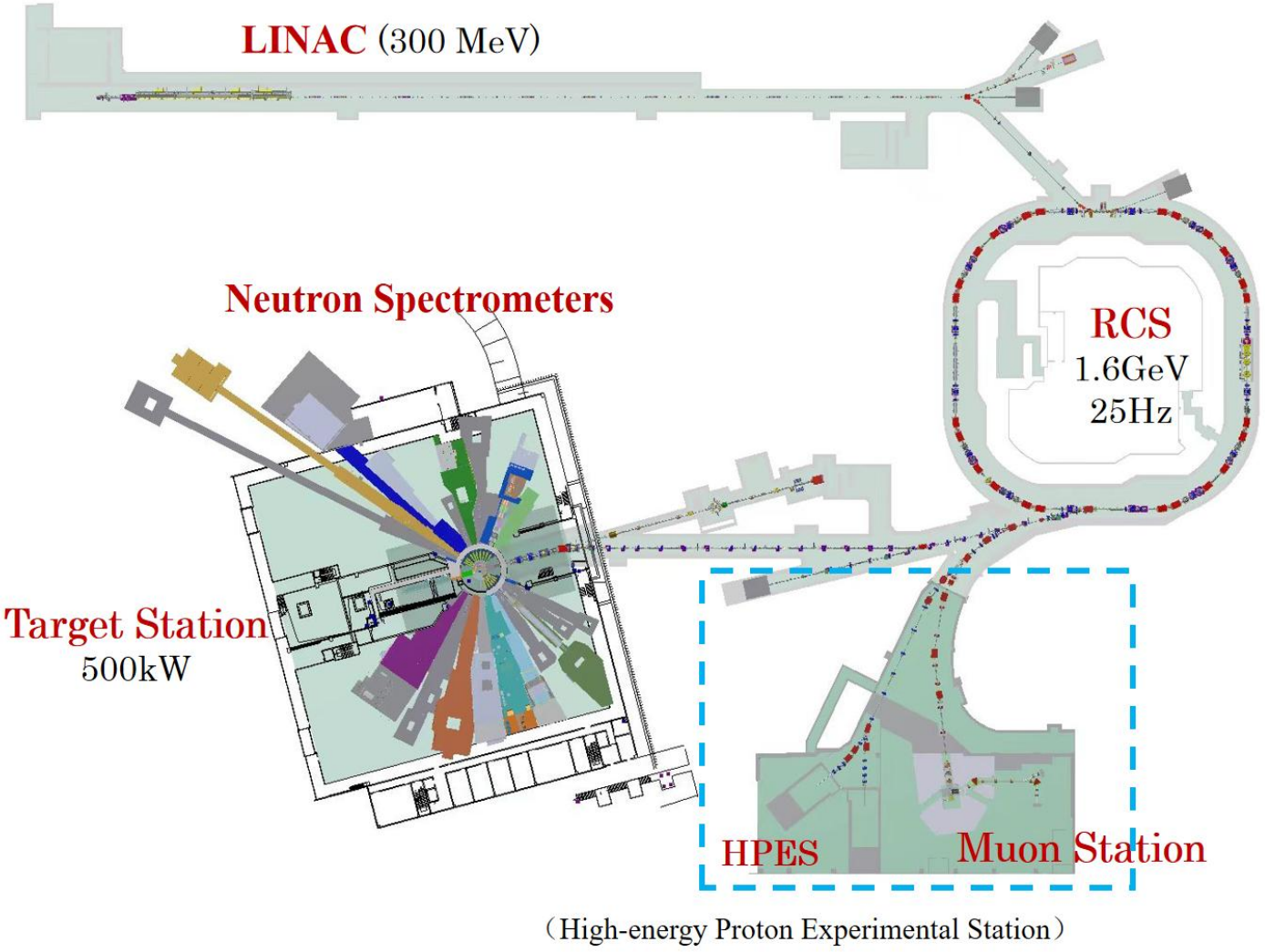
HPES质子引出束流研制进展

李 志 平

中科院高能物理研究所 / 散裂中子源科学中心

第二届测试束流与先进探测技术研讨会 • 2026/10/10 • 长沙

HPES的束流要求



CSNS-II 装置布局示意图

CSNS 主要参数

参数	CSNS	CSNS-II
束流功率 (kW)	100	500
重复频率 (Hz)	25	25
质子束平均流强 (μA)	62.5	312.5
直线加速器H^-束流动能 (MeV)	80	300
RCS 环质子束动能 (GeV)	1.6	1.6
谱仪数量	3+8	9+2

HPES 束流要求参数

参数	数值	单位
引出束流能量	~1.60	GeV
束流能量	0.8-1.6	GeV
重复频率	24	Hz
脉冲数量	> 1000	Pulse
脉冲粒子数	10^3-10^7	p/s
束斑尺寸（Φ）	20	mm

RCS束流引出方案：高流强与低流强

加速器的问题主要集中在“怎样引出”：

- HPES需要极弱质子束，设计流强覆盖约10^3–10^7 p/s
- 一个宏脉冲周期内包含1000个以上微脉冲

RCS高能循环束

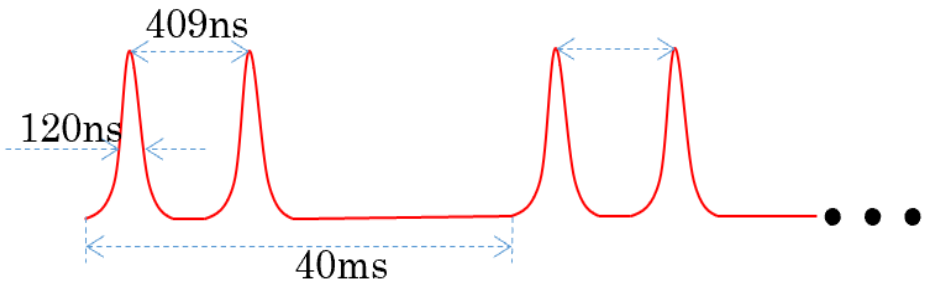
- 1.6 GeV
- 25 Hz · 40 ms / cycle
- 10^{13}-10^{14} p / pulse

