原子核电荷改变反应截面的测量及电荷半径

孙保华

北京航空航天大学物理学院, 北京 102206

E-mail: bhsun@buaa.edu.cn

2020-07-20 收稿, 2020-09-20 修回, 2020-09-21 接受, 2020-09-22 网络版发表

国家重点研发计划(2016YFA0400504)和国家自然科学基金(U1832211, 11922501, 11961141004)资助

摘要 原子核是由强相互作用将核子(包括质子和中子)束缚而成的一个有限量子多体系统, 是物质结构的一个重要微观层次, 其尺度在费米量级. 实验上, 在不同能区开展的核反应是研究原子核结构和性质的重要手段. 近年来, 核反应研究的一个新的增长点是对奇特原子核开展电荷改变反应截面(charge-changing cross section, CCCS)的系统测量, 探索可能存在的奇特结构和新奇现象. 原子核电荷改变反应截面指的是炮弹原子核在与反应靶中原子核碰撞发生相互作用后, 弹核中质子数减少的总概率, 反映了参与反应的弹核和靶核之间的碰撞几何截面, 可用于提取弹核的电荷半径. 本文回顾了世界范围内原子核电荷改变反应截面测量的进展, 内容从20世纪80年代末期放射性核束物理开始时的早期工作到远离稳定线丰中子原子核的最新进展; 介绍了基于兰州重离子加速器装置(Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, HIRFL)开展的研究工作, 初步测量了30余个轻原子核的电荷改变反应截面, 下一步计划开展sd壳原子核的系统测量, 研究 $Z(N)=14, 16$ 处的壳层结构; 讨论并分析了当前实验研究中的主要问题和拓展方向, 即电荷改变反应截面与相互作用截面的同时测量以及在氢(H)靶上的截面测量, 并对基于下一代大科学装置——强流重离子加速器(High-Intensity heavy-ion Accelerator Facility, HIAF)可能开展的工作进行了展望.

关键词 原子核, 壳模型, 放射性核束, 电荷改变反应截面, 固态氢靶

原子核是由质子和中子两种费米子组成的量子系统, 是物质结构的一个重要层次. 自1896年核科学诞生以来, 科学家利用不断更新的实验装置和技术, 陆续发现了118种化学元素^[1]和3200余种核素^[2], 极大扩展了元素周期表和核素存在版图. 其中, 在地球上天然存在的稳定原子核或长寿命原子核约有300种, 其余2900多种均为不稳定核素. 可通过自发地放出电子(β^-)、正电子(β^+)、 α 粒子、伽马射线(γ)乃至质子和中子而发生衰变的不稳定原子核通常被称为放射性核素. 以这些放射性核素为观测对象, 核物理学家已发现了很多奇特的新结构、新现象和新性质^[3,4], 同时, 新进展又持续深化着人们对原子核结构以及反应机制的认知. 而原子核的结构以及相互间的反应与宇宙大爆炸原初核合

成、恒星中化学元素产生等宇观天体过程密切相关, 影响着宇宙中星体的演变路径^[5-8].

实验上, 通过反应探索核结构问题一直是认识原子核的重要途径. 本文主要关注如何通过核反应来探索原子核的大小. 与宏观物体不同, 原子核不存在确切的边界. 作为一个量子体系, 原子核的密度分布是弥散的. 原子核的大小通常用核半径来表示, 可通过“探针”与待研究原子核的碰撞来获得. 这里的探针既可以是基本粒子(如电子、中微子), 也可以是核子(质子、中子)或不同质量的原子核.

根据相互作用方式以及探针的不同, 核半径可衍生出多种定义形式. 按照作用力来区分, 可以分为电磁相互作用半径、核作用半径或核力作用半径. 对于前

引用格式: 孙保华. 原子核电荷改变反应截面的测量及电荷半径. 科学通报, 2020, 65: 3886–3897

Sun B H. Charge-changing cross section measurements of atomic nuclei and charge radii (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 3886–3897, doi: 10.1360/TB-2020-0906

者,一个典型的例子是低能 α 散射实验。 α 粒子与原子核的作用主要表现为库仑排斥,因此,这种情况下对原子核大小的表征即为电磁相互作用半径。当 α 等带电粒子能量足够高时,其与原子核之间不仅存在库仑排斥力,在作用距离更小时还存在强的核力(吸引力)作用。核力本身有一个作用半径,在这一半径范围之外,核力为零。这种情况下对原子核的探测,可以用核力作用半径来表述。实验上,通过中子、质子或其他原子核所测得的核半径就是核力作用半径。

核的大小也可以按照所关注原子核中的对象而分类,包括电荷分布半径和核物质分布半径两种。电荷分布半径主要反映原子核中的质子密度分布,可通过高能电子在原子核上的散射、 μ 原子谱学、同位素位移、电荷改变反应截面等方法进行测量。核物质分布半径则反映原子核中所有质子和中子的整体密度分布,当前主要通过原子核与原子核间的总反应截面或相互作用截面来测定。电荷分布半径和核物质分布半径的区别在于后者考虑了原子核中的中子分布,两者的差别定性反映了中子在有限原子核系统中的分布。

1 相互作用截面和电荷改变反应截面

1.1 晕核及相互作用截面

在介绍电荷改变反应截面之前,先回顾一下晕核的发现。对应的工作是在美国劳伦斯伯克利国家实验室(Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL)的Bevalac上开展的。当时,Tanihata等人^[9]测量了790 MeV/nucleon的 ^{6-9}Li 同位素链分别在铍(Be)、碳(C)和铝(Al)等靶上的相互作用截面,提取了相应的“相互作用半径”,发现 ^6Li ~ ^9Li 的相互作用半径基本是一致的,约为2.5 fm;然而,当再往 ^9Li 上加两个中子变成 ^{11}Li 时,对应的相互作用半径迅速增加到3.3 fm,即增大了约40%。现在,我们认识到 ^{11}Li 实际上是由一个 ^9Li 中心内核以及外围两个弱束缚的中子组成,这两个中子离中心内核比较远,耦合较弱,因此 ^{11}Li 的物质密度分布与月晕类似,在后续的理论研究中这一现象被称为“中子晕”(如文献^[10,11])。核半径的异常增大,在当时是一个非常重要的发现,因为这很明显违背了核半径的 $A^{1/3}$ 规律(A 为原子核的质量数)。实验本身现在看来不是特别难,但是它所反映的物理图像非常重要,因为这使核物理学家们认识到:当研究远离稳定线的原子核时,会出现一些奇特的结构和性质。

