

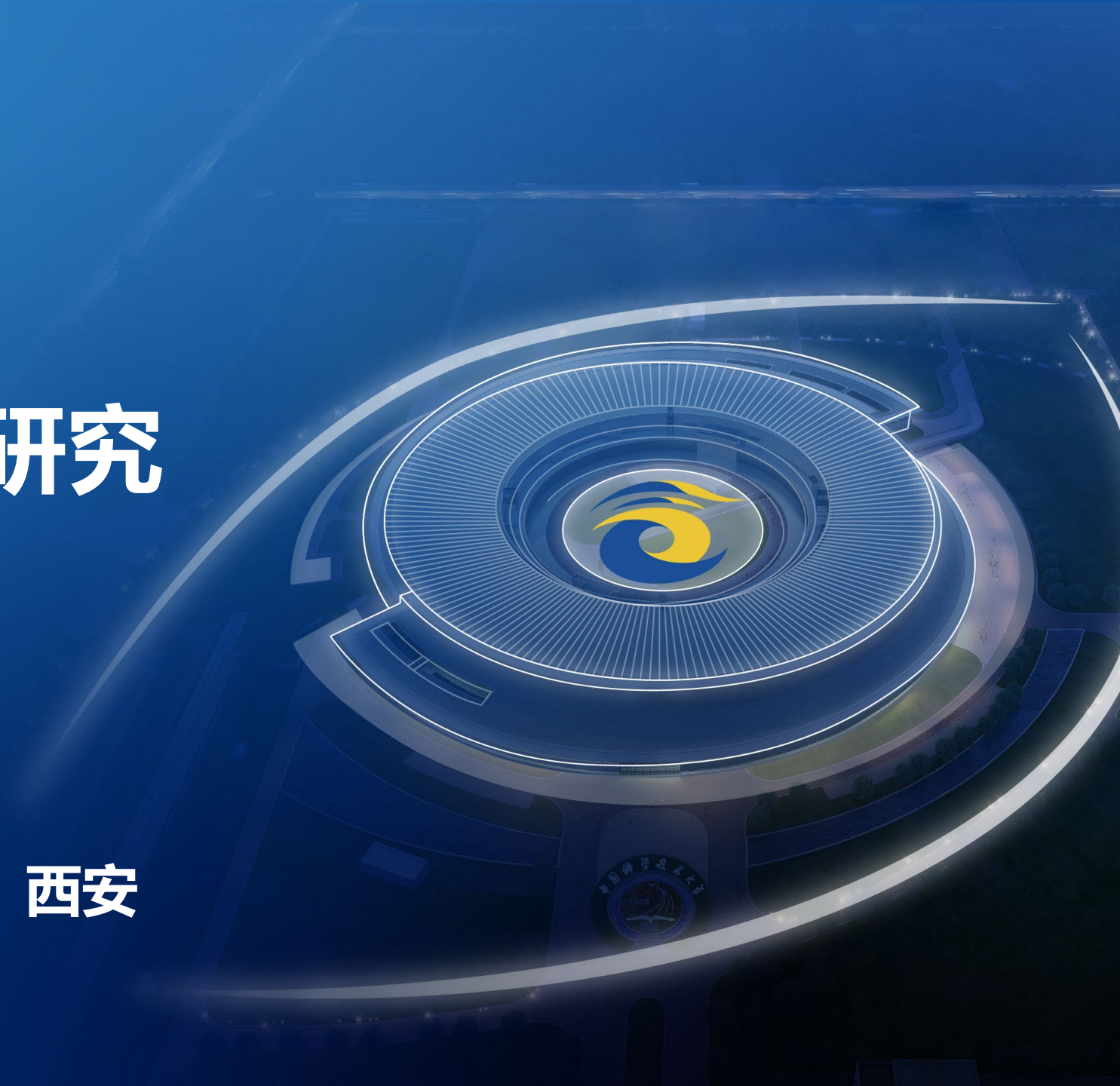


中国科学技术大学
国家同步辐射实验室
NATIONAL SYNCHROTRON RADIATION LABORATORY

基于量子激发的 发射度补偿方案研究

刘晓宇

2026年超级陶浆装置研讨会，西安





目 录

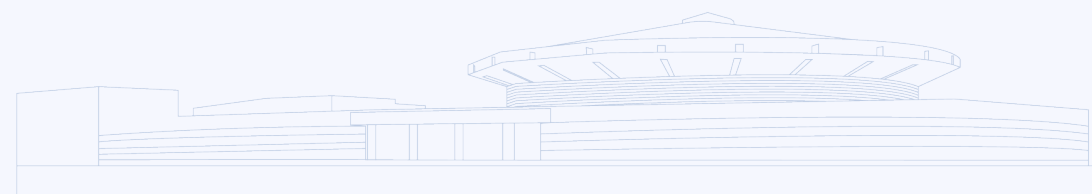
CONTENTS

01 研究背景与现状

02 基于量子激发的发射度补偿方案

03 发射度补偿方案参数研究

04 总结

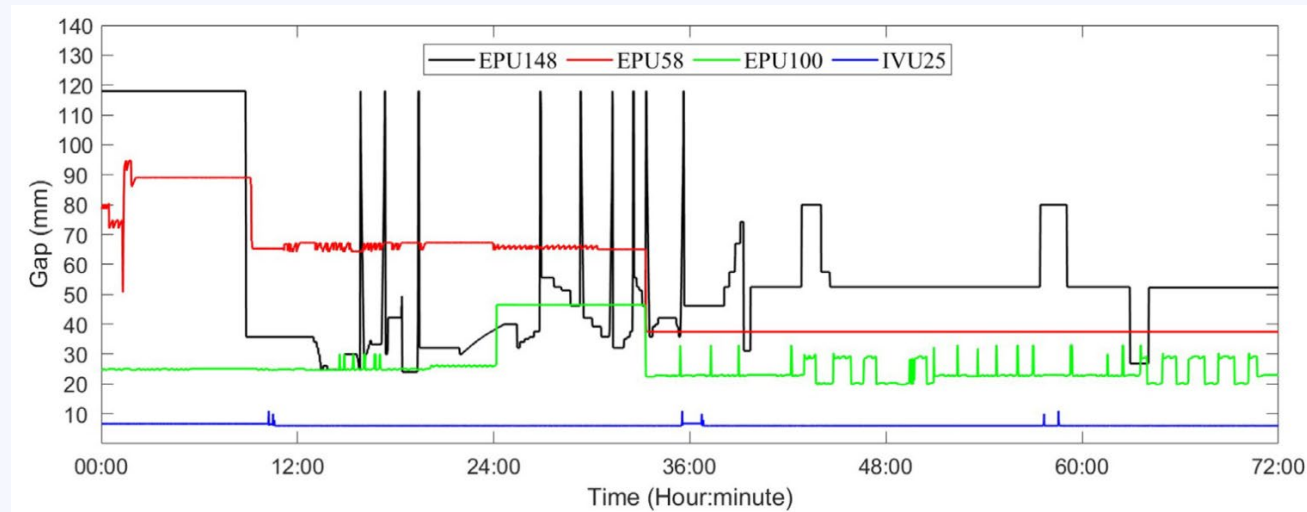


研究背景与现状：发射度扰动



➤ 同步辐射光源：插入件动态调整

- 第四代同步辐射光源普遍采用MBA结构降低束流发射度，自然发射度可以达到100 pm·rad甚至10 pm·rad水平。相比于第三代同步辐射光源，第四代同步辐射光源中二极磁铁中束流的同步辐射功率较小，插入件辐射对全环总辐射功率的贡献相对较大。
- 插入件间隙变化引起辐射能损变化，进而引起束流发射度和能散的变化，影响辐射光的稳定性。



➤ 对撞机：能量变化

- 新一代对撞机可运行在多种能量，对应于多种运行模式。
- 束流发射度与能量平方成正比，对撞机能量变化范围较大，其自然发射度也有较大变化。为了在整个能量范围达到最大亮度，需要控制辐射阻尼参数保持不同能量下发射度恒定。

对撞机	束流能量范围
FCC-ee	45.6 ~ 182.5
CEPC	45.5 ~ 180.0
STCF	1.0 ~ 3.5
SCTF(BINP)	1.0 ~ 2.5

研究背景与现状：发射度补偿方案



中国科学技术大学
国家同步辐射实验室
NATIONAL SYNCHROTRON RADIATION LABORATORY

➤ 发射度补偿原理：

- Lattice辐射阻尼参数调整。

$$\epsilon_x = C_q \gamma^2 \frac{I_5}{I_2 - I_4}, \quad \sigma_\delta = \sqrt{C_q \gamma^2 \frac{I_3}{2I_2 + I_4}}, \quad \epsilon_{x,\text{eff}} = \sqrt{\epsilon_x^2 + \frac{\epsilon_x \eta_x^2 \sigma_\delta^2}{\beta_x}}$$

量子激发

$$I_2 = \oint \frac{1}{\rho^2} ds$$

$$I_3 = \oint \frac{1}{\rho^3} ds$$

$$I_4 = \oint \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{1}{\rho^2} + 2K_1 \right) ds, \quad K_1 = \frac{1}{B\rho} \frac{\partial B_y}{\partial x}$$

$$I_5 = \oint \frac{\mathcal{H}_x}{|\rho^3|} ds, \quad \mathcal{H}_x = \gamma_x \eta_x^2 + 2\alpha_x \eta_x \eta'_x + \beta_x \eta_x'^2$$

辐射阻尼

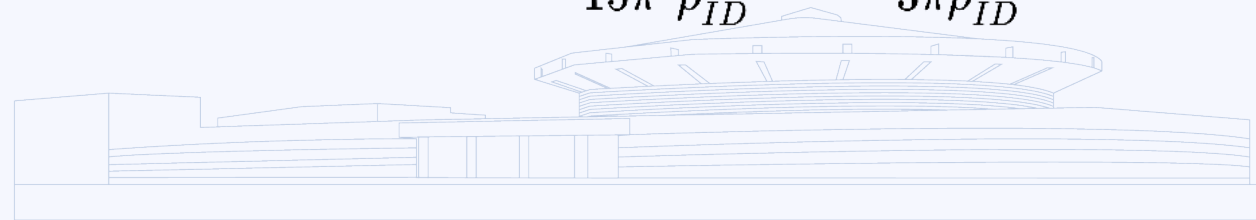
$$\Delta I_{2,ID} = \frac{L_{ID}}{2\rho_{ID}^2}$$

$$\Delta I_{3,ID} = \frac{4L_{ID}}{3\pi\rho_{ID}^3}$$

$$\Delta I_{4,ID} \approx 0$$

$$\Delta I_{5,ID} = \frac{\langle \beta_x \rangle \lambda_{ID}^2 L_{ID}}{15\pi^3 \rho_{ID}^5} + \frac{4L_{ID} \mathcal{H}_{x0}}{3\pi\rho_{ID}^3}$$

