



滴线外奇异双质子放射性的研究进展

黄博^{1,2}, 方德清^{1,2*}, 王思敏^{1,2*}

1. 复旦大学现代物理研究所, 教育部核物理与离子束应用重点实验室, 上海 200433

2. 国家自然科学基金委员会及复旦大学, 上海核物理理论研究中心, 上海 200438

* 联系人, E-mail: dqfang@fudan.edu.cn; wangsimin@fudan.edu.cn

2024-08-29收稿, 2024-11-20修回, 2024-11-21接受, 2024-11-22网络版发表

国家重点研发计划(2023YFA1606404, 2022YFA1602303)、国家自然科学基金(12347106, 12147101, 11925502, 11935001, 11961141003)和中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB34030000)资助

摘要 滴线区原子核是弱束缚或非束缚的开放量子系统, 由于连续谱与形变效应等影响, 表现出奇异的结构和放射性. 其中, 双质子发射是最新发现且最受关注的衰变模式之一, 对双质子发射的研究有利于理解质子滴线外原子核的独特结构和质子对关联. 本文概述了最近发展的理论方法, 重点介绍了基于Gamow耦合道方法和含时演化方法等三体模型对双质子发射核的衰变机制、核子-核子关联以及衰变动力学等方面的研究. 基于HIAF、FRIB以及FAIR等国内外新一代放射性核束装置, 人们有望对滴线附近原子核的奇异结构和放射性进行更多更深入的实验探究, 而理论方法的发展可以与未来的实验相辅相成.

关键词 滴线外原子核, 双质子发射, Gamow耦合道方法, 时演化方法

对处于稳定极限的原子核的研究是目前核物理研究的前沿方向之一. 原子核稳定极限是由其结合能决定的, 随着向中子(质子)数一定的原子核持续增加质子(中子), 它的价核子结合能具有越来越小的趋势, 直至最后一(两)个核子的结合能为零, 继续加入的质子(中子)会自发“滴出”. 这种处于稳定极限的原子核在核素图中形成的边界便是质子(中子)滴线. 得益于放射性核束装置以及探测技术的发展, 人们正积极探索滴线的位置, 并已经分别将中子和质子滴线扩展到Ne元素^[1,2]和Np元素^[3]. 远离稳定线的滴线区原子核是弱束缚或非束缚的开放量子系统, 表现出许多奇异的结构和衰变性质. 这些奇特现象包括晕结构^[4,5]、壳层演化^[6]、Thomas-Ehrman shift (TES)^[7,8]、集团结构以及核子放射性^[9]等.

对于一些质子滴线外的原子核, 非束缚的质子可以自发地从原子核中发射出来, 即具有质子放射性. 在

质子非束缚核中, 库仑势垒会阻碍非束缚质子的发射, 这导致了质子发射与 β 衰变的竞争. 实验上, 单质子发射最早于1982年在¹⁵¹Lu^[10]和¹⁴⁷Tm^[11]中被观测到. 在此之后的40多年里, 实验家们已经发现更多的基态单质子发射核, 并且将其发展成为一种能够提供丰富的奇异核性质和结构信息的研究对象^[12].

另一方面, 质子数 Z 为偶数的非束缚核则可能发生双质子($2p$)衰变, 表现为两个质子同时自发地从原子核中发射. $2p$ 放射性是最新发现的衰变模式之一, 同时它的衰变机制也不为人们所了解, 本文将着重介绍 $2p$ 放射性的研究现状. 实验上对 $2p$ 放射性的早期探索是在相对容易产生的轻核如⁶Be^[13], ¹²O^[14]和¹⁶Ne^[14]中进行的. 对这些轻核特别是对⁶Be的后续研究, 提供了对三体动力学的有趣见解, 在后文中会有详细的讨论. 除了直接发射质子, 一些丰质子核会先发生 β 衰变, 之后激发态子核继续发射两个质子, 这种过程被称为 β 缓发 $2p$

引用格式: 黄博, 方德清, 王思敏. 滴线外奇异双质子放射性的研究进展. 科学通报, 2025, 70: 3262–3269
Huang B, Fang D, Wang S. Research progress on the two-proton radioactivity beyond the drip line (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 3262–3269, doi: 10.1360/TB-2024-0914

($\beta 2p$)发射. 1983年, 人们在 ^{22}Al 中发现了第一例 $\beta 2p$ 发射^[15]. 后来, 更多的 $\beta 2p$ 发射核被观察到^[16]. 然而, 在这些激发态衰变的实验中, 一般级联发射被发现占主导地位.

2002年, 在德国重离子研究中心^[17]和法国国家重离子大加速器上^[18]分别开展的独立实验在 ^{45}Fe 中首次观测到长寿命原子核基态 $2p$ 发射. 在此之后, ^{54}Zn ^[19]、 ^{48}Ni ^[20]和 ^{67}Kr ^[21]的 $2p$ 放射性被陆续发现. 同时时间投影室等新技术的应用也为直接探测 $2p$ 衰变提供了有力的支持^[22]. 更多详细的关于 $2p$ 衰变的实验研究可以参考相关的一些综述文章^[16, 23~26].

总的来说, 滴线附近的奇特原子核的 $2p$ 发射等现象不仅丰富了我们的实验观测, 还为理论研究提供了新的方向和动力.

