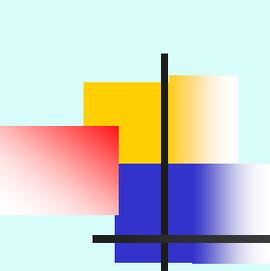


先进质子治疗装置(APTF) 概念设计

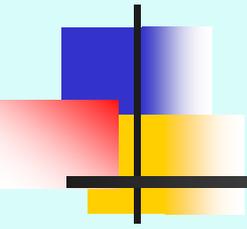
方守贤、唐靖宇

中国科学院高能物理研究所

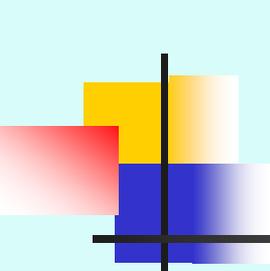


主要内容

- APTF简介
- APTF设计理念
 - 治疗粒子种类和加速器类型的选择
- APTF设计方案
 - 基本参数和布局
 - 直线注入器和同步加速器
 - 束流输运线和治疗头
- APTF工程建设规划
- 合作

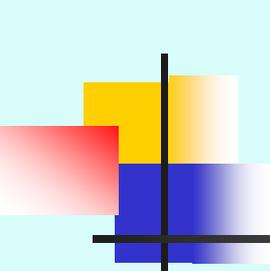


APTF简介



现在我国质子治疗已进入蓬勃发展时期

- 山东万杰医院开启了我国质子治疗的先河。
- 随着我国国民经济的飞速成长，发展和建立更多的质子治疗中心，又再一次被提到日程上来。医学界一致认为应该加速我国质子治疗中心的发展。
- 最近中日友好医院准备从**IBA**引进一台质子回旋加速器。同时复旦大学附属肿瘤医院已经签订合同从德国西门子公司进口一台重离子治疗装置，将在未来三年半内建成。
- 至今上海、北京、广州等地的一些有条件的大医院均在积极考虑引进或建造质子治疗中心。
- 在中国，质子治疗已具备很好的发展条件和具有非常好的前景。

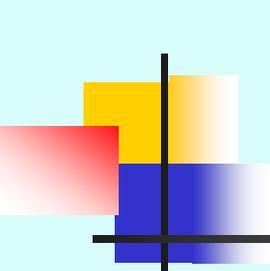


发展我们自己的治疗装置的必要性

- 质子治疗用的加速器及其装备技术难度大、涉及的学科多、投资昂贵是一个复杂的系统工程。
 - 必须有一批多专业的技术人才(核物理, 加速器, 真空, 高频, 自控, 计算机硬件软件, 精密机械, 电源等) 多专业治疗人才(医生, 物理师, 剂量师, 放疗师和专职护士), 和具有高水平的现代管理人才. 若没有这方面的人才准备和培训, 即使引进了先进的治疗装备也很难把它用好。
- 在引进的同时必须研发自己的质子疗装置, 在研发的过程中, 积累技术, 培养人材, 才能把它运行好维护好, 发挥出质子治疗装备的最佳效果。

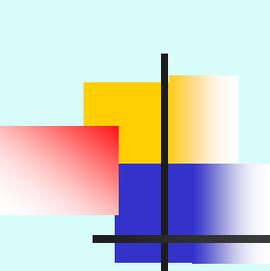


APTF设计理念



APTF的策略：治疗粒子选择

- 随着国际上强子治疗的发展，为了达到最好的治疗效果，质子和碳离子应是相辅相成，互不可缺。
- 我们在这个领域缺乏足够的经验，因此应当优先发展质子治疗，它在技术上更成熟，研发周期短、难度小，规模适中，投资相对较低，并且治疗效果已经得到很好的临床验证。
- 质子治疗比碳离子具有更广阔的市场需求。很多情况下，只适合建造质子治疗装置。
- 我们建议首先建造一台质子治疗装置，但是将来最终会扩展到碳离子治疗。



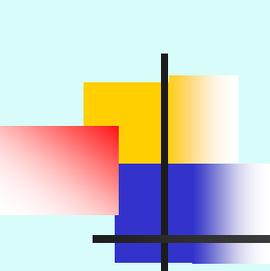
APTF的设计理念

1. 先质子，再碳离子

- 建设和运行质子治疗装置时，我们可以积累经验 and 培训人员。
- 同时，我们可以开展碳离子治疗装置关键技术的预研
- 设计时必须充分考虑到质子和碳离子的内在联系，技术的继承及发展。

2. 新技术、新的治疗方法

- 我们应当采用能体现当前世界上放射治疗最主要发展的方法。包括尽可能地运用最新的技术、最新的治疗方案，例如动态束流扫描方法和紧凑型旋转机架等。

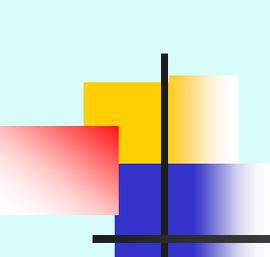


3. RAMI原则

- 治疗设备是高科技和多学科的集成，它主要用于医学治疗。因此必须按照**RAMI**原则来研制（稳定、可靠、易操作及维护）

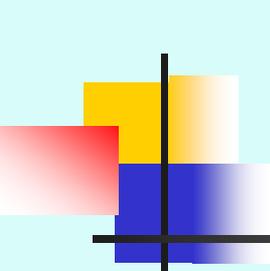
4. 造价低

- 增强性能、降低成本，提高竞争力



APTF加速器方案选择

- 已经投入使用和计划建造的众多质子治疗加速器方案中，只有回旋加速器和慢同步加速器具有长期的临床治疗经验。
- 高能所在设计和建造同步加速器方面，已经积累了丰富的经验。
- 对于我们质子治疗装置而言，采用同步加速器方案是一个合理选择
- 慢同步加速器还是快同步加速器？
 - 经过对二种加速器方案的全面认证和比较，我们认为慢同步加速器在与现有治疗计划的可匹配性、向重离子加速器的可延长性、对运动器官治疗的适应性等方面具有明显的优势，决定作为APTF的加速器方案。



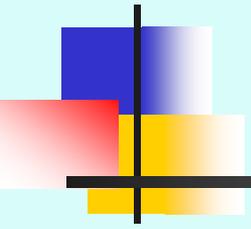
今后的强子治疗中心

■ 质子和碳离子各具有自己的一个环

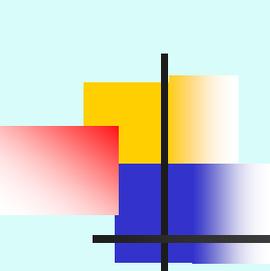
- 质子和碳离子将分别采用独立的加速器，在设计时，可各自优化到最佳。
- 两个环独立运行，可以同时开展质子和碳离子的治疗，从而发挥更高的治疗效率