- 引入额外的发射度贡献来源：白噪声、IBS等。

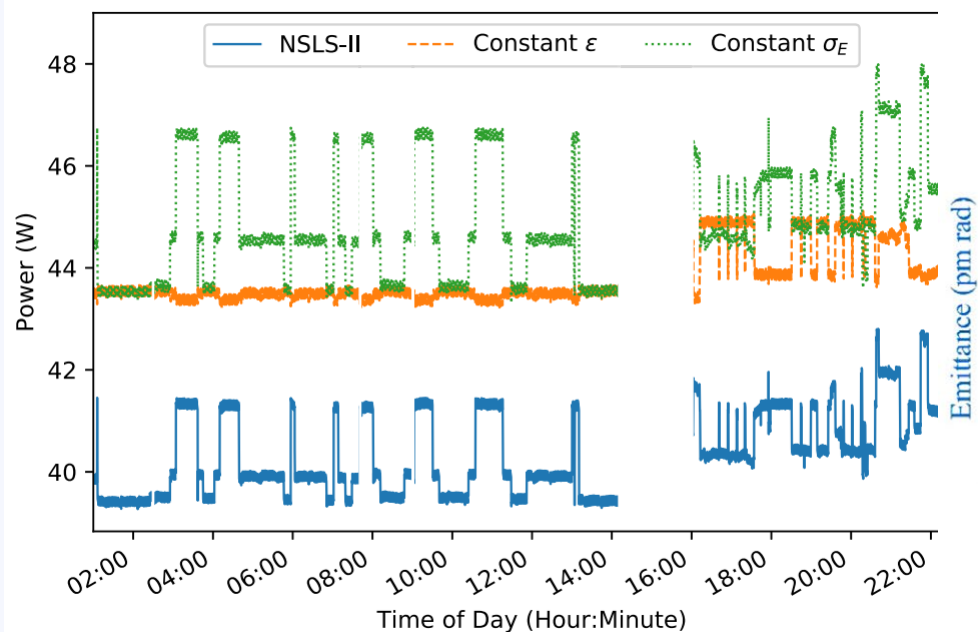


研究背景与现状：发射度补偿方案

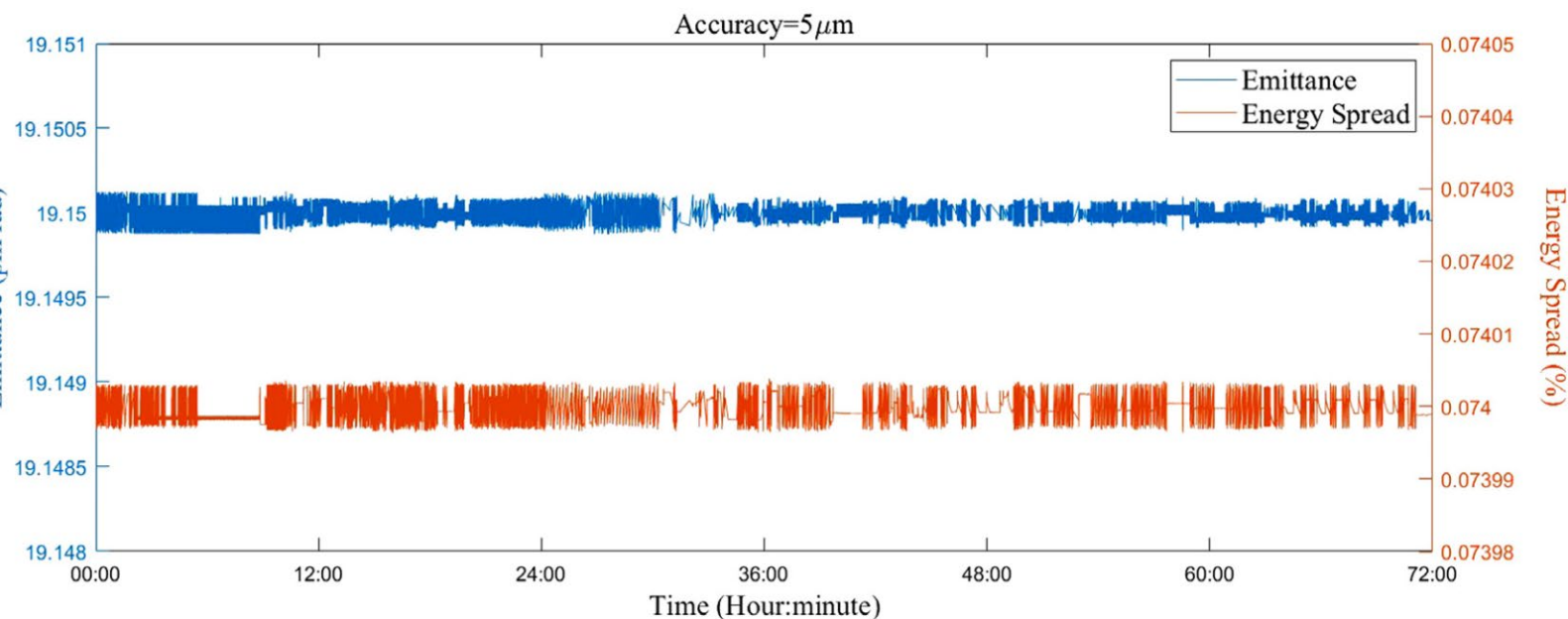
➤ 消色散直线节+可变间隙wiggler

- 消色散直线节安装可变间隙的专用wiggler，与用户插入件间隙同步调整，补偿用户插入件间隙变化引起的辐射能损变化。
- 基于**辐射阻尼**：补偿wiggler主要改变同步辐射积分 I_2 。
- NSLS-II、SSRF已有该方法相关的报道。

NSLS-II利用辐射阻尼效应补偿发射度变化



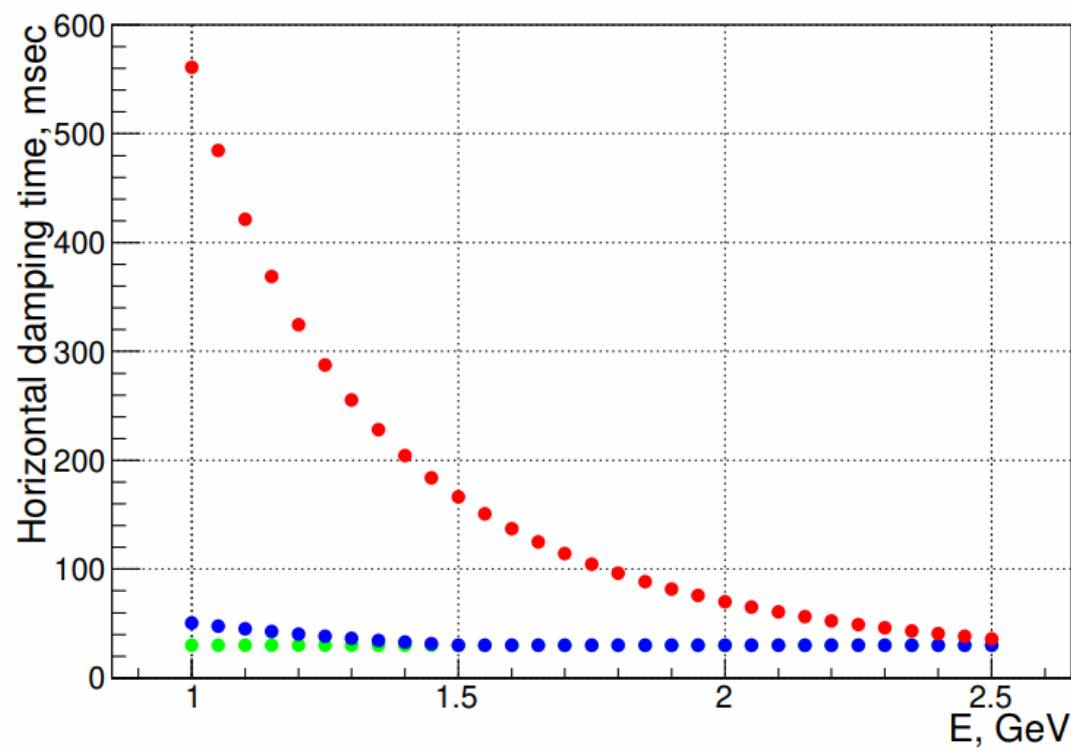
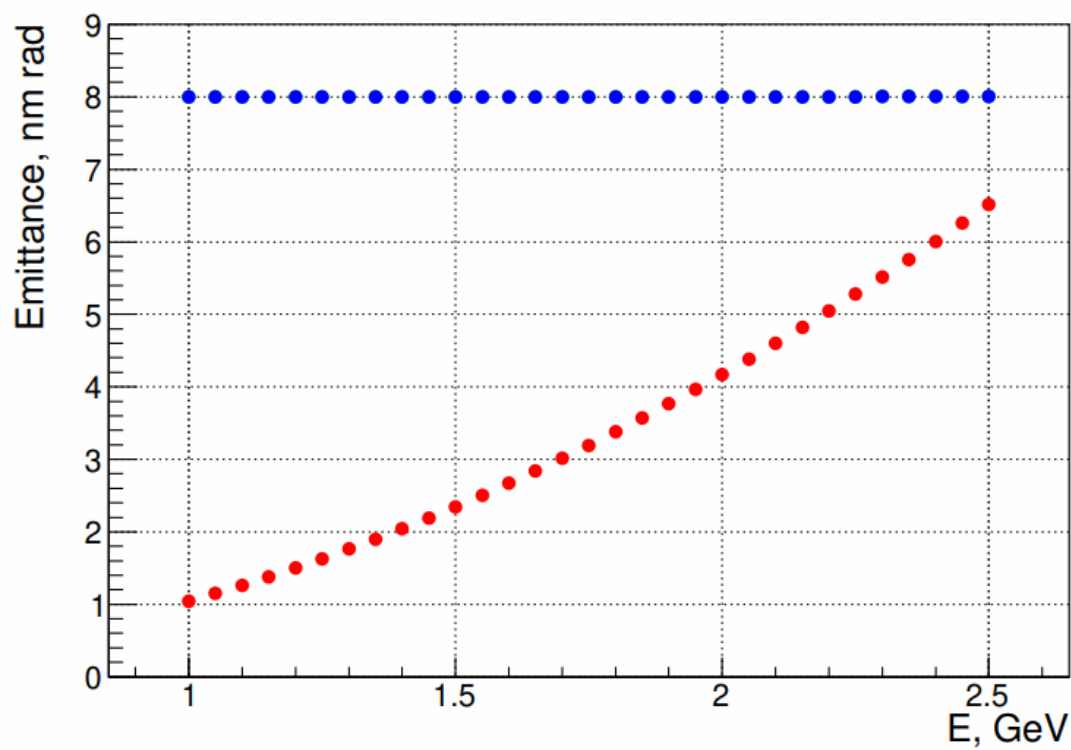
上海光源基于辐射阻尼效应利用两个wiggler同时补偿发射度和能散变化



研究背景与现状：发射度补偿方案

➤ 消色散直线节+可变间隙wiggler

- 消色散直线节安装超导wiggler时，磁场较强，wiggler自身引起的色散较大，量子激发效应增强，占据主导地位，发射度增大，同样可用于补偿发射度变化。
- BINP的SCTF对撞机使用变间隙的超导wiggler在不同能量下保持发射度恒定。



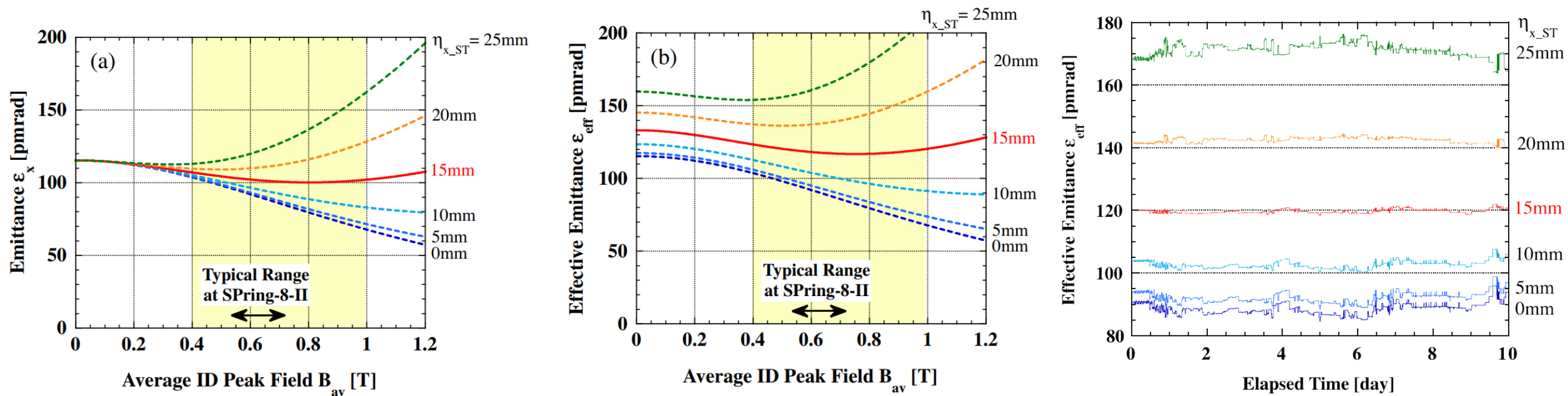
— w/o wigglers, — with 70 kGs wigglers, — with 50 kGs wigglers

研究背景与现状：发射度补偿方案

➤ 引入固定色散凸轨

- 所有插入件直线节引入色散，插入件间隙变化时，束流发射度和能散均在变化，通过优化色散值使得插入件处有效发射度的扰动最小（**辐射阻尼和量子激发的平衡**）。
- Spring-8-II提出，并进行了相关研究（泄露色散15mm）。与补偿前相比，用这种方法可以减少一个数量级的发射度变化。

