中国科学院
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

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

液态锂射流靶作为缪子源靶的研究

Study of the Liquid Lithium Jet as a Muon Source Target

牛建伟

2026.10.16

中国科学院 近代物理研究所

第八届OCPA专题加速器学校与研讨会-医学领域的加速器　四川广元

目录

01 高功率缪子源背景

02 束流打靶物理设计及放射性分析

03 液态锂射流Fluent模拟分析

04 无窗液态锂射流实验验证

05 总结与展望

目录

01 高功率缪子源背景

02 束流打靶物理设计及放射性分析

03 液态锂射流Fluent模拟分析

04 无窗液态锂射流实验验证

05 总结与展望

01 高功率缪子源背景

缪子在医学与生命科学领域的应用前景

加速器驱动的高强度缪子束，为生物组织元素分析及新型成像研究提供独特探针。

01 生物组织元素分析

负缪子特征X射线（μX）

已测量组织中的 C、N、O 等元素

Radiology, 1976

02 骨骼成分与钙含量

人体椎骨及腰部体模研究

钙含量测量与传统方法高度相关

TRIUMF 实验研究

03 三维元素成像探索

负缪子 + CdTe 成像探测器

已验证材料样品内部碳元素三维分布

Scientific Reports, 2022

医学及生命科学应用需求 → 高品质、高强度缪子束 → 高功率缪子靶技术

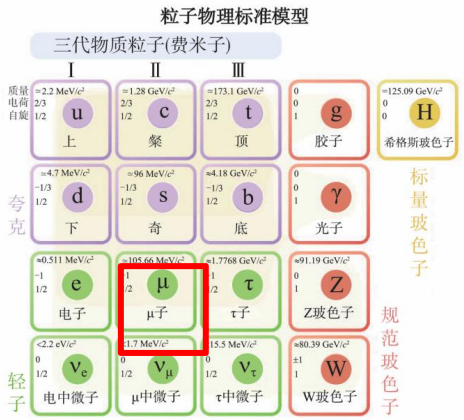
参考文献：Hutson et al., Radiology 120 (1976), DOI:10.1148/120.1.193；骨骼分析 PMID:8777593；Scientific Reports (2022), DOI:10.1038/s41598-022-09137-5

01 高功率缪子源背景

缪子源多学科应用与国际现状

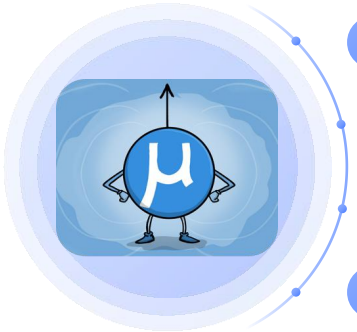
什么是缪子？

- 缪子（μ）属于轻子，是电子的第二代对应粒子
- 平均寿命约2.2μs
- 具有较强穿透能力
- 产生方式：宇宙射线（不可控）与人工缪子源（加速器驱动）



缪子源多学科应用

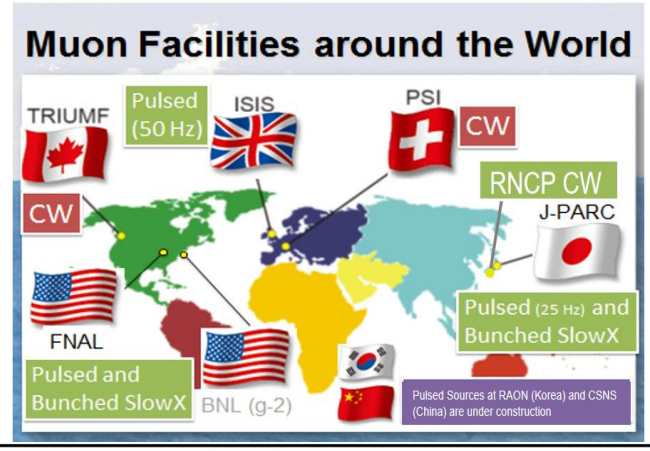
- 随着中高能质子加速器的发展，缪子源多学科领域的应用需求不断增长，对缪子源的流强提出更高的需求



基础物理	寻找超出标准模型新物理
材料科学	超导材料、磁性材料
凝聚态物理	研究凝聚态微观特性
医学应用	生物组织元素分析等

国际缪子源建设现状

- 国际现有4台大型缪子源+1台小型缪子源
- 3条专用缪子束线，用于缪子物理实验
- 束流功率进入MW时代，缪子源强PSI和J-PARC均达到10^8/s水平



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)
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
运行	PSI/瑞士	590	1200	30~40	10^8
运行	RNCP/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

01 高功率缪子源背景

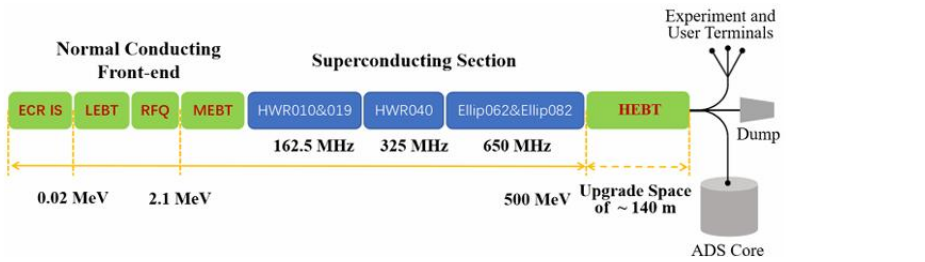
CiADS缪子源建设

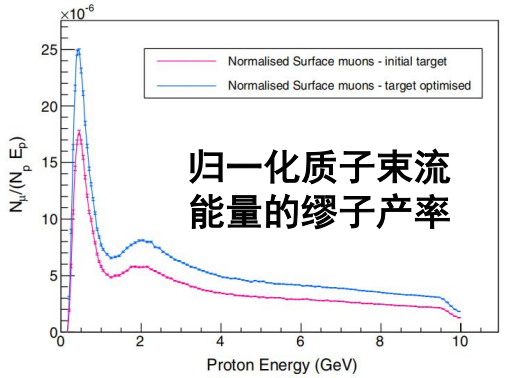
CiADS加速器优势

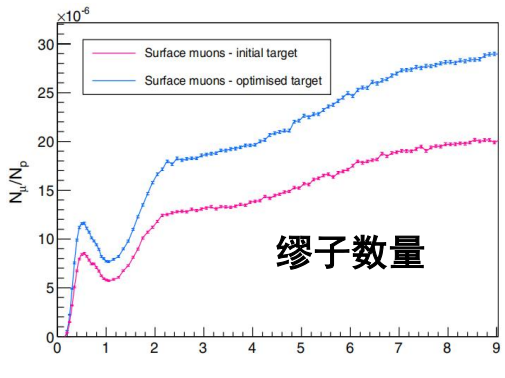
- **束流能量**：束流能量500~600 MeV，表面缪子源最佳能区
- **流强**：5mA，国际最高流强水平
- 时间结构：超导直线加速器，连续性CW运行

CiADS缪子源特色

- 连续型高强度缪子源，与CSNS脉冲型缪子源优势互补





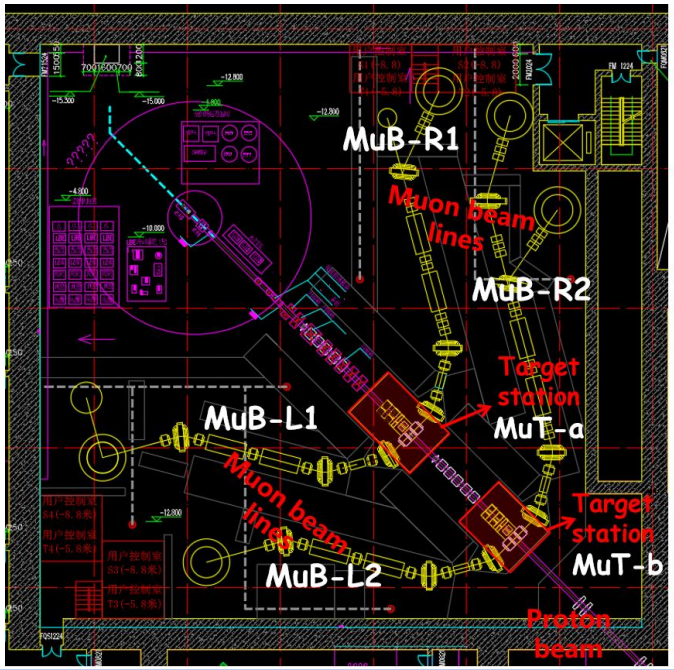


A. Bungau et al., PRAB 17, 034701, 2014

CiADS缪子终端MuST

- MuST当前规划：

Phase	Target	Muon beamlines		Applications
Phase I 2025~2029	Tgt a (MuT-a)	Φ300 up to 10^8μ/s @0.5mA	R1: ~30MeV/c	μSR/MACE
			L1: to 90MeV/c	MIXE/μCF
Phase II 2029~2032	Tgt b (MuT-b)	Φ500 up to 10^{10}μ/s@ 5mA	R2: to 90MeV/c	μSR/MIXE/MACE
			L2: to 120MeV	muography/MIXE



