

**“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)  
建设进展与终端束流性能**

**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**

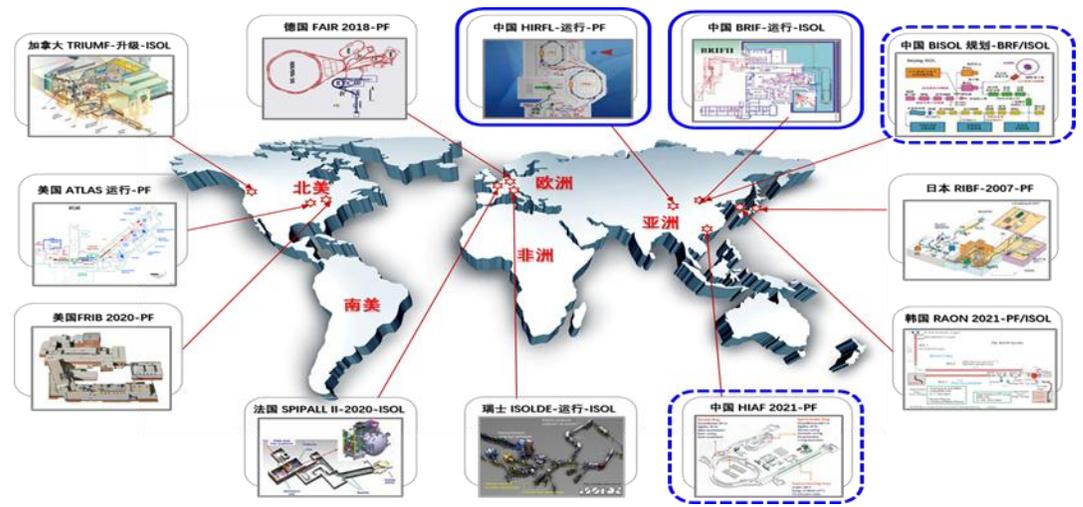
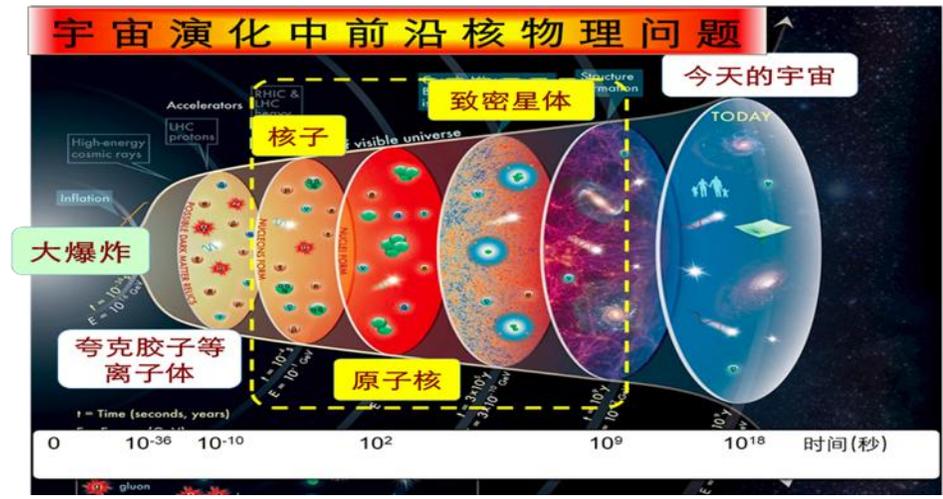
# 主要内容

- 一、工程概况
- 二、总体方案和工程主要进展
- 四、实验终端建设及束流性能
- 五、总结与展望

# 主要内容

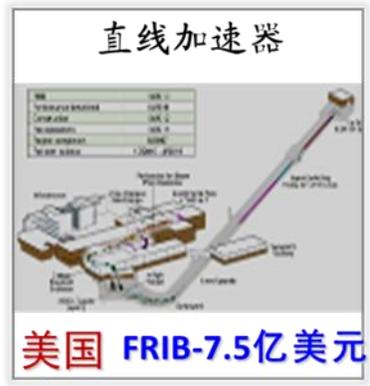
- 一、工程概况
- 二、总体方案和工程主要进展
- 四、实验终端建设及束流性能
- 五、总结与展望

# 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加速器设计历程

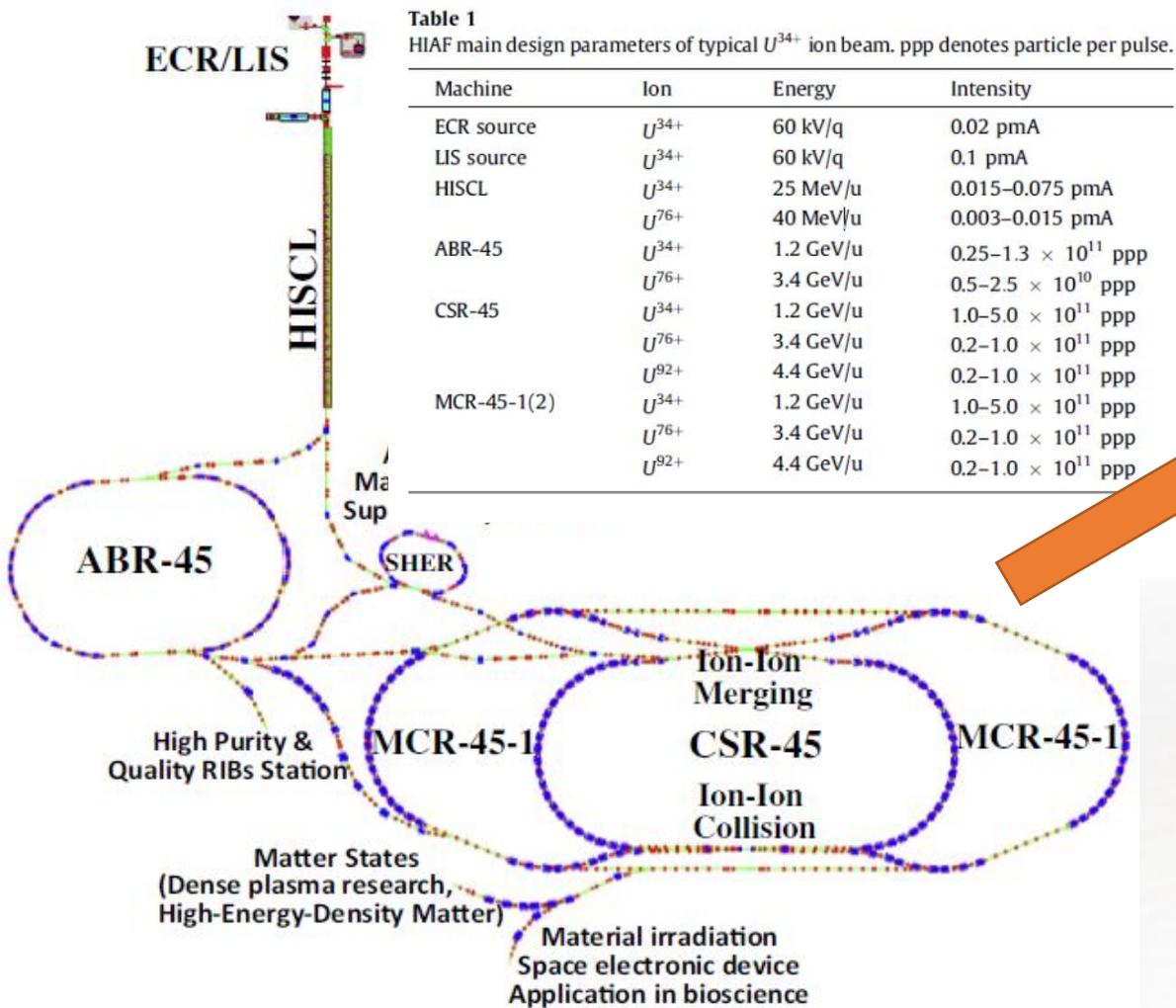
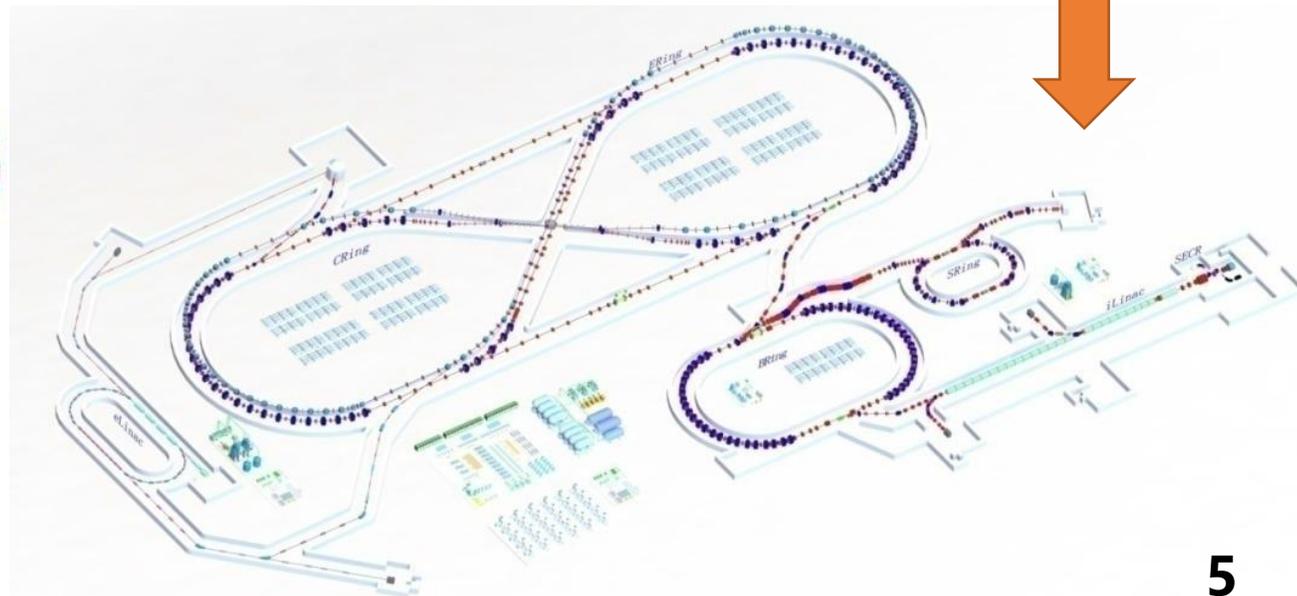
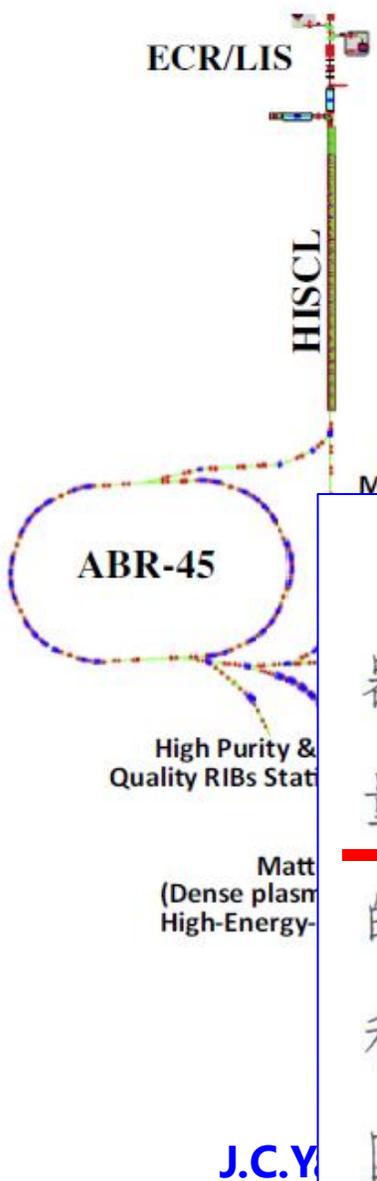