SPring-8-II利用辐射阻尼和量子激发的平衡使有效发射度变化最小



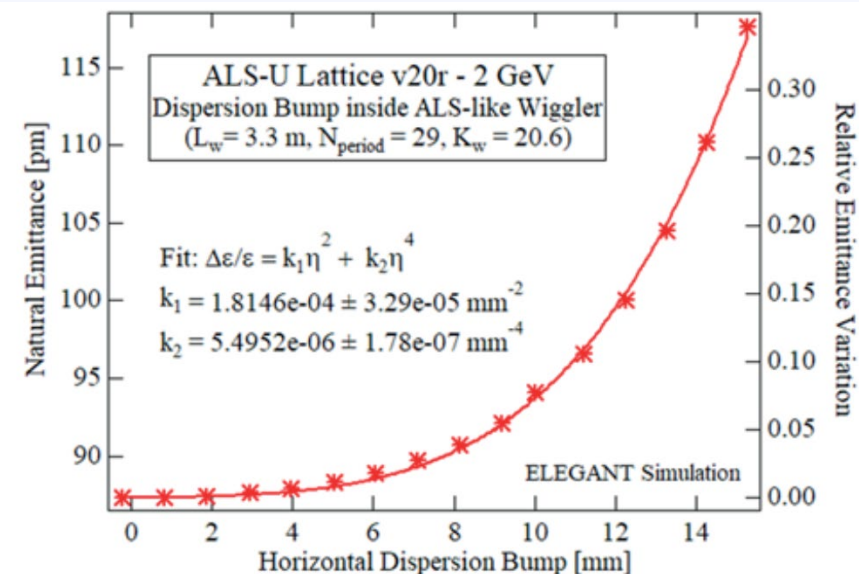
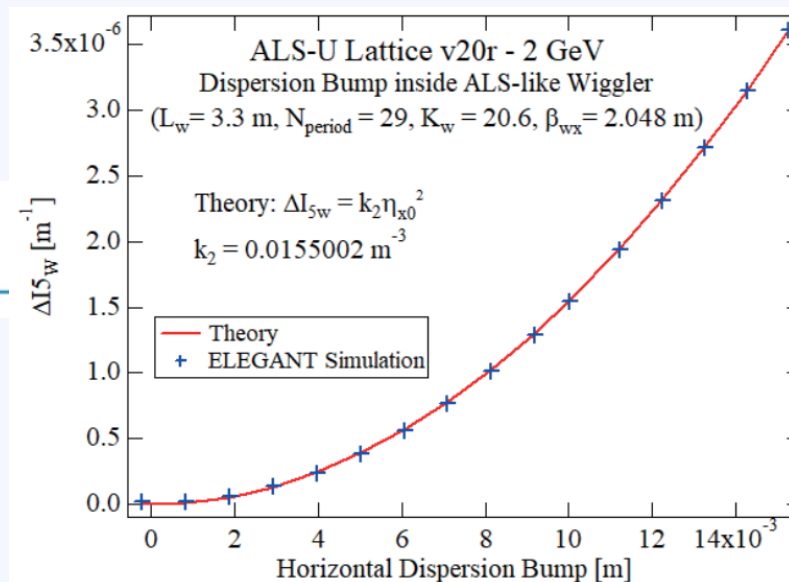
研究背景与现状：发射度补偿方案

➤ 固定wiggler间隙+可变局部色散凸轨

- Wiggler固定间隙，可为用户供光。
- 利用4个小弯铁组成**Chicane**，在wiggler处产生可变局部色散凸轨。动态调整Chicane强度改变色散，补偿其他插入件引起的发射度变化（**量子激发**）。
- ALS-U提出并开展相关研究：10 mm色散引起 5% 发射度变化
- 优势：wiggler间隙固定，可兼容用户模式（如果wiggler用户可以接受水平束流尺寸的变化）。
- 缺点：需要额外的调节手段产生较大的局部色散凸轨，可能会对束流动力学产生不利影响。



ALS-U利用Chicane在wiggler处产生局部色散



研究背景与现状：发射度补偿方案

➤ 其他方案

• 微调束流能量：

- 改变高频频率，利用发射度对能量的平方关系，1%的动量偏差引起 5%的发射度变化。
- 缺点：二极磁铁中光源点的位置及辐射光子能量发生变化；同时对储存环的动量接受度提出较大的要求。

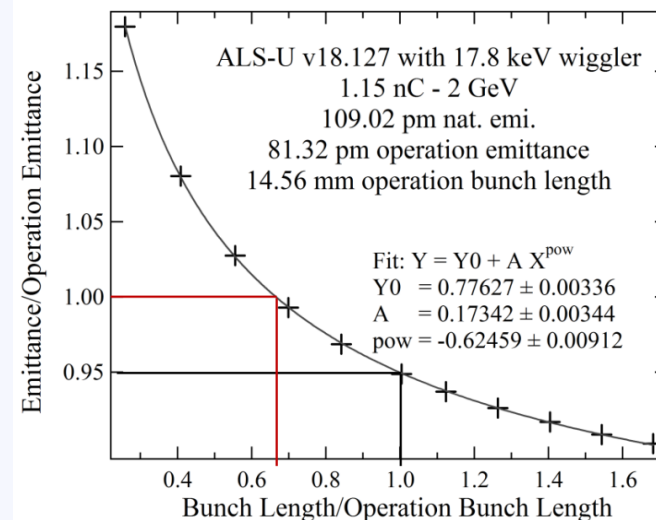
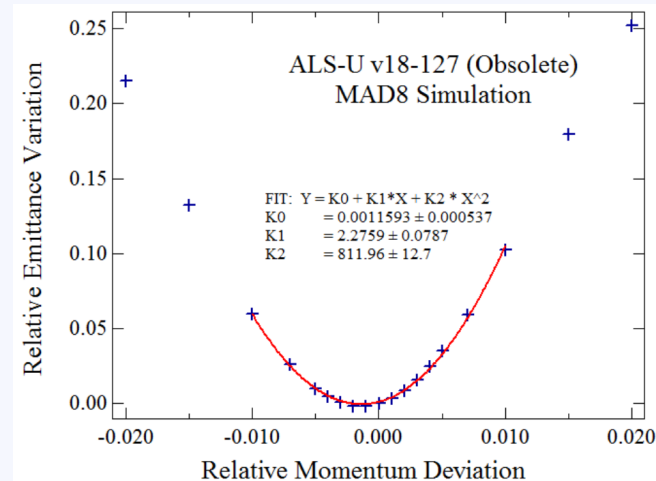
• 束内散射效应：

- 调整束团长度，控制IBS效应引起的发射度增长。束团长度需要缩短至之前的66%。
- 缺点：对束团长度的调节范围有限，无法补偿较大范围的发射度扰动；缩短束团长度会降低束流寿命。

以上方案的工程可实施性较差

• 白噪声激励：

- 利用现有的束流反馈系统激励产生额外的发射度，保证束流尺寸的稳定性
- 缺点：激励参数调整不佳则有可能引起束流不稳定性；激励信号产生的束流噪声会影响高时间分辨的实验。

