HIAF上的重离子束驱动的惯性约束聚变研究前沿

程锐^{1,2†}, 张晟^{1†}, 申国栋^{1,2†}, 陈燕红¹, 张延师¹, 陈良文¹, 张子民^{1,2}, 赵全堂^{1,2},
杨建成^{1,2}, 王瑜玉^{1,2}, 雷瑜^{1,2}, 林平¹, 杨杰^{1,2}, 杨磊^{1,2}, 马新文^{1,2}, 肖国青^{1,2}, 赵红卫^{1,2},
詹文龙^{1,2*}

1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

†同等贡献

*联系人, E-mail: zhan@impcas.ac.cn

收稿日期: 2020-07-28; 接受日期: 2020-09-24; 网络出版日期: 2020-10-13

国家重点基础研究发展计划(编号: 2017YFA0402300)和国家自然科学基金(编号: U1532263, 11705141, 11775282, 11705256)资助项目

摘要 强流重离子加速器技术的高速发展为实验室制备高能量密度物质提供了新的选择, 也为探索离子束驱动的惯性约束聚变科学提供了重要的实验平台. 本文重点介绍了中国科学院近代物理研究所负责承建的国家“十二五”项目——强流重离子加速器装置围绕高能量密度物理研究与惯性约束聚变科学的布局与构建规划, 涵盖了从一期装置单一束流打靶, 到优化装置中的双束对撞打靶, 再到升级装置中的多束复合打靶等多种方式. 利用流体动力学模拟程序, 初步预测了可产生的物质状态; 简要汇报了课题组围绕实验需要新发展的测量技术以及未来的理论发展规划. 本文的研究成果将为未来我国重离子束驱动惯性约束聚变研究提供重要的实验路线参考与技术支持.

关键词 HIAF装置, 高能量密度物理, 惯性约束聚变, 流体力学模拟, 高时空分辨诊断

PACS: 52.58.Hm, 52.70.-m, 52.40.Mj, 52.27.Gr, 52.50.Lp

1 引言

粒子加速器科学的发展与技术应用, 对人类从原子核层次上研究物质的结构、相互作用和运动规律, 发挥了不可替代的作用, 对回答物质基本结构和宇宙起源演化这两个人类长期探索的基本问题做出了特有

的贡献^[1-3]. 当今世界, 不仅在核物理领域, 重离子加速器装置在航天、核能、材料、医学、环境和国家安全等方面展现出了重大的应用价值^[4-6]. 随着研究内容的深入与研究对象的扩展, 粒子束流的需求发生巨大变化, 目前加速器装置正向着高能量、高流强、高亮度三个方向发展^[7,8]. 正在建设中的德国的FAIR项目^[9,10]

引用格式: 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
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, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0265

和中国的HIAF项目^[11], 均聚焦于获得高流强重离子束流, 离子束强度从 10^9 ppp提升到 10^{11} ppp甚至 10^{12} ppp量级, 为新元素合成、同位素存在极限、奇特原子核结构、极端天体环境中的核过程, 以及当前世界研究热点重离子束驱动的高能量密度物理与惯性约束聚变研究提供重要的研究平台^[12,13].

高能量密度是指能量密度高于 10^{11} J/m³, 对应的等效压强大于1 Mbar (1 bar= 10^5 Pa)^[14]. 作为物理学的一个研究领域, 高能量密度物理, 始于20世纪初对恒星结构的研究^[15-17], 兴于20世纪40年代开始的核武器研制的需求^[18-20]. 20世纪80年代开始, 在惯性约束聚变等研究牵引下^[21-25], 高能量密度物理得到快速发展, 形成了其基本内涵和研究方法. “高能量密度物理”一词首次出现应是在1969年为纪念Enrico Fermi举办的国际暑期讲习班上^[26]. 对于重离子束驱动方式, 能够产生高密低温状态的高能量密度物质, 这种极端物质内部原子或分子处于高压高密, 粒子间耦合作用极强, 电子处于简并态, 造成一系列新的物质结构和奇异的物理现象, 如非金属-金属相变等, 需要考虑量子力学、粒子关联等作用, 对现有等离子体物理、原子物理和材料科学等理论提出了新的挑战, 目前科学界还未达成统一的理论认识^[27].

高能量密度物理研究在天体物理中具有重要的意义, 该极端物质状态广泛存在于恒星内部和大型行星的内核区域(如木星和土星), 且随着系外行星的观测探索, 人们对此方向的研究兴趣越来越浓. 行星的形成、演化、内部结构与磁场形态, 与内核区域行星物质的物态方程、相图、输运和光学性质等关系密切, 造成的诸如分层、金属氢、超电离态水等新的物理现象, 并由此构成了当今行星物理研究的主要内容^[28].

在惯性约束聚变动作过程中, 物质经历了从固态或气态至等离子体状态的演化, 冲击波的产生和传播、流体力学界面不稳定性的产生和增长、物质惯性(物质动能)至物质内能的转变等物理过程基本发生在物质处于高能量密度状态时. 因此, 对高能量密度条件下物质的结构与特性及其发展规律的研究是惯性约束聚变的核心^[29-31]. 随着美国罗切斯特大学的Omega以及劳伦斯利弗莫尔国家实验室的国家点火装置NIF、法国的LMJ和PETAL计划、德国的FAIR项目、我国以神光为代表的激光聚变研究装置、新一代的强流重离子加速器HIAF装置的相继建成, 将为高能量密度物

理和惯性约束聚变科学的发展提供优秀的实验装置与研究条件^[32-34].

从1977年布鲁克海文国家实验室召开的世界首次重离子聚变(惯性约束聚变)研讨会以来, 这一重要课题已引起各国学术界的重视^[35], 该技术方式展现出的一系列突出特点获得了科学界的广泛关注. 一方面作为功率源, 强流高能加速器能够制备MJ能量水平离子束, 其能量沉积效率高, 重复频率、平均功率水平和耐久度等要求均能够满足惯性约束聚变能源的苛刻要求. 另一方面, 由于高能离子具备高的穿透能力, 能够轻易穿过DT靶丸外附着的金属保护层以及聚变反应堆芯中的厚的液态保护层; 在电磁场的精确调控下, 能够避免打靶后飞溅碎片以及中子和伽马射线对加速器装置的损坏. 在核电站建设中也具备一定的经济性, 聚变后的反应产物一般只具有低放射性. 在20个世纪70-80年代, 包括美国多个国家实验室, 如劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)、劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)、洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)、阿贡国家实验室(ANL)等以及德国重离子研究中心(GSI), 英国的卢瑟福实验室(Rutherford), 瑞士的欧洲核子中心(CERN)和俄罗斯的理论实验物理研究所(ITEP)纷纷加入合作联盟共同发展重离子束聚变技术. 离子束驱动惯性约束聚变方式对离子束的品质提出了严苛的要求: 不仅要求离子束能量高, 还要求束流强度大, 这就需要克服高电荷态离子的空间电荷效应, 实现输出小束斑、短脉冲的离子束, 如图1所示. 为此, 人们开

图1 重离子惯性约束聚变对加速器参数的要求

Figure 1 Parameter regimes of ion accelerator drivers for the inertial confinement fusion.

