



中国科学院近代物理研究所

Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences

强流重离子加速器装置HIAF现状 与EicC未来升级计划

冒立军

代表HIAF项目组

中国科学院 近代物理研究所

青岛, 2026/07/27

报告提纲

- 一. HIAF建设与调试进展**
- 二. EicC总体方案与设计参数**
- 三. 对撞、极化与束流冷却**
- 四. 总结与展望**

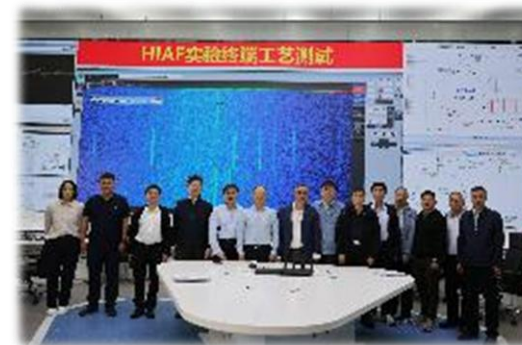
2026年7月21日，强流重离子加速器装置HIAF完成工艺验收，建成并投入试运行



强流重离子加速器装置建成 投入试运行

7月21日，位于广东省惠州市的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）通过了由中国科学院科技基础能力局主持的工艺验收，标志着该装置完成所有工程建设内容，进入试运行阶段，开始投入科学研究。

[查看详情](#)



■ **强流**重离子加速器装置 (High Intensity heavy-ion Accelerator Facility, HIAF)

《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012-2030)》优先安排项目

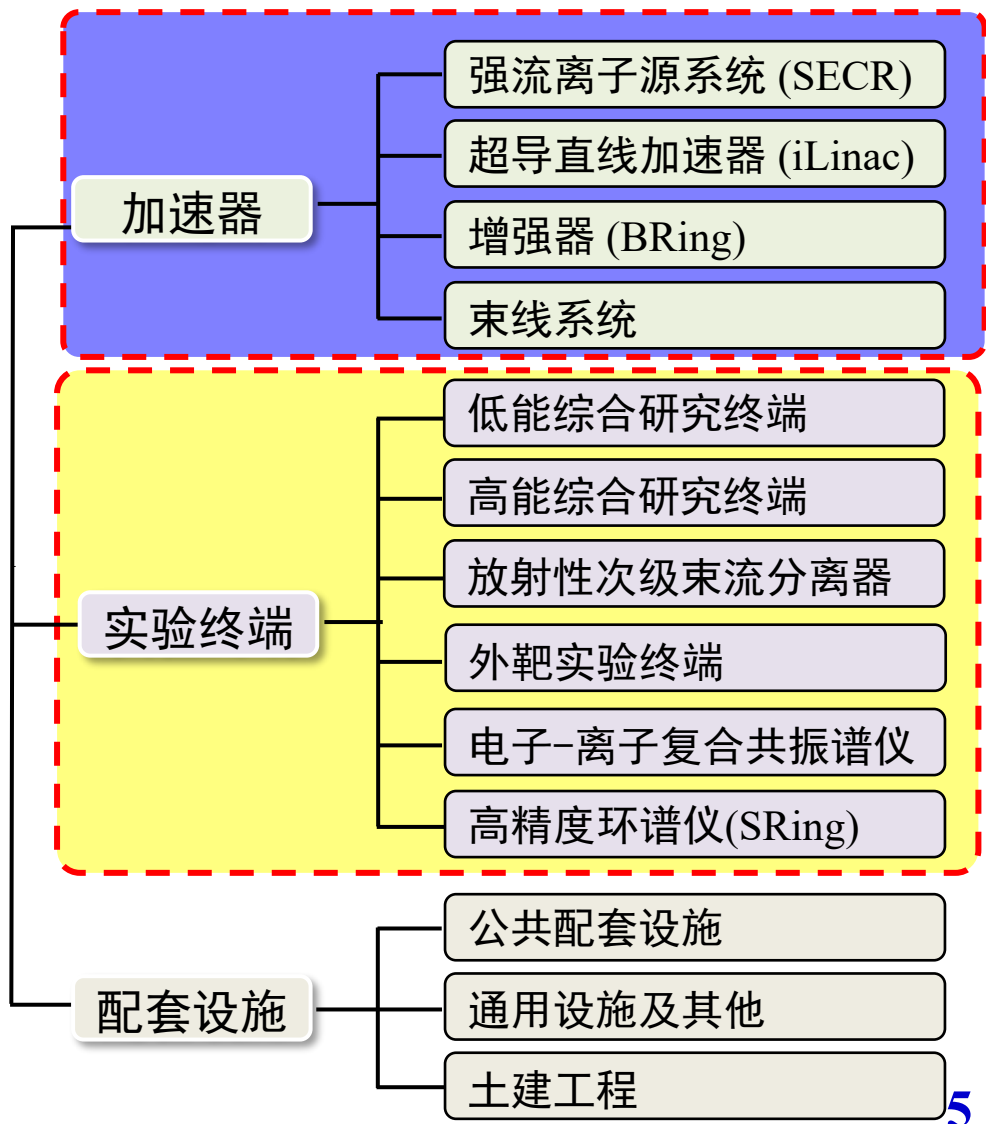


提供脉冲**流强最高**的重离子束和**精度最高**的核质量环形谱仪

为核科学前沿和重离子重大应用提供**国际领先**的研究平台
建设具有**国际影响**的重离子科学研究中心

➤ HIAF建设与调试进展

■ 超导ECR离子源、强流超导直线iLinac、快循环同步环BRing与六大实验终端组成的重离子综合研究装置



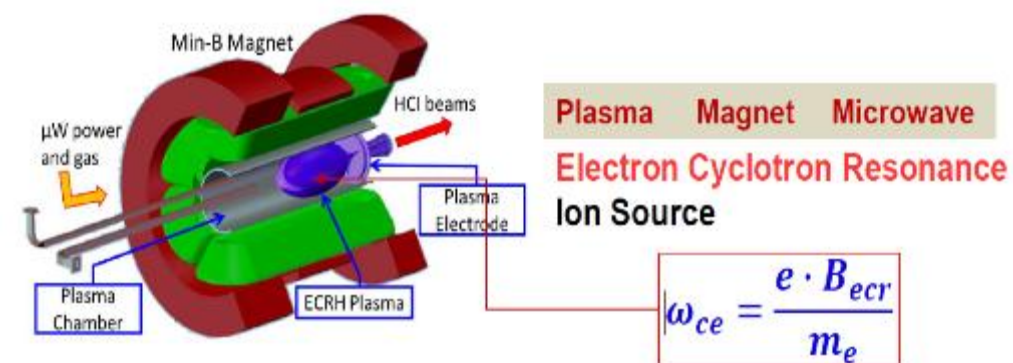
➤ HIAF建设与调试进展

- 提供**脉冲流强最高**的重离子束团 ($\sim 10^{11}$ ppp)
- 实现**非谐振快循环** ($\sim 3\text{Hz}$) 运行, 提升束流平均功率

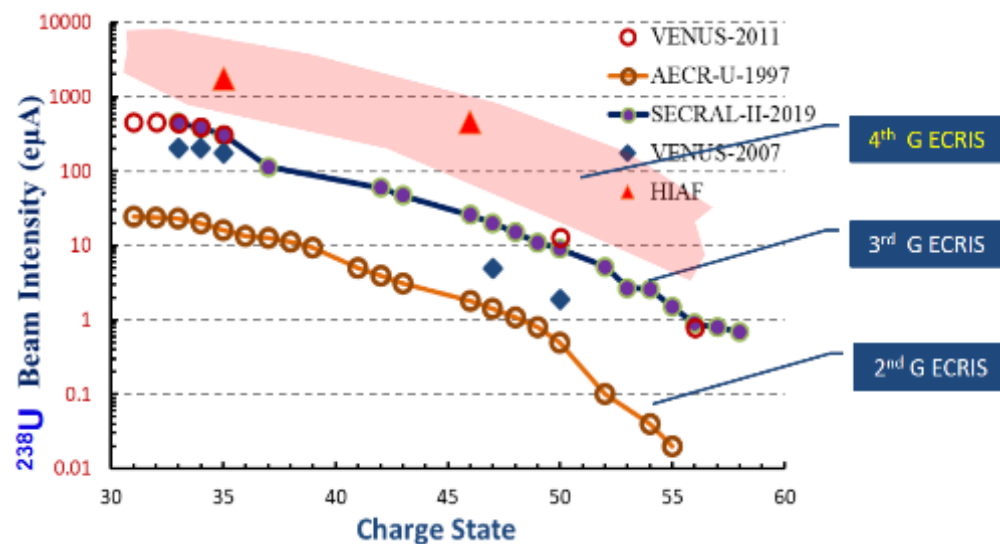
	iLinac	BRing	SRing	FAIR
长度/周长 (m)	114	569	277	1080
U束能量 (MeV/u)	17 (U^{35+})	835 (U^{35+})	835 (U^{92+})	2700 (U^{28+})
最大磁刚度 (Tm)	---	34	15	100
U束最高流强	28 pμA (U^{35+})	1×10^{11} ppp (U^{35+})	$(2 \sim 4) \times 10^{11}$ ppp (U^{92+})	4×10^{11} ppp (U^{28+})
运行模式	连续/脉冲	快循环 (12T/s, 3Hz)	直流 (高精度)	0.5

➤ HIAF建设与调试进展

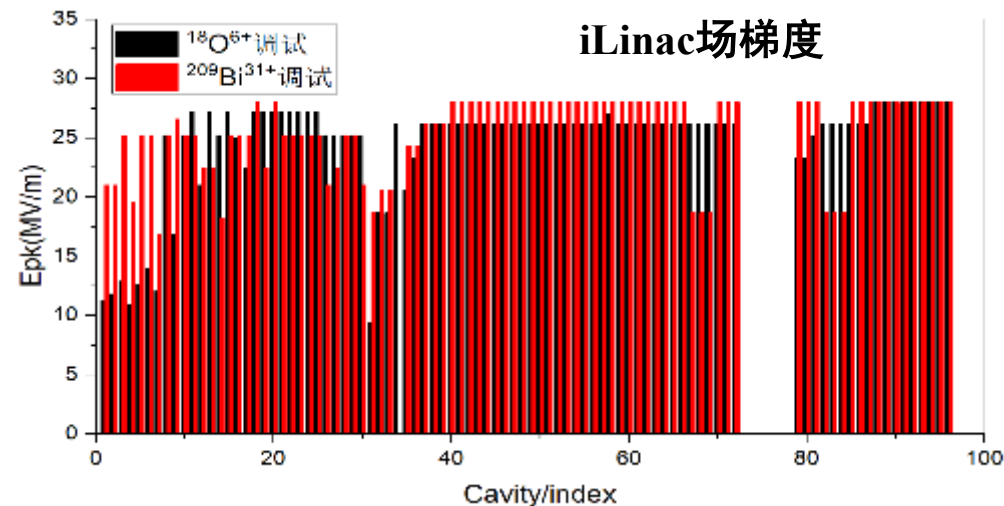
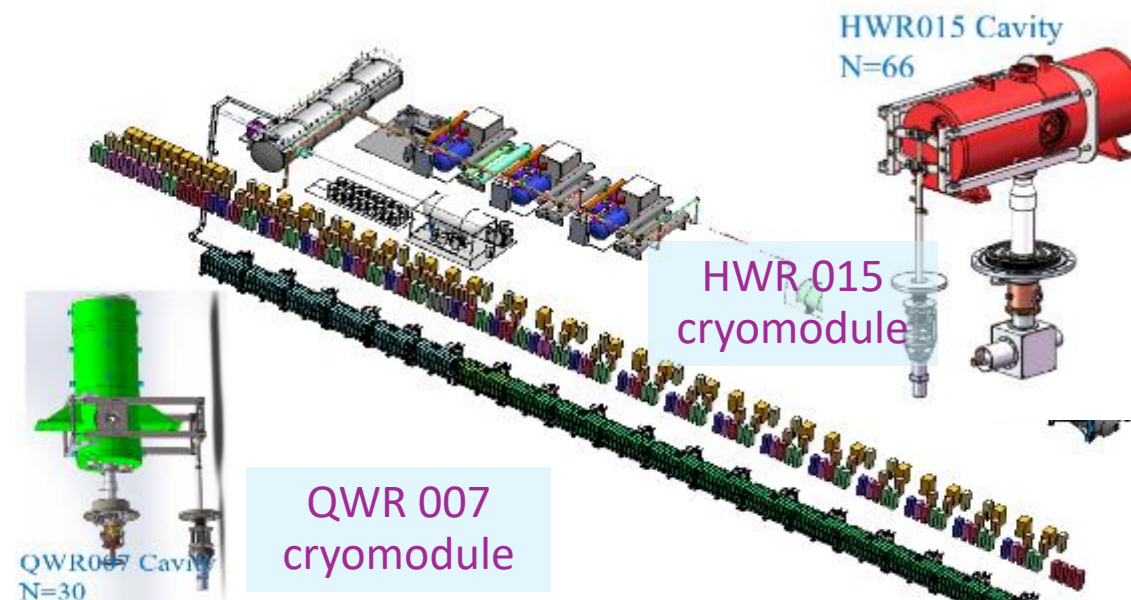
■ 45GHz第四代超导ECR离子源



$$n_{e,cutoff} \propto f_{RF}^2$$

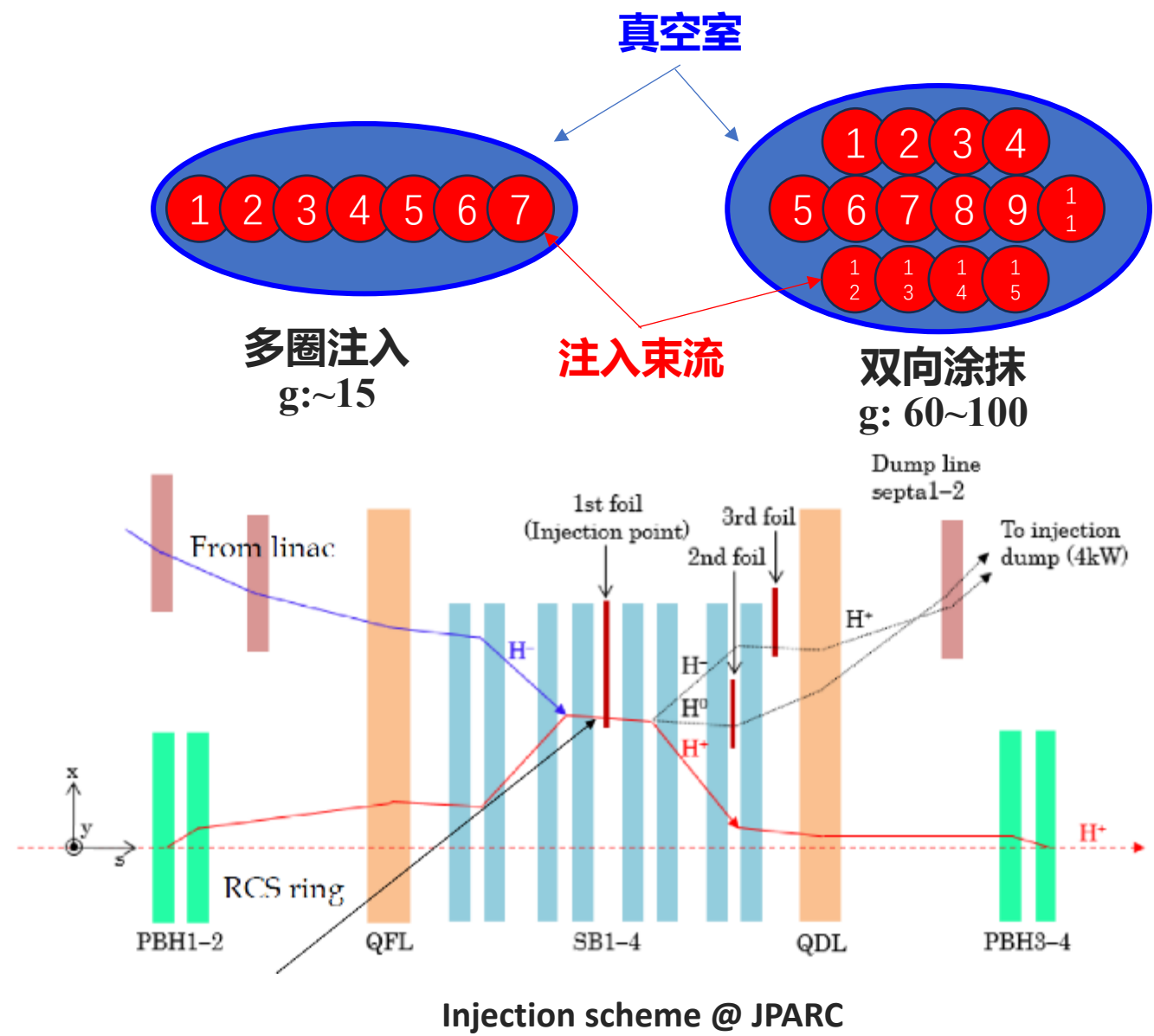


■ CW超导重离子直线加速器



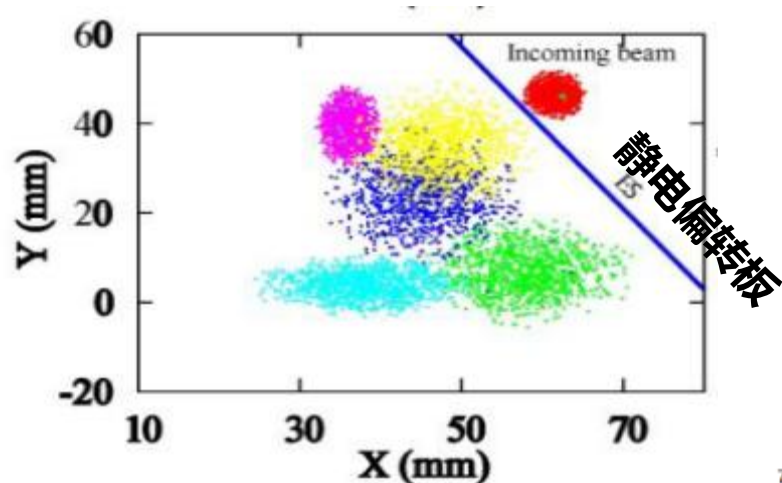
■ 双向相空间涂抹注入

	HIRFL	HIAF
周长 (m)	216	569
离子	$^{12}\text{C}^{6+}$	$^{238}\text{U}^{35+}$
注入能量(MeV/u)	7	17
注入流强(mA)	0.015	1
注入方法	多圈注入	双向涂抹
累积增益	13	>56
$\epsilon_{x/y}$ (π mm mrad)	5/5	5/5
$A_{x/y}$ (π mm mrad)	150/30	200/100
注入损失	~50%	<5%
累积流强	10^9	10^{11}

