



利用强子实验上的电弱物理过程 测量质子结构

杨思奇

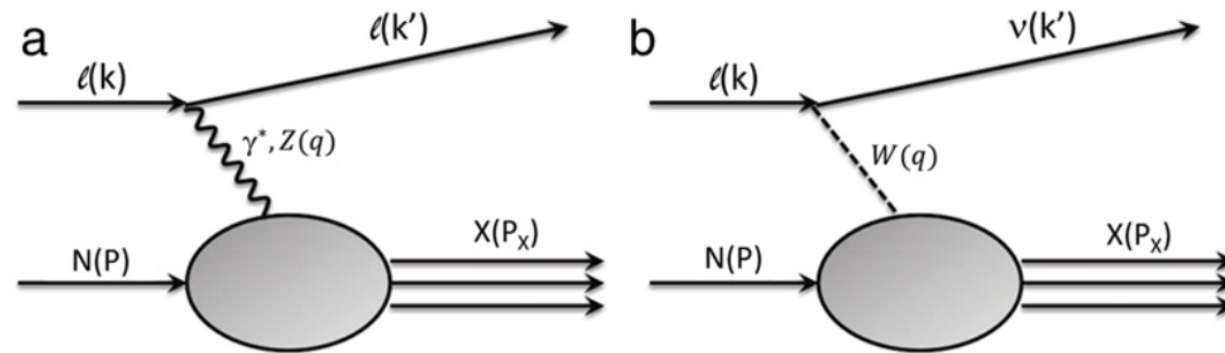
中国科学技术大学

2023. 4

核子结构的实验测量

第一类实验测量：无信息混合的直接测量

- 物理观测量只涉及某个单一的特定夸克信息 (flavor, x , Q)，或尤其主导



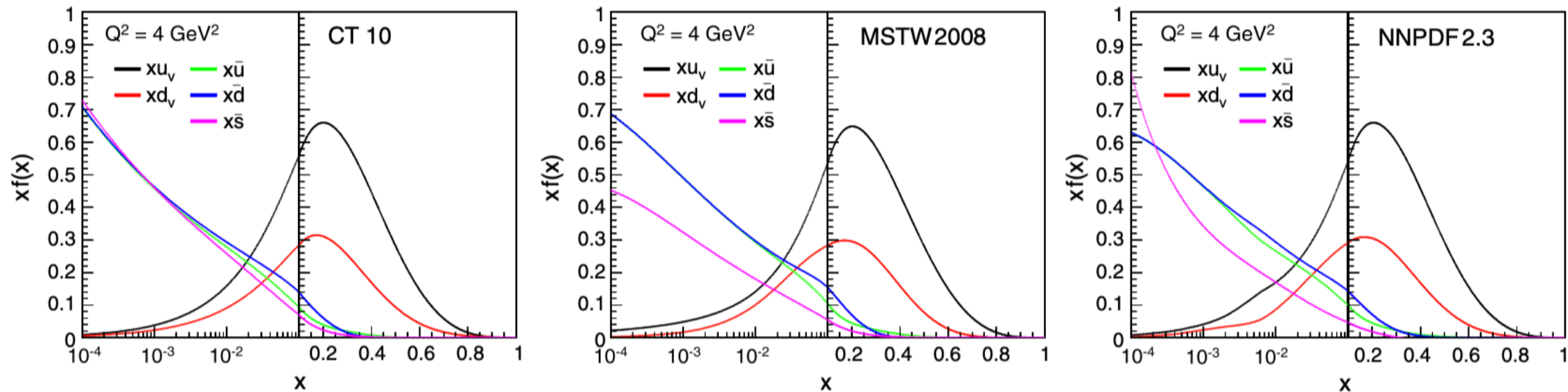
lepton-nucleon DIS

- 例如：低能标下光子交换过程的轻子-核子散射 (u 夸克主导)；带电流 W 交换过程的轻子-核子散射 (u 或者 d 夸克主导)

核子结构的实验测量

第一类实验测量：无信息混合的直接测量

- 优点：后续物理分析研究极为方便
- 缺点：能够做到这种无混合直接测量的很少，目前仅限于价夸克 (u, d) 且在分布峰值附近

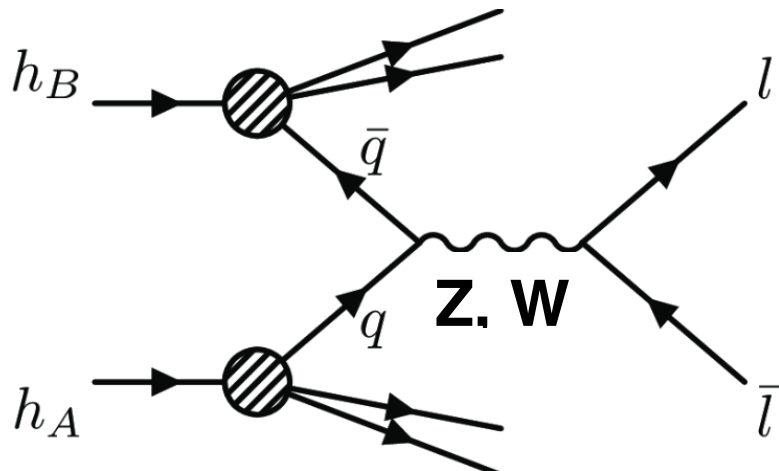


三个最主要的PDF (CT、MSTW、NNPDF) 在以第一类实验测量结果为主要输入时给出的质子结构的分布。

核子结构的实验测量

第二类实验测量：多信息混合的物理过程

- 物理观测量包含了广泛的夸克信息，但多种信息混合在一起
- 典型例子：强子实验上产生的Drell-Yan过程
 - 多种夸克初态： $u, \bar{u}, d, \bar{d}, s, \bar{s}, c, \bar{c}$
 - 两个 x 区域



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

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

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

核子结构的实验测量

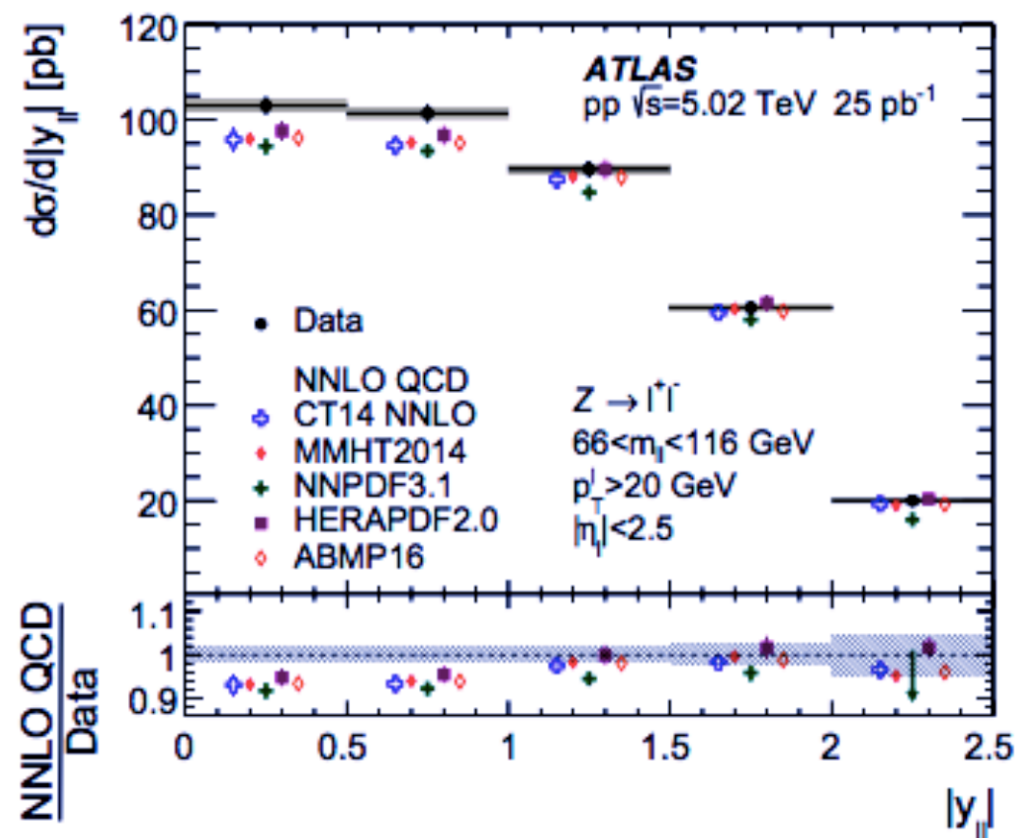
第二类实验测量：多信息混合的物理过程

- 优势：包含了广泛的质子结构信息，是拓展对质子结构了解范畴的前提基础
- 缺点：强烈依赖global fitting，难以独立给出结论。研究方式变成“一测俱测”

