



η 介子稀有衰变 过程模拟

王荣代表 η 介子稀有衰变模拟小组
中国科学院近代物理研究所

目录

- 研究动机
- 快模拟介绍
- 暗光子衰变道的结果
- 暗希格斯粒子衰变道的结果

研究动机

- 宇宙和天文观测

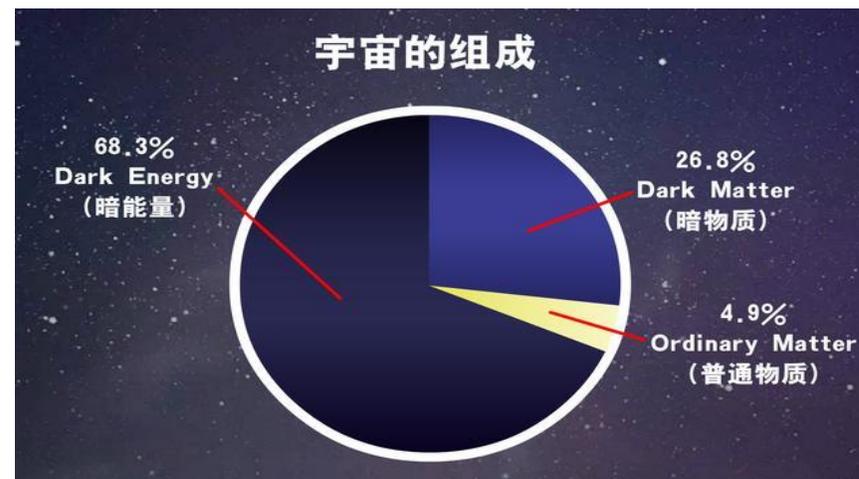
暗物质暗能量由什么构成、
有什么性质？

可见宇宙为啥正物质绝对主导？ CP破坏机制

如果是轻暗物质粒子，在大爆炸时产生数量过多？

$DM + DM \rightarrow SM$ annihilation processes

新的未知的标准模型的中性传播子
可以加速该湮灭过程。



研究动机

- 粒子物理

电弱能标等级问题, $m_H/m_{\text{Planck}}=10^{-17}$, 很不自然。

超对称? 新的调整机制? 例如: $(H^\dagger H) \times m_H^2 \longrightarrow (H^\dagger H) \times (m_H^2 + c_1 S + c_2 S^2 + \dots)$

强作用CP问题, $\theta_{\text{QCD}} G_{\mu\nu}^a \tilde{G}_{\mu\nu}^a \longrightarrow \left(\theta_{\text{QCD}} + \frac{a}{f_a} \right) G_{\mu\nu}^a \tilde{G}_{\mu\nu}^a$ 轴子/类轴子, 保持CP对称性

针对B-L或暗物质的新的规范群?
 $[SU(3) \times SU(2) \times U(1)]_{\text{SM}} \longrightarrow \text{GUT gauge group}$
 $\longrightarrow [SU(3) \times SU(2) \times U(1)]_{\text{SM}} \times U(1)_X \times \dots,$

中微子质量产生机制?

$$m_{\nu, \text{D}} \bar{\nu} \nu \longrightarrow y_\nu \bar{N} \nu H + (\text{h.c.}),$$

$$m_{\nu, \text{M}} \bar{\nu} \nu \longrightarrow (y_\nu)^2 (\nu H)^c \times \frac{1}{m_N} \times (\nu H) + (\text{h.c.})$$

研究动机

- 微弱耦合的桥梁粒子 (feebly interacting portal particle) 能很好地解决前面提到的有趣的理论问题。 [Ann.Rev.Nucl.Part.Sci. 71 (2021) 279-313]

暗区 (dark sector) : 不带电磁、弱、强相互作用的荷的隐藏的粒子。暗区与标准模型可以通过桥梁粒子连接。桥梁粒子可以通过相互作用的拉格朗日量来体现。

$$\mathcal{L}_{\text{total}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \mathcal{L}_{\text{DS}} + \mathcal{L}_{\text{portal}}; \quad \mathcal{L}_{\text{portal}} = \sum O_{\text{SM}} \times O_{\text{DS}}$$

Portal	Coupling
Vector: dark photon (A')	$-\frac{\varepsilon}{2 \cos \theta_W} F'_{\mu\nu} B^{\mu\nu}$
Scalar: dark Higgs (S)	$(\mu S + \lambda_{\text{HS}} S^2) H^\dagger H$
Fermion: heavy neutral lepton (N)	$y_N L H N$
Pseudo-scalar: axion (a)	$\frac{a}{f_a} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}, \frac{a}{f_a} G_{i,\mu\nu} \tilde{G}_i^{\mu\nu}, \frac{\partial_\mu a}{f_a} \bar{\psi} \gamma^\mu \gamma^5 \psi$

研究动机

- 探测微弱耦合的桥梁粒子的实验方案

[Ann.Rev.Nucl.Part.Sci. 71 (2021) 279-313]

Portal	Parameter space	Signature
Dark photon (A')	$y = \alpha_D \varepsilon^2 \alpha (m_\chi / m_{A'})^4$ versus m_χ	DM scattering, $A' \rightarrow$ invisible
	Q_χ / e	$A' \rightarrow$ millicharged fermions
	ε versus $m_{A'}$	$A' \rightarrow$ visible modes
Dark scalar (S)	$\sin \theta$ versus m_S	$S \rightarrow$ visible/invisible modes
Dark pseudoscalar (a)	Photons: $g_{a\gamma\gamma}$ versus m_a	$a \rightarrow$ visible/invisible modes
	Fermions: $g_Y = 2v/f_a$ versus m_a	$a \rightarrow$ visible/invisible modes
	Gluons: $g_G = 1/f_G$ versus m_a	$a \rightarrow$ visible
Heavy neutral lepton (N)	U_e^2, U_μ^2, U_τ^2 versus m_N	$N \rightarrow$ visible/invisible modes

强流加速器实验主要通过产生新粒子的方式来研究。
探测暗物质桥梁粒子分为不可见衰变模式和可见衰变模式。

研究动机

- 不可见衰变模式

例如：

$$e^- Z \rightarrow e^- Z A'$$

$$e^+ e^- \rightarrow A' \gamma$$

$$K \rightarrow \pi X$$

NA64、NA62、Belle2、BESIII……

- 超级η介子工厂属于可见衰变模式的实验方案

Physics goals		Decay channel
New physics	Dark photon & X17	$e^+ e^- \gamma$
	Dark higgs	$\pi^+ \pi^- \pi^0$ $\pi^0 e^+ e^-$
	Axion-like particle	$\pi^+ \pi^- e^+ e^-$ $\pi^+ \pi^- \gamma \gamma$
	CP violation	$\pi^+ \pi^- \pi^0$ $\pi^+ \pi^- e^+ e^-$
	Lepton flavor violation	$\gamma \mu^+ e^- / c.c.$ $\mu^+ e^- / c.c.$

快模拟介绍

- 未来惠州两大强流质子装置

HIAF (p到U, $<10^{13}$ ppp, 3 Hz)

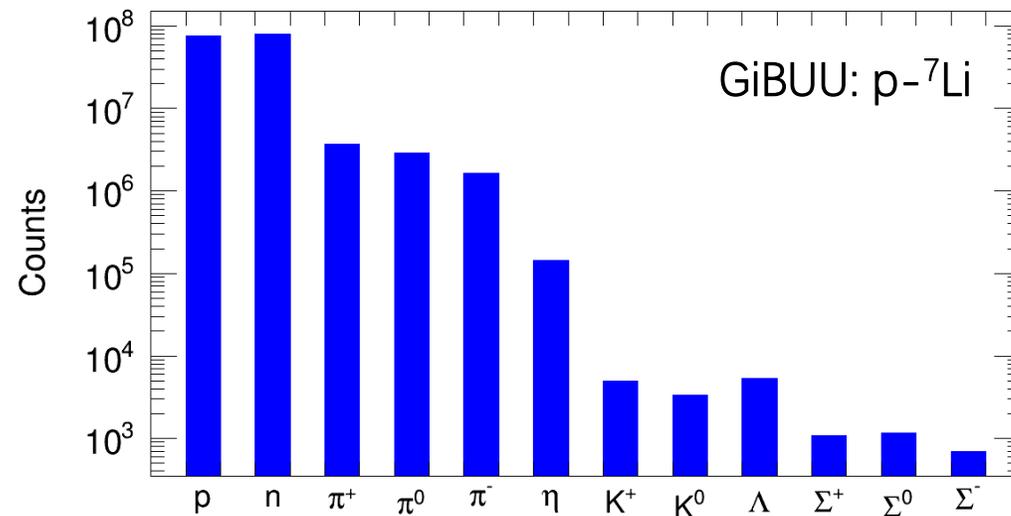
CiADS (连续束流, 2.5MW, 3.12×10^{16} pps, 有升级到2 GeV的可能性)

固定靶亮度: $\phi * L * \rho * N_A / M$

1 cm Li, 4.6×10^{35} cm⁻² s⁻¹

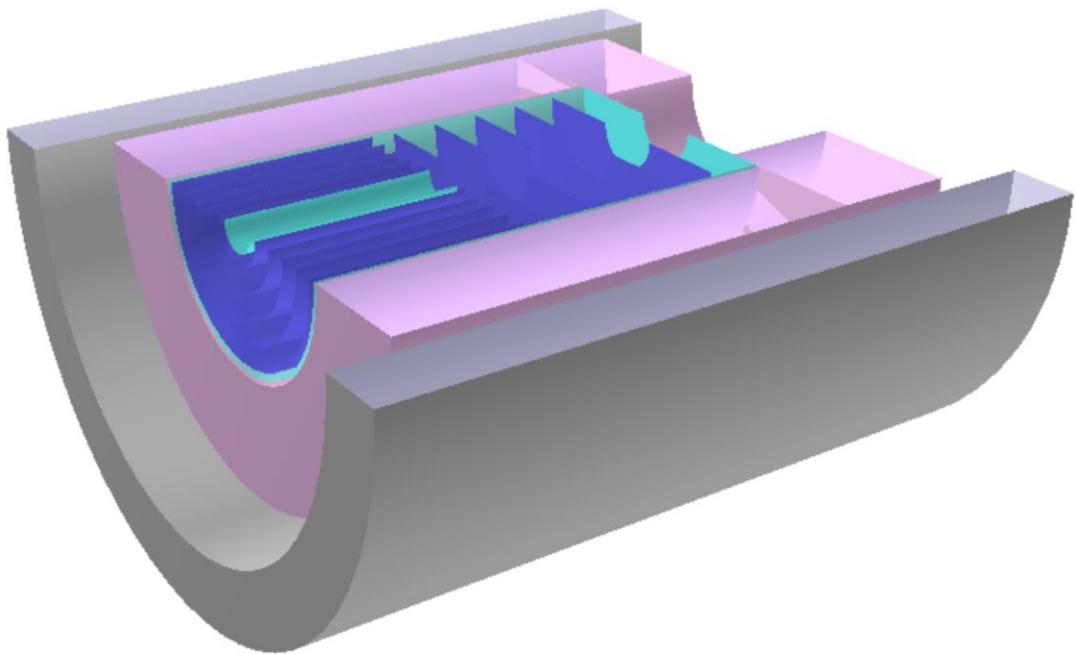
p-p η 产生截面 ~ 100 ub @ 1.8 GeV

考虑一个非常保守的运行一个月的前期实验
(慢引出): 5.9×10^{11} 的 η 产量。



p-A过程的 η 事例率比较高!
可以用来寻找暗物质桥梁粒子的
稀有衰变过程。

快模拟介绍



- 硅像素位置分辨 $\sigma = 50 \text{ um}$
- 时间、能量双读出技术（未来的目标：时间分辨好于5 ns，能量测量噪声为0.2MIP）
- 未来的单像素死时间小于10 us

