



清华大学
Tsinghua University

杰斐逊实验室C实验大厅中性粒子谱仪的 硬全举 π^0 电产生测量

博士研究生：张耀鹏（清华大学物理系）

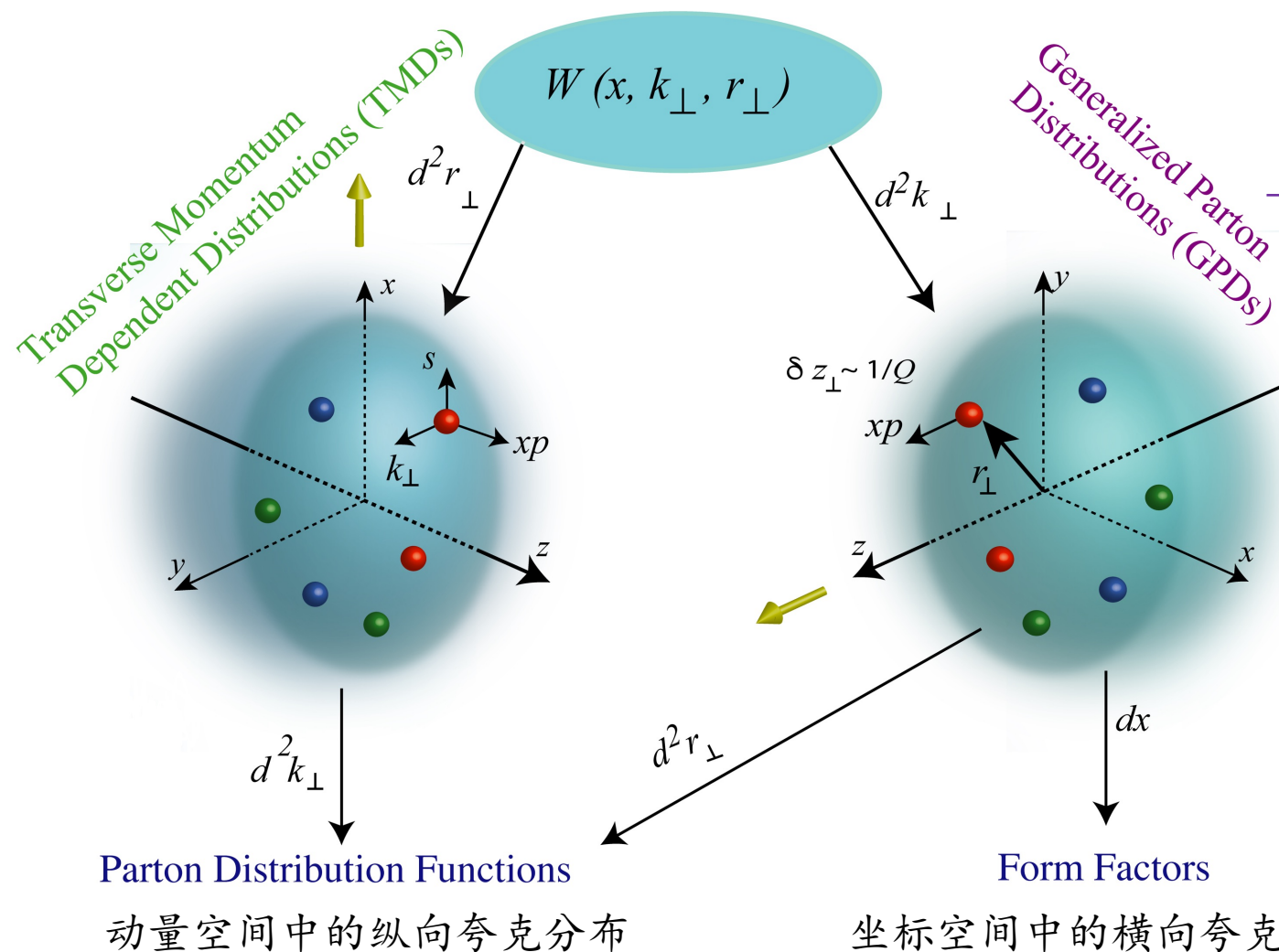
指导教师：叶志鸿（清华大学）

联合指导教师：Julie Roche（俄亥俄大学）

第一届强相互作用自旋物理会议，青岛，2026年7月29日

■ 核子结构的更完整描述

Wigner Distributions



康普顿形状因子
Compton Form Factors

硬全举反应

GPDs 的最直接探针:

DVCS: Deeply Virtual Compton Scattering

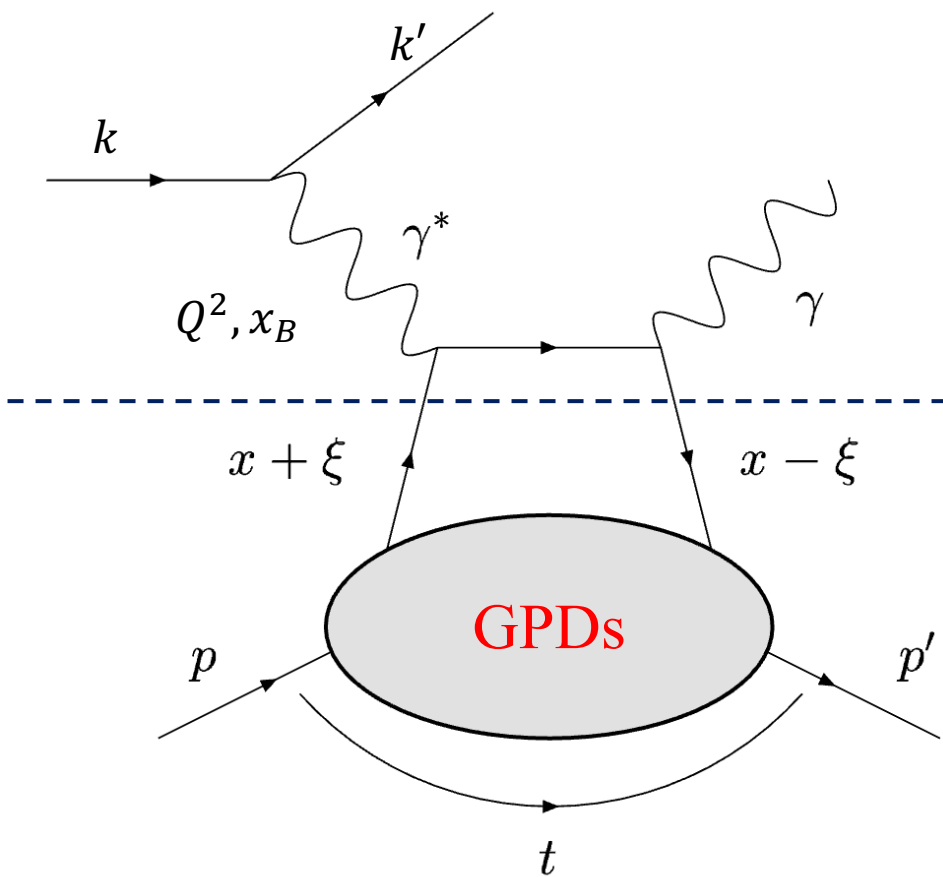
其它探针:

HEMP: Hard Exclusive Meson Production



■ 硬全举反应：手提包分解

分解成立的最小 Q^2 必须通过实验来测试及确定



硬过程
可 QCD 微扰

软过程
不可 QCD 微扰,
由 GPDs 描述

一些关键变量的定义:

- x : 平均纵向动量 (此类实验中无法测量)
- ξ : 纵向动量之差 $\simeq x_B/(2 - x_B)$
- t : 四动量转移
- $Q^2 = -(k - k')^2$ 虚光子的虚度
- $x_B = Q^2/2M\nu, \quad \nu = E_e - E_e'$

Bjorken 极限:

$$Q^2 = \left. \begin{matrix} -q^2 & \rightarrow & \infty \\ \nu & \rightarrow & \infty \end{matrix} \right\} x_B = \frac{Q^2}{2M\nu} \text{ fixed}$$

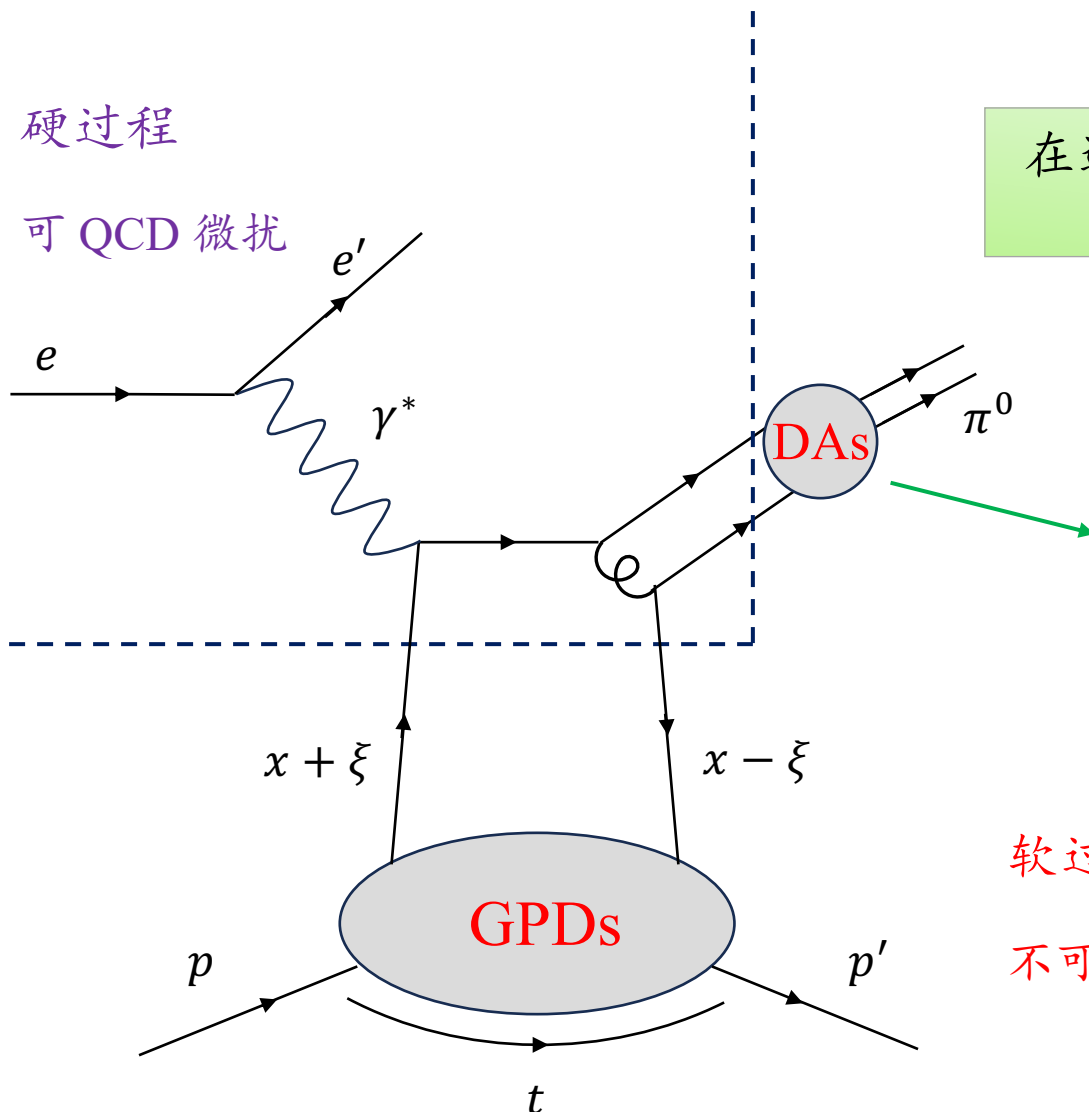
每次只与一个部分子碰撞

■ 硬全举 π^0 电产生

John C. Collins *et al*, Adv. Ser. Direct. High Energy Phys. (1989) PRD (1997)

硬过程

可 QCD 微扰



在这种类型的反应中，只有纵向偏振的虚光子的分解得到了完整证明

Distribution amplitude 描述产生的介子的结构
(不可微扰)

软过程

不可 QCD 微扰，由 GPDs 描述



■ 散射截面

➤ 纵向极化的束流以及非极化靶:

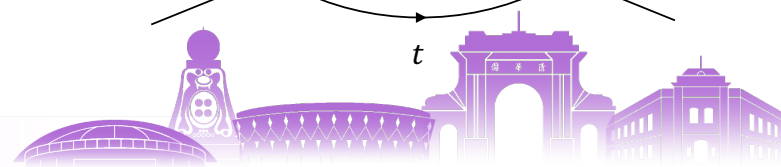
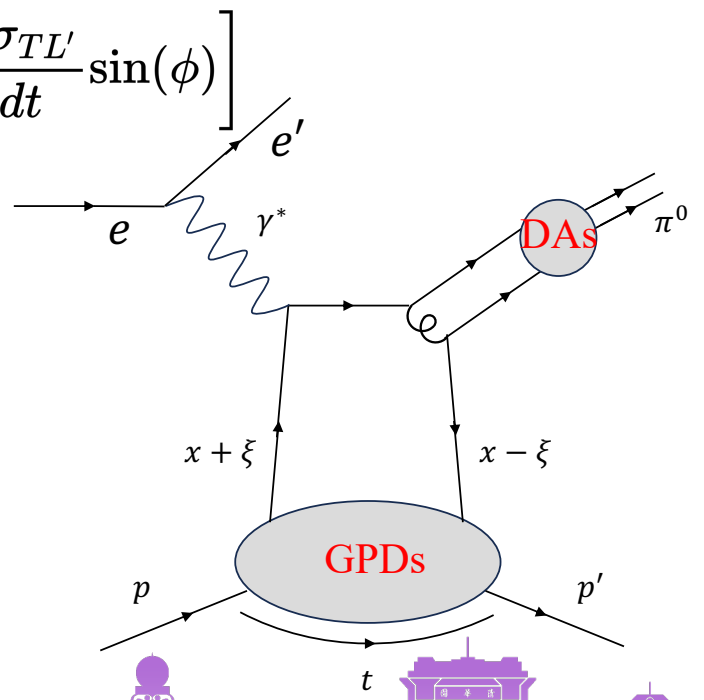
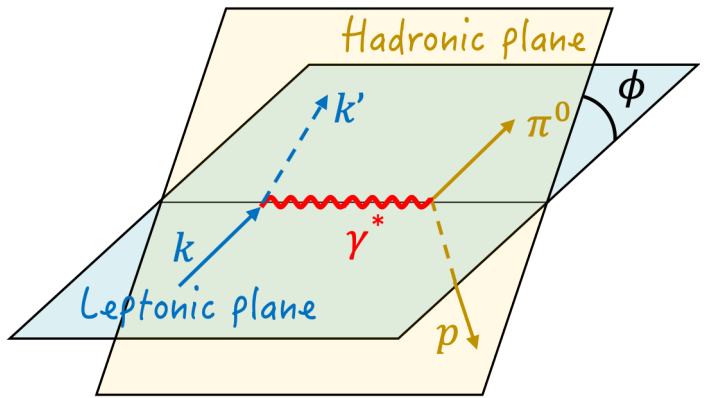
$$\frac{d^2\Gamma_{\gamma^*}}{dQ^2 dx_B}(Q^2, x_B, E_e) = \frac{\alpha}{8\pi} \frac{Q^2}{M^2 E_e^2} \frac{1-x_B}{x_B^3} \frac{1}{1-\epsilon^*}$$

$$\epsilon^* = \frac{1-y-\frac{Q^2}{4E_e^2}}{1-y+\frac{y^2}{2}+\frac{Q^2}{4E_e^2}}$$

$$\frac{d^4\sigma}{dtd\phi dQ^2 dx_B} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2\Gamma_{\gamma^*}}{dQ^2 dx_B}(Q^2, x_B, E) \left[\frac{d\sigma_T}{dt} + \epsilon^* \frac{d\sigma_L}{dt} + \sqrt{2\epsilon^*(1+\epsilon^*)} \frac{d\sigma_{TL}}{dt} \cos(\phi) + \epsilon^* \frac{d\sigma_{TT}}{dt} \cos(2\phi) + h \sqrt{2\epsilon^*(1-\epsilon^*)} \frac{d\sigma_{TL'}}{dt} \sin(\phi) \right]$$

- T/L (横/纵) 表示虚光子的极化方向
- $d\sigma_{TL}, d\sigma_{TT}, d\sigma_{TL'}$ 是干涉项
- 每个谐波分量都有 ϕ 以及束流能量的依赖 (散射截面分离)
- ϕ 是轻子平面和强子平面之间的夹角
- 根据手提包分解理论, σ_L 的标度行为满足 $\frac{1}{Q^6}$ 而 σ_T 的标度行为满足 $\frac{1}{Q^8}$

D. Dreschel and L. Tiator, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. (1992)



■ 通过 DVMP 探测 GPDs

➤ π^0 电产生的纵向振幅（涉及手征偶分布 GPDs）

在领头阶微扰 QCD 和领头扭度近似下： 手征偶领头扭度 DA

$$\mathcal{M}_{\pi^0}^L = -ie \frac{4}{9} \frac{1}{\sqrt{Q^2}} 4\pi\alpha_S \left[\int_0^1 dz \frac{\Phi_{\pi^0}(z)}{z} \right] \times \frac{1}{2} \int_{-1}^1 dx \left[\frac{1}{x - \xi + i\epsilon} + \frac{1}{x + \xi + i\epsilon} \right] \left\{ \tilde{H}_{\pi^0}^p(x, \xi, t) \bar{N}(p') \not{n} \gamma^5 N(p) + \frac{\xi}{2M} \tilde{E}_{\pi^0}^p(x, \xi, t) \bar{N}(p') \gamma^5 N(p) \right\}$$

➤ 三阶扭度 DA 以及横向 GPDs

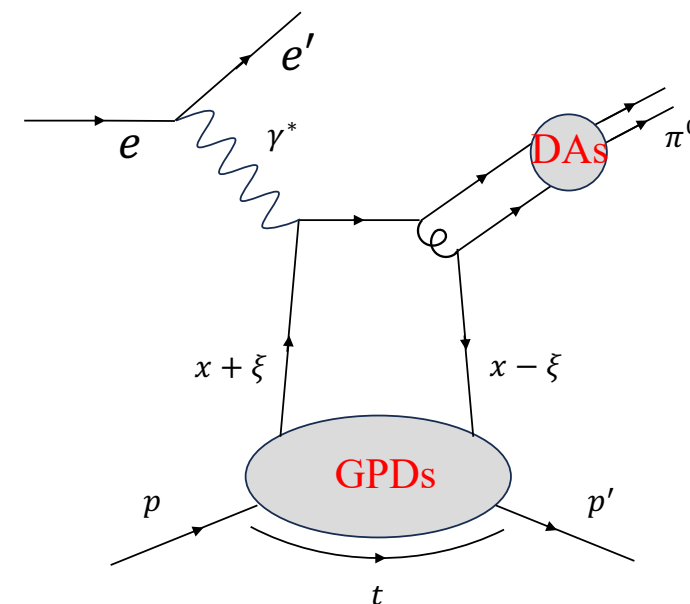
❖ 手提包分解理论（纵向主导）与实验观测冲突

❖ 涉及横向 GPDs 的新模型（与三阶扭度的 DAs 耦合）：

■ 三阶扭度的贡献相较于二阶扭度应该是被 $1/Q$ 抑制的

■ 但是三阶扭度的 DAs 包含新的质量参数 $\mu_\pi = \frac{m_\pi^2}{m_u + m_d} \approx 2.67 \text{ GeV}$

M. Diehl, Phys. Rept. (2003)
J. P. Lansberg *et al*, PRD (2007)
S. V. Goloskokov *et al*, Eur. Phys. J. A (2011)
G. R. Goldstein *et al*, PRD (2015)
L. Favart *et al*, Eur. Phys. J. A (2016)

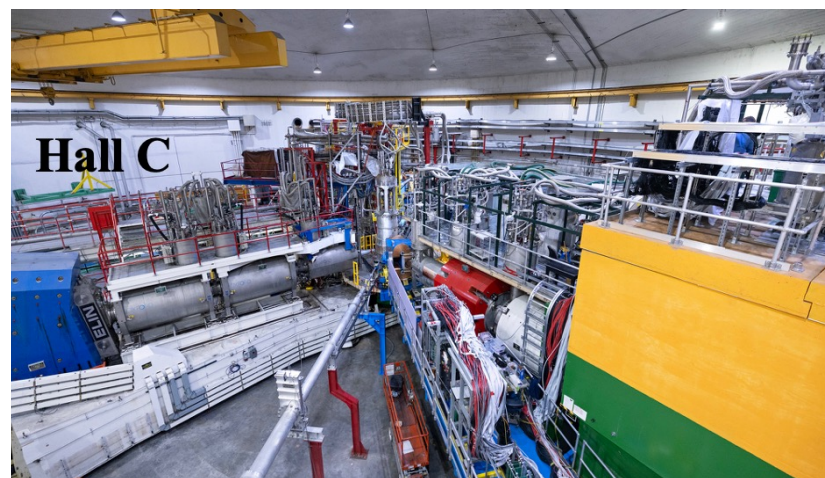
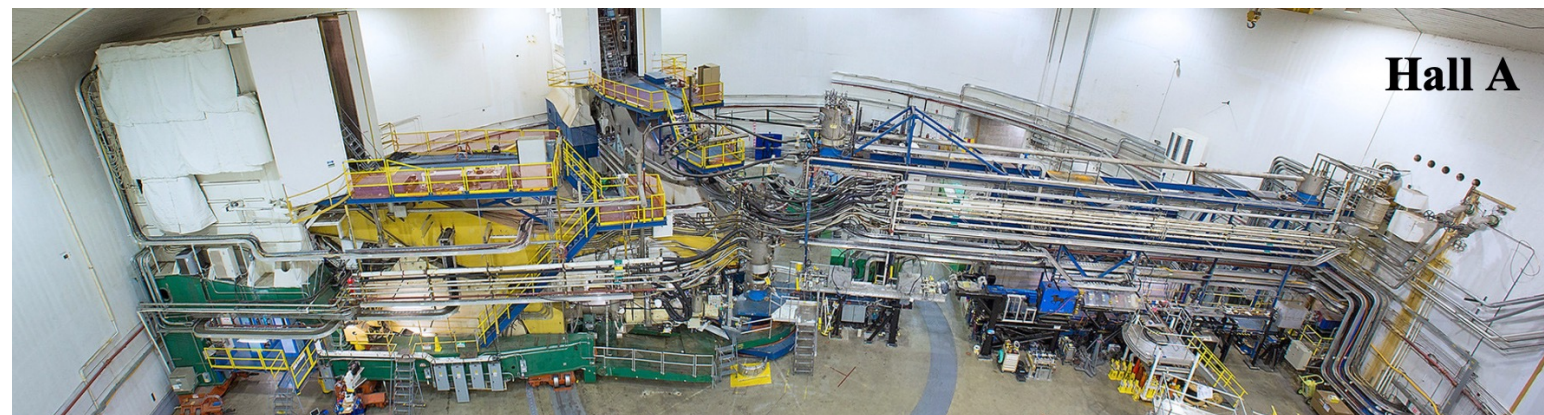
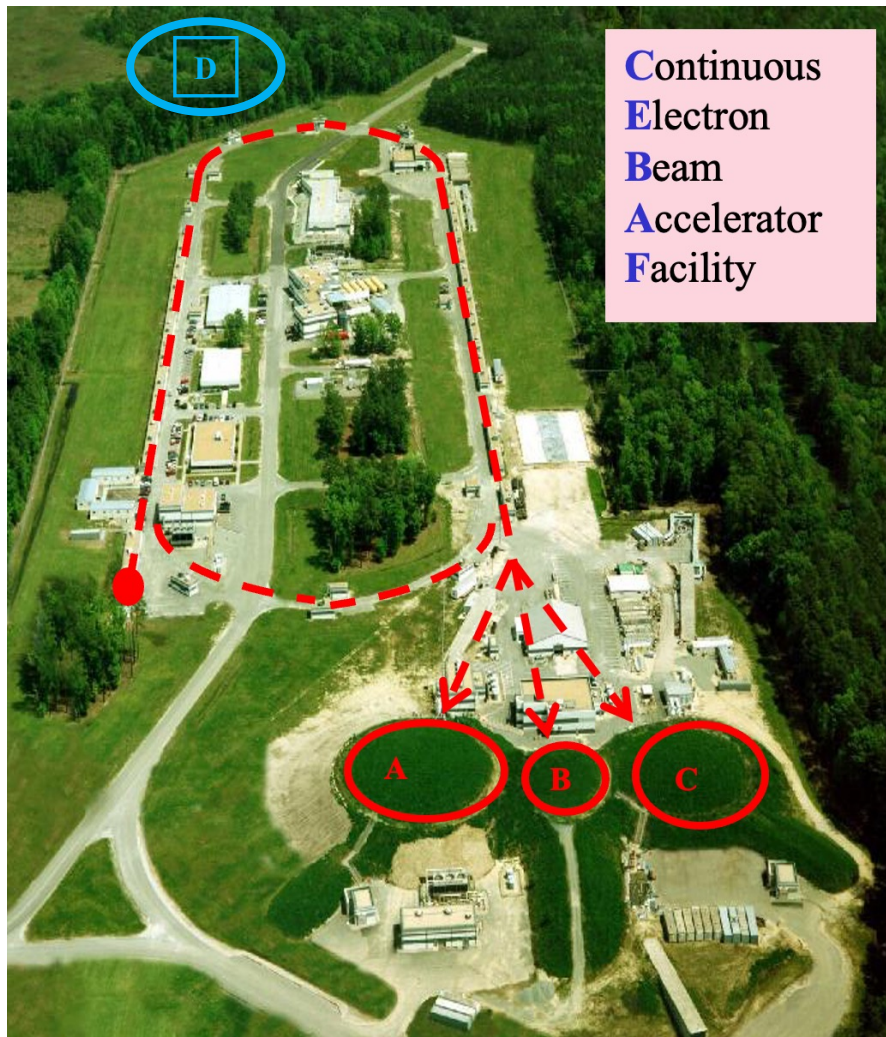


$$\tilde{H}_{\pi^0}^p(x, \xi, t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \frac{2}{3} \tilde{H}_{\pi^0}^{u/p} - \left(-\frac{1}{3} \right) \tilde{H}_{\pi^0}^{d/p} \right\}$$

$$\tilde{E}_{\pi^0}^p(x, \xi, t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \frac{2}{3} \tilde{E}_{\pi^0}^{u/p} - \left(-\frac{1}{3} \right) \tilde{E}_{\pi^0}^{d/p} \right\}$$



