

“十二五” 国家重大科技基础设施建设项目

强流重离子加速器装置-HIAF

High Intensity heavy ion Accelerator Facility

杨建成, 冒立军

(代表HIAF工程团队)

中国科学院近代物理研究所

主要内容

- 一、工程概况
- 二、总体方案和核心关键技术
- 三、工程主要进展
- 四、实验终端与未来规划
- 五、总结与展望

主要内容

一、工程概况

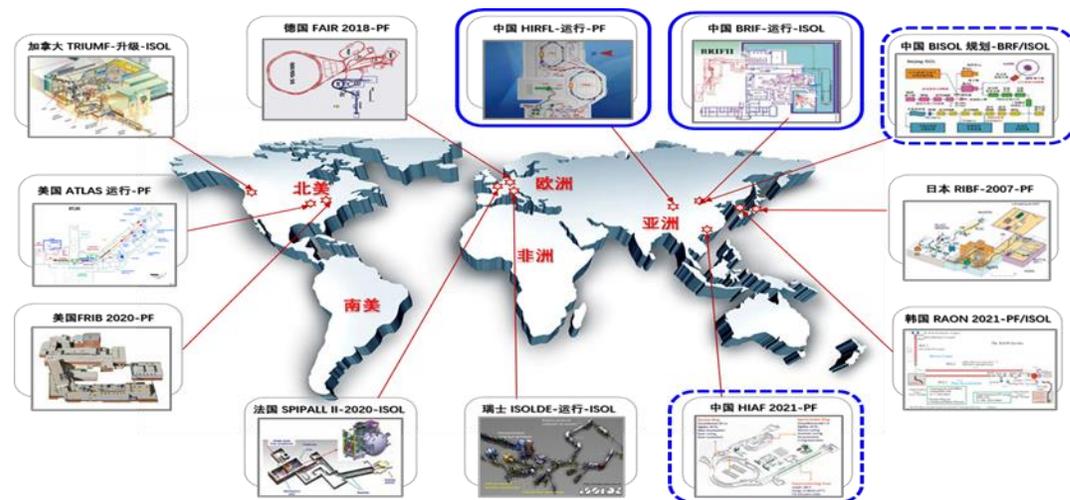
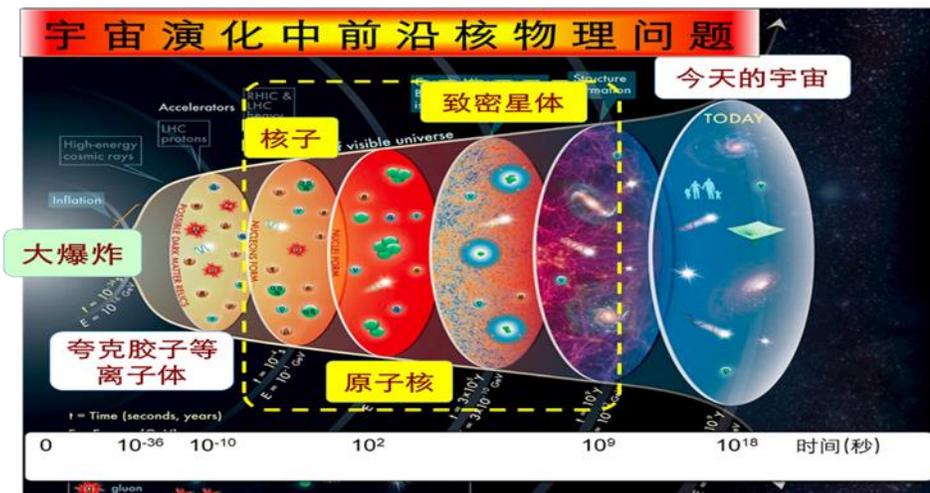
二、总体方案和核心关键技术

三、工程主要进展

四、实验终端与未来规划

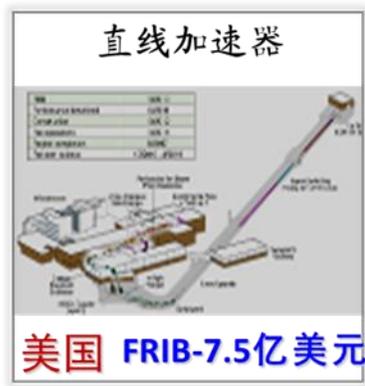
五、总结与展望

核物质起源、结构、性质和演化的研究是物质科学前沿



重离子碰撞是实验室产生和研究核物质的最佳手段之一

世界科技强国正在或者计划建造下一代强流离子加速器大科学装置



通过高流强、高能量、高功率抢占基础前沿研究制高点!



HIAF工程概况

HIAF是“十二五”时期优先安排**16项**重大科技基础设施之一，《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012 - 2030)》**国发〔2013〕8号(2013年1月16日国务院常务会通过)**

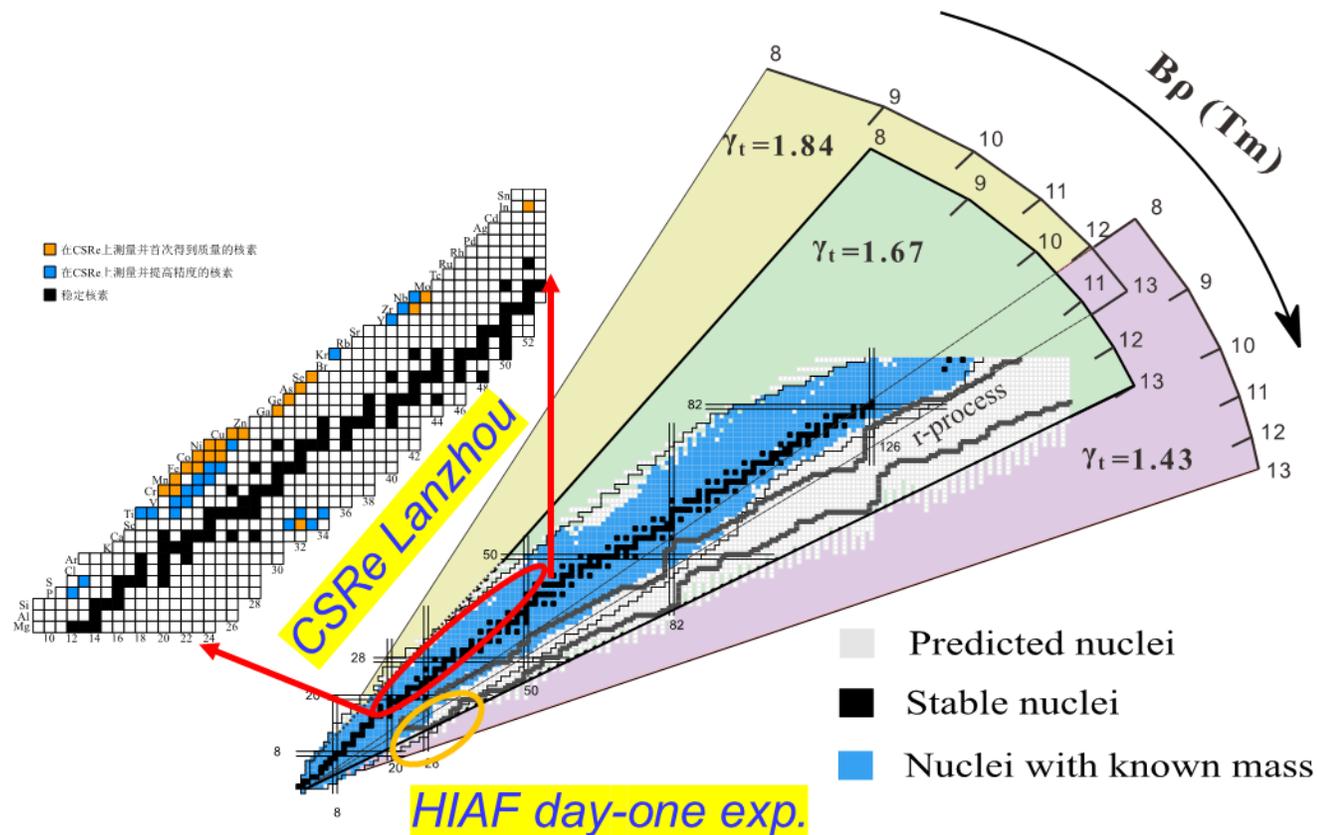
中文名称	全称	强流重离子加速器装置
英文名称	全称	High Intensity heavy-ion Accelerator Facility
	缩写	HIAF
组织部门	国家发展和改革委员会	
主管部门	中国科学院	
共建部门	无	
法人单位	中国科学院近代物理研究所	
共建单位	无	
项目性质	新建	
建设地点	广东省惠州市 (所有主建筑和附属建筑面积总和33123平方米)	
建设投资与来源	16.7086亿元	国家投资：16.2086亿元
		中国科学院：0.5亿元
		广东省政府、惠州市政府：配套设施建设
运行经费及来源	21615万元/年，申请国家拨款	
建设周期	7年	

科学目标与设施定位

原子核层次的前沿科学问题

- 探寻原子核存在的极限
 - 质子和中子滴线、超重核合成等
 - 远离稳定线核物质的新形态、巨晕结构、皮结构和核分子态等
 - 核幻数和单粒子态的演化
传统幻数演化、是否存在新幻数等
- 宇宙中比铁重的元素的产生
- 爆发性天体过程的能量来源

.....

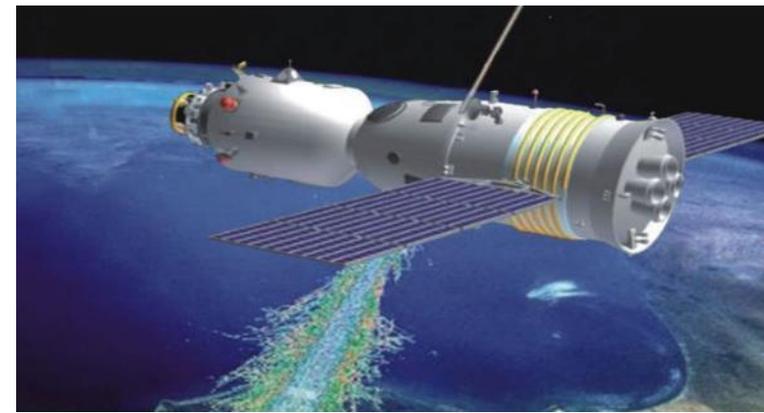


探索未知世界，解决重大基础前沿科学问题的**科学利器**

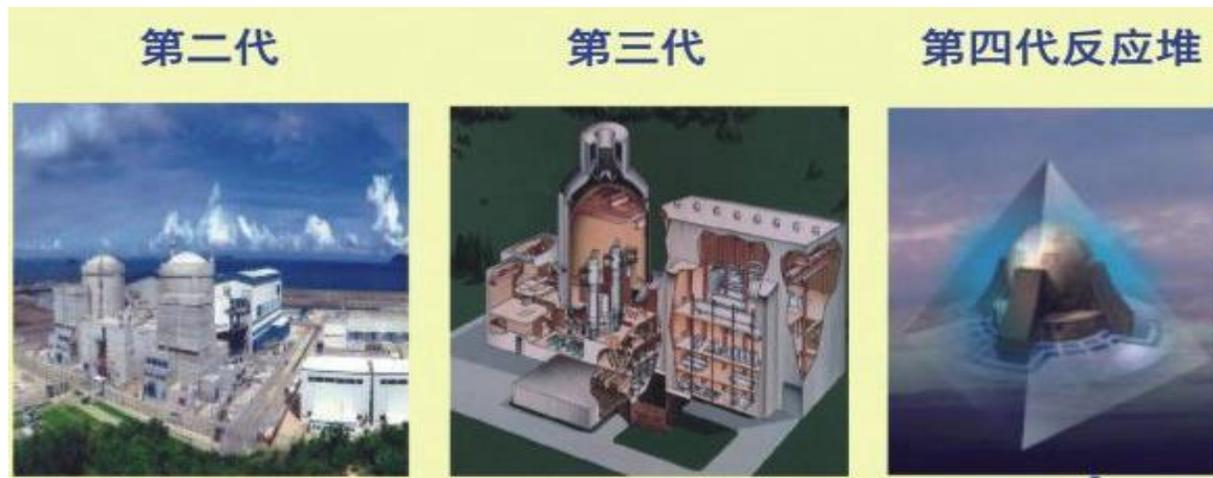
科学目标与设施定位

面向国家重大战略需求

- **空间辐射环境地面模拟**
 - 航天器、宇航员安全/健康保障
- **先进核能材料评价筛选**
 - 针对先进核能发展的瓶颈问题
- **辐射生物、功能材料等研究**
 - 离子与生物作用机理…
 - 作物、微生物品种等选育
 - 纳米材料、特殊功能材料…
- **高端医疗新技术和同位素靶向药研究**



