

缪缪论坛 - 缪子物理与缪子技术创新学术论坛，北京

基于HIAF的高能缪子源及相关应用

赵贺

hezhaohao@impcas.ac.cn

中国科学院近代物理研究所

2026.7.12



目录

1. 缪子与缪子源简介
2. HIAF装置进展
3. HIAF GeV高能缪子源
4. 基于HIAF的缪子应用



缪子(Muon)

- μ 子（缪子, muon）是一种带有一个单位负电荷、自旋为1/2的基本粒子， μ 子与电子性质基本相同。

质量: $\mu^\pm = 105.6583745(24) \text{ MeV}/c^2$

寿命: $2.1969811(22) \times 10^{-6} \text{ s}$

衰变: $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$

$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$

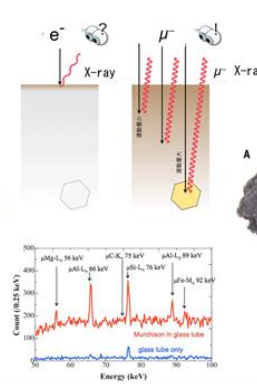
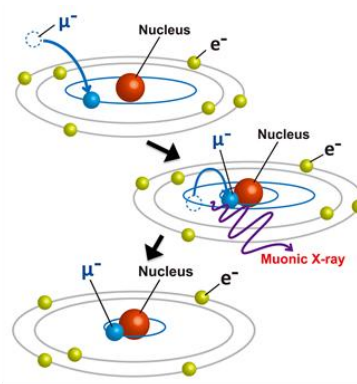
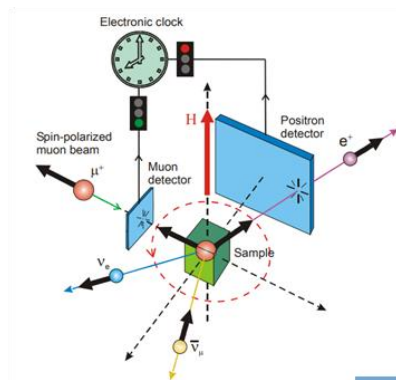
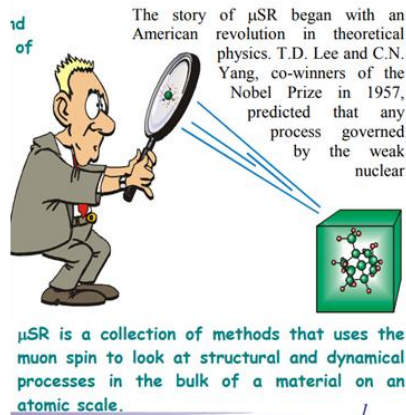
$$\tau = \gamma \tau_{rest}$$



- 质量为 $105.7 \text{ MeV}/c^2$ ，性质与电子相似（“加重版”的电子）。由于质量较电子为大，韧致辐射也较电子少，**穿透能量更强**。
- 质量和能量远大于常见放射性衰变的衰变能，除宇宙射线与大气层作用自然产生外，只能通过高能核反应产生。
- μ 子是一种不稳定的亚原子粒子，快速衰变为电子和中微子，**平均寿命为2.2微秒**。相对其他不稳定的亚原子粒子寿命较长，适合用于基础物理的实验研究。

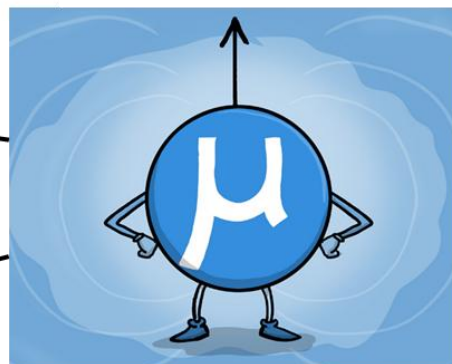


缪子的广泛应用



缪子自旋谱学应用：超导材料、磁性材料等

粒子物理实验：寻找超出标准模型的新物理等

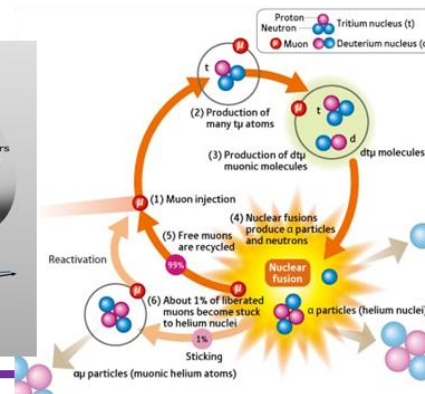
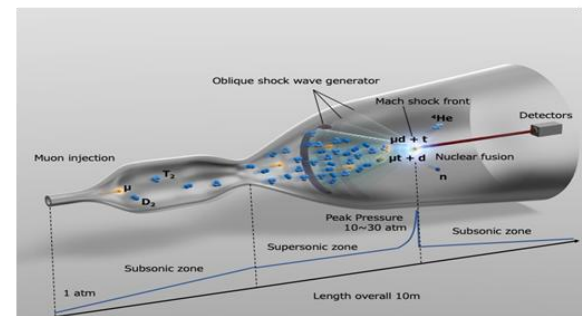
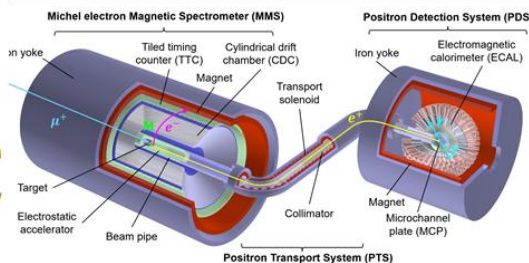
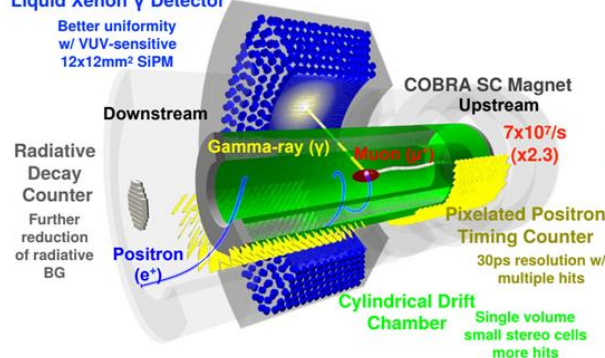


缪原子X射线元素分析：行星科学、科技考古、工业应用

缪子催化冷聚变

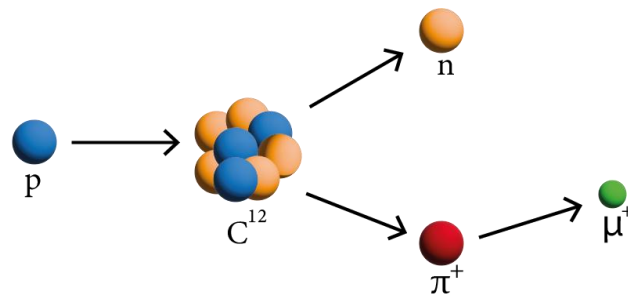


Liquid Xenon γ Detector
Better uniformity w/ VUV-sensitive 12x12mm² SiPM



缪子的产生

➤ 缪子产生



■ π

Mass: $\pi^\pm = 139.57018(35) \text{ MeV}/c^2$

$\pi^+ : u\bar{d}$

$\pi^- : \bar{u}d$

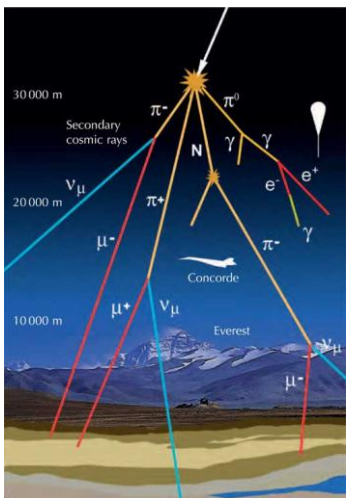
Lifetime: $2.6033 \pm 0.0005 \times 10^{-8} \text{ s}$

$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$

Decay: $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

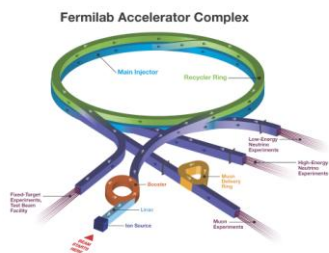
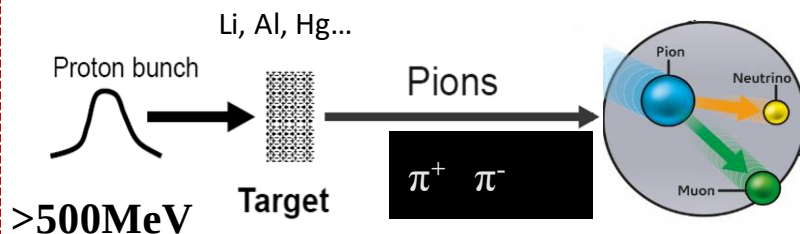
■ 宇宙射线

$N_\mu = 1/\text{cm}^2/\text{mins}$ (海平面)



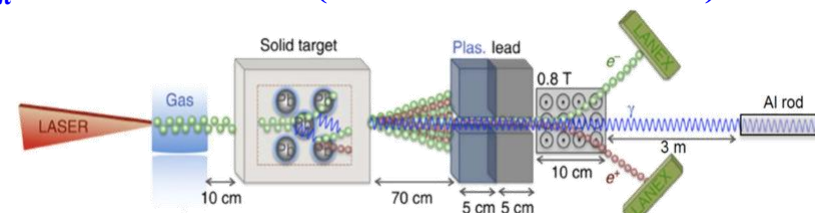
■ 高能粒子打靶 (pion decay)

$N_\mu < 1\text{e-}3 \text{ POT (Al Target)}$



■ 高能电子束 (BH过程)

$N_\pi = 150 \pm 50/\text{shot}$ (Est. with LWFA Acc.)



W. Schumaker et al., New J. Phys. 20, 073008, 2018.

■ Pair production

$N_\mu = 9\text{e-}8/e^+$ (3mm Be)

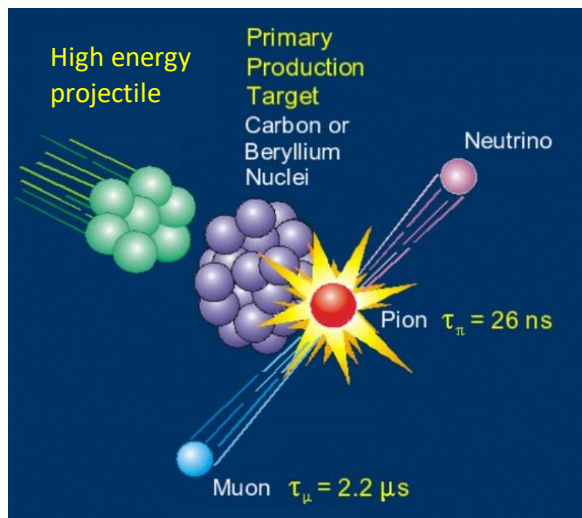
$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- : \mu^+\mu^-$ production

$e^+ : >45\text{Gev}$

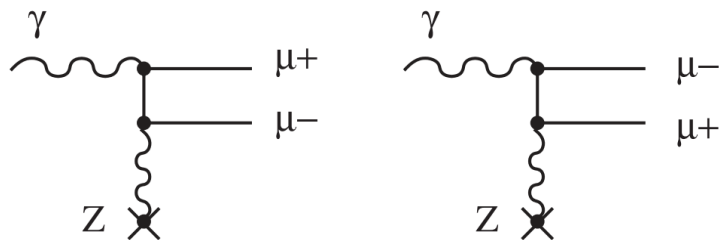


缪子源

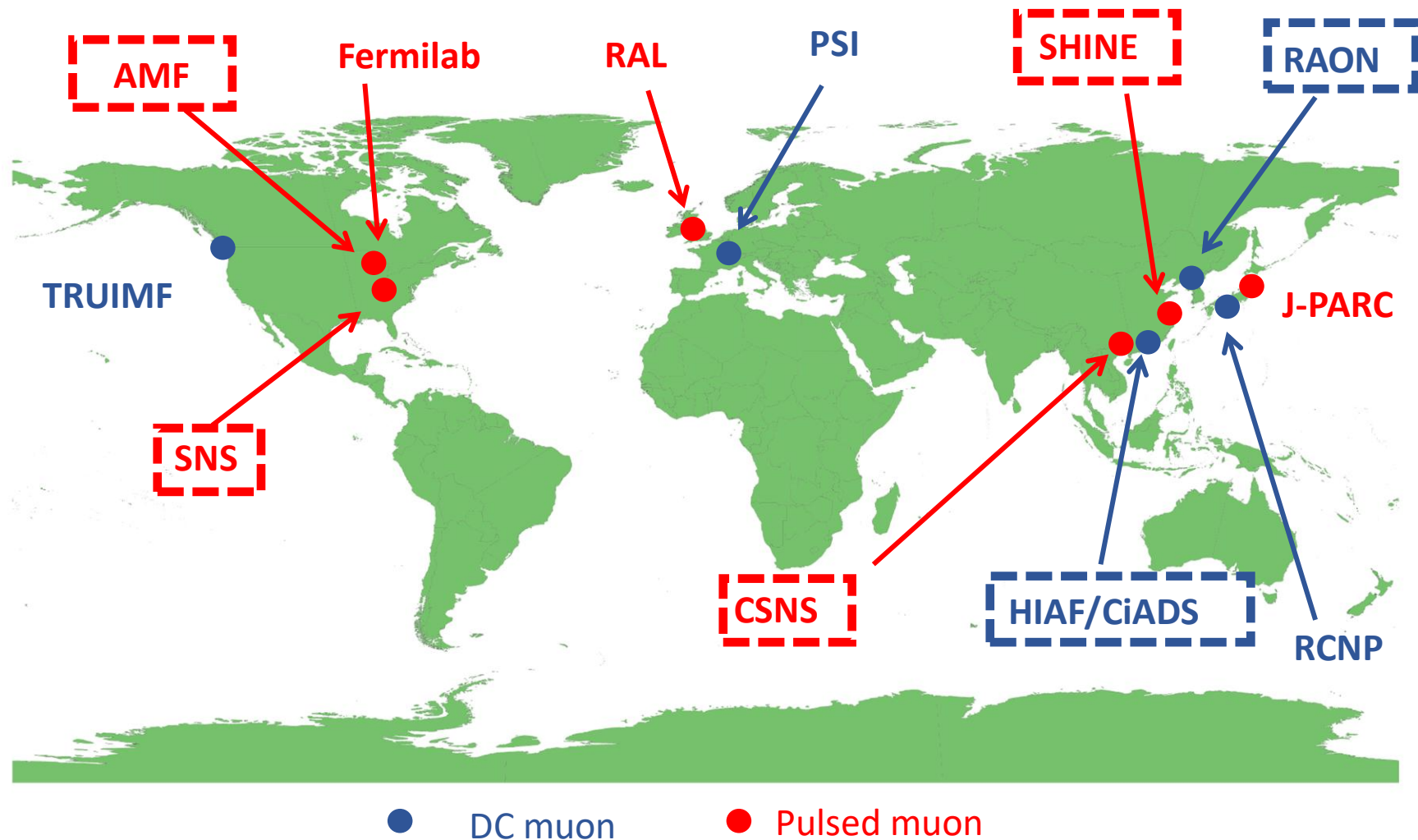
➤ 加速器缪子源:



