基于HIRFL-RIBLL1装置开展的极丰质子核衰变研究进展

林承键^{1,2*}, 徐新星^{1*}, 孙立杰¹, 贾会明¹, 杨磊¹, 马南茹¹, 王东玺¹, 杨峰¹

1. 中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413;

2. 广西师范大学物理科学与技术学院, 桂林 541004

* 联系人, E-mail: cjlin@ciae.ac.cn; xinxing@impcas.ac.cn

2020-12-29 收稿, 2021-02-06 修回, 2021-02-08 接受, 2021-02-09 网络版发表

国家重点研发计划(2018YFA0404404)、国家自然科学基金(11635015, U1732145, 11705285, U1867212, 11805280, 11961131012)、财政部稳定支持科研项目(WDJC-2019-13)和中核集团领创科研项目(LC192209000701, LC202309000201)资助

摘要 远离 β 稳定线原子核的衰变是当前核物理领域的一个前沿热点. 本文回顾了近年来在HIRFL-RIBLL1上开展的轻核区极丰质子核的衰变研究. 首先介绍实验方法, 包括 β - p - γ 符合测量的探测器阵列以及当前发展的连续束注入-衰变方法. 随后重点介绍 ^{22}Si 和 ^{27}S 的衰变研究及相关话题, 包括国际现状和国内工作的进展. 在 ^{22}Si 衰变研究中, 发现了奇特的 $\beta 2p$ 衰变模式, 由此首次从实验上确定了 ^{22}Si 的质量. 此外, 与 ^{22}O 的 β 衰变作对比, 发现跃迁到子核第一个 1^+ 激发态的不对称性达209%, 是迄今为止最大的镜像不对称性, 为探索同位旋破缺提供了新线索. 在 ^{27}S 衰变研究中, 观察到28条衰变分支, 其中24条 βp 分支是新发现的, 由此构建了完善的衰变纲图. 进一步, 推导出了 $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$ 热核反应率, 探讨了在新星和X射线暴场景中对星际 ^{26}Al 核合成的影响.

关键词 极丰质子核, β 延迟衰变, 半衰期, 衰变纲图, 镜像不对称性, 热核反应率

自1896年贝克勒尔发现天然放射性以来, 人类对原子核衰变的研究始终贯穿着核物理学的发展, 为理解原子核这一微观物质层次发挥了重大作用. 20世纪80年代, 随着放射性核束的出现, 人们拓展核素版图的能力大大增强. 现阶段, 质子滴线基本上到了 $Z=93$, 剩余为数不多的核素有待发现; 而中子滴线仅到 $Z=10$, 新近的一项研究^[1]表明, ^{34}Ne 是最重的中子滴线核. 对于这些远离 β 稳定线的原子核, 由于其衰变能很大, β 衰变后可能布居在子核的高激发态上, 进而通过发射一个或多个粒子进行退激, 即 β 延迟衰变, 典型的有 βp , $\beta 2p$, $\beta 3p$, $\beta \gamma p$, $\beta \alpha$, $\beta 2\alpha$, $\beta \alpha p$, $\beta p \alpha$, βn , $\beta 2n$ 以及 βf (β 延迟裂变)等, 统称为奇异衰变. 衰变谱学是一个强有力的工具, 它不但能够提供核结构信息, 而且可以给出核内核子

的有效相互作用、核子-核子关联等信息. 此外, 衰变过程也与天体的核合成过程密切相关, 如 (n,γ) , (p,γ) , (α,γ) 等. 滴线区, 特别是丰质子一侧, 原子核的衰变研究已成为放射性核素物理的一个前沿热点^[2-5].

中国科学院近代物理研究所于1998年在兰州重离子研究装置(Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, HIRFL)^[6]上建成了一条次级放射性束流线(Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou, RIBLL1)^[7], 这是我国现有唯一一个利用中能($E<100$ MeV/u)重离子碎裂产生放射性核束的装置. 随着RIBLL1性能的逐渐提升, 轻核区远离 β 稳定线核束的产生成为可能. 在前期研究晕核结构^[8,9]、激发态双质子发射^[10-17]和双 α 发射^[18,19]等工作的基础上, 我们发展了连续束注入-衰变方法, 从2011年

引用格式: 林承键, 徐新星, 孙立杰, 等. 基于HIRFL-RIBLL1装置开展的极丰质子核衰变研究进展. 科学通报, 2021, 66: 3527-3536

Lin C J, Xu X X, Sun L J, et al. Progress on decays of extremely proton-rich nuclei based on the HIRFL-RIBLL1 facility (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3527-3536, doi: [10.1360/TB-2020-1679](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1679)

起开始了sd壳层($10 \leq Z \leq 20$)极丰质子核基态的 β 延迟衰变研究. 此前, 国际上已有一些初步的研究, 基本清楚了这个区域内原子核的衰变模式(图1), 但数据比较零散, 统计普遍不足. 因此, 有必要对sd壳层丰质子核的衰变作一个系统性的研究, 获得更高的统计, 探索未知的衰变分支以及新的衰变模式. 目前, 实验已测量了 $^{20,21}\text{Mg}$ [20~22], $^{22,23}\text{Al}$ [23~25], $^{22-25}\text{Si}$ [25~29], $^{26,27}\text{P}$ [30], $^{27-29}\text{S}$ [31,32]和 $^{36,37}\text{Ca}$ [33]等10余个核(图1). 本文将对实验方法、国际研究现状和国内基于RIBLL1的实验结果等作一个简要回顾.

1 实验方法

传统上, β 衰变谱学研究采用的是脉冲束方式, 即放射性核素注入探测器后停束一段时间(通常为3~5个半衰期), 等待其衰变并开展测量. 这样, 虽然本底比较干净, 但束流利用率很低, 难以达到高统计. 有鉴于此, 我们发展了连续束注入-衰变的方法, 极大提升了实验效率.

