



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source



高能质子束实验终端
High-energy Proton Experiment Station

中国散裂中子源1.6GeV质子测试束线 研制进展



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 年 08 月 21 日

A Presentation @ 第十三届全国先进气体探测器研讨会 中国·上海 2025.08.20~22

目录

CONTENT



1

对撞机与测试束

Colliders and Test Beam



2

1.6 GeV质子束用途

Applications of 1.6 GeV Proton



3

HPES束流参数

Parameters of HPES



4

HPES终端探测设备

Instrumentations of HPES

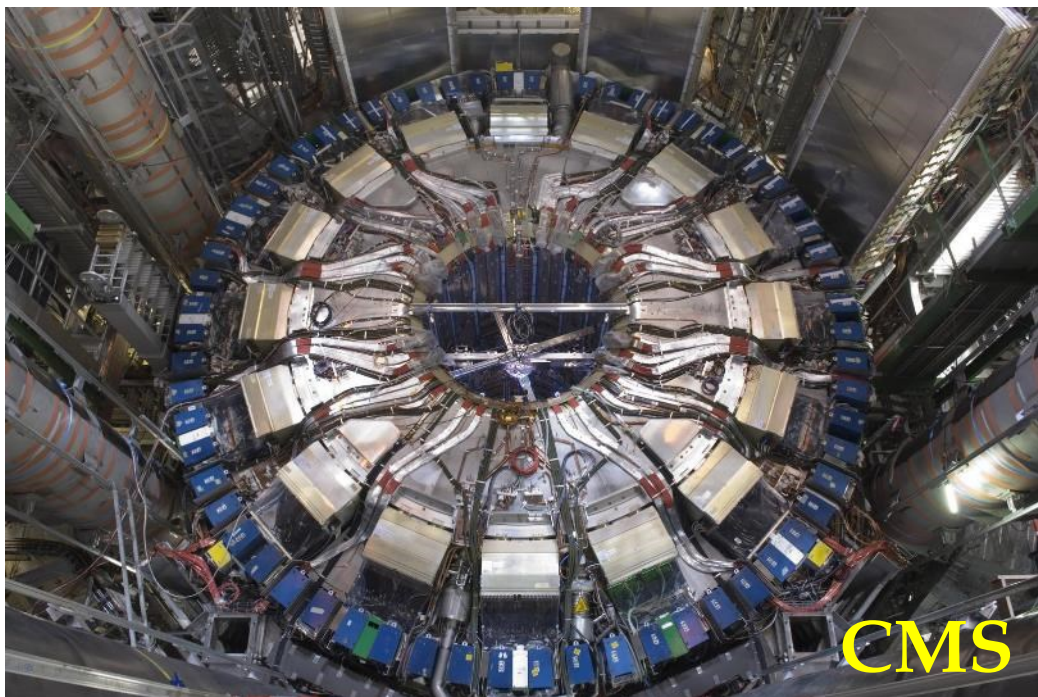


5

总结与展望

Summaries and Prospects

1.1 CMS探测器系统



Higgs Boson

Beyond SM

Top Quark Mass

Quark Gluon Plasma

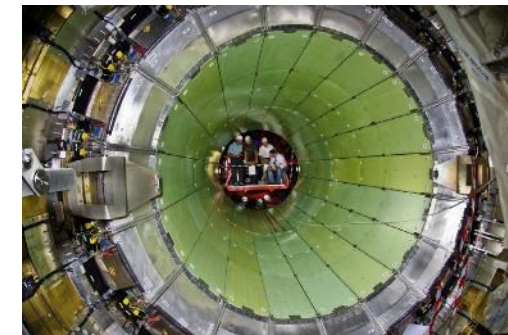
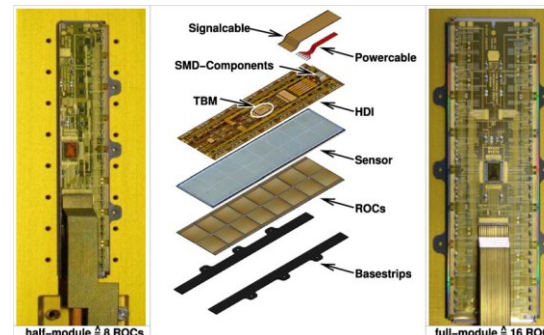
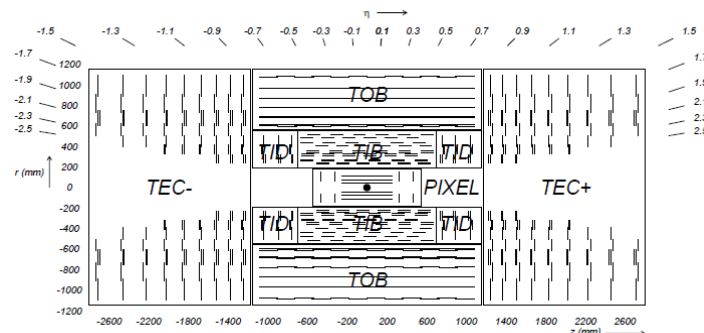
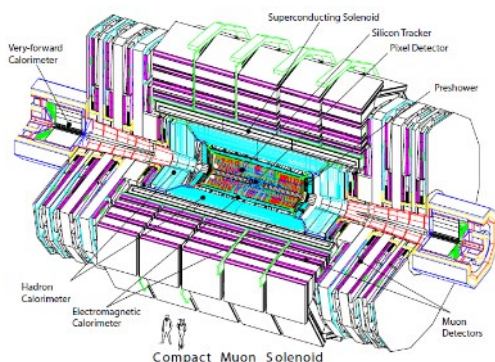
- CMS 探测器规模巨大。
- 要求对粒子径迹分辨能力达 $15\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 。
- 要求探测粒子能量分辨率 $<1\%$ 。

