

# HIAF高能终端谱仪快模拟以及辐射模拟

---



何熊宏

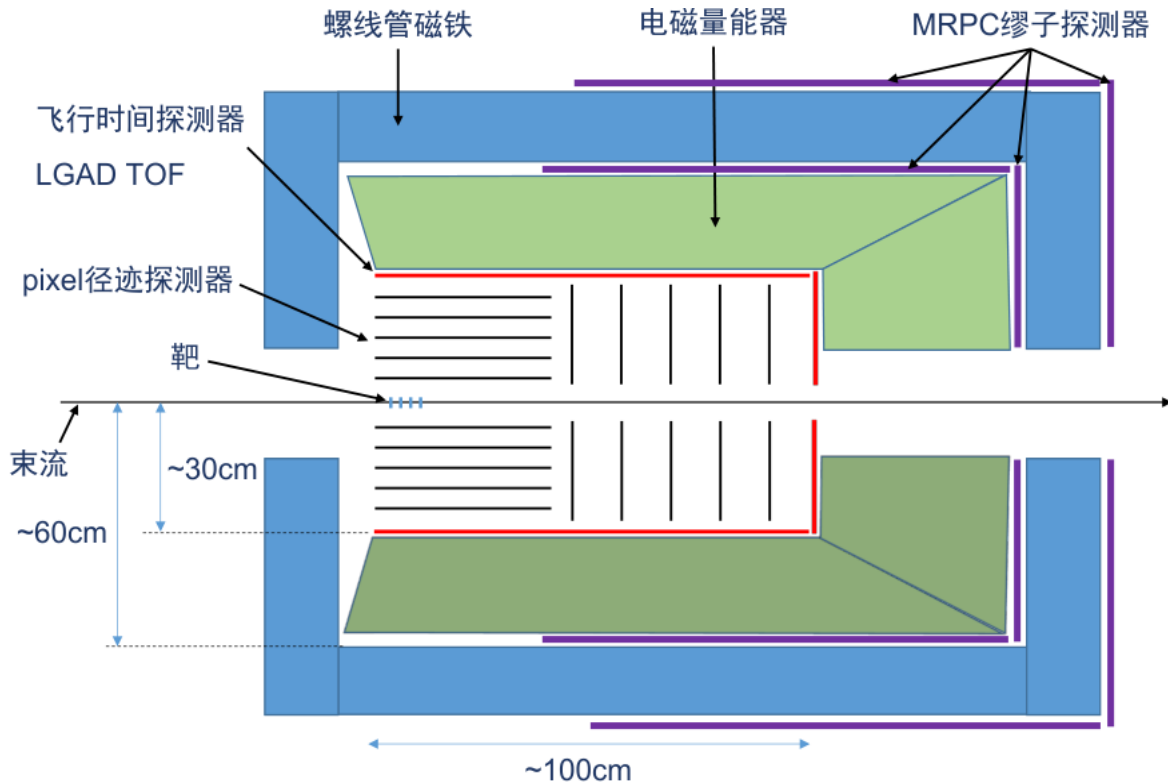
中国科学院近代物理研究所

2024年11月16日

# 提纲

- 高能终端谱仪快模拟
- 超氙核重建模拟（快模拟）
- 高能终端谱仪辐射模拟
- 总结

# HIAF高能终端谱仪



- 螺线管磁场：0.8 Tesla
- 全硅像素径迹探测器
- LGAD飞行时间探测器
- 电磁量能器

- 结构紧凑、分辨率高、响应时间快
- $\eta$ 介子物理、超核物理、轻强子物理、核物质相变物理

# 为什么需要快模拟?

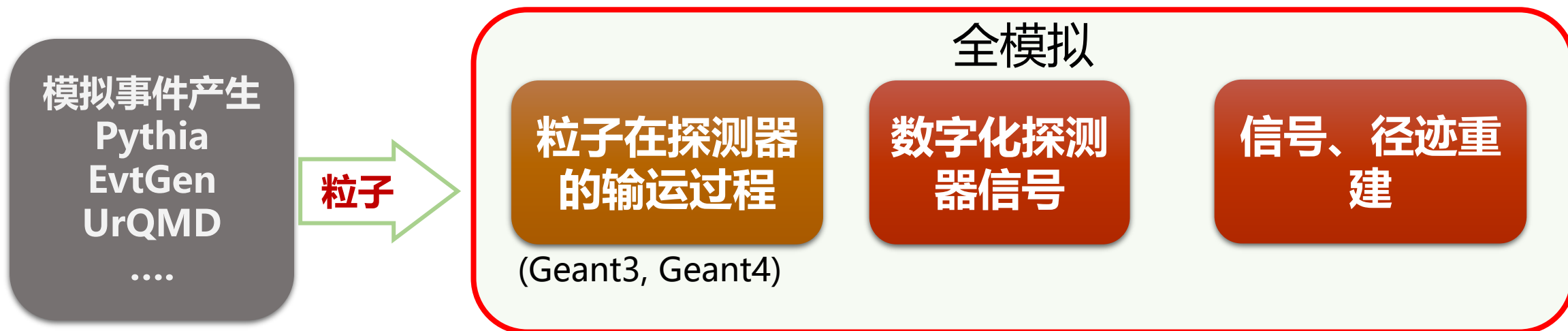
## 物理过程在探测器中的模拟流程



- 粒子运输模拟占用80%以上的CPU时间
- 每个探测器的数字化、径迹重建需要开发相应算法

**快模拟：缩短模拟所用时间，提高模拟效率**

# 高能终端谱仪快模拟



## 全模拟中探测器响应进行参数化

- 接收度：半径、方位角、极角
- 能损、能量沉积
- 分辨率：动量、能量、时间
- 探测效率

基于FairRoot

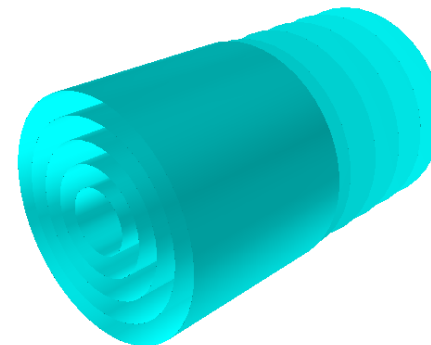
<https://gitee.com/hexionghong/chns-fast-sim>

# 高能终端谱仪快模拟

## ❑ 全硅像素径迹探测器：测量粒子动量和能损

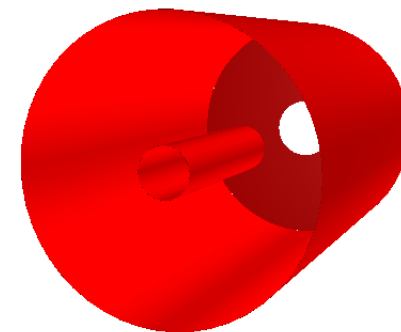
- 粒子动量分辨率  $\left(\frac{\sigma_p}{p}\right)^2 = \left(\sqrt{\frac{720}{N+4}} \frac{\sigma_{xz} p_{xz}}{0.3BL^2}\right)^2 + \left(\frac{0.0523}{\beta B \sqrt{LX_0 \sin\theta}}\right)^2$

