基于HIRFL-CSR的原子核质量测量实验进展

王猛^{1,2*}, 张玉虎^{1,2}, 焦红扬^{1,2}

1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730030;

2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: wangm@impcas.ac.cn

2020-12-31 收稿, 2021-02-08 修回, 2021-02-09 接受, 2021-02-10 网络版发表

国家重点研发计划(2018YFA0404401)资助

摘要 质量是原子核最基本的性质之一, 核质量数据被广泛应用于核结构及核天体物理等多个研究领域. 短寿命原子核质量的高精度测量是核物理研究的前沿课题. 基于兰州重离子加速器装置HIRFL-CSR(cooler storage ring of heavy ion research facility in Lanzhou), 我们建设了先进的等时性质谱术, 精确测量了一批短寿命原子核的质量, 研究了核结构及核天体物理中的前沿科学问题. 本文介绍了国际研究现状, 回顾了冷却储存实验环(experimental cooler storage ring, CSRe)质量测量发展过程, 综述了近期取得的一些代表性成果, 并对未来工作进行了展望.

关键词 原子核质量, 短寿命核素, 等时性质谱术, 壳演化, 同核异能态

原子核是由质子和中子两种费米子组成的量子多体系统, 其质量直接反映了结合能, 体现了核内强、弱、电磁等各种相互作用的总和. 原子核质量的测量可以用来研究各种重要的物理问题, 而这些物理问题需要的测量精度各不相同^[1,2]. 一般而言, 为了研究核结构和核天体物理, 质量测量精度需要好于100 keV, 而研究弱相互作用则需好于10 keV, 中微子物理相关的研究需好于1 keV.

物理目标的驱动促使各大核物理实验室投入到原子核质量测量工作^[1-6]. 经过国际核物理学界100多年来的共同努力, 我们已经知道了约2500个原子核的质量, 所有稳定核素及大部分邻近稳定线的核素质量都已被测量^[7,8]. 这些质量数据被用来探索原子核存在的极限、揭示核壳层结构的演化、研究核天体过程等, 促进了人类对微观和宏观物质结构的认识. 目前, 实验室已发现的原子核数目超过3300种^[9], 不同的理论预言可能存在的原子核数目有7000~9000种^[10,11], 所以仍有

大量原子核的质量未知. 这些远离稳定线的短寿命原子核可能存在奇异结构, 张量力、三体力等有效相互作用在核内可能有显著表现; 同时, 这些原子核存在于爆发性天体过程中, 对理解宇宙中化学元素的起源和丰度等有重要意义^[12,13], 因此亟需实验测量这些原子核的质量.

短寿命原子核的质量测量是核物理一个重要的研究方向, 但因为目标核产生截面小、寿命短, 准确测量其质量在技术上有很高要求. 我们基于兰州重离子加速器实验室的冷却储存实验环(experimental cooler storage ring, CSRe), 发展了等时性质谱术, 精确测量了一系列短原子核的质量, 研究了一些重要的物理问题. 本文介绍CSRe质量测量相关研究进展, 并对下一步的工作进行展望.

1 短寿命原子核质量测量历程及研究现状

早期的质谱仪仅能测量自然界存在的稳定原子核

引用格式: 王猛, 张玉虎, 焦红扬. 基于HIRFL-CSR的原子核质量测量实验进展. 科学通报, 2021, 66: 3517-3526

Wang M, Zhang Y H, Jiao H Y. The progress of nuclear mass measurement experiments based on HIRFL-CSR (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3517-3526, doi: 10.1360/TB-2020-1694

的质量,放射性核素的质量测量完全依赖于其衰变能或参与核反应的反应能测量等间接方法.放射性原子核质量的直接测量必须基于放射性核束装置开展,相关工作起始于20世纪70年代.放射性产物由欧洲核子中心(European Organization for Nuclear Research, CERN)的高能质子束诱发放裂反应产生,法国Orsay研究组安装了质谱仪,直接测量了一些丰中子轻核的质量^[14].这类传统的质谱仪测量离子在磁场中的偏转,需要对每一种核素进行针对性设置,测量效率和精度都比较差,逐渐失去竞争优势而被淘汰.目前,基于CERN的在线同位素分离器(isotope mass separator on-line facility, ISOLDE)质谱仪有离子阱ISOLTRAP^[15]和多次反射飞行时间谱仪(multi-reflection time-of-flight, MR-TOF)^[16],这两类质谱仪也是基于低能放射性束的主流质量测量装置.

测量离子在某段距离的飞行时间,结合其能量或动量信息,就可以得到离子的质量电荷比,从而得到质量,这是飞行时间(time-of-flight, TOF)测量方法的基本原理.与传统质谱仪相比,飞行时间方法可同时测量多个原子核的质量,精度和效率都比较高,因此被广泛用于短寿命原子核质量测量中.这方面的先驱是美国Los Alamos国家实验室的等时性飞行时间谱仪(time-of-flight isochronous spectrometer, TOFI)^[17,18].TOFI的束流光学经过特别设计,使较快离子运行在较长的轨道上,较慢离子运行在较短的轨道上,不同速度的目标核飞行时间相似,从而达到其名称所示的“等时性”效果.