1440 枚
硅像素探测器

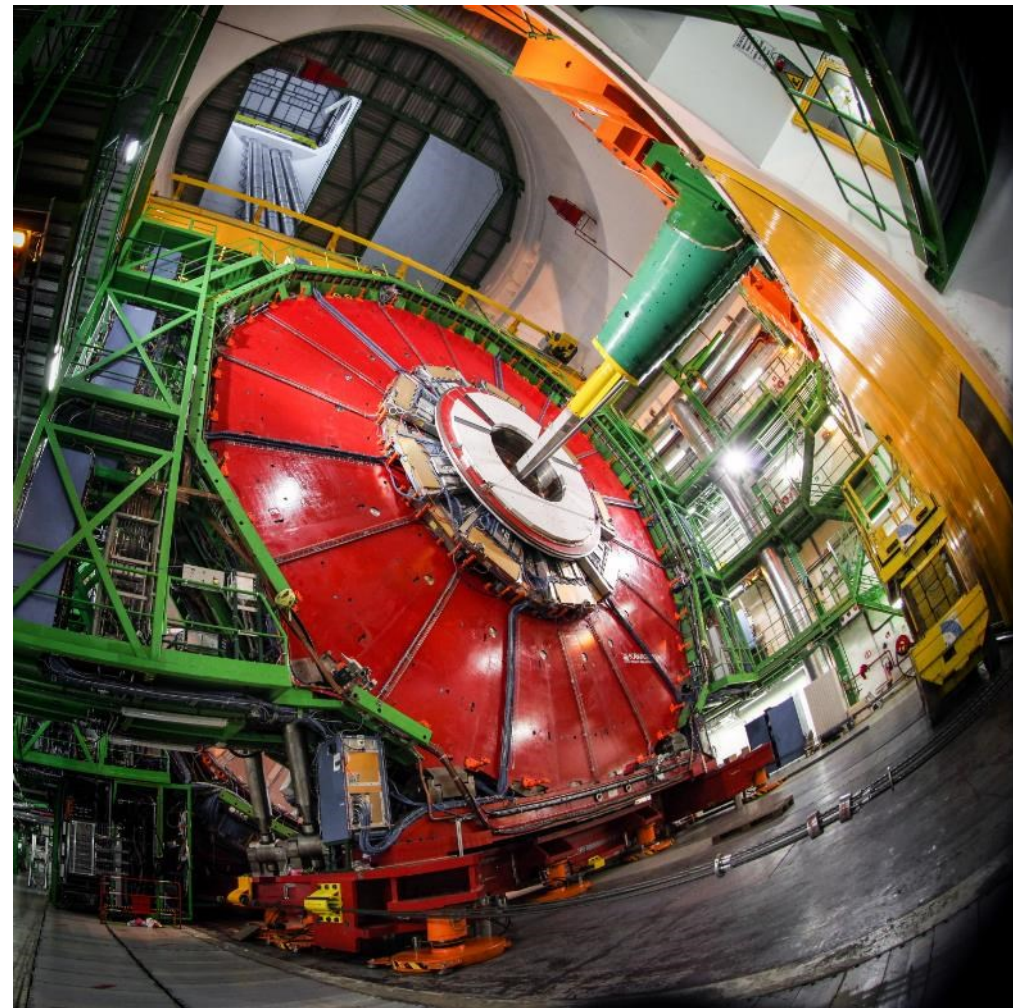
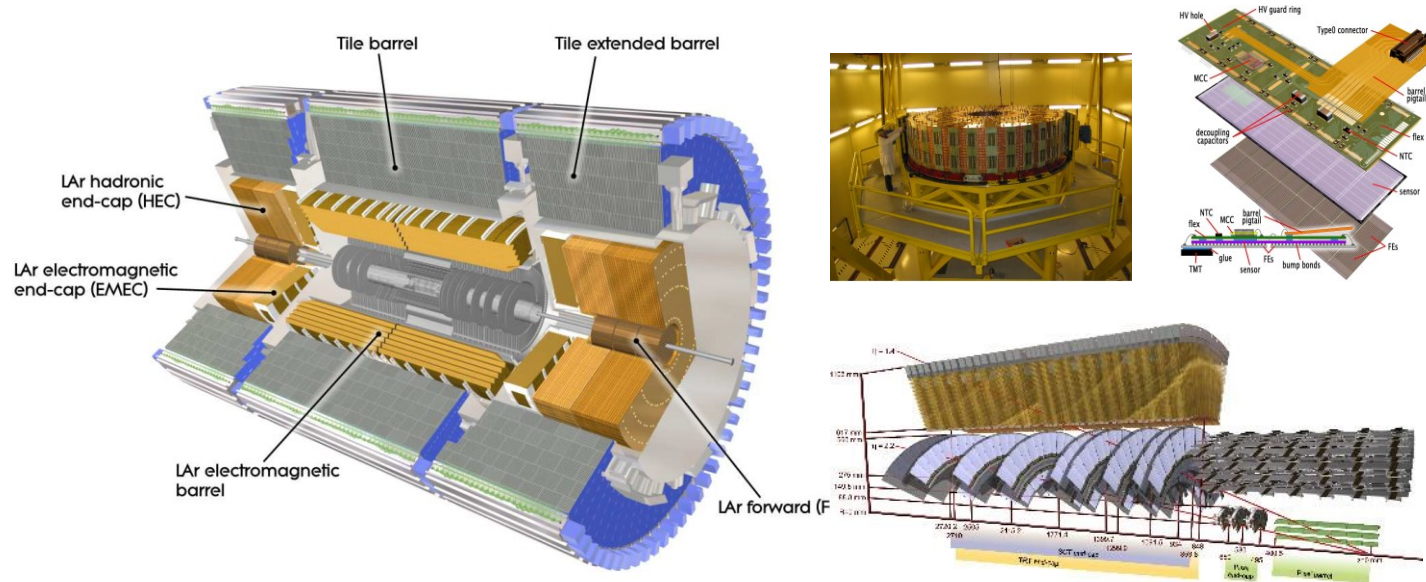
15148 枚
硅微条探测器

68524 块
 PbWO_4 晶体

~70k 片
塑料闪烁体



1.2 ATLAS探测器系统



1744 枚

硅像素探测器

15912 枚

硅微条探测器

7.5M 根

Straw Tube

数十吨

液氩

- ATLAS 探测器体积是CMS的6倍。
- 对粒子位置与能量的探测精度与CMS相当！

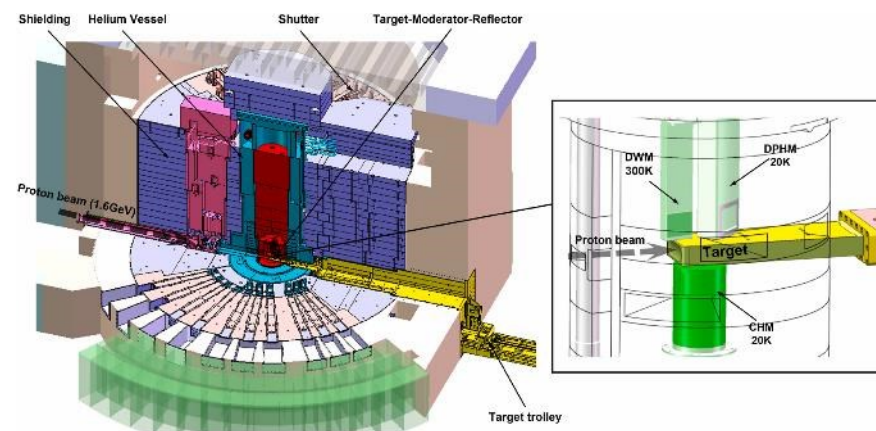
1.3 粒子测试束



- 在CMS/ATLAS的研制过程中，SPS、PS、DESY-TBF、FTBF等高能粒子测试束（Test Beam）发挥了重要作用！
- 然而**我国暂时没有高能粒子测试束**，在CEPC、STCF等大型粒子对撞机研制中，严重依赖国际上的Test Beam。

Name of Facility	Institute	Beamline	Country	Particle Types	Kinetics
CERN SPS North Area	CERN	H2, H4, H6, H8	Switzerland	protons, muons, electrons, pions	400GeV/c
CERN SPS North Area	CERN	H2-VLE, H4-VLE	Switzerland	pions, kaons	80 GeV/c
CERN PS East Area	CERN	T9, T10	Switzerland	secondary	<15 GeV/c
DESY II TBF	DESY	TB21/22/24	Germany	electron	1.5~6 GeV
FTBF	FermiLAB	--	USA	protons	120 GeV
ESTB	SLAC	--	USA	electron	2.5-15 GeV

1.4.1 CSNS简介



- 中国散裂中子源(CSNS), 是世界第四台散裂中子源
- 2018年国家验收, 目前功率170 kW。

[DOI:10.1016/j.nima.2025.170431](https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170431)