空间辐射严重威胁航天器和宇航员的安全



先进核能抗强辐照、耐高温和耐腐蚀材料

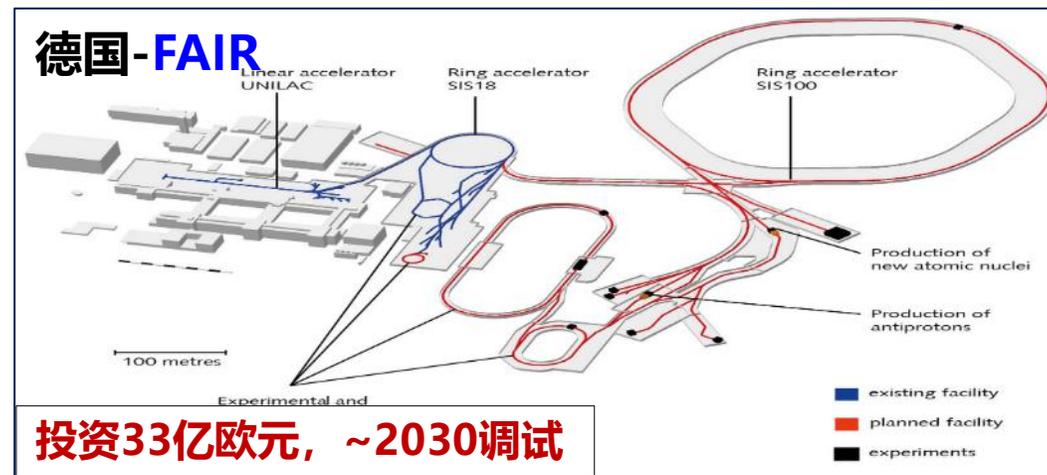
满足国家重大战略需求的**国之重器**

科学目标与设施定位

HIAF与FAIR是同期建设重离子加速器装置

- HIAF特色和优势：**束流指标和时间窗口**

研究所	装置	重复频率	离子种类	设计流强	达到流强
BNL	AGS Booster	/	Au ³²⁺	/	5×10^9
CERN	LEIR	/	Pb ⁵⁴⁺	/	9×10^8
JINR	NICA	/	Au ³²⁺	4×10^9	/
GSI	SIS18	2.7Hz	U ²⁸⁺	1.0×10^{11}	3×10^{10}
FAIR	SIS100	2.7Hz	U ²⁸⁺	$(1.0-2.0) \times 10^{11}$	/
IMP	HIAF-BRing	3-5Hz	U ⁴⁵⁺	2.0×10^{11}	/
IMP	HIAF-SRing	/	U ⁴⁵⁺	1.0×10^{12}	/



- 国际上**脉冲流强最高**的快循环重离子同步加速器、**精度最高**的核质量环形谱仪

主要内容

一、工程概况

二、总体方案和核心关键技术

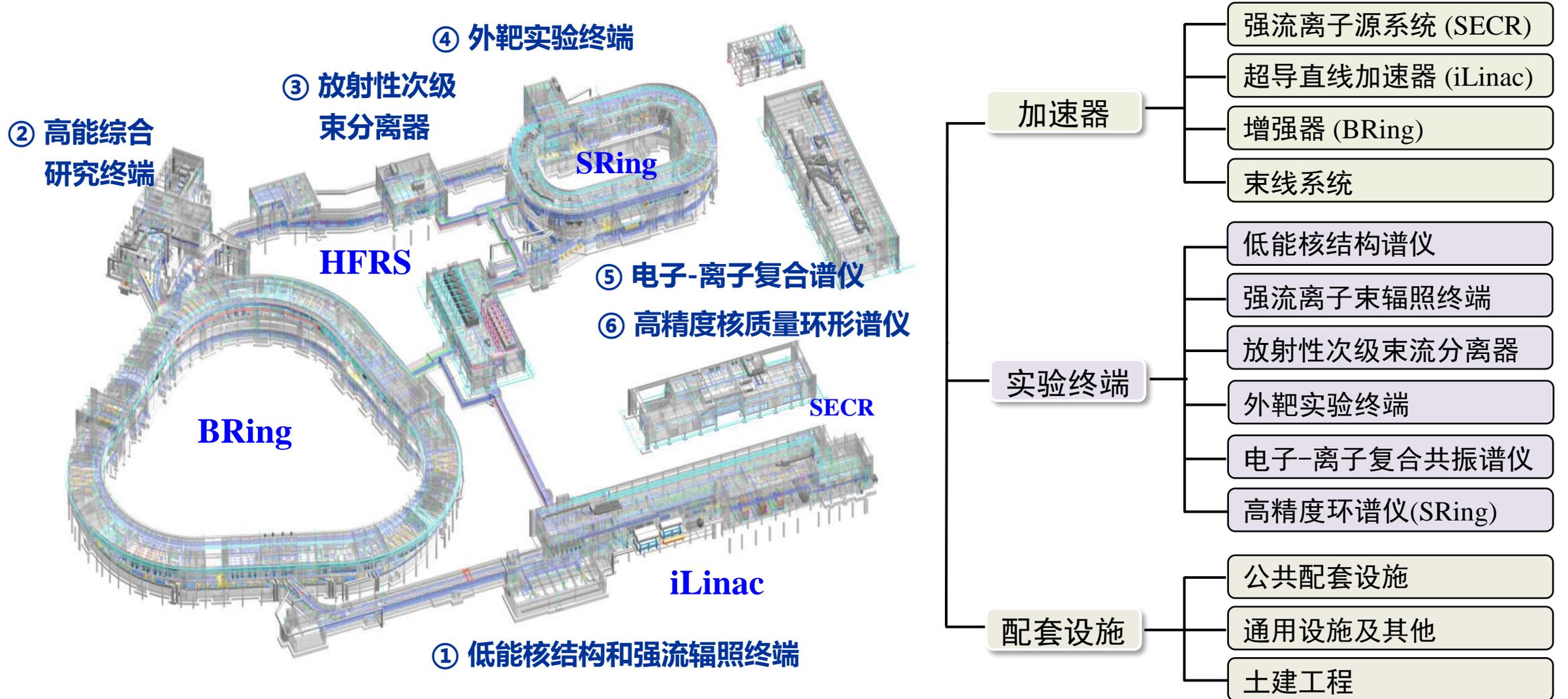
三、工程主要进展

四、实验终端与未来规划

五、总结与展望

总体方案与建设内容

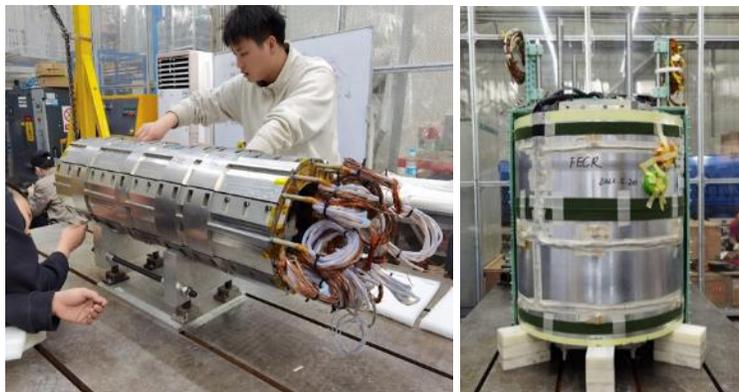
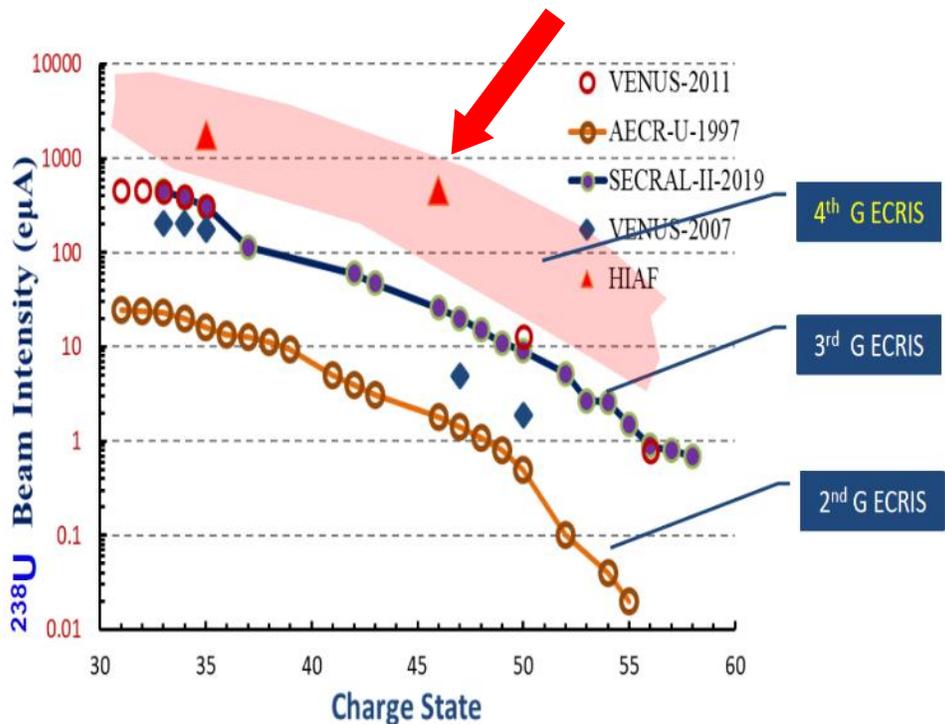
强流超导直线iLinac、快循环同步环BRing与六大实验终端结合



