

# 从 HIAF 到 CNUF

赵红卫

(中国科学院近代物理研究所 730000)

## 一、引言

对物质深层次结构及其相互作用的研究始终是自然科学最基础、最前沿的领域,它不仅引领着人类基本时空观的发展,也不断催生出变革性的新技术。强相互作用核物质构成了宇宙中可见物质质量的绝大部分。近百年来,依托不断升级换代的离子加速器大科学装置,致力于理解核物质起源、结构、演化的核物理研究持续深化着人们对物质世界的认知,研究中产生的新知识、技术和方法也被广泛应用于国防、能源、医疗、农业、材料以及空间探索等领域,并形成一批交叉学科,创造巨大经济效益和社会效益的同时,对人类社会的进步与发展、国家的地位提升与安全也产生了重大影响。核科学与技术在国家核心利益中的地位愈发显著,已成为大国必争的科技战略高地<sup>[1,2]</sup>。

基于离子加速器的重大科技基础设施(大科学装置)是研究核物理前沿科学问题不可或缺的重要工具和手段,而现代核科学研究越来越多地依赖于离子加速器重大科技基础设施的支撑。在微观层次上,核物质以多种多样的原子核形式存在。原子核是由核力(核内有效相互作用)将核子(质子和中子)聚合在一起形成的量子多体系统。尽管在认识世界的过程中人类已经深入到核子内部,但是对深层次微观物质结构及其背后的物理规律,如核力的本质和核子的内禀性质,还缺乏充分和全面的认识<sup>[1]</sup>。

当前,我国为实现高水平科技自立自强和高质量现代化建设,对科技创新提出了更为迫切的需求。而基础研究是科技创新的源头,也是突破关键核心技术问题的根基,我们更应该抓住机遇,前瞻布局,积极抢占未来发展制高点,在依托离子加速

器大科学装置的核物理研究及其相关应用领域,努力实现“国际领跑”。

中国科学院近代物理研究所正在广东惠州负责建设国家“十二五”重大科技基础设施“强流重离子加速器装置(HIAF)”和“加速器驱动嬗变研究装置(CiADS)”<sup>[3,4]</sup>,HIAF 和 CiADS 两个大科学装置预计在 2025~2028 年间建成,投入运行。中国科学院于 2022 年组织了面向“十五五”和 2035 年国家重大科技基础设施发展规划战略研究,用于粒子物理和核物理研究的粒子加速器大科学装置是其中的规划之一。以此为契机,以 HIAF 和 CiADS 为基础我们提出规划和建设“中国先进核物理研究装置(CNUF)”<sup>[1,5,6]</sup>。以下从核物理学科前沿和国家需求、国内外发展态势和战略目标、布局和发展步骤以及 CNUF 规划等方面,阐述依托 CNUF 装置在核物理领域要研究和致力于解决的重大科学问题,在国家需求方面要致力于实现的重大应用与技术突破,介绍如何从 HIAF&CiADS 逐步建设 CNUF,使其成为世界上性能领先的以核物理研究为主的国际旗舰型多学科综合装置,依托该装置将使我国引领世界重离子物理、强子物理和离子加速器驱动的先进核能研究,形成在国际上具有重大影响的领跑型核物理及其应用研究中心。

## 二、学科前沿和国家需求——解决核物理领域重大科学问题,满足国家重大需求,抢占科技制高点

### 1. 核物理领域前沿与重大科学问题

原子核作为物质结构的一个微观层次,受强相

相互作用支配、并通过多种相互作用共同制约形成典型量子多体复杂体系。原子核蕴含着丰富的内禀自由度,体现着基本对称性与演生对称性,与之相关的许多重大科学问题尚未得到解决,孕育着重大突破<sup>[1,2]</sup>,例如:核力的本质是什么?原子核的存在极限在哪里?宇宙中比铁重的元素是如何起源的?核子质量和自旋的起源是什么?宇宙中正物质为何多于反物质?质子会衰变吗?高密核物质的性质与新形态是怎样的?高能量密度物质性质如何<sup>[2]</sup>?这些问题的解决面临不同的挑战,有的因为实验手段和技术限制在短期内无法解决;有的由于相关科学问题的解决存在太多的可能性,具体方案的成功概率太小<sup>[2]</sup>;有的问题的研究在现有的离子加速器大科学装置上正在进行。但有一些问题经过长期的研究,已经形成具体方案,在短中期或中长期有望得到重大成果。

我们基于 HIAF&CiADS 提出建设 CNUF,主要是围绕短中期和中长期有望得到解决的问题来讨论的。CNUF 将为从核子、原子核、核物质等多个层面开展核物理基础研究提供世界上首屈一指的条件,致力于解决重大科学前沿问题,例如:(1) 探索核素存在极限,攀登超重核稳定岛,揭示核力的基本性质以及管控核子的方式;(2) 高重子密度核物质相结构,夸克胶子等离子体(QGP)态与强子气体态之间的一级相变和临界点;(3) 从夸克胶子层面理解核子的内禀性质,如其自旋组成和质量起源;(4) 超越施温格极限库仑场强下量子电动力学(QED)有效性的检验;(5) 重离子束驱动的高能量密度物质;(6) 通过 $\mu$ 、 $\eta$ 等的稀有衰变寻找超越标准模型新物理等。依托 CNUF 期望针对这些科学问题开展研究取得重大发现<sup>[1]</sup>。

## 2. 产生和应用新技术,满足国家重大需求

核物理学科一直处于物质科学研究的前沿,对前述任何重大科学问题的解答将从根本上改进人类对物质世界和宇宙演化的理解,是对人类文明的重大贡献,同时也将发现新的原理、产生新的技术、

带来重要的发明创造和应用。这些新原理、新技术、发明创造和重要应用在国防、能源、航空航天、医疗、交叉学科和经济社会发展等领域发挥重要的推动作用,甚至引发工业革命,体现了国家重大战略需求。

