

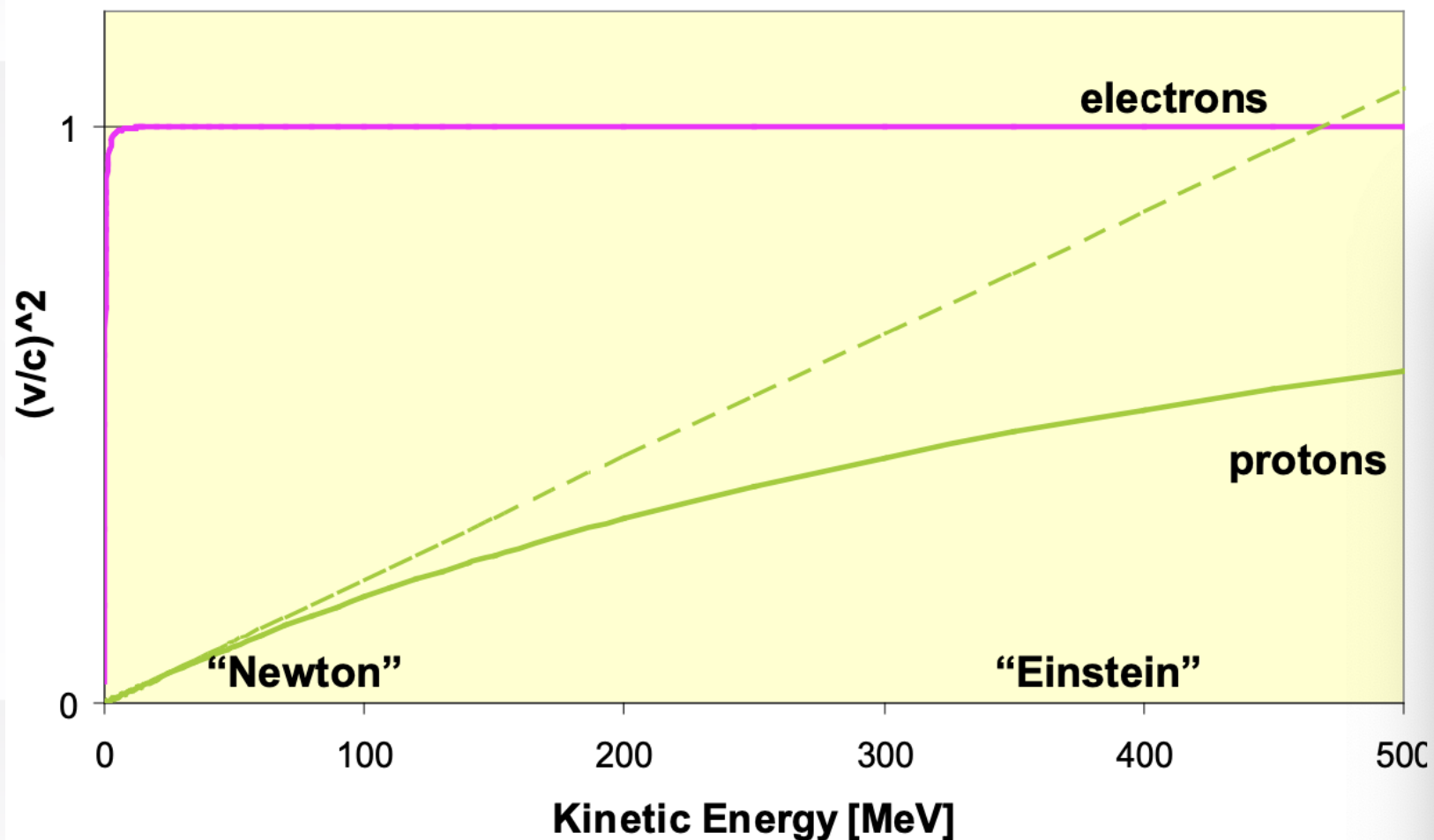
射频直线加速器（二）

射频直线加速器基础

刘星光

2024年12月11日

电子与质子重离子加速器的特性



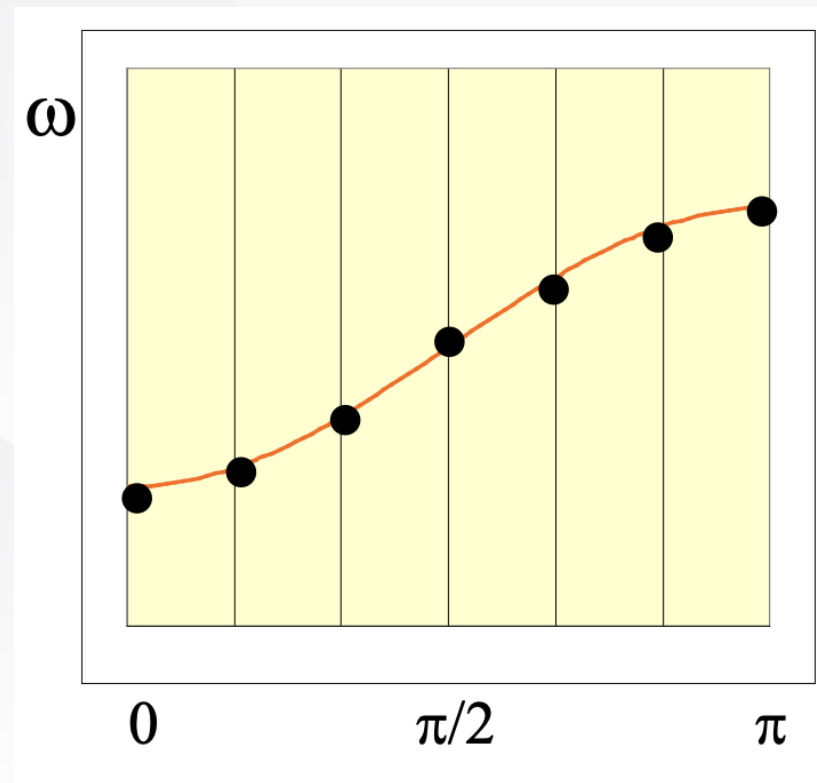
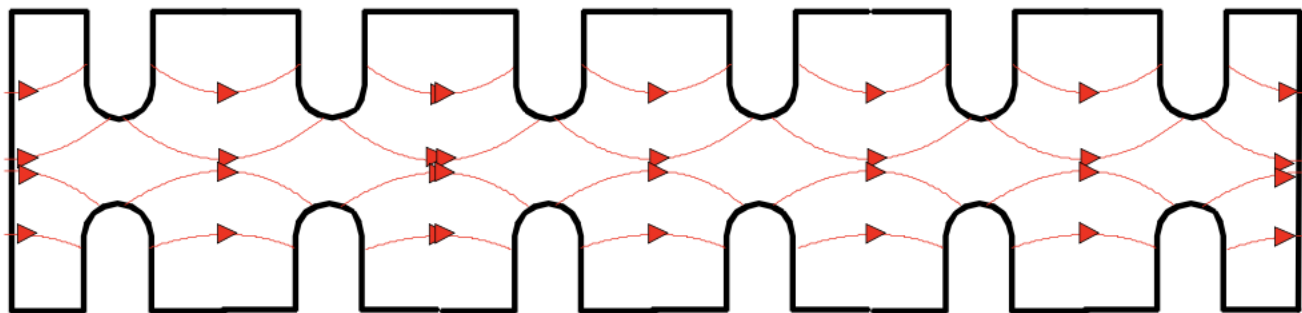
$m_{0,proton} = 938.3MeV, m_{0,electron} = 0.511MeV$, eg. $\beta=0.95$, 2GeV for proton, 1.1 MeV for electron

