



東江實驗室

先進能源科學與技術廣東省實驗室
ADVANCED ENERGY SCIENCE AND TECHNOLOGY GUANGDONG LABORATORY



中國科學院近代物理研究所
Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences

HIAF上的繆子束流可行性研究

報告人：徐宇

先進能源科學與技術廣東省實驗室

2024年10月23日



- 繆子物理簡介
- HIAF繆子源進展
- 總結和展望



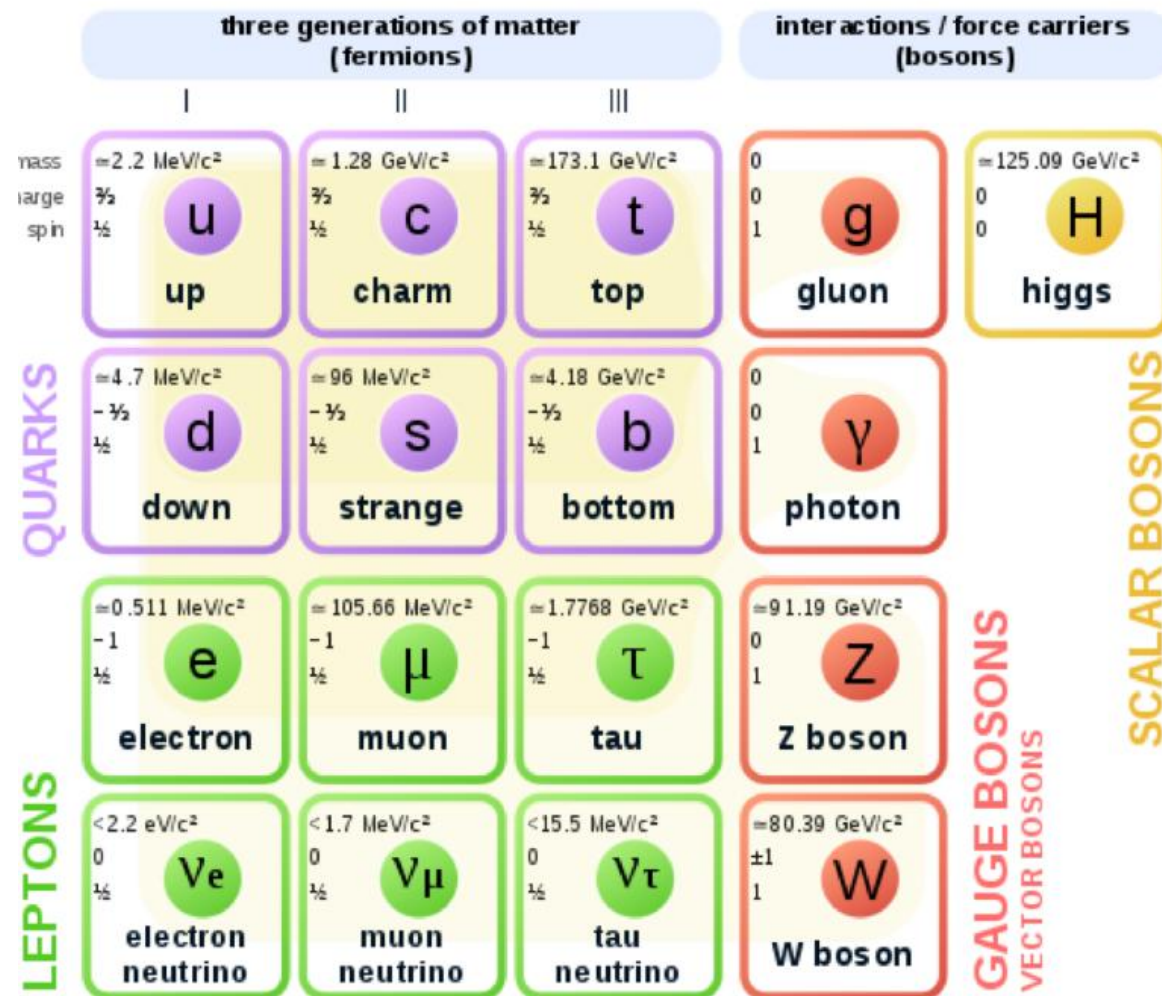
- 物理背景
- HIAF缪子源进展
- 总结和展望

什么是缪子?



- 1936年由卡尔·安德森在宇宙线实验中发现
- 基本性质：
 - 标准模型中第二代轻子
 - 寿命2.2us
 - 自旋为1/2
 - 质量为106MeV/c
 - $m_\mu \sim 206 m_e, m_\mu \sim 1/9 m_p$

Standard Model of Elementary Particles

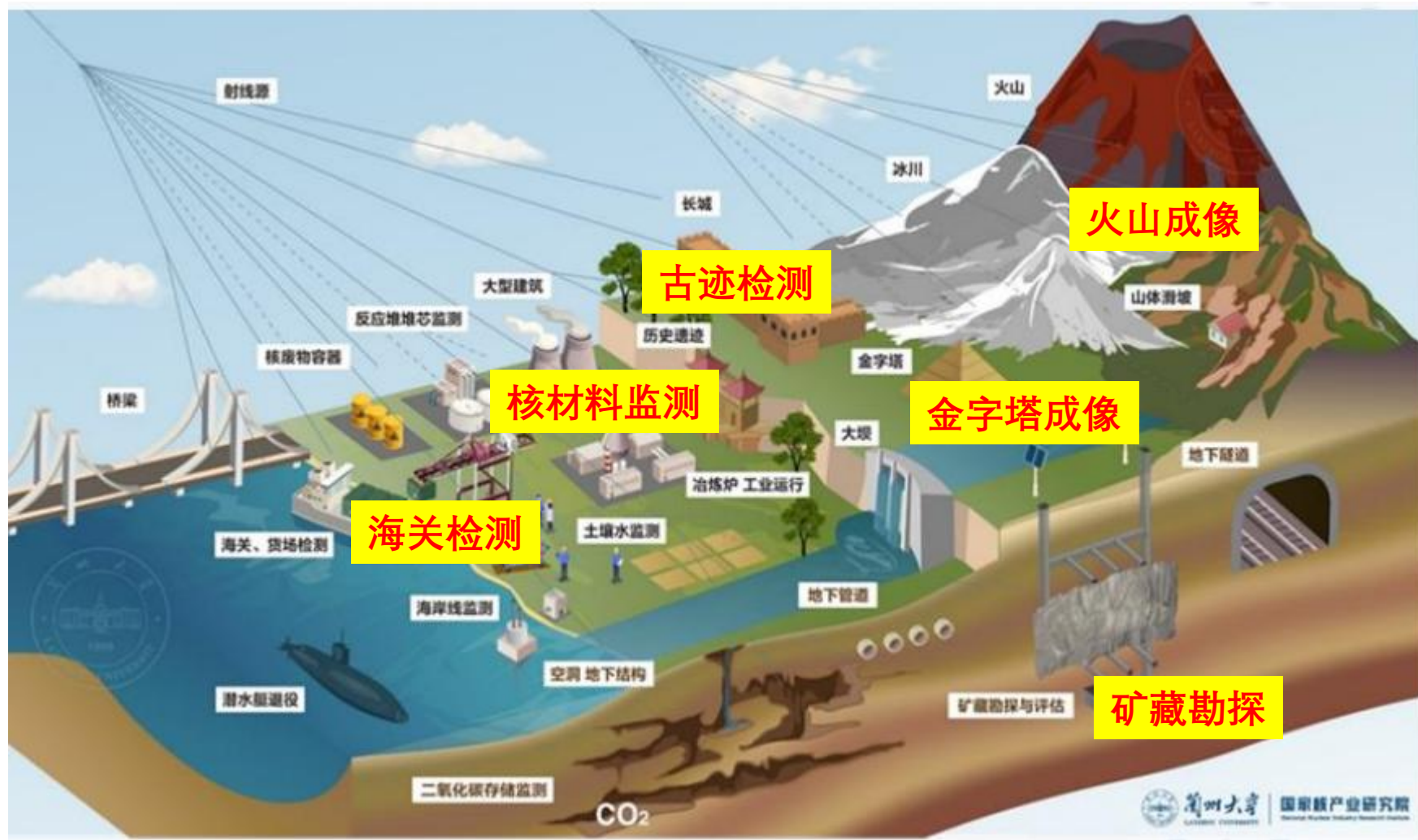


缪子成像应用



缪子成像

- 应用：
 - 文物保护
 - 矿藏勘探
 - 核材料监测
 - 高炉成像
 -
- 缪子来源：
 - 宇宙线
 - 优点：天然、廉价
 - 缺陷：通量小，能谱广，发射角大
 - 加速器
 - 优点：通量大，能谱窄，发射角小，可调节性好
 - 缺陷：无法移动



- 物理背景
- HIAF繆子源進展
 - 束流依托裝置
 - 束流產額
 - 束流截面大小及發射角
 - 束流純化方案
- 總結和展望

加速器缪子源的依托装置：HIAF



HIAF: High Intensity heavy-ion Accelerator Facility, 强流重离子加速器装置

两种运行模式:

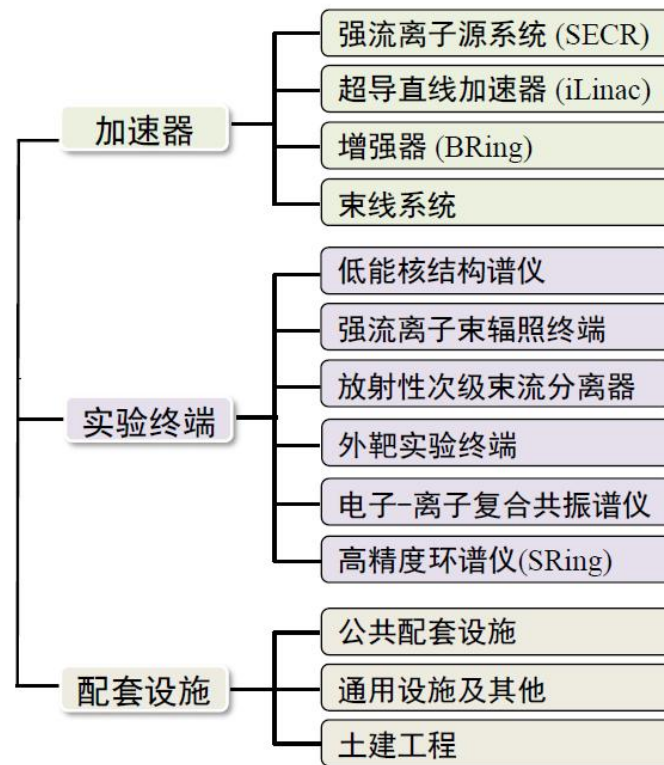
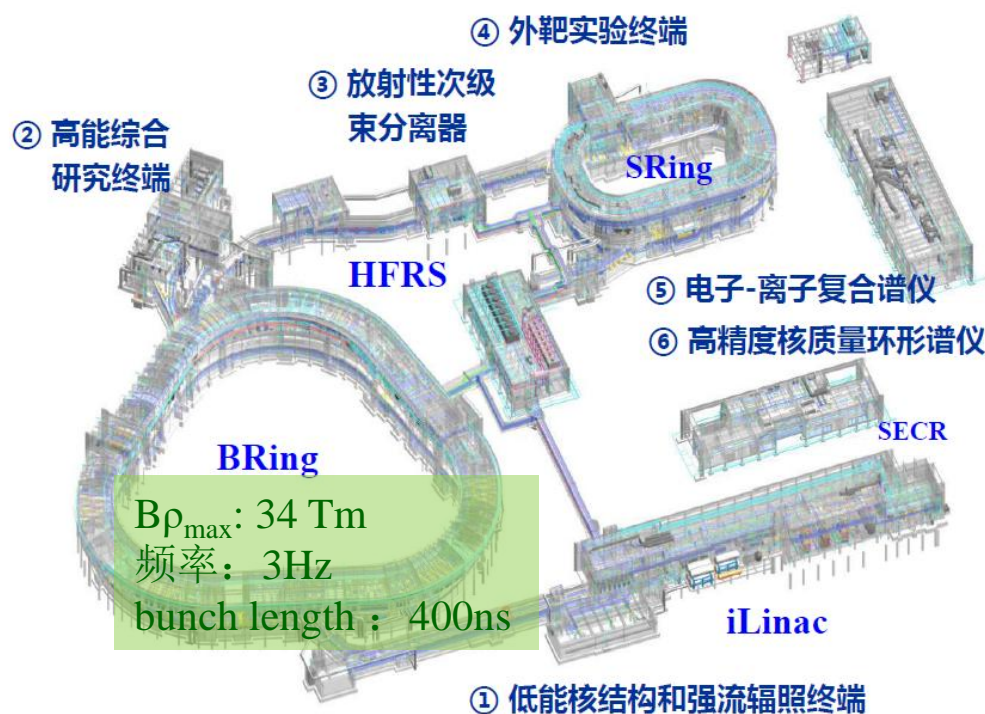
- 快引出: 400 ns bunch length with a repetition rate of 3 Hz
- 慢引出: 3 s extraction time with a repetition period of 13 s