■ 将在三年半内先建成质子治疗装置，并立即用于开展治疗，培养干部，尽快在中国申请到FDA。

■ 同时，展开碳离子治疗装置相关技术的研发，例如碳离子直线加速器、新型碳离子旋转机架等。确保在未来5至6年内，建成一台先进的碳离子治疗装置。

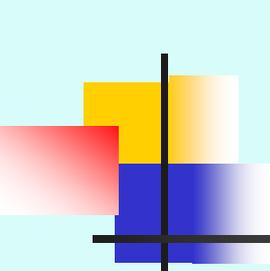


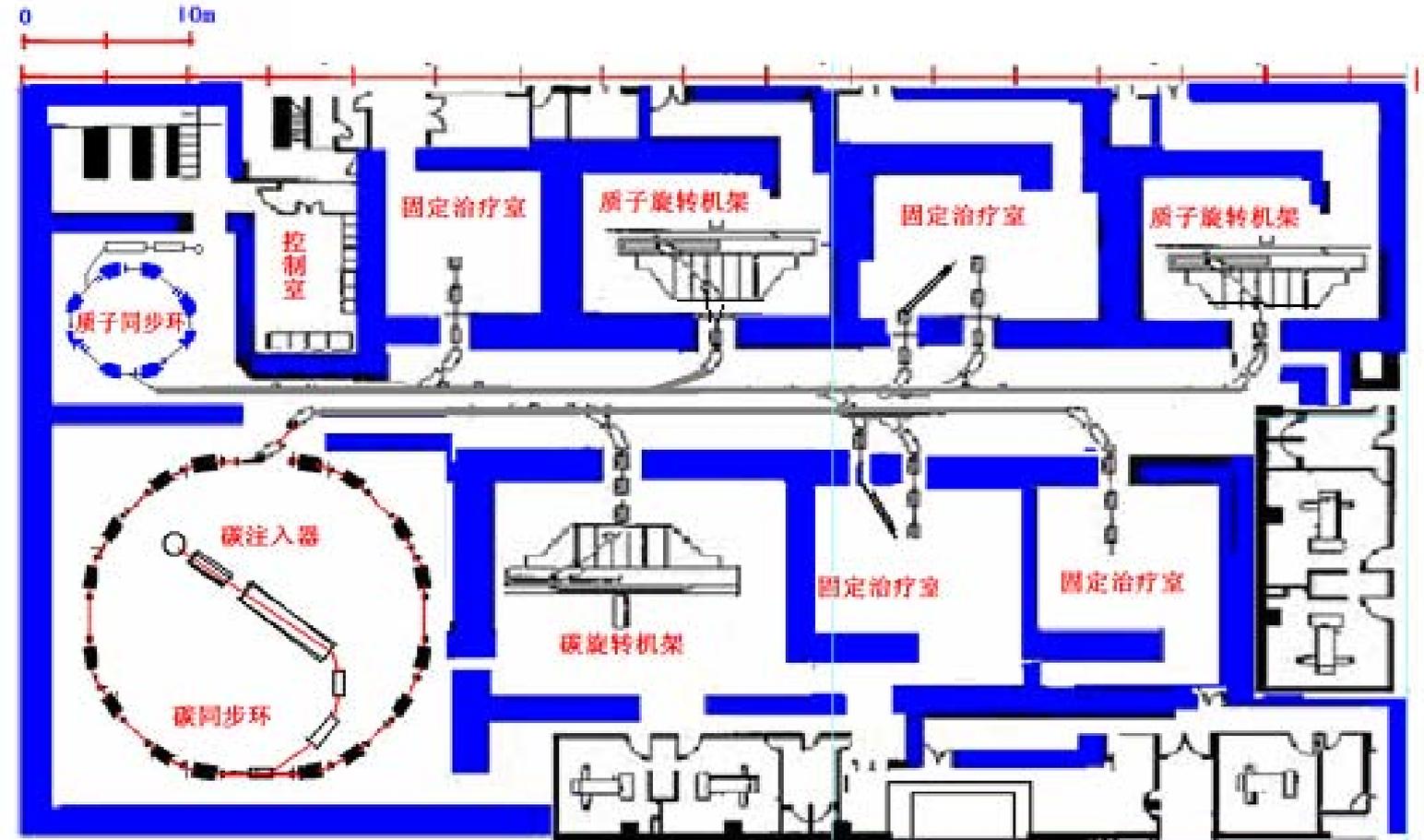
APTF基本参数和布局



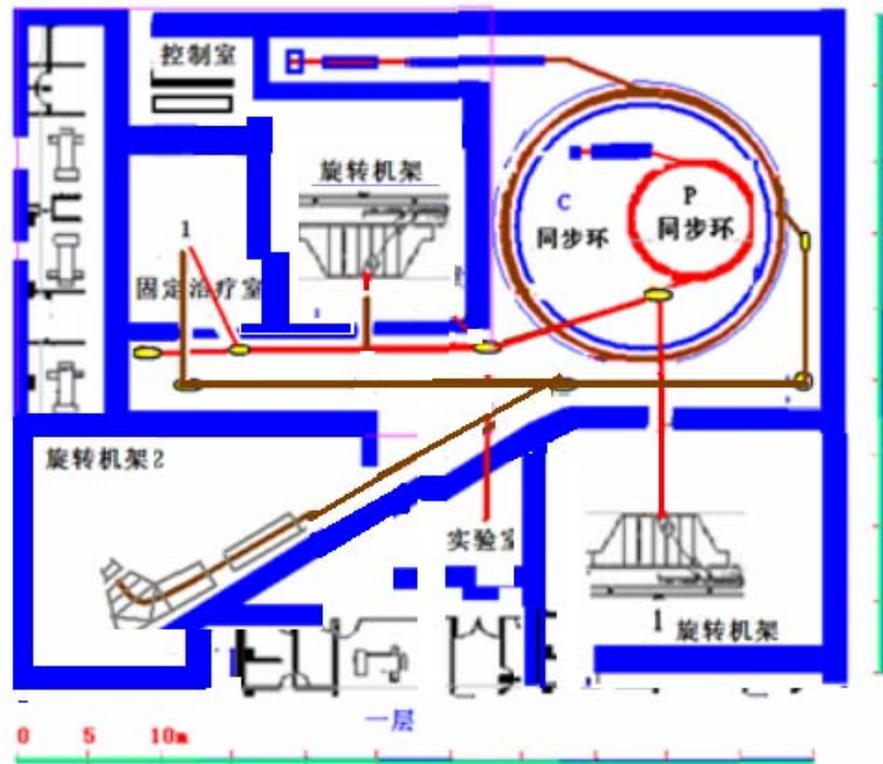
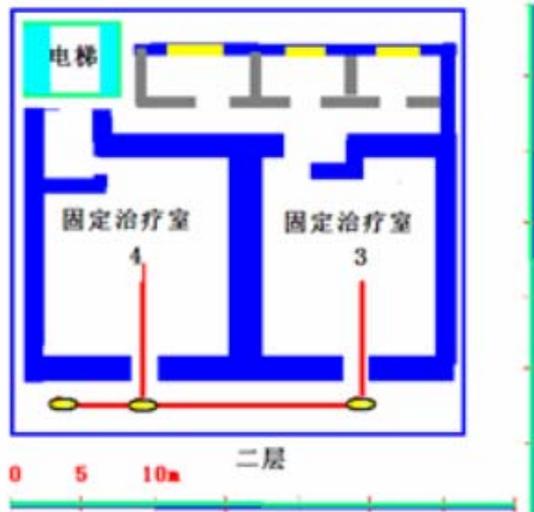
主要设计指标

- **质子**：能量为70~250MeV；
 - 散射模式单脉冲（0.5Hz）质子数为 1.2×10^{11} 或每分钟最大质子数为 3.6×10^{12} ，对应的剂量率为2 Gy/min/L；
 - 扫描模式：每分钟最大质子数为 5×10^{11} 。
- **碳离子**：能量为120~450MeV/u.
 - 散射模式：最大流强为 1.0×10^9 /ppp
 - 扫描模式：流强为 2×10^8 /ppp

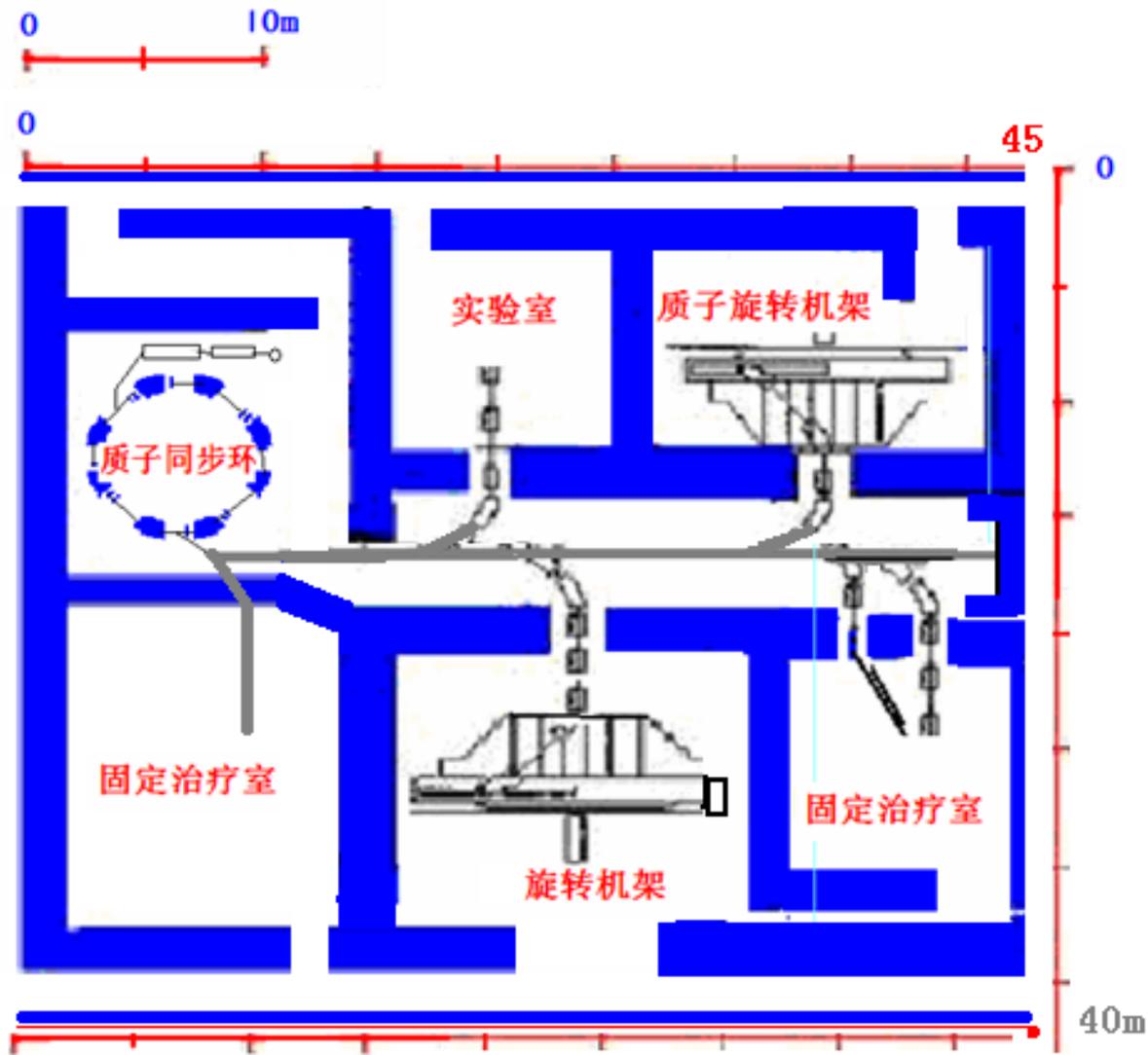
- 
-
- 质子治疗装置包括一个加速器链、旋转机架和治疗头。在初期只规划了两台旋转机架，随着经验的累积，将来会增加其数目。
 - 该加速器链包括一台7 MeV 直线注入器（RFQ+DTL）和一台70~250 MeV 的慢循环同步加速器。