核心关键技术-1：第四代ECR离子源

■ FECR-45GHz 国际首台第四代ECR离子源

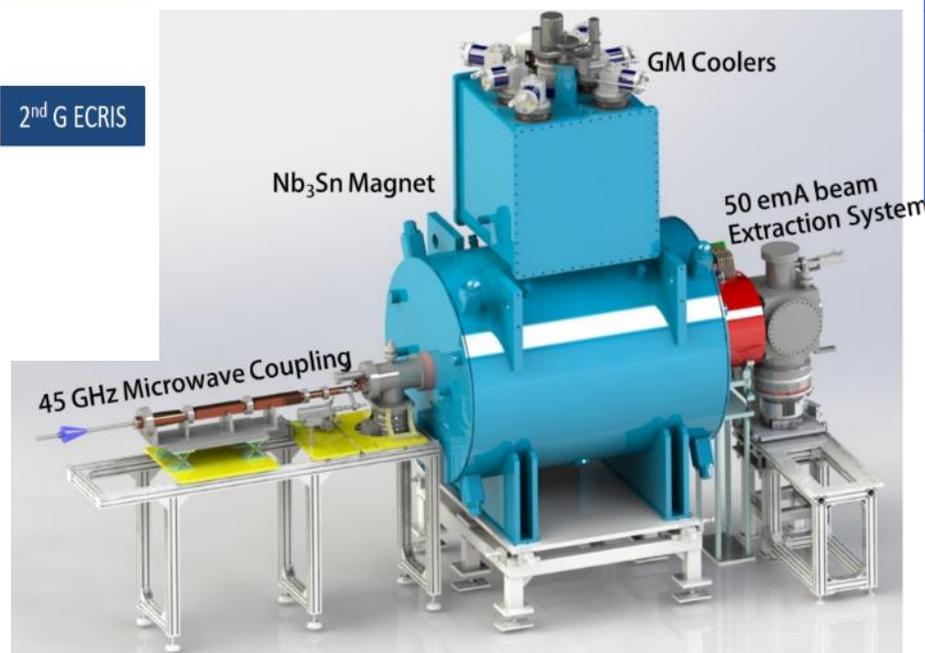
4th ECR源是实现HIAF束流设计指标的唯一选择



4th G ECRIS

3rd G ECRIS

2nd G ECRIS



- 完成FECR真机冷体三次集成，解决装配过程中发现的问题

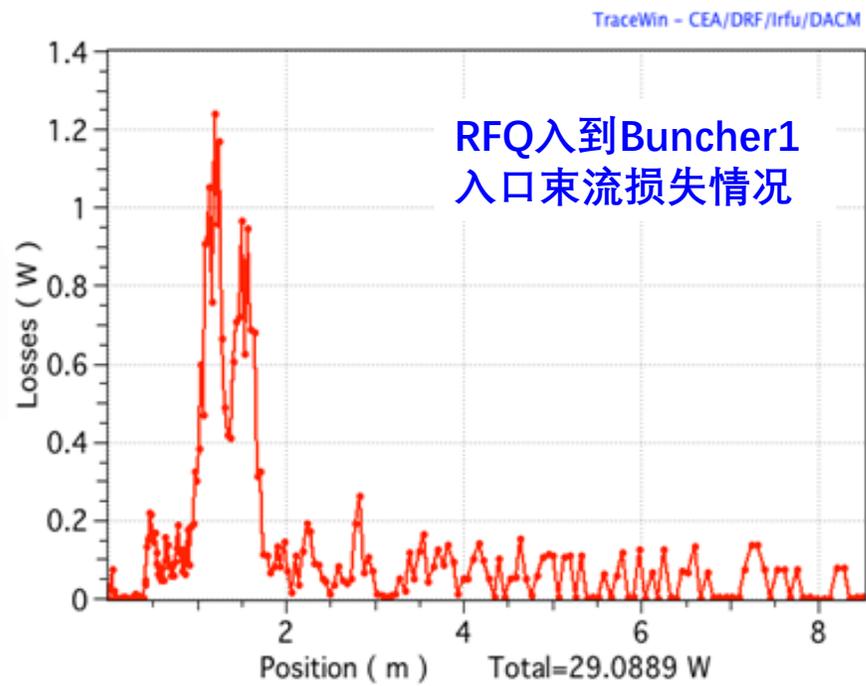
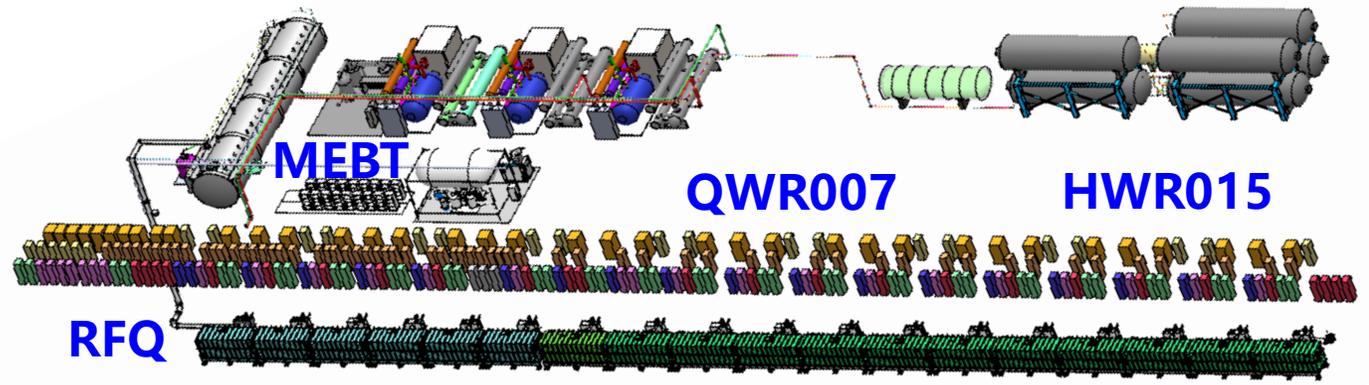
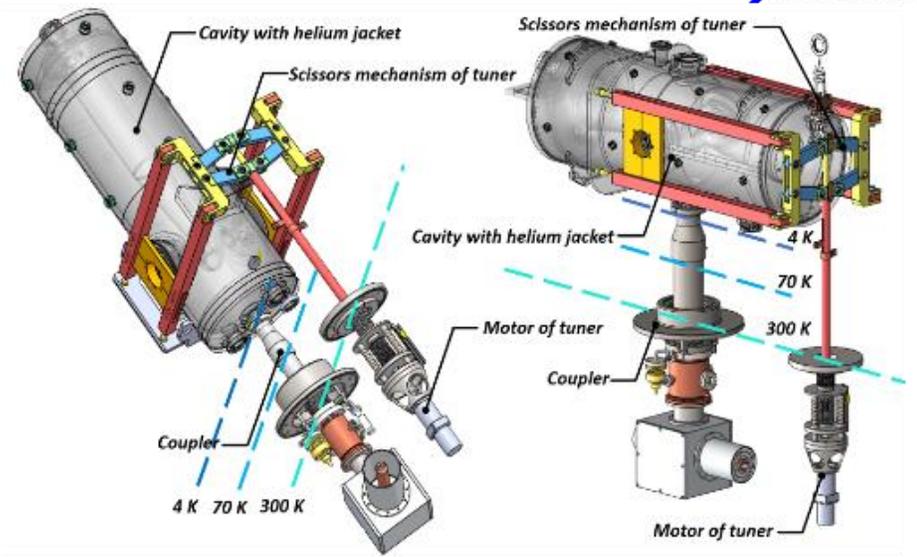
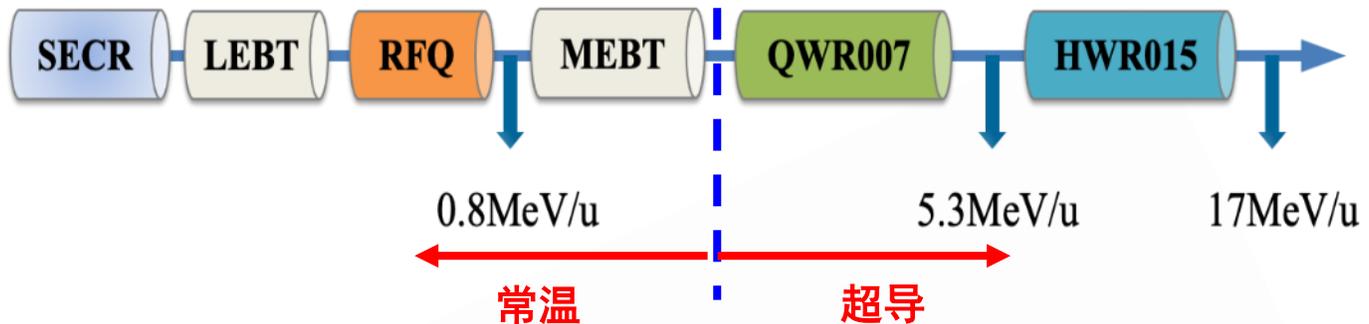
Specs.	Unit	Value
Frequency	GHz	45
RF Power	kW	20
Chamber ID	mm	≥Ø140
Mirror Fields	T	≥6.4/3.2
B_{rad}	T	≥3.2
Mirror Length	mm	~500
B_{max} in conductor	T	~11.8
Magnet coils	/	Nb ₃ Sn

- 完成高功率注入/引出组件加工、检测、离线测试
- 验证45 GHz微波准光传输、并有效馈入了ECR离子源

核心关键技术-2: 强流超导重离子直线加速器

毫安级流强、双运行模式

- 脉冲: 28 μA U^{35+}
- 连续: 15 μA U^{35+}

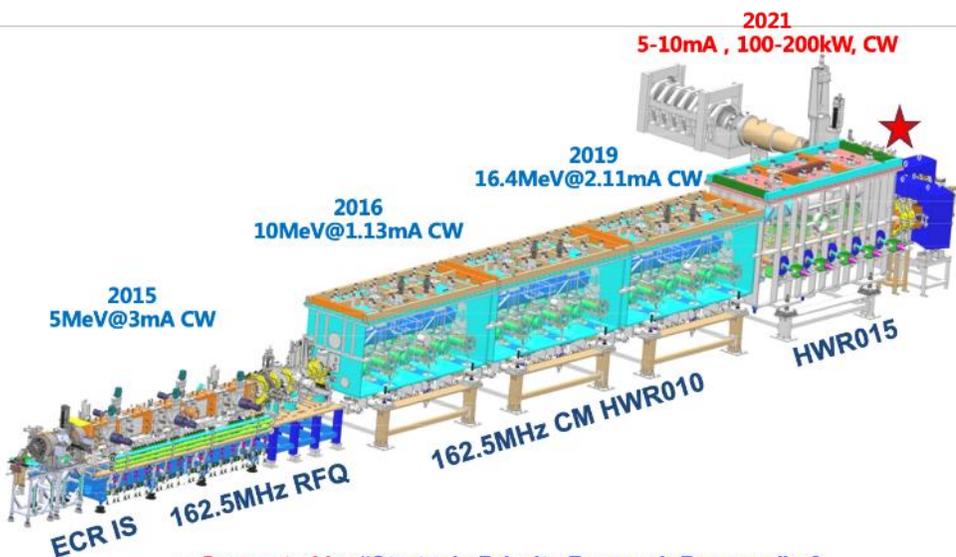
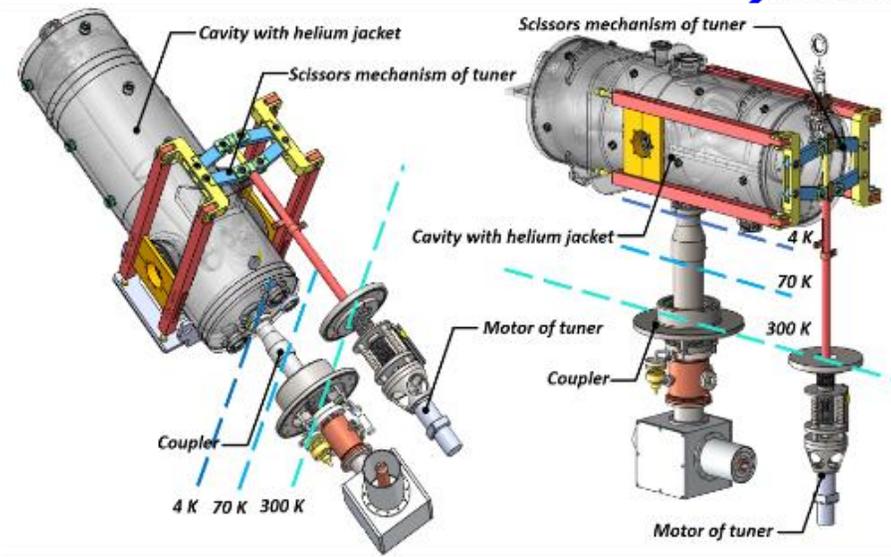
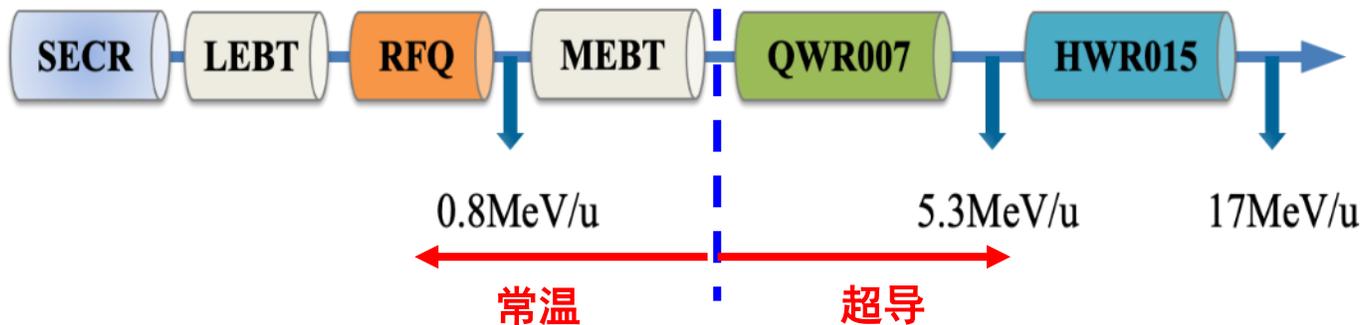


