



# EicC进展与加速器设计

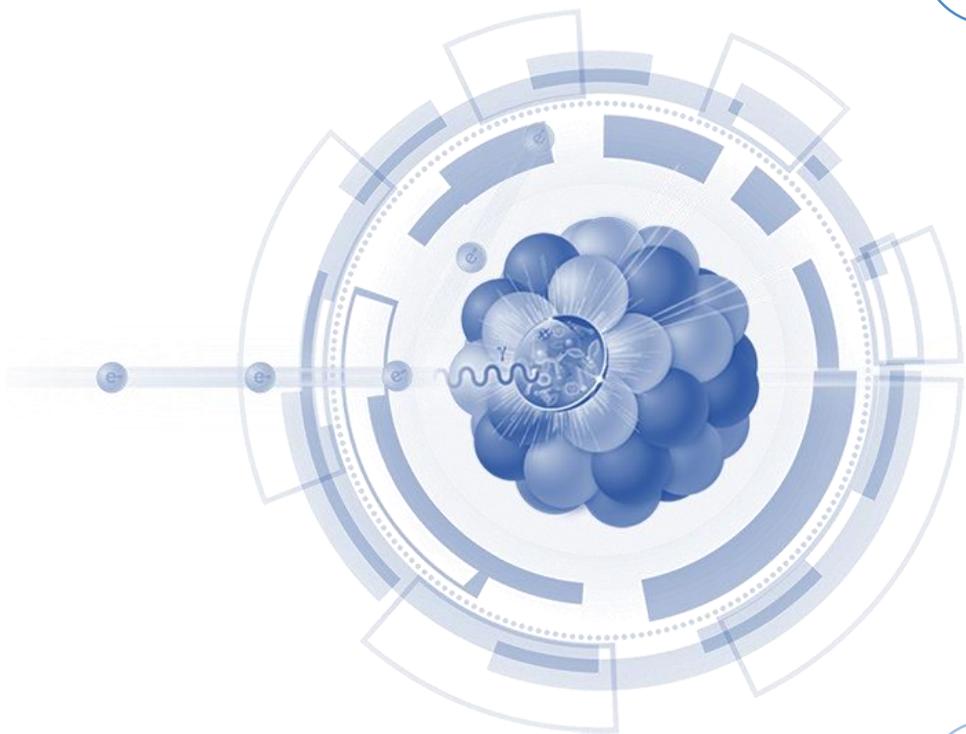
**冒立军**

**代表HIAF及EicC加速器团队**

**中国科学院近代物理研究所**

**2024年超级陶粲装置研讨会**





1 电子离子对撞与HIAF

2 EicC装置总体设计

3 离子加速器及对撞环

4 电子加速器及对撞环

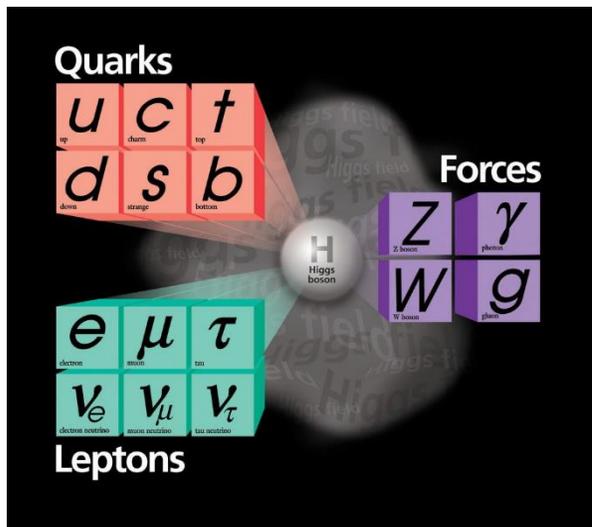
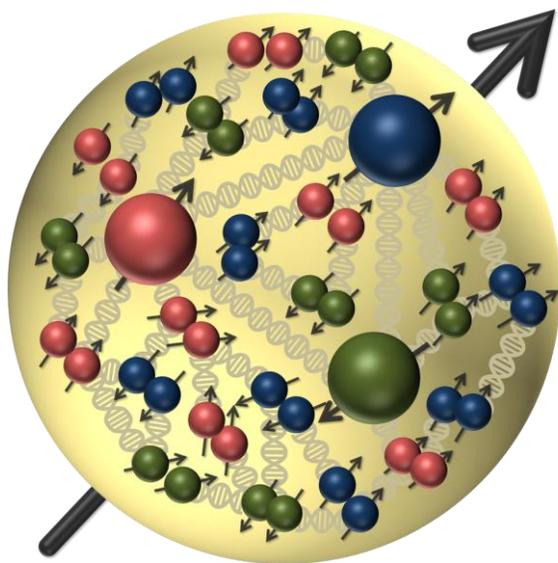
5 极化设计

6 电子冷却方案

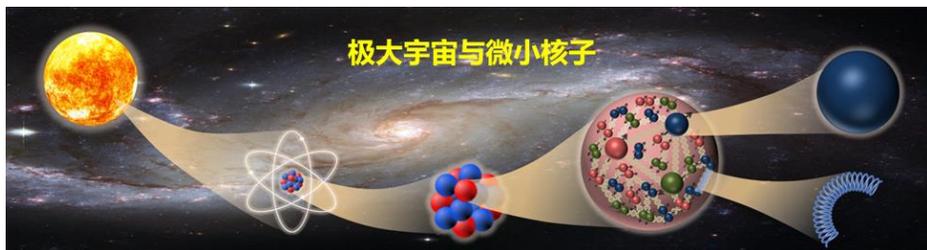
# 1. 电子离子对撞与HIAF



核子作为可见物质世界的主要基础构建单元，具有复杂的夸克和胶子内部结构。对核子结构的研究是人们认识物质结构的最前沿领域，还有一系列**根本性的重大问题有待解决**

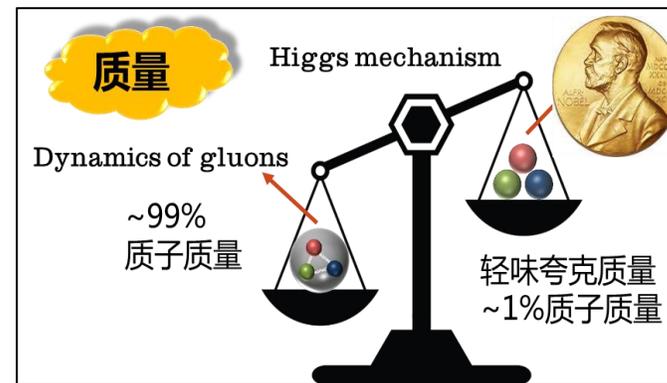


标准模型(SM)成功描述微观世界物质的基本单元和相互作用

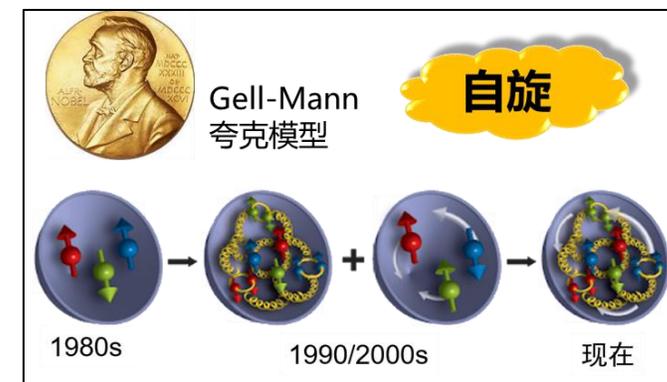


对理解大到宇宙起源和演化、中子星内部结构，小到核力本质、核子结构都具有重大意义

## 质子质量来源?



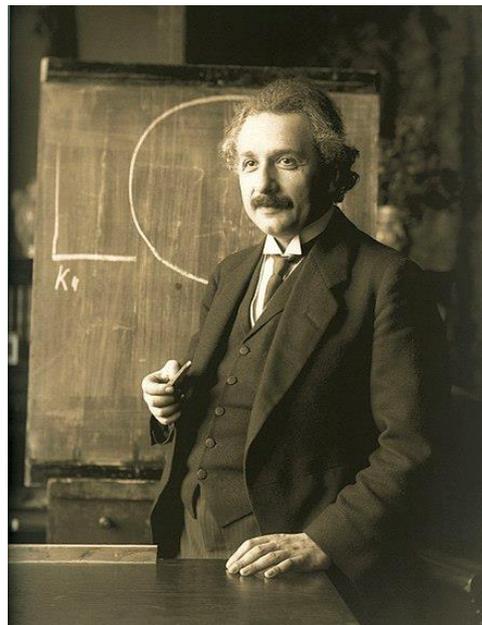
## 质子自旋结构?



# 1. 电子离子对撞与HIAF



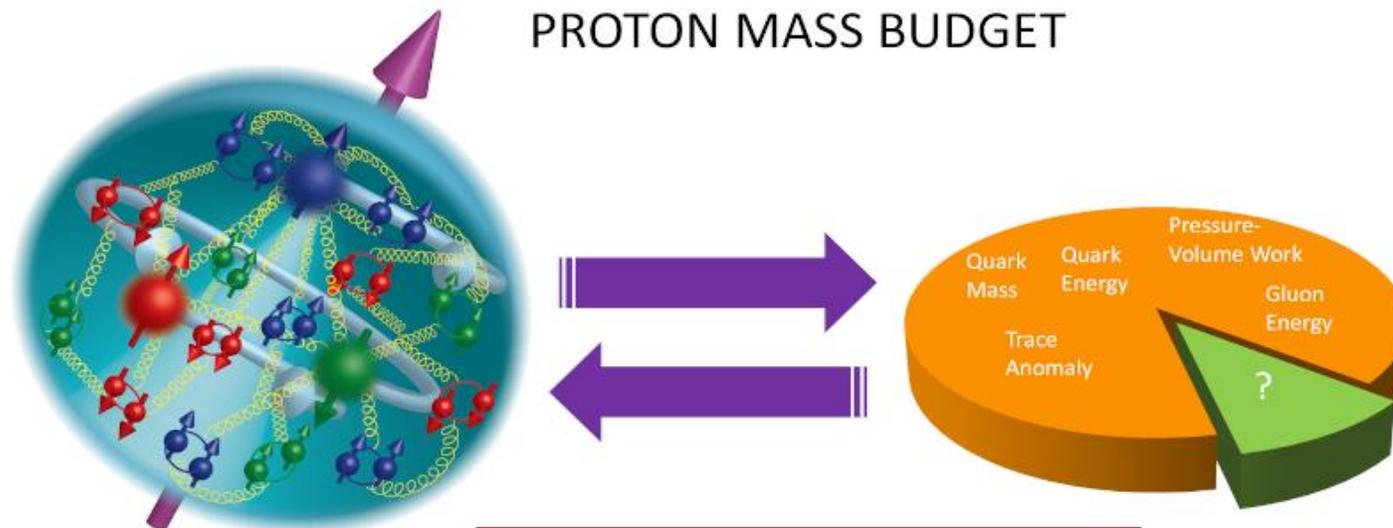
Is die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?  
von A. Einstein.



物体的惯性质量是否取决于它的能量含量?

爱因斯坦质能关系

$$m = E/c^2$$



质子质量分解:

$$M = M_q + M_m + M_g + M_a$$

夸克能量

夸克质量

胶子能量

量子反常能

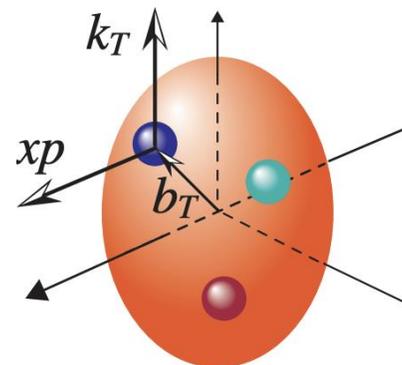
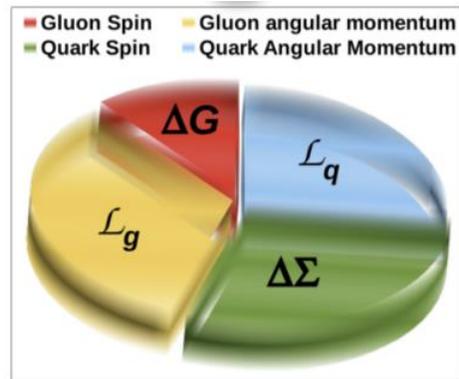
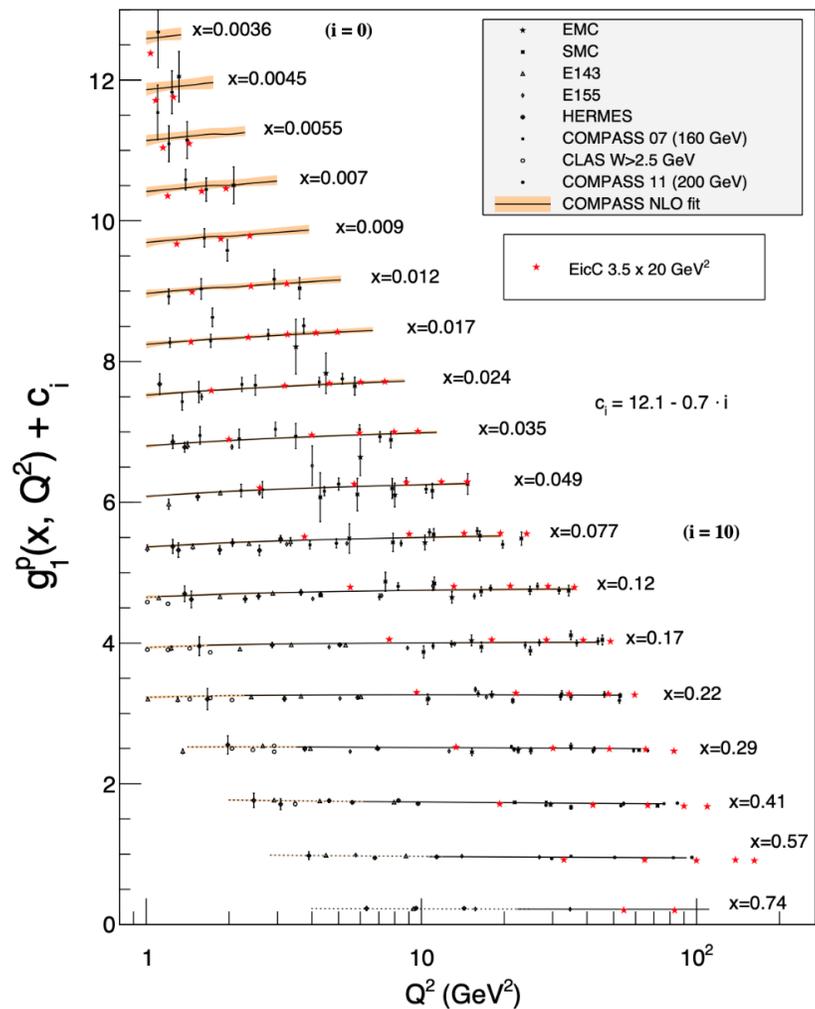
核子质量主要来源于夸克和胶子的相互作用

- 探测夸克和胶子对质子质量的贡献
- 结合希格斯机制 (夸克和轻子质量)

⇒ 明确质子质量的起源!

⇒ 可见物质的质量起源!

# 1. 电子离子对撞与HIAF



$$S_{tot} = \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta \Sigma + \Delta G + \mathcal{L}_q + \mathcal{L}_g$$

夸克自旋

胶子自旋

夸克角动量

胶子角动量

- 精确测定核子极化结构函数，确定夸克和胶子自旋的贡献
- 通过对核子结构的三维立体成像研究，探测夸克胶子的横向运动，研究其轨道角动量

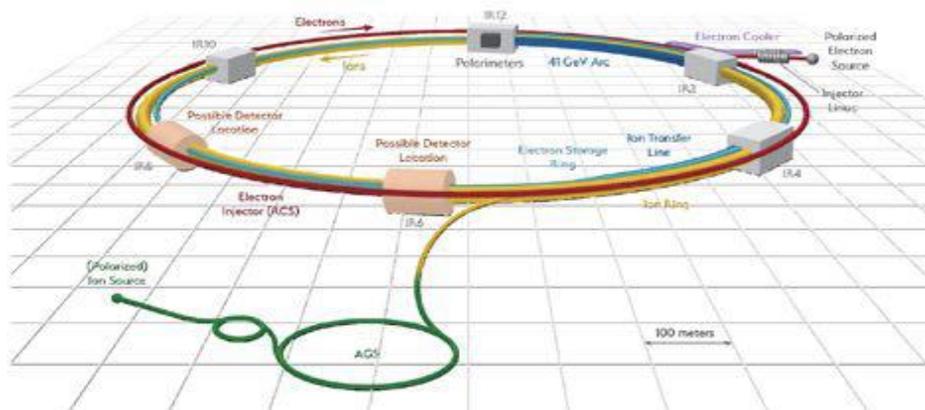
⇒ 明确核子自旋的起源!

