



轻质子滴线区 $N = 8$ 壳演化研究进展

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, 2025-11-19修回, 2025-11-19接受, 2025-11-20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 远离 β 稳定线原子核壳结构的演化一直是放射性核束物理研究的前沿方向之一. 近期, 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的放射性束流装置提供的 ^{20}Mg 次级束, 开展了对质子滴线区Na、Mg和Al同位素的能级结构及 $N = 8$ 壳演化的研究. 实验上确定了 ^{18}Na 的基态质量, 通过单中子分离能之差的系统学讨论了质子滴线区Na同位素中 $N = 8$ 中子闭壳的稳定性. 首次观察到了新核素 ^{18}Mg , 确定了其基态和 2_1^+ 态, 指认了 ^{19}Mg 的 $1/2_1^+$ 态, 区分开了 ^{20}Mg 的 4_1^+ 与 2_2^+ 态. ^{20}Mg 的 R_{42} 接近简谐振子的预期值, 表明 ^{20}Mg 的形状为球形或仅具有较小的形变, 排除了 ^{20}Mg 中存在形变驱动的 $N = 8$ 壳减弱的可能性. 通过轻质量区能级结构的系统学分析, 表明质子滴线区Mg同位素中 $N = 8$ 闭壳的存在, 并通过价质子激发模式的差异解释了 ^{18}Mg 的 2_1^+ 态激发能反常高于 ^{20}Mg 中 2_1^+ 态的原因. 通过三质子衰变过程研究了 ^{21}Al 的能级结构, 指认了看到的首个共振态的自旋宇称. 通过 $Z(N) = 13$ 同位素(同中子素)的 $5/2^+$ 基态与最低的 $3/2^+$ 激发态的能量差系统学, 揭示了 ^{21}Al 的半幻特性.

关键词 质子滴线, 质子衰变, 核结构, 壳演化

自Mayer^[1]、Haxel、Jensen和Suess^[2]提出原子核的壳模型(shell model, SM)以来, 人们对原子核壳结构在核素图上的演化进行了大量研究^[3~5]. 随着近年来研究逐渐向远离 β 稳定线的方向拓展, 人们发现在某些区域原子核壳结构发生了显著变化, 例如在丰中子区观察到了传统幻数 $N = 8, 20, 28$ 的消失^[6~13], 以及新幻数 $N = 14, 16, 32$ 和 34 的出现^[14~27].

受丰中子区同位素链较长的影响, 实验和理论工作者对 β 稳定线丰中子一侧原子核的壳演化开展了大量的研究. 相比之下, 目前人们对丰质子一侧的认识要少得多. 其中一项重要的研究结果是在质子非束缚核 ^{12}O 中观察到了由质子-中子单极相互作用引起的 $Z = 8$ 闭壳消失^[28,29]. 此外, 利用 $^{20}\text{Mg}(d, d')$ 反应,

人们在 $^{20}\text{Mg}(N = 8)$ 中发现其可能有较大的四极形变, 认为在质子滴线核 ^{20}Mg 中 $N = 8$ 闭壳将减弱^[30]. 理论方面, 平均场^[31~41]和超越平均场^[42]计算表明 ^{20}Mg 不存在显著形变, 而忽略对关联的Hartree-Fock计算^[43]预言 ^{20}Mg 中会出现明显形变.

目前关于 $N = 8$ 闭壳在轻质量质子滴线区演化的实验信息还比较匮乏. 近期, 北京大学实验核物理研究团队开展了对 $A \sim 20$ 轻质子滴线区原子核的质子衰变与壳演化的实验研究^[45~48]. 采用不变质量法, 重建了滴线区原子核 ^{18}Na 、 ^{18}Mg 、 ^{19}Mg 、 ^{20}Mg 和 ^{21}Al 的衰变能谱, 通过对该质量区原子核结构特点的系统分析并结合理论计算, 讨论了质子滴线区Na、Mg和Al同位素中 $N = 8$ 中子闭壳的演化.

引用格式: 倪磊, 金瑜, 华辉, 等. 轻质子滴线区 $N = 8$ 壳演化研究进展. 科学通报, 2026, 71: 1003–1016
Ni L, Jin Y, Hua H, et al. Progress on evolution of $N = 8$ shell around the light proton drip line (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 1003–1016, doi: 10.1360/CSB-2025-5449

1 实验设置

本次实验在美国密歇根州立大学的国家超导回旋加速器实验室(National Superconducting Cyclotron Laboratory, NSCL)完成. 实验用到的束流线和实验装置如图1所示. 采用NSCL实验室的两个回旋加速器将初级束 ^{24}Mg 加速到170 MeV/u, 流强为 5.2×10^{11} pps, 然后入射到7 mm厚的初级 ^9Be 靶上, 通过弹核破裂反应产生次级束, 并利用A1900放射性束流线^[44,49]筛选出 ^{20}Mg 次级束, 其中位于A1900束流线焦平面的XFP塑料闪烁体和S800分析线入口处的OBJ塑料闪烁体被用于给出次级束粒子鉴别的飞行时间. 能量为103 MeV/u, 流强为5600 pps, 纯度为31%的 ^{20}Mg 束流经过S800磁谱仪的分析线入射到次级 ^9Be 靶上, 布居了 ^{18}Na 、 ^{18}Mg 、 ^{19}Mg 、 ^{20}Mg 和 ^{21}Al 等多个质子滴线区原子核的共振态. 它们生成后迅速在靶内发生衰变, 通过对出射的衰变产物进行多体符合测量, 利用不变质量法重建了它们的衰变能谱.

对衰变产物的测量分两部分进行. 对质子的探

测主要使用环形双面硅微条探测器(Annular Double-sided Silicon Strip Detector, ADSSD)和20块5 cm厚的CsI(Tl)闪烁体构成的环形阵列. 二者组成 $\Delta E-E$ 望远镜探测系统, 给出质子的位置和能量信息. 实验中采用的ADSSD正背面各分为128条, 厚度为1.014 mm, 覆盖实验室系下 $1.2^\circ \sim 10.1^\circ$ 的角度范围. 衰变剩余核出射角很小, 从靶出射后, 会穿过望远镜阵列中心直径为10 mm的小孔, 然后由一个位置灵敏的闪烁光纤阵列给出其位置信息. 随后, 剩余核进入S800磁谱仪, 进行粒子鉴别和能量测量^[50,51].

2 Na同位素中 $N=8$ 壳演化

目前人们对丰质子的Na同位素中 $N=8$ 壳是否保持尚无定论. 考虑到中子幻数附近奇 N 核的能级结构可以提供相应壳隙的重要信息, 我们通过 ^{20}Mg 束流在 ^9Be 靶上的核子敲出反应产生了超出质子滴线两个中子的非束缚核 ^{18}Na , 并对 ^{18}Na 共振态的单质子衰变过程开展了研究^[45].

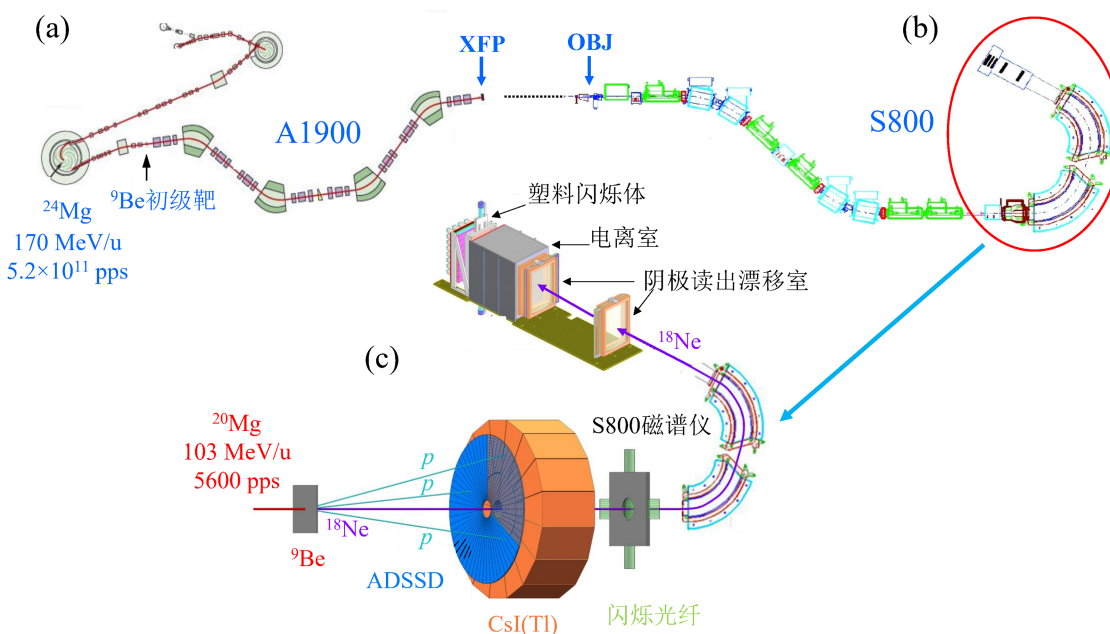


图1 (网络版彩色)束流线和实验装置图. (a) 耦合回旋加速器装置和A1900放射性次级束流线, 修改自文献[44]; (b) S800磁谱仪, 修改自S800网站(<https://wikihost.nsl.msui.edu/S800Doc/doku.php?id=introduction>); (c) 靶室探测阵列与S800焦平面探测阵列, 修改自S800网站(<https://wikihost.nsl.msui.edu/S800Doc/doku.php?id=detectors>)

Figure 1 (Color online) Beam line and experimental setup. (a) Coupled cyclotron facility and the A1900 fragment separator, modified from Ref. [44]; (b) S800 spectrograph, modified from S800 website (<https://wikihost.nsl.msui.edu/S800Doc/doku.php?id=introduction>); (c) target chamber detector array and S800 focal plane detector array, modified from S800 website (<https://wikihost.nsl.msui.edu/S800Doc/doku.php?id=detectors>)

