



北京大学
PEKING UNIVERSITY



缪子散射探测暗物质 基于RPC探测实验的初步进展与展望

Preliminary Progress in Probing Dark Matter with an RPC-based Cosmic Muon Scattering Detection System



李奇特 周辰 李强

PKMUON合作组

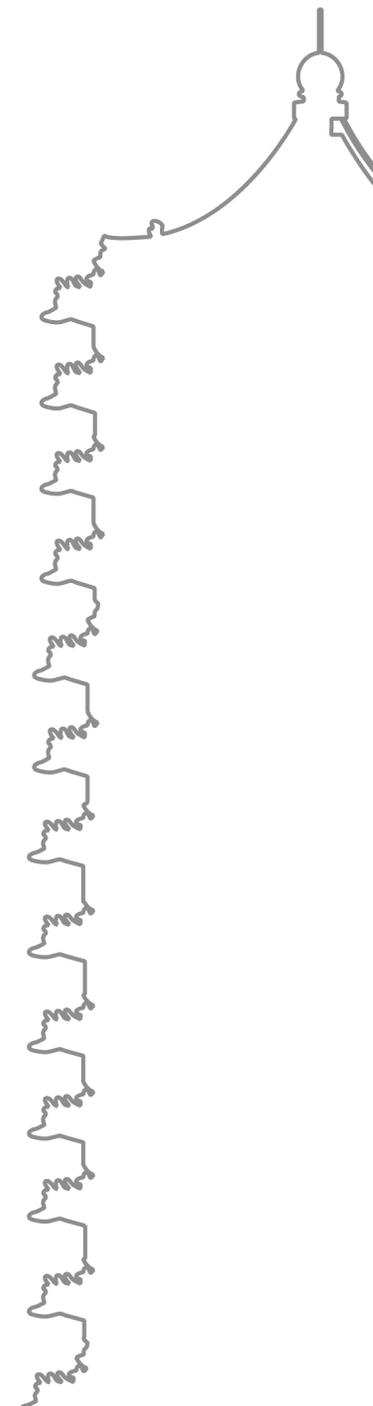
2024.05.09



CONTENTS

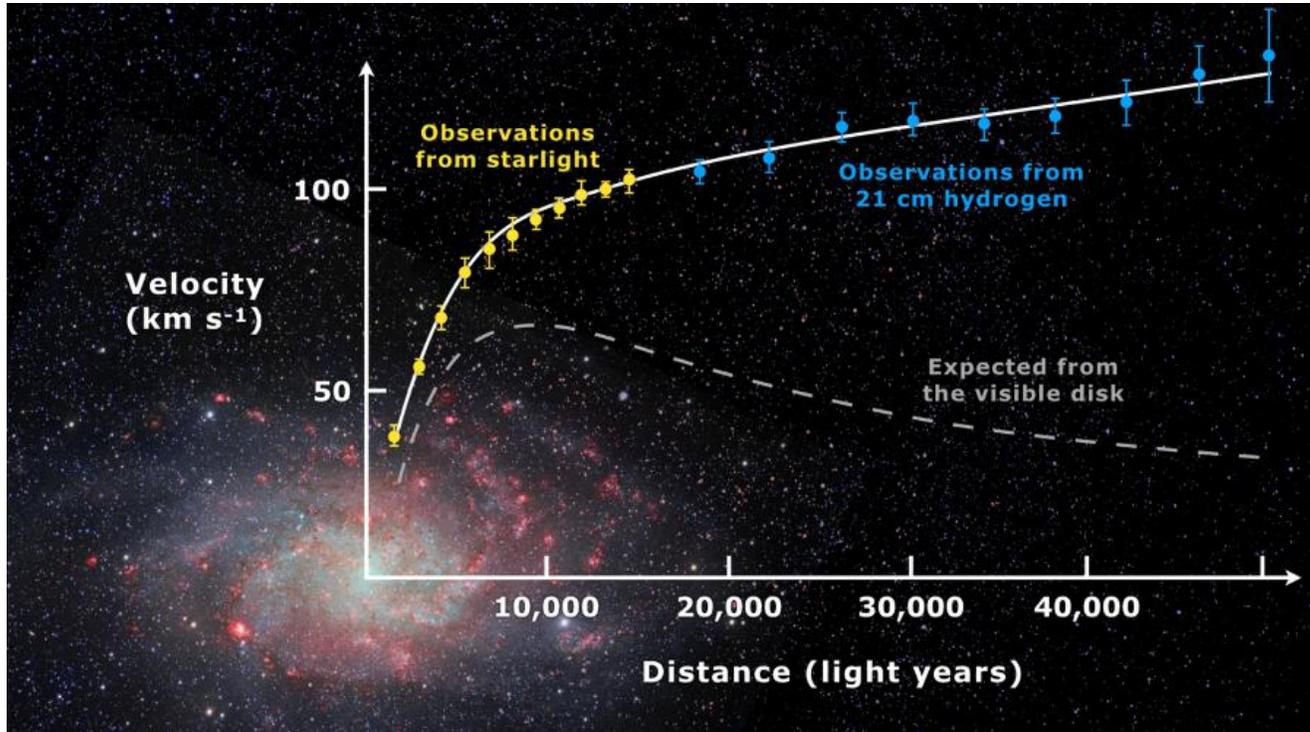
目录

1. 暗物质探测简介
2. PKMuon介绍
3. RPC实验装置介绍
4. 初步结果
5. 总结与展望



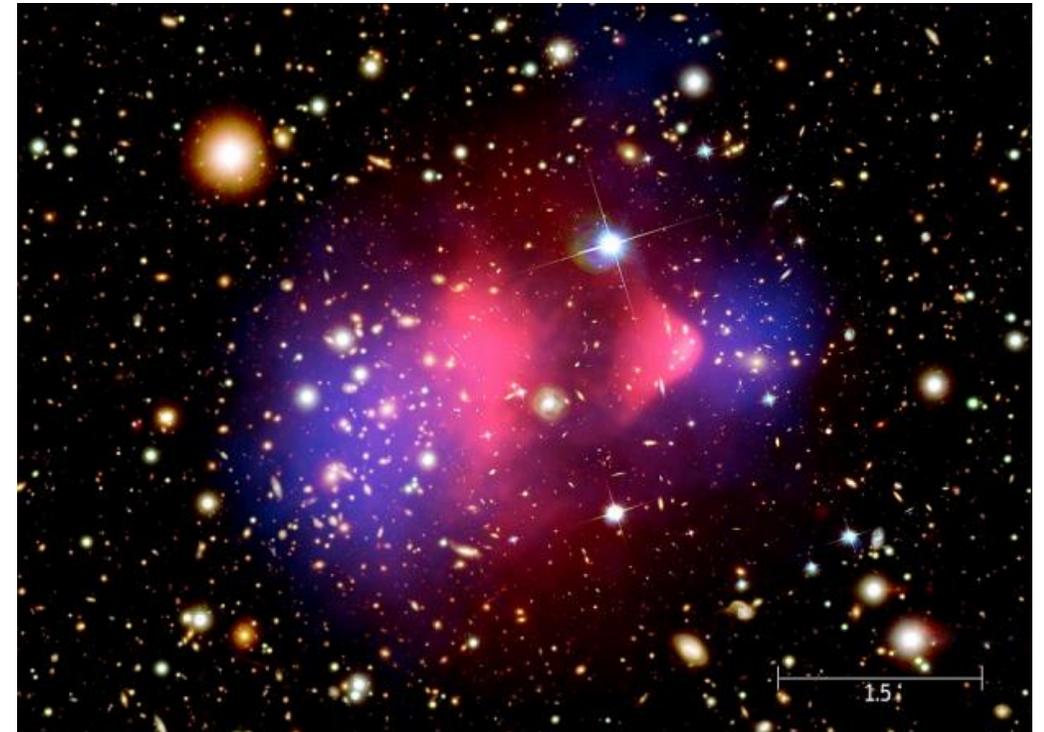
简介——暗物质存在证据

- 星系旋转曲线 (1933/1970s)



