



利用LHC上电弱物理过程测量质子结构

杨思奇

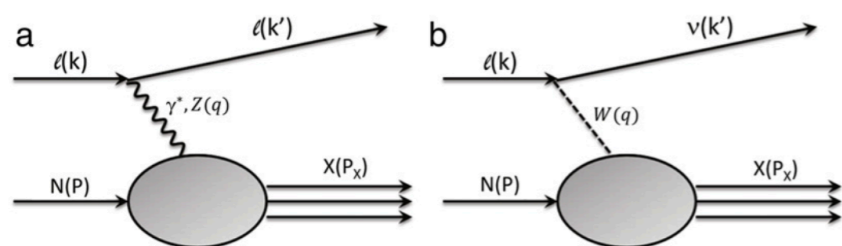
中国科学技术大学

2023. 2

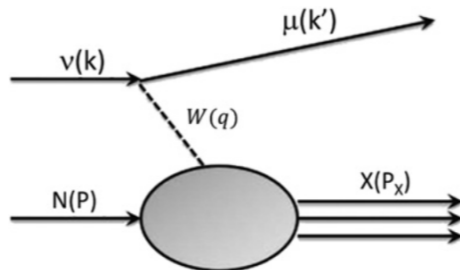
核子结构测量与研究

较好的价夸克测量 @ $x > 0.01$

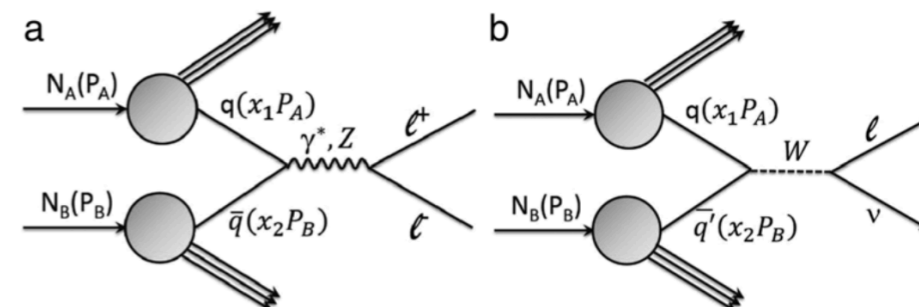
- 各种深度非弹性散射实验、Drell-Yan过程的打靶实验等
- 在分布峰值区域，价夸克 (u 、 d) 取得了较好的观测结果 (1%~10%)



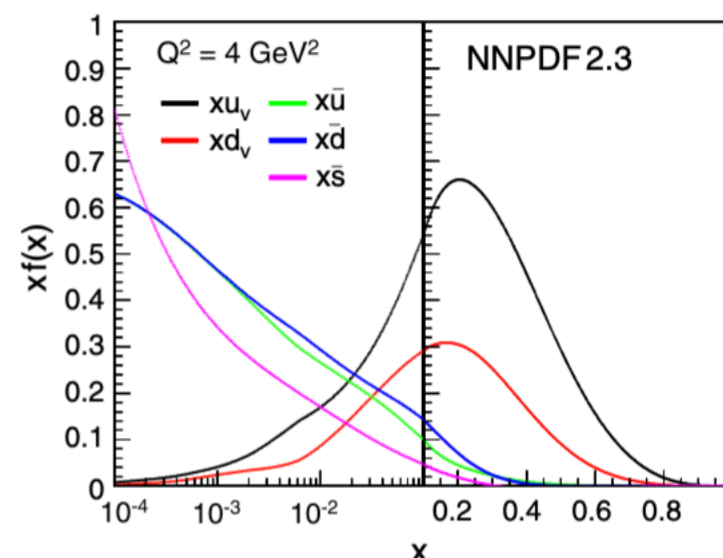
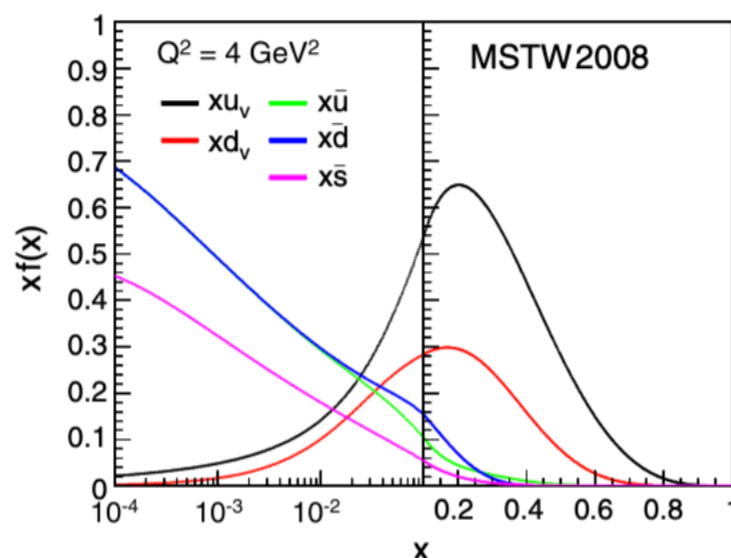
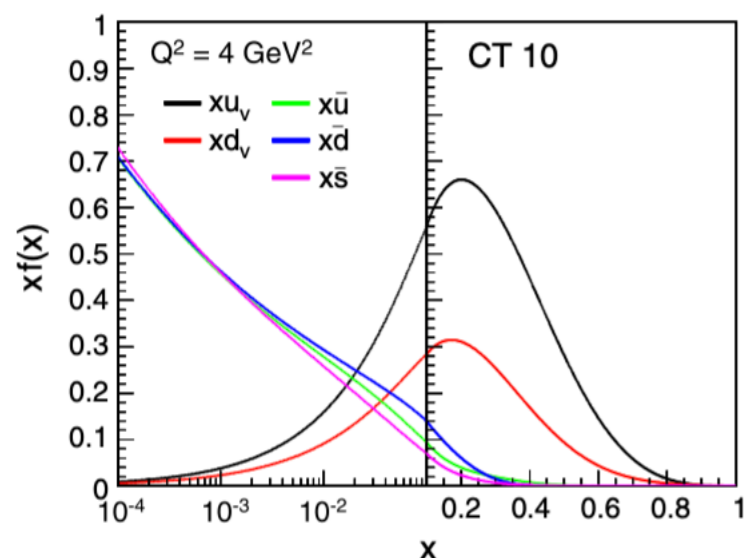
lepton-nucleon DIS



neutrino-nucleon DIS



Drell-Yan process



unpolarized parton distributions $xf(x, Q^2)$ given by CT, MSTW and NNPDF predictions, where LHC data has not been widely used yet.

核子结构测量与研究

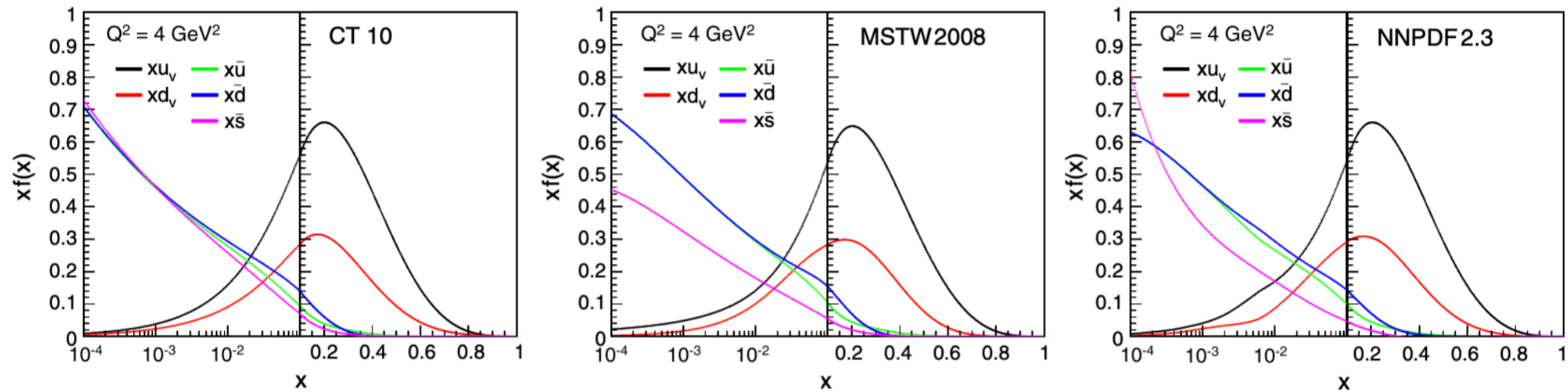
探索海夸克、探索更宽广的 x 范围

- 价夸克观测只是质子测量的第一步
- 海夸克分布
- 味不对称性 \bar{d}/\bar{u} ?
- s 夸克分布、 $s - \bar{s}$ 不对称性? Intrinsic c quark?
- $x \rightarrow 0$ 时的部分子分布演化?