总体方案与建设内容



强流超导直线iLinac、快循环同步环BRing与六大实验终端结合

磁钢度	34Tm, 重复频率 3Hz	
离子	离子数ppp	能量 (GeV/u)
$^{238}\text{U}^{35+}$	2.0×10^{11}	0.84
$^{238}\text{U}^{76+}$	5.0×10^{10}	2.5
$^{129}\text{Xe}^{27+}$	3.6×10^{11}	1.4
$^{78}\text{Kr}^{19+}$	5.0×10^{11}	1.7
$^{40}\text{Ar}^{12+}$	7.0×10^{11}	2.3
$^{18}\text{O}^{6+}$	8.0×10^{11}	2.6
Proton	5.0×10^{13}	9.3

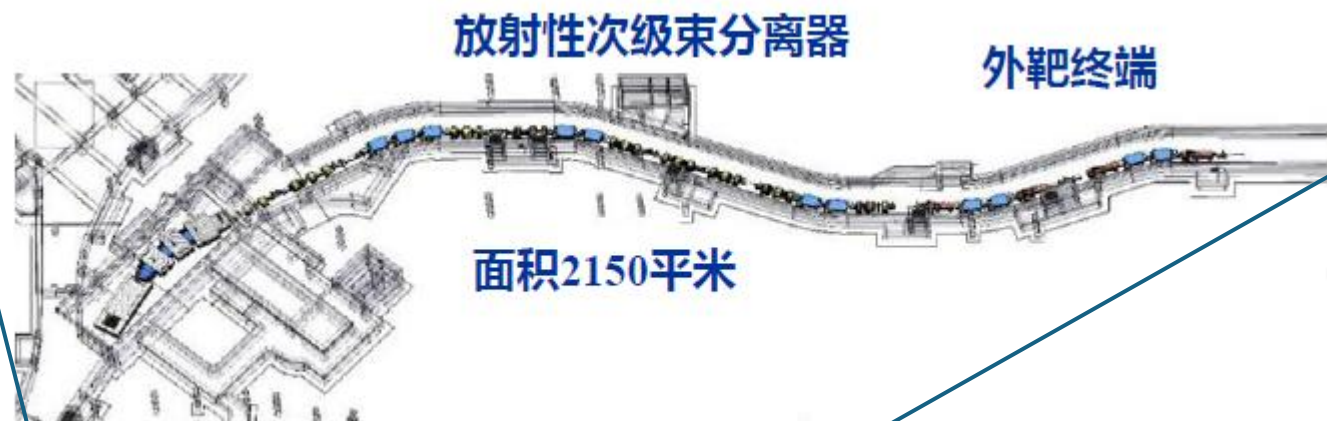


缪子束线：放射性次级束分离器 (HFERS)

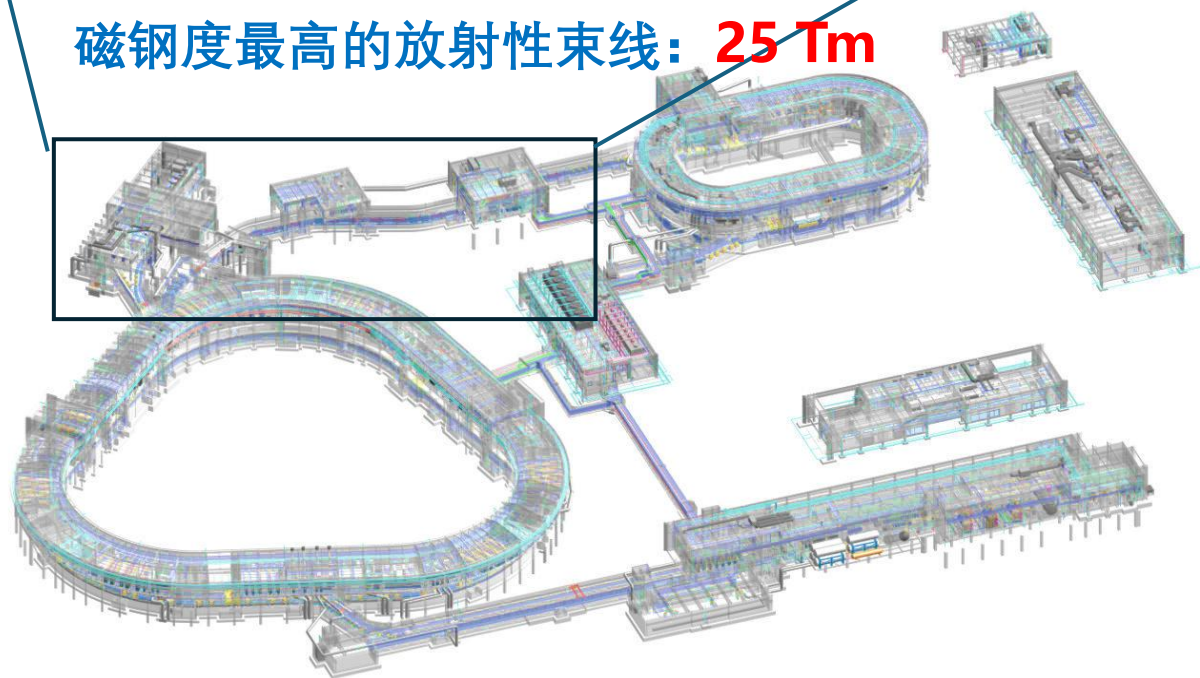


東江實驗室
先进能源科学与技术广东省实验室
ADVANCED ENERGY SCIENCE AND TECHNOLOGY GUANGDONG LABORATORY

- 世界上磁刚度最高的放射性次级束流分离器
 - 25Tm
- 用于放射性束核物理前沿研究
- 可以分离及纯化弹核碎裂反应和裂变反应产生的奇异粒子
 - 可以分离及纯化弹核反应产生的 π 介子及其衰变产生的 μ 子



磁刚度最高的放射性束线：**25 Tm**



HFRS 基本参数



D1...D6: 二级磁铁
确定束流粒子动量

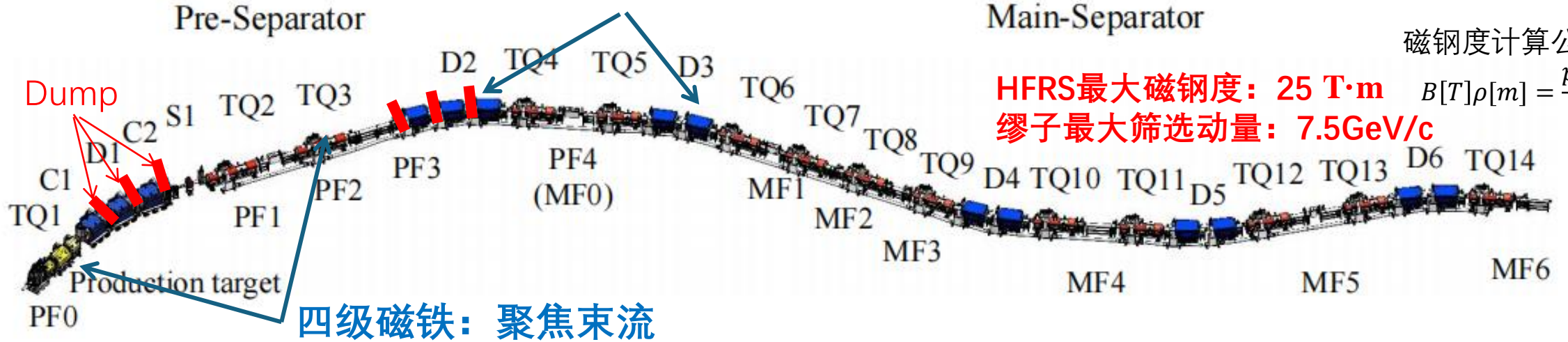
动量展宽: 2%

Main-Separator

磁钢度计算公式:

$$B[T]\rho[m] = \frac{p[MeV]}{300q}$$

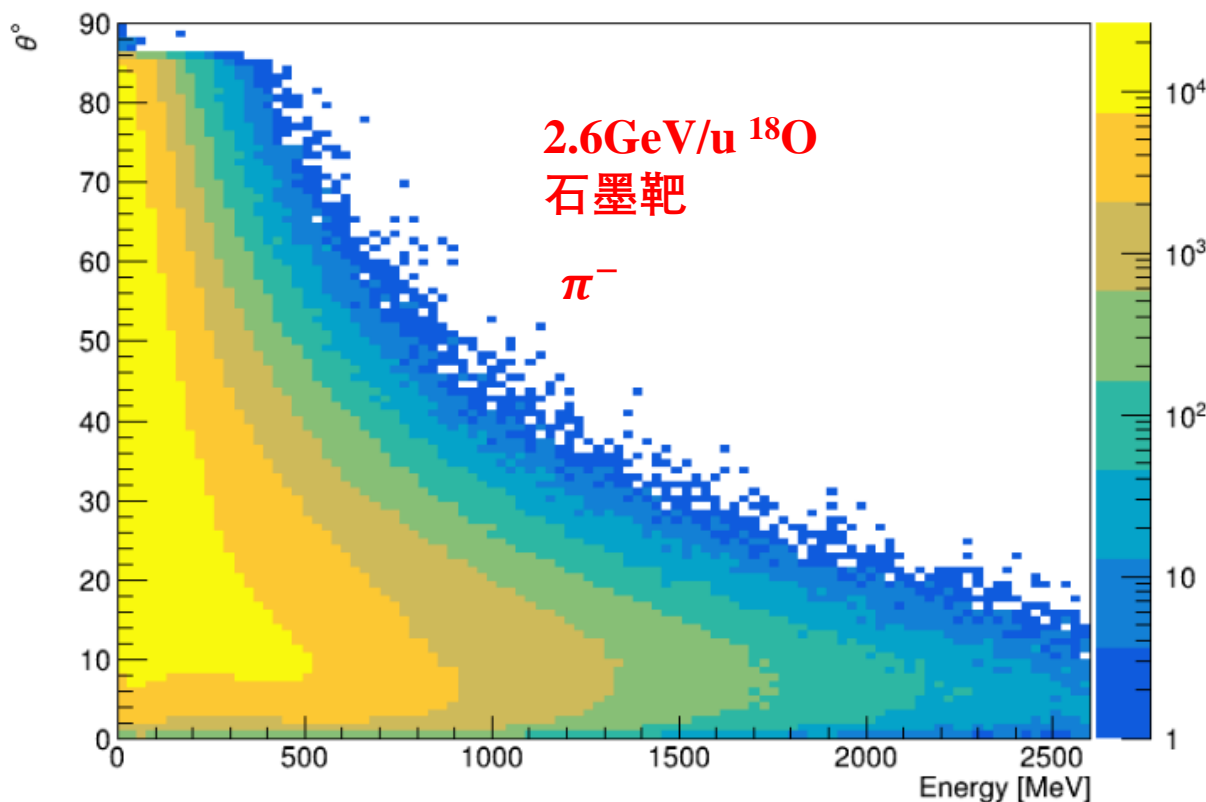
HFRS最大磁钢度: 25 T·m
缪子最大筛选动量: 7.5GeV/c



四级磁铁: 聚焦束流

Parameters of HFRS compared with others

	Length (m)	Beam size at target (mm)	Angular acceptance(mrad)	Momentum acceptance (%)	Resolving power	Max. Bp (Tm)
HFRS NIM.B 547(2024),165214	191.38	±1/±1.5	±30 (X); ±25 (Y)	±2.0	850/1100 (ΔX=±1mm)	25
SuperFRS NIM.B 204(2003),71	182.2	±1/±2	±40 (X); ±20 (Y)	±2.5	750/1500 (ΔX=±1mm)	20
BigRIPS Prog.Theor.EXP.Phys.2012,0 3C003	78.2	±0.5/±0.5	±40 (X); ±50 (Y)	±3	1260/3420 (ΔX=±0.5mm)	9.5
ARIS NIM.B 317(2013), 349	86.8	±0.5/±0.5	±40 (X); ±40 (Y)	±5	1720/3000 (ΔX=±0.5mm)	8



2.6 GeV/u的 $^{18}\text{O}^{6+}$ 与 22.53g/cm^2 的石墨靶作用产生 π^- 粒子的角度和动量分布

总pion产额:

π^+ yield: 1.34 per $^{18}\text{O}^{6+}$

π^- yield: 1.51 per $^{18}\text{O}^{6+}$

进入束线的pion产额:

π^+ : 7.04×10^{-3} per $^{18}\text{O}^{6+}$

π^- : 8.15×10^{-3} per $^{18}\text{O}^{6+}$

- HFRS最大磁钢度: 25Tm
对缪子的最大筛选动量: 7.5GeV/c

$$P_{\mu}[\text{MeV}/c] = B\rho[\text{T} \cdot \text{m}] * 300$$

- HFRS长度: 191m
1GeV pion的衰变长度: 56 m

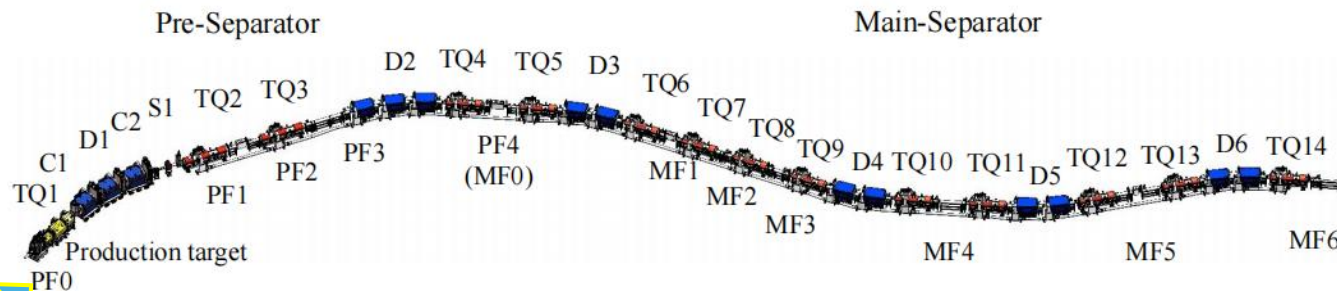
$$L_{\pi}[\text{cm}] = 5.6 P_{\pi} [\text{MeV}/c]$$

HFRS束线可以用于产生GeV量级高能缪子

π产生与分布



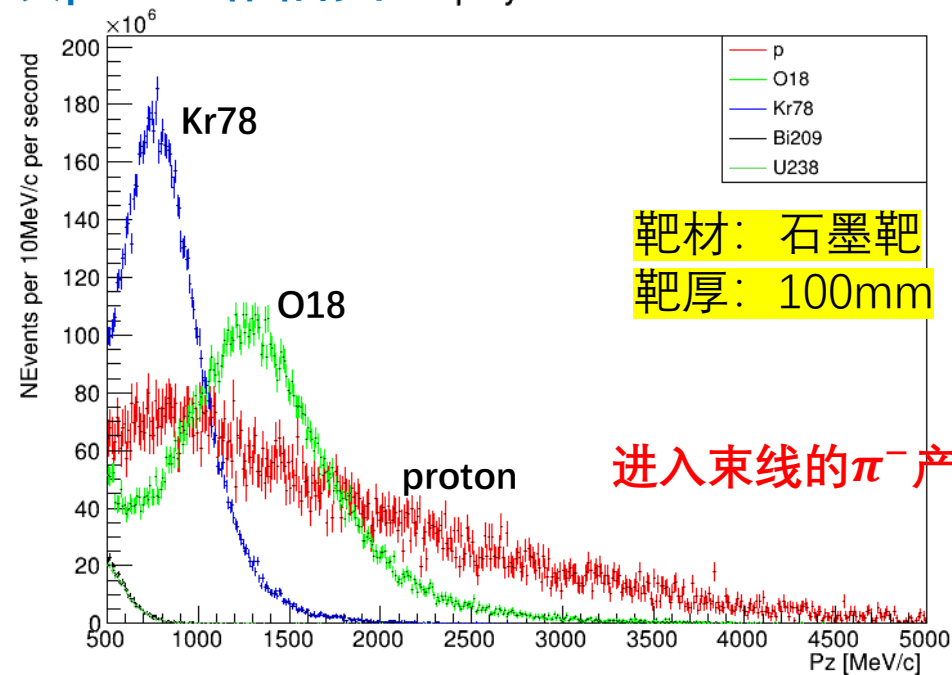
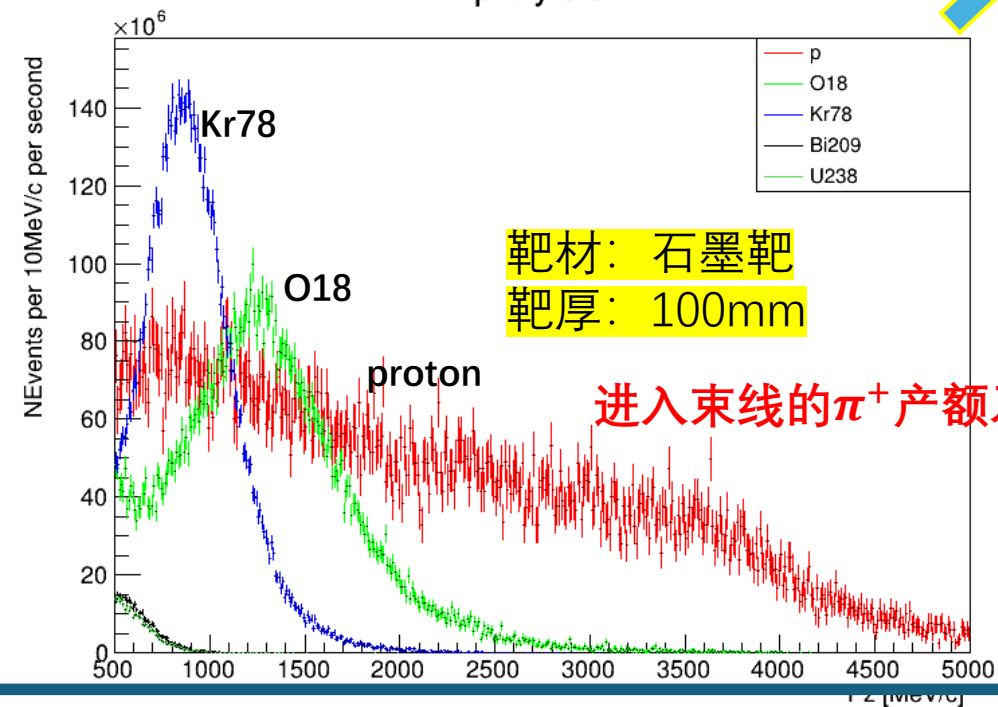
离子	能量 (GeV/u)	流强 (ppp)
H	9.3	2.0×10^{12}
$^{18}\text{O}^{6+}$	2.6	6.0×10^{11}
$^{78}\text{Kr}^{19+}$	1.72	3×10^{11}
$^{209}\text{Bi}^{31+}$	0.84	1.2×10^{11}
$^{238}\text{U}^{35+}$	0.83	1.0×10^{11}



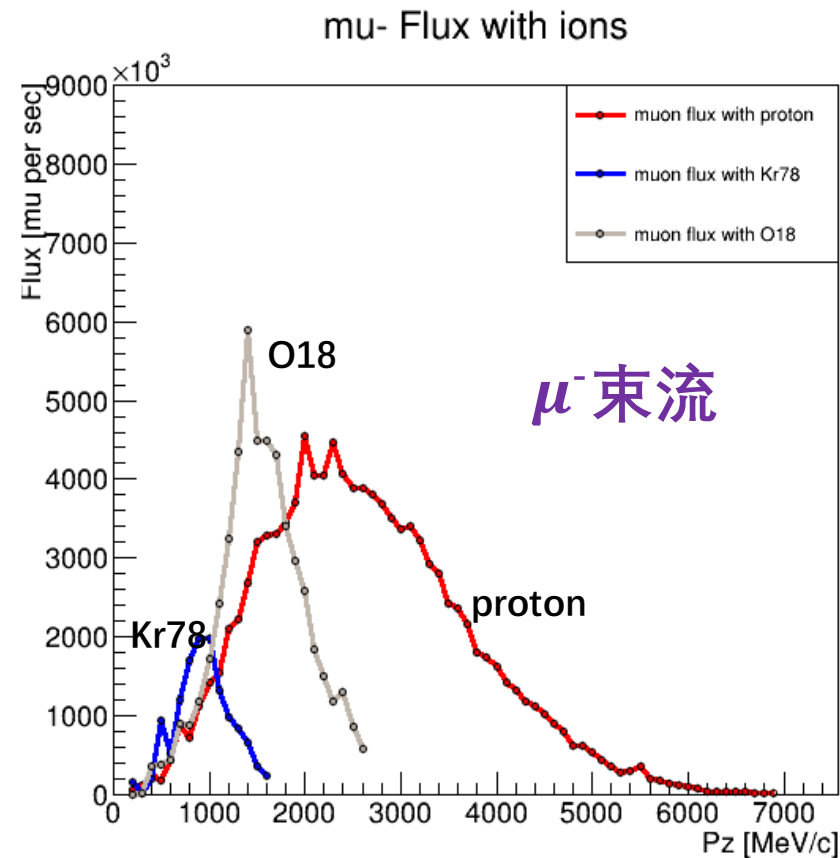
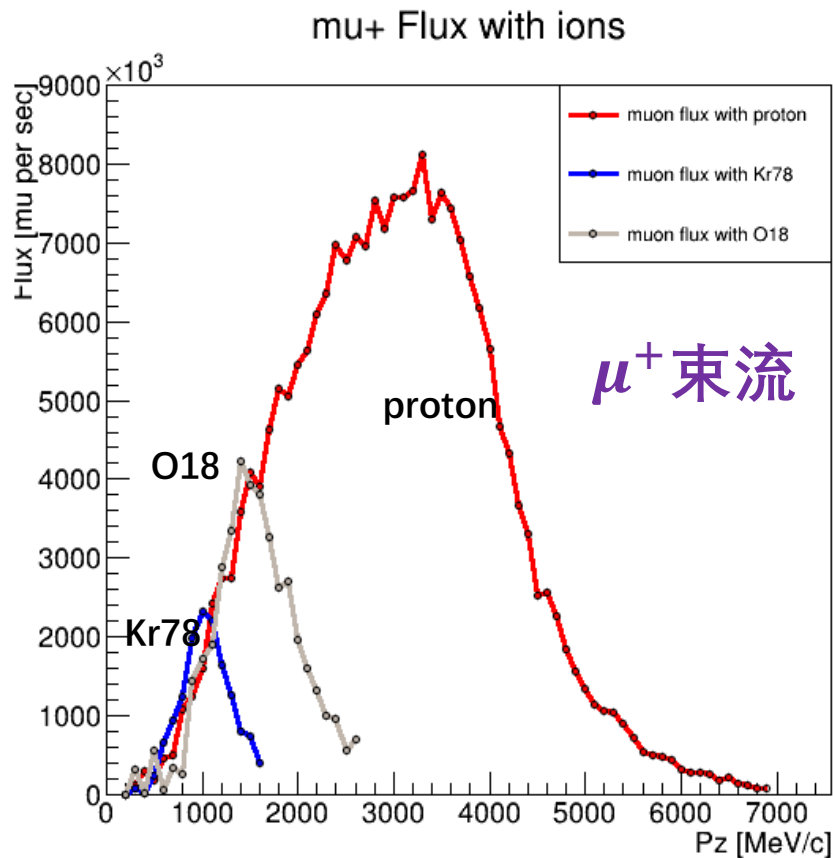
不同离子打靶产生的进入HFRS束线的pion的能谱有所不同

- 不同离子在不同能区各有优势
- 正负pion能谱略有不同 pi- yield

pi+ yield



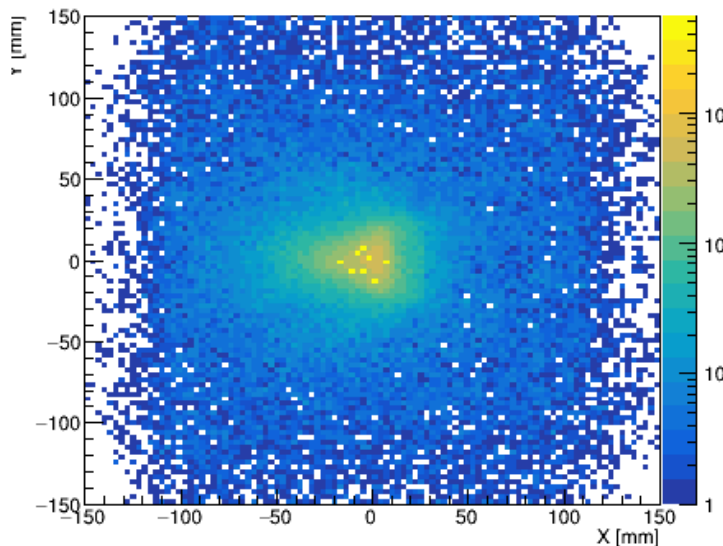
- 对于 μ^+ 束流:
 - 质子最佳
 - 最大产额:
 $8.5 \times 10^6 \mu^+ / s @ 3.5 \text{ GeV}$
- 对于 μ^- 束流:
 - $P_z < 1 \text{ GeV}$:
 $^{78}\text{Kr}^{19+}$ 最佳
 - $1 \text{ GeV} < P_z < 2 \text{ GeV}$:
 $^{18}\text{O}^{6+}$ 最佳
 - $P_z > 2 \text{ GeV}$:
 - 质子最佳
 - 最大产额:
 $6 \times 10^6 \mu^- / s @ 1.5 \text{ GeV}$



