

格点QCD进展:

高能质子结构的有效量子场论计算

季向东

上海交通大学

高能物理第十二届学术年会，广州华南师范大学

2026年7月15日

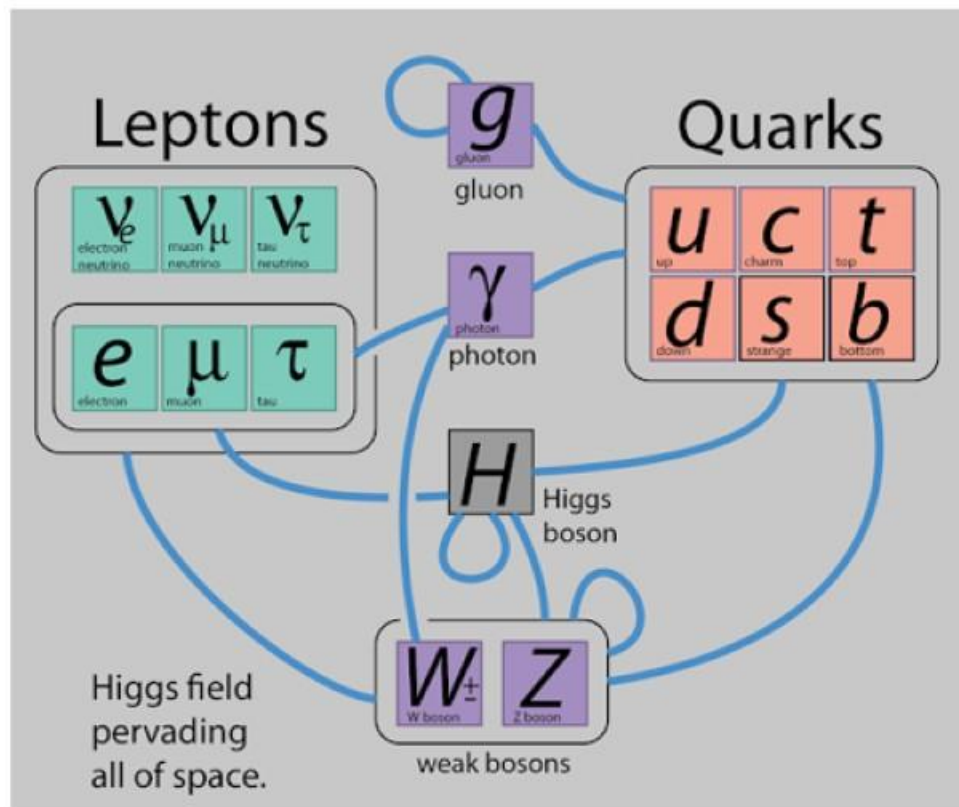
报告提纲

- 标准模型：高阶微扰论与格点QCD
- 为什么PDF无法用第一性原理直接计算？
- 大动量有效量子场论(LaMET)与高能质子结构计算
- 质子三维GPD成像和电子离子对撞机 (EIC,EicC)
- 展望