Muon from pion decay



Bethe-Heitler process





中国缪子源发展布局

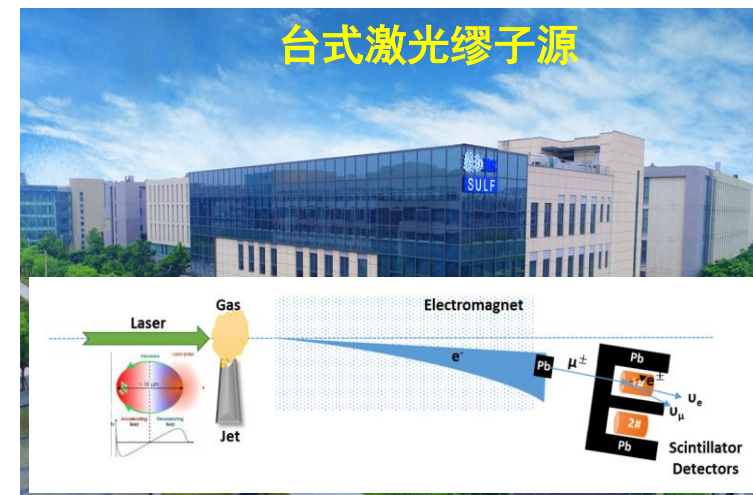
➤ MELODY@CSNS



➤ SHINE Muon Source



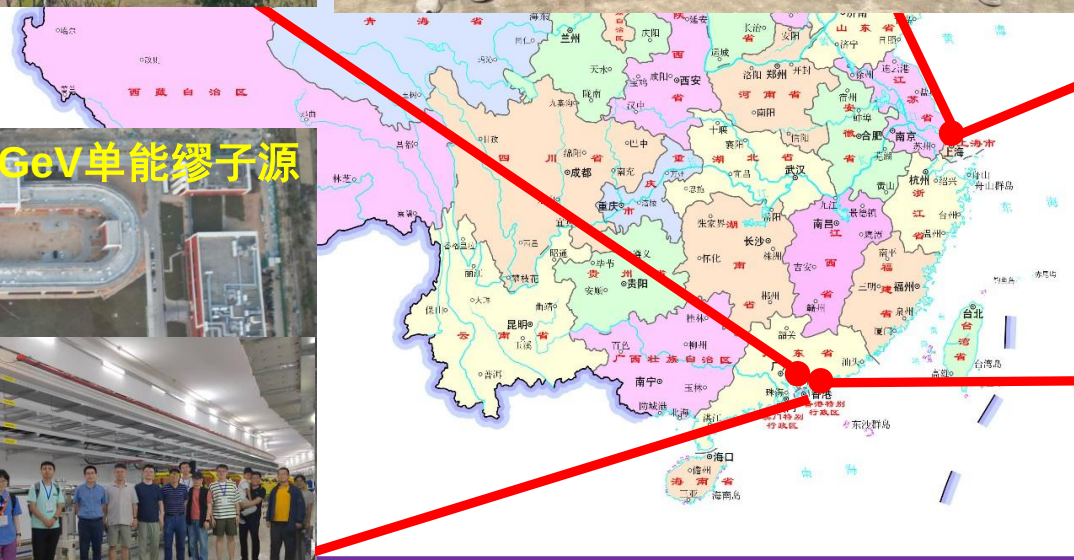
➤ Muon Source@ SULF



➤ HIAF-HIRIBL



➤ MuST@CiADS



基于HIAF的高能缪子源及相关应用



目录

1. 缪子与缪子源简介
- 2. HIAF装置进展**
3. HIAF GeV高能缪子源
4. 基于HIAF的缪子应用

强流重离子加速器装置-HIAF

High-Intensity heavy-ion Accelerator Facility

单位：中国科学院近代物理所

地点：广东惠州

预算：**30亿人民币**





中国强流重离子加速器装置 (HIAF)

HIAF为“十二五”国家重大基础设施，定位于重离子科学与技术研究，是国际上低能连续束流和高能脉冲束流强度最高的重离子加速器装置

HFRS: 放射性次级束流分离器

磁刚度: 25 Tm
分辨本领1100

SRing: 高精度环形谱仪

周长: 277m
磁刚度: 13-15 Tm

BRing: 增强器

周长: 569.1 m
磁刚度: 34 Tm

iLinac: 强流重离子直线加速器

长度: 100 m
能量: 17(U^{35+})- 48(H_2^+) MeV/u
全超导, 1mA CW重离子束

SECR: 超导ECR离子源

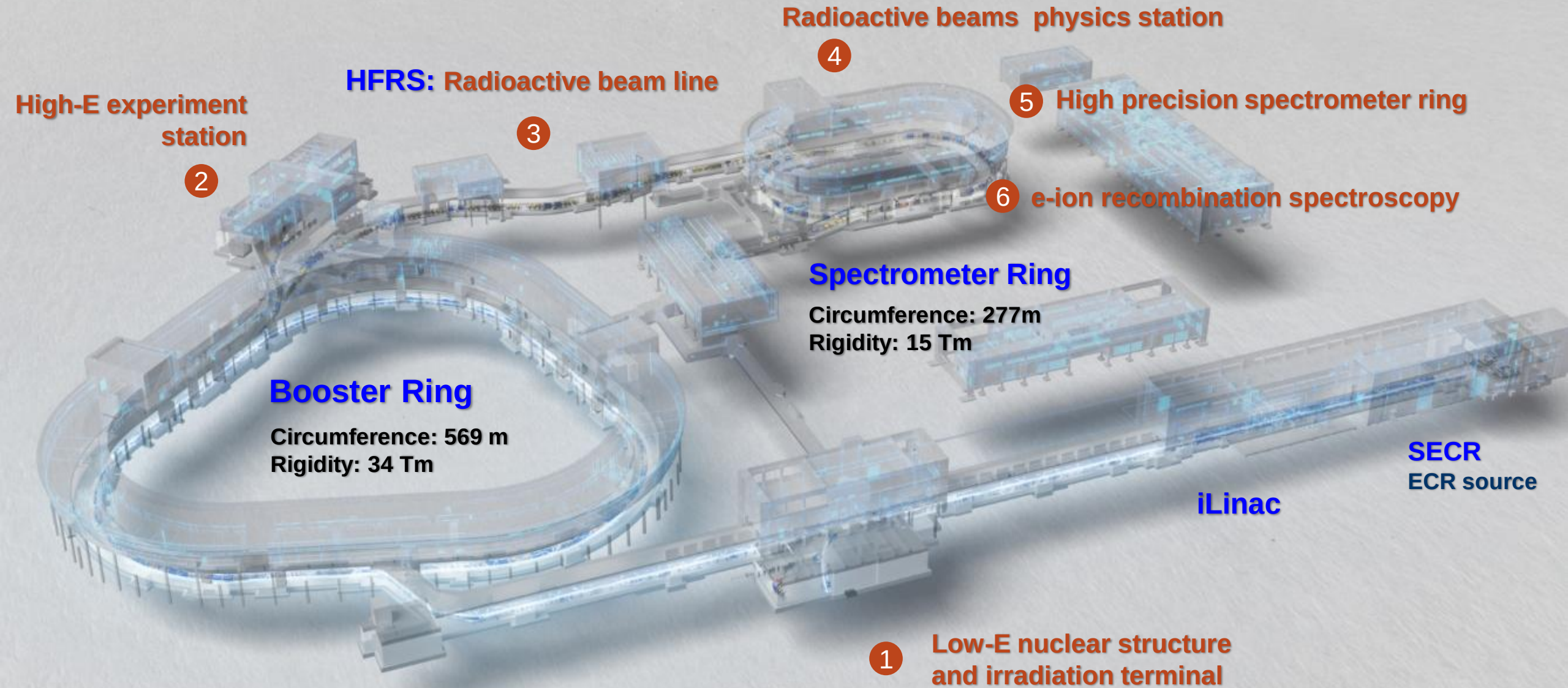
第四代强流超导离子源
0.05pA $^{238}\text{U}^{35+}$

科学目标 (原子核层次)

- 认识原子核中的有效相互作用
- 理解宇宙中从铁到铀重元素的来源
- 短寿命原子核质量测量
-

- 强流超导直线iLinac、快循环同步环BRing与六大实验终端结合
- 分时、劈束供束和快引出、慢引出等多模式，支撑多样化实验需求

总投资**31.31**亿元 (国拨**16.21**+院**0.5**+地方配套**12**+所自筹**2.6**)





HIAF工程建设

2018年12月开工建设，建设周期7年，2025年12月建成



总体方案

核心关键技术样机研制



关键样机研制完成

设备批量招标
剩余土建施工



设备批量加工调试

配套系统安装调试



设备联调联测
束流调试、项目验收



2019年

2020年

2021年

2022年

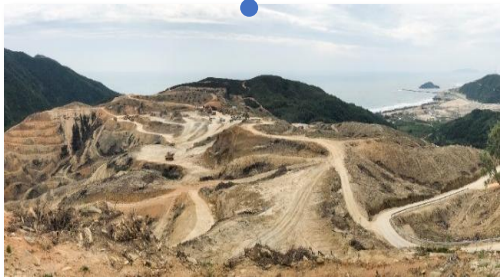
2023年

2024年

2025年

首台套设备研制

运行楼土建施工



设备批量加工

配套系统进场



土建完工 配套系统运行

工艺设备安装、前端出束





HIAF工程建设

装置占地**500亩**，建筑面积**5.8万平米**，包括**2.0公里地下隧道**与**10个地上单体建筑**。
土建工程完工、竣工验收备案，预计**10月份完成国家验收**