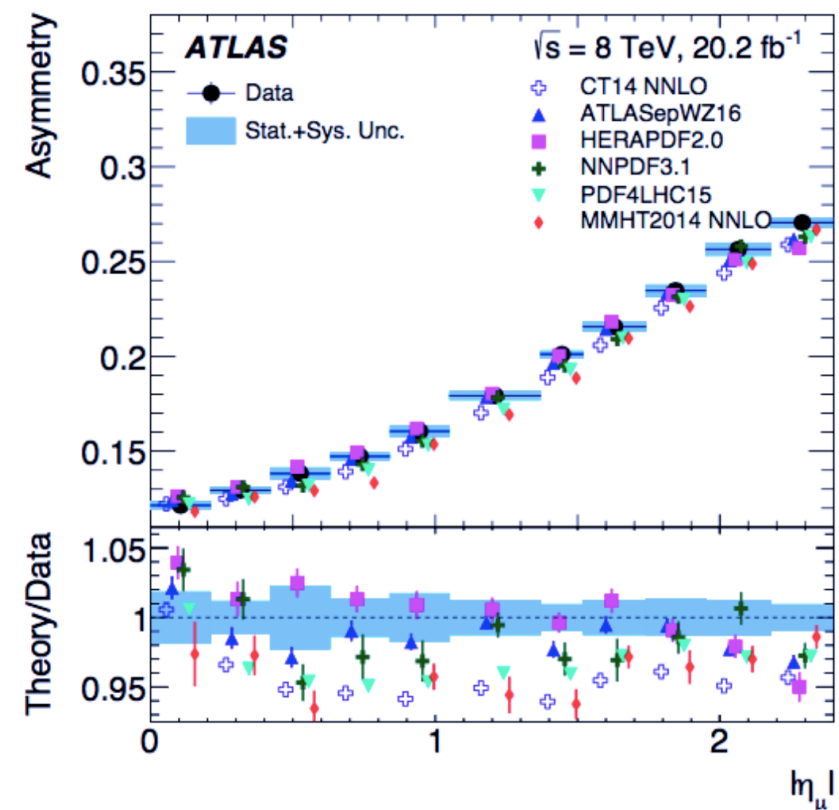
Global fitting面临的压力

困难一：基础假设面临挑战

- global fitting要求各个实验结果都可以由同一个PDF计算框架描述
- 然而，目前LHC数据与之前的DIS、fixed target实验出现了系统性偏差



LHC上Z玻色子rapidity分布测量。实验数据显示有更多事例处于low rapidity区域



LHC上W asymmetry分布测量。实验数据显示W+相对截面比当前PDF计算结果更大

Global fitting面临的压力

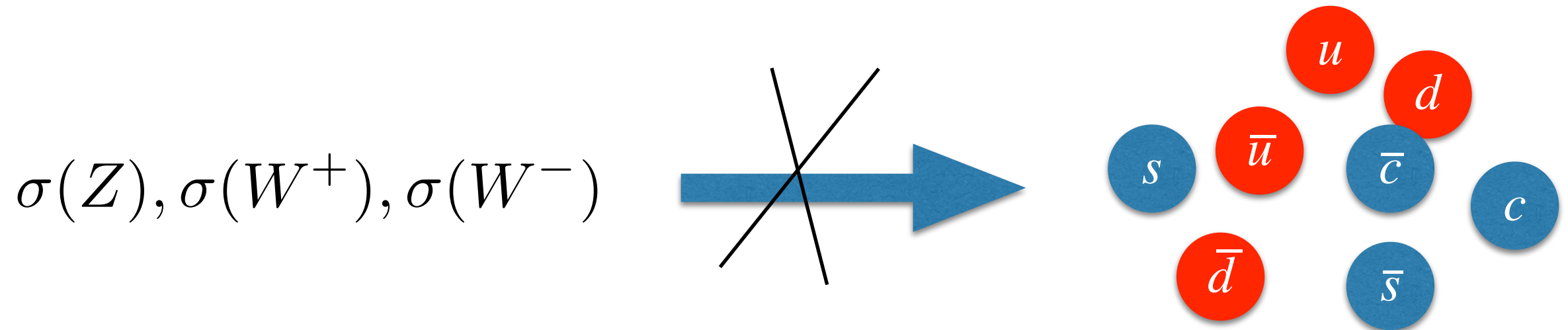
困难二：“一测俱测”

- 要么给出完整的质子结构信息，要么就什么结论都给不出来
- 然而当前有很多重要的研究，其实并不需要给出完整的质子结构信息：
 - flavor asymmetry of $\bar{d}/\bar{u}$ 的测量研究
 - s 夸克分布、 $s - \bar{s}$ 不对称性? Intrinsic c quark?
 - TeV级mass处的新物理寻找
 - ...