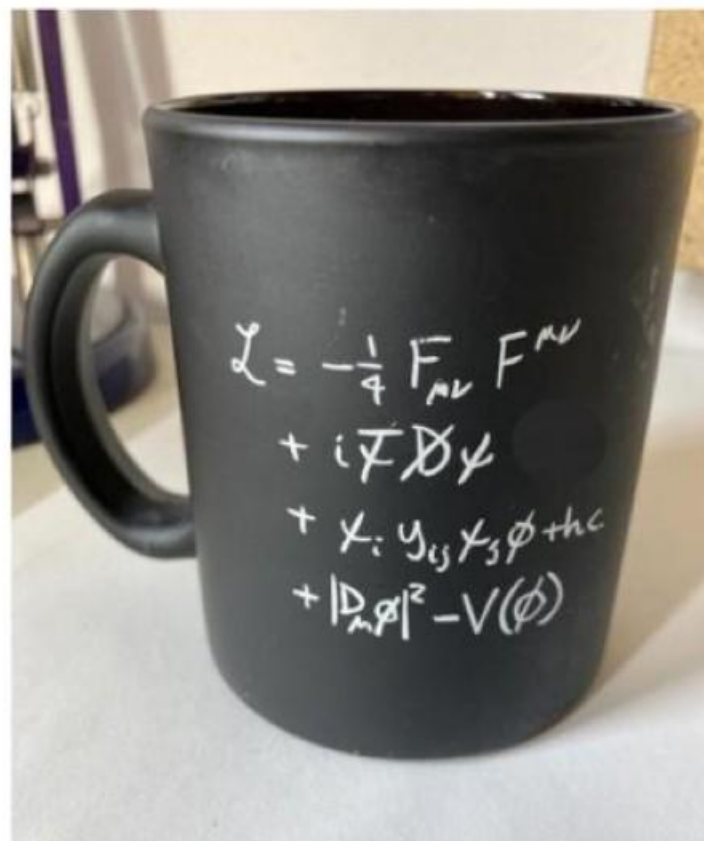
标准模型：微扰论与格点QCD

标准模型（弱电和强）

粒子和相互作用



$$SU_C(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$$

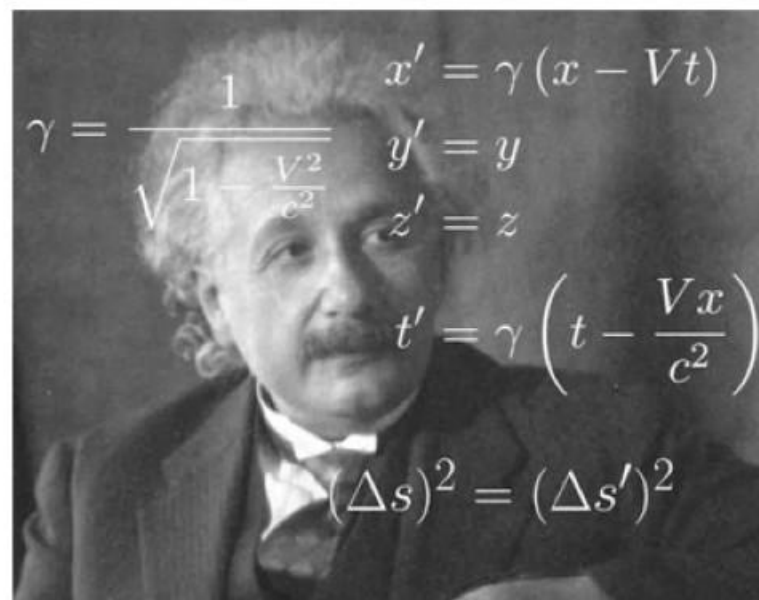


量子场论 (QFT) =

量子力学

+

狭义相对论

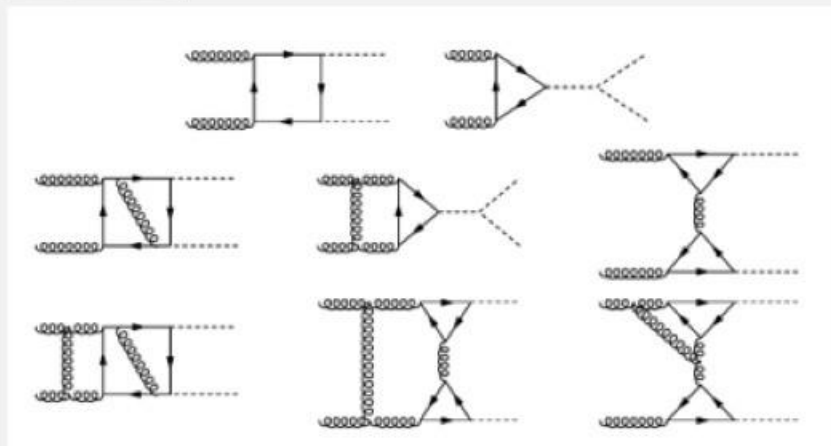


计算工具

微扰论与费曼图



理查德 费曼
Richard Feynman

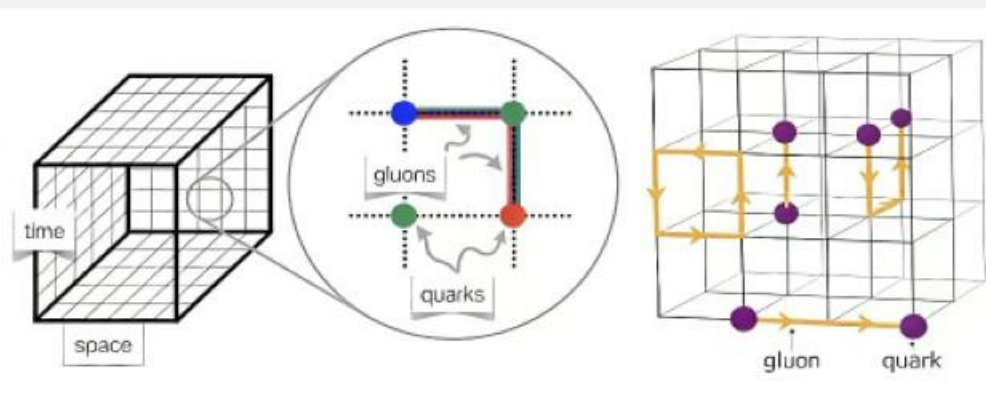


电弱理论: $\alpha_{EW} \ll 1$
高能 QCD: $\alpha_s(Q) \ll 1$

非微扰格点QCD



肯尼斯 威尔逊
Kenneth G. Wilson

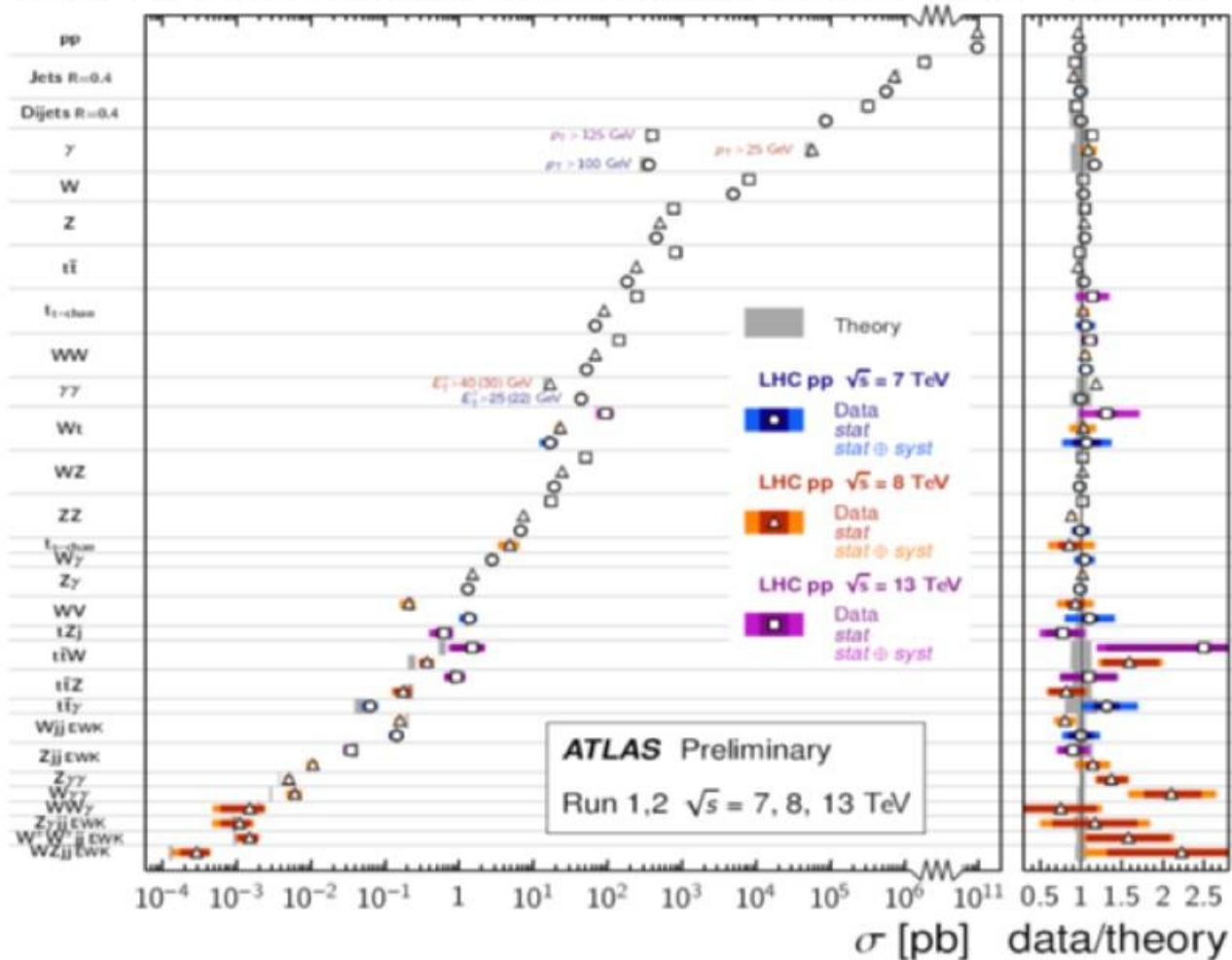


低能 QCD: $\alpha_s(Q) \sim 1$

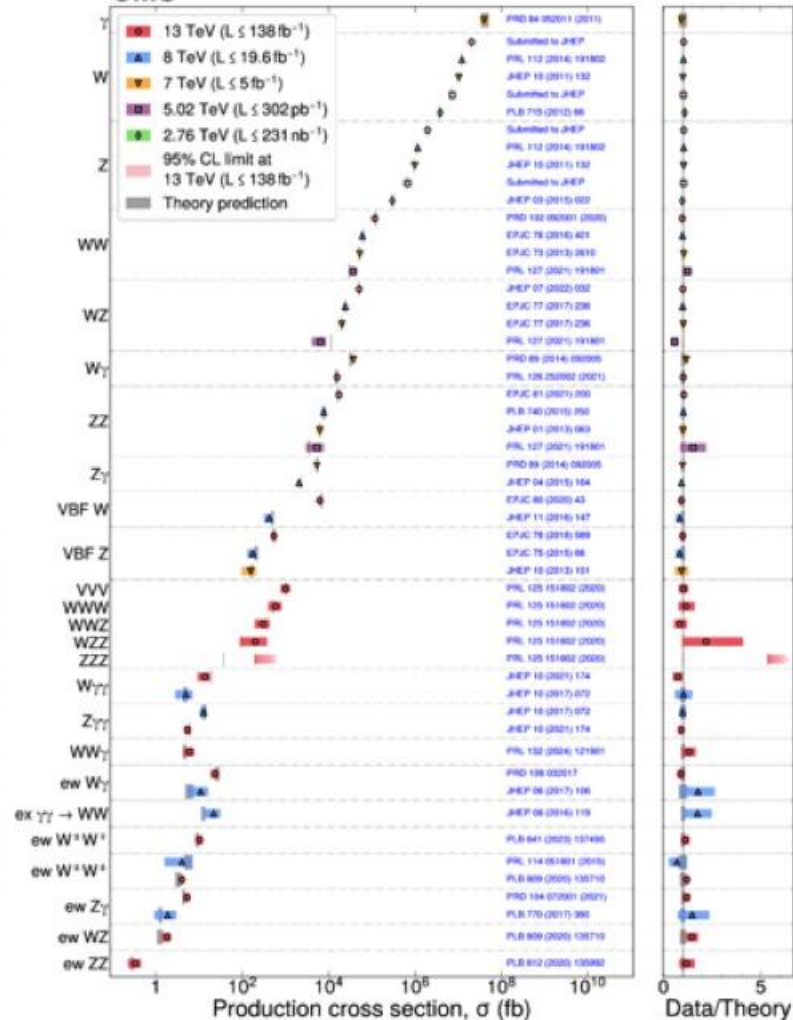
标准模型微扰论的成功

LHC对撞机上的截面测量与标准模型高阶微扰论预言高度一致。

Standard Model Production Cross Section Measurements Status: July 2017



