与HIAF装置相关的放射性核束物理研究

叶沿林*, 杨晓菲, 刘洋, 韩家兴

北京大学物理学院, 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871

*联系人, E-mail: yeyl@pku.edu.cn

收稿日期: 2020-07-24; 接受日期: 2020-08-27; 网络出版日期: 2020-10-13

国家重点基础研究发展计划(编号: 2018YFA0404403)和国家自然科学基金(编号: 11535004, 11875074, 11875073)资助项目

摘要 本文详述了放射性核束(Radioactive Ion Beam, RIB)物理所针对的科学问题、历史发展和未来机遇。自然界存在的稳定核素只有大约300个, 在实验室或天体极高温环境中产生的不稳定核素可以达到上万个。这些放射性核素的产生和研究是对广阔未知核素版图的开拓, 需要逐步发展新的装置手段和理论模型。RIB物理发展初期, 已经获得一系列对原子核新的认知, 如晕和集团等奇特结构、新幻数和壳演化、软巨共振等新的集体运动模式等。不稳定核的研究又与核天体过程以及攀登“超重元素稳定岛”密切相关, 涉及当今国际聚焦的重大前沿交叉科学问题。不稳定核区的测量, 也能够提供核燃料和核废料生成及演变中大量的核数据, 具有重要的应用和战略价值。强流重离子加速器装置(High Intensity heavy-ion Accelerator Facility, HIAF)具有强流的优势, 结合产生放射性束的先进技术与高水平的物理实验探测设备, 有可能在一些重要的方面走到国际引领位置, 同时显著提升我国核物理研究的整体水平。

关键词 放射性核束物理, 核素版图, 强流重离子加速器

PACS: 21.60.-n, 21.30.-x, 23.20.-g, 24.10.-i

1 放射性核束物理的重大科学问题及特征

原子核是物质结构的一个微观层次, 是典型的量子复杂多体系统, 体现着自然界在各个结构层次上独特的复杂性与简单性交替的美妙旋律^[1]。它的复杂性, 主要源于核力作为一种唯象短程作用在不同力程上理论描写的困难, 多体问题所涉及的巨大态空间的处理, 以及在膨胀(弱束缚)或压缩(重离子碰撞)时可能出现的新的结构自由度。它的简单性, 又源于在互补互斥规则下某些方面特征的突出表现

与另一些特征的自我屏蔽, 从而使得选择性观测和描写复杂对象成为必然且可能, 各种理论模型也就大有用武之地^[2]。

自1896年开始的上百年期间, 人类对原子核的认识, 主要基于对几百个稳定核素的研究。这些核基本上都有比较大的结合能(每核子5–8 MeV), 属于深束缚原子核。从科学研究的角度, 对一个客观对象的观察了解, 站在不同角度会得到不同的图像, 以此形成不同的理论模型; 它们相互补充, 从而达到比较完整的认识^[3]。对稳定原子核的观察分析, 主要形

引用格式: 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: 112003

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: 112003, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0282](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0282)

成了两种基本图像^[4,5]. 一是液滴模型的图像, 主要从核外角度观察, 描述原子核表面形态以及核子加入或分离时发生的现象, 体现为核子拥挤状态下结合能与体积的饱和. 另一个是独立粒子的图像, 主要从原子核内部角度观察, 发现核子基本可以被看作是在平均场范围内近似无碰撞的独立粒子运动(在壳模型中再加上一些剩余相互作用). 这两种图像看似相互矛盾, 而实际是从不同角度给出了互补的认识^[3].

从1985年在美国劳伦斯伯克利国家实验室运用放射性束(Radioactive Ion Beam, RIB)开展实验起, 人类可研究的核素数目迅速扩大, 目前实验室产生的核素已达3100多个, 而理论预言总共可能超过10000个. 远离稳定线原子核的结合能逐渐减小, 直到最后一个核子结合能为零的边界(滴线). 在滴线区, 原子核成为弱束缚的开放体系(Open System), 上述描述稳定核的基本图像可以发生根本改变. 比如从外部看, 核的表面可以大大扩张, 形成大范围的低密度区(晕结构), 价核子很容易分离, 这显著脱离了液滴的饱和图像. 从内部看, 多核子在张量力、三体力等有效相互作用下的关联效应突出, 可以大大改变量子态的组合和演化, 甚至形成多中心分子态, 改变了结构自由度. 这种基本物理图像的改变, 已经在轻核区显现, 实验观测正在逐步向中重核区扩展,

由此构成了滴线区新物理, 如图 1 所示.

