



强子治疗的束流配送系统

中国科学院高能物理研究所
唐靖宇

主要内容



☞ 引言

- 强子治疗中束流配送系统的作用和重要性
- 束流配送的主要方法
- 如何设计束流配送系统

☞ 双散射方法

☞ 摇摆束方法

☞ 笔束扫描方法

☞ 治疗头

☞ 加速器的控制和束流传输

☞ 旋转机架

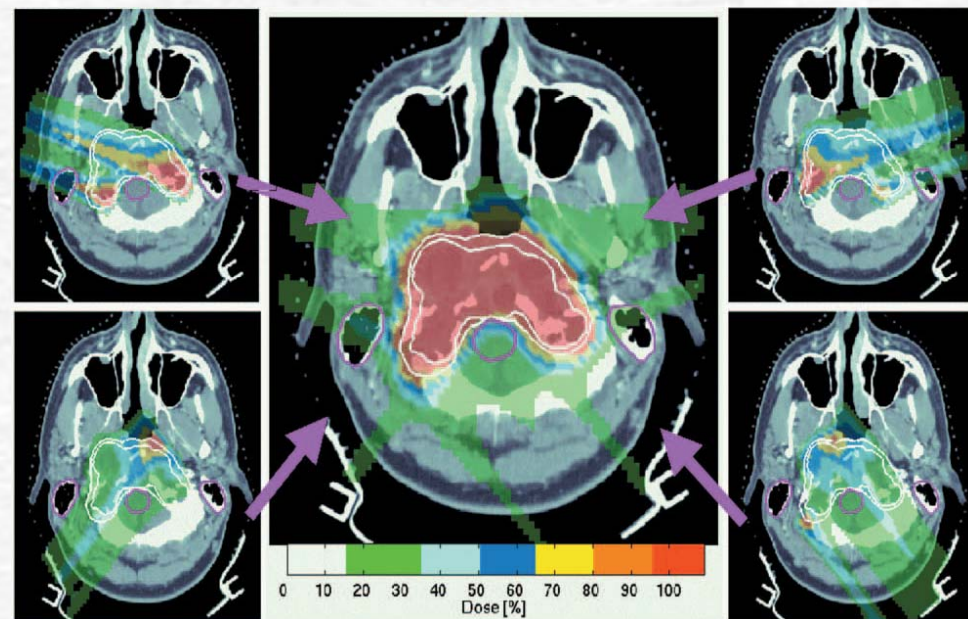
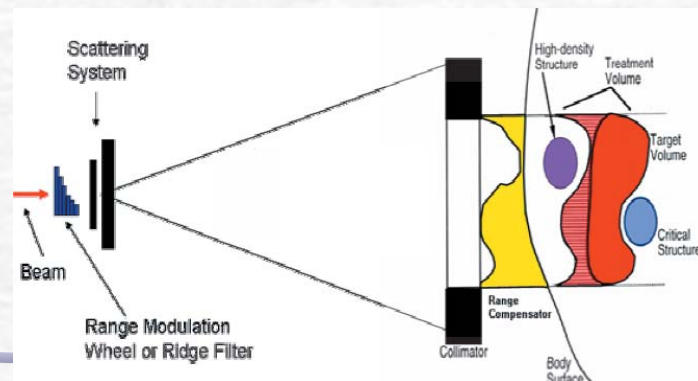
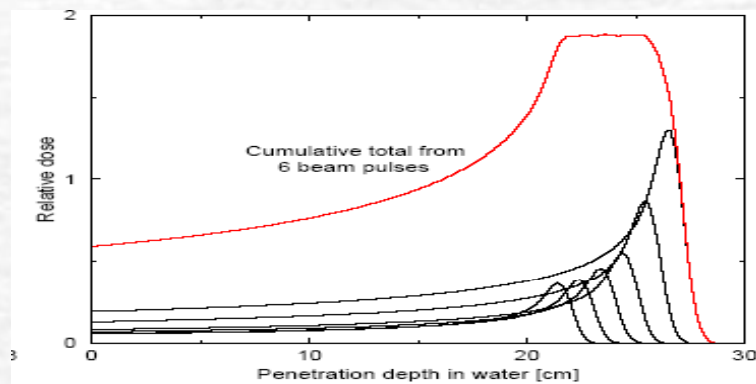
☞ 呼吸门控方法

§ 1 引言



强子治疗剂量分布

- 均匀剂量分布：3D内均匀，目前是常规的治疗方法。
- 调强剂量分布（IMPT）：3D内根据治疗要求设置，仍在发展中（容易发生治疗计划TPS的错误），从长远看，与IMXT（或IMRT）一样是先进的方法。





- 束流配送系统就是根据治疗计划（TPS）的设计控制将从加速器引出的束流以精确的方式射入人体中的肿瘤部位，在形成理想的治疗剂量分布的同时，尽可能地减小在肿瘤周围组织中的照射剂量，保证较短的治疗时间、保证剂量分布的可靠性和可控制性等要求。
- 通常不同的束流配送系统与不同的治疗计划系统相配。
- 束流配送系统在加速器与辐射治疗之间的衔接桥梁，它包括：
 - 部分加速器的控制功能（如慢同步加速器的引出）
 - 束流传输和切换
 - 束流能量和流强控制
 - 照射野或束斑的均匀化、布拉格峰展宽等
 - 入射方向和多照射野
 - 照射剂量的在线监测
- 因为治疗对精确性和高可靠性的要求，束流配送系统的设计远比一般的核物理研究终端的设计要复杂。



束流配送的基本方法

- 被动式方法(散射方法, passive)：将束流通过介质的散射和降能来进行横向和纵向展宽, 并进行边界限定, 从而在3D内形成均匀剂量。(典型: 双散射方法)
- 主动式方法(或笔束扫描方法, active)：将较小的束斑通过扫描磁铁在横向展宽, 通过调节加速器的能量或在输运线上进行降能处理进行纵向深度的控制。(典型: 点扫描和光栅扫描)
- 混合式方法(或摇摆束方法, 散射和扫描结合)：利用较薄的散射体将束流变成高斯分布, 再用旋转磁场将在靶位上的束流在中心部分叠加成均匀分布。(Spiral wobbling方法)



治疗野

- 水平固定束/垂直固定束：结合治疗床的移动，可以治疗大多病例。（造价便宜）
- 旋转机架（任意角度）：避开敏感器官，病人不需要侧倾定位。（造价高，重离子很难）
- 多治疗野：最大限度降低正常组织的平均照射剂量和有利于避开敏感器官。（治疗计划更复杂，旋转机架条件下容易实现）



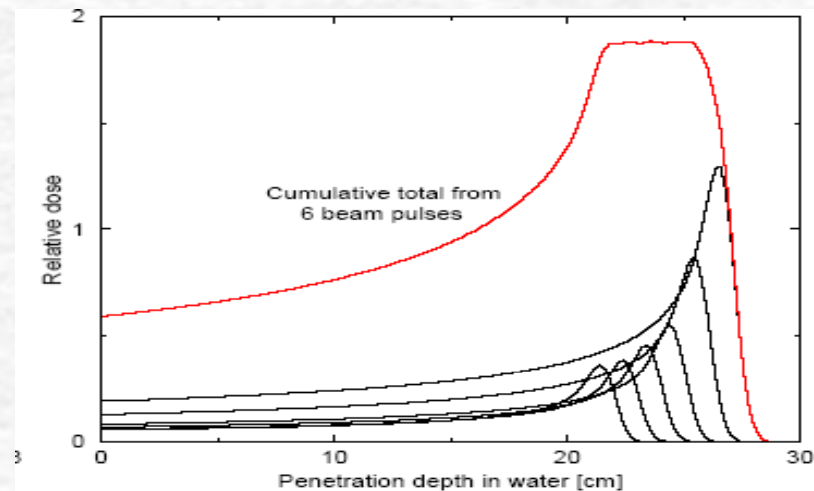
如何设计束流配送系统？

- 根据治疗方法：双散射、点扫描、Wobbling等等，对应的治疗计划
 - 照射野展宽方式
 - 准直器、脊形过滤器、射程调节器等
- 根据加速器的类型：回旋加速器、慢同步加速器等，束流品质不同、调节方式不同。
 - 变能量方式
 - 连续束、准连续束或脉冲束
 - 发射度大小和对称性
 - 流强稳定性
- 根据剂量测量和束流控制的方式
 - 重复多次
 - 呼吸门控

束流变能方法



- 在肿瘤内部形成纵向剂量的均匀分布，需要对束流进行Bragg峰展宽，形成SOBP(Spread Out Bragg Peak)平台。



- 不同的加速器采用不同的方法

- 回旋加速器：引出能量固定，只能在运输线上改变能量，通常采用降能片加上能量选择分析系统。
- 慢同步加速器：引出能量可调，运输线上进行Bragg峰展宽；有时引出能量只提供少数固定的。
- 快同步加速器/FFAG/CYCLINAC：引出任意可调，有时为了减少治疗时间，也采用较薄的Bragg峰展宽器。

