

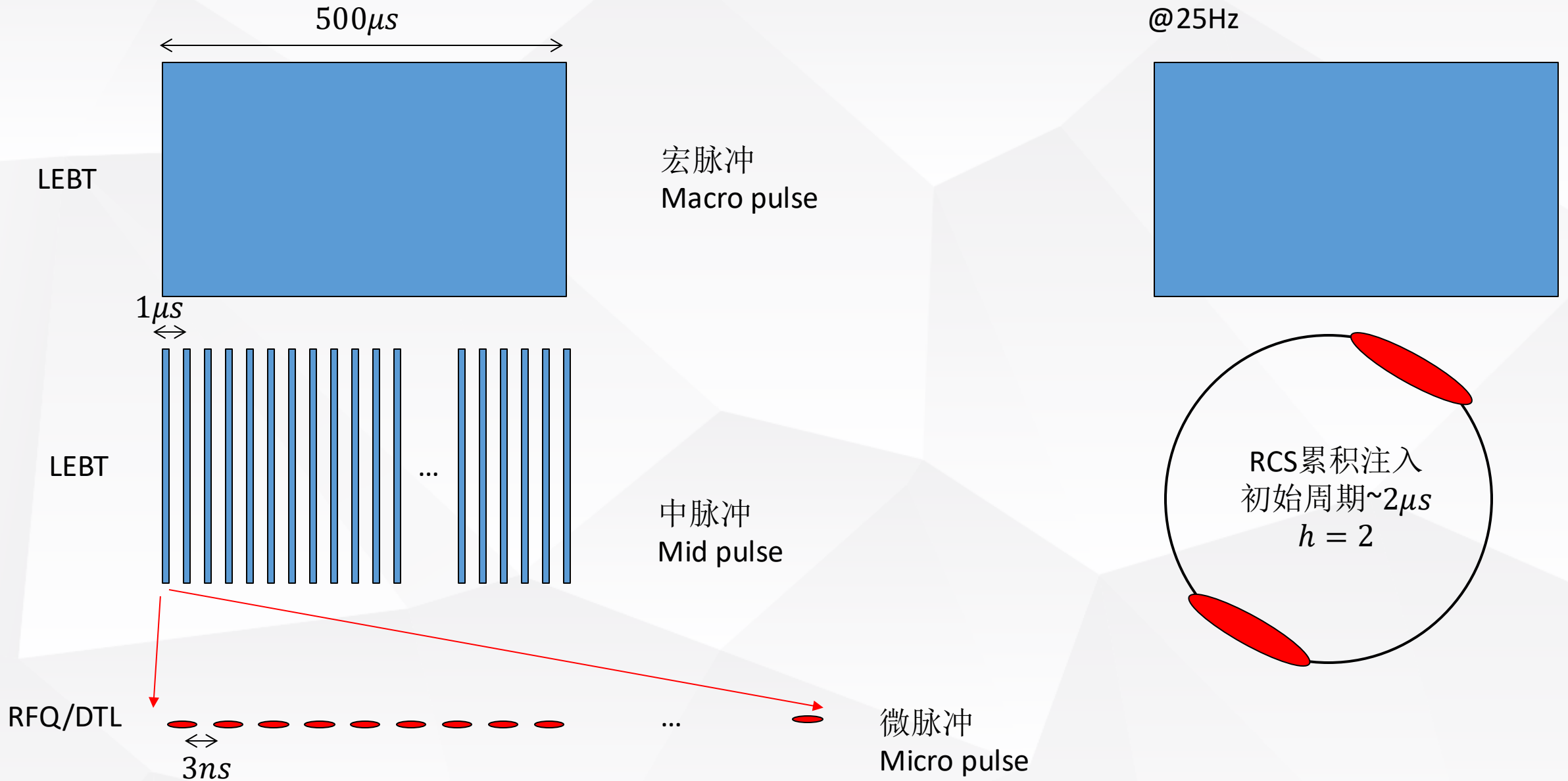
射频直线加速器（三）

多粒子束流参数与直线加速器物理设计

刘星光

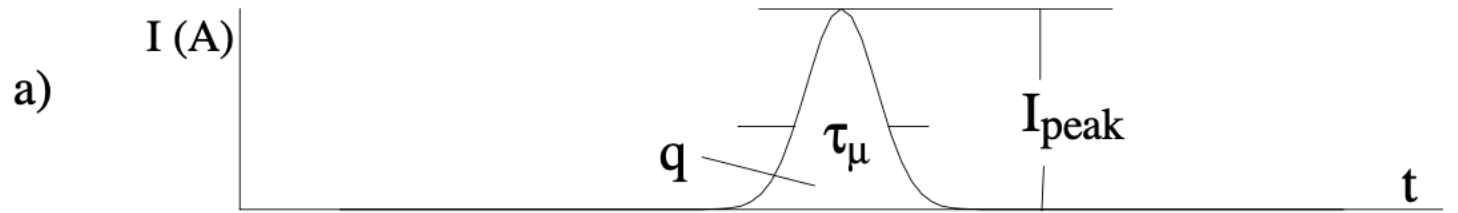
2024年12月16日

脉冲的时间结构 (Pulse structure)

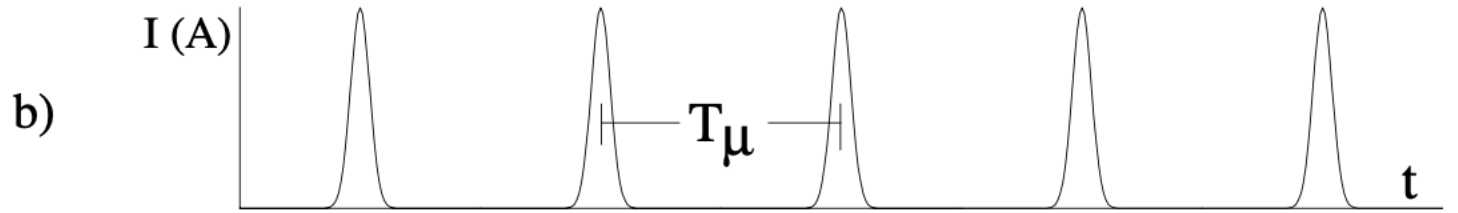


➤ 流强的定义 (Current Intensity: $I=q/t$)

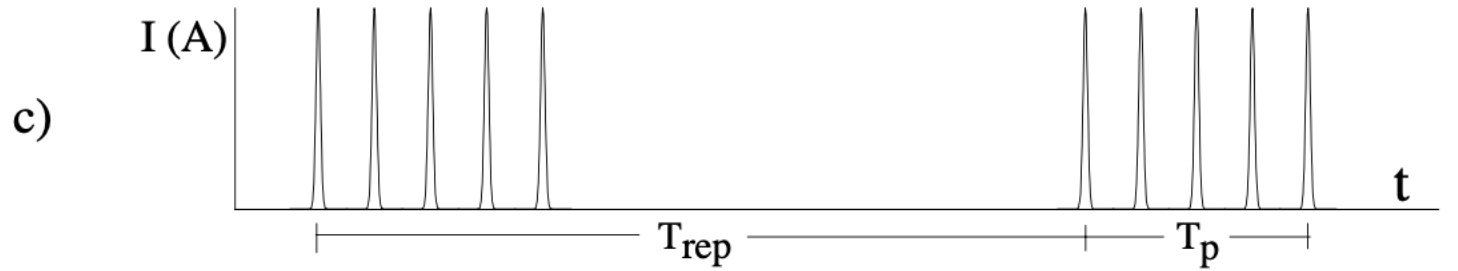
峰值流强 ($I_{peak} = q/\tau_{\mu}$)



脉冲流强 ($I_p = q/T_{\mu}$)



平均流强 ($I_{ave} = I_p \frac{T_p}{T_{rep}}$)