驻波加速结构

将带盘片的行波加速结构的两端设置为金属面：

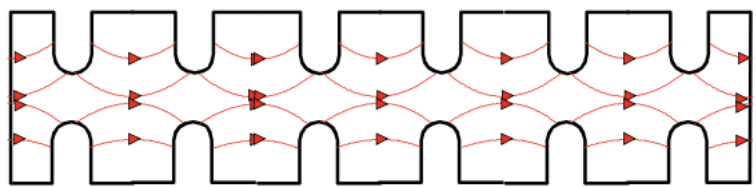
新增了两端电场必须垂直与金属面的边界条件

由于在两端有直接的反射，因此可以接受的模式（频率）为离散的（整数倍）

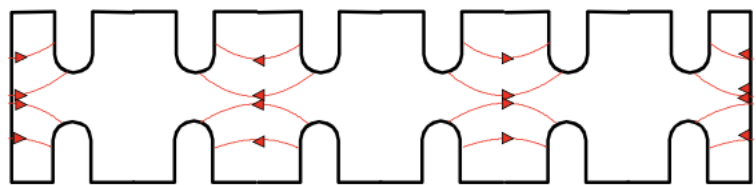
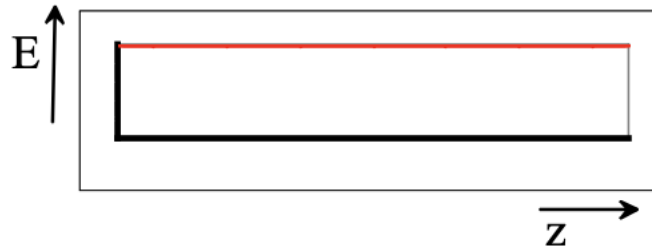


相邻单元相移

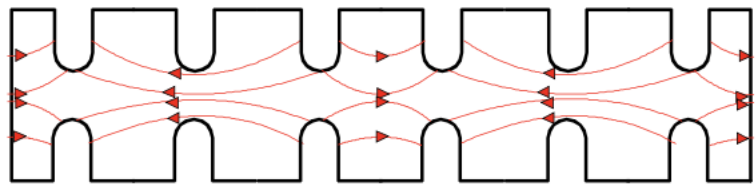
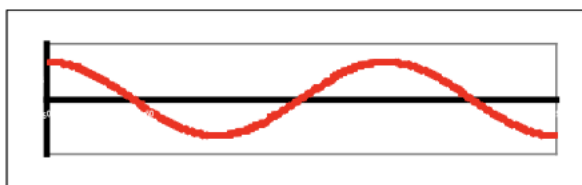
几种典型的驻波模式



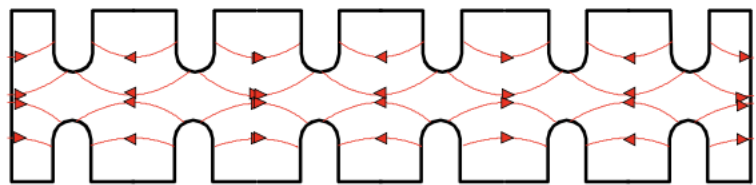
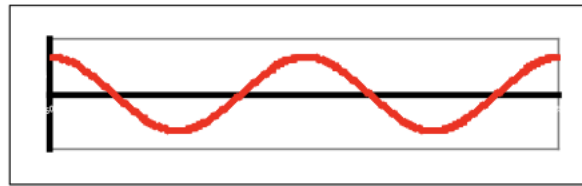
mode 0



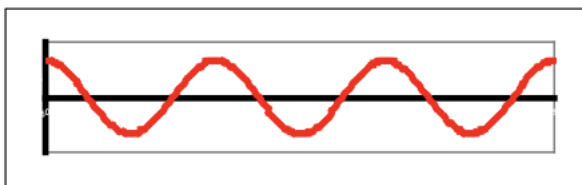
mode $\pi/2$



mode $2\pi/3$



mode π



同步条件

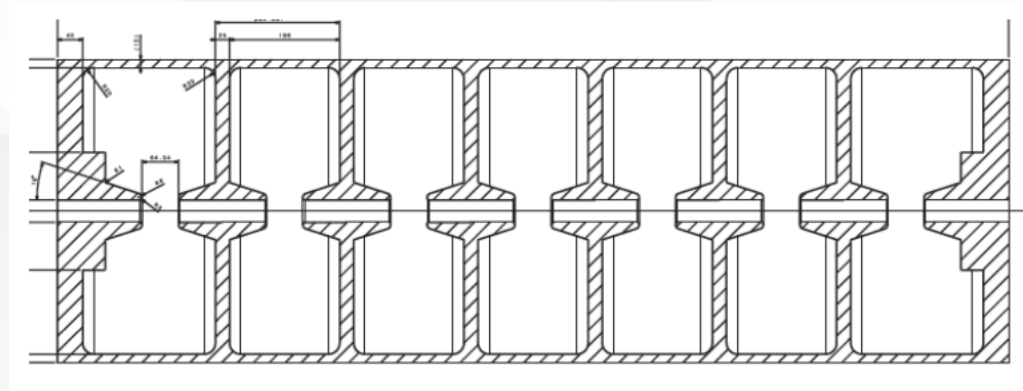
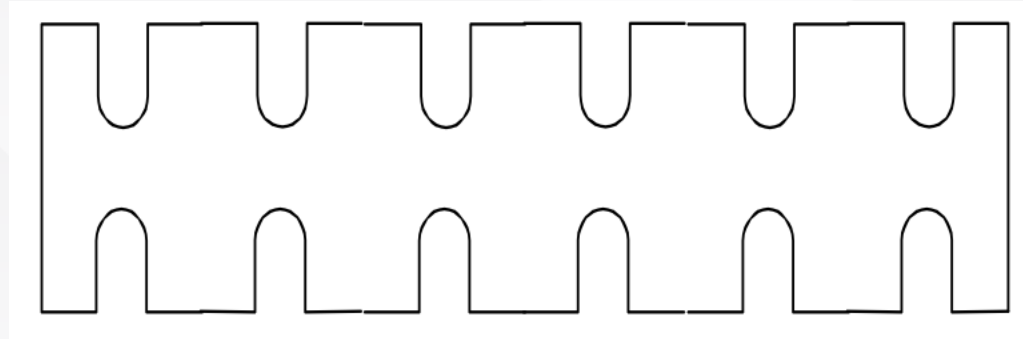
0-mode : $L = \beta\lambda$