Fig. 1. Layout of the HIAF complex

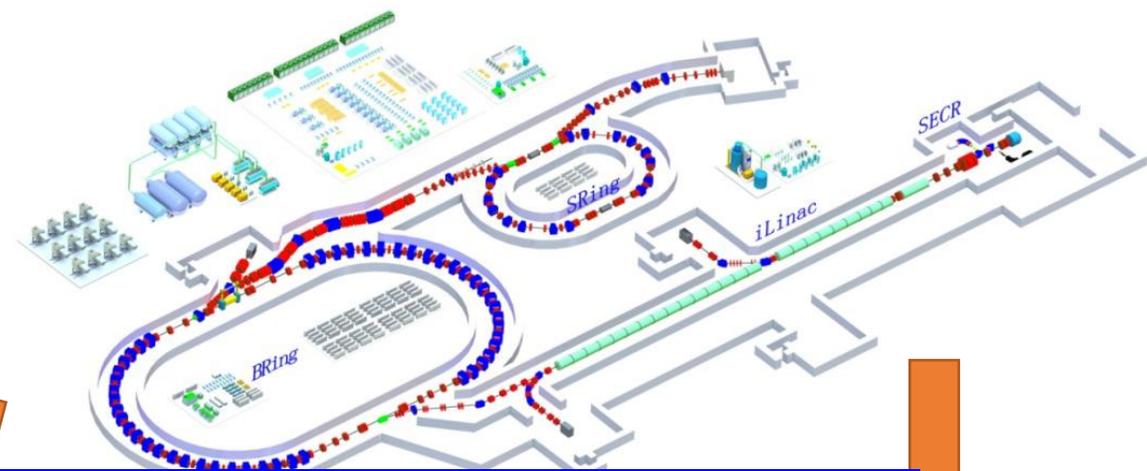


# HIAF加速器设计历程



**Table 1**  
HIAF main design parameters of typical  $U^{34+}$  ion beam. ppp denotes particle per pulse.

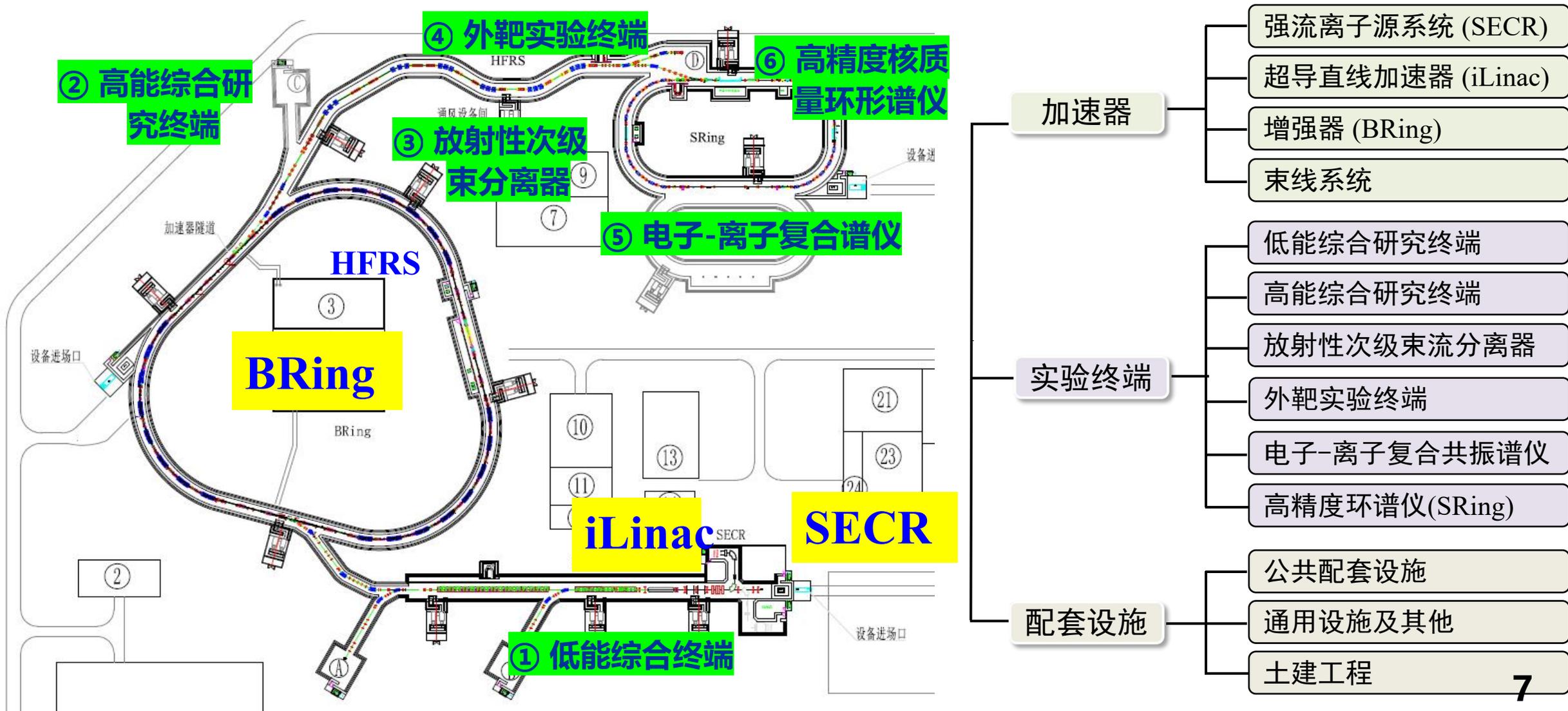
Machine	Ion	Energy	Intensity
ECR source	$U^{34+}$	60 kV/q	0.02 pA
LIS source	$U^{34+}$	60 kV/q	0.1 pA
HISCL	$U^{34+}$	25 MeV/u	0.015–0.075 pA
	$U^{76+}$	40 MeV/u	0.003–0.015 pA
ABR-45	$U^{34+}$	1.2 GeV/u	$0.25-1.3 \times 10^{11}$ ppp
	$U^{76+}$	3.4 GeV/u	$0.5-2.5 \times 10^{10}$ ppp
CSR-45	$U^{34+}$	1.2 GeV/u	$1.0-5.0 \times 10^{11}$ ppp
	$U^{76+}$	3.4 GeV/u	$0.2-1.0 \times 10^{11}$ ppp
	$U^{92+}$	4.4 GeV/u	$0.2-1.0 \times 10^{11}$ ppp
MCR-45-1(2)	$U^{34+}$	1.2 GeV/u	$1.0-5.0 \times 10^{11}$ ppp
	$U^{76+}$	3.4 GeV/u	$0.2-1.0 \times 10^{11}$ ppp
	$U^{92+}$	4.4 GeV/u	$0.2-1.0 \times 10^{11}$ ppp



三、项目的工程目标。建设一台国际领先水平重离子加速器综合研究装置,具备产生极端远离稳定线核素的能力,可提供能量范围为 5–250MeV/u 的强流连续重离子束和 35MeV/u–5.7GeV/u 的脉冲重离子束,为鉴别新核素扩展核素版图、研究弱束缚核结构和反应机制、特别是精确测量远离稳定线短寿命原子核质量提供国际领先的研究条件。

# HIAF加速器总体布局

## 强流超导直线iLinac、快循环同步环BRing与六大实验终端结合



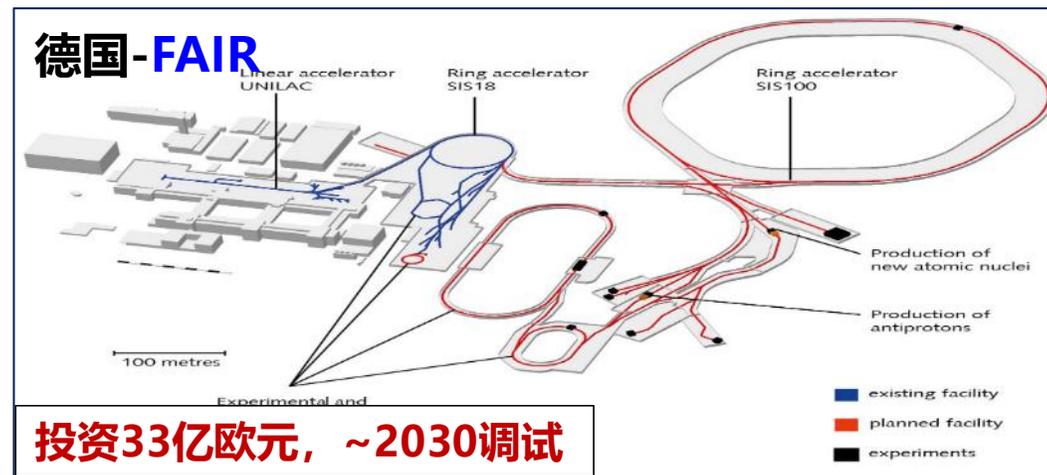
- 加速器
  - 强流离子源系统 (SECR)
  - 超导直线加速器 (iLinac)
  - 增强器 (BRing)
  - 束线系统
- 实验终端
  - 低能综合研究终端
  - 高能综合研究终端
  - 放射性次级束流分离器
  - 外靶实验终端
  - 电子-离子复合共振谱仪
  - 高精度环谱仪(SRing)
- 配套设施
  - 公共配套设施
  - 通用设施及其他
  - 土建工程

# HIAF科学目标与定位

## 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 <sup>32+</sup>	/	$5 \times 10^9$
CERN	LEIR	/	Pb <sup>54+</sup>	/	$9 \times 10^8$
JINR	NICA	/	Au <sup>32+</sup>	$4 \times 10^9$	/
GSI	SIS18	2.7Hz	U <sup>28+</sup>	$1.0 \times 10^{11}$	$3 \times 10^{10}$
FAIR	SIS100	2.7Hz	U <sup>28+</sup>	$(1.0-2.0) \times 10^{11}$	/
IMP	HIAF-BRing	3-5Hz	U <sup>45+</sup>	$2.0 \times 10^{11}$	/
IMP	HIAF-SRing	/	U <sup>45+</sup>	$1.0 \times 10^{12}$	/



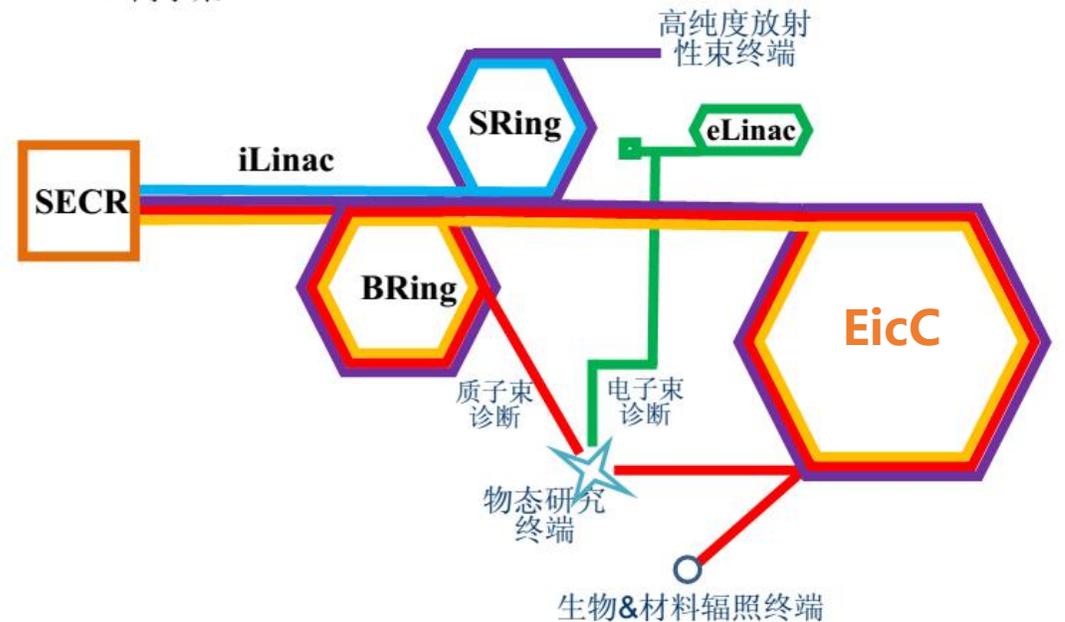
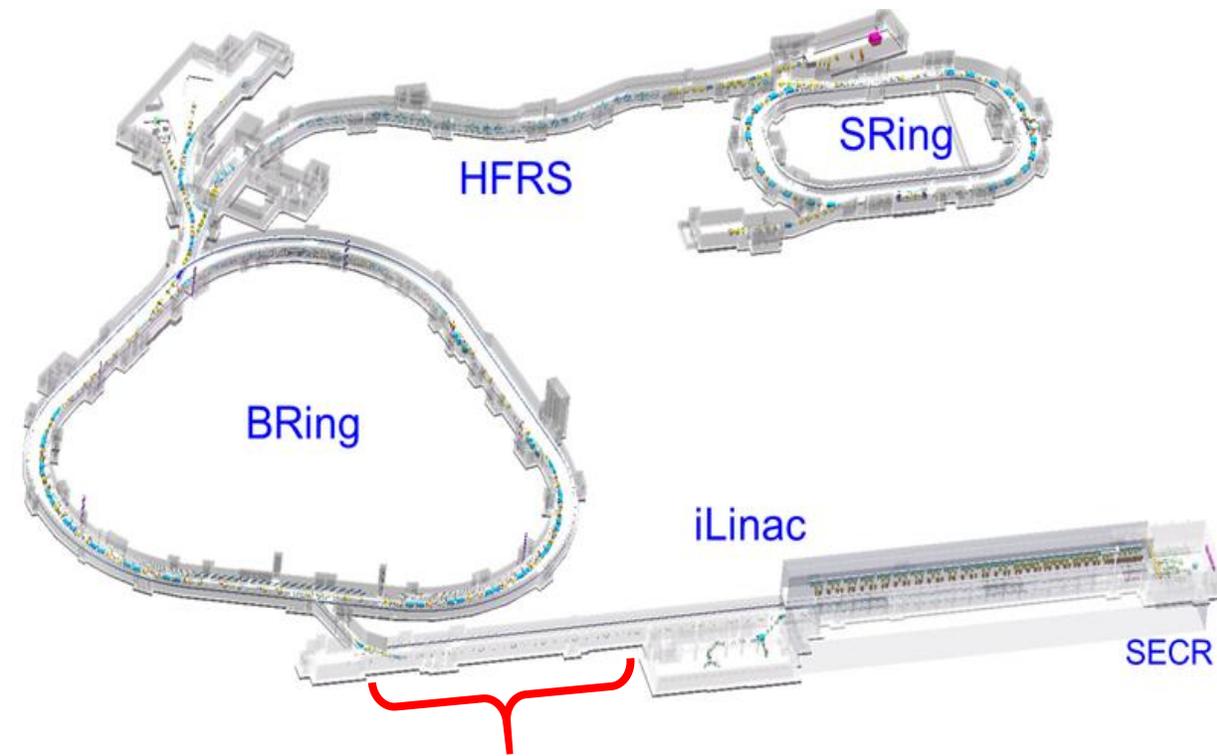
- 国际上**脉冲流强最高**的快循环重离子同步加速器、**精度最高**的核质量环形谱仪