§ 2 双散射方法

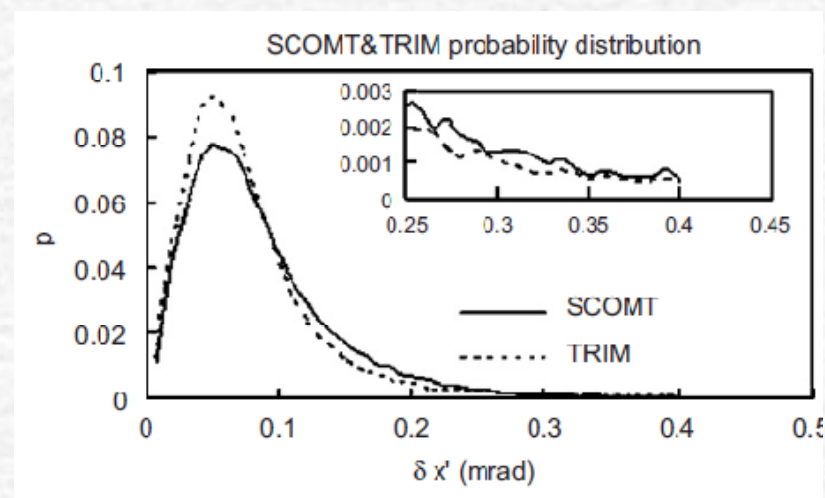


- 双散射方法是治疗方法中的最基本也是最常见的方法
 - 具有使用相对简单、可靠性好
 - 通常是指一套完整的利用不同材质的靶材料对束流的分布（包括横向和纵向的）进行控制，以及在治疗照射的时间内的平均效应在要求的3维照射区域内形成一个较为均匀的剂量分布，同时减小照射区域外的剂量。
 - 横向散束：采用分离的二级散射体，可以在较大的区域内(>20cm*20cm)得到很好的横向剂量分布。
 - 治疗过程中，束流参数调节很少，治疗设备基本是静止的，但也包括一些靶材料的运动，如旋转式Bragg峰展宽器等。
[所以称为被动式方法]
- 单散射方法：在很小的照射区域情况采用，如眼底色素瘤等。



束流与靶材料的作用机制

- 多重散射过程(multiple scattering): 入射粒子与靶中的原子核发生多次小角散的弹性碰撞（大碰撞参数），统计分布为类高斯分布或称为Moliere分布。
- 电离能量损失过程(ionization): 入射粒子与靶中电子的碰撞导致能量损失，也是Bragg峰形成的原因。
 - 射程歧离(range straggling): 单个粒子的射程弥散，由能损过程的统计涨落所致。
- 核反应过程(nuclear reaction): 入射粒子与靶中原子核发生核反应或产生大角度散射，导致该粒子的立即损失或特性改变。
 - 重离子的核碎片(fragmentation): C-12变为C-11或更轻的其它碎片，但仍具有类似入射粒子的速度，在碳离子治疗中对剂量分布有很大的影响。





■ 以上三个主要入射粒子-靶作用过程与靶材料、入射粒子种类和能量均相关

- 能量低：电离作用强、多重散射强
- 重元素材料：多重散射效应强（相对同样的能损）
- 重离子：有碎片效应，但射程边缘歧离小（纵向和横向）

■ 几种在束设备的材料选择

- 降能片：包括降能和Bragg峰展宽，采用轻质材料（低Z元素），如合成树脂（Lucite）等。
- 散射器：采用重质材料（高Z元素），如铅等；有时采用重元素和轻元素组合的复合散射体。
- 准直器：采用较重质材料如铜等，相对低活化性和高阻止率

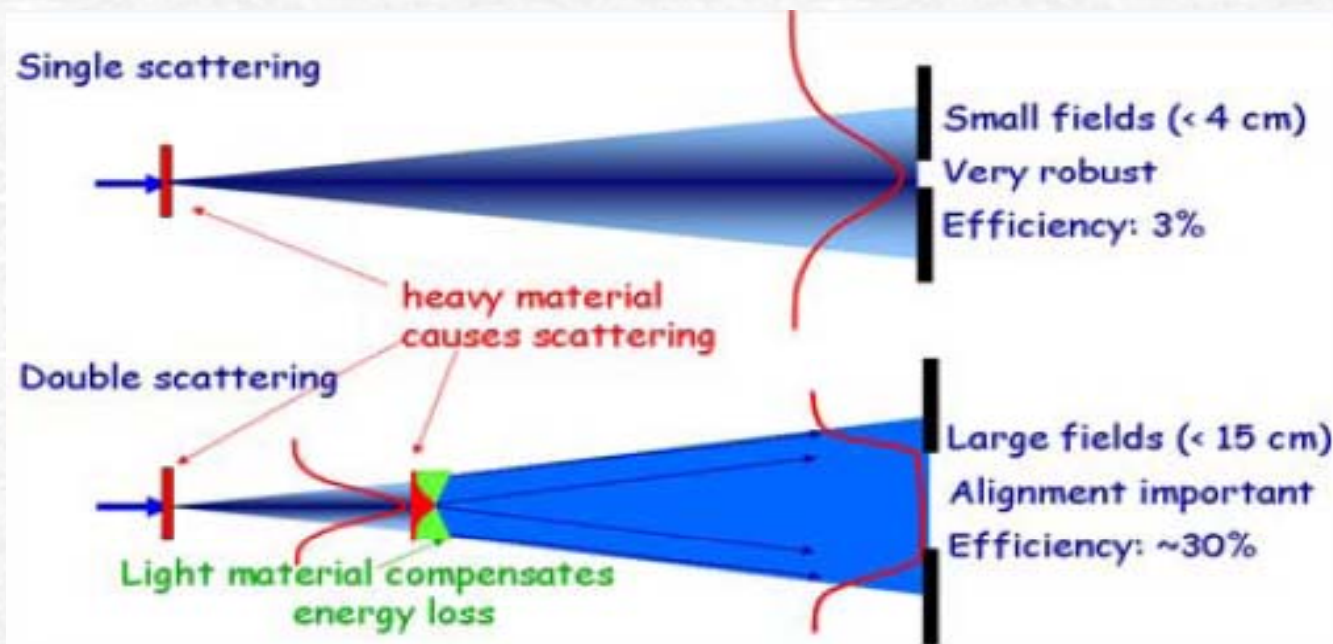
对应同样的散射角：

$$\frac{\Delta E_1}{\Delta E_2} = \frac{Z_2}{Z_1}$$



单散射方法和双散射方法

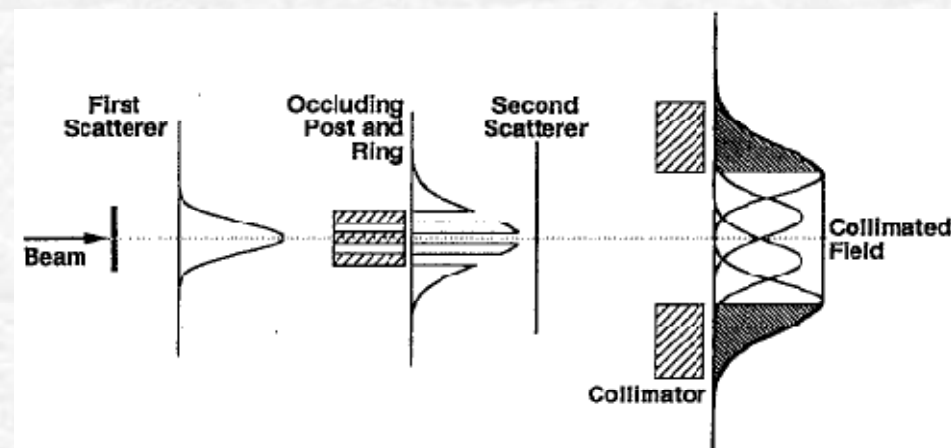
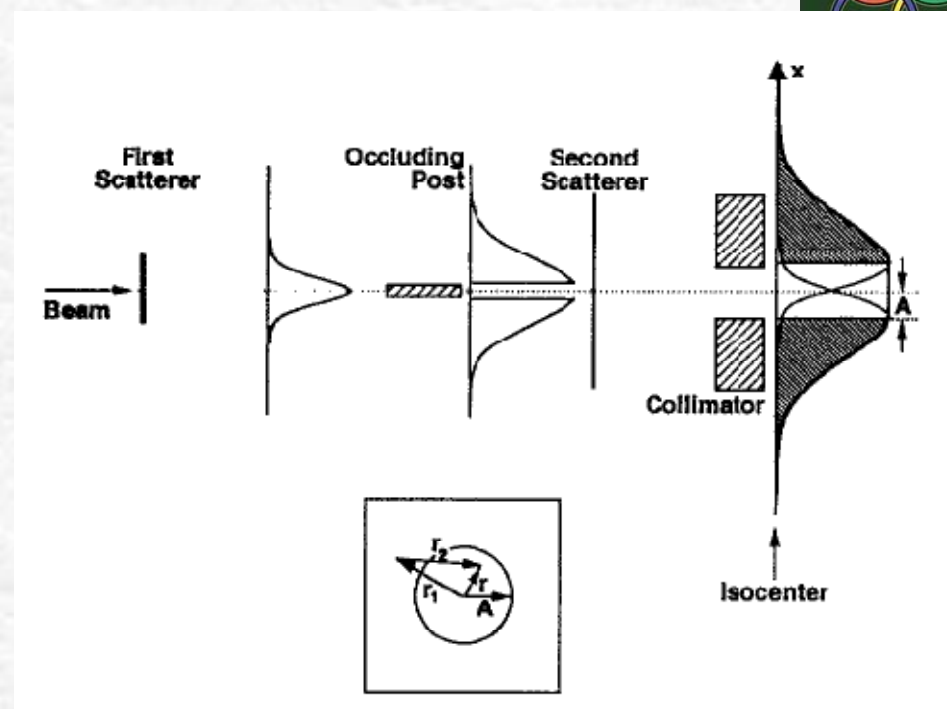
- 束流通过介质后的散射角为近似高斯分布
- 单散射方法：只采用一个较厚的散射体，如果需要得到较大的均匀照射野，束流利用率将非常低，所以通常只用于小照射野
- 双散射方法：通过让束流两次通过散射体从而在较大的照射面上（横向）形成均匀的剂量分布（通常： $< \pm 3\%$ ）。





采用双散射体进行束流横向展宽的基本方法

- 第一个散射体（高Z材料）产生较大的散射角分布
- 采用遮光孔或遮光环吸收部分粒子
- 通过第二散射体，使透光部分再次散射并发射重叠，从而在靶的中间部分形成均匀分布（ $\pm 2\%$ 的均匀度）
- 将不是均匀分布或超出靶区的粒子准直掉
- 束流利用效率约为20~40%