从实验出发的一种思路

寻找新的实验观测量

- 当前强子实验上对夸克信息的主要观测量：Drell-Yan过程截面



- 在同样的夸克、同样的 x 区域、同样的反应能标 Q 下，寻找新的高精度实验观测量

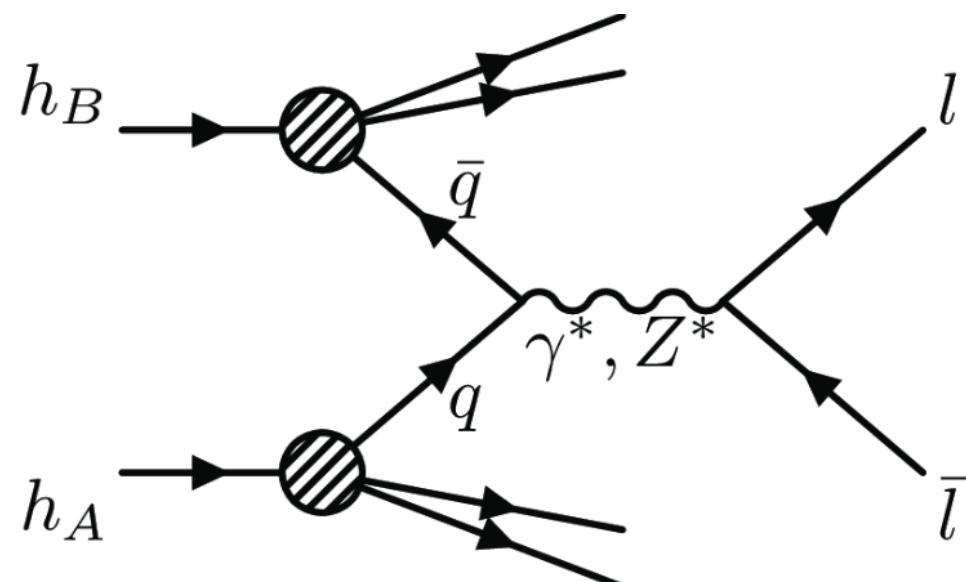
强子实验上的质子结构新测量（一）：

利用Drell-Yan过程空间不对称性 A_{FB} 区分 u 、 d 夸克初态，实现对 u 、 d 夸克信息的分别测量

初态夸克种类的混合

不同种类夸克初态混合，且无法区分

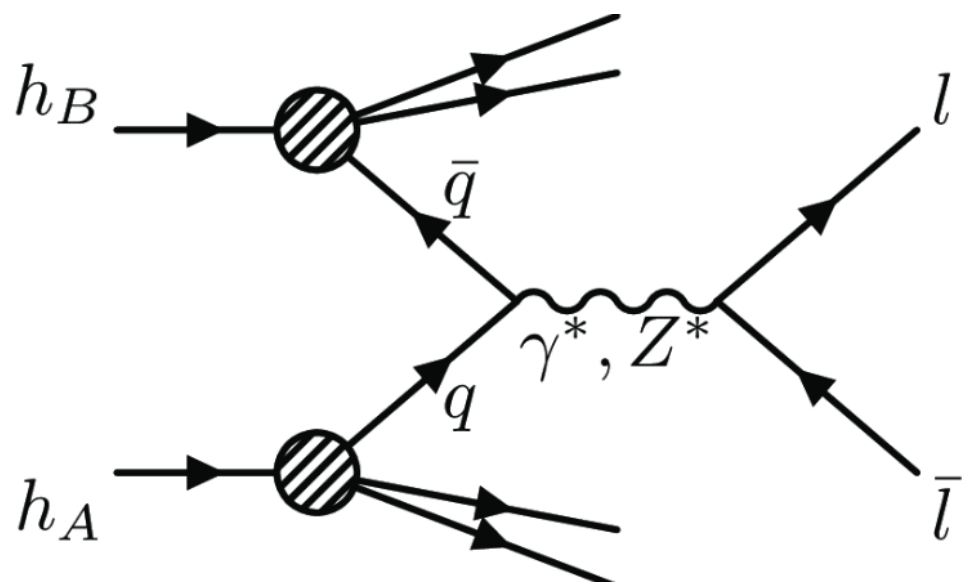
- $u\bar{u} \rightarrow Z, d\bar{d} \rightarrow Z$
- 测量到的总截面是 $u\bar{u} + d\bar{d}$ ，而非独立的 u 、 d 夸克观测



