HIRFL-CSR气体内靶核反应研究进展

曾奇^{1,2}, 张景涛^{2,3}, 岳珂², 涂小林^{2,4*}

1. 东华理工大学核科学与工程学院, 南昌 330013;

2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

3. 兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000;

4. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: tuxiaolin@impcas.ac.cn

2021-02-26 收稿, 2021-04-06 修回, 2021-04-07 接受, 2021-04-08 网络版发表

国家自然科学基金(12022504, 11775273, U1932140, 11805032)、中国科学院“百人计划”和中国科学院重大科技基础设施开放研究项目资助

摘要 近年来, 基于重离子冷却储存环气体内靶, 在逆运动学下, 发展出了开展轻粒子诱发直接核反应的新实验技术. 该技术弥补了常规实验的一些缺陷, 具有低动量灵敏、高探测效率和低本底的特点, 适合于开展物理化学性质易变材料和放射性同位素的研究. 本文介绍了国际上该类研究的现状, 阐述了2016年以来中国科学院近代物理研究所依托大科学装置兰州重离子冷却储存环(cooler-storage ring at the heavy ion research facility in Lanzhou, HIRFL-CSR)开展气体内靶核反应研究取得的进展, 着重描述了储存环气体内靶核反应谱仪关键探测单元的研发和利用谱仪开展的首次质子在⁵⁸Ni上的低动量转移弹性散射实验. 最后, 介绍了开展碱金属¹³³Cs核物质密度分布半径测量的意义, 以及未来HIRFL-CSR气体内靶核反应谱仪的研究方向.

关键词 直接核反应, 重离子冷却储存环, 气体内靶, 核物质分布半径

轻粒子(如p、d、³He和 α 等)诱发的直接核反应是研究反应机制、核结构以及核天体物理的一个重要探针^[1]. 它按类型一般可分为弹性散射、非弹性散射、转移反应以及电荷交换反应等. α 粒子的发现开启了研究轻粒子诱发直接核反应的大门. α 粒子散射实验又称Geiger-Marsden实验或金箔实验^[2], 是一个知名的轻粒子诱发的直接核反应实验. 这个实验确立了核式结构模型, 拉开了原子核结构研究的序幕. 带电粒子加速器的问世使人工加速粒子成为现实, 核反应炮弹拓宽到整个核素图, 从此不再局限于天然放射性产生的粒子^[3]. 值得提及的是, 早期这类实验均基于正常运动学, 通过轻粒子炮弹轰击静止的同位素反应靶来实现. 由于物理化学性质易变或具有放射性的材料较难制成反应靶, 因此在正常运动学下利用轻粒子诱发的直接核

反应只能针对一部分稳定同位素开展研究, 限制了实验的研究范围.

得益于放射性束装置的发展, 实验核物理的研究区域已经从稳定核拓展到奇特核^[4]. 一些新现象, 例如中子皮, 即原子核中子与质子物质分布半径不同的发现^[5], 使人们迫切地希望突破限制, 发展出新的实验方法, 把轻粒子诱发直接核反应的研究拓展到奇特核区. 奇特核区的研究可探索发现新的核物理现象, 检验基于稳定核发展的核模型的适用性, 限定天体环境中重元素合成路径等. 例如, 通过轻粒子在核上的弹性散射, 测量同位素链稳定核与奇特核的中子皮厚度, 能研究核物质密度分布半径的演化^[6], 限定核物质状态方程^[7], 研究致密星体如中子星等^[8]. 在放射性束流线上, 为开展轻粒子作用于奇特核的反应研究, 发展出了基

引用格式: 曾奇, 张景涛, 岳珂, 等. HIRFL-CSR气体内靶核反应研究进展. 科学通报, 2021, 66: 3395–3404

Zeng Q, Zhang J T, Yue K, et al. Progress on internal gas-jet target nuclear reaction at the HIRFL-CSR (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3395–3404, doi: [10.1360/TB-2021-0215](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0215)

于逆运动学的气体活性靶技术^[4,9]。此技术利用放射性束流装置提供的奇特核轰击氢气或氦气构成的高密度活性靶来诱发直接核反应。由于反应产物通过气体活性靶探测,因此能量分辨不高,对低能反应产物的精确测量较为困难^[10]。除了气体活性靶技术,人们也尝试利用⁶Li靶开展奇特核非弹性散射实验进行巨共振的研究^[11]。本文主要介绍近年来基于重离子冷却储存环气体内靶开展轻粒子诱发直接核反应的实验研究工作。

1 国外研究现状

环形加速器重离子冷却储存环一般均可储存和加速束流,有的还具有减速功能。德国的SIS-ESR(heavy ion synchrotron-experimental storage ring)^[12]和我国的HIRFL-CSR(cooler-storage ring at the heavy ion research facility in Lanzhou)^[13]装置是目前国际上主要用于研究核物理和原子物理的两台中高能重离子冷却储存环。为开展离子束与原子分子的碰撞谱学研究,发展出了重离子冷却储存环耦合气体内靶的原子物理实验方法^[12]。该技术也可用于核反应研究,不同之处在于测量的产物。重离子冷却储存环气体内靶核反应实验与束线气体活性靶技术有相似之处,均基于逆运动学。利用重离子炮弹轰击氢气或氦气靶来实现轻粒子碰撞奇特核的反应研究,能将探测器放置在大的实验室系角度下测量质心系小角度事件。然而,相对于气体活性靶技术,储存环气体内靶核反应实验还具有一些独特的优点^[10],例如储存环气体内靶无窗、靶密度低、分布半径小,因而低能反应产物可几乎无能损地从靶中飞到真空环境。这就能远离靶点,使用能量分辨和探测效率都高的硅探测器测量反应产物,实现对低能离子的高精度测量,使利用大截面和纯度高的低动量转移事件开展研究成为可能^[10,14]。而且,储存环气体内靶纯度极高,如氢气内靶相对于CH靶,将极大地降低实验本底。另外,储存环的减速功能可将炮弹,特别是弹核碎裂产生的中高能奇特核的能量降低到数MeV/u进入Gamow窗,因而可直接测量核天体物理相关的质子俘获(p, γ)

