

STCF束流集体效应研究进展

李伟伟 何天龙 (USTC) 周德民 (KEK)

超级陶粲装置研讨会

2025年7月

- 概述
- 束流-高频腔相互作用
- 元件发热 + 电阻壁不稳定性
- 单束团束流不稳定性
- 离子效应
- 电子云效应
- 总结与未来计划

概述

重点目标： 2 GeV 2 A 流强； 约 50% 填充比例，单束团流强目标 2.8 mA
不发生 束流不稳定性 & 明显的束流发射度/能散膨胀

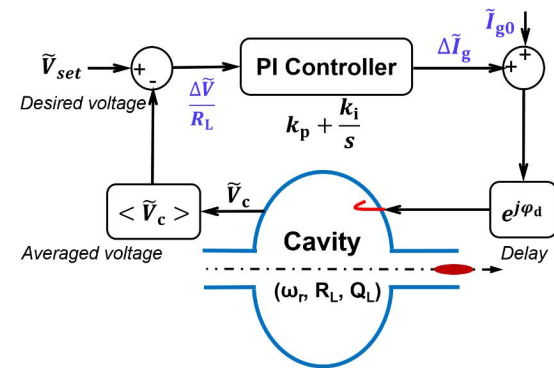
本报告包括：

- 束流-高频腔相互作用
加速腔加速模式不稳定性；瞬态束流负载效应；高次模不稳定性
- 阻抗驱动的集体效应（详细的阻抗建模待开展）
 - 简化模型进行初步估算：电阻壁不稳定性 + 纵向微波不稳定性 + 横向模式耦合不稳定性（TMCI）
- 相干波荡器/同步辐射（CWR/CSR） 驱动的微束团不稳定性
- 离子效应（电子环） + 电子云效应（正电子环） 初步评估

束-腔相互作用（1）加速模式不稳定性

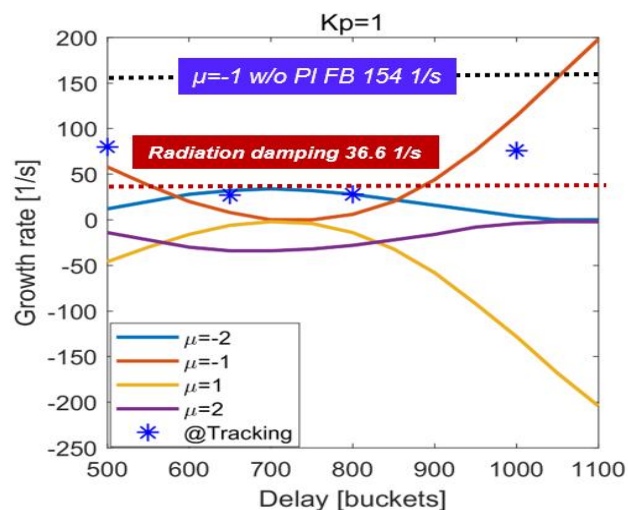
加速模式不稳定性分析

- 目前采用TM020型常温射频腔：高品质因子(Q) & 低R/Q
详见韦业龙老师报告《STCF常温腔预研进展》
- 解析评估 & 跟踪模拟：研究基模引发的耦合多束团不稳定性
- 其中-1阶模式最为严重：合理设置比例积分反馈(PI FB)可有效抑制该模式
CEPC也做了类似的抑制措施研究 RDTM (2023) 7:210–219

