

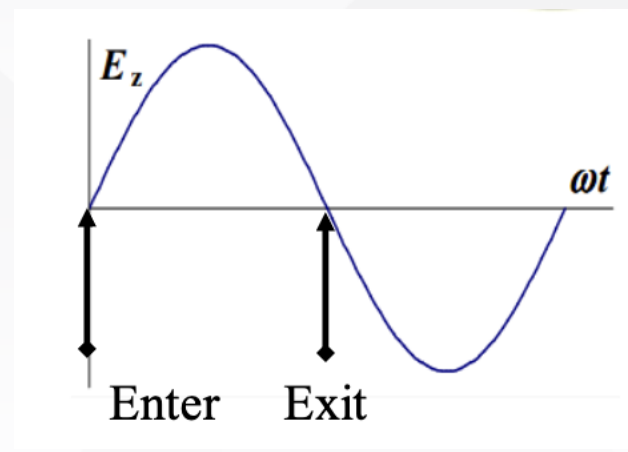
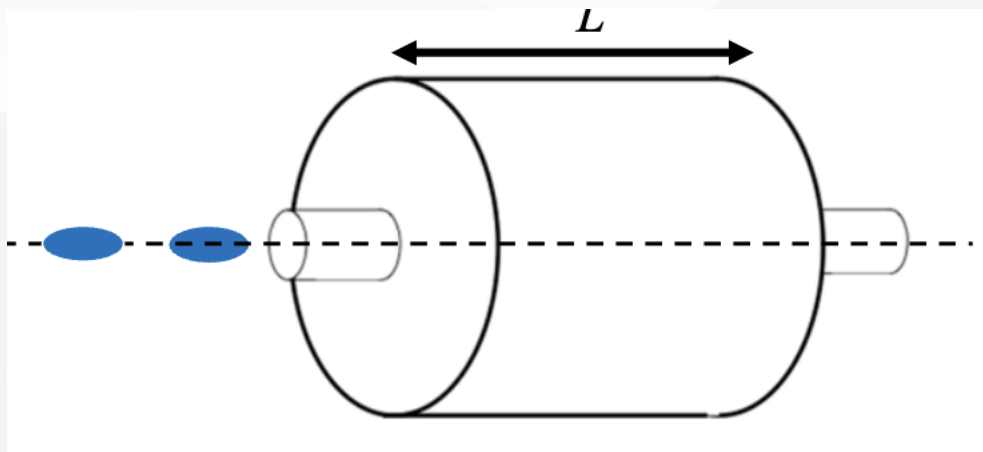
射频直线加速器（四）

射频腔基本参数与电子直线加速器物理设计

刘星光

2024年12月18日

➤ 腔体的关键参数：TTF (time transit factor)



$$V_c = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_z(\rho=0, z) e^{i\omega_0 z/\beta c} dz \right|$$

对于Pillbox腔体来说：

$$V_c = E_0 \left| \int_0^d e^{i\omega_0 z/\beta c} dz \right| = E_0 d \frac{\sin\left(\frac{\omega_0 d}{2\beta c}\right)}{\frac{\omega_0 d}{2\beta c}} = E_0 d \cdot T$$

一般情况下有：

$$T = \frac{V_{eff}}{V_0}$$

➤ 腔体的关键参数：加速梯度 E_{acc}

$$E_{acc} = \frac{V_{acc}}{L}$$

对于电子类加速结构 ($\beta \sim 1$), 假设加速单元个数为 N
假设其为 π -mode,

$$L = \frac{N\lambda}{2}$$

假设其为 $2\pi/3$ -mode?

对于质子重离子类加速结构 ($\beta \ll 1$), 假设加速单元个数为 N
假设其为 π -mode,

$$L_{cell} = \beta\lambda/2$$

► 腔体的电磁场能量U

腔体内的电磁场储存的能量密度:

$$u = \frac{1}{2}(\epsilon_0 \mathbf{E}^2 + \mu_0 \mathbf{H}^2)$$

因能量在电场和磁场之间反复交换, 因此, 储存的总能量可计算为:

$$U = \frac{\epsilon_0}{2} \int_V dV |\mathbf{E}|^2 = \frac{\mu_0}{2} \int_V dV |\mathbf{H}|^2$$

► 腔体的功率损耗 (P_{diss})

除了电磁场储存能量意外，结构表面由于电阻存在存在功率损耗，该损耗与表面阻抗 (R_s) 有关：

单位面积

$$\frac{dP}{da} = \frac{\mu_0 \omega \delta}{4} |\mathbf{H}_{\parallel}|^2 = \frac{R_s}{2} |\mathbf{H}_{\parallel}|^2$$

腔体损耗：

$$P = \frac{R_s}{2} \int_A da |\mathbf{H}_{\parallel}|^2$$

一般来说：

$$\frac{P}{L} \propto \frac{1}{\frac{R}{Q} QR_s} \frac{E^2 R_s}{\omega}$$

常温及超导结构的表面阻抗 (R_s) 有不同特性：

$$R_s \propto \omega^{1/2}$$

$$R_s \propto \omega^2$$

➤ 腔体的（无载）品质因子（ Q_0 ）

$$Q_0 = 2\pi \frac{\text{腔体储能}}{\text{单个震荡周期内的损耗}} = 2\pi \frac{U}{W_\tau}$$

一般情况下有：

$$Q_0 = \frac{\omega\mu_0 \int_V dV |\mathbf{H}|^2}{R_s \int_A da |\mathbf{H}_\parallel|^2}$$

常温谐振腔一般在 $\sim 10^4$
超导谐振腔一般在 $\sim 10^{10}$

几何因子 (G)

定义为无载品质因子与表面阻抗的乘积，
与材料特性无关
只与电磁场模式及几何形状有关

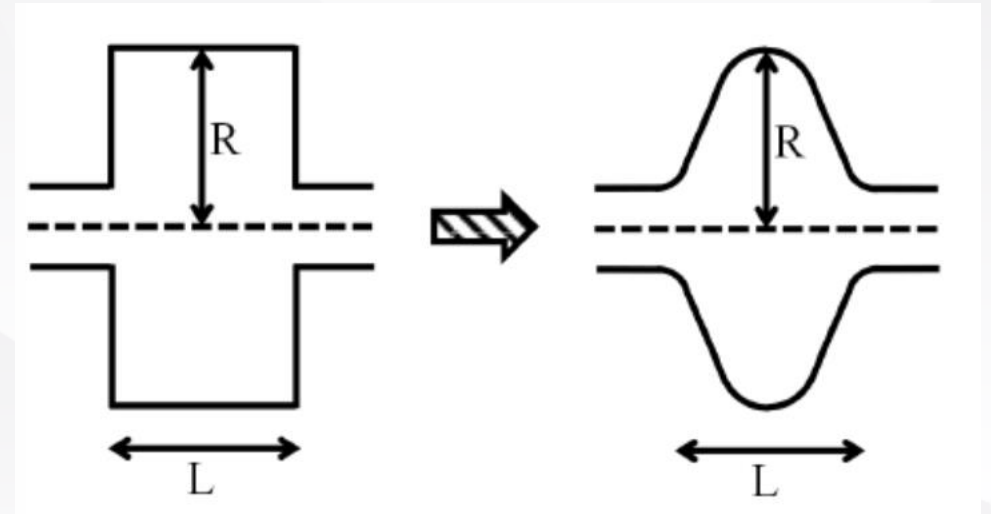
$$G = QR_s = \omega\mu_0 \frac{\int_V dV |\mathbf{H}|^2}{\int_A da |\mathbf{H}_{\parallel}|^2} = 2\pi \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{1}{\lambda} \frac{\int_V dV |\mathbf{H}|^2}{\int_A da |\mathbf{H}_{\parallel}|^2} = \frac{2\pi\eta}{\lambda} \frac{\int_V dV |\mathbf{H}|^2}{\int_A da |\mathbf{H}_{\parallel}|^2}$$

