



利用单核子转移反应研究轻丰中子核壳演化的实验进展

楼建玲^{1,2*}, 梁诗琪^{1,2}, 朱宏渝^{1,2,3}, 夏博龙^{1,2}, 葛浩煜^{1,2}, 万文武^{1,2}, 李奇特^{1,2}, G. Kaminski³

1. 北京大学物理学院技术物理系, 北京 100871

2. 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

3. Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 141980, Russia

* 联系人, E-mail: jllou@pku.edu.cn

2025-08-29 收稿, 2025-10-28 修回, 2025-10-28 接受, 2025-10-29 网络版发表

国家重点研发计划(2023YFA1606702)和国家自然科学基金面上项目(12275007)资助

摘要 单核子转移反应, 包括削裂反应(如(d, p)、(d, n)、(³He, d)等)和拾取反应(如(p, d)、(n, d)、(d, t)、(d, ³He)等), 是研究原子核单粒子结构的有效实验手段. 本文概述了单核子转移反应的研究历史, 重点介绍了如何获取谱因子、自旋宇称以及有效单粒子能等关键核结构信息. 以丰中子Be、B、C的实验研究为例, 阐述了应用单核子转移反应实验探索传统幻数 $N=8$ 消失, 新幻数 $N=14, 16$ 和 $Z=6$ 出现的进展. 为推进相关研究, 北京大学核物理实验组研发了一套高立体角、高分辨率、模块化的大接受度带电粒子探测阵列(LACPU). 利用该阵列开展的首次实验采用了¹⁴⁻¹⁶C束流, 其结果有望为 $Z=6$ 和 $N=16$ 壳层闭合问题提供新证据. 未来还计划采用活性靶时间投影室(AT-TPC)研究¹⁰Li的非束缚态, 为探索传统幻数 $N=8$ 的消失提供新机遇.

关键词 单核子转移反应, 谱因子, 有效单粒子能, 壳演化

原子核是由质子和中子组成的复杂量子多体系统, 是物质微观结构的一个重要层次. 近30年来, 不稳定原子核的奇特结构及相互作用机制的研究逐渐成为核物理领域的前沿, 推动了全球范围内大科学装置的建设及相关物理研究的深入发展. 随着加速器技术和核探测技术的不断进步, 近滴线区原子核的壳演化, 如传统幻数的消失和新幻数的出现等, 逐渐成为研究热点.

直接核反应是入射粒子与靶核相互作用时, 不经复合核形成的快速过程, 包括弹性、非弹性散射、削裂反应、拾取反应以及敲出反应等. 其中, 典型的削裂反应包括(d, p)、(d, n)、(³He, d)等; 拾取反应主要有(p, d)、(n, d)、(d, t)、(d, ³He)等; 敲出反应则以(p, 2p)、(e, e'p)等为代表. 这些反应是研究原子核结构的关键工具, 比如: 通过分析微分截面, 可提取终态核能级的自旋宇称值 J^π ; 基于微分截面提取的谱因子, 可以量化核态间

单粒子跃迁强度; 有效单粒子能则可用于探索单粒子轨道次序, 同时可揭示不稳定原子核的壳演化规律等等. 本文将简述单核子转移反应的实验与理论, 涵盖削裂和拾取反应的发展历程, 并结合具体实验案例, 重点介绍其在放射性核壳演化研究中的应用.

1 单核子转移反应的实验和理论发展历程

(1) Oppenheimer-Phillips过程. 1935年, Helmholtz等人发现氘核反应截面随能量的变化规律与Gamow理论不符^[1], 这促使Oppenheimer和Phillips^[2]提出新的反应机制: 氘核因结合能较低(~2.2 MeV), 半径较大(~2.1 fm), 在未完全穿透势垒时即可发生“质子剥离-中子俘获”过程. 他们采用绝热近似和WKB方法推导的截面与实验吻合, 奠定了直接核反应理论的基础. 1937年, Bethe^[3]明确指出该过程与复合核机制的区别, 并指出

引用格式: 楼建玲, 梁诗琪, 朱宏渝, 等. 利用单核子转移反应研究轻丰中子核壳演化的实验进展. 科学通报, 2026, 71: 865–873

Lou J, Liang S, Zhu H, et al. Experimental progress of shell evolution studies in light neutron-rich nuclei via single-nucleon transfer reactions (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 865–873, doi: 10.1360/CSB-2025-5436

可以通过出射质子能谱研究原子核结构. 1947年, Serber^[4]建立定量描述: 给出截面公式 $\sigma \approx 5A^{1/3} \times 10^{-26} \text{ cm}^2$, 证明相互作用时间($10^{-21} \sim 10^{-22} \text{ s}$)远短于复合核形成时间, 并成功解释了出射中子的角分布. Peaslee^[5]进一步证实: 当氘核能量 E_d 接近库仑势垒时, (d, p)截面主导($\sigma_{dp}/\sigma_{dn} > 1$); 随 E_d 增大, (d, n)过程增强, 截面比 σ_{dp}/σ_{dn} 趋近于1. 这些研究完整解释了(d, p)和(d, n)反应截面随入射能量的变化规律.

(2) 从PWBA到DWBA. 实验观测还发现高能(d, p)反应中出射质子呈现前倾角分布特征. Butler^[6-8]于1950年首次提出(d, p)反应的量子力学解释, 指出前倾角分布是氘核擦边碰撞时发生的核子削裂过程所致, 其中高角动量分波(l_n)起主导作用, 并建立了通过角分布峰值位置(满足 $qR_N \approx l_n$, q 为转移动量, $R_N \approx 1.2A^{1/3} \text{ fm}$)确定 l_n 值进而推断剩余核态特性的方法, 如图1所示. 需要指出的是, Butler的平面波玻恩近似(plane-wave Born approximation, PWBA)忽略了核内转移的贡献和相对运动势场效应的存在^[9]. 1958年, Huby等人^[10,11]发展了扭曲波玻恩近似(distorted-wave Born approximation, DWBA)理论: 通过引入光学模型势描述相对运动波函数, 成功预言并验证了 $l = 1, 2$ 转移过程的角分布. DWBA理论基于直接跃迁机制、光学势描述和微扰处理的核心假设^[12,13], 使其迅速取代PWBA成为核反应

分析的标准理论框架.

