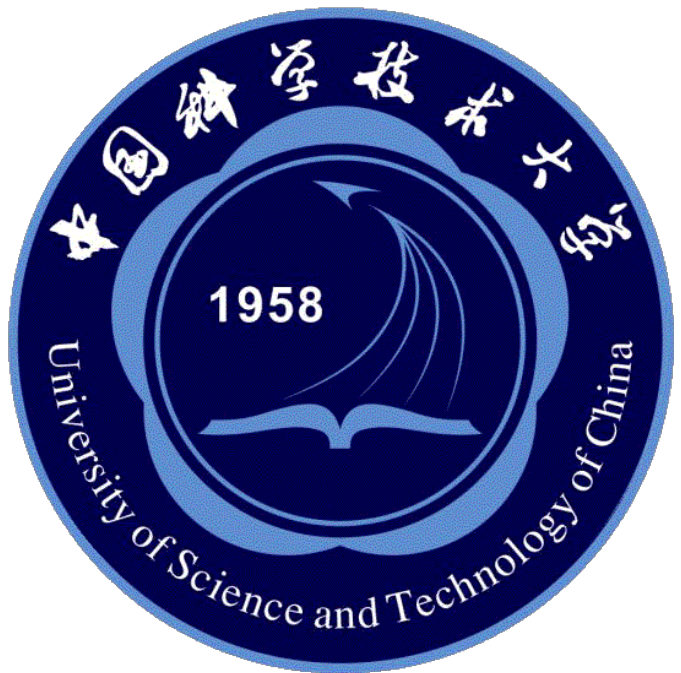




质子部分子分布与global analysis

杨思奇

中国科学技术大学

2025. 4

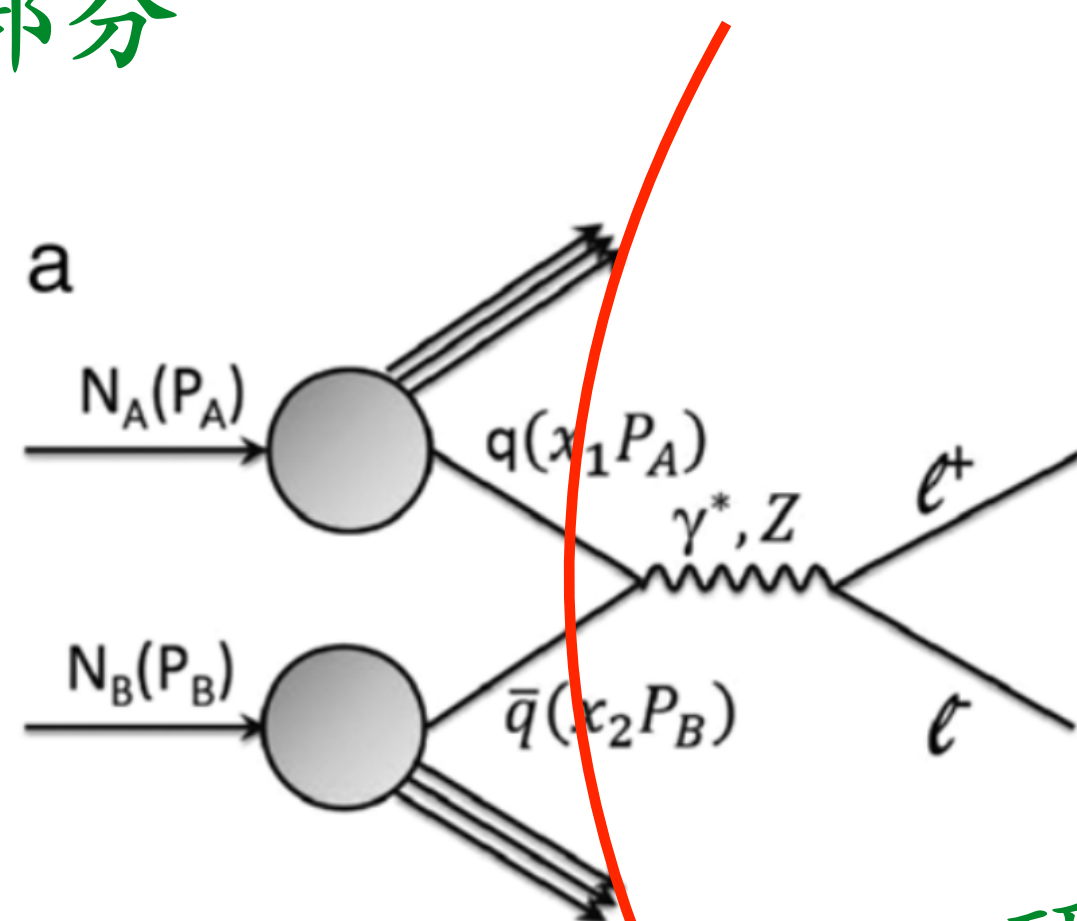
第20届中高能核物理大会

部分子分布函数(PDF)

用于对高能标质子反应的解释和描述

- 高能标下($Q > \mathcal{O}(1) \text{ GeV}$), 部分子相互作用可忽略
- 质子反应的截面写成各个部分子截面的简单叠加
- 初态部分子可以参数化成有效动量
- 用以描述初态部分子有效动量的分布函数, 即部分子分布函数(PDF)

初态部分



硬过程部分

$$\sigma(p) = \sum_i \sigma(q_i) = \sum_i \underline{q_i(x)} \otimes \text{HardProcess}(q_i; x)$$

PDF global analysis

低能标处的非微扰部分

(价夸克与轻夸克)