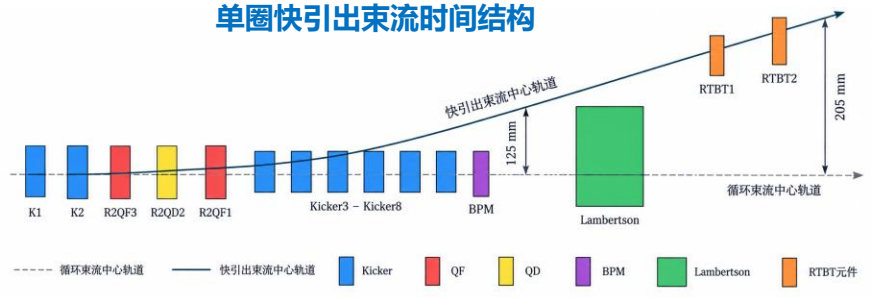
→ **需要一种“弱束提取”机制** →

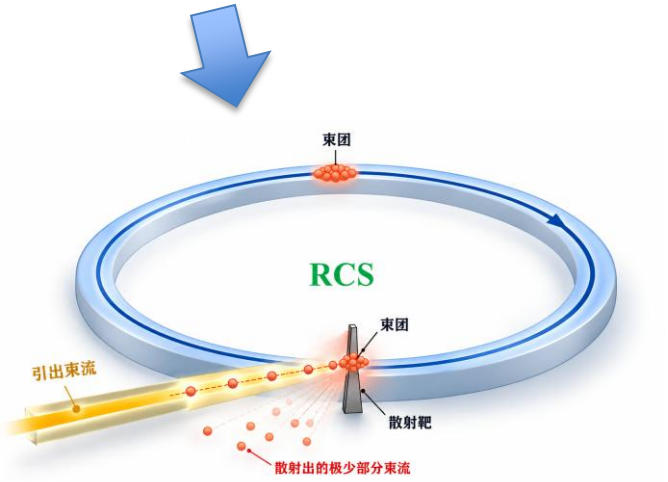
只作用于循环束小部分、又能跨多圈持续取束的引出方式

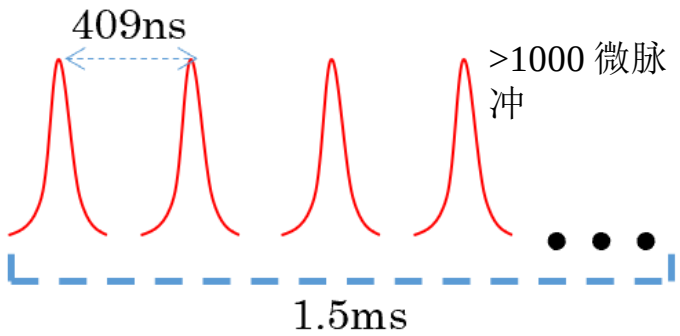
HPES需要的引出束

- 极弱、强可调，准单粒子
- 跨多个回旋周期持续引出
- 不扰动束核, 与快引出保持兼容







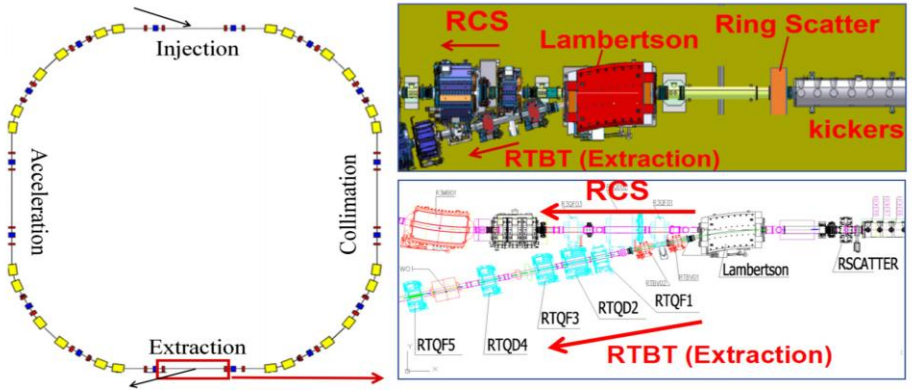


多圈引出束流时间结构

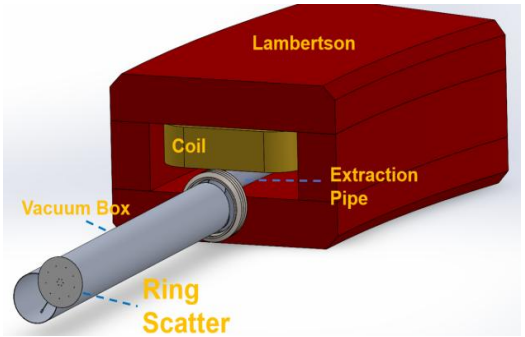
HPES的多圈散射引出方案

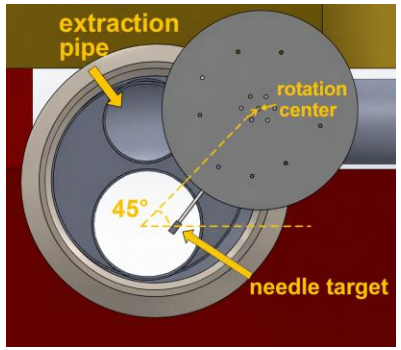
引入新的多圈引出方案：基于束流散射，25Hz旋转的散射靶与循环束流多次作用

- 散射引出装置的布局



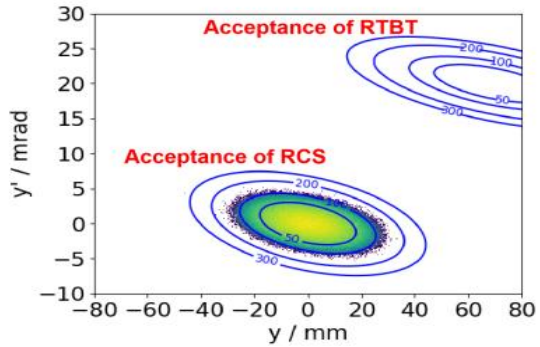
安装在Kicker-8出口

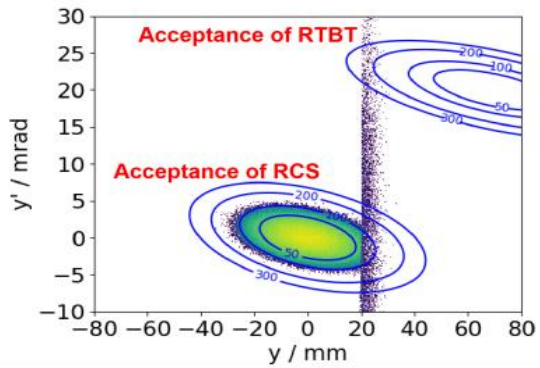




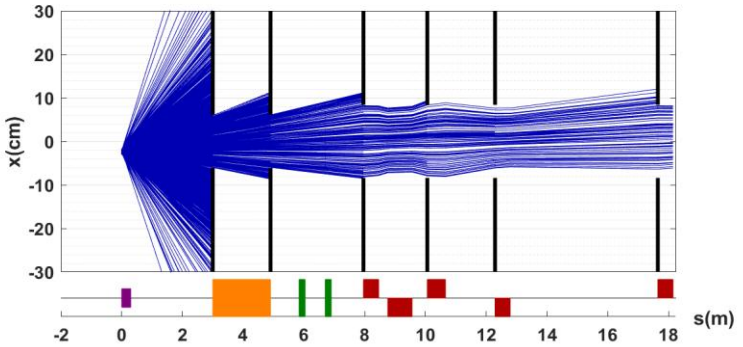
方位在真空管斜上方45°

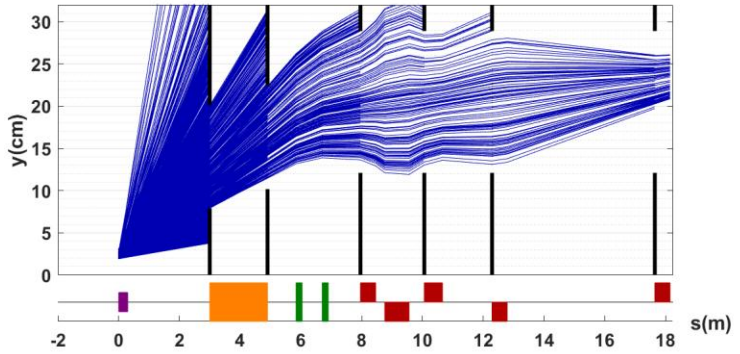
- 散射引出粒子分析
  - **散角在20~25mrad的粒子会被RTBT接收，适合于低流强束流的慢引出**
  - 散角在-8~5mrad的粒子回到RCS循环，5~10mrad被准直器吸收
  - 剩余粒子损失在Lambertson磁铁附近