连续束 (CW) 流强: I



多粒子束流参数

$$\epsilon_n = \beta\gamma\epsilon$$

归一化发射度

几何发射度（随加速变小：Adiabatic damping）

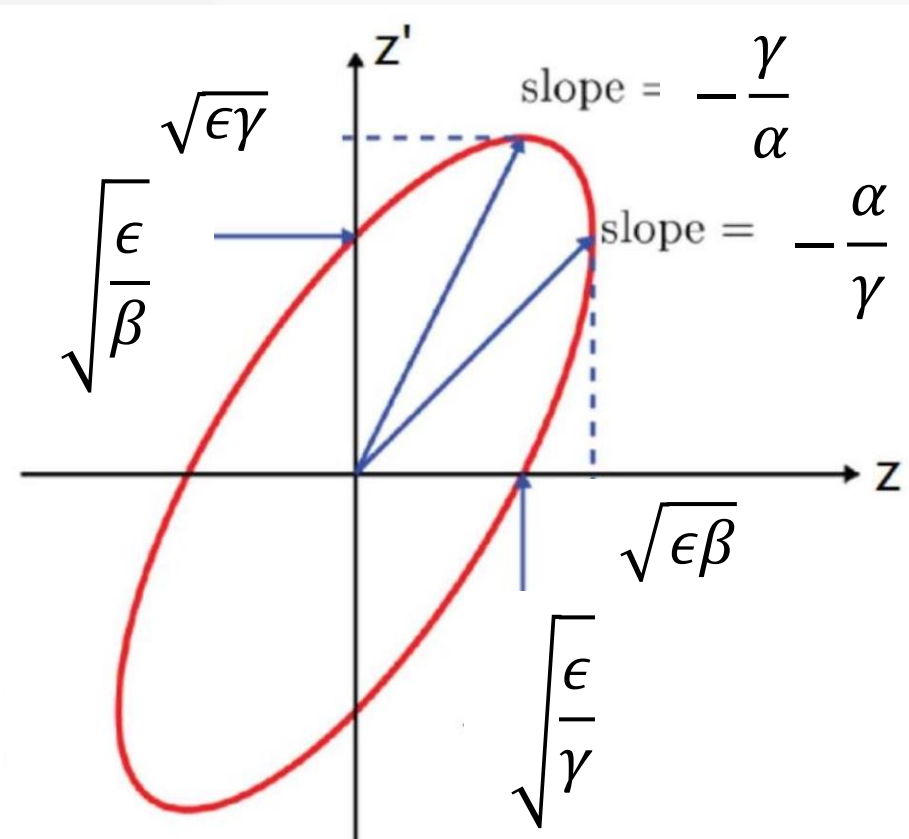
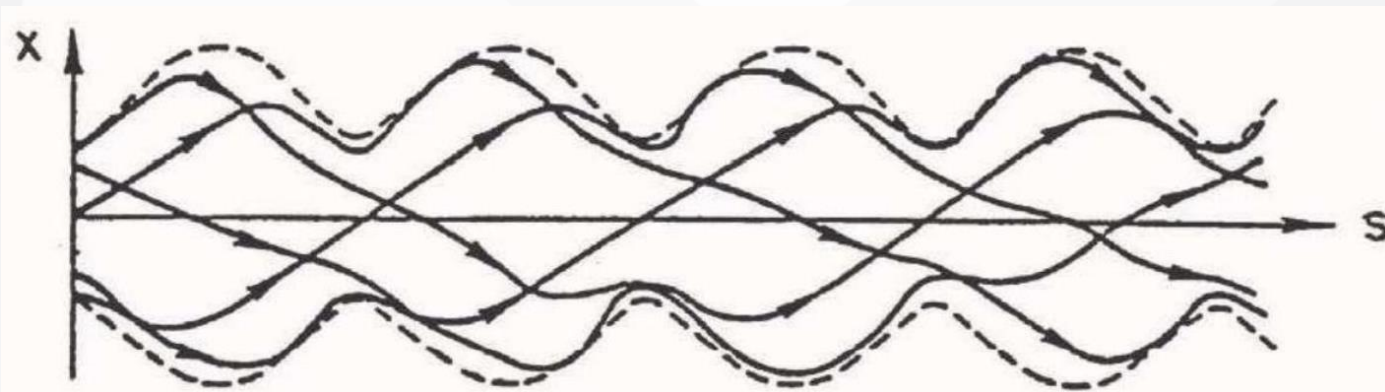
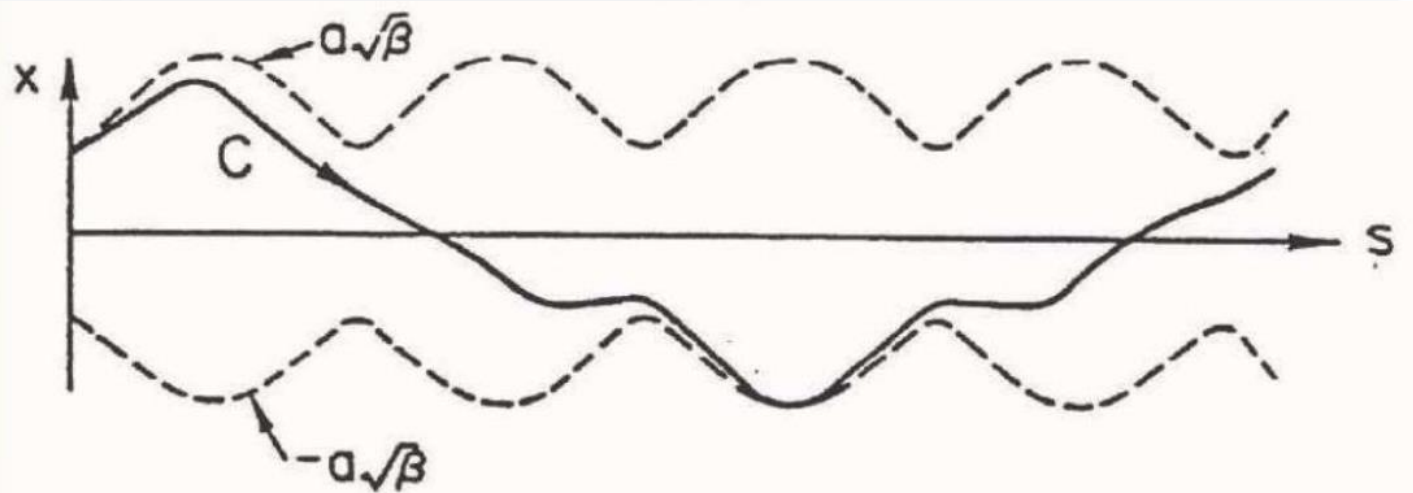
$$\langle x_i \rangle = \sum_N^{i=1} \frac{x_i}{N}$$

$$\langle x'_i \rangle = \sum_N^{i=1} \frac{x'_i}{N}$$

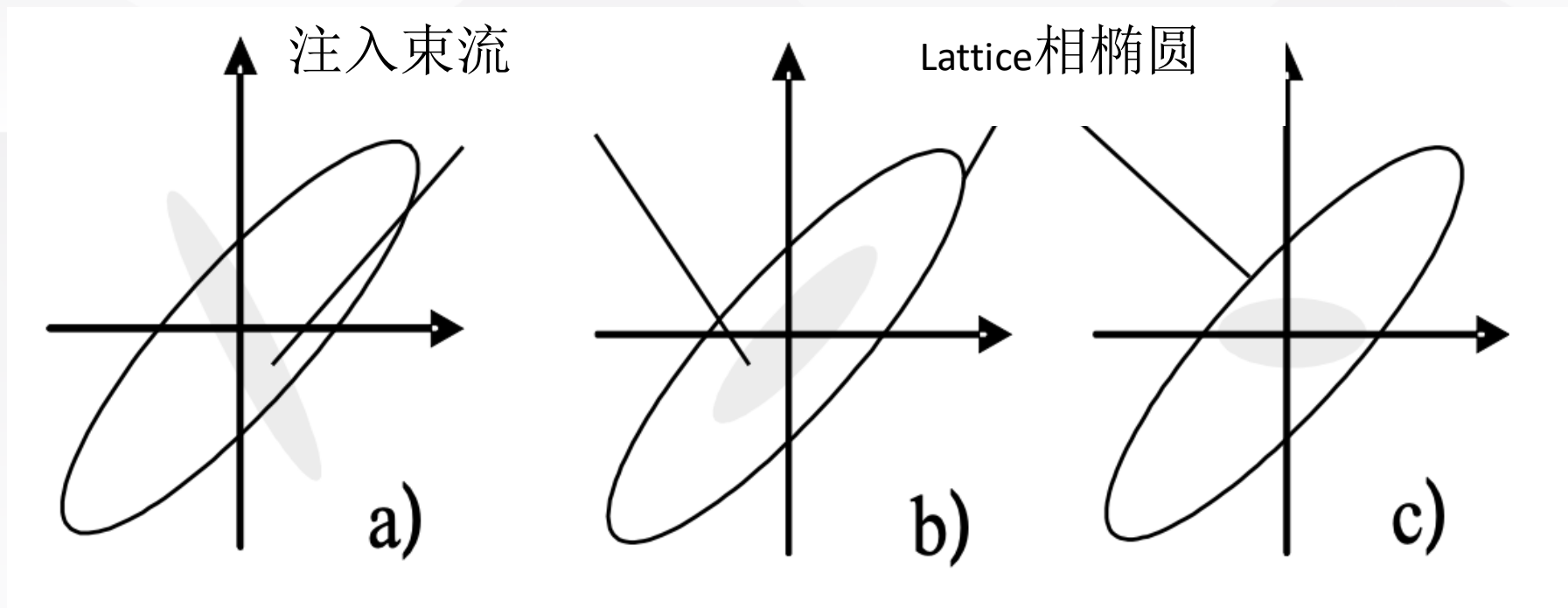
$$\sigma_x^2 = \langle x_i^2 \rangle - \langle x_i \rangle^2 = \sum_N^{i=1} \frac{x_i^2}{N} - \left(\sum_N^{i=1} \frac{x_i}{N} \right)^2$$

