



A ~ 20 质子滴线区原子核的质子衰变研究进展

倪磊¹, 金瑜^{1,2}, 华辉^{1*}, 李智焕¹

1. 北京大学物理学院核物理与核技术全国重点实验室, 北京 100871

2. 中国工程物理研究院材料研究所, 绵阳 621907

* 联系人, E-mail: Hhua@pku.edu.cn

2025-08-30收稿, 2025-10-24修回, 2025-11-04接受, 2025-11-05网络版发表

国家重点研发计划(2022YFA1602302)和国家自然科学基金(12035001)资助

摘要 开展滴线附近原子核的核子自发发射的实验研究, 有助于人们发现滴线附近的新核素或新的共振态, 揭示远离稳定线原子核的奇特结构和衰变特性, 对探索原子核稳定性的极限、理解极端同位旋条件下的核子-核子相互作用具有重要意义. 北京大学实验核物理研究团队利用美国密歇根州立大学国家超导回旋加速器实验室放射性束流装置提供的²⁰Mg次级束, 开展了A ~ 20质子滴线区原子核的质子衰变研究. 对¹⁸Na的单质子衰变、²⁰Mg激发态的双质子衰变、²¹Al的三质子衰变和¹⁸Mg的四质子衰变过程进行了完整运动学测量, 利用不变质量法得到了4个原子核发射质子的衰变能谱. 实验上确定了¹⁸Na基态位置, 解决了此前在¹⁸Na基态指认过程中存在的问题. 首次观察到了超出质子滴线两个中子的新核素¹⁸Mg, 并确定了其基态质量. 对²⁰Mg, ²¹Al和¹⁸Mg的多质子衰变产物进行了多体关联分析, 结合蒙特卡罗模拟, 发现²⁰Mg和²¹Al的质子非束缚态分别主要通过两步和三级级联的单质子发射进行衰变, 而¹⁸Mg的基态主要通过两级级联的直接双质子发射进行衰变.

关键词 质子滴线, 质子衰变, 不变质量法, 共振态

原子核是由质子和中子组成的、通过核子之间的强相互作用紧密结合在一起的量子多体系统. 相对于 β 稳定线上的原子核, 随着质子数或中子数的不断增加, 原子核最外层核子的结合能将逐渐降低, 直到最后一个质子(中子)的结合能降为零, 达到质子(中子)滴线. 在滴线附近, 最外层核子处于弱束缚或非束缚状态, 部分滴线内束缚核的激发态以及滴线外非束缚核可以通过自发核子发射进行衰变.

早在20世纪60年代初, 理论就预言了质子滴线区的原子核可能会发生发射单质子或双质子的自发衰变^[1,2]. 20世纪70年代开始, 实验上陆续发现了很多奇Z原子核的基态或长寿命激发态具有单质子放射性^[3,4]. 受能量和动量守恒限制, 单质子发射过程的衰变运动学是完全确定的. 随着发射质子数的增加, 衰变产物之间的相互关联逐渐复杂化, 呈现出许多

新奇的现象. 通过实验测量衰变出射的多个质子之间的动量与角度等关联关系, 可以得到核子波函数以及核子间相互作用等信息, 对理解极端同位旋条件下的核子-核子关联和滴线区原子核结构具有重要的价值. 到目前为止, 实验上已经观察到⁶Be, ¹¹O, ¹²O, ¹⁵Ne, ¹⁶Ne, ¹⁹Mg, ³⁰Ar, ⁴⁵Fe, ⁴⁸Ni, ⁵⁴Zn和⁶⁷Kr等原子核的基态具有双质子放射性^[4~10]. 随着原子核版图向质子滴线外的不断扩展, 近年来还陆续发现了⁷B^[11], ¹³F^[12], ¹⁷Na^[13], ²⁰Al^[14]和³¹K^[15]五个基态三质子发射核, ⁸C^[16]和¹⁸Mg^[17]两个基态四质子发射核, ⁹N^[18]基态五质子发射核.

本文主要介绍北京大学实验核物理研究团队近年来开展的对A ~ 20轻质子滴线区原子核质子衰变研究的部分实验结果^[17,19~21]. 采用不变质量法^[22], 对¹⁸Na的单质子衰变、²⁰Mg激发态的双质子衰变、

引用格式: 倪磊, 金瑜, 华辉, 等. A ~ 20 质子滴线区原子核的质子衰变研究进展. 科学通报, 2026, 71: 883–893
Ni L, Jin Y, Hua H, et al. Progress on the proton decays of A ~ 20 nuclei around the proton drip line (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 883–893, doi: 10.1360/CSB-2025-5448

^{21}Al 激发态的三质子衰变和 ^{18}Mg 的四质子衰变过程开展了研究,得到了这四个原子核的衰变能谱.在实验上确定了 ^{18}Na 基态位置,同时首次观察到了新核素 ^{18}Mg .通过对 ^{20}Mg 、 ^{21}Al 和 ^{18}Mg 的子系统能谱进行关联分析,讨论了其多质子衰变机制.

1 实验设置

针对 ^{18}Na 、 ^{20}Mg 、 ^{21}Al 和 ^{18}Mg 的实验是在美国密歇根州立大学国家超导回旋加速器实验室(National Superconducting Cyclotron Laboratory, NSCL)完成的,实验装置如图1所示.采用NSCL实验室的耦合回旋加速器设施(Coupled Cyclotron Facility, CCF)和A1900放射性次级束流线[23,24],产生了 ^{20}Mg 放射性束流,能量为103 MeV/u,流强为5600 pps,纯度为31%.利用 ^{20}Mg 束流与 ^9Be 靶反应,布居了包括 ^{18}Na 、 ^{20}Mg 、 ^{21}Al 和 ^{18}Mg 在内的多个质子滴线区原子核的共振态.这些共振态寿命极短,会迅速在 ^9Be 靶内发生衰变,出射一个或多个质子与剩余核.实验上通过对衰变产物进行多体符合测量,利用不变质量法对这些原子核共振态的质子衰变过程进行了研究.

对从靶中出射的质子,使用由一块环形双面硅微条探测器(Annular Double-sided Silicon Strip Detector,

ADSSD)和一个环形CsI(Tl)阵列组成的 $\Delta E - E$ 望远镜探测系统进行测量,得到衰变出射质子的位置和能量信息.衰变剩余核主要集中在零度角附近出射,在穿过望远镜阵列中心直径为10 mm的小孔后,由一个位置灵敏的闪烁光纤阵列给出其出射的位置信息.随后,剩余核进入S800磁谱仪,进行粒子鉴别和能量测量[25,26].

2 ^{18}Na 单质子衰变研究

^{18}Na 有11个质子与7个中子,较Na同位素的质子滴线核少两个中子,通过发射一个质子衰变到束缚核 ^{17}Ne .Zerguerras等人[27]利用 ^{20}Mg 束流轰击 ^9Be 靶,通过核子敲出反应首次在实验上产生了 ^{18}Na .通过对 $^{17}\text{Ne} + 1p$ 事件的不变质量重建,在衰变能谱中观察到了两个峰,衰变能分别为 $E_T = 0.42(17)$ 和 $1.27(17)$ MeV,二者都被认为可能是 ^{18}Na 的基态[27].随后,Assié等人[28,29]采用 $^{17}\text{Ne} + 1p$ 的共振弹性散射反应对 ^{18}Na 的低能共振态进行了进一步研究.通过对测量到的激发函数进行R矩阵分析,观察到了 ^{18}Na 的4个共振态,衰变能分别为 $E_T = 1.552(5)$, $1.842(40)$, $2.030(20)$, $2.084(5)$ MeV,自旋宇称分别为 2^- , 0^- , 1^- , 3^- [28,29].同一时期,Mukha等人[30]使用 ^{20}Mg 束流轰击 ^9Be 靶,利用核子敲出反应以及飞行衰变法对 ^{18}Na 进行了研究.通过