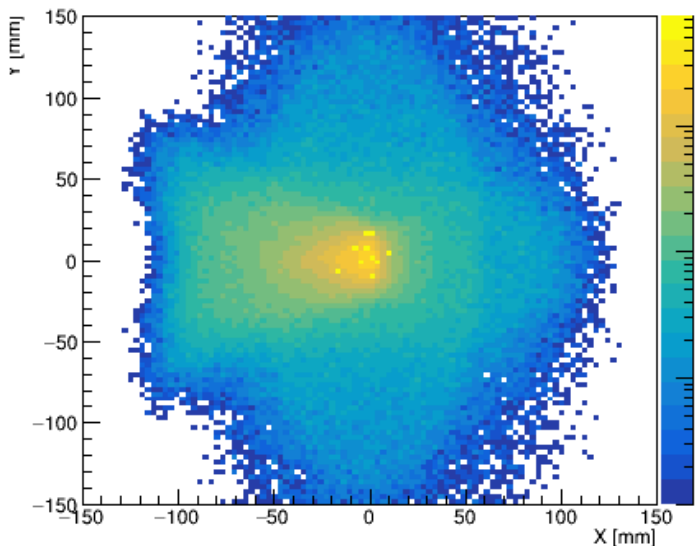
μ 束流截面



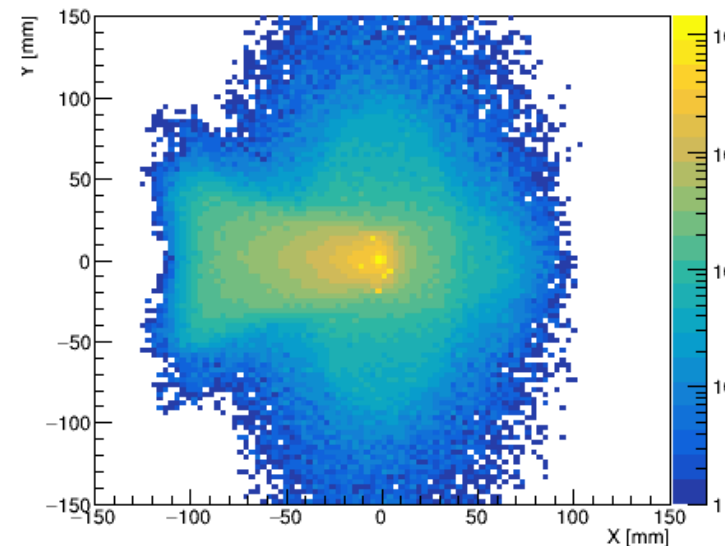
$P_z = 1 \text{ GeV/c}$



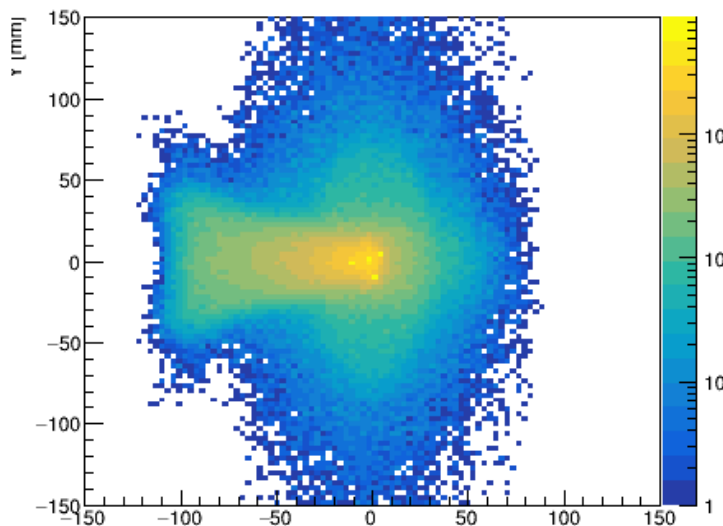
$P_z = 2 \text{ GeV/c}$



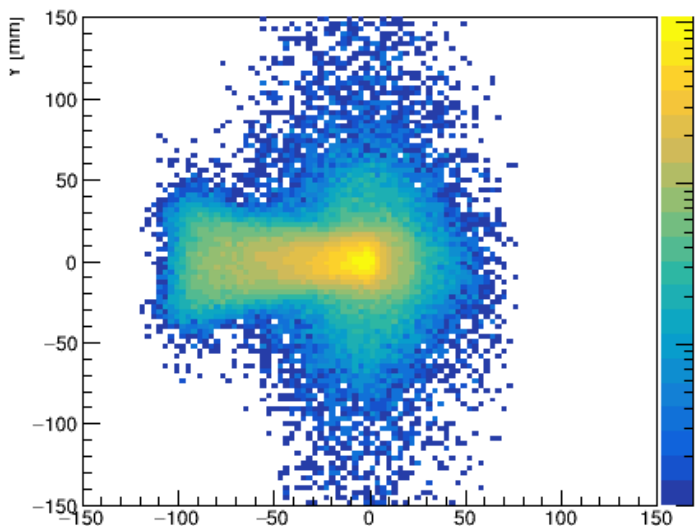
$P_z = 3 \text{ GeV/c}$



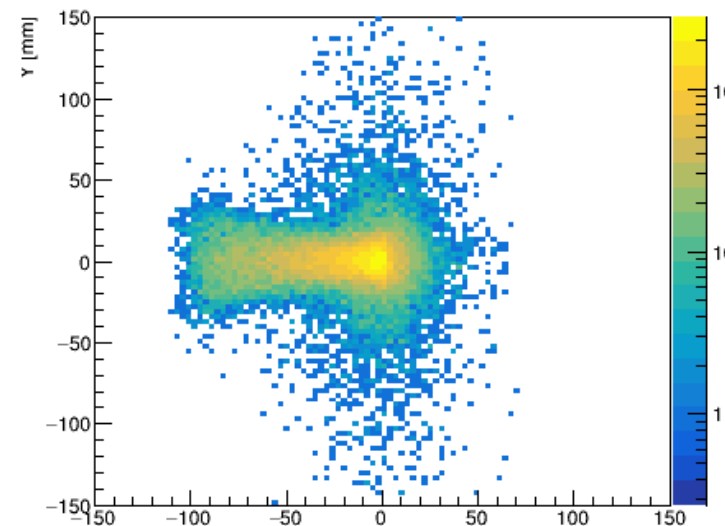
$P_z = 4 \text{ GeV/c}$



$P_z = 5 \text{ GeV/c}$



$P_z = 6 \text{ GeV/c}$

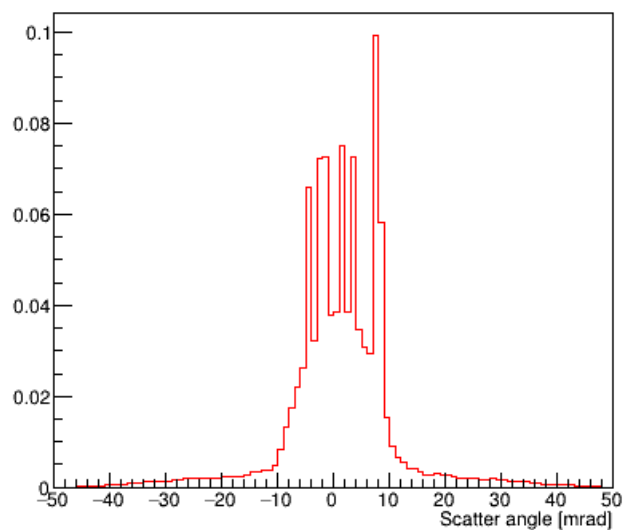


束斑大小：10cm*10cm以内，大角度发射缪子数量随缪子束流能量升高而减小

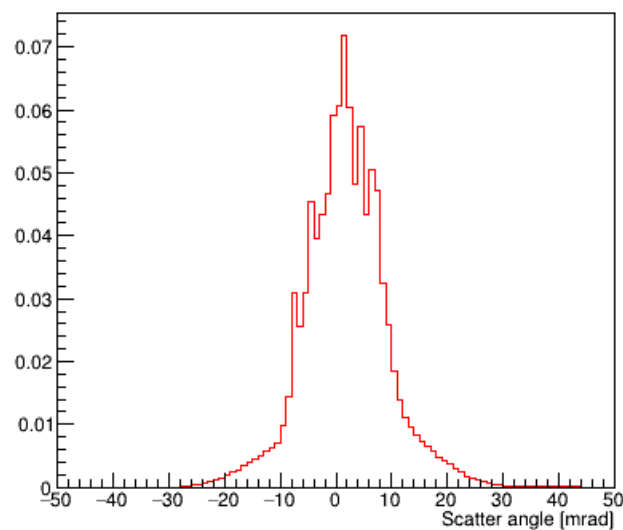
μ 束流发射角



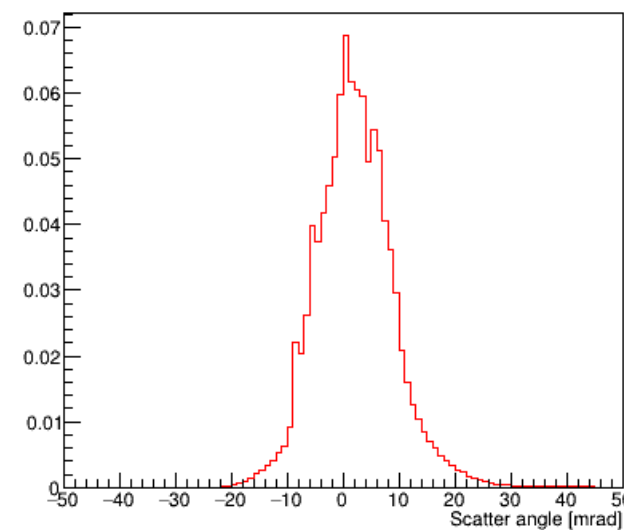
$P_z = 1 \text{ GeV/c}$



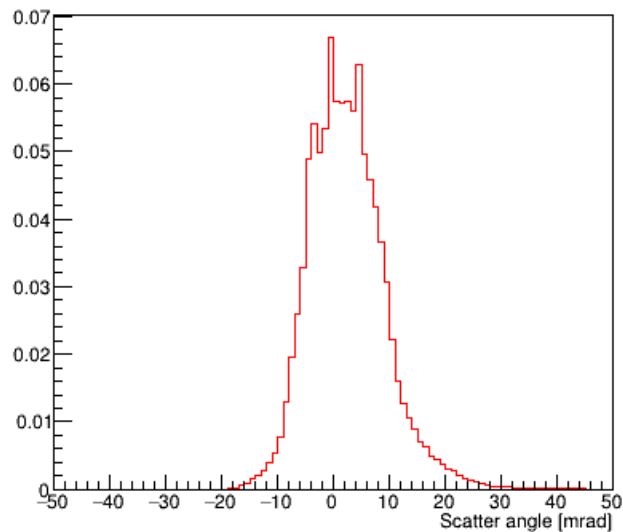
$P_z = 2 \text{ GeV/c}$



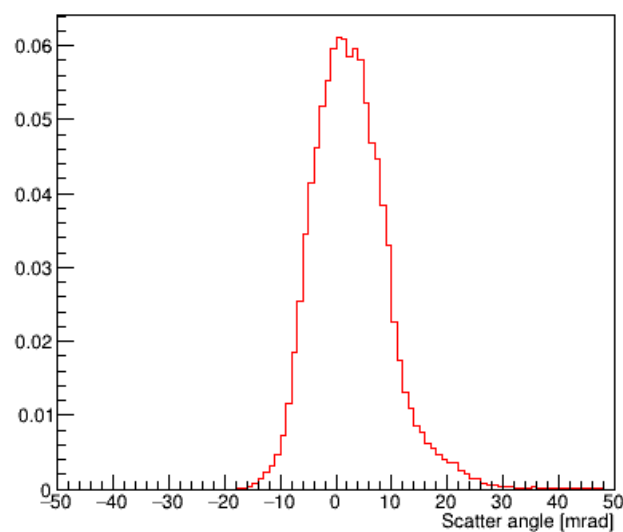
$P_z = 3 \text{ GeV/c}$



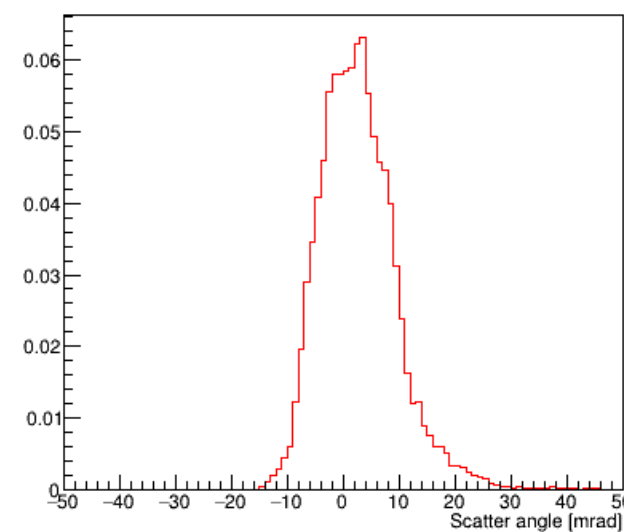
$P_z = 4 \text{ GeV/c}$



$P_z = 5 \text{ GeV/c}$



$P_z = 6 \text{ GeV/c}$



束流发射角：大部分小于10 mrad

μ 束流纯化：必要性



μ 束流成分

• 在束线出口处 μ 束流成分复杂：

➤ μ^- 束流：

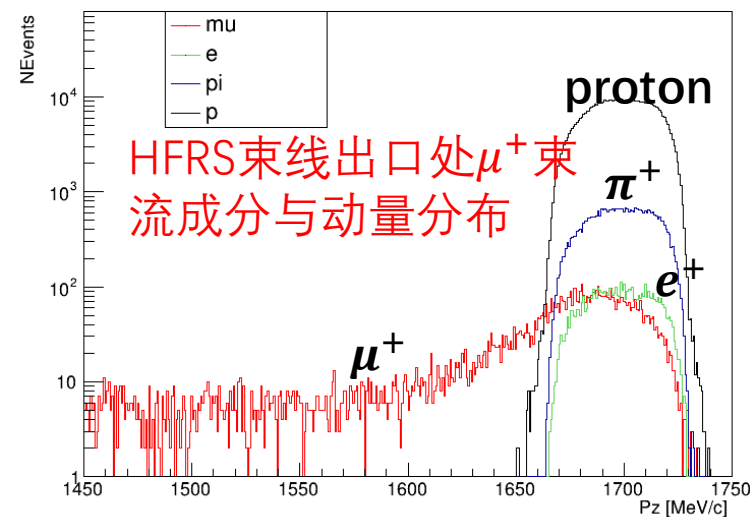
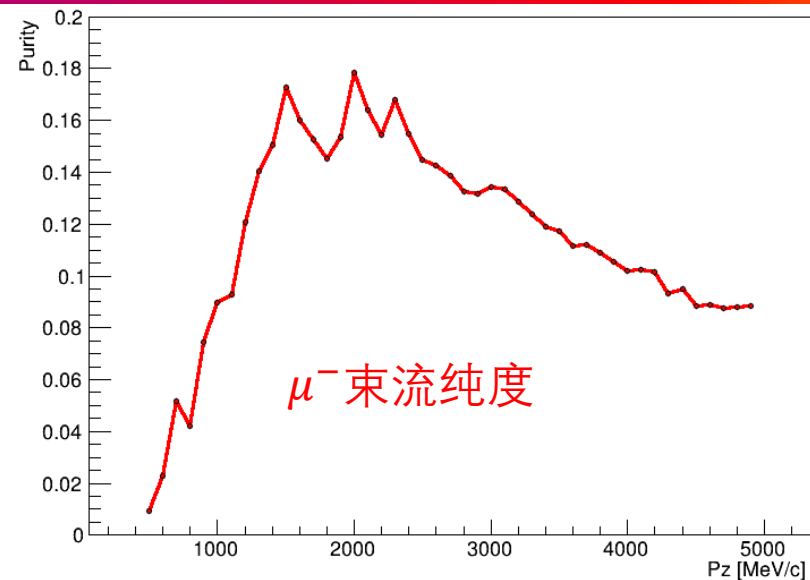
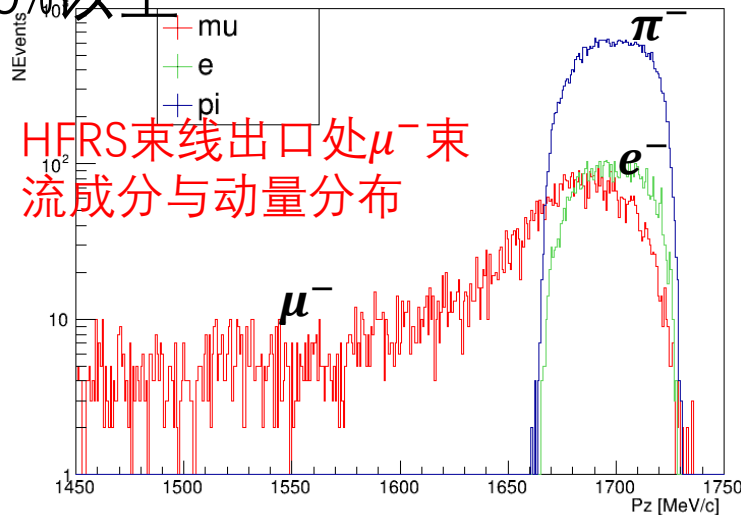
➤ 含有 π^- , μ^- , e^- 等，