1.4.2 CSNS二期工程



超导直线加速器-300 MeV

快循环同步加速器-500 kW

高能质子实验厅

中子谱仪和实验终端11台

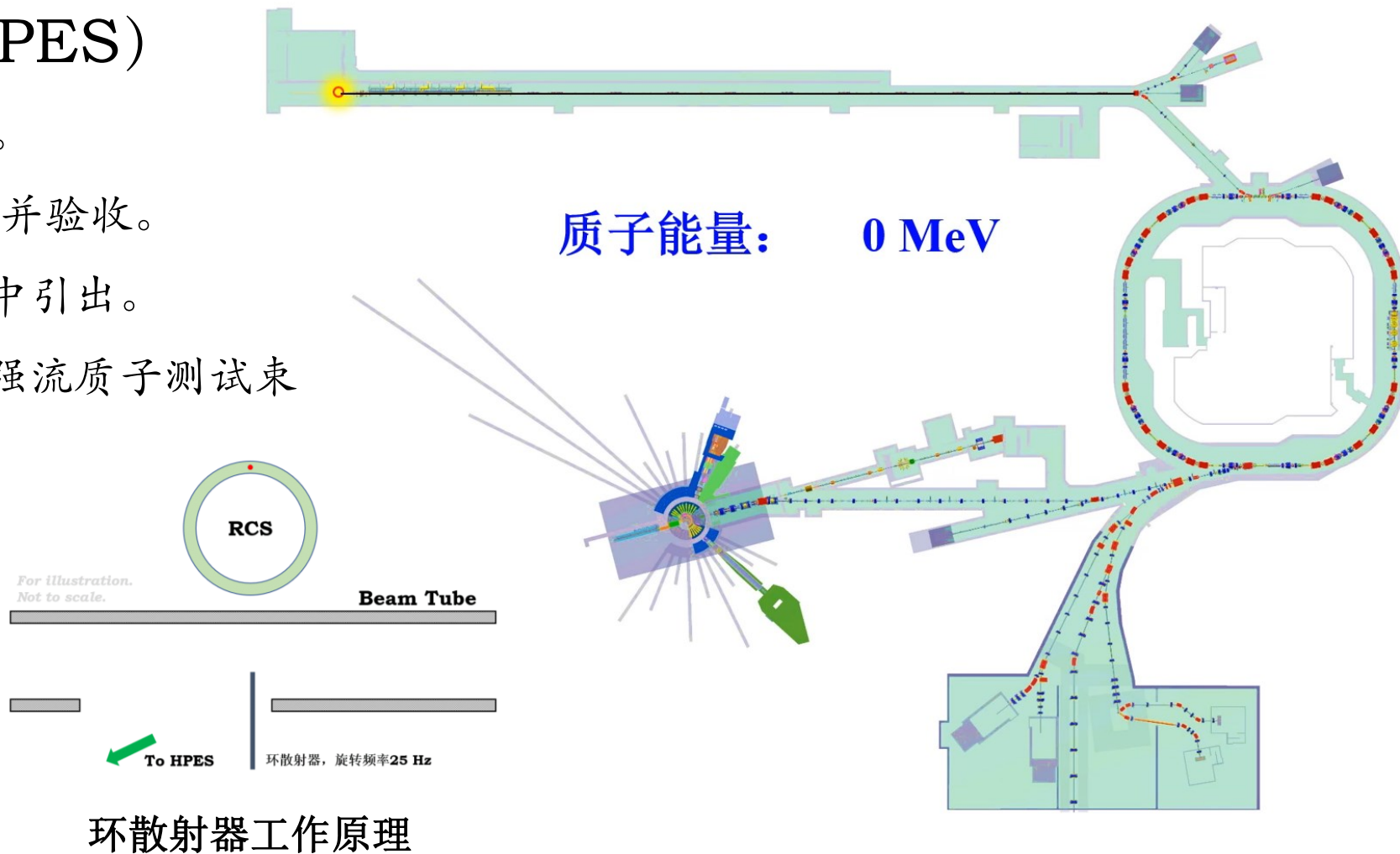
- 散裂二期工程预计总投资29亿
- 直线加速器能量提升到300 MeV
- 束流功率增加到500 kW
- 中子通量@14m达到 $1 \times 10^8 \text{ n/cm}^2/\text{s}$
- 新增新建中子谱仪和实验终端共计11台
- 其中包括:
 - 一条能提供1.6 GeV测试束的高能质子实验终端 (HPES)
 - 一台表面 μ 子源 (MELODY)

1.4.3 高能质子束实验终端

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	0.8-1.6 GeV
束流脉冲频率	24 Hz
强流质子流强	10^6-10^9 p/s
弱流质子流强	10^3-10^4 p/s



目录

CONTENT



1

对撞机与测试束
Colliders and Test Beam



2

1.6 GeV质子束用途
Application of 1.6 GeV protons



3

HPES束流参数
Parameters of HPES



4

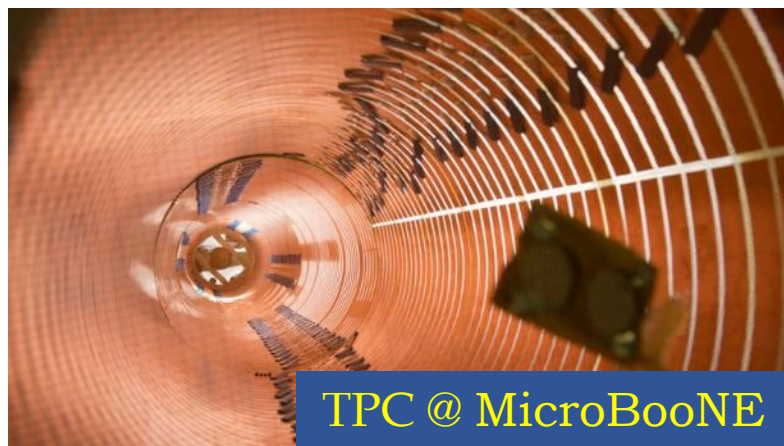
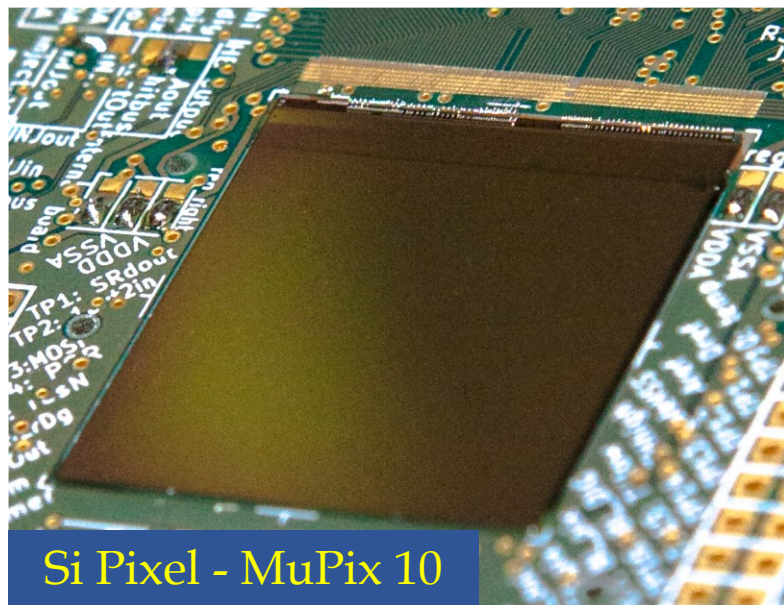
HPES终端探测设备
Instrumentations of HPES