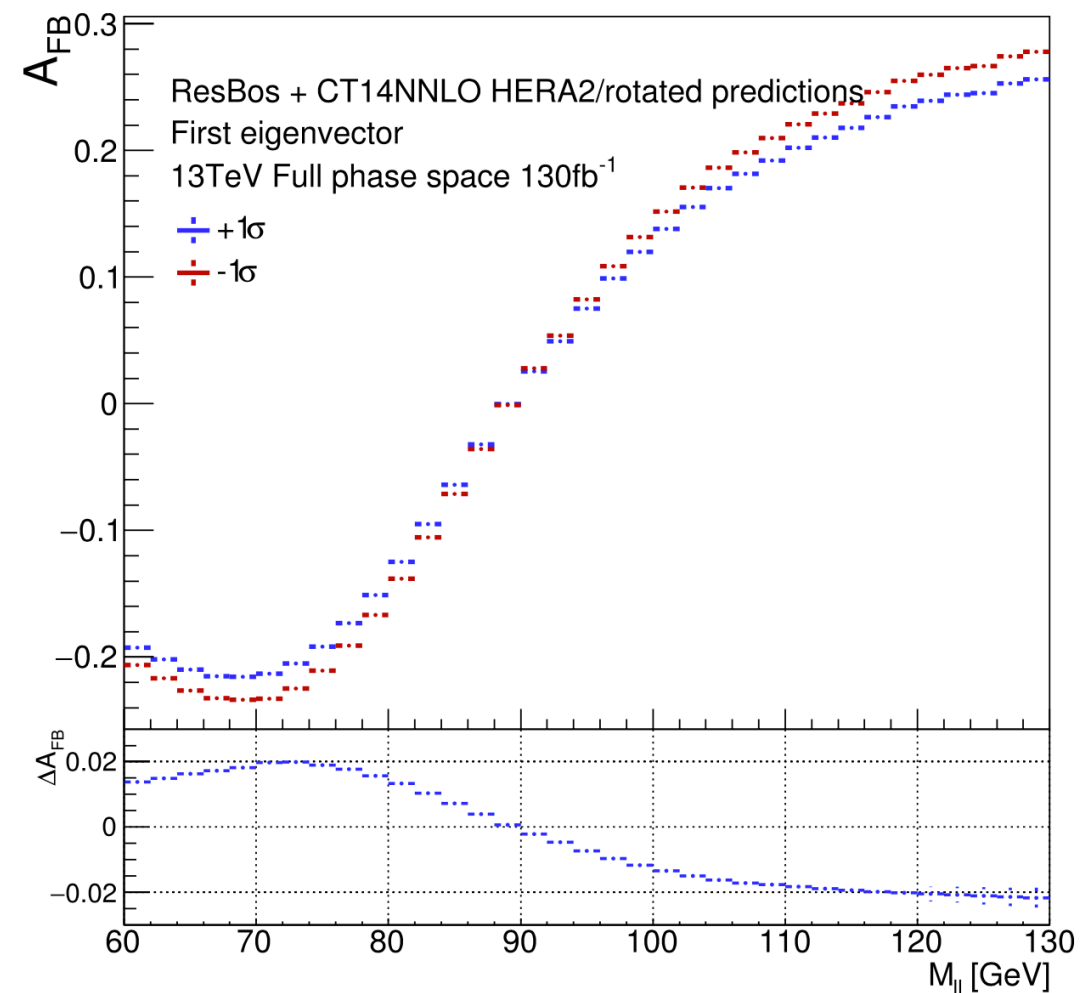
Drell-Yan过程与 A_{FB}

弱作用中的空间不对称性

- Forward: 负电轻子与入射quark夹角为锐角
- Backward: 负电轻子与入射antiquark夹角为锐角



$$A_{FB} = \frac{N_F - N_B}{N_F + N_B}$$

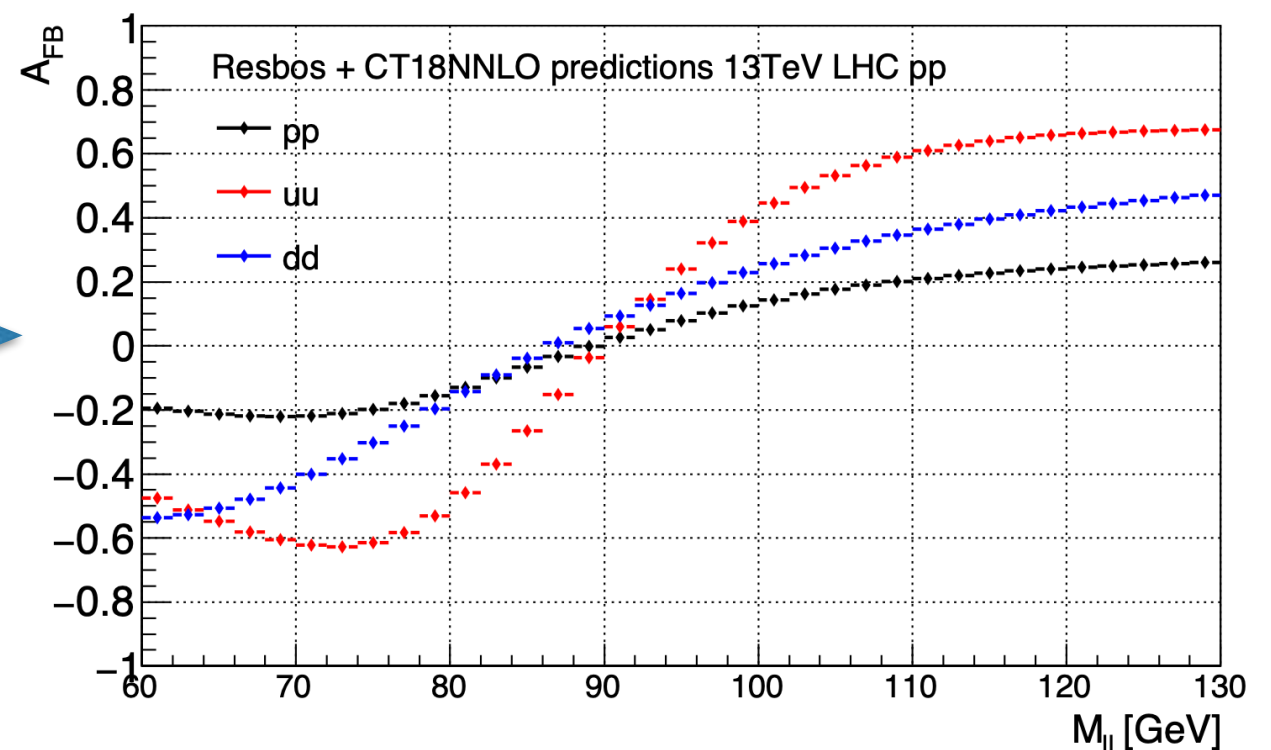
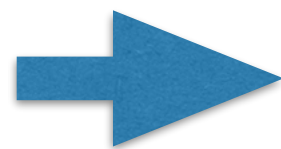
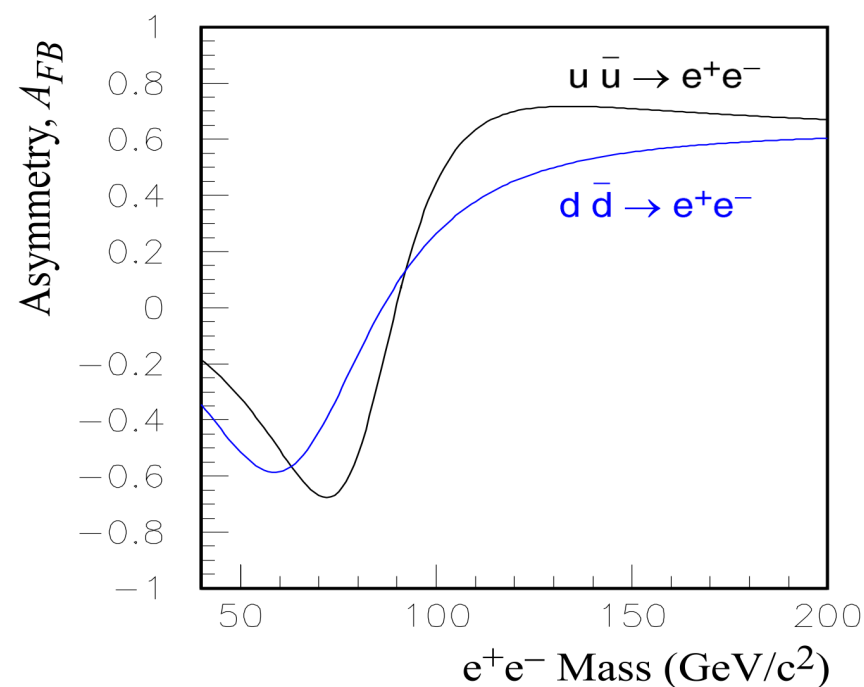


不同PDF给出的 A_{FB} vs M spectrum @
13 TeV LHC pp collision

区分 u 、 d 初态贡献

利用 up 型夸克和 down 型夸克的差异

- Z 与 up 型夸克耦合不同于 down 型夸克耦合，因此 up 型初态 ($u\bar{u}$, $c\bar{c}$) 产生的 A_{FB} 与 down 型初态 ($d\bar{d}$, $s\bar{s}$, $b\bar{b}$) 产生的 A_{FB} 也不同，如图
- 实验观测到的 A_{FB} 是 up 和 down 型两种 A_{FB} 的混合平均。混合的相对权重就分别代表了 up 型夸克和 down 型夸克的质子结构信息



A_{FB} 的参数化计算

成功实现强弱解耦与结构参数的定义

- 定义了代表up和down型夸克的结构参数 P_0^u 、 P_0^d
- 结构参数可以直接写成parton density形式

Phys. Rev. D 106, 033001 (2022)

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

Chin. Phys. C 45, 053001 (2021)

$$\begin{aligned} A_{FB}(M) &= \frac{\sum_{q=u,c}[1-2D_q(M)]\alpha_q(M)}{\alpha_{\text{total}}(M)} \cdot A_{FB}^u(M; \sin^2 \theta_{\text{eff}}^\ell) \\ &+ \frac{\sum_{q=d,s,b}[1-2D_q(M)]\alpha_q(M)}{\alpha_{\text{total}}(M)} \cdot A_{FB}^d(M; \sin^2 \theta_{\text{eff}}^\ell) \\ &\equiv [\Delta_u(M) + P_0^u] \cdot A_{FB}^u(M; \sin^2 \theta_{\text{eff}}^\ell) \\ &+ [\Delta_d(M) + P_0^d] \cdot A_{FB}^d(M; \sin^2 \theta_{\text{eff}}^\ell), \end{aligned} \quad (1)$$

在LHC pp 对撞情况下:

$$P_0^u \sim u(x_L)\bar{u}(x_S) - \bar{u}(x_L)u(x_S)$$

$$P_0^d \sim d(x_L)\bar{d}(x_S) - \bar{d}(x_L)d(x_S)$$

在Tevatron $p\bar{p}$ 对撞情况下:

$$P_0^u \sim u^2(x_L) - \bar{u}^2(x_L)$$

$$P_0^d \sim d^2(x_L) - \bar{d}^2(x_L)$$

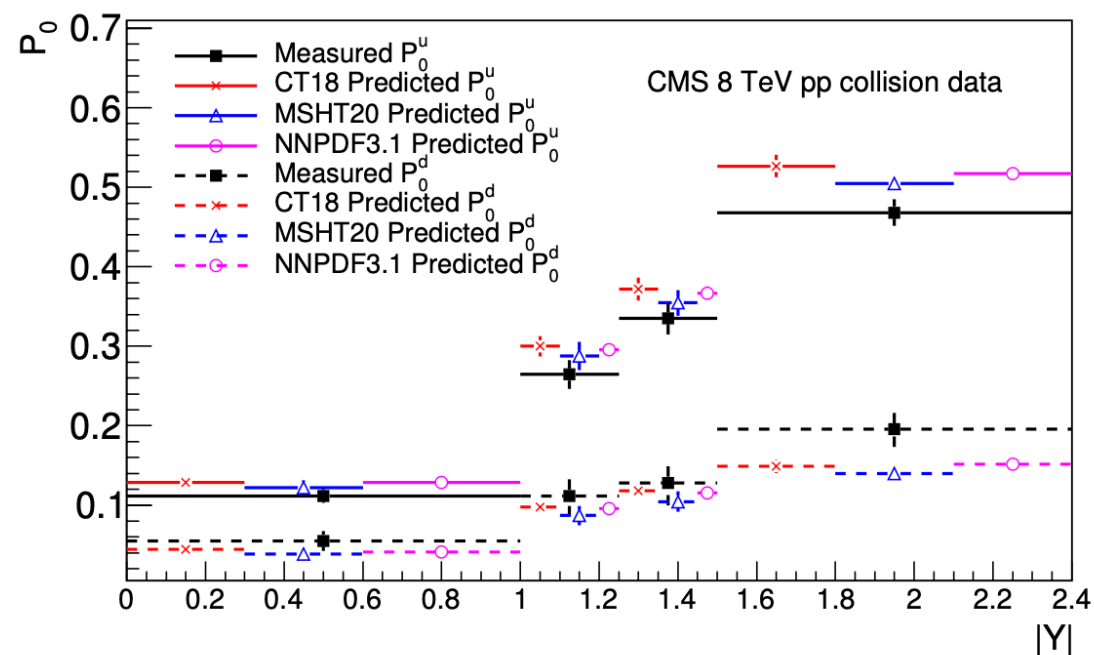
结构参数的实验测量

LHC CMS 8 TeV数据+Tevatron D0 1.96 TeV数据

- 两个实验同时显示 P_0^u 的测量值比PDF计算偏低, P_0^d 偏高
- 意味着强子实验表明 d 夸克可能有更高含量, 而 u 相对更少

PRD 107, 054008 (2023)