分路阻抗 R_{sh} 与 R_{sh}/Q

$$R_{sh} \equiv \frac{V_c^2}{P_{diss}}$$

一般的腔体设计目标：最大化分路阻抗

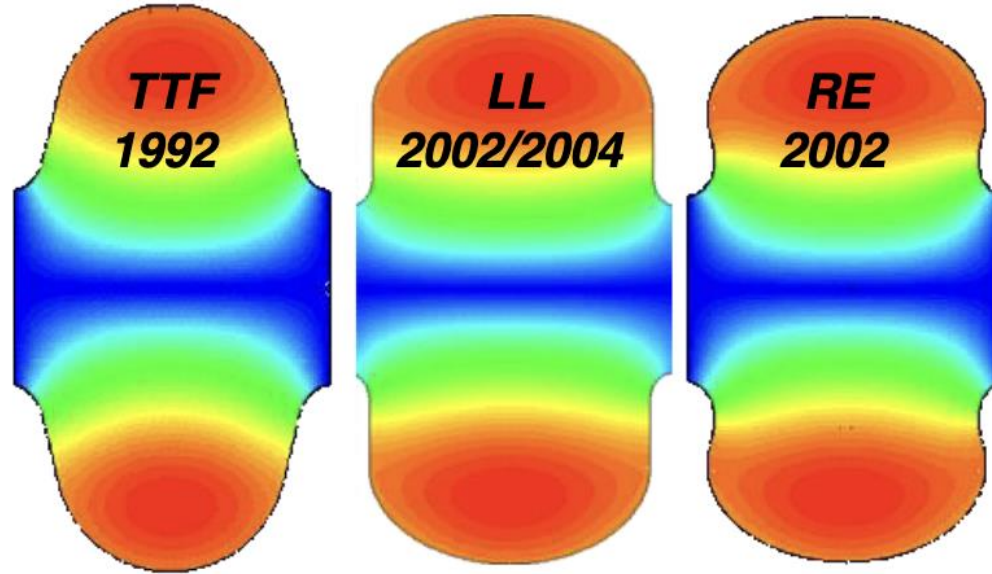
$$\frac{R}{Q} = \frac{V^2}{P} \frac{P}{\omega U} = \frac{E^2 L^2}{U \omega}$$



该量反应了结构对于一定损耗下能提供的加速能力

腔体形状的对比例：ILC的三种腔体参数比较

$f = 1300 \text{ MHz}$

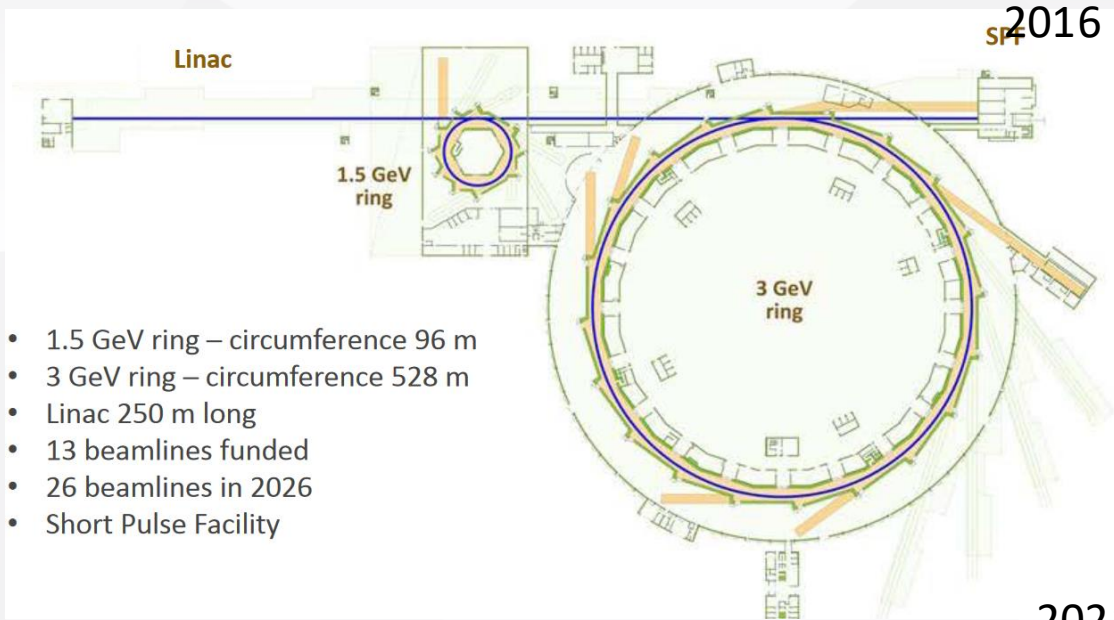


r_{iris}	[mm]	35	30	33
k_{cc}	[%]	1.9	1.52	1.8
E_{peak}/E_{acc}	-	1.98	2.36	2.21
B_{peak}/E_{acc}	[mT/(MV/m)]	4.15	3.61	3.76
R/Q	[Ω]	113.8	133.7	126.8
G	[Ω]	271	284	277
$R/Q \cdot G$	[$\Omega \cdot \Omega$]	30840	37970	35123