展了系列研究,取得了一定的进步,但是目前还未有一台装置离子束能量达到1 MJ量级(脉宽几十ns,束斑尺寸1 mm),束流强度超过 10^{12} ppp量级.装置的输出能力制约了物理实验研究的深入,迄今为止人们对高功率重离子束与靶相互作用、靶物质状态演化等离子束驱动惯性约束聚变中的关键问题还缺乏深入的理解.

随着现代加速器技术的发展,特别是注入技术与冷却储存环技术的进步,传统加速器中的低流强限制已被打破,高能强流重离子束的制备成为可能,具备开展重离子束驱动惯性约束聚变基础研究工作和原理验证实验条件^[36].俄罗斯的TWAC装置,拟达到 10^{13} ppp,脉冲宽度100 ns,束流加速能量0.7 MeV/u^[37].德国的FAIR装置,通过升级的方式将GSI原有的SIS18升级到SIS100,束流强度将从 10^9 ppp提升到 10^{11} ppp量级.中国科学院近代物理研究所(以下简称近物所)承建的国家“十二五”项目——强流重离子加速器装置项目,已经按照规划顺利开工建设,届时将能够提供超过1 GeV/u的 $^{238}\text{U}^{92+}$ 离子束,其最高束流强度接近 10^{12} ppp量级,为重离子束制备高能量密度物质、极端物质特性等研究提供重要的实验平台.在HIAF的升级装置中,重离子束流能量首次突破1 MJ,并实现多束同时打靶条件,有望具备开展重离子束驱动惯性约束聚变研究原理验证性相关工作条件,届时我们将充分利用HIAF装置高功率强脉冲重离子束的特点,着重对强流离子束能量沉积、离子输运、靶物态演化规律、靶材料物理特性等重要物理量开展实验测量工作,探索压缩与快离子点火技术等.

本文将详细介绍HIAF装置的整体技术结构、高能量密度物理终端的设计布局,未来多束打靶的概念设计与可获得的物质状态分析等,期待为我国的强流重离子束聚变研究提供重要的参考与建议.

2 国家“十二五”项目——强流重离子加速器装置及其优化

重离子加速器装置为近代物理学的发展奠定了重要基础,不仅在探索物质本源,如核结构、新核素合成等方面提供了强有力支持,而且在裂变能源发展方面提供了核心数据资源,目前在更加广阔的国民生产生活领域,如辐射材料科学、高精密原子物理学、辐射生物效应、重离子治癌等,发挥着愈来愈重要的作用.

近物所一直承担着我国重离子加速器技术研发与离子束应用科学的重要使命,先后在国家“一五”“七五”“九五”期间,建成并运行:回旋加速器(SFC)、大型分离扇回旋加速器(SSC)和兰州重离子加速器冷却储存环(CSR)装置,负责兰州重离子加速器国家实验室(HIRFL)装置的运行.随着科学技术日新月异发展,HIRFL加速器参数已难以满足新的研究需求,自2009年近物所提出的建设我国新一代的强流重离子加速器装置HIAF,经过多次论证,在2015年年底获得了国家批准立项,装置建于广东省惠州市,并于2018年12月正式破土动工^[38].

如图2所示,HIAF整体装置由超导ECR离子源、超导直线加速器、增强器(BRing)、放射性次级束流分离器、高精度环形谱仪(SRing)及多个低中高能实验终端构成,采用了第四代ECR离子源、双向涂抹注入、非谐振快循环磁铁电源、陶瓷内衬薄壁真空室等诸多的先进技术.其中高能量密度物理终端位于SRing面向BRing的出口端位置,在第一期建设中, U^{35+} 离子经过BRing的累积加速到1.0 GeV/u, 1.6×10^{11} ppp后,经过放射性束线进一步被剥离为 U^{92+} 离子并进入到SRing中进行更进一步的堆积,离子束强度最高可到 5×10^{11} ppp量级.经过束团压缩与终端聚焦后,强流 U^{92+} 离子束团从SRing中引出进入到高能量密度物理终端开展相关实验研究,高能量密度物理终端的典型束流参数如表1所示.

在HIAF的优化装置中,SRing与BRing两个储存环通过一段高能离子束线贯穿,高能量密度物理终端顺势前移至位于新束线的中间位置.届时一束重离子在SRing中实现堆积后引出,另外一束在BRing中加速和堆积后引出,两束同时进入到高能量密度物理终端实现双束打靶实验研究,如图3所示.

双束打靶的打靶过程可简要描述如下,参数设置如图4所示.

(1) 通过一系列的加速与累积过程,将 U^{92+} 离子(或 Xe^{54+} 离子,或 Bi^{83+} 离子)注入到SRing-1中,经过约4次的离子束强度累积后,最终达到1.0 GeV/u, 5×10^{11} ppp的 U^{92+} 待引出状态(或1.17 GeV/u, 2.5×10^{12} ppp的 Xe^{54+} 离子;或1.08 GeV/u, 2.25×10^{12} ppp的 Bi^{83+} 离子);

(2) 通过高频调制和等离子体透镜装置,将 U^{92+} 离子束(或 Xe^{54+} 离子束,或 Bi^{83+} 离子束)制备为环状束结构;

图 2 HIAF装置的整体设计与高能密度物理终端布局位置
Figure 2 Schematic illustration of the HIAF complex and the location of high energy density physics experimental terminal.