- 能损：  $\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$  分辨率10%



## ❑ LGAD飞行时间探测器：测量粒子飞行时间

- 磁场中飞行长度：  $L = \sqrt{\left(2\rho \times a \sin\left(\frac{R}{2\rho}\right)\right)^2 (1 + 1/\tan^2(\theta))}$ ,  $\rho = p_T/(qB)$
- 时间分辨：30ps



## ❑ 电磁量能器：能量沉积

- 基于全模拟的输入参数

# 超氙核重建模拟（快模拟）

# YN 相互作用及超核

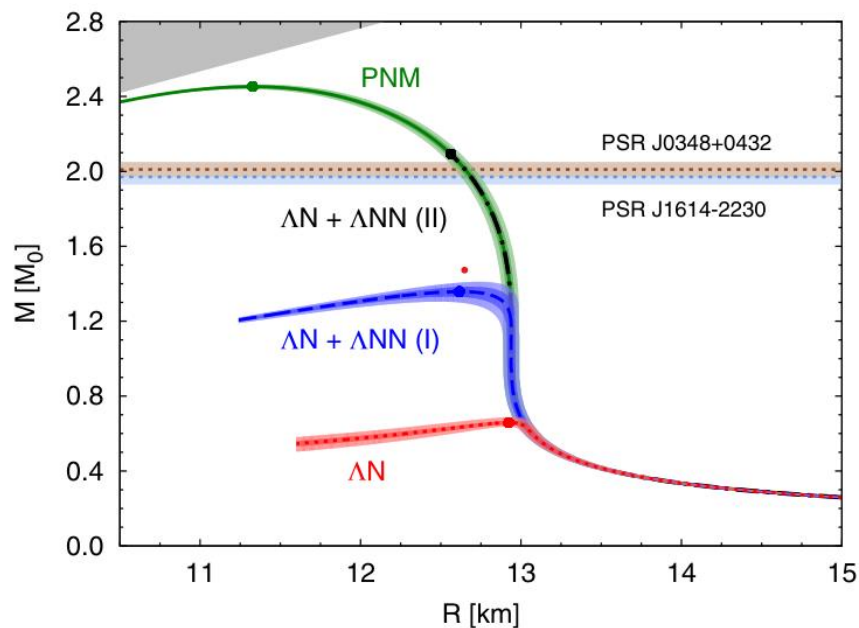
## 超子-核子 (YN) 相互作用

- 奇异粒子在核物质中的作用
- 致密星体内部性质

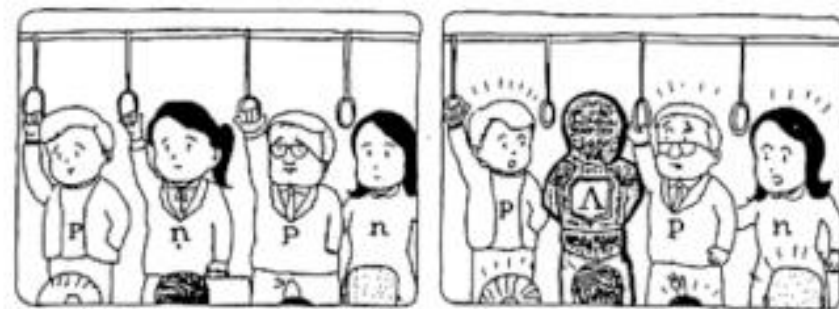
由于超子的寿命较短，实验上很难通过超子-核子散射测量YN相互作用。

## 超核

- 原子核中含有一个或多个超子
- 研究超子-核子相互作用的探针



*Phys. Rev. Lett.* 114, 092301 (2015)