散射前/后的束流相图与加速器接收度关系图

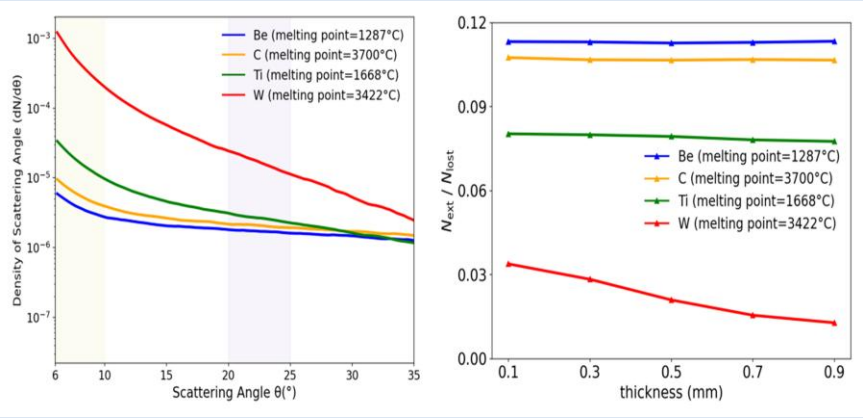




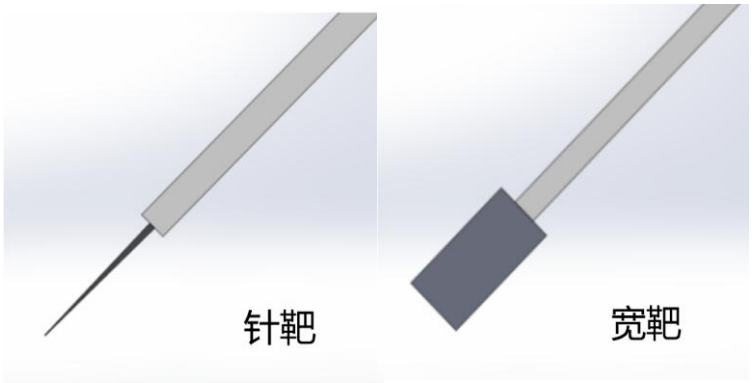
引出束流轨迹

散射靶与引出束强控制

散射靶参数与引出束流参数的关系



散射靶材料与形状选择



三个主要自由度

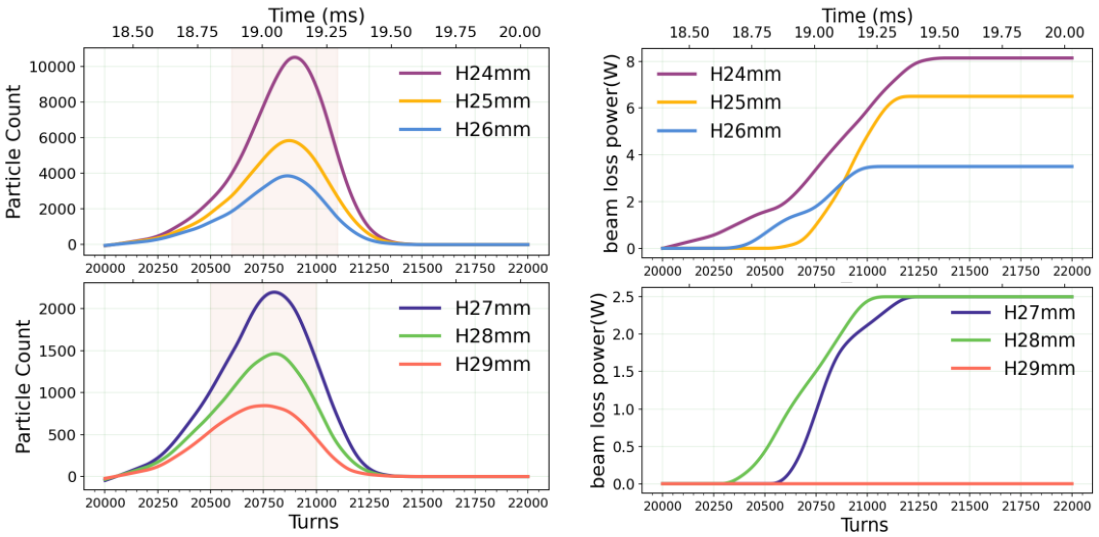
材料 有效散射、束损、热学和机械性能共同决定选择。

形状 针靶更靠近束核、工作点稳定；宽靶散热较好，对束流位置更敏感。

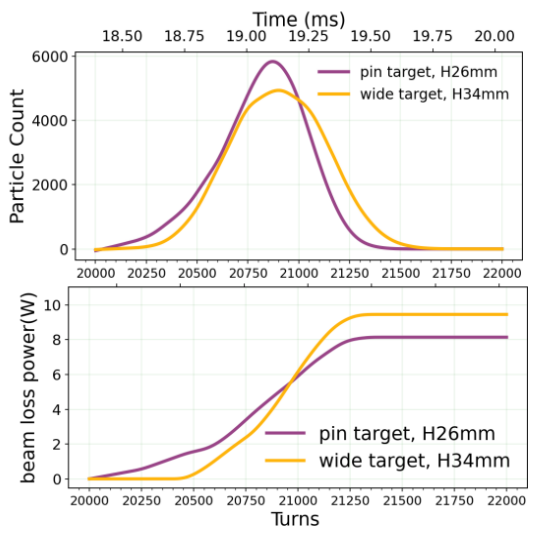
位置 插入深度直接决定参与散射的粒子数，是引出强度的第一级调节量。

束损 靶进入更深可提高引出量，但同时增加局部损失。

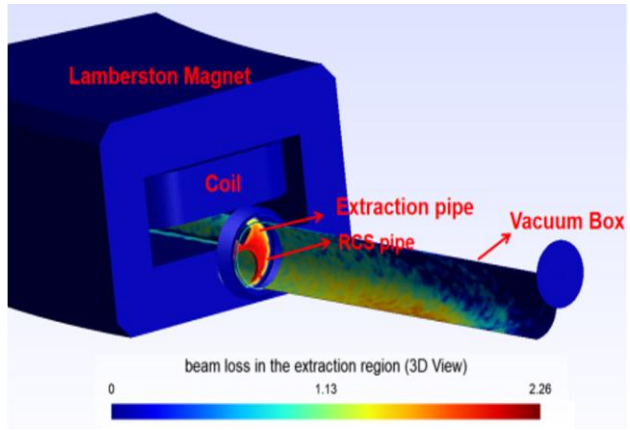
设计目标不是最大化散射，而是确定可运行的强度—束损工作区间。



不同深度的引出流强和束流损失比较



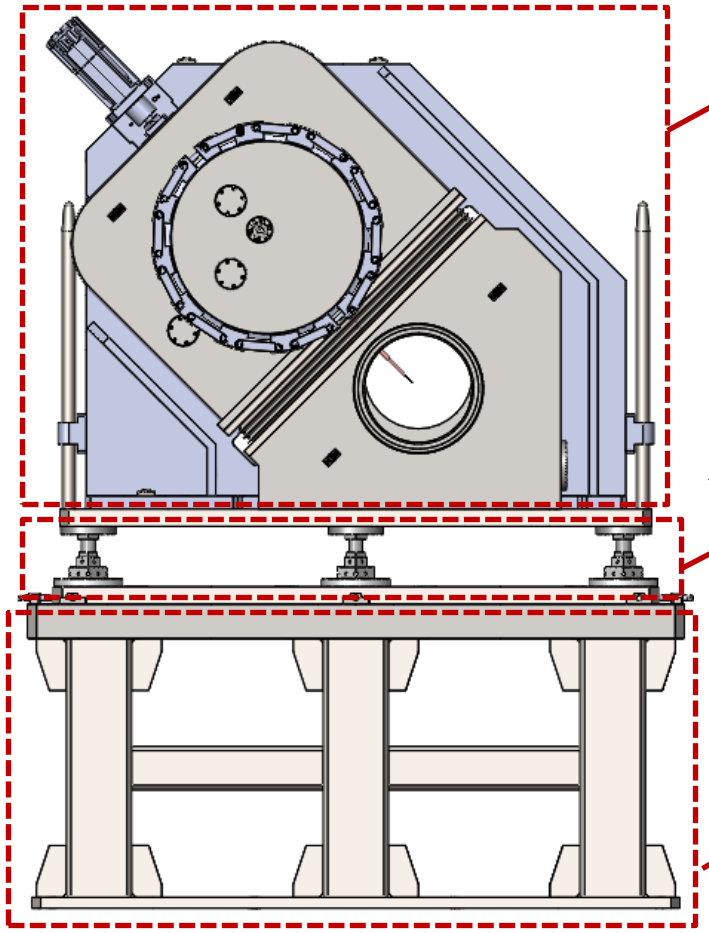
针靶与宽靶的引出比较

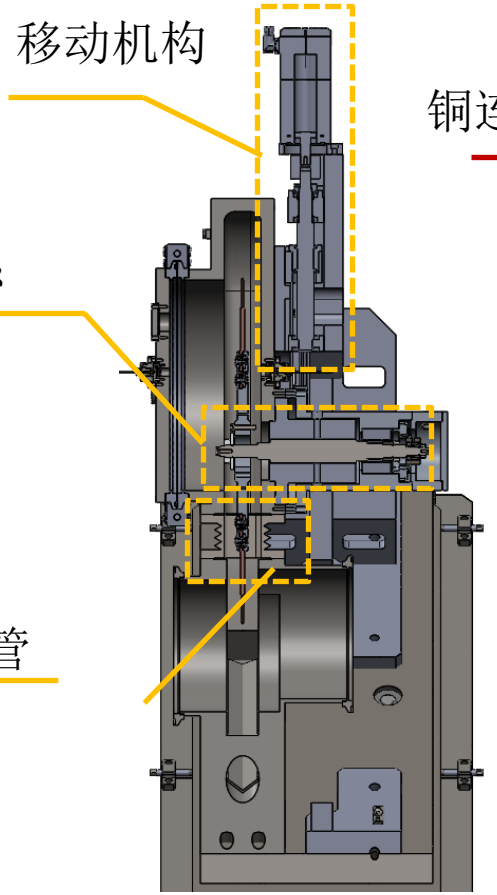


