

CSNS高能质子束及次级束实验终端

报告人：敬罕涛

中国科学院高能物理研究所

散裂中子源科学中心

2024-12-28

主要内容

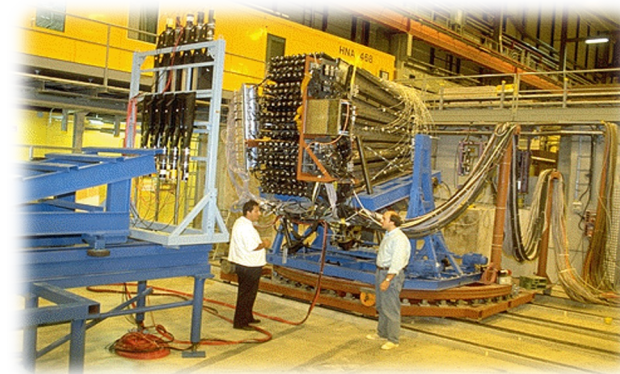
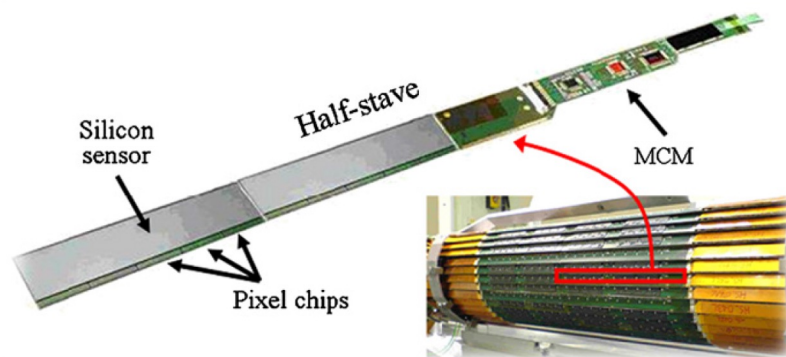
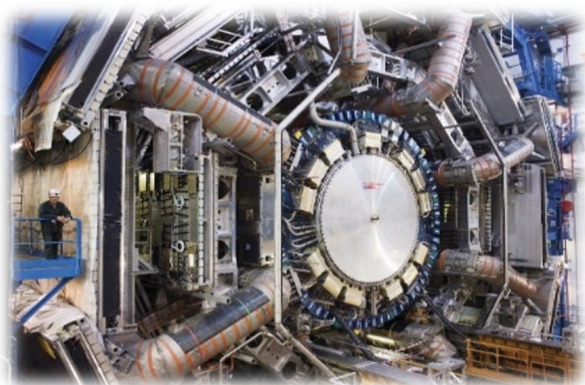
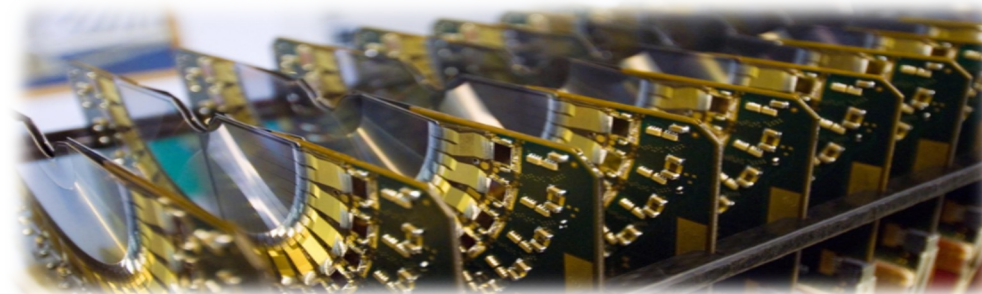
1. 质子测试束流的意义和作用
2. 国际同类测试束装置
3. CSNS布局和高能质子实验区
4. 高能质子束的测试需求
5. 实验终端探测方案设计
6. 布局及通用工艺
7. 次级束的考虑



1. 意义和作用

随着我国在先进粒子探测器的研发能力不断提高，对高性能质子测试束流的需求越来越强烈。建成高性能的质子测试束流能满足国家重大项目、重大装置和关键测量任务等探测器的研发需要。

- 对撞机实验中高能粒子顶点探测器（vertex）实现高精度顶点分辨能力和动量分辨能力测试；
- 高能粒子量能器的能量测试和标定；
- 快电子学性能测试和标定；
- 探测器的辐照测试；

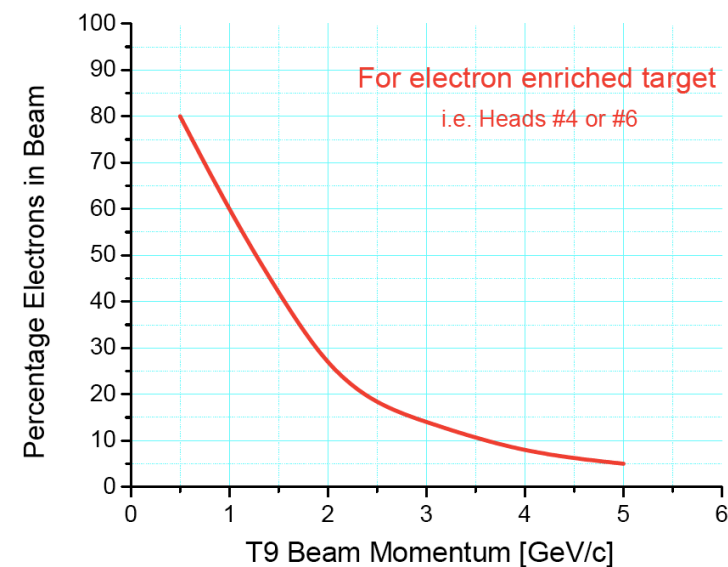


2. 国际同类测试束装置

序号	设施名称	所在机构	束线名称	所在国家	粒子类型	粒子能量或动量
1	CERN SPS North Area	CERN	H2, H4, H6, H8	Switzerland	primariy protons, hadrons, muons, electrons, pions	400GeV/c
2	CERN SPS North Area	CERN	H2-VLE, H4-VLE	Switzerland	pions, protons, kaons	80 GeV/c
3	CERN PS East Area	CERN	T9, T10	Switzerland	secondary	<15 GeV/c
4	DESY II TBF	DESY	TB21	Germany	electron	6.0 GeV
5	FTBF	FERMILAB	Beamline	USA	protons	120 GeV
6	IHEP protvino	IHEP Protvino	Beamline	Russia	protons	70 GeV
7	IHEP protvino	IHEP Protvino	Beamline	Russia	protons, pions, muons, electrons(secondary)	1-45 GeV
8	Beijing TBF	IHEP Beijing	E3	China	protons,pions (secondary)	0.4-1.5 GeV
9	ESTB	SLAC	Beamline	USA	electron	2.5-15 GeV
10	BTF	INFN	BTF-1	Italy	electron, positron	50-750 MeV
11	RCNP	Osaka University	Beamline	Japan	protons	392 MeV
12	piE1 piM1	Paul Scherrer Institute (PSI)	Beamline	Switzerland	pions, muons, positrons, protons	10-450 MeV/c
13	PIF	Paul Scherrer Institute (PSI)	Beamline	Switzerland	protons	6-230 MeV
14	CSNS	IHEP CAS	HPES	China	proton	0.8-1.6 GeV

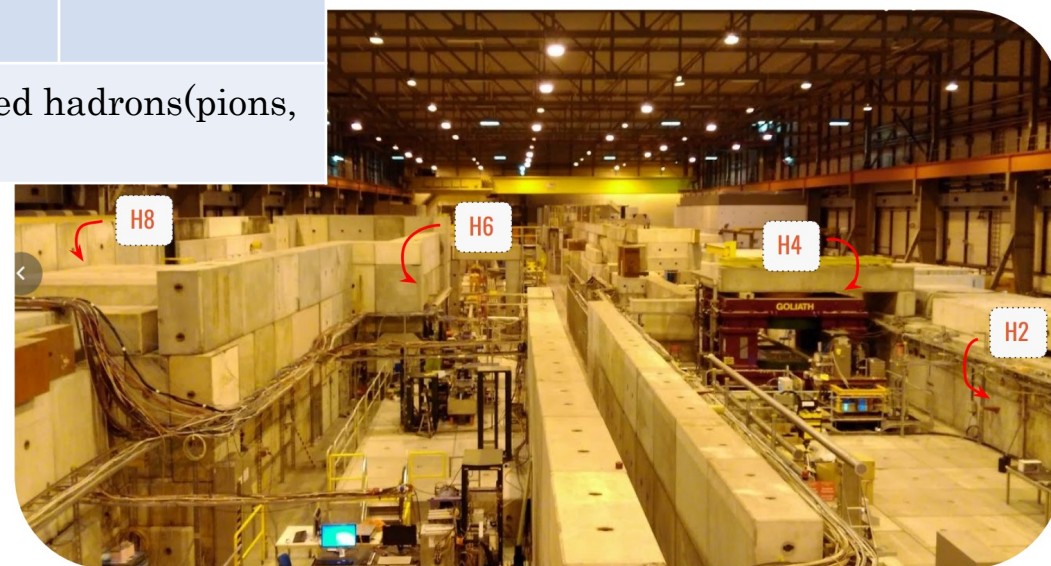
2.1 主要装置——CERN East Area

- Test Beams after LS2
- Secondary beams:
 - T9: $< 0.5 \text{ GeV}/c - 15 \text{ GeV}/c$
 - T10: $< 0.5 \text{ GeV}/c - 12 \text{ GeV}/c$
 - Horizontal momentum selection
- Particle types and intensity
 - Pure electrons, hadrons, muons
 - Max. $\sim 5 \cdot 10^6$ particles per spill
- Spill structure from PS
 - 400ms spill length
 - Typically 1 spill every 18s (15bp), more on request
- Telescope AZALEA in T10
- Quick access from control room to experimental area (< 1 minute)
- Short cables



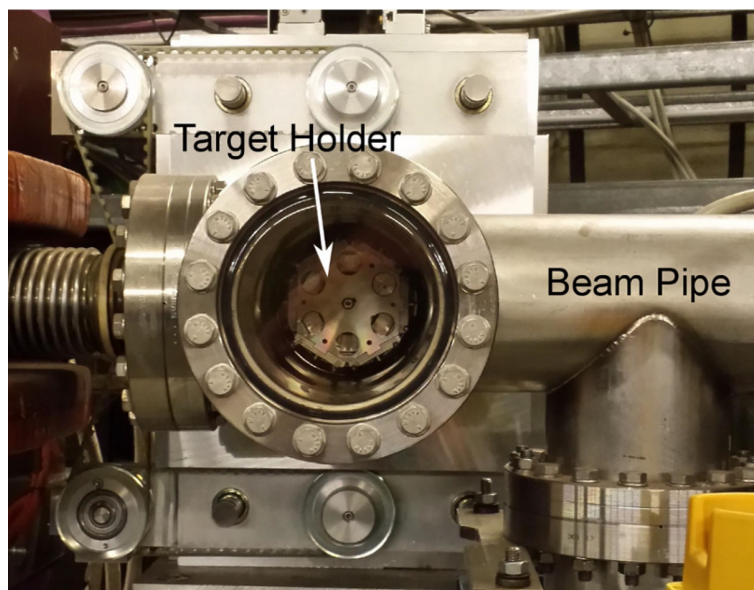
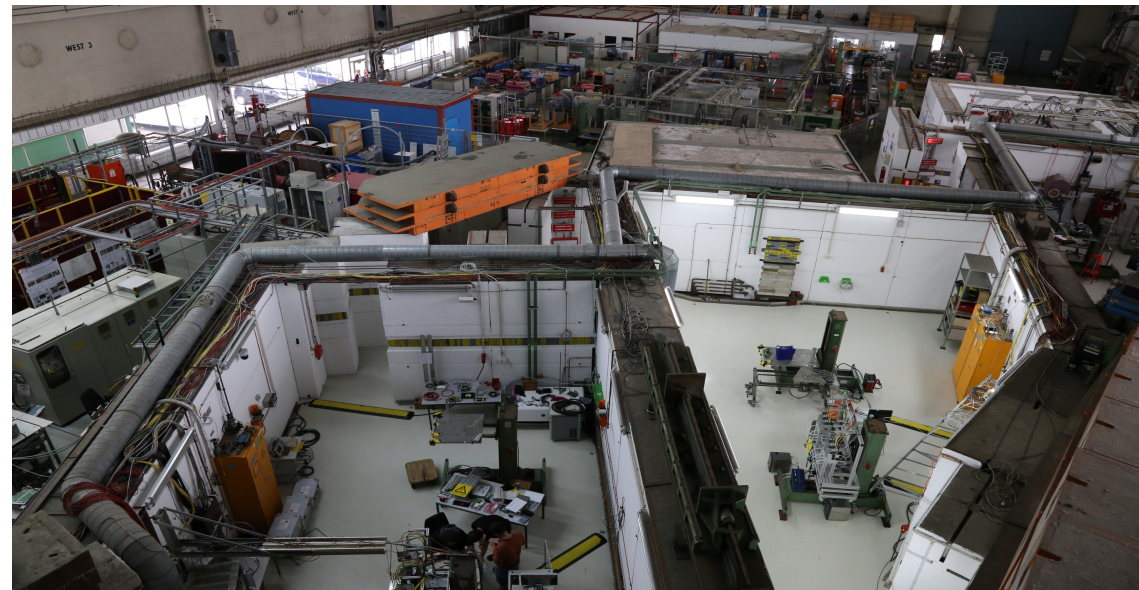
2.2 主要装置-CERN North Area