5

总结与展望
Summaries and Prospects

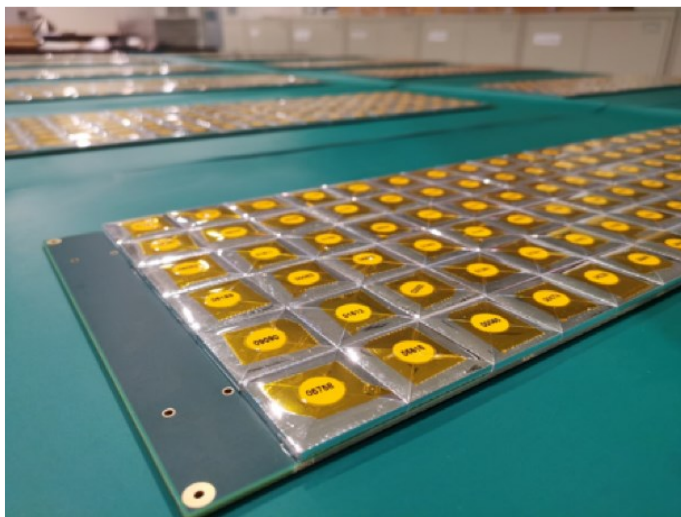
2.1 位置探测器标定



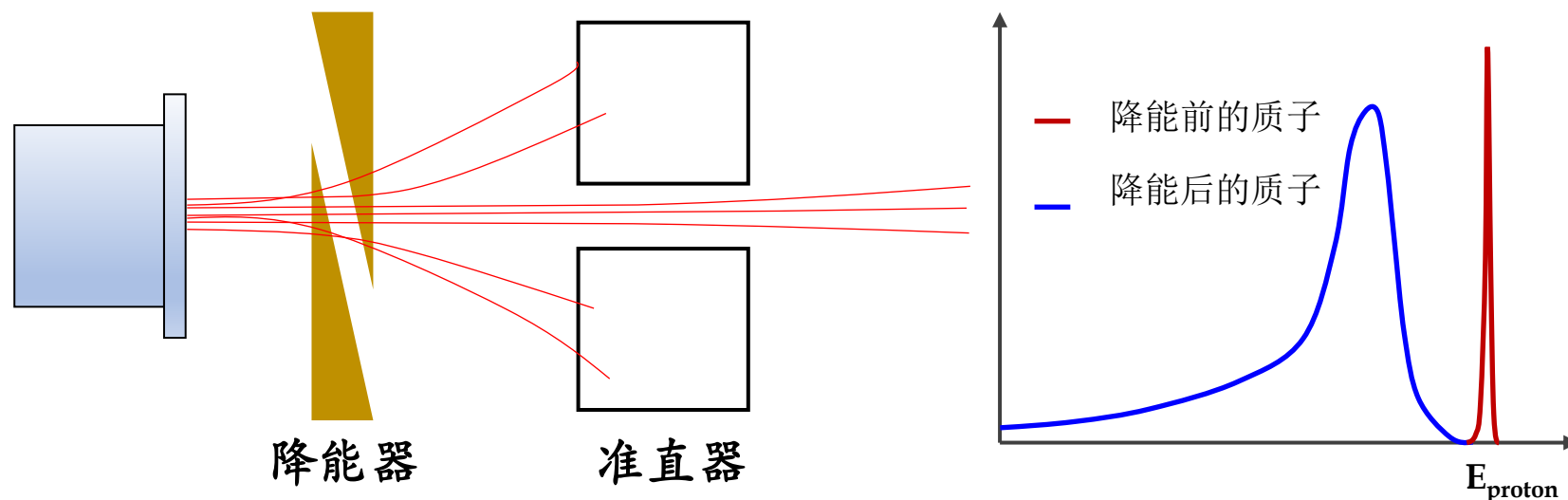
- 代表：硅像素探测器，位置精确度 $3\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 。
- 用途：对撞次级粒子径迹测量、医疗、无损检测。
- 需要大量束流资源，进行位置分辨率标定。
- 1.6 GeV质子束流穿透性能好，适合位置探测器标定。

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

2.2 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 微纳级系统级芯片测试

- 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。
- “超算、智算、智控”上天是趋势，微纳芯片的抗辐照加固研究是未来的趋势。
- HPES能够提供“大射程、低注量率、大束斑”的束流，且能量、强度、束斑可调。