1 理论模型

近些年, 在质子滴线外发现了越来越多的 $2p$ 发射核. 由于连续谱、壳层演化、形变效应等影响, 这些原子核通常具有不同的结构与衰变性质. 为了解释实验观测值并与结构信息建立相应的联系, 需要对 $2p$ 发射核的势垒内部和外部波函数进行自洽描述, 这对理论模型提出了很大的挑战. 一般来说, 内部结构、三体性质和连续谱效应对 $2p$ 衰变过程至关重要. 内部结构决定了价质子的谱因子和可能的衰变道, 而三体性质和连续谱效应则与衰变动力学和渐近行为有关. 由于衰变寿命的巨大差异和问题的复杂性, 目前还没有一个完善的理论能够同时将这三个方面描述得很好. 因此, 许多理论框架主要集中在其中的一个或两个方面, 如图1所示^[16, 23~25].

在内部结构方面, 有壳模型、密度泛函理论(density functional theory, DFT)与组态相互作用(configuration interaction, CI)等模型能够很好地描述核结构方面的信息. 特别地, DFT能够较好地描述原子核的本征性质, 适合系统地探索和预测 $2p$ 发射候选核^[27~31], 而CI则能对原子核组态、谱因子等结构信息进行预言^[32~34].

此外, 因为 $2p$ 发射核是位于质子滴线外的开放量子系统, 其衰变特性受到低激发连续谱的强烈影响. 为了将连续谱效应考虑到结构信息

中, 人们结合壳模型和Gamow理论开发了考虑连续谱的壳模型(shell model embedded with continuum, SMEC)^[32, 33, 35, 36]和Gamow壳模型(Gamow shell model, GSM)^[37, 38]等理论框架^[35~37, 39]. 其中SMEC被定义在希尔伯特空间中, 并已成功地被应用于 $2p$ 发射核 ^{45}Fe 与 ^{48}Ni 的半衰期研究^[32]. 与SMEC类似, GSM也是将原子核描述为价核子以及被其包围的核芯形成的系统. 在GSM中, 通过定义在拓展的希尔伯特空间中的Berggren基的使用^[34], 连续谱效应被自动地考虑. Berggren基的完备关系可以写成: $\sum_n |u_n\rangle\langle u_n| + \int_{L^+} |u(k)\rangle\langle u(k)| dk = \mathbb{I}$, 其中 u 是一个单体态, 而 n 表示束缚态和位于复动量平面第四象限的实动量轴之间的衰变共振(或Gamow)态. L^+ 围道表示复动量散射连续谱, 可以选择任意的围道将感兴趣的共振态包含进去. 通过对角化复对称哈密顿量, 能量和衰变宽度可以分别作为复本征能量的实部和虚部得到.

同时, $2p$ 衰变也是一种量子三体过程. 在通常计算中, 基于 R 矩阵理论的 $2p$ 衰变公式忽略了三体动力学. 为此, 人们利用了Faddeev方程或超球谐函数(hyperspherical harmonics, HH)等模型对 $2p$ 发射的角度和能量关联进行研究^[40~45], 但这些三体模型往往缺少微观的结构信息. 在此基础上, 通过结合CI的详细结构信息和三体框架中的部分衰变宽度开发了着重于结构和三体性质的Hybrid模型^[46].

此外, 为了研究 $2p$ 发射核的三体性质以及连续谱的影响, 并考虑一部分的结构信息, 复空间框架下少体模型的Gamow耦合道(Gamow coupled channel, GCC)方法被发展出来^[47]. 由于GCC也使用了Berggren基, 使

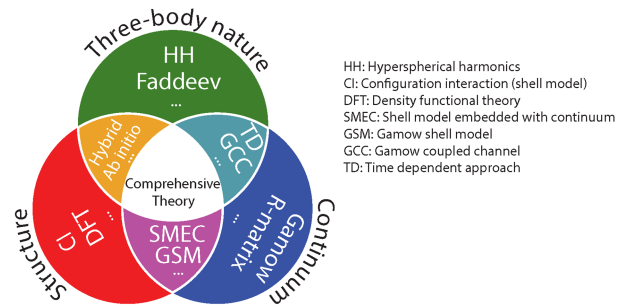


图1 (网络版彩色) $2p$ 衰变理论模型的分类示意图, 包含三个不同的方面: 结构、三体性质以及连续谱效应

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of the classification of theoretical models of $2p$ decay, which contain three different aspects: Structure, three-body properties, and continuum effects

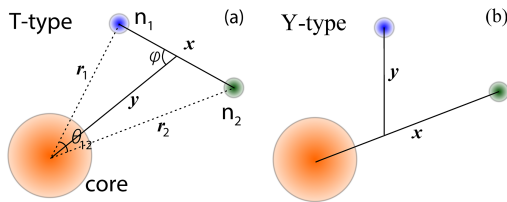


图 2 (网络版彩色)(a) 三体系统的T型Jacobi坐标; (b) 三体系统的Y型Jacobi坐标^[47]

Figure 2 (Color online) (a) Jacobi T coordinate in a three-body system; (b) Jacobi Y coordinate in a three-body system^[47]

得其能够描述三体系统的结构和衰变. GCC方法定义在Jacobi坐标系下(图2), 可以很好地处理质心运动和渐近行为, 从而研究其核子关联^[47~53]. 在此基础上, 含时演化方法也应运而生, 它可以通过求解长时间传播后的波函数和渐进处分量, 方便地研究衰变过程并展示 $2p$ 衰变的复杂三体动力学^[54,55]. 后面会着重介绍基于GCC三体模型和含时演化方法对 $2p$ 衰变的研究.

