差别变大, 会有很多在稳定线附近并不允许的衰变道打开, 衰变模式逐渐由 β 衰变倾向于 β 缓发粒子衰变。实验已证实 β 缓发中子发射^[4]、 β 缓发单质子发射^[5-10]、 β 缓

收稿日期: 2020-12-28; 修改日期: 2021-02-05

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)资助(XDB34000000); 国家自然科学基金资助项目(12022501, U1932206, U1632136)

作者简介: 高祺锐(1996-), 男, 陕西汉中, 硕士研究生, 从事原子核物理研究; E-mail: gaoqrpap@outlook.com

† 通信作者: 徐新星, E-mail: xinxing@impcas.ac.cn; 周小红, E-mail: zrxh@impcas.ac.cn。

发多质子发射^[11-13]、 β 缓发 γ -质子发射^[14]等衰变模式存在。 β 缓发粒子衰变是一个两步过程：首先，母核发生慢 β 衰变布居子核的激发态，然后快发射一个或者多个粒子。通过探测这些出射粒子，可以全面地描述一个核态的衰变特征^[2]。因此， β 衰变谱学研究成为了获取滴线附近核结构信息的强有力的工具，感兴趣奇特核的能级能量、宽度、自旋、同位旋、能级密度等谱学信息可以从实验数据中提取出来。

原子核是一个包含质子和中子这两种类型费米子的独特量子多体系统，质子与中子除电荷不同的特征外，基于强相互作用的电荷无关性假设，可以被认为同一粒子。Heisenberg 于 1932 年提出同位旋的概念来描述这种中子和质子间的变换不变性，所有的核子具有相同的同位旋 $t=1/2$ ，但质子和中子分别具有不同的同位旋第三分量 $t_z=-1/2$ 和 $t_z=1/2$ 。原子核的同位旋可以通过质子和中子同位旋的“合成”得到。中子数和质子数交换后形成的核素互为镜像核。因核力近似具有电荷无关性，同位旋对称性这一概念能够很好地描述稳定线附近的镜像核间的各种现象。但当核素向滴线靠近的过程中，由于受质子间库仑相互作用及电荷相关核力的影响变强，会出现同位旋对称性破缺的情况。研究同位旋对称性和同位旋对称性的破缺，对进一步深入理解核力和核结构具有重要的意义。目前在 sd 壳的镜像原子核间，已经发现不少同位旋对称性破缺现象^[15-20]。因此，将高精度的 β 衰变测量推广到更多核素上去，可以更好地理解同位旋对称性破缺现象，从而在微观模型中更清楚地认识同位旋对称性破缺的机制^[21-24]。

^{28}S 的同位旋第三分量 $T_z=-2$ ，是质子滴线内相当轻的硫的同位素。有关 ^{28}S 的 β 衰变实验的报告仅有一篇，该实验由 Pougheon 等^[25]在 GANIL 通过 ^{36}Ar 初级束轰击天然镍靶产生 ^{28}S ，然后使用 6 块硅探测器组成的探测阵列进行探测。其实验未使用测量 γ 射线的探测器进行 β - γ 和 p - γ 符合测量，没有获得关于 ^{28}S 的准确 β 延迟衰变质子发射衰变道的信息以及 β 延迟衰变 γ 发射的相关信息。为了获取 ^{28}S β 延迟衰变中的 γ 跃迁信息和得到 β 衰变子核 ^{28}P 激发态的布居情况，探究在镜像核 $^{28}\text{S} \rightarrow ^{28}\text{P}$ 和 $^{28}\text{Mg} \rightarrow ^{28}\text{Al}$ 的衰变中可能出现的同位旋对称性破缺，需要对实验技术做出进一步地改进，开展新的 ^{28}S 的 β 延迟 γ 衰变实验研究。