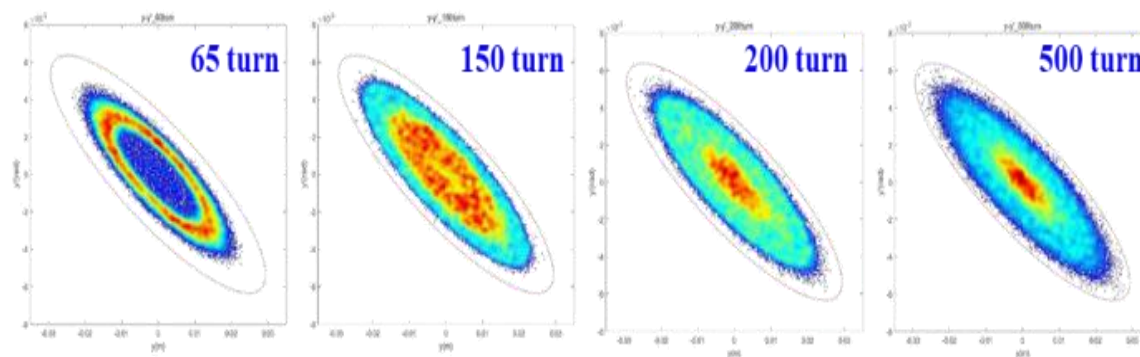


■ 双向相空间涂抹注入

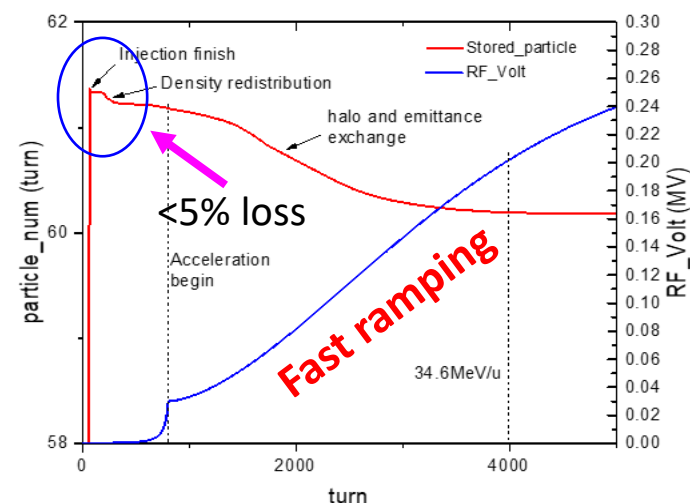
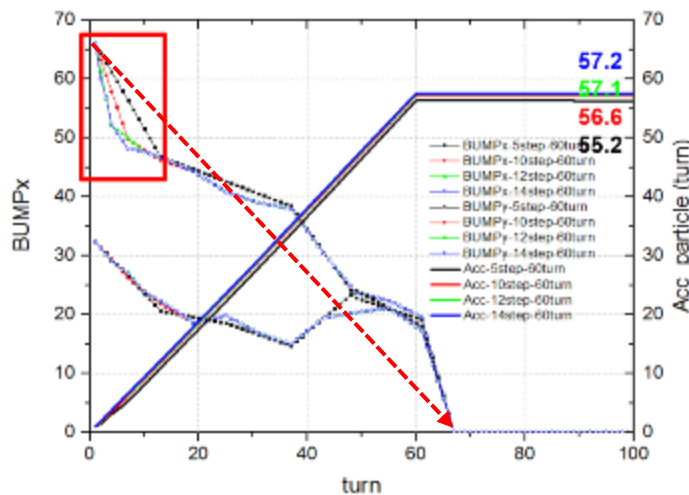
HIAF需要在累积增益提升**1.5倍**情况下，束流损失降低**1个量级**



• 快损失机制：电荷密度失配引起相空间重分布



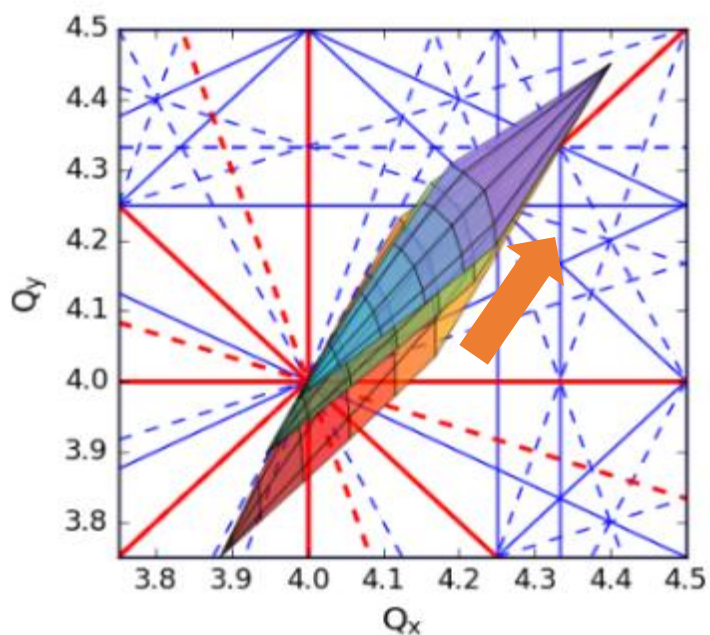
通过**BUMP**曲线调制减小电荷密度失配引起的发射度增长，增益达到**60.18 (>56)**



■ 非谐振快加速**磁场上升速率12T/s**

- 降低束流穿越共振线产生的损失
- 降低动态真空效应产生的束流损失

能量上升速度越快，损失越小



0.6T/s @ HIRFL

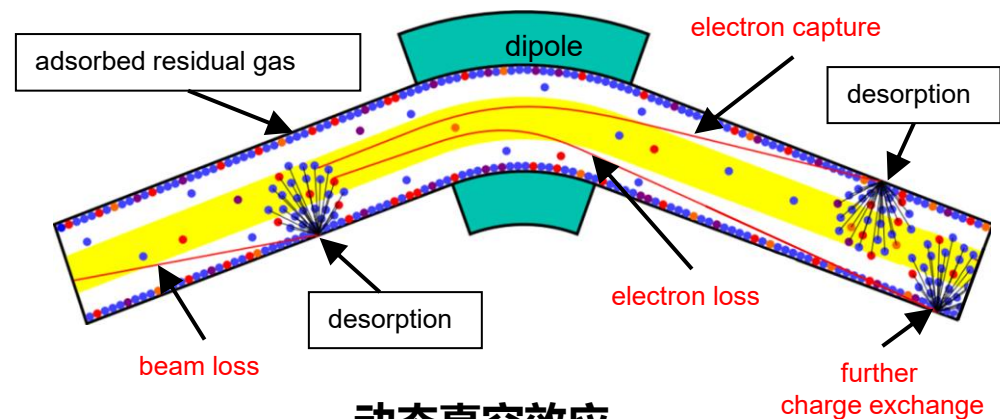


10T/s @ SIS 18

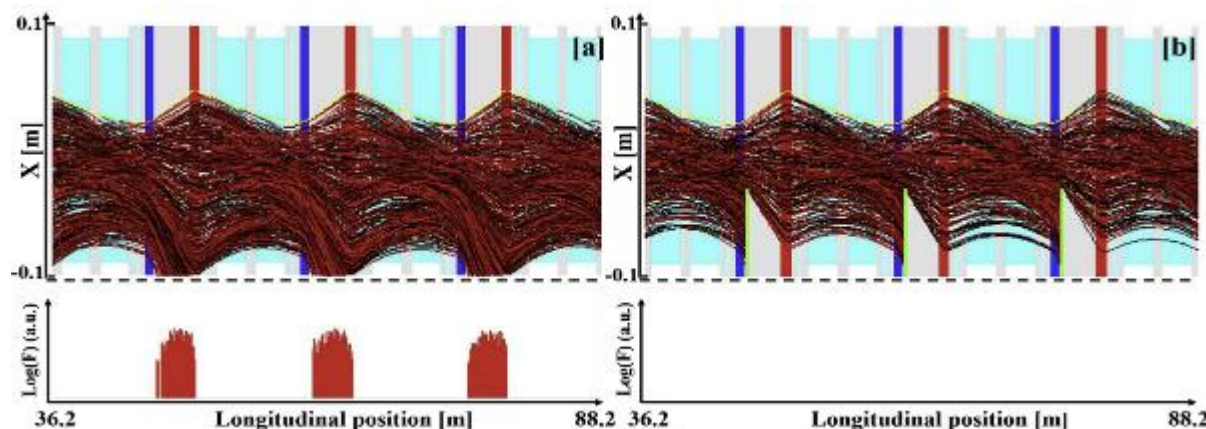


12T/s @ BRing

- 束流自身的空间电荷场引起的聚焦散焦
- 穿越共振线导致束流损失



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

■ 非谐振快加速核心关键技术

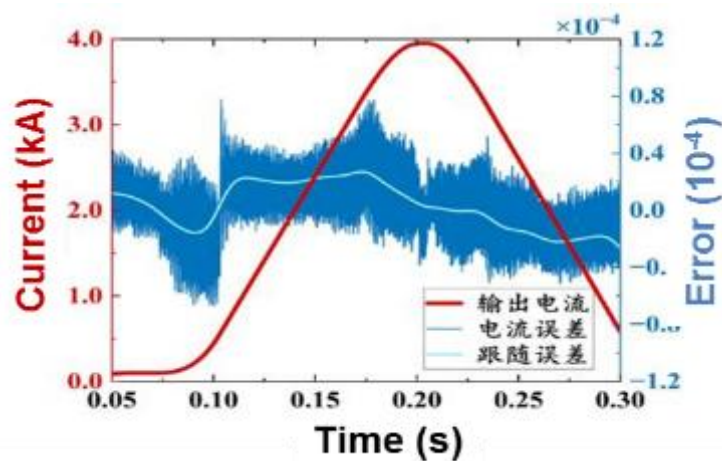
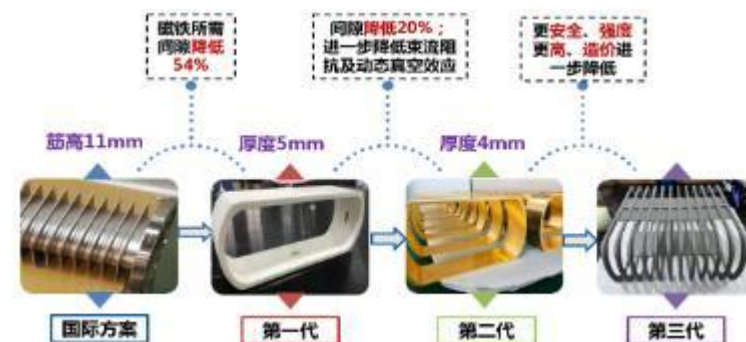
- 全储能电源实现**3Hz**、**40kA/s**励磁电流输出



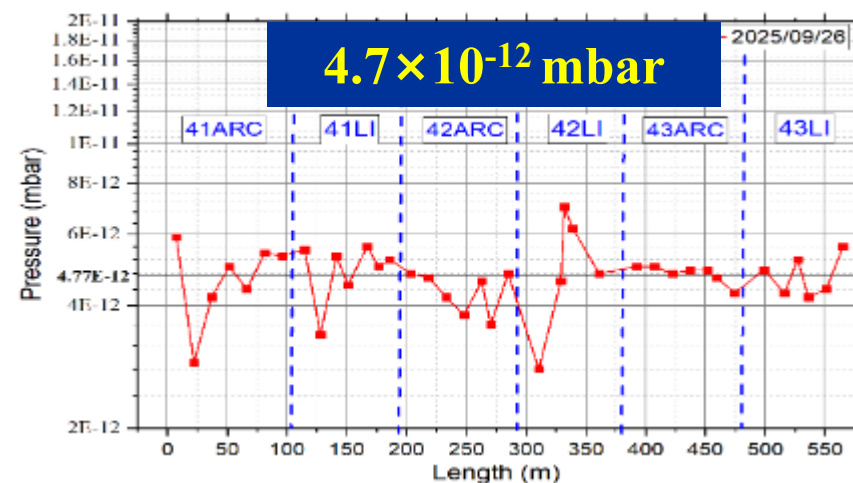
- 纳米磁合金高频系统最高加速电压超过**300kV**



- 骨架内衬极高真空系统优于 **5×10^{-12} mbar**



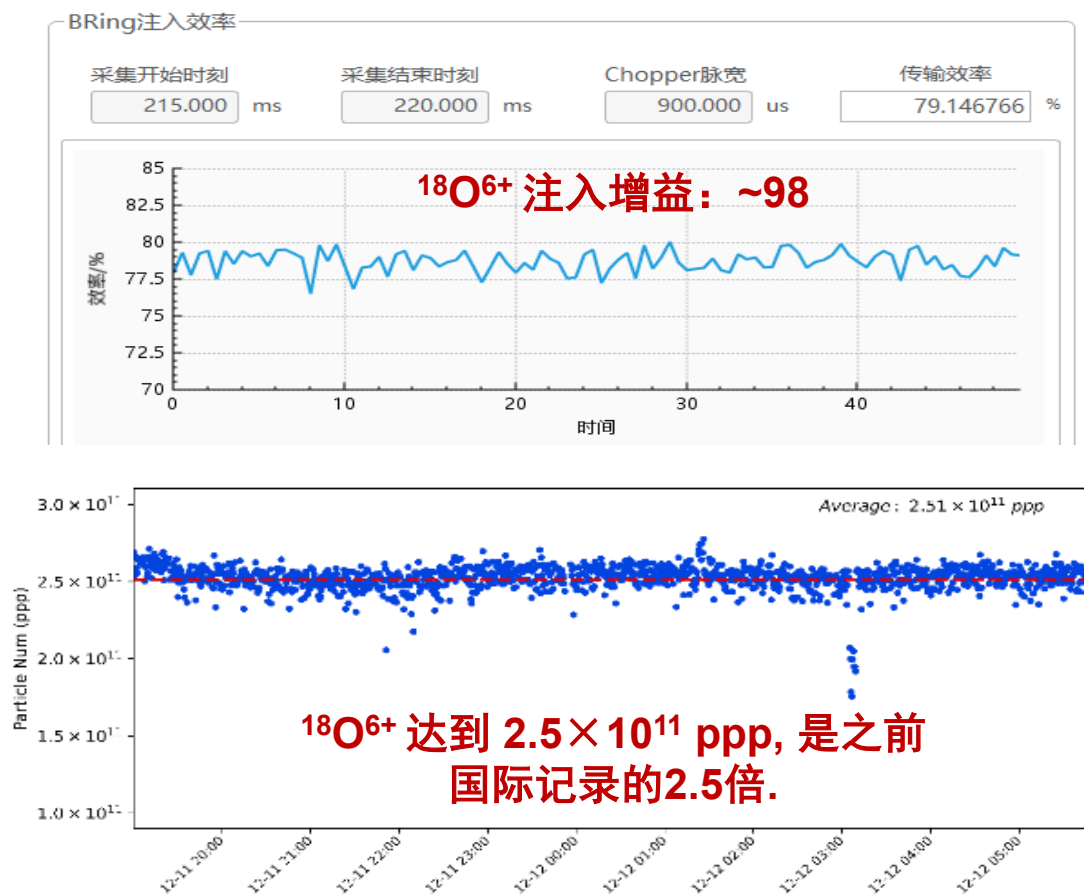
装置	电压 (kV)	梯度(kV/m)
JPARC-RCS	41	23
SIS18	50	25
HIAF-BRing	70	35



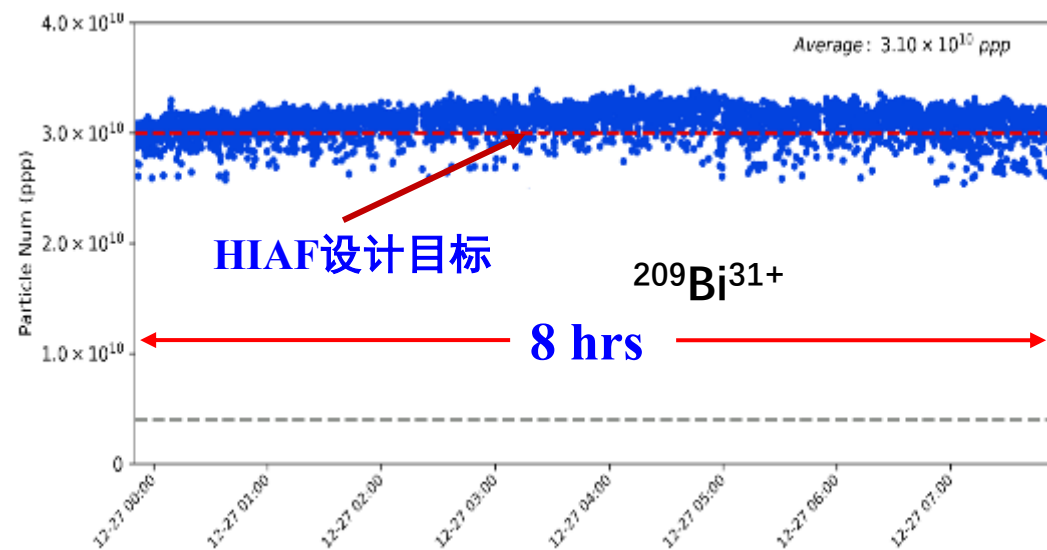
■ HIAF束流调试结果

双向涂抹注入在HIAF调试中成功应用，束流增益达到**90以上**，注入损失控制在**1%以下**

完成最高流强、最高能量及终端性能测试，进入试运行阶段



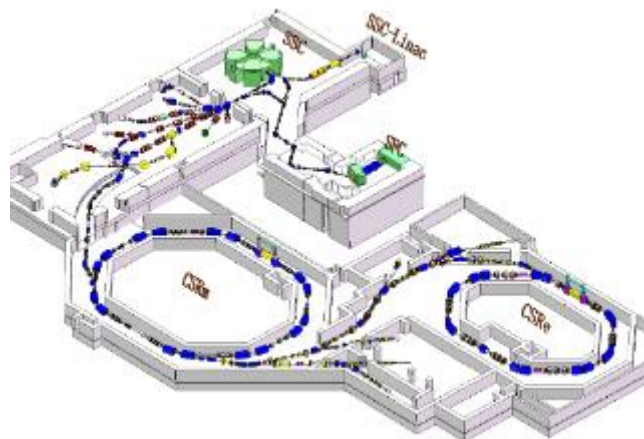
	能量 (GeV/u)	流强 (ppp)
$^{18}\text{O}^{6+}$	2.6	2.5×10^{11}
$^{209}\text{Bi}^{31+}$	0.85	3.0×10^{10}
$^{18}\text{O}^{8+}$	4.25	1.2×10^{11}



