惠州加速器集群装置及其未来发展

赵红卫¹, 徐珊珊¹, 肖国青¹, 夏佳文¹, 杨建成¹, 周小红¹, 许怒¹, 何源¹, 马新文¹,
杨磊¹, 陈旭荣¹, 唐晓东¹, 赵永涛¹, 孙志宇¹, 王志光¹, 胡正国¹, 张军辉¹, 马力祯¹,
原有进¹, 詹文龙^{1,2*}

1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院, 北京 100864

*联系人, E-mail: wzhan@cashq.ac.cn

收稿日期: 2020-06-30; 接受日期: 2020-08-05; 网络出版日期: 2020-10-13

国家“十二五”重大科技基础设施项目(编号: 发改高技[2015]3185和3187号)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2014CB845500)资助

摘要 本文概述了基于粒子加速器的核物理研究主要的前沿方向和重要科学问题, 分析了用于核物理研究的粒子加速器大科学装置发展现状和未来发展态势. 国家“十二五”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)和“加速器驱动的嬗变研究装置”(China Initiative Accelerator Driven System, CIADS)正在广东惠州建设. 以HIAF和CIADS为基础, 本文提出建设用于核物理及其交叉前沿研究的大型带电粒子加速器集群装置——高亮度电子离子研究装置(Bright Electron and Ion research Facility, BEIF). 依托BEIF装置拟开展的核物理前沿研究方向包括原子核结构、核天体物理、核子结构、夸克物质相结构, 以及基础物理若干重要前沿与核物理的交叉, 如高离化态原子物理、重离子驱动的高能量密度物理等. BEIF是由多台超导直线加速器、同步加速器、储存环、反应堆和各类大型实验探测器及实验终端等组成的大科学装置集群. BEIF计划分三期进行建设, 建成后的装置将极大地推动我国的核物理和核科学技术研究能力的提升.

关键词 核物理, 带电粒子加速器, 加速器集群, 重离子束, 束流强度, 束流能量

PACS: 29.27.-a, 29.20.-c, 29.30.Aj, 42.60.Jf, 13.85.-t

1 引言

核物理在原子核层次上研究物质的结构、相互作用和运动规律, 对回答物质基本结构和宇宙的起源与演化这两个人类长期探索的自然界基本问题和核技术在经济社会发展及国家安全等方面应用具有不可替代的重要意义. 基于粒子加速器的大科学装置是研究核

物理前沿科学问题的重要基本工具, 同时在航天、核能、材料、医学与人口健康、环境污染治理和国家安全等方面有重大应用. 现代核物理研究越来越多地依赖于粒子加速器大科学装置的支撑. 粒子加速器大科学装置可以为核物理研究提供不同能量、不同种类的高品质束流, 如稳定核离子束、放射性核束、极化和非极化粒子束、短波长X射线或强激光束等. 近百年

引用格式: 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

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: 112006, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0248](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0248)

来,随着粒子加速器装置的不断升级换代,核物理研究沿着同位旋、能量和角动量维度拓展^[1].与此同时,核物理与其他学科相互渗透和融合形成了核天体物理、强子物理、高离化态原子物理和重离子驱动的高能量密度物理等前沿交叉学科^[2].目前核物理及其交叉前沿研究领域包括新元素合成、同位素存在极限和奇特原子核结构、极端天体环境中的核过程、强子内部结构和强相互作用相结构、超临界场量子电动力学(QED)效应、极端高压高密条件下的温稠密物质状态方程及其辐射输运性质等研究.这些核物理前沿及交叉领域的研究基本上都是依托于粒子加速器大科学装置.在重大科学目标的牵引下,世界科技强国高度重视基于粒子加速器的核物理研究,表现为粒子加速器大科学装置的建设、功能强大的实验探测设备的研制、研究项目和团队的国际化等.核物理研究科学目标的复杂性,需求高能量、高束流强度的大型带电粒子加速器或由多个加速器组成的加速器集群装置,也特别需求高度精密的大型实验探测器.大型粒子加速器大科学装置的特点是涉及的关键核心技术繁多且复杂、建设周期长、经费投入大、建设队伍庞大.加速器大科学装置的建造、运行和进行核物理研究,必须组织一支包含理论、工程、实验探测技术、数据处理等各方面专家的研究团队,才可能保证巨大经费投入的安全性、高效性和装置性能的先进性.

国家“十二五”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)和“加速器驱动的嬗变研究装置”(China Initiative Accelerator Driven System, CIADS)正在广东惠州建设^[3,4].为了解决核物理及其前沿交叉领域的重大科学问题,使我国未来在若干核物理研究方向形成显著的优势,也为了充分发挥HIAF和CIADS两台装置在核科学研究方面的效益,在HIAF和CIADS两台大科学装置的基础上,我们提出建设用于核物理及其交叉前沿研究的大型带电粒子加速器集群装置——高亮度电子离子研究装置(Bright Electron and Ion research Facility, BEIF).BEIF是由多台超导直线加速器、同步加速器、储存环、反应堆和各类大型实验探测器及实验终端等组成的大科学装置集群.本文将重点介绍核物理前沿研究方向、基于核物理研究的粒子加速器大科学装置发展态势和BEIF加速器集群装置及其未来发展规划.

2 基于粒子加速器的核物理及其前沿交叉研究方向和主要科学问题

2.1 原子核结构和核天体物理

超重元素合成物理研究 经过半个多世纪的不懈努力,国际核物理界在元素合成领域取得了巨大成功,已将元素周期表从92号扩展至118号元素.目前,在新元素合成研究领域,有待解决的重大科学问题有:究竟存在多少种化学元素(化学元素周期表是否有终结点)、超重元素的化学性质是否符合周期表的外推^[5-8].依托强流重离子加速器,利用熔合反应是产生新元素的唯一途径^[8].考虑了壳修正的理论模型预言以质子数 $Z=114$ (120或126)、中子数 $N=184$ 为中心存在一片寿命较长、相对稳定的超重核稳定岛.探索超重核稳定岛能够揭示在极强库仑场下原子核的结构和性质,发现可能存在的最大核幻数.合成位于超重核稳定岛上的长寿命核素,将为精确确定超重元素的化学性质奠定物质基础,并且可能具有不可估量的重大应用价值^[5,6].

放射性束物理研究 自然界存在286种稳定原子核,理论预言应该存在约9000种原子核,已合成了约3150种不稳定原子核^[9,10].目前已发现极其丰富的核结构和核反应现象,建立了能够描述靠近稳定线原子核结构和性质的多种理论模型^[10].但是,人们对将质子和中子聚合在一起且形成原子核的长程强相互作用的认识非常有限.利用在线同位素分离器(ISOL)及弹核碎片分离器(Projectile Fragment Separator)等装置可以产生远离稳定线原子核.探索远离稳定线原子核的奇特性质、结构与有效相互作用,新的集体运动模式与对称性,原子核中的弱相互作用与基本对称性,有望建立描述弱束缚核结构和性质的新理论.对新发现的非稳定原子核基本物理量(质量、寿命、电荷、半径、自旋、磁矩、电四极矩等)的测量具有基础性意义.原子核质量的精确测量能够提供核子间有效相互作用强度、基态量子壳层结构、邻近原子核的相对稳定性等重要信息,成为原子核奇异衰变、幻数和壳层演变、晕结构出现、是否达到稳定性边界(滴线)等的重要指针.原子核基态的自旋、磁矩、电四极矩和电荷半径是原子核的基本性质,反映了原子核的内禀结构,是表征核内核子有效相互作用的基本物理量,也是检验和发展原子核理论模型的重要依据,在核结

构、核有效相互作用等的基础探索研究中不可或缺. 对于不稳定原子核的内在结构、有效相互作用形式、反应机制和效应的认识, 则需要大量系统性的核衰变和核反应的研究, 因此利用放射性核束流开展的物理研究, 已成为目前核物理研究的主要前沿方向之一^[9-11]. 过去多年来放射性束物理研究由于受实验装置条件的限制, 主要集中在轻核的范围, 目前实验已达到大部分质子滴线核, 但中子滴线只到 $Z=10$ 左右^[9,12,13]. 而很多重要的未知核素主要位于滴线区域特别是中重极丰中子核区, 因此未来放射性束物理研究的重点将向更重和更靠近滴线的核区扩展, 这些区域的未知核素可能具有奇特的结构和性质, 蕴藏着重大发现的机遇. 产生这些未知核素的最佳方法之一是建设新一代ISOL(强流加速器驱动的在线同位素分离器)加速器装置.