Parameters	T2		T4	
	H2	H4	H6	H8
Beam Line	H2	H4	H6	H8
Maximum Momentum (GeV/c) Primary/Secondary	400/360	400/330	-/205	400/360
Maximum Acceptance (μSr)	1.5	1.5	2	2.5
Maximum $\Delta p/p$ (%)	± 2.0	± 1.4	± 1.5	± 1.5
Maximum Intensity per spill (Hadrons/Electrons)	$10^7/10^5$	$10^7/10^6$	$10^7/10^5$	$10^7/10^5$
Available Particle Types	Primary protons or pure electrons or mixed hadrons(pions, protons, kaons)			

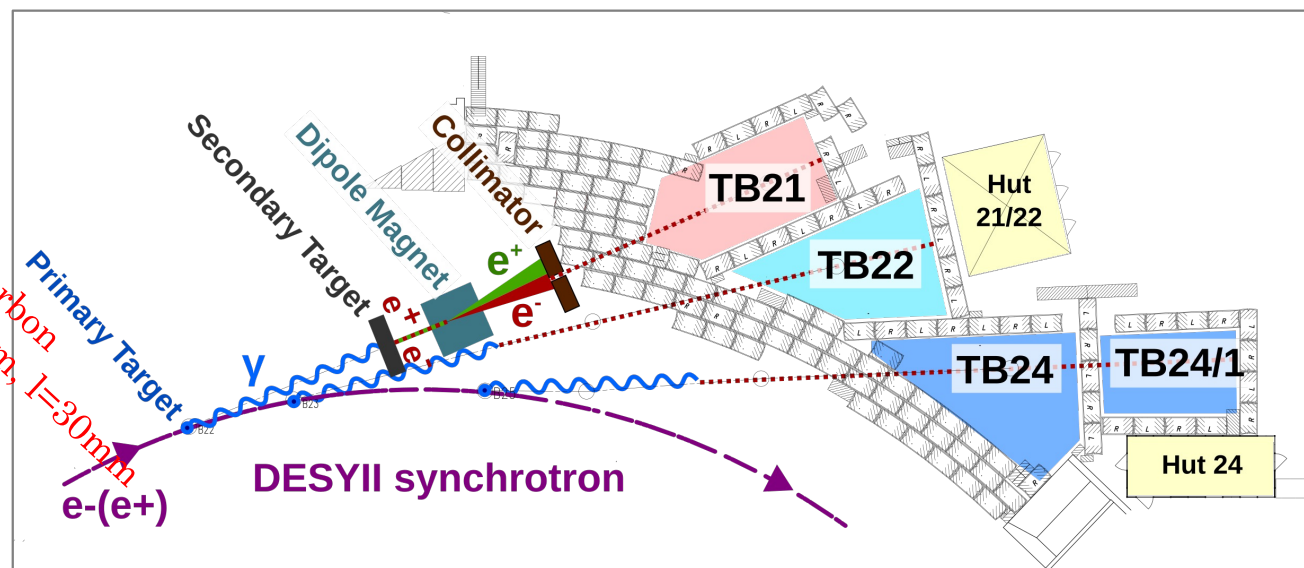


2.3 主要装置——DESY II 测试束

- Facility runs parasitically, fed by DESY II synchrotron (PETRA III injector)
- 1 bunch per fill, 30 ps, 1 MHz
- Sinusoidal cycle: 0.45 to 6.3 GeV @ 12.5 Hz
- Very high availability: ~ 99 % uptime



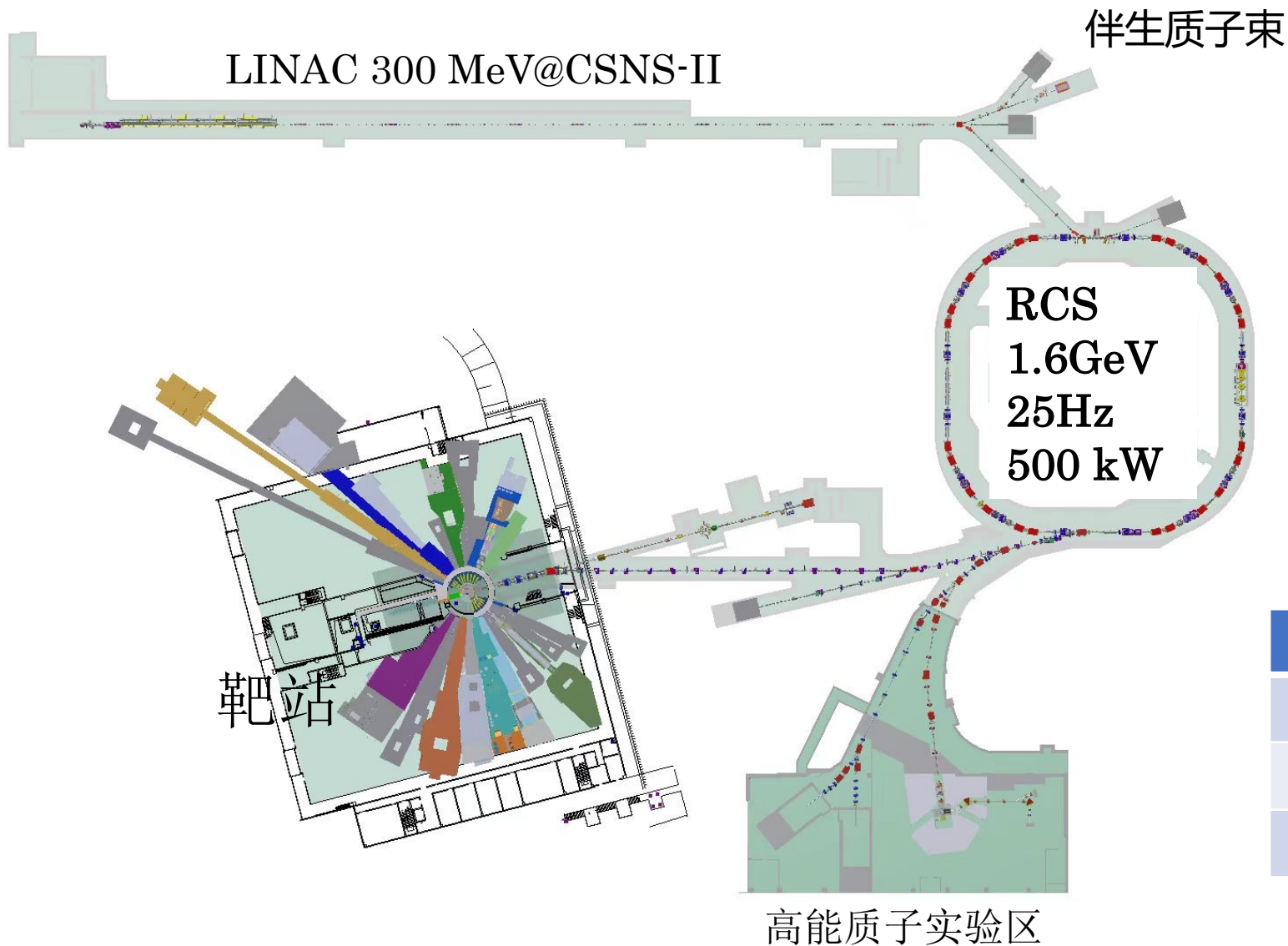
碳纤维丝靶可以从束外移到束流中心



3. CSNS布局和高能质子实验区



3. 1 CSNS布局和高能质子实验区



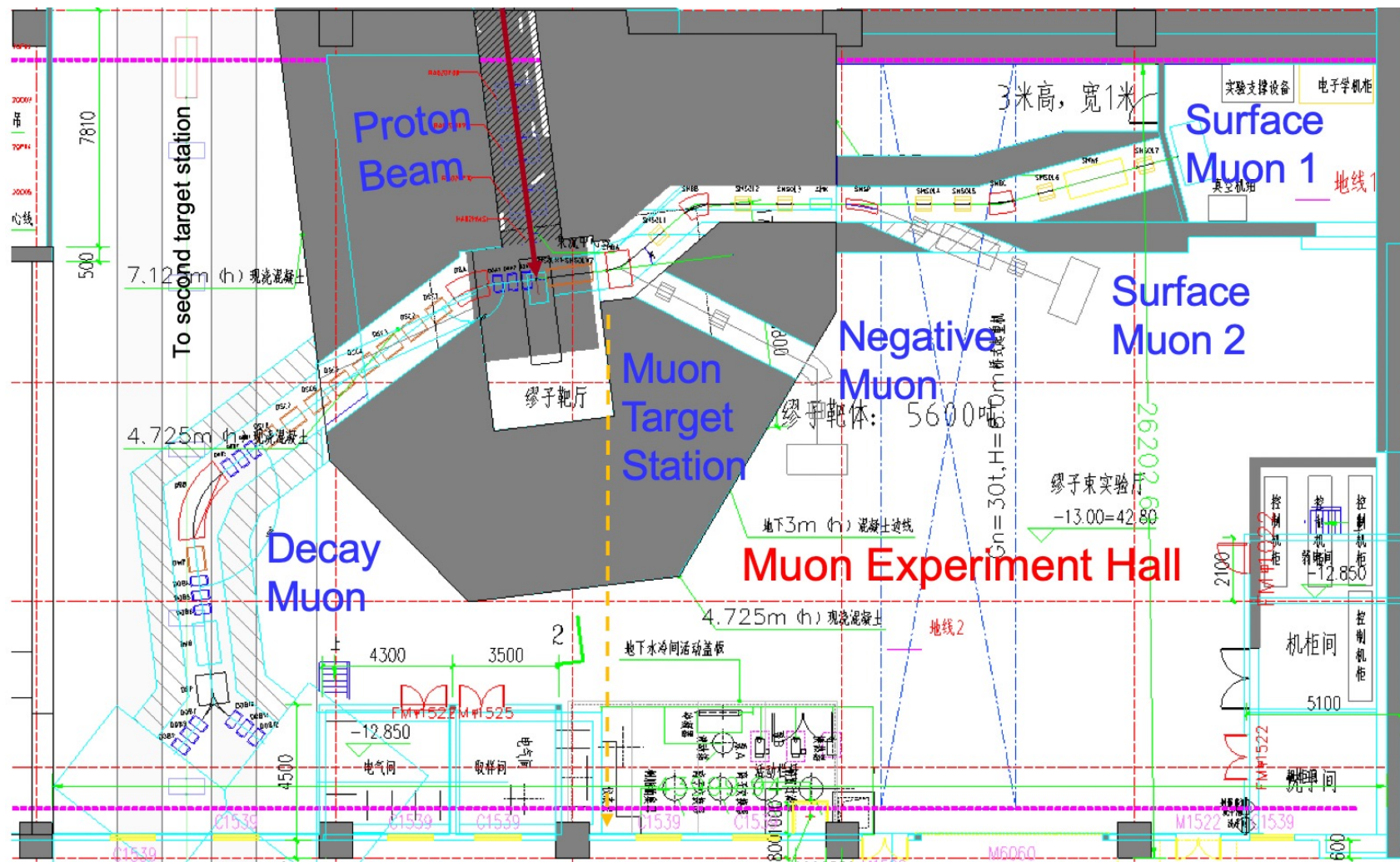
伴生质子束 30 - 80MeV@CSNS-I
100-300MeV@ CSNS-II