截面^[15,16]。需要提及的是,储存环气体内靶核反应实验也具有局限性^[17],如气体内靶密度低,虽然储存束的高频率循环特性可在一定程度上弥补反应亮度,但仍难达到固体靶甚至气体活性靶的水平。除此之外,经电子冷却和随机冷却降低次级束动量离散的时间通常在秒量级,因而也较难开展短寿命奇特核的研究。而且,目前储存环内靶核反应还未实现炮弹与反应产物的关联测量,实验对纯化要求高,不易同时开展多种不同核素的测量。表1列举了轻粒子诱发直接核反应实验中传统固体靶、气体活性靶和储存环气体内靶3种方式的特点。

国际上,依托德国重离子研究中心的重离子冷却储存环ESR气体内靶装置^[12],EXL国际合作组^[18]率先开展了储存环气体内靶直接核反应的研究。EXL合作组发展出了重离子储存环适用的硅探测器^[19],利用硅探测器进行了超高真空差分离^[20],发展了储存环气体内靶核反应实验技术^[18]。在这些技术支撑下,开展了广泛的实验研究,例如,利用质子和 α 两种轻粒子的弹性散射开展了原子核核物质密度分布半径的测量实验^[21,22],基于 α 粒子在原子核上的非弹性散射研究了巨共振^[10],在低能区直接测量了核天体物理相关的质子俘获(p, γ)截面^[15,16],以及利用(p, d)转移反应尝试测量了核天体物理相关的能态信息^[23]。EXL合作组取得的这些成果展示出了储存环气体内靶核反应作为一个新实验方式的独特之处。它是欧洲下一代存储环FAIR(facility for antiproton and ion research in Europe)的一个重要研究方向^[18],也被列入了欧洲核物理中长期发展规划之中^[24]。

兰州重离子冷却储存环HIRFL-CSR是一个开展核物理和原子物理实验研究的高精度谱仪。自2007年建成以来,被广泛应用于测量原子核质量^[25,26]和离子-原子分子碰撞谱学^[27]。为拓展兰州重离子冷却储存环国家实验室的研究领域,中国科学院近代物理研究所自2016年开始研发基于HIRFL-CSR的气体内靶核反应谱仪。经过近几年的工作,研制出了内靶核反应谱仪的关

表1 轻粒子诱发直接核反应实验中固体靶、气体活性靶和储存环气体内靶的对比

Table 1 Comparison of solid target, active gas target and internal gas-jet target for the direct nuclear reactions induced by light ions

方式	运动学	靶	炮弹	适用范围	探测方式	低动量转移
固体靶	正常运动学	密度高、较纯净	不循环、能散较大	稳定核素	磁谱仪结合探测器	测量较难
气体活性靶	逆运动学	密度较低、纯净	不循环、能散大	大部分核素	活性靶系统	测量较难
气体内靶	逆运动学	密度低、纯净	高频率循环、能散小	寿命较长核素	硅(微条)探测器	测量较易

键探测单元, 建成了储存环气体内靶低动量转移核反应测量装置, 开展了HIRFL-CSR上首次低动量转移质子弹性散射实验, 测量了 ^{58}Ni 的核物质分布半径. 本文主要介绍HIRFL-CSR气体内靶核反应谱仪关键探测设备的研制和首次开展的低动量转移弹性散射实验, 同时还简单陈述即将开展的质子在 ^{133}Cs 原子核上的低动量转移弹性散射实验的动机, 以及将来基于HIRFL-CSR气体内靶核反应谱仪的研究计划.

2 HIRFL-CSR气体内靶核反应研究

兰州重离子冷却储存环HIRFL-CSR^[13]是一个多功能的双冷却储存环同步加速器系统, 由主环CSRm(main cooler-storage ring)和实验环CSRe(experimental cooler-storage ring)构成. CSRm和CSRe通过放射性束流线RIBLL2(radioactive ion beam line 2 in Lanzhou)连接(图1). CSRm是同步加速器, 周长161 m, 最大磁刚度10.64 Tm, 能将元素周期表上从氢到铀的天然化学元素从数MeV/u加速到数百MeV/u, 速度达光速的90%左右. CSRe是一个高精度的实验谱仪, 有正常、等时和内靶3种运行模式, 其周长128.8 m, 最大磁刚度8.4 Tm. CSRe直线段分别对称地装配着电子冷却装置^[28]和气体内靶系统^[29], 通过前者提供的单能电子束可减小CSRe中储存束的速度离散, 能在一定程度上补偿储存束与残余气体碰撞导致的能量损失, 提高束流品质以开展高精度实验, 利用后者提供的各种气体靶可开展离子-原子分子碰撞实验. CSRm引出的束流可直接经RIBLL2传输, 注入储存在CSRe中开展实验, 也可在RIBLL2入口打靶, 通过弹核碎裂产生稀有同位素, 利用 $B\rho\text{-}\Delta E\text{-}B\rho$ 等技术纯化后, 注入储存到CSRe中开展奇特核研究. CSRe束流管道腔体内的真空度在 10^{-11} mbar左右, 是一个超高真空环境, 能长时间储存离子束. 循环束长的飞行时间或路径可提高原子核质量测量的精度^[25,26], 便于开展高电荷态离子衰变寿命的直接测量^[30]. 储存束高的循环频率能在一定程度上弥补气体内靶靶密度低的缺陷, 提高反应亮度^[17].