@MuST缪子靶站规划

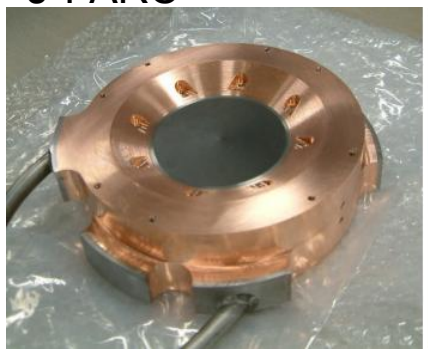
01 高功率缪子源背景

缪子靶发展与面临挑战

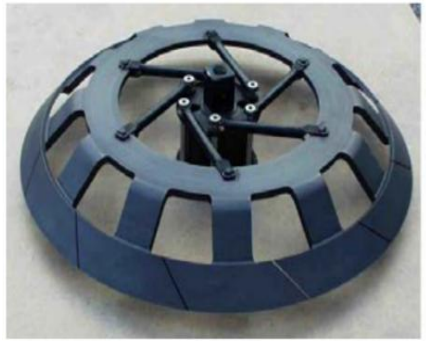
- 当束流能量达到MW级以上时，缪子靶逐渐成为限制更高束流功率的重要因素
- 与普通散裂靶相比，缪子靶体积更紧凑，热密度及辐照强度更高，但冷却方式存在更多的限制

固体靶（石墨）

J-PARC



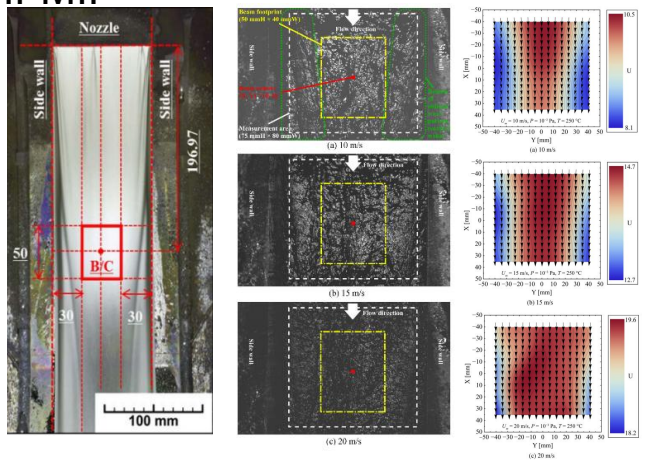
PSI



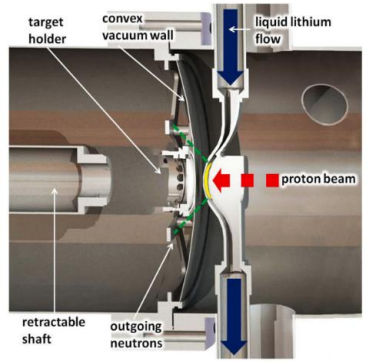
- 高温强辐照环境：寿命短，例行换靶操作难度大、处理成本高
- 转靶外围需要传动及换热系统，较难实现紧凑设计

液态锂靶（带背板）

IFMIF



SARAF





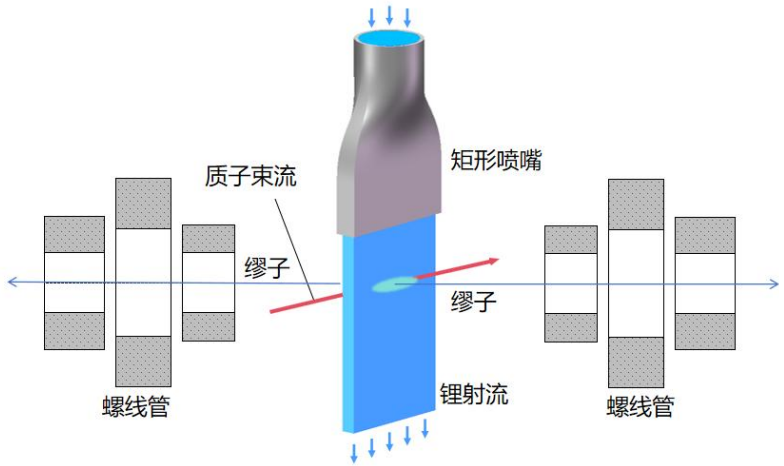
- 作为高功率缪子源无法避免背板上的高密度热沉积和辐照损伤

1. 热功率达到几十MW，石墨转靶温度最高可达1000-1500℃；
2. 作为全新的缪子靶构型，完全无约束、高长宽比的液态锂射流的发展状态、不稳定性亟待研究。

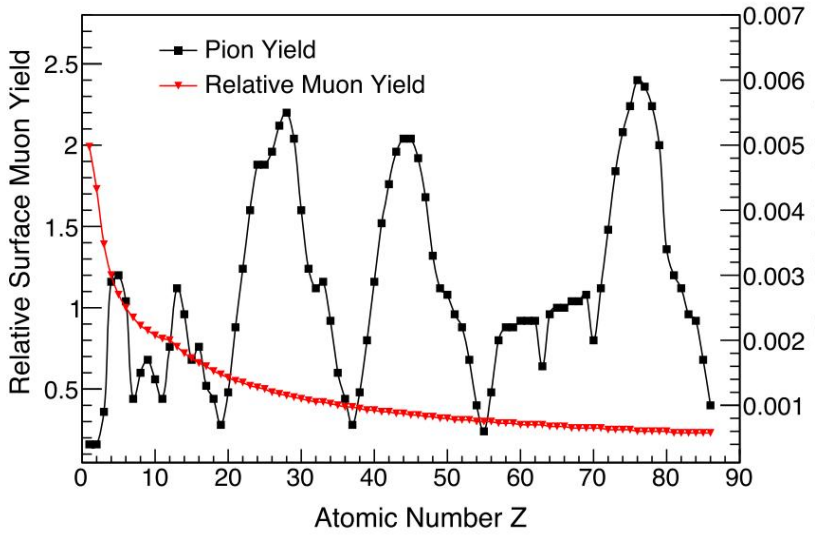
本研究优势与意义

无窗液态锂射流靶的优势

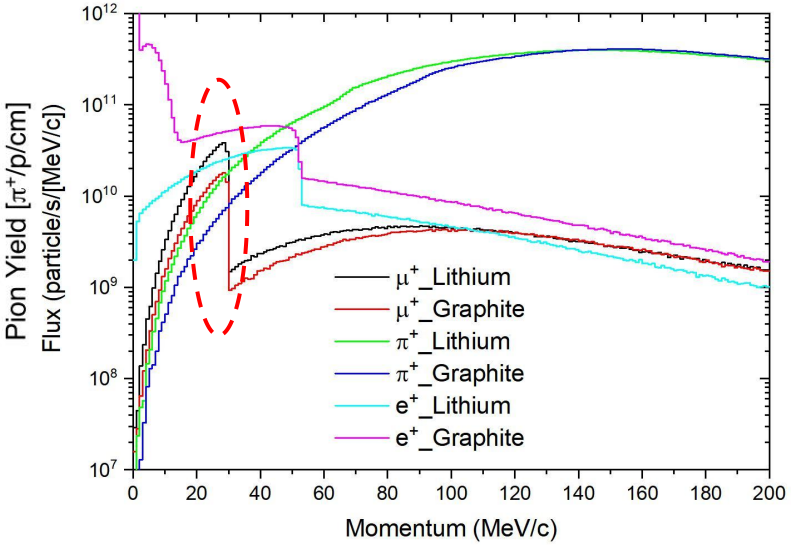
- **表面缪子产率高：**表面缪子产率$\propto Z^{-2/3}$, 考虑几何效应锂射流靶的表面缪子产率高1倍
- **低本底：**放射性核素相对较少，锂的正电子本底要低4倍
- **无热应力问题：**完全自由、瀑布射流构型，无结构承受热应力问题