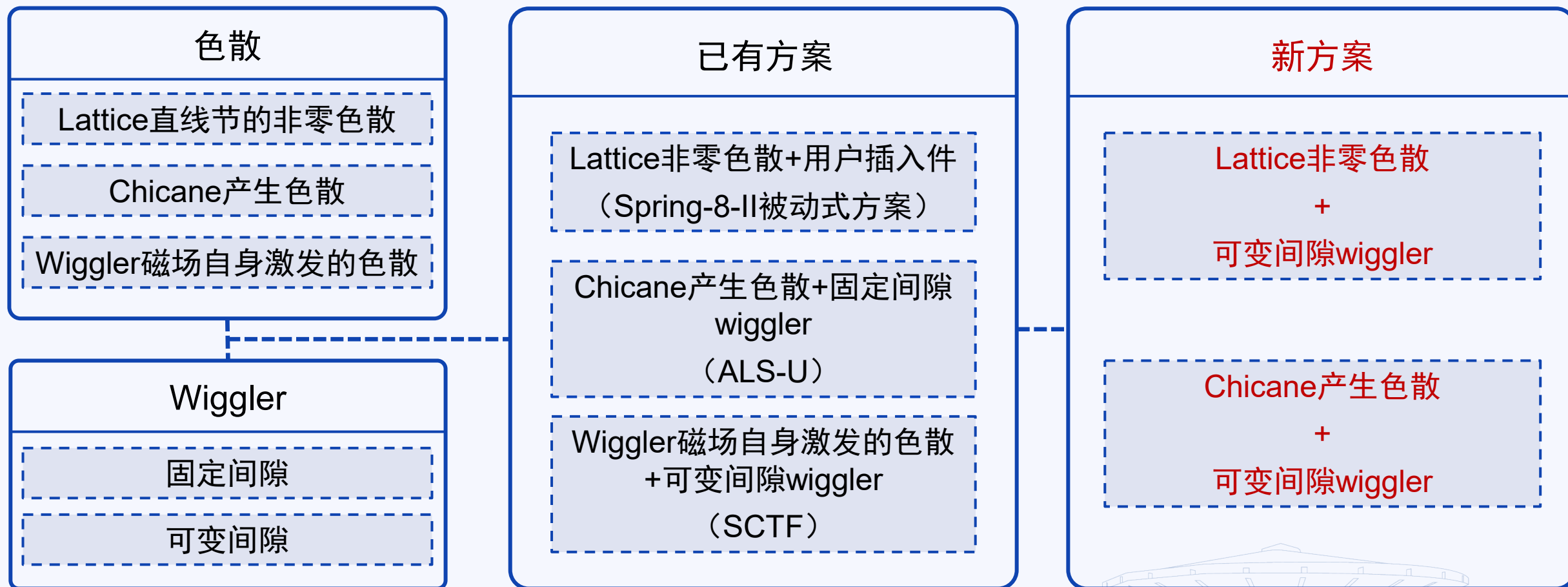


基于量子激发的发射度补偿方案



中国科学技术大学
国家同步辐射实验室
NATIONAL SYNCHROTRON RADIATION LABORATORY

➤ 核心因素：色散+Wiggler

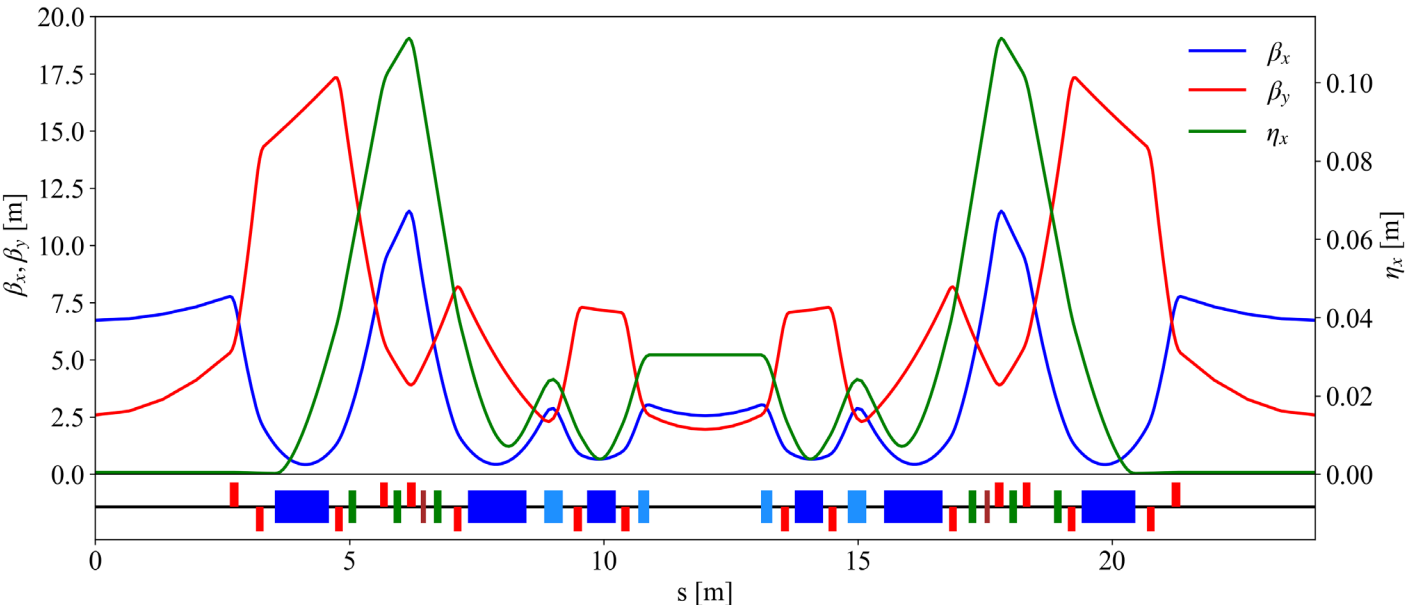


➤ 新方案可统一表述为：外部固定色散+可变间隙wiggler

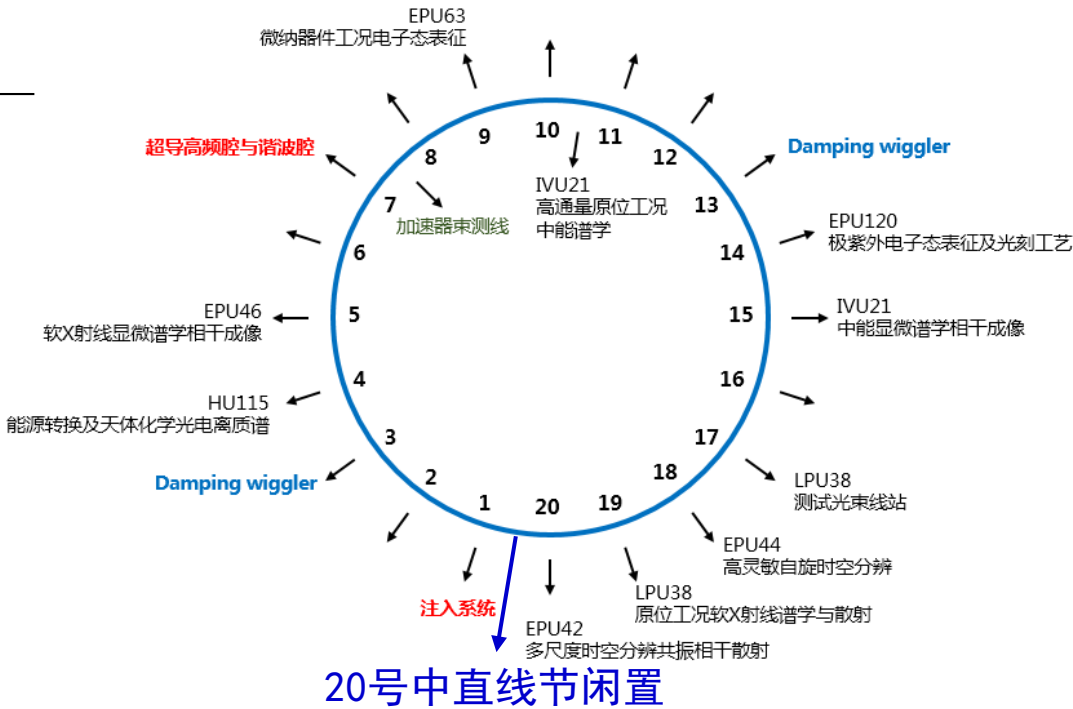
基于量子激发的发射度补偿方案

➤ HALF储存环及插入件主要参数:

Parameters	Value	ID	Type	Period [mm]	Period Number	Max. K	Number
Energy	2.2 GeV	HU		115	35	8.97	1
Circumference	479.86 m	EPU		120	33	11.26	1
Number of cells	20	EPU		63	65	5.77	1
Natural emittance	85.8 pm · rad	EPU		43.5	36	2.94	2
Natural energy spread	0.61×10^{-3}	EPU		46	90	3.29	1
Betatron tunes (H/V)	48.19 / 17.19	EPU		41.5	99	2.67	1
Natural chromaticities (H/V)	-81.6 / -56.6	IVU		20.7	182	2.10	1
Momentum compaction factor	0.94×10^{-4}	IVU		20.7	52	2.10	1
Damping partition (H/V/L)	1.36 / 1.0 / 1.64	LPU		38.2	108	2.83	1
Natural Damping time (H/V/L)	28.5 / 38.8 / 23.7 ms	LPU		38.5	108	3.36	1
Energy loss per turn	181.4 keV	Wiggler		100	42	16.00	2



- 20个长直线节+20个中直线节，中直线节色散函数较大（30 mm）
- 一期插入件中，一个短IVU位于中直线节，其他插入件均位于长直线节
- 第20号中直线节由于安装空间限制，无法安装用户插入件，目前闲置

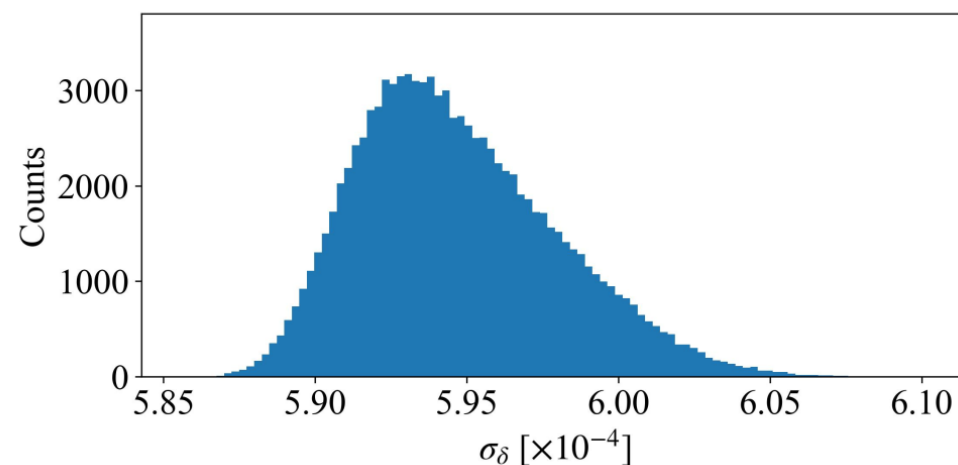
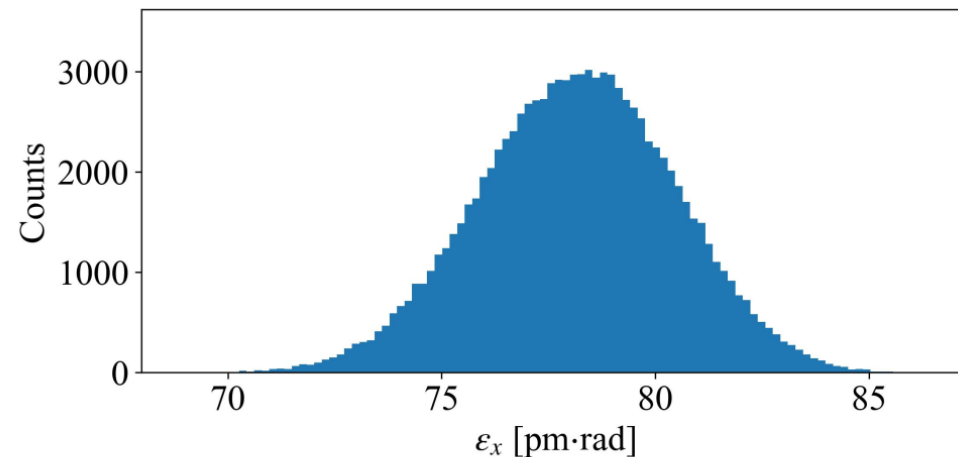


基于量子激发的发射度补偿方案

➤ HALF一期插入件引起的发射度扰动:

- 100000组用户插入件间隙随机变化样本, 统计分析其引起的发射度和能散变化 (99%运行情况)

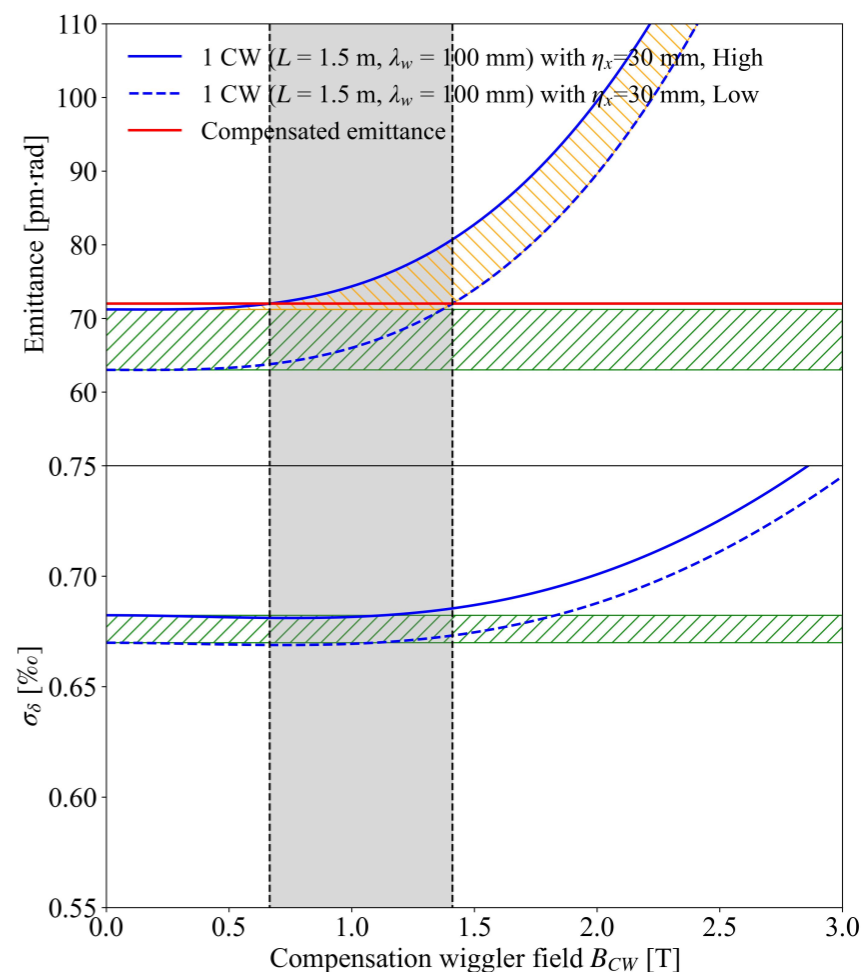
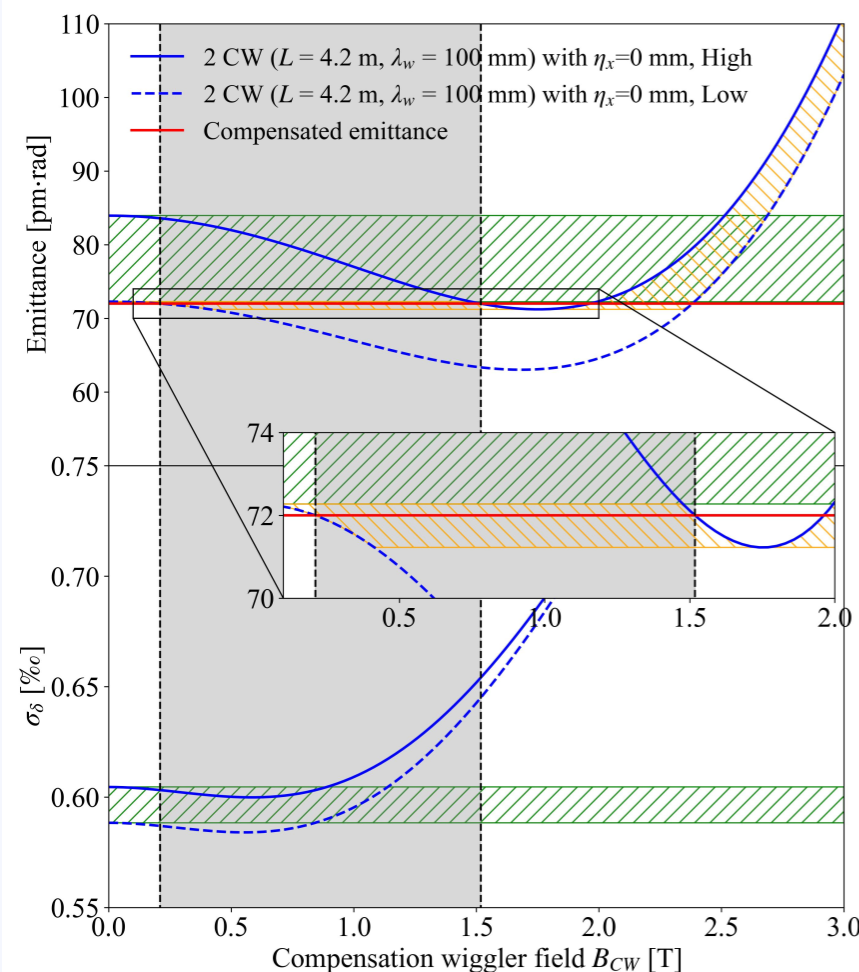
	发射度扰动	能散扰动	中直线节有效发射度扰动
Bare lattice	$\pm 7.4\%$	$\pm 1.3\%$	$\pm 5.0\%$
Bare lattice + 1 DW	$\pm 6.7\%$	$\pm 1.0\%$	$\pm 4.7\%$
Bare lattice + 2 DW	$\pm 6.1\%$	$\pm 0.9\%$	$\pm 4.3\%$
Bare lattice + 1 DW, IBS(20%耦合)	$\pm 3.8\%$	$\pm 1.0\%$	$\pm 3.0\%$
Bare lattice + 2 DW, IBS(20%耦合)	$\pm 3.4\%$	$\pm 1.0\%$	$\pm 2.7\%$
Bare lattice + 1 DW, IBS(100%耦合)	$\pm 4.6\%$	$\pm 0.9\%$	$\pm 3.3\%$
Bare lattice + 2 DW, IBS(100%耦合)	$\pm 4.0\%$	$\pm 0.9\%$	$\pm 3.0\%$



