



中国散裂中子源  
Chinese Spallation Neutron Source

# HPES: 一条1.6 GeV高能质子测试束

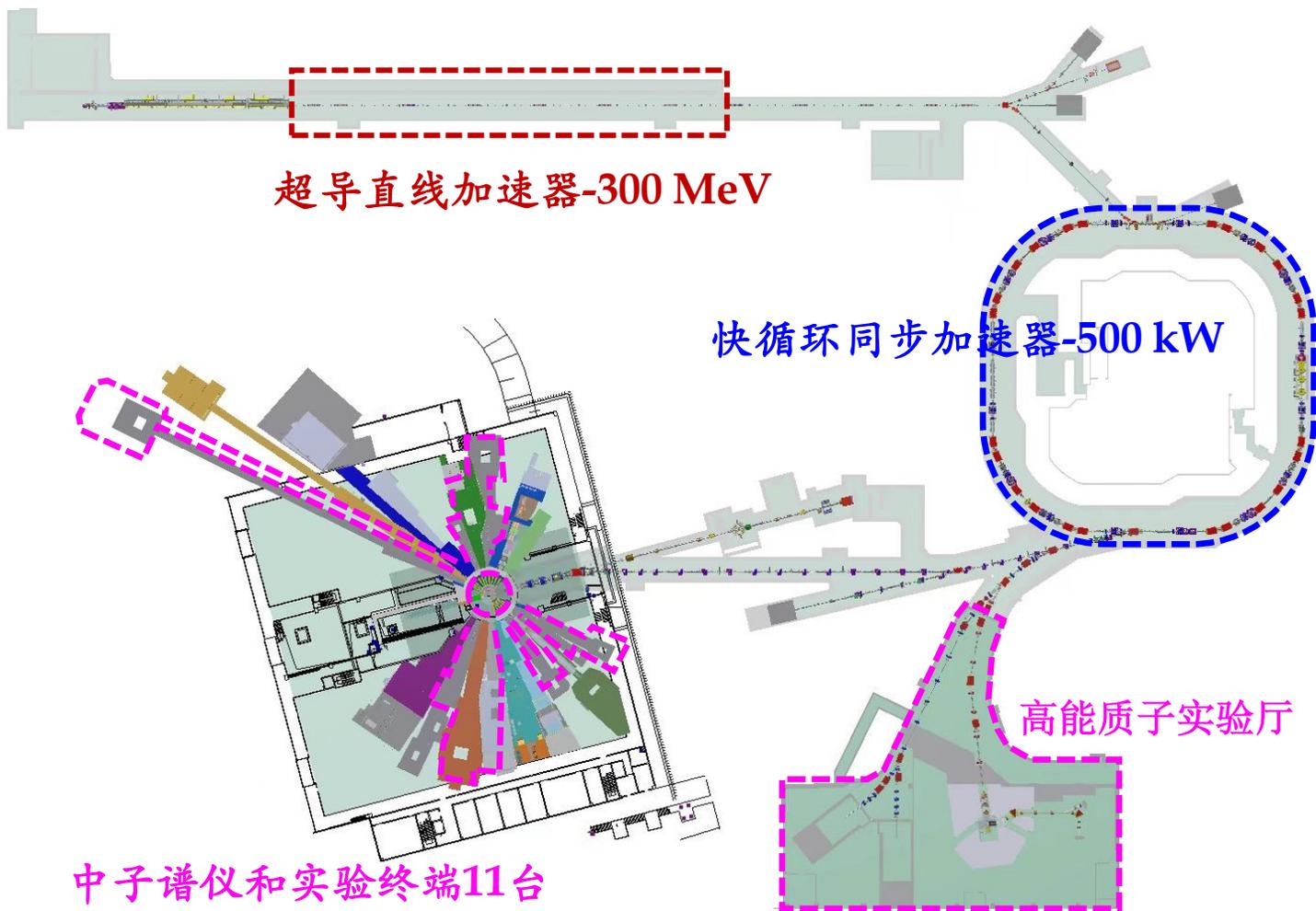
报告人: 郭宇航, 敬罕涛, 樊瑞睿等  
单 位: 中国科学院高能物理研究所  
日 期: **2025/04/18**

# 目 录

CONTENT

1. CSNS与HPES介绍
2. 高能质子的用途
3. HPES的束流参数
4. HPES的探测器系统
5. 总结

# 1.1 CSNS二期工程



- 散裂二期工程预计总投资29亿
- 直线加速器能量提升到300 MeV
- 束流功率增加到500 kW
- 中子通量@14m达到 $1 \times 10^8 \text{ n/cm}^2/\text{s}$
- 新增新建中子谱仪和实验终端共计11台
- 其中包括:
  - 一条能提供1.6 GeV测试束的高能质子实验终端 (HPES)
  - 一台表面 $\mu$ 子源 (MELODY)