# 1. 电子离子对撞与HIAF



**电子-离子对撞机**是国际公认的研究核子结构和核子内夸克胶子分布的**最有效实验装置**，全球高能核物理界竞争激烈的前沿领域

美国已确定EIC是其核物理发展的**重中之重**，并大力加速推进



美国电子离子对撞机-EIC

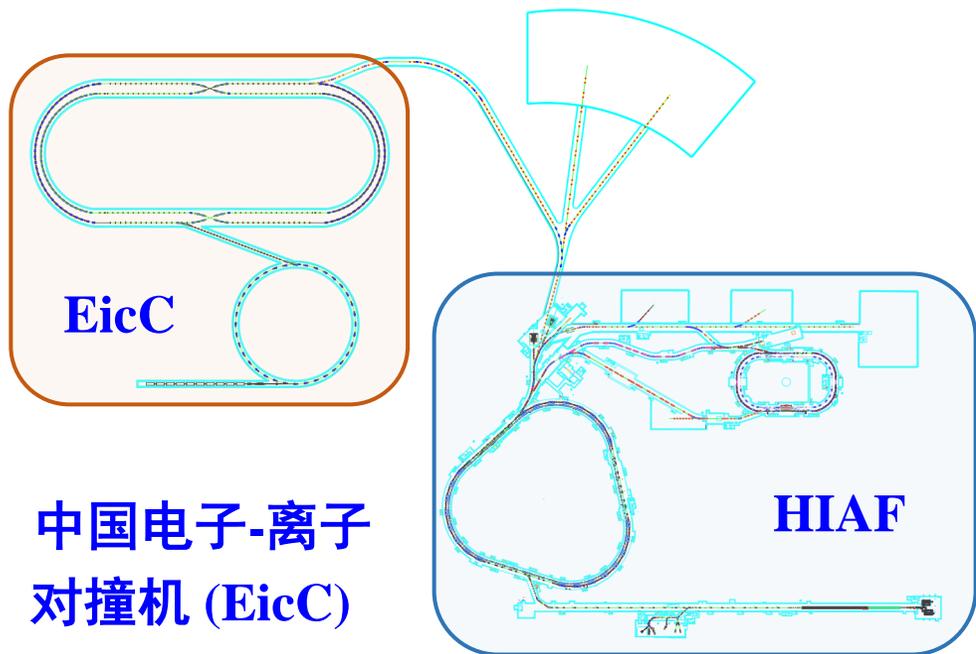
质心能约100GeV，聚焦胶子主导的高能区域，31国家，230单位，1200研究人员

LHeC和ENC等其他电子离子对撞装置也在规划、设计中



2020年1月9日，美国能源部宣布：选定位于纽约州的布鲁克海文国家实验室承建大型核物理研究设施-电子离子对撞机EIC

# 1. 电子离子对撞与HIAF



中国电子-离子对撞机 (EicC)

HIAF

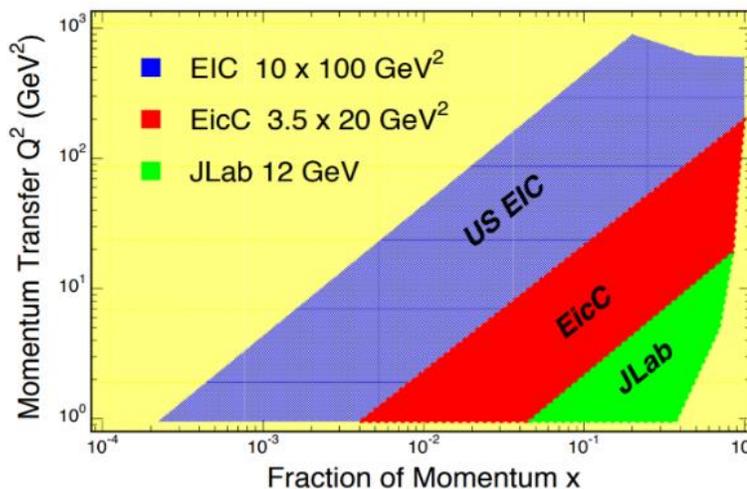
**强烈共识：** 建造电子-离子对撞机对实现我国在核物理前沿及交叉研究领域的领先地位，取得重大原创性成果有重大意义

## 指标领先：

	HERA	EIC	EicC
峰值亮度 ( $10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	0.05	10	4
积分亮度 ( $\text{fb}^{-1}$ )	0.21	100	100
电子极化率	60%	70%	80%
质子极化率	无	70%	70%

高亮度、  
高极化率

## 不可替代：



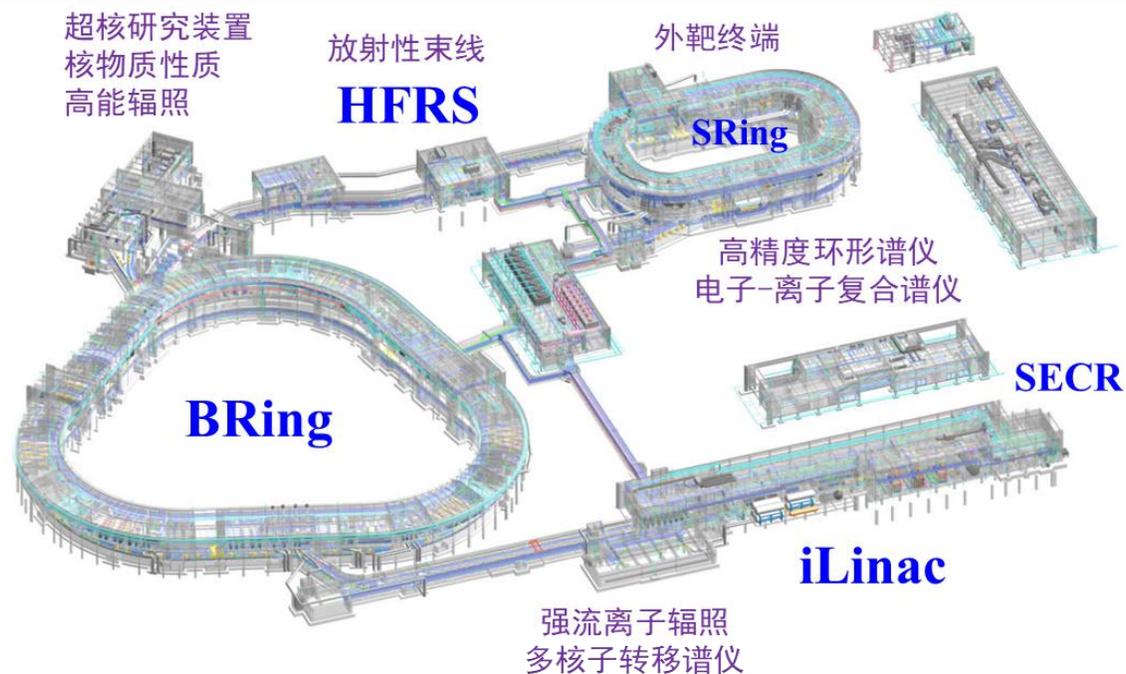
EicC—海夸克结构  
美国EIC—胶子研究  
Jlab-CEBAF—价夸克结构

# 1. 电子离子对撞与HIAF



## 强流重离子加速器HIAF：为EicC 建设提供了前所未有的机会和平台

“十二五”国家重大科技基础设施-强流重离子加速器（HIAF）



占地500亩，束线总长2.5 km，总投资28亿人民币

HIAF装置区航拍图-2024.06.24

**HIAF将在2025年开展调试，并达到验收指标**

# 1. 电子离子对撞与HIAF



HIAF的增强器BRing是国际上脉冲流强最高的快循环重离子同步加速器，  
作为离子注入器，为EicC的建设提供了前所未有的强大平台

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	0.7Hz	U <sup>28+</sup>	$4.0 \times 10^{11}$	/
IMP	HIAF-BRing	3-5Hz	U <sup>35+</sup>	$2.0 \times 10^{11}$	/
IMP	HIAF-SRing	/	U <sup>35+</sup>	$1.0 \times 10^{12}$	/

## □ HIAF装置亮点:

- 国际**首台全** Nb<sub>3</sub>Sn 超导ECR离子源：  
50 pμA (U<sup>35+</sup>)，高电荷重离子流强国际最高
- **毫安级**强流离子超导直线加速器：28 pμA (U<sup>35+</sup>)，脉冲 + 连续波
- 国际**速率最快**非谐振快循环增强器：  
速率 12T/s，频率 3-5 Hz
- 国际**精度最高**多功能原子核质量测量  
谱仪： $\Delta m/m \sim 10^{-8}$

# 1. 电子离子对撞与HIAF



**为EicC提供动力学研究基础和创新技术，将成为动力学、技术研发实验平台**

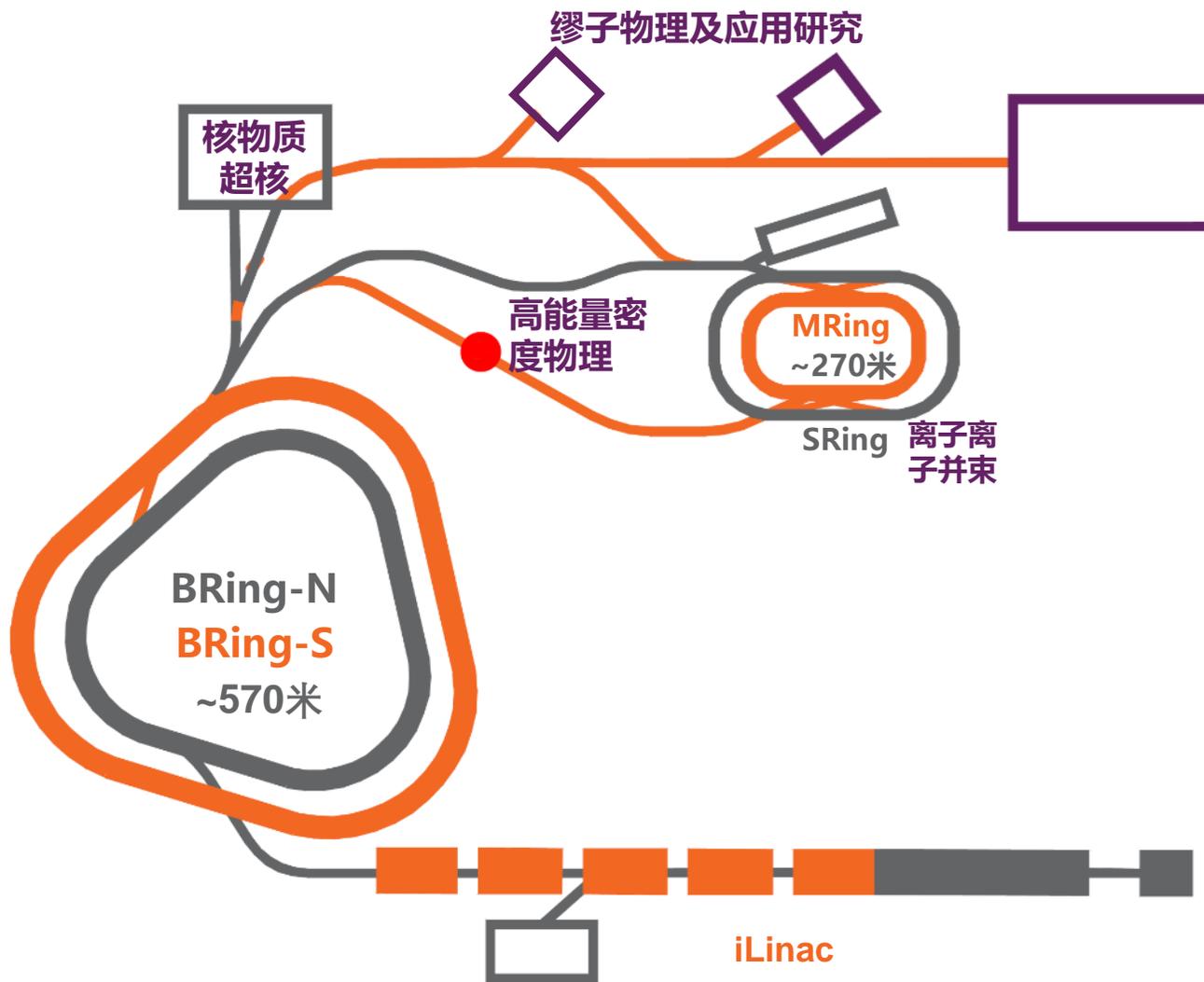
# 1. 电子离子对撞与HIAF



HIAF建成后，将对能量和流强进行进一步升级，为EicC提供满能量注入能力

装置	典型离子(GeV/u)	束流强度(ppp)	建成时间	
FAIR (德国)	2.7	$^{238}\text{U}^{28+}$	$5 \times 10^{11}$	2025
NICA (俄罗斯)	4.5	$^{197}\text{Au}^{32+}$	$4 \times 10^9$	2022
FNAL (美国)	8.0	p	$6.8 \times 10^{13}$	2028
HIAF-U (中国)	3.0	$^{238}\text{U}^{35+}$	$2 \times 10^{12}$	2034
	9.1	$^{238}\text{U}^{92+}$	$1 \times 10^{12}$	
	25	p	$4 \times 10^{14}$	

- iLinac能量升级到200MeV/u
- 建设超导同步加速器环BRing-S,  $B_{\rho_{\max}} = 86\text{Tm}$ , 3Hz
- 建设超导储存环MRing,  $B_{\rho_{\max}} = 45\text{Tm}$



### 科学目标对EicC加速器装置的需求

#### 质心能

- 质子电子对撞质心能可覆盖**12 GeV到25 GeV**中的指定能量点
- 优化质心能为**16.76 GeV**，对应质子**19.08 GeV**，电子**3.5 GeV**
- 离子电子对撞最大质心能由HIAF-U最大磁刚度**86 T m**决定

#### 亮度

- 质子电子对撞峰值亮度高于 **$4.0 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$** ，80%运行时间下全年积分亮度达到 **$100 \text{ fb}^{-1}$**
- 离子-电子对撞瞬时亮度约 **$1.0 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$** ，80%运行时间下全年积分亮度约为 **$20 \text{ fb}^{-1}$**

#### 极化

- 电子平均极化率高于**80%**，质子平均极化率高于**70%**，提供氘和氦的极化束流
- 电子在对撞点处极化方向为**纵向**，束团列之间极化方向**翻转**
- 质子极化方向在对撞点处任意可调，束团列之间极化方向**翻转**