基于量子激发的发射度补偿方案

➤ 零流强情况发射度补偿:

- **辐射阻尼方案**: 两个位于长直线节的DW可以调整gap补偿发射度扰动。
- **量子激发方案**: 在目前闲置的20号中直线节安装可变gap的短wiggler, 同时两个DW固定最小gap。
- 量子激发方案可以达到辐射阻尼方案**相同的发射度补偿水平**。
- 量子激发方案补偿wiggler数目更少 ($1 < 2$), **磁场更弱** ($1.41\text{ T} < 1.56\text{ T}$), 磁极间吸力更小。
- 发射度补偿过程中, 量子激发方案**对能散扰动更小** ($\pm 1.2\% < \pm 5.5\%$)。
- 两台长直线节的DW可以固定gap为用户供光, 即**增加了两条wiggler线站**。

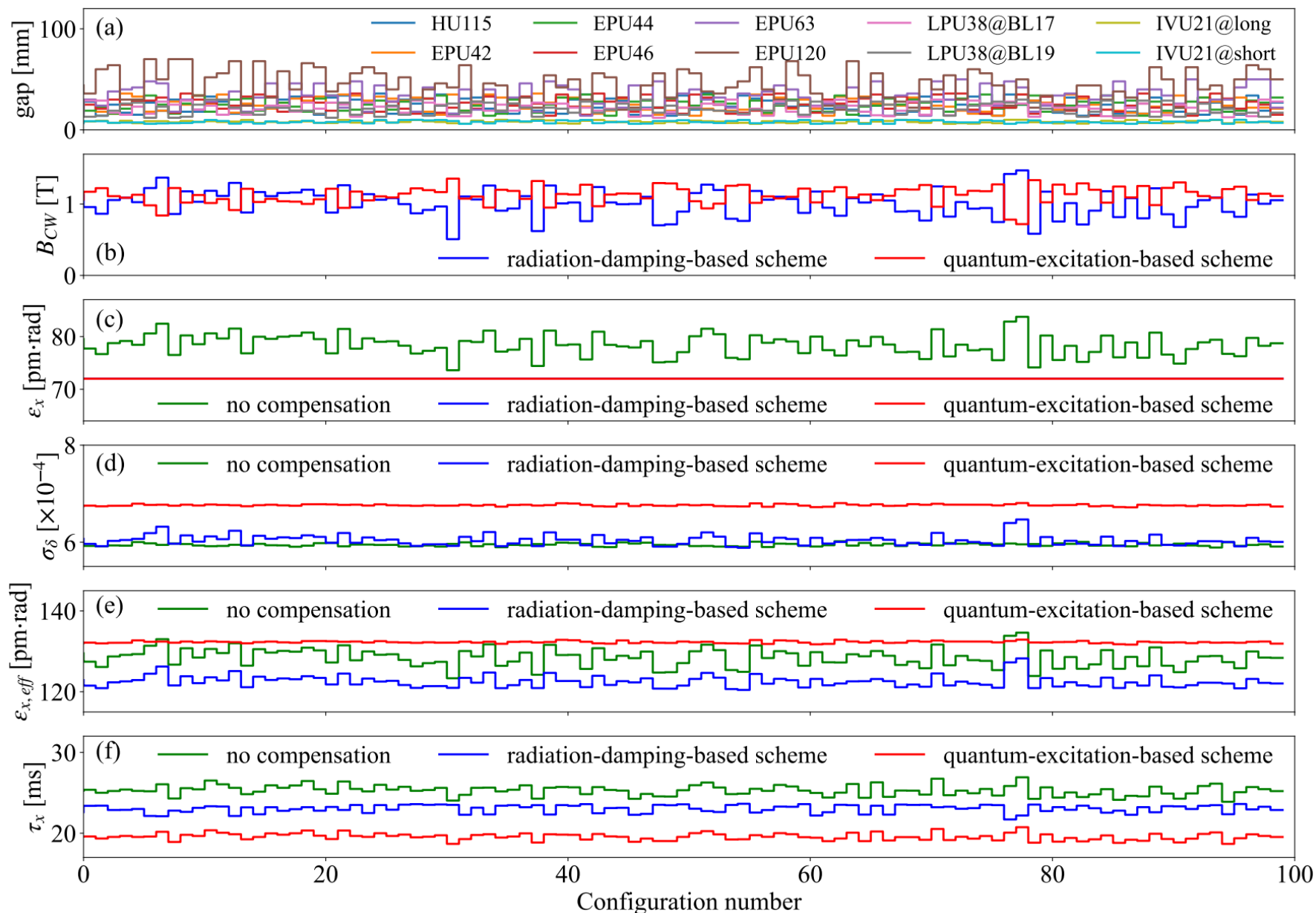


基于量子激发的发射度补偿方案

➤ 零流强情况发射度补偿:

模拟发射度补偿过程

- 量子激发方案可以达到辐射阻尼方案**相同的发射度补偿水平**。
- 量子激发方案发射度完全补偿，且补偿发射度过程中能散变化很小，使得**中直线节有效发射度基本得到补偿**（ $\pm 0.5\%$ ）。
- 量子激发方案中两个DW固定在最小gap，阻尼时间更短，有利于抑制IBS效应和束流不稳定性。



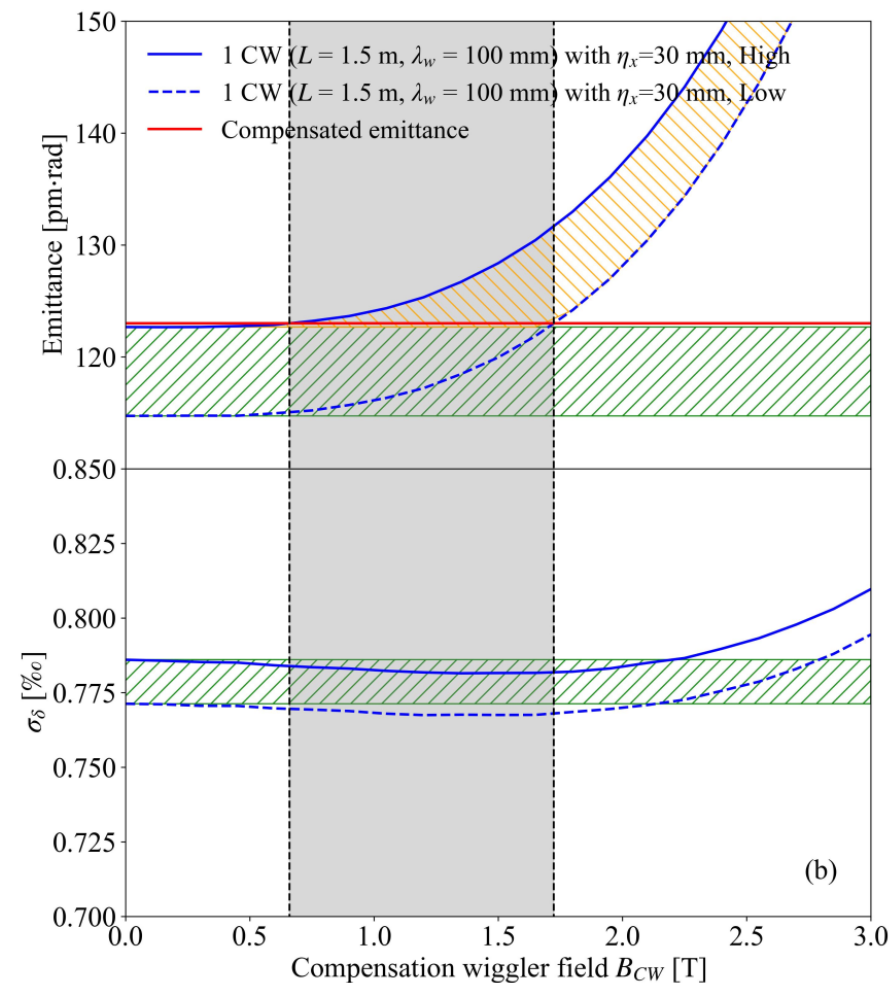
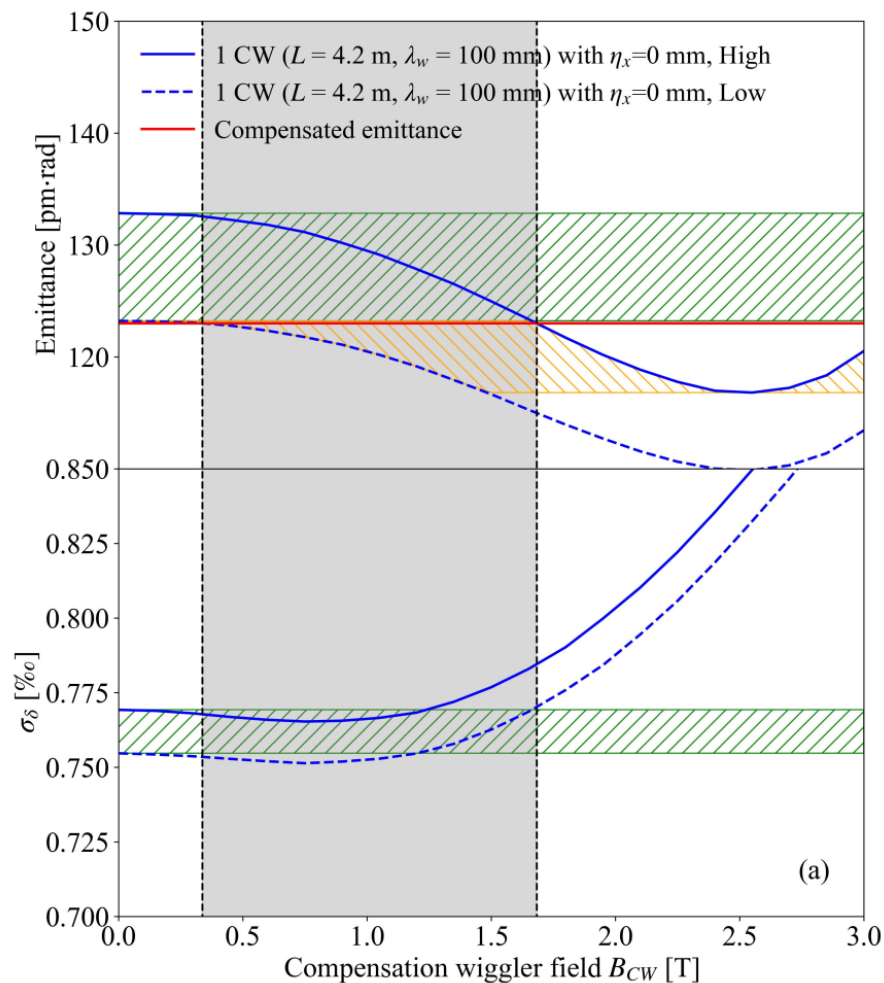
基于量子激发的发射度补偿方案



