



中国散裂中子源
Chinese Spallation Neutron Source

高能质子实验终端谱仪探测系统

报告人：郭宇航

高能质子实验终端研发团队

2023年10月19日

目 录

CONTENT

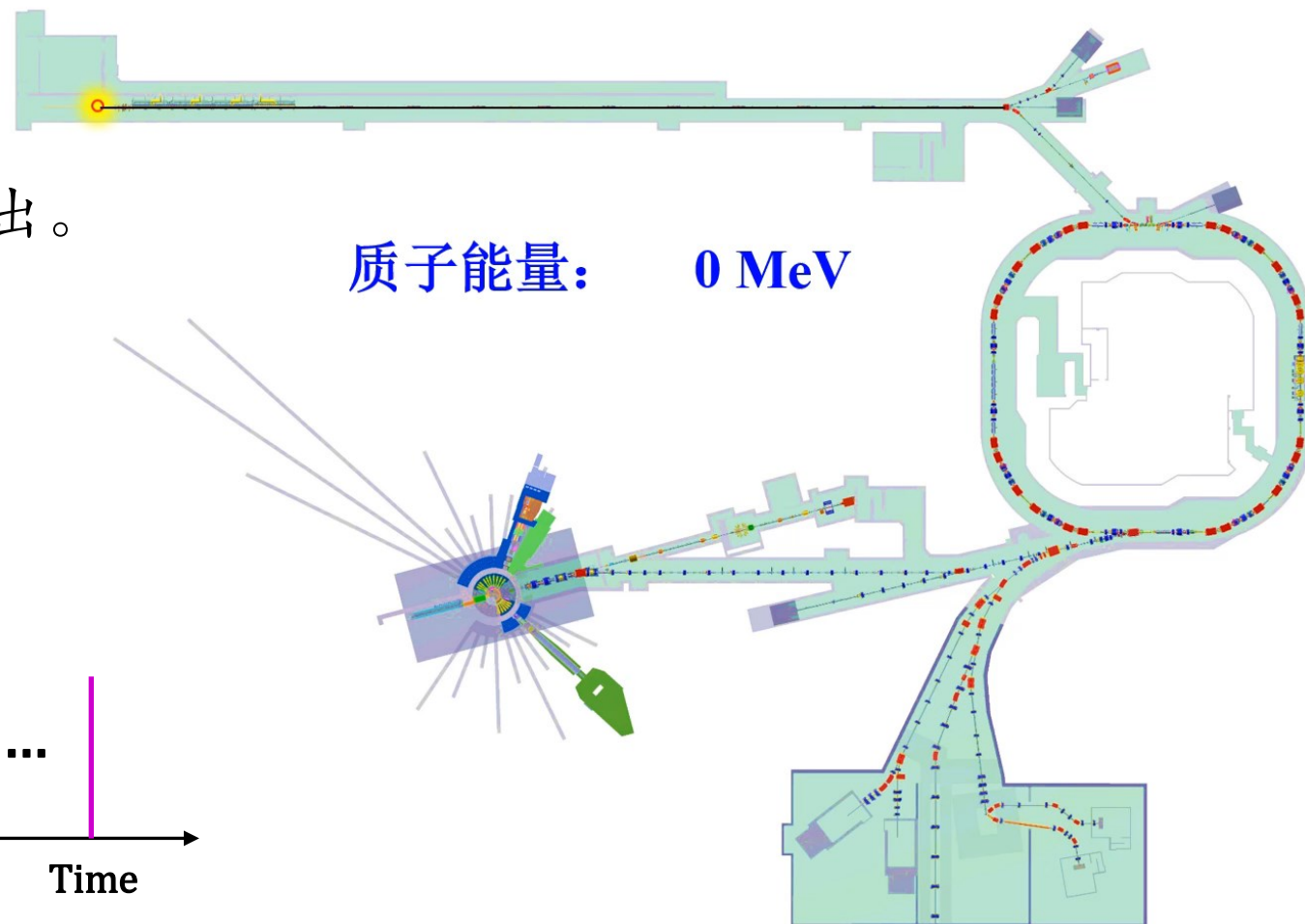
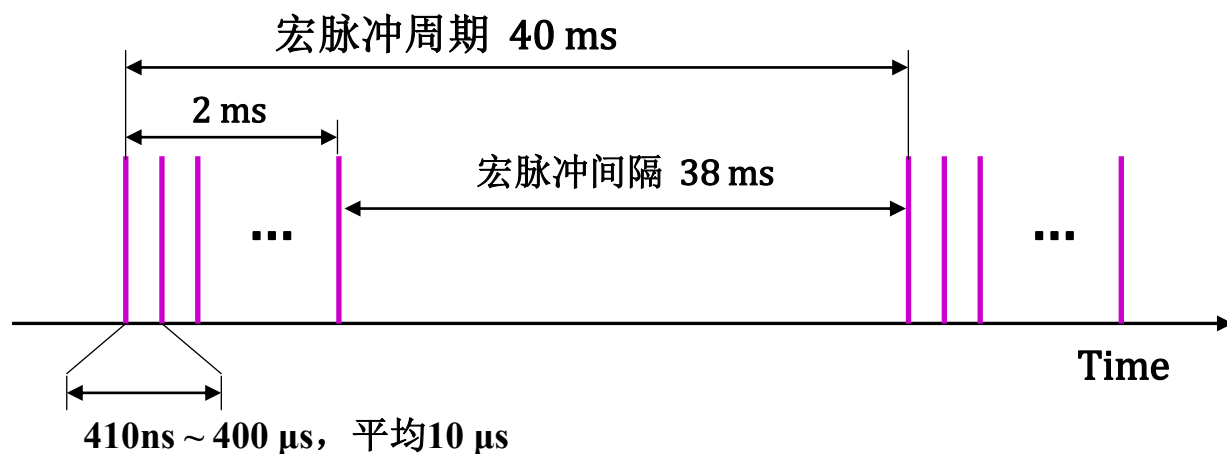
1. 高能质子实验终端介绍
2. 谱仪探测系统与应用
3. 研究进展与测试计划
4. 总结与展望

1.1 高能质子实验站

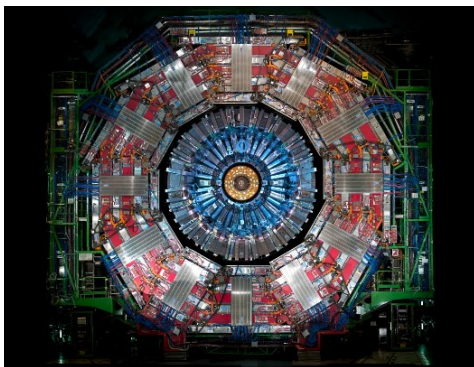


高能质子实验站 (HPES)