表 1 HIAF高能密度物理终端的离子束设计参数, 及其与优化装置上的可产生高能密度物质(基于课题组自己发展的流体动力学模拟计算数据结果)

Table 1 Ion beam parameters of high energy density physical terminal at HIAF, and the accessible states of matter that can be produced at HIAF (estimation is based on a fluid dynamics simulation developed by the IMP research group)

离子种类	能量 (GeV/u)	束斑尺寸 (mm)	脉宽长度 (ns)	束流强度 (ppp)	发射度 (mm mrad)	动量分散 (%)
$^{238}\text{U}^{92+}$ 或 $^{129}\text{Xe}^{54+}$	1.0	0.5–1	50–150	5×10^{11}	$20 \times 10\pi$	0.5
束流打靶模式	单脉冲能量 (kJ)	单脉冲功率 (TW)	能量密度 (TW)	预期物质压力(Pb靶)	预期物质温度(Pb靶) (eV)	预期物质密度(Pb靶)
单束	20	~0.5	~0.5	~100 GPa	~5	11 g/cm^3
双束	20–50	~1	~1	~2 TPa	~20	~2–3倍密度

(3) 在BRing-1环中将 U^{92+} 离子束累积并加速到 3.11 GeV/u, 1.2×10^{11} ppp(或 Xe^{54+} 离子束, 3.44 GeV/u, 6.5×10^{11} ppp; 或 Bi^{83+} 离子束, 3.22 GeV/u, 5.5×10^{11} ppp), 进入待引出状态;

(4) 通过束团压缩与聚焦装置, 将Bring-1离子束制备为强聚焦圆斑束结构;

(5) 首先引出SRing-1的环状束与靶物质进行作用, 进行向内压缩过程;

(6) 经过预先设定的时间延迟, 引出BRing中的聚焦圆斑束对压缩后的靶物质进行直接加热;

(7) 产生更高密度与温度的高能密度物质.

3 未来HIAF上的高能密度物理研究升级规划

为了能够更深入系统地开展高能密度物理研究工作, 也为我国的重离子束驱动的惯性约束聚变科学发展提供重要支撑, HIAF规划了未来装置的系列升级方案, 将为升级到更高的离子束脉冲功率、更高的沉积功率密度、更复杂的加速器结构提供多种束靶耦合

图 3 HIAF装置的优化与未来升级布局图, 高能密度物理终端从初始的SRing区域(HED-TI)前移到Bring与SRing中间位置(HED-TII)

Figure 3 Schematic illustration of HIAF-upgrading in the future. The HEDP terminal moves forward from the initial SRing region (HED-TI) to the middle position between BRing and SRing (HED-TII).

作用模式等, 例如实现双压缩与双加热束的制备, 参数设置如图5所示。

新的升级后HIAF装置具有以下几个突出特点。

(1) BRing与SRing形成内外双环嵌套结构, 在BRing-1外侧的同一隧道内新建超导BRing-2, 不仅可以束流强度提高5–6倍, 还可以将束流磁刚度提升至86 Tm (磁场强度4 T, 曲率半径21.5 m), 大幅提高引出束流能量, 如 U^{92+} 离子能量达到9 GeV/u, 强度 1×10^{12} ppp; Xe^{54+} 离子能量超过10 GeV/u, 强度 6×10^{12} ppp. SRing-1的内侧同一隧道内新建SRing-2, 不仅可以独立运行分别累积束流, 同时提供多束协同打靶的复合离子束体系。

(2) 利用高频调制技术和等离子体透镜技术在BRing与SRing引出束线上分别建成环状束制备装置, 能够产生环状高能重离子束。

(3) 采用精确的时序控制系统, 按照设计次序分别从不同的加速器环区域引出离子与靶物质作用, 实现三束甚至更多束的复合束打靶条件。

升级后的HIAF加速器装置与高能密度物理终端, 利用升级建成的磁刚度达到86 Tm的BRing-2, 和磁刚度为45 Tm的SRing-2, 同原有BRing-1与SRing-1实现双压缩与双加热束的制备, 将首次实现“多束复合打

图 4 双束打靶的加速器重离子束束流参数

Figure 4 Ion beams parameters in the double-ion beams shooting mode at HIAF.

图 5 三束打靶模式中, HIAF装置中BRing1/2与SRing1/2的储存环束流参数

Figure 5 Ion beams parameters of BRing1/2 and SRing1/2 respectively at HIAF in the triple-ion beams shooting mode.

靶”的全新工作模式, 以三束打靶情况为例, 简单介绍如下:

(1) SRing-1制备环状压缩束, $\sim 2 \times 10^{12}$ ppp, 2.11 GeV/A $^{238}\text{U}^{92+} \sim 160$ kJ/ppp (或 1.5×10^{13} ppp, 2.34 GeV/A $^{129}\text{Xe}^{54+} \sim 724$ kJ/ppp, 或 1.3×10^{13} ppp, 2.18 GeV/A $^{209}\text{Bi}^{83+} \sim 950$ kJ/ppp);

(2) SRing-2制备一束加热束, 2×10^{12} ppp, 4.36 GeV/A $^{238}\text{U}^{92+} \sim 332$ kJ/ppp (或 1.5×10^{13} ppp, 4.8 GeV/A $^{129}\text{Xe}^{54+} \sim 1.4$ MJ/ppp, 或 1.35×10^{13} ppp, 4.5 GeV/A $^{209}\text{Bi}^{83+} \sim 2$ MJ/ppp);

(3) BRing-2制备另一束加热束, $\sim 1 \times 10^{12}$ ppp, 9 GeV/A $^{238}\text{U}^{92+} \sim 342$ kJ/ppp (或 6.0×10^{12} ppp, 10 GeV/A $^{129}\text{Xe}^{54+} \sim 1.2$ MJ/ppp, 或 5.0×10^{12} ppp, 9.5 GeV/A $^{209}\text{Bi}^{83+} \sim 1.5$ MJ/ppp);

(4) SRing-1束流首先进行压缩, 待达到极致压缩密度时, BRing-2与SRing-2两束进行对头碰撞, 同时进入到高压压缩靶物质中, 产生压力与温度更高的靶物质状态, 其温度可达几十eV, 压力超过3.5 TPa, 甚至达到10倍的密度压缩条件.

需要指出的是, 随着对高能量密度物理研究的不断深入, 不局限于三束打靶模式, 新的加速器系统提供更多的模式可供选择, 例如从BRing1和2, SRing1和2分别制备不同直径的环状束, 按照一定的延时, 逐步作用于靶物质上, 从而探索重离子束对靶材料的极限压缩过程, 为行星物理和惯性约束聚变相关研究提供难得的新实验条件, 打靶过程如图6所示.