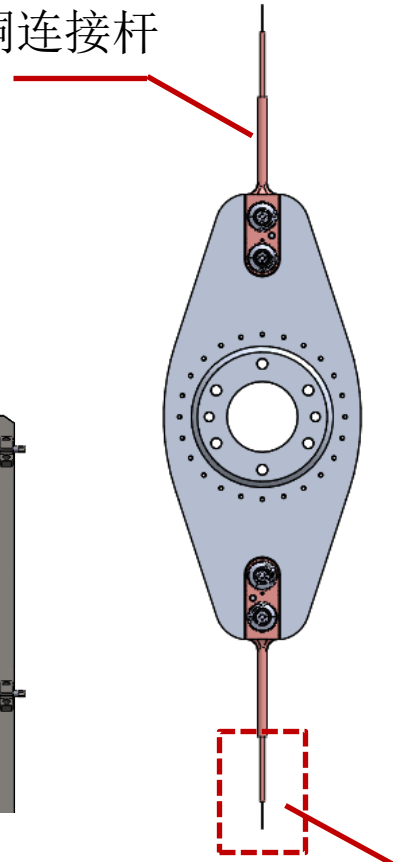
引出点附近局部束损分布

散射器与散射靶设计

环散射器的机械结构





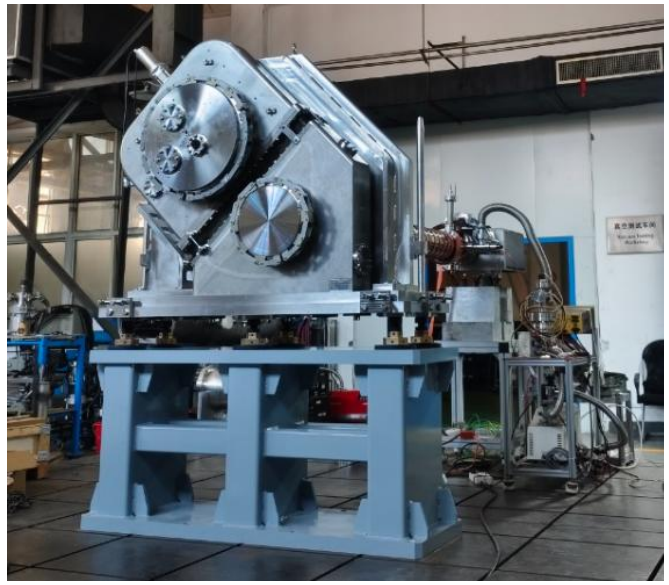


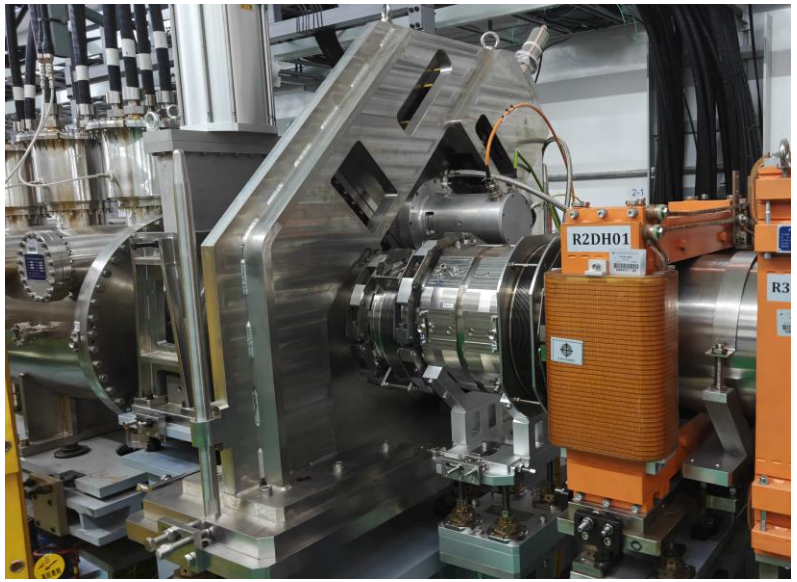
- 精密轴系与直驱结构
- 磁流变液动密封
- 45° 平移运动
- 双散射靶设计
- 机械振动与精密动平衡
- 高精度同步运动控制

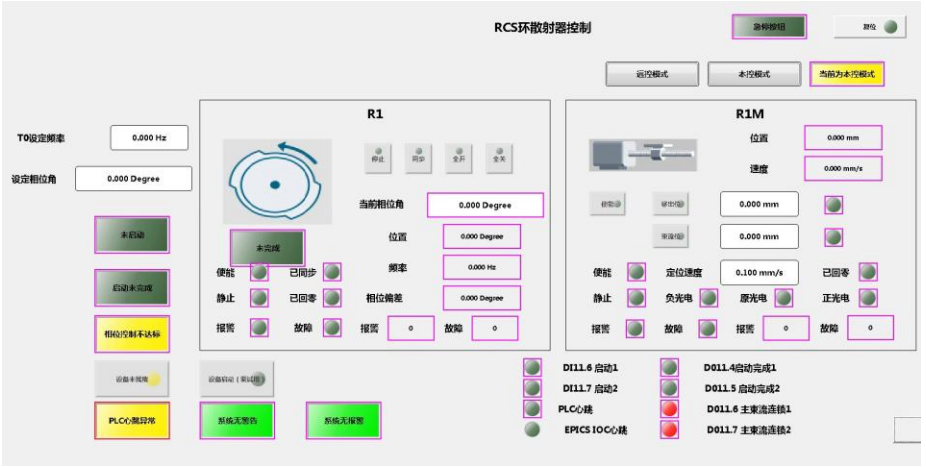
环散射器研制进展

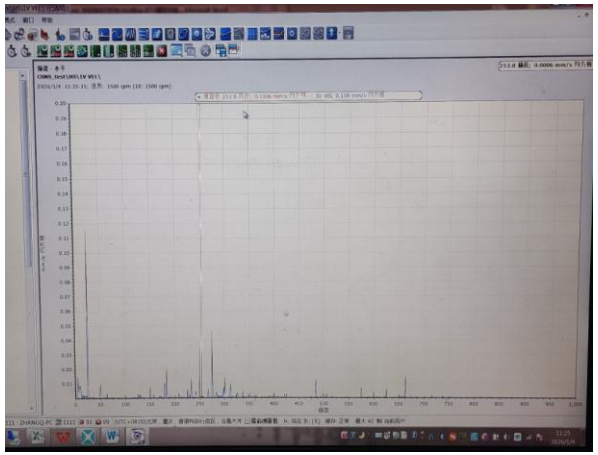
时间表

- 2024/09/24 机械设计评审
- 2024/12/06 机械加工制造
- 2025/04/05 控制系统评审
- 2025/09/05 控制系统硬件验收
- 2025/09/30 出厂验收
- 2025/10/21 环散射器到园区
- 2025/11/18-26/03/17 园区安装运行测试
- 2026/04/25-05/09 现场标定
- 2026/08/15 散射器隧道安装
- 2026/9/10-10/4 无束测试与系统联调
- 2026/10/26-10/29 束流实验