(3) 谱因子与求和规则. 1960年, Macfarlane和French^[14,15]系统发展了DWBA理论, 提出削裂反应是研究原子核低激发态结构的重要实验工具, 并将约化宽度分解为谱因子与单粒子宽度的乘积, 首次指出实验谱因子与独立粒子模型预言存在偏差的问题. 1961年, 他们进一步建立了谱因子求和规则. 1967年, Ehrenstein和Schiffer^[16]通过Zn同位素(d, p)反应发现实验谱因子普遍低于独立粒子模型预言值, 即谱因子的压低现象, 揭示了核多体关联效应的重要性. 2012年, Schiffer等人^[17]在Ni同位素转移反应中验证了求和规则的自治性(误差 $< 5\%$). 2013年, Kay等人^[18]系统分析了124个转移反应, 发现稳定核的谱因子普遍存在约0.55的压低因子, 且指出用求和规则归一后的谱因子是“好的实验观测量”, 可以直接与壳模型对比. 近期, Wuosmaa等人^[19]利用 $^2\text{H}(^{15}\text{C}, \text{p})^{16}\text{C}$ 反应布居了 ^{16}C 的 0_1^+ 和 0_2^+ . 通过角分布分析, 分别提取了该反应到 0_1^+ 和 0_2^+ 的s波谱因子. 应用求和规则得到这两个 0^+ 态的绝对谱因子分别为0.60和1.40. 该谱因子和壳模型的计算结果一致, 表明其作为实验观测量是可靠的. 此外, 根据谱因子得到了 ^{16}C 基态(0_1^+)的s波强度只占30%, 并非主要成分. 类似地, Chen等人^[20,21]利用 $^2\text{H}(^{11}\text{Be}, \text{p})^{12}\text{Be}$ 反应布居了 ^{12}Be 的 0_1^+ 和 0_2^+ . 经求和规则归一化处理, 得到 ^{12}Be 的 0_1^+ 和 0_2^+ 的s波谱因子分别为0.20和0.41. 结合其他实验数据推导出: ^{12}Be 基态中s波仅占19%, 远远小于 ^{11}Be 的 $\sim 80\%$; 而d波成分却高达57%, 是主要的闯入成分. 此外, Liu等人^[22]利用 $^1\text{H}(^{13}\text{B}, \text{d})^{12}\text{B}$ 反应布居了 ^{12}B 的一系列负宇称态. 应用求和规则分析, 得出 ^{13}B 基态中的s(d)波闯入成分波约为12%(5%), 处于从Be到C的过渡.

有效单粒子能(effective single particle energy, ESPE)是具有相同轨道成分的不同激发态实际能级的谱因子的加权平均值^[23]. 从 $ab-initio$ 的观点出发, 图2给出了有关联粒子系统A的ESPE的提取方法^[24], 即得到系统A加核子(去核子)后到达每一个核态的谱强度和能级后, 加权平均得到每个轨道的ESPE. 具体的公式如下:

$$\varepsilon(j) = \frac{\sum_k \frac{2J_k+1}{2J_i+1} S_k^{p+}(E_k-E_0) + S_k^{p-}(E_0-E_k)}{\sum_k \frac{2J_k+1}{2J_i+1} S_k^{p+} + S_k^{p-}}, \quad (1)$$

其中, $S_k^{p+}(S_k^{p-})$ 是核子数为A的系统增加(移除)一个核子后占据具有量子数 $p = \{nl\}$ 的k态的谱因子(谱幅度的

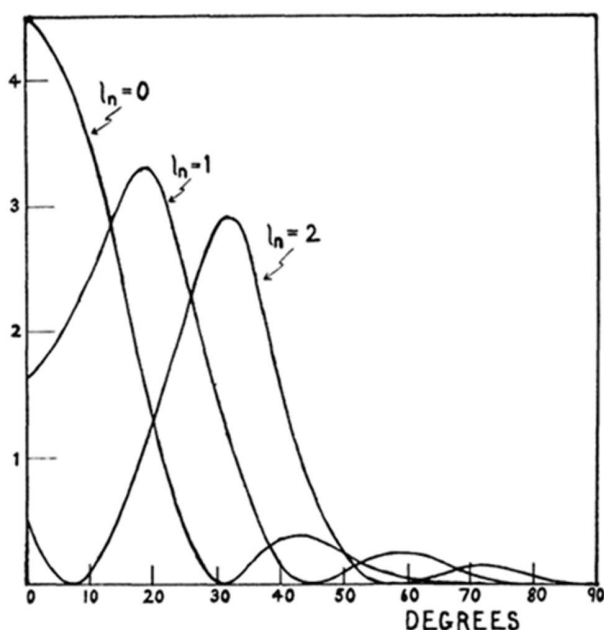


图1 转移不同轨道核子的角分布^[6]

Figure 1 Angular distributions of the transferred nucleon with different angular momentum^[6]

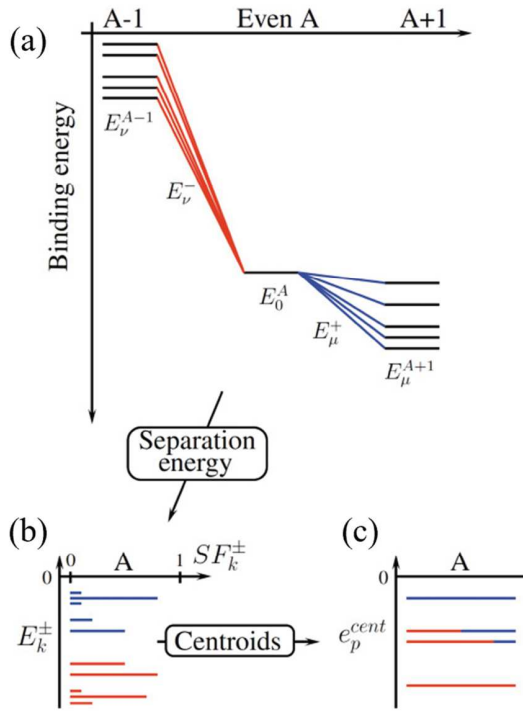


图2 (网络版彩色) (a) 三个级联原子核的束缚能, 以及中间系统基态的单核子增加和移除反应. (b) 谱强度的分布图. (c) 相应的有效单粒子能谱^[24]

Figure 2 (Color online) (a) Total binding energies of three successive nuclei and associated one-nucleon addition and removal energies from the ground state of the intermediate system. (b) Spectral strength distribution. (c) Corresponding ESPE spectrum^[24]