- 主要用于先进粒子物理探测器和航天探测器的研发和标定
- 辐照效应研究（系统级测试、单粒子实验为主）等

高能质子引出束流参数

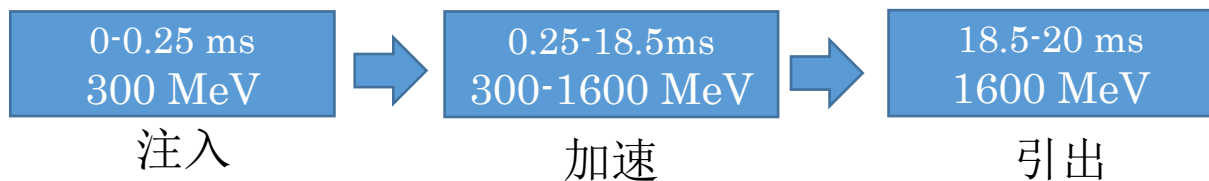
参数名称	设计指标
质子能量范围	0.8-1.6 GeV
束流宏脉冲频率	24 Hz
质子流强	10^3-10^7 n/s

3.2 CSNS上缪子实验终端

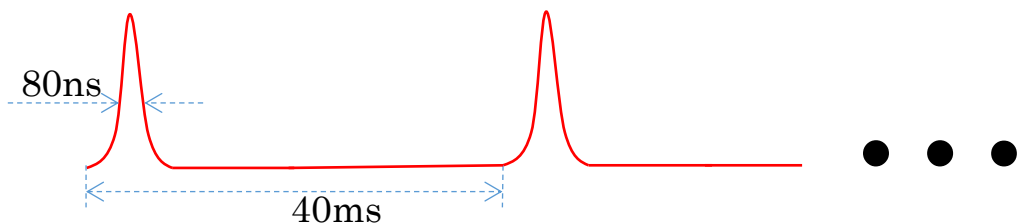


终端负责人：鲍煜，第二届缪子应用研讨会，2024年1月

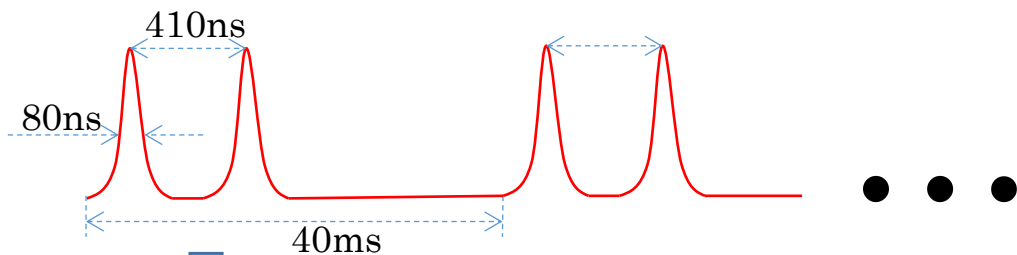
3.3 引出质子束的周期结构 (24Hz)



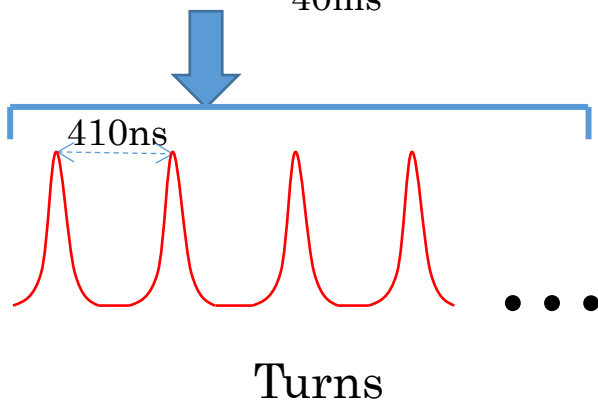
特殊运行模式
(单束团)



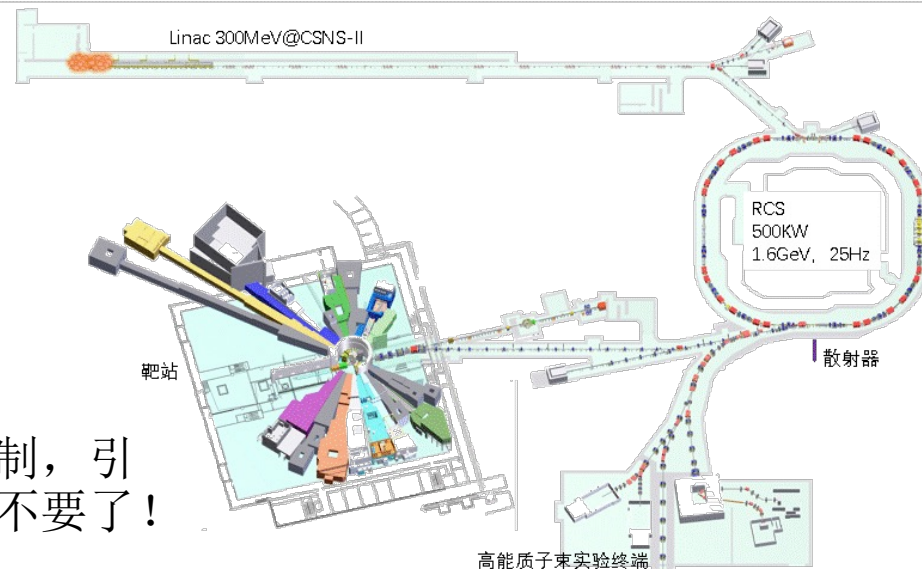
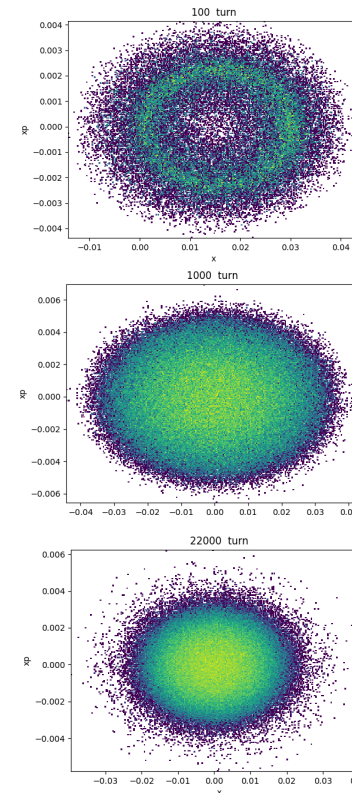
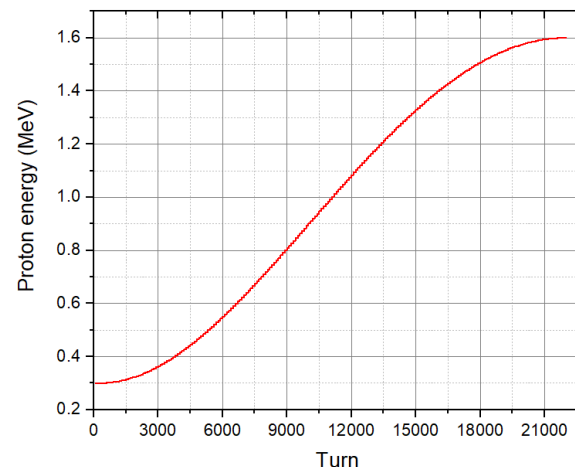
正常运行模式
(双束团)



多圈引出质子的
周期结构



20ms内能量、束斑变化
300-1600MeV



受引出磁铁硬件限制，引出到缪子靶的一发不要了！

3.4 CSNS引出高能质子束流能力

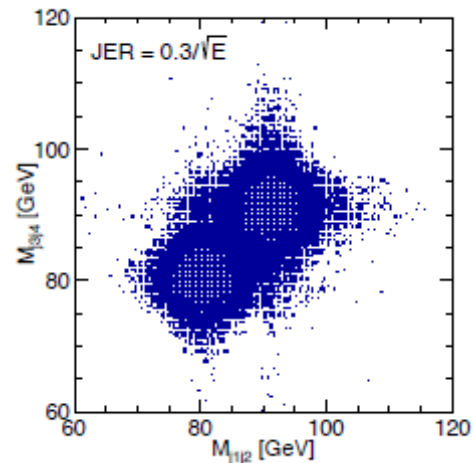
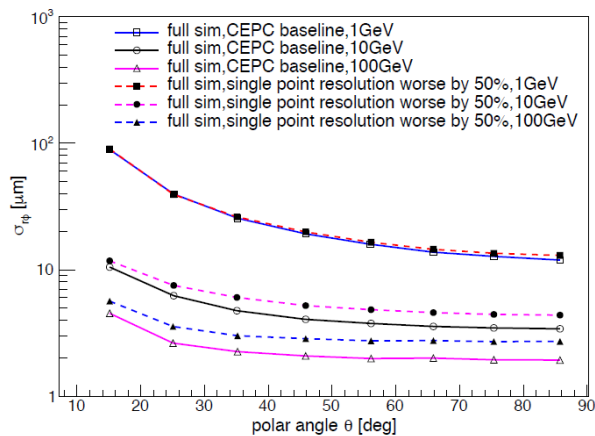
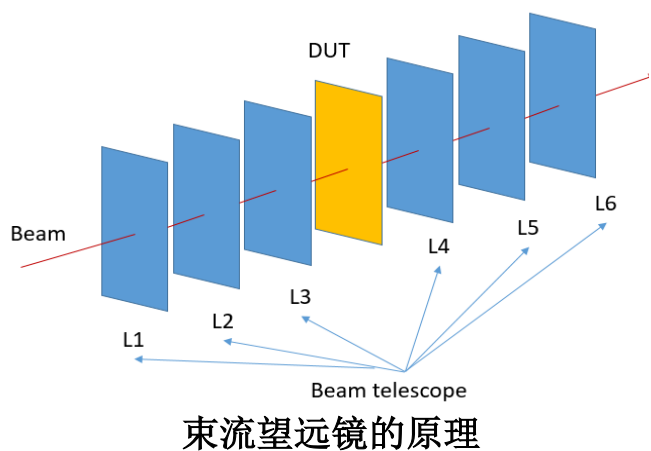
参数	数值	单位
引出束流能量	~1.60	GeV
降能束流能量	0.8-1.6	GeV
宏脉冲重复频率	24	Hz
微脉冲数量	>1000	Pulse
最高粒子数（无准直）	$>2 \times 10^6$	p/s
粒子数调节范围	10^3-10^6	p/s
束斑尺寸	20mm*20mm或者 $\leq \Phi 100$ （无准直）	mm
Pion/Muon能量	300-600	MeV