2 实验设置和过程

本次实验于 2017 年 11 月在兰州重离子加速器国家实验室 (HIRFL)^[26] 上完成，使用分离扇回旋加速器提

供的流强约为 100 enA、能量为 80.6 MeV/u 的 ^{32}S 初级束，通过轰击 1581 μm 厚的 ^9Be 靶发生弹核碎裂反应来产生感兴趣的核素。反应后产生的碎片进入兰州放射性束流线 (RIBLL-1)^[27]，使用磁刚度-能损-磁刚度 ($B\rho$ - ΔE - $B\rho$) 的方式进行消色差选择和分离。实验所使用的探测技术在之前的文章中已有详细介绍^[28-29]。次级束在穿过两块位于束流线上的塑料闪烁体 T1、T2 和硅探测阵列中的两块大面积四分硅探测器 $\Delta E1$ 、 $\Delta E2$ 后，可以获得飞行时间 ToF (Time-of-Flight) 和能损 ΔE 的信息，将其组合后得到 ΔE -ToF 二维鉴别图谱。参考 LISE++ 程序^[30]模拟的结果，对获得的 ΔE -ToF 图谱进行刻度，可以将目标核素 ^{28}S 从图 1 中清晰准确地分辨出来。实验使用两块大面积四分硅探测器来测量次级束中离子的能损信息，通过对两块硅探测器获得的时间和能量信号进行多重符合，减少了在实验中探测器由于损伤等原因对获取的数据造成的影响，使目标核素 ^{28}S 更加清晰可靠地与束流中其他污染核素区分开来。在最终得到的次级束中， ^{28}S 的平均纯度为 0.11%，平均强度为 1.2 pps (particles per second)。

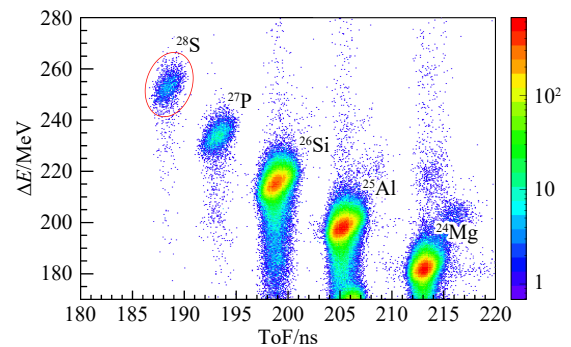


图 1 (在线彩图) ^{28}S 次级束 ΔE -ToF 二维鉴别图谱

实验中所使用的探测阵列主要由双面硅条探测器 DSSD (double-sided silicon strip detector)^[31]、大面积四分硅探测器 QSD (quadrant silicon detector)^[32] 和 Clover 型高纯锗探测器 (Clover-type high-purity germanium detector) 组成，图 2 是探测阵列的示意图。次级束中的目标核 ^{28}S ，在穿过两块用于探测能损的大面积四分硅探测器 ($\Delta E1$ 、 $\Delta E2$) 后，按照一定比例注入到厚度分别为 142 μm 的 DSSD1、40 μm 的 DSSD2 和 304 μm 的 DSSD3 中发生衰变并被探测。在硅探测阵列前方安置了 3 组共 9 块不同厚度的铝降能片，由步进电机驱动控制其厚度，来达到将目标核的能量下降到合适程度的目的。每块 DSSD 在正反两面各划分为 16 条，一面沿 X 轴排列一面沿 Y 轴排列，这使得组成的每一组 X - Y 像素格都可以被看做一个探测单元。所以，即使在此次实验中连续束模式的高注入率下，每个单元格内的注入事

件率仍可以保持较低的水平, 从而能够准确地获取到注入重离子和产生的带电粒子的位置信息和时间信息。再通过关联每一个注入事件和衰变事件的信号, 能够将实验中位置和时间不合理的干扰信号筛除。顺着束流前进的方向, 在DSSD3后设置了一块厚度为 $1546\mu\text{m}$ 的大面积四分硅探测器QSD1。由于QSD1拥有足够的厚度, 衰变产生的 β 粒子在其中的能损足够大, 能够被有效地探测。QSD1也兼具了探测穿过DSSD3的重离子和从DSSD3后表面逃逸的 β 缓发粒子的功能。在由弹核碎裂反应产生的次级束中, 存在着诸如 ^1H 、 ^2H 、 ^3H 、 ^4He 等轻离子, 其在探测范围约百兆电子伏特的 ΔE 探测器中能量损失太小而无法分辨。因此, 在束流最下游设置了两块厚度约为 $300\mu\text{m}$ 的大面积四分硅探测器QSD2和QSD3, 来对这些束流中的轻离子进行反符合测量, 以减少它们带来的干扰。在硅探测器阵列的周围, 环绕布置了5个Clover型的高纯锗探测器, 用以探测原子核激发态退激产生的 γ 射线。