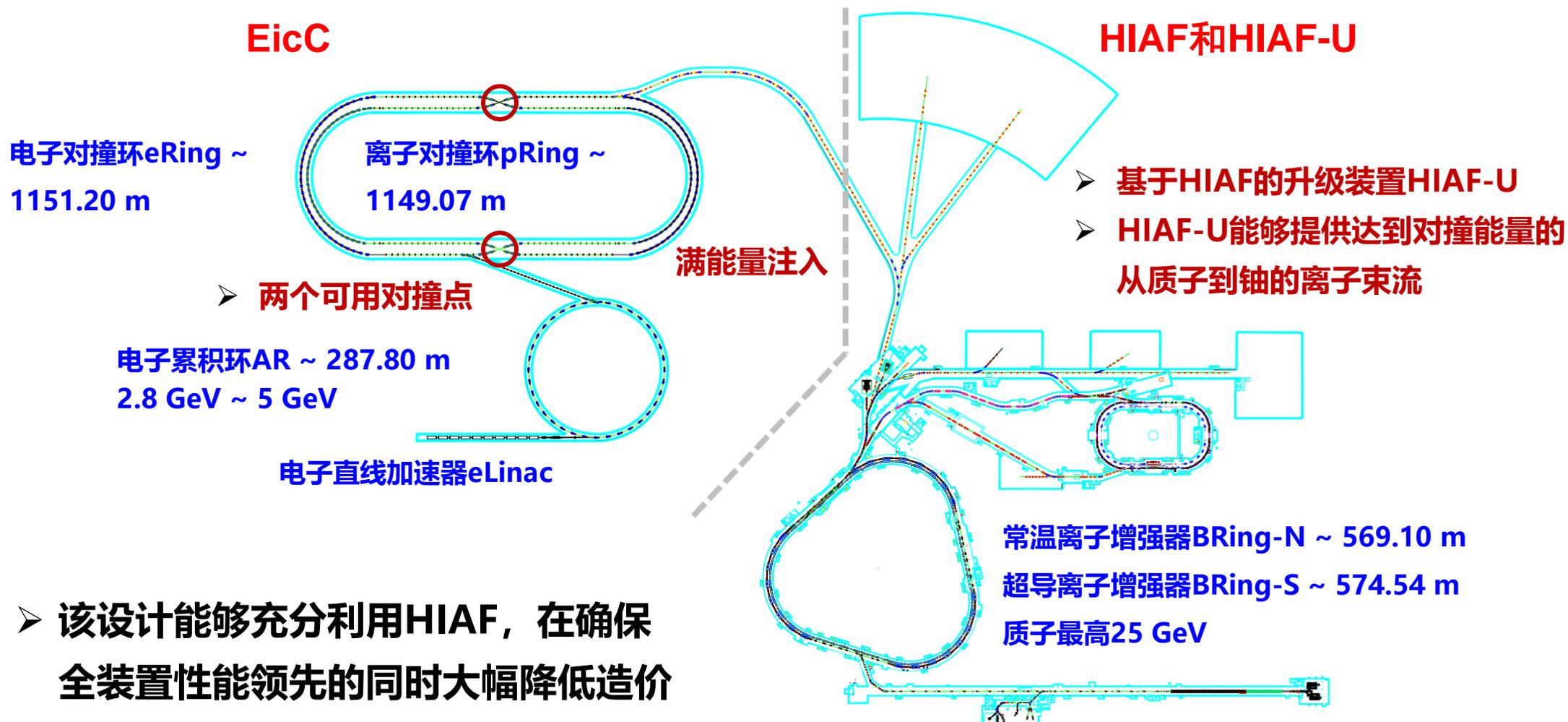
#### 对撞点

- 以一套磁铁实现适用于较大角度产物的高亮度模式和近似全接收度的小角散模式
- 提供**两个对撞点**，建设一个对撞点，保留一个对撞点，留待升级

## 2. EicC装置总体设计



EicC装置采用**等长双对撞点设计**，对撞环均为**满能量注入**



## 2. EicC装置总体设计



Table 1: The main design parameters with maximum luminosity

Parameter	electron	proton
Circumference(m)	1151.20	1149.07
Kinetic energy(GeV)	3.5	19.08
Momentum(GeV/c)	3.5	20
Total energy(GeV)	3.5	20.02
CM energy(GeV)		16.76
$f_{\text{collision}}$ (MHz)		100
Polarization	80%	70%
$B\rho$ (T · m)	11.7	67.2
Bunch intensity( $\times 10^{11}$ )	1.7	1.05
$\epsilon_x, \epsilon_y$ (nm · rad, rms)	50/15	100/50
$\beta_x^*/\beta_y^*$ (cm)	10/4	5/1.2
RMS divergence(mrad)	-	1.4/2.0
Bunch length(cm, rms)	0.75	8
Beam-beam parameter $\xi_x/\xi_y$	0.102/0.118	0.0144/0.01
Laslett tune shift $\Delta\nu_x/\Delta\nu_y$	-	0.066/0.105
Energy loss per turn(MeV)	0.32	-
Total SR power(MW)	0.86	-
Average current(A)	2.7	1.68
Crossing angle(mrad)		50
Hourglass		0.52
Luminosity at nucleon level ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )		$4.25 \times 10^{33}$

### 高亮度模式总体参数:

- 发射度、流强较大, 对撞点beta函数较小, 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  $106 \text{ fb}^{-1}$
- 亮度受限于
  1. 离子环空间电荷频移
  2. 电子环同步辐射功率
  3. 强沙漏效应

## 2. EicC装置总体设计



Table 3: The main design parameters with quasi-full-acceptance

Parameter	electron	proton
Circumference(m)	1151.20	1149.07
Kinetic energy(GeV)	3.5	19.08
Momentum(GeV/c)	3.5	20
Total energy(GeV)	3.5	20.02
CM energy(GeV)		16.76
$f_{\text{collision}}$ (MHz)		100
Polarization	80%	70%
$B\rho$ (T·m)	11.7	67.2
Bunch intensity( $\times 10^{11}$ )	0.44	0.27
$\epsilon_x, \epsilon_y$ (nm·rad, rms)	12.5/3.75	25/12.5
$\beta_x^*/\beta_y^*$ (cm)	10/4	5/1.2
RMS divergence(mrad)	-	0.7/1.0
Bunch length(cm, rms)	0.75	8
Beam-beam parameter $\xi_x/\xi_y$	0.105/0.121	0.015/0.010
Laslett tune shift $\Delta\nu_x/\Delta\nu_y$	-	0.065/0.10
Crossing angle(mrad)		50
Hourglass		0.52
Luminosity at nucleon level ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )		$1.13 \times 10^{33}$

### 近似全接收模式总体参数:

- 发射度、流强较小，对撞点beta函数较大，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  $28 \text{ fb}^{-1}$
- 亮度受限于
  1. 小发射度和低流强
  2. 离子环空间电荷频移
  3. 强沙漏效应

## 2. EicC装置总体设计



在12 ~ 25GeV质心能范围内提供4个额外能量点, 亮度不低于 $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

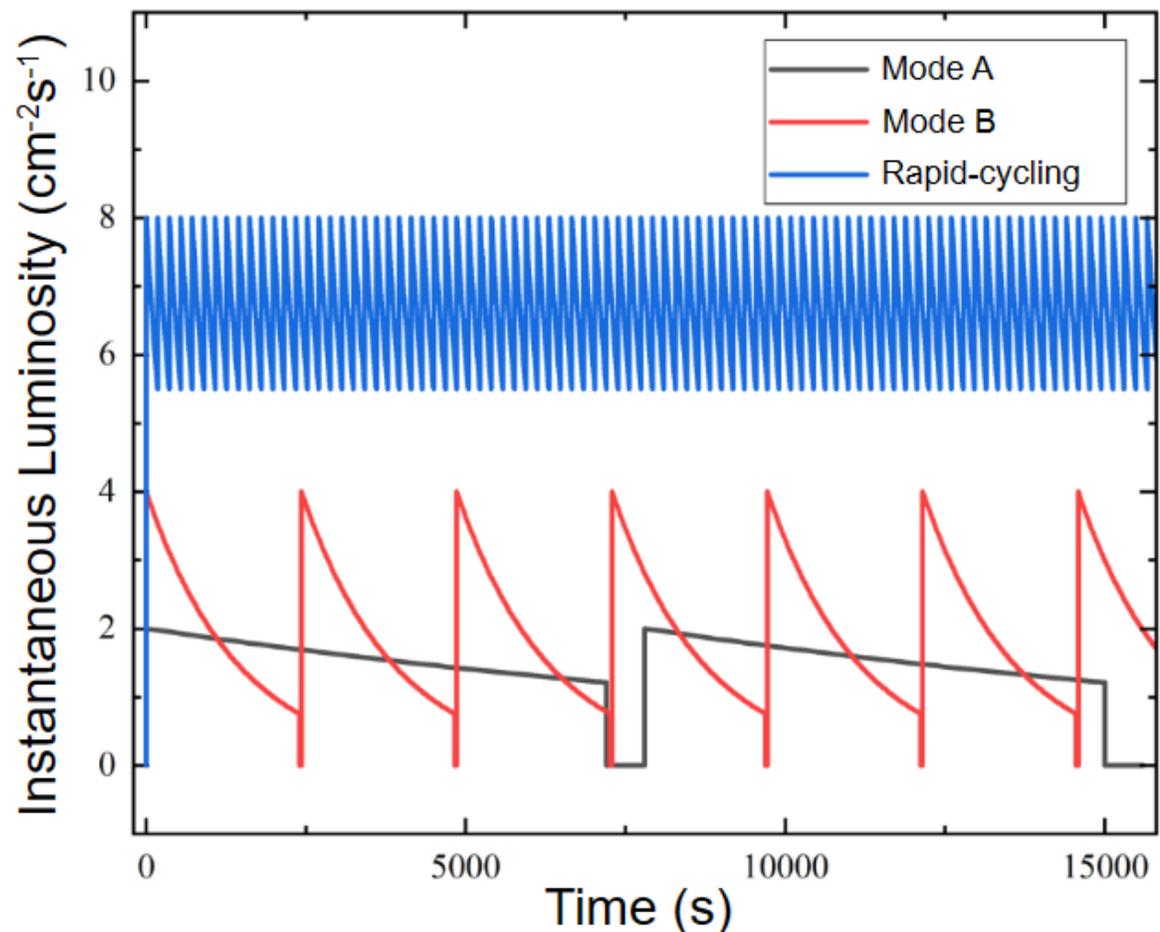
Designs	VE1		VE2		VE3		VE4	
Particle	e	p	e	p	e	p	e	p
Kinetic energy (GeV)	2.8	12	5	12	2.8	25	5	25
Momentum (GeV/c)	2.8	12.9	5	12.9	2.8	25.92	5	25.92
Total energy (GeV)	2.8	12.94	5	12.94	2.8	25.94	5	25.94
CM energy (GeV)	12.07		16.10		17.07		22.79	
$B\rho$ (T·m)	9.34	43.05	16.68	43.05	9.34	86.5	16.68	86.5
Bunch intensity( $\times 10^{11}$ )	1.7	0.4	1.7	0.4	1.7	0.7	1.7	1.2
$\varepsilon_x/\varepsilon_y$ (nm·rad, rms)	80/24	160/80	80/24	160/80	40/12	80/40	40/12	80/40
$\beta_x^*/\beta_y^*$ (cm)	10/4	5/1.2	10/4	5/1.2	10/4	5/1.2	10/4	5/1.2
RMS size [H/V] ( $\mu\text{m}$ )	90/31		90/31		63/22		63/22	
RMS divergence [H/V] (mrad)		1.79/2.58		1.79/2.58		1.27/1.83		1.27/1.83
Bunch length (cm, rms)	0.75	8	0.75	8	0.75	8	0.75	8
BB parameter $\xi_x/\xi_y$	0.031/0.035	0.014/0.010	0.017/0.02	0.014/0.010	0.106/0.123	0.014/0.010	0.102/0.118	0.014/0.010
Laslett tune shift	-	-0.06/-0.095		-0.06/-0.095		-0.025/-0.04		-0.043/-0.068
Luminosity ( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$1.0 \times 10^{33}$ (H=0.52)		$1.0 \times 10^{33}$ (H=0.52)		$3.54 \times 10^{33}$ (H=0.52)		$6.06 \times 10^{33}$ (H=0.52)	

**EicC也将提供最重到铀的离子电子对撞，最低年积分亮度为 $18.6 \text{ fb}^{-1}$**   
**并将实现氦束、氦3束流和电子束流的双极化对撞**

Table 4: Main parameters for the collisions of the electron beams and the ion beams in the EicC

Parameters	e	d	$^3\text{He}^{++}$	$^7\text{Li}^{3+}$	$^{12}\text{C}^{6+}$	$^{40}\text{Ca}^{20+}$	$^{197}\text{Au}^{79+}$	$^{208}\text{Pb}^{82+}$	$^{238}\text{U}^{92+}$
Kinetic energy(GeV/u)	3.5	12.00	16.30	10.16	12.00	12.00	9.46	9.28	9.09
Momentum(GeV/c/u)	3.5	12.90	17.21	11.05	12.90	12.90	10.35	10.17	9.98
Total energy(GeV/u)	3.5	12.93	17.23	11.09	12.93	12.93	10.39	10.21	10.02
CM energy(GeV/u)	-	13.48	15.55	12.48	13.48	13.48	12.09	11.98	11.87
$f_{\text{collision}}$ (MHz)	-	499.63	500.20	499.16	499.63	499.63	498.91	498.84	498.76
Polarization	80%	Yes	Yes	No	No	No	No	No	No
$B\rho$ (T·m)	11.67	86.00	86.00	86.00	86.00	86.00	86.00	86.00	86.00
Particles per bunch( $\times 10^9$ )	40	6.1	3.0	2.04	1.00	0.30	0.07	0.065	0.055
$\varepsilon_x, \varepsilon_y$ (nm·rad, rms)	50/15	100/50	100/50	100/50	100/50	100/50	100/50	100/50	100/50
$\beta_x^*/\beta_y^*$ (cm)	10/4	5/1.2	5/1.2	5/1.2	5/1.2	5/1.2	5/1.2	5/1.2	5/1.2
Bunch length(cm, rms)	0.75	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Beam-Beam Parameter $\xi_x/\xi_y$ ( $10^{-3}$ )	6/7	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2	3/2
Laslett tune shift( $10^{-2}$ )	-	3.7/5.9	2.1/3.3	5.1/8.1	3.7/5.8	3.7/5.8	5.2/8.3	5.2/8.3	5.1/8.2
Current(A)	3.3	0.42	0.48	0.49	0.48	0.48	0.44	0.43	0.40
Crossing angle(mrad)					50				
Hourglass	-	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Luminosity at nucleon level ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	-	$10.09 \times 10^{32}$	$7.44 \times 10^{32}$	$11.81 \times 10^{32}$	$9.92 \times 10^{32}$	$9.92 \times 10^{32}$	$11.40 \times 10^{32}$	$11.18 \times 10^{32}$	$10.82 \times 10^{32}$

### ➤ 亮度关键设计1：快循环对撞模式



#### □ 离子装置：

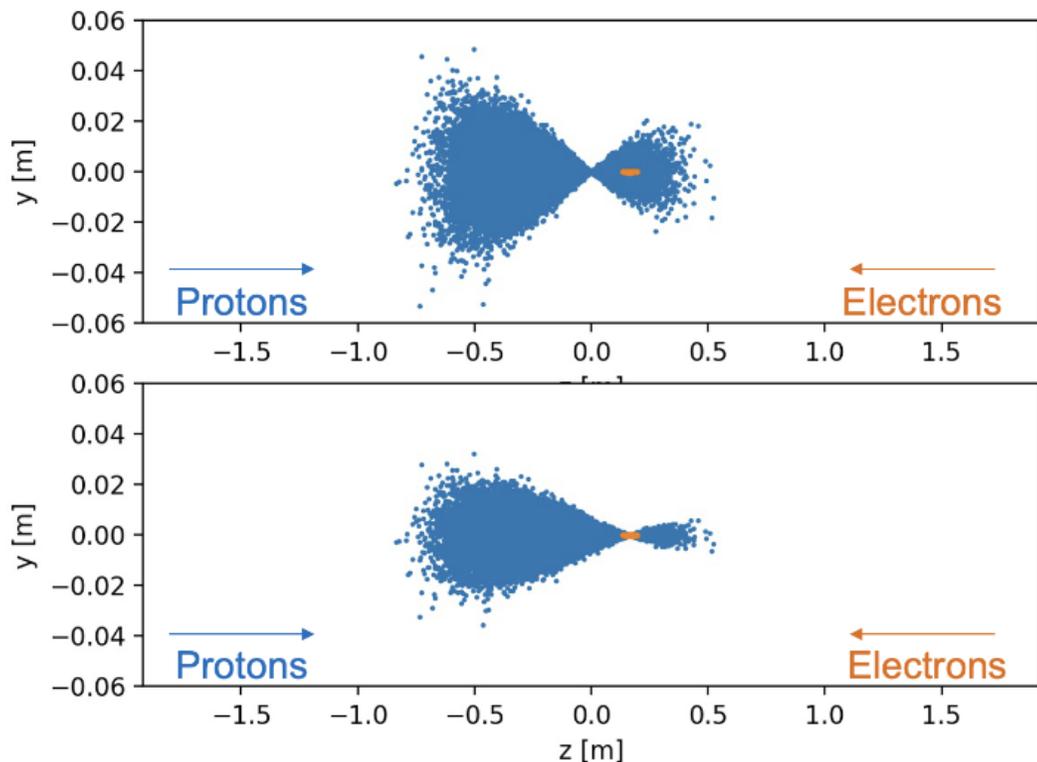
- 有直流电子冷却时，对撞环全束流替换时间约为12 min
- 无直流电子冷却时，对撞环全束流替换时间约为9 s