基于弹核碎裂(projectile fragmentation, PF)型的放射性核束装置从20世纪80年代起得到快速发展,在发现新核素并研究其性质方面发挥了重要作用.TO F方法可以自然地应用到PF型装置上,并可通过测量离子在束流线散焦面上的位置得到磁刚度信息,二者结合即为磁刚度-飞行时间方法,这方面工作最早在法国大加速器实验室(Grand Accélérateur National d'Ions Lourds, GANIL)的SPEG(spectrometer for GANIL)束流线上得到应用^[19,20],目前在美国超导加速器国家实验室(National Superconducting Cyclotron Laboratory, NSCL)的A1900和日本理化学研究所的BigRIPS(superconducting radioactive isotope beam separator)上有重要产出^[21~23].

基于束流线的TOF方法受限于束流线的长度,离子的飞行时间短,质量分辨能力仅有数千,测量精度较差.例如,TOFI束流线仅有14 m,典型飞行时间TOF

约为600 ns,而TOF测量误差约0.3 ns,包括飞行时间探测器的时间分辨0.1~0.2 ns和非均匀磁场带来的误差0.1~0.2 ns等.这样,TOFI的质量分辨能力仅有~2000^[17,18].

如果能够延长离子的飞行距离,则可提高分辨能力和测量精度,但束流线不能无限延长,可行的解决方案是让离子多次循环经过束流线,这就是重离子储存环质量谱仪的基本原理.德国重离子研究中心GSI首先开展相关研究,在实验储存环(experimental storage ring, ESR)上发展出了等时性谱仪(isochronous mass spectrometry, IMS)和肖特基谱仪(Schottky mass spectrometry, SMS)两种工作模式,取得了一些重要成果^[24,25].其中, SMS使用电子冷却,使环中离子的速度保持一致,而离子不同的质量电荷比 m/q 使它们有不同的磁刚度,从而运行在不同轨道,通过测量回旋周期即可得到它们的质量^[26].因为束流的冷却需要数秒时间, SMS仅能测量寿命在秒以上的原子核.而IMS不需要冷却束流,特别适合短寿命原子核的质量测量.在这种情况下,不同离子的磁刚度相似,运行轨道相近,但因 m/q 不同,速度有较大差异,回旋周期反映了 m/q 信息.因为储存环有一定的接收度,目标核有较大速度分散;为了避免速度分散对回旋周期的影响,将储存环设置为等时性模式,速度不同的目标核运行轨道不同,其长度的差异将速度差异抵消,循环周期不依赖于速度^[27].

2 CSR质量测量的技术发展

基于储存环的等时性质量谱仪是短寿命原子核质量测量的有效方法.“兰州重离子冷却储存环CSR”是国家“九五”大科学工程,在工程立项时,短寿命原子核的质量测量就被列为核心科学目标之一^[28].工程建设期间,基于实验环CSRc发展了等时性质谱术,并于2007年底开展测试实验.当时CSR还在调试期间,诸多功能如电子冷却等没有完全实现,无法借鉴GSI的方法,借助电子冷却来验证储存环的工作点,优化储存环的设置.通过精心设计,我们确定了一个巧妙的实验方案,利用³⁶Ar作为主束,选取打靶后产生 A/Z 同为2的碎裂产物作为目标原子核.这样主束和次级束有相同的 A/Z 值,就可以利用强流的主束验证储存环的等时性设置.在实验中,我们清楚地鉴别出了³²S、³⁰P等 $A/Z=2$ 系列的多个核素,并提取出它们的质量,得到的结果与文献值完全吻合.质量测量的相对精度达到了 10^{-6} ,证明了CSRc在测量短寿命放射性核素方面的能力^[29].这个实

验是CSR大科学工程验收过程中的第一个物理实验,为工程的顺利验收作出了贡献。兰州重离子加速器国家实验室成为继德国重离子研究中心GSI之后国际上第二家具备这种能力的实验室。

质量测量实验过程中,目标原子核由弹核碎裂反应产生,注入等时性设置的实验环CSRe中测量其回旋周期,从中提取目标核的质量。实验中,主束在同步加速器CSRm(main cooler storage ring)中加速到所需能量,在~300 ns的时间内将主束离子全部引出,轰击次级束流线RIBLL2(second radioactive ion beam line in Lanzhou)入口处的Be靶发生碎裂反应,产物由RIBLL2选择传输,注入到CSRe中储存起来。CSRe中安装飞行时间探测器,离子经过时可能会产生信号,通过分析这些周期性信号就可以提取离子的回旋周期。利用质量已知的参考核,建立 m/q 和回旋周期的刻度方程,一般用三阶多项式拟合。把目标核的回旋周期代入刻度方程,即可得到目标核的质量。因为离子经过探测器有能量损失,离子在环中储存时间一般小于1 ms,之后其动量会偏出储存环的接收度而损失到管壁上。实验中,每次注入的测量时间为200~400 μ s,对应离子在环中转了300~600圈。CSRe每25 s注入一次,完成一次测量。

从首次CSRe质量测量实验至今,我们不断改进测量技术,首创了一系列新方法和新技术用于实验中,提高了实验水平和测量精度。在实验硬件方面,我们精心改进TOF探测器各部分的时间响应,极大地提高了探测器的时间性能,前后发展了三代TOF探测器,其时间分辨分别达到 $(1\sigma)82$ ps^[30]、50 ps^[31]和19 ps^[32]。其中,最新版是国际上同类探测器中性能最好的。为了解决初始注入CSRe离子过多而影响探测器的性能问题,设计了脉冲式高压电源提供工作电压,极大地改善了探测器在高计数率下的性能^[33]。