此前的实验已经观察到 ^{18}Na 中的一些共振态^[52~56],但对于其基态的指认仍存在一定争议^[52,55]. Zerguerras等人^[52]利用 ^{20}Mg 束流与 ^9Be 靶的核子敲出反应,首次在实验上观察到了 ^{18}Na . 实验通过对 $^{17}\text{Ne} + 1p$ 事件进行不变质量重建,在谱中观察到了两个可能对应 ^{18}Na 基态的峰, $^{17}\text{Ne} + 1p$ 相对能分别为 $E_T = 0.42(17)$ 和 $1.27(17)$ MeV^[52]. 在随后的另一项实验研究中, Mukha等人^[55]使用了相同的弹靶组合,利用飞行衰变法对 ^{18}Na 进行了研究. 通过分析 ^{19}Mg 低激发态的双质子衰变事件的 p - ^{17}Ne 角关联,观察到了 $E_T = 1.23(15)$ 和 $1.55(7)$ MeV两个 ^{18}Na 共振态,自旋宇称分别被确定为 1^- 和 2^- ,其中第1个共振态 1^- 被认为可能是 ^{18}Na 基态,但没有看到文献^[52]中观察到的 $E_T = 0.42(17)$ MeV的能谱结构,也未对此现象做出解释^[55]. 另两项实验工作^[53,54,56]分别利用 $^{17}\text{Ne} + 1p$ 的共振弹性散射反应和 ^{17}Ne 束流与 ^9Be 靶的质子转移反应产生 ^{18}Na ,但都只测到了 ^{18}Na 的激发态,没有获得基态的信息.

图 2(a)展示了我们利用本次实验中得到的 $^{17}\text{Ne} + 1p$ 事件重建出的不变质量谱(图中红色数据点)^[45],其中 $E_T \approx 0.4$ MeV处的共振峰结构与文献^[52]中报道的位于 $E_T = 0.42(17)$ MeV的峰结构一致. 但是进一步的符合分析表明实验测量到的一部分 $^{17}\text{Ne} + 1p$ 事件可能来自 ^{20}Mg 敲出反应生成的 ^{19}Mg 的 $2p$ 衰变^[47,59]带来的干扰. 本实验和文献^[52]中看到的 $E_T \approx 0.4$ MeV峰结构实际上来自 ^{19}Mg 基态发生直接 $2p$ 衰变后仅探测到了其中一个质子和 ^{17}Ne 符合的事件. 图 2(b)给出了扣除 ^{19}Mg 衰变事件干扰后的 ^{18}Na 的衰变能谱^[45]. 使用蒙特卡罗模拟实验分辨和探测效率后得到的Breit-Wigner共振峰形对能谱进行拟合,提取出了包括基态在内的三个 ^{18}Na 共振态的能量与本征宽度,结果见表 1,其中 ^{18}Na 基态的 $1p$ 衰变能为 $1.38(2)$ MeV.

利用实验确定的 ^{18}Na 基态的 $1p$ 衰变能,得到其质量过剩为 $\Delta = 25.17(2)$ MeV^[45]. 结合已知的 ^{19}Na 基态质量 $\Delta = 12.929(11)$ MeV^[57],确定了 ^{19}Na 的单中子分离能为 $S_n(^{19}\text{Na}) = 20.31(2)$ MeV. 由于单中子分离能之差 $\Delta S_n(N) = S_n(N) - S_n(N+1)$ 可以较好反映壳隙大小^[3],图 3中给出了Na同位素链和邻近同位素链($9 \leq Z \leq 12$)的 $\Delta S_n(N)$ 演化系统学(实心点)^[45]. 图中Ne和Mg同位素的 ΔS_n 值均在 $Z = N$ 处有极大值,这

是因为 $T = 0$ 的中子-质子对关联较强,Wigner能的作用使得中子数与质子数近似相等的原子核具有较大的结合能^[60]. 为了更好地理解壳结构对 $\Delta S_n(N)$ 演化的影响,我们使用文献^[61~63]中提出的方法,扣除了Wigner能的贡献,在图 3中将扣除后的质分离能差以空心点的形式给出. 可以看到,在 $N = 20$ 处,四条同位素链的 ΔS_n 都很小,反映了这些原子核中 $N = 20$ 中子闭壳的消失^[3,5,7,58,64~70]. 在 $N = 8$ 处,F和Ne同位素的 ΔS_n 显著增加,表明了其 $N = 8$ 幻数的稳定性. 此外,在 $N = 6$ 处,F和Ne同位素的 ΔS_n 也都呈现较高值,这可能与轻核中自旋-轨道(spin-orbit, SO)耦合相互作用的强度演化有关. 事实上,文献^[71]中发现在丰中子区, $Z = 6$ 的幻数与其他来自SO效应的经典幻数同样显著. 因此,F和Ne同位素链中 $N = 6$ 处较大的 ΔS_n 可能预示着在丰质子区,在SO耦合相互作用下也会形成类似的 $N = 6$ 的新幻数.

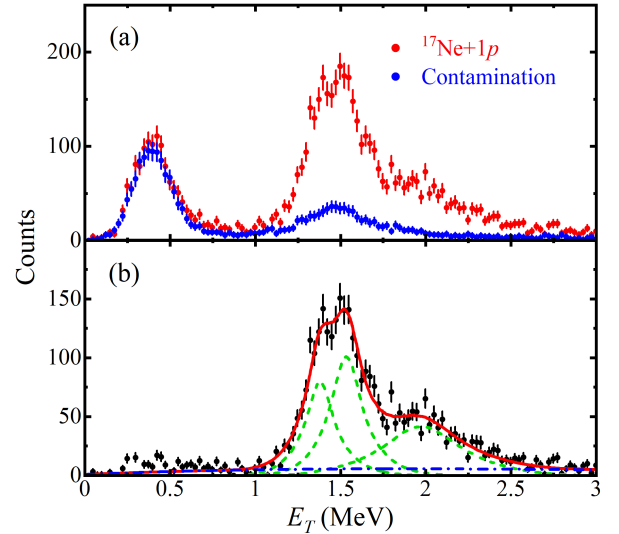


图 2 (网络版彩色)(a) 所有 $^{17}\text{Ne} + 1p$ 事件的衰变能谱(红色数据点), 通过从 $^{17}\text{Ne} + 2p$ 事件中任选1个质子构建 $^{17}\text{Ne} + 1p$ 能谱, 从而得到了 ^{19}Mg 的 $2p$ 衰变对 ^{18}Na 能谱的干扰谱形(蓝色数据点); (b) 扣除来自 ^{19}Mg 的 $2p$ 衰变事件干扰后的 $^{17}\text{Ne} + 1p$ 事件的衰变能谱^[45]. 红色实线表示总拟合谱, 包含了来自各个共振态(绿色虚线)和平滑本底(蓝色点虚线)的贡献

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 ^[45]. The blue 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-green curves) and a smooth background (dashed-dotted-blue curve)

表 1 本团队实验测到的 ^{18}Na 、 ^{18}Mg 、 ^{19}Mg 、 ^{20}Mg 和 ^{21}Al 中共振态的衰变能 E_T 、激发能 E^* 、本征宽度 Γ 以及自旋宇称 J^π . 结果取自文献[45~48]

Table 1 Decay energies E_T , excitation energies E^* , intrinsic widths Γ , and spin-parities J^π of the resonant states observed in ^{18}Na , ^{18}Mg , ^{19}Mg , ^{20}Mg and ^{21}Al . The results are taken from Refs. [45–48]

核素	E_T (MeV)	E^* (MeV)	Γ (MeV)	J^π
^{18}Na	1.38(2)	0	<0.04	1^-
	1.53(2)	0.15(3)	<0.04	2^-
	1.97(2)	0.59(3)	0.32(4)	
^{18}Mg	4.865(34)	0	0.115(100)	0^+
	6.71(14)	1.84(14)	0.266(150)	2^+
^{19}Mg	0.794(1)	0	0.000(70)	$1/2^-$
	1.844(3)	1.050(3)	0.015(50)	$(3/2^-)$
	2.82(1)	2.03(1)	0.00(7)	$(1/2^+)$
	3.26(1)	2.47(1)	0.04(15)	$(5/2^+, 3/2^-, 1/2^-)$
	5.54(3)	4.75(3)	0.00(4)	
^{20}Mg	0.930(2)	3.348(3)	0.019(30)	(4^+)
	1.468(5)	3.886(5)	0.045(60)	(2^+)
	3.008(2)	5.426(3)	0.209(90)	
	3.91(2)	6.33(2)	0.07(17)	
^{21}Al	4.85(5)	6.09(11)	0.74(10)	$(1/2^+ - 7/2^+)$
	6.9(1)	8.1(1)	1.27(20)	
	9.2(2)	10.4(2)	0.66(40)	

图 4展示了扣除Wigner能后, $N = 8$ 奇 Z 同中子素的 ΔS_n 随质子数的演化[45]. 在 $Z = 3$ 和 5 处, ΔS_n 显著减小, 这与人们在Li和B同位素中观察到的 $N = 8$ 闭壳消失现象是一致的[72~74]. N、F和Na同位素在 $N = 8$ 处具有接近的 ΔS_n 值, 表明 $N = 8$ 闭壳从 β 稳定线附近一直到质子滴线区始终保持. 图 4还给出了奇 N 的O同位素的单质子分离能之差 ΔS_p 的系统学, 可以看到它们与同中子核保持了很好的镜像对称性.

3 Mg同位素中 $N = 8$ 壳演化

通过 ^{20}Mg 与 ^9Be 靶的反应, 布局了质子滴线区Mg同位素的共振态并对其结构开展了系统性研究[46, 47]. 利用实验上测到的所有 $^{14}\text{O} + 4p$ 、 $^{17}\text{Ne} + 2p$ 和 $^{18}\text{Ne} + 2p$ 符合事件, 分别构建了 ^{18}Mg 、 ^{19}Mg 和 ^{20}Mg 的不变质量谱[46, 47], 如图 5所示, 这也是实验上首次观察到超出质子滴线两个中子的新核素 ^{18}Mg . 在 ^{18}Mg 、 ^{19}Mg 和 ^{20}Mg 中分别观测到了两个、五个和四个共振峰, 通过对能谱进行拟合, 得到了这些共振态的衰变能与本征宽度(见表 1).

