

Detector Design and Simulation for Exotic Moun Decay Researches at the High Intensity heavy-ion Accelerator Facility(HIAF)

北京大学 董凌志
2026.07.12



北京大学
PEKING UNIVERSITY

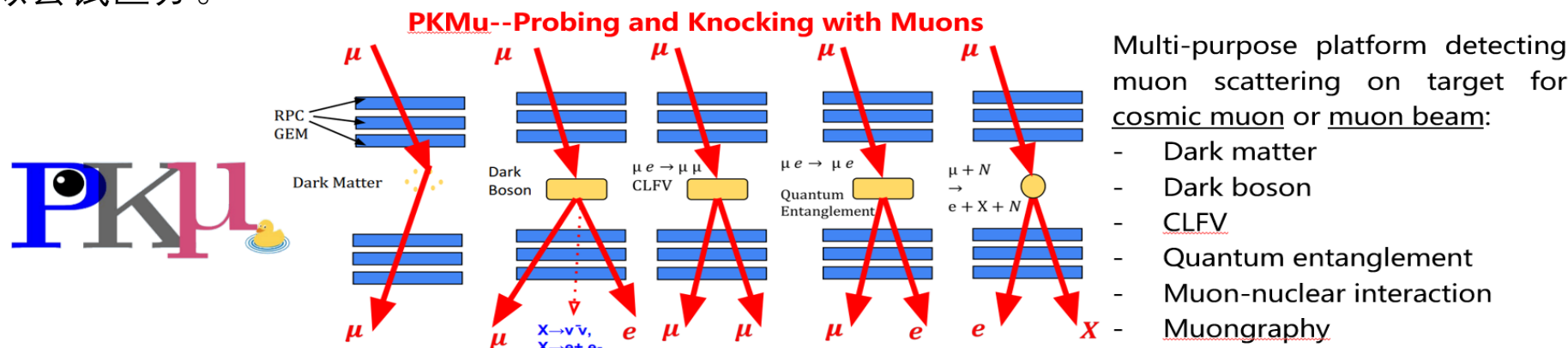


CONTENTS

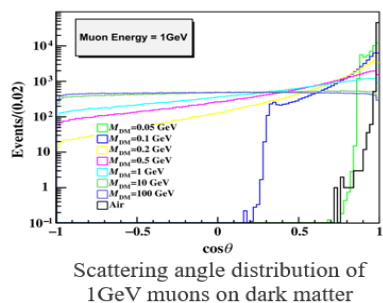
- Introduction
- Detector Design
- Simulation Analysis
- Results
- Summary and Outlook

Introduction

超出标准模型的轻子味破坏过程（CLFV）或许存在于 μ 衰变过程中，产生 e 和一个中性玻色子 X_0 。由于 X_0 质量较大（接近 μ 质量，如 $m_{X_0} = 105 \text{ MeV}$ ），其与标准模型衰变产生的 e 将存在显著区别（如能量，衰变角分布等），可以通过模拟尝试区分。

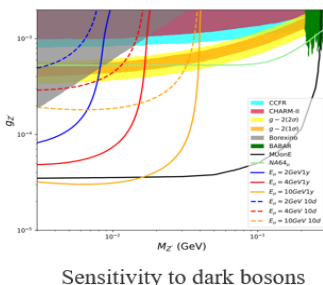


Preliminary simulation researches for muon beam experiments:



μ dark matter:

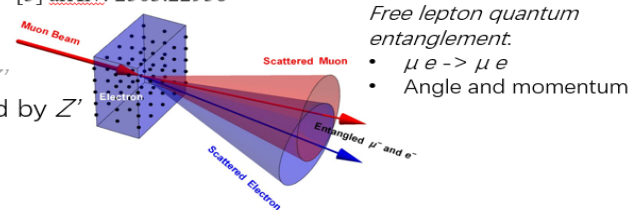
- $\mu \text{ DM} \rightarrow \mu \text{ DM}$
- Angle distribution



Dark boson:

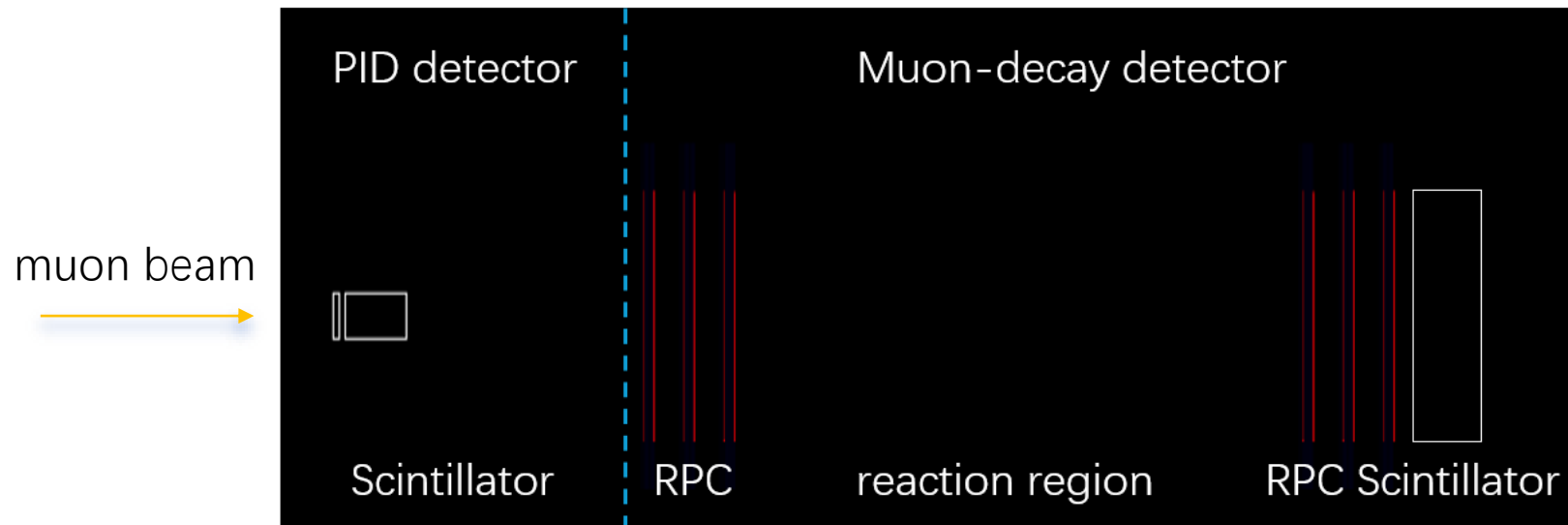
- $\mu e \rightarrow \mu e Z'$
- E loss caused by Z'

- [1] Phys. Rev. D 110, 016017
- [2] arXiv: 2410.20323
- [3] arXiv: 2411.12518
- [4] arXiv: 2502.20915
- [5] arXiv: 2503.22956



本次实验主要基于HIAF缪子束流模拟样本，通过PKMu设计的RPC等探测器，模拟缪子衰变过程，并合理设计筛选条件，统计不同衰变分支比下的显著度，以此尝试探测这一CLFV过程。