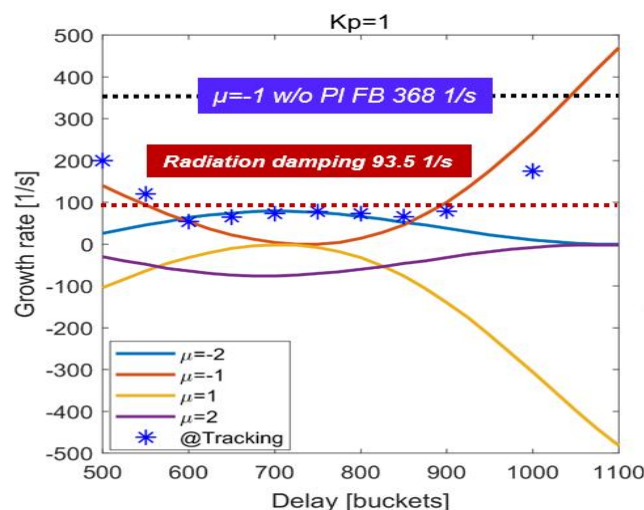


STABLE 新增功能模块

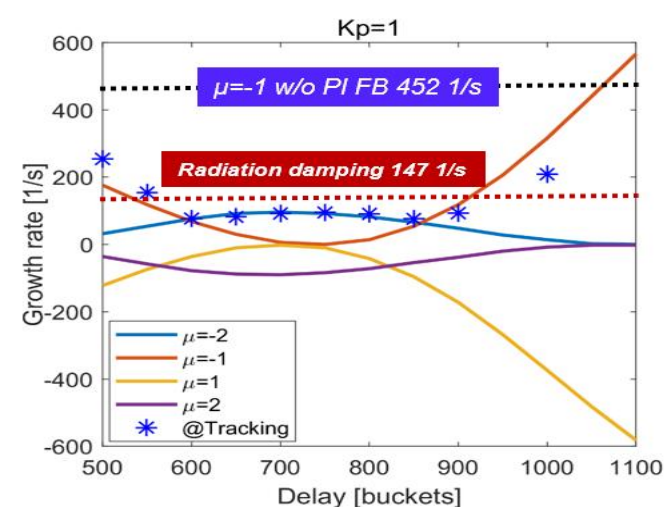
1 GeV



2 GeV



3.5 GeV



束-腔相互作用（2）瞬态束流负载效应

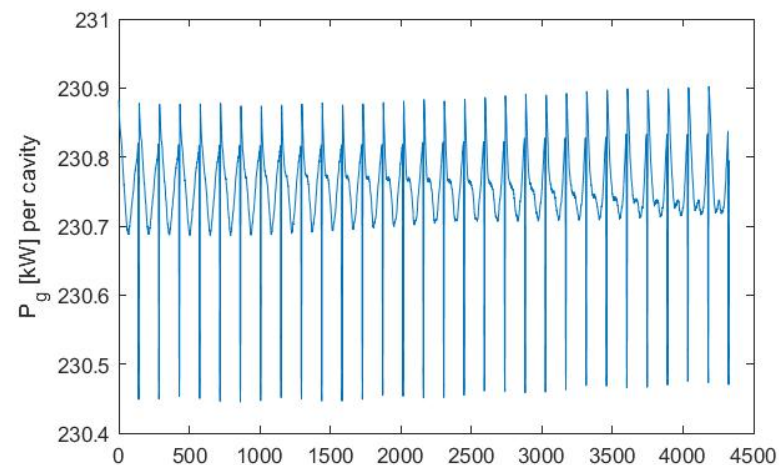
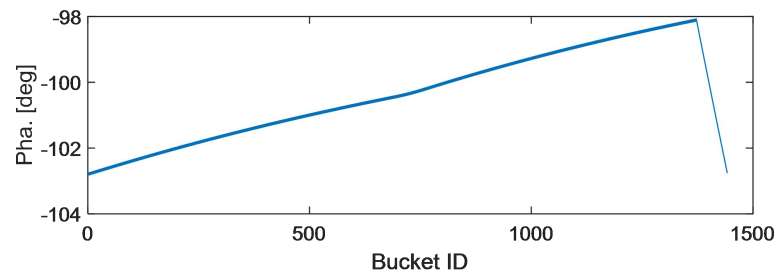
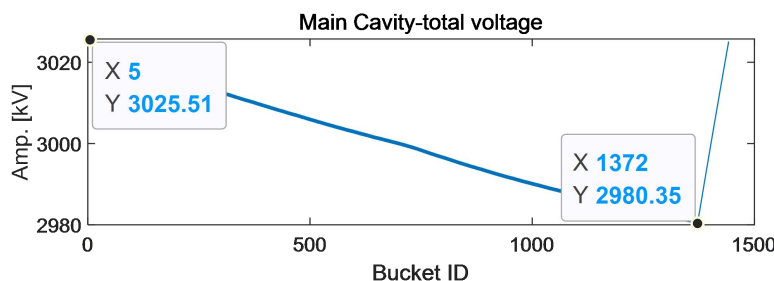
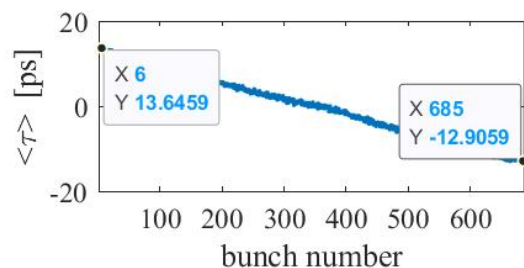
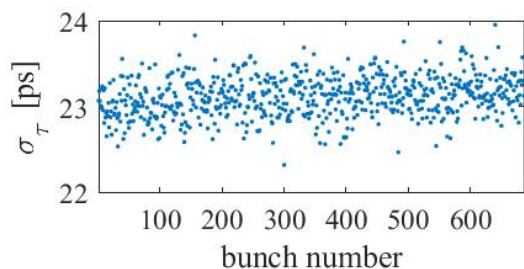
瞬态束流负载效应

➤ 填充模式中的间隙（gap）引起

假设填充模式 [1（填充）+ 1（空bucket）] × 686 + 70（空）（5% 的gap预留用于离子清洗）

➤ 2 GeV & 2 A 模拟结果如下

- 束团质心位置约 ±13 ps：亮度影响不大 & 双环参数接近：抵消质心偏移
- 单腔：生成功率 ~ 230 kW；腔压变化 $\frac{20}{6}$ kV（单腔腔压 500 kV）



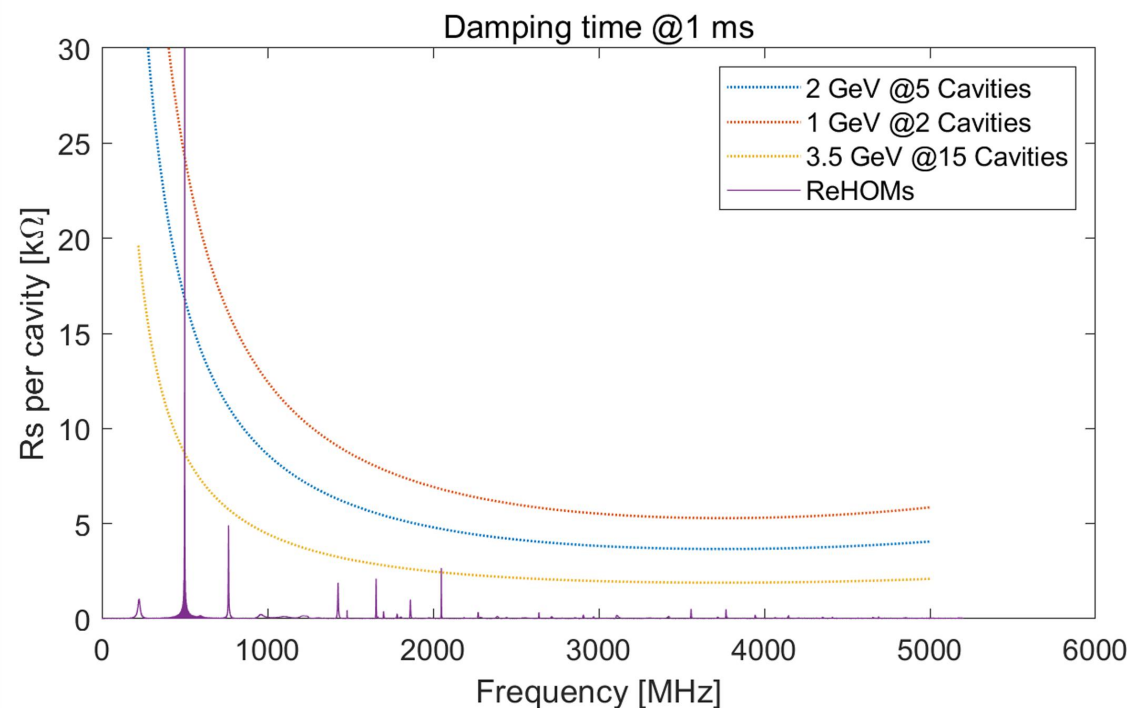
束-腔相互作用（3）高阶模式

高阶（寄生）模（HOM）引发的束流耦合不稳定性分析

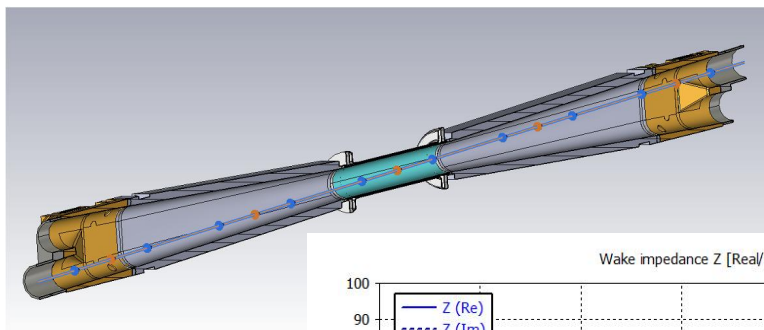
- HOM导致的耦合多束团不稳定性增长率超过阻尼率（逐束团反馈+辐射）
假设纵向反馈逐束团反馈系统可提供1 ms量级的阻尼时间
- 必须对这些寄生模式实施深度抑制；不同能量切换使用不同个数的RF腔
- 待研究：水温调节、RF腔之间的差异等因素措施避免不同RF腔的HOM重叠

$$\frac{1}{\tau_{HOM}} = \frac{I_0 \alpha \omega_r}{4\pi v_s E/e} e^{-(\omega_r \sigma_\tau)^2} \text{Re}Z$$