2 衰变机制

GCC三体模型的优点是它可以较容易地捕获价质子的组态和关联^[52]. 一个典型的例子便是轻质量 $2p$ 发射核 ${}^6\text{Be}$. 对其密度分布进行的研究表明, 它的内部结构在表现为质子对和雪茄状结构时具有两个峰值(图3), 这是因为它的价质子主要占据 p 波. 同时, 原子核相互作用在中程起着吸引作用, 因此中程的质子对结构通常比其他结构更明显. 核子对结构的形成也需要具有不同宇称和角动量的轨道的混合. 同时, 研究发现价核子的组态不局限于单个壳层, 低激发连续谱的存在是至关重要的.

此外, 内部结构在衰变过程中的演化可以用流密度 j 来分析, 它展示了两个价质子如何在给定的状态波函数 Ψ 内演化. 正如我们在 ${}^6\text{Be}$ 的流密度场(图3中的小箭头)中看到的, 质子对和雪茄状结构之间的竞争发生在原子核内部^[52]. 在原点附近, 由于排斥性库仑相互作用和泡利不相容原理的作用, 占优势的质子对结构倾向于向雪茄状结构演化. 另一方面, 在原子核表面附近, 流密度的方向从雪茄状结构向质子对结构的峰值延伸. 此外, 在质子对结构的峰值(位于势垒附近), 流密度的方向几乎与 $\text{core}-2p$ 轴平行, 这是清晰的质子对衰变特征^[47,54~56].

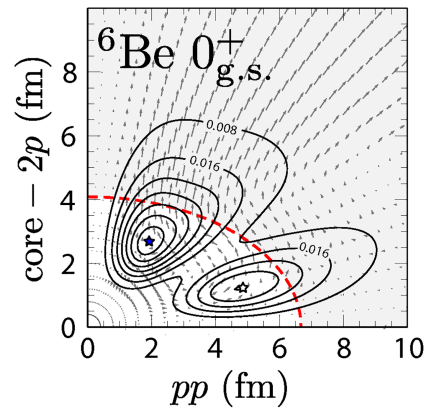


图 3 (网络版彩色)计算得到的 ${}^6\text{Be}$ 基态在Jacobi坐标 pp 和 $\text{core}-pp$ 上的 $2p$ 密度分布(以等高线标记)和 $2p$ 流(以箭头表示). 较粗的虚线表示库仑+离心位垒的内部转折点. 实心和空心星号代表的最大值分别对应于质子对和雪茄状结构^[52]

Figure 3 (Color online) The calculated $2p$ density distribution (marked by contours) and $2p$ flux (denoted by arrows) in the ground state of ${}^6\text{Be}$ in Jacobi coordinates pp and $\text{core}-pp$. The thick dashed line marks the inner turning point of the Coulomb-plus-centrifugal barrier. The maxima marked by filled and open stars correspond to diproton and cigarlike structures, respectively^[52]

对于在衰变过程前具有较好的预形成子核的 $2p$ 发射核, 三体模型可以提供价质子的准确信息. 然而, 有时子核可能是奇异核, 并且包含混合组态. 在这种情况下, 缺乏子核的结构信息成为常规三体模型的一个主要缺点. 因此, 为了在少体系统上建立一个更微观的框架, 人们已经做出了一些努力^[57~61]. 例如, 在三体方法中引入形变核^[58,59]. 后来, 基于生成坐标法^[57]的理论模型也被开发出来并被用于研究核结构.

对于 $2p$ 发射, GCC方法已经扩展到形变的情况^[48], 它允许价核子通过非绝热耦合耦合到核芯的集体态. 因此, 母核的总波函数是价核子波函数与核芯波函数耦合得到的. 这一方法被用来研究最近观测到的 $2p$ 发射核 ${}^{67}\text{Kr}$ ^[21], 它说明了形变和奇异结构是如何影响衰变性质和价核子组态的.

3 核子-核子关联

三体衰变的另一个重要特征是核子-核子关联. 高能方面, 具有大动量的核子关联揭示了短程强相互作用的本质^[62]. 而原子核的结构与衰变性质则受到核子中长程关联的影响, 例如原子核结合能的奇偶效应, 受到核子对关联的深刻影响^[63]. $2p$ 衰变的研究可以为短

程核力和远程电磁相互作用之间的相互联系提供有价值的信息^[12, 16, 64]. 在 $2p$ 衰变的初始阶段, 由于存在配对效应, 价核子高度关联^[65]. 在发射过程中, 尽管系统的库仑排斥力和不稳定性极大地改变了初始结构, 但一些初始信息依然可以在渐近核子-核子关联中探寻. 特别是发射核子之间的角度和能量关联, 它携带着原子核开放量子系统的结构和反应方面的相互作用信息^[50, 66].