Detector Design



PID 探测器

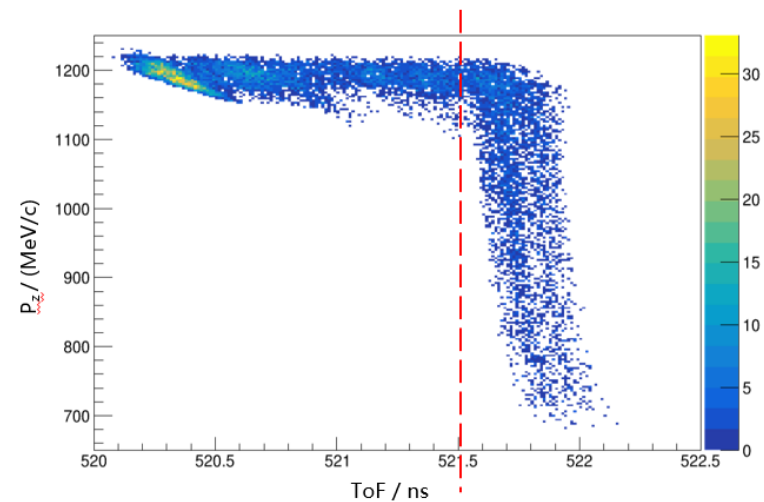
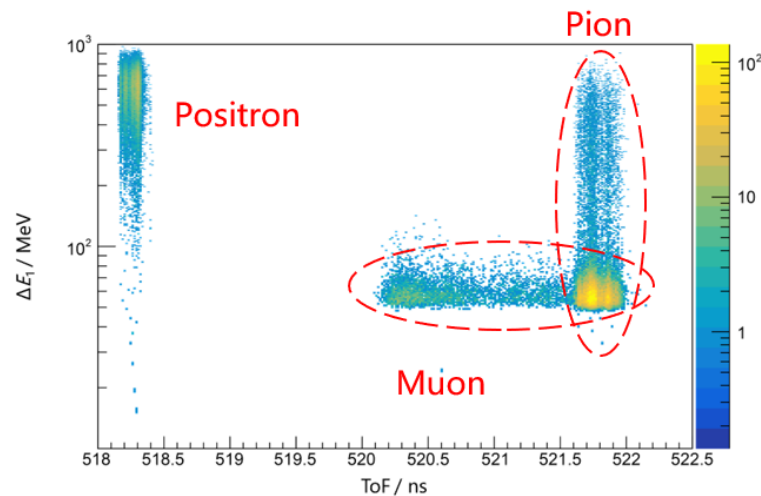
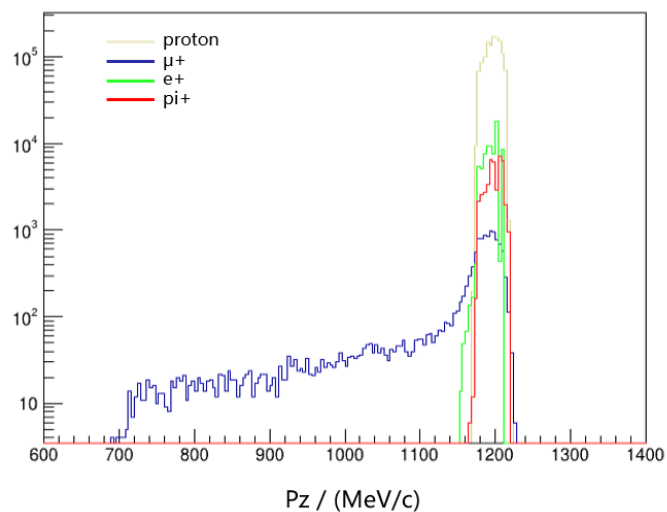
- 1 cm Plastic (用于测量飞行时间, 距前端 155 m)
- 10 cm CsI (用于测量沉积能量, 束流能损约 50 MeV)

Muon-decay 探测器

- 6*RPC (28 cm * 28 cm), 间隔 2.5 cm + 2.5 cm + 90 cm (反应区) + 2.5 cm + 2.5 cm
- 10 cm CsI (用于测量衰变电子能量, 同时设计合适长度去除缪子本底)

Simulation Analysis - PID

对模拟实验使用的1.2 GeV束流，采用飞行时间+沉积能量综合鉴别。



p 和 e 分别通过沉积能量 ΔE_1 和飞行时间 ToF 可以简单区分。

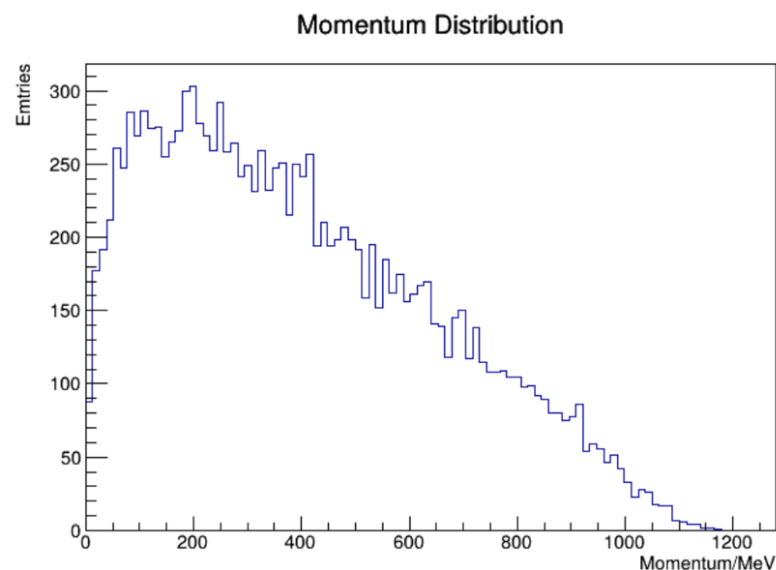
$\Delta E_1 - ToF$ 图中， μ 与 π 重叠的部分对应 $p_z - ToF$ 中 μ 的低能部分，因此可以通过飞行时间同时排除 π 和低能的 μ 。