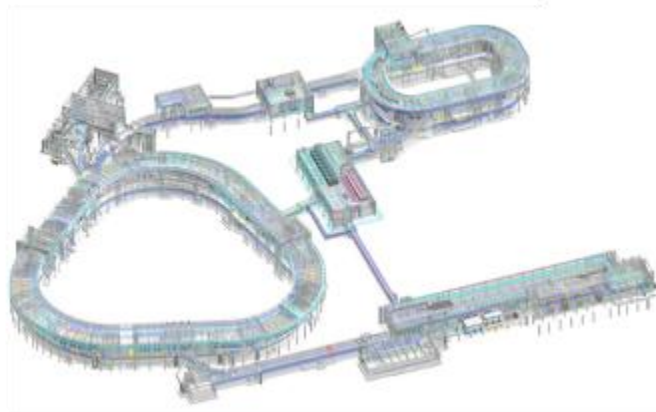
➤ HIAF建设与调试进展

■ HIAF测试实验发现新核素 (^{153}Hf) , 仅用12小时, 同时测得~35个新质量

• HIRFL

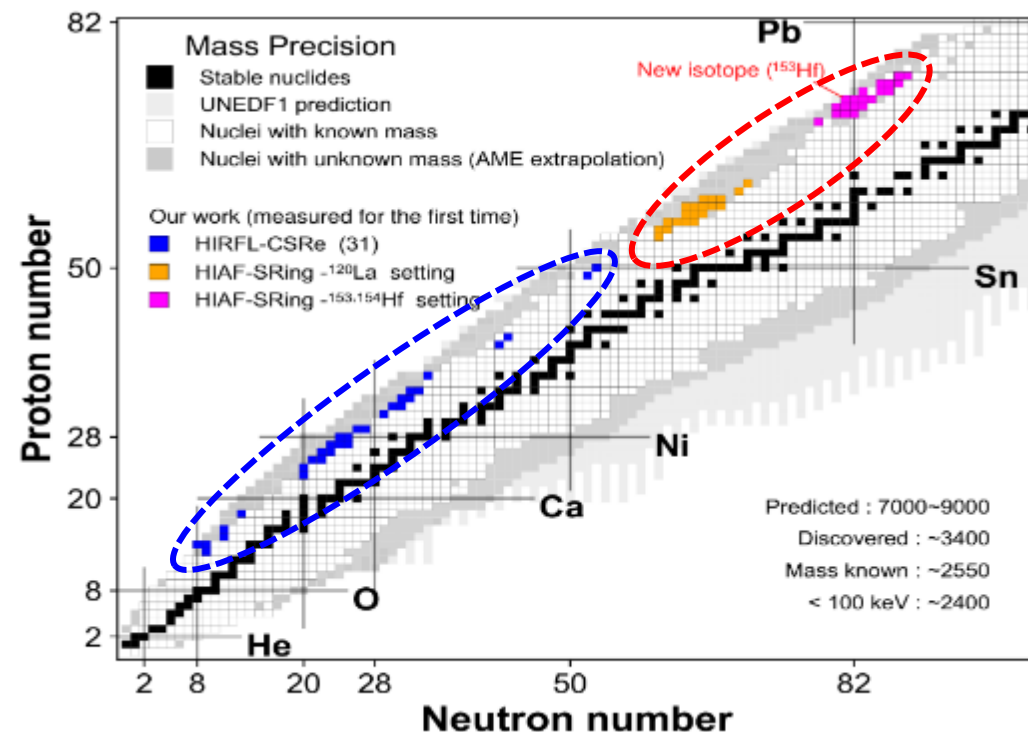


• HIAF



- | | | | |
|-----------------------------|---|------------------------|---------|
| — 最高能量: 1 GeV/u | ➡ | 4.25 GeV/u | ~ 4 倍 |
| — 最大流强: 2×10^9 ppp | ➡ | 3×10^{11} ppp | ~ 150 倍 |
| — 最快频率: 0.05 Hz | ➡ | 3 Hz | ~ 60 倍 |