特别的, 价核子的位置关联能够有效地反映原子核内部的结构信息. 例如, ^{67}Kr 是迄今为止观测到的最重的基态 $2p$ 发射核, 对它的研究可以提供集体激发下中等质量非束缚系统的独特的结构数据, 因而引起了人们浓厚的研究兴趣. 由于 ^{67}Kr 的 $1p$ 衰变道很可能是开放的, 因此探究 ^{67}Kr 的衰变中质子对分量的大小是很有趣的. 图4中展示了 ^{48}Ni 和 ^{67}Kr 的基态衰变的内部 $2p$ 的角度关联 $\rho(\theta)$ ^[48]. 在这两个核中, 对应

于小角度峰的质子对结构都非常明显. 有趣的是, 虽然 ^{48}Ni 和 ^{67}Kr 的壳模型结构非常不同, 但计算得出它们的两个价质子形成的T型Jacobi坐标下的组态却是非常相似的. 对于 ^{48}Ni , 它在T型Jacobi坐标下占主导地位的组合 (S, ℓ_x, ℓ_y) 为58%的 $(0, 0, 0)$ 和30%的 $(1, 1, 1)$, 而 ^{67}Kr 的主要组态为59%的 $(0, 0, 0)$ 和27%的 $(1, 1, 1)$. ^{67}Kr 中的对应质子对结构的峰略低于 ^{48}Ni 中的, 这是因为 ^{67}Kr 在能量上允许级联衰变. 由核芯-质子模型估计的 ^{67}Kr 的 $1p$ 衰变宽度为 8.6×10^{-20} MeV, 与 $2p$ 衰变宽度具有相同的数量级. 因此, 预计 ^{67}Kr 中的 $2p$ 衰变分支将与级联衰变产生竞争. 随着核子配对强度增加50%, $\rho(\theta)$ 中对应质子对结构的峰会由于 $1p$ 衰变道的关闭而强烈增强(图4). 图4中的点划线代表在假设两个价质子占据 $9/2 [404]$ 能级时计算的 ^{67}Kr 的 $2p$ 角度关联. 在这种情况下, 角度关联在 90° 处有最小值, 表明 $\rho(\theta)$ 能够很好地反映价质子结构.

另一方面, 末态的价核子动量关联则能够反映价核子在渐近处的衰变性质, 并能够被实验所直接探测到. 这些核子-核子关联的测量进一步加深了人们对 $2p$ 衰变的兴趣. 例如, ^6Be , ^{45}Fe 和其他几个 $2p$ 发射核的渐近核子-核子关联已经使用三体模型重现或预测^[24, 67-69]. 三体模型与实验测得的关联的比较结果表明 ^{45}Fe 基态中含有一定的 p 波分量^[70]. 此外, 为了深入了解这种联系并从这些渐近处的观测中提取结构信息, 需要高质量的实验数据和全面的理论模型. 渐近核子-核子关联也被证明可以揭示核力性质和各个态的情况. 例如, ^6Be 的渐近关联被发现对核子-核子相互作用强度很敏感^[50], 可以用来研究核力的介质效应. 为了更好地理解内部结构如何演变成渐近关联的衰变动力学, 含时演化框架可能对于解决这一问题是有帮助的.

4 衰变动力学

含时演化方法是处理衰变过程的一种有效策略, 它能以较为精确和自然的方式解决广泛的问题, 例如组态演化、衰变率和裂变. 因此, 可以在这个框架内揭示 $2p$ 衰变的复杂三体动力学. 以 ^{12}O 为例, 为了揭示其三体衰变动力学并更好地理解最终态相互作用起到的作用, 需要将 ^{12}O 的波函数传播到更大的距离和更长的时间^[50, 51], 从而可以分析包括核子-核子关联在内的渐

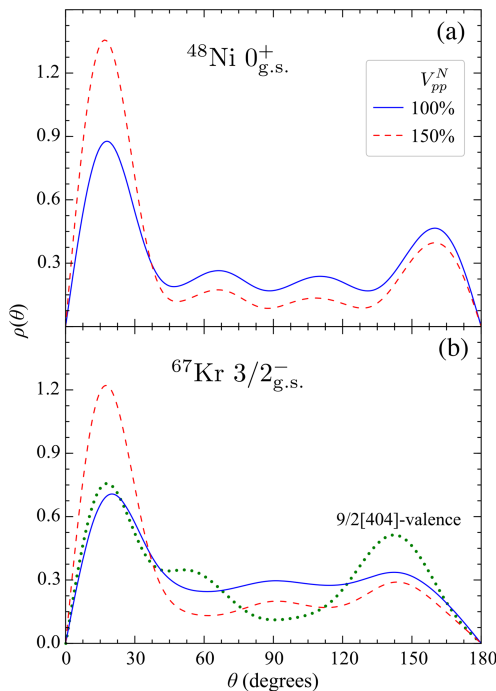


图4 (网络版彩色)用标准强度(实线)和增加50%强度(短划线)的明尼苏达力获得的 ^{48}Ni (a)和 ^{67}Kr (b)基态的双质子角度关联. 标准强度下假设两个价质子占据 $9/2 [404]$ 轨道时获得的角度关联用点划线表示^[48]

Figure 4 (Color online) Two-proton angular correlation for the ground state (g.s.) of ^{48}Ni (a) and ^{67}Kr (b) obtained with Minnesota force of standard strength (solid line) and 50% increased strength (dashed line). The dotted line marks the angular correlation obtained with the standard strength, assuming that the two valence protons occupy the $9/2 [404]$ level^[48]