- ▣ CSNS二期建设的实验站之一。
- ▣ 通过环散射器将RCS质子主束引出。
- ▣ 中国第一台1.6 GeV质子源。
- ▣ 弱流质子束→准单粒子束流。

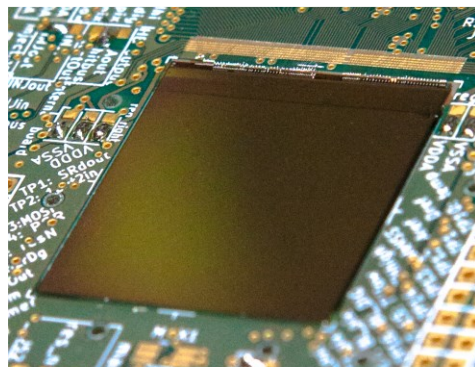


1.2 高能质子束流的用途



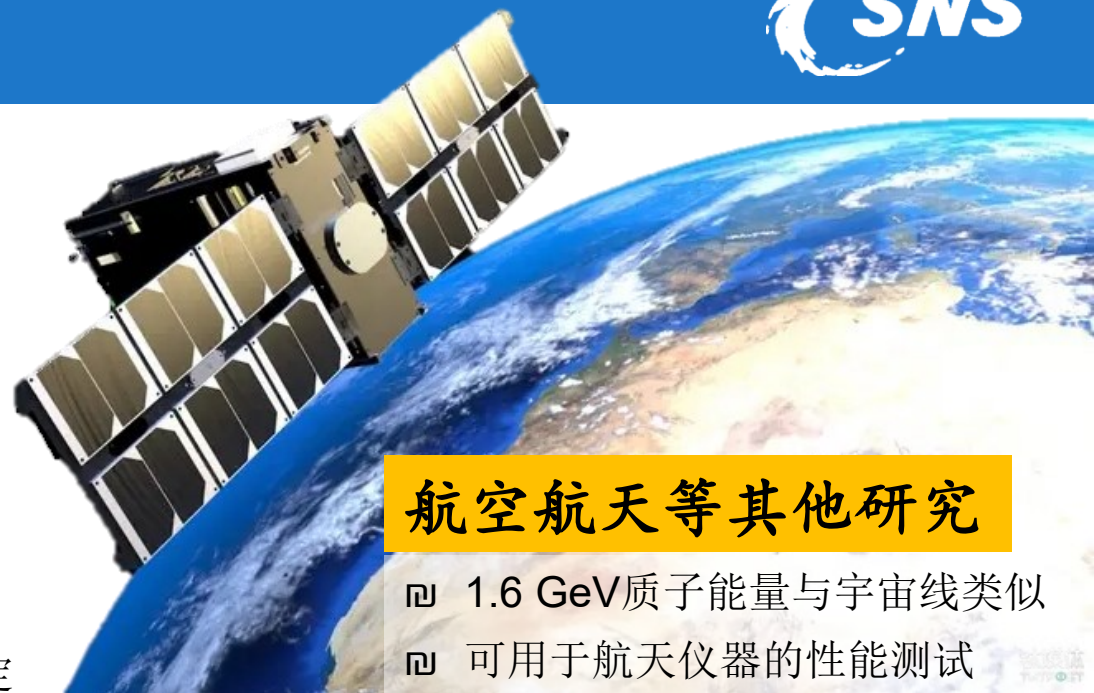
量能器标定

- ▣ 提供800~1600 MeV质子
- ▣ 大型强子对撞机的量能器标定



像素探测器标定

- ▣ 1.6 GeV质子最小电离，穿透性好
- ▣ 为位置探测器提供10 μm 位置标定



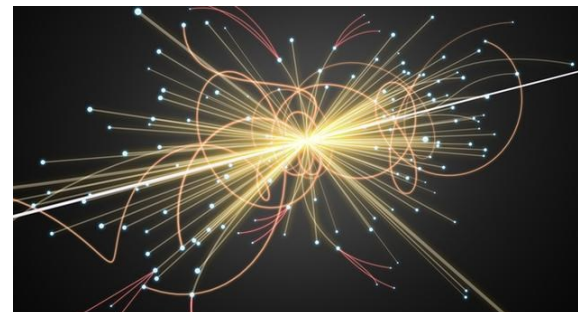
航空航天等其他研究

- ▣ 1.6 GeV质子能量与宇宙线类似
- ▣ 可用于航天仪器的性能测试



质子照相

- ▣ 结合束流望远镜等实验设备
- ▣ 为质子照相技术研发提供测试平台



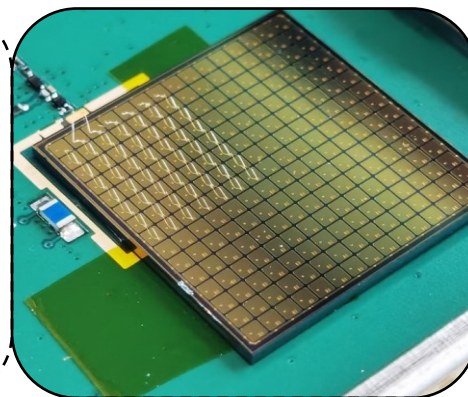
粒子物理研究

- ▣ 核数据库拾遗
- ▣ 寻找暗物质
- ▣ 质子基本参数测量

1.2 CSNS-高能质子实验终端



时间
闪烁体

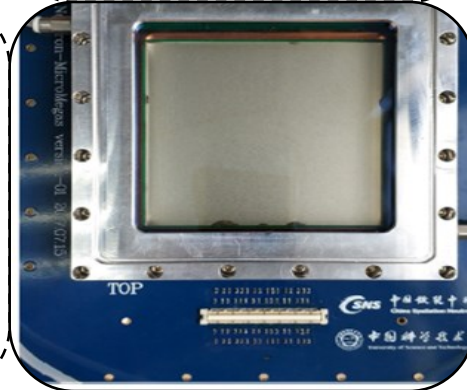


束斑
Micromegas

径迹
硅像素



能量
LGAD



使用多种类探测器对高能质子束提供的1.6 GeV质子进行4D径迹测量

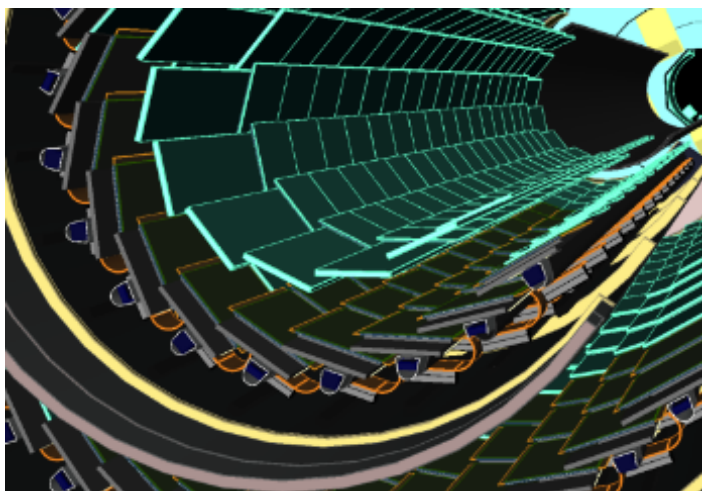
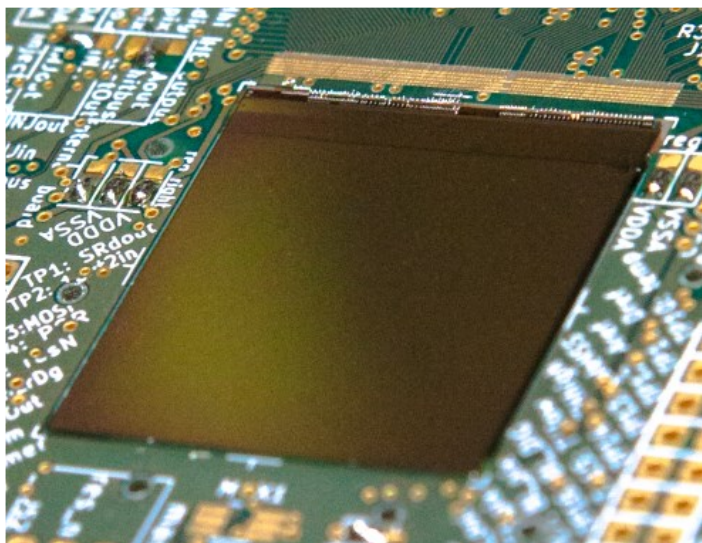
2. 谱仪探测系统与应用



- HPES总计有6套谱仪探测系统：
 - 束流设备：测量质子信息，辅助用户完成实验。
 - 束测设备：测量束流信息，保证用户实验安全进行。
- HPES的探测系统设计原则：以用户需求为本。

	设备名称	探测手段	关键参数
束流设备	能量测量系统 (LEMS)	LGAD	能量分辨率 < 1%
	束流望远镜 (Telescope)	硅像素探测器	位置分辨率 < 10 μm
	触发系统 (FLASH)	快塑闪	触发时间精度 1 ns
束测设备	流强测量系统 (BMOS)	SiC	计数率 > 10^5 p/s
	流强刻度系统 (PROUD)	塑闪	动态测量范围 $1\sim 10^8$ p/s
	束斑测量系统 (PALET)	Micromegas	位置分辨率 < 150 μm

2.1.1 像素探测器标定



- 硅像素探测器，位置精确度 $3\sim 30\ \mu\text{m}$ 。
- 用途：对撞次级粒子径迹测量、医疗、雷达、无损检测。
- 需要大量束流资源，进行探测器位置分辨率标定。
- 1.6 GeV质子束流穿透性能好，十分适合位置探测器标定。

名称	像素阵列	像素大小/ μm^2	应用实验	类型
FE-I4	80×160	50×250	ATLAS	Hybrid
Timepix3	256×256	55×55	GET-TPCs	Hybrid
ULTIMATE	928×960	20.7×20.7	RHIC STAR	Monolithic
ALPIDE	512×1024	28×28	ALICE ITS	Monolithic
ATLASPix3	132×372	150×50	ATLAS	Monolithic
Mupix10	250×256	80×80	Mu3e	Monolithic
JadePix3	512×192	16×23	CEPC	Monolithic
TaichuPix-2	192×64	25×25	CEPC	Monolithic

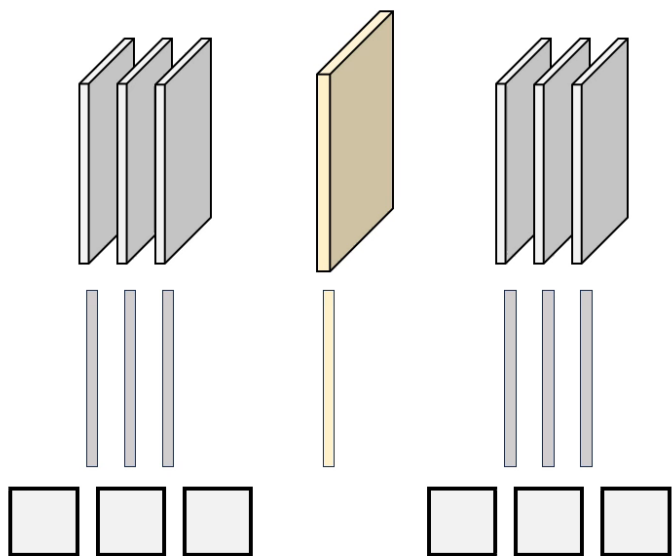
2.1.2 束流望远镜

Thanks to 董明义团队!