民用芯片
抗辐照加固
研究现状

解决问题：民用电子设备的环境本底抗辐照加固

任务特点：运行高运算量+复杂逻辑的算法

待测设备：大气环境下+裸露芯片级别

使用束流：MeV~100MeV 量级

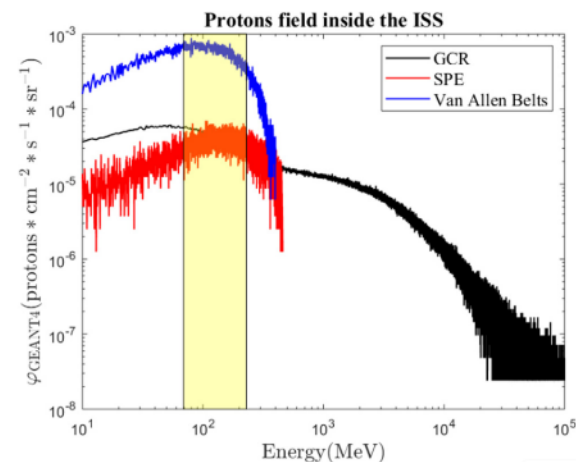
航空芯片
抗辐照加固
发展趋势

解决问题：满足航空电子设备运行复杂先进算法

任务特点：运行高运算量+复杂逻辑的算法

待测设备：有屏蔽封装的微纳器件系统

束流需求：GeV量级



目录

CONTENT



1

对撞机与测试束
Colliders and Test Beam



2

1.6 GeV质子束用途
Application of 1.6 GeV protons



3

HPES束流参数
Parameters of HPES



4

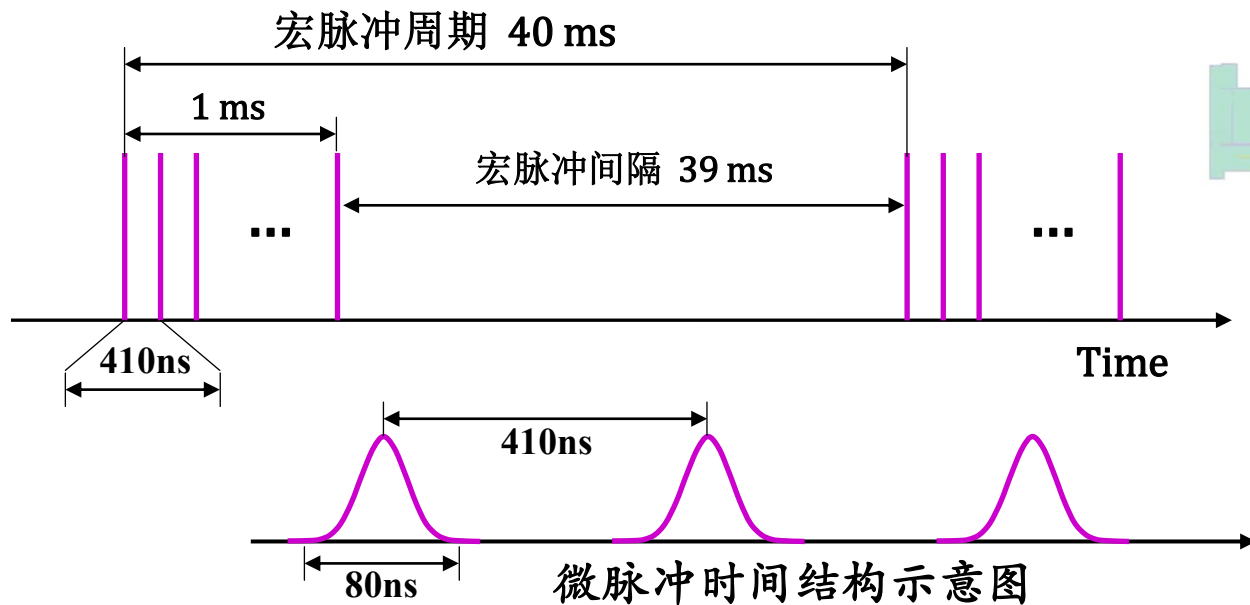
HPES终端探测设备
Instrumentations of HPES



5

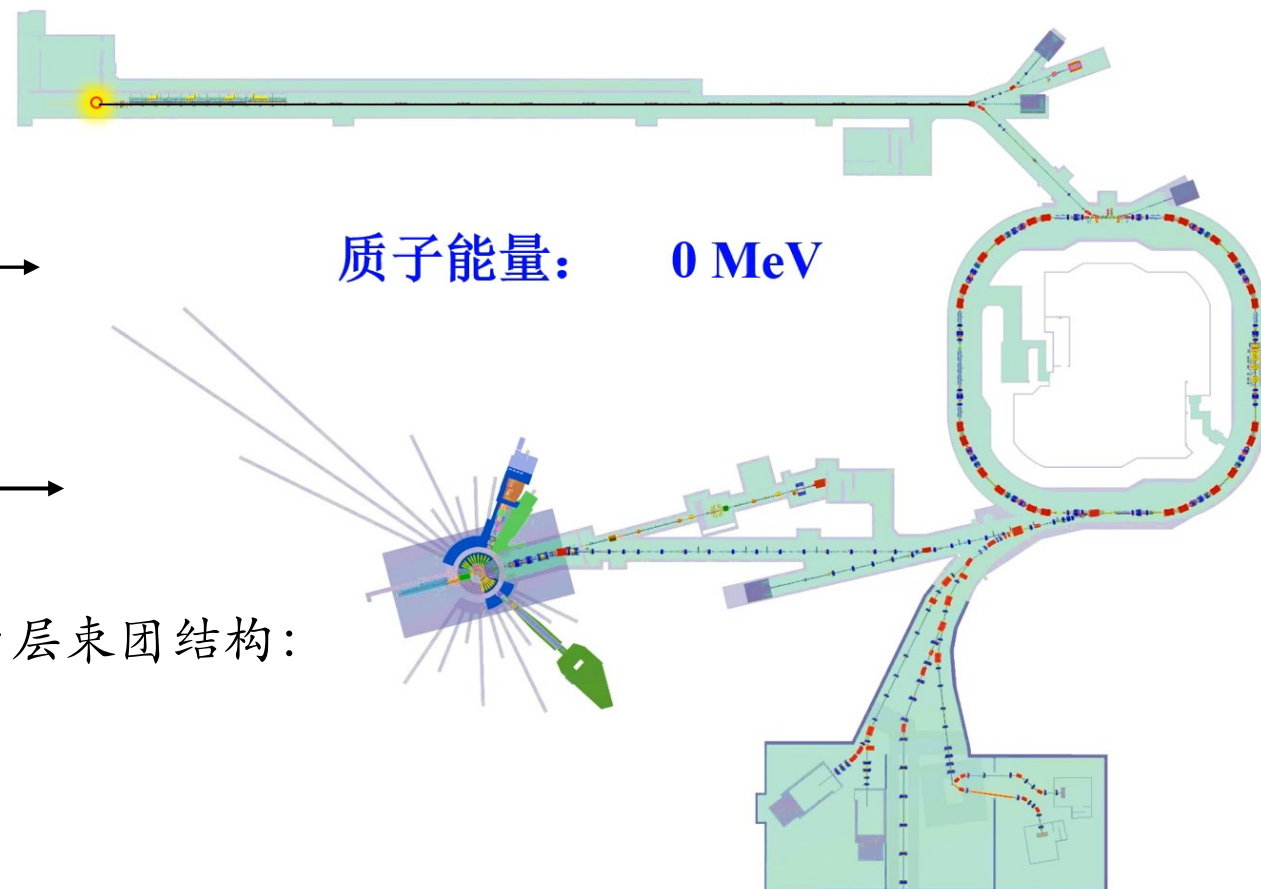
总结与展望
Summaries and Prospects

3.1 束流时间结构



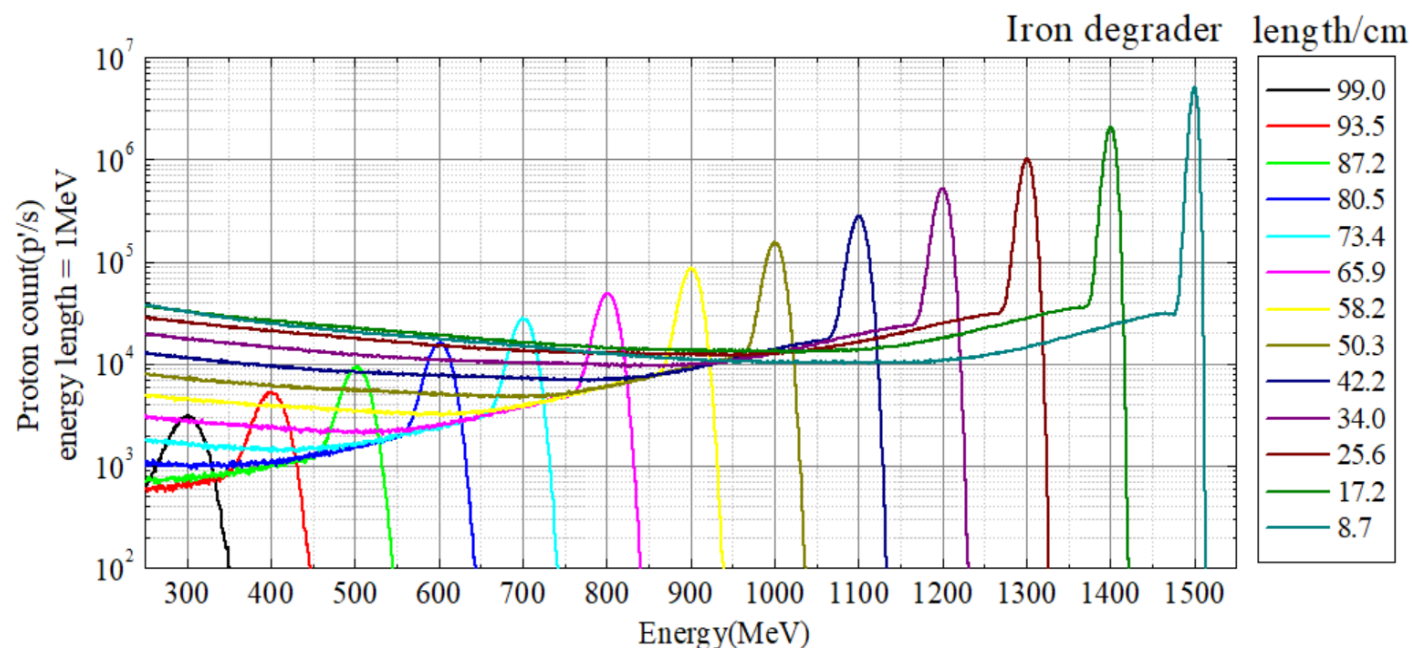
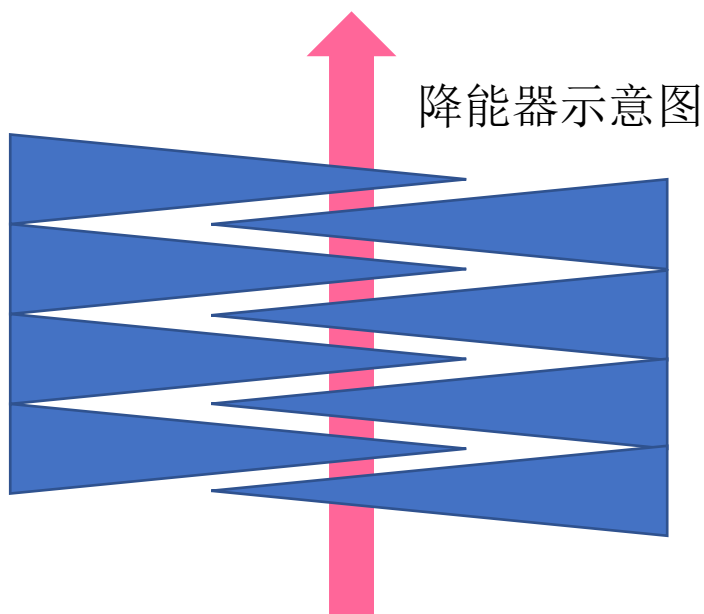
- 受限于CSNS束流特点，质子束在时间上存在两层束团结构：