平方), J_k 是 k 态的自旋, E_0 是 A 系统的单核子束缚能, $E_k - E_0$ (或者 $E_0 - E_k$) 是 k 态的激发能. 因此, 实验上只要测量到 A 系统加一个核子或者移除一个核子后占据 $A+1$ 或者 $A-1$ 系统的能级及谱因子 (归一后的绝对谱因子), 就能利用式(1)得到 A 系统的有效单粒子能. 需要指出的是, 从定义上看, 削裂反应 $A(d, p)A+1$ 属于典型的 A 系统加核子反应; 而拾取反应 $A(d, {}^3\text{He})A-1$ 属于典型的移除核子反应. 在实际的应用过程中, 每次实验可能只测量到加一个核子后占据 $A+1$ 系统的能级及其谱因子, 也可能只测量到移除一个核子后占据 $A-1$ 系统的能级及其谱因子. 对于这种情况, Bedoor 等人^[25] 基于 ${}^2\text{H}({}^{13}\text{B}, p){}^{14}\text{B}$ 转移反应, 发展了一种仅利用加核子反应求解 ${}^{14}\text{B}$ 中 $s_{1/2}$ 和 $d_{5/2}$ 轨道 ESPE 的方法. 研究结果显示, $s_{1/2}$ 比 $d_{5/2}$ 轨道低 1.5 MeV, 表明在 ${}^{14}\text{B}$ 中存在 $s_{1/2}$ 与 $d_{5/2}$ 轨道反转的现象. 我们进一步采用此方法研究了 ${}^{12,13}\text{B}$ 的 ESPE, 发现在丰中子 B 同位素中, $s_{1/2}$ 轨道能级均低于 $d_{5/2}$ 轨道. 这一系统性趋势与传统的壳模型预言相悖, 进一步证实了丰中子 B 同位素中存在显著的轨道反转^[26].

2 利用单核子转移反应研究轻中子核壳演化的进展

近年来, 远离 β 稳定线的放射性原子核的结构研究已成为核物理领域的重要前沿方向. 其中, 幻数和壳层演化规律的研究对于理解原子核的稳定性及其结构特性具有重要意义. 实验上, 丰中子 ${}^{22}\text{O}$ ($Z=8, N=14$) 和 ${}^{24}\text{O}$ ($Z=8, N=16$) 已表现出典型的双幻核特征; 同时, 在碳同位素中关于 $N=14$ 和 $N=16$ 壳层性质的研究也取得了重要进展. 然而, 仍有一系列问题还未澄清: $Z=6$ 是否为质子幻数? $N=14$ 、 $N=16$ 亚壳层在碳同位素中是否闭合? 传统幻数 $N=8$ 在非束缚核中如何演化? 这些问题的解答, 亟需更多系统的实验研究提供可靠依据.

在实验技术方面, 放射性核素因其较短的半衰期和较低的束缚能, 难以制备成固体靶材料. 这一特点促使单核子转移反应的实验研究从传统的正运动学 (氘等轻质量束流轰击重靶核) 逐渐转变为逆运动学 (放射性核束撞击氘等轻靶). 为适应这一转变, 探测器系统也经历了显著的技术革新: 从早期主要覆盖前角区域的探测器, 发展到如今近 4π 立体角覆盖的探测阵列^[27]. 值得注意的是, 随着电子学技术的进步, 活性靶时间投影室 (active target-time projection chamber, AT-TPC) 凭借其独特的技术优势, 包括可调节的等效靶厚、优异的 Q 值分辨、接近 4π 的立体角覆盖、原位测量能力以及低探测阈值等, 已成为当前直接核反应实验研究的利器^[28].

2.1 LACPU 的研制与新幻数 $N=14, 16$ 和 $Z=6$ 的实验研究进展

多个实验结果表明, 氧同位素 ${}^{22}\text{O}$ ($Z=8, N=14$) 和 ${}^{24}\text{O}$ ($Z=8, N=16$) 表现出典型的双幻核特征. 近期, 虽然在碳同位素中关于 $N=14$ 和 $N=16$ 壳层特性的研究也取得重要进展, 但还需要更多的实验证据. 首先, 实验观测到 ${}^{16}\text{C}$ 、 ${}^{18}\text{C}$ 和 ${}^{20}\text{C}$ 中第一 2^+ 态激发能非常接近, 但显著低于 ${}^{22}\text{O}$ 的相应能级. 该现象被解释为 $1s_{1/2}$ 和 $0d_{5/2}$ 轨道的能级简并, 导致 $N=14$ 亚壳层闭合效应的消失^[29,30]. 这一结论得到了最新 ${}^2\text{H}({}^{16}\text{C}, p){}^{17}\text{C}$ 反应实验数据的支持: 实验布居了 ${}^{17}\text{C}$ 在 $E_x = 217$ 和 335 keV 的两个束缚态, 通过角分布分析提取的谱因子与壳模型预言高度一致, 证实这两个态分别是 $1s_{1/2}$ 和 $0d_{5/2}$ 轨道主导的单粒子态, 从而为 $1s_{1/2}$ - $0d_{5/2}$ 能级简并提供了直接的实验证据^[31]. 最近, Kim 等人^[32] 通过 ${}^{18}\text{C}$ 的单中子敲出

反应新发现了 ^{17}C 的两个共振态, $E_x = 2.65(2)$ 、 $3.94(5)$ MeV, 宇称自旋分别为 $1/2_1^-$ 和 $3/2_1^-$. 通过对 ^{15}C 、 ^{17}C 和 ^{19}C 中 $1/2_1^-$ 和 $3/2_1^-$ 态的系统比较, 发现丰中子碳同位素中中子 $p_{1/2}$ 轨道与 sd 轨道($1s_{1/2}$ 和 $0d_{5/2}$)之间的能隙($N = 8$)稳定在3.0 MeV附近. 然而, 判断 $N = 16$ 亚壳闭合性的关键实验依据— sd 和 $0d_{3/2}$ 轨道之间的能隙大小——目前仍缺乏. 为此, 我们计划通过 $^2\text{H}(^{14}\text{C}, \text{p})^{15}\text{C}$ 、 $^2\text{H}(^{15}\text{C}, \text{p})^{16}\text{C}$ 和 $^2\text{H}(^{16}\text{C}, \text{p})^{17}\text{C}$ 转移反应布居 ^{15}C 、 ^{16}C 和 ^{17}C 的非束缚态, 重点探测并寻找以 $0d_{3/2}$ 中子轨道激发为主的态. 通过分析各激发态的角分布提取相应谱因子, 并根据式(1)计算 $sd(1s_{1/2}$ 和 $0d_{5/2})$ 和 $d_{3/2}$ 中子轨道之间的ESPE, 最终确定 sd – $d_{3/2}$ 轨道间隙, 为阐明丰中子碳同位素中 $N = 16$ 的亚壳闭合特性提供关键实验依据.