在数据处理方面,主要表现为对磁场晃动影响的修正。实验中,CSRe的磁场不可能绝对稳定,相应地,对不同注入,同一种离子的回旋周期会发生变化,对高精度测量有明显影响,必须进行修正。在早期的工作中,我们发展了一种新的数据处理方法,利用原子核间的相对回旋周期代替绝对数值,很大程度上修正了磁场强度变化带来的影响^[34]。但是,该方法需要某些离子作为参考,如果一次注入时没有产生相应参考核,则这次注入的数据无法使用,相应的实验数据利用率仅有~70%。我们最近发展了基于平均轨道进行逐次修正的方法,不需要特定的离子作为参考核,同时考虑了不同

离子对磁场晃动响应的差别,收到很好的效果^[35]。

储存环的精准设置对高精度测量非常重要。我们发展了基于GPU(graphics processing unit)并行计算技术的在线数据分析系统,极大地提高了数据分析速度,可实时监测储存环状态^[36]。通过深入分析离子回旋周期随时间的变化,提出了测量质谱仪工作点 γ 的新方法^[37]。研究了磁铁参数对实验环设置的影响,针对目标核进行了精准设置^[38]。为了消除工作点在磁铁边缘的畸变对测量的影响,使用储存环内狭缝的新技术限制离子的动量分散,提高了测量精度^[39]。

使用传统的单TOF等时性方法,环内储存的离子只有很少一部分满足等时性条件,测量精度和效率较低。离子的动量分散会影响质量测量的精度,甚至可能带来测量的系统误差。额外测量离子的速度会消除其影响,这可以通过在储存环直线段安装两个TOF探测器来实现^[40]。基于储存环的双TOF质谱术是一个全新的概念,国际上没有可供借鉴的经验。我们建立了基于CSRe的模拟平台^[41],针对模拟数据详细讨论了双TOF谱仪数据处理方法^[42]。我们开展了一系列测试实验,逐步解决遇到的各种问题^[43,44]。在最近的双TOF实验中,发现双TOF谱仪对放射性核素的接收度与单TOF谱仪相当,表明新谱仪已经可以完全替代传统谱仪。未来的质量测量实验都将转用双TOF质量谱仪进行,可极大提高高精度质量测量效率,拓展可研究核区。

经过不断发展,CSR-IMS实验水平持续提高。图1显示了典型测量结果。我们早期测量精度为 $\sim 10^{-6}$,与德国重离子研究中心GSI同类技术水平相当。目前的典型精度为 $\sim 10^{-7}$,最高精度达到 8×10^{-8} ,代表着国际上同类方法的最好水平。测量精度的提高使我们可以研究更加精细的物理问题,如首次将储存环质量数据用于弱相互作用的研究等^[45]。

3 CSR质量测量近期结果

从2009年至今,我们开展了10余次等时性质量测量实验,利用高能弹核 ^{36}Ar 、 ^{58}Ni 、 ^{78}Kr 、 ^{86}Kr 和 ^{112}Sn 碎裂反应产生了远离稳定线短寿命原子核,利用CSR-IMS进行了质量测量,发表了 $^{44-47}\text{Cr}$ 、 $^{40,41,43,54,56}\text{Ti}$ ^[45-48]、 $^{48-51}\text{Fe}$ ^[45-47,49]、 $^{52-54}\text{Ni}$ ^[45,49,50]、 $^{46,48,49}\text{Mn}$ ^[46,47]、 $^{50-52}\text{Co}$ ^[46,47,50,51]、 $^{55,56}\text{Cu}$ 、 $^{44,45}\text{V}$ ^[47]、 ^{94}Ru ^[52]、 ^{27}P 、 ^{29}S ^[53]、 $^{52-54}\text{Sc}$ ^[54,55]、 ^{79}Y 、 $^{81,82}\text{Zr}$ 、 $^{83,84}\text{Nb}$ ^[56]、 ^{101}In ^[57]、 ^{61}Ga 、 ^{63}Ge 、 ^{65}As 、 ^{67}Se 、 ^{71}Kr ^[58]等原子核的质量数据

图1 中国科学院近代物理研究所CSR质量测量典型结果(彩色点)和德国重离子研究中心GSI同类技术结果(黑色点)的比较。对两家实验室都测量过的原子核,插图给出了结果的直接比较。可以看出,经过不断发展,CSR质量测量精度有了明显提高

Figure 1 Comparison of the typical IMS results from the Institute of Modern Physics (IMP), Chinese Academy of Sciences (colored points) and from the GSI (black squares). For the nuclei measured by both laboratories, the inset shows a direct comparison of the results. It can be seen that with continuous development, the accuracy of CSR mass measurement has been significantly improved

(图2), 相对精度达到 10^{-6} ~ 10^{-8} , 在缺中子核区走到了国际最前沿。利用测得的高精度质量数据, 研究了核物理和核天体方面的前沿科学问题。早期的结果已在综述文章里进行了介绍^[59-61], 下面介绍近期的一些进展。

3.1 拓展测量核区

针对国际研究现状和CSR束流条件, 我们早期的质量工作集中于质量数40~70的缺中子原子核, 该核区最近的工作是首次测量了 ^{44}Cr 、 ^{46}Mn 、 ^{48}Fe 、 ^{50}Co 、 ^{52}Ni 等5个极缺中子核的质量, 研究了同位旋多重态质量公式^[46]。在此基础上, 我们向更重核区和丰中子核区进行开拓。这部分工作以下面两个例子做介绍: 测量更重的缺中子核素质量, 确定X-射线暴中的核过程路径; 测量丰中子核素质量, 研究原子核壳结构的演化。