- 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

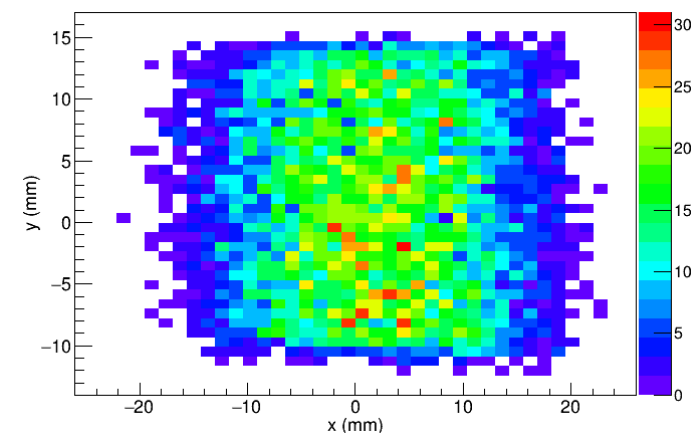
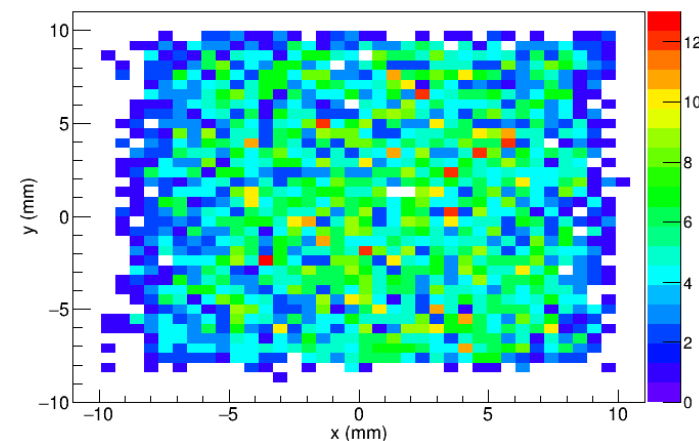
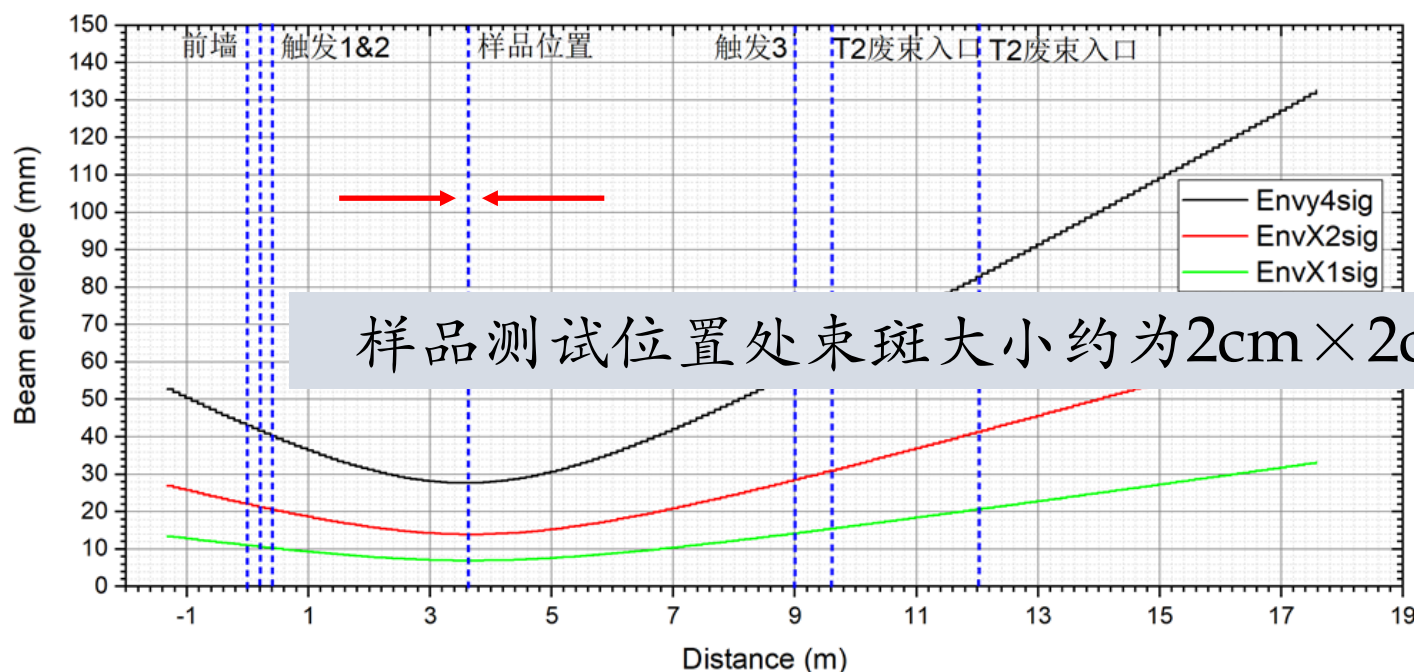
- 不使用降能器时，质子能量1.6 GeV，能量不确定性<0.5%。
- 使用降能器，将质子能量降低至0.8~1.6 GeV，范围内连续可调。



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	$10^6\sim 10^8$ p/s	$10\times 10\text{mm}^2\sim 100\times 100\text{mm}^2$



目录

CONTENT



1

对撞机与测试束
Colliders and Test Beam



2

1.6 GeV质子束用途
Application of 1.6 GeV protons



3

HPES束流参数
Parameters of HPES



4

HPES终端探测设备
Instrumentations of HPES



5

总结与展望
Summaries and Prospects

4. HPES终端探测设备



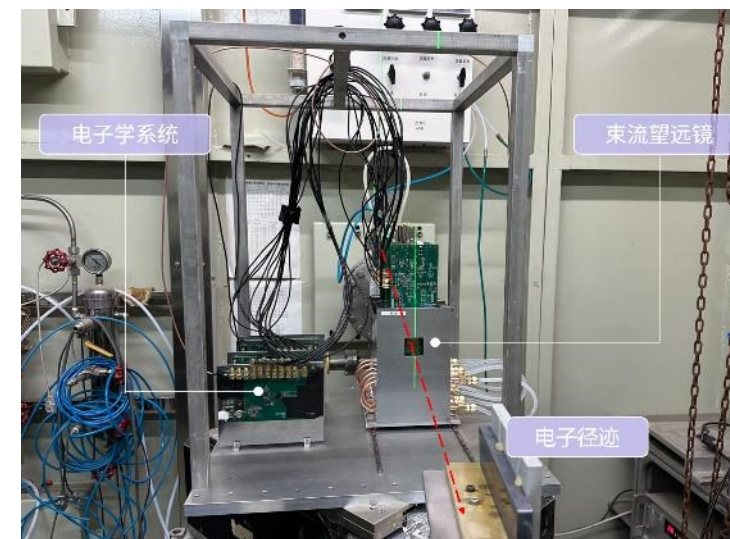
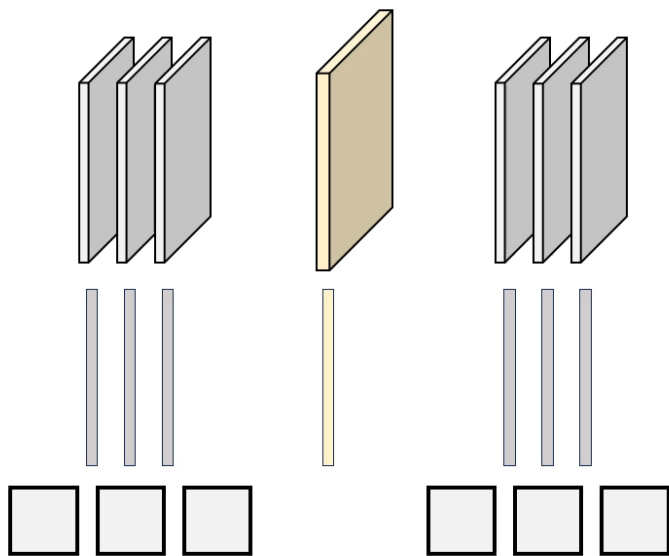
- HPES为用户配套研制了如下终端设备：
 - 束测设备：测量束流信息，保证用户实验安全进行。
 - 共用设备：协助用户更好地完成实验。
- HPES的终端设备设计原则：以用户需求为本。