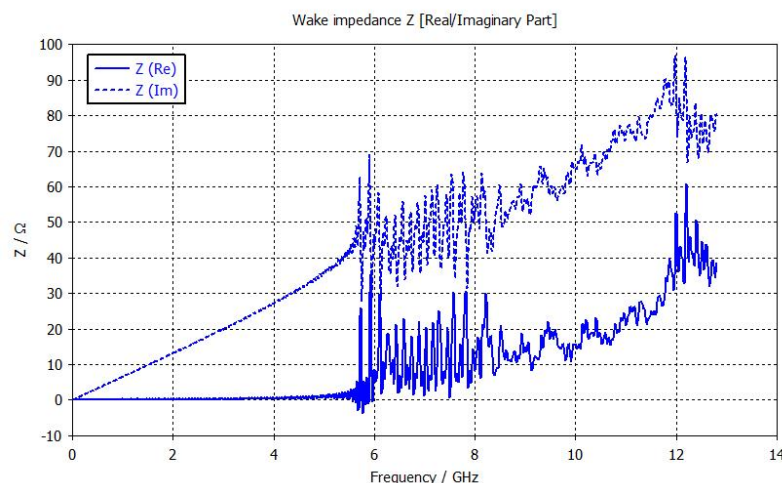
$$\text{Re}Z_{th} = \frac{4\pi v_s E/e}{\tau_{1ms} I_0 \alpha \omega_r e^{-(\omega_r \sigma_\tau)^2}}$$



元件发热 + 电阻壁不稳定性



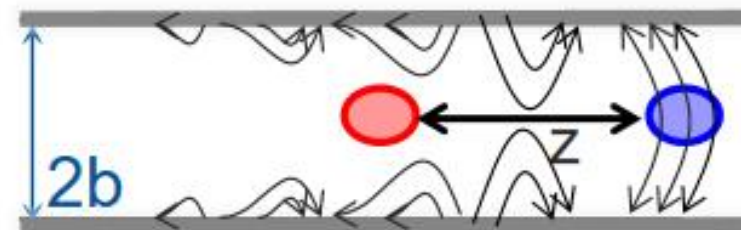
CST 模型



对撞区阻抗计算与高阶模热效应评估

- 高阶模总功率约587 W：主要耗散于含Y形腔体的锥形过渡结构），铍合金束流管区域约40 W
- 结构优化与冷却设计 持续进行中

电阻壁不稳定性



$$\frac{1}{\tau_{\min}} = \frac{I_0 e c C}{4 \pi^2 \nu_{\beta} E_s b^3} \sqrt{\frac{Z_0 c}{2 \sigma \omega_0 (1 - \text{frac}(\nu_{\beta}))}}$$

- 假设全环 25 mm半径铝制真空室
→ 不稳定增长率 1.6 ms^{-1}
- 主真空室材料：铝或铜
- 可采用横向逐束团反馈进行抑制
- 调正色品抑制作用：

$$\propto \exp \left[- \left(\frac{\xi \omega_0 \sigma_t}{\alpha_p} \right)^2 \right]$$

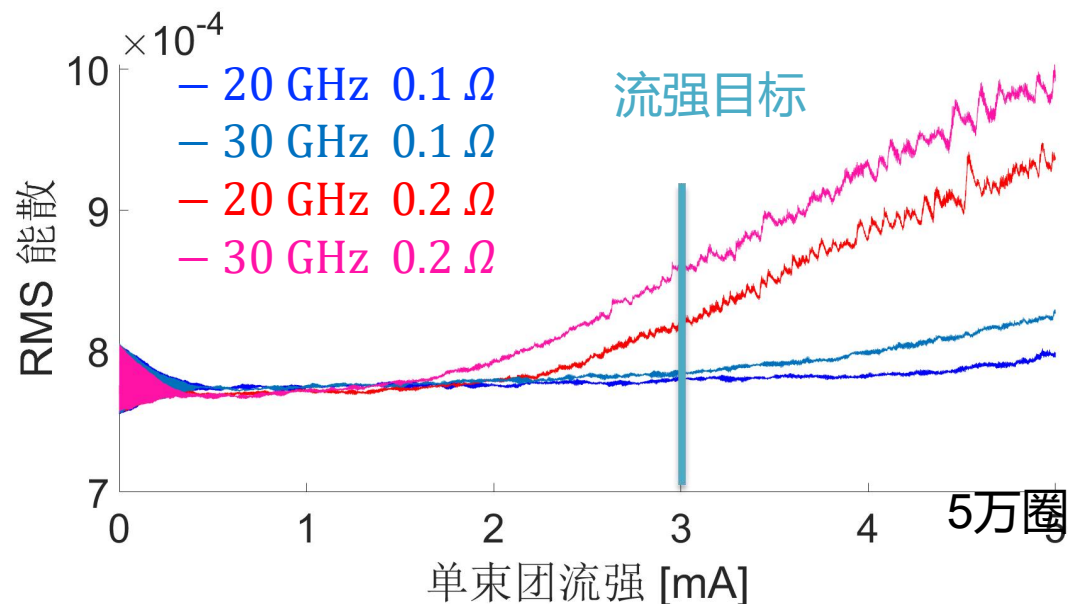
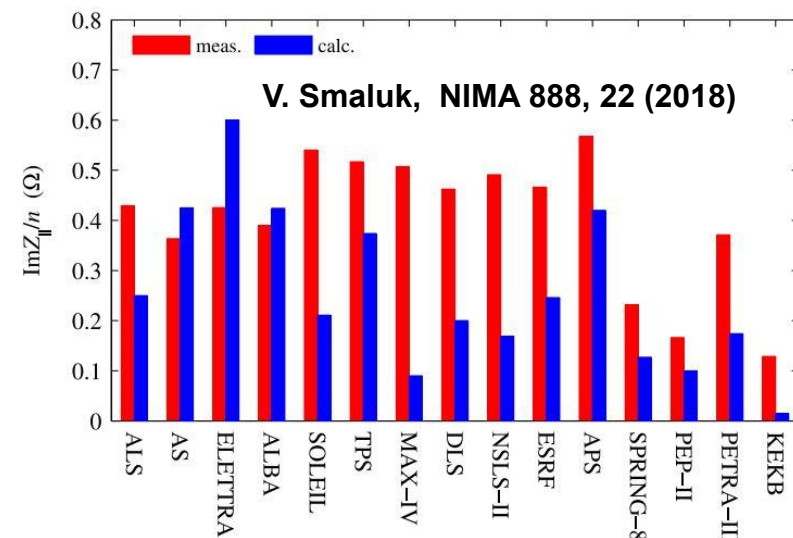
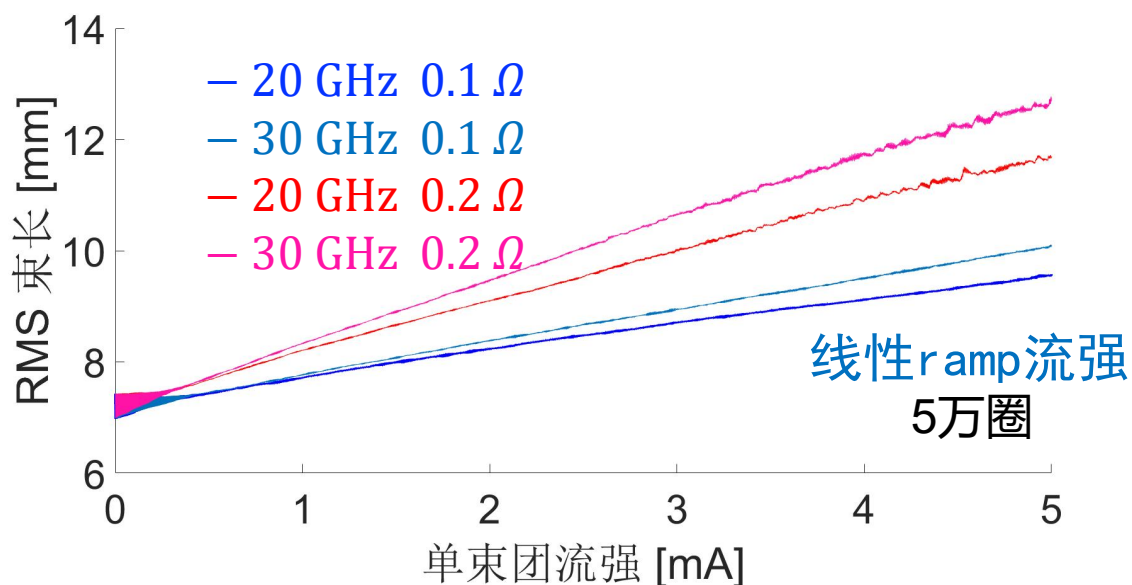
即使+10色品 → 系数因子 ~ 0.9
同理对横向HOM不稳定性抑制效果甚微