锂射流靶概念图



不同材料的π^+及表面缪子产率



锂靶与石墨靶产率对比

H.-J Cai et al, PRAB 27, 023703, 2024

目录

01 高功率缪子源背景

02 束流打靶物理设计及放射性分析

03 液态锂射流Fluent模拟分析

04 无窗液态锂射流实验验证

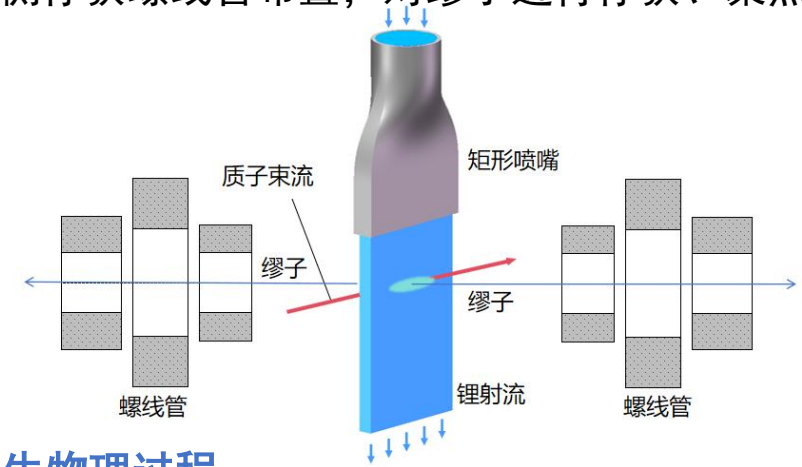
05 总结与展望

03 束流打靶物理设计及放射性分析

无窗液态锂射流靶方案

无窗液态锂射流靶方案

- 高长宽比矩形喷嘴，完全自由液态锂射流
- 回路真空，靶区布置在真空腔室
- 质子束小角度打靶
- 两侧自由液面有助于表面缪子逸出
- 两侧俘获螺线管布置，对缪子进行俘获、聚焦与传输

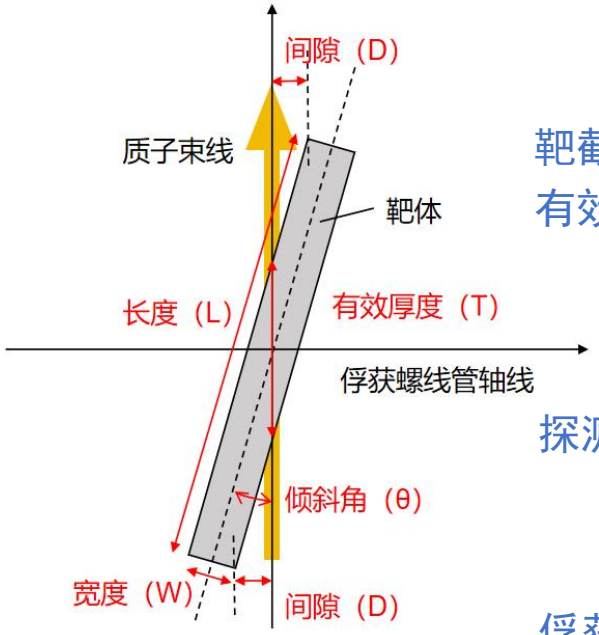


缪子产生物理过程

$$p + A \rightarrow \pi^+ + X \qquad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

- 高能质子轰击靶核产生 π^+（非弹性散射）
- 近表面停止的 π^+衰变形成表面 μ^+

束流与靶构型几何关系



有效厚度与束流角度和厚度的关系：

$$T=W/sin\theta$$

靶截面几何参数与束流入射角度以及有效厚度之间的关系：

$$L=T\cos\theta+2D/\sin\theta$$

$$W=L\ tan\ \theta-2D\ /\ cos\ \theta$$

探测器测得的缪子产额R：

$$R_{det}=\frac{N_{\mu^+}}{N_{proton}}$$

俘获效率：

$$\eta=\frac{R_{det2}}{R_{det1}}$$

H.-J Cai et al, PRAB 27, 023703, 2024

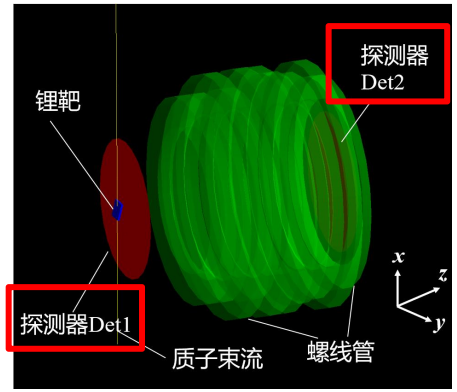
- 保持有效厚度不变，通过改变靶的厚度W与角度θ，评估缪子产额与俘获效率

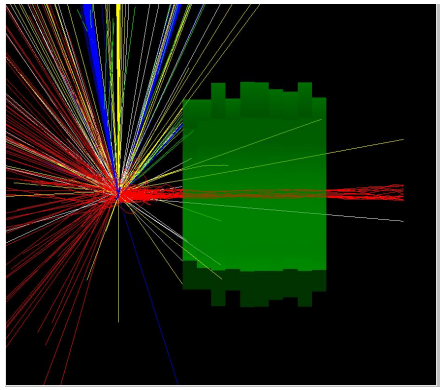
03 束流打靶物理设计及放射性分析

束流打靶物理模型

模型建立

- 通过G4beamline软件建立质子束流打靶及缪子捕获模型
- 设置靶前Det1统计靶前的μ^+，设置Det2统计螺线管俘获μ^+
- 通过基于进化算法自动优化束线俘获前端，得到俘获效率更高的俘获磁场布置方案



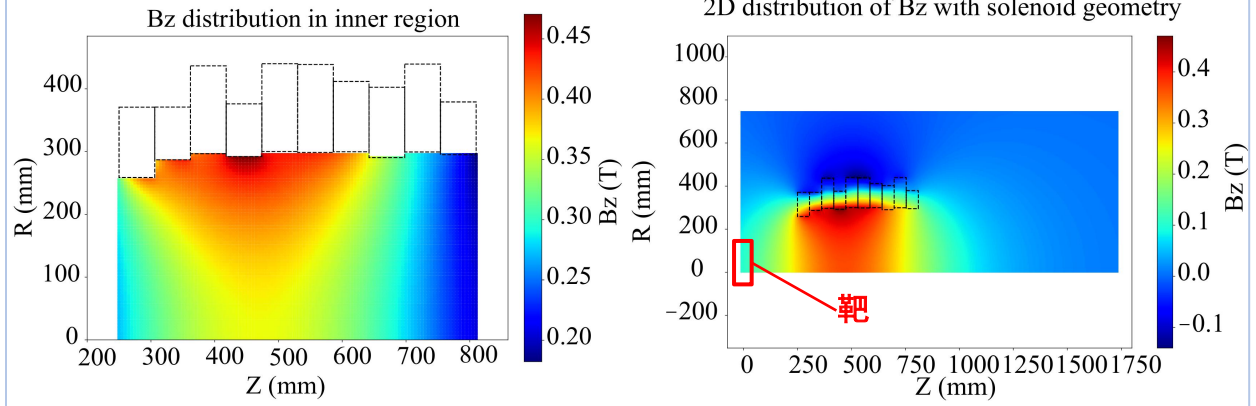


节号	轴向长度/mm	中心位置z/mm	内半径/mm	外半径/mm
1	56	278	258.73	370.73
2		334	286.89	370.89
3		390	296.57	436.57
4		446	292.02	376.02
5		502	299.96	439.96
6		558	298.69	438.69
7		614	299.72	411.72
8		670	290.43	402.43
9		726	299.38	439.38
10		782	295.04	379.04