- 位置探测器的标定需要设备支持：束流望远镜
 1. 采用4~6片**像素探测器**，实现质子径迹高精度重建
 2. 为待测像素探测器提供**高精度的位置标定**。
- 方案：采用MIMOSA28，搭建一套束流望远镜。
- DUT位置测量精度好于**10 μm** 。

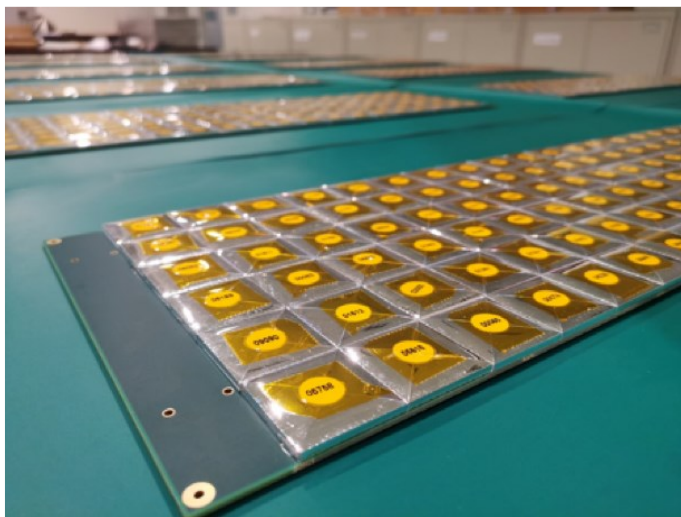
参数	需求
定位精度	< 10 μm
探测器位置精度	< 10 μm
总芯片数	4~6片



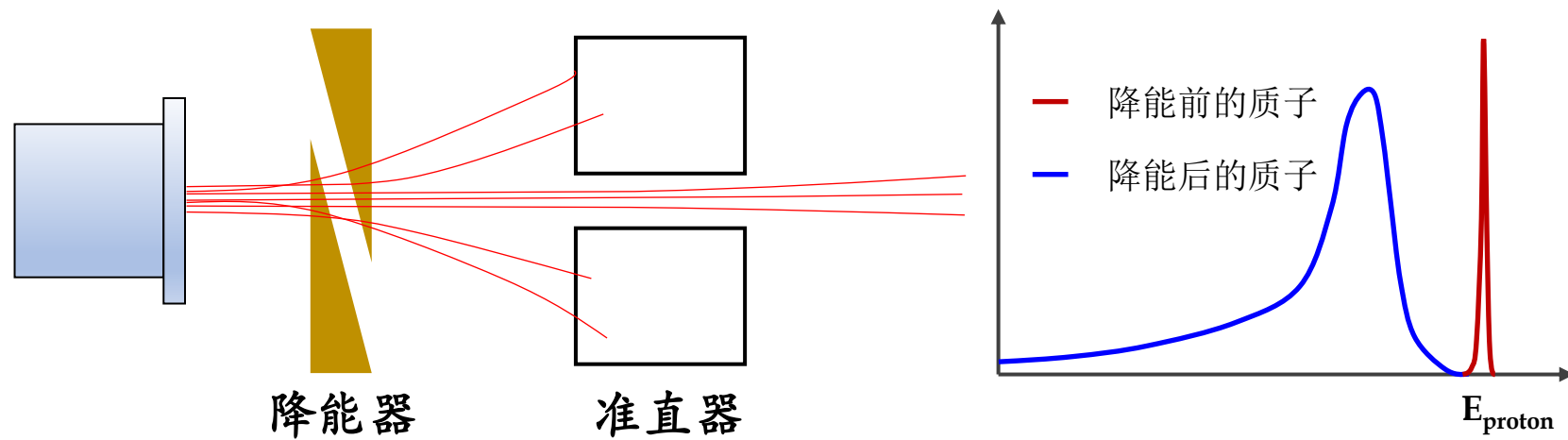
EUDET telescope @ DESY

- γ 硅像素探测器×6
- γ 塑闪×4
- γ 数据采集系统
- γ 机箱与机械台架
- γ 温度、湿度监控系统
- γ 冷却系统

2.2.1 量能器标定



- CEPC对撞次级粒子能量重建依赖量能器，ECAL/HCAL。
- BGO/Glass + SiPM，即将进入样机测试阶段。
- 需大量束流资源做能量标定，目前重度依赖DESY/CERN。
- HPES可将质子降能使用，提供 800 ~ 1600 MeV 质子。
- 需要HPES协助测量质子能量，精度需求：1% @ 1.6 GeV

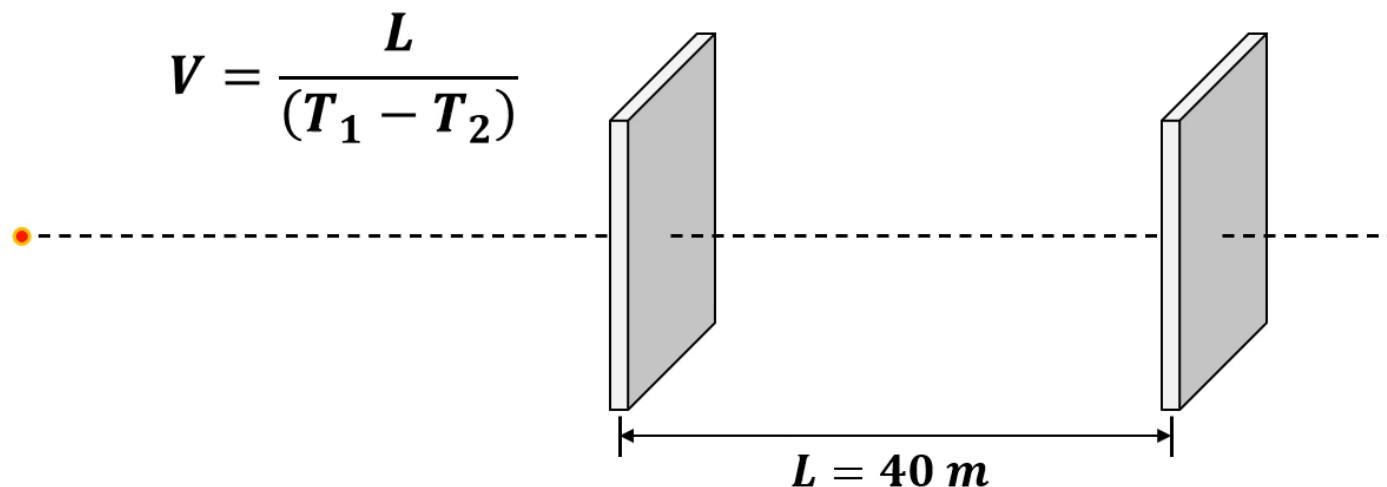
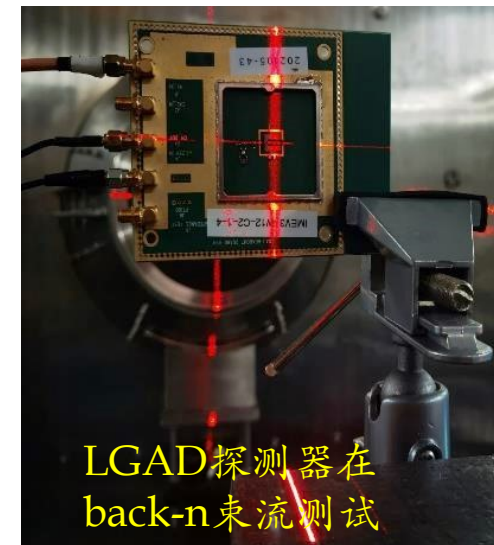


2.2.2 能量测量系统

Thanks to 梁志均团队!



- HPES提供能量测量系统（LEMS）。
- 采用LGAD探测器进行高精度飞行时间测量 → 质子能量。
- 测量每个质子的能量，能量分辨率好于 1% @ 1.6 GeV。
- 探测器距离40 m，时间分辨率好于70 ps。



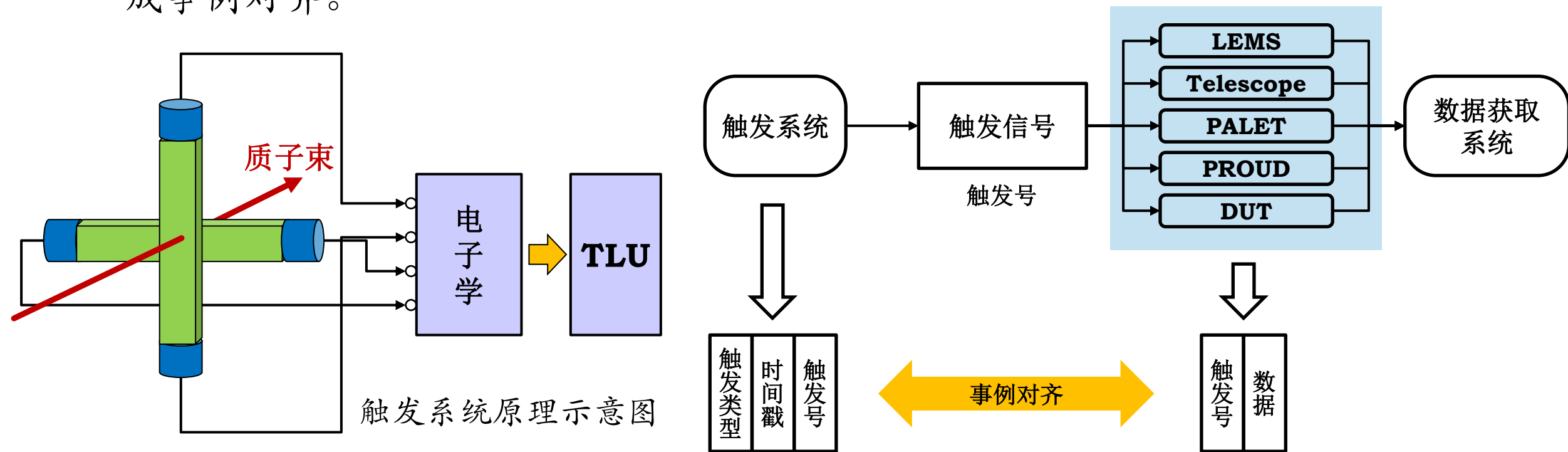
参数	需求
能量分辨率	1% @ 1.6 GeV
飞行时间精度	100 ps @ 40 m
探测器时间分辨率	70 ps

2.3 触发系统与数据获取系统

Thanks to 钱森、章红宇团队!



