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

中国科学院近代物理研究所
Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences

基于HIAF-HIRIBL的高能缪子束流

报 告 人：徐宇 陈良文 章学恒 等

先进能源科学与技术广东省实验室

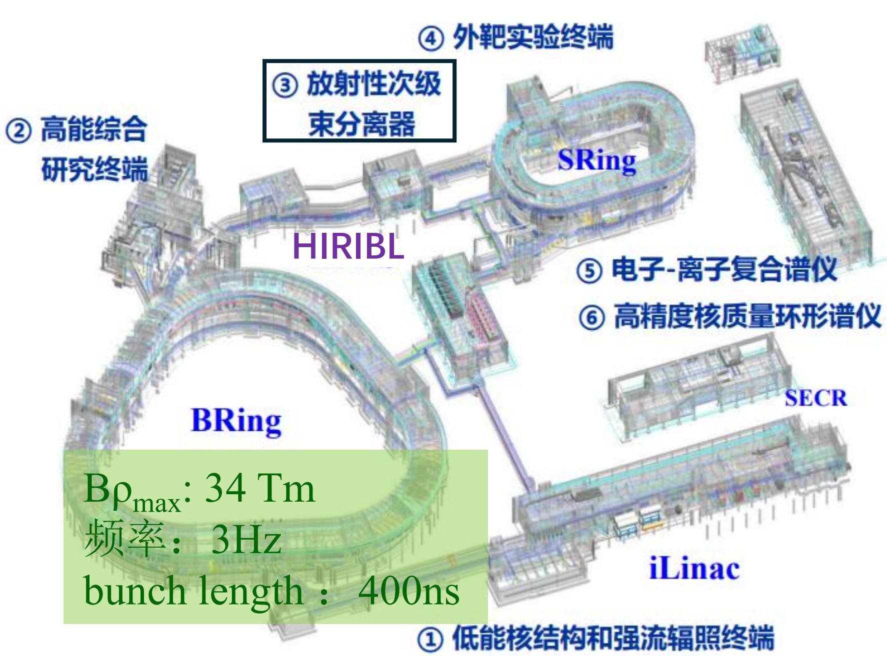
2025年9月20日

Outline

- HIAF简介
- 缪子束流介绍
- 总结和展望

HIAF简介

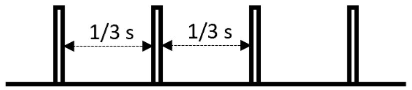
强流超导直线iLinac、快循环同步环BRing与六大实验终端结合



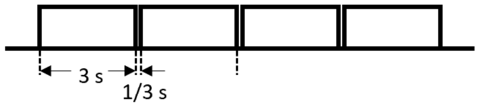
- 加速器
  - 强流离子源系统 (SECR)
  - 超导直线加速器 (iLinac)
  - 增强器 (BRing)
  - 束线系统
- 实验终端
  - 低能核结构谱仪
  - 强流离子束辐照终端
  - 放射性次级束流分离器
  - 外靶实验终端
  - 电子-离子复合共振谱仪
  - 高精度环谱仪(SRing)
- 配套设施
  - 公共配套设施
  - 通用设施及其他
  - 土建工程

磁钢度	34Tm，重复频率 3Hz	
离子	离子数ppp	能量 (GeV/u)
$^{238}U^{35+}$	1.0×10^{11}	0.84
$^{209}Bi^{27+}$	1.2×10^{11}	0.85
$^{78}Kr^{19+}$	3.0×10^{11}	1.7
$^{18}O^{6+}$	6.0×10^{11}	2.6
Proton	**2.0×10^{12}**	**9.3**

Fast extraction: High-intensity pulsed p/ion



Slow extraction: Quasi-continuous p/ion

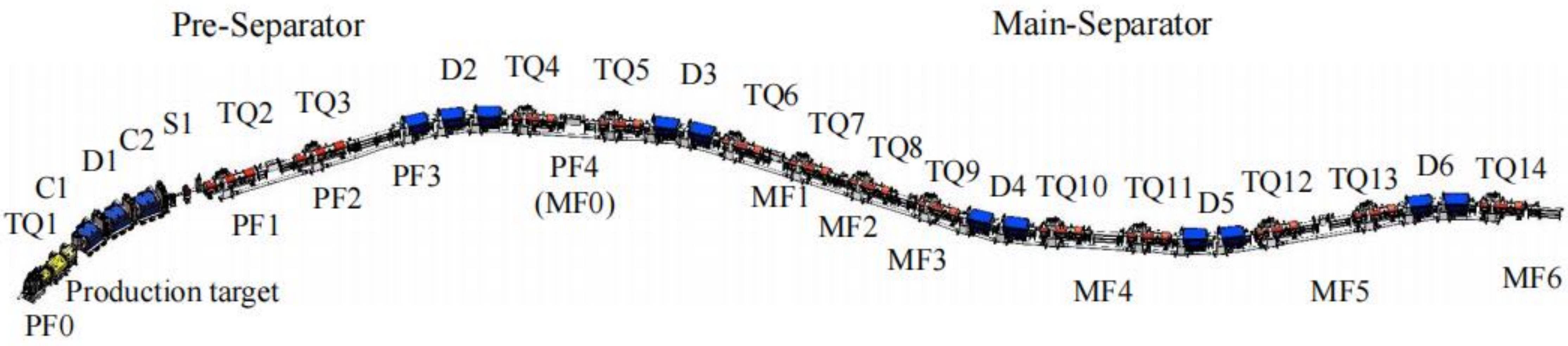


两种运行模式：快引出、慢引出

放射性束束线：HIRIBL

- 全离子束流
- 高能量、高流强

HIRIBL 简介



HIRIBL：世界最长、磁钢度最高的放射性束线

	长度 (m)	束斑尺寸(mm)	角接受度(mrad)	动量接受度(%)	最大磁钢度(Tm)
HIRIBL NIM.B 547(2024),165214	191.38	±1/±1.5	±30 (X); ±25 (Y)	±2.0	25 (15)
SuperFRS NIM.B 204(2003),71	182.2	±1/±2	±40 (X); ±20 (Y)	±2.5	20
BigRIPS Prog.Theor.EXP.Phys.2012,03C003	78.2	±0.5/±0.5	±40 (X); ±50 (Y)	±3	9.5
ARIS NIM.B 317(2013), 349	86.8	±0.5/±0.5	±40 (X); ±40 (Y)	±5	8

Outline

- HIRIBL缪子束线
- HIRIBL缪子束流
  - 束流产生
  - 束流品质
  - 束流纯化
  - 极化束流
- 总结和展望

束流产生：机理

pp collision

$$p + p \rightarrow p + n + \pi^+$$
$$p + p \rightarrow p + p + \pi^+ + \pi^-$$
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