$\pi/2$ mode: $2L = \beta\lambda/2$

π mode: $L = \beta\lambda/2$

模式以相邻单元的相位差命名

驻波结构如何用于加速带电粒子？

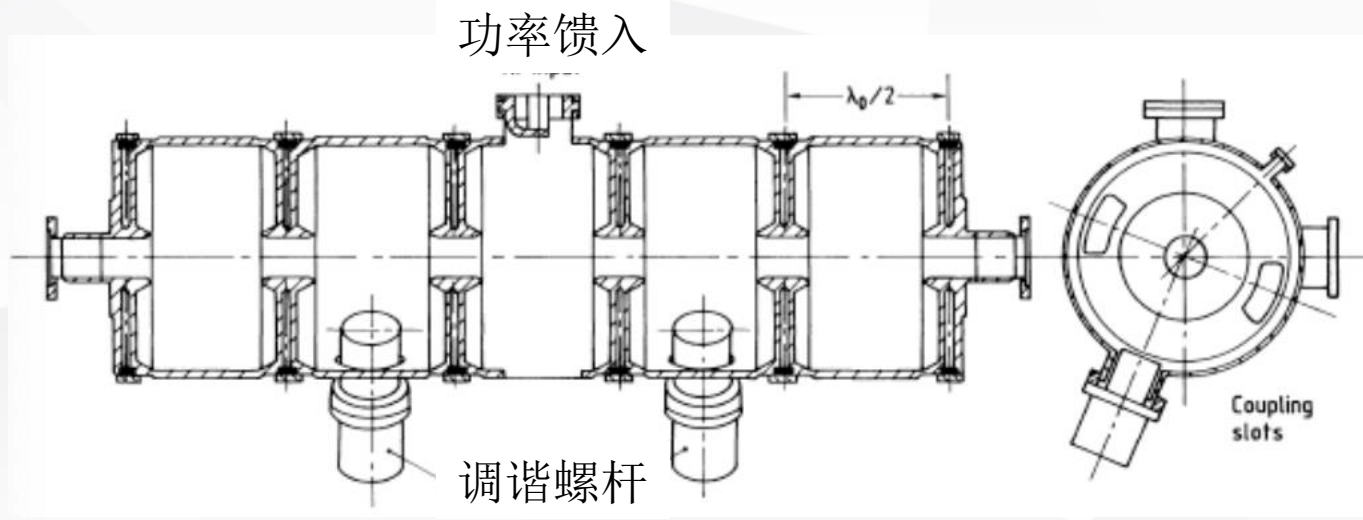
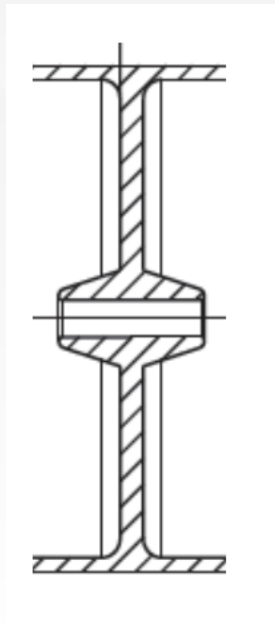