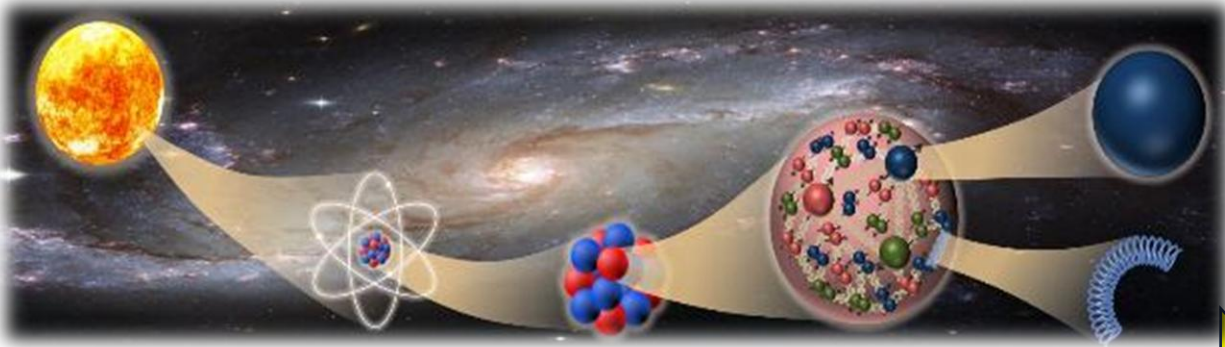
~~~~~  
**=36 000**



# ➤ EicC总体方案与设计参数

■ 从固定靶到**EIC**，研究核子结构和核子内夸克胶子分布的最有效实验装置

## EIC加速器物理问题与挑战



1911  
原子核模型

1919  
质子

1932  
中子

1968  
夸克物理图像

核子  
结构

质量

Higgs mechanism

Dynamics of gluons

~99%  
质子质量

轻味夸克质量  
~1%质子质量

质子质量来源之谜

Gell-Mann  
夸克模型

自旋

1980s

1990/2000s

现在

质子自旋结构危机



能量

对撞束流动力学设计

亮度

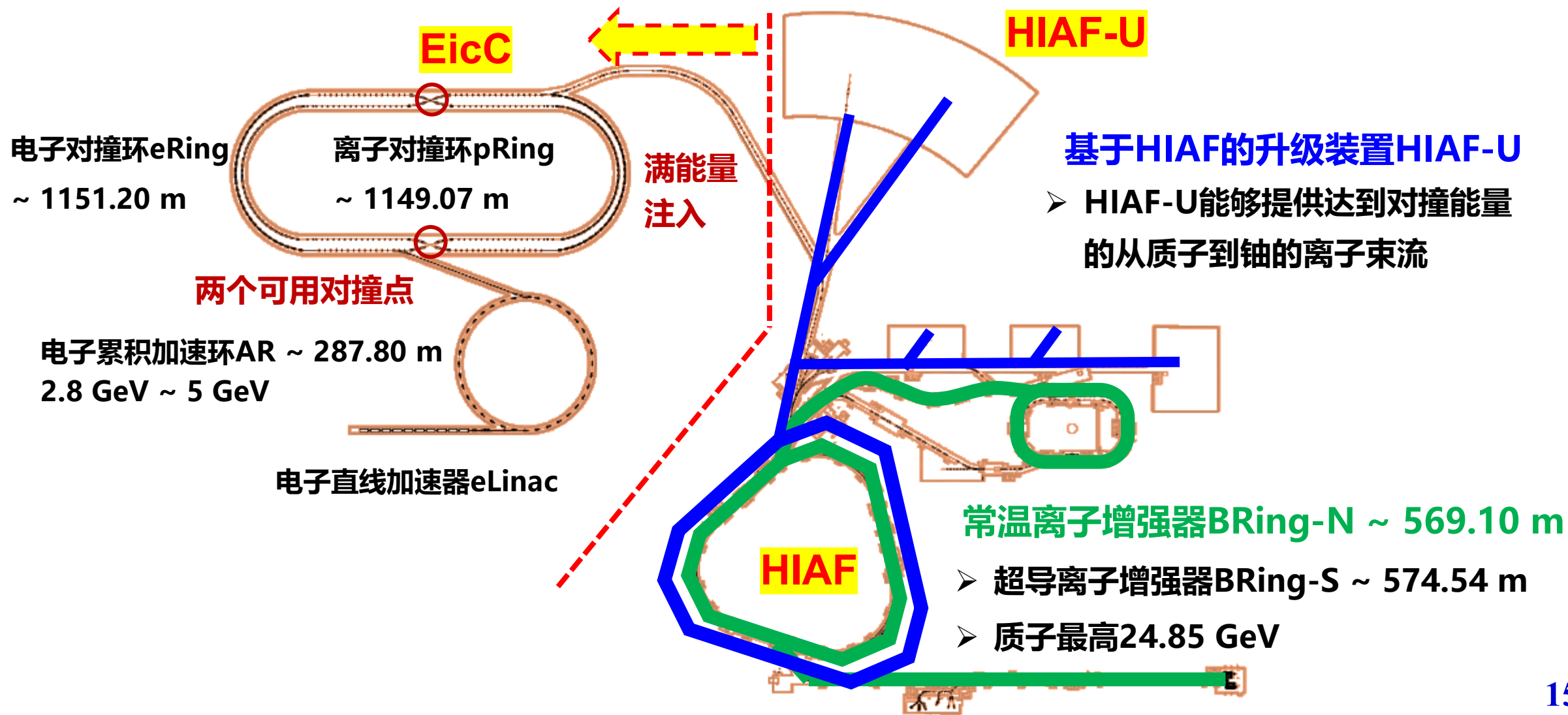
强流离子束流冷却

自旋

极化束流产生与极化度保持

## ➤ EicC总体方案与设计参数

### ■ 高亮度、双极化电子离子对撞机EicC是基于HIAF的升级规划



# ➤ EicC总体方案与设计参数

■ EicC包含两个对撞点，高亮度模式和近似全接收模式两种对撞方案设计

| 参数                                               | 电子      | 质子（高亮度）               | 质子（全接受度）              |
|--------------------------------------------------|---------|-----------------------|-----------------------|
| 对撞环周长 (m)                                        | 1151.20 | 1149.81               |                       |
| 粒子能量(GeV)                                        | 3.5     | 19.08                 |                       |
| CM对撞能量 (GeV)                                     | 16.76   |                       |                       |
| 对撞频率 $f_{\text{collision}}$ (MHz)                | 100     |                       |                       |
| 极化度                                              | 80%     | 70%                   |                       |
| 发射度 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ (nm·rad, rms) | 50/15   | 100/50                | 25/12.5               |
| 对撞点 $\beta$ 函数 $\beta_x^*/\beta_y^*$ (cm)        | 10/4    | 5/1.2                 |                       |
| 平均流强(A)                                          | 2.7     | 1.68                  | 0.43                  |
| 对撞角度 (mrad)                                      | 50      |                       |                       |
| 峰值亮度 (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )         |         | $4.25 \times 10^{33}$ | $1.13 \times 10^{33}$ |

# ➤ EicC总体方案与设计参数

■ 在12 ~ 23GeV质心能范围内提供4个对撞能量点，亮度不低于 $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

| 对撞模式                                       | VE1                   |        | VE2                   |        | VE3                   |       | VE4                   |       |
|--------------------------------------------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|
| 粒子种类                                       | e                     | p      | e                     | p      | e                     | p     | e                     | p     |
| 粒子能量 [GeV]                                 | 2.8                   | 12     | 5                     | 12     | 2.8                   | 24.85 | 5                     | 24.85 |
| CM对撞能量 [GeV]                               | 12.07                 |        | 16.10                 |        | 17.02                 |       | 22.73                 |       |
| 束团粒子数目 [ $\times 10^{11}$ ]                | 1.7                   | 0.4    | 1.7                   | 0.4    | 1.7                   | 0.7   | 1.7                   | 1.2   |
| 发射度 $\varepsilon_x/\varepsilon_y$ [nm·rad] | 80/24                 | 160/80 | 80/24                 | 160/80 | 40/12                 | 80/40 | 40/12                 | 80/40 |
| 对撞点 $\beta$ 函数 $\beta_x^*/\beta_y^*$ [cm]  | 10/4                  | 5/1.2  | 10/4                  | 5/1.2  | 10/4                  | 5/1.2 | 10/4                  | 5/1.2 |
| x/y RMS束流尺寸 [ $\mu\text{m}$ ]              | 90/31                 |        | 90/31                 |        | 63/22                 |       | 63/22                 |       |
| 束团长度 [cm]                                  | 0.75                  | 8      | 0.75                  | 8      | 0.75                  | 8     | 0.75                  | 8     |
| 对撞角度 [mrad]                                | 50                    |        |                       |        |                       |       |                       |       |