近处可观测量。

含时演化方法可以揭示短寿命系统的衰变动力学和结构演化。特别是 $2p$ 衰变, 由于其三体特性, 渐近处结构可能与内部结构不同。最近的测量发现从 ^{12}O 基态发射的质子的能量关联与其他 sd 壳的 $2p$ 发射核(如 ^{16}Ne 和 ^{19}Mg)的能量关联相似。这表明, 尽管 ^{12}O 、 ^{16}Ne 和 ^{19}Mg 中的质子数不同, 但它们的价质子组态可能存在一些结构相似性。为了了解 ^{12}O 和邻近的 ^{11}O 中的 $2p$ 关联模式, 含时演化方法被应用于探究 $^{11,12}\text{O}$ 的 $2p$ 密度和组态的演化。 ^{12}O 中的初始 $2p$ 密度表明其存在明显的质子对结构, 其次还有雪茄状结构^[50,52], 这与 p 壳层核的结构相类似。然而, ^{12}O 的所有组态的发射质子密度总体表现为图5(a)所示的较宽的密度分布。这与 ^{6}Be ^[49]的衰变动力学相比是截然不同的。此结果也与计算的流密度相一致, 表明质子对结构和雪茄状结构的衰变之间的竞争导致了 ^{12}O 基态的“民主”衰变, 即发射的两个质子不关联并且可以发生级联衰变。更详细的组态信息有助于更深入地了解这种奇特的衰变动力学。 ^{12}O 的基态波函数的 $S=1$ 分量的平方振幅为27%, 使得原子核内的坐标空间关联的分布更均匀^[49]。另一方面, ^{12}O 在T型Jacobi坐标下的组态 $(K, \ell_x, \ell_y, S)=(0, 0, 0, 0)$ (大致对应于 s 波分量)的权重显著增强(初始态为34%, 图5(b))。 ^{11}O 中也出现了类似的情况, 这是由于邻近核 $^{10,11}\text{N}$ 中出现了 s 波阈值共振^[49]。散射矩阵在复动量平面中的这些极点可以看作是丰中子镜像核中反束缚(虚)态的相似态, 它们的存在也有利于形成质子对结构。这是由于低 ℓ 分波的离心势垒较低, 从而使其在衰变过程中占主导地位。图5(b)显示了在 ^{12}O 的 $2p$ 衰变期间, 价质子波函数从具有一定的 p 波和 d 波分量的结构转变为绝大多数为 $\ell=0$ 分量的结构。这种转变也可以通过比较在非含时计算中获得的内部和外部组态来揭示^[69]。事实上, $(0, 0, 0, 0)$ 组态的权重在最终态中为76%, 这种 s 波的增强要部分归因于与核芯激发态的耦合。

5 总结与展望

具有奇异结构和放射性的滴线区原子核已经成为人们重点关注的研究对象, 而在质子滴线附近的原子核中, $2p$ 发射是最让人感兴趣的奇异现象之一。到目前

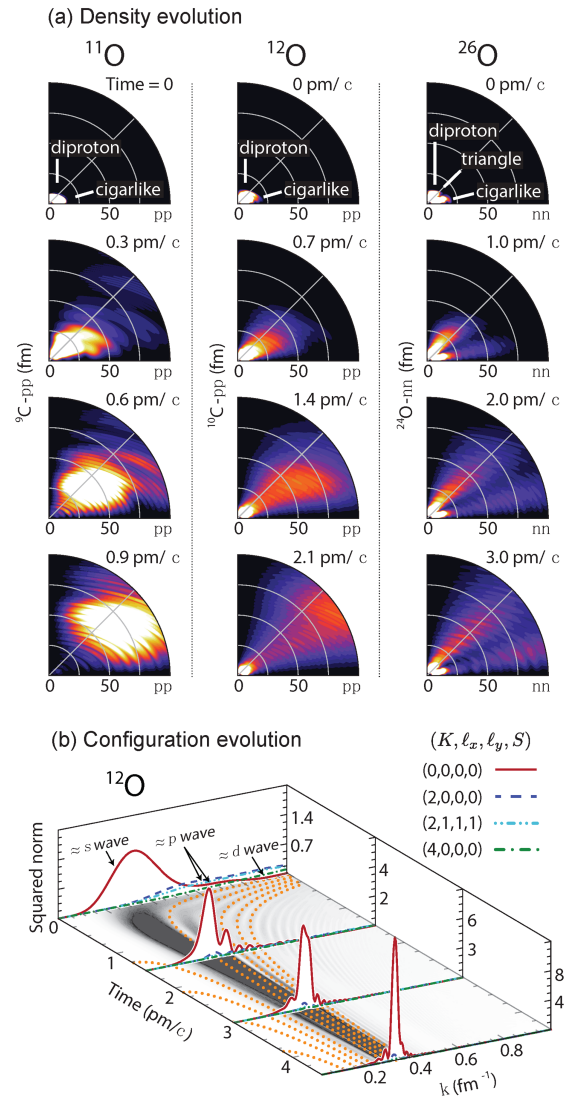


图 5 (网络版彩色)(a) 在4个不同时间段内, 氧同位素的基态双核子衰变的密度分布。(b) ^{12}O 的组态演化。渐近处关联是从组态分布中形成的共振峰中提取出来的。密度分布在T型Jacobi坐标中表示, 并乘以Jacobi极坐标的 ρ 。T型Jacobi的组态在动量空间中标记为 (K, ℓ_x, ℓ_y, S) 。 K 是超球谐量子数, ℓ 是Jacobi坐标中的轨道角动量, S 是价质子的总自旋。 $k = \sqrt{k_x^2/\mu_x + k_y^2/\mu_y}$ 是总动量, $\mu_x(\mu_y)$ 是约化质量。投影的围道表示所有组态的总和。其中干涉频率用虚线标记^[51]