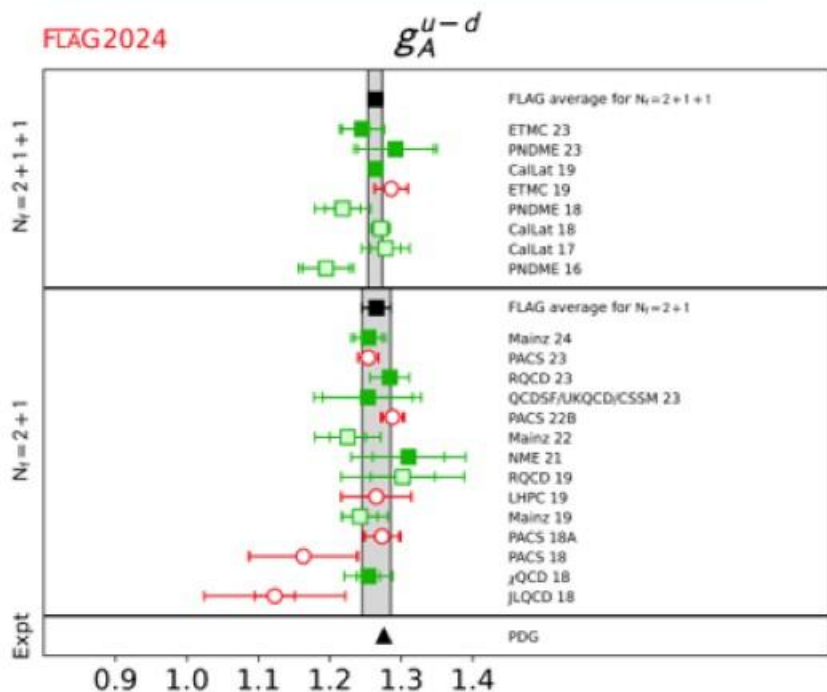
CMS



非微扰格点QCD成功

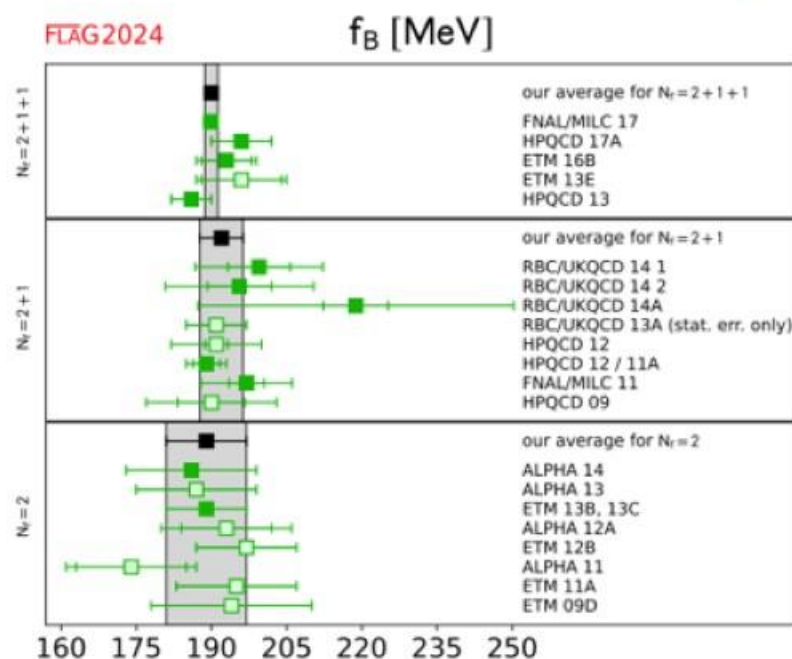
低能过程中的关键物理量与格点 QCD 第一性原理计算相符。

中子衰变常数

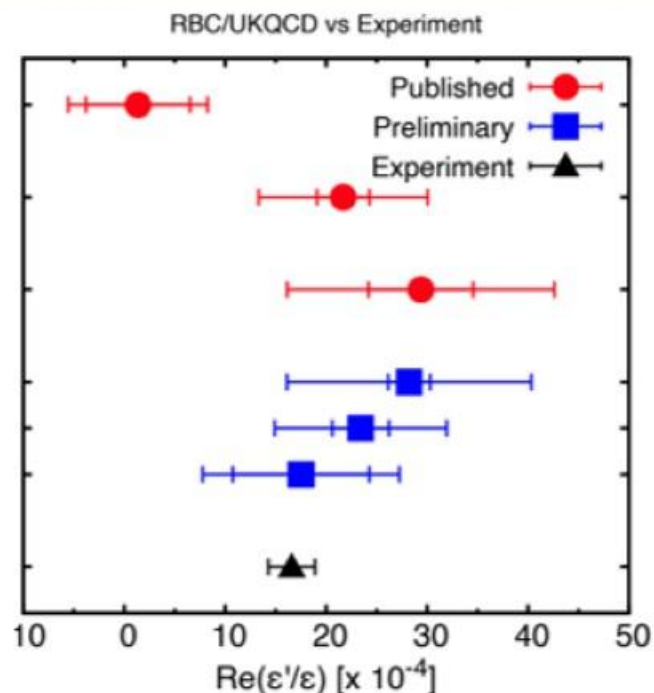


Flag Collaboration, PRD113 (2026)

B介子衰变常数



K介子CP破坏 ϵ'/ϵ



M. Tomii (RBC/UKQCD), PoS LATTICE2024 (2025)

缪子g-2: 微扰论+格点QCD

(2026 breakthrough prize)



BREAKTHROUGH
PRIZE

$$g - 2 \equiv a_{\mu}^{SM} = \underbrace{a_{\mu}^{QED}} + \underbrace{a_{\mu}^{EW}} + \underbrace{a_{\mu}^{HVP}} + \dots$$

QED (微扰): $a_{\mu}^{QED} = 116584718.8(0.2) \times 10^{-11}$

T. Aoyama et al., PRL109 (2012)

S. Volkov, PRD 110(2024)

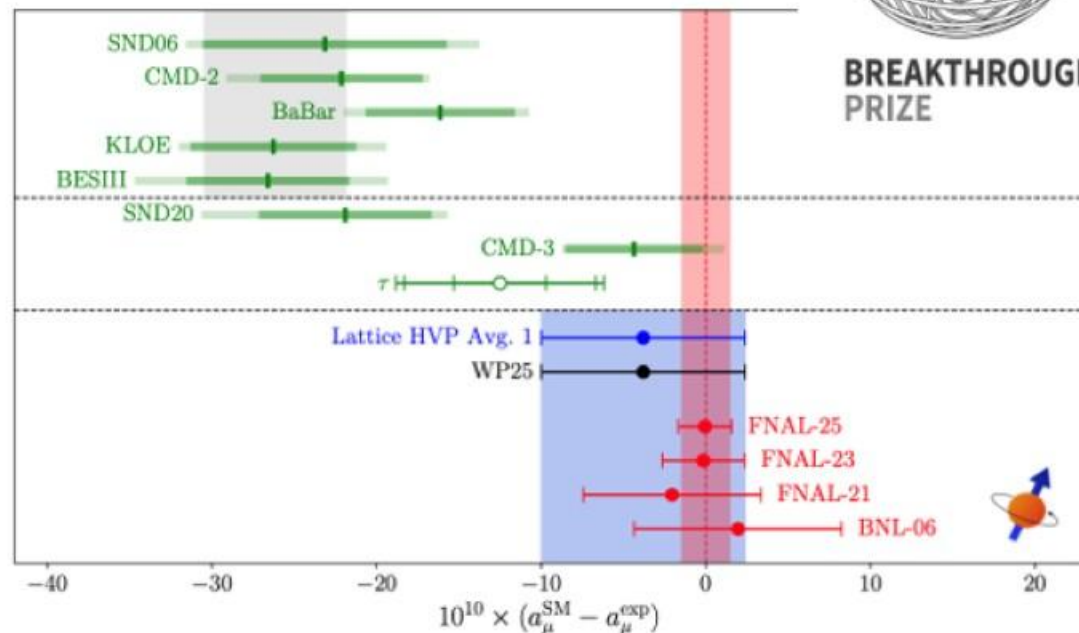
EW (微扰): $a_{\mu}^{EW} = 154.4(4) \times 10^{-11}$