3HB入口到SC段出口传输效率: 81.26%, 大部分低能离子损失在中能段

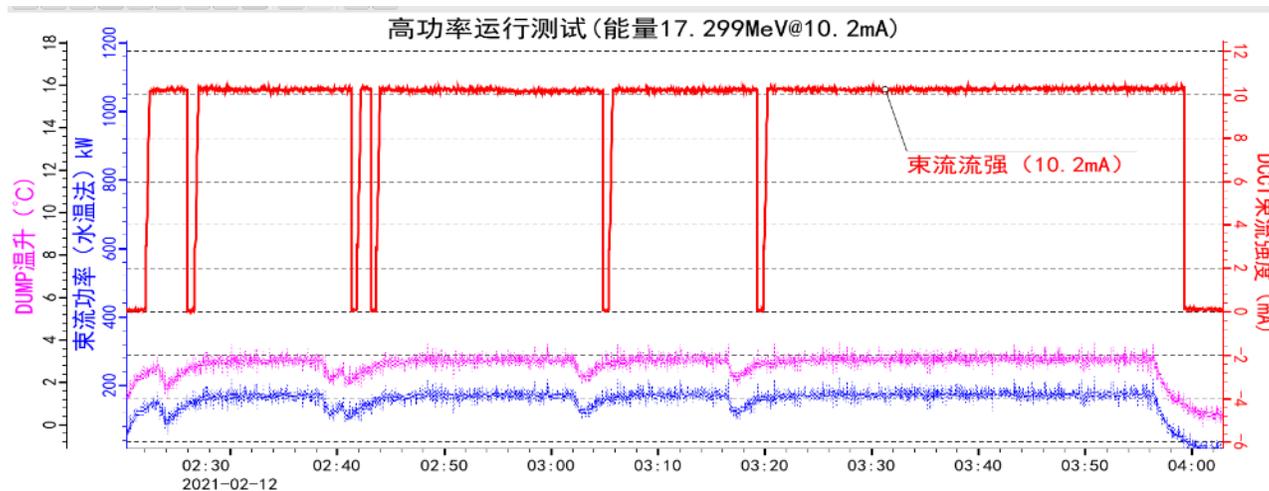
核心关键技术-2: 强流超导重离子直线加速器

毫安级流强、双运行模式

- 脉冲: $28 \mu\text{A } U^{35+}$
- 连续: $15 \mu\text{A } U^{35+}$



• Supported by "Strategic Priority Research Program" of the Chinese Academy of Sciences.



完成强流质子束流百千瓦百小时 & 10mA测试, 束流强度将世界最好指标水平提高5倍

核心关键技术-3：非谐振快循环加速技术

突破了**12T/s (40000A/s)** 国际最快速率重离子非谐振加速技术，解决了我国重大科技基础设施HIAF工程**难题挑战**，为国际同类装置提供了**新方案**

非谐振极快循环加速



物理实验需求：高能量
克服强流动态真空、空间电荷效应
引起束流损失：速度越快损失越小

现状：国际上尚未找到彻底解决方案

德国FAIR二极铁电源上升率**20000A/s** (300MW配电);
欧洲CERN 60MW 电源上升率**11000A/s**

创新1：国际首台全储能大功率高精度非谐振电源

创新2：首创骨架内衬极高真空超薄壁真空室

突破：国际领先高梯度大孔径纳米晶磁合金环高频系统



创新点-1: 首次提出了变前励全储能拓扑结构, 实现国际最快非谐振加速速率, 解决了感性负载电源对电网冲击的难题



一代工艺 (2018年)



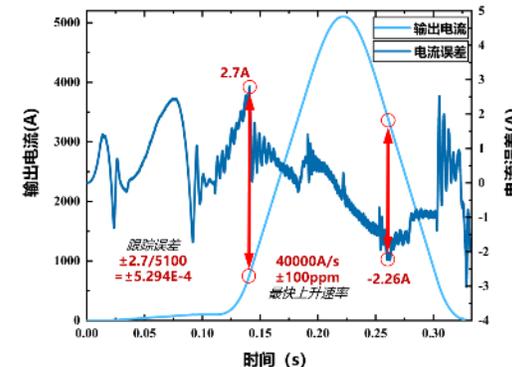
二代工艺 (2020年)



三代工艺 (2022年)



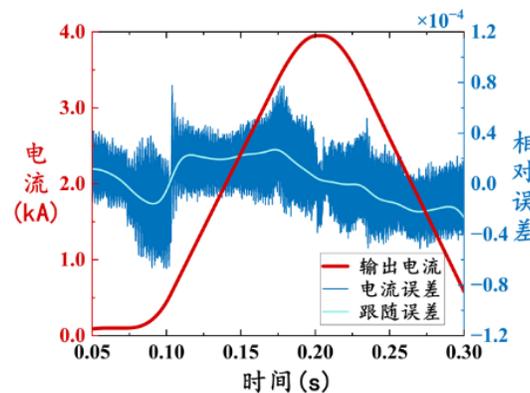
非谐振快循环全储能电源全尺寸样机



- 从原理样机到全尺寸样机、再到**国际首台**大型非谐振全储能快循环脉冲电源, 实现了**上升速率38kA/s、4kA脉冲电流输出**, 配电和消耗功率大幅下降 (约一个量级)



非谐振快循环全储能电源**批量生产**



配电功率 (MVA)	常规	全储能
BRing二极铁电源	180	15
BRing四极铁电源	50	6
BRing总配电	250	41
HIAF总配电	297	88

配电功率由 **230MVA** 减小到 **21MVA**

研发了新一代高性能实时全数字控制器，大幅提高响应速度和精度；创新提出动态电感辨识算法，解决了动态电感随电流波形时变的识辨难题



SZF-3 全数字控制器

Journals & Magazines > IEEE Transactions on Industri... > Early Access

Analytic Modeling Optimal Control with Kinetic Inductance Fine Turning Method of Pulsed Power Supply for Accelerator Magnet

Publisher: IEEE

Cite This

PDF

Xiaojun Wang; Shuai Zhang; Daqing Gao All Authors

Journals & Magazines > IEEE Transactions on Industri... > Volume: 67 Issue: 7

Analytic Modeling Optimal Control of Pulsed Power Supply for Accelerator Magnet

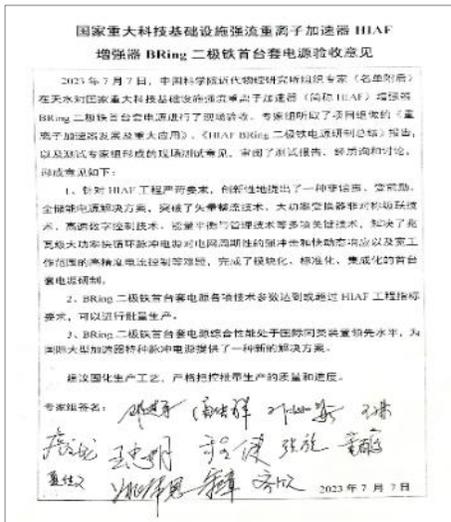
Publisher: IEEE

Cite This

PDF

Xiaojun Wang; Yuzhen Huang; Wanzeng Shen; Fengjun Wu; Daqing Gao All Authors

发表在电气电子领域**国际排名第一位**期刊（非综述）**IEEE Transactions on Industrial Electronics (TIE)**；**2019年影响因子 (7.503)**，**2021年影响因子 (8.236)**

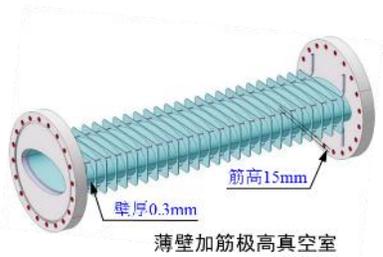


现场测试专家组：

“该非谐振快速率电源综合性能处于国际同类装置领先水平，为国际加速器大型特种脉冲电源提供了一种新的解决方案”

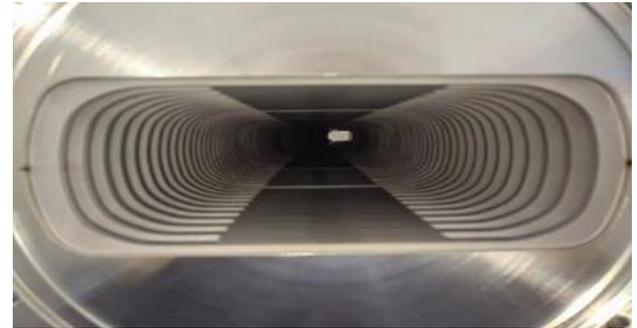
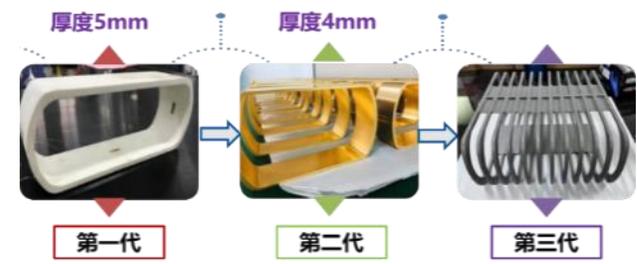
创新点-2: 首次提出“骨架内衬”极高真空室方案, 攻克技术和工艺难题, 成功研制全尺寸样机, 真空度 10^{-12} mbar, 达国际领先水平

国际方案: 薄壁加筋方案



存在问题

- 钎焊高温烘烤脱落
- 筋高增加了磁铁气隙
- 造价昂贵的特殊P506钢

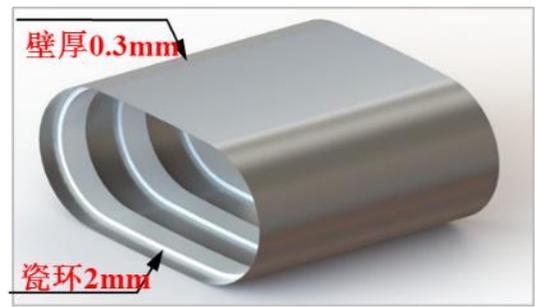


NEG镀膜钛合金骨架



二极铁真空室批量生产

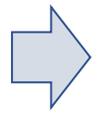
中国方案: 骨架内衬方案



- 耐高温烘烤、材料要求低
- 大幅减小磁铁气隙
- 降低磁铁造价~30%
- 减小配电功率

真空室研制得到欧洲核子CERN的大力支持

Dear all
 ok yes I see...if there are no resonances it could be due to the gold coating (very good) and the fact that the beam pipe is very thin and thus compressed by the vacuum pressure which make a good contact at the edge..thus we have the same functionality (assuring a good contact at the edge) as its normally done via the RF shoulder..
 Anyway you did an excellent job and this concept will be used in many future machines..
 you just need to invent a proper name now before others do it..since it looks a bit like a snake ..perhaps CHINESE DRAGON structure..?
 Happy new year to all of you
 REgards Fritz



这是一件非常出色的工作, 这个概念将会被推广到将来很多加速器装置上, 你们需要尽快给这种真空室命名, 比如“中国龙结构”