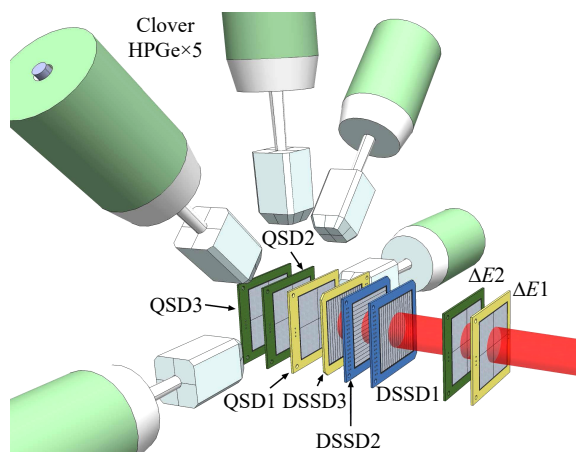


图2 (在线彩图) 探测阵列示意图

整个探测阵列在连续束模式下工作, 总计有效时间约17h。使用 ^{32}S 初级束轰击 ^9Be 靶发生弹核碎裂反应, 然后通过RIBLL-1消色差分离选择次级束。在经过 $220\mu\text{m}$ 厚的铝降能片后, 目标核 ^{28}S 恰好阻止在三块双面硅条探测器中(DSSD1、DSSD2、DSSD3)。其中共48108个目标核 ^{28}S , 占注入重离子总数的83.4%, 被阻挡在DSSD3的前表面附近。由于DSSD2厚度仅有 $40\mu\text{m}$, 对 β 粒子的探测效率极低, 并不适合用其与 γ 射线进行符合, 故数据分析主要以DSSD3上获取的信号为主。注入DSSD的 ^{28}S 从基态发生 β 衰变布居 ^{28}P 的激发态, 然后发射质子或发射 γ 射线退激, 退激过程中产生的 γ 射线将被放置在硅探测阵列周围的高纯锗探测器同时测量。

3 实验结果与分析

3.1 能量刻度与效率刻度

选用 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{133}Ba 和 ^{152}Eu 四个标准放射源对高纯锗探测器进行能量刻度。同时, 选取次级束流中有较高统计量且有可靠文献数据的 ^{25}Si 、 ^{26}P 和 ^{22}Al 三个核作为内放射源, 选用了它们在 β 延迟 γ 衰变中绝对强度较高的9个 γ 跃迁, 对 β 延迟 γ 射线的绝对探测效率进行了刻度^[29]。具体选用了四个来自 ^{25}Si 的 β 延迟 γ 跃迁, 其能量和相应的绝对强度为452keV [18.4(42)%]、493keV [15.3(34)%]、945keV [10.4(23)%]和1612keV [15.2(32)%]^[33], 两个来自 ^{26}P 的988keV [5.7(3)%]和1796keV [58(3)%]的 β 延迟 γ 跃迁^[19], 以及三个来自 ^{22}Al 的1248.5(20)keV [38.2(69)%]、1985.6(13)keV [31.1(54)%]、2062.3(15)keV [34.1(58)%]的 β 延迟 γ 跃迁^[34]。

3.2 β 延迟 γ 射线

将高纯锗探测器探测到的 γ 射线与DSSD3内 ^{28}S 衰变发射的 β 粒子进行符合, 最终得到的 β 延迟 γ 射线谱如图3所示, 这是首次获得的 ^{28}S 的 β 延迟 γ 射线谱。图中共有10个 γ 峰可以被清晰地分辨, 每个峰的中心能量值标注在上方, 单位为keV。其中, 三个没有以 γ 符号标记的峰分别是已知的能量为511keV的正负电子湮灭峰以及两个污染 γ 峰。从图1中可以看出, 在通过RIBLL-1分离后的次级束中, 同时存在着 ^{27}P 、 ^{26}Si 、 ^{25}Al 、 ^{24}Mg 等核素。其中统计量高过目标核 ^{28}S 百倍的 ^{26}Si , 在发生 β 衰变布居 ^{26}Al 的1057.7keV激发能级后, 退激产生了能量为827keV的 γ 射线^[35], 该 γ 跃迁表现为一个污染峰出现在谱中。而另一个具有很高统计的中心能量为1779keV的污染 γ 峰, 对应 ^{28}Si 1779keV的第一激发态退激到基态的 γ 跃迁, 它由目标核 ^{28}S 衰变到子核 ^{28}P 后, 再次发生 β 衰变到 ^{28}Si 后产生^[36]。