核子结构测量与研究

探索海夸克、探索更宽广的 x 范围

- 与价夸克相比,海夸克观测目前还很少,整体较为空白

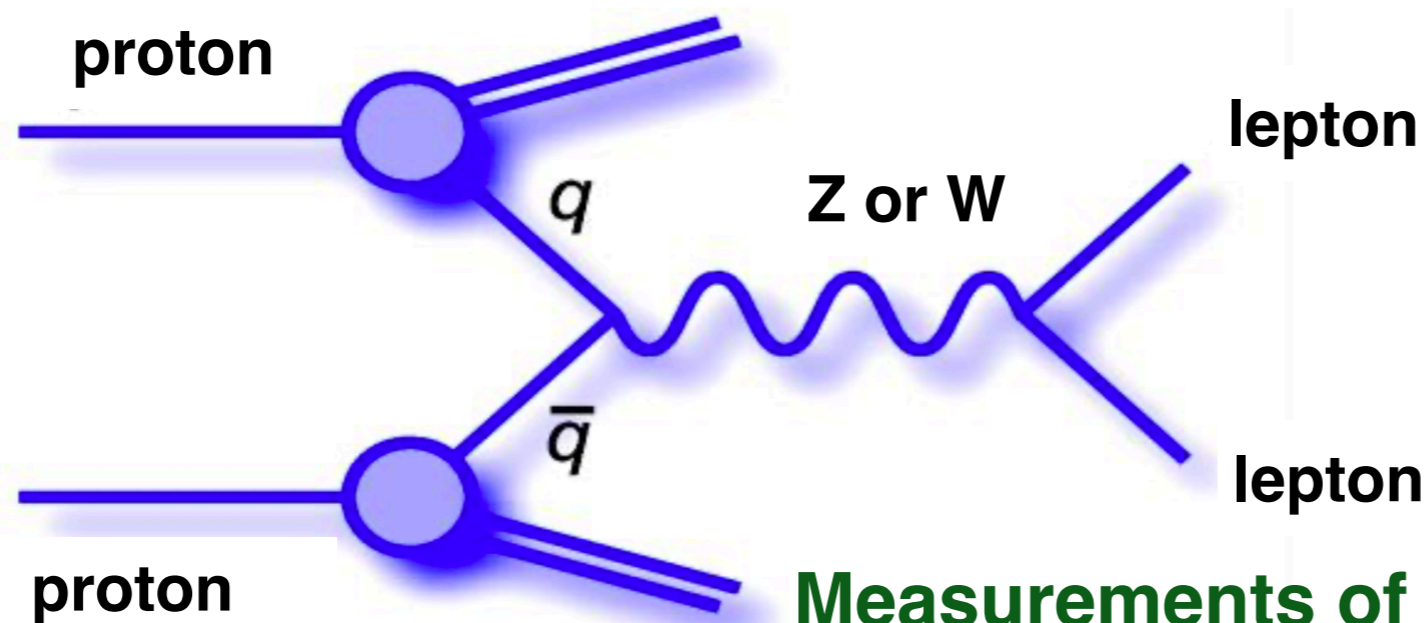


不同PDF在 u_v 和 d_v 峰处给出的结果是高度一致的,是因为有足够多的实验测量。对于各类海夸克,以及小 x 区域的分布,实验输入很少。不同PDF给出的结论可以有很大不同(注意:这还是各大PDF约定使用相同的QCD计算框架的情况)

利用LHC数据测量质子结构

LHC上的Drell-Yan过程截面测量

- 高灵敏度、大统计量，覆盖宽广的 x 范围 $\mathcal{O}(10^{-4}) \sim \mathcal{O}(10^{-2})$
- 从根本上保障了海夸克、小 x 区间灵敏度
 - $q\bar{q}$ 初态天然带有一个海夸克
 - Drell-Yan过程 s 和 c 贡献 $> 20\%$

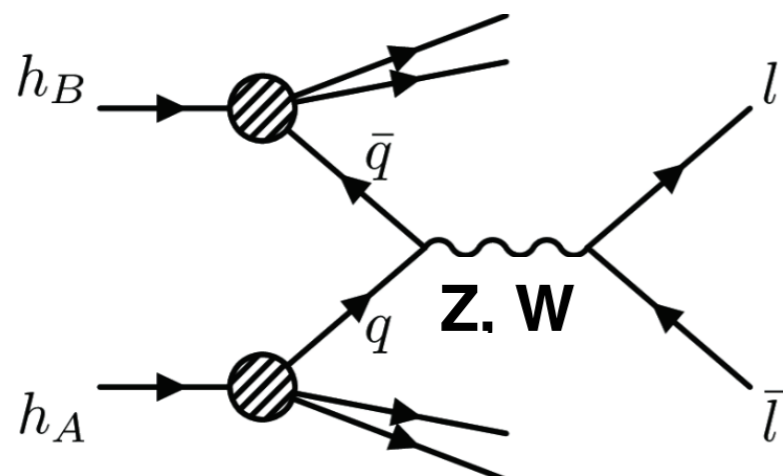


Measurements of the Drell-Yan xsections at the LHC have been introduced in CT18, NNPDF4 and MSHT20

LHC数据在质结构研究中的现状

多种夸克信息的混合结果

- 主导的夸克种类多 $u, d, \bar{u}, \bar{d}, s, c \dots$
- 覆盖的 x 范围广，大小 x 区域需要作为独立自由度考虑



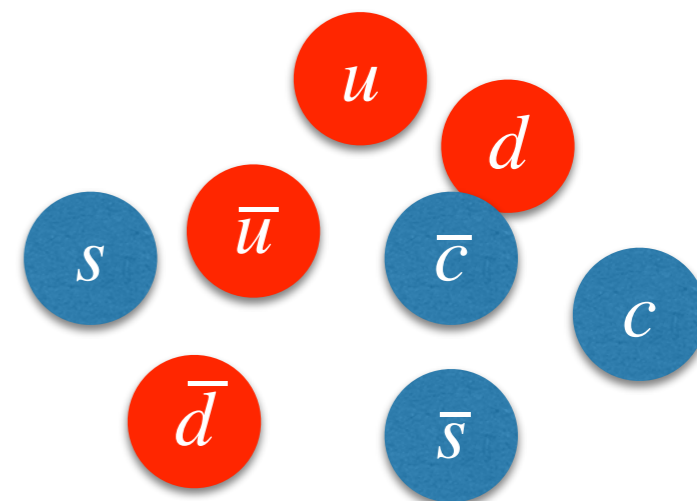
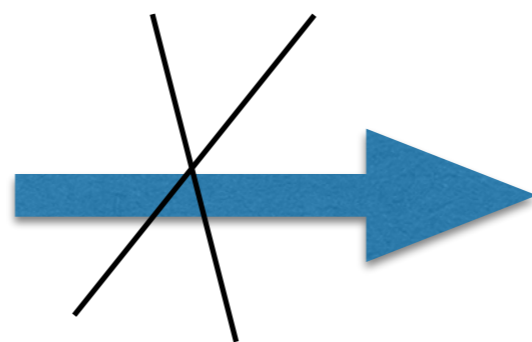
$$x_{L,S} = \frac{\sqrt{Q_T^2 + M^2}}{\sqrt{s}} \cdot e^{\pm Y}$$