突破-高梯度、宽频带、快响应油冷磁合金高频系统

多年探索研发，从小到大磁环，解决了从材料到工艺等核心技术难题，打破国外技术封锁与禁售，成功研制整体性能达到国际先进水平的高性能大尺寸液冷磁合金环

难题挑战

- 实现从质子到铀全粒子加速-宽频带
- 12T/s 上升速度，240kV电压
- 束团压缩电压上升沿小于10 μ s

传统铁氧体高频腔无法满足要求

技术路线

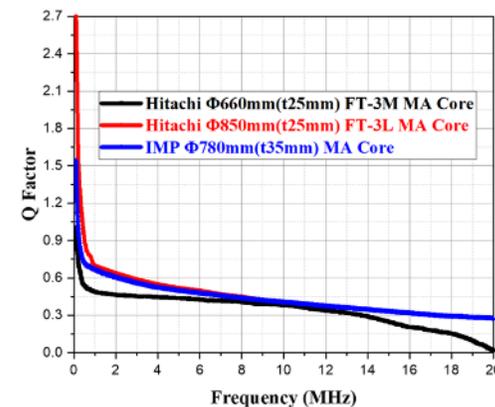
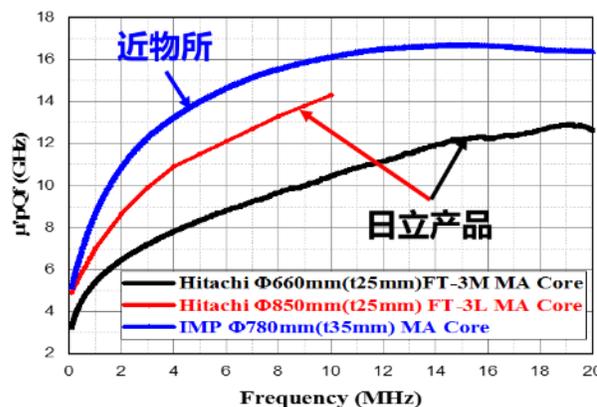
高梯度磁合金：高梯度(40kV/m)；宽频带（无需调谐）；快响应速度 (<10 us)

现状困境

只有日立公司能够生产高性能磁合金环，该环还可用于电力及核能相关设备等，所以对中国禁售，同时封锁核心工艺与关键技术。自主研发，突破关键技术

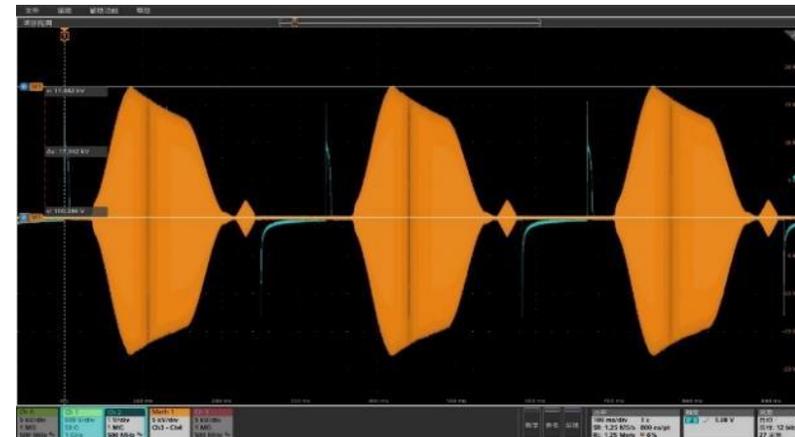
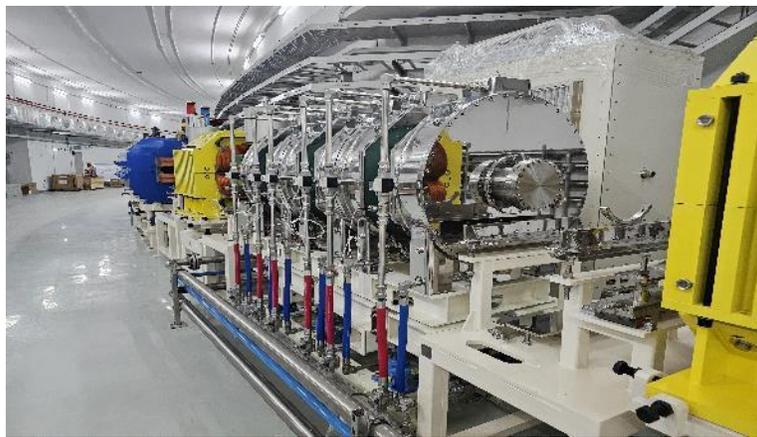


大尺寸纳米磁合金环在最具挑战的低频段(0.1-2MHz)性能超过国际公开报道的最好水平-国际领先



高频磁化关键指标参数对比

研制了国内首台大尺寸油冷磁合金高频系统，已实现70kV@0.3~2.1MHz、3Hz连续运行，性能达到国际先进水平，满足HIAF加速要求



高频系统首批进驻HIAF建设现场，离线测试结果满足工程要求



联合建设的磁合金环生产线，服务多个大科学工程建设

主要内容

一、工程概况

二、总体方案和核心关键技术

三、工程主要进展

四、实验终端与未来规划

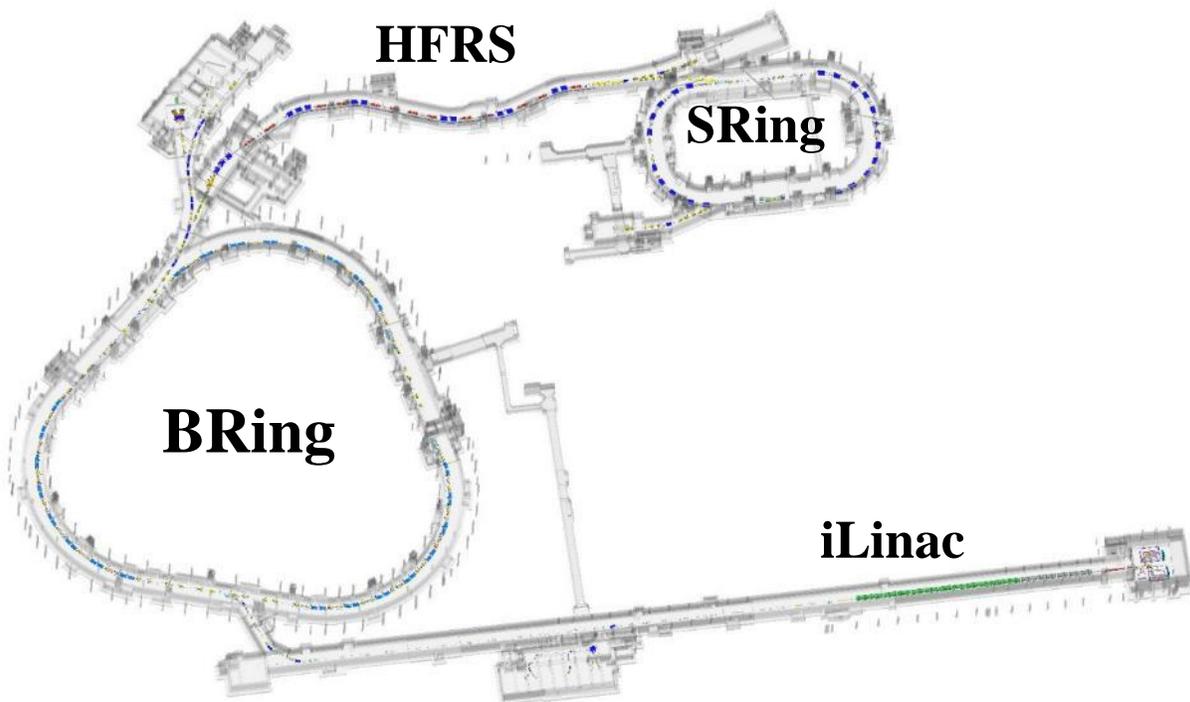
五、总结与展望



□ 土建与配套系统施工

总长约**1.7km**，埋深**-13m**，总建筑面积**2.46万**平方米，**一级防水结构设计及施工**

2024年3月底完成全部施工，交付使用，加速器主体设备逐步进场安装



加速器隧道总体布置



BRing加速器隧道

2024~2025年：批量加工与测试收尾，设备全面进场安装调试，建成出束

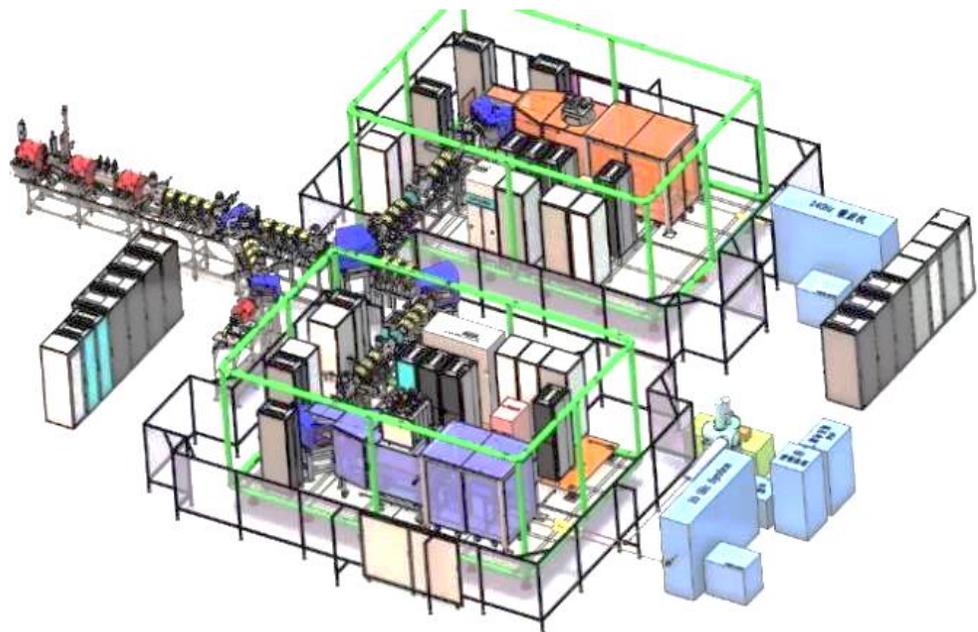
		2023年		2024年				2025年				
		7~9月	10~12月	1~3月	4~6月	7~9月	10~12月	1~3月	4~6月	7~9月	10~12月	
工艺设备	束流前端	批量加工与调试		预装配	安装	RFQ 出束						
	超导直线	批量加工与调试			安装与调试							
	BRing	批量加工与调试		● 进场安装	安装与调试	★ 闭环	分段出束	出束				
	HFRS	批量加工与调试			安装与调试							
	SRing	批量加工与调试			★ 闭环				全线贯通			
	束线终端	批量加工与调试										
	工艺样段	BRing样段测试										
公用配套	水冷通风	安装调试		■ 具备进场条件								
	配电	临电供电		■ 正式电启用				工艺配电安装				
	低温	具备低温测试条件			■ 在线安装		● 2.5kW ● 10kW制冷机见液					
	综合布线	桥架安装、线缆敷设										
土建施工	地下隧道			■								
	综合大厅/二三号站房		■									
	一号制冷中心			■								
	一号/二号测试大厅			■								
	直线设备楼2			■								
	直线设备楼1/一号站房				■	土建完工						