核天体物理研究^[14] 从铁到铀的重元素起源是21世纪的十一大“将夸克与宇宙联系起来的物理难题”之一^[7,15]. 快速中子俘获过程(r-过程)产生了宇宙中大约50%的从铁到铀的重元素以及铀、钍及其他的锕系元素. 该过程路径上的同位素性质(质量、寿命、衰变、中子俘获截面和裂变等)决定了特定天体物理环境中产生的r-过程元素丰度. 由于该过程涉及大量尚未合成的极丰中子同位素, 目前只好借助理论模型提供外推结果, 导致无法得到准确的元素丰度预言. 目前r-过程有两个最可能的天体环境——中子星合并和超新星爆发. 由于还缺乏可靠的天体物理模型来实现r-过程必要的极丰中子环境, 我们尚无法解释银河系中极贫金属星的重元素丰度演化历史. 核天体物理将研究的重要科学问题主要包括四个方面^[14,16]. (1) 核合成过程理论研究. 通过相关核过程研究, 确定关键核素及其需要研究的性质, 为实验指出方向; 根据实验结果, 约束核物理模型, 提升模型的预言能力, 更新核天体物理研究所需的质量和反应率数据库, 结合天文观测, 检验星体模型, 理解宇宙中的元素起源. (2) 核合成过程关键核素性质的实验研究. 实验产生快中子俘获过程核合成路径上的关键核素, 精确测量它们的质量、寿命、衰变模式、裂变及相关核反应率; 利用天体模型理论模拟发生在爆发性天体环境中的核过程, 比较模拟得到的元素丰度与观测的元素丰度, 确定合成过程发生的天体环境和物理环境, 理解宇宙中元素的产生. (3) 中子星物态方程. 中子星物态方程与中子星合并过程

中发射的引力波紧密相关. 研究重离子碰撞中不同物理量相对于对称能的敏感程度; 开展实验测量, 研究和提取丰中子核物质的状态方程, 特别是对称能在高密度区的行为. 基于核密度泛函理论, 利用当前对致密星体质量半径的观测及引力波的探测, 约束高密区核物质状态方程. (4) 弱相互作用率. 中微子在超新星爆发过程中起到至关重要的作用, 在爆发过程中, 高达99%的能量通过中微子释放出来. 超新星模型涉及一系列丰中子核素在高温高密环境中的电子俘获及 β 衰变过程. 利用电荷交换反应, 可以获得关键能级的跃迁强度, 用于确定星体环境中的弱相互作用反应率.

2.2 强子物理、核子结构和缪子物理

强子包括介子和重子, 是构成物质世界并具有内部结构的最小单元. 强子内部的夸克-胶子结构以及可能存在的新强子态属于当今人类正在探索的物质世界的更深层次, 是中高能核物理和粒子物理共同关心的交叉前沿热点^[17,18].

强子物理研究的基本问题包括: 夸克和胶子的一维和三维结构及如何构成强子, 强相互作用能产生何种形态的粒子和物质; 强相互作用的各种对称性及破缺如何体现出来; 如何有效地计算非微扰强相互作用等. 探索核子内部结构和解决强子物理的上述问题, 特别是解决核子的自旋和质量的起源、夸克胶子禁闭机制和半径等最基本的问题^[17-20].

半个多世纪以来, 人类对核子结构开展了一些初步的研究, 特别是美国托马斯杰斐逊国家实验室(Thomas Jefferson National Laboratory, JLab)利用较低能量的束流对质子内部的价夸克结构做了详细的研究. 对胶子和海夸克进行研究则需要更高能标的电子-离子对撞机(Electron Ion Collider, EIC). EIC装置可视为“超级电子显微镜”, 将是研究核子结构和原子核内夸克胶子分布的最有效设备, 能提供核子内部清楚的三维图像, 是人类认识物质世界深层次结构特别是核子与原子核结构的理想工具^[17-20].

核子结构 EIC将通过高精度测量, 为我们提供最直接和准确的核子内部夸克, 尤其是海夸克和胶子的三维部分子分布函数的信息, 深入揭示核子内部结构的图像, 有助于从根本上解决目前关于核子和强相互作用的一系列疑难问题, 深化人们对核子结构的微观认识. 除了自身的重要物理价值, 精确的部分子分布

函数对于在大型强子对撞机上粒子物理的精确研究甚至新物理的探索都是极其重要的. 双极化束流的EIC能提供精确测量不同味道海夸克自旋的独特机遇, 有助于更加清楚地研究核子的自旋结构等问题. 此外, EIC还可能在 π 和K介子的结构函数和核介质效应等方面取得独特的物理成果^[17-20].

质子质量的量子色动力学(QCD)结构 质量是粒子的最基本性质之一. 解决质子质量的组成问题, 是核与粒子物理中一个非常基本和有深刻物理意义的问题. 质子质量将近99%是由强相互作用引起的量子效应, 只有1%的质量来自于Higgs机制产生的夸克质量. 目前, 质子质量最不清楚的部分是迹反常部分. 按照目前的理论, 通过测量矢量玻色子近阈产生是研究迹反常效应一种很好的途径. 在EIC上, 将能首次精确测量重味(底)介子Upsilon粒子在阈值附近的产生. 结合粲味 J/ψ 粒子在阈值附近的产生, 将能深入了解QCD迹反常机制对质子质量的贡献. 这对于理解和最终解决质子质量问题是至关重要的, 同时促进我们从质量角度进一步理解强相互作用和QCD性质^[17-20].

缪子物理 强流重离子束或质子束打靶可以产生各种次级粒子, 如 π 介子和反质子束流, 缪子束流通常由 π 介子衰变产生, 而 π 介子或缪子的衰变还可以产生中微子束流^[21,22]. 基于这些束流可以开展多方面的重要基础物理问题研究, 特别是缪子物理研究^[21]. 粒子物理高强度前沿关键的、突破性的科学问题包括: 缪子反常磁矩的精确测量、缪子-电子转换的带电轻子味破缺(cLFV)过程的寻找等^[20,21]. cLFV是标准模型中唯一尚未被观测到的基本粒子味破缺现象, 实验上寻找cLFV信号将是新物理的直接证据, 灵敏的cLFV寻找可以检测相当数量的理论模型. 此外, 开展诸如缪子(μ)原子物理、利用反质子湮灭实验开展QCD低能区非微扰性质、非稳定核结构等研究也具有重要的科学意义. 缪子反常磁矩的理论计算和实验测量值的精度高于百万分之一, 对于高能标上超出标准模型新物理的寻找, 缪子反常磁矩的高精度测量将是非常灵敏的探针^[21].

2.3 夸克物质相结构

自然界中90%以上的可见物质都受强相互作用(自然界四种基本相互作用之一)支配, 而QCD是描述强相互作用的基础量子场论. Higgs粒子的发现让人们

在弱电对称性破缺的能标上可以理解基本粒子质量的来源^[20], 但在许多与QCD相关的重要问题上, 我们仍面对大量的未知. 在低温极高重子密度区, 相关的物理问题是夸克禁闭、手征对称性破缺、新的核物质相与中子星的内禀属性. 这些重要的物理问题是中高能重离子碰撞领域的主要研究目标^[23].

重离子碰撞是实验室研究低温高密核物质性质唯一的手段. 低温高密核物质性质的研究所涉及的束流能量跨度极大, 国际上众多大型核物理实验室, 如美国FRIB^[24]、德国FAIR^[25]、日本RIKEN^[26]等, 均投入大量的人力物力进行基础研究及其相应的高新探测技术研发, HIAF以及国际上俄罗斯的NICA^[27]、德国的FAIR和美国RHIC的能量扫描计划^[28], 将会形成一个完整的QCD相图的探索途径. 基于在惠州建造的大科学装置可以开展的夸克物质相结构研究包括^[23]: 临界性研究、集体性研究、手征性研究和超核研究.

临界性(Criticality)研究 理论研究预言从强子相到夸克胶子等离子体(Quark Gluon Plasma, QGP)相必然存在一个一阶相变的终结点, 即QCD相变临界点. 人们从理论和实验上做过许多努力去尝试寻找QCD临界点以及它在QCD相图中的位置. 至今为止, QCD临界点存在与否以及它在QCD相图中的位置始终没有定论. 因此选择适当的实验观测量来寻找QCD临界点, 研究QCD相结构的状态方程成为当今高能核物理理论和实验研究的热点和前沿. QCD临界点的实验确认将是研究强相互作用物质相变结构的一个里程碑, 对理解宇宙演化和致密星体内部结构都具有重要的科学意义^[23].