- 上述实验开展，都需要将探测器间的数据按质子事例对齐。
- 需要为每个质子事例生成一个触发号，并分发给各个系统。
- 各系统将触发号与数据打包后，上传给数据获取系统，用户线下根据触发号完成事例对齐。

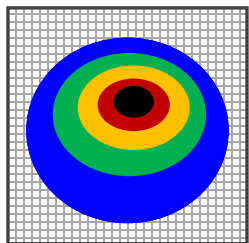


2.4 HPES的束测谱仪

Thanks to 易晗、吕游、史欣团队!



束测谱仪：对束流统计信息进行测量



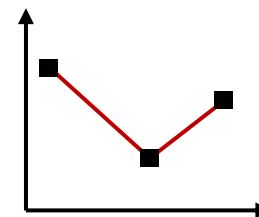
束斑测量系统

Micromegas 探测器

X p/s

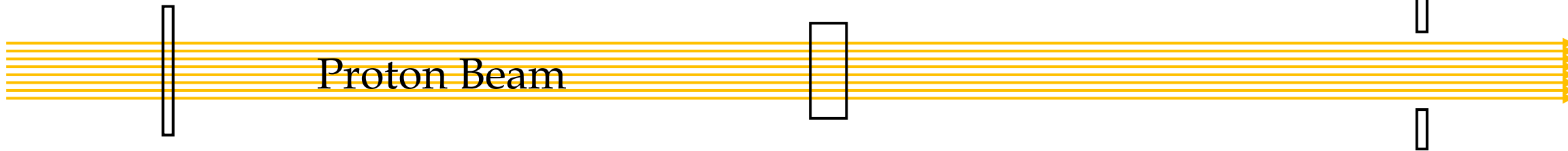
流强刻度系统

闪烁体+PMT



流强在线测量系统

SiC 探测器



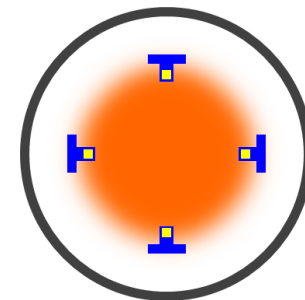
- 测量高能质子束斑分布

参数名称	参数值
计数率	10 kHz
灵敏区面积	$10 \times 10 \text{ cm}^2$
位置分辨率	$150 \mu\text{m}$

- 测量质子绝对流强
 - 调束，确保单粒子束。
 - 直接测量质子束流强度，为日常流强测量提供标定。

- **要求：动态范围大**
($10^4 \sim 10^9 \text{ p/s}$ or $0.2 \sim 20000 \text{ MIP}$)

- 间接测量质子流强
- 长期、在线流强监测



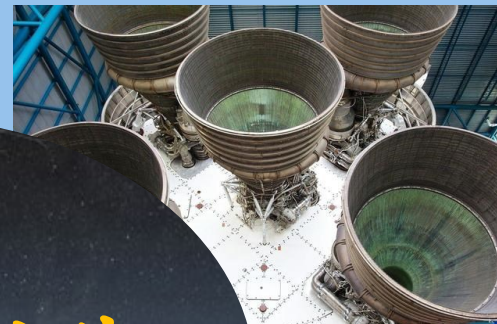
航天仪器抗辐照加固研究

- ▣ 仪表
- ▣ 芯片
- ▣ 电路



航天材料辐照效应研究

- ▣ 复合材料
- ▣ 超轻材料
- ▣ 纳米材料



宇宙射线

空间辐照实验研究

- ▣ 生物材料
- ▣ 农业育种
- ▣ 医疗药物



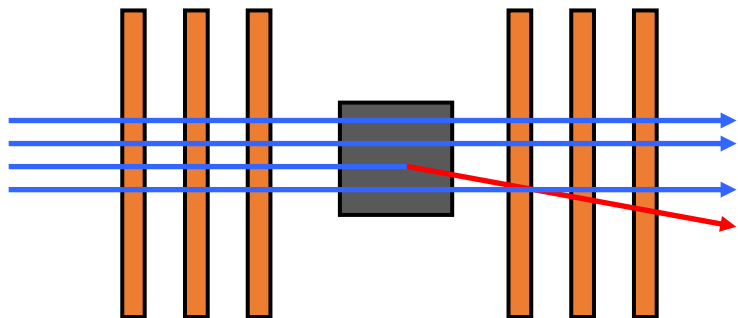
宇宙物质成分分析研究

- ▣ 月壤
- ▣ 小行星
- ▣ 在线分析

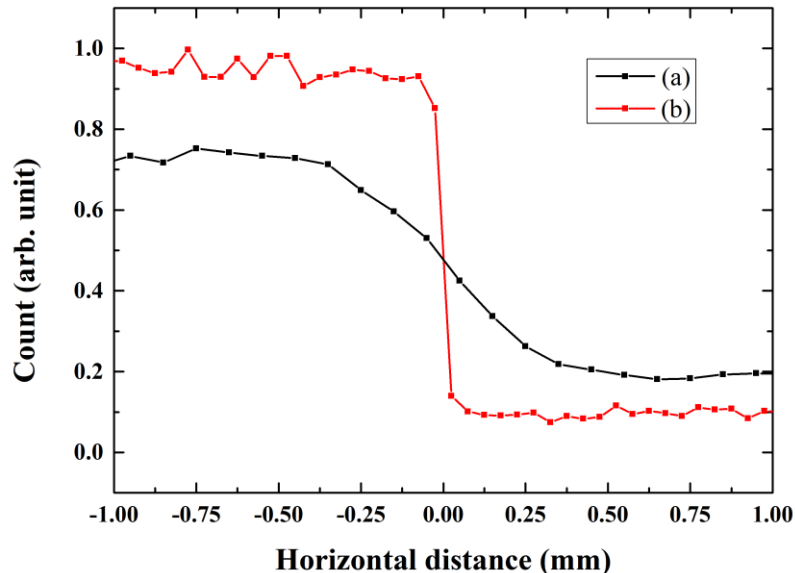
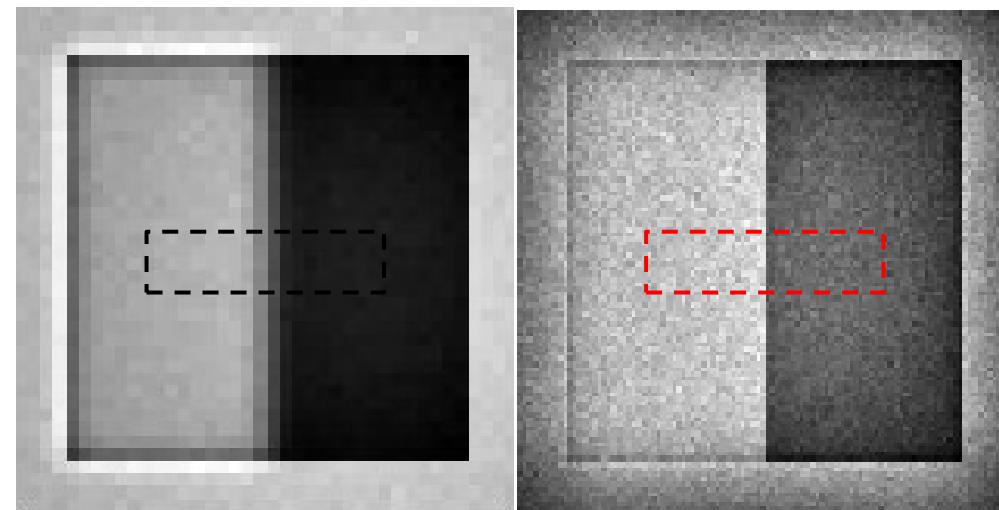
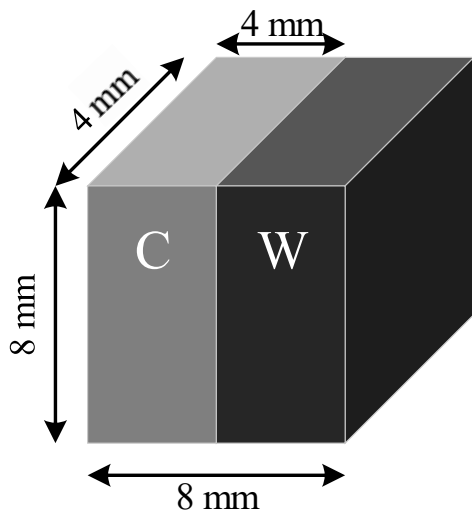


2.6 质子照相

感谢田斌斌提供的研究资料!

