

加速器、重离子束及其应用

加速器—重离子束的产生

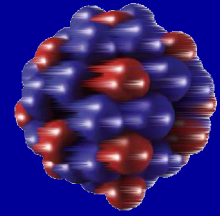
重离子束惯性约束聚变

重离子束治癌

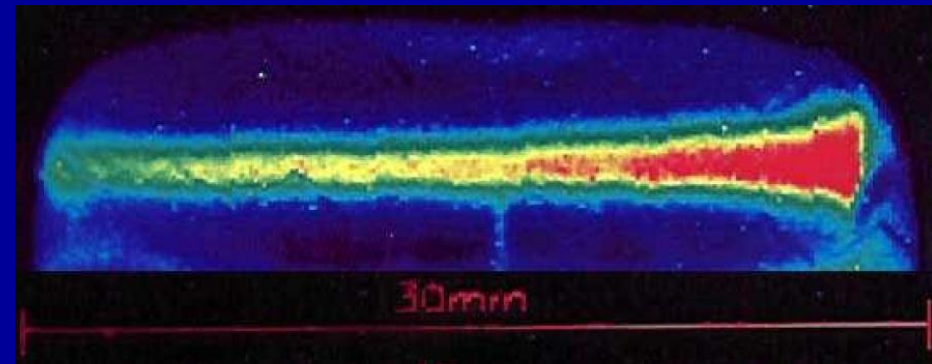
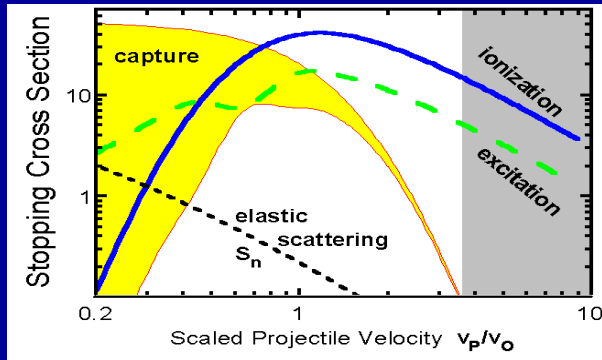
重离子束诱变育种

重离子束特殊功能材料制备

重离子及重离子束



- 重离子—比 α 粒子重的离子，
- 重离子束—连续的，或脉冲的重离子流，包含的离子数可多可少，最多可达 $10^{15}/s$ 以上；束流的斑点一般很小(mm)，微束直径<微米；能量范围很宽 keV($\sim 1m/\mu s$)—GeV/u(\sim 光速)；
- 在物质中穿行时，产生电离，与原子核反应，瞬时沉积大量能量；



加速器—重离子束的产生

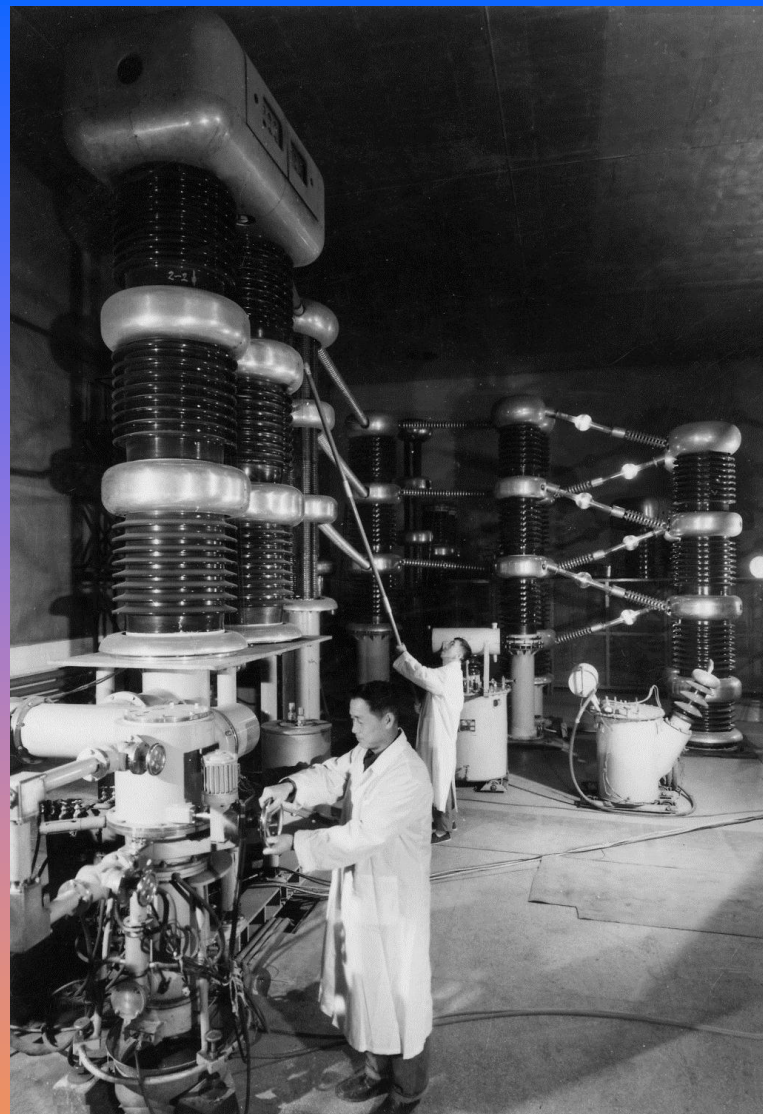
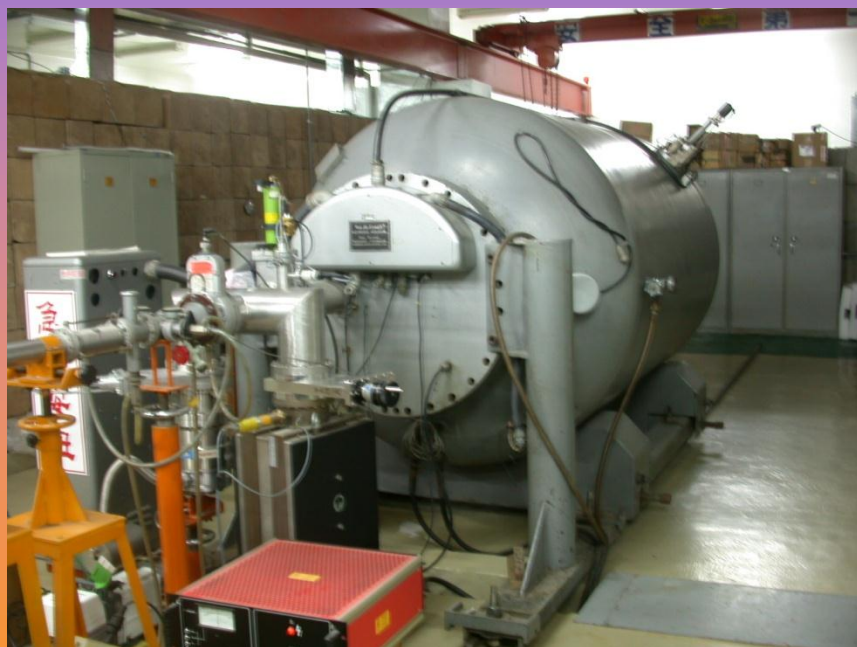
- 重离子束产生装置——重离子加速器，重离子在电场中获得能量装置；
- 重离子加速器类型：
 - 静电加速器—串列静电加速器，低能
 - 感应加速器——低能
 - 直线加速器——低、中能
 - 回旋加速器——低、中能
 - 同步加速器——到很高能量



加速器原理：带电离子在电场中获得能量，磁场可用来控制其方向。

高压倍加器

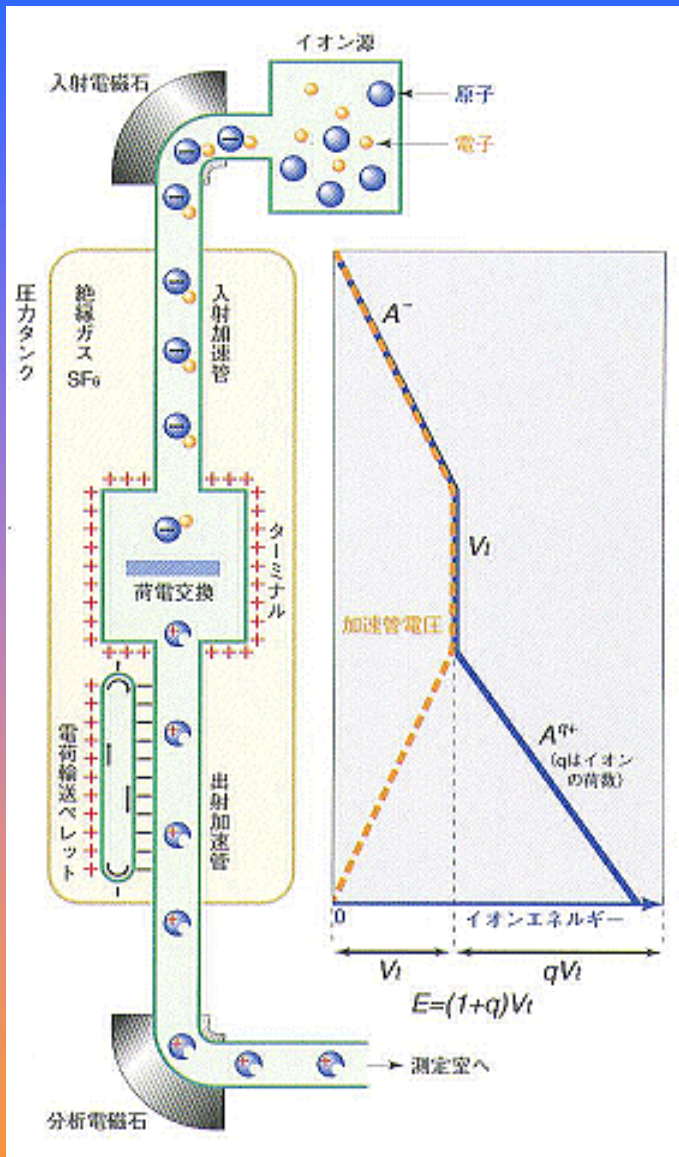
属于静电加速器，用倍压的方法产生高电压，用来加速粒子。一般只加速轻粒子，质子，氘等。



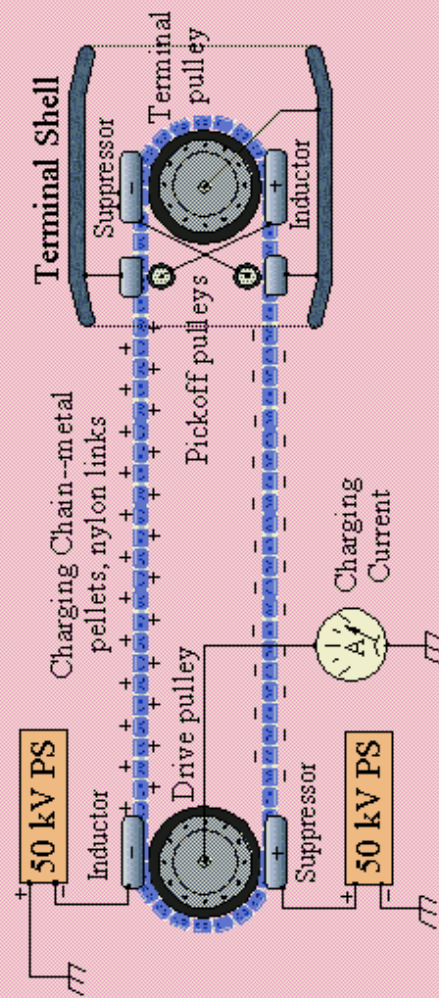
60年代的600kV高压倍加器



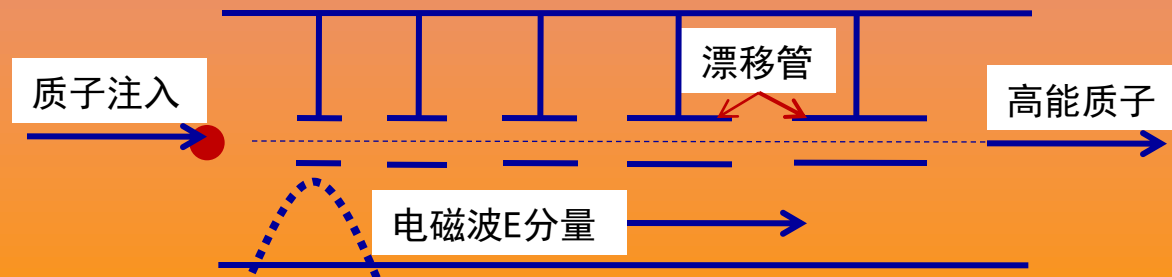
串列加速器



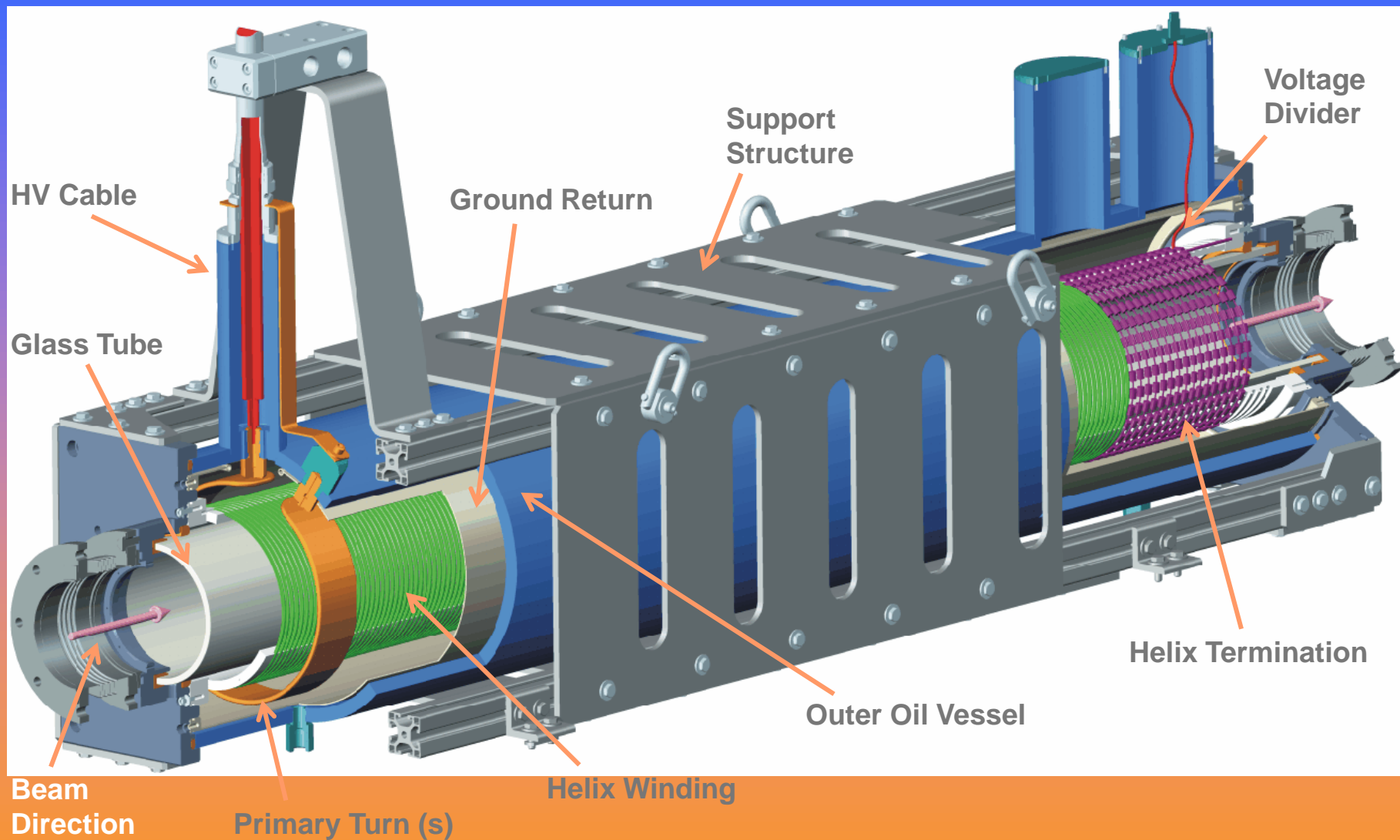
Pelletron Charging System
(Positive configuration shown)