联调
出束
实验
研究

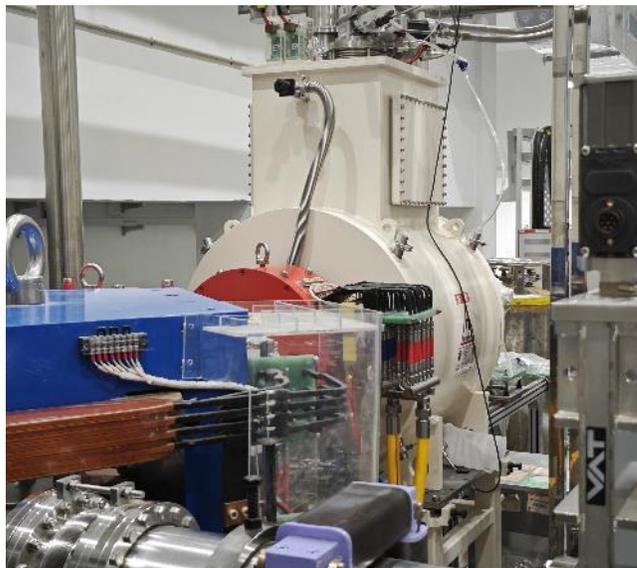
束流前端系统

- 已完成所有设备加工和测试，率先进场安装
- 24年6月完成现场安装，具备测试出束条件

束流前端包括离子源系统、聚束器、低能传输线及RFQ、中能传输线



束流前端系统布局图

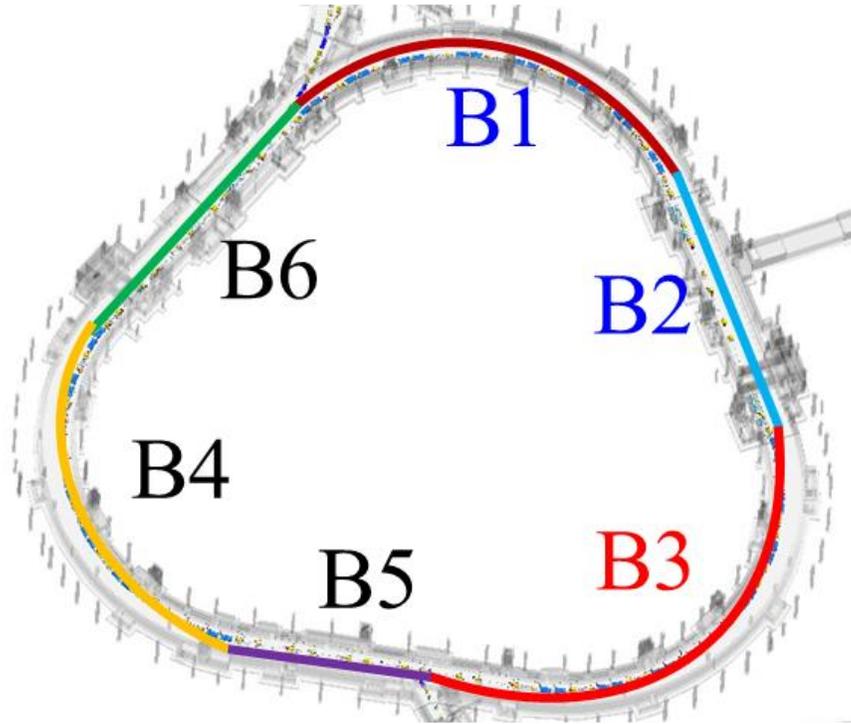


束流前端系统现场设备安装



□ 增强器B Ring

- 采用分区域同步安装的模式，6个安装区域同时展开，加快安装进度
- 24年3月28日起开始安装，已完成95%的工程量

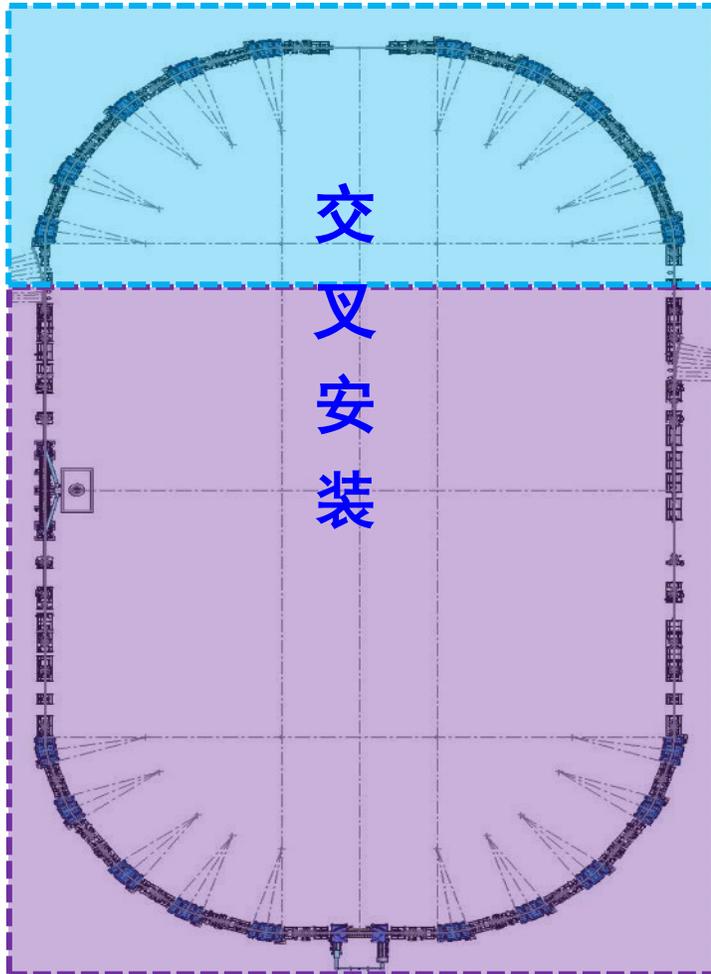


B Ring 安装分段



高精度环形谱仪SRing

- 按照设备到场的顺序，分两个区域进行交叉安装
- 目前安装进度接近90%，预计9月底完成闭环



主要内容

一、工程概况

二、总体方案和核心关键技术

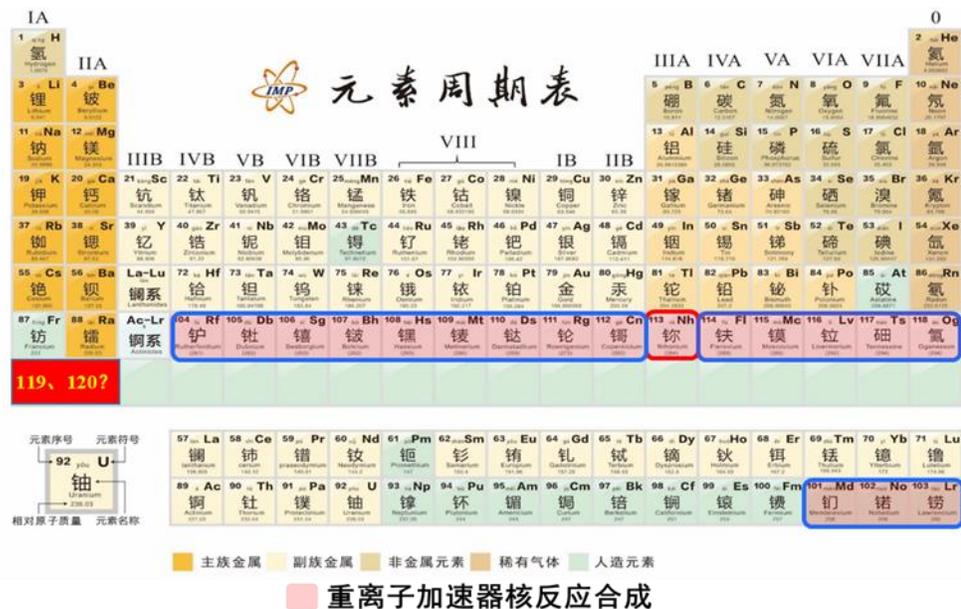
三、工程主要进展

四、实验终端与未来规划

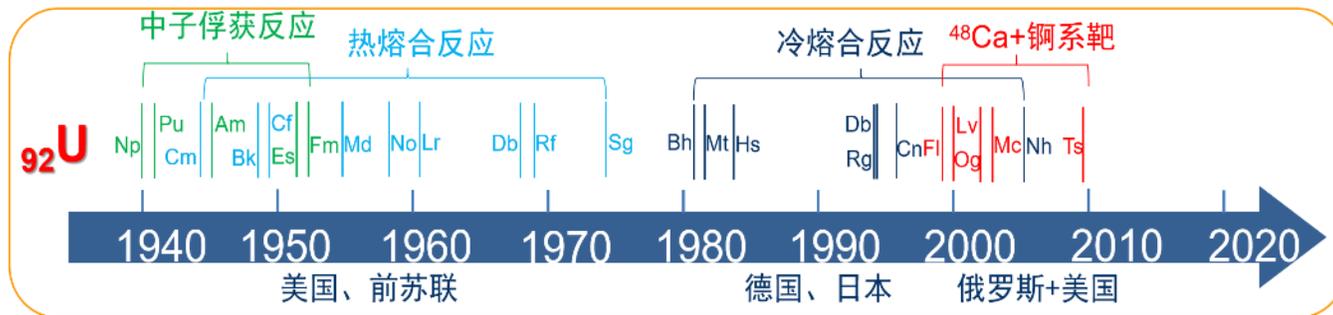
五、总结与展望

充气反冲谱仪 - 新元素合成

合成和鉴别新元素一直是核物理最具挑战性的前沿课题之一，新元素合成面临科学和技术的巨大挑战，近十多年国际上无重大进展！



100号之后的所有元素都是利用重离子加速器合成的



核心技术挑战:

fb产生截面的元素合成, 高束流强度, 高分离效率

以国家名命名的元素:

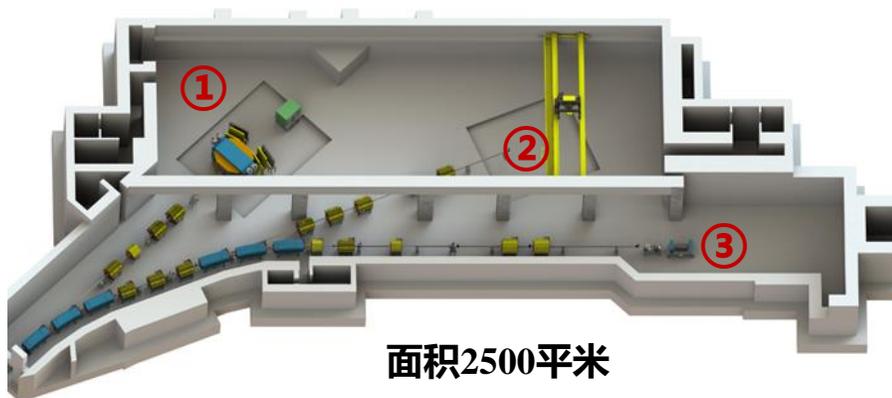
- 钌, Ruthenium, 俄罗斯
- 锗, Germanium, 德国
- 钋, Polonium, 波兰 (居里夫人)
- 钫, Francium, 法国
- 镅, Americium, 美国
- 鉈, Nihonium, 日本

现状: 目前俄罗斯JINR, 日本RIKEN正在研究新元素119号或120号; 德国正在建造超重核研究专用加速器; 美国、法国正在讨论建设专用加速器。

HIAF+CAFE

能否率先合成119、120号元素, 将五星红旗插上元素周期表?