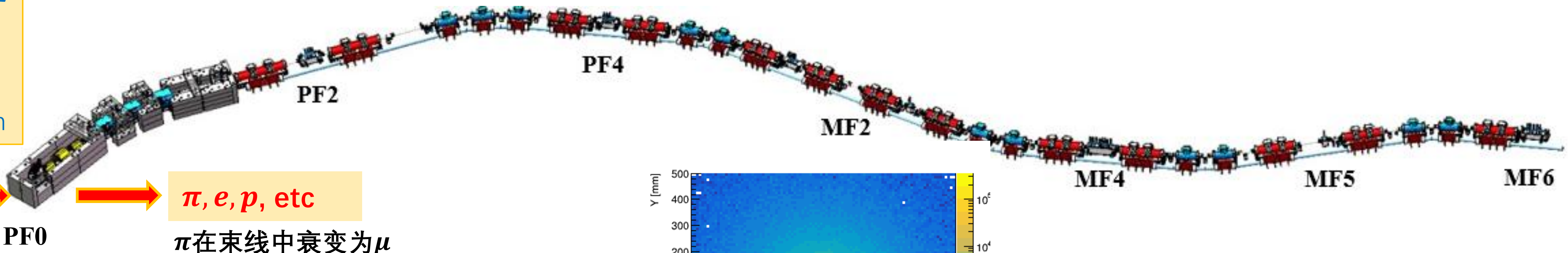
强流加速器 + 束线

强流缪子源

束流产生：π产生

靶体： PF0处

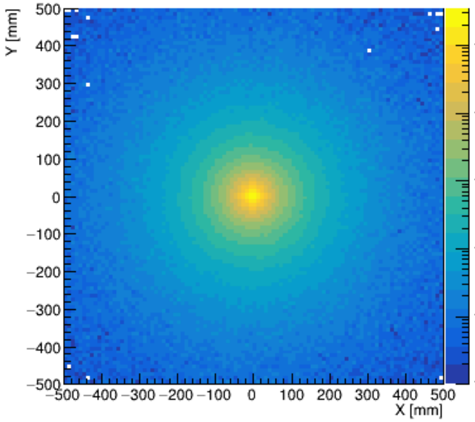
模拟设置：
- 石墨靶
- R=50 mm
- L=100 mm



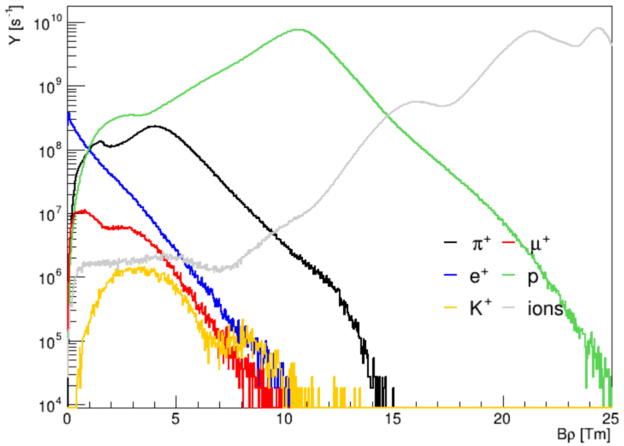
主束 → → π, e, p, etc

π在束线中衰变为μ

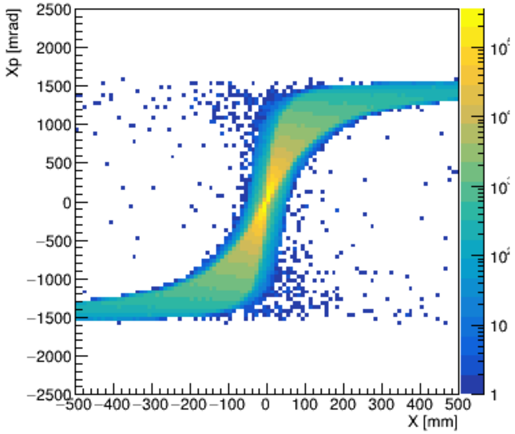
x/x'(RMS) [mm/mrad]	59.4/464.7
y/y'(RMS) [mm/mrad]	59.3/464.6
emit. x/y (RMS) [π · mm · mrad]	8784.31/ 8769.11