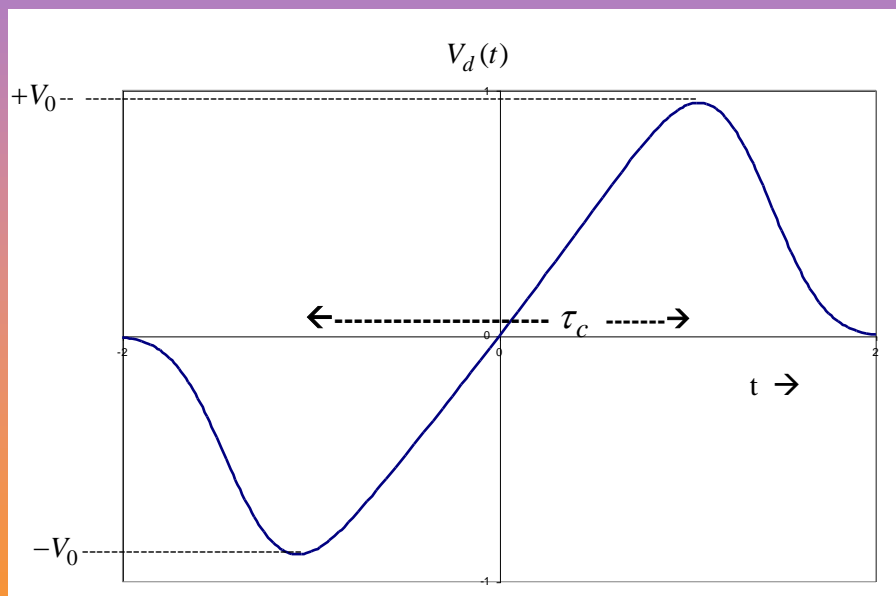
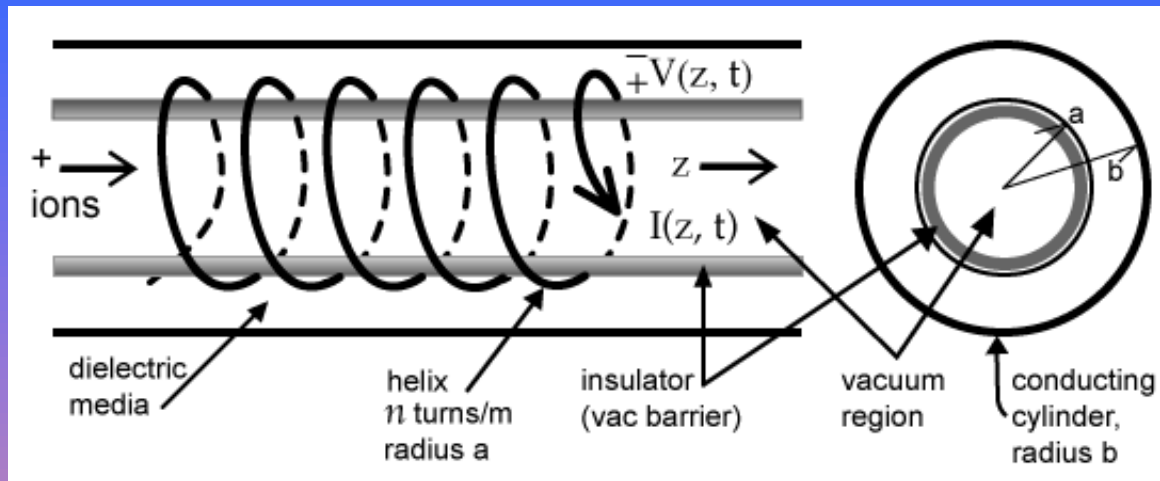
直线加速器—强流



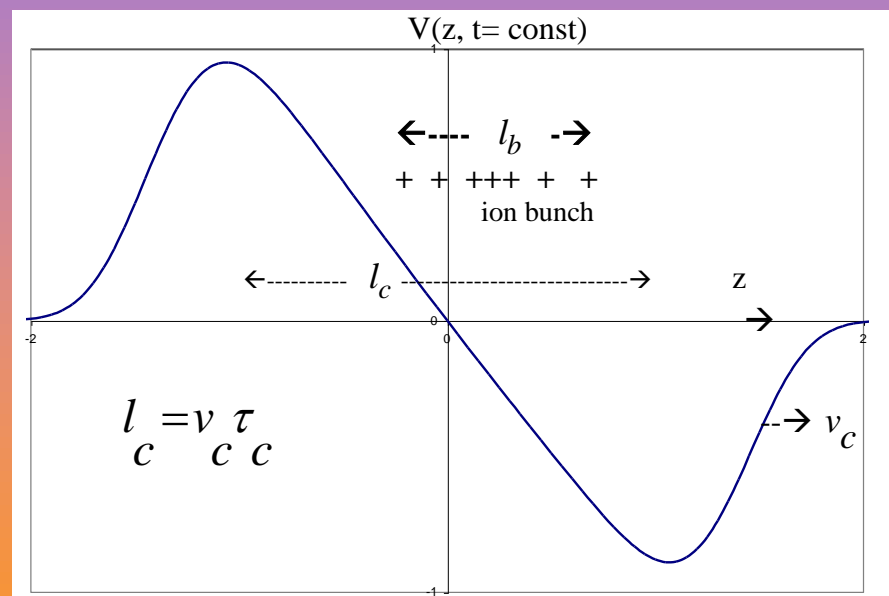
感应加速器的结构示意图



感应加速器的原理



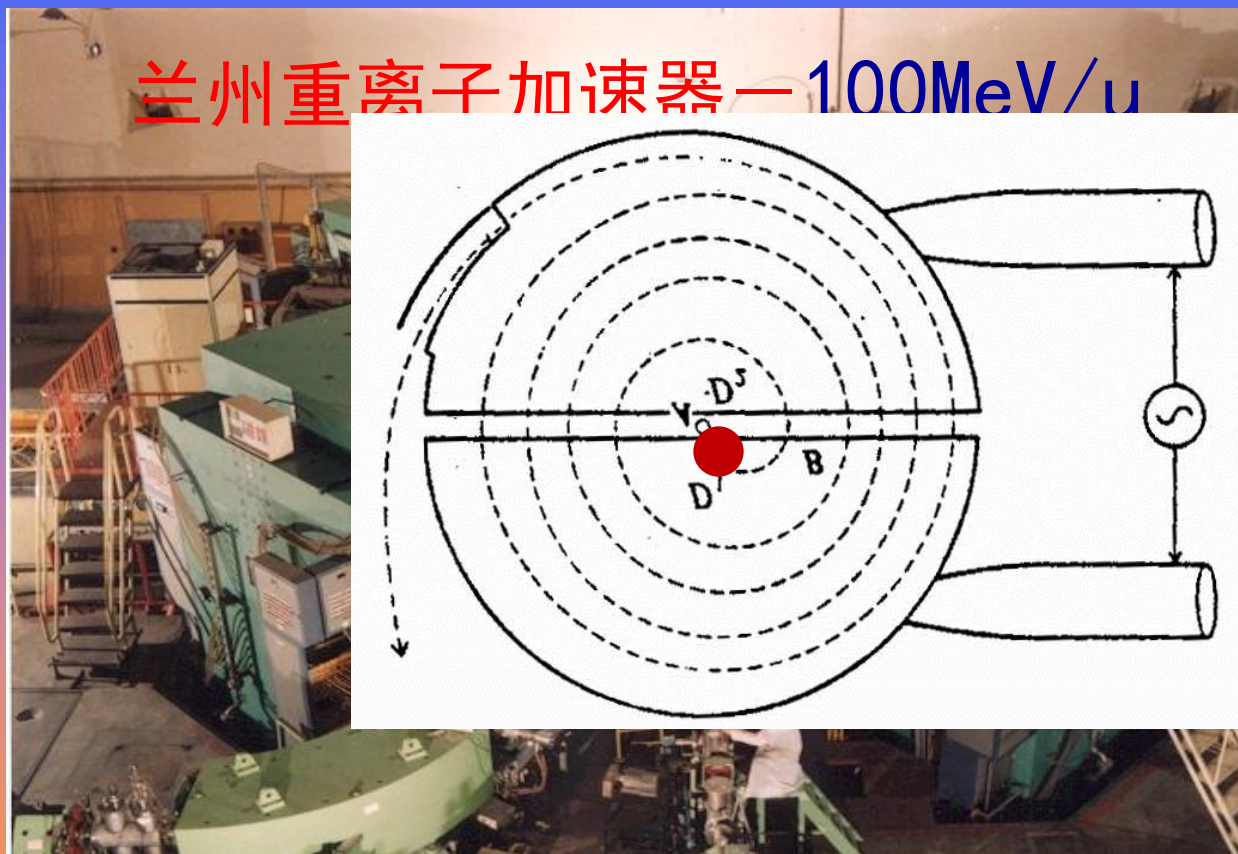
加到初级线圈上驱动电压 $V_d(t)$



感应电压传播 $V(z, t=\text{constant})$

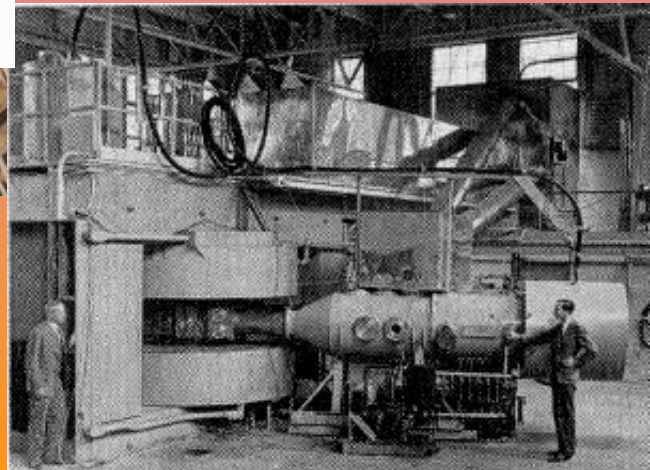
回旋加速器

回旋加速器
原理图



世界第一台
回旋加速器

分常规磁铁和超导磁铁两种



固定场变梯度加速器 (FFGA) (Fixed Field Alternating Gradient)

