



第三届惠州大装置高精度物理研讨会, 惠州, 2025.04.21

CiADS缪子源设计进展及展望

Muon Science and Technology application platform at CiADS (MuST-CiADS)

报告人: 蔡汉杰

代表CiADS缪子源设计团队

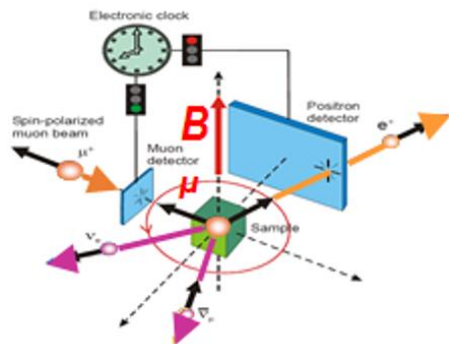
中国科学院近代物理研究所



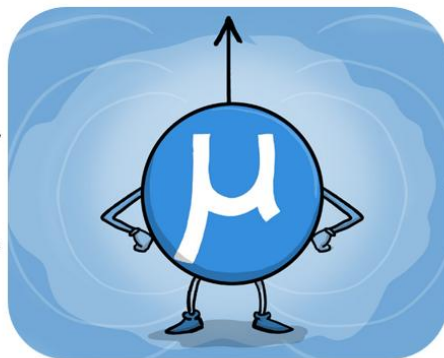
背景

The story of μ SR began with an American revolution in theoretical physics. T.D. Lee and C.N. Yang, co-winners of the Nobel Prize in 1957, predicted that any process governed by the weak nuclear

μ SR is a collection of methods that uses the muon spin to look at structural and dynamical processes in the bulk of a material on an atomic scale.



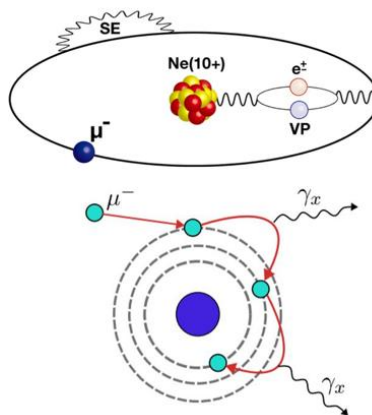
缪子源应用



MuSR: 磁性材料; 超导体; 半导体; 电池/太阳能; 生物物理; 化学等

粒子物理: MEG、Mu3e、Mu2e、MACE、反常磁矩、电偶极矩等

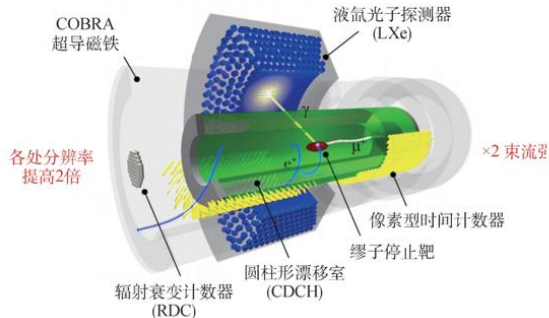
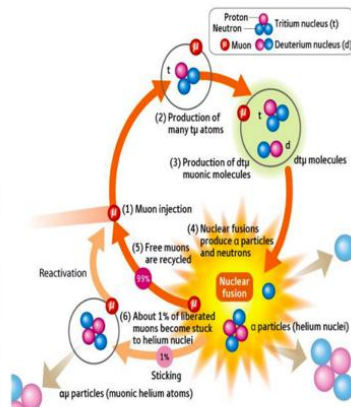
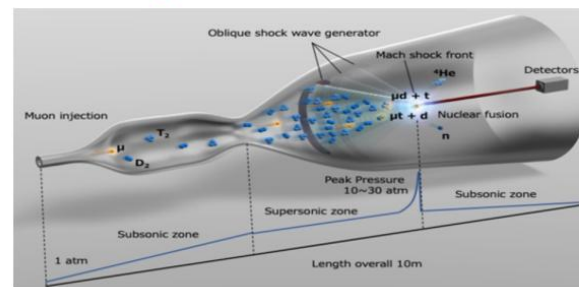
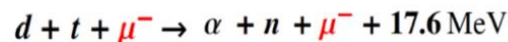
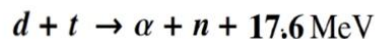
缪原子X射线精确测量/元素分析; 催化冷聚变; 缪子成像; 缪子素研究及应用等



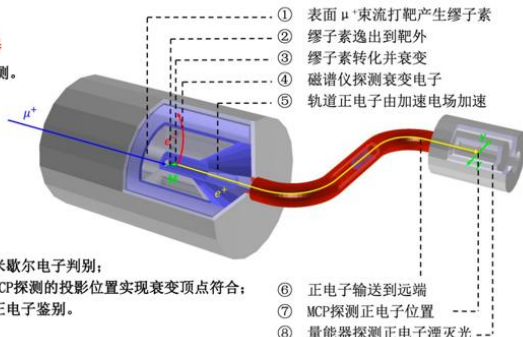
MIXE精确测量: 强场QED精确检验; 核结构研究



MIXE元素分析: 小行星样品及陨石样品、古文物、医药样品、工业应用等



基本方法:
磁谱仪、MCP、量能器
三个探测器的符合探测。



- 通过磁谱仪实现米歇尔电子鉴别;
- 通过谱仪径迹和MCP探测的投影位置实现衰变顶点符合;
- 通过量能器实现正电子鉴别。

- ① 表面 μ^+ 束流打靶产生缪子素
- ② 缪子素逸出到靶外
- ③ 缪子素转化并衰变
- ④ 磁谱仪探测衰变电子
- ⑤ 轨道正电子由加速电场加速
- ⑥ 正电子输送到远端
- ⑦ MCP探测正电子位置
- ⑧ 量能器探测正电子湮灭光

国内相关研究

1. 基于 μ SR技术的凝聚态物理实验

- 超导、半导体、磁性材料、量子临界性、非费米液体行为等（复旦、华东师范、物理所、浙大、中科大、上交等）

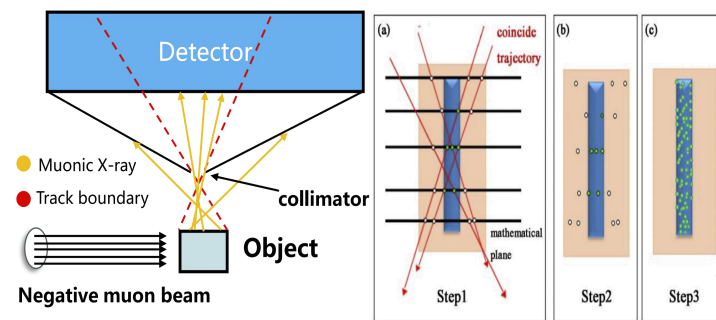
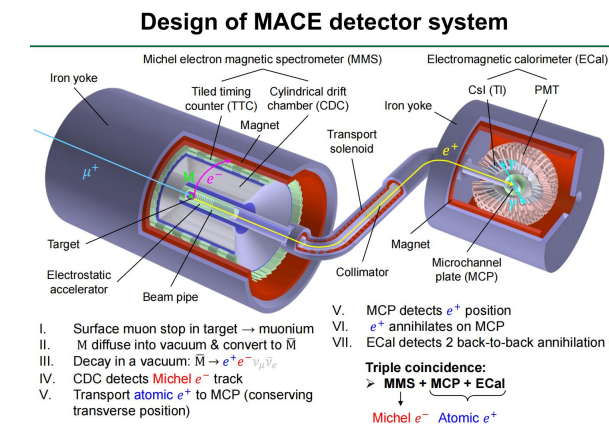
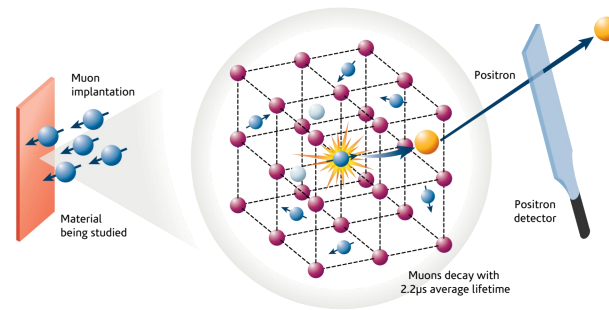
2. 高精度缪子物理实验

- 深度参与Mu2e、COMET、g-2/ μ EDM等国际缪子实验（高能所、上海交大、中山大学、近物所等）
- MACE实验计划，CDR发布（中大）

3. 缪原子谱学研究及MIXE应用

- 缪原子X射线检验强场QED（proposal, SCNT）
- 缪原子光谱研究核结构（华中师大）
- 缪致X射线的元素分析及3D重建技术（中科大、南华等）

.....





■ 功率及强度

- 束流功率进入兆瓦时代，缪子源强PSI（连续型）和J-PARC（脉冲型）均达到 $10^8/s$ 水平
- PSI升级计划HiMB项目启动，目标 $\sim 10^{10}\mu^+/s$ ，29年建成。

■ 现有缪子装置

- 4台大型缪子源（2脉冲+2连续）+1台小型（连续）
- 3条专用缪子束线，用于缪子物理实验

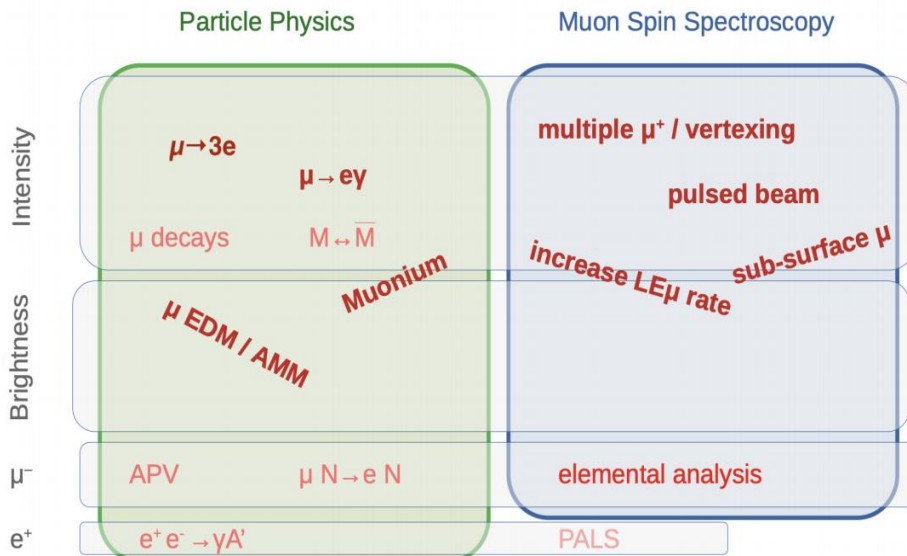
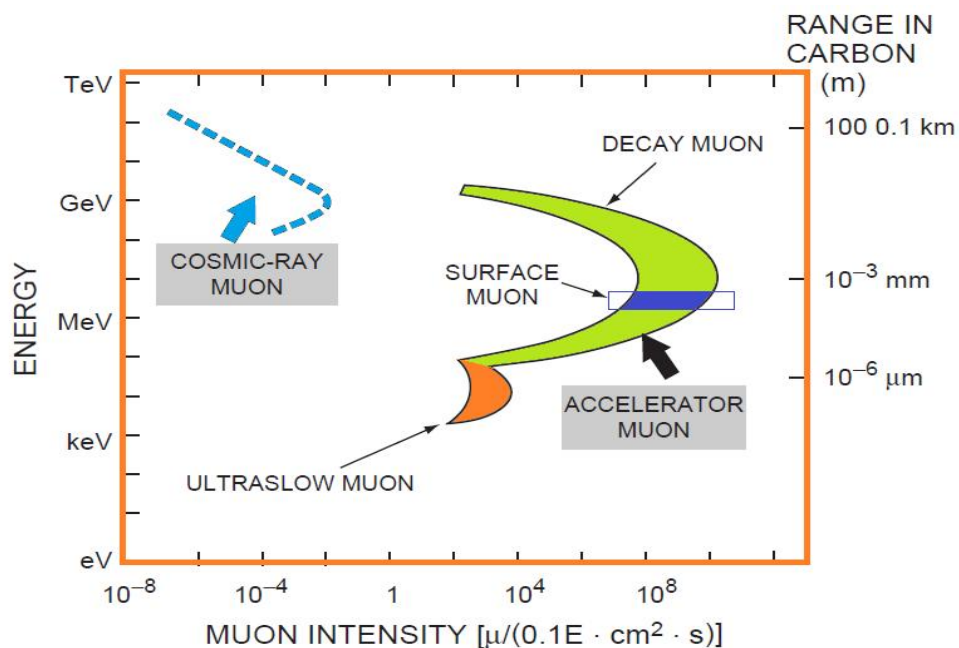
■ 未来装置