# 主要内容

- 一、工程概况
- 二、总体方案和工程主要进展**
- 三、实验终端建设及束流性能
- 四、实验终端建设及束流性能
- 五、总结与展望

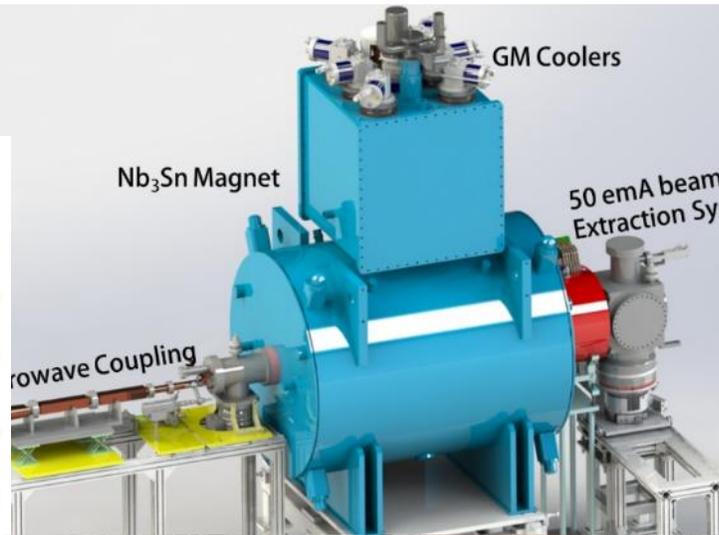
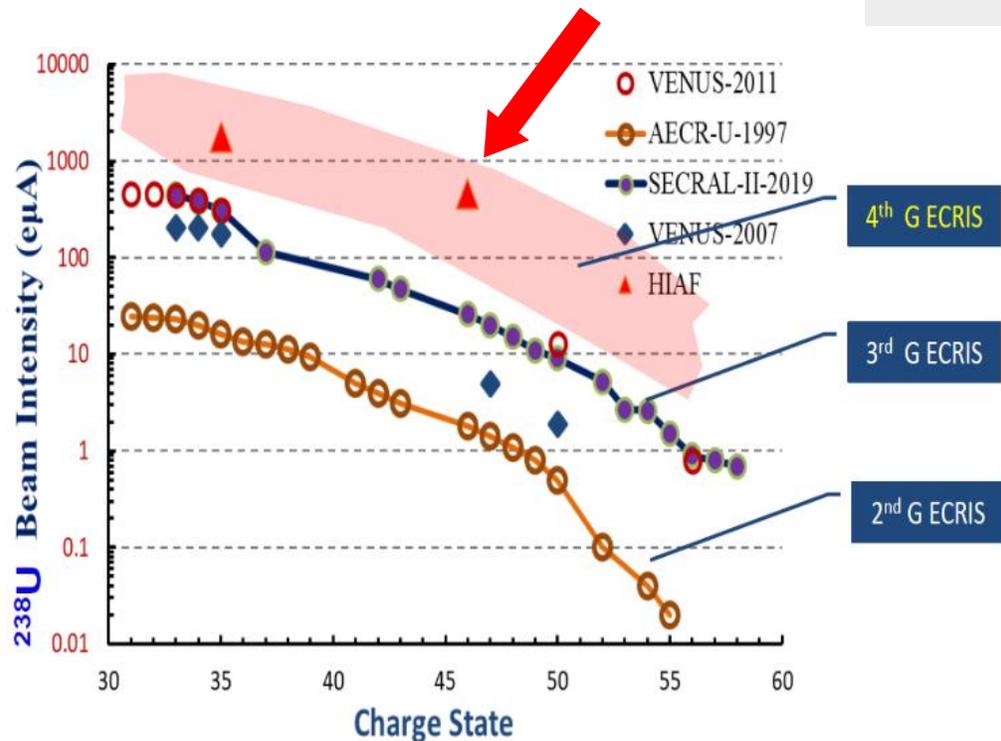
# 总体方案

- **第四代超导ECR离子源**——产生高电荷态强流离子束（产额、磁刚度需求、寿命）
- **超导直线加速器iLinac**——预加速器（空间电荷效应、磁刚度要求、造价……）
- **增强器Booster Ring** ——主加速器（动态真空、共振线、快循环……）



# 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，是实现HIAF束流设计指标的唯一选择**



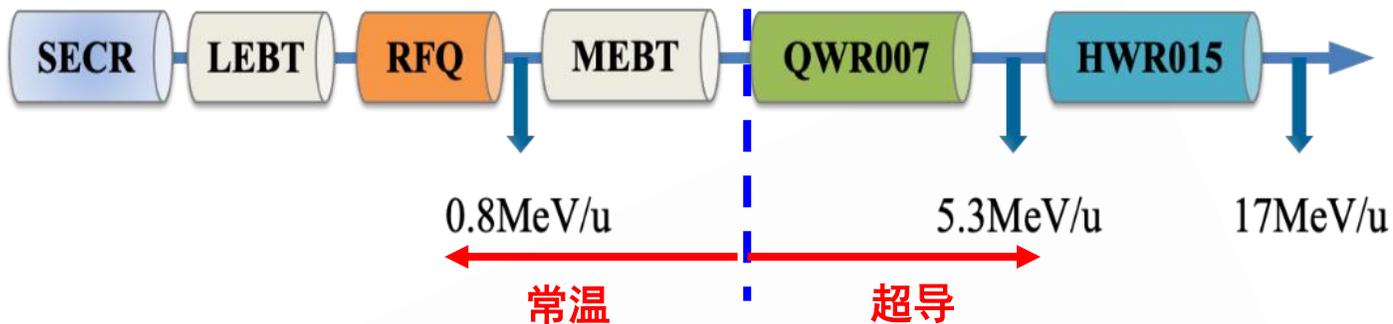
Specs.	Unit	Value
Frequency	GHz	45
RF Power	kW	20
Chamber ID	mm	≥Ø140
Mirror Fields	T	≥6.4/3.2
$B_{rad}$	T	≥3.2
Mirror Length	mm	~500
$B_{max}$ in conductor	T	~11.8
Magnet coils	/	Nb <sub>3</sub> Sn

- 完成Nb<sub>3</sub>Sn+ NbTi混合导体，冷体测试到目标磁场（当前国际最高场强ECR磁体）
- 验证45 GHz微波准光传输、并有效馈入了ECR离子源

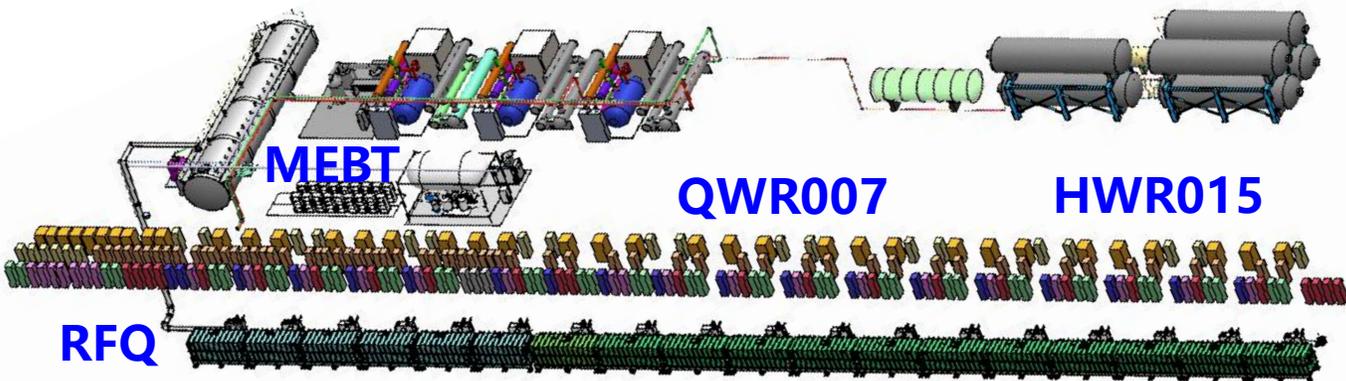
# 核心关键技术-2：强流超导重离子直线加速器

毫安级流强、双运行模式

- 脉冲：28 pμA U<sup>35+</sup>
- 连续：15 pμA U<sup>35+</sup>



100 eμA左右<sup>16</sup>O<sup>6+</sup>束流在RFQ中的传输效率达到98%以上，加速效率达到87%以上，引出束流能量为0.804 MeV/u，达到设计指标



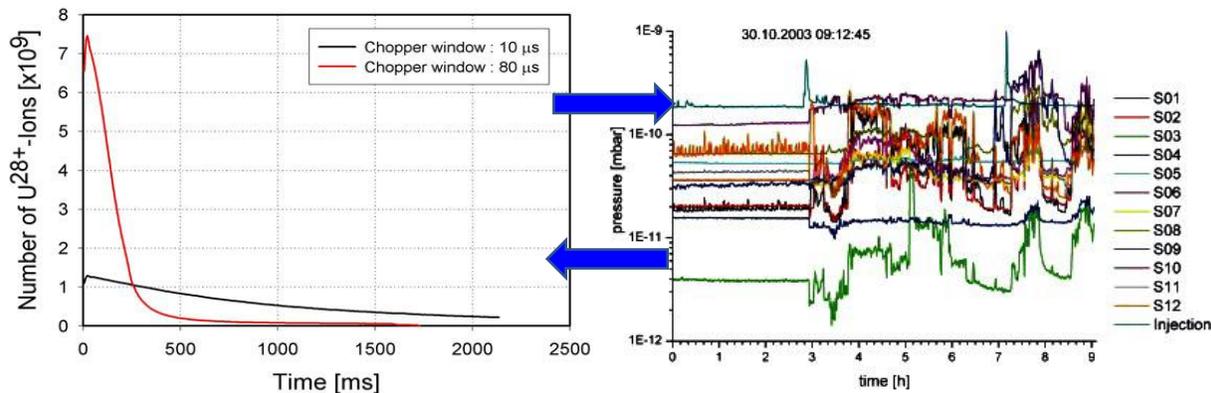
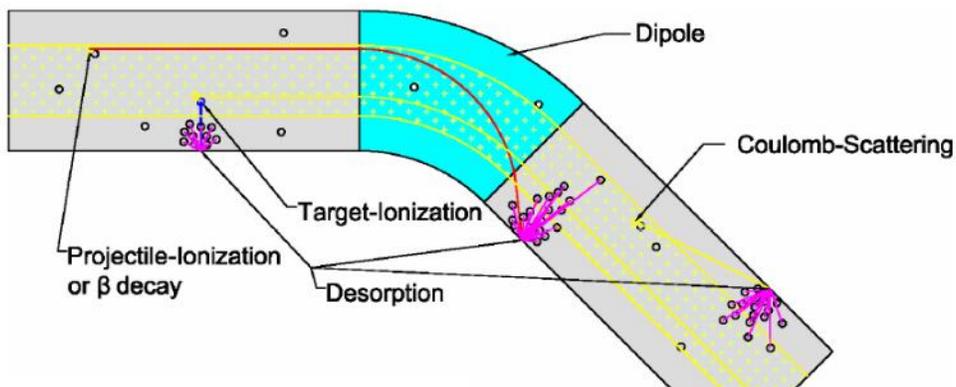
3HB入口到SC段出口传输效率：81.26%，大部分低能离子损失在中能段