| 峰值亮度 [ $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ]   | $1.00 \times 10^{33}$ |        | $1.00 \times 10^{33}$ |        | $3.54 \times 10^{33}$ |       | $6.06 \times 10^{33}$ |       |

# ➤ EicC总体方案与设计参数

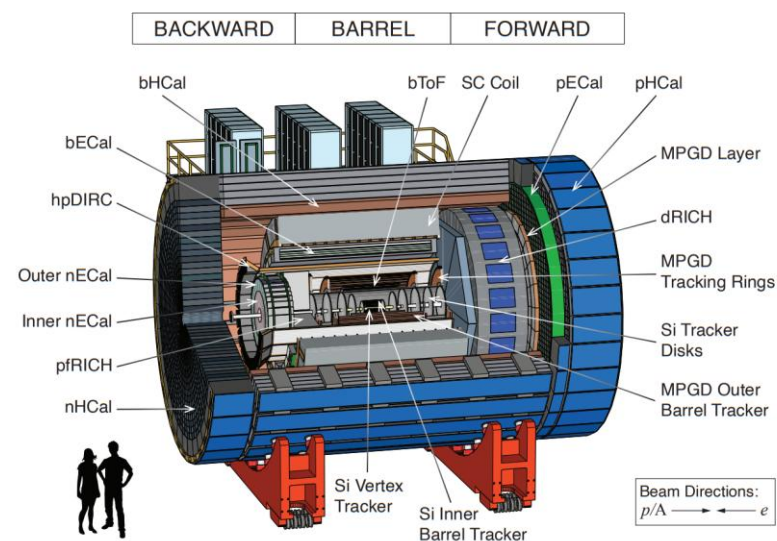
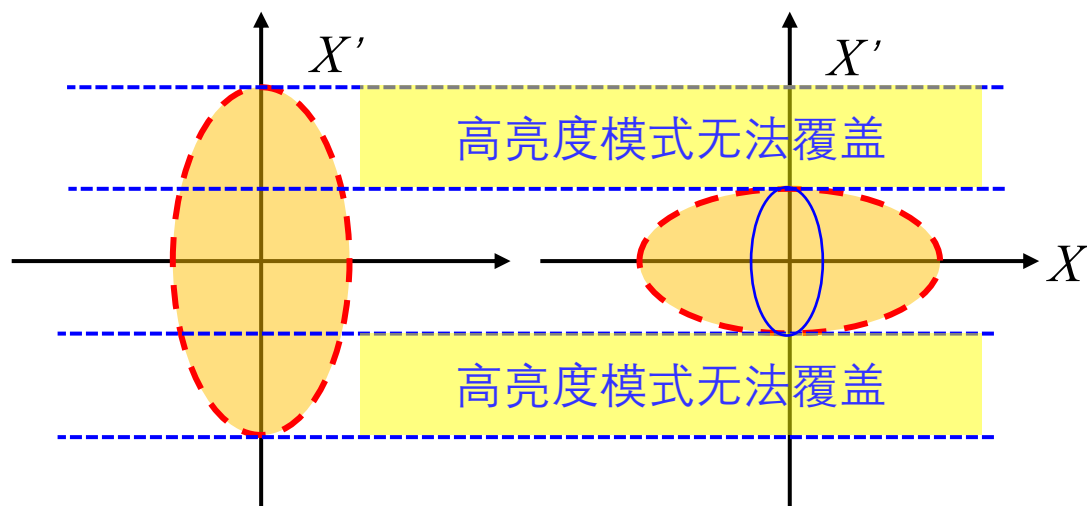
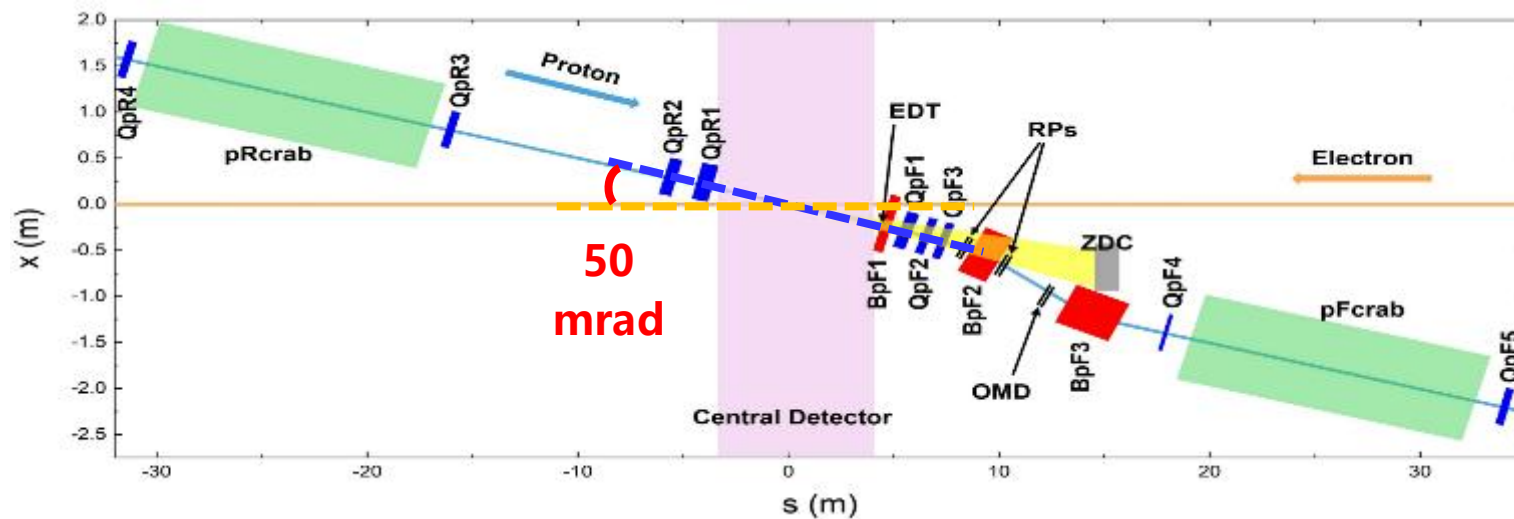
■ 提供最重到铀离子电子对撞，实现氦束、氦3束流和电子束流的双极化对撞

| 对撞模式                                                     | e     | d      | <sup>3</sup> He <sup>++</sup> | <sup>7</sup> Li <sup>3+</sup> | <sup>12</sup> C <sup>6+</sup> | <sup>40</sup> Ca <sup>20+</sup> | <sup>197</sup> Au <sup>79+</sup> | <sup>208</sup> Pb <sup>82+</sup> | <sup>238</sup> U <sup>92+</sup> |
|----------------------------------------------------------|-------|--------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 粒子能量 (GeV)                                               | 3.5   | 12.00  | 16.30                         | 10.16                         | 12.00                         | 12.00                           | 9.46                             | 9.28                             | 9.09                            |
| CM对撞能量 (GeV/u)                                           | -     | 13.48  | 15.55                         | 12.48                         | 13.48                         | 13.48                           | 12.09                            | 11.98                            | 11.87                           |
| 对撞频率 f <sub>collision</sub> (MHz)                        | -     | 499.63 | 500.20                        | 499.16                        | 499.63                        | 499.63                          | 498.91                           | 498.84                           | 498.76                          |
| 极化                                                       | 80%   | Yes    | Yes                           | No                            | No                            | No                              | No                               | No                               | No                              |
| 单束团粒子数目 (x10 <sup>9</sup> )                              | 40    | 6.1    | 3.0                           | 2.04                          | 1                             | 0.3                             | 0.07                             | 0.065                            | 0.055                           |
| 发射度 ε <sub>x</sub> , ε <sub>y</sub> (nm·rad, rms)        | 50/15 | 100/50 | 100/50                        | 100/50                        | 100/50                        | 100/50                          | 100/50                           | 100/50                           | 100/50                          |
| 束团长度 (cm, rms)                                           | 0.75  | 1.5    | 1.5                           | 1.5                           | 1.5                           | 1.5                             | 1.5                              | 1.5                              | 1.5                             |
| 流强 (A)                                                   | 3.3   | 0.42   | 0.48                          | 0.49                          | 0.48                          | 0.48                            | 0.44                             | 0.43                             | 0.40                            |
| 亮度(× 10 <sup>32</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) | -     | 10.1   | 7.44                          | 11.81                         | 9.92                          | 9.92                            | 11.40                            | 11.18                            | 10.82                           |

# ➤ 对撞、极化与束流冷却

## ■ 高亮度模式与近似全接收度模式对撞区设计

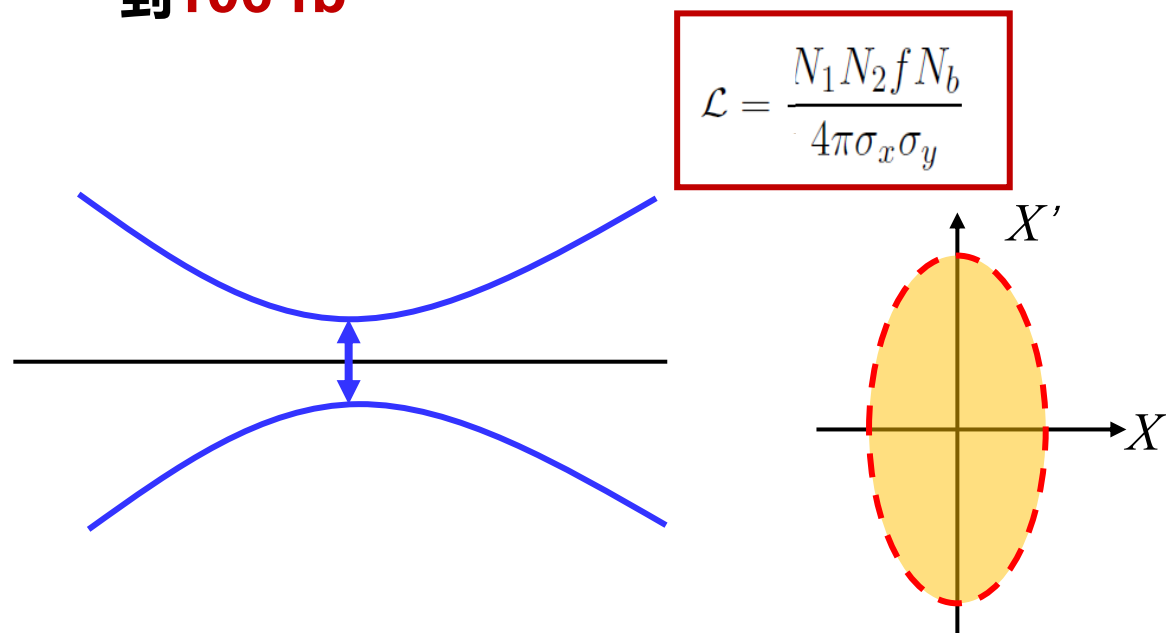
- 两种模式的重大区别是对**小角度对撞产物**的探测
- 近似全接受度模式下，通过减小发射度（或增大对撞点 $\beta$ 函数）**降低束流角散**，增大小角度对撞产物的探测能力



## ➤ 对撞、极化与束流冷却

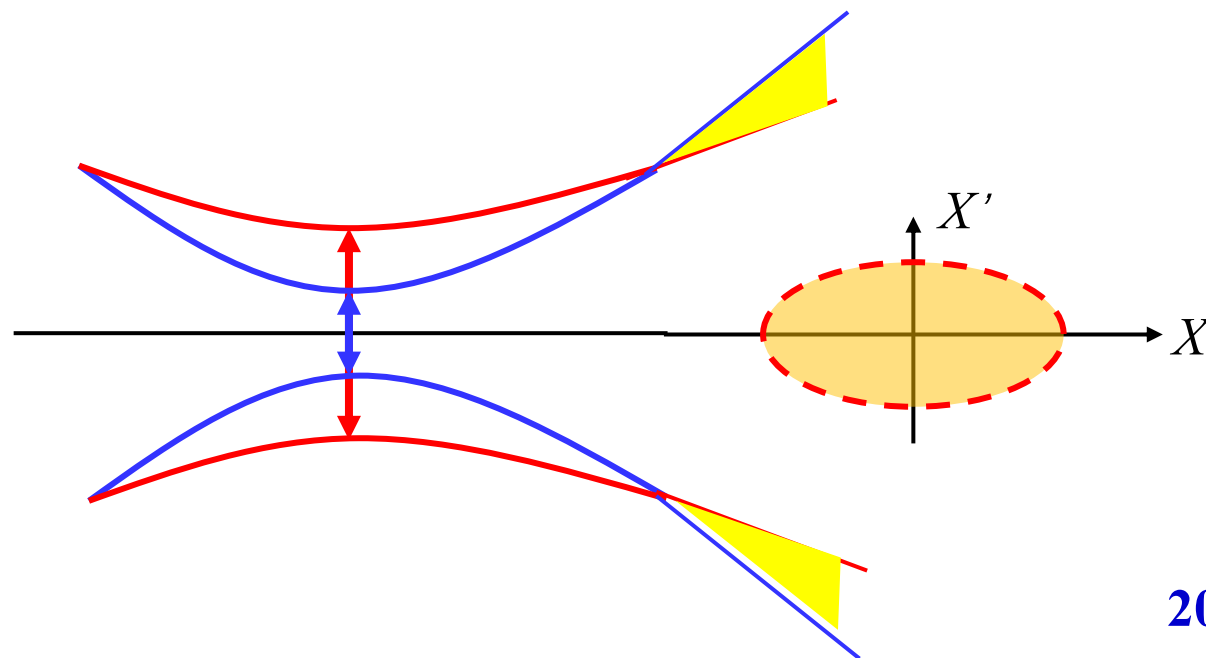
### ■ 高亮度模式

- 发射度、流强较大，束流角散大，**亮度高但无法探测极小角度产物**