参数设置

质子能量：	600 MeV
束流流强：	5 mA
束斑尺寸：	σ = 1 mm
有效厚度：	T = 3 cm

磁场分布



优化后的靶前俘获螺线管磁场分布

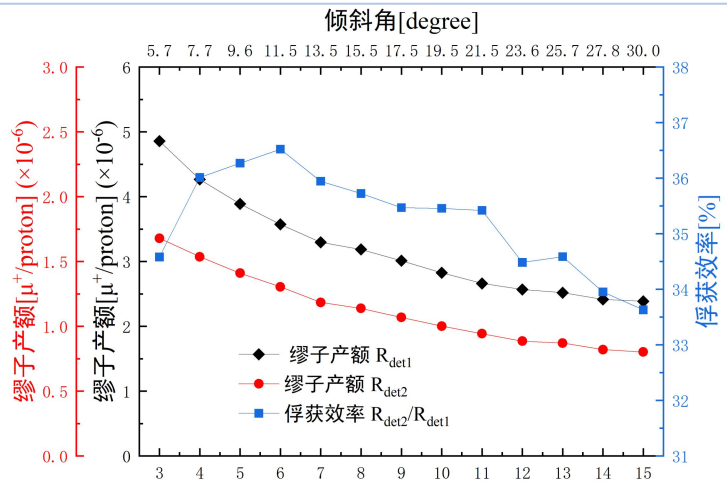
建立“束流—靶—俘获磁场—探测器”物理模型，为缪子产额与俘获效率计算提供基础

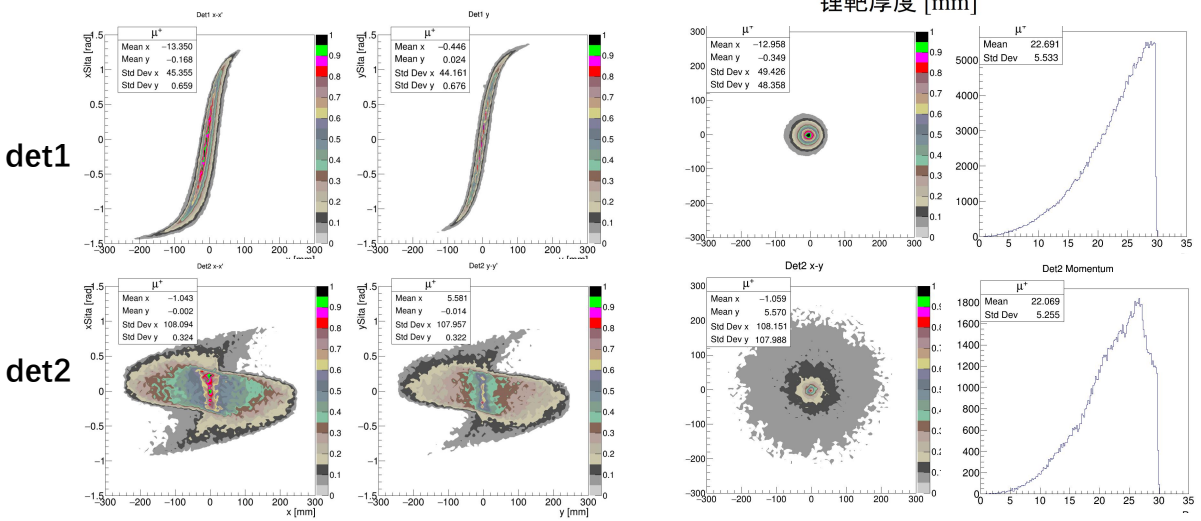
03 束流打靶物理设计及放射性分析

缪子产额与俘获效率分析

- 确定束流打靶的有效厚度为3cm保持不变，根据靶的结构参数，改变靶的厚度与入射角度
- 随着厚度从3mm增加到15mm（束流角度从5.7°同步增加到30°），缪子产率逐步降低
- 捕获效率呈现先增大后减小的趋势，在4~7mm区间达到最大，俘获效率＞36%

厚度 (mm)	角度 (°)	缪子产额R_{det1} (10^{-6})	缪子产额R_{det2} (10^{-6})	俘获效率R_{det2}/R_{det1}
3	5.739	4.85776	1.67986	0.345809591
4	7.662	4.26655	1.53647	0.360120003
5	9.594	3.88883	1.41053	0.362713207
6	11.537	3.57323	1.30506	0.365232577
7	13.493	3.29616	1.1848	0.35944857
8	15.466	3.18661	1.1384	0.357244846
9	17.458	3.01245	1.06852	0.354701323
10	19.471	2.82515	1.00171	0.354568784
11	21.51	2.66229	0.94298	0.354198829
12	23.578	2.56805	0.88557	0.344841417
13	25.679	2.51889	0.87124	0.345882512
14	27.818	2.41554	0.82013	0.339522426
15	30	2.38674	0.80267	0.336303912



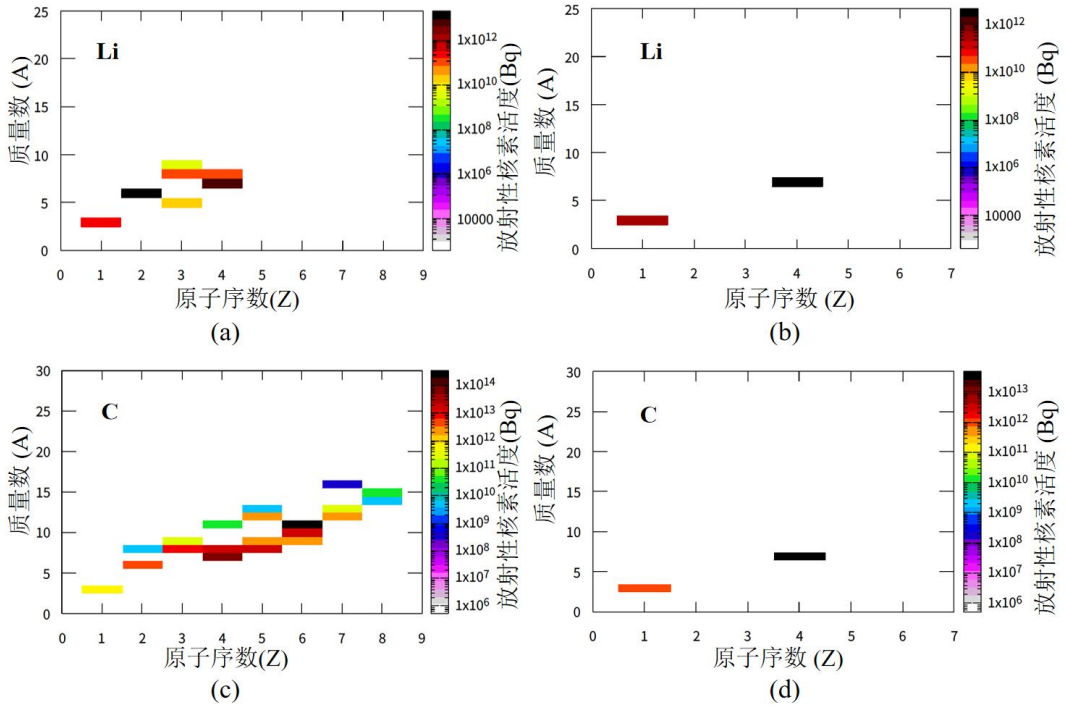


靶厚度为7mm时det1与det2探测到的缪子的相空间图、束斑二维图及动量谱

03 束流打靶物理设计及放射性分析

放射性核素活度分析

600MeV、5mA流强条件下打靶一个月后的放射性核素活度图



a. 锂靶未经冷却；b. 锂靶冷却3天；c. 石墨靶未经冷却；d. 石墨靶冷却3天

- 相同束流照射打靶下，锂靶产生的放射性核素更少，放射性活度比石墨靶更低
- 停束3天后，主要的长寿命放射性核素为氚和^{7}Be

放射性活度对比

	锂靶	石墨靶
放射性活度	2.2×10^{13}Bq	3.8×10^{14}Bq

残余核素（冷却3天后）

核素	锂靶	石墨靶
^{3}H	2.5×10^{11}Bq	7×10^{11}Bq
^{7}Be	4.5×10^{12}Bq	7.3×10^{13}Bq

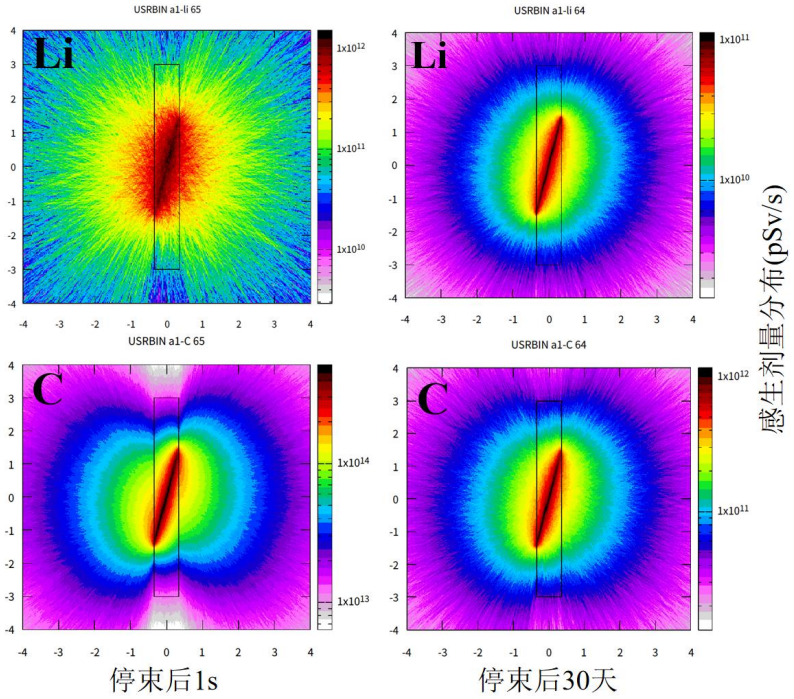
锂回路中长寿命放射性核素处理方案

- 液态锂回路能够具备流动性及循环净化能力，可以处理回路产生的杂质
- **^{3}H**（$T_{1/2}$=12.32年）：冷热阱处理十分高效
- **^{7}Be**（$T_{1/2}$=53.22天）：^{7}Be在液态锂中的溶解度十分微小，可在收集罐中富集