中央控制楼



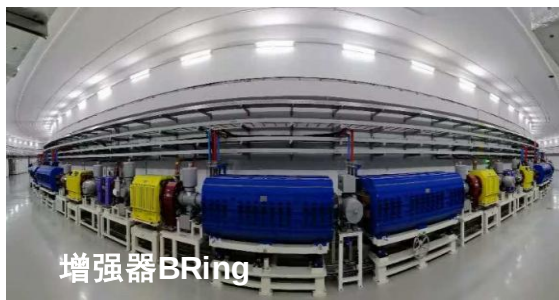
一号测试大厅



制冷中心



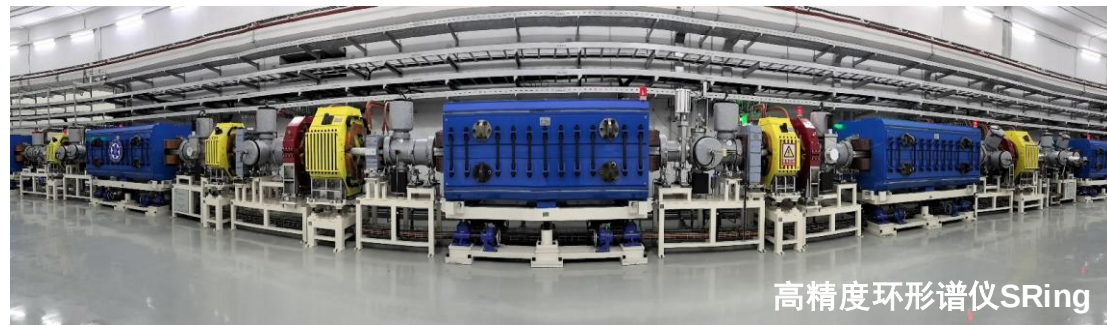
HFRS束线



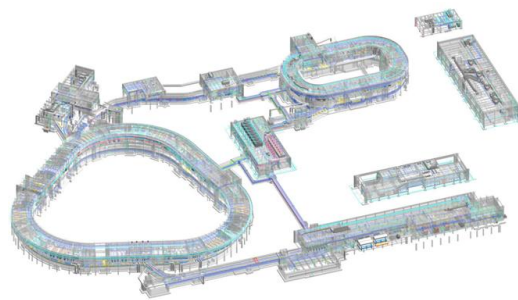
增强器BRing



BRing注入线



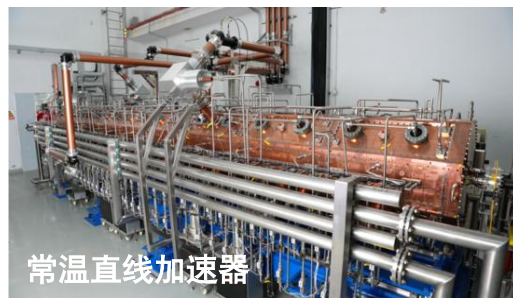
高精度环形谱仪SRing



离子源



超导直线加速器

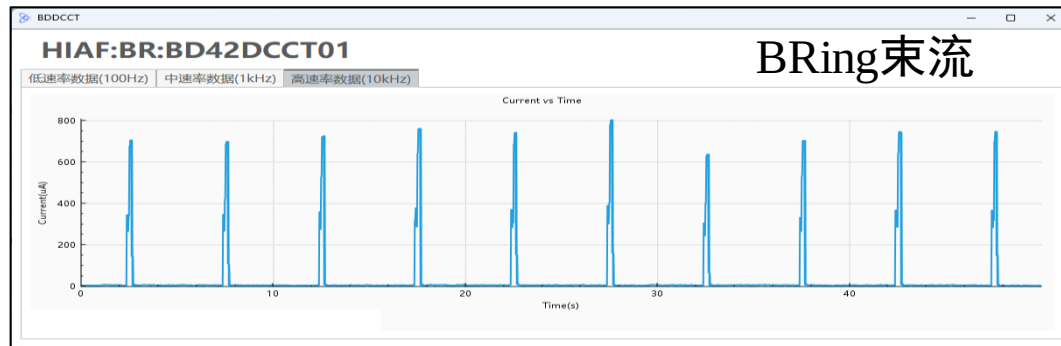


常温直线加速器



大型加速器束流调试速度新纪录

2025年10月27日调试成功，主同步加速器4小时出束，2公里束线16小时贯通



Heavy-ion Accelerator Fires Up



Heavy-ion accelerator fires up

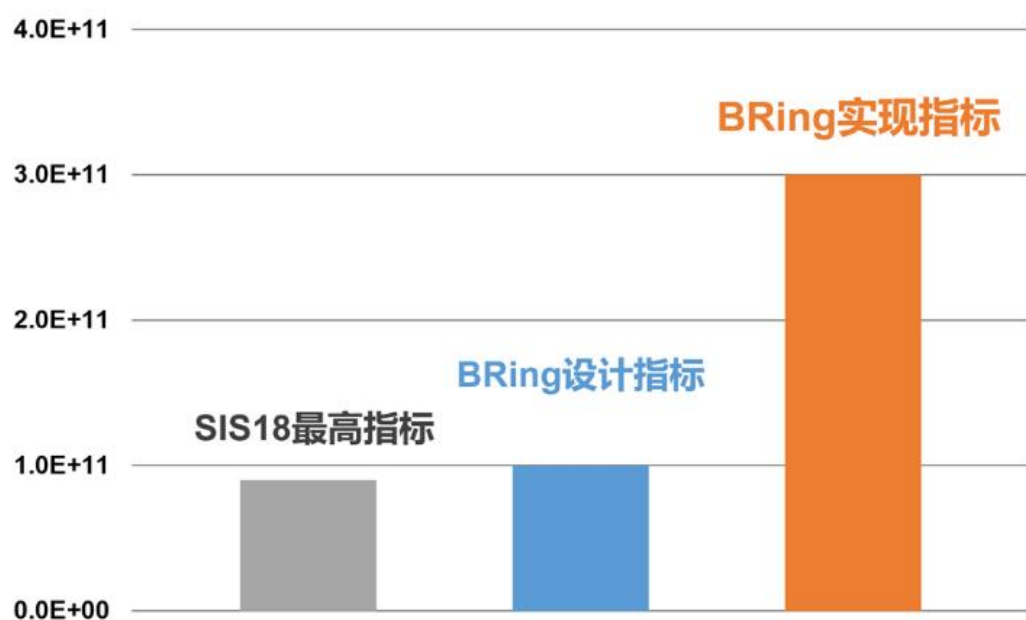
An accelerator that will produce the world's most intense pulses of heavy ions generated its first beam on 28 October. When fully operational, China's High Intensity heavy-ion Accelerator Facility (HIAF), nestled among the mountains of southern Guangdong province, will send pulses of exotic, short-lived ions into fixed targets or into a storage ring to support research on the properties of atomic nuclei and how stars forge heavy elements, as well as material sciences and biomedicine. The research center, which joins the ranks of similar facilities worldwide, represents a \$420 million investment by the Chinese

Aca will 美国《科学》杂志报道了调试成功^F

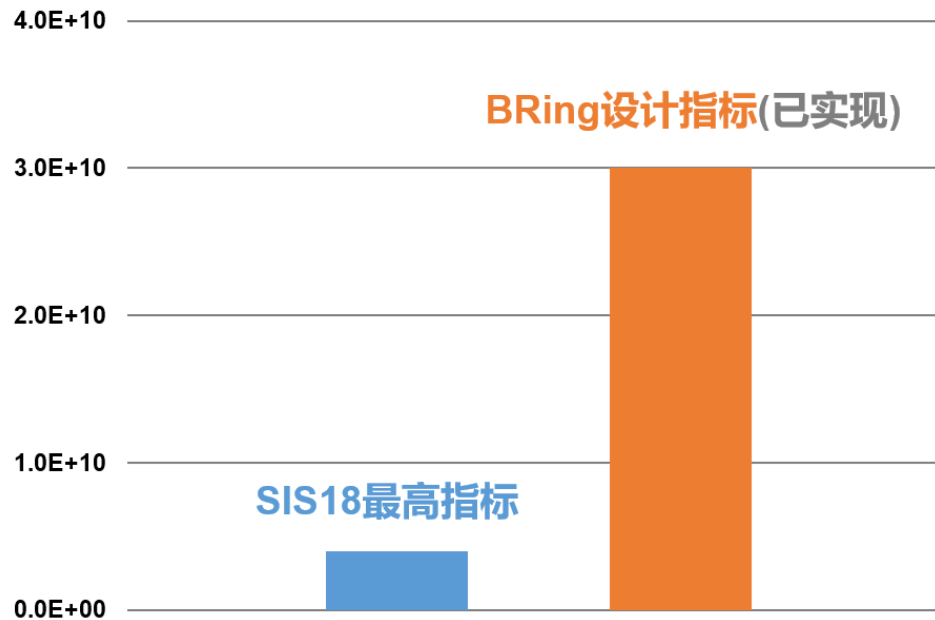


国际重离子脉冲流强新纪录

首次调试超过设计指标，大幅领先国际最高流强



^{18}O 国际最高流强
提高 3 倍



^{209}Bi 国际最高流强
提高 7.5 倍



目录

1. 缪子与缪子源简介
2. HIAF装置进展
- 3. HIAF GeV高能缪子源**
4. 基于HIAF的缪子应用



HIAF高能缪子源

HIAF是我国唯一可开展高能
缪子研究的实验平台

核心
优势

- 国际最高流强脉冲离子束驱动能力
- 天然适配GeV量级、高通量缪子束制备
- HIRIBL可直接扩展为专用高能缪子束线

HIAF束流参数

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

HIAF与国际缪子源对比

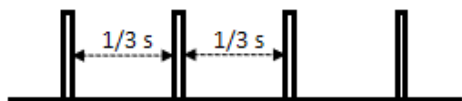
	TRIUMF	PSI	ISIS	SNS	CSNS	JPARC	FNAL	HIAF
注入能量 [GeV]	0.003	0.072	0.07	1	0.08	0.6	0.4	0.048
引出能量 [GeV]	0.52	0.59	0.8	1	1.6	3	8	9.3
磁刚度[Tm]	3.721314	4.021349	4.877887	5.653711	7.861919	12.7499	29.63001	34.0
重复频率 [Hz]	--	--	50	60	25	25	15	3
谐波数	CW	CW	2	2	2	2	84 (81)	2
粒子数(stored)	CW	CW	1.44E+13	1.50E+14	1.57E+13	8.40E+13	4.50E+12	5.0E+13
平均质子数(pps)	1.88E+15	1.53E+16	1.41E+15	8.75E+15	3.92E+14	2.08E+15	6.75E+13	1.5E+14
功率[MW]	0.156	1.44	0.1800	1.4000	0.1000	1.00	0.0864	0.223
说明	低能、截面小 CW表面μ+中子		低能、截面小 脉冲表面μ+中子			高能、截面大 脉冲衰变μ+反向μ		



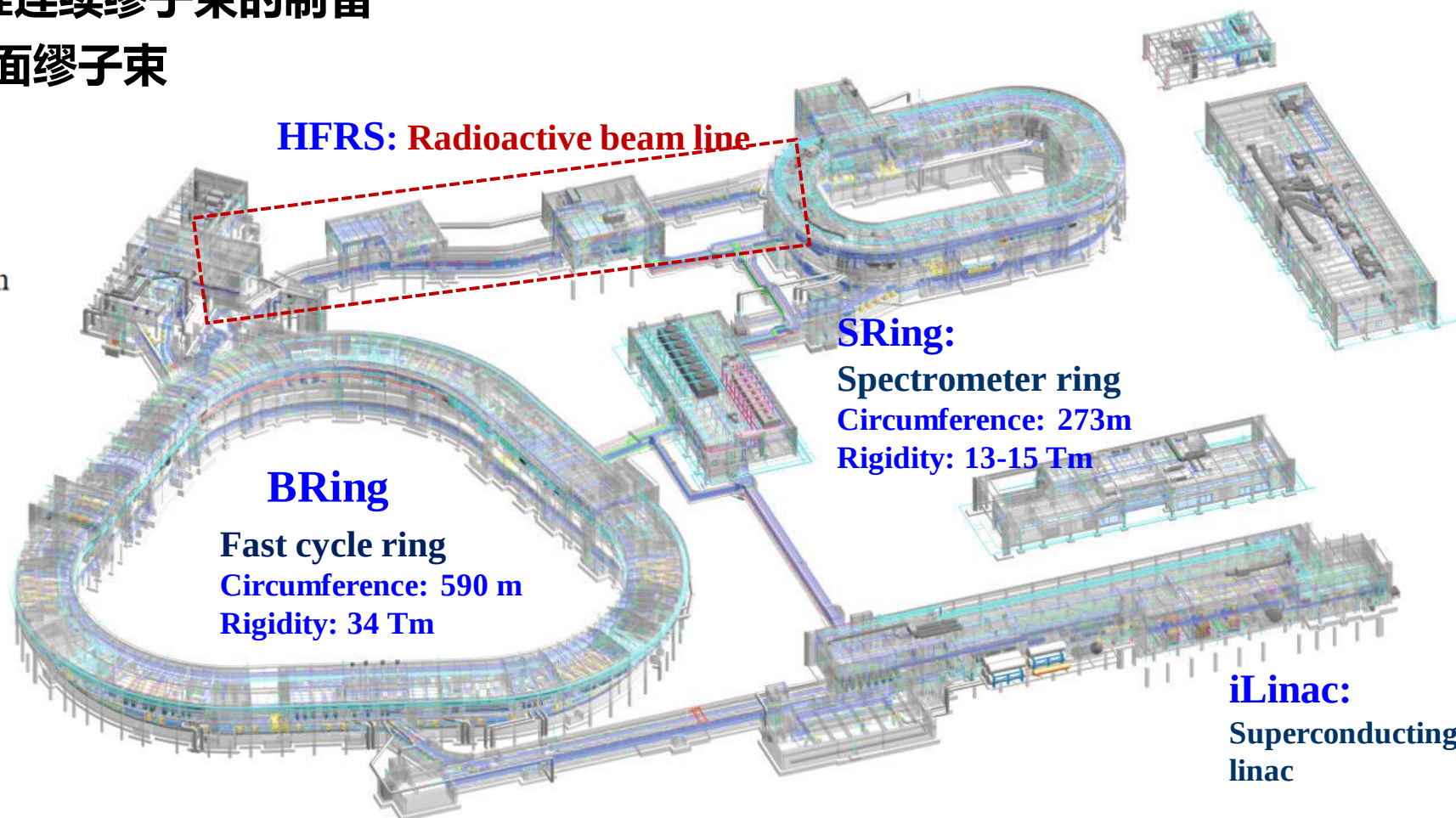
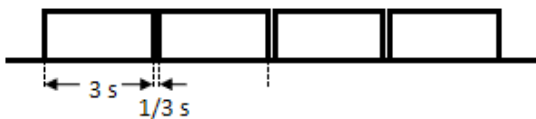
HIAF高能缪子源