➤ 考虑IBS效应的发射度补偿：400 mA，20%耦合，4倍束团拉伸

- **辐射阻尼方案**：一台DW调整gap补偿发射度扰动，另一台DW固定在最小gap。
- **量子激发方案**：在20号中直线节安装可变gap的短wiggler，同时两个DW固定最小gap。

- 辐射阻尼方案可以只使用一台DW进行补偿：增大DW磁场同时降低发射度和阻尼时间，更有利于抑制IBS
- 与零流强情况相同，量子激发方案可以达到辐射阻尼方案相同的发射度补偿水平。
- 量子激发方案所需最大磁场（1.72 T）与辐射阻尼方案（1.68 T）接近，**磁吸引力仍然显著更小**。



基于量子激发的发射度补偿方案

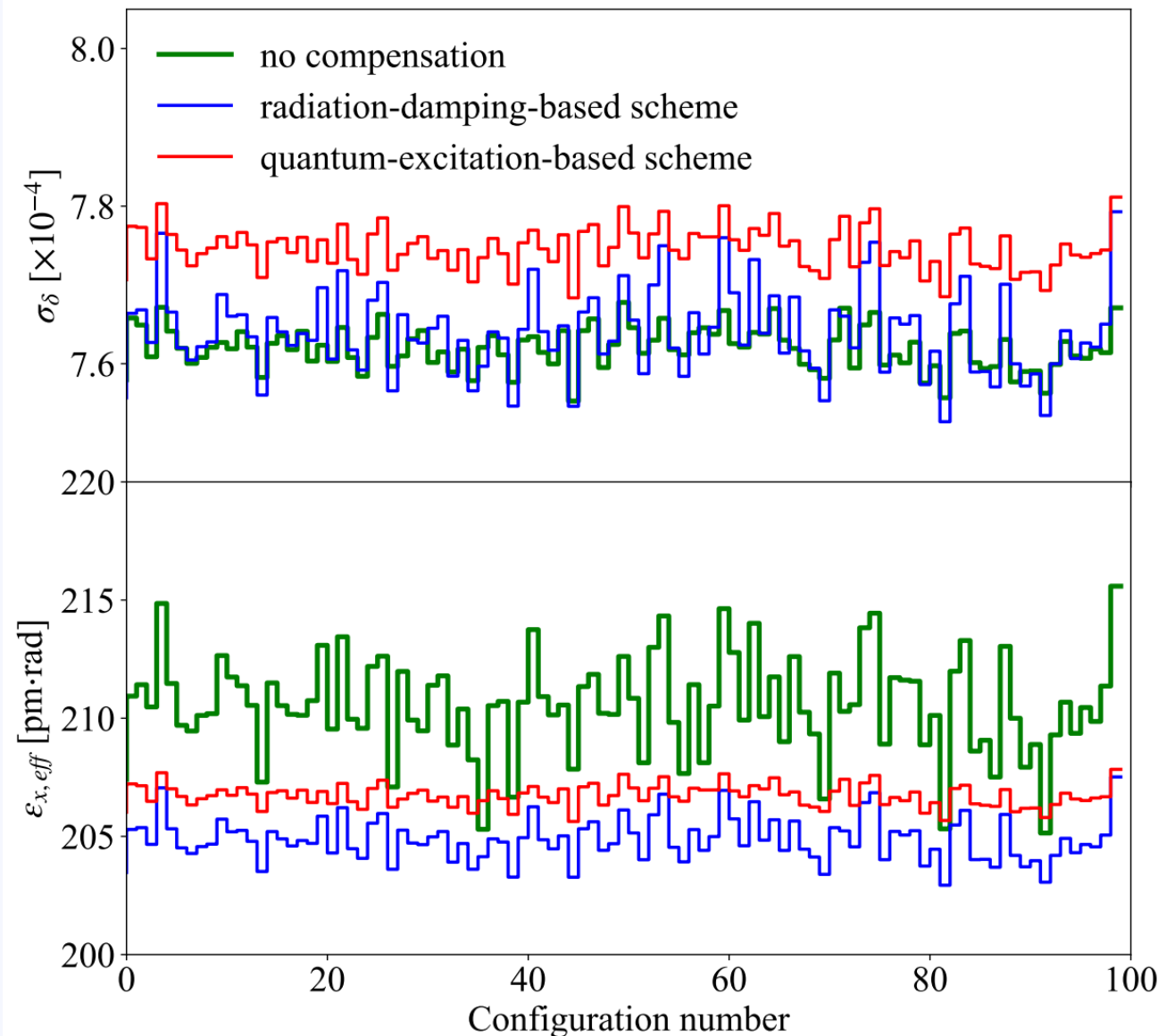


中国科学技术大学
国家同步辐射实验室
NATIONAL SYNCHROTRON RADIATION LABORATORY

➤ 考虑IBS效应的发射度补偿：400 mA，20%耦合，4倍束团拉伸

模拟发射度补偿过程

- 与零流强情况相同，发射度补偿过程中，量子激发方案对能散扰动更小，使得**中直线节有效发射度基本得到补偿**（ $\pm 0.9\%$ ，基于辐射阻尼的方案中中直线节有效发射度的变化为 $\pm 1.5\%$ ）。
- IBS效应很强时，两种发射度补偿方案的差异相比零流强情况减小。
- 对于耦合率 100% 的情况，IBS 效应相对于 20% 耦合率情况较弱，由于磁场强度限制，辐射阻尼方案需要使用两台DW进行发射度补偿。
- 以上分析表明**量子激发方案在IBS效应很强时**可达到优于辐射阻尼方案的水平，且在**IBS相对较弱时优势更显著**。



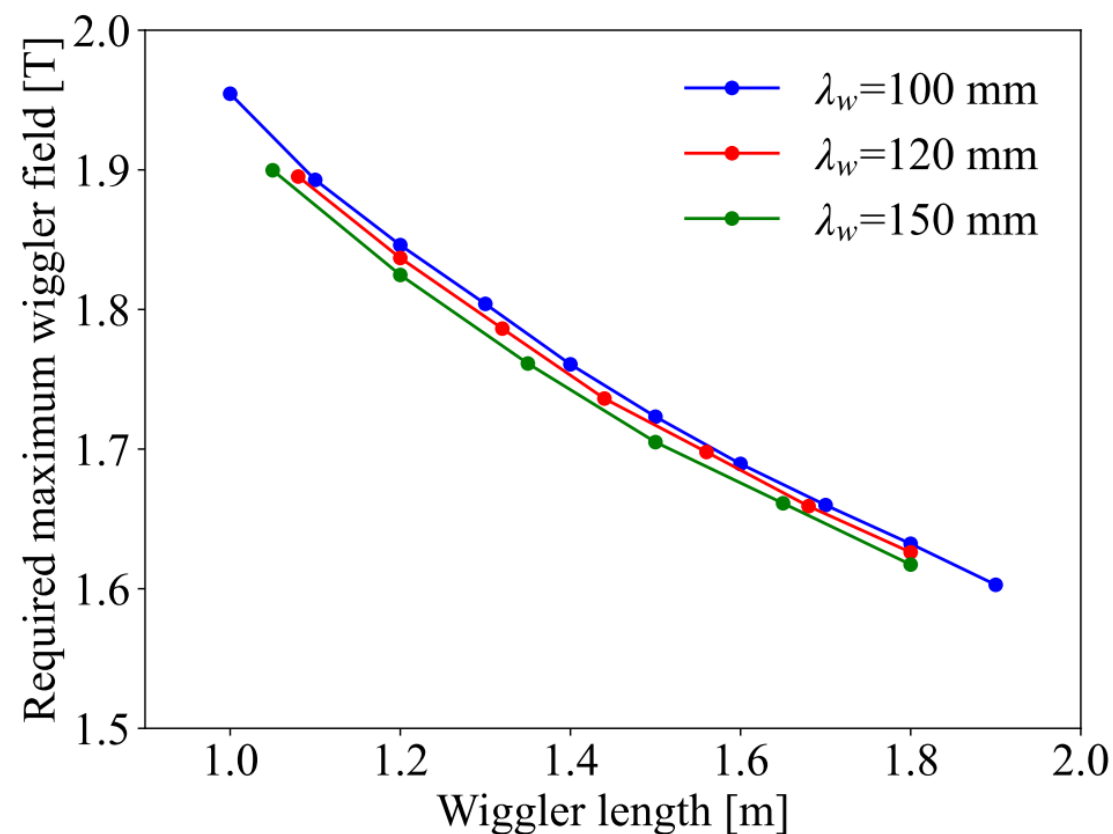
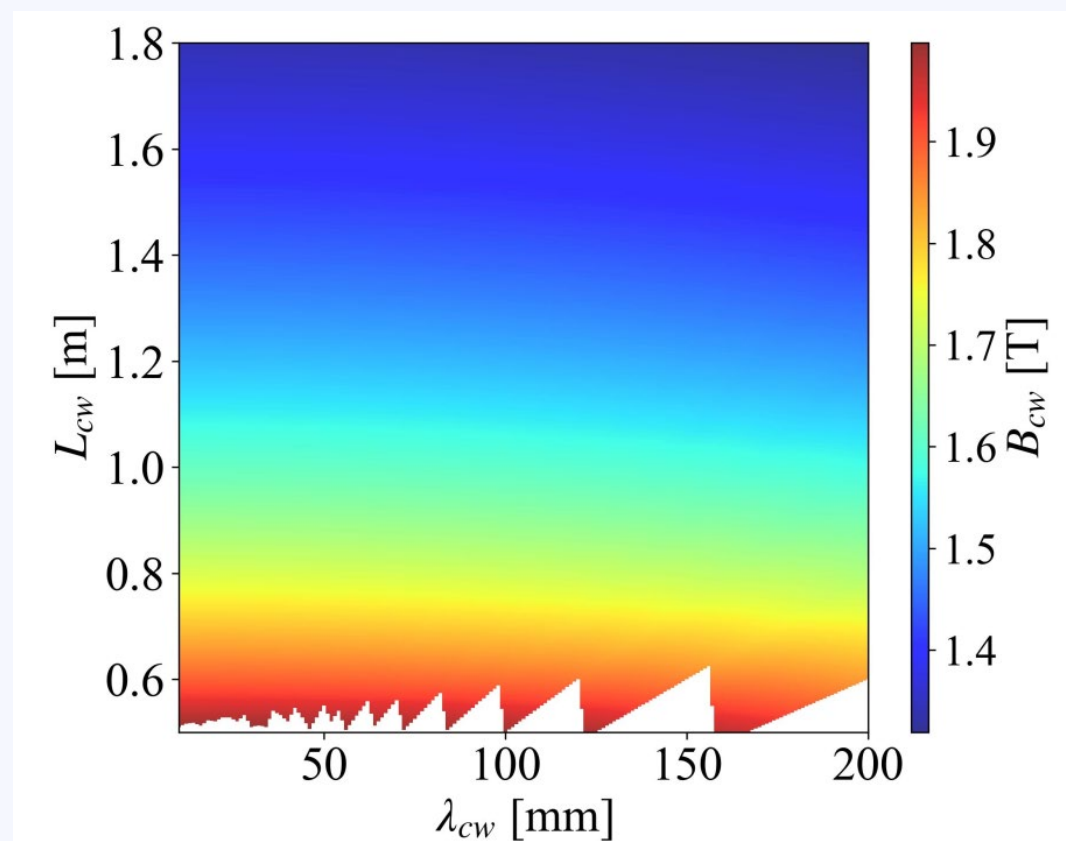
基于量子激发的发射度补偿方案参数研究



中国科学技术大学
国家同步辐射实验室
NATIONAL SYNCHROTRON RADIATION LABORATORY

➤ Wiggler长度和周期长度的影响

- 所需补偿 wiggler 磁场随 wiggler 长度和周期长度的增大而减小，且相比于周期长度，所需最大磁场受 wiggler 长度的影响更大
- 考虑IBS效应时，其变化规律与零流强情况一致
- 为降低所需补偿 wiggler 磁场，wiggler 长度和周期长度应尽可能长



