



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences



深圳综合粒子设施研究院
Institute of Advanced Science Facilities, Shenzhen

粒子加速器原理

~衍射极限环简介~

Diffraction Limited Storage Ring

刘星光

liuxg@ihep.ac.cn

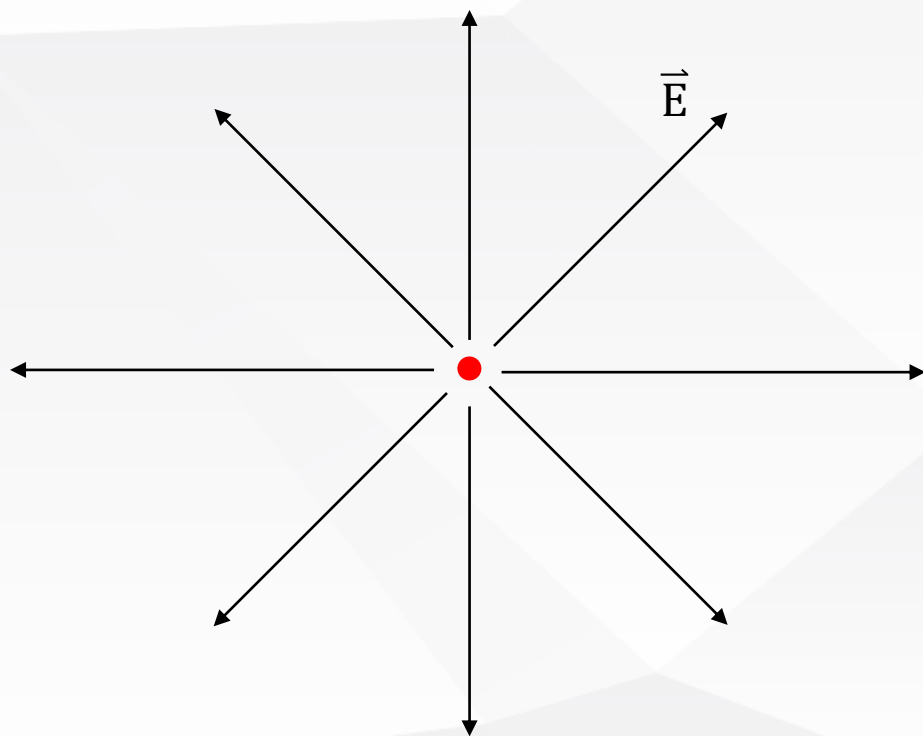
中国科学院高能物理研究所 东莞研究部

2023

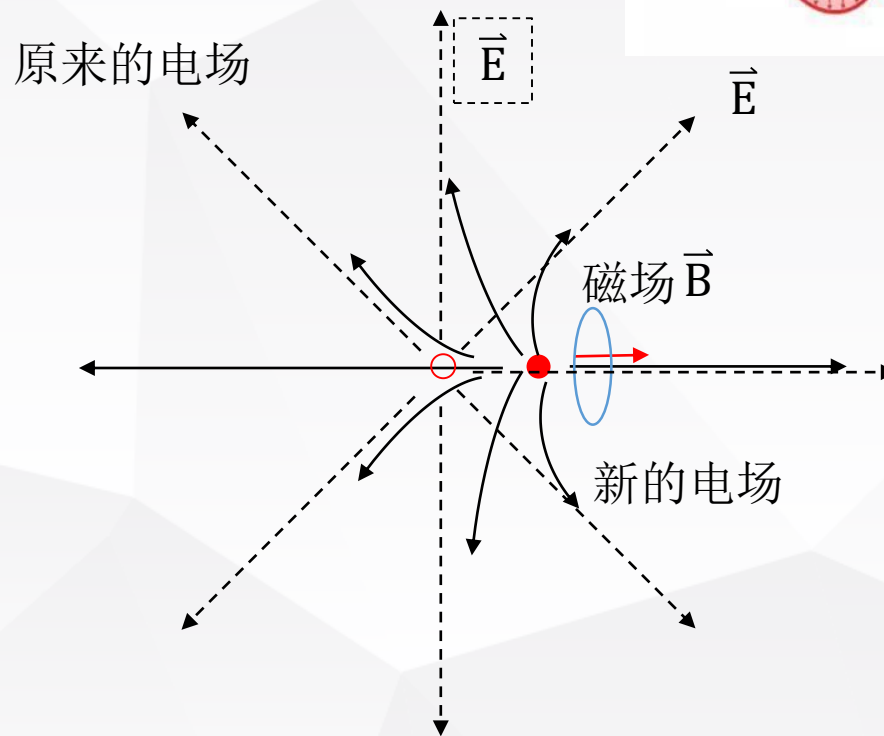


(电磁) 辐射的产生 (Electromagnetic) Radiation Generation