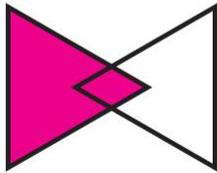
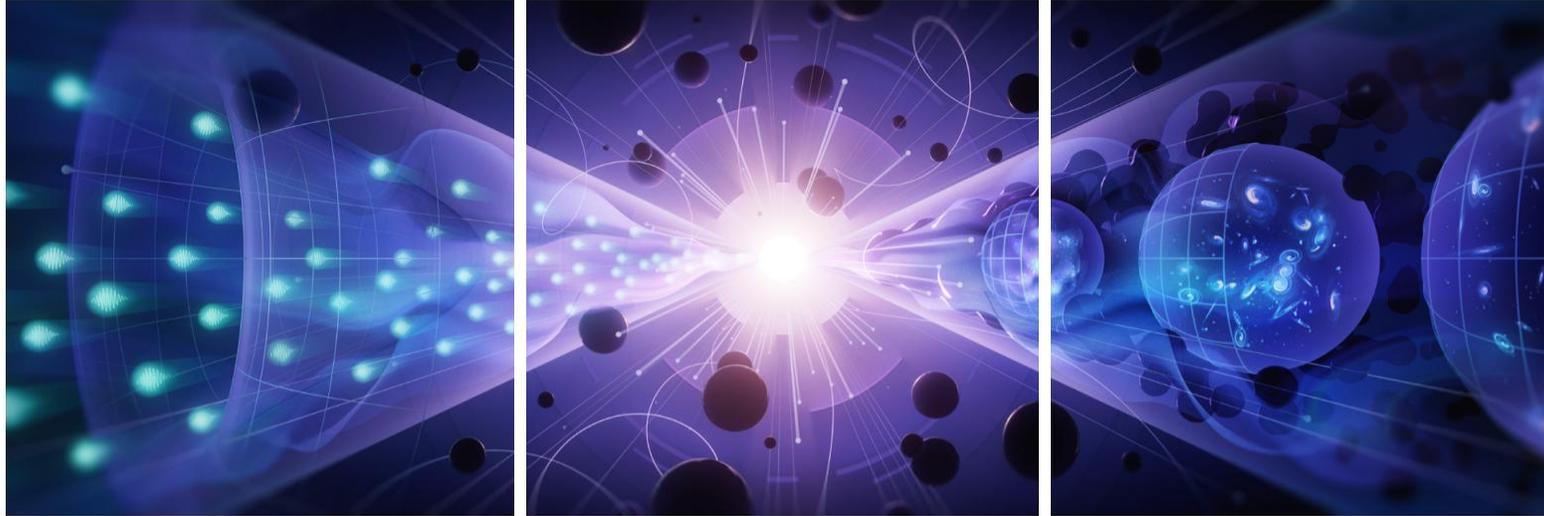
Credit: Mario De Leo. CC BY-SA 4.0.

子弹星系团



Credit: x-ray: NASA/CXC/CfA/M. Markevitch et al.; optical: NASA/STScI, Magellan/U. Arizona/D. Clowe et al.; lensing map: NASA/STScI ESO WFI, Magellan/U. Arizona/D. Clowe et al.

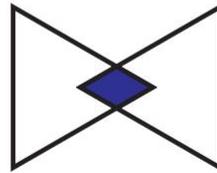
- 引力透镜、微波背景辐射、大尺度结构形成计算
- 正常物质：暗物质：暗能量 5:27:68