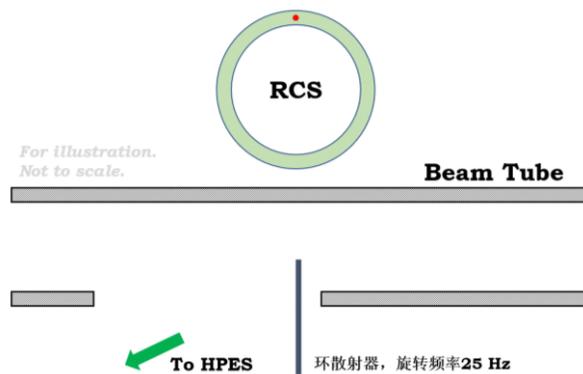
# 1.2 HPES简介



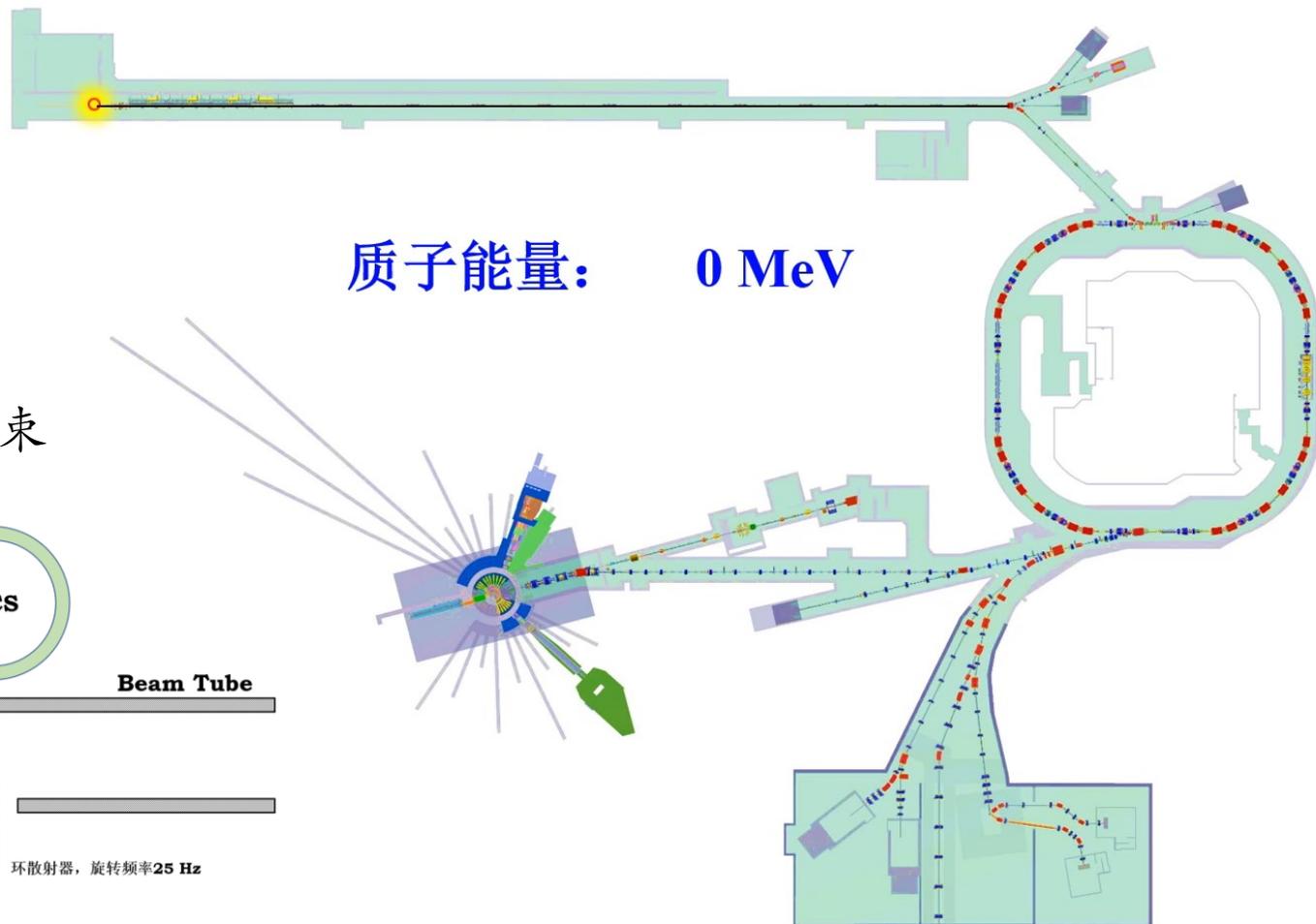
## 高能质子实验终端 (HPES)

- ▣ 中国第一台1.6 GeV质子源。
- ▣ 已开始土建，29年完成建设并验收。
- ▣ 首次用散射针将质子从主束中引出。
- ▣ 根据测试需求，提供弱流和强流质子测试束

参数名称	设计指标
质子能量范围	<b>0.8-1.6 GeV</b>
束流脉冲频率	<b>24 Hz</b>
强流质子流强	<b><math>10^6-10^9</math> p/s</b>
弱流质子流强	<b><math>10^3-10^4</math> p/s</b>



环散射器工作原理

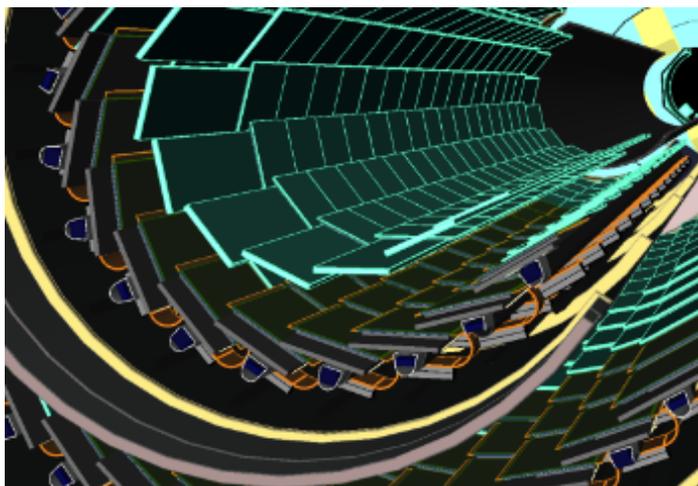
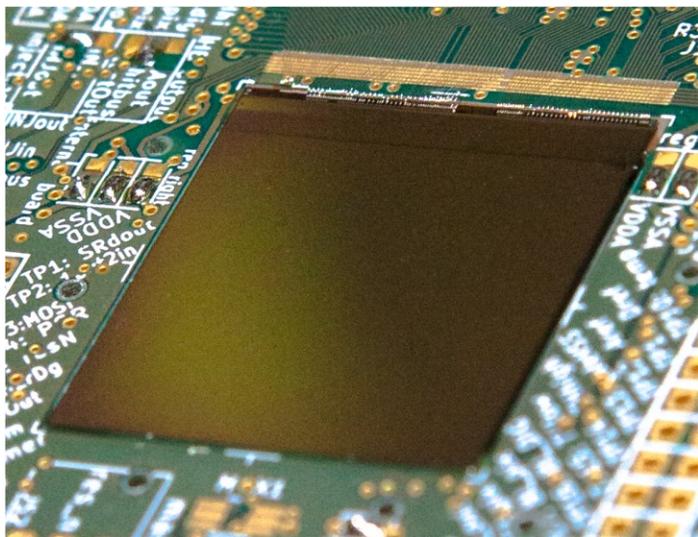