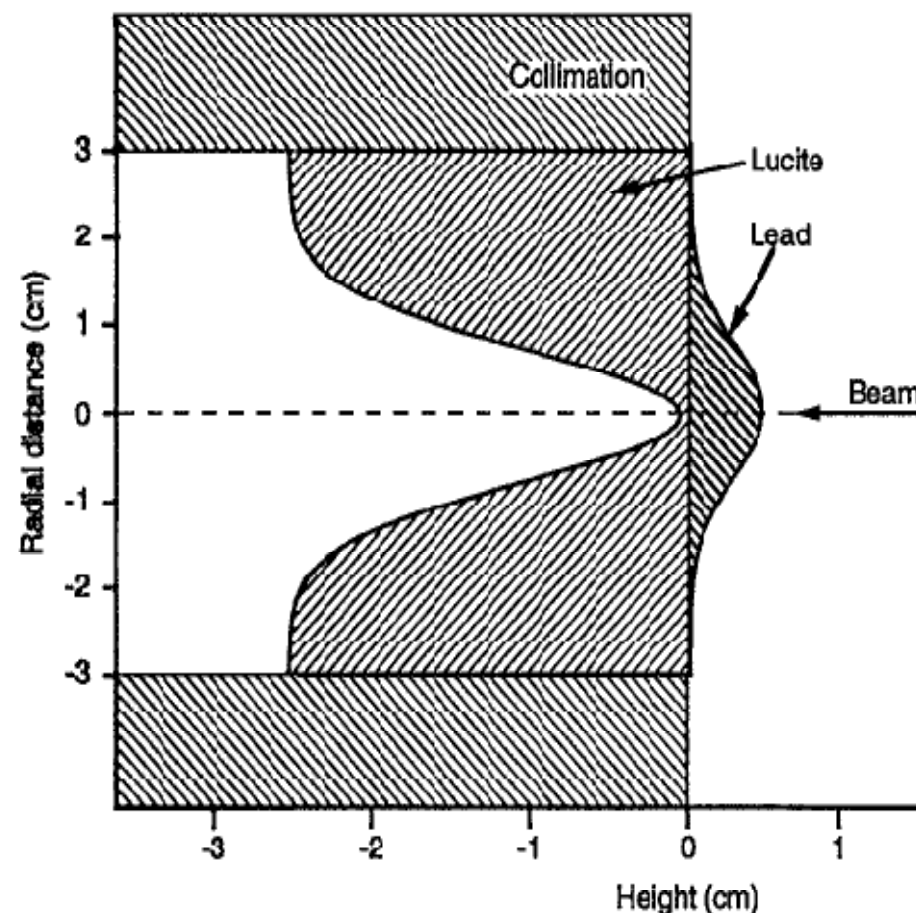


双散射方法的实际应用

- 不同能量的影响很大
- 对束流在遮光器上的准直要求高

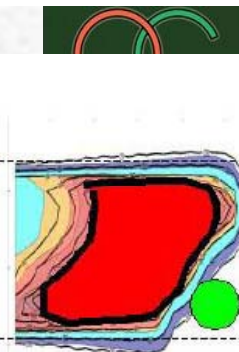
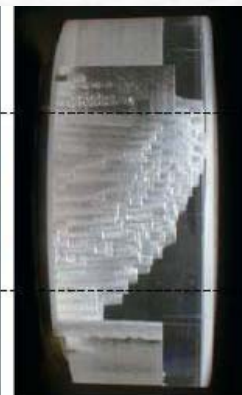
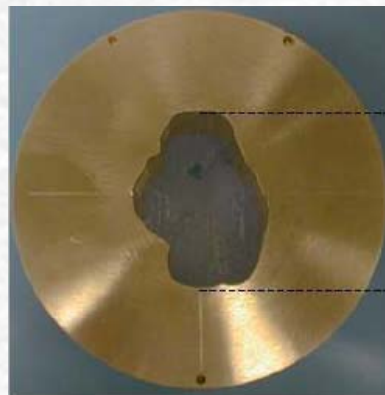
改进的双散射方法

- 将遮光器和第二散射体合并为双材料结构的散射体（右图），可以很好地适应在不同的能量下得到同样的散射角

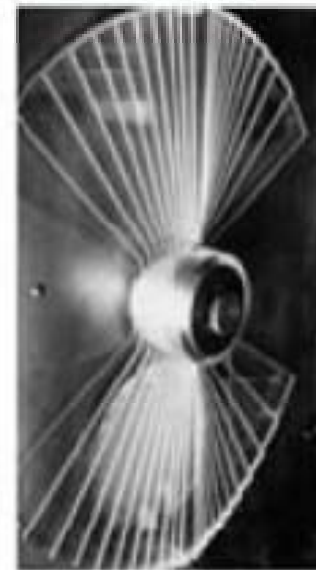
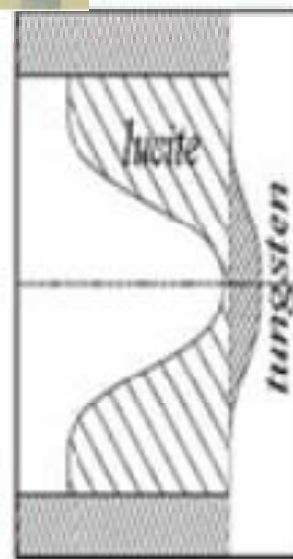


双散射方法的特点:

- 在线操作简单, 可靠性好
- 治疗时间短
- 对束流品质要求不高
- 束流利用率相对较低 (20~40%), 束流被准直的部分还造成格外的辐射
- 针对每个病人和每个疗程需要制造配套的准直器、射程补偿器(Bolus)
- 不易进行调强治疗



准直器和补偿器



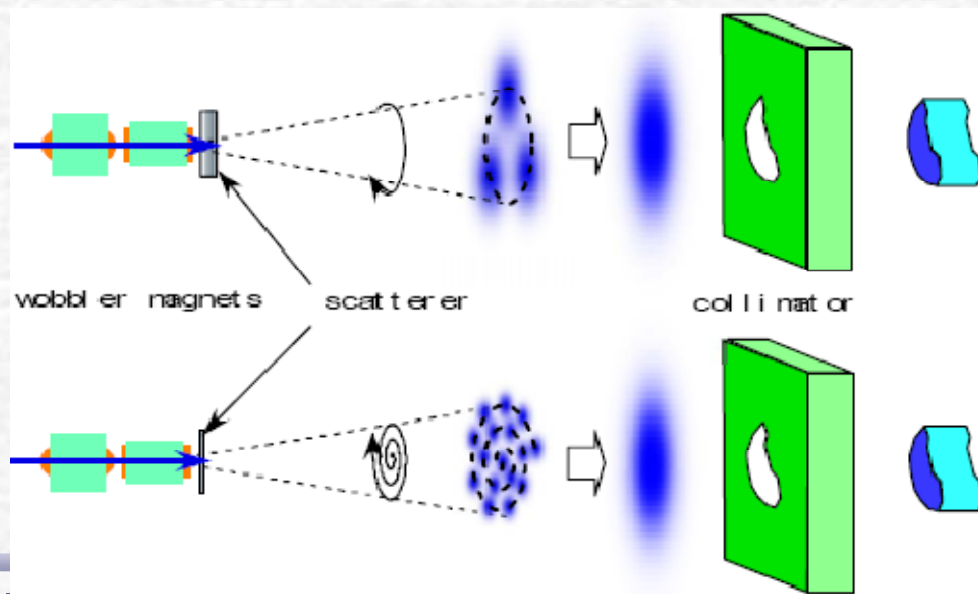
散射体、能量展宽器

§ 3 Wobbling(摇摆束)方法



是在双散射方法基础上的一个改进方法

- 采用旋转磁场（旋转磁铁或改变正交磁铁的电流）以代替双散射方法中的第一块散射体，并显著减小第二块散射体的厚度。
- 可以增加束流利用率（30%→60%）
- 可减小额外的照射剂量
- 适合重离子治疗（碳束通过散射体后会产生大量的次级粒子，对剂量分布有较大的影响）



传统摇摆方法
(Conventional)

螺旋摇摆方法
(Spiral wobbling)

§ 4 笔束扫描方法

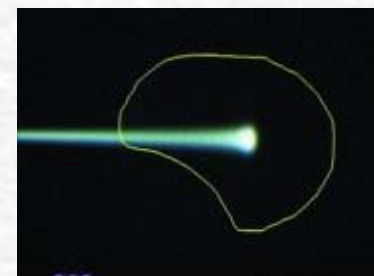


笔束扫描方法又分为点扫描方法和光栅扫描方法，它们都是将束流直接照射到病人上，不采用任何散射体，以减小额外的照射剂量和提高束流的利用率。

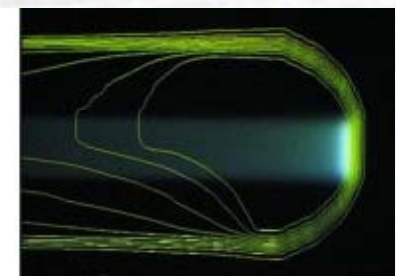
- 在病灶区的剂量由独立的较小束斑叠加而成，可以进行3D适形治疗。
- 束斑（点）的移动在横向靠快变化磁铁进行扫描，在纵向靠束流能量的改变。

→ 点扫描(spot scanning)方法

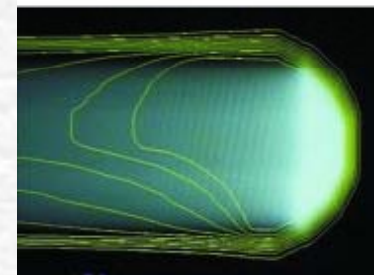
- 每个照射点上的剂量或采用一次累积、或采用一次点击、或采用多次扫描得到。



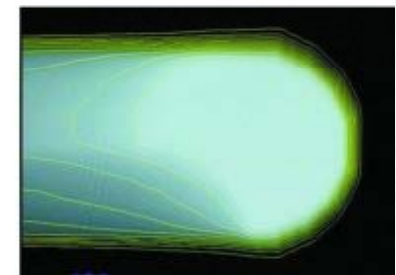
Single beam...