评估 $Z = 6$ 是否为幻数的关键依据为 $0p_{3/2}$ 壳层以外的质子占据数, 尤其是在 $0p_{1/2}$ 或 sd 壳层中的质子占据数目. Tran等人^[33]系统分析了轻核的点质子分布半径、电磁跃迁率和原子质量后指出: 碳同位素 $^{13-20}\text{C}$ 中存在一个由“自旋轨道耦合驱动”的质子幻数(子壳层闭合) $Z = 6$. 早期 $^{12-14}\text{C}(\text{d}, ^3\text{He})^{11-13}\text{B}$ 反应的研究显示, $0p_{1/2}$ 质子占据数从 ^{12}C 中的0.7降至 ^{13}C 中的0.4和 ^{14}C 中的0.3(图3(a)). 这一减弱趋势表明, $0p_{1/2}$ 中子的添加增强了碳同位素中 $0p_{3/2}$ 质子壳层的闭合^[34]. 然而, 利用 $^4\text{N}(\text{p}, 2\text{p})^4\text{C}$ 质子敲出反应进行的研究却发现了相反的趋势: $^{16,18,20}\text{C}$ 波函数中的 $0p_{1/2}$ 质子强度随中子数增加而上升, 暗示质子 $0p_{1/2}$ – $0p_{3/2}$ 自旋轨道劈裂可能减小, 从而对 $Z = 6$ 幻数在丰中子碳同位素中的持续性提出了质疑^[35]. 最新的 $^2\text{H}(^{14}\text{C}, ^3\text{He})^{13}\text{B}$ 实验证实, ^{14}C 基态中 $0p_{1/2}$ 质子数高达0.7, 且可能存在跨壳的 sd 壳层质子贡献. 对于 ^{15}C , 使用15.7 MeV/nucleon放射性 ^{15}C 束流进行的 $^2\text{H}(^{15}\text{C}, ^3\text{He})^{14}\text{B}$ 反应($Q = -15.586$ MeV)观测到了 ^{14}B 中以 $0p_{3/2}$ 质子为主的态, 但受限于束流强度和入射能量, 未探测到 ^{14}B 中其他可能的质子跃迁态^[36]. 对于 ^{16}C 的 2^+ 态, $^9\text{Be}(^{17}\text{N}, ^{16}\text{C} + \gamma)\text{X}$ 单质子敲出反应^[37]、 $^{17}\text{N}(\text{p}, 2\text{p})^{16}\text{C}$ 质子敲出反应以及 ^{16}C 在质子和氦核上的非弹性散射^[38]等实验研究表明, 从 $0p_{3/2}$ 到 $0p_{1/2}$ 壳层的质子激发贡献超出了壳模型计算和从头计算的理论预测, 支持 ^{16}C 基态中 $0p_{1/2}$ 质子成分不可忽略的结论. 迄今为止, $^{15,16}\text{C}$ 基态中 $0p_{1/2}$ 质子成分仍缺乏定量实验测量, 因此 $Z = 6$ 在丰中子碳同位素中是否存在仍需进一步研究. 图3(b)总结了基于碳同位素单质子转移反应实验数据和式(1)计算得到的 $^{11-13}\text{B}$ 中 $0p_{1/2}$ 与 $0p_{3/2}$ 轨道的ESPE差值. 结果显示, $^{12,13}\text{B}$ 中 $0p_{1/2}$

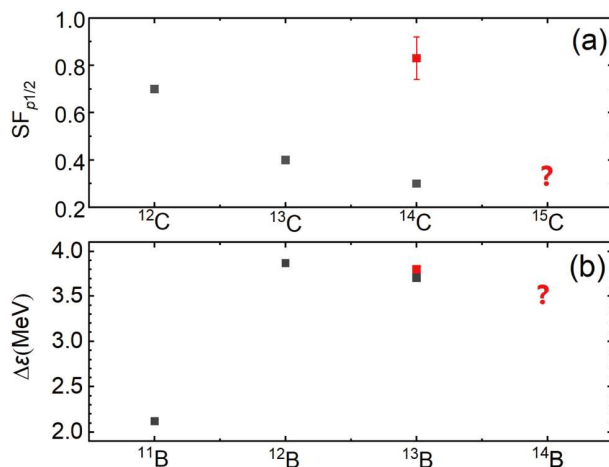


图3 (网络版彩色) (a) 利用单质子转移反应得到的 $^{12-14}\text{C}$ 中质子占据 $0p_{1/2}$ 轨道的数目, 黑色和红色数据点分别来自文献^[34,36]; (b) 利用单质子转移反应数据和有效单粒子能的公式, 计算得到的 $^{11-13}\text{B}$ 中 $0p_{1/2}$ 与 $0p_{3/2}$ 轨道的有效单粒子能差值

Figure 3 (Color online) (a) Proton occupation numbers in the $0p_{1/2}$ orbital for $^{12-14}\text{C}$ obtained from single-proton transfer reactions. Black and red squares are from Refs. ^[34,36], respectively. (b) Energy splitting between $0p_{1/2}$ and $0p_{3/2}$ orbitals in $^{11-13}\text{B}$ calculated using single-proton transfer reaction data and the effective single-particle energy formula

与 $0p_{3/2}$ 轨道的ESPE之差接近4.0 MeV, 接近丰中子 $^{22,24}\text{O}$ 的 $s_{1/2}$ – $d_{5/2}$ 之间的能隙, 甚至大于丰中子碳同位素 $0p_{1/2}$ – sd 之间的能隙, 说明 $Z = 6$ 在硼同位素中是一个次闭壳. 然而, 图3中还缺乏如 $^{15,16}\text{C}$ 等更加丰中子的碳同位素的单核子转移反应结果. 为此, 我们计划利用 $^2\text{H}(^{14-16}\text{C}, ^3\text{He})^{13-15}\text{B}$ 的单质子转移反应实验定量研究 $^{14-16}\text{C}$ 基态中 $0p_{1/2}$ 质子强度. 实验从三方面进行了优化: 采用较高的束流能量以便布居 $^{13-15}\text{B}$ 的高占据态($E_x > 10$ MeV); 提高次级束流的流强, 增大探测阵列的立体角, 提高实验统计; 改善 Q 值的分辨以便准确识别 $^{13-15}\text{B}$ 的不同激发态. 最终, 根据式(1)计算 $0p_{1/2}$ 和 $0p_{3/2}$ 壳的ESPE, 为判断 $Z = 6$ 在丰中子碳同位素中的壳层演化行为提供关键实验依据.