驻波结构用于加速需要考虑的问题

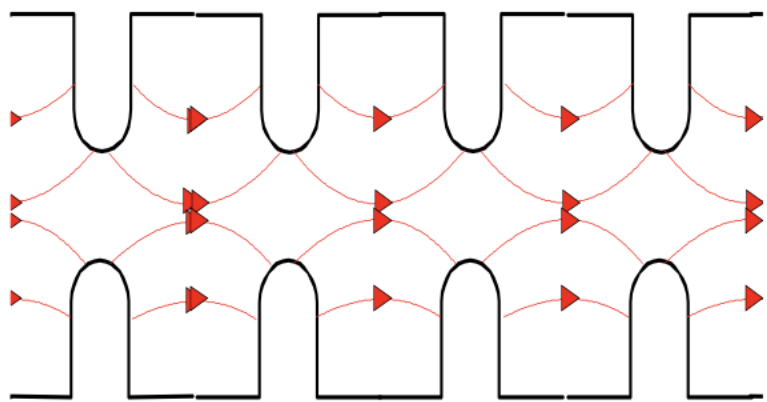
1 加速效率

2 功率馈入

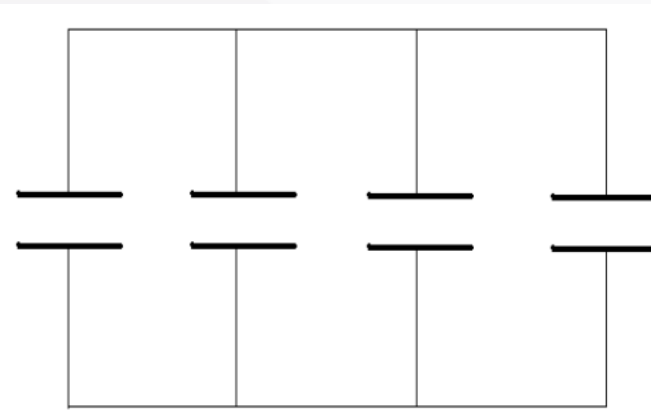
3 加速单元间的功率耦合



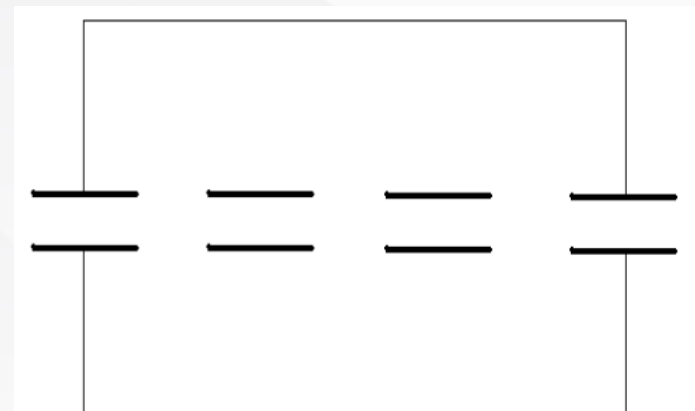
典型的驻波加速结构：DTL



带盘片的驻波结构



减小间隙

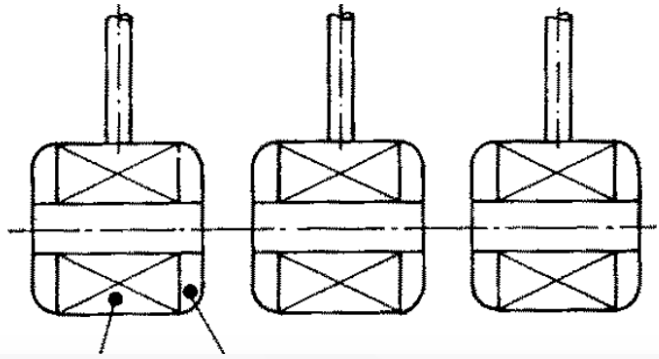


耦合最大化



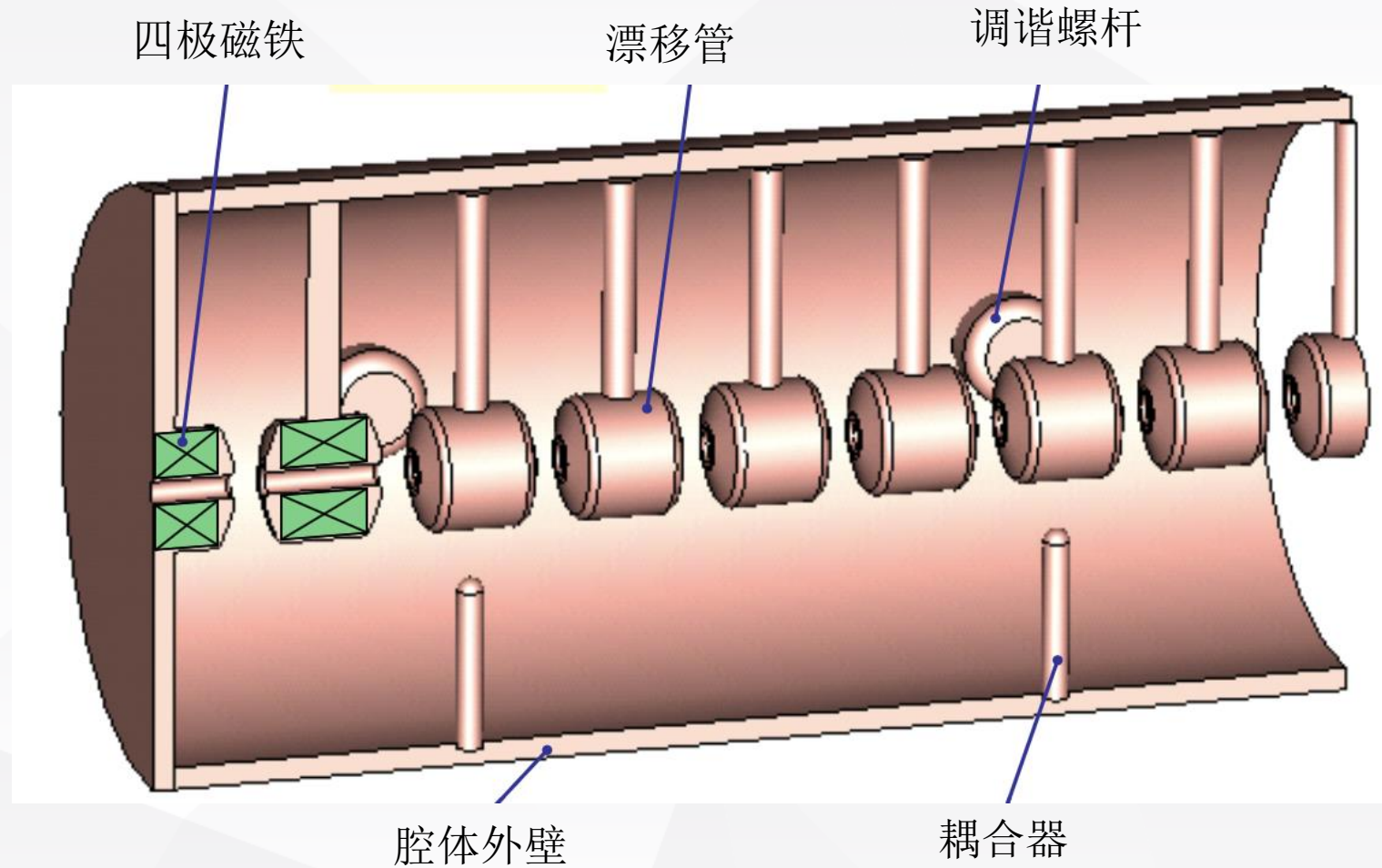
属于驻波的
什么模式？

典型的驻波加速结构：DTL



0-mode结合漂移管的优势：

- 可移除“加速单元”间的间隔