- 强流质子/重离子束流驱动的缪子源
- 快/慢引出模式实现脉冲/准连续缪子束的制备
- 可产生高能衰变缪子和表面缪子束

Fast extraction: High-intensity pulsed p/ion



Slow extraction: Quasi-continuous p/ion

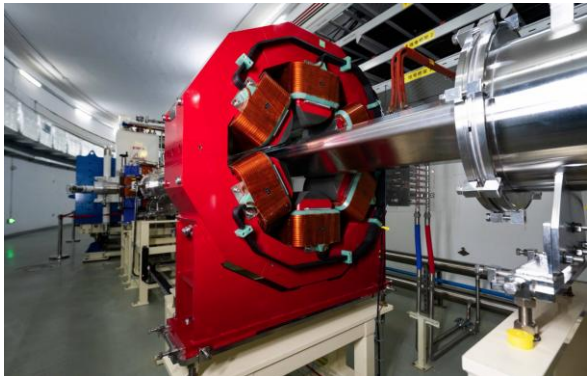
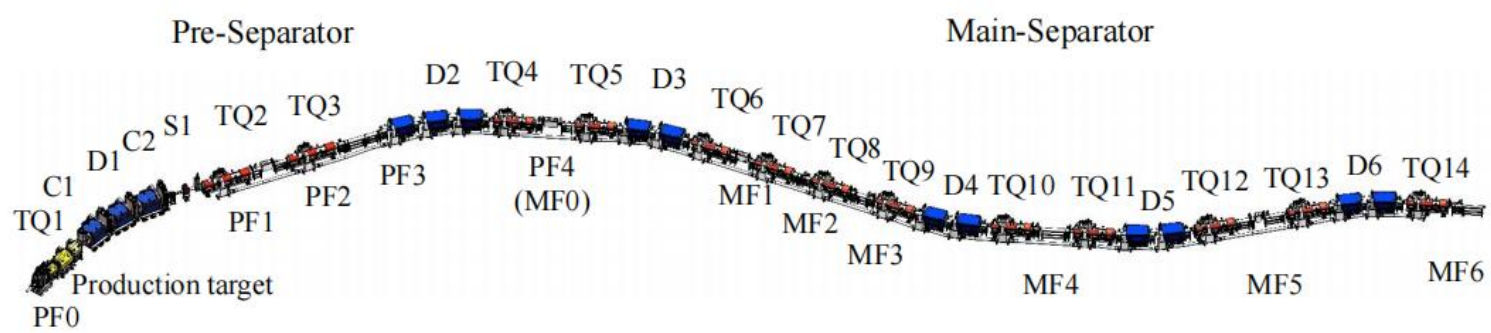




基于HFRS(HIRIBL)的高能缪子束线

长度 [m]	角接受度 [mrad]	动量展宽 [%]	$B\rho_{\max}$ [T·m]
191.38	± 30 (X) ± 25 (Y)	± 2.0	15(25)

最大筛选动量：4.5GeV/c

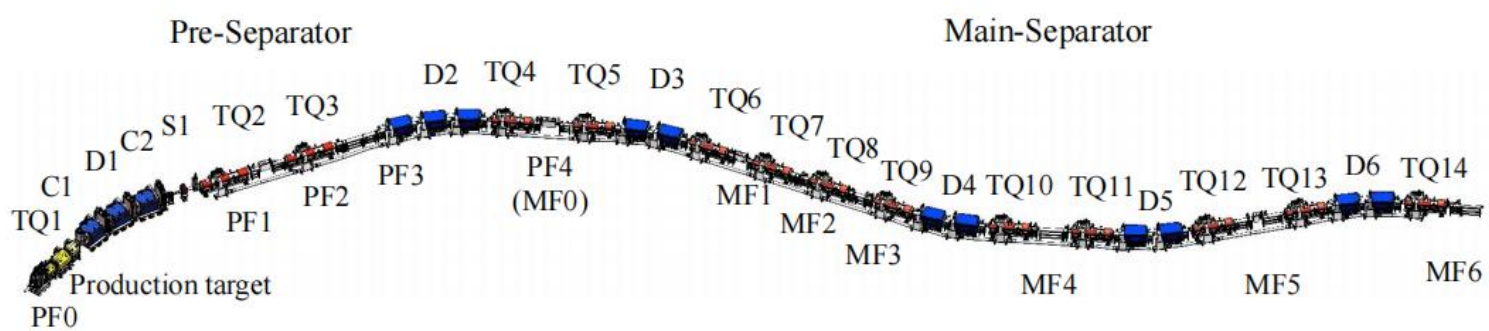




基于HFRS(HIRIBL)的高能缪子束线

长度 [m]	角接受度 [mrad]	动量展宽 [%]	$B\rho_{\max}$ [T·m]
191.38	± 30 (X) ± 25 (Y)	± 2.0	15(25)

最大筛选动量：4.5GeV/c



HFRS and Radioactive beamlines around the world

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

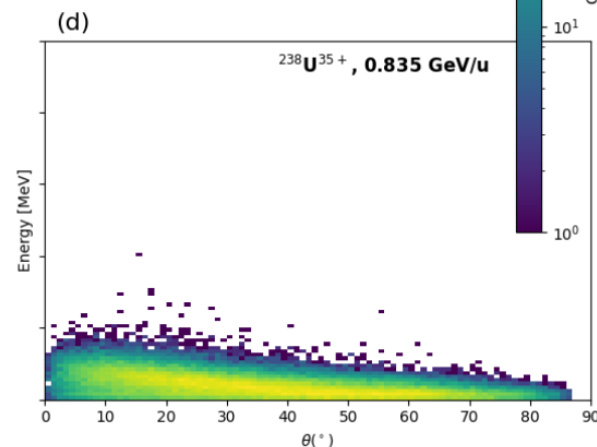
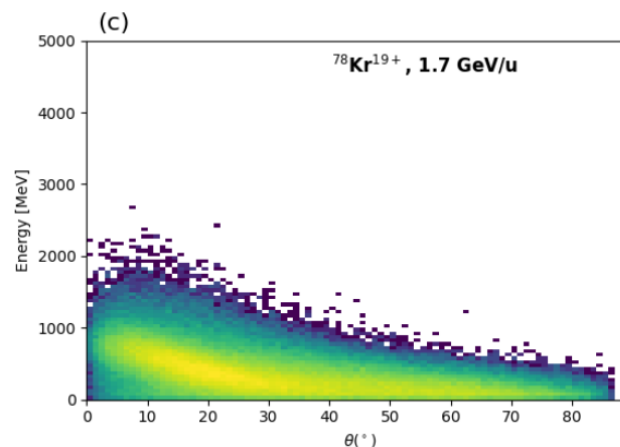
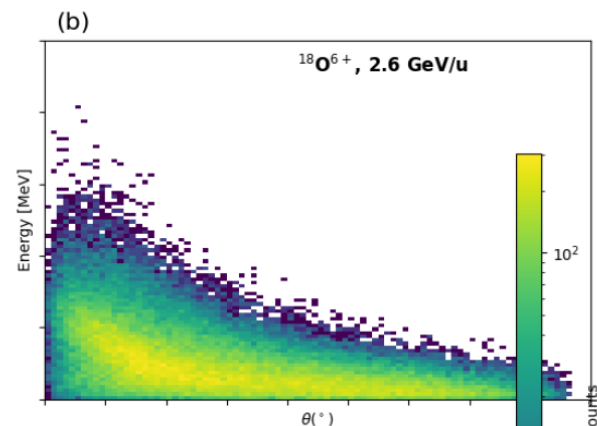
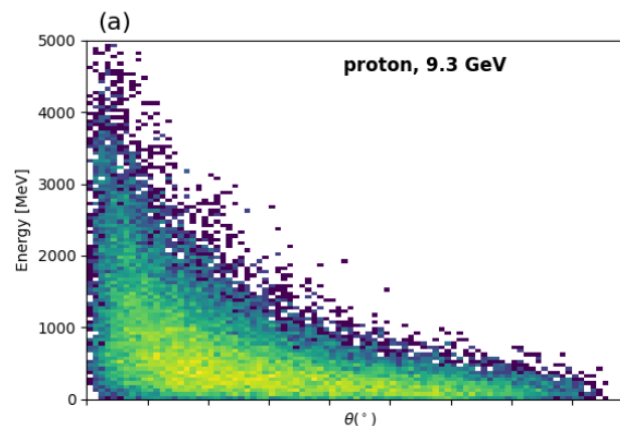
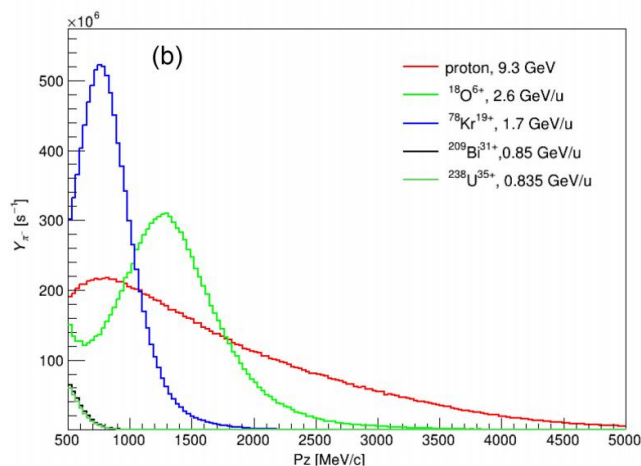
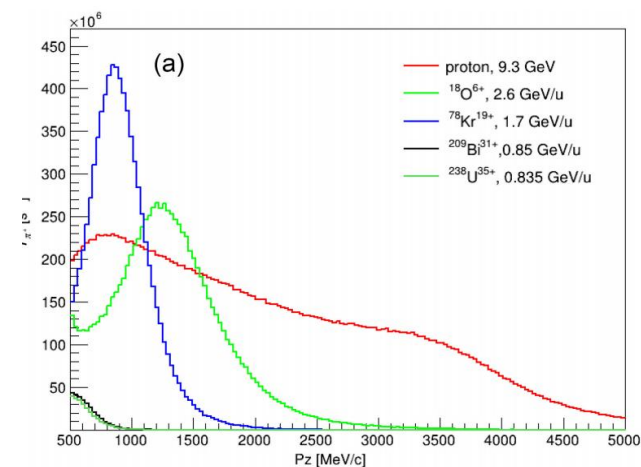