基于以上物理动机, 北京大学核物理实验组研发了一套高立体角、高分辨率、模块化的大接受度带电粒子探测阵列LACPU (Large Acceptance Charged particle detector array developed at Peking University)^[39-42], 并于2022年在兰州重离子加速器国家重点实验室的RIBLL1终端, 完成了第一次放射性束流实验^[42]. 实验装置图及实验时的照片见图4. LACPU由T0、T1、TAF和TAB四个望远镜组成, 其中心与靶的距离分别为10.0、16.6、12.0和13.5 cm. T0包括3块方形双面硅条

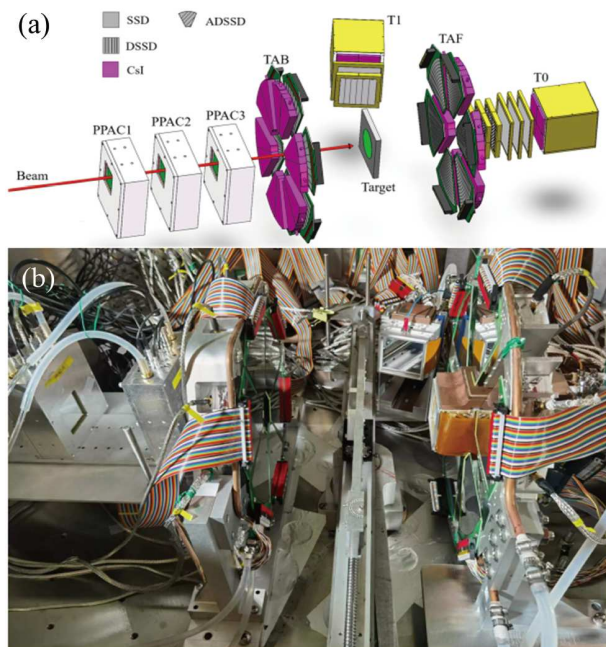


图4 (网络版彩色) LACPU的第一次实验装置图(a)及实验照片(b)^[42]

Figure 4 (Color online) Schematic view (a) and photo (b) of LACPU used in its first experiment^[42]

探测器(double-sided silicon strip detector, DSSD)、三块大面积硅探测器(large surface silicon detector, SSD)和一层 2×2 的CsI(Tl)闪烁体探测器阵列。T1包括一块DSSD、一块SSD以及一层 2×2 的CsI(Tl)阵列。所有DSSD和SSD有效面积均为 $64 \text{ mm} \times 64 \text{ mm}$, 除T0的第一层DSSD条宽为 1 mm 外, 其余DSSD条宽均为 2 mm 。TAF和TAB均由6片环形双面硅条探测器(annular double-sided silicon strip detector, ADSSD)匹配12块楔形CsI(Tl)构成。每块ADSSD的正面划分为16条环形条(条宽 6.4 mm), 背面划分为8条径向条(单条张角 6.8°)。利用 3α 源(^{239}Pu 、 ^{241}Am 、 ^{244}Cm , 分别发射 5.155 、 5.486 和 5.805 MeV 的 α 粒子)测得T0、T1望远镜中所有DSSD和SSD的能量分辨率约为 1% , 角度分辨优于 0.7° 。T0、T1望远镜的 ΔE - E 粒子鉴别图见图5, 可以清晰识别出p、d、t以及 $^{13,14,15}\text{C}$ 等粒子。

在实验中, 我们采用约 30 MeV/nucleon 的 $^{14-16}\text{C}$ 以及 ^{16}N 束流轰击 CH_2 或者 CD_2 固体靶发生直接核反应, 利用LACPU测量反应产物。得益于LACPU的大接受度, 我们在一个实验中同时测量了多个直接核反应道, 有效提高了放射性束流的利用效率, 为系统研究丰中子碳和硼同位素的壳层演化规律提供了综合数据支持。根据反应运动学^[27], LACPU的各部分功能如下: 望远

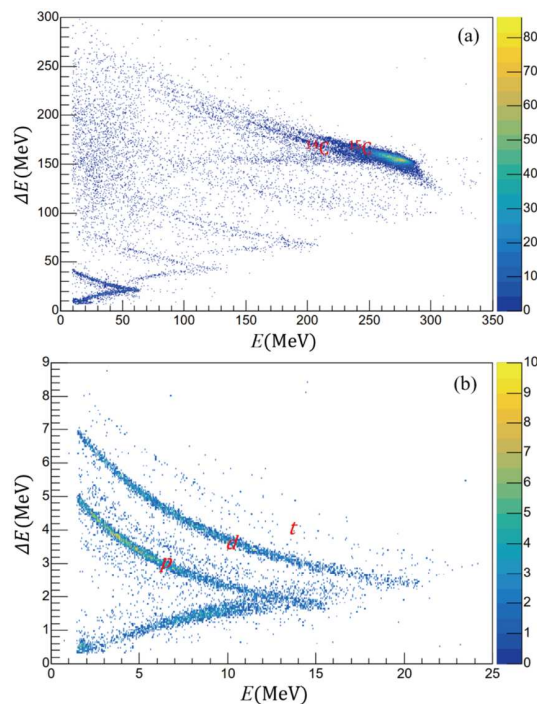


图5 (网络版彩色) T0(a)和T1(b)望远镜的粒子鉴别图^[42]

Figure 5 (Color online) Particle identification spectra measured by the telescopes T0 (a) and T1 (b)^[42]

镜T1测量(p, p)、(p, p')、(d, d)、(d, d')等弹性和非弹性散射反应; 望远镜TAF测量(p, d)、(p, t)、(d, ^3He)、(d, t)等转移反应; 望远镜TAB专门测量(d, p)反应道。目前, 该实验中测量的 $^{15}\text{C} + \text{p/d}$ 弹性散射角分布已经发表^[42]。弹性散射作为最简单的直接核反应过程, 其实验结果具有多重验证价值: 首先, 可用于检验实验装置的位置和能量刻度; 其次, 能够验证入射和出射粒子数目的测量可靠性; 同时, 所获取的数据也可后续更复杂的非弹性散射和转移反应等研究提供可靠的光学势参数。

LACPU首次实验的单核子转移反应数据分析已取得系列进展: 基于 $^2\text{H}(^{15}\text{C}, ^3\text{He})^{14}\text{B}$ g.s.、 $^1\text{H}(^{15}\text{C}, \text{d})^{14}\text{C}$ g.s.、 $^2\text{H}(^{16}\text{N}, ^3\text{He})^{15}\text{C}_{1\text{st}}$ 、 $^1\text{H}(^{16}\text{N}, \text{d})^{15}\text{N}$ g.s.等反应道的微分截面测量, 系统提取了谱因子压低因子随质子-中子不对称度的演化规律, 发现其与敲出反应呈现相似特征, 相关物理机制正在深入研究中^[43,44]; 通过逆运动学的(d, ^3He)转移反应在 $^{13,14}\text{B}$ 中观测到了若干新共振态^[43], 目前正通过精细分析确认其中 $0p_{1/2}$ 质子主导的激发态, 为研究 $Z = 6$ 壳层在丰中子硼和碳同位素链中的闭合特性提供关键实验依据; 通过逆运动学的(d, p)转移反应在 $^{15-17}\text{C}$ 中新发现了数个共振态, 将结合理论