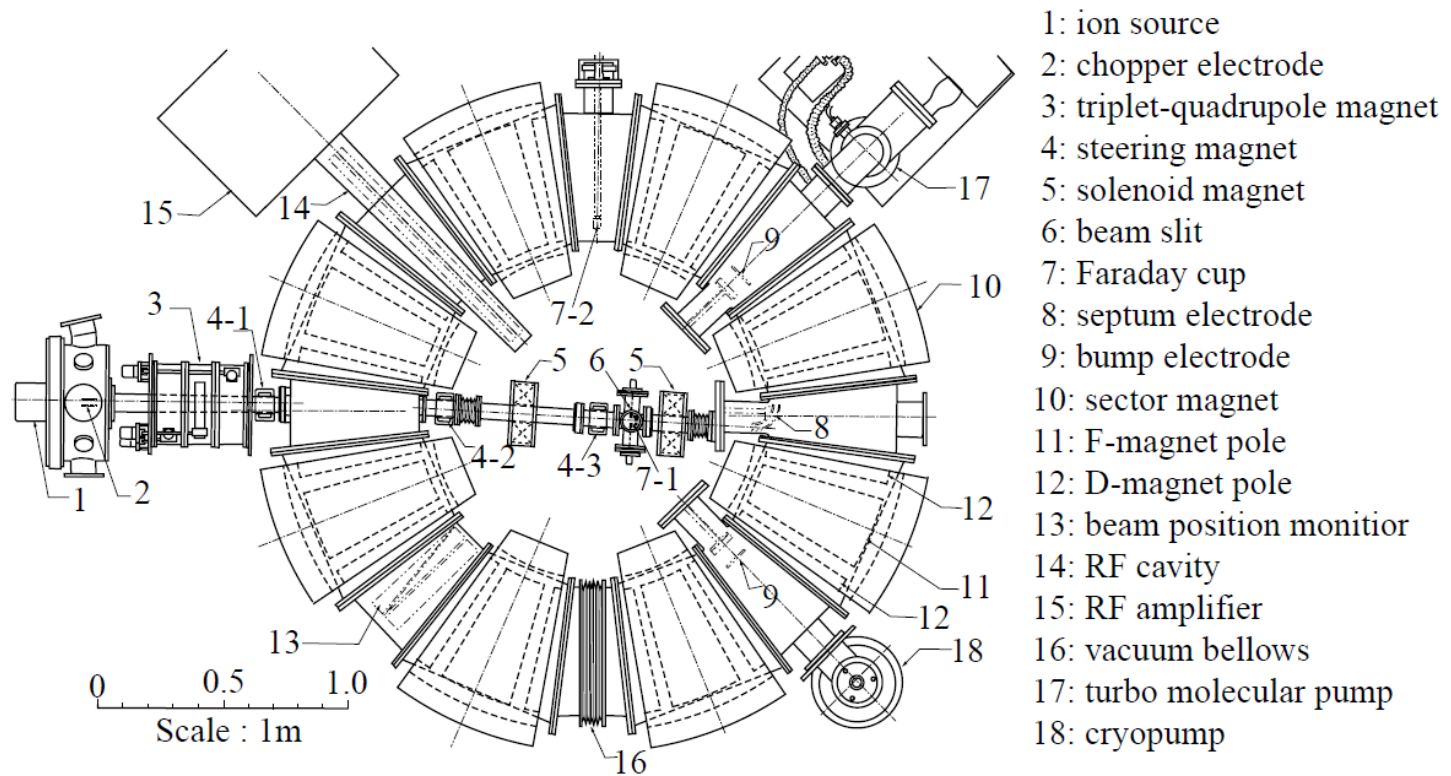
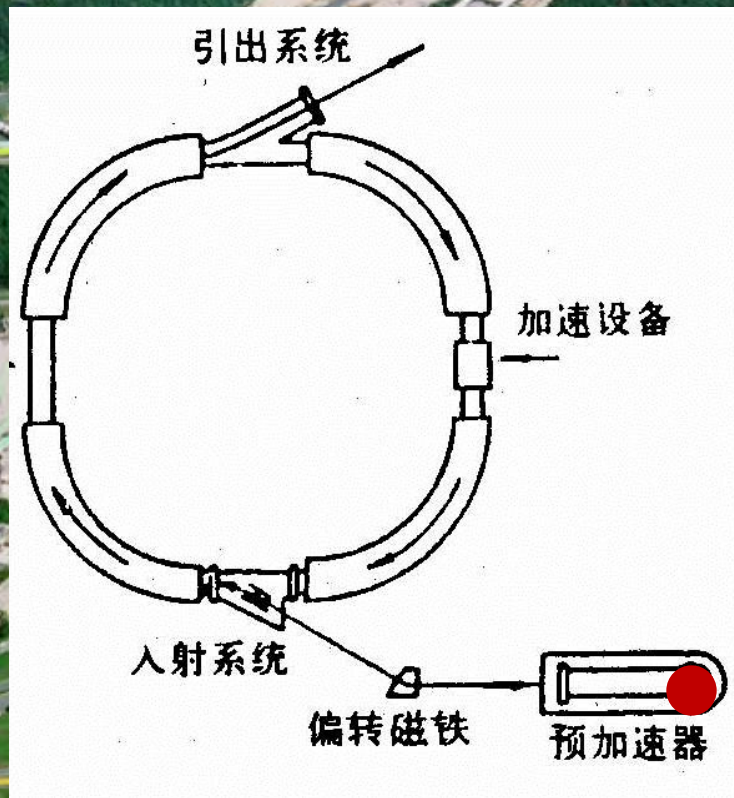
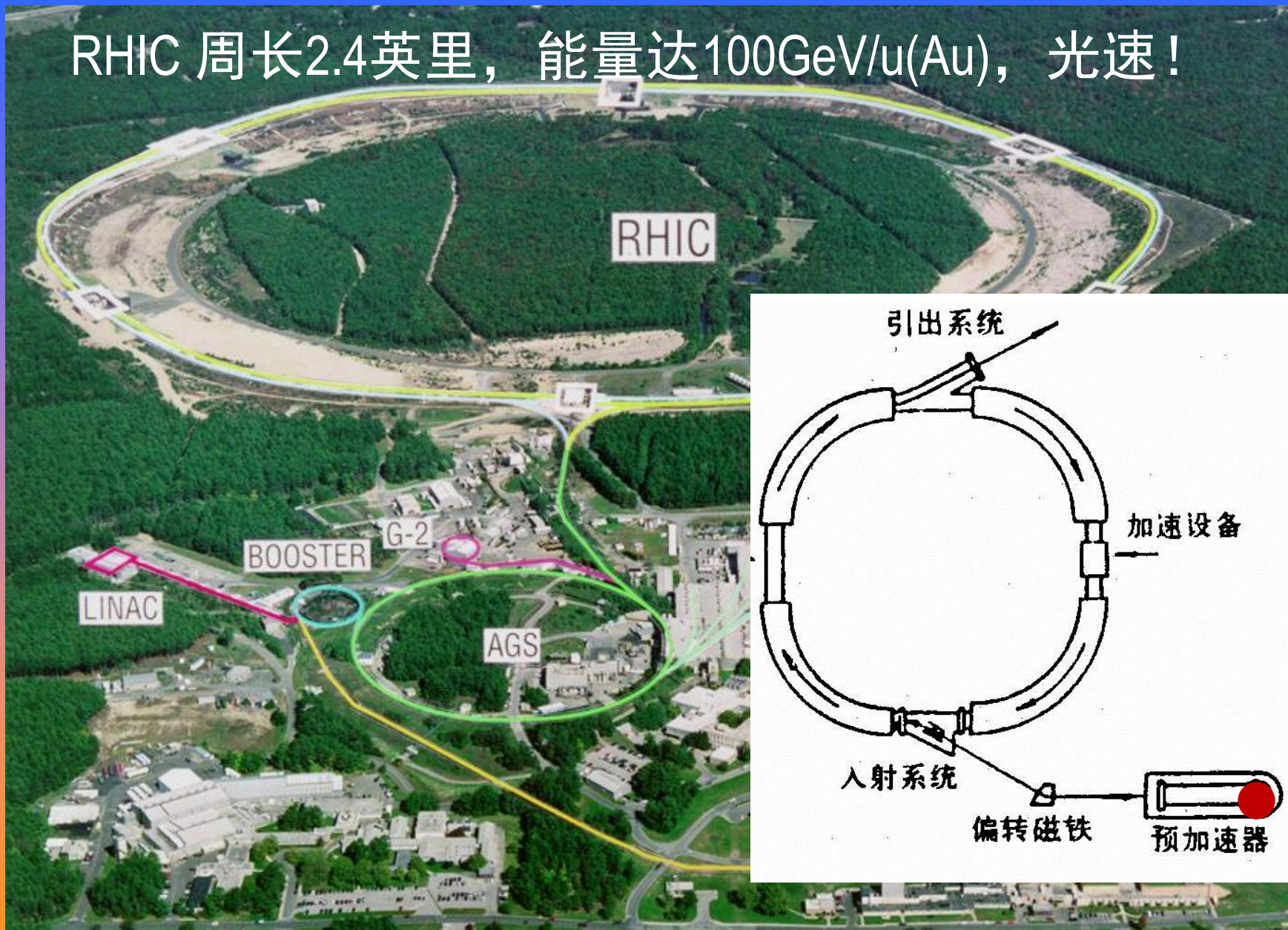


Figure 1: Top view of POP FFGA

同步加速器

RHIC 周长2.4英里，能量达100GeV/u(Au)，光速！

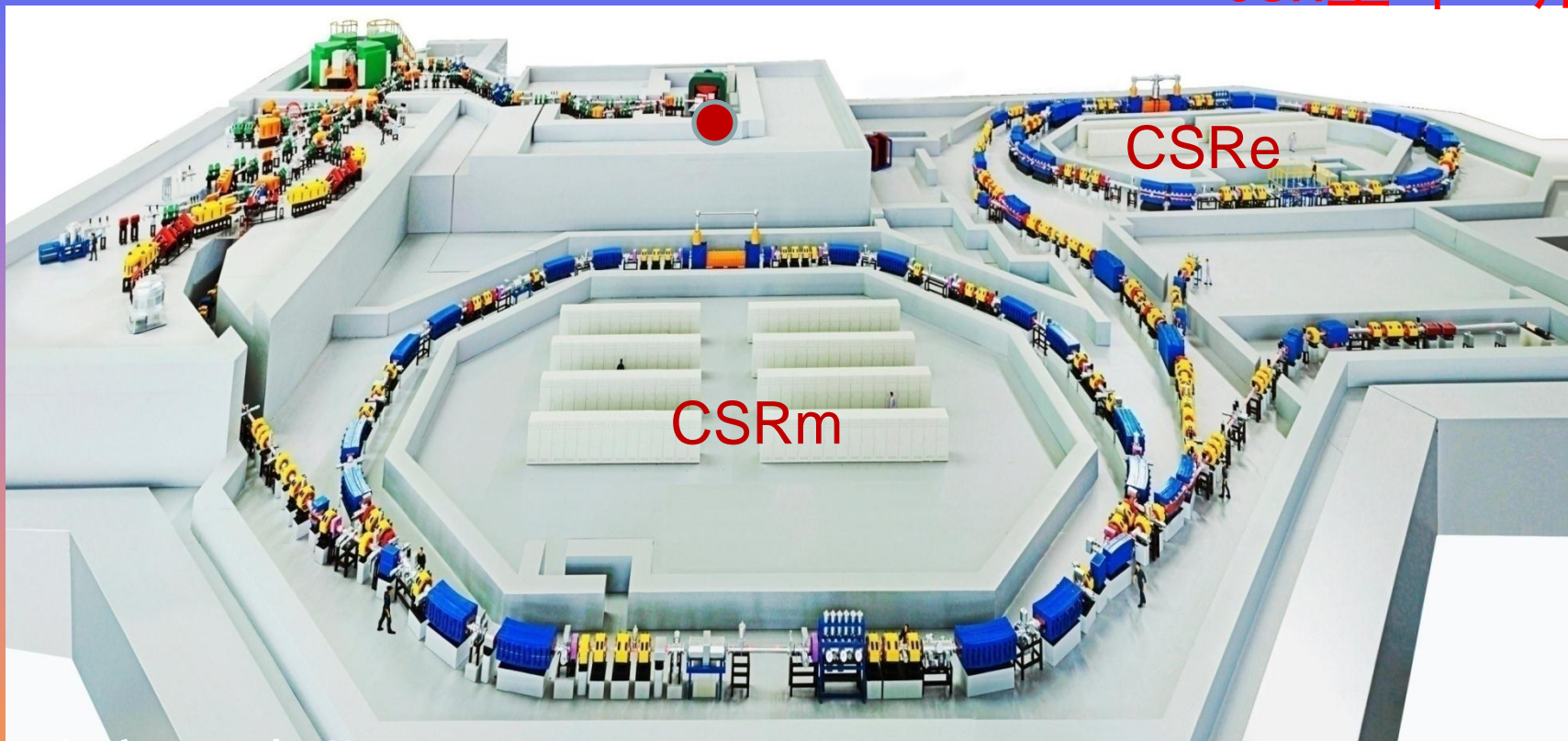


重离子冷却存储环—CSR

自主设计和建造；核物理，
强子物理，原子物理



CSR主环一角



加速离子种类： p, C-U

束流能量 (MeV/u)： (p) 2800, ($^{12}\text{C}^{6+}$) 1100, ($^{238}\text{U}^{72+}$) 520

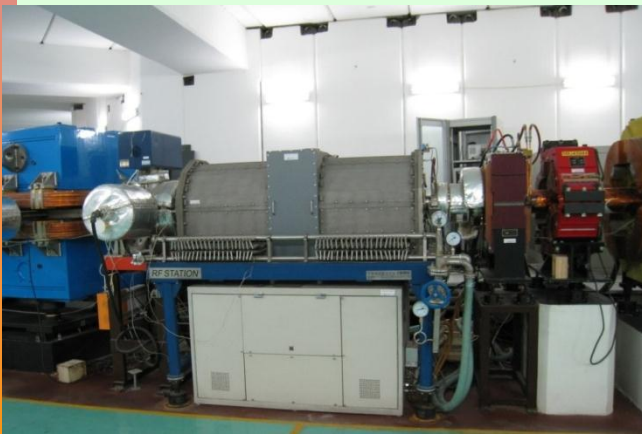
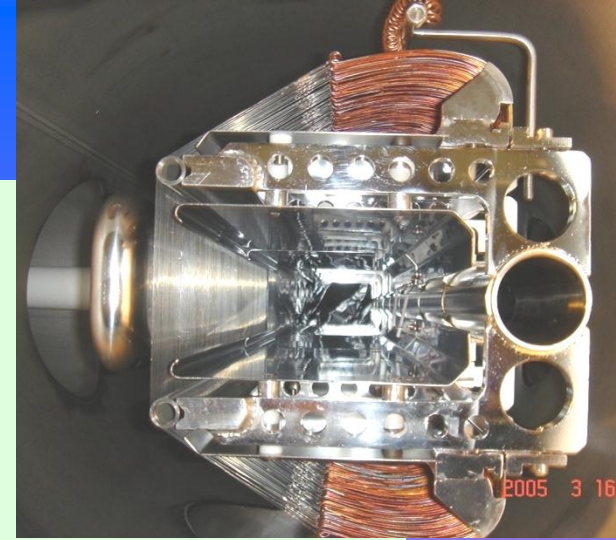
接近光速

加速器所涉及的技术

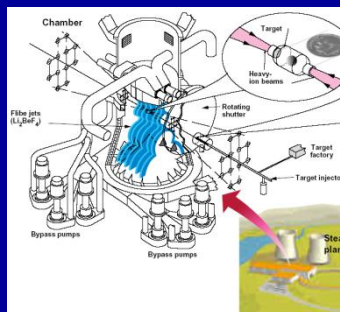
- 高电压——MV；
- 高频——MHz，百kW；
- 固定和交变磁场——kG；
- 真空技术—— 10^{-12} mb；
- 电源——kA，稳定度 10^{-4} — 10^{-5} ；
- 自动控制——上万参数，高精度；
- 离子源——强流，高电荷态；
- 辐射防护——多种辐射同时存在；
- 离子冷却——强流电子束（A, 几百kV）

- 机械

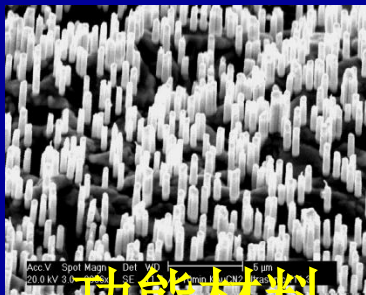
- 水、风、电（MW）



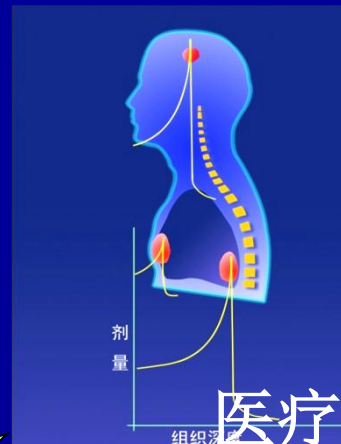
重离子束的应用



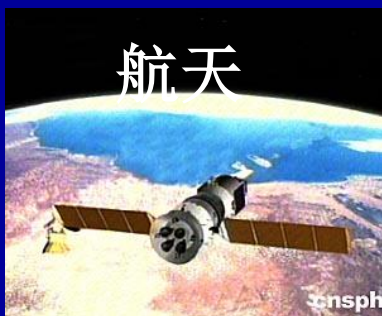
能源



功能材料



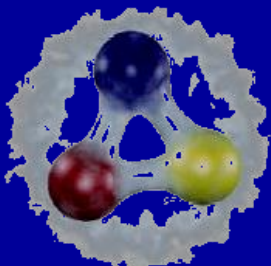
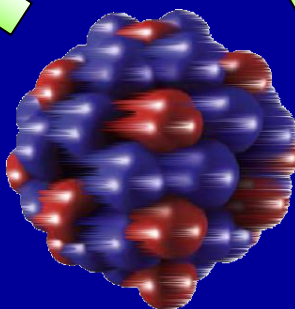
医疗