不稳定核的研究, 又与核天体过程以及攀登“超重元素稳定岛”密切相关, 涉及当今国际聚焦的重大前沿交叉科学问题(图 1). 不稳定核区的测量, 也提供核燃料和核废料生成及演变中大量的核数据, 具有重要的应用和战略价值. 因此, 在实验室利用放射性核(不稳定原子核)次级束流开展的物理研究(RIB物理), 已经成为当今国内外核物理研究的主要前沿领域之一, 世界各科技强国均重点部署.

由于是对新的未知领域的开拓, RIB物理具有明显的探索创新的特征^[6]. RIB物理在初期研究中已有的重大发现, 包括晕和集团等新的结构自由度在滴线区的明显加强、幻数和壳层在不稳定核区发生系统演变、软巨共振等新的集体运动模式的出现、核反应中的多步过程和强耦合效应、三体力和张量力等在不稳定核有效相互作用中的突出作用等. 这些重大进展, 基本上都基于实验室的偶然发现和随后新的理论诠释. 受实验装置条件的限制, 过去的研究还大体集中在丰质子核和比较轻的丰中子核的范围, 中子滴线只到电荷数 $Z = 10$ 左右. 目前的装置仍然难以企及大部分丰中子核区. 可以期待随着新一代RIB大科学装置的建设, RIB物理研究将向更重和更靠近滴线的核区扩展, 会发现更加丰富的科学宝藏.

图 1 不稳定原子核结构演化示意图

Figure 1 Schematic showing of the structure evolution for unstable nuclei.

2 放射性核束物理三十多年的创新发展

2.1 晕核的发现与不稳定核的奇特结构研究

RIB物理起源于1985年Tanihata等人^[7]在劳伦斯伯克利国家实验室偶然观察到 ^{11}Li 等丰中子核相互作用截面的反常增大, 以及随后Hansen等人^[8,9]基于创造性理论思维给出的晕结构解释. 这个解释基于弱束缚的性质, 采用简单的集团结构假定并与氦核的基态做比拟, 从而比较直观地给出了晕的图像, 并预言了软巨共振模式及其观测量, 也就是超大的库仑激发截面. 很快, ^{11}Li 中的软巨共振就被实验观测到^[10]. 结合实验发现的 ^{11}Li 的特别窄的核芯碎片动量分布^[11], 基本确认了 ^{11}Li 的晕结构, 由此开创了RIB物理研究的世界性热潮. 上述三种实验信号(反常增大的作用截面、超大的库仑激发截面, 以及特别窄的核芯碎片动量分布)也成为迄今判断晕结构的主要实验依据(当然还要结合低结合能与低轨道角动量等辅助分析). 实验上直接确定晕结构, 还需要实际观察到核作用半径与电荷分布半径的显著区别. 由于测量某些原子核电荷分布半径的特殊困难, ^{11}Li 的电荷分布半径直到2006年才由激光光谱实验确定为 $2.467(37)\text{ fm}$ ^[12], 而它的核物质半径为大约 $3.27(24)\text{ fm}$ ^[7], 实际尾部的中子低密度区扩展还要大很多(作用截面与 ^{208}Pb 相当). 由此最终奠定了丰中子弱束缚核的晕结构的观念^[9]. 到目前为止, 丰中子一侧比较确定的单中子晕核包括 ^{11}Be , ^{19}C , ^{31}Ne 等, 双中子晕核包括 ^6He , ^{11}Li , ^{14}Be , ^{19}B , ^{22}C 等^[13]. 丰质子一侧也有个别原子核具有晕核的性质, 如 ^8B , ^{17}Ne 等. 图2给出了目前认识到的具有晕核性质的核素.

晕的出现, 实际上反映了价核子的特殊关联以及集团结构自由度的出现, 这也是提出晕核概念的Hansen等人^[8]的核心思想. 历史上, 原子核的集团结构图像一直是理解原子核的许多奇特量子态的钥匙, 特别是包含 α 组分的集团结构^[15]. 在丰中子核区, 价中子的作用, 可以使得集团(分子)结构更加丰富, 这已经在轻核区得到证实^[16,17]. 近年来, 中国学者在这方面也做出了一系列重要贡献. 比如南京大学核理论组^[18]研究了核集团结构中的非局域性问题. 北京大学的研究组^[19]观察到丰中子 ^{12}Be 中

图2 具有晕结构特征的原子核. 图来源文献^[14], 已获得授权

Figure 2 Nuclide characterized by halo structures. Reproduced from ref. ^[14] with permission of IOP Publishing, Ltd.

10.3 MeV共振态的自旋为0且具有反常增大的单极跃迁强度, 确定其为分子转动带的带头. 中国科学院上海应用物理研究所的研究组^[20]用多体输运理论预言了通过偶极矩共振谱识别轻核中 α -集团结构的可能性. 最近, 北京大学的研究组^[21]在 ^{16}C 中发现了完整的线性链状分子转动带.