另外, 该系统还可以利用三束作为前驱的压缩束, 对中心靶材料进行压缩, 另外一束作为加热束, 直接注入到被压缩区域, 探索离子束与温稠密物质作用过程, 或者重离子束快点火技术等重离子束驱动惯性约束聚变的重要问题. 升级后可产生的极端物质状态参数如表2所示.

在原有的惯性约束聚变概念的基础上, 近年来利用背景强磁场提高等离子体加热和点火的效率成为了研究的热点^[39-41]. 强磁场的加入主要有三点好处, 一是诱导电子随磁力线旋转, 可以降低碰撞带来的能量扩散, 二是诱导alpha粒子进行同样的运动, 三是在一定程度上抑制等离子体不稳定性的发展. 所需的磁场强

图 6 HIAF 升级装置可提供 4 个环状束对靶物质级联压缩的打靶模式

Figure 6 Schematic illustration of the quadruple-ion beams shooting mode to perform the cascading compression of target at HIAF-upgrading.

表 2 HIAF 系列装置在不同束靶模式下可能产生的极端物质状态(基于课题组自己发展的流体动力学模拟计算数据结果)

Table 2 The accessible extreme states of matter that can be produced under different beams-shooting methods at HIAF (estimation is based on a fluid dynamics simulation developed by the IMP research group)

束流打靶模式	单脉冲束能量	温度 (eV)	压力	密度
单束	20 kJ	>5	>100 GPa	11 g/cm ³
双束	50 kJ	>20	>250 GPa	~2–3 倍
三束	1 MJ	>50	>3.5 TPa	~10 倍

度要使得回转半径小于粒子的自由程, 或者回转周期小于粒子碰撞时间. Basko 等人^[42]关于柱状靶的初步计算表明, 聚变的条件会在磁场达到 600 T 时显著下降. 为了达到如此高的磁场强度, 需要利用等离子体的磁冻结效应, 通过对其进行横向压缩, 使得增强的磁场和压缩的面积成反比. 但由于磁冻结基于等离子体电导率无限大的假设, 因此在真实情况中, 磁力线实际上会随时间扩散, 如果只考虑电子的贡献, 扩散速度和等离子体的电离程度及电子温度有关. 电子温度越高或电离程度越大, 则扩散越慢. 比如 100 eV 的完全电离等离子体中的扩散时间尺度大概是 1 μ s, 存在横向压缩的情况下扩散时间尺度下降为 200 ns^[43]. 因此未来实验中需要提供一个 1 T 量级的种子磁场, 磁场方向平行于束流方向, 同时对于目标等离子体的压缩过程必须短于磁力线扩散的时间, 这要求更短的束流脉宽. 2009 年 Gotchev 等人^[44]报道了使用 Omega 激光压缩 DT 靶, 将 5 T 的种子磁场提升到了 3–4 kT. 随后 Chang 等人^[45]的测量表明, 在这种情况下离子温度和

中子产额都有所提升. 此外还有基于 Z 箍缩的磁化等离子体惯性约束聚变概念 MagLIF, 不同之处是采用 Z 箍缩来压缩目标等离子体^[46].

如图 7 所示, 为了验证背景磁场对于重离子驱动的惯性约束聚变的有效性, 我们初步的实验设计磁场强度为 5–10 T, 使用环形束流对于目标柱状靶进行分级压缩. 为了追求更高的横截面压缩比, 可以考虑使用密度较小的靶材料, 比如多孔材料甚至是气体靶. 中心超强磁场的测量也是有待发展的诊断技术, 对于温度不太高的物质可以用感应线圈来测量, 对于高温物质可选的方案包括质子束和激光束诊断等.

高能量密度物质的诊断是一件极具挑战的任务, 在 HIAF 的升级装置中, 规划有高能电子(质子)成像束线, 用于穿透稠密等离子体的屏蔽, 从而对高压核心区域的物质状态进行在线诊断测量.

4 服务于 HIAF 的离子束驱动惯性约束聚变的模拟计算集群发展规划

高能束流产生和持续加热等离子体的过程十分复杂, 包括束流离子对核外电子的直接电离, 由此电离出的电子引起的二次电离、俘获和激发等级联效应, 以及随后产生的电子温度的传导和扩散等. 由于研究内容关心的时间尺度在 1 μ s 以内, 目标等离子体密度接近或高于固体密度, 因此在整个的能量传递和扩散过程中产生的电子和离子不满足平衡态假设的玻尔兹曼分布, 同时在时间和空间都具有各向异性的性质. 这些性质都会大大增加计算的复杂程度. 从算法的框架来说, 对于直接电离的描述拟采用平面波玻恩近似

图 7 背景强磁场存在条件下探索二级压缩束与中心加热束作用对靶物质的影响

Figure 7 Schematic illustration of the investigation of the extreme state of target matter with shooting by the double-compression beams and a central-heating beam in a strong magnetic field background.

(PWBA)、经典轨迹蒙特卡罗近似(CTMC)等方法进行描述^[47], 对于随后的加热过程的模拟, 计划先用离子束流在等离子体中的输运模型给出当前时刻的能损曲线(即空间中的能量沉积), 再耦合磁流体模拟的方法给出等离子体在强磁场中的演化. 其中的状态方程既可以使用现有的状态方程模型^[48,49], 也可以通过PIC方法给出相对精确的计算^[50,51].

GPU作为一种高性能计算卡, 在并行处理和计算密集型问题求解等方面具有诸多优势, 目前已经在各科学和工程领域得到广泛应用. 从2008年至今, 近物所开始建设GPU计算集群, 目前双精度总运算能力超过1 PFlops, 同时累积了丰富的关于GPU并行程序的编程经验, 自主开发了多种基于分子动力学和蒙特卡罗方法的程序^[52-55]. 作为HIAF上开展高能量密度物理实验的支撑, 拟针对性开发等离子体模拟的GPU并行软件, 同时搭建对应的计算平台, 计算能力希望达到双精度计算3 PFlops, 以PIC算法为例, 使得能直接模拟的宏粒子规模达到十亿以上, 如图8所示.