- CSNS 和 RAON 在建
- CiADS、HiAF、SHINE、SNS等

国内外主要缪子源参数（含在建）

缪子源类型	缪子源状态	依托装置/国家	束流能量 (MeV)	打靶束流功率 (kW)	功率损失 [#] (%)	表面缪子流强 (1/s)
脉冲束	运行	J-PARC/日本	3000	1000	6.5	10^7
	运行	ISIS/英国	800	160	4	10^6
	在建	CSNS/中国	1600	20	100	10^6
连续束	运行	PSI/瑞士	590	1200	30~40	10^8
	运行	RNCPCW/日本	400	0.4	100	10^5
	运行	TRIUMF/加拿大	520	75	100	10^6
	在建	RAON/韩国	600	400	100	10^7

- **束流时间:** PSI为例, $\mu\text{SR} \sim 65\%$ (30%~40%用户需求, 瑞士国内用户40%) ; 粒子物理+其他应用~35%
- **源强:** 高精度实验; 亚表面缪子/慢缪子应用
- **趋势:** 更多束线; 超高源强 ($10^9 \sim 10^{10}$) ; 应用拓展 (新想法、小实验) ; 新技术 (产生、收集传输、冷却/加速、探测)



➤ 高精度缪子物理实验计划及核心指标

实验计划	实验	实验室	目标精度	时间	需要源强 (1/s)
MEG-II	$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$	PSI	10^{-14}	2024+	10^8
Mu3e-II	$\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$	PSI	10^{-16}	2029+	$>10^9$
COMET-II	$\mu^- N \rightarrow e^- N^*$	J-PARC	10^{-17}	2030+	10^{11}
Mu2e-II	$\mu^- N \rightarrow e^- N^*$	FNAL	10^{-18}	2030+	10^{11}
MACE	$\mu^+ e^- \rightarrow \mu^- e^+$	SMOOTH	10^{-14}	2028+	$A \nu 10^8 / P \kappa 10^9$

■ 加速器条件

- CSNS-I、CSNS-II、CiADS、HiAF和SHINE等强流加速器。

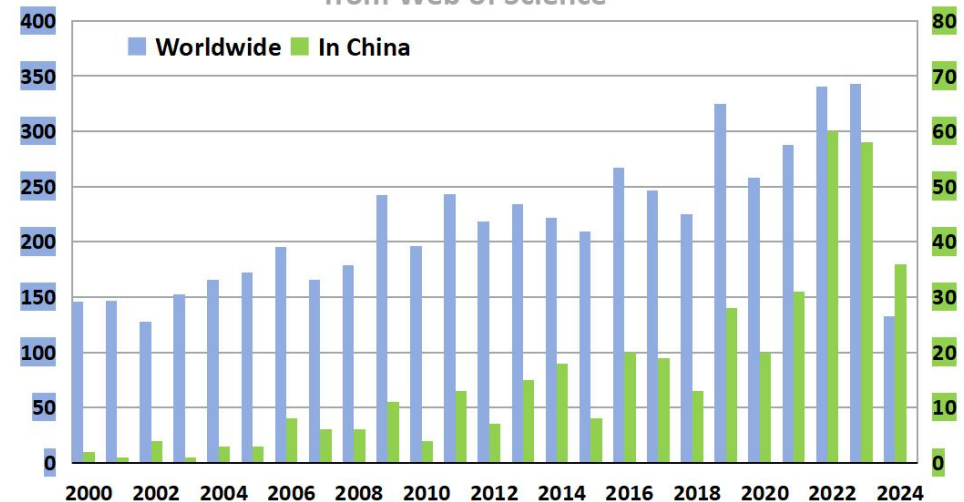
■ 缪子源

- 历程：未雨绸缪——百花齐放——R&D加速

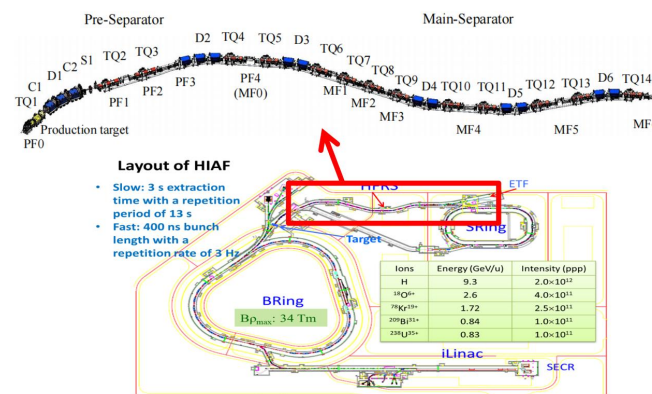
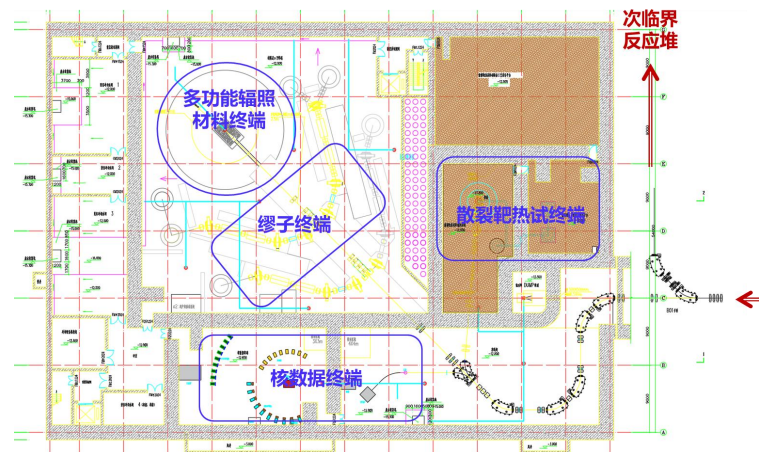
➤ 项目/计划：

- 1、CSNS缪子源~2028
- 2、CiADS缪子源~2028?
- 3、HIAF缪子束线~2027?
- 4、SHINE缪子源~2030?

Academic articles related to muon sources
from Web of Science



截止24.08





CiADS设计指标与建设内容



建设单位：近代物理研究所

参建单位：原子能院

合作单位：高能所，中广核

建设地点：广东惠州

建设经费：~40亿

- 加速器能量：500 MeV (upgrade to 2.GeV)
- 加速器流强：5 mA (upgrade to 10 mA)
- 系统总功率：<10 MW
- 运行模式： pulse&CW (gaps for reactor monitor)

一期; 加速器和通用设施;
2022~2023

二期; 反应堆和实验大厅;
2025-2026

- T1: ADS终端，10MW堆靶系统， K_{eff} 0.75~0.97;
- T2: 高功率铅铋靶验证终端;
- T3: 多功能材料辐照终端;
- T4: ADS中子学研究和数据库终端
- T5: 缪子科学技术应用终端
- T6: 未来规划ISOL终端



- **束流能量**: 束流能量500~600 MeV, 表面缪子源最佳能区 (A. Bungau et al, PRAB 17, 034701, 2014)
- **流强**: 5mA国际最高流强, 缪子强度可大幅度领先 (H.-J Cai et al, PRAB 27, 023703, 2024)
- **时间结构**: 超导直线加速器, 连续模式/时间结构 (Mu2e、MACE et al)

- **目标定位：**连续型高强度缪子源
- **国内特色：**与CSNS脉冲型缪子源优势互补



The project is now in planning phase with 2/3 approval stages passed. Main milestones:

- ➊ final approval - 2023
- ➋ end of preparation phase and Technical Design Report publication - end 2024
- ➌ 1.5-year long shut-down - 2027
- ➍ pilot operation - 2028
- ➎ user operation - 2029



CiADS 缪子源规划

□ CiADS反应堆

- 研究装置，年满功率运行3个月

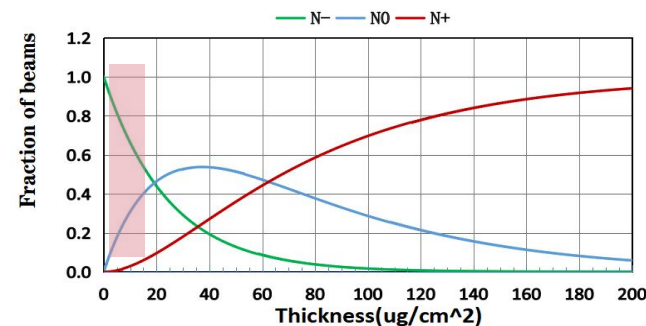
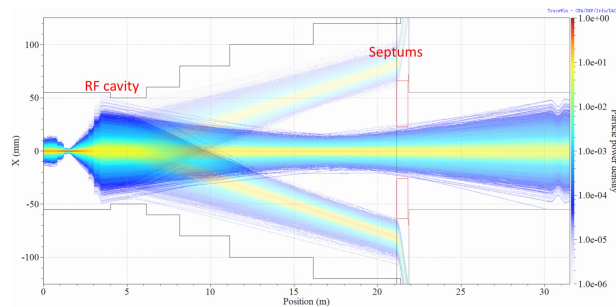
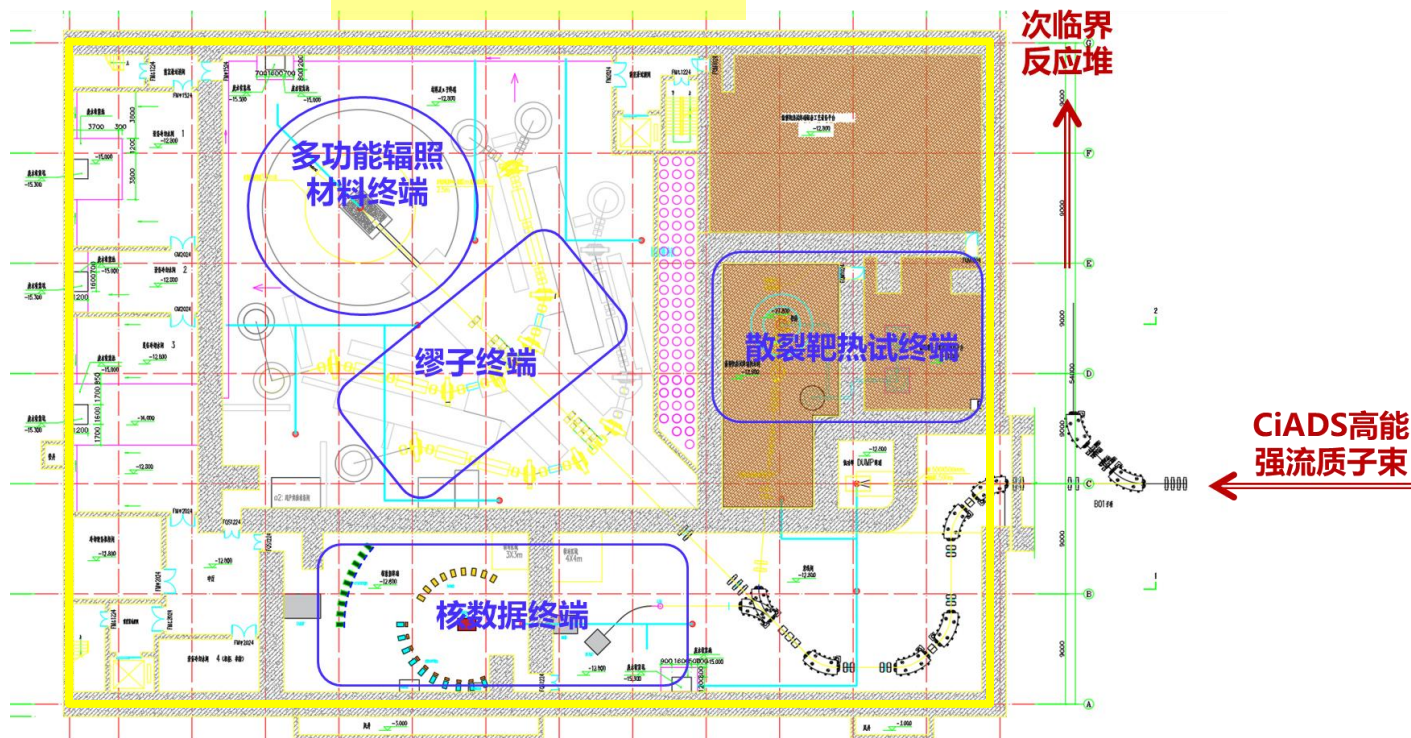
□ B05实验大厅终端