纵向微波不稳定性

- 电阻壁+几何结构阻抗暂缺：镀膜参数、元件CAD结构
- 比例关系：Keil-Schnell-Boussard criterion

$$I_{th} \left| \frac{Z_{\parallel}}{n} \right|_{eff} < \frac{(2\pi)^2 E_0 \alpha_p \sigma_{\delta}^2 \sigma_z}{c} \quad 0.2 \Omega \rightarrow 1 \text{ mA}$$

- 暂时采用简单的宽带谐振子（BBR）模型估算@ 2 GeV
Q=1; fr; Rs或Zeff; 粒子跟踪模拟结果如下
- 准确计算依赖于具体阻抗建模
- 需要严格控制阻抗预算

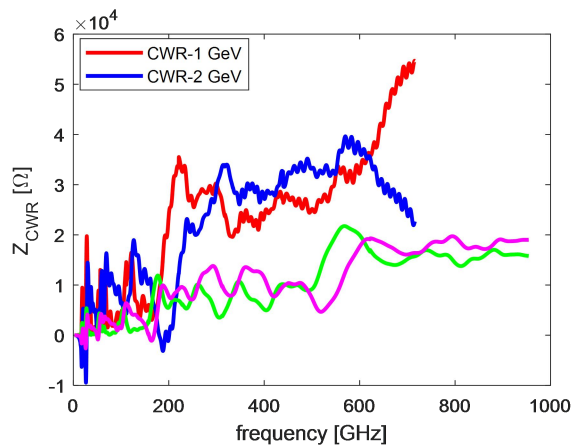
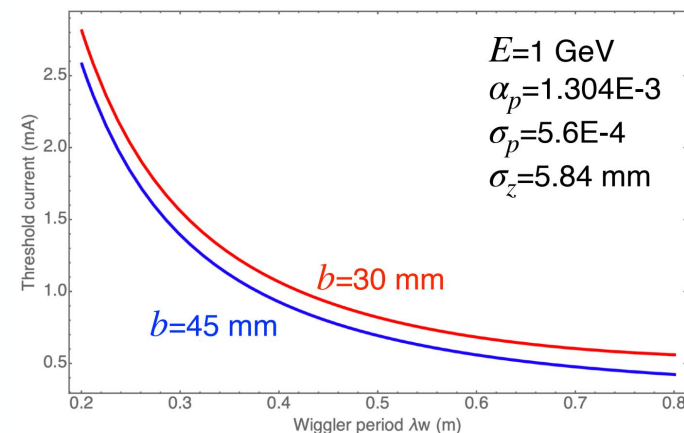


