双质子发射实验研究进展

方德清*, 马余刚*

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

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

2020-04-17 收稿, 2020-05-06 修回, 2020-05-07 接受, 2020-05-08 网络版发表

国家重点研发计划(2018YFA0404404)、国家自然科学基金(11925502, 11935001, 11961141003, 11421505, 11475244, 11927901)、上海市自然科学基金(19ZR1403100)和中国科学院B类战略性先导科技专项(XDB34030100)资助

摘要 放射性是不稳定核的一个重要特性, 比较常见的模式有 α 、 β 、 γ 衰变及裂变. 双质子发射是质子滴线区原子核的一种奇异放射性, 对研究极端丰质子核的结构、质量、质子对关联等有重要意义, 是近年来放射性核束物理的重要前沿方向之一. 本文简要评述了双质子发射实验研究进展, 介绍了几种常用的实验探测方法及鉴别双质子发射机制的研究方法. 奇异放射性研究的困难在于滴线区不稳定核的产生. 中国在建的HIAF装置有强流的优势, 结合先进的探测技术与研究方法, 将来有望在滴线区原子核的奇异放射性实验研究方向开展最前沿的工作.

关键词 丰质子核, 双质子发射, 在束衰变方法, 注入衰变方法, 光学读出时间投影室成像方法

原子核是物质微观结构的一个重要层次, 除自然界存在的约300个稳定核外, 理论预言可能有约7000个不稳定核^[1]. 放射性是原子核的一个重要特性, 它是指不稳定核自发地放出射线或粒子而衰变形成稳定核的现象. 人们对原子核放射性的研究始于100多年前, 1896年法国物理学家Becquerel^[2]首先发现了铀原子核的天然放射性. 该发现意义深远, 它使人们对物质微观结构有了全新认识, 并由此打开了原子核物理学的大门. 随后, 人们发现不稳定原子核常见的衰变方式有 α 、 β 、 γ 衰变及裂变. 在原子核物理学科发展的前半世纪, 人们通过系统研究不稳定核的这些常见衰变模式对了解原子核的结构及核力的性质起到了十分重要的作用.

20世纪60年代初, Goldansky等人^[3-5]提出在远离稳定线的丰质子核中可能存在质子或双质子发射的奇异放射性模式. 理论预言之后, 实验上最早发现的是激发态单质子发射. 1963年, 实验发现了²⁵Si的 β 延迟质子发射^[6], 实际上是²⁵Al激发态的质子发射. 1970年, 实验发

现了⁵³Co的同核异能素(isomer)的质子发射^[7]. 1982年, 实验发现了¹⁵¹Lu的基态单质子发射现象^[8]. 从此之后, 单质子发射实验成为研究近质子滴线原子核结构的重要手段, 发现的基态单质子发射核已有20多个.

双质子发射只在质子滴线附近的原子核中存在. 早期理论给出的候选核主要有³⁹Ti、⁴²Cr、⁴⁵Fe、^{48,49}Ni^[9-11], 但产生这些核很困难, 实验上一直没有被发现. 1980年, Goldansky^[12]又预言可能存在 β 延迟的激发态双质子发射, 并通过分析得出在 $Z=10\sim20$ 的丰质子 β 衰变核中可能存在候选核. 1983年, 在美国劳伦斯伯克利国家实验室(Lawrence Berkeley National Laboratory, LBL)开展的实验研究首次观测到²²Al的 β 延迟双质子发射($\beta 2p$)^[13], 该发射来自²²Al发生 β 衰变后布居²²Mg的激发能为14.044 MeV的同位旋相似态(isobaric analog state, IAS). 此后, 人们发现并研究了更多的 $\beta 2p$ 发射核, 如²³Si、²⁶P、²⁷S、³¹Ar、³⁵Ca、³⁹Ti、⁴³Cr及⁵⁰Ni等^[14-21]. 除通过 β 衰变布居激发态, 人们也通过核反应, 如碎裂、转移或拾取反应来布居, 发现了多个激发态双质子发射

引用格式: 方德清, 马余刚. 双质子发射实验研究进展. 科学通报, 2020, 65: 4018-4026

Fang D Q, Ma Y G. Progress of experimental studies on two-proton emission (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 4018-4026, doi: [10.1360/TB-2020-0423](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0423)

核, 如 ^{14}O 、 $^{17,18}\text{Ne}$ 等^[22~25]. 另外也发现了 ^{94}Ag 的同核异能素具有双质子发射现象^[26]. 这些激发态双质子发射过程的寿命一般都比较短, 大约在 10^{-21} s量级, 而这比理论最初预言的基态双质子发射寿命短很多. 近年来, 中国学者利用国内外的放射性束流装置开展了系列实验测量, 对 ^{22}Al 、 $^{22,23}\text{Si}$ 的 β 延迟双质子发射, ^{22}Mg 、 ^{23}Al 、 $^{27,28}\text{P}$ 、 $^{28,29}\text{S}$ 等核的激发态双质子发射现象进行研究并取得重要进展^[27~34].