Decipher
the
Quantum
Realm

Elucidate the Mysteries
of Neutrinos

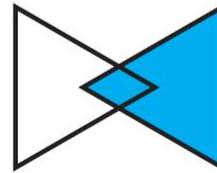
Reveal the Secrets of
the Higgs Boson



Explore
New
Paradigms
in Physics

Search for Direct Evidence
of New Particles

Pursue Quantum Imprints
of New Phenomena



Illuminate
the
Hidden
Universe

Determine the Nature
of Dark Matter

Understand What Drives
Cosmic Evolution

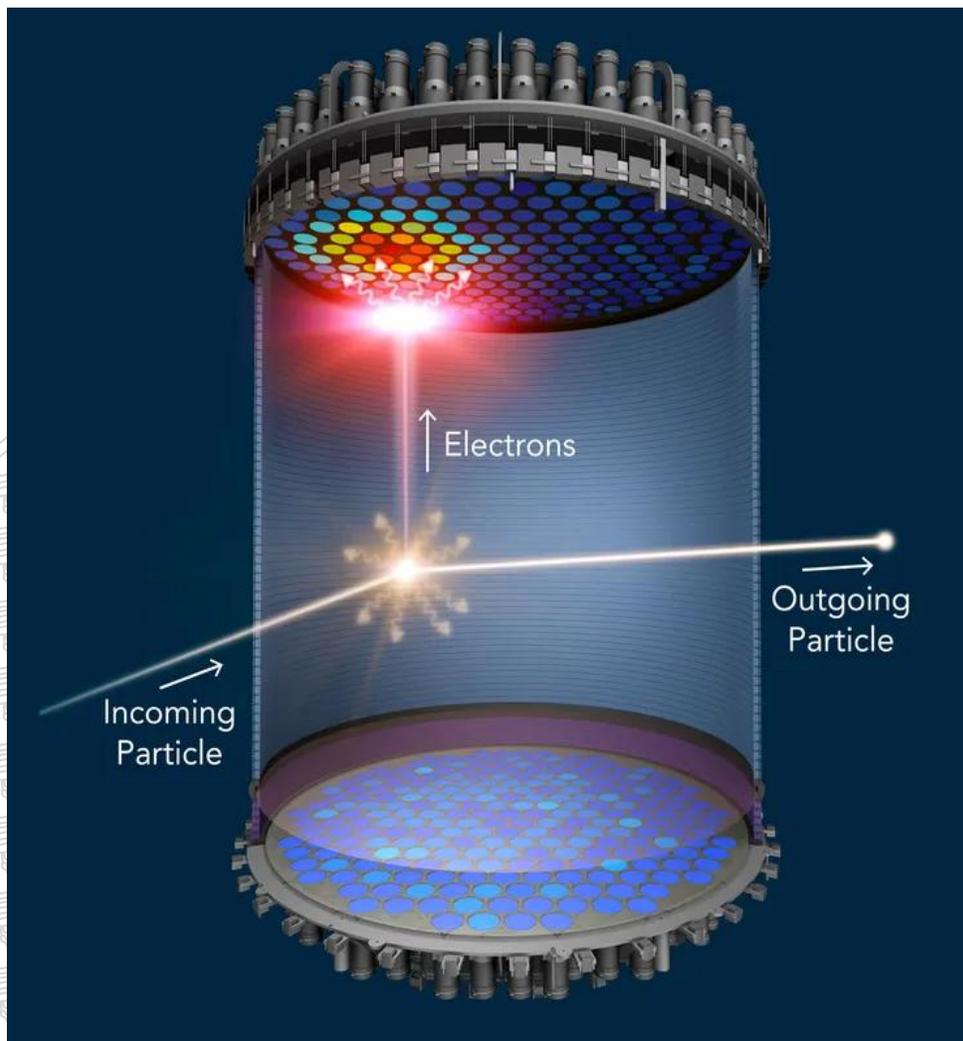


National Natural Science Foundation
of China

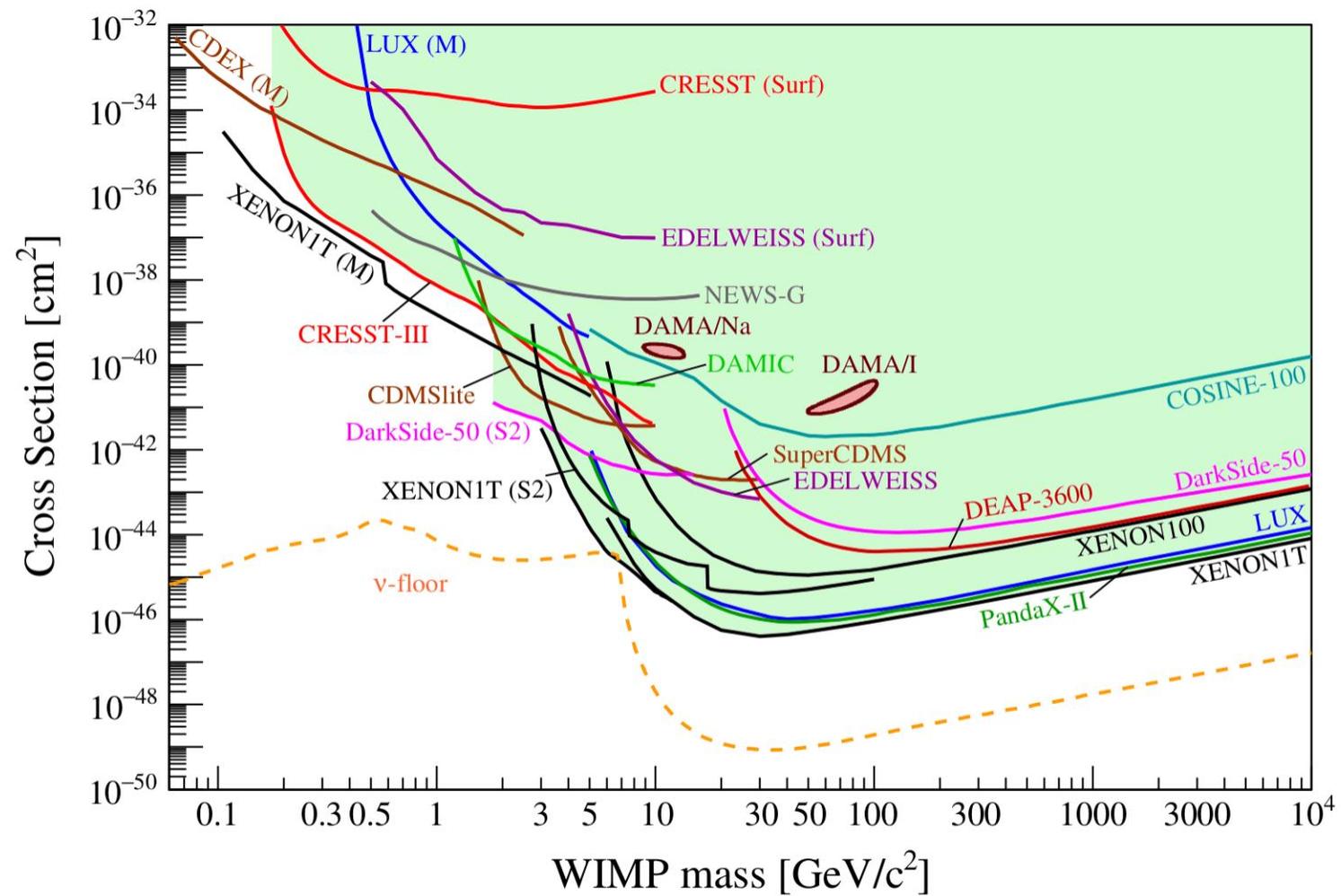
“十四五”优先发展领域（115项）

7.暗物质、暗能量以及星系巡天研究
围绕宇宙的起源和演化前沿科学问题，
重点研究暗物质和暗能量的本质，宇
宙网络中的星系形成与演化，超大质
量黑洞的起源与演化。

Determine the Nature of Dark Matter. The gravitational evidence for dark matter is overwhelming. We have many ideas for what dark matter could be, with a handful of particularly compelling candidates with viable cosmological histories. The number of strong candidates inspires a multifaceted campaign to determine the nature of dark matter, leveraging underground facilities, quantum sensors, telescopes, and accelerator-based probes.

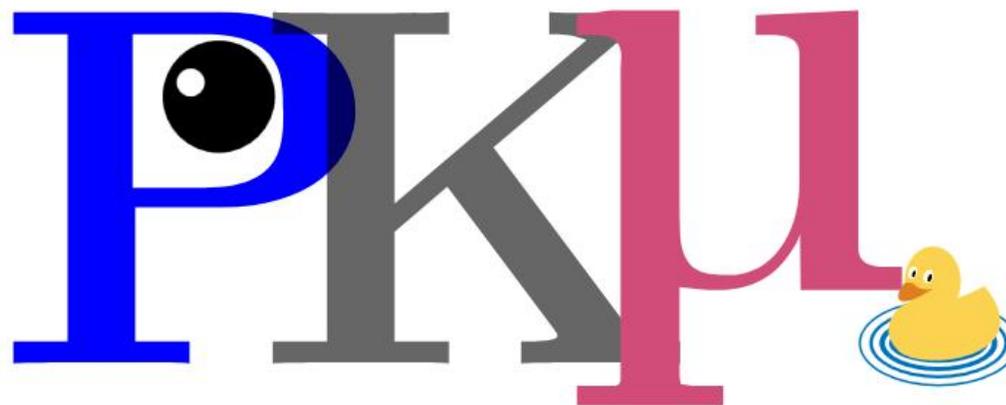


Credit: SLAC



APPEC Committee Report arXiv:2104.07634





PKMUON

Probing and Knocking with Muons

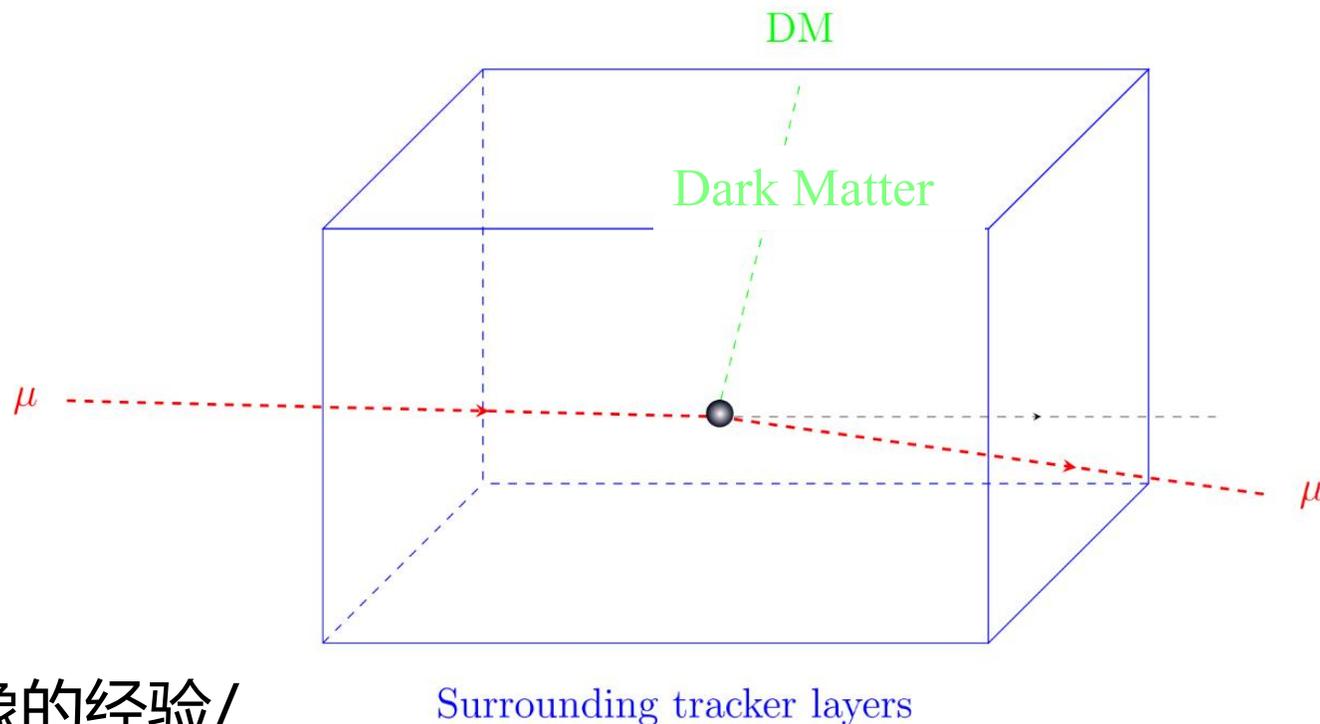
arXiv:2303.18117 [hep-ph] [accepted by International Journal of Modern Physics A](#)
arXiv:2402.13483 [hep-ex]

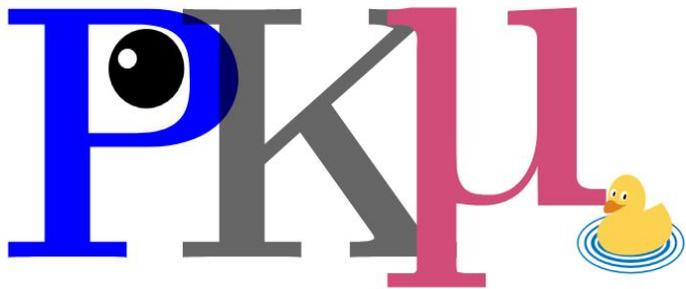
A proposed PKU-Muon experiment for muon tomography and dark matter search

