



质子部分子分布与global analysis

杨思奇

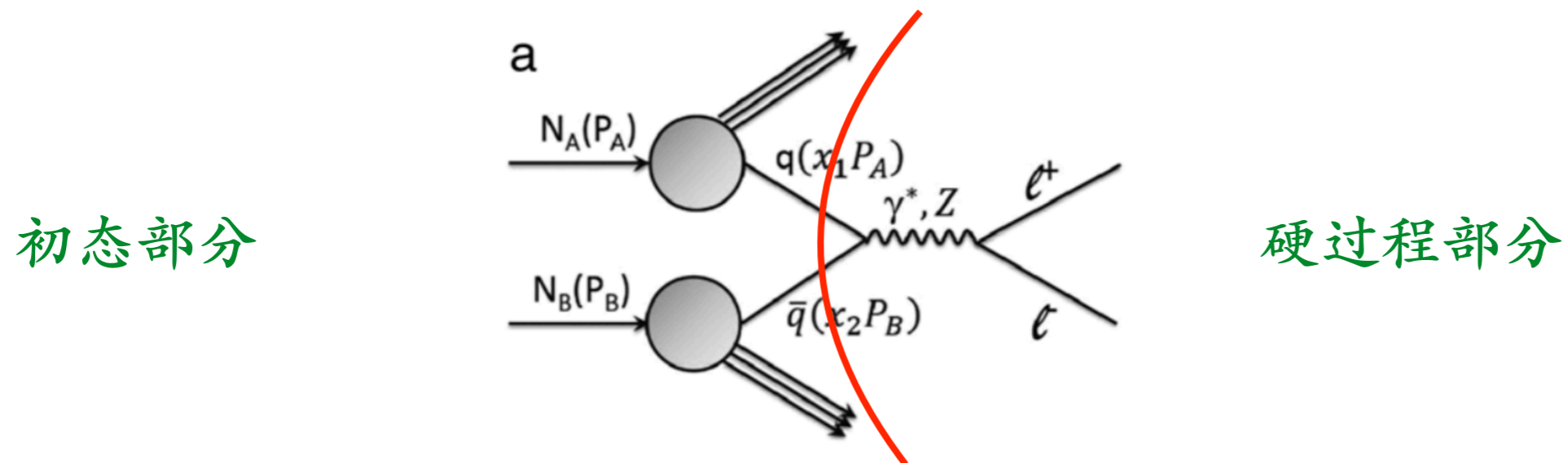
中国科学技术大学

2025.4

部分子分布函数

用于对高能标质子反应的解释和描述

- 高能标下($Q > \mathcal{O}(1) \text{ GeV}$), 质子参与的物理反应能量远高于质子内部分子结合能。
可将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)



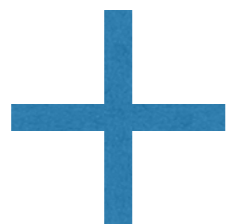
$$\sigma(p) = \sum_i \sigma(q_i) = \sum_i q_i(x) \otimes \text{HardProcess}(q_i; x)$$

PDF global analysis

低能标处的非微扰部分(价夸克与轻夸克)

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

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



Perturbative QCD计算:

evolution to high Q

以及 $c(x), b(x) \dots$

其他理论假设:

sum rule

各种标准模型假设

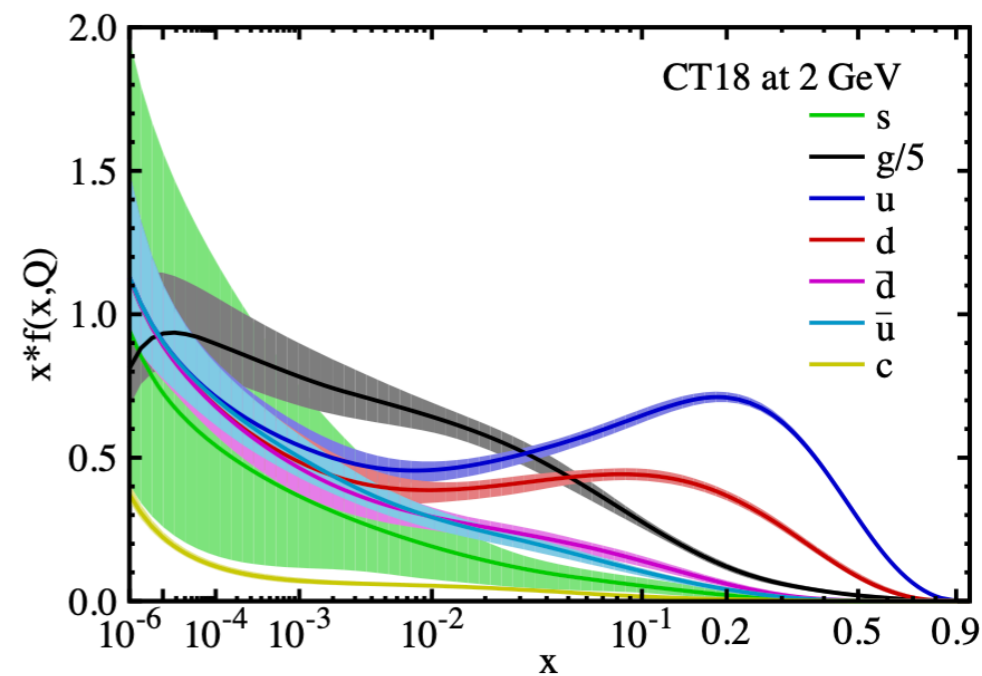
小 x 时 $\bar{u} = \bar{d}$

...

硬过程计算

fit

各个实验测量
对non-perturbative部分进行fit



质子结构的基本问题：夸克产生机制

微扰QCD+胶子劈裂解释

- 质子产生价夸克 u_V 、 d_V ，二者低能标处具有天然非微扰部分
- 所有海夸克原则上都由胶子劈裂产生，可由微扰QCD计算
 - 轻夸克 \bar{u} 、 \bar{d} 、 $s(\bar{s})$ 会额外产生共线发散导致的非微扰部分。但其 分布应当一致
 - 重夸克 c 、 b 分布可完全由微扰QCD计算得到，无非微扰贡献

非微扰部分

价夸克初始分布
轻夸克发散

微扰部分

能标演化
重夸克分布

质子结构的基本问题：夸克产生机制

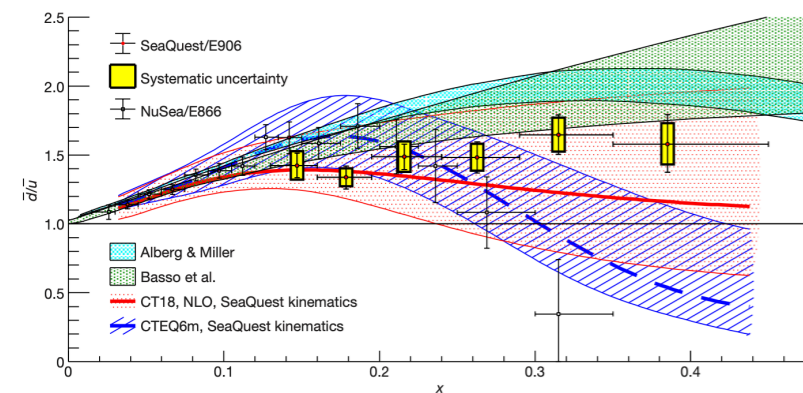
几个重要的实验结果

- SU(2) flavor asymmetry: $\bar{d} \neq \bar{u}$
- SU(3) flavor asymmetry: $s + \bar{s} \neq \bar{d} + \bar{u}$
- intrinsic charm(?): 高能DIS过程di- μ 截面高于微扰计算

SU(2) 味不对称性：
 $\bar{d} \neq \bar{u}$

SU(3) 味不对称性：
 $s + \bar{s} \neq \bar{d} + \bar{u}$

intrinsic charm：
重夸克的非微扰贡献



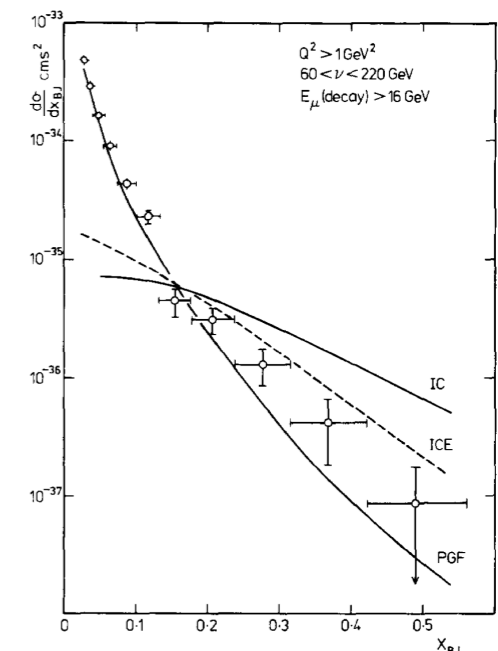
NuSea/SeaQuest实验 pp/pD
打靶，是SU(2)味不对称性的
最主导实验结果

Nature Vol 590, 561-565, 2021

$$\kappa_s = \frac{\int_0^1 x[s(x, \mu^2) + \bar{s}(x, \mu^2)]dx}{\int_0^1 x[\bar{u}(x, \mu^2) + \bar{d}(x, \mu^2)]dx}$$

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

一些典型的SU(3)味不对称性的
实验分析结果， s 明显偏低



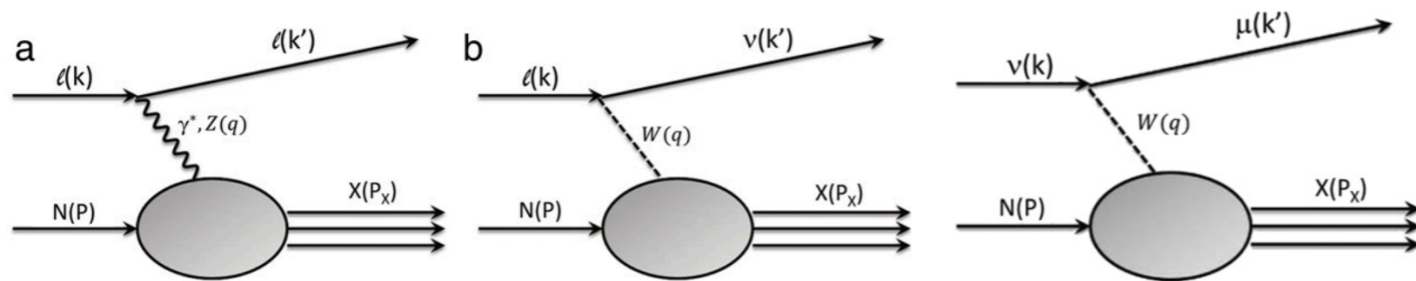
μ Fe散射实验测量

c 夸克分布疑似具有非微扰部分
Phys. Lett. B 110, (1982) 73

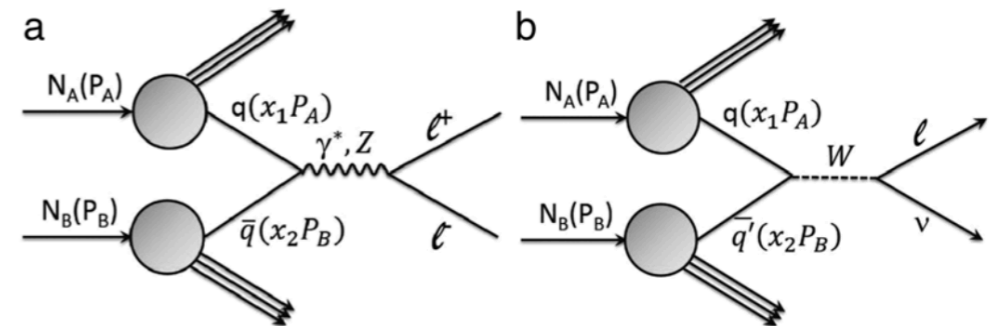
部分子分布的实验测量

当前的实验输入

- DIS与Drell-Yan过程为主，加少量jet data、top、Higgs数据



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

- 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
- 以截面测量为主体，观测信息结构较为单一

“和性质”

截面测量：夸克分布的简单叠加

- 按QCD improve parton model的计算方式，物理反应截面就是夸克分布的和。即便已有数千个数据点，其测量种类是单一的

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

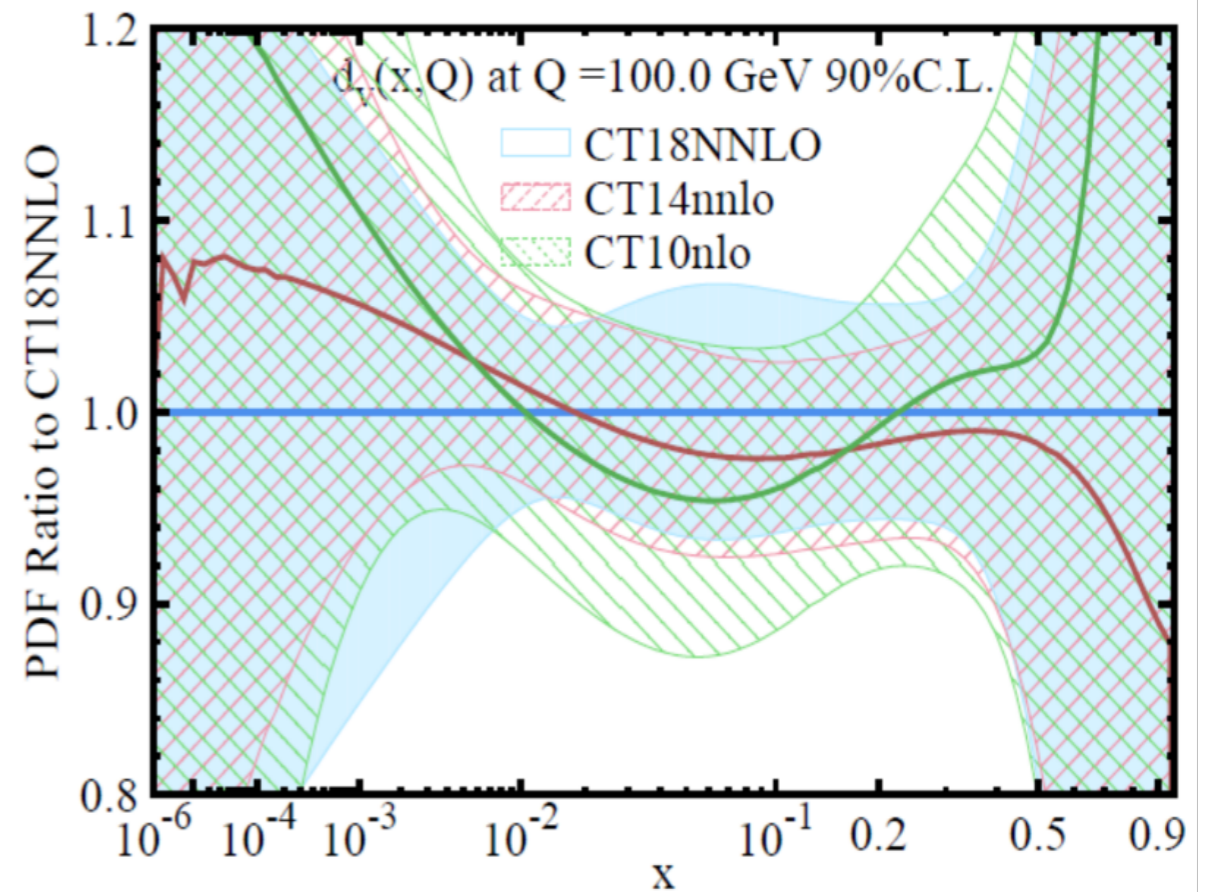
- SU(2) flavor asymmetry: \bar{d} 与 \bar{u} 之间的“差性质”
- SU(3) flavor asymmetry: s 与 u 、 d 之间的“差性质”
- intrinsic heavy quark: 重夸克微扰分布相对于轻夸克非微扰分布之间的“差性质”
- 价夸克比例: u_V 与 d_V 之间的“差性质”
- 夸克分布的 x 演化: 不同 x 区域夸克分布的“差性质”
- ...