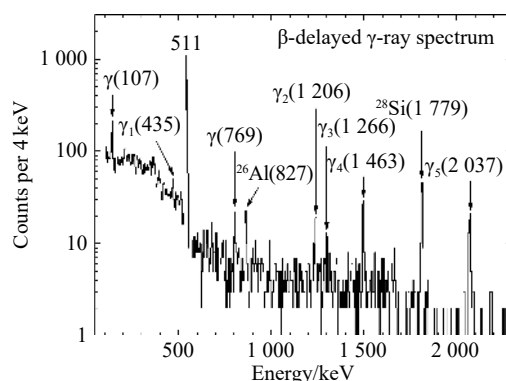


图3 ^{28}S β 延迟 γ 射线谱

图 3 中以 γ 符号标注的中心能量值分别为 107, 435, 769, 1206, 1266, 1463, 2037 keV 的 γ 峰对应 7 条 γ 射线, 由衰变子核 ^{28}P 的激发态退激产生。由于统计数量较少, 且每个 Clover 型高纯锗探测器的绝对探测效率极低, 并没有进行 γ - γ 的符合分析。但是发生 β 延迟 γ 衰变的质子束缚态, 通常是能量相对较低的激发态, 且 Clover 型高纯锗探测器具有极高的分辨率, 每条 γ 射线的跃迁过程可以参考已知的 ^{28}P 的能级纲图得到 [36]。确定各个 γ 射线的发射能级后, 再对比理论计算结果, 得到能量为 107(2) keV 和 769(2) keV 的 γ 射线由级联发射产生。107 keV 的 γ 射线由 ^{28}P 的 107(2) keV 第一激发态退激到基态产生, 769 keV 的 γ 射线由 ^{28}P 的 876(3) keV 第二激发态退激到 107(2) keV 的第一激发态产生。 γ_{1-5} 是五条 β 延迟 γ 射线, 均由 ^{28}S 发生 β 延迟衰变布居 ^{28}P 的激发态后退激产生。

各个 γ 跃迁的绝对强度 I_γ 可以用下式算出:

$$I_\gamma = \frac{N_\gamma}{N_{\text{impl}} \cdot \varepsilon_{\beta\gamma}}, \quad (1)$$

式中 N_γ 为对应 β 延迟 γ 射线的统计数量。 N_{impl} 是注入 DSSD3 的重离子总数。 $\varepsilon_{\beta\gamma}$ 则是 β 延迟 γ 射线的绝对探测效率, 该绝对探测效率等同于双面硅条探测器对 β 粒子的探测效率乘以高纯锗探测器对 γ 射线的绝对探测效率。在整个分析过程中, 能量和绝对强度的误差均是按照标准不确定度传递公式, 考虑了由分析程序在拟合中给出的统计误差以及整个实验过程中所包含的系统误差, 最终给出了对应的结果。所有 β 延迟 γ 射线的能量 (E_γ)、绝对强度 (I_γ) 和 γ 跃迁的初末态能级, 以及对应的误差范围均列在表 1 中。

表 1 ^{28}S β 延迟 γ 射线的能量、绝对强度和初末态能级

γ 峰	能量 E_γ /keV	绝对强度 I_γ /%	初态能级 E_i^* /keV	末态能级 E_f^* /keV
γ_1	435(2)	8.0(8)	1 313(3)	876(3)
γ_2	1 206(2)	9.6(14)	1 313(3)	107(2)
γ_3	1 266(2)	6.6(10)	2 144(3)	876(3)
γ_4	1 463(2)	20.5(31)	1 570(3)	107(2)
γ_5	2 037(2)	19.5(44)	2 144(3)	107(2)

3.3 衰变纲图

提取实验测量得到的 γ 射线的能量、绝对强度和初末态能级等信息, 可以获得 ^{28}P 衰变布居能级的能量和 β 衰变分支比, 其数据结果见表 2。 ^{28}S 衰变布居到 ^{28}P 的 2144(3) keV 激发能级的 β 衰变分支比为 26.1 (45)%, 由该能级退激产生的能量为 1266 和 2037 keV 的两个 γ