- 亮度可达到  $4.25 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- 以全年80%运行时间计算，积分亮度达到  **$106 \text{ fb}^{-1}$**



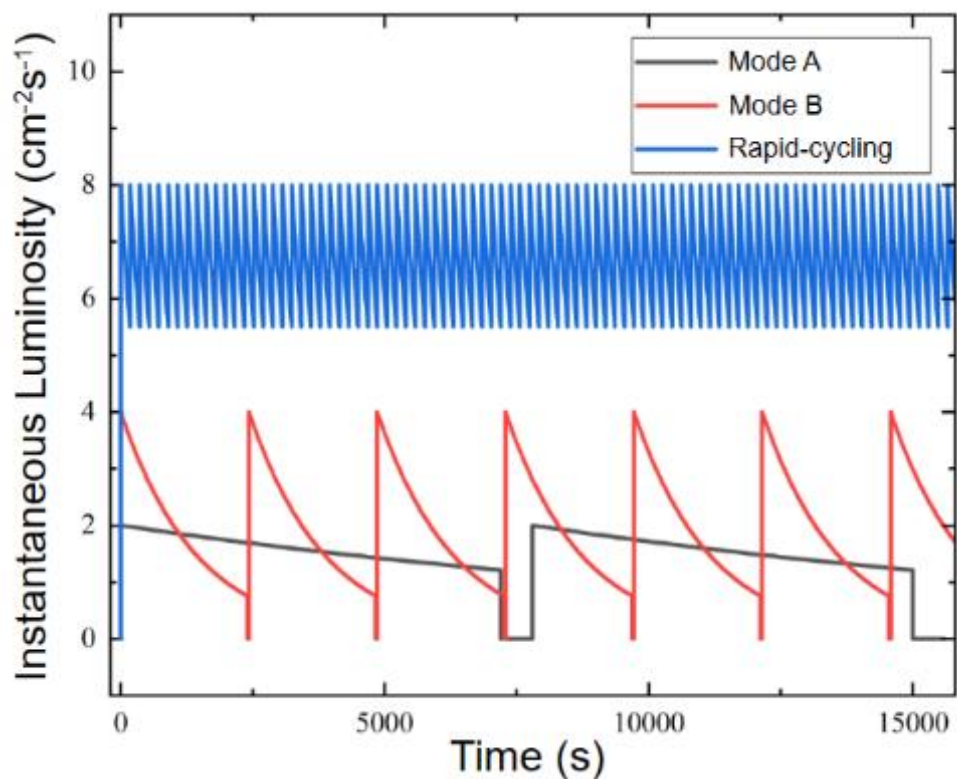
### ■ 近似全接收模式

- 发射度、流强较小，束流角散小，**亮度降低但可探测极小角度产物，补足数据区间**
- 亮度可达到  $1.13 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- 以全年80%运行时间计算，积分亮度达到  **$28 \text{ fb}^{-1}$**



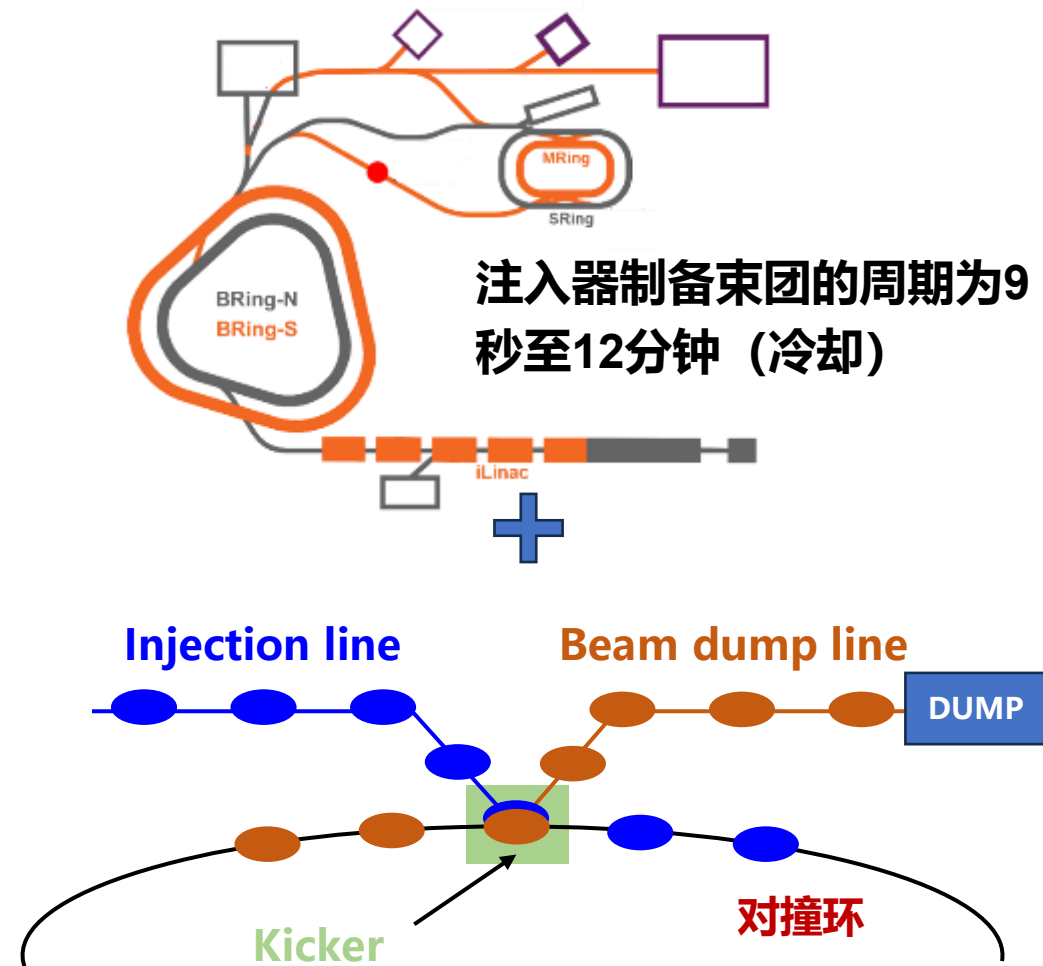
## ➤ 对撞、极化与束流冷却

### ■ 快循环对撞模式：提升平均亮度，增加装置积分亮度

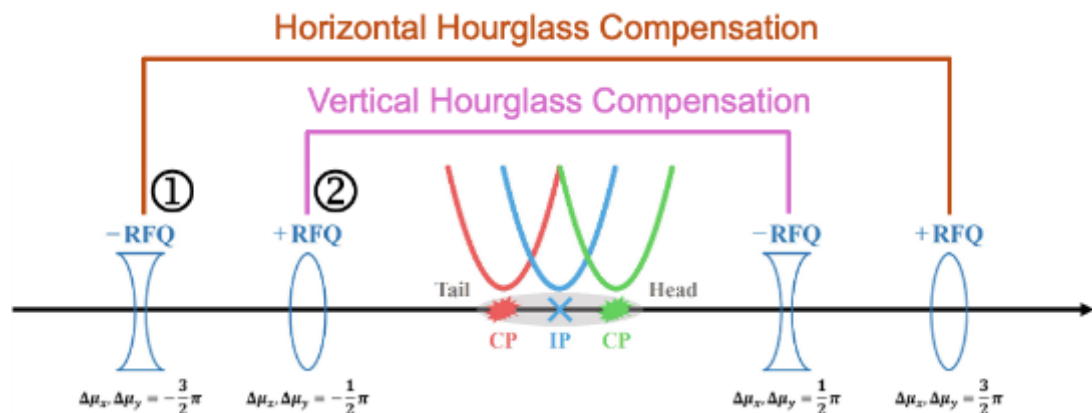


积分亮度提升

在较短时间内替换所有对撞束团，依赖于离子束团的制备、冷却过程，对同步加速器循环频率和平均功率提出更高要求



## ■ 移动聚焦对撞方案，实现束腰对撞

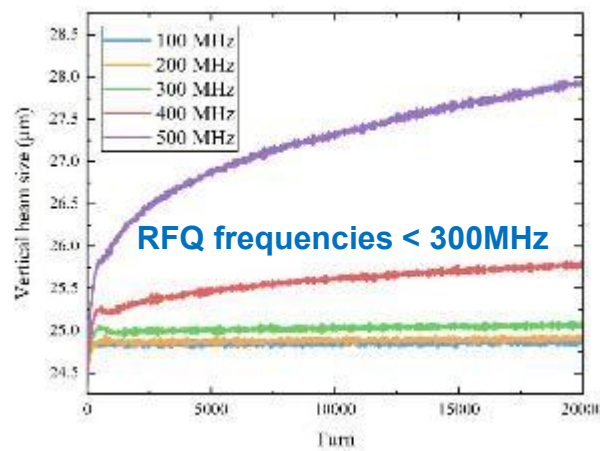
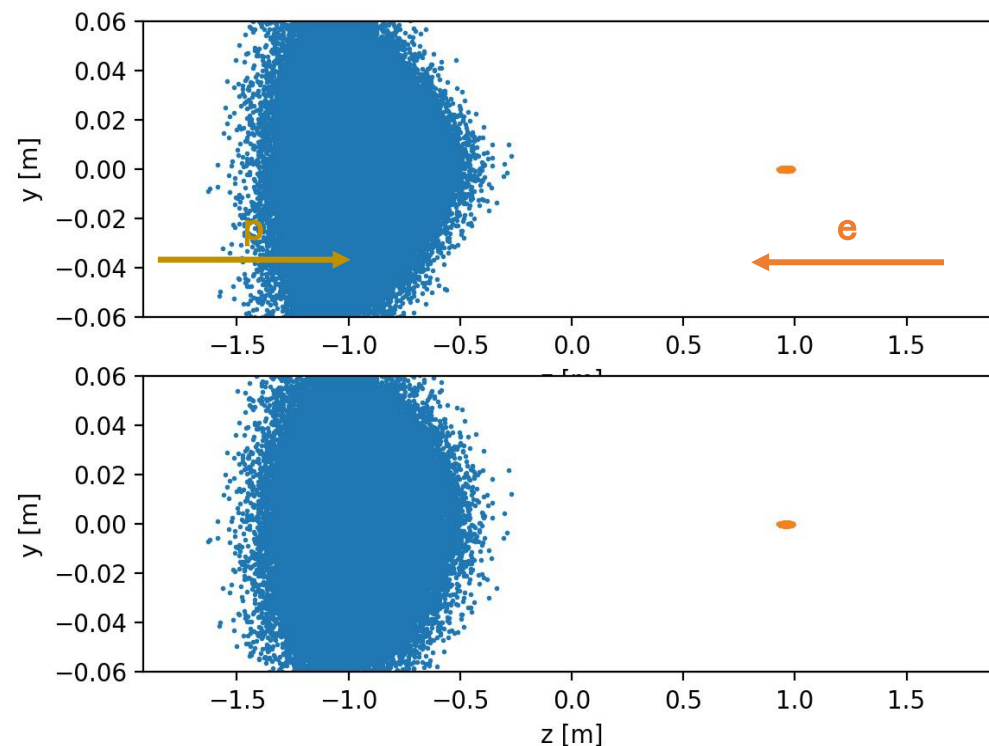


$$\Delta Q_{x,y} = \pm \beta_{x,y} \frac{b^{(2)}}{4\pi B_0 \rho} \cos\left(\frac{\omega}{\beta c} z + \phi_0\right)$$

$$\Delta Q_{x,y} = \pm \beta_{x,y} \frac{b^{(2)}}{4\pi B_0 \rho} \left[ \frac{2\pi f}{\beta c} z + O(z^3) \right] - \frac{\pi}{2} \Rightarrow \Delta Q_{x,y} \propto \pm K_1 z + O(z^3)$$

$$\Delta Q_{x,y} = \frac{1}{4\pi \beta^*} z \quad (\text{Theory})$$

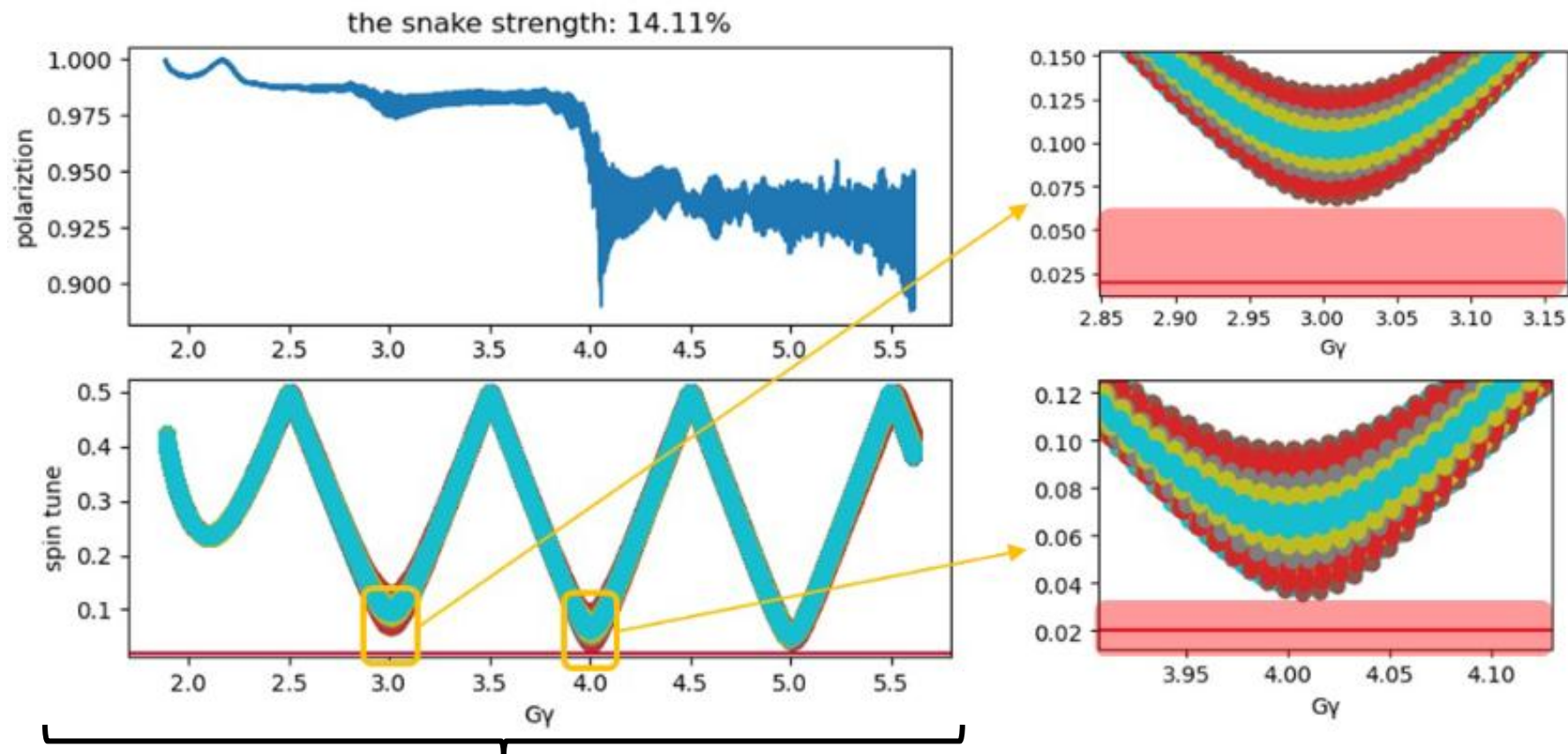
移动质子束团束腰位置，与较小的电子束团匹配，解决大交叉角沙漏效应限制峰值亮度及其寿命的难题（沙漏因子0.52→0.8）



|                 | $\beta_x$ [m] | $\beta_y$ [m] | $b^2$ [Tm/m] |
|-----------------|---------------|---------------|--------------|
| RFQ @ $-3/2\pi$ | 532.36        | 21.82         | 6.07766      |
| RFQ @ $-1/2\pi$ | 2400          | 1200          | 1.21553      |
| RFQ @ $+1/2\pi$ | 2400          | 1200          | 1.21553      |
| RFQ @ $+3/2\pi$ | 532.36        | 21.82         | 6.07766      |

RFQ 提供随z方向变化的  
聚焦力

## ■ 固定场西伯利亚蛇磁铁保持极化度



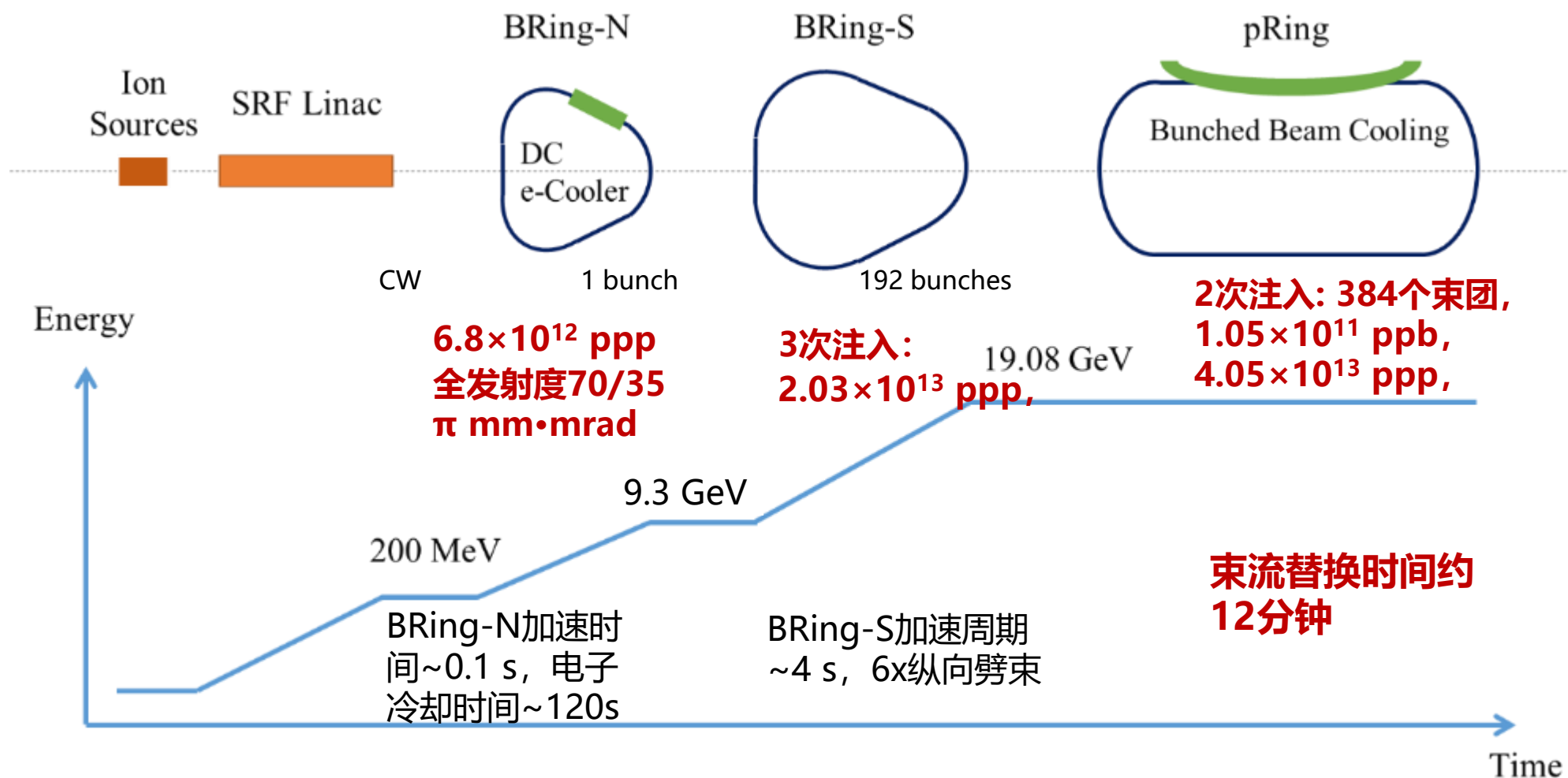
固定场西伯利亚蛇磁铁全加速过程中场值不变

**挑战：**BRing-N的磁场上升率可达数十T/s，传统西伯利亚蛇无法与主磁场同步

**固定场西伯利亚蛇，**  
通过调整垂直方向动力学方案，避开所有退极化共振

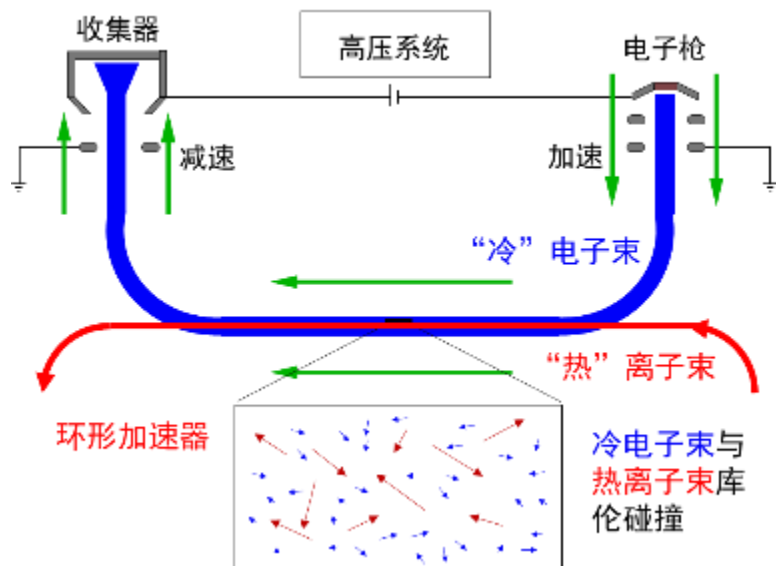
## ➤ 对撞、极化与束流冷却

- 冷却用于降低束流发射度，实现离子数目累积，约束能散和角散，**提升对撞亮度**

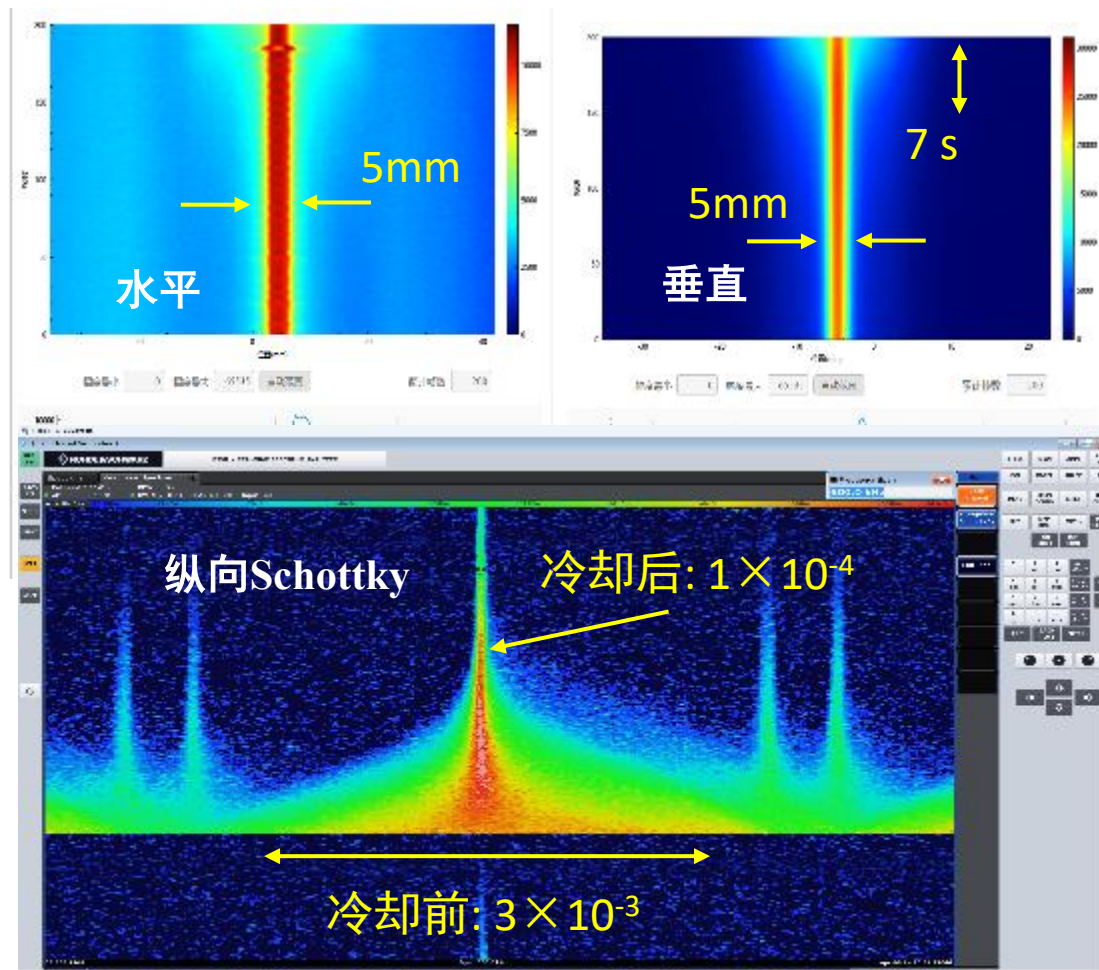


# ➤ 对撞、极化与束流冷却

## ■ 直流磁化电子冷却装置用于束流相空间压缩和品质提升



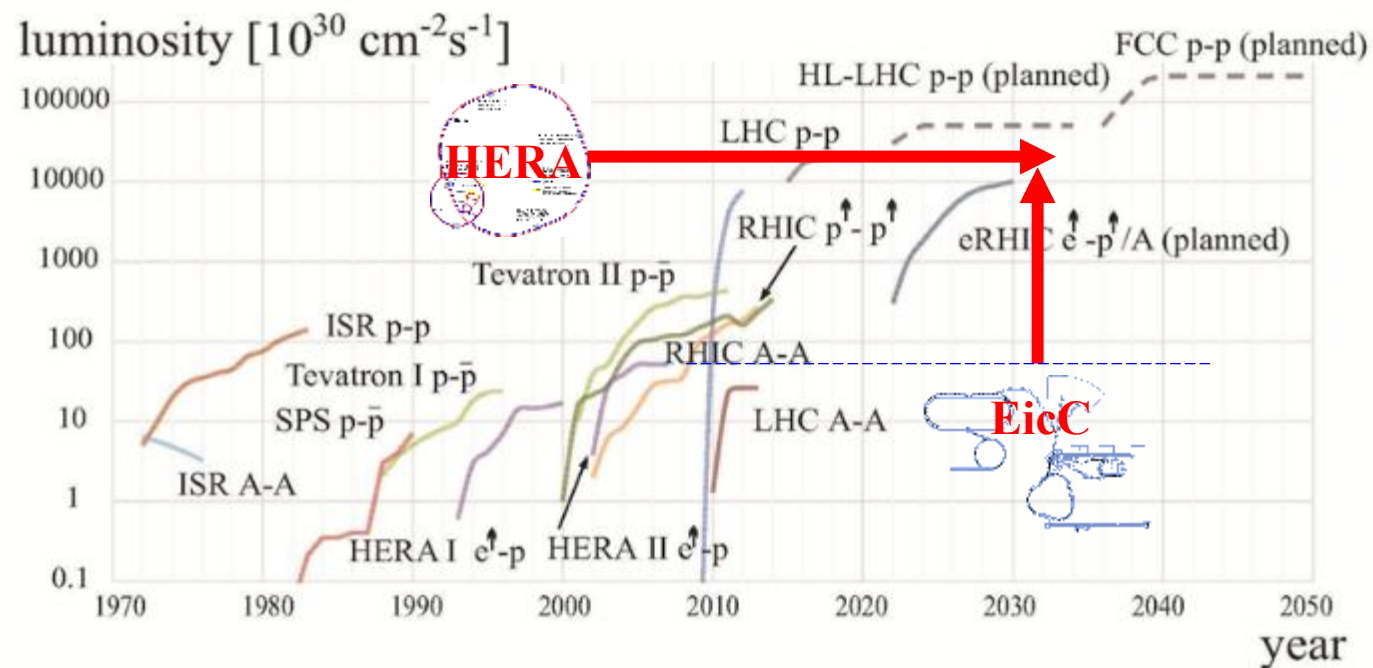
### 80 MeV/u $\text{Bi}^{3+}$ 束流冷却



# ➤ 对撞、极化与束流冷却

## ■ 高能束流冷却是实现EicC高亮度对撞指标的重大技术挑战

HERA升级之后的最高峰值亮度为 $5.1 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，最早提出了高能束流冷却的需求，2007年关闭



Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 441 (2000) 274–280

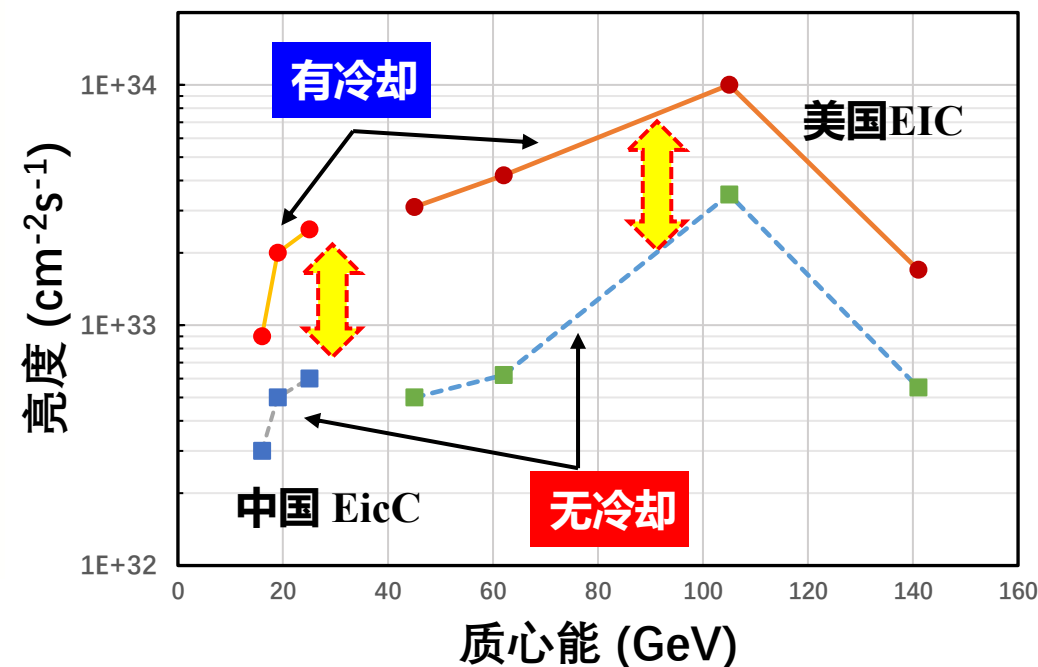


### Studies of electron cooling at DESY

K. Balewski<sup>a,\*</sup>, R. Brinkmann<sup>b</sup>, Y. Derbenev<sup>a</sup>, K. Floettmann<sup>a</sup>, P. Wesolowski<sup>b</sup>,  
M. Gentner<sup>b</sup>, D. Husmann<sup>b</sup>, C. Steier<sup>b</sup>

<sup>a</sup>DESY, D-22607 Hamburg, Germany  
<sup>b</sup>Universität Bonn, Physikalisches Institut, D-53115 Bonn, Germany

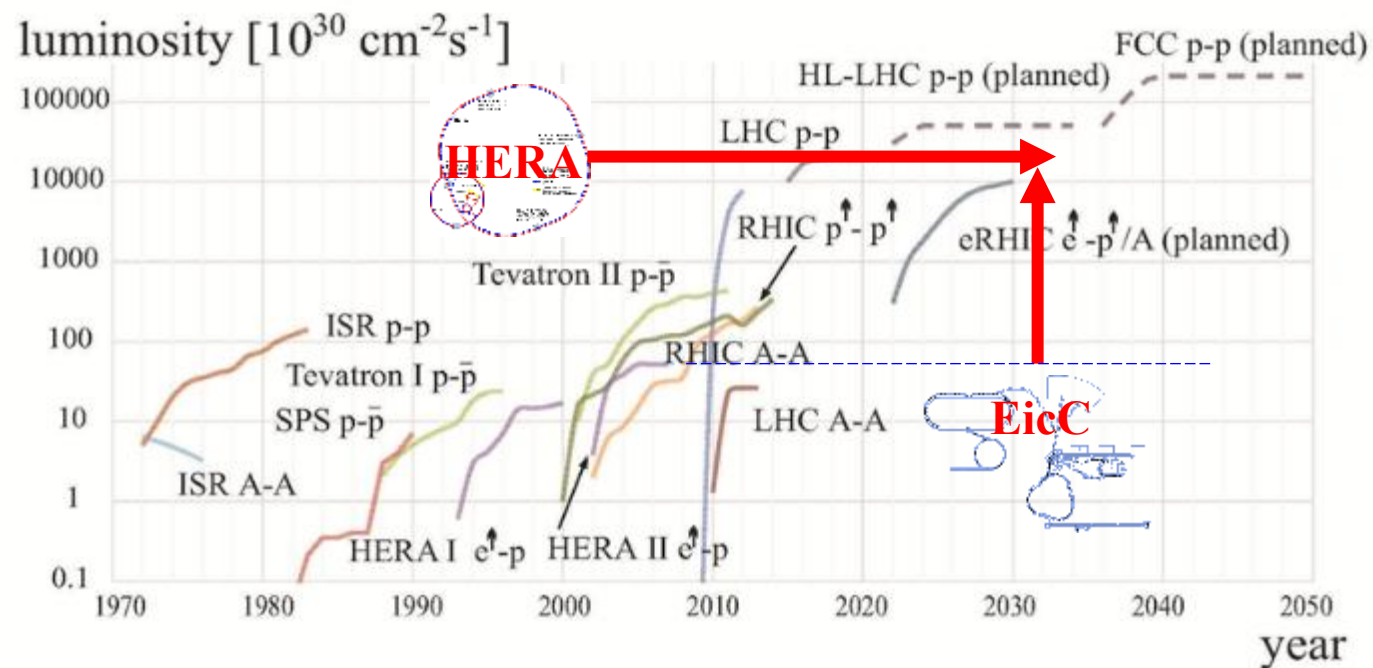
## 束流冷却可将EicC实验亮度提升数倍



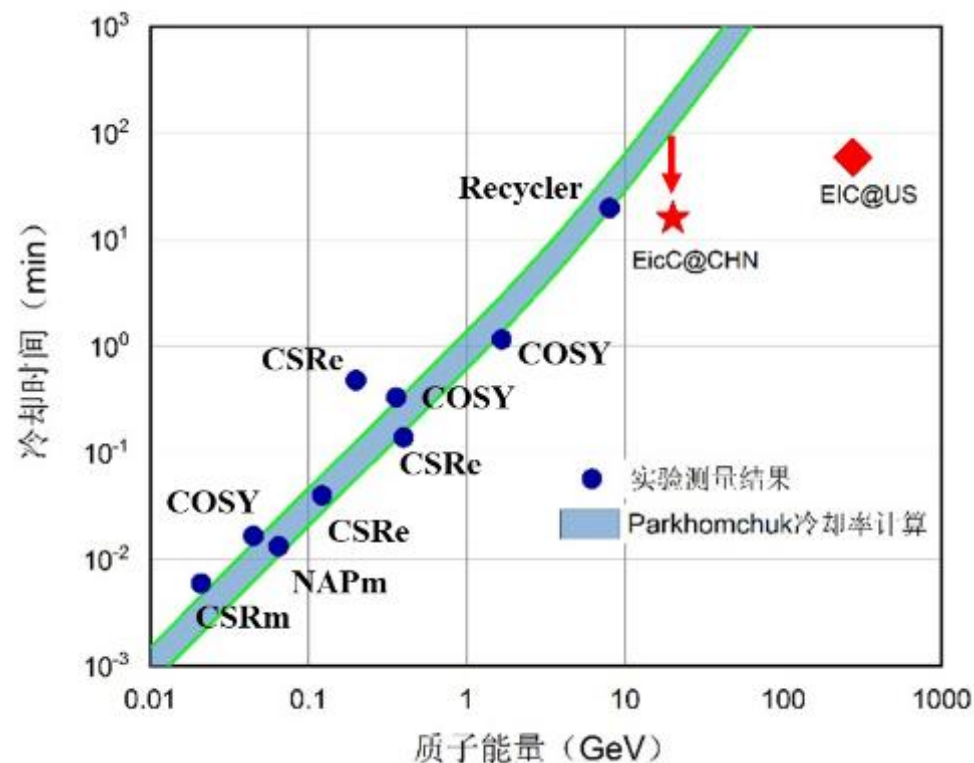
## ➤ 对撞、极化与束流冷却

### ■ 高能束流冷却是实现EicC高亮度对撞指标的重大技术挑战

HERA升级之后的最高峰值亮度为 $5.1 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，最早提出了高能束流冷却的需求，2007年关闭



EicC对束流冷却速率的要求比现有技术高数倍 (~5倍)



## ■ 基于储存环的电子冷却系统是最具可行性的EicC高能冷却方案

围绕EIC的需求提出了**单环/双环**等多种高能电子冷却设计方案

### High-energy Electron Cooling for EIC

Several approaches based on conventional **Electron Cooling**, were considered in the past:

#### 1. Induction Linac based Ring cooler (FNAL):

V. Lebedev, S. Nagaitsev et al., "CDR: A ring-based electron cooling for EIC", JINST 16 T01003 (2021).

#### 2. Dual-ring electron accelerator (JLAB):

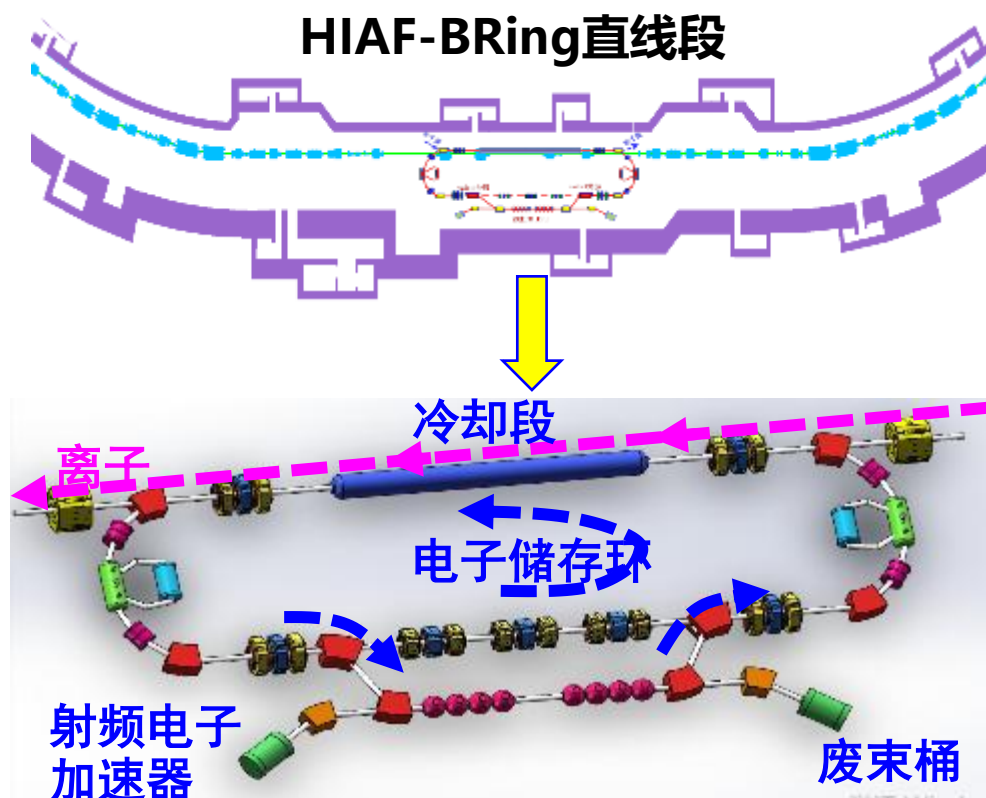
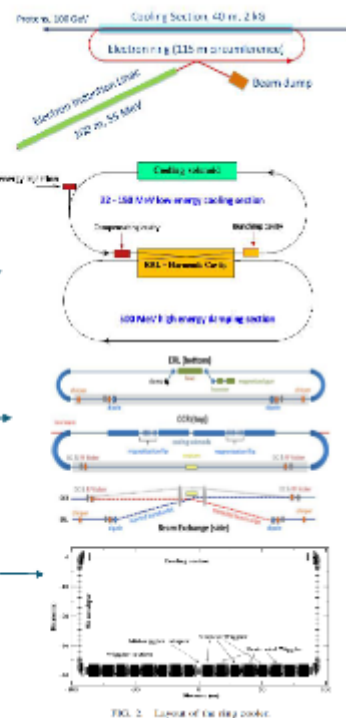
B. Dhital et al., "Beam dynamics study in a dual energy storage ring for ion beam cooling", Proc. IPAC21, TUXA07 (2021).

#### 3. ERL-based Circulator Ring (JLAB):

S. Benson et al., ERL19, LINAC20 presentations

#### 4. Storage Ring electron cooler (BNL):

H. Zhao, J. Kewisch et al., "Ring-based electron cooler for high energy beam cooling", PRAB 24, 043501 (2021)



## ■ 基于储存环的电子冷却系统是最具可行性的**EicC**高能冷却方案

围绕EIC的需求提出了**单环/双环**等多种高能电子冷却设计方案