■ 实验大厅

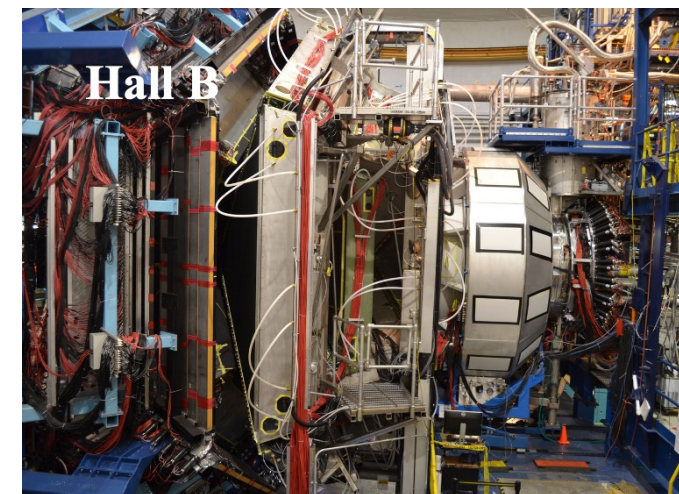


➤ Hall A/C:

- 高精度 ($\sim 5\%$)
- 高亮度 ($\sim 10^{37}/\text{cm}^2/\text{s}$)
- 有限的运动学探测范围
- 用于精确检验理论体系的有效性

➤ Hall B:

- 有限的精度 ($\sim 15\% +$)
- 有限的亮度 ($\sim 10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$)
- 广阔的运动学探测范围
- 用于大范围地进行 GPDs 探测



■ Hall A 的 DVMP 系列实验

➤ 第一代 (2004, 5.75 GeV)

- ✓ 第一个价夸克区域全举 π^0 电产生过程的散射截面测量
- ✓ 提取到 $\sigma_U = \sigma_T + \epsilon\sigma_L$ 、 σ_{TL} 、 σ_{TL}' 以及 σ_{TT} 的结果

- 研究了 Q^2 以及 x_B 的依赖
- 横向贡献占主导

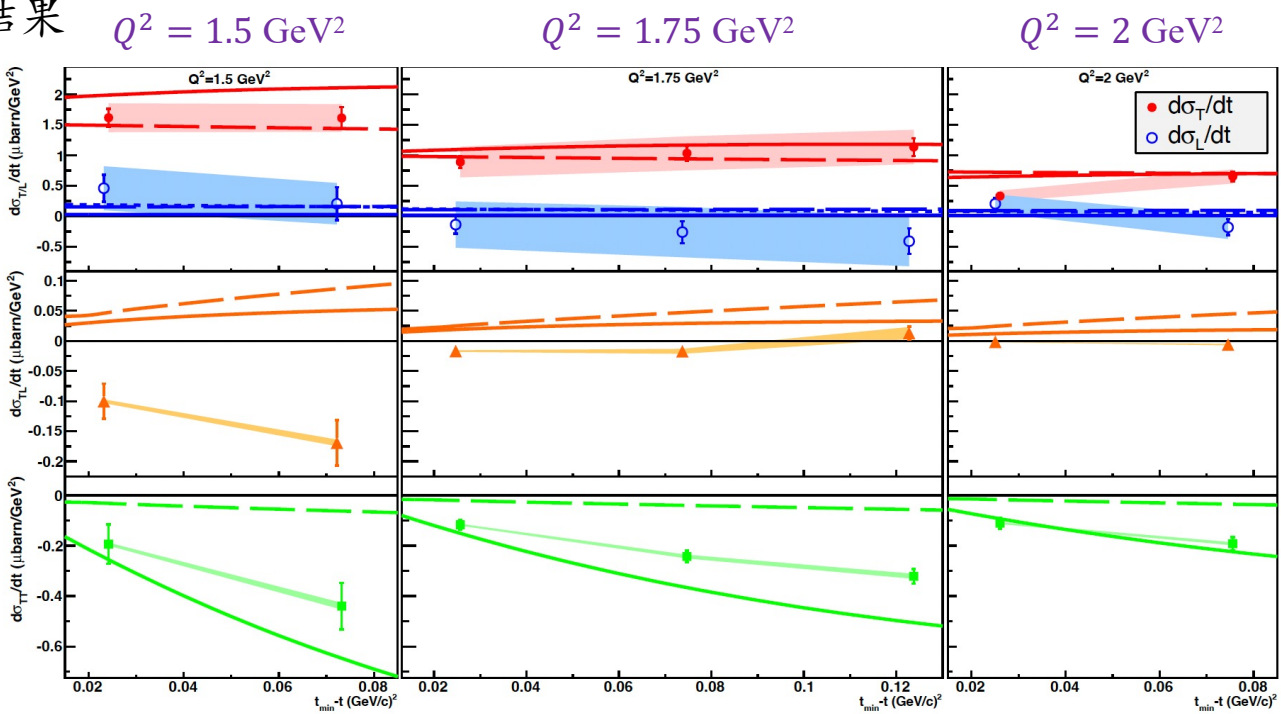
➤ 第二代 (2010, 4.45 and 5.55 GeV)

- ✓ 散射截面分离 (质子及中子)

- 分离 σ_T 以及 σ_L
- 分离 σ_{TL} 以及 σ_{TT}

- ✓ 散射截面由 σ_T 主导
- ✓ 非0的纵向贡献 σ_{TL}

E. Fuchey *et al*, Phys. Rev. C (2011)
M. Defurne *et al*, Phys. Rev. Lett. (2016), M. Mazouz *et al*, Phys. Rev. Lett. (2017)
M. Dlamini *et al*, Phys. Rev. Lett. (2021)



Goloskokov-Kroll (solid) and Goldstein (dashed) models



■ Hall A 的 DVMP 系列实验

➤ 第一代 (2004, 5.75 GeV)

- ✓ 第一个价夸克区域全举 π^0 电产生过程的散射截面测量
- ✓ 提取到 $\sigma_U = \sigma_T + \epsilon\sigma_L$ 、 σ_{TL} 、 σ_{TL}' 以及 σ_{TT} 的结果
 - 研究了 Q^2 以及 x_B 的依赖
 - 横向贡献占主导

➤ 第二代 (2010, 4.45 and 5.55 GeV)

- ✓ 散射截面分离 (质子及中子)
 - 分离 σ_T 以及 σ_L
 - 分离 σ_{TL} 以及 σ_{TT}
- ✓ 散射截面由 σ_T 主导
- ✓ 非0的纵向贡献 σ_{TL}

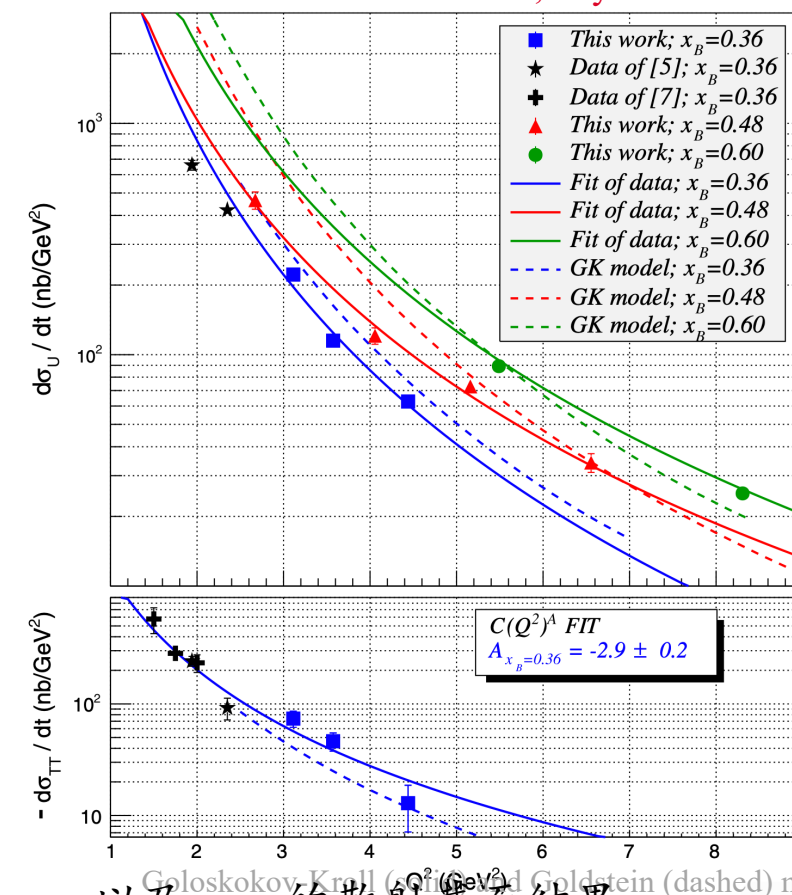
➤ 第三代 (2014-2016, 4.5 to 11 GeV)

- ✓ 测量了大 $x_B (\leq 0.6)$ 和 $Q^2 (\leq 8.4 \text{ GeV}^2)$ 下的 $\sigma_U = \sigma_T + \epsilon\sigma_L$ 、 σ_{TL} 、 σ_{TL}' 以及 σ_{TT} 的散射截面结果
- ✓ 在所有测量的运动学区间, 横向贡献依旧占散射截面的主导部分
- ✓ σ_U 随 Q 的减小略微慢于 GK 模型的预测 (Q^{-7}), σ_{TT} 的标度行为远远快于手提包分解的预测 (Q^{-8})

E. Fuchey *et al*, Phys. Rev. C (2011)

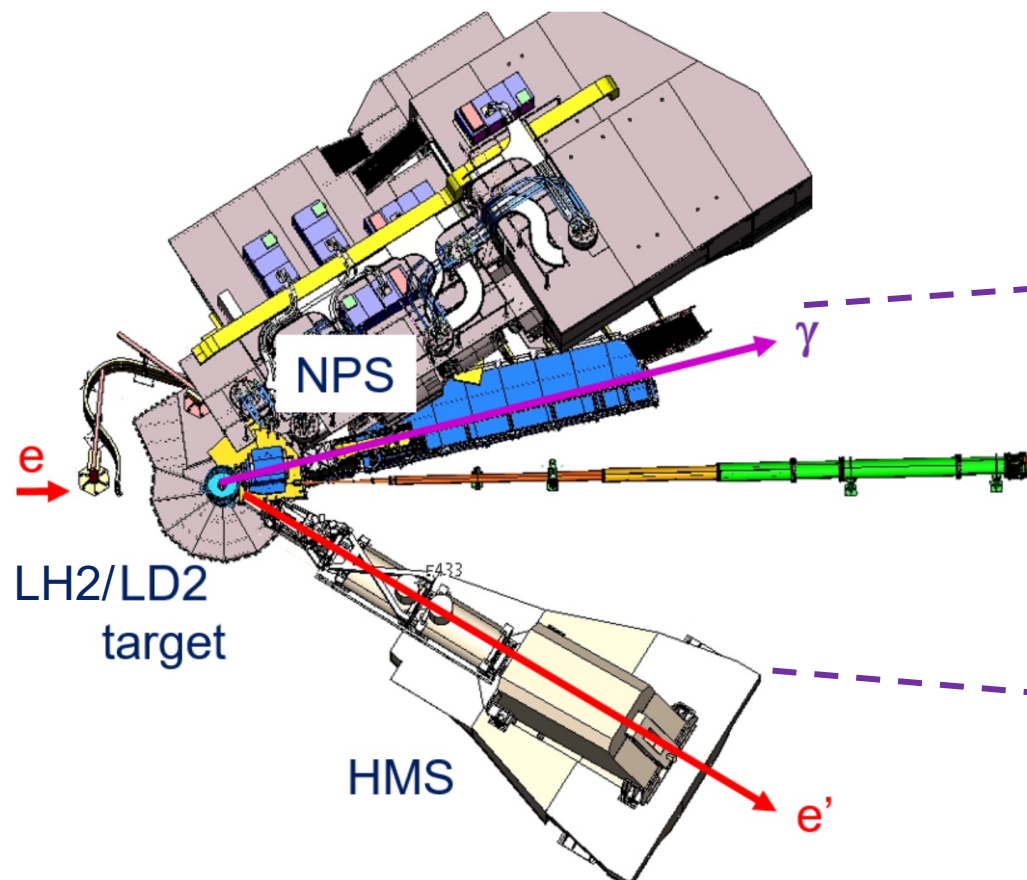
M. Defurne *et al*, Phys. Rev. Lett. (2016), M. Mazouz *et al*, Phys. Rev. Lett. (2017)