当前模拟的事例率是比较保守的估计。

快模拟介绍

铅玻璃量能器压低中子本底，同时具有快速时间响应。

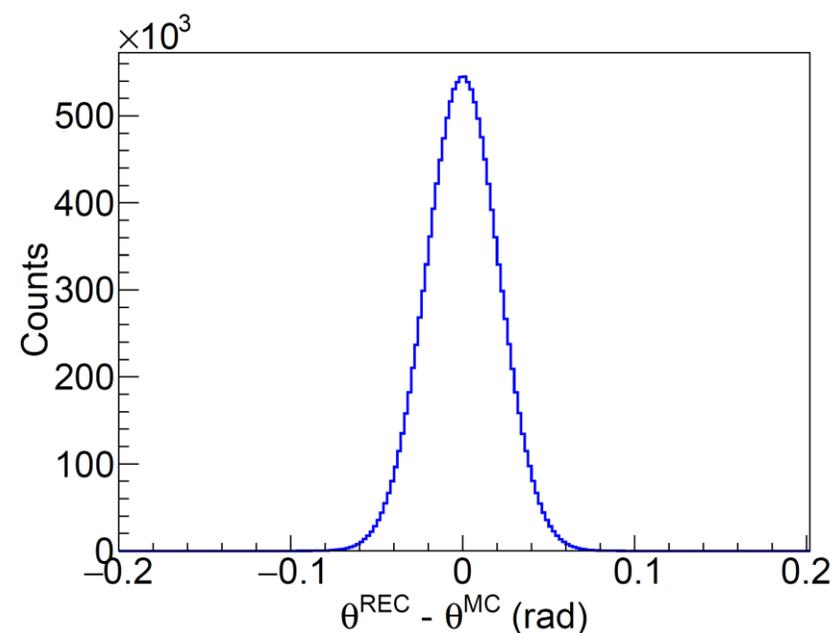
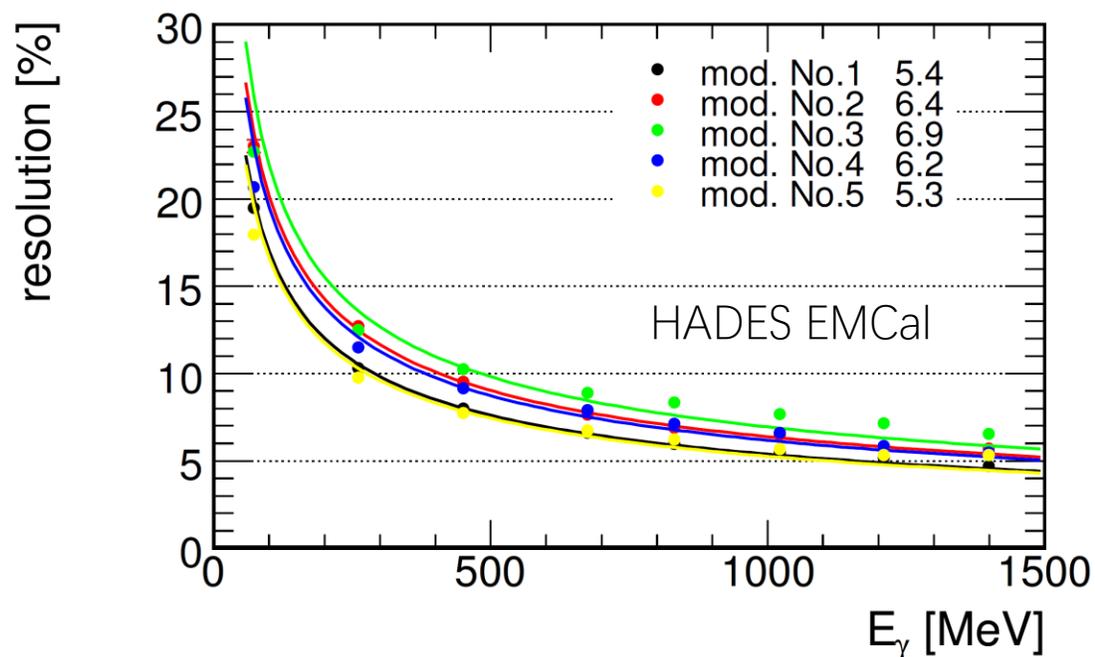
模拟能量分辨设置 $\frac{\delta E}{E} = \sqrt{0.0279^2 + 0.0557^2/E}$

基于geant4模拟，角度分辨设置为1.2 deg.

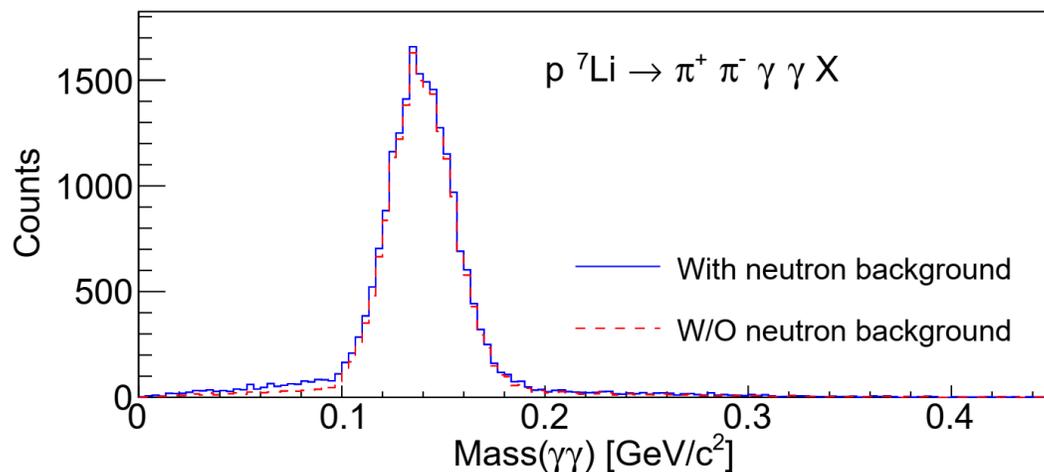
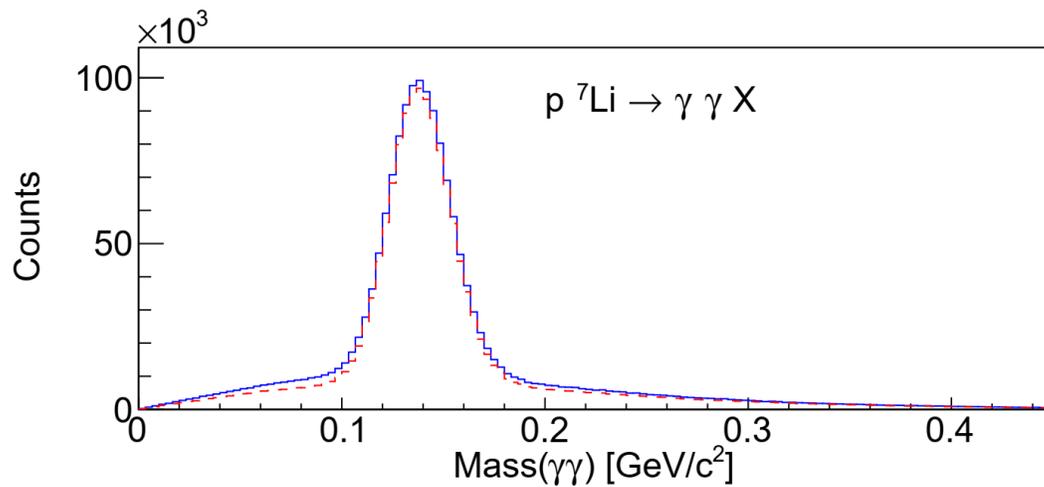
快模拟关键代码:

Yu-Tie LIANG, Xiong-Hong HE

Geat4模拟: Ye TIAN



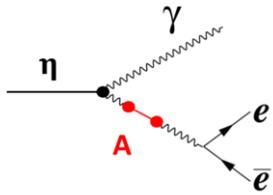
快模拟介绍



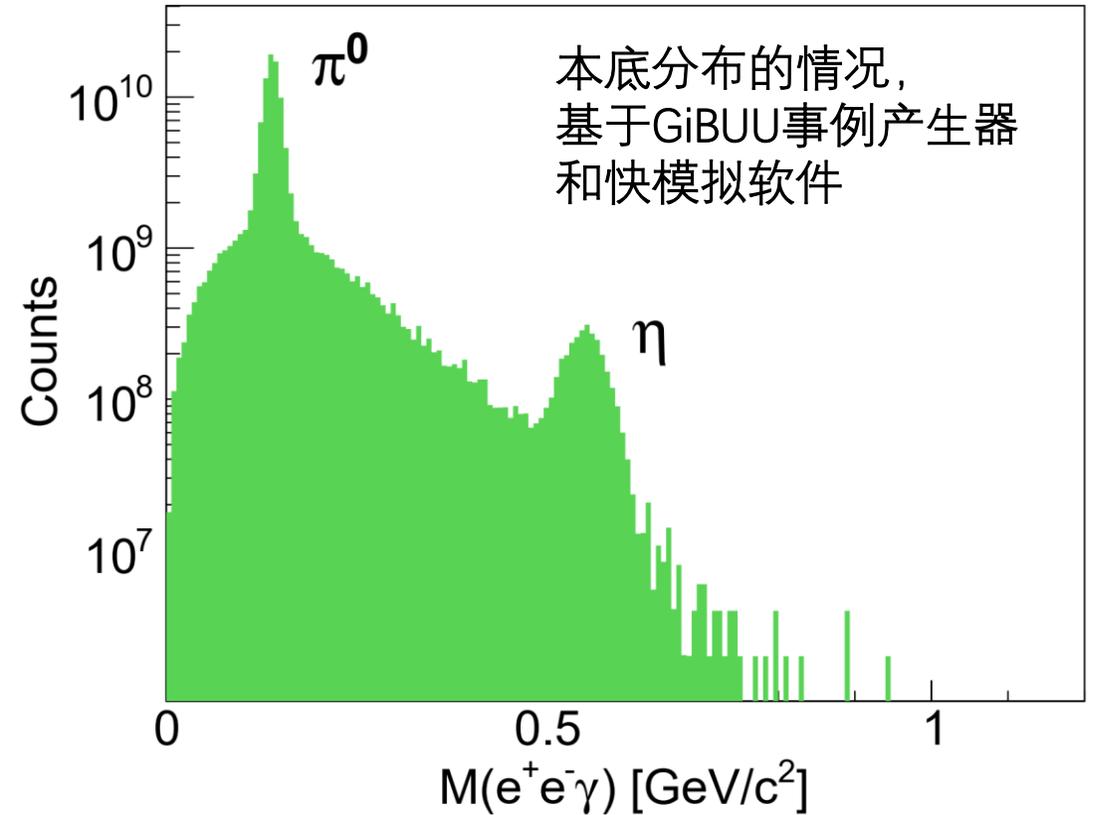
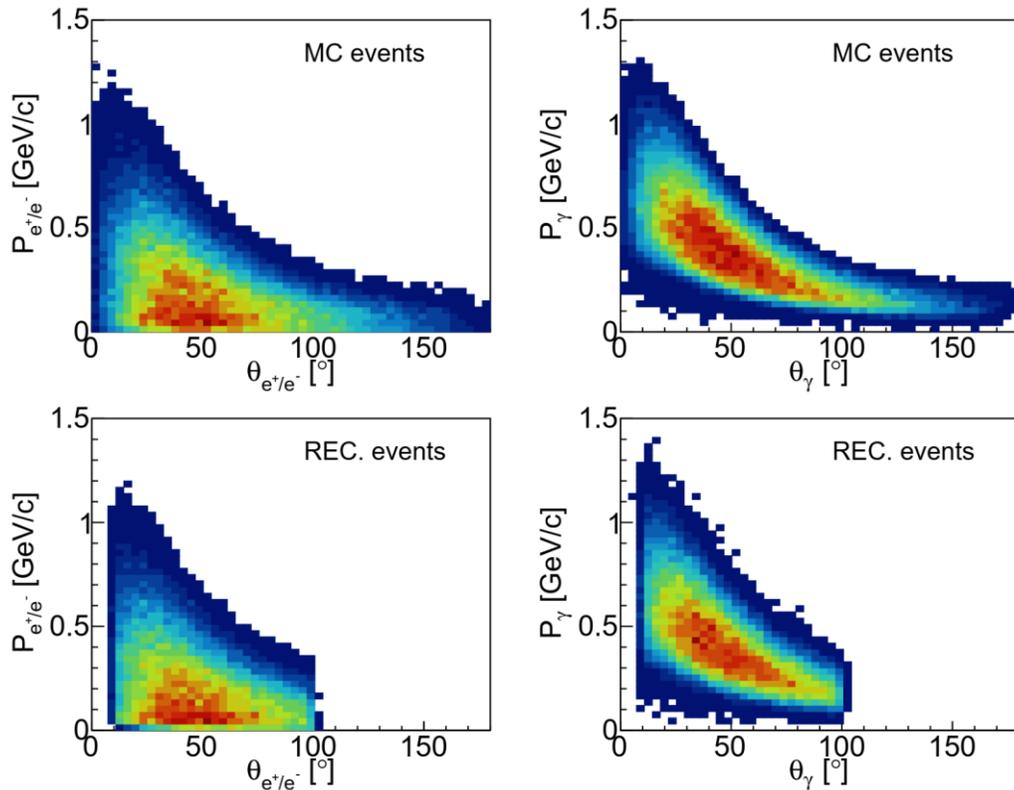
π^0 粒子的本底以及质量分辨本领如右图所示。

误鉴别的中子导致的本底几乎可以忽略。因为中子在铅玻璃中的奇伦科夫光子很少，并且大多数中子本底是低能的。

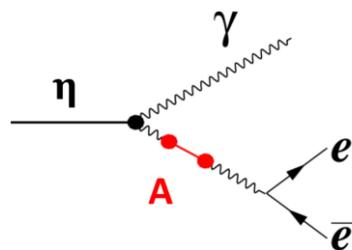
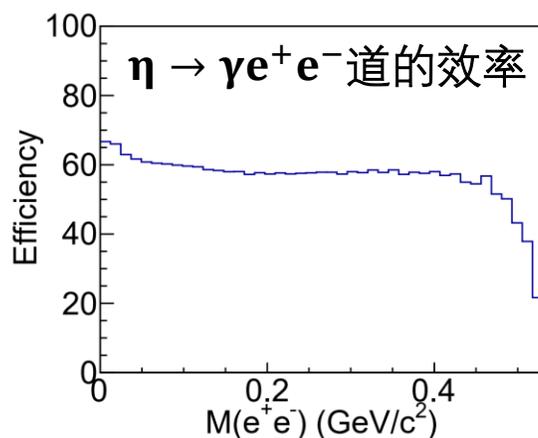
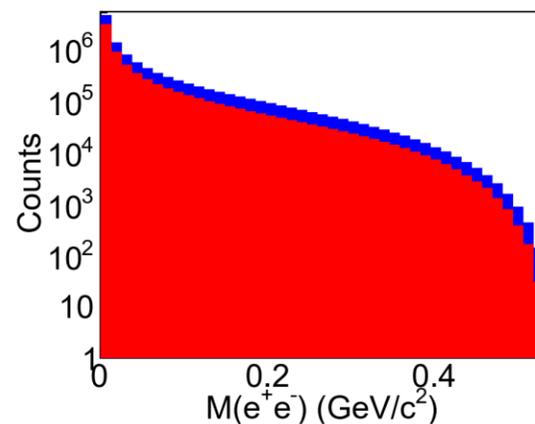
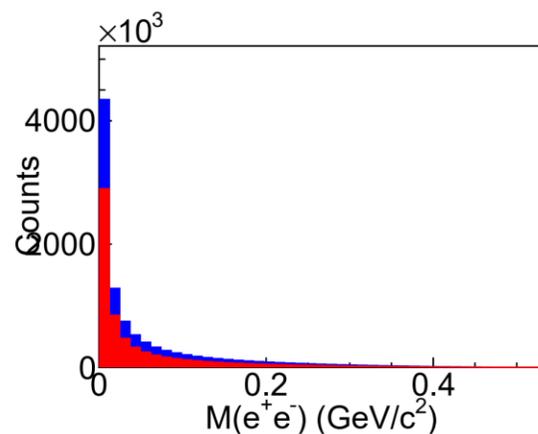
暗光子衰变道的结果



低能 η 介子的衰变末态主要在中央快度区域



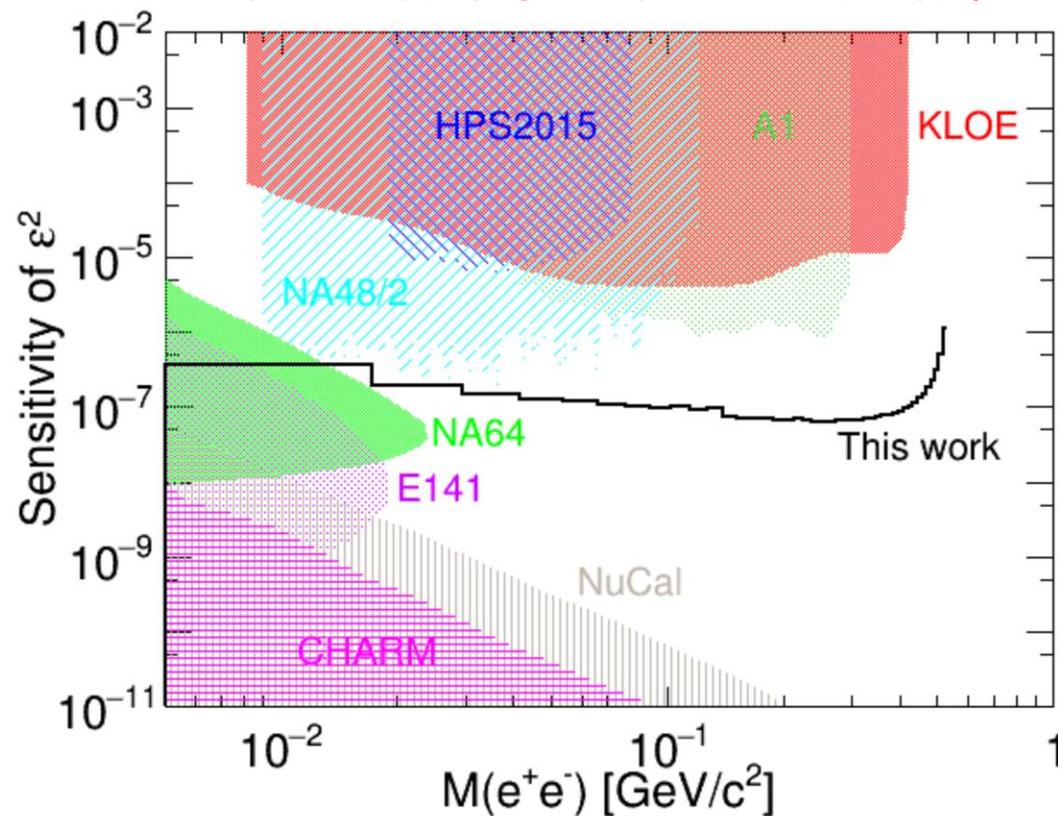
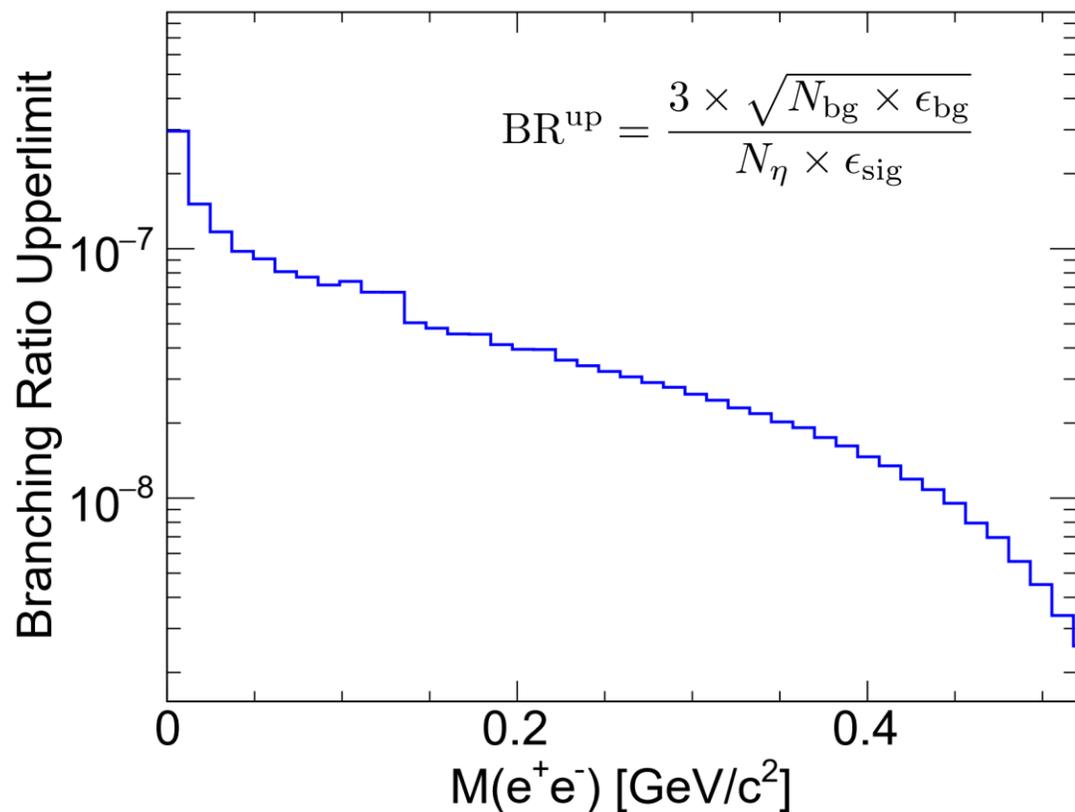
暗光子衰变道的结果