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 μm
	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

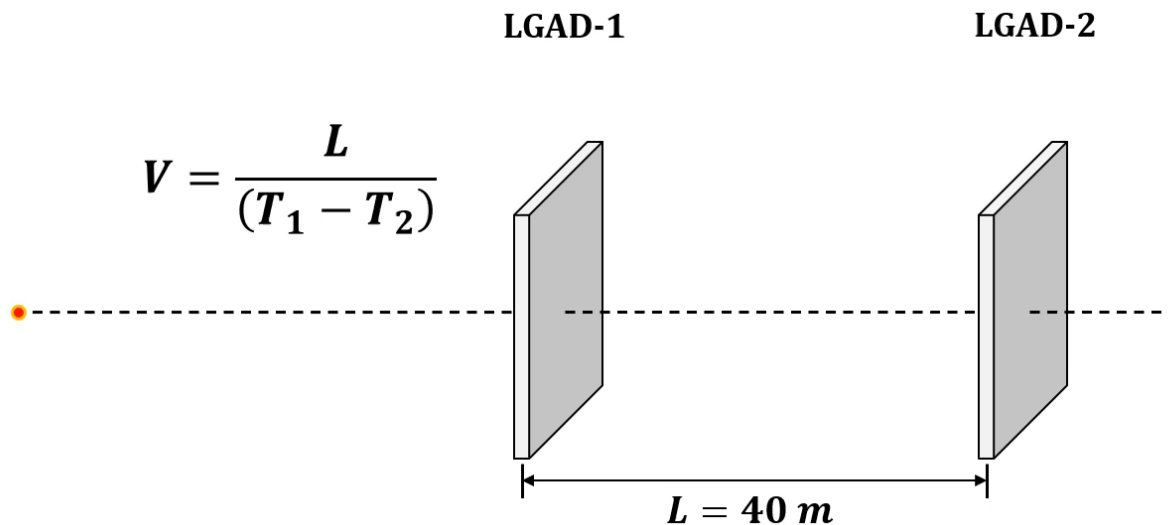
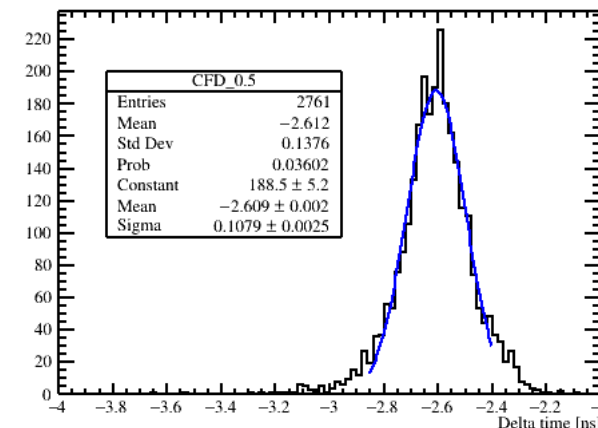
- 位置探测器的标定需要设备支持：束流望远镜
 - 采用4~6片像素探测器，实现质子径迹高精度重建。
 - 为待测像素探测器提供高精度的位置标定。
- 方案：采用MIMOSA28，搭建一套束流望远镜。
- 望远镜分辨率 $\sim 2.7\text{ }\mu\text{m}$ @ 1.3GeV电子束。

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

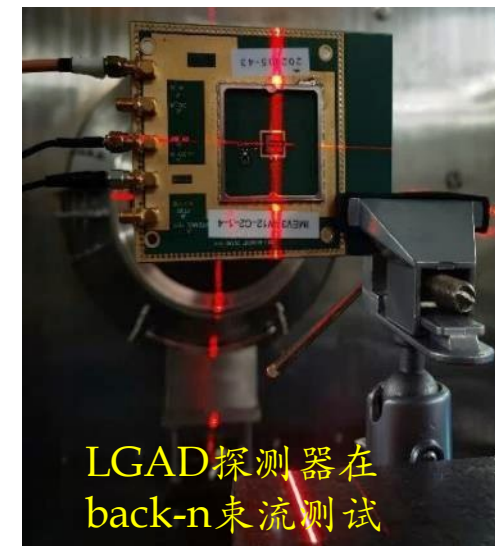


4.2 HEPS的能量测量系统

- 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，目前探测器时间分辨~104 ps。

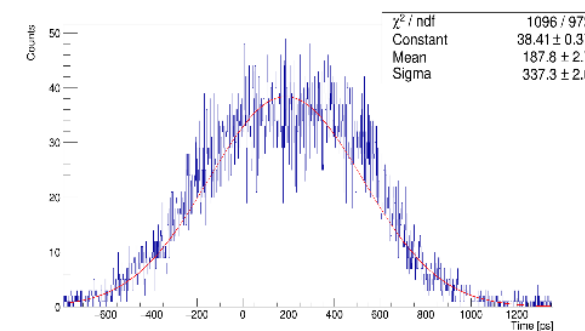
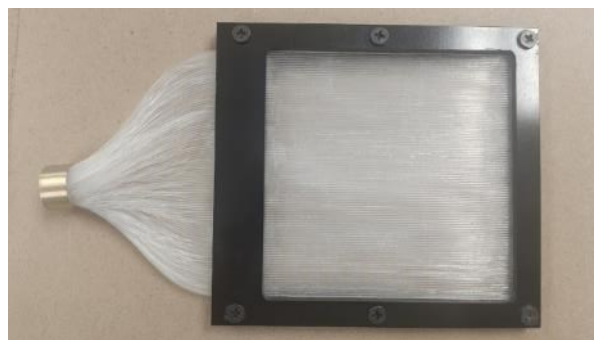


参数	需求
能量分辨率	1% @ 1.6 GeV
飞行时间精度	140 ps @ 40 m
探测器时间分辨率	100 ps

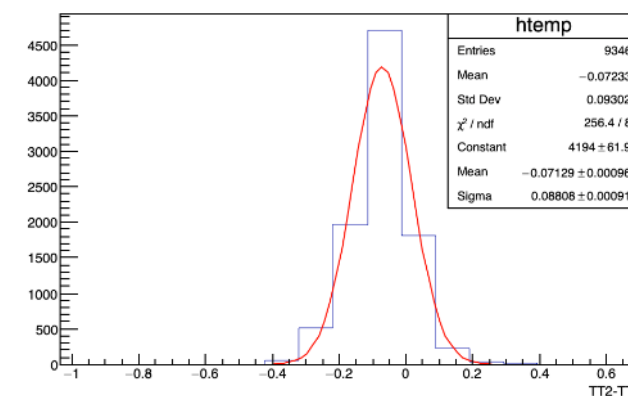


4.3 触发测量系统

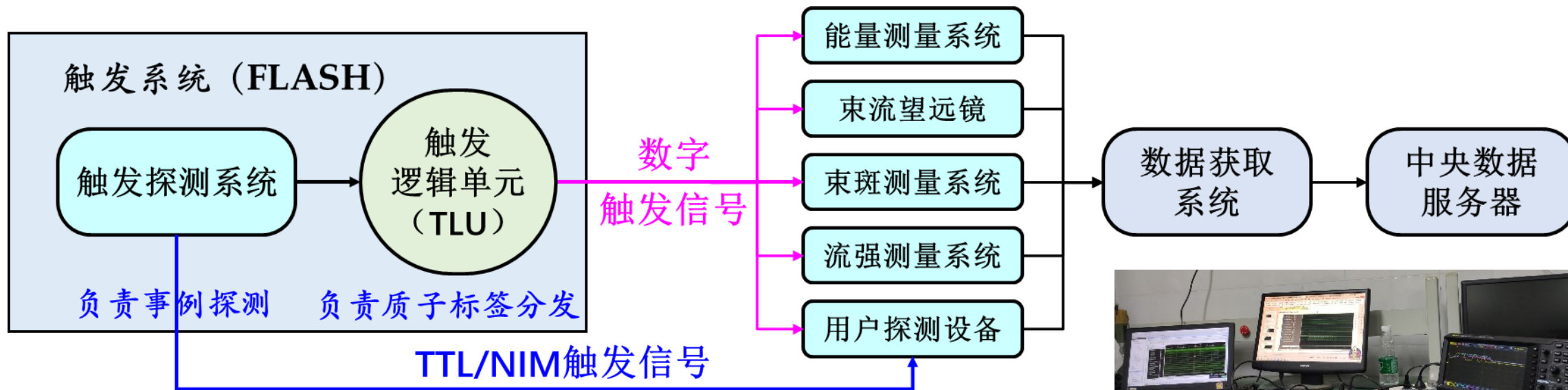
- 触发系统用于为用户探测器**提供数据采集起始时间**或事例编号信息。
- 探测器选用闪烁光纤+FPMT，能保证触发时间不大于1ns的时间分辨率。
- 为用户提供TTL/NIM等多种类型的脉冲触发信号。