APTf的总体布局（方案1）

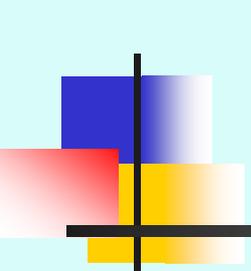


APTF的总体布局（方案2，两层、3000m²）

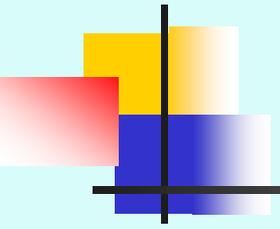


APTF的总体布局

(方案3、只有质子治疗装置、2个旋转机架、1800m²)



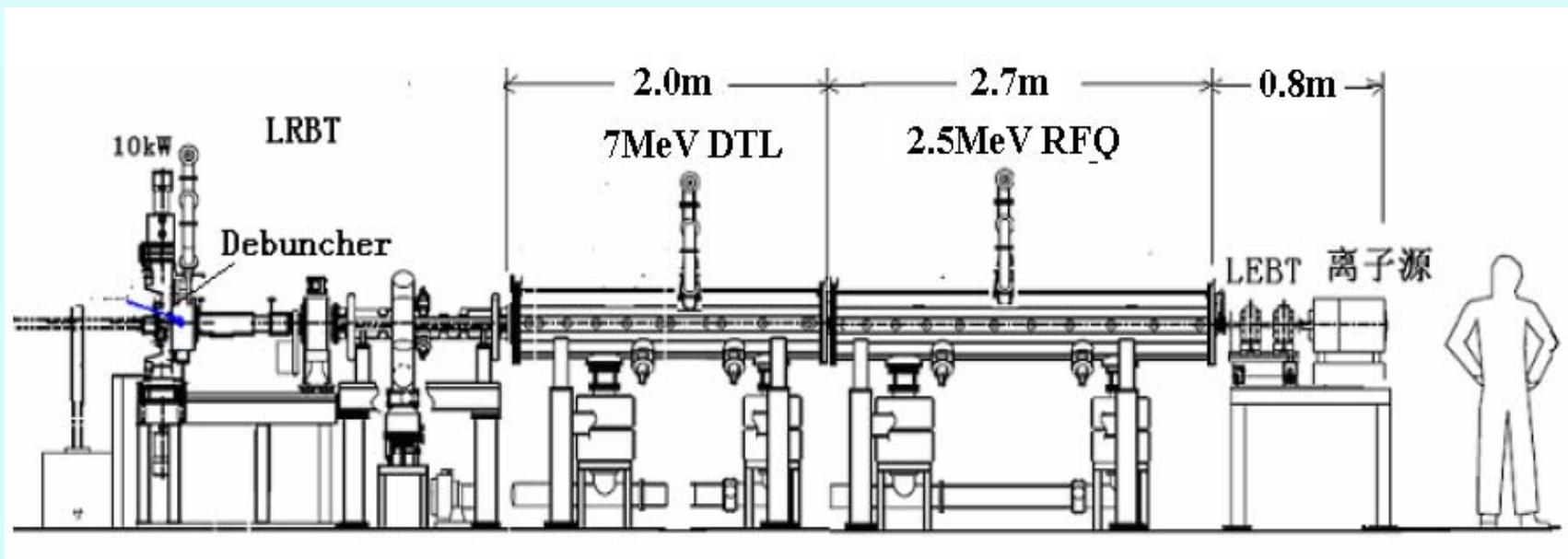
APTF主要设计特点



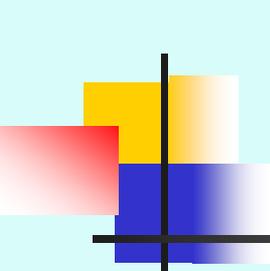
APTF 的主要参数

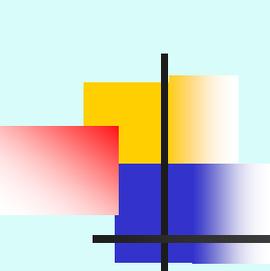
直线加速器能量 (MeV)	7
同步加速器能量 (MeV)	70~250
最大重复频率 (Hz)	0.5
单脉冲粒子数	1.2×10^{11}
治疗头	2-旋转机架, 2-水平治疗头, 1-45°治疗头

直线加速器-注入器



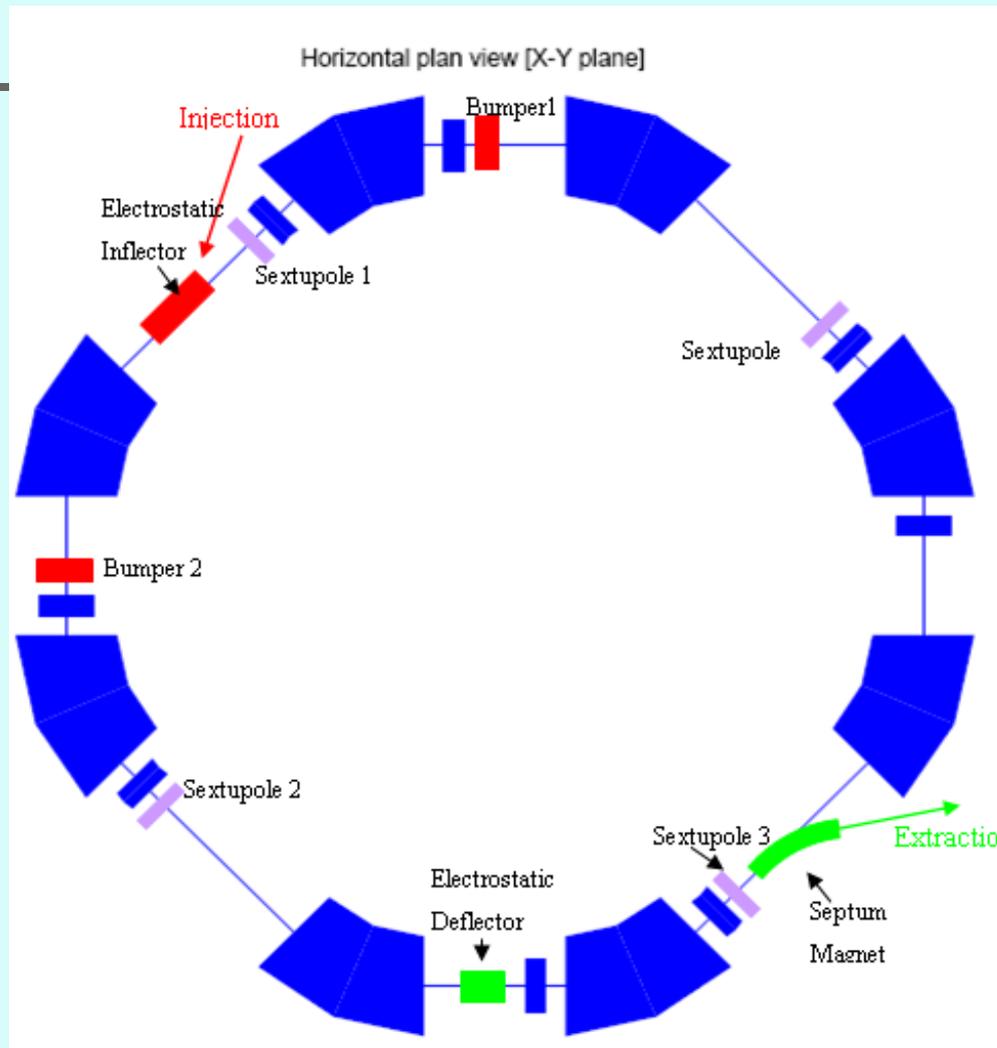
直线加速器的结构示意图

- 
- 直线加速器包括：会切场离子源、低能输运线、2.5MeV的RFQ加速器和 7MeV的DTL加速器。总长度约为5.5m。
 - 一个散束器将直线加速器最大能散从几个百分点降到 $\pm 0.2\%$ 。
 - 质子直线加速器输出流强为3.6 mA，横向归一化发射度为 $0.15 \pi \text{mm-mrad (rms)}$ 。
 - RFQ: four-vane structure, 2.7 m in length, RF power of 300 kW.
RFQ加速器：四翼结构、长度2.7m，射频功率300kW。
 - DTL加速器：长度2.0m、永磁型四极铁、射频功率400kW。
 - RFQ和DTL直线加速器的频率为324 MHz（与中国散裂中子源的直线加速器一样），并且采用相似的四极管射频放大器。