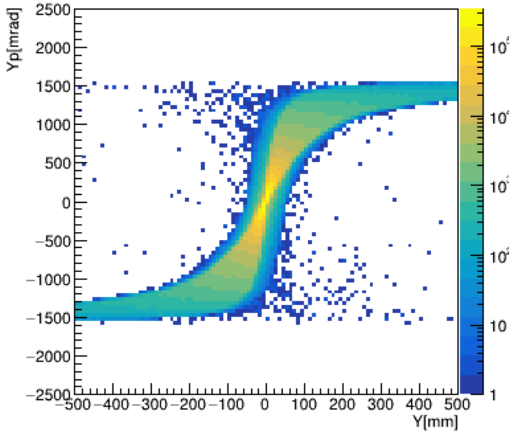


靶后粒子能谱

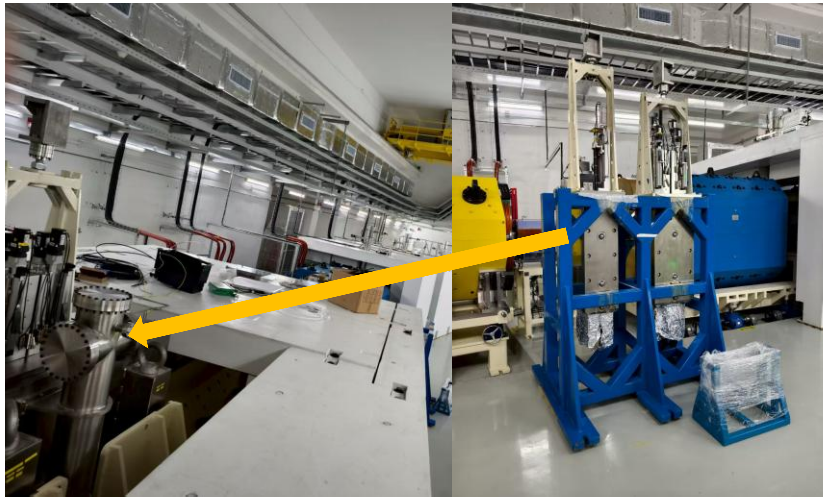


靶后π相空间





靶室

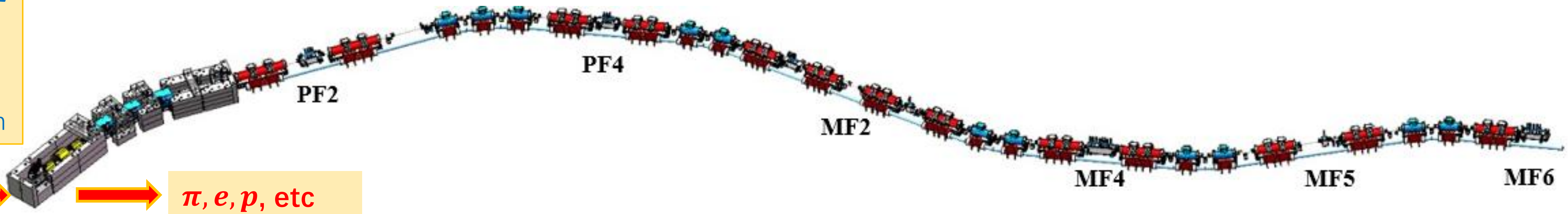


束流产生：π/μ产额优化

靶体：PF0处

模拟设置：

- 石墨靶
- R=50 mm
- L=100 mm

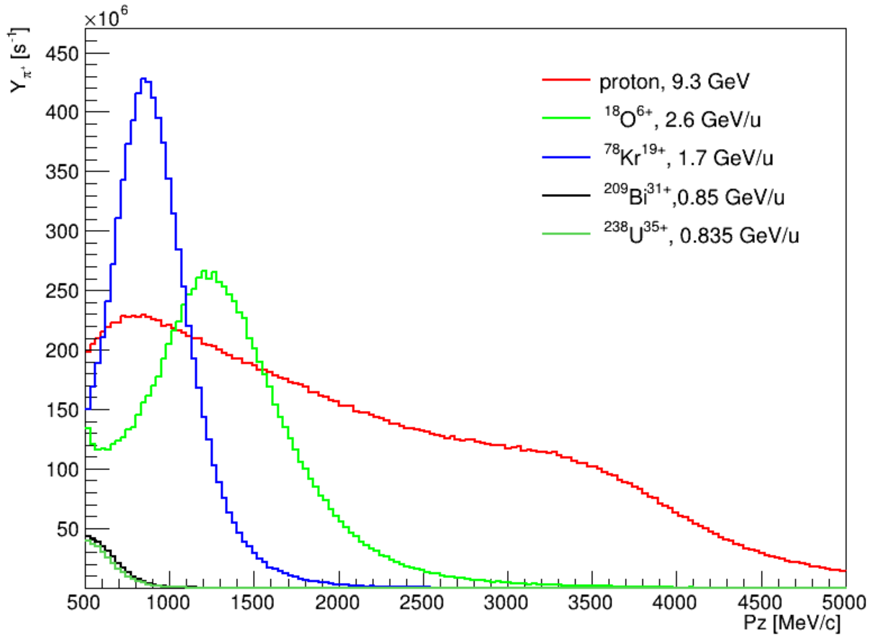
主束 → 

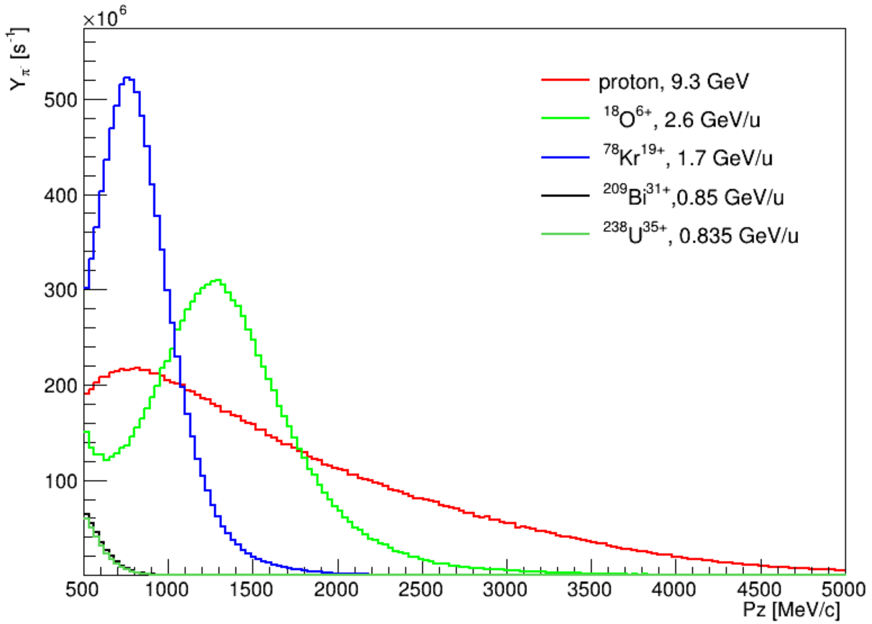
→ π, e, p, etc

PF0

π在束线中衰变为μ

- 不同主束产生的π能谱不同
- 根据需求的缪子能量，选择最优主束





束流产生：缪子传输

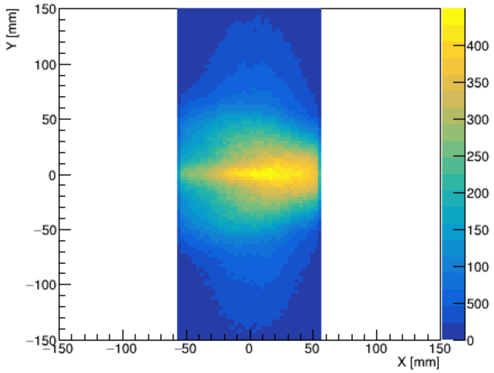
東江實驗室
先进能源科学与技术广东省实验室
ADVANCED ENERGY SCIENCE AND TECHNOLOGY GUANGDONG LABORATORY

靶体：PF0处
模拟设置：
- 石墨靶
- R=50 mm
- L=100 mm

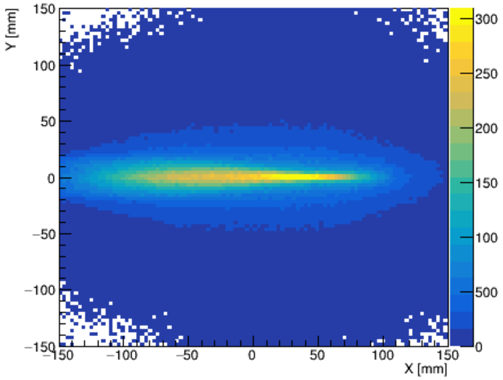
主束 → PF0 → π, e, p, etc → 束线元件：二级铁、四级铁、狭缝