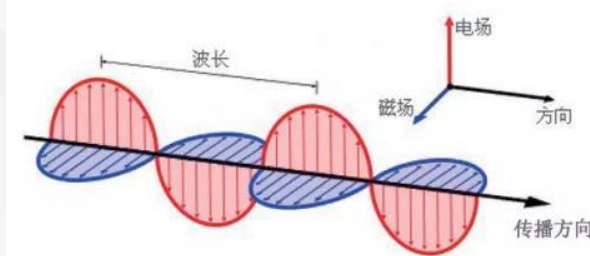
运动的粒子为何会产生辐射?



电荷静止时的电磁场

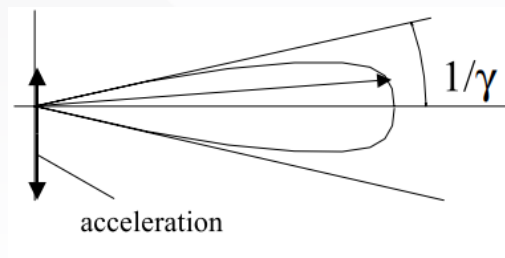


电荷从静止被加速时的电磁场



同步辐射 Synchrotron Radiation

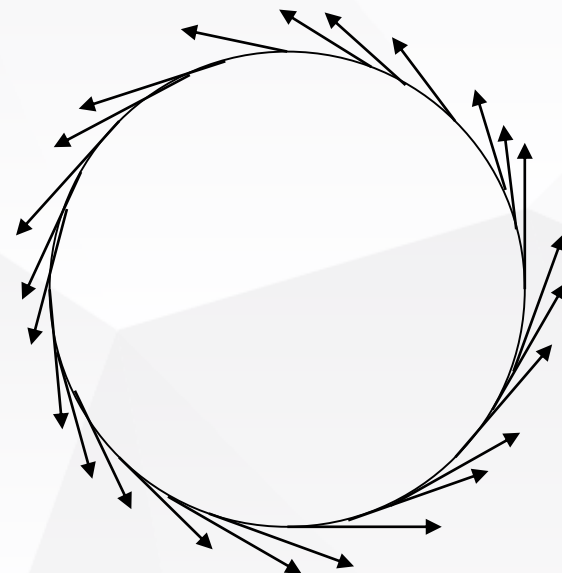
- Betatron发明以后研究辐射机制可能对能量损失的影响
- 1946年在Betatron上轨迹变化与考虑了辐射损失的预测相符
- 1947年在70MeV上的同步加速器上观察到可见的同步辐射光，命名为“同步辐射 Synchrotron Radiation”