➤ 束流纯度小于20%

➤ μ^+ 束流：

➤ 额外含有质子，占比90%以上

需要进行束流纯化



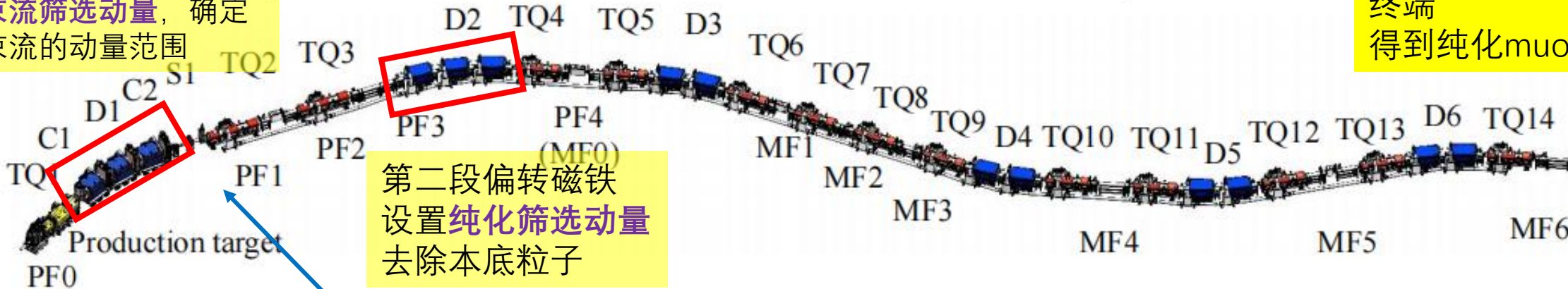
μ 束流纯化：原理及策略



纯化策略

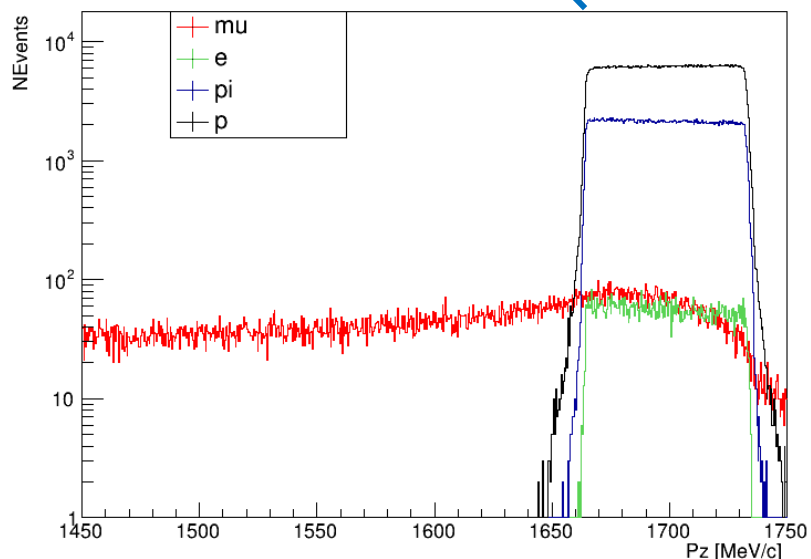
第一段偏转磁铁
设置束流筛选动量，确定
缪子束流的动量范围

Pre-Separator



第二段偏转磁铁
设置纯化筛选动量
去除本底粒子

终端
得到纯化muon flux



衰变muon动量范围较宽

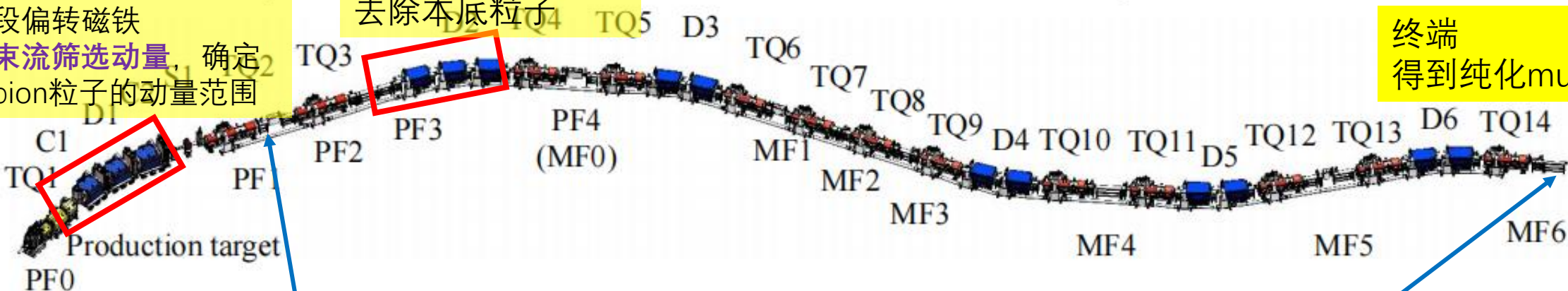
本底粒子的动量范围为筛
选动量 $\pm 2.0\%$ 以内

可通过更改第二段及以后的
偏转磁铁的筛选动量来
去除

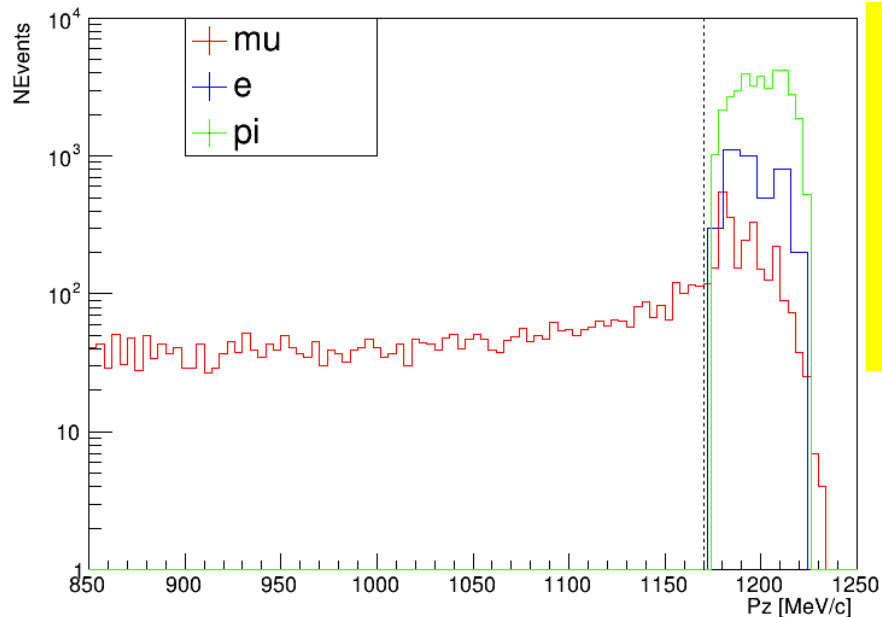
μ 束流纯化：效率

第二段偏转磁铁
设置纯化筛选动量
去除本底粒子

第一段偏转磁铁
设置束流筛选动量，确定
筛选pion粒子的动量范围

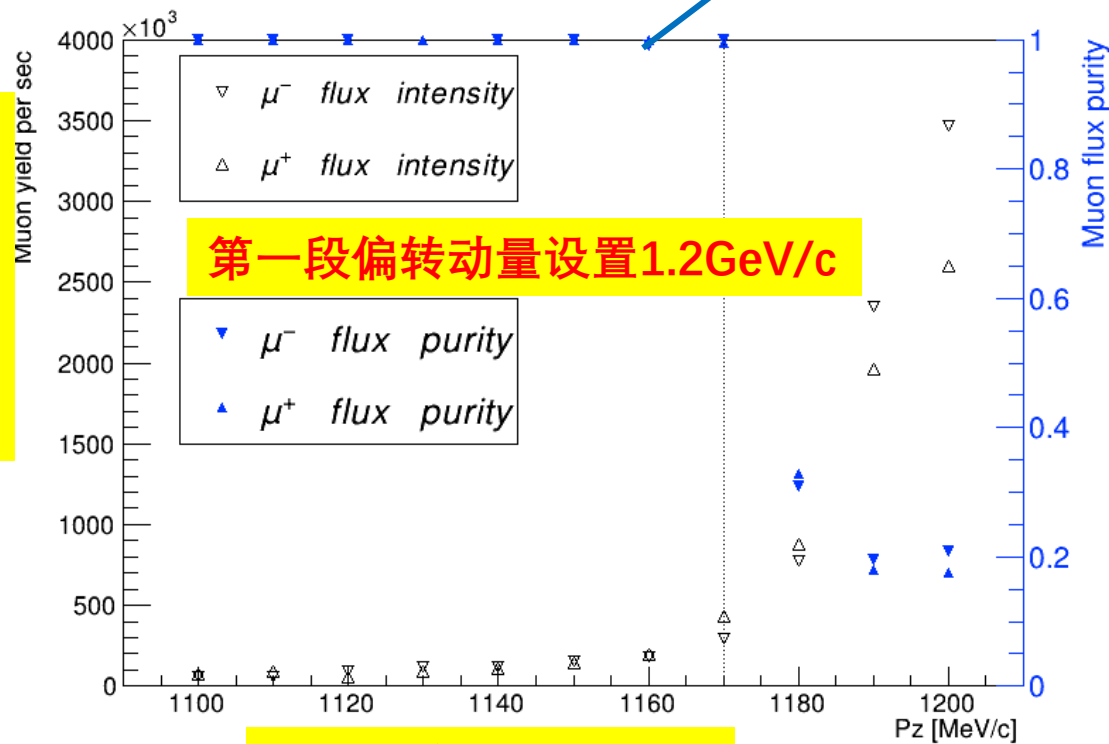


终端
得到纯化muon flux



以1.2GeV/c muon束流为例：

- 纯化筛选动量设置为1.17GeV/c
- muon flux纯度可达到100%



第一段偏转动量设置1.2GeV/c

第二段偏转动量设置



- 缪子物理简介
- HIAF缪子源进展
- 总结和展望

- 缪子在基础科学及应用科学中均有重要作用
- HIAF可以利用HFIRS束线产生缪子束流
 - 动量: 500MeV/c – 7.5GeV/c
 - 产额: $10^6 - 10^7 \mu/s$
 - 束斑大小: 10cm*10cm
 - 经过特殊设置, 纯度可以达到100%
- 未来缪子源正在规划
- HIAF未来将进一步升级

欢迎大家提出缪子源的新应用!

HIAF 工程进度



東江實驗室
先进能源科学与技术广东省实验室
ADVANCED ENERGY SCIENCE AND TECHNOLOGY GUANGDONG LABORATORY

最新进展：10月26日，常温前端成功调试出束

		2023年		2024年				2025年			
		7~9月	10~12月	1~3月	4~6月	7~9月	10~12月	1~3月	4~6月	7~9月	10~12月
工艺设备	束流前端	批量加工与调试		预装配	安装	RFQ 出束					
	超导直线	批量加工与调试		安装与调试				安装与调试			
	BRing	批量加工与调试		● 进场安装	安装与调试	★ 闭环	分段出束			出束	
	HFRS	批量加工与调试		安装与调试							
	SRing	批量加工与调试		★ 闭环				全线贯通			