CWR+CSR阻抗驱动的微束团不稳定性

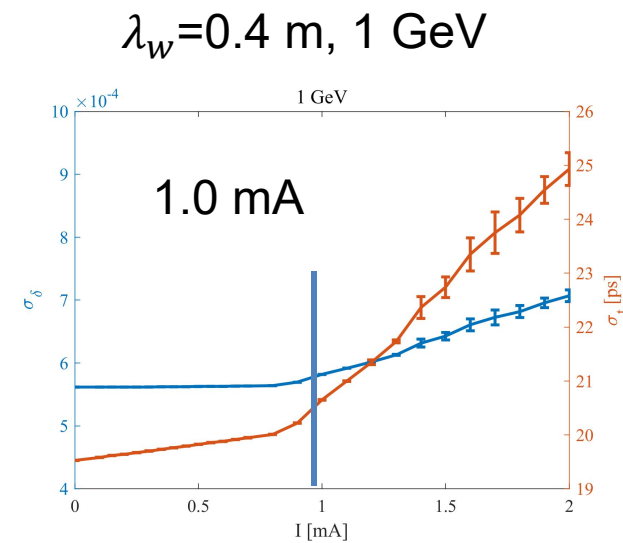
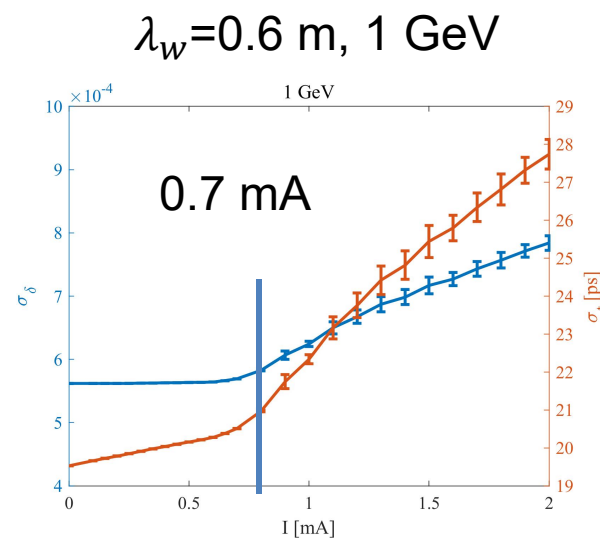
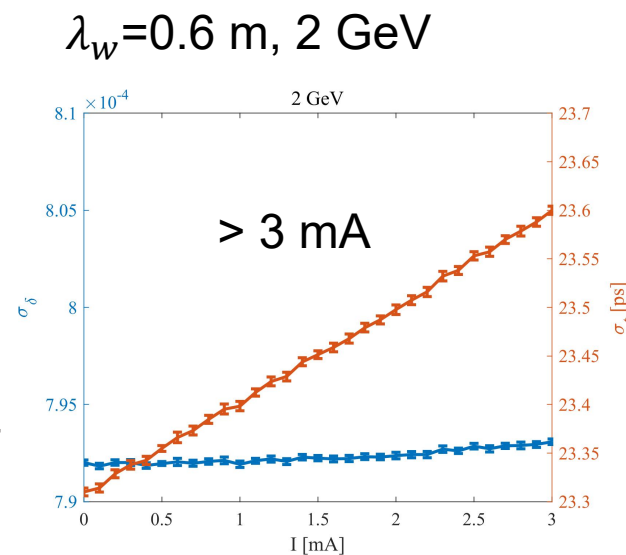
- 由于STCF较多使用阻尼扭摆器DW，相干波荡器辐射（CWR）在低能量时可能会有潜在的威胁
- 不稳定性流强阈值估算：

$$I_{th} \propto \frac{1}{\lambda_w^2 \ln \frac{\gamma b}{16.5 B_w \lambda_w^2}} \quad \text{Condition: } b \ll \lambda_w$$

- 粒子跟踪模拟：1 GeV 阈值可能低于 < 1 mA
- 抑制措施：减小DW间隙（真空室尺寸）、减小DW 周期



阻抗模型 (CSRZ)



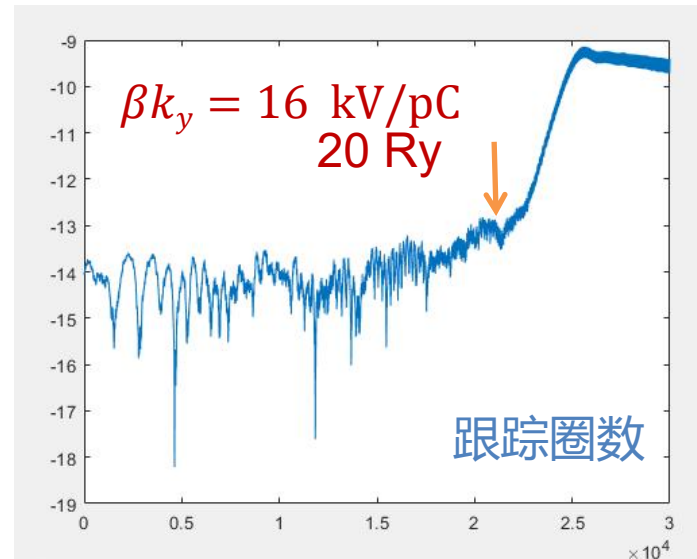
TMCI和准直器阻抗（1）

- 横向耦合模式不稳定性（TMCI）限制单束团流强阈值

$$I_{th} = \frac{4\pi\nu_s(E_0/e)}{T_0 \sum_i \beta_{y,i} k_{y,i}} \rightarrow \sum_i \beta_{y,i} k_{y,i} < 78 \text{ kV/pC/m}$$

- 准直器（高 $Z_{\perp}$ ）和作用区（IR，高 β ）阻抗起主导作用
- 简单BBR模型：fr=15 GHz；Qy=1 Ry=0.5e6×fr/c ky=0.8 kV/pC/m @ 8mm 束长
0色品；粒子跟踪得到的 βk_y 阈值显著小于解析估算
- 准确计算需进一步考虑：阻抗建模、色品、纵向阻抗、feedback提高阈值等因素

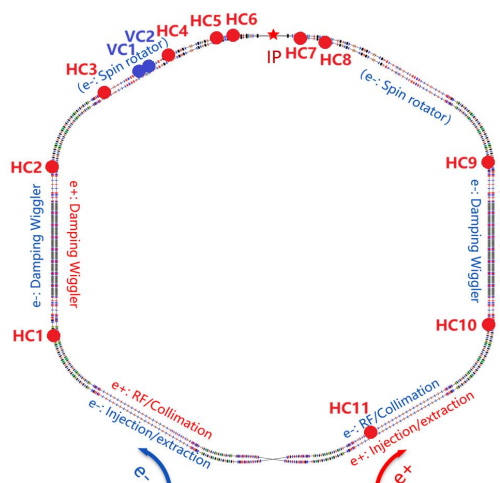
质心振幅
对数



STABLE 新增横向短程尾场跟踪模拟功能

线性ramp至
30 Ry

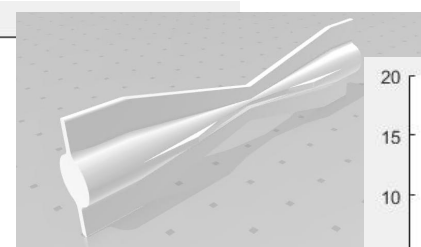
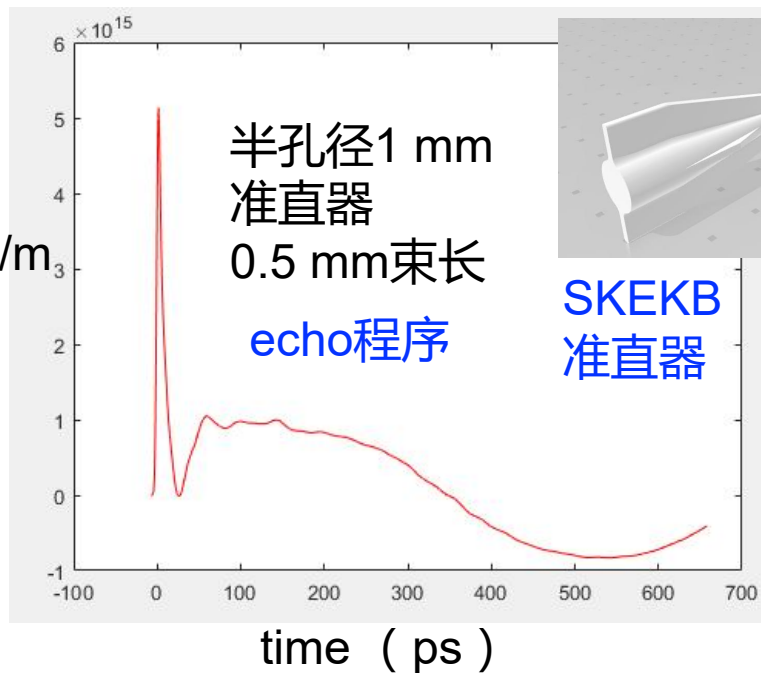
TMCI和准直器阻抗（2）