航天



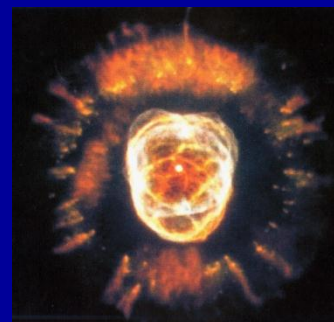
生物诱变



粒子物理



核学科

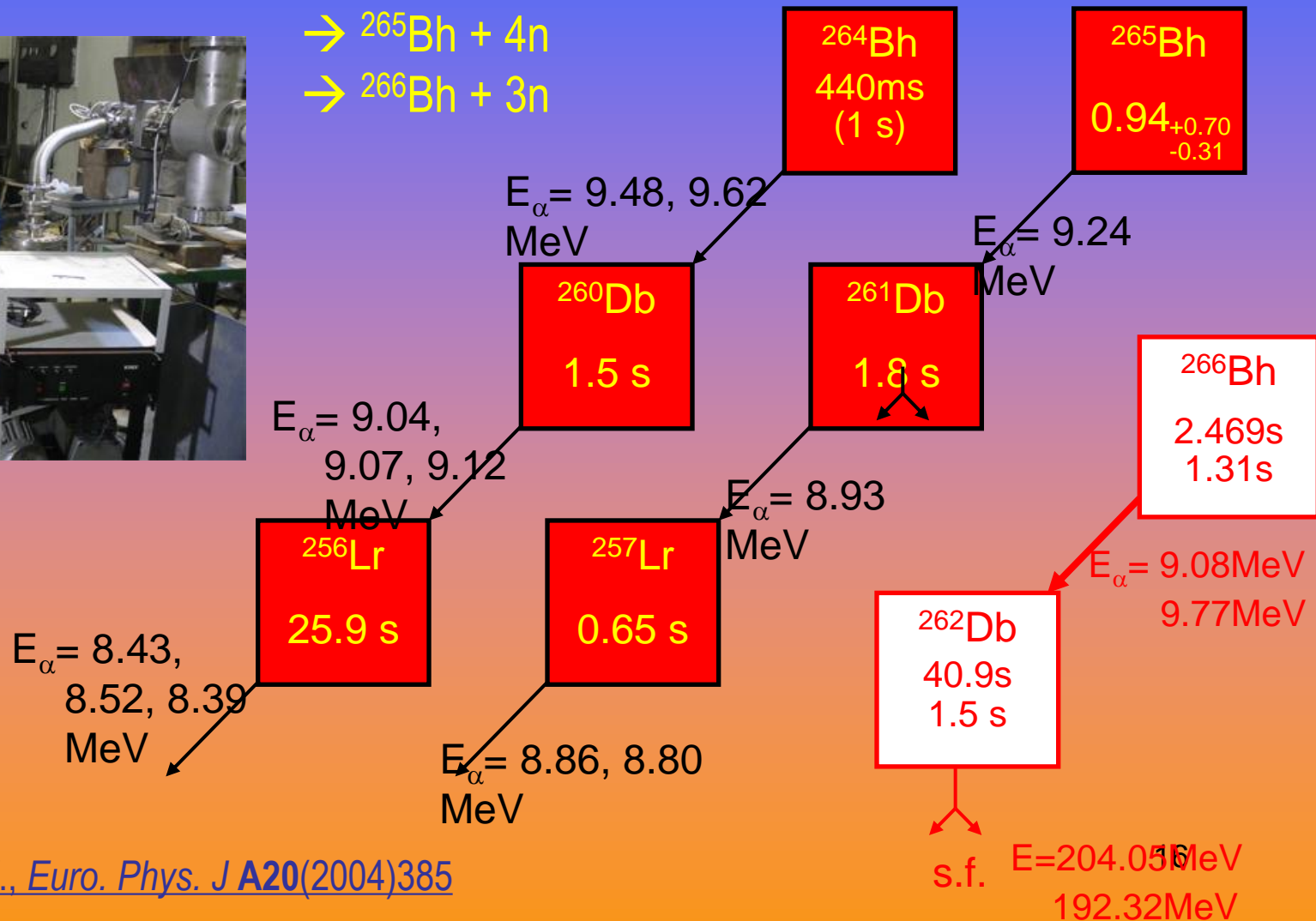
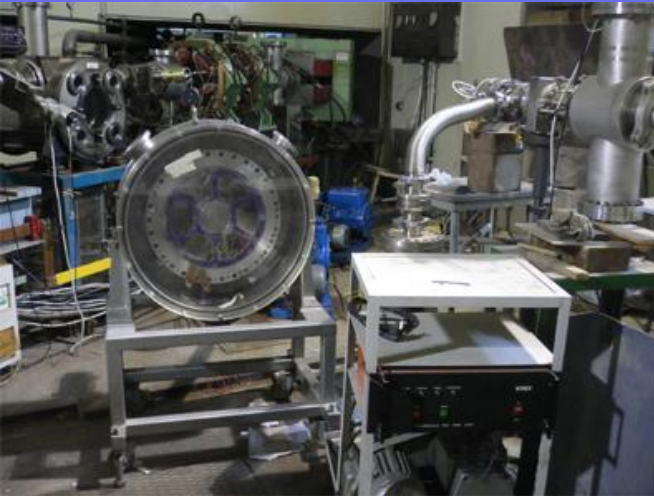
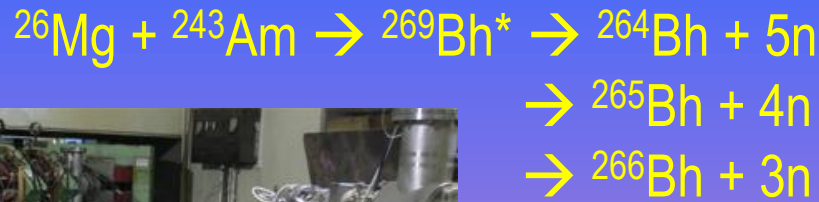


恒星演化

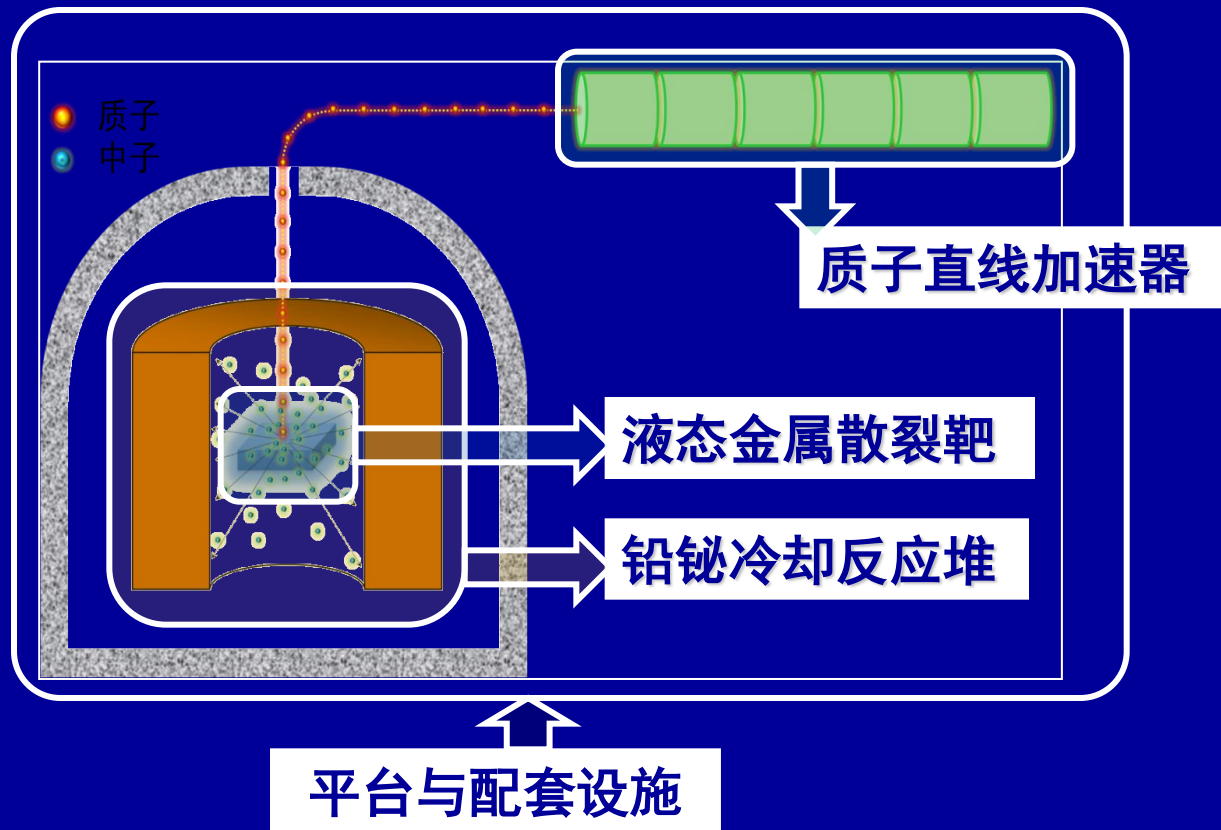
加速器产生于核物理的需要，反过来又促进核物理飞发展

	1932-1940年——	1955年——	1980年——	1990年——
加速器	开创轻粒子加速器	增加能量；开创重离子加速器	中能重离子及相对论重离子加速器	进一步增加能量 (GeV-TeV/u)
核物理实验	核结构研究及核结构模型的提出	超铀核合成	远离 β 稳定线核合成；放射性束物理；核子结构；	极端条件下的核物理 (同位旋，自旋，激发能，质量)，夸克—胶子等离子体
	裂变现象的发现及应用	开始超 (铀) 重元素合成	热核物质性质 (状态方程)，超重元素105—118合成	
	人工合成放射性核素	新反应机制 (深部非弹，大质量转移) 高自旋	超形变核 (预言核形状的多样性) 奇异核结构—晕结构，	新的衰变模式

107号同位素^{264,265,266}Bh的合成



承担单位：近物所、高能所、等离子体所



- 直线加速器：突破强流超导质子直线加速器低能段关键技术 (<10 MeV)
- 散裂靶：突破适用于ADS的液态金属散裂靶关键技术(直流束、MW)
- 先进核能材料：研制出适用于4代裂变堆尤其是ADS的结构材料
- ADS仿真平台：建立ADS专用数据库与设计仿真平台

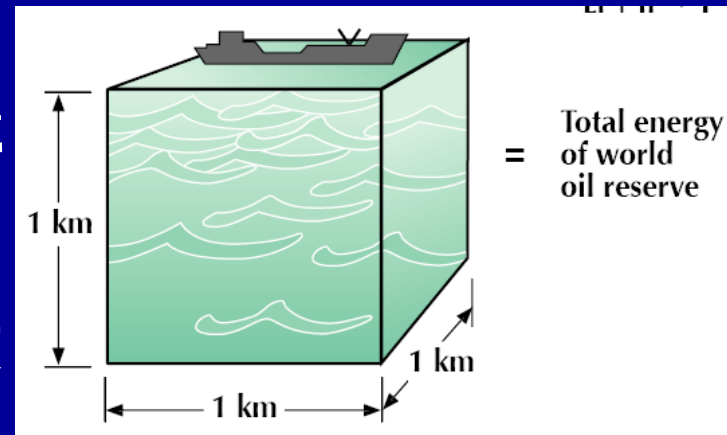
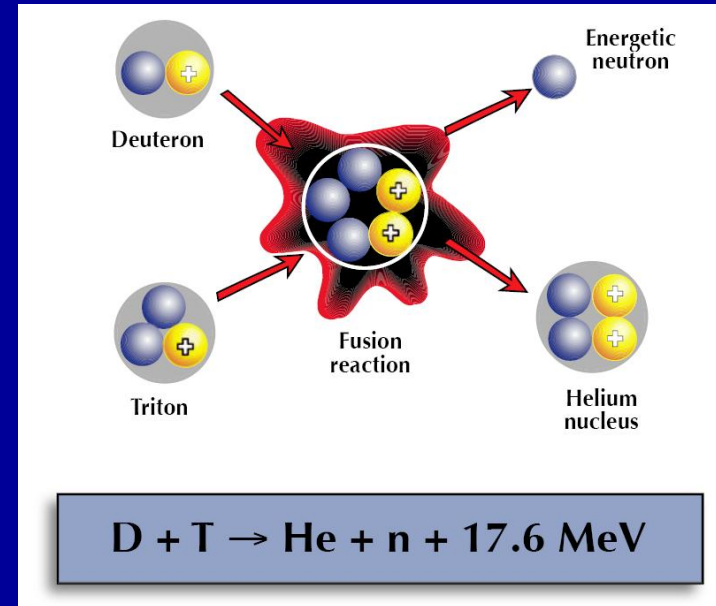
重离子束惯性约束聚变

解决能源的根本途径

——可控核聚变能

聚变能的先进性

- 新的大量的能源；
 $3.4 \times 10^{11} \text{ J/g} \Rightarrow 10$ 吨煤
- 燃料充足；0.03g/l海水，43万亿吨氘；
- 安全性高：任何事故都会自动停运；
- 不排放导致酸雨或温室效应的大气污染物；



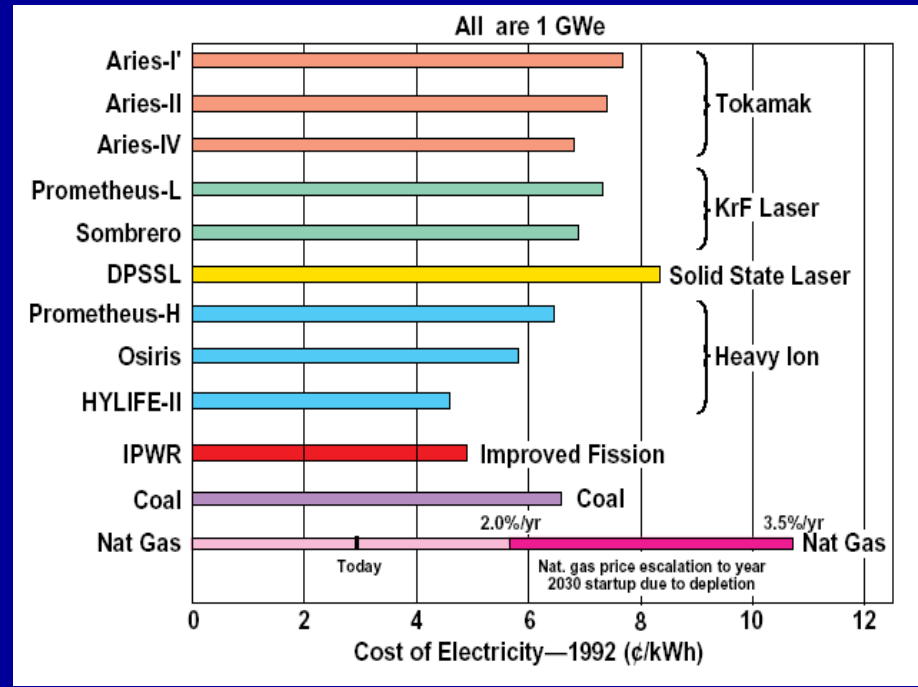
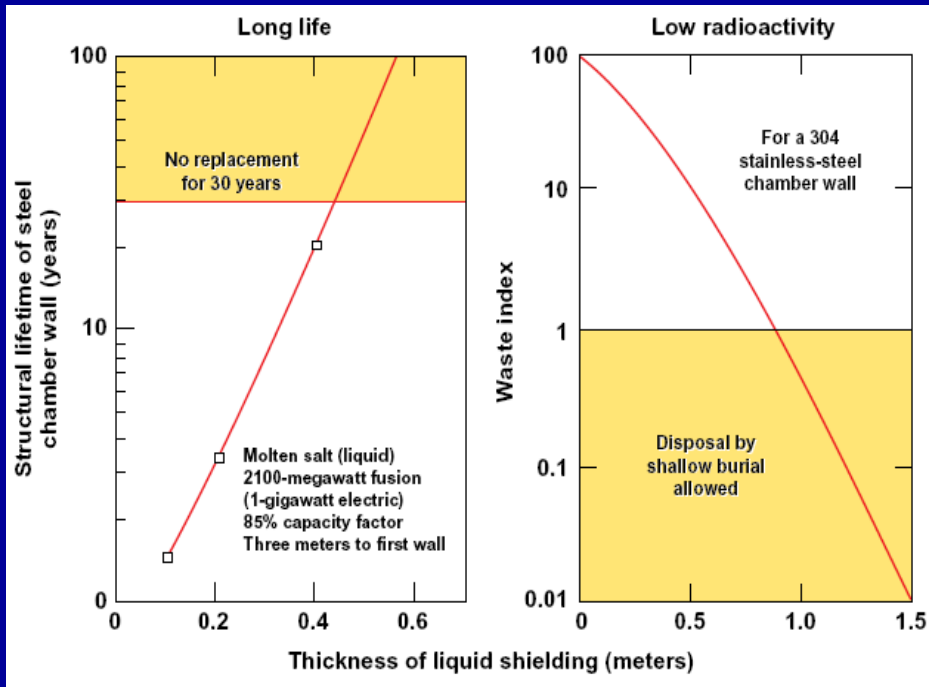
重离子束的特点

- 高能量的载体— $\text{MeV/n} \rightarrow \text{GeV/n}$;
- 脉冲窄，可调性好—几纳秒 \rightarrow 几十纳秒;
- 重复频率高(10Hz)，重复性好— 10^{-4}
- 整体转换效率高—电能 \rightarrow 离子能量(感应加速)

|||  可以用于惯性约束聚变!



