



滴线附近原子核的衰变和结构研究

倪磊 金瑜 华辉 李智焕

Decay and Structure of Nuclei Around the Drip Line

NI Lei, JIN Yu, HUA Hui, LI Zhihuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC80>

引用格式:

倪磊, 金瑜, 华辉, 李智焕. 滴线附近原子核的衰变和结构研究[J]. 原子核物理评论, 2024, 41(1):86–93. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC80

NI Lei, JIN Yu, HUA Hui, LI Zhihuan. Decay and Structure of Nuclei Around the Drip Line[J]. Nuclear Physics Review, 2024, 41(1):86–93. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC80

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

质子滴线外奇异原子核的衰变研究

Decay Studies of Exotic Nuclei Beyond the Proton Dripline

原子核物理评论. 2023, 40(3): 327–340 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022132>

近质子滴线核 ^{28}S 的延迟衰变研究

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

原子核物理评论. 2021, 38(2): 117–122 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2020084>

质子滴线核 ^8B 的实验研究进展

Study on Proton Drip-line Nucleus ^8B

原子核物理评论. 2019, 36(2): 135–143 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.135>

sd 壳层极丰质子核的 β 延迟衰变谱学

β -delayed Decay Spectroscopies of Extremely Proton-rich Nuclei in sd -shell

原子核物理评论. 2020, 37(3): 492–499 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC62>

不稳定原子核 β 衰变强度的实验测量方法

Experimental Measurement Method of Beta Decay Strength of Unstable Nuclei

原子核物理评论. 2020, 37(3): 438–446 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC69>

利用改进的Gamow-like模型研究原子核的 α 衰变和质子放射性

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

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

滴线附近原子核的衰变和结构研究

倪磊¹, 金瑜^{1,2}, 华辉^{1,†}, 李智焕¹

(1. 北京大学物理学院和核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871;
2. 中国工程物理研究院材料研究所, 四川 绵阳 621907)

摘要: 滴线区原子核奇异衰变和结构研究对人们认识原子核新规律及发展新理论起到了关键的作用。近些年来相关研究取得了重要进展, 但是还有很多新现象和新规律有待人们去认识。以质子滴线外 ^{16}Ne 原子核的双质子衰变为例, 介绍了不变质量法在质子衰变研究中的应用, 得到了 ^{16}Ne 基态和第一激发态的衰变能与动量关联。与利用飞行衰变法得到的结果进行了比较, 说明了运用完整运动学测量的不变质量法可以更准确地确定共振态的衰变信息。假设 ^{16}Ne 基态具有不同半衰期, 通过模拟生成不变质量谱, 研究了原子核寿命不同对不变质量谱准确度的影响。结果表明对于寿命较短的原子核不变质量法有效且可靠, 对于寿命较长的原子核飞行衰变法则更为合适。

关键词: 滴线; 不变质量法; 飞行衰变法; 质子衰变; ^{16}Ne

中图分类号: O571.53

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC80

0 引言

原子核通过核子间的强相互作用紧密地结合在一起, 构成复杂的量子有限多体体系。对于处于 β 稳定线上的原子核, 如果不断增加中子或质子, 最外层核子与其他核子的结合会变得越来越松散, 其结合能越来越小, 直至结合能为零, 达到稳定性的极限 (滴线)。到目前为止, 人类一共发现了 118 种元素的超过 3 300 种同位素, 其核素种类包括 3 340 种基态核素以及 1 938 种衰变半衰期大于 100 ns 的同核异能态核素。在核素图上, 稳定原子核只有 280 多个, 但理论预言滴线内的原子核可能有 8 000~10 000 个, 95% 以上的原子核位于不稳定区域。近 30 多年来, 人们依托放射性核束装置, 开展了不稳定原子核的研究, 发现了晕结构、新幻数、连续态强耦合、奇异衰变等量子多体的新现象, 极大地改变了人们对原子核的传统认识。不稳定原子核研究已成为核物理的前沿新领域——放射性核束物理, 是核物理未来的一个优先发展方向^[1-3]。目前国际上已经或正在推出若干新一代放射性核束装置, 如日本理化所的 RIBF-BigRIPS^[4-5]、德国的 GSI-Super-FRS^[6]、法国的 GANIL-SPIRAL-II^[7]、美国的 MSU-FRIB^[8] 和中国科学院近代物理研究所的 HIAF^[9] 等。随着这些新的放射性核束装

置的建成和成功运行, 将使不稳定核研究的深度和广度都得到极大提高, 给核物理的发展提供前所未有的条件和机遇。与此同时, 开展远离 β 稳定线直至滴线附近不稳定原子核的研究, 对人们理解天体物理和大尺度核物质状态的许多重要问题, 如宇宙能量变迁和元素起源, 中子星的结构和冷却, 超新星爆发等也将发挥重要作用。