4 当前国际主流测试束线上开展的探测器测试概况

类型	名称	用途与特点	关键性能参数	束流测试需求
量能器	HGCAL	CMS@HL-LHC	时间-空间-能量5D测量	强子束流；数据对齐；能够提供粒子能量。
	CMS-ECAL	CMS@HL-LHC	30ps高时间分辨率测量shower能量	电子束流；数据对齐；能够提供粒子能量。
硅像素探测器	TANGERINE	新一代硅像素探测器，探测单元采用六边形，信号时间精度更高。 用于FCC对撞机径迹重建、DESY-II升级标准探测器	空间分辨率3 μm 时间分辨率ns量级 厚度50 μm	径迹重建精度<3 μm 束流能量离散<1% 束流粒子处于MIP状态
	MuPix 11	Mu3e实验径迹探测器、 μSR 谱仪	像素尺寸80 μm ；时间粒度8ns；厚度50~100 μm	数据对齐；10 μm 量级的空间分辨率
	3D pixel detector	下一代硅像素探测器，能够提供击中三维坐标	25 \times 100 μm^2 ；150 μm 厚度	束流望远镜，且探测器空间分辨达到2 μm
	TaichuPix-3	CEPC径迹探测	3 μm 空间分辨率	束流望远镜，能够提供好于3 μm 的空间分辨率标定
	FE-I4&ITkPix	ATLAS径迹探测	>97% @ 1.7E16 neq/cm ²	束流望远镜
硅微条探测器	E16-STC	用于E16实验的次级正负电子对探测。	位置分辨率30 μm ；时间分辨率5ns；高计数率@10MHz	径迹重建精度<30 μm ；数据对齐；束团结构小于ns方便高计数率研究
	AMS-L0	用于AMS内层探测器径迹测量	7m ² 覆盖面积	束流望远镜，且探测器空间分辨达到5 μm
LGAD	iLGAD	反LGAD增益层设计，提高LGAD探测器的空间颗粒度	10~20 μm 空间分辨率	束流望远镜
	AC-LGAD	AC耦合LGAD设计，提高LGAD探测器的空间颗粒度	10~20 μm 空间分辨率	束流望远镜
闪烁体+SiPM	CMS-BTL	CMS@HL-LHC	30~50 ps时间分辨率；物质的量低	数据对齐；能够提供高时间精度辅助测量。
	LYSO Cristal	用于PIONEER实验寻找pion异常衰变	能量分辨率好于1%	pion束流，电子能量辅助测量
闪烁光纤	EPFL-SciFi	搭建闪烁光纤束流望远镜，用于大尺寸、低空间分辨率探测器测试	~100 μm 空间分辨，13 \times 13cm ²	束流望远镜；数据对齐
切伦科夫	dRICH	ePIC实验谱仪主探测装置	动量测量范围3~60 GeV/c	强子束流；准单粒子束流；粒子能量可调
气体探测器	RD51	搭建气体束流望远镜，用于大尺寸、低空间分辨探测器测试	50~100 μm 空间分辨率，10 \times 10cm ²	束流望远镜；数据对齐
photo diode	VTH2090	配合CsI闪烁体，用于高能宇宙线探测@HERD	1E7动态范围	准单粒子束，数据对齐，粒子能量可调，能量精度高
MCP	LAPPD	用于对撞产生的带电粒子识别，寻找正反物质不对称性	时间分辨率60ps；高增益；单光子测量	强子束流；准单粒子束流；粒子能量可调

4.1 国内对撞机测试需求

- 我国对撞机探测器测试需求可分为径迹探测器测试与量能器测试两个方面：



- 径迹探测器一般包括：硅像素探测器、时间投影室等物质的量低、位置探测精度高的探测器。
- 径迹探测器测试需要使用束流望远镜精确测量粒子径迹。
- CEPC径迹探测器对质子的径迹重建精度3-10 μm 。

- 量能器包括基于PFA方法的强子量能器和电磁量能器。
- 量能器的测试需要实验终端为其提供每一个质子的能量。
- CEPC量能器区分W/Z玻色子的能量分辨率要求好于3%。保守考虑，要求质子能量测量分辨率好于1%。

4.2 其他测试实验需求

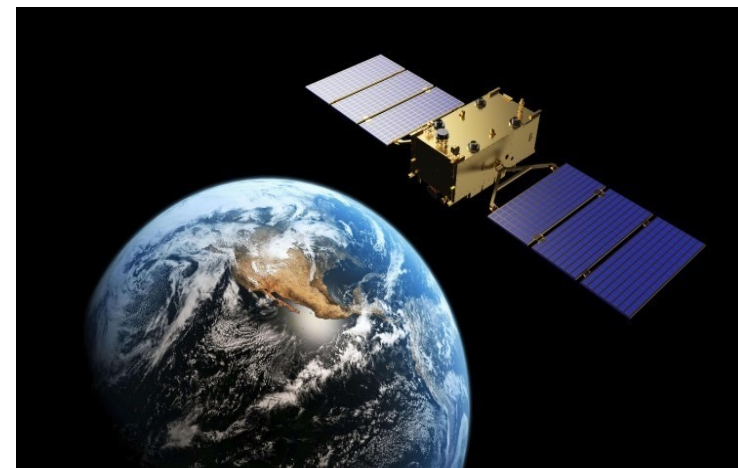
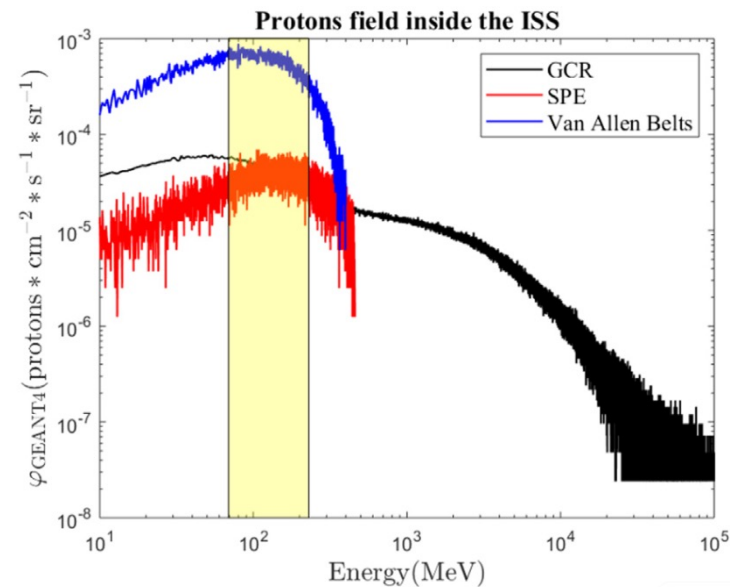
HPES的1.6 GeV质子还能在以下领域发挥重要作用：

星际探测器的宇宙线效应研究

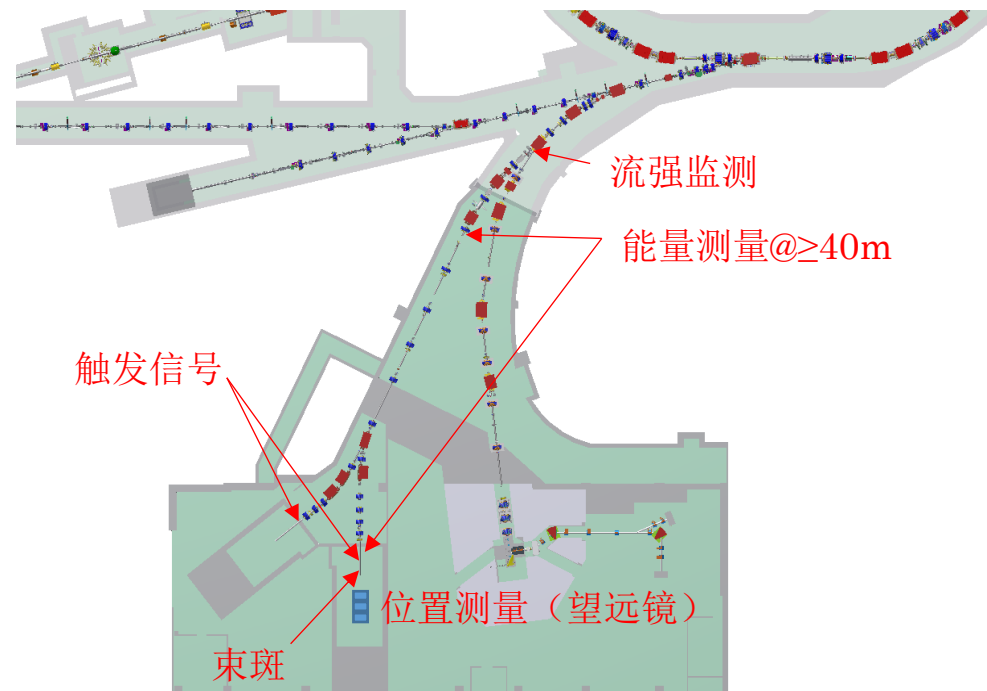
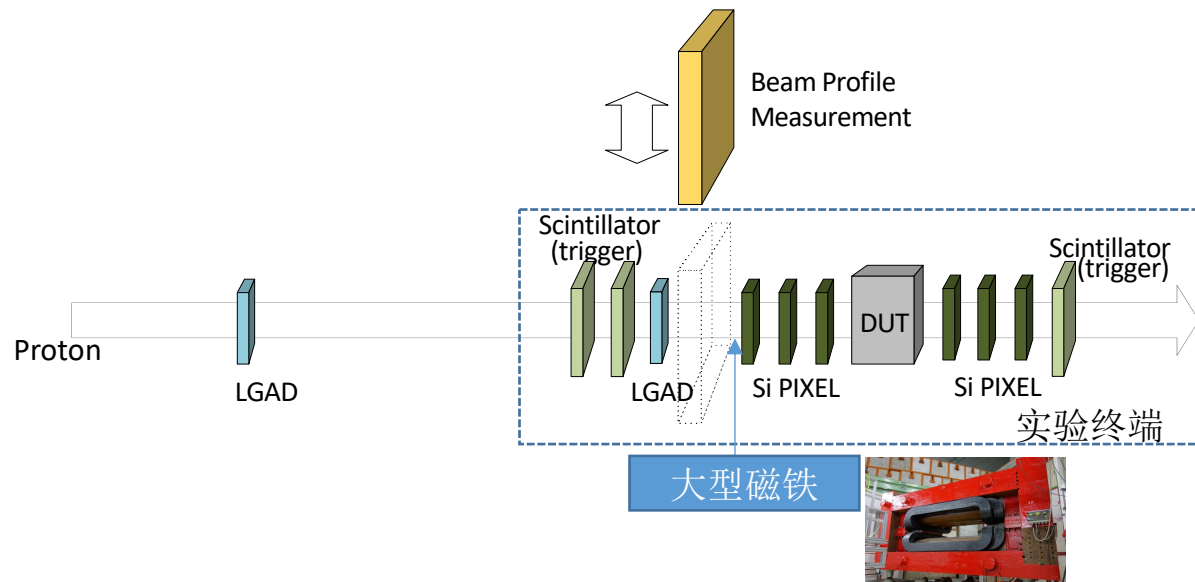
- 在远离太阳系的星际空间中，银河宇宙线（GCR）GeV能级的质子占据重要作用。
- 该能量段的质子对航天飞船上的闪烁体和硅像素探测器有着不可忽视的影响。另外生物效应也开始受到关注。
- 这方面研究需要HPES工作在相对较高的流强，不需要准单粒子束。

航天卫星的系统级测试

- 当前国内缺乏高能质子的测试终端，当前测试主要集中在航天器件级抗辐照加固研究，系统级和整星级的抗辐照研究暂无相关报道。
- 未来卫星的发展趋势是小型化，届时系统级和整星级的测试需求将非常多。
- 能提供GeV能级的HPES是实现芯片级、系统级、整星级抗辐照实验研究的平台。