回顾核科学发展历史,可以看到有很多变革性的技术产生和应用,例如:裂变与聚变核反应在裂变反应堆和聚变反应堆核能源领域中的应用,以及在原子弹和氢弹等核武器中的应用;等离子体推进技术在火箭与卫星中的应用;人工合成放射性同位素在核材料和核电池等方面的应用;人工合成放射性同位素和粒子加速器在肿瘤诊疗核医学领域的应用;由核探测技术与粒子加速器技术衍生发展起来的 X 射线光机、计算机断层扫描(CT)、正电子断层扫描(PET)、核磁共振(NMR)、磁共振成像(MRI)等在核医学成像中的应用;离子注入在半导体掺杂和激光等离子体在光刻机等微电子领域中的应用;粒子束和辐射技术在海关集装箱检测、安全检查、食品保鲜、细菌病毒消杀、材料改性、污水与烟尘处理等领域的应用。毫无疑问,这些新原理、新技术和重要应用在人类的生存与发展以及国家安全等方面发挥了重大作用,不但体现了国家战略需求,甚至改变了人类的生活范式。用于核物理基础研究的粒子加速器大科学装置,对精密机械、超高真空、超导磁体、低温制冷技术、大功率微波技术、束流测控技术、高速电子学、大规模准直处理技术、高分辨成像与探测技术等均有重要的引领和推动作用,这些技术也会应用到经济社会发展的各个方面。所以,核科学与核技术在国家核心利益中的地位愈发显著,已成为大国必争的科技战略高地,一直是国际竞争的最前沿。美俄欧日从未停止对此领域的持续投入和支持。

CNUF 将为国家在核科学与核技术应用领域的重大需求提供支撑,并能够满足国家重大需求。例如,利用 CNUF 提供的高能量短脉冲重离子束可获得能量密度超过  $100 \text{ GJ/m}^3$  的典型高能量密度物质状态,为制备和研究这一惯性约束聚变必经的物质

状态提供了新手段,对极端高温高压条件下物态方程、新物态制备、清洁聚变能源等发展具有非常重要的意义<sup>[1,5]</sup>;CNUF提供的高能重离子可应用于航天装备的整星级单粒子效应检测;CNUF产生的高通量高能缪子、中子等次级粒子成像技术可应用于包壳核材料无损检测等国家需求等领域, $\mu$ SR技术在凝聚态物理、能源材料、化学等研究领域都有难以替代的重要作用<sup>[1,2]</sup>;利用CNUF还可以研究加速器驱动的先进核裂变能源关键技术,研究核电大规模可持续性发展所面临的重大挑战,研究集核燃料增殖、乏燃料嬗变及核能发电于一体的铀钍燃料循环利用技术方案,致力于将核电铀资源的利用率大幅度提高,并把产出的核废料的放射性寿命从数十万年缩短到约几百年。这些前沿应用领域和关键技术的重大突破,将可能对国家战略需求产生深远的影响。

### 三、发展态势和战略目标与布局 ——实现从“并跑”到“领跑”

#### 1. 发展态势

离子加速器大科学装置是核物理前沿研究和国家战略需求不可或缺的重要工具和手段,一直是国际竞争的最前沿。利用离子加速器提供的离子束通过核反应产生大量的核产物或者高通量的次级粒子,这些核产物或次级粒子包括了次级的放射性离子束、稀有的同位素、或者是反应产生的中子、光子、中微子、缪子等粒子束。无论是对核物理领域重大科学问题的探索还是满足国家战略及经济社会发展的需求,都希望不断提高核反应产额或者次级粒子的通量,这就要求离子加速器不断挑战高能量、高流强、高束团功率、高束流品质和亮度,其实验设施的综合性、规模化趋势也愈发明显。

100多年的核物理研究取得了辉煌的成就。回顾历史,在20世纪60年代以前,核物理领域重大原始创新性发现主要依赖于新现象的偶然发现、新思想新理论的提出、新技术的应用与突破、理论的预

言与指引等,例如曾获得诺贝尔奖的重大发现:天然放射性的发现、原子内部结构、同位素的发现、放射性元素的产生、重原子核的裂变、超铀元素的合成、原子核壳模型的建立、元素起源的研究等。

自20世纪70年代以来,核物理领域重大原始创新性发现基本上都是利用离子加速器大科学装置和新型实验装置以及新理论新机制,例如,经过半个多世纪的不懈努力,美国LBNL、俄罗斯Dubna、德国GSI和日本RIKEN等实验室,利用新建或性能不断提升的重离子加速器和实验探测装置合成了原子序数100至118号所有的重元素,已将元素周期表扩展至118号<sup>[7]</sup>;从1985年在美国LBNL实验室运用加速器产生的放射性束开展实验以来,人类可研究的核素数目迅速扩大,理论预言的核素总共可能超过10000个,目前实验室产生发现的核素已超过3100多个<sup>[8]</sup>。近40年来,美国LBNL和MSU-NSCL、日本RIKEN、法国GANIL、德国GSI、俄罗斯Dubna、加拿大TRIUMF、中国IMP和PKU及CIAE等实验室,利用新建或性能不断提升的离子加速器和放射性束装置,系统研究了放射性核素的产生和不稳定核奇异结构与性质,进一步拓展了未知核素的版图,并有一系列重大发现如晕结构、集团结构、幻数和壳演化、奇异放射性与奇异结构等等;20世纪90年代末美国布鲁克海文实验室BNL建造了相对论重离子对撞机RHIC,该装置拥有最高的重离子束流能量,RHIC于2000年开始运行以来在核物质层次研究方面取得了一系列重要成果,如夸克胶子等离子体(QGP)的发现和高温低密核物质性质研究等<sup>[1,2]</sup>。

在过去20多年里,国际上—部分以核物理研究为主的大型质子重离子加速器装置逐步发展为多学科研究综合装置,取得了一系列突破性成果,如瑞士PSI质子回旋加速器装置、加拿大TRIUMF质子加速器装置、德国GSI重离子冷却储存环和中国的兰州重离子加速器装置HIRFL等,这些加速器装置除了用于核物理研究外,还同时提供中子束、缪子束,也用于同位素产生、质子重离子肿瘤治疗关