- 漂移管内可放置四极磁铁



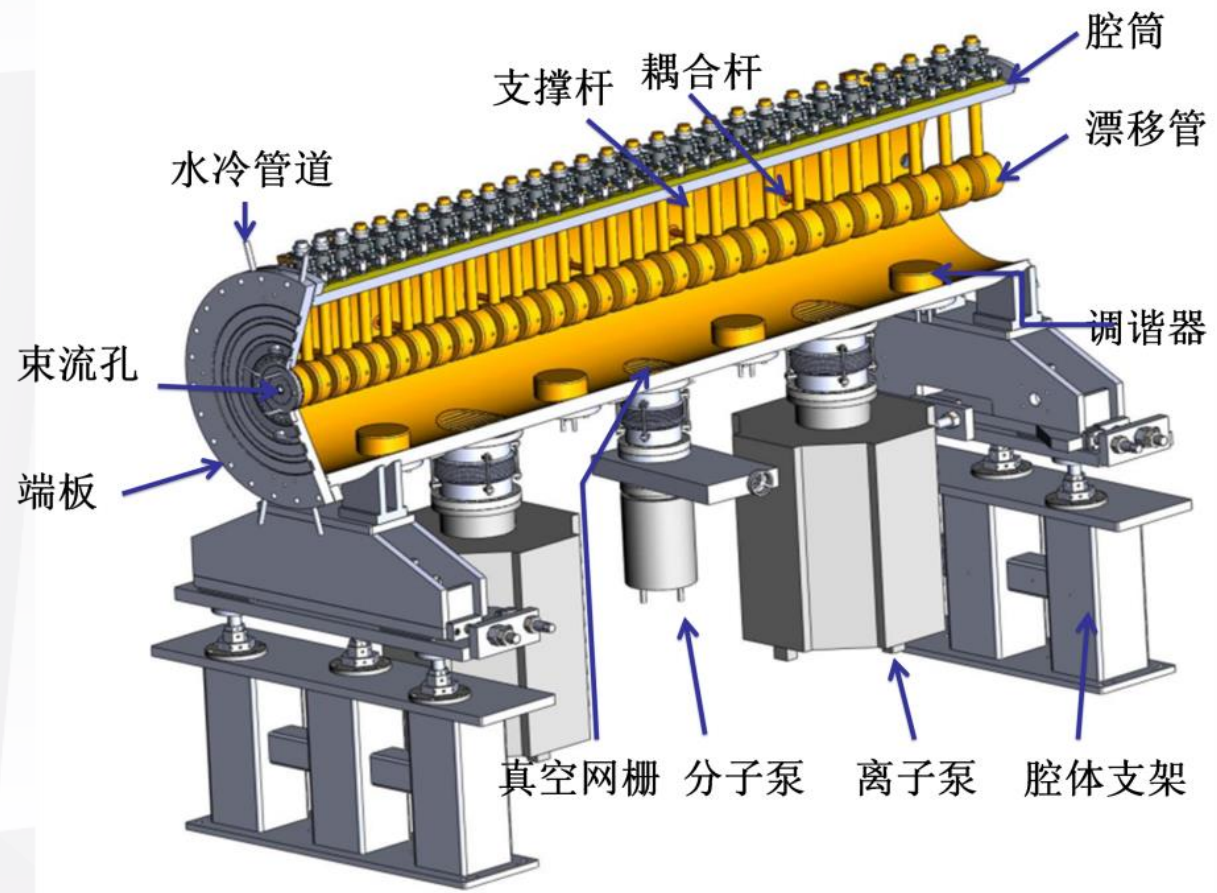
散裂中子源上的DTL加速器



CSNS-Linac-DTL模型

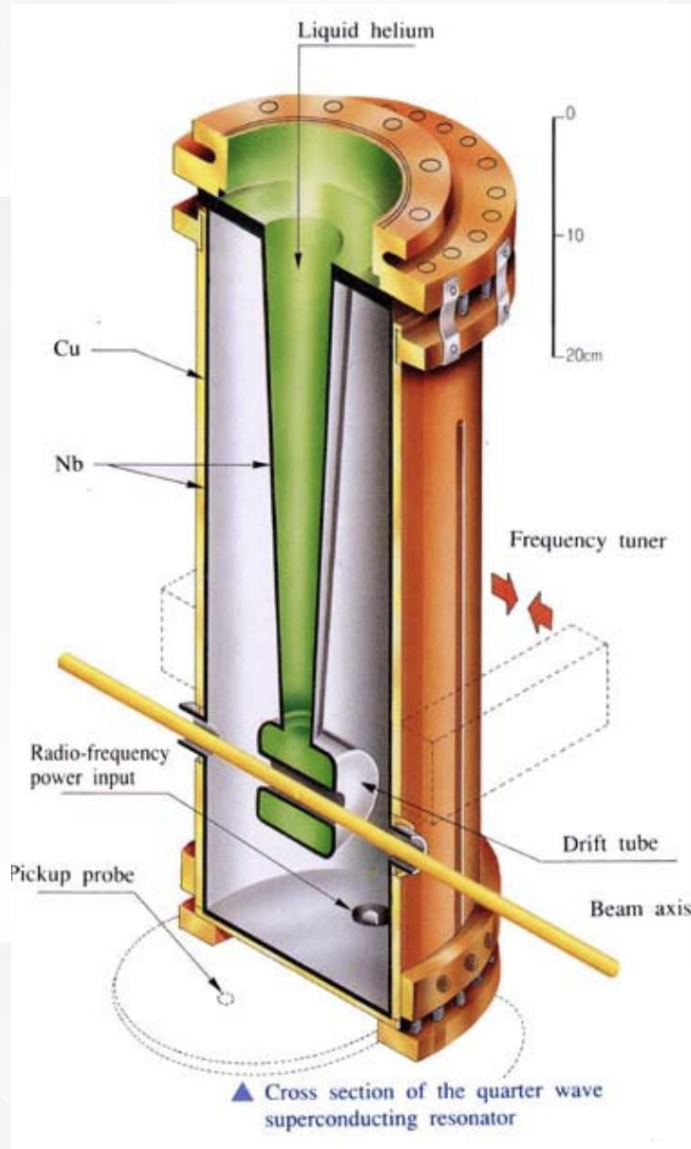


散裂中子源上的DTL加速器



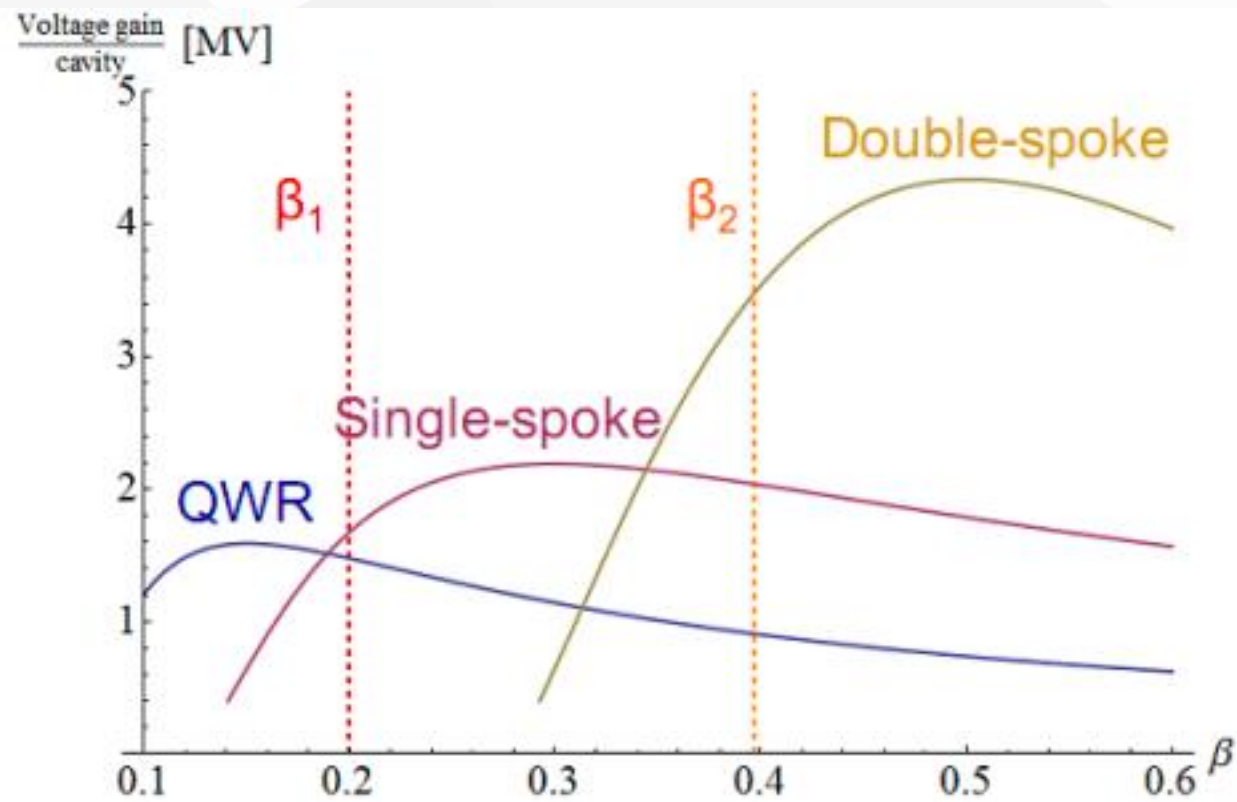
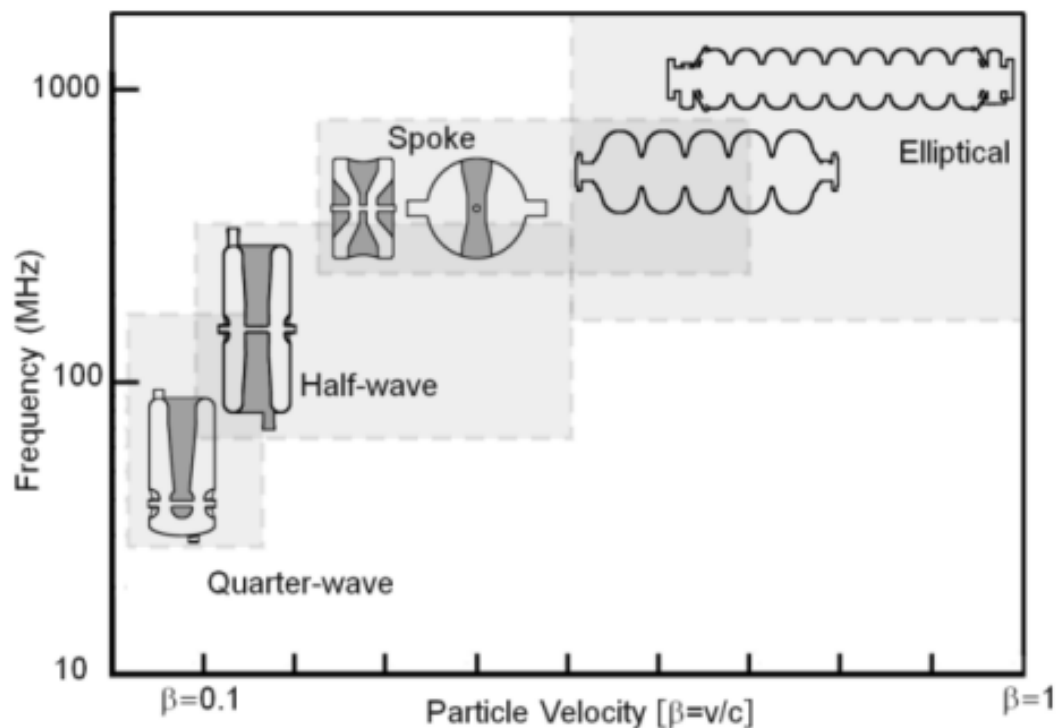
参数	设计指标
工作频率 (MHz)	324
注入能量 (MeV)	3.0
引出能量 (MeV)	80.1
平均束流流强 (μA)	312.5
脉冲重复频率 (Hz)	25
高频脉宽 (μs)	650
高频占空比	1.625%