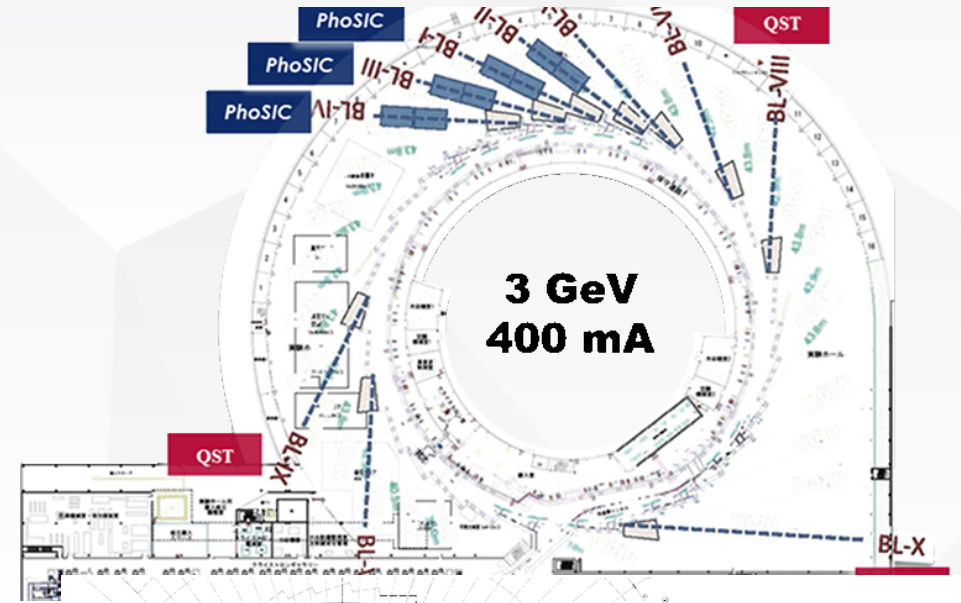
电子直线加速器中的物理设计简介

作为全能量直线注入器的电子直线加速器



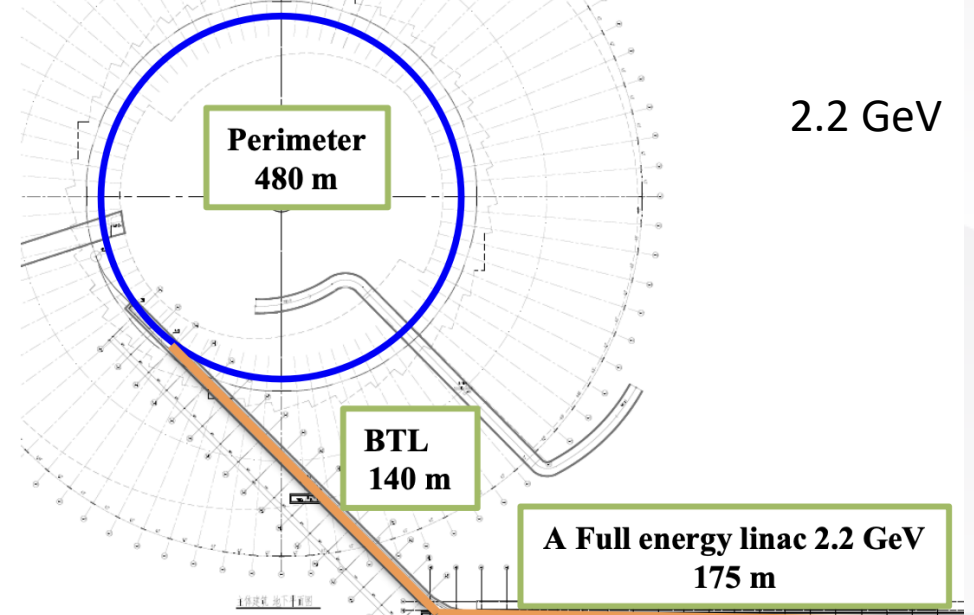
- 1.5 GeV ring – circumference 96 m
- 3 GeV ring – circumference 528 m
- Linac 250 m long
- 13 beamlines funded
- 26 beamlines in 2026
- Short Pulse Facility

2024

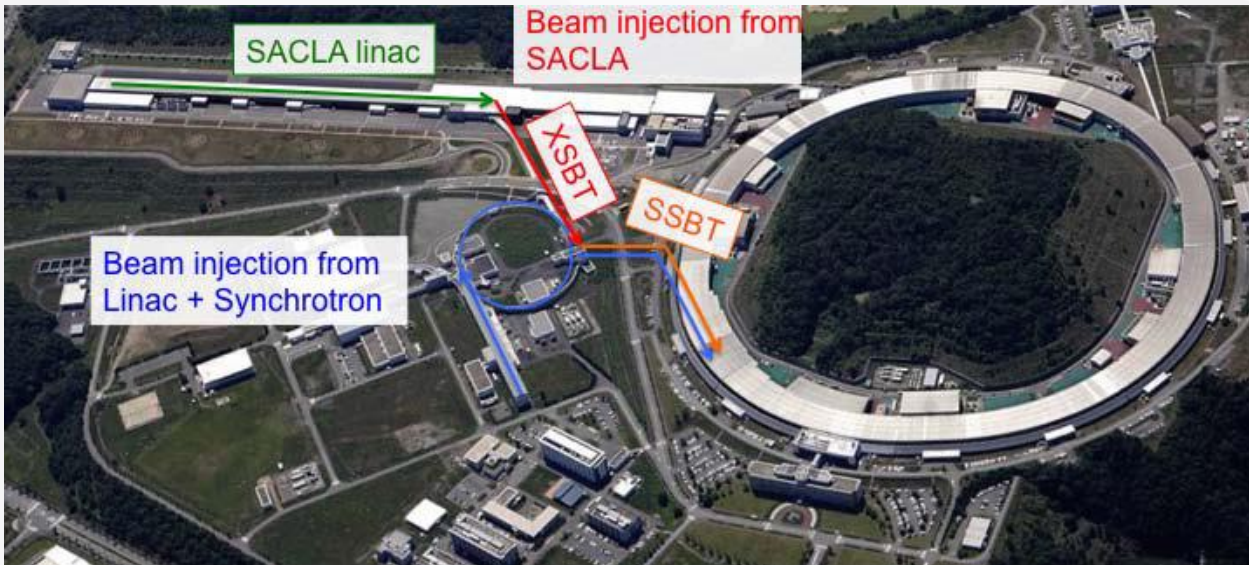


2021

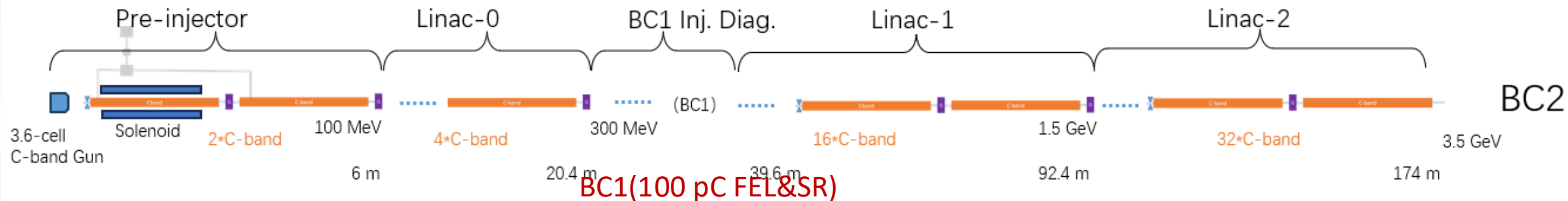
2.2 GeV 2027



A Full energy linac 2.2 GeV
175 m



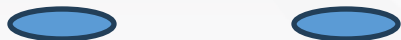
全能量直线注入器的整体布局



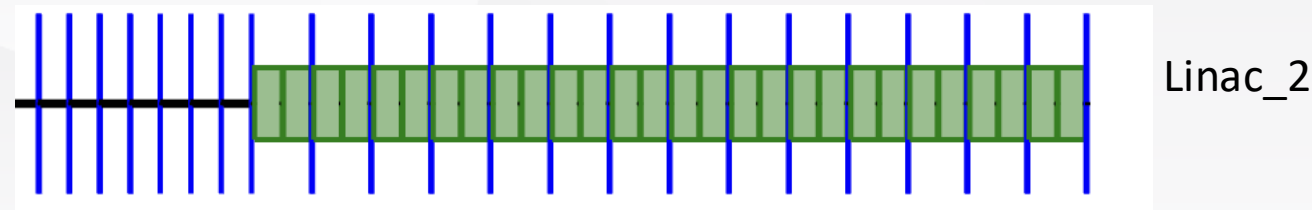
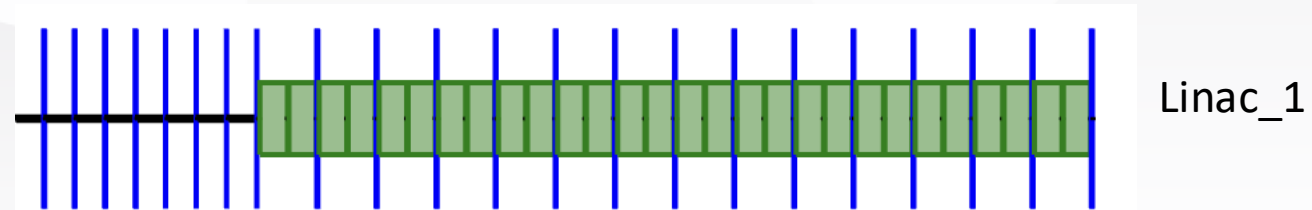
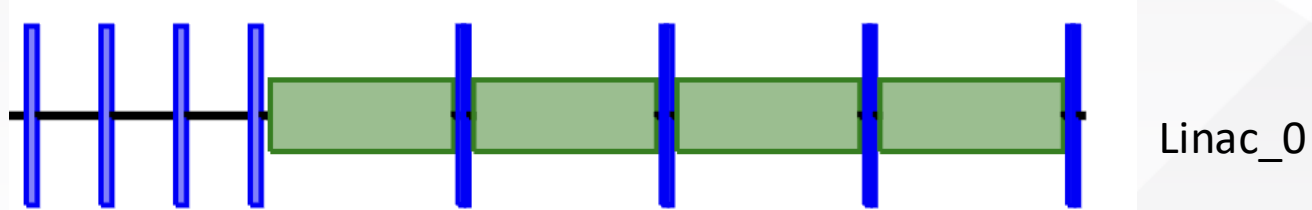
700 pC (100mA)