Figure 5 (Color online) (a) The density distributions of two-nucleon decays from the g.s. of oxygen isotopes for four different time slices. (b) The configuration evolution for ^{12}O . The asymptotic correlations are extracted from the developed resonance peak in the configuration distribution. The density distributions are shown in the Jacobi-T coordinates, and multiplied by the polar Jacobi coordinate ρ . The Jacobi-T configurations are labeled as (K, ℓ_x, ℓ_y, S) in momentum space. K is the hyperspherical quantum number, ℓ is the orbital angular momentum in Jacobi coordinate, and S is the total spin of valence protons. $k = \sqrt{k_x^2/\mu_x + k_y^2/\mu_y}$ is the total momentum and $\mu_x(\mu_y)$ is the reduced mass. The projected contour map represents the sum of all the configurations, in which the interference frequencies are marked by dotted lines^[51]

为止, 实验上只发现了 ^{45}Fe , ^{54}Zn , ^{48}Ni 和 ^{67}Kr 的基态 $2p$ 发射, 它们具有不同的结构和衰变宽度. 为了更好地理解这种奇特现象, 过去几十年来理论方面取得了很大的进展. 本文重点介绍了强调三体特征和连续谱效应的包括GCC和含时演化方法在内的三体模型以及根据这些方法对 $2p$ 衰变的衰变机制、核子-核子

关联以及衰变动力学的研究. 实验上, HIAF、FRIB以及FAIR等国内外新一代放射性核束装置预计将为已知 $2p$ 发射核特性的深入研究提供更有利条件并发现更多新的 $2p$ 发射核. 相关理论框架的发展可以为 $2p$ 发射等现象提供一系列新数据, 从而进一步了解质子滴线外原子核的 $2p$ 衰变等奇异性质.

参考文献

- 1 Ahn D S, Fukuda N, Geissel H, et al. Location of the neutron dripline at fluorine and neon. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 212501
- 2 Spyrou A. Reaching the limits of nuclear existence. *Physics*, 2019, 12: 126
- 3 Yang H B, Ma L, Zhang Z Y, et al. Alpha decay properties of the semi-magic nucleus ^{219}Np . *Phys Lett B*, 2018, 777: 212–216
- 4 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O, et al. Measurements of interaction cross sections and nuclear radii in the light p -shell region. *Phys Rev Lett*, 1985, 55: 2676–2679
- 5 Nakamura T, Kobayashi N, Kondo Y, et al. Deformation-driven p -wave halos at the drip line: ^{31}Ne . *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 142501
- 6 Otsuka T, Gade A, Sorlin O, et al. Evolution of shell structure in exotic nuclei. *Rev Mod Phys*, 2020, 92: 015002
- 7 Thomas R G. An analysis of the energy levels of the mirror nuclei, C^{13} and N^{13} . *Phys Rev*, 1952, 88: 1109–1125
- 8 Ehrman J B. On the displacement of corresponding energy levels of C^{13} and N^{13} . *Phys Rev*, 1951, 81: 412–416
- 9 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
- 10 Hofmann S, Reisdorf W, Münzenberg G, et al. Proton radioactivity of Lu^{151} . *Z Phys A*, 1982, 305: 111–123
- 11 Klepper O, Batsch T, Hofmann S, et al. Direct and beta-delayed proton decay of very neutron-deficient rare-earth isotopes produced in the reaction $^{58}\text{Ni}+^{92}\text{Mo}$. *Z Phys A*, 1982, 305: 125–130
- 12 Pfützner M, Karny M, Grigorenko L V, et al. Radioactive decays at limits of nuclear stability. *Rev Mod Phys*, 2012, 84: 567–619
- 13 Geesaman D F, McGrath R L, Lesser P M S, et al. Particle decay of ^6Be . *Phys Rev C*, 1977, 15: 1835–1838
- 14 KeKelis G J, Zisman M S, Scott D K, et al. Masses of the unbound nuclei ^{16}Ne , ^{15}F , and ^{12}O . *Phys Rev C*, 1978, 17: 1929–1938
- 15 Cable M D, Honkanen J, Parry R F, et al. Discovery of beta-delayed two-proton radioactivity: ^{22}Al . *Phys Rev Lett*, 1983, 50: 404–406
- 16 Blank B, Borge M J G. Nuclear structure at the proton drip line: Advances with nuclear decay studies. *Prog Part Nucl Phys*, 2008, 60: 403–483
- 17 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
- 18 Giovinazzo J, Blank B, Chartier M, et al. Two-proton radioactivity of ^{45}Fe . *Phys Rev Lett*, 2002, 89: 102501
- 19 Blank B, Bey A, Canchel G, et al. First observation of ^{54}Zn and its decay by two-proton emission. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 232501
- 20 Pomorski M, Pfützner M, Dominik W, et al. First observation of two-proton radioactivity in ^{48}Ni . *Phys Rev C*, 2011, 83: 061303
- 21 Goigoux T, Ascher P, Blank B, et al. Two-proton radioactivity of ^{67}Kr . *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 162501
- 22 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
- 23 Blank B, Płoszajczak M. Two-proton radioactivity. *Rep Prog Phys*, 2008, 71: 046301
- 24 Grigorenko L V. Theoretical study of two-proton radioactivity. Status, predictions, and applications. *Phys Part Nucl*, 2009, 40: 674–714
- 25 Zhou L, Wang S M, Fang D Q, et al. Recent progress in two-proton radioactivity. *Nucl Sci Tech*, 2022, 33: 105
- 26 Pfützner M, Mukha I, Wang S M. Two-proton emission and related phenomena. *Prog Part Nucl Phys*, 2023, 132: 104050
- 27 Singh D, Saxena G. Study of two-proton radioactivity within relativistic mean-field plus BCS approach. *Int J Mod Phys E*, 2012, 21: 1250076
- 28 Olsen E, Pfützner M, Birge N, et al. Landscape of two-proton radioactivity. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 222501
- 29 Olsen E, Pfützner M, Birge N, et al. Erratum: Landscape of two-proton radioactivity [*Phys. Rev. Lett.* 110, 222501 (2013)]. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 139903
- 30 Saxena G, Kumawat M, Kaushik M, et al. Two-proton radioactivity with $2p$ halo in light mass nuclei $A = 18 - 34$. *Phys Lett B*, 2017, 775: 126–129
- 31 Neufcourt L, Cao Y, Giuliani S, et al. Beyond the proton drip line: Bayesian analysis of proton-emitting nuclei. *Phys Rev C*, 2020, 101: 014319
- 32 Rotureau J, Okołowicz J, Płoszajczak M. Microscopic Theory of the Two-Proton Radioactivity. *Phys Rev Lett*, 2005, 95: 042503
- 33 Rotureau J, Okołowicz J, Płoszajczak M. Theory of the two-proton radioactivity in the continuum shell model. *Nucl Phys A*, 2006, 767: 13–57
- 34 Berggren T. On the use of resonant states in eigenfunction expansions of scattering and reaction amplitudes. *Nucl Phys A*, 1968, 109: 265–287
- 35 Bennaceur K, Nowacki F, Okołowicz J, et al. Analysis of the $^{16}\text{O}(p, \gamma)^{17}\text{F}$ capture reaction using the shell model embedded in the continuum. *Nucl Phys A*, 2000, 671: 203–232