2.2 RIB敲出反应碎片纵向动量分布与在束 γ 测量

RIB物理发展迈上另一个重要台阶, 源于一项关键的技术突破: 消色差磁谱仪用于RIB次级束核芯碎片纵向动量分布的精确测量. RIB实验通常需要两步核反应过程, 第一步是RIB的产生和分离, 第二步是运用RIB做次级反应或衰变物理实验. 通常而言, 人们感兴趣的远离稳定线的RIB, 流强都较低, 束流能散度也比较大(如果用弹核碎裂-PF方法产生). 要开展比较精细的实验, 一方面需要改进产生RIB的技术(通常需要提高原始束流和靶的功率), 另一方面也需要革新利用RIB做物理测量的方法. 20世纪90年代初期, 受到测量RIB核芯碎片纵向动量分布的物理目标的驱动, 在密西根州立大学(MSU)的超导回旋加速器国家实验室(NSCL)实现了对RIB的束流分离段和物理产物测量段两种不同带电粒子做消色差匹配的磁谱仪技术, 从而使

得RIB束流的能量(动量)分散能够在磁谱仪最后的聚焦面上基本消除,而RIB在次级物理靶上破碎后核芯碎片的物理动量分布却能够在最后的聚焦面上展宽.这样消色差匹配的结果,首次实现了RIB条件下核芯碎片纵向动量分布的精确测量^[22].在那之前,只能给出碎片的横向动量分布,受到的质疑比较多(可以引起横向动量展宽的因素很多,不只是核芯原始的动量分布).实现对 ^{11}Li 核芯碎片 ^9Li 的纵向动量分布展宽的精确测量^[22],首先就是为 ^{11}Li 的晕结构提供了有说服力的支持(利用动量分布与空间分布的测不准关系).进一步,因为这个次级物理反应段的测量是在零度开展,且束流能量比较高,便于使用更厚的靶,使得实验可以在低流强下有效展开.在零度测得的碎片纵向动量展宽(等价于移去核子的纵向动量展宽),与移去核子的分离能相结合,可以用于定出移去核子的角动量.后续的实验装置又普遍增加了在次级物理靶周围做 γ -射线测量(在束 γ),以此定出移去核子的能态.在束 γ 与零度消色差谱仪的结合,构成探测不稳定核表面核子量子态(能量和角动量)的强有力谱学手段,在美国MSU-NSCL、日本理化所的RIBF、德国GSI、法国GANIL等均得到发展,在不稳定核量子态演化的研究中发挥了突出作用(见图3)^[23].特别是MSU-NSCL,基于1992年的创新技术,在21世纪初进一步建造了专用的物理探测磁谱仪S800,与升级后的RIB分离装置A1900做消色差匹配,形成鲜明的特色和优势,取得一系列重要成果^[24,25].实际上,在束 γ 谱学与零度消色差谱仪的结合,起到了过去稳定核研究中常规 γ 谱学和大角度范围转移反应测量的作用.但过去稳定核测量需要 10^9 pps(每秒粒子数)以上的流强,这对

于RIB次级束实验显然是很难实现的.采用现在的新方法,在零度测量,束流强度达到大约 10^2 pps即可.对于远离稳定线原子核的研究,提高大型装置的原始束流强度(靶功率)是必须的,但能够提高3-4个量级就已经很困难,需要增加大量的投资.而上述物理方法的革新,却能产生6-7个量级的效益,可见思想和方法的创新十分重要. MSU-NSCL在RIB物理研究中的创新思想和突出表现,为其后来在与其他实验室的竞争中胜出、获准建设新一代RIB大科学装置FRIB打下了很好的基础.

当然,敲出反应也有其局限性,比如敲出深束缚的核子时反应机制比较复杂,很难用常规的理论描写.束流里可能有同核异能素干扰,以及只能观察原子核基态的组态等^[26].对不稳定核基态和低激发态的奇特组态成分的研究,也常用转移反应的办法,它与敲出反应形成互补关系,往往综合利用这两种反应手段研究同样的目标核,结果可以相互验证和补充.典型的例子如 ^{12}Be 闯入态的研究^[27,28].

传统的低能核反应的多种手段,如直接核反应和熔合反应等,在不稳定核区也得到长足的发展,各种测量十分活跃^[29,30].这首先是研究核天体过程的需要,因为天体核反应主要是发生在低能和超低能区,并且通常是远离稳定线核的演变.低能核反应也是合成超重核素的必要手段,但需要在丰中子核区开展,才可能接近中质比较高的超重稳定岛.无论采用极端丰中子炮弹,或是采用重核区的多中子转移,均需要大量的丰中子区低能核反应研究.在涉及核天体和超重核的低能核反应工作中,我国学者也做出了重要贡献.如中国原子能科学研究院的研究组^[31]系统研究了奇特原子核光学势的色散关系.中

图3 在束 γ 测量与零度磁谱仪的结合. 图来源文献^[25], 已获得授权

Figure 3 Online γ spectroscopy together with the 0-degree spectrometer. Reproduced from ref. ^[25] with permission of IOP Publishing, Ltd.