Ordinary nucleus

With a strange particle

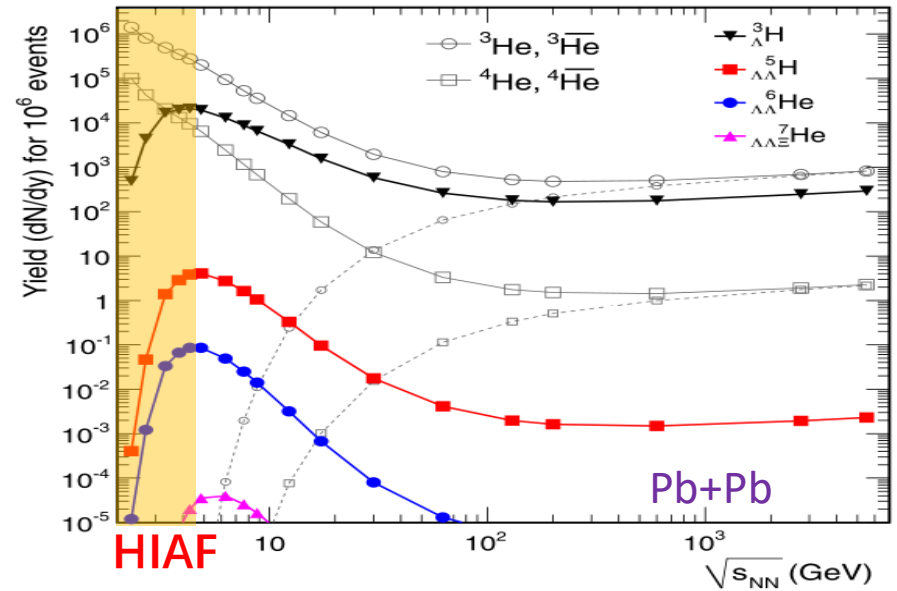
*H. Bando, PARITY 1, 54 (1986)*



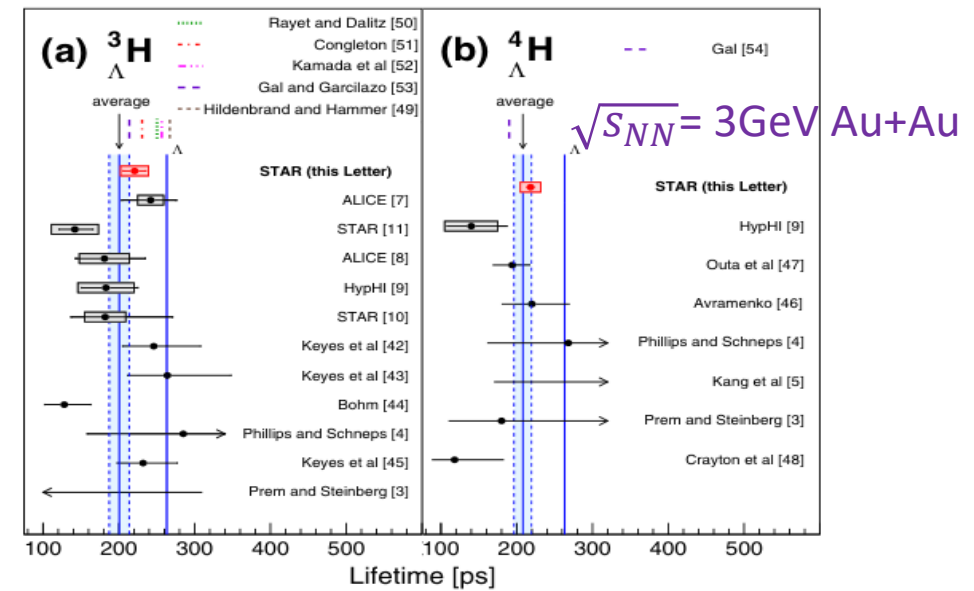
# 重离子碰撞中超核的产生

- 高能重离子碰撞能够产生大量超子和超核
- 超核在高能重离子碰撞中的形成过程是研究超子-核子相互作用的有效办法

**几个GeV能区的高能重离子碰撞中，超核产额达到最大**



*Phys. Lett. B 697, 203 (2011)*

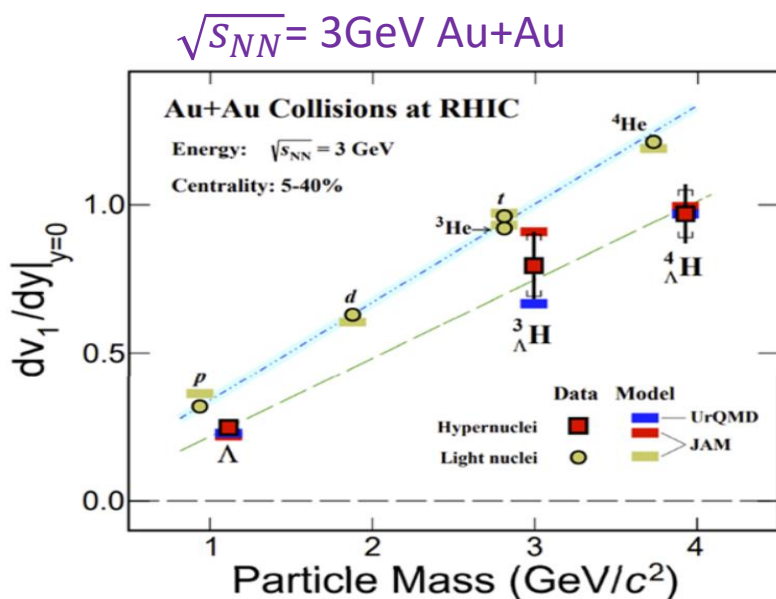


*STAR Collabotation, Phys. Rev. Lett. 128, 202301 (2022)*

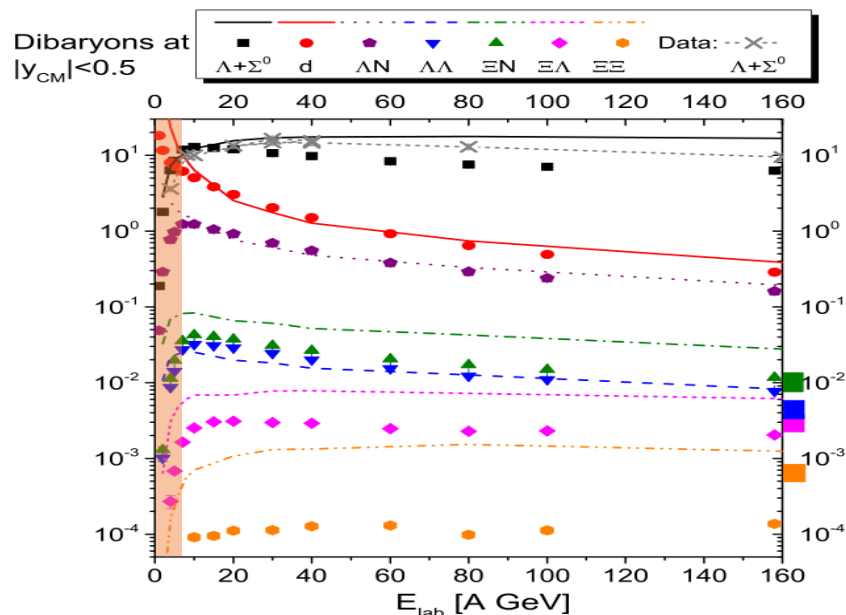
**U+U at HIAF  $\sqrt{s_{NN}} = 2.2-4.5 \text{ GeV}$**

# 重离子碰撞中超核的可测量量

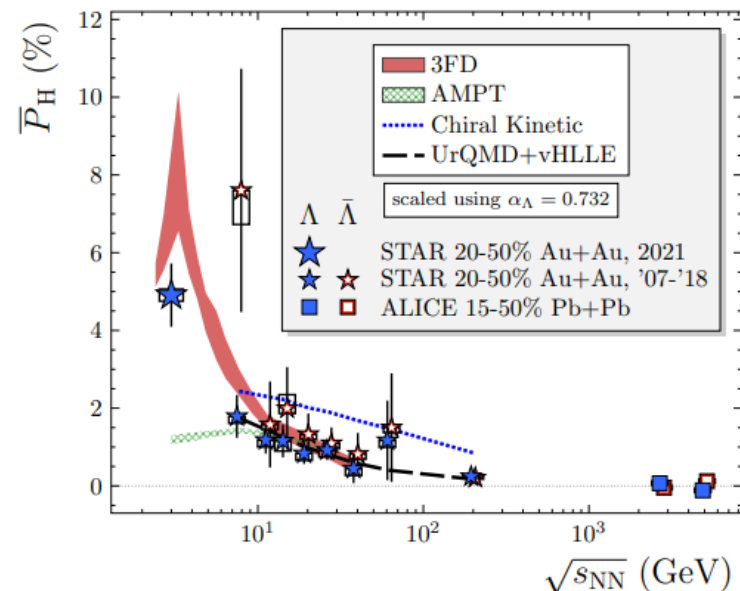
- 超核寿命、产额、集体流 — 产生机制、YN相互作用
- 寻找多超子超核和双重子超核
- 超核的自旋极化



STAR Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 130, 212301 (2023)