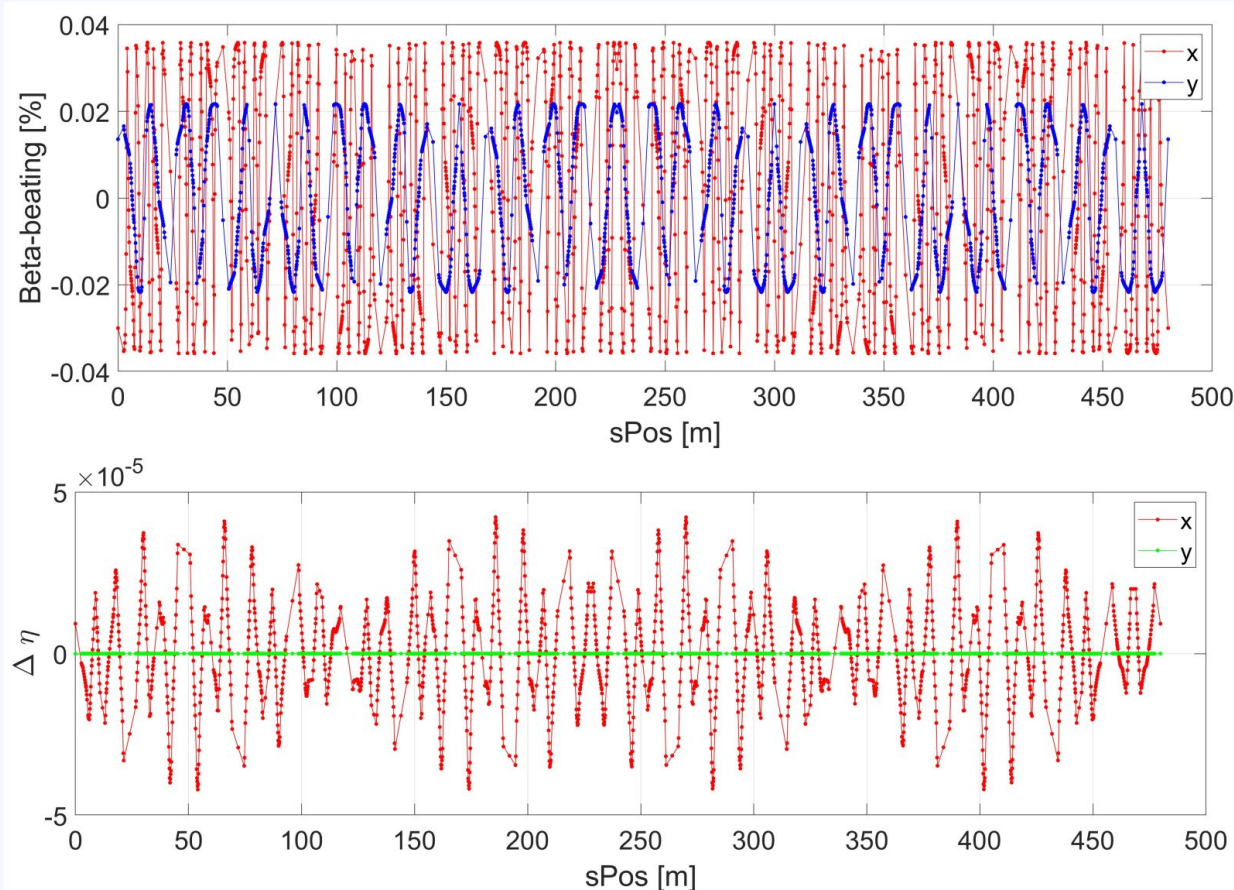
基于量子激发的发射度补偿方案参数研究



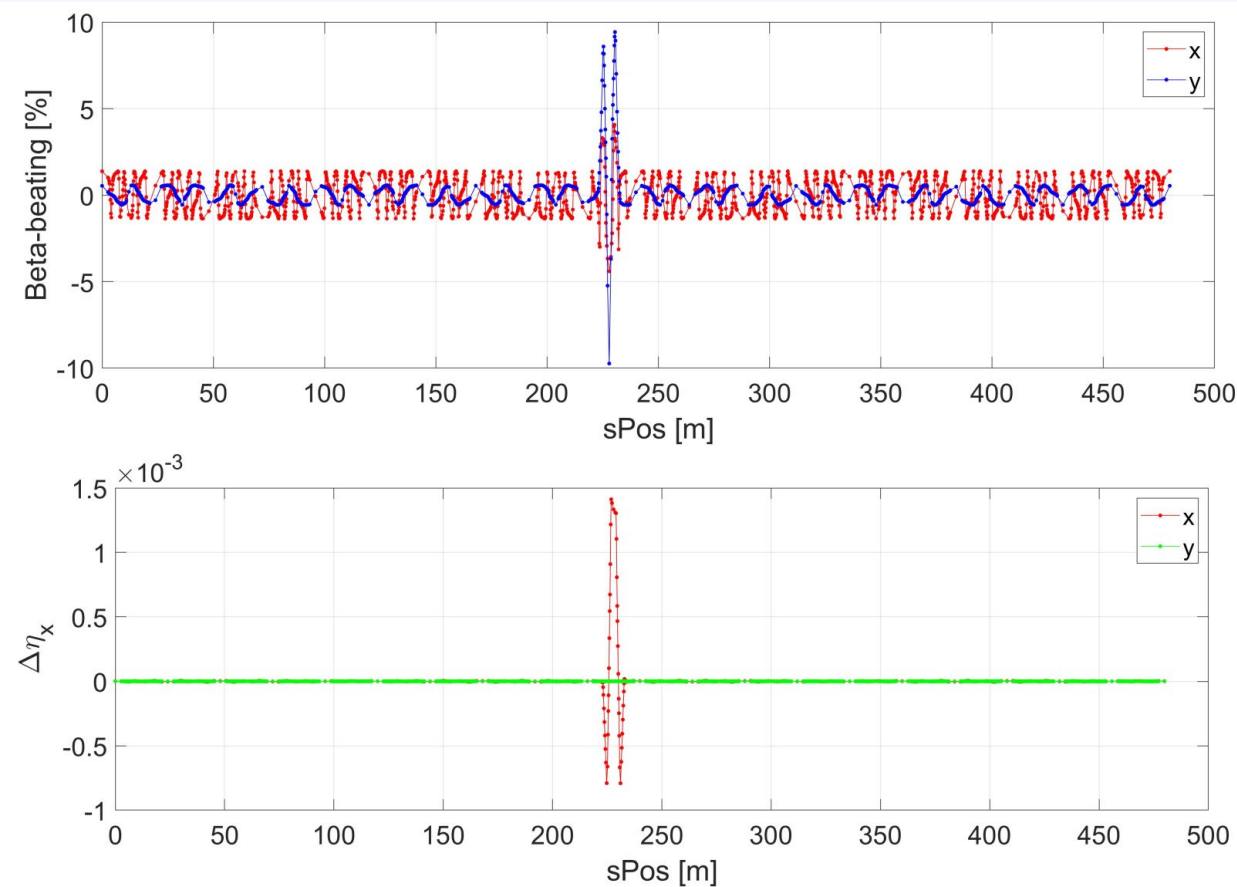
中国科学技术大学
国家同步辐射实验室
NATIONAL SYNCHROTRON RADIATION LABORATORY

➤ 补偿wiggler长度和周期长度的影响

- 补偿wiggler周期长度越长，对lattice线性光学的扰动越大，150 mm时最大 β -beating 10%。
- 补偿wiggler周期长度应小于150 mm



周期长度125 mm



周期长度150 mm

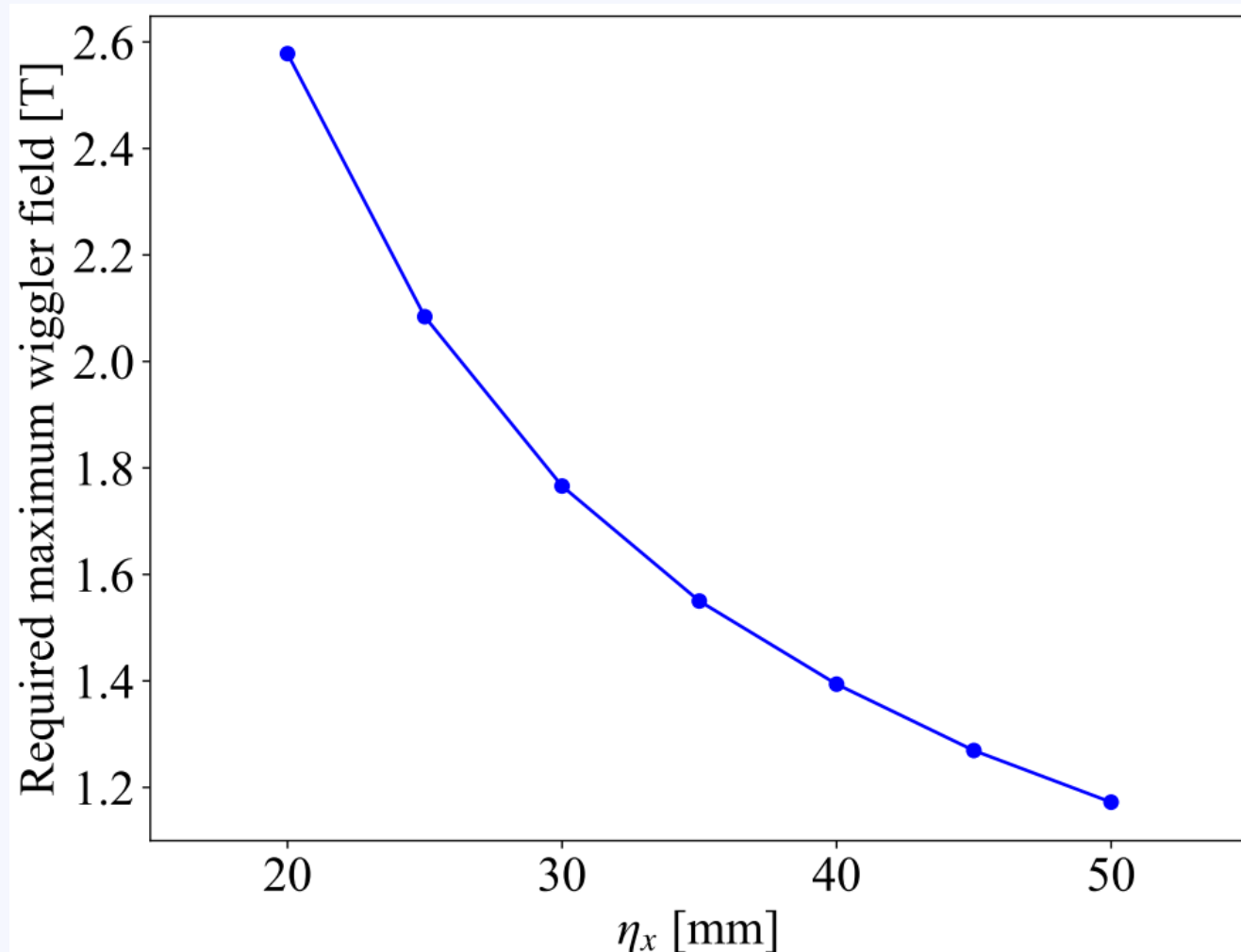
基于量子激发的发射度补偿方案参数研究



中国科学技术大学
国家同步辐射实验室
NATIONAL SYNCHROTRON RADIATION LABORATORY

➤ 补偿 wiggler 处色散函数的影响

- 考虑 IBS 和 20% 耦合率，4倍束团拉伸（所需wiggler磁场最强的情况）
- 补偿 wiggler处色散函数越大，所需最大磁场越弱
- 对于HALF储存环，为降低 wiggler 所需最大磁场，补偿 wiggler 处色散函数可进一步提升至 35 mm。
- 为补偿未来更多插入件引起的发射度扰动，可采用用户插入件直线节降低色散，补偿 wiggler 直线节增大色散的超周期 lattice，在降低发射度扰动范围的同时，提高补偿 wiggler 的发射度补偿能力。