350 pC (100mA)



100 pC (20 SR + 80 FEL) @ 100/400Hz



Current Intensity	100	500	mA
RF frequency	166.7	166.7	MHz
Circumference	810	810	m
bucket filling rate	0.9	0.9	
Charge/bunch	0.67	3.33 (0.1)	nC
Injection scheme	Swap-out	Longitudinal injection	

预注入器

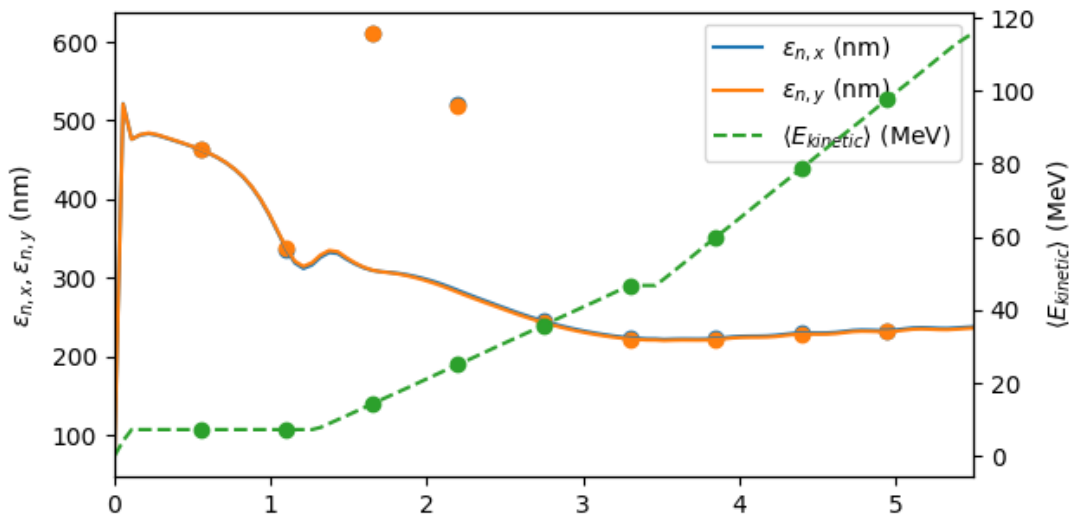
Solenoid
0.37 T

Solenoid

2m C-band Acc. Structure

0.9 m

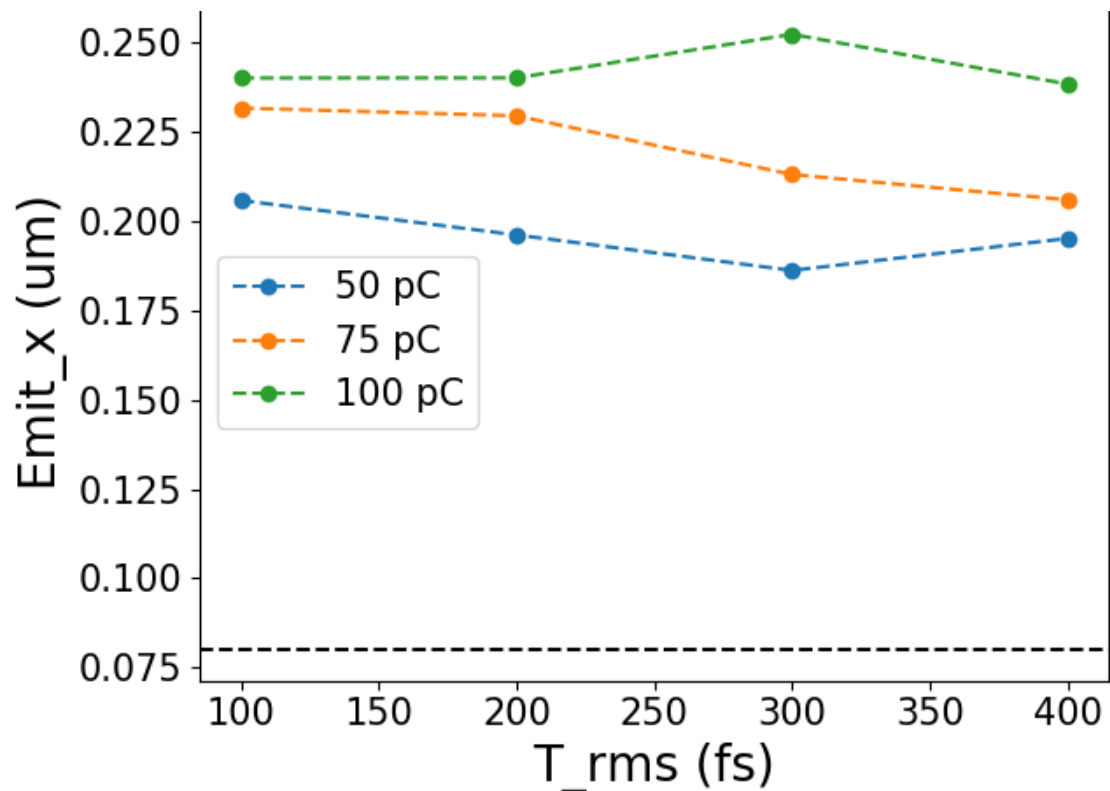
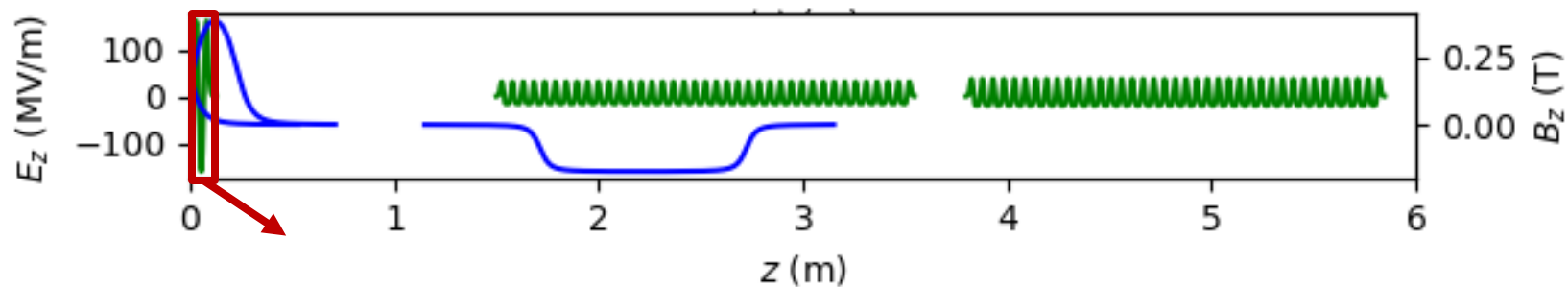
1.0 m