Goldansky预言的双质子发射是指双质子发射道能级比单质子发射子核能级低, 单质子发射道是禁止的, 称为真正的双质子放射性(“2p radioactivity”), 并给出了衰变寿命不短于约 10^{-12} s的要求^[3,35]. 满足这些要求的核通常为质子滴线核, 产生极其困难. 直到2002年, 在法国国家重离子大加速器(Grand Accélérateur National d'Ions Lourds, GANIL)及德国重离子研究中心(Gesellschaft für Schwerionenforschung, GSI)的装置上开展的实验研究中发现了 ^{45}Fe 的基态双质子发射现象^[36,37]. 观测到的2p事件数分别为12和3个, 半衰期分别为 $4.7^{+3.4}_{-1.4}$ 和 $3.2^{+2.6}_{-1.0}$ ms. 2005年, 在GANIL完成的实验发现了 ^{54}Zn 的基态双质子发射^[38], 观测到的2p事件数为7个, 半衰期为 $3.7^{+2.2}_{-1.0}$ ms. 同年, GANIL的实验宣称发现了 ^{48}Ni 的基态双质子发射^[39], 但观测到的2p事件数仅有1个. 2011年, 在美国密歇根州立大学(Michigan State University, MSU)超导回旋加速器国家实验室(National Superconducting Cyclotron Laboratory, NSCL)开展的实验宣布首次直接观测到 ^{48}Ni 的基态双质子发射^[40], 测得的2p事件数为4个, 半衰期为 $2.1^{+1.4}_{-0.4}$ ms. 另外, 有更多实验也对 ^{45}Fe 、 ^{48}Ni 、 ^{54}Zn 的基态双质子发射做了进一步研究^[41~43]. 2016年, 在日本理化学研究所(Institute of Physical and Chemical Research, RIKEN)开展的实验发现了更重的基态双质子发射核 ^{67}Kr ^[44], 考虑获取系统的死时间修正后测到的2p事件数约为13个, 半衰期为7.4(30) ms. 到目前为止, 长寿命的基态双质子

发射核只发现了这4个. 理论预言 ^{59}Ge 、 ^{63}Se 也是双质子发射候选核, 但在实验测量中没有观测到双质子发射现象^[44]. 对短寿命的基态双质子发射, 实验上也已经发现了多个候选核, 如 ^6Be 、 ^{12}O 、 ^{16}Ne 及 ^{19}Mg , 它们的半衰期通常为ps量级^[45~48].

双质子发射过程一般有一个核芯和两个质子参与, 比单质子发射复杂得多, 因此研究起来更困难. 通常认为, 双质子发射的机制可分为3种^[5]. 如图1所示, 第一种为 ^2He 集团发射, 两个强关联的质子形成一个准束缚的 $^1\text{S}_0$ 态被发射出来, 然后再分开成两个质子; 第二种为三体发射, 即核芯与两个质子同时分开, 除末态相互作用外没有任何关联的两个质子被发射出来; 第三种为级联发射, 初态核先发射一个质子到中间态, 然后再发射一个质子到末态. 第三种方式基本上是两次级联的单质子发射, 前两种才是人们更感兴趣的发射机制. 由于发射出的两个质子间的动量和角度关联包含了核子波函数的具体形态及核子间的相互作用等信息, 因而对质子滴线核的结构、质量及质子对关联的研究具有非常重要的科学意义. 另一方面, 研究双质子发射对核天体物理也具有重要意义. 双质子发射过程与天体核演化中的(2p, γ)和(γ , 2p)过程密切相关^[49], 对研究元素合成过程中等待点原子核的特性十分重要. 同时, 一些双质子发射核的结构与反应对理解天体核反应中的NeNa、NaMg等元素循环过程十分关键^[50]. 不管是基态还是激发态双质子发射, 都是靠近质子滴线或就是处于质子滴线的核, 在实验上产生的计数率很低. 通常实验能观测到的双质子发射事件十分稀少, 能确定的关于该衰变过程的物理量也很少, 一般只能得到衰变能、半衰期. 要明确鉴别双质子发射的不同机制, 就需要测量到足够多的事件数, 并且对发射出来的核芯与两个质子的动量、角度及其关联进行测量. 到目前为止, 发现的双质子发射核为数不多, 并且这样的实验要求一般很难达到, 这给双质子衰变的研究带来了很大的困难. 为了深入开展这方面的研究, 目前世界上各大

图1 (网络版彩色)双质子发射的不同机制示意图. (a) ^2He 集团发射; (b) 三体发射; (c) 级联发射

Figure 1 (Color online) Sketch of the different mechanism of 2p emission. (a) ^2He cluster emission; (b) three body emission; (c) sequential emission

国家实验室都在努力发现更多的双质子发射核, 并对双质子衰变的机制进行深入系统的实验及理论研究.