### High-energy Electron Cooling for EIC

Several approaches based on conventional **Electron Cooling**, were considered in the past:

#### 1. Induction Linac based Ring cooler (FNAL):

V. Lebedev, S. Nagaitsev et al., "CDR: A ring-based electron cooling for EIC", JINST 16 T01003 (2021).

#### 2. Dual-ring electron accelerator (JLAB):

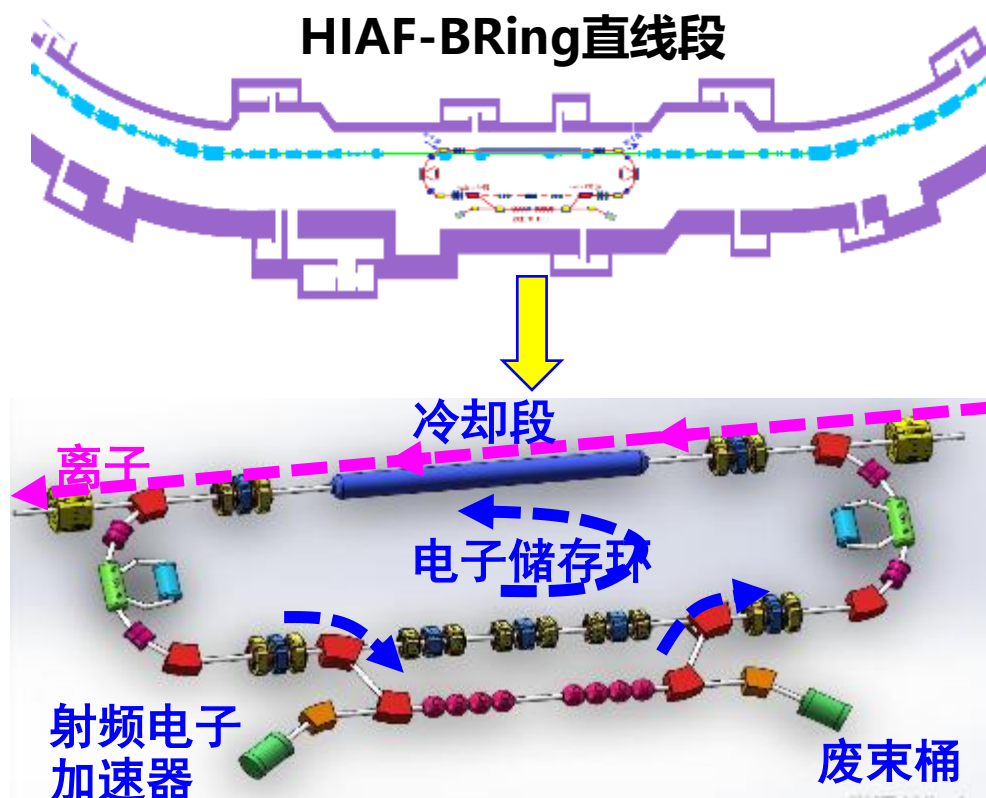
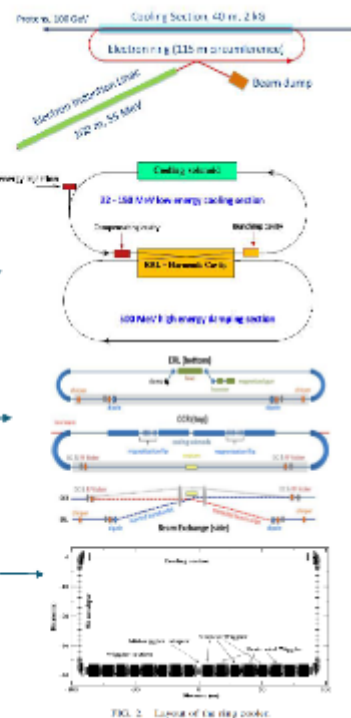
B. Dhital et al., "Beam dynamics study in a dual energy storage ring for ion beam cooling", Proc. IPAC21, TUXA07 (2021).

#### 3. ERL-based Circulator Ring (JLAB):

S. Benson et al., ERL19, LINAC20 presentations

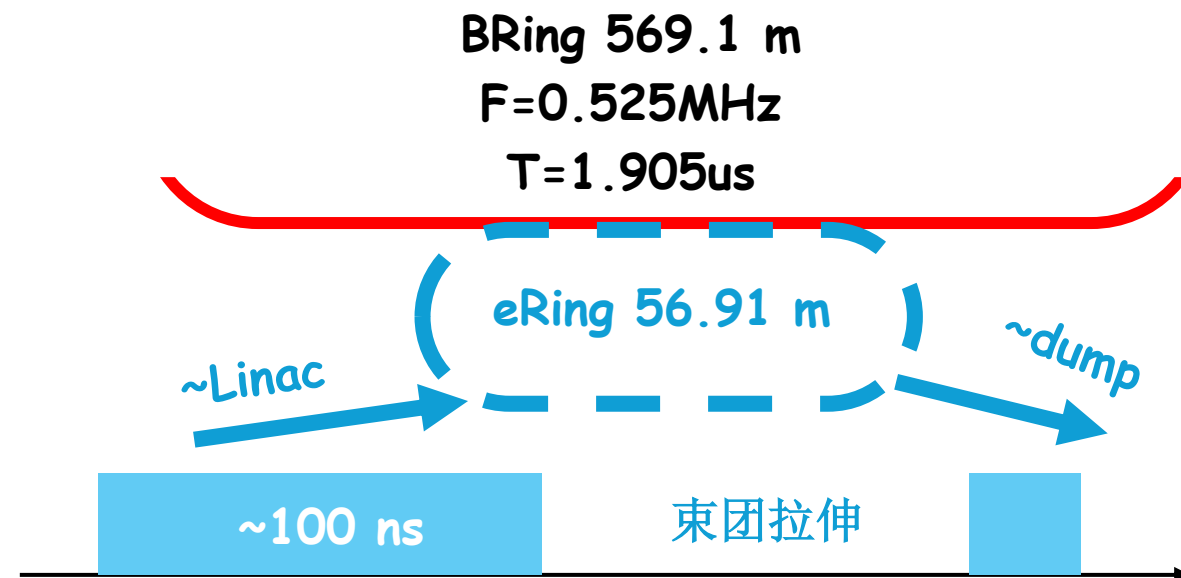
#### 4. Storage Ring electron cooler (BNL):

H. Zhao, J. Kewisch et al., "Ring-based electron cooler for high energy beam cooling", PRAB 24, 043501 (2021)



## ➤ 对撞、极化与束流冷却

### ■ BRing高能电子冷却原理验证方案



#### Linac e beam:

$E_k = 5.066 \text{ MeV}$

宏束团长度 = 100 ns,

微束团个数 = ~70

电荷量 = 200 pC/bunch,

峰值流强 = 140 mA,

宏束团重复频率 = 525 kHz

平均流强 = 7.35 mA

束流功率 = 37.3 kW

to ring



#### Ring e beam:

$E_k = 5.066 \text{ MeV}$

储存时间 = ~10 000 turns

注入频率 = 525 Hz

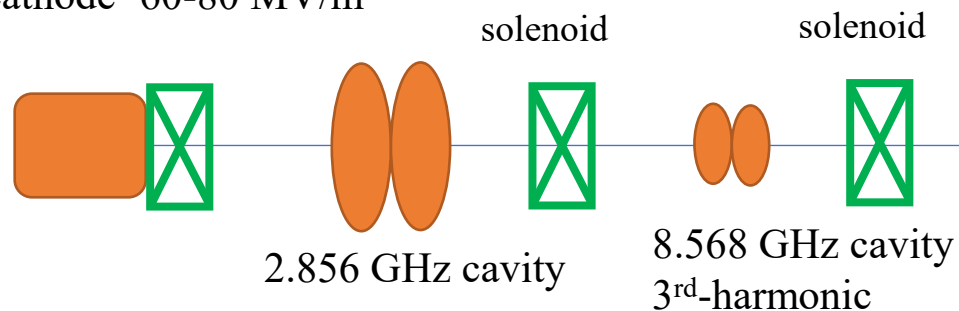
注入器功率 = 37.3 W

# ➤ 对撞、极化与束流冷却

## ■ 直线注入器束团拉伸与能散降低

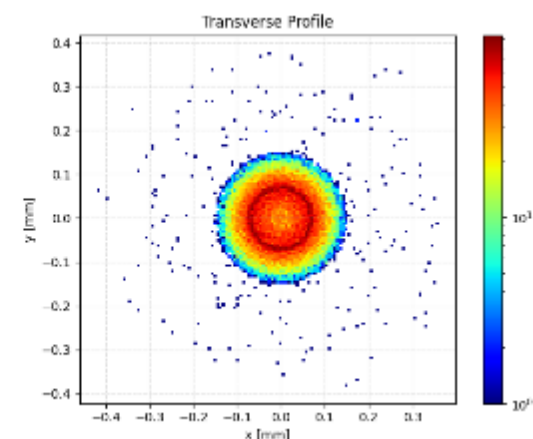
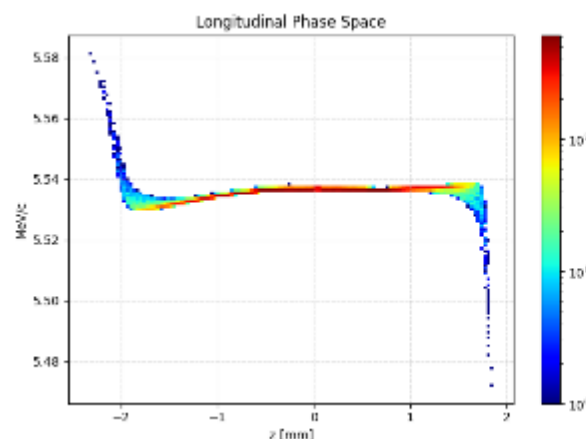
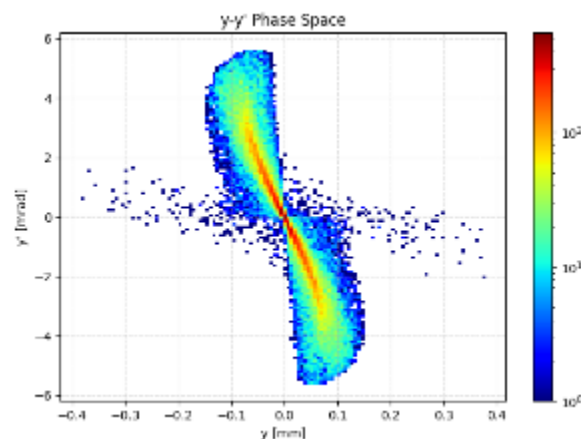
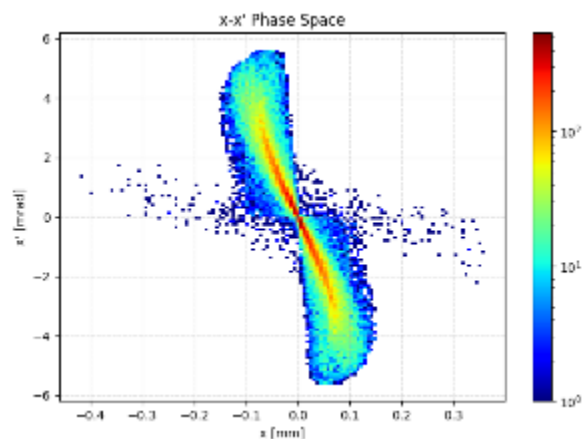
2.856 GHz photocathode gun

Ecathode=60-80 MV/m



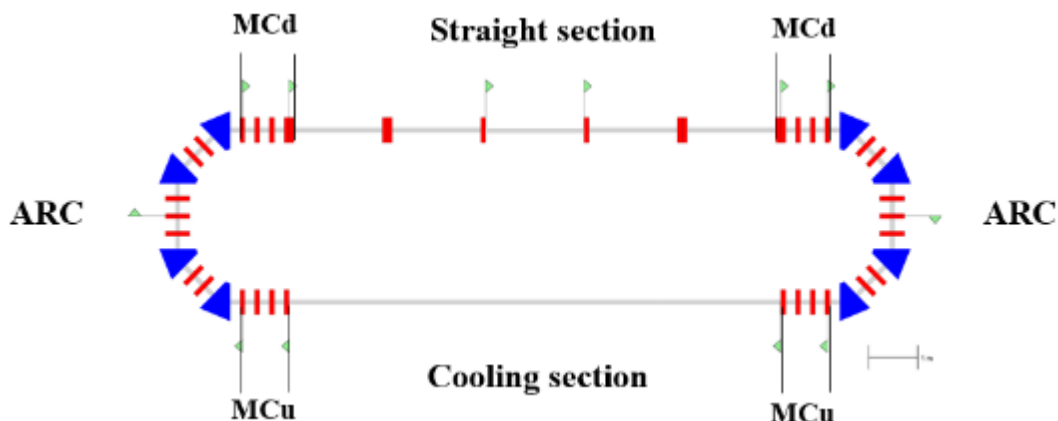
- ✓ Energy chirper (ballistic stretching)
- ✓ Energy chirper + chicane

能量: 5.06 MeV  
束团长度: 30 ps  
电荷量: 100 pC  
发射度: <2  $\mu\text{m}$   
能散: <5 $\times 10^{-4}$



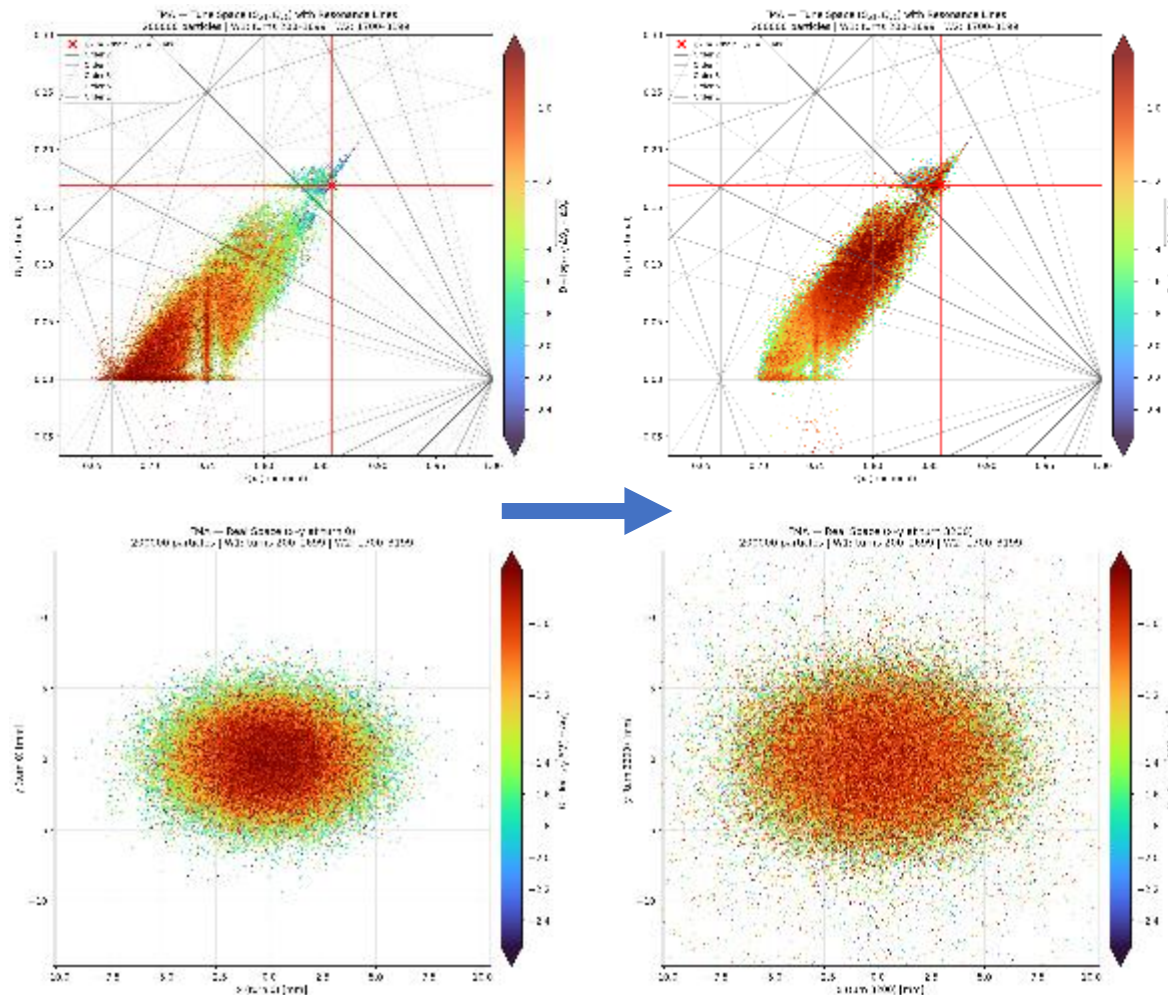
## ■ 低能电子储存环动力学

低能电子束空间电荷效应和束内散射效应  
导致储存寿命极地 (~1000圈)



半环长度参数表

| 结构            | 半环长度/m  |
|---------------|---------|
| 冷却段 halfcool  | 10.00   |
| 匹配段MCu        | 1.75    |
| 弧段 ARC        | 4.9708  |
| 匹配段 MCd       | 1.70    |
| 直线段 halfdrift | 10.05   |
| 合计            | 28.4708 |



- 强流重离子加速器装置HIAF达到设计指标，完成工艺测试，进入试运行阶段；
- EicC作为HIAF升级计划的重要组成部分，面临亮度、极化和束流冷却等方面的巨大挑战；
- 移动聚焦方案、固定场西伯利亚蛇极化保持方案、电子环高能冷却方案等新型束流物理设计思路在不断探索之中；
- 基于HIAF的EicC装置能够成为中国下一代离子加速器装置的发展方向之一。



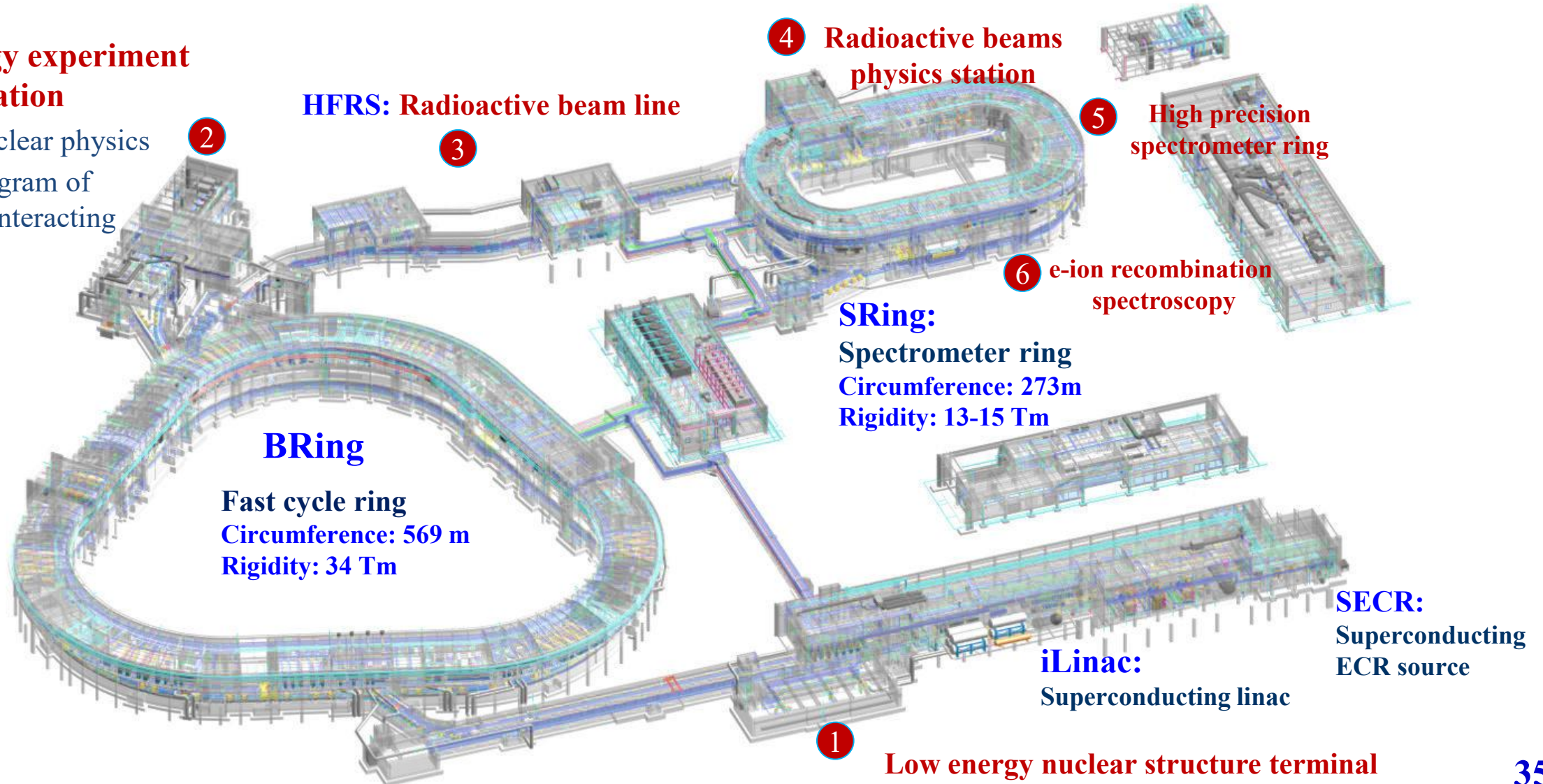
**欢迎大家莅临HIAF指导！**

## □ Experimental terminals

### - Distribution of 6 experimental terminals

#### High energy experiment station

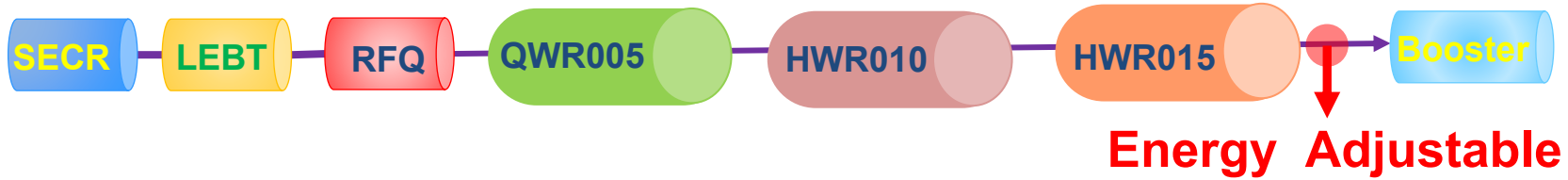
- Hyper nuclear physics
- Phase diagram of strongly interacting matter



## □ Experimental terminals

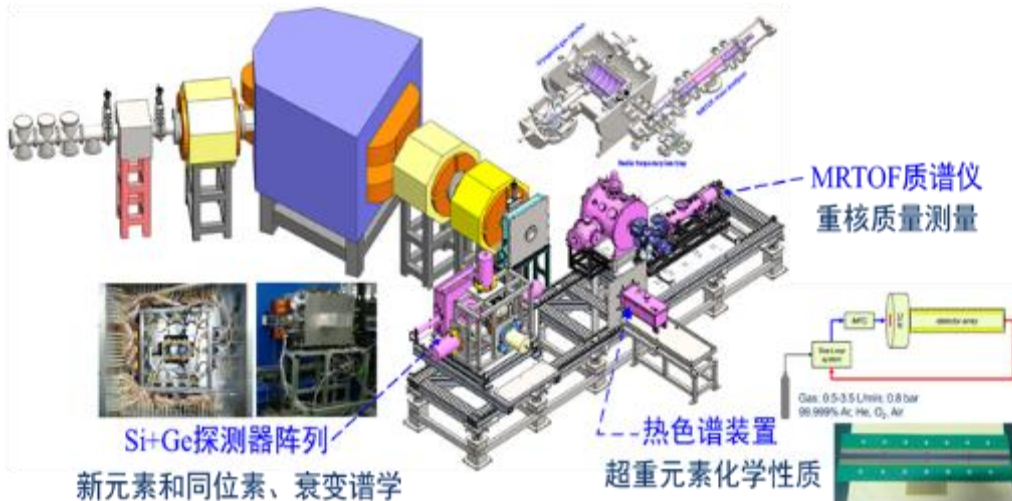
- Low energy nuclear structure terminal

Use the CW beam provided by iLinac for **new element discovery**



CW mode:

10 pμA beams with  $A/Q=2\sim5$



Gas-filled recoil separator



# Experimental terminals

Typical beam parameters from the Booster Ring

- High energy experimental station

| Ions                    | Energy(GeV/u) | Intensity (ppp)      |
|-------------------------|---------------|----------------------|
| p                       | 9.3           | $2.0 \times 10^{12}$ |
| $^{18}\text{O}^{6+}$    | 2.6           | $6.0 \times 10^{11}$ |
| $^{78}\text{Kr}^{19+}$  | 1.7           | $3.0 \times 10^{11}$ |
| $^{209}\text{Bi}^{31+}$ | 0.85          | $1.2 \times 10^{11}$ |
| $^{238}\text{U}^{34+}$  | 0.8           | $1.0 \times 10^{11}$ |



Pulsed beam from BRing



The External Target Experiment Setup



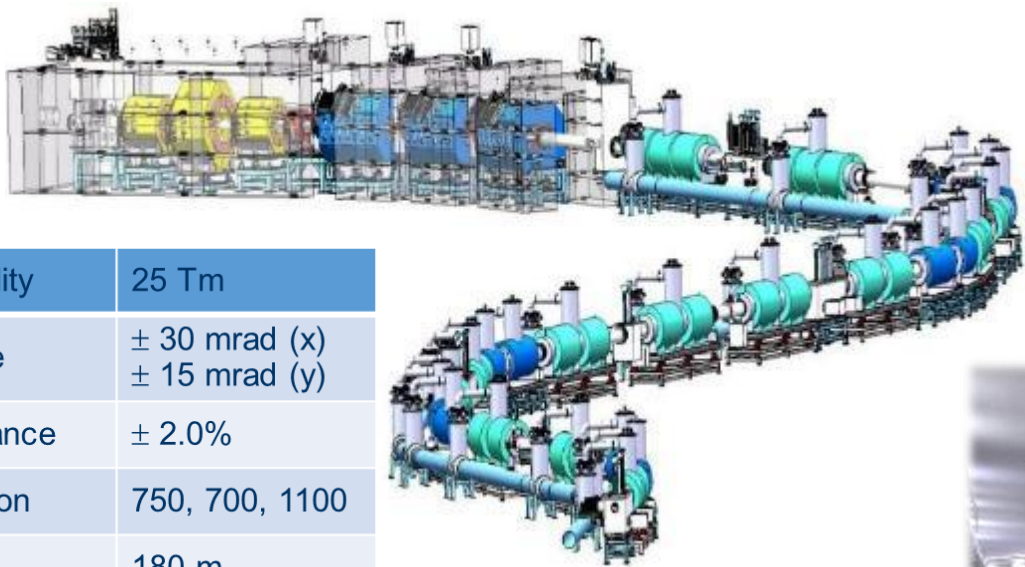
Study of the QCD Phase Structure



Hyperon-Nucleon Spectrometer (H-NS)

# Experimental terminals

## - High Energy Fragment Separator (HFRS)

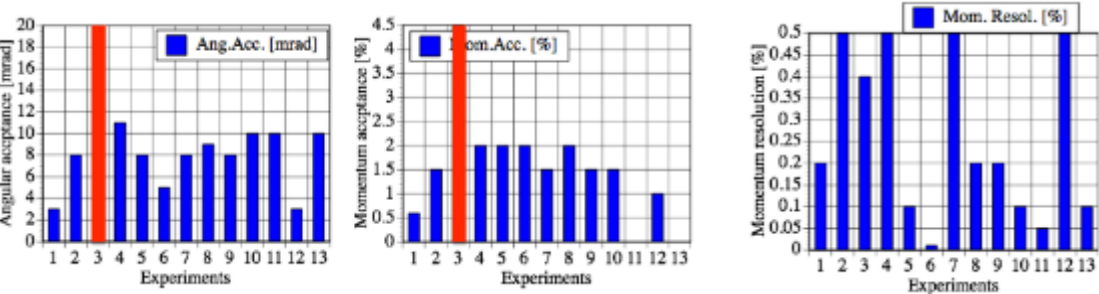


|                        |                                        |
|------------------------|----------------------------------------|
| Max. magnetic rigidity | 25 Tm                                  |
| Angular acceptance     | $\pm 30$ mrad (x)<br>$\pm 15$ mrad (y) |
| Momentum acceptance    | $\pm 2.0\%$                            |