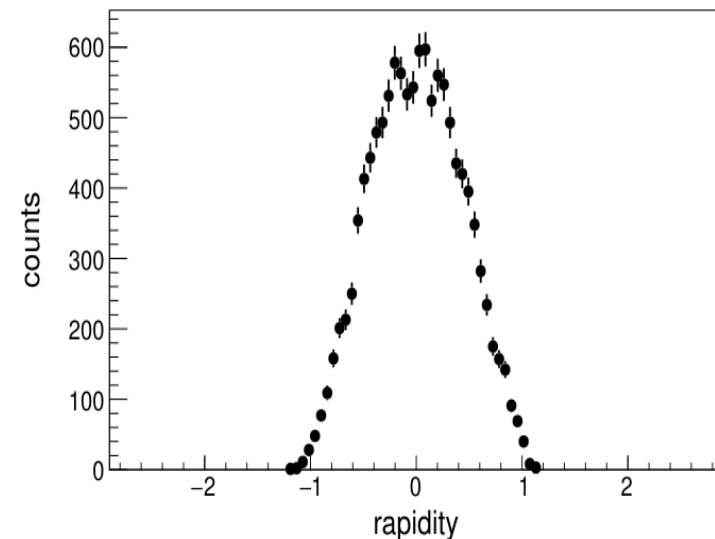
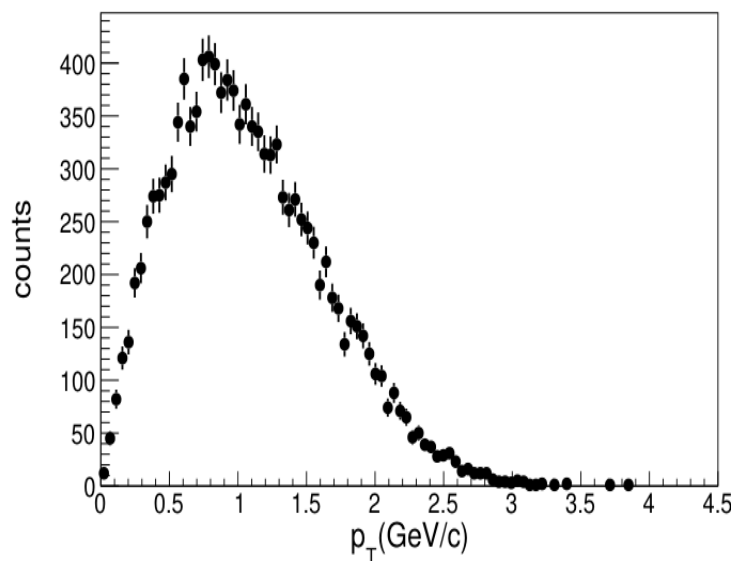
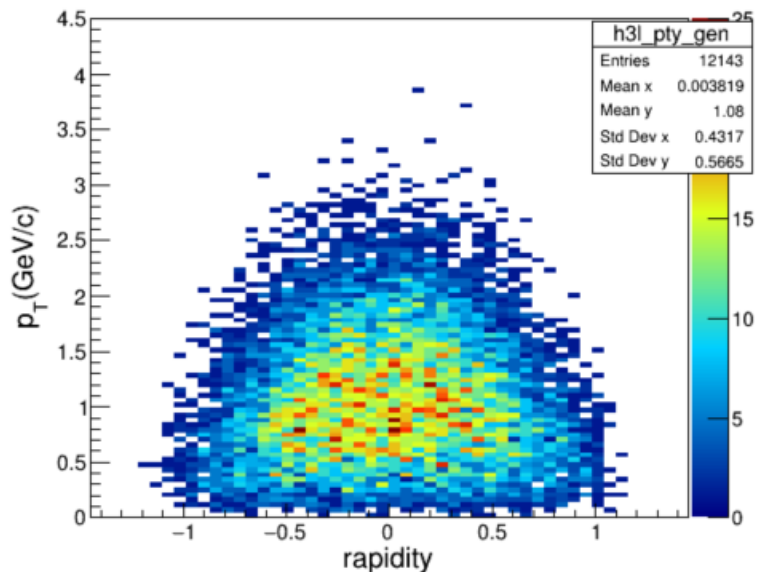
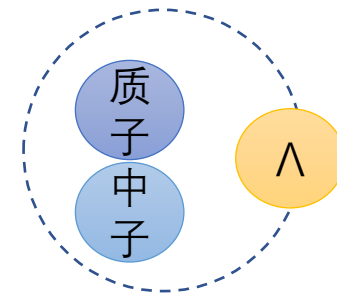
*Phys. Lett. B* 714, 85 (2012)



STAR Collaboration, *Phys. Rev. C* 104, L061901(2021)

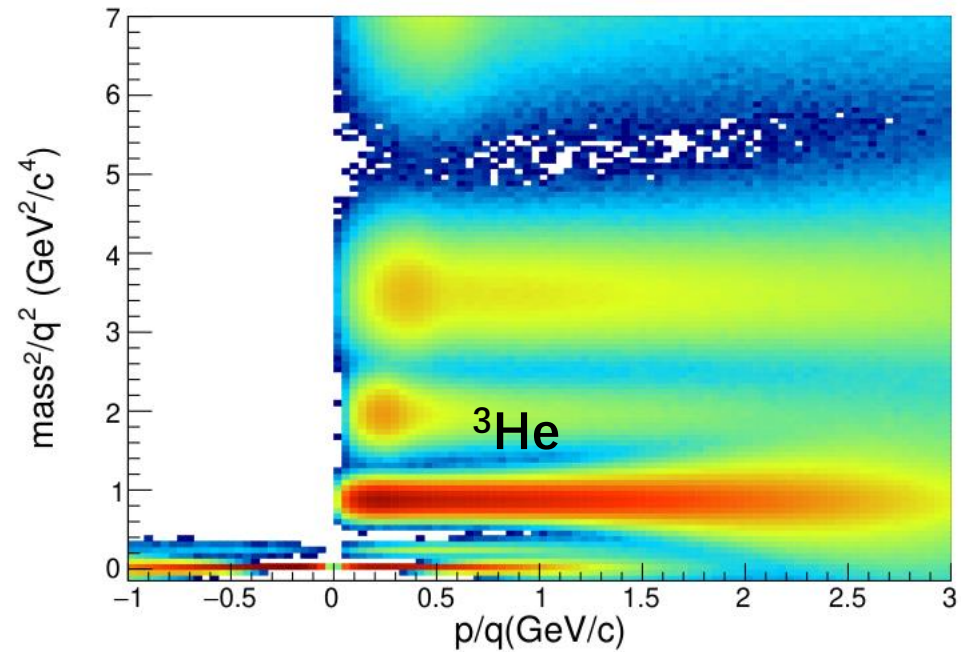
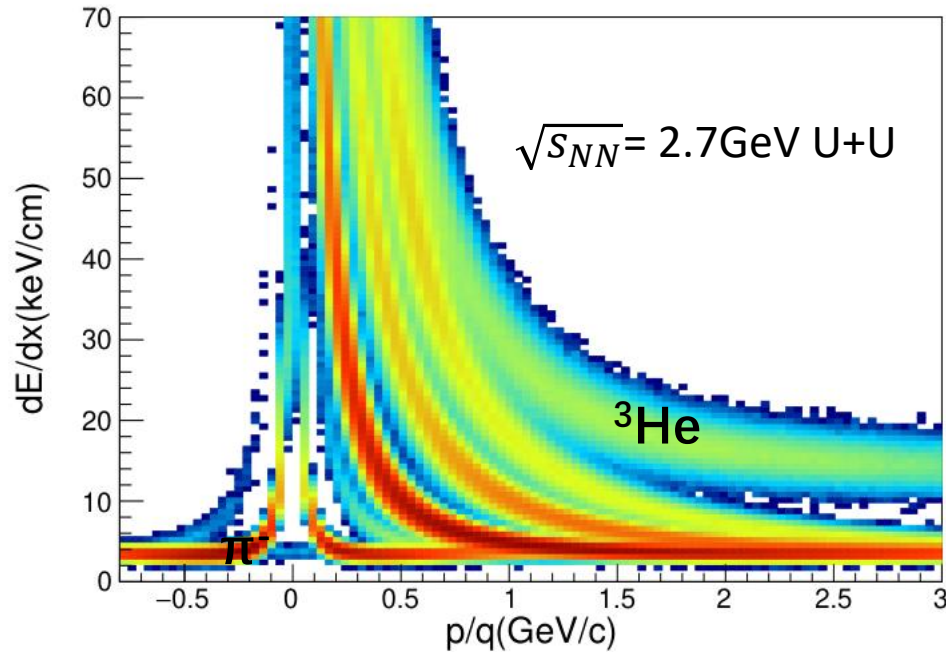
# $\sqrt{s_{NN}} = 2.7\text{GeV}$ , U+U中 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 的产生