#### □ 电子装置：

- 对撞环全束流替换时间约为10 s

可在较短时间内替换所有对撞束团，突破峰值亮度极限，取得高平均亮度，有效提升装置积分亮度

### ➤ 亮度关键设计2：移动聚焦对撞方案



移动质子束团束腰位置，与较小的电子束团匹配，解决沙漏效应限制峰值亮度及其寿命的难题（沙漏因子 $0.52 \rightarrow 0.9$ ）

Table 2: The improvements of beam parameters with floating-waist method

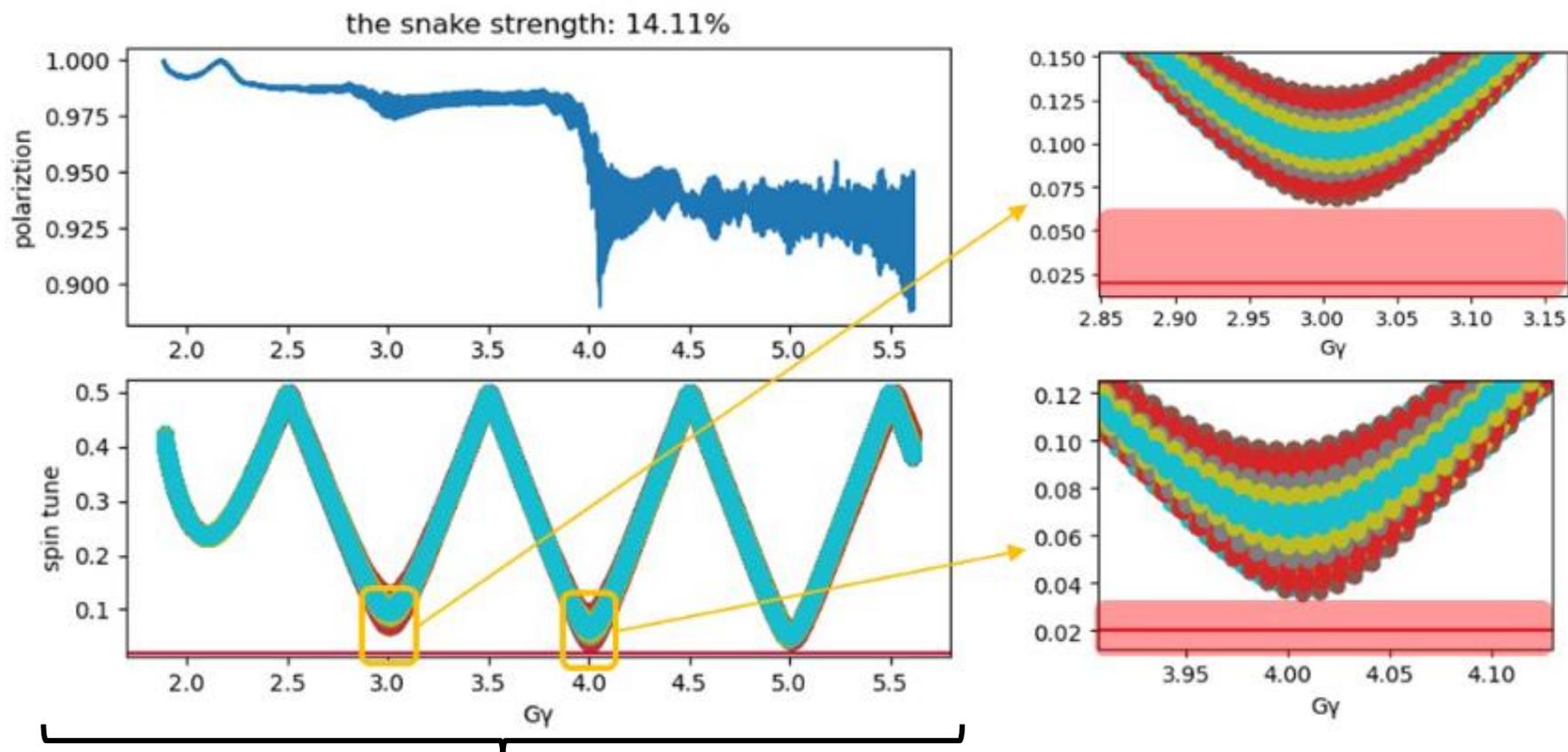
Parameter	Accelerator	Value	HIAF-U	HIAF-U + FW
Laslett tune shifts	ENC	$> 0.1$	0.12/0.19	0.066/0.105
	EIC	$\sim 0.06$		
	JLEIC	$\sim 0.06$		
	NICA	$< 0.075$		
Beam-beam parameters for lepton	CESR-B	0.062	0.056/0.028	0.102/0.118
	PEP-II	0.064/0.055		
	KEKB	0.12/0.1		
	EIC	$\sim 0.1$		
Beam-beam parameters for hadron	RHIC	0.015	0.017/0.017	0.0144/0.01
	LHC (design)	0.0034		
	LHC (1 IP/2 IPs)	0.017/0.034		

利用EicC装置束束相互作用参数余量，降低空间电荷频移，在实现高亮度的同时使参数更加合理

## 2. EicC装置总体设计



### ➤ 极化关键设计1：固定场西伯利亚蛇



固定场西伯利亚蛇磁铁全加速过程中场值不变

**难题：**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

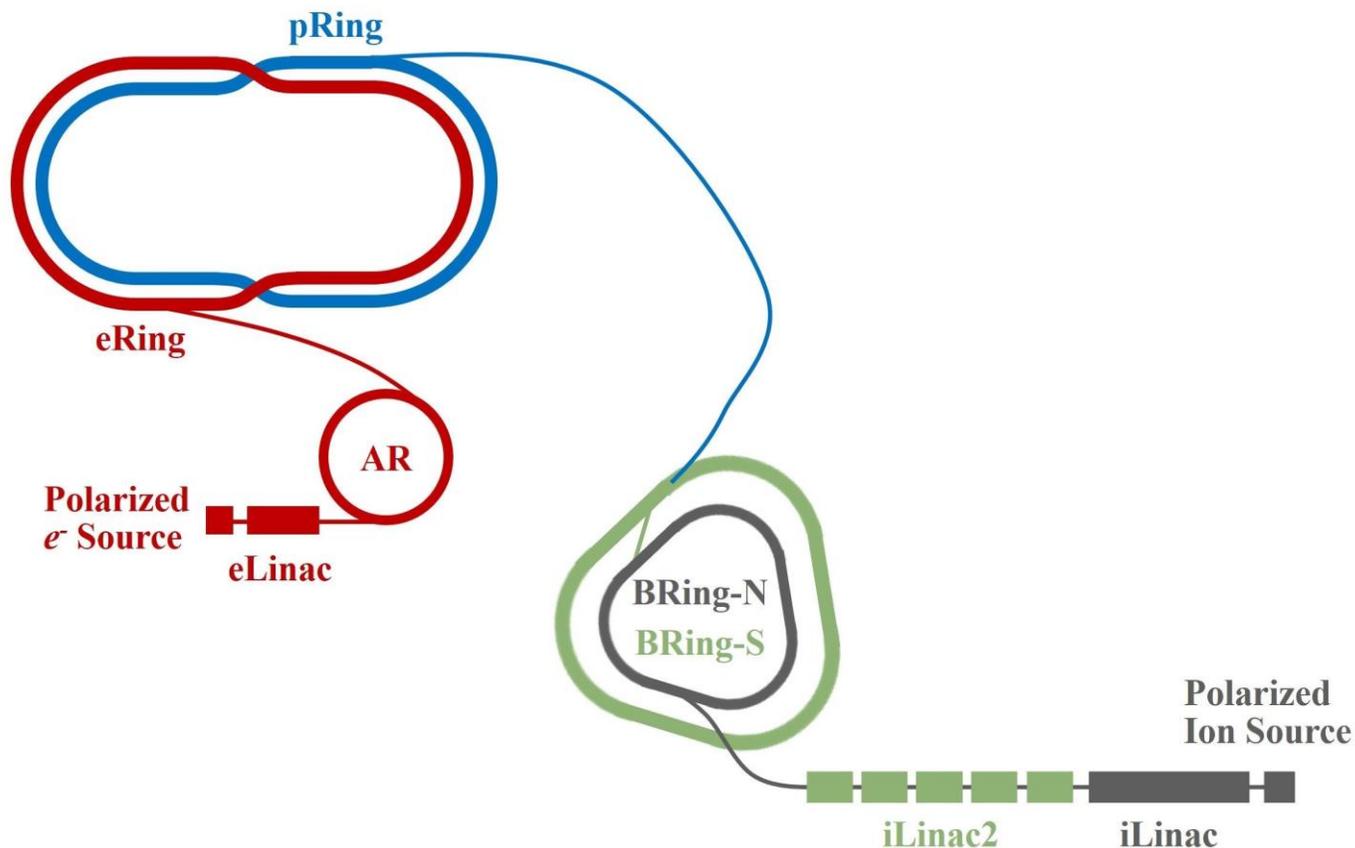
EicC设计了**固定场西伯利亚蛇**，通过调整动力学方案恰好避开所有退极化共振

### 3. 离子加速器及对撞环



➤ 离子加速器包括：极化离子源 (iSource)、直线加速器 (iLinac)、两级增强器 (BRing-N、BRing-S)、离子对撞环 (pRing)

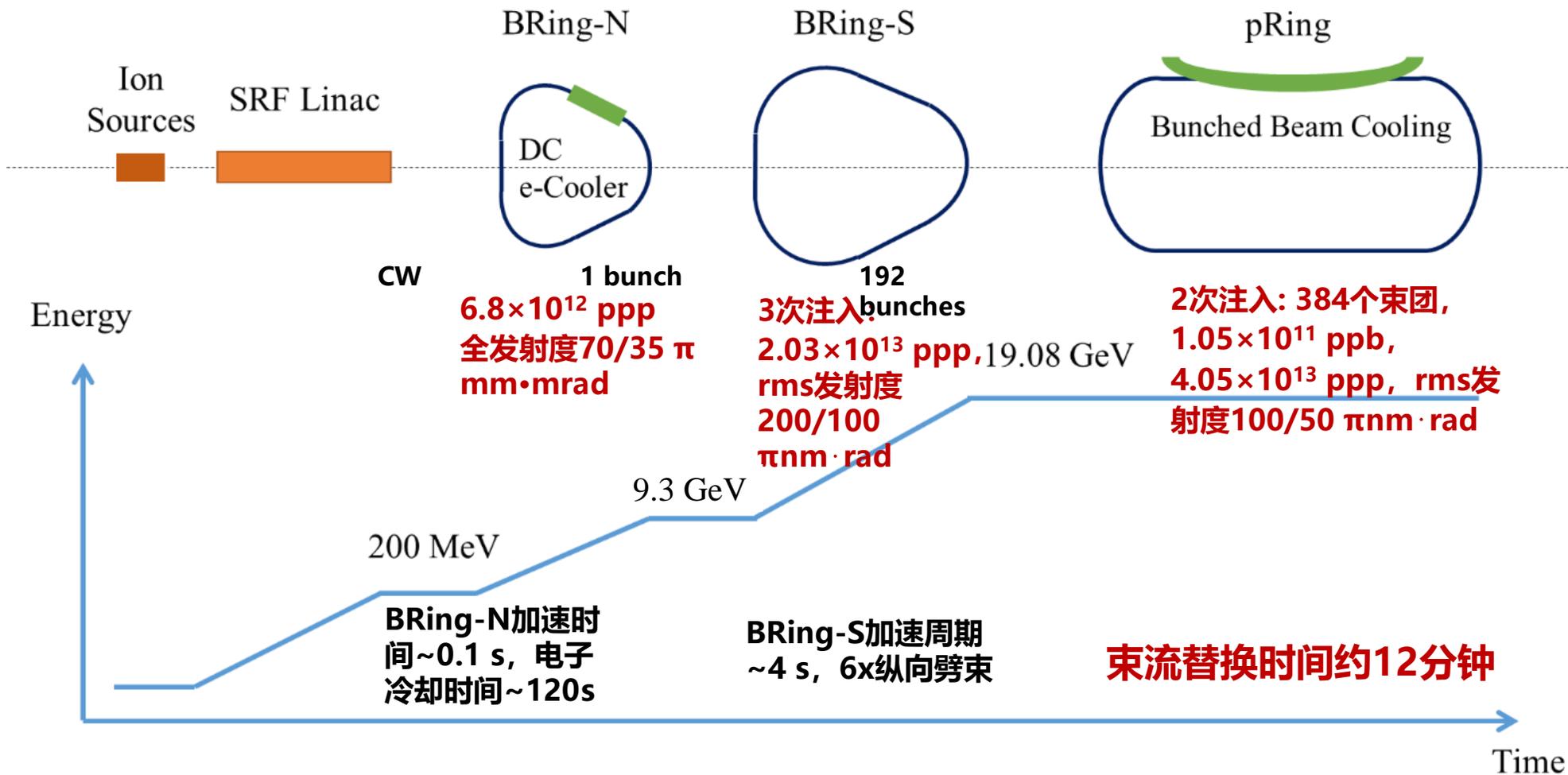
- iSource
  - 提供极化质子、氘、氦束流
- iLinac
  - 全粒子加速，质子最高能量200 MeV/u
- BRing-N & BRing-S
  - 能量：9.3 GeV -> 25 GeV (max.)
  - 流强： $6.8 \times 10^{12}$  ppp ->  $2.03 \times 10^{12}$  ppp
  - 发射度：满足对撞束流需求
- pRing
  - 384个束团，对撞频率100 MHz
  - 满能量、满电荷量束团在线替换