集体性(Collectivity)研究 相对论重离子碰撞的集体运动与碰撞产生物质的整体性质(Bulk Properties)密切相关. 重离子碰撞中的多重数、各粒子的产额、动量分布、强子的关联(特别是横动量小于1.5 GeV/c的软强子)反映了碰撞中产生物质的整体性质. 通过研究低横动量强子的性质, 希望推断出系统的初始条件、热化程度、自由度和状态方程. 测量强子谱可以反映物质在动力学冻结(Freezeout)时的整体性质. 不同粒子的横动量分布反映了随机和集体运动分量. 随机运动分量可以通过动力学冻结时的温度确定, 集体分量由高能核碰撞产生的“火球”从中心到边缘的物质密梯度产生, 这种集体流与相互作用的强度密切相关^[23].

手征性(Chirality)研究 (1) 磁场效应的研究. 多

种与手征性相关的集体输运效应在高能RHIC重离子碰撞中获得了实验证据支持, 但仍然无法排除背景机制的干扰, 目前还无法证实其在重离子碰撞中是否存在. 依赖于电磁场的多种与手征性相关的集体输运效应非常有希望在HIAF能量下观测到, 并得到进一步的深入研究. 在HIAF能区对于手征磁效应等信号的探测也将给我们提供关于手征对称性破缺对于手征磁效应等反常输运现象影响的重要信息. (2) 极化效应的研究. HIAF装置的高亮度和低碰撞能量给整体极化效应的研究提供新的机会. 在HIAF能区可以测量超子的整体极化, 有助于研究碰撞能量和集体流的依赖行为. 在HIAF装置上可以实现多种碰撞, 例如质子与原子核碰撞, 为研究小系统的整体极化效应提供了机会. 对HIAF能区产生的核物质的整体极化效应测量, 可以深化人们对强子层次的自旋轨道耦合的认识^[23].

超核研究 超核由超子和核子组成, 在普通核素图上增加了奇异性自由度, 是研究味相关核力性质的理想场所. 同时, 也是研究超子-超子(Y-Y)、超子-核子(Y-N)相互作用的理想载体, 这些强相互作用物质和过程也存在于宇宙大爆炸过程及可能存在于超子凝聚现象的中子星等天体中. 因此, 对超核产生截面、寿命等关键参数的测量既是实验室研究超子-核子相互作用的有效手段, 也可以为理论上研究中子星等天体的物质构成与状态方程提供实验数据. 超核研究是几十年来原子核物理研究的重要前沿领域之一^[29,30]. 在GeV/u能区的重离子碰撞中, 理论计算发现, 束流能量为1 GeV/u时, 超核的产生截面可以高达几个 μb . HIAF的束流设计指标可以使碰撞能量达到质子能量10 GeV, 这为研究基于超核的Y-N, Y-Y相互作用提供了重要的实验平台. 从实验技术路线上, 精确测量带电粒子径迹, 利用不变质量重构的方法重建并测量超核, 给出超核的产额、集体运动等观测量, 进而研究重子-奇异性关联(例如奇异性布居因子)和核子-超子相互作用. 利用动量关联方法测量核子-超子相互作用参数, 该方法已经被广泛用于相对论重离子碰撞中的稀有粒子相互作用测量, 通过测量的相互作用参数可以提取超核的本征参数, 也可以探索双重子态(超子-核子两体束缚态)的可能性^[29,30].

2.4 高离化态原子物理

量子电动力学(QED)是描述光与物质相互作用的

基本理论, 同时满足狭义相对论和量子力学, 是迄今为止物理学中能精确描述实验结果的理论^[31]. 在氢原子等弱电磁场条件下, QED的检验精度已经达到了 10^{-10} 水平, 但是在强电磁场条件下, QED的检验精度才接近1%^[32]. 极端强电磁场条件下QED的高精度实验检验依然是我们面临的巨大挑战. 然而, 国际上的超强激光目前只产生了接近 5×10^{12} V/cm电磁场, 目前实验室中还无法产生可以开展极端强场QED高精度检验的宏观电场. 利用高电荷态重离子(HCI)产生极端强电磁场条件成为目前实验室的唯一手段, 例如, 类氢的铀离子中的1s轨道电子感受到的平均电场强度是氢原子中的一百万倍, 达到了 10^{16} V/cm. 因此, 通过精密测量高电荷态重离子的能级结构, 就可以在更高精度上检验强场条件下的QED效应. 另外, QED理论进一步预言, 在超强电磁场条件下, 即场强超过施温格极限值(Schwinger Limit) 1.3×10^{16} V/cm时, 中性的真空会被超强场撕裂而变得不稳定, 直接产生正负电子对^[33]. 目前, 高性能的重离子加速器系统已基本具备创造超越施温格极限超强电磁场的能力. HIAF的升级装置将提供两束同向运动、小角度交叉碰撞的高电荷态离子束, 其质心系碰撞能量在原子核库仑势垒之下, 在两核接近时可产生超越施温格极限的场强, 而且最新的理论研究对此提供了可行性支持^[34]. 因此, 利用现代重离子加速器装置产生高电荷态重离子束为开展强场QED实验研究提供了独特的条件^[31].

激光技术和储存环的结合有可能将高电荷态离子谱学的精度提升到激光谱线的超高精度. 在激光精密谱学实验中对超精细能级的精密测量能够探测精细结构常数 α 是否随时间和空间变化, 有可能为检验超出标准模型的新物理提供重要的依据^[35]. 利用激光谱技术还可以测量放射性核素原子的超精细结构以及电子能级同位素移位(或者同核异能态移位)来提取原子核的基本性质^[36], 研究原子核的内禀结构, 是检验和发展不稳定核区原子核理论的重要依据, 为原子物理精密谱学与现代核物理的交叉研究提供了广阔的舞台^[37-39].

在碰撞动力学研究方向, 加速器装置提供的高电荷态离子的速度接近光速, 能够产生超短和超强的电磁脉冲, 其与原子分子相互作用的时间尺度在 10^{-21} – 10^{-18} s, 远小于原子分子内部电子运动特征时间. 因此, 相对论高电荷态离子可作为研究原子分子内部电

子关联动力学、分子团簇库仑爆炸动力学的有效探针^[31].

2.5 重离子驱动的高能量密度物理

高能量密度物理研究的对象是能量密度超过 10^{11} J/m^3 , 等价压强超过 1 MPa 的高能量密度物质, 这种极端条件物质广泛存在于恒星和大质量行星内部, 同时也是核武器、激光聚变以及 Z 箍缩(Z-pinch)等过程中物质发展和存在的一个重要阶段. 随着高功率激光、Z 箍缩以及大型离子加速器等新一代高功率装置不断发展, 与高能量密度物理相关的基本科学问题的解决正孕育着重大突破, 可望催生新的思想和理论, 产生颠覆性技术^[40-45].

高功率离子束作为一种全新的驱动方式, 将揭开高能量密度物理研究新的一页. 高能高功率重离子束可以准等容高熵加热任何高密度样品, 得到体积大、状态均匀、内部没有冲击波而且能量密度参数可以精确计算和控制的高熵态, 这与通常的主雨贡纽线(Principal Hugoniot)上的冲击加载完全不同, 十分有利于高精实验数据的获取和高精度物理模型的检验. 依托高能高功率重离子加速器, 可以开展的高能量密度物理前沿研究包括以下几个方面: 可控制备极端高压高密条件下的新物态、极端条件下温稠密物质的物态方程、高能量密度物质的原子结构及其辐射输运特性、极端条件下物质的绝缘体-金属相变、强流粒子束在稠密电离物质中的能损和输运过程^[40-43].

可控制备极端高压高密条件下的新物态 高能量密度物质, 尤其是温度为 0.1–10 eV, 密度 0.1–10 倍固体密度的温稠密物质的产生及其发展规律是高能量密度物理研究的核心科学问题. 利用离子加速器可以产生具有一定重复频率的高功率重离子束, 单脉冲束流能量可以达到十万焦耳甚至百万焦耳, 功率可达太瓦(TW)量级. 这样的高功率离子束直接打靶即可产生接近固体密度、温度达到 10 eV 量级、能量密度达到 10^{13} J/m^3 量级的大体积均匀高熵态, 从而可以将离子束驱动高能量密度物理研究拓展到强冲击波区域, 为实验室制备和研究极端高压高密新物态提供全新的研究平台.