暗光子可见衰变道的探测效率如右图所示

暗光子衰变道的结果

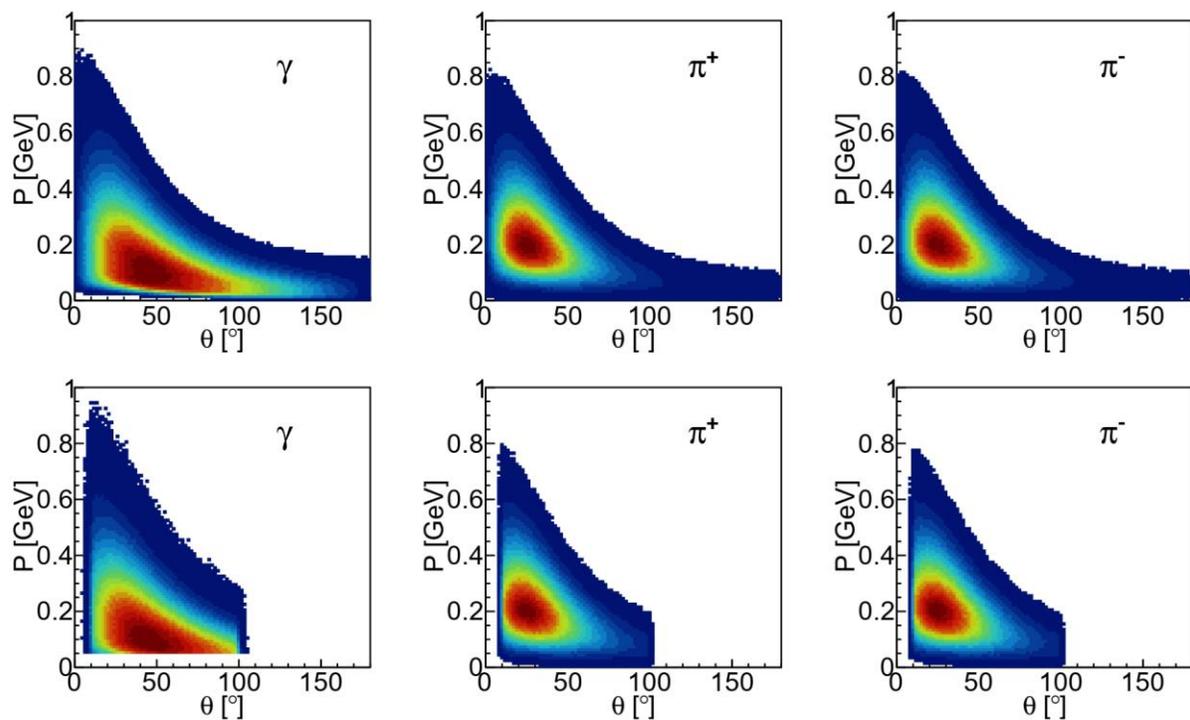
一个月、保守事例率下的初步结果!



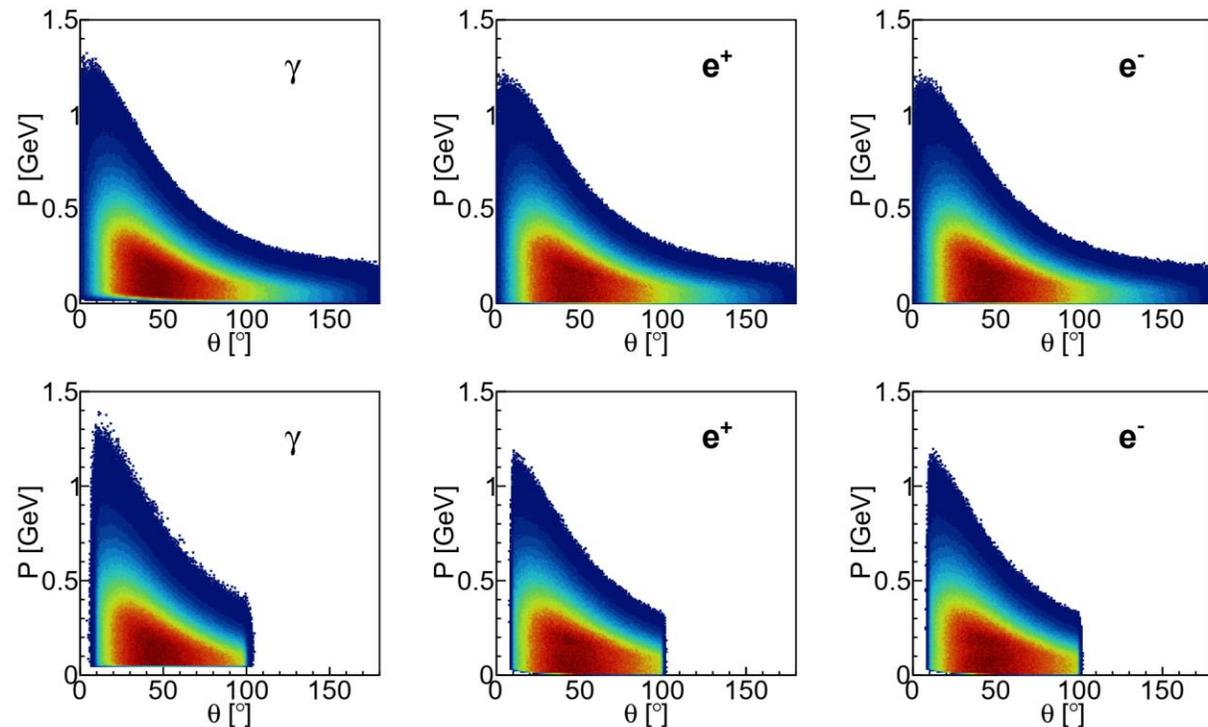
$$S(\epsilon^2) = \frac{BR^{\text{up}}}{2|F(m_A^2)|^2 \left(1 - \frac{m_A^2}{m_\eta^2}\right)^3}$$