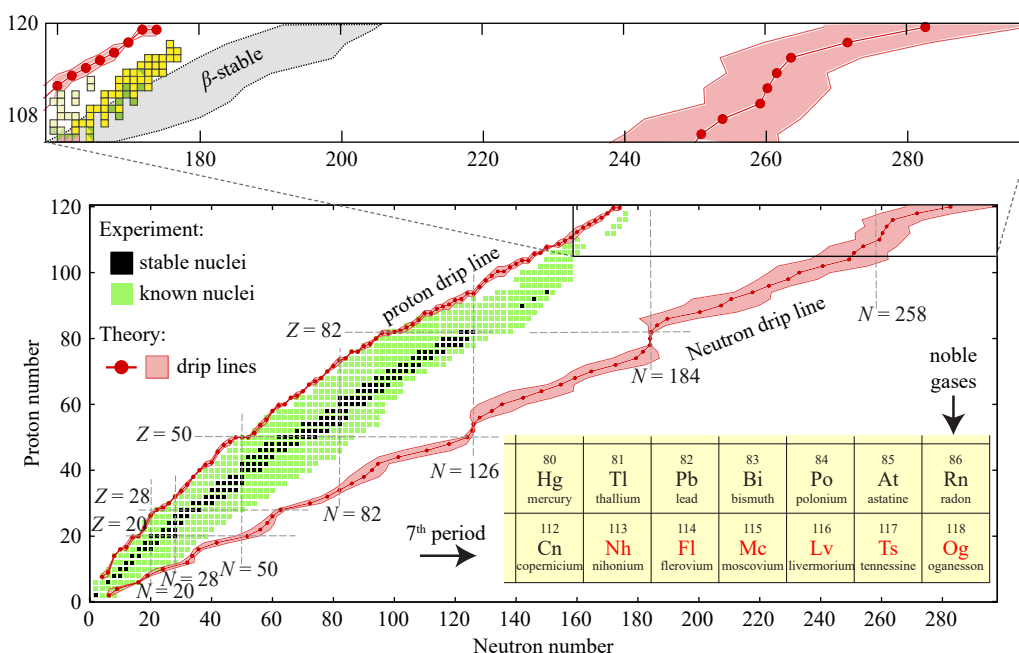
放射性核束物理研究中, 质子和中子滴线的具体位置及滴线核特性一直是最引人关注的内容。其对探索原子核稳定性的极限, 理解极端同位旋条件下核子的相互作用具有重要意义。目前核素版图中 (见图 1), 实验上质子滴线已推进到了镎 (Np, 质子数 $Z=93$)^[10]; 中子滴线由于距离 β 稳定线相对较远, 目前仅确认到氦 (He , $Z=10$)^[11]。在滴线附近, 原子核作为弱束缚的量子多体开放体系, 结构形态和有效相互作用的性质发生了显著变化, 放射性核束物理研究中的许多重大发现 (例如奇异衰变, 幻数和壳层的演变, 晕和集团等新的结构自由度, 三体力和张量力的突出作用等) 多集中在滴线区附近, 滴线区原子核奇异衰变和结构新现象的研究对人们认识原子核新规律、发展新的核理论起到了关键的作用。

收稿日期: 2024-01-01; 修改日期: 2024-02-19

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFA1602302, 2018YFA0404403); 国家自然科学基金资助项目 (12035001)

作者简介: 倪磊 (1998-), 男, 青海西宁人, 博士研究生, 从事核物理实验研究; E-mail: 2101110128@stu.pku.edu.cn

† 通信作者: 华辉, E-mail: Hhua@pku.edu.cn

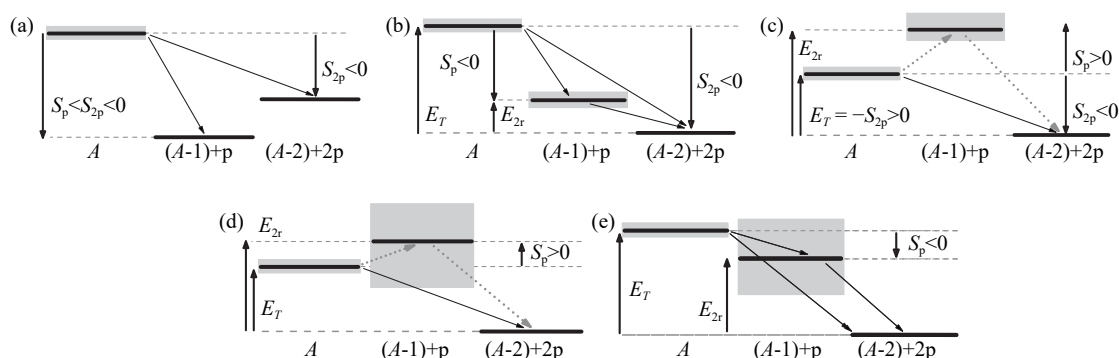
图 1 核素图及核子滴线^[12](在线彩图)

1 滴线附近的核子衰变

对于质子滴线区一些奇 Z 和偶 Z 的原子核，早在 20 世纪 60 年代初理论就预言它们分别会出现单质子衰变和双质子衰变模式^[13-14]。20 世纪 70 年代开始，人们在实验中陆续发现了很多奇 Z 原子核基态和长寿命激发态具有单质子放射性^[15-16]。到目前为止，发现的基态和长寿命激发态具有单质子放射性的奇 Z 核主要集中在中等质量质子滴线区 ($83 > Z > 50$)， $Z \leq 50$ 质子滴线区奇 Z 原子核的单质子放射性实验信息还非常缺乏。在轻滴线核区 ($Z \leq 50$)，原子核的性质非常依赖外层少数核子，增加或减少一个核子可以显著改变原子核的行为特性，因此有待于系统全面的实验和理论研究。

相对于单质子放射性，双质子放射性涉及两个质子

的关联与相互作用。通过实验测量衰变出射的两个质子间的动量和角度等关联关系，可得到核子波函数的具体形态及核子间的相互作用等信息，对理解极端同位旋条件下的量子关联性质及其对原子核结构稳定性的影响具有重要的意义，国际上几个大的核物理实验室都把双质子放射性作为重要研究目标。经过多年努力，2002 年在 ^{45}Fe 核中首次观测到基态双质子发射现象^[17-18]。到目前为止，实验上已发现 ^6Be ， ^{11}O ， ^{12}O ， ^{15}Ne ， ^{16}Ne ， ^{19}Mg ， ^{30}Ar ， ^{45}Fe ， ^{48}Ni ， ^{54}Zn 和 ^{67}Kr 等原子核的基态有双质子衰变性质^[15, 19-22]。由于双质子发射同时受母核、中间过渡核和子核内部结构及能级相对位置等的影响，因此呈现出非常复杂的图像(见图 2)。近年来随着原子核版图向质子滴线外进一步拓展，实验上还发现了 ^7B ^[23]、 ^{13}F ^[24]、 ^{17}Na ^[25] 和 ^{31}K ^[26] 四个基态