其他驻波加速结构：1/4波长谐振腔（QWR）



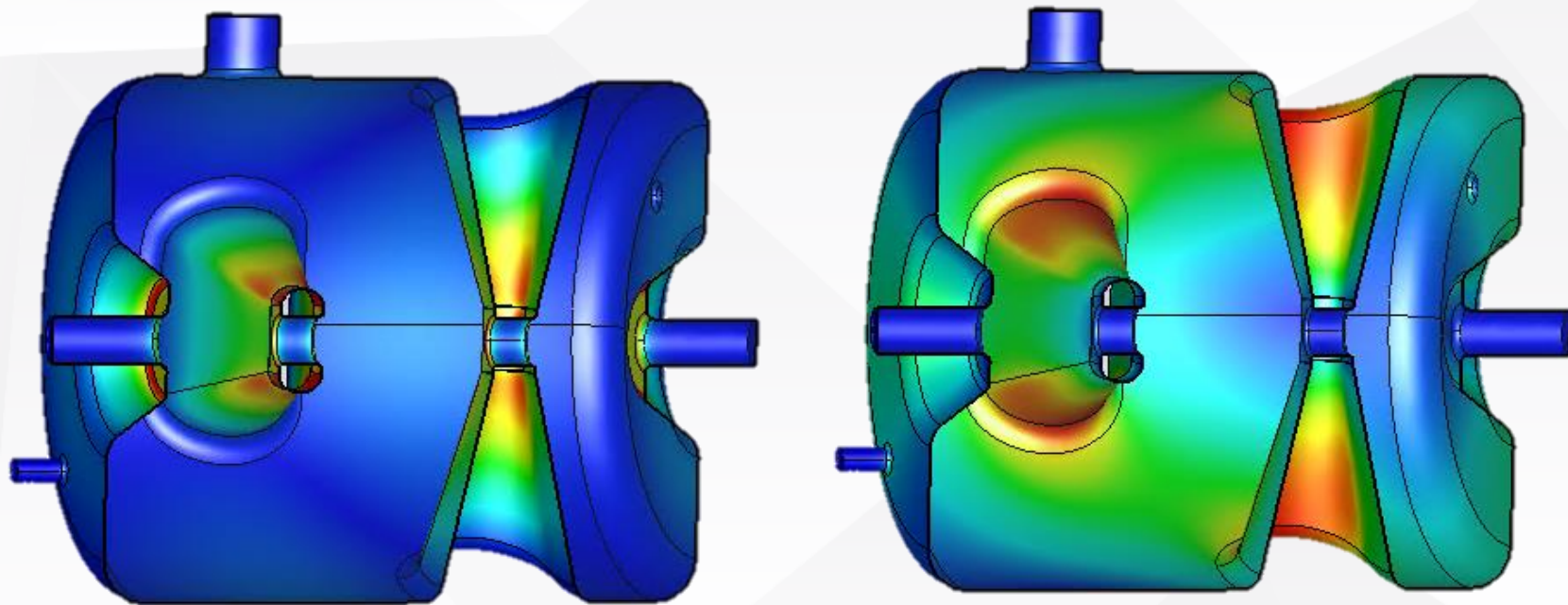
- 用于低 β 值质子或离子直线加速器，尤其是需要连续波运行的直线加速器。
- 针对某一特定能量 / 速度得要求同步性（两个间隙之间的距离为 $\beta\lambda/2$ ）
- 便于建造，直线加速器可直接由一系列相同的QWR组成

超导加速器的腔型选择



$E_p=30\text{MV/m}$ 时三种腔型加速增益对比

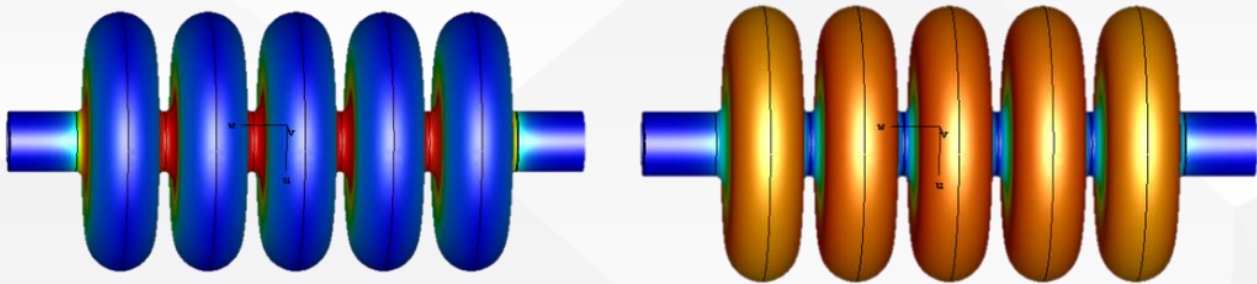
其他驻波加速结构：Spoke腔



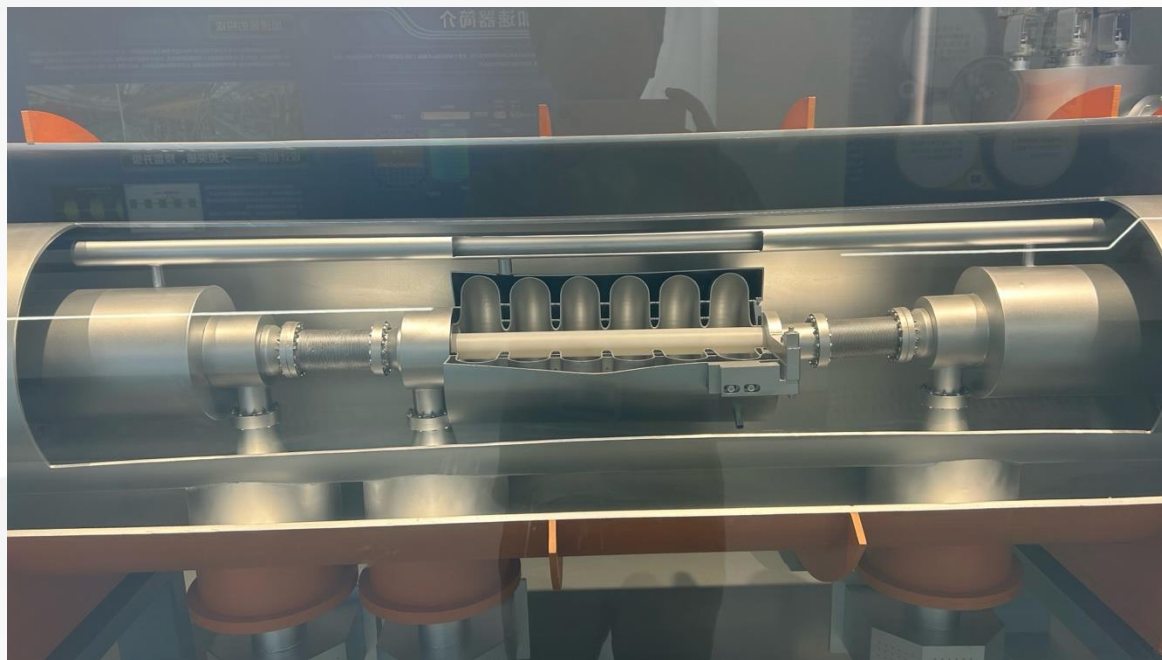
CSNS-II Linac 双spoke腔电场（左）和磁场分布（右）

电磁参数	设计值
频率 (MHz)	324
孔径 (mm)	50
E_p/E_{acc}	4.1
$B_p/E_{acc}(mT/MV/m)$	9.2
B_{op}	0.5
$G (\Omega)$	120
$R/Q (\Omega)$	410
运行梯度 (MV/m)	7.3