# 核心关键技术-3：非谐振快循环同步加速器

## 挑战1：动态真空效应

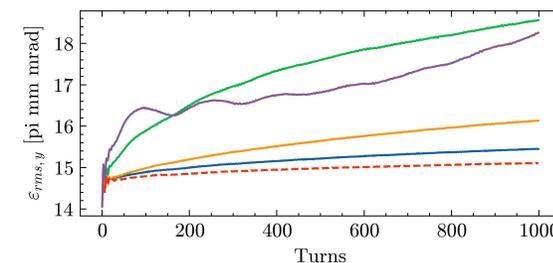
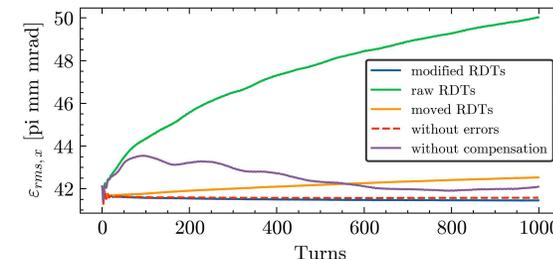
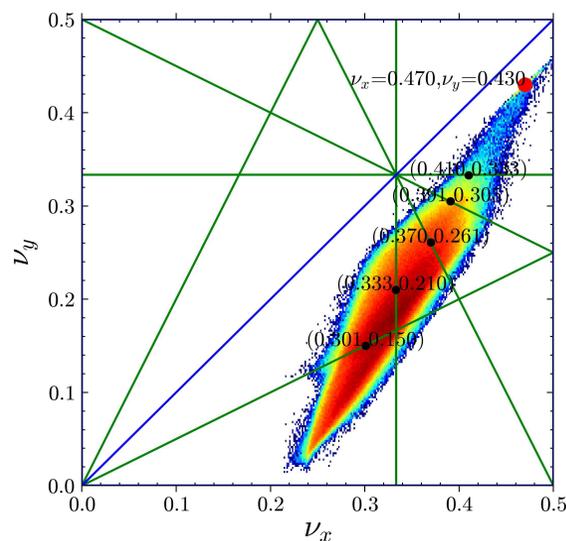
- 束流损失解吸引起剩余气体压力变化
- 气体压力变化导致更严重的束流损失



Peter Spiller, LHC Lumi 06, Valencia 10.2006

## 挑战2：空间电荷效应

- 束流自身的空间电荷场引起的聚焦散焦（非线性）
- 穿越共振线导致束流损失



C.Guo, arXiv:2408.01954

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

# 核心关键技术-3：非谐振快循环同步加速器

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**

**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

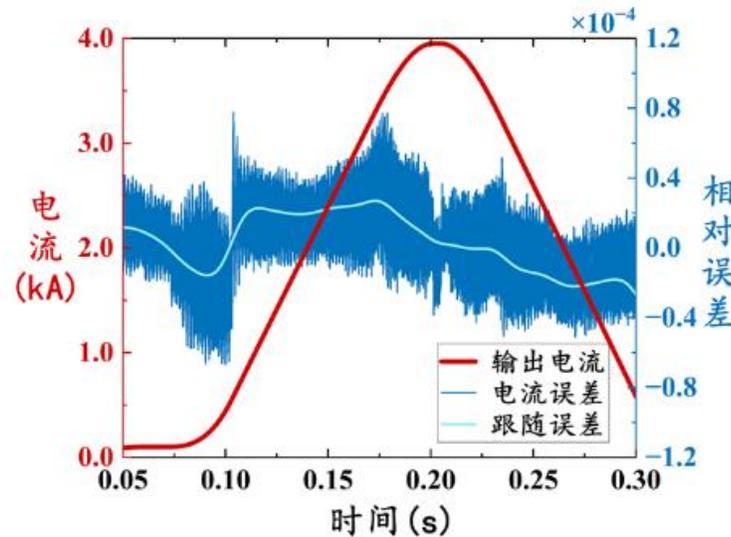
**创新2：**首创骨架内衬极高真空超薄壁真空室

**突破：**国际领先高梯度大孔径纳米晶磁合金环高频系统

# 核心关键技术-3：非谐振快循环同步加速器

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**

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



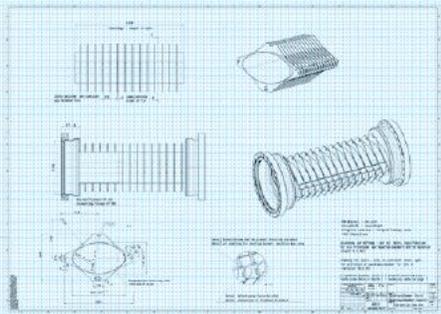
配电功率 (MVA)	常规	全储能
BRing二极铁电源	180	15
BRing四极铁电源	50	6
BRing总配电	250	41
HIAF总配电	297	88

- 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**）

# 核心关键技术-3：非谐振快循环同步加速器

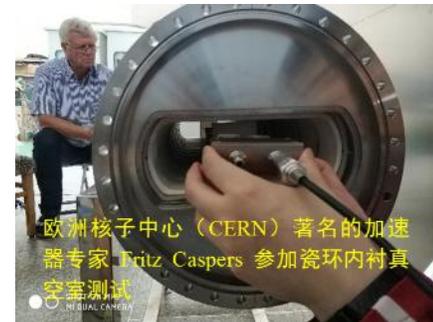
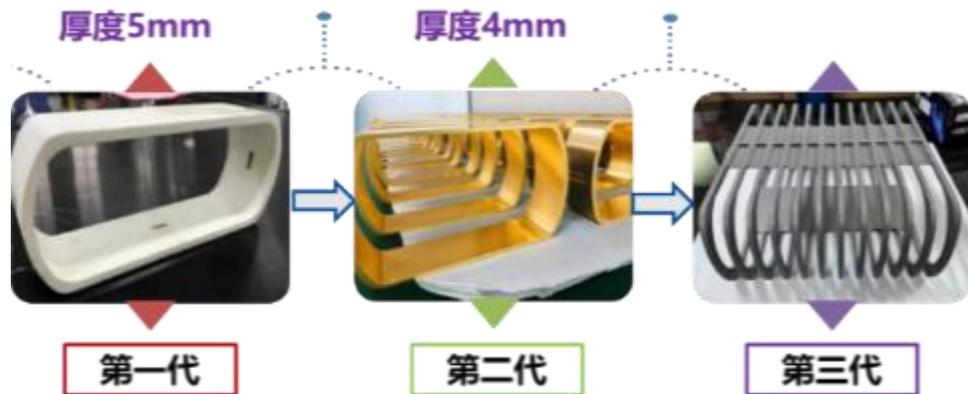
## 国际方案：薄壁加筋方案

- Replacement of all dipole- and quadrupole chambers by new, NEG coated chambers
- Improved bake-out system for operation up to 300K

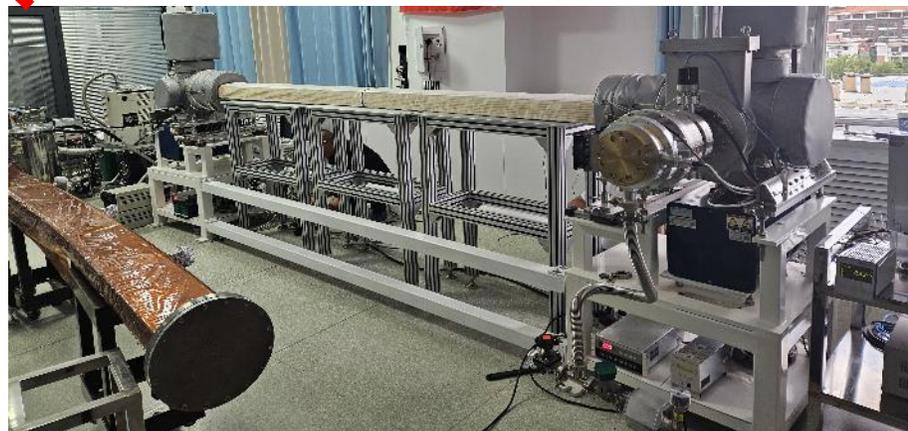


NEG coating facility commissioned. First sector equipped with new, coated chambers.

GSI



**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**



# 核心关键技术-3：非谐振快循环同步加速器

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 $\mu$ s

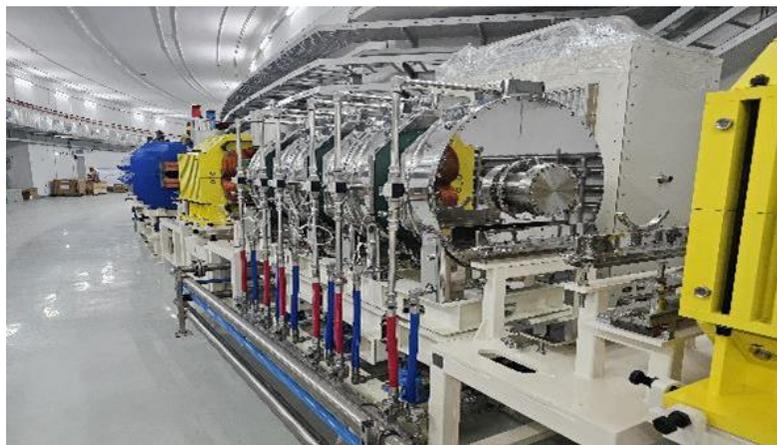
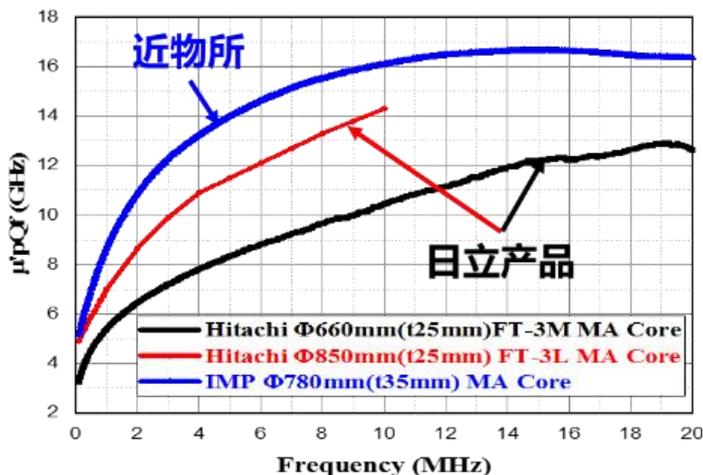
传统铁氧体高频腔无法满足要求

## 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



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

# HIAF安装进展

➤ **离子源系统：完成所有设备安装及测试，正在开展束流调试及参数优化。**



➤ **常温直线：RFQ加速器完成脉冲与连续波功率锻炼；MEBT全部设备完成安装及真空贯通，正在开展带束调试。**



# HIAF安装进展

➤ BRing完成磁铁、高频、真空、束诊等设备安装及测试，实现设备安装、综合布线与BIM建模1:1精准施工，**全环真空贯通及烘烤，真空度进入 $E^{-12}$ mbar量级，最高真空度达到 $5E^{-12}$ mbar。**