辐射方向及夹角



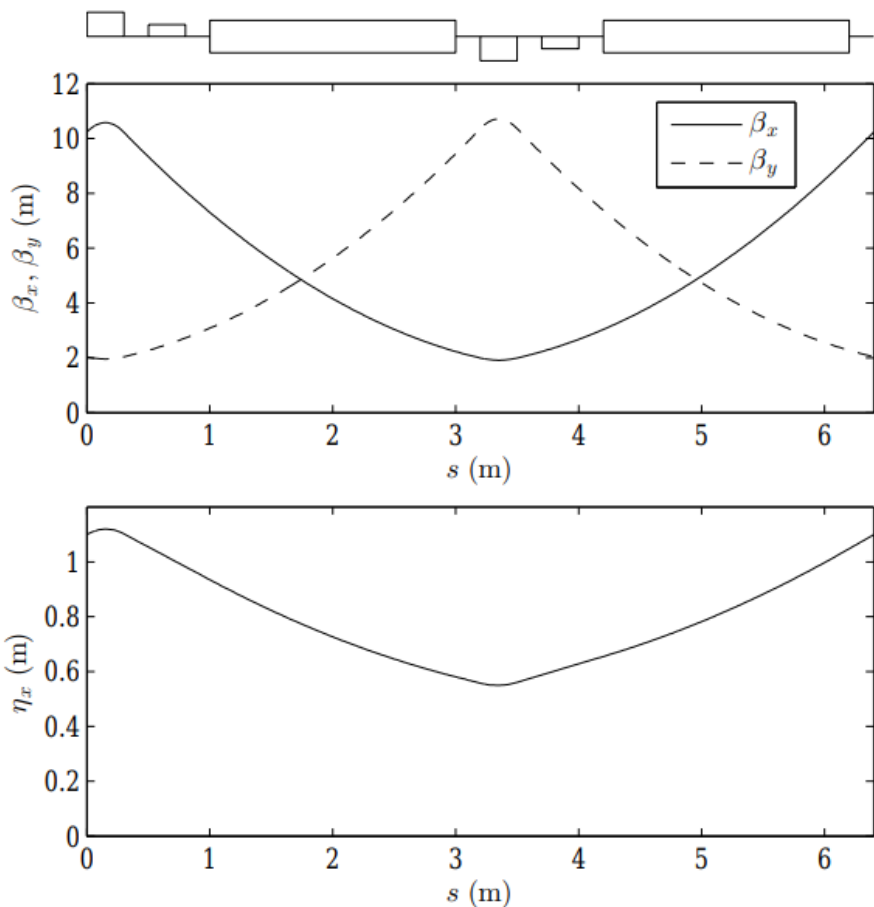
质子会产生同步辐射吗？



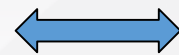
电子储存环上的同步辐射光

同步辐射对lattice影响

FODO和偏转铁组成的环单元节



I_2
同步辐射的damping效应



I_5
量子激发效应

$$\varepsilon_0 \approx C_q \gamma^2 \frac{I_5}{j_x I_2}$$

C_q 量子常数, $I_2 = \oint \frac{ds}{\rho^2}$, $\frac{I_5}{I_2} \approx \frac{8f^3}{\rho^3}$, $j_x = 1$ for 理想二极铁

对于由FODO和偏转铁组成的环:

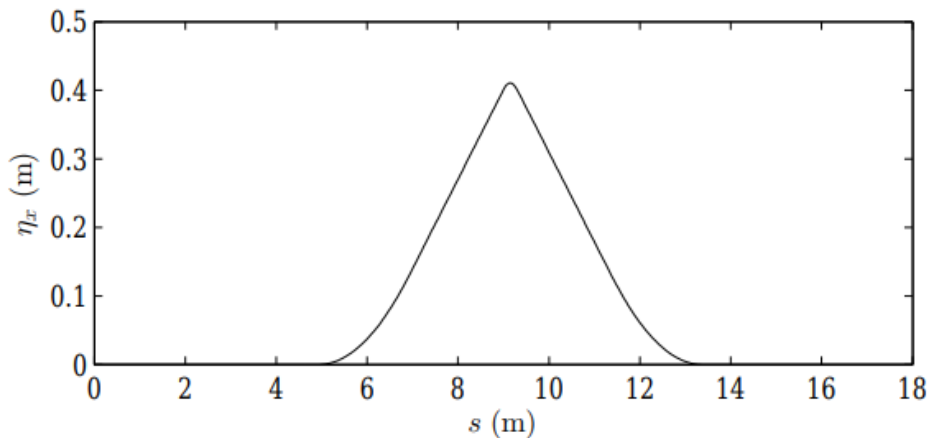
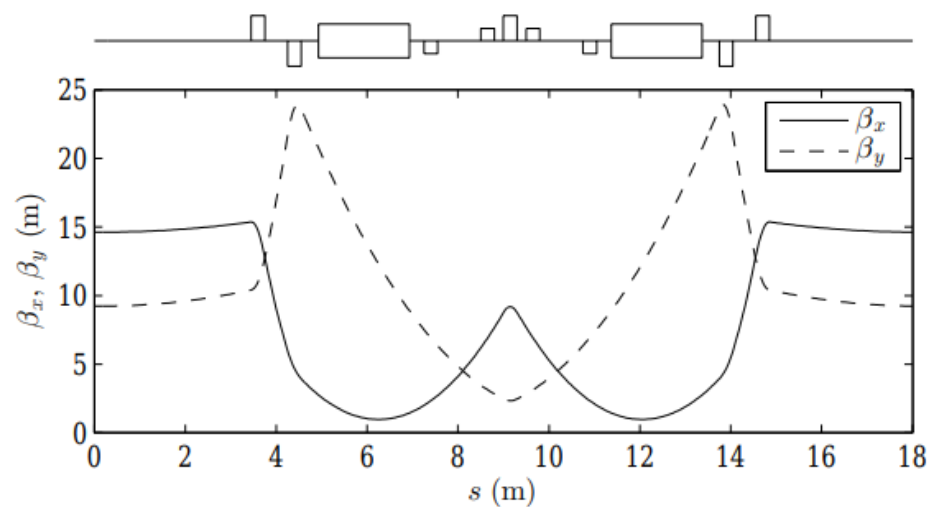
$$\varepsilon_0 \approx C_q \gamma^2 \left(\frac{2f}{L} \right)^3 \theta^3$$