	束线终端	批量加工与调试									
	工艺样段	BRing样段测试									
公用配套	水冷通风	安装调试		■ 具备进场条件							
	配电	临电供电		■ 正式电启用		工艺配电安装					
	低温	具备低温测试条件		■ 在线安装		● 2.5kW ● 10kW制冷机见液					
	综合布线			桥架安装、线缆敷设							
土建施工	地下隧道			■							
	综合大厅/二三号站房		■								
	一号制冷中心			■							
	一号/二号测试大厅			■							
	直线设备楼2			■							
	直线设备楼1/一号站房				■	土建完工					

联调出束实验研究

2024~2025年：批量加工与测试收尾，设备全面进场安装调试，建成出束



HIAF

CIADS

总长约1.7km，埋深-13m，总建筑面积2.46万平方米，一级防水结构设计及施工
2024年3月底完成全部施工，交付使用，加速器主体设备逐步进场安装

谢谢大家!



Back Up



東江實驗室

先進能源科學與技術廣東省實驗室
ADVANCED ENERGY SCIENCE AND TECHNOLOGY GUANGDONG LABORATORY

世界上的缪子源



東江實驗室

先进能源科学与技术广东省实验室
ADVANCED ENERGY SCIENCE AND TECHNOLOGY GUANGDONG LABORATORY

- 已建成缪子源 粒子物理专用
- 规划中缪子源 μ SR应用平台

- 粒子物理:
- cLFV测量
 - g-2测量
- 应用物理:
- μ SR平台



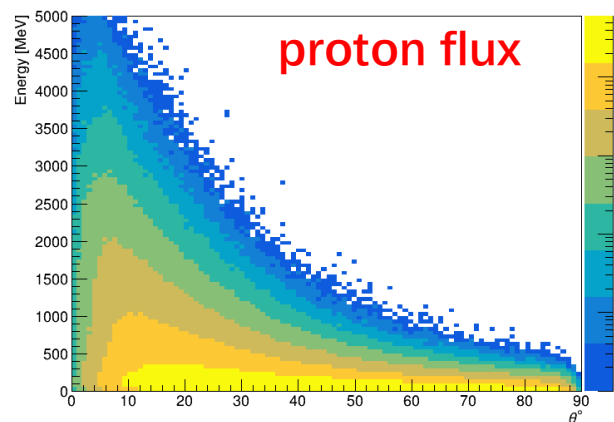
π 产生与分布



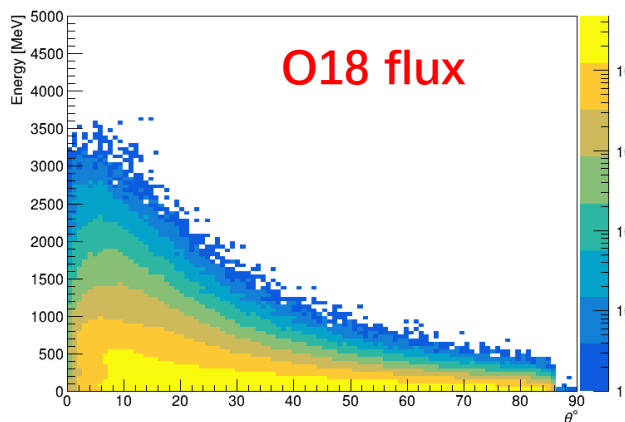
靶后Pion产额与动量-角度分布谱

靶材：石墨靶
靶厚：100mm

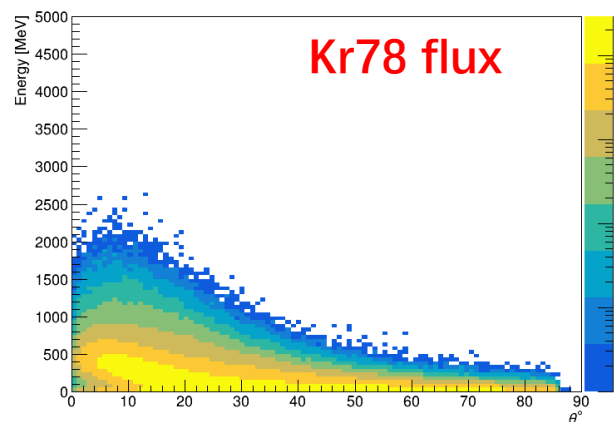
Energy vs Scater angle for pi+ after target [p flux]



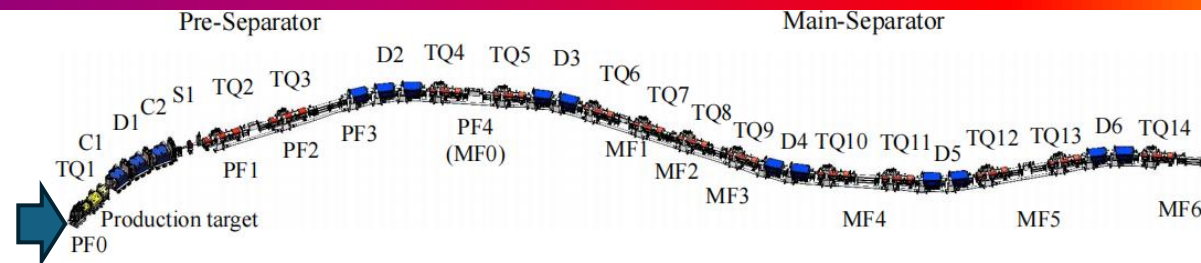
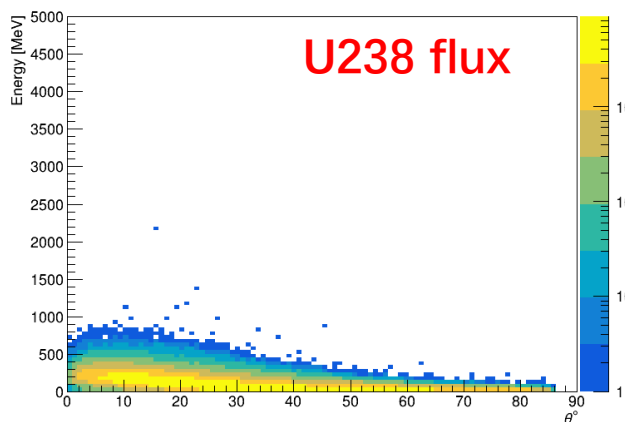
Energy vs Scater angle for pi+ after target [O18 flux]



Energy vs Scater angle for pi+ after target [Kr78 flux]



Energy vs Scater angle for pi+ after target [U238 flux]