这个工作也极大地推动了世界范围内放射性核束物理的发展。高精度测量奇特原子核的相互作用截面,进而获得对应的物质分布半径,直到现在都是实验核物理的一个主流研究方向。相关研究不仅为认识轻核区的核结构(中子皮、晕核、幻数演化等)提供了非常宝贵的第一手资料,同时也触发了一系列针对放射性原子核结构的精细研究。

相互作用截面通常利用透射法进行测量,原理如图1(a)所示。它表征的是入射粒子与反应靶原子核相互作用过程中核子数减少的概率,携带了入射粒子中核子(或物质)的密度分布信息。为了开展实验测量,原则上需同时准确测量入射粒子(A_p, Z_p)的数目 N_{in} 以及反应后质量数小于 A_p 的所有出射原子核的数目。需要注意的是,反应靶厚度需要适中,这样既可增大反应产额,同时也不会因在靶中的能损而导致反应截面显著变化。在实际研究中,发生核反应的粒子数目通常小于入射粒子数目的20%,而且与入射粒子相比,反应产物可能会发生较大的动量变化,这就要求反应靶后探测器具有足够大的接收度,电子学应具有较大的动态响应范围,以满足对不同种类原子核的探测需求。采用透射法测量则可较大程度上避免上述实验难度,只需统计反应靶后原子核种类不变的粒子数目 N_{out} 。一方面,未发生反应粒子的径迹基本保持不变,对靶后探测器的接收度要求不高;另一方面,种类不变的粒子占比很高,达到相同测量精度所需的统计要求低。此方法在保证测量精度的同时,还大大提高了束流的利用效率。

图1 (网络版彩色)相互作用截面及电荷改变反应截面测量示意图。 $A_p(Z_p)$ 、 $A_t(Z_t)$ 、 N_{in} 、 N_{out} 和 t 分别代表弹核的质量数(质子数)、靶核的质量数(质子数)、弹核的个数、反应后相应产物的个数和反应靶厚度

Figure 1 (Color online) Schematic drawing on interaction and charge-changing cross section measurements of atomic nuclei. $A_p(Z_p)$, $A_t(Z_t)$, N_{in} , N_{out} and t are the mass (proton) number of projectile nuclides, mass (proton) number of target nuclides, the counts of incident projectile nuclides and the relevant outgoing nuclides, and the target thickness

1.2 电荷改变反应截面

类似于相互作用截面的测量原理, 电荷改变反应截面的测量只需对实验产物的电荷数 Z 进行鉴别. 如图1(b)所示, 它表征的是弹核在与反应靶碰撞发生相互作用后, 弹核中质子数减少的总概率. 从这个意义上考虑, 电荷改变反应截面携带了质子密度分布的信息, 这是探索原子核中质子密度分布信息的基本出发点.

相互作用截面和电荷改变反应截面均是积分截面, 它们的差值可以给出另外一个截面, 即中子移除总截面, 其反映的是碰撞之后从弹核中仅移除中子的总概率, 而碰撞产物的质子数仍与弹核相同. 相互作用截面、电荷改变反应截面及中子移除总截面这3个观测量只有两个独立变量. 实验上直接测量中子移除总截面难度很大. 但是, 如果可以对前两个截面进行精确测量, 就可以进一步得到中子移除总截面.

原则上, 3个截面分别反映原子核中的核子分布、质子分布以及中子分布, 结合合适的理论, 有望提取出相应的物质密度分布半径、质子密度分布半径以及中子密度分布半径. 然而, 相比于相互作用截面与物质半径间的关联^[12], 理解电荷改变反应的机制则更为复杂, 其中涉及弹核中中子的参与度、弹核碎裂之后蒸发过程引起的质子移除效应等. 为了更好地理解电荷改变反应, 需要从理论与实验上开展进一步的探索.

2 电荷改变反应截面测量

2.1 研究进展

早期对稳定原子核的电荷改变反应截面进行测量的一个重要动机, 是解释宇宙射线在银河系中传播时次级核的产生过程, 以便更好地评估原初宇宙射线中的元素和同位素组分. 相关工作从20世纪80年代开始, 持续到2000年左右^[13], 测量了超过30种稳定原子核在C、氢(H)、铁(Fe)等靶上的电荷改变反应截面, 能量区间在300~1700 MeV/nucleon. 这些工作提供了一个电荷改变反应截面实验数据库, 不仅为研究电荷改变反应截面对能量、同位旋、质量等物理量的依赖性提供了关键数据, 而且为理解高能重核碰撞中周边相互作用机制提供了重要依据.

首次将电荷改变反应截面与核结构关联在一起的工作可以追溯到1988年. 当时, Bochkarev等人^[14]在德国亥姆霍兹重离子研究中心(GSI Helmholtz Centre for

Heavy Ion Research, 简称GSI)系统测量了950 MeV/nucleon能区 $A=20$ 同量异位素在C靶上的电荷改变反应截面以及相互作用截面. 相关结果如图2所示, 其中包括稳定原子核 ^{20}Ne 以及丰中子原子核 ^{20}N 和缺中子原子核 ^{20}Mg . 随着质子-中子比的增大, 整体上电荷改变反应截面在相互作用截面中的占比越来越大, 从丰中子原子核 ^{20}N 处的70%, 到稳定原子核 ^{20}Ne 处的90%, 再到缺中子原子核 ^{20}Mg 处的98%. 这意味着在丰中子原子核的反应截面中, 约有30%的贡献来源于中子移除反应, 随着中子数的减少, 中子移除反应的贡献也越来越小. 文章最后通过对比反应截面与相应的电荷改变反应截面, 推测 ^{20}N 中应存在一个比较厚的中子皮.