# 目 录

CONTENT

1. CSNS与HPES介绍
2. 高能质子的用途
3. HPES的束流参数
4. HPES的探测器系统
5. 总结

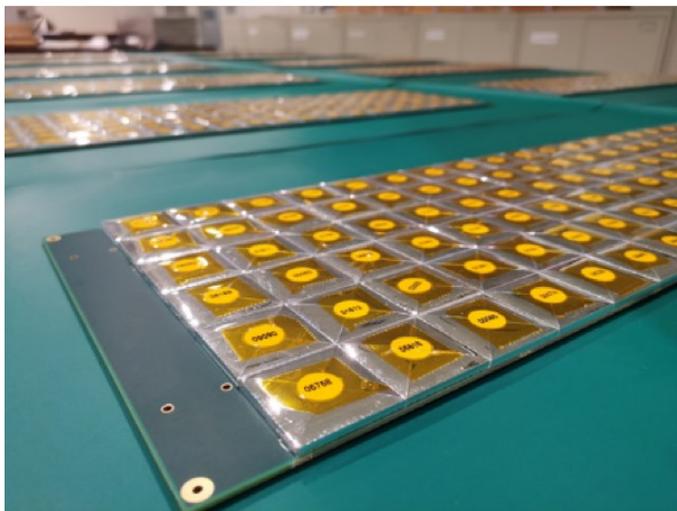
## 2.1 位置探测器标定



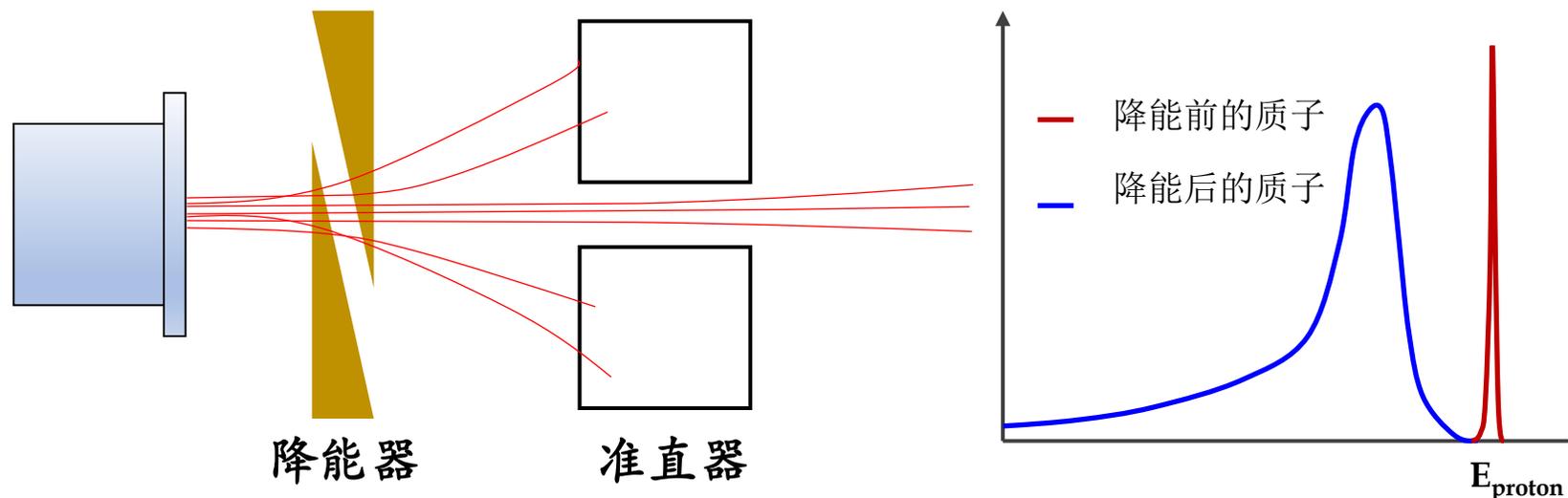
- 硅像素探测器，位置精确度 $3\sim 30\ \mu\text{m}$ 。
- 用途：对撞次级粒子径迹测量、医疗、雷达、无损检测。
- 需要大量束流资源，进行探测器位置分辨率标定。
- 1.6 GeV质子束流穿透性能好，十分适合位置探测器标定。

名称	像素阵列	像素大小/ $\mu\text{m}^2$	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
<b>JadePix3</b>	<b>512×192</b>	<b>16×23</b>	<b>CEPC</b>	<b>Monolithic</b>
<b>TaichuPix-2</b>	<b>192×64</b>	<b>25×25</b>	<b>CEPC</b>	<b>Monolithic</b>

## 2.2 量能器标定



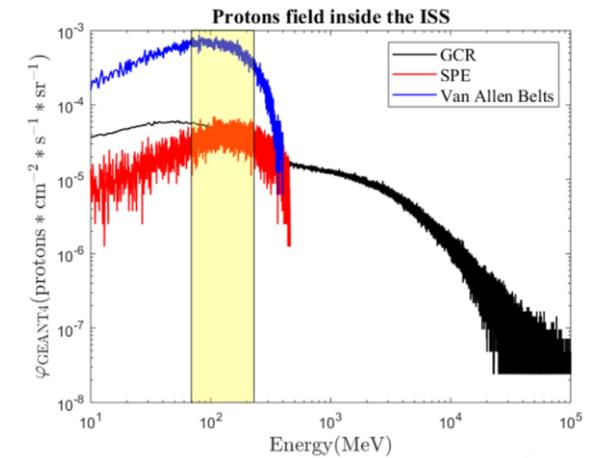
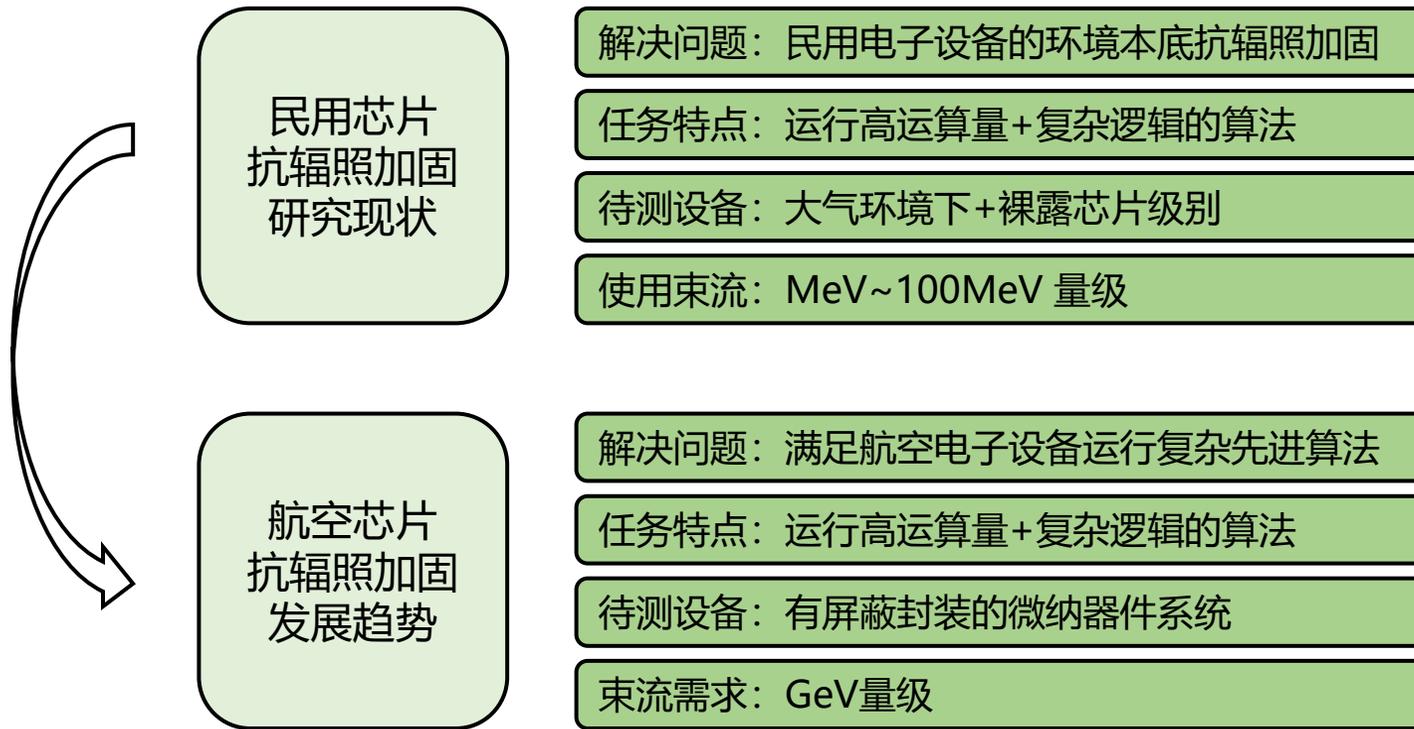
- CEPC对撞次级粒子能量重建依赖量能器，ECAL/HCAL。
- BGO/Glass + SiPM，即将进入样机测试阶段。
- 需大量束流资源做能量标定，目前重度依赖DESY/CERN。
- HPES可将质子降能使用，提供 800 ~ 1600 MeV 质子。