- 高功率靶热试终端(HiT_a)
- 核数据终端(NDET)
- 缪子终端(MuST),
- 多功能材料辐照终端(MIRS)

□ 供束模式

- CiADS反应堆：~3个月独立运行
- B05大厅终端：8~9个月，单终端或多终端
- 多终端模式：
 1. ISOL **vs** B05
 2. HiT_a **vs** NDET **vs** MuST+MIRS

B05实验大厅

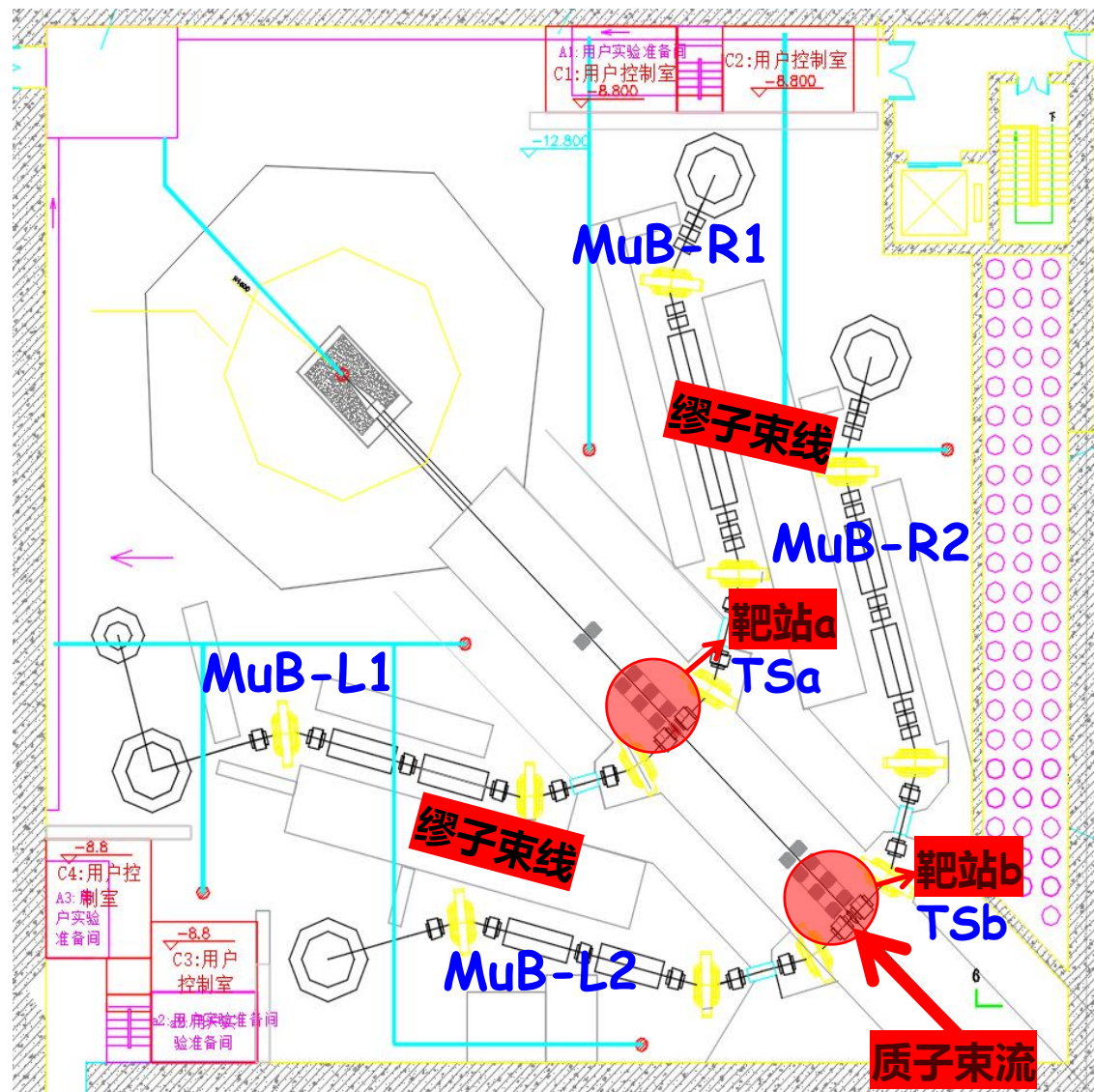


- **目标：**基于超导直线加速器束流，建成国内首台连续型缪子源
- **装置定位：**对标PSI缪子源，实现关键指标超越，冲击1E9甚至1E10强度
- **分期建设计划：**

建设周期	靶站	缪子束流	主要应用
1期 2025~2028	靶站a (TSa)	R1: 表面缪子	μ SR
		L1: 表面/衰变/慢缪	μ SR/MIXE/part. phys.
II期 2029~2032	靶站b (TSb)	R2: 表面缪子	μ SR
		L2: 表面/衰变/慢缪	μ SR/MIXE/part. phys.

□ 总体进展：

- 基本完成靶及束线概念设计
- 完成土建提资：空间占位布局；水、电、气、通风；用户空间需求规划（用户控制/值班室4个，样品准备间3个）





设计进展

靶材料

➤ 低原子序数材料：Be、C等

石墨靶

➤ 固定靶：ISIS、RNCP、TRIUMF

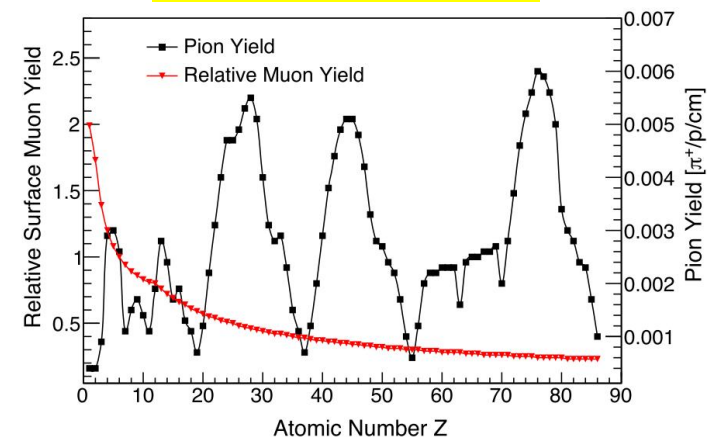
➤ 旋转靶：J-PARC、PSI、RAON

表面缪子产率经验公式

$$I_{\mu^+}^{\text{rel}} \propto n \sigma_{\pi^+} \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\pi^+} \frac{1}{\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\mu^+}} \frac{n_c 6}{nZ} l_c$$

表面缪子产率 $\propto Z^{-2/3}$

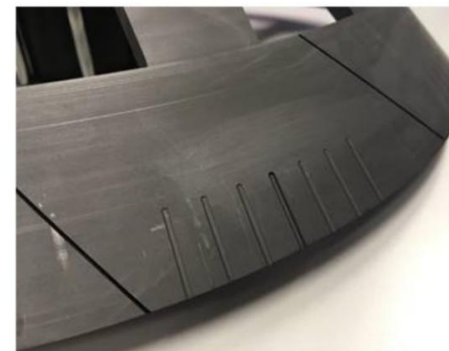
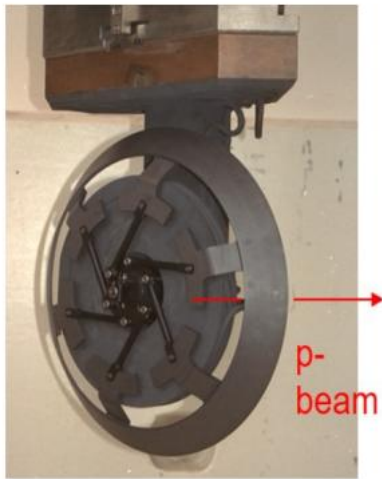
不同材料相对产率



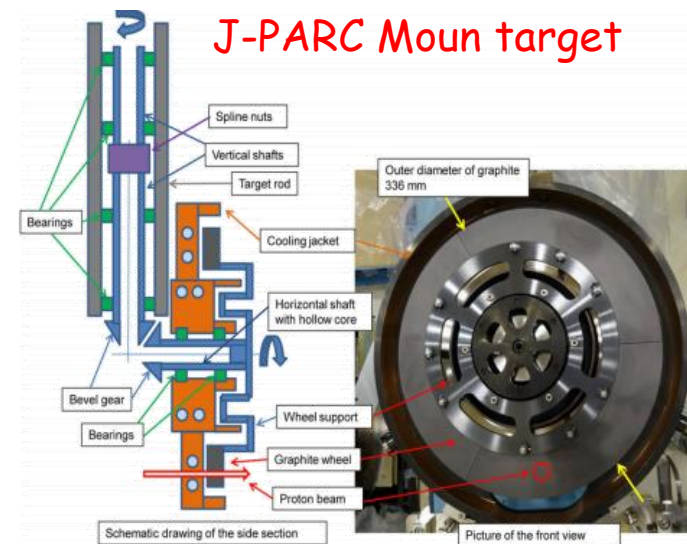
ISIS Moun target



Different target E types from 2002 on of PSI



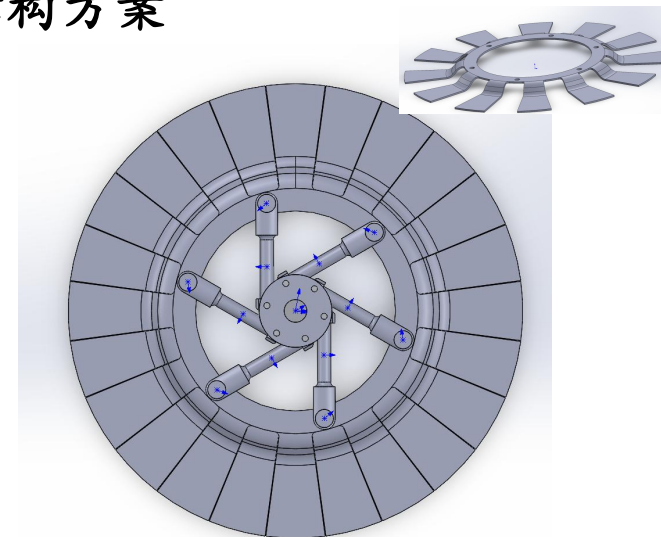
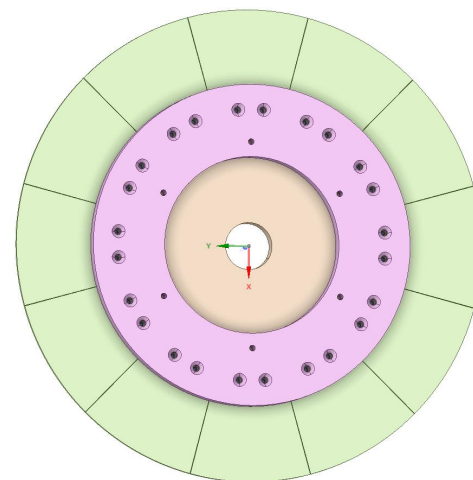
J-PARC Moun target