其他驻波加速结构：椭球腔



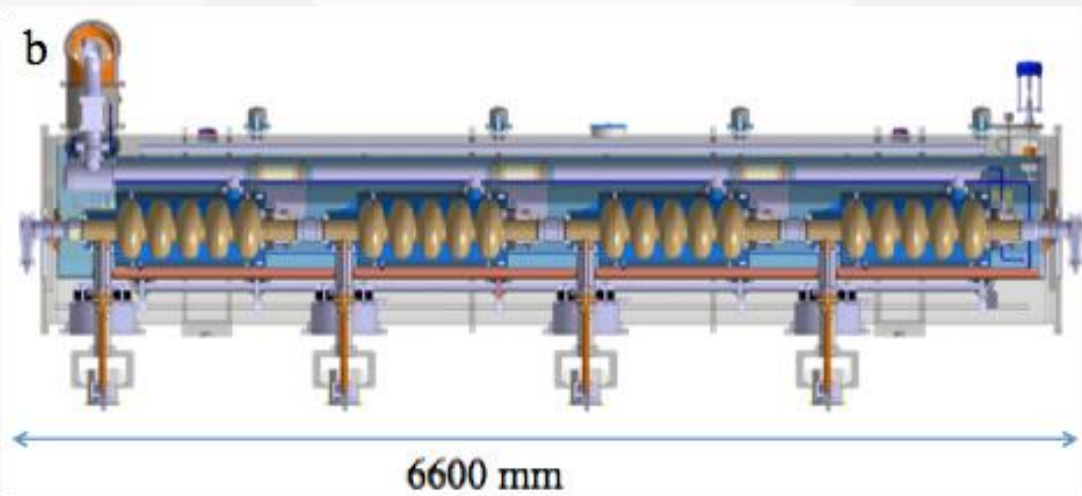
CSNS-II Linac 5单元椭球腔电场（左）和磁场分布（右）



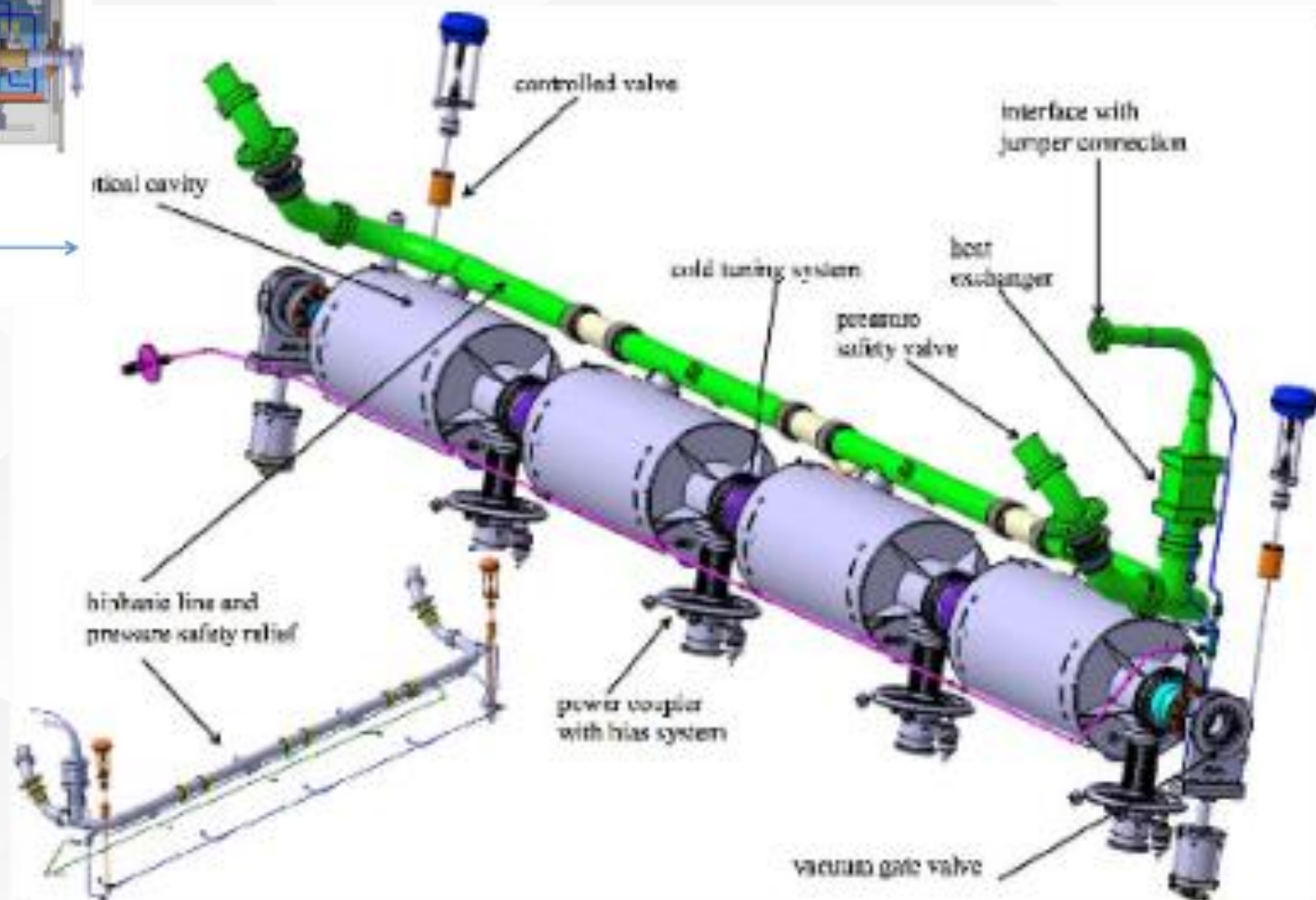
CSNS-II 椭球腔加速器模型

电磁参数	设计值
频率 (MHz)	648
孔径 (mm)	90
E_p/E_{acc}	2.58
B_p/E_{acc} (mT/(MV/m))	5
G (Ω)	179
R/Q (Ω)	301
Geometry Beta	0.6
E_{acc} (MV/m)	12