对于 ^{18}Mg , 拟合得到其基态的 $4p$ 衰变能为 $E_T = 4.865(34)$ MeV, 对应质量过剩为 $\Delta = 40.029(34)$ MeV; ^{18}Mg 的 2_1^+ 态的激发能为 $1.84(14)$ MeV[46]. 对于 ^{20}Mg , 如图 6(a)所示, 此前的实验只观测到两个双质子共振结构, 能量分别为 $E^* = 3.7(2)$ 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^+ 态和 2_2^+ 态这两个共振态的叠加[30]. 在该实验中, 我们成功区分开了位于 $E^* = 3.7(2)$ MeV处的共振叠加结构, 并通过与文献[30]中的SM计算结果以及镜像核 ^{20}O 的能级结构[75]进行对比, 指认看到的前两个共振态分别为 ^{20}Mg 的 4_1^+ 态和 2_2^+ 态[47].

对于 ^{19}Mg , 此前使用飞行衰变法的实验[55, 59, 76~78]观察到 ^{19}Mg 的5个共振态, 发现它们全部衰变到 ^{17}Ne 基态. 图 6(b)对比了该实验[47]得到的 ^{19}Mg 能级与此前的实验结果, 并给出了SM计算结果. 其中SM计算是在 psd 模型空间中进行的, 采用YSOX相互作用[79]. 从图 6(b)中可以看出本次实验[47]观察到的 ^{19}Mg 共振态与SM计算结果符合得很好, 除对位于 $E^* = 2.03$ MeV的第2激发态的自旋宇称指认外, 与此前的实验研究结果[55]也是一致的.

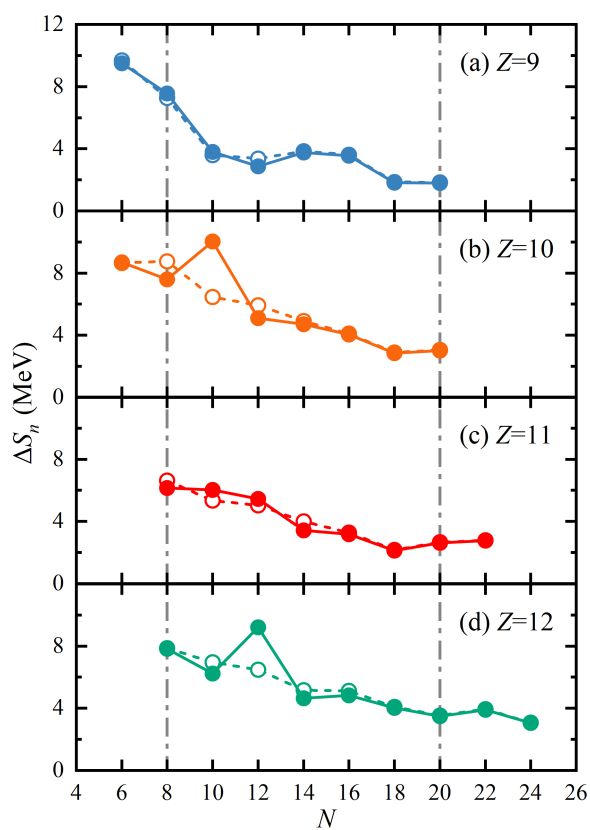


图3 (网络版彩色)(a) $Z = 9$, (b) $Z = 10$, (c) $Z = 11$ 和(d) $Z = 12$ 同位素链的实验单中子分离能之差的系统学(实线连接的实心点)^[45]. 虚线连接的空心点为扣除了Wigner能后的结果. 数据来自文献^[45,57,58]. 灰色竖直线给出了传统幻数 $N = 8$ 和 $N = 20$ 的位置

Figure 3 (Color online) Systematics of the differences in experimental one-neutron separation energy for (a) $Z = 9$, (b) $Z = 10$, (c) $Z = 11$ and (d) $Z = 12$ isotopic chains (solid points connected by solid lines)^[45]. The open points connected by dashed lines show the results with the Wigner energy subtracted. The data are taken from Refs. ^[45,57,58]. The dashed-dotted-grey vertical lines show the positions of traditional magic numbers $N = 8$ and $N = 20$

文献^[55]曾尝试指认 ^{19}Mg 的 $E^* = 2.03$ MeV激发态的自旋宇称为 $5/2^-$. 考虑到文献^[55]和该工作都是利用 ^{20}Mg 的单中子敲出反应生成 ^{19}Mg , 而 ^{20}Mg 基态中 $f_{5/2}$ 中子轨道的占据是非常小的, 因此对 ^{19}Mg 低能 $5/2^-$ 态的布居应该非常弱. 我们使用Glauber模型^[80]和SM核结构模型, 计算了核子敲出反应布居 ^{19}Mg 共振态的反应截面. 表2给出了 ^{19}Mg 低能共振态相对基态的理论和实验产额^[47]. 理论和实验的对比表明, 实验测到的 ^{19}Mg 的第2激发态($E^* = 2.03$ MeV)最可能对应敲出一个 $s_{1/2}$ 中子形成的 $1/2^+$ 态. 对位于 $E^* = 2.47$ MeV的第3激发态, 计算表明自旋宇称为 $5/2^+$ 、 $3/2^-$ 和 $1/2^-$ 都有可能.

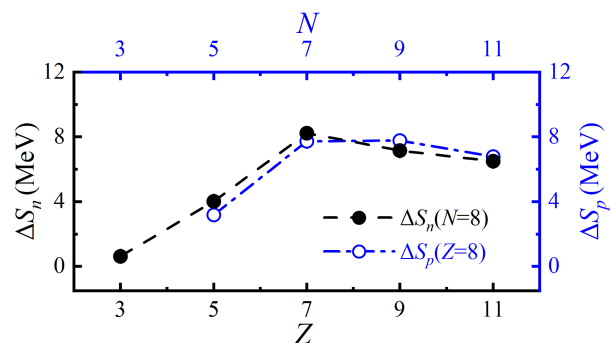


图4 (网络版彩色) $N = 8$ 奇 Z 同中子素的实验单中子分离能之差的系统学, 以及镜像的 $Z = 8$ 奇 N 同位素的实验单质子分离能之差的系统学^[45]. 同位素与同中子素均进行了Wigner能修正. 数据来自文献^[45,57]

Figure 4 (Color online) Systematics of the differences in experimental one-neutron separation energy for $N = 8$ isotones with odd- Z , and the mirror systematics of the differences in experimental one-proton separation energy for $Z = 8$ isotopes with odd- N ^[45]. The Wigner energy corrections have been made for both isotones and isotopes. The data are taken from Refs. ^[45,57]

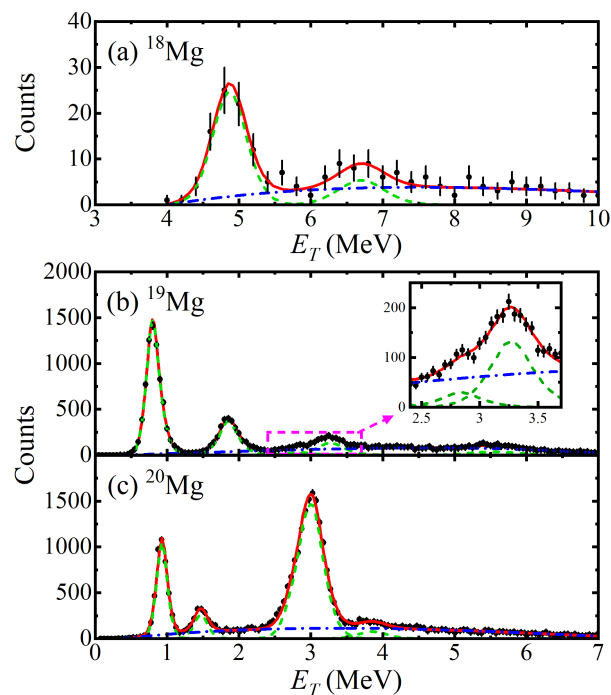


图5 (网络版彩色)所有(a) $^{14}\text{O} + 4p$ 事件、(b) $^{17}\text{Ne} + 2p$ 事件和(c) $^{18}\text{Ne} + 2p$ 事件的衰变能谱^[46,47]. 红色实线表示完整拟合谱, 包含各个共振态(绿色虚线)和平滑本底(蓝色点虚线)的贡献. (b)中内插图放大了(b)中 $E_T = 3$ MeV附近的能谱

Figure 5 (Color online) Decay energy E_T spectra for all detected (a) $^{14}\text{O} + 4p$, (b) $^{17}\text{Ne} + 2p$ and (c) $^{18}\text{Ne} + 2p$ events^[46,47]. The solid-red curves show the fitted spectra along with the contributions of each states (dashed-green curves) and the smooth background (dashed-dotted-blue curve). The inset in (b) highlights the region around $E_T = 3$ MeV of (b)