理论最小值为: $\varepsilon_0 \approx 1.2 C_q \gamma^2 \theta^3$



DBA结构： Double Bend Achromat

消色散结构单元节



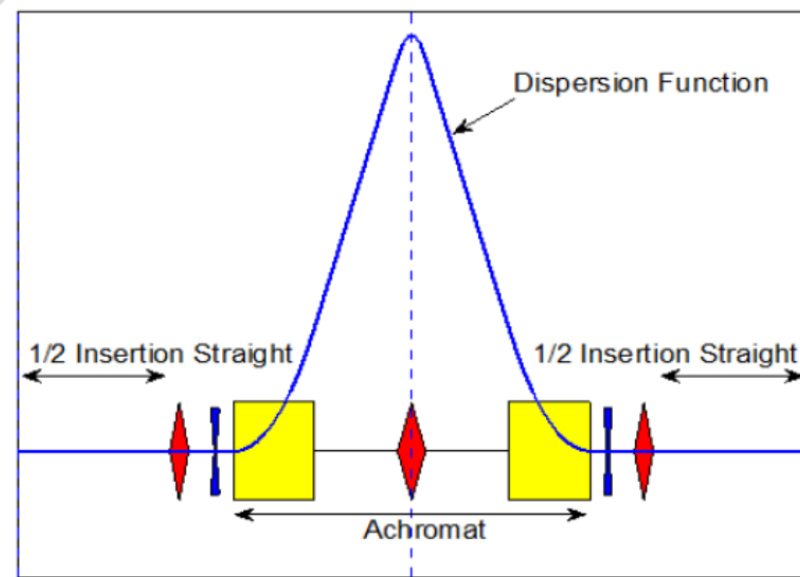
为何要消色散?

$$\varepsilon_0 \approx C_q \gamma^2 \frac{\oint H(s)/\rho^3 ds}{j_x \oint 1/\rho^2 ds}$$

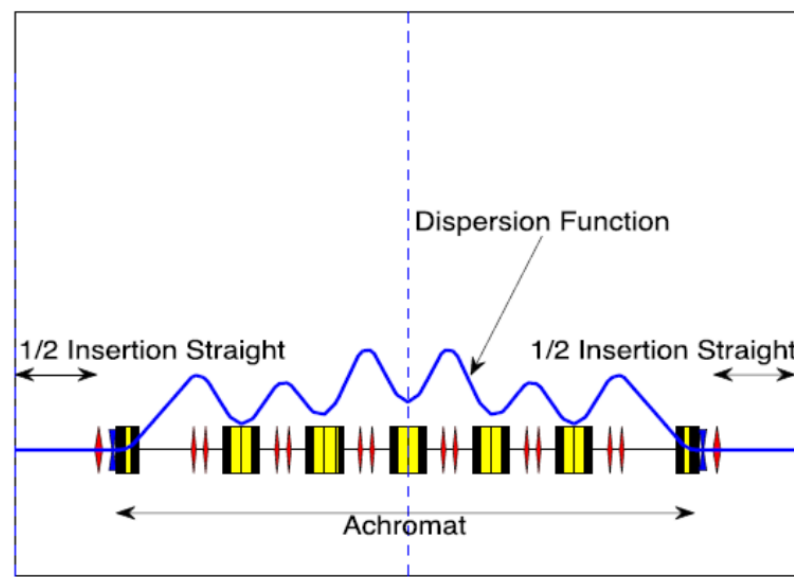
$$H(s) = \gamma \eta^2 + 2\alpha \eta \eta' + \beta \eta'^2$$

理论最小值为: $\varepsilon_0 \approx \frac{1}{4\sqrt{15}} C_q \gamma^2 \theta^3$

消色散结构



MBA结构



- 放开色散为零的限制

理论最小值TME为: $\varepsilon_0 \approx \frac{1}{12\sqrt{15}} C_q \gamma^2 \theta^3$

- 放开只使用纯偏转铁的限制 (使用横纵向均有梯度的偏转铁)

$$\varepsilon_0 \approx \frac{1}{12\sqrt{15}} C_q \gamma^2 \theta^3 \left(\frac{M+1}{M-1} \right)$$

近似关系: $\varepsilon_0 \sim E^2 / N^3$

衍射极限 Diffraction Limited

- 什么是**衍射极限**?