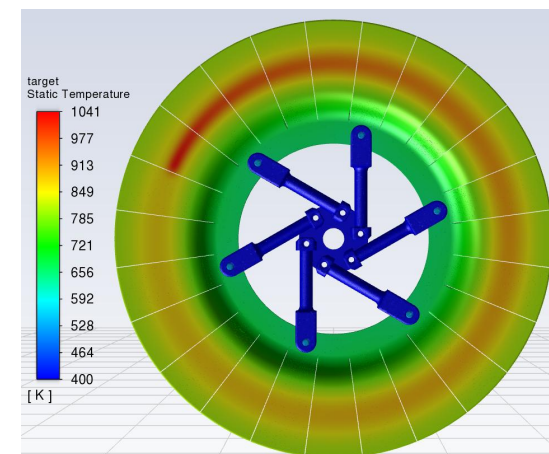
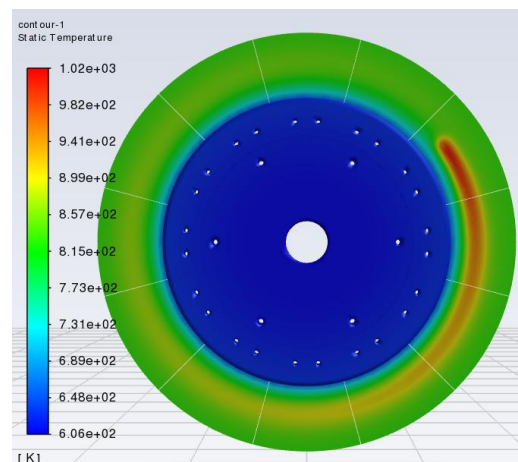
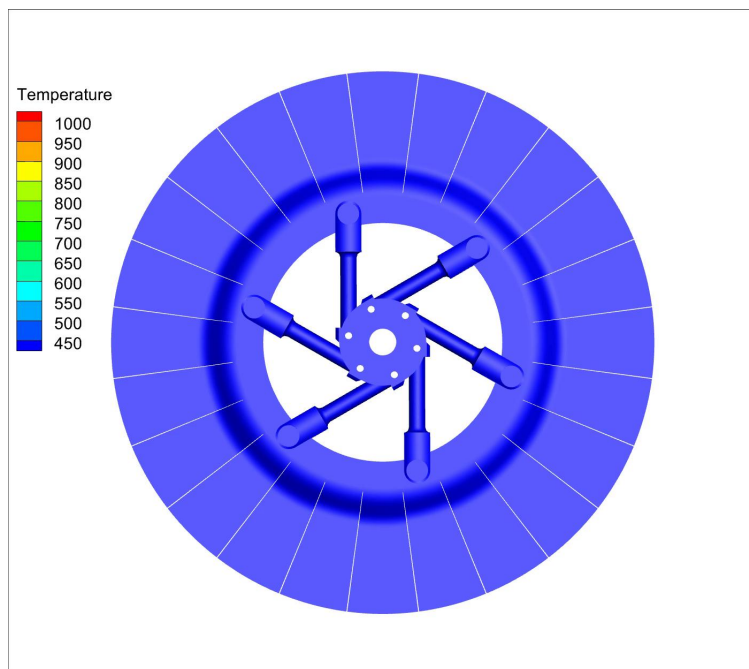
□ 主要参数

- 300kW束流功率； 10° 角倾斜打靶；等效厚度2cm，靶上热功率~5kW
- 双层浅碟型结构；插拔式组件；磁流体密封
- 可行性：最高温度~770℃，余量较大

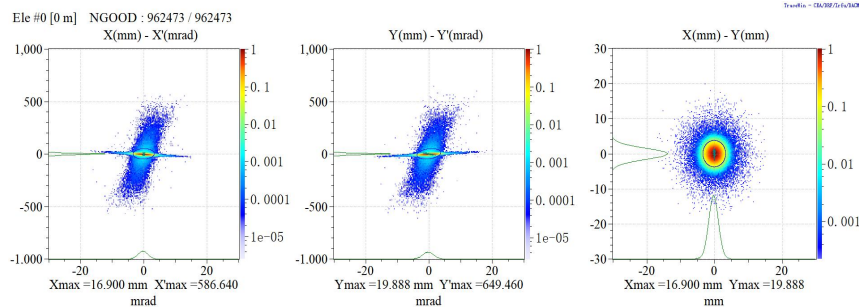
本体结构方案



本体结构热分析

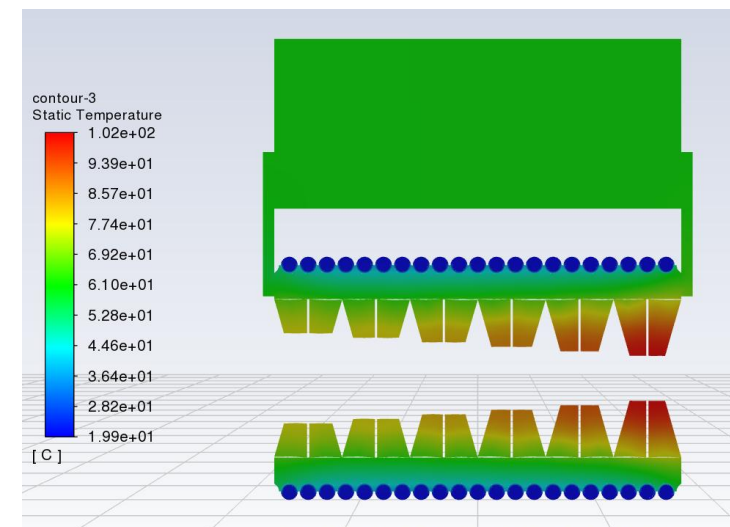
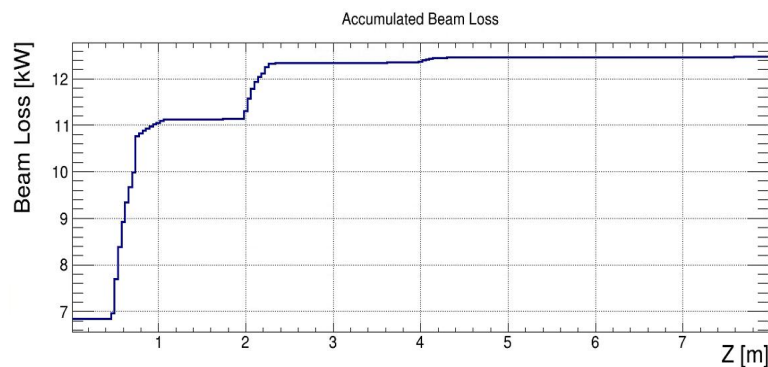
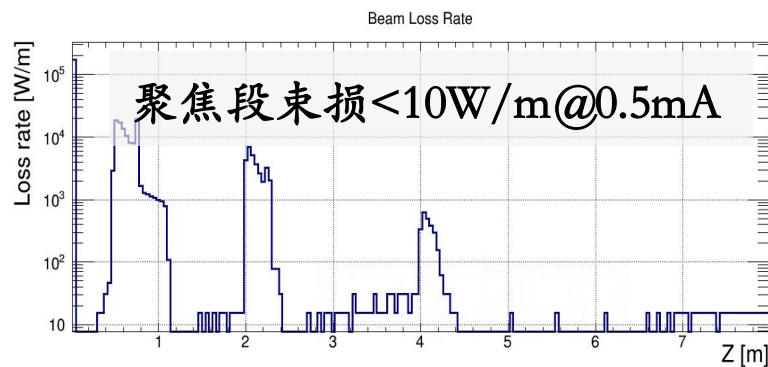
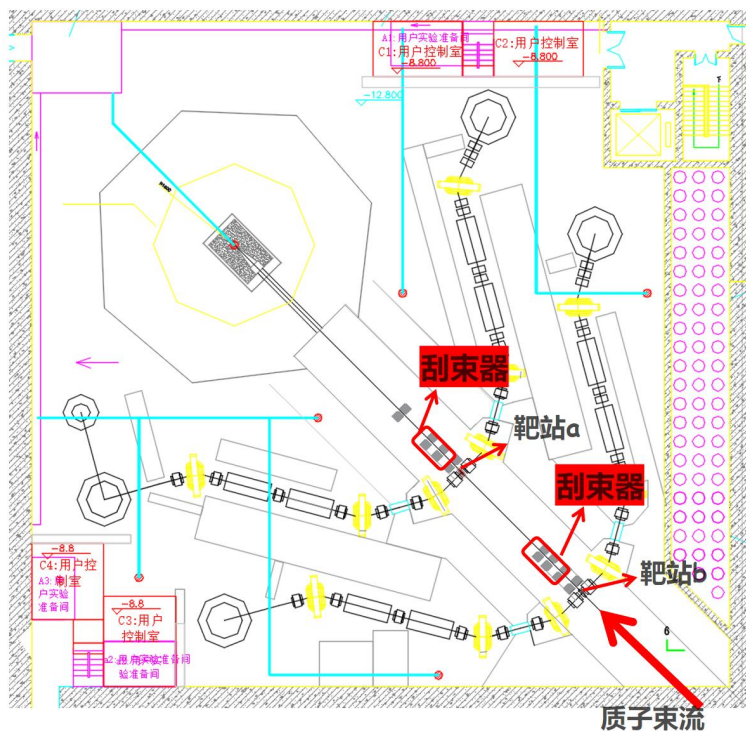
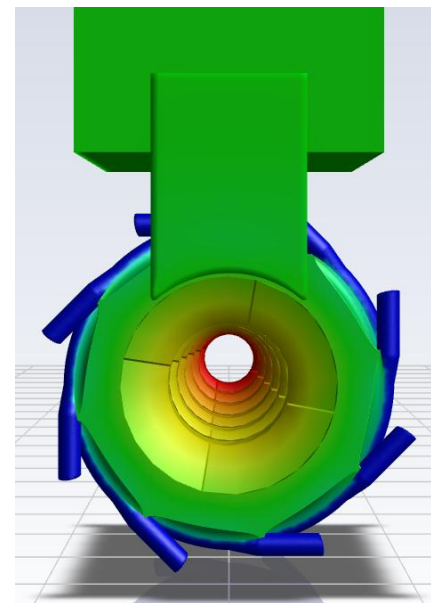


靶后主束发射度 $> 40\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$



刮束器设计:

- $\sim 5\text{kW}@0.5\text{mA}$; 束损 $< 10\text{W/m}$
- 预留刮束能力, 满足功率升级需要。

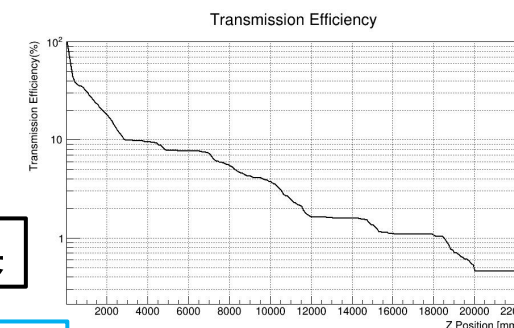
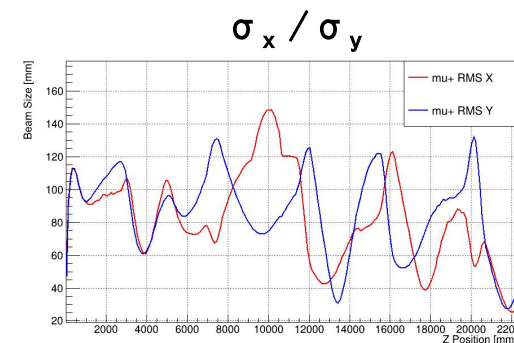
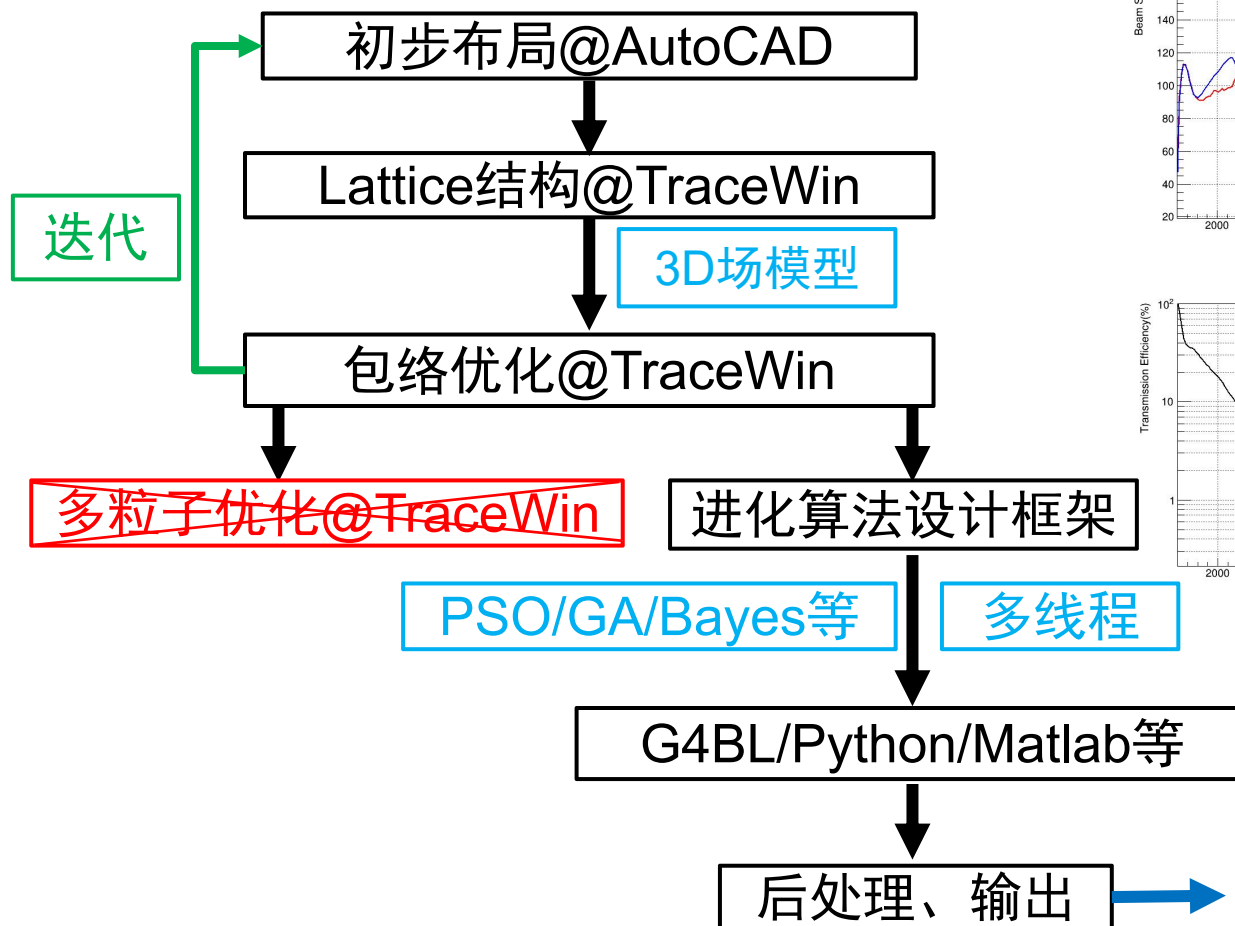


设计方法

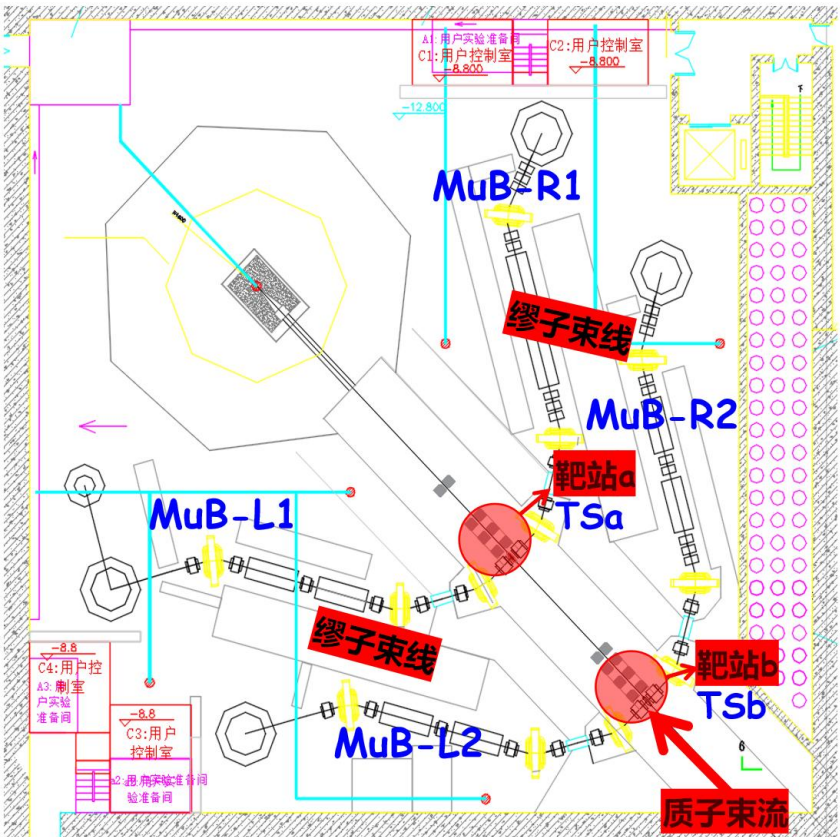
1. 基于缪子束线类型及终端目标进行经验性概念布置
2. 开展光学初步设计，建立场模型，完成包络优化
3. 基于G4Beamline和进化算法，开展多目标自动优化

持续改进

- 更多优化目标
- 更多自由度
- 更高计算效率
- 更好的适应性

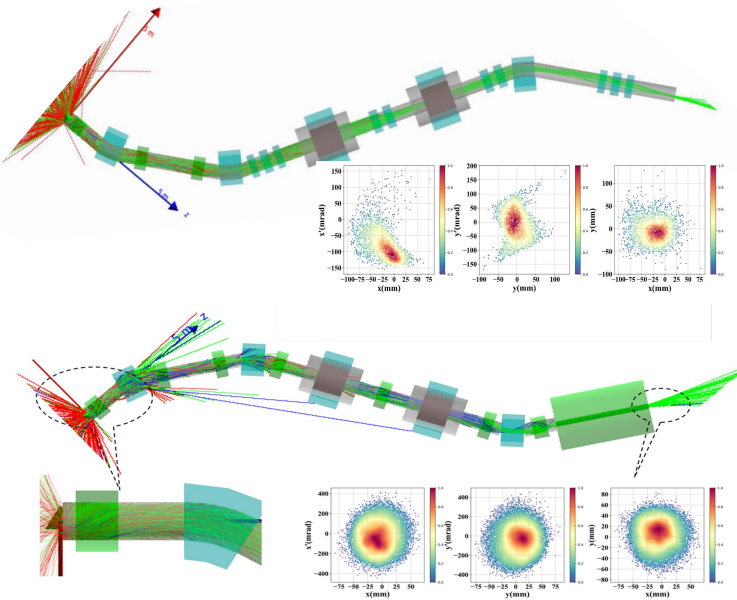


分布、传输效率、
本底率、极化率等

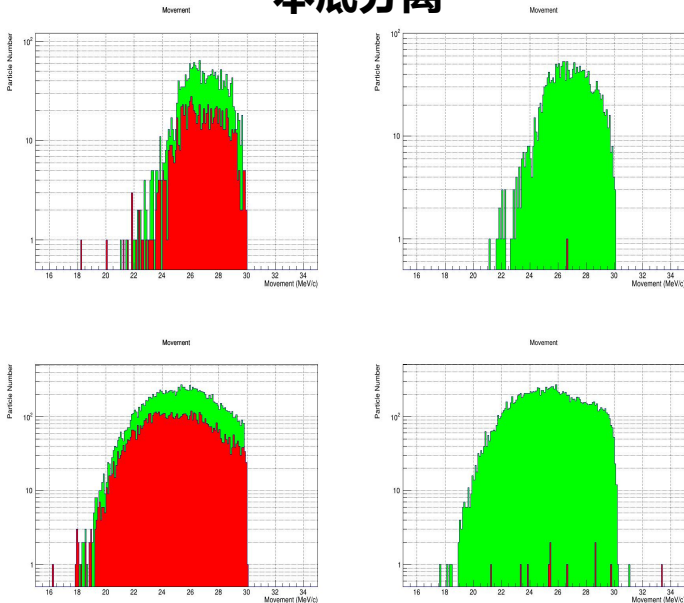


混合聚焦

全螺线管聚焦



本底分离



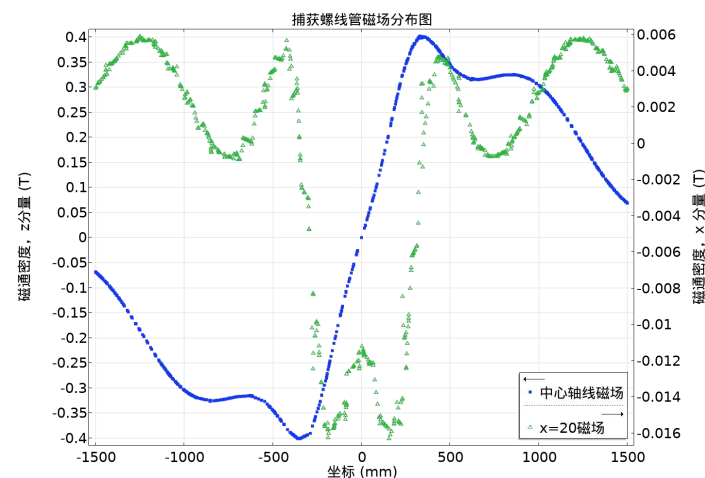
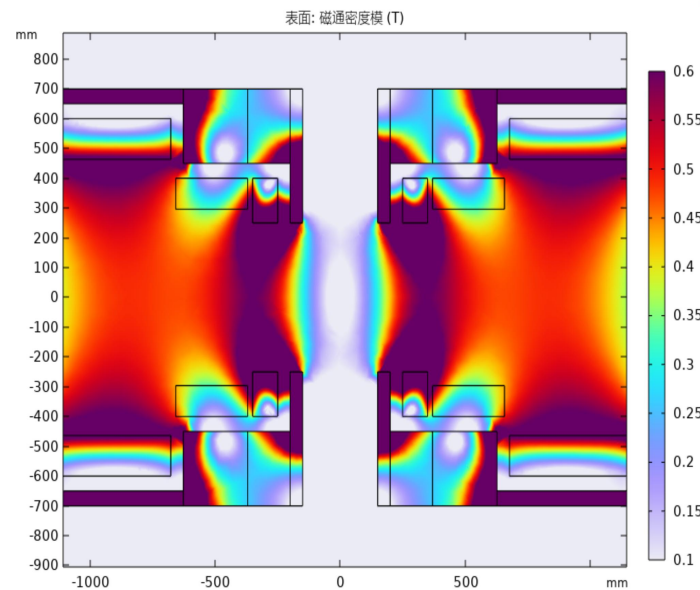
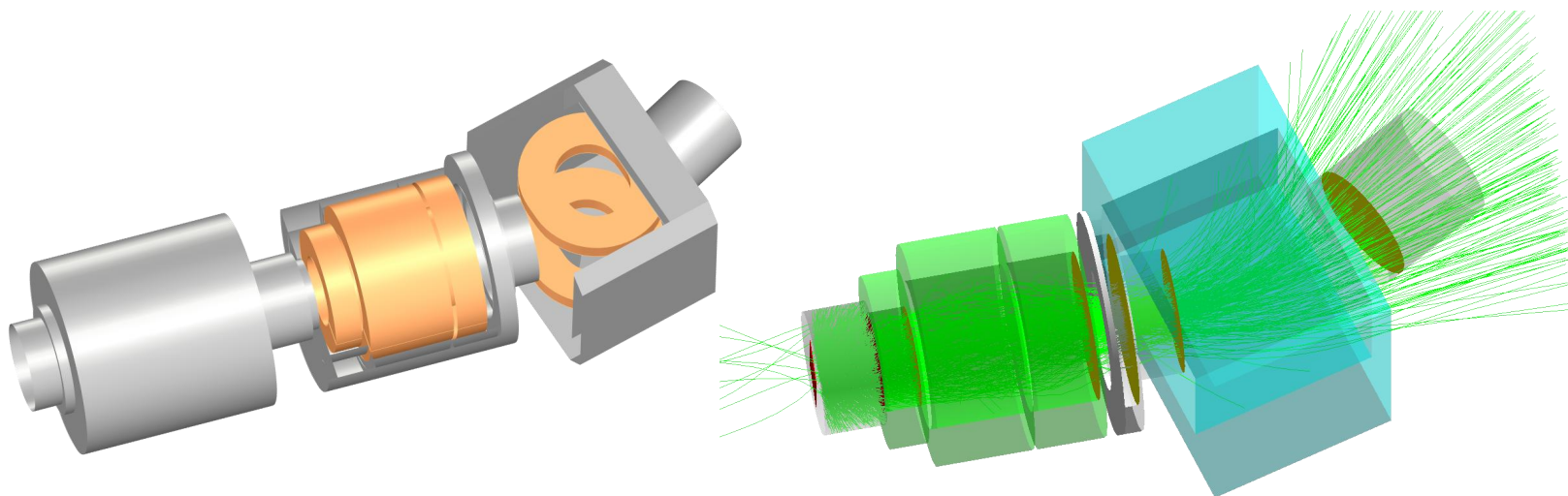
打靶功率	靶方案	束线方案	表面缪子强度 μ^+/s		极化率	本底率
			全尺寸	$\Phi 30\text{mm}$		
300kW	石墨转靶	全螺线管	$>5\text{E}8$	$\sim 1\text{E}8$	$\sim 94\%$	$<0.1\%$
		混合聚焦	$>5\text{E}7$	$\sim 1\text{E}7$	$>99\%$	
3MW	液态锂靶	全螺线管	$>1\text{E}10$	$\sim 2\text{E}9$	$\sim 94\%$	
		混合聚焦	$>1\text{E}9$	$\sim 2\text{E}8$	$>99\%$	