BRing 弧段



BRing 注入段



BRing 高频段



强电布线



弱电接线



磁合金高频腔



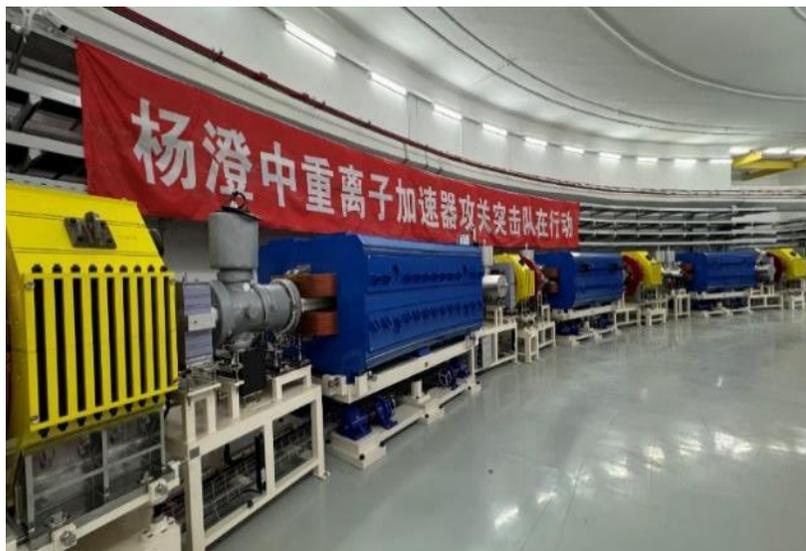
真空度

# HIAF安装进展

➤ SRing完成磁铁、真空、束诊等设备安装，逐段开展真空烘烤；1/6段真空烘烤完成，最高真空度达到 $5.2E^{-12}$ mbar。



SRing直段



SRing82弧段



SRing83弧段



电子冷却



末端布线



真空度 20

# HIAF安装进展

- 12台变前励全储能二极磁铁电源全部完成安装调试，可靠性和稳定性全面验证，同步性和指标优于设计验收指标；直流电源逐步进场安装，开展电源与磁铁联调测试。



- 高频系统：5套磁合金腔体均已在线安装测试完成，电压梯度超过35Kv/m，达到设计指标。正在开展功率源与负载联合调试。



# HIAF安装进展

- 10kW制冷机完成机械和电气检查，完成PID与施工符合性检查。开始循环工质净化处理。隧道内低温分配阀箱机械精准就位完成，正在内管焊接和检漏等收尾。预计2024年12月底见液。
- 2.5kW制冷机完成机械、电气检查；压缩机开始上电，制冷机开始降温。预计2024年11月底完成调试。

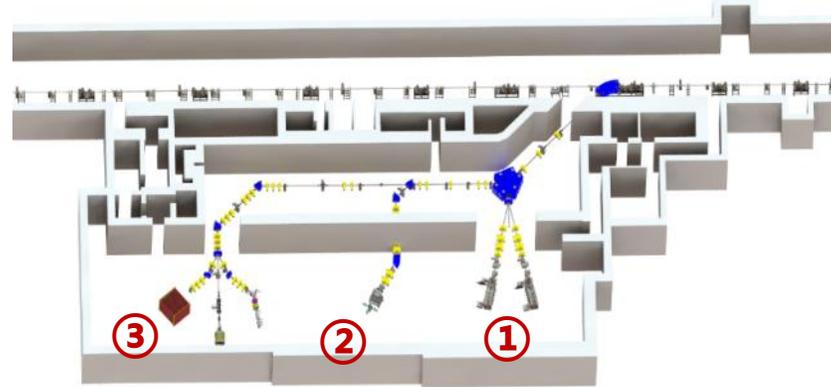


# 主要内容

- 一、工程概况
- 二、总体方案和工程主要进展
- 四、实验终端建设及束流性能**
- 五、总结与展望

# 实验终端-1：低能综合研究平台

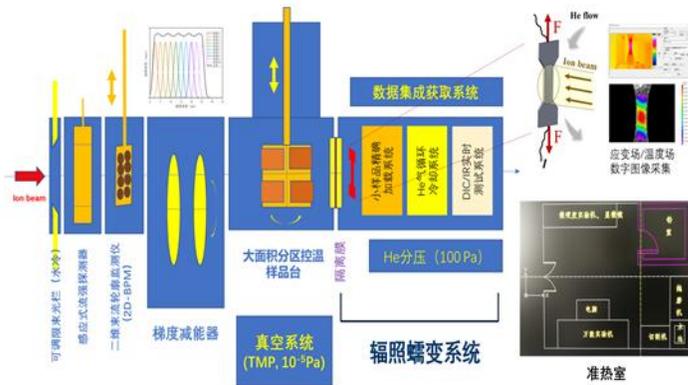
- **流强最高的低能CW重离子束流**  
(U:15pμA、Kr:20pμA、Ar:60pμA)
- **分时并行供束，90%束流时间可用于该终端，年机时大于5000小时**



面积1500平米

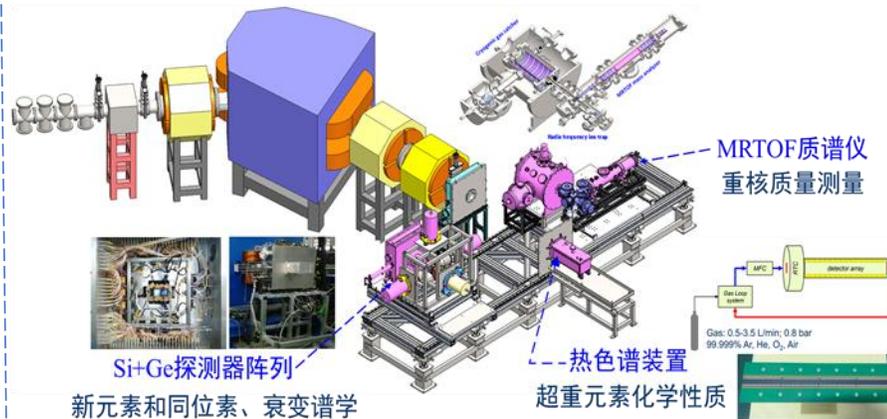
- ① 强流离子束辐照终端
- ② 低能核结构谱仪
- ③ 多核子转移反应终端

## 强流离子束辐照终端



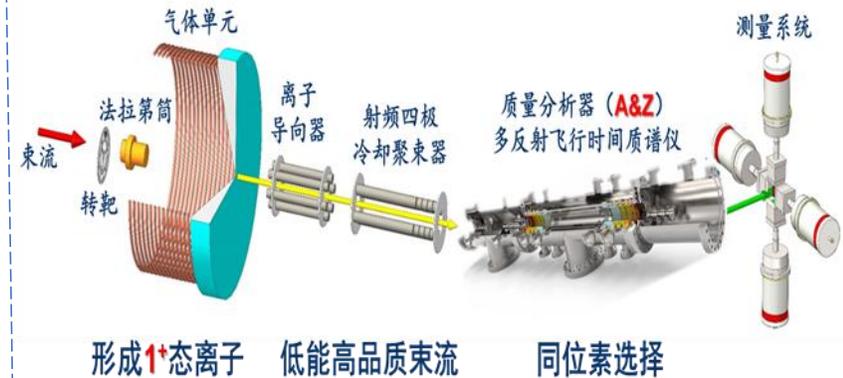
评价先进核能材料抗辐照性能

## 充气反冲谱仪终端



新元素和缺中子新核素合成、衰变谱学

## 多核子转移反应终端



形成 $\uparrow$ 态离子 低能高品质束流 同位素选择

探索超重核稳定岛、理解宇宙中重元素起源

# 实验终端-2：高能综合研究平台



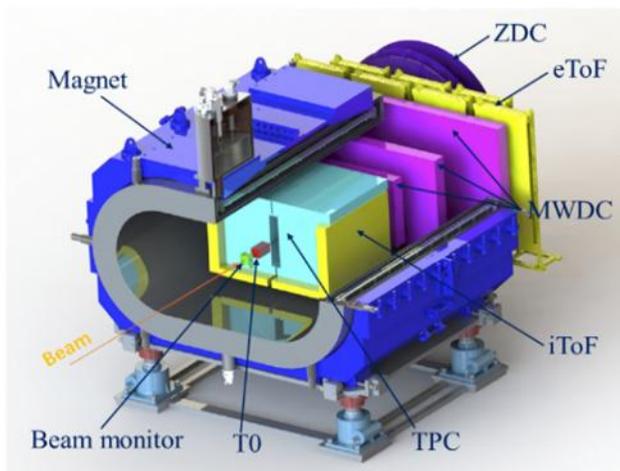
面积2500平米

- 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

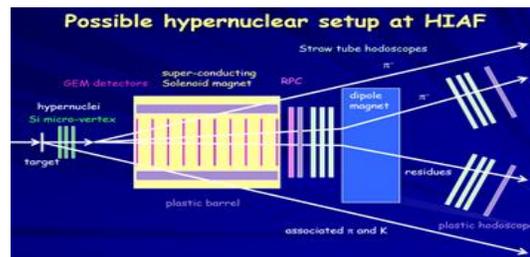
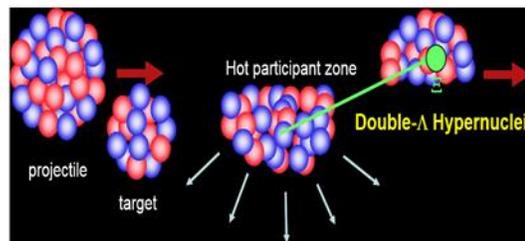
离子种类	能量 (GeV/u)	流强 (ppp)
<b>p</b>	<b>9.3</b>	<b><math>6.0 \times 10^{12}</math></b>
$^{12}\text{C}^{6+}$	4.2	$1.2 \times 10^{12}$
$^{78}\text{Kr}^{19+}$	1.7	$6.0 \times 10^{11}$
$^{209}\text{Bi}^{31+}$	0.85	$2.4 \times 10^{11}$
<b><math>^{238}\text{U}^{35+}</math></b>	<b>0.835</b>	<b><math>2.0 \times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