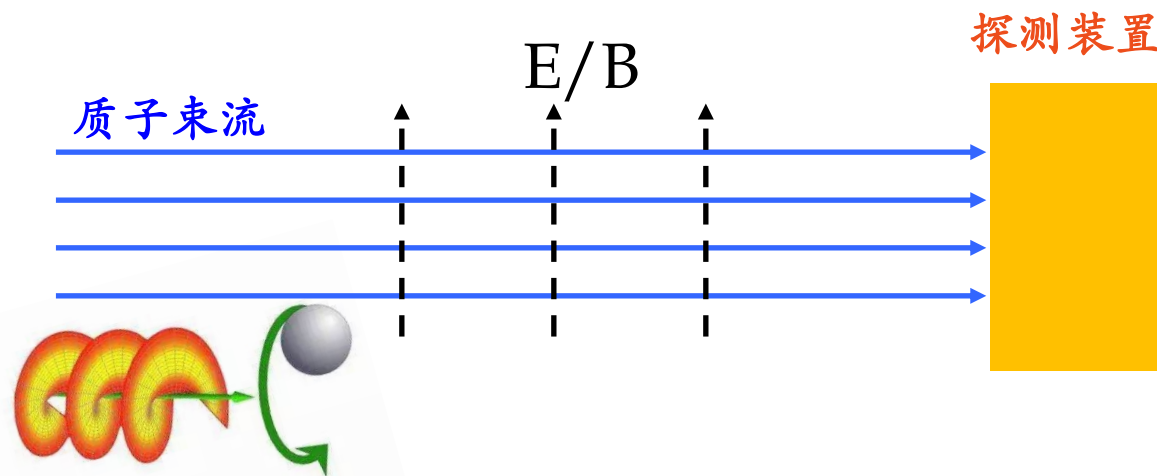
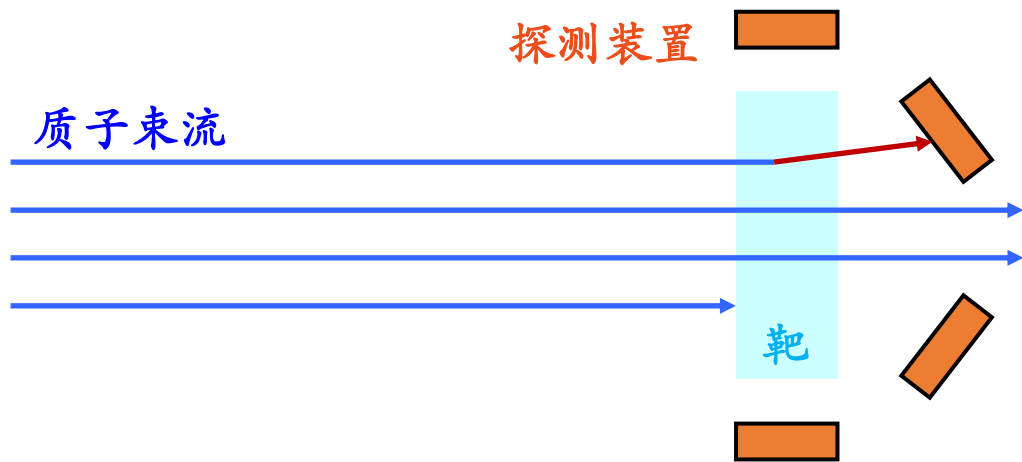


利用束流望远镜重建小角度散射质子径迹



- 径迹重建后可观察到两种材料的分界面
- 位置投影法筛选后，界面分辨率大幅度提升

高能质子束可应用于质子照相



- ※ pp散射截面测量
- ※ ppX散射截面测量
- ※ 质子电偶极矩 (pEDM) 探测
- ※ $p \rightarrow X$ 暗物质寻找实验
- ※ 寻找质子碰撞宇称不守恒实验

- 感谢以下老师们提供思路：
 - SJTU李政道研究所 李亮、许金祥
 - 高能物理研究所 阮曼奇、鲍煜等
- 以上思路还参考了
 - CERN的AWAKE实验
 - 兰州近物所的HPLUS实验
 - FZJ的EDDA实验

目 录

CONTENT

1. 高能质子实验终端介绍
2. 谱仪探测系统与应用
3. 研究进展与测试计划
4. 总结与展望

3.1 HPES的研究进展

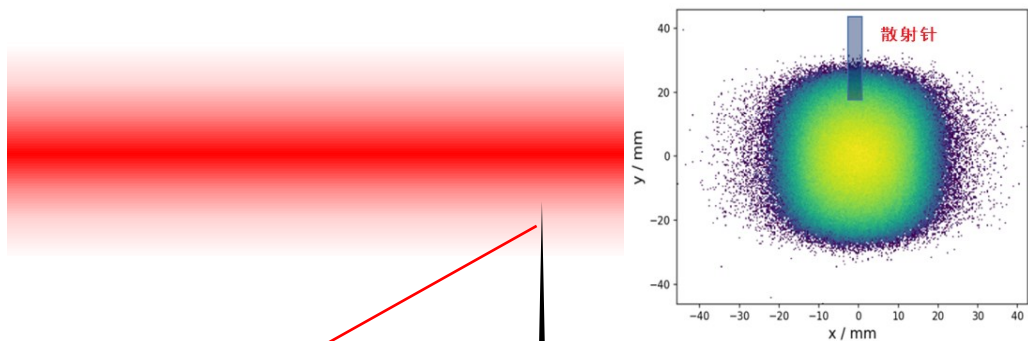
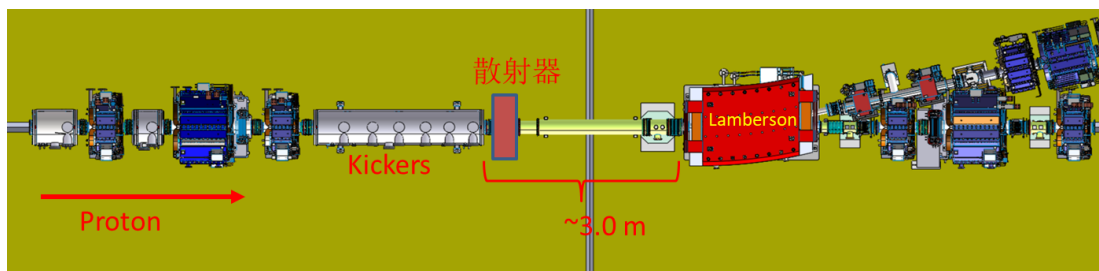


时间	MILESTONE
2022.02 ~ 2023.12	实验终端探测系统设计
2022.12 ~ 2023.03	初步设计报告撰写
2023.12 ~ 2025.12	束线隧道与高能质子实验大厅土建与通用安装
2023.12 ~ 2025.12	实验终端制造、搭建与调试
2026.01 ~ 2026.06	质子束线安装与调试
2026.07 ~ 2027.12	实验终端探测系统在束调试
2028.01 ~ 2028.12	整体试运行并验收

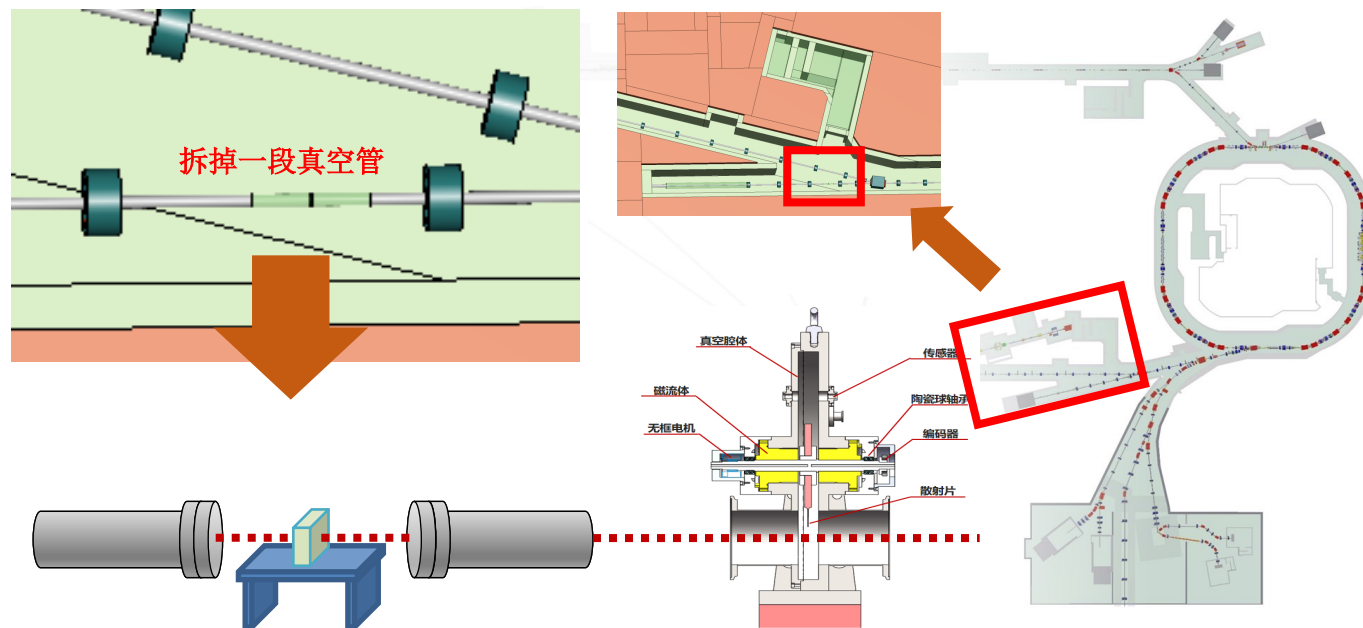
- 目前实验终端各探测系统设计顺利进行中，初步设计报告已完成。
- 预计**27**年底完成探测系统的在束调试，**28**年底完成验收。

3.2 HPES的R-dump测试平台

Very Preliminary !!