# 2.3 系统级芯片测试



- 航空芯片中运行的算法相对保守，因此能够通过加高冗余来降低故障率。
- 以AI为代表的先进复杂算法上天是趋势，然而受限于航天芯片的抗辐照加固研究。
- 航天芯片发展需求：在深空高水平宇宙线环境中运行高运算量+复杂逻辑的算法。

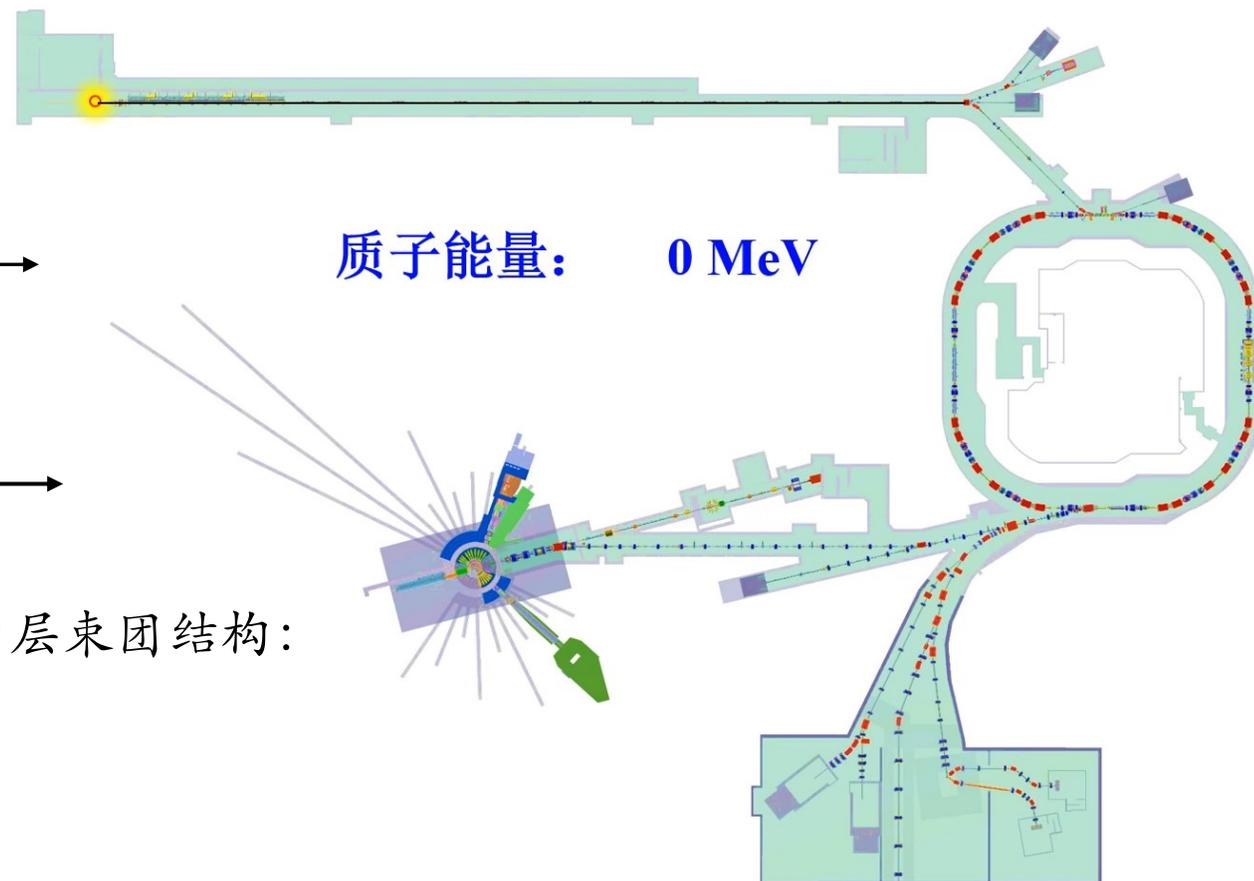
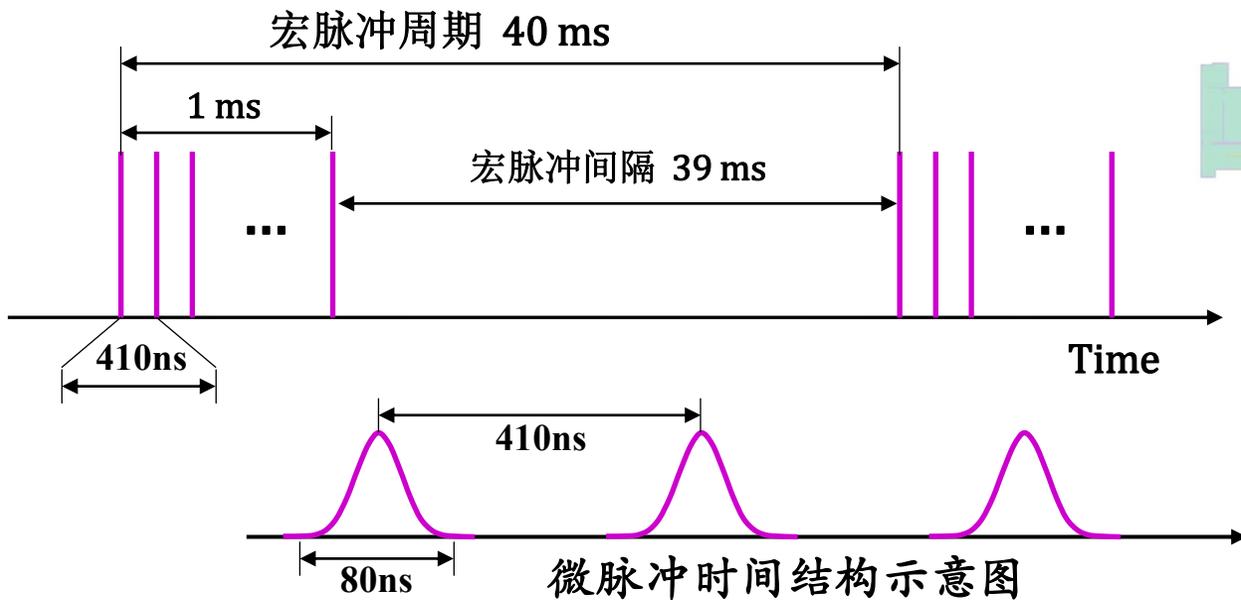