- 碰撞系统:  $E_{\text{beam}} = 2\text{ GeV U+U}$ ,  $\sqrt{s_{NN}} = 2.7\text{GeV}$ ,  $y_{\text{cm}} = 0.9$ ,  $2 \times 10^6$  事件
- JAM强子输运模型: GeV能区模拟重离子碰撞的事件产生器
- 轻原子核和 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 的形成: 核子并和模型 ( $p+n \rightarrow d$ ,  $d+\Lambda \rightarrow {}^3_{\Lambda}\text{H}$ )
- ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  产生率: 0.006/事件



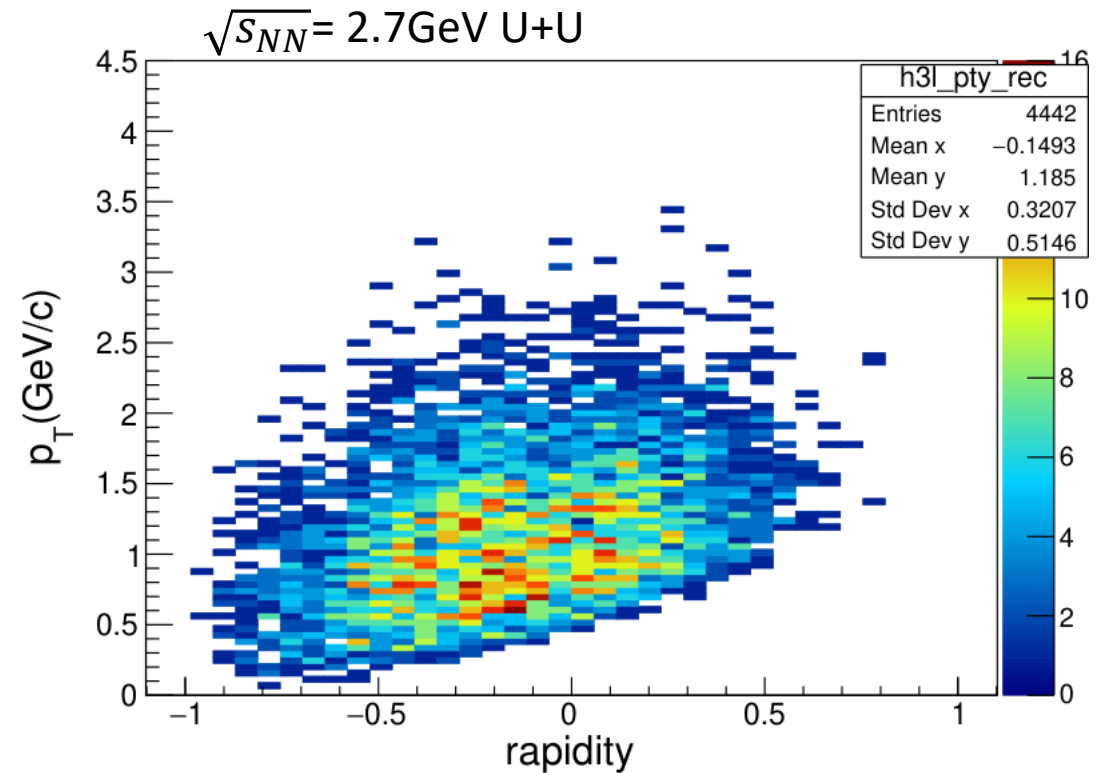
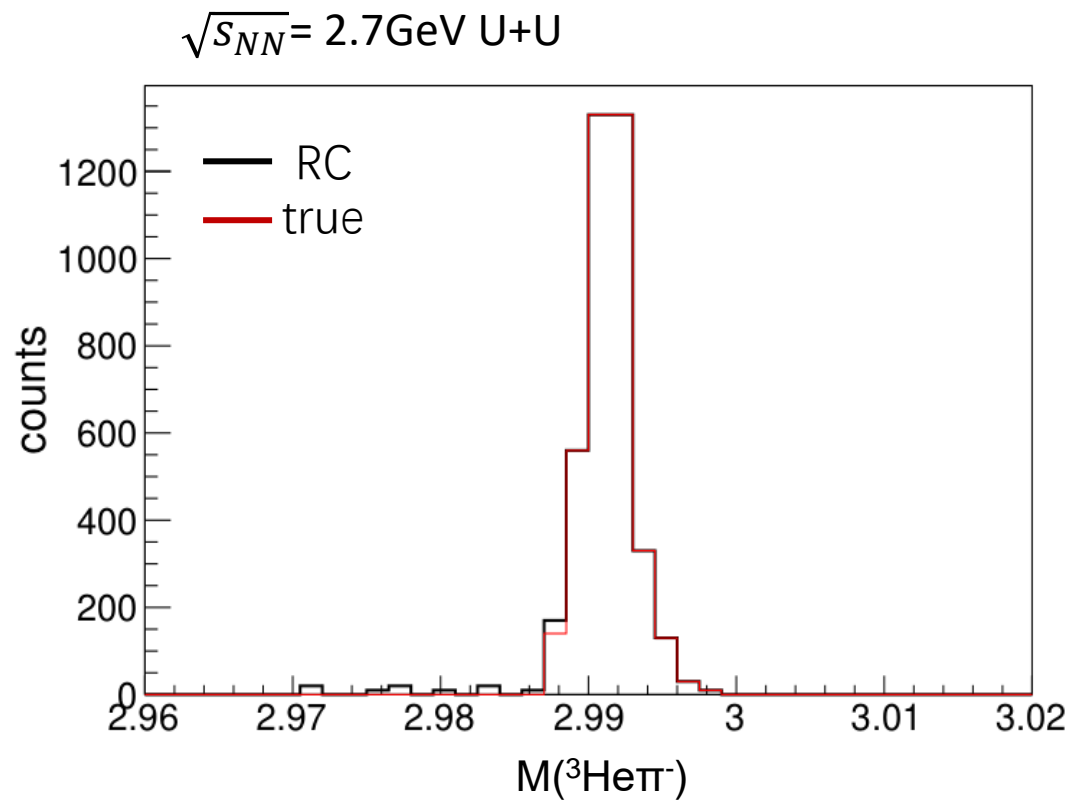
# 带电粒子鉴别及重建 ${}^3\Lambda\text{H}$