Simulation Analysis – muon decay

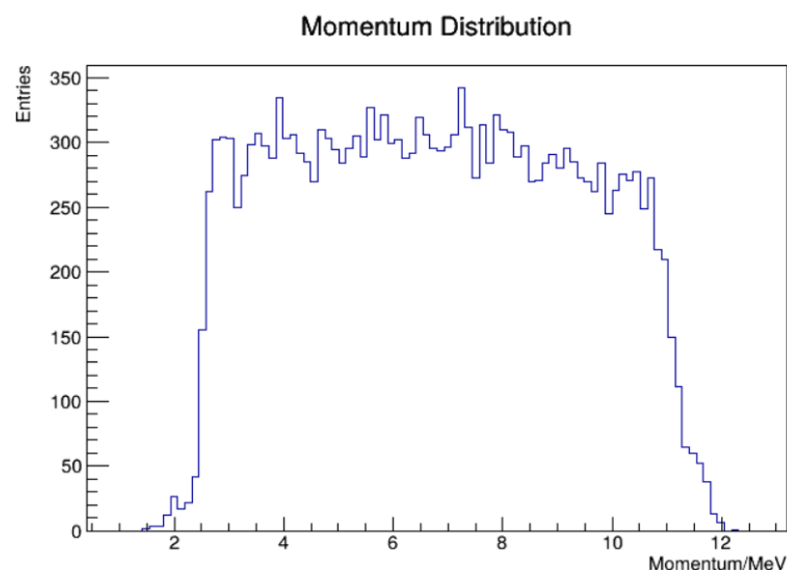
使用HIAF 1.2 GeV 缪子束流，束斑3 cm，流强 $10^5/\text{s}$ ，模拟10天数据（ 10^{11} 原始 μ 事例）。

反应区 $\sim 1\text{m}$ ，反应 μ 事例约 10^7 ，衰变分支比设定为0.1%。

信号：奇异道衰变 e ；本底：未衰变 μ ，标准模型衰变 e 。两种衰变道的电子初动量模拟如下：
由此发现信号相较于本底集中在 $\sim 10\text{ MeV}$ ，可以据此区分信号。



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



$$\mu^- \rightarrow e^- + X_0$$

Simulation Analysis – muon decay

理论计算上，衰变电子角分布满足以下关系。因此标准模型电子角分布更大，减小后端探测器接收面积能更好压低本底。模拟上只统计4号RPC上半径小于10 cm的范围内的事例。

质心系：

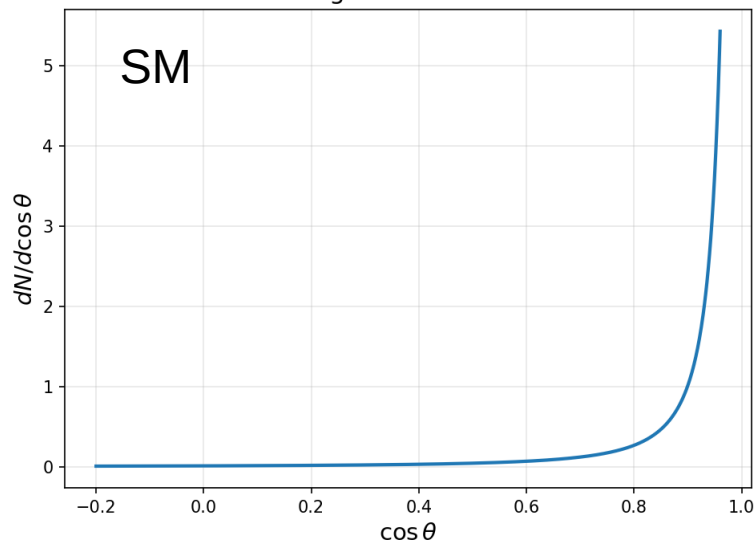
Standard: $\frac{dN'}{d \cos \theta'} \propto 1 - \cos \theta'$ $\beta = 0.9944$