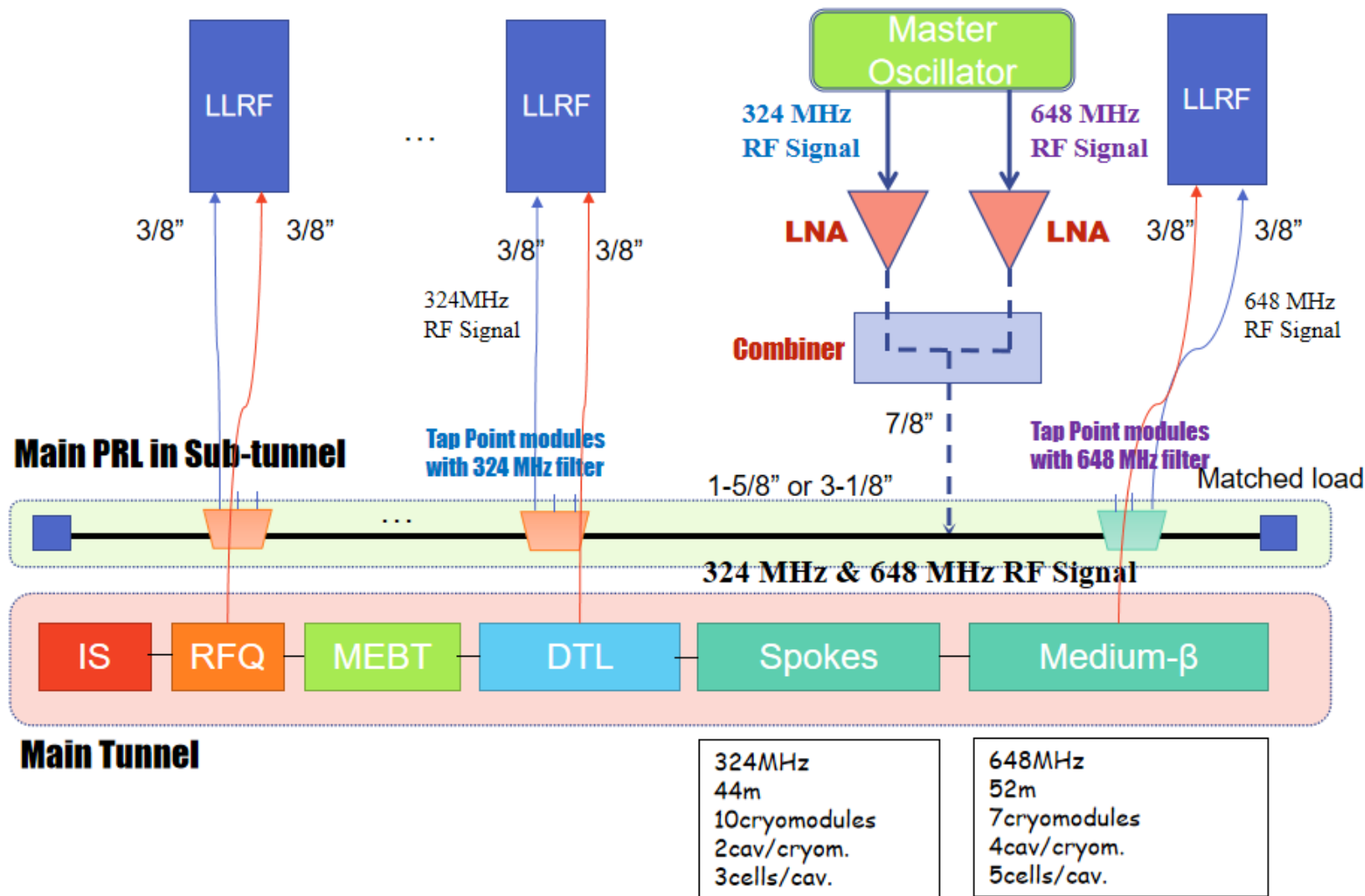
其他驻波加速结构： 椭球腔



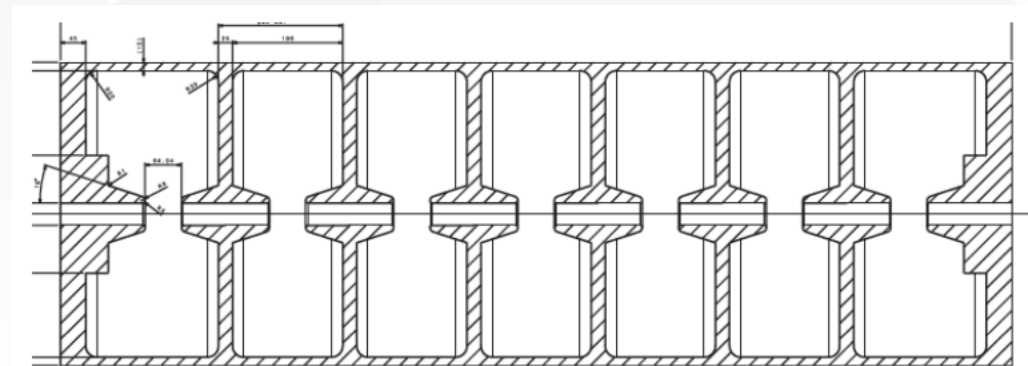
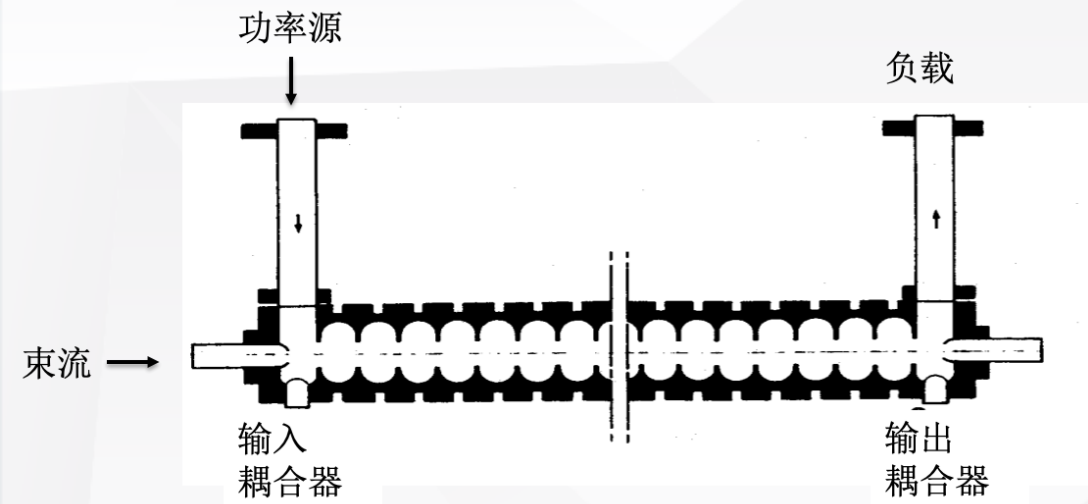
ESS椭球腔及其低温系统（2K）



CSNS-II 直线加速器系统及高频系统



行波加速结构与驻波加速结构的对比



- 单元之间通过轴上孔径实现耦合。射频功率从一端的输入耦合器输入，在结构中和负载上耗散。
- 短脉冲，高频 (≥ 3 GHz)。
- 场梯度为 $15\sim 40$ MV/m。
- 用于速度接近光速的电子。

- 通过狭缝（或开口）实现（单元之间的）耦合。
- 轴上孔径减小，轴上电场强度更高且功率效率得以提升。
- 射频功率来自一个耦合端口，在结构中耗散
- 长脉冲，场梯度为 $2 - 5$ MV/m。
- 适用于各种能量的质子、离子和电子。