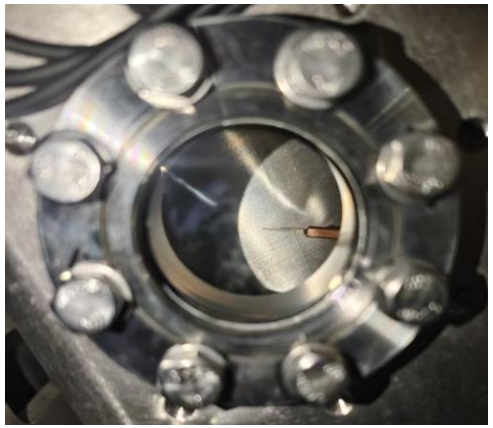
环散射器关键指标：相位稳定度，真空度，振动等均满足设计要求

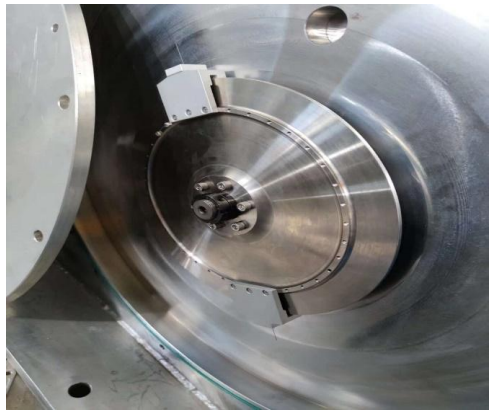
散射靶研制与测试

金刚石针靶/宽靶：完成加工，针靶安装到散射器，初步完成高速转动测试。
散射测试计划：散射靶与RCS高功率束流长时间作用，研究金刚石靶在高速、高温、高辐照条件下的寿命。

高速转动

- 针靶厚度0.3mm，1500rpm转速，伴随振动
- 在离心力作用下，散射靶最大应力25.4MPa



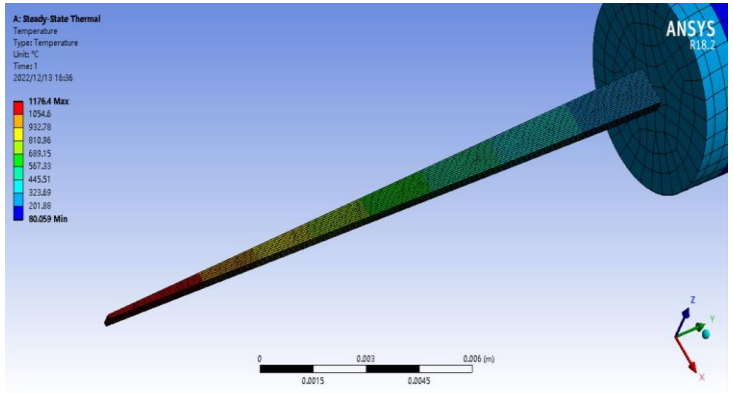


高温

- 靶温升对靶工作深度很敏感
- 深度27mm，1146.5℃，热应力14.9MPa

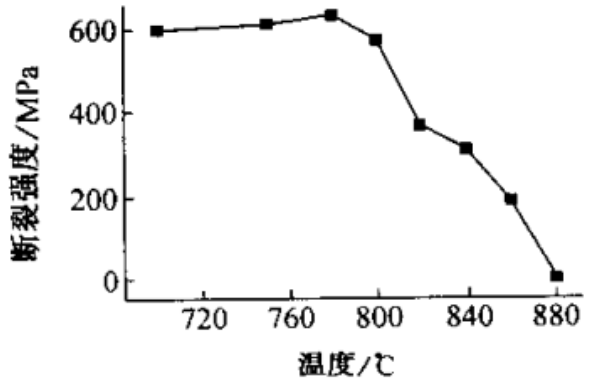
金刚石散射靶

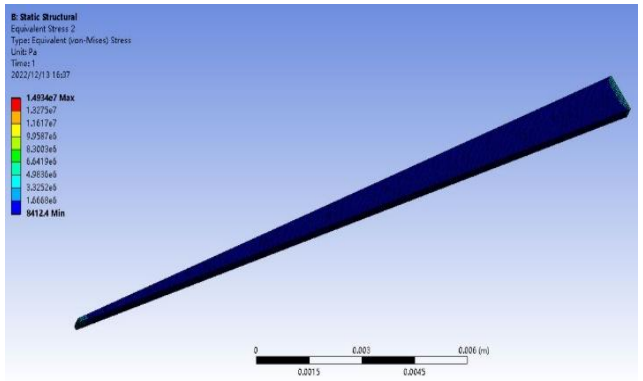
序号	深度 (mm)	热沉积最高温度 (℃)	最大应力 (MPa)
1	25	2210.8	28.3
2	26	1670.8	21.4
3	27	1146.5	14.9
4	28	646.7	8.5
5	29	337.5	4.5
6	30	152.5	2.1
7	31	79	1.9



高辐照

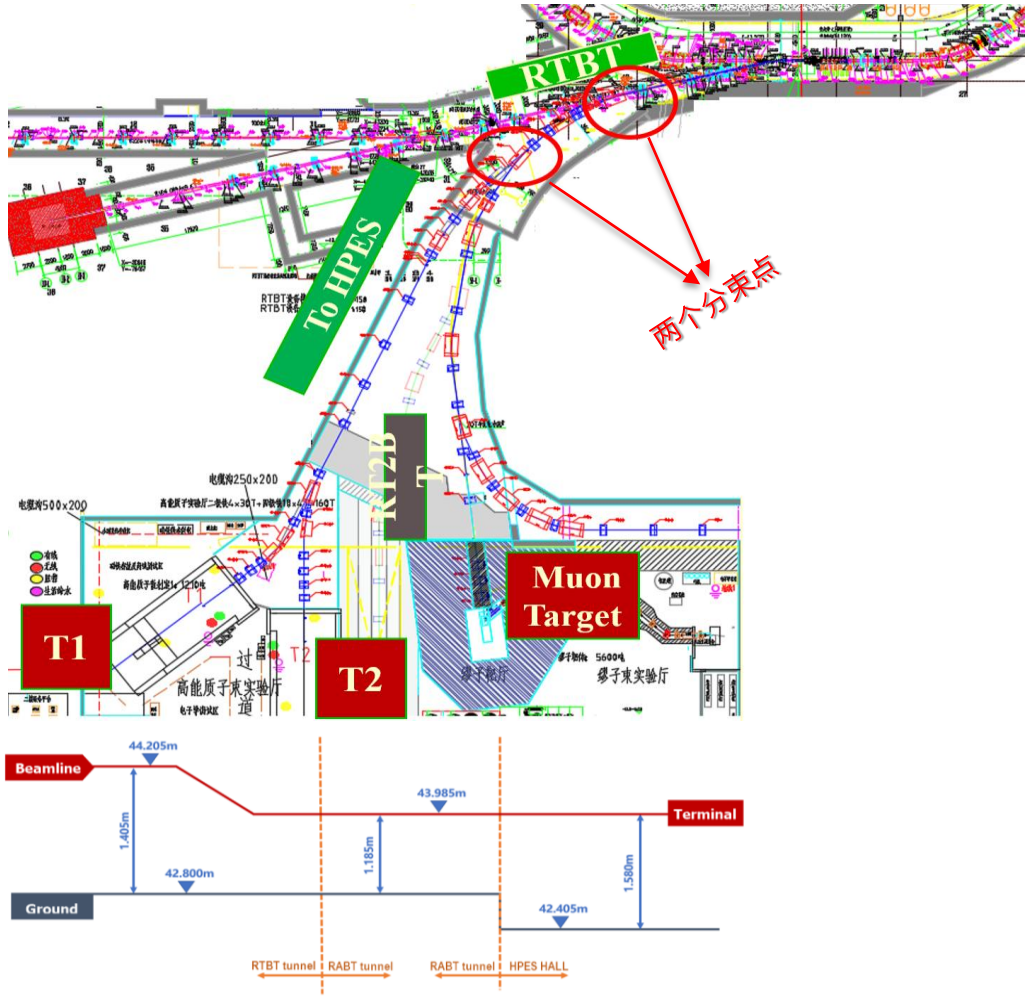
- 金刚石散射靶直接与束流作用，辐照剂量很高
- 需要强辐照环境测试金刚石散射靶的耐辐射性能