两个例子

高精度“和性质”测量+global analysis能否无限提升?

- 从CT14到CT18, 高精度LHC数据大面积引入, 但很多PDF精度并未提升
- 需要直接观测“差性质”而不是一味追求高精度“和性质”测量

	$\sin^2\theta_w$ 上的误差
LEP/SLC测量	0.00029 0.00026
Tevatron测量	0.00033
LHC上PDF误差 CT14	0.00034
LHC上PDF误差 CT18	0.00038



从CT14到CT18, LHC数据大规模引入global fitting。
然而, 弱混合角(或 A_{FB})上的PDF误差并未降低

相关信息: 正反夸克相对差异

价夸克 d_v 分布精度也并未提高

相关信息: 价夸克相对比例

利用不对称性测量“差性质”

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”

Phys. Rev. D 106, L051301 (2022)

Phys. Rev. D 106, 033001 (2022)

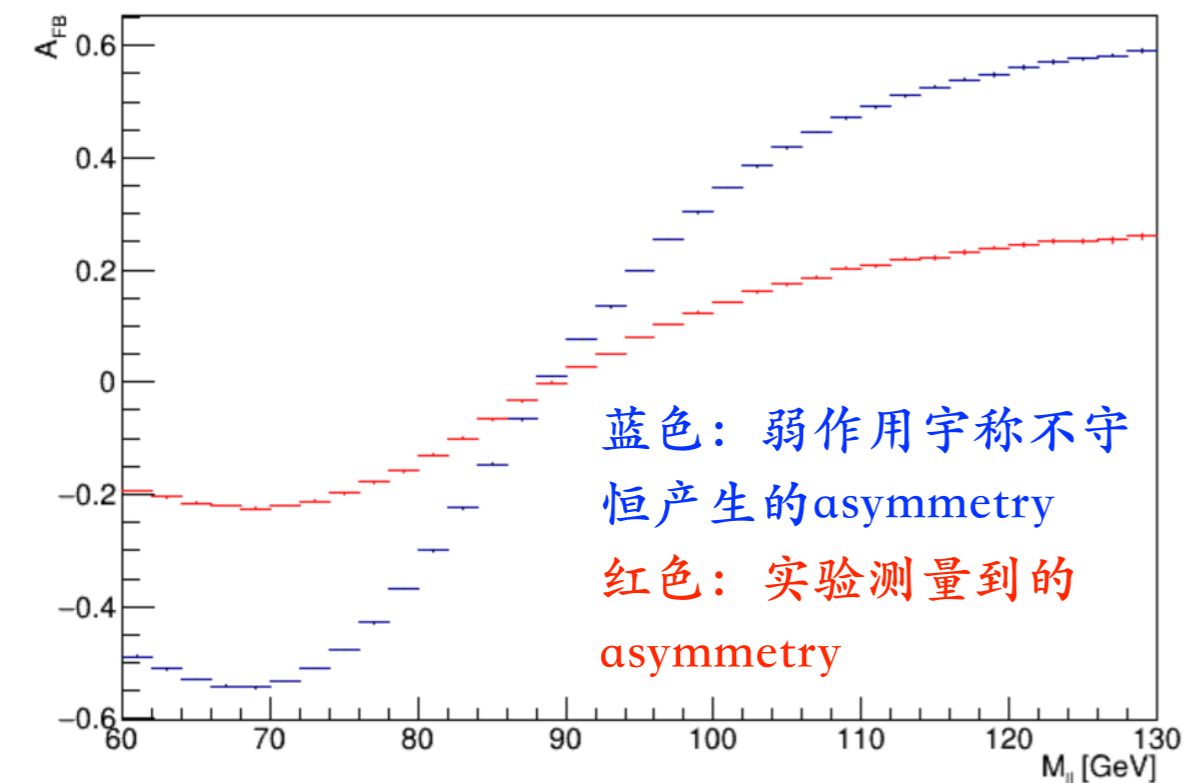
Eur. Phys. J. C 82:368 (2022)

Chin. Phys. C 45, 053001 (2021)

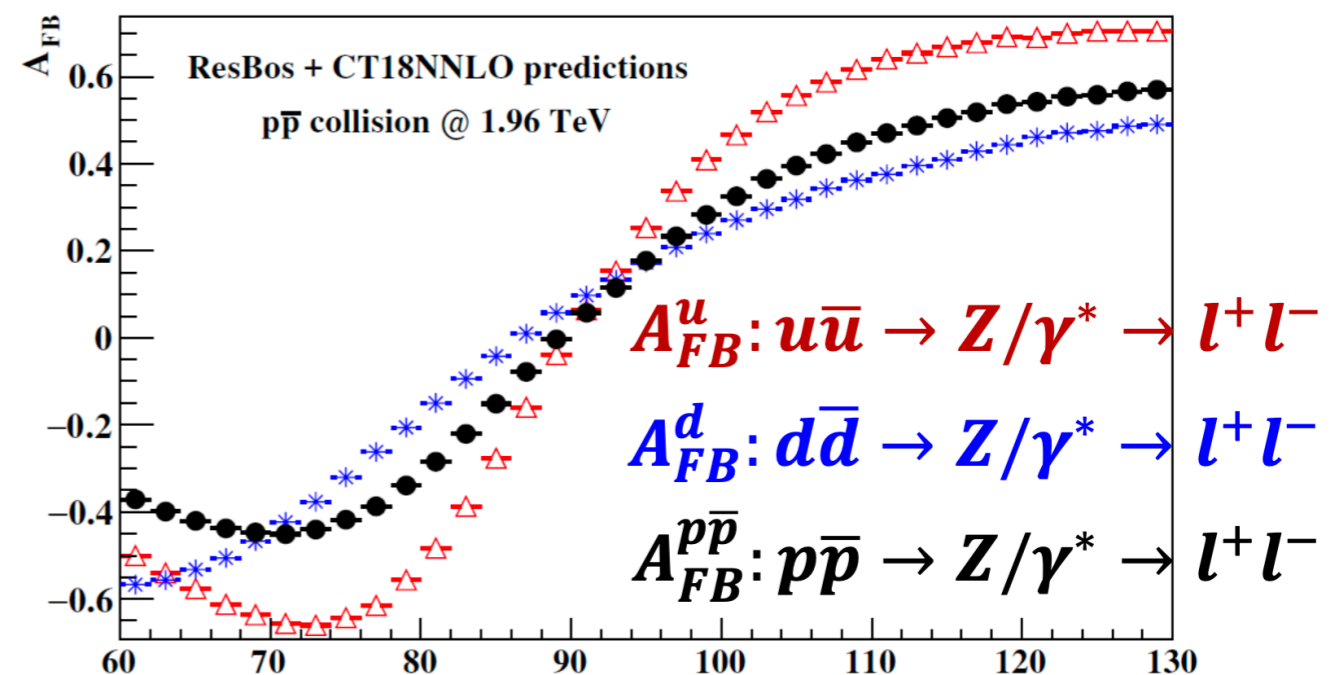
两类差性质：flavor 与 x

测量不同夸克种类之间的差性质

- 利用Drell-Yan过程空间不对称性测量轻夸克差性质、正反夸克差性质



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} 。其实实验观测值会受到 u 、 d 夸克相对差异的影响

两类差性质：flavor 与 x

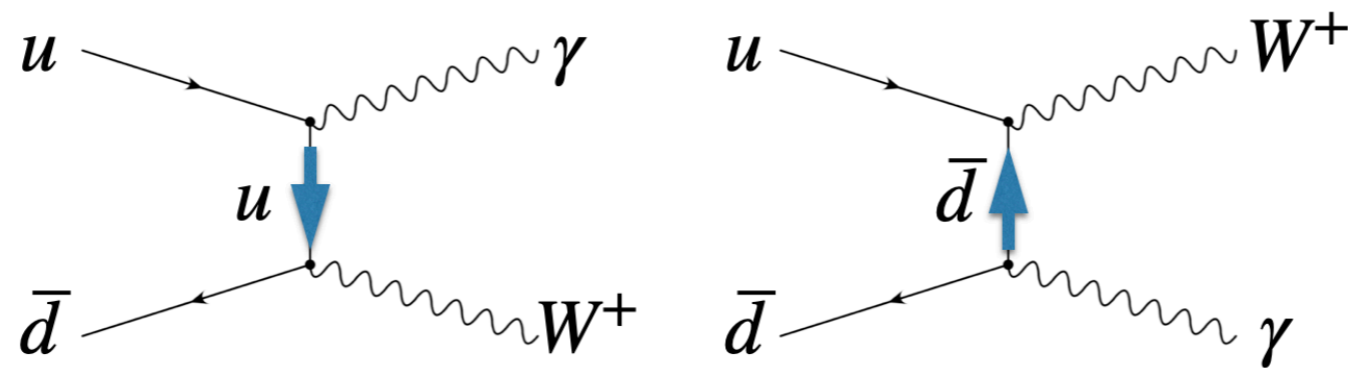
测量不同 x 区间的分布差性质

- 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

以 $W^+\gamma$ 过程为例：

- W^+ 直接和 \bar{d} 耦合，因此其运动学信息主导于 \bar{d}
- 同理， γ 直接与 u 耦合，因此其运动学信息主导于 u
- 定义 $W^+\gamma$ 事例中的boost asymmetry，可区分不同 x 区间的夸克

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



主导过程

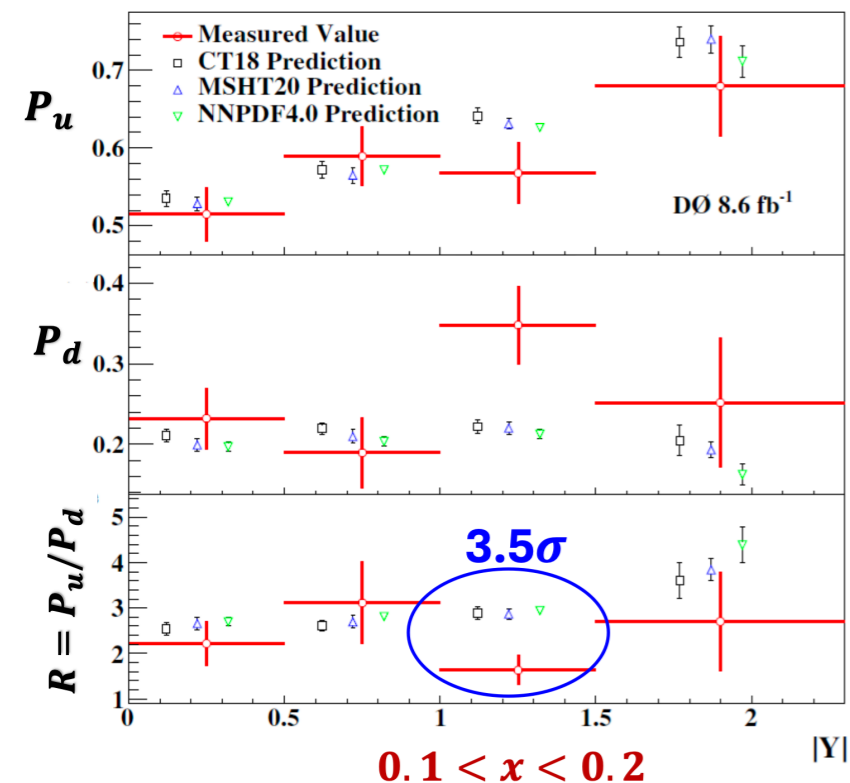
压低过程

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

利用不对称性测量“差性质”

质子-反质子对撞实验：首次实现价夸克相对差异直接测量(u_V/d_V)

质子-质子对撞实验：首次实现正、反夸克相对差异直接测量($u - \bar{u}$ 、 $d - \bar{d}$)



• 测量显示，质子内 d 夸克含量(峰处)比当前理论高约10%，显著偏差

• 由于QCD求和规则的存在，质子内所有夸克分布都将受到影响，是质子结构研究的重要实验新观测

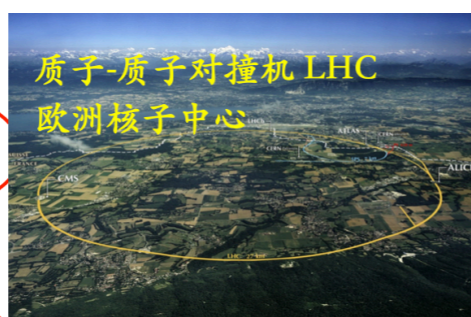
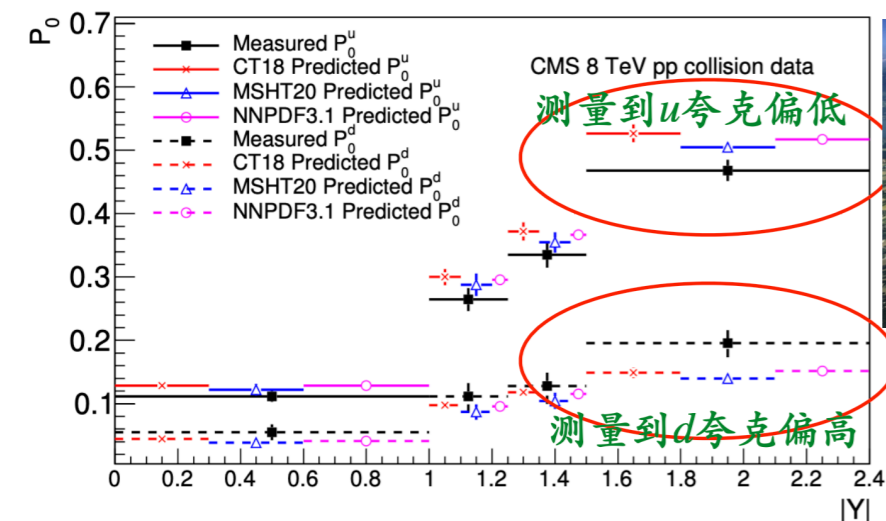
文章发表

Phys. Rev. D 107, 054008 (2023)

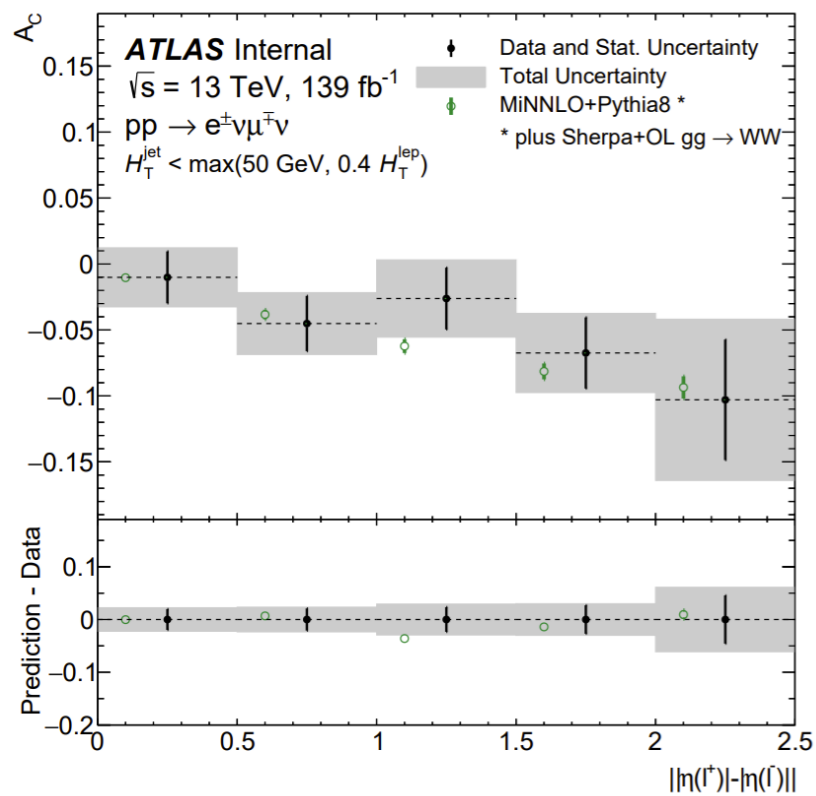
Phys. Rev. D 110, L091101 (2024)