Xudong Yu,^{*} Zijian Wang, Cheng-en Liu, Yiqing Feng, Jinning Li, Xinyue Geng, Yimeng Zhang, Leyun Gao, Ruobing Jiang, Youpeng Wu, Chen Zhou,[†] Qite Li,[‡] Siguang Wang, Yong Ban, Yajun Mao, and Qiang Li[§]
*State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology,
School of Physics, Peking University, Beijing, 100871, China*

简介——缪子散射探寻暗物质

- 我们希望利用缪子进行暗物质搜索：
 1. 缪子是基本粒子
 2. 自由缪子寿命较短/宇宙中非常稀少
 3. 缪子与暗物质反应甚少有人研究
 4. 实验条件：宇宙射线缪子探测与成像的经验/
中国未来缪子源



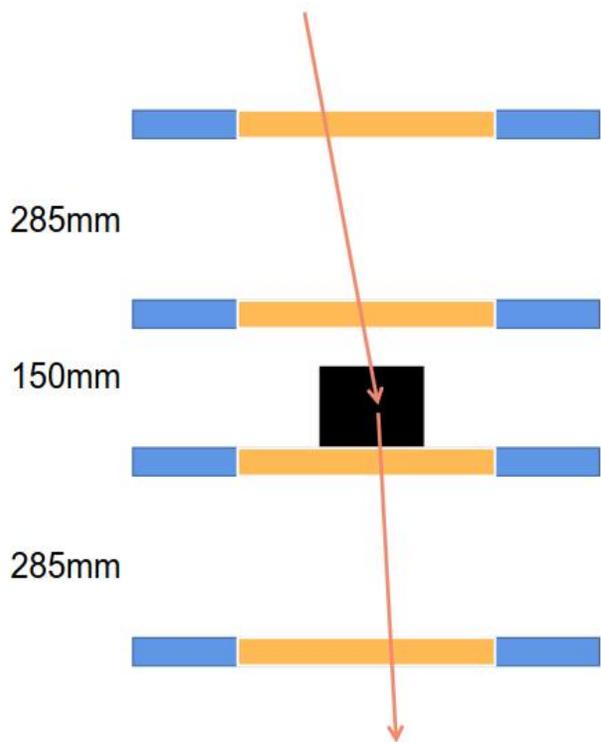


PKMUON: PKU提出的缪子散射成像和暗物质寻找的实验方案

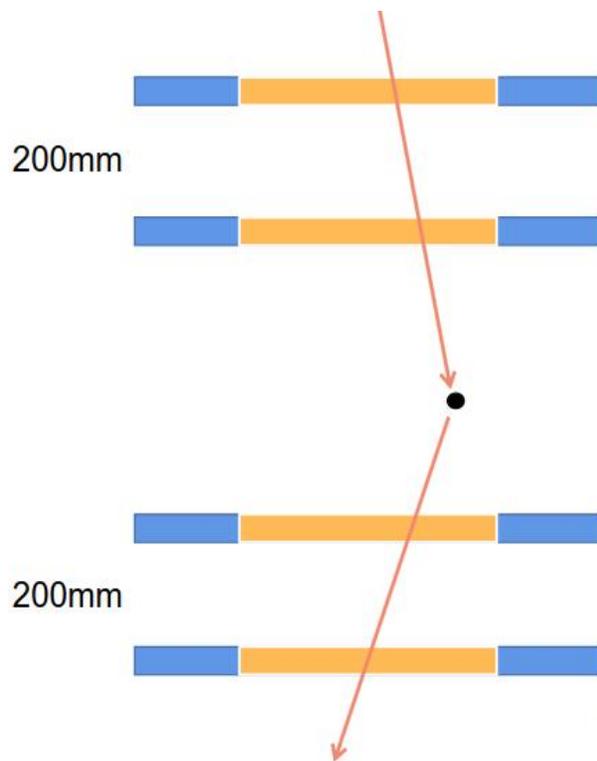
arXiv:2402.13483

基于 RPC, GEM, AT-TPC, etc.
20cm*20cm 60cm*40cm 完整径迹

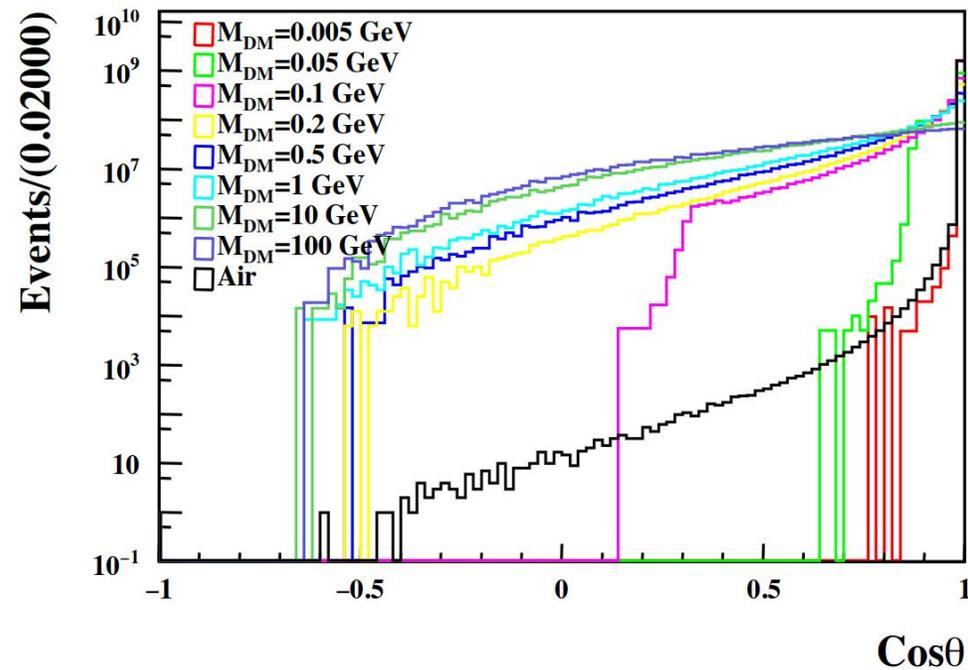
Muon Tomography
缪子成像装置，容易转换成
缪子对空间的散射角测量



Dark Matter Search 暗物质寻找
(arXiv: 2303.18117 accepted by ITJMPA)