3.1.1 X-射线暴中的核过程路径

I型X-射线暴是银河系最常见的热核爆炸事件, 驱动这一天体现象的核过程是快质子俘获过程(rapid proton capture process, rp-process), 此过程的剧烈程度和反应路径走向决定了X-射线暴灰烬中的元素丰度、光变曲线的形状和持续时间等。理论研究发现, 影响rp-过程剧烈程度的重要瓶颈是“等待点”和核反应“循环”。

由于缺乏关键核素的高精度质量数据, 此类“瓶颈”存在与否以及在多大程度上影响rp-过程的剧烈程度和走向存在很大争议和不确定性。2011和2013年, 我们分别发表了 ^{65}As 、 ^{45}Cr 等关键核素的质量数据, 研究了rp-过程路径上 ^{64}Ge 等待点^[58]和Ca-Sc循环问题^[57], 取得了重要国际影响。

在前期工作基础上, 我们将研究延伸到更重核区, 首次精确测定了 ^{82}Zr 和 ^{84}Nb 的原子核质量, 大幅提高了 ^{79}Y 、 ^{81}Zr 和 ^{83}Nb 的质量精度, 其中 ^{82}Zr 的相对质量精度达到 1.3×10^{-7} 。基于新的质量数据, 重新计算了相关核子分离能, 结果否定了Mo、Tc丰质子区同位素低 α 分离能岛的存在。为了定量研究这些新测核素质量对rp-过程的影响, 利用I型X-射线暴模型, 重新计算了rp-过程核反应路径的走向, 得到了Zr-Nb循环分支比的比例。在温度低于1.9 GK的情况下, 否定了Zr-Nb循环对rp-过程具有较大贡献的可能性, 澄清了由于缺乏关键核素质量数据而困扰核天体物理学界的争论, 消除了rp-过程核反应路径和X射线暴光变曲线的不确定性。此外, 还研究了新质量数据对中微子-质子(vp)核合成过程的影响, 计算了vp-过程产生p核(宇宙中无法通过中子俘获过程——r过程或s过程产生的核素)的丰度, 部分解释了vp-过程理论计算中 ^{84}Sr 产额过高的问题^[51]。

3.1.2 丰中子核素质量的测量和 $N=32$ 中子新幻数

原子核的壳模型是描述原子核结构的基本模型, 原子核的壳结构在远离稳定线核区的演化是核物理研究的重要前沿。针对丰中子轻核区的壳演化, 测量了 $^{52-54}\text{Sc}$ 、 ^{56}Ti 等丰中子核素的质量, 把CSR-IMS研究核区从缺中子核区开拓至丰中子核区。初步分析结果显示, $N=32$ 中子新幻数在Sc同位素中依然存在^[54]。当时的数据处理手段还比较粗糙, 实验结果误差较大。通过加深理解IMS, 我们不断改进数据处理方法, 重新分析了实验数据, 质量精度普遍提高了~30%。新的实验数据发现, $N=32$ 在Sc同位素中的表现最为明显, 而Sc同位素处于该壳演化的过渡区域^[47]。

3.2 原子核同核异能态的研究

一些原子核中存在长寿命的激发态, 被称为同核异能态(isomer)。这些同核异能态通常蕴含着丰富的核结构信息, 是核物理研究的重要前沿课题。实验上一般用衰变谱学进行研究。高精度的质谱技术灵敏度高, 可以直接得到同核异能态的激发能, 成为发现并测量同核异能态的一个重要手段。CSR-IMS的质量分辨能力

图2 中国科学院近代物理研究所CSR质量测量结果核素图

Figure 2 The chart of nuclides whose masses have been measured at CSR in the Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences

处于国际同类技术最好水平, 开辟了基于CSR-IMS研究同核异能态的新方向, 下面以全裸离子衰变、同位旋对称性检测、第二类壳演化为例做介绍。

3.2.1 ^{52}Co 基态和isomer的质量及同位旋对称性

技术上的发展使我们能够清楚分辨 ^{52}Co 及其同核异能态, 首次测量了它们的质量, 精度达到 2×10^{-7} 。利用高精度质量结果, 结合已有其他数据, 重新构建了 ^{52}Ni 的 β 衰变纲图, 重新指认了 ^{52}Co 中 $T=2$ 的同位旋相似态。结果发现, 对 $A=52$ 、 $T=2$ 的同位旋多重态, 新得到的质量符合基于同位旋对称性假设建立起的多重态质量公式IMME(isobaric mass multiplet equation), 澄清了原有结果的错误。结合壳模型计算, 发现 ^{52}Co 的 $T=2$ 同位旋相似态中同位旋混合程度极低, 因此主要通过 γ 跃迁退激, 而通过质子发射到 ^{51}Fe 基态这一衰变道几乎可以忽略。该工作为研究该核区原子核的同位旋对称性提供了重要数据, 并指出了通过 β 缓发质子谱来指认同位旋相似态这一传统方法的局限性^[53]。

3.2.2 ^{94}Ru 的同核异能态在全裸离子状态下的衰变
一般实验中, 原子核寿命测量是在中性原子状态

下进行的, 研究外部环境对原子核衰变性质的影响可以促进人们更加深入地理解衰变现象, 对核天体物理研究也有重要意义。我们发现, 相比其他质量测量技术, IMS中飞行时间的测量精度随测量时间的增长最为迅速, 特别适合短寿命离子的测量。充分利用这个优势, 通过监测 ^{94}Ru 的同核异能态在全裸离子状态下回旋周期的变化, 直接观测到了 $^{94\text{m}}\text{Ru}^{44+}$ 的衰变。测量得到其半衰期为 $102(17) \mu\text{s}$, 与在中性原子状态下的半衰期有很大不同。这个工作开创了测量寿命在 $10 \mu\text{s}$ 至毫秒量级全裸离子衰变的新方法, 同时也创造了直接质量测量核态寿命最短的世界纪录^[52]。