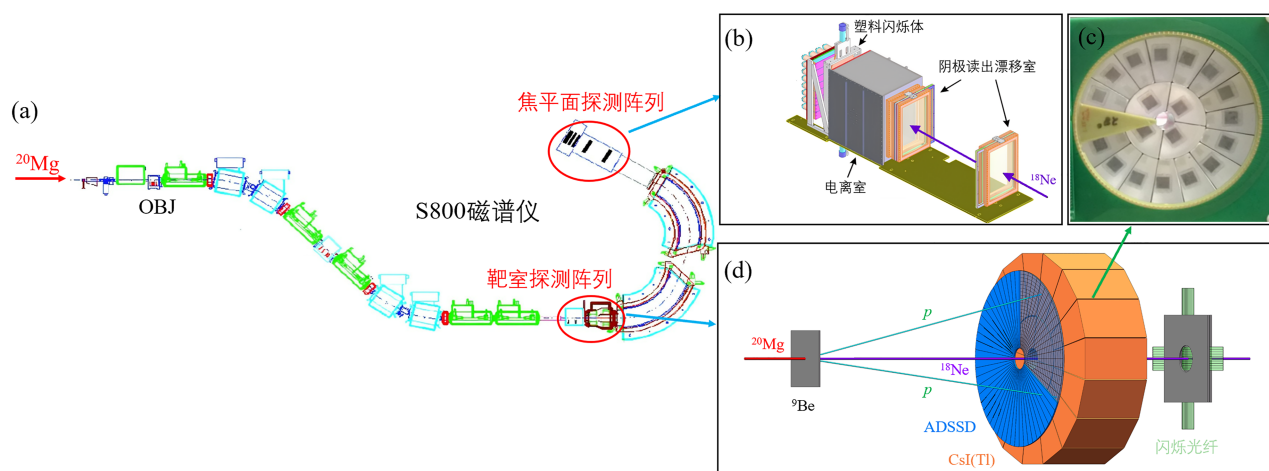


图1 (网络版彩色)实验装置图. (a) S800磁谱仪,修改自S800网站(<https://wikihost.nsl.mscl.edu/S800Doc/doku.php?id=introduction>); (b) S800焦平面探测阵列,修改自S800网站(<https://wikihost.nsl.mscl.edu/S800Doc/doku.php?id=detectors>); (c) 环形CsI(Tl)探测器阵列; (d) 反应靶与靶室探测阵列

Figure 1 (Color online) Experimental setup. (a) S800 spectrograph, modified from S800 website (<https://wikihost.nsl.mscl.edu/S800Doc/doku.php?id=introduction>); (b) S800 focal plane detector array, modified from S800 website (<https://wikihost.nsl.mscl.edu/S800Doc/doku.php?id=detectors>); (c) circular CsI(Tl) detector array; (d) reaction target and target chamber detector array

对 ^{19}Mg 低能态的 $2p$ 衰变事件的 p - ^{17}Ne 角关联进行分析, 观察到 $E_T = 1.23(15)$ 和 $1.55(7)$ MeV两个 ^{18}Na 共振态, 自旋宇称分别为 1^- 和 2^- ^[30]. 其中第1个共振态 1^- 被认为可能是 ^{18}Na 的基态, 而第2个共振态则对应文献[28, 29]中看到的 $E_T = 1.552(5)$ MeV的 2^- 激发态. 该实验没有发现与文献[27]中 $E_T = 0.42(17)$ MeV的 $1p$ 峰相对应的能谱结构, 但也未对出现这个差异的原因做出解释. 最近, Charity等人^[31]利用 ^{17}Ne 束流与 ^9Be 靶的质子转移反应布居了 ^{18}Na 共振态, 测量到了衰变能为 $E_T = 1.527(25)$ 和 $2.085(23)$ MeV的 2^- 和 3^- 激发态, 但没有观察到 ^{18}Na 基态. 为了精确指定 ^{18}Na 的基态位置, 我们通过 ^{20}Mg 在 ^9Be 靶上的核子敲出反应布居了 ^{18}Na 的共振态, 并对 ^{18}Na 共振态的单质子衰变过程开展了实验研究.

图2(a)展示了我们利用 $^{17}\text{Ne} + 1p$ 事件重建出的不

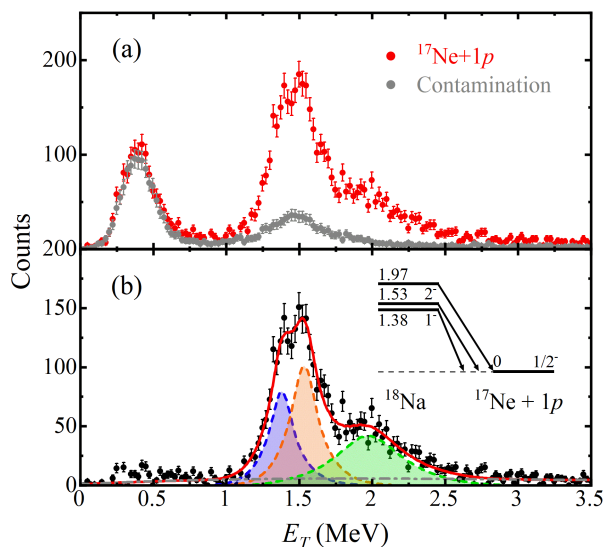


图 2 (网络版彩色)(a) 所有 $^{17}\text{Ne} + 1p$ 事件的衰变能谱(红色数据点), 通过从 $^{17}\text{Ne} + 2p$ 事件中任选1个质子构建 $^{17}\text{Ne} + 1p$ 能谱, 从而得到了 ^{19}Mg 的 $2p$ 衰变对 ^{18}Na 能谱的干扰谱形(灰色数据点); (b) 扣除来自 ^{19}Mg 的 $2p$ 衰变事件干扰后的 $^{17}\text{Ne} + 1p$ 事件的衰变能谱^[19]. 红色实线表示总拟合谱, 包含了来自各个共振态(虚线)和平滑本底(灰色点虚线)的贡献. 内插图展示了 ^{18}Na 三个共振态的衰变路径

Figure 2 (Color online) Decay energy spectra for (a) all detected $^{17}\text{Ne} + 1p$ events (red points), and (b) $^{17}\text{Ne} + 1p$ events after subtracting the contamination from the $2p$ decay of ^{19}Mg ^[19]. The grey spectrum in (a) indicates the contamination from ^{19}Mg decay, which is estimated from invariant-mass reconstruction of the two possible $^{17}\text{Ne} + 1p$ subevents within each $^{17}\text{Ne} + 2p$ event. The solid-red curve in (b) shows the fitted spectrum, which includes the contributions from individual states (dashed curves) and a smooth background (dashed-dotted-grey curve). The inset shows the decay paths of the three resonant states in ^{18}Na

变质量谱^[19]. 可以清晰地看到在 $E_T \approx 0.4$ MeV处有一个共振峰结构, 与文献[27]中使用同一反应机制报道的位于 $E_T = 0.42(17)$ MeV的 $1p$ 峰结构一致. 但是, 进一步的符合分析表明, 实验中测量到的 $^{17}\text{Ne} + 1p$ 事件不仅仅来自 ^{18}Na 共振态的 $1p$ 衰变, 还有一部分来自 ^{20}Mg 敲出反应生成的 ^{19}Mg ^[20, 32]的 $2p$ 衰变带来的干扰. 在 ^{19}Mg 衰变出射的两个质子中, 可能只有其中一个质子能够被ADSSD和CsI(Tl)探测器同时测量到, 而另一个质子的信息被丢失, 这也将导致实验测量到 $^{17}\text{Ne} + 1p$ 符合事件, 从而对 ^{18}Na 的真实衰变能谱带来干扰. 通过从 $^{17}\text{Ne} + 2p$ 事件中任选一个质子来构建 $^{17}\text{Ne} + 1p$ 能谱, 可以近似得到实验中丢失一个质子的干扰能谱, 如图2(a)中灰色数据点所示. 对于 ^{19}Mg 基态($E_T \approx 0.8$ MeV)的直接 $2p$ 衰变, 两个质子的能量在均分衰变能时概率最大, 就会导致在 $^{17}\text{Ne} + 1p$ 能谱中形成 $E_T \approx 0.4$ MeV的峰结构. 由于 ^{19}Mg 基态衰变不经过 ^{18}Na 的中间态, 因此可以很好地确定本实验和文献[27]中看到的 $E_T \approx 0.4$ MeV的峰结构实际上来自 ^{19}Mg 基态的直接 $2p$ 衰变, 而不是来自某一 ^{18}Na 共振态的 $1p$ 衰变.