键技术研发、材料辐照等应用研究。

未来20~30年以核物理研究为主的离子加速器大科学装置一个显著特点和发展趋势,可能是把传统核物理和强子物理等多个研究领域集于一体形成多功能、多用途、应用于多学科的加速器集群<sup>[5]</sup>。这类加速器集群装置所提供的粒子束一定是高能量、高流强、高束团功率、高亮度、高束流品质和高精度,提供的粒子束种类将是稳定离子束、放射性次级束、极化束或缪子束等多种类组合。利用这样的粒子束开展的研究涉及远离稳定线原子核结构、核子结构、强相互作用物质、高能量密度物理、超临界场QED检验、材料科学和凝聚态物理等多学科研究。

未来用于核物理研究的大型离子加速器装置的总体布局基本上是采用较高能量的强流离子直线加速器作为注入器,首先通过一台快循环快注入的同步加速器作为增强器,快速提高束流能量和束流强度。然后再根据每台加速器的科学目标和功能,由多台同步加速器或储存环或多种新型加速器集群级联组合,进一步提高束流能量、累积束流强度并提高束流品质<sup>[5]</sup>。有些是以对撞机的形式,有些直接从同步加速器引出强流脉冲束至实验终端进行固定靶实验。用于核物理研究的下一代大型离子加速器装置注入器趋于采用射频超导强流离子直线加速器,增强器和同步加速器或储存环基本上都将采用超导磁铁技术和射频超导腔技术。

近年来,为了产生更多种类、更强的放射性束流,日本RIKEN建造了世界上能量和束流强度最高的重离子超导回旋加速器SRC,并于2007年开始正式运行,能够提供能量为345 MeV/A的连续波铀离子束,使RIKEN的RIBF装置成为由5台回旋加速器组成的大型加速器集群装置,在过去的10多年使RIKEN在放射性束装置和放射性束核物理领域处于世界领先,取得了世界瞩目的研究成果。美国密歇根州立大学(MSU)经过约10年的努力于2022年建成稀有同位素束流装置(FRIB),并开始试运行;FRIB是一台全超导腔加速的重离子直线加速器,是当前设计束流强度最高、束流功率最高的中低能

量重离子加速器装置,可以提供能量200MeV/A、束流功率最高可达到400kW的<sup>238</sup>U连续束流。凭借这一流强,FRIB能够产生更远离 $\beta$ 稳定性的短寿命核素,在探索核素存在极限,研究奇特原子核结构领域将处于优势地位。为了覆盖更高的重子密度区域,德国重离子研究中心(GSI)正在建设反质子和离子加速器设施(FAIR),FAIR是以现正在运行的SIS18/ESR重离子冷却储存环为基础,增建三台离子同步加速器或储存环和相关实验探测装置,使FAIR成为由直线加速器注入器和5台离子同步加速器或储存环组成的大型离子加速器集群装置,预期2028年后可以开始开展2.7~4.9 GeV质心能量的重离子碰撞实验。俄罗斯联合核研究所(JINR)也在建设NICA加速器装置,将在更高的4~11 GeV质心能量区开展重离子对撞实验。在原子核层次,扩展核素图需要极高流强的重离子束流,通过核反应产生自然界不存在的短寿命核素或元素。核子内禀结构的研究是中高能核物理领域的新前沿。美国BNL实验室的电子离子对撞机(EIC)即将开始建造,计划在2035前后实现275 GeV质子和18 GeV电子的对撞研究,最高对撞亮度将达到 $10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,积分亮度 $100 \text{ fb}^{-1}$ 。

我国的核物理研究和离子加速器大科学装置经过60多年持续投入和发展,经过三代科技工作者持续的努力和三代大科学装置的建设,逐步建成了以核物理研究为主的兰州重离子加速器研究装置HIRFL和原子能科学研究院基于串列静电加速器和回旋加速器的北京放射性束装置CIAE-BRIF。HIRFL是由两台回旋加速器和两台冷却储存环构成的大型重离子加速器大科学装置,也是目前亚洲能量最高的重离子加速器装置,如图1所示。HIRFL能够提供中低能量稳定重离子束流和千余种放射性离子束流,为我国科技工作者开展核物理基础研究和满足国家需求的应用研究提供了先进的实验平台。