- 36 Okołowicz J, Płoszajczak M, Rotter I. Dynamics of quantum systems embedded in a continuum. *Phys Rep*, 2003, 374: 271–383
- 37 Michel N, Nazarewicz W, Płoszajczak M, et al. Gamow shell model description of neutron-rich nuclei. *Phys Rev Lett*, 2002, 89: 042502
- 38 Michel N, Li J G, Xu F R, et al. Proton decays in ^{16}Ne and ^{18}Mg and isospin-symmetry breaking in carbon isotopes and isotones. *Phys Rev C*, 2021, 103: 044319
- 39 Hagen G, Hjorth-Jensen M, Jansen G R, et al. Continuum effects and three-nucleon forces in neutron-rich oxygen isotopes. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 242501
- 40 Faddeev L D. Scattering theory for a three particle system. *Sov Phys JETP*, 1961, 12: 1014–1019
- 41 Garrido E, Jensen A S. Few-body structures in the mirror nuclei ^{11}O and ^{11}Li . *Phys Rev C*, 2020, 101: 034003
- 42 Zhang D M, Qi L J, Zhu D X, et al. Systematic study on the proton radioactivity of spherical proton emitters. *Nucl Sci Tech*, 2023, 34: 55
- 43 Zhu D X, Xu Y Y, Liu H M, et al. Two-proton radioactivity of the excited state within the Gamowlike and modified Gamow-like models. *Nucl Sci Tech*, 2022, 33: 122
- 44 Zhu D X, Xu Y Y, Chu L J, et al. Two-proton radioactivity from excited states of proton-rich nuclei within coulomb and proximity potential model. *Nucl Sci Tech*, 2023, 34: 130
- 45 Grigorenko L V, Mukha I G, Thompson I J, et al. Two-proton widths of ^{12}O , ^{16}Ne , and three-body mechanism of Thomas-Ehrman shift. *Phys Rev Lett*, 2002, 88: 042502
- 46 Brown B A, Blank B, Giovanazzo J. Hybrid model for two-proton radioactivity. *Phys Rev C*, 2019, 100: 054332
- 47 Wang S M, Michel N, Nazarewicz W, et al. Structure and decays of nuclear three-body systems: The Gamow coupled-channel method in Jacobi coordinates. *Phys Rev C*, 2017, 96: 044307
- 48 Wang S M, Nazarewicz W. Puzzling two-proton decay of ^{67}Kr . *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 212502
- 49 Wang S M, Nazarewicz W, Charity R J, et al. Structure and decay of the extremely proton-rich nuclei $^{11,12}\text{O}$. *Phys Rev C*, 2019, 99: 054302
- 50 Wang S M, Nazarewicz W. Fermion pair dynamics in open quantum systems. *Phys Rev Lett*, 2021, 126: 142501
- 51 Wang S M, Nazarewicz W, Charity R J, et al. Nucleon – nucleon correlations in the extreme oxygen isotopes. *J Phys G Nucl Part Phys*, 2022, 49: 10LT02
- 52 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
- 53 Zhou L, Fang D Q, Wang S M, et al. Structure and $2p$ decay mechanism of ^{18}Mg . *Nucl Sci Tech*, 2024, 35: 107
- 54 Oishi T, Hagino K, Sagawa H. Role of diproton correlation in two-proton-emission decay of the ^6Be nucleus. *Phys Rev C*, 2014, 90: 034303
- 55 Oishi T, Kortelainen M, Pastore A. Dependence of two-proton radioactivity on nuclear pairing models. *Phys Rev C*, 2017, 96: 044327
- 56 Grigorenko L V, Wiser T D, Mercurio K, et al. Three-body decay of ^6Be . *Phys Rev C*, 2009, 80: 034602
- 57 Damman A, Descouvemont P. Three-body continuum states in a microscopic cluster model. *Phys Rev C*, 2009, 80: 044310
- 58 Nunes F, Christley J, Thompson I, et al. Core excitation in three-body systems: Application to ^{12}Be . *Nucl Phys A*, 1996, 609: 43–73
- 59 Nunes F, Thompson I, Johnson R. Core excitation in one neutron halo systems. *Nucl Phys A*, 1996, 596: 171–186
- 60 Brida I, Nunes F. Two-neutron overlap functions for ^6He from a microscopic structure model. *Nucl Phys A*, 2010, 847: 1–23
- 61 Vasilevsky V, Arickx F, Vanroose W, et al. Microscopic cluster description of ^{12}C . *Phys Rev C*, 2012, 85: 034318
- 62 Hen O, Miller G A, Piasetzky E, et al. Nucleon-nucleon correlations, short-lived excitations, and the quarks within. *Rev Mod Phys*, 2017, 89: 045002
- 63 Dean D J, Hjorth-Jensen M. Pairing in nuclear systems: From neutron stars to finite nuclei. *Rev Mod Phys*, 2003, 75: 607–656
- 64 Goldansky V. On neutron-deficient isotopes of light nuclei and the phenomena of proton and two-proton radioactivity. *Nucl Phys*, 1960, 19: 482–495
- 65 Hagino K, Sagawa H. Pairing correlations in nuclei on the neutron-drip line. *Phys Rev C*, 2005, 72: 044321
- 66 Michel N, Nazarewicz W, Okołowicz J, et al. Open problems in the theory of nuclear open quantum systems. *J Phys G Nucl Part Phys*, 2010, 37: 064042
- 67 Kruppa A T, Papadimitriou G, Nazarewicz W, et al. Nuclear three-body problem in the complex energy plane: Complex-scaling Slater method. *Phys Rev C*, 2014, 89: 014330
- 68 Thompson D R, Lemere M, Tang Y C. Systematic investigation of scattering problems with the resonating-group method. *Nucl Phys A*, 1977, 286: 53–66
- 69 Grigorenko L V, Zhukov M V. Two-proton radioactivity and three-body decay. II. Exploratory studies of lifetimes and correlations. *Phys Rev C*, 2003, 68: 054005
- 70 Miernik K, Dominik W, Janas Z, et al. Two-proton correlations in the decay of ^{45}Fe . *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 192501