中国科学院近代物理所的研究组^[32]合成了 ^{220}Np 并研究了 $N = 126$ 中子幻数在缺质子一侧的稳定性. 中国原子能科学研究院的研究组测量了关键的 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应并用以约束相关联的 S 因子^[33]. 核天体物理与超重核合成等, 在本专题中另外安排了文章, 此处不作重复.

2.3 不稳定核基本性质测量与新幻数和壳演化

2000年, 日本理化所的Ozawa等人^[34]通过系统分析在不同中质比(不同同位旋三分量 T_Z)情况下中子分离 S_n 能随中子数目的变化, 发现在稳定核附近($T_Z \approx 0$)的中子幻数8在丰中子核中逐渐消失, 而稳定核中的中子幻数20在非常丰中子的区域($T_Z \geq 3$)被移动到了中子数 $N = 16$ 的地方. 由此提出了丰中子核中“新幻数”的概念. 由于幻数是原子核结构理论的基石之一, 幻数的变化显然会引发对传统核理论的冲击, 因此“新幻数”的出现立刻引起广泛关注^[35]. S_n 的实验数据主要来源于不稳定核质量的测量, 由此显示了原子核基本性质测量在认识原子核内在结构方面具有重要的价值. 随后, 采用各种手段观测丰中子区壳演化和新幻数, 成为热点研究目标之一. 后续发现 $N = 28$ 的幻数在丰中子的原子核区域可能移动到了 $N = 34$ 的地方^[36]. 而在稍重的丰中子核区(^{78}Ni 附近), $N = 50$ 的幻数还得以保持, 但在其低激发态中就可以发生形变, 这是很奇特的性质^[37,38].

原子核的最基本性质之一是它的质量, 或者说结合能(与自由核子质量之和相比较的原子核质量亏损)^[4]. 结合能的来源是核子之间的相互作用. 当测量精度足够高时, 核素质量的变化就在很大程度上反映了原子核内各种相互作用的总效应. 一般地, 当测量精度达到 $\sim 10^{-6}$ – 10^{-7} 时, 核质量数据可用于研究核结构, 比如揭示一些奇特结构现象(如新幻数、壳演化等); 当精度达到 $\sim 10^{-7}$ – 10^{-8} 时, 核质量数据可用于研究核天体物理; 测量精度达到 $\sim 10^{-8}$ – 10^{-9} 时, 核质量数据可用于研究基本对称性^[14]. 目前精确测量原子核质量的主要手段是离子阱和冷却储存环. 前者测量精度更高(可达 10^{-7} – 10^{-9}), 但需要目标核具有比较长的寿命; 后

者精度稍低($\sim 10^{-6}$ – 10^{-7}), 但可达到更短寿命(更远离稳定线)的核区. 离子阱的设备规模较小, 在世界上许多放射性束流装置上均有配置或计划配置, 具体实现的技术路线各有特点^[14]. 冷却储存环是大型装置, 目前只有德国GSI和中国HIRFL国家实验室成功建造. 近年来, 在中国的储存环HIRFL-CSR装置上开展了一批有重要影响的工作. 比如测量短寿命核素 ^{63}Ge , ^{65}As , ^{67}Se 和 ^{71}Kr 的质量并分析其对核天体快质子过程的重要影响^[39]; 基于缺中子核素质量测量分析fp-壳层同位旋多重态的对称性^[40]; 以及确定 ^{52}Co 中的 $T = 2$ 同位旋相似态及其对 ^{52}Ni 的 β 衰变的影响^[41]等.

对原子核电荷半径以及多种矩的测量, 往往依靠原子的超精细结构. 由于需要极高的能量分辨率($\Delta E \leq 10^{-6}$ eV)以识别超精细结构, 通常采用单色性很高的激光技术($\Delta \nu \leq 100$ MHz)^[4]. 与此同时, 还需要避免原子运动造成的多普勒展宽, 由此需要控制与激光发生相互作用的原子速度展宽. 目前大量采用的是共线激光技术, 即使得窄带激光与速度基本单一的离子(原子)束流在一条直线上运动并发生相互作用, 将原子选择性地激发到感兴趣的超精细能级上, 再通过测量退激荧光或多步电离后的离子数目来获得超精细激发谱, 也就是激光核谱. 按照原子理论和系统性比较分析, 可将这些谱结构与原子核的电荷半径、自旋、磁矩、电四极矩等基本物理量联系起来, 获得精度很高的结果^[14,42]. 这些物理量反映原子核基态(也包括长寿命同核异能态)的基本性质, 与原子核的内在结构和相互作用紧密相关, 因此成为核物理研究的重要手段. 这种测量所需的原子物理知识比较成熟, 而与核结构模型无关, 因此相对客观可靠. 共线激光核谱测量只需很低的离子能量, 并可运用到几十到几百每秒离子数(pps)的低束流强度情况, 因此对于不稳定核的研究具有独特的优势, 适合在RIB装置上先期部署和早出物理成果. 近年来, 运用激光核谱技术测量了基本性质的原子核已达到约900种(见图4), 特别是在不稳定核区增长很快, 如近期在双幻核 ^{78}Ni 附近开展的工作等^[43]. 目前, 在日本理化研究所发展了新型的可用于弹核碎裂(PF)型RIB装置的激光核谱技术, 欧洲核子中心CERN的ISOLDE实验室等正在发