目前我国离子加速器大科学装置整体水平处于国际先进并实现“国际并跑”,与国际旗舰型领先

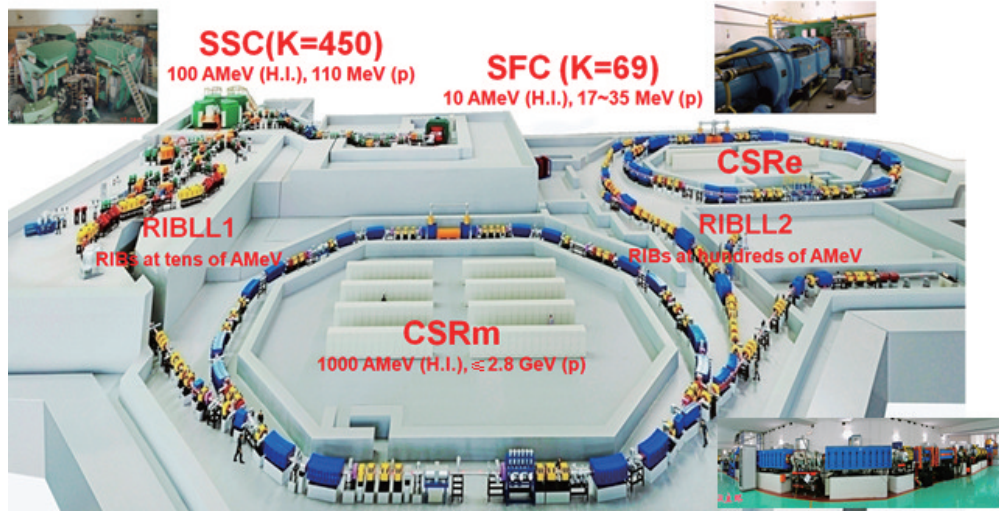


图1 兰州重离子研究装置HIRFL布局

水平的装置在规模上、性能指标和核心技术方面还有一定的差距,要实现装置整机性能国际领先还面临挑战。我国目前只是在加速器部分子系统或某些方向的技术或一些技术指标处于国际领先,例如,强流高电荷态 ECR 离子源、低能量强流连续波离子超导直线加速器、低 $\beta$ 半波长超导体射频频腔(HWR)和 1.3 GHz 9-cell 椭球型超导体射频频腔等已在国际上处于领先。我国粒子加速器大科学装置面临的挑战与存在的主要问题是,缺乏提出“0”到“1”原创的加速器概念、完全原创的核心技术及加速器主流设备;缺乏正在运行的世界级旗舰型、整机性能全面领先的大型粒子加速器。我国直到今天甚至还没有运行的大型全超导粒子加速器。而美国 Jlab 实验室在 20 世纪 90 年代初就已建成并成功运行 6 GeV 全超导腔加速的连续波多次回转型电子超导直线加速器 CEBAF;本世纪初美国 BNL 实验室建造成功国际上能量最高的重离子对撞机 RHIC 装置、ORNL 实验室建造成功散裂中子源 SNS, SNS 至今仍然拥有国际上正在运行的能量和平均束流功率最高的全超导质子直线加速器(1.0 GeV/1.7 MW),目前 SNS 每年运行 5000 多小时,在 1.4 MW 束流功率下束流可用性高达 95%;瑞士 PSI 研究所 20 世纪 90 年代中期能量为 590 MeV 质子回旋加速器束流

功率已达到 0.8 MW,本世纪初束流功率即超过 1.0 MW,目前每年运行 5000 多小时,在 1.4 MW 束流功率下束流可用性平均高于 90%;日本 RIKEN 研究所于 20 世纪初建造了世界上束流能量最高(铀离子束 345 MeV/A)的超导重离子回旋加速器 SRC 等。

由于没有旗舰型、性能世界领先的用于核物理基础研究的离子加速器大科学装置和大型实验探测器设施,我国核物理学家只能依托 HIRFL、CIAE-BRIF 和一些小型粒子加速器平台开展研究。我国核物理基础研究只能在少数研究方向或研究点上具有较强的国际竞争力而处于世界前列,例如,铀核附近质子滴线区新核素合成、利用储存环对短寿命原子核质量精确测量、重离子熔合反应机制和原子核集团结构研究、基于锦屏地下实验室低能强流离子加速器装置的关键核天体反应截面测量等。

总体而言,新中国成立后的发展过程中,我国先后建成了以兰州重离子加速器装置 HIRFL 为代表的用于核物理研究的大科学装置和相关实验探测器设施,为我国核科技工作者开展核物理基础研究和满足国家需求的应用研究提供了先进的实验平台,在核物理研究及其应用的相关领域(方向)及核技术研发方面已达到国际先进水平、在世界高科技领域占有一席之地、处于独特地位,同时也培养了



一批具有国际视野和国际影响力的优秀人才。但也应该看到,我们距离“领跑者”的地位还有不小的差距,整体还处于跟跑或并跑阶段。我国依然缺乏世界级旗舰型的离子加速器大科学装置,高水平大型实验探测设施数量不足,关键性能指标也处于劣势,缺乏诺贝尔奖量级的核物理重大研究成果,原创或输出给发达国家的核心技术很少,在核物理和粒子加速器大科学装置领域有重大国际影响的学术领袖太少,这些已经成为核物理基础研究和离子加速器大科学装置进入国际领跑的关键制约因素。

造成以上局面的主要原因,一是核物理基础研究与离子加速器大科学装置领域与欧美相比,我国起步较晚,基础和积累不够深厚。二是前期国家投入严重不足。我国的研发(R&D)投入在GDP中的占比不高,R&D中基础研究的占比较低,2020年基础研究的经费总投入仅为1440亿元,大约是同年美国投入的1/5,其中用于大科学装置建设的经费更少,仅有美国的1/10<sup>[2]</sup>;2020年我国投入在核物理研究和相关装置建设费用只有美国的1/6<sup>[2]</sup>;同类型的离子加速器大科学装置的建造我国投入的经费大约是欧美的1/3~1/2;欧美日建成的离子加速器大科学装置与之配套的造价在1~8亿元人民币的大型核物理实验探测器一般都有5~6套,而目前我国正在运行的以核物理研究为主的离子加速器大科学装置上几乎没有一台造价超过1亿元的大型实验探测器。三是我国核物理领域科研人员队伍规模明显小于欧美日。目前我国核物理领域的科研队伍人数仅分别是美国和日本的大约27%和90%<sup>[2]</sup>。四是未能吸引和聚集全球最优秀的人才参与我国的基础研究和大科学装置建设。

## 2. 战略目标与布局

在我们思考以核物理研究为主用于多学科研究的离子加速器大科学综合装置未来发展与远景规划时,主要的战略目标也是面临的核心挑战,就是努力在整体上赶超国际先进水平,积极抢占科技竞争和未来发展制高点,突破关键核心技术,实现

“国际领跑”。我们期望结合现有的基础与条件,以学科前沿重大科学问题和国家重大需求为导向,建设国际旗舰型、引领型的离子加速器大科学装置,依托这样的装置研究产出新理论、新思想和有国际影响的重大科学成果,培养和造就一批世界级的科学家和学科领袖,产生或衍生一批重大原始创新技术、方法和仪器设备,并得到广泛应用。

近年来国家在实施高水平的科技自立自强和高质量的现代化建设,科技创新驱动经济社会发展和科技强国成为核心目标。国家在研发(R&D)和基础研究领域的投入逐步增加。这为实现上述战略目标提供了千载难逢的机遇,抓住这个战略机遇,积极并前瞻布局,是我们的历史使命。也正因为如此,在核物理与离子加速器大科学装置领域,“十二五”期间(2011~2015)布局建设HIAF和CIADS,“十四五”期间(2021~2025)布局中国散裂中子源CSNS升级工程。我们提出规划建议,在“十五五”(2026~2030)和“十六五”(2031~2035)期间以HIAF和CIADS为基础分期建设“中国先进核物理研究装置(CNUF)”。