# 目 录

CONTENT

1. CSNS与HPES介绍
2. 高能质子的用途
3. HPES的束流参数
4. HPES的探测器系统
5. 总结

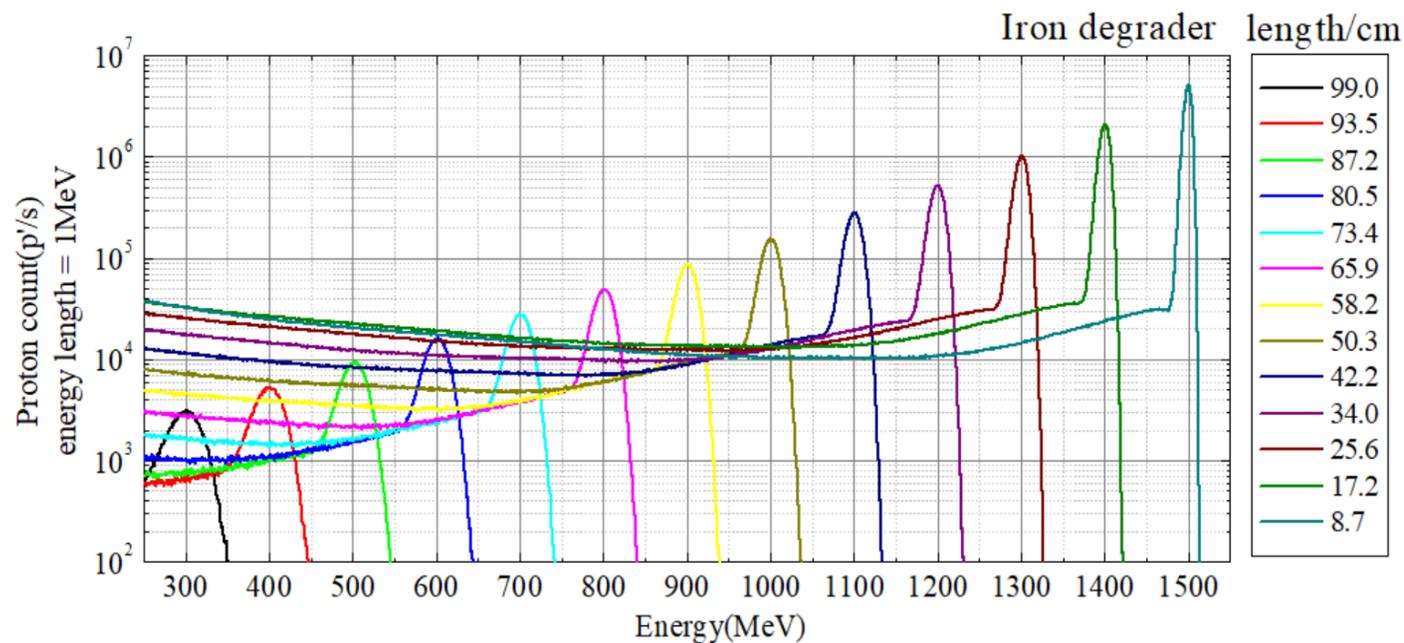
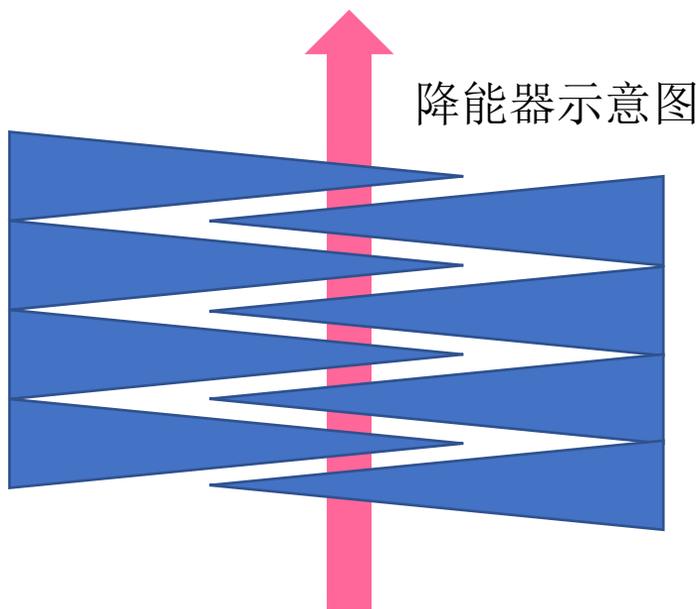
# 3.1 束流时间结构



- 受限于CSNS束流特点, 质子束在时间上存在两层束团结构:
  - 宏脉冲频率25 Hz(24 Hz有效)
  - 宏脉冲长度1 ms, 间隔39 ms
  - 宏脉冲内存在微脉冲
  - 微脉冲周期410 ns, 微脉冲宽度80 ns