$$\epsilon_{rms,x} = \sqrt{\sigma_x^2 \sigma_{x'}^2 - \sigma_{xx'}^2}$$

束流包络与相椭圆

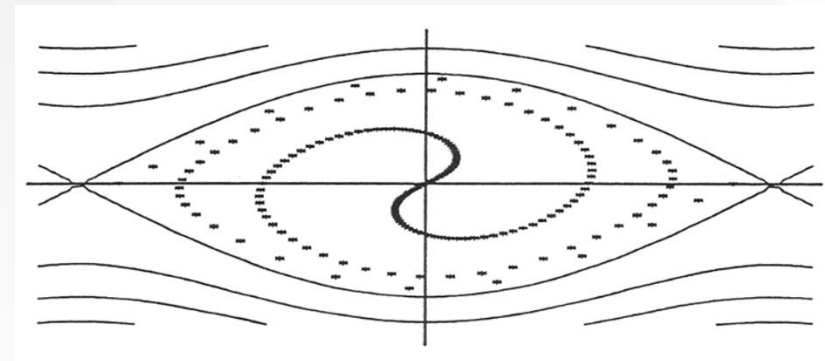
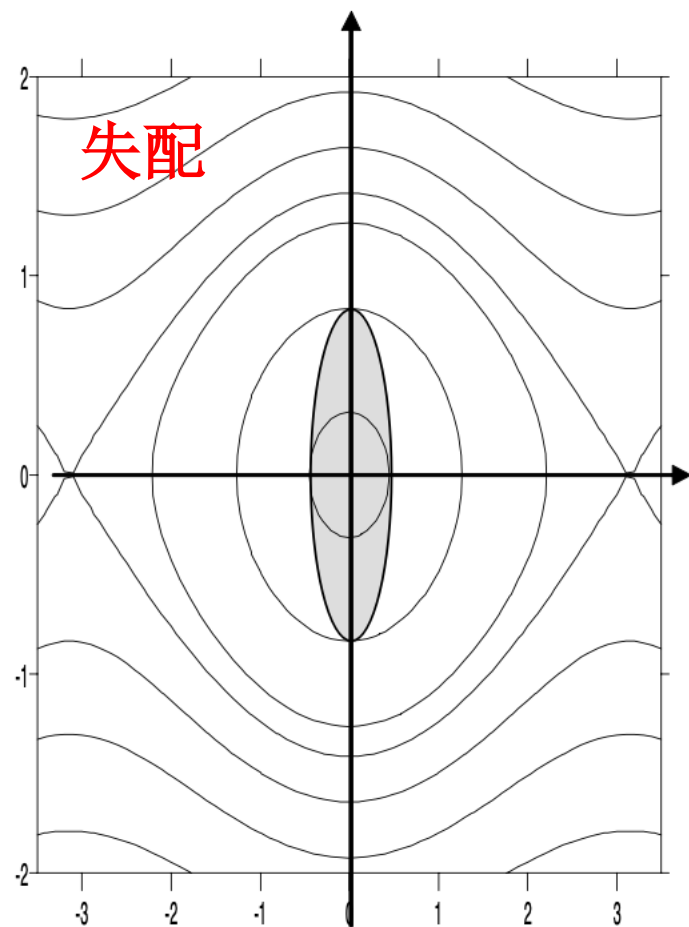
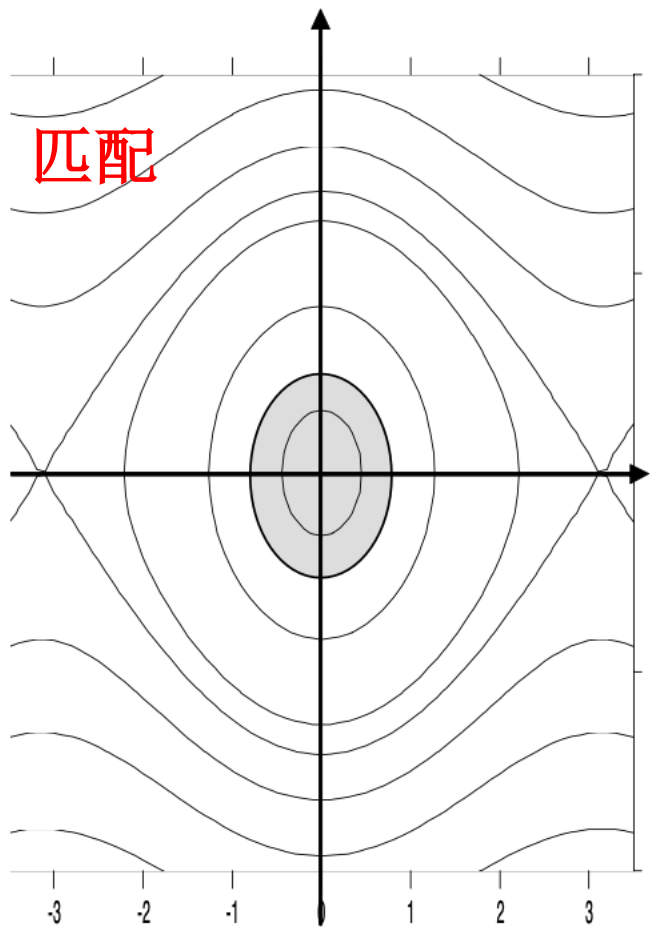