□ 俘获螺线管

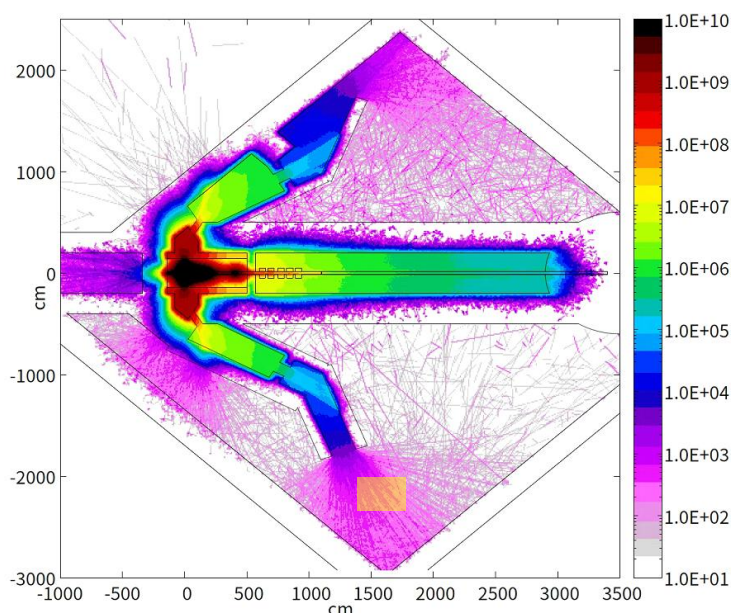
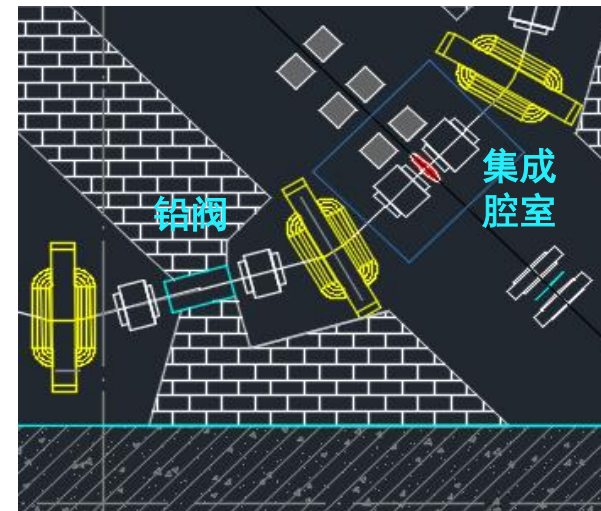
- **大孔径:** 400/600mm, 接收度~660mSr
- **抗辐照:** 氧化镁线圈

□ 前端设计

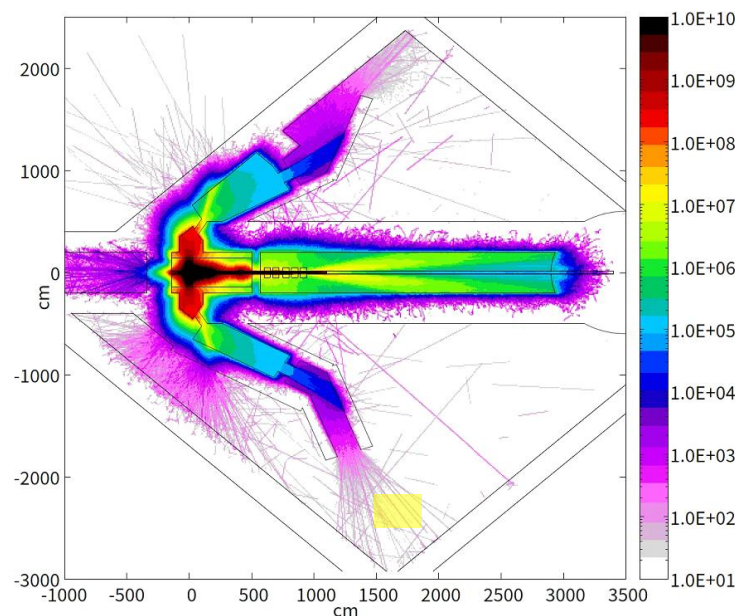
- **优化设计:** 基于进化算法的自动优化 (前端效率~20%)
- **磁屏蔽:** 靶区 $< 0.05\text{T}$



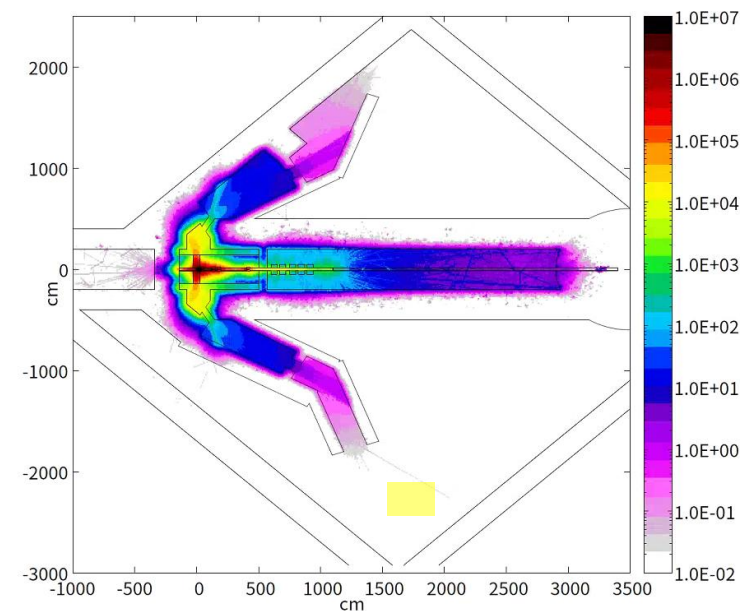
- 屏蔽需求：缪束终端人员抵近、降低信号干扰、设备维护等
- 屏蔽难点：非规则结构、大孔径通道、束线短
- 屏蔽方案：靶/俘获螺线管/刮束器集成屏蔽、束线通道收口
- 屏蔽效果：终端满足在线抵近需求



中子通量 $< 200 \text{ n/cm}^2/\text{s}$



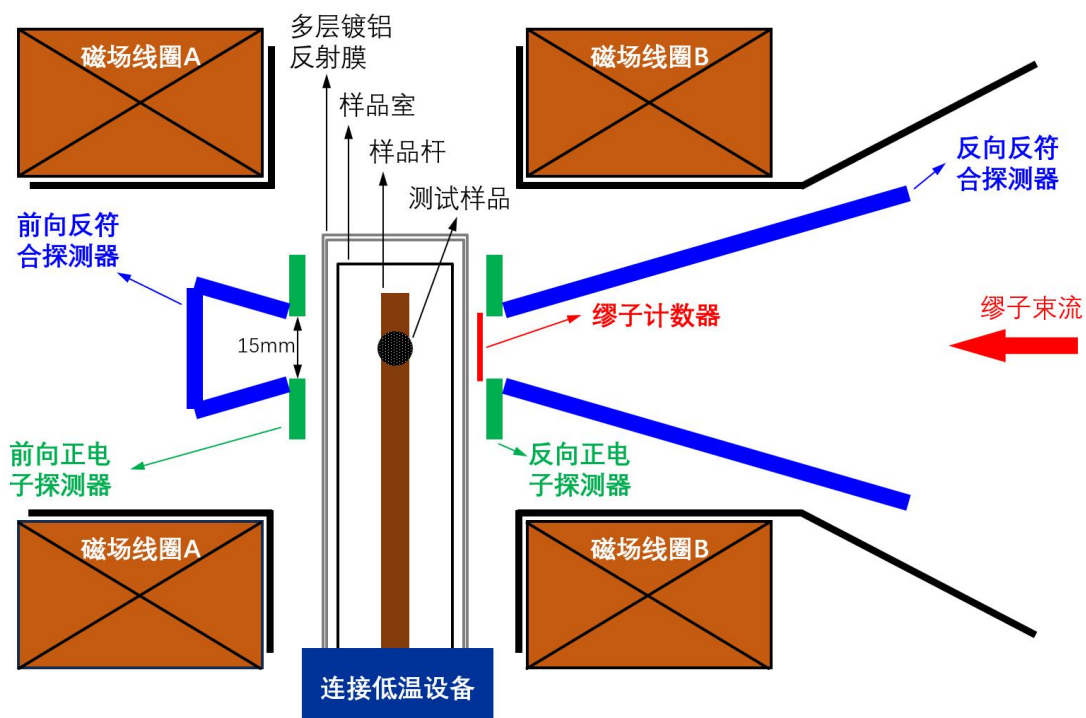
在线当量剂量 $< 30 \text{ μSv/h}$



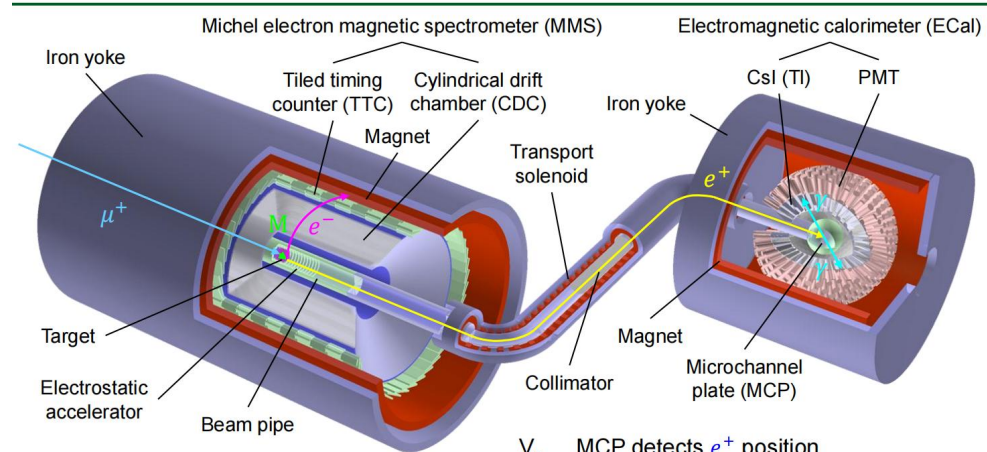
停束3天感生剂量 $< 2 \text{ μSv/h}$

可能的终端

- MuSR谱仪
- 粒子物理实验终端
- MIXE终端



Design of MACE detector system



- Surface muon stop in target $\rightarrow$ muonium
- M diffuse into vacuum & convert to $\bar{M}$
- Decay in a vacuum: $\bar{M} \rightarrow e^+ e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e$
- CDC detects Michel e^- track
- Transport atomic e^+ to MCP (conserving transverse position)