~100 MeV

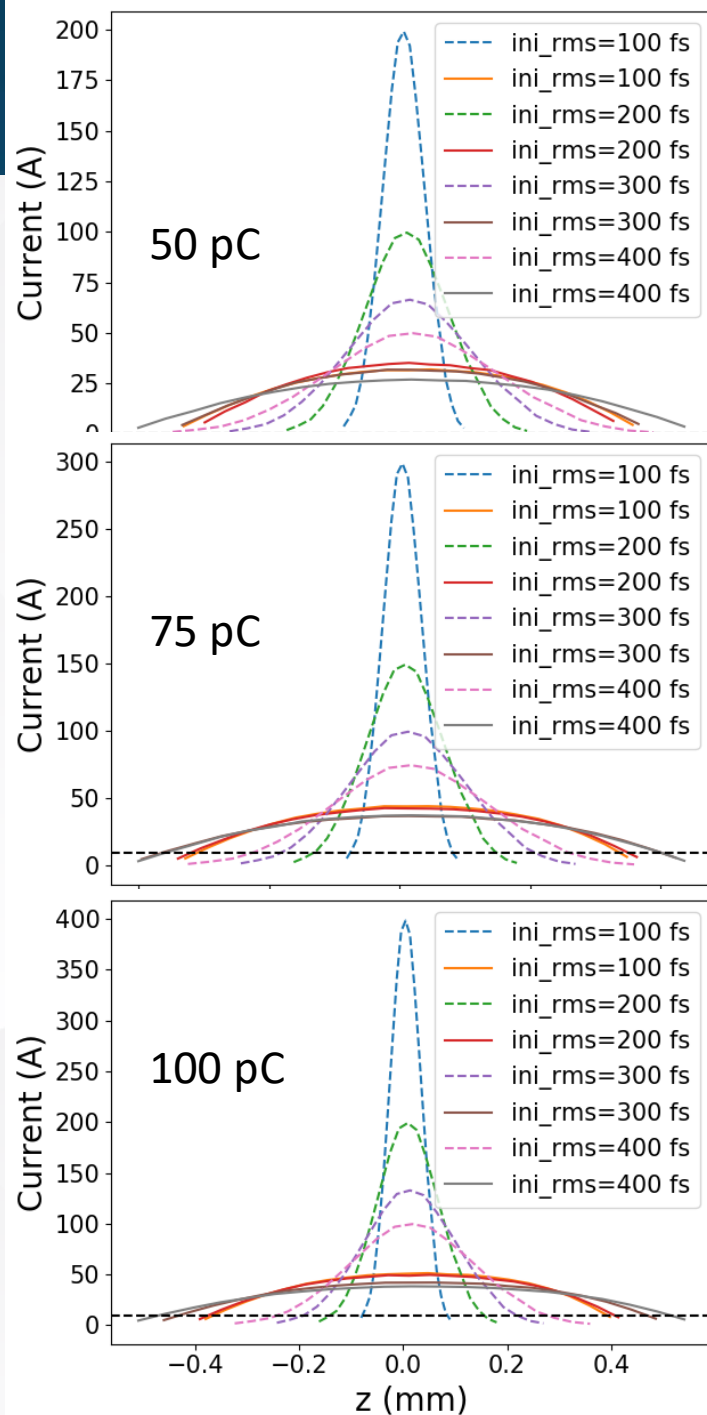
0.2 m

预注入器的模拟计算

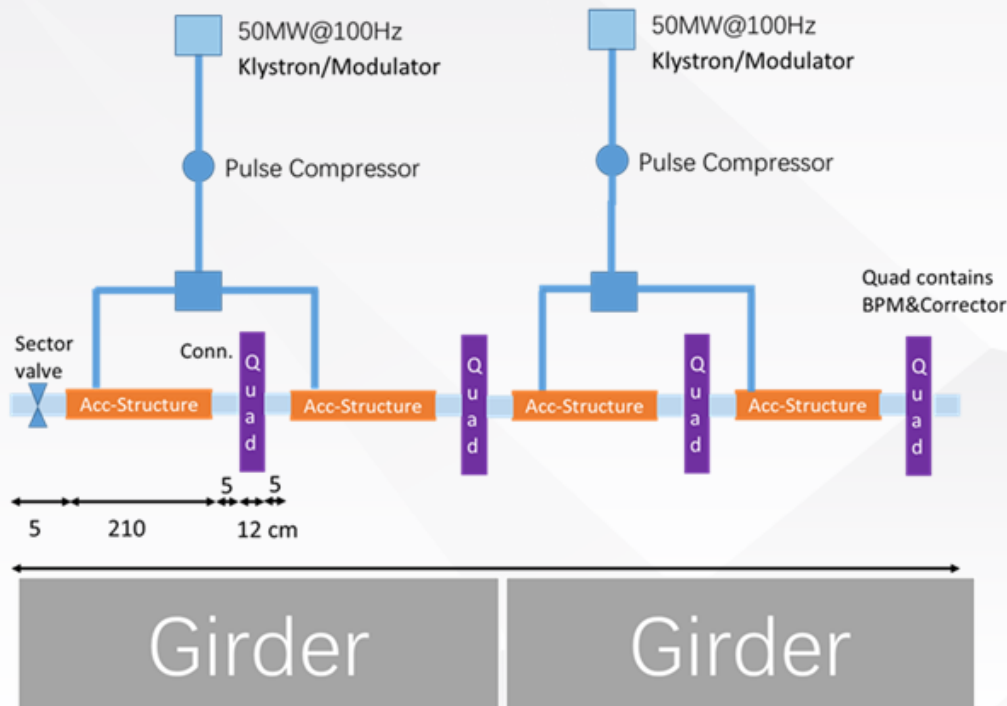


Initial conditions

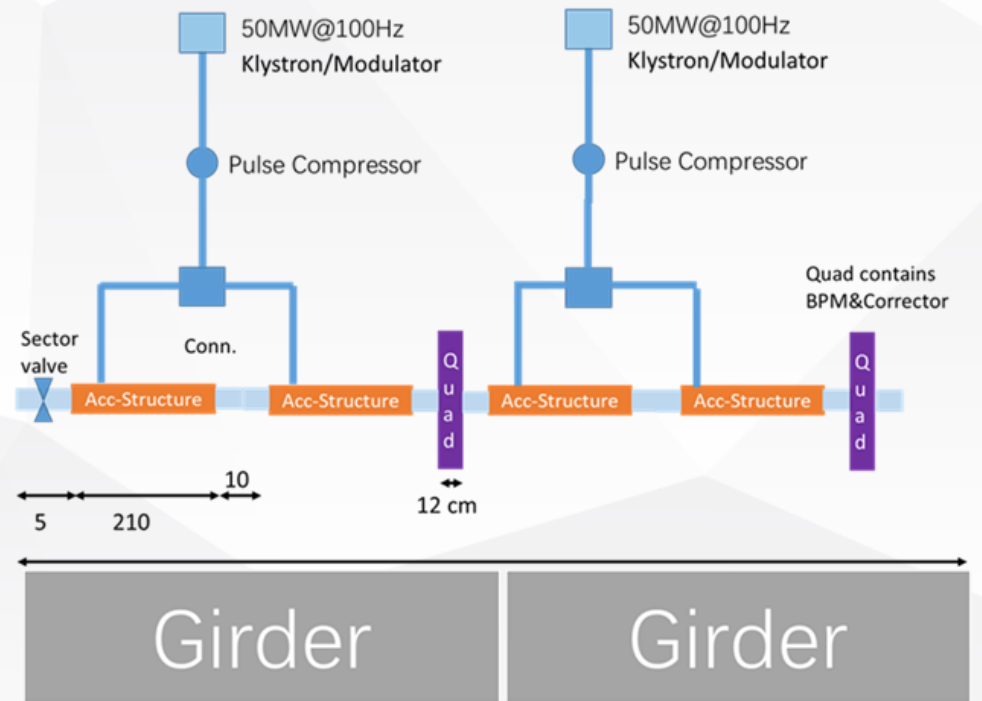
Charge [pC]	Laser pulse [fs]
50	100
75	200
100	300
	400