暗希格斯粒子衰变道的结果

$\eta \rightarrow \pi^0 h \rightarrow \gamma\gamma\pi^+\pi^-$ 衰变末态的运动学分布

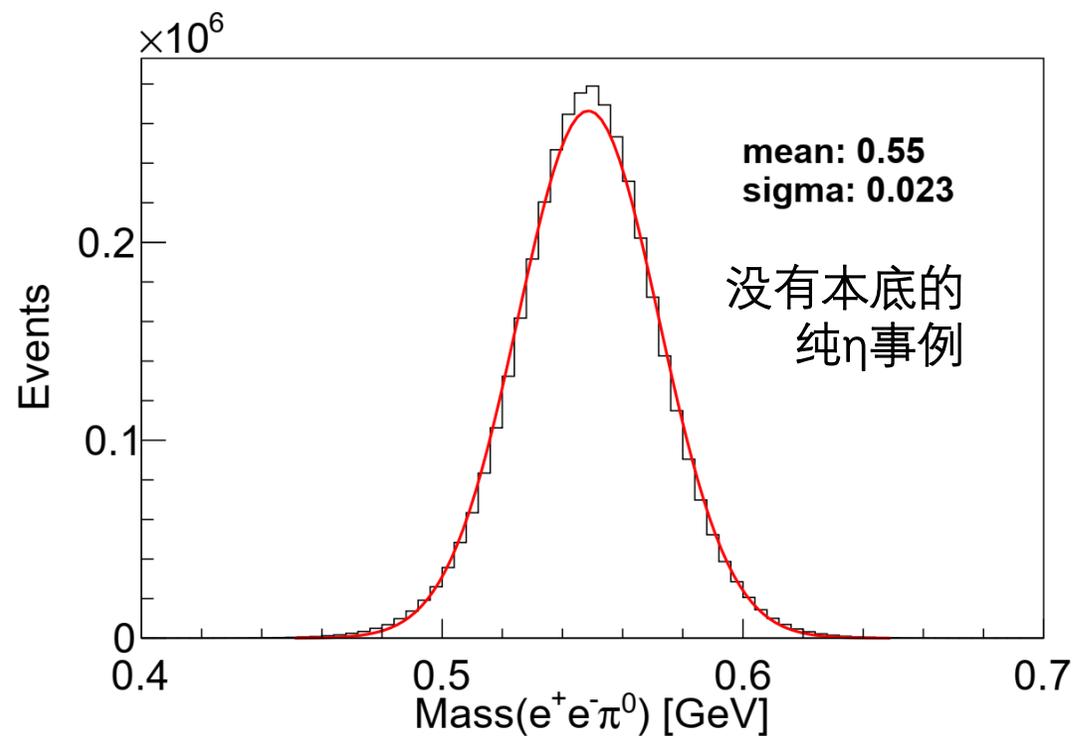
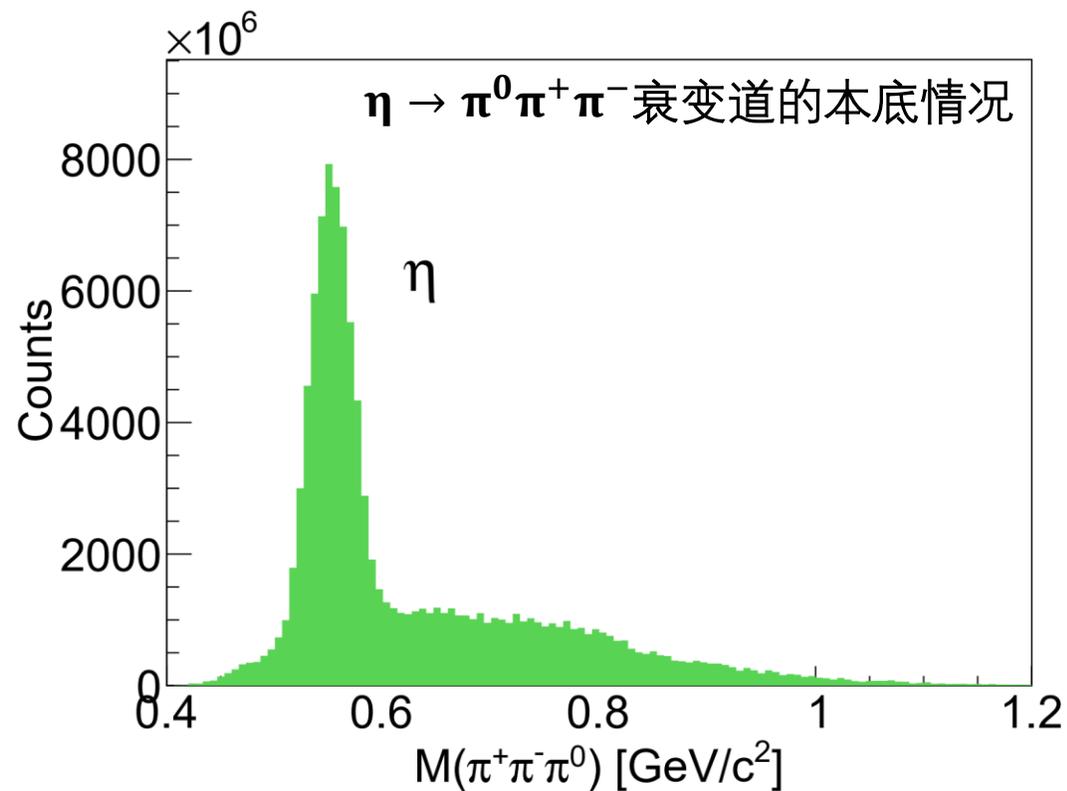


$\eta \rightarrow \pi^0 h \rightarrow \gamma\gamma e^+ e^-$ 衰变末态的运动学分布



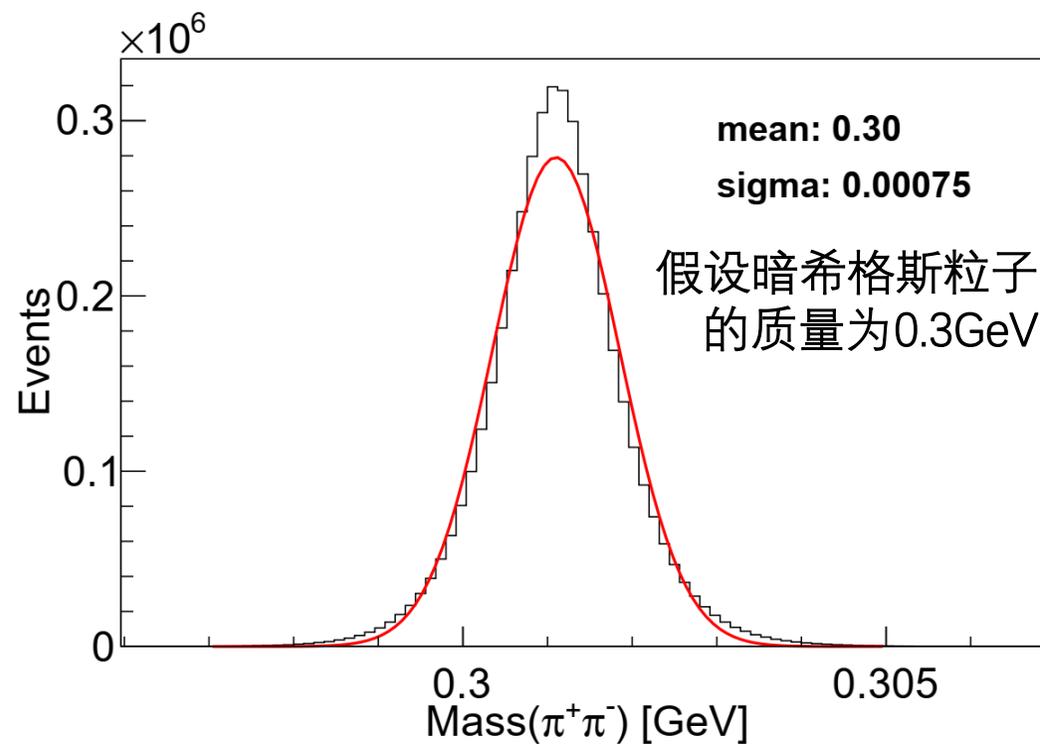
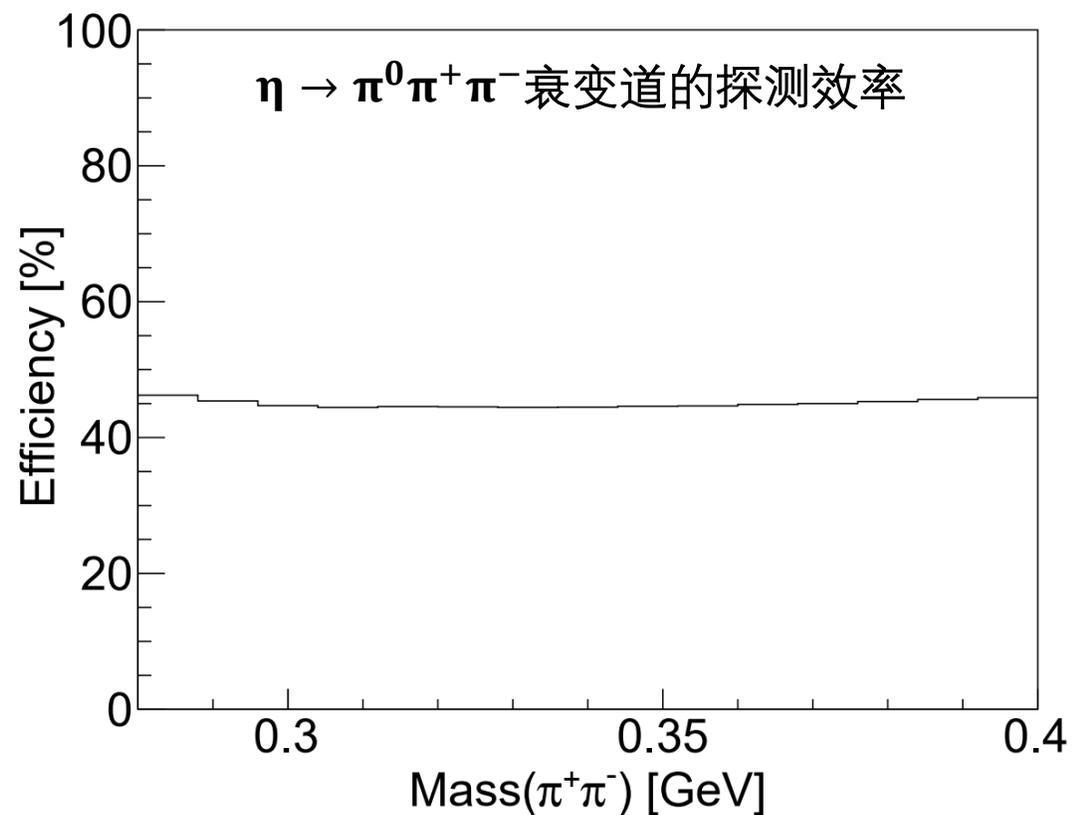
低能 η 介子的衰变末态主要在中央快度区域，并且动量（和横动量）较低。