对于特定能量的光子来说，辐射的特性由辐射产生的光子决定，而不是电子。

在束流动力学上来说，束流的**亮度**不再随电子束团的发射度变化。

- 亮度 Brightness, 特定带宽、单位面积、单位立体角内的通量 $\text{ph}/(\text{s mm}^2 \text{ mrad}^2 0.1\% \text{BW})$

$$\mathcal{B} = \frac{F}{4\pi^2 \Sigma_x \Sigma_{x'} \Sigma_y \Sigma_{y'}} \quad \text{或} \quad \mathcal{B} = \frac{F}{4\pi^2 (\varepsilon_x + \varepsilon_R)(\varepsilon_y + \varepsilon_R)}$$

$$\Sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_R^2}$$

$$\varepsilon_R = \frac{\lambda}{4\pi}$$

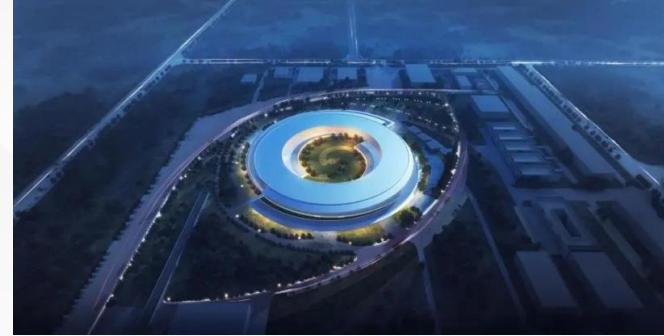


我国同步辐射光源的发展

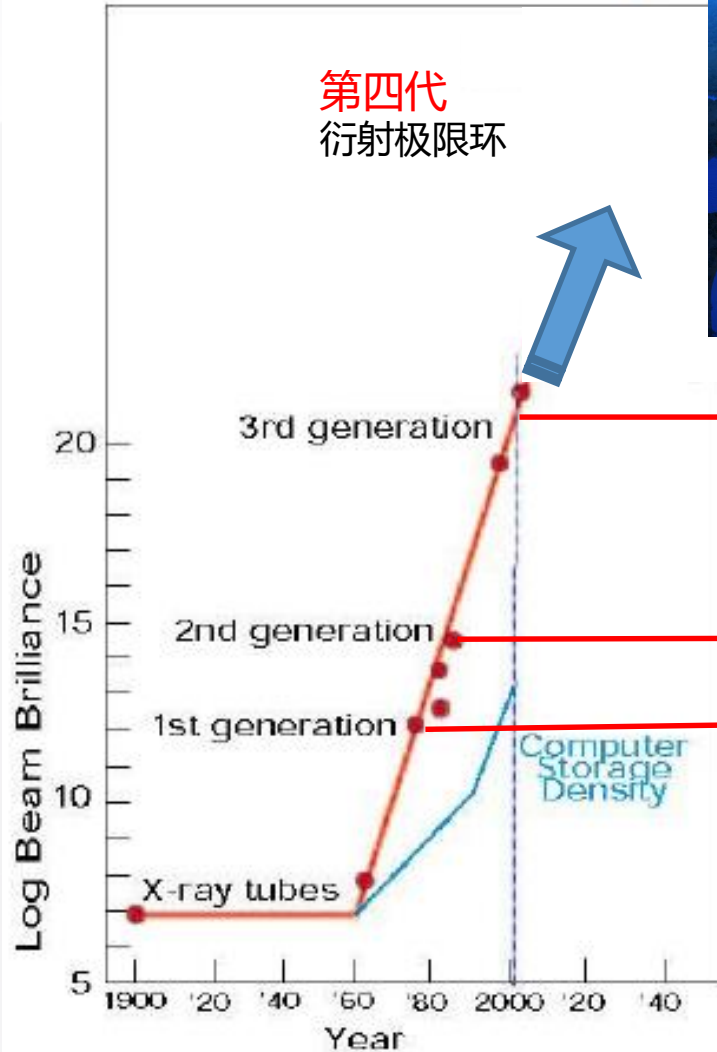
北京高能同步辐射光源 (6GeV, 安装调试)



合肥低能先进光源 (2.2GeV, 立项)