计算甄别 $d_{3/2}$ 中子主导的激发态,为进一步研究丰中子碳同位素中 $N=14, 16$ 壳层闭合特性提供新机遇。

2.2 AT-TPC与 $N=8$ 的幻数在丰中子核中的演化

在轻质量区 $N=7$ 的同中子素中,除 $Z=3$ 的 ^{10}Li 外, $0p_{1/2}$ 、 $1s_{1/2}$ 、 $0d_{5/2}$ 轨道的次序均已通过实验确定^[45]。如图6所示,尽管已有多项关于 ^{10}Li 非束缚态的实验研究,并普遍认为在0.5 MeV附近存在一个以 $p_{1/2}$ 波中子为主的宽共振态,但对其 $p_{1/2}$ 与 $s_{1/2}$ 轨道相对能级位置的研究仍存在显著分歧,尤其体现在两项 $^2\text{H}(^9\text{Li}, p)^{10}\text{Li}$ 单中子转移反应的相互矛盾的实验结果上。目前,虽然已开展多项 ^{11}Be 的单质子敲出实验,但仍缺乏单质子转移反应实验的进一步补充验证。为此,我们提出了 $^2\text{H}(^{11}\text{Be}, ^3\text{He})^{10}\text{Li}$ 反应的实验方案,通过缺失质量法研究 ^{10}Li 的激发态能谱。该反应机制有利于高效转移 $p_{3/2}$ 质子,同时最大限度地减少对 ^{11}Be 基态 $s_{1/2}$ 中子的干扰,从而有效布居 $s_{1/2}$ 中子为主的激发态。通过测定 s 波主导态的激发能是否低于0.5 MeV,可明确判定 ^{10}Li 的 $p_{1/2}$ 与 $s_{1/2}$ 轨道是否发生反转^[46]。若确认反转,将与 $^{11,12}\text{Be}$ ^[20,21]的研究结果一致,进一步支持 $N=8$ 的幻数消失的结论^[45]。该实验计划已获日本大阪大学核物理研究中心(Research Center for Nuclear Physics, RCNP)批准,并将利用密歇根州立大学(Michigan State University, MSU)的活性靶时间投影室AT-TPC实施。目前AT-TPC已在RCNP完成安装调试,预计2025年12月开展实验。

同时,基于AT-TPC的厚靶、高 Q 值分辨、原位测

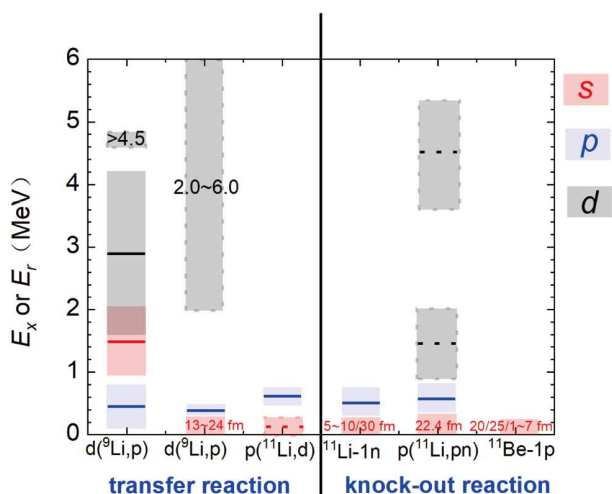


图6 (网络版彩色) ^{10}Li 的低占据态实验研究结果总结^[44]

Figure 6 (Color online) Summary of experimental results for low-lying states of ^{10}Li ^[44]

量、低探测阈值等优势,北京大学核物理实验组还计划和俄罗斯杜布纳核反应实验室联合升级已有的AT-TPC样机^[47,48],发展适用于放射性核直接核反应实验的AT-TPC阵列。AT-TPC可同时兼作靶和探测器,能够直接探测反应后出射的低能粒子,从而降低探测阈值、消除其在靶中的能损进而提升 Q 值分辨^[28,46]。初步的升级实验方案见图7: AT-TPC测量低能反冲粒子,周边的CsI(Tl)阵列以及前后角度的环形硅望远镜测量高能破裂粒子;前角度($<30^\circ$)容易出射多个粒子,需要硅条来辅助测量并区分不同粒子;在 0° 附近采用硅条和快时间探测器GAGG以适用于高计数率情形。CsI(Tl)探测阵列由72个 $1.6\times 1.6\times 4.0\text{ cm}^3$ 的CsI(Tl)组成,耦合APD读出时对5.486 MeV的 α 粒子的能量分辨率优于3.5%。

3 总结与展望

单核子转移反应的研究起源于Helmholtz等人观测到的氘核反应截面随能量变化的异常现象,随后通过Oppenheimer-Phillips、Bethe和Serber等理论家的努力,建立了区别于复合核过程的直接核反应机制。理论框架的建立经历了从Butler的平面波玻恩近似(PWBA)到扭曲波玻恩近似(DWBA)的逐步完善过程。实验上,单核子转移反应可以通过反应角分布分析提取终态核的自旋宇称、谱因子和有效单粒子能等核结构参数,在核结构研究中发挥了重要作用。以丰中子Be、B、C同位素为例,已有的实验观测揭示了传统幻数 $N=8$ 的消失,新幻数 $N=14, 16$ 以及 $Z=6$ 的出现等壳演化现象,但仍存在很多待研究问题。针对这些问题,我们计划发展新型探测阵列以提升单核子转移反应的实验能力,进而深入研究轻丰中子核的壳演化现象。

未来,随着新一代放射性核束装置(如惠州HIAF强流重离子加速器与北京BRIF放射性核束装置)陆续建

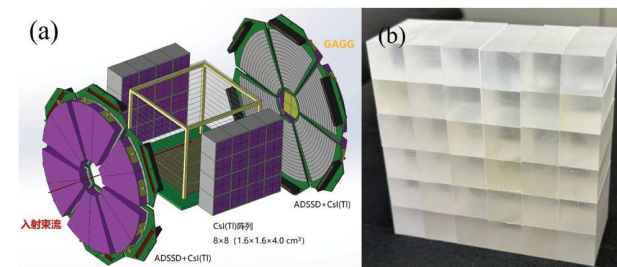


图7 (网络版彩色) AT-TPC升级方案示意图(a)和已经购置的CsI(Tl)阵列(b)

Figure 7 (Color online) Updated plan for the AT-TPC (a) and the CsI(Tl) crystal array (b)

成并投入运行, 可供研究的放射性核素种类将进一步丰富, 为探索奇特核结构提供更优越的实验条件. 与此同时, 大接受度带电粒子探测器阵列(LACPU)和活性靶时间投影室(AT-TPC)等探测设备性能的持续提升, 将显著增强单核子转移反应在研究放射性核壳演化方面的实验能力. 在理论方面, 需充分考虑奇特结构对核

反应过程的影响, 例如可将Gamow壳模型等结构理论计算得到的微观重叠函数作为输入, 引入到扭曲波玻恩近似等反应理论框架中, 从而更精确地描述弱束缚核中连续态耦合对反应机制的影响. 核结构与核反应理论的深度融合, 将为未来利用单核子转移反应系统揭示放射性核的壳结构演化规律提供重要支撑.