后续实验主要是对轻核区同位素链开展系统截面测量, 关注电荷改变反应截面随同位旋的演化. 这里选择两个比较有代表性的工作进行讨论. 一个是在80 MeV/nucleon能区开展的Li同位素链的截面测量^[15], 另一个是Chulkov等人^[16]在GSI开展的930 MeV/nucleon Be~F(氟)同位素链的系统截面测量. 图3展示了C和O同位素链在C靶上的电荷改变反应截面. 对比两个工作中的截面演化趋势, 可以发现, 不论实验能区在低能80 MeV/nucleon还是高能950 MeV/nucleon, 同位素链上原子核的电荷改变反应截面基本保持不变, 且几乎完全由质子分布决定, 受中子的影响很小. 但是, 电荷改变反应截面亦可能呈现较小的变化, 例如在C同位素链中的 ^{15}C 处出现峰值. 这反映了原子核内的质子分布可能呈现微小的、与中子分布相关联的结构变化. 当然, 为了探索这种精细变化, 实验数据需要具有更高的精度.

Chulkov等人^[16]的工作也触发了一系列的理论研究. Meng等人^[17]在Glauber模型的框架下, 利用由相对

图2 $A=20$ 同量异位素的相互作用截面 σ_i (空心圆)和电荷改变反应截面 σ_{cc} (实心圆)

Figure 2 Interaction cross sections σ_i (empty circles) and charge-changing cross sections σ_{cc} (filled circles) of $A=20$ isobars

图3 C(圆)和O(三角)同位素链在C靶上的电荷改变反应截面. 原始数据取自文献[16]

Figure 3 Charge-changing cross sections σ_{CC} of C (circles) and O (triangles) isotopes on C targets. The data are from Ref. [16]

论连续谱Hartree-Bogoliubov理论预言的质子密度分布, 分别计算了 $^{10-22}\text{C}$ 、 $^{12-24}\text{N}$ 、 $^{14-26}\text{O}$ 和 $^{16-29}\text{F}$ 等同位素链在C靶上的电荷改变反应截面, 发现理论可以较好地再现实验数据, 而且质子分布半径与电荷改变反应截面具有类似的系统变化趋势. 在计算中, 他们假定原子核的电荷改变反应截面完全由入射核的质子与靶核碰撞所贡献. 此种假设下计算的理论截面, 我们记为 $\sigma_{CC}^{\text{free}}$.

Bhagwat和Gambhir^[18]进一步发现, 理论值 $\sigma_{CC}^{\text{free}}$ 约为实验值的90%, 即系统地低于实验值. 为了更好地再

现总反应截面和电荷改变反应截面数据, 他们在 $\sigma_{CC}^{\text{free}}$ 的基础上唯象地引入了弹核里中子对电荷改变反应截面的贡献, 这一贡献约为10%. 2010年, Yamaguchi等人^[19]测量了100~600 MeV/nucleon ^{28}Si 在C靶上的截面, 通过对比实验值与理论值 $\sigma_{CC}^{\text{free}}$, 同样发现 $\sigma_{CC}^{\text{free}}$ 系统地低于实验值, 实验值与理论值的比值约为1.1, 且呈现较小的能量关联. 此外, 由于中子的贡献难以从理论上进行自洽计算, 他们发现, 对 $\sigma_{CC}^{\text{free}}$ 引入一个能量相关的修正因子后, 可以很好地再现实验数据及其能量相关性. 这一工作也为后续利用电荷改变反应截面提取电荷半径奠定了基础.

2010年至今, 不同实验组利用世界范围内的放射性次级束流线, 已经测量了轻质量区($Z < 10$)原子核的电荷改变反应截面, 并提取了相关核的电荷半径. 主要的实验装置如图4所示, 包括日本的Heavy-Ion Medical Accelerator in Chiba(HIMAC)、Rikagaku KENkyusho/Institute of Physical and Chemical Research(RIKEN)、Research Center for Nuclear Physics(RCNP), 德国的GSI, 以及我国的HIRFL, 它们可以提供能量为50~900 MeV/nucleon的次级束. 相应地, 利用电荷改变反应截面探索远离稳定线原子核的质子分布半径, 已快速发展为实验核物理领域中的一个重要课题. 当前, 日本HIMAC

图4 (网络版彩色)开展电荷改变反应截面测量的主要实验装置. (a) HIMAC; (b) RIKEN; (c) GSI; (d) RCNP

Figure 4 (Color online) Experimental setups for charge-changing cross section studies. (a) HIMAC; (b) RIKEN; (c) GSI; (d) RCNP

主要针对稳定线附近的原子核进行系统测量^[20,21]；德国GSI主要关注1 GeV/nucleon等较高能量条件下 $Z < 10$ 不稳定原子核的截面测量^[22~25]，日本RIKEN因具备当前性能最好的次级束流条件，主要瞄准质量更重、产额更低的奇特原子核，如 ^{30}Ne 和 $^{32-33}\text{Na}$ ^[26]。相对于较高能量，在较低能量开展电荷改变反应截面的测量工作面临着一些难点，既有因产物角分布过大而对探测装置接受度的挑战，也有对反应产物能谱进行精确解析的分析困难。RCNP^[27]曾报道过40 MeV/nucleon C同位素链的截面结果，北京航空航天大学课题组^[28]也在意大利南方国家实验室(Laboratori Nazionali del Sud)开展了60 MeV/nucleon $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 以及 $^{12}\text{C}+^1\text{H}$ 系统的截面测量。

2.2 提取不稳定原子核的电荷半径

实验上，对电荷半径测量的传统方法包括电子散射、 μ 原子光谱以及同位素位移等。然而，受限于不稳定原子核的产额以及电子散射靶等因素，在研究远离稳定线的奇特原子核时，这些方法均存在一定的局限性。例如，目前精度最高的同位素位移方法很难对psd壳等原子核的电荷半径进行系统测量。通过高精度的电荷改变反应截面来提取电荷半径为系统地研究不稳定原子核提供了一种新的有效手段。这种方法的可靠性也在稳定原子核上得到了验证。图5展示了 $^{12-14}\text{C}$ 和 $^{14-15}\text{N}$ 的电荷半径，可以看出，利用电荷改变反应截面提取的半径结果^[24,25,27]与传统方法^[29]吻合得很好。相比于电子散射、同位素位移方法(精度可以低至1‰)，电荷改变反应截面方法的精度约为1%，其主要不