3.2.3 ^{101}In 中同核异能态的发现及第二类壳演化

原子核的壳演化研究是核物理的重要前沿课题。此前的研究大多集中于第一类壳演化, 即原子核壳结构随着质子数、中子数变化而演化。近年来, 原子核理论学家提出了第二类壳演化: 在同一个原子核的不同能量状态下, 核子占据的组态发生变化, 从而导致原子核壳层结构的变化。目前, 实验上发现的第二类壳演化的事例很少, 且都存在于丰中子的偶偶核内。

In的奇 A 同位素基态和同核异能态都是单质子空穴态, 非常适合用来研究该质子空穴位置对核能级的影响. In同位素拥有49个质子, 比幻数50少一个质子, 基态的 $1g_{7/2}$ 质子轨道存在一个空穴, 奇 A (质量数)的In同位素基态的自旋宇称为 $9/2^+$. 当质子从 $2p_{1/2}$ 轨道激发到 $1g_{7/2}$ 轨道时, 产生的 $1/2^-$ 激发态退激到基态的 γ 跃迁概率很小, 形成同核异能态. 奇 A 的缺中子In同位素中, $1/2^-$ 的激发能反映出重要的核结构信息, 国际上多个实验室开展了相关研究, 通过衰变谱学的方法发现了所有 $A>101$ 缺中子In同位素中的 $1/2^-$ 同核异能态, 但数次尝试在 ^{101}In 中寻找该态, 都没有成功.

我们开展了 ^{112}Sn 碎裂产物的等时性质量测量实验, 在回旋周期谱中 ^{101}In 基态峰旁边观测到7个事例, 经分析认为是所寻的同核异能态. 这是首次在 ^{101}In 中发现同核异能态, ^{101}In 也因此成为最靠近质子滴线的相应核态已知的In同位素. 结合已有实验数据, 发现In的奇 A 同位素中同核异能态的激发能基本不变. 理论计算表明, 形成这一现象的原因是, 中子的 $1g_{7/2}$ 和 $2d_{5/2}$ 轨道非常接近, 导致非常强的中子组态混合. 当 ^{101}In 同位素从基态激发到同核异能态时, 质子、中子相互作用使基态和同核异能态中的中子 $g_{7/2}$ 和 $d_{5/2}$ 轨道发生了反转, 在同一个原子核中发生了组态依赖的壳演化, 即第二类壳演化(图3). 此项研究是首次在奇 Z 核中讨论第二类壳演化现象^[48].

4 研究展望

目前CSR质量测量工作主要受限于目标核素的产生, 这迫切需要HIRFL-CSR装置提供更高流强以及更重的初级束流. 2019年12月, 中国科学院近代物理研究所自行设计研制的连续波高电荷态强流重离子直线加速器SSC-Linac(separate sector cyclotron linac)与分离扇回旋加速器(SSC)联合调试, 首次成功引出重离子束流, 为CSRm提供高能Pb、U等重离子束流奠定了基础, 相应的 $Z<50$ 离子束流的流强会有较大提升. 丰中子重

图3 ^{101}In 中基态和 $1/2^-$ 同核异能态组态示意图及对中子轨道影响
Figure 3 The configurations of the ground state and the $1/2^-$ isomeric state of ^{101}In and the influence on neutron orbits

核区有大量原子核的质量未知, 它们对研究快中子俘获天体核合成过程研究有着重要作用, 迫切需要实验测量. 我们考虑利用Pb、U等重核作为初级束流, 利用IMS测量一些丰中子重核的质量. CSR质量测量实验中, 在目标核产额尽可能高的前提下, 需要每次注入都有多个离子同时储存到实验CSRe中, 才能针对逐次注入修正磁场晃动的影响, 得到高精度测量结果. 但在丰中子核区, 当目标核产生截面非常低时, 每次注入储存到环中的离子数目太少. 为了解决这个问题, 我们建议了一种混合靶厚的方法, 在不明显改变目标核产额的情况下, 显著增加单次注入储存的离子数, 可满足实验要求^[62]. 基于新型注入器, 将进一步开拓研究核区, 推进短寿命原子核质量测量工作.

强流重离子加速器装置(High Intensity heavy-ion Accelerator Facility, HIAF)为《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012—2030年)》“十二五”重点内容之一, 目前正在建设, 预计将于2025年完工^[63–65]. HIAF为国际领先的下一代强流重离子加速器装置, 具备产生极端远离稳定线核素的能力^[66,67], 为精确测量远离稳定线短寿命原子核质量提供了优越的研究条件. 我们将基于CSR质量测量积累的经验, 发展先进的探测装置, 充分发挥HIAF的性能, 引领储存环质谱术的发展.