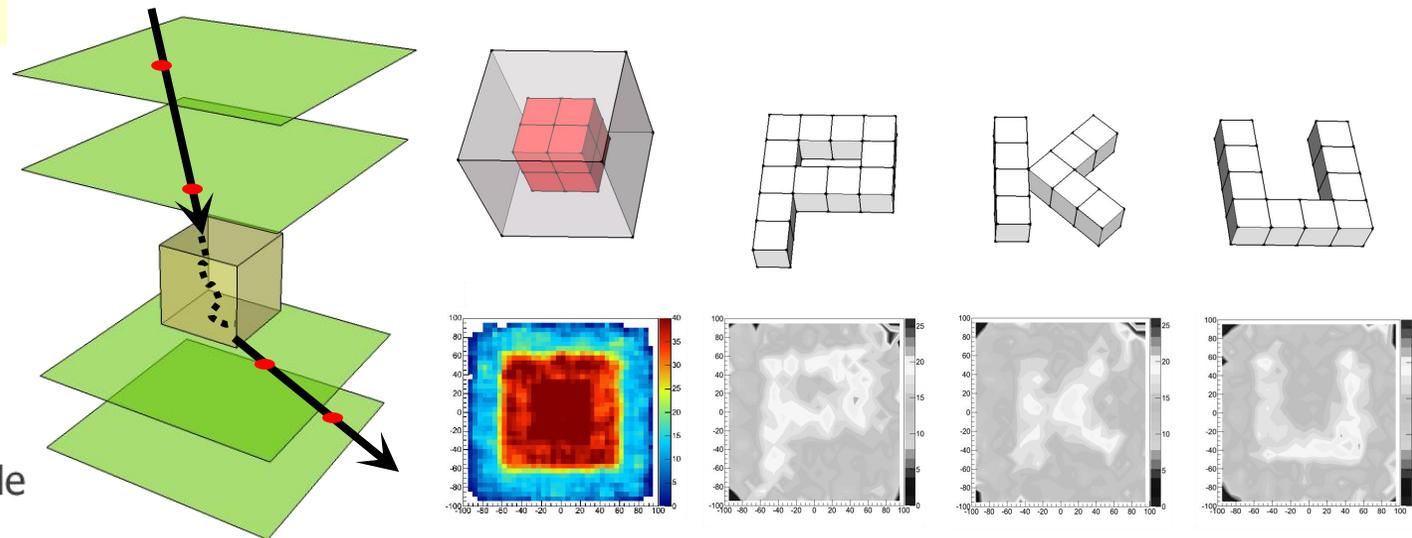
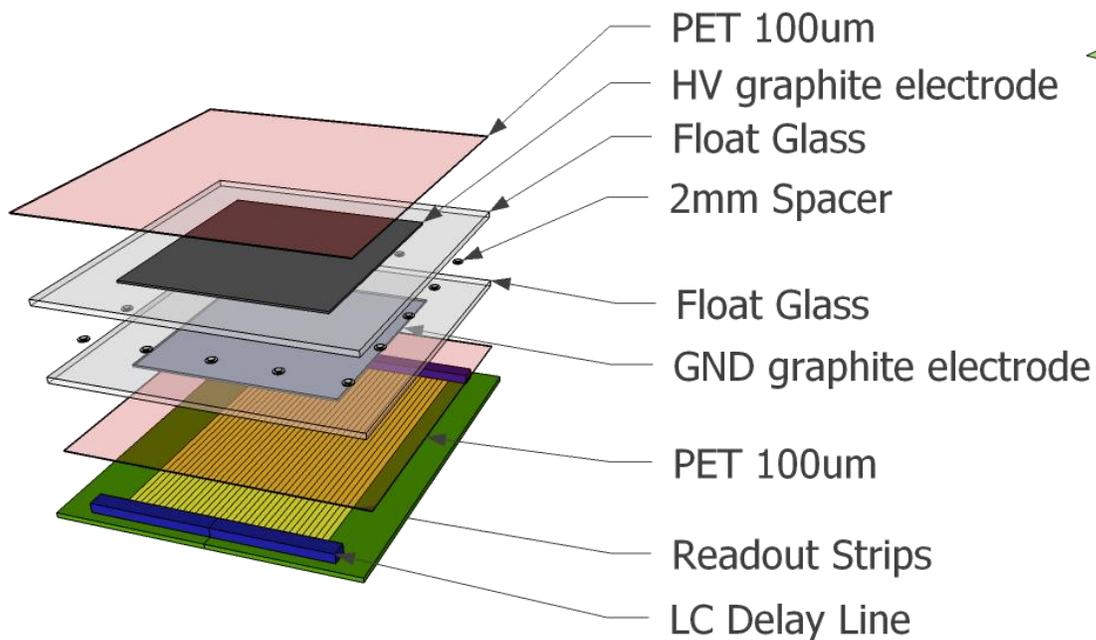


缪子穿过1m厚度空气及不同质量暗物质的散射角模拟结果
Geant4 simulation results for muon scattering with 1m thick air or DM



高位置分辨率阻性板气体室 (RPC) 研发与宇宙射线缪子成像结果

首创大面积玻璃RPC与延迟块读出技术结合
对 μ 子位置分辨 $0.3\sim 0.4\text{ mm} (\sigma)$



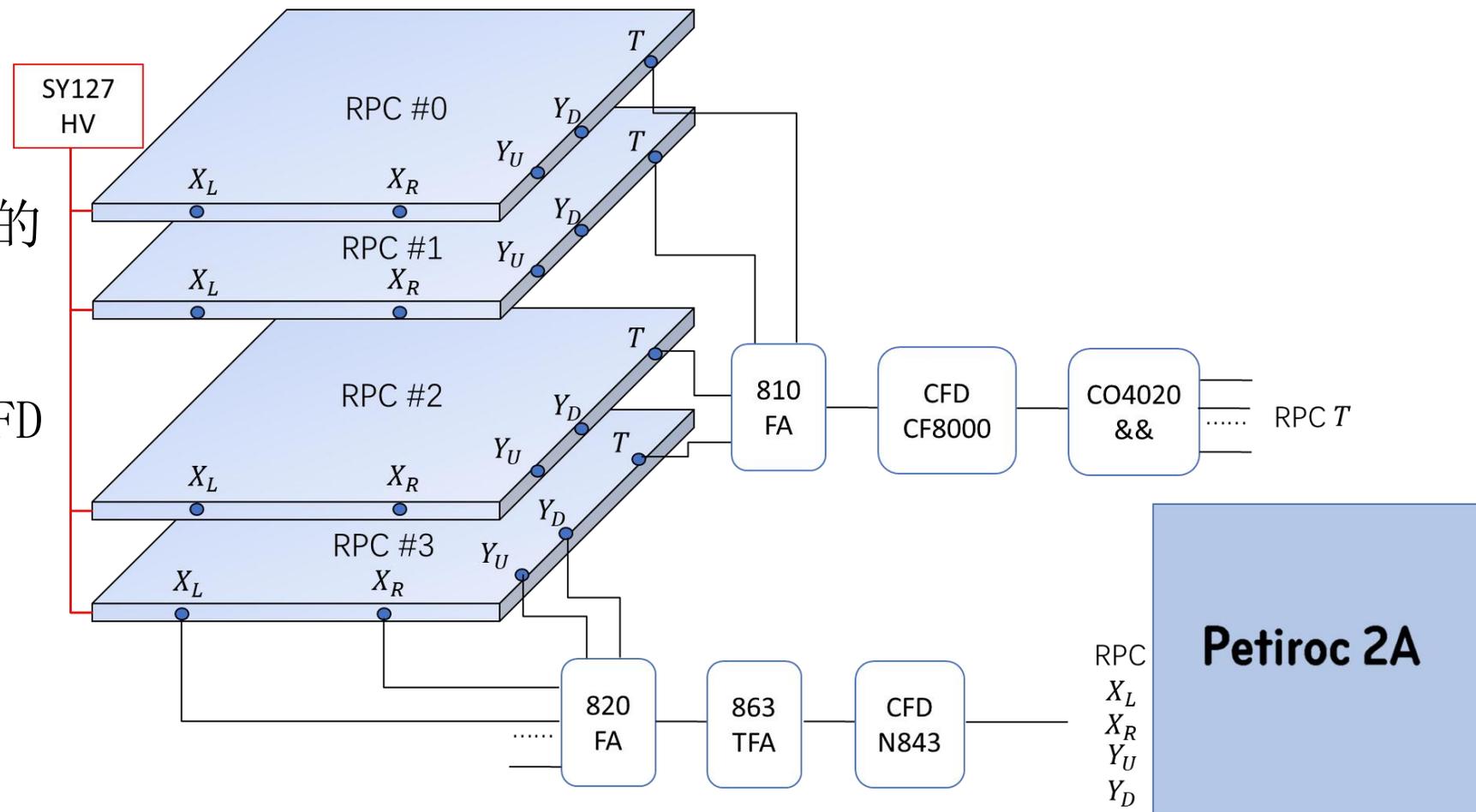
参考文献:

- Li, Qite, *et al.* *NIM-A* 663.1 (2012): 22-25.
- Qi-Te, Li, *et al.* *Chinese Physics C* 37 (2013)016002.
- S. Chen, Q. Li*, *et al.* *JINST*: 10 (2014)10022.
- 许金艳,李奇特*, 等, *物理实验*, 41(2021)23