5 服务于HIAF上极端物质状态诊断技术的发展

利用强流重离子束开展惯性约束聚变相关研究, 除利用重离子束产生高能量密度物质之外, 如何开展高精度的极端物质状态参数测量和演化过程诊断是项目组人员必须要解决的核心问题之一. 鉴于离子束产生的高能量密度物质在体积、结构、寿命及压力、温

度等关键参数与其他驱动方式存在较大差别, 因此实验人员必须按照离子束打靶的特点研发相应的诊断系统.

5.1 粒子束诊断

重离子束驱动产生的高能量密度物质核心过程就在于离子将动能传递给靶物质, 使其温度上升到稠密等离子体的过程. 离子在常规冷物质中的能损研究已经取得了较为丰富的成果, 但是对于离子在等离子体中的能损, 目前实验结果较为匮乏, 理论也未形成统一的认识. 近物所研究团队基于HIRFL加速器装置, 已建成离子束与等离子体相互作用研究的专用实验平台(图9所示), 加速器装置能提供keV–MeV能区的多种离子束(H, He, C等), 入射离子初始电荷态与束流强度大范围可调. 配备的等离子体靶装置包括气体放电等离子体、RF射频等离子体、角箍缩等离子体与激光等离子体, 等离子体电子密度范围 10^9 – 10^{20} cm⁻³, 温度1–20 eV, 离化度60%–100%. 实验中已观测到了离子在氢等离子体中能损明显增强现象, 该能损随自由电子密度增加趋势明显高于束缚电子密度情况^[56,57].

在HIRFL-CSR的高能束实验中, 已采用CsI晶体发光方法对穿过靶物质后的离子射程进行了测量, 通过设备标定与数据处理, 获得了出射离子能量与在靶物质中的能量沉积信息, 针对未来HIAF装置强辐射环境特点, 液闪探测器的研发工作也在逐步开展, 图10所示^[58]. 未来HIAF上的能损在线诊断系统, 不仅精确测量离子的沉积能量, 还能根据能损与电子密度的函数关系来诊断等离子体密度信息.

高能电子束辐射成像同样是一种重要的主动诊断手段, 它能够穿透稠密物质和等离子体层的屏蔽, 进入到靶物质的核心区域, 通过出射电子的辐射成像技术,

图8 不同的计算方法将应用在不同时间尺度下重离子束驱动过程

Figure 8 Different simulation methods for various parameter regimes of ion beam driven high energy density physics.

图9 HIRFL上离子束与等离子体相互作用实验平台

Figure 9 Ion beam-plasma interaction experimental platform at HIRFL.

	离子能量 (MeV/u)	计算值 (mm)	测量值 (mm)	相对误差 (%)
1	200	32.6	32.6	标准
2	191.7	30.3	30.4	0.3
3	177.4	26.5	26.6	0.4
4	162.2	22.6	22.8	0.9
5	146.0	18.8	19.1	1.6
6	128.5	14.9	15.3	2.6
7	109.1	11.0	11.3	2.7
8	86.6	7.1	7.2	1.4
9	58.447	3.1	3.1	0

图 10 HIRFL-CSR 上开展的高能离子束射程成像实验结果
Figure 10 Results of range imaging experiment for heavy energy ion beams at HIRFL-CSR.

展现出内部的物质状态. 同时高能电子束还能用于产生高亮度X射线、伽马射线源等, 提供相应的诊断条件. 在未来HIAF装置及升级规划中, 高能电子束线将与高能量密度物理终端同步建设和发展.

在聚变反应过程中, 将会发射出中子, 对热中子的诊断能够获取靶物质内部的温度等信息. 随着快/慢中子成像探测器以及数据读取技术的发展, 未来在HIAF装置上也将会布局对应的诊断技术.

5.2 光谱学测量

HIAF装置上强流重离子束对靶物质的压缩与加热, 靶物质的密度和温度不断升高, 从固态转变为温稠密态或热稠密态, 由于极高的密度与等离子体屏蔽效

应, 靶中心区域的物质状态信息诊断是一项极具挑战的工作. X射线具有相对较长的穿透距离, 因此X射线能谱是有效诊断等离子体状态的手段. 项目组人员将利用电子束产生的韧致辐射X射线或者采用靶材的自发X射线辐射精细谱测量电子激发谱. 通常轨道电子和自由电子分别对应X射线的弹性散射和非弹性散射, X射线谱能够对等离子体中的特定元素不同电荷态离子进行测量, 从而获得靶物质中的离化度、温度和自由电子密度等信息^[59-61]. 在HIRFL装置上项目组已经开展了大量基础性的离子束诱发X射线能谱研究工作^[62-65]. 结合X射线弯晶谱仪和分幅相机, 已合作研发了多通道X射线精细谱测量系统, 采用了4块不同种类的球面弯晶材料, 不仅可以测量复杂结构的靶物质, 而且可以对包括入射离子在内的多种类离子同时开展X射线特征谱的测量工作, 如图11所示.

重离子束驱动产生的极端物质将发射出大量的光辐射, 对红外波段、可见波段到紫外波段的光谱进行测量是一项重要和有效的等离子体诊断手段, 可以反应靶表面温度等重要的边界条件, 同时为流体力学模拟提供基准参数. 然而, 随着离子束馈入能量功率的不断提升, 极端状态的靶物质存在寿命将明显缩短, 因此需要一种具备极高时间分辨的光学谱仪和探测器. 通过与中国科学院西安光学精密机械研究所的合作, 共同研发了由可见光谱仪与条纹相机组成的ps时间分辨的光谱测量系统. 光谱响应范围280–840 nm, 时间分辨50 ps, 扫描宽度从2 ns到1 μ s可调. 实验中我们采用点对点成像与光纤传输装置, 及不同刻划线光栅, 对靶物质发射的特征光谱进行测量, 通过条纹相机的超快扫描能力, 获得在靶物质快速演化过程中的

图 11 研发的4画幅X射线相机(a)与多通道X射线弯晶谱仪能谱测量系统(设计图) (b)
Figure 11 4-framing camera (a) for X-ray diagnostic and the specially designed multi-channel bent crystal X-ray spectrometer (b).

光谱准连续变化, 结合相关辐射理论, 获得靶物质的温度准连续演化信息, 如图12所示. 同时研究团队已利用窄带滤光片分光法和光谱仪分光法开发了不同的多路高温计装置, 满足高温靶物质温度快速诊断的需求.