$u(x), d(x), \bar{u}(x), \bar{d}(x), s(x), \bar{s}(x), g(x)$

例: $q(x) = x^{a_0}(1-x)^{a_1} \cdot P(x; a_i)$

微扰QCD+胶子劈裂机制

演化至任意能标

以及 $c(x), b(x) \dots$

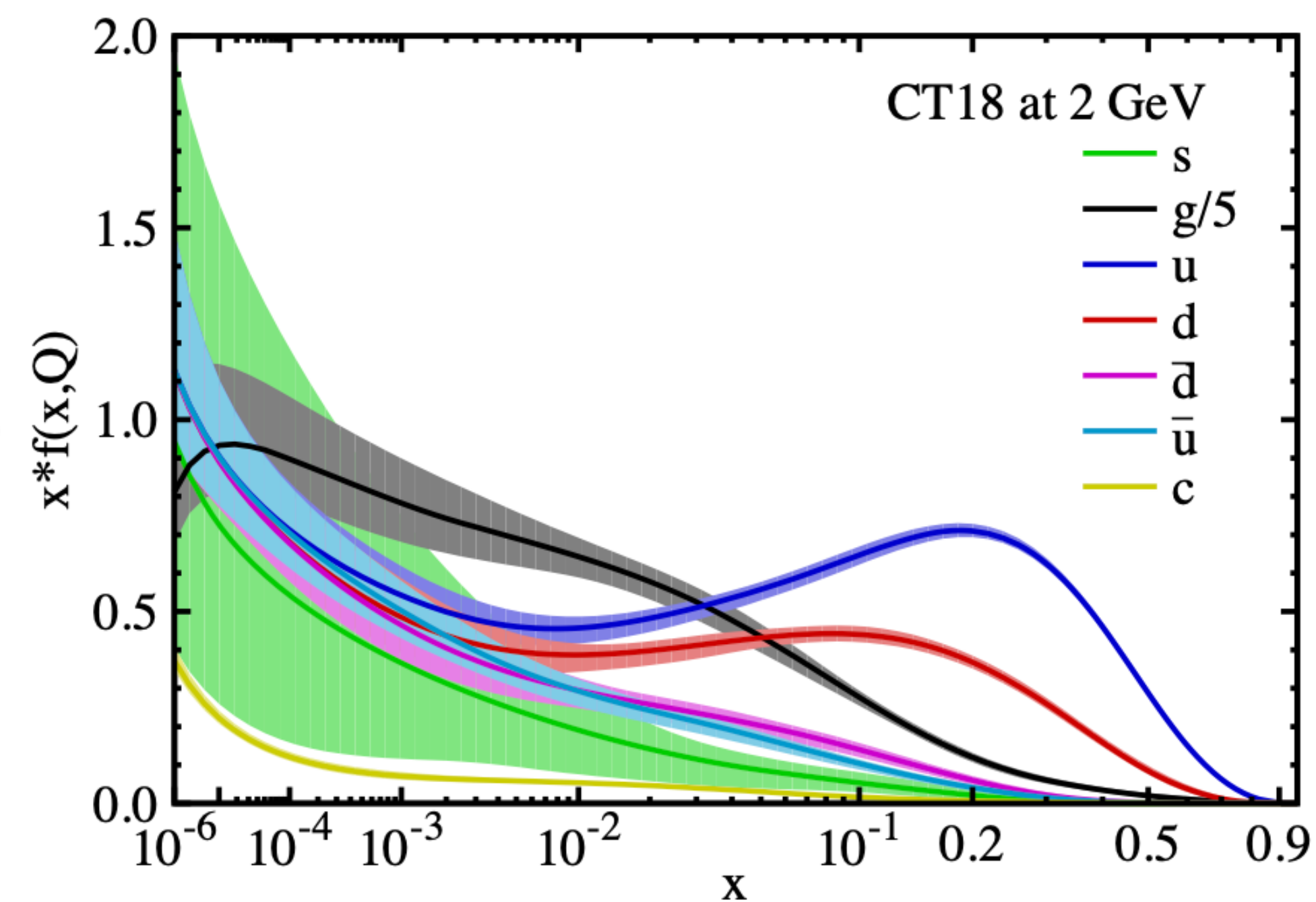
QCD sum rule

各种标准模型假设

硬过程计算

fit

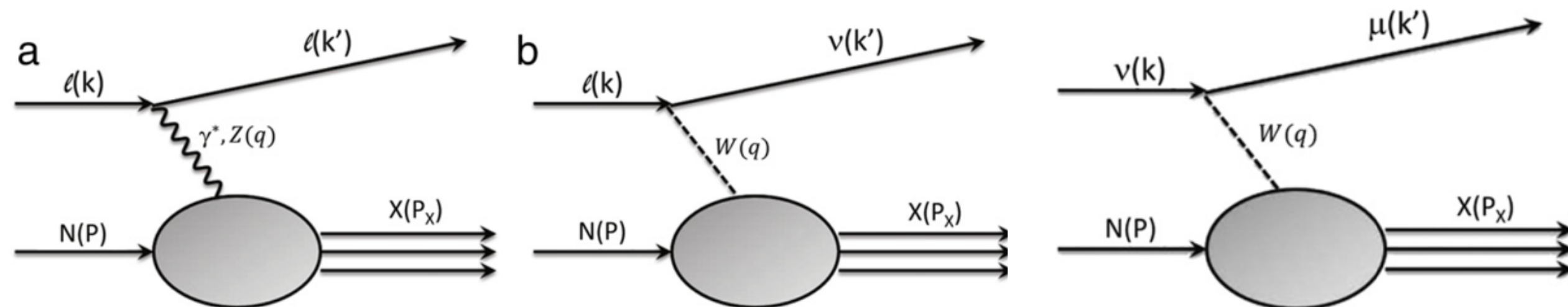
各个实验测量
对non-
perturbative部
分进行fit



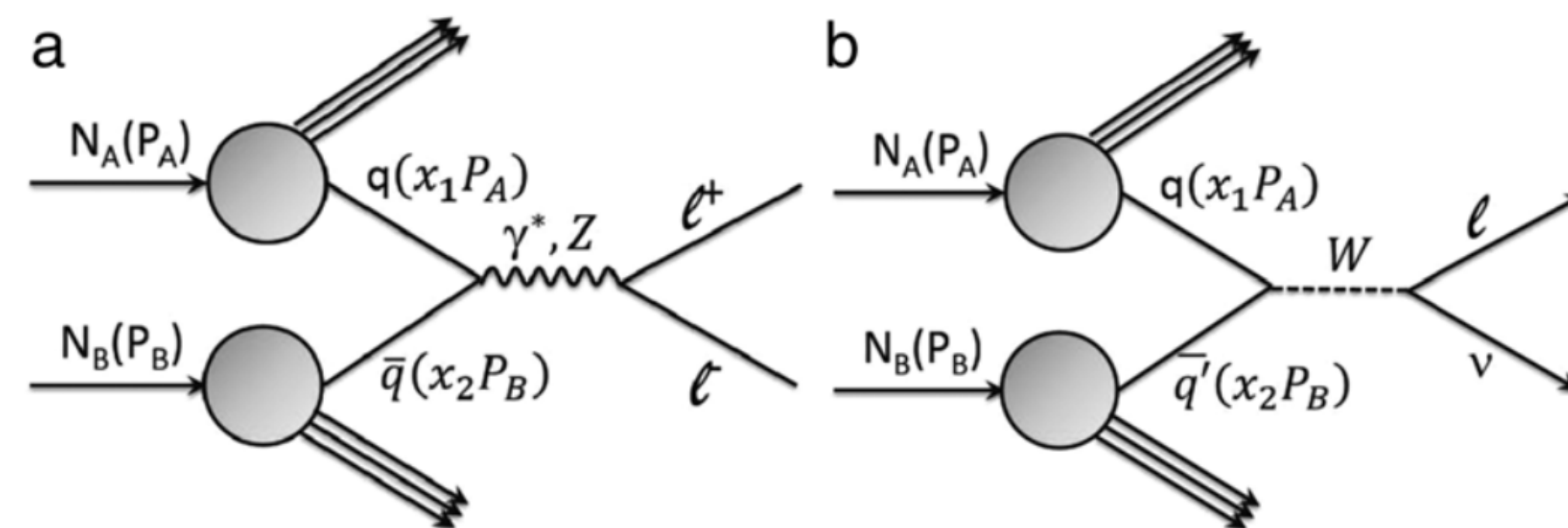
部分子分布函数的实验测量

当前的实验输入

- DIS与Drell-Yan过程为主，加少量jet data、top data
- 实验数据覆盖 $Q \sim \mathcal{O}(1)$ 至 $\mathcal{O}(100)$ GeV、 $x \sim 10^{-4}$ 至 0.4 的广泛区域



各类轻子-核子散射与中微子-核子散射过程

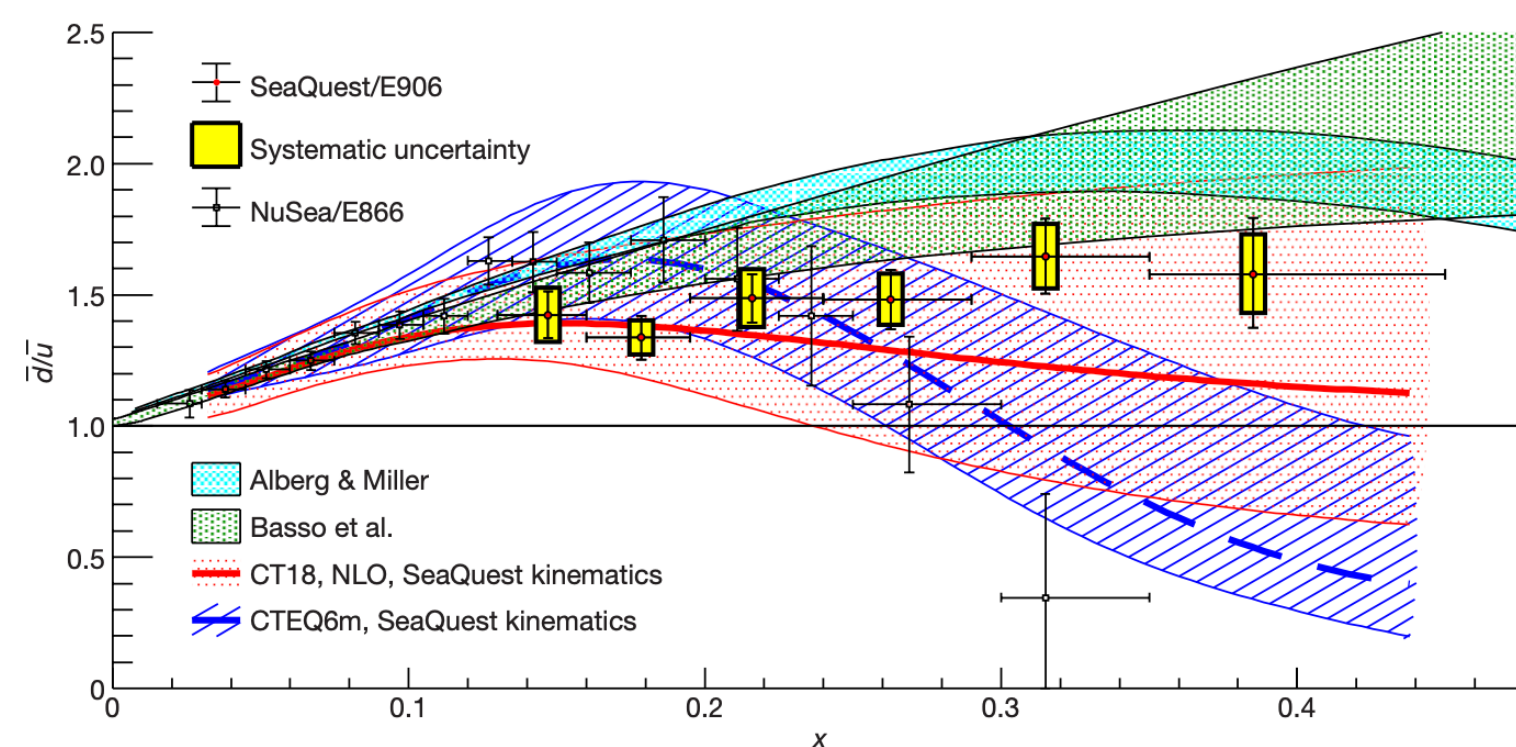


中性流与带电流Drell-Yan过程

基本问题：夸克产生机制

微扰QCD+胶子劈裂机制与实验的冲突

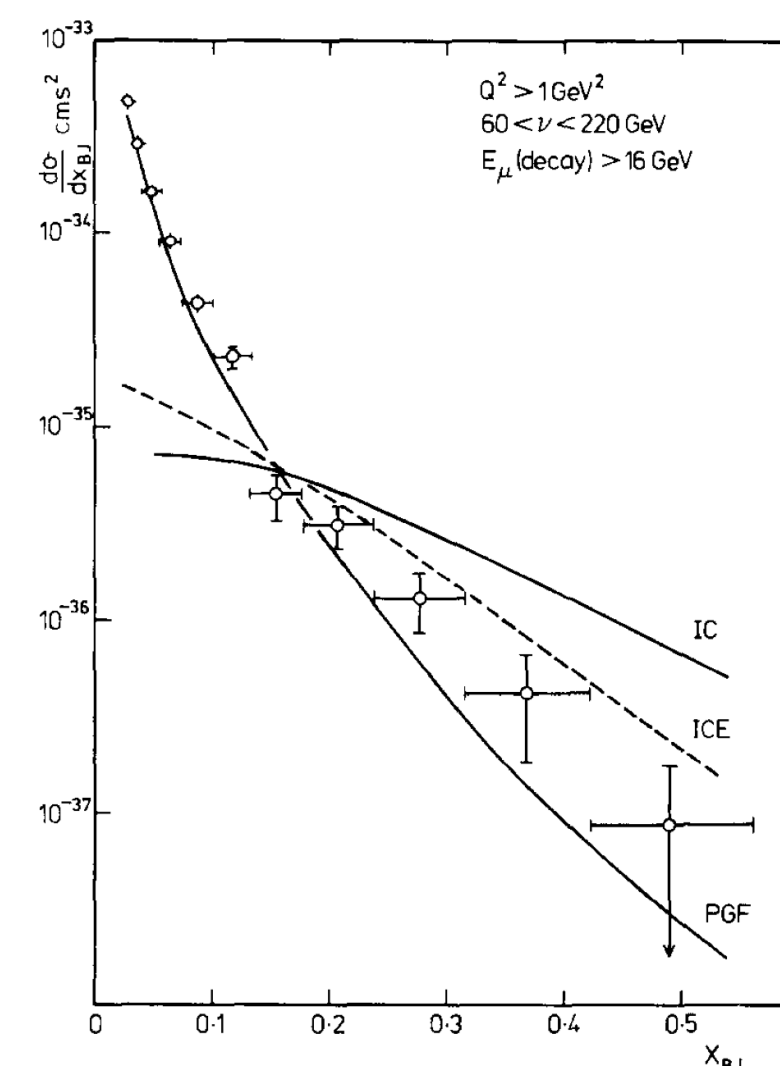
- SU(2) flavor asymmetry: $\bar{d} \neq \bar{u}$
- SU(3) flavor asymmetry: $s + \bar{s} \neq \bar{d} + \bar{u}$
- intrinsic heavy quark: 疑似的 c 夸克非微扰贡献



Experiment (year)	QCD order	κ_s
CDHS (1982)	LO	0.52 ± 0.09
CCFR (1993)	LO	$0.373^{+0.048}_{-0.041} \pm 0.018$
CCFR (1995)	NLO	$0.477^{+0.051-0.017}_{-0.050+0.036}$
CHARMII (1999)	LO	$0.388^{+0.074}_{-0.061} \pm 0.067$
NOMAD (2000)	LO	$0.48^{+0.09+0.17}_{-0.07-0.12}$
NuTeV (2001)	LO	$0.38 \pm 0.08 \pm 0.043$
NuTeV (2007)	NLO	
CHORUS (2008)	NLO	$0.33 \pm 0.05 \pm 0.05$
NOMAD (2013)	NNLO	0.591 ± 0.019

胶子劈裂机制：

- i) 轻夸克分布一致
- ii) 重夸克无非微扰贡献



NuSea/SeaQuest实验 pp/pD打靶

$\bar{d} > \bar{u}$

Nature Vol 590, 561-565, 2021

一些典型的SU(3)味不对称性的
实验分析结果， s 明显偏低

μ Fe散射实验测量

疑似 c 夸克非微扰贡献

Phys. Lett. B 110, (1982) 73

Siqi Yang

截面测量与“和性质”

实验测量数量庞大，但大部分属于夸克分布叠加，即“和性质”

中性流DIS过程

$$\sigma(\text{DIS } Z/\gamma^*) \sim u(x) + \bar{u}(x) + d(x) + \bar{d}(x) + \dots$$

带电流DIS过程

$$\sigma(\text{DIS } W^+) \sim u(x) + \bar{d}(x) + \dots$$

$$\sigma(\text{DIS } W^-) \sim \bar{u}(x) + d(x) + \dots$$

中性流Drell-Yan过程($p\bar{p}$)

$$\sigma_{p\bar{p}}(\text{DY } Z/\gamma^*) \sim u(x_1)u(x_2) + d(x_1)d(x_2) + \bar{u}(x_1)\bar{u}(x_2) + \bar{d}(x_1)\bar{d}(x_2) + \dots$$

中性流Drell-Yan过程(pp)

$$\sigma_{pp}(\text{DY } Z/\gamma^*) \sim u(x_1)\bar{u}(x_2) + d(x_1)\bar{d}(x_2) + \bar{u}(x_1)u(x_2) + \bar{d}(x_1)d(x_2) + \dots$$

带电流Drell-Yan过程($p\bar{p}$)

$$\sigma_{p\bar{p}}(\text{DY } W^+) \sim u(x_1)d(x_2) + \dots$$

$$\sigma_{p\bar{p}}(\text{DY } W^-) \sim u(x_2)d(x_1) + \dots$$

带电流Drell-Yan过程(pp)

$$\sigma_{pp}(\text{DY } W^+) \sim u(x_1)\bar{d}(x_2) + u(x_2)\bar{d}(x_1) + \dots$$

$$\sigma_{pp}(\text{DY } W^-) \sim \bar{u}(x_1)d(x_2) + \bar{u}(x_2)d(x_1) + \dots$$

“差性质”