参考文献

- 1 Blaum K. High-accuracy mass spectrometry with stored ions. *Phys Rep*, 2005, 425: 1–78
- 2 Lunney D, Pearson J M, Thibault C. Recent trends in the determination of nuclear masses. *Rev Mod Phys*, 2003, 75: 1021–1082
- 3 Wang M, Zhang Y H, Zhou X H. Nuclear mass measurements (in Chinese). *Sci Sin Phys Mech Astron*, 2020, 50: 54–64 [王猛, 张玉虎, 周小红. 原子核质量的测量. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2020, 50: 54–64]
- 4 Wang M. Nuclear mass measurement and evaluation (in Chinese). *Nucl Phys Rev*, 2017, 34: 380–386 [王猛. 原子核质量的测量和评估. *原子核物理评论*, 2017, 34: 380–386]

- 5 Wang M. Nuclear mass measurement and evaluation relevant to astrophysics. In: Proceedings of the 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC2016). J Phys Soc Japan, 2017. 011001
- 6 Dilling J, Blaum K, Brodeur M, et al. Penning-trap mass measurements in atomic and nuclear physics. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 2018, 68: 45–74
- 7 Huang W J, Audi G, Wang M, et al. The AME2016 atomic mass evaluation (I). Evaluation of input data; and adjustment procedures. *Chin Phys C*, 2017, 41: 030002
- 8 Wang M, Audi G, Kondev F G, et al. The AME2016 atomic mass evaluation (II). Tables, graphs and references. *Chin Phys C*, 2017, 41: 030003
- 9 Thoennessen M. The discovery of isotopes: A complete compilation. Cham: Springer, 2016
- 10 Xia X W, Lim Y, Zhao P W, et al. The limits of the nuclear landscape explored by the relativistic continuum Hartree–Bogoliubov theory. *Atom Data Nucl Data Tables*, 2018, 121–122: 1–215
- 11 Erler J, Birge N, Kortelainen M, et al. The limits of the nuclear landscape. *Nature*, 2012, 486: 509–512
- 12 Mumpower M R, Surman R, McLaughlin G C, et al. The impact of individual nuclear properties on r-process nucleosynthesis. *Prog Part Nucl Phys*, 2016, 86: 86–126
- 13 Schatz H. Nuclear masses in astrophysics. *Int J Mass Spectrom*, 2013, 349–350: 181–186
- 14 Klapisch R, Prieels R, Thibault C, et al. On-line mass-spectrometric measurement of the masses of neutron-rich sodium isotopes. *Phys Rev Lett*, 1973, 31: 118–121
- 15 Kreim S, Atanasov D, Beck D, et al. Recent exploits of the ISOLTRAP mass spectrometer. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2013, 317: 492–500
- 16 Wolf R N, Beck D, Blaum K, et al. On-line separation of short-lived nuclei by a multi-reflection time-of-flight device. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Detect Assoc Equip*, 2012, 686: 82–90
- 17 Wouters J M, Vieira D J, Wollnik H, et al. Optical design of the TOFI (time-of-flight isochronous) spectrometer for mass measurements of exotic nuclei. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Detect Assoc Equip*, 1985, 240: 77–90
- 18 Vieira D J, Wouters J M, Vaziri K, et al. Direct mass measurements of neutron-rich light nuclei near $N=20$. *Phys Rev Lett*, 1986, 57: 3253–3256
- 19 Gillibert A, Mittag W, Bianchi L, et al. New mass measurements far from stability. *Phys Lett B*, 1987, 192: 39–43
- 20 Sarazin F, Savajols H, Mittag W, et al. Shape coexistence and the $N = 28$ shell closure far from stability. *Hyperfine Interact*, 2001, 132: 147–152
- 21 Meisel Z, George S, Ahn S, et al. Nuclear mass measurements map the structure of atomic nuclei and accreting neutron stars. *Phys Rev C*, 2020, 101: 052801
- 22 Michimasa S, Kobayashi M, Kiyokawa Y, et al. Magic nature of neutrons in ^{54}Ca : First mass measurements of $^{55-57}\text{Ca}$. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 022506
- 23 Michimasa S, Kobayashi M, Kiyokawa Y, et al. Mapping of a new deformation region around ^{62}Ti . *Phys Rev Lett*, 2020, 125: 122501
- 24 Steck M, Litvinov Y A. Heavy-ion storage rings and their use in precision experiments with highly charged ions. *Prog Part Nucl Phys*, 2020, 115: 103811
- 25 Franzke B, Geissel H, Münzenberg G. Mass and lifetime measurements of exotic nuclei in storage rings. *Mass Spectrom Rev*, 2008, 27: 428–469
- 26 Litvinov Y A, Geissel H, Radon T, et al. Mass measurement of cooled neutron-deficient bismuth projectile fragments with time-resolved Schottky mass spectrometry at the FRS-ESR facility. *Nucl Phys A*, 2005, 756: 3–38
- 27 Hausmann M, Attallah F, Beckert K, et al. First isochronous mass spectrometry at the experimental storage ring ESR. *Nucl Phys A*, 2000, 446: 569–580
- 28 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
- 29 Wang M, Xu H S, Xia J W, et al. First isochronous mass measurements at CSRe. *Int J Mod Phys E*, 2009, 18: 352–358
- 30 Tu X L, Wang M, Hu Z G, et al. Secondary electron time detector for mass measurements at CSRe. *Chin Phys C*, 2010, 34: 363–367
- 31 Mei B, Tu X, Wang M, et al. A high performance time-of-flight detector applied to isochronous mass measurement at CSRe. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Detect Assoc Equip*, 2010, 624: 109–113
- 32 Zhang W, Tu X L, Wang M, et al. Time-of-flight detectors with improved timing performance for isochronous mass measurements at the CSRe. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Detect Assoc Equip*, 2014, 756: 1–5
- 33 Zhang W, Tu X L, Wang M, et al. A timing detector with pulsed high-voltage power supply for mass measurements at CSRe. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Detect Assoc Equip*, 2014, 755: 38–43
- 34 Tu X L, Wang M, Litvinov Y A, et al. Precision isochronous mass measurements at the storage ring CSRe in Lanzhou. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Detect Assoc Equip*, 2011, 654: 213–218
- 35 Xing Y M, Zhang Y H, Wang M, et al. Particle identification and revolution time corrections for the isochronous mass spectrometry in storage rings. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Detect Assoc Equip*, 2019, 941: 162331
- 36 Chen R J, Wang M, Yan X L, et al. A parallelization scheme of the periodic signals tracking algorithm for isochronous mass spectrometry on GPUs.