图 2 不同双质子发射模式^[15]

图中 E_T 表示体系相对于三体破裂阈的能量， E_{2r} 表示相对于这一阈值的最低两体共振能， S_p 表示单质子分离能， S_{2p} 表示双质子分离能：(a) 典型的激发态衰变模式 (1p 或 2p 发射都有可能)；(b) 经过窄共振中间态的级联衰变；(c) 直接双质子衰变；(d) 和 (e) 经过宽共振中间态的三体衰变。

三质子发射核, $^8\text{C}^{[27]}$ 和 $^{18}\text{Mg}^{[28]}$ 两个基态四质子发射核, $^9\text{N}^{[29]}$ 基态五质子发射核, 为理解极端同位旋条件下原子核内核子关联和集团效应提供了新的途径。

类似于多质子放射性, 目前中子滴线区原子核的多中子放射性研究也备受人们关注。质子滴线区原子核衰变的多质子关联在穿越势垒时由于库仑力的影响有可能遭到破坏, 相较之下, 丰中子原子核的多中子衰变过程中不存在库仑相互作用的影响, 因此人们预期多中子关联在衰变过程中更容易被保持, 从而成为研究原子核内最外层的多个中子配对关联的有效探针。由于中子滴线离 β 稳定线距离相对较远, 滴线区丰中子核的生成截面小, 同时多中子符合测量难度大, 目前人们只观测到了相对较轻的 $^5\text{H}^{[30]}$, $^{10}\text{He}^{[31]}$, $^{13}\text{Li}^{[32]}$, $^{16}\text{Be}^{[33]}$, $^{21}\text{B}^{[34]}$, $^{26}\text{O}^{[35]}$ 等双中子发射核, $^6\text{H}^{[36]}$ 和 $^{27}\text{O}^{[37]}$ 等三中子发射核, $^7\text{H}^{[38]}$ 和 $^{28}\text{O}^{[37]}$ 等四中子发射核。

由上面的介绍可以看到, 滴线区原子核的核子放射性研究经过多年努力, 近年来取得了重大突破, 但整体研究还处于初步阶段, 很多理论预言的候选核目前还没有任何实验信息, 观察到的多核子发射图像比较复杂, 需要进一步通过实验和理论的研究加深认识。此外, 滴线区除了滴线外的直接核子放射性, 滴线内(离滴线较近)的很多核因为 β 衰变 Q 值很大, 同时子核的双核子分离能较低, 经 β 衰变可布居到子核的双核子甚至多核子非束缚能级, 通过发射双核子(多核子)退激。Riisager^[39] 根据原子核质量表, 分析了远离稳定线原子核的 β 缓发核子发射模式, 如图 3 所示。这种 β 缓发多核子发射模式为人们研究原子核双核子(多核子)发射提供了新的研究手段。近年来质子滴线内 β 缓发双质子出射研究取得了很大进展^[15, 40], 我国实验团队在这个领域取得了很多有特色的研究成果^[41-46]。中子滴线内 β 缓发双中子出射同样由于实验上双中子的符合探测难度较大, 目前还没有见到 β 缓发双中子出射关联机制研究的

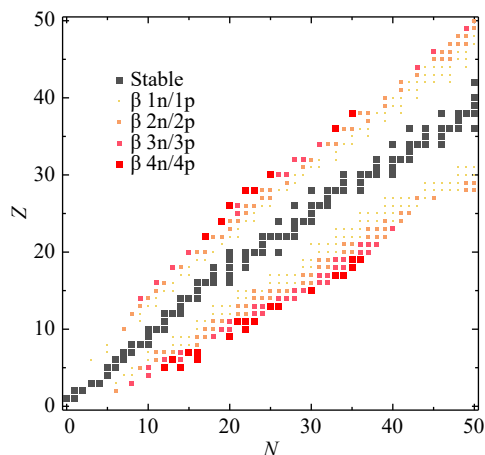


图 3 β 缓发中子/质子衰变的原子核^[39](在线彩图)

实验报道。当前随着实验技术的发展, 特别是探测系统探测效率的显著提高, 研究对象可以延伸到滴线外更远的原子核, 同时很多衰变分支比很小的奇异衰变模式在实验上也有可能被发现, 为系统地研究滴线附近原子核的奇异衰变、探索原子核稳定性的极限提供了机遇。

2 不变质量法研究质子滴线外原子核 ^{16}Ne 的双质子衰变

依据质子滴线目标核寿命的不同, 目前主要有三种不同的实验方法对双质子衰变进行研究, 包括注入衰变法、飞行衰变法、不变质量法^[47-48]。图 4 中给出了使用三体理论模型计算的一些 2p 发射体的衰变能与寿命的区间, 同时标出了不同寿命区间适合使用的实验方法^[15]。如图 4 所示, 对于寿命短于 ps 量级的原子核共振态, 其在靶内很快发生衰变, 一般使用不变质量法来开展实验研究。特别是随着近年来研究逐渐超出质子滴线, 目标核的寿命越来越短, 不变质量重建被证明是研究具有奇异中质比的原子核结构的一种有效方法, 受到人们的极大关注。下面主要介绍我们研究团队利用不变质量法开展的对 ^{16}Ne 核共振态的双质子发射研究, 并与 Mukha 等^[49] 采用飞行衰变法得到的结果进行比较。