第四代
衍射极限环



第三代
可加装波荡器磁铁的
同步辐射专用光源



上海同步辐射光源

第二代
基于同步辐射专用
储存环的专用机



合肥同步辐射光源

第一代
寄生于高能物理实验专
用的高能对撞机的兼开
机



北京同步辐射装置

世界已有的第四代同步辐射光源

MAX-IV, 瑞典, 528 m, 3 GeV, 0.2-0.4 nm



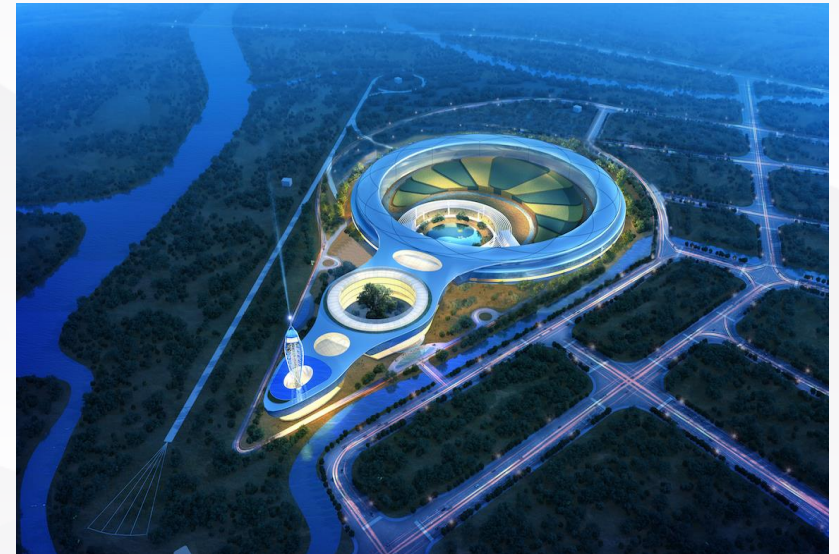