A. Czarnecki et al., PRD 67 (2003)

C. Gnendiger et al., PRD 88 (2013)

HVP (格点): $a_{\mu}^{HVP} = 7045(61) \times 10^{-11}$

S. Borsányi et al., Nature 593 (2021)



R. Aliberti, Phys.Rept. 1143, 1-158 (2025)

$$\Delta a_{\mu} = a_{\mu}^{exp} - a_{\mu}^{SM} = 36(83) \times 10^{-11}$$

微扰理论与格点 QCD 联手，实现与实验的精确吻合。

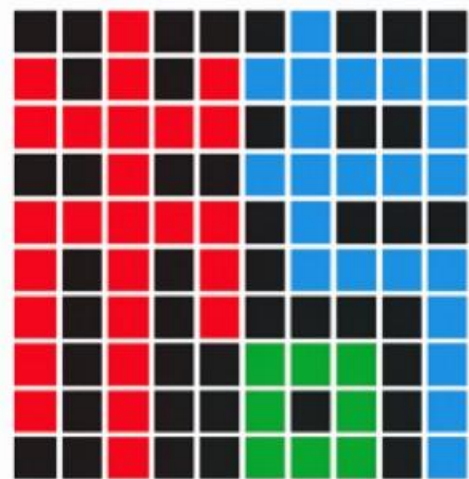
中国格点QCD的崛起

中国格点大型会议



第四届中国格点QCD研讨会（2024）湖南·长沙

国产组态



CLQCD



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

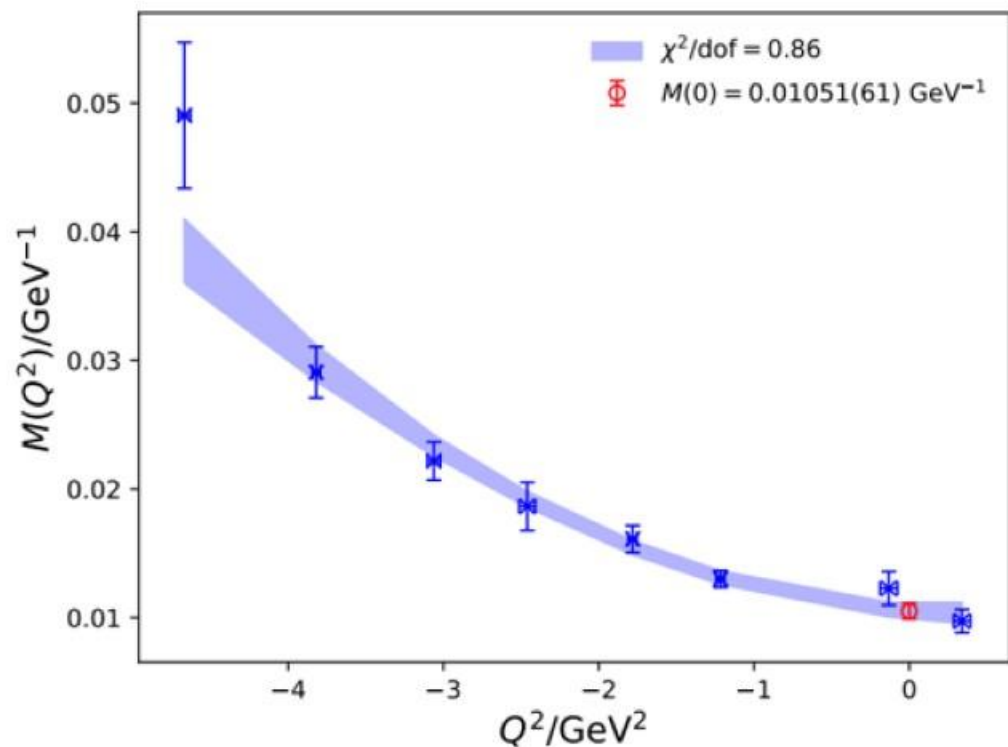
国内格点 QCD 研究的重要参与单位（不完全列举）：
北大，高能所，理论所，华中师大，华南师大，近代物理所，上海交大/TDLI，湖南师大，...

CLQCD重要工作

高能所：陈莹、宫明、刘朝峰、孙玮
西安工业大学：李宁

北大：冯旭、刘川
康涅狄格大学：靳路昶

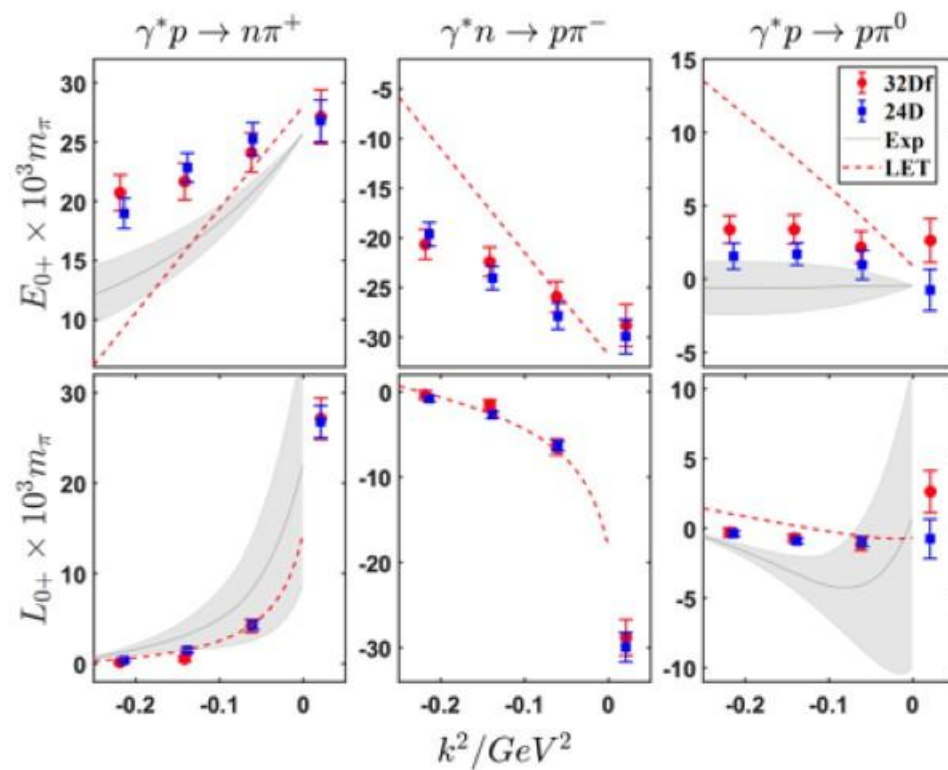
J/ψ 辐射衰变宽度



$$\Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma \eta_{(2)}) = 0.385(45) \text{ keV}$$

X. Jiang et al., PRL 130 (2023)

首次从格点 QCD 研究核子 pion 产生



Y.-S. Gao et al., PRL 134 (2025)

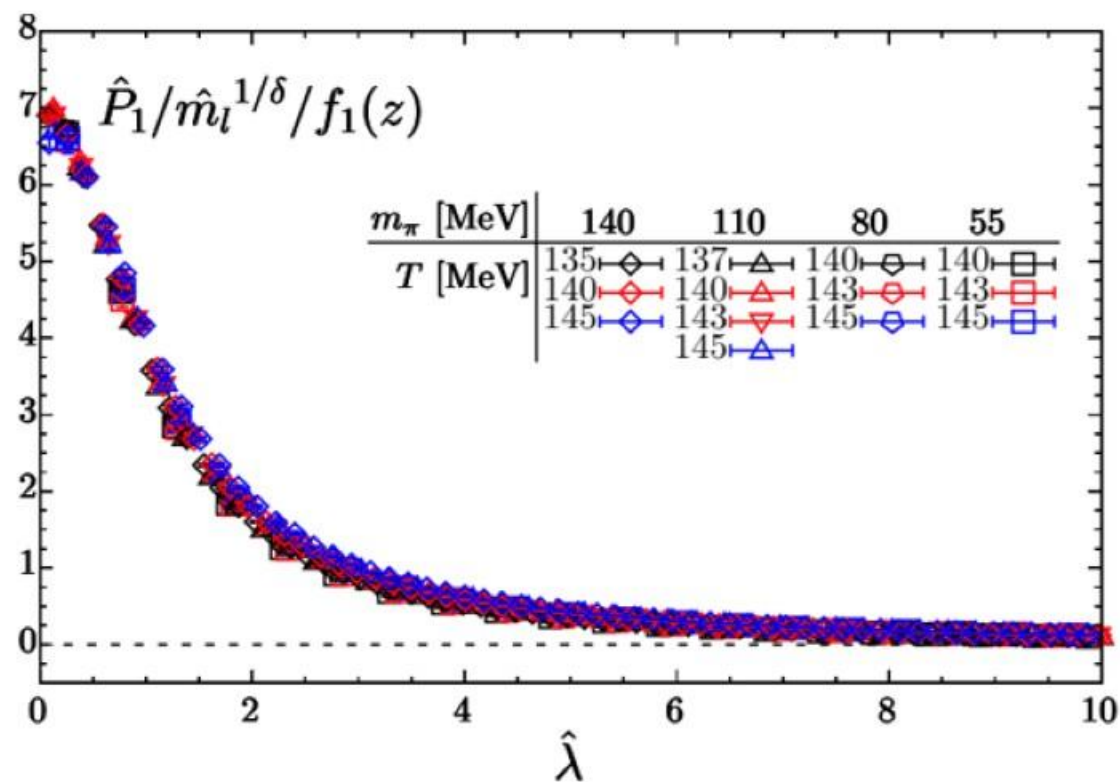
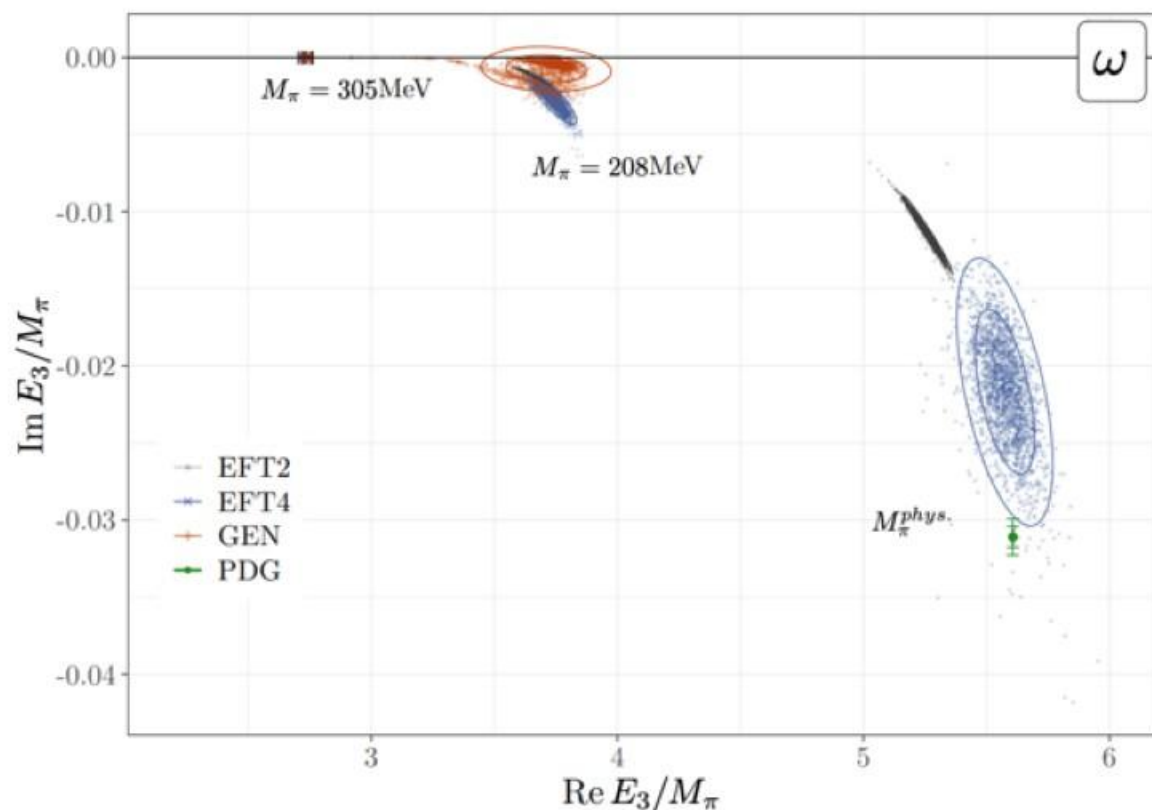
CLQCD重要工作