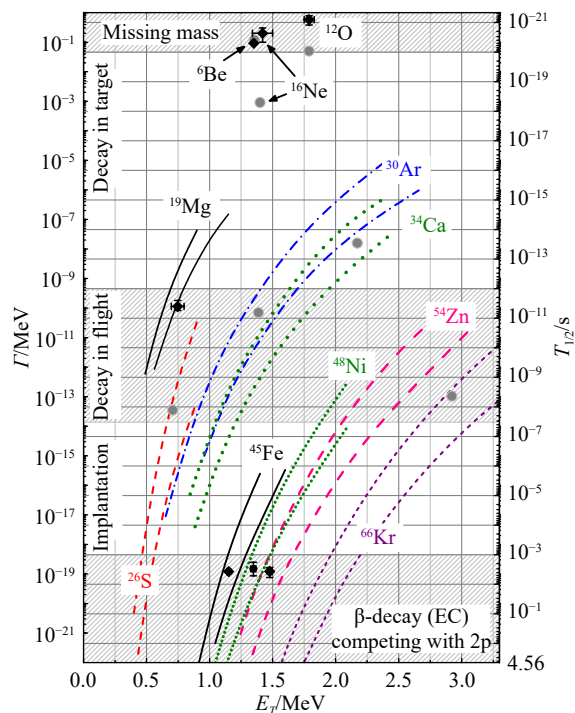


图 4 三体模型得到的部分已知 2p 发射核或候选核的寿命 $T_{1/2}$ (衰变宽度 Γ) 与衰变能 E_T 的系统性^[15](在线彩图)

黑色菱形点表示实验值, 灰色圆点表示理论预言结果, 阴影区域表示不同实验技术适合测量的寿命区域。

我们的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。实验使用的 ^{20}Mg 放射性束流由 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 (A1900 fragment separator) 提供, 能量为 103 MeV/u, 强度为

5 600 pps, 纯度为 31%, 并且可以进行逐事件的次级束粒子鉴别。 ^{20}Mg 与 ^9Be 靶反应, 去除两个质子和两个中子, 生成 ^{16}Ne 的共振态。由于 ^{16}Ne 的共振态寿命极短, 会迅速在 ^9Be 次级靶内发生衰变, 实验中采用不变质量法来研究 ^{16}Ne 的共振态。 ^{16}Ne 衰变测量的实验装置如图 5 所示。

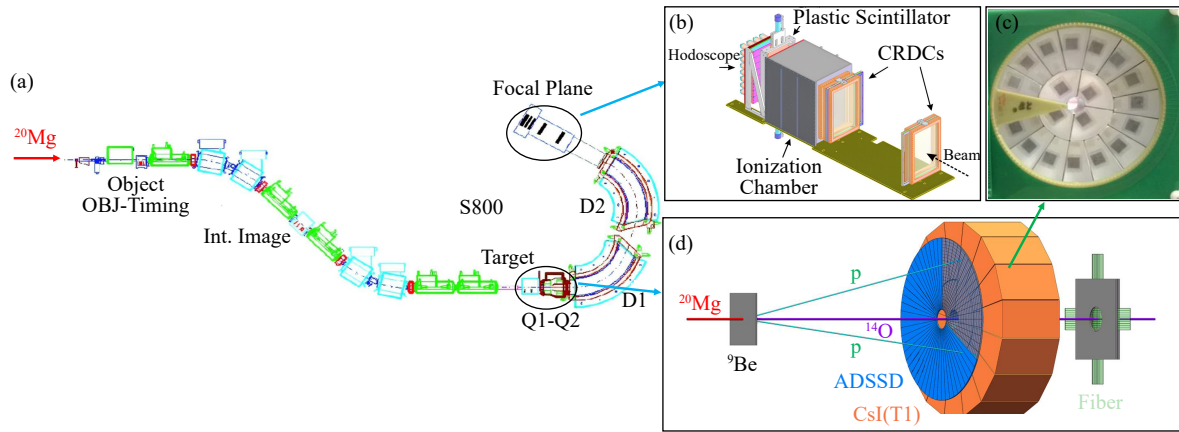


图 5 利用不变质量法测量 ^{16}Ne 衰变示意图

(a) S800 磁谱仪^[50]; (b) S800 焦平面探测器^[51]; (c) 环形 CsI(Tl) 阵列, 内环包含 4 个 CsI(Tl) 晶体, 外环包含 16 个 CsI(Tl) 晶体; (d) 反应靶与靶室探测阵列。

^{16}Ne 共振态的衰变产物 ^{14}O 和 2 个质子同时从 ^9Be 次级靶里发射出来后, 使用由一块环形双面硅微条探测器 (ADSSD)^[52] 和一个环形 CsI(Tl) 阵列组成的 $\Delta E - E$ 望远镜探测系统, 对衰变出射的质子进行探测, 给出质子的位置和能量信息。剩余核 ^{14}O 主要集中在零度角附近出射, 大部分与次级束混在一起。因此, 在望远镜阵列中心留有一个直径为 10 mm 的小孔, 让剩余核和次级束一同穿过, 而后首先经过一个位置灵敏的闪烁光纤阵列给出剩余核出射的位置信息, 随后由 S800 磁谱仪筛选出剩余核, 同时对其进行粒子鉴别^[53-54], 并提供剩余核的能量信息。

此前, Mukha 等^[49] 曾采用飞行衰变法对 ^{16}Ne 的双质子衰变进行过实验研究。其实验装置如图 6(a) 所示, 利用多层硅微条探测器对出射的末态粒子进行径迹追踪, 通过重建衰变顶点来确定末态粒子的出射角度^[49, 55]。图 6(b) 和 (c) 给出了实验室系下质子和剩余核的相对动量 k_{p-HI} 与二者之间夹角 θ_{p-HI} 的关系。对于确定的相对动量值, θ_{p-HI} 的最概然值将出现在其可取的最大值处^[49], 因而在飞行衰变法中, 可以通过在实验系下测量到的 θ_{p-HI} 分布来反映衰变粒子之间的相对动量信息, 无需测量衰变粒子的能量。对于不同的衰变模式, 质子和剩余核的相对动量关联将呈现不同的分布特征, 图 6(d) 和 (e) 分别给出了直接双质子衰变和级联双质子衰变形成的相对动量关联, 考虑到 k_{p-HI} 与 θ_{p-HI} 的关系, 可以利