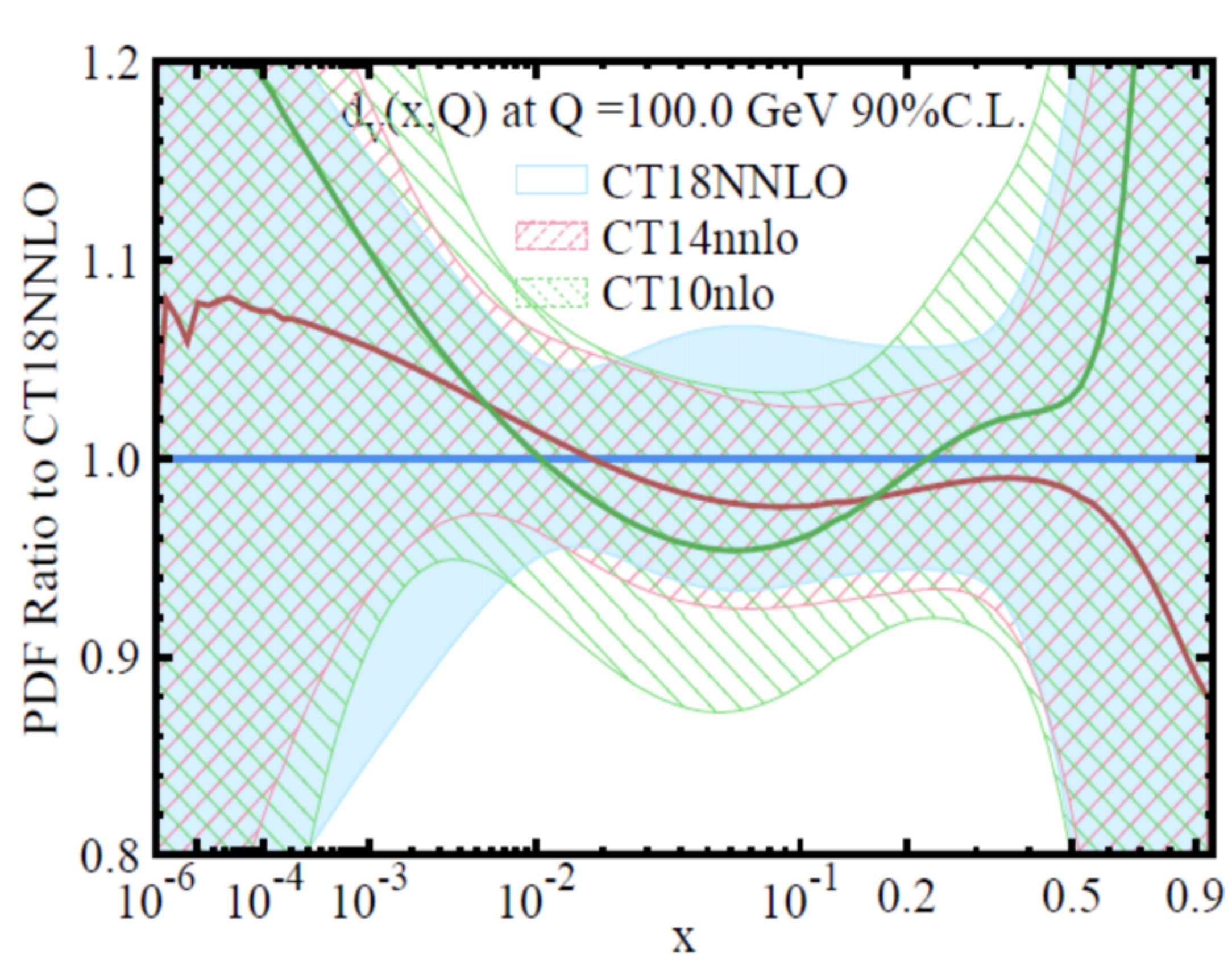
当前PDF研究的核心问题与夸克分布相对差异有关

- SU(2)/SU(3) flavor asymmetry: $\bar{d}$ 、 $\bar{u}$ 、 s 之间的“差性质”
- intrinsic heavy quark: 非微扰相对于微扰的“差性质”
- 价夸克比例: u_V 与 d_V 之间的“差性质”
- 夸克分布的 x 演化: 不同 x 区域夸克分布的“差性质”
- . . .

一个例子

高精度“和性质”测量+global fitting能否间接求解“差性质”?

- 答案是：不能



从CT14(DIS主导)到CT18(广泛引入LHC数据),
价夸克 d_V 分布精度并未提高

“差性质”新测量

强子实验上的不对称性(asymmetry)

- 强子对撞产生丰富的asymmetry(弱作用、强作用、空间、运动学……),
虽然未必由PDF性质产生, 但实验观测受到夸克的差性质影响
- 影响不对称性的夸克分布信息往往是“差性质”
- 强子对撞实验的优点: 统计量大精度高; 纯粹质子反应

Phys. Rev. D 106, L051301 (2022)

Phys. Rev. D 106, 033001 (2022)

Eur. Phys. J. C 82:368 (2022)

Chin. Phys. C 45, 053001 (2021)

截面测量“和性质”	不对称性测量“差性质”
中性流DIS过程 $\sigma(\text{DIS } Z/\gamma^*) \sim u(x) + d(x) + \bar{u}(x) + \bar{d}(x) + \dots$	W^+W^- 过程boost asymmetry: $A_{boost}^{WW} \sim q(x_1)\bar{q}(x_2) - q(x_2)\bar{q}(x_1)$
带电流DIS过程 (e^+p 散射) $\sigma(\text{DIS } W^+) \sim u(x) + \bar{d}(x) + \dots$	$W^+\gamma(W^+Z)$ 过程boost asymmetry: $A_{boost}^{W^+\gamma, W^+Z} \sim u(x_1)\bar{d}(x_2) - u(x_2)\bar{d}(x_1)$
带电流DIS过程 (e^+p 散射) $\sigma(\text{DIS } W^-) \sim d(x) + \bar{u}(x) + \dots$	
中性流Drell-Yan过程 ($p\bar{p}$ 对撞) $\sigma_{p\bar{p}}(\text{DY } Z/\gamma^*) \sim u(x_1)\bar{u}(x_2) + u(x_2)\bar{u}(x_1) + d(x_1)\bar{d}(x_2) + d(x_2)\bar{d}(x_1) + \dots$	$W^-\gamma(W^-Z)$ 过程boost asymmetry: $A_{boost}^{W^-\gamma, W^-Z} \sim d(x_1)\bar{u}(x_2) - d(x_2)\bar{u}(x_1)$
中性流Drell-Yan过程($p\bar{p}$对撞): $\sigma_{p\bar{p}}(\text{DY } Z/\gamma^*) \sim u(x_1)u(x_2) + d(x_1)d(x_2) + \dots$	
带电流Drell-Yan过程($p\bar{p}$对撞): $\sigma_{p\bar{p}}(\text{DY } W^+) \sim u(x_1)d(x_2) + \dots$ $\sigma_{p\bar{p}}(\text{DY } W^-) \sim u(x_2)d(x_1) + \dots$	中性流空间不对称性结构参数($p\bar{p}$对撞): $D_{p\bar{p}}(A_{FB}) \sim u(x_1)u(x_2) - d(x_1)d(x_2)$ $S_{p\bar{p}}(A_{FB}) \sim q(x_1)q(x_2) _{q=u,d} - q(x_1)q(x_2) _{q=s,c,b}$
带电流Drell-Yan过程(pp对撞): $\sigma_{pp}(\text{DY } W^+) \sim u(x_1)\bar{d}(x_2) + u(x_2)\bar{d}(x_1) + \dots$ $\sigma_{pp}(\text{DY } W^-) \sim d(x_1)\bar{u}(x_2) + d(x_2)\bar{u}(x_1) + \dots$	中性流空间不对称性结构参数(pp对撞): $C_{pp}^u(A_{FB}) \sim u(x_1)\bar{u}(x_2) - u(x_2)\bar{u}(x_1)$ $C_{pp}^d(A_{FB}) \sim d(x_1)\bar{d}(x_2) - d(x_2)\bar{d}(x_1)$

质子-反质子对撞实验测量

首次观测价夸克相对比例

- Tevatron上实际观测测量:

$$P_u \approx u_V^2$$

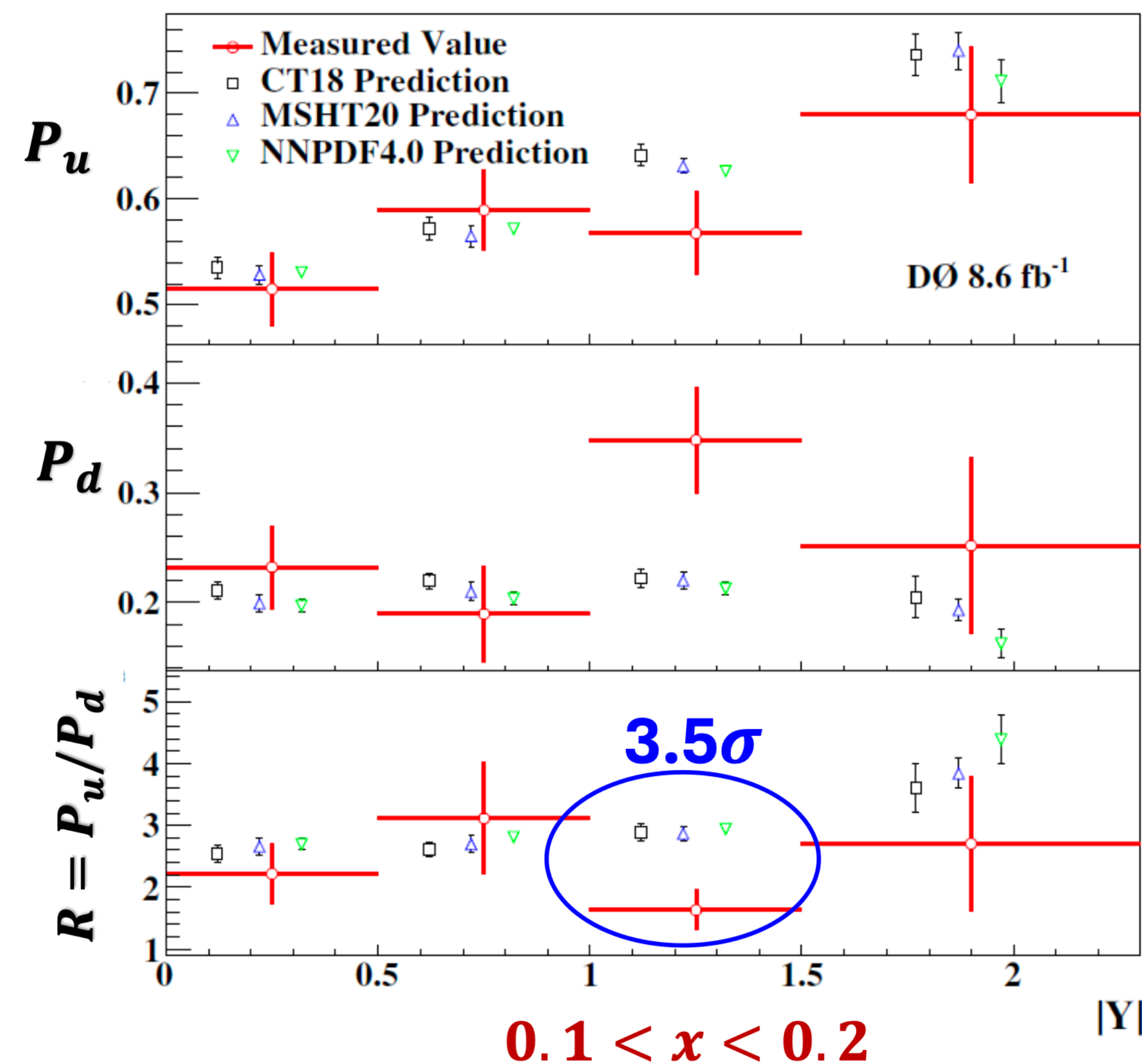
$$P_d \approx d_V^2$$

$$R \approx u_V^2/d_V^2$$

- 1.96 TeV, D0 实验 8.6 fb^{-1} 数据
- 在价夸克峰处 $x \sim 0.1$, 观测到 d_V 夸克含量明显上升, 相应地 u_V 含量下降