气体内靶是CSRe上的一个重要实验装置, 其最初的建造目的是开展离子-原子分子碰撞相关的原子物理研究. 该装置当前可提供5种气体靶, 分别是氢气、氮气、氦气、氖气和氩气. 气体内靶密度可达 $10^{11}\sim 10^{13}$ atom/cm², 空间分布直径在4 mm左右, 靶周围本底真空可到 10^{-11} mbar(1 mbar=100 Pa). 关于CSRe气体内靶装置的详细信息见文献^[29]. 气体内靶装置自建成以来, 已

图1 (网络版彩色)兰州重离子冷却储存环气体内靶核反应谱仪及低动量转移反应实验探测器布局示意图

Figure 1 (Color online) Schematic illustration of the layout of the internal gas-jet target nuclear reaction spectrometry at the HIRFL-CSR and the detector system installed for low momentum transfer experiments

经陆续开展了多次离子-原子分子的碰撞实验^[27,29], 展示了气体内靶在原子物理研究中的重要作用. 基于HIRFL-CSR气体内靶装置, 目前内靶核反应研究的主要工作是研制核反应谱仪探测设备和开展核反应物理实验.

2.1 气体内靶核反应核心探测设备

HIRFL-CSR气体内靶靶密度低、空间分布小且无窗, 因此, 能量低至数十keV的低能反应产物, 如来自质心系小角度的弹性散射质子, 可几乎无能损地从靶中飞出到超高真空区域. 储存环气体内靶核反应的这个特点使得测量低能反应产物, 研究相关物理成为可能. 为测量低能粒子, 探测器不能有窗, 必须被直接安装到储存环超高真空管道腔体内, 且不能破坏重离子冷却储存环 10^{-11} mbar量级的超高真空而影响离子的储存寿命, 这就要求制作探测器的材料需满足超高真空规范, 出气率要低. 另一限制就是高温烘烤. 重离子储存

环要获得超高真空, 真空腔体200°C左右的长时间烘烤是不可或缺的, 故而探测器还须能承受长时间的高温。

核反应产物的数量、能量以及径迹信息是核反应研究的重要输入参数。针对不同的实验条件和物理研究要求, 发展出了各种各样的探测器来测量这些参数。硅探测器对带电离子灵敏, 具有近100%的高探测效率和优于1%的能量分辨率, 将其分割成mm- μm 量级的硅微条还能具有高的位置分辨能力。硅微条探测器(Si-strip detector, SSD)是一款成熟的商业探测器, 被广泛地应用于测量各种带电粒子的数目、能量和角度信息, 是核反应研究的首选探测器。储存环内靶核反应实验的超高真空极端环境对探测器的适用性附加了更多的条件。虽然通用商业硅微条探测器硅片的出气率和耐高温属性均满足储存环超高真空条件, 但其周边附件, 如常规PCB(printed circuit board)板、信号传输线以及焊接材料等出气率一般较大且不耐高温, 不能直接用于储存环内靶核反应实验。因此, 必须对硅微条探测器进行改进, 使它适用于重离子储存环高温、超高真空环境。

烧制陶瓷PCB板具有高阻抗性, 在电子行业有着广泛的应用。不仅如此, 烧制陶瓷出气率低且耐高温, 也是优良的超高真空部件材料, 因此可用烧制陶瓷PCB板代替商业硅微条探测器的通用PCB板。以此为基础, 通过真空适用的导电胶黏合硅片与陶瓷PCB板, 结合压接工艺, 可将信号传输线与硅片整合为一体。靶室超高真空端信号通过Kapton绝缘排线传输。靶室真空端与空气端的信号桥接通过陶瓷密封的D型头实现。研制的硅微条探测系统在测试靶室中经过5天150°C的连续烘烤, 真空度达到了 10^{-10} mbar量级。最为重要的是, 烘烤后探测器能量分辨依然好于1%, 可分辨天然放射源 ^{241}Am 发射的3组能量不同的 α 粒子。关于HIRFL-CSR气体内靶核反应谱仪核心探测设备的研制细节可参见文献[17]。图2是最新研制的300 μm 厚的双面32 $\times$ 32条的硅微条探测器。该探测器全面使用了压接工艺, 替代了第一代探测器中使用的锡焊, 更符合超高真空操作规范。研制的硅微条探测器可安装在实验环内靶区域, 相对于束流方向成90°或35°角(图1), 分别用于测量来自弹性散射和非弹性散射的低动量转移事件, 也可作为内靶反应的 ΔE 能损探测器使用。

气体内靶的扩散性会导致靶密度在空间上分布不均。另外, 储存环电磁铁磁场晃动以及离子-原子碰撞均会导致束流位置变化和离子数损失, 即束流强度在空间、时间上实时变化。这使得精确测量束流-气体内靶

图2 (网络版彩色)为 $^{133}\text{Cs}(\text{p}, \text{p})$ ^{133}Cs 低动量转移弹性散射实验制作的, 满足储存环高温、超高真空条件的双面硅微条探测器