- PDF global analysis表明, 与NuSea、NuTeV、 $F_2@DIS$ 等实验结果存在冲突



Measured proton structure parameters from the CMS 8 TeV A_{FB} data, compared to PDF predictions

	P_0^u	P_0^d
D0 data	$0.6395 \pm 0.0356(\text{exp.}) \pm 0.0059(\Delta)$	$0.2706 \pm 0.0662(\text{exp.}) \pm 0.0061(\Delta)$
CT18	0.6994 ± 0.0089	0.1733 ± 0.0062
MSHT20	0.6887 ± 0.0066	0.1658 ± 0.0075
NNPDF3.1	0.6919 ± 0.0054	0.1703 ± 0.0055

Measured proton structure parameters from the D0 1.96 TeV A_{FB} data, compared to PDF predictions

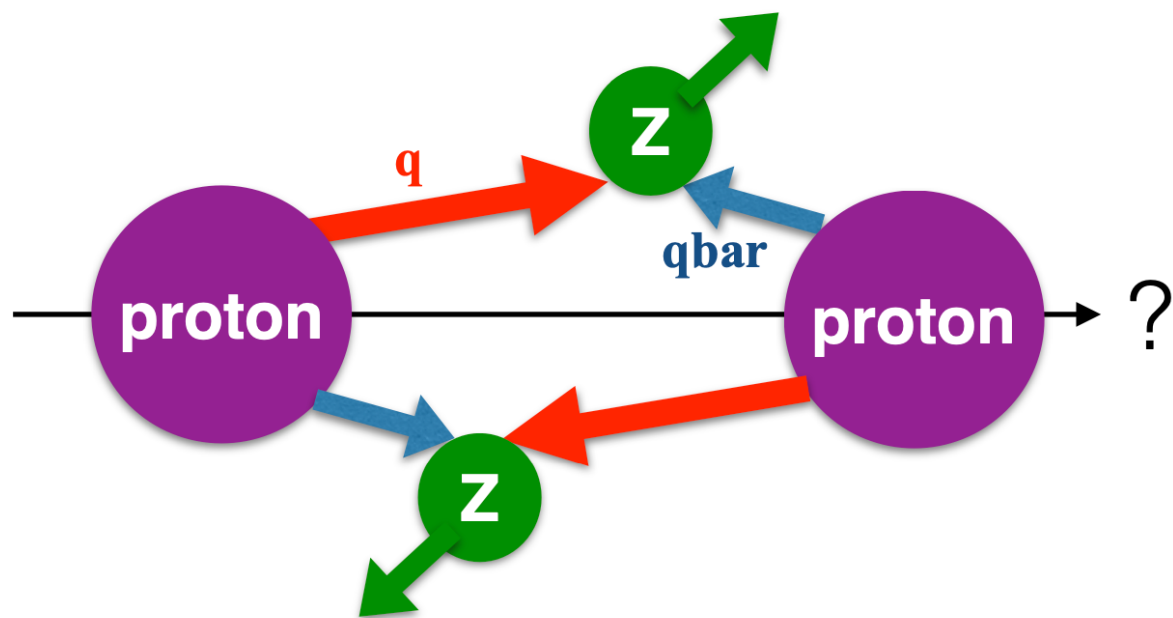
LHC上的质子结构新测量（二）：

Diboson事例中的boost asymmetry

大、小 x 区间的信息混合

初态夸克/反夸克能量大小关系未知

- 对于 $q_i\bar{q}_j$ 初态，夸克/反夸克都可以具有更大能量，是无法区分的
- 观测到的截面是 $q_i(x_S)\bar{q}_j(x_L)$ 和 $q_i(x_L)\bar{q}_j(x_S)$ 的混合



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

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

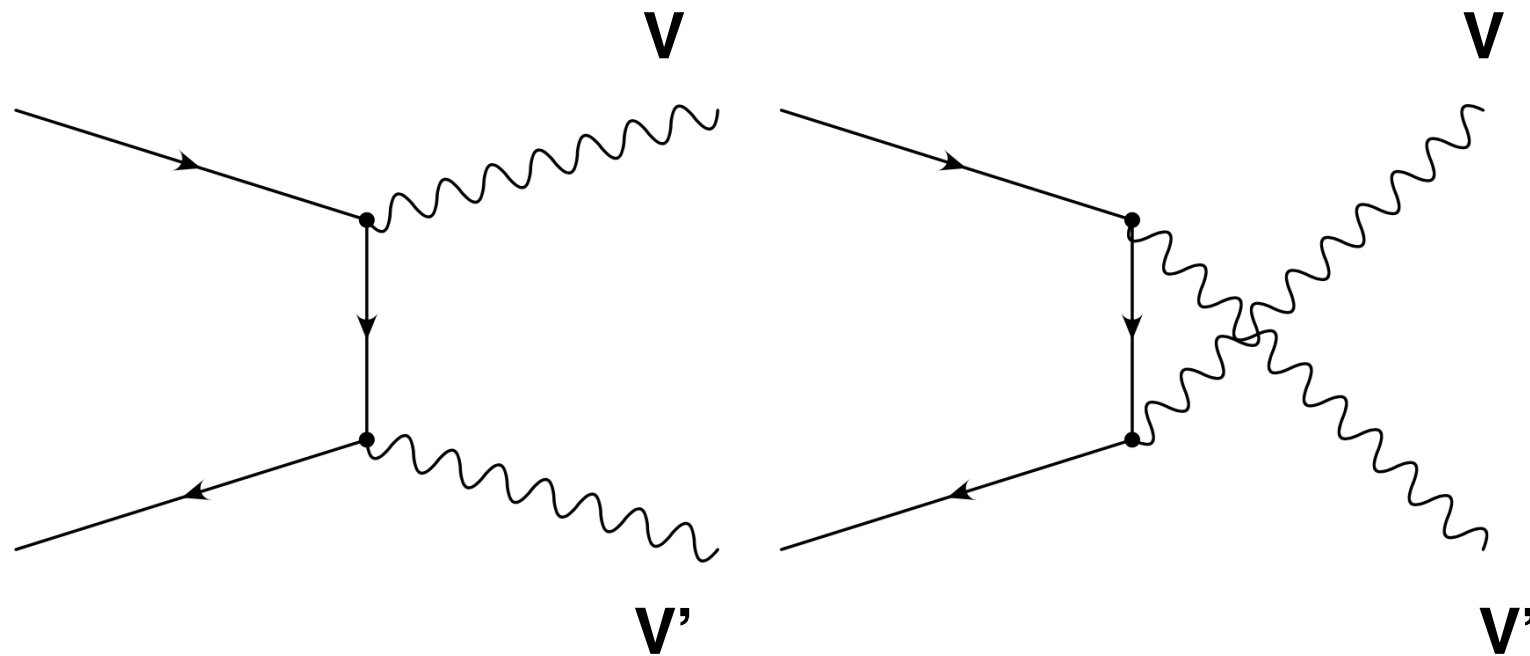
$$x_S \sim \mathcal{O}(10^{-4}) \text{ to } \mathcal{O}(10^{-3})$$

diboson过程和Boost asymmetry

$W\gamma$ 、 WZ 、 WW 过程

Phys. Rev. D 106, L051301 (2022)