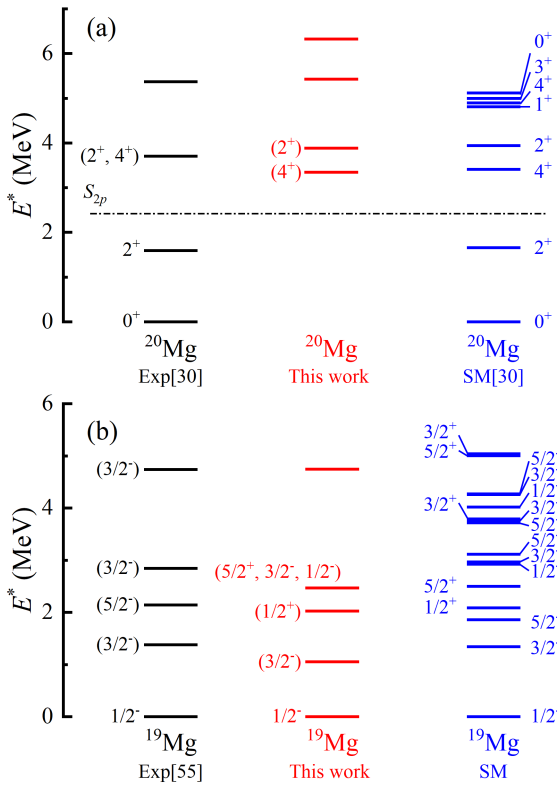


图 6 (网络版彩色)文献 [47]中观察到的(a) ^{20}Mg 中4个共振态和(b) ^{19}Mg 中5个共振态的激发能 E^* (红色能级). 同时给出了此前 ^{20}Mg [30]和 ^{19}Mg [55]的实验结果(黑色能级), 以及文献 [30]中给出的对 ^{20}Mg 的壳模型计算和对 ^{19}Mg 的壳模型计算[47](蓝色能级)作为对比(a)中的点虚线表示 ^{20}Mg 的双质子分离能 S_{2p}

Figure 6 (Color online) The excitation energies E^* of the (a) four resonant states in ^{20}Mg and (b) five resonant states in ^{19}Mg identified in Ref. [47] (in red). The previous experimental results of ^{20}Mg [30] and ^{19}Mg [55] (in black) and shell model calculations (in blue) for ^{20}Mg from Ref. [30] and for ^{19}Mg [47], are given for comparison. The dashed-dotted line in (a) indicates the two-proton separation energy S_{2p} of ^{20}Mg

表 2 理论计算和实验得到的 ^{19}Mg 低能共振态($E^* < 3.0$ MeV)的激发能以及相对基态的产额[47]. 激发能单位为MeV

Table 2 The theoretical and experimental excitation energies and yields relative to the ground state for low-lying resonant states ($E^* < 3.0$ MeV) in ^{19}Mg [47]. The excitation energies are in MeV

实验值		理论值			
E^*	σ_{exp}	E^*	σ_{th}	组分	J^π
0	1	0	1	$1p_{1/2}$	$1/2^-$
1.050	0.320(8)	1.341	0.156	$1p_{3/2}$	$3/2^-$
2.03	0.032(6)	2.085	0.016	$2s_{1/2}$	$1/2^+$
2.47	0.214(9)	2.498	0.042	$1d_{5/2}$	$5/2^+$
		2.922	0.029	$1p_{1/2}$	$1/2^-$
		2.971	0.086	$1p_{3/2}$	$3/2^-$

图 7(a)和(b)展示了 $Z = 10$ 和 12 同位素以及 $N = 10$ 和 12 同中子素的 2_1^+ 态激发能的系统学[47]. 对于图 7(b)中所示的 $N = 10$ 和 12 同中子素, 2_1^+ 态激发能在 $Z = 8$ 处有极大值. 在图 7(a)中所示的 $Z = 10$ 同位素链中也看到了类似的规律, 即 2_1^+ 态激发能在 $N = 8$ 处为极大值. 然而Mg同位素链表现出了独特的系统学规律, 即 ^{20}Mg ($N = 8$)的 2_1^+ 态激发能低于 ^{18}Mg ($N = 6$)[46]. 这一现象似乎与文献 [30]中提到的 ^{20}Mg 可能具有四极形变的结论一致, 即质子滴线区Mg同位素中可能出现了 $N = 8$ 闭壳的减弱.

为确认 ^{20}Mg 是否具有明显形变, 我们利用实验得到的 ^{20}Mg 中 4_1^+ 态的激发能进行了进一步的系统学研究. 图 7(c)和(d)给出了 $Z = 10$ 和 12 同位素以及 $N = 10$ 和 12 同中子素的 4_1^+ 态与 2_1^+ 激发能之比 R_{42} 的系统学[47]. 可以看到在 $Z(N) = 8$ 处, R_{42} 均显著较小. 通常, 对于形变的刚性转子, R_{42} 应接近3.3; 对于近球形核的谐振子激发, 这一比值近似等于2. Mg同位素在 $N = 8$ 处相对较低的 $R_{42} = 2.10(1)$ 值表明 ^{20}Mg 的形状接近球形, 排除了质子滴线区出现形变驱动的 $N = 8$ 壳减弱的可能性. 该结果也与平均场[31~41]和超越平均场[42]理论的预言相符. 图 7将实验结果与SM计算进行了比较, 可以看到理论计算很好重现了实验演化趋势.

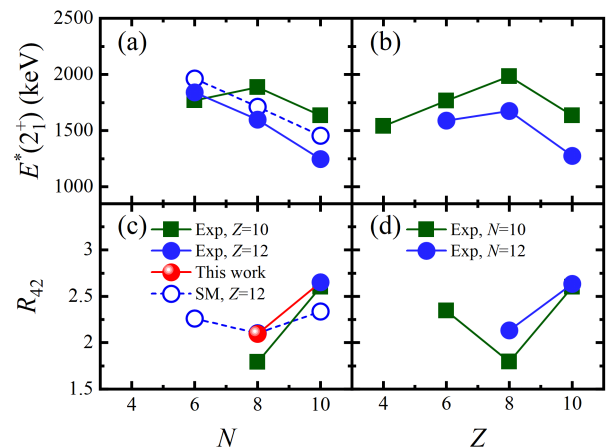


图 7 (网络版彩色) $Z = 10$ 和 12 同位素的(a) $E^*(2_1^+)$ 和(c) R_{42} ; $N = 10$ 和 12 同中子素的(b) $E^*(2_1^+)$ 和(d) R_{42} [47]. 实验数据来自文献 [47]和NNDC (<https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>). 对Mg同位素的(a) $E^*(2_1^+)$ 和(c) R_{42} , 给出了SM计算结果以进行对比

Figure 7 (Color online) (a) $E^*(2_1^+)$ and (c) R_{42} ratios for $Z = 10, 12$ isotopes; (b) $E^*(2_1^+)$ and (d) R_{42} ratios for $N = 10, 12$ isotones[47]. Experimental data are taken from Ref. [47] and NNDC (<https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>). The SM calculations for (a) $E^*(2_1^+)$ and (c) R_{42} in Mg isotopes are given for comparison

特别是在 ^{20}Mg 中, 理论预言此处 R_{42} 出现极小值点, 反映了 $N = 8$ 闭壳的稳定性.

作为 $N = 7$ 的奇 N 核, ^{19}Mg 的能级信息可以直观反映质子滴线区 $N = 8$ 壳的壳隙大小. SM计算表明相比 ^{21}Mg , 在 ^{19}Mg 中出现了 $1/2^+$ 态和 $5/2^+$ 态次序的反转(见图 6), 反映了其 $\nu 2s_{1/2}$ 和 $\nu 1d_{5/2}$ 中子轨道的反转. 在从 $Z = 2$ 到 $Z = 10$ 的所有的 $N = 7$ 同中子素中都可以看到类似的 $1/2^+$ 态相对 $5/2^+$ 态的反转现象^[8,81~84]. 因此, $N = 7$ 同中子素中最低的 $1/2^+$ 态和 $1/2^-$ 态(分别来自 $\nu 2s_{1/2}$ 和 $\nu 1p_{1/2}$ 轨道)的能级差 $\Delta E_{1/2}$ 可以直观提供 $N = 8$ 壳隙幅度的信息. 图8给出了 $N = 7$ 同中子素中 $1/2^+$ 态和 $1/2^-$ 态能级能量差 $\Delta E_{1/2} = E^*(1/2^+) - E^*(1/2^-)$ 的系统学变化^[47], 可以看到中子滴线附近($Z \leq 4$)的 $\Delta E_{1/2}$ 为负值, 表明此时 $\nu 2s_{1/2}$ 轨道闯入到了 p 壳层中, 反映了 He ^[85]、 Li ^[72,73]、 Be ^[8,10,86~89]和 B ^[74]同位素中 $N = 8$ 壳的消失. $\Delta E_{1/2}$ 的最大值出现在 ^{15}O ($Z = 8$)处, 反映了 $Z = 8$ 的质子闭壳效应^[3]. ^{13}C 和 ^{17}Ne 也具有较大的 $\Delta E_{1/2}$ 值, 并且此前研究已经确认了在 C 和 Ne 同位素中 $N = 8$ 闭壳的稳定性^[3,90]. 图8中 ^{19}Mg 具有和 ^{17}Ne 接近的 $\Delta E_{1/2}$ 值, 且仅略小于具有 $Z = 6$ 次闭壳的 ^{13}C 的 $\Delta E_{1/2}$ 值, 这进一步支持了质子滴线区 Mg 同位素中 $N = 8$ 壳的稳定性.