Figure 2 (Color online) The developed double-sided Si-strip detector (DSSD) that meets the requirements of high temperature and ultra-high vacuum conditions for in-ring nuclear reaction experiment on $^{133}\text{Cs}(\text{p}, \text{p})$ ^{133}Cs elastic scattering at the HIRFL-CSR

的空间重合密度变得困难, 因而文献[12]认为精确测量储存环气体内靶实验的亮度是一个具有挑战性的工作。在储存环碰撞实验中, 束流容易被气体靶电离或从气体靶俘获电子, 从而发射X射线。相较于强相互作用, 电磁相互作用已得到了很好的研究, 如内壳电离截面、辐射电子俘获截面等能被原子理论很好地预言, 相对精度甚至可达1%量级。因而, 在储存环气体内靶核反应实验中, 经常使用这些理论预言的原子截面来确定亮度, 归一核反应绝对截面^[15,16]。图1展示了CSRe气体内靶终端处安装的X射线Si(Li)探测器, 它与束流前进方向成35°夹角, 用于测量离子-原子碰撞发射的X射线以确定内靶碰撞反应实验的亮度。

2.2 HIRFL-CSR上首次低动量转移弹性散射实验

开启核反应研究大门的弹性散射^[2]并未随百年时光的流逝而热度衰减, 其在核物理研究中随处可见。从理论的角度来说, 低动量转移弹性散射来自擦边碰撞, 能灵敏地反映出核物质分布半径大小, 有利于开展中子皮(晕)的研究^[14]。实验上, 处于质心系小角度的低动量转移反应截面大, 可以被高效、准确地测量, 适合于通过微分截面确定核物质密度分布半径。另外, 对于一些拥有低激发态的原子核, 实验上很难从能量上区分出非弹性和弹性散射事件。如图3(a)所示, 随着激发能的减小, 非弹性散射反冲产物的发射角度和能量逐渐接近弹性散射反冲产物的角度和能量。然而在低动量转移的质心系小角度区域, 弹性散射的截面远大于非弹性散射的截面, 因而可以忽略低激发态的影响。图3

图3 (网络版彩色)质子和¹²⁴Xe在100 MeV/u的动能碰撞下发生弹性散射和非弹性散射。(a) 不同激发能下反冲质子能量与实验室系角度的关系。(b) 耦合道模型FRESCO^[31]计算的弹性散射和非弹性散射微分截面

Figure 3 (Color online) Proton elastic and inelastic scattering on ¹²⁴Xe with a collision energy of 100 MeV/u. (a) Energy of recoil proton as a function of scattering angle in the laboratory system. (b) Differential cross sections for elastic and inelastic scatterings calculated by the coupled-channel model FRESCO^[31]

(b)对比了基于耦合道模型^[31]计算的100 MeV/u的¹²⁴Xe原子核碰撞氢气靶的弹性散射和非弹性散射微分截面。同样,在非弹性散射中,质心系小角度低动量反应产物也较纯净,受多极反应事件影响小,有利于实验上测量同位旋单极巨共振(isoscalar giant monopole resonance, ISGMR),提取核物质压缩系数等^[10]。不仅如此,它也适合通过(³He, t)类型的电荷交换反应开展核天体物理相关的弱相互作用率和电子俘获率的研究。

在HIRFL-CSR开展的首次⁵⁸Ni(p, p) ⁵⁸Ni低动量转移实验中^[32],研制的硅微条探测器安装在靶处相对束流方向成90°角以测量低动量转移的弹性散射质子,测量X射线以确定反应亮度的Si(Li)探测器安装在靶处与束流前进方向成35°夹角(图1)。实验前,利用天然放射源刻度探测器。实验时,来自超导离子源的⁵⁸Ni¹⁹⁺离子束被注入到扇形聚焦回旋加速器(sector focusing cyclotron, SFC)中,加速到约6 MeV/u后引出注入到主环CSRm。通过多次注入,CSRm中的⁵⁸Ni离子数达到约10⁷个,随后这些低能离子被加速到95 MeV/u。CSRm中储存的高能⁵⁸Ni¹⁹⁺离子束被引出后,经放射性束流线RIBLL2传输并注入到实验环CSRe中储存。在CSRe中循环的储存束通过与电子冷却装置的单能电子束相互作用来降低速度分散。CSRe气体靶提供的氢气与循环的⁵⁸Ni¹⁹⁺离子发生碰撞,通过弹性散射发射出的质子被安装在实验室系90°角的硅微条探测器所测量。⁵⁸Ni¹⁹⁺离子核外带有电子,其K壳电子被氢气内靶电离,外壳电子填补空缺后发射的X射线通过实验室系35°角的X射线Si(Li)探测器测量。数据处理上,由于束流与靶的

重合区域通常不能简单考虑为点,而且探测器与靶点距离的测量精度相对于精确刻度的能量测量来说通常较低,因此质子弹性散射的微分截面依靠硅微条探测器测量的反冲质子的能量和计数来提取,计算公式如下:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{L} \frac{|P|^2}{\pi} \frac{\Delta N_t}{\Delta t}, \quad (1)$$

$$-t = 2m_p T_k = 2P^2(1 - \cos\theta_{cm}), \quad (2)$$

式中, T_k 和 N 分别为反冲质子的动能和计数。具体的公式定义、实验参数以及数据处理过程见文献^[32]。

学界对质子在核上的弹性散射进行了广泛的实验和理论研究。Koning和Delaroche^[33]利用唯象方式从大量中低能区(<200 MeV)实验数据中提取了全局光学势(KD03)。该光学势能较好地描述质子在稳定球形核上的弹性散射微分截面,平均预言精度可到10%左右,特别是在质心系小角度区域,不同模型之间的预言结果几乎没有明显的差别^[33,34]。因此,通过开展质子弹性散射实验,能验证HIRFL-CSR气体靶核反应谱仪的可靠性,也可用于原子物理电离截面的归一^[35]。图4对比了实验得到的质子在⁵⁸Ni上的弹性散射微分截面和唯象全局光学势计算的结果,两者在误差范围内具有很好的一致性^[32]。