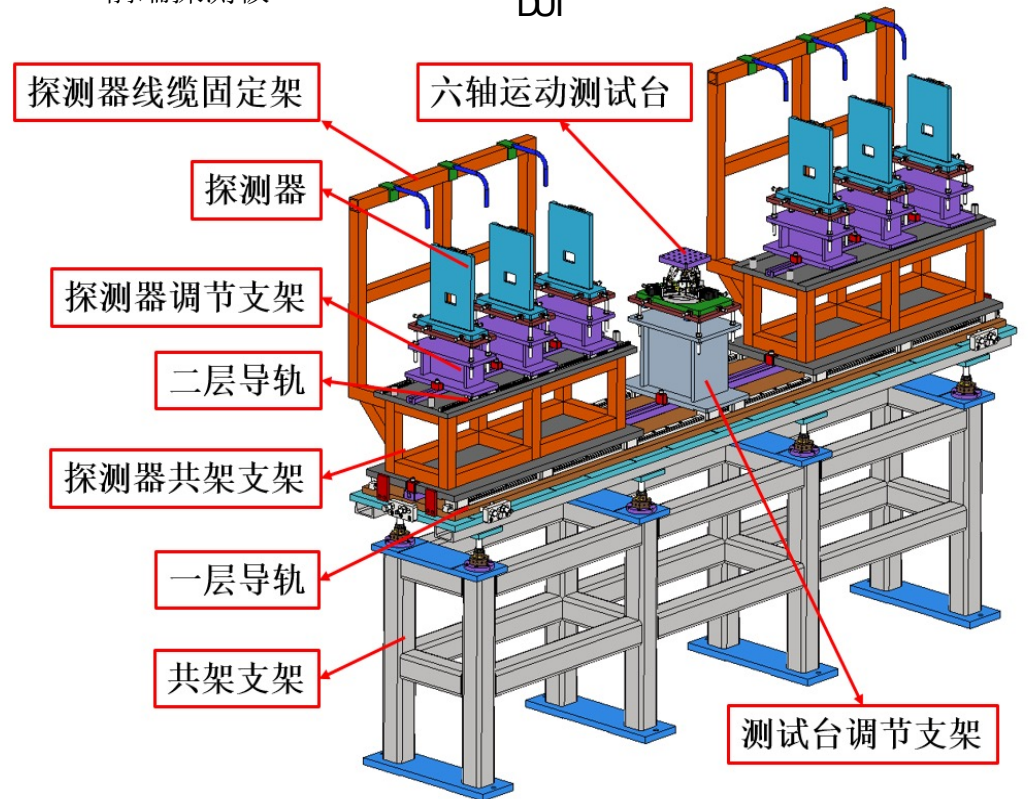
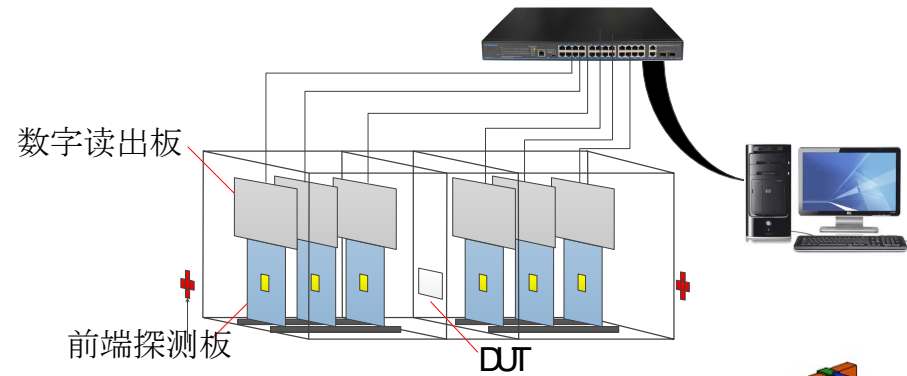
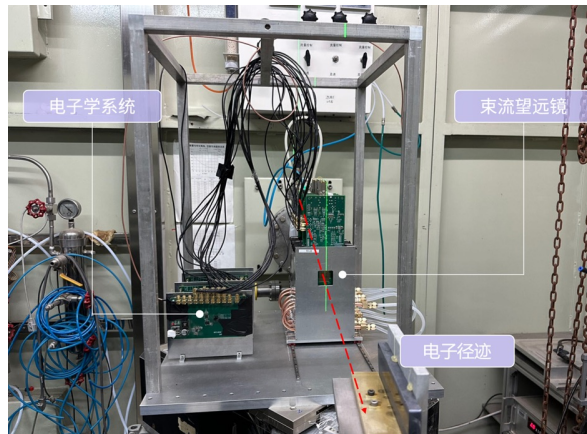
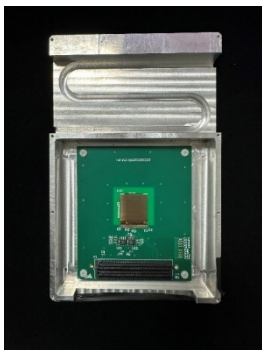
5. 实验终端探测系统



编号	设备名称	设备功能	主要参数	拟采用的技术路线
1	束流望远镜探测器	高精度定位测试粒子入射径迹	位置分辨小于 $10\mu\text{m}$	基于硅像素探测器的望远镜系统
2	粒子能量测量探测器	测量降能后的入射粒子能量	探测器时间精度 小于 $100\text{ps}@1.6\text{GeV}$	LGAD探测技术
3	触发探测器	测量入射粒子时间并给出系统触发信号	时间分辨小于 1ns	闪烁光纤+快光电倍增管技术
4	束斑测量探测器	测量束斑剖面、均匀性	位置分辨小于 $150\mu\text{m}$; 通道数大于1200路	Micromegas气体探测器
5	束流强度测量探测器	长期质子流强监测	极弱质子束; 计数率大于 $10^5/\text{s}$	二次电子监督器和SiC探测器
		极弱质子流强测量		塑料闪烁体探测器

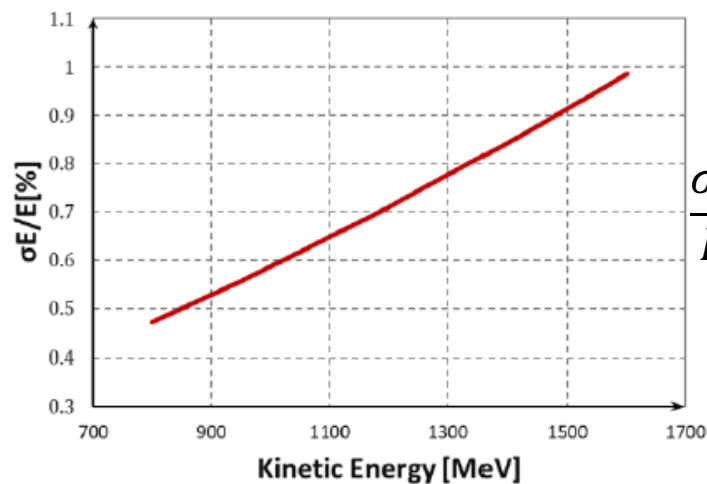
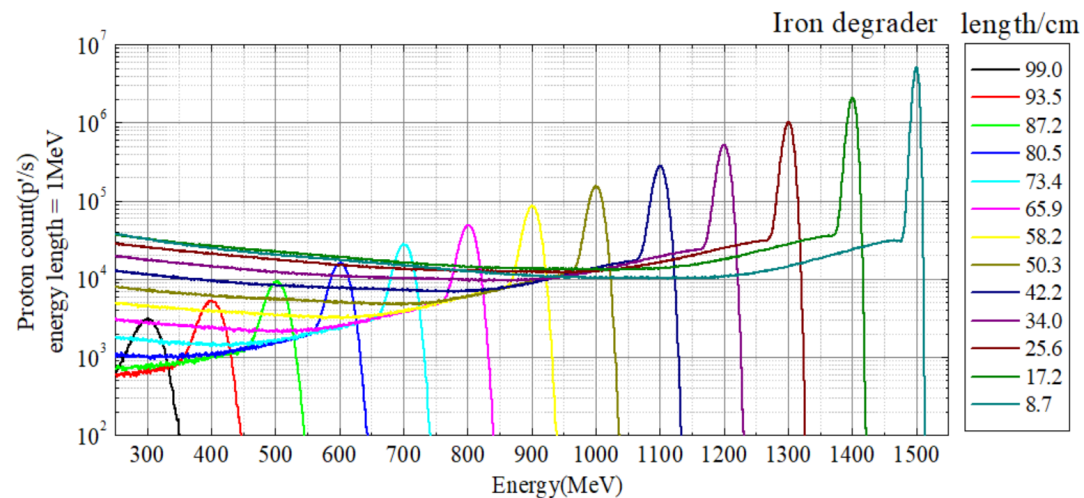
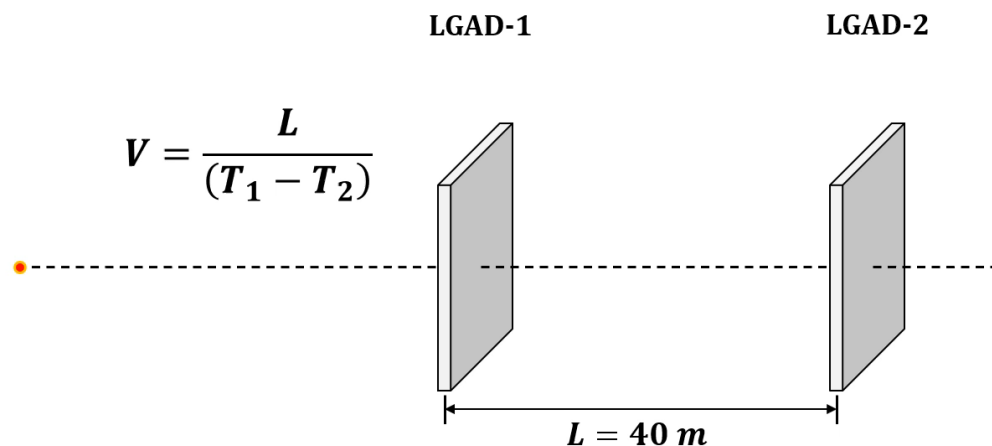
5.1 质子束流望远镜系统 (Telescope)

- 用于HPES的质子径迹的高精度测量。
- 主要参数：
 - 探测模块层数：6层
 - 每层灵敏面积 $>3\text{cm}^2$
 - 位置分辨率 $\leq 10\ \mu\text{m}$
- 应用场景：
 - CEPC等大型粒子对撞机径迹探测器的高精度测试。
 - 先进位置探测器的高精度测试。
 - 质子成像原理测试。



5.2 质子能量测量

- 量能器测试需要降能使用质子。
- 测量思路：飞行时间法（TOF）进行粒子能量测量。
- 飞行距离：按照最大可用空间设置（40米）
- 探测器时间分辨：小于100 ps