在扣除来自 ^{19}Mg 的 $2p$ 衰变的干扰后, 图2(b)给出了 ^{18}Na 的衰变能谱^[19]. 我们利用蒙特卡罗模拟生成的Breit-Wigner共振峰形对能谱进行了拟合, 得到了包括基态在内的三个 ^{18}Na 共振态的能量 E_T 与本征宽度 Γ . 其中, ^{18}Na 基态的 $1p$ 衰变能为 $1.38(2)$ MeV, 与此前实验报道的 ^{18}Na 基态候选峰能量 $1.27(17)$ MeV^[27]和 $1.23(15)$ MeV^[30]一致, 新结果大幅减小了 ^{18}Na 基态质量的不确定度. 第2个共振态衰变能为 $E_T = 1.53(2)$ MeV, 宽度 $\Gamma < 0.04$ MeV, 与文献[28, 29]中报道的位于 $E_T = 1.552(5)$ MeV, 宽度 $\Gamma = 0.005(3)$ MeV的 ^{18}Na 中 2^- 态相符, 也与文献[30, 31]中得到的结果一致. 位于 $E_T = 1.97(2)$ MeV, 宽度为 $\Gamma = 0.32(4)$ MeV的第3个共振峰可能来自该能量区域中的三个已知共振态(0_1^- , 1_2^- , 3_1^-)的叠加^[28, 29], 其宽度最接近 0_1^- 态的本征宽度. 如图2(b)中内插图所示, 这三个共振态均衰变到 ^{17}Ne 的基态.

3 ^{20}Mg 双质子衰变研究

作为质子滴线核, ^{20}Mg 的基态 0_1^+ 态与第1激发态 2_1^+ 态为束缚态, 此前人们在实验上只观测到两个高于其双质子分离阈($S_{2p} = 2.418(2)$ MeV^[33])的共振

结构, 分别位于 $E^* = 3.7(2)$ 和 $5.37(2)$ MeV, 其中第1个共振结构被认为可能来自 ^{20}Mg 的 4_1^+ 和 2_2^+ 两个共振态的叠加[34]. 我们通过 ^{20}Mg 在 ^9Be 靶上的非弹激发布居了 ^{20}Mg 的双质子发射共振态, 利用实验测得的 $^{18}\text{Ne} + 2p$ 事件, 构建了 ^{20}Mg 的衰变能谱, 如图3所示[20]. 通过拟合实验能谱, 得到了 ^{20}Mg 的4个共振态的能量及宽度信息. 借助更高的分辨能力, 新结果很好地区分开了文献[34]中看到的位于 $E^* = 3.7(2)$ MeV处的叠加共振结构, 并通过与文献[34]中的壳模型计算结果以及镜像核 ^{20}O 的能级结构[35]进行对比, 指认看到的前两个共振态分别为 ^{20}Mg 的 4_1^+ 和 2_2^+ 态, 能量分别为 $E_T = 0.930(2)$ 和 $1.468(5)$ MeV[20].

为了研究 ^{20}Mg 的 4_1^+ 和 2_2^+ 态的 $2p$ 衰变机制, 通过对图3中能量范围G1和G2开窗, 我们分析了其 $^{18}\text{Ne} + 1p$ 子系统的衰变能谱[20], 分别如图4(a)和(b)所示. 对位于 $E_T = 0.930$ MeV的 4_1^+ 态, 其 $^{18}\text{Ne} + 1p$ 子系统谱中清晰地出现了0.315和0.615 MeV两个峰, 其中能量较低的0.315 MeV峰很好地对应了 ^{19}Na 基态的 $1p$ 衰变能(见图4(a)中内插图), 因此可以确认 ^{20}Mg 的 4_1^+ 态主要发生级联 $2p$ 衰变, 第1步衰变到 ^{19}Na 基态, 随后该中间态再衰变到束缚的 ^{18}Ne 基态. 图4(a)中的红色曲线给出了该衰变路径的蒙特卡罗模拟结果, 与实验符合很好. 位于 $E_T = 1.468$ MeV的 2_2^+ 态则具有不同的衰变路径. 图4(b)给出了 ^{20}Mg 的第2个共振态 2_2^+ 态的 $^{18}\text{Ne} + 1p$ 子系统能谱, 可以看到位于0.467和1.001 MeV的两个峰. 它

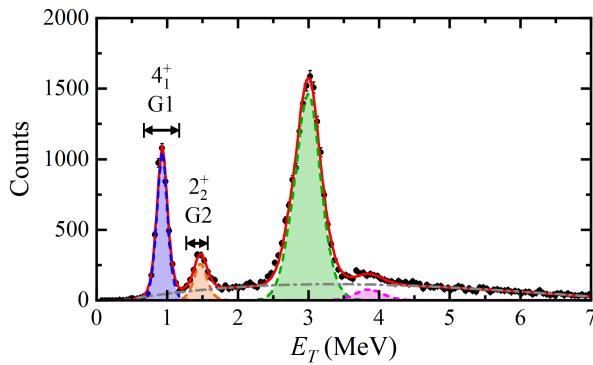


图3 (网络版彩色)所有 $^{18}\text{Ne} + 2p$ 事件的衰变能谱[20]. 红色实线表示完整的拟合谱, 包含了各个共振态(虚线)和平滑本底(灰色点虚线)的贡献

Figure 3 (Color online) Decay energy E_T spectrum for all detected $^{18}\text{Ne} + 2p$ events[20]. The solid-red curve shows the fitted spectrum along with the contributions of each states (dashed curves) and the smooth background (dashed-dotted-grey curve)

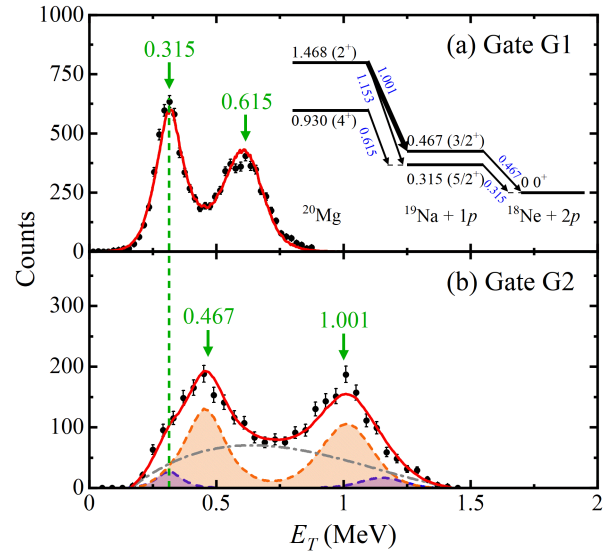


图4 (网络版彩色)对 ^{20}Mg 的(a) $E_T = 0.930$ MeV (G1)和(b) 1.468 MeV (G2)共振态开窗得到的 $^{18}\text{Ne} + 1p$ 子系统的衰变能谱[20]. 假设 ^{20}Mg 的共振态分别经过 ^{19}Na 的 $E_T = 0.315$ MeV态(蓝色虚线)和 $E_T = 0.467$ MeV态(橙色虚线)发生级联 $2p$ 衰变. 红色曲线表示考虑不同衰变分支和本底的总拟合结果. 由于图3中 $E_T = 1.468$ MeV态开窗范围(G2)内的本底占比相对较高, 因此在(b)中加入了平滑本底(灰色点虚线). 绿色竖虚线、箭头和数字表示了相应的衰变能, 单位为MeV. (a)中的内插图显示了 ^{20}Mg 前两个共振态的主要衰变路径. 能级上方的值分别表示 ^{20}Mg 和 ^{19}Na 的各共振态相对 $2p$ 和 $1p$ 分离阈值的能量, 单位为MeV. 其中 ^{19}Na 中间态的能量与现有实验结果[36~38]相符. 内插图中的蓝色数字表示对应能级间 $1p$ 衰变的衰变能, 单位为MeV. 较粗的箭头代表 ^{20}Mg 的 $E_T = 1.468$ MeV态的主要衰变分支