通过对质子弹性散射微分截面拟合,得到⁵⁸Ni原子核物质分布半径为3.74(13) fm^[32]。由于⁵⁸Ni质子物质分布半径已经被精确测量,利用式(3)^[36]就可以得到⁵⁸Ni的中子皮厚度为0.096(248) fm。

图4 (网络版彩色)实验提取的微分截面与光学势计算的微分截面的比较。两者在误差范围内具有很好的一致性^[32]

Figure 4 (Color online) Comparison between experimental differential cross sections and theoretical differential cross sections calculated by the KD03. A good agreement has been achieved^[32]

$$\Delta r_{np} = \left\langle r_n^2 \right\rangle^{1/2} - \left\langle r_p^2 \right\rangle^{1/2} = \sqrt{\frac{A}{N} \left\langle r_m^2 \right\rangle - \frac{Z}{N} \left\langle r_p^2 \right\rangle} - \left\langle r_p^2 \right\rangle^{1/2}. \quad (3)$$

我们的实验结果与其他实验提取的⁵⁸Ni中子皮厚度是一致的^[21]。值得注意的是,该实验仅测量了数小时,体现了利用储存环内靶核反应谱仪开展低动量转移实验的高效性和灵敏性,也展示了HIRFL-CSR气体内靶核反应谱仪的可靠性。

在此基础上,我们团队于2021年初开展了⁷⁸Kr低动量转移质子弹散实验。⁷⁸Kr在通常条件下为气体,HIRFL-CSR气体内靶核反应谱仪非常适合开展此类材料的研究。实验利用152 MeV/u的⁷⁸Kr冷却循环束轰击实验环氢气内靶,利用1 mm厚的32×32条的硅微条探测器测量质心约10°内的弹散质子,以研究形变核的物质分布半径。目前,数据正在进一步分析中,初步提取的微分截面形状与全局光学势KD03^[33]的预言结果基本一致。

3 HIRFL-CSR气体内靶核反应研究计划

原子核是由中子和质子构成的量子多体系统。核内质子和中子的物质分布半径是原子核的基本属性之一。不同于测量和电磁相互作用关联的质子分布半径,中子分布半径的提取更加具有模型依赖性。因此,系统地研究原子核中子分布半径有助于理解核结构,促进核模型的改进发展。另外,中子皮厚度还能限定核物质状态方程参数,对理解核反应和核天体物理极其重要。

不仅如此,在一些与原子物理和粒子物理相关的研究中,中子皮厚度也是一个必不可少的输入量。

1974年, Bouchiat^[37]首次指出,可利用原子宇称破缺(atomic parity nonconservation, APN),在低能弱电区检验基本粒子标准模型。依据该建议,1999年,结合¹³³Cs宇称不守恒跃迁幅度和跃迁极化率, Bennett^[38]通过提取标示中性弱相互作用强度的弱电荷QW(weak charge),检验了基本粒子标准模型。结果发现,实验获得的弱电荷值与标准模型的预言结果存在2.5倍误差的偏离。近20年来,理论家们引入各种修正,试图解决这个问题,但不同的修正得到了不同的结果(图5),争论依然存在^[38–46]。

在提取弱电荷时,¹³³Cs原子核的中子皮厚度是一个不可或缺的输入量^[47],如下式:

$$\frac{\delta Q_w}{Q_w} = -\frac{3}{7}(\alpha Z)^2 \frac{\Delta r_{np}}{r_p}. \quad (4)$$

但是,由于Cs元素在28.5°C就液化,且在空气中极易自燃,不易制作为反应靶,较难通过正常运动学测量其物质半径。因此,¹³³Cs中子皮厚度就成为一个可能给弱电荷提取准确性带来影响的未知量。在缺少实验数据的情况下,原子物理理论家采用理论半径来提取弱电荷,但是由于强相互作用还不十分清楚,而且¹³³Cs处于核的形变区域,因而各种核模型预言的¹³³Cs中子皮厚度存在一定的偏差。特别是在2019年, Cadeddu和Dordei^[46]基于COHERENT实验和一些假定条件得到的¹³³Cs中子皮厚度为0.62(31) fm,与其他结果极不相

图5 (网络版彩色)不同研究提取的弱电荷值与标准模型预言的比较。数据来自文献^[38–46]

Figure 5 (Color online) Comparison of the experimental weak charge values with the predictive result by the standard model. The data were taken from Refs. [38–46]

同。HIRFL-CSR内靶核反应谱仪成功开展了 ^{58}Ni 和 ^{78}Kr 低动量转移质子弹性散射实验,提取了中子皮厚度。基于这些研究基础,计划在近一两年内利用内靶核反应谱仪,开展质子在 ^{133}Cs 上的低动量转移弹性散射实验,测量其中子皮厚度。Cadeddu等人^[45]基于COHERENT实验提取的 ^{133}Cs 中子分布半径是 ^{133}Cs 和 ^{127}I 的平均中子分布半径。计划开展的 ^{133}Cs 低动量转移质子弹散实验是直接测量 ^{133}Cs 中子分布半径,排除了 ^{127}I 的影响。同时,利用低动量转移反应截面大的特点,以 ^{58}Ni 实验作为参考,延长测量时间至数十小时,可将微分截面统计误差大幅降低至1%水平。基于此, ^{133}Cs 中子皮厚度的测量精度能大幅提高,误差可期盼小于0.1 fm。