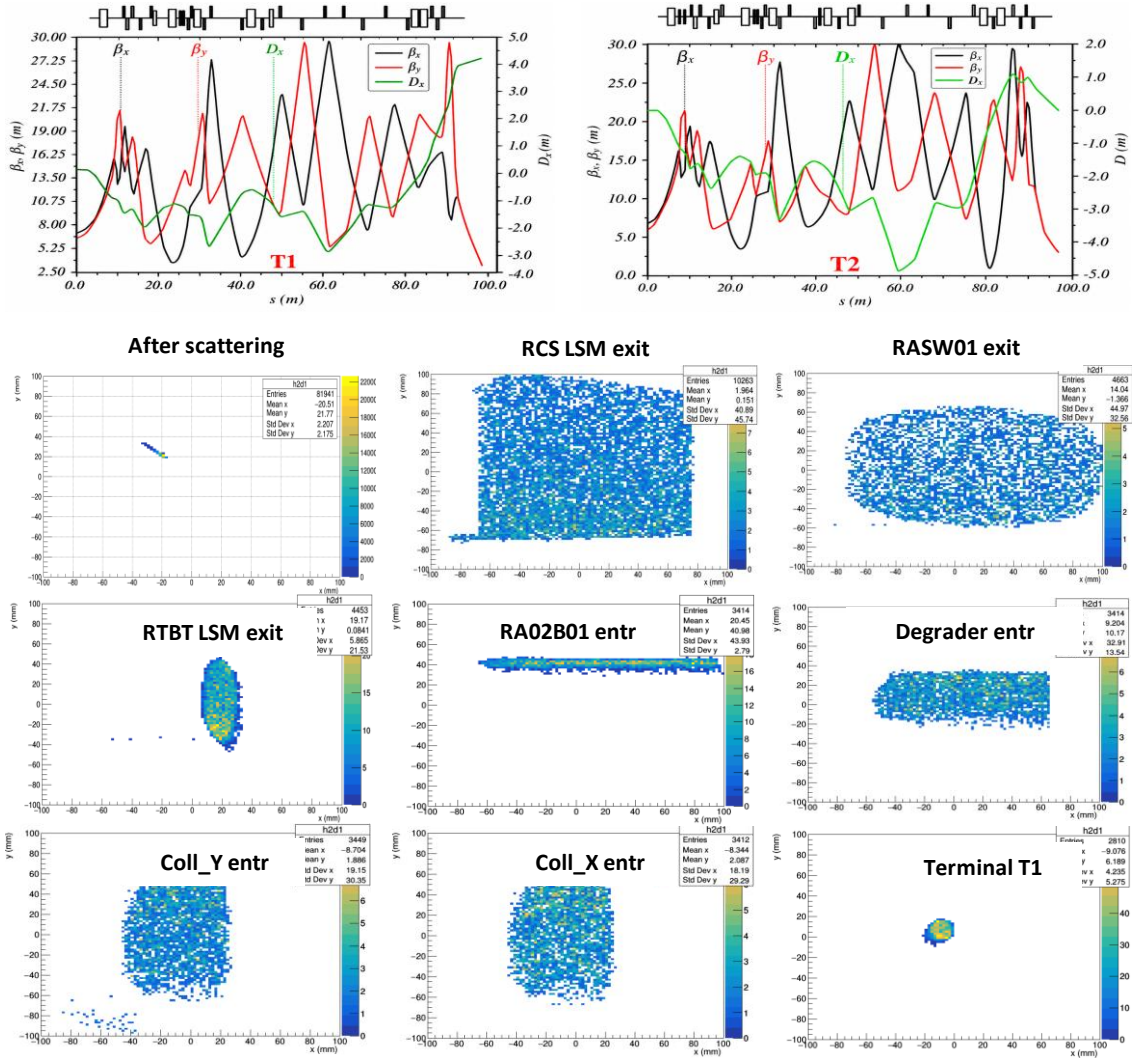


束线光学设计与束流传输

质子应用束线（RABT）：实现强/弱两种束流的引出、分离、传输、降能、准直、监测



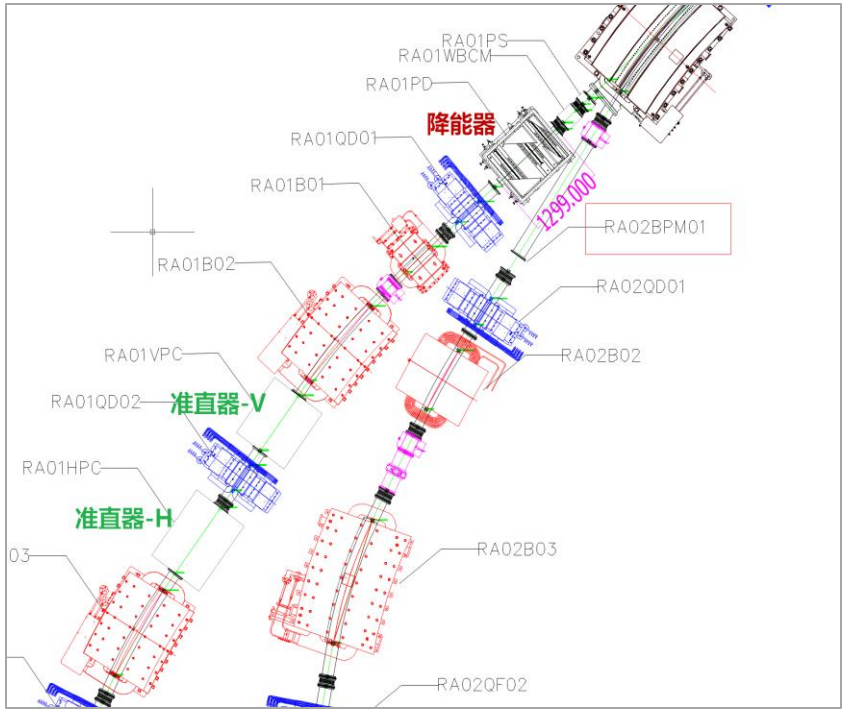
HPES 束线布局：水平与垂直



RABT 束流光学与多粒子模拟

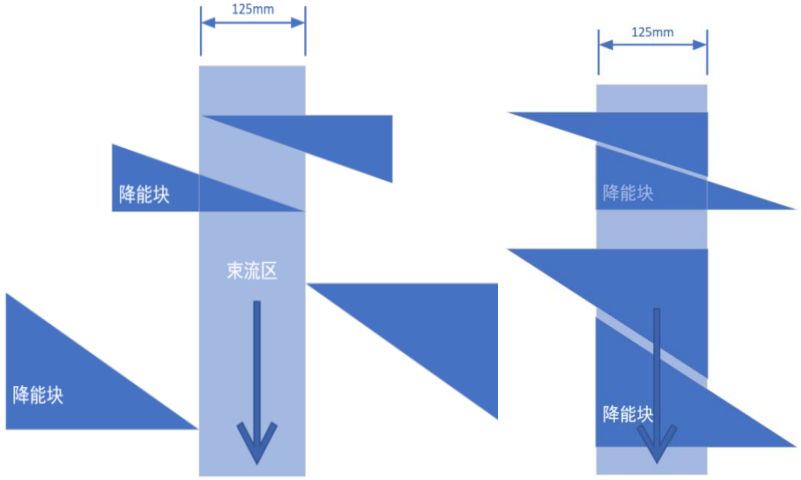
降能与准直：形成实验所需束流

通过束流降能与束流准直，覆盖不同束流能量与束流流强应用场景



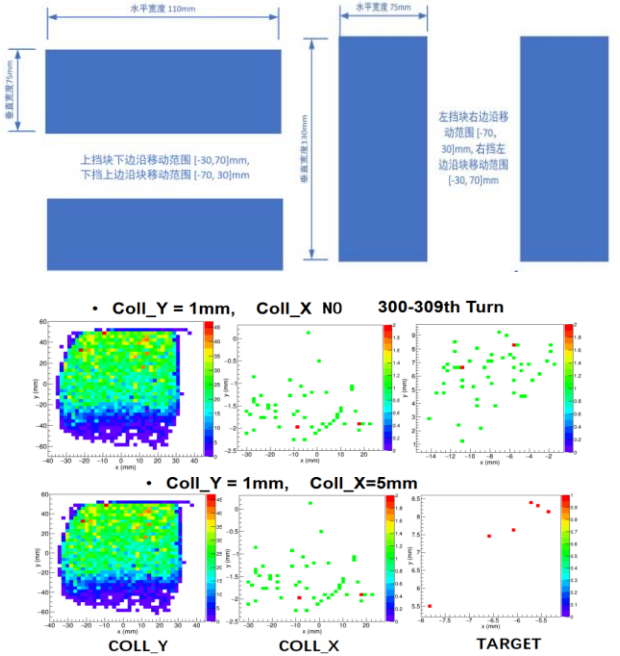
RABT 降能器与准直器布局示意图

两级降能方案



- RCS直接引出约1.6 GeV；通过降能系统覆盖约0.8–1.6 GeV。
- 纵向占用空间： ≤1.4 m
- 降能材料：不锈钢
- 纵向厚度调节范围： 50 到 850 mm

水平垂直准直

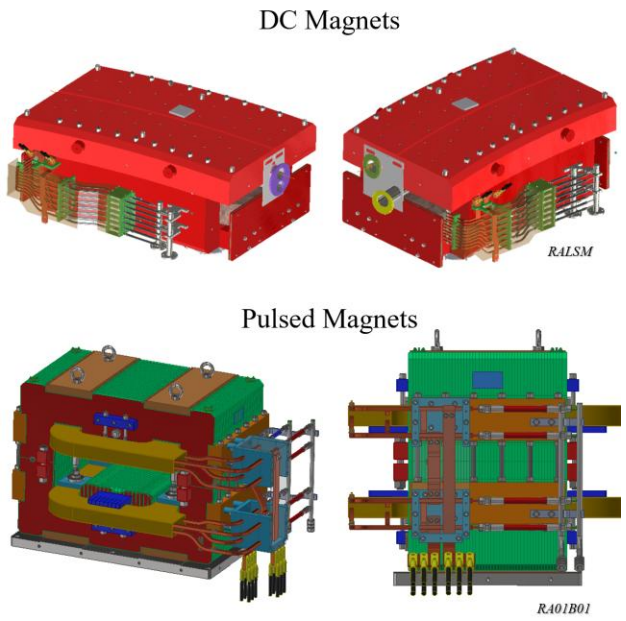


- 限制横向接受度，控制终端束斑和束流范围。
- 开口最小间隙： 1 mm
  开口调节步长 0.2 mm