极端条件下温稠密物质的物态方程 温稠密物质内部压强极大, 体系中分子部分离解、原子部分电离, 各种粒子(包括光子、电子、离子、原子、分子、团

簇等)之间的相互耦合作用极强, 所有微扰方法均已失效, 量子效应也必须考虑, 微观作用过程十分复杂. 目前还没有任何一种理论能够比较全面地描述温稠密物质的微观作用机制和相变与状态方程等宏观性质. 另外, 当前实验室制备的温稠密物质往往处于一种极端非平衡状态, 样品的存在时间极短, 密度、温度和压力等参数空间梯度很大, 样品状态及其演化过程极为复杂, 实验上很难给出某一特定状态下温稠密物质的高精度物理参数, 亟需发展新的驱动技术和实验方法. HIAF 提供的高功率重离子束准等容加载将可以制备体积大、状态均匀的温稠密物质, 从而有望把温稠密物质状态方程研究从半定量推进到定量甚至精细定量的程度.

高能量密度物质的原子结构及其辐射输运特性 高能量密度物质的原子结构及其辐射不透明度的研究, 决定了我们对宇宙天体演化以及惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)靶丸燃烧过程的认识. 高能量密度物质内部原子或分子处于高压高密度条件下, 相互耦合作用极强, 原子结构表现出与通常凝聚态或孤立态的原子分子截然不同的复杂特性, 电子屏蔽作用导致内部原子/离子的电离势降低, 出现原子、分子或晶体结构等奇异的新变化. 而目前理论上计算等离子体辐射不透明度所涉及的原子结构及原子过程引入了大量的近似, 基于这些模型的理论计算结果与实际观测到的部分现象不符(如太阳辐射对流层边界、太阳中各元素的丰度等), 极端高压高密条件下温稠密物质的原子结构物理模型及其辐射输运系数等关键参数的可靠性亟待高精度实验检验.

极端条件下物质的绝缘体-金属相变 高能量密度物理中, 绝缘体-金属-超导体相变是一个重要的研究方向. 一般来说, 固体可以被高度压缩, 或者膨胀成为过热液体, 液体可以转化为气体或转变为强耦合等离子体. 良导体在加热和拉伸时会发生金属-绝缘体(Metal to Insulator, MTI)相变; 而绝缘物质在高压条件下会发生绝缘体-金属(Insulator to Metal, ITM)的转变. 例如极端高压下产生的金属氢(MH)以及氢化物具有很好的导电性, 成为高温超导体, 其临界温度将可能高于室温.

强流粒子束在稠密电离物质中的能损和输运过程 强流离子束在稠密电离物质中的非线性能量沉积和输运过程是离子束驱动高能量密度物理及惯性约束聚变

研究中最核心的基础科学问题之一. 新一代强流加速器提供的离子束流强密度可以达到 10^{14} – 10^{16} cm^{-3} 量级, 而惯性约束聚变氦离子燃烧(Alpha Heating)和离子束快点火(Ion Fast Ignition)涉及的离子束流强密度则可以高达 10^{24} cm^{-3} 量级. 随着流强密度增大, 离子束在等离子体中激发的自生电磁场及其引起的能损与输运的非线性效应将会显著加强, 相关物理建模挑战性极高, 高精度实验数据报道也极少. HIAF设计了交叉束和对撞束方案, 同时也能够制备状态均匀且体积较大的温稠密物态, 非常有利于强流离子束与温稠密物质相互作用机制的研究.

3 用于核物理研究的粒子加速器大科学装置发展现状和态势

3.1 用于传统核物理研究的离子加速器装置发展现状

目前国际上运行的大型离子加速器装置约20余台. 逐步深入和拓展的核物理研究驱使着加速器升级换代. 用于核物理研究的离子加速器的发展趋势是不断挑战高能量、高流强、高束团功率、高束流品质和亮度. 实现高能量的最佳途径是同步加速器, 典型代表是欧洲大型强子对撞机LHC^[46]; 实现高流强连续离子束的最佳技术路线是超导直线加速器, 典型代表是在建的美国稀有同位素束流装置FRIB^[24]; 实现高束团功率的最佳方案是级联的环形同步加速器, 逐级提高束

流能量, 逐级累积提高单束团离子数, 典型代表是在建的我国强流重离子加速器研究装置HIAF和德国反质子和离子研究装置FAIR^[25]. 实现高束流品质的技术路线是应用各种束流冷却技术如随机冷却、电子冷却或激光冷却. 目前国外正在建造的大型重离子加速器装置主要有德国FAIR、美国FRIB和俄罗斯NICA^[27], 这三个装置将于2022–2025年左右建成并投入运行, 将在今后一定时期内引领国际上重离子核物理研究. 欧洲曾经提出世界上驱动主加速器束流功率和次级束束流强度最强的ISOL型放射性束加速器装置EURISOL^[47,48].

我国现有的核物理大型加速器装置主要是兰州重离子研究装置(Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, HIRFL)^[49]和北京放射性核束装置(Beijing Rare Ion beam Facility, BRIF)^[50]. HIRFL加速器装置如图1所示. 这台装置能够提供中低能稳定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提供了先进的实验平台. 但是, 由于前期经费投入不足, 现有装置的总体能力和水平与国际上同类装置相比稍落后, 只能在新核素合成、短寿命原子核质量精确测量等研究方向上具有一定的国际竞争力. 与国际上的主要核物理大科学装置相比, 我国现有核物理大科学装置的用户群体主要来自国内的大学或研究机构, 实验用户和上器实验的选择基本上是基于国内专家委员会, 国际化开发程度需要进一步提高.

国家“十二五”重大科技基础设施HIAF已开工建

图1 兰州重离子研究装置(HIRFL), 由两台重离子回旋加速器和两台冷却储存环组成

Figure 1 Heavy Ion Research Facility in Lanzhou (HIRFL), which consists of two heavy-ion cyclotrons and two cooling storage rings.

设, 建设周期7年, HIAF能够产生5000种左右不稳定原子核, 是一台束流指标先进、多学科用途的重离子科学研究装置, 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条件. HIAF建成投入运行后, 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能重离子束流、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^[3,4]. 利用HIAF开展核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以及重离子驱动的高能量密度物理等研究方向上代表国际先进水平.

由中国原子能科学研究院和北京大学提出的“北京ISOL”装置^[51]是以反应堆和强流氦束超导直线加速器双驱动的放射性束装置. HIAF和“北京ISOL”两大科学装置在基础科学目标和满足国家重大需求方面优势互补, 各有侧重, 并各自具有独到的特点. HIAF在产生远离稳定线原子核、精确测量短寿命原子核质量、重离子驱动产生高能量密度物质和高能电子离子碰撞等方面极具优势. “北京ISOL”能够在Ni到Sn的中子滴线区域产生高束流强度的丰中子核素, 对研究远离稳定线原子核的奇异结构和壳演化、天体r-过程的核合成路径及走向等重大疑难问题具有重要意义.

3.2 用于强子物理研究的加速器装置发展现状

探索强子内部夸克-胶子结构主要有两个基本途径: 一是通过高能电磁探针与核子的深度非弹性散射测量核子的夸克-胶子结构函数; 二是通过高能碰撞产生强子激发态、研究强子谱. 在近十年间, 核物理学家为了能显著地对质子和中子中的夸克和胶子层析成像, 已经发展出了新的理论框架. 在美国JLab升级到12 GeV的连续电子束加速器(CEBAF)和欧洲核子研究中心(CERN)的COMPASS实验组里^[52,53], 这些理论将被进一步发展并用于研究核子中价夸克支配的区域. 对胶子和海夸克进行研究则需要更高能标的电子-离子对撞机EIC. 目前, 国际强子物理领域已基本形成共识: EIC将是研究核子、原子核内夸克-胶子分布的最有效设备^[19]. 美国能源部已决定将美国EIC装置落户

于布鲁克海文国家实验室(BNL), 并由BNL牵头联合多个实验室建造.

通过高能碰撞实验产生强子激发态、研究强子谱是探索强子内部结构的另一重要途径. 近年来, 随着高能实验数据的积累, 实验上发现了许多新的介子和重子共振态, 极大地推动了这一领域的发展. 国际上有不少粒子加速器装置开展强子谱方面的研究, 例如我国的北京正负电子对撞机(BEPC II)、CERN大型强子对撞机(LHC)、JLab的CEBAF、日本KEK的超级B工厂等. 同时, 国际上还在建造新型的加速器装置, 例如德国的加速器装置FAIR-PANDA、日本JPARC的K介子和 π 介子束流线等^[54,55].