跃迁的绝对强度相加给出。该激发能级的能量值, 可以选择 2037 和 107 keV γ 跃迁的组合或是 1266, 769 和 107 keV γ 跃迁的组合给出, 在考虑相对强度的大小和级联发射关系后, 选择第一个组合以相加的方式计算得到 2144(3) keV 的结果。 ^{28}S 衰变布居到 ^{28}P 的 1570(3) keV 激发能级的 β 衰变分支比为 20.5 (31)%, 由 1463 keV 的 γ 跃迁给出。该激发能级的能量值则是通过 1463 和 107 keV 的 γ 跃迁计算所得。能量为 435 和 1206 keV 的两条 γ 射线由 ^{28}S 衰变布居到 ^{28}P 的 1313(3) keV 激发能级退激产生, 故考虑这两条 γ 射线的绝对强度, 得到该激发能级的分支比为 17.6 (16)%, 激发能级的能量值则是由 1206 和 107 keV 的 γ 跃迁计算给出。选择 1206 而非 435 keV 的 γ 跃迁进行计算, 同样是考虑了其较简单的退激过程, 并且都同样参考了 ^{28}P 的 107 keV 第一激发态的能量值。分析结果给出的所有激发能级的能量和分支比的误差范围, 均按照标准不确定度传递公式传递得到。对比此结果中的 ^{28}P 各能级的能量值与表 2 中 Nuclear Data Sheets(NDS) [36] 给出的结果, 其数值在误差范围内是一致的。

表 2 ^{28}S β 衰变布居能级的能量和分支比

本次实验 E /keV	分支比 I_β /%	NDS [36] E^* /keV
1 313(3)	17.6(16)	1 313(2)
1 570(3)	20.5(31)	1 567(3)
2 144(3)	26.1(45)	2 143(5)

依据壳模型计算结果, 位于 0^+ 基态的 ^{28}S 发生 β 延迟 γ 衰变后, 将主要布居到 ^{28}P 的 1^+ 激发态上。通过所获得的数据结果, 最终推得 ^{28}S 发生 β 延迟 γ 衰变并布居到 ^{28}P 低激发态的部分衰变纲图如图 4 所示。图中, 5 条 β 延迟 γ 射线用蓝色箭头线表示, 2 条级联发射的 γ 射线则用紫色箭头线表示, $Q_{\text{EC}} = 11\,221(160)$ keV 的结果参考 AME2016 [37] 给出。

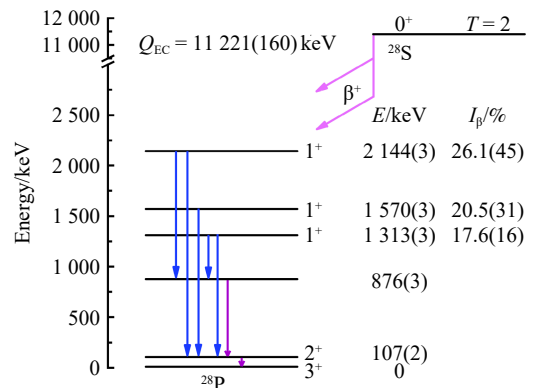


图 4 (在线彩图) ^{28}S 部分衰变纲图

4 结语

依托兰州重离子加速器国家实验室的兰州放射性束流线, 完成了近质子滴线核 ^{28}S 的 β 延迟 γ 衰变研究。本次实验使用由QSD及DSSD组成的硅探测阵列和Clover型高纯锗探测器, 在连续束的高注入条件下, 准确地对每个注入和衰变事件之间建立了关联。首次研究了 ^{28}S 的 β 延迟 γ 衰变, 获得并指认了5个来自 ^{28}S β 延迟衰变布居能级的 γ 跃迁, 并给出了这些来自质子束缚态的 γ 跃迁的绝对强度。进一步得到了 ^{28}S β 衰变布居至 ^{28}P 的激发态能级的信息, 获得了3个 ^{28}S β 衰变到 ^{28}P 激发态的分支比, 其能量和对应分支比分别为1313(3) keV [17.6(16)%]、1570(3) keV [20.5(31)%]和2144(3) keV [26.1(45)%]。最后, 根据实验获得的数据结果给出了 ^{28}S 的部分 β 衰变纲图。此次实验的结果与之前的研究工作符合很好并得到了全新的内容, 在未来可以进一步和理论计算结果相结合, 探索 ^{28}S 与其镜像核 ^{28}Mg 之间的同位旋对称性破缺现象, 构建更加完整的 ^{28}S 的衰变纲图。