### 3. 离子加速器及对撞环



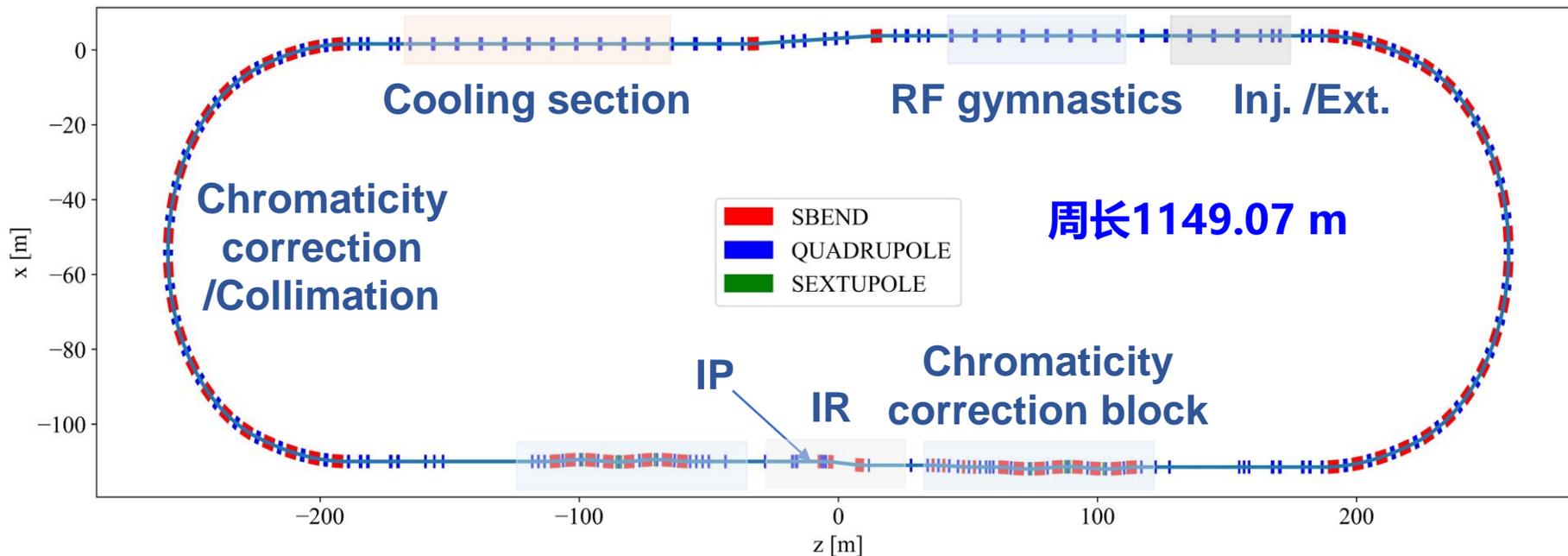
#### ➤ 离子加速器运行模式—双向涂抹注入+多级电子冷却



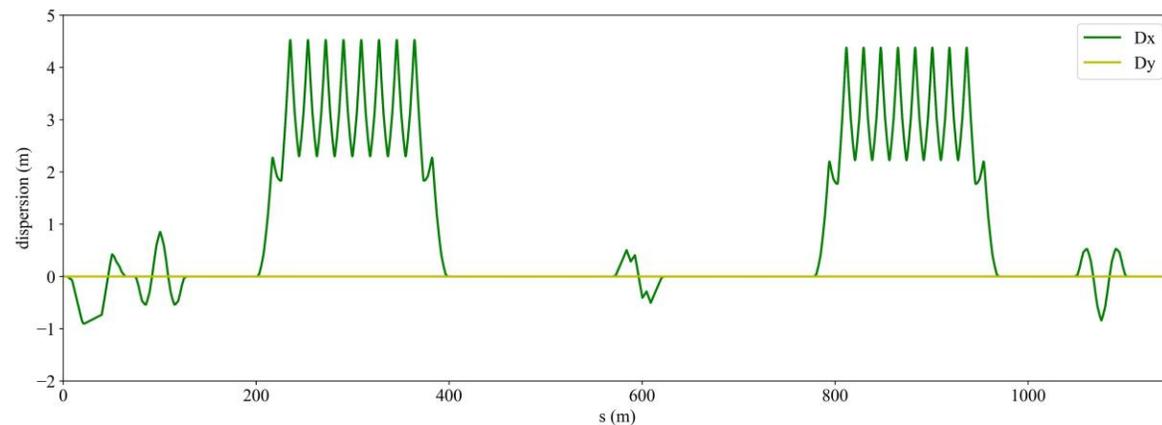
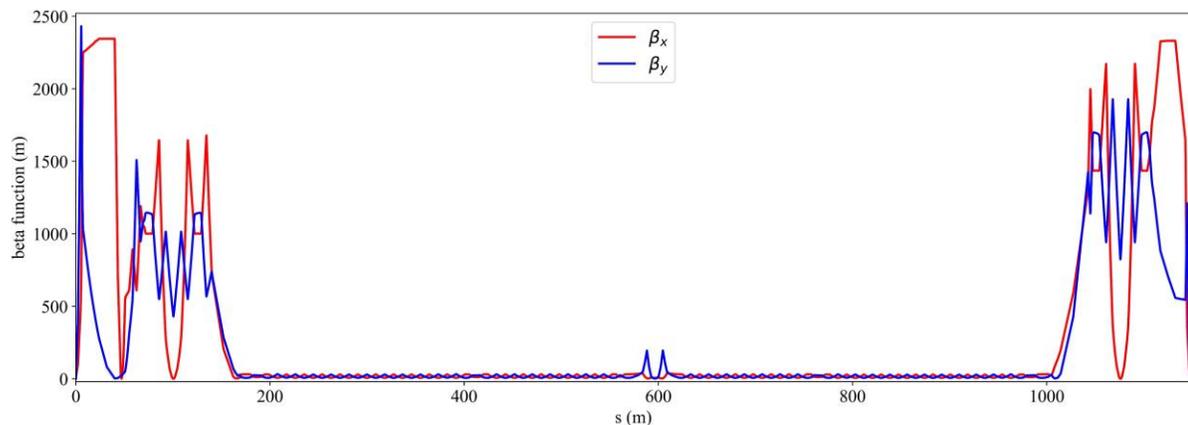
# 3. 离子加速器及对撞环



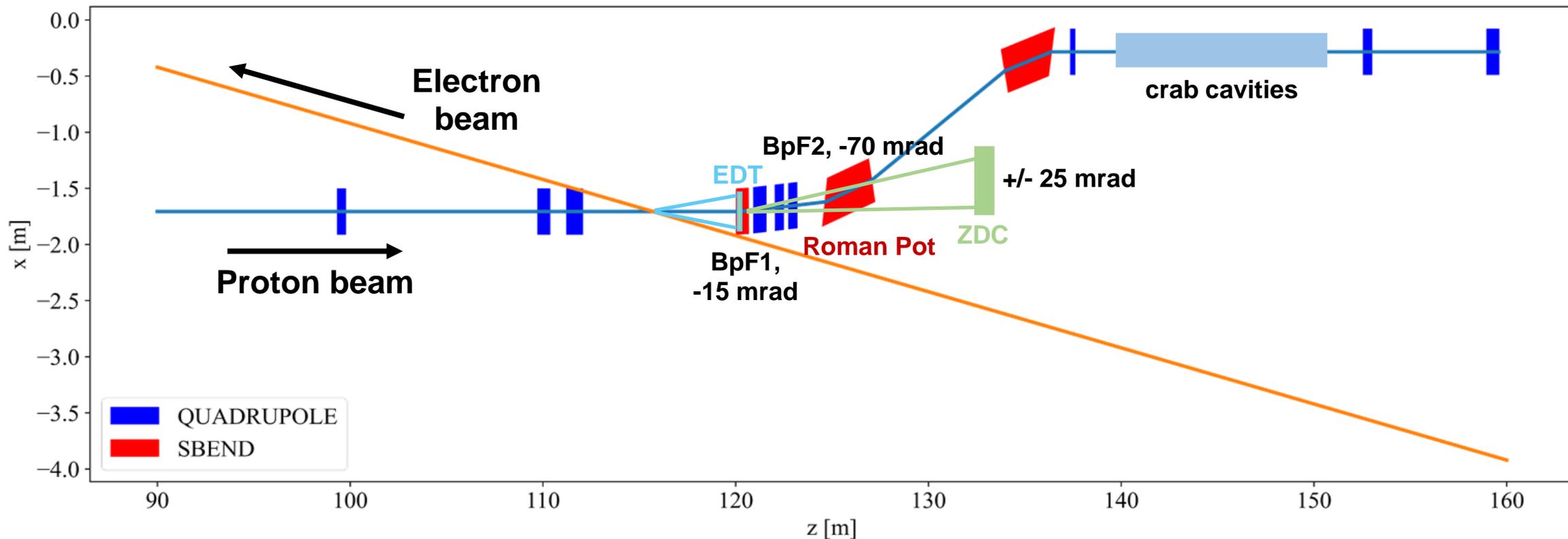
## 离子对撞环pRing光学设计



- ✓ 对撞点 $\beta^* = (5, 1.2)$  cm
- ✓ 蟹腔位置 $\beta \sim 2330$  m
- ✓ 弧区大色散函数用于减弱空间电荷效应
- ✓ 初步考虑采用CCB和弧区结合的方式进行色品校正



#### ➤ 离子加速器侧对撞区布局

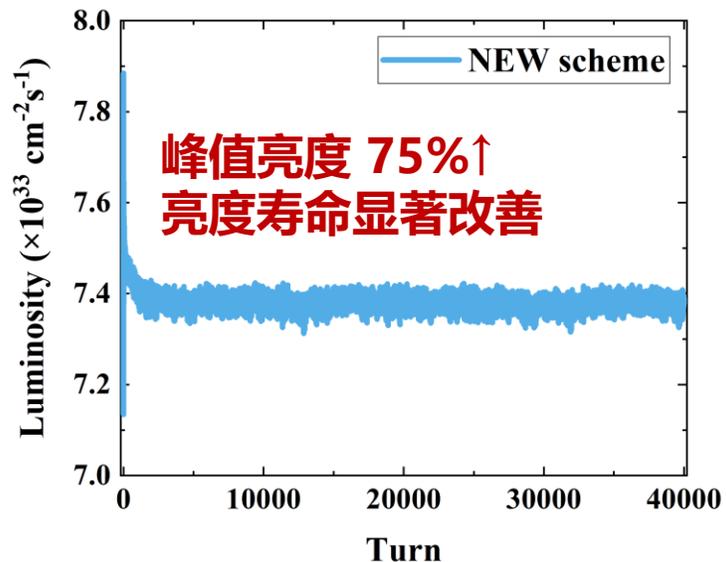
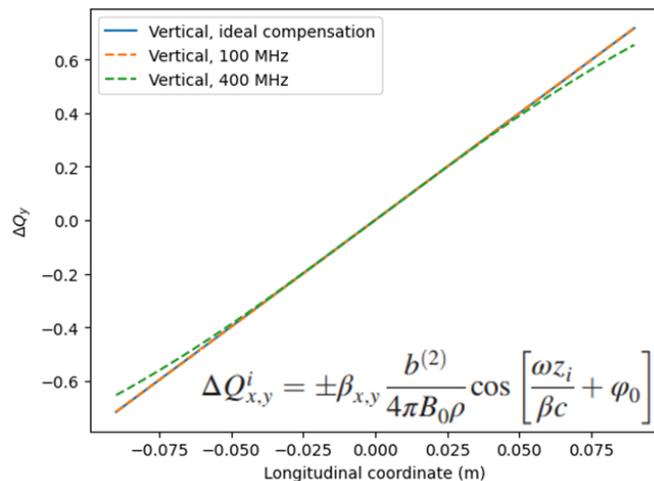
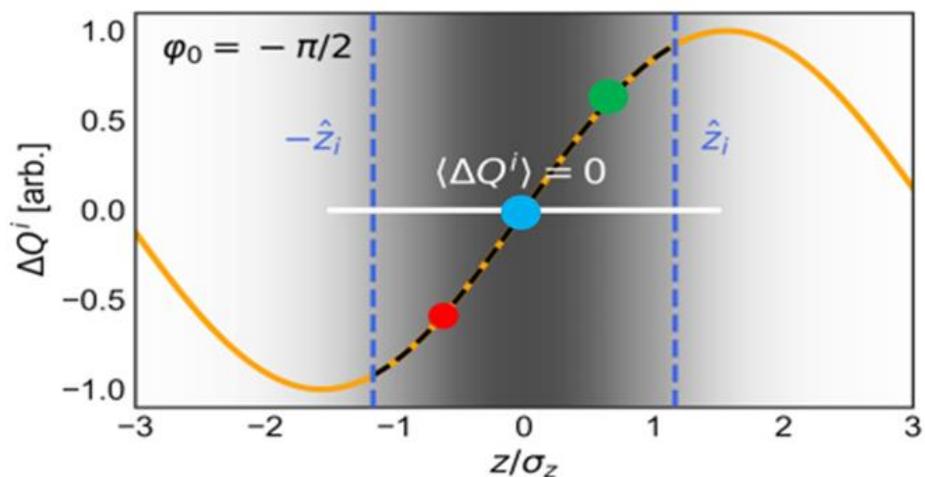


- ✓ BpF1: -15 mrad, BpF2: -70 mrad, BpF3: +85 mrad, 兼顾谱仪磁铁和束流分离
- ✓ 中心探测器+4.4 m/-3.6 m, 局部蟹腔~16 m
- ✓ 50 mrad交叉角由pRing中的CCB模块提供
- ✓ EDT位于BpF1磁铁内部, 接受度+/-16~60 mrad
- ✓ Roman Pot探测器位于BpF2后方, 用于极小角度前冲产物测量, 接受度 5~16 mrad
- ✓ ZDC用于中子测量, 接受度要求+/- 25 mrad

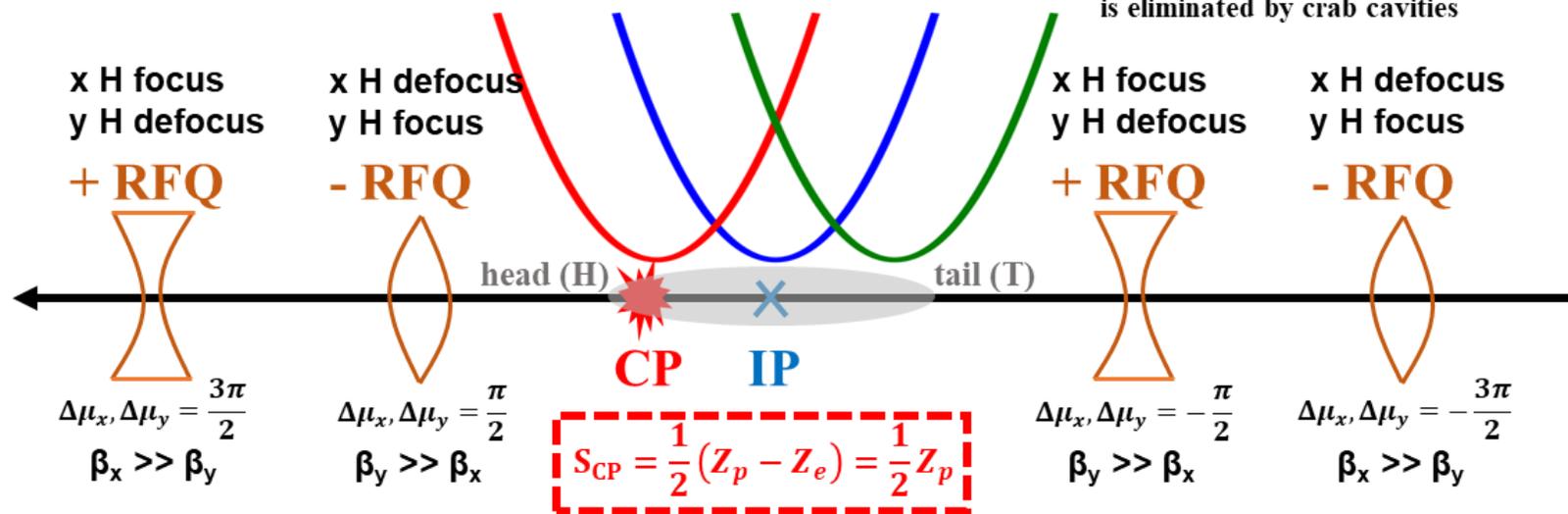
### 3. 离子加速器及对撞环



➤ EicC特殊设计：两侧采用两组射频四极透镜实现质子束流移动聚焦，抑制沙漏效应



similar to 'crab waist' scheme



✓ 射频四极透镜作用下，不同纵向位置的粒子产生局部振荡频率调制，实现束腰沿对撞过程的重分布。

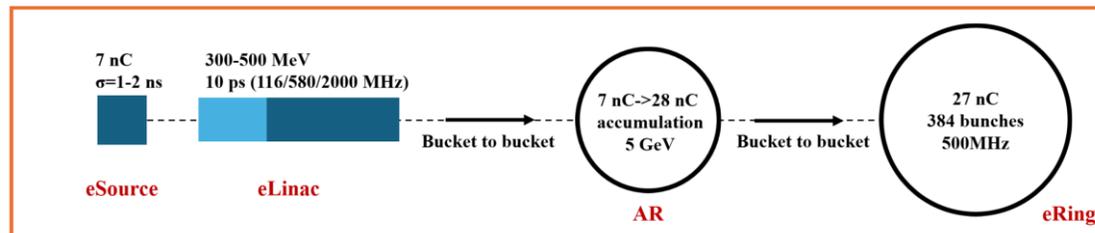
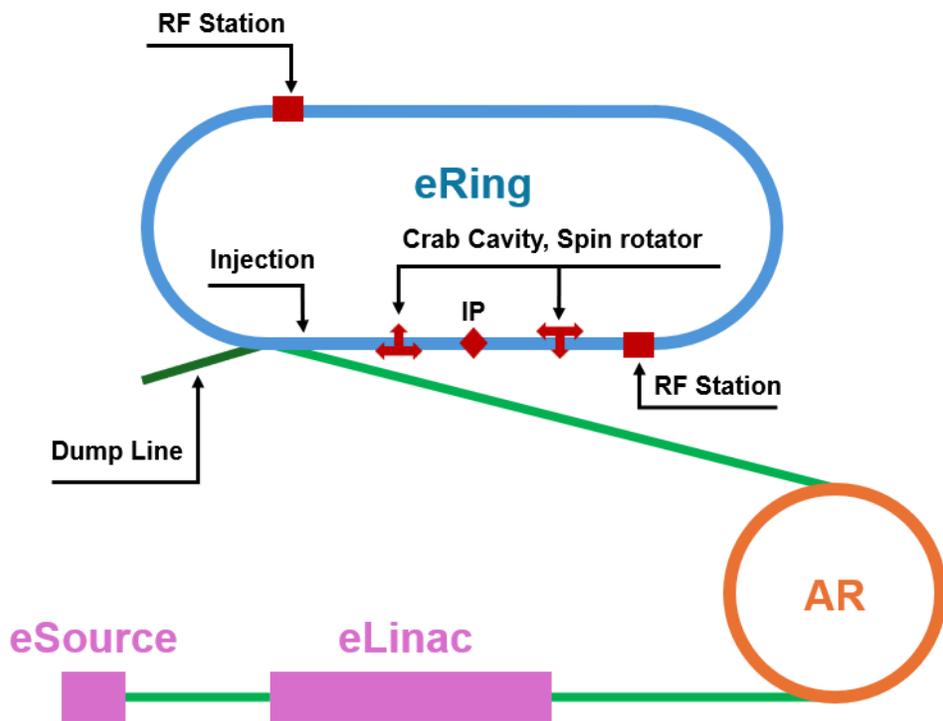
✓ Hourglass效应得到抑制，H->0.9，亮度大幅提升。