## 核物质相结构终端



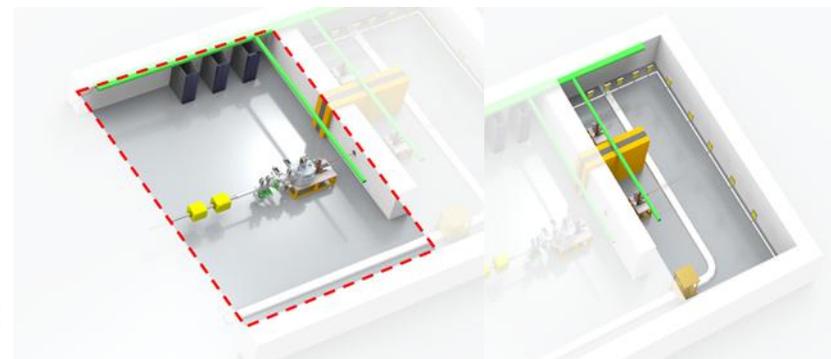
寻找QCD相变临界点

## 超核终端



研究超核性质、扩展超核存在版图

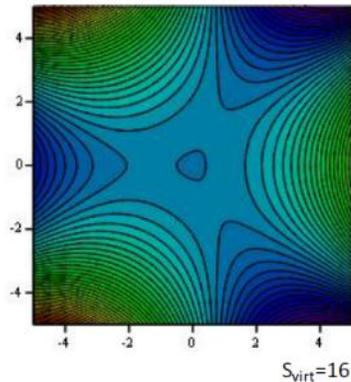
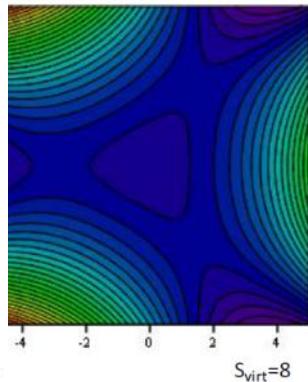
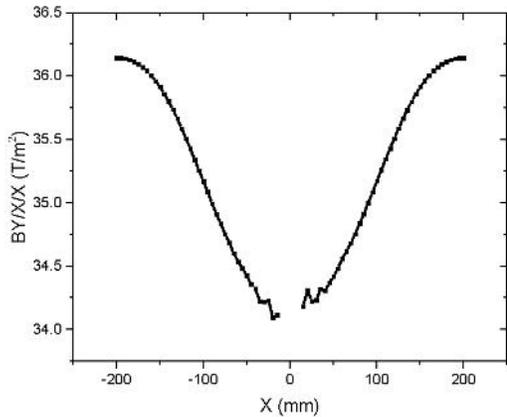
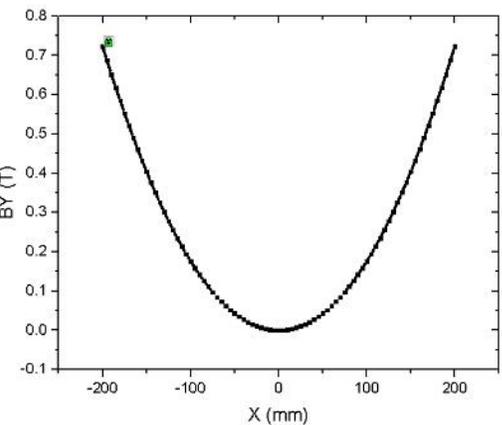
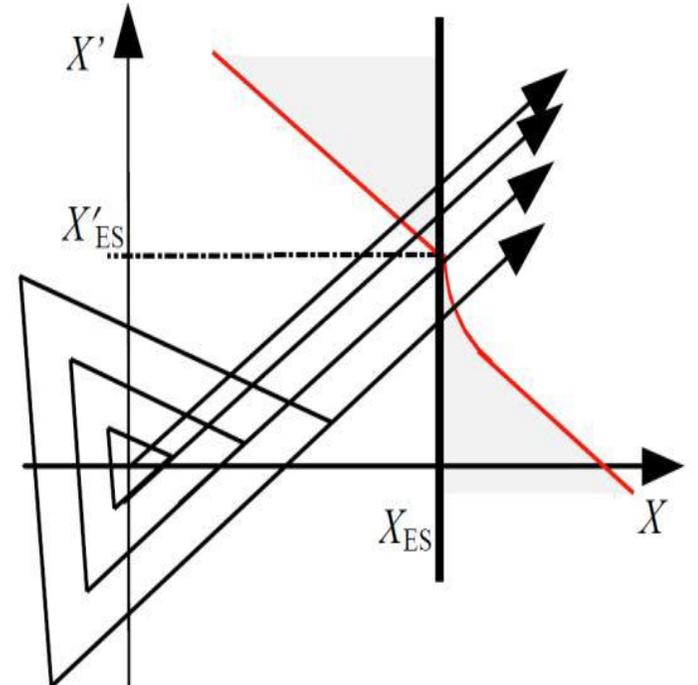
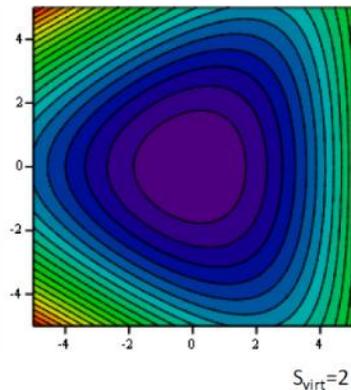
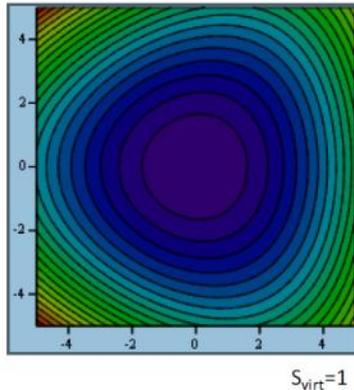
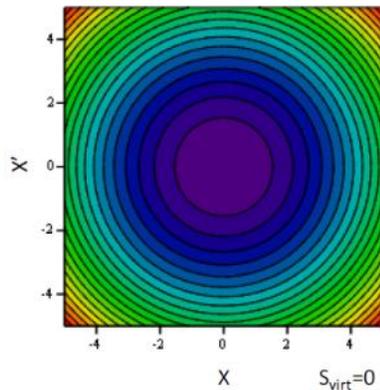
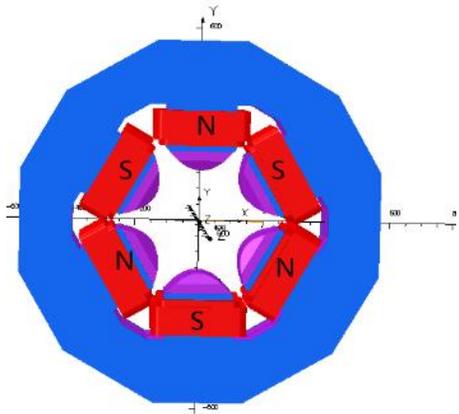
## 高能单粒子效应终端



模拟整机和小卫星空间运行环境的综合、复杂辐射场

## □ BRing慢引出系统:

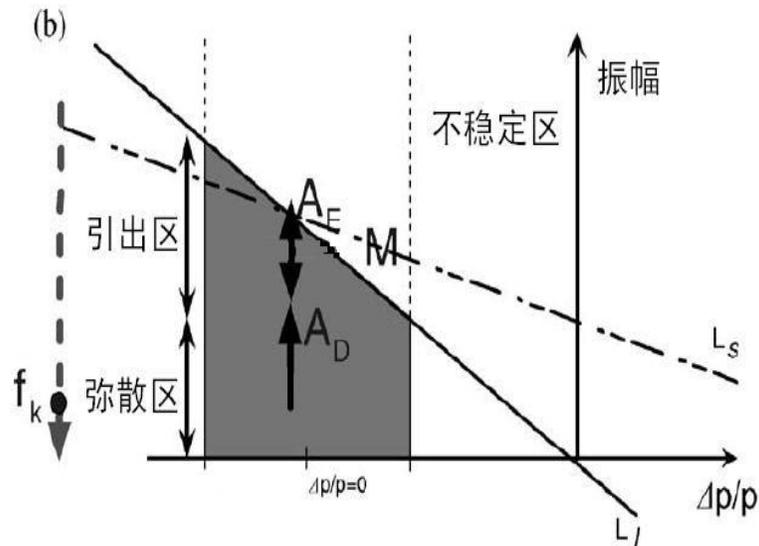
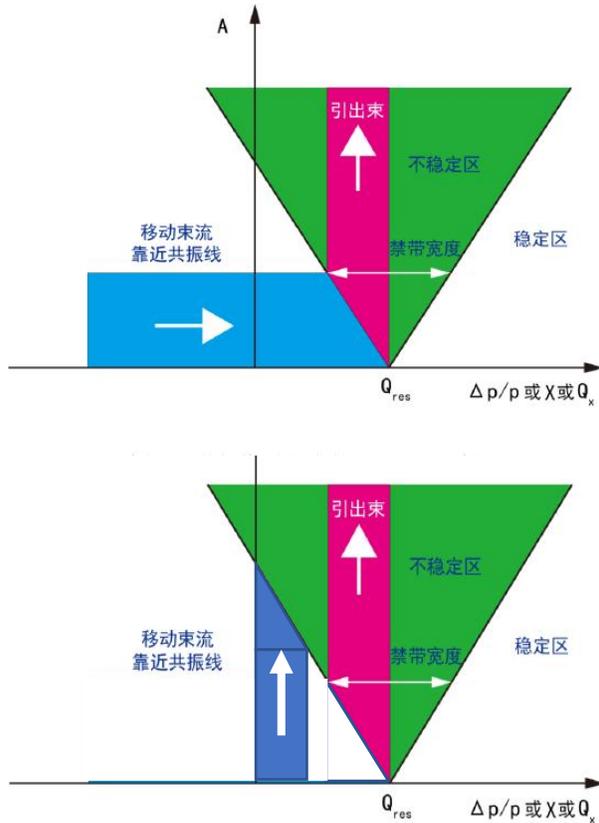
**六极铁的作用:** 相空间发生形变, 逐渐由圆变成三角形, 随着六极磁铁强度继续增大, 三角形的面积越发规则, 当增大到一定程度时, 束流便从三角形的三个顶点开始, 沿着延长线发射度迅速增大而引出



# 实验终端-2：高能综合研究平台

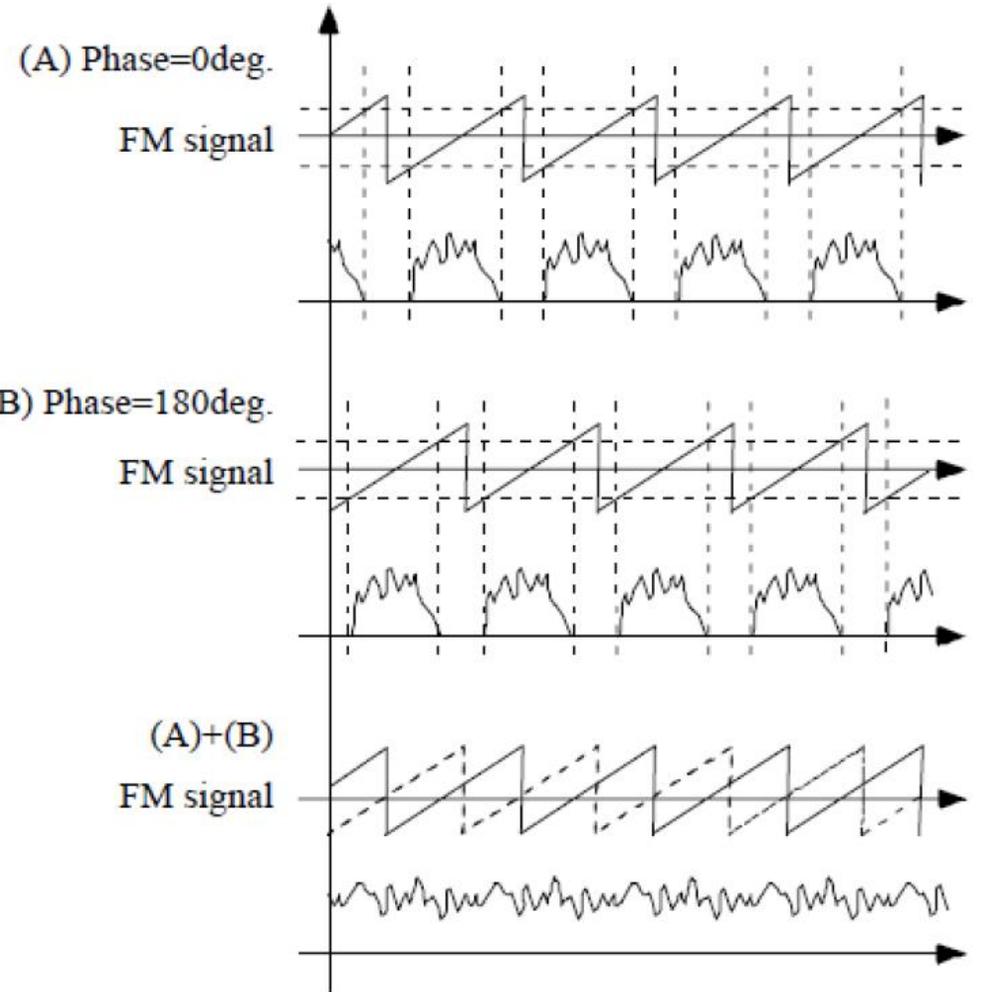
## □ B Ring 慢引出系统：

1. 调节六极铁强度：影响稳定区面积
2. 调节工作点：磁聚焦结构发生变化
3. RF-KO 横向激励，增大横向发射度



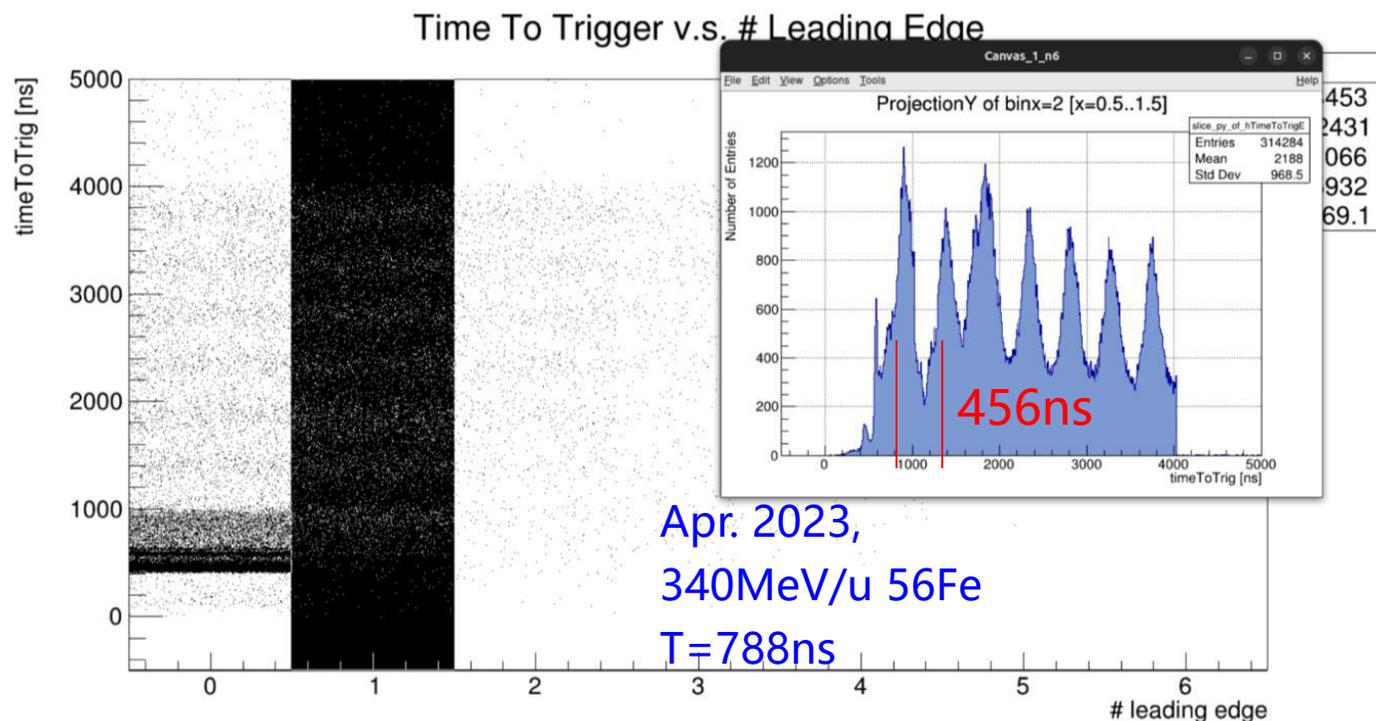
### RF-KO 的频率调制：

由于扫频不可能同时作用于引出区和弥散区，  
当频率匹配到弥散区时，将不会有束流引出或者引出束流较弱



## □ BRing慢引出系统:

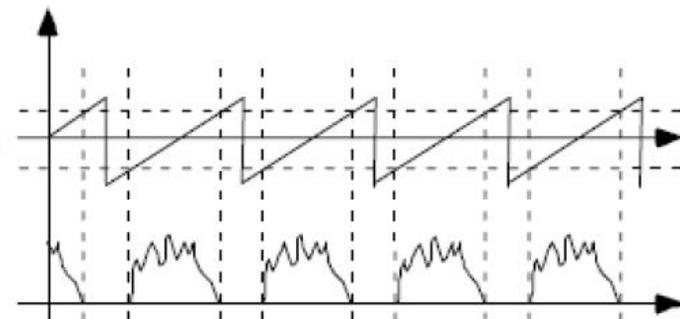
1. 调节六极铁强度: 影响稳定区面积
2. 调节工作点: 磁聚焦结构发生变化
3. **RF-KO横向激励, 增大横向发射度**