Mg 同位素中 $N = 8$ 壳的稳定性表明偶偶核 ^{20}Mg 和 ^{18}Mg 中的 2_1^+ 态应该主要来自价质子激发. 我们利用SM计算了 Mg 同位素中的质子有效单粒子能, 发现在

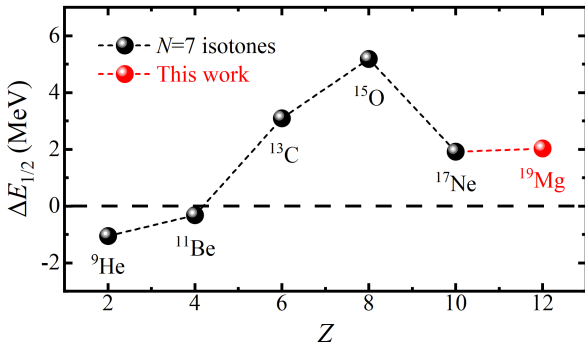


图 8 (网络版彩色) $N = 7$ 同中子素中最低的 $1/2^+$ 和 $1/2^-$ 能级的能量差 $\Delta E_{1/2}$ 系统学^[47]. 数据来自文献^[47, 81, 82]和NNDC (<https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>)

Figure 8 (Color online) Systematics of experimental energy differences $\Delta E_{1/2}$ between the lowest-lying $1/2^+$ and $1/2^-$ states in $N = 7$ isotones^[47]. Data are taken from Refs. [47, 81, 82] and NNDC (<https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>)

^{18}Mg 中由于两个 $1p_{1/2}$ 轨道中子的减少引发了核子-核子单极相互作用的变化^[3,4], 在 ^{20}Mg 和 ^{18}Mg 之间出现了 $\pi 2s_{1/2}$ 和 $\pi 1d_{5/2}$ 轨道的反转^[47]. 这一发生在 $N = 8$ 和 $N = 6$ 之间的质子轨道反转现象此前已在相邻的奇 Z 核 F 同位素中被观测到^[91~94]. SM计算表明 ^{20}Mg 和 ^{18}Mg 中 2_1^+ 态的中子组分基本与各自基态相同, ^{18}Mg 中的 2_1^+ 态主要来自 $\pi 2s_{1/2} \rightarrow \pi 1d_{5/2}$ 的激发, 而 ^{20}Mg 中的 2_1^+ 态主要来自 $\pi 1d_{5/2}$ 轨道内部激发. 因此, 不同的价质子激发模式导致了 ^{18}Mg 具有相对 ^{20}Mg 较高的 2_1^+ 态激发能^[47].

4 Al同位素中 $N = 8$ 壳演化

最近, Kostyleva等人^[95]利用飞行衰变法, 在实验上首次观察到了 ^{21}Al 的 $(5/2^+)$ 基态和 $(3/2^+)$ 激发态. 二者都是 $1p$ 共振态, 通过发射1个质子衰变到 ^{20}Mg 基态. 由于 ^{20}Mg 的双质子分离能较低($S_{2p} = 2.418(2)$ MeV)^[57], ^{21}Al 的高激发共振态很可能经过 ^{20}Mg 的双质子非束缚态进行三质子衰变. 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, 并利用符合测量的 $^{18}\text{Ne} + 3p$ 事件, 构建了 ^{21}Al 的三质子衰变能谱, 如图9所示^[48]. 通过对能谱进行拟合, 得到了其中三个共振峰的衰变能与本征宽度(见表 1).

对图 9中最显著的 $E_T = 4.85(5)$ MeV共振峰, 选择

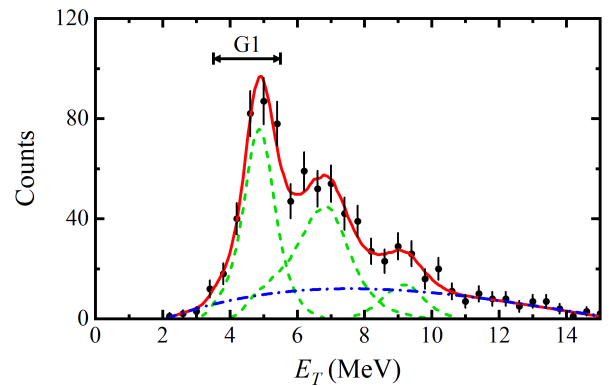


图 9 (网络版彩色)所有 $^{18}\text{Ne} + 3p$ 事件的衰变能谱^[48]. 图中的红色实线表示完整的拟合谱, 包含了各个共振态(绿色虚线)和平滑本底(蓝色点虚线)的贡献

Figure 9 (Color online) Decay energy E_T spectrum for all detected $^{18}\text{Ne} + 3p$ events^[48]. The solid-red curve shows the fitted spectrum along with the contributions of each states (dashed-green curves) and the smooth background (dashed-dotted-blue curve)

能量范围G1内的事件重建了 $^{18}\text{Ne} + 3p$ 质心在实验室系下的动能分布,如图10所示^[48].从图中可以看出,整体的动能分布较窄,并且低于 ^{20}Mg 束流的动能,这符合核子转移反应的特征.在快束流的核子转移反应中,核子倾向于被转移到弹核中轨道角动量较高的轨道^[96~100].对于该实验使用的 ^{20}Mg 束流和 ^9Be 靶,相对于 $s_{1/2}$ 轨道,核子更倾向于被转移到 d 轨道^[56],因此该实验中更易于布居 ^{21}Al 的 d 波共振态.

文献[95]的实验结果给出 ^{21}Al 基态质量过剩为 $\Delta = 25.95(10)$ MeV,与此前理论预言的26.024 MeV^[102]、25.785 MeV^[103]、26.082 MeV^[104]一致,也与我们 $ab\ initio$ 计算的结果26.149 MeV^[101]接近.基于实验质量,我们计算了该实验中观察到的 ^{21}Al 各共振态的激发能,并与文献[95]中得到的实验结果、镜像核 ^{21}O 正宇称态的实验结果,以及 $ab\ initio$ 的计算结果进行了对比,如图11所示^[48].需要指出,文献[95]中给出的 ^{21}Al 第1激发态($1/2^+$)的激发能为势模型的计算结果.

从图11可以看到,对于 ^{21}Al 中最低的 $5/2^+$ 和 $3/2^+$ 态,实验与理论计算结果符合得很好.随着激发能增加,能级密度也不断增加.在高激发能区,通过对比实验与理论结果,显示理论计算出的 $1/2^+$ 、 $7/2^+$ 、 $5/2^+$ 、 $3/2^+$ 和 $11/2^+$ 态都可能对应该实验观测到的 $E^* = 6.09(11)$ MeV共振峰.表3给出了 $ab\ initio$ 计算得到的这五个共振态的质子占据情况,它们的主要组分均为 $\pi(d_{5/2})^4(d_{3/2})^1$,符合实验上单质子转移反应倾

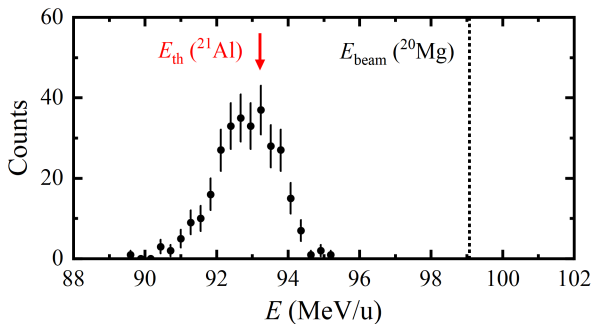


图10 (网络版彩色) ^{21}Al 的 $E_T = 4.85(5)$ MeV共振态在实验室系下的实验动能分布^[48].红色箭头为单质子转移反应下产生的 ^{21}Al 的理论动能,黑色虚线为穿过一半靶厚的 ^{20}Mg 束流的预期能量

Figure 10 (Color online) Experimental kinetic energy distribution for reconstructed ^{21}Al at $E_T = 4.85(5)$ MeV in laboratory frame^[48]. For comparison, the red arrow shows the expected kinetic energy of ^{21}Al produced in one-proton transfer reactions, while the position of dashed-black line is the expected energy of the ^{20}Mg beam after traversing half of the target thickness

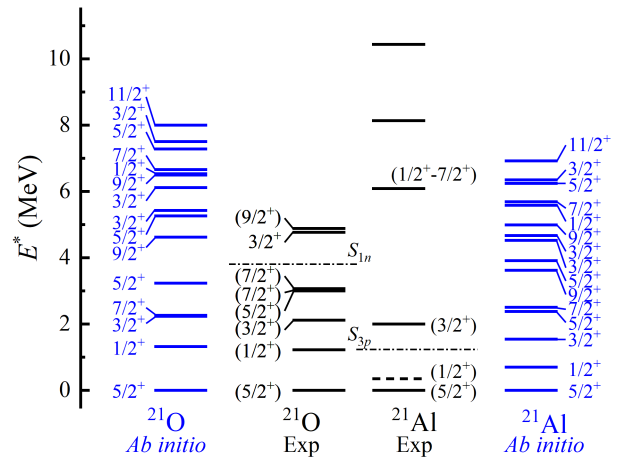


图11 (网络版彩色)文献[48, 95]观察到的 ^{21}Al 的共振态和镜像核 ^{21}O 的正宇称态(黑色能级),同时给出了使用价空间的介质相似重整化群方法的第一性原理($ab\ initio$ valence-space in-medium similarity renormalization group, $ab\ initio$ VS-IMSRG)计算得到的 ^{21}Al - ^{21}O 理论计算结果^[101](蓝色能级). ^{21}O 的能级结构来自NNDC (<https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>).点虚线标出了 ^{21}O 的单中子分离能 S_{1n} 以及 ^{21}Al 的三质子分离能 S_{3p} .虚线所示的实验共振态为文献[95]中采用势模型预言的 ^{21}Al 第1激发态

Figure 11 (Color online) The resonant states in ^{21}Al identified in Refs. [48, 95], and the experimental positive-parity states in its mirror nucleus ^{21}O (in black), in comparison with the $ab\ initio$ calculations (in blue) using the valence-space in-medium similarity renormalization group (VS-IMSRG) approach^[101] for ^{21}Al - ^{21}O pair. The level structures of ^{21}O are taken from NNDC (<https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>). The dashed-dotted lines indicate the one-neutron separation energy S_{1n} of ^{21}O and the three-proton separation energy S_{3p} of ^{21}Al . The experimental resonant state represented by the dashed line shows the predicted location of the first excited state of ^{21}Al from the potential model of Ref. [95]

表3 ^{21}Al 中5个候选共振态的理论激发能、自旋宇称、质子占据数以及相对位于 $E^* = 5.567$ MeV的 $1/2^+$ 态的产额^[48]

Table 3 Theoretical excitation energies, spin-parities, proton occupancies, and yields relative to the $1/2^+$ state at $E^* = 5.567$ MeV for the five candidate resonant states in ^{21}Al ^[48]

E^* (MeV)	J^π	质子占据数			σ_{rel}
		$d_{5/2}$	$s_{1/2}$	$d_{3/2}$	
5.567	$1/2^+$	3.610	0.286	1.104	1
5.682	$7/2^+$	3.706	0.251	1.043	17.27
6.229	$5/2^+$	3.752	0.188	1.060	3.29
6.344	$3/2^+$	3.673	0.256	1.071	10.71
6.904	$11/2^+$	3.898	0.072	1.030	

向于布居 d 波共振态的预期^[48].利用扭曲波玻恩近似(distorted-wave Born approximation, DWBA)方法,结合 $ab\ initio$ 计算得到的谱因子,计算了布居 ^{21}Al 这些共振态的相对单质子转移截面,见表3.除 $11/2^+$ 态的产

额非常低而未列出外,其余四个态都具有相近的单质子转移反应产额.因此,该实验观察到的 ^{21}Al 的 $E^* = 6.09(11)$ MeV共振结构可能的自旋宇称范围为 $(1/2^+ \sim 7/2^+)^{[48]}$.考虑到理论给出的4个态的激发能及产额的差距都不大,目前的实验结果不能完全排除该共振结构是来自这4个能级的混合的可能性.