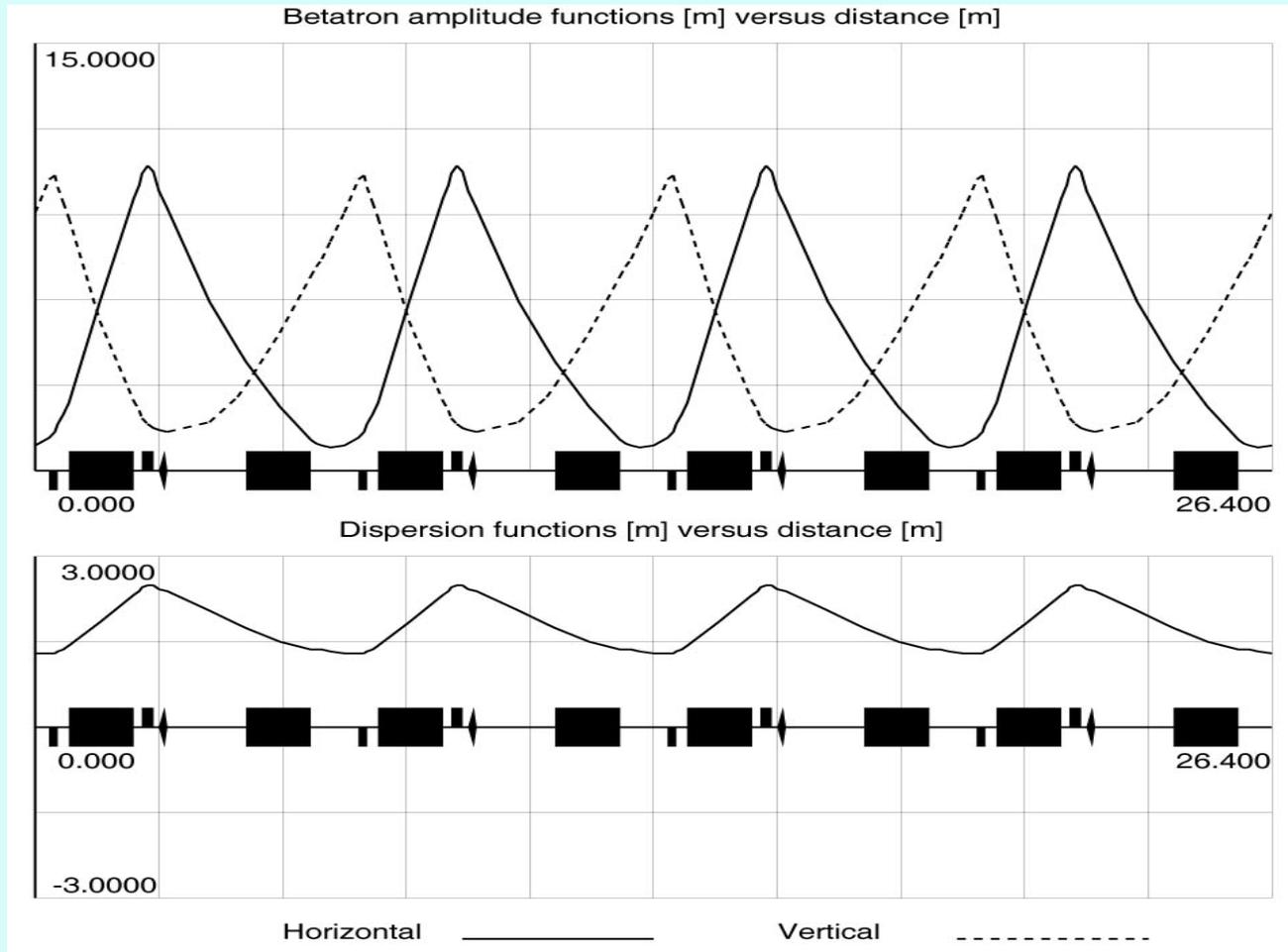
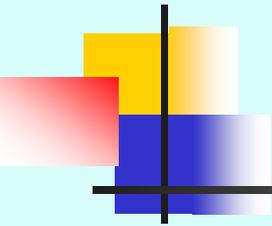


同步加速器—磁聚焦结构

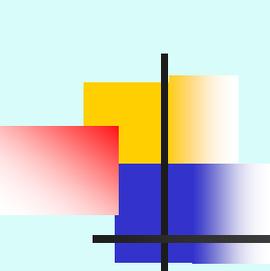
- 质子环由4折对称的FODO聚焦结构组成，
特性：结构紧凑、 β 函数较小、具有4个较长的直线节空间。
 - 该lattice设计的一个显著优点是主二极铁带有很小的梯度场，可以有效地改善 β 函数分布。
 - 4个长直线节可用于高频加速系统、注入系统、引出系统和束流诊断元件的安排。
- 名义工作点选在（1.70， 1.40），在引出前，水平工作点需要调到5/3共振线附近。同时，根据慢引出的要求，必须满足Hardt条件。



APTF同步加速器布局图



APTF质子同步加速器的Lattice函数分布

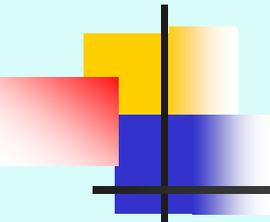


环接受度

- 环的接受度主要由注入和引出过程决定，其中引出要求水平方向接受度较大。为了获得较高的引出效率，要求螺旋型跨距为5~10mm。
- 综合考虑，环的孔径由水平接受度（ $100\pi\text{mm.mrad}$ ）和垂直接受度（ $50\pi\text{mm.mrad}$ ）决定。

同步加速器的主要参数

周长	26.4
注入能量 (MeV)	7
引出能量 (MeV)	70--250
磁刚度 $B\rho$ (T·m)	0.3830~2.4321
重复频率 (Hz)	0.5
直线段长度 (m)	4x2.0,4x1.0
超周期数	4
工作点 ν_x/ν_y	1.70/1.40
自然色品 ξ_x/ξ_y	-0.999/-0.077
临界能量 γ_t	1.568
谐波数	1
高频腔频率 (MHz)	1.38—6.97
最大腔压 (kV)	2
最大 β 函数 (m)	10.076/10.274
最大色散 (m)	2.52

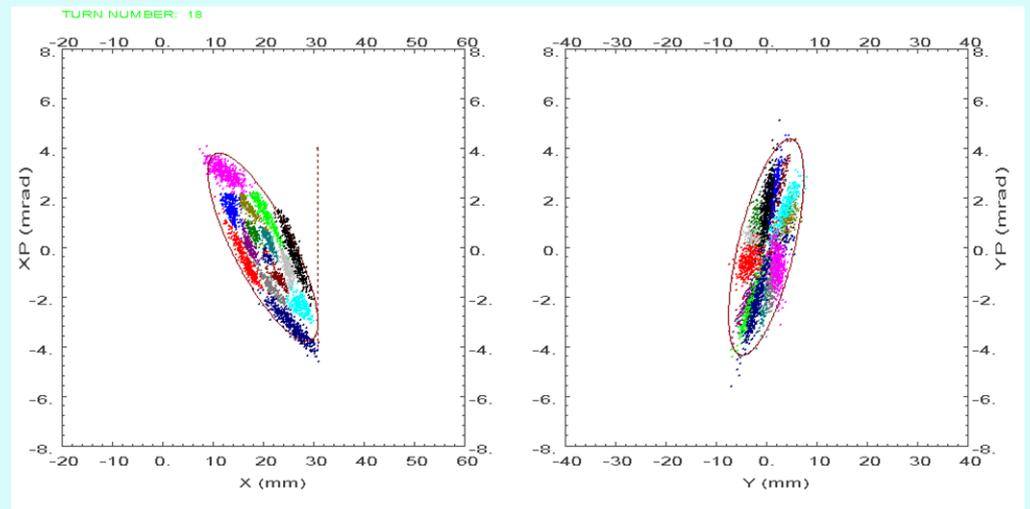


二极铁数目	8
四极铁数目	8
电源数目 (二极铁+四极铁)	1+2
注入束流发射度 (nor., rms, $\pi \cdot \mu\text{m}$)	0.15
注入束流发射度(un., full, $\pi \cdot \mu\text{m}$)	6.3
填充发射度(un., full, p.mm)	24.5
注入回旋周期(μs)	0.74
注入时间(μs)	11~22
注入圈数/有效圈数	15~30/9
注入流强(mA)	<3.6
高频俘获粒子数(10^{11})	1.5
束流平均流强(nA)	6.8