审稿人评价：“本领域的必读文章”

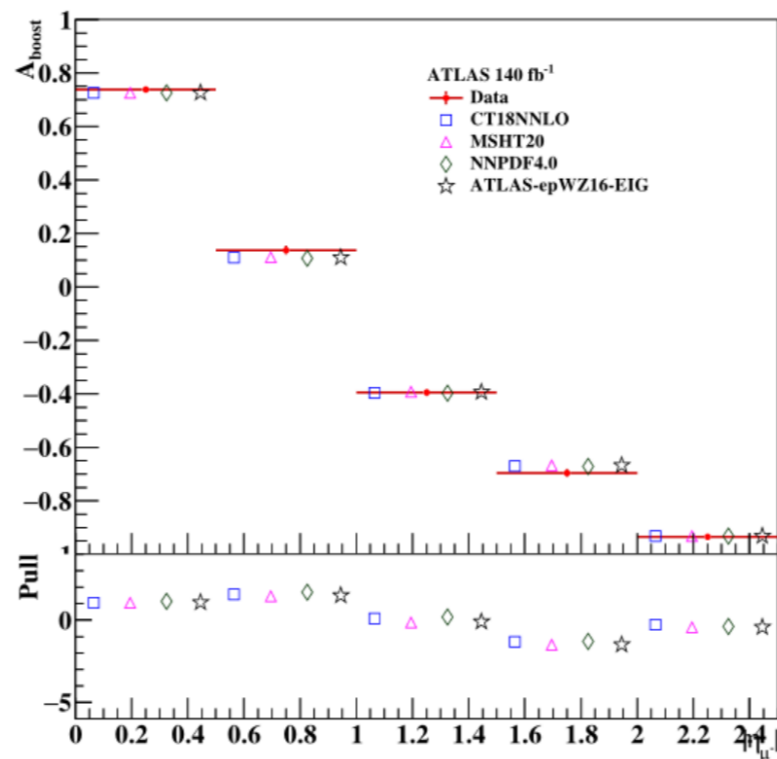
Together with the tension of the results reported with common and widely used parametrizations of the proton's parton structure makes it an important ("must read") paper for that specific community. As such



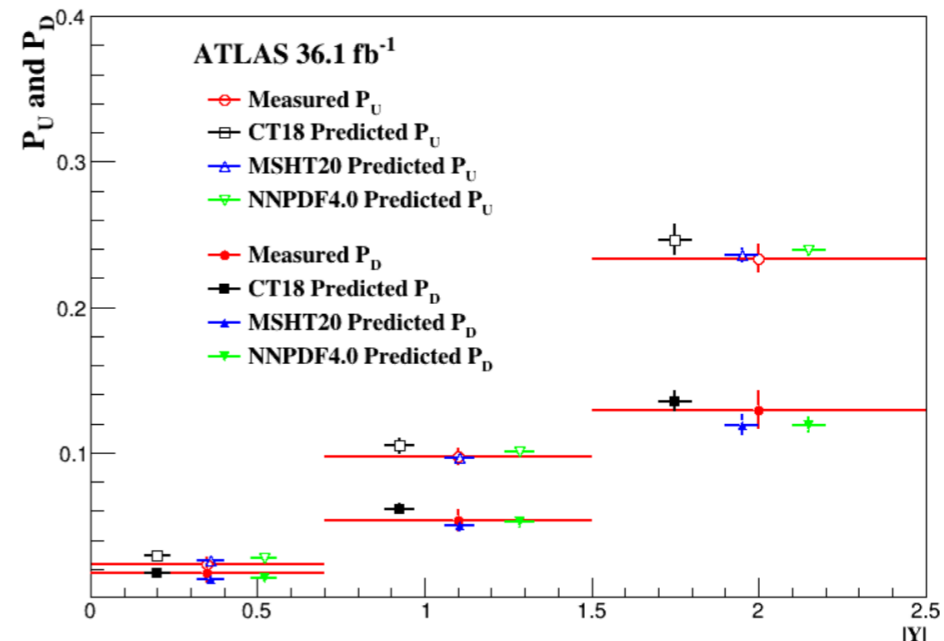
利用不对称性测量“差性质”



ATLAS 13 TeV full Run 2
 WW boost asymmetry
 $q\bar{q}$ 分布在大、小 x 处的
 “差性质”测量



ATLAS 13 TeV full Run 2
 $W\gamma$ boost asymmetry
 $q_i\bar{q}_j$ 分布在大、小 x 处的
 “差性质”测量

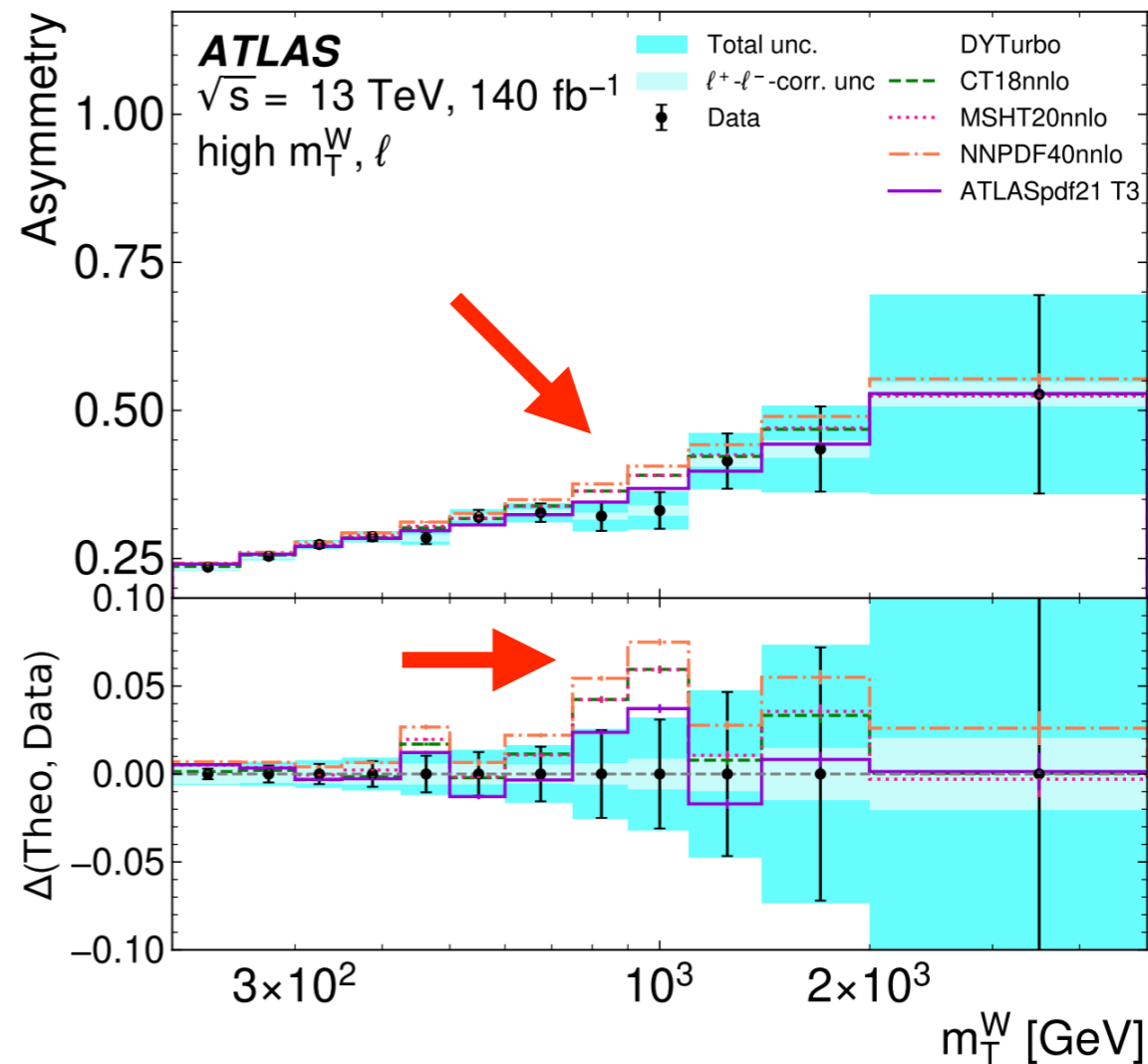
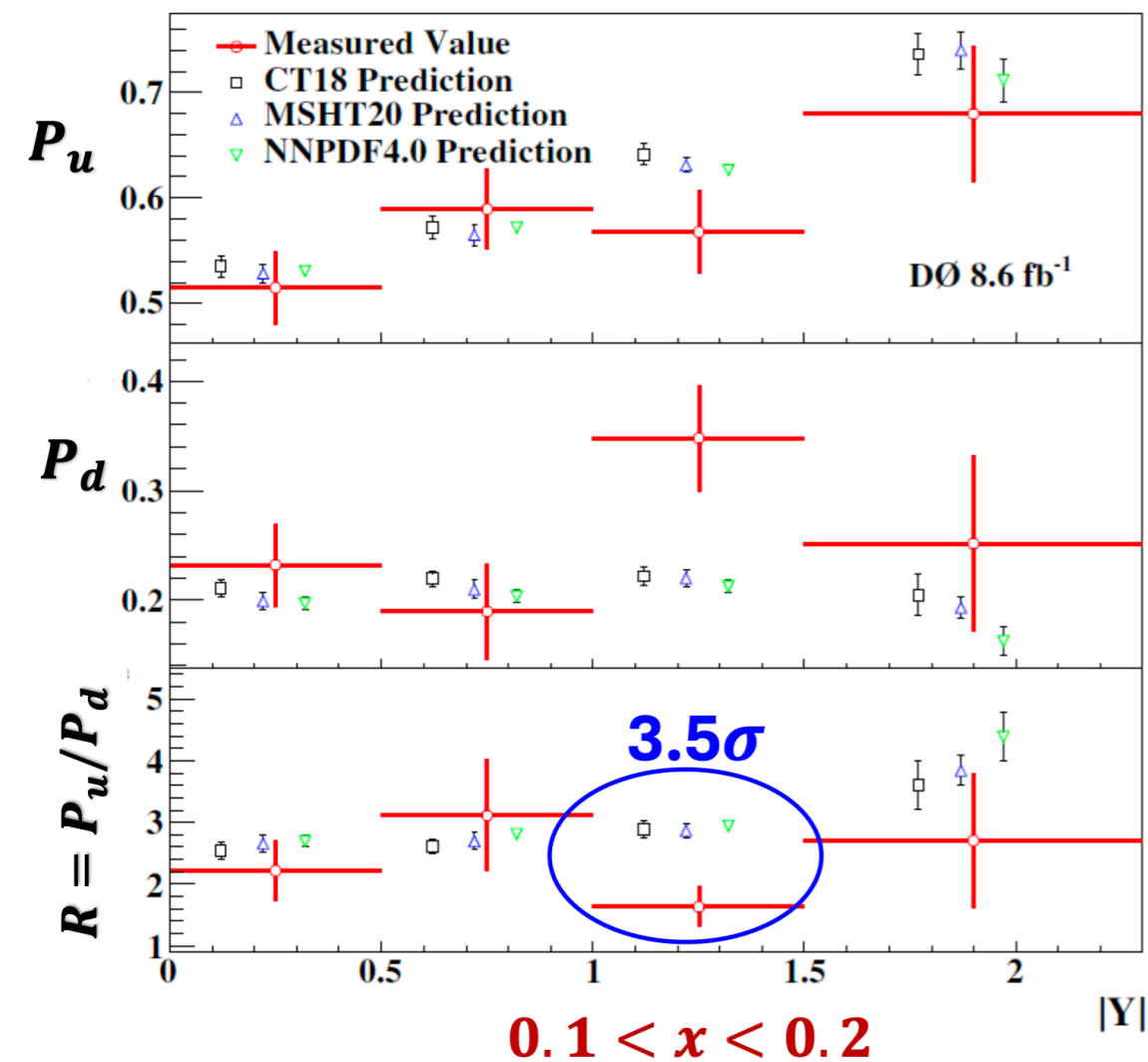


ATLAS 13 TeV 2015+2016
 Z 空间不对称性测量新结构参数
 正、反夸克“差性质”
 轻、重夸克“差性质”

利用不对称性测量“差性质”

质子-反质子对撞实验：首次实现价夸克相对差异直接测量(u_V/d_V)

与质子-质子对撞高横质量 W asymmetry 测量



Tevatron上测量 u 、 d 夸克差异 $\frac{u^2 - \bar{u}^2}{d^2 - \bar{d}^2}$

LHC上测量high m_T W asymmetry

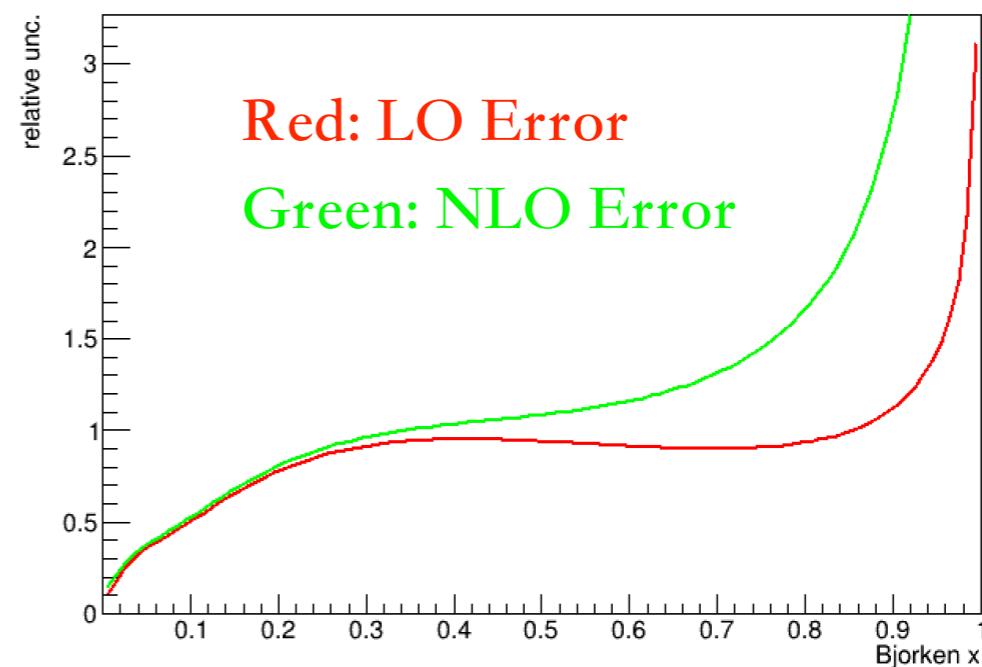
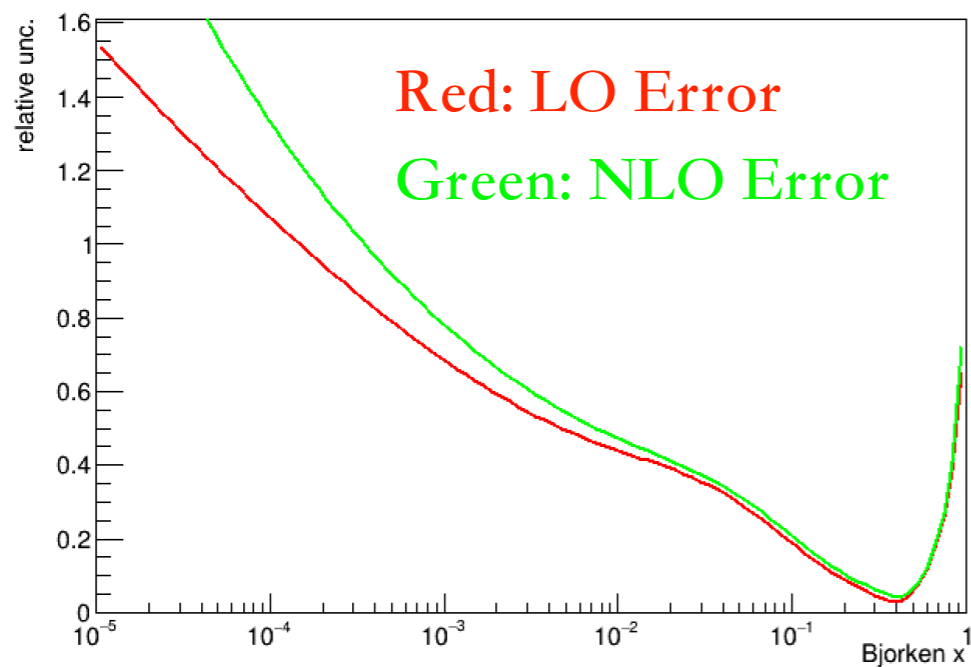
$u\bar{d}/d\bar{u}$

arXiv: 2502.21088

独立构建PDF global analysis

构建具有独立、完整PDF global analysis能力的程序框架

- 引入新测量(各种“差性质”观测)、引入新维度(新物理、格点QCD、标准模型常数)需要对PDF global analysis进行有针对性的大改动，需要有自主控制的global analysis
- 当前PDF global analysis为线性分析框架，难以适应复杂的强子对撞数据，需要进行非线性PDF global analysis的统计方法研究