3.3 用于核物理研究的加速器装置未来发展态势

用于核物理研究的加速器大科学装置发展的主要驱动力来自核物理领域的重大科学问题和重大应用目标. 正如本文第2节所述, 核物理及其前沿交叉研究方向和重大科学问题很多, 还有一些国家需求的重大应用, 一台加速器装置在一定的时期内只能聚焦2-3个重要科学问题或重要的应用目标. 正因为如此, 要解决核物理领域许多研究方向的重大科学问题并满足国家一些重大应用需求, 未来20-30年用于核物理研究的粒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. 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束、放射性束、极化束等多种类组合. 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、高能量密度物理和超临界场QED检验等. 未来用于核物理研究的大型粒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 and 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、累积的束流强度和束流品质. 有些是对撞机的形式, 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粒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.

4 惠州大型加速器集群装置及其初步规划

4.1 总体布局和初步规划

为了充分发挥HIAF和CiADS两台装置的优势及其在科学研究方面的效益, 在HIAF和CiADS两台大科学装置的基础上, 我们提出建设高亮度电子离子研究装置(BEIF). BEIF是由多台超导直线加速器、同步加速器、储存环、反应堆和各类大型实验探测器及实验终端等组成的大科学装置集群.

BEIF装置计划分三期完成建设. 第一期, HIAF和CiADS两台装置建设; 第二期, HIAF升级工程建设(HIAF Upgrade project, HIAF-U); 第三期, 以HIAF为基础, 建设中国电子离子对撞机(Electron Ion Collider in China, EicC). BEIF装置总体布局如图2所示. BEIF装置建成后有望成为综合性能处于世界前列的以核物理研究为主的多学科研究装置. 如果按计划建成, 将有可能是世界上具有极高束流功率和极强放射性束流强度的放射性束研究装置, 也将是极高束流强度的重离子同步加速器、极高束流功率的连续波离子束超导直线加速器装置和世界上第一台运行在海夸克能区的电子离子对撞机. 基于BEIF装置将建设一个高度国际化的

核物理前沿研究中心, BEIF装置将完全对国际用户开发, 成立国际用户委员会和科学实验委员会, 对BEIF装置的运行和用户实验进行国际化的管理, 并将通过各种方式和渠道吸引全世界优秀科学家利用BEIF装置开展核物理及其前沿交叉领域的基础研究.

4.2 BEIF装置第一期: HIAF和CiADS

HIAF总体布局如图3所示^[3]. 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^[3]. 从氢到铀的强流重离子束由两台28–45 GHz超导电子回旋共振ECR (Electron Cyclotron Resonance)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至iLinac注入器. 重离子超导直线注入器iLinac主要由射频四极加速器RFQ (Radio Frequency Quadrupole)、中能传输线和超导直线加速器组成, 超导直线加速器全长约100 m, 由九十多只低 β 射频超导腔组成的加速单元可以把铀离子加速到 $17(^{238}\text{U}^{35+})$ – $22(^{238}\text{U}^{46+})$ MeV/u, 被加速铀离子束最高脉冲束流强度可达到28 pμA (粒子微安), 该超导直线加速器工作频率162.5 MHz, 在2 K低温条件下运行. iLinac产生的能量为17–22 MeV/u的强流重离子束通

图2 高亮度电子离子研究装置(BEIF)总体布局

Figure 2 General layout of Bright Electron and Ion research Facility (BEIF).

图 3 强流重离子加速器(HIAF)总体布局

Figure 3 General layout of High Intensity heavy-ion Accelerator Facility (HIAF).

过垂直双向四维相空间涂抹注入方法, 多次多圈注入常温同步加速器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 T m. 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, 从注入器iLinac产生的重离子束不经过剥离, 直接注入BRing-N中, 例如在强流运行模式下可以把 $^{238}\text{U}^{35+}$ 铀离子束加速到0.8 GeV/u, BRing-N环内铀离子束束流强度可以达到 $(0.5\text{--}1.0)\times 10^{11}$ ppp (particles per pulse); 在高能量低流强模式下, 从注入器iLinac产生的重离子束经过剥离至更高电荷态, 然后再注入BRing-N中, 例如可以把 $^{238}\text{U}^{35+}$ 铀离子束剥离至 $^{238}\text{U}^{76+}$, 经过BRing-N可以加速至能量2.45 GeV/u, 环内束流强度 5.0×10^{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, 又是一条高磁刚度的放射性次级束流线(HFRS), HFRS磁刚度25 T m, 长约180 m. 从BRing-N中引出的稳定核重离子束打靶产生放射性次级束, 经过次级束流线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/u, 引出束流强度可达到 5.0×10^{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277.3 m, 环内配置有电子冷却、随机冷却、双TOF探测器和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. HIAF主要束流指标如表1所示. 目前HIAF设计有6个实验终端, 主要包括: 终端1, 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; 终端2, 位于BRing-N引出端的高能综合终端, 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; 终端3, 位于BRing-N和SRing之间的次级束流线HFRS; 终端4, 位于HFRS后方的外靶实

表 1 HIAF加速器装置主要束流参数

Table 1 Beam parameters of HIAF accelerator

分系统	离子束	束流能量	束流强度
iLinac	$^{238}\text{U}^{35+}$ – $^{238}\text{U}^{46+}$	17–22 MeV/u	28 pμA
BRing-N	$^{238}\text{U}^{35+}$	0.8 GeV/u	0.5×10^{11} – 1×10^{11} ppp
	$^{238}\text{U}^{76+}$	2.45 GeV/u	5×10^{10} ppp
SRing	丰中子丰质子次级束	0.8 GeV/u	10^5 – 10^9 ppp
	高电荷态初级束, 如 $^{238}\text{U}^{92+}$	0.8–1.1 GeV/u	5×10^{11} ppp

验终端; 终端5, SRing高精度环形谱仪和电子-离子复合共振谱仪; 终端6, 高能量密度物理研究实验终端。

加速器驱动的嬗变研究装置(CiADS)总体布局如图4所示^[4]。CiADS由高功率质子超导直线加速器、散裂靶和次临界反应堆三大部分组成。连续波高功率质子超导直线加速器长约300 m, 质子束能量500 MeV, 连续波质子束流强度5 mA, 束流功率2.5 MW。该质子超导直线加速器包含三种类型5个β的射频超导腔, 超导腔数量约150只, 射频超导腔运行在2 K低温环境。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)。

4.3 BEIF装置第二期: HIAF升级工程(HIAF-U)

HIAF建成投入运行后, 主要国际竞争者是德国FAIR和美国FRIB加速器装置。由于投入偏少的原因, HIAF装置的总体能力具有一定局限性, 只能在若干研究方向上形成特色、在若干点上处于国际前列。HIAF要成为国际上全面领先的核物理研究装置, 需要进行升级。因此, 我们提出BEIF装置第二期HIAF升级工程,

简称HIAF-U。HIAF-U以建成的HIAF和CiADS两装置为基础, 进行以下五个方面的升级改造或建设。HIAF-U总体布局如图5所示, 主要束流参数如表2所示, 表3列出了HIAF-U与目前国际上正在建造或提出的重离子加速器装置主要束流性能指标对比^[24,25,27,47,48]。

(1) 将HIAF重离子超导直线注入器能量提升至150–200 MeV/u, 把HIAF同步加速器BRing-N升级改造为HIAF快循环增强器, 并在同一隧道内建造全超导的HIAF主同步加速器BRing-S, 该同步加速器BRing-S所有磁铁全部为超导磁铁, 环周长约600 m, 磁刚度86 T m。通过这样的升级工程, iLinac既可作为BRing-N高能高流强注入器, 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同步加速器引出重离子束流强度大于 1×10^{12} ppp, 最高能量达到9.1 GeV/u, 每脉冲重离子束功率达到0.5–1.0 MJ, 从表3可看出将可能使HIAF束流强度和束流功率等指标超越德国FAIR和美国FRIB装置。

(2) 以HIAF实验环SRing为基础, 在SRing储存环隧道内增建一台全超导重离子储存环MRing。SRing和

图 4 加速器驱动的嬗变研究装置(CiADS)总体布局

Figure 4 General layout of China Initiative Accelerator Driven System (CiADS).

图 5 HIAF升级后的加速器装置(HIAF-U)总体布局设计图
Figure 5 Designed layout of HIAF upgrade accelerator facility (HIAF-U).