展高精度和高灵敏度相结合的新一代共线激光谱仪,我国也正在发展这方面的新技术和设备[44].

不稳定原子核的另一种重要性质是衰变特性. 远离稳定线原子核发生 β 衰变时,可以释放出高达 ~ 20 MeV的能量(衰变能),由此可以布居子核的大量激发态,包括粒子不稳定态(发射中子、质子等)和束缚激发态(发射 γ 光子). 为此, β 延迟粒子/ γ 衰变就成为研究不稳定核基态和激发态性质的重要手段[45]. 为此,需要建立和发展相应的装置,开展系列研究. 北京大学的研究组在这方面持续开展了重要的工作,如中子球等装置的建设和持续改进[46,47],以及涉及反转岛等的 β 衰变物理研究[48–50].

对于幻数移动的观测,除了基态性质测量之外,一个重要手段是偶偶核第一个 2^+ 态的激发能 $E(2^+)$ 及其衰变强度 $B(E2)$ 的测量. 图 5[37,51]显示了直到最近的偶偶核 $E(2^+)$ 测量结果及其在核素图上的分

布. 丰中子轻核区幻数的移动已有实验证据,中重核区则还有大量的工作要做. 原子核基本性质和 β 衰变的高精度测量,与天体核过程的确定以及基本对称性的研究有密切关系. 核天体物理的研究在本专题的其他文章中会有专门论述,涉及基本对称性的研究,典型的如电偶极矩的观测[52],以及无中微子双 β 衰变等.

3 与HIAF装置相关的放射性核束物理发展机遇

21世纪以来,RIB物理在世界范围快速发展,其中一个代表性的现象是日本理化所(RIKEN)仁科中心(Nishina Center)的放射性束流装置RIBF成为世界RIB物理研究首屈一指的基地,实现了跨越式发展. 这有多方面的原因. 第一,由于美国 and 欧洲的大

图 4 显示激光核谱测量的核素图. 图片来源文献[42], 已获得授权

Figure 4 Nuclear chart demonstrating laser spectroscopy measurements for nuclear properties. Reproduced from ref. [42] with permission of *Nuclear Physics Review*.

图 5 实验 $E(2^+)$ 在偶偶核素图上的分布. 传统的幻数用实线标出(图中数据取自文献[51], 其中 ^{78}Ni 数据取自文献[37])

Figure 5 Experimental $E(2^+)$ systematics on the even-even nuclear landscape. Canonical magic numbers are indicated by solid lines (Data taken from ref. [51], except those for ^{78}Ni from ref. [37]).

装置建设在一段时期有所放慢, 日本的RIBF正好率先进入到第三代装置所能达到的不稳定核区, 把握住了重要的窗口期. 例如其标志性的指标, 也就是 ^{238}U 的束流强度, 十多年来一直稳定提高, 始终处于世界领先地位. 由此通过弹核碎裂(PF)方式得到的RIB束流强度自然具有独特优势, 可以收获大量“首次测量”. 第二, RIKEN-RIBF在大型束流装置建设的同时, 十分重视物理实验探测设备的建设, 每过1-2年就有一套价值上千万美元的实验设备投入运行. 先后建成的有: 零度谱仪ZDS、高分辨消色差谱仪SHARAQ、大接收度超导磁谱仪SAMURAI、小型储存环RI-ring、电子-离子散射环e-RI、减速低能终端SLOWRI等. 这些实验设备的建设均经过详细论证, 物理目标明确、技术先进, 形成了广泛的国际用户群体和良好的研究生态. 第三, RIKEN-RIBF自己也形成了在国际上起引领作用的实验路线. 比如通过在束 γ 对不稳定核 2^+_1 态的测量及其相关的新幻数研究, 处于公认的国际领先地位^[36, 37]. 第四, RIKEN-RIBF从一开始建设就十分强调国际合作, 形成了规范的国际开放格局, 包括研究目标和技术路线的确定、大部分束流的分配、技术支撑和装置运行的开放模式等. 这种高水平开放管理和运行模式, 保障了很高的国际参与度. 实际上每个实验终端都形成了活跃的国际合作体, 由此大大提高了国际影响力和地位, 也在开放竞争中促进了自身队伍的成长.