## 4. 电子加速器及对撞环



### ➤ EicC电子加速器包括极化电子源 (eSource)、直线加速器 (eLinac)、电子累积环 (AR)、电子对撞环 (eRing)

- eSource
  - 300-500kV 直流GaAs光阴极电子枪
  - 极化电子束, 5-10 nC/pulse
- eLinac
  - 加速电子束团至300-500MeV
- AR
  - 287.8m, 累积4次使束团电荷量达到27nC
  - 加速器电子束团至2.8-5.0GeV
- eRing
  - 1151.2m, 384个束团, 以100MHz对撞频率与离子束团进行对撞
  - 满能量、满电荷量束团在线替换



## 4. 电子加速器及对撞环



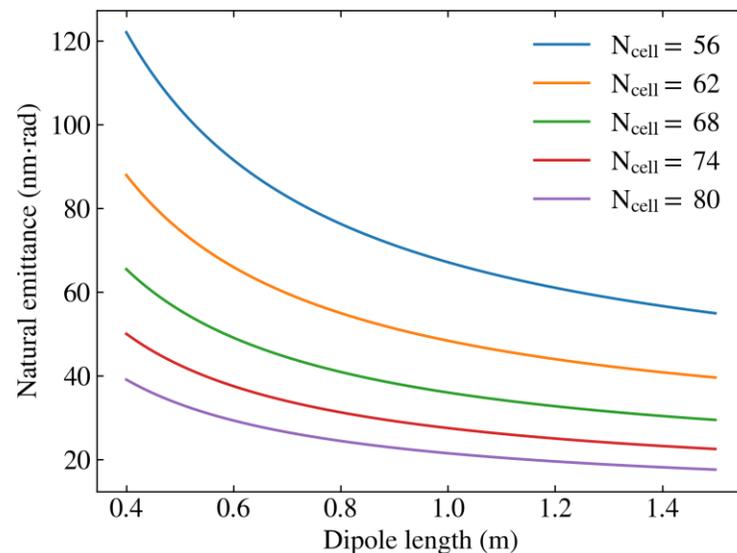
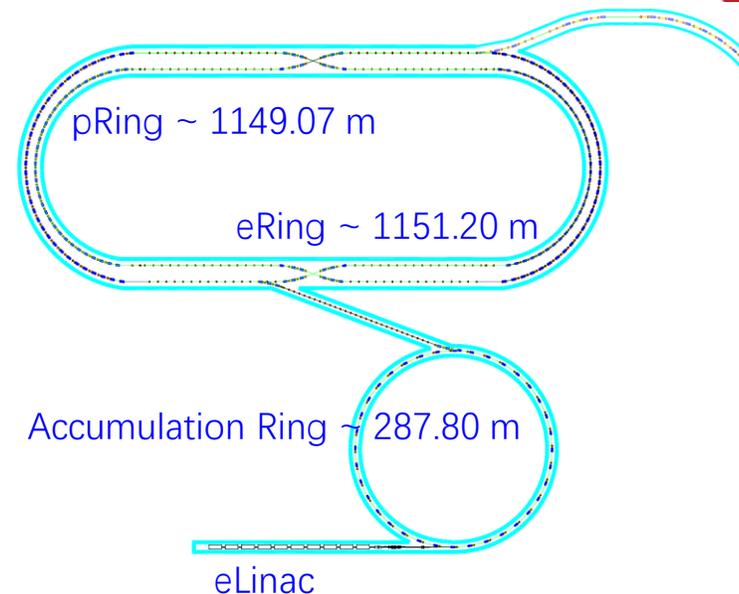
### ➤ AR通过多次累积提升单束团电荷量从7nC至27nC

- 方案1: 注入**384个7nC束团**至AR并加速, 在**1GeV**能量通过**2次合束操作**完成累积, 再将束团加速至目标能量
- 方案2: AR中存储**96个束团**, 通过**多次注入**完成电荷量累积, 再进行加速

### ➤ AR至eRing的注入线上, 使用**自旋旋转器**调整电子自旋方向

### ➤ 对撞环换束周期~7分钟, AR的设计关键在于**小自然发射度的获得**

- 根据理论公式计算结果使用68个弧区, 二极磁铁长度为0.7m时自然发射度可以达到45 nmrad。



常规FODO结构,  $\pi/3$ 相移时磁铁长度与弧区数量对自然发射度的影响

## EicC极化设计要求

1. **高平均极化率:** 电子 ~ 80%, 质子 ~ 70%, 和极化D和 $^3\text{He}^{2+}$
2. **高自旋翻转频率:** 1.04 MHz, 同时存在**正正、反正、正反、反反**的e-p对撞
3. **极化方向可调:** 电子 ~ 纵向极化方向及其反向, 离子 ~ 任意极化方向

### 质子极化参数

parameters	proton	
	BRing-N	BRing-S
energy (GeV)	0.20~2.00	2.00~19.08
spin tune $G\gamma$	2.18~5.64	5.64~38.52
$Q_x$	9.47	9.47
$Q_y$	9.43	9.43
Momentum spread $\times 10^{-4}$	7.0	6.0
Beam intensity ( $10^{12}$ ppp)	6.77	20.3
Norm. horizontal RMS emitt. ( $\mu\text{m} \cdot \text{rad}$ )	8.47	2.22
Norm. vertical RMS emitt. ( $\mu\text{m} \cdot \text{rad}$ )	4.24	1.11
superperiod	3	3

### 电子极化参数

parameters	eRing
energy (GeV)	2.8~5.0
spin tune $G\gamma$	6.36~11.35
$Q_x$	0.58
$Q_y$	0.56
$Q_s$	0.025
Beam intensity per bunch ( $10^{11}$ )	1.7
Horizontal RMS emitt. (nm · rad)	50.0
Vertical RMS emitt. (nm · rad)	15.0
bending radius of dipoles $\rho$ (m)	25.0
the average radius R (m)	183.22

# 5. 极化设计

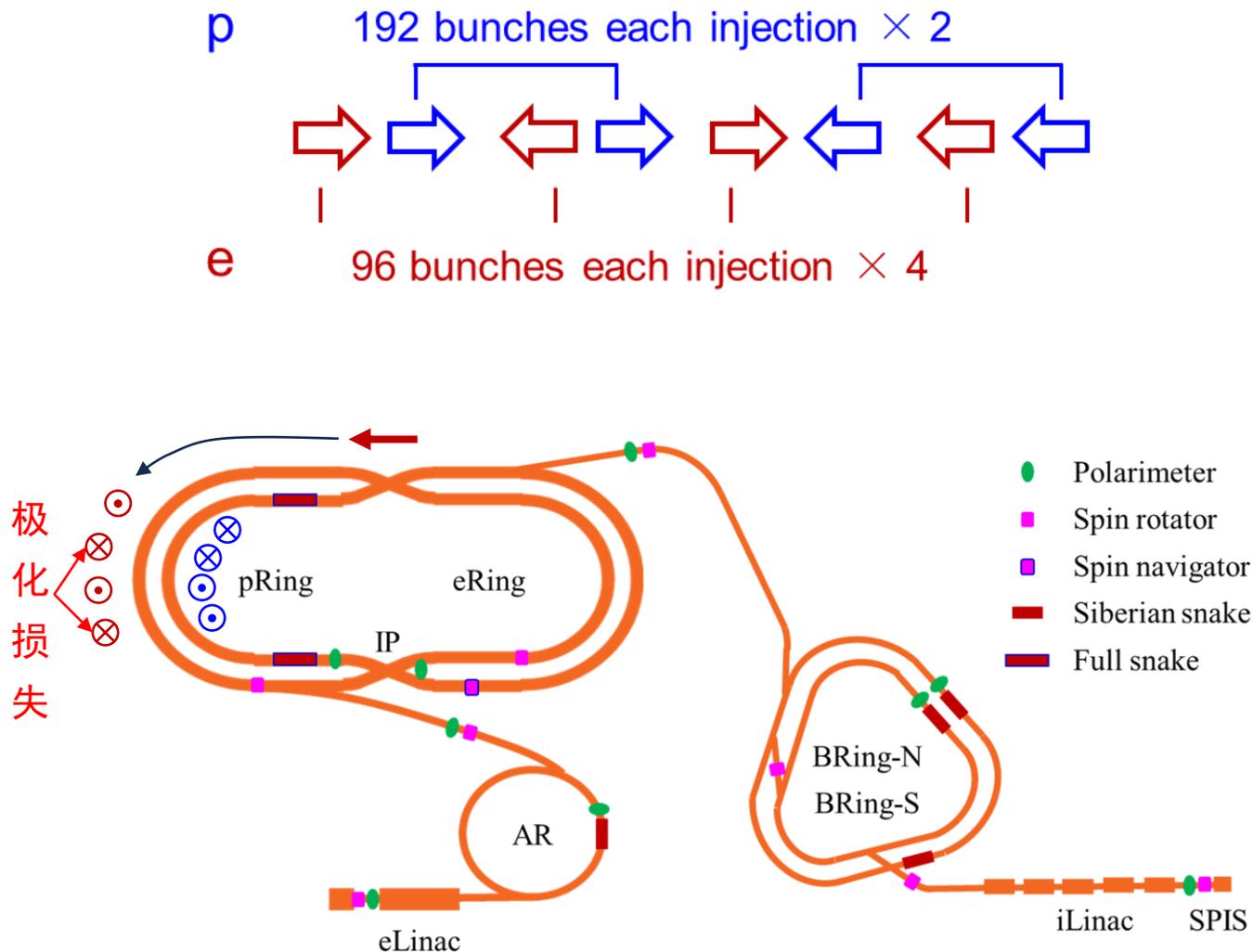


## 离子加速器侧

- 极化质子束按**正反极化方向**分两组注入直线加速器和增强器
- BRing-N和BRing-S加速过程中，采用**西伯利亚蛇避免退极化共振**造成的极化率损失
- pRing为**自旋透明环**，质子束在注入线被旋转为**对撞指定方向**

## 电子加速器侧

- 顺主场方向：**自发极化造成极化率损失**，**快速束团替换**保持高极化率
- 直线和AR中极化方向均为**逆主场方向**，分四组在**对撞环入口**旋转
- 对撞点两侧**自旋旋转器匹配自旋方向**

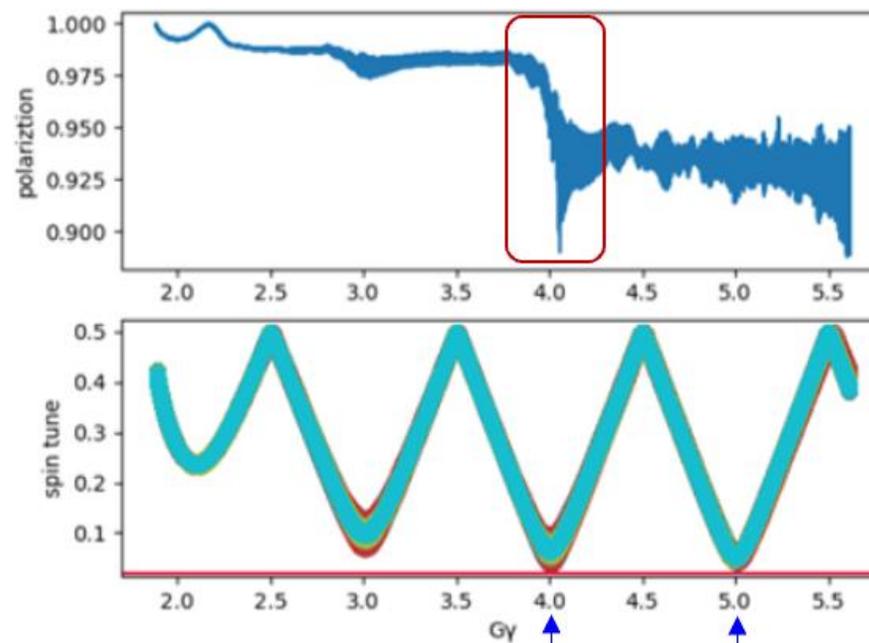


# 5. 极化设计



- ✓ 常规固定强度螺线管型西伯利亚蛇需要磁场上升速率达**29 T/s**，方案**不可行**
- ✓ **固定场螺线管型西伯利亚蛇**可以控制BRing-N中极化损失在**10%以内**，满足EicC的极化需求
- ✓ 剩余的极化损失由**二阶snake共振**引起，可通过**提高snake强度避免** (25% snake, P=97%)
- ✓ **固有耦合退极化共振、非线性退极化共振**等高阶退极化共振的影响**可以忽略** (小于极化率实验测量精度)

type	constant strength	fixed field
$L_s(m)$	2	2
$K_s(/m)$	0.1125	0.4610 ~ 0.0503
$B_s(T)$	0.1149 ~ 1.0524	0.4708
$\frac{dB_s}{dt} / \frac{dB_D}{dt}$	<b>2.4185</b>	0.0



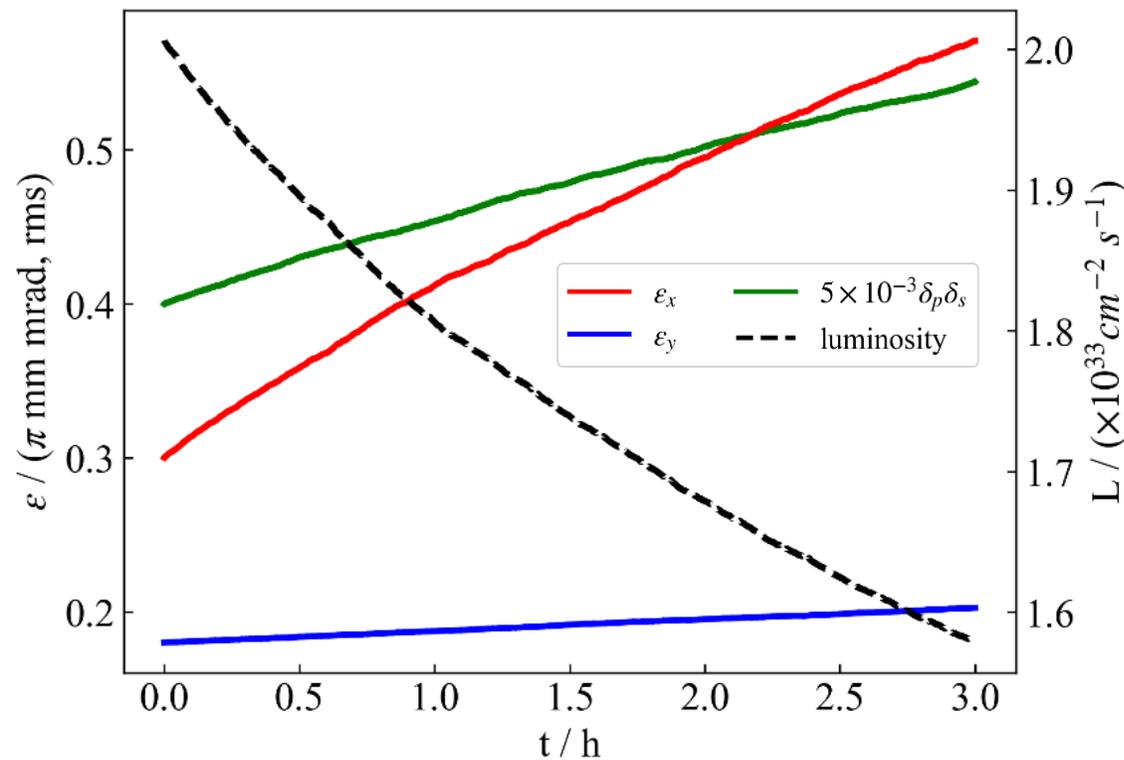
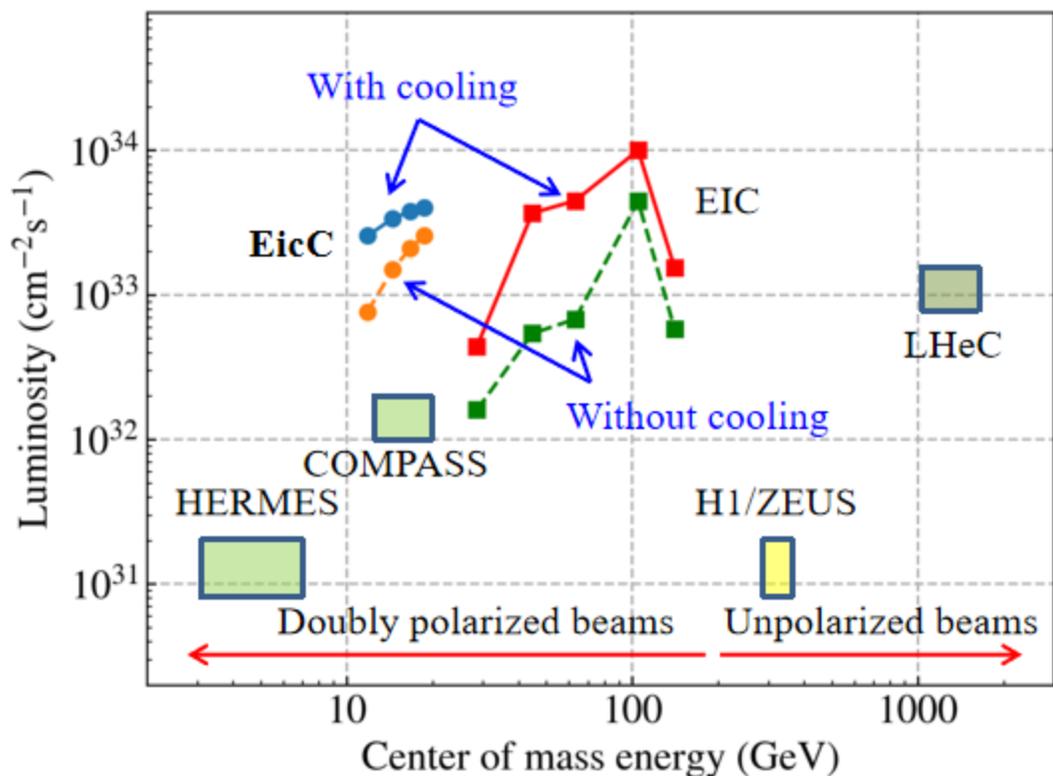
spin tune gap: [0, 0.038] [0, 0.042]