注入、加速、引出

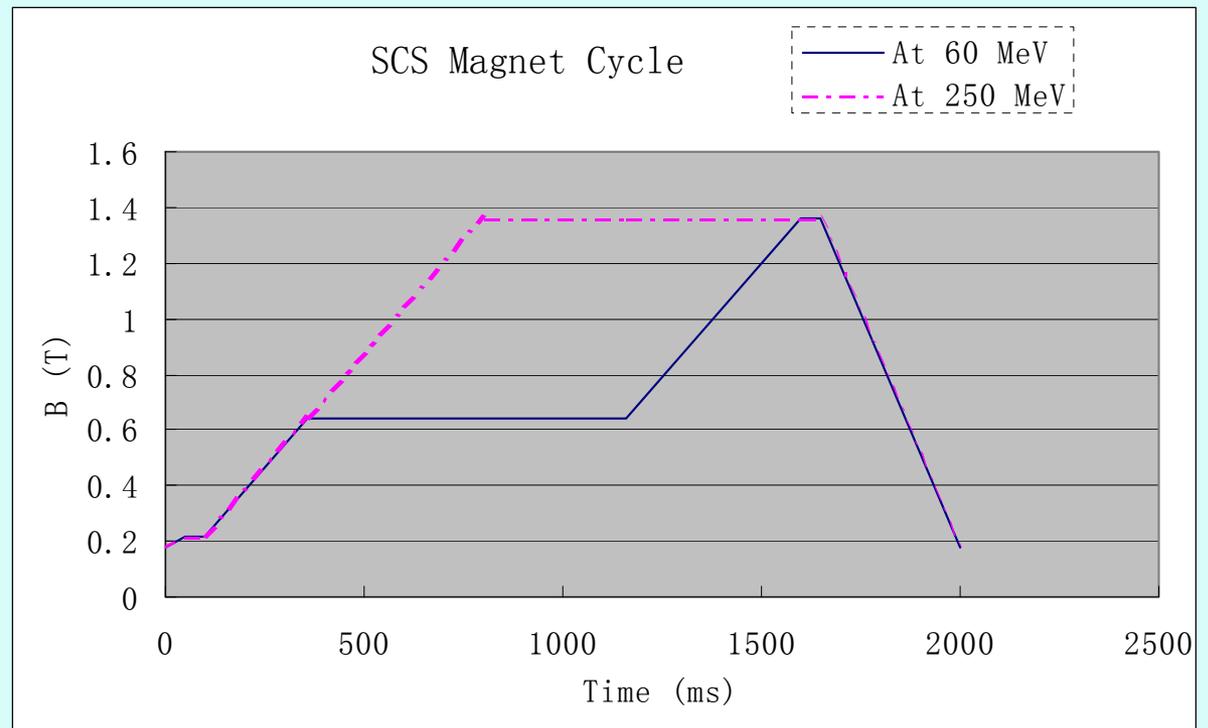
■ 注入

- 多圈注入方式，该系统包括一台静电偏转板和两块凸轨磁铁。
- 注入能量低，因此空间电荷效应作用明显。
- 通过凸轨变化和 β 函数非匹配注入实现发射度填充：水平和垂直两个方向发射度为 $24 \pi \text{mm.mrad}$ 。
- 负氢离子剥离注入方式可以作为备选方案之一。



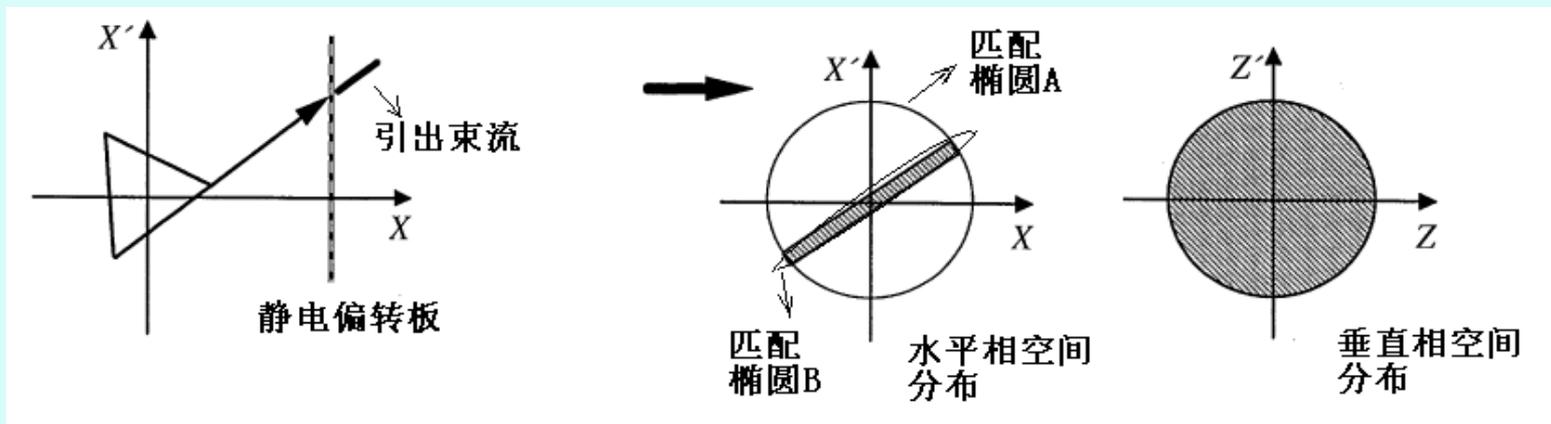
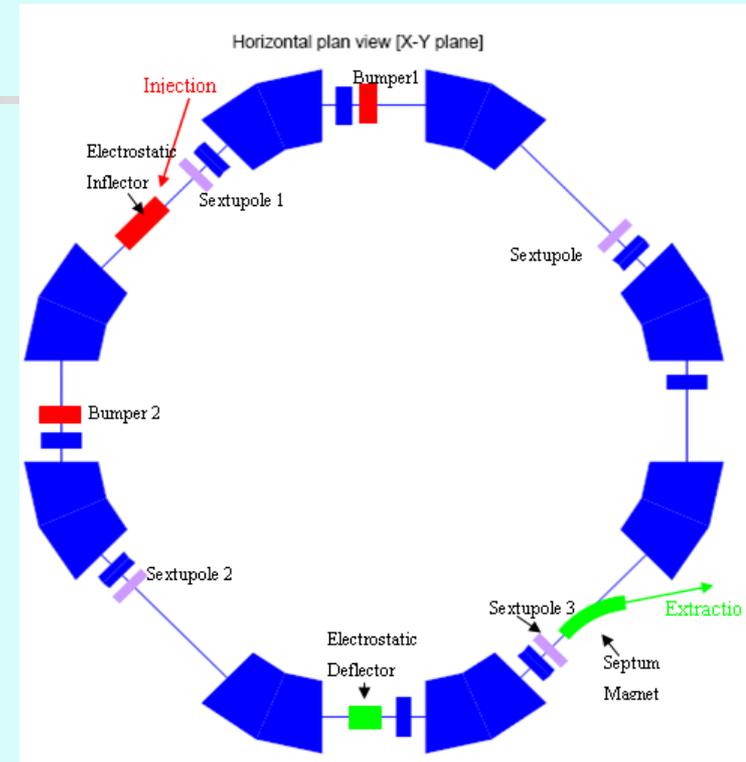
■ 加速过程

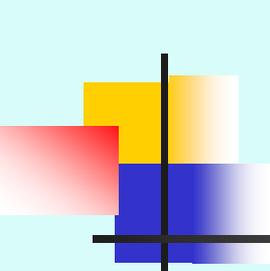
- 磁场基本按线性关系上升和下降
- 最大同步相位: $<14^\circ$
- 腔压 <2 kV

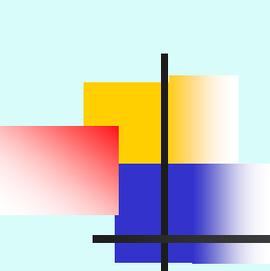


引出过程

- 要实现高稳定的束流引出是比较困难的
- 在5/3共振线附近进行共振引出，并采用**RFKO技术**
- 采用静电偏转板和切割磁铁
- 水平方向引出束流分布特殊



- 
-
- 根据不同的治疗计划，引出时间可以从几毫秒变化到几秒。
 - 在治疗随呼吸而运动的肿瘤器官时，RFKO方法可以根据呼吸运动，暂停或重启引出过程。
 - 为了避免在一个spill内，引出流强变化太大，电源在kHz频带内的纹波应当小于 2×10^{-6}