参考文献

- 1 Lawrence E O, McMillan E, Thornton R L. The transmutation functions for some cases of deuteron-induced radioactivity. *Phys Rev*, 1935, 48: 493–499
- 2 Oppenheimer J R, Phillips M. Note on the transmutation function for deuterons. *Phys Rev*, 1935, 48: 500–502
- 3 Bethe H A. The Oppenheimer-Phillips process. *Phys Rev*, 1938, 53: 39–50
- 4 Serber R. The production of high energy neutrons by stripping. *Phys Rev*, 1947, 72: 1008–1016
- 5 Peaslee D C. Deuteron-induced reactions. *Phys Rev*, 1948, 74: 1001–1013
- 6 Butler S T. On angular distributions from (d, p) and (d, n) nuclear reactions. *Phys Rev*, 1950, 80: 1095–1096
- 7 Butler S T. Angular distributions from (d, p) and (d, n) nuclear reactions. *Proc Roy Soc A*, 1951, 208: 559
- 8 Butler S T. Direct nuclear reactions. *Phys Rev*, 1957, 106: 272–286
- 9 Ascuito R J, Vaagen J S. The 50th anniversary of the coupled channels Born approximation (CCBA) and the coupled reaction channels (CRC) theories of nucleon transfer reactions (a unique interplay between theory, experiment and computer technology, conducted during the most tumultuous period in modern American society). *EPJH*, 2024, 49: 3
- 10 Huby R, Refai M Y, Satchler G R. Predictions of the distorted wave theory of deuteron stripping reactions. *Nucl Phys*, 1958, 9: 94–107
- 11 Kuehner J A, Almqvist E, Bromley D A. Distorted wave effects in stripping. *Phys Rev Lett*, 1960, 4: 132–134
- 12 Penny S K, Satchler G R. Inelastic effects in stripping and other direct reactions. *Nucl Phys*, 1964, 53: 145–158
- 13 Satchler G R. The distorted-waves theory of direct nuclear reactions with spin-orbit effects. *Nucl Phys*, 1964, 55: 1–33
- 14 Macfarlane M H, French J B. Stripping reactions and the structure of light and intermediate nuclei. *Rev Mod Phys*, 1960, 32: 567–691
- 15 French J B, MacFarlane M H. Isobaric-spin splitting of single-particle resonances. *Nucl Phys*, 1961, 26: 168–176
- 16 von Ehrenstein D, Schiffer J P. Study of the (d, p) reactions on $Zn^{64,66,68,70}$. *Phys Rev*, 1967, 164: 1374–1385
- 17 Schiffer J P, Hoffman C R, Kay B P, et al. Test of sum rules in nucleon transfer reactions. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 022501
- 18 Kay B P, Schiffer J P, Freeman S J. Quenching of cross sections in nucleon transfer reactions. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 042502
- 19 Wuosmaa A H, Back B B, Baker S, et al. $^{15}C(d, p)^{16}C$ reaction and exotic behavior in ^{16}C . *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 132501
- 20 Chen J, Lou J L, Ye Y L, et al. Low-lying states in ^{12}Be using one-neutron transfer reaction. *Phys Rev C*, 2018, 98: 014616
- 21 Chen J, Lou J L, Ye Y L, et al. A new measurement of the intruder configuration in ^{12}Be . *Phys Lett B*, 2018, 781: 412–416
- 22 Liu W, Lou J L, Ye Y L, et al. s - and d -wave intruder strengths in $^{13}B_{g.s.}$ via the $^1H(^{13}B, d)^{12}B$ reaction. *Phys Rev C*, 2021, 104: 064605
- 23 Baranger M. A definition of the single-nucleon potential. *Nucl Phys A*, 1970, 149: 225–240
- 24 Duguet T, Hagen G. *Ab initio* approach to effective single-particle energies in doubly closed shell nuclei. *Phys Rev C*, 2012, 85: 034330
- 25 Bedoor S, Wuosmaa A H, Lighthall J C, et al. Structure of ^{14}B and the evolution of $N = 9$ single-neutron isotones. *Phys Rev C*, 2013, 88: 011304
- 26 Xia B L, Lou J L, Ye Y L, et al. Search for the missing d -wave neutron excitation states in ^{13}B . *Phys Rev C*, 2023, 108: 064605
- 27 Lou J L, Ye Y L, Yang Z H, et al. Progress of exotic structure studies in light neutron-rich nuclei (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 1004–1015 [楼建玲, 叶沿林, 杨再宏, 等. 轻丰中子核的奇特结构研究进展. 科学通报, 2023, 68: 1004–1015]
- 28 Chen J, Ayyad Y, Bazin D, et al. Near-threshold dipole strength in ^{10}Be with isoscalar character. *Phys Rev Lett*, 2025, 134: 012502
- 29 Stanoiu M, Sohler D, Sorlin O, et al. Disappearance of the $N = 14$ shell gap in the carbon isotopic chain. *Phys Rev C*, 2008, 78: 034315
- 30 Stanoiu M, Azaiez F, Dombrádi Z, et al. $N = 14$ and 16 shell gaps in neutron-rich oxygen isotopes. *Phys Rev C*, 2008, 69: 034312
- 31 Pereira-López X, Fernández-Domínguez B, Delaunay F, et al. Low-lying single-particle structure of ^{17}C and the $N = 14$ sub-shell closure. *Phys Lett B*, 2020, 811: 135939
- 32 Kim S, Hwang J W, Satou Y, et al. Unbound states in ^{17}C and p - sd shell-model interactions. *Phys Lett B*, 2023, 836: 137629
- 33 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
- 34 Mairle G, Wagner G J. The decrease of ground-state correlations from ^{12}C to ^{14}C . *Nucl Phys A*, 1975, 253: 253–262
- 35 Syndikus I, Petri M, Macchiavelli A O, et al. Probing the $Z = 6$ spin-orbit shell gap with $(p, 2p)$ quasi-free scattering reactions. *Phys Lett B*, 2020,