用实验测到的 θ_{p-HI} 关联来得到 ^{16}Ne 的衰变信息^[49]。图 6(f) 展示了 Mukha 等^[49] 利用飞行衰变法测得的 ^{16}Ne 双质子衰变的角度关联图, 由此 Mukha 等^[49] 确定了 ^{16}Ne 基态和第一激发态的衰变能。

随后, Charity 等^[56-57] 通过不变质量法研究了 ^{16}Ne 的双质子衰变。实验利用 ^{17}Ne 次级束与 ^9Be 发生单中子敲出反应生成 ^{16}Ne , 采用了 HiRA 望远镜阵列^[58] 对 ^{16}Ne 衰变产生的两个质子与 ^{14}O 剩余核进行符合测量, 并通过不变质量法重建了 ^{16}Ne 的衰变能谱和双质子关联结果。

图 7 显示了本实验通过符合测量的 $^{14}\text{O} + 2p$ 事件构建的 ^{16}Ne 不变质量谱, 可以非常清晰地分辨出两个峰, 与 Charity 等^[56-57] 得到的不变质量谱结构一致。通过拟合实验能谱, 我们得到了这些共振态对应的衰变能, 并与飞行衰变法得到的结果^[49] 以及 Charity 等得到的结果^[56-57] 进行了对比, 见表 1。可以看到, 本工作所得的衰变能与其他工作的结果基本一致, 但分辨最好。

为了直接与飞行衰变法进行对比, 图 8(a) 给出了本实验测得的两个质子与剩余核夹角 θ_{p-HI} 的二维分布图。虽然由于束流能量不同, 本实验的 θ_{p-HI} 绝对值与 Mukha 等^[49] 实验的绝对值不同, 但仍可以看出图 8(a) 与图 6(f) 的结构有一定相似性, 都具有对应于 ^{16}Ne 共振态的两个统计集中区域, 反映相同的衰变信息。进一步地, 通过筛选 ^{16}Ne 的基态和 2^+ 态事件 (应用图 7 中 G1、G2 两

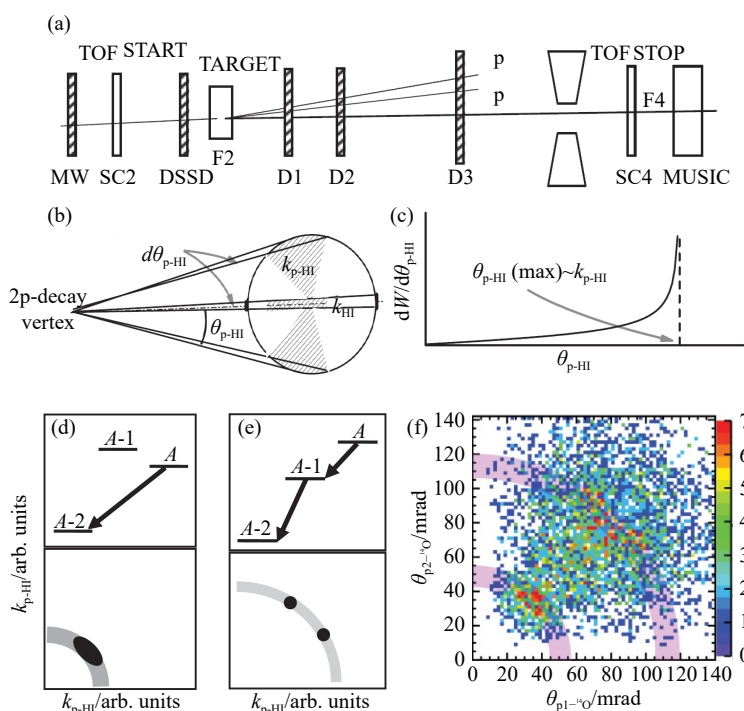


图 6 利用飞行衰变法测量 ^{16}Ne 的双质子衰变的实验设置和基本原理示意图 [49]

(a) 利用飞行衰变法测量 ^{16}Ne 的实验设置; (b) 和 (c) 质子与剩余核的相对动量 $k_{p\text{-HI}}$ 与它们之间夹角 $\theta_{p\text{-HI}}$ 的关系; (d) 和 (e) 不同双质子衰变模式下单质子和剩余核子系统的动量关联关系; (f) ^{16}Ne 双质子衰变实验测得的质子与剩余核的角度关联。

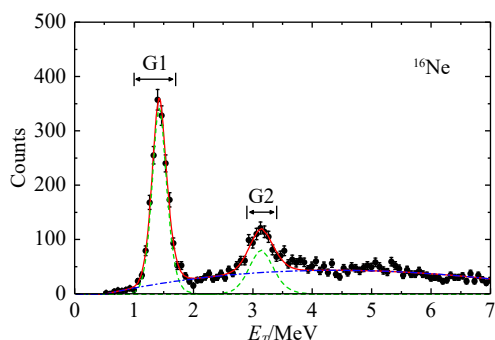


图 7 利用 $^{14}\text{O} + 2p$ 符合事件构建的 ^{16}Ne 的不变质量谱 (在线彩图)

绿色虚线是各自拟合的峰, 蓝色点虚线是平滑本底, 红色实线是总的拟合结果。黑色竖线表示用于挑选出 ^{16}Ne 两个共振态事件的能量范围。

表 1 利用不变质量法得到的 ^{16}Ne 共振态衰变能 E_T 与飞行衰变法 [49] 以及 Charity 等得到的结果 [56-57] 的对比

单位: MeV

	E_T (本工作)	E_T (飞行衰变法 [49])	E_T (Charity [56-57])
$^{16}\text{Ne}(\text{g.s.})$	1.422(4)	1.35(8)	1.466(20)
$^{16}\text{Ne}(2_1^+)$	3.140(10)	3.20(20)	3.160(20)