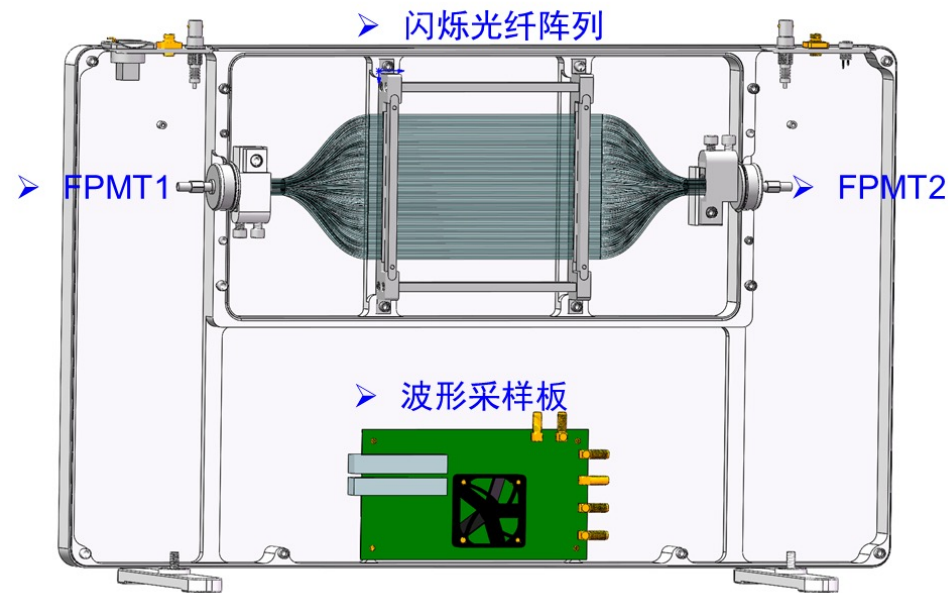


$$\frac{\sigma_E}{E} = \gamma(\gamma + 1) \sqrt{\left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_L}{L}\right)^2}$$

- 飞行距离40 m、质子角散忽略，探测器时间分辨100 ps时，测量设备能量分辨率随能量变化关系，好于1%。

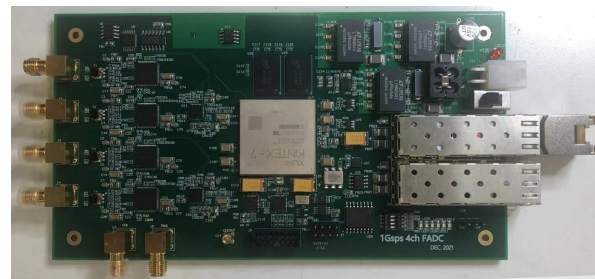
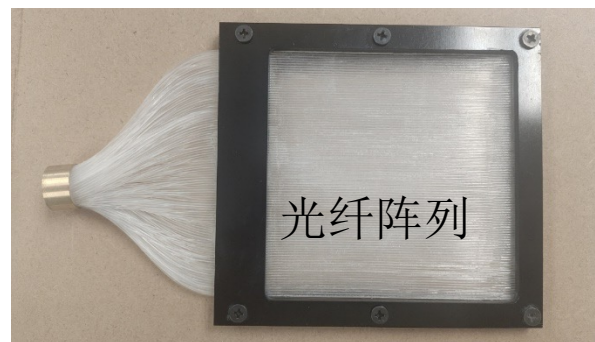
5.3 触发系统 (FLASH)

- 选用闪烁光纤组成探测器阵列。
- 闪烁光纤厚度约2mm，物质的量低，对质子能量影响小。



FLASH系统设计参数

参数类型	参数名称	参数值
探测器设计参数	计数率上限	10kHz
	灵敏区面积	10cm*10cm
	探测器数量	3组
	电子学通道	2CH X 3组
	质子能量测量区间	0.8~1.6GeV
	触发系统符合时间分辨	<1ns
	光电倍增管单光子时间分辨	< 100ps



波形采样板



FPMT

5.4 束流束斑测量系统 (PALOT)

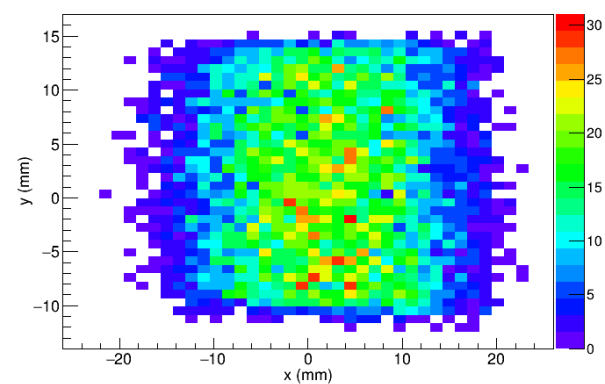
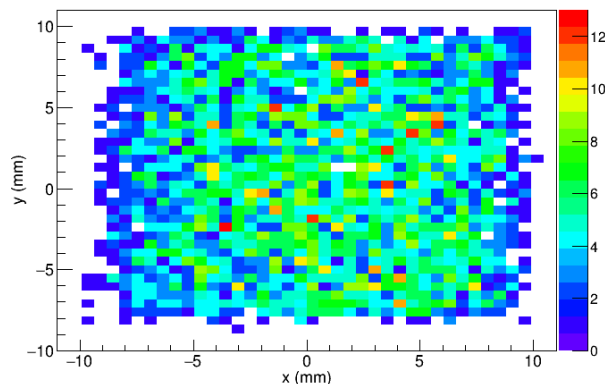
- 束斑测量探测器作用：提供原始束斑分布

- 参数要求：

- 极弱束流束斑： $10 \times 10 \text{mm}^2 \sim 30 \times 30 \text{mm}^2$ ；
- 辐照实验束斑： $10 \times 10 \text{mm}^2 \sim 100 \times 100 \text{mm}^2$ ；
- 像素分辨： **$150 \mu\text{m}$** ；

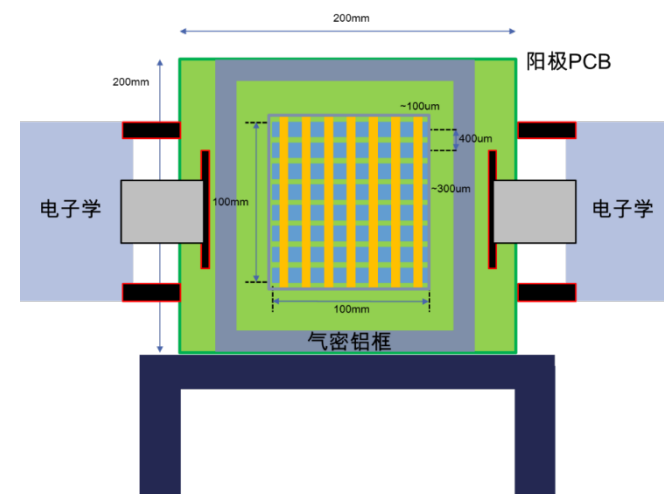
- 测量思路：**Micromegas**探测器

- 探测效率高(>95%)
- 高计数率(最高MHz)，匹配调束需求
- 低离子回流，高计数率时空间电荷效应低
- 时间分辨(~ns)和空间分辨(~ $10^2 \mu\text{m}$)满足需求
- 技术成熟工艺稳定，研制成本低



终端处模拟得到的束斑尺寸 $\sim 2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$

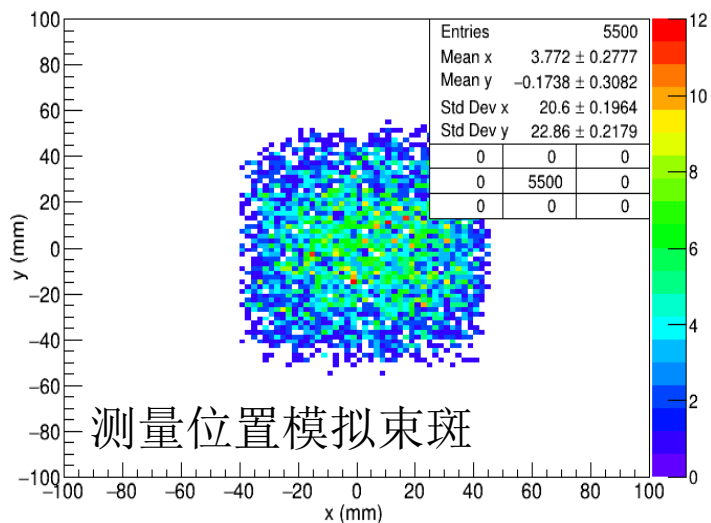
计数率	10 kHz
灵敏区面积	$10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$
位置分辨率	$150 \mu\text{m}$
电子学通道	2048



5.5 质子流强监测——长期实时质子流强监测

测量需求

- 预计最大流强 $5E7$ p/s
- 设计值 $1E6$ - $1E8$ p/s, 测量精度小于10%
- 耐用, 造价低



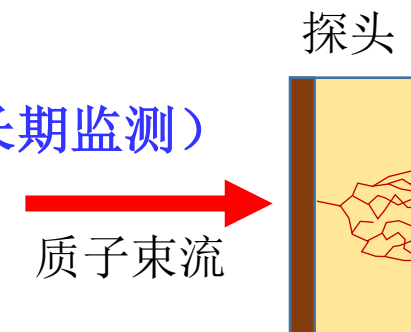
测量思路:

1. 截断式

- 采用二次电子发射原理 (中低流强长期监测)

优点: 不受束流束斑分布影响;

缺点: 影响质子角散;



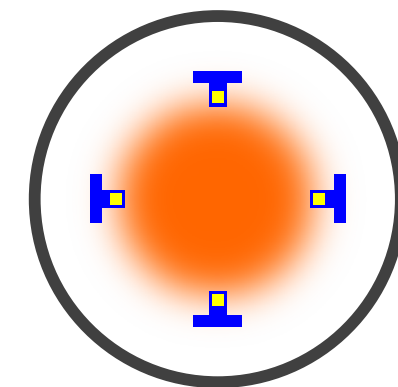
2. 周边测量

- CT (一般测量大流强)

- 半导体探测 (低流强长期监测)

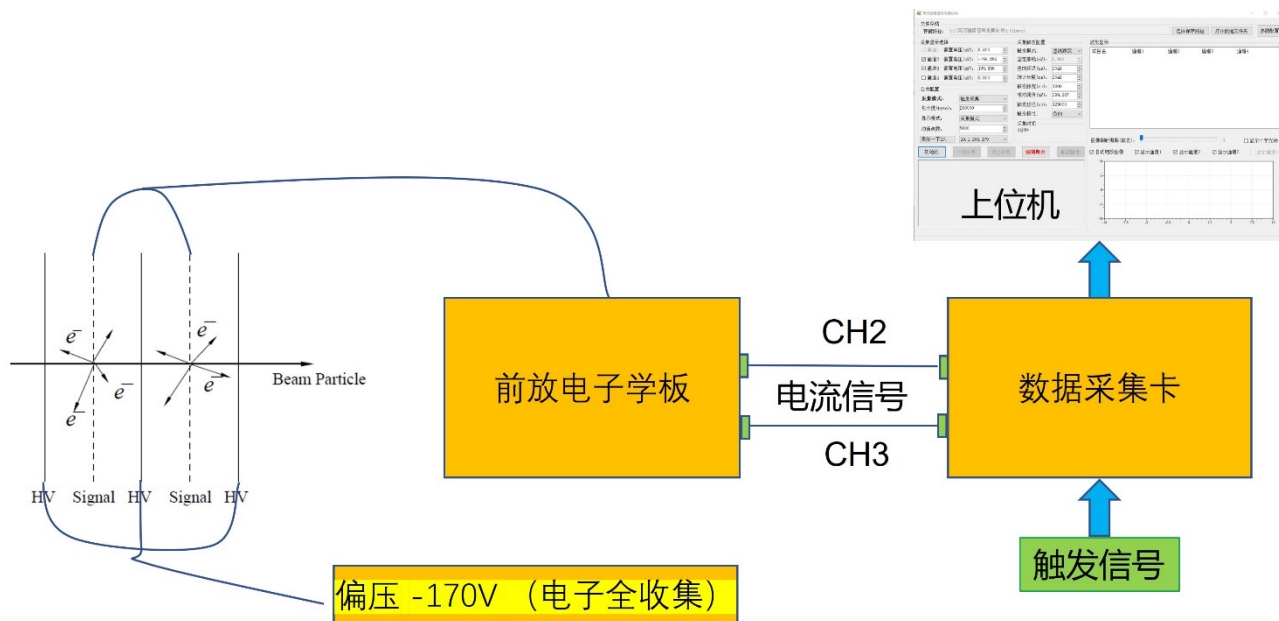
优点: 不影响主束流, 低流强灵敏性好;