暗希格斯粒子衰变道的结果



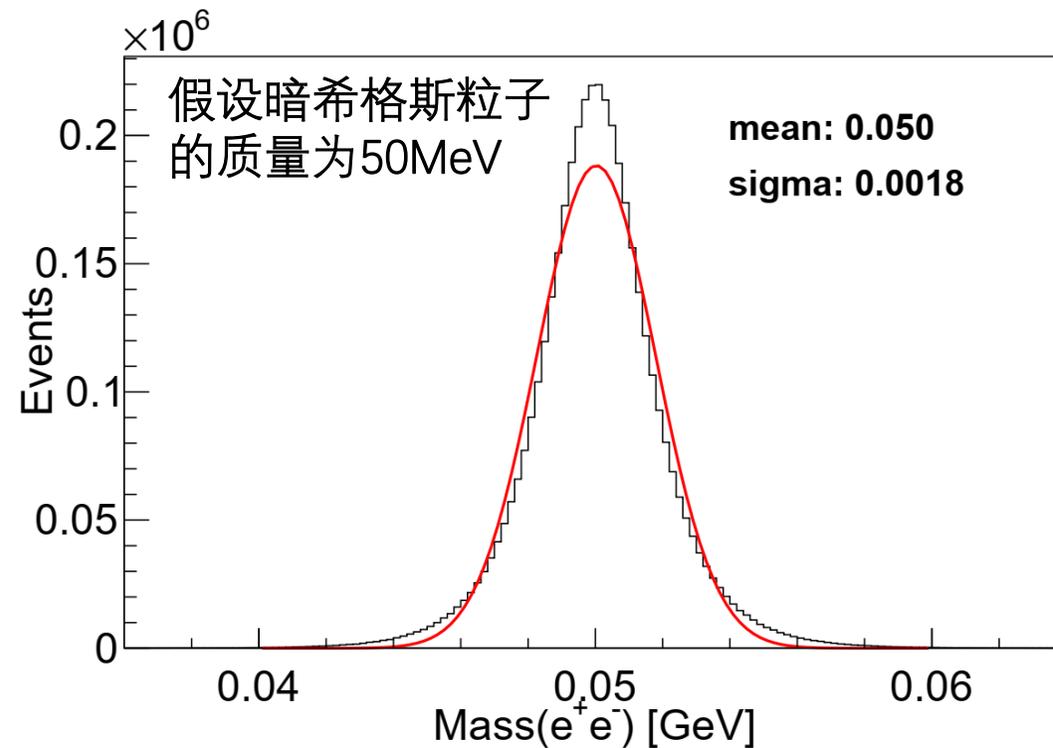
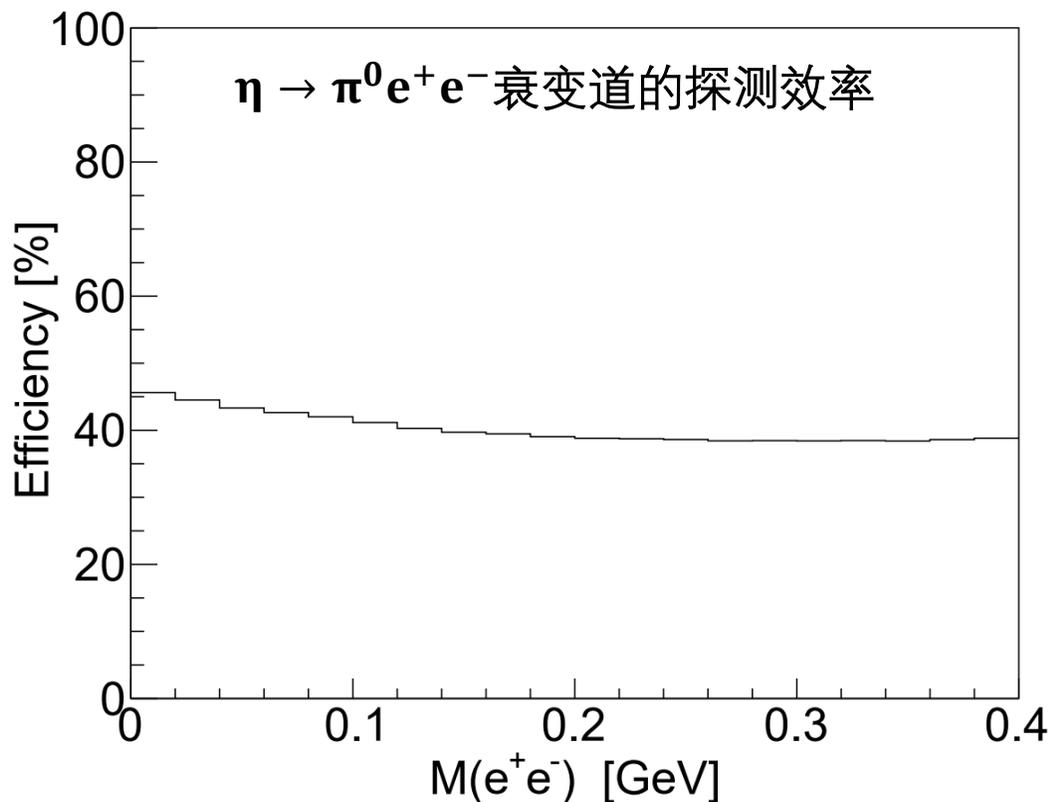
$\eta \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$ 衰变道的不变质量的分辨大约在23MeV。
(基于纯铅玻璃量能器的结果)

暗希格斯粒子衰变道的结果



暗希格斯粒子质量的分辨很好
(带电粒子动量测量较准)

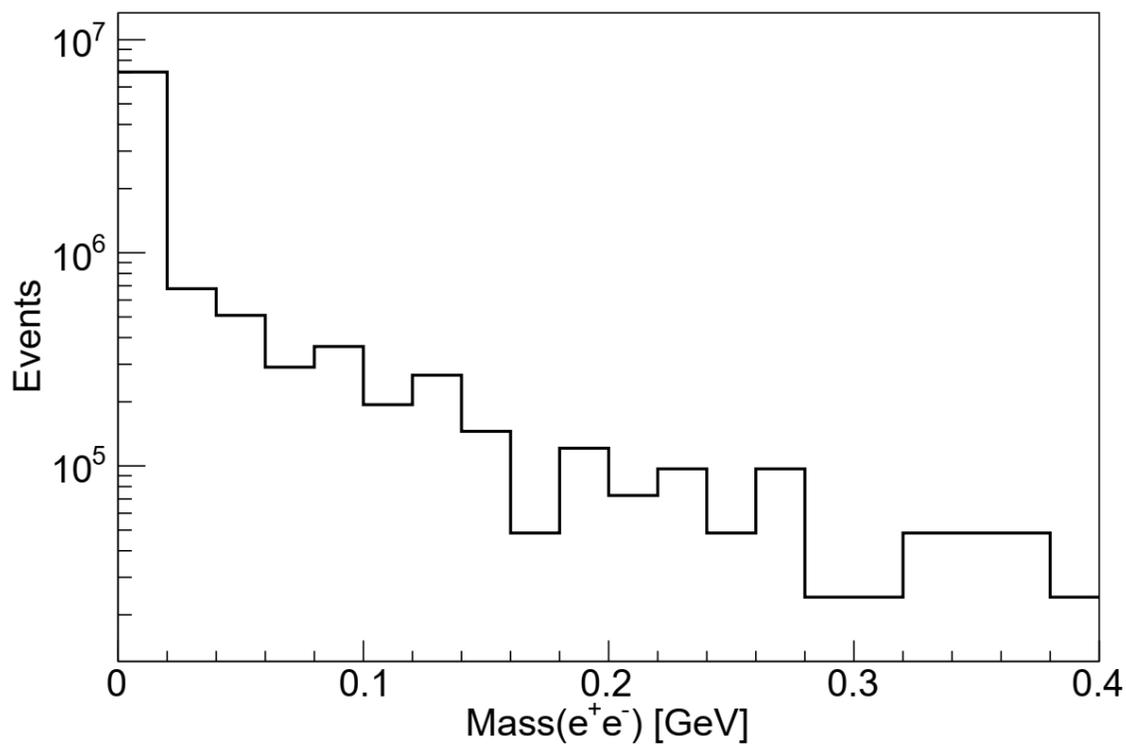
暗希格斯粒子衰变道的结果



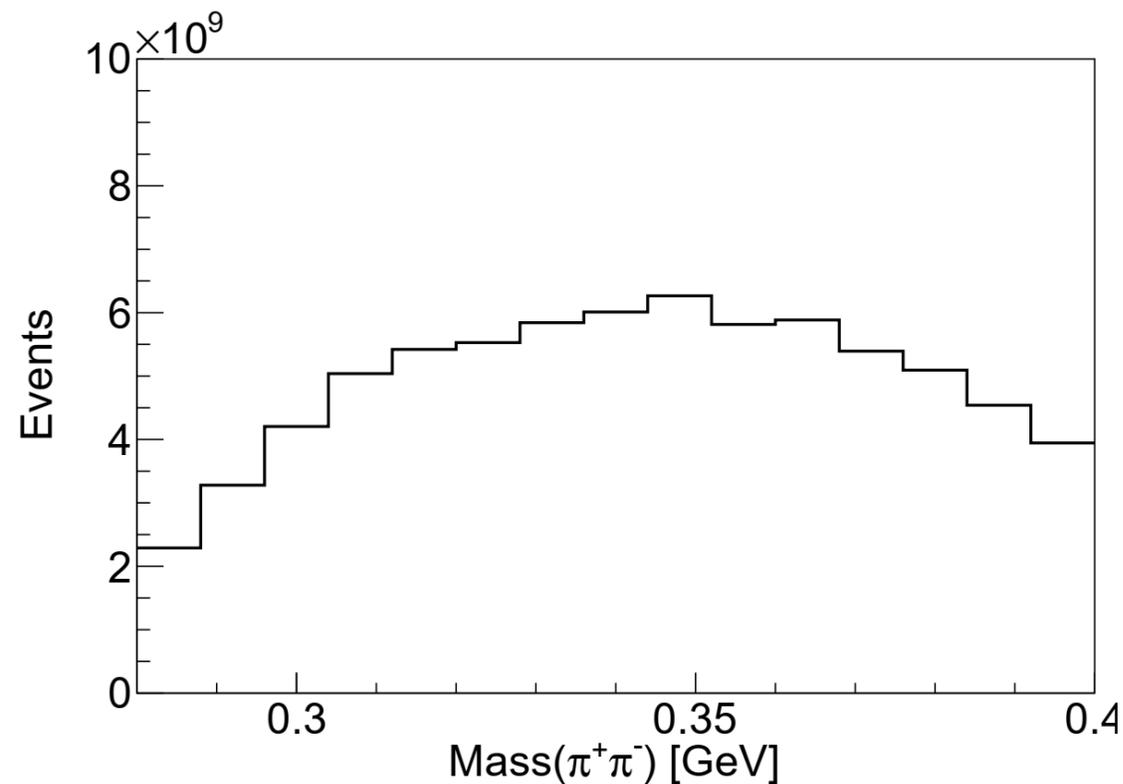
暗希格斯粒子质量的分辨很好
(带电粒子动量测量较准)