Summary for “滴线外奇异双质子放射性的研究进展”

Research progress on the two-proton radioactivity beyond the drip line

Bo Huang^{1,2}, De-Qing Fang^{1,2*} & Si-Min Wang^{1,2*}

¹ Key Laboratory of Nuclear Physics and Ion-beam Application (MOE), Institute of Modern Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China

² Shanghai Research Center for Theoretical Nuclear Physics, National Natural Science Foundation of China and Fudan University, Shanghai 200438, China

* Corresponding authors, E-mail: dqfang@fudan.edu.cn; wangsimin@fudan.edu.cn

The drip line nuclei are weakly bound or unbound open quantum systems. Due to the continuum effect, they exhibit many exotic structures and radioactivities including halo structures, shell evolution, Thomas-Ehrman shift, and nucleon radioactivity. Among them, two-proton ($2p$) emission, observed experimentally in only a few nuclei, is one of the latest and most concerned decay modes. The study of $2p$ emission is conducive to understanding the unique structure and proton pair correlation of proton drip line nuclei. This paper briefly reviews the research progress of $2p$ emission and introduces several recently developed theoretical methods. Given the wide range of decay lifetimes and the complexity of the problem, these theoretical developments are based on different assumptions and focus on various aspects of the internal structure, nucleon-nucleon correlation, and decay dynamics, which together provide a comprehensive description of $2p$ decay. Particularly, the framework of the Gamow coupled-channel (GCC) method and its applications are reviewed. The complex-plane framework of the GCC method is a few-body model formulated in Jacobi coordinates and constructed using the Berggren basis. This method emphasizes the three-body properties and continuum effect of two-proton emitters, which has been widely used to describe the decay properties and nucleon-nucleon correlations. In decay mechanism research, GCC is used to study the structural evolution of the internal configuration of $2p$ emitters during decay. Moreover, the configuration evolution of the internal structure during decay can be analyzed by using the flux current, which shows how the two valence protons evolve within a given state wave function. With the extension of the GCC method to incorporate nuclear deformation, the effects of deformation and exotic structures on decay properties and valence nucleon configurations are more clearly revealed. Meanwhile, nucleon-nucleon correlation is an important feature of three-body decay and has been shown to reveal the properties of nuclear forces and the properties of various states, which further deepens the interest in $2p$ decay. To this end, GCC is applied to study the asymptotic energy and angular correlations of two valence nucleons in $2p$ emitters, which reflect information about the structure and reaction of nuclear open quantum systems. Additionally, recent advancements in time-dependent approaches to $2p$ decay are discussed. It is an effective strategy to deal with the decay process, which can solve a broad range of problems including configuration evolution and decay rates in a more accurate and natural way. The time-dependent method can conveniently study the decay process by solving the wave function propagated for long durations and the component at the asymptotic region. Therefore, complex three-body dynamics and structural evolution of the $2p$ decay could be shown in this framework. These developments can be helpful to gain insight of open quantum systems and guide future experiments.

nuclei beyond the drip line, two-proton emission, Gamow coupled-channel method, time-dependent approach

doi: [10.1360/TB-2024-0914](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0914)