HIAF正在广东惠州进行建设,有望于2025~2026年建成投入运行。HIAF能够产生5000多种不稳定原子核,是一台束流指标先进、以核物理研究为主的多学科用途的重离子加速器大科学装置,将为核物理、核天体物理和重离子驱动的高能量密度物理等基础研究创造国际先进水平的实验条件。HIAF建成投入运行后,将有可能成为世界上脉冲束流强度最高的重离子加速器,主要国际竞争对手是德国FAIR和美国FRIB离子加速器装置。与FAIR和FRIB相比,由于投入明显偏小,HIAF装置总体能力具有一定局限性。HIAF的优势是产生最强的低中能量重离子束流、具有最高磁刚度的放射性束流线、开展高精度储存环物理实验和重离子驱动的高能量密度物理研究,有望在利用多核子转移反应合成丰中子超重核素以及探索“超重核稳定岛”、基于冷却储存环精确测量短寿命原子核质量、依托高能放射性束流装置研究奇异原子核结构研究方向上代表国际最高水平或处于国际领先。

CiADS正在广东惠州进行建设,有望于2027~2028年建成投入运行。CiADS将是国际上首台兆瓦级质子加速器驱动的嬗变研究装置,主要目标是将高功率质子加速器、散裂靶和次临界反应堆耦合匹配,验证和研究乏燃料嬗变核心技术,大幅度降低乏燃料放射性毒性和寿命。CiADS建成投入运行后,有望在连续波强流高功率离子加速器和加速器驱动的嬗变研究领域处于世界领先。

在“十五五”(2026~2030)和“十六五”(2031~2035)期间以HIAF和CiADS为基础建设CNUF离子加速器大科学集群装置,通过两期大科学装置“五年”规划与建设,在2040年左右,CNUF有望成为世界上束流强度和束流功率最高的重离子加速器装置、束流强度和束流功率最高的连续波质子超导直线加速器装置、放射性束种类最多和强度最高的放射性束装置,CNUF可能成为世界上第一台运行在海夸克能区的电子离子对撞机和世界上通量或强度最高的缪子束装置,并有可能成为国际上首台离子加速器驱动的集核燃料增殖、乏燃料嬗变及核能发电于一体的铀钍燃料循环利用技术示范装置。努力使CNUF成为世界上性能领先的以核物理研究为主的国际旗舰型多学科综合装置,吸引全球优秀的核科技工作者或核物理学家依托该装置开展创新性的研究工作,将使我国引领世界重离子物理、强子物理和离子加速器驱动的先进核能研究,形成在国际上具有重大影响的领跑型核物理及其应用研究中心。

#### 四、发展步骤——从HIAF&CiADS到CNUF

以HIAF和CiADS为基础建设中国先进核物理研究装置CNUF,将分三个阶段进行:第一阶段,首先完成HIAF和CiADS建设,并投入实验运行。第二阶段,分别对HIAF和CiADS装置升级,提高其性能;升级后的HIAF实现与CiADS装置的有效融合,利用在线同位素分离方法(ISOL)产生种类更多、束

流更强的放射性次级束,并升级完善实验探测装置。第三阶段,增建极化电子离子对撞机(EicC)等研究装置。在各个实施阶段,逐步新建一批创新设计的先进实验探测设施、实验平台和示范装置。

强流重离子加速器装置HIAF由一台重离子超导直线加速器(iLinac)作注入器,一台重离子常温同步加速器(BRing-N)作增强器,一台常温重离子冷却储存环(SRing)作为实验谱仪,在BRing-N和SRing之间是一条高磁刚度的放射性次级束流线(HFRS),HIAF共有6个实验终端,HIAF总体布局如图2所示。从氢到铀的强流离子束由两台28~45 GHz超导ECR离子源产生,产生的强流重离子束通过低能量束流传输线注入到注入器iLinac。iLinac主要由射频四极加速器RFQ、中能传输线和由低 $\beta$ 射频超导腔构成的直线加速器组成,可以把铀离子加速到能量17( $^{238}\text{U}^{35+}$ )-22( $^{238}\text{U}^{46+}$ ) MeV/A,被加速铀离子束最高脉冲束流强度可达到28粒子微安。iLinac加速制备的重离子束通过垂直双向四维相空间涂抹注入方法,多次多圈注入到常温同步加速器BRing-N中,经过束流累积、纵向堆积和加速等过程,使重离子束达到设计的束流强度和能量,最终通过慢引出或快引出方式从BRing-N环中引出。BRing-N设计周长570 m,磁刚度34 Tm。BRing-N同步加速器有两种工作模式,低能量高流强模式和高能量低流强模式。在低能量高流强模式下,可以把 $^{238}\text{U}^{35+}$ 铀离子束加速到0.8 GeV/A, BRing-N引出铀离子束束流强度可以达到 $(0.5\sim 2.0)\times 10^{11}$  ppp;在高能量低流强模式下,电荷剥离后 $^{238}\text{U}^{76+}$ 经过BRing-N可以加速至能量2.45 GeV/A、引出束流强度 $5.0\times 10^{10}$  ppp。储存环SRing和BRing-N之间的传输线既是两环之间的传输线,又是一条高磁刚度(25 Tm)的放射性次级束流线(HFRS)。从BRing-N中引出的稳定核重离子束打靶产生放射性次级束,经过HFRS分离选择后可直接用于实验测量,也可把分离出的不稳定核次级束注入到实验谱仪SRing中,通过电子冷却制备出高品质次级束流,用于高精度实验测量,例如短寿命原子核质量测量。从BRing-N中引出的一