M. Dlamini *et al*, Phys. Rev. Lett. (2021)



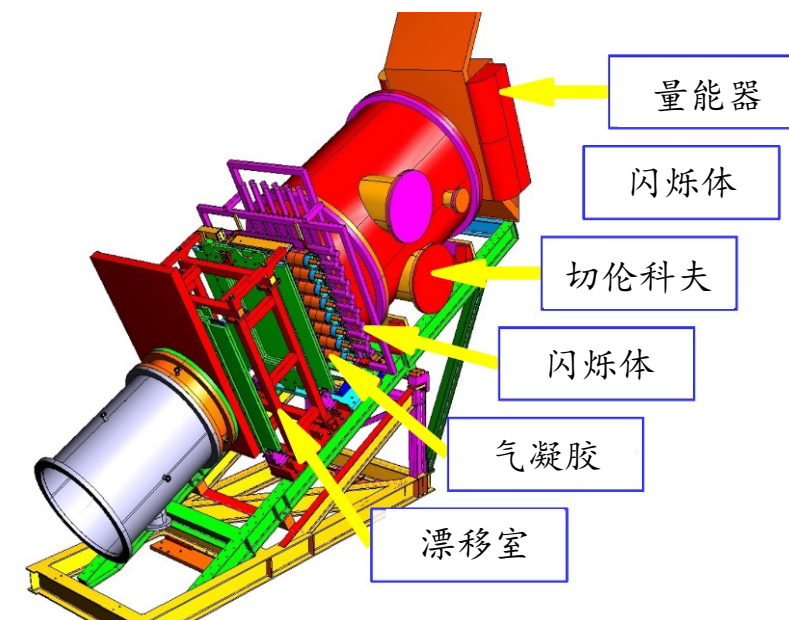
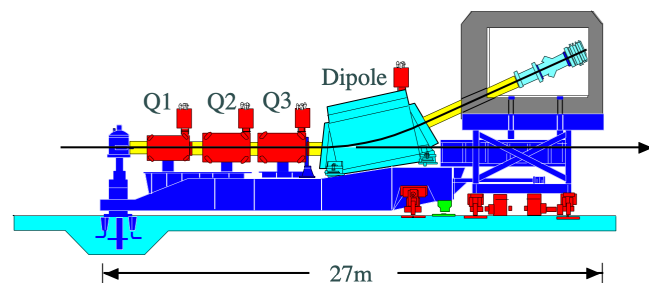
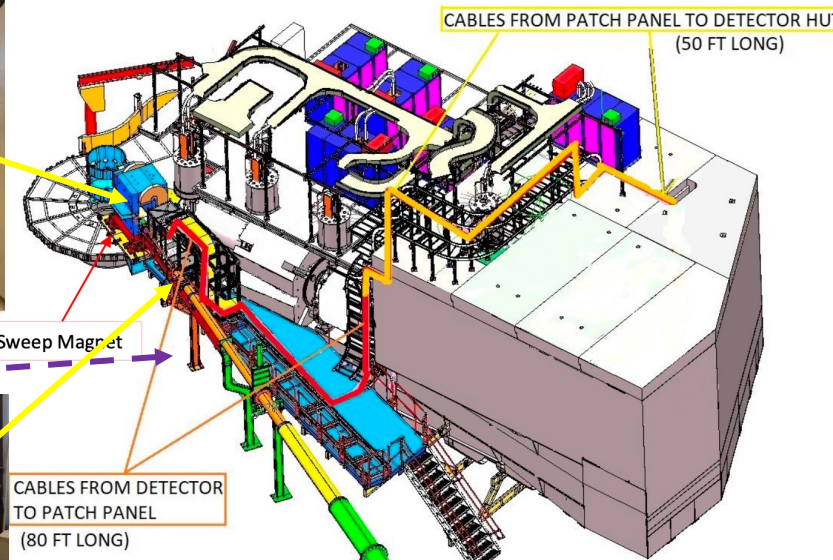
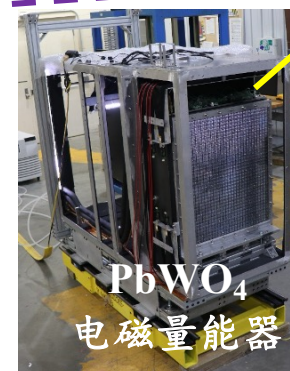
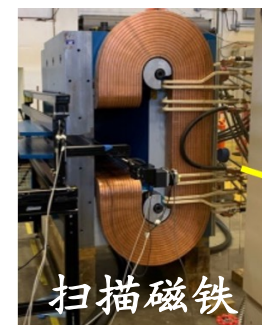
Goloskokov, Kroll (dashed) Goldstein (dashed) models

最近的 Hall C 实验 (2023年9月 - 2024年5月)



$$\text{DVCS: } H(e, e'_{HMS}, \gamma_{calo})X$$

$$\text{DVMP: } H(e, e'_{HMS}, \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)X$$



■ NPS 量能器



- 1,080 PbWO_4 ($2 \times 2 \text{ cm}^2$) 的 30×36 晶体阵列
- 0.5mm 碳纤维网格支撑晶体
- 0.3 T·m 扫描磁铁去除带电本底
- F250ADC 采样电子学来进行高计数率数据采集



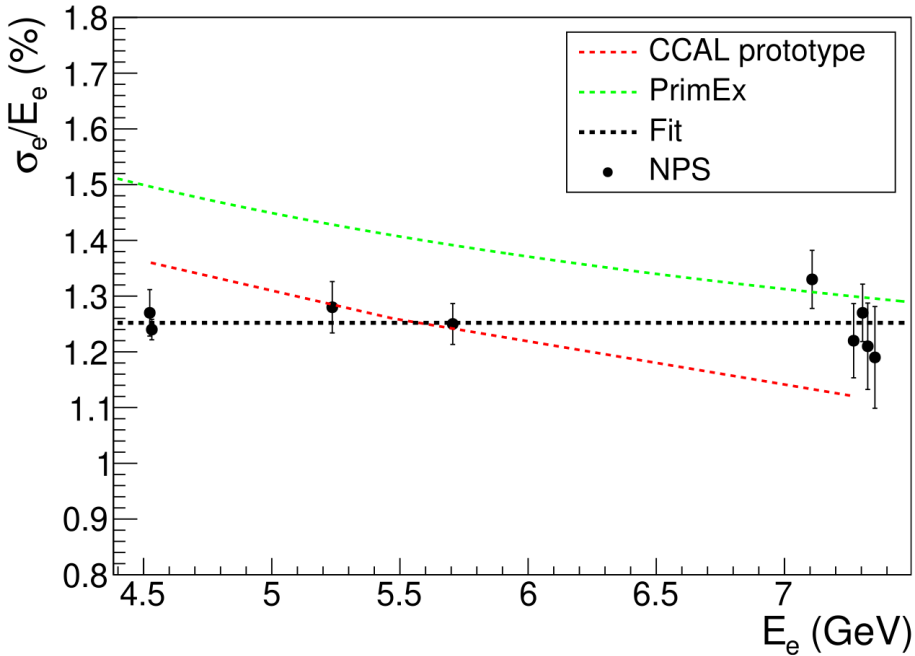
■ E12-13-010 实验

- 高精度散射截面测量：HMS + NPS
- 拓展运动学覆盖范围到更小的 x_B (0.25, 0.36, 0.5, 0.6)
- 大多数运动学都设置有多组束流能量 (6.4, 8.5, 10.6 GeV)

实验的最终目标：

- DVCS:
 - ...
- 全举 π^0 电产生：
 - 从 π^0 的总散射截面中分离各个结构函数的贡献
 - 测量 σ_L 和 σ_T 的相对贡献并检验其关于 Q^2 的依赖

NPS 能量分辨率：1.2 ~ 1.3%



	分辨率
HMS 动量	0.1%
HMS 角度	1 mrad
NPS 能量	1.25%
NPS 时间	200 ps



■ E12-13-010 实验

- 高精度散射截面测量：HMS + NPS
- 拓展运动学覆盖范围到更小的 x_B (0.25, 0.36, 0.5, 0.6)
- 大多数运动学都设置有多组束流能量 (6.4, 8.5, 10.6 GeV)

实验的最终目标：

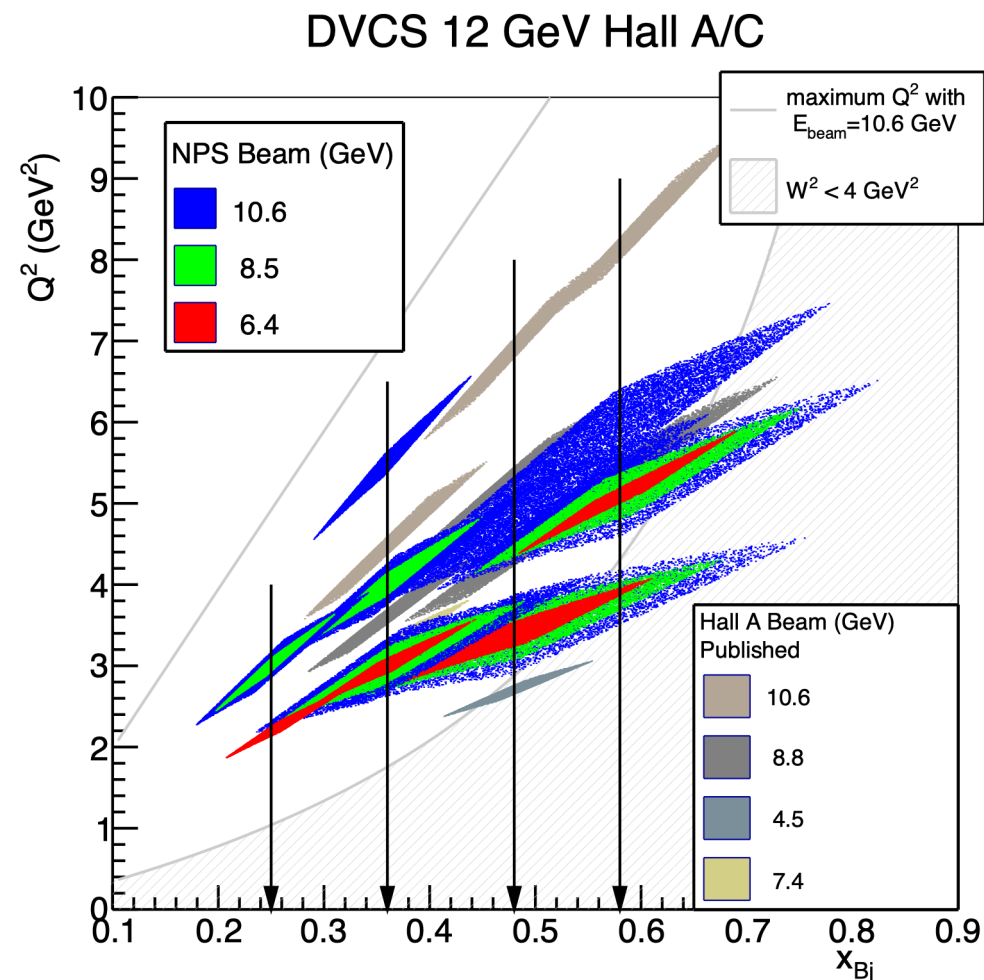
- DVCS:

□ ...

- 全举 π^0 电产生：

□ 从 π^0 的总散射截面中分离各个结构函数的贡献

□ 测量 σ_L 和 σ_T 的相对贡献并检验其关于 Q^2 的依赖



■ 筛选条件

➤ 束流稳定性条件

➤ 电子筛选:

✓ $E_{\text{cal}}/p \geq 0.7$

✓ $n_{\text{pe}} \geq 2$

✓ $|\delta p/p| < 8\%$

➤ π^0 筛选:

✓ $-3 \text{ ns} < t_{\text{coin}} < 3 \text{ ns}$

✓ $0.116 \text{ GeV} < m_{\text{inv}} < 0.149 \text{ GeV}$

✓ $E_{\gamma 1} > 1.6 \text{ GeV}, E_{\gamma 2} > 1.6 \text{ GeV}$

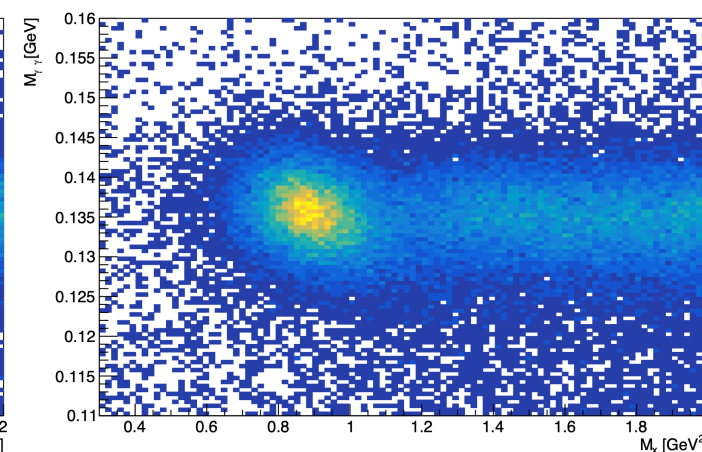
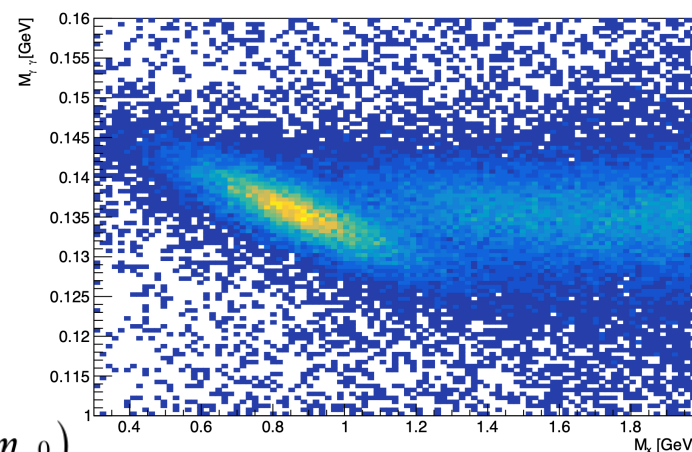
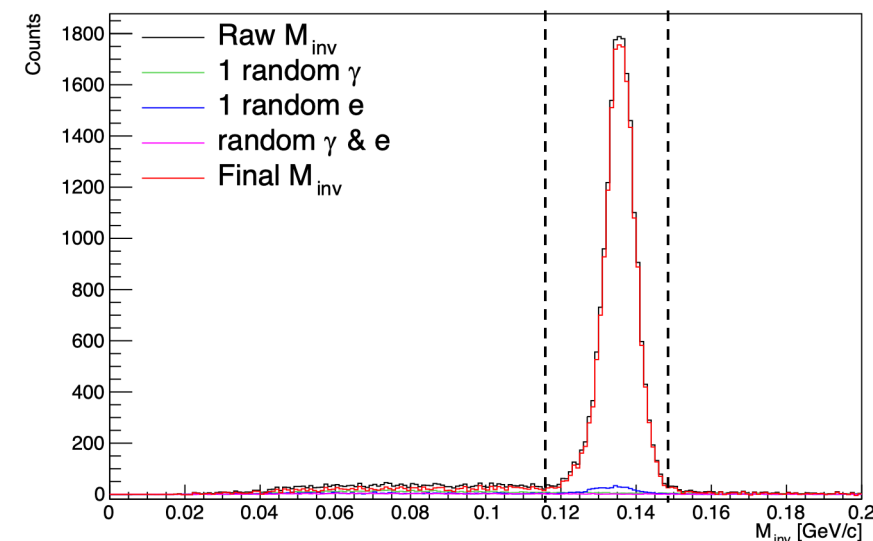
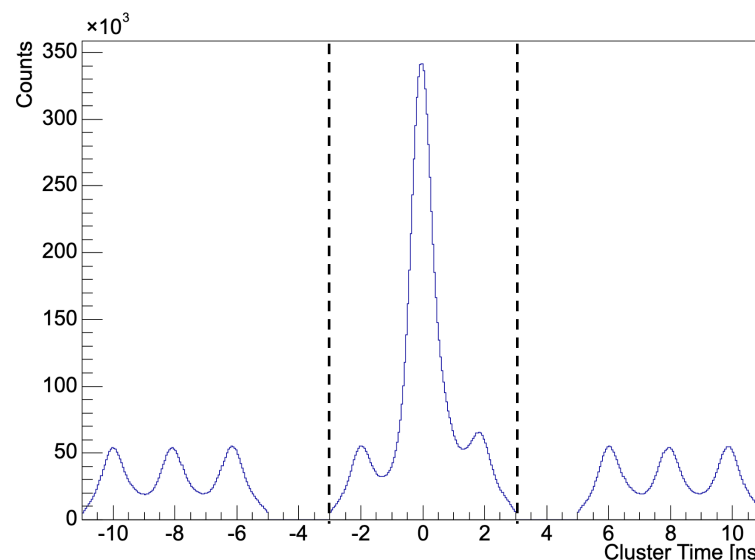
✓ 去掉边缘1.5 行/列的事例