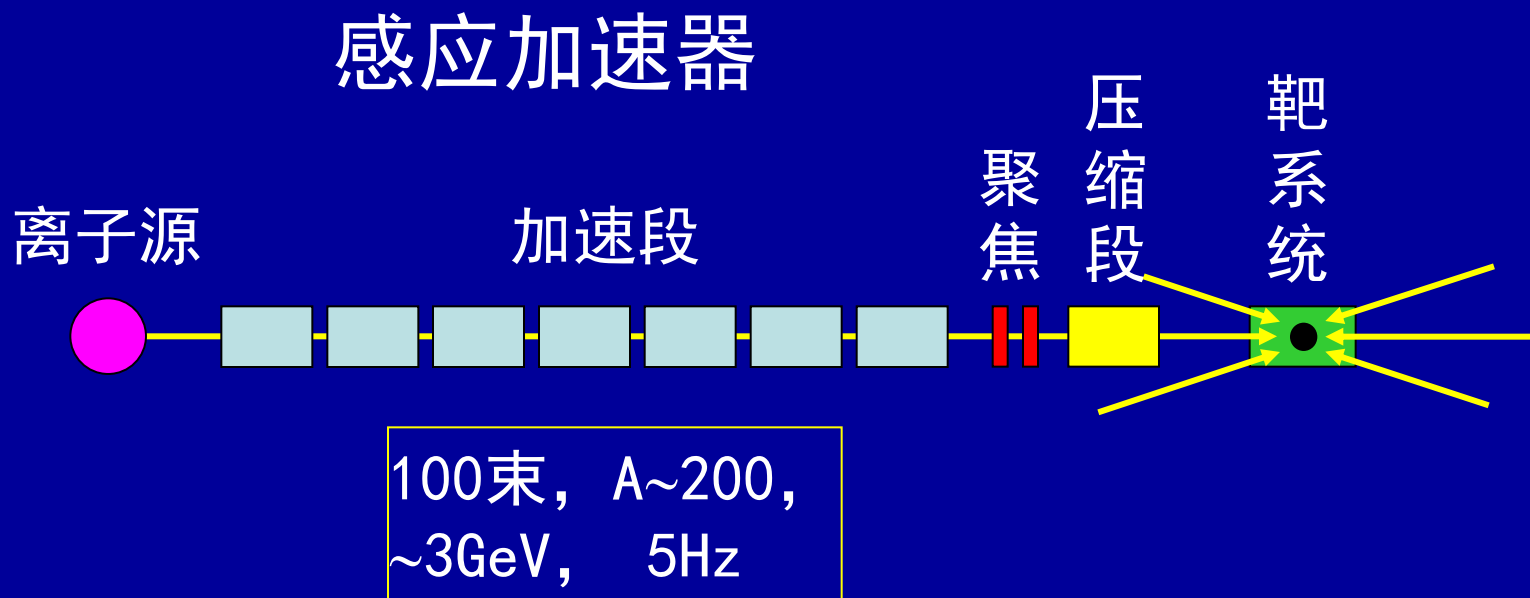
环境和经济性能的考虑



液态防护层厚度对反应室第一壁材料结构寿命及废物指标的关系

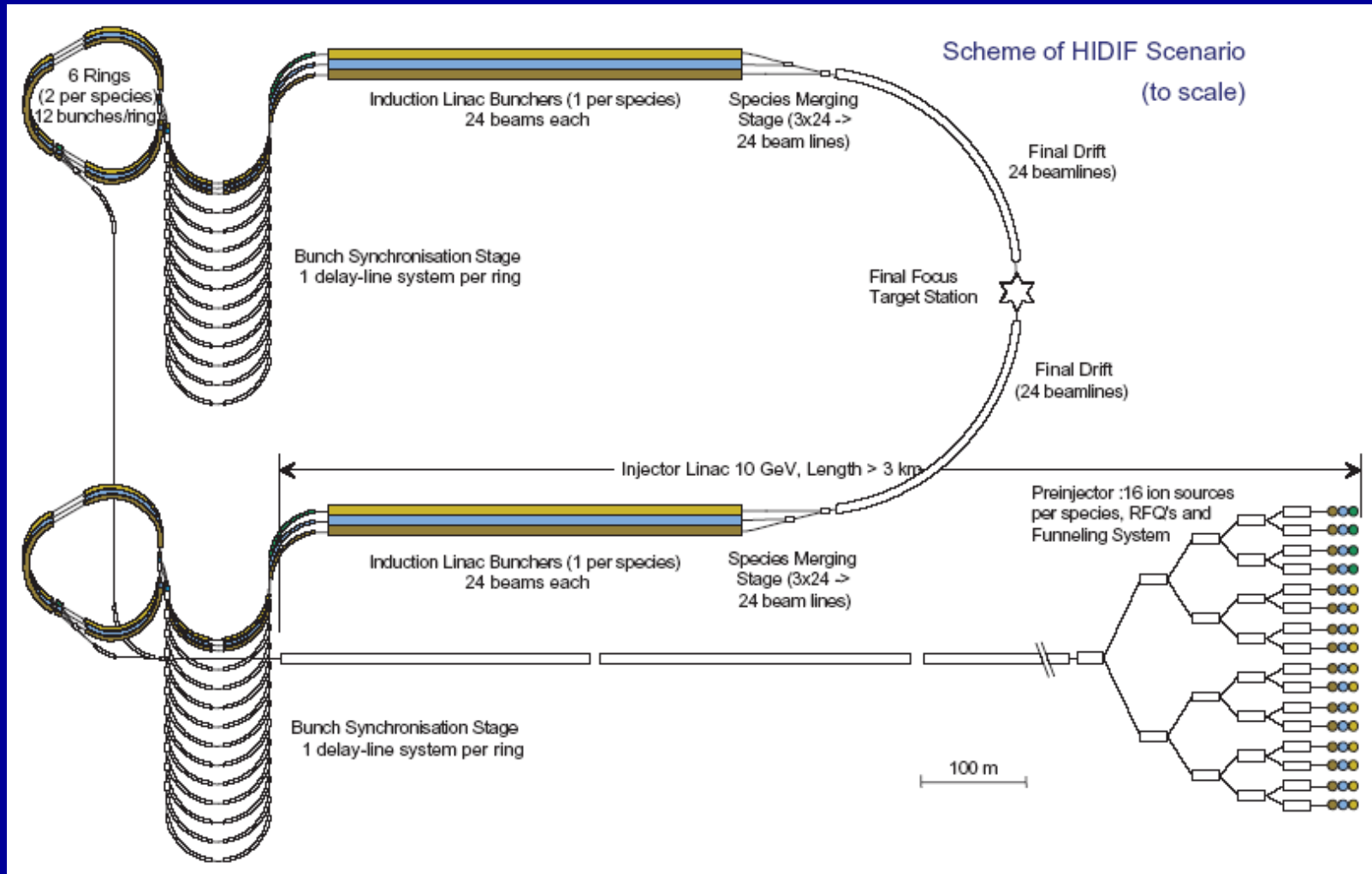
聚变能的成本

重离子驱动惯性约束聚变模式2



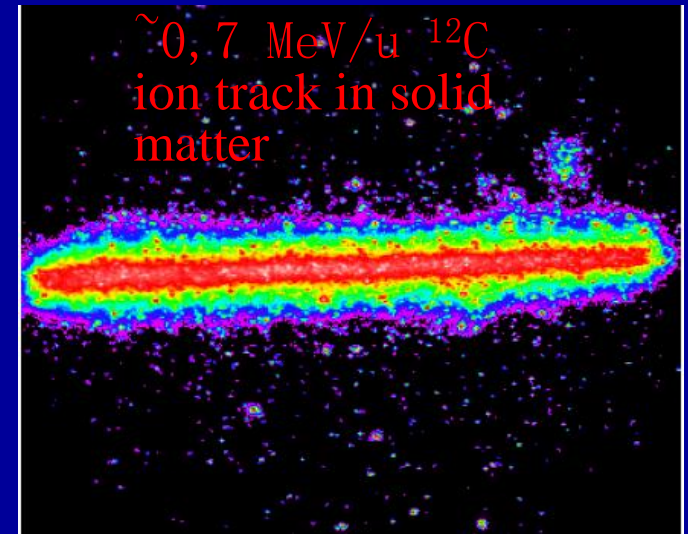
可用重离子存储环代替！

重离子驱动惯性约束聚变模式



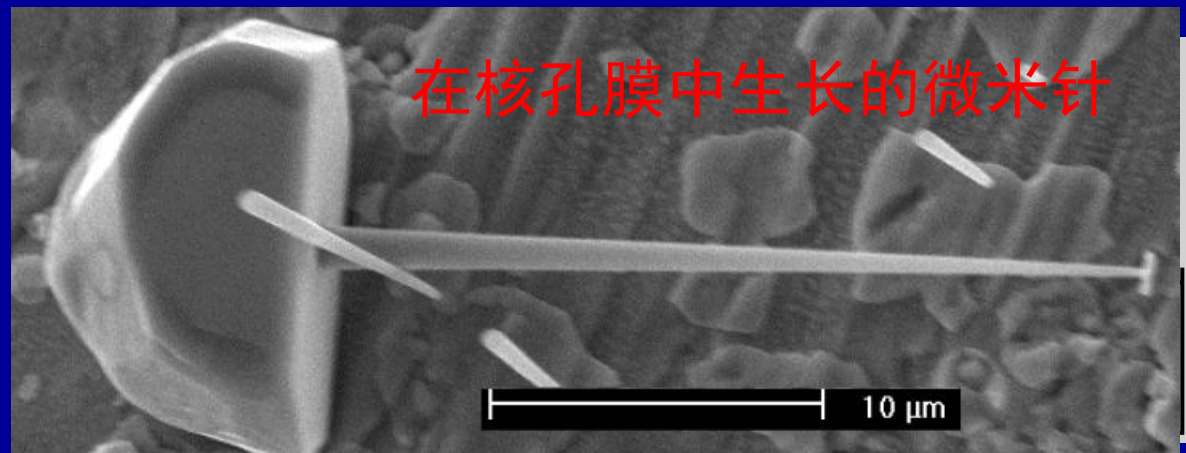
重离子束在材料方面的应用

当离子穿过物质时，在极短的时间内损失大量能量，在其路径上形成高压、高温的环境，使其路径上的物质分子组成受到破坏，并重新组合；



- 核微孔膜

DNA分析，血液过滤，纳米线生长；等



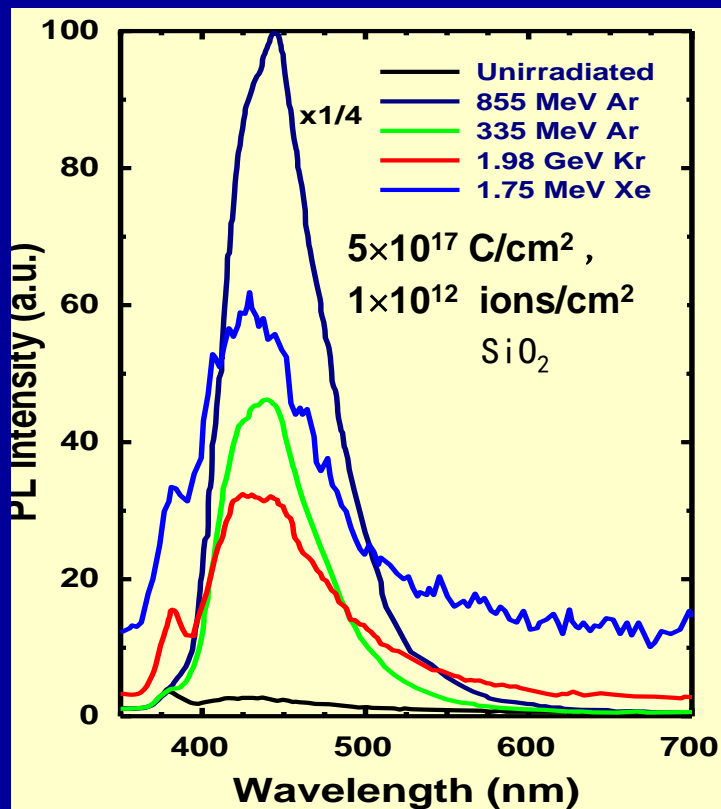
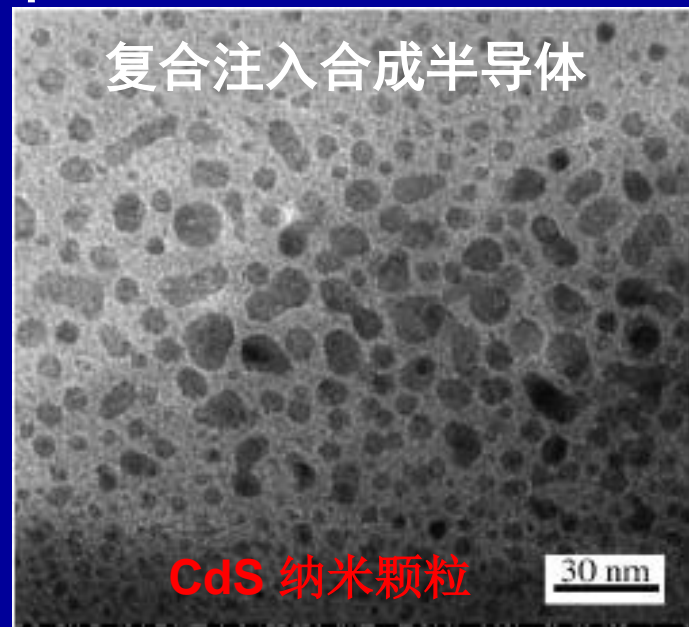
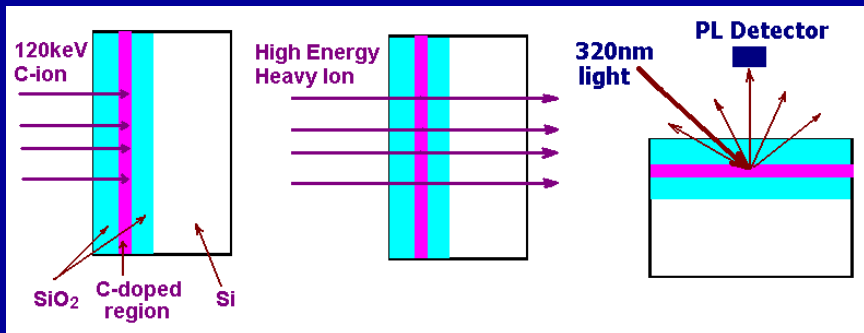
核孔膜的制作