(lateral scanning



+ scanning in depth



= 3d conformed dose)



☛ 光栅扫描方法(raster scanning)与点扫描方法相接近，只不过是束斑是连续移动的。

- 扫描点移动的速度根据束流流强改变（束流诊断元件提供），以保证剂量的均匀性。如果是匀速扫描，则需要重复多次。
- 可以采用相对较大的平均流强，总的扫描时间比一般的点扫描方法短一些。

☛ 扫描中束斑可变

- 点扫描和光栅扫描均可用。
- 在靶区的中间部分采用较大的束斑，以减小扫描点数和治疗时间。
- 在边缘部分，保持小束斑以保证边界定义的精度。
- 显著增加了治疗计划和加速器控制的难度。

其它横向束流展宽方法



■ 非线性磁铁进行束斑均匀化方法

- 采用八极磁铁或八极+十二极磁铁可以对靶上的束斑进行均匀化
- 优点：属于被动式方法，没有复杂的束流控制
- 缺点：均匀化程度稍低，通常超过 $\pm 2\%$ 的要求；通常仍需要准直器将边缘不均匀的束流卡掉和进行照射区域的准确给定。

§ 5 治疗头

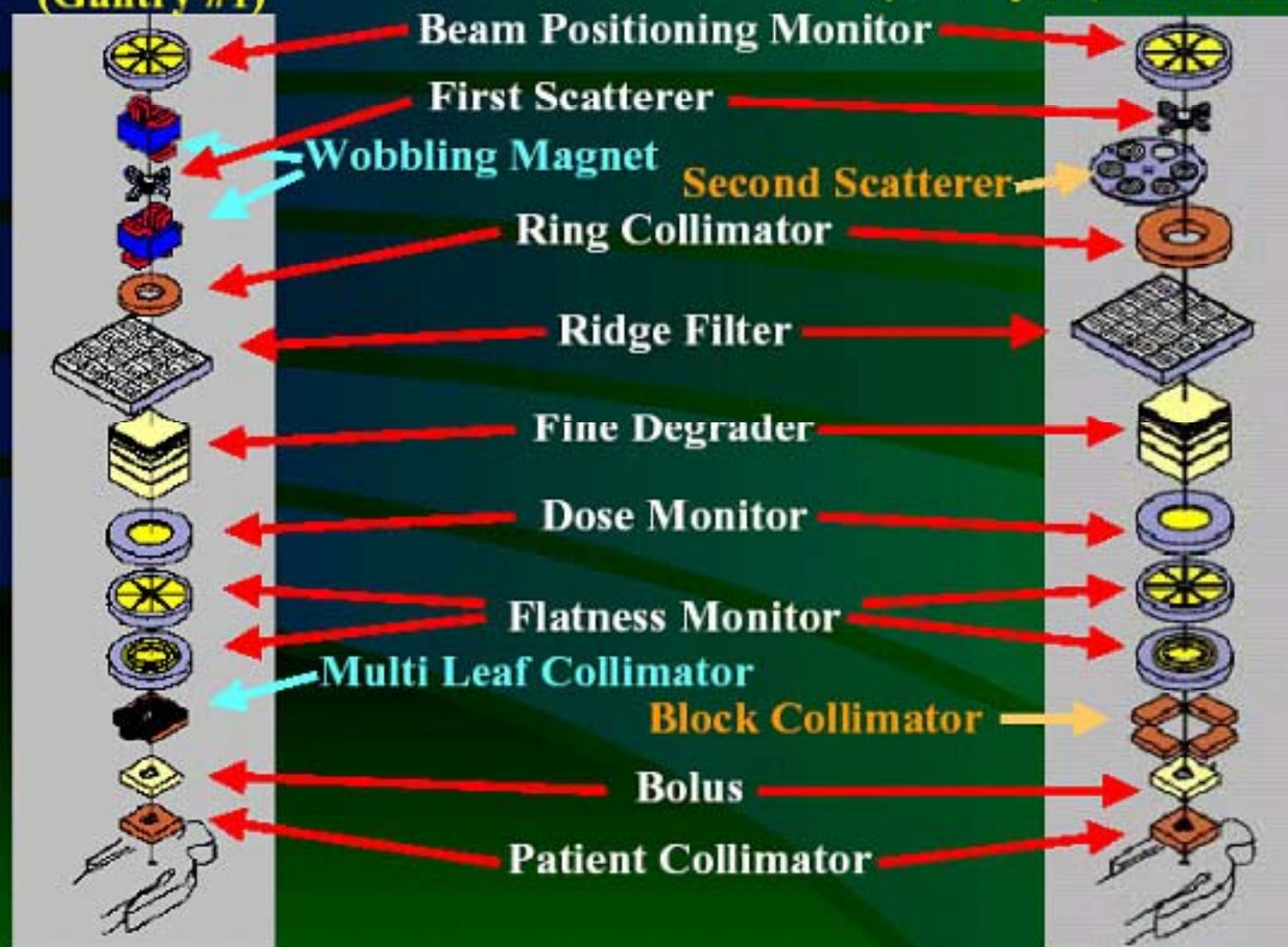


- 治疗头(Nozzle)通常是束流进入人体前的最后一个传输段，如果是旋转机架治疗头，通常是经过最后一个偏转磁铁后的直行段（也有扫描磁铁前置的）。
- 治疗头包括前面提到的对束流进行操作的散射体、扫描磁铁、准直器、射程补偿器等设备外，还包括对束流进行测量（剂量测量和位置测量）和进行定位的设备。通常因为空间紧和包括一些运动设备，是个非常复杂的系统。
- 不同的治疗方法对应于不同的治疗头设计：
 - 双散射方法：第一和第二散射体、脊形过滤器、射程补偿器、准直器等
 - 摇摆束方法：摇摆磁铁、散射体、脊形过滤器、射程补偿器、准直器等
 - 笔束扫描方法：扫描磁铁、脊形过滤器等

Nozzle System (NCC, Kashiwa)

**Wobbling system
(Gantry #1)**

**Dual-ring double scattering system
(Gantry #2, Fixed beam port)**



SHI

§ 6 加速器控制和束流传输



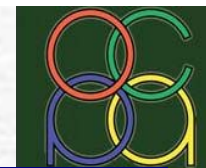
强子治疗对束流的品质包括能量、流强、发射度和稳定性都有很高的要求，束流配送系统也包括与加速器的交接面问题。

- 能量控制：无论是采用什么类型的加速器，都有治疗能量控制的问题，除回旋加速器不适用加速器引出能量的控制外，其它的几种加速器类型均可以做到对引出能量的在线控制。回旋加速器则在输运线上采用降能片降能。
- 流强控制：不同的治疗计划需要不同的束流流强，采用不同的加速器类似，其对流强的控制方法也不一样：
 - 回旋加速器：对离子源和中心区进行控制
 - 慢同步加速器：对共振引出的进程进行控制
 - 快同步加速器：对位于直线加速器前段的离子源和低能传输线进行控制

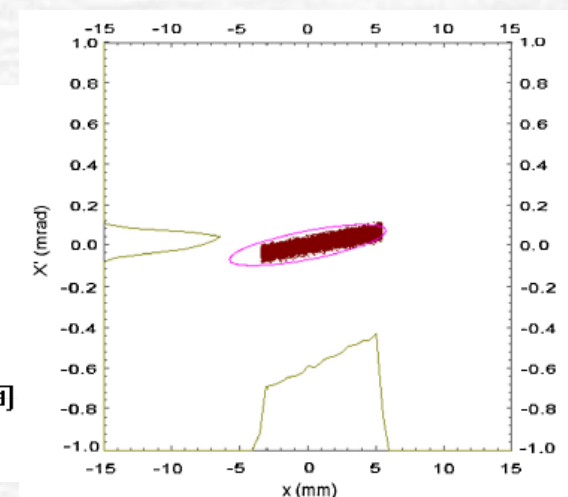
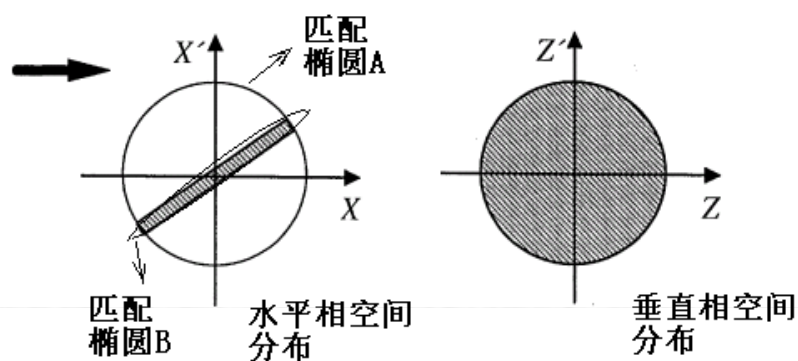
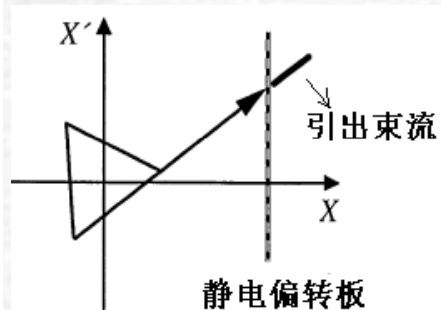
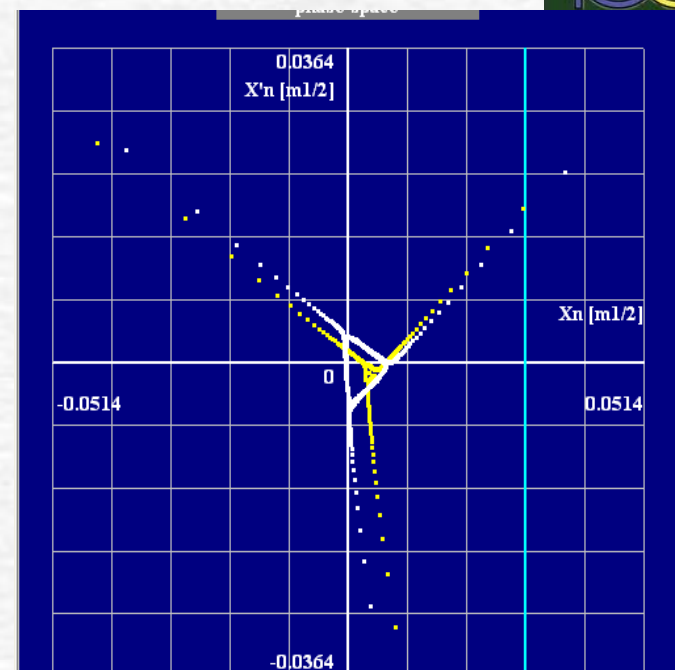