➤ 确保事例是全举事例（质子末态仍为质子）:

✓ 缺失质量: $M_X^2 = (q + p - P_{\pi^0})^2$

✓ 缺失质量修正: $M_{X,\text{corr}}^2 = M_X^2 - \bar{C}_{\text{corr}} (m_{\text{inv}} - m_{\pi^0})$

✓ $0.55 \text{ GeV}^2 \leq M_{X,\text{corr}}^2 \leq 1.05 \text{ GeV}^2$

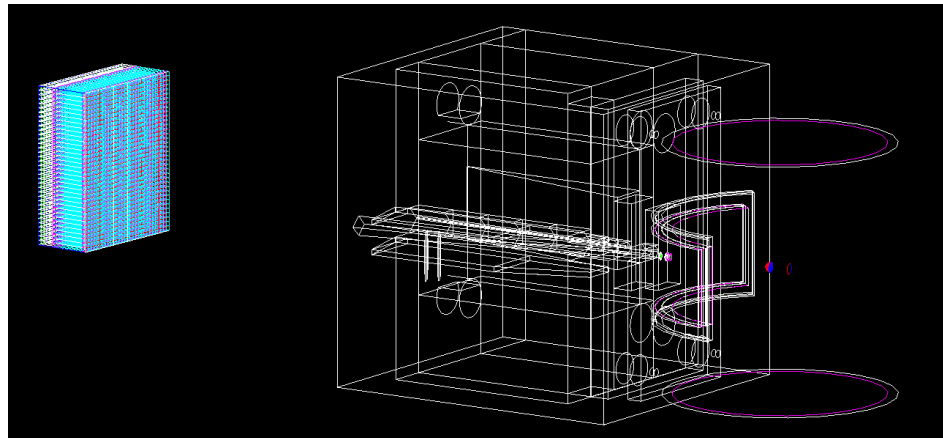


$$C_{\text{corr}} = \frac{dM_X^2}{dm_{\text{inv}}} = \frac{2}{m_{\text{inv}}} \left[m_{\text{inv}}^2 - 2\sqrt{2} (M_p + \nu - |\vec{q}| \cos \theta_{\gamma^* \pi^0}) \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \right]$$



■ NPS 模拟

- 几何设置：量能器、扫描磁铁、散射室及靶
- 与实验数据进行同样的成簇处理
- Geant4 模拟得到的光子团簇必须经过**能量刻度**、**能量展宽**以及**位置展宽**才能复现探测器实际的分辨率



能量刻度及展宽

$$P_{\gamma}^{\text{smeared}} = c_{\text{smear}} P_{\gamma}^{\text{recon}}$$

$$c_{\text{smear}} = \frac{\text{Gauss}(\mu E_{\text{old}}, \sigma \sqrt{E_{\text{old}}})}{E_{\text{old}}}$$

位置展宽

$$x_{\text{smeared}} = \text{Gauss}(x_{\text{recon}}, \sigma_{\text{pos}})$$

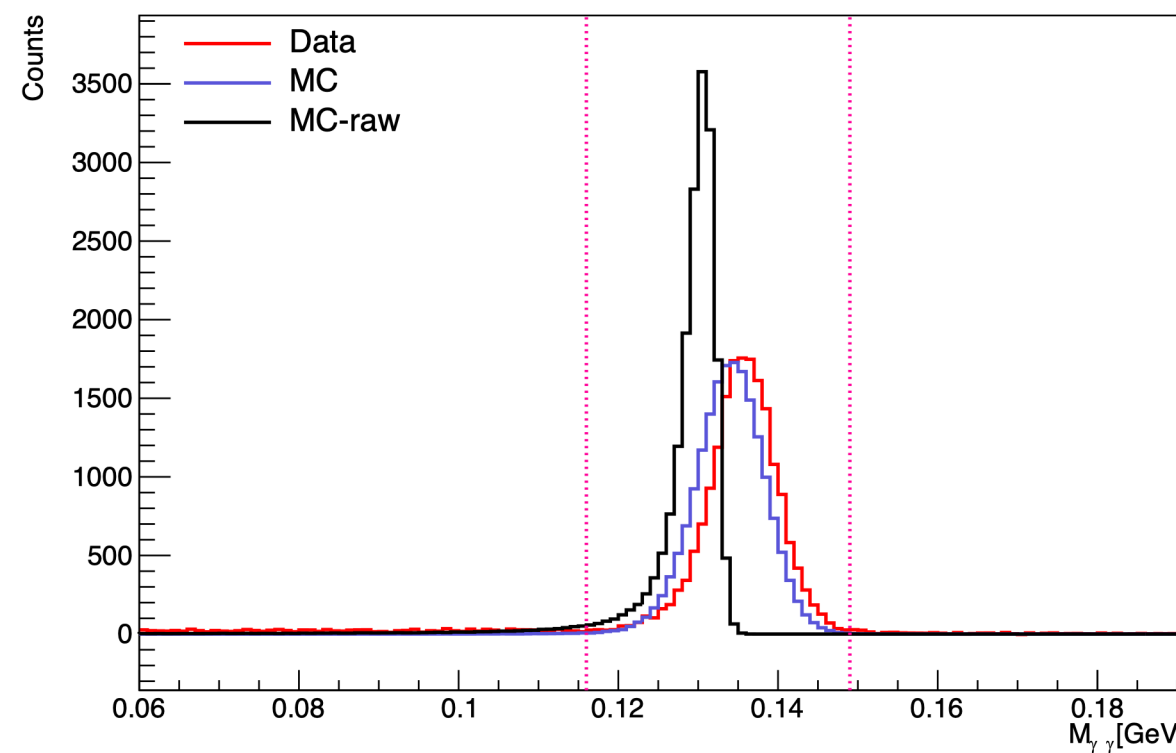
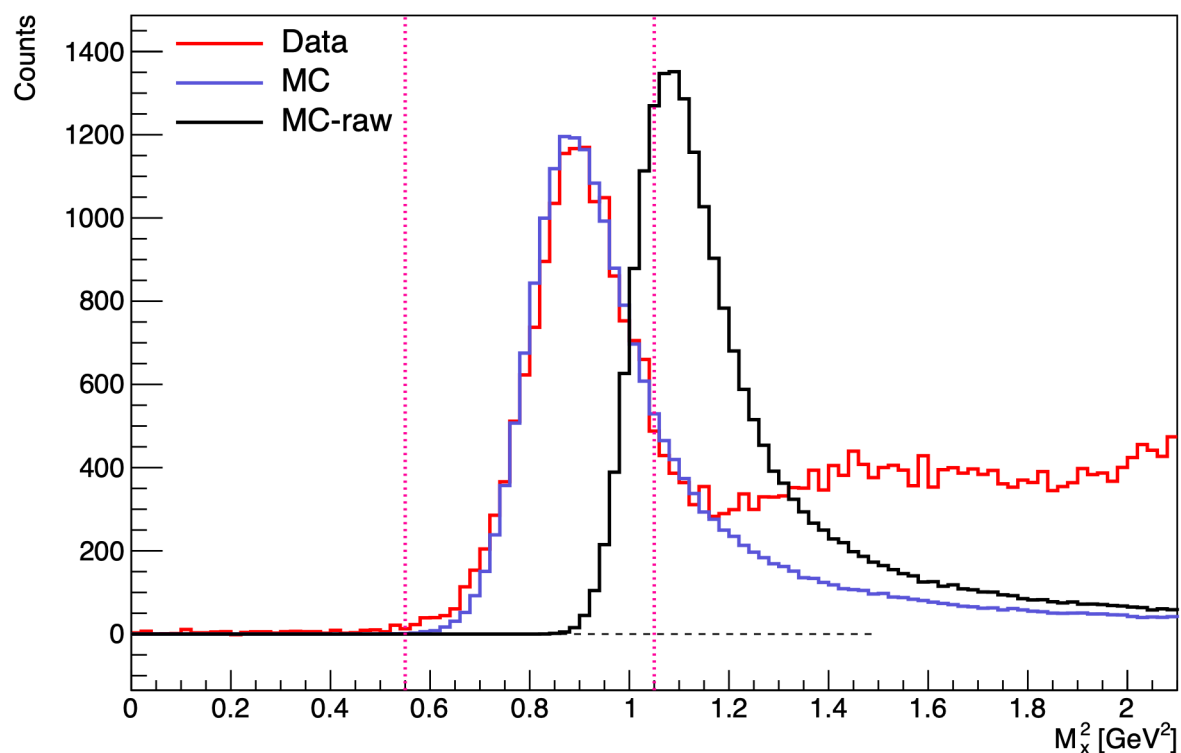
$$y_{\text{smeared}} = \text{Gauss}(y_{\text{recon}}, \sigma_{\text{pos}})$$

$$\sigma_{\text{pos}} = \frac{\sigma_{\text{pos}}^0}{\sqrt{E_{\gamma}}}$$



■ 模拟刻度及展宽

- NPS 的表面区域被分成了25个相互交叠的区域（每个区域含有 10×12 个晶体）
- 刻度系数和展宽参数通过最小化类似 $\chi^2(\mu, \sigma) = \sum_i \frac{[N_i^{\text{sim}}(\mu, \sigma) - N_i^{\text{exp}}]^2}{\Delta_i^2}$ 的函数来获得
- 每个区域的参数通过插值得到连续的参数分布图，并据此对每个光子进行展宽



■ 基于蒙卡模拟的拟合流程

- 将 $t' = t_{\min} - t$ 分成 5 个分箱 (bins)
- 将 ϕ 分成 12 个分箱
- 生成器给出的顶点层面的 t' 分箱可能和重建得到的 t' 分箱不同
- 这一现象可以用模拟生成的相应矩阵来描述:

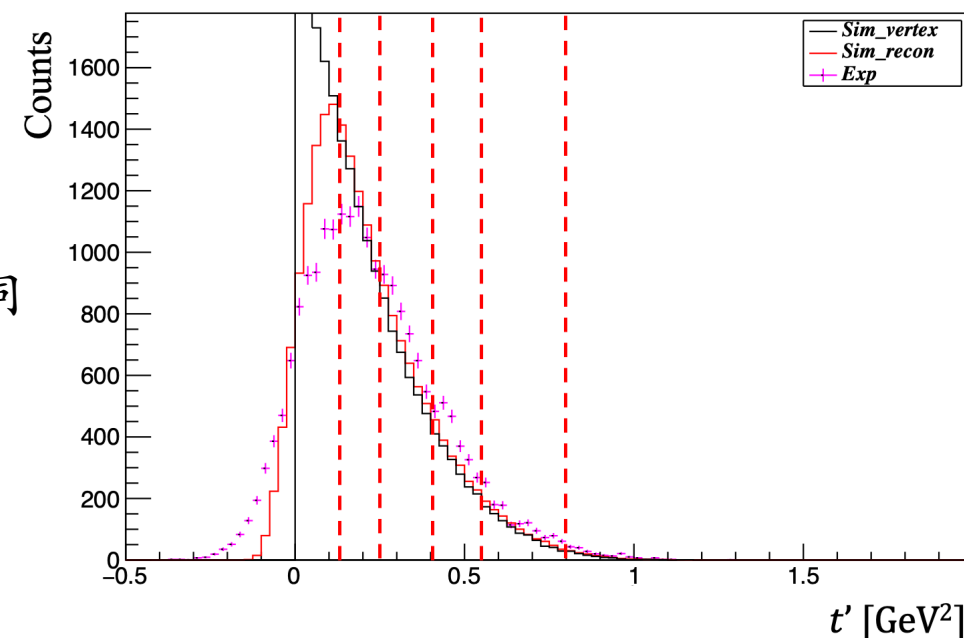
$$N_r = \mathcal{L} \sum_v K_{rv} \left(\int_{\Phi_v} d\Phi \right) \frac{d^4\sigma}{d\Phi} \Big|_v$$