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

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

- LHC数据的观测量太少，不能独立给出质子结构的结论

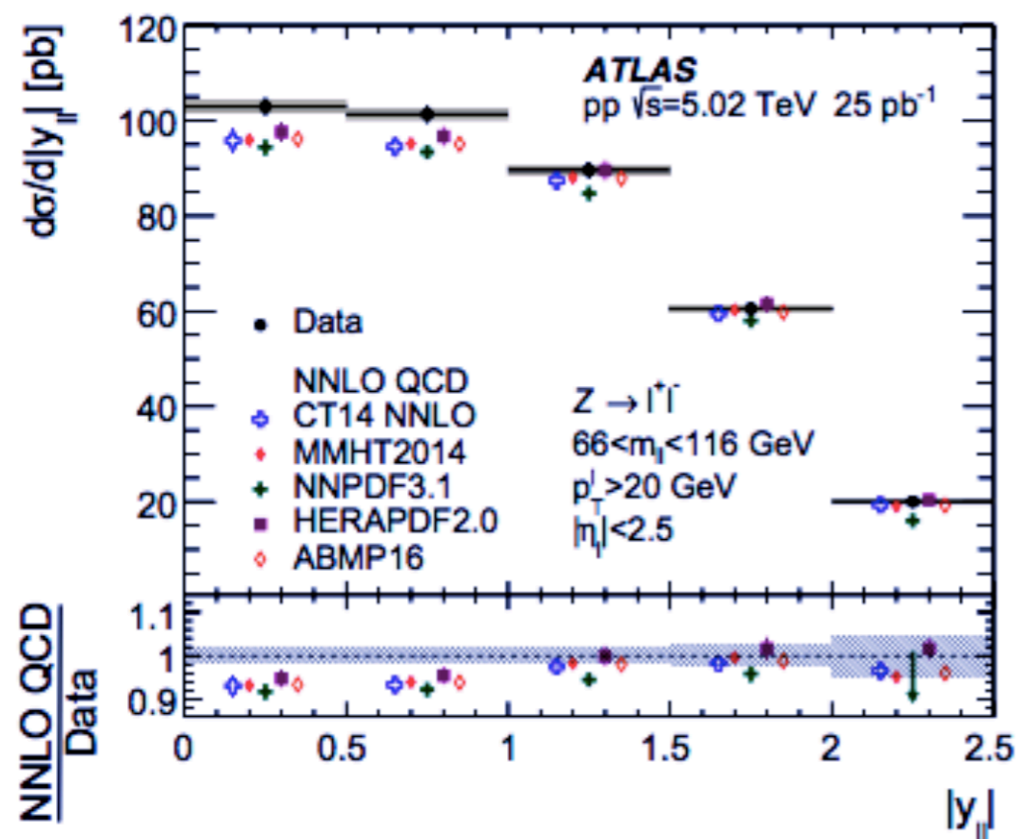
$$\sigma(Z), \sigma(W^+), \sigma(W^-)$$



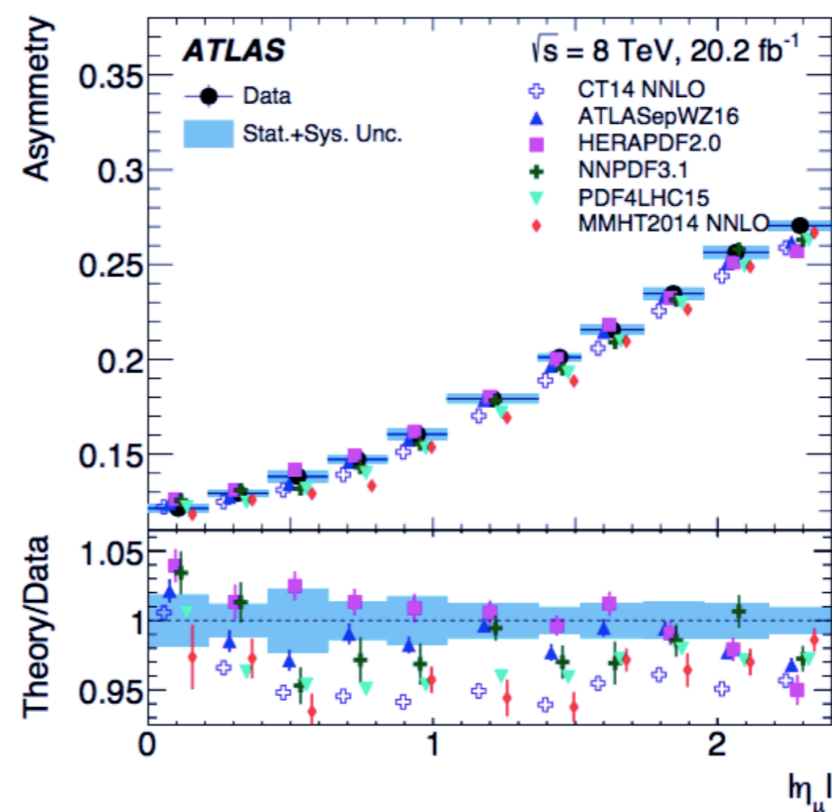
LHC数据在质结构研究中的现状

引入PDF global fitting

- LHC上缺少的实验观测不能靠其他实验代替，依然缺少实验输入
- LHC数据与DIS、Fixed target实验结果并不一致，挑战global fitting基本前提



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

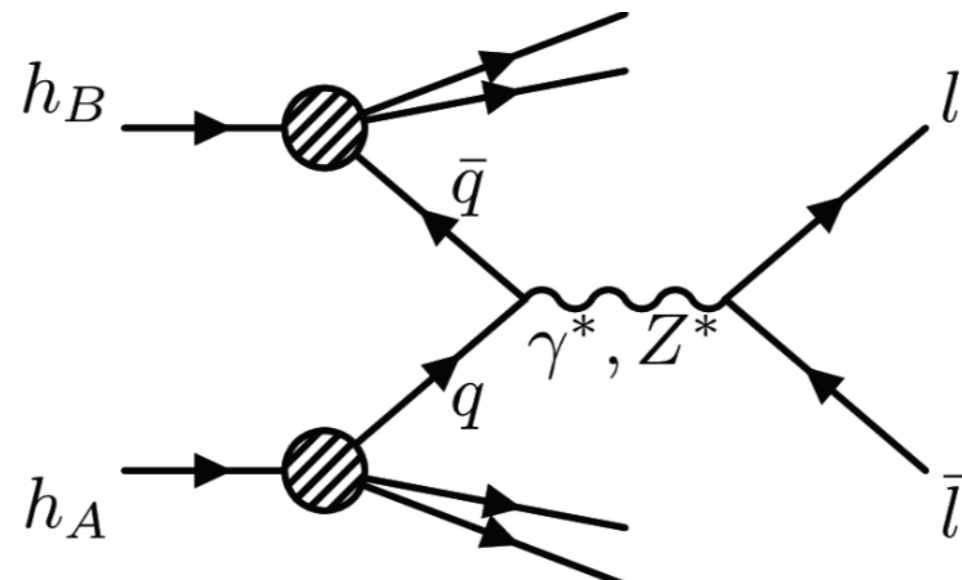
LHC上的质子结构新测量（一）：

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

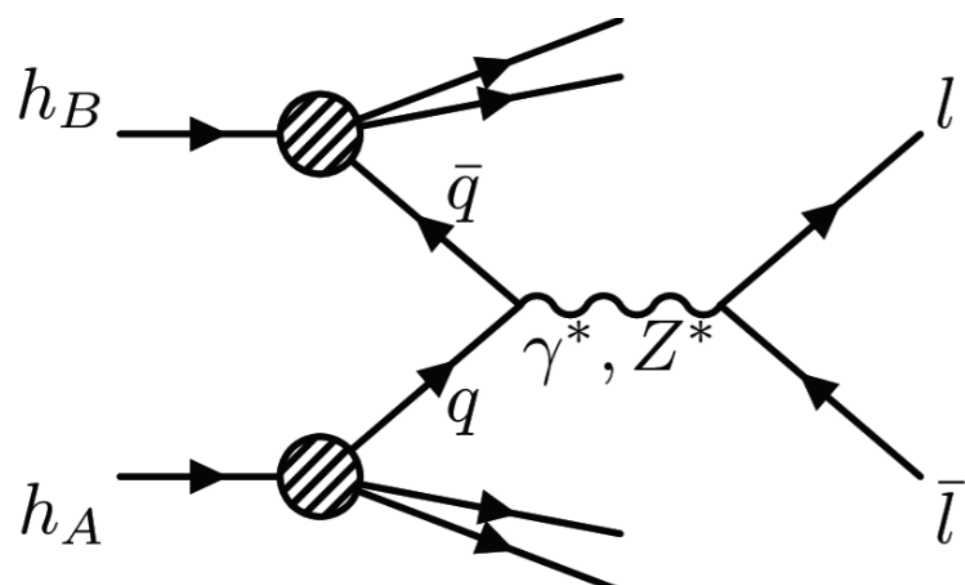
- $u\bar{u} \rightarrow Z, d\bar{d} \rightarrow Z$
- 测量到的总截面是 $u\bar{u} + d\bar{d}$ ，而非独立的 u 、 d 夸克观测