图5 (网络版彩色)利用电荷改变反应截面(空心符号)以及传统方法(实心符号)提取的 $^{12-14}\text{C}$ 和 $^{14-15}\text{N}$ 电荷半径。空心圆、空心三角、空心方块代表的数据分别取自文献^[24,25,27]

Figure 5 (Color online) Charge radii of $^{12-14}\text{C}$ and $^{14-15}\text{N}$ determined by using charge-changing cross sections (empty symbols) and traditional methods (filled symbols). Data labelled by empty circles, empty triangles and empty squares are taken from Refs. ^[24,25,27], respectively

确定度来源于实验的统计误差以及模型带来的不确定度。

结合物质分布半径与质子分布半径，就可以系统地研究中子皮等核结构的演化。图6展示了 $^{12-19}\text{C}$ 和 $^{14-21}\text{N}$ 同位素链的半径演化趋势。其中，物质分布半径由相互作用截面提取^[30]，质子分布半径由电荷改变反应截面提取^[24,25]，两个反应的能量均约900 MeV/nucleon。可以看出，中子皮厚度从 ^{12}C 的0.05 fm到 ^{15}C 的0.3 fm，增大到 ^{19}C 的1 fm。同时，结合理论分析可以得到， ^{19}C 晕核子的半径约为6.7 fm，这几乎与 ^{11}Li 晕核半径相当。

3 基于HIRFL装置的电荷改变反应研究

3.1 研究进展

兰州重离子加速器研究装置^[31]的RIBLL2束流线，是世界上少数几个可以提供300 MeV/nucleon能区的放射性束流线^[32]，如图7所示。质子-质子(中子-中子)与质子-中子的总散射截面在300 MeV/nucleon能区相差超过50%，因此该能区是研究原子核结构、探索原子核密度分布的一个非常好的能量窗口。

2014年，我们课题组^[33]提出了基于RIBLL2开展相对论能区电荷改变反应截面测量的建议，开展相关次级束离子鉴别系统的研发和测试。在后续3年时间里，我们陆续研制、测试并安装了飞行时间探测器、多采样气体电离室以及位置灵敏探测器^[34]。通过系统优化塑料闪烁体与光电倍增管间的匹配，提高闪烁光子的收集与传输，成功研发了小尺寸的时间拾取探测器，得

图6 (网络版彩色) $^{12-19}\text{C}$ (圆圈)和 $^{14-23}\text{N}$ (三角)的物质分布均方根半径 R_m (空心符号)和质子分布均方根半径 R_p (实心符号)

Figure 6 (Color online) Matter distribution radii R_m (empty symbols) and proton distribution radii R_p (filled symbol) for $^{12-19}\text{C}$ (circles) and $^{14-23}\text{N}$ (triangles)

图7 (网络版彩色)基于RIBLL2的原子核电荷改变反应截面测量装置. 图中列出了电荷改变反应截面测量平台以及F4实验终端

Figure 7 (Color online) Platform for charge-changing cross section studies of atomic nuclei at RIBLL2. The station for charge-changing cross section measurements and the F4 terminal are shown

到的最优本征时间分辨本领为5.1 ps(σ), 这是国际同类探测器的最高时间分辨^[35]; 研制的50 mm×50 mm×3 mm时间拾取探测器本征时间分辨达到了27 ps(σ)^[36], 已被用作实验平台的飞行时间终点探测器. MUSIC探测器提供的Z分辨优于0.12(σ)^[37,38], 性能与德国、日本同类型探测器相当; 实验中使用多丝漂移室作为位置灵敏探测器, 其位置精度约为100 μm (σ), 对C同位素的探测效率几乎为100%. 同时, 加速器的束流条件也在不断改进. 基于上述探测器, 北京航空航天大学-中国科学院近代物理研究所团队成功搭建了次级束粒子鉴别系统, 完成了电荷改变反应截面测量平台的建设. 当前电荷改变反应截面测量平台已经可以很好地满足psd核区的实验需求.

基于该实验平台, 北京航空航天大学课题组^[39]已在300 MeV/nucleon能区开展了两次实验, 目标核分别是 $^{12-16}\text{C}$ - $^{14-17}\text{N}$ 和 $^{28-32}\text{Si}$ - $^{32-37}\text{S}$ 等同位素链. 前者旨在300 MeV/nucleon能区开展一次独立的实验测量, 并与之前HIMAC的结果进行对比, 发展独立的实验测量和数据分析方法; 后者则是世界上首次对Si-S等同位素进行电荷改变反应截面的测量并提取相关核的电荷半径, 为研究丰中子区 $N=16$ 、20的壳结构演化提供了关键实验信息. 然而, 由于束流条件等因素的限制, 远离稳定线的丰中子核尚未达到理想统计.

图8汇总了实验中鉴别的约60个次级束核素, 其中约30个核素统计较好, 有望进一步提取它们的电荷半径. 这些原子核主要分布在 β 稳定线附近, 位于 $N=Z$ 线右侧. 这些数据较大地丰富了 $Z<20$ 原子核在C靶上的

图8 (网络版彩色)实验中鉴别的核素汇总. 图中标记了实验中产生并鉴别的原子核、具有较好统计性的原子核以及已完成分析的原子核. 阴影区代表计划研究的原子核

Figure 8 (Color online) Isotopes identified in our experiment. The nuclei identified in our experiment, the nuclei having relatively good statistic and those analyzed are also marked. Nuclei in the shaded area are to be studied in our plan

电荷改变反应截面数据, 为探索300 MeV/nucleon能区电荷改变反应截面的系统演化、提取相关原子核的电荷半径提供了重要实验依据. 部分稳定原子核($^{12-14}\text{C}$ 、 $^{14-15}\text{N}$ 和 $^{17-18}\text{O}$)的电荷改变反应截面数据总结在图9中. 与已知电荷半径相对比, 可以发现, 两组数据间呈现出非常好的关联. 然而, 除 ^{15}N 和 ^{17}O 外, 其他原子核的统计误差较大, 尚不利于系统评估提取电荷半径方法的不确定度, 这需要我们进一步提高实验数据的统计量. 基于现有装置, 我们将进一步开展sd壳原子核

图9 $^{12-14}\text{C}$ 、 $^{14-15}\text{N}$ 和 $^{17-18}\text{O}$ 的电荷半径(a)以及我们实验中测量的电荷改变反应截面(b)