暗希格斯粒子衰变道的结果

筛选出来的 $p\ ^7\text{Li} \rightarrow \eta X \rightarrow \pi^0 e^+ e^- X$ 的事例。



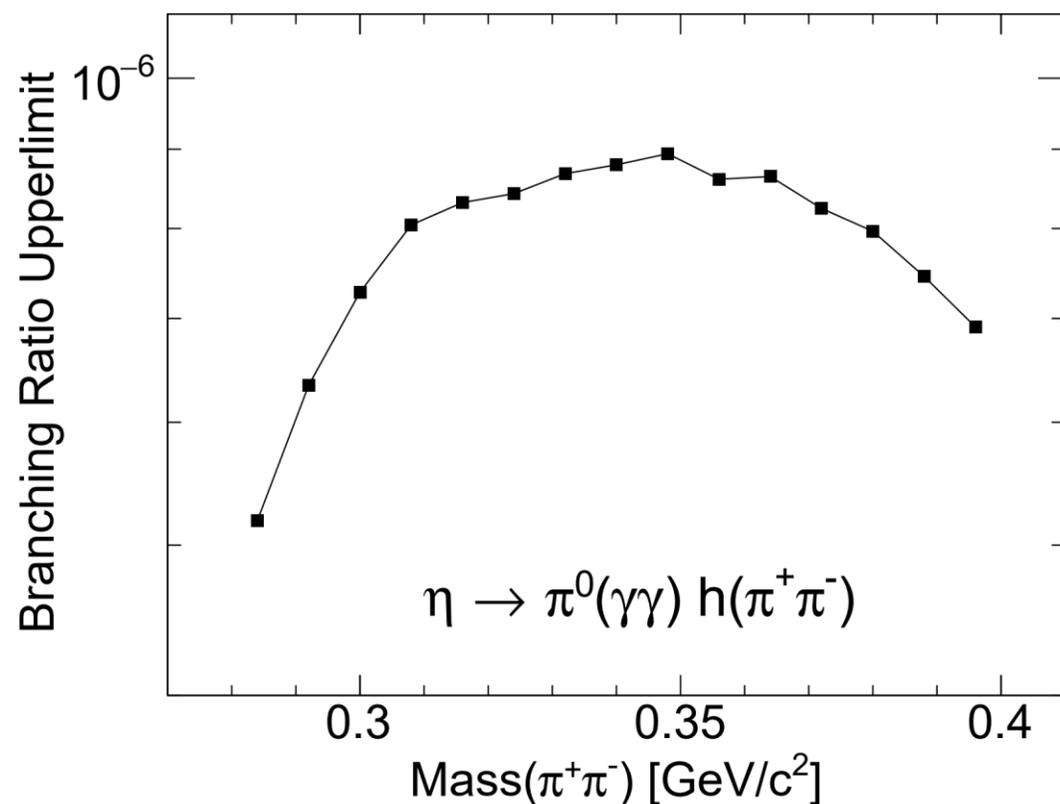
筛选出来的 $p\ ^7\text{Li} \rightarrow \eta X \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^- X$ 的事例。



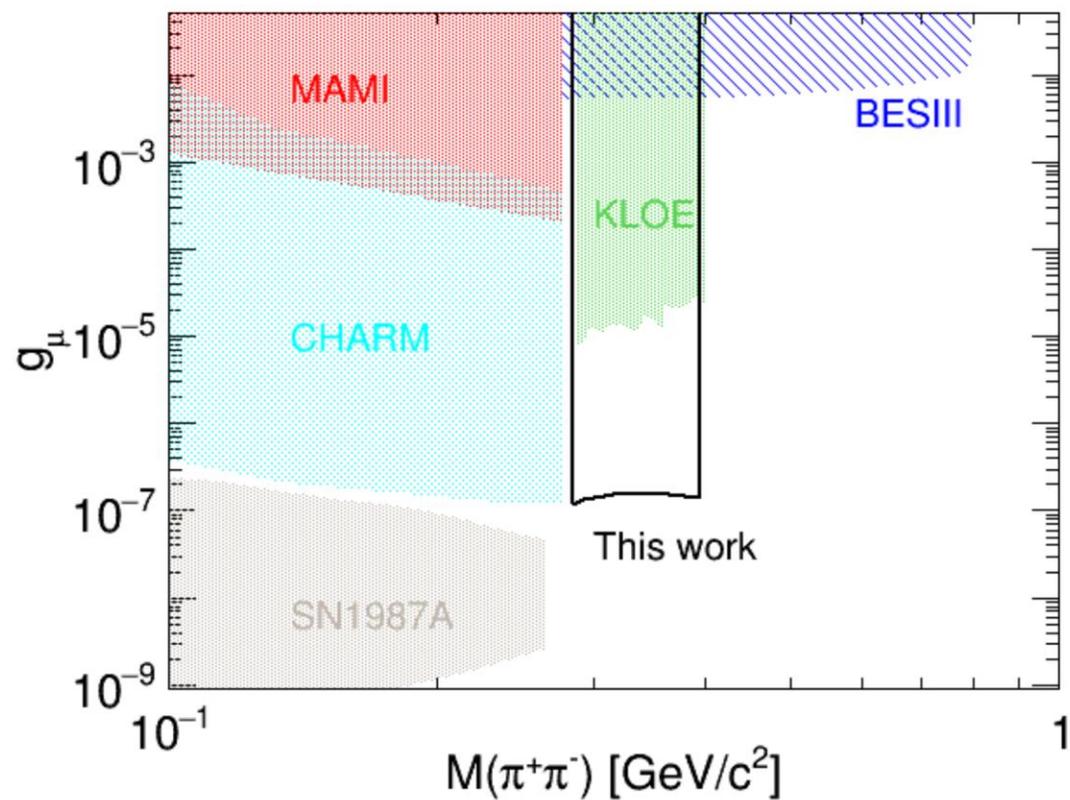
一个月且保守取数事例率下的初步结果!

暗希格斯粒子衰变道的结果

理论: [Phys.Rev.D 100 (2019) 9, 095020; Phys.Rept. 945 (2022) 1-105]



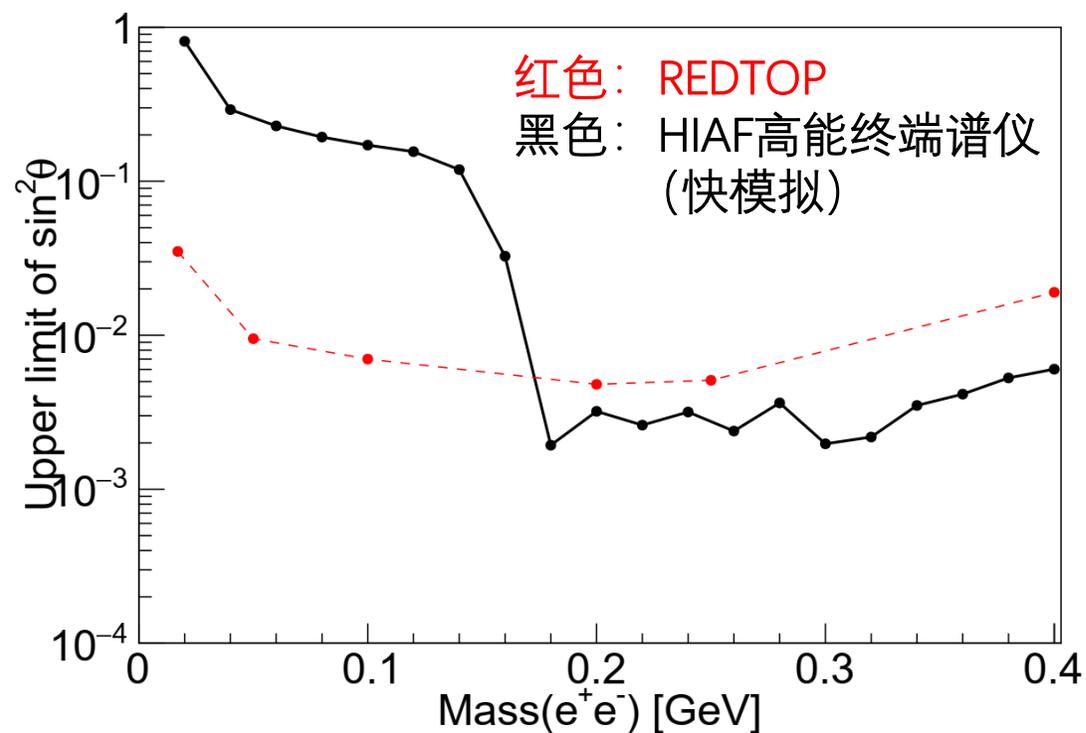
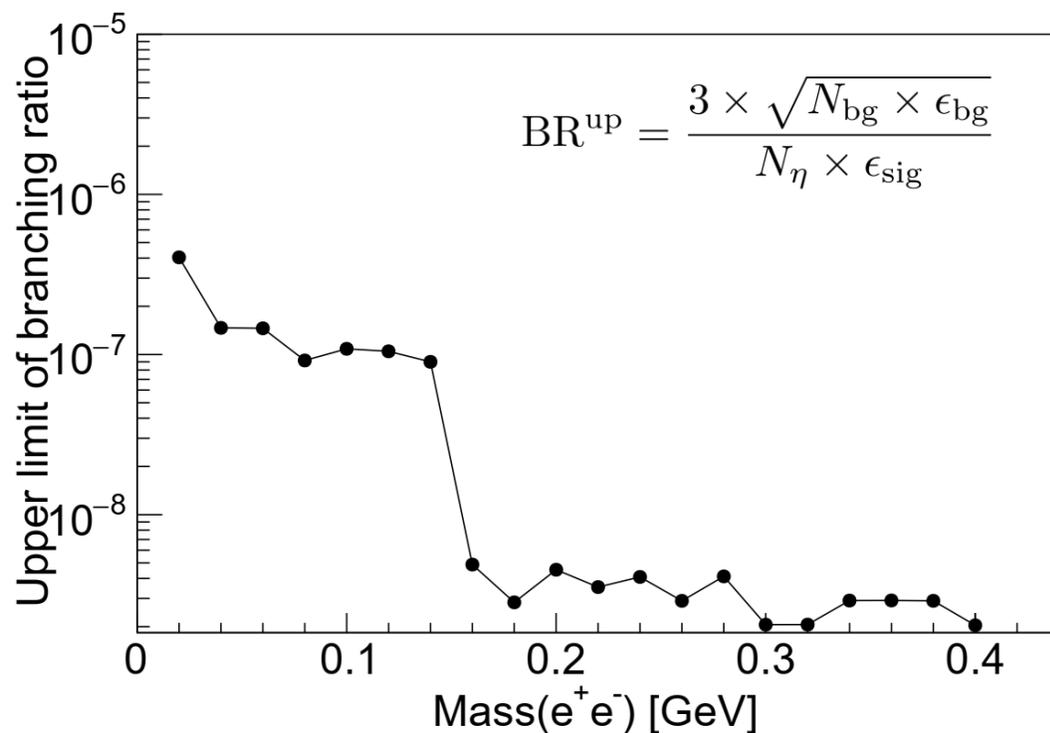
$$\text{BR}^{\text{up}} = \frac{3 \times \sqrt{N_{\text{bg}} \times \epsilon_{\text{bg}}}}{N_{\eta} \times \epsilon_{\text{sig}}}$$



$$\text{Br}(\eta \rightarrow \pi^0 S) = \frac{c_{S\pi^0\eta}^2 g_u^2 B^2}{16\pi m_{\eta} \Gamma_{\eta}} \lambda^{1/2} \left(1, \frac{m_S^2}{m_{\eta}^2}, \frac{m_{\pi^0}^2}{m_{\eta}^2} \right)$$