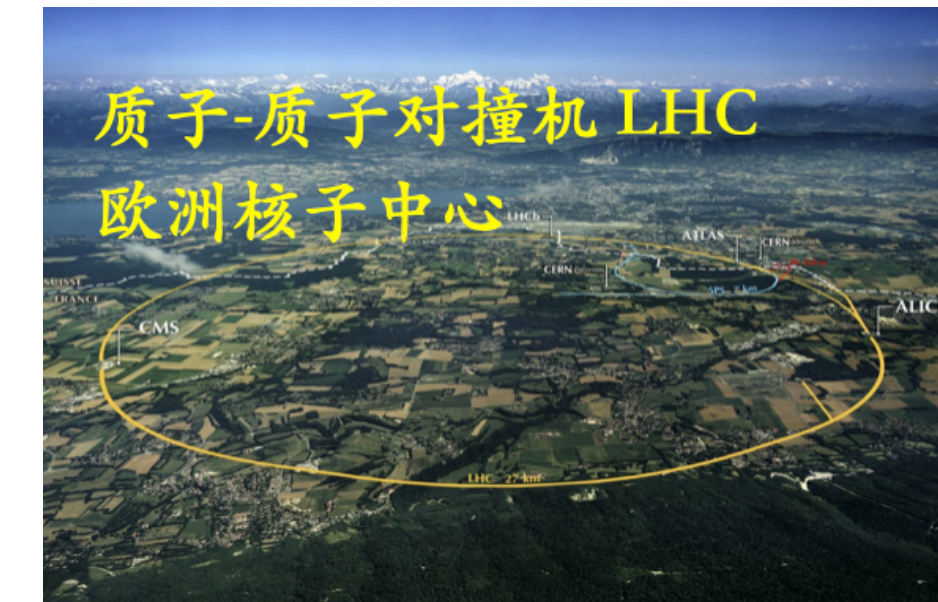
Phys. Rev. D 110, L091101 (2024)



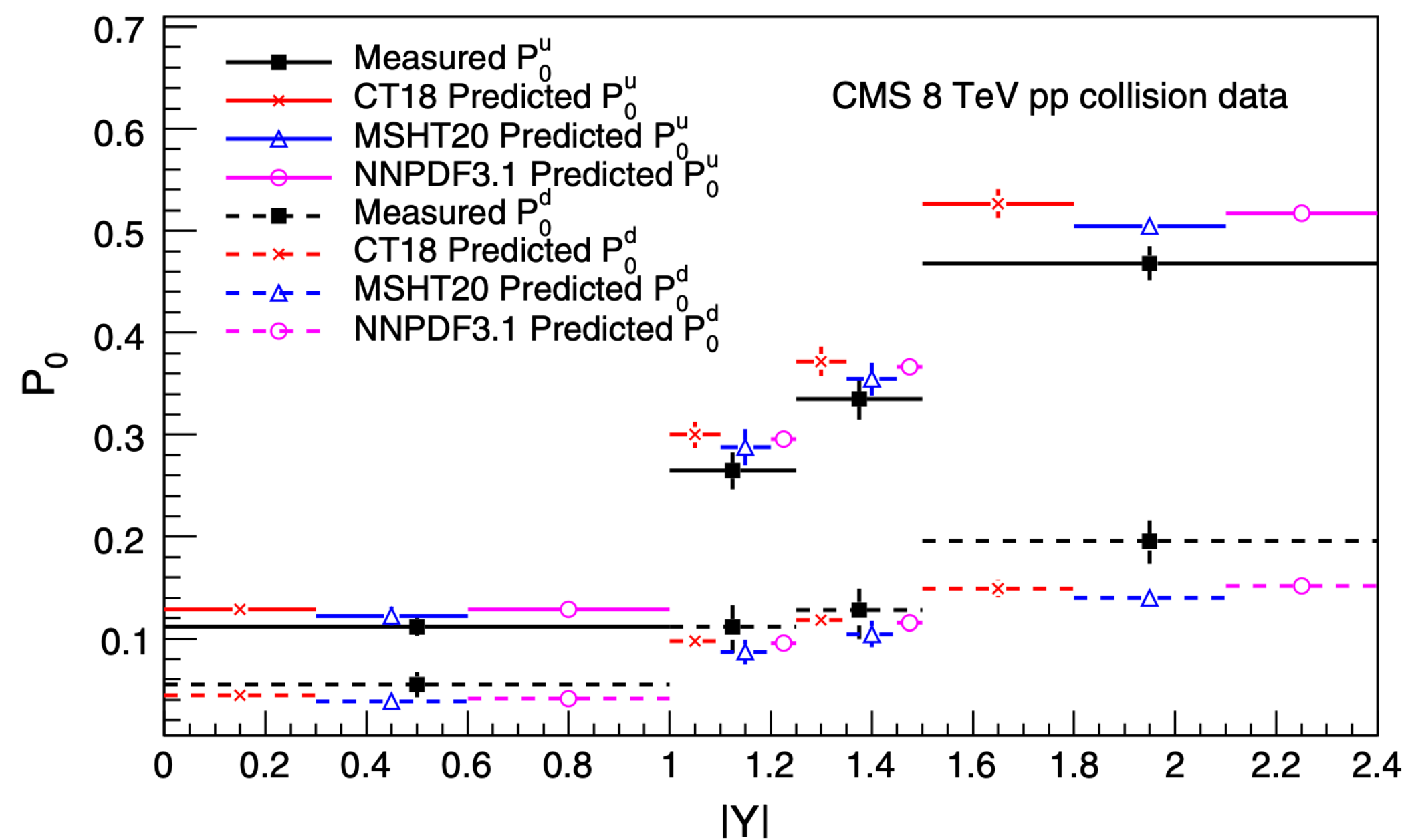
质子-质子对撞实验测量

宽广 x 范围内观测 u 、 d 夸克相对比例

- 在LHC上，观测到相同的趋势
- 在较大 x 区域，观测到 d 夸克含量上升， u 夸克含量下降

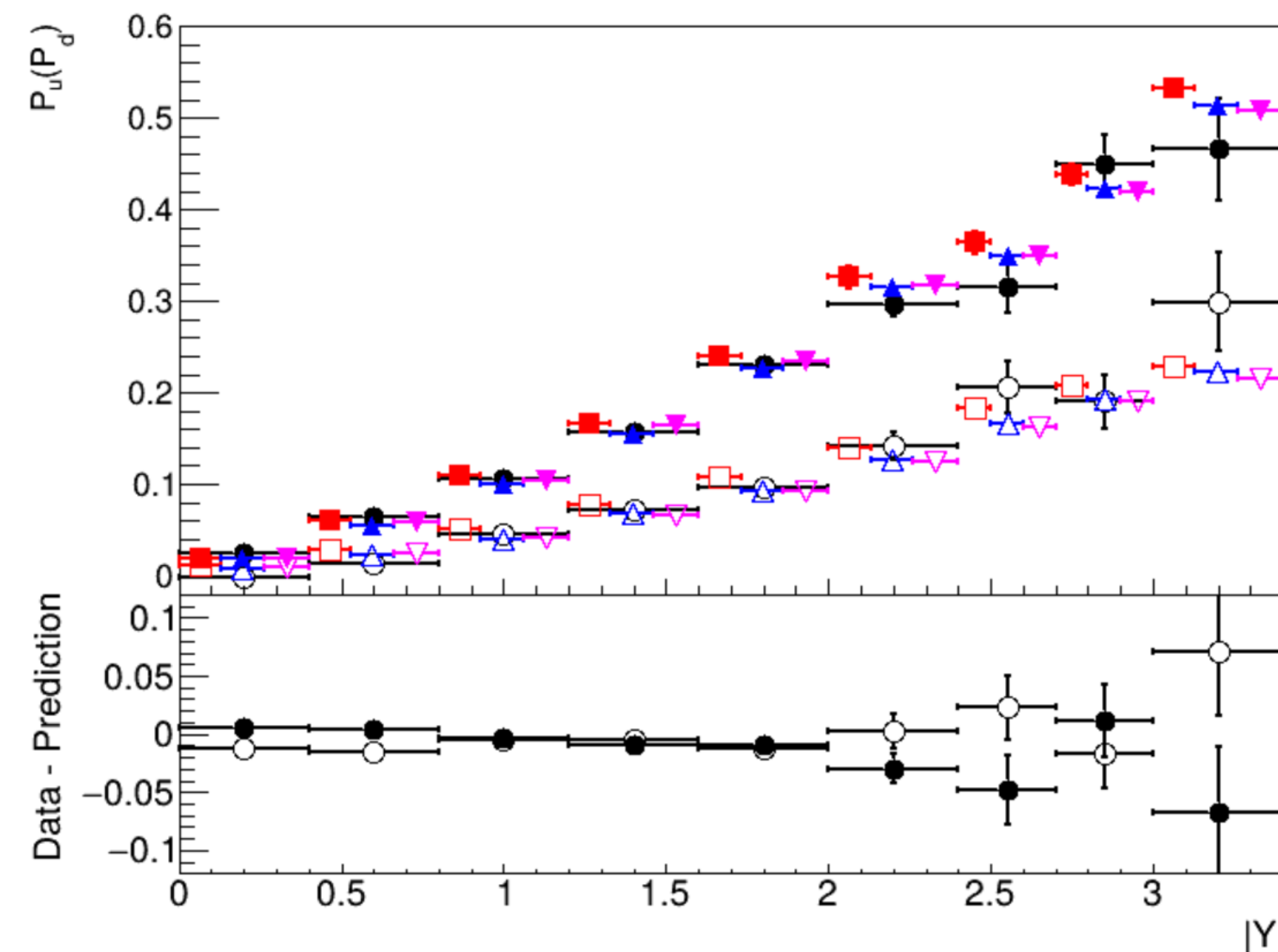


Phys. Rev. D 107, 054008 (2023)