- 生物、医学、食品过滤
- 大型输液器
- 防伪商标

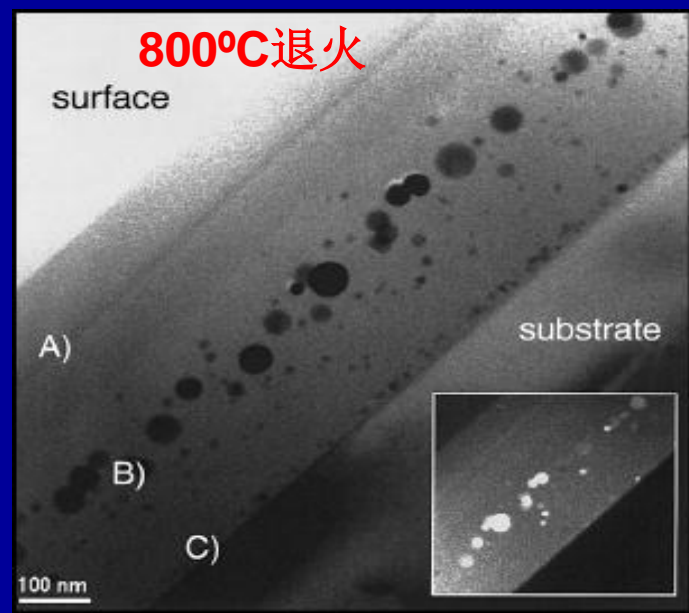


纳米点阵与发光材料



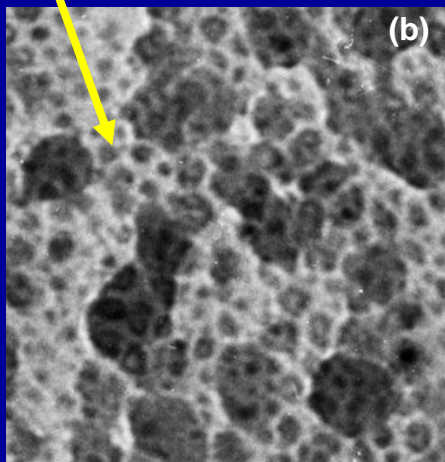
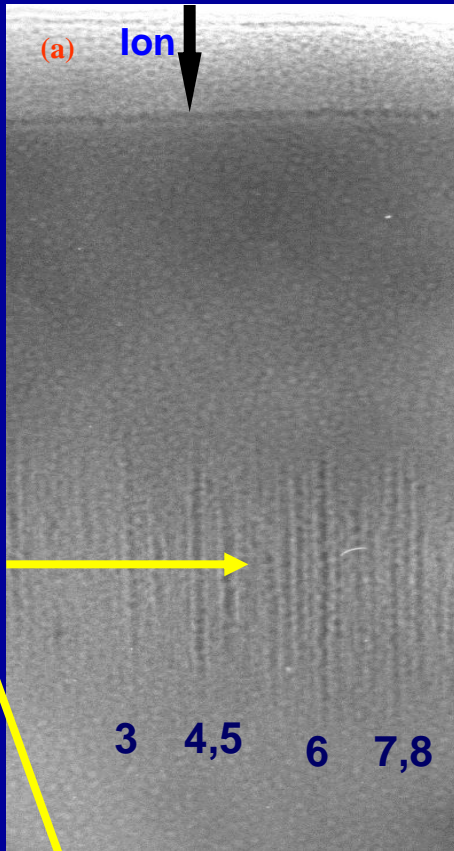
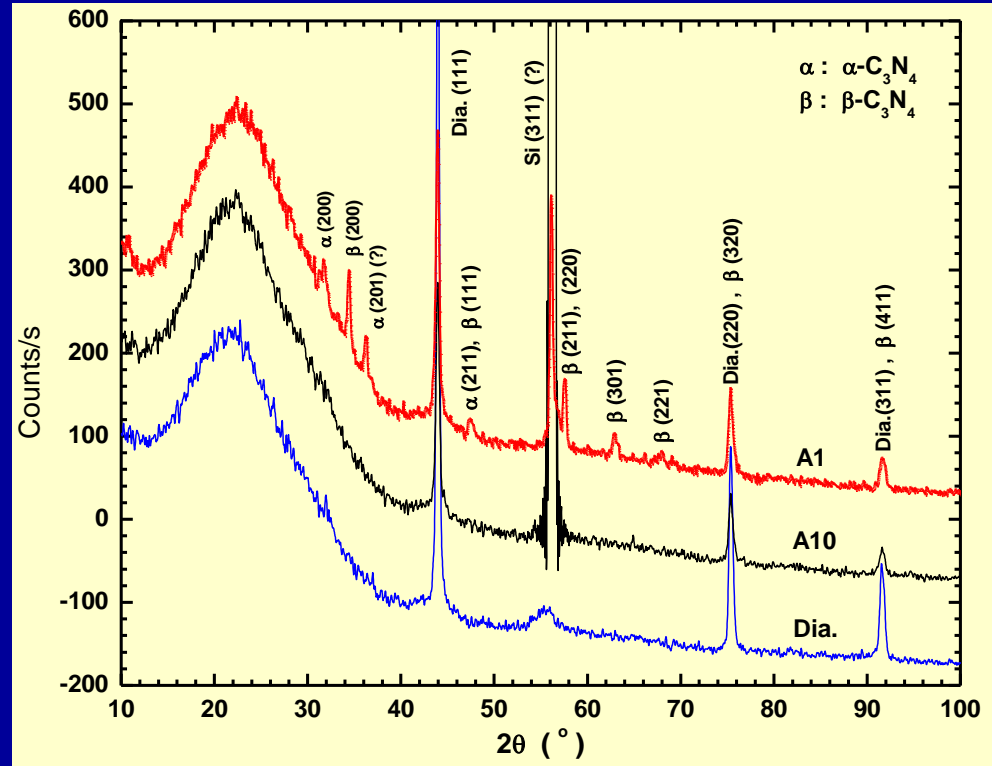
产生短
波长发
光材料

Sn离子注入
SiO₂退火后
形成Sn和
SnO_x团簇



超硬材料— β - C_3N_4

5×10^{17} N/cm², 5×10^{11} Xe/cm²
 分别注入辐照金刚石



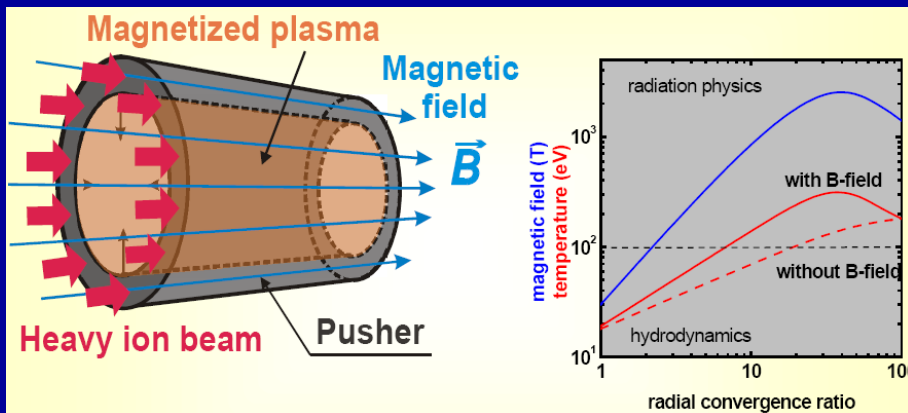
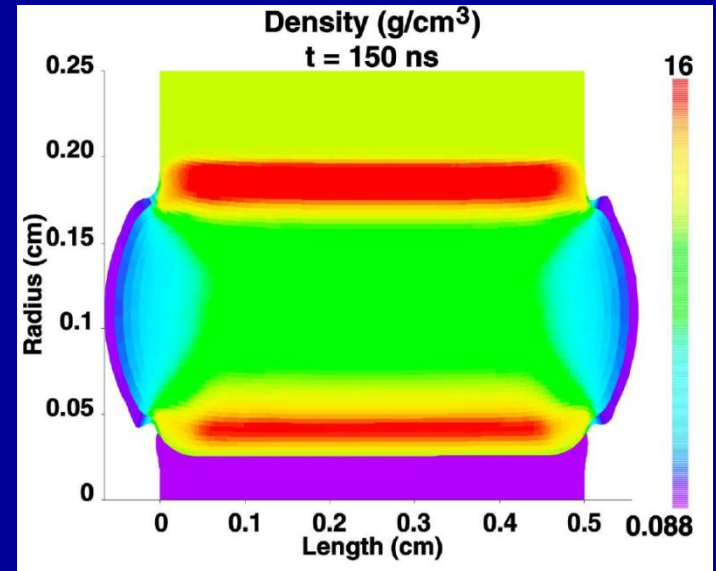
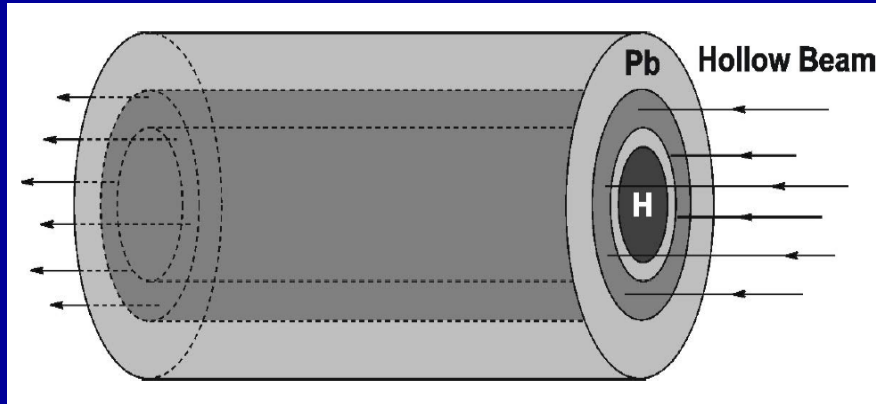
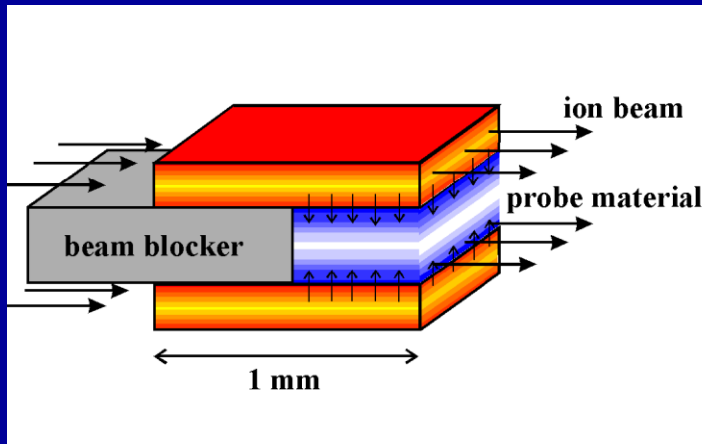
快重离子辐照注C SiO₂

形成新的相?

(a)和(b)分别为沿离子路径和垂直离子

子路径的剖面 (径迹长150~180nm, 直径约5~12nm)

金属氢的形成 (5Mbar)



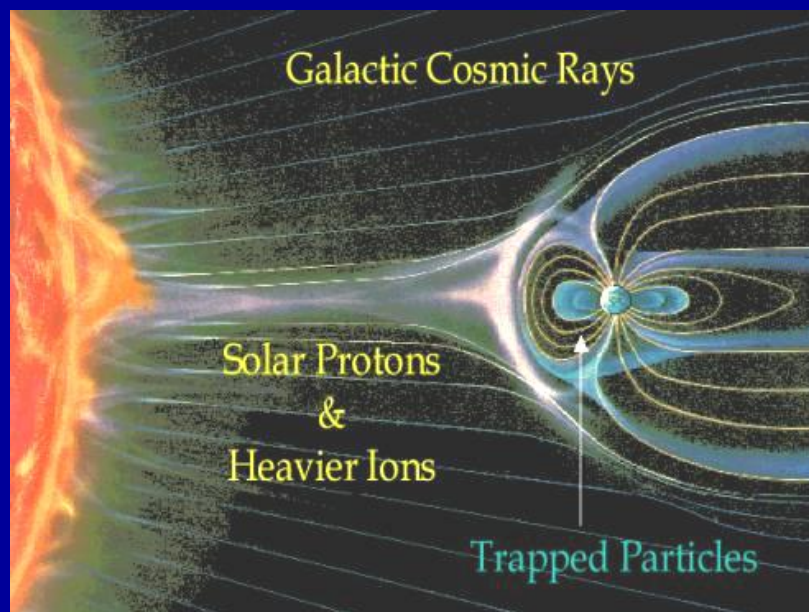
高密高温物质的形成 (10^6 , keV可)

重离子在航天中的应用

空间辐照效应与单粒子效应的研究

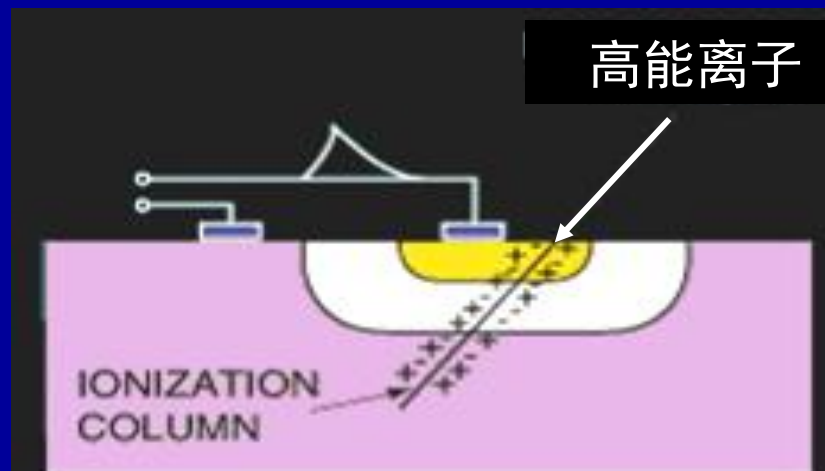
宇宙射线的来源：

- 银河宇宙射线—数百MeV-GeV高能质子 α 粒子少量重离子；
- 太阳宇宙射线—数百MeV高能质子；
- 范·阿伦辐射带—数MeV的质子



辐射对航天器的危害

- 充放电效应
- 总剂量效应
- 单粒子效应—翻转，锁定，烧毁



宇航元器件单粒子效应试验基地

国防重大专项

近物所已与几十家航天单位、半导体厂家、相关研究所和高校开展合作研究；2010年，单粒子效应试验的束流时间达770小时，占总供束时间1/6，2010年用户提出了2500多小时的束流申请。

利用HIRFL装置为我国新一代卫星关键器件的选用提供了重要参考依据。

中国空间技术研究院
CISTEC Chinese Academy of Space Technology (CAST)