定能量的强流重离子束也可以在HFRS束流线上再剥离至全裸重离子束,例如可产生 $^{238}\text{U}^{92+}$ 铀离子束,全裸的铀离子束注入到SRing中,经过纵向堆积、纵向压缩和束流冷却后,可以从SRing中引出高能量、高功率的极短脉冲重离子束,用于高能量密度物理研究,铀束能量可达到0.8~1.1 GeV/A,引出束流强度可达到 $5.0 \times 10^{11}$  ppp,束团脉冲宽度50~100 ns,脉冲束流功率可达到20~25 kJ。SRing储存环周长277 m,环内配置有电子冷却、随机冷却、双TOF探测器 and 用于高离化态原子物理研究的电子靶以及气体喷射内靶装置。目前HIAF设计有6个实验终端,主要包括:位于注入器iLinac末端的低能量核结构研究谱仪和强流离子束辐照终端;位于BRing-N引出端的高能量综合终端,包含QCD与核物质性质研究实验探测器、超核研究实验探测器和高能量辐照终端;位于BRing-N和SRing之间的次级束流线HFRS和高能量密度物理研究实验终端;位于HFRS后方的外靶实验终端以及SRing高精度环形谱仪和电子-离子复合共振谱仪。

加速器驱动的嬗变研究装置CiADS由高功率质子超导直线加速器、散裂靶、次临界反应堆和高功率靶及材料辐照实验终端等部分组成,总体布局

如图3所示。由离子源产生的强流质子束经RFQ低能量加速后,由两种类型5个 $\beta$ 总数量157只射频超导腔和32套低温恒温器以及高能量束流传输线构成的超导直线加速器,逐步把质子束加速到500 MeV,连续波质子束流强度5 mA,束流功率2.5 MW,超导直线加速器长约300 m。强流高功率质子束轰击散裂靶,产生用于维持次临界反应堆持续进行裂变反应的高通量散裂中子,这些高通量的中子与次临界反应堆里的乏燃料中的核素发生持续的链式核反应,将长寿命高放射性核素嬗变成为短寿命核素或者稳定核素,从而达到嬗变核废料的目的。CiADS散裂靶采用铅铋冷却靶和原创的颗粒流靶,可承受2.5 MW质子束流功率。次临界快中子反应堆核热功率约10 MW(包含约2.5 MW束流功率)。

HIAF和CiADS两装置正在广东惠州建设,基建已基本完成。HIAF目前已完成了设备批量加工和离线测试,已进入设备现场安装阶段,预计2025~2026年完成装置束流调试并开始运行。CiADS超导直线加速器部分设备已进入批量加工和离线测试,通用基础设施已开始现场安装,安全分析报告和建造许可证批复后,次临界反应堆土建将开始建设,反应堆设备将开始加工。预计2027年器靶堆将