| Momentum resolution    | 750, 700, 1100                         |
| Total length           | 180 m                                  |

## Physics Cases @HFRS

- ✓ New isotopes in the south east of  $^{208}\text{Pb}$  (PF of  $^{208}\text{Pb}$  and  $^{238}\text{U}$ )
- ✓ Neutron dripline up to Ni isotopes (PF of Kr and Xe)
- ✓ New isotopes by  $^{238}\text{U}$  fission (In-flight fission of  $^{238}\text{U}$ )
- ...

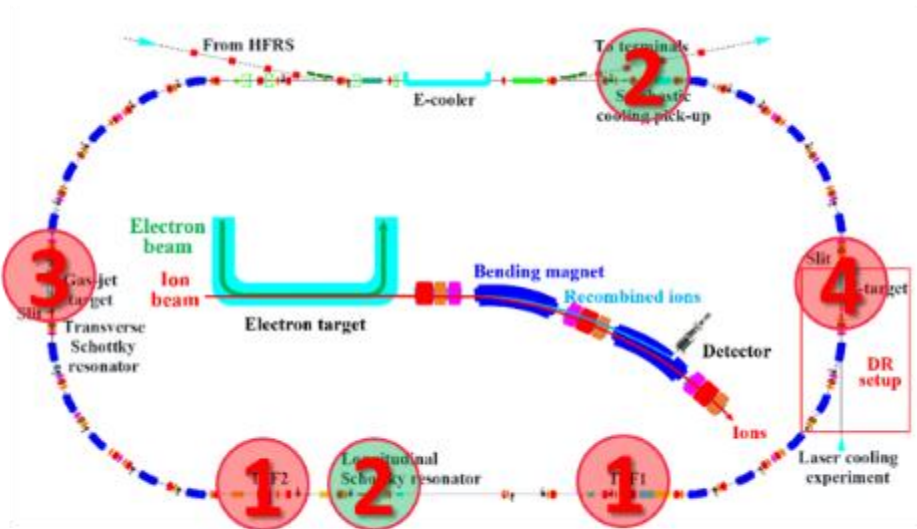
## Requirements from Physics



Acceptance, and Momentum Resolution

## □ Experimental terminals

### - Spectrometer Ring: Multi Working Modes of Storage Ring



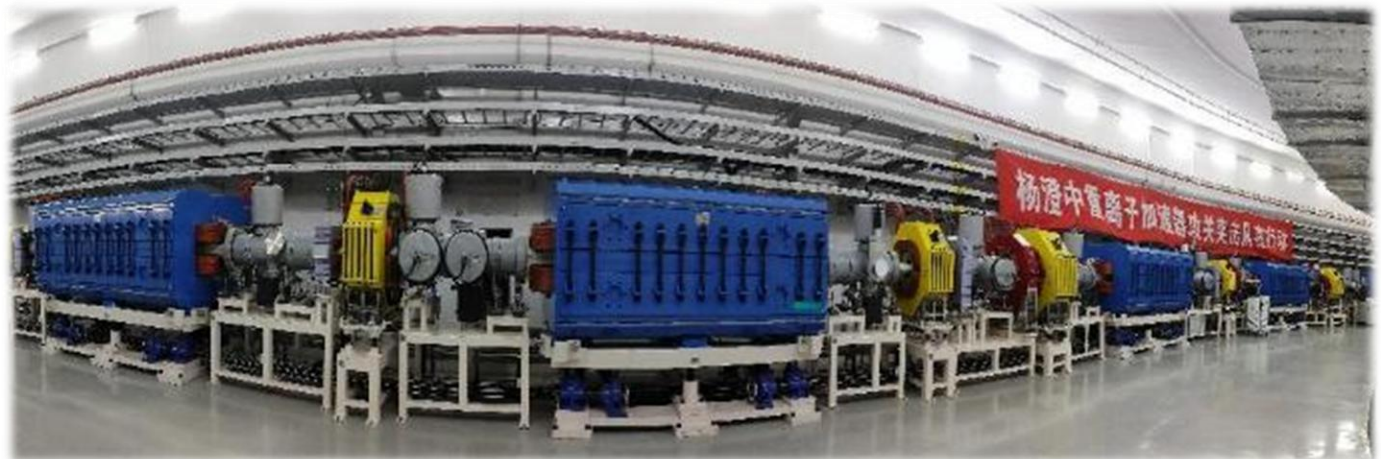
With fast extracted projectiles from the Booster, HFRS produces, separates and injects the isotopes of interests into the Spectrometer Ring

### Experiments:

- Isochronous Mass Spectroscopy
- Schottky Spectroscopy
- DR Spectroscopy
- In-ring Nuclear Reactions

### Spectrometer Ring:

- Circumference: 273 m
- Rigidity: 15 Tm
- Electron cooler
- Stochastic cooler



# □ Protons

## The Energy Transition Factor

denoted by  $\gamma_t$  is a fundamental parameter that describes the relationship between a particle's momentum and its revolution frequency in a circular accelerator.

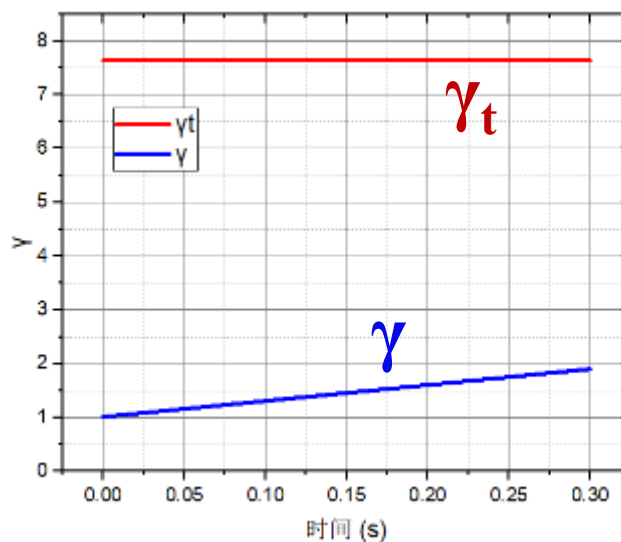
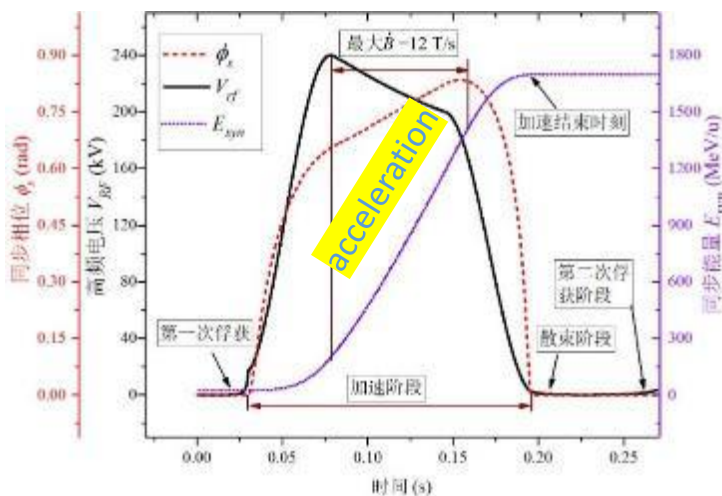
$$\gamma < \gamma_t$$

Higher energy particles move “faster” than lower energy particles

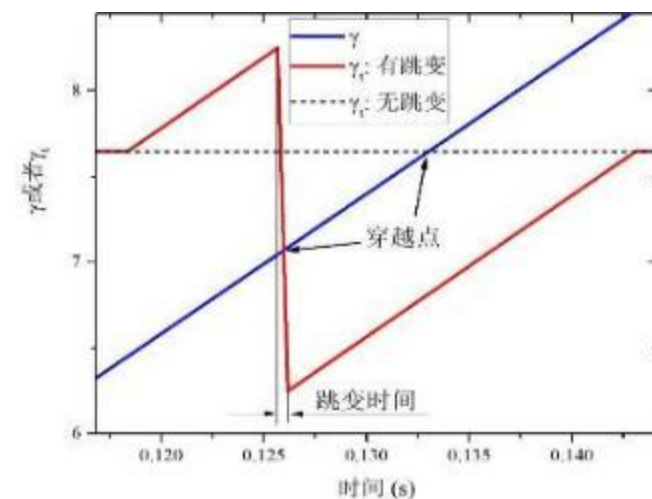
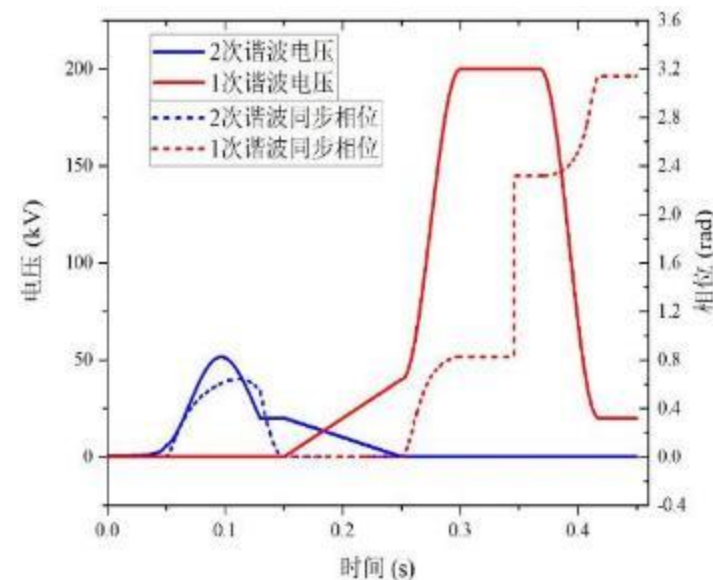
$$\gamma > \gamma_t$$

Higher energy particles move “slowly” than lower energy particles

## - Heavy ion acceleration



## - Proton acceleration



□ Future plan

| Institution | Facilities        | Time      | Reference ion                            | Energy                 | Intensity or power                          |
|-------------|-------------------|-----------|------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------|
| GSI         | FAIR SIS100       | 2025      | $^{238}\text{U}^{28+}$                   | 2. 7 GeV/u             | $5 \times 10^{11}$ ppp                      |
| MSU         | FRIB              | 2021      | $^{238}\text{U}^{76-80+}$                | 200 MeV/u              | CW 13 pμA                                   |
| JINR        | NICA-Booster      | 2023      | $^{197}\text{Au}^{32+}$                  | 4. 5 GeV/u             | $4 \times 10^9$ ppp                         |
| IMP         | HIAF              | 2025-2027 | $^{238}\text{U}^{35+}$                   | 0. 8 GeV/u             | $1.0\text{-}2. 0 \times 10^{11}$ ppp        |
|             |                   |           | $^{238}\text{U}^{76+}$                   | 2. 45 GeV/u            | $0.5\text{-}1.0 \times 10^{11}$ ppp         |
|             |                   |           | <b>p</b>                                 | <b>9.3 GeV/u</b>       | <b><math>5 \times 10^{13}</math></b>        |
|             | HIAF-U<br>BRing-S | 2027-2032 | <b><math>^{238}\text{U}^{35+}</math></b> | <b>2. 95 GeV/u</b>     | <b><math>2. 0 \times 10^{12}</math> ppp</b> |
|             |                   |           | <b><math>^{238}\text{U}^{76+}</math></b> | <b>7. 3 GeV/u</b>      | <b><math>1.0 \times 10^{12}</math> ppp</b>  |
|             |                   |           | <b><math>^{238}\text{U}^{92+}</math></b> | <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>1.0 \times 10^{14}</math></b>      |
|             | HIAF-U<br>MRing   | 2027-2032 | $^{238}\text{U}^{92+}$                   | 4. 4 GeV/u             | $2 \times 10^{12}$ ppp                      |
|             | HIAF-U<br>iLinac  | 2027-2032 | $^{238}\text{U}^{46+}$                   | 150-200 MeV/u          | 1 emA                                       |
|             | HIAF-ISOL         | 2027-2032 | <b>H<sup>-</sup>, H<sup>+</sup></b>      | <b>0. 5-1. 0 GeV/u</b> | <b>5-10 mA<br/>(2.5~10 MW)</b>              |