## 3.2 束流能量

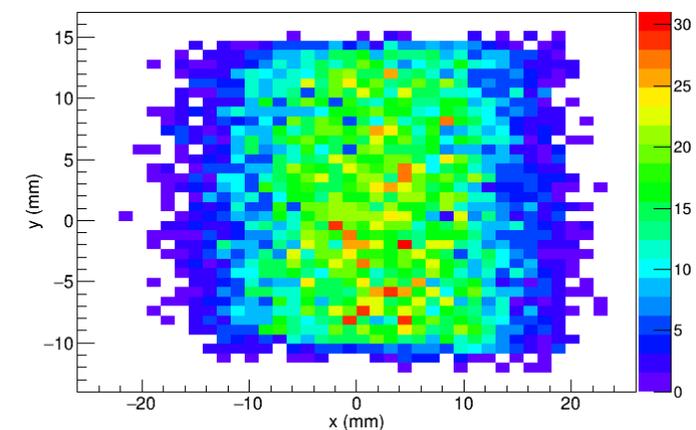
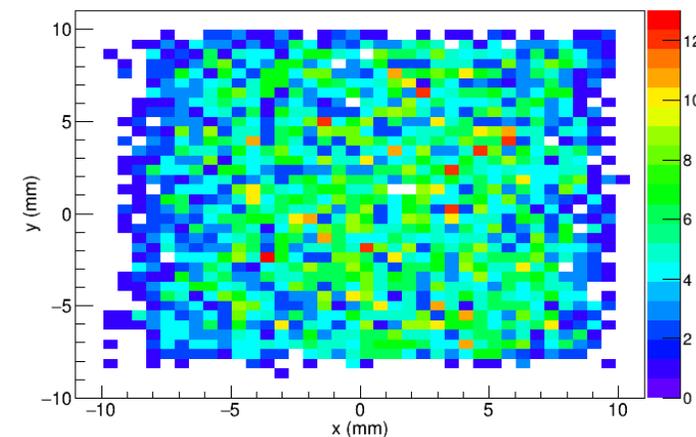
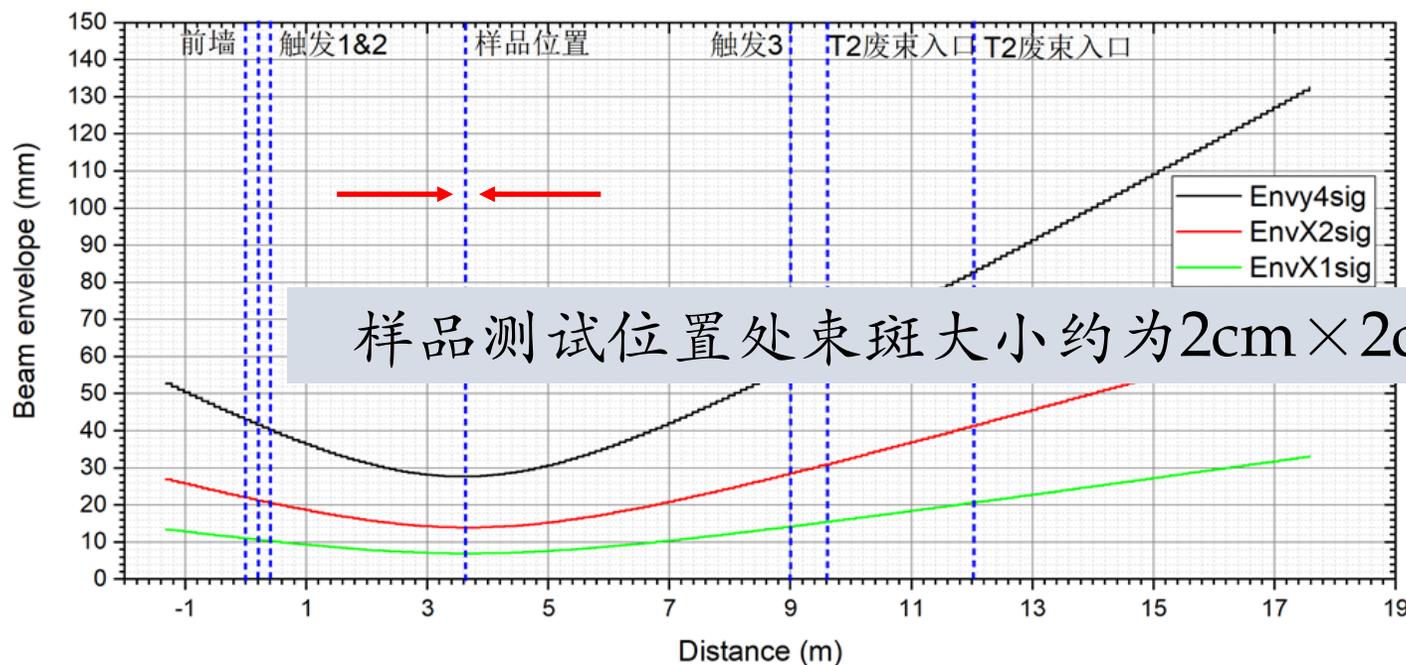
- 不使用降能器时，质子能量1.6 GeV，能量不确定性 $<0.5\%$ 。
- 使用降能器，将质子能量降低至0.8~1.6 GeV，范围内连续可调。



# 3.3 束流强度与束斑尺寸

HEPS有两种工作状态:

模式	主要用途	流强	束斑尺寸
弱流模式	探测器测试	1k~10k p/s	$10 \times 10 \text{mm}^2 \sim 30 \times 30 \text{mm}^2$
辐照模式	辐照测试	$10^6 \sim 10^8 \text{ p/s}$	$10 \times 10 \text{mm}^2 \sim 100 \times 100 \text{mm}^2$



# 目 录

CONTENT

1. CSNS与HPES介绍
2. 高能质子的用途
3. HPES的束流参数
4. HPES的探测器系统
5. 总结

# 4. HPES终端设备



- HPES为用户配套研制了如下终端设备：
  - 束测设备：测量束流信息，保证用户实验安全进行。
  - 共用设备：协助用户更好地完成实验。
- HPES的终端设备设计原则：以用户需求为本。

	设备名称	技术手段	目标性能参数
束流设备	能量测量系统 (LEMS)	LGAD	能量分辨率预期达到1%
	束流望远镜 (Telescope)	硅像素探测器	位置分辨率好于10 $\mu\text{m}$
	触发系统(FLASH)	快塑闪	触发时间精度 1 ns
共用设备	触发逻辑单元(TLU)	--	质子级数据对齐
	共用电子学(CROS)	--	多通道通用波形采集

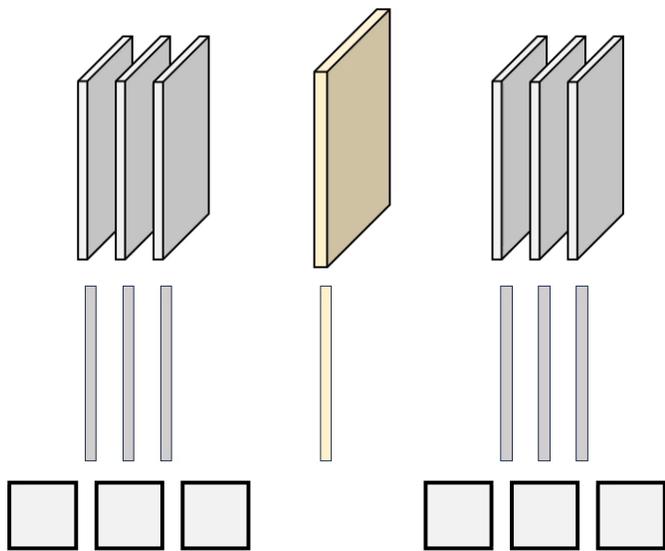
# 4.1 HEPS束流望远镜

感谢高能所董明义老师团队!