- 狭缝
  - PF2、MF4处
  - 约束动量：±2%

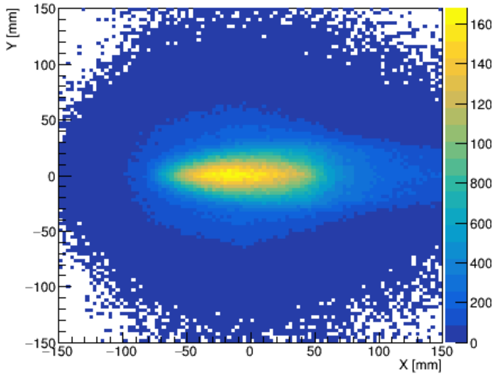
PF2



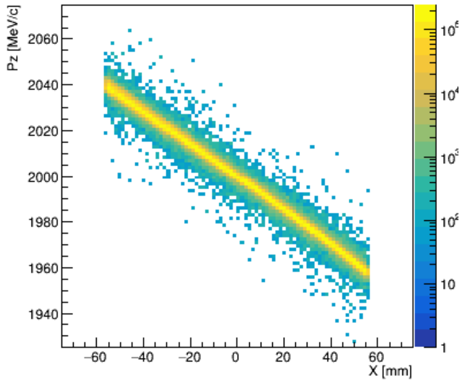
MF2



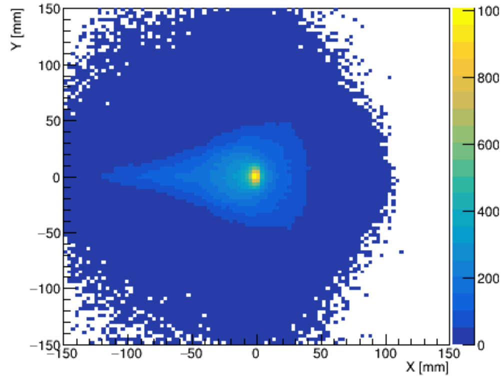
MF5



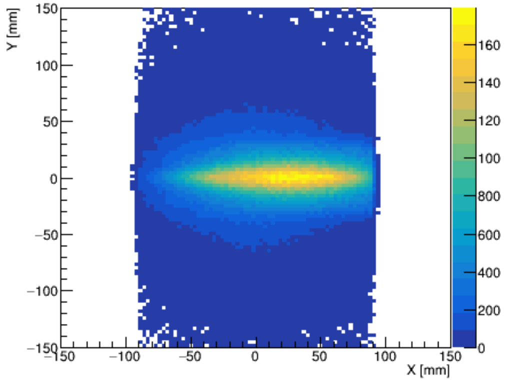
PF2



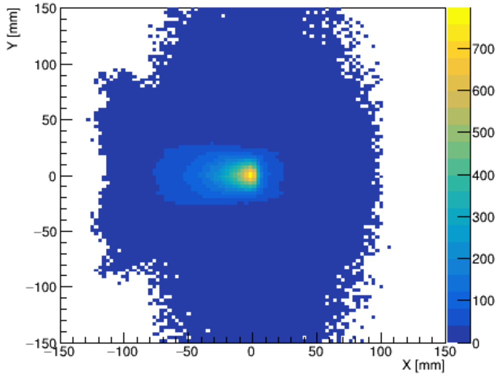
PF4



MF4



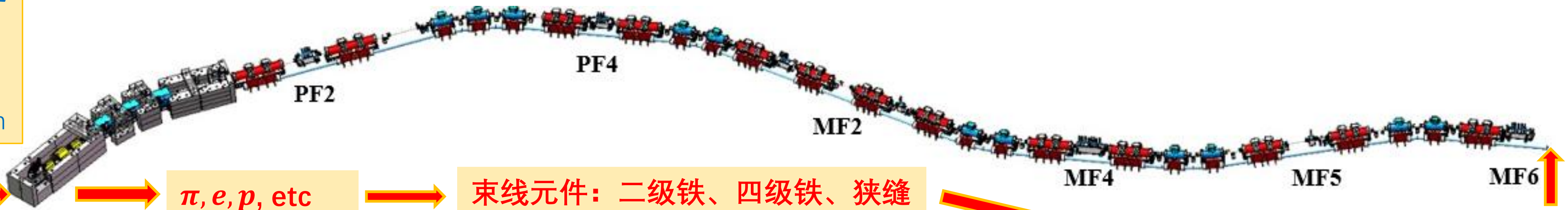
MF6



束流产生：出口

靶体：PF0处
模拟设置：
- 石墨靶
- R=50 mm
- L=100 mm

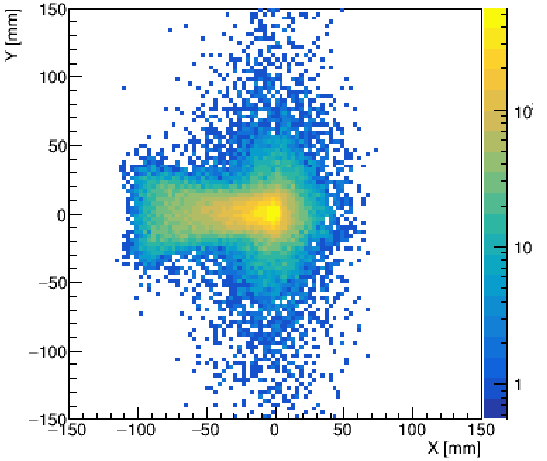
主束 → π, e, p, etc → 束线元件：二级铁、四级铁、狭缝

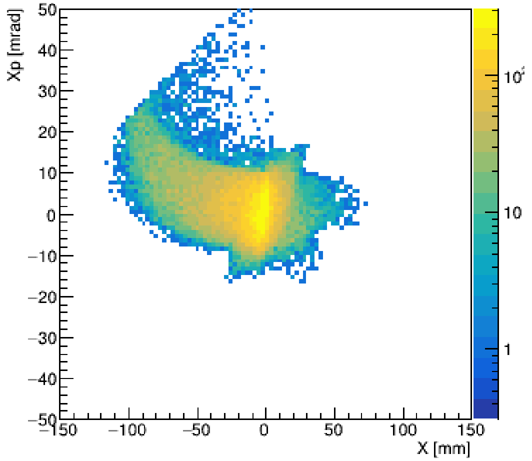


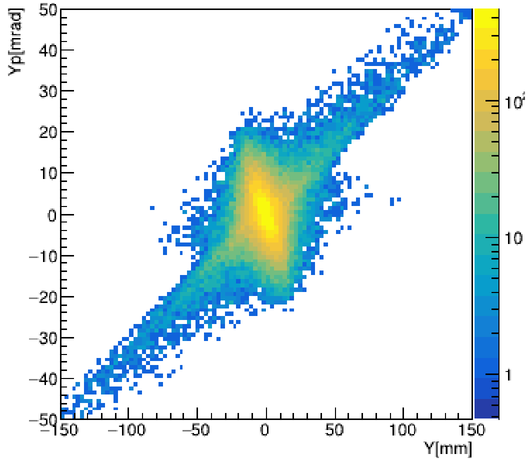
MF6：束线出口
约3m空间：
- 放置探测器

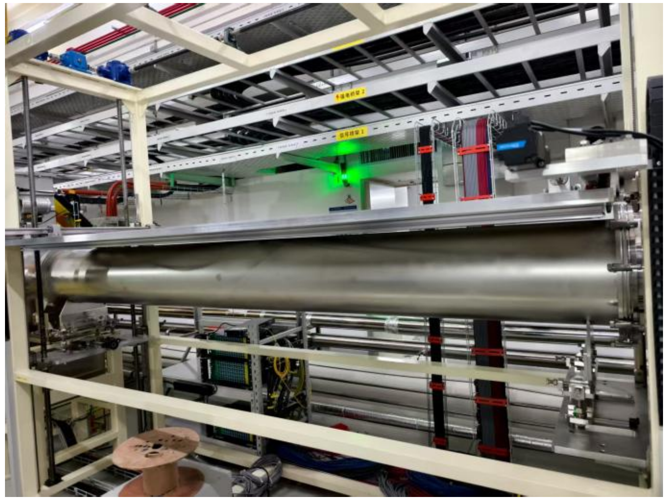
Pz [GeV/c]	1	2	3	4	5	6
x/x'(RMS) [mm/mrad]	42.21/11.11	35.79/7.97	31.96/7.16	30.32/6.94	29.34/6.89	28.77/6.84
y/y'(RMS) [mm/mrad]	42.45/14.7	34.36/12	26.96/10.56	23.39/9.69	21.49/9.21	20.99/8.89
emit. x/y (RMS) [π · mm · mrad]	148.07/ 197.92	88.61/ 130.17	71.06/ 88.34	64.03/ 70.51	61.36/ 61.28	59.79/ 57.74