- Comput Phys Commun, 2017, 221: 216–220
- 37 Chen R J, Yan X L, Ge W W, et al. A method to measure the transition energy γ_t of the isochronously tuned storage ring. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Detect Assoc Equip*, 2018, 898: 111–116
 - 38 Ge W W, Yuan Y J, Yang J C, et al. Experimental investigation of the transition energy γ_t in the isochronous mode of the HIRFL-CSR. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Detect Assoc Equip*, 2018, 908: 388–393
 - 39 Liu J H, Xu X, Zhang P, et al. Improving the resolving power of isochronous mass spectrometry by employing an in-ring mechanical slit. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2020, 463: 138–142
 - 40 Shuai P, Xu X, Zhang Y H, et al. An improvement of isochronous mass spectrometry: Velocity measurements using two time-of-flight detectors. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2016, 376: 311–315
 - 41 Chen R J, Yuan Y J, Wang M, et al. Simulations of the isochronous mass spectrometry at the HIRFL-CSR. *Phys Scr*, 2015, T166: 014044
 - 42 Xu X, Wang M, Shuai P, et al. A data analysis method for isochronous mass spectrometry using two time-of-flight detectors at CSRe. *Chin Phys C*, 2015, 39: 106201
 - 43 Xing Y M, Wang M, Zhang Y H, et al. First isochronous mass measurements with two time-of-flight detectors at CSRe. *Phys Scr*, 2015, T166: 014010
 - 44 Deng H Y, Wang M, Zhang Y H, et al. Progress of isochronous mass spectrometry at HIRFL-CSR (in Chinese). *Nucl Phys Rev*, 2020, 37: 301–308 [邓涵宇, 王猛, 张玉虎, 等. HIRFL-CSR上等时性质量测量进展. 原子核物理评论, 2020, 37: 301–308]
 - 45 Zhang P, Xu X, Shuai P, et al. High-precision Q EC values of superallowed $0^+ \rightarrow 0^+$ β -emitters ^{46}Cr , ^{50}Fe and ^{54}Ni . *Phys Lett B*, 2017, 767: 20–24
 - 46 Fu C Y, Zhang Y H, Wang M, et al. Mass measurements for the $T_Z = -2$ fp-shell nuclei ^{40}Ti , ^{44}Cr , ^{46}Mn , ^{48}Fe , ^{50}Co , and ^{52}Ni . *Phys Rev C*, 2020, 102: 054311
 - 47 Zhang Y H, Zhang P, Zhou X H, et al. Isochronous mass measurements of $T_Z = -1$ fp-shell nuclei from projectile fragmentation of ^{58}Ni . *Phys Rev C*, 2018, 98: 014319
 - 48 Yan X L, Xu H S, Litvinov Y A, et al. Mass measurement of ^{45}Cr and its impact on the Ca-Sc cycle in X-ray bursts. *Astrophys J*, 2013, 766: L8
 - 49 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
 - 50 Xu X, Zhang P, Shuai P, et al. Identification of the lowest $T = 2$, $J^\pi = 0^+$ isobaric analog state in ^{52}Co and its impact on the understanding of β -decay properties of ^{52}Ni . *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 182503
 - 51 Shuai P, Xu H S, Tu X L, et al. Charge and frequency resolved isochronous mass spectrometry and the mass of ^{51}Co . *Phys Lett B*, 2014, 735: 327–331
 - 52 Zeng Q, Wang M, Zhou X H, et al. Half-life measurement of short-lived $^{94\text{m}}_{44}\text{Ru}^{44+}$ using isochronous mass spectrometry. *Phys Rev C*, 2017, 96: 031303
 - 53 Fu C Y, Zhang Y H, Zhou X H, et al. Masses of the $T_Z = -3/2$ nuclei ^{27}P and ^{29}S . *Phys Rev C*, 2018, 98: 014315
 - 54 Xu X, Wang M, Zhang Y H, et al. Direct mass measurements of neutron-rich ^{86}Kr projectile fragments and the persistence of neutron magic number $N=32$ in Sc isotopes. *Chin Phys C*, 2015, 39: 104001
 - 55 Xu X, Wang M, Blaum K, et al. Masses of neutron-rich $^{52-54}\text{Sc}$ and $^{54,56}\text{Ti}$ nuclides: The $N=32$ subshell closure in scandium. *Phys Rev C* 2019, 99: 064303
 - 56 Xing Y M, Li K A, Zhang Y H, et al. Mass measurements of neutron-deficient Y, Zr, and Nb isotopes and their impact on rp and vp nucleosynthesis processes. *Phys Lett B*, 2018, 781: 358–363
 - 57 Xu X, Liu J H, Yuan C X, et al. Masses of ground and isomeric states of ^{101}In and configuration-dependent shell evolution in odd- A indium isotopes. *Phys Rev C*, 2019, 100: 051303
 - 58 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
 - 59 Xu H S, Zhang Y H, Litvinov Y A. Accurate mass measurements of exotic nuclei with the CSRe in Lanzhou. *Int J Mass Spectrom*, 2013, 349–350: 162–171
 - 60 Zhang Y H, Litvinov Y A, Uesaka T, et al. Storage ring mass spectrometry for nuclear structure and astrophysics research. *Phys Scr*, 2016, 91: 073002
 - 61 Sun M Z, Zhou X H, Wang M, et al. Precision mass measurements of short-lived nuclides at HIRFL-CSR in Lanzhou. *Front Phys*, 2018, 13: 132112
 - 62 Liu M Z, Wang M, Zhang Y H, et al. A proposal for mass measurements of heavy neutron-rich ions at HIRFL-CSR (in Chinese). *Nucl Phys Rev*, 2020, 37: 18–25 [刘明正, 王猛, 张玉虎, 等. 基于HIRFL-CSR测量丰中子重核质量的建议. 原子核物理评论, 2020, 37: 18–25]
 - 63 Yang J C, Zeng G, Xiao G Q, et al. High intensity heavy-ion accelerator facility-shouldering the new mission of exploring the unknown world (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 8–11 [杨建成, 曾钢, 肖国青, 等. 强流重离子加速器, 肩负探索未知世界新使命. 科学通报, 2020, 65: 8–11]