1 实验探测方法

通常丰质子核的半衰期随着质子-中子不对称度的增大而变小, 跨度区间为 $10^1 \sim 10^{-22}$ s. 在实验测量丰质子核衰变时, 需要根据其半衰期的长短采用不同的产生、探测方法与技术. 当放射性核素半衰期比较短时(小于ms量级), 主要用弹核碎裂(projectile fragmentation, PF)型放射性束流装置来产生, 而在线同位素分离(isotope separation on-line, ISOL)型装置主要用于产生半衰期大于ms量级的核. 当丰质子核的半衰期特别短时, 大多数核被产生后还来不及飞出分离提纯谱仪便已衰变, 通常采用在束衰变、不变质量重构等方法来测量. 当半衰期远大于其被产生后在谱仪中的飞行时间时, 一般可以采用注入衰变等方法来测量. 下面以丰质子核的双质子发射现象为例, 介绍在不同情况下(主要为核素衰变半衰期的长短、衰变模式及实验目标的不同)测量丰质子核衰变所采用的几种不同方法及其适用范围、优缺点等.

第一种是在束衰变(in-flight decay)方法. 当丰质子核素半衰期特别短(ps量级或更短)时, 放射性核束装置所产生的核素基本上很快会衰变掉, 测量这些极短寿命的丰质子核素衰变时, 在束衰变方法是实验上可采用的一种有效方法, 如半衰期很短的 ^{19}Mg 等核的双质子发射实验就是采用这个方法^[48]. 同时也有很多激发态双质子发射核, 其半衰期也十分短, 在束衰变方法是主要采用的实验方法. 下面以在RIKEN开展的 ^{22}Mg 激发态双质子发射实验为例^[30], 介绍在束衰变方法在测量极短寿命丰质子核素衰变时的应用. 实验在RIKEN

的放射性次级束流线(RIKEN projectile-fragment separator, RIPS)上进行, 探测器布局如图2所示. 能量约为55 A MeV的次级束流 ^{22}Mg 是通过重离子加速器提供的135 A MeV ^{28}Si 束打铍靶(^9Be)发生碎裂反应并经RIPS偏转及选择得到的. 然后, 在反应靶室打碳靶(^{12}C)被激发到特定的激发态, 随后发生双质子衰变. 衰变余核通过紧跟靶后的2层硅微条阵列及3层方硅阵列探测器测量, 发射出的2个质子通过硅微条阵列探测器及后面由3层闪烁体探测器组成的阵列探测, 质子的动量通过从靶到第一层闪烁体探测器的飞行时间确定, 径迹通过硅微条阵列探测器确定. 因此, ^{22}Mg 发生双质子衰变的三体过程将被完全探测、鉴别. 利用测得的余核与两个质子的能量、动量及出射角度, 可以通过三体系统的不变质量关系重构得到 ^{22}Mg 衰变时的激发能, 并得到两质子间的关联信息. 通过研究, 从实验中观测到 ^{22}Mg 的高激发态有明确的 ^2He 集团发射存在^[30].

第二种是注入衰变(implantation decay)方法, 适用于测量长寿命核. 由于 β 衰变半衰期一般较长(ms量级), 注入衰变法是测量丰质子核 β 延迟粒子发射最常用方法之一. 下面以在兰州重离子加速器装置的放射性次级束流线(radioactive ion beam line in Lanzhou, RIBLL)开展的 ^{22}Al β 延迟双质子发射实验为例, 介绍注入衰变测量方法^[27,51,52], 图3为实验探测器布局示意图. 由RIBLL产生的 ^{22}Al 首先要经过两个位于靶室T1与T2的塑料闪烁体探测器, 这两个探测器可以测量入射粒子的飞行时间(time of flight, TOF). 图中的降能片由多片铝膜组成, 通过步进电机选择不同厚度的铝膜组合来调节次级束的能量, 使得尽可能多的目标核素注入并刚好阻止在目标位置. 置于降能片之后的3块厚度分别为300 μm 的硅探测器用来测量粒子的能量损失(ΔE),

图2 (网络版彩色)在束衰变方法的探测器布局^[30,31]

Figure 2 (Color online) Sketch of the detector setup for in-flight decay^[30,31]

图3 (网络版彩色)注入衰变方法的探测器布局^[27]

Figure 3 (Color online) Sketch of the detector setup for implantation decay^[27]

通过 ΔE -TOF方法来鉴别注入核素。入射核将被注入并阻止1块呈45°角放置的双面硅微条探测器，其衰变后发射的带电粒子将通过如图3所示的各个方向由双面硅微条及四分硅组成的阵列探测器测量， γ 射线由外围的5个高纯锗Clover探测器测量。能量比较高的入射粒子将会被注入探测器后面的单面硅微条探测器探测到，起到注入离子反符合的作用。在注入衰变实验中，被阻止在硅探测器中的放射性核素经过一定时间后通过 β 延迟质子发射或双质子发射进行衰变。在整个过程中，放射性核素在注入到硅探测器及其衰变时都会在硅探测器中产生相应的信号，但不是同时的。另外需要注意的是，放射性核素在硅探测器中的能损比较大(约几百MeV)，而其衰变发射出的质子能量较小(一般只有几MeV)，注入粒子与衰变质子的能量信号差别比较大，很难在数据获取中用相同的放大倍数进行测量。为了解决这个问题，实验中把用作注入的硅探测器信号经前放后分为两路，分别输入两个主放大器并设置不同的放大倍数，相对较小的放大倍数用于注入粒子信号，相对较大的放大倍数用于衰变质子信号。对双质子衰变，通过图3所示的探测器布局可以获得两个出射质子的能量、动量、角度及其之间的关联信息，确定衰变道及半衰期，但是这样通过 β 延迟发射测得的半衰期实际是 β 衰变的^[27]。