- 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  $\mu\text{m}$** 。

参数	需求
定位精度	< 10 $\mu\text{m}$
探测器位置精度	< 10 $\mu\text{m}$
总芯片数	4~6片



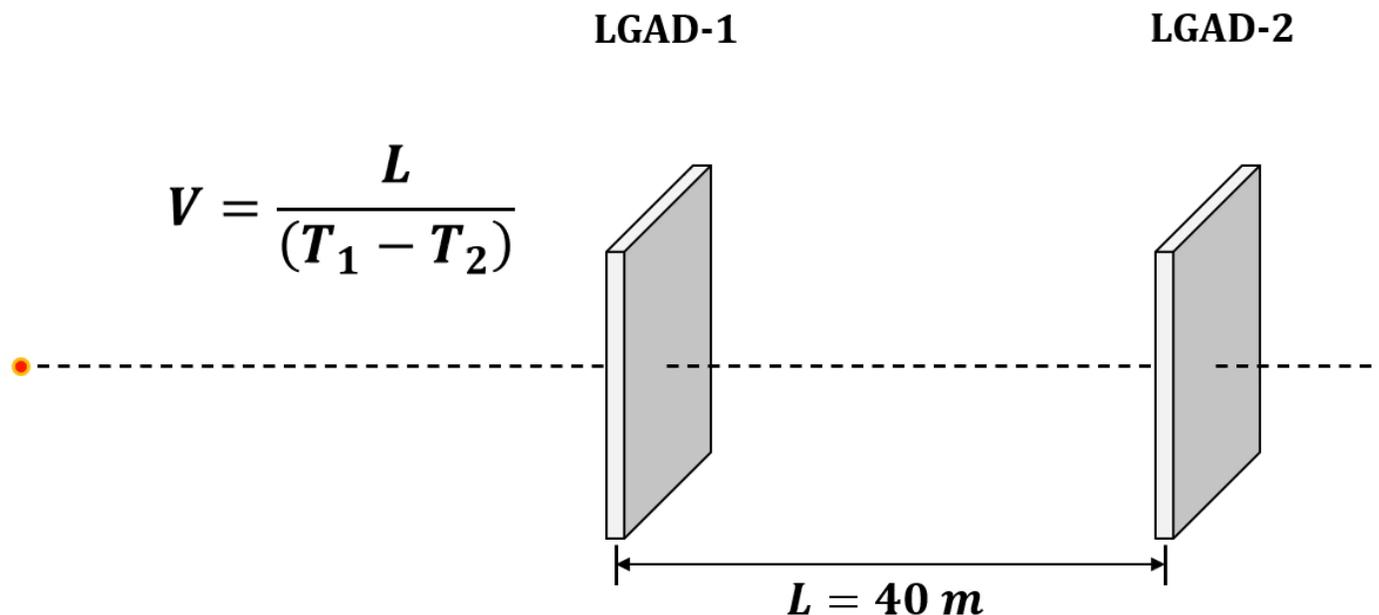
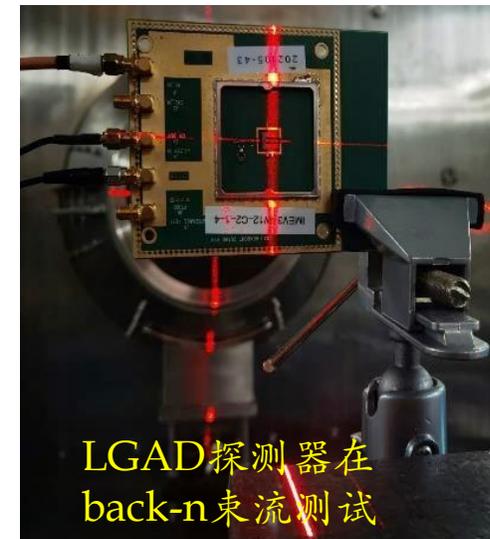
- γ 硅像素探测器 × 6
- γ 塑闪 × 4
- γ 数据采集系统
- γ 机箱与机械台架
- γ 温度、湿度监控系统
- γ 冷却系统

# 4.2 HEPS的能量测量系统

感谢高能所梁志均老师团队!



- 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, 预期能量分辨率好于 1% @ 1.6 GeV。
- 探测器距离40 m, 时间分辨率好于70 ps。



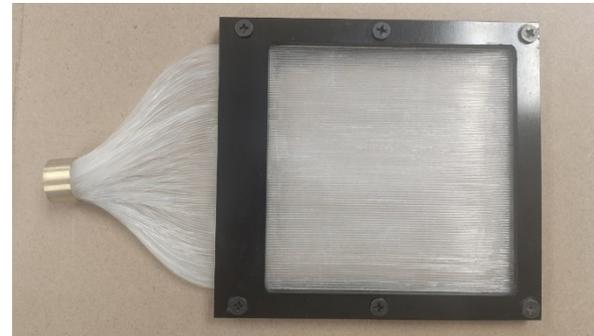
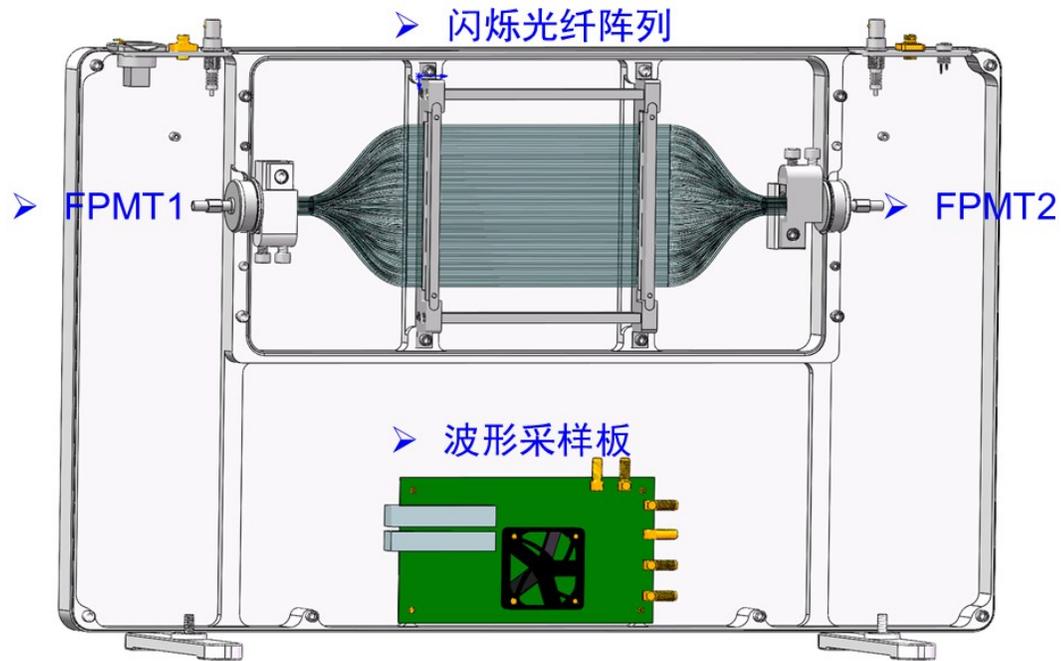
参数	需求
能量分辨率	<b>1%</b> @ 1.6 GeV
飞行时间精度	140 ps @ 40 m
探测器时间分辨率	<b>100 ps</b>