HIAF 缪子源初步计算

□ 缪子产生

- 不同粒子；粒子数100000个；石墨靶；g4beamline 模拟计算

Kinetic energy vs scatter angle distribution of π^+



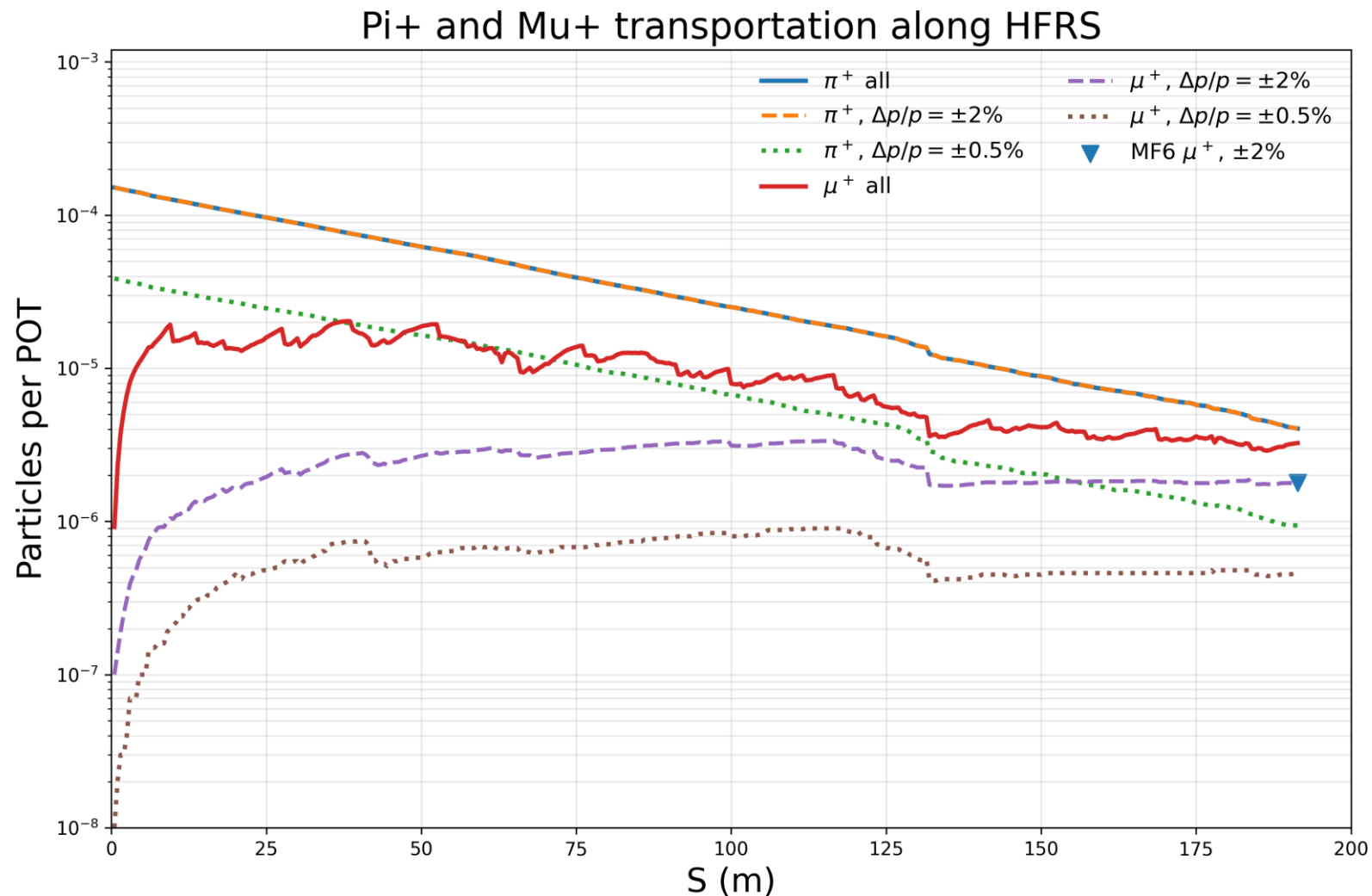


HIAF缪子源初步计算

□ 缪子传输

- Projectile: 4.26 GeV/u C^{6+}
- Muon momenta 1.0 GeV/c

终端缪子通量 $10^5 - 10^6 \mu/s$

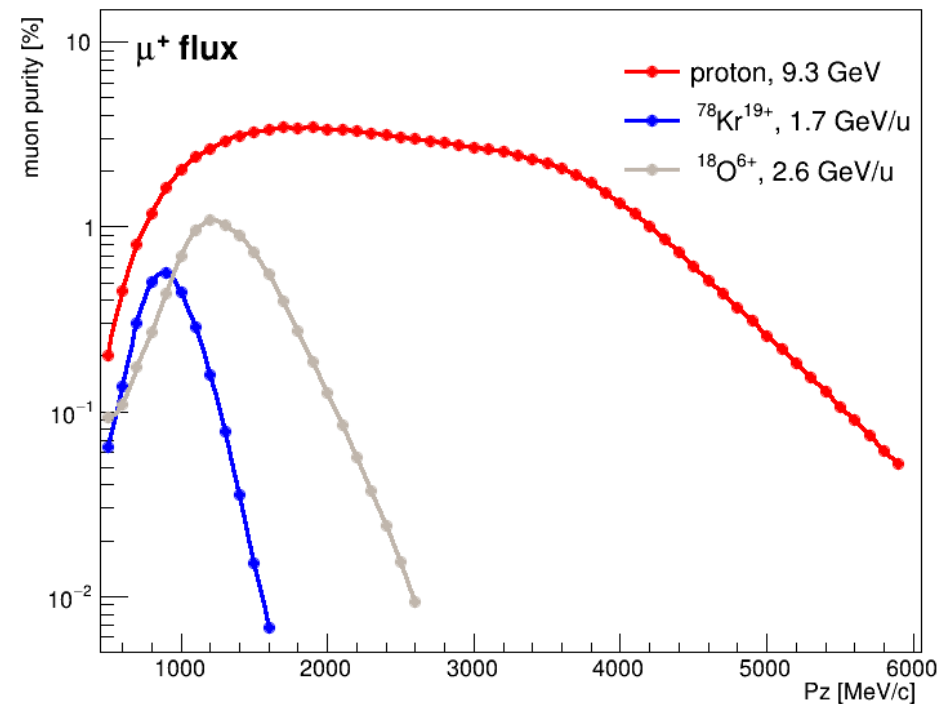
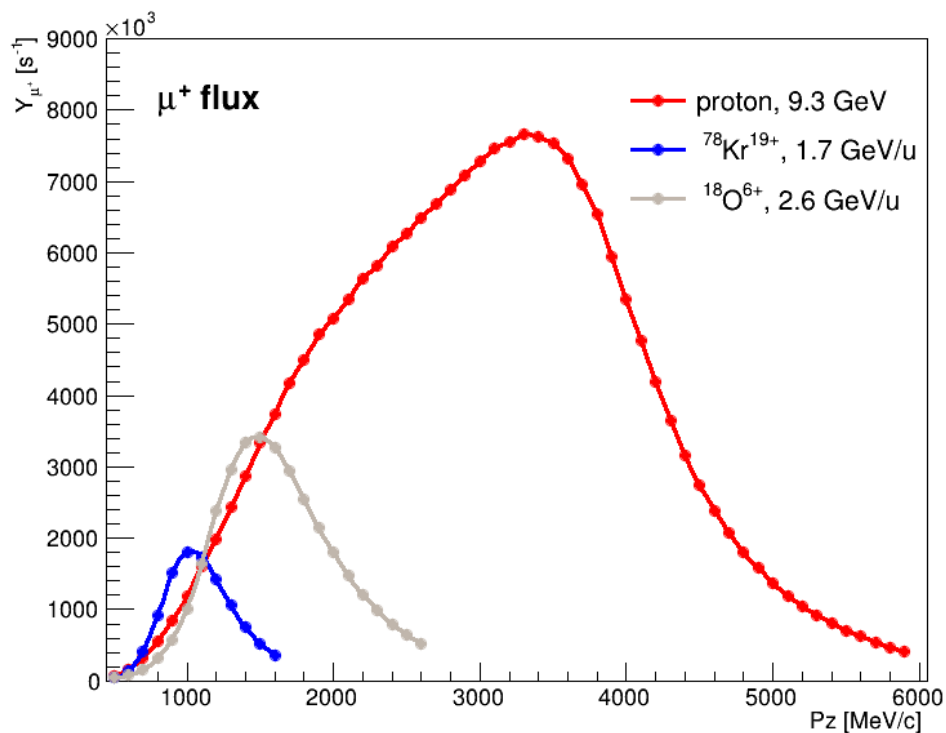




HIAF缪子源初步计算

□ 缪子产额与纯度

μ^+ beam	proton	$^{18}\text{O}^{6+}$	$^{78}\text{Kr}^{19+}$
momentum [GeV/c]	3.5	1.5	1.0
flux intensity [μ^+/s]	8.2×10^6	3.5×10^6	1.8×10^6
muon purity	2.0%	0.80%	0.60%



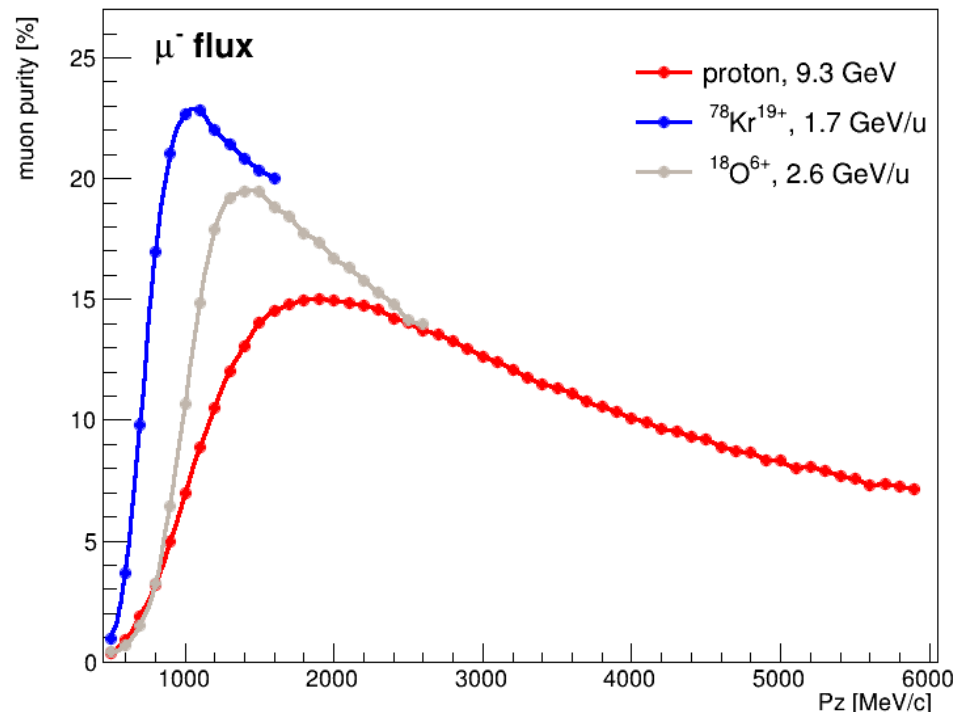
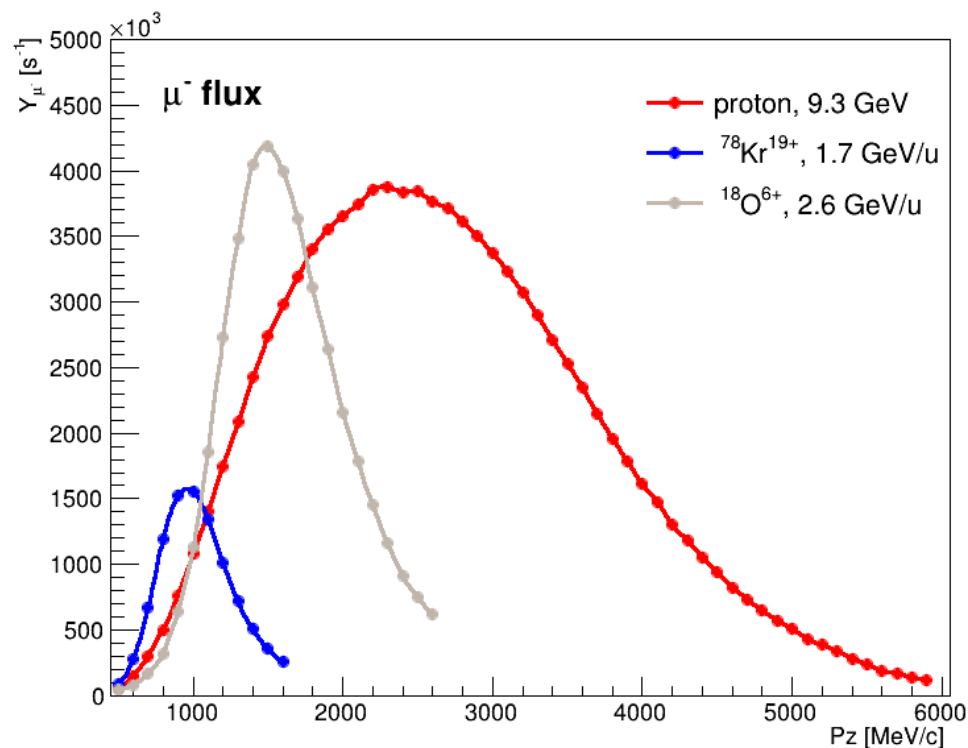
HIAF装置上几种典型主束所产生 μ 子产额及相应纯度



HIAF缪子源初步计算

□ 缪子产额与纯度

μ^- beam	proton	$^{18}\text{O}^{6+}$	$^{78}\text{Kr}^{19+}$
momentum [GeV/c]	2.3	1.5	1.0
flux intensity [μ^-/s]	3.8×10^6	4.2×10^6	1.6×10^6
muon purity	13%	20%	23%



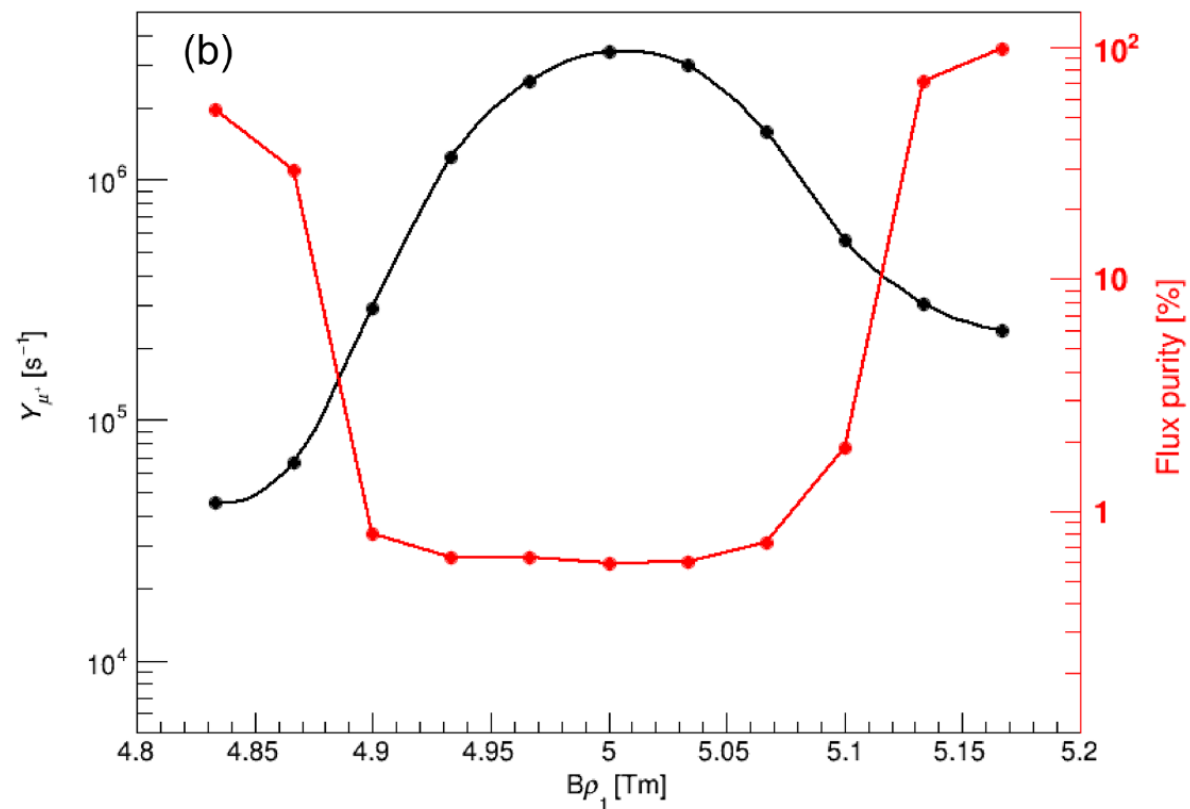
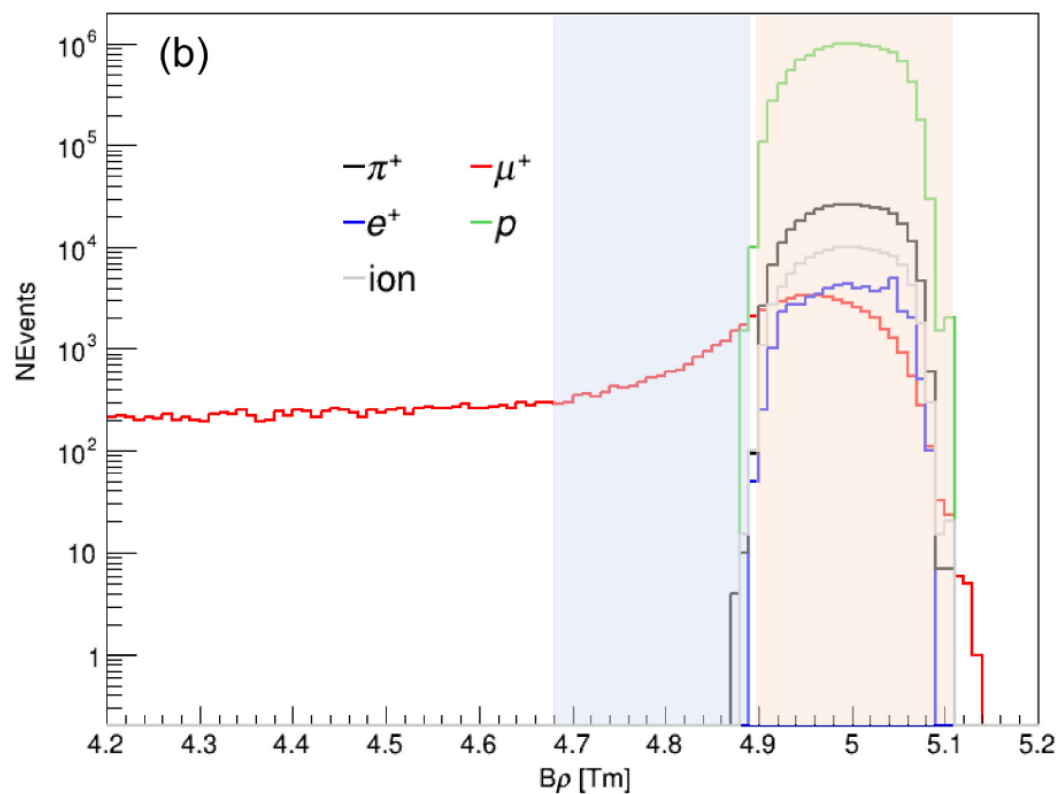
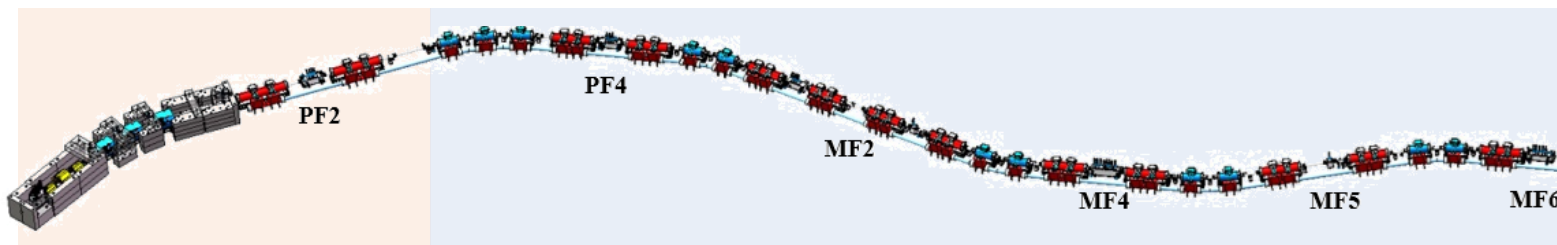
HIAF装置上几种典型主束所产生μ子产额及相应纯度