Figure 4 (Color online) Decay energy E_T spectra for the $^{18}\text{Ne} + 1p$ subsystem with the gates on (a) $E_T = 0.930$ MeV (G1), and (b) 1.468 MeV (G2) resonant states in ^{20}Mg [20]. Red lines are the results of simulations, assuming sequential $2p$ decay for the resonant states in ^{20}Mg resulting from decay paths through the state at $E_T = 0.315$ MeV in ^{19}Na (dashed-blue curve) and the state at $E_T = 0.467$ MeV in ^{19}Na (dashed-orange curve). A smooth background (dashed-dotted-grey curve) is added in (b) because of the relatively high background contribution under the $E_T = 1.468$ MeV state as shown in Fig. 3. The green arrows with numbers and dashed-green vertical line show the positions of decay energies in MeV. The inset in (a) shows the main decay paths of the first two resonant states in ^{20}Mg . The energies of the states in ^{20}Mg and ^{19}Na relative to the $2p$ and $1p$ thresholds, respectively, are listed on the levels in MeV. The energies of the intermediate states in ^{19}Na are consistent with the available experimental results[36~38]. The blue numbers in the inset are the $1p$ decay energies in MeV between the corresponding states. The bold arrow is the main decay branch of the $E_T = 1.468$ MeV state in ^{20}Mg

们对应以 $E_T = 0.467$ MeV的 ^{19}Na 第1激发态为中间态的级联 $2p$ 衰变过程(见图4(a)中内插图). 与其基态一样, ^{19}Na 的第1激发态随后也会衰变到 ^{18}Ne 基态. 对该子系统能谱的进一步分析表明 ^{20}Mg 的 2_2^+ 态还存在少量经过 ^{19}Na 基态的级联衰变分支(图4(b)中蓝色虚线). 从上

面的分析可以看出, ^{20}Mg 的前两个共振态不同的自旋宇称(4_1^+ 与 2_2^+)与它们不同的衰变路径是相符的: 即较高自旋的 4_1^+ 态倾向于衰变到 ^{19}Na 的($5/2^+$)基态, 而较低自旋的 2_2^+ 态则主要衰变到 ^{19}Na 的($3/2^+$)第1激发态. 位于 $E_T = 3.008\text{ MeV}$ 的 ^{20}Mg 第3共振态与第1共振态 4_1^+ 态类似, 也主要经过 ^{19}Na 基态发生级联 $2p$ 衰变, 这里不再详述.

4 ^{21}Al 三质子衰变研究

最近, Kostyleva等人^[39]采用飞行衰变法观察到了 ^{21}Al 中包括基态在内的两个共振态 $5/2^+$ 态和 $3/2^+$ 态, 二者均通过发射1个质子衰变到 ^{20}Mg 基态. 受限与实验统计, 文献^[39]中得到的 $\theta(^{20}\text{Mg} - p)$ 角关联谱中没有看到更高的共振态. 考虑到 ^{20}Mg 的双质子分离能仅为 $S_{2p} = 2.418(2)\text{ MeV}$ ^[33], ^{21}Al 的高激发共振态可能成为三质子非束缚态, 经过 ^{20}Mg 的双质子非束缚态发生三质子衰变. 我们通过 ^{20}Mg 在 ^9Be 靶上的转移反应布居了 ^{21}Al 的高激发共振态, 利用 $^{18}\text{Ne} + 3p$ 事件对 ^{21}Al 的三质子衰变态进行了研究^[21]. 图5给出了通过 $^{18}\text{Ne} + 3p$ 事件进行不变质量重建得到的 ^{21}Al 三质子衰变能谱^[21]. 可以看到三个峰结构, 其中第1个共振峰最为显著. 通过对实验能谱进行拟合, 提取了三个共振态的衰变能和本征宽度. 对于其中最显著的 $E_T = 4.85(5)\text{ MeV}$ 共振态, 通过分析其反应过程中的动能分布, 确认该共振态的布居机制与单质子转移反应一致. 结合使用价空间的介质相似重整化群方法的第一性原理(*ab initio* valence-space in-medium similarity renormalization group, *ab initio* VS-IMSRG)计算得到的能级结构与组分信息^[40,41]和扭曲波玻恩近似(distorted-wave Born approximation, DWBA)方法计算出的单质子转移截面, 我们将 ^{21}Al 的 $E_T = 4.85(5)\text{ MeV}$ 共振态的自旋宇称指认为 $(1/2^+ - 7/2^+)$ ^[21].

利用图5中的能量范围G1选出了 $E_T = 4.85(5)\text{ MeV}$ 共振态事件, 得到了其 $^{18}\text{Ne} + 1p$ 和 $^{18}\text{Ne} + 2p$ 子系统的衰变能谱^[21], 如图6(a)和(b)所示. 图6(a)中出现了三个峰, 分别对应经过 ^{20}Mg 的 $E_T = 3.008\text{ MeV}$ 中间态的三步级联衰变的 $1p$ 衰变能, 来自 $1.84\text{ MeV} \rightarrow 2.693\text{ MeV} \rightarrow 0.315\text{ MeV}$ 这一衰变路径(见图7), 表明这个共振态具有显著的由三步级联 $1p$ 衰变构成的衰变分支, 最

终衰变到 ^{18}Ne 基态. 此外, 图6(a)在 3.92 和 0.615 MeV 附近的计数对应经过 ^{20}Mg 的 $E_T = 0.930\text{ MeV}$ 中间态的级联衰变, 显示另一条衰变路径 $3.92\text{ MeV} \rightarrow 0.615\text{ MeV} \rightarrow 0.315\text{ MeV}$ 也有少量贡献.

对于 $^{18}\text{Ne} + 2p$ 子系统, 上述主要衰变路径中的3个 $1p$ 衰变能两两组合会形成3个加和峰, 分别为 2.16 MeV ($0.315 + 1.84$), 3.008 MeV ($0.315 + 2.693$)和 4.53 MeV ($1.84 + 2.693$). 在图6(b)中可以清晰地看到这3个加和峰. 此外, 0.930 MeV ($0.615 + 0.315$)处的小峰反映了另一条次要衰变路径($3.92\text{ MeV} \rightarrow 0.615\text{ MeV} \rightarrow 0.315\text{ MeV}$)的贡献. 图6(a)和(b)中的红色实线给出了对这两条级联 $3p$ 衰变路径进行蒙特卡罗模拟所得到的结果, 可以看到模拟结果很好地重现了两个子系统的实验能谱^[21].

在直接 $2p$ 衰变中, 两个质子与剩余核的相对能通常近似相等, 使得势垒穿透因子的乘积最大化^[42~45]. 因此, 我们预期如果 ^{21}Al 的 $E_T = 4.85(5)\text{ MeV}$ 共振态存在直接 $3p$ 衰变分支, 其3个质子与剩余核的相对能也应近似相等. 对应到图6(a)和(b)所示的 $^{18}\text{Ne} + 1p$ 和 $^{18}\text{Ne} + 2p$ 子系统能谱中, 应分别在总衰变能的 $1/3$ 和 $2/3$ 处(图中绿色箭头所示位置)成峰. 对于 ^{21}Al 的 $E_T = 4.85(5)\text{ MeV}$ 共振态, 由图6(a)和(b)可以看到, 直接 $3p$ 衰变不是其主要的衰变模式, 然而目前的实验结果无法完全排除该分支存在的可能性^[21].