5.3 超高时间分辨的成像系统

高功率离子束能量沉积引起靶物质温度和压力的升高, 高压环境能够极大地改变物质特性与作用过程, 针对靶物质的压力诊断测量也是一项非常重要的研究内容. 同时, 高能量密度物质存在的寿命非常短(几十至百ns量级), 升温后的靶物质粒子将以声速迅速向外膨胀, 其体积的变化是物态方程研究中的关键物理量之一. 我们发展闪光背影成像技术、VISAR等技术, 并结合ICCD相机和条纹相机等高时间分辨探测设备, 对冲击波速度、靶物质的体积和压力等物理量进行快速诊断.

另外, 利用X射线相对较长的穿透距离, 采用X射线成像方式(例如靶物质自发辐射或者从高能电子束线段引出主动测量), 有望对靶物质中心的物质状态信息进行测量. 开发的X射线分幅相机成像系统, 能谱响应范围为0.1–10 keV, 分为4个画幅, 单画幅成像区域 $\geq 12\text{ mm} \times 66\text{ mm}$, 曝光时间 $\leq 5\text{ ns}$. 通过针孔成像的方式测量自发发射X射线, 测量靶物质内层区域的空间分布信息.

此外, 强流离子束可以引起传输路径上的物质电离和发光, 在高能量密度终端靶区充入稀薄气体, 并利用瞬态光学成像方式, 能够较为准确地诊断出离子径迹, 对于束靶瞄准和整体诊断系统的校准, 具备重

要的实际应用价值.

6 总结与展望

国家“十二五”项目——强流重离子加速器装置的建设不仅对传统的核物理研究产生极大的促进作用, 特别是HIAF升级装置束流能量将达到1 MJ量级, 对我国重离子束驱动的高能量密度物理和惯性约束聚变前期研究工作提供了新的机遇. 围绕重离子束驱动的惯性约束聚变需求, 在HIAF的一期建设中, 计划将高能量密度物理终端布局于SRing引出端位置, 重离子束通过BRing的初步累积加速后, 再灌入到SRing中进行进一步的堆积, 实现离子束强度的提升, 预期能够产生1.0 GeV/u和 5×10^{11} ppp的 U^{92+} , 聚焦半径1.0 mm, 脉冲宽度50–150 ns, 从而开展温稠密物质的特性研究. 在HIAF的优化中, 实验系统将联通SRing与BRing区域, 实现双束打靶并尝试开展压缩与加热双束实验研究, 进入到高能量密度物理区域. 未来HIAF的升级规划中, 将采用内外环嵌套的方案, 分别建成BRing-1, BRing-2, SRing-1和SRing-2四个储存环, 从SRing-1引出的环状离子束对靶物质的向心压缩, 提升中心密度, BRing-2和SRing-2同时引出第二束和第三束强聚焦重离子束(单束脉冲能量超过1 MJ), 从靶物质前后两端同时注入到中心区域进行直接加热, 进一步提升靶物质的密度与温度等, 扩展高能量密度物理研究范围, 如实验室环境制备超电离态水、金属氢、室温超导材料等. 在多个储存环的支持下, 实验中不仅能够产生大参数范围灵活可调的高能量密度物质状态, 还能够探索由多个序列圆环状离子组成的级联压缩束, 研究重离子束的极限压缩过程. 在压缩过程基础上, 探索离子束与温稠密物质的相互作用过程、离子束在高能量密度物质中的快点火过程等. HIAF及其系列升级装置将为我国的高能量密度物理和惯性约束聚变科学的发展提供源源不断的动力支持与保障.

为更加系统研究HIAF装置上的高能量密度物理和惯性约束聚变相关问题, 拟发展相应的计算中心, 建设总计算能力达到双精度计算3 PFlops的GPU集群. 同时开发并程序, 整合CTMC, MHD, PIC等离子体模拟算法, 来描述束流驱动高能量密度物质的产生和演化这一过程.

基于现有HIRFL装置, 研究团队正在不断发展用

图 12 ps时间分辨的光谱测量系统所包括收光、传输与条纹相机等单元

Figure 12 ps-resolution spectrometer system including the light collection, transmission and streak camera.

于未来HIAF上的高能密度物理研究所需的新型诊断技术, 包括离子束在等离子体中的能损、高能强流离子射程成像、X射线成像与谱仪系统、超高时间分

辨的光学诊断等, 以上技术的发展, 将为HIAF装置上高能密度物质的温度、空间分布、离化度等关键参数诊断提供重要技术支持.

致谢 本文团队和中国科学院近代物理研究所、西安交通大学、大连理工大学、激光聚变研究中心、中国科学院西安光学精密机械研究所、中国科学院等离子体所等多个单位的相关专家进行了有益的讨论, 在此一并致谢.

参考文献

- 1 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
- 2 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
- 3 Simos N, Zhong Z, Ghose S, et al. Radiation damage and thermal shock response of carbon-fiber-reinforced materials to intense high-energy proton beams. *Phys Rev Accel Beams*, 2016, 19: 111002, arXiv: 1712.00509
- 4 Tsai S C, Jen H Y, Kai J J, et al. Microstructural evolutions of three-dimensional carbon-carbon composite materials irradiated by carbon ions at elevated temperatures. *Prog Nucl Energy*, 2012, 57: 32–37
- 5 Paulmier T, Balat-Pichelin M, Le Quéau D. Structural modifications of carbon-carbon composites under high temperature and ion irradiation. *Appl Surf Sci*, 2005, 243: 376–393
- 6 Tahir N A, Stöhlker T, Shutov A, et al. Ultrahigh compression of water using intense heavy ion beams: Laboratory planetary physics. *New J Phys*, 2010, 12: 073022
- 7 Zhang C. Frontiers of particle accelerators in the world (in Chinese). *Physics*, 2008, 5: 289–297 [张闯. 国际粒子加速器的前沿. *物理*, 2008, 5: 289–297]
- 8 Turner S. *Frontiers of Accelerator Technology*. Tsukuba: World Scientific, 1996
- 9 Sharkov B, Varentsov D. Experiments on extreme states of matter towards HIF at FAIR. *Nucl Instr Methods Phys Res Sect A*, 2014, 733: 238–241
- 10 Augustin I. Status of the FAIR project. *Nucl Inst Methods Phys Res Sect B*, 2007, 261: 1014–1017
- 11 Yang J C, Xia J W, Xiao G Q, et al. High Intensity heavy-ion Accelerator Facility (HIAF) in China. *Nucl Inst Methods Phys Res Sect B*, 2013, 317: 263–265
- 12 Loubeyre P, Occelli F, LeToullec R. Optical studies of solid hydrogen to 320 GPa and evidence for black hydrogen. *Nature*, 2002, 416: 613–617
- 13 Johnson K A, Ashcroft N W. Structure and bandgap closure in dense hydrogen. *Nature*, 2000, 403: 632–635
- 14 National Research Council. *Frontiers in High Energy Density Physics: The X-Games of Contemporary Science*. Washington D C: The National Academies Press, 2003
- 15 Winget D E, Hansen C J, Liebert J, et al. An independent method for determining the age of the Universe. *Astrophys J*, 1987, 315: L77
- 16 Vladimirov A S, Voloshin N P, Nogin V, et al. Shock compressibility of aluminum at $p \geq 1$ Gbar. *JETP Lett*, 1984, 39: 82–85
- 17 Cauble R, Perry T S, Bach D R, et al. Absolute equation-of-state data in the 10–40 Mbar (1–4 TPa) regime. *Phys Rev Lett*, 1998, 80: 1248–1251
- 18 Chernyshev V K, Protasov M S, Shevtsov V A. The first disk explosive generators. In: *Proceedings of the 3rd International Conference Megagauss Fields and Applications*. Novosibirsk, 1983
- 19 Mokhov V N, Chernyshev V K, Yakubov V B, et al. On feasibility to solve the controlled thermonuclear fusion problem basing on the magnetogasdynamical energy cumulation. *Sov Phys Dokl*, 1979, 24: 557
- 20 Buyko A M, Bidylo N P, Chernyshev V K, et al. Results of Russian/US high-performance DEMG experiment. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1997, 25: 145–154
- 21 Drake R P, Davison L, Horie Y. *High-Energy-Density Physics, Fundamentals, Inertial Fusion and Experimental Astrophysics*. New York: Spring, 2006