个能量范围), 可以分别得到 ^{16}Ne 基态和激发态对应的 $\theta_{p\text{-HI}}$ 关联图 [图 8(b)、图 8(c)]。从图中可以看到, 两个共振态的质子-剩余核夹角关联边界较为模糊, 分布弥散范围大, 尤其是激发能较高的态, 存在较为明显的拖

尾。造成这一现象的原因可以由图 6(c) 解释, 对于一个确定的相对动量值 $k_{p\text{-HI}}$, $\theta_{p\text{-HI}}$ 并不是一个确定值, 而是在小角度处具有一定的拖尾, 这会导致低激发态处的角分布叠加了来自高激发态的拖尾, 进而影响对母核衰变能提取的精度。相比较而言, 本实验对 ^{16}Ne 的所有衰变末态粒子进行了能量和角度测量, 因此可以直接给出质子和剩余核相对动量 $k_{p\text{-HI}}$ 的关联图, 如图 8(d)~(f) 所示。图 8(d) 给出所有 ^{16}Ne 事件的 $k_{p\text{-HI}}$ 关联, 它比图 8(a) 中不同共振态的区分度更高, 也与图 6(d) 和 (e) 的结构一致。图 8(e) 和 (f) 分别为 ^{16}Ne 基态和 2^+ 态事件的 $k_{p\text{-HI}}$ 关联 (应用图 7 中 G1、G2 两个能量范围), 两个共振态的质子-剩余核相对动量关联在这两幅图中可以被清楚地分开, 因此运用完整运动学测量的不变质量法非常有利于准确地确定共振态的衰变信息。

考虑到原子核寿命的不同会影响可选用的实验手段, 不变质量法和飞行衰变法有各自适用的寿命区间。如图 4 所示, 不变质量法比较适用于寿命短于 ps 量级的原子核, 对于寿命较长的原子核, 它的准确度将下降。这是因为在提取衰变系统的不变质量时, 需要考虑各衰变产物之间的相对夹角 [48], 它们是根据实验测到的各衰变产物的出射角计算得到的。由于很难确定母核产生和衰变的具体位置, 在进行分析时, 一般假设衰变顶点在靶中心, 再根据测到的各衰变粒子位置信息得到它们的

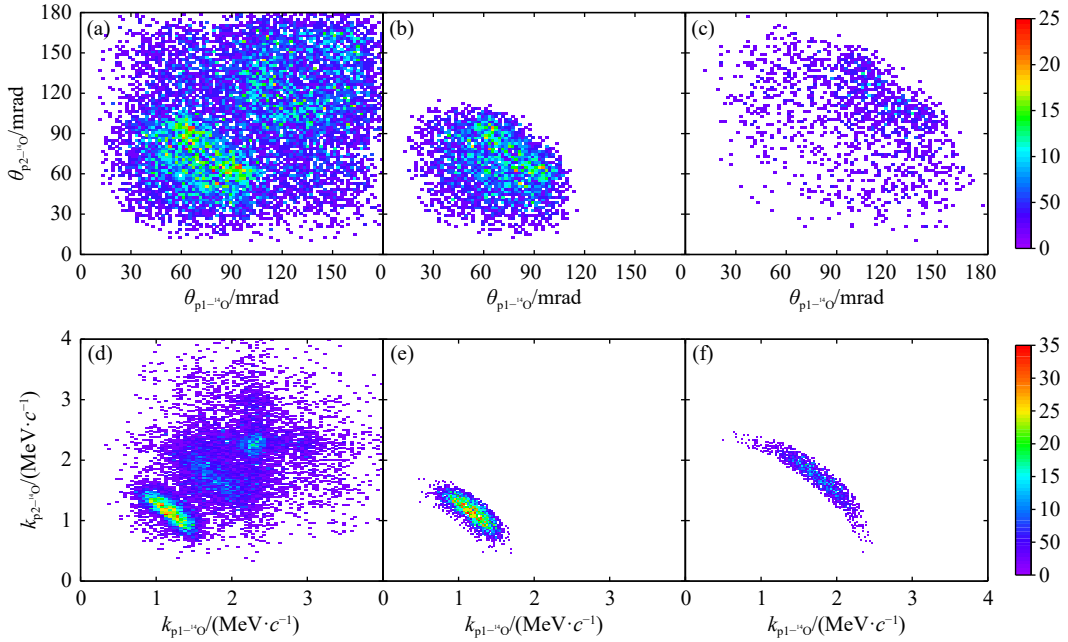


图 8 质子和剩余核的夹角 θ_{p-HI} 的关联图与相对动量 k_{p-HI} 的关联图(在线彩图)

(a) 所有 ^{16}Ne 事件; (b) 能量门在 $E_T = 1.422(4)$ MeV (G1) 和 (c) 能量门在 $E_T = 3.14(1)$ MeV (G2) 的 θ_{p-HI} 关联图; (d) 所有 ^{16}Ne 事件; (e) 能量门在 $E_T = 1.422(4)$ MeV (G1) 和 (f) 能量门在 $E_T = 3.14(1)$ MeV (G2) 的 k_{p-HI} 关联图。

出射角和它们之间的夹角。由于实验中束流速度很快, 对于寿命较长的原子核, 它们产生后在衰变之前可以飞行较远的距离(可能飞出靶外), 因此衰变顶点将会有较大的空间分布, 进而影响重建的不变质量谱的共振峰位置及分辨。为了研究原子核不同的寿命对不变质量谱准确度的影响, 以 ^{16}Ne 为例, 在 103 MeV/u 的入射 ^{20}Mg 次级束能量下, 假设 ^{16}Ne 的 $E_T = 1.422$ MeV 基态具有不同半衰期, 我们模拟了实验重建的不变质量谱, 如图 9 所示。可以看到, 半衰期为 1 ps 时得到的不变质量谱与半衰期远小于 1 ps ($T_{1/2} = 0$) 的结果非常接近, 此时不变质量法仍然可以获得很高的准确度。当半衰期增大到 10 ps 时, 不变质量谱的峰位开始出现移动, 分