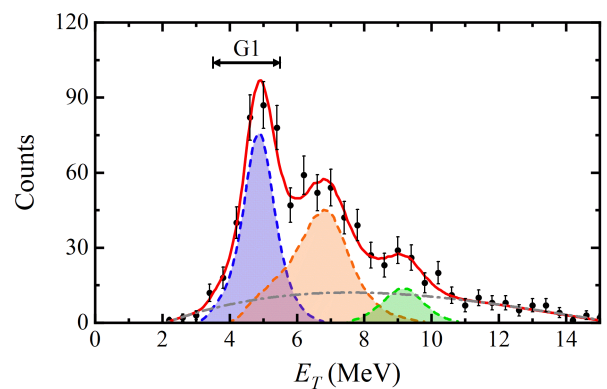


图5 (网络版彩色)所有 $^{18}\text{Ne} + 3p$ 事件的衰变能谱^[21]. 红色实线表示完整的拟合谱, 包含了各个共振态(虚线)和平滑本底(灰色点虚线)的贡献

Figure 5 (Color online) Decay energy E_T spectrum for all detected $^{18}\text{Ne} + 3p$ events^[21]. The solid-red curve shows the fitted spectrum along with the contributions of each states (dashed curves) and the smooth background (dashed-dotted-grey curve)

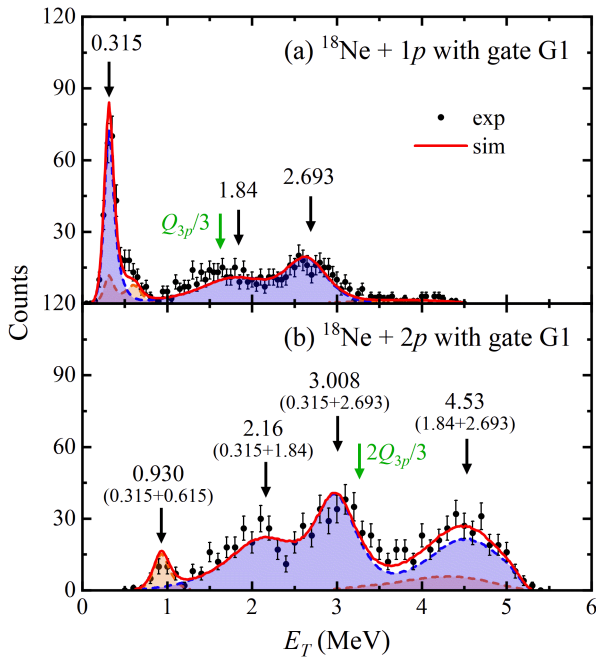


图 6 (网络版彩色)对 ^{21}Al 的 $E_T = 4.85(5)$ MeV共振态开窗(G1)得到的(a) $^{18}\text{Ne} + 1p$ 和(b) $^{18}\text{Ne} + 2p$ 子系统的衰变能谱^[21]. 通过假定 ^{21}Al 的 $E_T = 4.85(5)$ MeV共振态发生三步级联 $1p$ 衰变,得到了红色曲线所示的总拟合结果,它包含了经过不同 ^{20}Mg 中间态的模拟结果(蓝色虚线对应经过 $E_T = 3.008$ MeV中间态的衰变路径;橙色虚线对应经过 $E_T = 0.930$ MeV中间态的衰变路径).黑色箭头与数字标出了(a)中的 $1p$ 衰变能与(b)中的两个 $1p$ 衰变能(括号中数字)之和的位置,单位为MeV. (a)和(b)中的绿色箭头分别位于 ^{21}Al 的 $E_T = 4.85(5)$ MeV共振态的总衰变能的 $1/3$ 和 $2/3$ 处,对应直接 $3p$ 衰变时的能谱峰位

Figure 6 (Color online) Decay energy E_T spectra for the (a) $^{18}\text{Ne} + 1p$ and (b) $^{18}\text{Ne} + 2p$ subsystems with the gate G1 on the $E_T = 4.85(5)$ MeV resonant state in ^{21}Al ^[21]. Red lines are the results of simulations, assuming a three-sequential-steps of $1p$ decay for the resonant state at $E_T = 4.85(5)$ MeV in ^{21}Al and consisting of simulated results passing through different states in ^{20}Mg (dashed-blue curve corresponds to the decay path via the intermediate state at $E_T = 3.008$ MeV in ^{20}Mg ; dashed-orange curve corresponds to the decay path via the intermediate state at $E_T = 0.930$ MeV in ^{20}Mg). The black arrows with numbers show the positions of (a) $1p$ decay energies and (b) summed energies of two $1p$ decay energies (in bracket) in MeV. The green arrows are located at (a) one-third and (b) two-thirds of the total decay energy of the resonant state at $E_T = 4.85(5)$ MeV in ^{21}Al , where the corresponding distribution should peak for prompt $3p$ decay

近期, Xu等人^[14]采用飞行衰变法, 实验上首次观察到了相较 ^{21}Al 更远离质子滴线的新核素 ^{20}Al , 并确定了其基态的衰变模式. 同样作为三质子衰变共振态, ^{20}Al 基态表现出了独特的三质子衰变机制. 不同于本次实验中观察到的 ^{21}Al 的 $E_T = 4.85(5)$ MeV共振态主要发生三步级联的 $1p$ 衰变, ^{20}Al 基态先发射1个质子到 ^{19}Mg 基态, 而后同时发射2个质子直接衰变到 ^{17}Ne 基

态^[14]. 对其衰变过程进一步开展实验和理论研究, 将增进我们对质子滴线区原子核的奇异衰变模式的认识.

5 ^{18}Mg 四质子衰变研究

最近, 我们在实验上首次观察到超出质子滴线两个中子的新核素 ^{18}Mg ^[17, 46], 这也是目前观察到的第2例四质子非束缚核. 利用实验测到的所有 $^{14}\text{O} + 4p$ 符合事件, 构建了 ^{18}Mg 的不变质量谱^[17], 如图8所示. 谱中两个明显的峰结构分别对应 ^{18}Mg 的两个共振态. 通过对实验能谱进行拟合, 得到了 ^{18}Mg 基态和激发态的衰变能与本征宽度, 分别为 $E_T = 4.865(34)$ MeV, $\Gamma = 115(100)$ keV和 $E_T = 6.71(14)$ MeV, $\Gamma = 266(150)$ keV. 结合镜像核 ^{18}C 和 $^{20, 22}\text{Mg}$ 同位素中 2_1^+ 态的系统性演化规律, 指认了观察到的激发态为 ^{18}Mg 的 2_1^+ 态^[17].

为了研究 ^{18}Mg 基态和 2_1^+ 态四质子衰变的具体机制, 我们在每个测量到的 $^{14}\text{O} + 4p$ 符合事件中, 从4个质子里随机挑选2个计算 $^{14}\text{O} + 2p$ 子系统的相对能, 得到它与 $^{14}\text{O} + 4p$ 系统相对能的关联图. 如图9所示, 横轴对应 $^{14}\text{O} + 4p$ 系统的相对能 $E_T(^{14}\text{O} + 4p)$, 纵轴

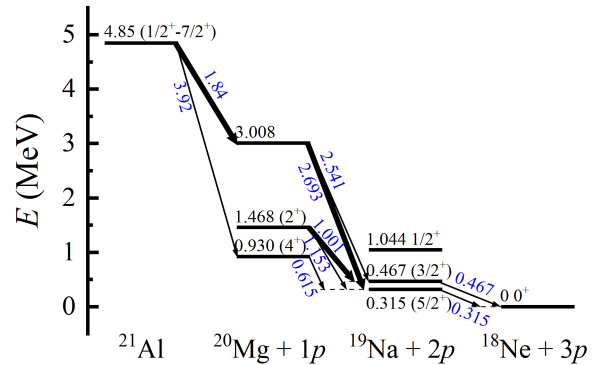


图 7 (网络版彩色) ^{21}Al 的 $E_T = 4.85(5)$ MeV共振态的主要衰变路径^[21]. 在能级上方分别给出了 ^{21}Al , ^{20}Mg 和 ^{19}Na 的各共振态相对 $3p$, $2p$ 和 $1p$ 分离阈值的能量, 单位为MeV. 其中 ^{20}Mg 与 ^{19}Na 中间态的能量与现有实验结果^[20, 36–38]相符. 蓝色数字表示对应能级间 $1p$ 衰变的衰变能, 单位为MeV. 对于具有两条衰变分支的能级, 其主要的衰变分支由较粗的箭头表示

Figure 7 (Color online) Main decay paths of the resonant state at $E_T = 4.85(5)$ MeV in ^{21}Al ^[21]. The energies of the states in ^{21}Al , ^{20}Mg , and ^{19}Na relative to the $3p$, $2p$, and $1p$ thresholds, respectively, are listed on the levels in MeV. The energies of the intermediate states in ^{20}Mg and ^{19}Na are consistent with the available experimental results^[20, 36–38]. The blue numbers are the $1p$ decay energies in MeV between the corresponding states. The bold arrows are the main decay path among the two decay paths of corresponding states