CMS 8 TeV 20 fb^{-1} 数据测量

$x \approx 0.01 \sim 0.1$



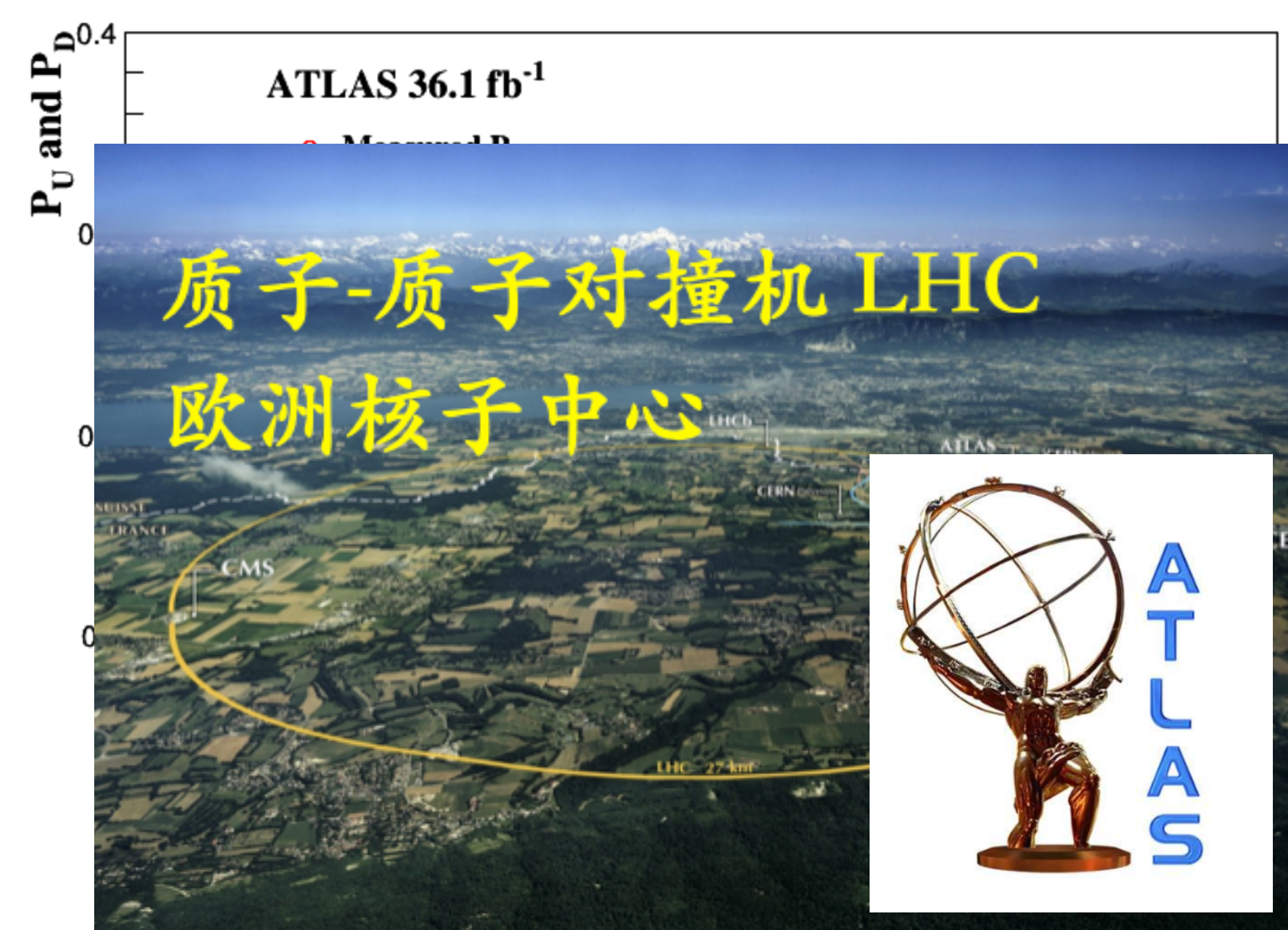
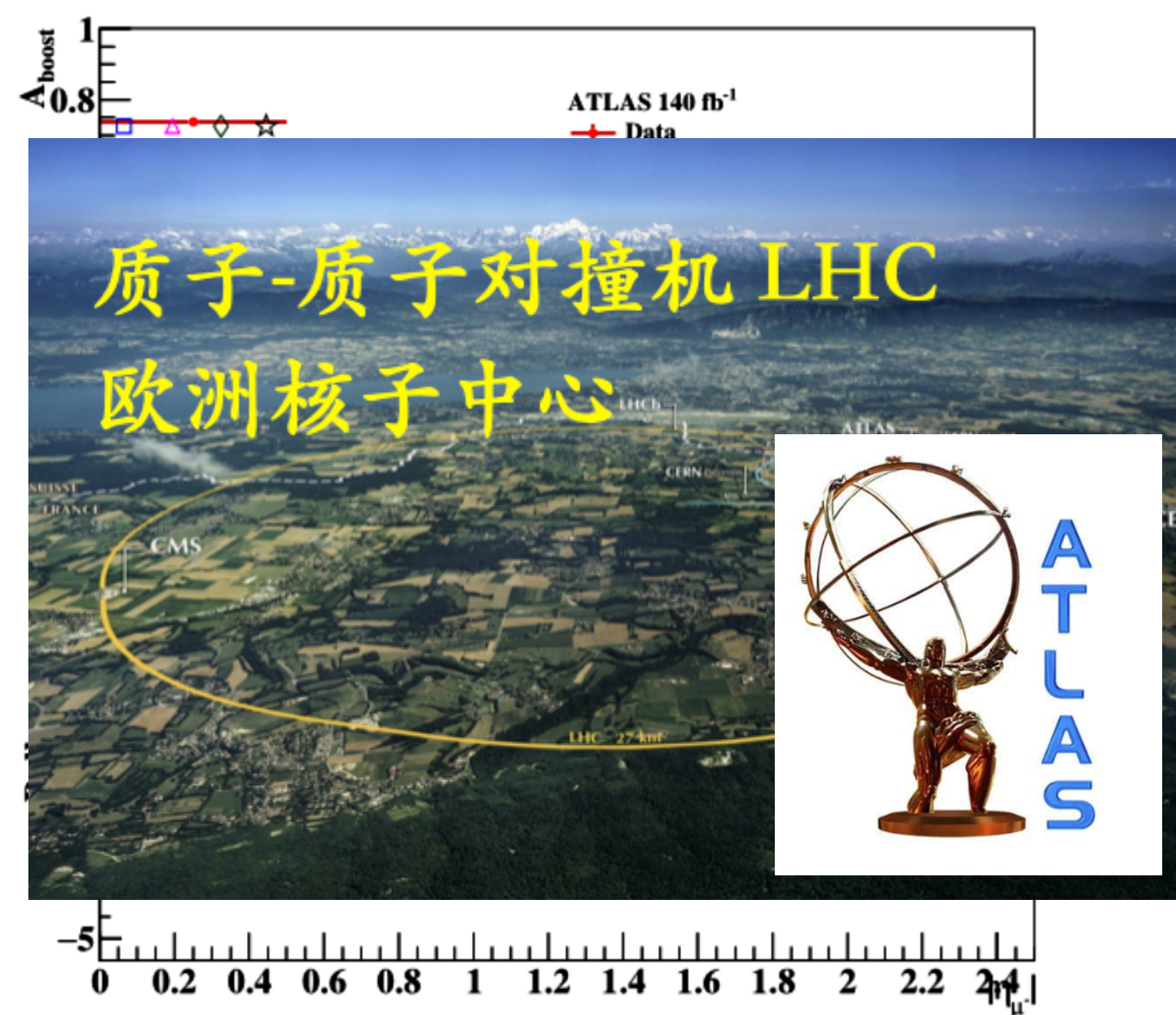
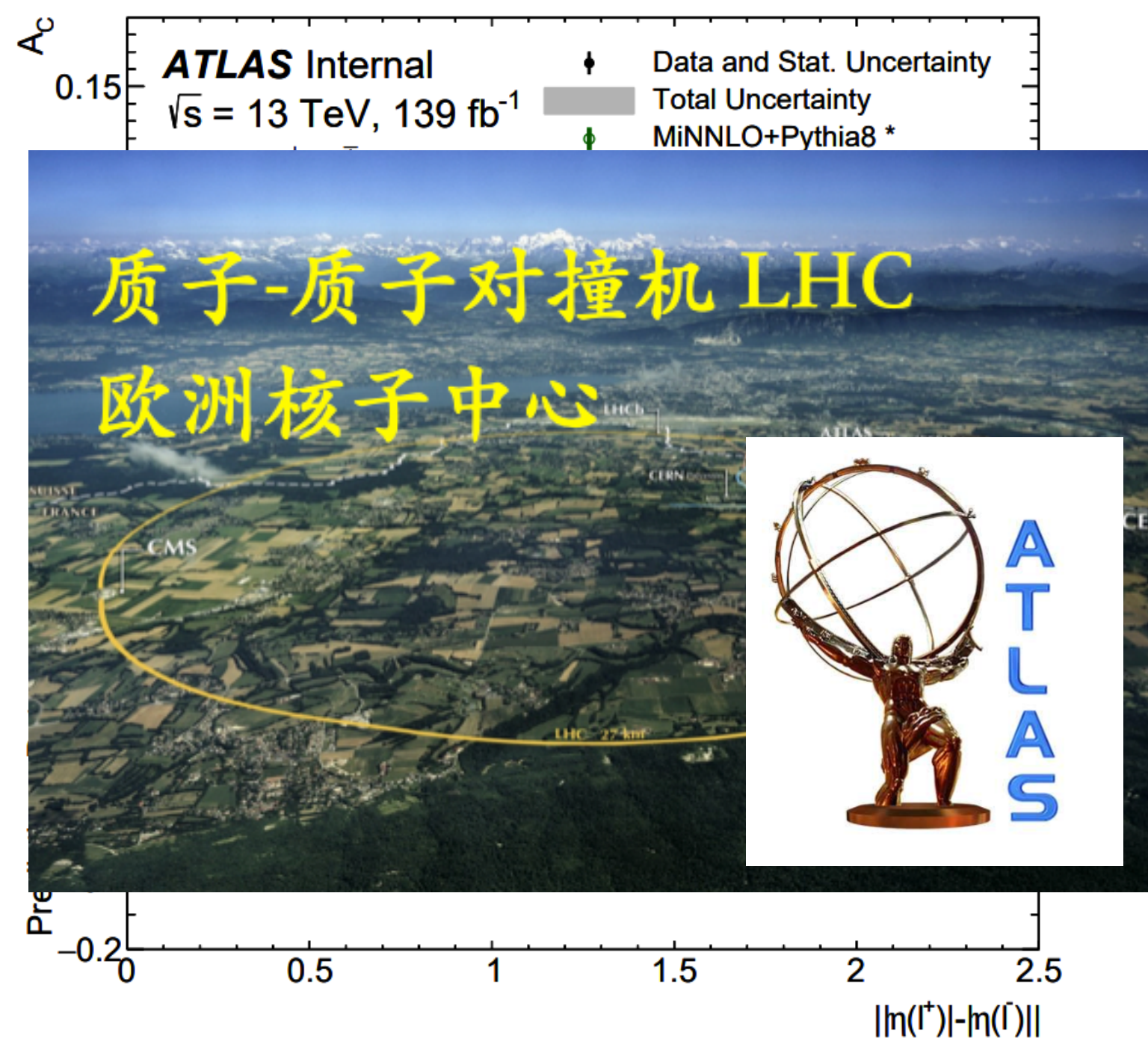
CMS 13 TeV 138 fb^{-1} 数据测量

$x \approx 0.005 \sim 0.17$

即将公布

ATLAS实验 13 TeV数据测量

- 利用 WW 、 $W\gamma$ 双玻色子过程首次测量 $x \sim 0.01$ 与 $x \sim 0.001$ 轻夸克分布相对差异
- 利用 Drell-Yan过程测量正、反夸克相对差异