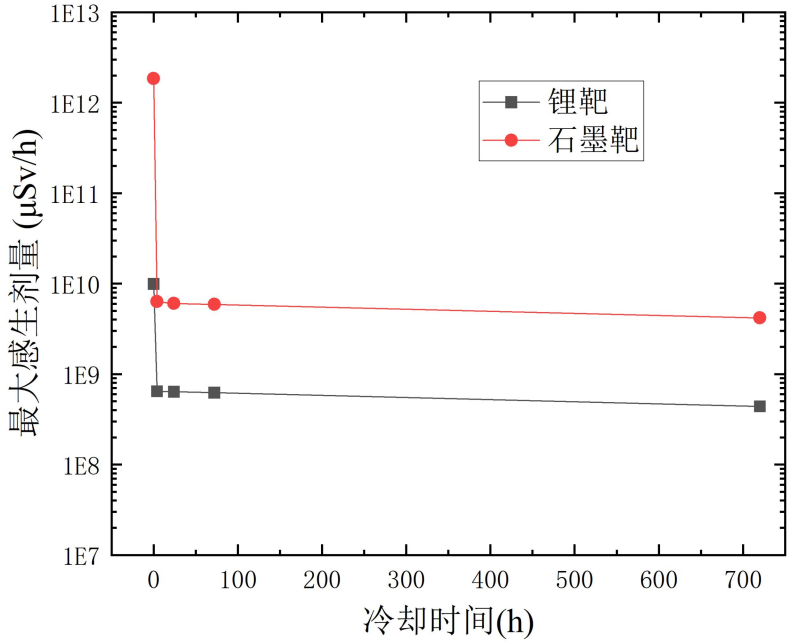
03 束流打靶物理设计及放射性分析

感生剂量分析

典型感生剂量分布图



停束后不同时刻锂靶与石墨靶最大残余剂量对比



- 锂靶产生的残余剂量在10^8 μSv/h左右
- 停束后1h感生剂量下降很快，之后缓慢降低
- 对比得到锂靶的剂量率要比石墨靶低一个量级，具有更低的感生剂量
- 更低的感生剂量有利于检修维护和辐射防护

液态锂靶在放射性安全、感生剂量及长寿命核素管理等方面均表现出较好的综合特性

目录

01 高功率缪子源背景

02 束流打靶物理设计及放射性分析

03 液态锂射流Fluent模拟分析

04 无窗液态锂射流实验验证

05 总结与展望

04 液态锂射流Fluent模拟分析

射流形态量化分析

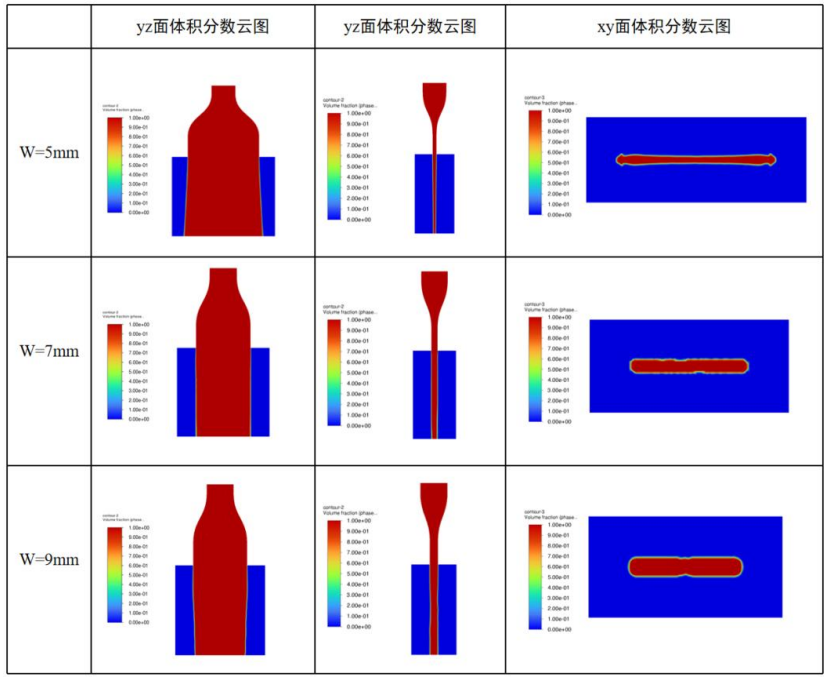
射流参数设定

- 锂射流的流量由电磁泵控制，设定为 $Q = 7.5\ \mathrm{m^3/h}$
- 束流小角度打靶，安全间隙设定为 $D = 5\ \mathrm{mm}$
- 选取三种厚度 $W = 5, 7, 9\ \mathrm{mm}$
- 获得对应长度 L、角度 θ、流速 v

T/mm	Q/(m³/h)	d/mm	W/mm	L/mm	θ(°)	v/(m/s)
30	7.5	5	5	89.6	9.59	4.65
			7	72.0	13.49	4.13
			9	61.9	17.46	3.74

量化体系构建

体积分数云图
↓ 导出点云数据
点云数据(x_i, z_i, φ_i)
↓ 线性插值φ=0.5
等值边界线
↓ 基于截面形状
量化分析



量化指标定义

厚度h关于z的曲线：

$$h(z_0) = x_{\max}(z_0) - x_{\min}(z_0)$$

$$P_i = (x_i, z_i), i = 1, 2, \ldots, N$$

$$d_i = \min_{Q \in B_{\mathrm{rec}}} \|P_i - Q\|$$

平均偏差 $\bar{d} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} d_i$

均方根偏差 $d_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} d_i^2}$

最大偏差 $d_{max} = \max_{1 \le i \le N} d_i$

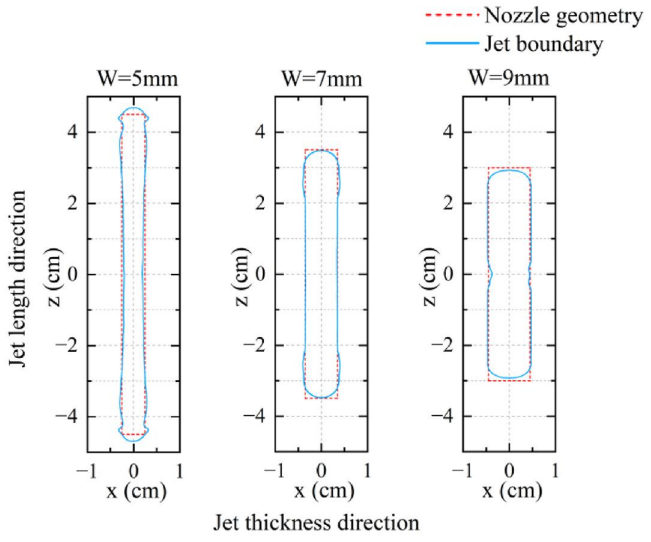
- 通过厚度不均匀度和边界偏差指标，来对不同射流厚度下的截面形态稳定性进行定量比较