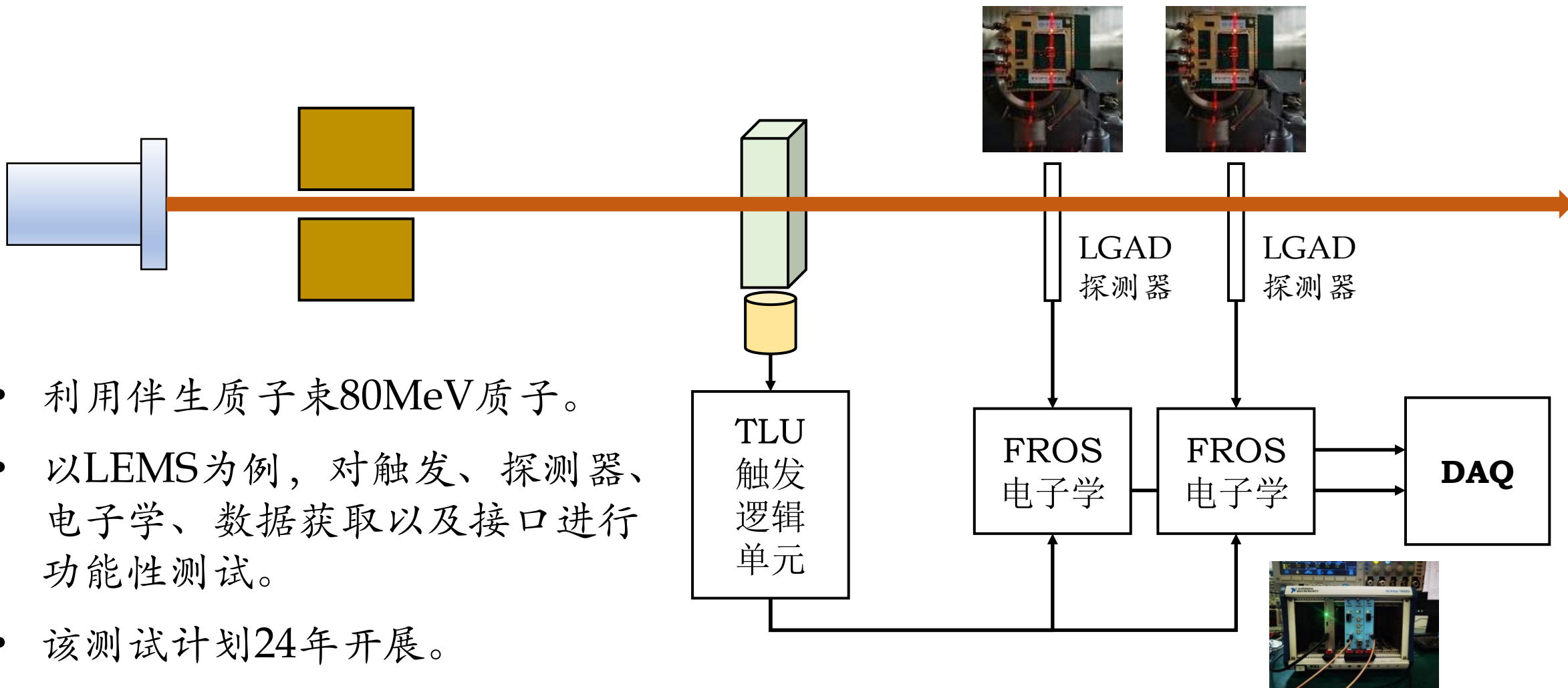
hPES质子引出示意图



- 环散射器是HPES最关键的设备。
- 实际引出效果需要提前通过实验验证。

- 在R-dump前的RTBT管线中拆掉一段真空管。通过PROUD测量实时流强。
- 环散射器调试成功后，将能根据实际需求，提供强/弱流质子束流。

3.3 HPES prototype 1.0 测试



- 利用伴生质子束80MeV质子。
- 以LEMS为例，对触发、探测器、电子学、数据获取以及接口进行功能性测试。
- 该测试计划24年开展。

4. 总结与展望



- 高能质子实验终端的主要建设目标是为CEPC探测器标定服务。
 - 六套探测系统
 - 数据获取系统
 - 触发逻辑方案
- 此外，高能质子实验终端还可以开展其他工作：
 - 航天实验应用测试
 - 质子照相
 - 粒子物理研究
- 初步设计已完成，下一步的研究重点：
 - ▣ 电子学研发
 - ▣ 触发逻辑与接口
 - ▣ 数据获取系统测试
- 期待我国第一条1.6GeV高能质子应用束线早日建成!

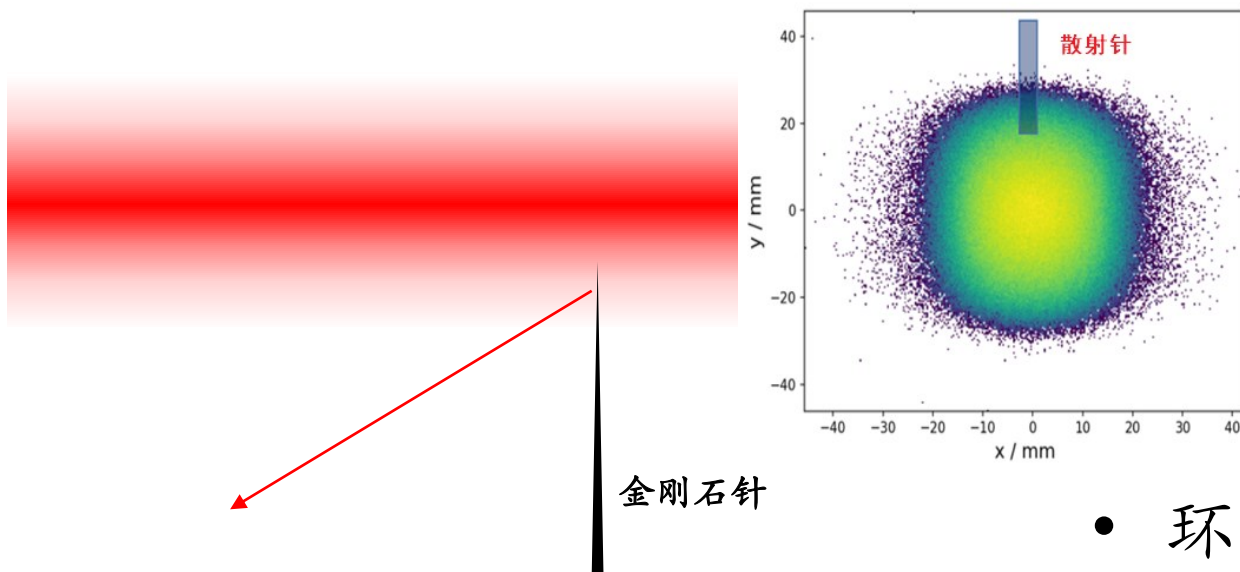
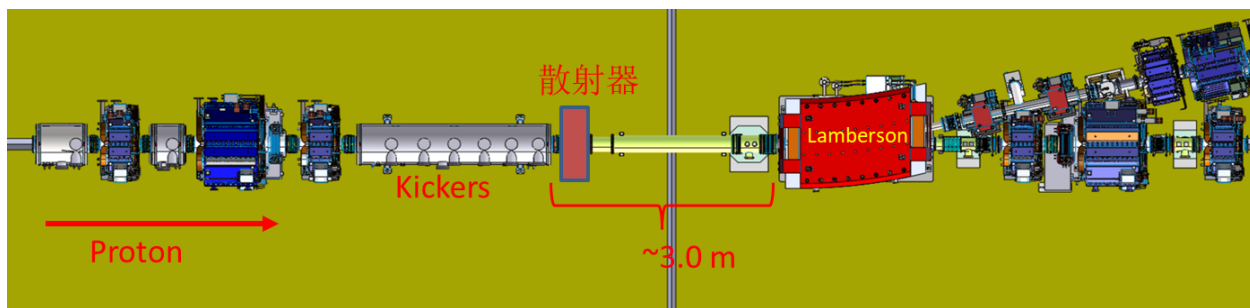
	设备名称	探测手段	关键参数
束流设备	能量测量系统 (LEMS)	LGAD	能量分辨率 < 1%
	束流望远镜 (Telescope)	硅像素探测器	位置分辨率 < 10 μm
	触发系统 (FLASH)	快塑闪	触发时间精度 1 ns
束测设备	流强测量系统 (BMOS)	SiC	计数率 > 10 ⁵ p/s
	流强刻度系统 (PROUD)	塑闪	动态测量范围 1~10 ⁸ p/s
	束斑测量系统 (PALET)	Micromegas	位置分辨率 < 150 μm

致谢

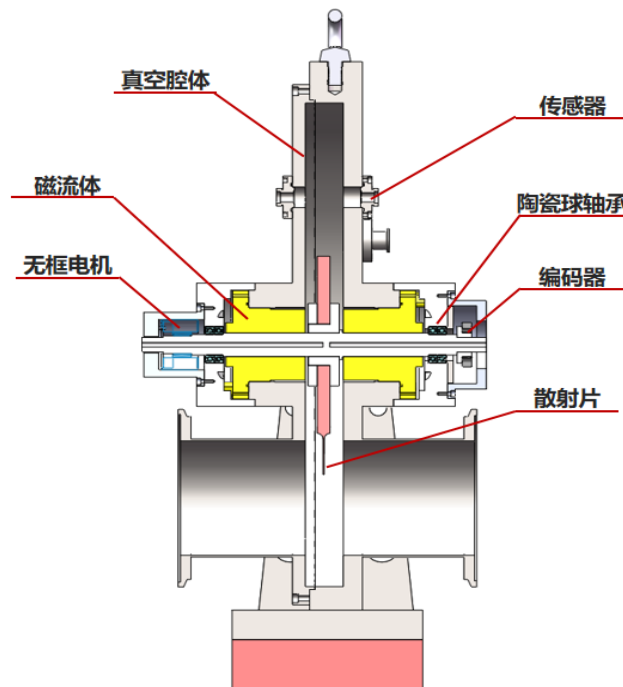


承蒙厚爱
感谢倾听
Thanks!