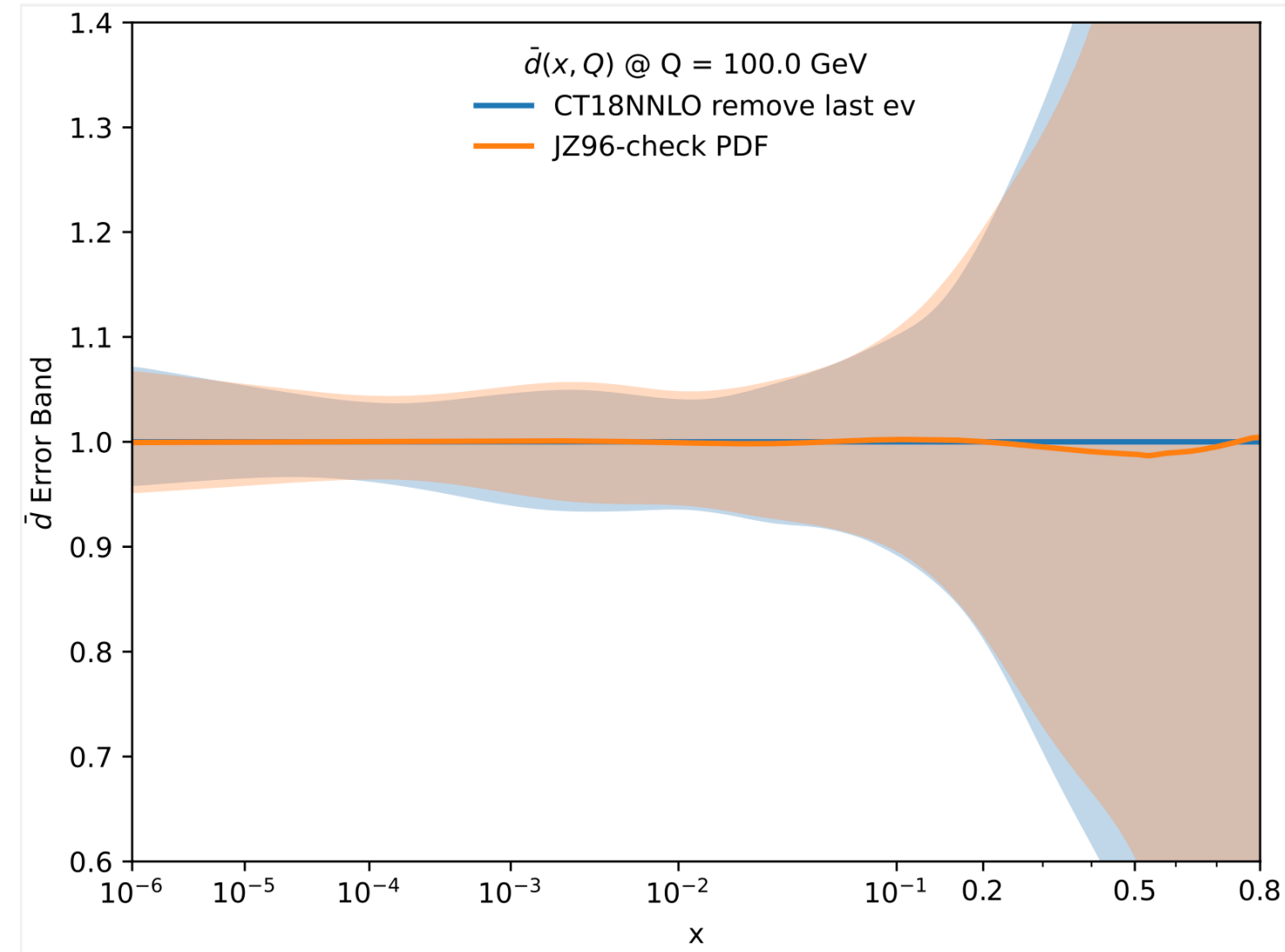
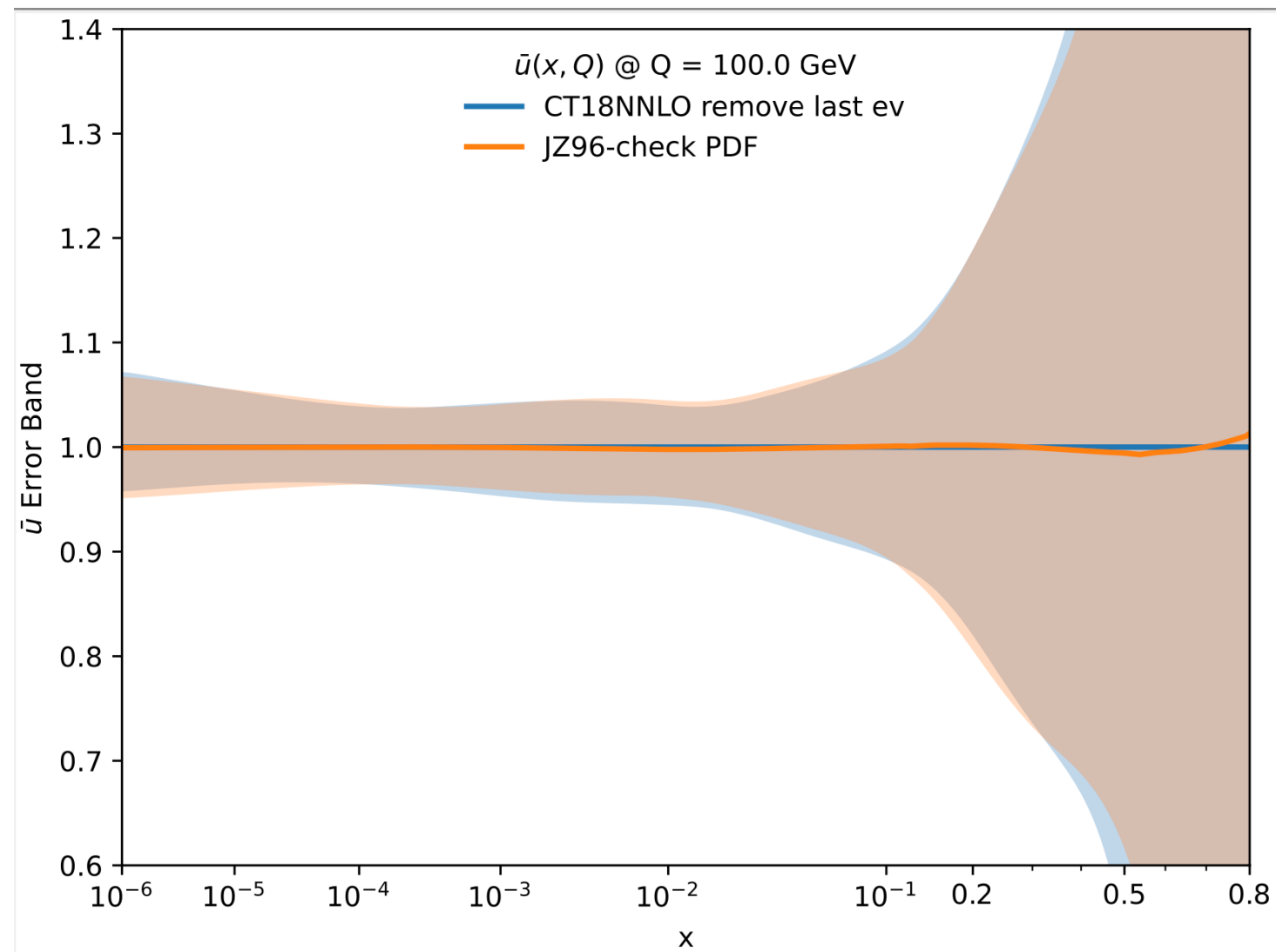
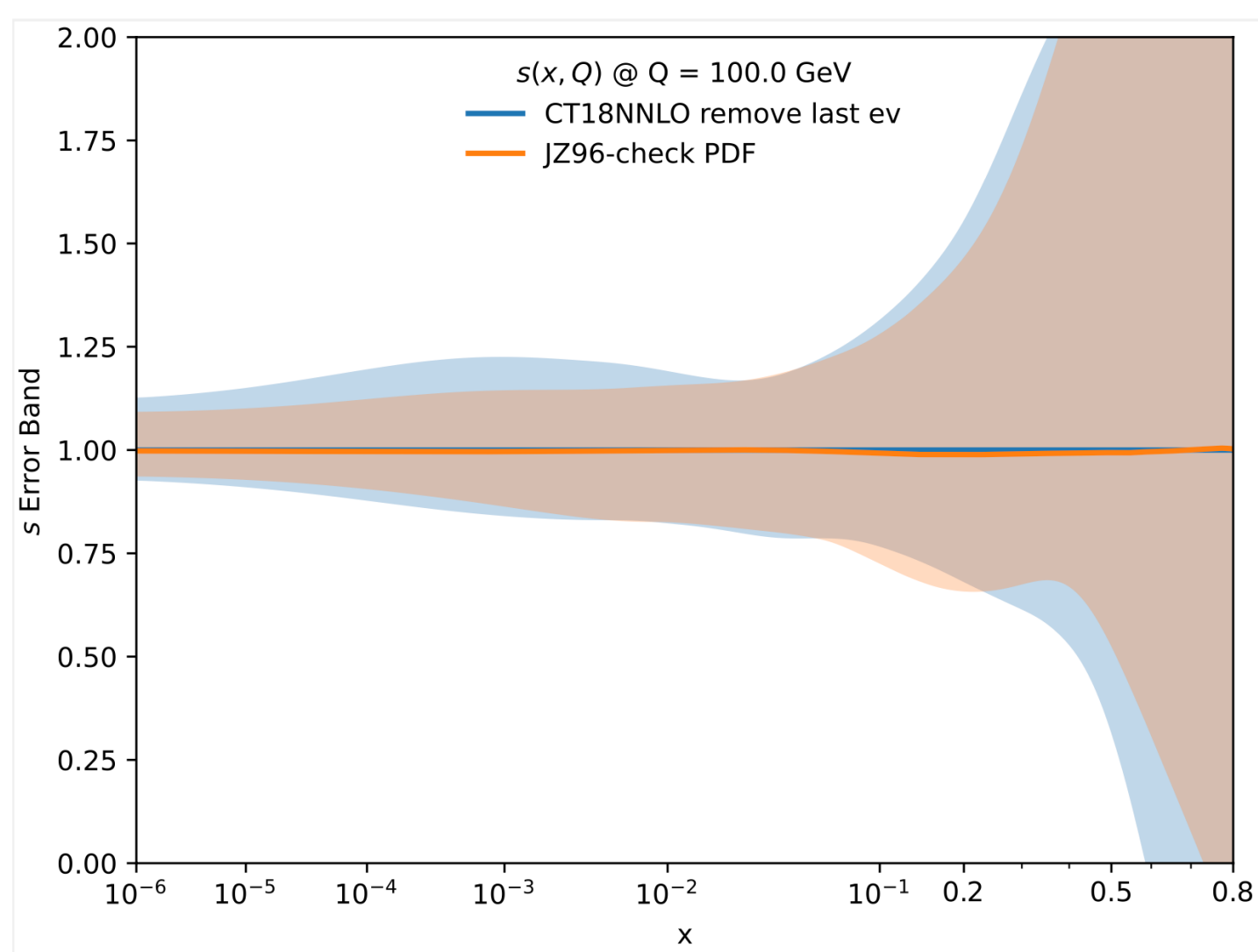