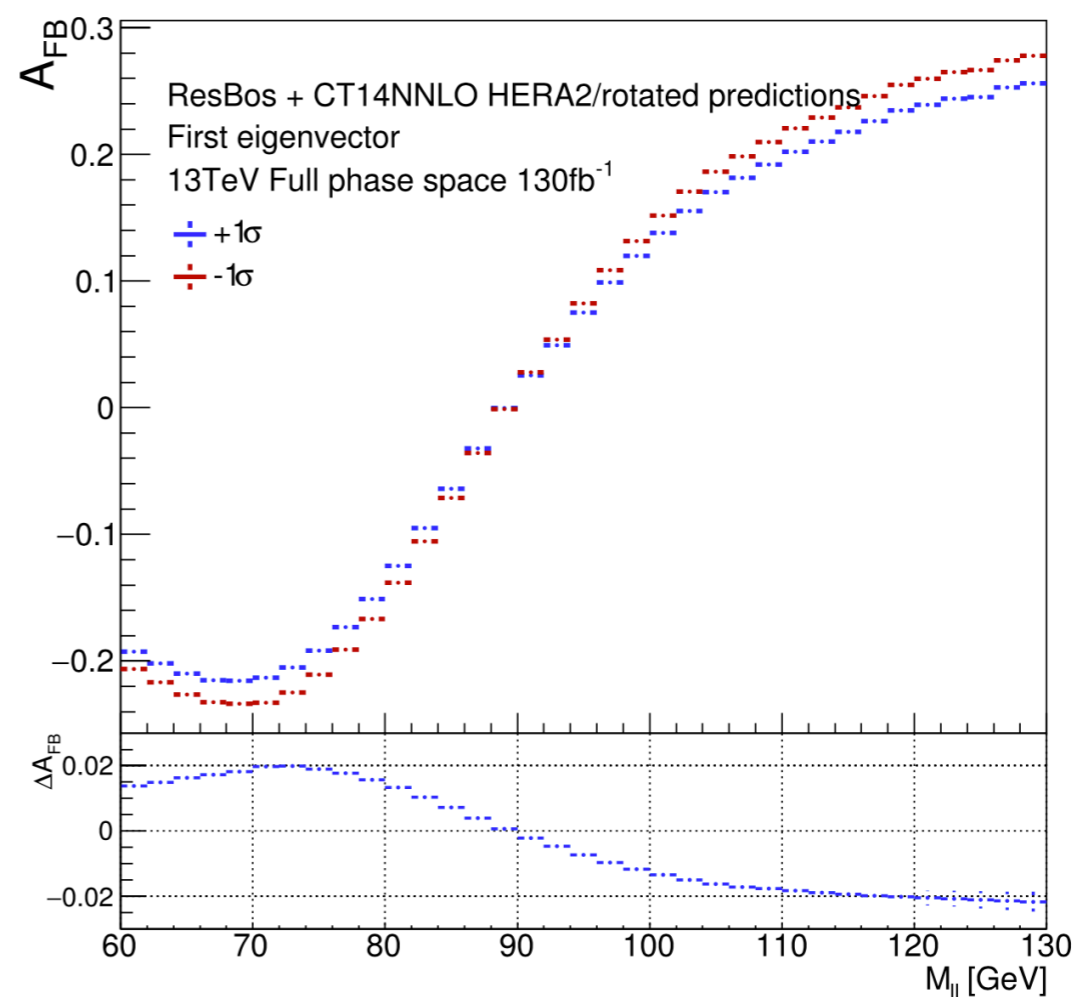
Drell-Yan过程与 A_{FB}

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



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

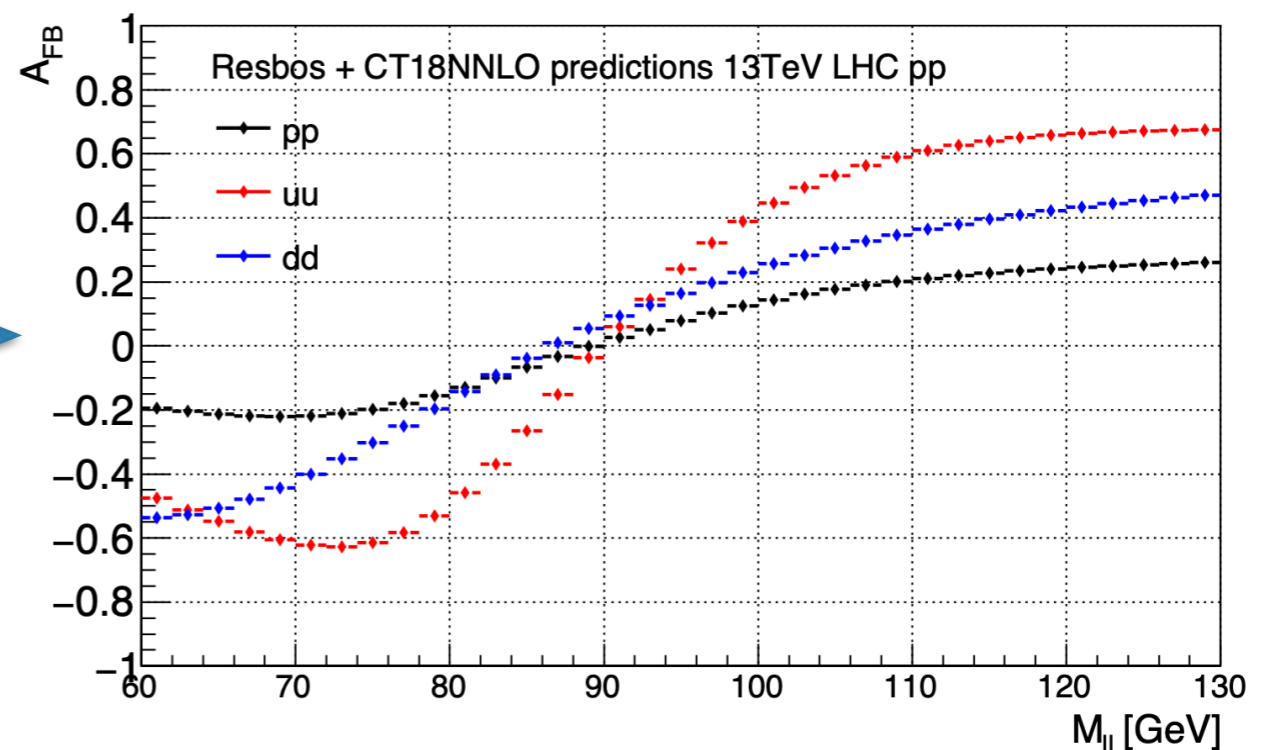
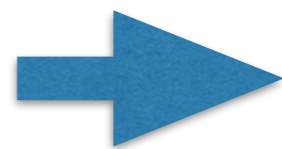
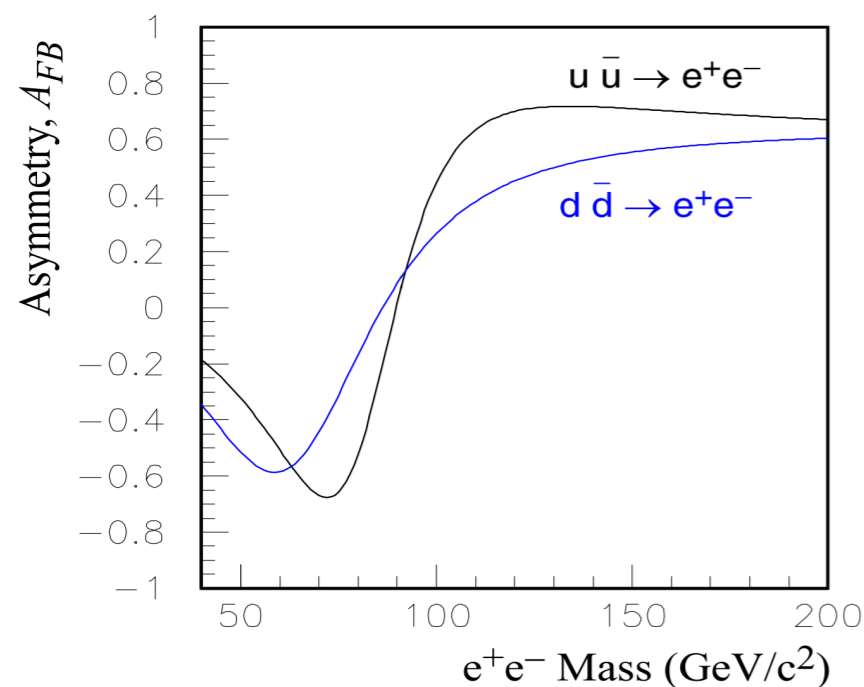