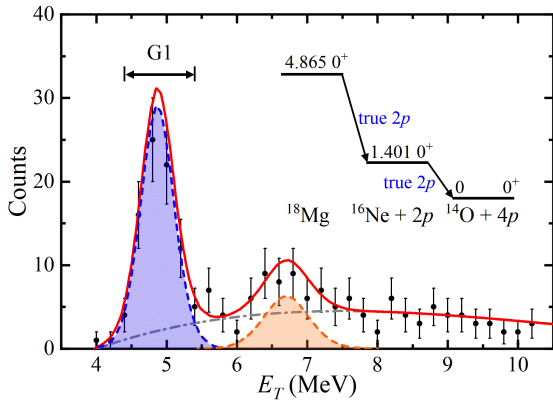


图 8 (网络版彩色)所有 $^{14}\text{O} + 4p$ 事件的衰变能谱^[17]. 图中的红色实线表示完整的拟合谱, 包含了各个共振态(虚线)和平滑本底(灰色点虚线)的贡献. 内插图展示了 ^{18}Mg 基态的主要衰变路径. 在能级上方分别给出了 ^{18}Mg 和 ^{16}Ne 的各共振态相对 $4p$ 和 $2p$ 阈值的能量, 单位为MeV. 其中, ^{18}Mg 和 ^{16}Ne 共振态的能量来自文献^[17]和NNDC (<https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>)

Figure 8 (Color online) Decay energy E_T spectrum for all detected $^{14}\text{O} + 4p$ events^[17]. The solid-red curve shows the fitted spectrum along with the contributions of each states (dashed curves) and the smooth background (dashed-dotted-grey curve). The inset shows the main decay path of the ground state in ^{18}Mg . The energies of the states in ^{18}Mg and ^{16}Ne relative to the $4p$ and $2p$ thresholds, respectively, are listed on the levels in MeV. The energies of the resonant states in ^{18}Mg and ^{16}Ne are taken from Ref. ^[17] and NNDC (<https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>)

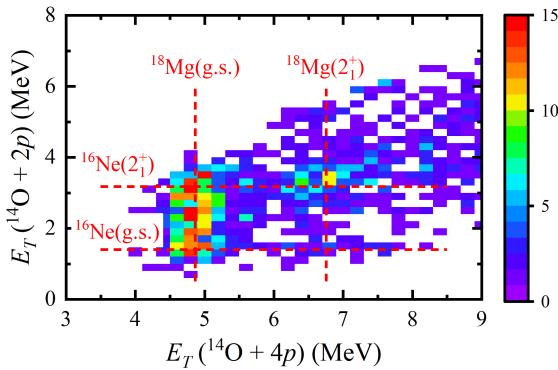


图 9 (网络版彩色) $^{14}\text{O} + 4p$ 符合事件中, $^{14}\text{O} + 2p$ 子系统相对能和 $^{14}\text{O} + 4p$ 系统相对能的关联图. 水平红线表示 ^{16}Ne 基态和 2_1^+ 态的双质子衰变能, 竖直红线表示 ^{18}Mg 基态和 2_1^+ 态的四质子衰变能

Figure 9 (Color online) Correlation between the relative energy of the $^{14}\text{O} + 2p$ subsystem and the relative energy of the $^{14}\text{O} + 4p$ system in $^{14}\text{O} + 4p$ coincidence events. Horizontal red lines indicate the two-proton decay energies for the ground and 2_1^+ states of ^{16}Ne . Vertical red lines indicate the four-proton decay energies for the ground and 2_1^+ states of ^{18}Mg

对应 $^{14}\text{O} + 2p$ 子系统的相对能 $E_T(^{14}\text{O} + 2p)$, 图中两条水平红线分别给出 $E_T(^{14}\text{O} + 2p) = 1.401$ MeV和 3.171 MeV的 ^{16}Ne 基态和 2_1^+ 态的位置, 两条竖直红线分别给出

$E_T(^{14}\text{O} + 4p) = 4.865$ MeV和 6.71 MeV的 ^{18}Mg 基态和 2_1^+ 态的位置. 从二维关联图中可以清楚看到, ^{18}Mg 基态的四质子衰变过程在对应 ^{16}Ne 基态的位置有较高的统计, 直观地说明在 ^{18}Mg 基态的衰变过程中经过了 ^{16}Ne 的基态(见图8中内插图). 此外, 在图9中可以看到双质子相对能 $E_T(^{14}\text{O} + 2p)$ 在大于 1.7 MeV处的一定能量范围内(覆盖了 ^{16}Ne 的 2_1^+ 态的位置)有一定的统计. 直接从二维谱中判断 ^{18}Mg 基态是否还经过 ^{16}Ne 的 2_1^+ 态发生衰变比较困难, 需要对 ^{18}Mg 基态子系统的一维能谱开展进一步分析.

通过对图8中的能量范围G1开窗挑选出 ^{18}Mg 基态事件, 给出了其 $^{14}\text{O} + 2p$ 子系统的相对能谱(见图10)^[17]. 需要注意的是, 从4个质子中挑选2个, 一共有6种可能的组合方式, 图10给出了所有6种组合计算出的 $^{14}\text{O} + 2p$ 子系统的相对能. 当 ^{18}Mg 基态经过 ^{16}Ne 基态进行衰变时, 其中只有1种组合给出 ^{16}Ne 基态的双质子衰变能, 而另5种组合将形成本底. 此外, 由于 ^{18}Mg 基态的第1步双质子衰变能为 3.464 MeV, 远大于第2步 ^{16}Ne 基态双质子衰变的能量 1.401 MeV, 因此5种错误组合形成的本底将主要位于能谱的较高能量处. 这在图10得到了清晰的反映, 可以看到, 在

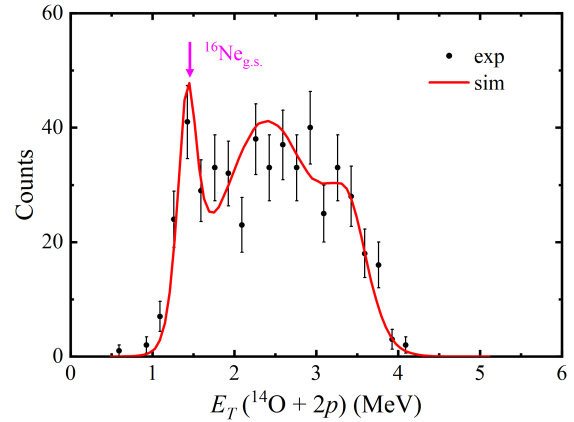


图 10 (网络版彩色)对 ^{18}Mg 基态开窗(G1)得到的 $^{14}\text{O} + 2p$ 子系统相对能谱^[17]. 通过假设 ^{18}Mg 基态经过 ^{16}Ne 基态, 通过两步级联的直接 $2p$ 发射衰变到 $^{14}\text{O} + 4p$ 末态, 得到了红色曲线所示的模拟结果. 其中衰变关联被假定与 ^{16}Ne 基态的衰变关联相同. 箭头显示了 ^{16}Ne 基态的衰变能

Figure 10 (Color online) Relative energy E_T spectrum for the $^{14}\text{O} + 2p$ subsystem with the gate G1 on $^{18}\text{Mg}_{\text{g.s.}}$ ^[17]. Red lines are the results of simulations assuming $^{18}\text{Mg}_{\text{g.s.}}$ decays to $^{14}\text{O} + 4p$ by two sequential steps of prompt $2p$ decay through $^{16}\text{Ne}_{\text{g.s.}}$, where the decay correlations are assumed to be the same as those observed for $^{16}\text{Ne}_{\text{g.s.}}$. The arrow shows the decay energy of the ground state of ^{16}Ne