匹配与失配（横向）



如何保证束流横向相空间的匹配？

匹配与失配（纵向）



相空间丝化现象
Phase space filamentation

如何保证束流纵向相空间的匹配？

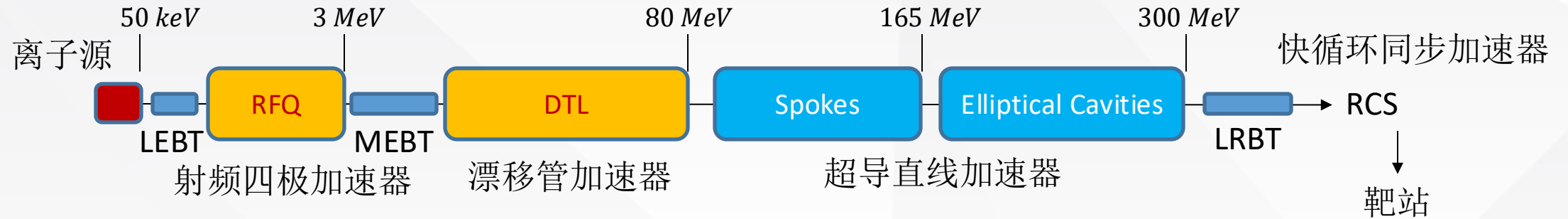
散裂直线加速器中的物理设计简介

中国散裂中子源

世界五大散裂中子源：英国ISIS，美国CSNS，日本J-Parc，中国CSNS，ESS（调试）



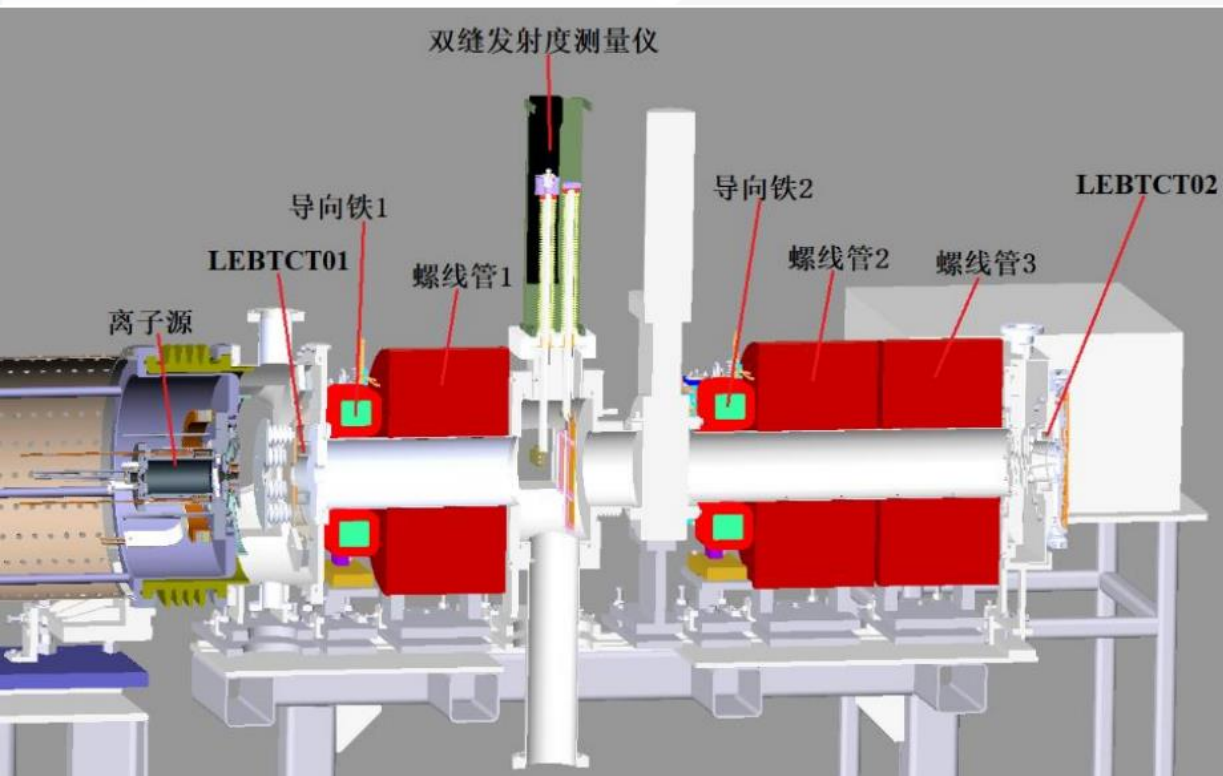
➤ 直线加速器包含多种类型的加速器（结构）



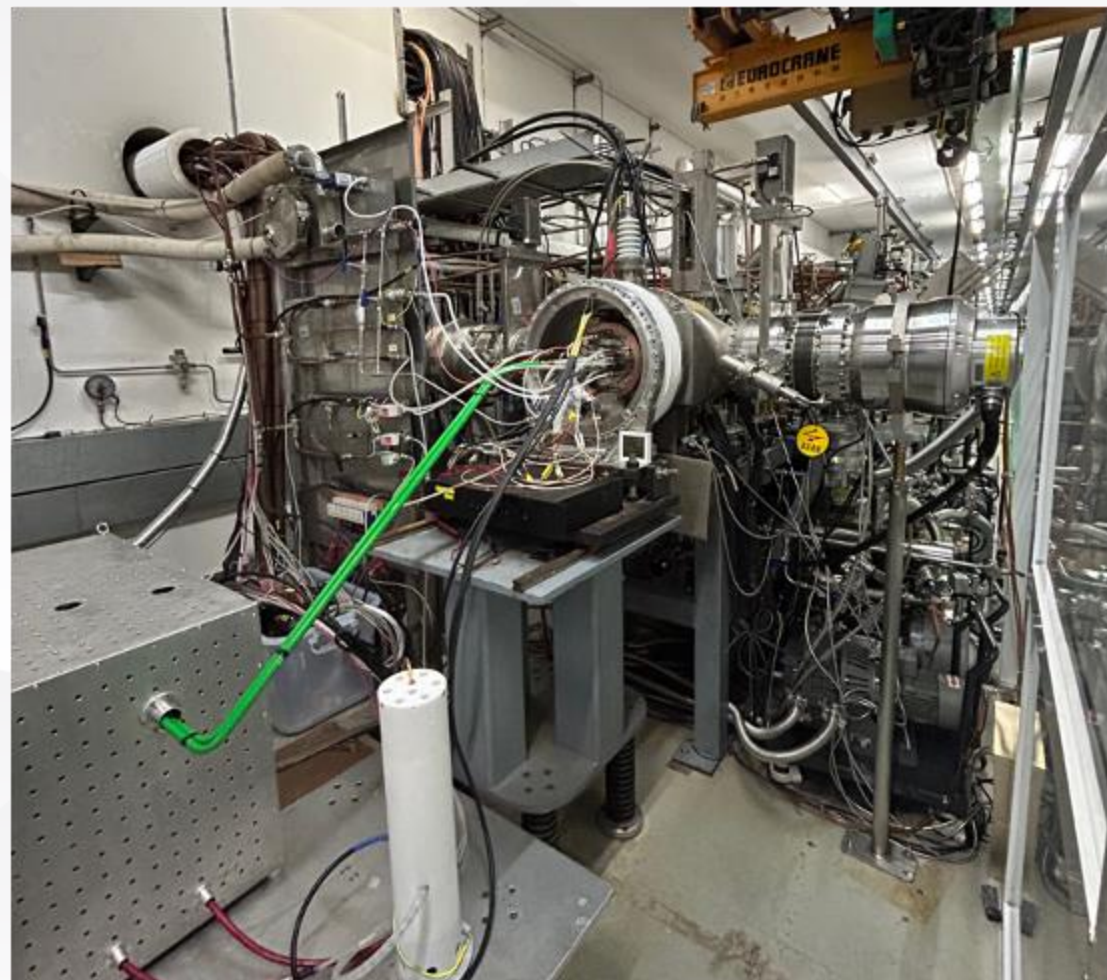
➤ 直线加速器的作用与目的：提供环所需的束流

- 能量（多种加速结构）
- 脉冲结构（切束）
- 束流光学参数：发射度，Twiss参数（设计、匹配、测量）

离子源与低能传输线 (Ion Source & LEBT)