TT2-TT1



4.4 触发逻辑单元



- 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
 -

目录

CONTENT



1

对撞机与测试束
Colliders and Test Beam



2

1.6 GeV质子束用途
Application of 1.6 GeV protons



3

HPES束流参数
Parameters of HPES



4

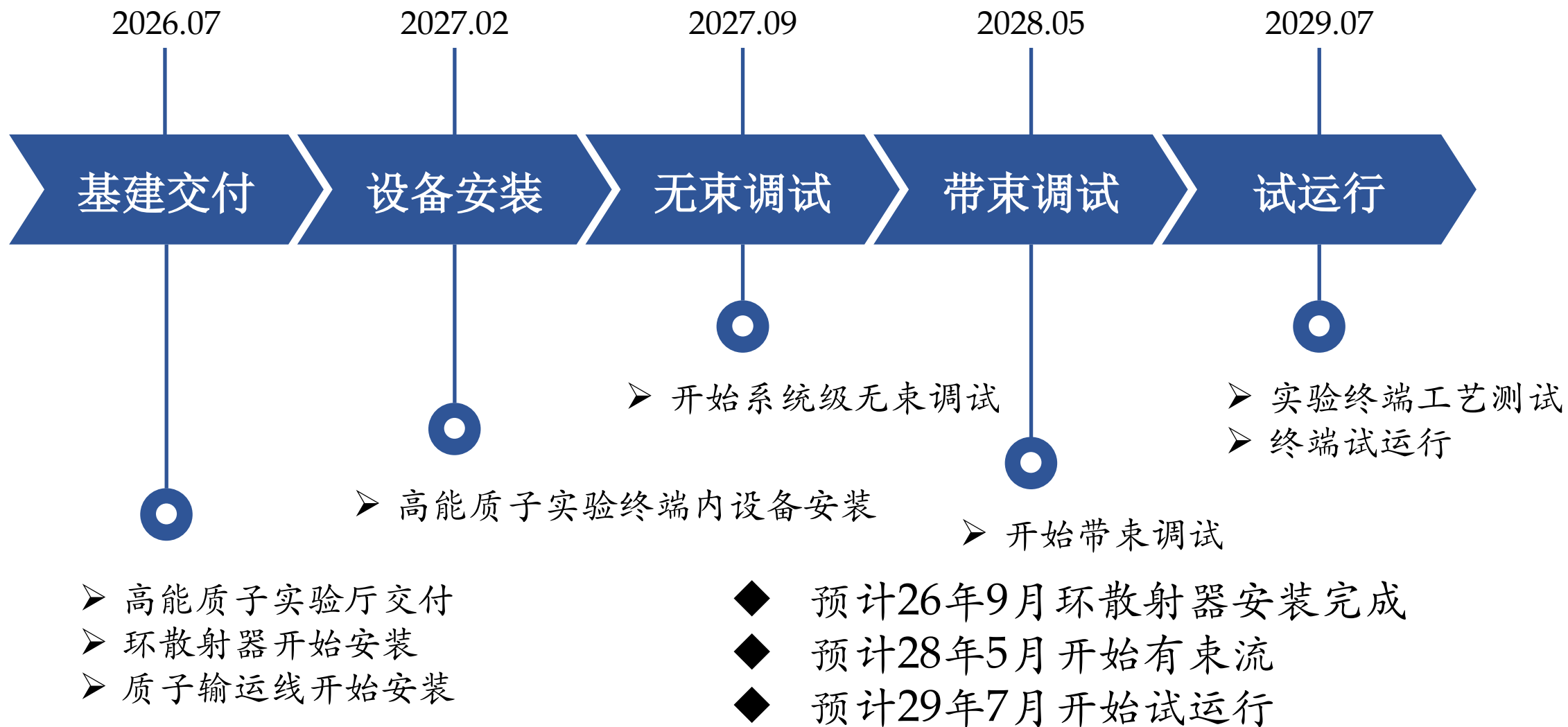
HPES终端探测设备
Instrumentations of HPES



5

总结与展望
Summaries and Prospects

5.1 时间线



5.2 总结与展望



- 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

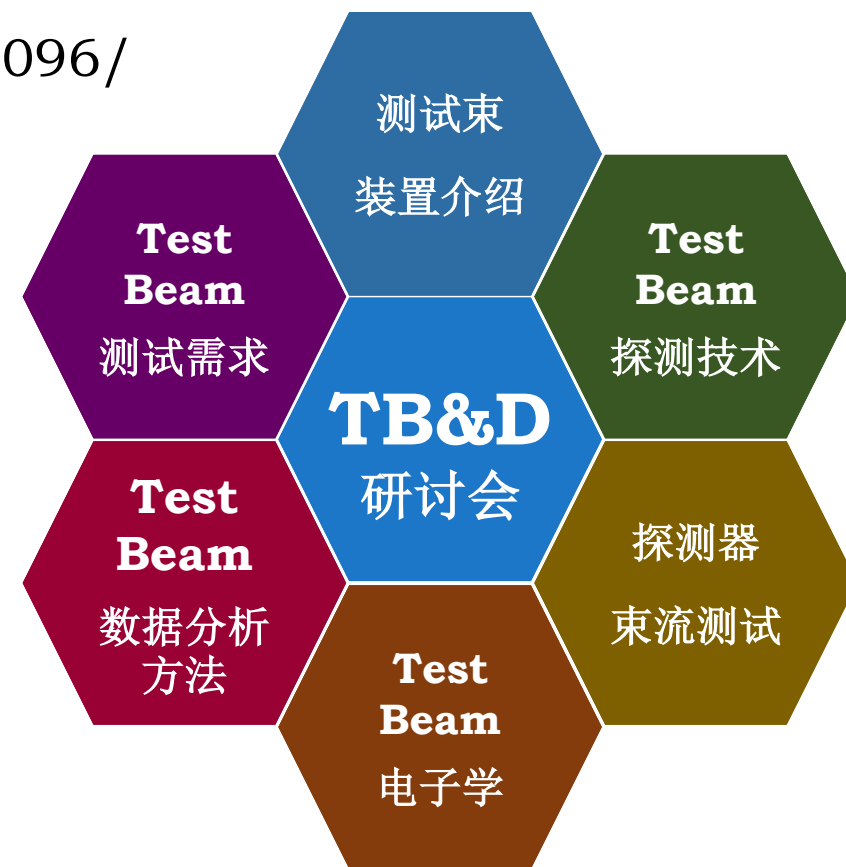
邮 件：guoyh@ihep.ac.cn

欢迎扫码添加我的微信

第一届测试束流与先进探测技术研讨会



- 第一届测试束流与先进探测技术研讨会（TB&D）已于2025年8月14~16日在河南省登封市成功举办！
- 本次会议网站：<https://indico.ihep.ac.cn/event/25096/>
- 计划办成系列年会，欢迎各界同行关注！



致谢



承蒙厚爱
感谢倾听
Thanks!