第三种是光学读出时间投影室成像(optical time projection chamber-CCD, OTPC-CCD)方法。前面两种

方法是通过测到的信号重构出衰变及有关信息，但无法直接观测到衰变的物理过程。如果希望很直观地看到衰变过程及粒子的径迹，时间投影室(time projection chamber, TPC)是一种很好的探测技术。TPC是核物理、粒子物理实验中被广泛使用的一种粒子径迹探测器^[53]，可以测量出粒子的三维空间轨迹及能量信息。在丰质子核的衰变实验中TPC也被广泛应用，特别是光学读出时间投影室成像方法，被用于 ^{45}Fe 等核素的双质子衰变实验测量，图4为该方法的探测器结构示意图^[41]。此时间投影室的有效几何大小为20 cm×20 cm×15 cm，其中填充气体为流动模式(90 cm³/min)下一个大气压的混合气体(49% Ar+49% He+1% N₂+1% CH₄)。入射核在

图4 (网络版彩色)光学读出时间投影室成像方法的探测器示意图^[41]

Figure 4 (Color online) Sketch of the detector setup for optical time projection chamber + CCD (OTPC-CCD)^[41]

探测器中发生衰变后, 电离产生的紫外光信号经波长漂移装置(wave-length-shifter, WLS)被转换为可见光信号, 然后穿过玻璃窗被CCD相机及光电倍增管记录. 光电倍增管的采样频率为50 MHz, 可以记录信号漂移的时间, 也可以得到粒子的空间Z方向信息. 图5为在GANIL用OTPC-CCD成像法测量 ^{43}Cr 的 β 延迟质子、双质子及三质子发射结果, 从照片中很直观地看到发射出的质子径迹图像^[54].

前面介绍的3种测量丰质子核双质子发射的实验方法各有特点. 在束衰变方法适合研究半衰期很短的衰变过程, 而对长寿命的不适合, 如半衰期超过 μs 的衰变. 注入衰变方法适合研究长寿命的衰变, 特别是对 β 延迟衰变, 实验获取系统记录的注入核事件与衰变事件有一定的时间差, 因此在衰变事件中只记录了衰变发射出的粒子信号, 没有大量入射核的干扰, 本底很少. OTPC-CCD方法与前面两种方法完全不同, 可以对衰变的物理过程进行很直观的观测, 同时对衰变的半衰期没有明确要求, 短寿命或像 β 延迟衰变这种长寿命的都能进行测量. 不过, OTPC-CCD方法虽然也可以通过TPC得到发射质子的能量信息, 但精度一般比用硅探测器测到的低, 因此在研究双质子发射机制、发射核的能级或质量等方面将困难一些. 近年来, 核物理探测技术发展迅速^[55,56], 特别是在核电子学方面, 波形采样技术在核物理实验数据获取中被广泛应用^[57]. 如果实验中采用波形采样等新的技术, 把探测器原始信号完整地保存下来, 再离线对数据进行分析处理, 将可以扩展这些方法的适用条件.

2 双质子发射机制鉴别

如图1所示, 双质子发射有3种不同的机制, 不同机制发射的两个质子的关联强度、发射时间是不一样的. 由于 ^2He 集团发射在两个质子的动量和角度关联谱上与另外两种机制有明显差异, 因此人们通常用这两个物

理量来把 ^2He 集团发射跟另两种机制区分开. 如 ^{18}Ne 的激发态双质子发射与 ^{12}O 的基态双质子发射, 通过实验测得两个质子的相对动量或相对角度关联谱与不同发射机制的理论模拟结果比较, 鉴别出 ^{18}Ne 的6.15 MeV激发态有明确的 ^2He 集团发射机制^[25], 而 ^{12}O 的基态则没有 ^2He 集团发射成分^[46]. 中国学者在RIBLL上开展的 $^{27,28}\text{P}$ 、 $^{28,29}\text{S}$ 激发态双质子发射研究中, 也用同样的方法鉴别出 ^2He 集团发射的存在^[32-34]. 1983年, 在LBL开展的 β 延迟发射实验发现, ^{22}Mg 的14.044 MeV激发态存在双质子发射现象, 但由于得到的相对角度谱统计太低而无法明确得出其发射机制^[58]. 中国学者通过国际合作在RIKEN开展了激发态双质子发射研究^[30], 实验采用前面介绍的在束衰变方法, 探测器布局如图2所示. 从实验数据中得到了 ^{23}Al 与 ^{22}Mg 衰变发射的两个质子的相对动量、相对角度及衰变核的激发能. 通过不同机制的双质子发射理论模拟结果来拟合实验数据, 得出 ^{23}Al 的高激发能态的双质子衰变基本为三体衰变或级联发射, 如图6(a), (b)所示, 低激发态的结果也类似. 但是, 得出 ^{22}Mg 在14.044 MeV激发态附近存在约30%的 ^2He 集团发射机制, 另有约70%的概率为三体或级联发射, 如图6(c), (d)所示. 低激发态 ^{22}Mg 的双质子衰变机制基本为三体衰变或级联发射. 该实验首次定量地确定了 ^{22}Mg 的14.044 MeV激发态的双质子发射机制^[30], 这对双质子发射现象及其规律的研究具有重要意义. 中国学者在RIBLL采用注入衰变方法测量了 ^{22}Al 的 β 延迟双质子发射, 用不同的实验方法进一步明确验证了 ^{22}Mg 的14.044 MeV态有明显的 ^2He 集团发射机制^[27]. 相对动量或相对角度分析方法能有效区分 ^2He 集团与非 ^2He 集团发射, 但却无法区分三体发射与级联发射, 这给双质子发射机制的研究带来了很大困难.