- 该类过程由t、u道费曼图主导
- 两个玻色子实验上可区分
- 玻色子分别与两个夸克耦合，因此各自体现了其中一个夸克的信息
- 因此，可以通过比较两个玻色子的运动学信息，确定初态夸克/反夸克的能量大小



一个例子： $W\gamma$ 事例中的boost asymmetry

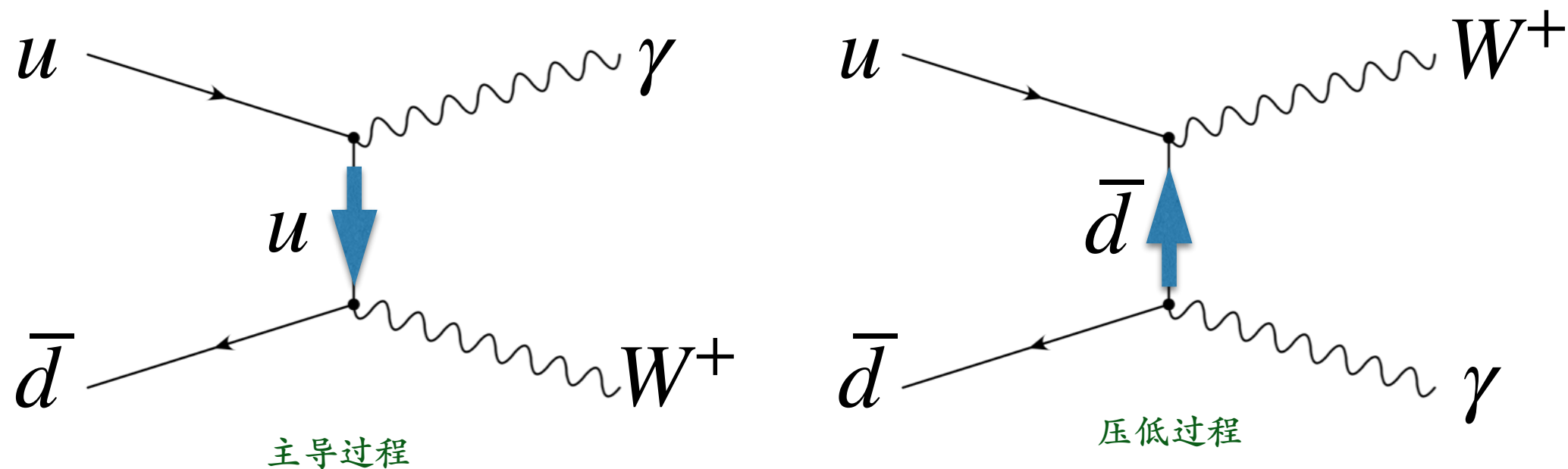
Phys. Rev. D 106, L051301 (2022)

对于 $W^+\gamma$ 事例：

- W^+ 的能量 (boost) 由 $\bar{d}$ 主导，而 γ 由 u 主导
 - 注意：当然也存在 W^+ 与 u 耦合、 γ 与 $\bar{d}$ 耦合的情况，但是被 d 夸克电荷压低了，因此不会出现boost asymmetry抵消的情况
- 定义 $W^+\gamma$ 事例中的boost asymmetry:

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

- $A_{\text{boost}}^{W^+\gamma}$ 直接代表了 $u(x_L)\bar{d}(x_S)$ 和 $u(x_S)\bar{d}(x_L)$ 两种初态的相对比例



一个例子： $W\gamma$ 事例中的boost asymmetry

Phys. Rev. D 106, L051301 (2022)

对于 $W^-\gamma$ 事例：

- W^- 的能量 (boost) 由 d 主导，而 γ 由 $\bar{u}$ 主导
- 定义 $W^-\gamma$ 事例中的boost asymmetry:

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

- $A_{\text{boost}}^{W^-\gamma}$ 直接代表了 $\bar{u}(x_L)d(x_S)$ 和 $\bar{u}(x_S)d(x_L)$ 两种初态的相对比例

	$W^+\gamma$ events	$W^-\gamma$ events
$A_{\text{boost}}^{W\gamma}$ prediction in CT18	0.457 $\pm 0.006(\text{PDF})$	-0.119 $\pm 0.008(\text{PDF})$
$A_{\text{boost}}^{W\gamma}$ prediction in MSHT20	0.446 $\pm 0.004(\text{PDF})$	-0.114 $\pm 0.005(\text{PDF})$
$A_{\text{boost}}^{W\gamma}$ prediction in NNPDF4.0	0.444 $\pm 0.004(\text{PDF})$	-0.111 $\pm 0.004(\text{PDF})$

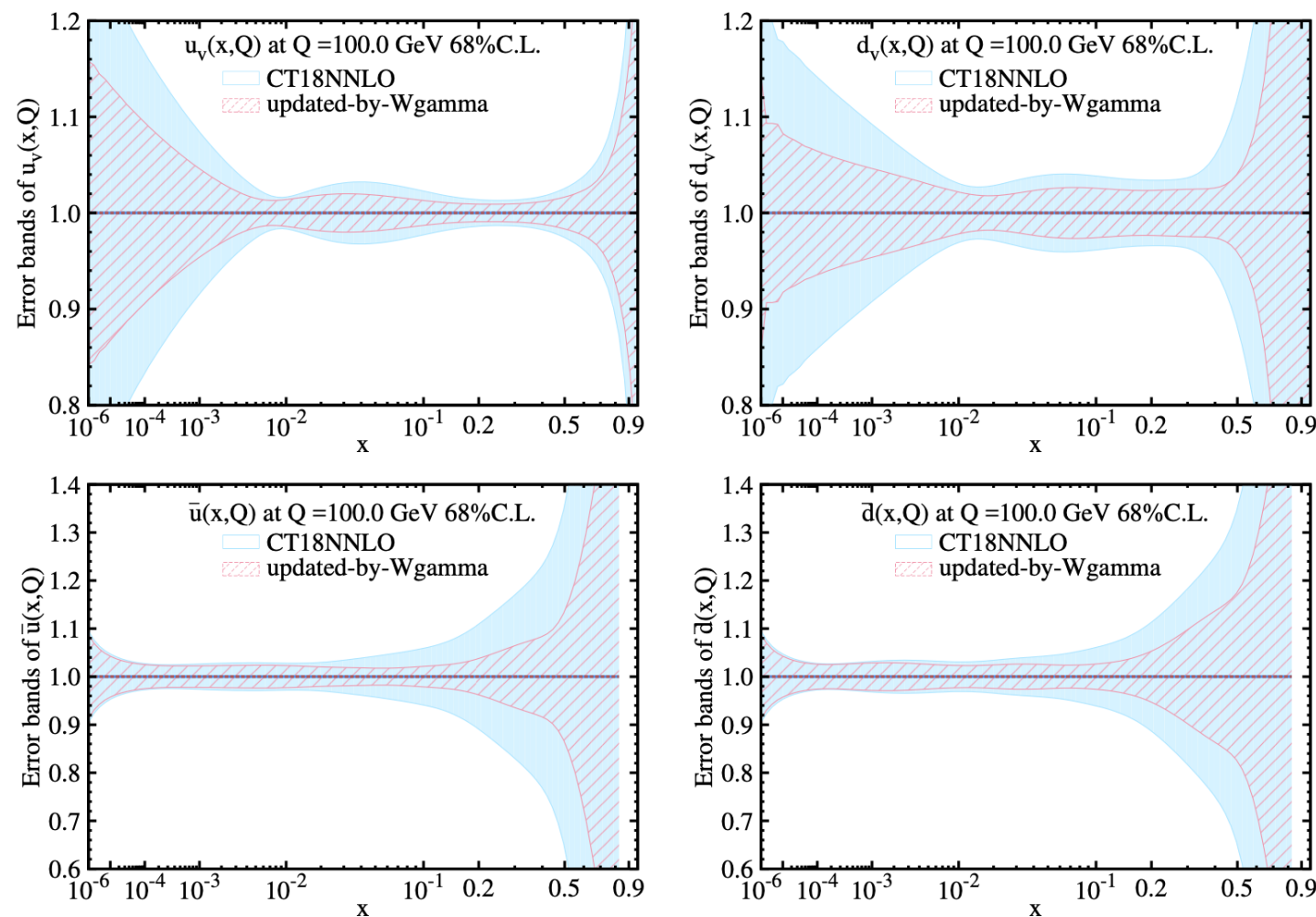
$W\gamma$ 事例中的boost asymmetry

Impact study

Phys. Rev. D 106, L051301 (2022)