北大：刘川
近物所：刘柳明

华中师大：丁亨通

ω 介子：三体共振的第一性原理研究

Dirac 本征谱：揭示 QCD 相变起源



$$M_\omega = 778.0(11.2) \text{ MeV}, \quad \Gamma_\omega \approx 6.0(1.0) \text{ MeV}$$

H.-T. Ding et al., PRL 131 (2023)

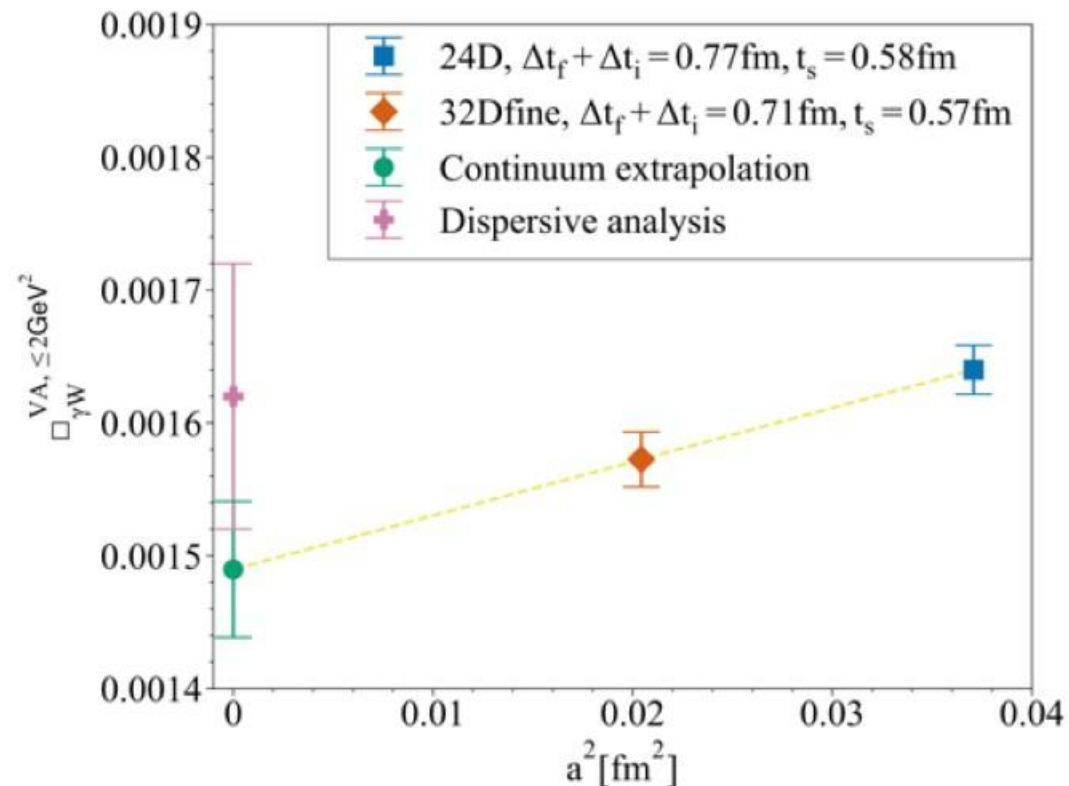
H. Yan et al., PRL 133 (2024)

CLQCD重要工作

北大：冯旭
肯塔基大学：刘克非

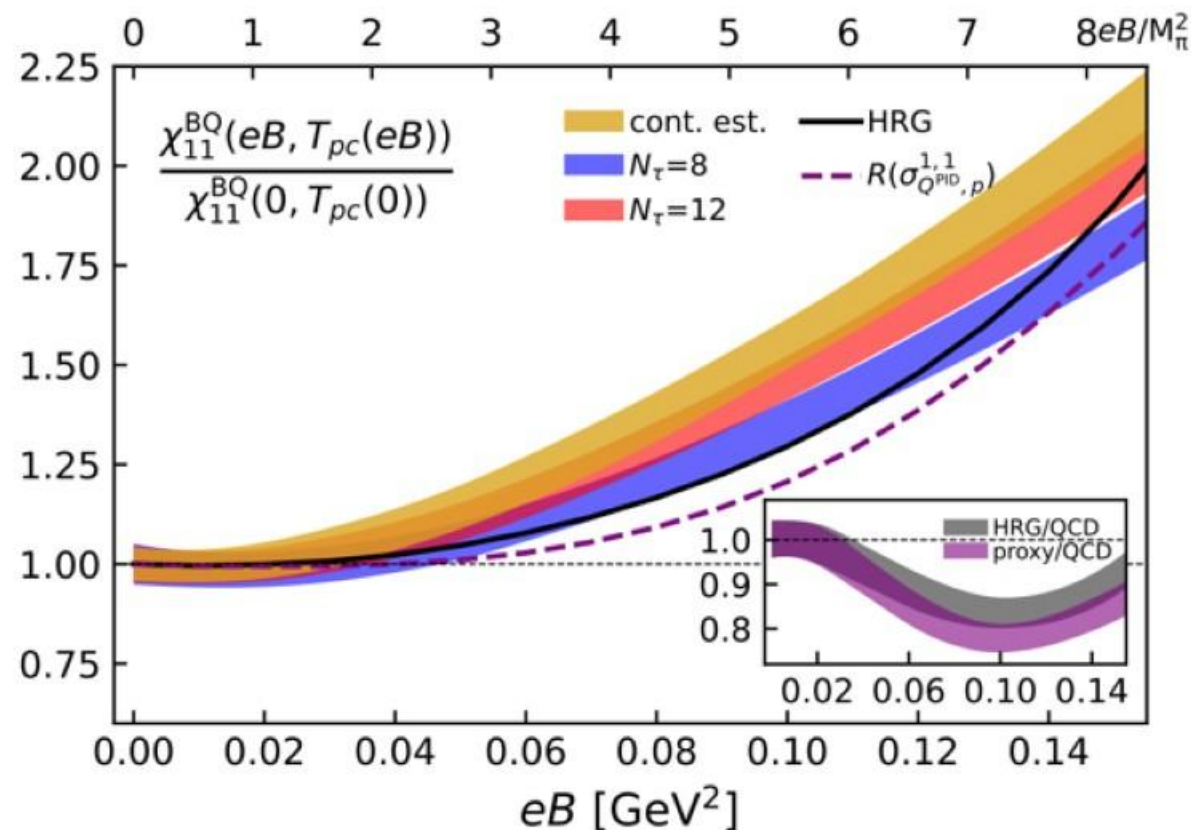
华中师大：丁亨通、李胜泰、刘俊宏

β 衰变中的 γW -box: CKM 精确检验



P.-X. Ma et al., PRL 132 (2024)