两粒子强度干涉法, 最初由Brown和Twiss^[59]提出(又称HBT方法), 是在中高能核反应中被广泛用来提取发射源的尺寸及粒子发射时间信息的研究方法^[60]. 由

图5 (网络版彩色) ^{43}Cr 的 β 延迟粒子发射照片^[54]. (a) 单质子发射; (b) 双质子发射; (c) 三质子发射

Figure 5 (Color online) The photo of β -delayed particle emission from ^{43}Cr . (a) Proton emission; (b) two-proton emission; (c) three-proton emission

图6 (网络版彩色) ^{23}Al 的激发态发射的两个质子相对动量(a)和相对角度谱(b)及 ^{22}Mg 的激发态发射的两个质子相对动量(c)和相对角度谱(d)^[30]
Figure 6 (Color online) The relative momentum (a) and opening angle (b) between the two protons emitted from the excited states of ^{23}Al , the relative momentum (c) and opening angle (d) between the two protons emitted from the excited states of ^{22}Mg ^[30]

于三体发射与级联发射最主要的差异在于两个质子的发射时间不同,前者是同时发射,而后者存在一定的发射时间差.在上述 ^{23}Al 与 ^{22}Mg 的双质子发射研究中,为了进一步鉴别三体发射与级联发射两种机制,尝试了HBT方法^[31].利用在互联网上公开的CRAB程序(<https://web.pa.msu.edu/people/pratts/freecodes/crab/home.html>)计算质子-质子动量关联函数,假设发射源为高斯源,源的函数形式为

$$\exp(-r^2/2r_0^2 - t/\tau), \quad (1)$$

式中, r_0 为高斯源的半径参数,若以第一个质子发射时间为起点, τ 为第二个质子的平均发射时间, r 和 t 分别为随机抽取的质子发射空间位置和时间.通过用不同参数 r_0 和 τ 算出的动量关联函数来拟合实验数据,可以提取出 r_0 和 τ 的实验值.拟合结果如图7(a),(b)^[31],得出 ^{23}Al 的源尺寸为1.2~2.8 fm, ^{22}Mg 的源尺寸为2.2~2.4 fm,两核的源尺寸虽然有些差异但基本与该原子核的大小一致.拟合得到的 ^{23}Al 的两质子发射时间差为600~2450 fm/c, ^{22}Mg 的两质子发射时间差为0~50 fm/c,表明 ^{23}Al 与 ^{22}Mg 的两质子发射时间差存在很大差别,即 ^{23}Al 的两质子发射时间差长,主要为级联发射,而 ^{22}Mg 的两质子发射时间差很短,几乎为同时发射.因

图7 (网络版彩色)用CRAB计算的质子-质子动量关联函数拟合实验数据的约化方差^[31]. (a) $^{23}\text{Al} \rightarrow p + p + ^{21}\text{Na}$; (b) $^{22}\text{Mg} \rightarrow p + p + ^{20}\text{Ne}$

Figure 7 (Color online) Contour plot of the reduced χ^2 obtained from fitting the proton-proton momentum correlation function using the CRAB calculation^[31]. (a) $^{23}\text{Al} \rightarrow p + p + ^{21}\text{Na}$; (b) $^{22}\text{Mg} \rightarrow p + p + ^{20}\text{Ne}$

此,利用关联函数分析方法可以对三体发射与级联发射机制进行区分,再结合两质子的相对动量及相对角度分析将可以对双质子发射的3种机制作出清楚的判别^[31,61]. HBT方法在丰质子核双质子发射研究中的应用为双质子发射机制的鉴别提供了一个非常有效的实验方法.近年来,中子滴线区原子核的双中子发射成为放射性核束物理的前沿^[62].在GSI完成的¹⁸C和²⁰O双中子发射实验研究中,用同样的HBT分析方法成功解释了两个原子核的中子-中子动量关联函数实验数据,得出这两个核的两个中子发射时间差或发射机制存在很大差异^[63],表明HBT方法是十分有效的鉴别不稳定核的双核子发射机制方法.