参考文献:

- [1] BLANK B, BORGE M. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2008, 60(2): 403.
- [2] BORGE M J G. *Physica Scripta*, 2013, T152: 014013.
- [3] PFÜTZNER M, KARNY M, GRIGORENKO L V, et al. *Rev Mod Phys*, 2012, 84: 567.
- [4] ROBERTS R B, MEYER R C, WANG P. *Phys Rev*, 1939, 55: 510.
- [5] MCPHERSON R, HARDY J C. *Canadian Journal of Physics*, 1965, 43(1): 1.
- [6] SUN L J, LIN C J, XU X X, et al. *Chin Phys Lett*, 2015, 32(1): 012301.
- [7] SUN L J, XU X X, FANG D Q, et al. *Phys Rev C*, 2017, 95: 014314.
- [8] WANG Y T, FANG D Q, WANG K, et al. *Eur Phys J A*, 2018, 54(6): 107.
- [9] LIANG P F, SUN L J, LEE J, et al. *Phys Rev C*, 2020, 101: 024305.
- [10] SUN L, XU X, HOU S, et al. *Phys Lett B*, 2020, 802: 135213.
- [11] CABLE M D, HONKANEN J, PARRY R F, et al. *Phys Rev Lett*, 1983, 50: 404.
- [12] MIERNIK K, DOMINIK W, JANAS Z, et al. *Phys Rev C*, 2007, 76: 041304.
- [13] XU X, LIN C, SUN L, et al. *Phys Lett B*, 2017, 766: 312.
- [14] ORRIGO S E A, RUBIO B, FUJITA Y, et al. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 222501.
- [15] LEE J, XU X X, KANEKO K, et al. *Phys Rev Lett*, 2020, 125: 192503.
- [16] BORGE M, DEDING J, HANSEN P. *Phys Lett B*, 1993, 317(1): 25.
- [17] TILLEY D, WELLER H, CHEVES C. *Nuclear Physics A*, 1993, 564(1): 1.
- [18] WEISSMAN L, LISETSKIY A F, ARNDT O, et al. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 2005, 31(7): 553.
- [19] PÉREZ-LOUREIRO D, WREDE C, BENNETT M B, et al. *Phys Rev C*, 2016, 93: 064320.
- [20] GRINYER G F, SVENSSON C E, ANDREOIU C, et al. *Phys Rev C*, 2005, 71: 044309.
- [21] LAM Y H, SMIRNOVA N A, CAURIER E. *Phys Rev C*, 2013, 87: 054304.
- [22] SMIRNOVA N A, BLANK B, BROWN B A, et al. *Phys Rev C*, 2017, 95: 054301.
- [23] KANEKO K, SUN Y, MIZUSAKI T, et al. *Phys Lett B*, 2017, 773: 521.
- [24] KANEKO K, SUN Y, MIZUSAKI T, et al. *Nuclear Physics A*, 2019, 986: 107.
- [25] POUICHEON F, BORREL V, JACMAR J, et al. *Nuclear Physics A*, 1989, 500(2): 287.
- [26] ZHAN W, XIA J, ZHAO H, et al. *Nuclear Physics A*, 2008, 805(1): 533c.
- [27] SUN Z, ZHAN W L, GUO Z Y, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2003, 503(3): 496.
- [28] SUN L, XU X, LIN C, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2015, 804: 1.
- [29] SUN L J, XU X X, LIN C J, et al. *Phys Rev C*, 2019, 99: 064312.
- [30] TARASOV O, BAZIN D. *Nucl Instr and Meth B*, 2008, 266(19): 4657.
- [31] XU X X, TEH F C E, LIN C J, et al. *Nuclear Science and Techniques*, 2018, 29(5): 73.
- [32] BAO P F, LIN C J, YANG F, et al. *Chinese Physics C*, 2014, 38(12): 126001.
- [33] THOMAS J C, ACHOURI L, ÄYSTÖ J, et al. *The European Physical Journal A - Hadrons and Nuclei*, 2004, 21(3): 419.
- [34] ACHOURI N L, DE OLIVEIRA SANTOS F, LEWITOWICZ M, et al. *The European Physical Journal A - Hadrons and Nuclei*, 2006, 27(3): 287.
- [35] BASUNIA M, HURST A. *Nuclear Data Sheets*, 2016, 134: 1.
- [36] BASUNIA M S. *Nuclear Data Sheets*, 2013, 114(10): 1189.
- [37] WANG M, AUDI G, KONDEV F G, et al. *Chinese Physics C*, 2017, 41(3): 030003.