缪子束流相空间 P=6 GeV/c









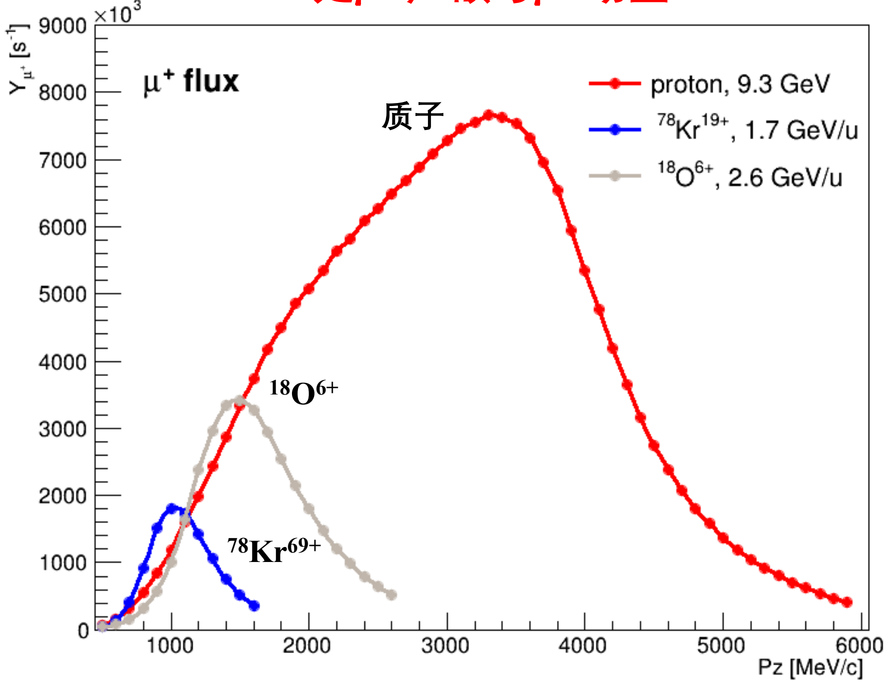
束流品质：动量与产额

最大μ^+束流产额：$8.2\times10^6/s$

- 主束粒子：质子
- 缪子动量：3.5 GeV/c

	proton	$^{18}O^{6+}$	$^{78}Kr^{19+}$
动量 [GeV/c]	3.5	1.5	1.0
产额 [μ^+/s]	8.2×10^6	3.5×10^6	1.8×10^6
纯度	2.0%	0.80%	0.60%

MF6处μ^+产额与μ^+动量

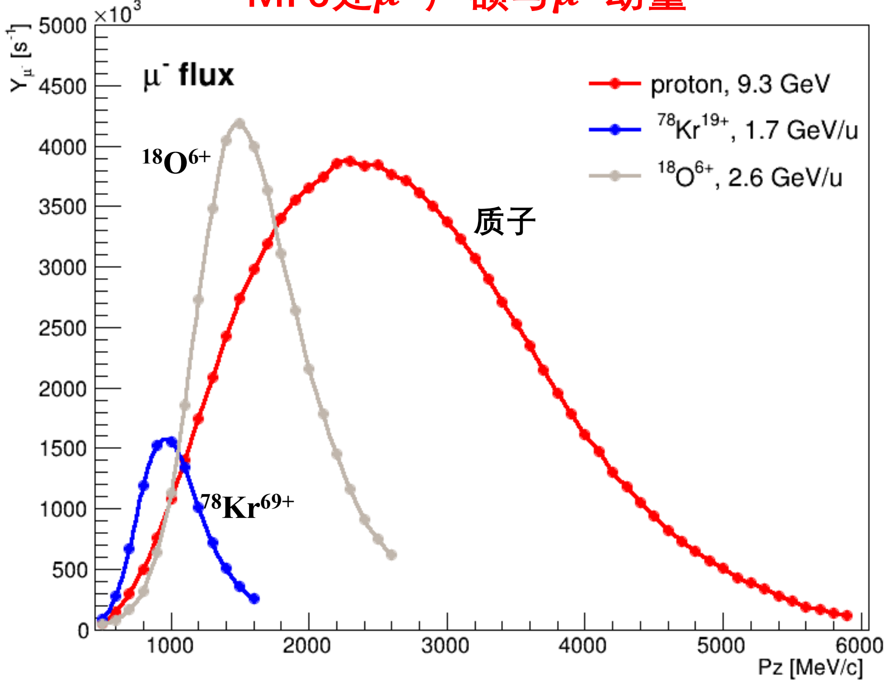


最大μ^-束流流强：$4.2\times10^6/s$

- 主束粒子：$^{18}O^{6+}$
- 缪子动量：1.5 GeV/c

	proton	$^{18}O^{6+}$	$^{78}Kr^{19+}$
动量 [GeV/c]	2.3	1.5	1.0
产额 [μ^-/s]	3.8×10^6	4.2×10^6	1.6×10^6
纯度	13%	20%	23%