Figure 9 Charge radii of $^{12-14}\text{C}$, $^{14-15}\text{N}$, $^{17-18}\text{O}$ (a) and the determined charge-changing cross sections in our experiments (b)

的系统测量(图8), 研究 $Z(N)=14$ 、16处的壳层结构。

4 研究计划与展望

电荷改变反应截面数据可以按照束流能量、反应靶、待研究原子核质量数等进行分类, 相关数据的测量对理解核反应截面的系统性非常关键。然而, 整体上这些数据还非常匮乏, 尤其是面向不稳定原子核的数据。同时, 不同实验组对同一系统的测量结果也有较大分歧, 这也急需独立的高精度测量数据。HIRFL提供了一个新的、独立的电荷改变反应截面测量平台, 通过新实验终端建设和新型实验靶研发, 有望在探索不稳定原子核反应截面方面作出重要贡献。此外, 利用高精度截面测量研究奇特原子核电荷半径亦被列为在建HIAF项目的一个主要研究方向。

4.1 电荷改变反应截面与反应截面的同时测量

前文已经提到, 系统地对比各同位素的相互作用截面(σ_I)与电荷改变反应截面(σ_{CC}), 可以提供非常丰富的核结构信息。图10展示了C、N两条同位素链中各核素在C靶上电荷改变反应截面与相互作用截面的比值(σ_{CC}/σ_I), 束流能量约为900 MeV/nucleon。对于稳定原子核, σ_{CC}/σ_I 接近90%; 随着中子数的增大, 此值逐渐减小到约60%, 这意味着中子移除总截面的贡献越来越大,

图10 900 MeV/nucleon C同位素链(空心方块)和N同位素链(实心方块)在C靶上的电荷改变反应截面与相互作用截面的比值 σ_{CC}/σ_I

Figure 10 Ratio of charge-changing cross sections to interaction cross sections σ_{CC}/σ_I for 900 MeV/nucleon C (empty squares) and N isotopes (filled squares) on C targets

中子皮厚度逐渐增大。2017年, Aumann等人^[40]通过Glauber模型分析指出, 中子移除总截面可能是约束核物质状态方程的一个灵敏探针^[41]。正如2.1节所讨论的, 直接对中子移除总截面进行高精度测量面临着很多挑战, 而实验上若可同时开展相互作用截面和电荷改变反应截面的测量, 则可同步得到中子移除总截面($\sigma_{\Delta n}$)。当前, 北京航空航天大学-中国科学院近代物理研究所合作组已经完成了RIBLL2上的F4终端改造, 这为开展两个截面的同时测量奠定了基础。我们计划2020年开展F4终端的综合测试。

4.2 H靶上的截面测量

与截面测量常用的C靶相比, ^1H 因具有不对称的质子-中子数目, 在探索原子核中子皮厚度方面具有显著的优势^[12,42], 这点可借助图11理解。在低能区(<100 MeV), 中子-质子反应总截面(σ_{np})远大于质子-质子反应总截面(σ_{pp}); 在200~300 MeV能区, σ_{np} 的大小约是 σ_{pp} 的1.5倍; 在约530 MeV处, σ_{np} 与 σ_{pp} 趋于一致; 随着能量进一步增大, σ_{np} 与 σ_{pp} 的差距在约900 MeV处达到另一个极大, 之后减小。因此, 若开展两个或多个能量在质子靶上的截面测量, 原则上将可直接研究原子核内质子和中子密度分布的差异。

然而, H靶上的相关数据非常缺乏, 且主要为稳定核素^[13,21], 无法形成系统性的认知。实验数据的匮乏制约着Glauber模型的发展。最新发展的Glauber模型虽可基本再现 $^{12}\text{C}+^1\text{H}$ 这一标准系统的能量相关性, 却与实验结果存在着系统性偏差^[43]。我们^[44]最近关于N同位

图 11 (网络版彩色)核子-核子反应总截面。pp、pn、np分别代表质子-质子(空心方块)、质子-中子(实心圆圈)以及中子-质子(空心圆圈)
Figure 11 (Color online) Nucleon-nucleon total reaction cross sections. pp, pn, np stand for proton-proton (empty squares), proton-neutron (filled circles) and neutron-proton (empty circles) systems, respectively

素链的研究也显示同样的结论。

通常,为了得到H靶上的反应截面,需要分别测量 $(\text{CH}_2)_n$ 靶与C靶上的截面,一方面,这将会导致实验束流时间加倍;另一方面,C元素的干扰也限制了截面的测量精度。因此,直接开展在H靶上的截面测量则变得尤为迫切。然而,常温、常压下,H以气态形式存在,密度太低,不能满足放射性核束物理研究的需求,因此,国际上诸多大型核物理实验室均开发了液态H靶系统,该系统具有高密度、无背景污染物等天然优势。

近年来,随着低温制冷机、控温技术的发展,均匀、稳定的固态H靶制作成为可能。与液态H靶相比,固态H靶密度约高出20%,且不需要严格的温度控制;此外,固态H的工作压强远低于液态H,因此可以使用薄窗,甚至是无窗,更适于高精度测量。目前,北京航空航天大学课题组已完成固态H靶系统的自主设计和加工,正在进行系统测试。为了兼容不同能量、不同束流核反应研究的实际需求,固态H靶被设计为1~10 cm厚度可调;设计了空靶工作模式,以消除束流线上在H靶之外材料上的反应产物干扰,提高测量精度。固态H靶系统计划安装在F4实验终端(图7),将可直接用于研究电荷改变反应,也为在国内开展逆向运动学下(p, n)电荷交换反应、质子散射实验等奠定了基础。

4.3 面向国内下一代放射性核束装置的研究

当前基于现有RIBLL2的实验研究,将为“十二五”装置HIAF提供必要的技术积累,同时将培育基于高能次级束流线的实验队伍。在HIAF装置^[45]中,加速器系统包括强流超导离子源、超导离子直线加速器、增强器,以及连接各部分之间的束流传输线等,实验终端包括低能核结构谱仪、强流离子束辐照终端、高能次级束流线(High-Energy Fragment Separator, HFRS)、外靶实验终端、高精度环形谱仪、电子-离子复合共振谱仪、高能综合终端和高能量密度物理终端。其中,HFRS不仅可以作为增强器与环形谱仪间的束流传输线,而且借助必要的辅助探测系统亦可作为独立的实验平台。