- 散射截面可以被表示为:

$$\frac{d^4\sigma}{d\Phi} = \sum_{n=1}^N f_n(E, Q^2, x_B, \phi) X^n \quad X^n = \left\{ \frac{d\sigma_U}{dt}, \frac{d\sigma_{TT}}{dt}, \frac{d\sigma_{TL}}{dt}, \frac{d\sigma_{TL'}}{dt} \right\}$$

- 顶点层面 v 和重建层面 r 之间的关系可以表示为:

$$N_r^{\text{MC}} = \mathcal{L} \sum_v \sum_{n=1}^N K_{rv}^n X_v^n \quad K_{rv}^n = \sum_{i \in r \cap v} f_n(E_i, Q_i^2, x_{B,i}, \phi_i) \frac{1}{N_{\text{gen}}} \frac{\Gamma_{\text{MC}}^i}{2\pi}$$



$$\frac{d^4\sigma}{dt d\phi dQ^2 dx_B} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2\Gamma_{\gamma^*}}{dQ^2 dx_B} (Q^2, x_B, E) \left[\frac{d\sigma_T}{dt} + \epsilon^* \frac{d\sigma_L}{dt} + \sqrt{2\epsilon^*(1+\epsilon^*)} \frac{d\sigma_{TL}}{dt} \cos(\phi) + \epsilon^* \frac{d\sigma_{TT}}{dt} \cos(2\phi) + h \sqrt{2\epsilon^*(1-\epsilon^*)} \frac{d\sigma_{TL'}}{dt} \sin(\phi) \right]$$

■ 基于蒙卡模拟的拟合流程

$$\Gamma_{MC} = \Delta Q^2 \Delta x_B \Delta \phi_e \Delta t \Delta \phi$$

➤ 顶点层面 v 和重建层面 r 之间的关系可以表示为：

$$N_r^{MC} = \mathcal{L} \sum_v \sum_{n=1}^N K_{rv}^n X_v^n \quad K_{rv}^n = \sum_{i \in r \cap v} f_n(E_i, Q_i^2, x_{B,i}, \phi_i) \frac{1}{N_{\text{gen}}} \frac{\Gamma_{MC}^i}{2\pi}$$

➤ 散射截面可以通过最小化 χ^2 进行提取：

$$\chi^2 = \sum_{r=1}^R \left(\frac{N_r^{\text{exp}} - N_r^{MC}}{\sigma_r^{\text{exp}}} \right)^2$$

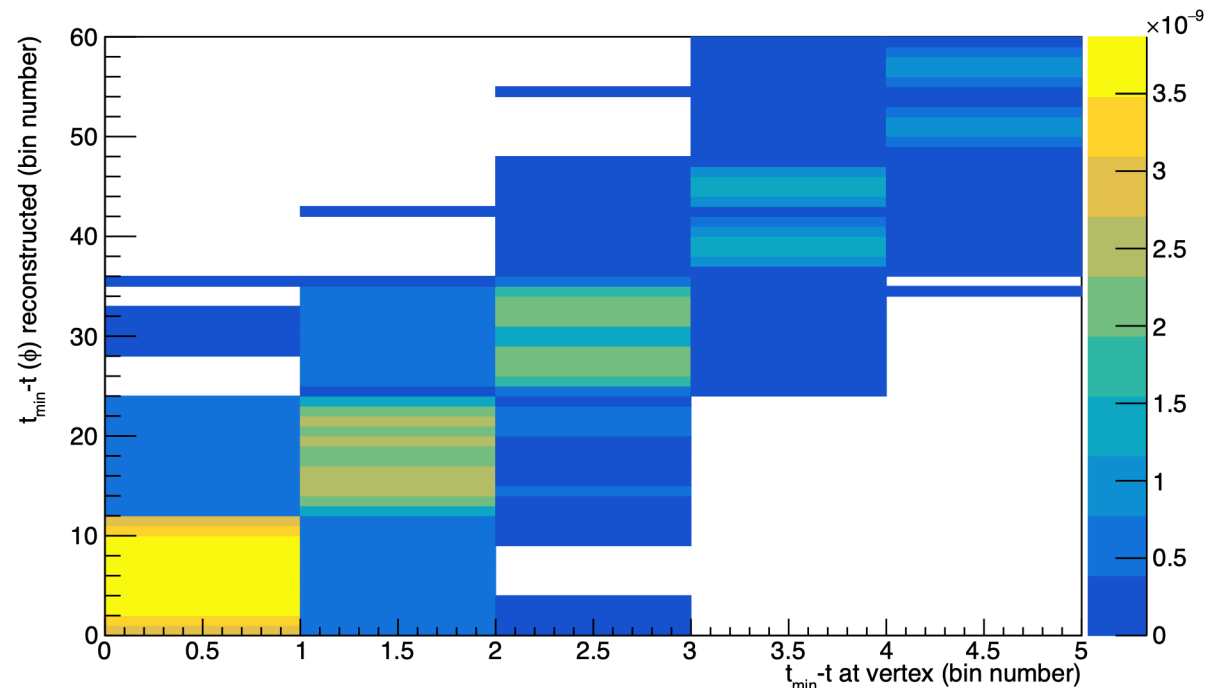
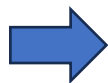
➤ 最小化方式为：

$$\left. \frac{\partial \chi^2}{\partial X_v^n} \right|_{\bar{X}} = 0 \quad \Rightarrow$$

$$\sum_{v'=1}^V \sum_{n'=1}^N A_{v,v'}^{n,n'} \bar{X}_{v'}^{n'} = B_v^n$$

$$A_{v,v'}^{n,n'} = \sum_{r=1}^R \frac{\mathcal{L}^2 K_{rv}^n K_{rv'}^{n'}}{(\sigma_r^{\text{exp}})^2}$$

$$B_v^n = \sum_{r=1}^R \frac{\mathcal{L} K_{rv}^n N_r^{\text{exp}}}{(\sigma_r^{\text{exp}})^2}$$



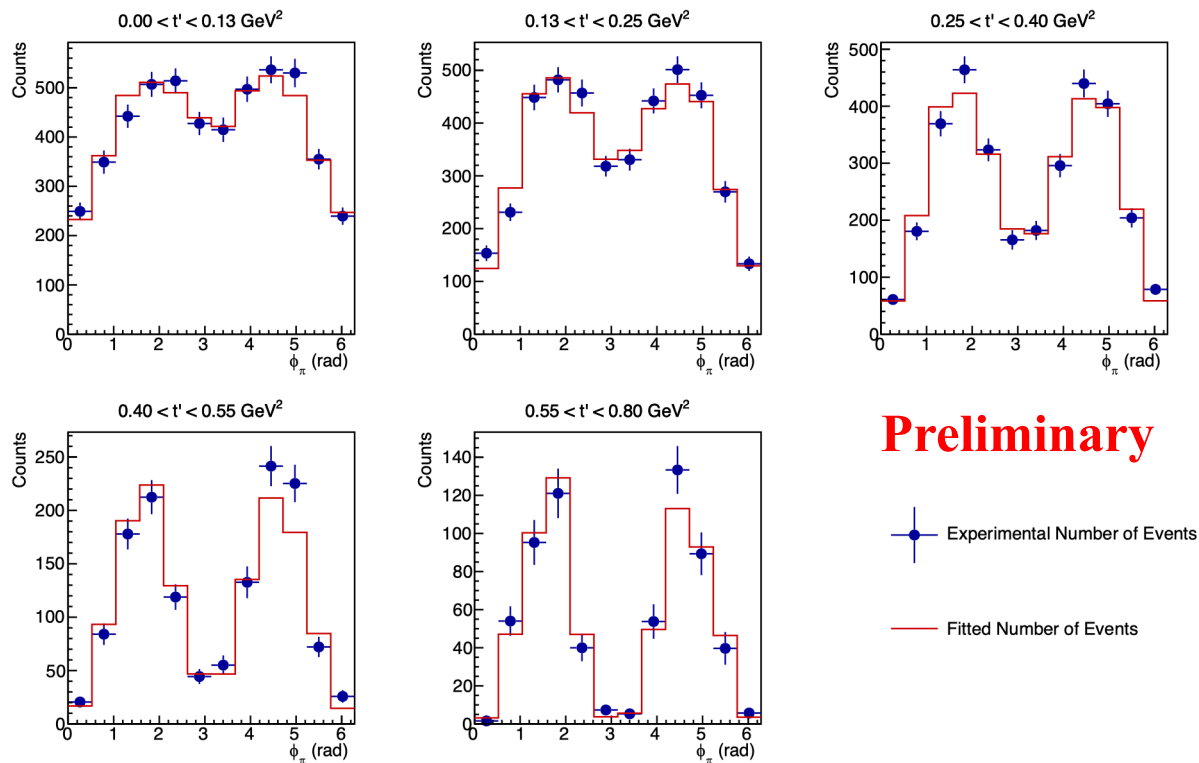
$$X^n = \left\{ \frac{d\sigma_U}{dt}, \frac{d\sigma_{TT}}{dt}, \frac{d\sigma_{TL}}{dt}, \frac{d\sigma_{TL'}}{dt} \right\}$$

$$\bar{X}_v^n = \sum_{v',n'} [A^{-1}]_{v,v'}^{n,n'} B_{v'}^{n'} \quad (\delta X_v^n)^2 = [A^{-1}]_{v,v}^{n,n}$$

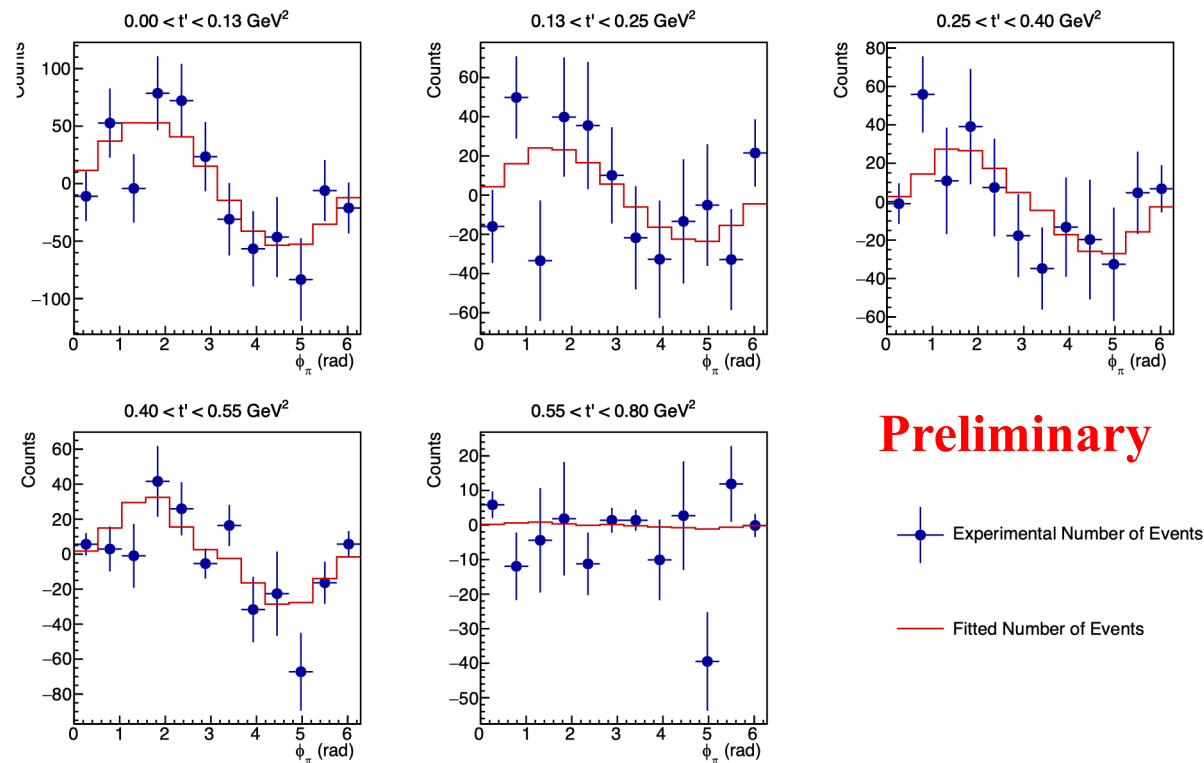
$$\frac{d^4\sigma}{dt d\phi dQ^2 dx_B} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2\Gamma_{\gamma^*}}{dQ^2 dx_B} (Q^2, x_B, E) \left[\frac{d\sigma_T}{dt} + \epsilon^* \frac{d\sigma_L}{dt} + \sqrt{2\epsilon^*(1+\epsilon^*)} \frac{d\sigma_{TL}}{dt} \cos(\phi) + \epsilon^* \frac{d\sigma_{TT}}{dt} \cos(2\phi) + h \sqrt{2\epsilon^*(1-\epsilon^*)} \frac{d\sigma_{TL'}}{dt} \sin(\phi) \right]$$