实验是在中国科学院近代物理研究所的HIRFL-RIBLL1装置[7]上完成的. 到目前为止, 共开展了5次大规模的衰变实验测量, 参数最多一次达800路以上. RIBLL1的设置关系到目标核的强度和纯度, 是实验成败的关键. 针对不同的目标核, 选择距离最近的稳定核, 即 ^{28}Si 、 ^{32}S 和 ^{40}Ca 作为主束. 从分离扇回旋加速器引出主束的能量约80 MeV/u, 流强约10 pA, 轰击初级靶室 T_0 内厚度约1000~1500 μm 的金属 ^9Be 靶, 由弹核

碎裂分别产生感兴趣的Si, Al, Mg, S, P和Ca的丰质子同位素. 初级靶 ^9Be 的厚度视目标核的质量而定, 对 ^{22}Si 、 ^{20}Mg 等轻质量核, 采用1500 μm 厚度以增加产额; 对 ^{27}S 、 ^{26}P 等较重质量核, 采用1000 μm 厚度以减少能损和能散, 提升传输效率. RIBLL1采用 $B\rho$ - δE - $B\rho$ 的方法纯化次级束流, 这里 δE 由厚度约500 μm 的Al降能片提供, 其厚度的选择需要综合考虑强度和纯度. 整个RIBLL1的设置及其优化采用LISE++软件[34]完成.

阻停-衰变探测器阵列是探测系统的核心, 位于RIBLL1的 T_2 焦面靶室内. 目前已经发展了3代, 其总体结构基本一致, 其中第3代阵列如图2所示.

阵列中心是3块双面硅条探测器(double-sided silicon strip detector, DSSD), 即DSSD1-3, 厚度分别约为140, 40和300 μm . 这3块DSSD都是16 $\times$ 16条构型, 条宽3 mm, 间距0.1 mm, 有效面积50 mm $\times$ 50 mm, 用来停阻入射的目标核并测量其衰变的带电粒子. 使用3块不同厚度DSSD的原因是兼顾衰变事件的探测效率和能量分辨率: 厚硅探测器对质子的探测效率高, 但 β 粒子的能量沉积也多, 造成质子峰的高能拖尾, 影响能谱的分辨, 而薄硅探测器正好相反, 有利于准确识别峰位. 使用DSSD的重要优点是: (1) 通过注入粒子与衰变粒子之间的位置关联, 大幅度降低偶然符合的事件率; (2) 由于每个硅条的分流, 整块探测器可承受的计数率以及剂量率均大幅提升. 需要提及的是, 采用DSSD后, 可以采用连续束注入-衰变的模式, 这是实验技术上的一个重要发展.

在DSSD的下游放置了3块四分硅探测器(quadrant silicon detector, QSD), 即QSD1-3, 厚度分别为1500、300和300 μm , 有效面积50 mm $\times$ 50 mm, 用以测量衰变的 β 粒子以及束流中的杂质轻离子. 在靶室外, 环绕核心探测器设置了5个Clover型的高纯锗(high-purity germanium, HPGe)探测器和3个溴化镧(LaBr_3)探测器, 用以测量 γ 射线. 在上游放置了3组降能器, 每组含3块面积为40 mm $\times$ 40 mm、厚度不同的Al降能片, 由步进电机驱动. 整体上可以实现Al降能片的厚度在5~316 μm 之间调节, 步长5 μm . 通过调整降能片的厚度, 保证注入的束流粒子停阻在DSSD2和DSSD3之间, 以达到最佳探测效率和最佳能谱分辨.

整套硅探测器和电荷灵敏前置放大器安装在印刷电路板制成的支架上, 保证了良好的接地; 同时, 用酒精循环制冷到0 $^\circ\text{C}$ 甚至更低, 大大降低了电子学噪声. 硅探测器的能量刻度分为两部分: 高能部分由不同种

图1 此前已知的sd壳层极丰质子核的 β 延迟衰变模式和在RIBLL1上研究的核

Figure 1 Previously known β -delayed decay modes for the extremely proton-rich nuclei in sd shell and the nuclei studied by the RIBLL1

图2 阻停-衰变探测器阵列的示意图

Figure 2 Schematic plot of the stop-decay detector array

类的束流粒子与LISE++计算对比并迭代完成,这部分主要针对束流粒子,不需要很高的精度,用于确定其注入深度;低能部分主要针对衰变产物,需要高精度.除了用Am-Pu-Cm三组分 α 源刻度外,还使用了内源刻度的方法,即利用束流上来的已知高精度 βp 衰变能量的核注入探测器作为刻度源,典型的核有 ^{21}Mg , $^{24,25}\text{Si}$ 等.这样可以消除探测器死层的影响,进一步提高精度.采取上述措施后,硅条探测器的探测阈值可低至 ~ 200 keV,能量分辨率可达 ~ 35 keV;采用数字化波形采样技术后,可分别达到 ~ 100 和 ~ 20 keV.硅探测器阵列对带电粒子的探测效率以及 γ 探测器的探测效率也可以采用内源刻度的方法,并结合蒙特卡罗模拟完成.整个阵列对 βp 的探测效率大于50%,对 β2p 的探测效率大于20%,对 $\beta\gamma$ 的探测效率大于0.5%.