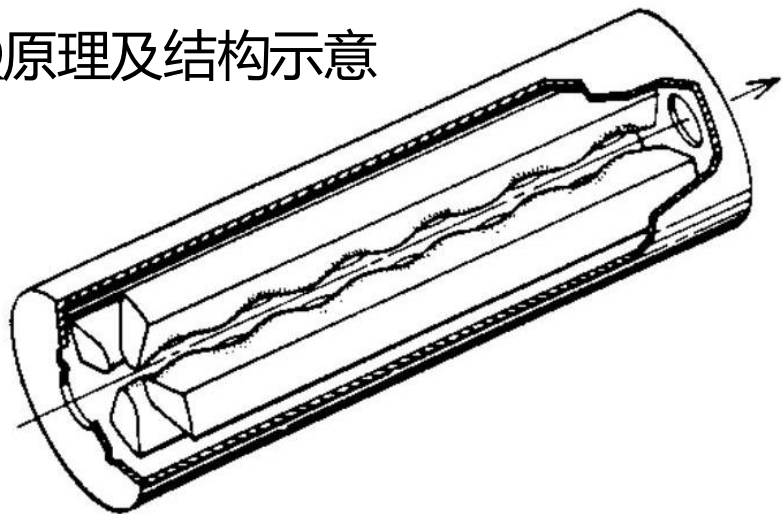
射频负氢离子源结构示意图



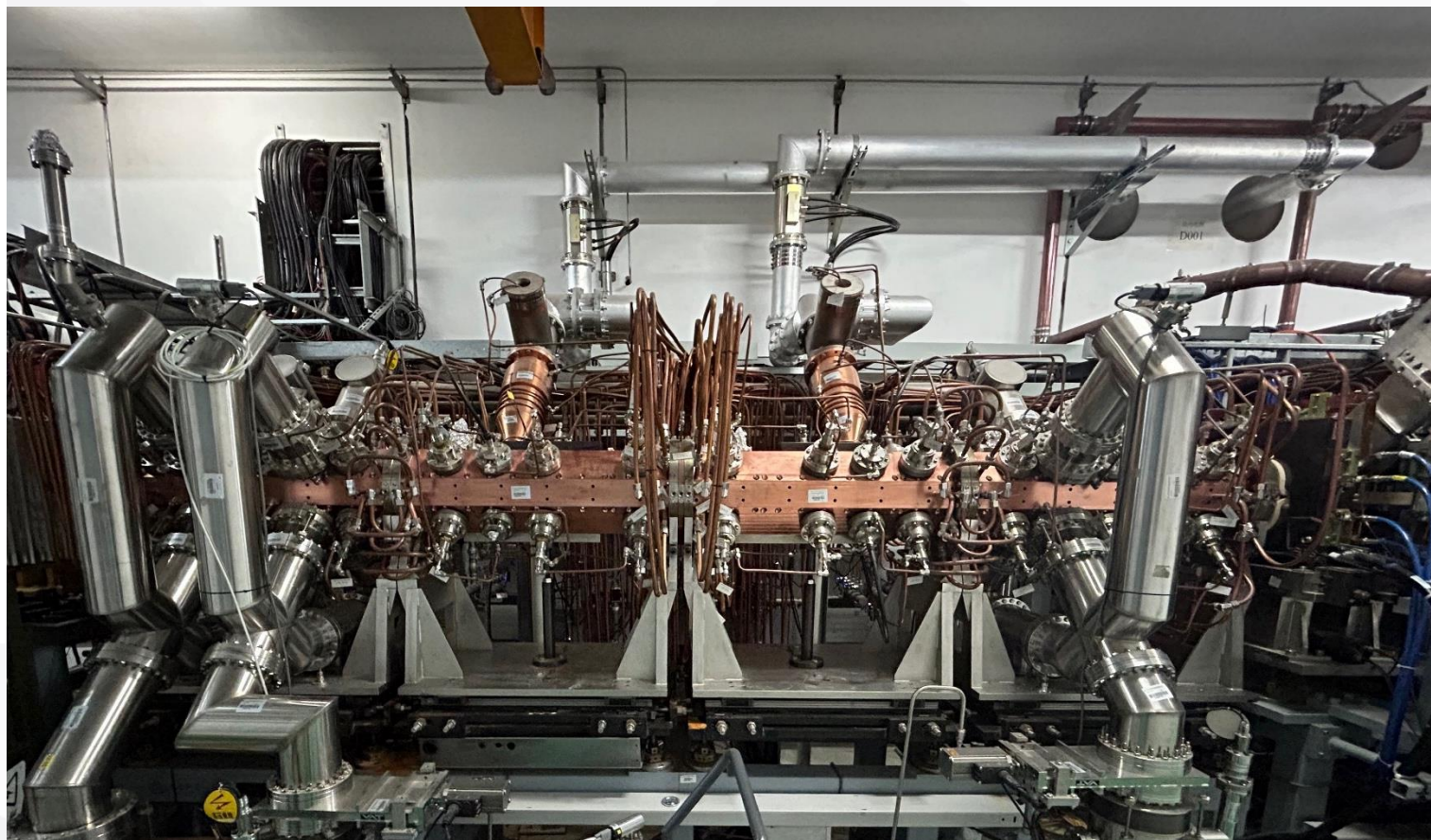
射频负氢离子源(隧道内)

➤ 射频四极加速器 (RFQ, Radio Frequency Quadrupole)

RFQ原理及结构示意图

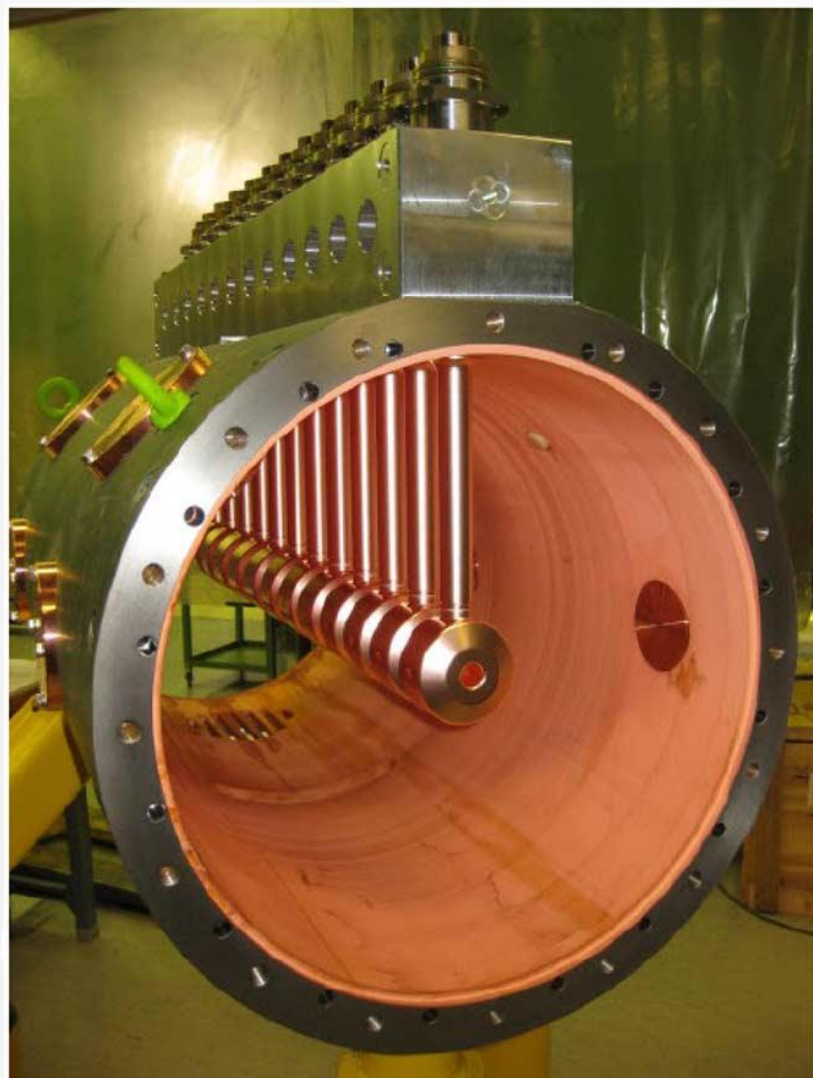


RFQ端面



CSNS RFQ (隧道内)

▶▶ 漂移管加速器 (DTL, Drifting Tube Linac)