主直线的模块化设计

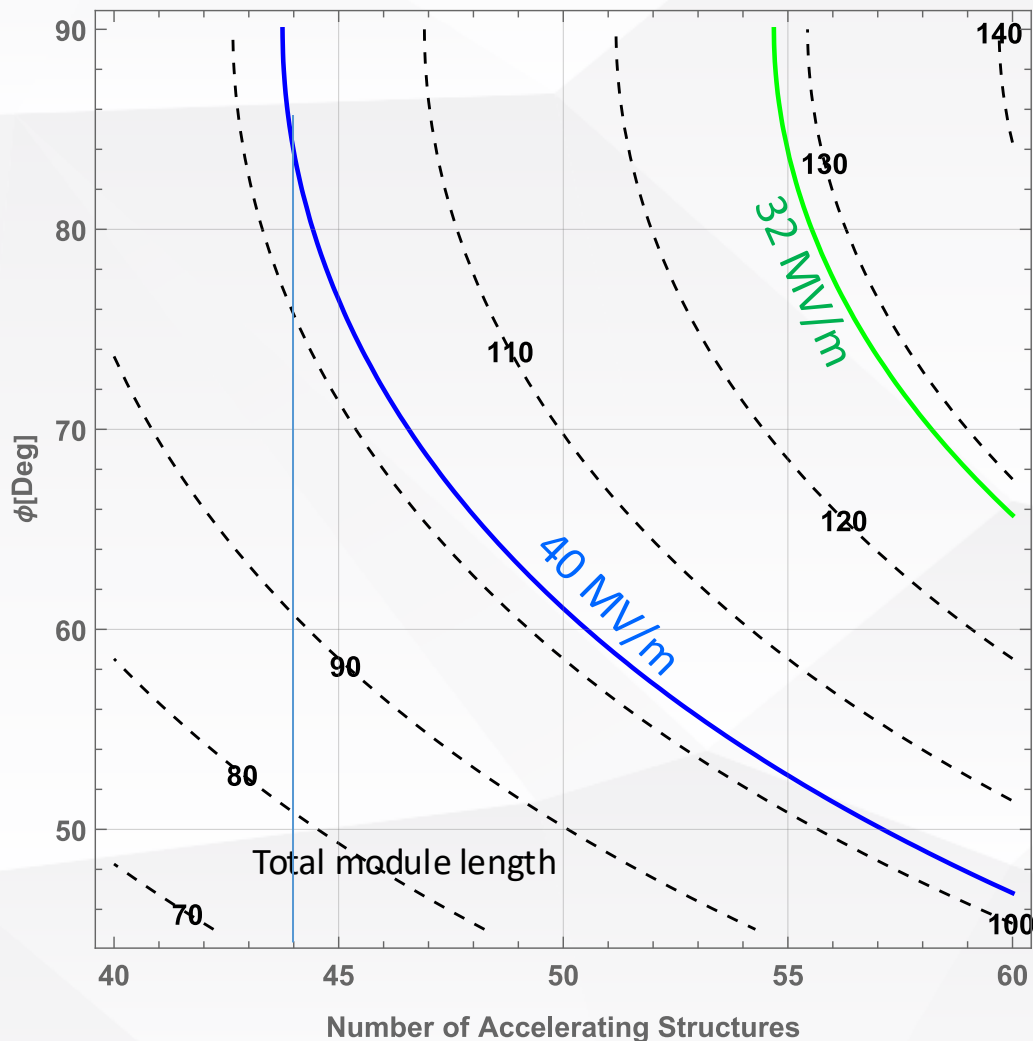


Module I (< 1.5 GeV)



Module II (≥ 1.5 GeV)

加速梯度及结构长度的考虑



* 假设3.5GeV由相同的结构提供

	Pre-injector	Linac_0	Linac_1&2	Total
Energy	100	200	3200	3500
# Acc. Structure	2	4	44(+4)	54
# Klystron	1	2	24	27
Redundancy@40MV/m	60%	60%	20%	23%
	2	4	60	66
# Klystron	1	2	15	18

Max-IV 20*2 S-band 工作在20MV/m, 300 m 隧道长度 (total), 1/3冗余度

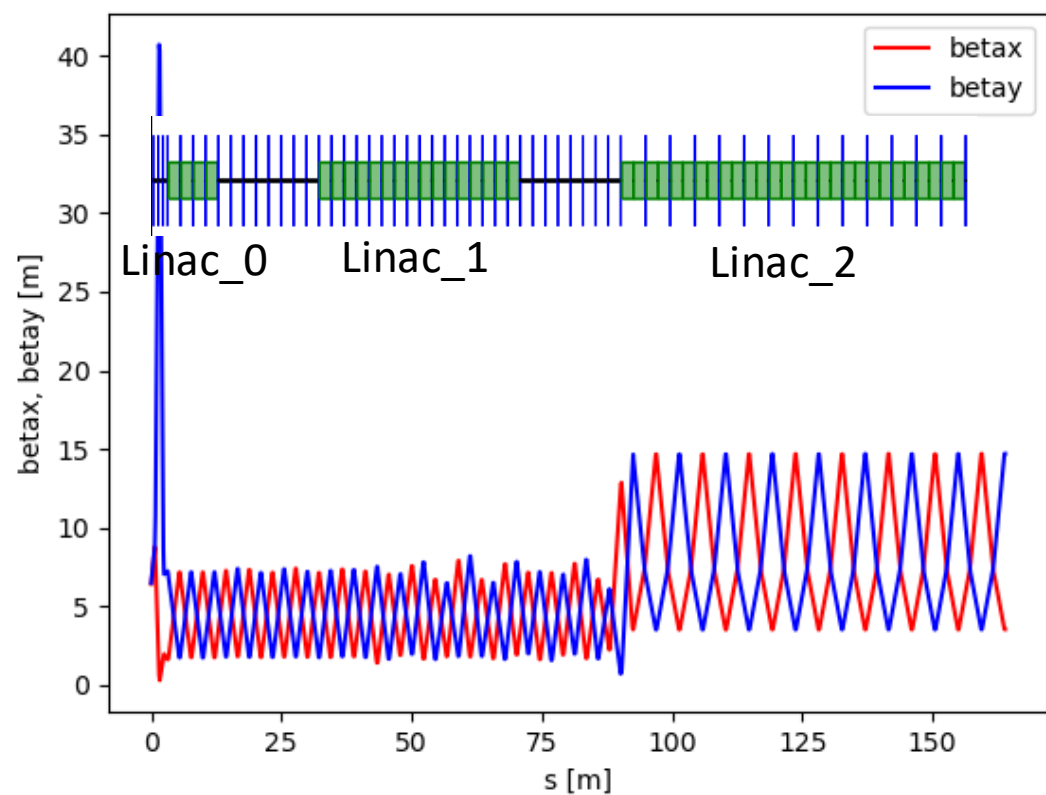
能量冗余度相同时梯度比较

		40MV/m	32 MV/m	备注
		27	18	仅主直线梯度不同
高频+加速模块	500万/套	13500	9000	加速管为2或者4估价相同
隧道长度 (仅加速模块)	4.8m/双加速管	129.6	158.4	隧道与屏蔽价格未知

建造成本: 设备节约30%, 长度增加约22%

运行成本: (预计低梯度高频能耗减少约20~30%)