在DSSD和降能器之间放置了两块QSD,给出入射粒子的能损信号 $\Delta E1$ 和 $\Delta E2$,结合在 T_1 和 T_2 靶室内塑料闪烁体探测器给出的飞行时间(time of flight, ToF),可以用作次级束流的粒子鉴别.图3显示了产生两个滴线核 ^{22}Si 和 ^{27}S 时的次级束流粒子鉴别情况.其中, ^{22}Si 的强度约 3×10^{-3} 个/s,纯度约 $8 \times 10^{-4}\%$,共收集了约 1.6×10^3 个; ^{27}S 的强度约0.14个/s,纯度约 $2.4 \times 10^{-2}\%$,共收集了约 4.7×10^4 个.此外,次级束流中包含的 ^{20}Mg , ^{26}P 和 ^{25}Si 等也被用来开展 β 衰变的谱学研究.

通过详细的数据分析,到目前为止,我们获得了15个极丰质子核的 βp , β2p 和 $\beta\gamma$ 的能谱、相应的半衰期、衰变分支比和比较半衰期、衰变子核的质量等丰富的谱学信息,发现了多个新的 βp 分支,首次在 ^{22}Si 中发现了 β2p 模式,修正了多个能级的信息以及跃迁途径,重

图3 ^{22}Si (a)和 ^{27}S (b)的束流粒子鉴别图

Figure 3 Particle identification of the ^{22}Si (a) and ^{27}S (b) beams

建了较为完整的衰变纲图.这部分工作的结果较多,限于篇幅,下面就两个重要结果,即 ^{22}Si 和 ^{27}S 的衰变以及相关研究进行介绍.

2 ^{22}Si 的衰变及其物理

^{22}Si 于1987年被首次发现^[35],是轻核区($A40$)唯一一个同位旋第3分量 $T_z=-3$ 的核,具有双质子的Borromean结构,且中子数 $N=8$ 是传统幻数,是研究滴线区核结构、有效相互作用等物理的理想原子核.由于产生 ^{22}Si 极其困难,在RIBLL1的工作之前,仅有Blank等人^[36]于1996年开展了一次 β 衰变的谱学研究,确认了一个质子能量为 (1.99 ± 0.05) MeV的 βp 衰变,分支比约 $20\% \pm 2\%$,并确定了半衰期为 (29 ± 2) ms. RIBLL1的工作是第二例成功开展 ^{22}Si 衰变的实验,由于统计量较高,获得了丰富的物理结果^[27,29].

2.1 ^{22}Si 的半衰期

半衰期是原子核的一个基本属性. 根据 βp 衰变计数随时间变化的曲线可以确定母核的半衰期. β 衰变的半衰期通常在ms量级. 需要注意的是, ^{22}Si βp 衰变的子核 ^{21}Mg 也具有 βp 衰变, 其半衰期为122 ms, 分支比约32.6%^[37]. 因此, 在拟合中考虑了 ^{21}Mg 的影响(图4), 得到 ^{22}Si 的半衰期为 $T_{1/2}=(28.6\pm 1.4)$ ms.

2.2 ^{22}Si 的衰变能谱和衰变纲图

在 ^{22}Si 衰变测量中, 使用的是第二代探测器阵列, 仅有两块DSSD, 厚度分别为149和66 μm , 所测量的 βp 衰变能谱如图5(a)和(b)所示. Clover阵列测量的 γ 能谱见图5(c), 其中202 keV的峰是 βp 衰变子核 ^{21}Mg 第一激发态的退激 γ . DSSD1的厚度较厚, 统计较高, 但是由于 β 的堆积造成高能拖尾, 能谱分辨率较差; DSSD2统计较低, 但是基本上没有 β 堆积的影响. 因此, 质子峰位主要靠DSSD2来确定, 能量分辨率约50 keV.

为排除 ^{21}Mg βp 衰变的影响, 选择衰变时间在100 ms之内的事件做进一步分析. 通过与 β 的符合可以确定3个质子峰, 能量分别为710, 1950和2150 keV(图5), 其中, 710和1950 keV的质子峰与202 keV的 γ 峰符合, 表明它们是衰变到 ^{21}Mg 的第一激发态上; 2150 keV质子峰与 γ 没有明显的符合, 表明它是衰变到 ^{21}Mg 的基态上.

根据符合关系确定了各能级的激发能(E_x)、衰变分支比(br)、比较半衰期(t)等信息, 构建了衰变纲图(图6). 除了 J^π , 图中所有数值均是在RIBLL1的工作中获得的. 需要说明的是, 衰变能(Q_{EC})和 E_x 的误差较大, 主要来源于 ^{22}Al 基态质量的误差400 keV^[38].

图4 ^{22}Si 的衰变曲线
Figure 4 Decay curve of ^{22}Si

2.3 ^{22}Si 的 $\beta 2\text{p}$ 衰变及其质量

1990年, Brown^[39]预言, ^{22}Si 可以经由同位旋相似态(isobaric analogue state, IAS)发生 $\beta 2\text{p}$ 和 $\beta 3\text{p}$ 衰变. 但由于事件稀少, 在Blank等人^[36]的实验中并没有明确观察到. 在RIBLL1的实验中, 我们采用2块较薄的DSSD, 衰变的2个质子同时全能损在同一块DSSD上的概率较低, 仅在DSSD1上观察到1个事件, 能量在5600 keV处(图5(a)). 通过母核与子核的时间-位置关联分析, 得到

图5 由DSSD1(a)、DSSD2(b)和Clover阵列(c)测量的 ^{22}Si 衰变能谱
Figure 5 Energy spectrum of ^{22}Si decay measured by DSSD1 (a), DSSD2 (b), and Clover array (c)