为了确定 sd 壳区域的轨道间距,图12展示了 $Z = 13$ 同位素与 $N = 13$ 同中子素中 $5/2^+$ 基态与最低的 $3/2^+$ 激发态(分别来自 $d_{5/2}$ 和 $d_{3/2}$ 轨道 $^{[95]}$)的激发能差系统学 $^{[48]}$,可以看到它们的镜像对称性较好.闭壳效应通常会使原子核的形状为球形或形变较小,造成单粒子能级之间具有较大的间距.例如人们发现在 ^{23}F 中 $5/2^+$ 态和 $1/2^+$ 态的能级差在 $N = 14$ 处有较大的值,表明在F同位素中出现了 $N = 14$ 次闭壳 $^{[105]}$.在图12中,Al同位素链在 $N = 16$ 处的极大值也反映了 $N = 16$ 闭壳的效应 $^{[3]}$.从图中可以看到, $N = 8$ 处的能级差大小与 $N = 16$ 处相近,表明 ^{21}Al 也具有较大的 $\pi d_{5/2}$ 和 $\pi d_{3/2}$ 轨道间距,展现了 $N = 8$ 的壳效应.此外,镜像半幻核 ^{21}O ($Z = 8$)中 $\nu d_{5/2}$ 和 $\nu d_{3/2}$ 中子轨道的间距也与 ^{21}Al 中相应质子轨道的间距大致接近,这进一步支持了 $N = 8$ 闭壳在质子滴线Al同位素中仍然存在.

5 总结与展望

近年来,极端同位旋条件下原子核壳结构的演化

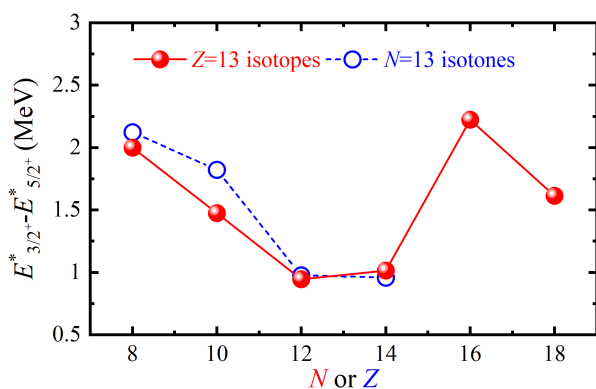


图12 (网络版彩色) $Z = 13$ 同位素与 $N = 13$ 同中子素中 $5/2^+$ 基态与最低的 $3/2^+$ 激发态的激发能差系统学 $^{[48]}$.数据来自文献 $^{[48,95]}$ 和NNDC (<https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>)

Figure 12 (Color online) Systematics of experimental excitation energy difference between the $5/2^+$ ground state and lowest-lying $3/2^+$ excited state in $Z = 13$ isotopes and $N = 13$ isotones $^{[48]}$. Data are taken from Refs. $^{[48,95]}$ and NNDC (<https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>)

受到人们广泛的关注.本文主要介绍了我们近期对轻质子滴线区原子核壳演化的一些实验研究结果.我们利用不变质量法,通过研究滴线区原子核 ^{18}Na 、 ^{18}Mg 、 ^{19}Mg 、 ^{20}Mg 和 ^{21}Al 的质子衰变过程,重建了这五个原子核的衰变能谱,得到了它们的共振能级结构.确定了 ^{18}Na 的基态质量 $E_T = 1.38(2)$ MeV,进而得到 ^{19}Na 的单中子分离能 $S_n(^{19}\text{Na}) = 20.31(2)$ MeV.通过分析 $Z = 9 \sim 12$ 同位素链的单中子分离能之差 ΔS_n 的演化特点,讨论了Na同位素中的 $N = 8$ 闭壳效应.首次观察到四质子非束缚核 ^{18}Mg ,确定了其基态与 2^+ 激发态位置,指认了 ^{19}Mg 的 $1/2^+$ 态,并区分开了 ^{20}Mg 的 4^+ 与 2^+ 态.得到 ^{20}Mg 的 $R_{42} = 2.10(1)$,排除了Mg同位素中存在由形变驱动的 $N = 8$ 壳减弱的可能性;结合SM计算结果,利用 $E^*(2^+)$ 和 R_{42} 的系统学证实了Mg同位素中 $N = 8$ 闭壳的存在;进一步基于 ^{19}Mg 中 $1/2^-$ 和 $1/2^+$ 态能量差的系统学,直观地反映了Mg同位素中 $N = 8$ 壳隙的大小;通过质子滴线外Mg同位素中 $\pi 2s_{1/2}$ 和 $\pi 1d_{5/2}$ 轨道的反转,解释了 ^{18}Mg 的 2^+ 态激发能高于 ^{20}Mg 的原因.布居了 ^{21}Al 的三质子非束缚态,基于 $ab initio$ 和DWBA计算,指认看到的 $E^* = 6.09(11)$ MeV共振态自旋宇称为 $(1/2^+ - 7/2^+)$.通过分析 $Z(N) = 13$ 同位素(同中子素)的 $5/2^+$ 基态与最低的 $3/2^+$ 激发态能量差的系统学,表明了 ^{21}Al 的半幻特性.

到目前为止,人们对丰中子一侧的壳演化研究已经取得了丰硕的成果,大大增进了我们对远离 β 稳定线区域核子-核子间相互作用的认识.近年来,随着加速器和实验探测技术的发展,在极端丰质子不同质量区的研究逐渐开展,例如Lalanne等人 $^{[106]}$ 利用 $^{37}\text{Ca}(p,t)^{35}\text{Ca}$ 双中子转移反应,首次研究了质子滴线核 ^{35}Ca ,得到了其基态质量,并通过单中子分离能之差 ΔS_n 的系统学,进一步支持了 ^{36}Ca 的双幻特性. Koyama等人 $^{[107]}$ 利用 $^9\text{C}(p,d)^8\text{C}$ 单中子转移反应,得到了四质子非束缚核 ^8C 的缺失质量谱,首次指认了 ^8C 的 2^+ 态,通过 $E^*(2^+)$ 的系统学演化,讨论了 ^8C 中 $Z = 6$ 的次闭壳效应.最近,中国科学院近代物理研究所Xing等人 $^{[108]}$ 基于兰州重离子加速器冷却储存环,利用改进后的磁刚度识别等时性质谱术,首次精确测量了质子滴线核 ^{22}Si 的基态质量.通过将提取出的 ^{22}Si 的质子对能与镜像核 ^{22}O 的中子对能进行对比,并结合伽莫夫壳模型计算,证明

了 ^{22}Si 中 $Z = 14$ 和 $N = 8$ 的双幻特性. 结合本文讨论的Na、Mg和Al同位素中 $N = 8$ 闭壳的演化, 目前实验上已经证明了在质子滴线附近, 直到Si同位素, $N = 8$ 中

子闭壳均得到了保持. 未来继续在质子滴线区开展实验, 探索新奇的物理现象并理解原子核结构在这一区域的演化是非常有意义的.