图12为HFRS示意图。在次级束物理实验中,由增强器引出的高能、高流强主束首先轰击位于PF0的初级靶,利用重核飞行裂变和弹核碎裂来产生远离稳定线的稀有同位素。这些稀有同位素继而在后续的电磁设备中得到进一步分离、鉴别和纯化,最终制备得到实验所需的次级束流。HFRS设计的最高磁刚度为25 Tm,高于国际同类型装置日本BigRIPS和德国在建的Super-FRS,这为开展极丰中子稀有同位素、超核以及高电荷态原子等实验提供了可能。同时,HFRS具有较大的接受度,相关设计指标与Super-FRS相当,水平和垂直方向接受度分别为 ± 30 和 ± 15 mrad,动量接受度为 $\pm 2\%$,因此可高效地收集反应产物,提高稀有同位素产物的利用率。以800 MeV/nucleon ^{238}U 飞行裂变为例,对于产物 ^{132}Sn ,HFRS的收集效率约为40%。

HFRS是一个典型的第三代放射性束流线^[46],包括预分离器 and 主分离器两部分。其中,预分离器长度为74 m(图12中的PF1~PF4),主要目的是将高强度的初级束和不感兴趣的反应产物偏转掉,并传输感兴趣的相关次级束。主分离器(图12中的MF0~MF6)长度为118 m,具有MF1~MF6等多个离子光学聚焦面,可设置

图 12 (网络版彩色)HFRS示意图。标示了初级靶、预分离器、主分离器以及相应的聚焦面(PF0~PF4和MF0~MF6)

Figure 12 (Color online) Schematic layout of the HFRS. Primary target, pre-separator, main-separator and various focus plans (PF0~PF4 and MF0~MF6) are indicated

降能器、次级靶以及探测系统,并可工作在色散、消色差或色散匹配等不同的离子光学模式下,以满足大接受度、高分辨率、高精度等不同实验的需求。

在RIBLL合作组内,国内核物理学者正积极探讨HFRS上探测和数据采集系统以及可能开展的物理课题。通过配备高精度的探测系统,利用HFRS可以开展原子物理、核物理和强子物理学等方面的诸多独特实验,尤其是寻找新同位素、研究超核和奇异原子。此外,HFRS也为探索原子核层次以及与之相关的元素起源中的关键科学问题提供了巨大机遇,如探索原子核中的稀有衰变模式(如多质子或中子发射)、核力的短程关联以及天体环境下进行的弱衰变过程等。针对奇特原子核,开展相互作用和电荷改变反应截面的系统测量,提取物质密度和电荷密度分布,探究核结构演化和核物质状态方程,也是基于HFRS的一个重要研究方向。

在现阶段,一个非常值得着重思考的问题是,如何充分利用HFRS大接受度、高分辨的特点,针对制备的次级束,实现几个或多个研究对象的“全盘”测量?与高能物理中的对心碰撞实验略有不同,在核物理实验中,探测系统分布更为发散,而且对于不同的研究目标,实验采集对象和方式也经常存在着较大差异。要解决这一问题,一方面需要一支稳定的、高素质的数据采集运行团队,另一方面需要尽早布局通用型、高精度的探测系统。这一设想一旦实现,将会改变传统的核物理实验模式,即“实验申请-探测器搭建-束流实验”的单兵

团方式,开启“大合作组”模式,这将极大地降低核物理实验准备的难度,有助于发挥不同实验组的优势,更好地聚焦物理学问题。例如,在一次束流实验中,利用HFRS中的多个聚焦面,在MF4、MF6放置反应靶,通过靶前后的探测系统分别完成入射核和反应核的离子鉴别乃至动量测量,即可对一种或多种次级束开展研究,同时测量多个反应截面,如总相互作用反应、电荷改变反应等积分截面以及电荷交换反应、核子敲出反应等精细截面,提取原子核中的核子密度分布、天体情况下Gamow-Teller跃迁强度、价核子的谱因子等。利用高能次级束的优势,在MF6和外靶实验终端进行次级束降能和阻停,亦可同时开展精细核谱学和衰变研究。

5 总结

大量研究表明,远离稳定线的原子核可能具有不同于稳定原子核的奇特结构和性质。对新奇结构和性质的探索和确认,需要从实验上对多个物理观测量进行综合分析,并从理论上进行自洽的模型解析。近年发展的电荷改变反应,为探索原子核中的质子分布提供了一种可行的方案,结合相互作用反应,可为研究中子皮厚度、晕核等提供重要的实验依据。本文回顾了电荷改变反应截面的研究进展,介绍了基于国内核物理大科学装置开展的工作以及展望,尤其是有望基于HFRS实现多个实验的同时测量,开启核物理实验“大合作组”新模式。

致谢 感谢北京航空航天大学-中国科学院近代物理研究所CCCS合作者以及RIBLL合作组。感谢课题组赵建伟、李光帅、魏秀琳、王晶、张寂潮等对文章初稿的建议。

参考文献

- 1 Zhou S G. Study on superheavy nuclei and superheavy elements (in Chinese). Nucl Phys Rev, 2017, 34: 318–331 [周善贵. 超重原子核与新元素研究. 原子核物理评论, 2017, 34: 318–331]
- 2 Audi G, Wang M, Wapstra A H, et al. The AME2012 atomic mass evaluation. Chin Phys C, 2012, 36: 1287–1602
- 3 Zhou S G. Structure of exotic nuclei: A theoretical review. In: The 26th International Nuclear Physics Conference (INPC2016), 2016, Adelaide, Australia. Proc Sci, 2017, 281: 373, doi: <https://doi.org/10.22323/1.281.0373>
- 4 Tanihata I, Savajols H, Kanungo R. Recent experimental progress in nuclear halo structure studies. Prog Particle Nucl Phys, 2013, 68: 215–313
- 5 Qian Y Z. A brief introduction to nuclear astrophysics (in Chinese). Physics, 2013, 42: 468–483 [钱永忠. 原子核天体物理简介. 物理, 2013, 42: 468–483]
- 6 He J J, Zhou X H, Zhang Y H. Experimental studies of nuclear astrophysics (in Chinese). Physics, 2013, 42: 484–495 [何建军, 周小红, 张玉虎. 核天体物理实验研究. 物理, 2013, 42: 484–495]
- 7 Li Z, Sun B H, Meng J. Nuclear physics of the astrophysical rapid neutron-capture process (in Chinese). Physics, 2013, 42: 505–514 [李竹, 孙保华, 孟杰. 天体环境下快中子俘获过程相关的核物理. 物理, 2013, 42: 505–514]
- 8 He J J, Guo B, Liu W P, et al. How were the heavy chemical elements beyond iron made in the Universe (in Chinese)? Chin Sci Bull, 2018, 63: 2429–2439 [何建军, 郭冰, 柳卫平, 等. 宇宙中铁以上的重核是如何合成的. 科学通报, 2018, 63: 2429–2439]