不同PDF给出的 A_{FB} vs M spectrum @
13 TeV LHC pp collision

区分 u 、 d 初态贡献

利用 up 型夸克和 down 型夸克的差异

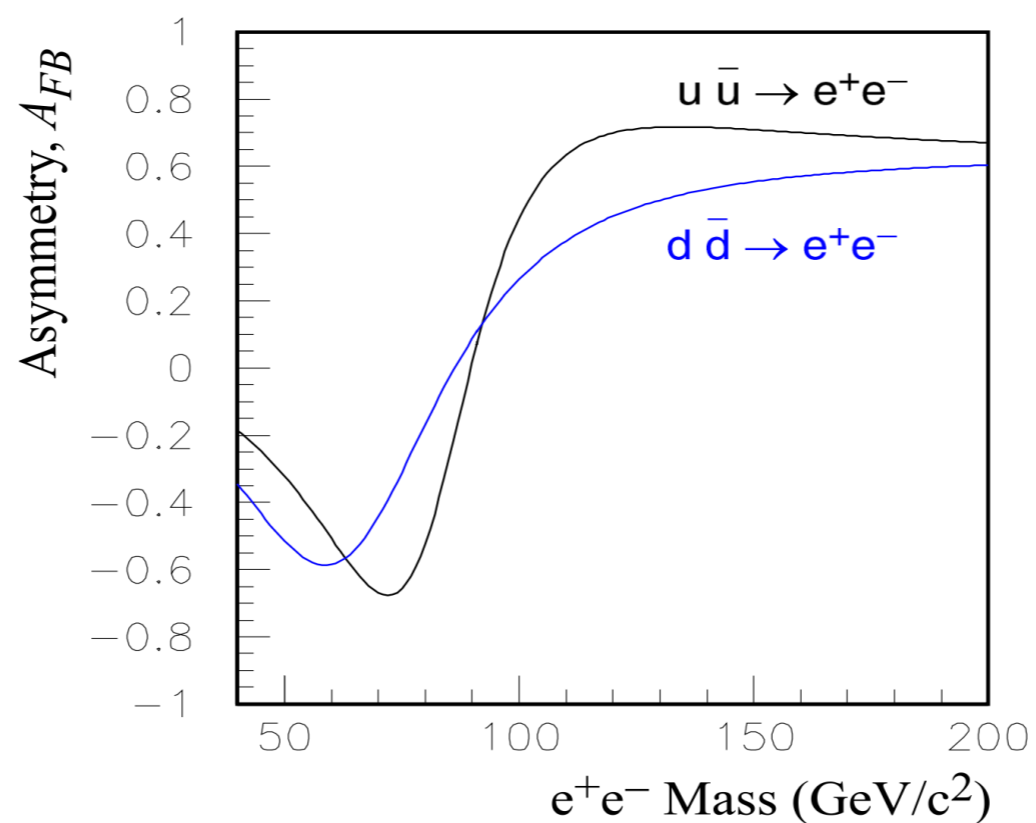
- Z 与 up 型夸克耦合不同于 down 型夸克耦合，因此 up 型初态 ($u\bar{u}$, $c\bar{c}$) 产生的 A_{FB} 与 down 型初态 ($d\bar{d}$, $s\bar{s}$, $b\bar{b}$) 产生的 A_{FB} 也不同，如图
- 实验观测到的 A_{FB} 是 up 和 down 型两种 A_{FB} 的混合平均。混合的相对权重就分别代表了 up 型夸克和 down 型夸克的质子结构信息



区分 u 、 d 初态贡献

利用 up 型夸克和 down 型夸克的差异

- 无论是 up 型还是 down 型，硬过程产生的 A_{FB} 是电弱物理，计算精度高。因此，可以通过将硬过程中的 up 和 down 型 A_{FB} 视作已知条件，从实验测量的 A_{FB} 中分别测量 up、down 型夸克的分布信息



A_{FB} 的参数化计算

实现 u 、 d 夸克分别观测的前提

- 要证明Drell-Yan过程的 A_{FB} 可以实现严格的参数化（与阶数无关的），并且能够将电弱计算部分与质子结构部分完全拆分解耦
- 要实现上述参数化，并且定义出可以作为实验观测量的质子结构参数，并且up型和down型夸克质子结构信息要能严格拆分到各自的结构参数中

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:

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

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

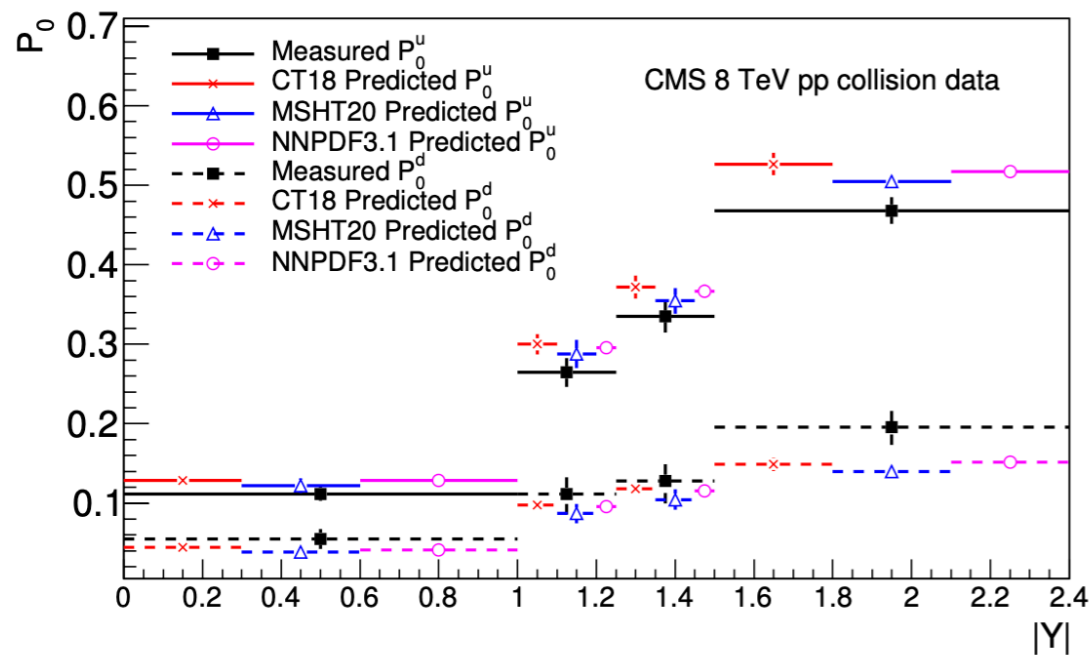
结构参数的实验测量

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



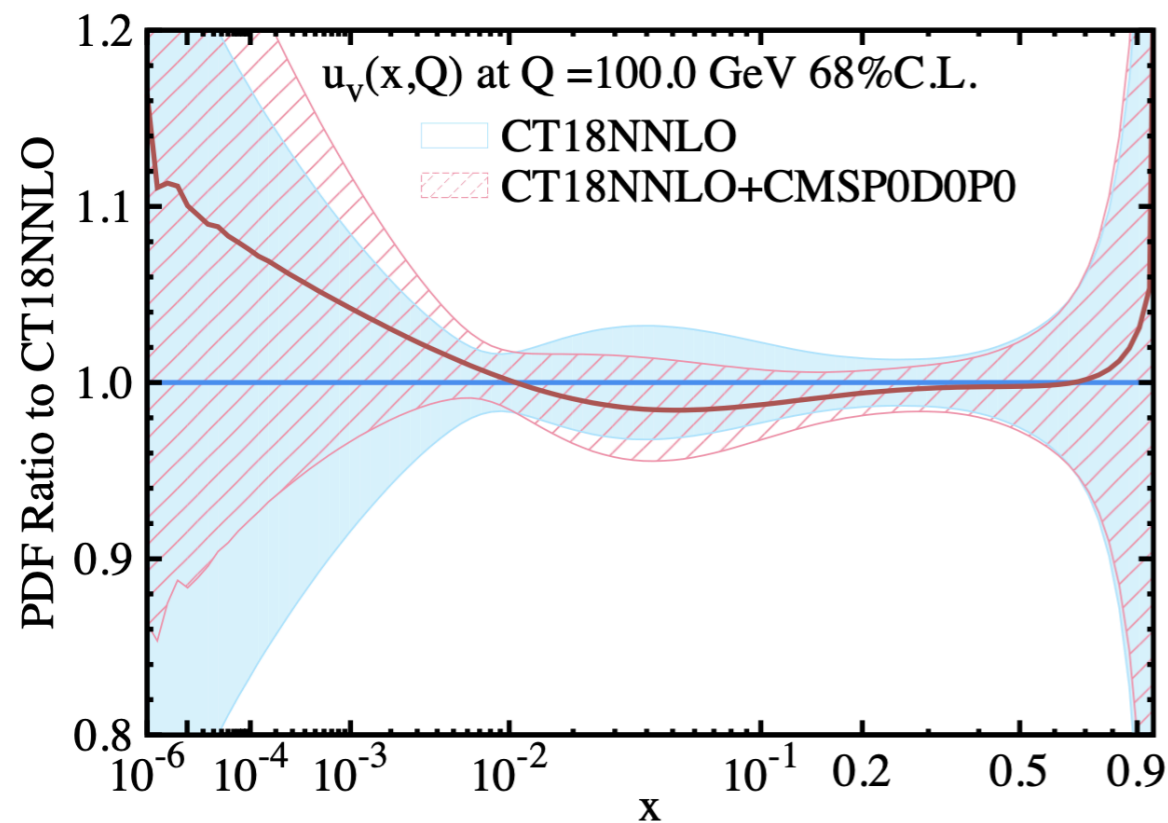
Measured proton structure parameters from the CMS 8 TeV A_{FB} data, compared to PDF predictions

	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 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

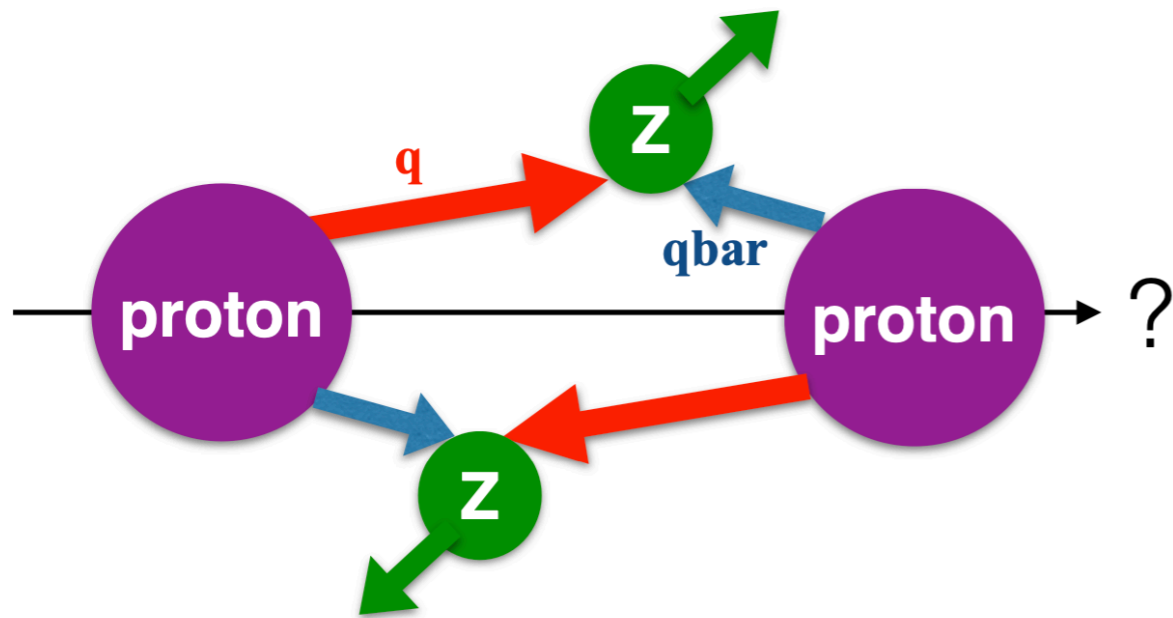
LHC上的质子结构新测量（二）：

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



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

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

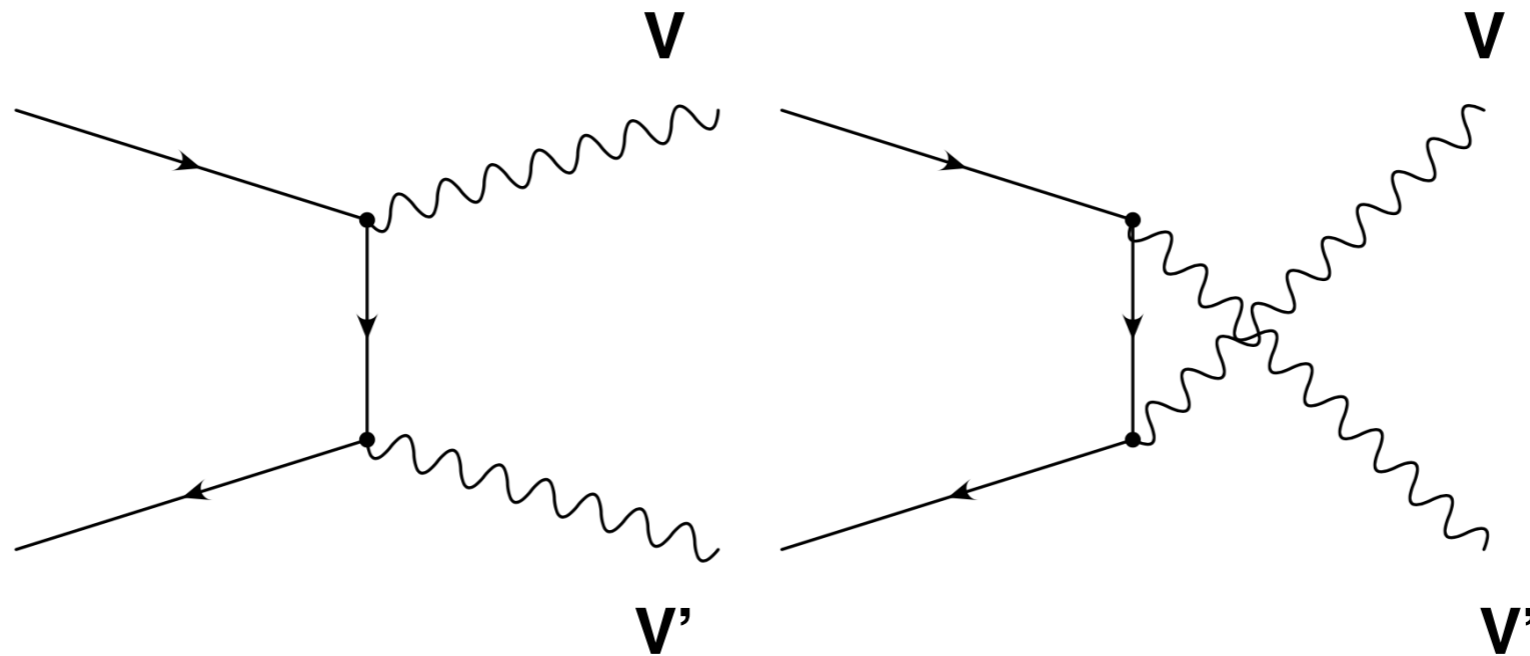
$$x_S \sim \mathcal{O}(10^{-4}) \text{ to } \mathcal{O}(10^{-3})$$