MF6处μ^-产额与μ^-动量



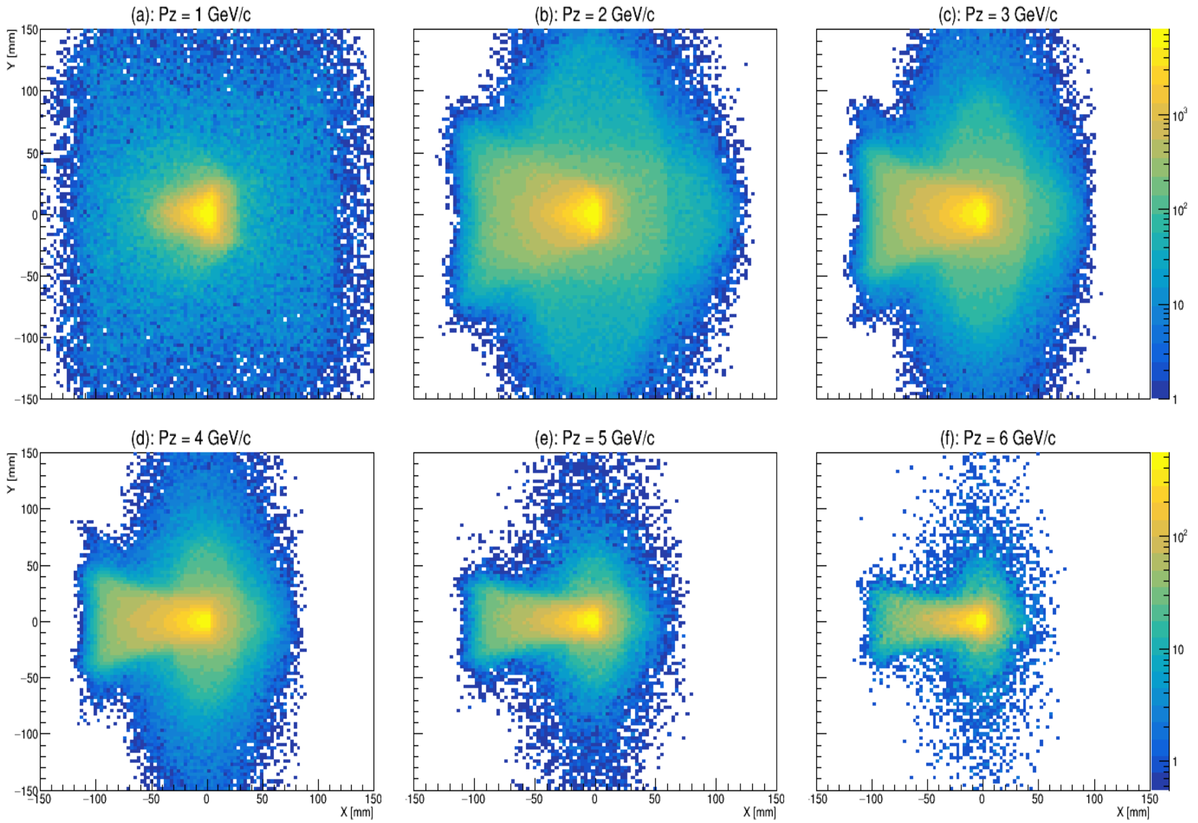
束流品质：MF6处束斑

- 束斑大小:
  - 半径约30 mm
  - 随能量增加而减小

- 束斑翼状部分：磁场高阶效应

主束：p@9.3GeV，流强$2\times10^{12}/s$

	束斑半径r[mm]		半高宽[mm]		缪子产额[μ^+/s]	
P_μ	N>50%	N>90%	$FWHM_X$	$FWHM_Y$	r<20 mm	r<50 mm
1 GeV/c	28.0	133.6	23.8	25.6	3.9×10^5	6.6×10^5
2 GeV/c	32.4	89.7	27.3	30.4	1.5×10^6	2.8×10^6
3 GeV/c	29.4	78.5	27.0	27.5	2.2×10^6	4.3×10^6
4 GeV/c	26.6	74.8	26.0	25.3	1.7×10^6	3.3×10^6
5 GeV/c	24.2	73.6	24.3	22.4	4.8×10^5	8.6×10^5
6 GeV/c	22.6	72.8	18.0	16.8	1.3×10^5	2.3×10^5



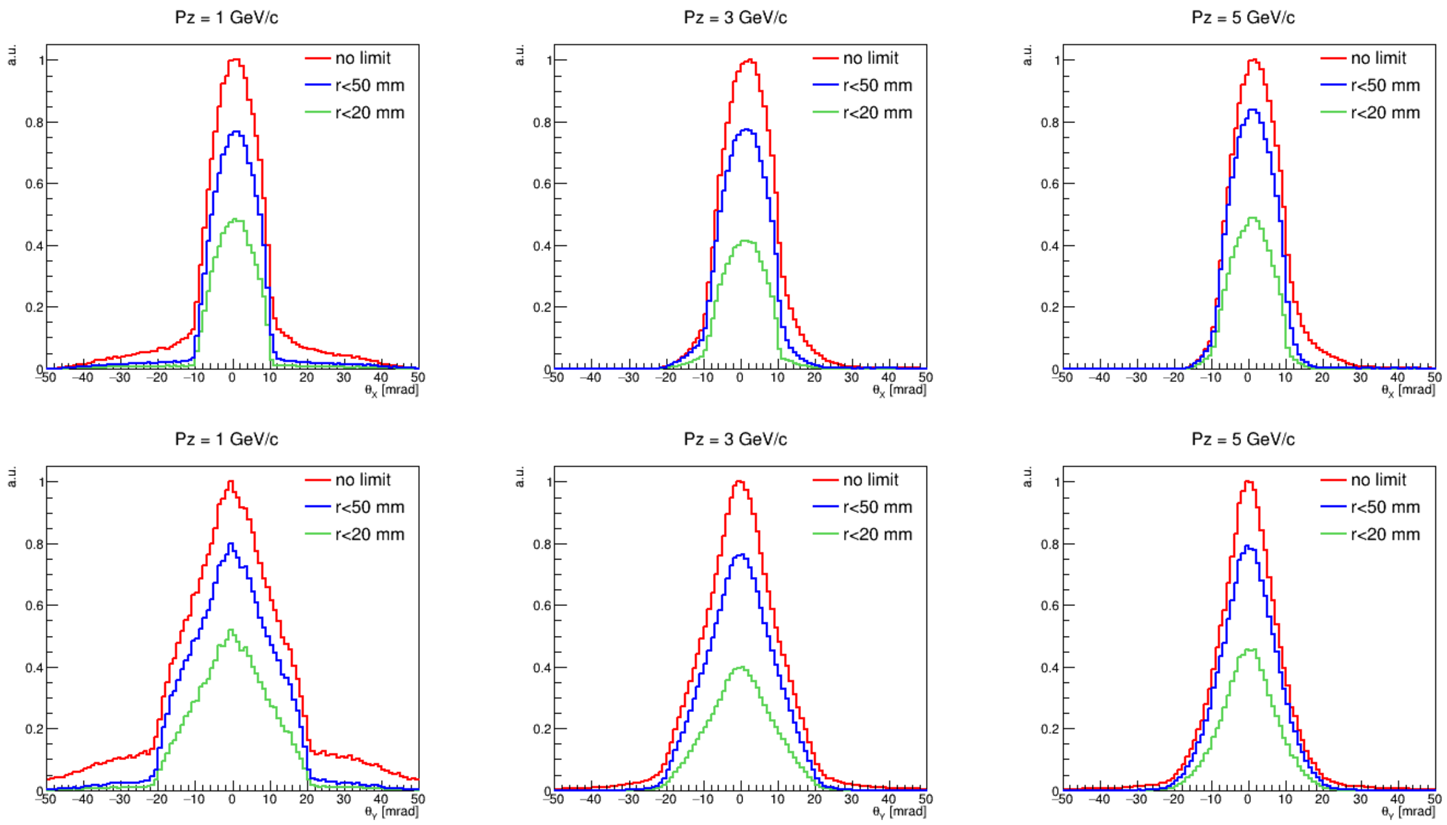
束流品质：发射角

- X方向：半高宽约16 mrad
- Y方向：半高宽14-28 mrad
  - 随动量升高而降低

- Cut：r<50 mm
  - 大发射角粒子被基本去除

主束：p@9.3GeV，流强2×10^{12}/s

	半高宽[mrad]		缪子产额[μ^+/s]	
P_μ	$FWHM_X$	$FWHM_Y$	$\theta_X<5$ mrad $\theta_Y<5$ mrad	$\theta_X<10$ mrad $\theta_Y<10$ mrad
1 GeV/c	15.5	28.1	4.7×10^5	6.9×10^5
2 GeV/c	16.3	22.6	1.9×10^6	3.0×10^6
3 GeV/c	16.5	19.7	2.8×10^6	4.4×10^6
4 GeV/c	15.9	17.0	2.1×10^6	3.4×10^6
5 GeV/c	15.6	15.4	5.4×10^5	8.7×10^5
6 GeV/c	15.6	13.7	1.4×10^5	2.3×10^5