Exotic: $\frac{dN'}{d \cos \theta'} = \frac{1}{2}$

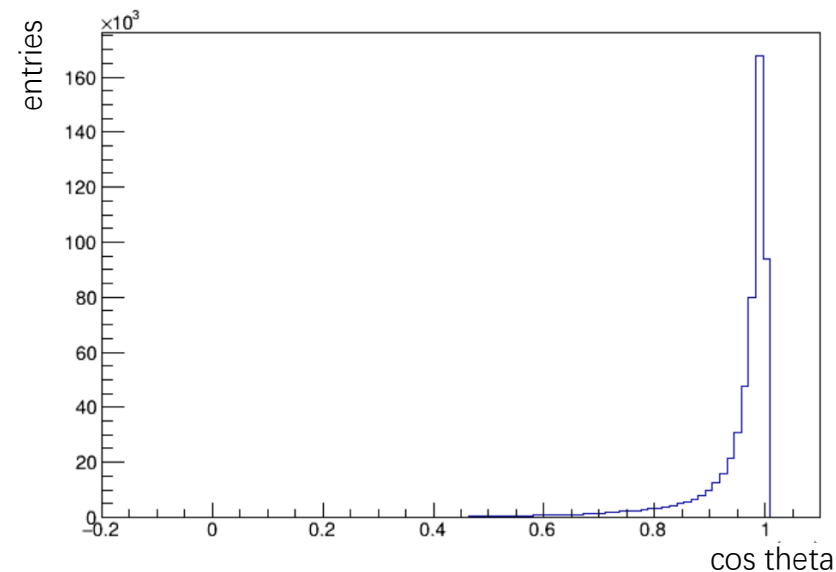
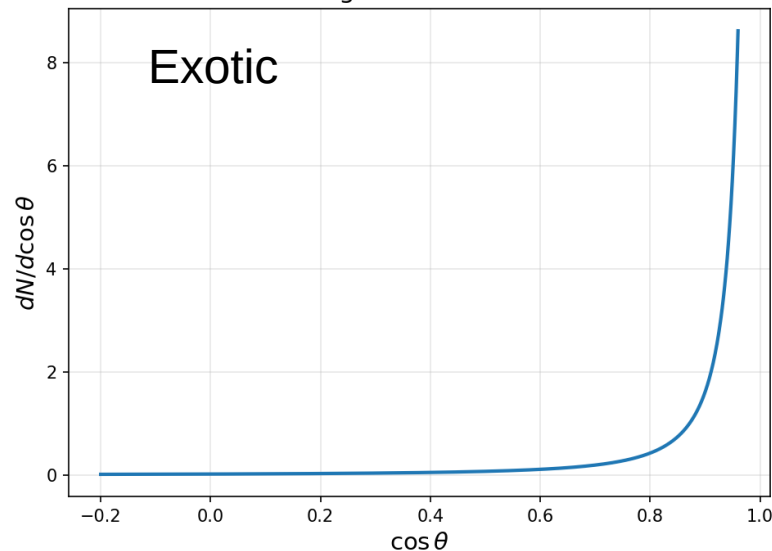
实验室系：

$$\frac{dN}{d \cos \theta} \propto \frac{1}{\beta_e' \gamma^2} \frac{1}{(1 - \beta \cos \theta)^2}$$