主要的硬件系统

- 磁铁系统

- 常规的加速器磁铁设计

- 电源系统

- 对电源纹波要求较高： 2×10^{-6}

- 射频加速系统

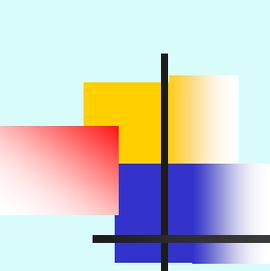
- 磁合金腔，2kV，不需要调谐，固态功率放大器

- 真空系统

- 10^{-7} torr，常规设计

- 束流诊断系统

- 除了治疗头的诊断系统外，其它的为常规设计

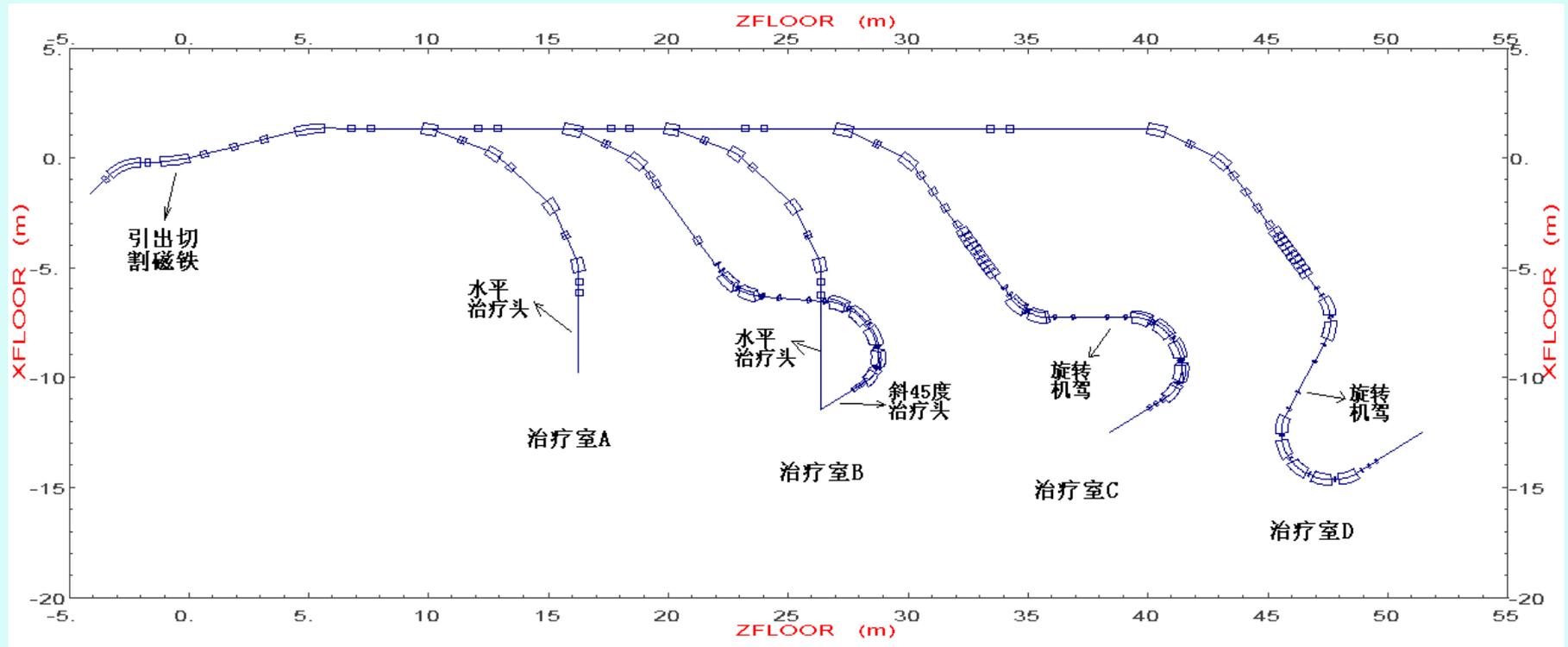


■ 控制系统

- 与其它加速器控制系统相比，质子治疗对控制系统的要求更高。
- 放射治疗剂量测量和医疗师之间保持良好的通信

束流配送系统

- 束流被送到4个治疗室和5个治疗头
 - 2个旋转机架、3个固定治疗头
 - 使用螺线管或四极束流旋转器来进行发射度均衡



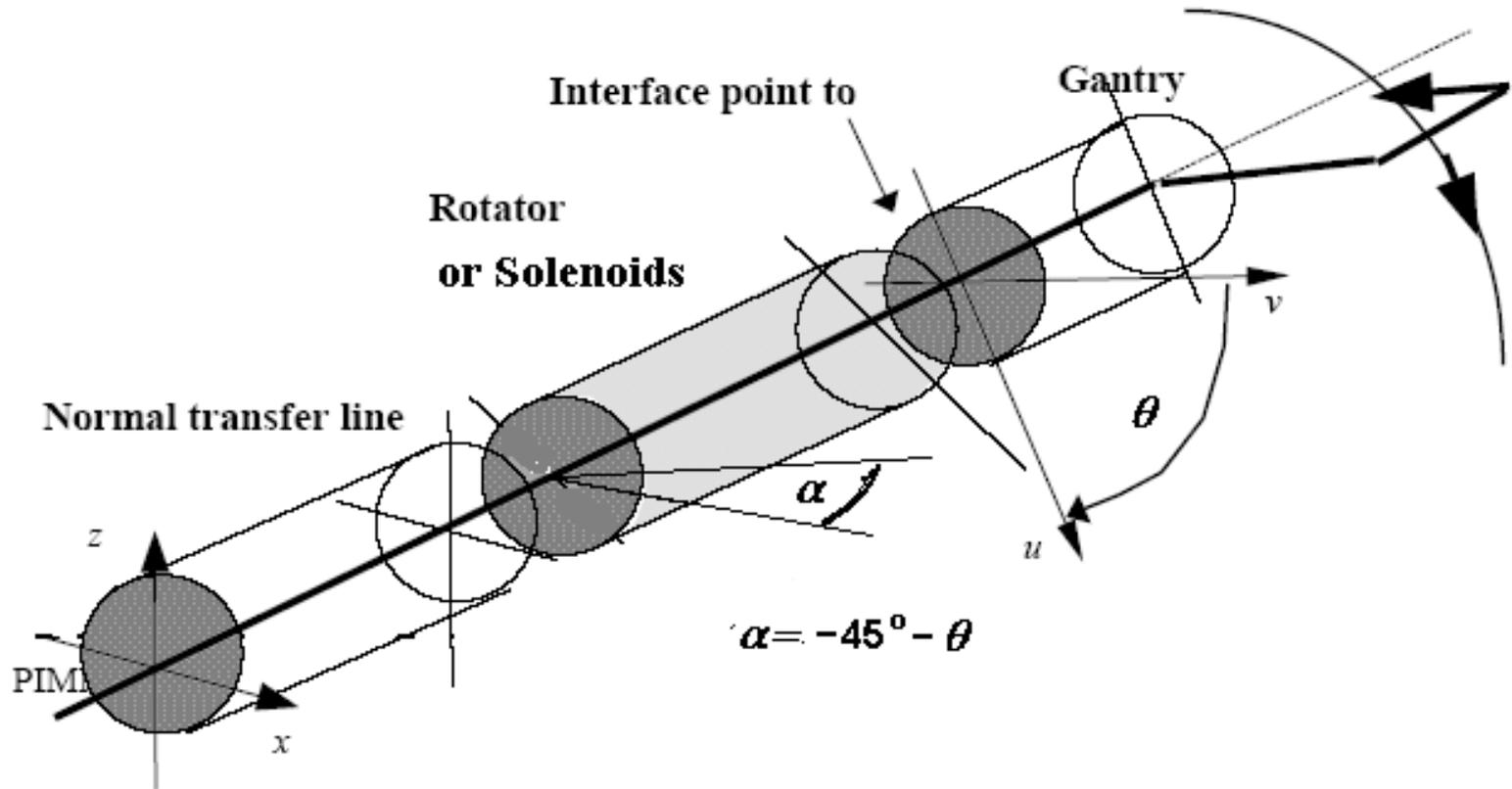
发射度均衡技术

- 因为引出束流在水平和垂直两个方向发射度极不对称，因此采用发射度均衡技术来产生相同的发射度。
 - 提高笔束模式的扫描点分布
 - 提高照射点的束流分布
 - 降低旋转机架磁铁的规模和重量
- 原则和造价
 - 在旋转机架前，增加螺线管或束流旋转器，使束流旋转 45° （和旋转机架一起）。如果在入口处，TWISS参数匹配成一样的，则最终垂直和水平相空间发射度将一样。