■ 基于蒙卡模拟的拟合流程

➤ 基于拟合得到的产额可以表示为: $N_r^{\text{MC}} = \mathcal{L} \sum_{v,n} K_{rv}^n \bar{X}_v^n$



束流极化事件之和

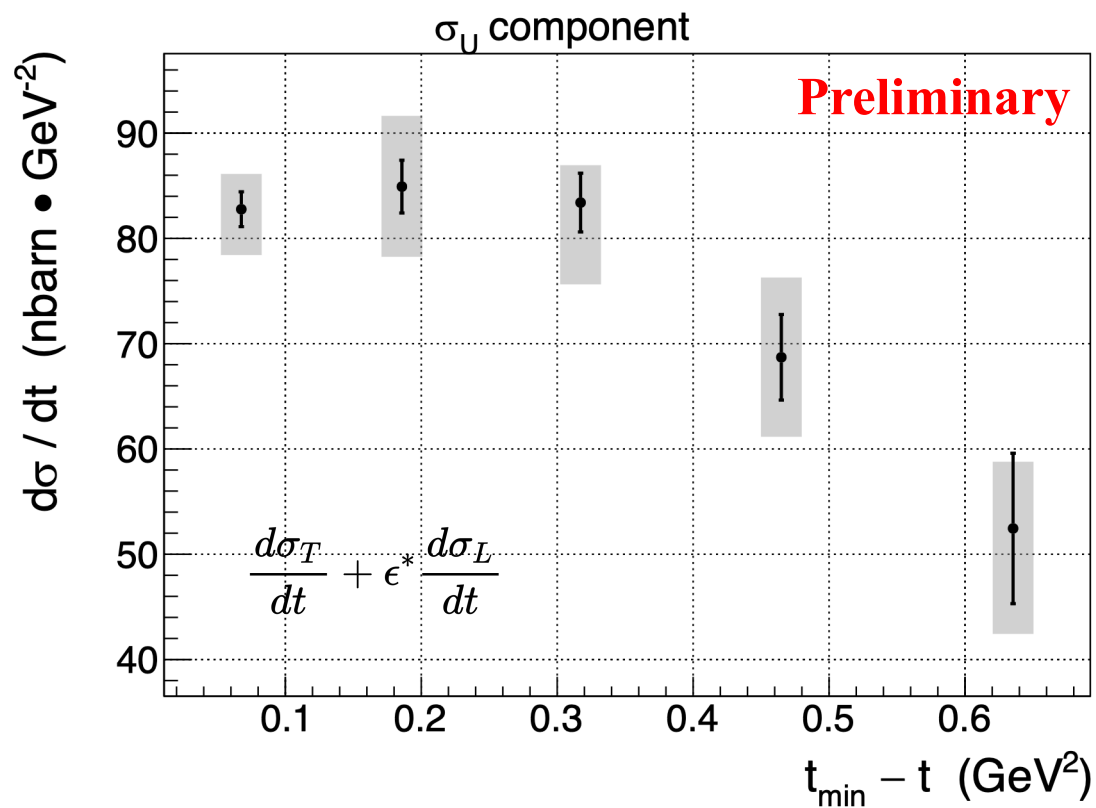
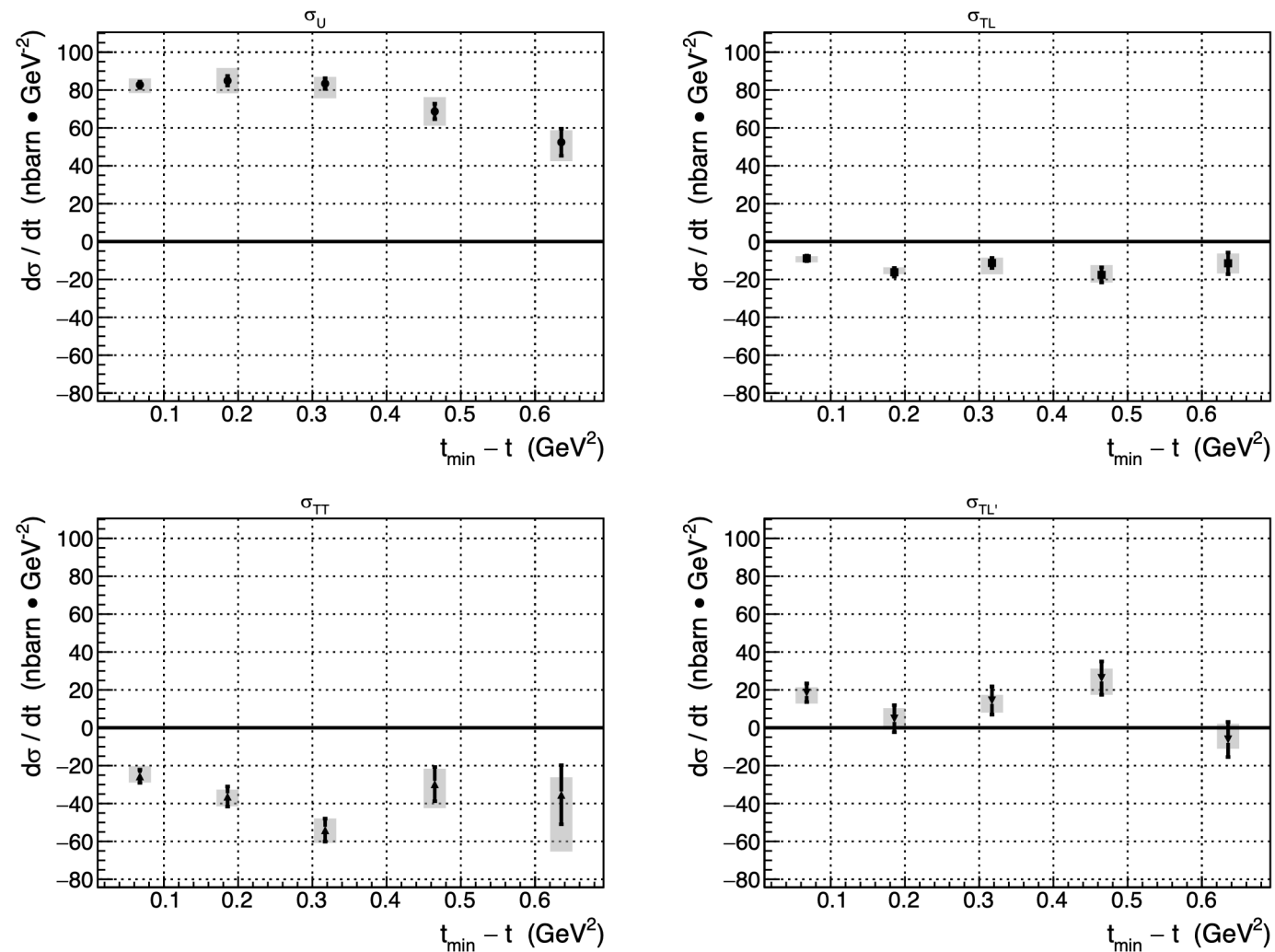


束流极化事件之差

$$\frac{d^4\sigma}{dt d\phi dQ^2 dx_B} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2\Gamma_{\gamma^*}}{dQ^2 dx_B}(Q^2, x_B, E) \left[\frac{d\sigma_T}{dt} + \epsilon^* \frac{d\sigma_L}{dt} + \sqrt{2\epsilon^*(1+\epsilon^*)} \frac{d\sigma_{TL}}{dt} \cos(\phi) + \epsilon^* \frac{d\sigma_{TT}}{dt} \cos(2\phi) + h \sqrt{2\epsilon^*(1-\epsilon^*)} \frac{d\sigma_{TL'}}{dt} \sin(\phi) \right]$$

■ KinC_x36_5 ($Q^2 = 4.0 \text{ GeV}^2, x_B = 0.36, W = 2.82 \text{ GeV}$)

➤ 与筛选条件相关的系统误差以及来自靶沸腾效应、靶密度修正以及束流极化度的误差均已包含在灰色误差带中



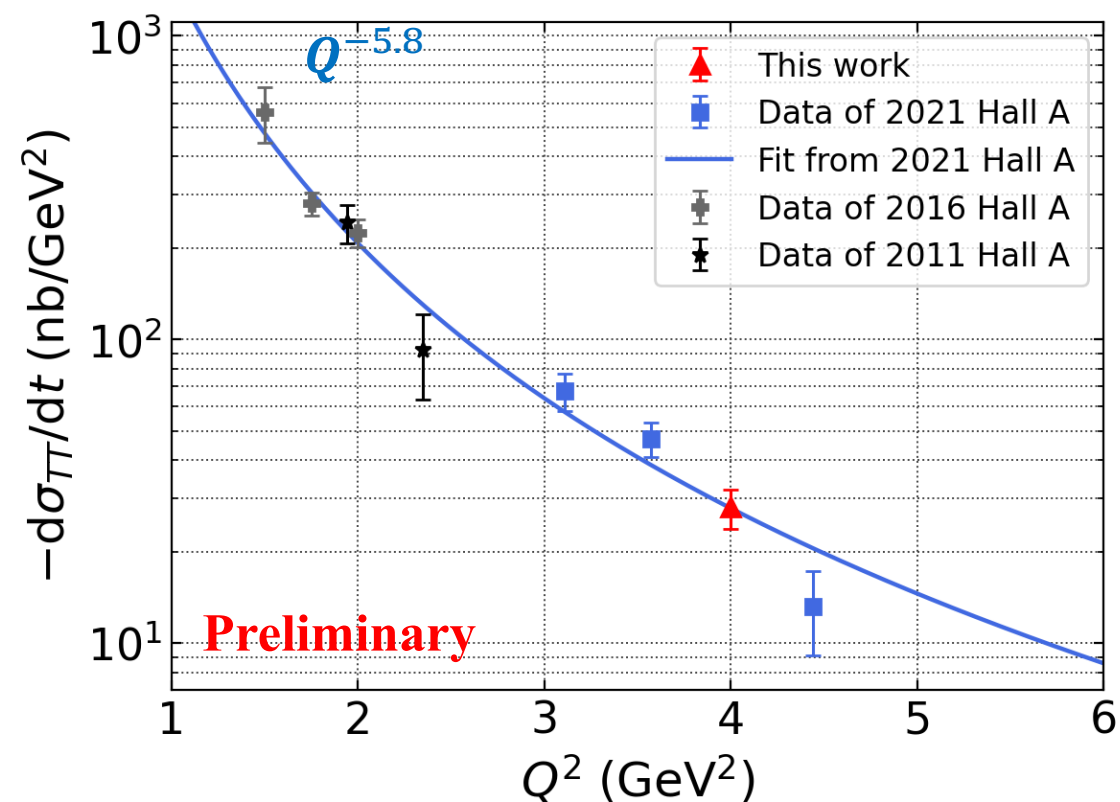
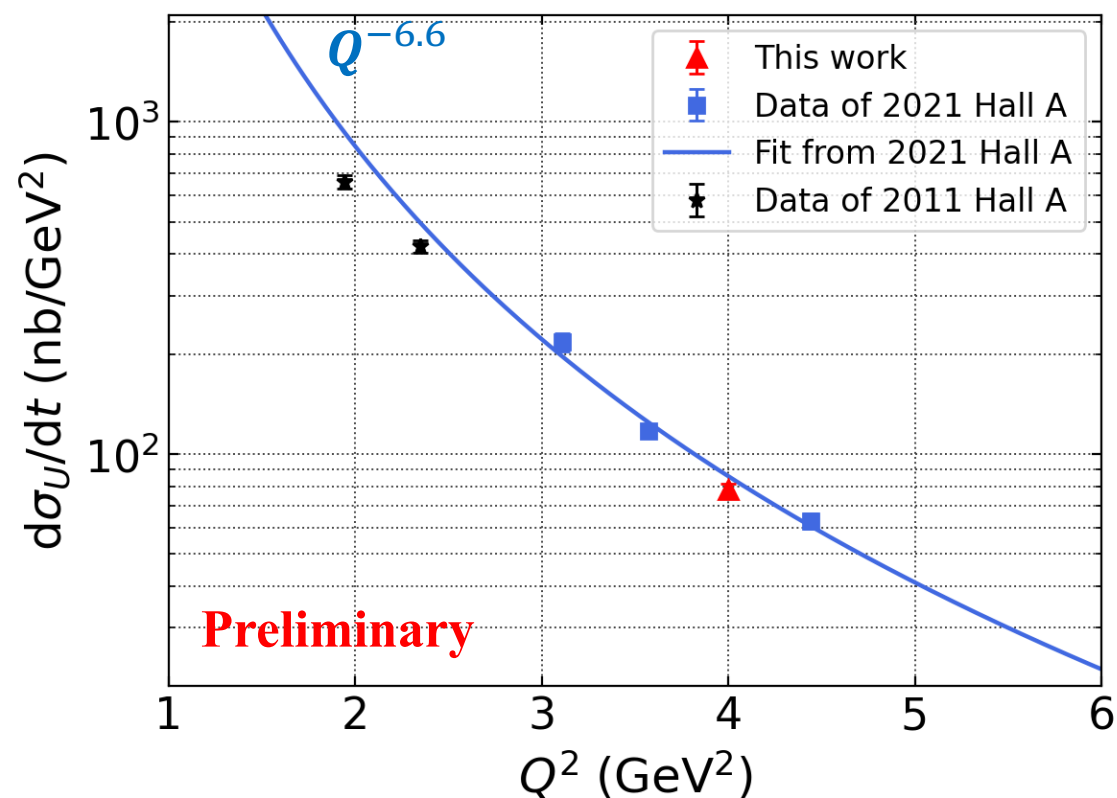
不包含辐射修正