angle distribution

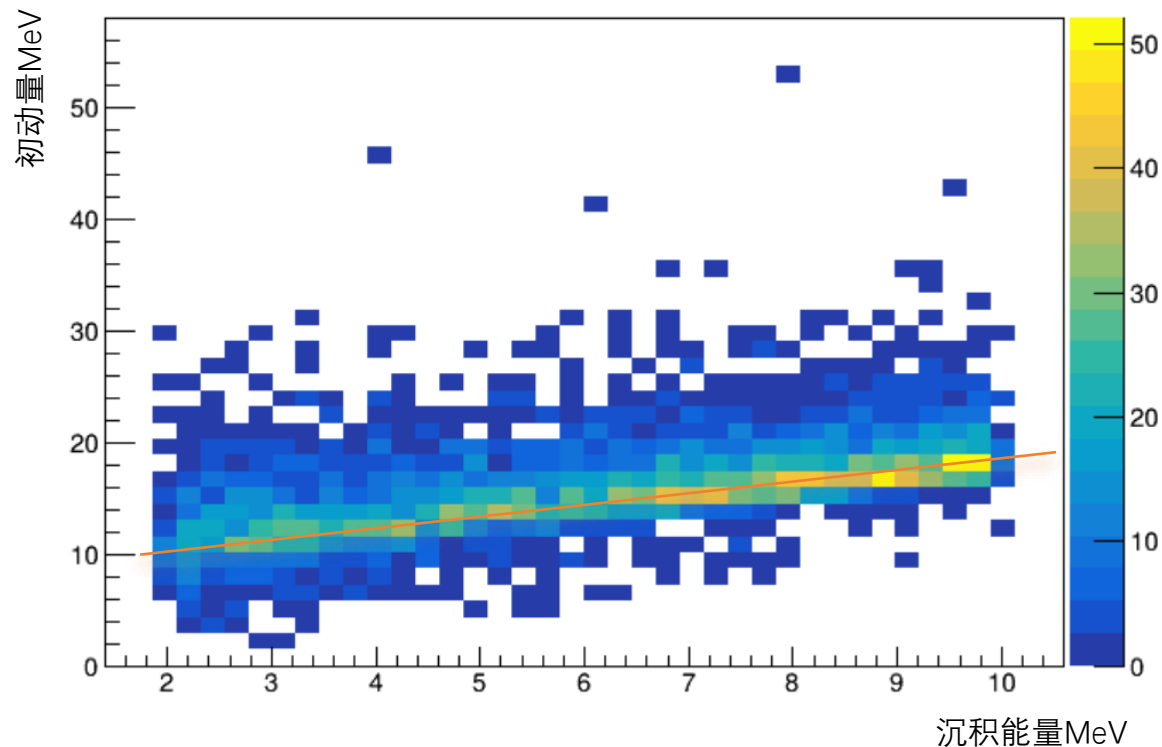
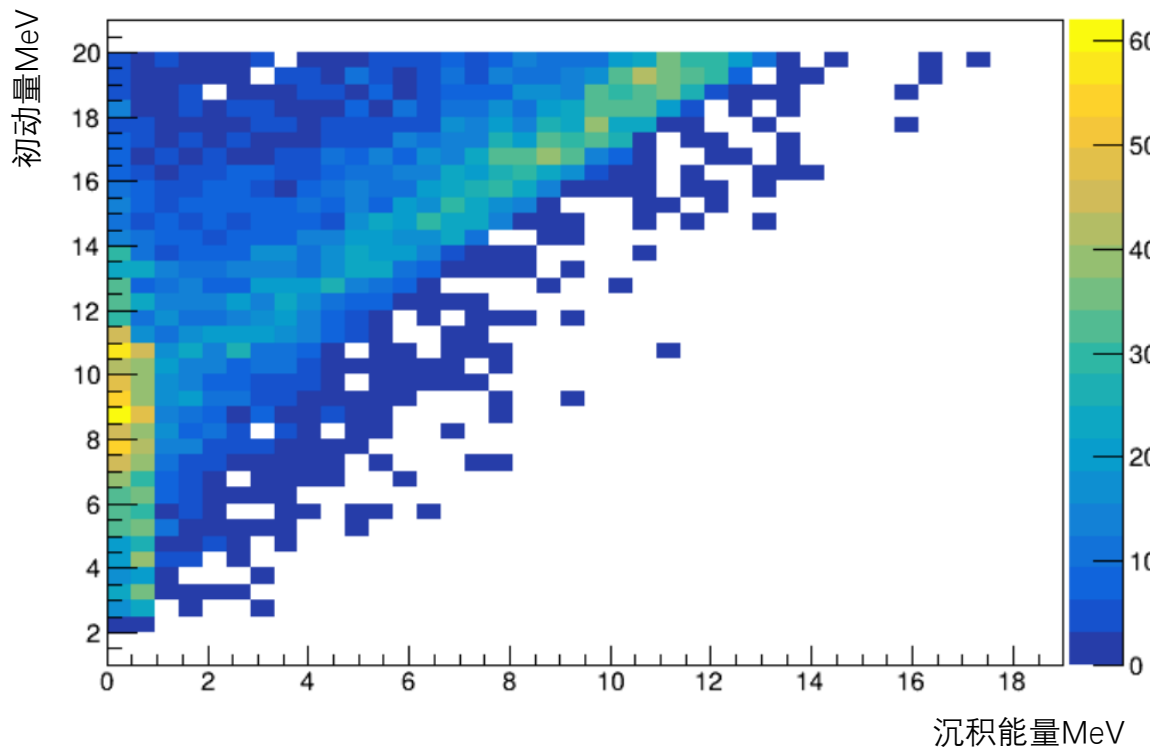