横向束流动力学设计



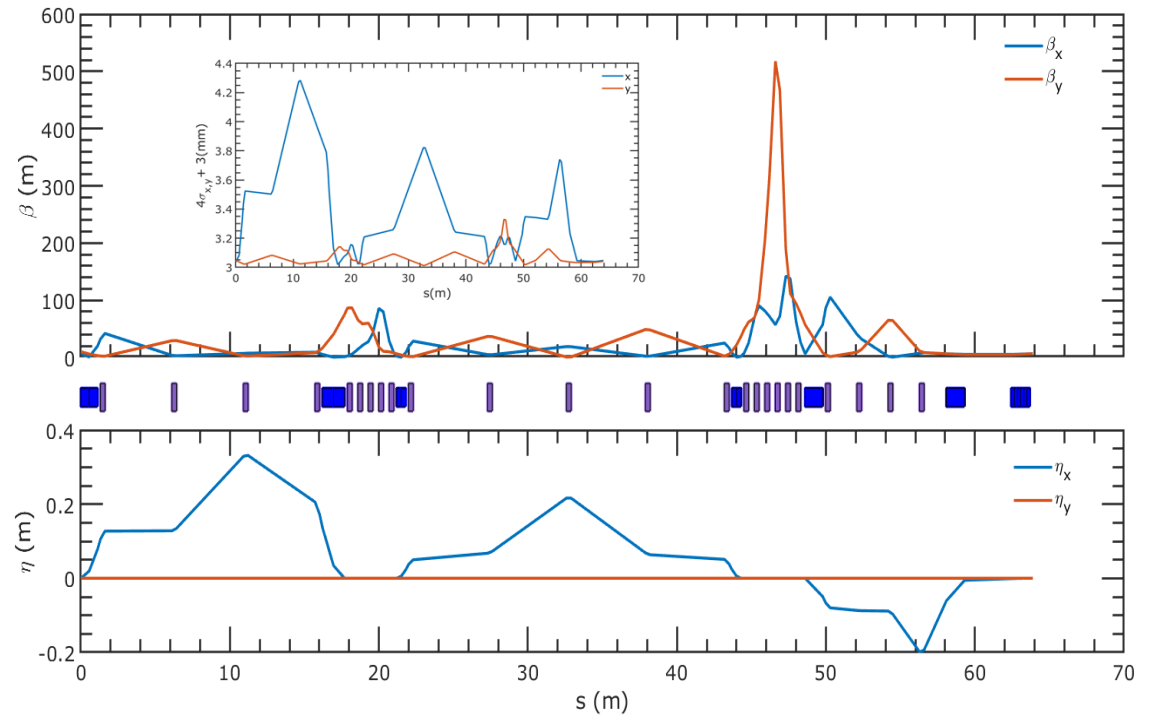
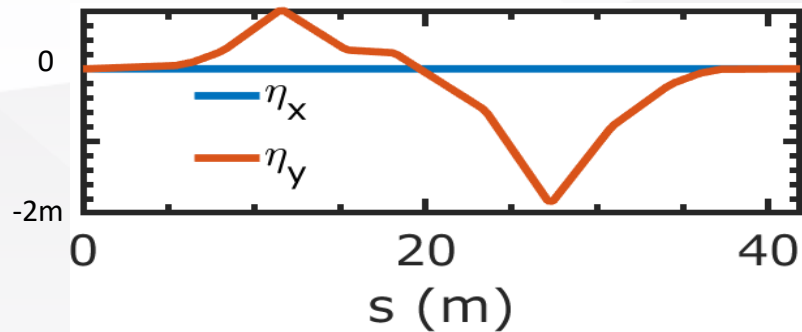
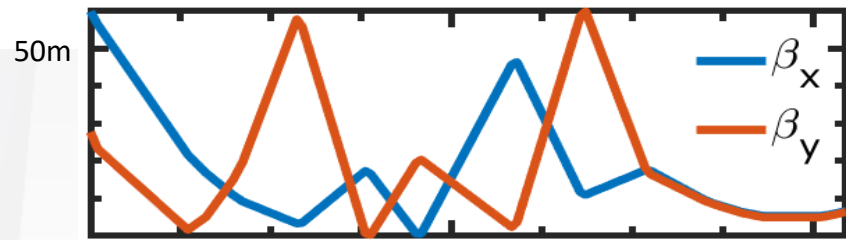
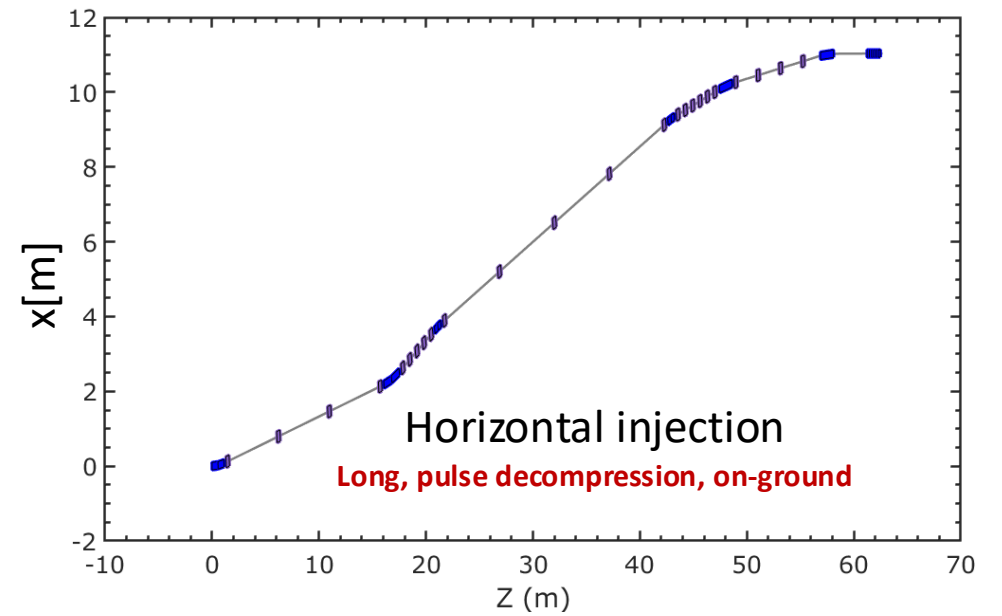
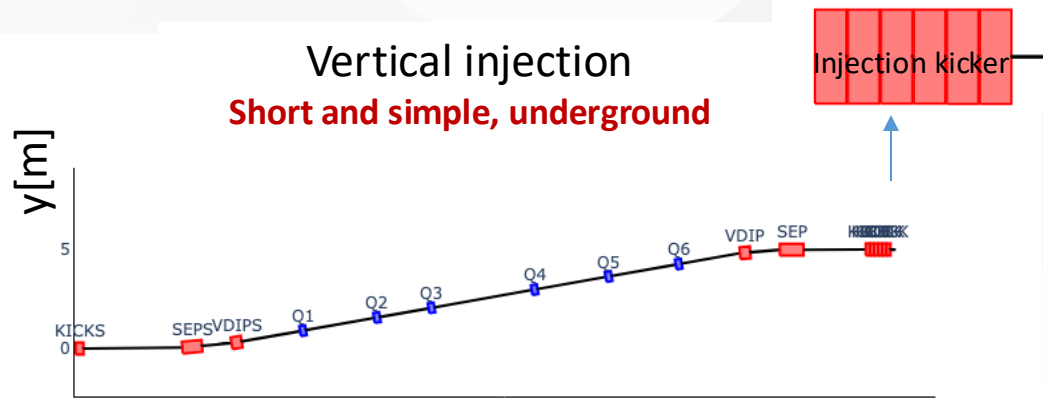
- 考虑尾场, β 在 $E < 1.5$ GeV 时选择4, 在 $E > 1.5$ GeV 时为8