我国的RIB物理研究起步于20世纪90年代末期, 主要基于HIRFL-CSR装置和CIAE-BRIF装置. 近年来实验路线和技术储备均有长足的发展, 如前所述也取得了一些重要成果, 形成了一些有特点和优势的研究路线和方向, 整体状况应该优于日本RIBF起步时的状况. 因此, 强流重离子加速器装置(High Intensity heavy-ion Accelerator Facility, HIAF)的建设, 应该有机会使我国的RIB物理研究实现跨越发展, 许多方面可以参考RIKEN-RIBF的成功经验.

HIAF与RIB相关的是低能核物理部分(iLinac实验)和高能放射性束流线部分(high-energy radioactive beam line-HFRS以及SRing)^[53]. 在低能段, 充分利用高流强的重离子束流(1 emA), 通过熔合反应和多核子转移机制, 能够产生大量的丰质子滴线核和

中重质量区丰中子核^[54]. 按照正在发展的分离鉴别技术, 可以对这些新的核素进行识别, 从而大大扩充人类可以利用的核素版图, 特别是有望合成一批超重新核素^[55]. 在分离线之后部署先进的离子阱、共线激光等探测设备, 可以测量一大批远离稳定线原子核的基本性质, 如质量和多种电磁矩等, 从而获得新的结构和相互作用认知以及实用的核数据. 这部分物理研究工作因为是在加速器装置的起步安装运行阶段就可以开展, 因此特别适合于早部署早开展. 在iLinac的每核子 ~ 20 MeV段, 如果能部署实验终端, 也很适合开展弱束缚体系的极其重要的特征结构和反应动力学研究. HIAF的高能部分, 将部署弹核碎裂和分离的放射性束流线HFRS, 适合获得特别丰中子的束流. 与连接在其后的环形谱仪SRing相结合, 可以开展不稳定核质量的精确测量和环上的核反应测量. 这对中重质量区丰中子核的新结构认知具有关键作用.

RIB物理研究产生的不稳定核数据, 也具有直接的应用价值. 比如核裂变装置(核电站等)的产物有很多是不稳定核素, 它们在演化过程中又普遍处于激发状态, 因此涉及的未知核反应和核衰变数据量极大. 显然这些数据对于核能系统的操控和核废料的处置是十分需要的. 核素之间的转化和与之相关联的能量释放或吸收, 深刻影响着宇宙的演变和人类社会的生存与发展, 这也是世界上各科技大国均在建设RIB大型装置的原因. HIAF的建设, 必将在这些重大问题的探索中发挥特殊的作用.

4 结语

放射性核束物理诞生于1985年, 现在还很年轻. 大部分的核素目前还不能在实验室产生, 还需要一代又一代RIB大装置的发展. 核素产生之后还需要较高的产额, 才足以用来研究核结构和反应过程, 这就需要更长远的努力. RIB物理是对未知版图的开拓, 面临探索创新和智慧创造的机遇^[56]. HIAF装置具有强流的优势, 结合产生放射性束的先进技术与高水平的物理实验探测设备, 以及国际化的开放运行机制, 有可能引领我国的核物理研究走进世界科技强国的行列.

致谢 本文采用了文献[2]中的部分观点和素材, 特此致谢. 感谢中国科学院近代物理研究所于2018年12月组织的“未来核物理研讨会”, 本文为该会议的系列文稿之一.