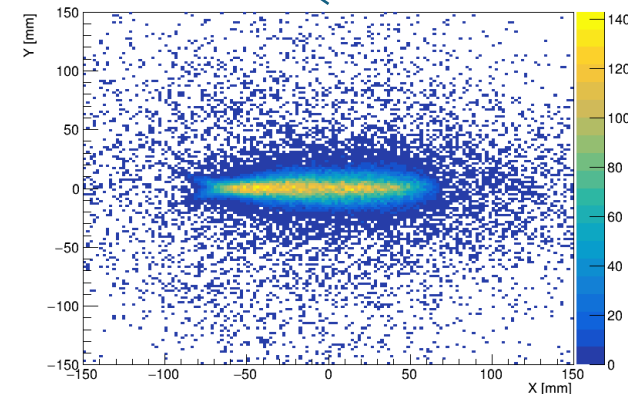
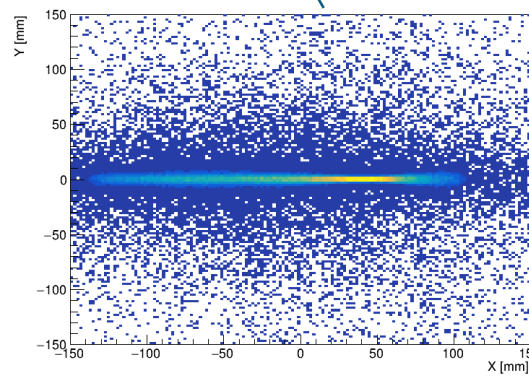
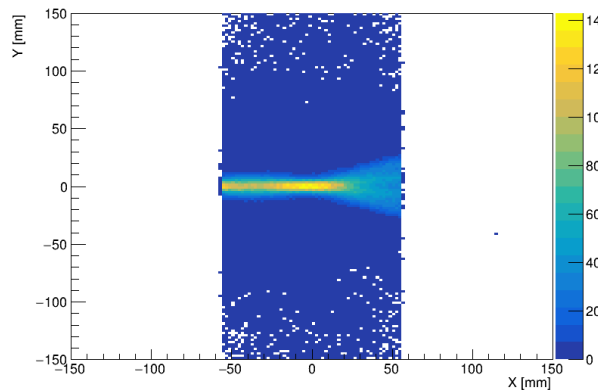
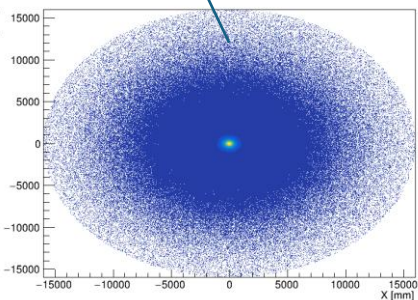
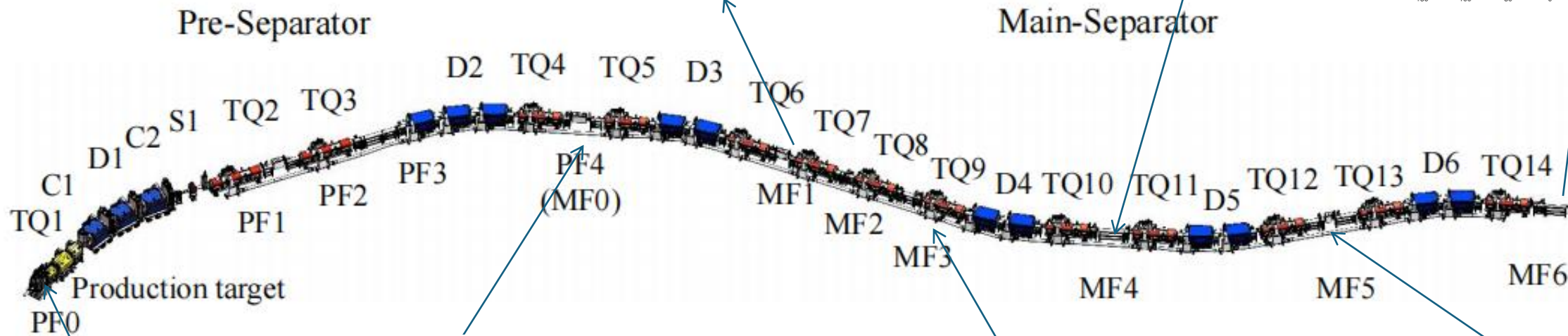
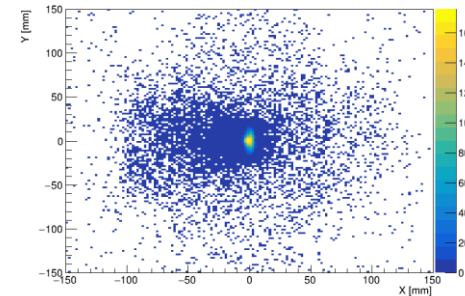
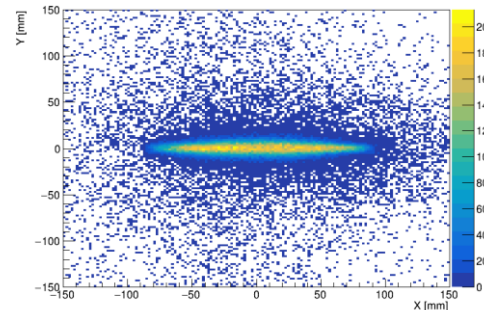
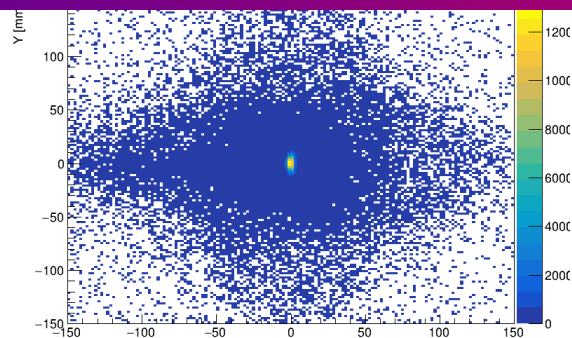


离子	能量 (GeV/u)	流强 (ppp)
H	9.3	2.0×10^{12}
$^{18}\text{O}^{6+}$	2.6	6.0×10^{11}
$^{78}\text{Kr}^{19+}$	1.72	3×10^{11}
$^{209}\text{Bi}^{31+}$	0.84	1.2×10^{11}
$^{238}\text{U}^{35+}$	0.83	1.0×10^{11}

π/μ 束流截面演变



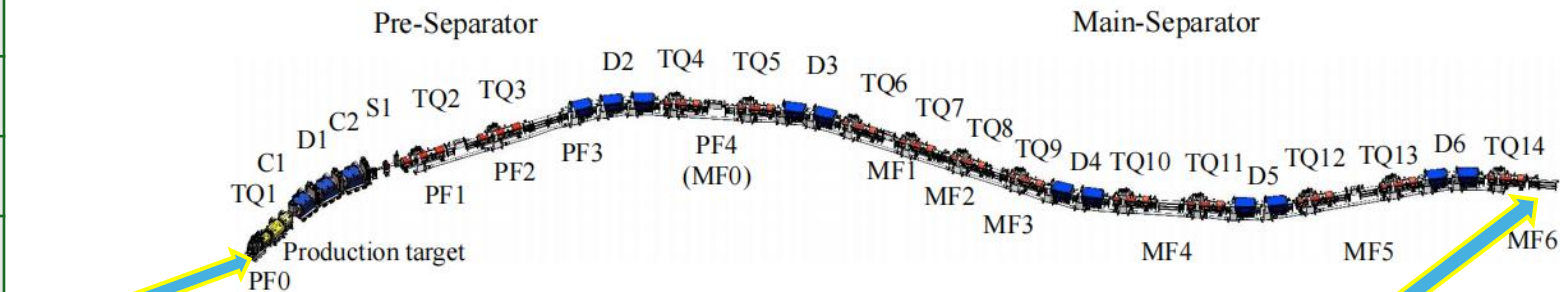
- 束流中心位置与束线截面中心不完全重合
 - 是个可以改进的地方



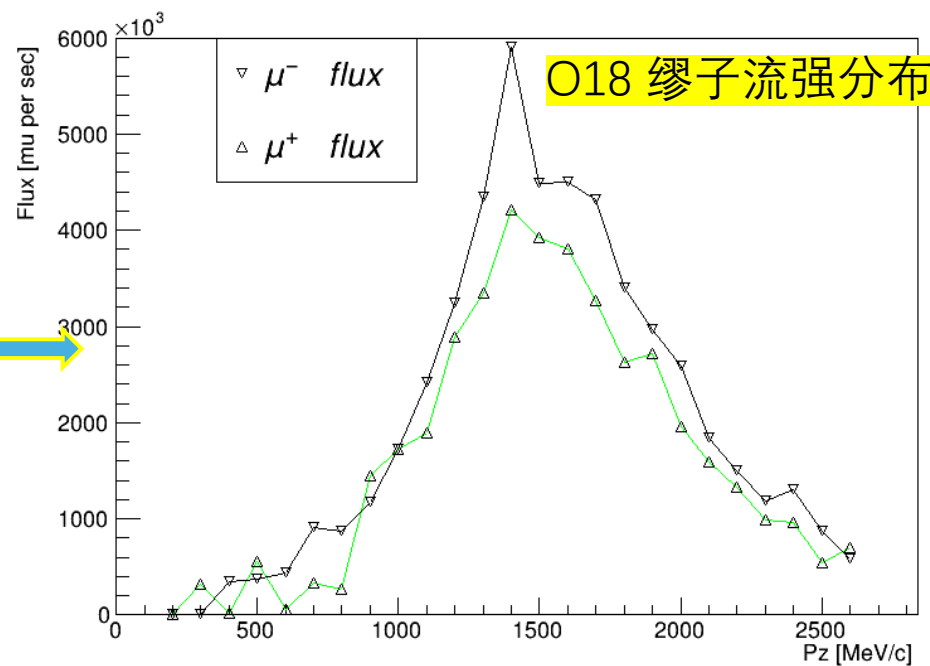
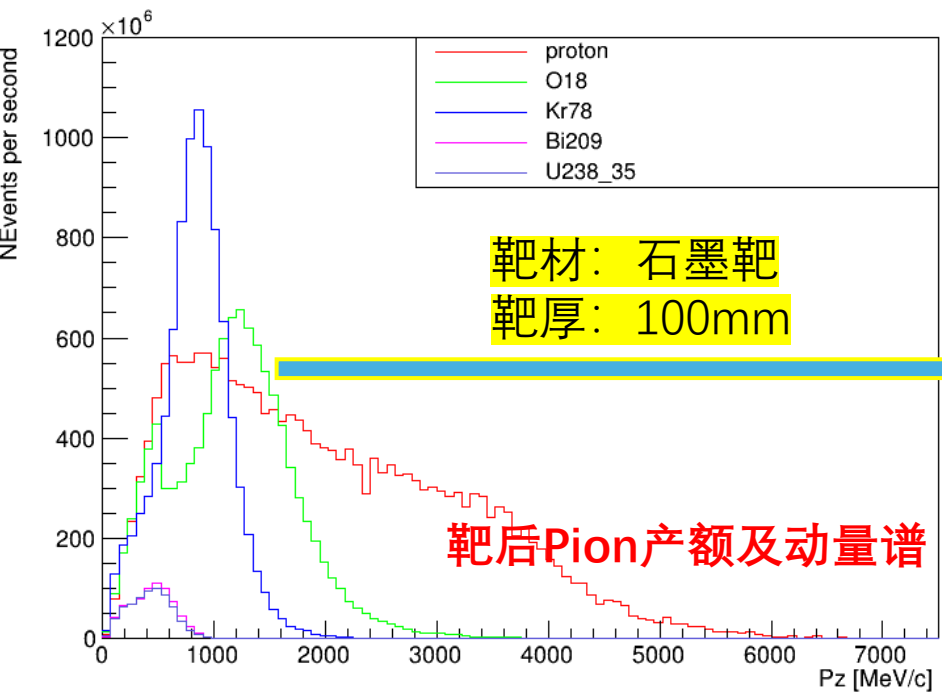
μ 束流产生与分布



离子	能量 (GeV/u)	流强 (ppp)
H	9.3	2.0×10^{12}
$^{18}\text{O}^{6+}$	2.6	6.0×10^{11}
$^{78}\text{Kr}^{19+}$	1.72	3×10^{11}
$^{209}\text{Bi}^{31+}$	0.84	1.2×10^{11}
$^{238}\text{U}^{35+}$	0.83	1.0×10^{11}