- 稳定性控制：主要是指束流的各种瞬间状态，与治疗方法有关，被动式治疗要求低一些；主动式治疗要求高，通常需要采取特殊的措施，如：
 - 为了提高慢同步加速器的引出流强的稳定性，采用RFKO方法和提高电源的纹波要求的措施。
- 发射度控制：在采用笔束扫描方法时，这个问题很重要。
 - 回旋加速器采用降能片时，发射度的变化靠发射度限制准直器来控制；
 - 慢同步加速器引出束流的发射度在水平和垂直方向相差很大，且在引出过程中不能保证恒定，稍后有进一步的讨论；
 - 快同步加速器的引出发射度也随引出能量变化。
- 束流传输是将从加速器引出的束流传输到不同的治疗室/治疗终端，并进行所需要的与治疗头（包括旋转机架）的匹配。

慢同步加速器引出束流发射度的问题



慢同步加速器采用共振切削引出方法，在水平方向的发射度非常小，造成水平/垂直不发射度相差很大，且本身还具有不对称性和抖动大的缺点，很不利于进行点扫描和与旋转机架的匹配。



不对称发射度的匹配方法



- 束流的水平/垂直方向的严重不对称在与旋转机架相匹配时最为麻烦，尤其是在采用点扫描的情况下，下表是几种处理方法的比较。

TABLE II. Comparison among different matching methods to gantries, where the beam has a large difference between the two transverse emittances. Q denotes quadrupole magnets and B bending magnets.

	Beam line	Gantry	Irradiation spot
Emittance balancing	Longer line Cost solenoids or rotator and matching Q	Smaller Q magnet sizes Fixed envelope with respect to (wrt) gantry angle	Stable Equal and small emittance Fixed spot Symmetric spot
Matched rotator	Longer line Cost rotator and matching Q Phase shifter in trunk line	Smaller B magnet sizes Fixed envelope wrt gantry angle	Small X and large Y emittance Fixed spot Nonsymmetric spot Less stable
Thin scatterer	Focusing Q in trunk line Variable thickness scatter Local radiation	Large B and Q magnet sizes Fixed envelope wrt gantry angle	Equal and larger emittance Fixed spot Nonsymmetric spot Less stable
None	No cost	Large B and Q magnet sizes Changing envelope wrt gantry angle	Irregular spot distribution Less stable Varying X and Y emittance Fitting spot

发射度均衡方法



针对慢循环同步加速器采用共振慢引出方法时引出束流的极端不对称性，可以一种发射度均衡的方法：

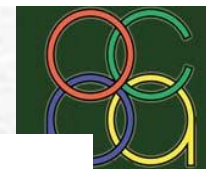
- 可以改善采用笔束治疗时束斑的分布
- 可以提高束流在照射点上的稳定性
- 可以减小Gantry的尺寸和重量

原理和代价：

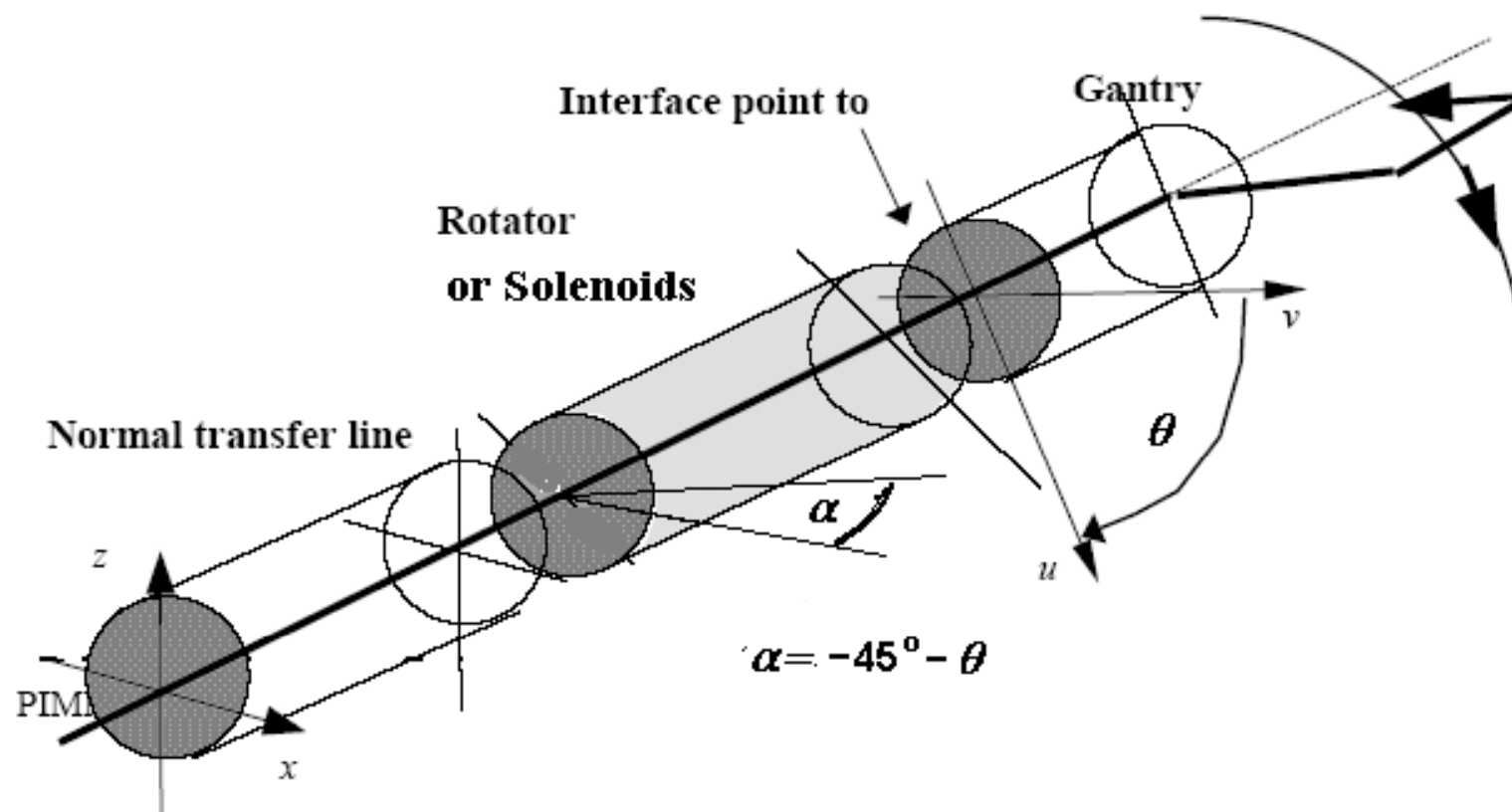
- 在Gantry前或输运线上增加一组螺线管（或一个可机械旋转的透镜组），将束流绕光轴旋转一定角度，该角度与Gantry旋转角之和为 45° ，并满足入口的TWISS参数相等的条件，此时，X和Y的发射度变为相等的，且均为原Y发射度的一半。