HIAF 缪子源初步计算

□ 缪子纯化

➤ 磁钢度筛选





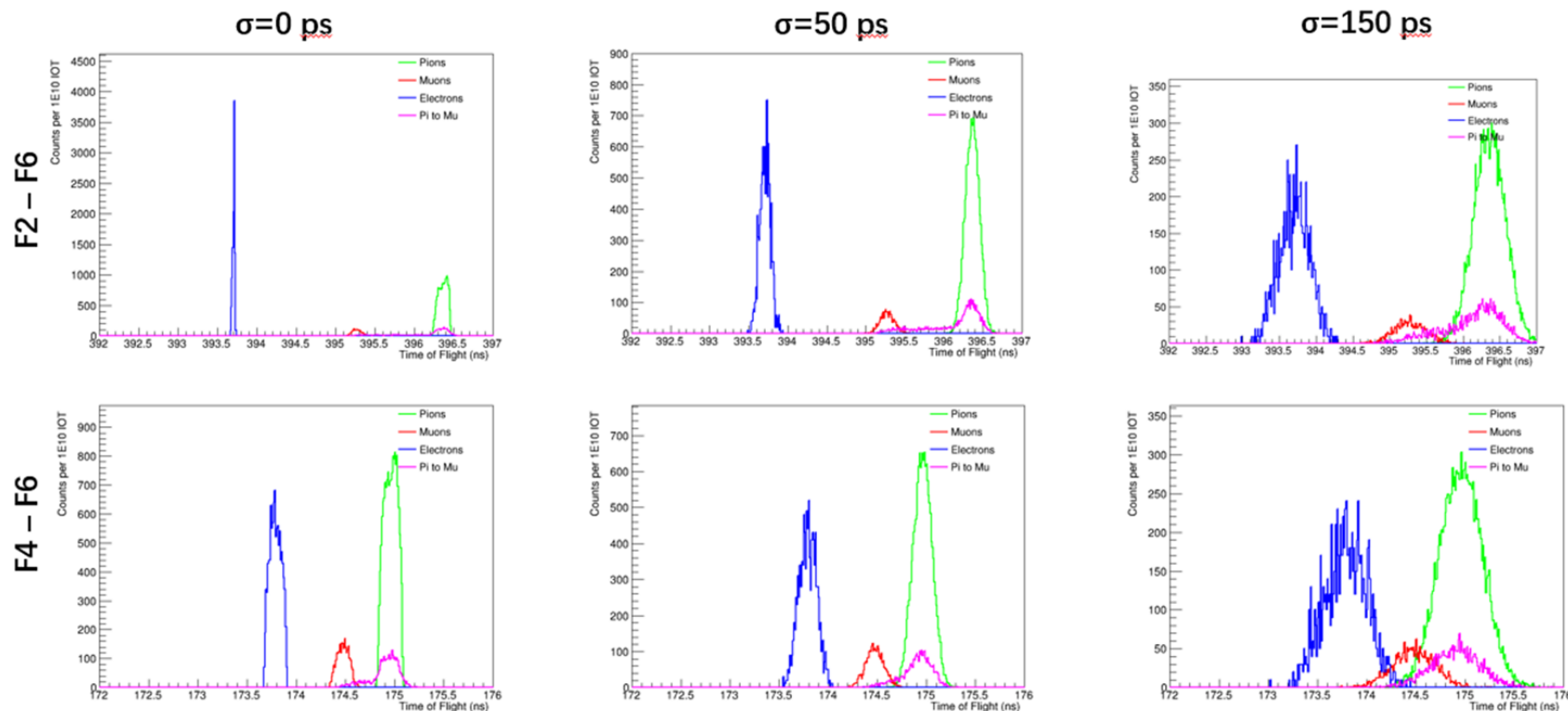
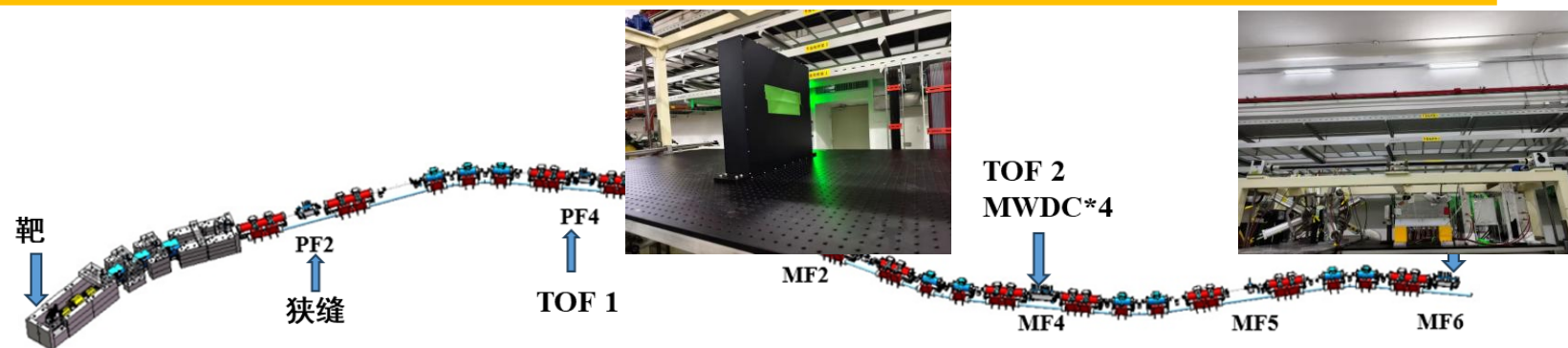
HIAF缪子源-实验测试

□ 缪子产生与鉴别

- 主束 $^{16}\text{O}^{8+}$ ，能量：4.26 GeV/u
- 缪子动量800MeV/c

- 目标：
 - 产生并鉴别缪子
 - 筛选并纯化缪子
 - 缪子成像应用

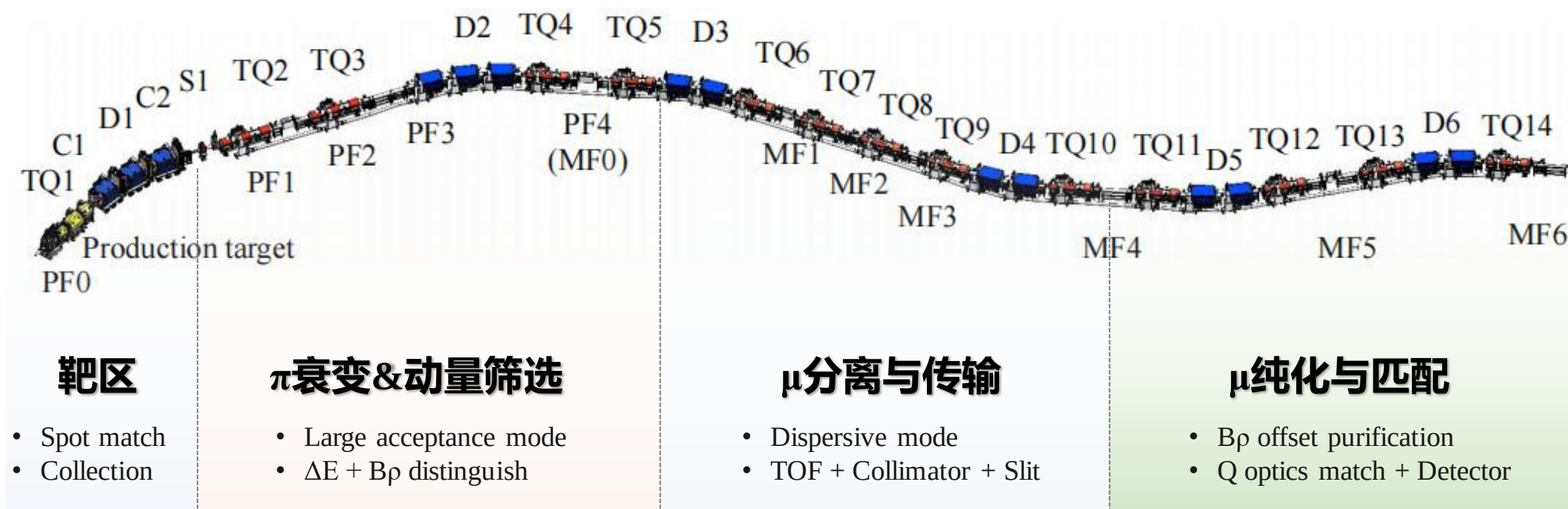
- 识别方式：
 - 做出粒子的TOF谱，可以清晰看出几个峰，峰位与理论计算值比较，作为识别缪子的依据





HIAF 缪子源-未来计划

未来目标：产额 $> 10^6 \mu/s$, 纯度 $> 95\%$, 能散 $< \pm 1\%$





目录

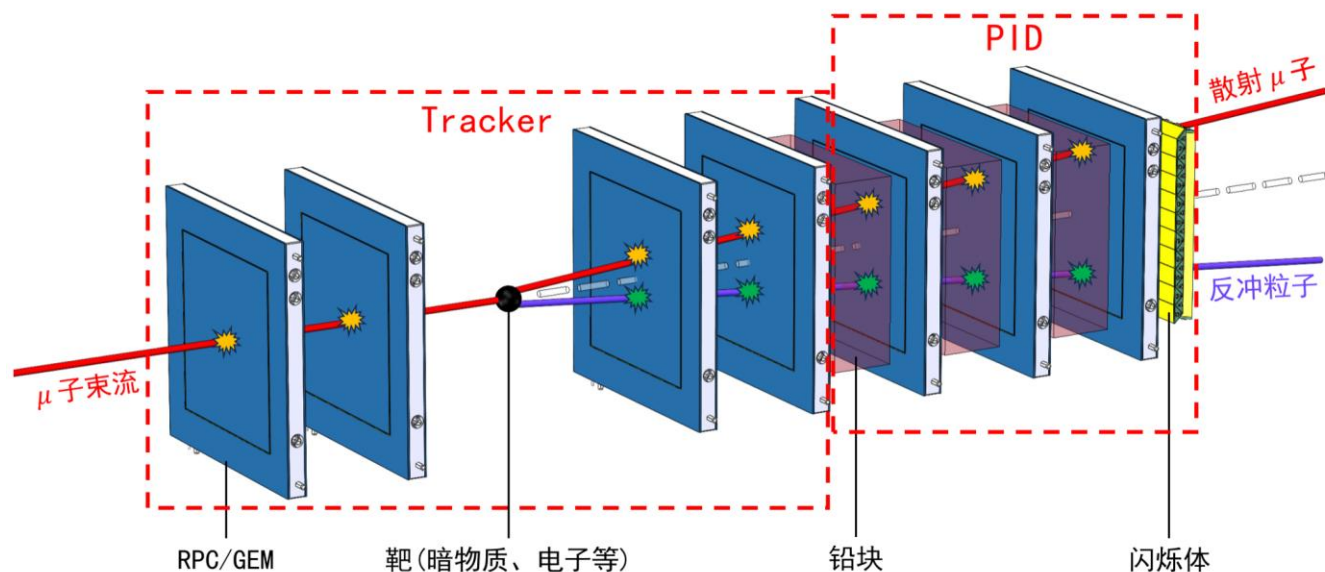
1. 缪子与缪子源简介
2. HIAF装置进展
3. HIAF GeV高能缪子源
- 4. 基于HIAF的缪子应用**