衰变过程:  ${}^3\Lambda\text{H} \rightarrow \pi^- + {}^3\text{He}$  (假设分支比为100%)



- 通过硅径迹探测器中的 $dE/dx$  筛选 $\pi^-$ ；联合 $dE/dx$  飞行时间信息筛选 ${}^3\text{He}$
- $\pi^-$ 和 ${}^3\text{He}$ 据碰撞顶点的距离大于0.5 cm

# ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 不变质量分布



- 粒子鉴别和顶点筛选后,  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  信号纯度~93%
- 覆盖中心快度区; 重建平均效率: 70.7%

# 超核在 $\sqrt{s_{NN}} = 2.7 \text{ GeV U+U}$ 中的产额

假设数据数据采集时间为1个月，总共  $> 5 \times 10^{11}$  事件数

*Phys. Lett. B 714, 85 (2012); Phys. Lett. B 697, 203 (2011)*

	yield per event	Total yield	Possible candidates
${}^3_{\Lambda}\text{H}$	$6 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^9$	$\sim 10^8 (30\% \pi^- + {}^3\text{He})$
${}^4_{\Lambda}\text{H}$	$6 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^8$	$\sim 10^7 (70\% \pi^- + {}^4\text{He})$
${}^5_{\Lambda}\text{He}$	$2 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^7$	$\pi^- + {}^4\text{He} + p$
${}^4_{\Lambda\Lambda}\text{H}$	$10^{-5}$	$5 \times 10^6$	$\pi^- + {}^4_{\Lambda}\text{He}$
${}^5_{\Lambda\Lambda}\text{H}$	$10^{-7}$	$5 \times 10^4$	$\pi^- + {}^5_{\Lambda}\text{He}$