Y.H.Yu

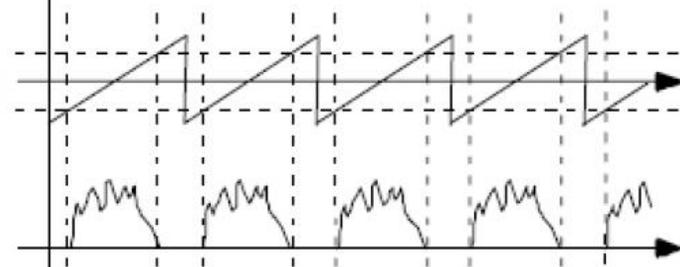
(A) Phase=0deg.

FM signal



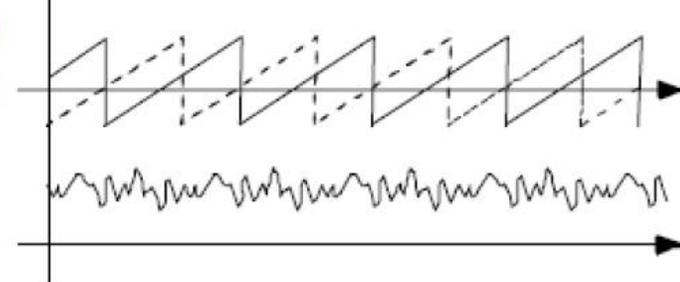
(B) Phase=180deg.

FM signal



(A)+(B)

FM signal

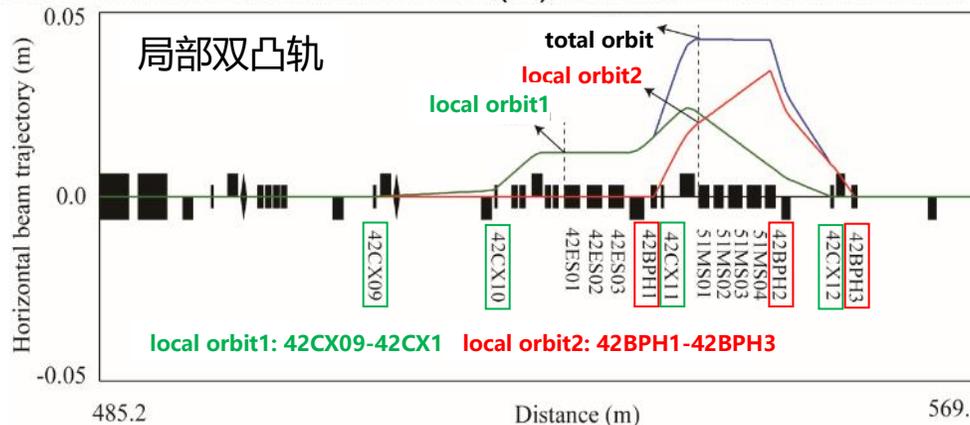
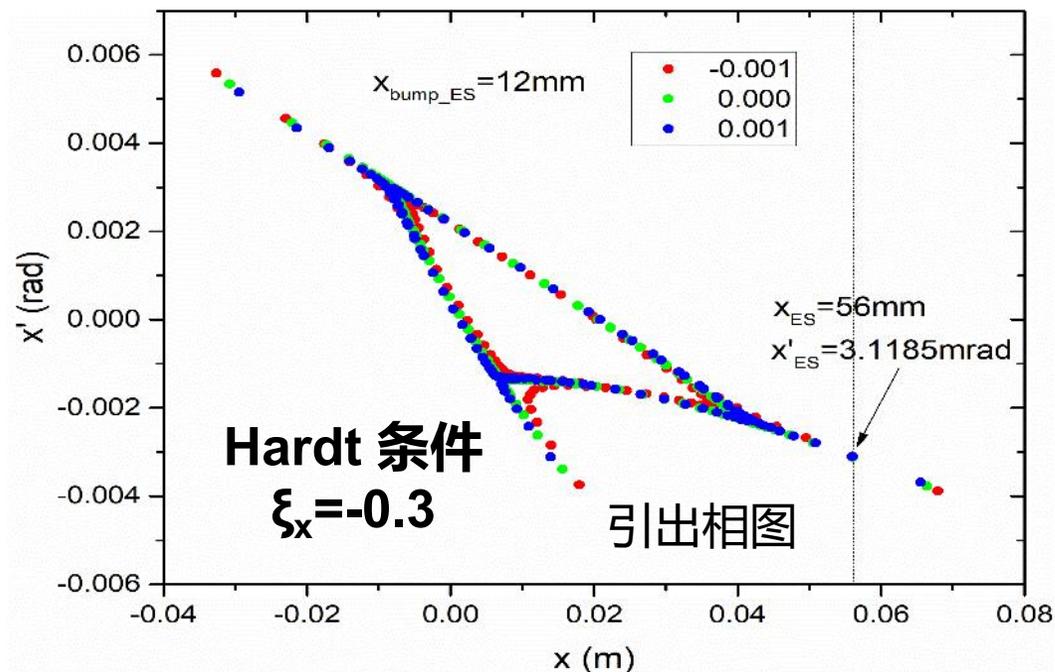
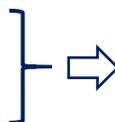


## BRing慢引出系统：

典型粒子	$^{238}\text{U}^{35+}$		p
引出能量-MeV/u	200	835	9300
引出粒子数-ppp	$3.0 \times 10^{10}$		$2.0 \times 10^{12}$
引出磁刚度-T·m	14.6	34	34
引出发射度 $\epsilon_x/\epsilon_y$ - $\pi\text{mm.mrad}$	24/12	56/28	6/3
束团长度-ns	800	650	334
束团 $\Delta p/p$ -‰	$\pm 1.9$	$\pm 1.0$	$\pm 0.5$
连续束 $\Delta p/p$ -‰	$\pm 0.9$	$\pm 0.5$	$\pm 0.3$

慢引出元件

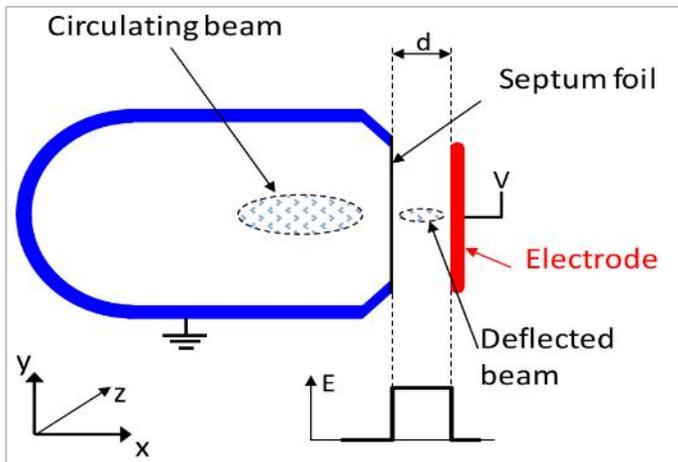
- 6块共振六极铁
- 3块引出静电偏转板42ES01~42ES03
- 4块引出切割铁51MS01~51MS04
- 4块校正铁在42ES01处产生凸轨
- 3块凸轨磁铁在51MS01处产生凸轨



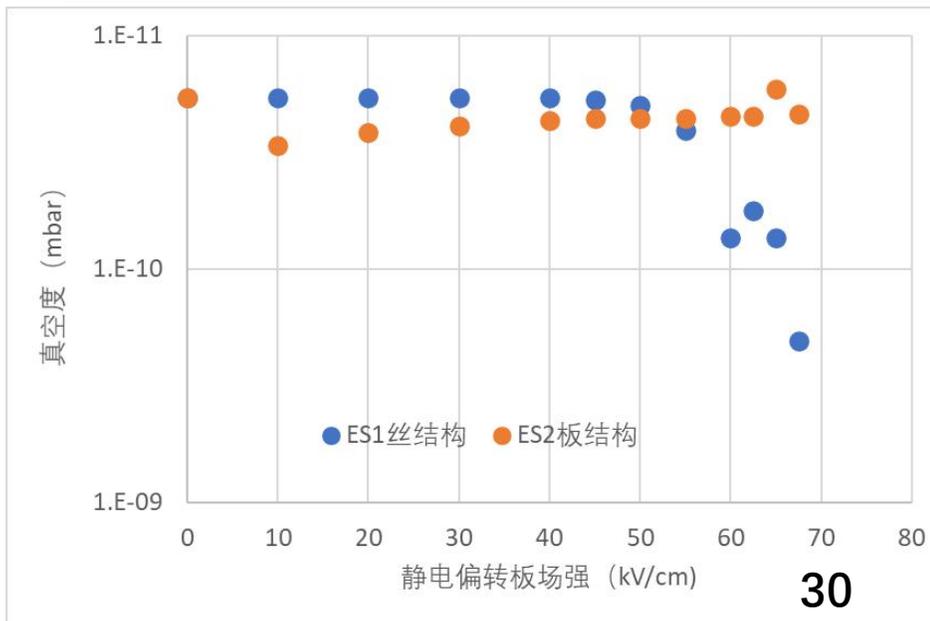
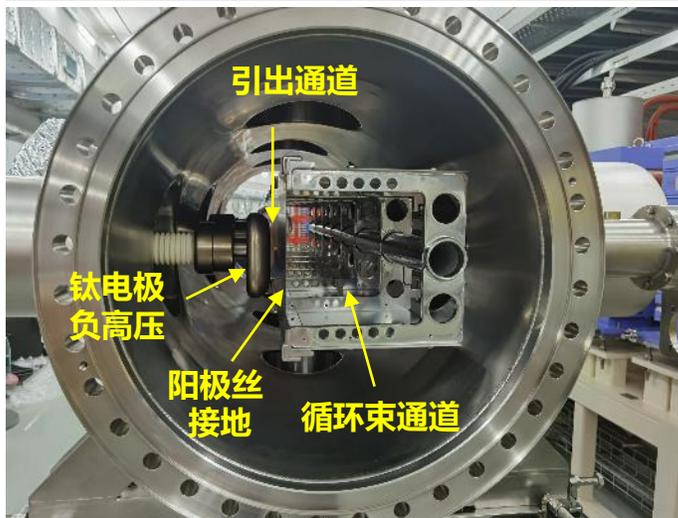
# 实验终端-2：高能综合研究平台



## □ BRing慢引出系统:



引出静电偏转板	
数量	3
编号	42ES01/02/03
有效长度-m	1.5/1.5/1.5
<b>最大场强-kV/cm</b>	<b>90/95/95</b>
有效孔径-mm <sup>2</sup>	15×60
阳极丝/板厚度-mm	≤0.1/≤1/≤1
最大电压-kV	135/143/143