独立构建PDF global analysis

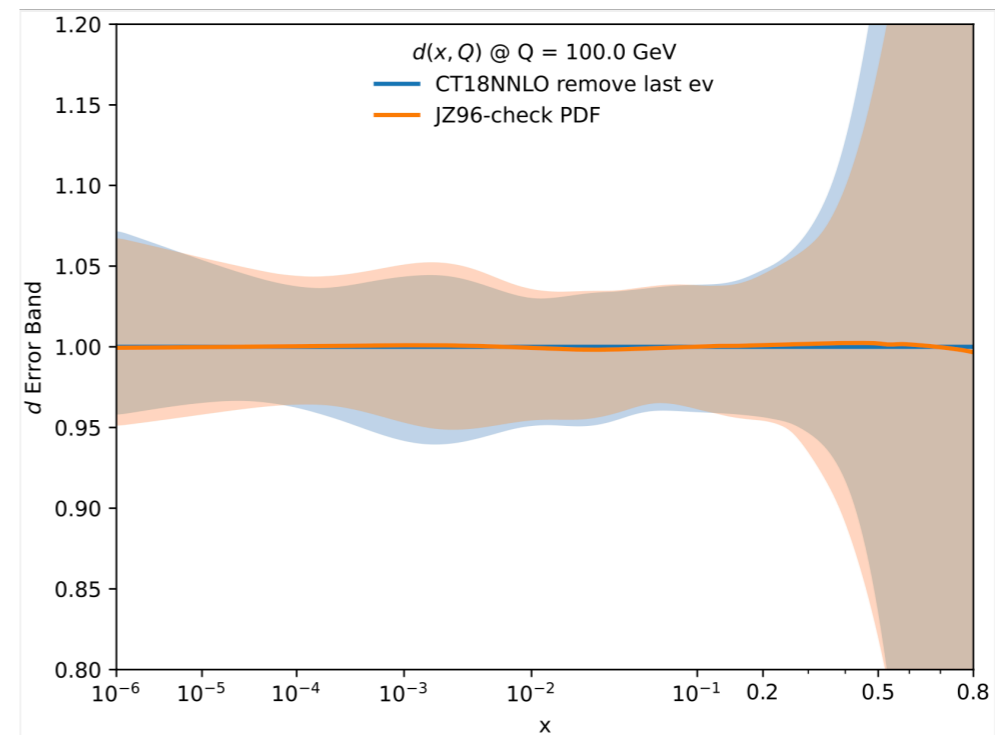
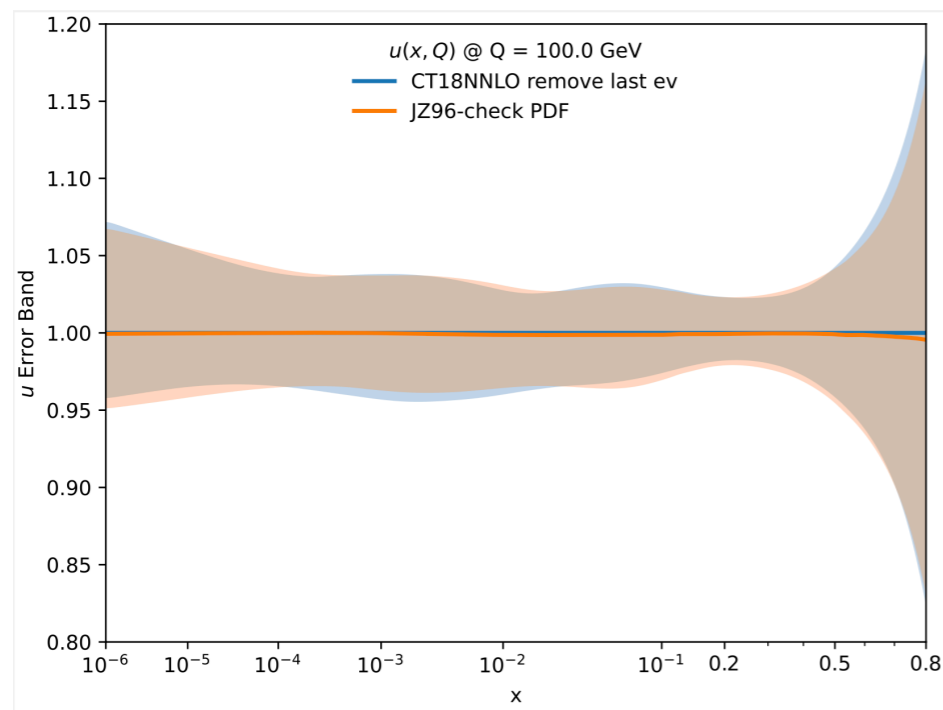
已完成新的PDF global analysis: JZ96 PDF

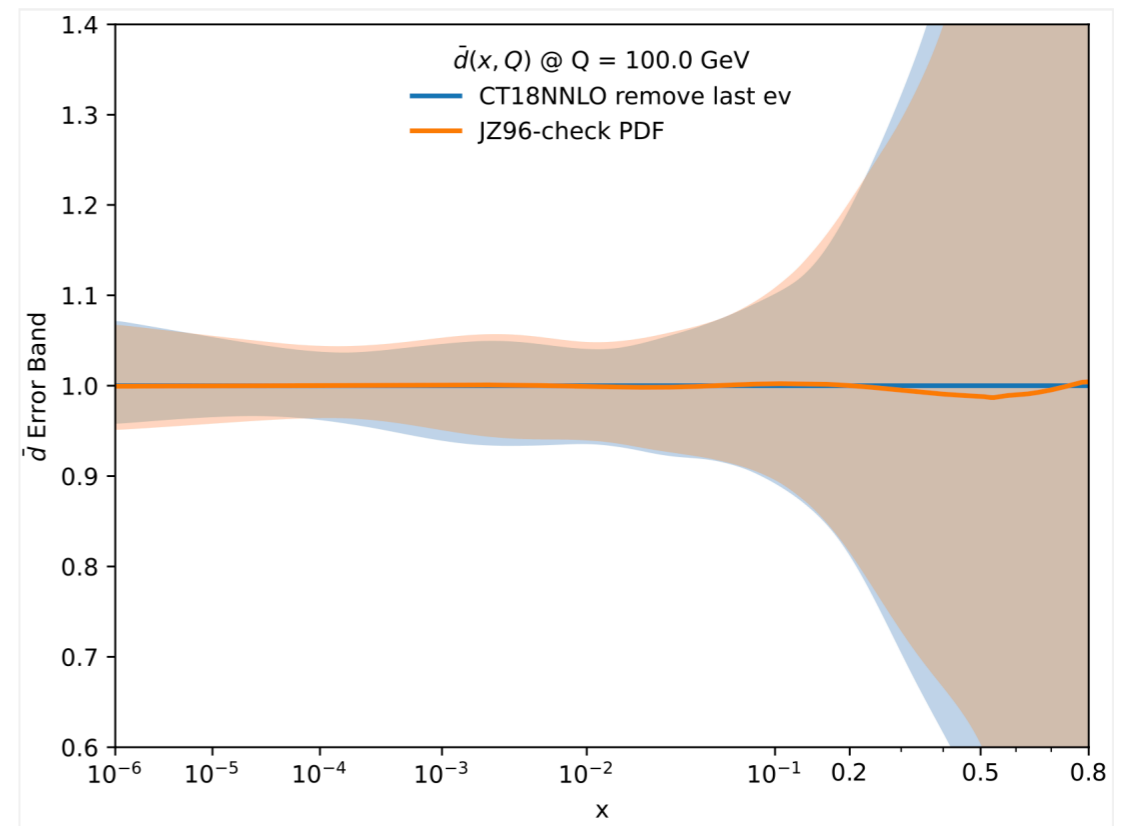
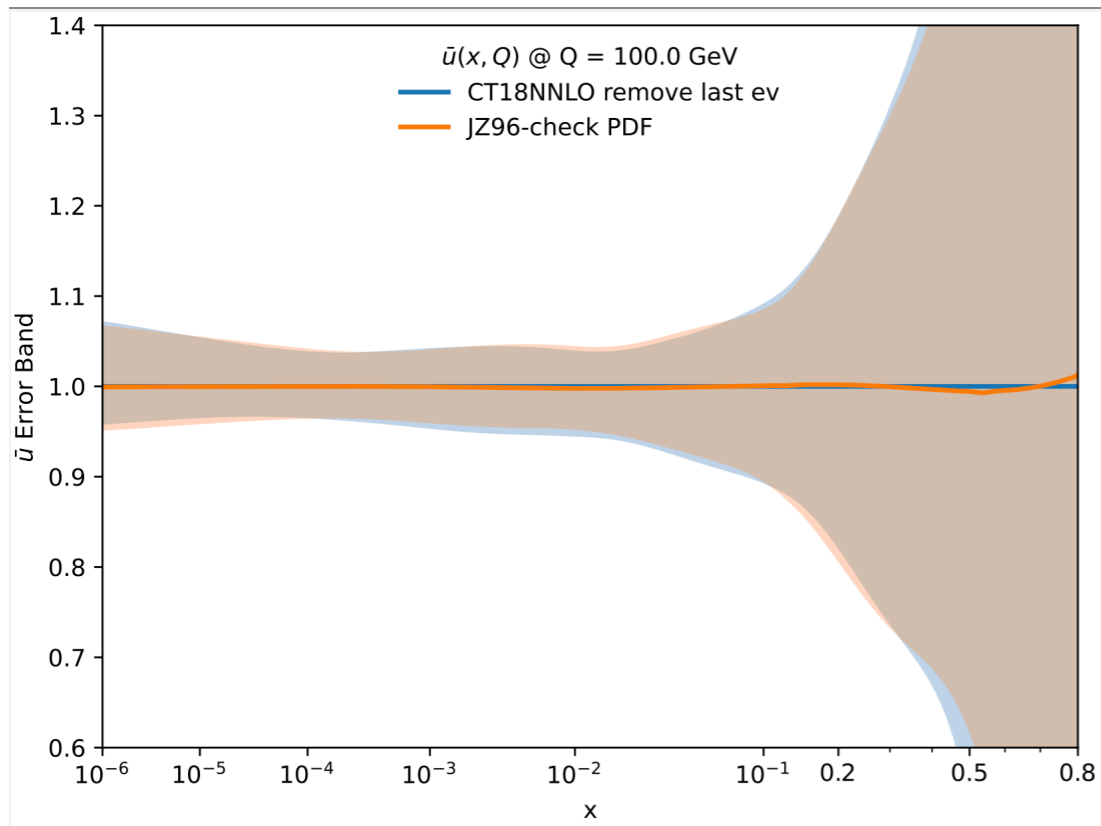
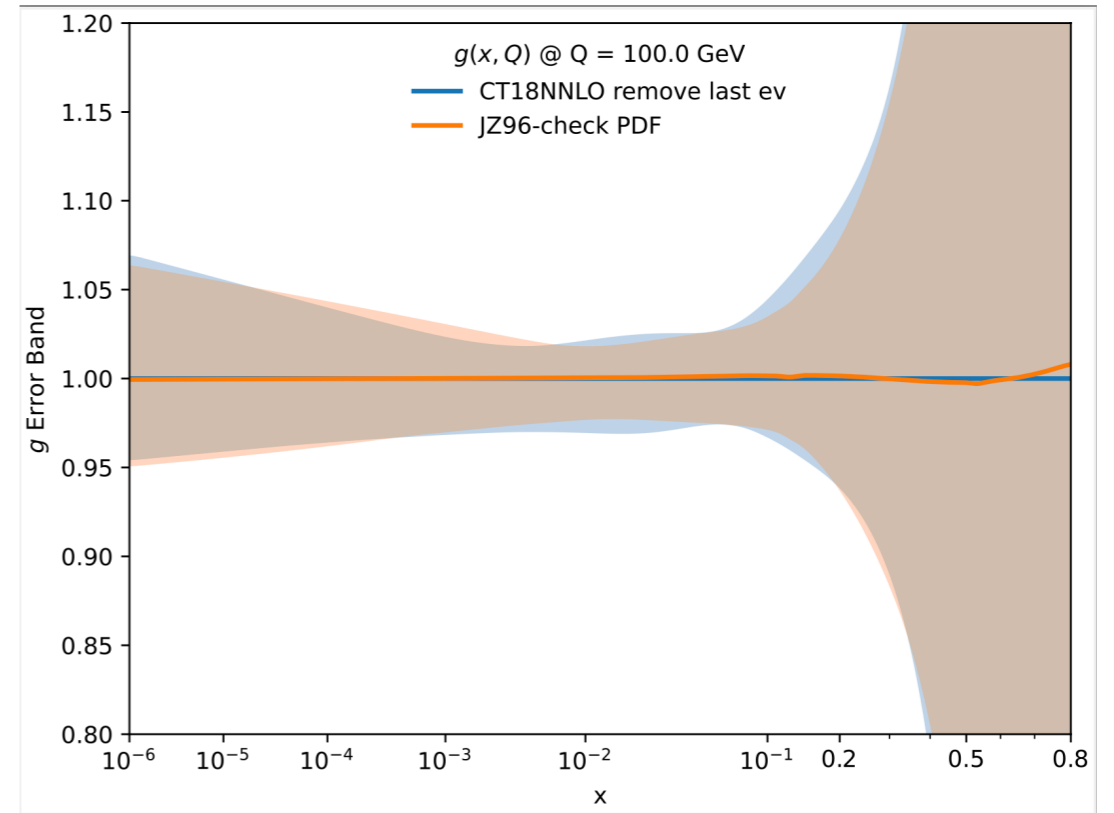
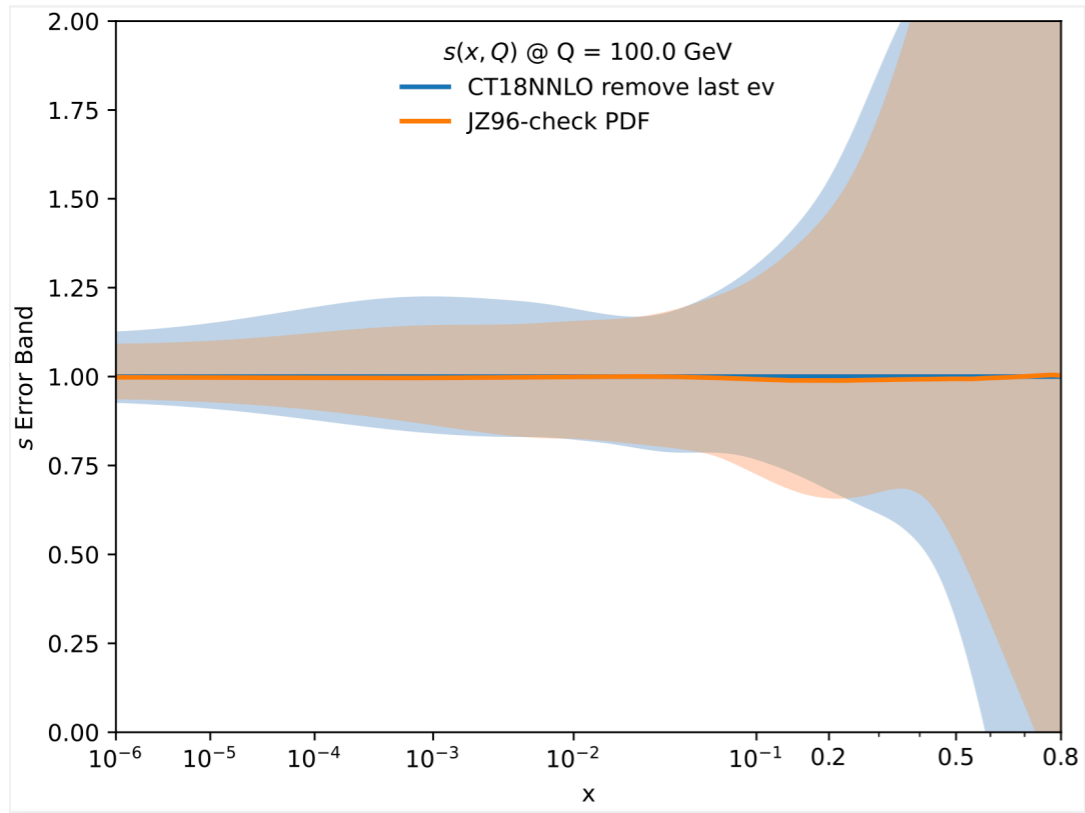
- 包含了从BCDMS、CDHSW等传统DIS实验到HERA、Tevatron、LHC的36组实验测量共3698个实验点
- 将引入各类“差性质”新测量
- Hessian EigenVector型PDF
- 全部以C++实现的模块化程序框架
- DGLAP能标演化: apfelxx library
- DIS结构函数/固定靶Drell-Yan过程计算 NLO QCD + Gauss-Kronrod数值积分
- Collider数据计算: W/Z过程NNLO+NNLL ApplGrid; Jet/Top过程FastNLO