- 9 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
- 10 Hansen P G, Jonson B. The neutron halo of extremely neutron-rich nuclei. *Europhys Lett*, 1987, 4: 409–414
- 11 Meng J, Toki H, Zhou S G, et al. Relativistic continuum Hartree Bogoliubov theory for ground-state properties of exotic nuclei. *Prog Particle Nucl Phys*, 2006, 57: 470–563
- 12 Horiuchi W, Hatakeyama S, Ebata S, et al. Extracting nuclear sizes of medium to heavy nuclei from total reaction cross sections. *Phys Rev C*, 2016, 93: 044611
- 13 Webber W R, Soutoul A, Kish J C, et al. Measurement of charge changing and isotopic cross sections at ~600 MeV/nucleon from the interactions of ~30 separate beams of relativistic nuclei from ^{10}B to ^{55}Mn in a liquid hydrogen target. *Phys Rev C*, 1998, 58: 3539–3552
- 14 Bochkarev O V, Chulkov L V, Egelhof P, et al. Evidence for a neutron skin in ^{20}N . *Eur Phys J A*, 1998, 1: 15–17
- 15 Blank B, Gaimard J J, Geissel H, et al. Charge-changing cross sections of the neutron-rich isotopes $^{8,9,11}\text{Li}$. *Z Phys A*, 1992, 343: 375–379
- 16 Chulkov L V, Bochkarev O V, Cortina-Gil D, et al. Total charge-changing cross sections for neutron-rich light nuclei. *Nucl Phys A*, 2000, 674: 330–342
- 17 Meng J, Zhou S G, Tanihata I. The relativistic continuum Hartree–Bogoliubov description of charge-changing cross section for C, N, O and F isotopes. *Phys Lett B*, 2002, 532: 209–214
- 18 Bhagwat A, Gambhir Y K. Microscopic investigations of mass and charge changing cross sections. *Phys Rev C*, 2004, 69: 014315
- 19 Yamaguchi T, Fukuda M, Fukuda S, et al. Energy-dependent charge-changing cross sections and proton distribution of ^{28}Si . *Phys Rev C*, 2010, 82: 014609
- 20 Yamaguchi T, Hachiuma I, Kitagawa A, et al. Scaling of charge-changing interaction cross sections and point-proton radii of neutron-rich carbon isotopes. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 032502
- 21 Sawahata K, Ozawa A, Saito Y, et al. Investigations of charge-changing processes for light proton-rich nuclei on carbon and solid-hydrogen targets. *Nucl Phys A*, 2017, 961: 142–153
- 22 Terashima S, Tanihata I, Kanungo R, et al. Proton radius of ^{14}Be from measurement of charge-changing cross sections. *Prog Theor Exp Phys*, 2014, 2014(10): 101D02
- 23 Estradé A, Kanungo R, Horiuchi W, et al. Proton radii of $^{12-17}\text{B}$ define a thick neutron surface in ^{17}B . *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 132501
- 24 Kanungo R, Horiuchi W, Hagen G, et al. Proton distribution radii of $^{12-19}\text{C}$ illuminate features of neutron halos. *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 102501
- 25 Bagchi S, Kanungo R, Horiuchi W, et al. Neutron skin and signature of the $N=14$ shell gap found from measured proton radii of $^{17-22}\text{N}$. *Phys Lett B*, 2019, 790: 251–256
- 26 Ozawa A, Moriguchi T, Ohtsubo T, et al. Charge-changing cross sections of ^{30}Ne , ^{32}Na , ^{33}Na with a proton target. *Phys Rev C*, 2014, 89: 044602
- 27 Tran D T, Ong H J, Nguyen T T, et al. Charge-changing cross-section measurements of $^{12-16}\text{C}$ at around 45A MeV and development of a Glauber model for incident energies 10A–2100A MeV. *Phys Rev C*, 2016, 94: 064604
- 28 Sun B H, Verde G. Cross section measurements for the $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ and $^{12}\text{C}+\text{proton}$ systems at 30–80 A MeV with the FAZIA detector. Experimental Proposal for Laboratori Nazionali del Sud proposal, INFN, 2017
- 29 Angeli I, Marinova K P. Table of experimental nuclear ground state charge radii: An update. *Atom Data Nucl Data Tables*, 2013, 99: 69–95
- 30 Ozawa A, Suzuki T, Tanihata I. Nuclear size and related topics. *Nucl Phys A*, 2001, 693: 32–62
- 31 Xia J W, Zhan W L, Wei B W, et al. Heavy ions research facility in Lanzhou (HIRFL) (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 467–477 [夏佳文, 詹文龙, 魏宝文, 等. 兰州重离子加速器研究装置HIRFL. 科学通报, 2016, 61: 467–477]
- 32 Sun B H, Zhao J W, Zhang X H, et al. Towards the full realization of the RIBLL2 beam line at the HIRFL-CSR complex. *Sci Bull*, 2018, 63: 78–80
- 33 Zhao J W, Sun B H. Progress of the charge-changing cross section measurements of exotic nuclei at RIBLL2 (in Chinese). *Nucl Phys Rev*, 2018, 35: 362–368 [赵建伟, 孙保华. 基于RIBLL2的奇特原子核电荷改变反应截面实验测量进展. 原子核物理评论, 2018, 35: 362–368]
- 34 Zhang X, Hu R J, Lu C G, et al. Study of double-layer multi-wire proportional chamber based on LC delay circuit (in Chinese). *Nucl Phys Rev*, 2017, 34: 591–597 [张兴, 胡荣江, 鲁辰桂, 等. 基于LC延迟电路的双层多丝正比室的研制. 原子核物理评论, 2017, 34: 591–597]
- 35 Zhao J W, Sun B H, Tanihata I, et al. Reaching time resolution of less than 10 ps with plastic scintillation detectors. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2016, 823: 41–46
- 36 Lin W J, Zhao J W, Sun B H, et al. Plastic scintillation detectors for precision time-of-flight measurements of relativistic heavy ions. *Chin Phys C*, 2017, 41: 066001
- 37 Zhang X H, Tang S W, Ma P, et al. A multiple sampling ionization chamber for the external target facility. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2015, 795: 389–394
- 38 Zhao J W, Sun B H, He L C, et al. Improvement of charge resolution for radioactive heavy ions at relativistic energies using a hybrid detector system. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2019, 930: 95–99
- 39 Zhao J W, Sun B H, Terashima S, et al. Charge-changing cross section measurements of pd-shell nuclei at around 300 MeV/nucleon at HIRFL-