DTL内部结构



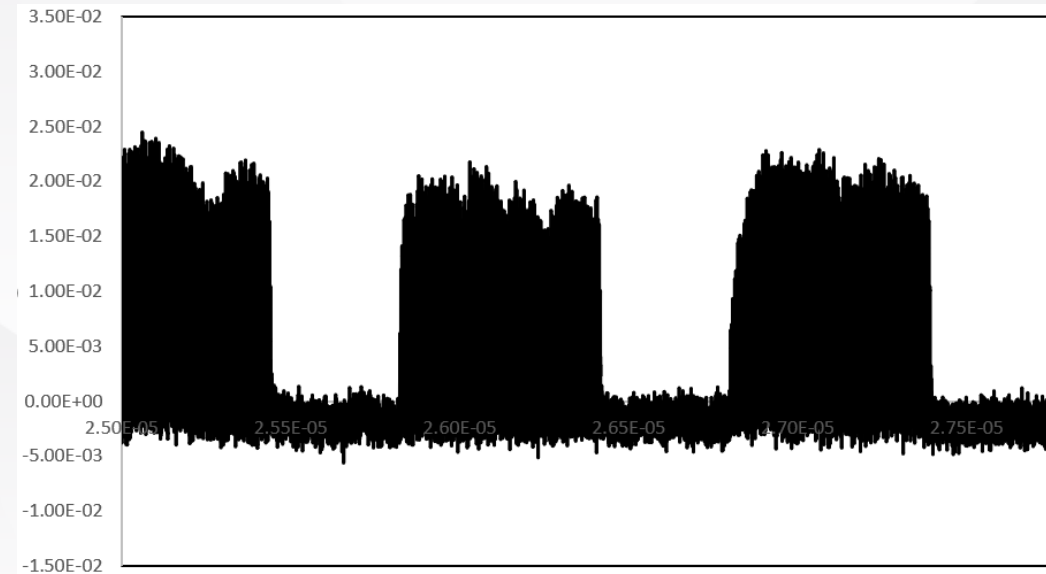
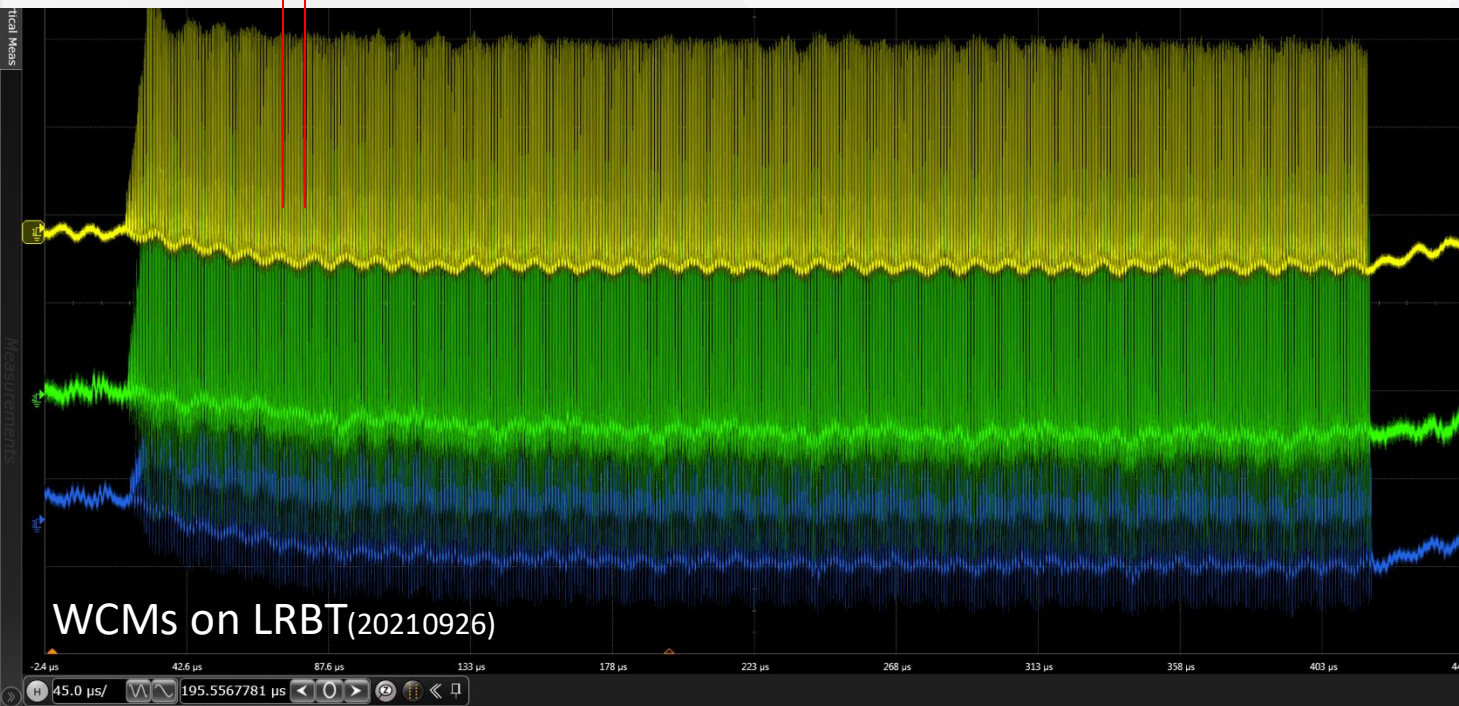
散裂直线隧道的DTL

➤ 直线隧道内 (从下游)



脉冲结构的测量 (Wall Current Monitor)

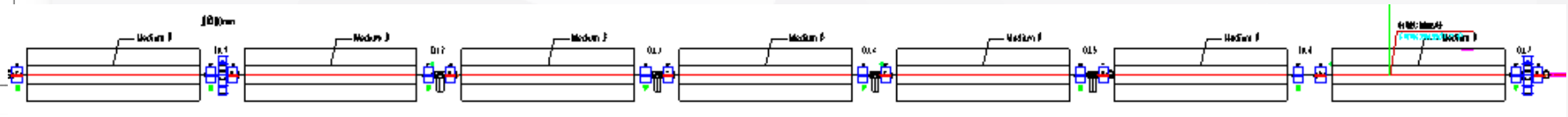
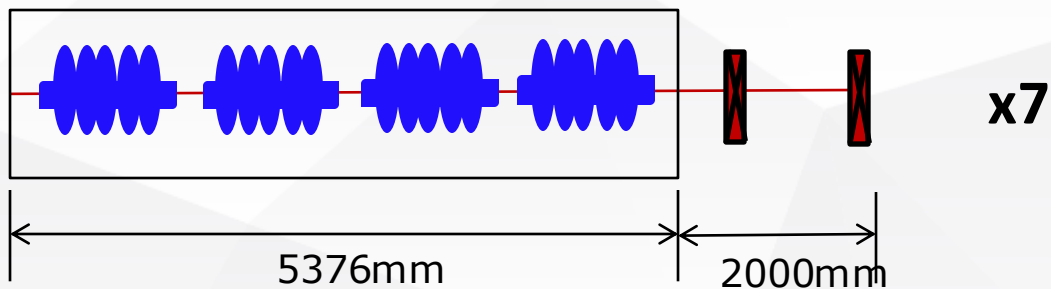
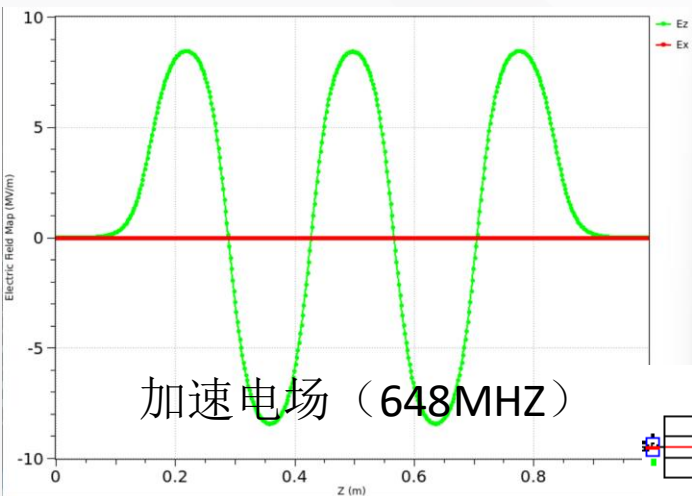
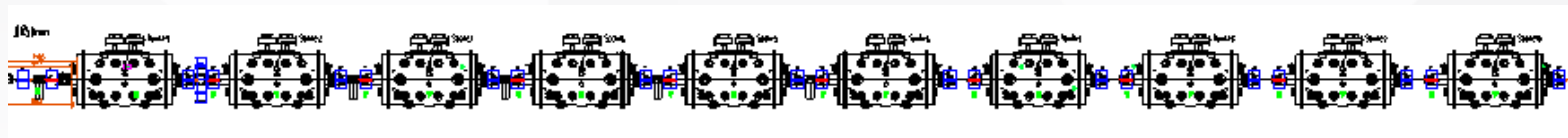
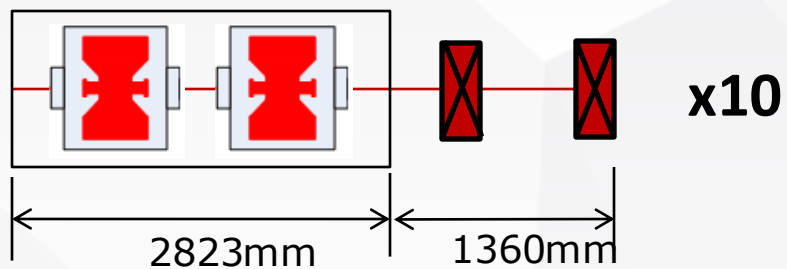
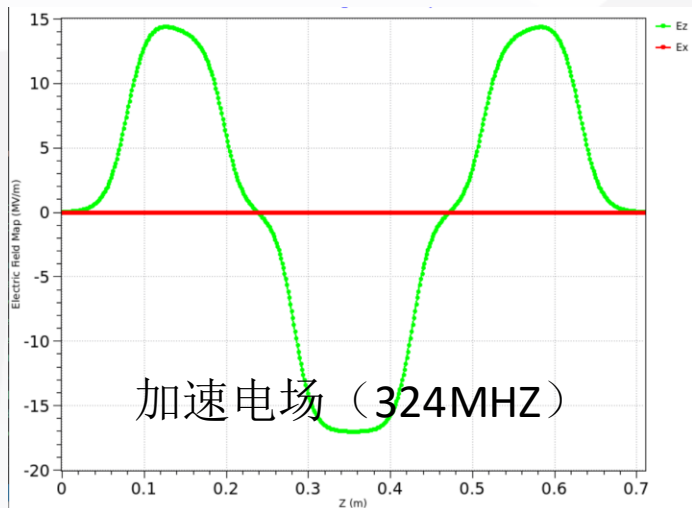
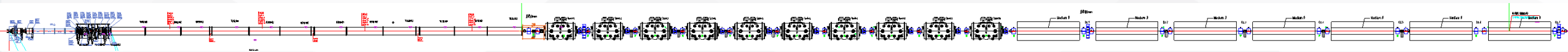
~10 μs