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

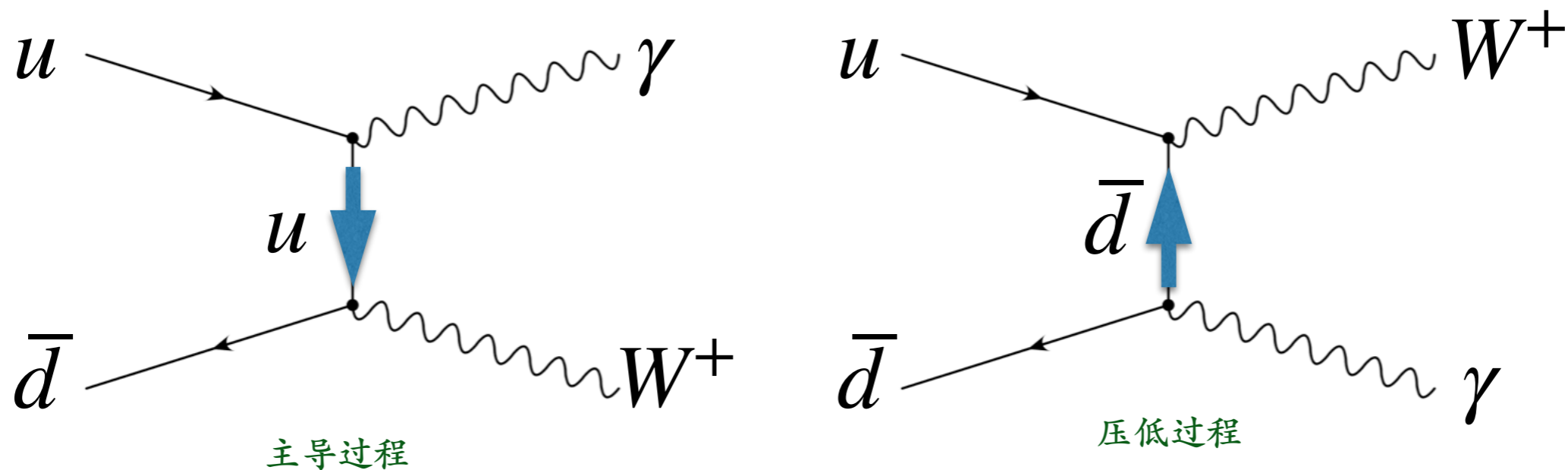
Phys. Rev. D 106, L051301 (2022)

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

一个例子： $W\gamma$ 事例中的boost asymmetry

Phys. Rev. D 106, L051301 (2022)

	$W^+\gamma$ 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 $\pm 0.004(\text{PDF})$

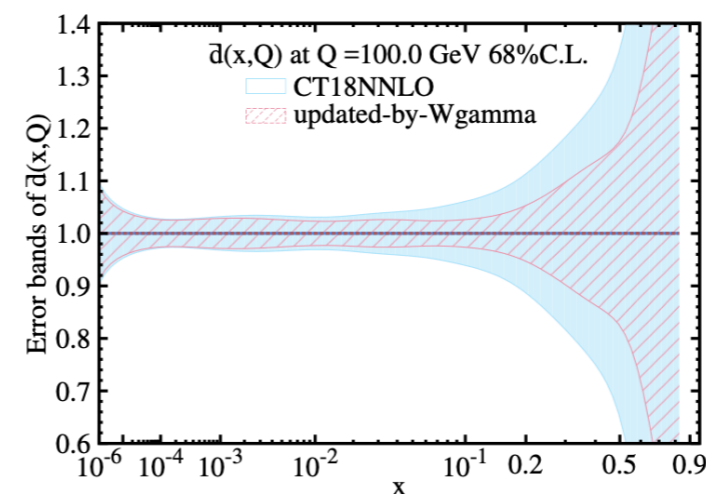
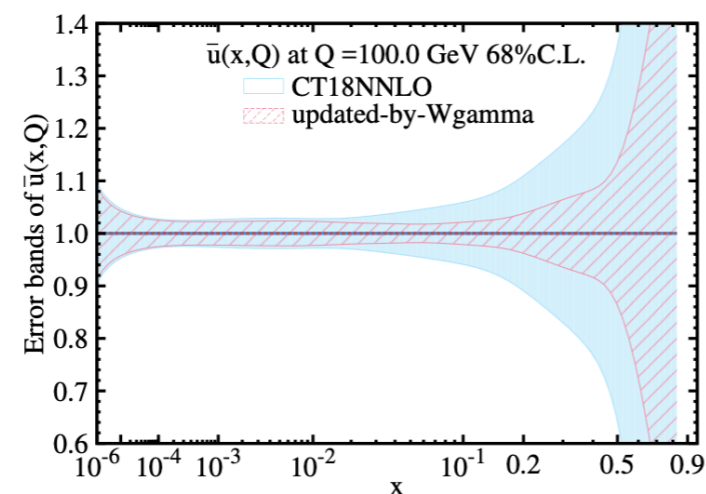
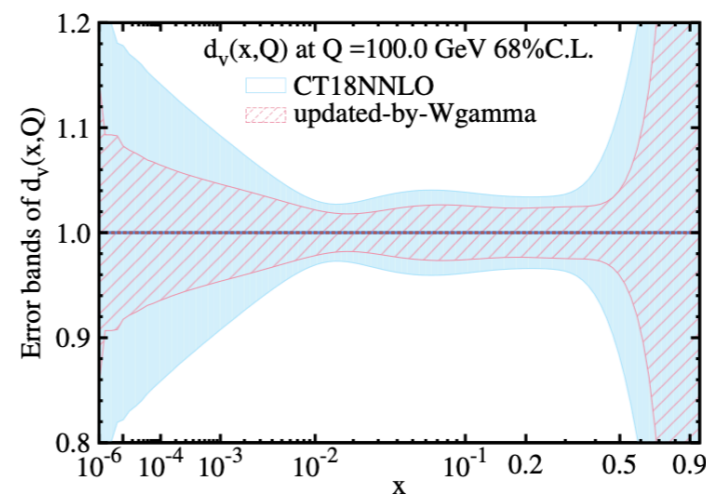
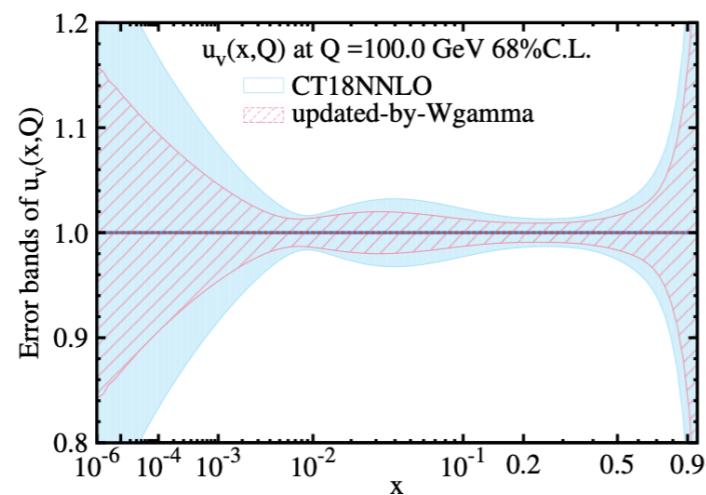
$W\gamma$ 事例中的boost asymmetry