- 22 Lindemuth I R, Ekdahl C A, Kirkpatrick R C, Magnetic-compression/magnetized-target-fusion (MAGO/MTF): A marriage of inertial and magnetic confinement. In: Proceedings of 16th International Conference on Fusion Energy. Vienna: IAEA, 1997. 723–734
- 23 Di Nicola J M, Bond T, Bowers M, et al. The national ignition facility: Laser performance status and performance quad results at elevated energy. *Nucl Fusion*, 2019, 59: 032004
- 24 He X T. Advancing the study of hybrid-drive inertial fusion ignition and high energy density physics—Teller medal lecture at IFSA2019. *High Energy Density Phys*, 2020, 36: 100804
- 25 He X T, Li J W, Fan Z F, et al. A hybrid-drive nonisobaric-ignition scheme for inertial confinement fusion. *Phys Plasmas*, 2016, 23: 082706; He X T. The updated advancements of inertial confinement fusion program in China. *J Phys: Conf Ser*, 2016, 688: 012029
- 26 Teller E. Some thoughts about high energy densities. In: Proceedings of the International School of Physics Enrico Fermi, Course XLVIII. London, New York: Academic Press, 1971
- 27 Redmer R, Hensel F, Holst B, et al. Metal-to-Nonmetal Transitions. In: Springer Series in Material Science. Berlin: Springer, 2010. 63–84
- 28 Chen Q F. The Frontiers and Challenges in the Study of Warm Dense Matter (in Chinese). Beijing: China Atomic Energy Press, 2017. 172–176 [陈其峰. 温稠密物质研究的前沿与挑战. 北京: 中国原子能出版社, 2017. 172–176]
- 29 Jiang S E, Ding Y K, Miao W Y, et al. Recent progress of inertial confinement fusion experiments in China (in Chinese). *Sci China Ser G-Phys Mech Astron*, 2009, 39: 1571–1583 [江少恩, 丁永坤, 缪文勇, 等. 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]
- 30 Arnold R C, Meyer-ter-Vehn J. Inertial confinement fusion driven by heavy-ion beams. *Rep Prog Phys*, 1987, 50: 559–606
- 31 Wang N Y. Fusion Energy and Its Future (in Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 2001 [王乃彦. 聚变能及其未来. 北京: 清华大学出版社, 2001]
- 32 Zhao Y, Hu Z, Cheng R, et al. Trends in heavy ion interaction with plasma. *Laser Part Beams*, 2012, 30: 679–706
- 33 Cheng R, Lei Y, Zhou X, et al. Warm dense matter research at HIAF. *Matter Radiat Extremes*, 2018, 3: 85–93
- 34 Ma X, Wen W Q, Zhang S F, et al. HIAF: New opportunities for atomic physics with highly charged heavy ions. *Nucl Inst Methods Phys Res Sect B*, 2017, 408: 169–173
- 35 Dai G X. Progress in the research of HIDIF (in Chinese). *Sci Tech Rev*, 2000, 12: 3–5 [戴光曦. 重离子惯性约束核聚变的研究近况. 科技导报, 2000, 12: 3–5]
- 36 Horioka K. Progress in particle-beam-driven inertial fusion research: Activities in Japan. *Matter Radiat Extremes*, 2018, 3: 12–27
- 37 Sharkov B Y. Overview of Russian heavy-ion inertial fusion energy program. *Nucl Inst Methods Phys Res Sect A*, 2007, 577: 14–20
- 38 Zhou X H. Construction of the High Intensity heavy-ion Accelerator Facility (HIAF). *AAPPS Bull*, 2019, 29: 6–12
- 39 Basko M M. Magnetized implosions driven by intense ion beams. *Phys Plasmas*, 2000, 7: 4579–4589
- 40 Gotchev O V, Jang N W, Knauer J P, et al. Magneto-inertial approach to direct-drive laser fusion. *J Fusion Energ*, 2008, 27: 25–31
- 41 Sharkov B Y, Hoffmann D H H, Golubev A A, et al. High energy density physics with intense ion beams. *Matter Radiat Extremes*, 2016, 1: 28–47
- 42 Basko M M, Kemp A J, Meyer-ter-Vehn J. Ignition conditions for magnetized target fusion in cylindrical geometry. *Nucl Fusion*, 2000, 40: 59–68
- 43 Knauer J P, Gotchev O V, Chang P Y, et al. Compressing magnetic fields with high-energy lasers. *Phys Plasmas*, 2010, 17: 056318
- 44 Gotchev O V, Chang P Y, Knauer J P, et al. Laser-driven magnetic-flux compression in high-energy-density plasmas. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 215004
- 45 Chang P Y, Fiksel G, Hohenberger M, et al. Fusion yield enhancement in magnetized laser-driven implosions. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 035006
- 46 Gomez M R, Slutz S A, Sefkow A B, et al. Experimental demonstration of fusion-relevant conditions in magnetized liner inertial fusion. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 155003
- 47 Martinez A, Ordonez C A. Classical trajectory Monte Carlo simulation of plasma fueling using magnetic plasma expulsion. *AIP Adv*, 2019, 9: 075209
- 48 Lin P, Yan X S, Yang Y Y, et al. A study oil global equation of state for LBE (in Chinese). *Mater Rep*, 2011, 25: 1–4 [林平, 闫雪松, 杨阳阳, 等. 金属合金LBE全局物态方程的初步研究. 材料导报, 2011, 25: 1–4]
- 49 Meng D Y, Zhang L Y, Yan X S, et al. A numerical solution of the Thomas-Fermi equations for mixtures (in Chinese). *Nucl Fusion Plasma Phys*, 2013, 33: 226–230 [孟东原, 张玲玉, 闫雪松, 等. 混合物Thomas-Fermi方程组的求解研究. 核聚变与等离子体物理, 2013, 33: 226–230]
- 50 Kaganovich I D, Startsev E A, Davidson R C. Nonlinear plasma waves excitation by intense ion beams in background plasma. *Phys Plasmas*,