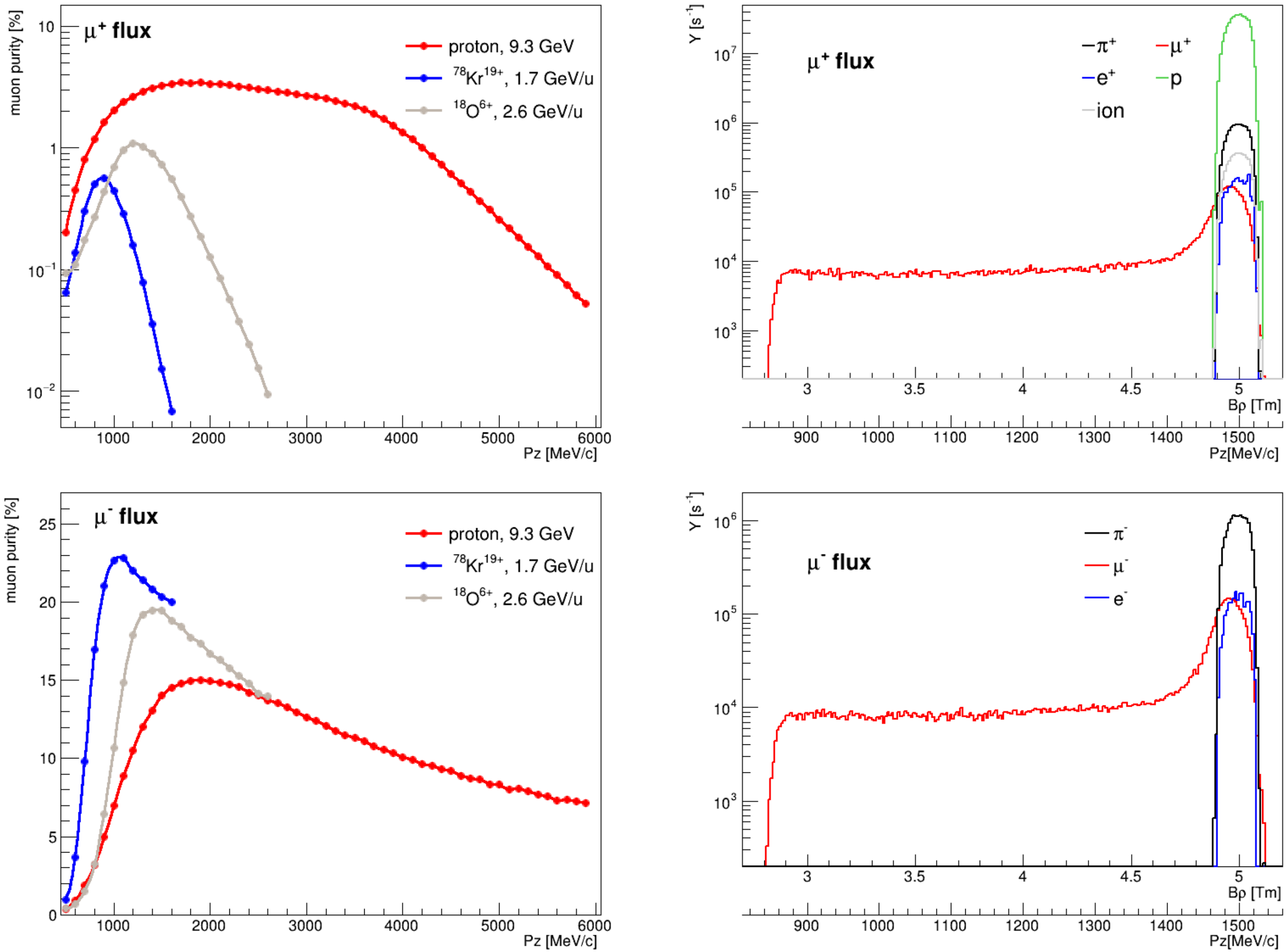


束流品质：纯度、成分与能谱

- 纯度：
  - μ^+束流：~0.1% - 5%
  - μ^-束流：~1% - 25%
- 成分：
  - μ^+束流：$p, \pi^+, \mu^+, e^+, \mathrm{ion}$
    - 主要杂质：p
  - μ^-束流：π^-, μ^-, e^-
    - 主要杂质：π^-
- 能谱：
  - 杂质粒子：单能谱，$\Delta P < \pm 2\%$
  - 缪子：连续谱
- 六段二级铁设置不同参数：
  - 二次动量筛选