表 2 设计中的HIAF升级装置HIAF-U主要束流参数

Table 2 Beam parameters of HIAF-U facility which is a HIAF upgrade under design

分系统	离子束	束流能量	束流强度
iLinac	$^{238}\text{U}^{76+}$	150–200 MeV/u	20 pμA
	$^{238}\text{U}^{35+}$	0.8 GeV/u	2×10^{11} ppp
BRing-N	$^{238}\text{U}^{76+}$	2.45 GeV/u	1×10^{11} ppp
	$^{238}\text{U}^{35+}$	2.95 GeV/u	1×10^{12} ppp
BRing-S	$^{238}\text{U}^{76+}$	7.3 GeV/u	5×10^{11} ppp
	$^{238}\text{U}^{92+}$	9.1 GeV/u	5×10^{11} ppp
SRing	丰中子丰质子次级束	0.8 GeV/u	$10^9\text{--}10^{10}$ ppp
MRing	高电荷态初级束, $^{238}\text{U}^{92+}$	0.8–4.4 GeV/u	$0.5 \times 10^{12}\text{--}2 \times 10^{12}$ ppp
HIAF-ISOL	质子束驱动器	0.5–1.0 GeV	5–10 mA (>2.5–10 MW)

MRing两台储存环中的全裸重离子束可以进行交叉碰撞或并束对撞,在碰撞区周围建造阵列探测器,可鉴别和测量正负电子,对反应离子和X射线进行符合测量,克服本底信号造成的不确定性,可能将是世界上灵敏度最高的研究临界场QED效应的装置.全超导储存环MRing周长约270 m,磁刚度约45 T m.

(3) 利用BRing-N, BRing-S, SRing, MRing可以同时储存、引出束流的优势,在BRing和SRing中间增建高能密度物理研究对撞区,实现“双束协同打靶”甚

至“多束复合打靶”的全新工作模式,极大地提升靶物质的密度与温度,单束团束流能量达到1 MJ以上,研究范围从温稠密区扩展到高能密度区,成为世界上性能先进的重离子驱动的高能密度物理研究实验平台.

(4) 把CiADS装置500 MeV@CW 5 mA超导质子直线加速器作为驱动器,利用高能、强流质子束或轻离子束轰击在线同位素(ISOL)靶,产生丰中子核素.ISOL靶束流功率高达2.5 MW(未来可再升级至

表 3 设计中的HIAF升级装置HIAF-U主要束流参数与国外正在建造的或提出的重离子加速器比较**Table 3** Beam parameters of HIAF-U facility which is a HIAF upgrade under design and comparison with those heavy ion accelerators under construction or proposed in the world

研究机构	加速器	建成时间	典型离子束	典型离子束能量	束流强度或束流功率
德国GSI	FAIR SIS100 ^[25]	2025	$^{238}\text{U}^{28+}$	2.7 GeV/u	5×10^{11} ppp
美国MSU	FRIB ^[24]	2021	$^{238}\text{U}^{76+}$ – $^{238}\text{U}^{80+}$	200 MeV/u	CW 13 pμA
俄罗斯JINR	NICA-Booster ^[27]	2023	$^{197}\text{Au}^{32+}$	4.5 GeV/u	4×10^9 ppp
欧洲	EURISOL驱动加速器 ^[47,48]	计划	H^- , H^+ , $^3\text{He}^{2+}$	1.0 GeV/q	4 MW
	HIAF	2025	$^{238}\text{U}^{35+}$	0.8 GeV/u	0.5×10^{11} – 1.0×10^{11} ppp
			$^{238}\text{U}^{76+}$	2.45 GeV/u	0.25×10^{11} – 0.5×10^{11} ppp
			$^{238}\text{U}^{35+}$	2.95 GeV/u	1.0×10^{12} ppp
	HIAF-U BRing-S	2027–2032	$^{238}\text{U}^{76+}$	7.3 GeV/u	5×10^{11} ppp
			$^{238}\text{U}^{92+}$	9.1 GeV/u	5×10^{11} ppp
中国IMP	HIAF-U MRing	2027–2032	$^{238}\text{U}^{92+}$	4.4 GeV/u	2×10^{12} ppp
	HIAF-U iLinac	2027–2032	$^{238}\text{U}^{46+}$	150–200 MeV/u	1 emA
	HIAF-ISOL 驱动加速器	2027–2032	H^- , H^+	0.5–1.0 GeV/u	5–10 mA (2.5–10 MW)

10 MW), 或者从CiADS次临界反应堆中引出丰中子核素, 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. 经过这样的升级工程, 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, 例如 ^{28}O , ^{78}Ni , ^{91}Kr , ^{120}Sr , ^{132}Sn , ^{142}Xe 等放射性束流, 在放射性束产生种类、放射性束流强度和束流功率等方面处于世界前列, 形成在国际上独特的放射性束装置.

(5) 建造与科学目标和加速器装置相对应的大型实验探测器和实验终端, 不断产出重大成果. 针对BEIF加速器装置以上四方面的升级, 必须规划和建造与之相对应的实验探测器, 实现科学目标. 例如, 基于HIAF-U的新一代放射性束物理实验终端和基于高功率ISOL靶的放射性束物理探测装置. 目前正在建设的低温高密度核物质测量谱仪(CEE)投入运行后, 应该考虑建设新一代高密核物质性质研究和相结构研究谱仪. 为了开展超核物理和缪子物理研究, 需要尽早规划建设超核研究谱仪和缪子物理研究实验探测装置. 高能量密度物理研究是HIAF-U最具特色和优势的研究方向之一, 需要发展适于重离子驱动的高能量密度物质状态诊断手段和实验探测器. 针对HIAF-U在高离化

态原子物理方面的科学目标, 需要建造高电荷态离子精密谱学和精密结构研究的在线激光谱学实验装置, 以及开展强场QED实验研究的高灵敏度探测器等.

4.4 BEIF装置第三期: 在HIAF的基础上增建中国电子离子对撞机(EicC)

在强子物理领域已形成共识, 电子-离子对撞机(EIC)将是研究核子、原子核内夸克-胶子分布的最有效装置, 也是强子物理未来发展的前沿. 我们提出在HIAF的基础上, 建造“8”字型离子环pRing、电子注入器以及跑道形电子环eRing, 常规质子束升级为20 GeV的极化束流, 并提供2.8–5 GeV极化电子束流, 从而实现质心能量为15–20 GeV的双极化电子-离子对撞, 为探索核子与原子核结构提供理想工具. EicC设计的对撞亮度为 $(2\text{--}4) \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 质子束流极化率达到70%, 电子束流极化率达到80%. 该装置还能提供极化轻离子束流(例如氦-3)和非极化重离子束流, EicC总体布局如图6所示^[18], 主要设计参数如表4所示. 由于依托于已有的HIAF加速器系统, EicC离子加速器中新建离子对撞环pRing能够极大地减小项目投入. HIAF增强器BRing能够制备最高能量为9.3 GeV的强流质子束流, 其能量范围能够覆盖离子对撞环pRing的注入能量

图 6 在HIAF加速器基础上设计的中国电子离子对撞机(EicC)装置总体布局
Figure 6 General layout of Electron Ion Collider in China (EicC) which is designed on basis of HIAF accelerator.

表 4 设计中的中国电子离子对撞机(EicC)主要参数
Table 4 Main parameters of EicC facility which is under design

中国电子离子对撞机参数	离子环(质子)	电子环
周长 (m)	1347.7	819.4
对撞束流能量范围 (GeV)	20	2.8–5
优化束流能量 (GeV)	20	3.5
极化率 (%)	70	80
对撞频率 (MHz)	30	
平均流强 (A)	0.5	3
发射度(ϵ_x/ϵ_y) (nm rad)	300/180	60
β 函数@IP(β_x^*/β_y^*) (mm)	40/20	200/60
束团长度 (mm)	35	20
交叉角 (m rad)	50	
束-束频移	0.011	0.04
Hourglass效应	0.85	
亮度 ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	$2 \times 10^{33} - 4 \times 10^{33}$	

2 GeV. 离子对撞环pRing接收来自增强器BRing预冷却的2 GeV极化质子束流, 并加速到对撞能量20 GeV. 为了避免加速过程中的退极化共振, 离子对撞环pRing采用了非常特殊的“8”字型结构, 使该环自旋工作点总是为零, 确保质子束流在加速过程中保持极化率, 也可以更高效地控制质子束流极化方向^[18]. 除了增强器BRing中的预冷却, 为了进一步减小质子束流的发射度, 增加对撞亮度, 并维持较长的对撞寿命, 能量回收

型直线加速器(ERL)高能束团电子冷却装置将在质子束流加速到对撞能量20 GeV后再次进行束流冷却, 并在整个对撞过程中保持运行, 用来抑制强流离子束的束内散射. EicC装置的电子加速器主要包括电子注入器和电子对撞环eRing. 电子注入器采用超导射频SRF循环直线加速器, 提供能量为2.8–5.0 GeV的电子束流. 由于采用全能量注入而没有加速过程, 且电子束流在环形加速器中存在自极化过程, 电子对撞环采用了常规的跑道形结构. 但电子注入器产生电子束流的极化方向需与电子对撞环eRing相匹配^[18].