3 结论与展望

目前发现的基态双质子发射核数目还不多,测到

的事件数也很少,主要还是以观测到双质子发射现象为首要目标,对其发射机制等其他更详细信息研究还不够.理论预言,在比⁵⁴Zn重的核中,^{57,58}Ge、^{62,63}Se、⁶⁶Kr及^{102,103}Te以及更多质子滴线区的重核可能是基态双质子发射候选核^[64].但这些极端丰质子的不稳定核产生困难,其他粒子发射如 α 衰变道的影响大,双质子发射不易被实验观察到.新一代高性能加速器装置的建造及探测技术的发展,如中国的强流重离子加速器(high intensity accelerator facility, HIAF)、美国的奇异核素装置(facility for rare isotope beams, FRIB)、韩国的放射性束流装置(rare isotope accelerator complex for on-line experiment, ROAN)等,将可提供流强更高的束流,并提高实验探测的效率及精度,为深入研究原子核的奇异放射性现象(双质子、双中子发射等)提供更好的实验条件.

参考文献

- 1 Erler J, Birge N, Kortelainen M, et al. The limits of the nuclear landscape. *Nature*, 2012, 486: 509–512
- 2 Becquerel H. Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents. *Comptes Rendus*, 1896, 122: 501–503
- 3 Goldansky V I. On neutron-deficient isotopes of light nuclei and the phenomena of proton and two-proton radioactivity. *Nucl Phys*, 1960, 19: 482–495
- 4 Goldansky V I. 2-Proton radioactivity. *Nucl Phys*, 1961, 27: 648–664
- 5 Blank B, Płoszajczak M. Two-proton radioactivity. *Rep Prog Phys*, 2008, 71: 046301
- 6 Barton R, McPherson R, Bell R E, et al. Observation of delayed proton radioactivity. *Can J Phys*, 1963, 41: 2007–2025
- 7 Jackson K P, Cardinal C U, Evans H C, et al. ⁵³Co^m: A proton-unstable isomer. *Phys Lett B*, 1970, 33: 281–283
- 8 Hofmann S, Reisdorf W, Munzenberg G, et al. Proton radioactivity of ¹⁵¹Lu. *Z Phys A-Hadrons Nuclei*, 1982, 305: 111–123
- 9 Brown B A. Diproton decay of nuclei on the proton drip line. *Phys Rev C*, 1991, 43: R1513–R1517
- 10 Cole B J. Stability of proton-rich nuclei in the upper sd shell and lower pf shell. *Phys Rev C*, 1996, 54: 1240–1248
- 11 Ormand W E. Properties of proton drip-line nuclei at the sd-fp-shell interface. *Phys Rev C*, 1996, 53: 214–221
- 12 Goldansky V I. Emission of β^+ -delayed pairs of proton and doubly β^+ -delayed protons and particles. *JETP Lett*, 1980, 39: 554–556
- 13 Cable M D, Honkanen J, Parry R F, et al. Discovery of beta-delayed two-proton radioactivity: ²²Al. *Phys Rev Lett*, 1983, 50: 404–406
- 14 Blank B, Boué F, Andriamonje S, et al. Spectroscopic studies of the βp and $\beta 2p$ decay of ²³Si. *Z Phys A-Hadrons Nuclei*, 1997, 357: 247–254
- 15 Honkanen J, Cable M D, Parry R F, et al. Beta-delayed two-proton decay of ²⁶P. *Phys Lett B*, 1983, 133: 146–148
- 16 Borrel V, Jacmart J C, Pougheon F, et al. ³¹Ar and ²⁷S: Beta-delayed two-proton emission and mass excess. *Nucl Phys A*, 1991, 531: 353–369
- 17 Reiff J E, Hotchkis M A C, Moltz D M, et al. A fast in-beam recoil catcher wheel and the observation of beta-delayed two-proton emission from ³¹Ar. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 1989, 276: 228–232
- 18 Äystö J, Moltz D M, Xu X J, et al. Observation of the first $T_z = -\frac{5}{2}$ nuclide, ³⁵Ca, via its β -delayed two-proton emission. *Phys Rev Lett*, 1985, 55: 1384–1387
- 19 Moltz D M, Batchelder J C, Lang T F, et al. Beta-delayed two-proton decay of ³⁹Ti. *Z Phys A-Hadrons Nuclei*, 1992, 342: 273–276
- 20 Borrel V, Anne R, Bazin D, et al. The decay modes of proton drip-line nuclei with A between 42 and 47. *Z Phys A-Hadrons Nuclei*, 1992, 344: 135–144
- 21 Dossat C, Adimi N, Aksouh F, et al. The decay of proton-rich nuclei in the mass region. *Nucl Phys A*, 2007, 792: 18–86
- 22 Bain C R, Woods P J, Coszach R, et al. Two proton emission induced via a resonance reaction. *Phys Lett B*, 1996, 373: 35–39
- 23 Chromik M J, Brown B A, Fauerbach M, et al. Excitation and decay of the first excited state of ¹⁷Ne. *Phys Rev C*, 1997, 55: 1676–1679
- 24 Gómez del Campo J, Galindo-Uribarri A, Beene J R, et al. Decay of a resonance in ¹⁸Ne by the simultaneous emission of two protons. *Phys Rev Lett*, 2001, 86: 43–46
- 25 Raciti G, Cardella G, De Napoli M, et al. Experimental evidence of ²He decay from ¹⁸Ne excited states. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 192503
- 26 Mukha I, Roeckl E, Batist L, et al. Proton-proton correlations observed in two-proton radioactivity of ⁹⁴Ag. *Nature*, 2006, 439: 298–302