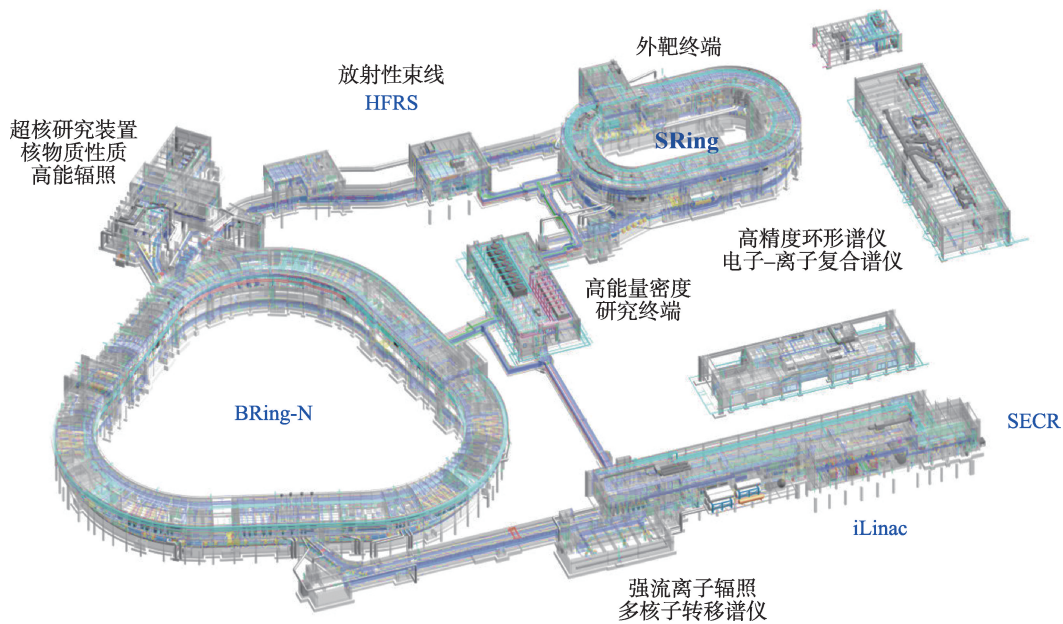


图2 强流重离子加速器装置HIAF布局



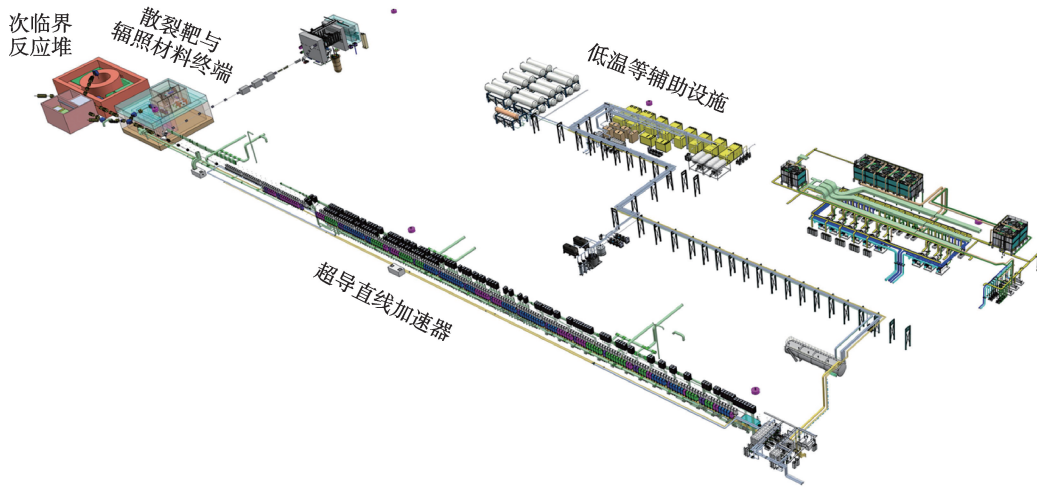


图3 加速器驱动嬗变研究装置 CiADS

联合调试,2027~2028年开始运行。图4是HIAF和CiADS两装置在惠州建设现场照片。

CNUF将是在有效结合HIAF和CiADS建设成果,充分发挥其优势基础上,拓展建设的集多运行模

式、高精度束流操控于一身的国际高功率、高亮度、高精度粒子加速器装置,总体布局如图5所示<sup>[1-3]</sup>。

CNUF将分阶段建设由直线加速器、同步加速器、储存环、电子离子对撞机和各类大型实验探测



图4 HIAF和CiADS两装置建设现场照片

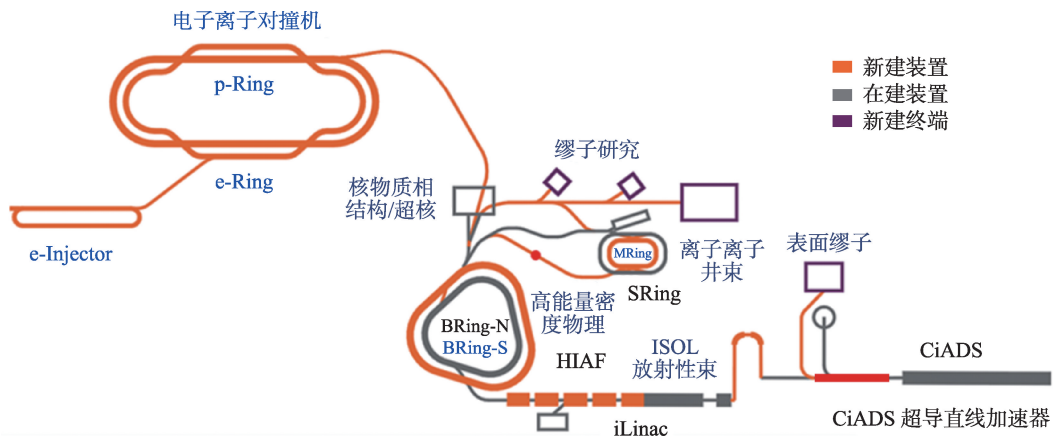


图5 中国先进核物理研究装置 CNUF 布局

设施及平台终端组成的大科学装置集群。主要建设内容包括:

(1) HIAF 加速器升级工程。注入器 iLinac 的能量升级至 200 MeV/A, 在 BRing-N 隧道内建造磁刚度 86 Tm 的全超导同步加速器 BRing-S, 通过这样的升级工程, iLinac 既可作为 BRing-N 高能量高流强注入器, 又可通过分时或分束作为独立的高功率重离子加速器同时为核物理实验供束, 而且使 HIAF 同步加速器 BRing 引出重离子束流强度大于  $1 \times 10^{12}$  ppp, 最高能量达到 9.1 GeV/A, 每脉冲重离子束功率达到 0.5~1.0 MJ。同时在 SRing 储存环隧道内建造全超导重离子储存环 MRing。升级后的 HIAF-iLinac 束流强度和束流功率将高于美国 MSU 的 FRIB 加速器, HIAF-BRing 束流强度将高于德国 GSI 的 FAIR-SIS100。通过升级工程使 HIAF 成为国际上束流强度和束流功率等指标领先的强流重离子加速器装置。

(2) CiADS 超导直线加速器升级工程。将 CiADS 装置质子超导直线加速器从 500 MeV/5 mA 升级至 2.0 GeV/10 mA。利用 CiADS 超导直线加速器制备的高功率质子束轰击在线同位素 (ISOL) 靶产生丰中子核素, 并与 HIAF 加速器相结合, 利用 HIAF 注入器 iLinac 或者同步加速器 BRing 后加速丰中子放射性核束, 建造成新一代 ISOL 型放射性束装置 HIAF-ISOL, 可以为放射性束核物理研究提供高产额的丰中子核束, 在放射性束产生种类、放射性束流强度和束流功率等方面将处于世界领先。

(3) 基于 HIAF 加速器装置建造海夸克能区高亮度极化电子离子对撞机及测量谱仪 (EicC), 质子束流能量 25 GeV, 极化率达到 70%, 电子束流能量 5 GeV, 极化率达到 80%。EicC 可能成为世界上第一台运行在海夸克能区的电子离子对撞机<sup>[9]</sup>。

(4) 分阶段新建一批创新设计的先进实验探测设施、实验平台和示范装置, 分别用于开展高密度物理、重离子驱动的惯性约束聚变前期物理及技术、核物质和超核、强场 QED 效应、缪子物理和基于缪子束的应用、以及离子加速器驱动的先进核裂

变能关键技术和示范等领域的研究工作<sup>[1]</sup>。

核物质和超核实验探测设施将建设由超导螺线管, 径迹探测器、粒子鉴别探测器、电磁量能器等组成的探测谱仪。谱仪可探测质心系中心快度区带电粒子并进行  $\pi$ 、K、p、轻核等粒子鉴别, 其中 90% 以上粒子动量分辨率好于 5%。电磁量能器在 0.1~10 GeV 能量范围内对  $\gamma$  光子的能量分辨率好于  $5\%/\sqrt{E}$ 。利用 BRing-S 提供的高品质离子束流轰击固定靶, 可开展核物质相变、超核、 $\eta$  物理、 $\Lambda$  极化测量等研究。后期更可通过对靶、径迹探测器、电磁量能器等探测系统, 以及新型高速探测器电子学和数据获取系统的升级, 大幅提升事例率至 100 MHz 量级, 开展  $\eta$  介子稀有衰变高精度测量等研究<sup>[1]</sup>。