终端2- 高能综合研究平台



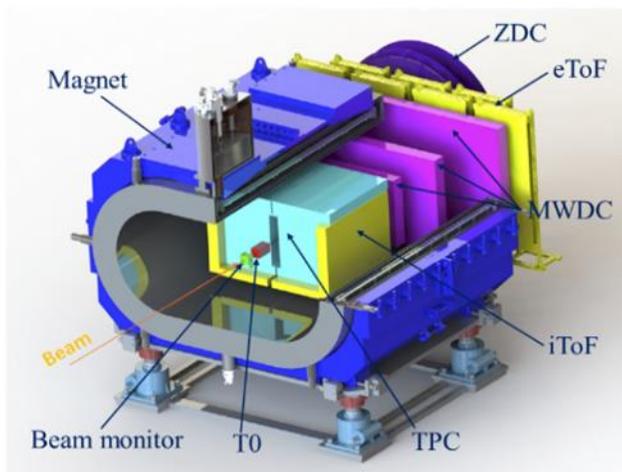
面积2500平米

- ① 核物质相结构终端
- ② 超核终端
- ③ 高能单粒子效应终端

- 宽能量范围全离子
- 高品质慢引出束流

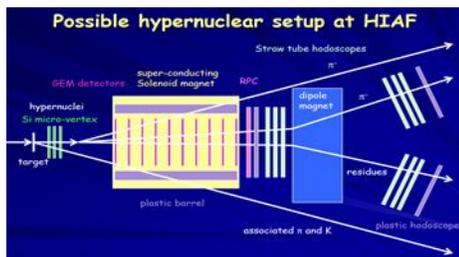
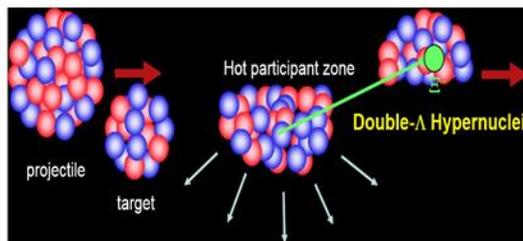
离子种类	能量 (GeV/u)	流强 (ppp)
p	9.3	6.0×10^{12}
$^{12}\text{C}^{6+}$	4.2	1.2×10^{12}
$^{78}\text{Kr}^{19+}$	1.7	6.0×10^{11}
$^{209}\text{Bi}^{31+}$	0.85	2.4×10^{11}
$^{238}\text{U}^{35+}$	0.835	2.0×10^{11}

核物质相结构终端



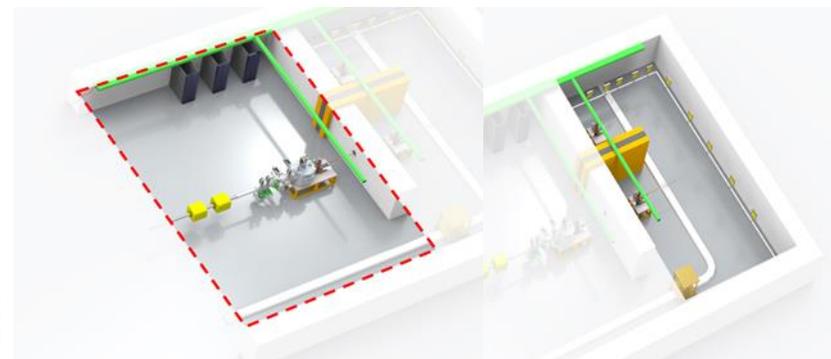
寻找QCD相变临界点

超核终端



研究超核性质、扩展超核存在版图

高能单粒子效应终端

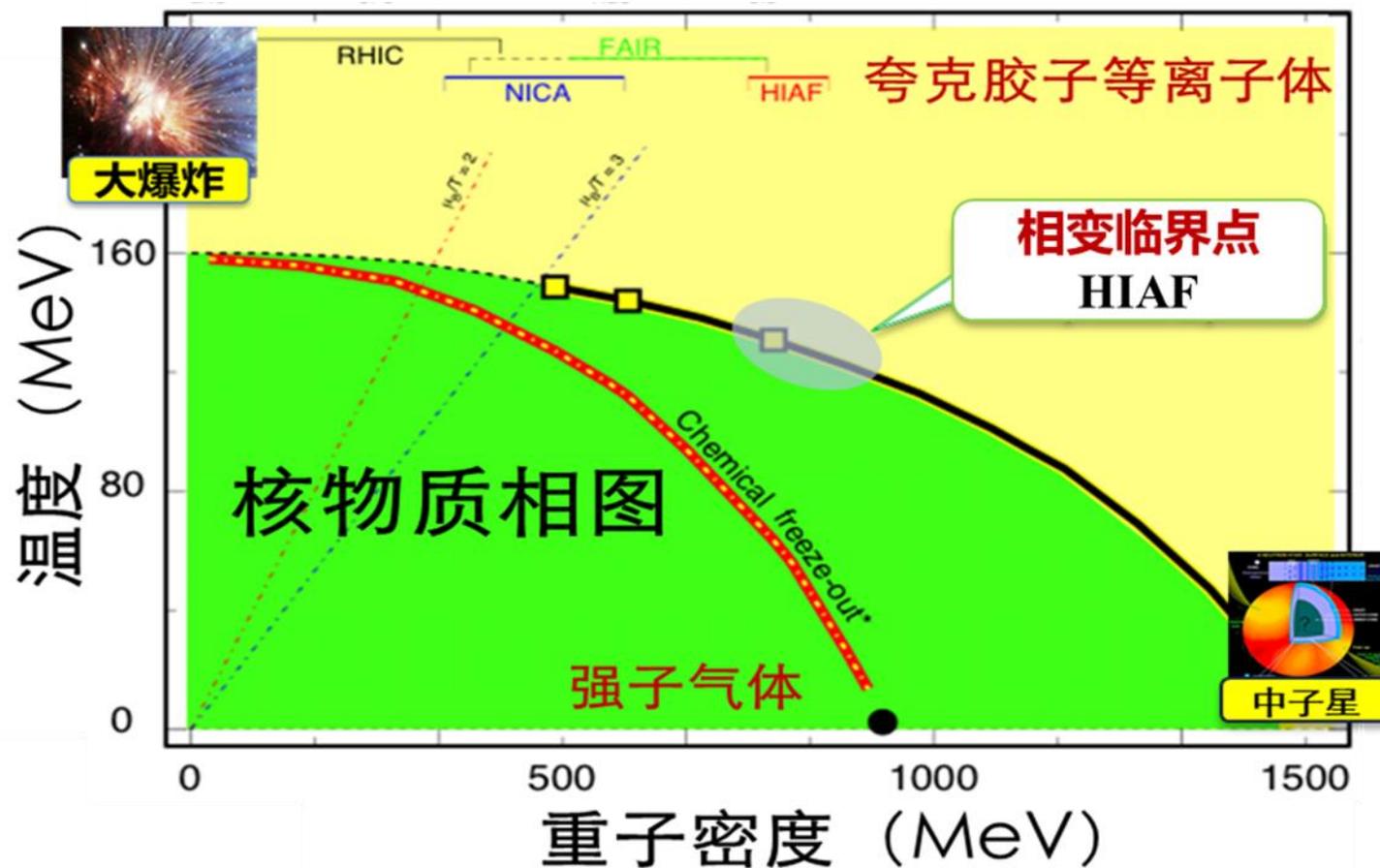


模拟整机和小卫星空间运行环境的综合、复杂辐射场

相变临界点是研究核物质性质和理解强相互作用的基点，是核物质性能研究的圣杯，是目前世界主要的重离子实验室竞争的**前沿热点课题**

HIAF装置：为研究高重子密度区的核物质相结构提供了绝佳机遇

- **能量窗口：**填补2.5-4GeV能区核物质相结构数据空白
- **时间窗口：**美国RHIC、德国FAIR、俄罗斯NICA

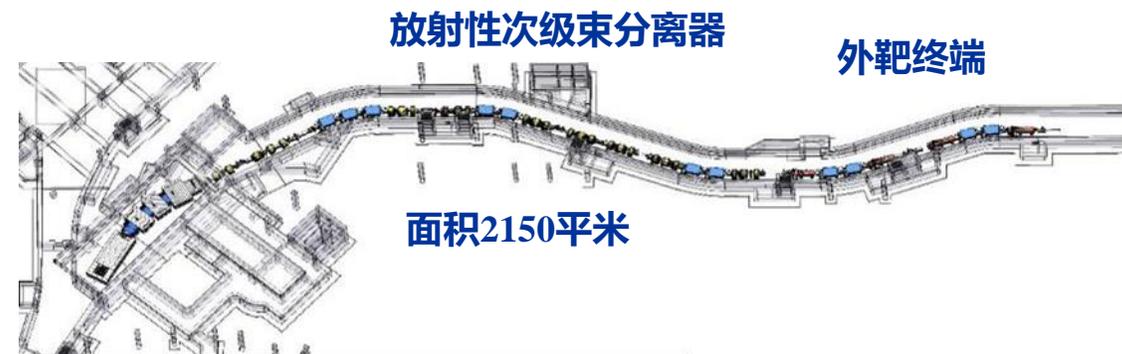


终端3 - 放射性束流线 HFRS+外靶终端



高磁刚度、大接受度、高分辨本领、多运行模式

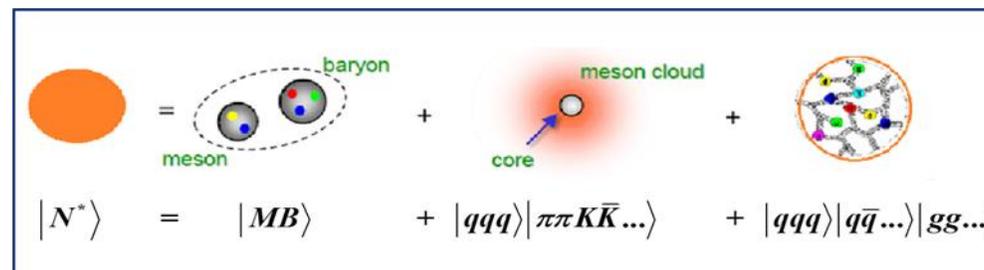
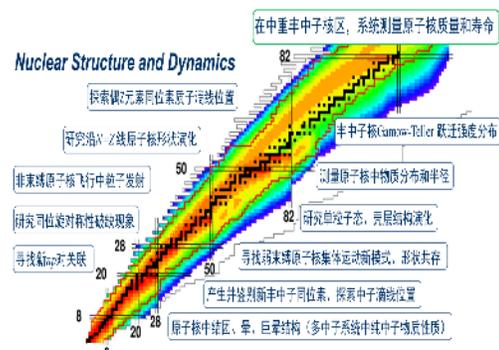
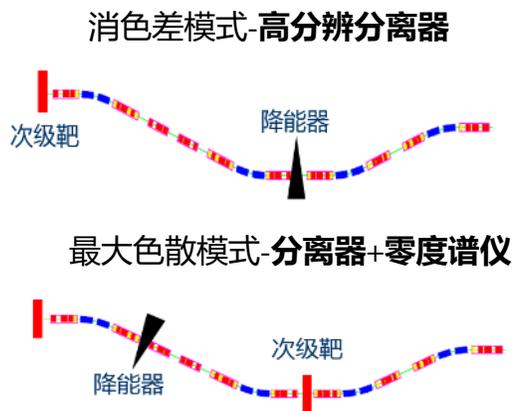
磁刚度	25Tm
角度接受度	$\pm 30\text{mrad(H)} \pm 25\text{mrad(V)}$
动量接受度	$\pm 2.0\%$
分辨本领 ($x = \pm 1\text{mm}$)	预分离器: 850 主分离器: 700/1100