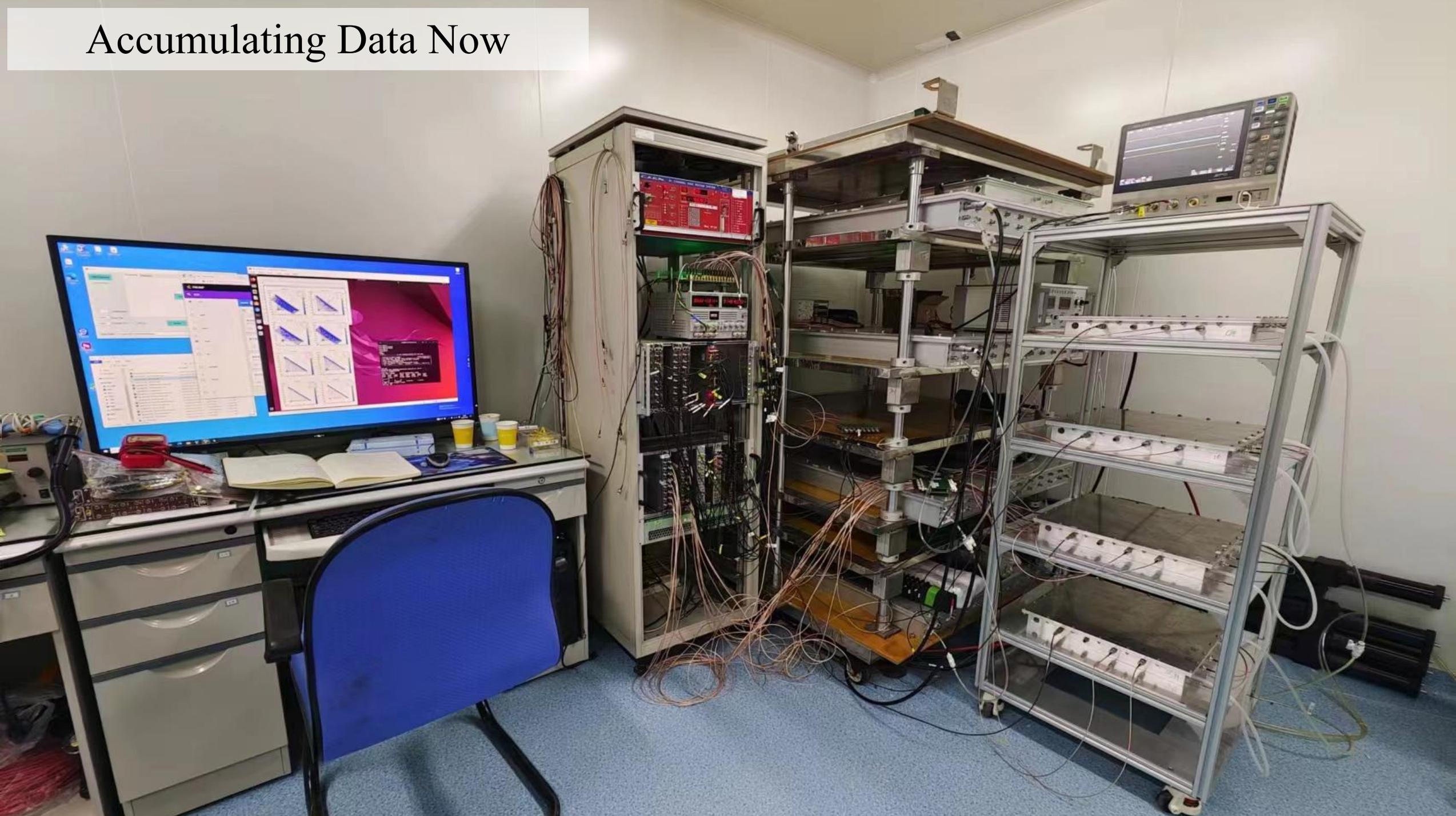
- 用这种高位置分辨率RPC搭建宇宙射线缪子成像系统探测宇宙射线缪子入射与出射径迹矢量, 可测量到非常小的散射偏转角 $< 5\text{ mrad} (0.3^\circ)$, 重建灵敏区内物质分布信息
- 右图是北京大学缪子成像原型机对包裹在 $12*12*12\text{ cm}^3$ 铁壳中的 $6*6*6\text{ cm}^3$ 方形铅块, 以及用 $3*3*3\text{ cm}^3$ 铁块组成的PKU字母的成像结果

暗物质探测系统——4RPCs设置

- 间隔20cm-50cm-20cm
- Petiroc是由中科大提供的基于ASIC的获取系统
- 4个T信号经过放大器、CFD和符合插件通入Petiroc
- 剩余位置路通过放大器、CFD通入Petiroc

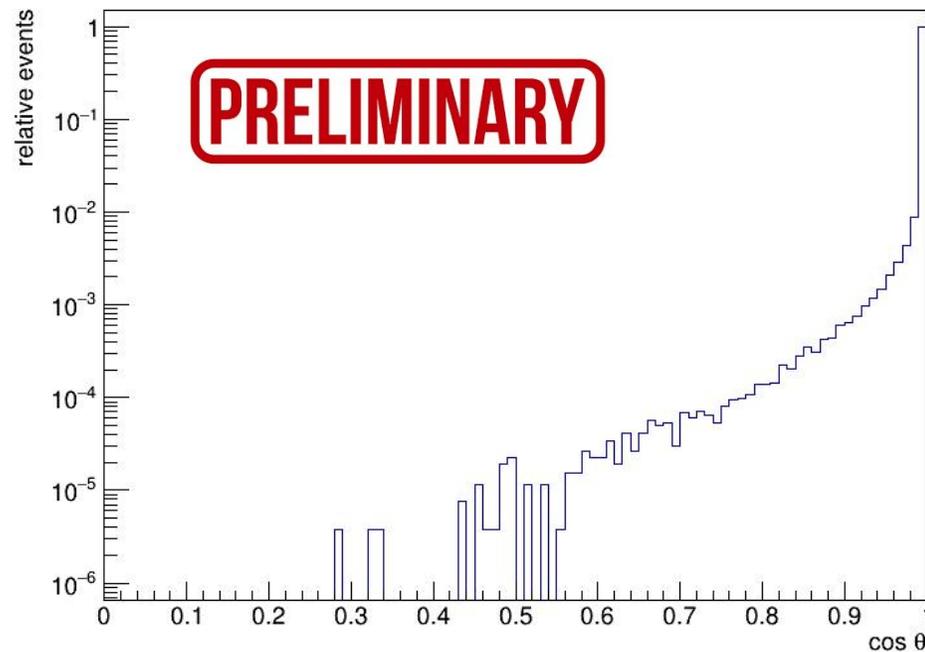
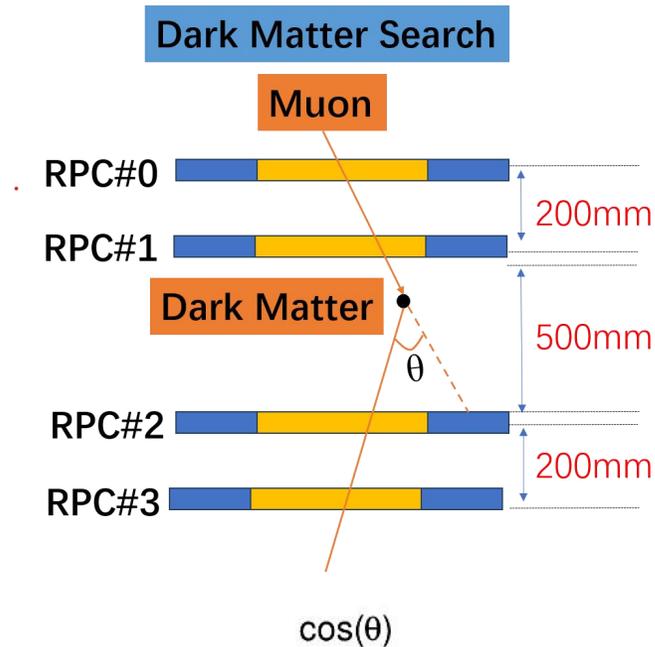