- 可实现准单粒子束流

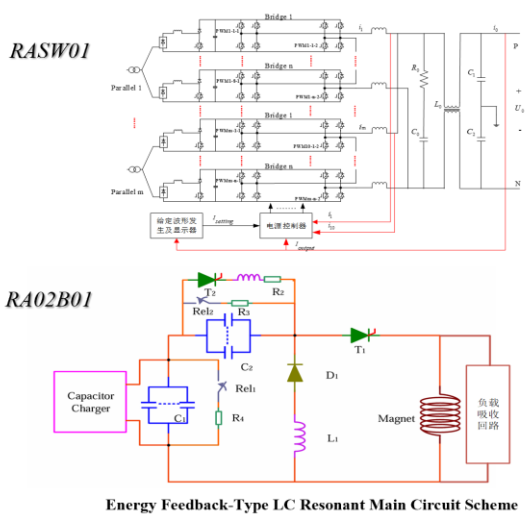
束线设备研制进展

RABT关键硬件设备均已完成工程设计，开始加工制造

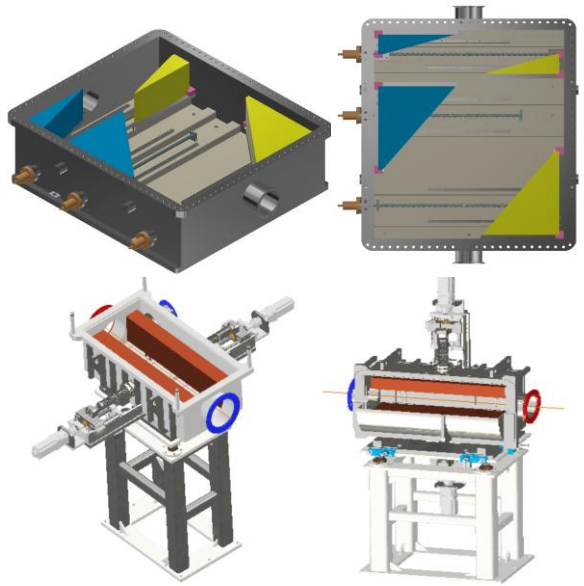
- 束流光学和设备参数固化，关键硬件设备完成工程设计评审
- 常规束线设备已进入研制阶段，包括：各类磁铁、电源、真空系统、降能、准直，支架等机械设备
- 2027年起各硬件设备将按计划陆续进入验收和安装、联调阶段



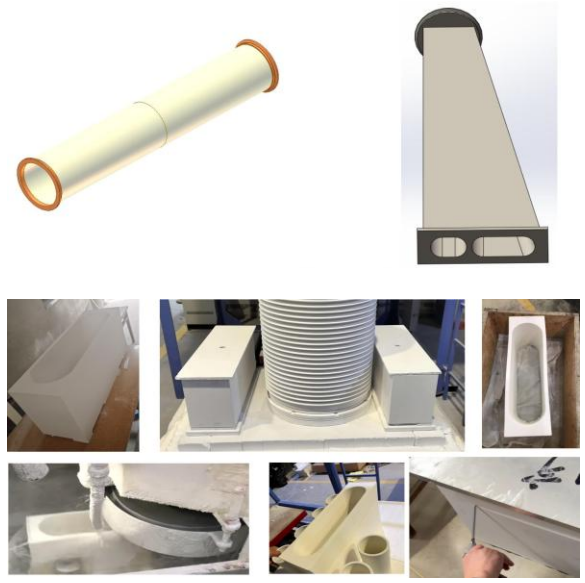
直流与脉冲磁铁



脉冲磁铁电源



机械设备：降能器、准直器



陶瓷真空盒

束流实验计划

硬件条件 （已完成）

- 完成引出区改造和散射器安装
- 完成散射器控制程序等测试
- 完成RDBT改造

束流条件

- 运行期间 RCS 主束不引出
- 环高频在引出时序结束后延时 0.05ms 关闭腔压，磁铁电源保持常规正弦波形运行
- 实验采用单发模式，单发粒子数3.12×10^{12}，触发频率 2次/min
- 散射器与靶高功率测试：200 kW （25 Hz 主束）