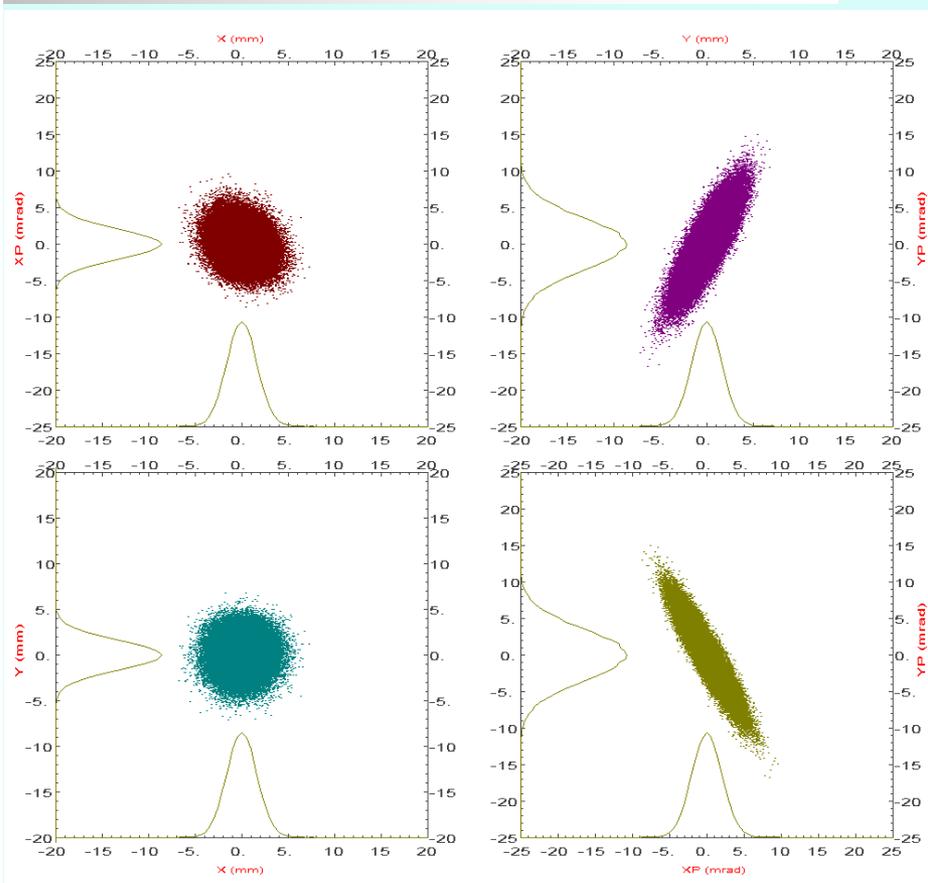
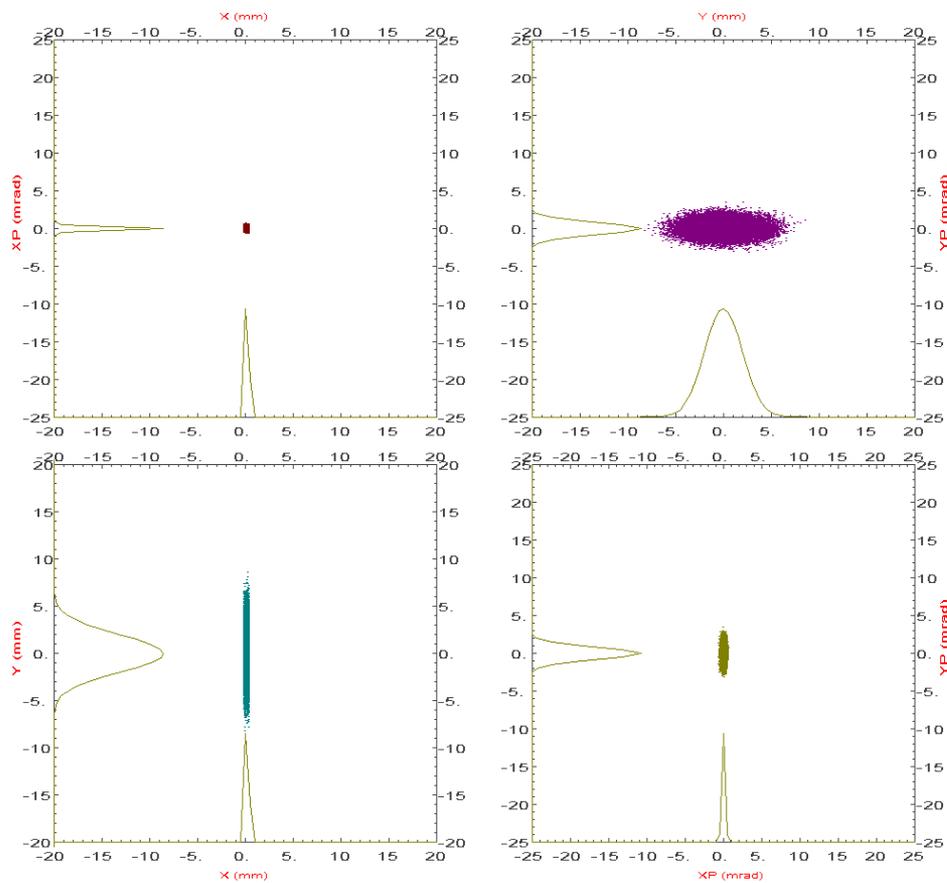
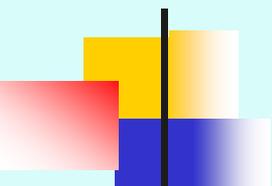
$$\alpha_{x,i} = \alpha_{y,i}, \quad \theta_T = \theta_s + \theta_g = \frac{\pi}{4} \text{ or } \frac{3\pi}{4} \quad \varepsilon_{x,f} = \varepsilon_{y,f} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{x,i} + \varepsilon_{y,i})$$
$$\beta_{x,i} = \beta_{y,i},$$

- 螺线管：长度为1m，磁场为3.75T，超导结构（很多医院已经有了超导核磁共振仪）

Emittance Balancing Schematic

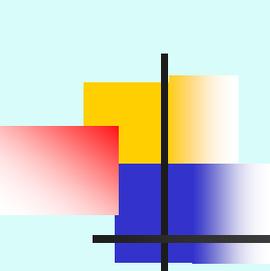


发射度均衡技术结构示意图



相空间束流分布

(左边：束流在螺线管出口处分布；右边：束流在照射点束流分布)



治疗室和治疗头

■ 4个治疗室

- 所有的治疗室都配有必要的剂量检测设备、治疗床和病人定位系统。
- 1个水平束流
 - 双体散射加摇摆磁铁扫描方法的治疗头
 - 同时还可以用于研究质子放射治疗剂量检测、空间生命科学和空间材料科学
- 1个水平束+1个斜 45° 束流
 - 还没有确定最终方案，或许1个为点扫描模式治疗头，另1个为双环散射模式治疗头
- 2个旋转机架
 - 点扫描模式，与PSI-II旋转机架结构类似
 - 双环散射模式治疗头，与IBA旋转机架结构类似
 - 因为采用了发射度均衡技术，所以两种旋转机架的磁铁规模相对较小。

扫描模式旋转机架设计

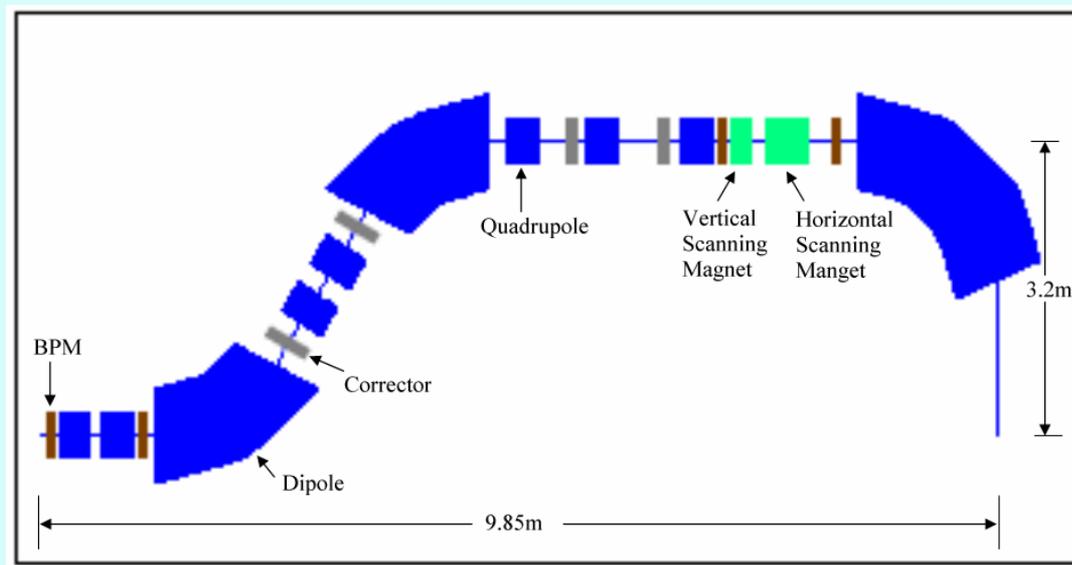
- 使用螺线管来均衡束流发射度 → 磁铁尺寸较小
- 三块二极铁使束流向上/下偏转，7块四极铁用于消色散和匹配 β 函数
- 保持旋转机架入口处的Twiss函数不变，确定旋转机架出口处的 β 函数能改变12.5倍。
- 为了节省空间，减小半径比降低长度的效果更好，因此将扫描系统放置在旋转机架上部的直线段处（1.56m）
- 因为束流需要在 ± 10 cm 范围内进行扫描，所以最后一块二极铁必须具有较大孔径

比较

PSI-II旋转机架:

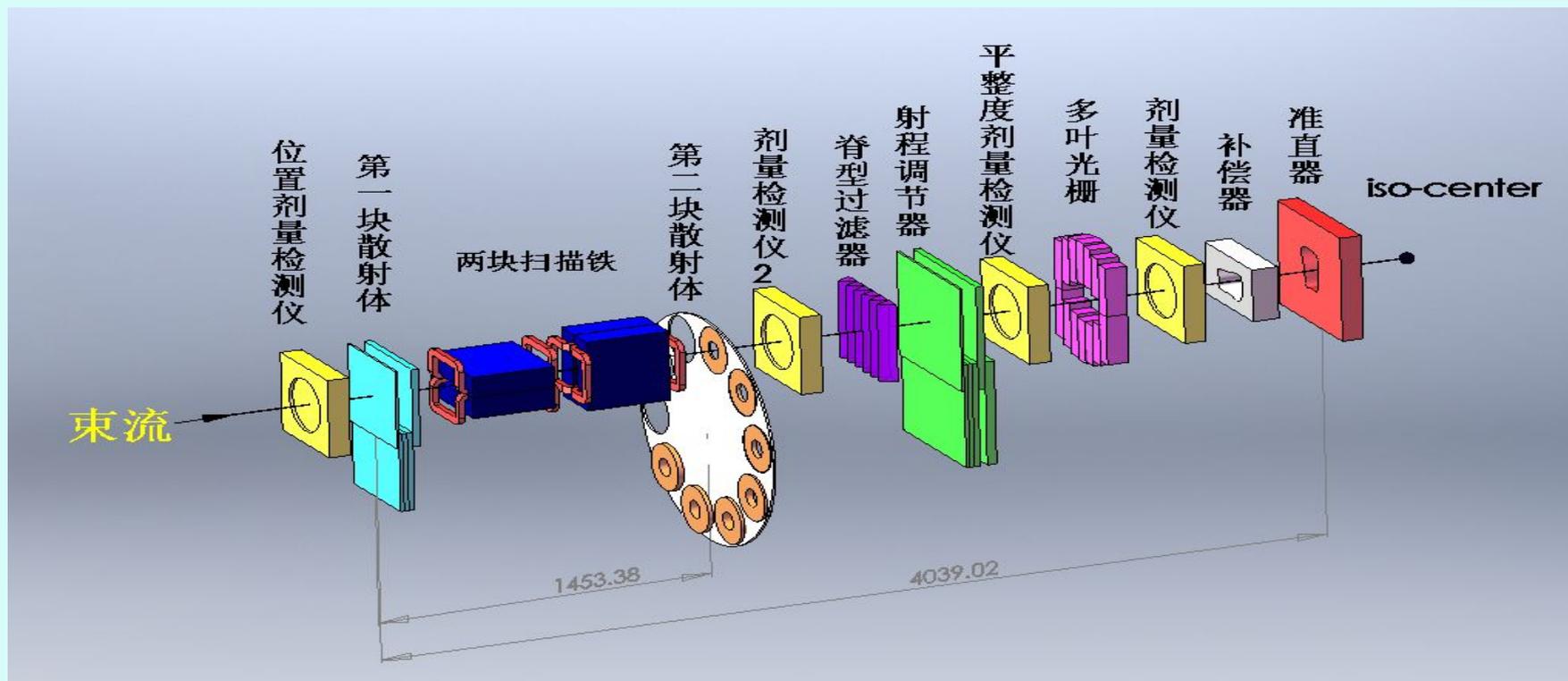
长度: 11.7m

半径: 3.2m



散射模式治疗头

■ 双环散射加扭摆磁铁扫描方法



扫描模式治疗头

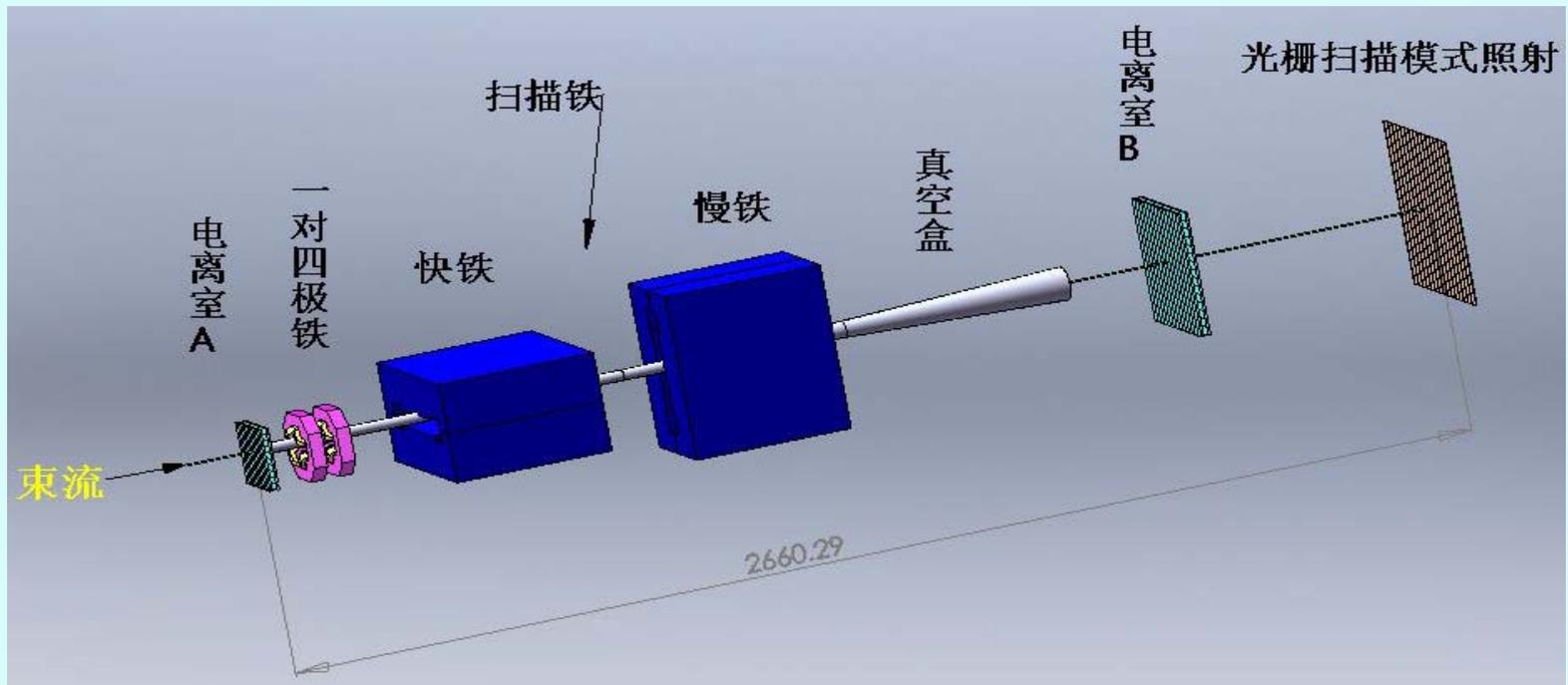
穿透深度：30cm

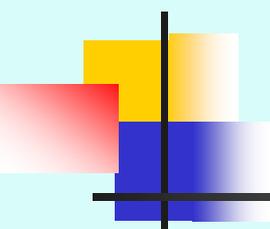
照射范围：标准范围：20×20cm，扩展范围：40×80cm

平整度：±3.5%

束流利用率：100%

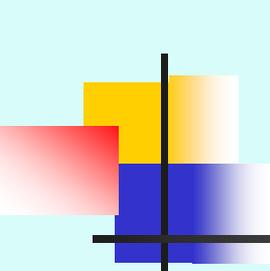
治疗时间：10000 voxels / 升，4~5分钟





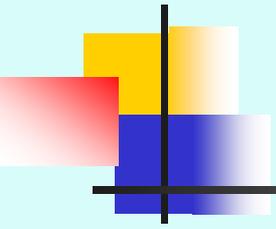
APTF工程建设规划

- 高能所已基本上完成APTf的概念性设计和部分技术性设计
 - 随时可以组织力量启动APTf的工程建设（示范性装置）
- 工程建设安排
 - 先进行质子治疗系统的建设，后进行重离子治疗系统的建设
 - 质子治疗系统约需要3年半时间，在此期间开展重离子治疗系统的预制研究工作
 - 再用3~4年时间建设重离子治疗系统



合作

- 高能物理所也是刚进入质子放射治疗领域，因此国内外合作对我们而言是非常重要的。
- 技术性合作
 - 国内：和上海应用物理所（SINAP）、万杰医院及其它医疗机构建立密切合作关系
 - 国际：与日本NIRS、瑞士PSI合作，交流加速器和治疗头设计经验，以及培训人员
 - 在加速器和旋转机架部件加工方面，和国内的厂家和研究所合作
 - 在FDA申请和治疗计划系统方面，和PSI或IBA合作
 - 与其它国际机构合作
- 建设和运营合作
 - 与国内的地方政府、有实力的医疗集团共同开发并在中国推广质子治疗技术。



Thank you for attention!