Accumulating Data Now



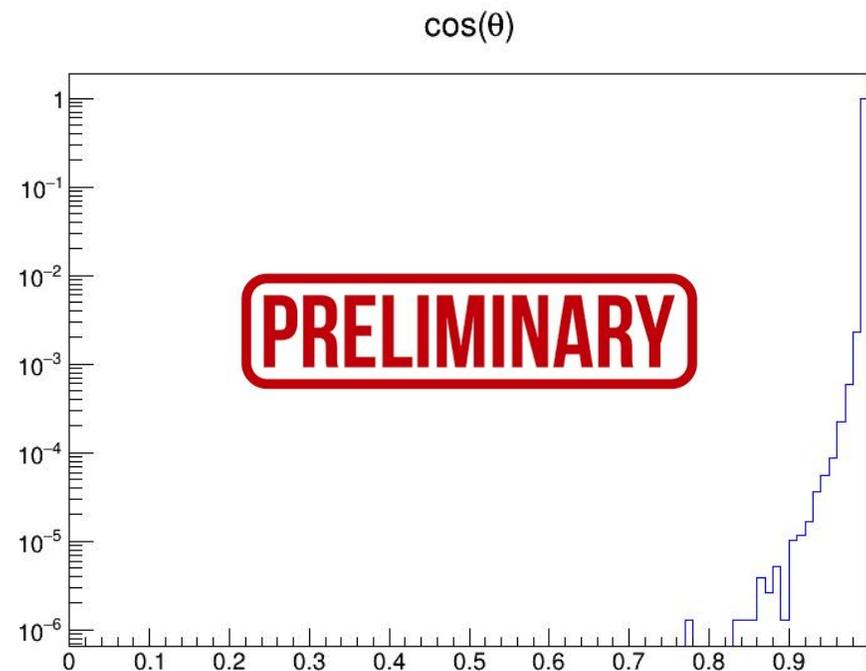
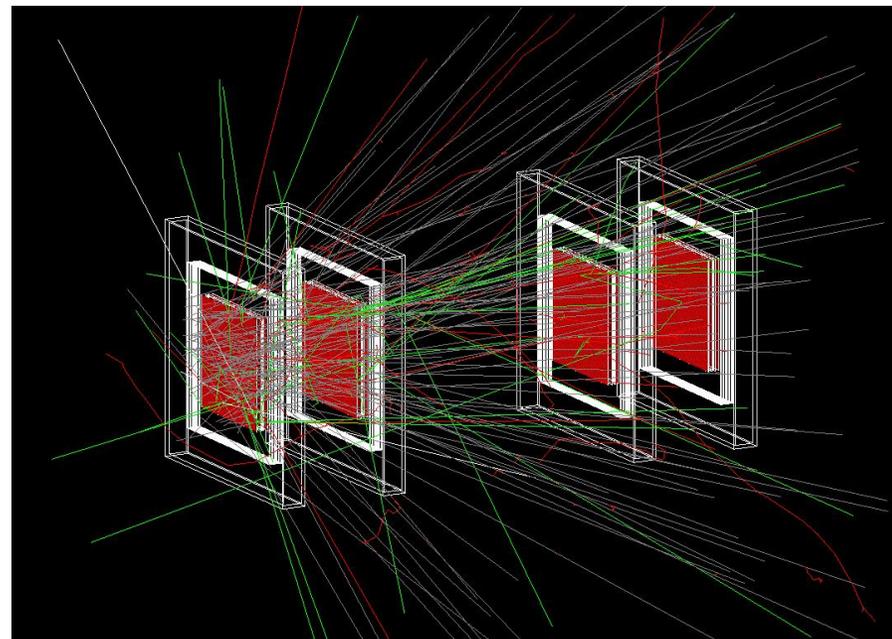
长期测试

- 2024年1-3月开始，测量了56天的宇宙线缪子在空间中的散射。
- 缪子散射灵敏体积为 $50\text{cm} \times 20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 。
- 测得有效事件270858个，其中散射角 $\cos \theta < 0.8$ 的有370个，占总事件的0.14%。
- 存在 $\cos \theta$ 最小到了0.3以下的事件



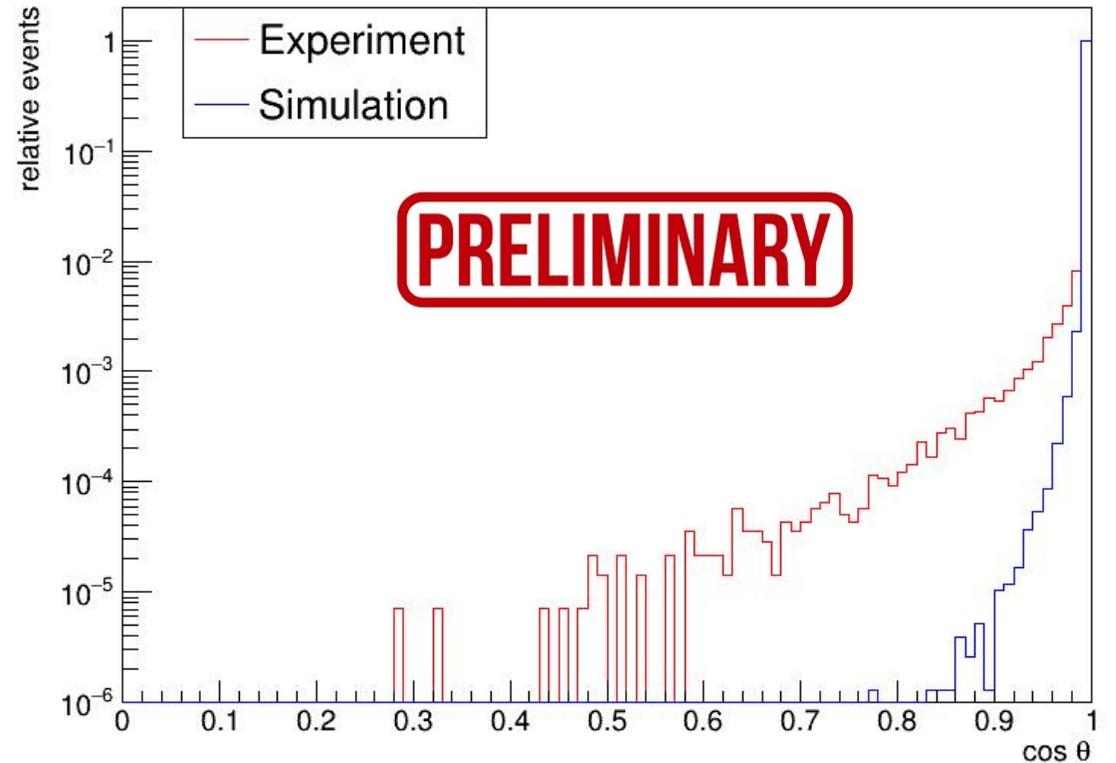
GEANT4模拟 (王子健)

- 利用GEANT4 构建了相同尺寸、材料以及间隔距离设置的缪子散射探测系统，模拟了该系统在空间中宇宙线缪子散射的散射角分布。
- 模拟位置分辨为0.57mm，模拟粒子为 10^8 个，有效事件为771909个，其中 $\cos \theta < 0.8$ 的占比约为0.0002%



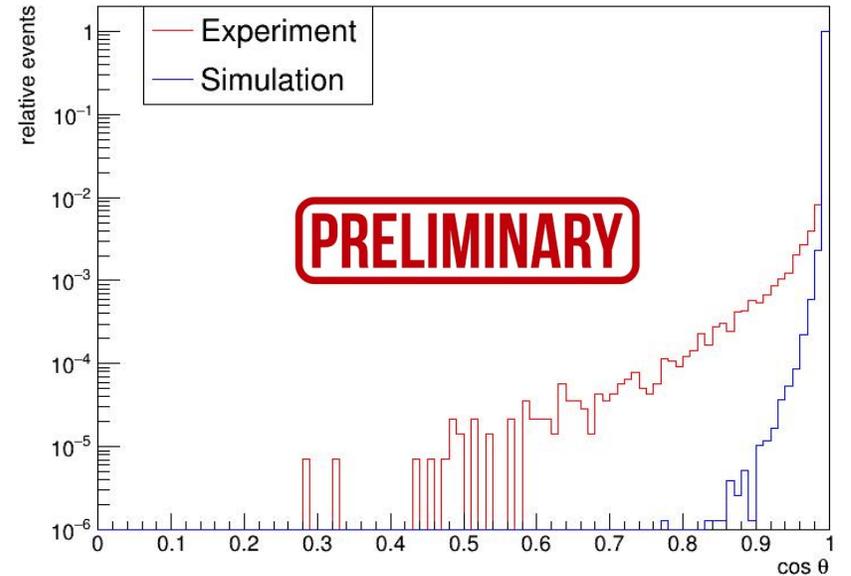
长期测试——散射角分布

- 实验结果 $\cos\theta$ 最小可达0.3以下，模拟结果最小不小于0.75。
- 在 $\cos\theta < 0.8$ 处，实验结果的占比为0.13%，而模拟结果为0.0002%。
- 大角度散射事件的实验结果为模拟结果的527.22倍