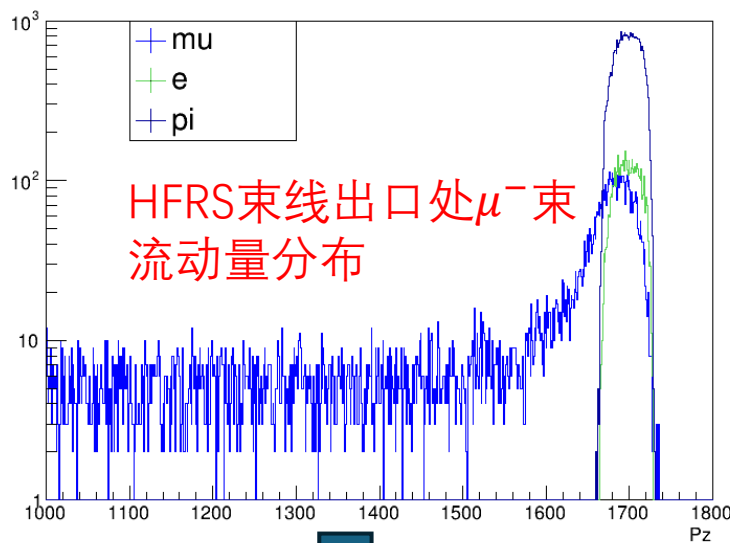


HFRS束线出口处 μ 产额随HFRS的筛选动量的变化



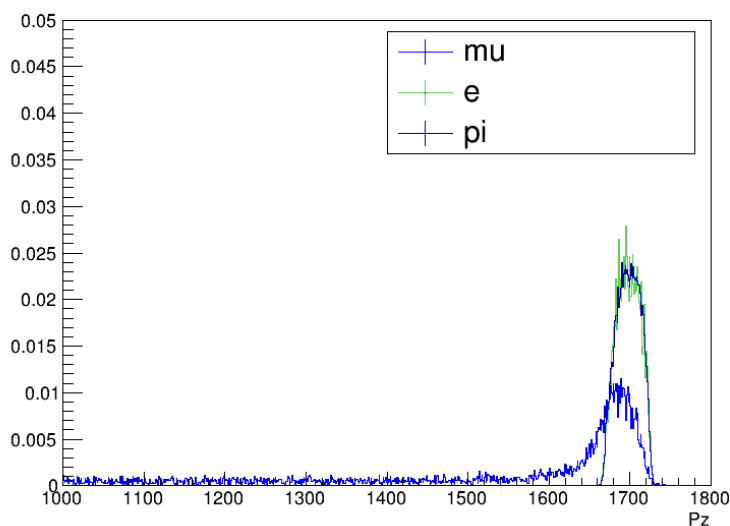
μ 束流成分

Pz for particles at entrance for minus magnitude, p=1.7G

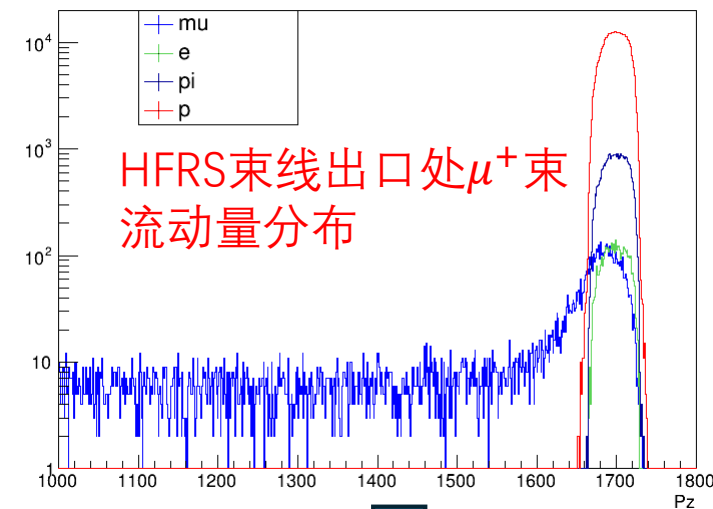


Scaled

Pz for particles at entrance for minus magnitude, p=1.7G

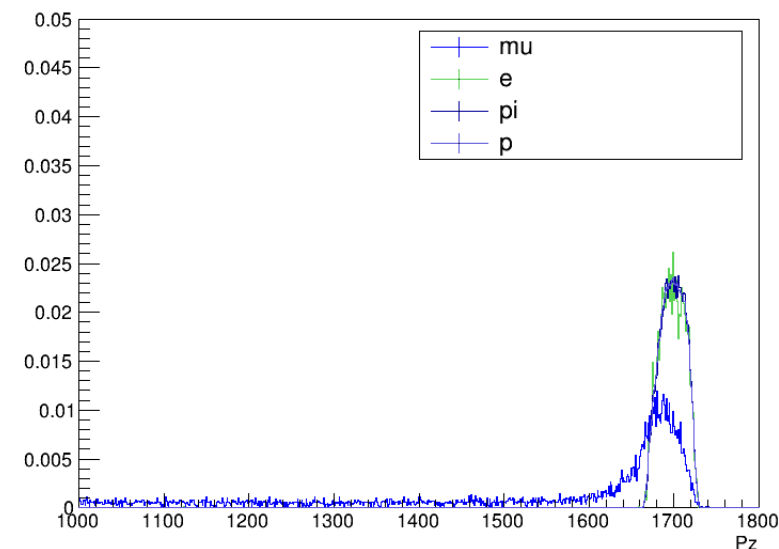


Pz for particles at entrance for plus magnitude, p=1.7G



Scaled

Pz for particles at entrance for plus magnitude, p=1.7G



本底粒子的动能谱的形状完全相同

可以同时去除所有本底粒子

理论解释

- Proton打靶产生的pi+与pi-的反应截面有显著差别
- Pi+的反应截面大于pi-的反应截面

2 Proton - proton reactions

The total inclusive cross section for pion production in proton - proton collisions has been parameterized as [2]

$$\sigma_{pp \rightarrow \pi^+ X} = \left(0.00717 + 0.0652 \frac{\log T_{\text{lab}}}{T_{\text{lab}}} + \frac{0.162}{T_{\text{lab}}^2} \right)^{-1}, \quad (1)$$

$$\sigma_{pp \rightarrow \pi^- X} = \left(0.00456 + \frac{0.0846}{T_{\text{lab}}^{0.5}} + \frac{0.577}{T_{\text{lab}}^{1.5}} \right)^{-1}, \quad (2)$$

$$\sigma_{pp \rightarrow \pi^0 X} = \left(0.007 + 0.1 \frac{\log T_{\text{lab}}}{T_{\text{lab}}} + \frac{0.3}{T_{\text{lab}}^2} \right)^{-1}, \quad (3)$$

multiple of the pp cross section. The reaction, $n + p \rightarrow \pi^- + X$, has been studied by Abdivaliev [10] and the data are shown in Figure 7, compared to the following simple parameterization (dashed line) of the np cross section,

$$\sigma_{np \rightarrow \pi^- X} = 2.5 \sigma_{pp \rightarrow \pi^- X}, \quad (9)$$

where $\sigma_{pp \rightarrow \pi^- X}$ is given in equation (2). The np experimental cross sections for other pion species (π^+ and π^0) are not available, and parameterizations cannot be developed.

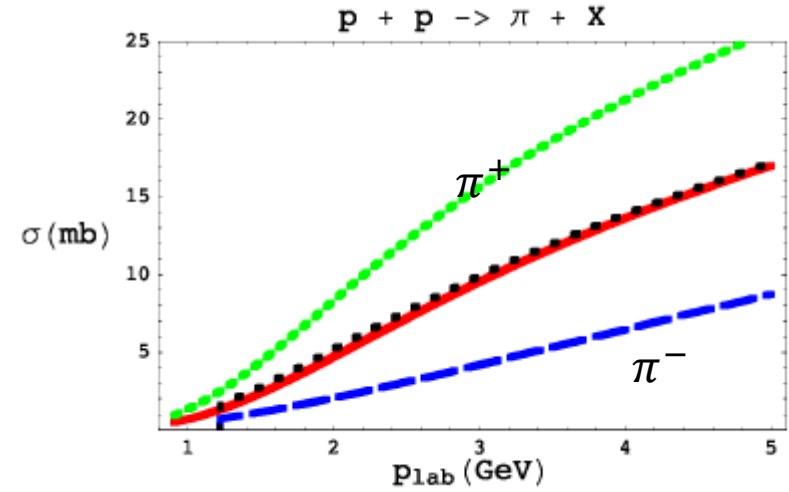
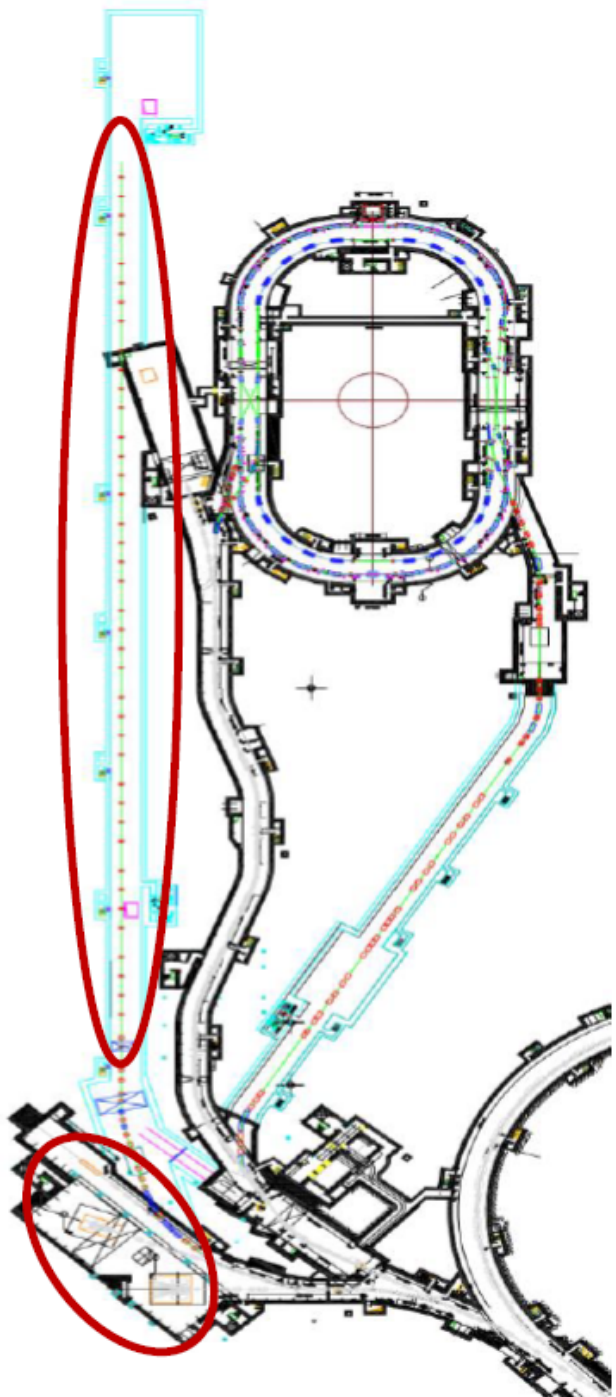


Table 3: Cross section data for π^\pm production in proton - proton reactions.

Reaction	T_{lab} (GeV)	p_{lab} (GeV)	\sqrt{s} (GeV)	σ (mb)	Reference
$p + p \rightarrow \pi^+ + X$	0.59	1.2	2.2	9.7 ± 1.2	[6]
	0.73	1.38	2.21	13.5 ± 0.73	[9]
	2.85	3.67	2.98	26.1 ± 5.0	[7]
	7.91	8.8	4.3	39.9 ± 0.6	[4]
	11.1	12	4.9	43.2 ± 0.9	[3, 14]
	18.1	19	6.1	47.5 ± 1.0	[3]
	23.1	24	6.8	56.8 ± 0.9	[3, 14]
	68.1	69	11.5	81.5 ± 8.2	[3]
	101.1	102	13.9	91.8 ± 9.2	[3]
	204.1	205	19.7	108 ± 11	[3]
302.1	303	23.9	125 ± 13	[3]	
$p + p \rightarrow \pi^- + X$	0.73	1.38	2.2	0.03 ± 0.01	[9]
	2.85	3.67	2.98	6.0 ± 1.2	[7]
	7.91	8.8	4.3	19.1 ± 0.6	[4]
	11.1	12	4.9	21.3 ± 0.4	[3, 14]
	18.1	19	6.1	30 ± 0.6	[3, ?]
	23.1	24	6.8	33.8 ± 0.6	[3, 14]
	68.1	69	11.5	62.7 ± 1.0	[3]
	101.1	102	13.9	66.9 ± 1.3	[3]
	204.1	205	19.7	86 ± 2	[3]
	302.1	303	23.9	99.5 ± 3.0	[3]

HIAF未来升级计划 (HIAF-U)



研究机构	加速器	建成时间	典型离子束	典型离子束能量	束流强度或束流功率
德国GSI	FAIR SIS100	2025	$^{238}\text{U}^{28+}$	2.7 GeV/u	5×10^{11} ppp
美国MSU	FRIB	2021	$^{238}\text{U}^{76-80+}$	200 MeV/u	CW 13 μA
俄罗斯JINR	NICA-Booster	2023	$^{197}\text{Au}^{32+}$	4.5 GeV/u	4×10^9 ppp
欧洲	EURISOL 驱动加速器	建议	H^- , H^+ , $^3\text{He}^{2+}$	1.0 GeV/q	4 MW
中国IMP	HIAF	2025	$^{238}\text{U}^{35+}$	0.8 GeV/u	$1.0-2.0 \times 10^{11}$ ppp
			$^{238}\text{U}^{76+}$	2.45 GeV/u	$0.5-1.0 \times 10^{11}$ ppp
			p	9.3 GeV/u	5×10^{13}
	HIAF-U BRing-S	2027- 2032	$^{238}\text{U}^{35+}$	2.95 GeV/u	2.0×10^{12} ppp
			$^{238}\text{U}^{76+}$	7.3 GeV/u	1.0×10^{12} ppp
			$^{238}\text{U}^{92+}$	9.1 GeV/u	1.0×10^{12} ppp
			p	25.0 GeV/u	4.0×10^{14}
	HIAF-U MRing	2027- 2032	$^{238}\text{U}^{92+}$	4.4 GeV/u	2×10^{12} ppp
	HIAF-U iLinac	2027- 2032	$^{238}\text{U}^{46+}$	150-200 MeV/u	1 emA
HIAF-ISOL 驱动加速器	2027- 2032	H^-, H^+	0.5-1.0 GeV/u	5-10 mA (2.5~10 MW)	