图6 ^{22}Si 的衰变纲图
Figure 6 Decay scheme of ^{22}Si

了5个总能量在5600 keV附近的衰变事件(表1)。其中,行程是质子在注入探测器中的径迹长度,由SRIM程序^[40]根据母核注入深度、发射质子角度等信息计算得到;能损和剩余能量分别是注入探测器和另一块探测器测量到的质子能量,总能量是它们的和。表1还列出了计算的单质子在注入探测器上的能损,可以看到,这与测量到的能损差别巨大,因此不可能是单质子发射的事件。由于次级束流总强度在400个/s左右,并且采用了多重关联的分析,这样保证了2个无关联单质子偶然符合的概率极低。此外,利用最大似然法分析这5个事件的半衰期,与 ^{22}Si 的半衰期在误差范围内一致。在多重条件的保证下,可以判断这5个事件是真实的 $\beta 2\text{p}$ 衰变^[27]。

^{22}Si 的质量可以根据IAS态的库仑置换能公式给出,即 $\Delta(^{22}\text{Si})=\Delta(^{22}\text{Al IAS})+\Delta E_{\text{c}}-\Delta_{\text{nH}}$,这里, Δ 表示质量过剩; $\Delta(^{22}\text{Al IAS})$ 是 $^{22}\text{Al IAS}$ 态的质量过剩,由 $\beta 2\text{p}$ 的双质子衰变能和子核 ^{20}Na 的质量^[38]给出,为27029(70) keV; ΔE_{c} 是 ^{22}Si 基态和 $^{22}\text{Al IAS}$ 态的库仑置换能,由系统学公式^[41]给出,为5917(101) keV; Δ_{nH} 是中子和质子的质量差。这样, ^{22}Si 的质量过剩确定为32163(123) keV,相应的双质子分离能 $S_{2\text{p}}=-108(125)$ keV。另外,从同位旋多重态质量公式(isospin multiplet mass equation, IMME)也可以导出 ^{22}Si 的质量,即 $\Delta(^{22}\text{Si})=\Delta(^{22}\text{O})-2b(A,T)T_{\text{z}}$,这里,系数 b 取最新的评估值^[42],得到 ^{22}Si 双质子分离能 $S_{2\text{p}}=-15$ keV。

这是首次从实验上提取出 ^{22}Si 的质量,表明 ^{22}Si 是一个非常临界的滴线核,值得进一步关注。目前的结果虽然误差较大,但可以检验众多的质量模型^[27]。需要提及的是,Holt等人^[43]利用包含和不包含三体力的手征有效场理论计算了 $N=8$ 的丰质子核在不同组态下的质子和双质子分离能。我们的实验结果支持 ^{22}Si 的两个价质子处于 $\text{sdf}_{7/2}\text{p}_{3/2}$ 组态,并表明三体力扮演了重要作用。

2.4 $^{22}\text{Si}/^{22}\text{O}$ 衰变的镜像不对称性

原子核是由质子和中子两种费米子组成的复杂量子多体系统。通常认为,除电荷外,质子和中子的性质是一样的,统称核子,用同位旋(T)这个物理量来区别它们。因此,镜像核即质子数和中子数互换的一对原子核具有同位旋对称性。极丰质子核为研究同位旋对称性破缺提供了一个理想的场所。

在RIBLL1的工作中,我们通过 βp 衰变确定了 ^{22}Si 衰变到 ^{22}Al 两个低激发的 1^+ 态,确定了它们的 E_{x} , br 和 $\log(ft)$ (图6)。相应地, ^{22}Si 的镜像核 ^{22}O 也存在两个类似的跃迁,其 β 衰变已于2005年被详细研究过^[44]。由此,可以比较这一对镜像核 β 衰变的情况及其对称性(表2)。其中,不对称度 $\delta=ft^+/ft^- - 1$,这里 ft^+ 和 ft^- 分别表示 β^+ 和 β^- 衰变的 ft 。可以看到,衰变到第一个 1^+ 激发态(1^+_1)的不对称度极大,达209%,是迄今为止发现的最大不对称性,而衰变到第二个 1^+ 激发态(1^+_2)基本上是对称的。

通常,镜像核衰变的不对称性仅百分之几到百分

表 1 5个 $\beta 2\text{p}$ 衰变事件的信息^{a)}

Table 1 Information on the five $\beta 2\text{p}$ decay events

事件号	行程(μm)	能损(keV)	计算的单质子能损(keV)	剩余能量(keV)	衰变时间(ms)	总能量(keV)
1	32.2(5)	680(50)	420(70)	4950(50)	30.5	5630
2	35.7(99)	1930(50)	470(130)	3630(50)	19.3	5560
3	66.1(177)	3420(50)	900(260)	2190(50)	16.4	5610
4	49.3(91)	4980(50)	660(130)	620(50)	3.1	5600
5	—	5600(50)	—	—	89.6	5600

a) “—”指无数据

表 2 镜像核 $^{22}\text{Si}/^{22}\text{O}$ 衰变的对比

Table 2 Comparison of decays of mirror nuclei $^{22}\text{Si}/^{22}\text{O}$

末态	$^{22}\text{Si} \rightarrow ^{22}\text{Al}$						$^{22}\text{O} \rightarrow ^{22}\text{F}$					$\delta(\%)$	
	实验			理论			实验			理论		实验	理论
	$E_{\text{x}}(\text{MeV})$	$br(\%)$	$\log(ft)$	$E_{\text{x}}(\text{MeV})$	$\log(ft)$		$E_{\text{x}}(\text{MeV})$	$br(\%)$	$\log(ft)$	$E_{\text{x}}(\text{MeV})$	$\log(ft)$		
1^+_1	0.905	5.3(10)	5.09(9)	1.12	4.81		1.625	29(4)	4.6(1)	1.98	4.32	209(96)	212
1^+_2	2.145	56.5(51)	3.83(5)	2.43	3.71		2.572	68(6)	3.8(1)	2.58	3.72	7(28)	-3.4

之几十. 为理解实验发现的这一极大的不对称性, 利用包含同位旋不守恒力的壳模型开展计算, 完美重现了实验结果(表2), 指出这个大的不对称性来源于 ^{22}Al 核中 $s_{1/2}$ 轨道的晕结构^[29]. 这个结果不但为晕核提供了一个可能的新判据, 而且为理解同位旋不对称性的起源提供了新线索. 同位旋对称性破缺是一个十分引人注目的话题^[45-47], 值得进一步探索.