# 6. 电子冷却方案



➤ 电子冷却对EicC实现亮度目标十分关键:

1.降低束流发射度和能散, 提升峰值亮度 / 2.抑制发射度增长, 提升积分亮度

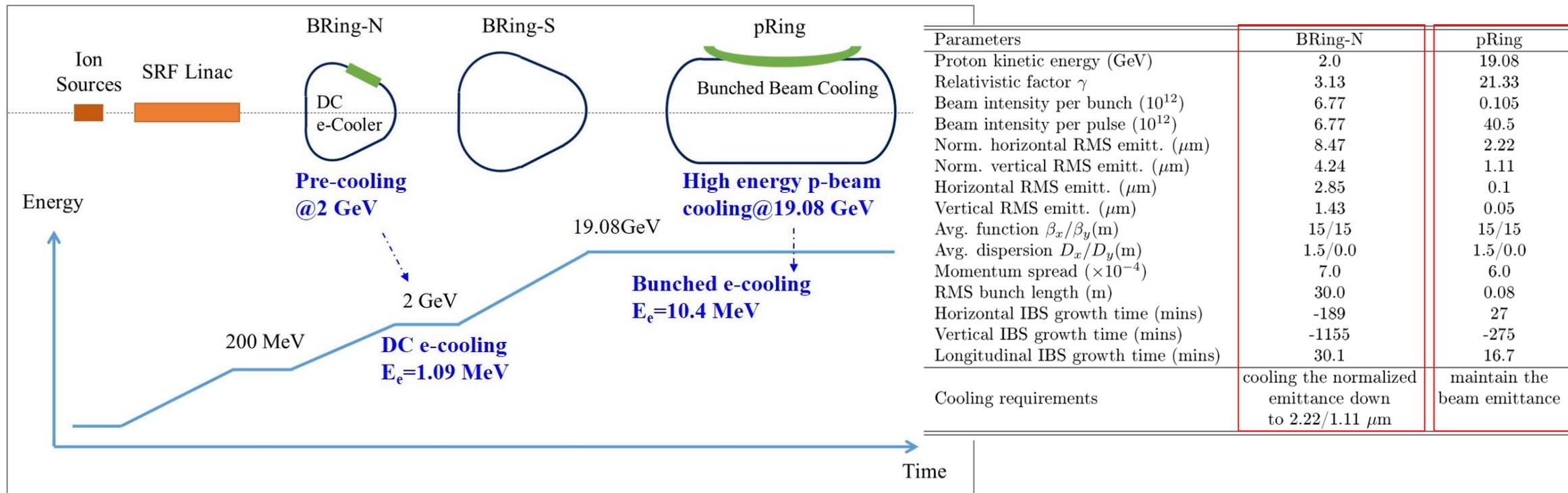


# 6. 电子冷却方案

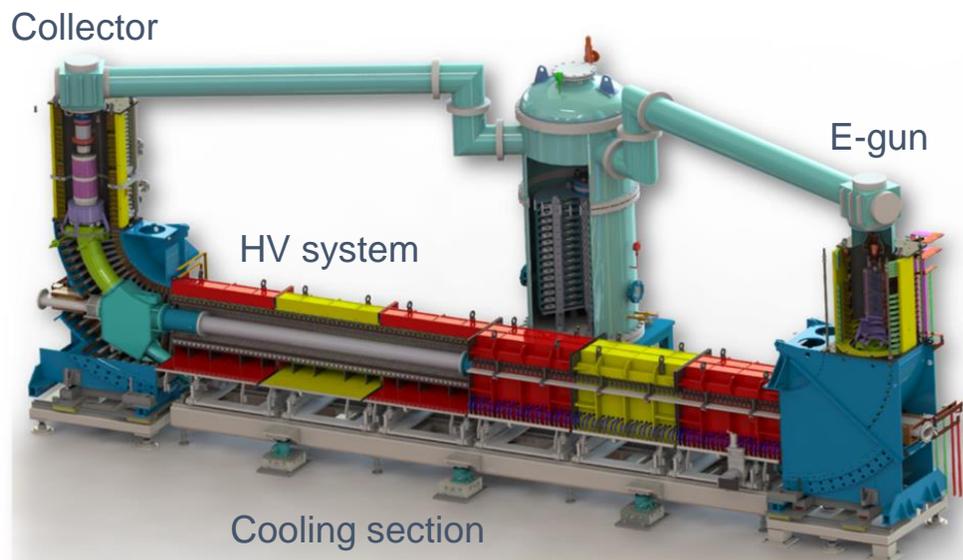
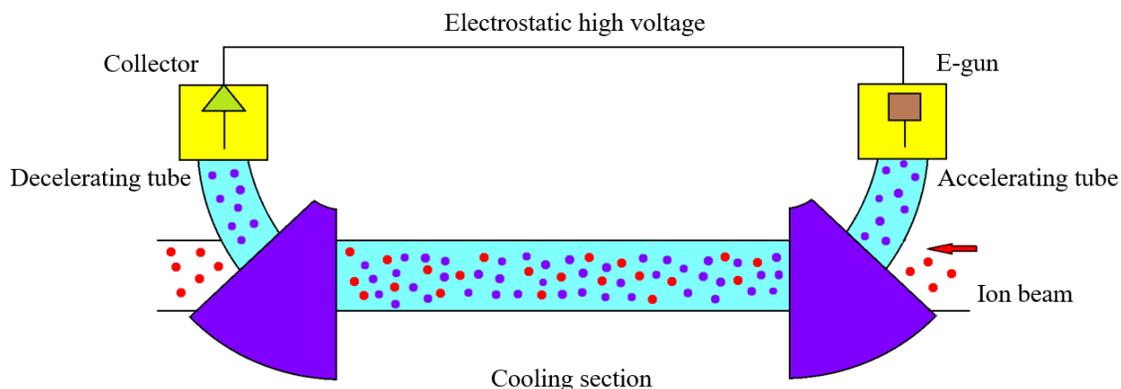


## 两级电子冷却方案

1. BRing-N 2GeV低能质子束预冷却 – 提升峰值亮度
2. pRing 19.08 GeV高能质子束冷却 – 提升积分亮度



## ➤ BRing-N 1.09 MeV直流DC磁化电子冷却装置 (8.4/4.2 -> 2.22/1.11 $\mu$ m)



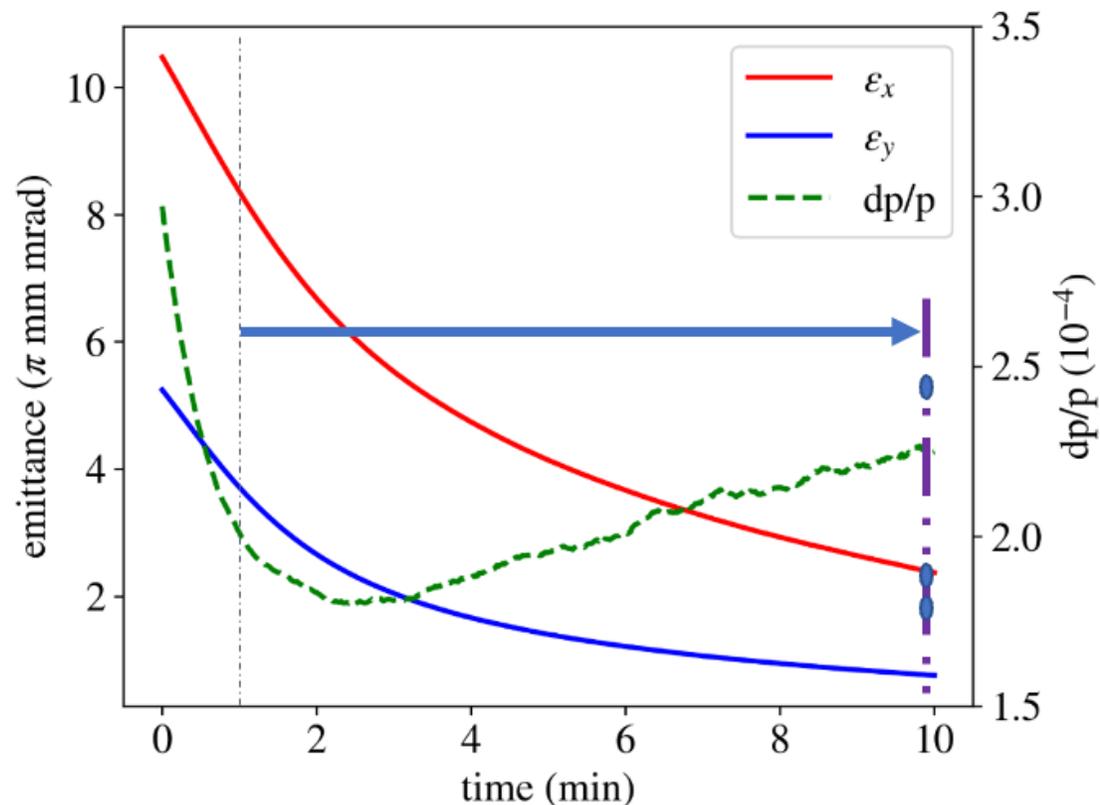
Parameter	Value
Kinetic energy range (MeV)	<1.1
High voltage stability	<1 × 10 <sup>-4</sup>
High voltage tuning accuracy (V)	<2
Current (A)	1-3
E-beam radius @Gun (cm)	1-2
E-beam radius @cooling section (cm)	1-5
Transverse temp. (eV)	<0.2
Longitudinal temp. (eV)	<1 × 10 <sup>-4</sup>
Cooling section length (m)	15-25
Fraction $\eta$ (%)	2.5-4.2
Gun/collector section field (T)	0.5-1.2
Bending section field (T)	0.3-1.0
Bending (toriod) angle (deg.)	90
Cooling section field (T)	0.1-0.8
Dipole coil field (T)	<0.01
$\beta$ function x/y (m)	10-25
Vacuum (mbar)	10 <sup>-10</sup> – 10 <sup>-11</sup>
BPM accuracy (mm)	<1.0
Homogeneity of the magnetic fields	<5 × 10 <sup>-5</sup>

## 6. 电子冷却方案



- 冷却时间约9分钟，对撞环完整束流替换时间约 1小时，尚未达到快循环要求
- 更低冷却能量、色散冷却机制等方法可加快束流冷却，缩短制备时间

Proton beam	
Energy (GeV)	2.0
Intensity	$4 \times 10^{12}$
Norm. horizontal RMS emittance ( $\mu\text{m}$ )	10.0
Norm. vertical RMS emittance ( $\mu\text{m}$ )	5.0
Momentum spread	$3 \times 10^{-4}$
$\beta$ function x/y (m)	25
Electron beam	
Energy (MeV)	1.09
Current (A)	3
E-beam radius (cm)	1.5
Transverse temp. (eV)	0.1
Longitudinal temp. (eV)	$1 \times 10^{-5}$
Cooling section length (m)	20
B field in cooling section (T)	1.0

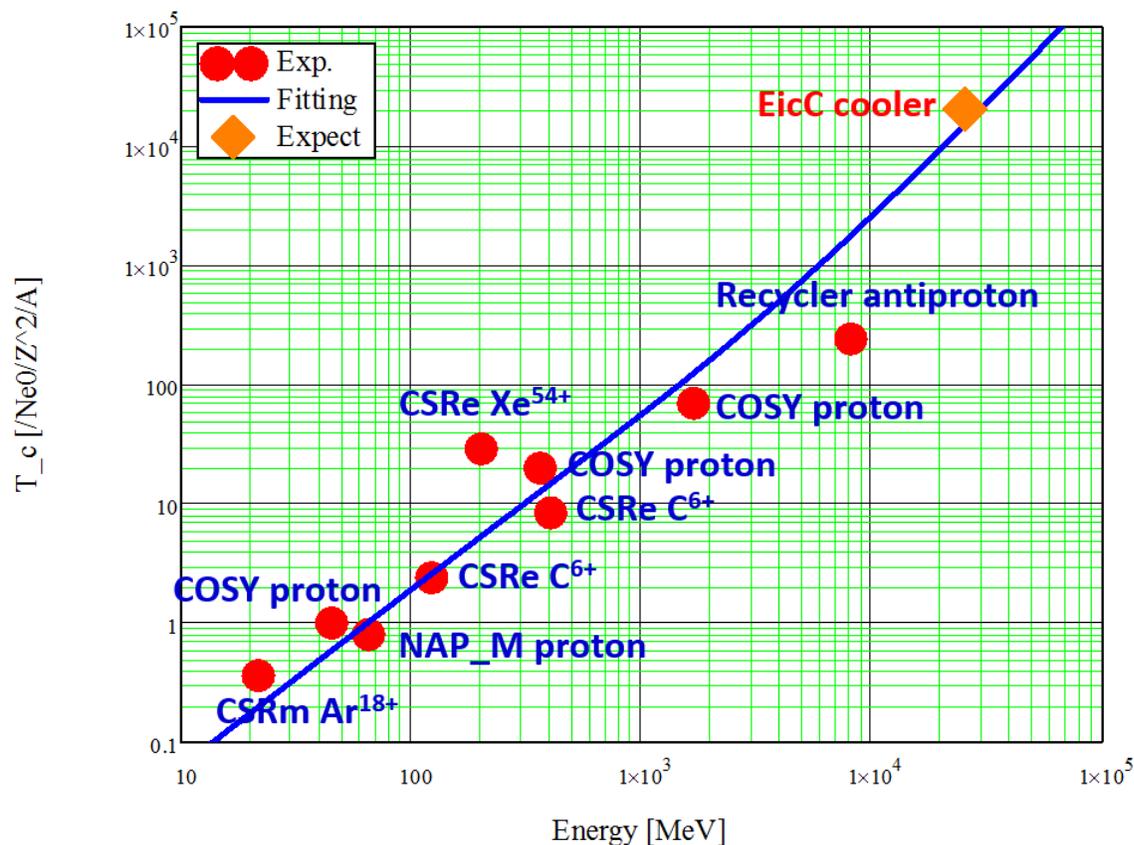
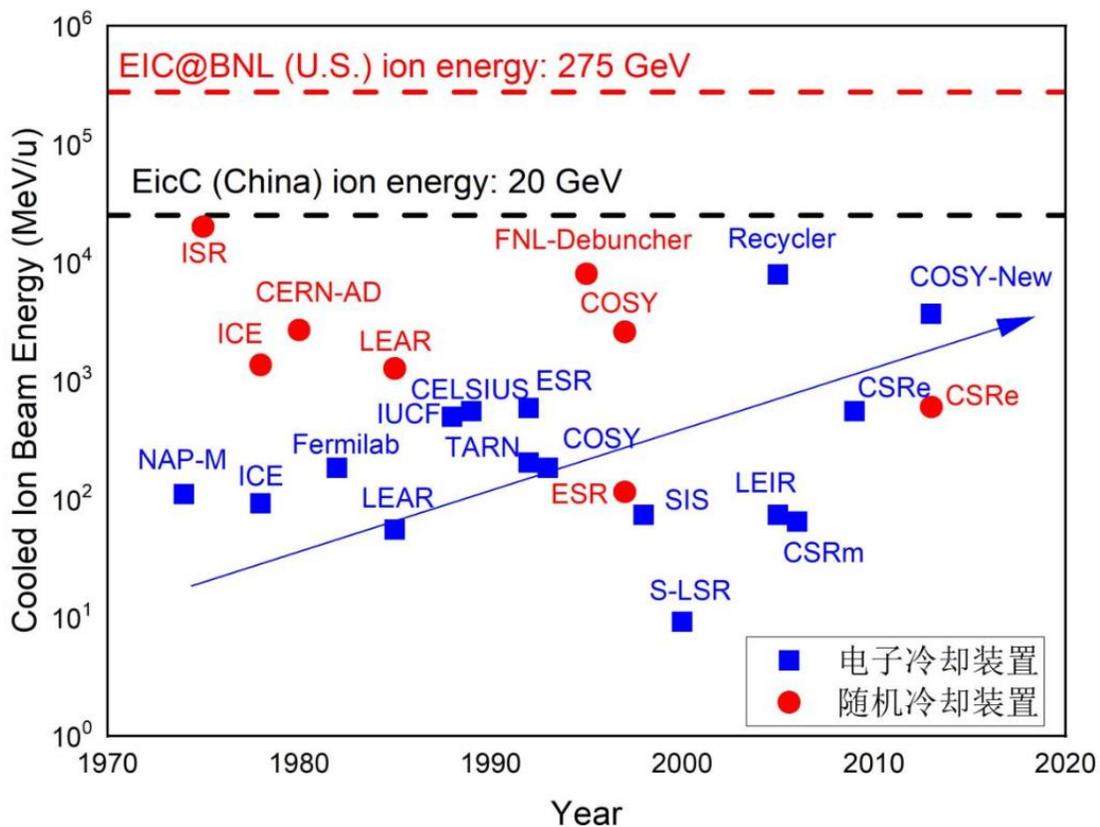