- 对超核产额、寿命、集体流进行精确测量
- 可能观测到双超子超核以及超核的极化

# 高能终端谱仪辐射模拟

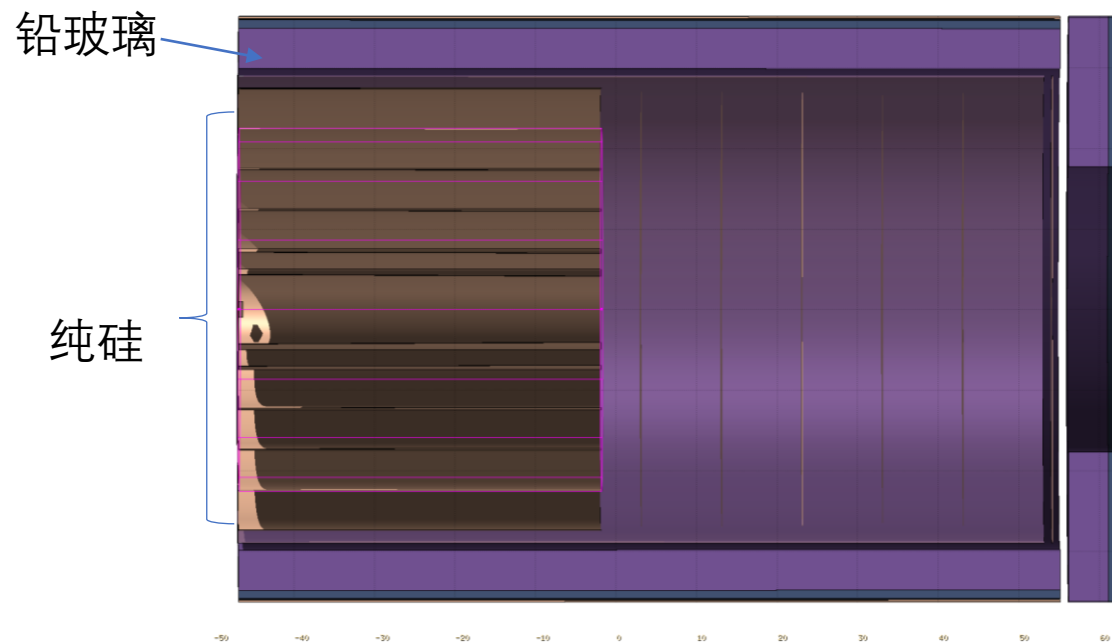
# 辐射损伤模拟设置

## 探测器

- 硅像素径迹探测器：纯硅，100微米
- LGAD飞行时间探测器：纯硅，300微米
- 电磁量能器（铅玻璃+CsI+硅）

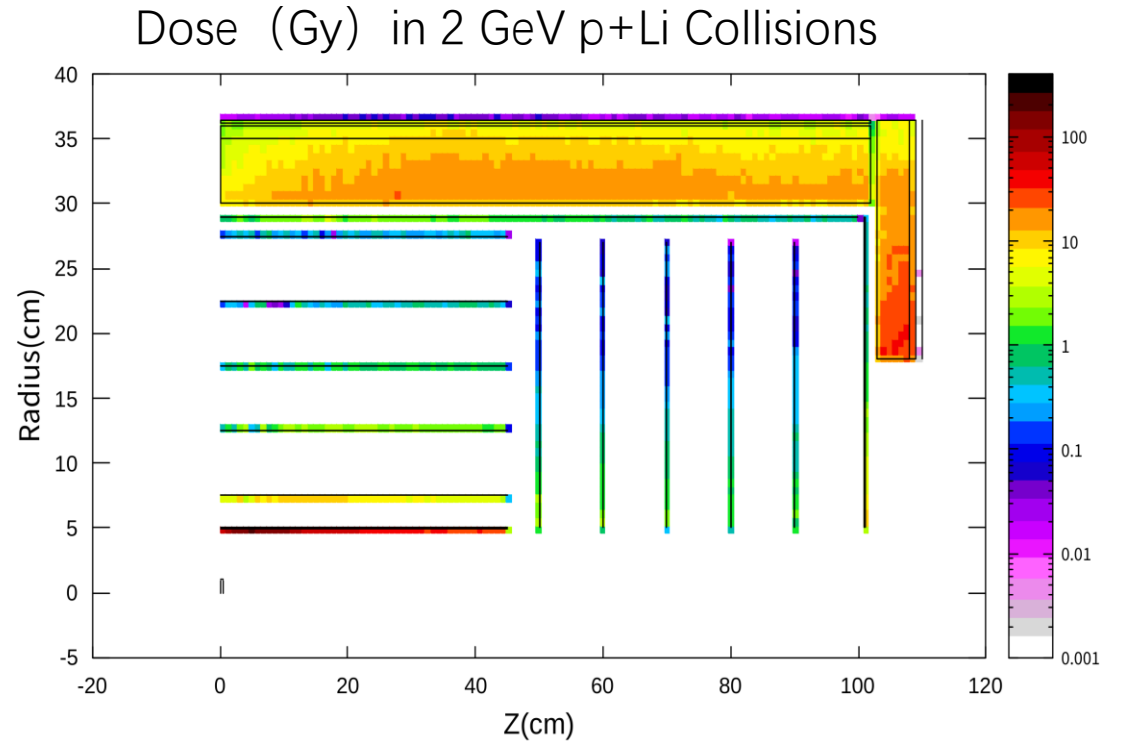
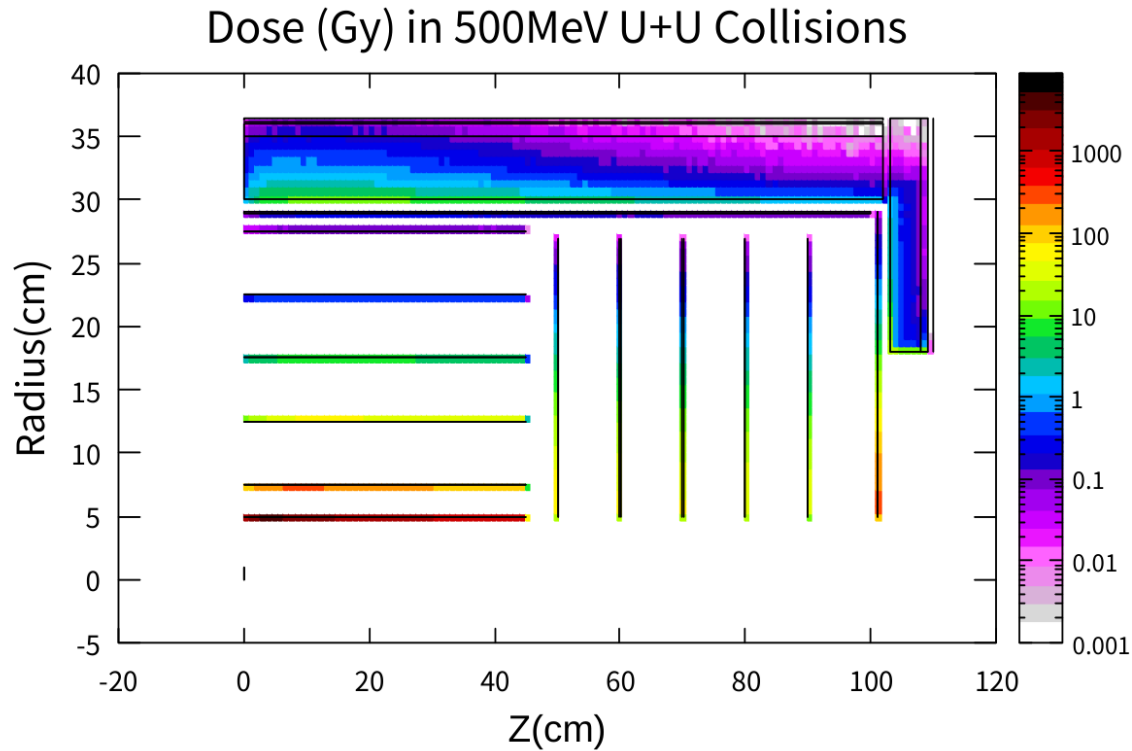
## 事件产生：Fluka

- 500MeV U+U: 靶厚度250微米, 非弹散射事件率：2%，末态粒子数目多，动量小  
一个月剂量： $1\text{MHz} / 0.02 \times 3600\text{s/h} \times 24\text{h/d} \times 30\text{d}$
- 2GeV p+Li: 靶厚度5毫米, 非弹散射事件率：0.4%，末态粒子数目少，动量大  
一个月剂量： $100\text{MHz} / 0.004 \times 3600\text{s/h} \times 24\text{h/d} \times 30\text{d}$