## 4.3 触发测量系统

感谢高能所钱森老师团队!

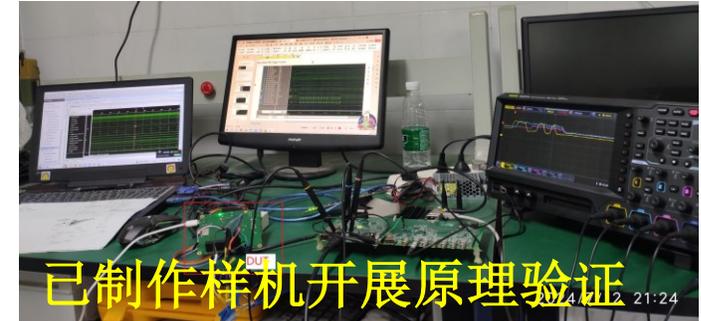
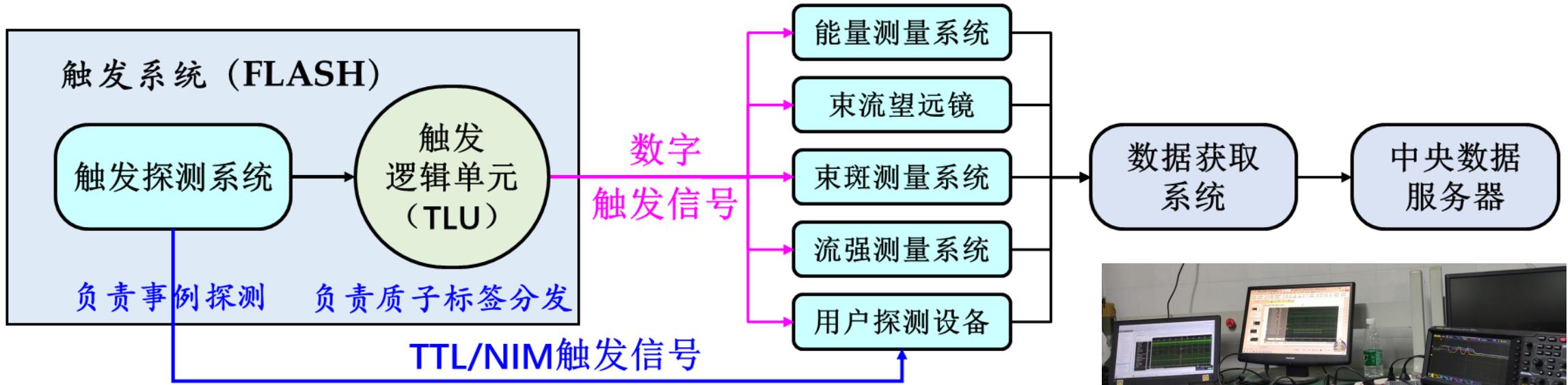


- 触发系统用于为用户探测器提供数据采集起始时间或事例编号信息。
- 探测器选用闪烁光纤+FPMT，能保证触发时间不大于1ns的时间分辨率。
- 为用户提供TTL/NIM等多种类型的脉冲触发信号。



# 4.4 触发逻辑单元

感谢郑州大学刘义、谷肖飞团队!



已制作样机开展原理验证

- 用户数据与终端探测系统数据需要实现事例级数据对齐。
  - 基于AIDA@DESY的技术方案，研发了HPES-TLU。
  - 触发逻辑单元 (TLU) 为HPES实现数据对齐提供参照。
  - 负责向各探测系统提供数字触发信号。
- 传递至少**40位**的触发号
  - 每个触发号传递时间小于**410ns**
  - 兼容**AIDA**触发传递协议

- HPES的共用电子学的作用:

1. 为用户提供一个易用的数据读出方案。
2. 尽可能统一用户数据格式, 便于DAQ与数据储存。
3. 提高HPES的用户友好性。

- 波形采集, 便于多样化数据分析
- > 0.5 Gsps采样率
- 提供多种触发条件
- 研发成本低



- 基于白光共用电子学框架, 搭建用于HPES的用户电子学设备。
- 波形采集性能: 1 Gsps, 0.5 GHz, 无死时间连续读出。
- 多种触发条件设置: 阈值、脉宽、极性、时间窗口
- 适用于无需触发号的多通道、复杂测试需求:
  - 常见探测器波形采样
  - 多通道谱仪实验
  - .....

# 5. 总结



- CSNS-II工程预计29年建成我国首条1.6 GeV质子测试束。
- 该束流能根据用户需求，提供准单粒子束流和辐照束流。预期在先进探测器研发和微纳芯片系统抗辐照加固研究发挥重要作用。
- 为协助用户更好地完成实验，HPES配建了多套终端设备：
  - 束流望远镜
  - 能量测量系统
  - 触发系统+触发逻辑单元
  - 用户共用电子学
- 欢迎全国各地的同事为我们的工作提供宝贵建议！
- 我们欢迎任何新的研究思路、研究内容、研究需求！



联系人：郭宇航

电 话：18392181025

邮 件：guoyh@ihep.ac.cn

欢迎扫码添加我的微信

# 致谢



承蒙厚爱  
感谢倾听  
**Thanks!**