➤ 直线物理设计的基本原则及工具

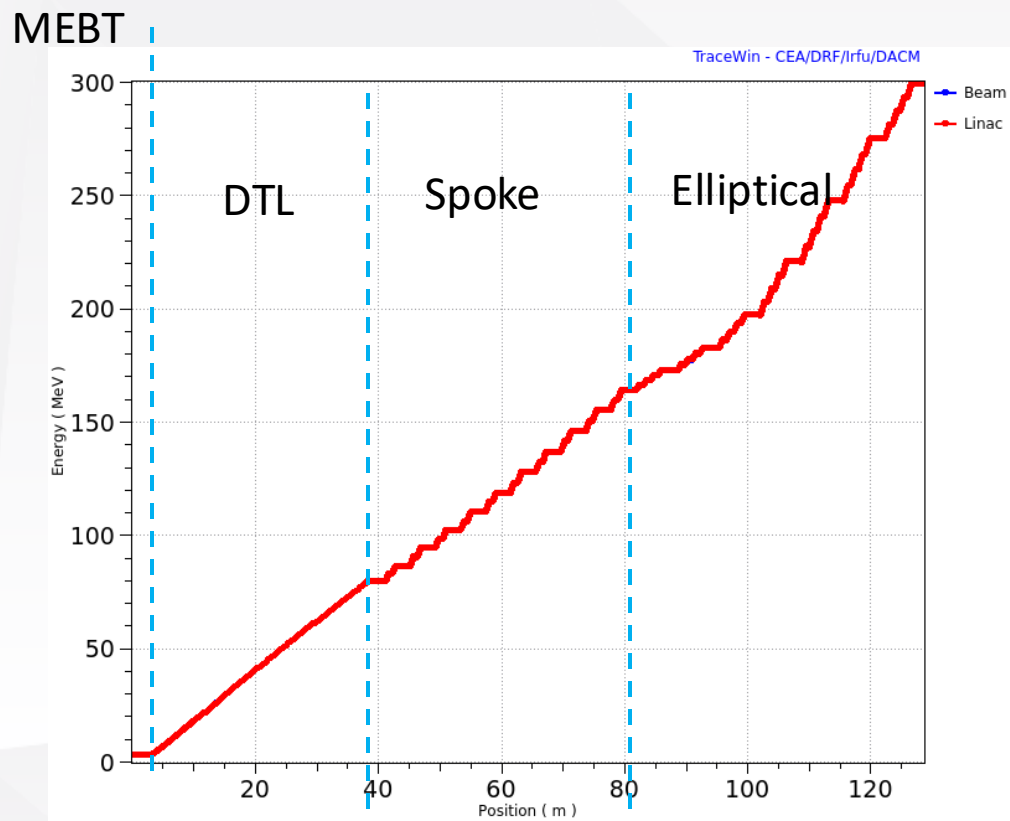
- 离子源 和LEBT（IGUN, CST Particle Studio）
- RFQ（Parmteqm, Toutatis）：长度、电压、通过率、不稳定性等
- DTL & 超导直线加速器（TraceWin）
 - 周期相移（零流强）：
 - $\Delta\phi < \pi/2$ （不稳定性抑制）
 - 相移平滑过渡
 - 均温原理（抑制发射度增长）
 - 空间电荷效应相移与零流强相移比： $\eta = \sigma_{sc}/\sigma_0 > 0.4$
- 传输线（MEBT & LRBT）：束流匹配，抑制发射度增长
- 束流损失控制标准：1W/m