●2009年1月，利用HIRFL，航天五院对XX-1卫星用300万门 SRAM FPGA进行重离子单粒子辐照试验，验证了单粒子翻转导致系统功能中断的故障。

中国空间技术研究院
中国航天 Chinese Academy of Space Technology (CAST)

●2009年5月，利用HIRFL，按标准的试验方法，航天五院对我国新研制的抗辐射加固SPAR V8微处理器抗单粒子锁定能力进行了评估。试验结果为我国新一代卫星关键器件的选用提供了重要参考依据。

- 标准要求离子射程大于 $30\mu\text{m}$ (实际 $89.5\mu\text{m}$)
- 标准要求入射离子LET大于 $75\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ (实际 $93.5\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$)
- 得到器件抗单粒子锁定能力大于 $100\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$



束流需求

$\text{LET} \geq 75 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, >1000 小时/年

国内只有HIRFL满足

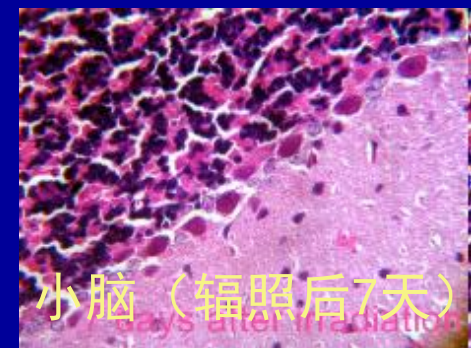
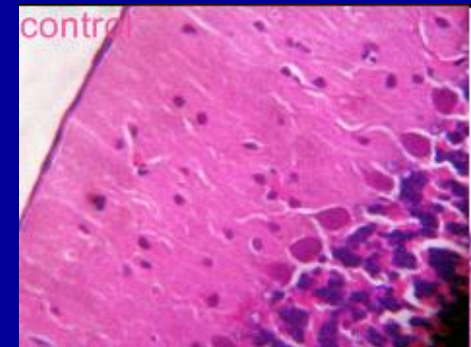
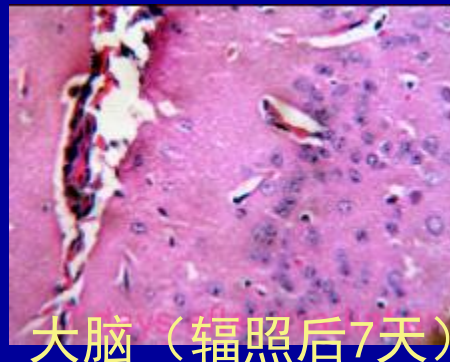
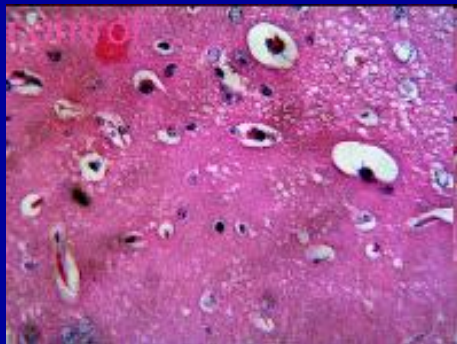
$\text{LET} < 75 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, >1000 小时/年

航天—宇宙射线对宇航员的危害

造血系统，生殖系统，神经系统；
细胞变异，致癌作用，诱发白内障，
重离子辐照的地面模拟，找出预防措施！

重离子辐射生物学研究

^{12}C 辐照会造成脑损伤，一定剂量对大脑和小脑产生明显的病理学改变



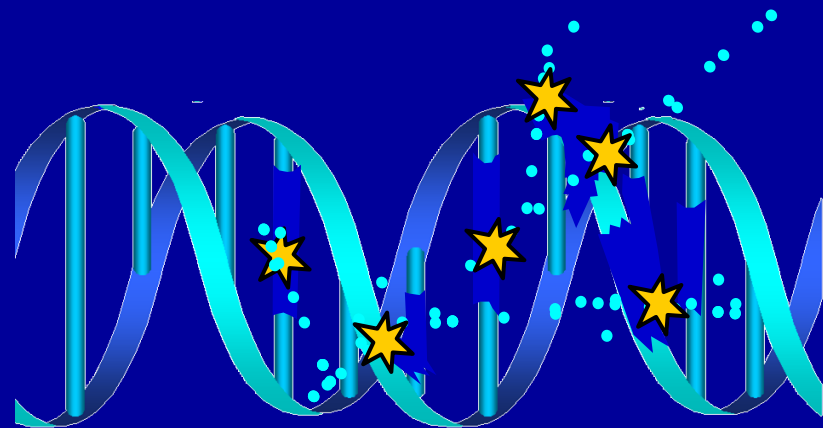
束流

DNA是重离子作用的关键靶



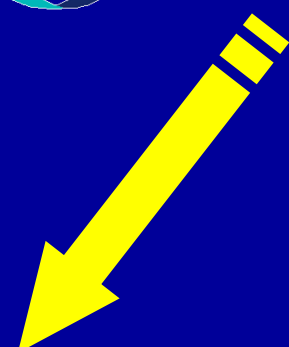
重离子辐照诱变

- DNA受损、修复不全而导致突变。
- 重离子引起的突变谱广；



存活 ← 修复
变异 ← 错修复
死亡 ← 不修复

单链断裂
双链断裂



重离子辐照小麦新品种—“陇辐2号”

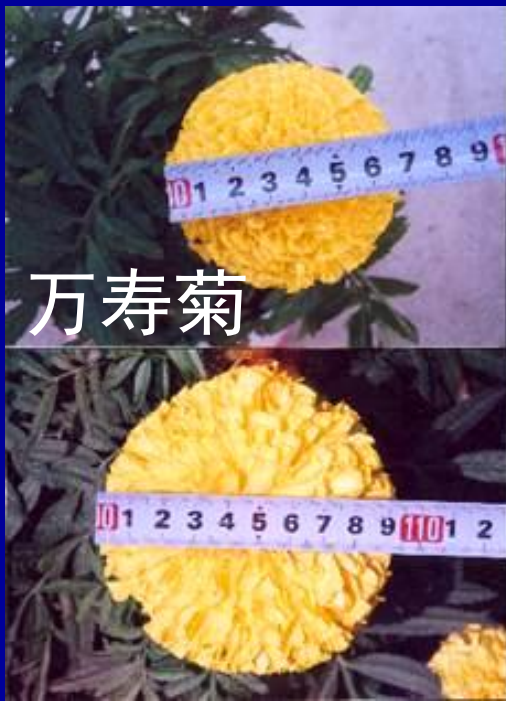
- 表观性状：生长期短，高产稳产，对条锈病、黄矮病抗性较好。抗倒伏，耐旱、抗干热风。
- 品质：含粗蛋白质13.0–17.3%，湿面筋28.3–39.2%，赖氨酸0.52%；
- 已推广200多万亩。



重离子辐照甜高粱新品系

含糖量高，高产，生长期短；
生产生物乙醇的原料

近物所重离子诱变花卉



万寿菊



辐照后的鸡冠花



吊竹梅 对照



突变体的绿叶阶段

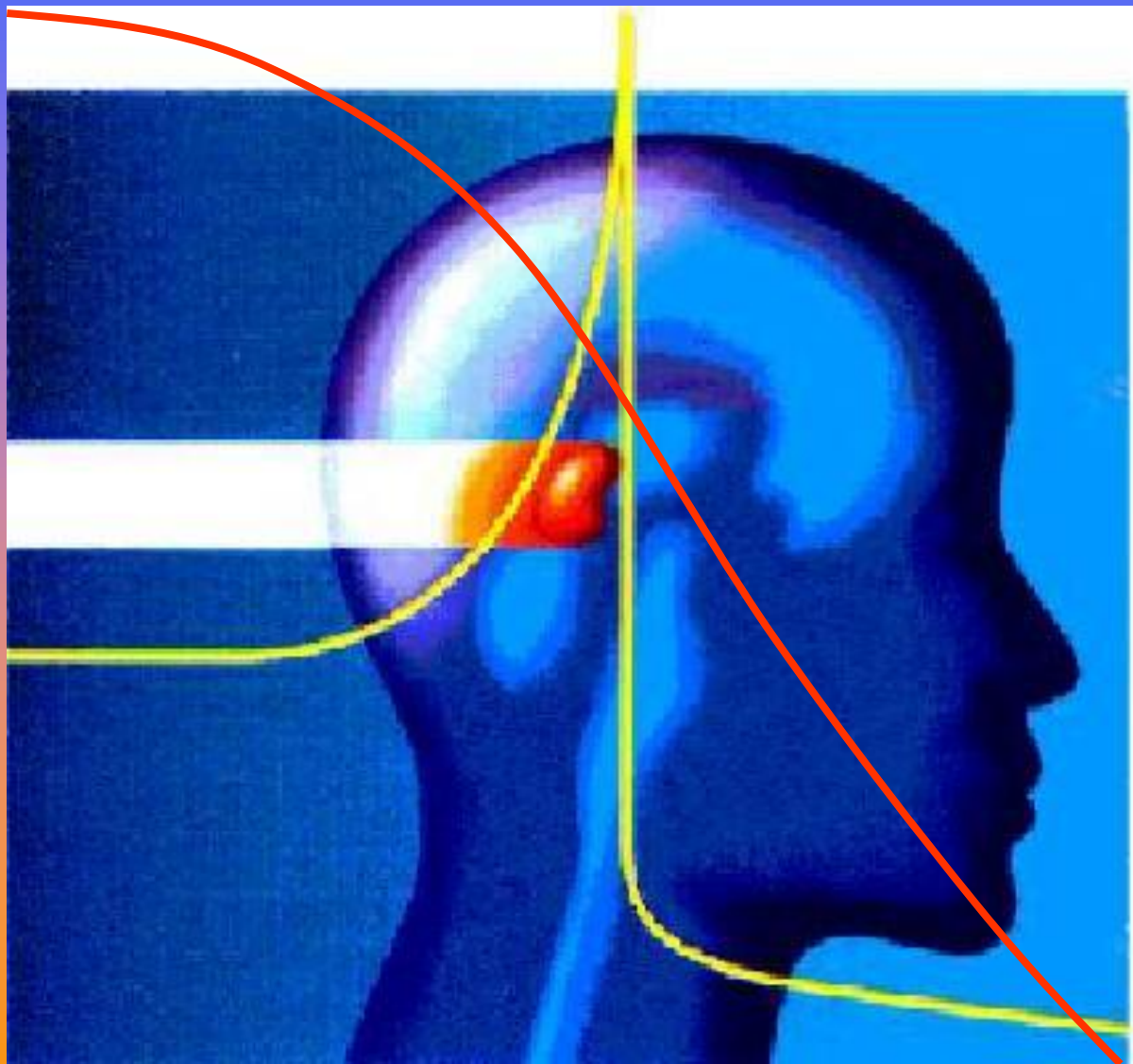


突变体的粉叶阶段

重离子治癌

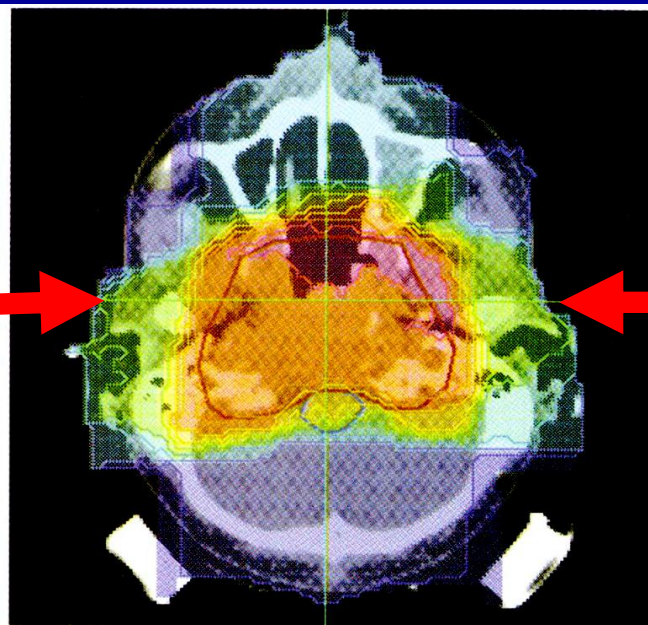
γ , X-射线,
电子, 中子能
量沉积曲线

重离子束能
量沉积曲线



重离子辐照的范围精确，剂量边缘清晰，可以实现癌肿的精确适形治疗。

二视野的光子适形治疗



90-100%

80-90%

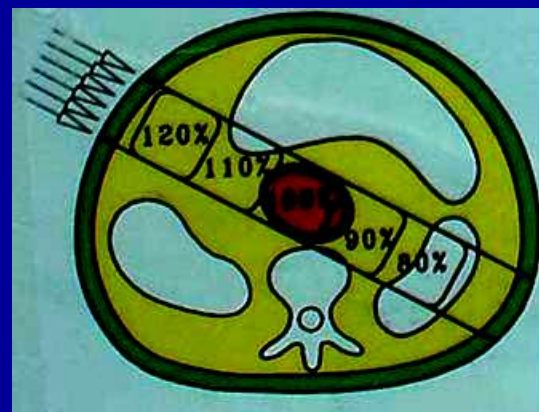
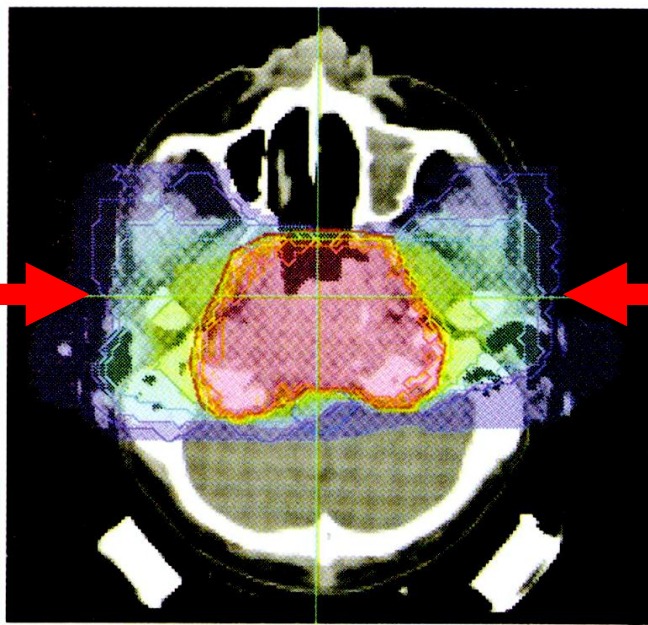
50-60%