参考文献

- 1 Anderson P W. More is Different. *Science*, 1972, 177: 39–396
- 2 Ye Y L, Ren Z Z, Zhou X H, et al. Chapter 3: Nuclear Structure and Dynamics (in Chinese). In: *Frontiers and Strategic Development of Nuclear Physics and Plasma Physics. Vol. 1 Nuclear Physics*. Beijing: Science Press, 2017 [叶沿林, 任中洲, 周小红, 等. 第三章核结构和动力学. 核物理与等离子体物理-学科前沿及发展战略(上册: 核物理卷). 北京: 科学出版社, 2017]
- 3 Bohr N. The quantum postulate and the recent development of atomic theory. *Nature*, 1928, 121: 580–590
- 4 Lu X T, Jiang D X, Ye Y L. *Atomic Nuclear Physics (in Chinese)*. Beijing: Atomic Energy Press, 2000 [卢希庭, 江栋兴, 叶沿林. 原子核物理. 北京: 原子能出版社, 2000]
- 5 Krane K S. *Introductory Nuclear Physics*. New York: John Wiley & Sons, 1987
- 6 Rowland H A. A plea for pure sciences. *Science*, 1883, 29: 242
- 7 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
- 8 Hansen P G, Jonson B. The neutron halo of extremely neutron-rich nuclei. *Europhys Lett*, 1987, 4: 409–414
- 9 Tanihata I. Nuclear physics with RIB's: How it all started. *Eur Phys J Plus*, 2016, 131: 90
- 10 Kobayashi T, Shimoura S, Tanihata I, et al. Electromagnetic dissociation and soft giant dipole resonance of the neutron-dripline nucleus ^{11}Li . *Phys Lett B*, 1989, 232: 51–55
- 11 Kobayashi T, Yamakawa O, Omata K, et al. Projectile fragmentation of the extremely neutron-rich nucleus ^{11}Li at 0.79 GeV/nucleon. *Phys Rev Lett*, 1988, 60: 2599–2602
- 12 Sánchez R, Nörtershäuser W, Ewald G, et al. Nuclear charge radii of $^{9,11}\text{Li}$: The influence of halo neutrons. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 033002
- 13 Riisager K. Halos and related structures. *Phys Scr*, 2013, T152: 014001
- 14 Blaum K, Dilling J, Nörtershäuser W. Precision atomic physics techniques for nuclear physics with radioactive beams. *Phys Scr*, 2013, T152: 014017
- 15 Ikeda K, Tagikawa N, Horiuchi H. The systematic structure-change into the molecule-like structures in the self-conjugate $4n$ nuclei. *Prog Theor Phys Suppl*, 1968, 1: 464
- 16 Freer M, Horiuchi H, Kanada-En'yo Y, et al. Microscopic clustering in light nuclei. *Rev Mod Phys*, 2018, 90: 035004
- 17 Liu Y, Ye Y L. Nuclear clustering in light neutron-rich nuclei. *Nucl Sci Tech*, 2018, 29: 184
- 18 Zhou B, Funaki Y, Horiuchi H, et al. Nonlocalized clustering: A new concept in nuclear cluster structure physics. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 262501
- 19 Yang Z H, Ye Y L, Li Z H, et al. Observation of enhanced monopole strength and clustering in ^{12}Be . *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 162501
- 20 He W B, Ma Y G, Cao X G, et al. Giant dipole resonance as a fingerprint of α configurations in ^{12}C and ^{16}O . *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 032506
- 21 Liu Y, Ye Y L, Lou J L, et al. Positive-parity linear-chain molecular band in ^{16}C . *Phys Rev Lett*, 2020, 124: 192501
- 22 Orr N A, Anantaraman N, Austin S M, et al. Momentum distributions of ^9Li fragments following the breakup of ^{11}Li . *Phys Rev Lett*, 1992, 69: 2050–2053
- 23 Gade A, Glasmacher T. In-beam nuclear spectroscopy of bound states with fast exotic ion beams. *Prog Particle Nucl Phys*, 2008, 60: 161–224
- 24 Baumann T, Amthor A M, Bazin D, et al. Discovery of ^{40}Mg and ^{42}Al suggests neutron drip-line slant towards heavier isotopes. *Nature*, 2007, 449: 1022–1024
- 25 Gade A. Nuclear spectroscopy with fast exotic beams. *Phys Scr*, 2013, T152: 014004
- 26 Flavigny F, Obertelli A, Bonaccorso A, et al. Nonsudden limits of heavy-ion induced knockout reactions. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 252501
- 27 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
- 28 Liu W, Lou J L, Ye Y L, et al. Experimental study of intruder components in light neutron-rich nuclei via single-nucleon transfer reaction. *Nucl Sci Tech*, 2020, 31: 20
- 29 Jones K L. Transfer reaction experiments with radioactive beams: From halos to the r-process. *Phys Scr*, 2013, T152: 014020
- 30 Bonaccorso A. Reaction mechanisms in the scattering of exotic nuclei. *Phys Scr*, 2013, T152: 014019
- 31 Yang L, Lin C J, Jia H M, et al. Is the dispersion relation applicable for exotic nuclear systems? The abnormal threshold anomaly in the $^6\text{He}+^{209}\text{Bi}$ system. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 042503