极化电子离子对撞机 EicC 将基于快循环增强器 BRing-S 的满能量束团快速替换亮度新模式, 通过 PRing 高品质离子束流持续更新, 以及基于 ERL 与电子储存环的高能束团冷却技术, 使对撞峰值亮度达到  $(5\sim 6) \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 积分亮度达到  $(150\sim 200) \text{ fb}^{-1}$  (美国 EIC 装置  $100 \text{ fb}^{-1}$ )。配合由超导螺线管、高精度径迹探测器、高性能粒子鉴别系统、量能器系统等组成的实验探测谱仪, 可对反应产物整体接近全立体角覆盖, 实现动量分辨好于  $1\% @ 1 \text{ GeV}$  和  $15 \text{ GeV}/c$  的  $\pi/K$  分辨能力, 在海夸克能区开展核子结构与强相互作用性质的国际前沿问题研究<sup>[1]</sup>。

强场 QED 效应实验平台将建设创新设计的正负电子测量谱仪, 高精度测量正负电子能量和发射角, 鉴别真空自发电子对产生。结合 SRing 和 MRing 两台储存环中全裸重离子束实现独特的并束碰撞, 在质心能量 4~10 MeV/A 可调、亮度大于  $4 \times 10^{26} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  条件下获得超过施温格极限值的超强电磁场低本底实验环境, 将是国际上灵敏度最高的极端强电磁场条件下 QED 效应研究装置<sup>[1]</sup>。

ISOL 放射性束流装置依托 CiADS 超导直线加速器提供的 10~20 MW 高功率连续波质子束, 可产生并快速在线分离丰中子核素, 通过 iLinac 和快循环增强器 BRing-N 实现最高到几百 MeV/A 的后加速, 获得高流强极丰中子次级束流, 为核素存在极

限和超重核稳定岛探索等问题研究提供最具优势的实验条件<sup>[1]</sup>。

高能量密度物理实验平台利用 iLinac、BRing-N、BRing-S 和 MRing 加速器级联组合提供的 2MJ 高功率、纳秒量级短束团,通过精确操控实现独特的“双束协同打靶”和“多束复合打靶”,获得大尺寸、状态均匀、能量密度精确控制的高能量密度物质,首次将研究范围从温稠密物质区拓展到强冲击波区,也将为探索重离子驱动惯性约束聚变物理提供当前唯一的高功率束流条件。通过研发先进的诊断技术,从时间、空间、谱学(能量)等五个维度实现对极端物态参数的高精度测量,这将成为该领域国际领先的研究平台<sup>[1]</sup>。

缪子物理与应用研究平台包括依托 CiADS 超导直线加速器 10~20 MW 强流高功率质子束流,建设下一代高通量强聚焦低能缪子物理与技术综合研究平台,以及依托 BRing-N 与 BRing-S 高能量强流离子束建设的高通量高能缪子物理与技术前沿研究平台。两者结合,可开展高能 $\mu$ 束成像,超出标准模型新物理探索, $\mu$ SR 技术,特别是基于慢缪的 $\mu$ SR 技术,在凝聚态物理、能源材料、化学等领域的交叉应用, $\mu$ 束冷却等物理、应用和新技术研究<sup>[1]</sup>。

加速器驱动的先进核裂变能关键技术和示范设施以 CiADS 装置为基础,逐步建设相关工艺试验平台,研究乏燃料中长寿命强放射性核素的嬗变、乏燃料裂变产物分离与再生制备、铀钚燃料循环利用与核废料嬗变、再生燃料组件制备、再生燃料嬗变增殖等关键技术与工艺。相关核心技术与工艺突破后,适时建设集核燃料增殖、乏燃料嬗变及核能发电于一体的铀钚燃料循环利用的百兆瓦核能系统示范装置。

## 五、展望

随着科技创新驱动经济社会发展的推进和高质量现代化的建设,相信我国经济实力会进一步增强,在基础研究领域以及国家需求的关键核心技术研发方面的投入将稳步增长。在重要科技领域抢

占制高点、成为“领跑者”是我们科技工作者面临的核心问题,也是我们努力的方向。只要按照计划与设计建设并运行好 HIAF 和 CiADS 两装置,不断取得预期的重要成果,逐步突破相关核心技术,在经费和时间方面确保规划的实施,持之以恒布局和落实 CNUF 装置各个阶段的建设与运行,努力使 CNUF 成为世界上性能领先的以核物理研究为主的国际旗舰型多学科综合装置,依托该装置形成在国际上具有重大影响的领跑型核物理及其应用研究中心,相信是有可能实现的;路虽远,行则将至,事虽难,做则必成。

### 致谢:

本文是作者根据近年来参与中国科学院重大科技基础设施战略研究组—核物理领域大科学装置规划报告编写。感谢核物理大科学装置设施建设项目建议书 CNUF 装置撰写组!感谢中国科学院重大科技基础设施战略研究—高能物理领域报告撰写组!特别感谢众多专家对 CNUF 装置的规划提出的建议与意见!感谢詹文龙院士对 CNUF 装置提出的设想和一系列新思想。感谢《现代物理知识》编辑部邀请作者撰写此文。

### 参考文献

- [1] 孙志宇,等.核物理大科学装置设施建设项目建议书——中国先进核物理研究装置(CNUF).中国科学院重大科技基础设施战略研究报告,2023(内部报告).
- [2] 中国科学院重大科技基础设施战略研究报告——高能物理领域报告,2023(内部报告).
- [3] 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.2019,64(1):1-4.
- [4] 肖国青,徐珊珊,王思成,等.HIAF及CiADS项目进展与展望.原子核物理评论.2017,34(3):275-283.
- [5] 赵红卫,徐珊珊,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,2020,50,112006.
- [6] 陈和生,赵红卫,等.中国科学院重大科技基础设施战略规划——粒子物理核物理领域组报告,2018(内部报告).
- [7] 周小红,张志远,甘再国,等.基于HIAF的超重元素和核素研究.中国科学:物理学力学天文学,2020,50:112002.
- [8] 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.
- [9] 曹须,常雷,畅宁汤,等.中国极化电子离子对撞机计划.核技术,2020,43(2),020001.