Collimator	Half gap [mm]	Half gap [σ]	Position [m]	$\beta_{x/y}$ [m]	Available space [m]
HC1	8	24.10	112.62	8.03	0.87
HC2	12	36.29	203.18	7.98	2.56
HC3	9	25.14	259.15	27.68	1.60
HC4	21	23.31	307.34	161.11	1.51
HC5	10	23.55	342.05	15.99	3.01
HC6	12	28.65	350.23	15.34	3.01
HC7	11	26.09	394.21	18.91	1.55
HC8	10	23.23	410.23	18.36	1.84
HC9	8	25.48	536.91	7.52	0.80
HC10	8	25.47	631.15	7.57	2.40
HC11	13	24.27	739.09	61.99	1.60
VC1	7	49.38	282.87	1.53	1.04
VC2	7	34.54	285.06	1.61	1.88

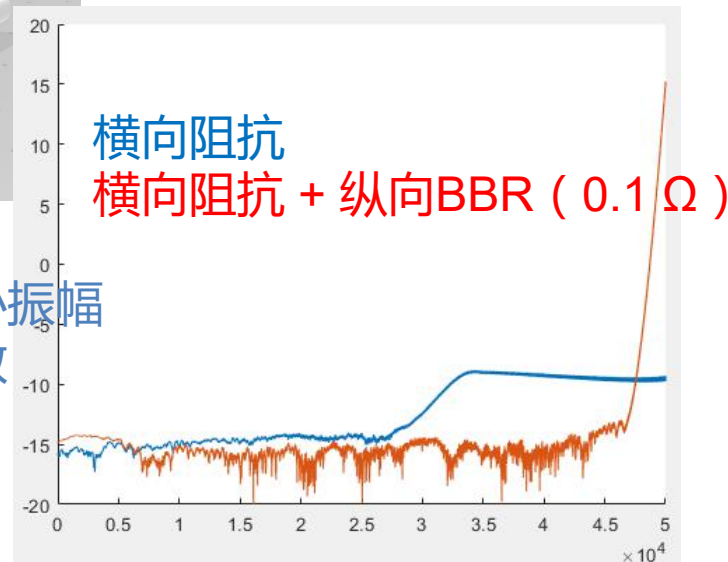
数据由莫铤豪等提供

Wy V/C/m



SKEKB
准直器

质心振幅
对数

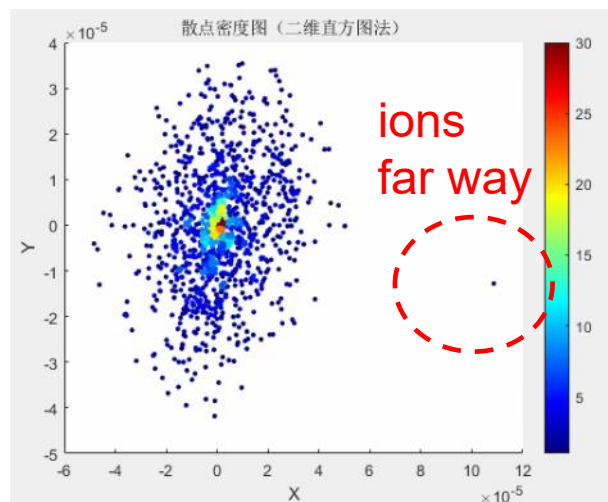


线性ramp至50 Zy

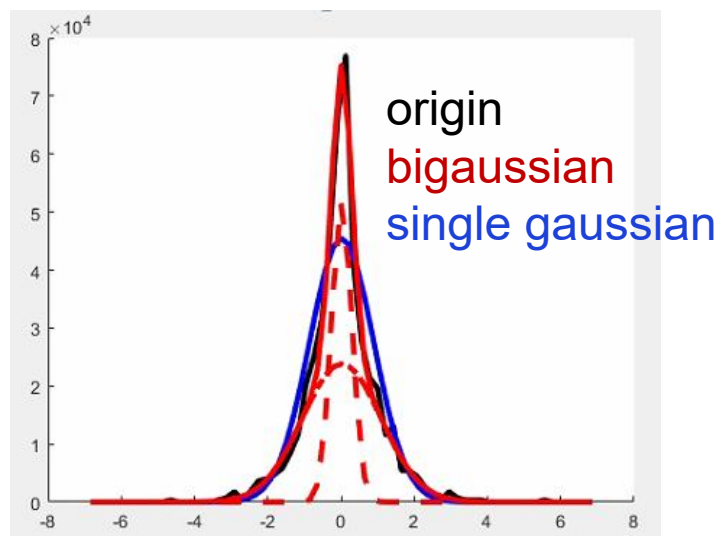
- $\beta(1 \text{ m}) \times Z_y$ ($a=1 \text{ mm}$) 作为单位1；0色品；无feedback
可以容忍该阻抗强度的45倍，预计准直器占 $\frac{1}{3}$ 比重
- 当前设计 $\sum \beta_i \frac{1}{a_i^2} = 2.1 \ll 15$ 阻抗方面还有较大裕量
- 未来进一步考虑准直器的结构优化降低阻抗