2004, 11: 3546–3552

- 51 Hui D X, Hu Z H, Zhao Y T, et al. Modulation of ion beams in two-component plasmas: Three-dimensional particle-in-cell simulation. *Phys Plasmas*, 2019, 26: 093104
- 52 Zhang S, Lin P, Wang C L, et al. Investigating the influence of wall frictions on hopper flows. *Granular Matter*, 2014, 16: 857–866
- 53 Lin P, Zhang S, Qi J, et al. Numerical study of free-fall arches in hopper flows. *Phys A-Stat Mech Its Appl*, 2015, 417: 29–40
- 54 Tian Y, Zhang S, Lin P, et al. Implementing discrete element method for large-scale simulation of particles on multiple GPUs. *Comput Chem Eng*, 2017, 104: 231–240
- 55 Qi M L, Yang Q, Wang C L, et al. Parallel algorithm on GPU and optimization for molecular dynamics simulation of irradiation damage of structure materials (in Chinese). *Chin J Comput Phys*, 2017, 34: 461–467 [祁美玲, 杨琼, 王苍龙, 等. 结构材料辐照损伤的分子动力学程序 GPU 并行化及优化. *计算物理*, 2017, 34: 461–467]
- 56 Cheng R, Zhou X, Wang Y, et al. Energy loss of protons in hydrogen plasma. *Laser Part Beams*, 2018, 36: 98–104
- 57 Deng J C, Zhao Y T, Cheng R, et al. Investigation on the energy loss in low energy protons interacting with hydrogen plasma. *Acta Phys Sin*, 2015, 64: 145202
- 58 Lei Y, Zhao Y, Cheng R, et al. Fluorescence emission from CsI(Tl) crystal induced by high-energy carbon ions. *Opt Mater*, 2013, 35: 1179–1183
- 59 Brambrink E, Wei H G, Barbrel B, et al. Direct density measurement of shock-compressed iron using hard X-rays generated by a short laser pulse. *Phys Rev E*, 2009, 80: 056407
- 60 Lorenz K T, Edwards M J, Glendinning S G, et al. Accessing ultrahigh-pressure, quasi-isentropic states of matter. *Phys Plasmas*, 2005, 12: 056309
- 61 Mahieu B, Jourdain N, Ta Phuoc K, et al. Probing warm dense matter using femtosecond X-ray absorption spectroscopy with a laser-produced betatron source. *Nat Commun*, 2018, 9: 3276
- 62 Zhou X, Cheng R, Zhao Y, et al. Multiple ionization state of Ar^{q+} ions during collisions near the Bohr velocity. *Sci Rep*, 2019, 9: 5359
- 63 Zhou X, Cheng R, Zhao Y, et al. L X-ray production in ionization of ^{48}Cd and ^{49}In by 75–250 keV protons. *Nucl Inst Methods Phys Res Sect B*, 2018, 416: 94–101
- 64 Lei Y, Cheng R, Zhou X, et al. Charge state effect on K-shell ionization of silicon induced by iodine $^{q+}$ ions. *Eur Phys J D*, 2018, 72: 132
- 65 Ren J, Zhao Y, Zhou X, et al. Charge-state dependence of inner-shell processes in collisions between highly charged Xe ions and solids at intermediate energies. *Phys Rev A*, 2015, 92: 062710

Research frontier of heavy-ion-beam-driven inertial confinement fusion at HIAF

CHENG Rui^{1,2†}, ZHANG Sheng^{1†}, SHEN GuoDong^{1,2†}, CHEN YanHong¹,
ZHANG YanShi¹, CHEN LiangWen¹, ZHANG ZiMin^{1,2}, ZHAO QuanTang^{1,2},
YANG JianCheng^{1,2}, WANG YuYu^{1,2}, LEI Yu^{1,2}, LIN Ping¹, YANG Jie^{1,2}, YANG Lei^{1,2},
MA XinWen^{1,2}, XIAO GuoQing^{1,2}, ZHAO HongWei^{1,2} & ZHAN WenLong^{1,2*}

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

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

The rapid development of a heavy-ion accelerator technology avails a new approach of producing high-energy-density (HED) matter in the laboratory, and an beneficial experimental platform for the inertial-confinement-fusion (ICF) that is driven by ion beams. The Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, is responsible for the construction of the recently developed heavy ion accelerator facility (HIAF) in the 12th five-year plan period. The layout and building plan of the accelerator complex regarding HED and ICF includes the shooting of single-ion beams in phase-1, the shooting of double-ion beams in the optimization of phase-1 and the shooting of multi-ion beams in the phase-upgrade. A brief introduction of the state of matter driven by different beams-shooting methods and the new diagnostic development by IMP are presented. This paper will provide essential references of the experimental route and technical support for the research on ICF in China.

HIAF project, high energy density physics, inertial confinement fusion, hydrodynamic simulation, high spatial and temporal resolution diagnostics

PACS: 52.58.Hm, 52.70.-m, 52.40.Mj, 52.27.Gr, 52.50.Lp

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0265](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0265)