CSNS-II Linac 超导加速器建模

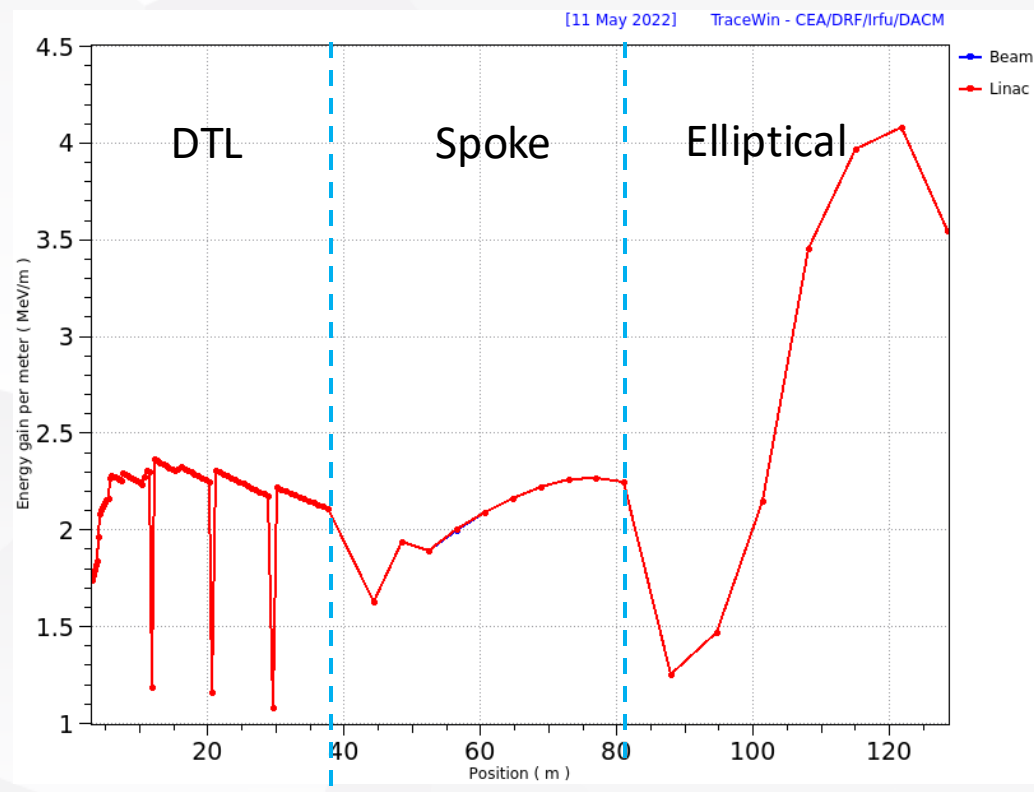


CSNS-II Linac 各部分能量变化及加速梯度

能量变化曲线

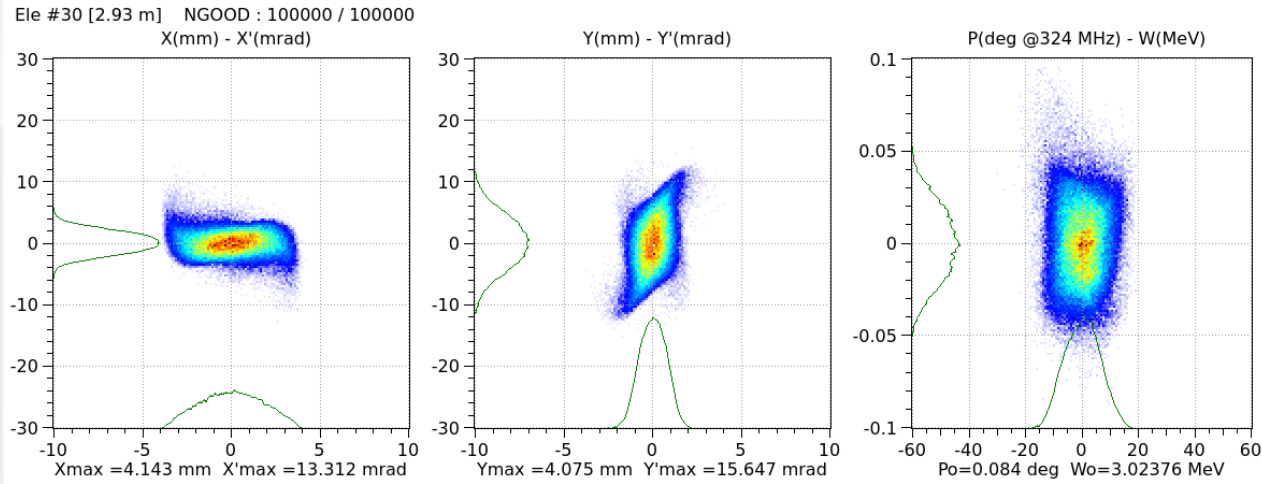


各区间加速梯度

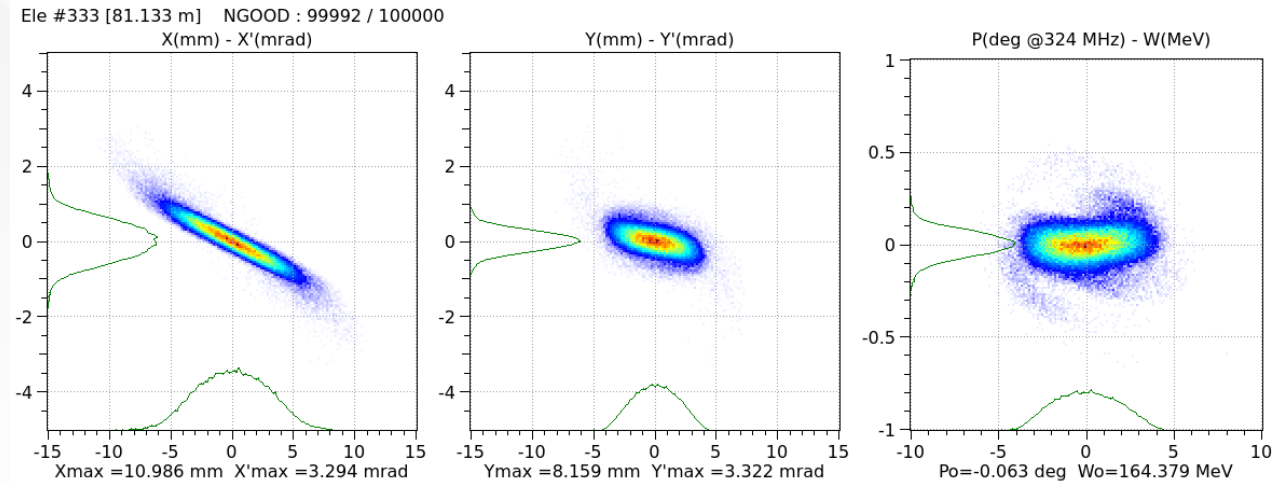


各部分出口束流相空间分布

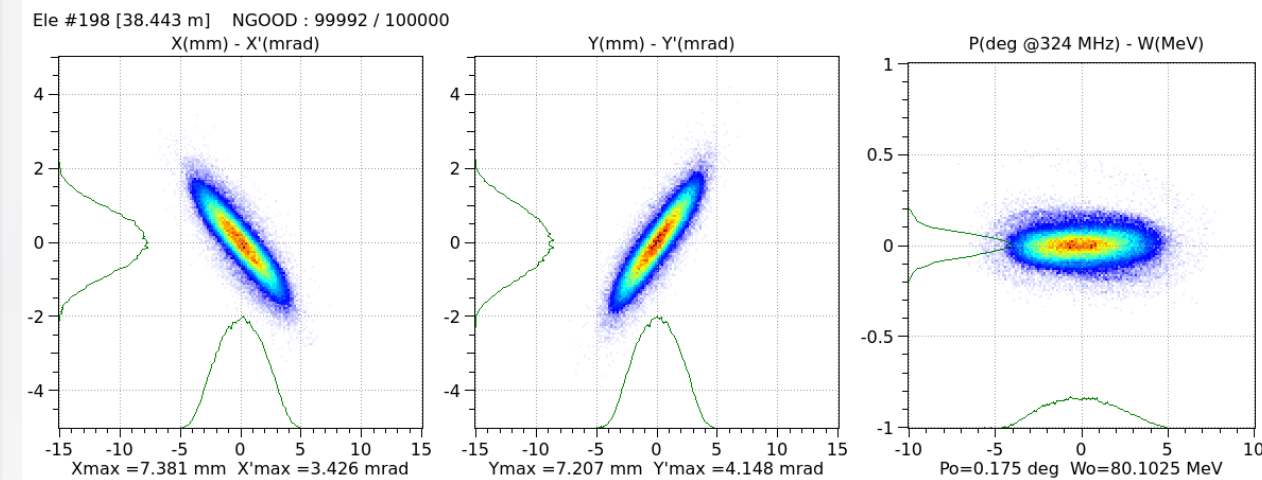
①MEBT出口



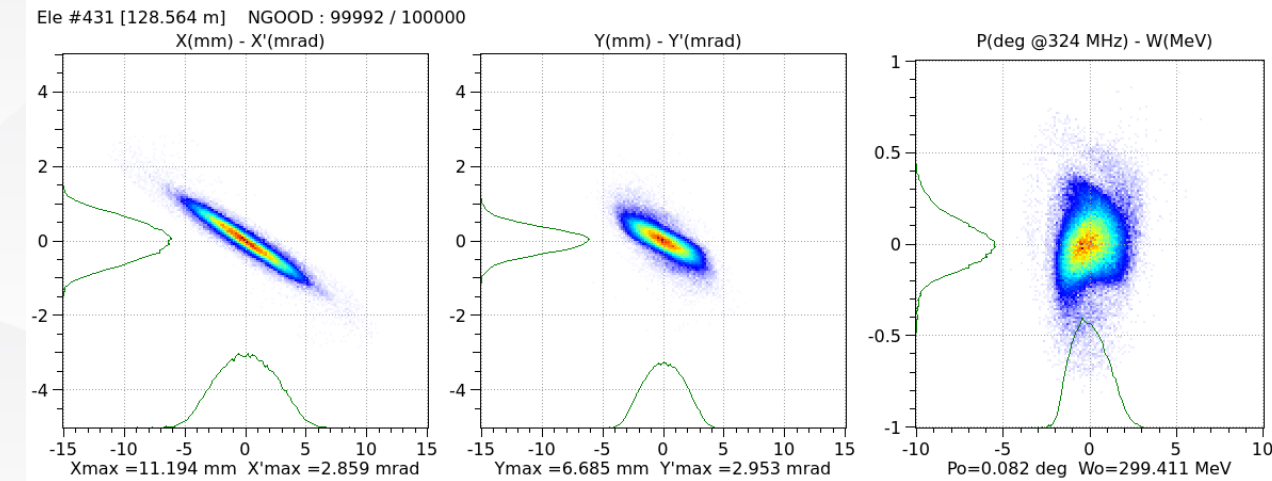
③Spoke超导段出口



②DTL出口



④椭球超导段出口



- 1 实际的直线加速器物理与硬件条件密切相关，且一般涉及多种类型的加速结构类型**
- 2 在直线加速器的除能量和束流参数外，需要考虑不同加速结构或加速段之间横向与纵向的匹配问题**
- 3 束流动力学模拟及设计软件是现代加速器的必要工具**