04 液态锂射流Fluent模拟分析

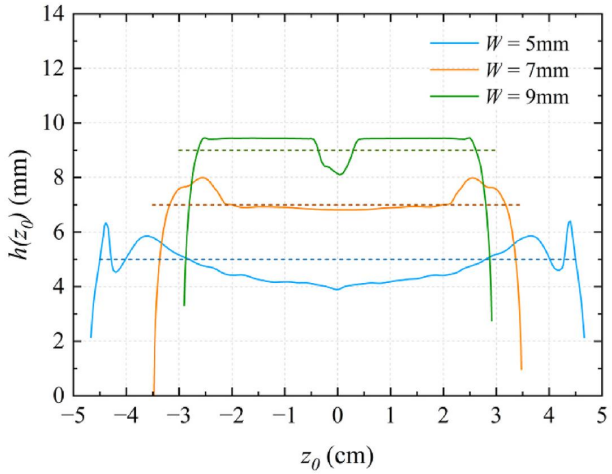
射流形态量化分析

等值边界线与厚度分布对比

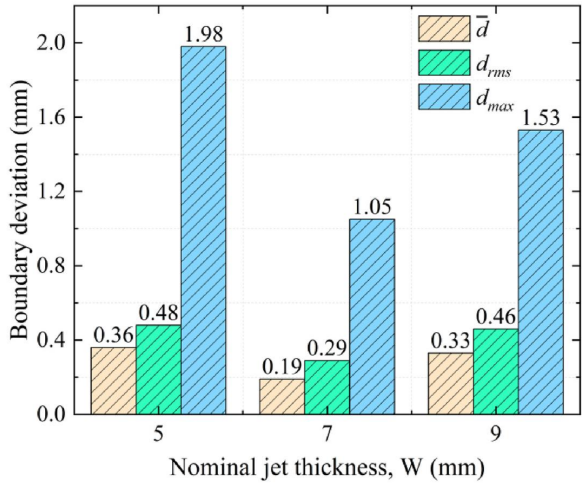
理想轮廓vs边界线



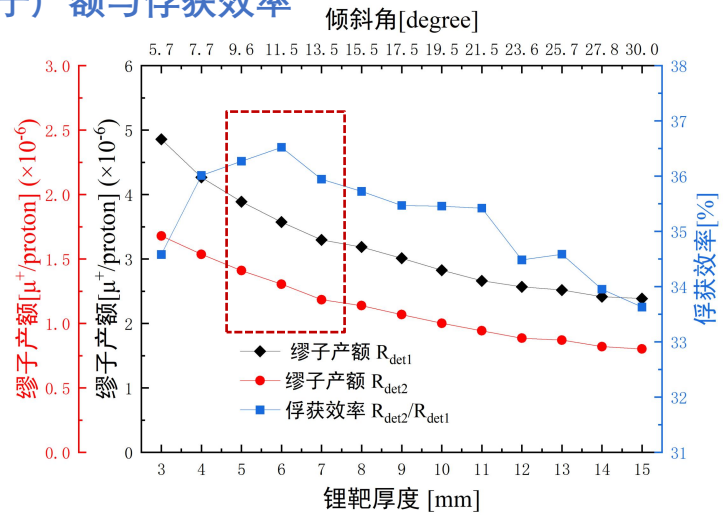
厚度分布 $h(z)$



厚度不均匀性及边界偏差



缪子产额与俘获效率



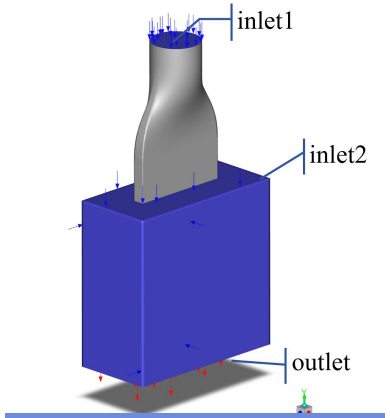
结果分析

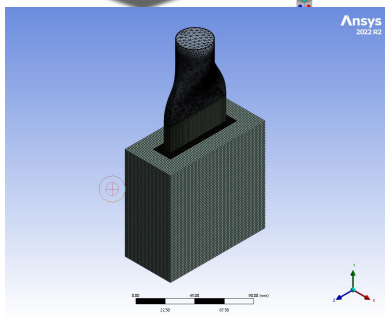
1. 在特定流量与束流入射间隙下，对W = 5mm、 7mm和9mm三种射流进行fluent模拟和量化
2. 7mm厚度射流下U_h=0.61 最低，表明厚度最稳定
3. 7mm射流三个偏差值分别为0.21mm、0.26mm、 1.08mm，表明边界更平直且局部起伏最小
4. 结合μ子产额与俘获效率，综合分析确定7mm厚度是当前设计参数下的最优选择

较优方案：W=7mm

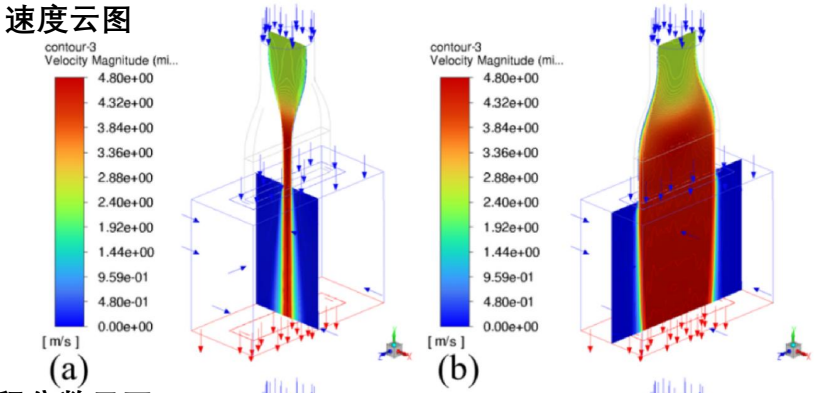
04 液态锂射流Fluent模拟分析

射流稳定性分析

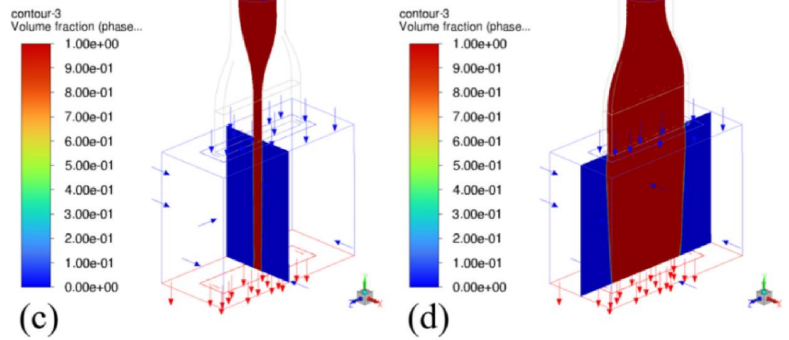




速度云图

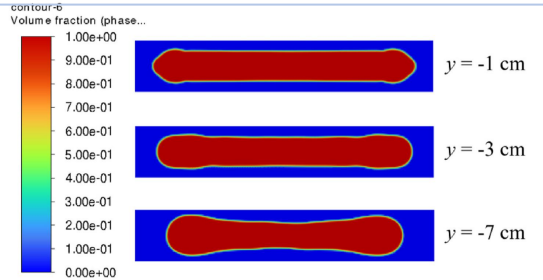


体积分数云图

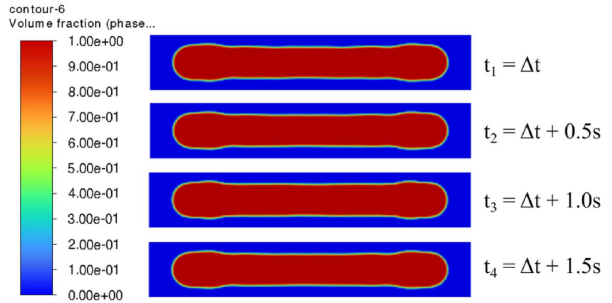


- 4m/s射流速度场稳定发展，射流形态并未出现大幅度的聚拢以及扩散，该特征参数以及流速下符合射流靶设计要求
- 射流的表面不断在波动、变化，但波动幅度在0.5mm范围内，验证了液态锂射流靶作为缪子靶的可行性