重子数-电荷关联

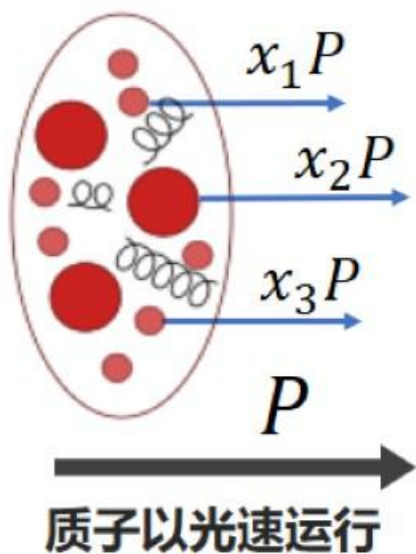


H.-T. Ding et al., PRL 132 (2024)

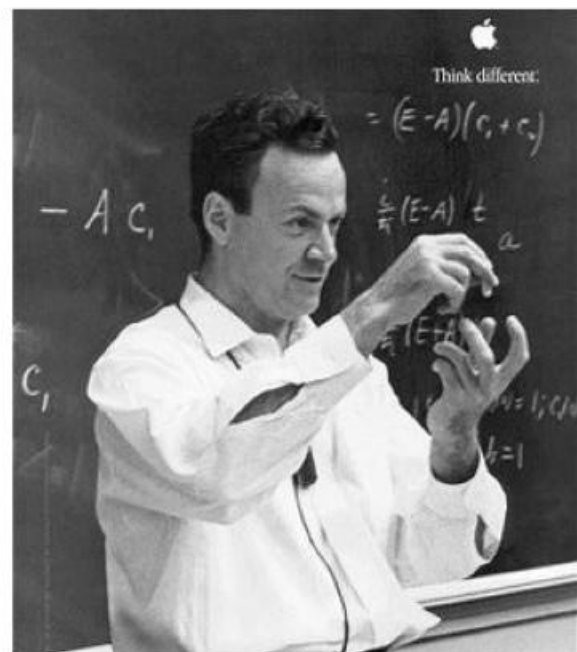
一个明显的例外：部分子分布函数 (PDFs)

$$\sigma_{pp \rightarrow X} = \sum_{i,j} f_{i/p}(x_1, \mu_F) \otimes f_{j/p}(x_2, \mu_F) \otimes \hat{\sigma}_{ij \rightarrow X}(Q, \mu_F, \mu_R)$$

部分子分布函数 (PDFs)



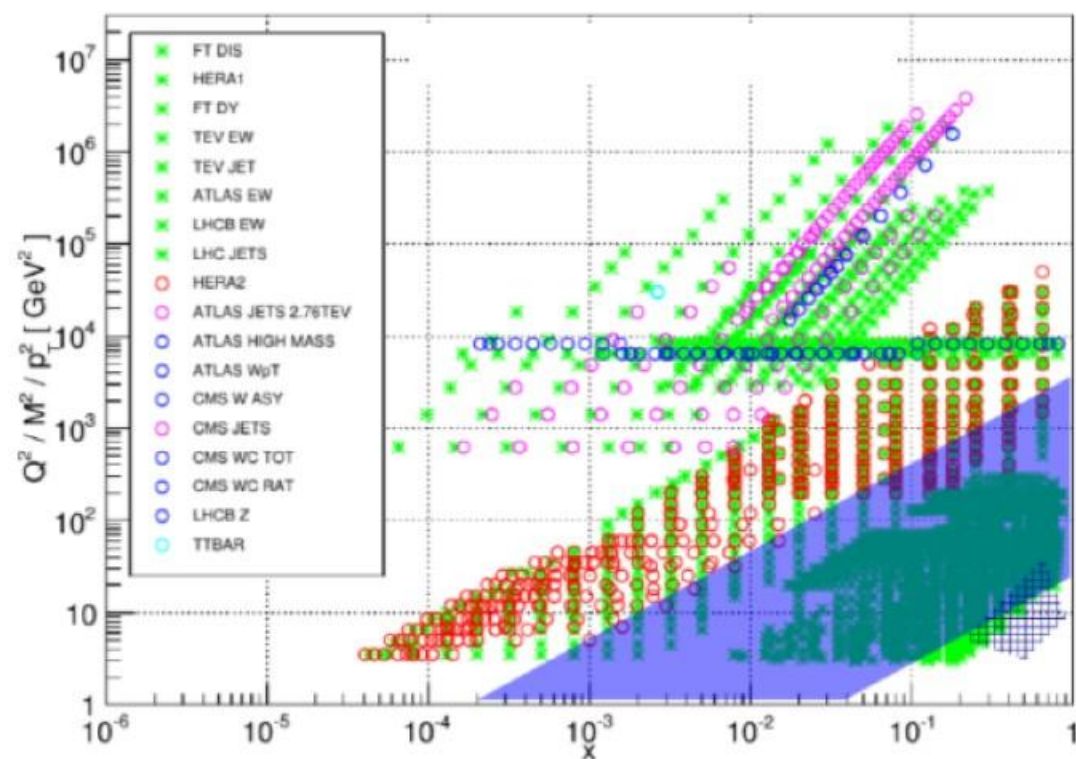
高速运动的质子可近似看作沿同一方向运动的、夸克与胶子（部分子）束构成。



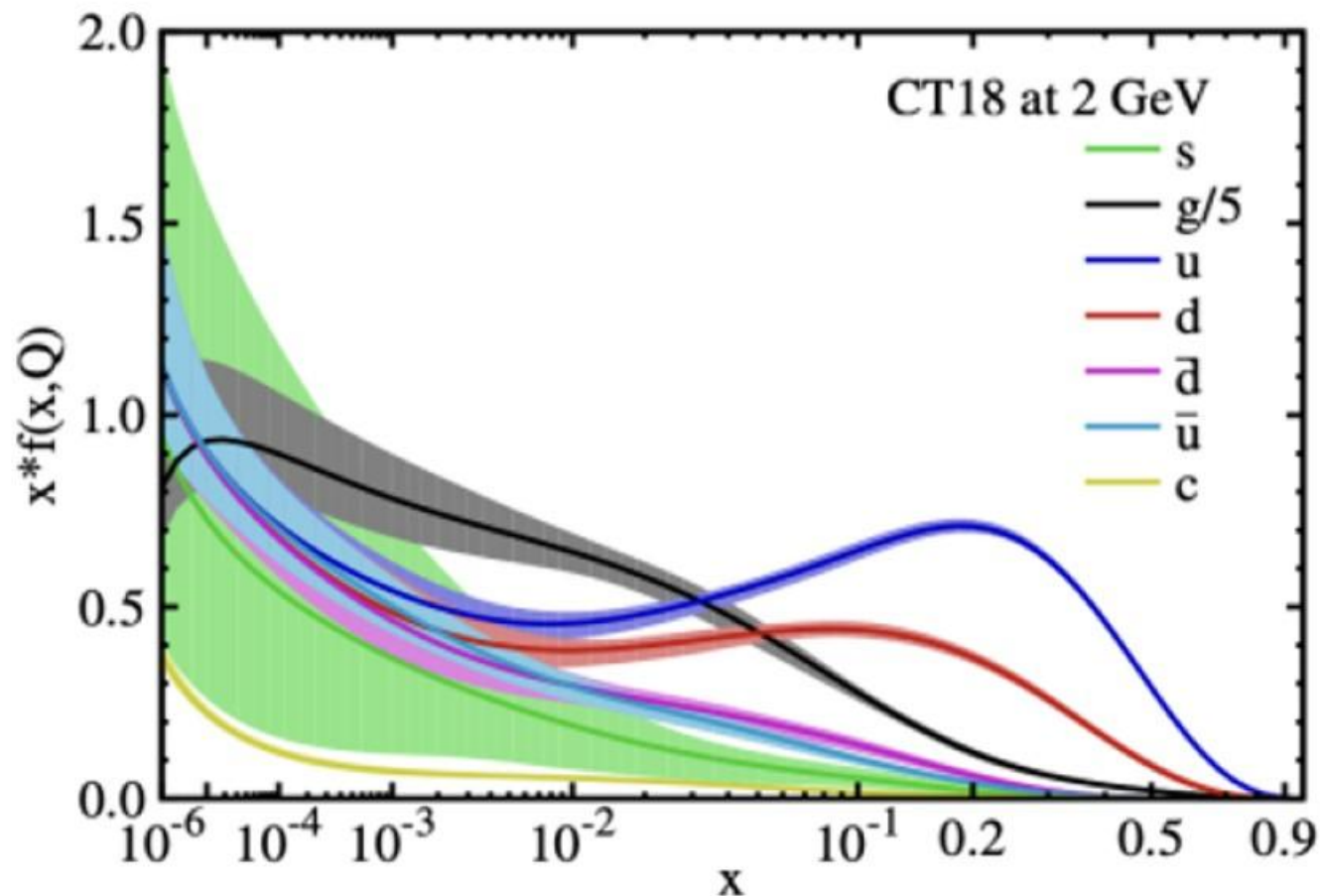
CMS 与 ATLAS 理论计算，不完全是标准模型的预言！

唯象拟合的PDFs

PDFs依赖实验抽取: CTEQ, NNPDF, MSHT ...