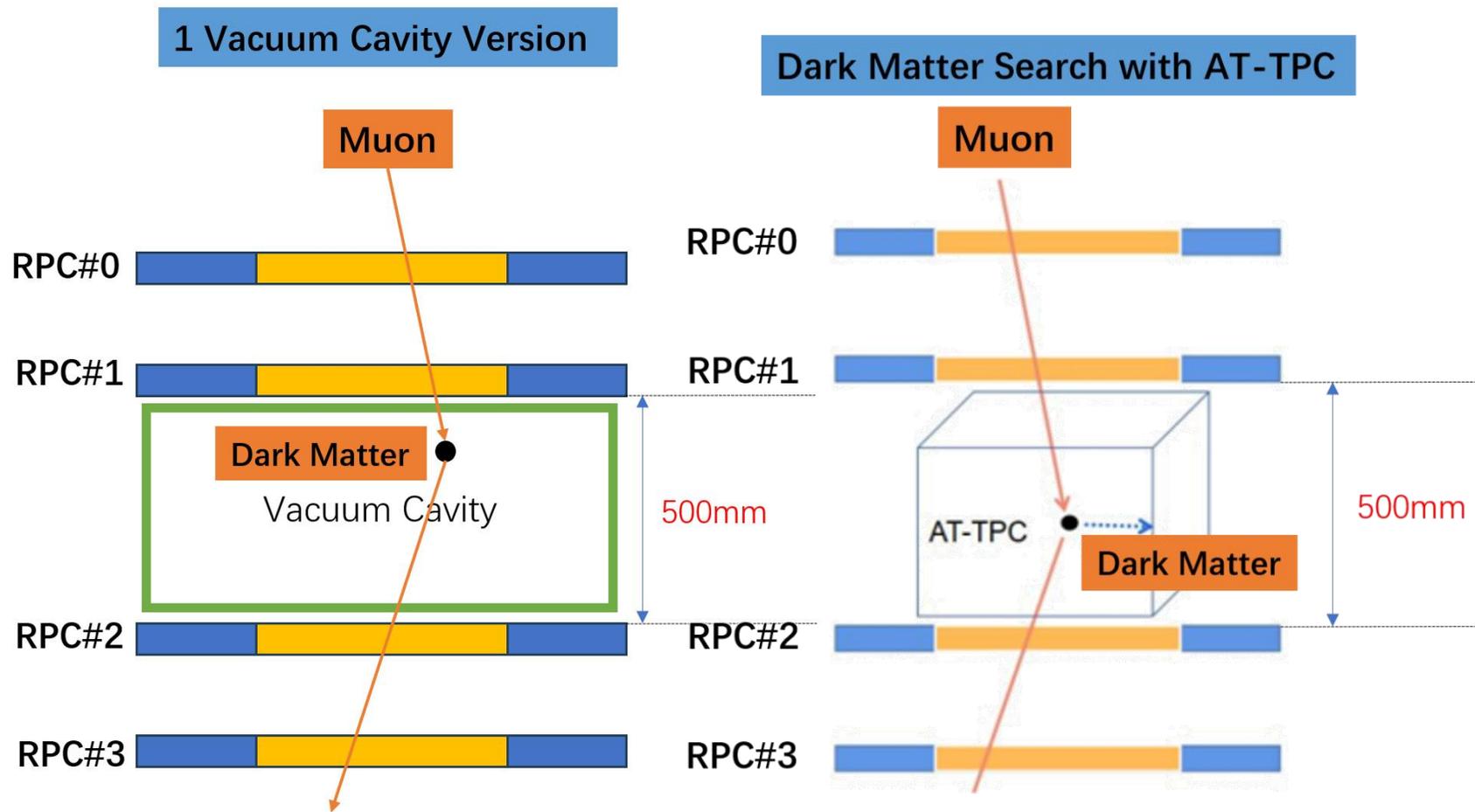
长期测试——散射角分布

- 实验结果与模拟结果可能原因：
 1. 实验噪音
 2. GEANT4模拟用的物理过程可能和现实中对 μ 子大角度散射模拟有所偏差
 3. 对缪子在材料和空间中的散射可能需要有进一步的理解



未来计划

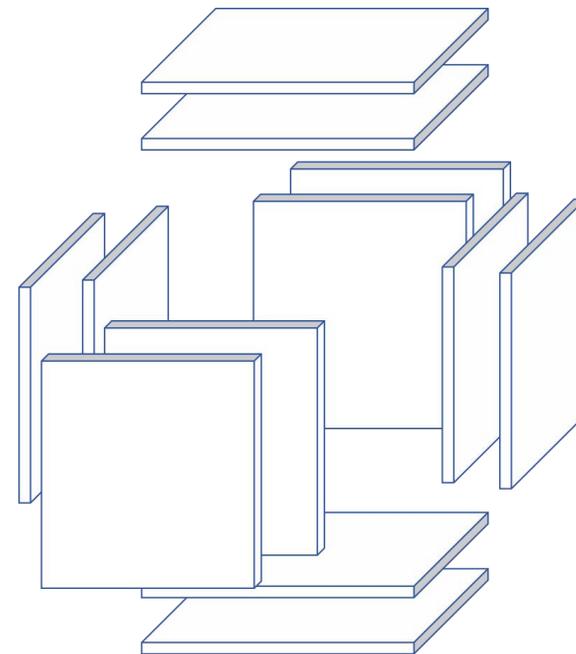
1. 将探测系统升级为真空腔模式，排除空气干扰
2. 使用AT-TPC排除多重散射的影响，定位反应点



未来计划

3、增加侧面探测器，提高
缪子在大角度散射的接受度

4、平方米至百平方米量级
的缪子散射测量站研发



Future: 全球宇宙线 μ 子散射暗物质探测阵列

Several Projects worldwide interested in Muon

Tomography

INFN Padova (Italy)

Los Alamos National Laboratory (USA)

Carleton University (Canada)

Tsinghua University (China)

Peking University (China)

USTC(China)

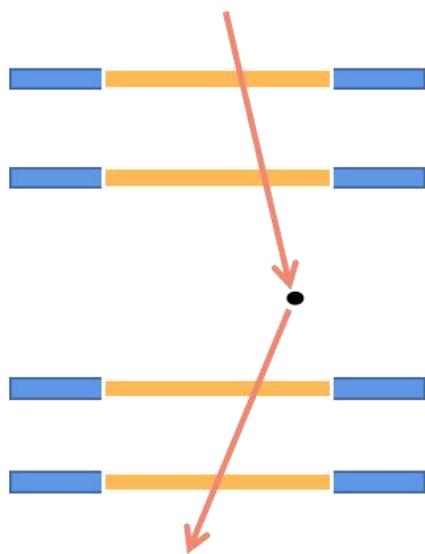
Lanzhou University (China)

CIAE (China)

SYSU(China)

Bristol University (UK)

.....



参考: Jiang, M., Hong, T., Hu, D. et al. Long-baseline quantum sensor network as dark matter haloscope. Nat Commun 15, 3331 (2024).

总结

- 我们使用延迟线玻璃RPC搭建了缪子散射成像系统，探测灵敏50cm宇宙线缪子散射进行了2个月的测试。
- 在GEANT4中构建了相同尺寸、材料以及间隔距离设置的缪子散射探测系统，模拟了该系统在空气中宇宙线缪子散射的散射角分布。
- 对比实验结果与模拟结果，发现实验测得的大角度散射事件占比远高于模拟结果，

这预示着缪子在空间和材料中的散射过程还有需要进一步理解的地方。我们将进一步优化实验和模拟，研究缪子的散射物理过程。



THANKS

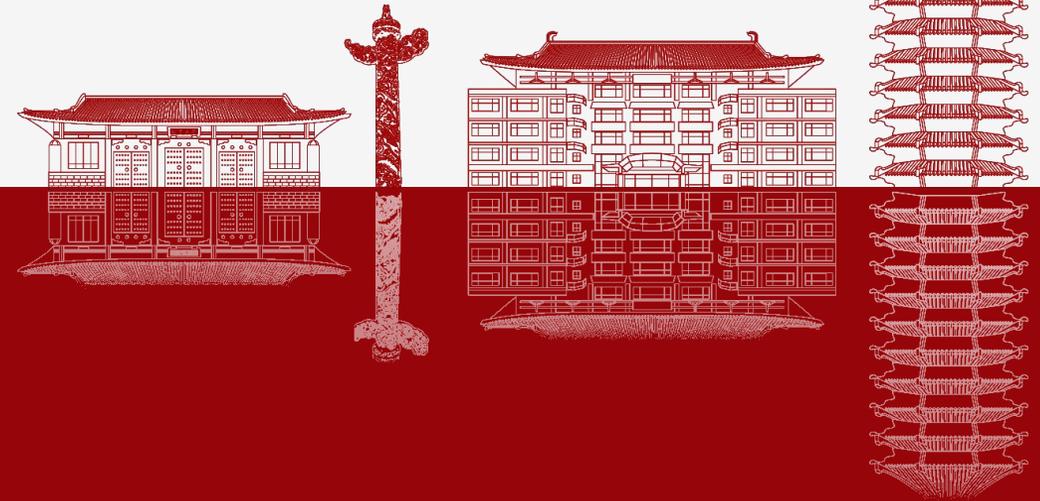
PKU



感谢中科大沈仲弢、刘豪对Petiroc DAQ的开发与支持工作



2024-5-9



春名園
謝晉亭