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

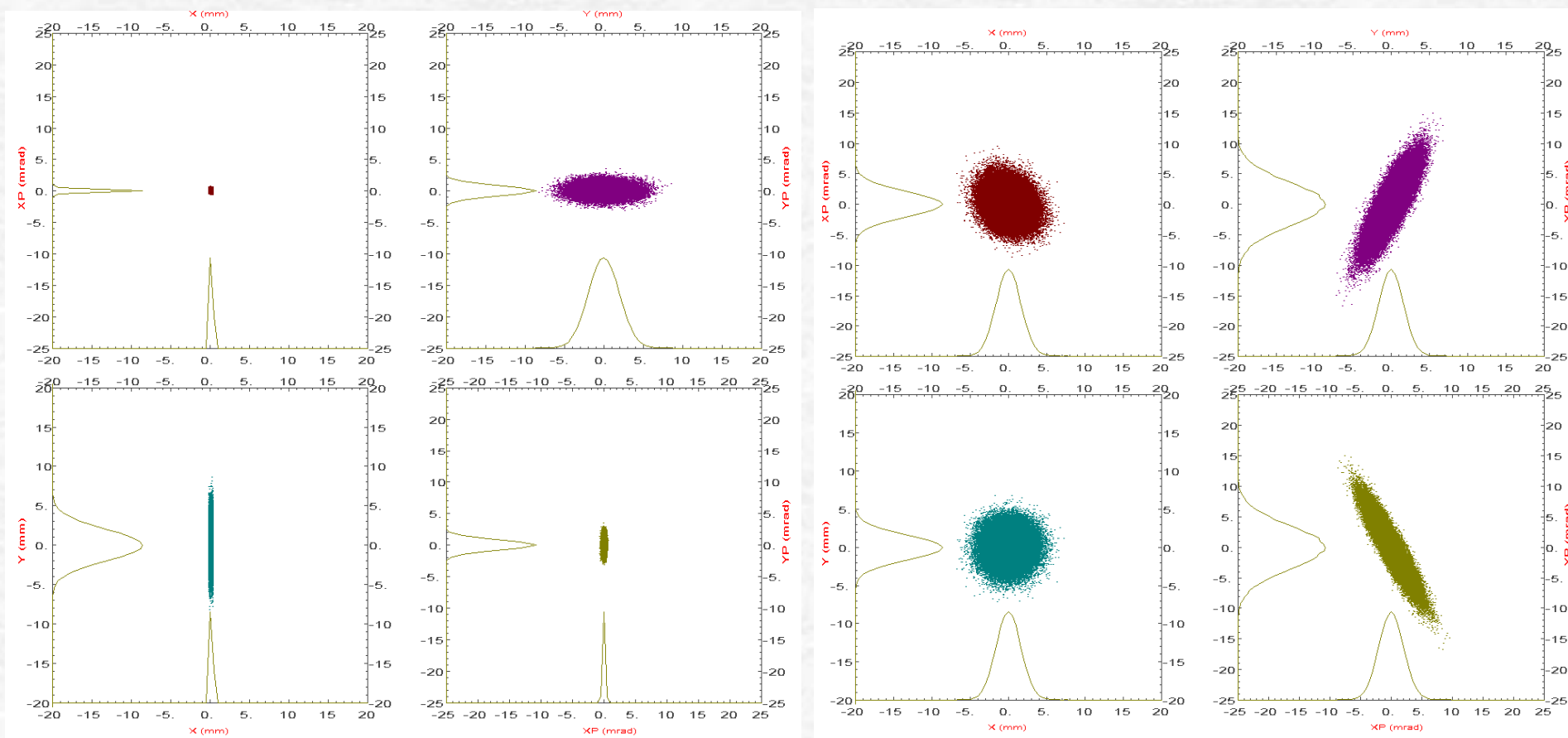
- 代价：需要采用超导螺旋管，对应250MeV：长度1m，磁场3.875 T。



Emittance Balancing Schematic

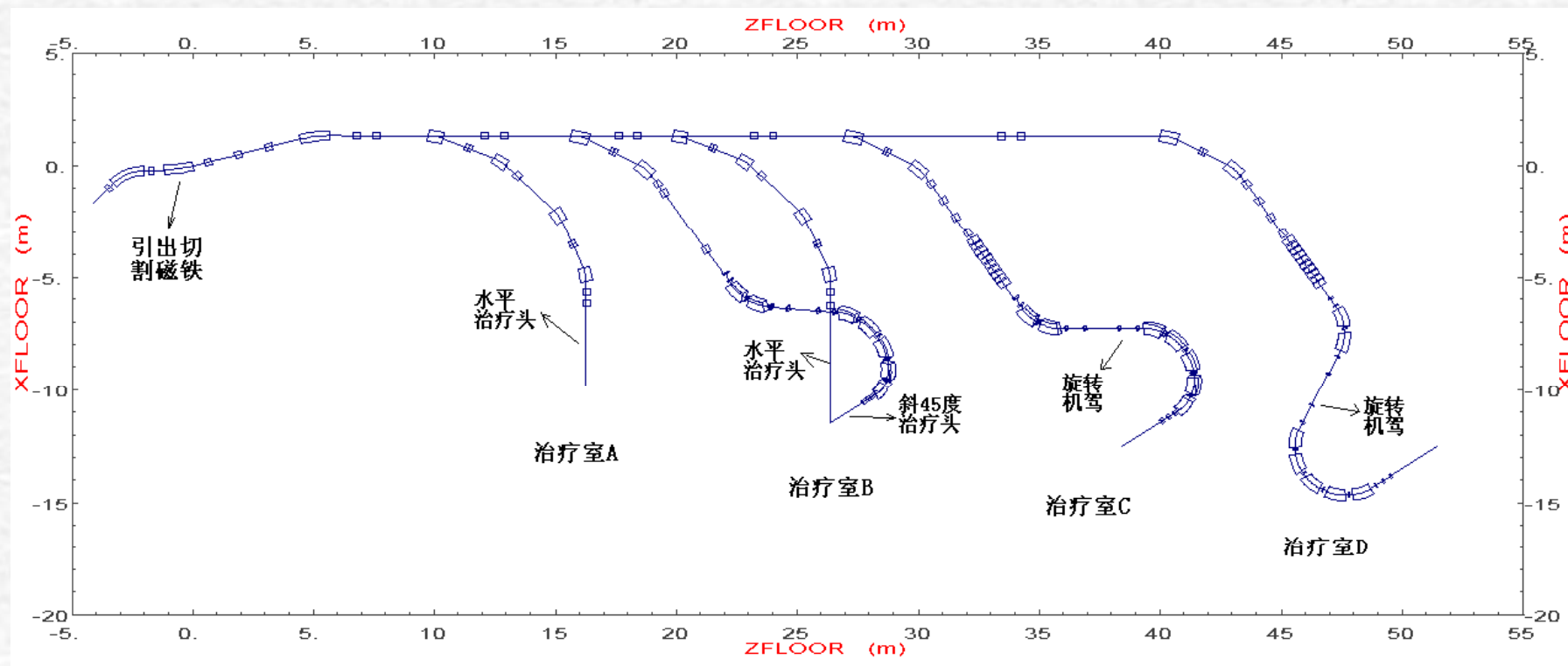


发射度均衡方法示意图



在螺线管入口和照射点的束流相空间分布

束流传输系统的设计例子



APTF质子治疗束流传输线

§ 7 旋转机架

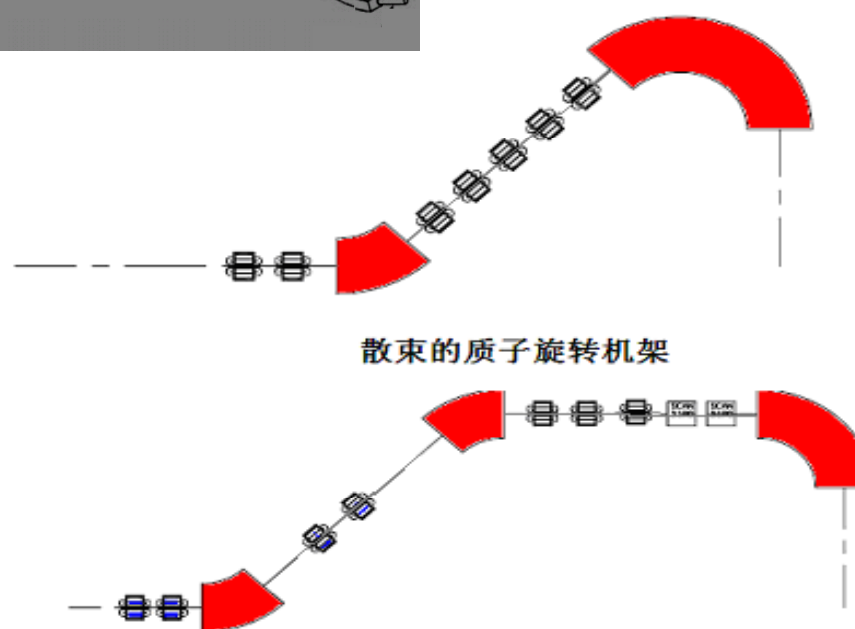
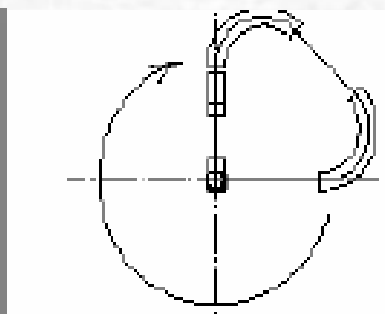
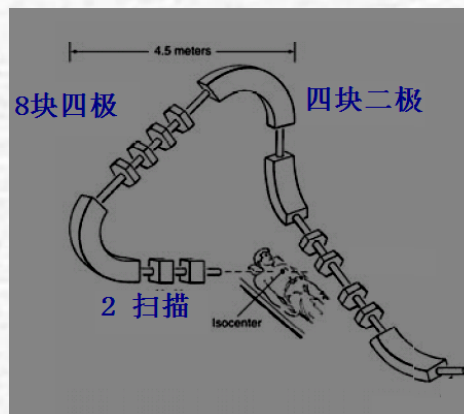


旋转机架(gantry)是现代强子治疗非常强调的设备，它可以为一个仰卧的病人在竖直平面内以任何角度照射视野提供可能，避免对病人进行倾斜定位，并方便进行多视野的治疗。

- 旋转机架是由一个由机械旋转机构来控制照射角度的装置，其核心部分是进行束流传输的偏转磁铁/聚焦磁铁和机械传动部分，也承载整个治疗头系统。鉴于其庞大的重量/体积和对控制精度的要求，它是一个很复杂的装置。
- 通常，不同的治疗头和束流条件采用不同的旋转机架设计方案，包括束流光学设计和机械结构设计。
- 鉴于它比水平/垂直固定束治疗有明显的优势，现在质子治疗中心基本都配备带有旋转机架的治疗室；而重离子旋转机架因为重量/体积过于庞大，仅有个别治疗装置考虑建设。