将 $A_{boost}^{W\gamma}$ 事例引入PDF global fitting (假想实验)

- 以CT18NNLO PDF global fitting为基础, 将 $A_{boost}^{W^+\gamma}$ 和 $A_{boost}^{W^-\gamma}$ (约 1 ab^{-1} @LHC 13 TeV) 引入重新进行global fit
- 明显对 u 、 d 、 $\bar{u}$ 、 $\bar{d}$ 有极高sensitivity



Summary

强子实验上的质子结构新观测量

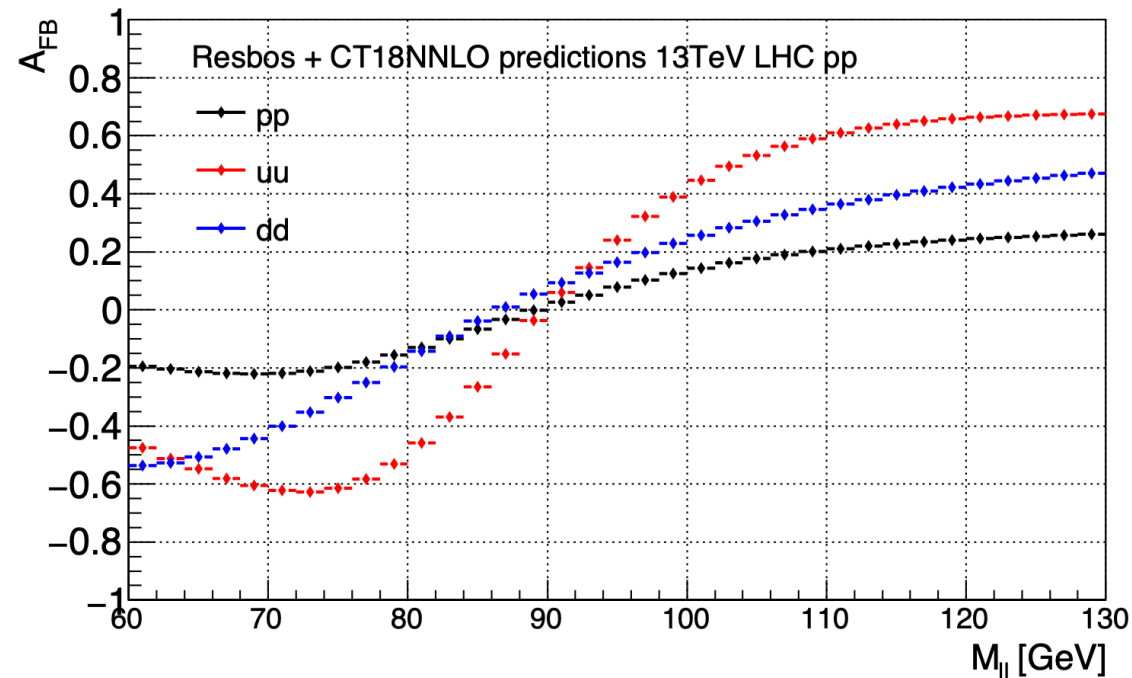
- Drell-Yan过程 A_{FB} 中的结构参数：利用弱作用对称性破缺区分 u 、 d 夸克信息
 - Phys. Rev. D 107, 054008 (2023)
 - Phys. Rev. D 106, 033001 (2022)
 - Eur. Phys. J. C 82, 368 (2022)
 - Chin. Phys. C 45, 053001 (2021)
- diboson过程中的 $A_{boost}^{VV'}$ ：利用玻色子相对运动学差异区分 x_L 、 x_S
 - Phys. Rev. D 106, L051301 (2022)

Backup

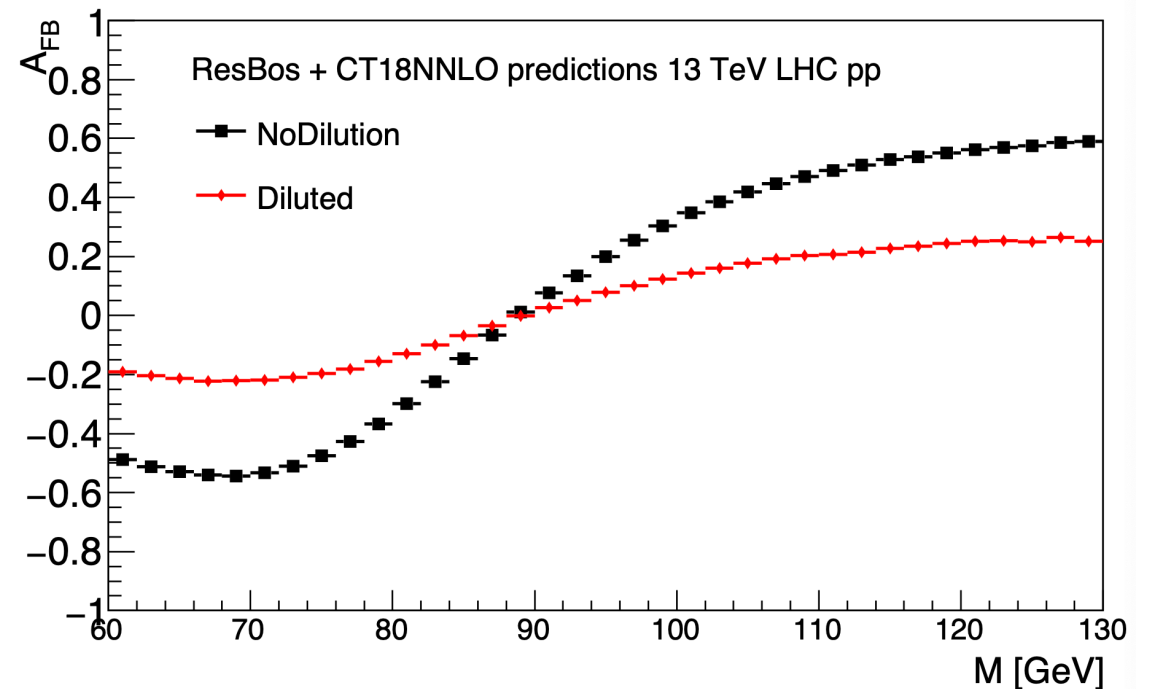
Separating u and d contributions

Weights in the u - d A_{FB} average

- Total luminosity of the $u\bar{u}$ and $d\bar{d}$ sub-processes
- Dilution of the $u\bar{u}$ and $d\bar{d}$ sub-processes



The $u\bar{u}$, $d\bar{d}$ and their combined A_{FB} . Such combination is determined by the cross sections of the $u\bar{u}$ and $d\bar{d}$ sub-processes



The original A_{FB} and the observed diluted A_{FB} . The dilution reduces the asymmetry significantly at the LHC.