独立构建PDF global analysis

已完成新的PDF global analysis: JZ96 PDF

- check: 将使用实验数据列表、计算输入设置、参数设置、非微扰函数形式等调至与CT18NNLO一致





以global analysis为重点的研究

新物理寻找

- PDF是很多新物理寻找课题的瓶颈，尤其是大质量粒子的直接寻找
- 利用global analysis 同时约束PDF并寻找新物理
- 典型课题： W' 、 Z' 的寻找

格点QCD计算的实验检验研究

- 格点QCD计算、Hamilton体系计算往往难以在实验上进行直接测量验证
- 以global analysis为框架，构建格点QCD计算结果与众多实验测量之间的间接检验
- 典型课题：格点QCD对极大 x 处的 $s - \bar{s}$ 计算引入PDF global fitting

标准模型和QCD精确测量研究

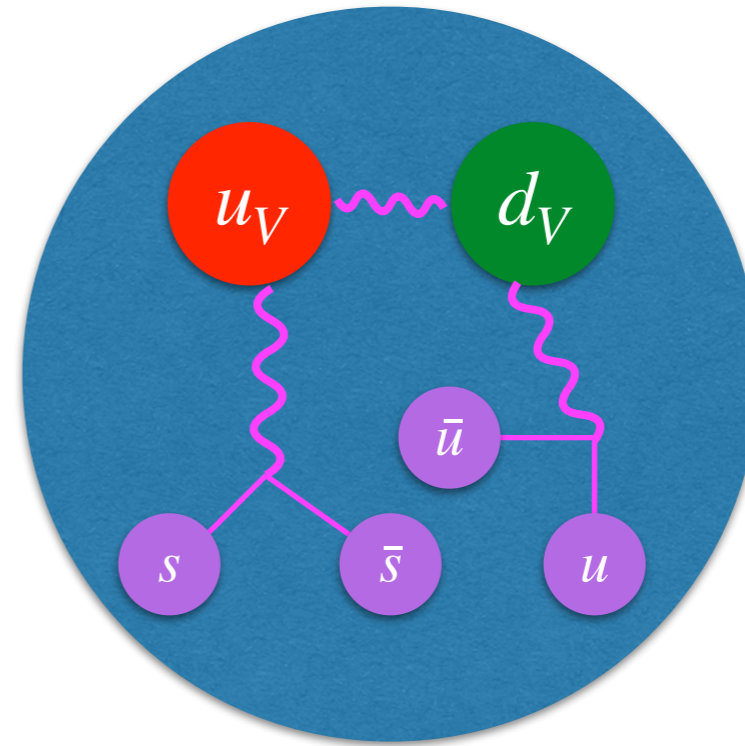
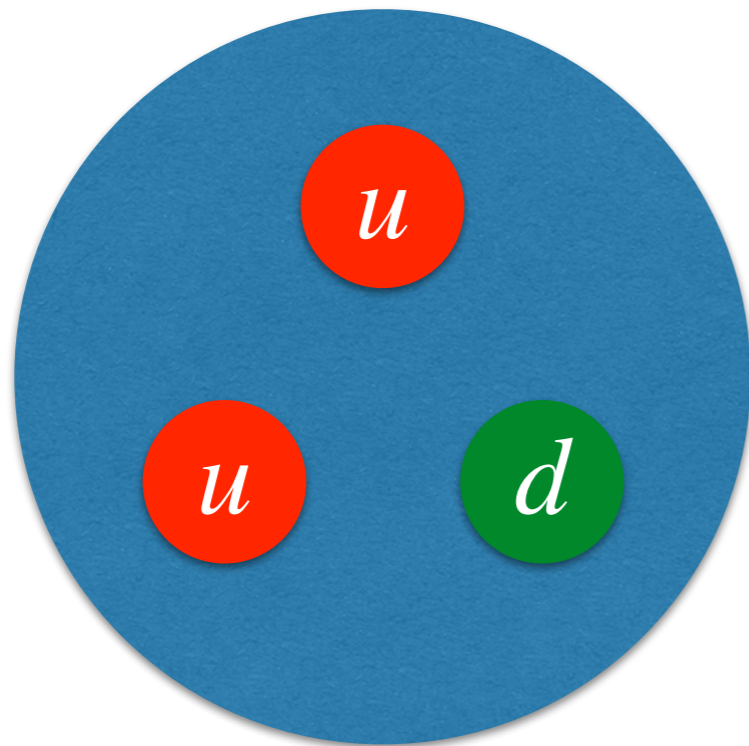
- 很多课题存在目标物理与PDF的强关联问题
- 利用 global analysis 解决关联性问题
- 典型课题： α_s 测量、 $\sin^2 \theta_W$ 测量、QCD resummation计算的精确检验

Backup

高能标下的质子结构

Constituent quark model 和 QCD improved parton model

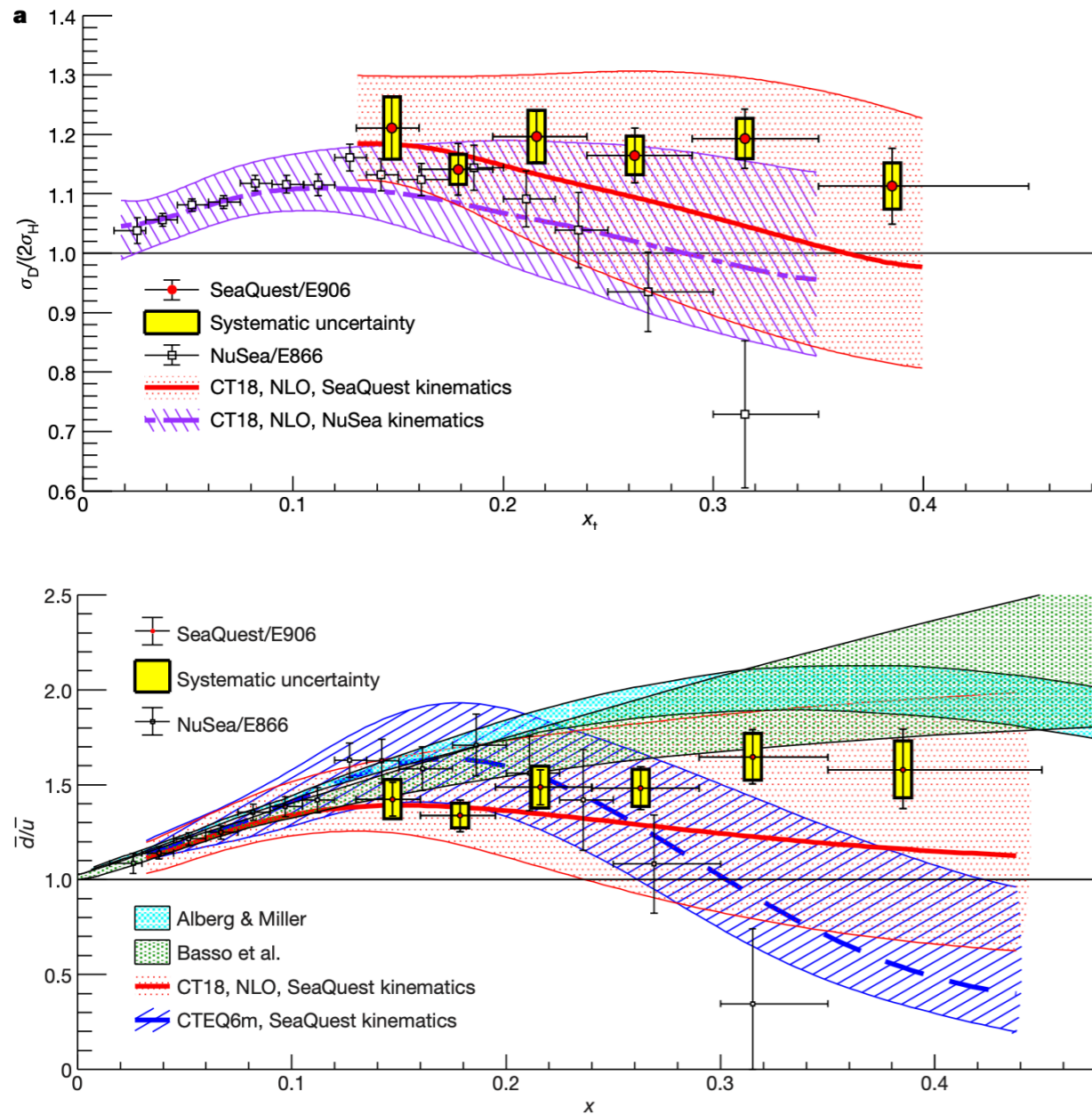
- Constituent quark model: proton = uud
- QCD improved parton model: proton = $u_V, d_V + g, u, \bar{u}, d, \bar{d}, s, \bar{s}, c, \bar{c}, b, \bar{b} + \dots$



- 在 $\mathcal{O}(1)$ GeV 以上能标的物理反应中，可将各个 parton 视为相互独立参与物理反应，忽略 parton 之间的相互作用

$$\sigma(p) = \sum_i \sigma(q_i)$$

Breaking of SU(2) flavor symmetry: $\bar{d} \neq \bar{u}$



- 实验测量已经证实，在较大 x ，出现了明显的 $\bar{d}/\bar{u} > 1$ 的结果
- 该现象可以用pion-cloud、chiral quark等模型定性解释，但都要求 $\bar{d}/\bar{u} > 1$
- 在小 x 处， \bar{d}/\bar{u} 会小于1吗?
- 小 x 处观测 \bar{d}/\bar{u} 非常困难

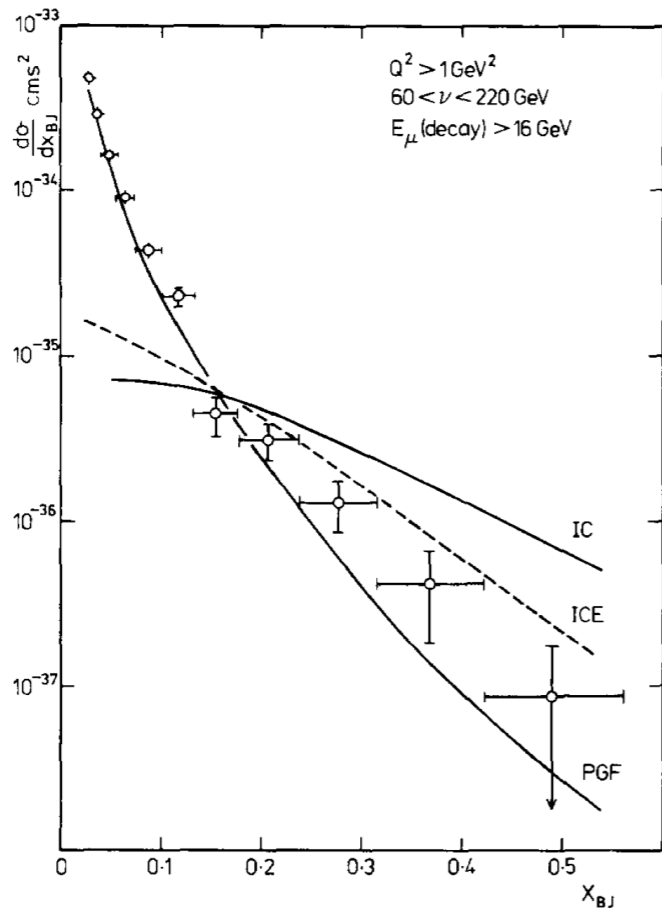
NuSea/SeaQuest实验测量结果
Nature Vol 590, 561-565, 2021

Heavy quark sea: intrinsic charm

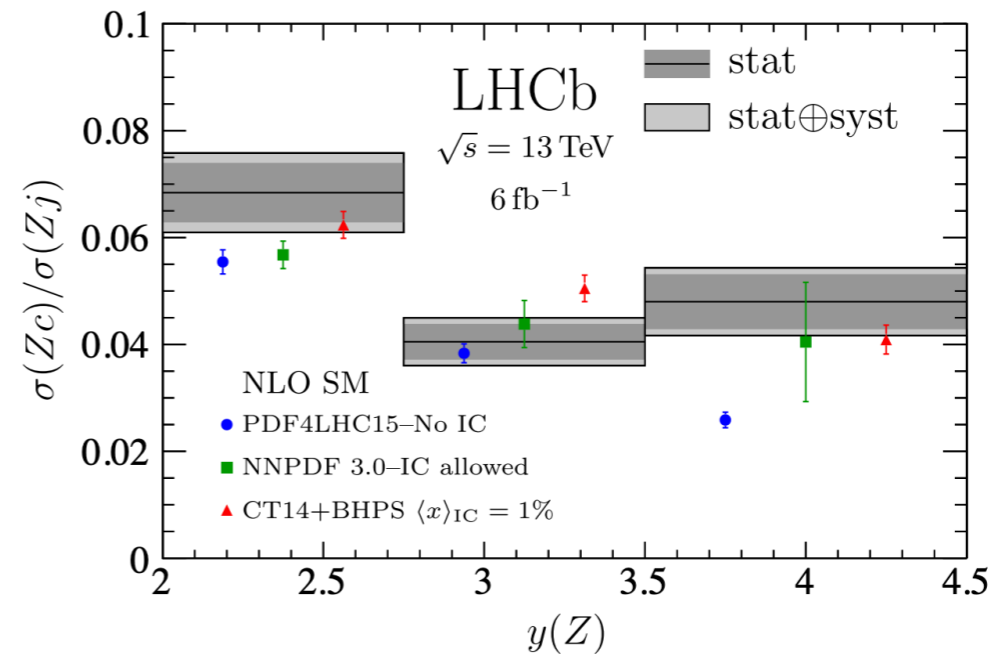
DIS到LHC Z+c jet实验测量:

- 早期DIS实验(EMC)给出了intrinsic charm的可能性
- LHCb测量了 Z+c 过程截面
- 为了构造带有特定夸克种类的过程, 最终精度有限

早期 μ Fe散射实验测量
Phys. Lett. B 110, (1982) 73



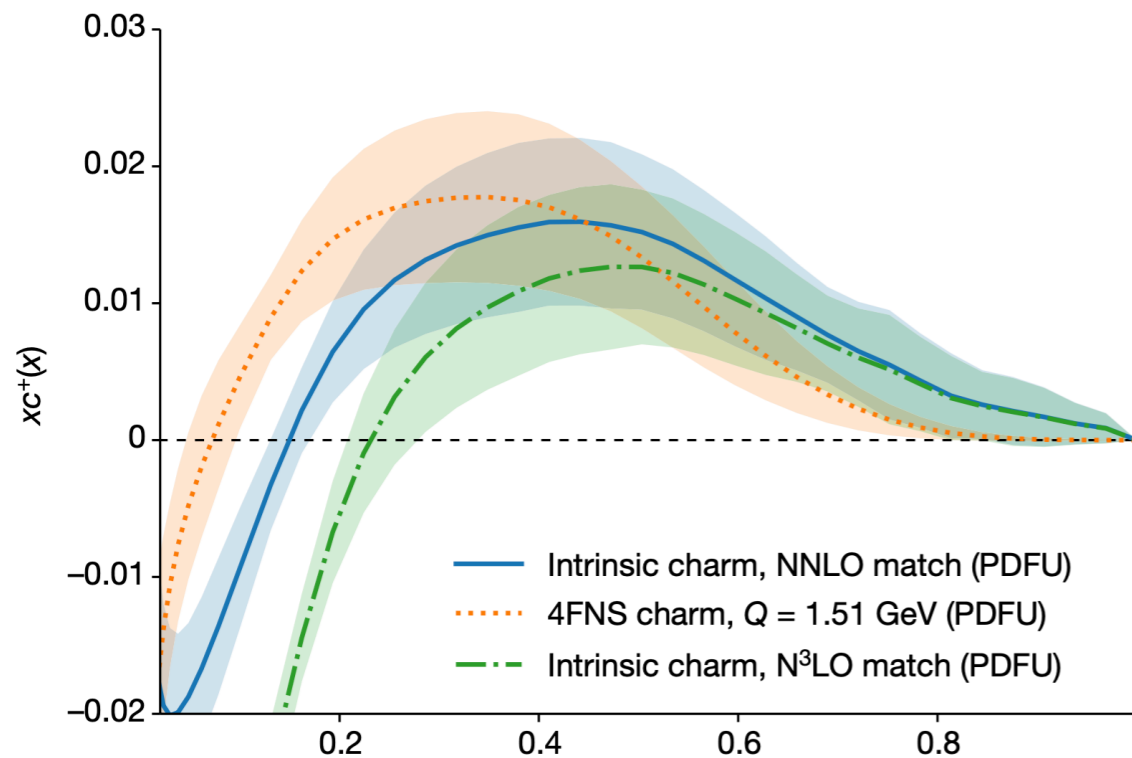
LHCb Z+c 实验测量
Phys. Rev. Lett. 128, 082001 (2022)



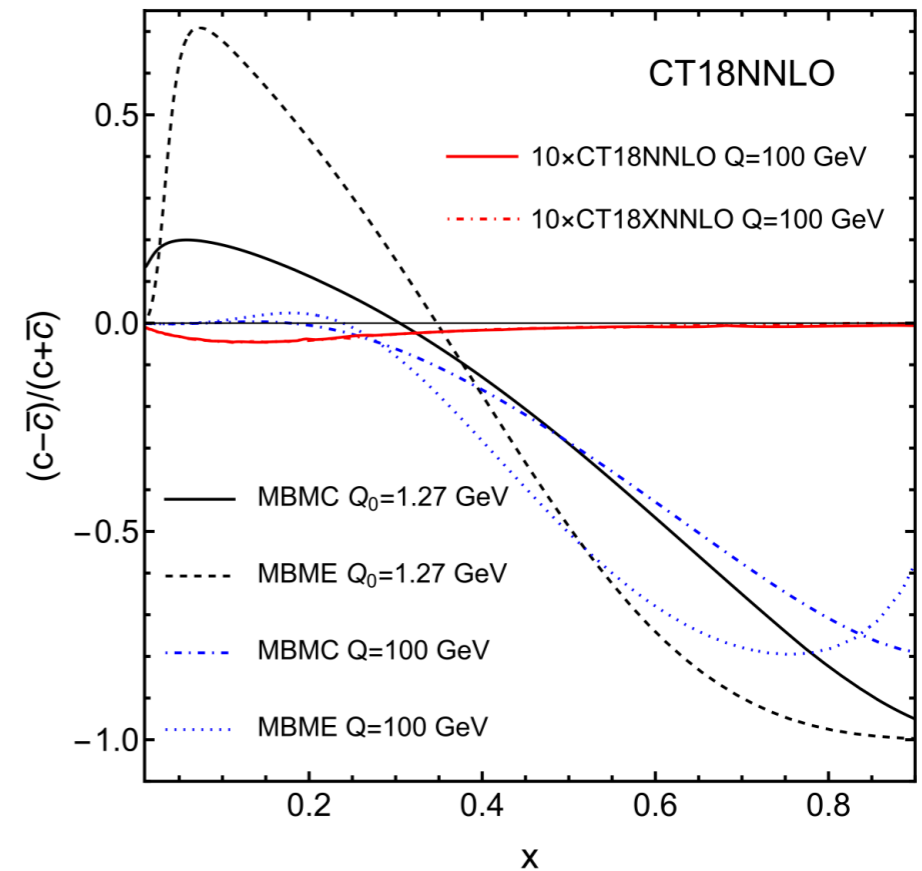
Heavy quark sea: intrinsic charm

不同QCD计算给出完全不同的intrinsic charm结果:

- NNPDF: intrinsic charm observed
- CT18: no intrinsic charm



NNPDF对intrinsic charm的
global fit结果
Nature Vol 608, 483 (2022)

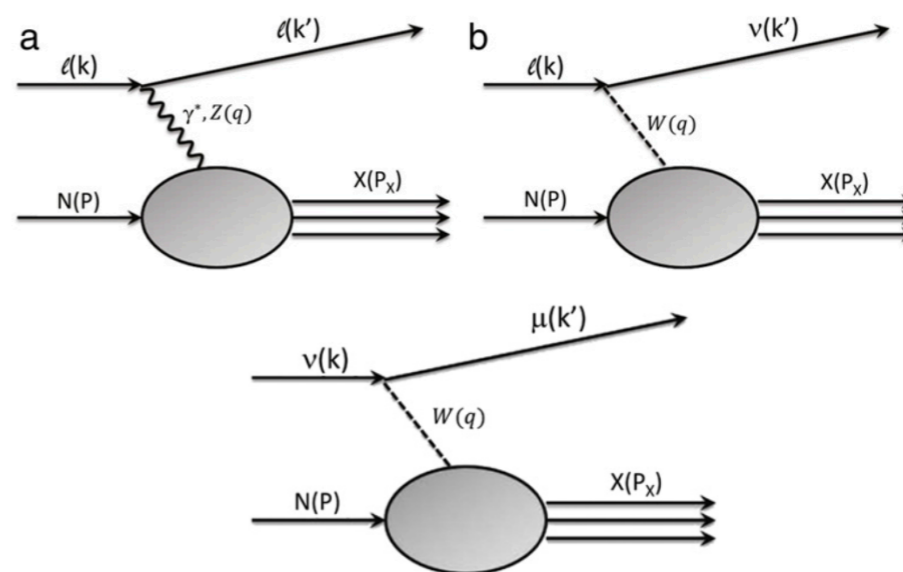


CT18对intrinsic charm的
global fit结果
Phys. Lett. B 843, 137975 (2023)

PDF global fitting 中的实验测量

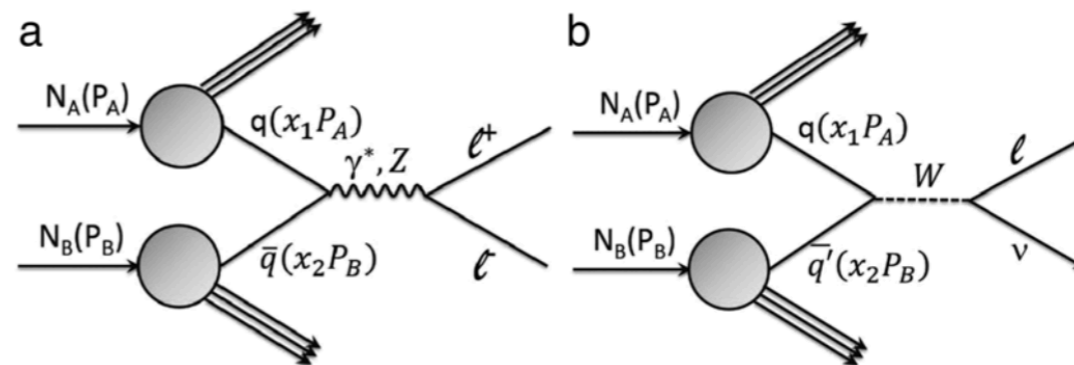
DIS 实验

- 部分子动量范围相对较大: $x > 0.01$
- 价夸克 u 、 d 贡献主导, 海夸克贡献被压低
- 统计量偏小, 精度不够
- 早期实验分析缺少 higher order QCD 计算



强子对撞实验

- 广泛的动量范围: $10^{-4} < x < 0.1$
- 各类夸克都具有极高产额
- 统计量大、实验测量精度高



PDF与质子结构研究的瓶颈:

缺少实验观测

举例: 强子实验中的三个主要物理观测量

- $hh(q\bar{q}) \rightarrow Z/\gamma^* \rightarrow \ell^+\ell^-$, $hh(q\bar{q}) \rightarrow W^+ \rightarrow \ell^+\bar{\nu}$, $hh(q\bar{q}) \rightarrow W^- \rightarrow \ell^-\nu$
- 在截面测量中, 不同种类夸克初态无法区分, x_1x_2 信息无法区分
- 实验观测量数目远小于涉及到的夸克信息自由度

$$\begin{aligned}\sigma_Z &= \mathcal{N}_u [u(x_1)\bar{u}(x_2) + \bar{u}(x_1)u(x_2)] \\ &\quad + \mathcal{N}_d [d(x_1)\bar{d}(x_2) + \bar{d}(x_1)d(x_2)] \\ &\quad + \mathcal{N}_s [s(x_1)\bar{s}(x_2) + \bar{s}(x_1)s(x_2)] + \dots\end{aligned}$$

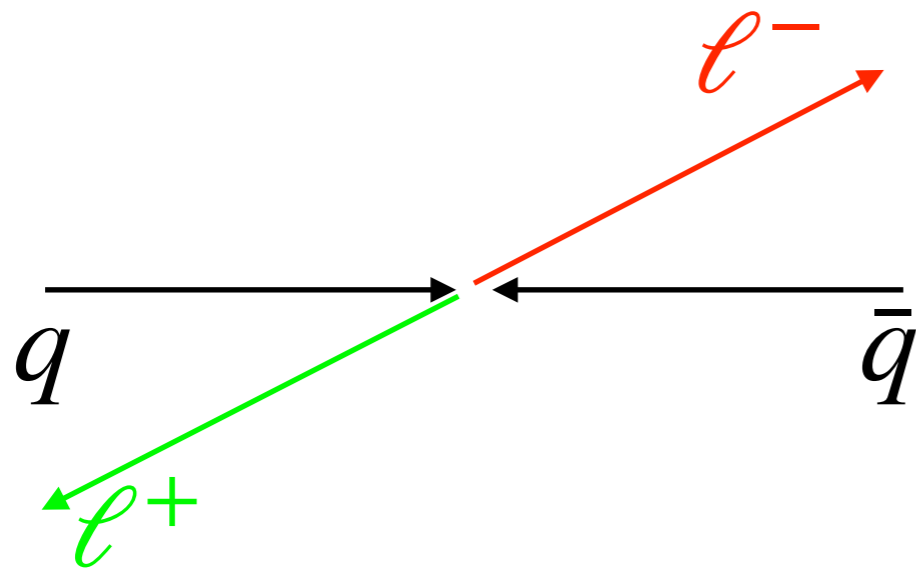
$$\begin{aligned}\sigma_{W^+} &= \mathcal{N}_{ud} [u(x_1)\bar{d}(x_2) + \bar{d}(x_1)u(x_2)] \\ &\quad + \mathcal{N}_{cs} [c(x_1)\bar{s}(x_2) + \bar{s}(x_1)c(x_2)] + \dots\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{W^-} &= \mathcal{N}_{ud} [d(x_1)\bar{u}(x_2) + \bar{u}(x_1)d(x_2)] \\ &\quad + \mathcal{N}_{cs} [s(x_1)\bar{c}(x_2) + \bar{c}(x_1)s(x_2)] + \dots\end{aligned}$$

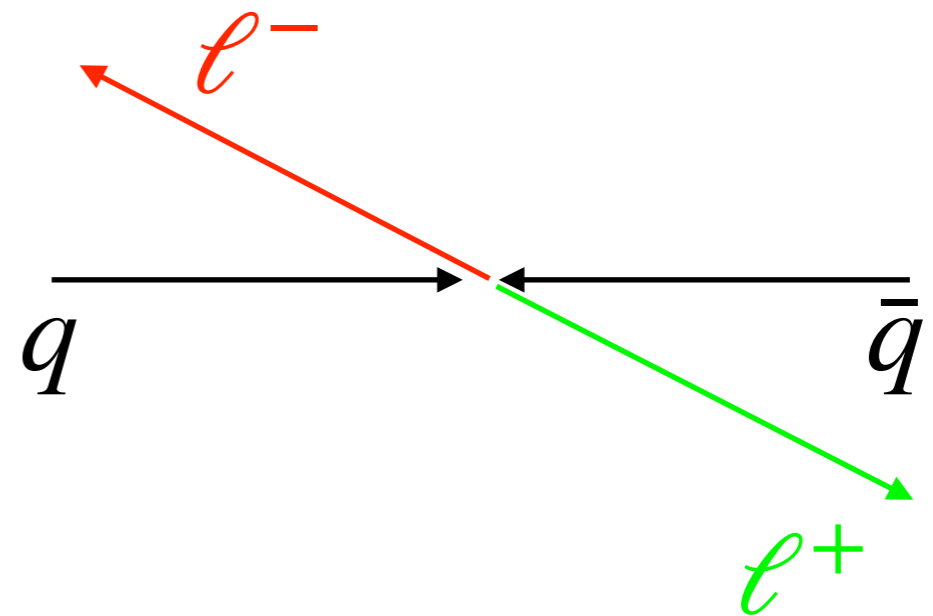
利用弱作用不对称性区分不同夸克初态

弱作用空间不对称性

- $hh(q\bar{q}) \rightarrow Z/\gamma^* \rightarrow \ell^+\ell^-$



forward event



backward event

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

A_{FB} 的严格参数化

Phys. Rev. D 106, 033001 (2022)