# 6. 电子冷却方案



## ➤ pRing 10.4 MeV ERL-Ring电子冷却 (保持发射度)

- 必须采用基于射频加速的电子冷却，其中ERL-Ring是实现EicC高能质子束快速冷却的理想方案

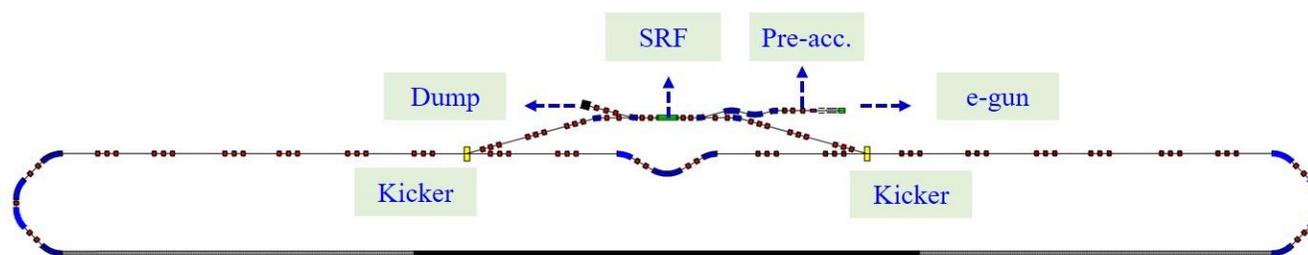


# 6. 电子冷却方案

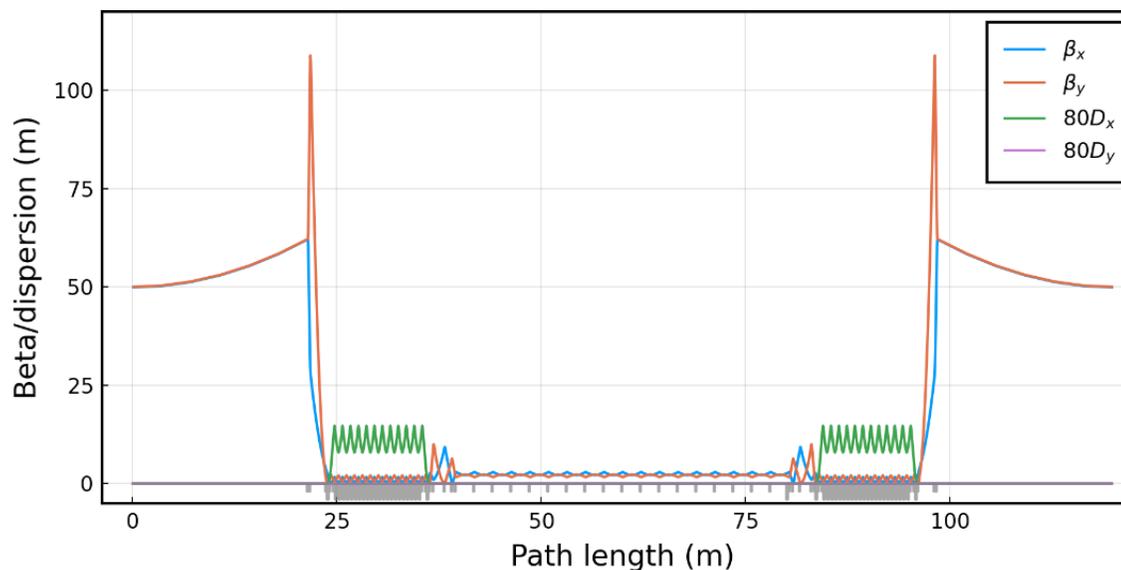


Linac	
Pre. acceleration energy (MeV)	2.0-4.0
Final kinetic energy (MeV)	10.4
E-gun type	VHF/SRF
E-gun voltage (MeV)	0.5-1.0
Pre. RF frequency (MHz)	100
Repetition frequency (MHz)	2.5
Charge per pulse (nC)	0.5-2.0
Beam average current (mA)	<2.5
Beam peak current (A)	1-4
RMS normalized emittance ( $\mu\text{m}$ )	<2.0
RMS bunch length (ps)	50-200
RMS energy spread	< $2 \times 10^{-4}$

Ring	
Kinetic beam energy (MeV)	10.4
Circumference (m)	120
Charge per bunch (nC)	0.5-2.0
Revolution frequency (MHz)	2.5
Number of bunches	40
Main SRF frequency (MHz)	100
Bunch frequency (MHz)	100
Store turns $N_{circ}$	1600
Average beam current (mA)	50-200
Peak current (A)	1-4
Cooling section length (m)	50
RMS normalized emittance ( $\mu\text{m}$ )	<3.0
RMS bunch length (ps)	50-200
RMS energy spread	< $4 \times 10^{-4}$
Radiation damping time (turns)	$\gg 10^3$
Energy loss per cycle (keV)	<0.1
Beta function@CS of cooler (m)	50-80
Dispersion function@CS of cooler (m)	1-5
Fast kicker repetition frequency (MHz)	2.5
Fast kicker pulse width (ns)	<1



pRing 10.4 MeV ERL-Ring电子冷却



# 6. 电子冷却方案



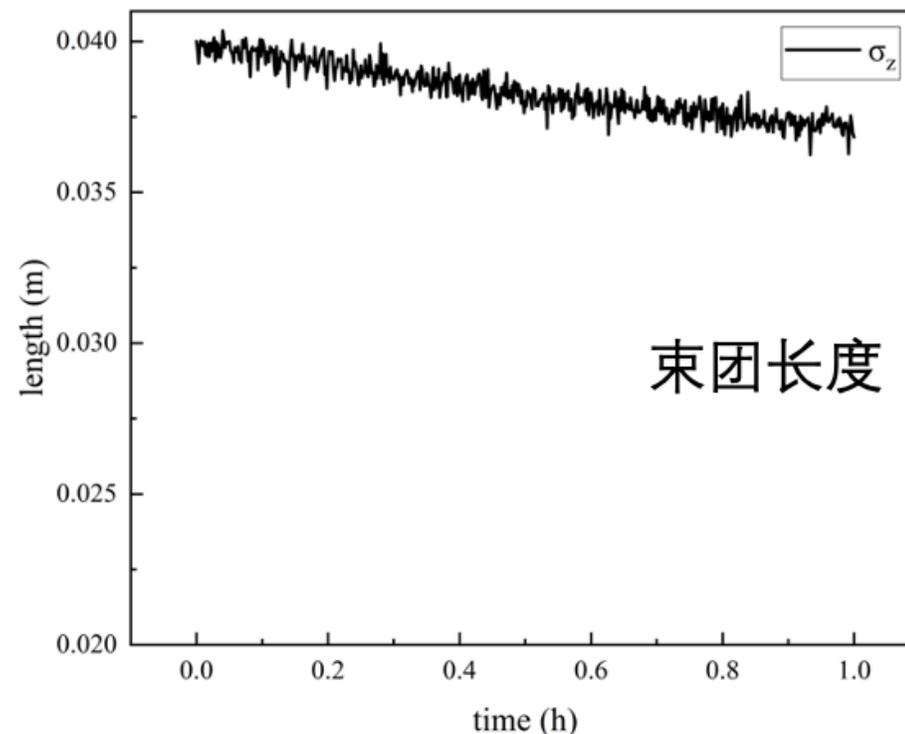
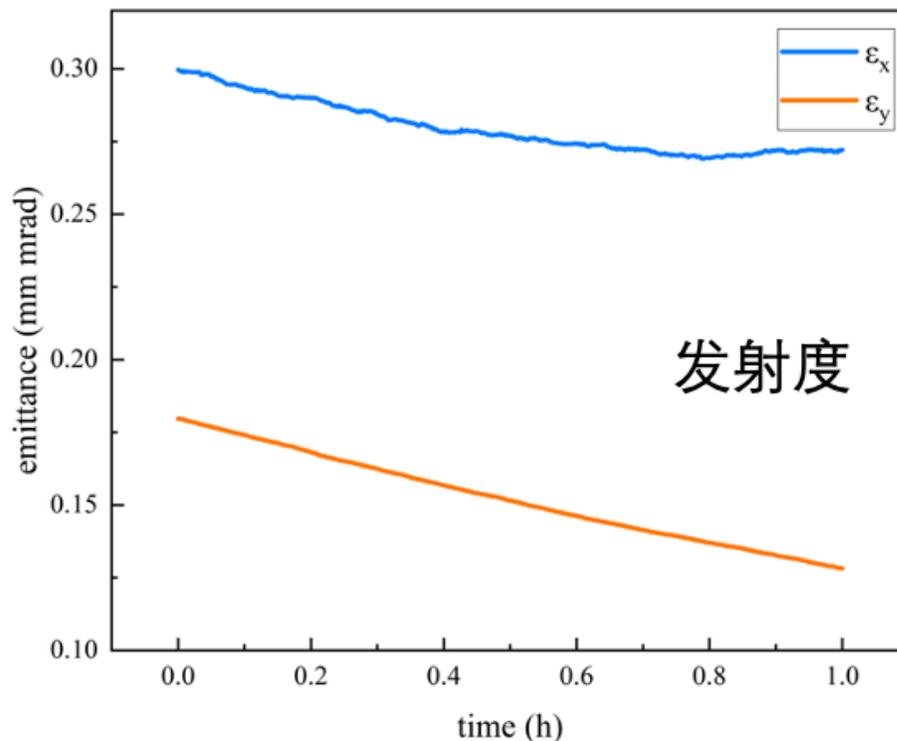
模拟显示, ERL-Ring高能束团束电子冷却装置的冷却率可满足 EicC对撞质子束流发射度增长抑制需求

电子束: 1nC

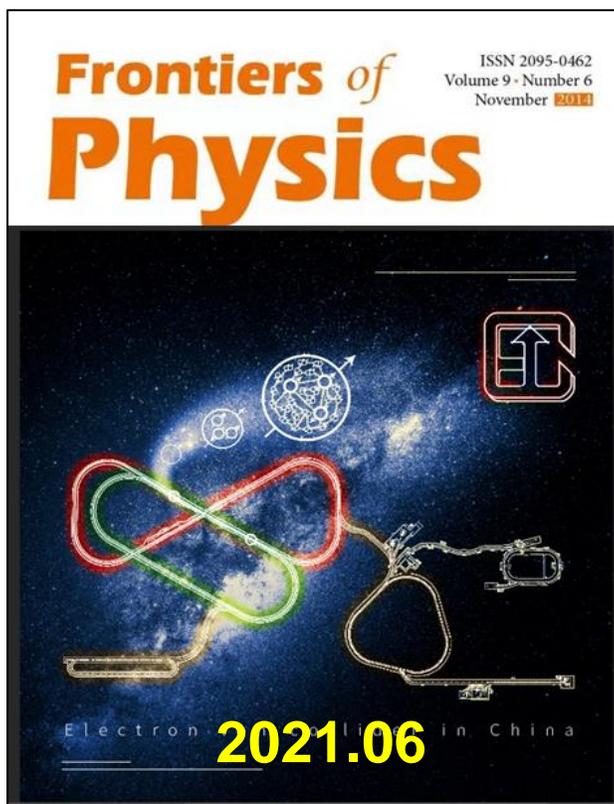
横向角分散: 100 urad

归一化发射度: 5  $\pi$ mm mrad

Electrons per bunch	$6.25 \times 10^9$
Beam size (x/y/z)	3/3/40 mm
Emittance	5 $\pi$ mm mrad
Momentum spread	$5 \times 10^{-4}$
Beta function	50 m
Dispersion	2 m
Effective cooling length	50 m

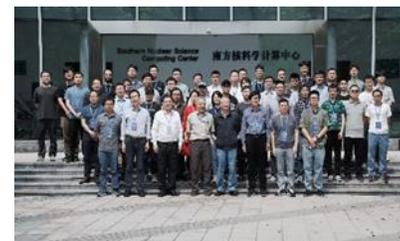


## EicC已完成项目中英文白皮书，概念设计报告即将发布，作为国家**粒子物理和核物理重大科技基础设施建设长期规划项目**完成15次项目研讨会，3次国内/国际专家评议



### 概念设计报告

CONTENTS	
2	Physics requirements and detector concept 115
2.1	Physics requirements 115
2.2	Detector concept 118
3	Tracking system 123
3.1	Introduction 123
3.2	Requirements 124
3.3	Choice of technology 126
3.3.1	The MAPS for EicC tracker 126
3.3.2	The MPGD for EicC tracker 127
3.4	The conceptual design and performance 128
3.4.1	The hybrid tracker layout 128
3.4.2	Detector simulation and reconstruction 133
3.4.3	Momentum resolution 133
3.4.4	Vertex resolution 134
3.4.5	Angular resolution 136
3.4.6	Tracking efficiency 137
3.5	Optimization and evolution of design 137
3.5.1	The toolkit for optimization 138
3.5.2	The strategy of optimization 138
3.5.3	The optimized geometry (with LGAD?) 138
4	PID system 139
4.1	Physics Requirements to PIDs 139
4.2	Detector Options for PID 140
4.2.1	Tracking detectors 140
4.2.2	Cherenkov detectors 140
4.2.3	Time Of Flight (TOF) 145
4.3	Baseline Design for PID 148
4.3.1	The dRICH Designed at Ion Endcap 148
4.3.2	The hpDRIC Designed at Barrel Region 151
4.3.3	The pRICH Designed at Electron Endcap 154
4.3.4	The TOF-detector design 156
4.3.5	Summary of PID detectors 159
5	Calorimetry 165
5.1	Introduction 165
5.2	The Design of ECal Detector 166
5.3	The Crystal Calorimeter 168
5.3.1	C4 Module Design 168
5.3.2	Array Simulation 169
5.3.3	Optical transportation simulation 172
5.3.4	The Crystal Prototype 172
5.4	The Shashlik Style Sampling Calorimeter 173
5.4.1	Shashlik Module Design 173
5.4.2	Array Simulation 174
5.4.3	Design optimization 177



### 国内外45个单位，100多名科研人员参与，概念性设计报告将于2024年底发布

- **EicC将基于HIAF升级装置建设，以最经济的途径取得领先的性能指标**
- **高亮度和双极化是EicC装置的首要目标，年积分亮度 $\geq 100 \text{ fb}^{-1}$ ，电子平均极化率好于80%，质子平均极化率好于70%**
- **快循环模式、移动聚焦对撞等新对撞机动力学方案将有效提升EicC装置的峰值亮度和积分亮度，移动聚焦将开展实验研究**
- **固定场西伯利亚蛇、自旋透明环等新极化保持、控制技术可确保高极化率，提升EicC研究自旋时的有效对撞亮度，固定场西伯利亚蛇将在HIAF测试**
- **色散冷却等新冷却方案，基于ERL的高能束团束等新冷却技术将推动EicC装置在峰值亮度和积分亮度两方面取得突破，也将在HIAF装置进行测试**
- **未来，EicC加速器装置将开展更精细的光学设计和更高精度的动力学研究**



谢谢!