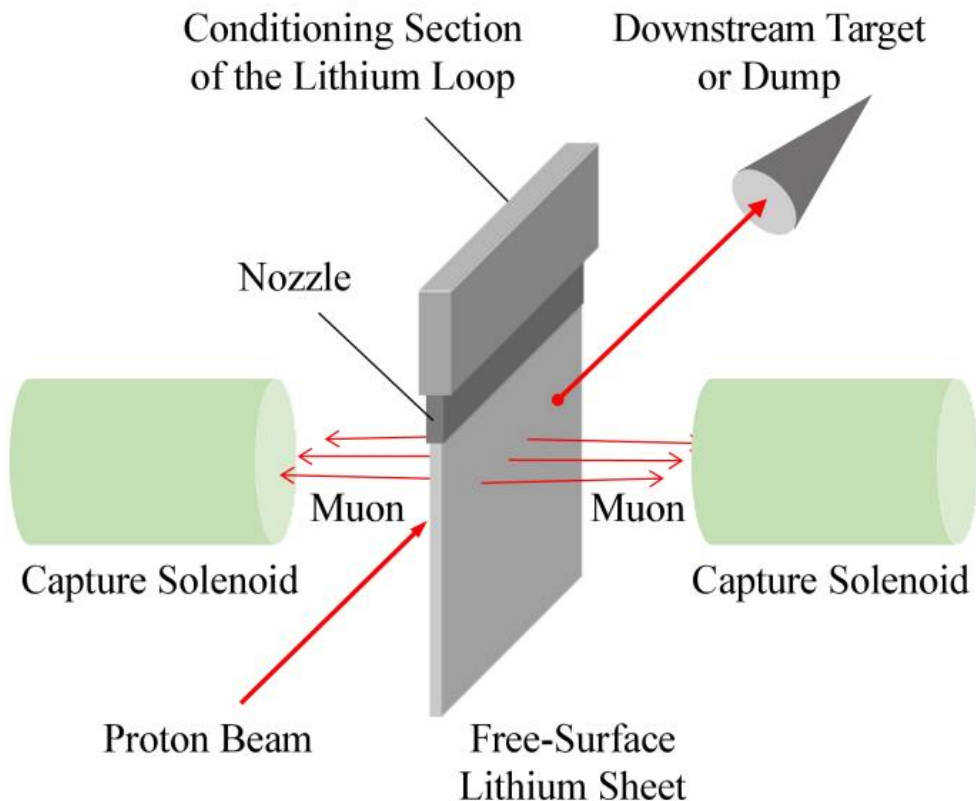
- MCP detects e^+ position
- e^+ annihilates on MCP
- ECal detects 2 back-to-back annihilation γ