- CSR. JPS Conf Proc, 2020, 32: 010023
- 40 Aumann T, Bertulani C A, Schindler F, et al. Peeling off neutron skins from neutron-rich nuclei: Constraints on the symmetry energy from neutron-removal cross sections. [Phys Rev Lett](#), 2017, 119: 262501
- 41 Bertulani C A, Valencia J. Neutron skins as laboratory constraints on properties of neutron stars and on what we can learn from heavy ion fragmentation reactions. [Phys Rev C](#), 2019, 100: 015802
- 42 Horiuchi W, Suzuki Y, Inakura T. Probing neutron-skin thickness with total reaction cross sections. [Phys Rev C](#), 2014, 89: 011601
- 43 Suzuki Y, Horiuchi W, Terashima S, et al. Parameter-free calculation of charge-changing cross sections at high energy. [Phys Rev C](#), 2016, 94: 011602
- 44 Wang F. Measurements of charge changing and charge exchange reaction of neutron-rich nitrogen isotopes (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Beihang University, 2018 [王枫. 丰中子N同位素链的电荷改变和电荷交换截面的测量. 博士学位论文. 北京: 北京航空航天大学, 2018]
- 45 Zhou X H. Physics opportunities at the new facility HIAF (in Chinese). *Nucl Phys Rev*, 2018, 35: 339–349 [周小红. 基于HIAF的物理研究. 原子核物理评论, 2018, 35: 339–349]
- 46 Sheng L N, Zhang X H, Zhang J Q, et al. Ion-optical design of High energy FRagment Separator (HFRS) at HIAF. [Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip](#), 2020, 469: 1–9

Summary for “原子核电荷改变反应截面的测量及电荷半径”

Charge-changing cross section measurements of atomic nuclei and charge radii

Baohua Sun

School of Physics, Beihang University, Beijing 102206, China

E-mail: bhsun@buaa.edu.cn

The atomic nucleus is a finite open quantum many-body system that is composed of two basic building blocks, proton and neutron. Like many systems governed by the laws of quantum mechanics, a nucleus is an object full of mysteries. Nuclear properties and structure are much more difficult to characterize than those of macroscopic objects and it is almost impossible to build an exact replica of this Fermi-scale nuclear system. In reality, physicists have developed an approach to reveal nature by collisions of two atomic nuclei, i.e., nuclear reactions, since the very beginning of nuclear physics. One famous example is the Rutherford scattering experiment performed at around 1910, in which the nuclide as a core of atom was discovered.

Since the late 1980s, precision measurements of reaction cross section or interaction cross sections played a crucial role in nuclear size determination. This was entwined with the realization of radioactive ion beams (RIB). Such measurements contributed to discovering, for example, the neutron skin and neutron halo, when moving far away from the stability line. The new phenomena and properties found along the experimental advance are meanwhile among the strongest motivations for initiating, constructing, and operating the new generations of nuclear physics facilities worldwide. HIAF, the High-Intensity heavy-ion Accelerator Facility, is now under construction in Huizhou, China.

In the last few years, systematic measurements of charge-changing cross sections (CCCS) of exotic nuclei have attracted much attention. It offers a complementary way to study exotic structures that could exist in exotic nuclei. By definition, CCCS refers to the total probability of removing at least one proton from the projectile nuclide. It reflects the geometric overlapping area during the collision. In particular, by combining with the Glauber-type model calculations, precise CCCS data have been used as an effective probe to investigate the proton density distribution of unstable atomic nuclei. This method is suitable for the investigation of exotic nuclei with low production yields, and the measurements accordingly were proposed in almost all the major nuclear physics facilities in the last years.

In this paper, we first attempted to give a review on the progress of CCCS worldwide, from the pioneering work of RIB physics in the 1980s to the recent advances towards neutron-rich nuclei. Then we introduced the experimental work performed at the Heavy Ion Research Facility at Lanzhou (HIRFL). So far, CCCSs of more than 30 light nuclei have been determined and most of them are along the β -stability line. Based on the same setup, the Beihang group will focus on the CCCS measurements of sd-shell nuclei, aiming to study the (sub-)shell structure at 14 and 16. After surveying the existing CCCS data worldwide, it is found that there are often large deviations among various measurements in different laboratories even for the simplest reaction system. Precision data are therefore urgently called to clarify the deviations in existing data and to constrain the reaction mechanism on hydrogen targets. From my point of view, simultaneous measurements of both CCCS and reaction cross section in particular on hydrogen targets, the simplest target composed of only protons, are expected to enhance dramatically the journey to reveal the nature of very exotic nuclei. In the last part of this paper, perspectives at the High-energy FRagment Separator (HFRS) at HIAF are discussed. After a careful design of the detector setup and data taking system, it is possible to open a new era of nuclear physics experiments, in which various types of experiments can be carried out simultaneously.

atomic nuclei, shell model, radioactive ion beam, charge-changing cross section, solid hydrogen target

doi: [10.1360/TB-2020-0906](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0906)