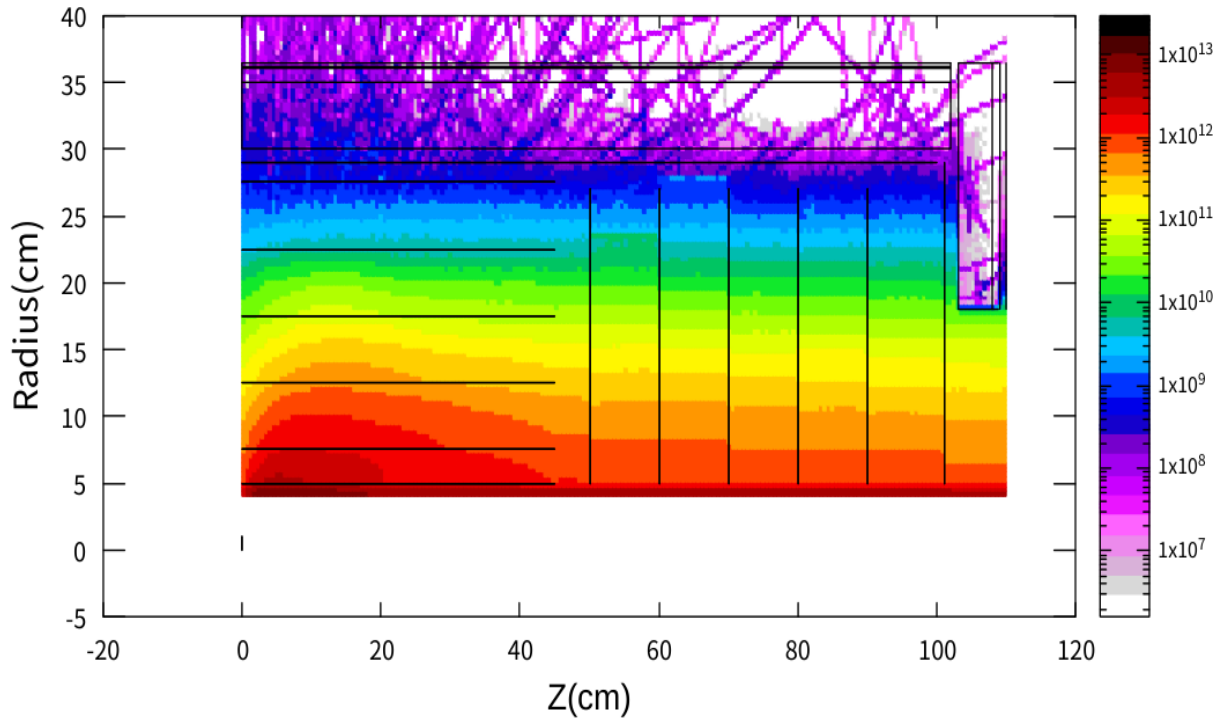
# 一个月运行辐射剂量



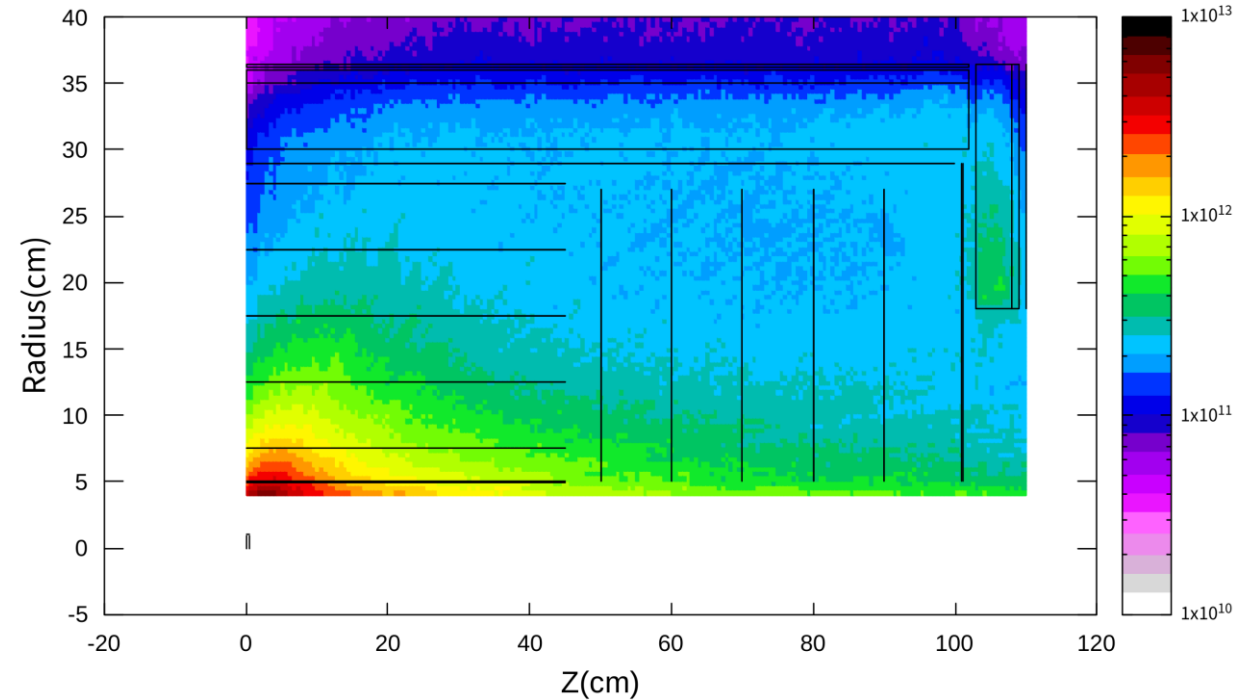
- 最内层LGAD中的辐射剂量最大~3000 Gy
- 前端量能器辐射剂量~50 Gy

# 1 MeV等效中子通量

Silicon 1MeV-Neutron Equivalent Fluence in 500MeV U+UCollisions



Silicon 1MeV-Neutron Equivalent Fluence in 2 GeV p+Li Collisions



- 最内层LGAD中的最高通量  $\sim 3 \times 10^{12}/\text{cm}^2$
- 前端量能器辐射剂量  $\sim 3 \times 10^{11}/\text{cm}^2$

# 高能终端谱仪辐射

	2 GeV p+Li (100MHz 1 month)		500 MeV U+U (1MHz 1 month)		探测器可承受 参考剂量/通量		
	Dose (Gy)	Si1MeV fluence ( $n_{eq}/cm^2$ )	Dose (Gy)	Si1MeV fluence ( $n_{eq}/cm^2$ )	探测器/材料/元件	Dose (Gy)	Si1MeV fluence ( $n_{eq}/cm^2$ )
最内层Si	200	$3 \times 10^{12}$	3000	$3 \times 10^{12}$	pixel	$2 \times 10^4$ [1] $1 \times 10^6$ [3]	$1.7 \times 10^{13}$ [1] $1 \times 10^{13}$ [2] $1 \times 10^{15}$ [3]
量能器	20 50 (前角局部)	$3 \times 10^{11}$	20	$10^9$	LGAD		$1 \times 10^{15}$ [4]
					铅玻璃	20 [5]	
					SiPM		$1 \times 10^{14}$ [6]

- **pixel、LGAD、SiPM，已有同类探测器满足抗辐射要求，需要研发和选型时确定抗辐射指标并实现**
- **铅玻璃受到的辐射剂量与现有产品的抗辐射能力接近，需要专门研发提高，或每次实验后拆卸高温淬火恢复**

[1] ALPIDE抗辐射 (ALICE IST upgrade已大规模使用) :  $1.7 \times 10^{13} n_{eq}/cm^2$

[https://indico.cern.ch/event/695271/contributions/2956083/attachments/1637991/2614211/CERN\\_LHC\\_Rad\\_symp\\_23042018\\_HHI.pdf](https://indico.cern.ch/event/695271/contributions/2956083/attachments/1637991/2614211/CERN_LHC_Rad_symp_23042018_HHI.pdf)

[2] CMOS pixel探测器抗辐射 (Supix-1, CEPC, 山大) :  $1 \times 10^{13} n_{eq}/cm^2$  <https://arxiv.org/abs/2202.11471>

[3] DMAPS抗辐射 (MALTA2, HL-HLC) :  $1 \times 10^{15} n_{eq}/cm^2$  <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10246423&tag=1>

[4] LGAD抗辐射 (NDL, HL-LHC, 高能所、北师大) :  $1 \times 10^{15} n_{eq}/cm^2$  <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900220310056>

[5] 铅玻璃抗辐射 (TF101) : 20Gy辐照后透光率降低1% [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)90990-3](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)90990-3)

[5] SiPM抗辐射综述:  $1 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$

[https://indico.ipmu.jp/event/166/contributions/2761/attachments/2145/2627/SiPM-rad-dam-review\\_PD18\\_Musienko-v3.pdf](https://indico.ipmu.jp/event/166/contributions/2761/attachments/2145/2627/SiPM-rad-dam-review_PD18_Musienko-v3.pdf)

材料来自仇浩

# 总结

- 基于参数化的HIAF高能终端谱仪快模拟（全硅像素径迹探测器、LGAD飞行时间探测器、电磁量能器）

<https://gitee.com/hexionghong/chns-fast-sim>

- HIAF能区重离子碰撞中，超核产额达到最大；高能终端谱仪顶点分辨率高， ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 的重建纯度可达93%
- 基于FLUKA的辐射模拟，硅像素径迹探测器和LGAD满足谱仪要求，铅玻璃的辐射剂量与现有产品的抗辐射能力接近

谢谢大家！

Back up

# 超核极化 (arXiv:2405.12015)