- 32 Zhang Z Y, Gan Z G, Yang H B, et al. New isotope ^{220}Np : Probing the robustness of the $N=126$ shell closure in neptunium. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 192503
- 33 Shen Y P, Guo B, deBoer R J, et al. Constraining the external capture to the ^{16}O ground state and the $E2$ S factor of the $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ reaction. *Phys Rev Lett*, 2020, 124: 162701
- 34 Ozawa A, Kobayashi T, Suzuki T, et al. New magic number, $N=16$, near the neutron drip line. *Phys Rev Lett*, 2000, 84: 5493–5495
- 35 Kanungo R. A new view of nuclear shells. *Phys Scr*, 2013, T152: 014002
- 36 Steppenbeck D, Takeuchi S, Aoi N, et al. Evidence for a new nuclear “magic number” from the level structure of ^{54}Ca . *Nature*, 2013, 502: 207–210
- 37 Taniuchi R, Santamaria C, Doornenbal P, et al. ^{78}Ni revealed as a doubly magic stronghold against nuclear deformation. *Nature*, 2019, 569: 53–58
- 38 Hagen G, Papenbrock T. A doubly magic nucleus that has two faces. *Nature*, 2019, 569: 49–50
- 39 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
- 40 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
- 41 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
- 42 Yang Y C, Bai S W, Yang X F. Development and prospect of precision laser spectroscopy techniques for nuclear physics study (in Chinese). *Nucl Phys Rev*, 2019, 36: 161–169 [刘永超, 白世伟, 杨晓菲. 用于核物理研究的精密激光谱技术的发展核展望. 原子核物理评论, 2019, 36: 161–169]
- 43 Yang X F, Wraith C, Xie L, et al. Isomer shift and magnetic moment of the long-lived $1/2^+$ isomer in $^{30}_{79}\text{Zn}_{49}$: Signature of shape coexistence near ^{78}Ni . *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 182502
- 44 Yang X F. IUPAP Young Scientist Prize in Nuclear Physics. <http://iupap.org/commissions/c12-nuclear-physics/c12-awards/>
- 45 Borge M J G. Beta-delayed particle emission. *Phys Scr*, 2013, T152: 014013
- 46 Lou J, Li Z, Ye Y, et al. Performances of a β -delayed neutron detection array at Peking University. *Nucl Inst Methods Phys Res Sect A*, 2009, 606: 645–650
- 47 Wang C, Li X, Han R, et al. A β -delayed neutron detection system working with the continuous beam mode. *Nucl Inst Methods Phys Res Sect A*, 2019, 940: 83–87
- 48 Liu H N, Lee J, Doornenbal P, et al. Intruder configurations in the ground state of ^{30}Ne . *Phys Lett B*, 2017, 767: 58–62
- 49 Chen Z Q, Li Z H, Hua H, et al. Proton shell evolution below ^{132}Sn : First measurement of low-lying β -emitting isomers in $^{123,125}\text{Ag}$. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 212502
- 50 Tao L C, Ichikawa Y, Yuan C X, et al. Negative parity states in ^{39}Cl configured by crossing major shell orbits. *Chin Phys Lett*, 2019, 36: 062101
- 51 Pritychenko B, Birch M, Singh B, et al. Tables of $E2$ transition probabilities from the first 2^+ states in even-even nuclei. *Atomic Data Nucl Data Tables*, 2016, 107: 1–139
- 52 Gaffney L P, Butler P A, Scheck M, et al. Studies of pear-shaped nuclei using accelerated radioactive beams. *Nature*, 2013, 497: 199–204
- 53 Zhou X H. Physics opportunities at the new facility HIAF. *Nucl Phys Rev*, 2018, 35: 339–349
- 54 Chen P H, Niu F, Guo Y F, et al. Nuclear dynamics in multinucleon transfer reactions near Coulomb barrier energies. *Nucl Sci Tech*, 2018, 29: 185
- 55 Boilley D, Cauchois B, Lü H, et al. How accurately can we predict synthesis cross sections of superheavy elements? *Nucl Sci Tech*, 2018, 29: 172
- 56 Feynman R. The Character of Physics Law. Cambridge: The MIT Press, 1965

Radioactive ion beam physics related to HIAF

YE YanLin*, YANG XiaoFei, LIU Yang & HAN JiaXing

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

This article aims to describe the key scientific problems, historical developments and prospects of the radioactive ion beam (RIB) physics. There exist only less than 300 stable nuclides in the universe, whereas the the number of unstable nuclei can be as high as 10000. The production and study of such radioactive nuclides (RIB physics) are an exploration of an undiscovered area, which necessities new experimental tools and theoretical models. Numerous new findings have been reported at the initial stage of RIB physics research based on new observations. Typical examples include the halo and cluster structures, new magic numbers, shell evolution and soft dipole resonances. The study of unstable nuclei is also closely related to that of nuclear astrophysics processes as well as the synthesis of superheavy nuclei, which are belonging to the most important interdisciplinary problems worldwide. Investigations on unstable nucleus provide experimental data for nuclear energy systems; thus, they have strategic application value. The advantages of HIAF are associated with high beam intensity. When combined with advanced technologies for RIB separation and experimental detection, HIAF would play certain leading roles in the international community.

radioactive ion beam physics, nuclear chart, High Intensity heavy-ion Accelerator Facility

PACS: 21.60.-n, 21.30.-x, 23.20.-g, 24.10.-i

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0282](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0282)