HIAF 缪子实验规划

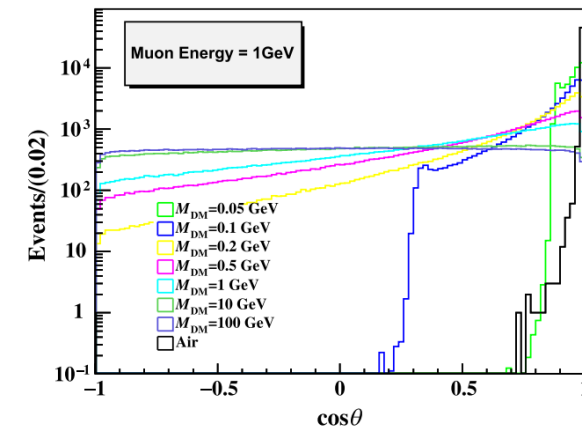
Probing and Knocking with Muons

- One of the highest intensity ($4e6/s$) GeV energy muon around world
- Direct searches for DM
- Searching dark boson

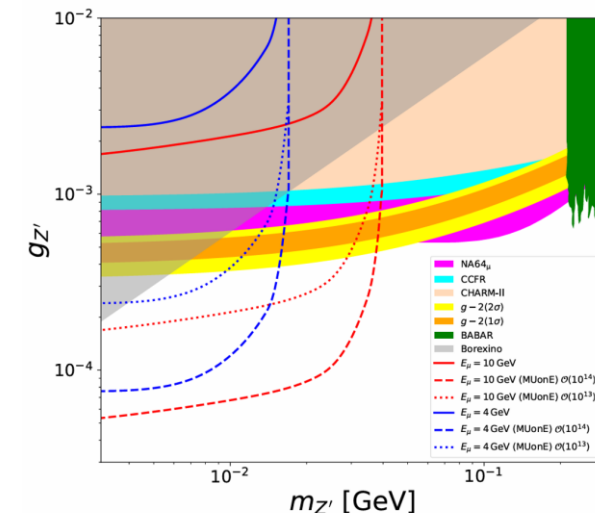


PK μ @HIRIBL

Credit: Prof. Qiang Li



Searching for Muon Philic Dark Sector



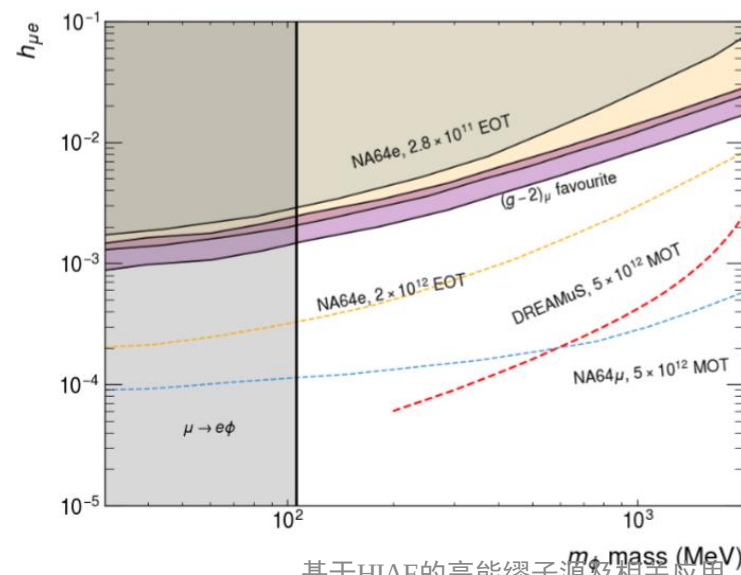
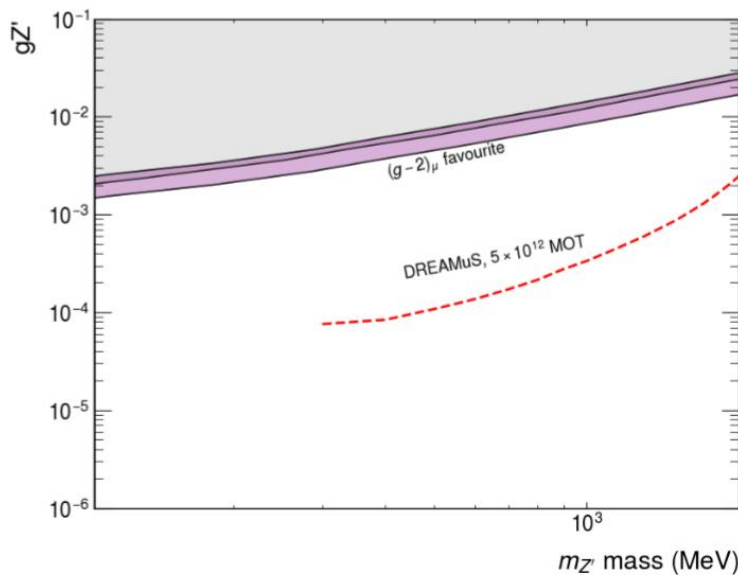
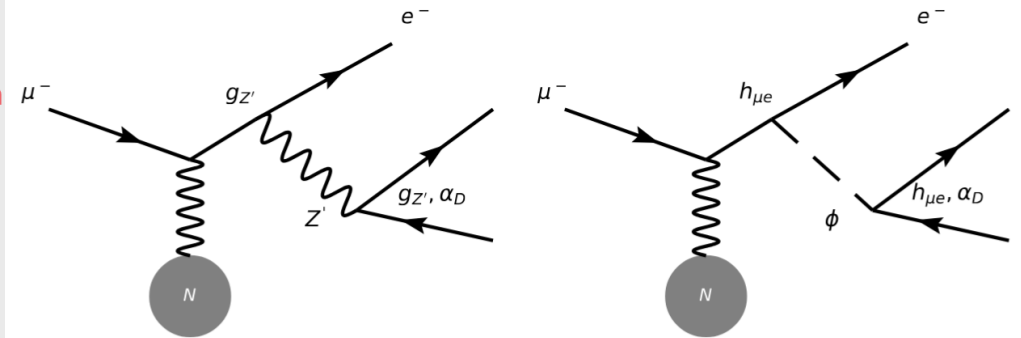
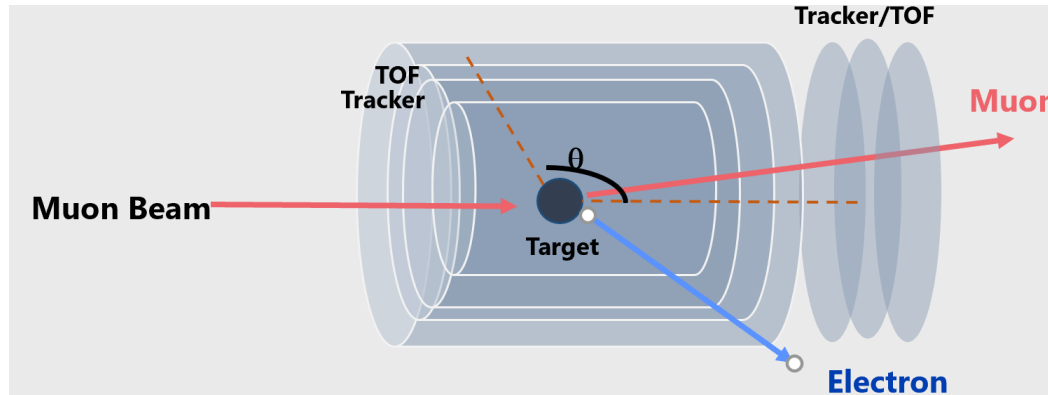
Could be more sensitive to X boson at 1-10 MeV region!
(to appear soon on arXiv)



HIAF 缪子实验规划

DREAMuS: Dark matter REsearch with Advanced Muon Source

- Dark matter (χ) from a flavor-violating Z' or ϕ scalar particle
- 3 GeV muon interaction with 22cm lead target



Best limit on flavor violating scalar ϕ model in the low mass region

- 90% C.L. limit on $g_{Z'}$: $\sim 10^{-4} - 10^{-5}$
- 90% C.L. limit on $h_{\mu e}$: $\sim 10^{-4} - 10^{-5}$

Credit: Prof. Liang Li



HIAF 缪子实验规划



LUNE : Low-energy mUon-Nucleon scattering Experiment

Assuming 20 cm LH2 target

15 days @ 1.0 GeV

30 days @ 1.5 GeV

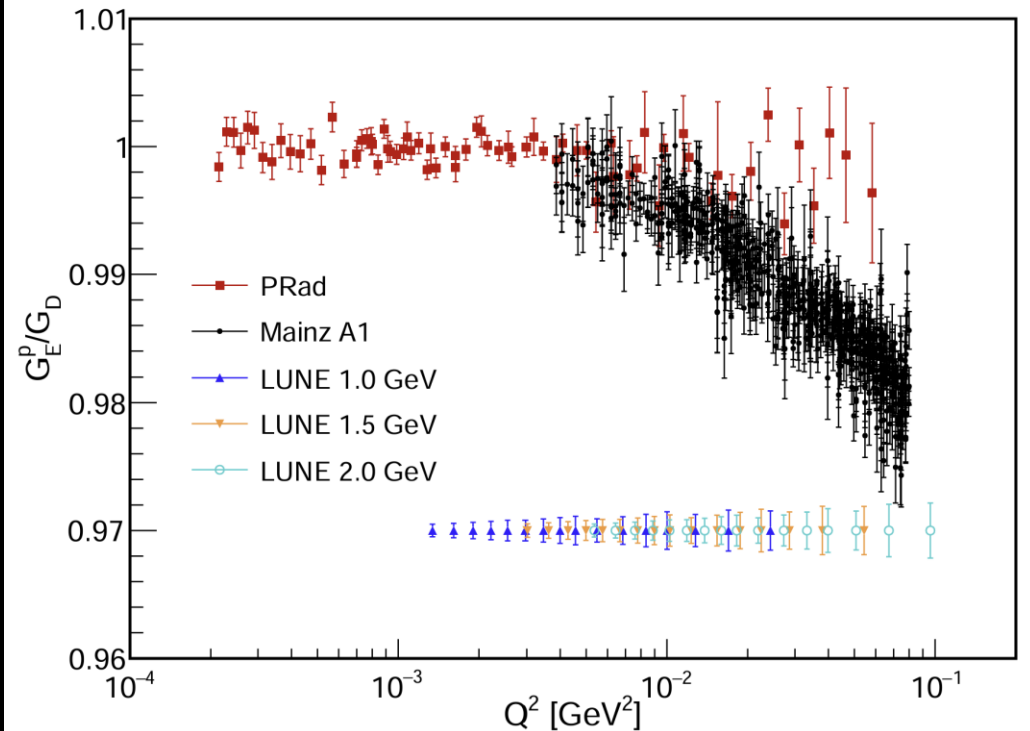
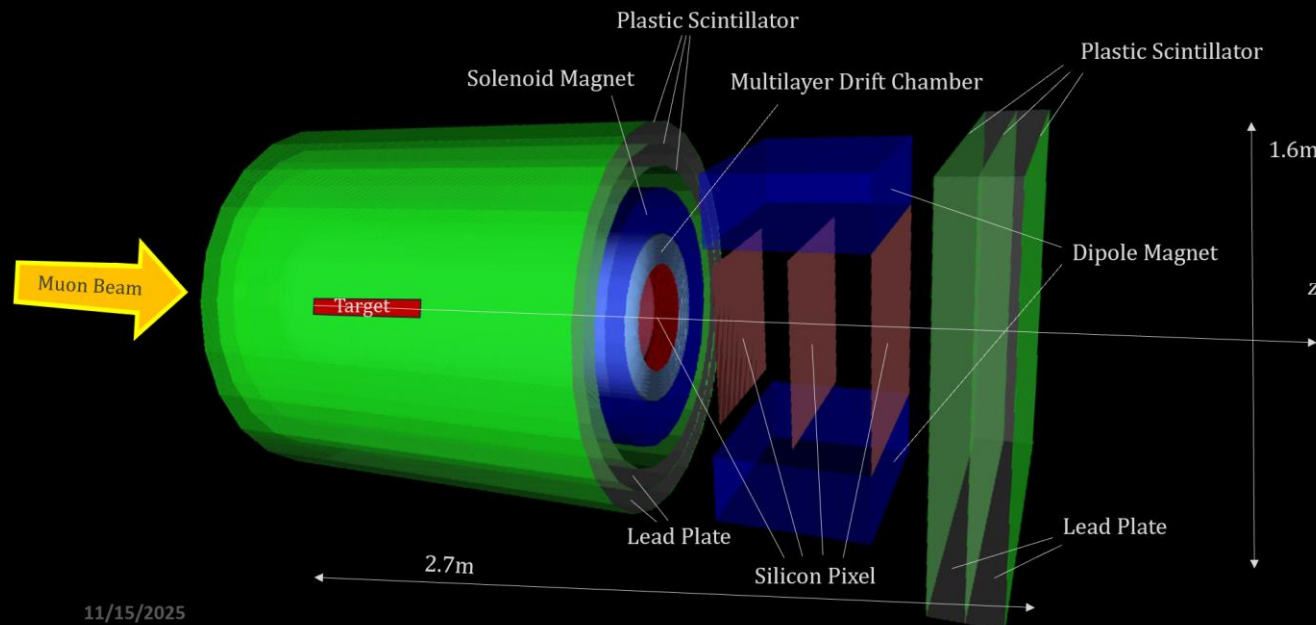
60 days @ 2.0 GeV