参考文献

- 1 Mayer M G. On closed shells in nuclei. II. Phys Rev, 1949, 75: 1969–1970
- 2 Haxel O, Jensen J H D, Suess H E. On the “Magic Numbers” in nuclear structure. Phys Rev, 1949, 75: 1766–1766
- 3 Sorlin O, Porquet M G. Nuclear magic numbers: new features far from stability. Prog Part Nucl Phys, 2008, 61: 602–673
- 4 Otsuka T, Gade A, Sorlin O, et al. Evolution of shell structure in exotic nuclei. Rev Mod Phys, 2020, 92: 015002
- 5 Nowacki F, Obertelli A, Poves A. The neutron-rich edge of the nuclear landscape: experiment and theory. Prog Part Nucl Phys, 2021, 120: 103866
- 6 Détraz C, Guillemaud D, Huber G, et al. Beta decay of $^{27-32}\text{Na}$ and their descendants. Phys Rev C, 1979, 19: 164–176
- 7 Warburton E K, Becker J A, Brown B A. Mass systematics for $A = 29 - 44$ nuclei: the deformed $A \sim 32$ region. Phys Rev C, 1990, 41: 1147–1166
- 8 Navin A, Anthony D W, Aumann T, et al. Direct evidence for the breakdown of the $N = 8$ shell closure in ^{12}Be . Phys Rev Lett, 2000, 85: 266–269
- 9 Iwasaki H, Motobayashi T, Akiyoshi H, et al. Low-lying intruder 1^- state in ^{12}Be and the melting of the $N = 8$ shell closure. Phys Lett B, 2000, 491: 8–14
- 10 Pain S D, Catford W N, Orr N A, et al. Structure of ^{12}Be : intruder d -wave strength at $N = 8$. Phys Rev Lett, 2006, 96: 032502
- 11 Gaudefroy L, Sorlin O, Beaumel D, et al. Reduction of the spin-orbit splittings at the $N = 28$ shell closure. Phys Rev Lett, 2006, 97: 092501
- 12 Bastin B, Grévy S, Sohler D, et al. Collapse of the $N = 28$ shell closure in ^{42}Si . Phys Rev Lett, 2007, 99: 022503
- 13 Crawford H L, Fallon P, Macchiavelli A O, et al. First spectroscopy of the near drip-line nucleus ^{40}Mg . Phys Rev Lett, 2019, 122: 052501
- 14 Ozawa A, Kobayashi T, Suzuki T, et al. New magic number, $N = 16$, near the neutron drip line. Phys Rev Lett, 2000, 84: 5493–5495
- 15 Stanoiu M, Azaiez F, Dombrádi Z, et al. $N = 14$ and 16 shell gaps in neutron-rich oxygen isotopes. Phys Rev C, 2004, 69: 034312
- 16 Cortina-Gil D, Fernandez-Vazquez J, Aumann T, et al. Shell structure of the near-dripline nucleus ^{23}O . Phys Rev Lett, 2004, 93: 062501
- 17 Gallant A T, Bale J C, Brunner T, et al. New precision mass measurements of neutron-rich calcium and potassium isotopes and three-nucleon forces. Phys Rev Lett, 2012, 109: 032506
- 18 Wienholtz F, Beck D, Blaum K, et al. Masses of exotic calcium isotopes pin down nuclear forces. Nature, 2013, 498: 346–349
- 19 Steppenbeck D, Takeuchi S, Aoi N, et al. Evidence for a new nuclear ‘magic number’ from the level structure of ^{54}Ca . Nature, 2013, 502: 207–210
- 20 Steppenbeck D, Takeuchi S, Aoi N, et al. Low-lying structure of ^{50}Ar and the $N = 32$ subshell closure. Phys Rev Lett, 2015, 114: 252501
- 21 Rosenbusch M, Ascher P, Atanasov D, et al. Probing the $N = 32$ shell closure below the magic proton number $Z = 20$: mass measurements of the exotic isotopes $^{52,53}\text{K}$. Phys Rev Lett, 2015, 114: 202501
- 22 Michimasa S, Kobayashi M, Kiyokawa Y, et al. Magic nature of neutrons in ^{54}Ca : first mass measurements of $^{55-57}\text{Ca}$. Phys Rev Lett, 2018, 121: 022506
- 23 Leistenschneider E, Reiter M P, Ayet San Andrés S, et al. Dawning of the $N = 32$ shell closure seen through precision mass measurements of neutron-rich titanium isotopes. Phys Rev Lett, 2018, 120: 062503
- 24 Chen S, Lee J, Doornenbal P, et al. Quasifree neutron knockout from ^{54}Ca corroborates arising $N = 34$ neutron magic number. Phys Rev Lett, 2019, 123: 142501
- 25 Liu H N, Obertelli A, Doornenbal P, et al. How robust is the $N = 34$ subshell closure? First spectroscopy of ^{52}Ar . Phys Rev Lett, 2019, 122: 072502
- 26 Xu X, Wang M, Blaum K, et al. Masses of neutron-rich $^{52-54}\text{Sc}$ and $^{54,56}\text{Ti}$ nuclides: the $N = 32$ subshell closure in scandium. Phys Rev C, 2019, 99: 064303
- 27 Leistenschneider E, Dunling E, Bollen G, et al. Precision mass measurements of neutron-rich scandium isotopes refine the evolution of $N = 32$ and $N = 34$ shell closures. Phys Rev Lett, 2021, 126: 042501
- 28 Suzuki D, Iwasaki H, Beaumel D, et al. Breakdown of the $Z = 8$ shell closure in unbound ^{12}O and its mirror symmetry. Phys Rev Lett, 2009, 103: 152503
- 29 Otsuka T, Fujimoto R, Utsuno Y, et al. Magic numbers in exotic nuclei and spin-isospin properties of the NN interaction. Phys Rev Lett, 2001, 87: 082502
- 30 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)

- 31 Ren Z, Zhu Z, Cai Y, et al. Relativistic mean-field study of Mg isotopes. *Phys Lett B*, 1996, 380: 241–246
- 32 Grümmer F, Chen B, Ma Z, et al. Bulk properties of light deformed nuclei derived from a medium-modified meson-exchange interaction. *Phys Lett B*, 1996, 387: 673–679
- 33 Lalazissis G, Farhan A, Sharma M. Light nuclei near neutron and proton drip lines in relativistic mean-field theory. *Nuc Phys A*, 1998, 628: 221–254
- 34 Siiskonen T, Lipas P O, Rikowska J. Shell-model and Hartree-Fock calculations for even-mass O, Ne, and Mg nuclei. *Phys Rev C*, 1999, 60: 034312
- 35 Stoitsov M V, Dobaczewski J, Ring P, et al. Quadrupole deformations of neutron-drip-line nuclei studied within the Skyrme Hartree-Fock-Bogoliubov approach. *Phys Rev C*, 2000, 61: 034311
- 36 Lalazissis G A, Vretenar D, Ring P. Relativistic Hartree-Bogoliubov description of sizes and shapes of $A = 20$ isobars. *Phys Rev C*, 2001, 63: 034305
- 37 Mitra P, Gangopadhyay G, Malakar B. Deformation constrained calculation for light nuclei in generalized hybrid derivative coupling model. *Phys Rev C*, 2002, 65: 034329
- 38 Stoitsov M V, Dobaczewski J, Nazarewicz W, et al. Systematic study of deformed nuclei at the drip lines and beyond. *Phys Rev C*, 2003, 68: 054312
- 39 Li L, Meng J, Ring P, et al. Deformed relativistic Hartree-Bogoliubov theory in continuum. *Phys Rev C*, 2012, 85: 024312
- 40 Gaidarov M K, Sarriguren P, Antonov A N, et al. Ground-state properties and symmetry energy of neutron-rich and neutron-deficient Mg isotopes. *Phys Rev C*, 2014, 89: 064301
- 41 Zhang K Y, Wang D Y, Zhang S Q. Effects of pairing, continuum, and deformation on particles in the classically forbidden regions for Mg isotopes. *Phys Rev C*, 2019, 100: 034312
- 42 Rodríguez-Guzmán R, Egido J, Robledo L. Correlations beyond the mean field in magnesium isotopes: angular momentum projection and configuration mixing. *Nucl Phys A*, 2002, 709: 201–235
- 43 Ebata S, Nakatsukasa T, Inakura T. Systematic investigation of low-lying dipole modes using the canonical-basis time-dependent Hartree-Fock-Bogoliubov theory. *Phys Rev C*, 2014, 90: 024303
- 44 Stolz A, Baumann T, Ginter T, et al. Production of rare isotope beams with the NSCL fragment separator. *Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect B*, 2005, 241: 858–861.
- 45 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
- 46 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
- 47 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
- 48 Ni L, Jin Y, Li Z, et al. Observation of three-proton-decaying resonant states in ^{21}Al . *Phys Lett B*, 2025, 868: 139660
- 49 Morrissey D, Sherrill B, Steiner M, et al. Commissioning the a1900 projectile fragment separator. *Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect B*, 2003, 204: 90–96.
- 50 Yurkon J, Bazin D, Benenson W, et al. Focal plane detector for the S800 high-resolution spectrometer. *Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect A*, 1999, 422: 291–295
- 51 Bazin D, Caggiano J, Sherrill B, et al. The S800 spectrograph. *Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect B*, 2003, 204: 629–633
- 52 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
- 53 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
- 54 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
- 55 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
- 56 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
- 57 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
- 58 Kahlbow J, Aumann T, Sorlin O, et al. Magicity versus superfluidity around ^{28}O viewed from the study of ^{30}F . *Phys Rev Lett*, 2024, 133: 082501
- 59 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
- 60 Satuła W, Dean D, Gary J, et al. On the origin of the Wigner energy. *Phys Lett B*, 1997, 407: 103–109
- 61 Chamel N, Goriely S, Pearson J M. Further explorations of skyrme-hartree-fock-bogoliubov mass formulas. XI. Stabilizing neutron stars against a ferromagnetic collapse. *Phys Rev C*, 2009, 80: 065804
- 62 Goriely S, Chamel N, Pearson J M. Further explorations of skyrme-hartree-fock-bogoliubov mass formulas. XII. stiffness and stability of neutron-