3 ^{27}S 的衰变及其物理

^{27}S 是 $Z=16$ 的质子滴线核. 由于产生困难, 此前仅有3个实验开展了它的衰变研究. 1991年, Borrel等人^[48]首次开展了 ^{27}S 的 β 衰变研究, 测定其半衰期为 (21 ± 4) ms; 在 (6320 ± 20) keV能量处观察到一个 $\beta_2\text{p}$ 的衰变峰, 分支比为 $2.0\%\pm1.0\%$; 由此, 根据库仑置换能给出质量过剩为 (17709 ± 101) keV. 2001年, Canchel等人^[49]的衰变实验测定半衰期为 (15.5 ± 1.5) ms; 观察到2个 βp 衰变峰, 能量分别在 (10560 ± 400) 和 (7800 ± 400) keV处, 相应分支比为 $0.9\%\pm0.4\%$ 和 $1.4\%\pm0.5\%$; 并且观察到2个 $\beta_2\text{p}$ 衰变峰, 能量分别在 (6270 ± 50) 和 (5315 ± 60) keV处, 相应分支比为 $0.7\%\pm0.3\%$ 和 $0.4\%\pm0.2\%$; 同样, 根据库仑置换能给出质量过剩为 (17638 ± 95) keV. 2017年, Janiak等人^[50]用光学时间投影室(optical time projection chamber, OTPC)开展了测量, 给出半衰期为 (15.5 ± 1.6) ms; 清楚观察到了 $\beta_2\text{p}$ 衰变的径迹, 定出分支比为 $3.0\%\pm0.6\%$; 并且观察到2个低能的 βp 衰变峰, 能量分别在 (320 ± 30) 和 (710 ± 30) keV处, 相应分支比的下限为 $19.6\%\pm1.5\%$ 和 $6.7\%\pm0.8\%$. 可以看到, 上述工作的统计都很低, 观察到的衰变分支很少. 在RIBLL1上的测量由于统计量高, 大量的衰变分支被观察到, 由此得到了丰富的物理结果^[31,32].

3.1 ^{27}S 的半衰期

同样, 根据衰变曲线获得了 ^{27}S 的半衰期(图7). 由于 ^{27}S βp 衰变的子核 ^{26}Si 没有 βp 衰变, 拟合仅考虑了常数本底, 加上指数衰变, 得到 ^{27}S 的半衰期 $T_{1/2}=(16.3\pm0.2)$ ms. 值得指出的是, 这个结果是现有半衰期数据中精度最高的一个.

3.2 ^{27}S 的衰变能谱和衰变纲图

在 ^{27}S 衰变测量中, 使用的是第三代探测器阵列(图2), 有3块DSSD, 注入的 ^{27}S 有99.3%分布在DSSD2和DSSD3之间. 为提高统计, 考虑了这两块探测器累

积的 βp 衰变谱(图8). 经过分析, 确认了28个质子峰: (1) $\text{p}_1\sim\text{p}_{27}$ 属于 βp 衰变, 其中分支比大于5.7%的 p_1 , p_2 和 p_{10} 这三条分支是此前已被观测到的, 其余24条分支均是此次实验新发现的, 分支比最低达0.3%; (2) p_{28} 属于 $\beta_2\text{p}$ 衰变, 峰位在6372(15) keV处, 这与此前观测基本符合.

根据这些质子峰的时间、位置、能量以及与 γ 的符合关系, 确定了衰变子核各能级的 E_x 、跃迁的 br 和 ft 等信息, 构建了衰变纲图(图9). 除了 J^π 和 ^{26}Si 的质量过剩外, 图9中所有数值均是在RIBLL1的工作中获得的. 由于 βp 衰变子核 ^{26}Si 现有的质量精度极高^[38], 由此得到 ^{27}P 的质量及其激发能精度也很高, 例如, ^{27}P 的质量过剩 $\Delta(^{27}\text{P})=-659(9)$ keV, 是现有质量中精度最高的. 另外, 根据测量的 $\beta_2\text{p}$ 衰变能和 ^{25}Al 质量^[38], 由库仑置换能得到 ^{27}S 的质量过剩 $\Delta(^{27}\text{S})=17678(77)$ keV, 也达到了较高的精度, 是同类测量中精度最高的.

图7 (网络版彩色) ^{27}S 的衰变曲线
Figure 7 (Color online) Decay curve of ^{27}S

图8 (网络版彩色)DSSD2和DSSD3累积的 ^{27}S βp 谱
Figure 8 (Color online) βp spectrum of ^{27}S cumulated by DSSD2 and DSSD3

图9 (网络版彩色) ^{27}Si 的衰变纲图

Figure 9 (Color online) Decay scheme of ^{27}Si

3.3 $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$ 的热核反应率

星际 ^{26}Al 的来源是天体物理学中长期存在的一个热点问题^[51~53], 现有理论尚不能解释大量 ^{26}Al 的存在. 在天体核合成网络中, $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$ 是和 ^{26}Si β^+ 衰变到 ^{26}Al 竞争的一个反应, 对 ^{26}Al 的产生有影响.