离子效应（1）程序开发

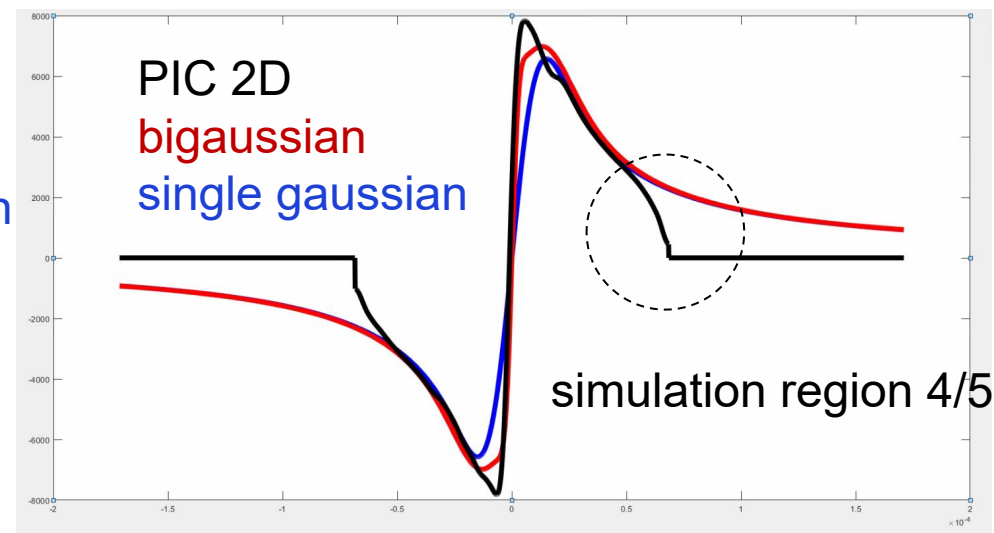
- （负）电子环：电子束电离残余气体，引发离子俘获和快离子不稳定性
- 新开发束流-粒子作用跟踪程序（BIIT），与mbtrack2程序算法和功能接近
- 功能全面：任意填充模式、电子束电荷量不均匀、色品、PIC2D、高斯拟合、多种气体、多作用点（作用点之间线性传输map）
- 例如某一时刻离子分布和kick力分布



离子分布

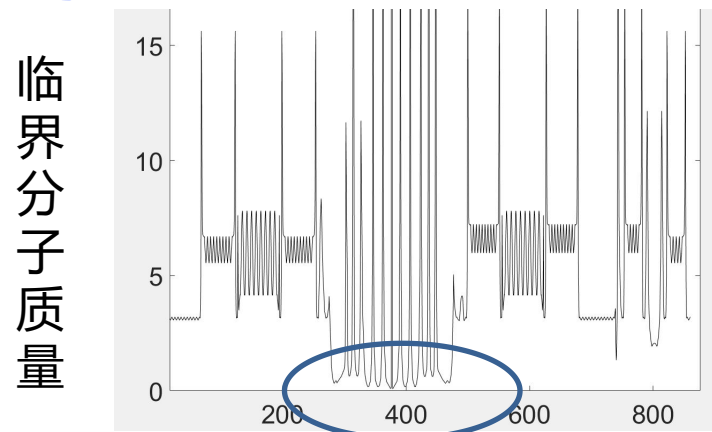


kicks on the axes



离子效应 (2) 离子俘获+快离子效应

离子俘获

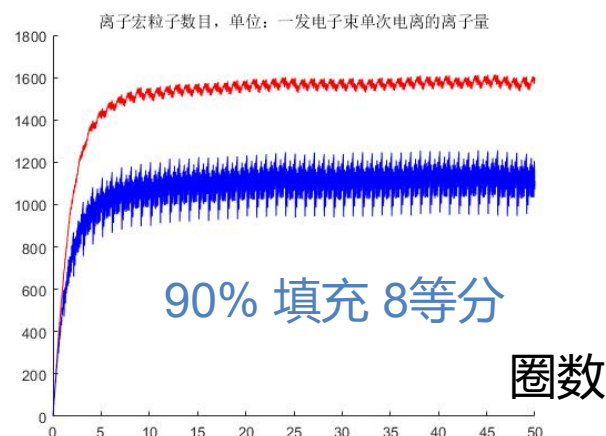


均匀填充

Interaction Region

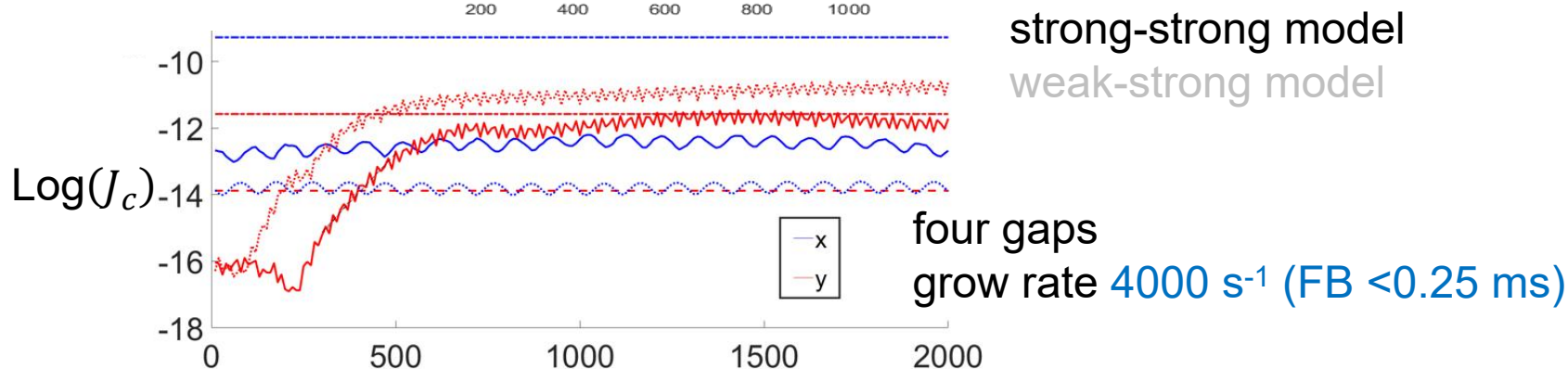
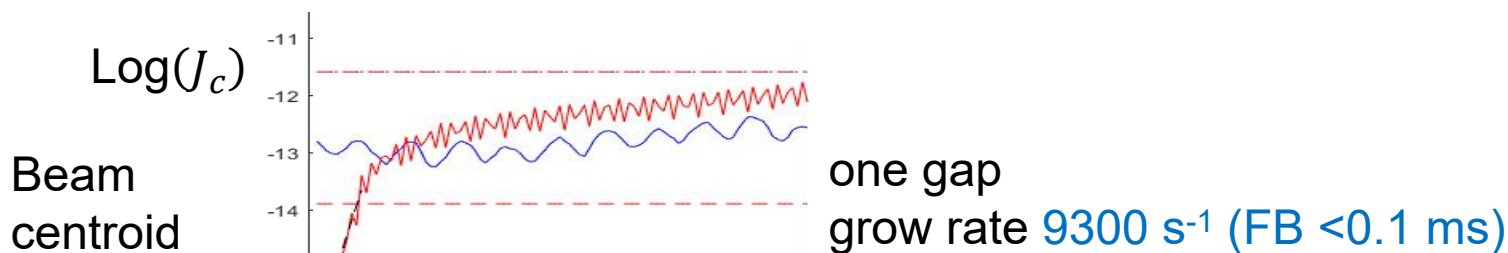
$$A_{\text{crit}} = \frac{N_e r_p L_{\text{sep}}}{2 \min(\sigma_x, \sigma_y) (\sigma_x + \sigma_y)}$$