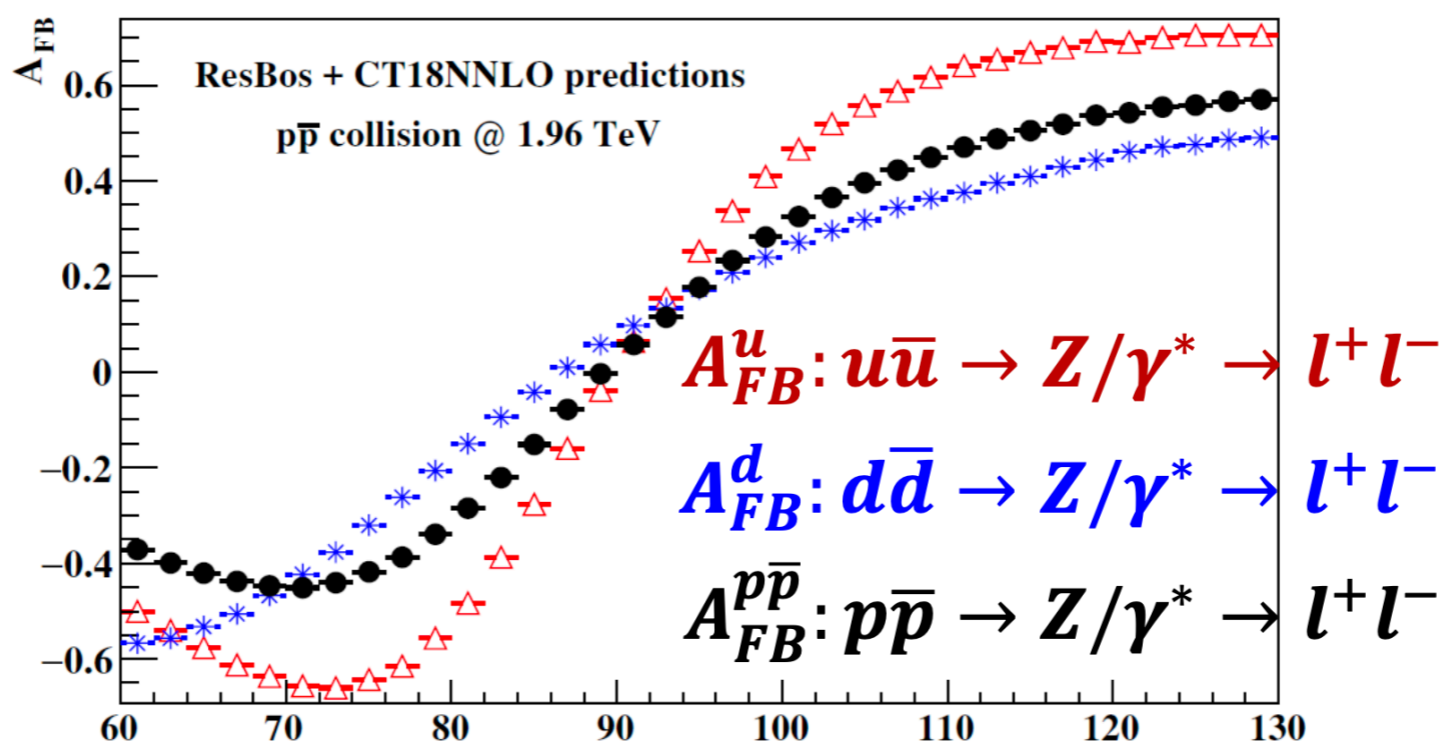
Eur. Phys. J. C 82:368 (2022)

Chin. Phys. C 45, 053001 (2021)

证明了 A_{FB} 可以进行严格参数化

- A_{FB}^u : 硬过程 $u\bar{u} \rightarrow Z/\gamma^* \rightarrow \ell^+\ell^-$ 的不对称性
 - A_{FB}^d : 硬过程 $d\bar{d} \rightarrow Z/\gamma^* \rightarrow \ell^+\ell^-$ 的不对称性
 - C_u : 上型夸克(u, c)的结构参数
 - C_d : 下型夸克(d, s, b)的结构参数
- 纯粹EW计算, 与初态质子结构信息与QCD无关
- 完全代表相关初态信息

$$A_{FB}^h = C_u(Y, M, Q_T) \times A_{FB}^u(Y, M, Q_T) + C_d(Y, M, Q_T) \times A_{FB}^d(Y, M, Q_T)$$



Tevatron情况下的参数化

Phys. Rev. D 106, 033001 (2022)

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

Chin. Phys. C 45, 053001 (2021)

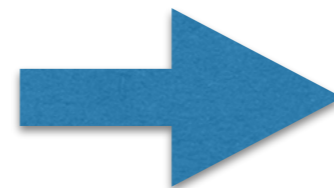
$$C_u(x_1, x_2) = \frac{\sum_{q=u,c} [q(x_1)q(x_2) - \bar{q}(x_1)\bar{q}(x_2)] \mathcal{N}_q}{\sum_{q=u,d,s,c,b} [q(x_1)q(x_2) + \bar{q}(x_1)\bar{q}(x_2)] \mathcal{N}_q}$$

$$C_d(x_1, x_2) = \frac{\sum_{q=d,s,b} [q(x_1)q(x_2) - \bar{q}(x_1)\bar{q}(x_2)] \mathcal{N}_q}{\sum_{q=u,d,s,c,b} [q(x_1)q(x_2) + \bar{q}(x_1)\bar{q}(x_2)] \mathcal{N}_q}$$

考虑到Tevatrons反夸克贡献很低，且 s, c, b 与其反夸克一致则

$$C_u \approx \frac{u^2 - \bar{u}^2}{\sigma_{total}} \approx \frac{u_v^2}{\sigma_{total}}$$

$$C_d \approx \frac{d^2 - \bar{d}^2}{\sigma_{total}} \approx \frac{d_v^2}{\sigma_{total}}$$



$$R = \frac{C_u}{C_d} = \left(\frac{u_v}{d_v} \right)^2$$

$$S = C_u + C_d = \frac{\sigma_{valence}}{\sigma_{total}}$$

LHC情况下的参数化

Phys. Rev. D 106, 033001 (2022)

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

Chin. Phys. C 45, 053001 (2021)

$$C_u(x_1, x_2) = \frac{\sum_{q=u,c} [q(x_1)\bar{q}(x_2) - \bar{q}(x_1)q(x_2)] \mathcal{N}_q}{\sum_{q=u,d,s,c,b} [q(x_1)\bar{q}(x_2) + \bar{q}(x_1)q(x_2)] \mathcal{N}_q}$$

$$C_d(x_1, x_2) = \frac{\sum_{q=d,s,b} [q(x_1)\bar{q}(x_2) - \bar{q}(x_1)q(x_2)] \mathcal{N}_q}{\sum_{q=u,d,s,c,b} [q(x_1)\bar{q}(x_2) + \bar{q}(x_1)q(x_2)] \mathcal{N}_q}$$

同样，考虑到 s, c, b 与其反夸克一致，则

$$C_u \approx \frac{u(x_1)\bar{u}(x_2) - u(x_2)\bar{u}(x_1)}{\sigma_{total}}$$

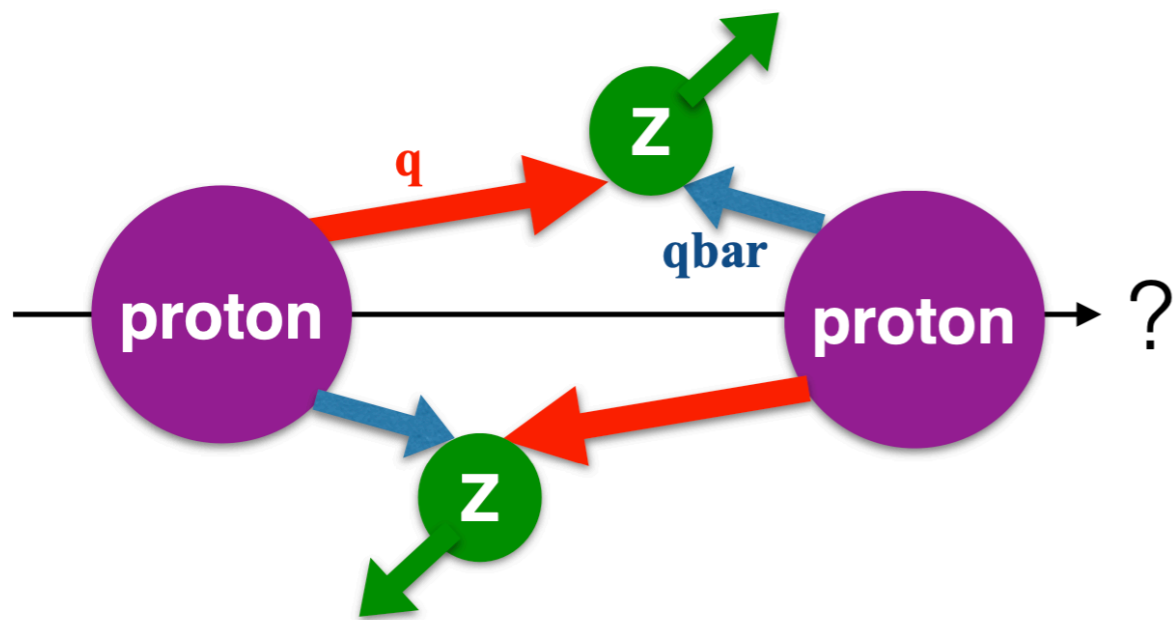
$$C_d \approx \frac{d(x_1)\bar{d}(x_2) - d(x_2)\bar{d}(x_1)}{\sigma_{total}}$$

$$R = \frac{C_u}{C_d} = \frac{u(x_1)\bar{u}(x_2) - u(x_2)\bar{u}(x_1)}{d(x_1)\bar{d}(x_2) - d(x_2)\bar{d}(x_1)}$$

大、小 x 处的信息混合

初态夸克能量大小无法区分

- 对于强子对撞实验上的 $q_i \bar{q}_j$ 初态物理过程，实际上是 $q_i(x_S) \bar{q}_j(x_L)$ 和 $q_i(x_L) \bar{q}_j(x_S)$ 的混合。任何一个夸克都可以携带更高能量，实验上无法区分



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

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

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

双玻色子过程中的boost asymmetry

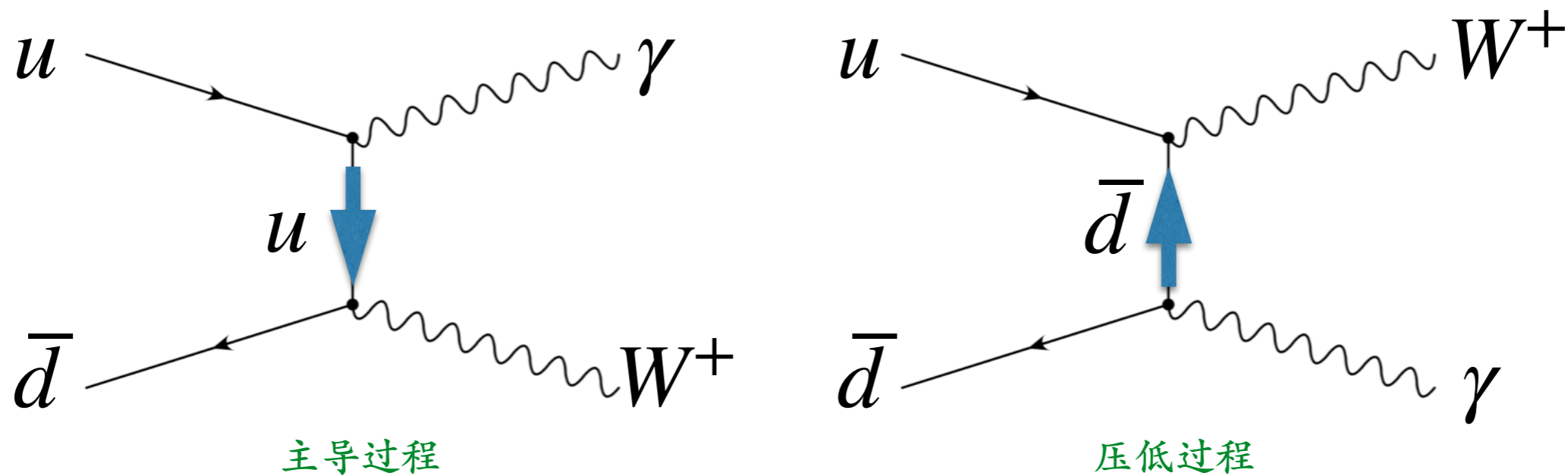
Phys. Rev. D 106, L051301 (2022)

以 $W^+\gamma$ 过程为例:

- W^+ 直接和 \bar{d} 耦合, 因此其运动学信息主导于 \bar{d}
- 同理, γ 直接与 u 耦合, 因此其运动学信息主导于 u
- 定义 $W^+\gamma$ 事例中的boost asymmetry:

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

- $A_{\text{boost}}^{W^+\gamma}$ 直接反映了 $u(x_L)\bar{d}(x_S)$ 和 $u(x_S)\bar{d}(x_L)$ 的相对比例