angle distribution



Results

选取初动量 2-12 MeV作为cut范围。模拟给出反应区前的3层RPC大约会吸收 7 MeV 电子能量。



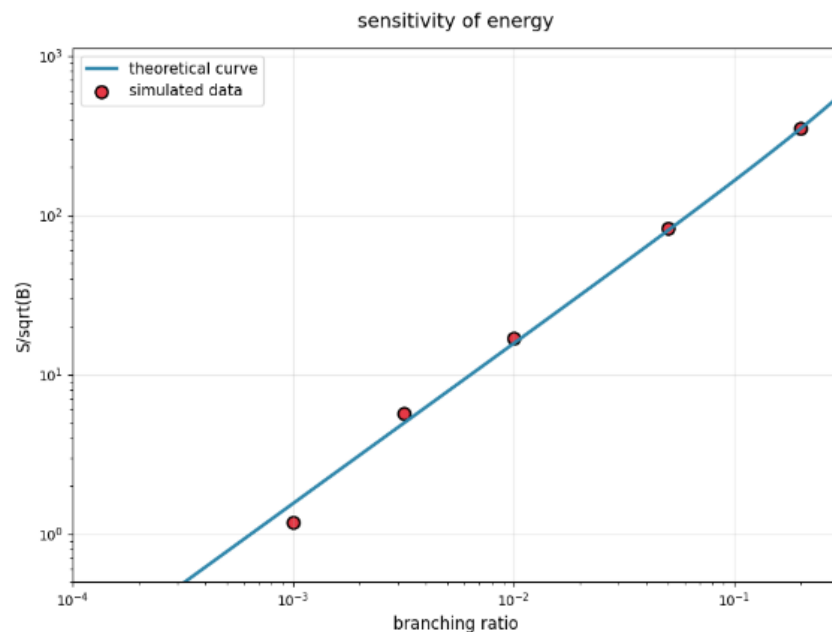
对应初动量范围的沉积能量大致分布在 0-3 MeV，集中分布在 0-1 MeV。

Results

结合初动量-沉积能量关系，统计三组条件下的显著度：

- 沉积能量 0-1 MeV内，本底12434，信号5374， $S/\sqrt{B}=48.19$
- 沉积能量 0-3 MeV内，本底21465，信号6948， $S/\sqrt{B}=47.42$
- 初动量 2-12 MeV内，本底34521，信号9106， $S/\sqrt{B}=49.01$

在分支比 $\ll 1$ 时，可以认为显著正比于分支比。



使用小样本制作的显著-分支比关系

最终认为使用10天束流的样本量，能够在衰变分支比0.01%时达到 5σ 显著。

Summary & Outlook

- 模拟实验基于PKMu与HIAF缪子束流提出，主要目的为探测轻子味破坏的 $\mu \rightarrow e + X_0$ 过程。
- PID对 1 GeV左右的束流成分设计了飞行时间的沉积能量探测器进行鉴别，效果出色，能够很好地区分质量相近的 μ 、 π 成分。
- 缪子衰变模拟通过沉积能量区分信号与本底，并结合衰变电子角分布进一步提高显著性。目前使用10天的束流样本可以在0.01%衰变分支比下达到 5σ 。
- 后续可以进行实验完善结果。

感谢！



北京大学
PEKING UNIVERSITY