R. D. Ball et al., JHEP 04 (2015)

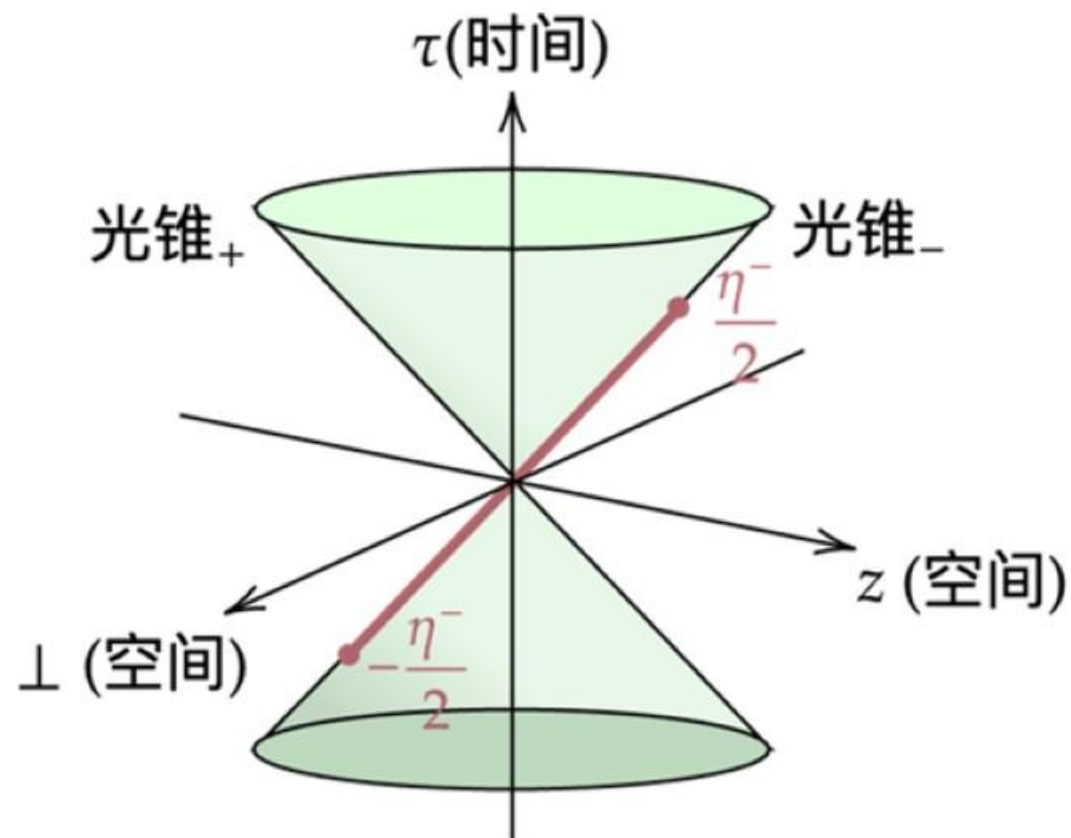


T.-J. Hou et al., PRD 103 (2021)

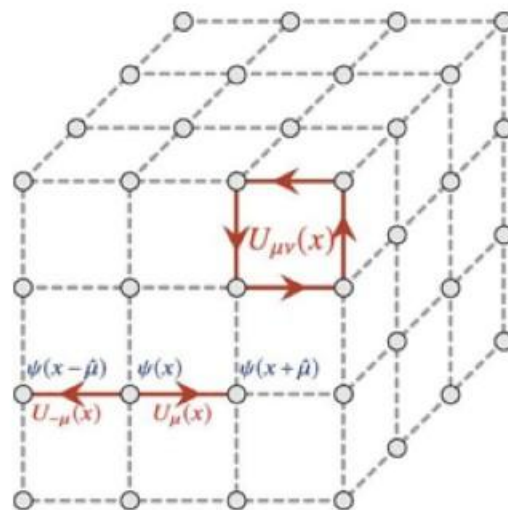
为什么PDFs无法用第一性原理直接计算？

I. 光锥关联与欧几里得空间

PDFs 依赖于量子场在光锥方向的关联



格点QCD是定义在四维
“欧几里得”空间



K. Wilson在发明了格点
QCD之后，重新寻找新的理论来算PDF

光锥关联与光速运行

- 光锥关联起源于质子的光速运行
- 在高能散射实验中，质子的运行速度很快

SLAC, $v \sim 0.98c$

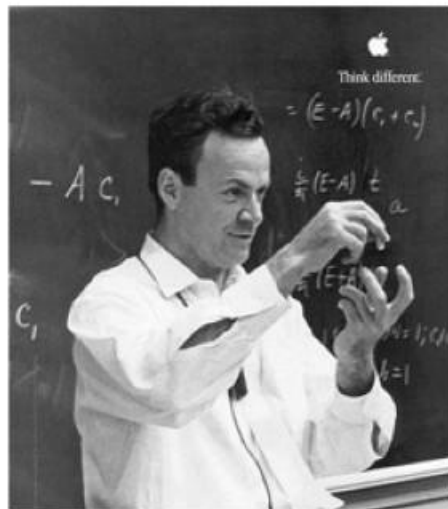
Tevatron, $v \sim 0.99999999c$

LHC, $v \sim 0.9999999999c$

- Feynman部分子模型近似:
 $v = c!$



- 爱因斯坦的疑问:
如果我追上一束光,
我会看到什么?



- 相关的疑问:
一个光速运动的质子
结构是什么样的?

II. 光速运行与量子场紫外模

粒子在光速运动时德布罗意波长 $\rightarrow 0$ ，其结构依赖于量子场论的紫外性质。

Dirac (1949)

光锥量子化



没考虑紫外问题

Weinberg (1966)

无穷大动量坐标系量子场论



紫外截断与大动量极限交换

Wilson (1988)

光锥量子化的重整化理论



需要无穷多重整化常数

III. 光速运行是个类似于相变的临界点!

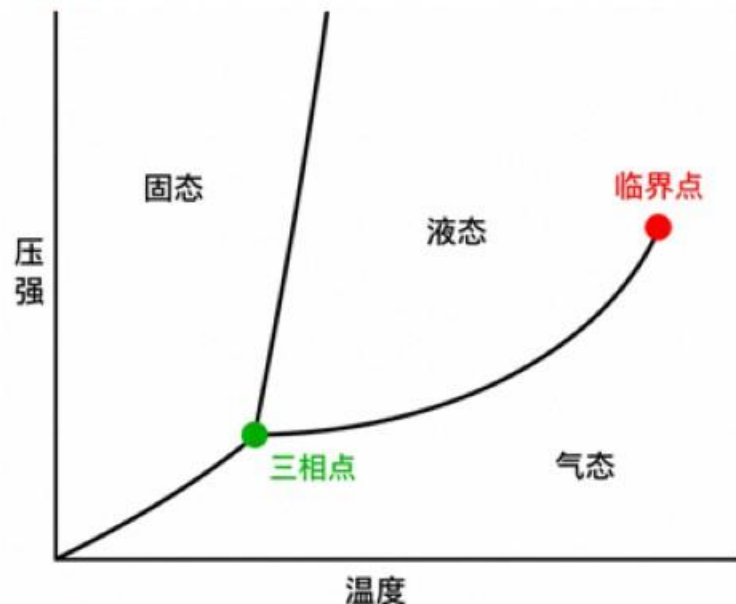
高能对撞机中的无限动量极限类似于一个具有发散关联长度的临界极限。

- 标度不变性:

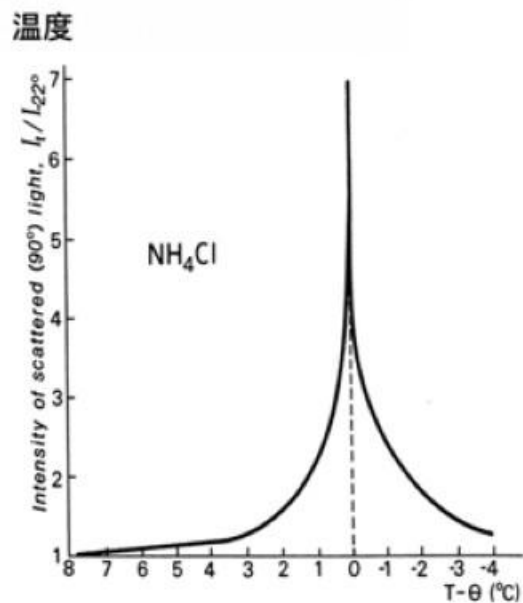
粒子的结构在Lorentz 变换之下不改变

在运动方向上的关联长度是无穷大，类似于相变临界点

在多体问题中，相变点的物理量无法直接计算的!