离子量



快离子效应

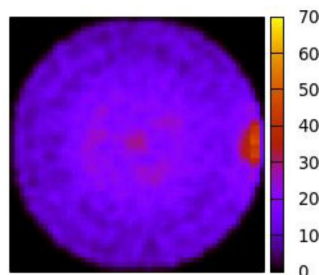
- 简化考虑: 假设全环一个气体作用点, 一种气体
平均 β_{xy} , 0.25 nTor CO, 90% 填充 @2 GeV
- 可能对于横向逐束团反馈要求较高 (~ 0.1 ms), 可优化填充模式
- 进一步计算需要知道气体种类和压强分布



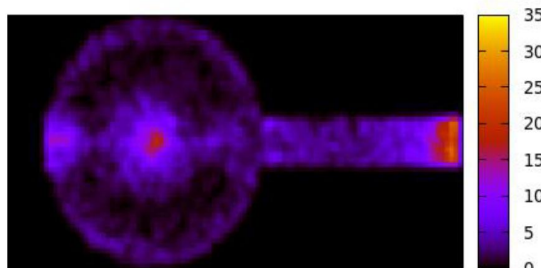
电子云效应

- 正电子环：同步辐射初级光电子 + 正电子库伦场 + 管壁 → 二次电子倍增 + 电子云 → 束流不稳定性 + 发射度增长
- 模拟得到的正电子束附近区域的电子云密度阈值 $\rho_e = 1.4 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$ ；真空系统设计目标 $< 1 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$
- 综合采用各种措施：前室、TiN/NEG 镀膜、弱螺线管磁场、褶皱表面、清洗电极

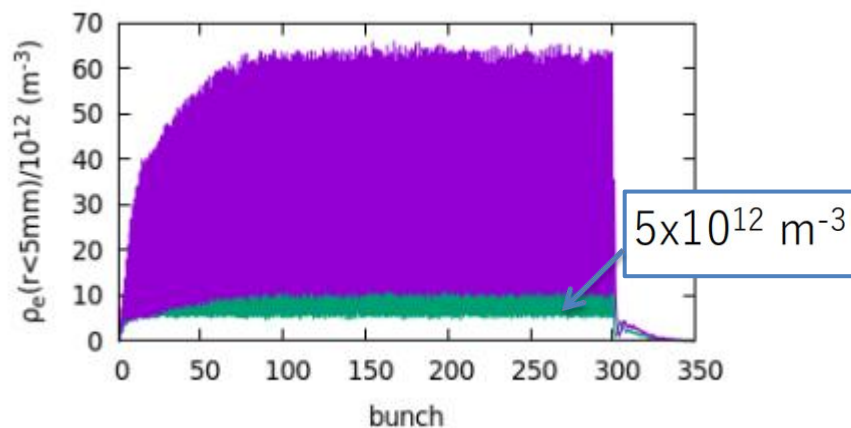
电子云分布
(PEI程序)
K. Ohmi



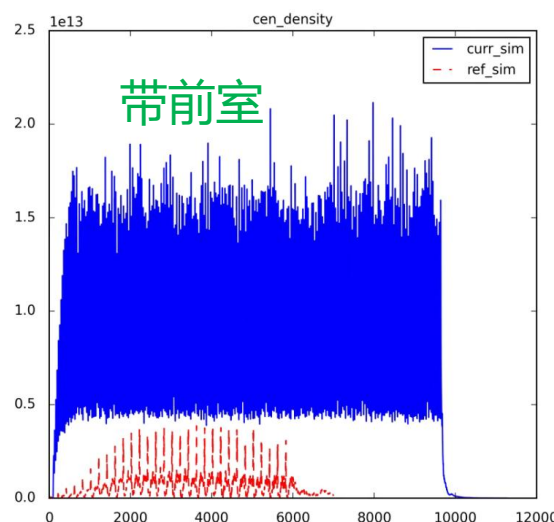
圆形管道



前室



$\delta_2 = 1.3$, $E_{2,peak} = 300 \text{ eV}$, $refe = 0.5$

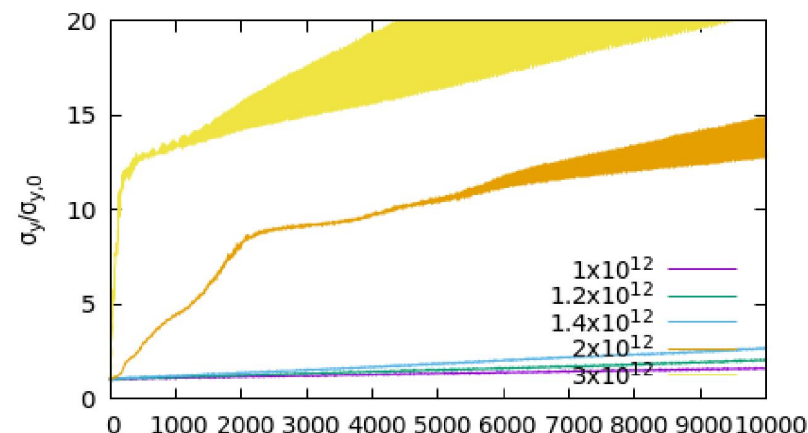


PyECLOUD程序 by W.Li

$$\rho_{e,th} = \frac{2\gamma\nu_s\omega_e\sigma_z/c}{\sqrt{3}KQr_0\beta L} \quad K = \omega_e\sigma_z/c$$

$$Q = \min(\omega_e\sigma_z/c, \theta)$$

理论阈值估算： $\rho_e = 1.6 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$



单束团不稳定性模拟 (PEHTS程序)
K. Ohmi

总结和未来计划

➤ 对于各种集体效应进行了初步研究

➤ 各子任务进展不一：取决于其他研究任务协作、前期研究经验（例如电子云）

- 高频腔加速模式：不稳定性可通过PI反馈抑制，瞬态束流负载效应不太严重
- 高次模HOM不稳定性和加热问题有待于元件的阻抗优化；电阻壁不稳定性可通过feedback抑制
- 1GeV时 CWR不稳定性流强阈值可能小于1 mA，设计DW时需要同时统筹考虑
- 微波不稳定和TMCI的准确计算依赖于阻抗建模并且需要严格控制阻抗预算
- 离子效应：模拟程序 ready
- 电子云效应：模拟程序熟悉中

} 未来需要与真空组配合推进

➤ 近期迫切任务：建立初步的阻抗模型，束-束作用模拟也同样关注

- 占比贡献较大的元件：电阻壁、RF腔、准直器、波纹管、BPM等
- 参考借鉴SKEKB/CEPC/FCC等

谨此汇报，
感谢关注！

➤ 未来计划

- 上述内容持续进行更细致的研究
- 多物理效应复合（束-束作用、阻抗、空间电荷、IBS、feedback噪声等）
- 包括与其他研究组或束流物理组其他成员的协作（RF、真空、束测等；束-束作用、DW、准直器等）