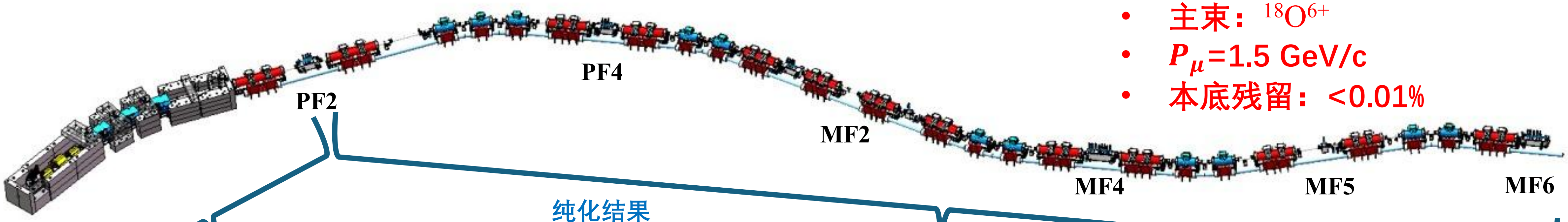
μ^+束流

μ^-束流



束流纯化

- 主束：$^{18}O^{6+}$
- P_μ=1.5 GeV/c
- 本底残留：<0.01%



$B\rho_1$ 第一次动量筛选

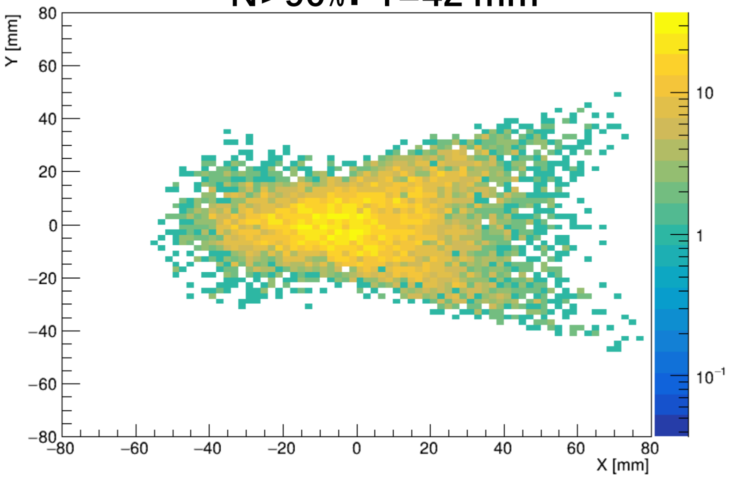
$B\rho_2$ 第二次动量筛选

纯化结果

	未纯化	纯化
产额[μ/s]	3.4×10^6	2.4×10^5
纯度[%]	0.7	100

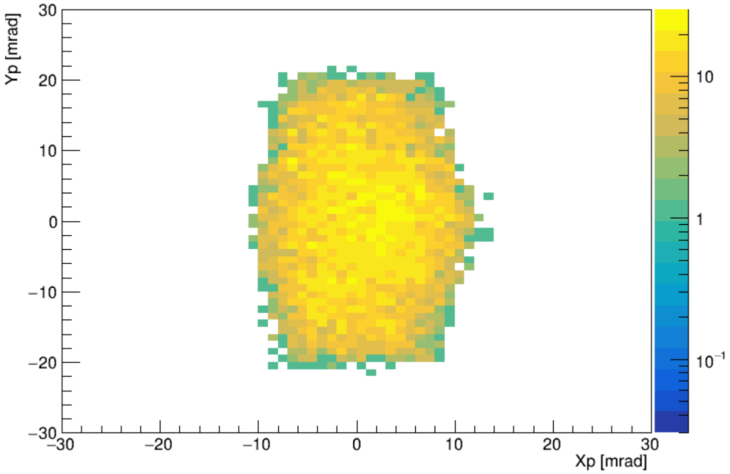
能谱
- 单能谱
- 半高宽：3.6%

束斑
束斑半径r：
- N>50%：r=20 mm
- N>90%：r=42 mm



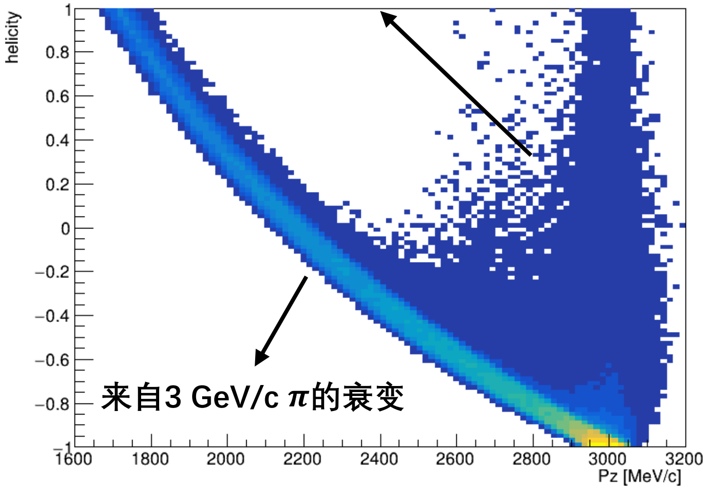
发射角
半高宽：
- $\mathrm{FWHM_X}$ = 14 mrad
- $\mathrm{FWHM_Y}$ = 25 mrad

无大发射角缪子



极化束流

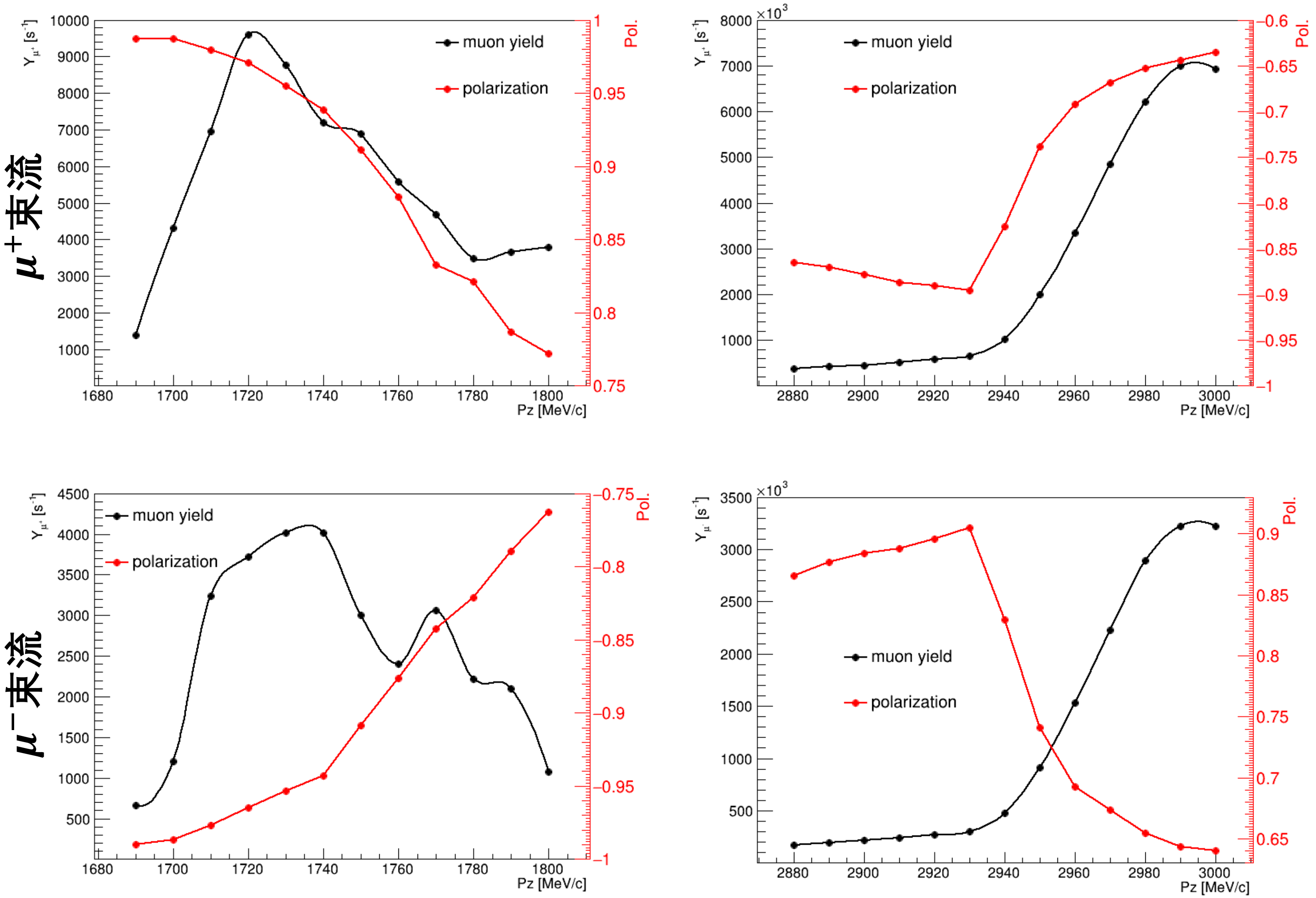
来自更高能量π的衰变



主束：p@9.3GeV
缪子动量：3 GeV/c

- π衰变产生的缪子的极化率与缪子能量相关
- 两次动量判选➔高品质极化缪子束
- 极端向后缪子
  - 极化率高（>95%），纯度高（100%），产额较低（$10^3-10^4\ \mu/s$）
- 极端向前缪子
  - 极化率较高（85%-90%）纯度较高（>99%），产额较高($10^5-10^6\ \mu/s$)

极端向后缪子　　　　极端向前缪子



- HIRIBL缪子束线
- HIRIBL缪子束流
- **总结和展望**

总结

- HIAF可以利用HIRIBL束线产生缪子束流
  - 动量范围：500MeV/c – 7.5GeV/c
  - 缪子产额：$10^6 - 10^7\ \mu$/s
  - 束斑大小：半径约30 mm
  - 高品质纯化束流
    - 产额降低一个量级
    - 本底残留小于0.01%
    - 束斑大小：20 mm
    - 无大发射角粒子
  - 极化缪子束流
    - 高能、高极化率、高纯度、高产额

欢迎大家提出GeV缪子源的新应用！

谢谢大家！