缺点: 要求束斑分布确定及束流对中好;

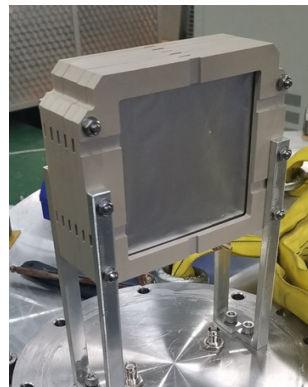


5.5.1 二次电子发射监测器 (SEEM)

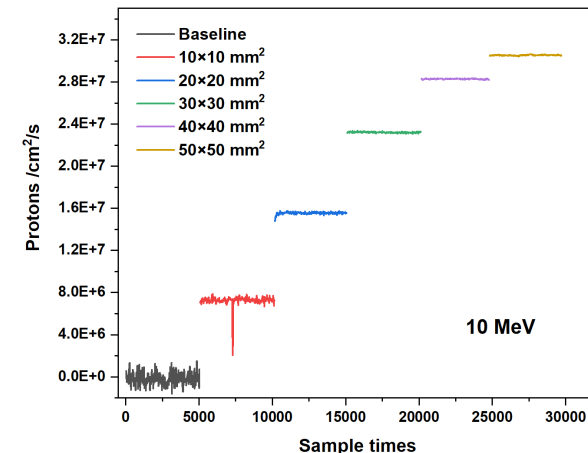
原理方案:



实物



SEEM监测APEP质子注量率随束斑变化:



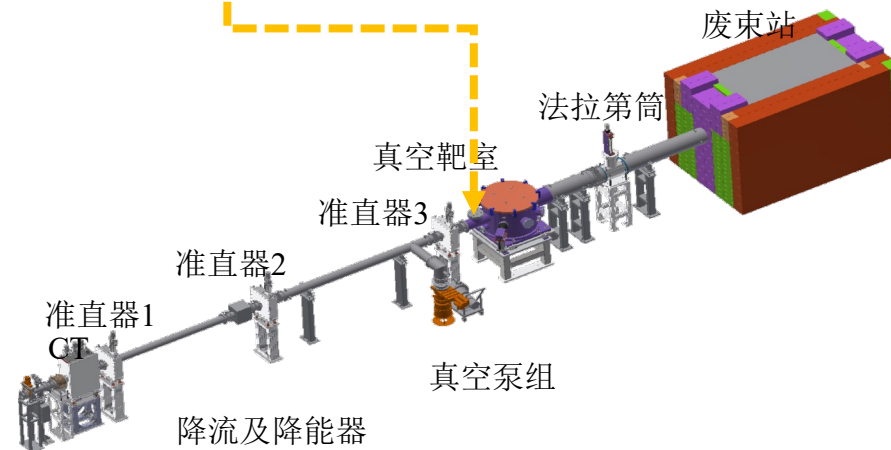
铝膜对质子的二次电子发射系数:

$$\epsilon = 38.26 E_{eq}^{-1/2}$$

参数:

铝膜厚度: 10 μ m 层数: 5层

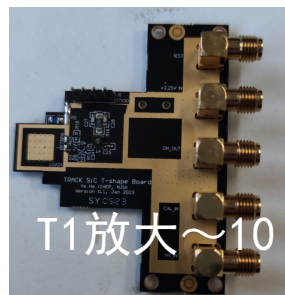
偏压: 大于100V 可监测流强: 10⁶~10⁸ p/s



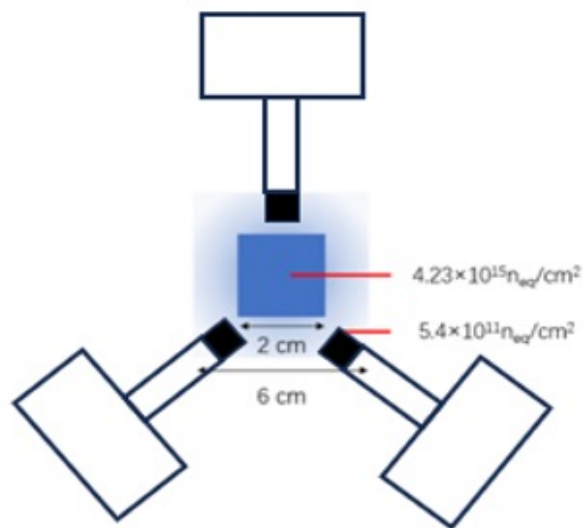
5.5.2 基于SiC的流强监测系统 (BMOS)

束流监控系统设计目标:

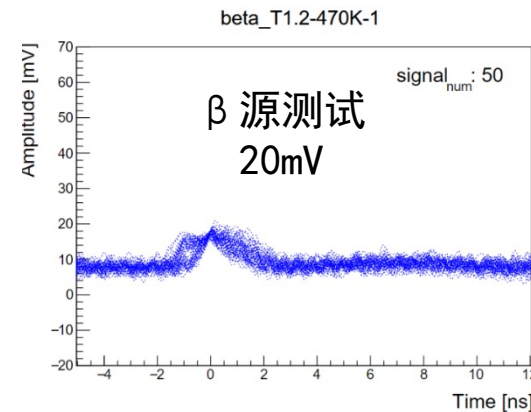
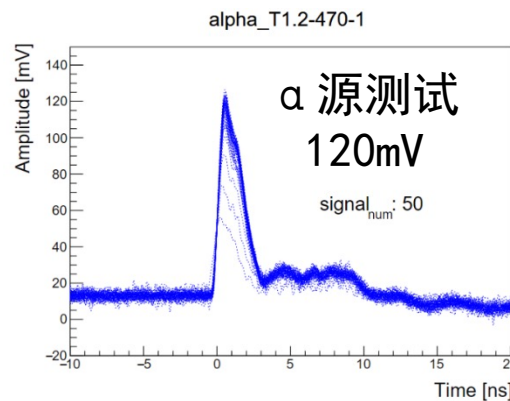
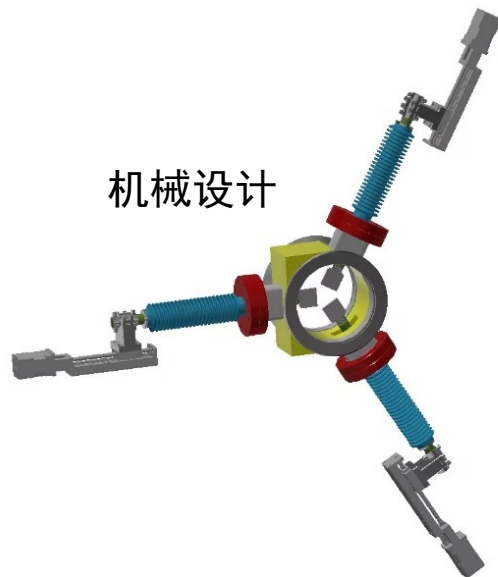
- 测量误差: < 1%
- 工作时间: 5000 h/y