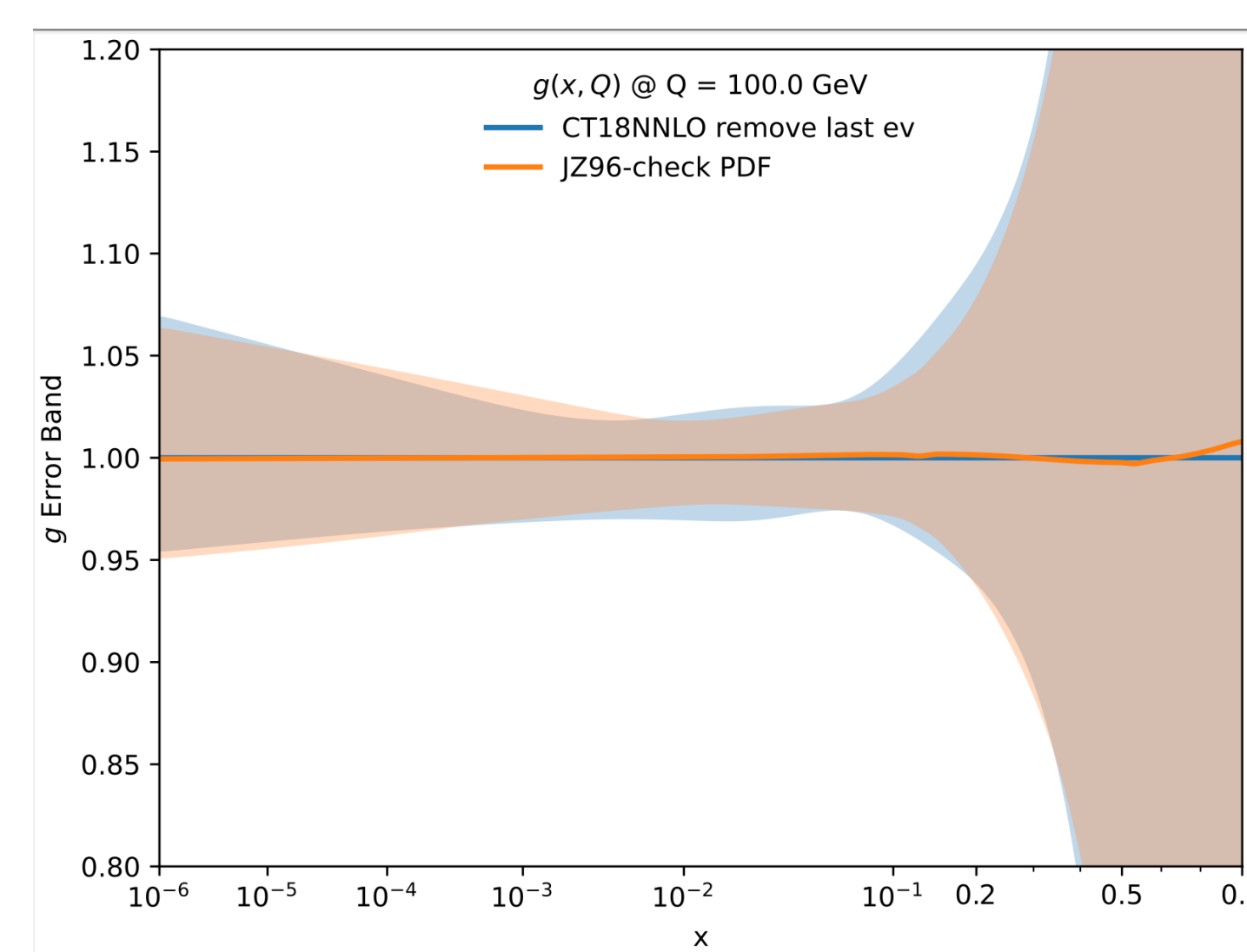
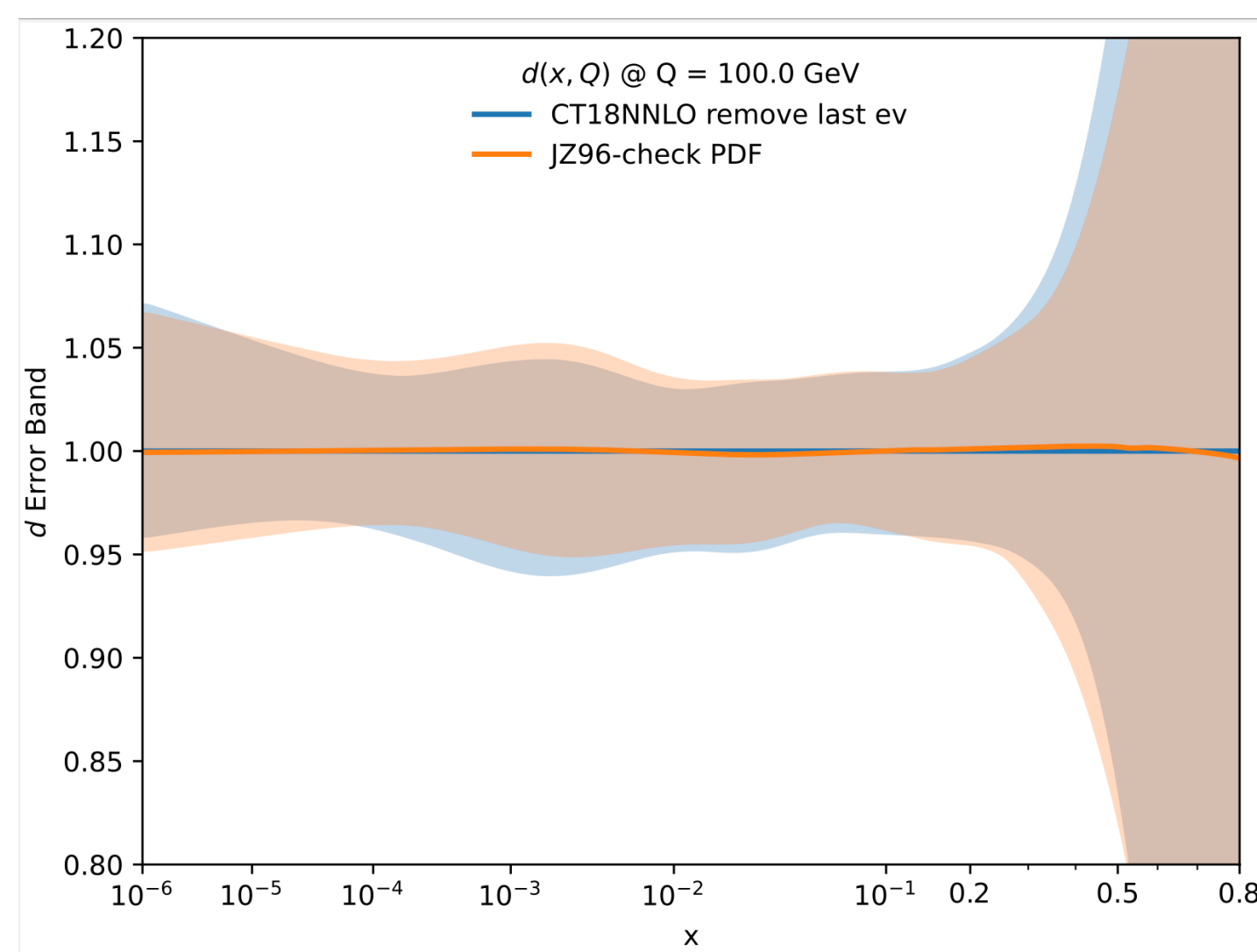
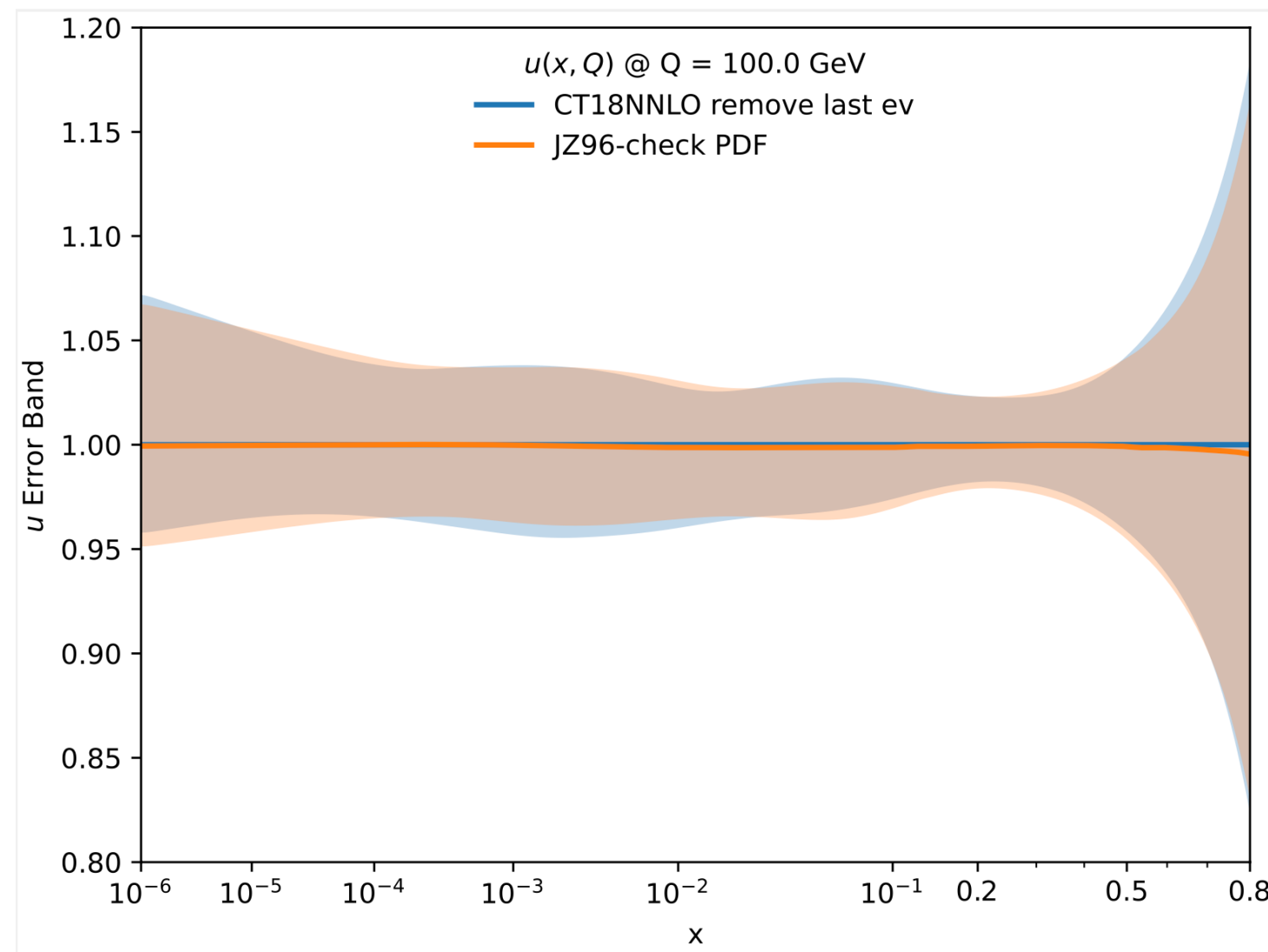