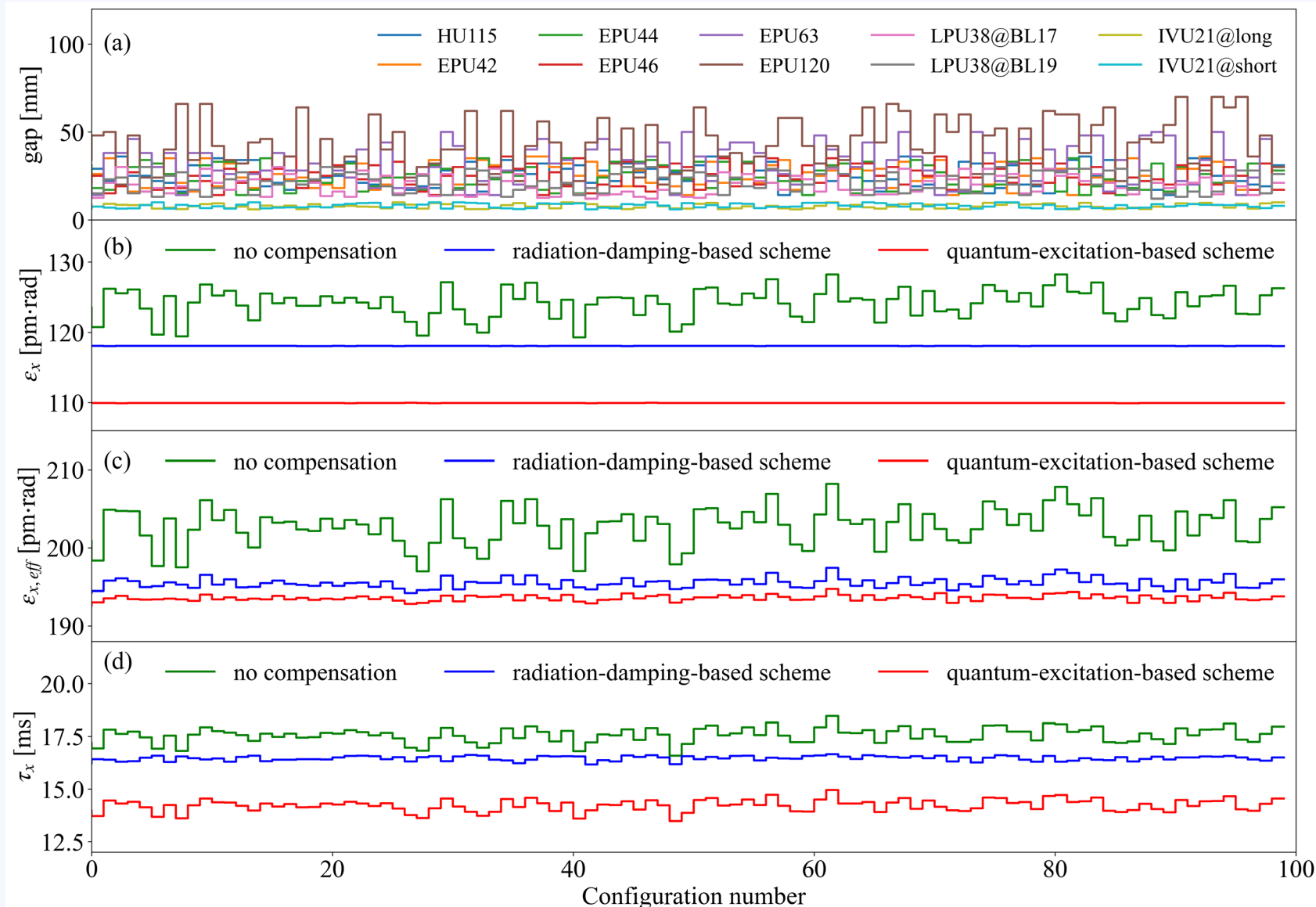
基于量子激发的发射度补偿方案参数研究



中国科学技术大学
国家同步辐射实验室
NATIONAL SYNCHROTRON RADIATION LABORATORY

➤ 束流能量的影响：HALF可从2.2 GeV 升能至 2.5 GeV 400 mA, 20%耦合, 4倍束团拉伸

- 升能后, IBS效应减弱, 辐射阻尼方案需使用两台DW进行发射度补偿
- 与2.2 GeV情况相比, IBS效应减弱, 发射度降低, 且量子激发方案的补偿发射度更低 ($110 \text{ pmrad} < 118 \text{ pmrad}$), 所需补偿wiggler磁场减弱。
- 与2.2 GeV情况相同, 量子激发方案有效发射度扰动更小 ($\pm 0.6\% < \pm 0.9\%$), 阻尼时间更短。
- 升能后, IBS效应减弱, 量子激发方案优势更加显著



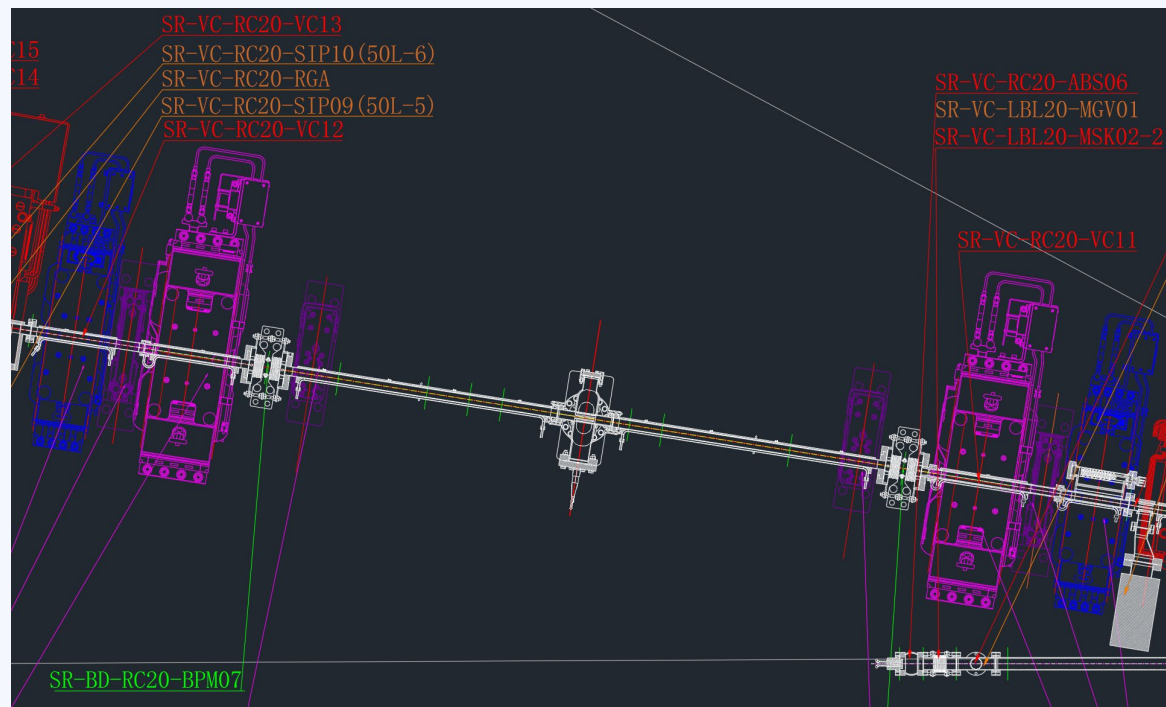
基于量子激发的发射度补偿方案参数研究



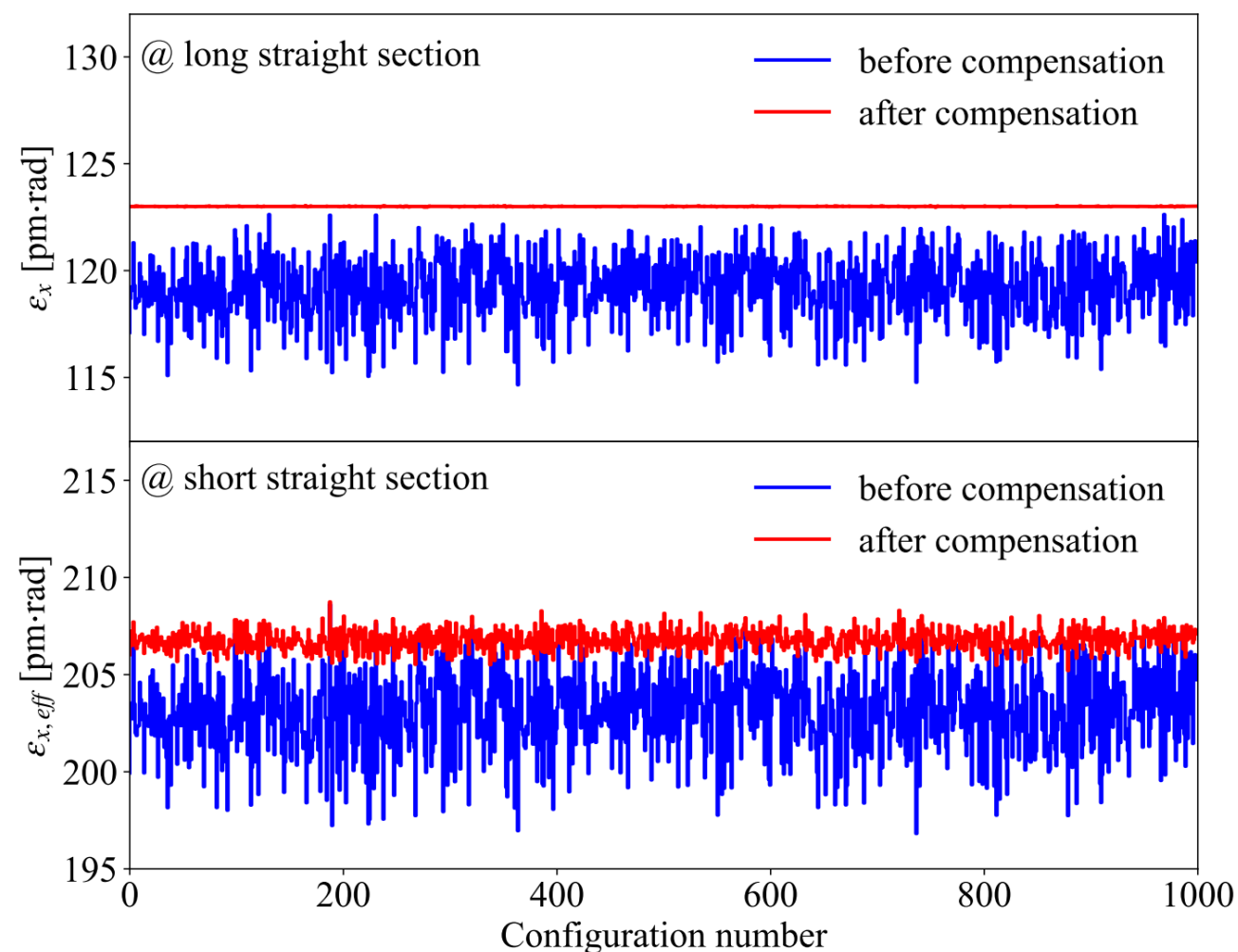
中国科学技术大学
国家同步辐射实验室
NATIONAL SYNCHROTRON RADIATION LABORATORY

➤ HALF补偿wiggler参数选择

- 中直线节长度2.2 m，考虑BPM、校正铁、真空管道支撑、插入件端部等元件空间，中直线节补偿wiggler有效长度1.2 m，周期长度120 mm，磁场1.8 T



- 在400 mA、20%耦合、4倍束团拉伸条件下，长直线节发射度完全补偿，中直线节有效发射度的变化范围从补偿前的 $\pm 3.0\%$ 降低至 $\pm 0.9\%$ 。



- 为抑制HALF储存环中插入件引起的发射度变化，提出了在已有两台长直线节阻尼wiggler固定间隙的基础上，在色散中直线节安装可变间隙wiggler的量子激发发射度补偿方案。该方案具有多种优势：
 - 充分利用目前闲置的第20号中直线节，使两台长直线节上的阻尼wiggler可以固定gap为用户供光，同时固定gap还可降低阻尼时间；
 - 与辐射阻尼方案相比，量子激发方案利用较短的wiggler长度可达到相同的发射度补偿效果，磁极间吸力相对更小，降低机械控制难度，同时在补偿发射度变化时，对束流能散的扰动更小，使中直线节的有效发射度同时得到补偿。
- 系统分析了wiggler长度、周期长度、色散、束流能量等参数对基于量子激发的发射度补偿方案的影响。确定了HALF中直线节发射度补偿wiggler的关键参数。



中国科学技术大学

国家同步辐射实验室

NATIONAL SYNCHROTRON RADIATION LABORATORY

THANKS