辨开始变差。而半衰期为 100 ps 和 1 000 ps 的模拟结果与半衰期为 0 ps 的模拟结果差别很大, 其分辨显著变差, 同时峰位发生了明显移动, 这将导致不变质量法得出的结果相对真实结果出现明显的偏差。因而, 对于寿命较短的原子核, 例如 ^{16}Ne , 不变质量法是非常有效且可靠的研究方法, 对于一些寿命较长的原子核, 飞行衰变法是非常合适的。

3 总结与展望

放射性核束物理是核物理研究的前沿方向之一, 其中滴线区原子核的核子放射性近年来备受关注。受限于多体发射问题的复杂性, 目前的理论和实验工作虽然取得了很大的进展, 但还有很多的结构和衰变机制尚不清楚。近年来随着实验技术的进一步发展, 尤其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方向延伸, 有助于发现新的奇异衰变、厘清复杂的衰变模式, 为人们更加深入且系统地研究滴线区原子核的奇异衰变模式和结构、探索原子核稳定性的极限提供全新的机遇。

本文简要总结了近年来滴线附近核子衰变的实验研究现状, 以质子滴线外 ^{16}Ne 原子核的双质子衰变为例, 着重讨论了不变质量法和飞行衰变法在质子衰变研究中的应用。利用 ^{14}O 和两质子的三体符合测量, 我们构建了 ^{16}Ne 的不变质量谱, 提取了其共振态的能级信息, 得到了不同共振态质子和剩余核的相对动量关联。通过

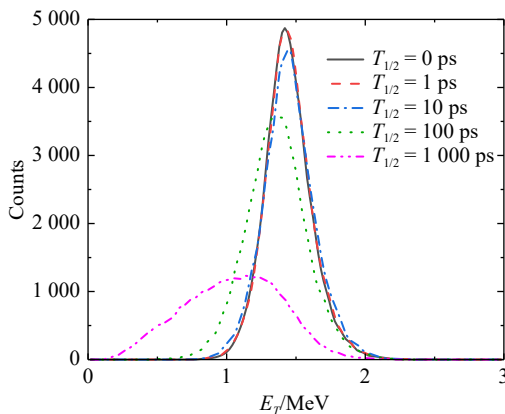


图 9 假设 ^{16}Ne 的 $E_T = 1.422$ MeV 基态具有不同半衰期时, 利用模拟程序得到的不变质量谱(在线彩图)

与 Mukha 等人利用飞行衰变法得到的结果进行比较, 说明了包含完整运动学测量的不变质量法可以得到更加准确的共振态信息。假设 ^{16}Ne 基态具有不同半衰期, 模拟生成了不变质量法重建后的衰变能谱, 研究了原子核寿命对不变质量法准确度的影响。模拟结果表明, 对寿命较短的原子核, 不变质量法可以准确给出其衰变信息, 对寿命较长的原子核, 飞行衰变法更加合适。

参考文献:

- [1] NuPECC long range plan[EB/OL]. [2023-11-27]. <http://www.nupecc.org>.
- [2] APRAHAMIAN A, et al. Reaching for the Horizon: The 2015 Long Range Plan for Nuclear Science[EB/OL]. [2023-11-27]. http://inspirehep.net/record/1398831/files/2015_LRPNS_091815.pdf.
- [3] CARLSON J, CARPENTER M P, CASTEN R, et al. *Pro Part Nucl Phys*, 2017, 94: 68.
- [4] YANO Y. *Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect B*, 2007, 261(1): 1009.
- [5] KUBO T. *Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect B*, 2003, 204: 97.
- [6] GEISSEL H, WEICK H, WINKLER M, et al. *Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect B*, 2003, 204: 71.
- [7] GALES S. *Nucl Phys A*, 2010, 834(1): 717c.
- [8] SOULIOTIS G. *Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect B*, 2008, 266(19): 4213.
- [9] XIAO Guoqing, XU Hushan, WANG Sicheng. *Nuclear Physics Review*, 2017, 34(3): 275. (in Chinese)
(肖国青, 徐珊珊, 王思成. *原子核物理评论*, 2017, 34(3): 275.)
- [10] ZHANG Z Y, GAN Z G, YANG H B, et al. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 192503.
- [11] AHN D S, FUKUDA N, GEISSEL H, et al. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 212501.
- [12] GIULIANI S A, MATHESON Z, NAZAREWICZ W, et al. *Rev Mod Phys*, 2019, 91: 011001.
- [13] GOLDANSKY V. *Nuclear Physics*, 1960, 19: 482.
- [14] ZEL'DOVICH Y B. *Sov Phys JETP*, 1960, 38: 812.
- [15] PFÜTZNER M, KARNY M, GRIGORENKO L V, et al. *Rev Mod Phys*, 2012, 84: 567.
- [16] BLANK B. *Lect Notes Phys*, 2009, 764: 153.
- [17] GIOVINAZZO J, BLANK B, CHARTIER M, et al. *Phys Rev Lett*, 2002, 89: 102501.
- [18] PFÜTZNER M, BADURA E, BINGHAM C, et al. *The European Physical Journal A*, 2002, 14: 279.
- [19] WAMERS F, MARGANIEC J, AKSOUH F, et al. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 132502.
- [20] MUKHA I, GRIGORENKO L V, XU X, et al. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 202501.
- [21] GOIGOUX T, ASCHER P, BLANK B, et al. *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 162501.
- [22] WEBB T B, WANG S M, BROWN K W, et al. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 122501.
- [23] CHARITY R J, ELSON J M, MANFREDI J, et al. *Phys Rev C*, 2011, 84: 014320.
- [24] CHARITY R J, WEBB T B, ELSON J M, et al. *Phys Rev Lett*, 2021, 126: 132501.
- [25] BROWN K W, CHARITY R J, ELSON J M, et al. *Phys Rev C*, 2017, 95: 044326.
- [26] KOSTYLEVA D, MUKHA I, ACOSTA L, et al. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 092502.
- [27] CHARITY R J, ELSON J M, MANFREDI J, et al. *Phys Rev C*, 2010, 82: 041304.
- [28] JIN Y, NIU C Y, BROWN K W, et al. *Phys Rev Lett*, 2021, 127: 262502.
- [29] CHARITY R J, WYLIE J, WANG S M, et al. *Phys Rev Lett*, 2023, 131: 172501.
- [30] GOLOVKOV M S, GRIGORENKO L V, FOMICHEV A S, et al. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 262501.
- [31] KORSHENINNIKOV A, YOSHIDA K, ALEKSANDROV D, et al. *Phys Lett B*, 1994, 326(1): 31.
- [32] AKSYUTINA Y, JOHANSSON H, ADRICH P, et al. *Phys Lett B*, 2008, 666(5): 430.
- [33] SPYROU A, KOHLEY Z, BAUMANN T, et al. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 102501.
- [34] LEBLOND S, MARQUÉS F M, GIBELIN J, et al. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 262502.
- [35] KOHLEY Z, BAUMANN T, BAZIN D, et al. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 152501.
- [36] ALEKSANDROV D, GANZA E, GLUKHOV Y, et al. *Sov J Nucl Phys*, 1984, 39: 323.
- [37] KONDO Y, ACHOURI N, FALOU H, et al. *Nature*, 2023, 620: 965.
- [38] KORSHENINNIKOV A A, NIKOLSKII E Y, KUZMIN E A, et al. *Phys Rev Lett*, 2003, 90: 082501.
- [39] RIISAGER K. *Eur Phys J A*, 2002, 15: 75.
- [40] BLANK B, BORGE M. *Prog Part Nucl Phys*, 2008, 60(2): 403.
- [41] WANG Y, FANG D, WANG K, et al. *Phys Lett B*, 2018, 784: 12.
- [42] XU X, LIN C, SUN L, et al. *Phys Lett B*, 2017, 766: 312.
- [43] FANG D Q, MA Y G, SUN X Y, et al. *Phys Rev C*, 2016, 94: 044621.
- [44] MA Y, FANG D, SUN X, et al. *Phys Lett B*, 2015, 743: 306.
- [45] XU X, LIN C, JIA H, et al. *Phys Lett B*, 2013, 727(1): 126.
- [46] LIU J J, XU X X, SUN L J, et al. *Phys Rev Lett*, 2022, 129: 242502.
- [47] GRIGORENKO L V, ZHUKOV M V. *Phys Rev C*, 2003, 68: 054005.
- [48] JIN Yu, NI Lei, HUA Hui, et al. *Nuclear Physics Review*, 2023, 40(3): 327. (in Chinese)
(金瑜, 倪磊, 华辉, 等. *原子核物理评论*, 2023, 40(3): 327.)
- [49] MUKHA I, SÜMMERER K, ACOSTA L, et al. *Phys Rev C*, 2010, 82: 054315.
- [50] S800 Introduction[EB/OL]. [2023-11-28]. <https://wikihost.nsl.ms.edu/S800Doc/doku.php?id=introduction>.
- [51] S800 Detectors Introduction[EB/OL]. [2023-11-28]. <https://wikihost.nsl.ms.edu/S800Doc/doku.php?id=detectors>.
- [52] S4 Design by Micron Semiconductor Ltd.[EB/OL]. [2023-09-16]. <http://www.micronsemiconductor.co.uk/product/s4/>.
- [53] YURKON J, BAZIN D, BENENSON W, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 1999, 422(1): 291.
- [54] BAZIN D, CAGGIANO J, SHERRILL B, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 2003, 204: 629.

- [55] MUKHA I, GRIGORENKO L V, KOSTYLEVA D, et al. *Phys Rev C*, 2018, 98: 064308.
- [56] BROWN K W, CHARITY R J, SOBOTKA L G, et al. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 232501.
- [57] BROWN K W, CHARITY R J, SOBOTKA L G, et al. *Phys Rev C*, 2015, 92: 034329.
- [58] WALLACE M, FAMIANO M, van Goethem M J, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2007, 583(2): 302.

Decay and Structure of Nuclei Around the Drip Line

NI Lei¹, JIN Yu^{1,2}, HUA Hui^{1,†}, LI Zhihuan¹

(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, Sichuan, China)

Abstract: Studies of nuclear exotic decay and structure around the drip line are of critical importance for understanding new laws in nuclei and developing new nuclear theories. In recent years, significant progress has been made in related research. However, there are still numerous new phenomena and mechanisms, which need further exploration. In this paper, the two-proton decay of resonant states in ^{16}Ne is used as an example to introduce the applications of the invariant mass method in proton decay studies. With the invariant mass method, the decay energies and the corresponding momentum correlations of the ground state and the first excited state in ^{16}Ne are determined. Comparative analysis with results obtained using the decay-in-flight method has illustrated that the invariant mass method, with its complete kinematic measurements, offers more precise results about the decay characteristics of resonant states. By simulating invariant mass spectra under the assumption of different half-lives for the ground state of ^{16}Ne , the impact of nuclear lifetime on the accuracy of the invariant mass spectrum is studied. The results indicate that the invariant mass method is effective and reliable for short-lived nuclei, while the decay-in-flight method is more suitable for long-lived nuclei.

Key words: drip line; invariant mass method; decay-in-flight method; proton decay; ^{16}Ne

Received date: 01 Jan. 2024; Revised date: 19 Feb. 2024

Foundation item: National Key Research and Development Program of China(2022YFA1602302, 2018YFA0404403); National Natural Science Foundation of China(12035001)

† Corresponding author: HUA Hui, E-mail: HHua@pku.edu.cn