储存环气体内靶纯度高,相对于CH靶实验本底低,适合开展低截面稀有产物的测量。为进一步拓展HIRFL-CSR气体内靶核反应谱仪的研究区域,计划在未来5年内研制出开展(p, d)等转移反应的探测器系统,为测量核天体物理关键反应,如 $^{15}\text{O}(\alpha, \gamma)^{19}\text{Ne}$ ^[48]奠定基础。该反应可能是突破碳-氮-氧循环,触发快质子俘获过程的关键反应,对理解核天体物理研究中重元素的合成有重要意义^[23]。图6展示了开展该实验所需的探测器装置及其布局,最终的探测器将依据测试实验调整。

装置研发上,将进一步标准化、集成化探测器,以制作大阵列探测系统。另外,HIRFL-CSR气体内靶在设计研发时主要针对的是原子分子碰撞实验,目前尚不能提供氦气靶^[29]。虽然基于氦的非弹性散射依然可以

开展巨共振的相关研究^[49],但 α 粒子依然是最好的实验探针。由于储存环气体内靶核反应也是国家重大科技基础设施强流重离子加速器装置(high intensity heavy ion accelerator facility, HIAF)的一个重要研究方向^[50,51],对HIRFL-CSR气体靶进行改造以提供氦气靶,不仅适合当前的工作要求,也与HIAF上气体靶的相关预研一致。在低能质子俘获实验方面,由于HIRFL-CSR实验环的供电系统是直流模式,其上的能量减速功能从未被调试,未来将联合加速器团队做一些减速方面的可行性预研。

4 总结与展望

中国科学院近代物理研究所基于兰州重离子加速器冷却储存环气体内靶开展了轻粒子诱发的直接核反应研究,研制了一套适用于储存环超高真空极端条件的硅微条探测器系统。利用该探测器系统开展了HIRFL-CSR上的首次储存环内靶低动量转移核反应实验,实验结果与文献数据一致,验证了新研发的储存环内靶核反应谱仪的可靠性。基于当前拥有的实验条件,近期将开展 ^{133}Cs 中子皮厚度测量实验。同时,介绍了未来5年内建设新平台、开展新实验的工作计划及初步方案。针对现有储存环和气体内靶装置的短板,制定了长期的研发计划,以进一步扩展HIRFL-CSR的功能。遇到的这些困难很有挑战性,也是难得的机遇。基于现有装置逐一解决问题,有助于HIAF相关终端的建造。

图6 (网络版彩色)储存环气体内靶转移反应实验所需的各类探测器及布局示意图

Figure 6 (Color online) Schematic illustration of the detector systems for in-ring transfer reaction at the HIRFL-CSR