809: 135748

- 36 Bedoor S, Wuosmaa A H, Albers M, et al. Structure of ^{14}C and ^{14}B from the $^{14,15}\text{C}(d, ^3\text{He})^{13,14}\text{B}$ reactions. *Phys Rev C*, 2016, 93: 044323
- 37 Petri M, Paschalis S, Clark R M, et al. Structure of ^{16}C : testing shell model and *ab initio* approaches. *Phys Rev C*, 2012, 86: 044329
- 38 Jiang Y, Lou J L, Ye Y L, et al. Quadrupole deformation of ^{16}C studied by proton and deuteron inelastic scattering. *Phys Rev C*, 2020, 101: 024601
- 39 Li G, Lou J L, Ye Y L, et al. Property investigation of the wedge-shaped CsI(Tl) crystals for a charged-particle telescope. *Nucl Instruments Methods Phys Res Sect A-Accelerators Spectrometers Detectors Associated Equipment*, 2021, 1013: 165637
- 40 Zhu H Y, Lou J L, Ye Y L, et al. Two annular CsI(Tl) detector arrays for the charged particle telescopes. *Nucl Sci Tech*, 2023, 34: 159
- 41 Pu W L, Ye Y L, Lou J L, et al. Digital signal acquisition system for complex nuclear reaction experiments. *Nucl Sci Tech*, 2024, 35: 12
- 42 Ge H Y, Lou J L, Ye Y L, et al. First experiment of LACPU, large acceptance charged particle detector array developed at Peking University. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2025, 1080: 170645
- 43 Zhu H Y. Study on the quenching of spectroscopic factors via single-nucleon transfer reactions (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Peking University, 2025 [朱宏渝. 单核子转移反应的谱因子压低现象研究. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 2025]
- 44 Zhu H Y, Lou J L, Ye Y L, et al. Progress of experimental studies on direct nuclear reactions induced by the neutron-rich halo nuclei on protons and deuterons (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, 70: 3308–3317 [朱宏渝, 楼建玲, 叶沿林, 等. 丰中子晕核在质子和氘上的直接核反应实验研究进展. 科学通报, 2025, 70: 3308–3317]
- 45 Hoffman C R, Kay B P, Schiffer J P. Neutron *s* states in loosely bound nuclei. *Phys Rev C*, 2014, 89: 061305
- 46 Lou J L, Ye Y L, Ge H Y, et al. Investigation of the shell inversion in ^{10}Li via a $d(^{11}\text{Be}, ^3\text{He})^{10}\text{Li}$ reaction with the Active Target Time Projection Chamber (AT-TPC), RCNP E581, 2021
- 47 Xu J Y, Li Q T, Ye Y L, et al. Performance of a small AT-TPC prototype. *Nucl Sci Tech*, 2018, 29: 97
- 48 Yang L S, Xu J Y, Li Q T, et al. Performance of the CAT-TPC based on two-dimensional readout strips. *Nucl Sci Tech*, 2021, 32: 85

Summary for “利用单核子转移反应研究轻丰中子核壳演化的实验进展”

Experimental progress of shell evolution studies in light neutron-rich nuclei via single-nucleon transfer reactions

Jianling Lou^{1,2*}, Shiqi Liang^{1,2}, Hongyu Zhu^{1,2,3}, Bolong Xia^{1,2}, Haoyu Ge^{1,2}, Wenwu Wan^{1,2}, Qite Li^{1,2} & G. Kaminski³

¹ Department of Technical Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

² State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

³ Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 141980, Russia

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

Single-nucleon transfer reactions, including both stripping (e.g., (d, p), (d, n)) and pickup (e.g., (p, d), (n, d)) processes, provide a fundamental experimental approach for investigating single-particle structures of atomic nuclei. This paper reviews the historical progression of single-nucleon transfer reaction studies, with particular emphasis on their critical role in extracting essential nuclear structure parameters, such as spectroscopic factors, spin-parity, and effective single-particle energies. Special attention is paid to recent progress of shell evolution phenomena in neutron-rich Be, B, and C isotopes, specifically addressing the disappearance of the conventional $N = 8$ magic number and the emergence of new shell closures at $N = 14$, 16, and $Z = 6$.

The theoretical framework for direct nuclear reactions was established by Oppenheimer-Phillips, Bethe, and Serber, who successfully interpreted the anomalous energy dependence of deuteron-induced reaction cross-sections and clearly differentiated direct reaction mechanisms from compound nuclear processes. The theoretical evolution from the plane-wave Born approximation (PWBA) to the distorted-wave Born approximation (DWBA) significantly enhanced the quantum mechanical treatment of transfer reactions, facilitating accurate extraction of nuclear structure parameters from angular distribution analyses. Of particular significance, Macfarlane and French introduced the foundational concepts of spectroscopic factors and sum rules, which revealed the quenching phenomenon of spectroscopic factors that are related to nuclear many-body correlations.

Recent experimental advances utilizing radioactive ion beams have yielded important insights. Complementary measurements of $^2\text{H}(^{11}\text{Be}, p)^{12}\text{Be}$ demonstrated a predominant d-wave intruder configuration (57%) in ^{12}Be , in striking contrast to the s-wave dominance (approximately 80%) observed in ^{11}Be . The $^2\text{H}(^{16}\text{C}, p)^{17}\text{C}$ reaction provided conclusive evidence for $s_{1/2}$ - $d_{5/2}$ orbital degeneracy in ^{17}C , supporting the weakening of the $N = 14$ shell closure in carbon isotopes. These findings demonstrate the unique capability of single-nucleon transfer reactions in elucidating shell evolution in exotic nuclei. To address controversial questions regarding the persistence of the $Z = 6$ magic number and $N = 16$ subshell closure, we have developed a Large Acceptance Charged-particle detector array at Peking University (LACPU). The large acceptance of LACPU enables simultaneous measurement of multiple reaction channels with high detection efficiency, including (d, p), (d, ^3He), and (d, t). Its first experiment with $^{14-16}\text{C}$ beams can determine proton occupancy in $0p_{1/2}$ orbitals and the ESPEs of $0p_{1/2}$, $0p_{3/2}$, $0d_{3/2}$ orbitals, providing evidence for $Z = 6$ and $N = 16$ shell closure. Future investigations will employ the Active Target Time Projection Chamber (AT-TPC) to study unbound states in ^{10}Li , offering new opportunities to examine the breakdown of conventional magic number $N = 8$.

In conclusion, single-nucleon transfer reactions, when combined with next-generation accelerator facilities (such as HIAF and BRIF) and advanced detection systems (including LACPU and AT-TPC), will continue to provide unparalleled insights into shell evolution phenomena in exotic nuclei.

single-nucleon transfer reaction, spectroscopic factor, effective single-particle energy, shell evolution

doi: [10.1360/CSB-2025-5436](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5436)