暗希格斯粒子衰变道的结果

理论: [Phys.Rev.D 75 (2007) 037701; Phys.Rept. 945 (2022) 1-105]

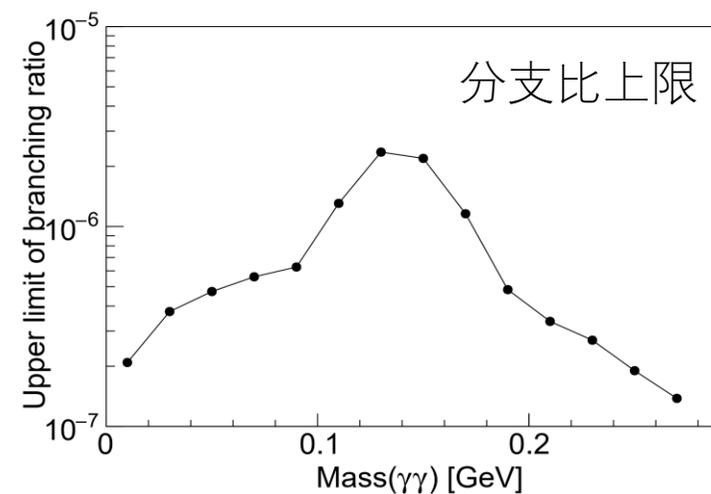
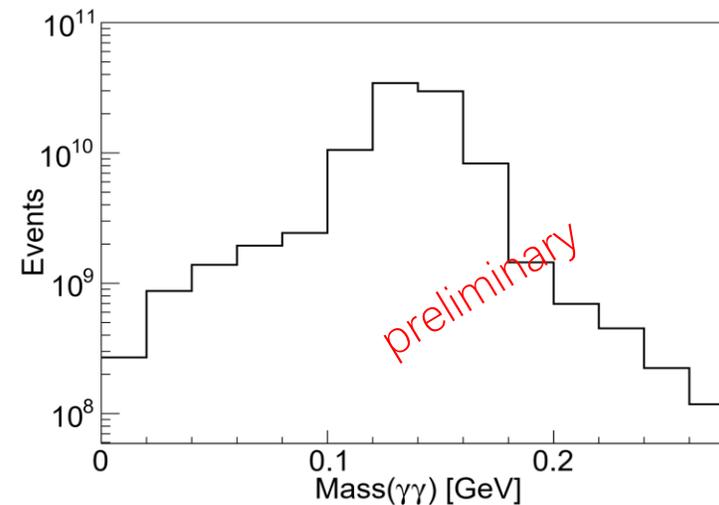
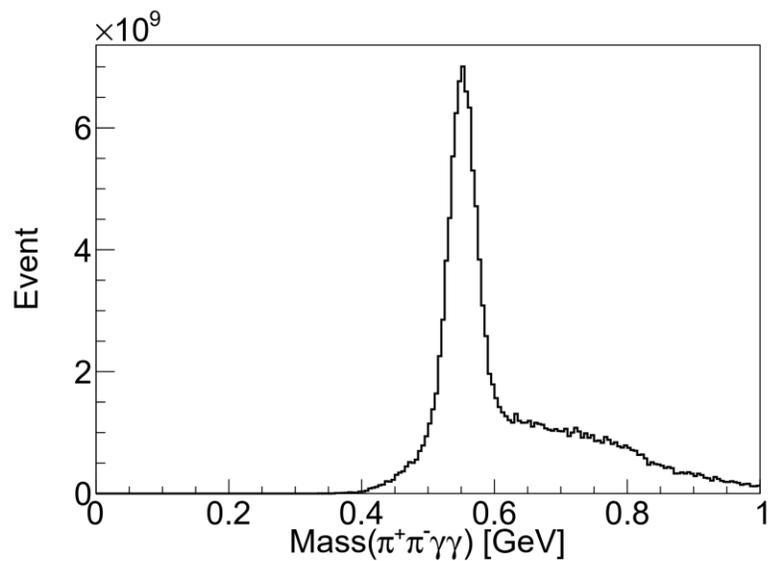


$$Br(\eta \rightarrow \pi^0 S) \simeq 1.8 \times 10^{-6} \lambda^{1/2} \left(1, \frac{m_S^2}{m_\eta^2}, \frac{m_{\pi^0}^2}{m_\eta^2} \right) \sin^2 \theta$$

该公式有10%的理论误差。

类轴子的寻找

寻找类轴子的反应道之一：
 $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- a \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma \gamma$

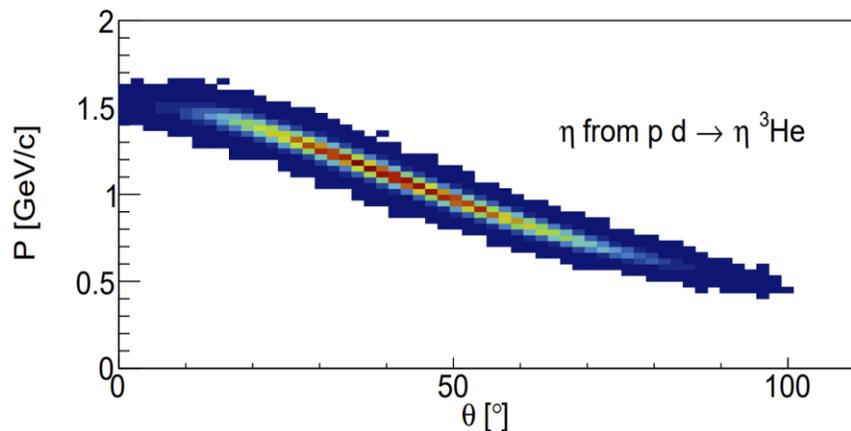
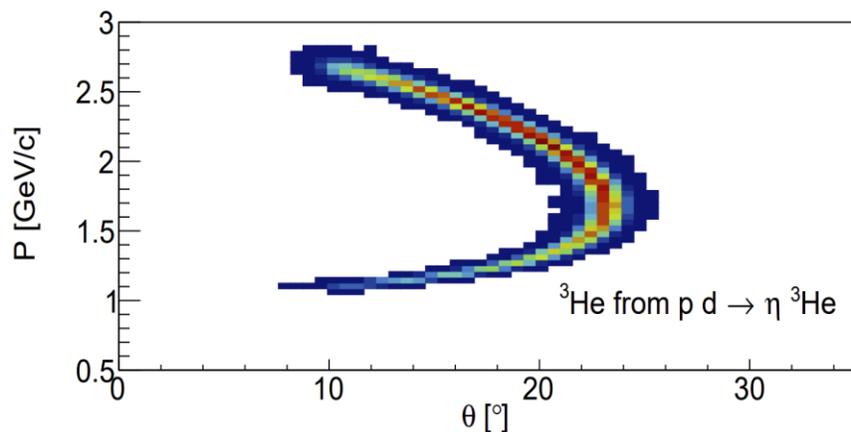


谢谢！

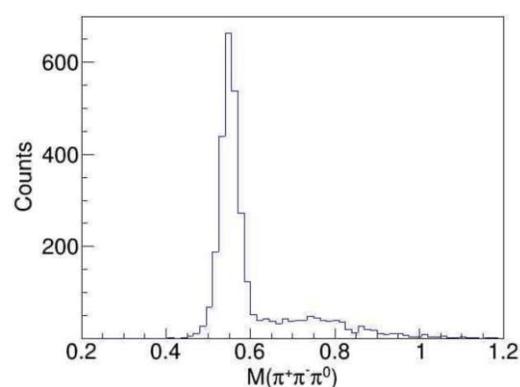
- 请各位专家批评指正

遍举测量方案以进一步降低本底

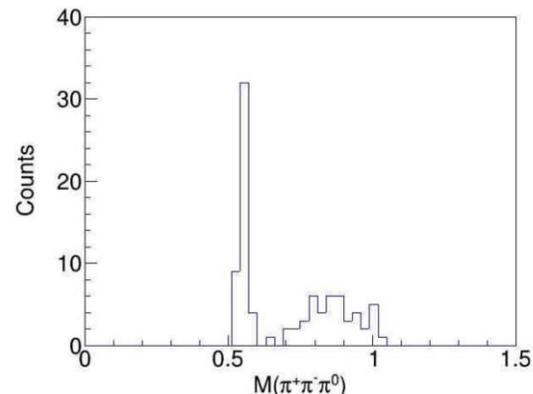
采用氦靶的一个遍举过程的运动学
(同时探测 ^3He 可以消除本底)



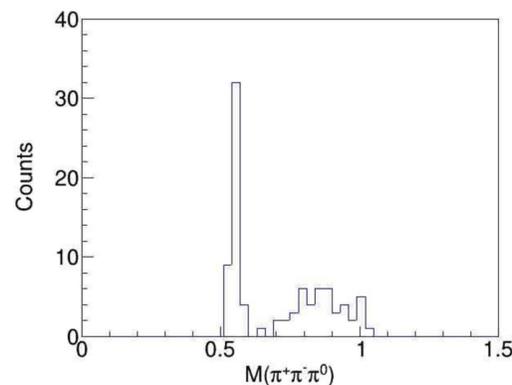
$pd \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 X$ 道的模拟结果, 基于GiBUU和快模拟



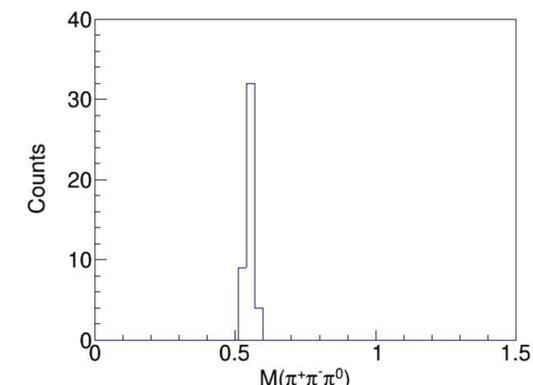
没有经过选择的不变质量分布



对 $M(X)$ 加以限制的不变质量分布



对 $M(X)$ 加以限制的不变质量分布



对 $M(X)$ 、动量角度关系都加以限制的不变质量分布