- 27 Wang Y T, Fang D Q, Wang K, et al. Observation of β -delayed ^2He emission from the proton-rich nucleus ^{22}Al . *Phys Lett B*, 2018, 748: 12–15
- 28 Xu X X, Lin C J, Sun L J, et al. Observation of β -delayed two-proton emission in the decay of ^{22}Si . *Phys Lett B*, 2017, 766: 312–316
- 29 Wang K, Fang D Q, Wang Y T, et al. Spectroscopic study of β -delayed particle emission from proton-rich nucleus ^{23}Si . *Int J Mod Phys E*, 2018, 27: 1850014
- 30 Ma Y G, Fang D Q, Sun X Y, et al. Different mechanism of two-proton emission from proton-rich nuclei ^{23}Al and ^{22}Mg . *Phys Lett B*, 2015, 743: 306–309
- 31 Fang D Q, Ma Y G, Sun X Y, et al. Proton-proton correlations in distinguishing the two-proton emission mechanism of ^{23}Al and ^{22}Mg . *Phys Rev C*, 2016, 94: 044621
- 32 Xu X X, Lin C J, Jia H M, et al. Correlations of two protons emitted from excited states of ^{28}S and ^{27}P . *Phys Lett B*, 2013, 727: 126–129
- 33 Lin C J, Xu X X, Jia H M, et al. Experimental study of two-proton correlated emission from ^{29}S excited states. *Phys Rev C*, 2009, 80: 014310
- 34 Xu X X, Lin C J, Jia H M, et al. Investigation of two-proton emission from excited states of the odd- Z nucleus ^{28}P by complete-kinematics measurements. *Phys Rev C*, 2010, 81: 054317
- 35 Goldansky V I. Neutron-excessive nuclei and two-proton radioactivity. *Phys Lett B*, 1988, 212: 11–12
- 36 Giovannazzo J, Blank B, Chartier M, et al. Two-proton radioactivity of ^{45}Fe . *Phys Rev Lett*, 2002, 89: 102501
- 37 Pfützner M, Badura E, Bingham C, et al. First evidence for the two-proton decay of ^{45}Fe . *Eur Phys J A*, 2002, 14: 279–285
- 38 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
- 39 Dossat C, Bey A, Blank B, et al. Two-proton radioactivity studies with ^{45}Fe and ^{48}Ni . *Phys Rev C*, 2005, 72: 054315
- 40 Pomorski M, Pfützner M, Dominik W, et al. First observation of two-proton radioactivity in ^{48}Ni . *Phys Rev C*, 2011, 83: 061303
- 41 Miernik K, Dominik W, Janas Z, et al. Two-proton radioactivity of ^{45}Fe . *Eur Phys J A*, 2009, 42: 431–439
- 42 Pomorski M, Pfützner M, Dominik W, et al. Proton spectroscopy of ^{48}Ni , ^{46}Fe , and ^{44}Cr . *Phys Rev C*, 2014, 90: 014311
- 43 Ascher P, Audirac L, Adimi N, et al. Direct observation of two protons in the decay of ^{54}Zn . *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 102502
- 44 Goigoux T, Ascher P, Blank B, et al. Two-proton radioactivity of ^{67}Kr . *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 162501
- 45 Geesaman D F, McGrath R L, Lesser P M S, et al. Particle decay of ^6Be . *Phys Rev C*, 1977, 15: 1835–1838
- 46 Kryger R A, Azhari A, Hellström M, et al. Two-proton emission from the ground state of ^{12}O . *Phys Rev Lett*, 1995, 74: 860–863
- 47 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
- 48 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
- 49 Fisker J L, Thielemann F K, Wiescher M. The nuclear reaction waiting points: ^{22}Mg , ^{26}Si , ^{30}S , and ^{34}Ar and bolometrically double-peaked Type I X-ray bursts. *Astrophys J*, 2004, 608: L61–L64
- 50 Seweryniak D, Woods P J, Carpenter M P, et al. Level structure of ^{22}Mg Implications for the $^{21}\text{Na}(p,\gamma)^{22}\text{Mg}$ astrophysical reaction rate and for the ^{22}Mg Mass. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 032501
- 51 Wang Y T, Fang D Q, Xu X X, et al. Implantation-decay method to study the β -delayed charged particle decay. *Nucl Sci Tech*, 2018, 29: 98
- 52 Sun L J, Xu X X, Lin C J, et al. A detection system for charged-particle decay studies with a continuous-implantation method. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2015, 804: 1–7
- 53 Xu J Y, Li Q T, Ye Y L, et al. Performance of a small AT-TPC prototype. *Nucl Sci Tech*, 2018, 29: 97
- 54 Pomorski M, Miernik K, Dominik W, et al. β -delayed proton emission branches in ^{43}Cr . *Phys Rev C*, 2011, 83: 014306
- 55 Duan F F, Yang Y Y, Hu B T, et al. Silicon detector array for radioactive beam experiments at HIRFL-RIBLL. *Nucl Sci Tech*, 2018, 29: 165
- 56 Liu J H, Ge Z, Wang Q, et al. Electrostatic-lenses position-sensitive TOF MCP detector for beam diagnostics and new scheme for mass measurements at HIAF. *Nucl Sci Tech*, 2019, 30: 152
- 57 Grzywacz R. Applications of digital pulse processing in nuclear spectroscopy. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2003, 204: 649–659
- 58 Jahn R, McGrath R L, Moltz D M, et al. Angular correlations in the beta-delayed two-proton decay of ^{22}Al . *Phys Rev C*, 1985, 31: 1576–1578
- 59 Brown R H, Twiss R Q. A test of a new type of stellar interferometer on sirius. *Nature*, 1956, 178: 1046–1048
- 60 Koonin S E. Proton pictures of high-energy nuclear collisions. *Phys Lett B*, 1977, 70: 43–47
- 61 Zhou L, Fang D Q. Effect of source size and emission time on the p-p momentum correlation function in the two-proton emission process. *Nucl Sci Tech*, 2020, 31: 52
- 62 Spyrou A, Kohley Z, Baumann T, et al. First observation of ground state dineutron decay: ^{16}Be . *Phys Rev Lett*, 2012, 102: 102501
- 63 Revel A, Marqués F, Sorlin O, et al. Strong neutron pairing in core + 4n nuclei. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 152504
- 64 Olsen E, Pfützner M, Birge N, et al. Landscape of two-proton radioactivity. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 222501