Triple coincidence:
 ➤ **MMS + MCP + ECal**
 ↓
 Michel e^- Atomic e^+



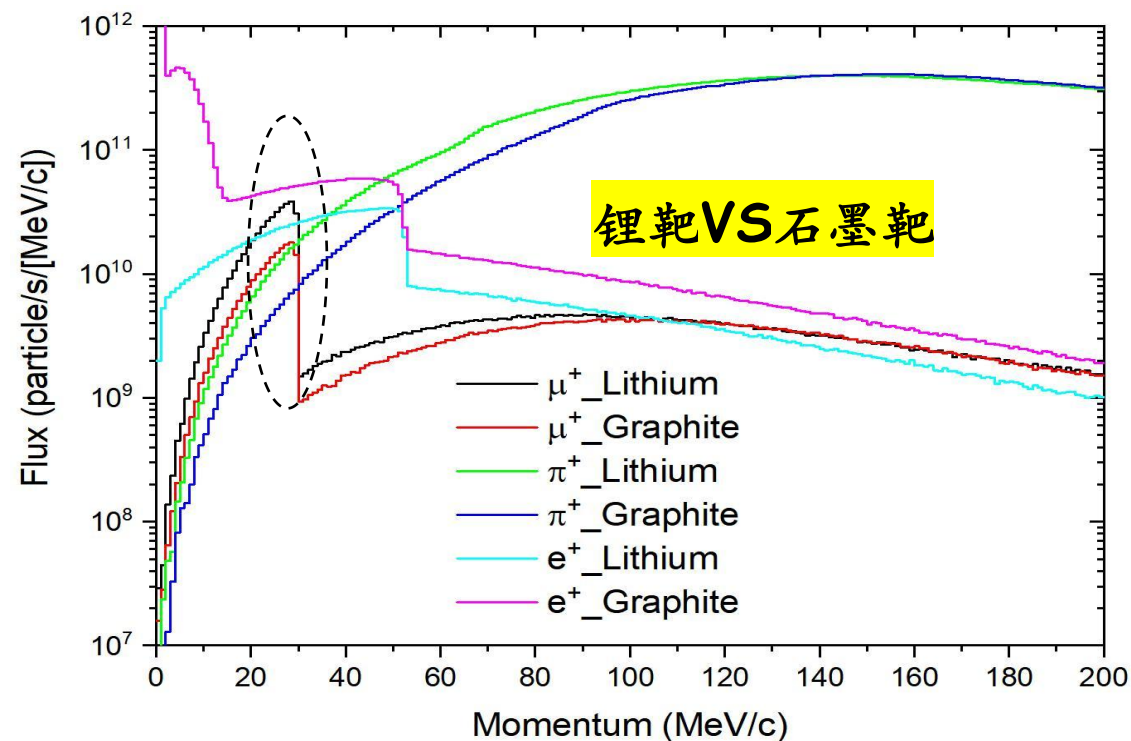
未来关键技术

液态锂射流靶概念



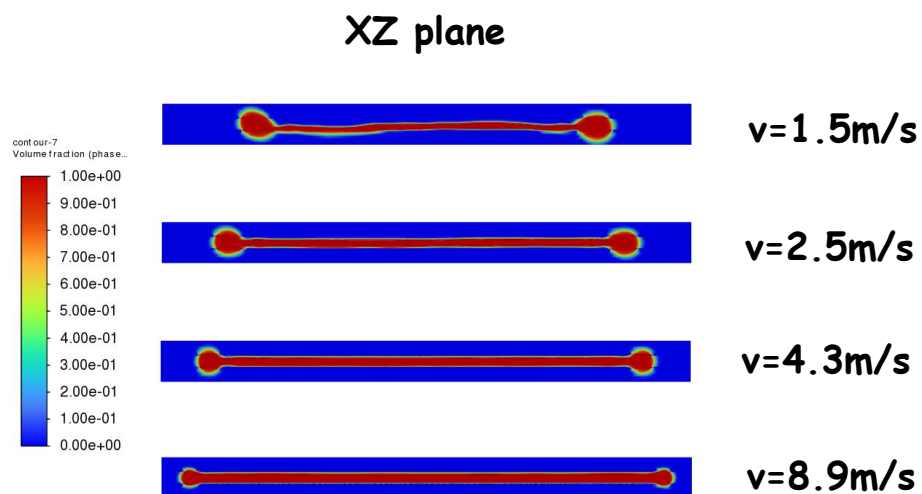
□ 液态锂射流靶 VS 石墨转靶

- 表面缪子产率高
- 放射性核素少，正电子本底低
- 无热应力问题，无需频繁更换，可承受功率上限更高
- 理论上更紧凑

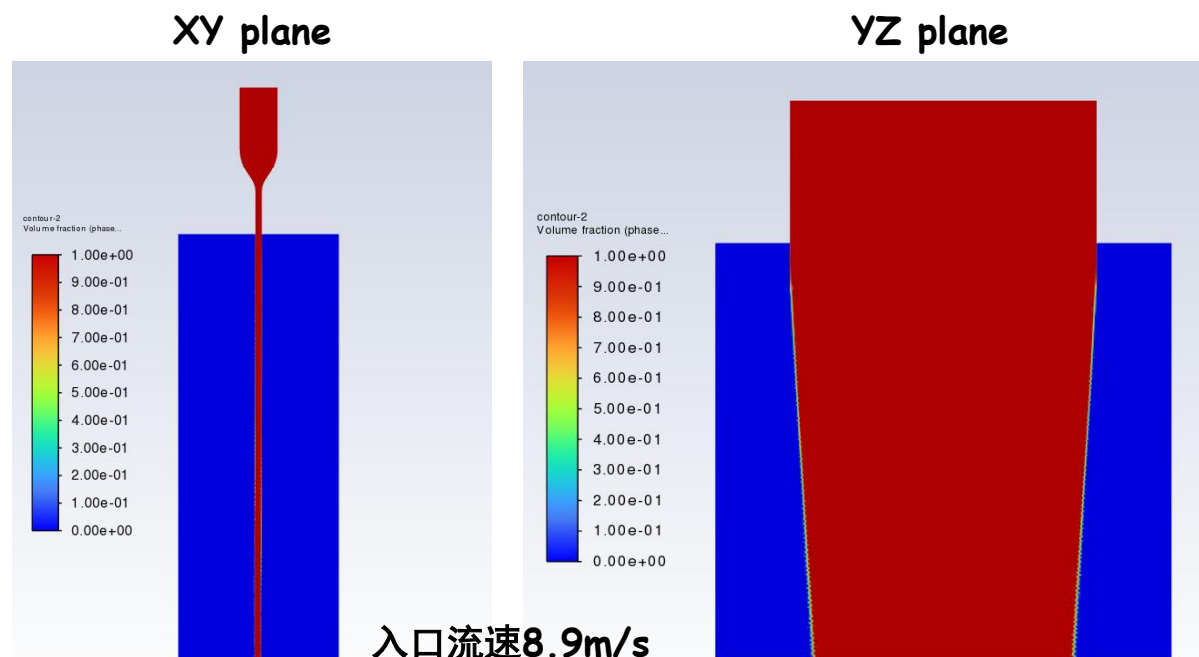


□ 射流形态

- 入口流速越高，射流形态越好
- 5~10m/s流速可满足要求

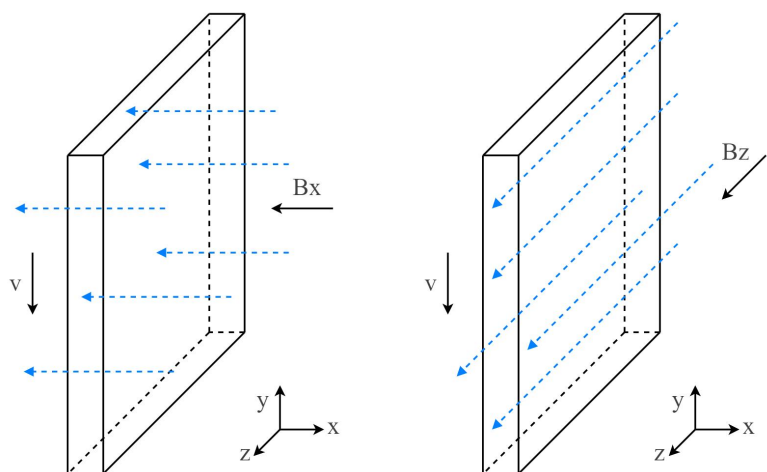


10cm高度处水平截面射流形态

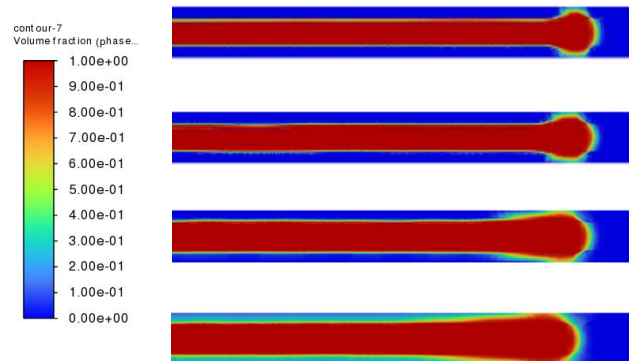


磁流体动力学效应

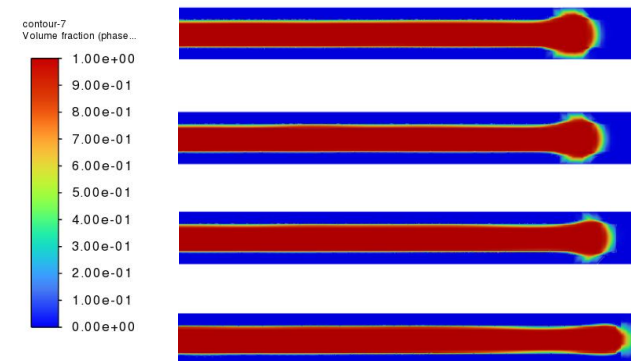
- 厚度方向磁场影响大于长度方向
- 0.1T磁场的影响可以忽略



x方向磁场



z方向磁场

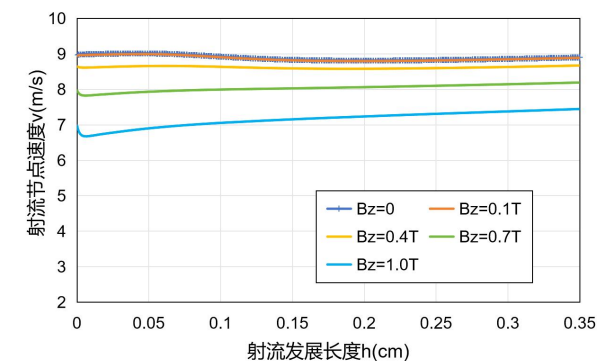
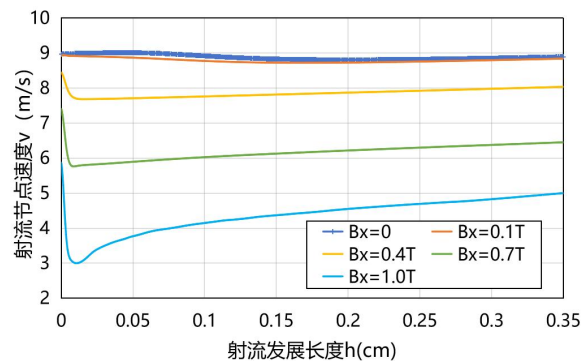
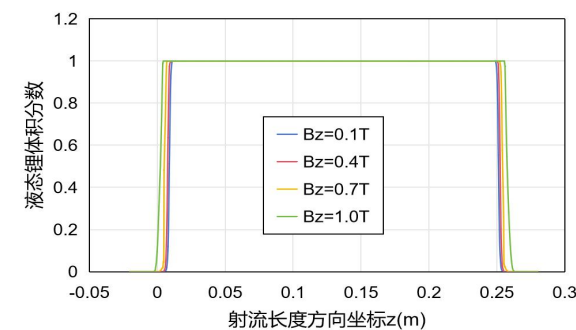
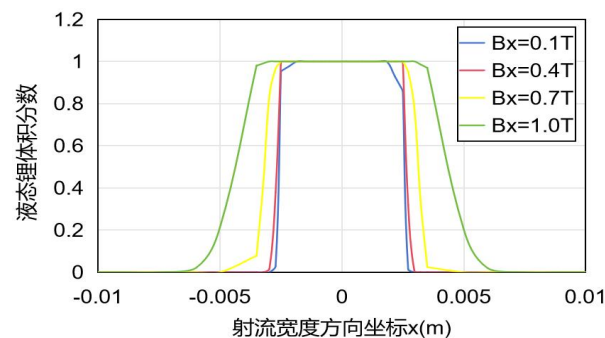


$B_z=0.1\text{T}$

$B_z=0.4\text{T}$

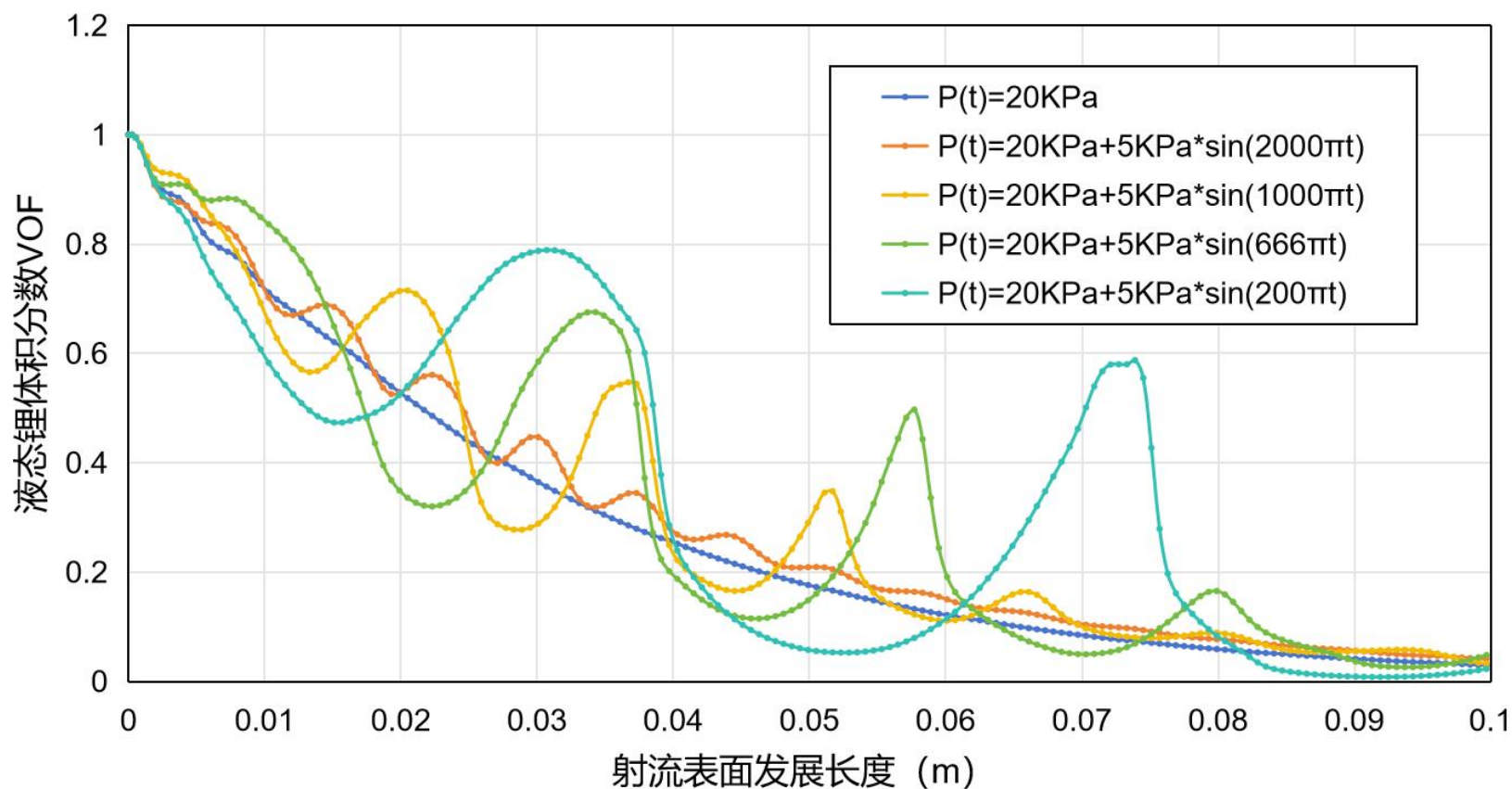
$B_z=0.7\text{T}$

$B_z=1.0\text{T}$

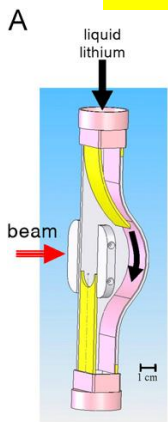


□ 初始扰动影响

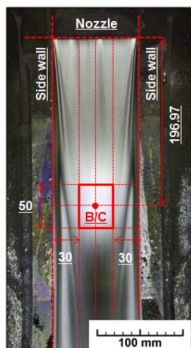
- 频率越高，表面波动的影响越小
- 重点屏蔽1000Hz以下的外部扰动



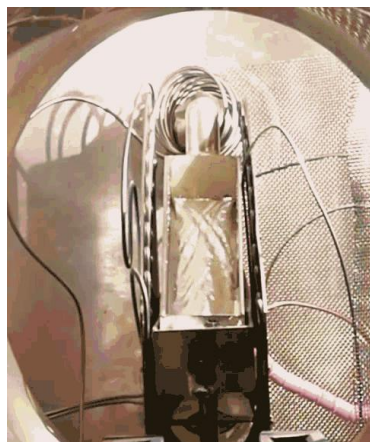
SARAF液态锂靶



IFMIF液态锂靶



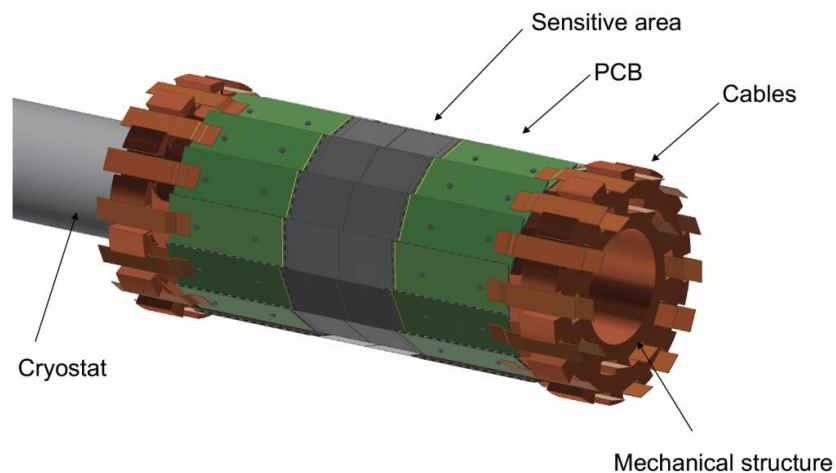
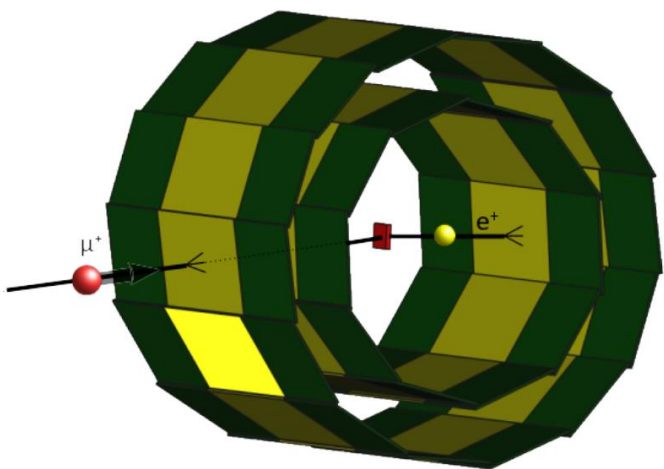
联合四川大学苟富均&叶宗标团队，开展原理验证研究



- **借鉴：** 依托背板的无窗液态锂射流已成功应用于紧凑型中子源，完全自由射流仍需实验验证
- **实验验证：** 射流形态（自由表面波动、外部扰动影响等）、磁流体动力学效应

□ 顶点重建/高位置分辨

- 小样品测量
- 饱和事例率量级提升
- 极端样品条件（高压、DC/射频磁场）
- 非关联本底排除能力等



基于硅像素的表面缪子谱仪（PSI方案）



◆ 设计团队:

- ✓ **靶站:** 田斌斌、刘颖一、周馨钰、牛建伟、帅文文
- ✓ **缪子束线:** 秦元帅、张涵、李锦程、张志绿、鲁桂昊 (中大)
- ✓ **终端对接:** 王荣 (唐健团队、潘子文团队、所内研究部门)
- ✓ **机械:** 王锋锋、向平安

◆ 组织支持:

- ✓ **部门支撑:** 磁铁、电源、通用配套
- ✓ **组织:** CiADS项目总体、近物所/中心/科室



总结



- 基于CiADS的超导直线加速器，有望建设指标先进的连续型缪子源。
- CiADS缪子源已基本完成靶及束线的概念设计，基于当前方案，可以为实验终端提供具有国际竞争力的缪子源强。
- 期待业内合作及用户专家建议，共同推动CiADS缪子源建设，服务高精度物理研究及多学科应用。

***Thanks for
your attention!***