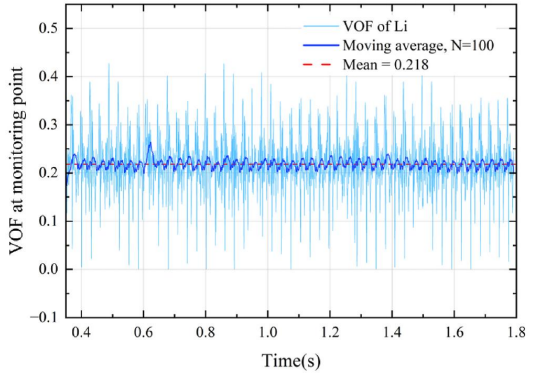
射流截面：



4m/s流速下，不同高度处的体积分数云图



距离喷嘴3cm高度处，随时间变化的体积分数云图



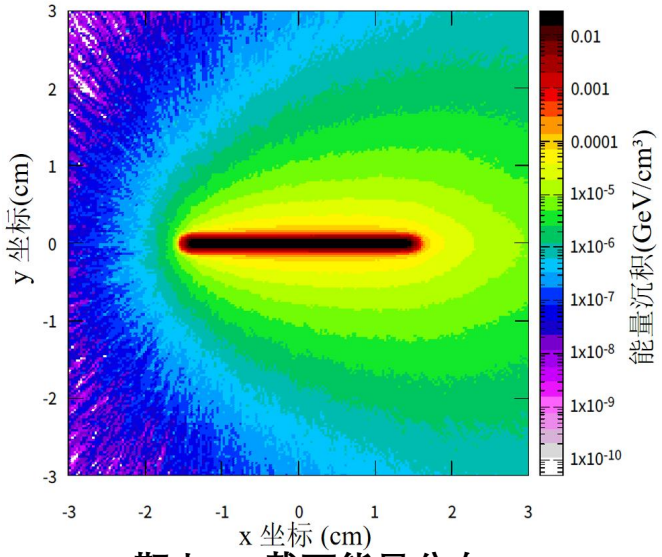
射流表面某点锂相的体积分数随时间的变化曲线

04 液态锂射流Fluent模拟分析

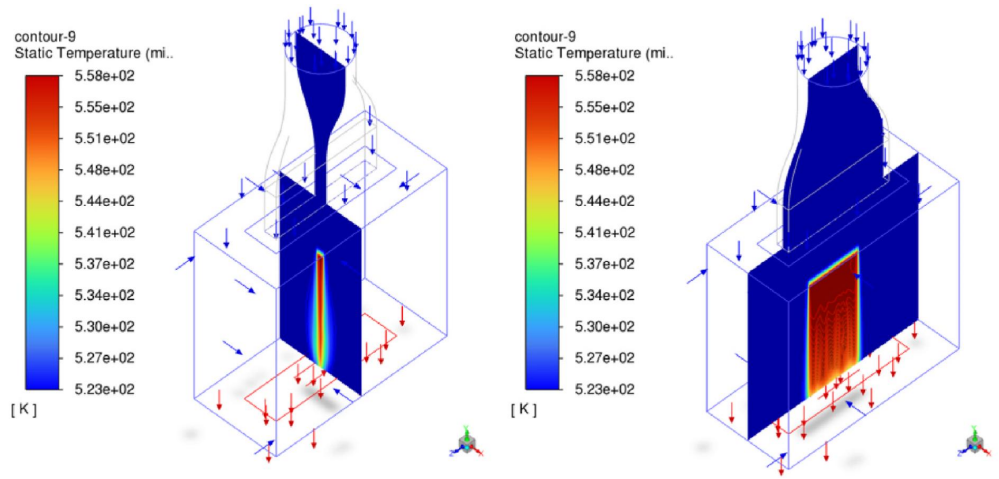
热分析

能量沉积计算

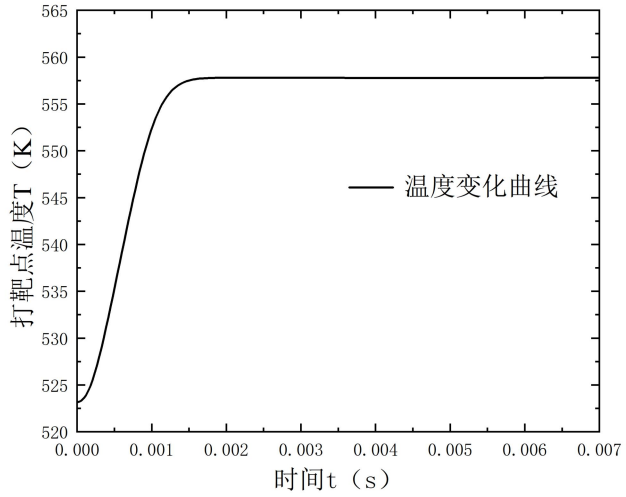
- 通过FLUKA计算600MeV、5mA的束流打靶模拟计算，得到锂靶能量沉积为6.9×10^{-3}GeV，靶上总功率沉积为34.6kW
- 将 FLUKA 输出的空间能量沉积分布转换为 Fluent 坐标系下的体热源分布，进行了蒙特卡洛能量沉积结果向CFD热流场计算的耦合
- 通过UDF编译加载热源至Fluent模型液态锂射流区域，进行瞬态热流计算