参考文献

- Glendenning N K. Direct Nuclear Reactions. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2004
- Geiger H, Marsden E. On a diffuse reflection of the α -particles. *Proc Roy Soc Lond A*, 1909, 82: 495–500
- Cockcroft J D, Walton E T S. Experiments with high velocity positive ions. II. -The disintegration of elements by high velocity protons. *Proc Roy Soc Lond A*, 1932, 137: 229–242
- Egelhof P. Nuclear matter distributions of neutron-rich halo nuclei from intermediate energy elastic proton scattering in inverse kinematics. *Prog Part Nucl Phys*, 2001, 46: 307–316
- 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
- Tanaka M, Takechi M, Homma A, et al. Swelling of doubly magic ^{48}Ca core in Ca isotopes beyond $N=28$. *Phys Rev Lett*, 2020, 124: 102501
- Chen L W, Ko C M, Li B A. Nuclear matter symmetry energy and the neutron skin thickness of heavy nuclei. *Phys Rev C*, 2005, 72: 064309
- Fattoyev F J, Piekarewicz J, Horowitz C J. Neutron skins and neutron stars in the multimessenger era. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 172702
- Monrozeau C, Khan E, Blumenfeld Y, et al. Measurement of the GMR in the unstable ^{56}Ni nucleus using the active target Maya. *Nucl Phys A*, 2007, 788: 182–187
- Zamora J C, Aumann T, Bagchi S, et al. First measurement of isoscalar giant resonances in a stored-beam experiment. *Phys Lett B*, 2016, 763: 16–19
- Chen X, Lui Y W, Clark H L, et al. Giant resonances in ^{116}Sn from 240 MeV ^6Li scattering. *Phys Rev C*, 2009, 79: 024320
- Eichler J, Stöhlker T. Radiative electron capture in relativistic ion-atom collisions and the photoelectric effect in hydrogen-like high-Z systems. *Phys Rep*, 2007, 439: 1–99
- Xia J W, Zhan W L, Wei B W, et al. The heavy ion cooler-storage-ring project (HIRFL-CSR) at Lanzhou. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Detect Assoc Equip*, 2002, 488: 11–25
- Alkhazov G D, Andronenko M N, Dobrovolsky A V, et al. Nuclear matter distributions in ^6He and ^8He from small angle p-He scattering in inverse kinematics at intermediate energy. *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 2313–2316
- Mei B, Aumann T, Bishop S, et al. First measurement of the $^{96}\text{Ru}(p, \gamma)^{97}\text{Rh}$ process with a storage ring. *Phys Rev C*, 2015, 92: 035803
- Glorius J, Langer C, Slavkovská Z, et al. Approaching the Gamow window with stored ions: Direct measurement of $^{124}\text{Xe}(p, \gamma)$ in the ESR storage ring. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 092701
- Zhang J T, Yue K, Li H X, et al. The development of in-ring reaction measurements at the HIRFL-CSR. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Detect Assoc Equip*, 2019, 948: 162848
- Gutbrod H H, Augustin I, Eickhoff H, et al. FAIR Baseline Technical Report. Darmstadt: GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, 2006
- Moeini H, Ilieva S, Aksouh F, et al. First feasibility experiment for the EXL project with prototype detectors at the ESR storage ring. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Detect Assoc Equip*, 2011, 634: 77–84
- Streicher B, Egelhof P, Ilieva S, et al. Application of a double-sided silicon-strip detector as a differential pumping barrier for NESR experiments at FAIR. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Detect Assoc Equip*, 2011, 654: 604–607
- Zamora J C, Aumann T, Bagchi S, et al. Nuclear-matter radius studies from $^{58}\text{Ni}(\alpha, \alpha)$ experiments at the GSI Experimental Storage Ring with the EXL facility. *Phys Rev C*, 2017, 96: 034617
- Schmid M, Bagchi S, Bönig S, et al. Investigation of the nuclear matter distribution of ^{56}Ni by elastic proton scattering in inverse kinematics. *Phys Scr*, 2015, T166: 014005
- Doherty D T, Woods P J, Litvinov Y A, et al. Nuclear transfer reaction measurements at the ESR—for the investigation of the astrophysical $^{15}\text{O}(\alpha, \gamma)^{19}\text{Ne}$ reaction. *Phys Scr*, 2015, T166: 014007
- Bracco A, Chomaz P, Gaardhøje J J, et al. NuPECC Long Range Plan 2010: Perspectives of Nuclear Physics in Europe. European Science Foundation, 2010
- Tu X L, Xu H S, Wang M, et al. Direct mass measurements of short-lived $A=2Z-1$ nuclides ^{63}Ge , ^{65}As , ^{67}Se , and ^{71}Kr and their impact on nucleosynthesis in the rp process. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 112501
- Zhang Y H, Xu H S, Litvinov Y A, et al. Mass measurements of the neutron-deficient ^{41}Ti , ^{45}Cr , ^{49}Fe , and ^{53}Ni nuclides: First test of the isobaric multiplet mass equation in fp-shell nuclei. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 102501
- Shao C, Yu D, Cai X, et al. Production and decay of K-shell hollow krypton in collisions with 52–197-MeV/u bare xenon ions. *Phys Rev A*, 2017, 96: 012708
- Mao L J, Zhao H, Yang X D, et al. Longitudinal electron cooling experiments at HIRFL-CSRe. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Detect Assoc Equip*, 2016, 808: 29–34
- Shao C, Lu R, Cai X, et al. HIRFL-CSR internal cluster target. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2013, 317:

617–622

- 30 Tu X L, Chen X C, Zhang J T, et al. First application of combined isochronous and Schottky mass spectrometry: Half-lives of fully ionized $^{49}\text{Cr}^{24+}$ and $^{53}\text{Fe}^{26+}$ atoms. *Phys Rev C*, 2018, 97: 014321
- 31 Thompson I J. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics. *Comput Phys Rep*, 1988, 7: 167–212
- 32 Yue K, Zhang J T, Tu X L, et al. Measurement of $^{58}\text{Ni}(p, p)^{58}\text{Ni}$ elastic scattering at low momentum transfer by using the HIRFL-CSR heavy-ion storage ring. *Phys Rev C*, 2019, 100: 054609
- 33 Koning A J, Delaroche J P. Local and global nucleon optical models from 1 keV to 200 MeV. *Nucl Phys A*, 2003, 713: 231–310
- 34 Xu R, Ma Z, Zhang Y, et al. Global analysis of isospin dependent microscopic nucleon-nucleus optical potentials in a Dirac-Brueckner-Hartree-Fock approach. *Phys Rev C*, 2016, 94: 034606
- 35 Zhang J T, Yue K, Shao C J, et al. Employing $p+^{58}\text{Ni}$ elastic scattering for determination of K-shell ionization cross section of $^{58}\text{Ni}^{19+}$ in collisions with hydrogen gas target at 95 MeV/u. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2020, 478: 46–49
- 36 Alkhazov G D, Beurtey R, Boudard A, et al. Neutron matter densities in the even Ni isotopes. *Phys Lett B*, 1977, 67: 402–404
- 37 Bouchiat M A, Bouchiat C. I. Parity violation induced by weak neutral currents in atomic physics. *J Phys France*, 1974, 35: 899–927
- 38 Bennett S C, Wieman C E. Measurement of the $6S \rightarrow 7S$ transition polarizability in atomic cesium and an improved test of the standard model. *Phys Rev Lett*, 1999, 82: 2484–2487
- 39 Derevianko A. Reconciliation of the measurement of parity nonconservation in Cs with the standard model. *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 1618–1621
- 40 Kozlov M G, Porsev S G, Tupitsyn I I. High-accuracy calculation of $6s \rightarrow 7s$ parity-nonconserving amplitude in Cs. *Phys Rev Lett*, 2001, 86: 3260–3263
- 41 Dzuba V A, Flambaum V V, Ginges J S M. High-precision calculation of parity nonconservation in cesium and test of the standard model. *Phys Rev D*, 2002, 66: 076013
- 42 Flambaum V V, Ginges J S M. Radiative potential and calculations of QED radiative corrections to energy levels and electromagnetic amplitudes in many-electron atoms. *Phys Rev A*, 2005, 72: 052115
- 43 Porsev S G, Beloy K, Derevianko A. Precision determination of electroweak coupling from atomic parity violation and implications for particle physics. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 181601
- 44 Dzuba V A, Berengut J C, Flambaum V V, et al. Revisiting parity nonconservation in cesium. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 203003
- 45 Cadédu M, Giunti C, Li Y F, et al. Average CsI neutron density distribution from COHERENT Data. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 072501
- 46 Cadédu M, Dordei F. Reinterpreting the weak mixing angle from atomic parity violation in view of the Cs neutron rms radius measurement from COHERENT. *Phys Rev D*, 2019, 99: 033010
- 47 Derevianko A. Correlated many-body treatment of the Breit interaction with application to cesium atomic properties and parity violation. *Phys Rev A*, 2001, 65: 012106
- 48 Davids B, van den Berg A M, Dendooven P, et al. Astrophysical rate of $^{15}\text{O}(\alpha, \gamma)^{19}\text{Ne}$ via the (p, t) reaction in inverse kinematics. *Phys Rev C*, 2003, 67: 065808
- 49 Patel D, Garg U, Itoh M, et al. Excitation of giant monopole resonance in ^{208}Pb and ^{116}Sn using inelastic deuteron scattering. *Phys Lett B*, 2014, 735: 387–390
- 50 Yang J C, Xia J W, Xiao G Q, et al. High intensity heavy ion accelerator facility (HIAF) in China. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2013, 317: 263–265
- 51 Zhou X H. Physics opportunities at the new facility HIAF. *Nucl Phys Rev*, 2018, 35: 339–349