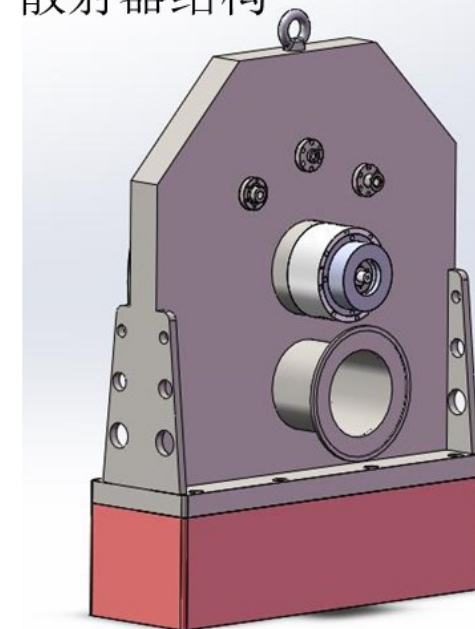
3.2 HPES的R-dump测试平台



hPES质子引出示意图

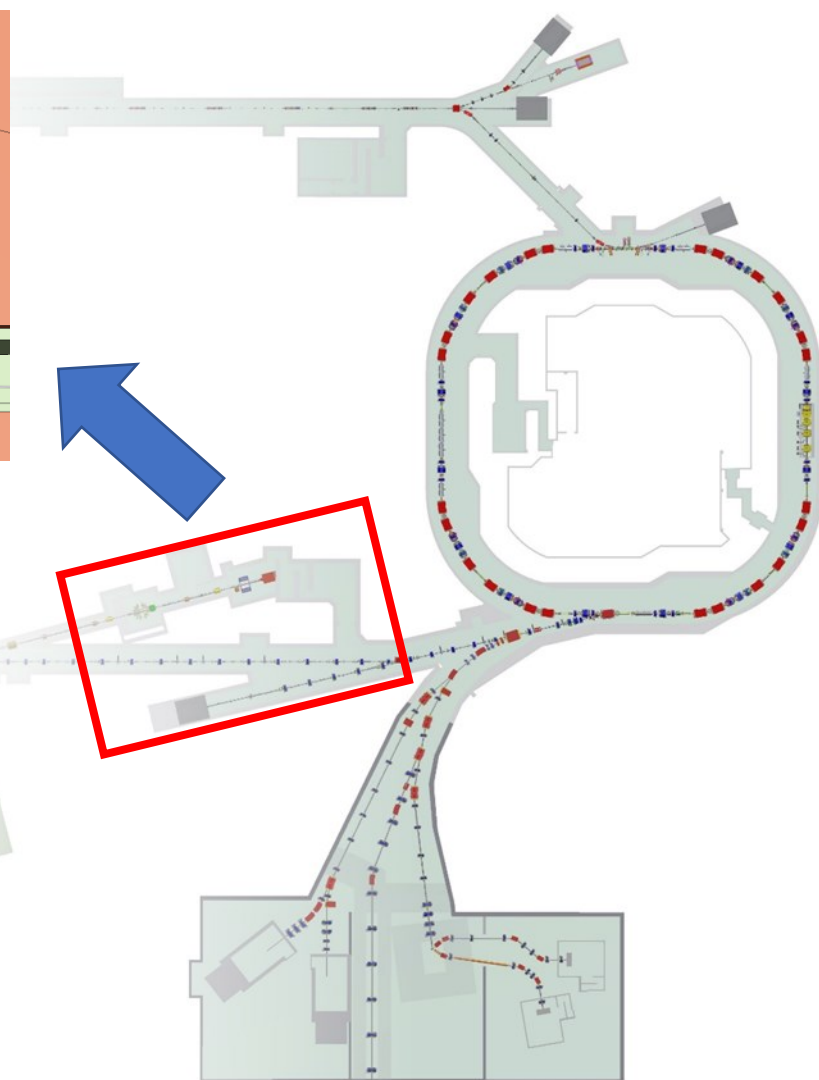
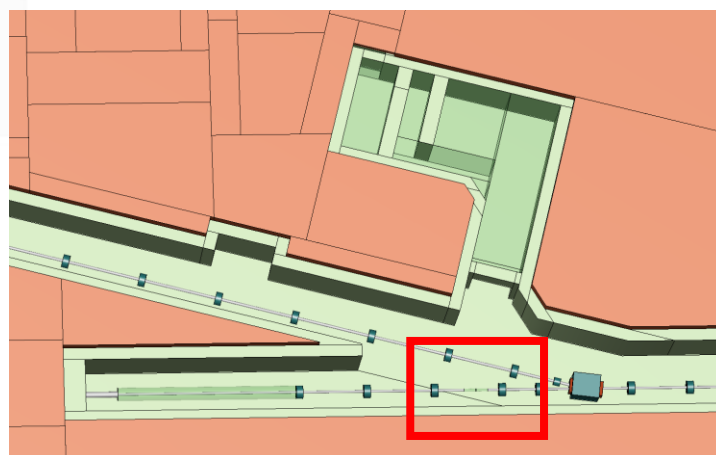
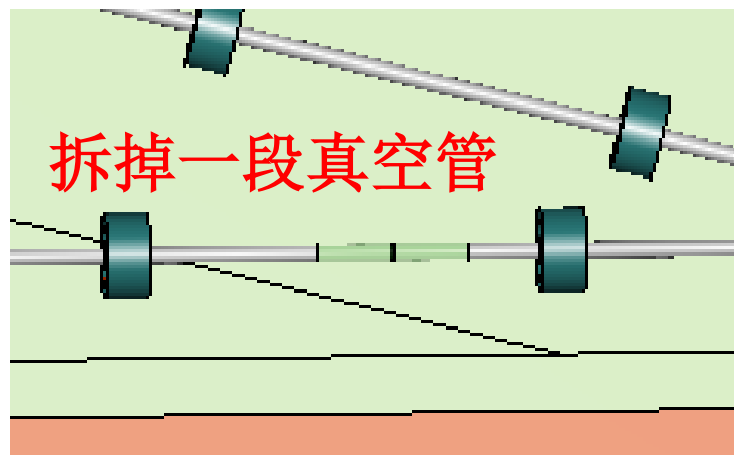