在RIBLL1的工作中, 我们同时测量了衰变的质子和 γ , 通过 βp 和 $\beta\gamma$ 关联, 可以获得质子与 γ 的衰变强度比 I_p/I_γ . 特别是 ^{27}P 的两个低激发态, 即(1125 keV, $3/2^+$)态和(1569 keV, $5/2^+$)态(图9), 对天体环境的热核反应贡献最大. 据此, 计算了 $^{26}\text{Si}(p,\gamma)$ 布居 ^{27}P 这两个态的共振俘获截面和直接辐射俘获截面以及相应的反应速率(图10(a)). 图10(b)显示了总反应率(这3个反应速率的总和)与STARLIB推荐值^[54]的比较, 可以看出, 温度在0.1 GK附近时, 该结果比推荐值低了约2个数量级. 进一步, 我们开展了网络计算, 结果表明, 现有反应速率对X射线暴(X-ray burst, XRB)产生星际 ^{26}Al 的贡献有影响, ^{26}Al 和 ^{26}Si 的质量占比将降低2.4倍; 而对新星的贡献没有显著影响^[32].

4 总结与展望

我们研制了由DSSD, QSD和 γ 探测器组成的高性能 β - p - γ 符合测量探测器阵列, 发展了连续束注入-衰变方

图10 (网络版彩色) $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$ 的热核反应率. (a) 不同反应道的贡献; (b) 与STARLIB值的比较

Figure 10 (Color online) Thermonuclear reaction rate of $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$. (a) Contributions of different reaction channels; (b) comparison with the STARLIB values

法, 基于HIRFL-RIBLL1装置开展了sd壳层极丰质子核衰变的系统研究, 获得了丰富的核谱学信息. 在 ^{22}Si 衰变研究中, 发现了奇特的 $\beta_2 p$ 衰变, 根据IAS态的库仑置换能, 首次从实验上确定了 ^{22}Si 的质量, 表明它是一个非常临界的滴线核. 与镜像核 ^{22}O 的衰变作对比, 发现跃迁到子核第一个 1^+ 激发态的 β 衰变存在极大的镜像不对称性, 达209%, 是迄今为止观察到的最大值, 这与 ^{22}Al 的 $s_{1/2}$ 轨道的晕结构有关, 为探索同位旋破缺提供了新线索. 在 ^{27}S 衰变研究中, 观察到27条 βp 衰变分支和1条 $\beta_2 p$ 衰变分支, 其中24条 βp 分支是新发现的, 由此构建了完善的衰变纲图. 确定了 ^{27}P 和 ^{27}S 精确的质量, 并根据 p/γ 衰变分支比导出了 $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$ 热核反应率, 探讨了在新星和X射线暴场景中对星际 ^{26}Al 核合成的影响.

随着放射性核束技术的发展, 在对核素版图的探索过程中, 人们越来越接近原子核的滴线区域, 尤其是丰质子一侧, 人们甚至产生了滴线外的原子核. 高精度衰变谱学是研究核结构、有效相互作用和基本对称性的强有力手段, 特别是对于这些产额极低的原子核. 在对这些原子核的探索中, 人们已经发现奇异的双质子衰变、低密度核物质中双核子镜像的BCS-BEC渡越、镜像核衰变中的同位旋破缺等诸多新现象. 随着研究的深入, 相信会有更多激动人心的新现象被发现.