束流流强分布

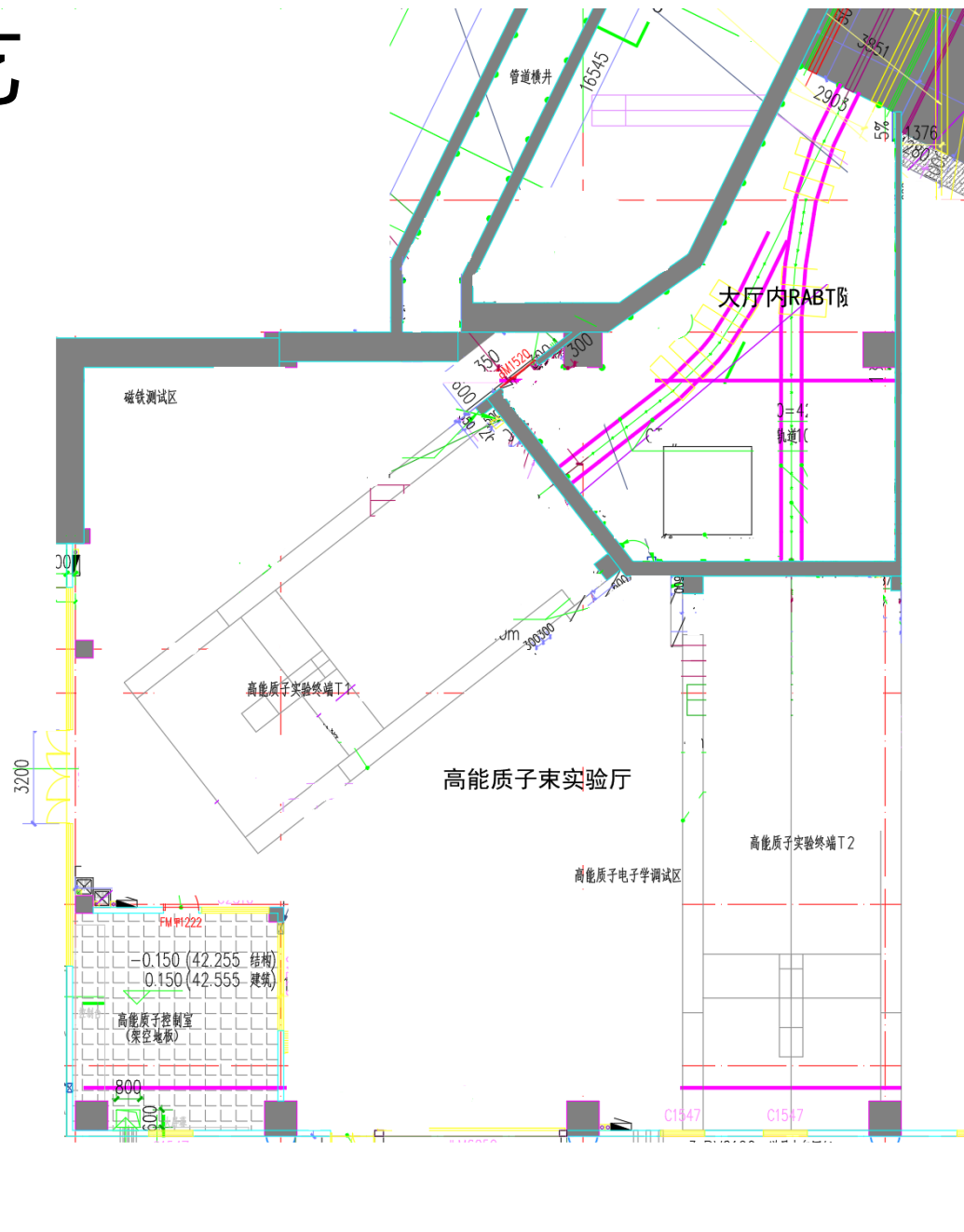


机械设计

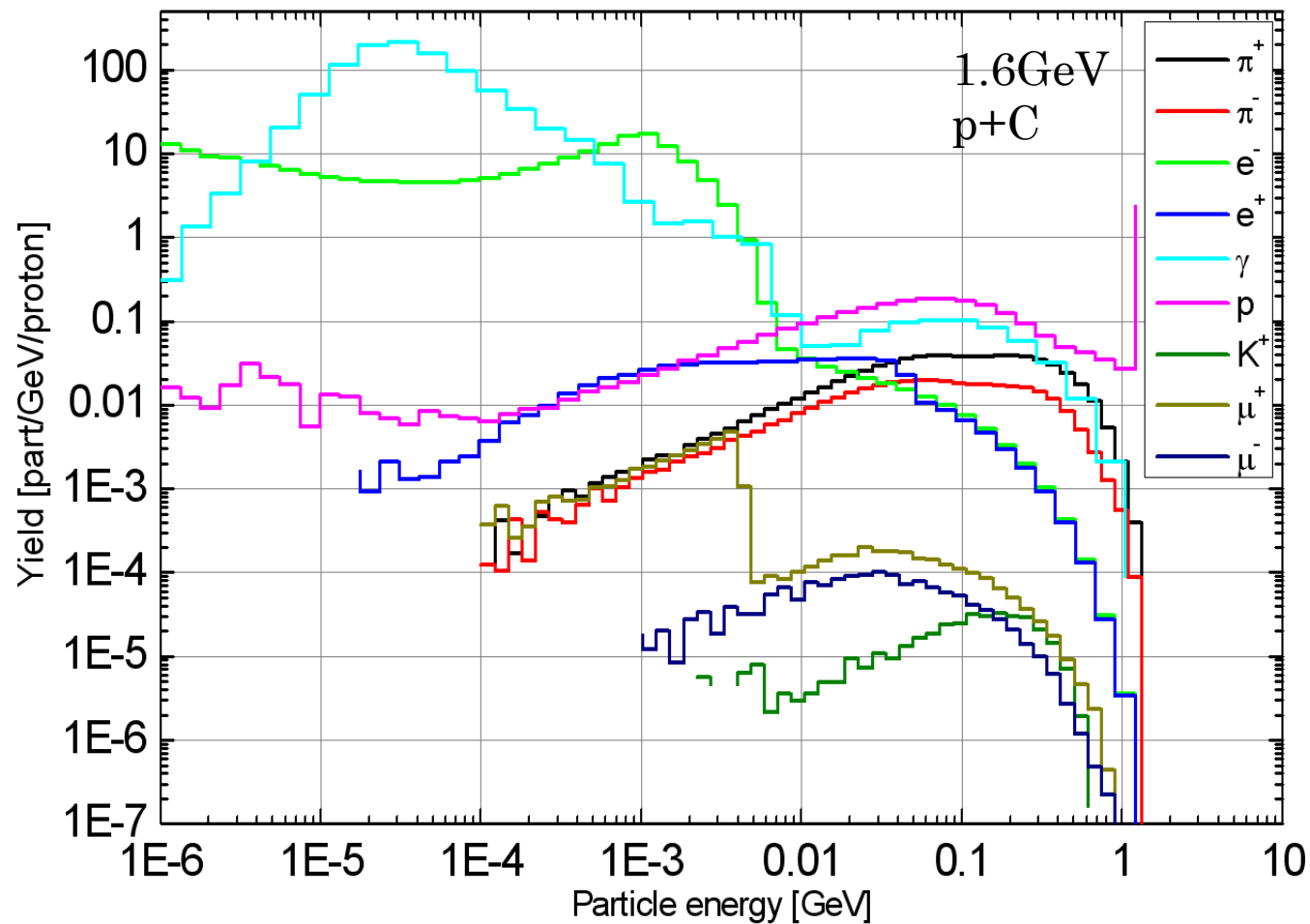


6.1 实验厅布局及主要公用工艺

- 实验终端两个（130平方米）
- 控制室一间（50平方米），顶部为机柜区域（50平方米）
- 磁铁测试及设备临时存放区一处
- 高能质子电子学调试区一处
- 设置通用地线，小于4欧姆
- 设置专业测试地线，小于1欧姆
- 为用户提供校园网



7.1 次级粒子产额估算



K^+ 粒子的产生机制有两种:

- 1) $p + N \rightarrow N + K^+ + \Lambda$; (阈能: $\sim 1.58\text{GeV}$)
- 2) $p + N \rightarrow N + N + \pi$, $N + \pi \rightarrow K^+ + \Lambda$; (阈能: $\sim 0.76\text{GeV}$)

K^- 粒子的产生机制有两种:

- 1) $p + N \rightarrow N + N + K + K^-$; (阈能: $\sim 2.49\text{GeV}$)
- 2) $p + N \rightarrow p + N + \phi$, $\phi \rightarrow K^+ + K^-$; (阈能: $\sim 2.59\text{GeV}$)

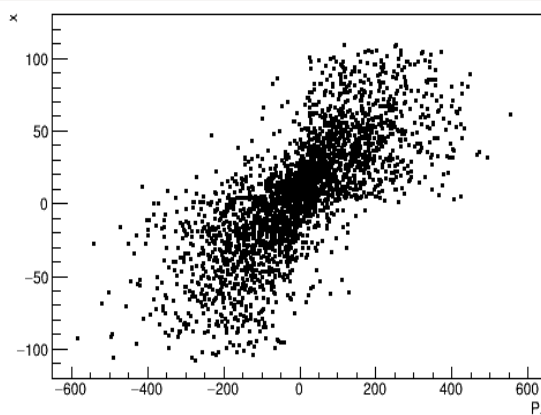
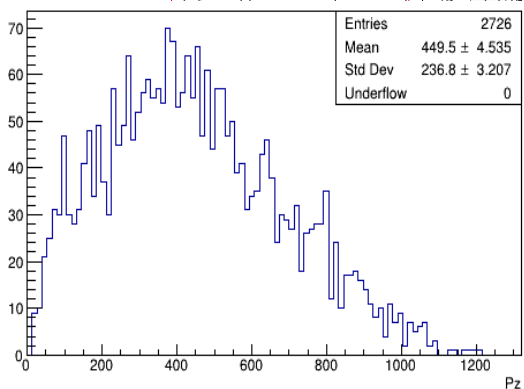
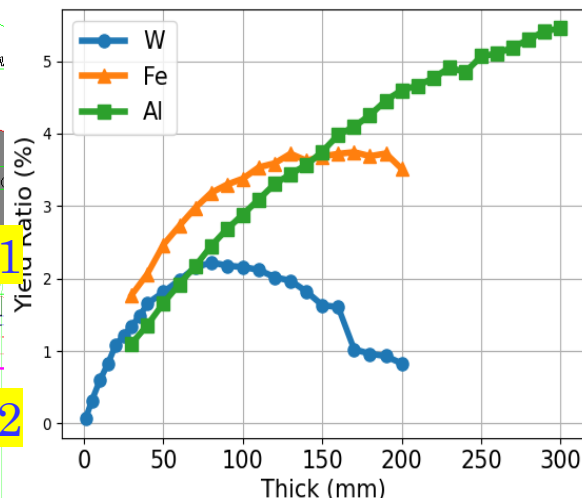
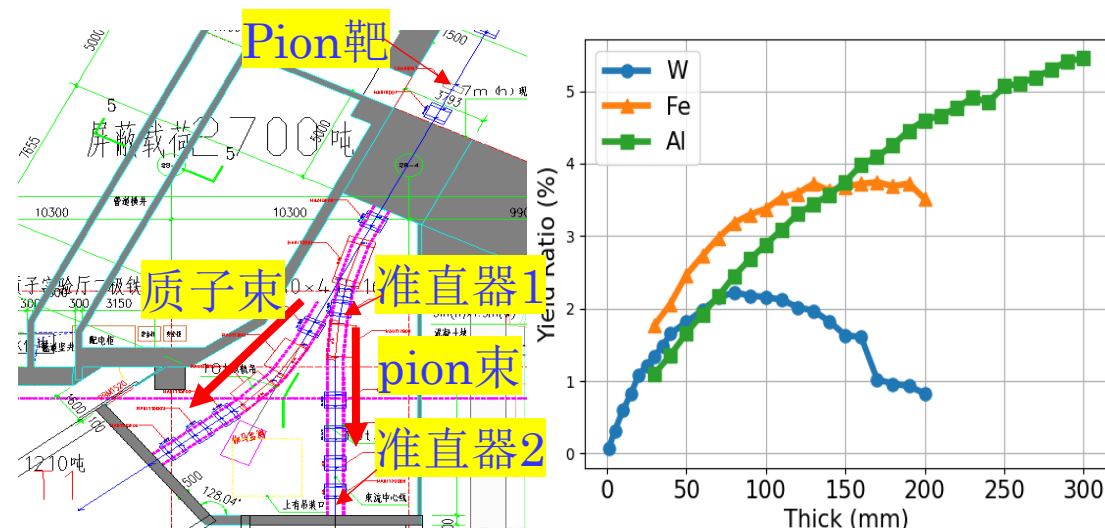
- 1) π^+ 粒子数为: $2.09\text{E-}02 \pi^+/\text{proton}$
- 2) π^- 粒子数为: $8.37\text{E-}03 \pi^-/\text{proton}$
- 3) K^+ 粒子数为: $9.86\text{E-}06 K^+/\text{proton}$
- 4) K^- 粒子数为: $1.42\text{E-}10 K^-/\text{proton}$
- 5) e^- 粒子数为: $3.50\text{E-}02 e^-/\text{proton}$
- 6) e^+ 粒子数为: $2.83\text{E-}03 e^+/\text{proton}$

连续谱情况下Pion和muon分离比较困难!

7.2 次级测试束 (pions , muons , 重离子)

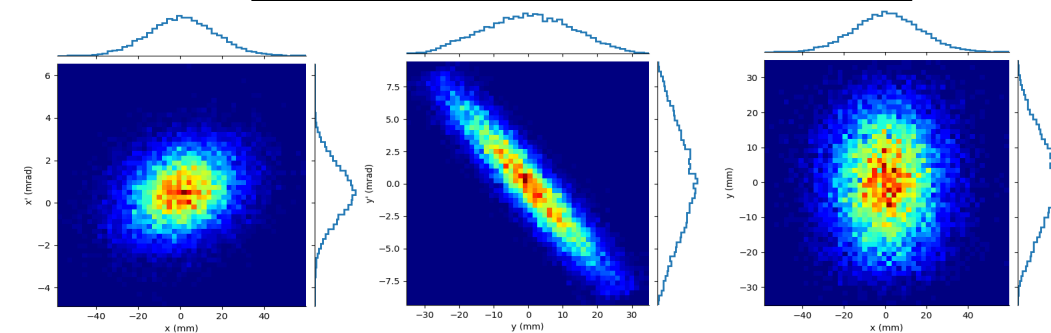
Pion 传输

- 模拟了W, Fe和Al 三种材料, Al的产额阈值较高
- 有效传输的比例小于 1E-6



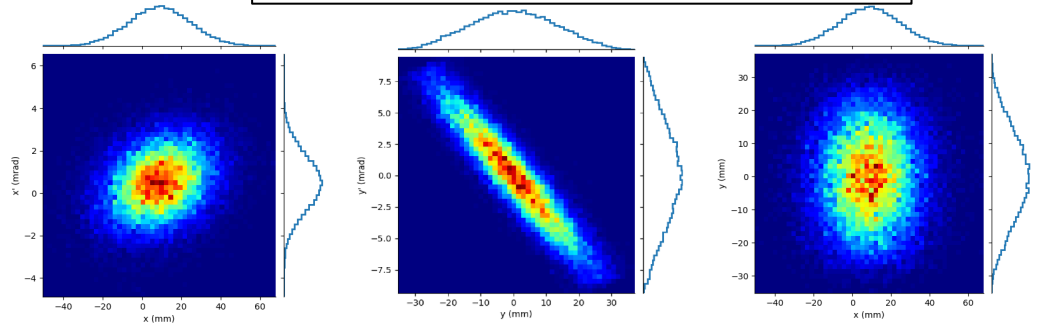
300 MeV:

$\sigma_X = \sigma_Y = 10 \text{ mm}; \quad \sigma_{Xp} = \sigma_{Yp} = 2 \text{ mrad}$
 $P_{\text{Mean}} = 416.8 \text{ MeV/c}; \quad N_p = 50k$
 传输效率: 33% (衰变的pion较多)



600 MeV:

$\sigma_X = \sigma_Y = 10 \text{ mm}; \quad \sigma_{Xp} = \sigma_{Yp} = 2 \text{ mrad}$
 $P_{\text{Mean}} = 726.3 \text{ MeV/c}; \quad N_p = 50k$
 传输效率: 48.9%



请各位老师多提宝贵建议！