散射器结构



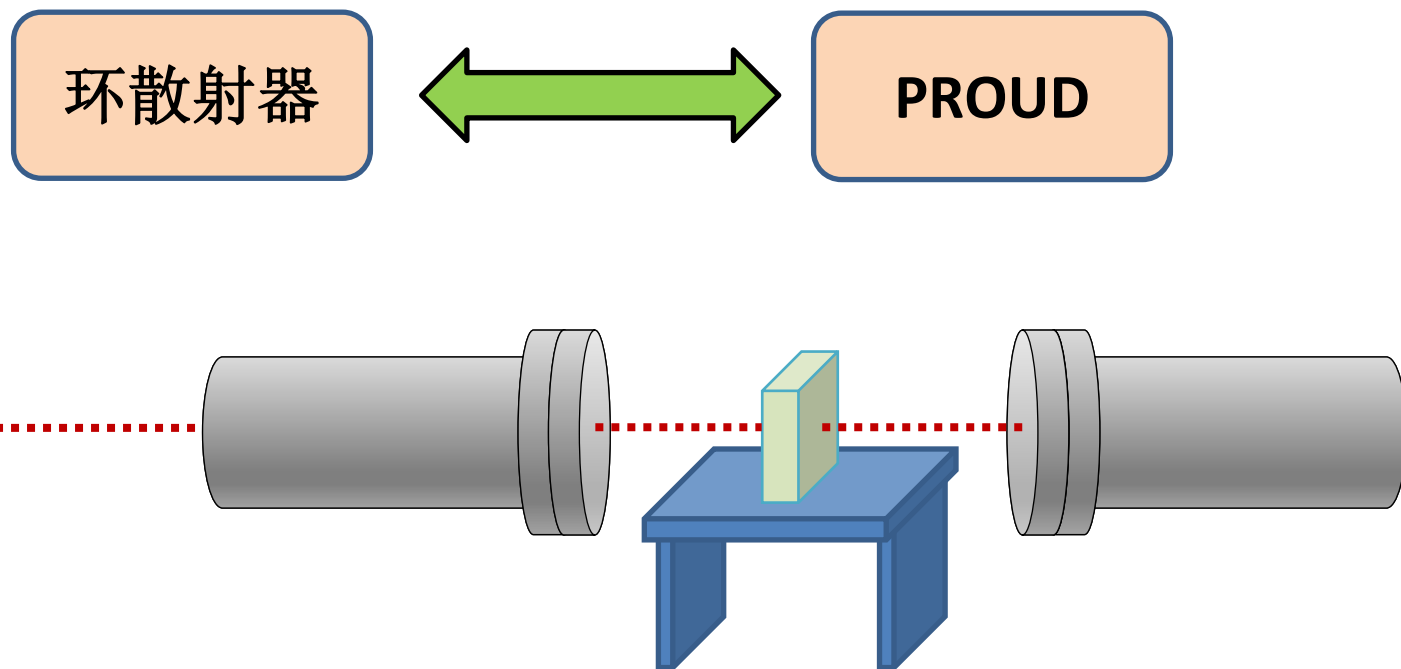
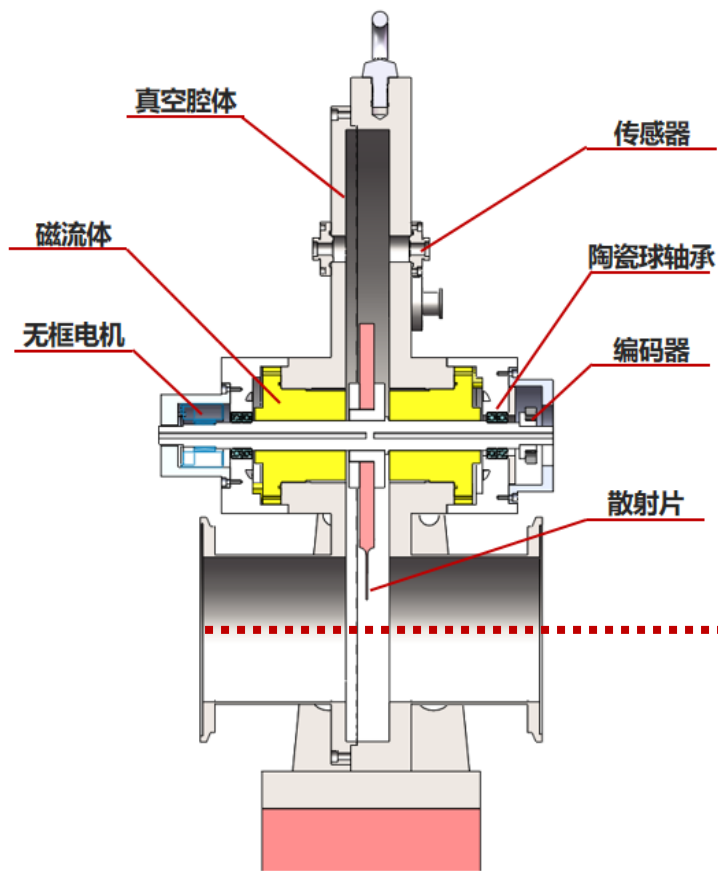
- 环散射器是HPES最关键的设备。
- 实际引出效果需要提前通过实验验证。

3.2.1 改造方案（拟）



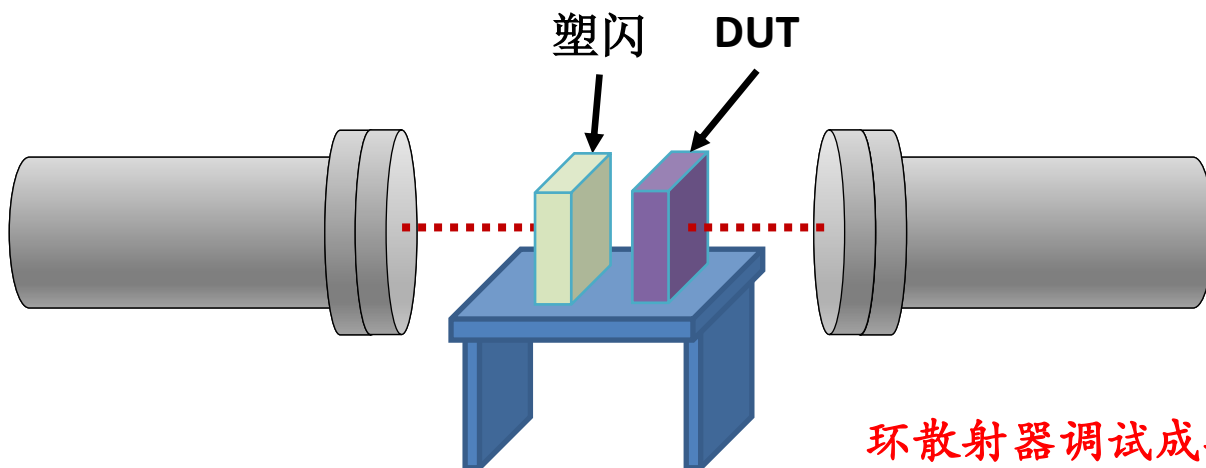
- 在R-dump前的RTBT管线中拆掉一段真空管。
- 管口用Ti窗(1mm)封住，避免影响其他管线真空。

3.2.2 环散射器调试

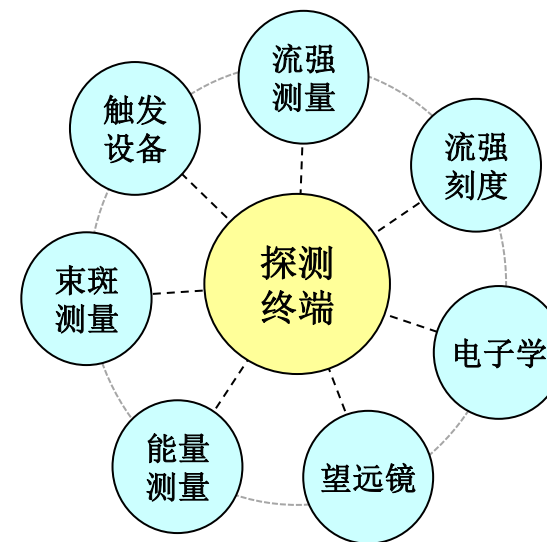


- 通过PROUD测量实时流强，为环散射器的工作状态提供反馈
- 环散射器调试成功后，将能根据实际需求，提供强/弱流质子束流

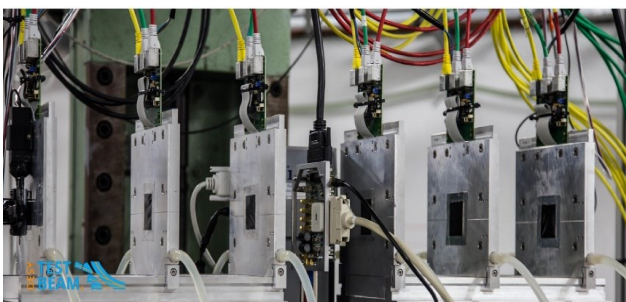
3.2.3 HPES终端探测器测试



环散射器调试成功后、短期测试



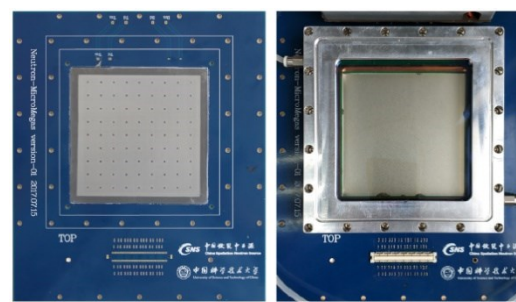
- 将HPES的其他探测设备放在束线上，测试探测设备的功能
- 需要弱流质子束 (several p/pulse, $\sim 10^6$ p/s)



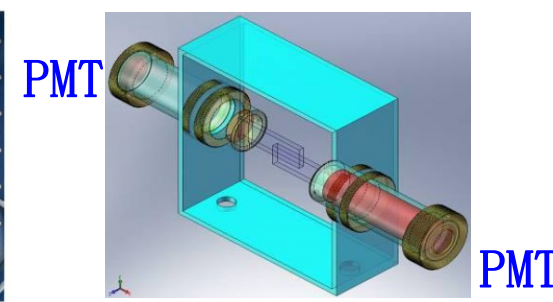
硅像素探测器



LGAD探测器



Micromegas



PMT

PMT

3.2.3 HPES终端探测器测试



探测设备	待测探测器	测试项目
束流望远镜	Mimosa28硅像素探测器	<ul style="list-style-type: none">• 各探测器的software alignment• 径迹重建测试• DUT的位置分辨率分析算法测试
能量测量设备	LGAD探测器	<ul style="list-style-type: none">• LGAD探测器时间分辨率• 数据分析算法测试
束斑测量设备	Micromegas	<ul style="list-style-type: none">• 束斑测量位置分辨率测试（结合束流望远镜）• 数据分析算法测试
触发设备	快响应塑闪	<ul style="list-style-type: none">• 探测器响应测试• 触发逻辑单元测试
束流强度检测设备	SiC探测器	<ul style="list-style-type: none">• 探测器响应测试• 束流强度分析方法测试