β -delayed γ Decay of the Nucleus ^{28}S Near the Proton Drip-line

GAO Qirui^{1,2}, XU Xinxing^{2,3,4,5,6,†}, ZHOU Xiaohong^{2,3,6,†}, SUN Lijie^{4,5,7}, LIANG Pengfei⁴, LIU Jiajian^{2,4}, LIN Chengjian^{5,8}, Jenny Lee⁴, LI Zhihuan⁹, WU Hongyi⁹, YANG Yanyun², WANG Jiansong^{2,10}, WANG Dongxi⁵, LAN Yihua², MA Peng², DUAN Fangfang^{2,11}, GAO Zhihao^{2,11}, HU Qiang², BAI Zhen², MA Junbing², WANG Jianguo², ZHONG Fupeng^{5,8}, WU Chengguang⁹, LUO Diwen⁹, JIANG Yin⁹, LIU Yang⁹, HOU Dongsheng^{2,3}, LI Ren^{2,3}, MA Nanru⁵, MA Weihu^{2,12}, SHI Guozhu², YU Gongming², Patel Dipika², JIN Shuya^{2,3}, WANG Yufeng^{2,13}, YU Yuechao^{2,13}, ZHOU Qingwu^{2,14}, WANG Peng^{2,14}, HU Liyuan¹⁵, WANG Xiang⁹, ZANG Hongliang⁹, LI Pengjie⁴, ZHU Haofan^{2,16}, LIN Zheyang^{2,11}, ZHAO Qingqing⁴, YANG Lei⁵, WEN Peiwei⁵, YANG Feng⁵, JIA Huiming⁵, ZHANG Gaolong¹⁷, PAN Min^{5,17}, WANG Xiaoyu¹⁷, SUN Haohan⁵, HU Zhengguo^{2,3,6}, CHEN Ruofu^{2,3}, LIU Minliang^{2,3}, YANG Weiqing²

(1. Institute of Quantum Matter, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;

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

3. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Department of Physics, University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China;

5. Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

6. Advanced Energy Science and Technology Guangdong Laboratory, Huizhou 516003, Guangdong, China;

7. School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

8. College of Physics and Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, Guangxi, China;

9. School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

10. School of Science, Huzhou University, Huzhou 313000, Zhejiang, China;

11. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

12. Institute of Modern Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China;

13. School of Physics and Astronomy, Yunnan University, Kunming 650091, China;

14. School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400044, China;

15. Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory,

Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

16. School of Physics and Microelectronics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

17. School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The nucleus ^{28}S (isospin projection $T_z = -2$) near the proton drip-line was produced, separated and purified by HIRFL-RIBLL1 facility and the measurement of β -delayed γ decay of ^{28}S was performed using a detector array consisted of double-sided silicon detectors and Clover-type high purity germanium detectors. Five γ transitions from β decay of ^{28}S were precisely measured and the corresponding energies of the states of daughter ^{28}P were obtained. The branch ratios of low-lying states of ^{28}P populated by β decay were extracted for the first time and the new partial ^{28}S β -decay scheme was deduced. This work provides accurate data for the further study of mirror asymmetry in $^{28}\text{S}/^{28}\text{Mg}$.

Key words: β decay; double-sided silicon strip detector; γ -ray spectrum; β -decay branch ratio

Received date: 28 Dec. 2020; Revised date: 05 Feb. 2021

Foundation item: Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences(XDB34000000); National Natural Science Foundation of China(12022501, U1932206, U1632136)

† Corresponding author: XU Xinxing, E-mail: xinxing@impcas.ac.cn; ZHOU Xiaohong, E-mail: zxh@impcas.ac.cn.