研究质子结构的最初想法

质子结构 (PDF) 是基本常数弱混合角 $\sin^2 \theta_W$ 的最大误差来源

- 在LHC上, PDF一项误差就达到了Tevatron、LEP、SLC测量总误差的水平

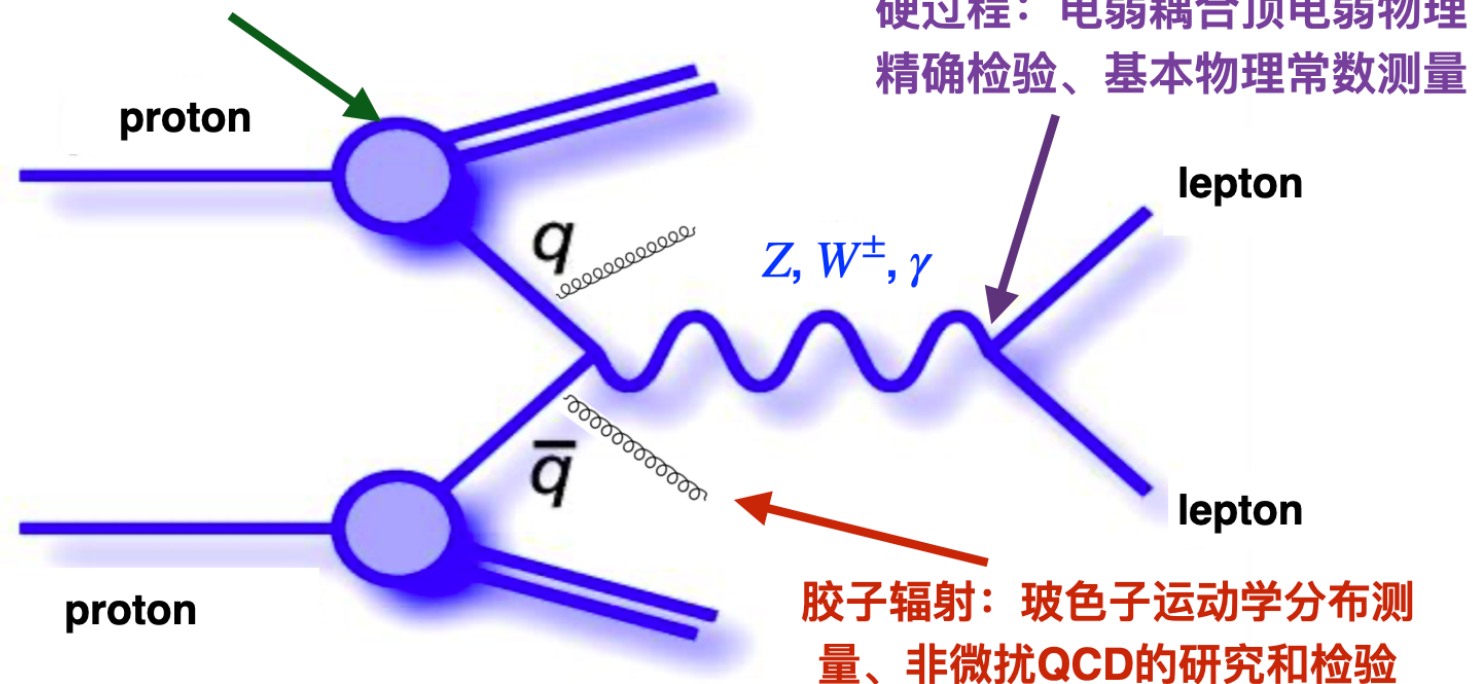
	Uncertainty on $\sin^2 \theta_W$
Tevatron	0.00033 (total unc.)
LEP/SLC	0.00029/0.00026 (total unc.)
LHC	~ 0.00030 (PDF)

LHC上的电弱物理过程

EW、QCD和质子结构同时主导

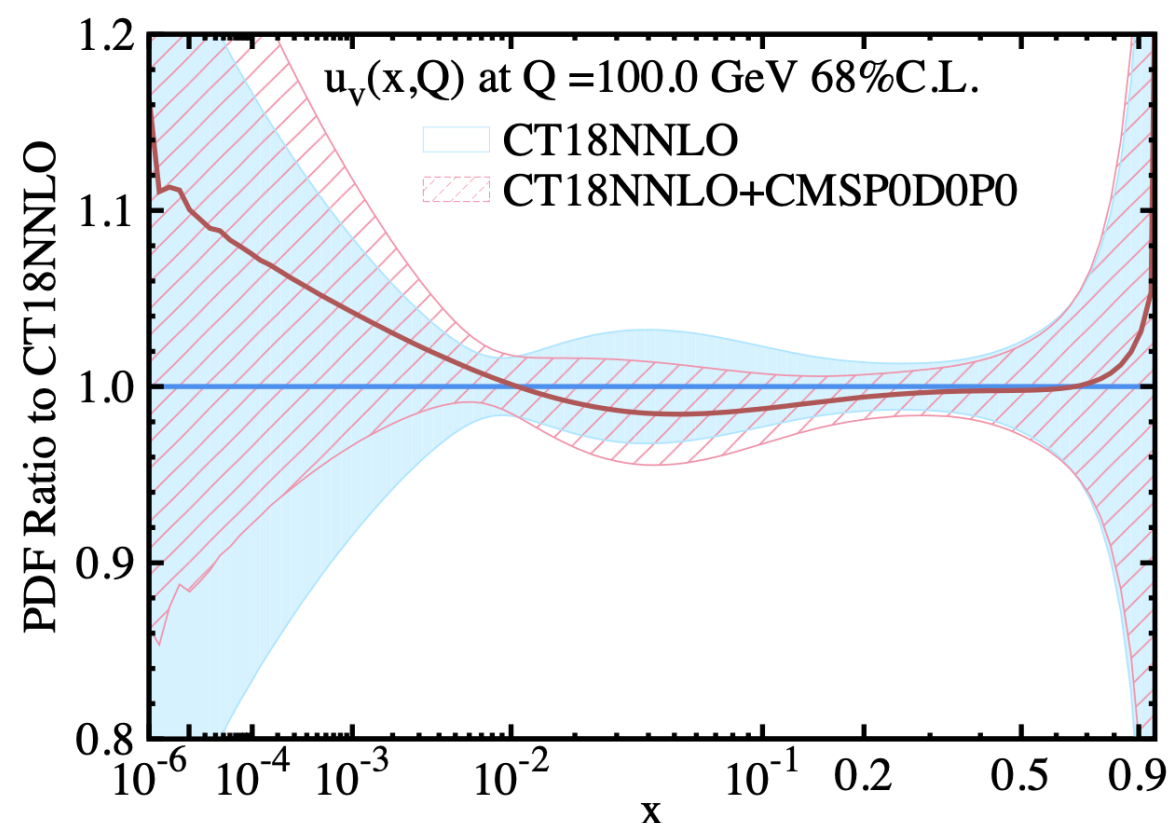
- EW: 硬过程, 基本常数测量 $\sin^2 \theta_W$ 、 M_W
- QCD: 非微扰计算初态胶子辐射
- 质子结构: 初态夸克分布
- 同时具有高灵敏度, 也相互关联。互为最大系统误差来源
- 需要将EW、QCD和质子结构结合起来研究

初态信息: 质子结构研究



LHC CMS 8 TeV data + Tevatron D0 1.96 TeV data

- 后续研究表明，该测量结果与NuSea (p-p and p-D target experiments), NuTeV (neutrino-scattering) 和DIS (lepton scattering)实验有系统偏差
- LHC数据首次可以在夸克分布上给出明确的结论，而非只能进行混合物理截面观测



例：将该测量结果引入CT18NNLO为基础的PDF global fitting后， u 夸克分布在 $0.01 < x < 0.2$ 区间内有明显压低