特色1: 分离器与零度磁谱仪两种工作模式

特色2: 磁刚度最高的放射性束线 - 25 Tm

独特实验: 奇特核中核子激发态 (Δ , N^*) 性质研究

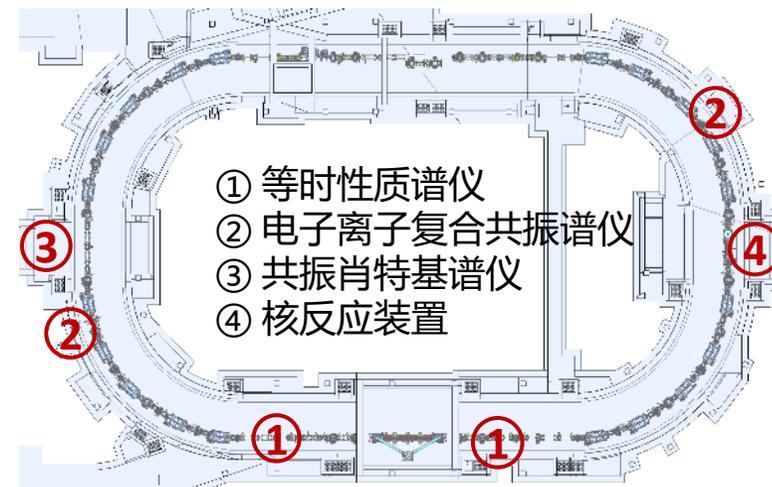


研究核子共振态的结构和性质, 理解强相互作用的核介质效应等

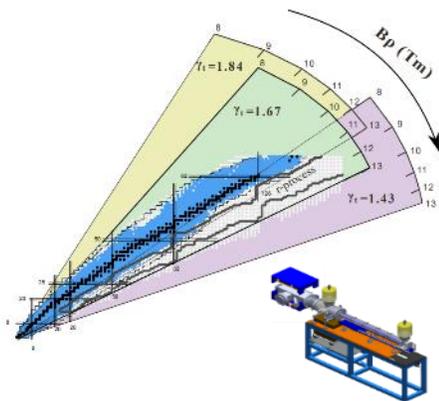
发现奇特核结构现象, 认知核力; 理解天体环境中的核过程

终端4- 高精度环形谱仪

- 国际上脉冲流强最高的初级束流强
- 多模式运行：等时性模式、内靶模式、正常模式、堆积模式
- 国际精度最高的环形核质量谱仪和首创基于双TOF的质谱术

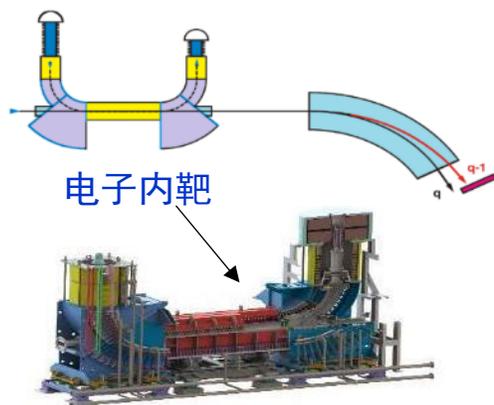


• 等时性质谱仪



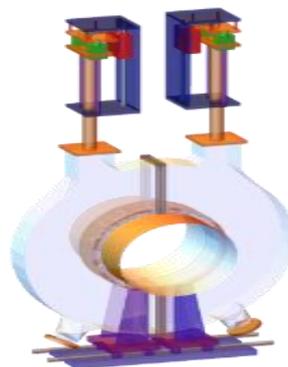
双TOF探测器，首创 $B\rho$ -defined等时性质谱术

• 电子离子复合共振谱仪



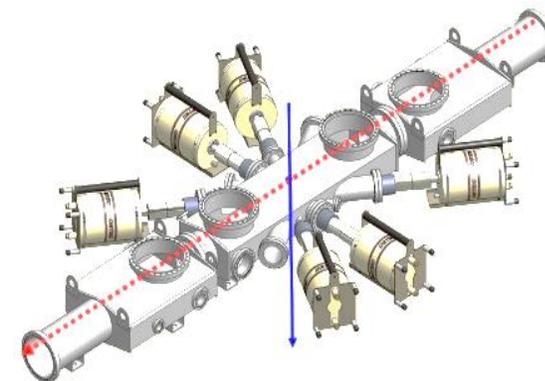
研究强场QED效应、
测量核电荷分布半径

• 共振肖特基谱仪



精确测量原子核质量和寿命
(半衰期大于10ms)

• 核反应装置

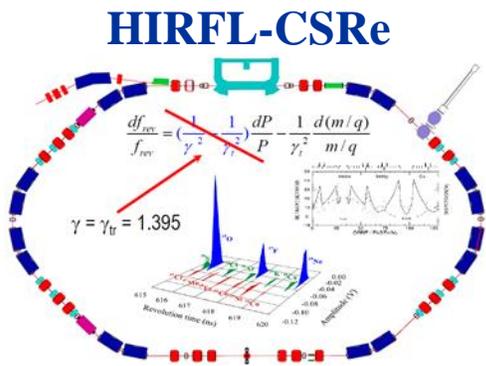


测量反应截面，揭示奇特核结构、
理解天体环境核过程

等时性模式核质量谱仪

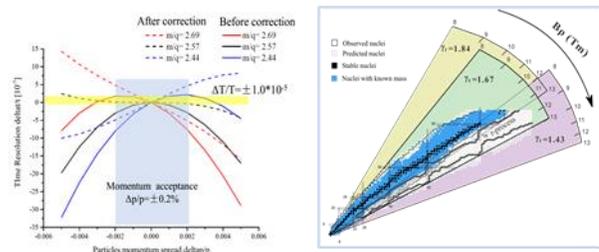
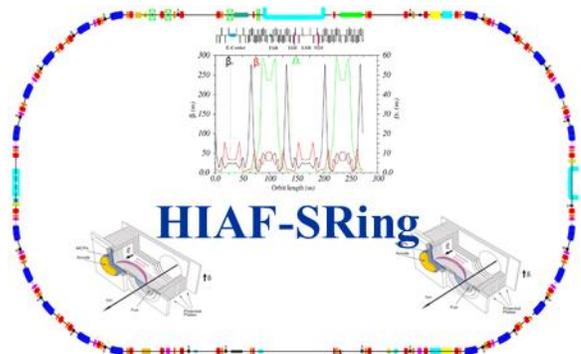
国际精度最高的环形核质量谱仪

世界上首次采用双TOF方案



首次测量质量: 32个, 提高质量精度: 50个

$\Delta M/M \sim 10^{-7}$

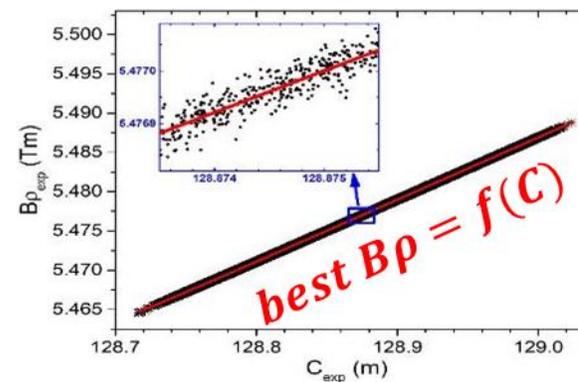
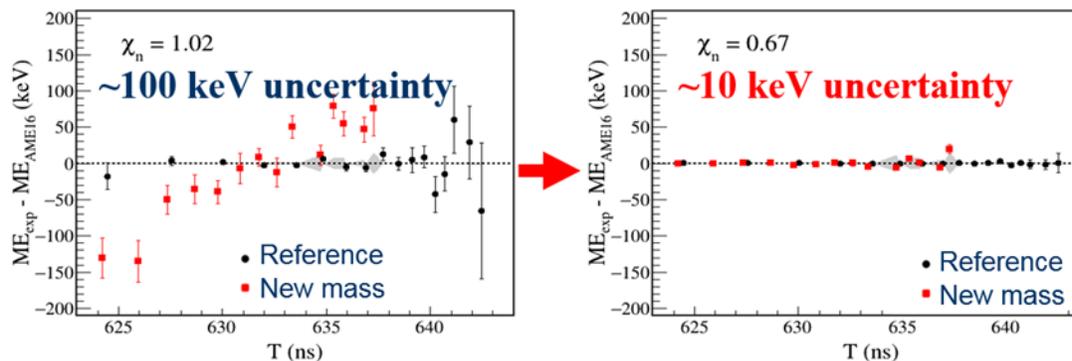


$\Delta M/M \sim 10^{-7} - 10^{-8}$

首创 $B\rho$ - defined 等时性质谱术

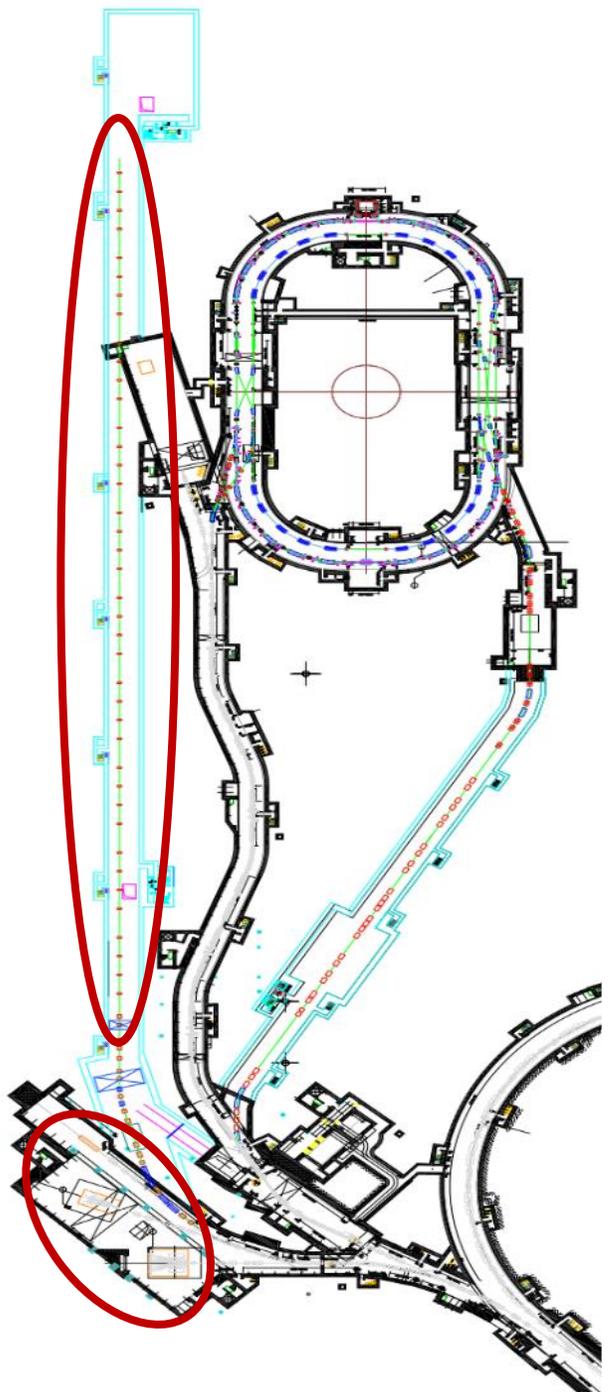
传统的IMS

$B\rho$ -defined IMS



最先进的储存环质谱术: 高精度; 消除系统误差; 宽频谱测量; 单离子灵敏; 零本底; 可用于短寿命

HIAF未来升级计划 (HIAF-U)



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	2025	$^{238}\text{U}^{28+}$	2.7 GeV/u	5×10^{11} ppp
美国MSU	FRIB	2021	$^{238}\text{U}^{76-80+}$	200 MeV/u	CW 13 μA
俄罗斯JINR	NICA-Booster	2023	$^{197}\text{Au}^{32+}$	4.5 GeV/u	4×10^9 ppp
欧洲	EURISOL 驱动加速器	建议	H^- , H^+ , $^3\text{He}^{2+}$	1.0 GeV/q	4 MW
中国IMP	HIAF	2025	$^{238}\text{U}^{35+}$	0.8 GeV/u	$1.0-2.0 \times 10^{11}$ ppp
			$^{238}\text{U}^{76+}$	2.45 GeV/u	$0.5-1.0 \times 10^{11}$ ppp
			p	9.3 GeV/u	5×10^{13}
	HIAF-U BRing-S	2027-2032	$^{238}\text{U}^{35+}$	2.95 GeV/u	2.0×10^{12} ppp
			$^{238}\text{U}^{76+}$	7.3 GeV/u	1.0×10^{12} ppp
			$^{238}\text{U}^{92+}$	9.1 GeV/u	1.0×10^{12} ppp
			p	25.0 GeV/u	4.0×10^{14}
	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)

主要内容

一、工程概况

二、总体方案和核心关键技术

三、工程主要进展

四、实验终端与未来规划

五、总结与展望

总结与展望

- HIAF在**动力学和核心关键技术**方面实现了一系列**创新突破**，保证了装置的创新性，也为实现国际领先指标打下了坚实基础，建成后将是国际上重要的重离子科学研究平台
- 工程整体进展顺利，土建完工，公用配套进入收尾，工艺设备加工、测试基本完成，分区分段安装全面展开，**安装进度好于预期**；疫情、中美贸易战等超预期因素对工程整体进度有一定的影响，但项目组通过动态调整和工序优化，**能够保证如期完成建设任务**
- 接下来将进一步加快工程进度，重点加强**超导直线、放射性束流分离器HFRS**相关设备测试安装进度，确保按期完工

谢谢大家!