四极磁铁参数设计

单一磁铁设计

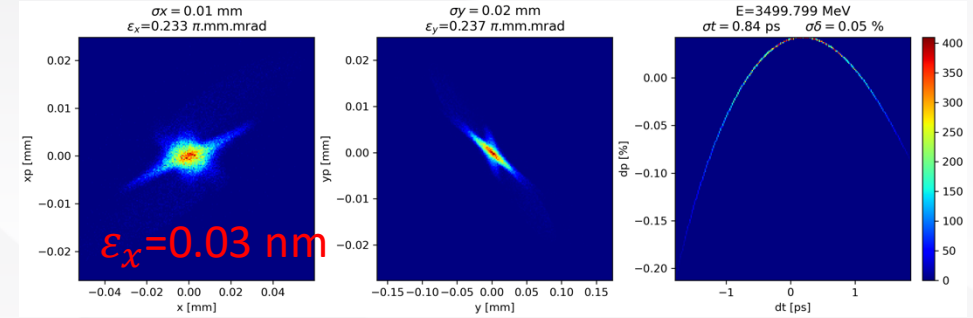
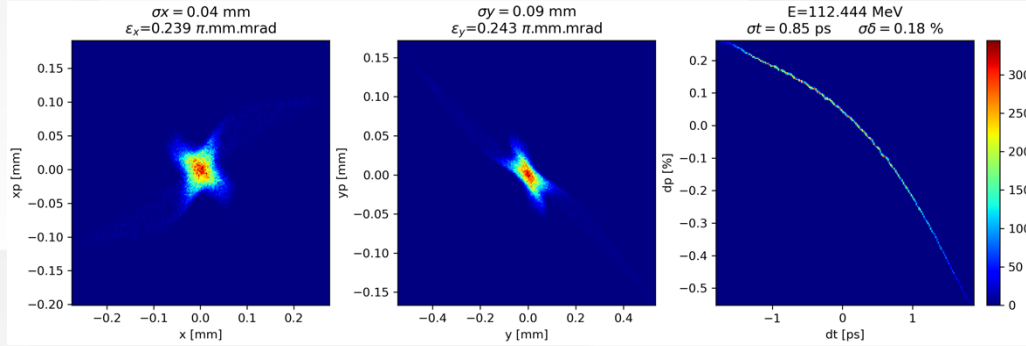
	Linac_0	Linac_1	Linac_2
$L_{\text{eff}}[\text{m}]$	0.12	0.12	0.12
K	4.695	4.695	2.33
#	4	16	14
E[MeV]	100~300	300~1500	1500~3500
G_max	4.7	23.5	27.2

传输线设计：匹配



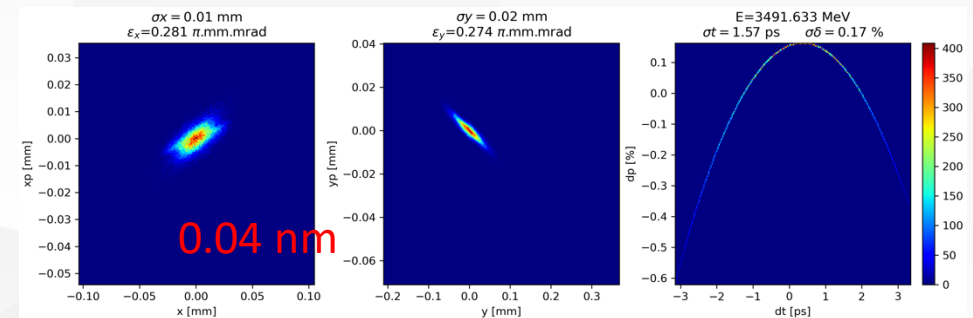
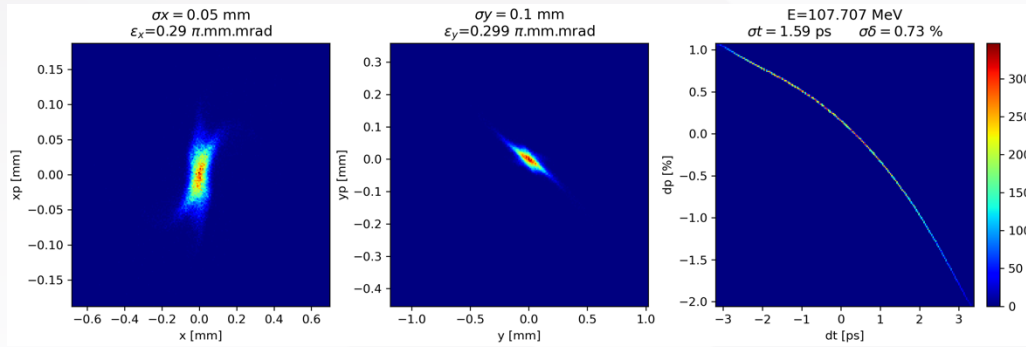
端到端模拟Elegant: 左 (主直线入口) 右 (主直线出口)

100
pC



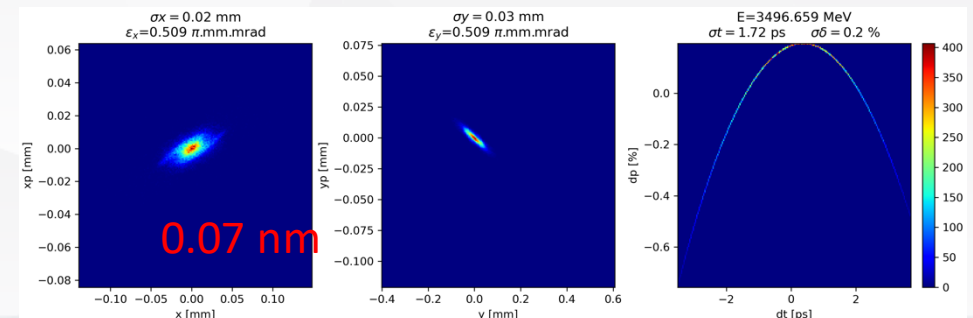
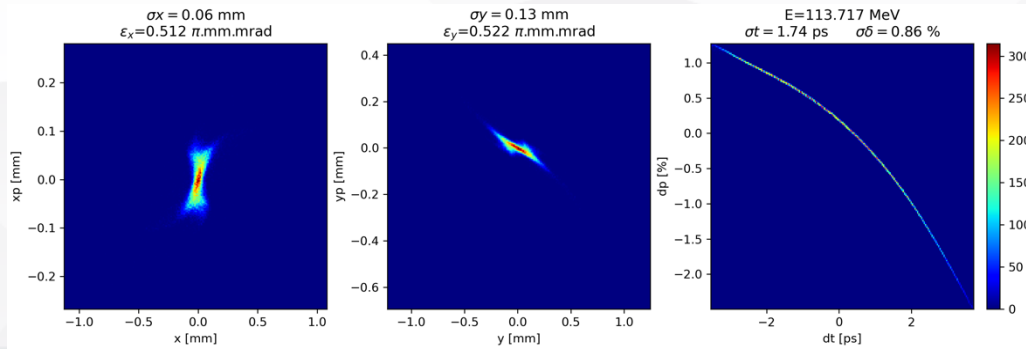
$\sigma_z = 0.25$
 mm
 $\frac{\Delta E}{E} = 0.05$
 $\%$

350
pC



0.47
 mm
 0.17
 $\%$

700p
C



0.52
 mm
 0.2%

- 1 电子直线加速器在设计上相对简单，束流动力学上也不如质子重离子复杂**
- 2 电子直线加速器更多的考虑其他实际因素**
- 3 电子直线加速器追求极致的束流品质**