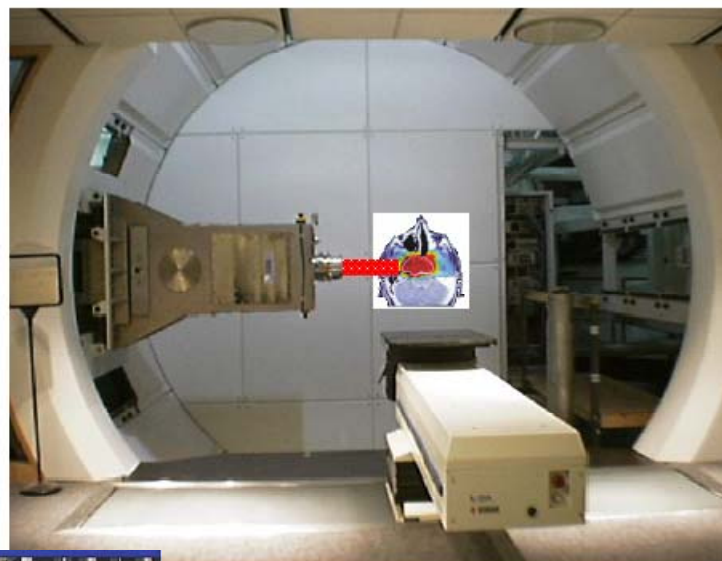
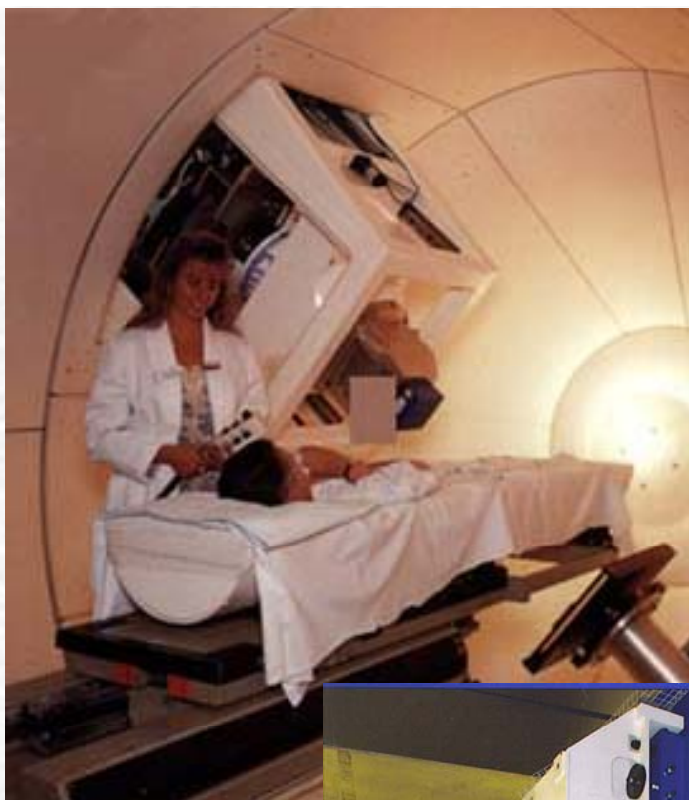
几个典型的旋转机架光学设计

- Loma Linda (Corkscrew type)
- IBA
- PSI Gantry-II
- PIMMS (Riesenrad)



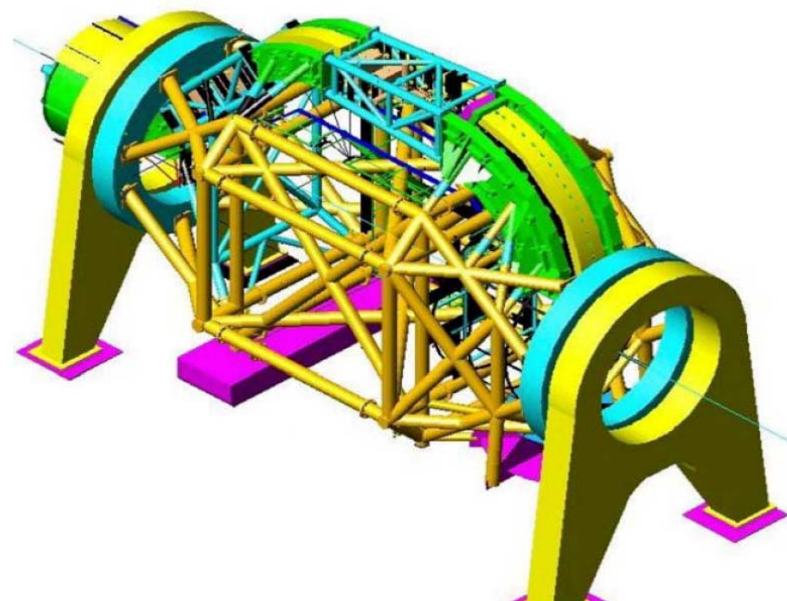
Riesenrad 旋转机架及其前置旋转器

IonBeamApplications Inc (IBA) Gantry



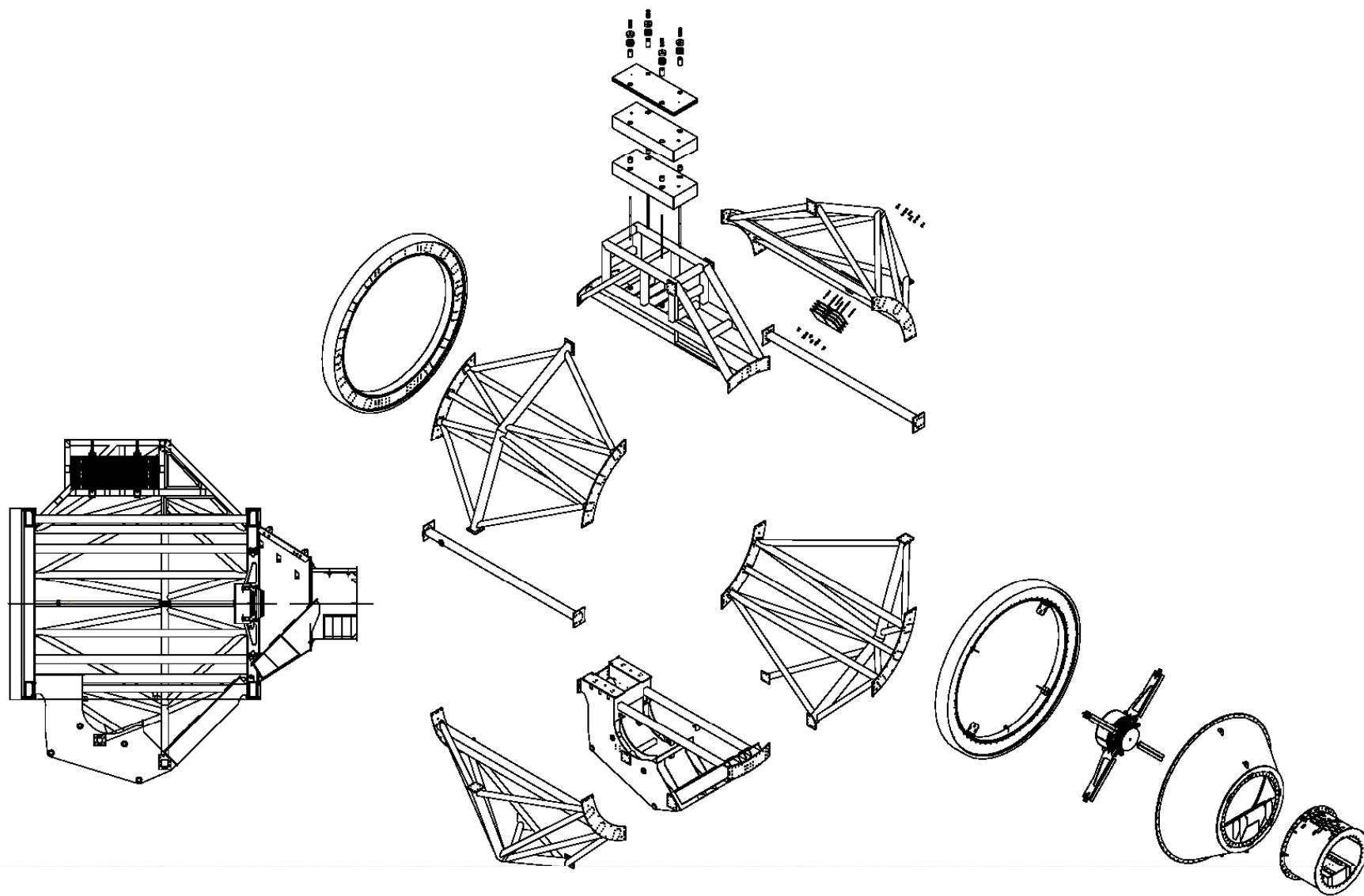
Loma Linda

PSI
Gantry-II



Heidelberg, H.I. 600t

旋转机架框架分解图





旋转机架的物理设计要求

- 束流光学性能应当与机架的旋转角度无关，即在等中心点处的束斑尺寸不随机架的旋转角度而改变；
- 束流传输应当是消色散的，即在等中心点处的位置不随平均动量改变、束斑尺寸不随动量分散改变；
- 全部偏转和聚焦磁元件的设计参数应当适应粒子束的全部能量范围。