根据物理研究需求, 运用最先进的探测器技术建造接近全立体角覆盖的探测谱仪, 需要尽早开展EicC探测器的预研和规划^[18]. EicC探测器需要提供好的动量测量、散射电子能量测量、强子末态的粒子鉴别、极小角度探测散射质子等. EicC探测器将由中心探测器和前向探测器组成^[18]. 中心探测器从功能上由四部分构成: 用于测量对撞顶点以及次级顶点探测器; 用于测量带电粒子动量的径迹探测器, 如时间投影室(TPC)、气体电子倍增器(GEM)、稻草管探测器、漂移室等; 用于粒子鉴别的飞行时间探测器和切伦科夫探测器; 用于测量电子、光子和强子能量的电磁量能器以及强子量能器^[18]. EicC将聚焦核子海夸克部分子、原子核物质结构和奇特强子态三方面的物理研究, 同美国将来建设的高能EIC项目形成互补.

EicC作为BEIF装置第三期规划建成后, BEIF将是

由HIAF, HIAF-U和EicC组成的大型加速器集群装置. HIAF总体设计时已对HIAF-U和EicC的建设隧道和用地做了预留和规划. BEIF装置三个时期的建造和升级改造将尽可能做到一边运行一边建设并进行集中安装, 以最大程度地降低对已有装置运行供束的影响. BEIF装置三个时期的升级和装置的运行, 基本上是采用多模式运行, 即多个加速器装置、多个实验终端同时运行, 技术上采用国际上较成熟的分时、分束、劈束等多装置多用户同时实验供束模式, 以发挥这类大型加速器集群装置的最大效率和最大效益.

5 总结与展望

本文概述了基于粒子加速器的核物理研究主要的前沿方向和重要科学问题, 并分析了用于核物理研究的粒子加速器大科学装置发展现状和未来发展态势. 据此提出以我国正在广东惠州建设的两项国家“十二

五”重大科技基础设施“强流重离子加速器装置(HIAF)”和“加速器驱动的嬗变研究装置(CiADS)”为基础, 建设大型粒子加速器集群“高亮度电子离子研究装置(BEIF)”. 预期经过约20年三期工程建设, BEIF有望成为综合性能处于世界前列的用于核物理和核科学技术研究的大型粒子加速器集群装置, 特别是在重离子同步加速器和放射性束装置的束流强度指标、连续波离子束超导直线加速器装置的束流功率指标上处于国际前列水平, 并有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. 通过各种方式吸引全世界优秀科学家利用BEIF装置开展核物理及其交叉前沿基础研究和核科学技术应用研究, 主要聚焦解决以下方向重大科学问题: 原子核结构和核天体物理(包含超重元素合成和放射性束物理)、核子结构、夸克物质相结构(QCD相结构)和基础物理若干重要前沿领域如重离子驱动的高能量密度物理、高离化态原子物理等.

致谢 感谢HIAF和CiADS两台装置设计团队, 感谢EicC项目组成员, 感谢“核物理研究需求的重大科技基础设施2035–2050规划”撰稿组成员.

参考文献

- 1 Writing Group of Development Strategies of Nuclear Physics and Plasma Physics. Development Strategies of China Science Disciplines: Frontier Subjects and Development Strategies of Nuclear Physics and Plasma Physics (in Chinese) (Vol. 1: Volume of Nuclear Physics). Beijing: Science Press, 2017. [核物理与等离子体物理发展战略研究编写组. 中国学科发展战略: 核物理与等离子体物理-学科前沿与发展战略(上册: 核物理卷). 北京: 科学出版社, 2017]
- 2 Bosch F, Litvinov Y A, Stöhlker T. Nuclear physics with unstable ions at storage rings. *Prog Particle Nucl Phys*, 2013, 73: 84–140
- 3 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]
- 4 Xiao G Q, Xu H S, Wang S C. HIAF and CiADS national research facilities: Progress and prospect (in Chinese). *Nucl Phys Rev*, 2017, 34: 275–283 [肖国青, 徐珊珊, 王思成. HIAF及CiADS项目进展与展望. 原子核物理评论, 2017, 34: 275–283]
- 5 Zhou X H, Zhang Z Y, Gan Z G, et al. Research program of superheavy elements and nuclides based on HIAF (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 112002 [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]
- 6 Zhou S G. Super-heavy nuclear and new element research (in Chinese). *Nucl Phys Rev*, 2017, 34: 318–331 [周善贵. 超重原子核与新元素研究. 原子核物理评论, 2017, 34: 318–331]
- 7 Nazarewicz W. Challenges in nuclear structure theory. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2016, 43: 044002, arXiv: 1603.02490
- 8 Oganessian Y T, Sobiczewski A, Ter-Akopian G M. Superheavy nuclei: From predictions to discovery. *Phys Scr*, 2017, 92: 023003
- 9 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 [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]
- 10 Tanihata I. Nuclear physics with RIB's: How it all started. *Eur Phys J Plus*, 2016, 131: 90

- 11 Taniuchi R, Santamaria C, Doornenbal P, et al. ^{78}Ni revealed as a doubly magic stronghold against nuclear deformation. *Nature*, 2019, 569: 53–58, arXiv: [1912.05978](#)
- 12 Ahn D S, Fukuda N, Geissel H, et al. Location of the neutron dripline at fluorine and neon. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 212501
- 13 Thoennessen M. Current status and future potential of nuclide discoveries. *Rep Prog Phys*, 2013, 76: 056301, arXiv: [1304.3267](#)
- 14 Guo B, Liu W P, Tang X D, et al. Research program of nuclear astrophysics based on HIAF (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020 50: 112007 [郭冰, 柳卫平, 唐晓东, 等. 基于HIAF的核天体物理研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 112007]
- 15 Bracco A. The NuPECC long range plan 2017: Perspectives in nuclear physics. *Europhys News*, 2017, 48: 21–24
- 16 He J J, Guo B, Liu W P, et al. How were the nuclides heavier than iron synthesized in the universe (in Chinese)? *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 2429–2439 [何建军, 郭冰, 柳卫平, 等. 宇宙中铁以上的重核是如何合成的. 科学通报, 2018, 63: 2429–2439]
- 17 Cao X, Chen X R, Gong C, et al. Physics and detector design of polarized Electron Ion Collider in China (EicC) (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 112005 [曹须, 陈旭荣, 龚畅, 等. 中国极化电子离子对撞机(EicC)物理及探测器设计研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 112005]
- 18 Cao X, Chang L, Chang N B, et al. Plan of polarized electron ion collider in China (EicC) (in Chinese). *Nucl Tech*, 2020, 43: 020001 [曹须, 常雷, 畅宁波, 等. 中国极化电子离子对撞机计划. 核技术, 2020, 43: 020001]
- 19 Accardi A, Albacete J L, Anselmino M, et al. Electron-ion collider: The next QCD frontier. *Eur Phys J A*, 2016, 52: 268
- 20 Tanabashi M, Hagiwara K, Hikasa K, et al. Review of particle physics. *Phys Rev D*, 2018, 98: 030001
- 21 Sun Z Y, Chen L W, Cai H J, et al. Producing high intensity muon, antiproton beams and related physical researches in the HIAF accelerators (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 112010 [孙志宇, 陈良文, 蔡汉杰, 等. 基于HIAF集群的高强度缪子、反质子次级束产生及其物理研究展望. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 112010]
- 22 Mallot G K, Voss R. Deep inelastic scattering with the sps muon beam. *Int J Mod Phys A*, 2015, 30: 1530052
- 23 Ma Y G, Xu N, Liu F. Study of the QCD phase structure at HIAF (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 112009 [马余刚, 许怒, 刘峰. 基于HIAF集群的QCD相结构研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 112009]
- 24 Wei J, Ao H, Beher S, et al. Advances of the FRIB project. *Int J Mod Phys E*, 2019, 28: 1930003
- 25 Spiller P, Bai M, Blaurock J, et al. Status of the FAIR project. In: Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference (IPAC'18). Vancouver, 2018. 63
- 26 Kamigaito O, Dantsuka T, Fujimaki M, et al. Progress toward high-intensity heavy-ion beams at RIKEN RIBF. In: Proceedings of the 4th International Particle Accelerator Conference (IPAC'13). Shanghai, 2013. 333
- 27 Trubnikov G, Agapov N N, Butenko A V, et al. Status of the NICA project at JINR. In: Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference (IPAC'14). Dresden, 2014. 1003
- 28 Fisher W, Alessi J G, Altinbas Z, et al. RHIC performance with stochastic cooling for ions and head-on beam-beam compensation for protons. In: Proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference (IPAC'16). Busan, 2016. 2055
- 29 Feliciello A, Nagae T. Experimental review of hypernuclear physics: Recent achievements and future perspectives. *Rep Prog Phys*, 2015, 78: 096301
- 30 Sanchez Lorente A. Hypernuclear physics studies of the PANDA experiment at FAIR. *Hyperfine Interact*, 2014, 229: 45–51
- 31 Ma X W, Zhang S F, Wen W Q, et al. Atomic physics at the HIAF under extreme conditions: QED effects from strong Coulomb fields to beyond Schwinger limits (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 112008 [马新文, 张少峰, 汶伟强, 等. 基于HIAF的极端条件原子物理: 从强库仑场到超越临界电磁场的量子电动力学效应研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 112008]
- 32 Gumberidze A, Stöhlker T, Banaś D, et al. Quantum electrodynamics in strong electric fields: The ground-state lamb shift in hydrogenlike uranium. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 223001
- 33 Rafelski J, Kirsch J, Müller B, et al. Probing QED vacuum with heavy ions. In: *New Horizons in Fundamental Physics*. Cham: Springer International Publishing, 2017. 211–251
- 34 Maltsev I, Shabaev V, Popov R, et al. How to observe the vacuum decay in low-energy heavy-ion collisions. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 113401, arXiv: [1903.08546](#)
- 35 Safronova M S, Budker D, DeMille D, et al. Search for new physics with atoms and molecules. *Rev Mod Phys*, 2018, 90: 106, arXiv: [1710.01833](#)
- 36 Campbell P, Moore I D, Pearson M R. Laser spectroscopy for nuclear structure physics. *Prog Particle Nucl Phys*, 2016, 86: 127–180
- 37 Pálffy A, Harman Z, Kozhuharov C, et al. Nuclear excitation by electron capture followed by fast X-ray emission. *Phys Lett B*, 2008, 661: 330–