Stat. uncertainty on proton radius:

~ 0.0022 fm ($\sim 0.3\%$)

Compared to 1% (Amber), 0.5% (MUSE)

First version of Lune Detector



11/15/2025

7/8/2026

基于HIAF的高能缪子源及相关应用

Credit: Prof. Hang Yin

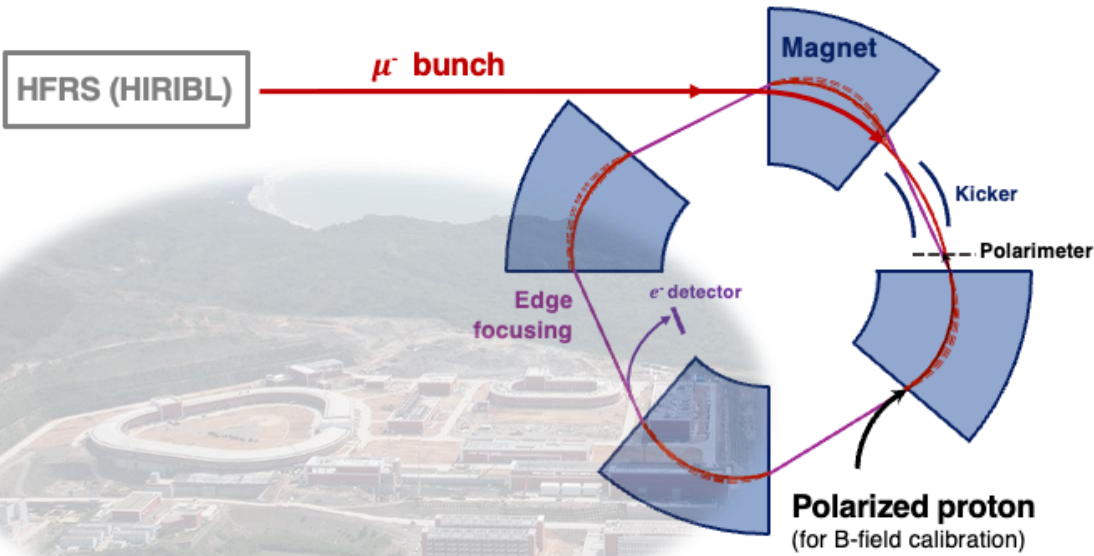


HIAF 缪子实验规划

CANTON- μ : Creative Anomalous magNetic momenT Observation with Negative-muon

We propose a new muon g-2 experiment using HIAF's unique GeV-scale, high intensity muon:

- It prioritizes *negative* muons, offering both precision SM measurement and probe to New Physics.
- The precision aims at 0.05 ppm, surpassing Fermilab's 0.14 ppm - a truly **next-generation experiment**.



Facilities	CERN / BNL / FNAL	J-PARC	HIAF
Muon momentum	3.1 GeV/c	300 MeV/c	Flexible 2-4 GeV (HIAF) 10-20 GeV (HIAF-U)
Magnet	Full-ring magnet	Full-ring magnet	Sector magnet
Storage	B-field & E-field	B-field	Edge B-field focusing w/o E-field
Field calibration	NMR calibration	NMR calibration	Calibration via polarized proton
Data taking	650 days (FNAL)	> 300 days (expected)	100-200 days
Precision	μ^+ : 0.14 ppm (FNAL) μ^- : 0.7 ppm (BNL)	μ^+ : 0.46 ppm $\rightarrow$ $\sim$ 0.1ppm	μ^-/μ^+ : 0.1 ppm $\rightarrow$ 0.05 ppm

More details: see Ce Zhang's [talk @ PKU seminar \(Chinese\)](#) / [MPP2025 workshop \(English\)](#); the paper will be released on arXiv soon.

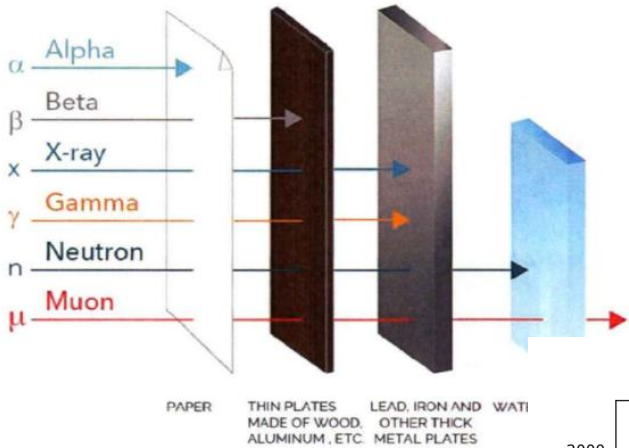


HIAF 缪子实验规划

- ❑ 缪子成像对重核、高密物质灵敏，可对物质内部结构无损成像
- ❑ 加速器缪子成像物质分辨等能力显著强于宇宙射线缪子成像

缪子成像显著优势

- 穿透力更强
- 对高密度高Z材料敏感
- 清洁安全、无损伤
- 无需防护



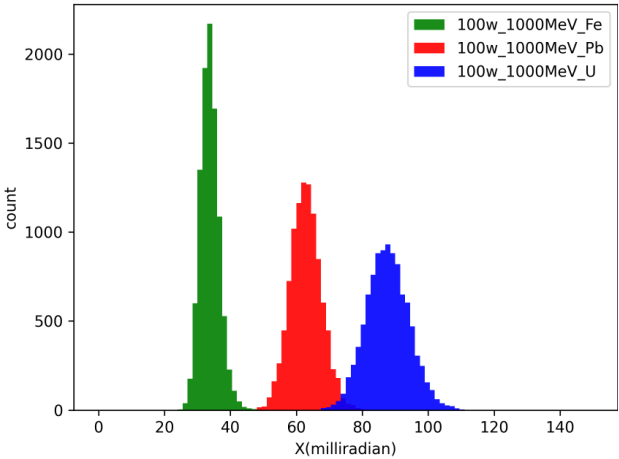
加速器缪子源

- 高能量，能量单一性强
- 高通量，方向单一
- 能量可调

特点	宇宙线缪子	加速器缪子源
通量	0.02/cm ² /s	>10 ⁴ /cm ² /s
能量分布	范围宽	单色、自主可调
方向	随机、不稳定	稳定可控
优劣势	易获取、精度差	精度高、效率高

加速器缪子

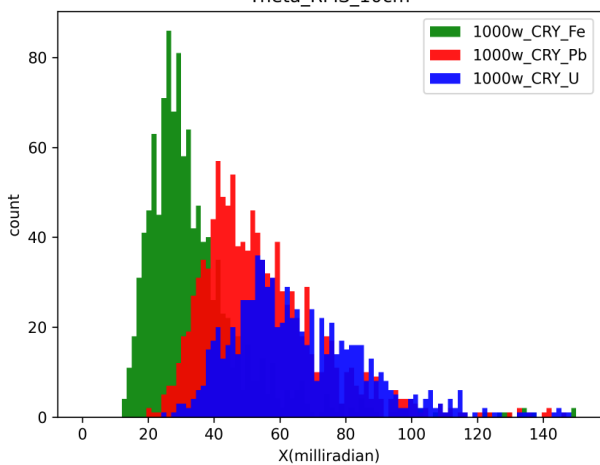
Theta_RMS_10cm



V.S.

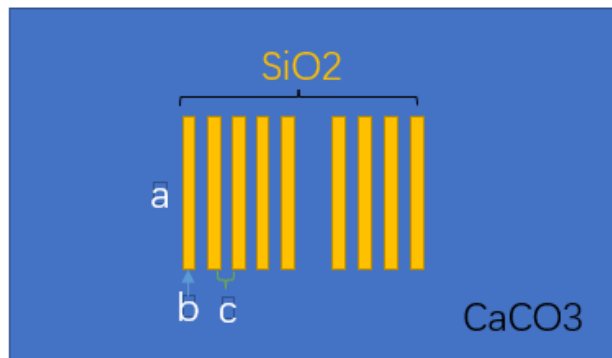
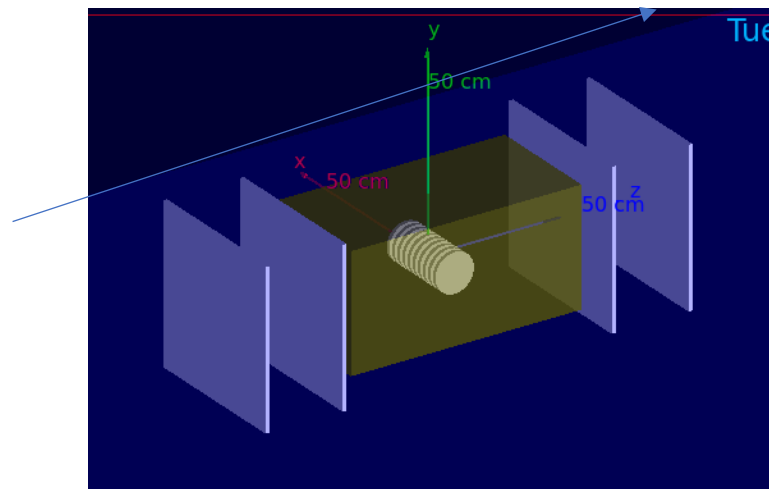
宇宙射线缪子

Theta_RMS_10cm



加速器单能缪子成像有很强的物质分辨能力

□ 加速器缪子成像的密度分辨率



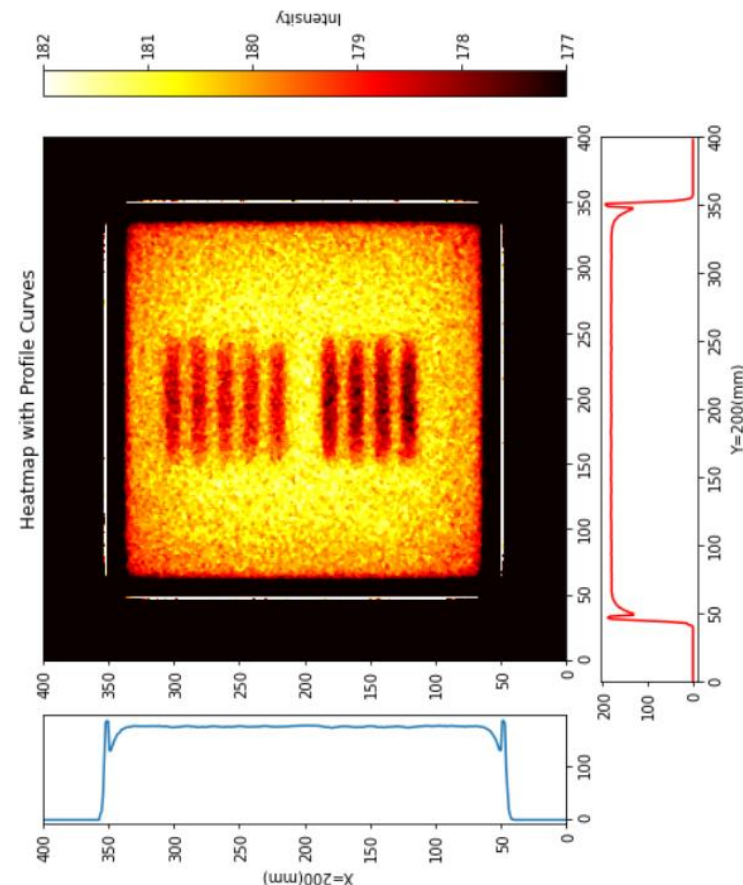
$a=10\text{cm}$, $b=1\text{cm}$, $c=1\text{cm}$

被CaCO3材料包裹的SiO2材料

- CaCO3的尺寸为：30cm×30cm×60cm
- SiO2的为直径10cm，厚度1cm的圆盘
- 束流缪子的能量为：1GeV

二氧化硅实际的密度为2.65g/cm³

碳酸钙的实际密度为2.71g/cm³



□ 1GeV的缪子，~6e6/cm²的通量下，可以区分CaCO3包裹体内密度差异0.1g/cm³的SiO2



总结

- **HIAF具备建设GeV能区高能缪子源的独特优势，可充分发挥强流重离子束流和已有放射性束线平台优势，形成国际特色的高能缪子研究能力。**
- **即将开展首次缪子测试实验，未来将围绕缪子产生、收集、输运、纯化等关键技术开展系统研究，建立高品质缪子束流制备能力，目标实现产额 $>10^6$ μ/s 、纯度 $>95\%$ 、能散 $<\pm 1\%$ 的高能缪子束流。**
- **依托高品质缪子束，支撑暗物质与新物理搜索、 μ 子g-2、缪子散射及高精度缪子成像等前沿研究，构建"HIAF高能缪子源+基础科学+交叉应用"的发展布局，打造我国高能缪子研究的重要平台。**

谢谢