30-50%

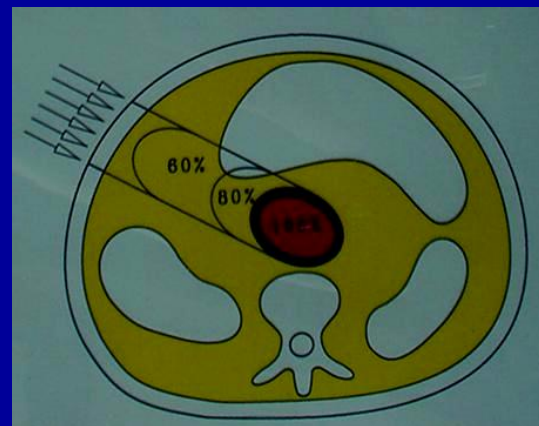
10-30%

0-10%

二视野的碳离子适形治疗

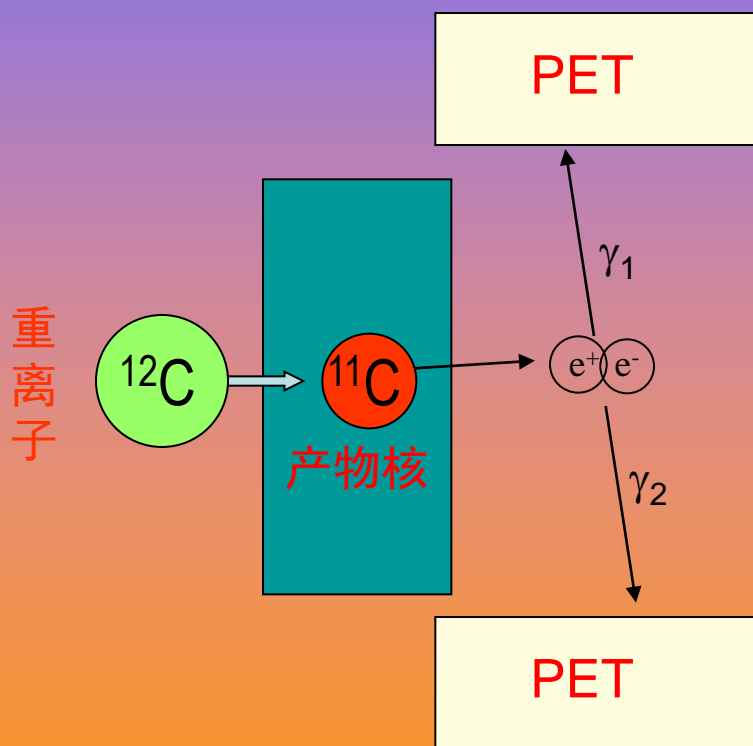


γ 或中子辐照

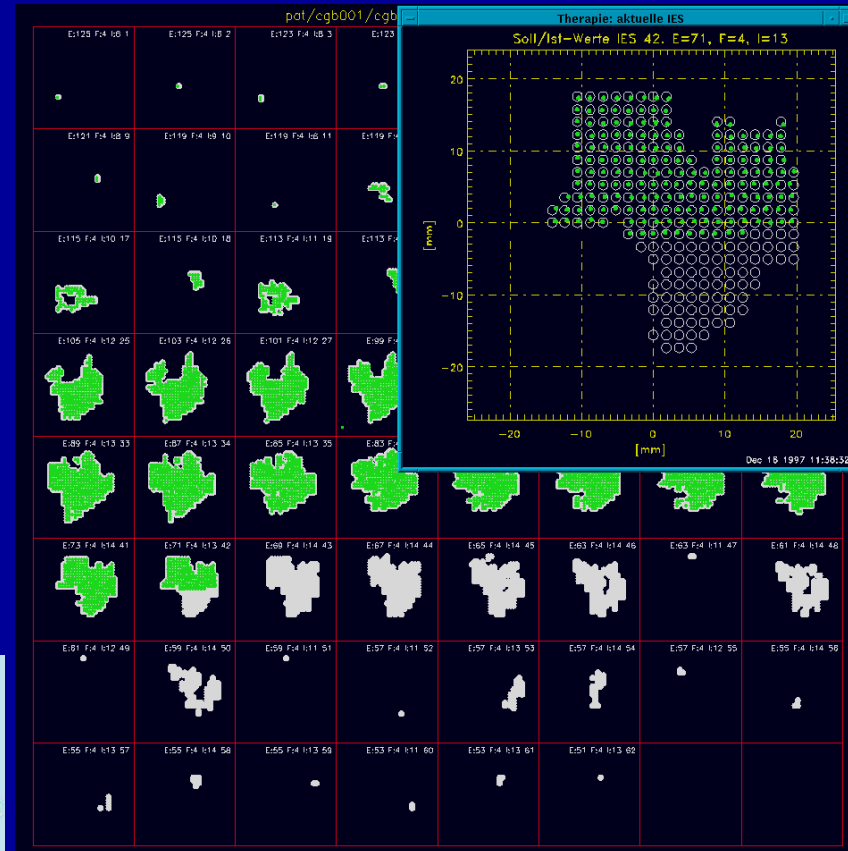
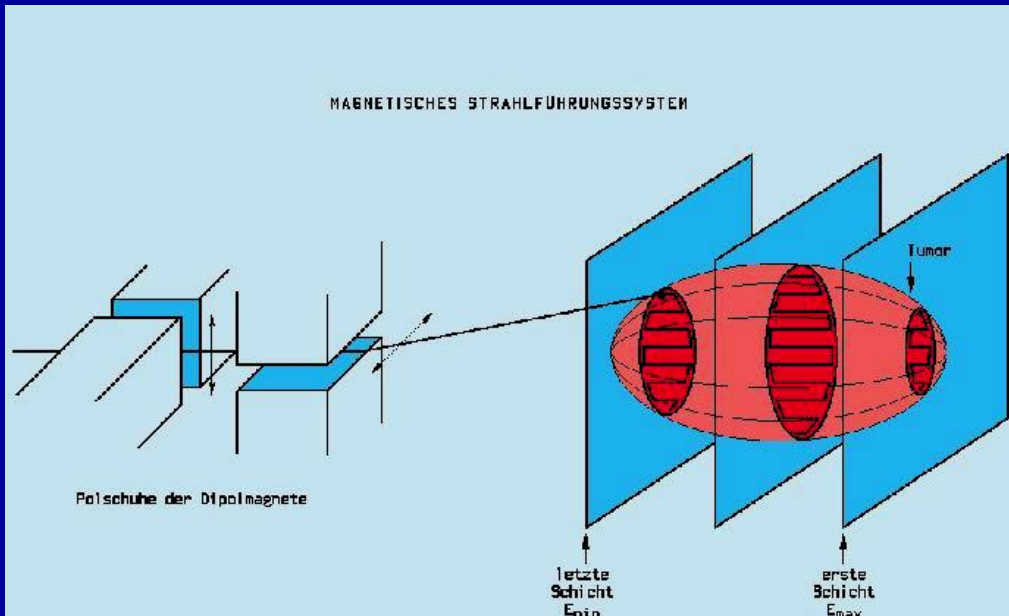


重离子辐照

- 核反应产物中有正电子发射体，可用PET 进行实时在线监控；



通过扫描磁铁来导向束流，使其按肿瘤断层的面积形状精确地进行照射，做到适形治疗。

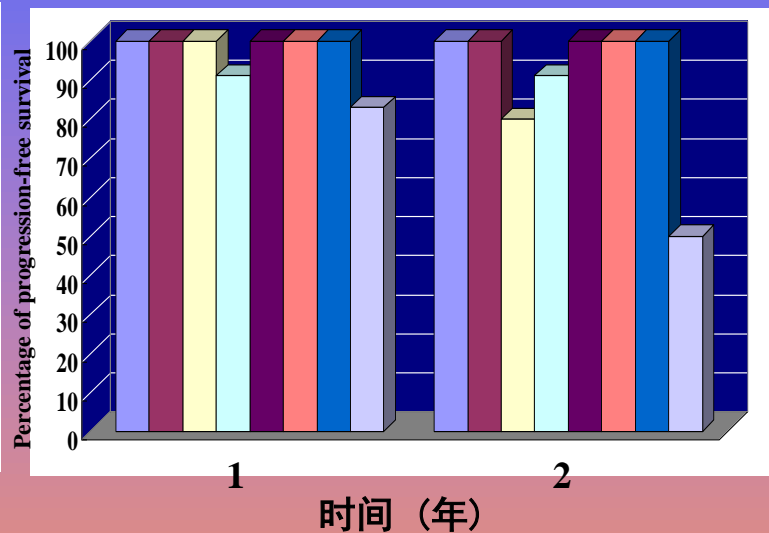
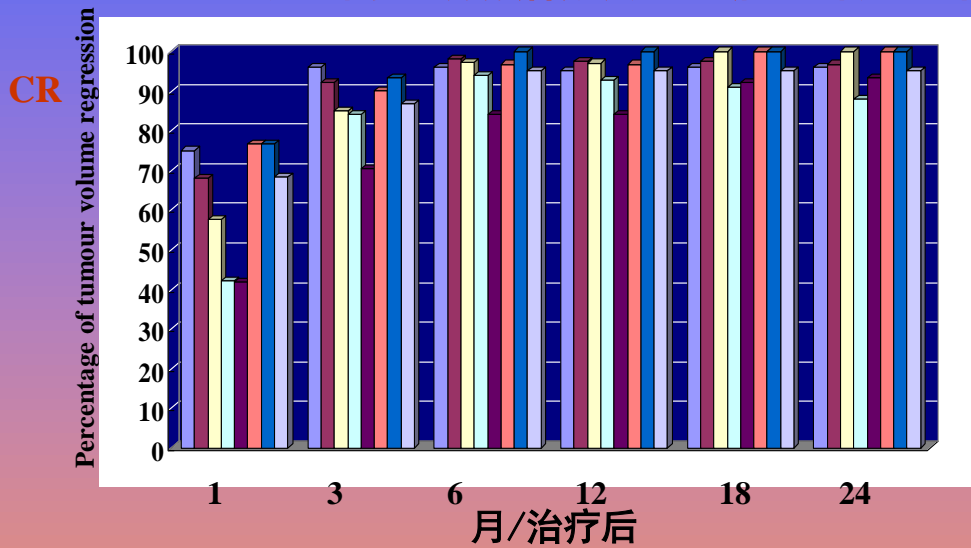


重离子治疗浅层肿瘤试验研究

治疗病例103， 成果获2008年甘肃省科技进步一等奖

100例重离子放射治疗病人肿瘤局部控制率

重离子放射治疗病人生存率

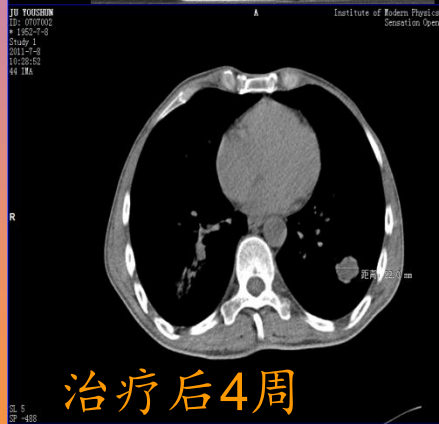
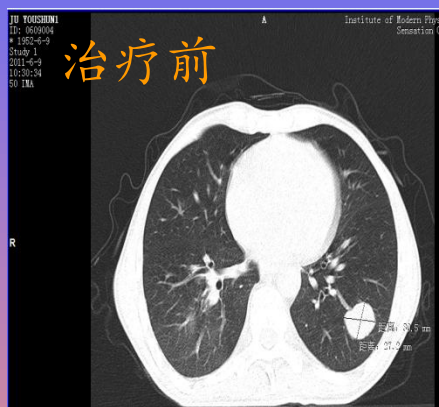


- 皮肤鳞癌 (42-70.4GyE/4-10fr)
- 皮肤基底细胞癌 (54.8-61.2GyE/6-11fr)
- 皮肤恶性黑色素瘤 (61-75GyE/6-7fr)
- 软组织肉瘤 (51-65.7GyE/6-11fr)

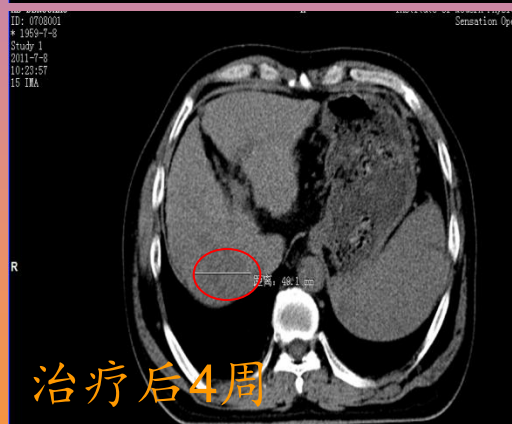
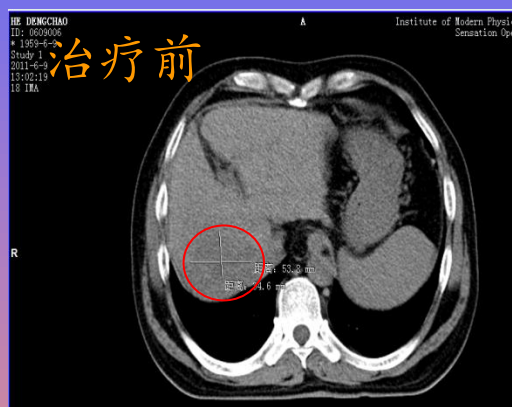
- 其他皮肤病变 (40-60GyE/6-8fr)
- 恶性淋巴瘤 (40-54GyE/6-9fr)
- 腺癌 (40-70GyE/6-9fr)
- 恶性肿瘤转移性淋巴结 (40-70GyE/6-11fr)



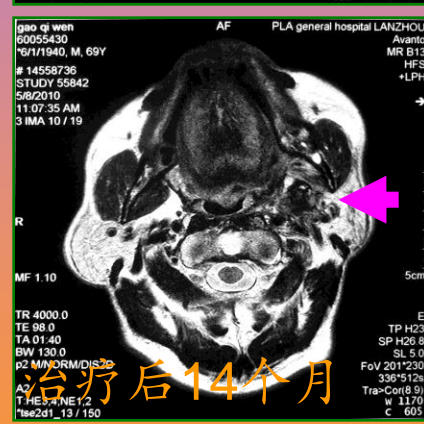
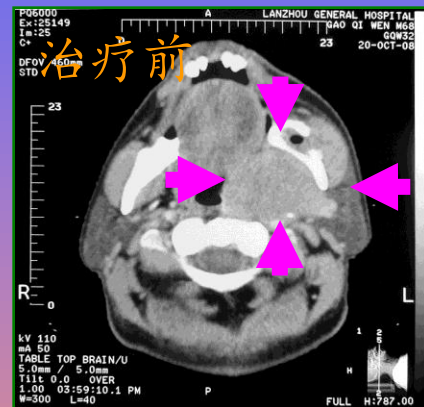
2009年3月至今，进行了60多例深部 肿瘤患者重离子临床治疗试验



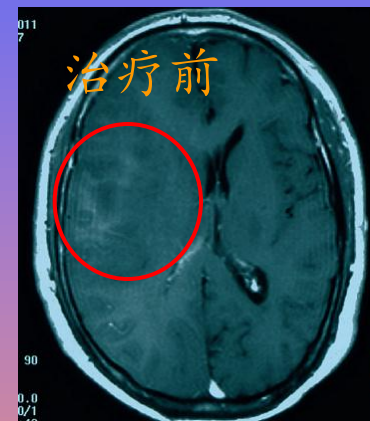
肺转移癌



原发性肝癌



左涎腺腺泡细胞癌



脑胶质瘤

总之，重离子加速器除了是核物理研究的不可缺少的工具，促进了核物理的发展，同时，它提供的重离子束流在许多科学领域和国民经济建设和医疗方面都有重要的应用。加速器及其应用的进一步发展需要更多的年青人参与，发挥自己的聪明才智。

谢谢!