Sirius, 巴西, 518 m, 3 GeV, 0.27 nm



ESRF-EBS, 法国, 844 m, 6 GeV, 0.13 nm



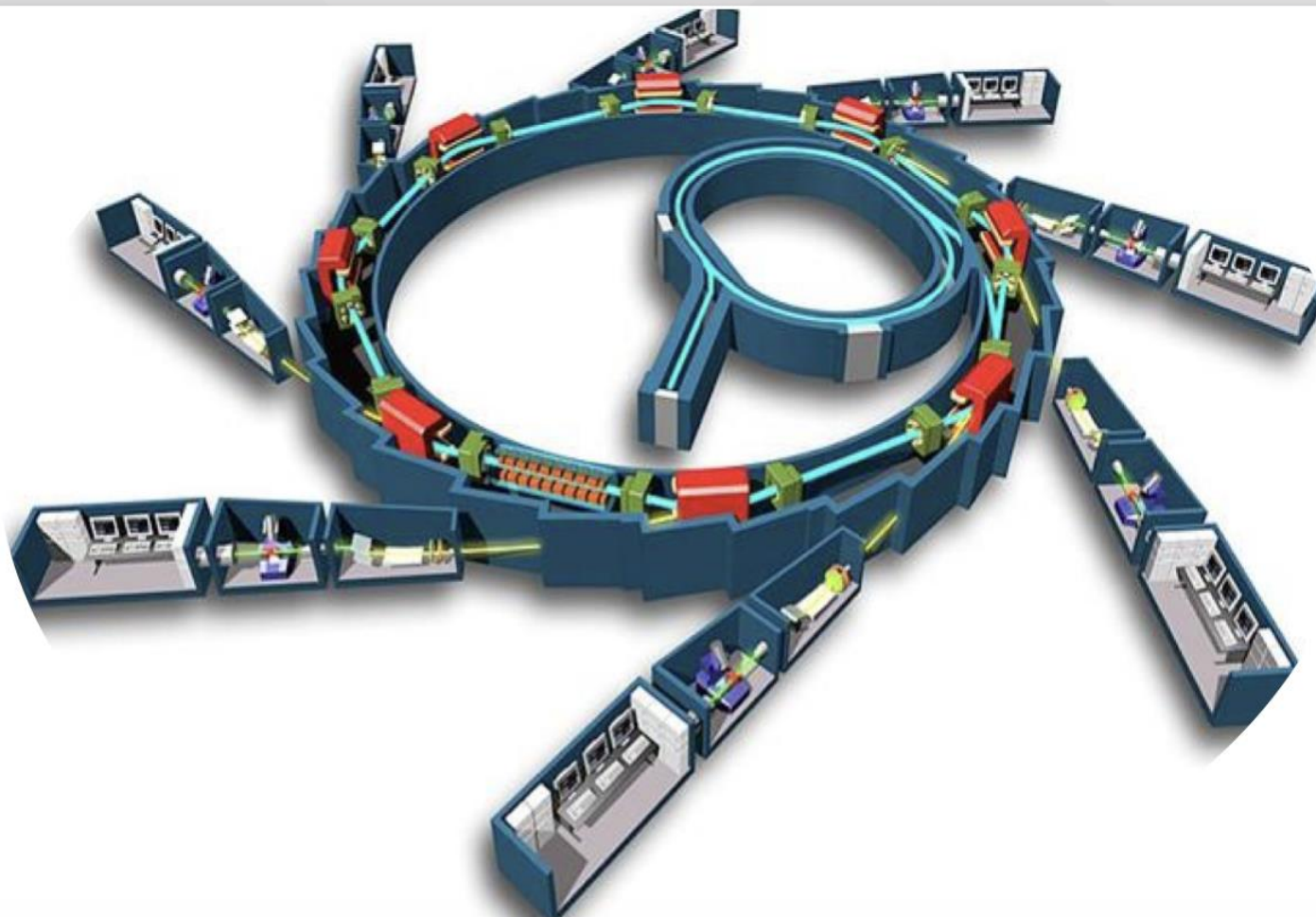
HEPS, 中国, 1360 m, 6GeV, < 0.036 nm



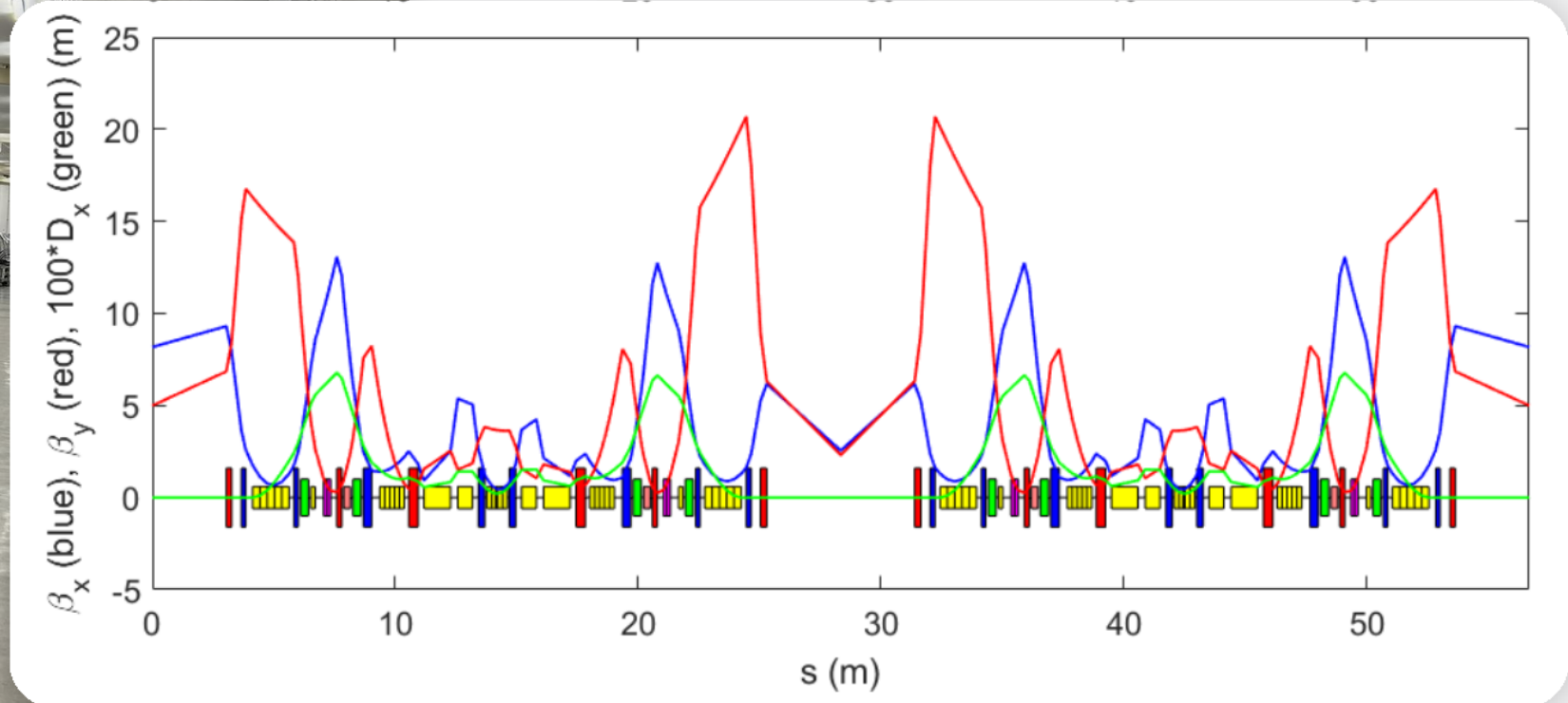
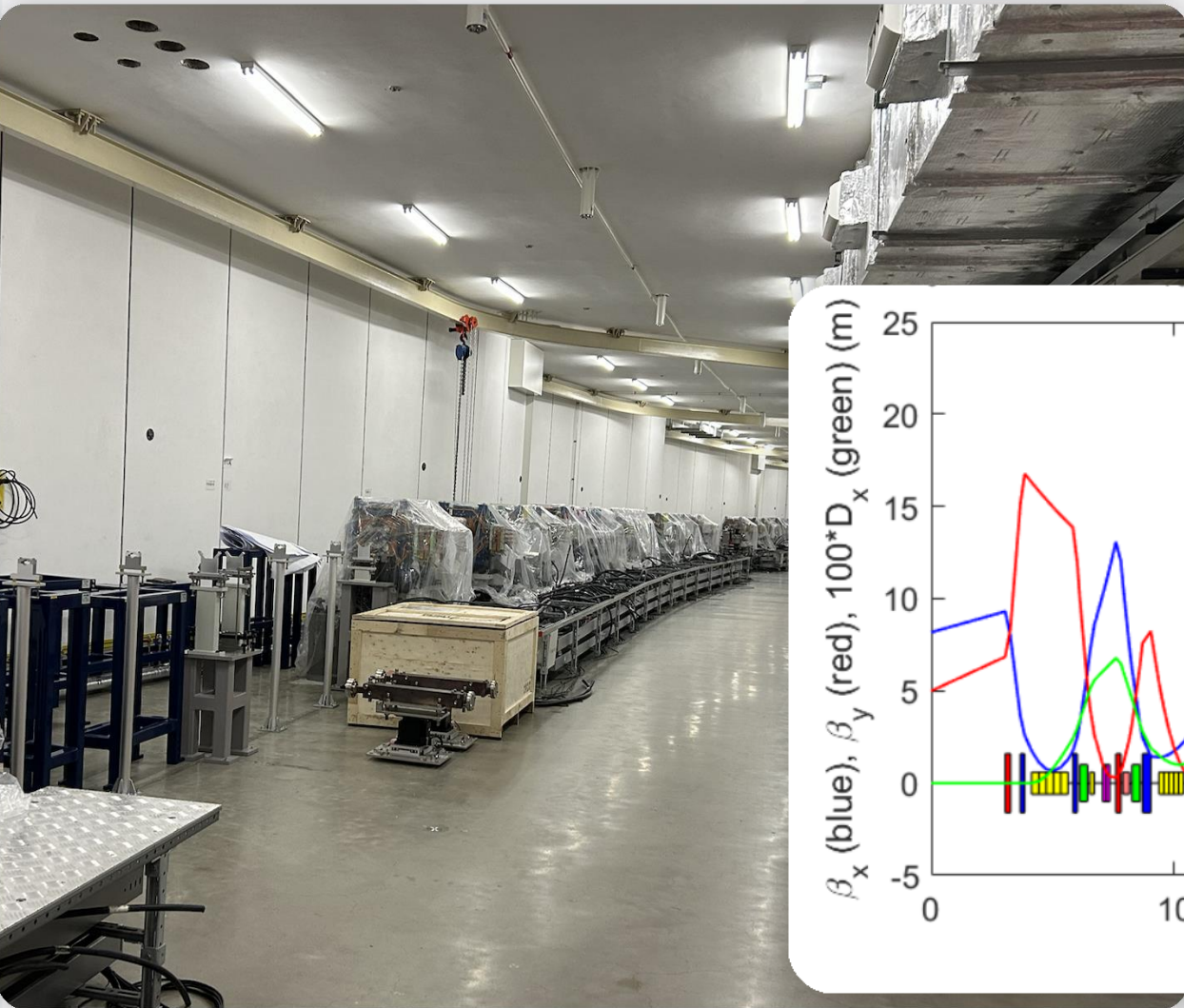
安装调试中

>> HEPS 整体示意图

能量	6GeV
亮度	10^{22}
流强	200 mA
水平自然发射度	$<60\text{ pm}$



➤ HEPS 周期性单元节设计



- **衍射极限环是物理和工程的完美结合，将光源的亮度几乎推到了理论设计的极限**
- **我国在第四代同步辐射光源的发展处于国际前沿，必将对基础科研提供重要支撑**
- **希望年轻一代也能积极投身“大国重器”的建设事业当中**