低能1.4 MeV处存在一个较窄的尖峰,其能量正好为 ^{16}Ne 基态的双质子衰变能,而高能处由于5种错误的组合存在较宽的本底。

利用蒙特卡罗模拟,我们对 ^{18}Mg 基态的衰变路径进行了进一步研究^[17]。在模拟中假设 ^{18}Mg 基态以 ^{16}Ne 基态为中间态,通过两步直接 $2p$ 发射衰变到 ^{14}O 基态。模拟谱形如图10中的红色曲线所示,可以看到实验能谱与模拟结果符合得很好,支持了对其衰变路径的分析。这一衰变模式与 ^8C 类似。作为实验上发现的首例四质子衰变核, ^8C 主要通过两步级联的直接 $2p$ 发射过程,经过 ^6Be 的基态进行衰变^[16]。值得一提的是,作为四中子衰变核的 ^{28}O 同样主要通过两步级联的直接 $2n$ 发射进行衰变^[47,48],与 ^8C 和 ^{18}Mg 基态的衰变模式非常相似。此外,如上所述,在图9中对 ^{18}Mg 基态的四质子衰变能处, $^{14}\text{O} + 2p$ 子系统的相对能在2.0~3.5 MeV之间的位置也出现了明显的统计,特别是在2.4 MeV处统计较多。这在图10的一维谱中也可以被清晰地看到。在 ^{18}Mg 基态经过 ^{16}Ne 基态发生的连续两步双质子衰变过程中,第1步从 ^{18}Mg 到 ^{16}Ne 的直接双质子衰变出射的两个质子最可能各分得约1.7 MeV的衰变能,第2步从 ^{16}Ne 到 ^{14}O 的直接双质子衰变出射的两个质子则最可能各分得约0.7 MeV的衰变能,因此在随机挑选2个质子的组合时,有2/3的概率会得到 $E_T(^{14}\text{O} + 2p) \approx 1.7 + 0.7 = 2.4$ MeV的结果。因此,在2.4 MeV附近的高计数并不对应 ^{16}Ne 中某一真实共振态的能量,而是两质子错误组合形成的本底。同样,如图9所示,在 ^{18}Mg 第1激发态的四质子衰变能处,可以发现 $^{14}\text{O} + 2p$ 子系统的相对能在3.4 MeV附近有一定的计数。无论 ^{18}Mg 第1激发态是通过 ^{16}Ne 基态发生两步直接双质子发射,还是经过 ^{16}Ne 的第1激发态衰变,随机挑选的2个质子的组合都有很大的概率出现在3.4 MeV处。由于实验得到的 ^{18}Mg 第1激发态的统计不高,因此目前对图9中二维谱的分析,很难确定其经过 ^{16}Ne 的哪一个共振态发生衰变,需要未来进一步的实验研究。

6 总结与展望

滴线区极端同位旋条件下原子核的奇异衰变和结构研究对人们认识原子核新规律、发展新理论起到了关键的作用,一直是核物理领域非常活跃的前沿研究方向之一。相较于单核子发射,多体发射问题的复杂性使得目前人们对滴线区原子核的结构与衰变机制的认识尚不全面。本文主要介绍了我们近期开展的对 $A \sim 20$ 质子滴线区原子核的质子衰变研究的部分实验结果。利用不变质量法,研究了 ^{18}Na 的单质子衰变、 ^{20}Mg 激发态的双质子衰变、 ^{21}Al 的三质子衰变和 ^{18}Mg 的四质子衰变过程,构建了这四个原子核的衰变能谱。确定了 ^{18}Na 基态的位置,澄清了此前在 ^{18}Na 基态指认过程中存在的争议;在 ^{20}Mg 和 ^{21}Al 中分别发现了4个双质子共振态和3个三质子共振态;首次在实验上观察到了超出质子滴线两个中子的新核素 ^{18}Mg 。通过对 ^{20}Mg 、 ^{21}Al 和 ^{18}Mg 的多质子衰变过程中的衰变产物的关联分析,结合蒙特卡罗模拟指认了这些共振态的质子衰变机制,发现 ^{20}Mg 和 ^{21}Al 的共振态分别主要通过两步和三步级联的 $1p$ 发射进行衰变,而 ^{18}Mg 的基态主要通过两步级联的直接 $2p$ 发射进行衰变。

需要指出的是,目前实验上还没有观察到3个及以上数目的质子同时发射的现象,所有已知的多质子(≥ 3)衰变过程都可以被约化为多步连续发生的 $1p$ 或 $2p$ 衰变过程。更多数目的质子同时发射的现象是否存在,其内在机制与目前观察到的 $1p$ 或 $2p$ 衰变过程有何差异,将成为未来质子衰变研究的重要问题之一。事实上,相较于中子滴线区,目前质子滴线区原子核衰变和结构的实验信息要少很多。随着新一代放射性束流装置的建成运行以及实验技术的进一步发展,特别是探测装置探测效率和分辨本领的提高,研究对象将向滴线外更远的位置延伸,这将对人们发现并理解新的奇异衰变模式,研究滴线区原子核的结构与多体量子关联提供全新的机遇。

参考文献

- Goldansky V. On neutron-deficient isotopes of light nuclei and the phenomena of proton and two-proton radioactivity. Nucl Phys, 1960, 19: 482–495
- Zel'dovich Y B. The existence of new isotopes of light nuclei and the equation of state of neutrons. Sov Phys JETP, 1960, 38: 812