靶上x-z截面能量分布



射流x-y和y-z截面温度分布云图



加载热源后温度随时间变化曲线

液态锂初始温度设定为250℃，加载热源后最高温度为285℃，温升35℃，这证实了射流具有更优秀的冷却表现

目录

01 高功率缪子源背景

02 束流打靶物理设计及放射性分析

03 液态锂射流Fluent模拟分析

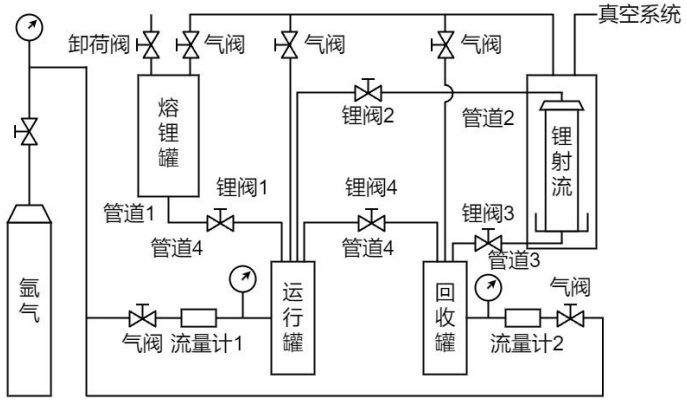
04 无窗液态锂射流实验验证

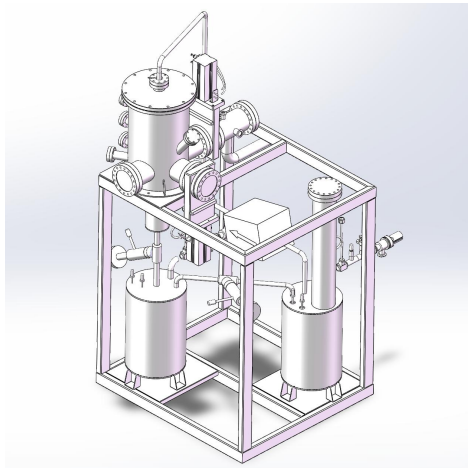
05 总结与展望

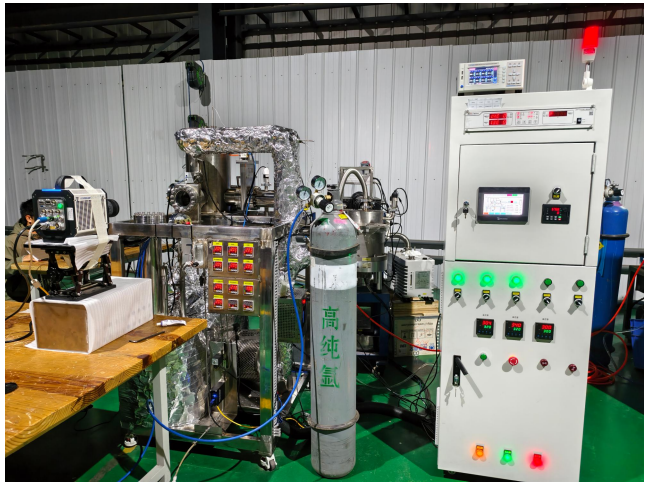
05 无窗液态锂射流实验验证

实验搭建

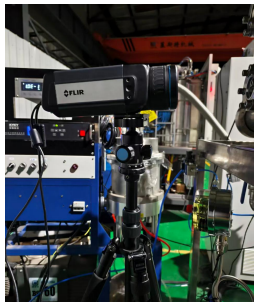
无窗液态锂射流回路系统的搭建

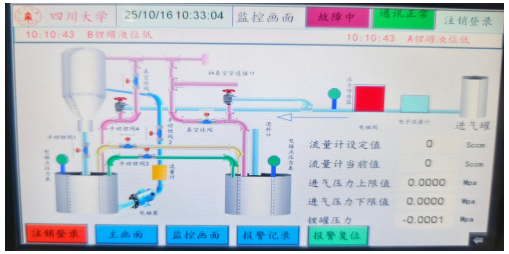






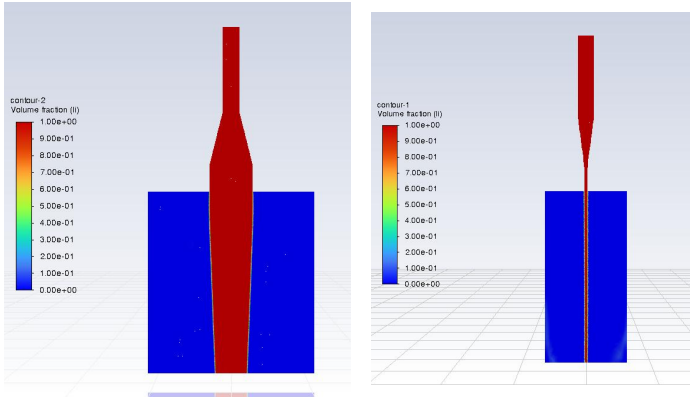




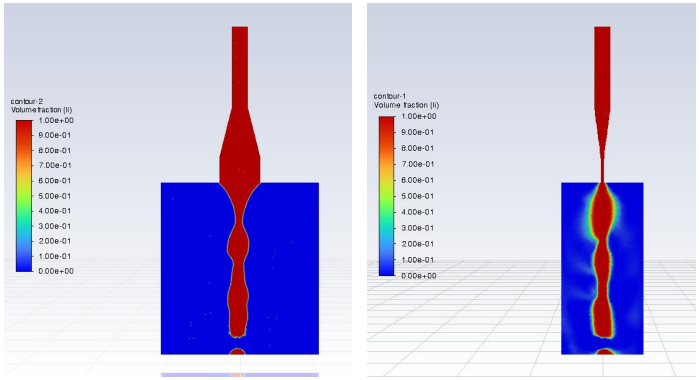


模拟结果

高流量工况：射流稳定呈片状



低流量工况：射流呈水滴状聚拢破碎

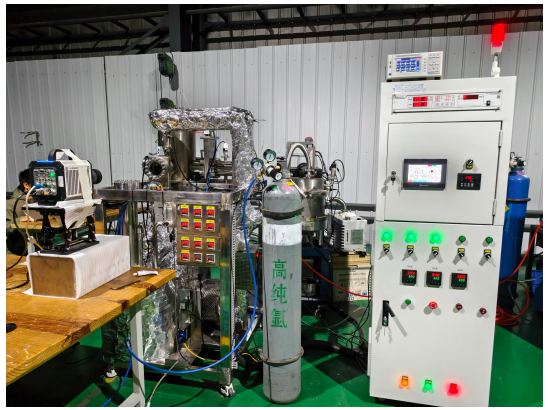


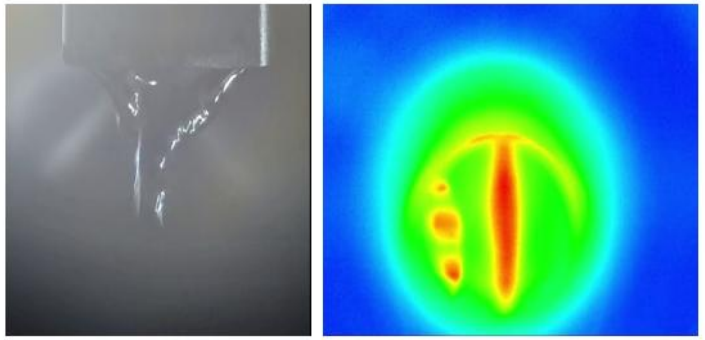
05 无窗液态锂射流实验验证

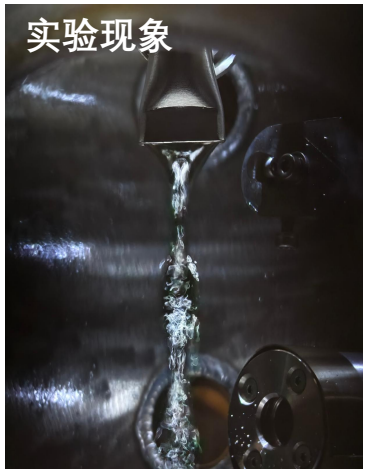
实验结果分析

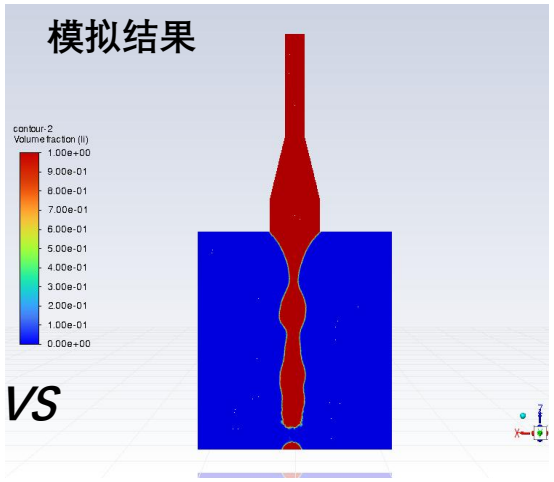
初步试验结果

核心参数	反馈值
处理罐温度	300℃
喷嘴温度	270℃
真空度	1.7×10^{-1}Pa









结果分析

- 完成了无窗液态锂射流回路系统的搭建
- 液态锂回路系统成功运行，实现液态锂在300℃温度、1.7×10^{-1}Pa真空度下的循环
- 受电磁泵老化影响，实际流量明显低于设计值
- 验证了模拟真实性

液态锂射流回路系统成功运行，初步验证了其工程可行性

目录

01 高功率缪子源背景

02 束流打靶物理设计及放射性分析

03 液态锂射流Fluent模拟分析

04 无窗液态锂射流实验验证

05 总结与展望

06 总结与展望

主要结论

- 通过蒙特卡罗与CFD模拟，验证了无窗液态锂射流靶用于高强度缪子源的可行性。研究表明，综合考虑缪子产额、俘获效率及射流稳定性，确定7 mm为较优射流厚度，射流保持稳定；最大温升约35 ℃，且放射性残余剂量低于石墨靶；
- 液态锂循环回路的成功运行进一步验证了工程可行性；
- 未来将重点开展MHD效应研究、射流优化及实验验证，推动其工程化应用

相关研究已发表至***NET***期刊：

Niu, J., et al., “Simulation Study of the Curtain-Type Liquid Lithium Jet as a Muon Source Target,” Nuclear Engineering and Technology, 58 (2026), 104511. DOI: [10.1016/j.net.2026.104511](https://doi.org/10.1016/j.net.2026.104511).

Nuclear Engineering and Technology 58 (2026) 104511

Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Engineering and Technology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/net

Original Article

Simulation study of the curtain-type liquid lithium jet as a muon source target

Jianwei Niu [a,b], Han-Jie Cai [a,c,d,*], Zhilv Zhang [a,c], Guihao Lu [e], Huan Jia [a,c], Zongbiao Ye [f], Yunpeng Cao [a,f], Xiaobo Li [a], Binbin Tian [d], Jincheng Li [a,c], Rong Wang [a,c], Yuanshuai Qin [a,c], Yuan He [a,c]

[a] Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000, China
[b] School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China
[c] School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China
[d] Advanced Energy Science and Technology Guangdong Laboratory, Huizhou, 516001, China
[e] Sun Yat-sen University, Guangzhou, 510275, China
[f] Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu, 610065, China

ARTICLE INFO

Keywords:
Muon source
Liquid-lithium jet target
Coupled simulation
CiADS

ABSTRACT

With the development of the China Initiative Accelerator Driven System (CiADS) and its Muon Science and Technology application platform (MuST), a curtain-type liquid lithium jet target has been proposed as a promising solution for high-power muon production. Monte Carlo and ANSYS Fluent simulations were combined to evaluate the muon yield, hydrodynamic stability, thermal response, and radiological characteristics of the free-surface liquid lithium jet target. For a fixed effective thickness of 3 cm, a 7 mm jet thickness is identified as the more preferable configuration. At this thickness, the surface muon production rate from the target is 3.29×10^{-6} μ^+/p, and the muon capture efficiency reaches 36%. Considering the expected overall transmission efficiency of approximately 10% from the target region to the experimental area, a surface-muon beam rate on the order of 10^{10} μ^+/s could be delivered to the experimental area at a proton beam current of 5 mA. Hydrodynamic simulations confirm that the jet maintains a continuous and stable free-surface morphology without obvious breakup or large-scale deformation. Transient thermal analysis shows that, under a 600 MeV, 5 mA proton beam and a jet velocity of 4 m/s, the maximum temperature rise is only ~35 °C, demonstrating excellent heat-removal performance. Radiological analysis further shows that the dominant long-lived radionuclides in the lithium target are mainly ^{3}H and ^{7}Be. After one month of irradiation, the total activity of the lithium target is 2.2×10^{13} Bq, approximately 17.3 times lower than that of the graphite target. After 72 h of cooling, the maximum residual dose rate of the lithium target is 6.23×10^8 μSv/h, compared with 5.90×10^9 μSv/h for the graphite target, corresponding to a reduction factor of approximately 9.5. These results indicate that the curtain-type liquid lithium jet is a feasible and advantageous target solution for the high-intensity muon source driven by a high-current superconducting linac.

1. Introduction

With the development of muon sciences and technologies, the demand for high-intensity muon sources has been steadily increasing [1–5]. The MuST muon source, based on the continuous-wave (cw) proton beam of CiADS, is intended to provide a technical pathway for the construction of high-intensity muon sources in China [6–9]. With a proton beam power of 3 MW, the muon production target becomes the most critical factor limiting the achievable muon intensity. Unlike neutron targets, muon production targets are typically thin and subjected to focused beam bombardment, which restricts the choice of cooling methods and results in higher thermal power densities and more severe radiation damage. At present, major high-intensity muon sources such as PSI, J-PARC, and RAON employ rotating graphite targets [10–13]. For beam powers approaching 1 MW, the deposited thermal power in the target reaches tens of kilowatts; with radiative cooling

* Corresponding author. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000, China.
E-mail address: caihj@impcas.ac.cn (H.-J. Cai).

https://doi.org/10.1016/j.net.2026.104511
Received 9 December 2025; Received in revised form 28 May 2026; Accepted 19 June 2026
Available online 20 June 2026
1738-5733/© 2026 Korean Nuclear Society, Published by Elsevier Korea LLC. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

中国科学院
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

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



THANKS

牛建伟

2026.10.16

中国科学院近代物理研究所