新的PDF global analysis

PDF global analysis: JZ96 PDF

- 包含了从BCDMS、CDHSW等传统DIS实验到HERA、Tevatron、LHC的所有观测
- 引入各类“差性质”新测量
- Hessian EigenVector型PDF
- 全部以C++实现的模块化程序框架
- DGLAP能标演化: apfelxx library
- DIS结构函数/固定靶Drell-Yan过程计算 NLO QCD + Gauss-Kronrod数值积分
- Collider数据计算: W/Z过程NNLO+NNLL ApplGrid; Jet/Top过程FastNLO

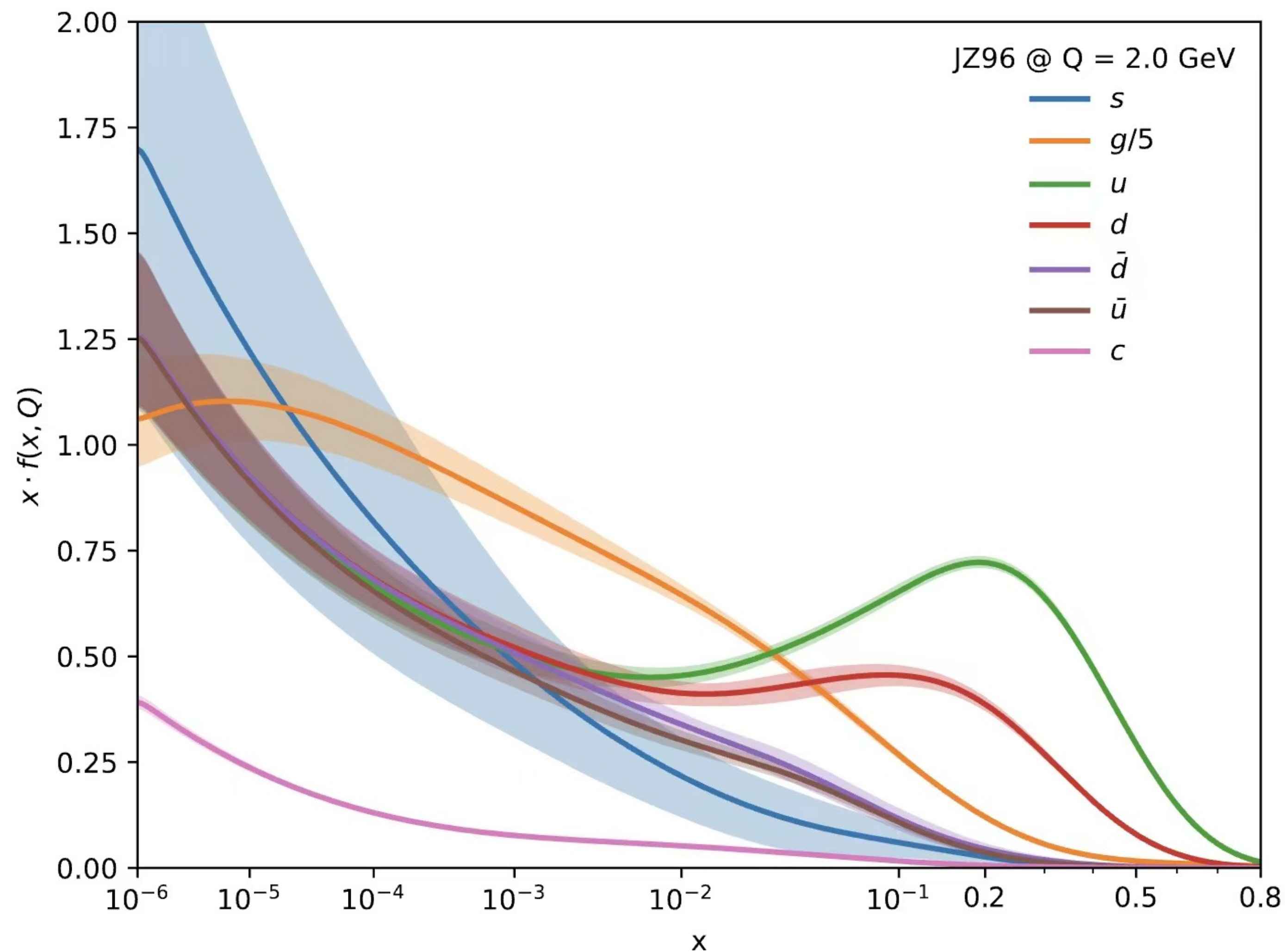
例子1：与CT18NNLO的一致性检验



例子2：纯粹质子反应的PDF global fitting

使用HERA、Tevatron、LHC
等纯粹质子反应数据进行的
PDF global fitting结果

去除了各类重核散射、打靶
实验数据



部分子分布函数的研究前沿

质子结构的直接探索

- 夸克分布行为
- 质子内夸克产生机制

基于global analysis的研究

- 微扰QCD精确检验、 α_s 测量、新物理寻找(W' 、 Z')
- 格点QCD计算的理论与实验比对检验

为质子反应计算提供初态信息

- 高能强子对撞、DIS、打靶实验的必需输入

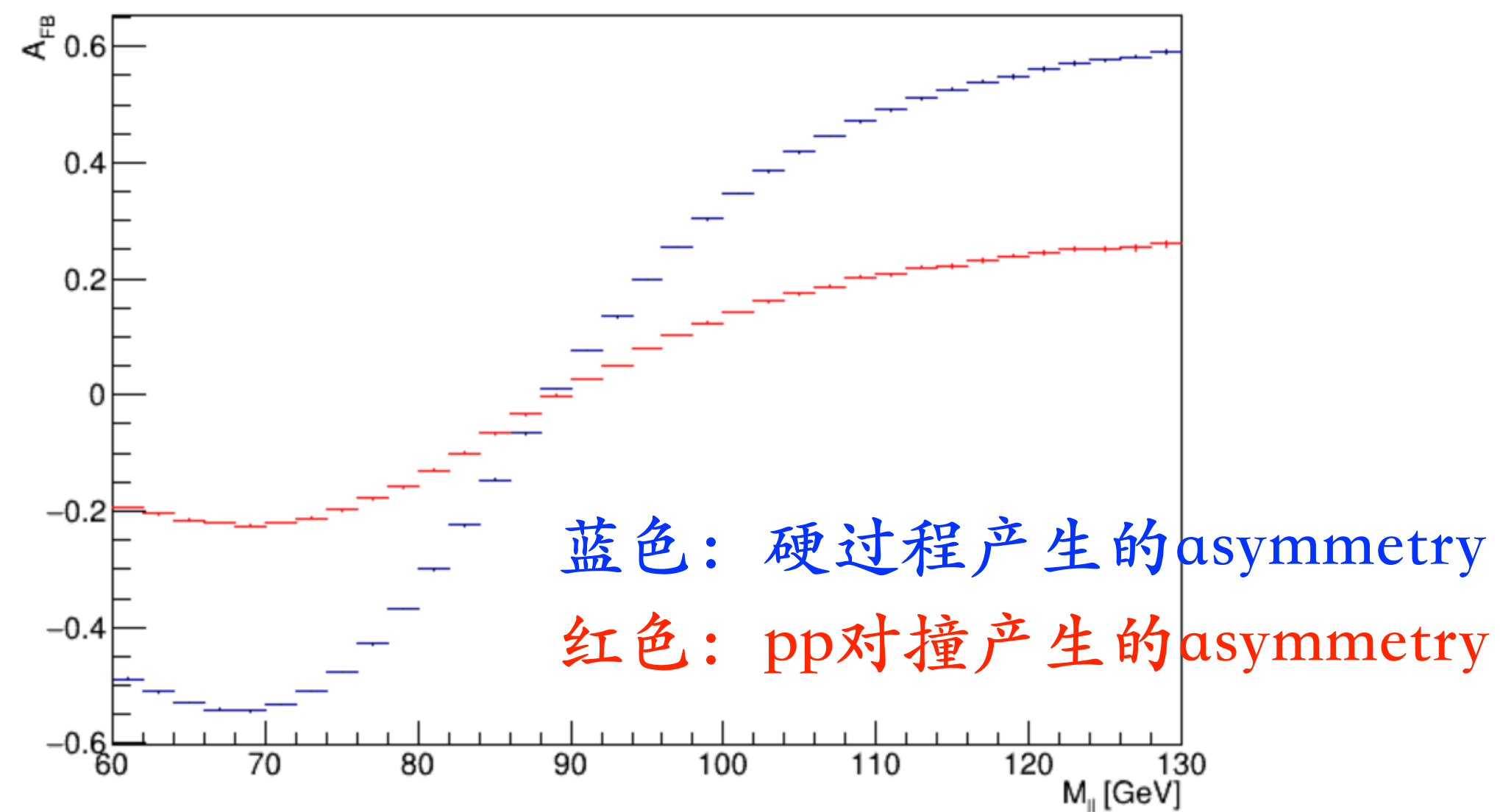
期待与各位老师的进一步交流合作
谢谢！

Backup

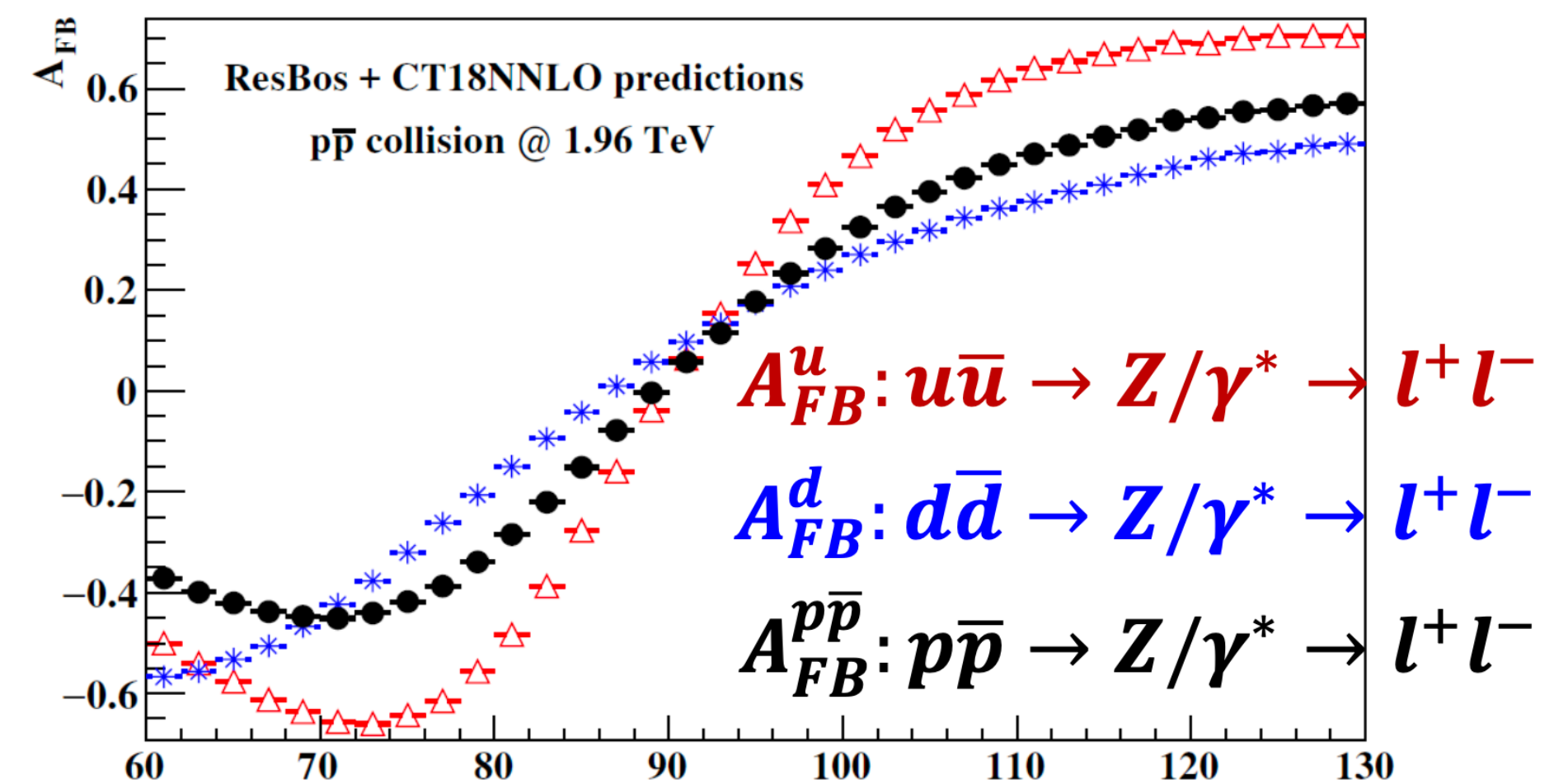
第一类测量：不同flavor之间差性质

利用Drell-Yan过程空间不对称性测量不同夸克种类差性质

- LHC上：正反夸克差性质 $u/\bar{u}$ 、 $d/\bar{d}$
- Tevatron上：价夸克差性质 u_V/d_V



LHC上， $pp \rightarrow Z/\gamma^* \rightarrow \ell^+ \ell^-$ 事例中的弱作用空间不对称性 A_{FB} 。其实验观测值会受到正反夸克差异($u - \bar{u}$ 、 $d - \bar{d}$)的强烈影响



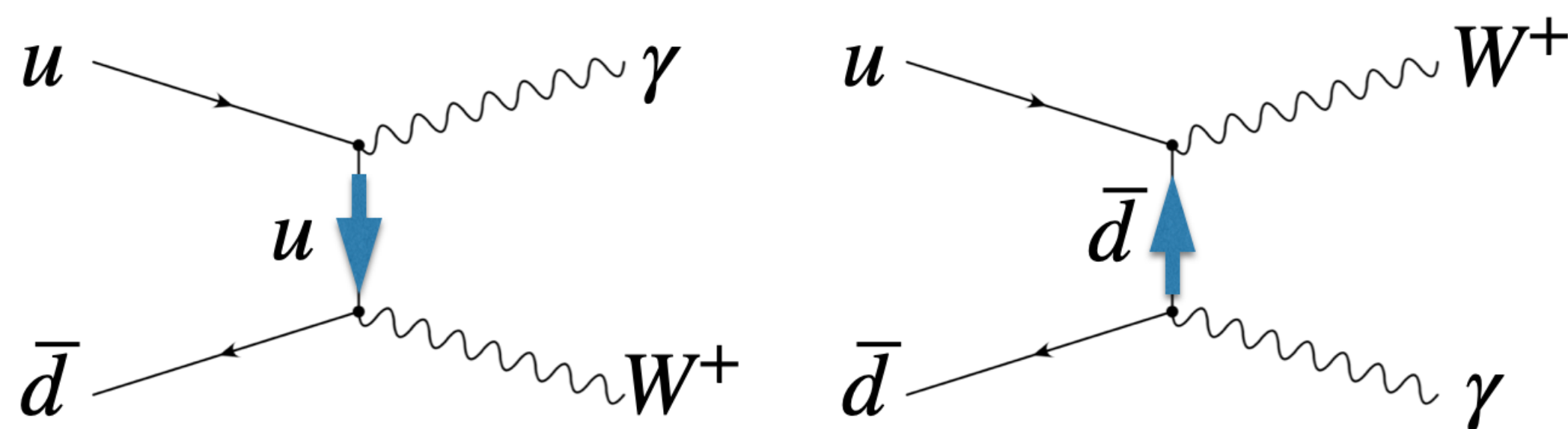
Tevatron上， $p\bar{p} \rightarrow Z/\gamma^* \rightarrow \ell^+ \ell^-$ 事例中的弱作用空间不对称性 A_{FB} 。其实验观测值会受到 u 、 d 夸克相对差异的影响

第二类测量：不同flavor之间差性质

测量不同 x 区间的分布差性质

- LHC上初态两个强子，同时涉及大 $x \sim 10^{-2}$ 、小 $x \sim 10^{-3}$ 不同区间的夸克分布信息
- 提出新的观测量：双玻色子过程 $W^\pm\gamma$ 、 $W^\pm Z$ 、 W^+W^- 中的boost asymmetry

$$A_{\text{boost}}^{W^+\gamma} = \frac{N(|Y_\gamma| > |Y_{\ell^+}) - N(|Y_\gamma| < |Y_{\ell^+})}{N(|Y_\gamma| > |Y_{\ell^+}) + N(|Y_\gamma| < |Y_{\ell^+})}$$



主导过程

压低过程

$$x_{L,S} = \frac{\sqrt{Q_T^2 + M^2}}{\sqrt{s}} \cdot e^{\pm Y}$$

$$x_L \sim \mathcal{O}(0.01) \text{ to } \mathcal{O}(0.1)$$

$$x_S \sim \mathcal{O}(10^{-4}) \text{ to } \mathcal{O}(10^{-3})$$