双玻色子过程中的boost asymmetry

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

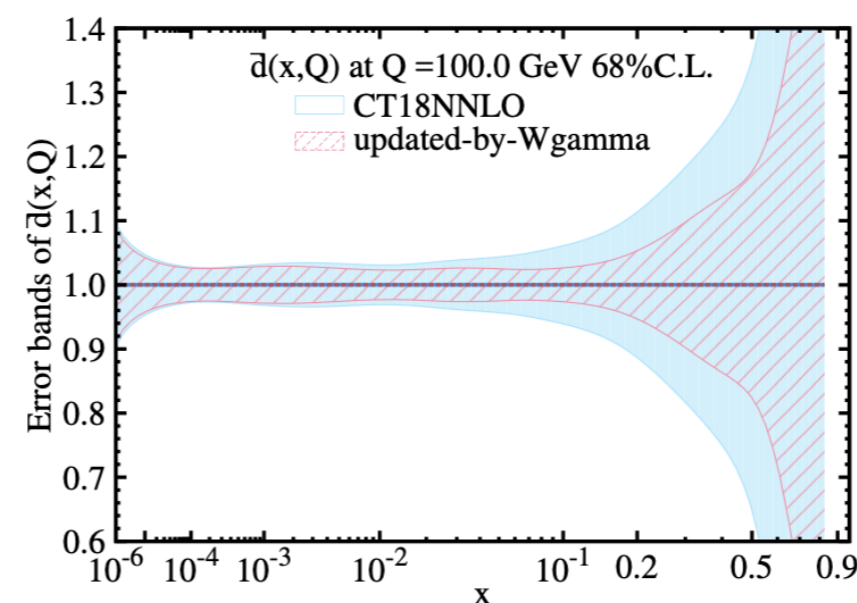
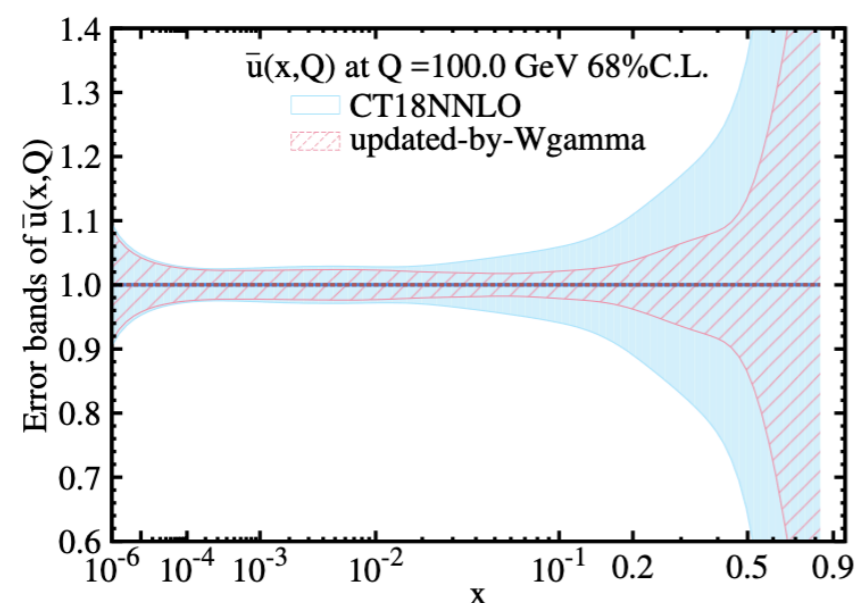
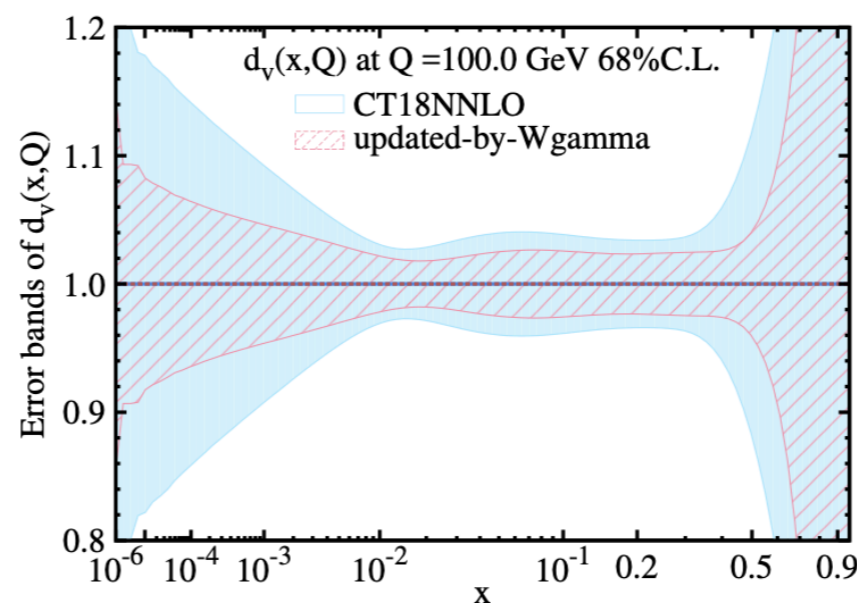
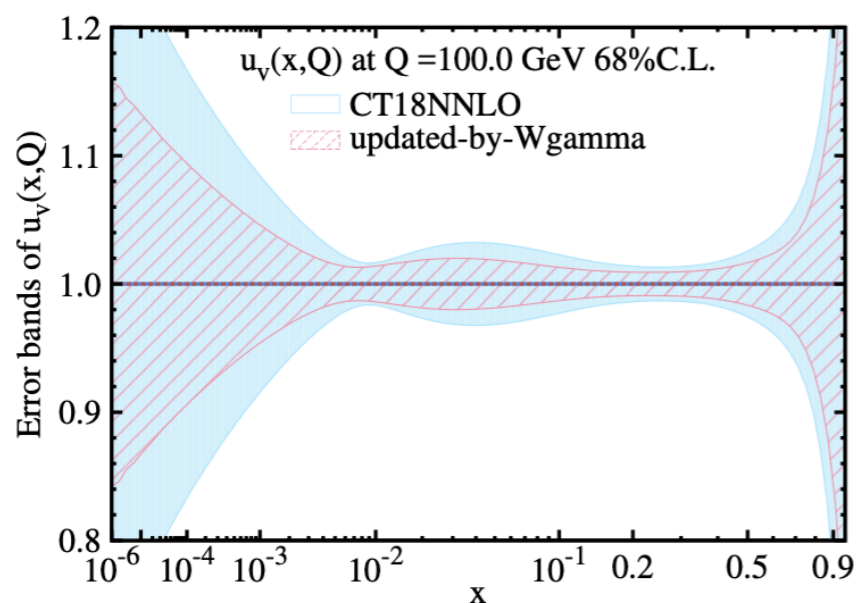
各种类型物理过程中的boost asymmetry

Impact study

Phys. Rev. D 106, L051301 (2022)

Introducing $A_{boost}^{W\gamma}$ into PDF global fitting

- Based on the CT18NNLO PDF global fitting, we introduce $A_{boost}^{W^+\gamma}$ and $A_{boost}^{W^-\gamma}$ (corresponding to 1 ab^{-1} data @ LHC 13 TeV) into the fit
- Significantly improvement on u , d , \bar{u} , \bar{d}



研究内容(1) 利用不对称性测量“差性质”

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

不对称性	可测量的“差性质”	实验测量工作
质子-反质子对撞 Z过程空间不对称性	<ul style="list-style-type: none">独立测量价夸克u_V、d_V价夸克差性质 u_V/d_V	<ul style="list-style-type: none">Tevatron D0实验测量已完成并发表
质子-质子对撞 Z过程空间不对称性 新结构参数	<ul style="list-style-type: none">正反夸克差性质 $u - \bar{u}$、$d - \bar{d}$轻重夸克差性质 $(u + d)/(s + c + b)$	<ul style="list-style-type: none">LHC CMS 8 TeV测量已完成并发表LHC ATLAS 13 TeV 2015+2016, 已EB
质子-质子对撞 $W\gamma$ 运动学不对称性	<ul style="list-style-type: none">不同味正反夸克$q_i\bar{q}_j$ 在大、小 x 区域差性质 $x \sim 10^{-2} / x \sim 10^{-4}$	<ul style="list-style-type: none">LHC ATLAS 13 TeV测量 full Run 2待EBLHC ATLAS 13.6 TeV测量进行中
质子-质子对撞 WW 运动学不对称性	<ul style="list-style-type: none">同味正反夸克$q\bar{q}$ 在大、小 x 区域差性质 $x \sim 10^{-2} / x \sim 10^{-4}$	<ul style="list-style-type: none">LHC ATLAS 13 TeV测量 full Run 2 EB结束
质子-质子对撞 WZ 运动学不对称性	<ul style="list-style-type: none">同味正反夸克$q\bar{q}$ 在大、小 x 区域差性质 $x \sim 10^{-2} / x \sim 10^{-4}$	<ul style="list-style-type: none">LHC ATLAS 13.6 TeV测量进行中

PDF global analysis 中的技术问题

非线性误差估计

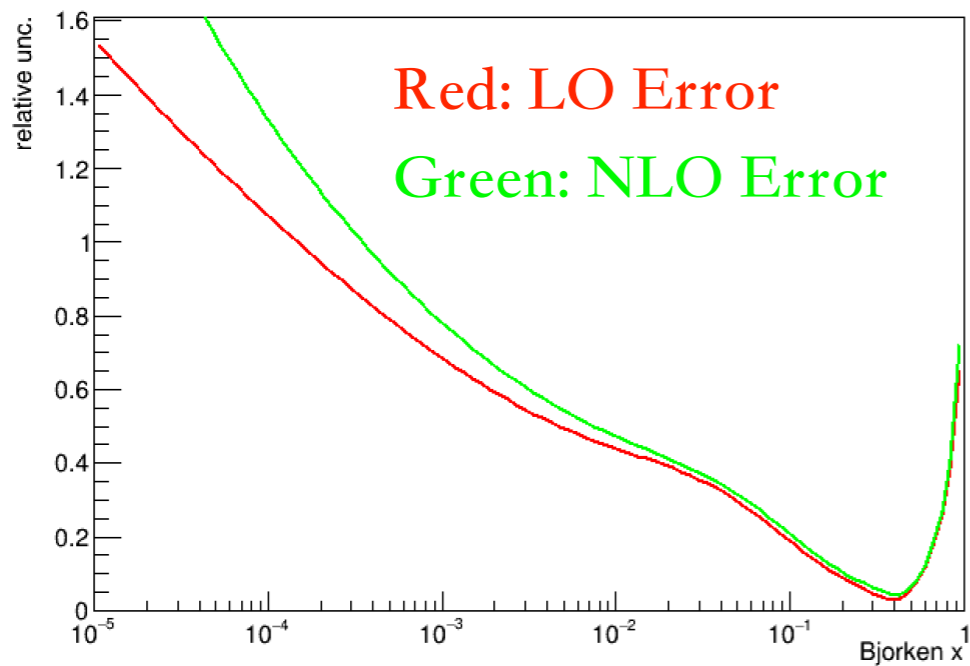
- CT系列PDF是典型的Hessian方法，是按物理量的线性展开做误差估计

$$\sigma(X)_{\text{LO}} = \sum_i \frac{\partial X}{\partial z_i}$$

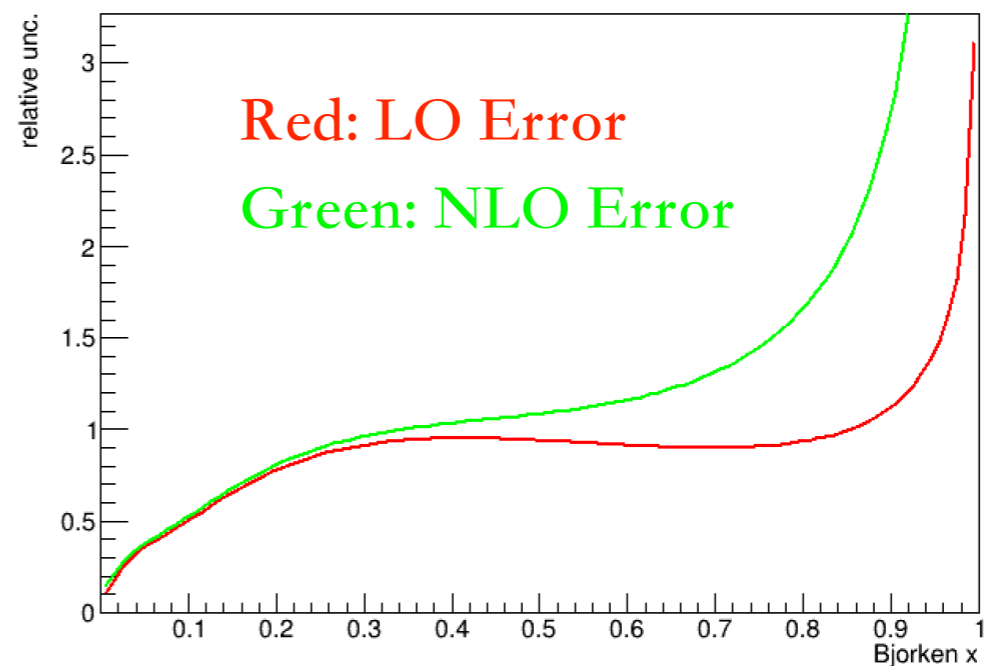
- 发展新的PDF analysis，可以按照二阶非线性展开估计误差

$$\sigma(X)_{\text{NLO}} = \sum_i \frac{\partial X}{\partial z_i} \sigma_i + \frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{\partial^2 X}{\partial z_i \partial z_j} \sigma_i \sigma_j$$

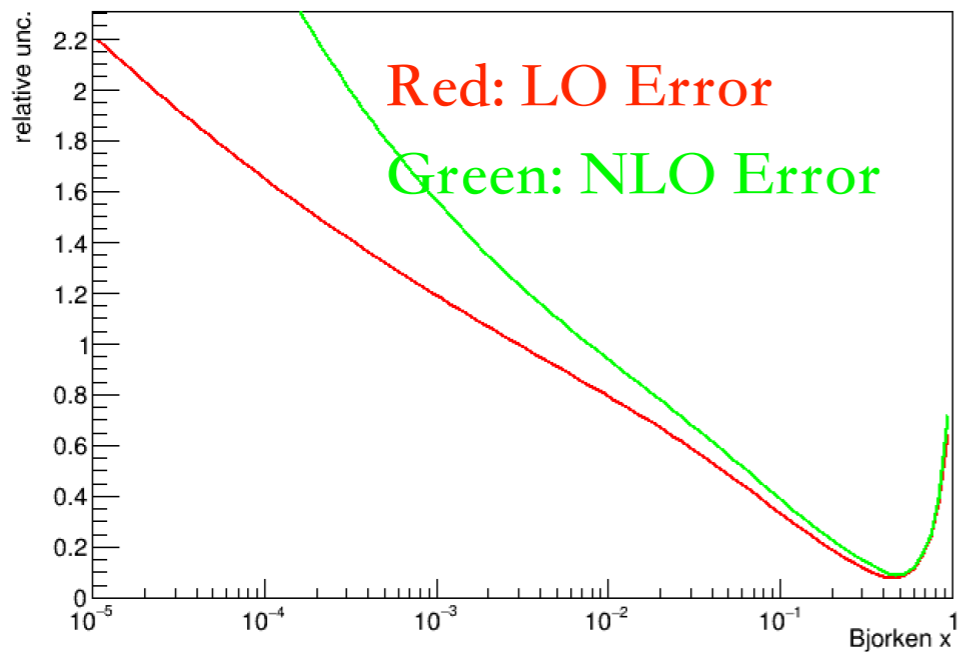
PDF global analysis 中的技术问题



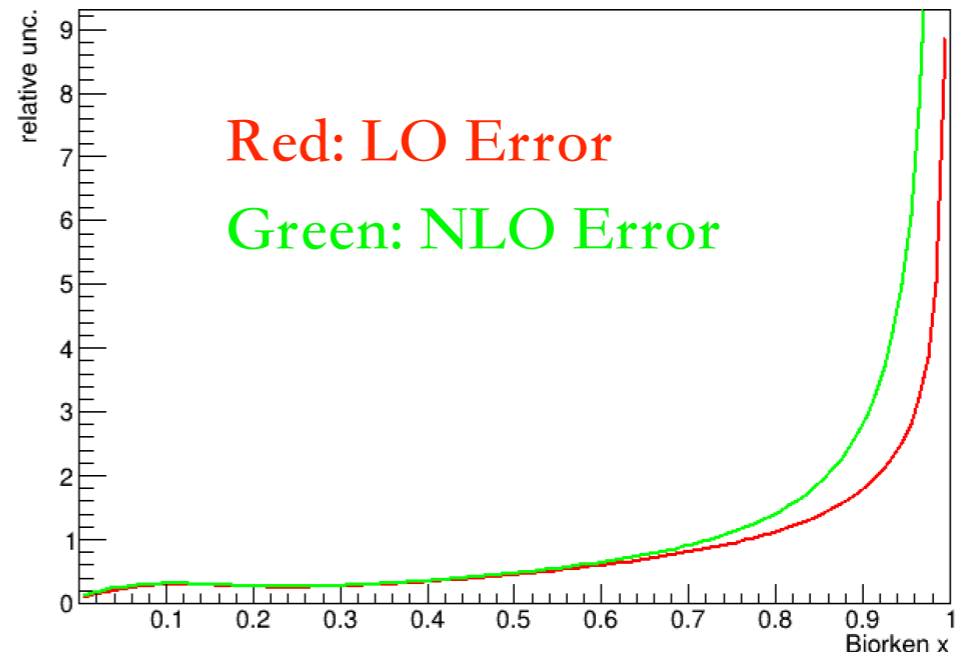
Uncertainty for u_V , in $\log x$



Uncertainty for \bar{u}



Uncertainty for d_V , in $\log x$



Uncertainty for \bar{d}