旋转机架的工程设计要求

- 旋转角范围和定位精度；
- 旋转速度和旋转加速度；
- 刚性变形和温度变形；
- 可靠性和运行寿命；
- 等等。

§ 8 呼吸门控方法

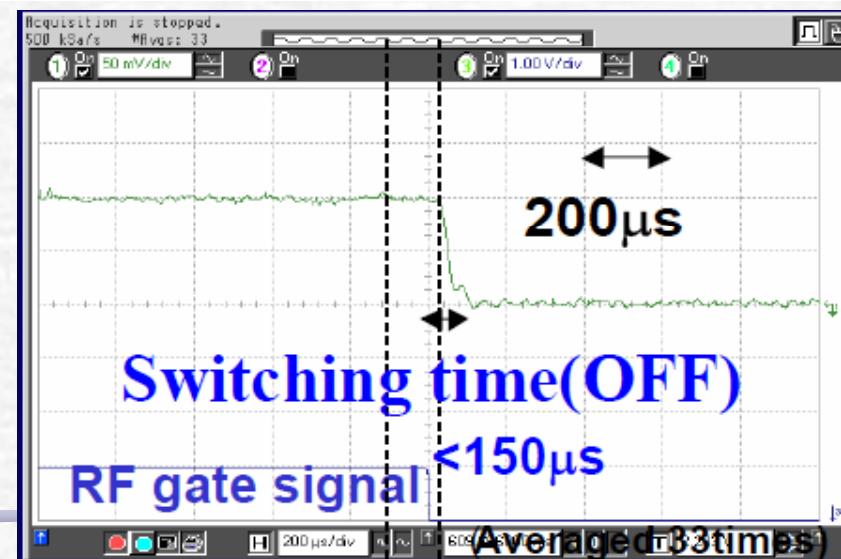
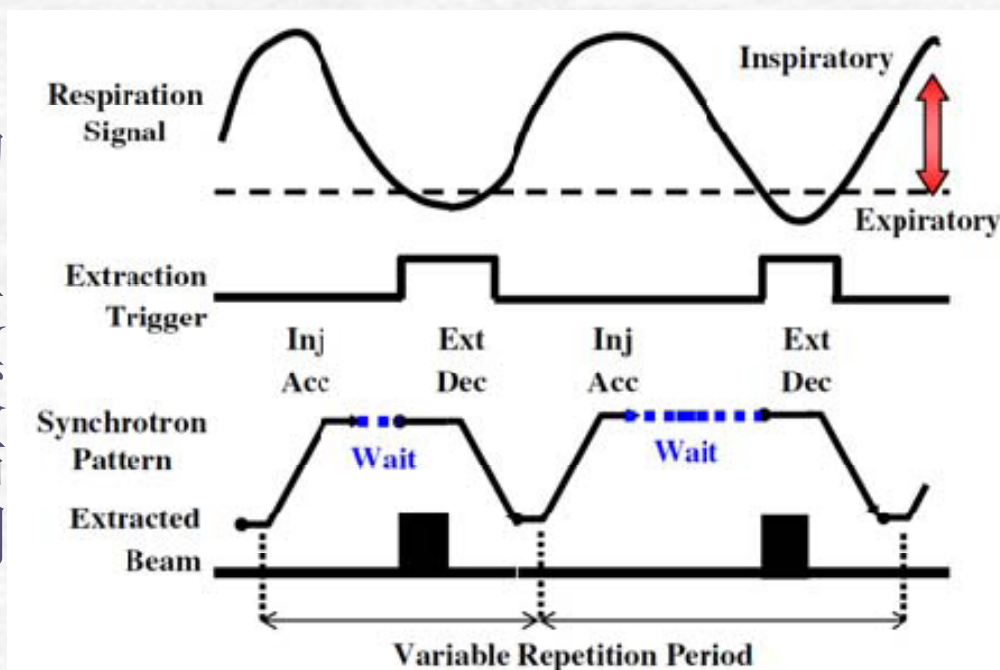


- 人是活动的，尤其是胸部和腹部器官由于呼吸和心跳始终是在运动状态，即使采取固定措施，还是不能保证包括肿瘤器官和周边器官不运动，如果处理不当，会造成严重的剂量不均匀。
 - 器官移动对笔束扫描方法的影响远大于对双散射法的影响，在扫描过程中器官的移动会造成剂量分布的严重不均匀性（热点和冷点），这也是到目前为止笔束扫描主要用于可固定器官肿瘤治疗的原因。
 - 新技术的发展有望解决这一问题。
- 目前解决器官运动的主要措施有：
 - 憋气方法：最简单的方法，需要对病人进行训练，不够可靠
 - 呼吸门控方法：监测病人身上靶标的运动以启停束流照射
 - 重复扫描方法：通过多次的重复扫描减小器官运动带来的剂量误差（对扫描磁铁的要求比较高）
 - 扫描点跟踪方法：即在器官运动时，扫描点也随之进行位置调整，可以不停束治疗（难度较大，尚待开发）



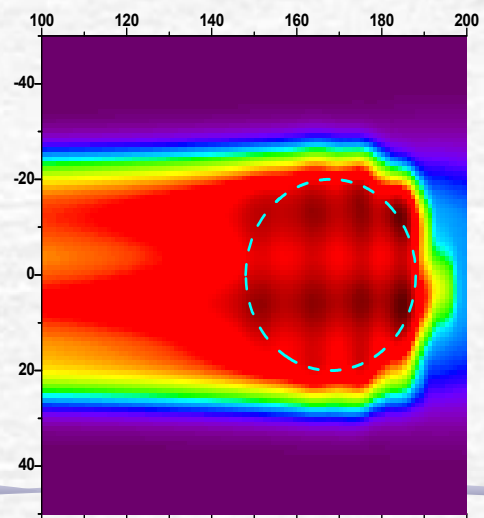
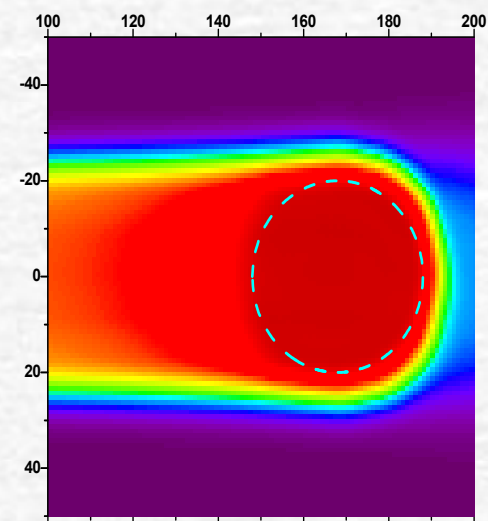
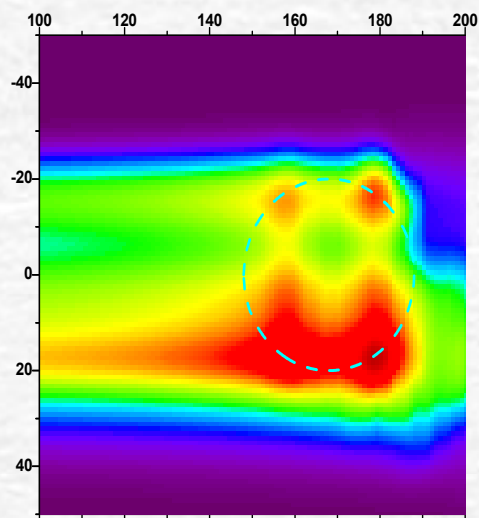
呼吸门控方法

- 在吸气时进行治疗，人的呼吸周期为2~4秒，且不一定有很强的规律，在运动的顶部或底部变化率较小，可以进行治疗。由贴在病人身体上的靶标控制治疗过程。
- 如果是回旋加速器，则在运输线上进行停束处理。
- 如果是慢同步加速器，则可以控制束流的引出过程（特别是采用RFKO方法，甚至可在扫描点之间停束）





重复扫描方法

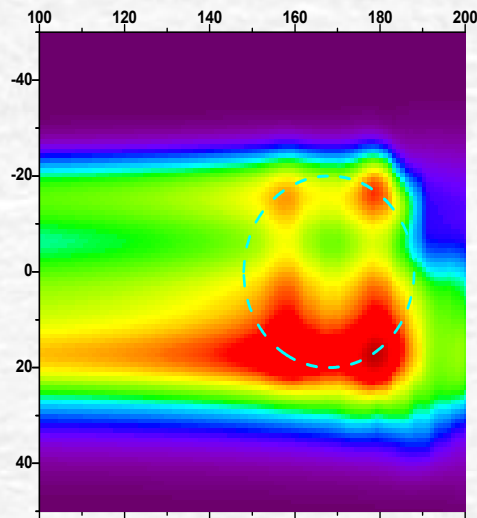


重复扫描方法 (NIRS)

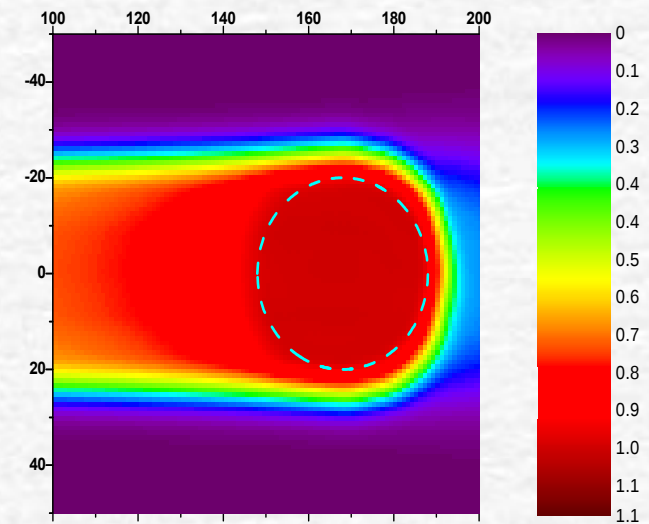
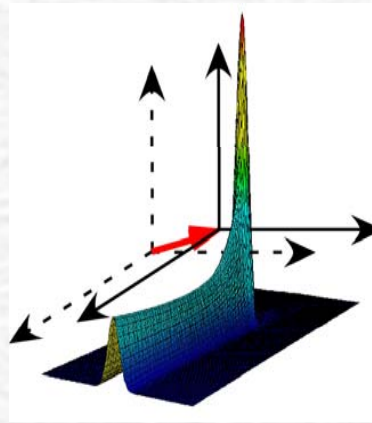
- 非常快的扫描磁铁，快速剂量测量



Simulation of moving tumor irradiation



Non-gating

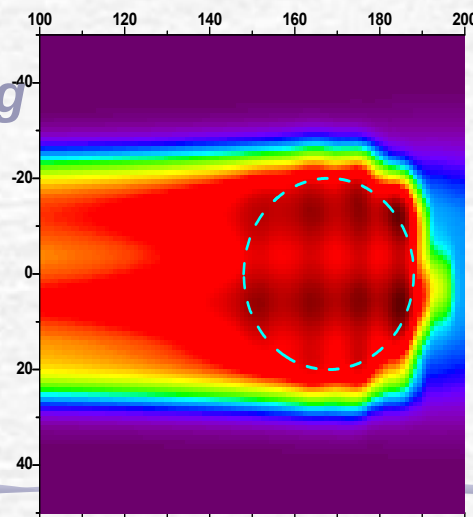
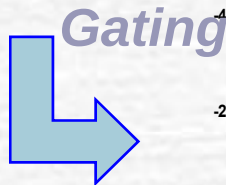


*Gating
with rescanning
(8 times)*

Example:
Φ40mm
spherical
target

$$s(t) = 1.7 - 31.3 \cdot \cos^4(\pi t / 3, 2s - \phi)$$

Motion: 7mm in gate



In order to avoid hot/cold spot due to target motion, we decided to employ “gating method” with rescanning.



谢谢!