实验内容 1. 散射器整机测试 （已基本完成）

开展设备长时间连续运行试验，监测转速、相位、振动、真空度等关键参数稳定性；完成本地、远程控制系统与定时、机器保护等系统联调，验证无束、带束工况下设备运行可靠性，测试过程不影响加速器常规供束。

实验内容 2. 散射靶性能研究

针对金刚石靶开展高速、高温、高辐照环境下的寿命考核；未来计划测试不同材质、不同形态（针靶 / 宽靶）散射靶的引出效率与综合性能，完成靶形、选材对比试验。

实验内容 3. 束流引出物理实验（10月下旬）

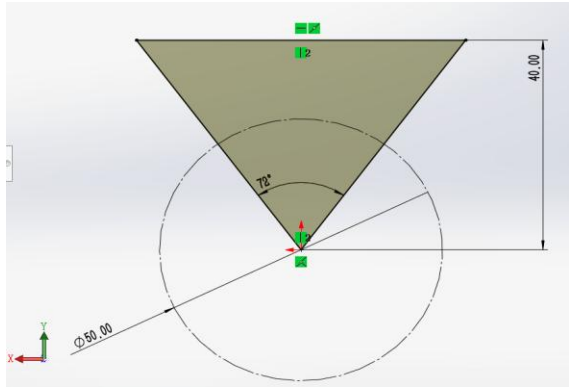
- 完成等效20 kW测试束流的调试，twiss、轨道等参数的测量；
- 完成散射器、RTBT-RDBT 磁铁参数优化，实现散射引出粒子至探测器的稳定传输；
- 对散射器同步相位、靶插入深度、20ms 束流凸轨开展多维度参数扫描，确定最优工作模式；
- 测量引出束流横向、纵向相空间参数，分析粒子数随圈数 / 时间的变化规律，研究束流运行重复性；
- 结合实测束损数据，进一步优化区域屏蔽设计方案。

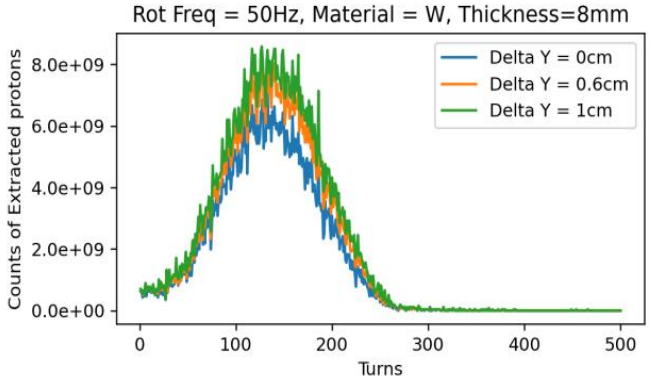
更高流强的多脉冲高能质子束设计

通过新的引出方案，CSNS具备提供更高流强（10^9~10^{11} proton/pulse）的多脉冲高能质子束流的潜力

方案-1：散射引出

散射器，宽钨靶

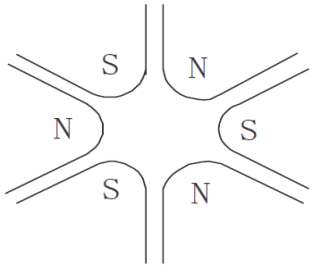


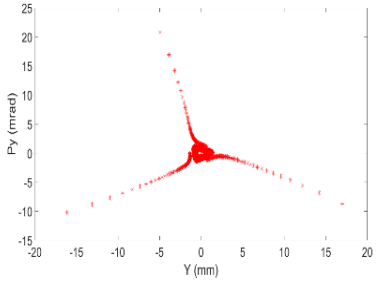


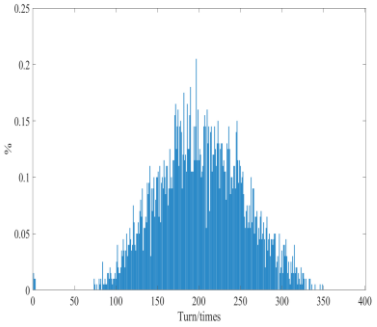
约5×10^9，约100个脉冲
改动小但束损相对高

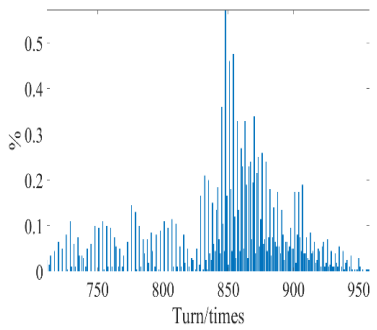
方案-2：共振慢引出

交流斜六极铁，RF Knockout，切割磁铁





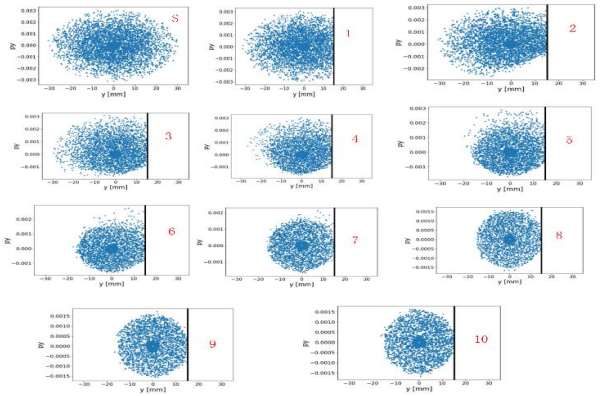


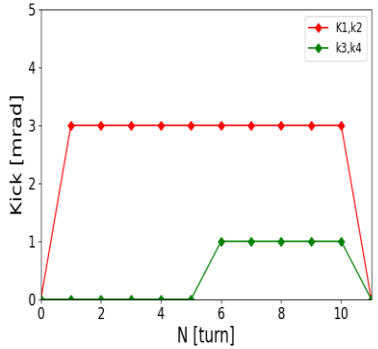


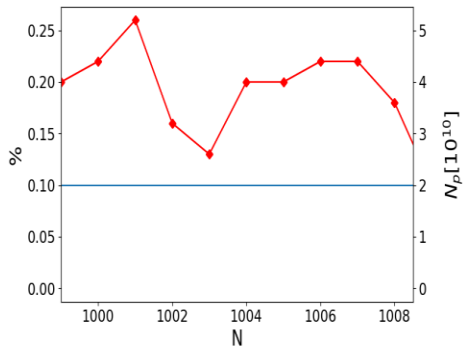
约1×10^{10}，超过100个脉冲
流强稳定性问题

方案-3：多圈快引出

快脉冲磁铁，切割磁铁







约1×10^{11}，约20个脉冲
RCS引出区改造较多

总结

01 **束流形成**

HPES质子束从RCS多圈散射引出开始，经过传输、降能和准直，最终形成实验需要的能量、流强、束斑和时间结构。

02 **物理设计**

散射引出、束流输运以及0.8–1.6 GeV降能和准直方案已经完成主要物理设计，确定硬件参数。

03 **硬件进展**

散射器/靶已完成制造、测试和RCS安装；束线设备完成设计并进入研制。

04 **下一步**

完成散射器安装后的无束测试后，计划10月下旬开展首次散射引出带束实验。2027年开始陆续开始设备验收与安装测试。