- star matter. Phys Rev C, 2010, 82: 035804
- 63 Goriely S, Chamel N, Pearson J M. Further explorations of Skyrme-Hartree-Fock-Bogoliubov mass formulas. XIII. the 2012 atomic mass evaluation and the symmetry coefficient. Phys Rev C, 2013, 88: 024308
- 64 Thibault C, Klapisch R, Rigaud C, et al. Direct measurement of the masses of ^{11}Li and $^{26-32}\text{Na}$ with an on-line mass spectrometer. Phys Rev C, 1975, 12: 644–657
- 65 Poves A, Retamosa J. Theoretical study of the very neutron-rich nuclei around $N = 20$. Nucl Phys A, 1994, 571: 221–241
- 66 Doornenbal P, Scheit H, Takeuchi S, et al. Mapping the deformation in the “island of inversion”: inelastic scattering of ^{30}Ne and ^{36}Mg at intermediate energies. Phys Rev C, 2016, 93: 044306
- 67 Motobayashi T, Ikeda Y, Ieki K, et al. Large deformation of the very neutron-rich nucleus ^{32}Mg from intermediate-energy Coulomb excitation. Phys Lett B, 1995, 346: 9–14
- 68 Yanagisawa Y, Notani M, Sakurai H, et al. The first excited state of ^{30}Ne studied by proton inelastic scattering in reversed kinematics. Phys Lett B, 2003, 566: 84–89
- 69 Revel A, Sorlin O, Marqués F M, et al. Extending the southern shore of the island of inversion to ^{28}F . Phys Rev Lett, 2020, 124: 152502
- 70 Fortunato L, Casal J, Horiuchi W, et al. The ^{29}F nucleus as a lighthouse on the coast of the island of inversion. Commun Phys, 2020, 3: 132
- 71 Tran D T, Ong H J, Hagen G, et al. Evidence for prevalent $Z = 6$ magic number in neutron-rich carbon isotopes. Nat Commun, 2018, 9: 1594
- 72 Kanungo R, Andreyev A, Buchmann L, et al. Spectroscopic factors for the ^9Li ground state and $N = 6$ shell closure. Phys Lett B, 2008, 660: 26–31
- 73 Moriguchi T, Ozawa A, Ishimoto S, et al. Density distributions of ^{11}Li deduced from reaction cross-section measurements. Phys Rev C, 2013, 88: 024610
- 74 Iwasaki H, Dewald A, Fransen C, et al. Low-lying neutron intruder state in ^{13}B and the fading of the $N = 8$ shell closure. Phys Rev Lett, 2009, 102: 202502
- 75 LaFrance S, Fortune H T, Mordechai S, et al. ^{20}O from $^{18}\text{O}(t, p)$. Phys Rev C, 1979, 20: 1673–1679
- 76 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
- 77 Xu X D, Mukha I, Grigorenko L V, et al. Spectroscopy of excited states of unbound nuclei ^{30}Ar and ^{29}Cl . Phys Rev C, 2018, 97: 034305
- 78 Mukha I, Grigorenko L, Sümmerer K, et al. Proton-proton correlations observed in two-proton decay of ^{19}Mg and ^{16}Ne . Phys Rev C, 2008, 77: 061303
- 79 Yuan C, Suzuki T, Otsuka T, et al. Shell-model study of boron, carbon, nitrogen, and oxygen isotopes with a monopole-based universal interaction. Phys Rev C, 2012, 85: 064324
- 80 Bertulani C, Gade A. MOMDIS: a glauher model computer code for knockout reactions. Comput Phys Commun, 2006, 175: 372–380
- 81 Al Kalanee T, Gibelin J, Roussel-Chomaz P, et al. Structure of unbound neutron-rich ^9He studied using single-neutron transfer. Phys Rev C, 2013, 88: 034301
- 82 Sharov P G, Fomichev A S, Bezbakh A A, et al. Search for $2p$ decay of the first excited state of ^{17}Ne . Phys Rev C, 2017, 96: 025807
- 83 Liu G B, Fortune H T. $^9\text{Be}(t, p)^{11}\text{Be}$ and the structure of ^{11}Be . Phys Rev C, 1990, 42: 167–173
- 84 Ajzenberg-Selove F. Energy levels of light nuclei $A = 13 - 15$. Nucl Phys A, 1991, 523: 1–196
- 85 Seth K K, Artuso M, Barlow D, et al. Exotic nucleus helium-9 and its excited states. Phys Rev Lett, 1987, 58: 1930–1933
- 86 Iwasaki H, Motobayashi T, Akiyoshi H, et al. Quadrupole deformation of ^{12}Be studied by proton inelastic scattering. Phys Lett B, 2000, 481: 7–13
- 87 Chen J, Lou J, Ye Y, et al. A new measurement of the intruder configuration in ^{12}Be . Phys Lett B, 2018, 781: 412–416
- 88 Morse C, McCutchan E, Iwasaki H, et al. Enhanced collectivity in ^{12}Be . Phys Lett B, 2018, 780: 227–232
- 89 Kanada-En'yo Y. Breaking of $N = 8$ magicity in ^{13}Be . Phys Rev C, 2012, 85: 044320
- 90 Marinova K, Geithner W, Kowalska M, et al. Charge radii of neon isotopes across the sd neutron shell. Phys Rev C, 2011, 84: 034313
- 91 Fortune H T. Constraints on energies of $^{15}\text{F}(\text{g.s.})$, $^{15}\text{O}(\frac{1}{2}^+, T = \frac{3}{2})$, and $^{16}\text{F}(0^+, T = 2)$. Phys Rev C, 2006, 74: 054310
- 92 de Grancey F, Mercenne A, de Oliveira Santos F, et al. An above-barrier narrow resonance in ^{15}F . Phys Lett B, 2016, 758: 26–31
- 93 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
- 94 Morton A, Chow J, King J, et al. Beta-delayed particle decay of ^{17}Ne . Nucl Phys A, 2002, 706: 15–47
- 95 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
- 96 Gade A, Adrich P, Bazin D, et al. Inverse-kinematics one-proton pickup with intermediate-energy beams: the $^9\text{Be} (^{20}\text{Ne}, ^{21}\text{Na} + \gamma)X$ reaction. Phys Rev C, 2007, 76: 061302(R)
- 97 Gade A, Tostevin J A, Baugher T, et al. Inverse-kinematics one-neutron pickup with fast rare-isotope beams. Phys Rev C, 2011, 83: 054324
- 98 Gade A, Tostevin J A, Bader V, et al. One-neutron pickup into ^{49}Ca : bound neutron $g_{9/2}$ spectroscopic strength at $N = 29$. Phys Rev C, 2016, 93:

031601(R)

- 99 Charity R J, Brown K W, Elson J, et al. Invariant-mass spectroscopy of ^{18}Ne , ^{16}O , and ^{10}C excited states formed in neutron-transfer reactions. *Phys Rev C*, 2019, 99: 044304
- 100 Brink D. Kinematical effects in heavy-ion reactions. *Phys Lett B*, 1972, 40: 37–40
- 101 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
- 102 Tian J, Wang N, Li C, et al. Improved Kelson-Garvey mass relations for proton-rich nuclei. *Phys Rev C*, 2013, 87: 014313
- 103 Yuan C, Qi C, Xu F, et al. Mirror energy difference and the structure of loosely bound proton-rich nuclei around $A = 20$. *Phys Rev C*, 2014, 89: 044327
- 104 Fortune H T. Mirror energy differences of $2s_{1/2}$, $1d_{5/2}$, and $1f_{7/2}$ states. *Phys Rev C*, 2018, 97: 034301
- 105 Sumithrarachchi C S, Morrissey D J, Brown B A, et al. Structure of ^{23}F via β decay of ^{23}O . *Phys Rev C*, 2007, 75: 024305
- 106 Lalanne L, Sorlin O, Poves A, et al. $N = 16$ magicity revealed at the proton drip line through the study of ^{35}Ca . *Phys Rev Lett*, 2023, 131: 092501
- 107 Koyama S, Suzuki D, Assie M, et al. Mirror symmetry at far edges of stability: the cases of ^8C and ^8He . *Phys Rev C*, 2024, 109: L031301
- 108 Xing Y M, Luo Y F, Zhang Y H, et al. $z = 14$ magicity revealed by the mass of the proton dripline nucleus ^{22}Si . *Phys Rev Lett*, 2025, 135: 012501

Summary for “轻质子滴线区 $N = 8$ 壳演化研究进展”

Progress on evolution of $N = 8$ shell around the light proton drip line

Lei Ni¹, Yu Jin^{1,2}, Hui Hua^{1*} & Zhihuan Li¹¹ School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China² Institute of Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621907, China* Corresponding author, E-mail: Hhwa@pku.edu.cn

In recent years, with the acquired capability to study nuclei far from the line of β stability, significant changes in nuclear shell structures have been revealed in certain areas, including the disappearance of some traditional magic numbers and the emergence of new ones. Currently, exploring the shell evolution in weakly bound/unbound nuclei, both experimentally and theoretically, has become one of the frontiers in radioactive ion beam physics. This line of research not only deepens our understanding of the structure and interaction mechanisms in quantum many-body systems but also provides guidance for the search of potentially longer-lived new isotopes. Recently, we investigated proton decays of Na, Mg, and Al isotopes around the proton drip line using the radioactive isotope beam ^{20}Mg provided by National Superconducting Cyclotron Laboratory at Michigan State University. Resonant structures of these nuclei were obtained by invariant mass reconstruction. The ground-state mass of ^{18}Na was experimentally determined, and the shell effect at $N = 8$ in Na isotopes was discussed based on the systematics of the difference of single-neutron separation energy. The new isotope ^{18}Mg was observed for the first time, with its ground and 2_1^+ states determined. The $1/2_1^+$ state in ^{19}Mg was identified, and the 4_1^+ and 2_2^+ states in ^{20}Mg were separated experimentally. The ratio $R_{42} = 2.10(1)$ in ^{20}Mg is close to the expected harmonic-vibrator value, suggesting a spherical or weakly deformed shape for ^{20}Mg and excluding the possibility of deformation-driven weakening of the $N = 8$ shell closure. Systematic comparison of $E^*(2_1^+)$ and R_{42} with shell model calculations, combined with systematics of energy difference between the $1/2_1^-$ and $1/2_1^+$ states in ^{19}Mg and its isotones, together with the good mirror symmetry, further suggests the persistence of $N = 8$ shell closure in ^{20}Mg . According to the shell model calculations, due to the inversion of $\pi 2s_{1/2}$ and $\pi 1d_{5/2}$ orbitals in the Mg isotopes near the proton drip-line, the 2_1^+ state in ^{18}Mg mainly arises from the excitation of $\pi 2s_{1/2} \rightarrow \pi 1d_{5/2}$, whereas the 2_1^+ state in ^{20}Mg results from the internal excitation within the $\pi 1d_{5/2}$ orbital. Thus, the relatively higher 2_1^+ excitation energy in ^{18}Mg relative to ^{20}Mg can be ascribed to different excitation characters of the valence protons. The structure of the proton-unbound nucleus ^{21}Al was studied via its three-proton decay. The first observed resonant state at $E^* = 6.09(11)$ MeV likely has a spin-parity of $(1/2^+ - 7/2^+)$. Systematics of experimental energy difference between the $5/2^+$ ground state and lowest-lying $3/2^+$ excited state for isotopes (isotones) of $Z(N) = 13$ suggest a likely semimagic nature of ^{21}Al .

proton drip line, proton decay, nuclear structure, shell evolutiondoi: [10.1360/CSB-2025-5449](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5449)