- 64 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
- 65 Zhao H W, Xu H S, Xiao G Q, et al. Huizhou accelerator complex facility and its future development (in Chinese). *Sci Sin Phys Mech Astron*, 2020, 50: 77–94 [赵红卫, 徐瑚珊, 肖国青, 等. 惠州加速器集群装置及其未来发展. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2020, 50: 77–94]
- 66 Zhou X H. Physics opportunities at the new facility HIAF. *Nucl Phys Rev*, 2018, 35: 339–349
- 67 Ye Y L, Yang X F, Liu Y, et al. Radioactive ion beam physics related to HIAF (in Chinese). *Sci Sin Phys Mech Astron*, 2020, 50: 25–34 [叶沿林, 杨晓菲, 刘洋, 等. 与HIAF装置相关的放射性核束物理研究. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2020, 50: 25–34]

Summary for “基于HIRFL-CSR的原子核质量测量实验进展”

The progress of nuclear mass measurement experiments based on HIRFL-CSR

Meng Wang^{1,2*}, Yuhu Zhang^{1,2} & Hongyang Jiao^{1,2}¹ Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730030, China;² School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China* Corresponding author, E-mail: wangm@impcas.ac.cn

As one of the most fundamental properties of nuclei, nuclear mass data are widely used in many research fields such as nuclear structure and nuclear astrophysics. At present, mass measurement of short-lived nuclei is an important research topic in nuclear physics. However, due to their small production rates and short lifetimes, it is technically challenging to measure their masses accurately. Isochronous mass spectrometry (IMS) based on the storage ring is an effective technique for measuring masses of short-lived nuclei. We established the IMS at the experimental cooler-storage ring (CSRe) in Lanzhou and developed the techniques continuously, achieving the highest precision of IMS measurement in the world.

Since 2009, 10 isochronous mass measurement experiments have been conducted and high-precision mass data were obtained. In the earlier researches, we focused on mass measurements for medium-mass neutron-deficient nuclei. Recently, we have extended the research to heavier and neutron-rich regions. The masses of ^{82}Zr and ^{84}Nb were measured for the first time, and the masses of ^{79}Y , ^{81}Zr , and ^{83}Nb were re-determined with a higher precision. The results do not support the existence of the hypothetical island of pronounced low α separation energies for neutron-deficient Mo and Tc isotopes, making the formation of Zr-Nb cycle in the rp-process unlikely. The results also partly remove the overproduction of the p-nucleus ^{84}Sr in the vp-process simulations. The masses of the neutron-rich $^{52-54}\text{Sc}$ and $^{54,56}\text{Ti}$ nuclei were measured. The empirical shell gap extracted from the experimental results shows a significant subshell closure at $N=32$ in scandium. Combined with the theoretical calculations, it turns out that the Sc isotopes are located in the transition region of the shell evolution.

Exploiting the high mass resolution of the IMS at CSRe, we also studied the nuclear isomeric states. Masses of $^{52g,52m}\text{Co}$ were measured for the first time with an accuracy of ~ 10 keV. Combining the results with the previous β - γ measurements of ^{52}Ni , the $T=2, J^\pi=0^+$ isobaric analog state (IAS) in ^{52}Co was newly assigned, questioning the conventional identification of IASs from the β -delayed proton emissions. Using the new results, the isobaric multiplet mass equation is restored for the masses of the $T=2$ multiplet. Decay of the 8^+ isomer in fully stripped ions $^{94}\text{Ru}^{44+}$ was directly observed by monitoring the revolution times during its circulation in the CSRe. The isomeric half-life was found to be longer by about 44% than that in the neutral atoms. A new isomer in ^{101}In was discovered and its excitation energy was measured. Using the experimental results, the configuration-dependent shell evolution, type-II shell evolution, in odd-A nuclei is discussed for the first time.

High intensity heavy-ion accelerator facility (HIAF) is a large-scale research facility for nuclear science. It is under construction and is expected to be delivered in 2025. HIAF, as the world-leading next generation heavy ion accelerator device, has the ability to generate nuclides extremely far away from the stable line and provide superior research conditions for accurately measuring masses of short-lived nuclei far away from the stable line. Based on the accumulated experience of CSR mass measurement, we will develop advanced detection devices, fully exploit the performance of HIAF, and lead the development of storage ring mass spectrometry.

nuclear mass, short-lived nuclei, isochronous mass spectrometry, shell evolution, isomer statedoi: [10.1360/TB-2020-1694](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1694)