参考文献

- 1 Ahn D S, Fukuda N, Geissel H, et al. Location of the neutron dripline at fluorine and neon. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 212501
- 2 Blank B, Płoszajczak M. Two-proton radioactivity. *Rep Prog Phys*, 2008, 71: 046301
- 3 Pfützner M, Karny M, Grigorenko L V, et al. Radioactive decays at limits of nuclear stability. *Rev Mod Phys*, 2012, 84: 567–619
- 4 Blank B, Borge M J G. Nuclear structure at the proton drip line: Advances with nuclear decay studies. *Prog Part Nucl Phys*, 2008, 60: 403–483
- 5 Borge M J G. Beta-delayed particle emission. *Phys Scr*, 2013, T152: 014013
- 6 Zhan W L, Xia J W, Zhao H W, et al. HIRFL today. *Nucl Phys*, 2008, 805: 533c–540c
- 7 Sun Z, Zhan W L, Guo Z Y, et al. RIBLL, the radioactive ion beam line in Lanzhou. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Detect Assoc Equip*, 2003, 503: 496–503
- 8 Liu Z H, Ruan M, Zhao Y L, et al. Evidence for enhancement of the total reaction cross sections for $^{27,28}\text{P}$ with a ^{28}Si target and examination of possibly relevant mechanisms. *Phys Rev C*, 2004, 69: 034326
- 9 Liu Z H, Ruan M, Zhao Y L, et al. Possible experimental evidence of a moderate proton halo in ^{29}S . *Chin Phys Lett*, 2004, 21: 1711–1713
- 10 Lin C J, Xu X X, Jia H M, et al. Experimental study of two-proton correlated emission from ^{29}S excited states. *Phys Rev C*, 2009, 80: 014310
- 11 Jia F, Lin C J, Zhang H Q, et al. Experimental evidence of two-proton emissions from ^{18}Ne excited state. *Chin Phys Lett*, 2009, 26: 032301
- 12 Lin C J, Xu X X, Jia H M, et al. Experimental study of the two-proton correlated emission from the excited states of $^{17,18}\text{Ne}$ and $^{28,29}\text{S}$. *Nucl Phys A*, 2010, 834: 450c–453c
- 13 Xu X X, Lin C J, Jia H M, et al. Investigation of two-proton emission from excited states of the odd- Z nucleus ^{28}P by complete-kinematics measurements. *Phys Rev C*, 2010, 81: 054317
- 14 Lin C J, Xu X X, Jia H M, et al. Experimental research into the two-proton emissions from $^{17,18}\text{Ne}$, ^{28}P and $^{28,29}\text{S}$. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2011, 54: 73–80
- 15 Xu X X, Lin C J, Jia H M, et al. Correlations of two protons emitted from excited states of ^{28}S and ^{27}P . *Phys Lett B*, 2013, 727: 126–129
- 16 Lin C J, Xu X X, Jia H M, et al. Experimental research on two-proton emissions from the excited states of proton-rich nuclei close to the drip line. *JPS Conf Proc*, 2014, 1: 013026
- 17 Lin C J, Xu X X, Wang J S, et al. Proton and two-proton emissions from proton-rich nuclei with $10 \leq Z \leq 20$. *Nucl Phys Rev*, 2016, 33: 160–166
- 18 Xu X X, Lin C J, Jia H M, et al. Observation of two- α emission from high-lying excited states of ^{18}Ne by complete-kinematics measurements. *Phys Rev C*, 2010, 82: 064316
- 19 Xu X, Lin C, Jia H, et al. Experimental study of two-alpha emission from high-lying excited states of $^{17,18}\text{Ne}$. *Plasma Sci Technol*, 2012, 14: 371–374
- 20 Sun L J, Xu X X, Lin C J, et al. Beta-decay spectroscopy of ^{20}Mg and the implications for $^{15}\text{O}(\alpha, \gamma)^{19}\text{Ne}$ Reaction. *Nucl Phys Rev*, 2017, 34: 431–436
- 21 Sun L J, Xu X X, Fang D Q, et al. β -decay study of the $T_z = -2$ proton-rich nucleus ^{20}Mg . *Phys Rev C*, 2017, 95: 014314
- 22 Wang Y T, Fang D Q, Wang K, et al. β -delayed particle emission from ^{21}Mg . *Eur Phys J A*, 2018, 54: 107
- 23 Wang Y T, Fang D Q, Xu X X, et al. Implantation-decay method to study the β -delayed charged particle decay. *Nucl Sci Technol*, 2018, 29: 98
- 24 Wang Y T, Fang D Q, Wang K, et al. Observation of β -delayed ^2He emission from the proton-rich nucleus ^{22}Al . *Phys Lett B*, 2018, 784: 12–15
- 25 Sun L J, Xu X X, Lin C J, et al. A detection system for charged-particle decay studies with a continuous-implantation method. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Detect Assoc Equip*, 2015, 804: 1–7
- 26 Sun L J, Xu X X, Lin C J, et al. An implantation and detection system for spectroscopy of $^{22,24}\text{Si}$. *Nucl Phys Rev*, 2016, 33: 230–234
- 27 Xu X X, Lin C J, Sun L J, et al. Observation of β -delayed two-proton emission in the decay of ^{22}Si . *Phys Lett B*, 2017, 766: 312–316
- 28 Wang K, Fang D Q, Wang Y T, et al. Spectroscopic study of β -delayed particle emission from proton-rich nucleus ^{23}Si . *Int J Mod Phys E*, 2018, 27: 1850014
- 29 Lee J, Xu X X, Kaneko K, et al. Large isospin asymmetry in $^{22}\text{Si}/^{22}\text{O}$ mirror Gamow-Teller transitions reveals the halo structure of ^{22}Al . *Phys Rev Lett*, 2020, 125: 192503
- 30 Liang P F, Sun L J, Lee J, et al. Simultaneous measurement of β -delayed proton and γ emission of ^{26}P for the $^{25}\text{Al}(p, \gamma)^{26}\text{Si}$ reaction rate. *Phys Rev C*, 2020, 101: 024305
- 31 Sun L J, Xu X X, Lin C J, et al. β -decay spectroscopy of ^{27}S . *Phys Rev C*, 2019, 99: 064312
- 32 Sun L J, Xu X X, Hou S Q, et al. Experimentally well-constrained masses of ^{27}P and ^{27}S : Implications for studies of explosive binary systems. *Phys Lett B*, 2020, 802: 135213
- 33 Sun L J, Lin C J, Xu X X, et al. Experimental study of beta-delayed proton emission of $^{36,37}\text{Ca}$. *Chin Phys Lett*, 2015, 32: 012301
- 34 Tarasov O B, Bazin D. LISE++: Radioactive beam production with in-flight separators. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2008, 266: 4657–4664