- 334, arXiv: [0803.2858](#)
- 38 Ma X, Wen W Q, Huang Z K, et al. Proposal for precision determination of 7.8 eV isomeric state in ^{229}Th at heavy ion storage ring. *Phys Scr*, 2015, T166: 014012
- 39 Atanasov D, Blaum K, Bosch F, et al. Between atomic and nuclear physics: Radioactive decays of highly-charged ions. *J Phys B-At Mol Opt Phys*, 2015, 48: 144024
- 40 Zhao Y T, Zhang Z M, Cheng R, et al. High-energy-density physics based on HIAF (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 112004 [赵永涛, 张子民, 程锐, 等. 基于HIAF装置的高能量密度物理研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 112004]
- 41 Cheng R, Zhang S, Shen G D, et al. Research frontier of heavy-ion-beam-driven inertial-confinement fusion at HIAF (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 112011 [程锐, 张晟, 申国栋, 等. HIAF上的重离子束驱动的惯性约束聚变研究前沿. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 112011]
- 42 Zhao Y T, Xiao G Q, Li F L. Status and perspectives of inertial confinement fusion physics research based on modern particle accelerator (in Chinese). *Physics*, 2016, 45: 98–107 [赵永涛, 肖国青, 李福利. 基于现代加速器的惯性约束聚变物理研究现状及发展. 物理, 2016, 45: 98–107]
- 43 HEDGeHOB Collaboration. Technical Proposal for Design, Construction, Commissioning and Operation: High Energy Density Matter Generated by Heavy Ion Beams. FAIR_PAC: APPA, Internal Report. Issued by GSI, Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH, Germany, 2005
- 44 McMahon J M, Morales M A, Pierleoni C, et al. The properties of hydrogen and helium under extreme conditions. *Rev Mod Phys*, 2012, 84: 1607–1653
- 45 Jiang S E, Ding Y K, Miao W Y. Experimental research progress of inertial confinement fusion driven by laser in China (in Chinese). *Sci China Ser G-Phys Mech Astron*, 2009, 39: 1571–1583 [江少恩, 丁永坤, 缪文勇. 我国激光惯性约束聚变实验研究进展. 中国科学G辑: 物理学 力学 天文学, 2009, 39: 1571–1583]
- 46 Wenninger J. Approaching nominal performance at LHC. In: Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference (IPAC'17). Copenhagen, 2017
- 47 Blumenfeld Y, Butler P, Cornell J, et al. EURISOL design study: Towards an ultimate ISOL facility for Europe. *Int J Mod Phys E*, 2009, 18: 1960–1964
- 48 Blumenfeld Y, Nilsson T, Van Duppen P. Facilities and methods for radioactive ion beam production. *Phys Scr*, 2013, T152: 014023
- 49 Zhan W L, Xia J W, Zhao H W, et al. HIRFL today. *Nucl Phys A*, 2008, 805: 533c–540c
- 50 Liu W P, Li Z H, Bai X X, et al. BRIF and CARIF progress. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2011, 54: 14–17
- 51 Zeng S, Liu W P, Ye Y L. Progress of Beijing ISOL project (in Chinese). *At Energ Sci Technol*, 2019, 53: 2321–2326 [曾晟, 柳卫平, 叶沿林. 北京ISOL项目进展. 原子能科学技术, 2019, 53: 2321–2326]
- 52 Freyberger A. Commissioning and operation of 12 GeV CEBAF. In: Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference (IPAC'15). Richmond, 2015
- 53 Abbon P, Adolph C, Akhunzyanov R, et al. The COMPASS setup for physics with hadron beams. *Nucl Instruments Methods Phys Res Sect A*, 2015, 779: 69–115, arXiv: [1410.1797](#)
- 54 Ohnishi Y, Abe T, Adachi T, et al. Accelerator design at SuperKEKB. *Prog Theor Exp Phys*, 2013, 2013(3): 3A011
- 55 Nagamiya S. J-PARC program overview. *Nucl Phys A*, 2009, 827: 179c–186c

Huizhou accelerator complex facility and its future development

ZHAO HongWei¹, XU HuShan¹, XIAO GuoQing¹, XIA JiaWen¹, YANG JianCheng¹,
ZHOU XiaoHong¹, XU Nu¹, HE Yuan¹, MA XinWen¹, YANG Lei¹, CHEN XuRong¹,
TANG XiaoDong¹, ZHAO YongTao¹, SUN ZhiYu¹, WANG ZhiGuang¹, HU ZhengGuo¹,
ZHANG JunHui¹, MA LiZhen¹, YUAN YouJin¹ & ZHAN WenLong^{1,2*}

¹ *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

² *Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China*

This paper provides an overview of the frontier research fields and significant questions in nuclear physics regarding particle accelerators, and the status and future development trends for big-science facilities of particle accelerators are reviewed. Two Chinese government-approved “12th Five-Year” major science infrastructure facilities, the “High Intensity heavy-ion Accelerator Facility (HIAF)” and “China Initiative Accelerator Driven System (CiADS)”, are being constructed in Huizhou, Guangdong Province. Based on these two big-science projects (HIAF and CiADS), we proposed to establish a large-scale charged particle accelerator complex facility named the “Bright Electron and Ion research Facility (BEIF).” This facility will be dedicated to the research and development of nuclear physics and its interdisciplinary frontier fields. The research frontier fields of nuclear physics at the BEIF will include nuclear structure and astrophysics, nucleon structure, quark matter phase structure, and interdisciplinary fields between several significant frontiers of fundamental and nuclear physics, such as highly charged atomic physics and heavy ion-driven high energy density physics. BEIF will be a large-scale scientific complex facility comprising several superconducting ion LINAC accelerators, synchrotrons, storage rings, reactors, and various large experimental detectors and setups. BEIF will be built in three construction phases and will become one of the premier global large-scale particle accelerator complex facilities dedicated to the research of nuclear physics and technology.

nuclear physics, charged particle accelerator, accelerator complex, heavy ion beam, beam intensity, beam energy

PACS: 29.27.-a, 29.20.-c, 29.30.Aj, 42.60.Jf, 13.85.-t

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0248](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0248)