Summary for “双质子发射实验研究进展”

Progress of experimental studies on two-proton emission

Deqing Fang^{*} & Yugang Ma^{*}*Key Laboratory of Nuclear Physics and Ion-beam Application of Ministry of Education, Institute of Modern Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China*^{*} Corresponding authors, E-mail: dqfang@fudan.edu.cn; mayugang@fudan.edu.cn

Radioactivity is one of the most significant characteristics of unstable nuclei, the familiar modes including α , β , γ decay and fission. Two-proton (2p) emission is an exotic radioactivity mode of nuclei in the proton drip-line area, which is very significant for studying the structure, mass and correlation between proton pair of extremely proton-rich nuclei and one of the frontiers in radioactive ion beam physics. In this article, progress of experimental studies on two-proton emission was briefly reviewed. Several experimental measurement methods were introduced. The identification method for the mechanism of two-proton emission was discussed. Two-proton emission was predicted to be existed in extremely proton-rich nuclei in 1960. For 2p emission from the ground state of a nucleus with long half-life, it was observed for the first time in 2002 due to the difficulty in the production of a candidate. Only few decay events were observed for the four proton drip-line nuclei with a long half-life ground state. For the detection of 2p emission process, the in-flight decay, implantation decay and optical time projection chamber (OTPC) plus CCD method are the three main experimental methods. The in-flight decay method is suitable for the candidate with very short half-life and almost inapplicable for the candidate with a half-life longer than 1 μ s. The implantation decay method is suitable for the candidate with long half-life, especially for β -delayed decay nuclei. In this case, the measured decay signal will be very clear with low background due to the separation recording of the implantation and decay events. The OTPC plus CCD method could record a picture of 2p emission process directly for the candidate. Generally, there are three mechanisms for proton-rich nuclei to emit two protons: (1) ^2He cluster emission; (2) three-body emission; (3) sequential emission. The ^2He cluster emission is basically two protons constrained by the pair correlation into a quasi-bound singlet, i.e., $^1\text{S}_0$ configuration. Such a quasi-bound state can only exist for very short time and then becomes separated after penetrating through the Coulomb barrier. Usually, the two-proton relative momentum and the opening angle distributions are used to identify the mechanism of 2p emission in experimental investigations. However, this method can only distinguish it being ^2He cluster emission or not. For the three-body and sequential emissions, the key difference is the emission time between the two protons. The proton-proton momentum correlation function (also called HBT) method is a widely used analysis technique in nuclear physics, which can extract the emission time of a particle. It has been demonstrated that the three-body and sequential emissions could be distinguished by using the HBT method. The difficulty in the study of exotic radioactivity is the low production rate of the unstable nuclei in the drip-line area. The high-intensity heavy-ion accelerator facility (HIAF) under construction in China has an advantage of high beam intensity, the most frontier work in the field of exotic radioactivity for nuclei around the drip-line could be performed on it by adopting the superior detection technique and investigation method.

proton-rich nuclei, two-proton emission, in-flight decay method, implantation decay method, optical time projection chamber-CCD method

doi: [10.1360/TB-2020-0423](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0423)