- 35 Saint-Laurent M G, Dufour J P, Anne R, et al. Observation of a bound $T_z = -3$ nucleus: ^{22}Si . *Phys Rev Lett*, 1987, 59: 33–35
- 36 Blank B, Andriamonje S, Boué F, et al. First spectroscopic study of ^{22}Si . *Phys Rev C*, 1996, 54: 572–575
- 37 National Nuclear Data Center (NNDC). Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF). <https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>
- 38 Wang M, Audi G, Kondev F G, et al. The AME2016 atomic mass evaluation (II). Tables, graphs and references. *Chin Phys C*, 2017, 41: 030003
- 39 Brown B A. Isospin-forbidden β -delayed proton emission. *Phys Rev Lett*, 1990, 65: 2753–2756
- 40 Ziegler J F, Ziegler M D, Biersack J P. SRIM—The stopping and range of ions in matter (2010). Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms, 2010, 268: 1818–1823
- 41 Miernik K. Mass determination of two-proton radioactive nuclides. *Acta Phys Pol B*, 2013, 44: 483–489
- 42 MacCormick M, Audi G. Evaluated experimental isobaric analogue states from $T = 1/2$ to $T = 3$ and associated IMME coefficients. *Nucl Phys A*, 2014, 925: 61–95
- 43 Holt J D, Menéndez J, Schwenk A. Three-body forces and proton-rich nuclei. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 022502
- 44 Weissman L, Lisetskiy A F, Arndt O, et al. β -decay of ^{22}O . *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2005, 31: 553–561
- 45 Miller G A, Opper A K, Stephenson E J. Charge symmetry breaking and QCD. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 2006, 56: 253–292
- 46 Hoff D E M, Rogers A M, Wang S M, et al. Mirror-symmetry violation in bound nuclear ground states. *Nature*, 2020, 580: 52–55
- 47 Blank B. Mirror symmetry broken for nuclear ground states. *Nature*, 2020, 580: 37–38
- 48 Borrel V, Jacmart J C, Pougheon F, et al. ^{31}Ar and ^{27}S : Beta-delayed two-proton emission and mass excess. *Nucl Phys A*, 1991, 531: 353–369
- 49 Canchel G, Achouri L, Äystö J, et al. The β -delayed one- and two-proton emission of ^{27}S . *Eur Phys J A*, 2001, 12: 377–380
- 50 Janiak Ł, Sokołowska N, Bezbakh A A, et al. β -delayed proton emission from ^{26}P and ^{27}S . *Phys Rev C*, 2017, 95: 034315
- 51 Prantzos N, Diehl R. Radioactive ^{26}Al in the galaxy: Observations versus theory. *Phys Rep*, 1996, 267: 1–69
- 52 Diehl R, Halloin H, Kretschmer K, et al. Radioactive ^{26}Al from massive stars in the Galaxy. *Nature*, 2006, 439: 45–47
- 53 Arnould M, Goriely S. Astronuclear Physics: A tale of the atomic nuclei in the skies. *Prog Part Nucl Phys*, 2020, 112: 103766
- 54 Iliadis C, Longland R, Champagne A E, et al. Charged-particle thermonuclear reaction rates: II. Tables and graphs of reaction rates and probability density functions. *Nucl Phys A*, 2010, 841: 31–250

Summary for “基于HIRFL-RIBLL1装置开展的极丰质子核衰变研究进展”

Progress on decays of extremely proton-rich nuclei based on the HIRFL-RIBLL1 facility

Chengjian Lin^{1,2*}, Xinxing Xu^{1*}, Lijie Sun¹, Huiming Jia¹, Lei Yang¹, Nanru Ma¹, Dongxi Wang¹ & Feng Yang¹¹ Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;² College of Physics and Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China* Corresponding authors, E-mail: cjlin@ciae.ac.cn; xinxing@impcas.ac.cn

The decay of the nucleus far from the β -stability line is a currently hot topic in the field of nuclear physics. Research progress on decays of extremely proton-rich nuclei in sd shell based on the HIRFL-RIBLL1 facility is reviewed in this paper. The detector array mainly consists of 3 double-sided silicon strip detectors for implanted heavy-ions as well as decayed protons, 4 quadrant silicon detectors for emitted β -particles, and 5 Clover-type γ -ray detectors. With this setup, a continuous beam implantation-decay method was developed for the β -p- γ coincident measurement. Thanks to the excellent performance of the detection system, high precision β -decay spectroscopies of 15 proton-rich nuclei in sd shell have been obtained. For two typical cases, ^{22}Si and ^{27}S , their decays as well as related topics are presented in detail. In the study of ^{22}Si decay, the half-life was determined as (28.6 ± 1.4) ms, where the influence of βp decay of daughter nucleus ^{21}Mg was taken into account. An exotic $\beta 2\text{p}$ decay mode was discovered for the first time by tracking two decayed protons. Consequently, the mass of ^{22}Si was deduced by the Coulomb displacement energy of isobaric analogue state. The 2p separation energy is -108 (125) keV, indicating that ^{22}Si is a very marginal candidate for 2p ground-state emission. This result is in good agreement with the mass predication by the chiral effective field theory with 3-nucleon forces. Together with 3 branches of βp decay, the decay scheme of ^{22}Si was established. Comparing with the β decay of ^{22}O , a hitherto largest mirror asymmetry up to 209% was found in transition to the first 1^+ excited state of the daughter nucleus. Shell-model calculations with isospin-nonconserving forces reproduced the observed data, attributing the large mirror asymmetry to the $s_{1/2}$ proton-halo state of ^{22}Al . It provides another means to identify halo nuclei and a new clue to explore the isospin breaking. In the study of ^{27}S decay, the half-life was determined as (16.3 ± 0.2) ms, which is the most precise one so far. A total of 27 βp decay branches were observed, and among them 24 with branch ratio less than 5% were new found branches. Besides, 1 $\beta 2\text{p}$ decay via the isobaric analogue state ($T=5/2$) of daughter nucleus ^{27}P to the ground state of ^{25}Al was confirmed. The level energies of ^{27}P , branch ratios and $\log(f)$ s of β -feeding to these levels were determined, and therefore the decay scheme of ^{27}S was established perfectly. Thanks to the high energy resolution of the detector system, the masses of ^{27}P and ^{27}S were determined with very high precision as $\Delta(^{27}\text{P}) = -659(9)$ keV and $\Delta(^{27}\text{S}) = 17678(77)$ keV, respectively. Based on the new mass data, the thermonuclear reaction rate of $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$ was deduced and its influence on the nucleosynthesis of galactic ^{26}Al in scenes involving nova and X-ray burst (XRB) was discussed. The abundance of $A=26$ in the burst ashes is increased by a factor of 2.4, while no substantial change was found in the XRB energy generation rate or the light curve. Results also suggest that ^{27}S is not a significant waiting point in the rapid proton capture process, and the change of the $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$ reaction rate is not sufficiently large to affect the nova contribution to the synthesis of galactic ^{26}Al .

extremely proton-rich nucleus, β -delayed decay, half-life, decay scheme, mirror asymmetry, thermonuclear reaction rate

doi: [10.1360/TB-2020-1679](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1679)