■ 与 Hall A 实验结果的比较

M. Dlamini *et al*, Phys. Rev. Lett. (2021)

- 自 $t' \approx 0.1 \text{ GeV}^2$ 提取到的散射截面与之前 Hall A 系列测量的趋势吻合
- 为 σ_{TT} 在高 Q^2 区域提供了更精确的实验约束



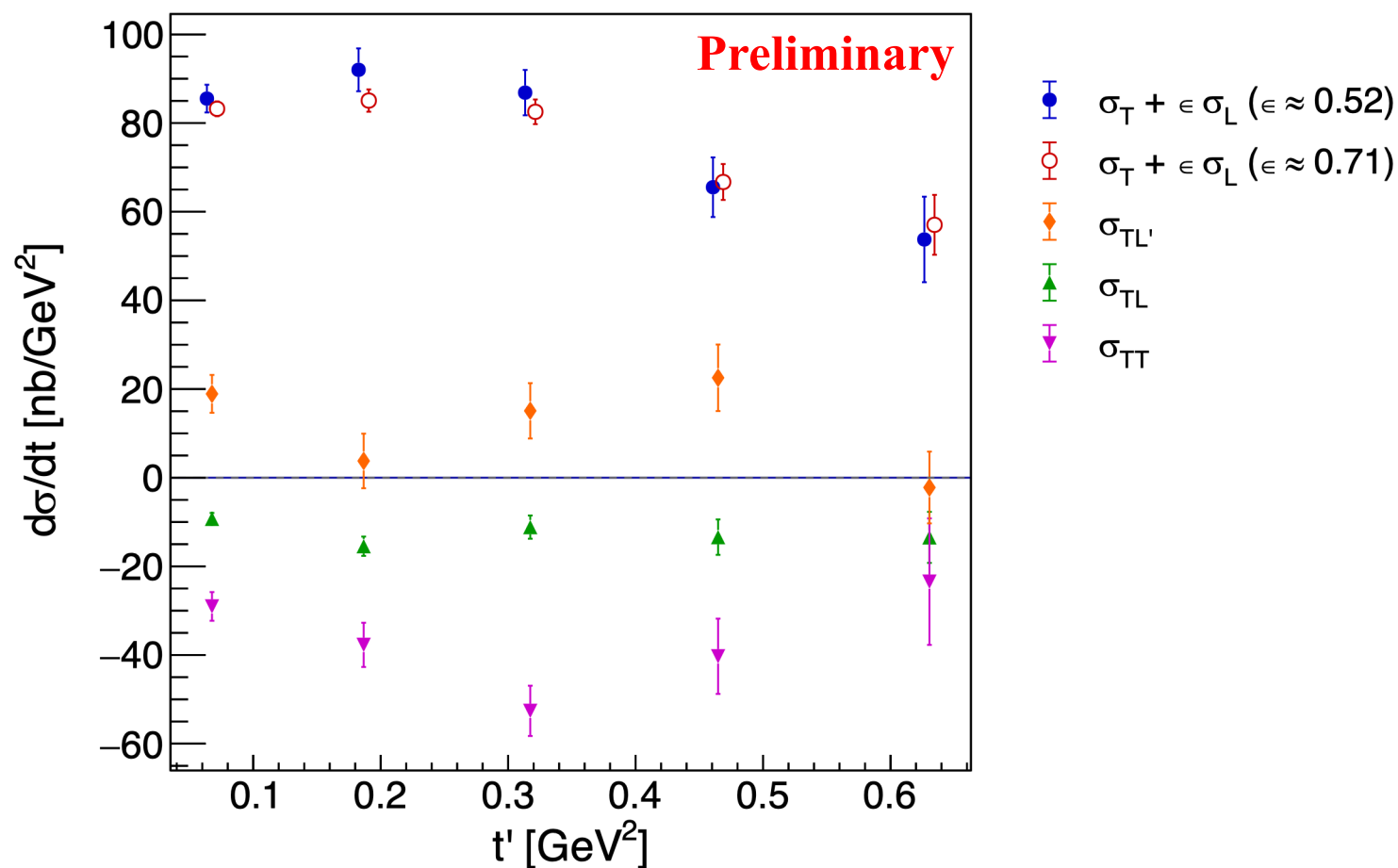
■ 利用不同束流能量来进行 L/T 分离

➤ KinC_x36_5: $Q^2 = 4.0 \text{ GeV}^2$, $x_B = 0.36$, $E = 10.6 \text{ GeV}$, $\epsilon^* \approx 0.71$

➤ KinC_x36_4: $Q^2 = 4.0 \text{ GeV}^2$, $x_B = 0.36$, $E = 8.5 \text{ GeV}$, $\epsilon^* \approx 0.52$

$$\frac{d\sigma_T}{dt} + \epsilon^* \frac{d\sigma_L}{dt}$$

$$\epsilon^* = \frac{1 - y - \frac{Q^2}{4E_e^2}}{1 - y + \frac{y^2}{2} + \frac{Q^2}{4E_e^2}}$$



不包含辐射修正



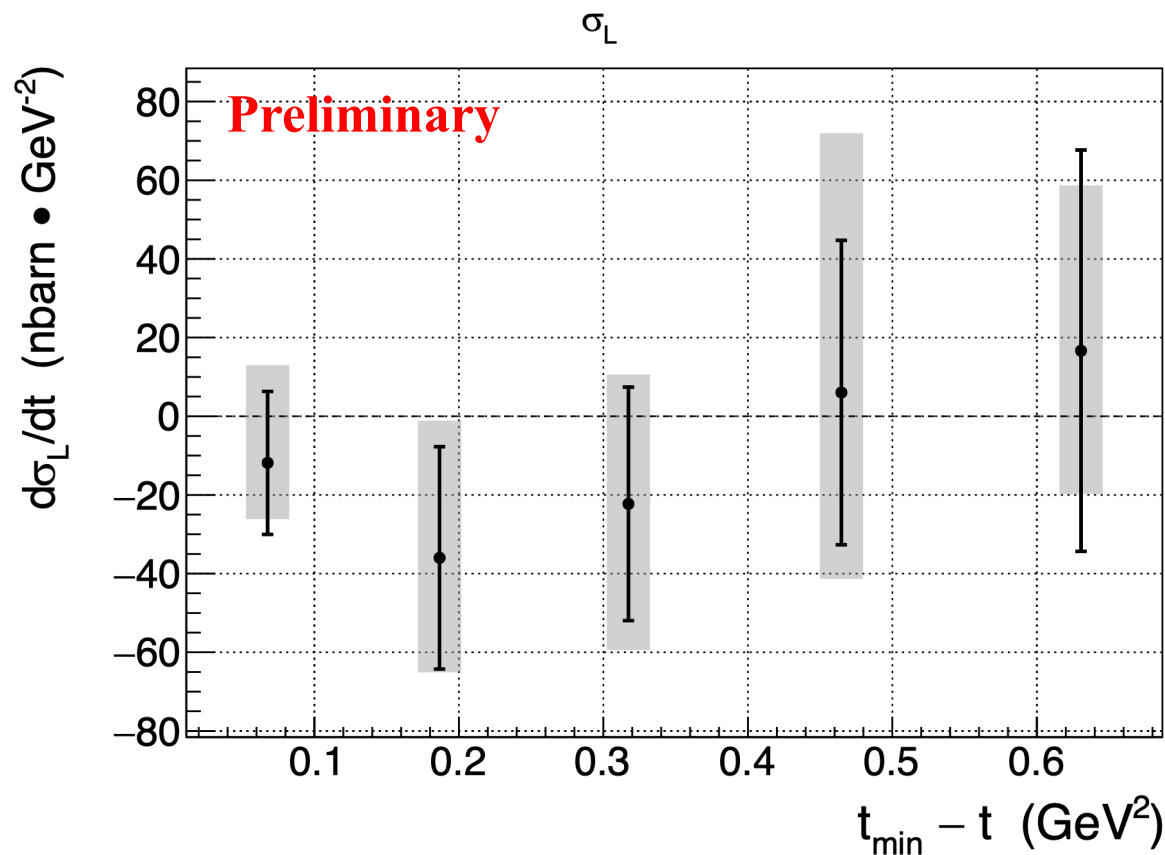
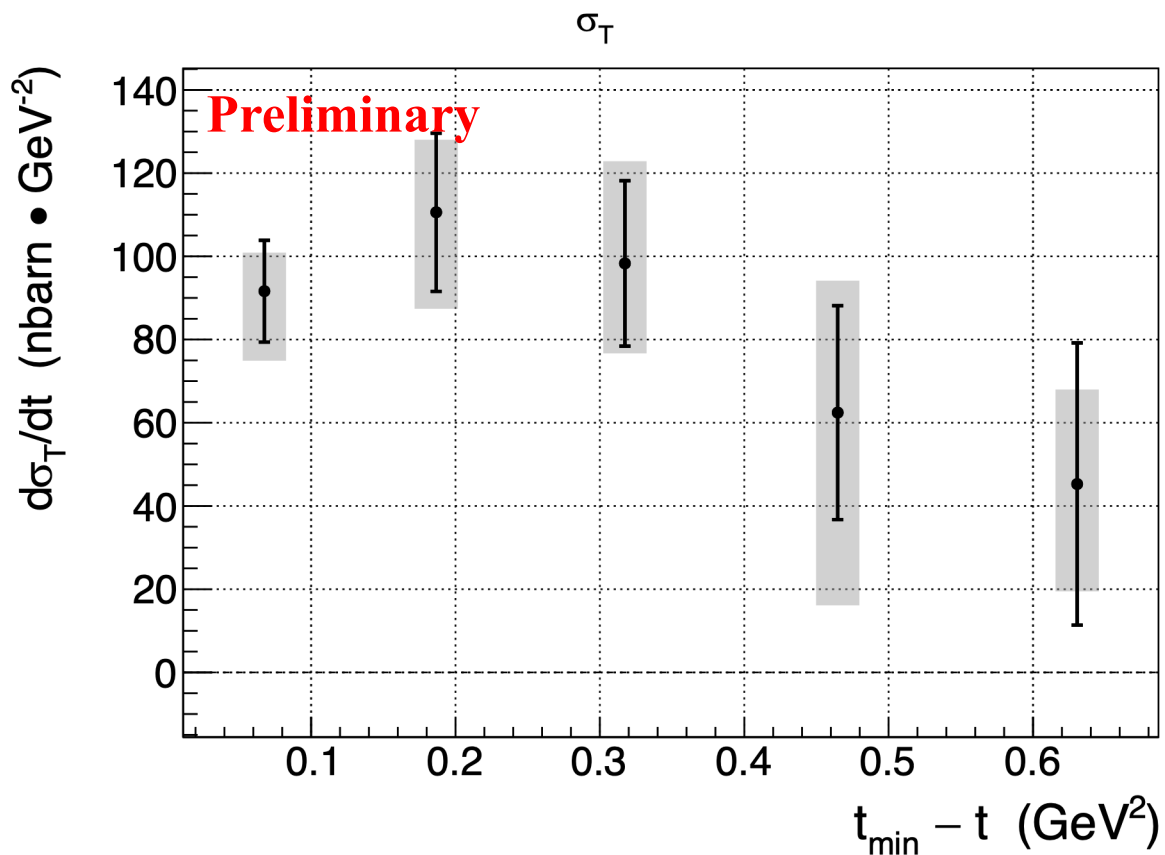
■ 利用不同束流能量来进行L/T分离

➤ KinC_x36_5: $Q^2 = 4.0 \text{ GeV}^2$, $x_B = 0.36$, $E = 10.6 \text{ GeV}$, $\epsilon^* \approx 0.52$

➤ KinC_x36_4: $Q^2 = 4.0 \text{ GeV}^2$, $x_B = 0.36$, $E = 8.5 \text{ GeV}$, $\epsilon^* \approx 0.71$

$$\frac{d\sigma_T}{dt} + \epsilon^* \frac{d\sigma_L}{dt}$$

$$\epsilon^* = \frac{1 - y - \frac{Q^2}{4E_e^2}}{1 - y + \frac{y^2}{2} + \frac{Q^2}{4E_e^2}}$$



不包含辐射修正



■ 研究背景

- GPDs 可通过 DVCS、DVMP 等硬全举反应测量
- 在当前可达到的运动学下，DVMP 的反应机制仍有待进一步研究

■ JLab Hall C E12-13-010 实验

- 实验概况：利用 HMS + NPS 进行 DVCS 和 DVMP 过程的全举测量
- 实验特点及目标：更广运动学范围、高精度散射截面测量、 σ_L 和 σ_T 的相对贡献及其关于 Q^2 的依赖

■ 数据分析及散射截面提取

- 事例筛选：在探测器刻度、粒子重建等工作的基础上实现
- 蒙卡模拟：HMS+NPS 以及模拟层面的刻度和展宽
- 实验产额：经过本底去除、效率修正、密度修正、靶沸腾效应修正、死时间修正等得到实验产额（未讲）
- 拟合方法：结合蒙卡模拟和实验产额进行拟合，提取散射截面中的四个结构函数及相应的误差

■ 结论及展望

- 建立了用于可靠散射截面提取的实验及分析框架，提供了 E12-13-010 数据的首个 π^0 基准结果
- 实验的完整数据集结果将为 DVMP 理论模型的全局拟合提供精确实验输入



感谢各位老师同学的垂听
请批评指正



清华大学
Tsinghua University