- 3 Blank B. One- and two-proton radioactivity. *Lect Notes Phys*, 2009, 764: 153
- 4 Pfützner M, Karny M, Grigorenko L V, et al. Radioactive decays at limits of nuclear stability. *Rev Mod Phys*, 2012, 84: 567–619
- 5 Giovinazzo J, Blank B, Chartier M, et al. Two-proton radioactivity of ^{45}Fe . *Phys Rev Lett*, 2002, 89: 102501
- 6 Pfützner M, Badura E, Bingham C, et al. First evidence for the two-proton decay of ^{45}Fe . *Eur Phys J A*, 2002, 14: 279
- 7 Wamers F, Marganec J, Aksouh F, et al. First observation of the unbound nucleus ^{15}Ne . *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 132502
- 8 Mukha I, Grigorenko L V, Xu X, et al. Observation and spectroscopy of new proton-unbound isotopes ^{30}Ar and ^{29}Cl : an interplay of prompt two-proton and sequential decay. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 202501
- 9 Goigoux T, Ascher P, Blank B, et al. Two-proton radioactivity of ^{67}Kr . *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 162501
- 10 Webb T B, Wang S M, Brown K W, et al. First observation of unbound ^{11}O , the mirror of the halo nucleus ^{11}Li . *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 122501
- 11 Charity R J, Elson J M, Manfredi J, et al. Investigations of three-, four-, and five-particle decay channels of levels in light nuclei created using a ^9C beam. *Phys Rev C*, 2011, 84: 014320
- 12 Charity R J, Webb T B, Elson J M, et al. Observation of the exotic isotope ^{13}F located four neutrons beyond the proton drip line. *Phys Rev Lett*, 2021, 126: 132501
- 13 Brown K W, Charity R J, Elson J M, et al. Proton-decaying states in light nuclei and the first observation of ^{17}Na . *Phys Rev C*, 2017, 95: 044326
- 14 Xu X D, Mukha I, Li J G, et al. Isospin symmetry breaking disclosed in the decay of three-proton emitter ^{20}Al . *Phys Rev Lett*, 2025, 135: 022502
- 15 Kostyleva D, Mukha I, Acosta L, et al. Towards the limits of existence of nuclear structure: observation and first spectroscopy of the isotope ^{31}K by measuring its three-proton decay. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 092502
- 16 Charity R J, Elson J M, Manfredi J, et al. $2p$ - $2p$ decay of ^8C and isospin-allowed $2p$ decay of the isobaric-analog state in ^8B . *Phys Rev C*, 2010, 82: 041304
- 17 Jin Y, Niu C Y, Brown K W, et al. First observation of the four-proton unbound nucleus ^{18}Mg . *Phys Rev Lett*, 2021, 127: 262502
- 18 Charity R J, Wylie J, Wang S M, et al. Strong evidence for ^9N and the limits of existence of atomic nuclei. *Phys Rev Lett*, 2023, 131: 172501
- 19 Ni L, Jin Y, Li Z H, et al. Resonant structure of ^{18}Na and the $N = 8$ shell. *Phys Rev C*, 2025, 112: 024321
- 20 Ni L, Jin Y, Li Z H, et al. Neutron magicity in the proton drip-line nucleus ^{20}Mg : first invariant-mass reconstruction of $^{19,20}\text{Mg}$. *Phys Rev C*, 2024, 110: L061301
- 21 Ni L, Jin Y, Li Z, et al. Observation of three-proton-decaying resonant states in ^{21}Al . *Phys Lett B*, 2025, 868: 139660
- 22 Wei K, Ye Y L, Yang Z H. Clustering in nuclei: progress and perspectives. *Nucl Sci Tech*, 2024, 35: 216
- 23 Stolz A, Baumann T, Ginter T, et al. Production of rare isotope beams with the NSCL fragment separator. *Nucl Instrum Meth B*, 2005, 241: 858–861
- 24 Morrissey D, Sherrill B, Steiner M, et al. Commissioning the A1900 projectile fragment separator. *Nucl Instrum Meth B*, 2003, 204: 90–96
- 25 Yurkon J, Bazin D, Benenson W, et al. Focal plane detector for the S800 high-resolution spectrometer. *Nucl Instrum Meth A*, 1999, 422: 291–295
- 26 Bazin D, Caggiano J, Sherrill B, et al. The S800 spectrograph. *Nucl Instrum Meth B*, 2003, 204: 629–633
- 27 Zerguerras T, Blank B, Blumenfeld Y, et al. Study of light proton-rich nuclei by complete kinematics measurements. *Eur Phys J A*, 2004, 20: 389–396
- 28 Assié M, de Oliveira F, e521as collaboration. Spectroscopy of the unbound nucleus ^{18}Na in link with ^{19}Mg two-proton radioactivity. *AIP Conf Proc*, 2011, 1409: 93–97
- 29 Assié M, de Oliveira Santos F, Davinson T, et al. Spectroscopy of ^{18}Na : bridging the two-proton radioactivity of ^{19}Mg . *Phys Lett B*, 2012, 712: 198–202
- 30 Mukha I, Grigorenko L, Acosta L, et al. New states in ^{18}Na and ^{19}Mg observed in the two-proton decay of ^{19}Mg . *Phys Rev C*, 2012, 85: 044325
- 31 Charity R J, Brown K, Webb T, et al. Invariant-mass spectroscopy of ^{10}B , ^{11}C , ^{14}F , ^{16}F , and ^{18}Na . *Phys Rev C*, 2023, 107: 054301
- 32 Mukha I, Sümmerer K, Acosta L, et al. Observation of two-proton radioactivity of ^{19}Mg by tracking the decay products. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 182501
- 33 Wang M, Huang W, Kondev F, et al. The AME 2020 atomic mass evaluation (II). Tables, graphs and references. *Chin Phys C*, 2021, 45: 030003
- 34 Randhawa J S, Kanungo R, Holl M, et al. Observation of excited states in ^{20}Mg sheds light on nuclear forces and shell evolution. *Phys Rev C*, 2019, 99: 021301(R)
- 35 LaFrance S, Fortune H T, Mordechai S, et al. ^{20}O from $^{18}\text{O}(t,p)$. *Phys Rev C*, 1979, 20: 1673–1679
- 36 Benenson W, Guichard A, Kashy E, et al. Mass measurements of ^{19}Na and ^{23}Al using the (^3He , ^8Li) reaction. *Phys Lett B*, 1975, 58: 46–48
- 37 Angulo C, Tabacaru G, Couderc M, et al. Identification of a new low-lying state in the proton drip line nucleus ^{19}Na . *Phys Rev C*, 2003, 67: 014308
- 38 Mukha I, Sümmerer K, Acosta L, et al. Spectroscopy of proton-unbound nuclei by tracking their decay products in-flight: one- and two-proton decays of ^{15}F , ^{16}Ne , and ^{19}Na . *Phys Rev C*, 2010, 82: 054315
- 39 Kostyleva D, Xu X D, Mukha I, et al. Observation and spectroscopy of the proton-unbound nucleus ^{21}Al . *Phys Rev C*, 2024, 110: L031301
- 40 Li H H, Li J G, Xie M R, et al. *Ab initio* calculations of mirror energy difference in *sd*-shell nuclei. *Chin Phys C*, 2023, 47: 124101
- 41 Xu X Y, Fan S Q, Yuan Q, et al. Progress in *ab initio* in-medium similarity renormalization group and coupled-channel method with coupling to

the continuum. Nucl Sci Tech, 2024, 35: 215

- 42 Egorova I A, Charity R J, Grigorenko L V, et al. Democratic decay of ^6Be exposed by correlations. Phys Rev Lett, 2012, 109: 202502
- 43 Brown K W, Charity R J, Sobotka L G, et al. Observation of long-range three-body Coulomb effects in the decay of ^{16}Ne . Phys Rev Lett, 2014, 113: 232501
- 44 Webb T B, Charity R J, Elson J M, et al. Particle decays of levels in $^{11,12}\text{N}$ and ^{12}O investigated with the invariant-mass method. Phys Rev C, 2019, 100: 024306
- 45 Miernik K, Dominik W, Janas Z, et al. Two-proton correlations in the decay of ^{45}Fe . Phys Rev Lett, 2007, 99: 192501
- 46 Zhou L, Fang D Q, Wang S M, et al. Structure and $2p$ decay mechanism of ^{18}Mg . Nucl Sci Tech, 2024, 35: 107
- 47 Kondo Y, Achouri N L, Al Falou H, et al. First observation of ^{28}O . Nature, 2023, 620: 965–970
- 48 Li J G, Hu B S, Zhang S, et al. Unbound ^{28}O , the heaviest oxygen isotope observed: a cutting-edge probe for testing nuclear models. Nucl Sci Tech, 2024, 35: 21

Summary for “A ~ 20 质子滴线区原子核的质子衰变研究进展”

Progress on the proton decays of A ~ 20 nuclei around the proton drip line

Lei Ni¹, Yu Jin^{1,2}, Hui Hua^{1*} & Zhihuan Li¹

¹ School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China

² Institute of Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621907, China

* Corresponding author, E-mail: Hhua@pku.edu.cn

Experimental studies focusing on the spontaneous emission of nucleons in nuclei around the drip line have enabled us to explore new isotopes or resonant states near the drip line, and reveal exotic structures and decay properties of nuclei located far from the β stability line; consequently, these studies are of critical importance for probing limits of nuclear stability and understanding nucleon-nucleon interactions under extreme conditions of isospin asymmetry. In recent years, significant progress has been made in related research. However, there are still numerous new phenomena and mechanisms, which need further exploration. With the radioactive isotope beam ^{20}Mg provided by National Superconducting Cyclotron Laboratory at Michigan State University, we studied the proton decays of nuclei around the proton drip line at A ~ 20 mass region. Complete-kinematics measurements were performed for proton decays of one-proton resonant states in ^{18}Na , two-proton resonant states in ^{20}Mg , three-proton resonant states in ^{21}Al , and four-proton resonant states in ^{18}Mg , yielding decay energy spectra for all four nuclei with the invariant mass method. Further coincidence analysis reveals that the measured $^{17}\text{Ne} + 1p$ events may not solely originate from the $1p$ decay of ^{18}Na , but could also result from the prompt $2p$ decay of the ground state of ^{19}Mg . After the subtraction of the contamination from the $2p$ decay of ^{19}Mg , the ground state of ^{18}Na was firmly identified, clarifying previous ambiguities of its position. The new isotope ^{18}Mg , which is located two neutrons beyond the proton drip line, was experimentally observed for the first time and its ground state decay energy was found to be $E_T = 4.865(34)$ MeV. Multi-body correlation of emitted protons from ^{20}Mg , ^{21}Al , and ^{18}Mg are studied. Two new resolved states (4_1^+ and 2_2^+) in ^{20}Mg are found to decay through ^{19}Na intermediate states to the ground state of ^{18}Ne from the examination of the decay-energy spectra for $^{18}\text{Ne} + 1p$ subsystems. The decay-energy spectra for the two subsystems of ^{21}Al , i.e., $^{18}\text{Ne} + 1p$ and $^{18}\text{Ne} + 2p$, indicate that the observed resonant state with the lowest energy has decay branches consisting of three sequential steps of one-proton decay. The momentum correlations between the relative energy of the $^{14}\text{O} + 2p$ subsystem and the relative energy of the $^{14}\text{O} + 4p$ system in $^{14}\text{O} + 4p$ coincidence events, together with the relative energy E_T spectrum for the $^{14}\text{O} + 2p$ subsystem, are consistent with predominant two sequential steps of prompt $2p$ decay passing through the ground state of ^{16}Ne .

proton drip line, proton decay, invariant mass method, resonant state

doi: [10.1360/CSB-2025-5448](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5448)