Summary for “HIRFL-CSR 气体内靶核反应研究进展”

Progress on internal gas-jet target nuclear reaction at the HIRFL-CSR

Qi Zeng^{1,2}, Jingtao Zhang^{2,3}, Ke Yue² & Xiaolin Tu^{2,4*}¹ School of Nuclear Science and Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;² Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;³ School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;⁴ School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China* Corresponding author, E-mail: tuxiaolin@impcas.ac.cn

Direct nuclear reactions induced by light ions, e.g., proton and alpha particles, have been investigated for about a century since the Geiger-Marsden experiment in 1908. It provides important information on nuclear structure and nuclear astrophysics. For instance, neutron skin thicknesses of nuclei determined by using proton and α elastic scattering play an important role in constraining the equation of state (EOS) of isospin asymmetric nuclear matter. These reactions were mostly conducted in direct kinematics, that is to say, the light-ion beam from accelerator interacts with a target made of the nuclei of interest. Obviously, such kinds of experimental investigations are limited to stable solid isotopes without active chemical property and radioactivity, due to the difficulty to make unstable targets.

To test theoretical models developed from stable nuclei and explore new physical phenomenon on exotic nuclei, it is essential to investigate direct reactions on nuclei far from stability. As a result, experimental method based on inverse kinematics, namely active gas target technique, has been developed, where the unstable nuclei of interest produced by radioactive ion beam facilities collide with hydrogen and helium gases in a bubble chamber. The direct reactions are performed in inverse kinematics. One advantage is that low energy recoils at small center of mass angles can be measured easily at relatively large laboratory angles. However, this experimental method is insensitive to detect scattering recoils with energies of a few hundred keV, due to measurement based on gas detector.

In recent years, a novel experimental method, namely study with stored beam in storage ring interacting with internal gas-jet target, has attracted much interest. It was proposed firstly for the exotic nuclei studied with light-ion induced reactions in storage rings (EXL) project. The technique is based on the internal gas-jet target instead of active gas target. It is an important supplementary experiential method for studying direct nuclear reactions induced by light ions, which is characterized by low-momentum sensitivity, high detection efficiency and low background. It is an ideal tool to study the isotopes with active chemical property and radioactivity.

The cooler storage ring at the heavy ion research facility in Lanzhou (HIRFL-CSR) consists of a main cooler storage ring (CSRm) and an experimental cooler storage ring (CSRe). The two rings are connected by a radioactive ion beam line 2 (RIBLL2). The CSRe is equipped with an internal gas-jet target. As one of the existing facilities, the HIRFL-CSR provides an opportunity for performing in-ring direct nuclear reactions induced by light ions with the internal gas-jet target. Since 2016, a silicon strip detector compatibility with ultra-high vacuum in heavy-ion storage ring has been developed to build the in-ring direct nuclear reaction spectrometry at the HIRFL-CSR. A feasibility experiment on proton elastic scattering on ^{58}Ni nuclei has been operated successfully by using the in-ring nuclear reaction spectrometry at the HIRFL-CSR. The nuclear matter distribution radius of ^{58}Ni was extracted from measured differential cross sections at low momentum transfer. Proton elastic scattering experiment on ^{78}Kr nuclei was also carried out to extract the nuclear matter radius at the beginning of 2021.

In this paper, we report the development of in-ring direct nuclear reaction spectrometry at the HIRFL-CSR and corresponding experiments. Research plans in the (near) future, especially for measuring nuclear matter distribution radius of ^{133}Cs , are also introduced.

direct nuclear reaction, heavy-ion cooler storage ring, internal gas-jet target, nuclear matter distribution radiusdoi: [10.1360/TB-2021-0215](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0215)