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



一些讨论

补足实验观测自由度，实现从强子实验独立得出的结论

- 在引入 A_{FB} 结构参数、boost asymmetry后，强子实验上的实验观测数量基本与涉及到的夸克信息自由度处于同一水平

$$\sigma(Z), \sigma(W^+), \sigma(W^-)$$

$$P_0^u(A_{FB}^{LHC}), P_0^d(A_{FB}^{LHC}),$$

$$P_0^u(A_{FB}^{Tevatron}), P_0^d(A_{FB}^{Tevatron})$$

$$A_{boost}^{W^+\gamma}, A_{boost}^{W^-\gamma}, A_{boost}^{WW}$$



$$u(x_L), d(x_L), \bar{u}(x_L), \bar{d}(x_L)$$

$$u(x_S), d(x_S), \bar{u}(x_S), \bar{d}(x_S)$$

$$s(x), c(x) \dots$$

质子结构测量、QCD测量与精确电弱测量

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

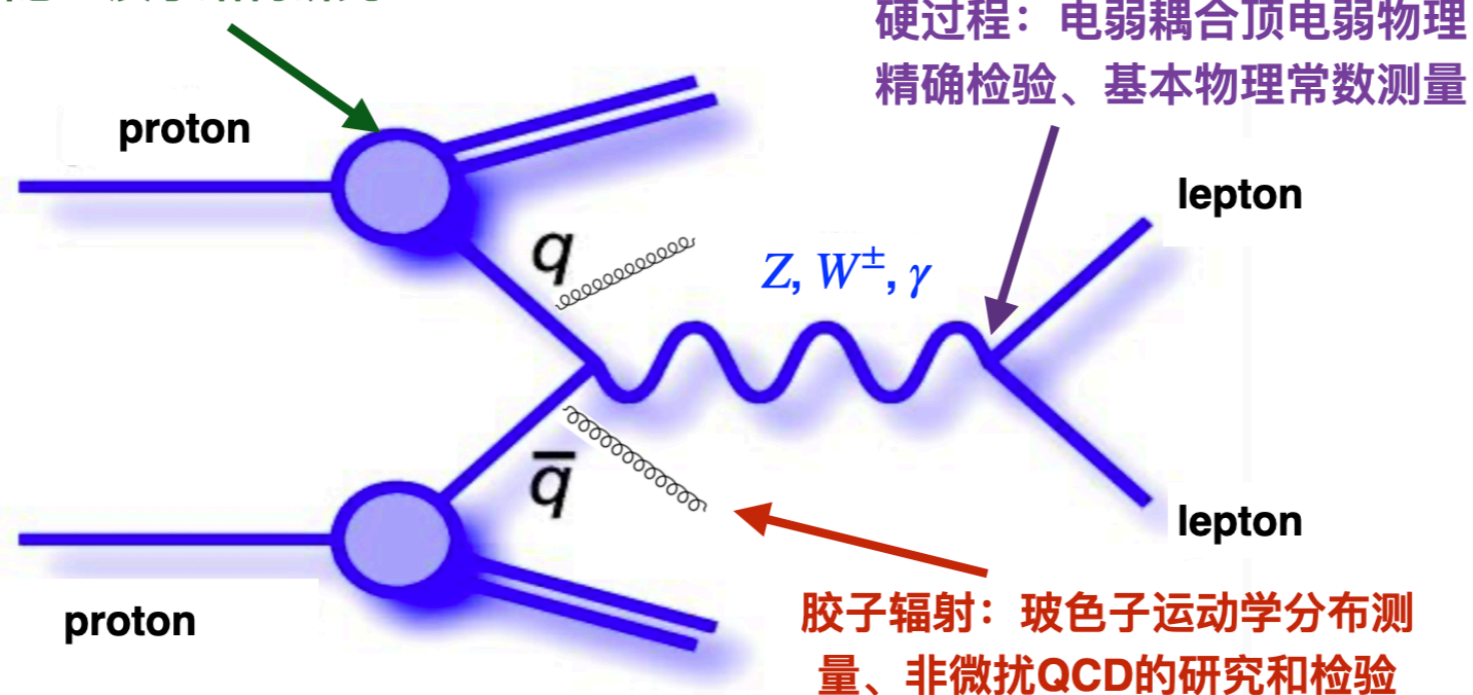
	Uncertainty on $\sin^2 \theta_W$
Tevatron	0.00033 (total unc.)
LEP/SLC	0.00029/0.00026 (total unc.)
LHC	~ 0.00030 (PDF)

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

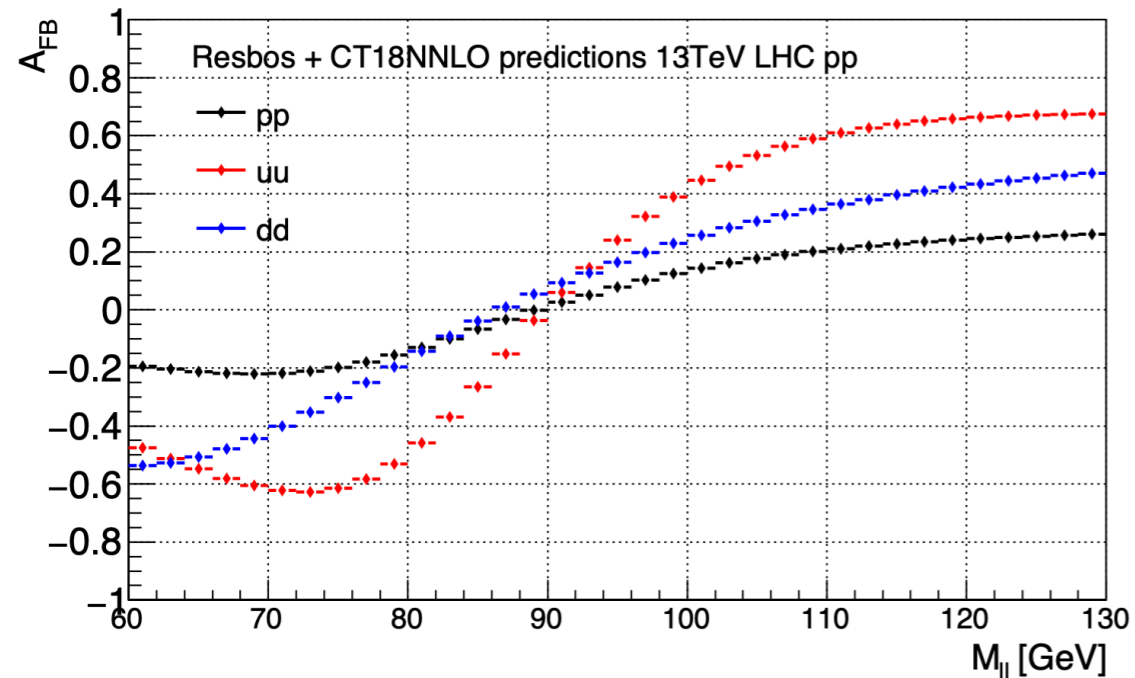


Backup

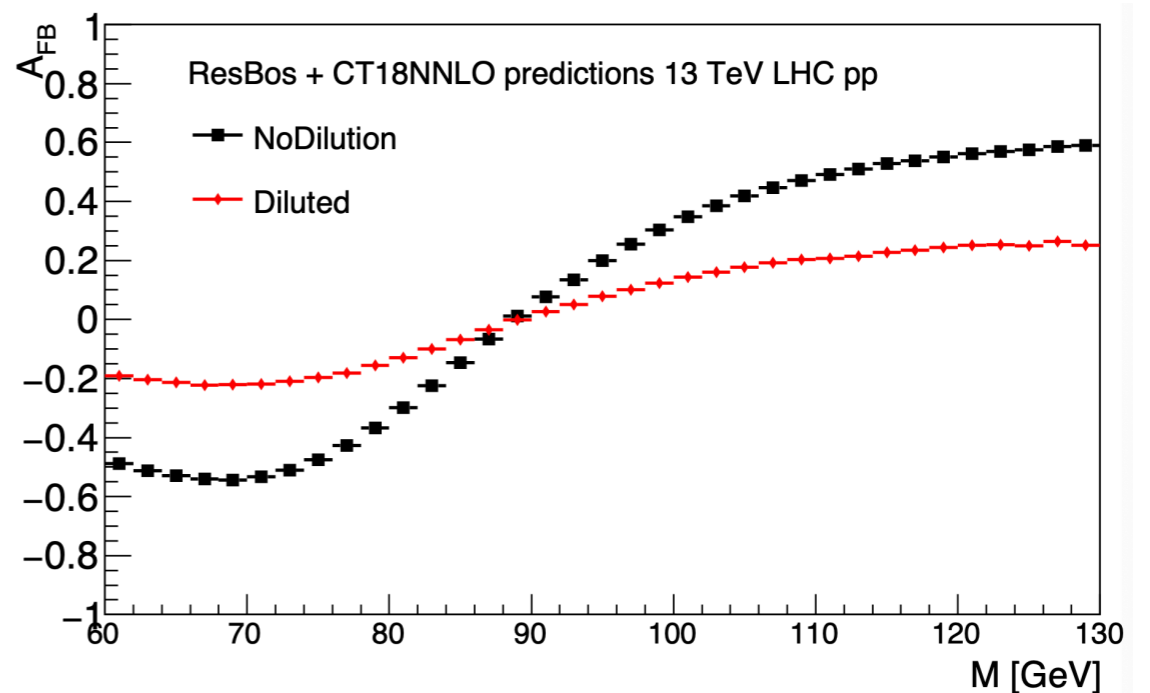
Separating u and d contributions

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.