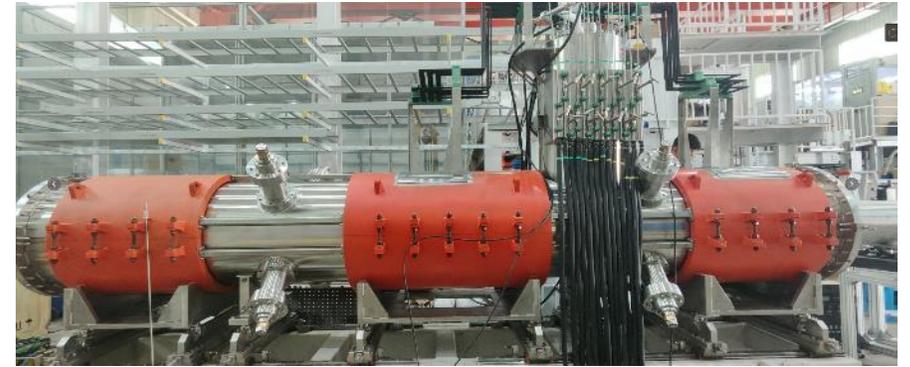
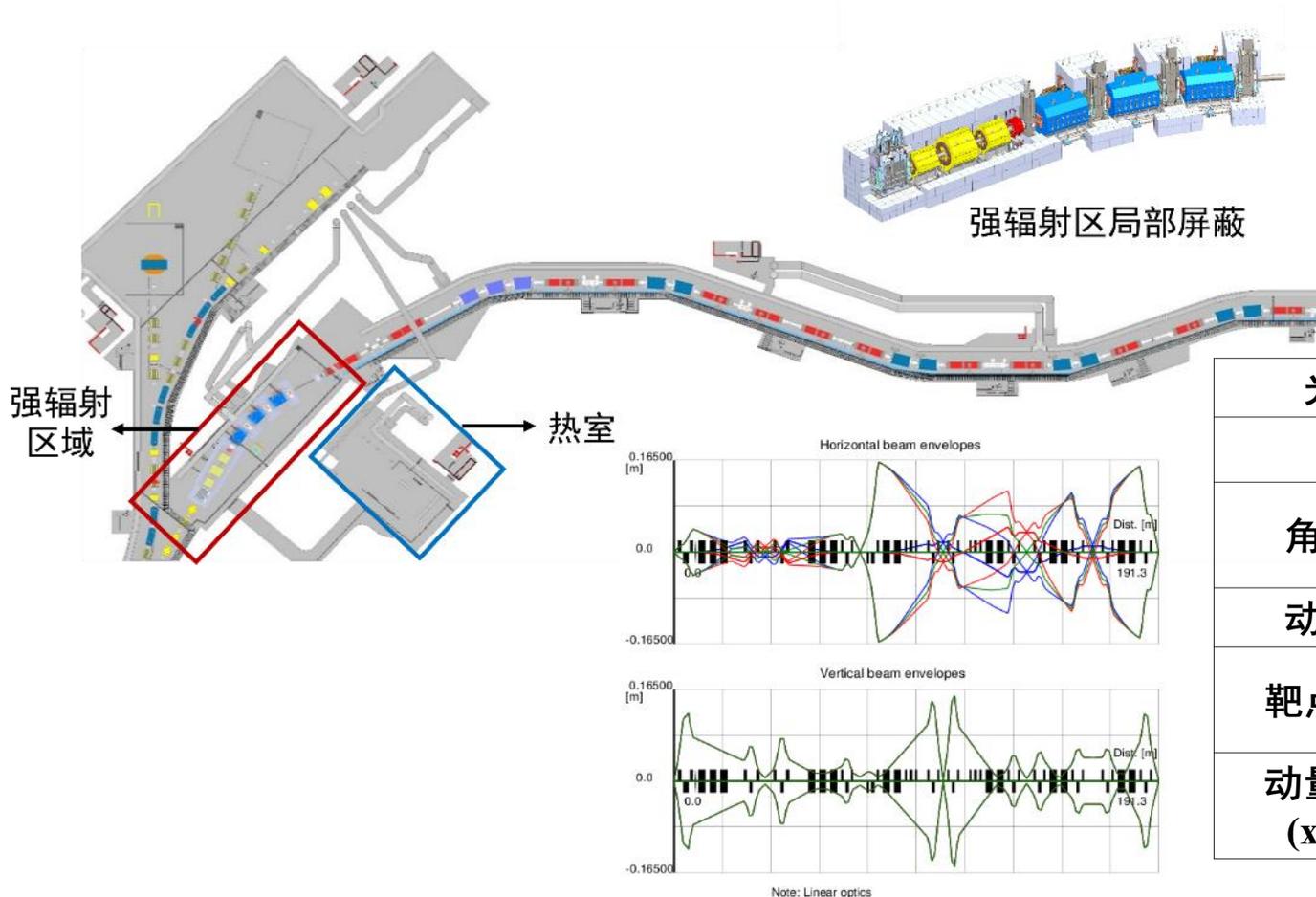


静电偏转板实物图

42ES01阳极丝: ≤0.1mm  
160kV@d=17.7mm,梯度场: 90.4kV/cm

# 实验终端-3：放射性束流线 HFERS

HFERS是磁刚度最高的高性能次级束流分离器，用于产生、分离、纯化、传输短寿命奇异原子核。HFERS由预分离器和主分离器组成，可开展次级束流的两级纯化，同时，还可作为独立的高性能磁谱仪开展实验研究。除传统的放射性束物理研究外，HFERS尤其可开展极丰中子奇异核研究，如超核和 $\Delta$ 共振等。



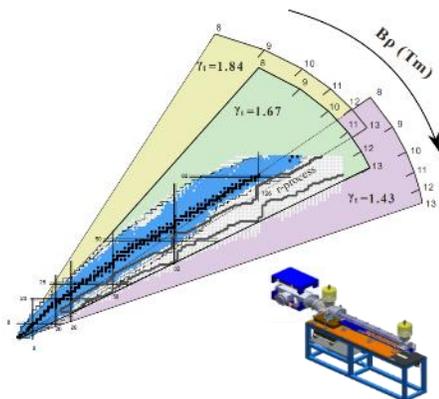
光学模式	消色散模式 / 色散模式	高分辨模式
磁刚度	<b>25 Tm</b>	
角度接受度	H: $\pm 30$ mrad V: $\pm 25$ mrad	H: $\pm 10$ mrad V: $\pm 25$ mrad
动量接受度	$\pm 2.0\%$	$\pm 0.3\%$
靶点束斑尺寸	慢引出: $\pm 1/\pm 1.5$ 快引出: $\pm 4/\pm 6$	慢引出: $\pm 1/\pm 1.5$
动量分辨本领 ( $x = \pm 1$ mm)	预分离器: 850 主分离器: 700 / 1100	预分离器: 1270 主分离器: 7500

# 实验终端-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

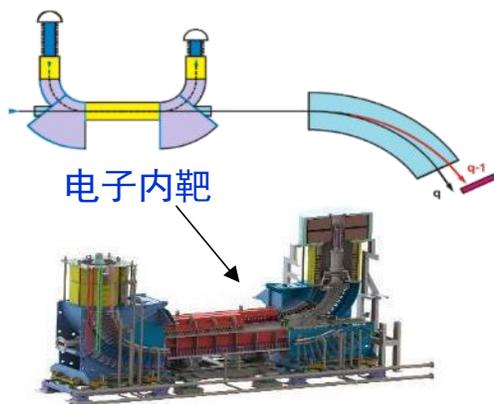


## 等时性质谱仪



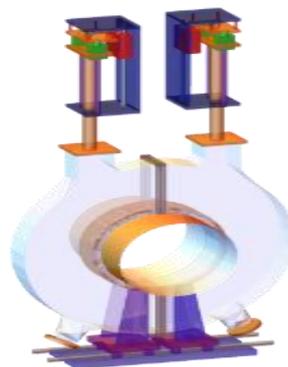
双TOF探测器，首创Bp-defined等时性质谱术

## 电子离子复合共振谱仪



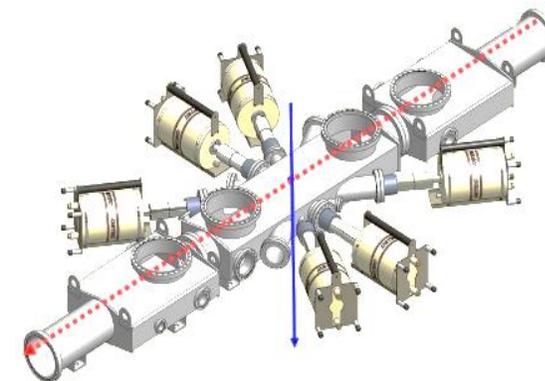
研究强场QED效应、测量核电荷分布半径

## 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

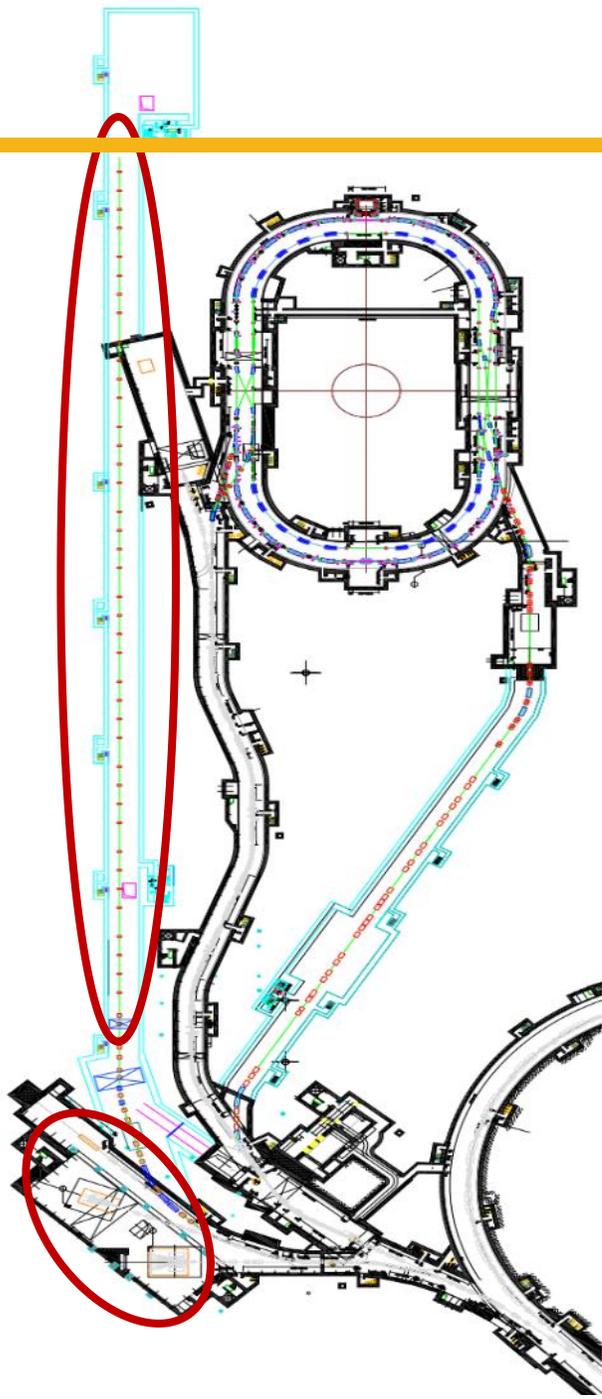


测量反应截面，揭示奇特核结构、理解天体环境核过程

# 主要内容

- 一、工程概况
- 二、总体方案和工程主要进展
- 四、实验终端建设及束流性能
- 五、总结与展望

# 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	$5 \times 10^{11}$ ppp
美国MSU	FRIB	2021	$^{238}\text{U}^{76-80+}$	200 MeV/u	CW 13 $\mu\text{A}$
俄罗斯JINR	NICA-Booster	2023	$^{197}\text{Au}^{32+}$	4.5 GeV/u	$4 \times 10^9$ ppp
欧洲	EURISOL 驱动加速器	建议	H, H <sup>+</sup> , $^3\text{He}^{2+}$	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
			<b>p</b>	<b>9.3 GeV/u</b>	<b><math>5 \times 10^{13}</math></b>
	HIAF-U BRing-S	2027- 2032	$^{238}\text{U}^{35+}$	<b>2.95 GeV/u</b>	<b><math>2.0 \times 10^{12}</math> ppp</b>
			$^{238}\text{U}^{76+}$	<b>7.3 GeV/u</b>	<b><math>1.0 \times 10^{12}</math> ppp</b>
			$^{238}\text{U}^{92+}$	<b>9.1 GeV/u</b>	<b><math>1.0 \times 10^{12}</math> ppp</b>
			<b>p</b>	<b>25.0 GeV/u</b>	<b><math>4.0 \times 10^{14}</math></b>
	HIAF-U MRing	2027- 2032	$^{238}\text{U}^{92+}$	4.4 GeV/u	$2 \times 10^{12}$ 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	<b>H, H<sup>+</sup></b>	<b>0.5-1.0 GeV/u</b>	<b>5-10 mA (2.5~10 MW)</b>

# HIAF安装计划



		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

- 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**，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!