临界乳光现象



大动量有效量子场论(LaMET) 与高能质子结构计算

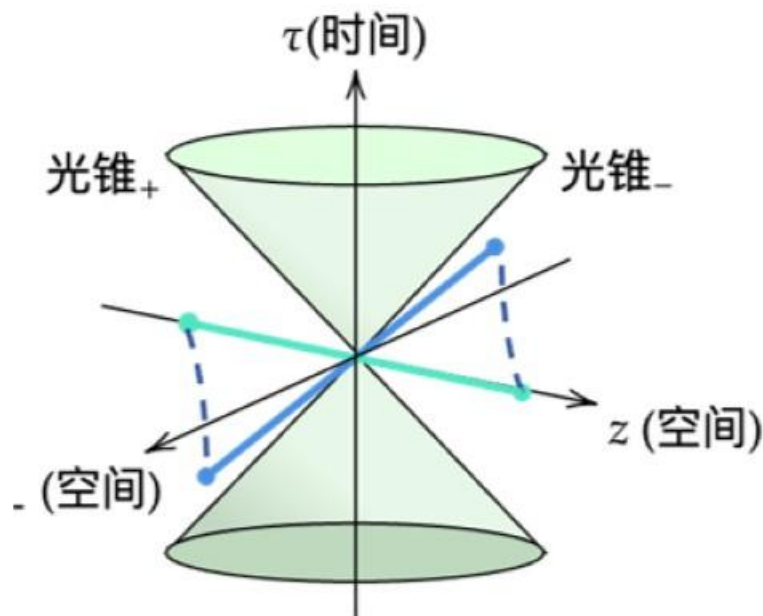
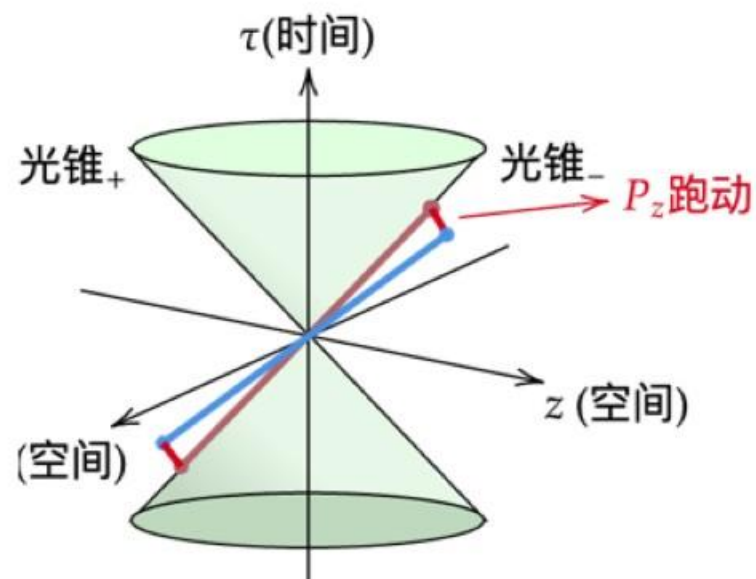
大动量有效理论 (LaMET)

基本物理思想：

1. 利用Wilson临界点理论，在临界点附近进行非微扰计算，利用重整化群的跑动来逼近临界点
2. 在临界点附近，利用Lorentz 不变性把含时关联退化为等时关联
(任何两个类空事件都可以变换为等时事件)

X. Ji, PRL 110, 262002 (2013)

X. Ji, 中国科学PMA 57, 1407 (2014)



通过等时关联来计算光锥关联

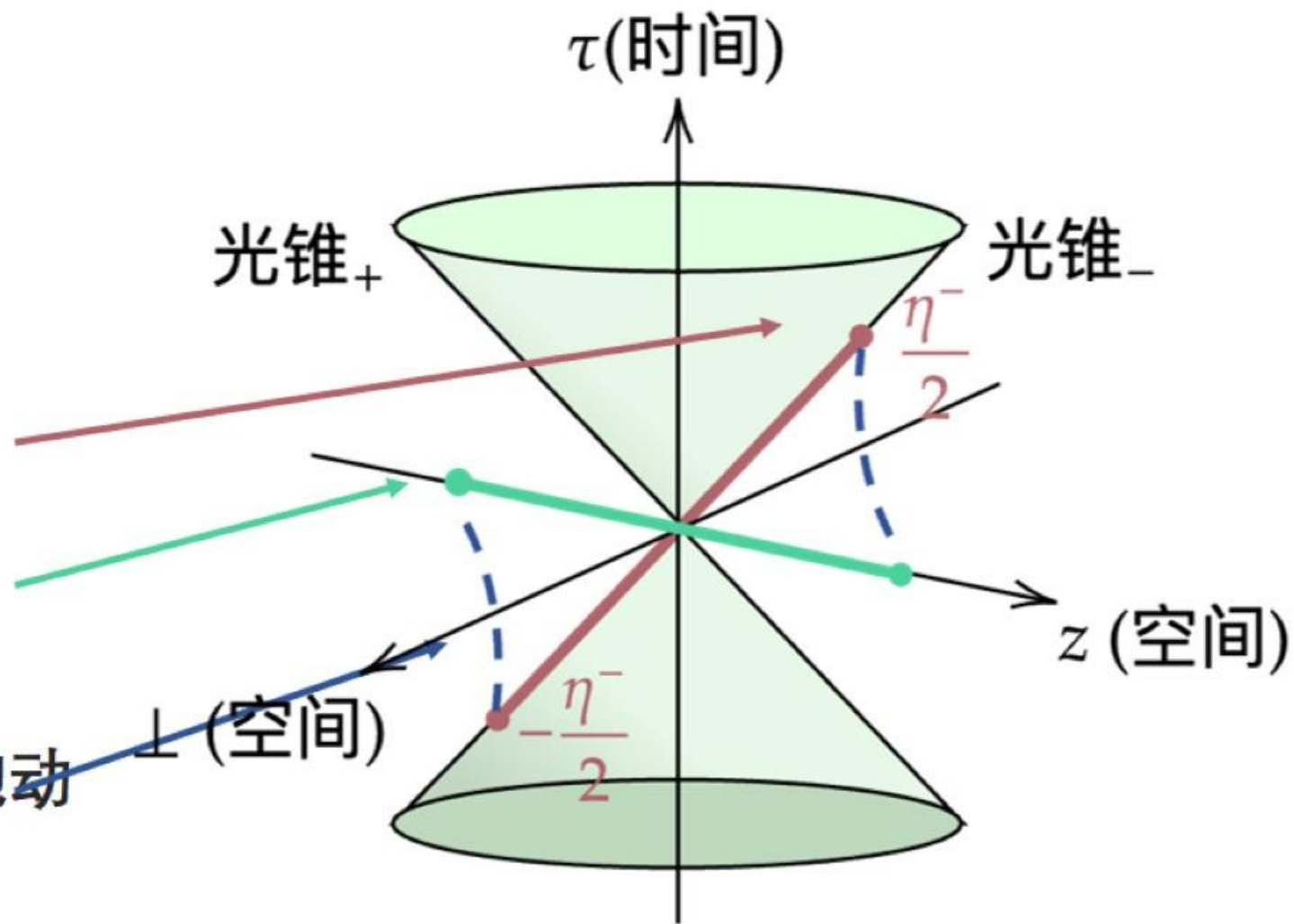
$$\text{PDF} = C \otimes \text{qPDF}$$

Where:

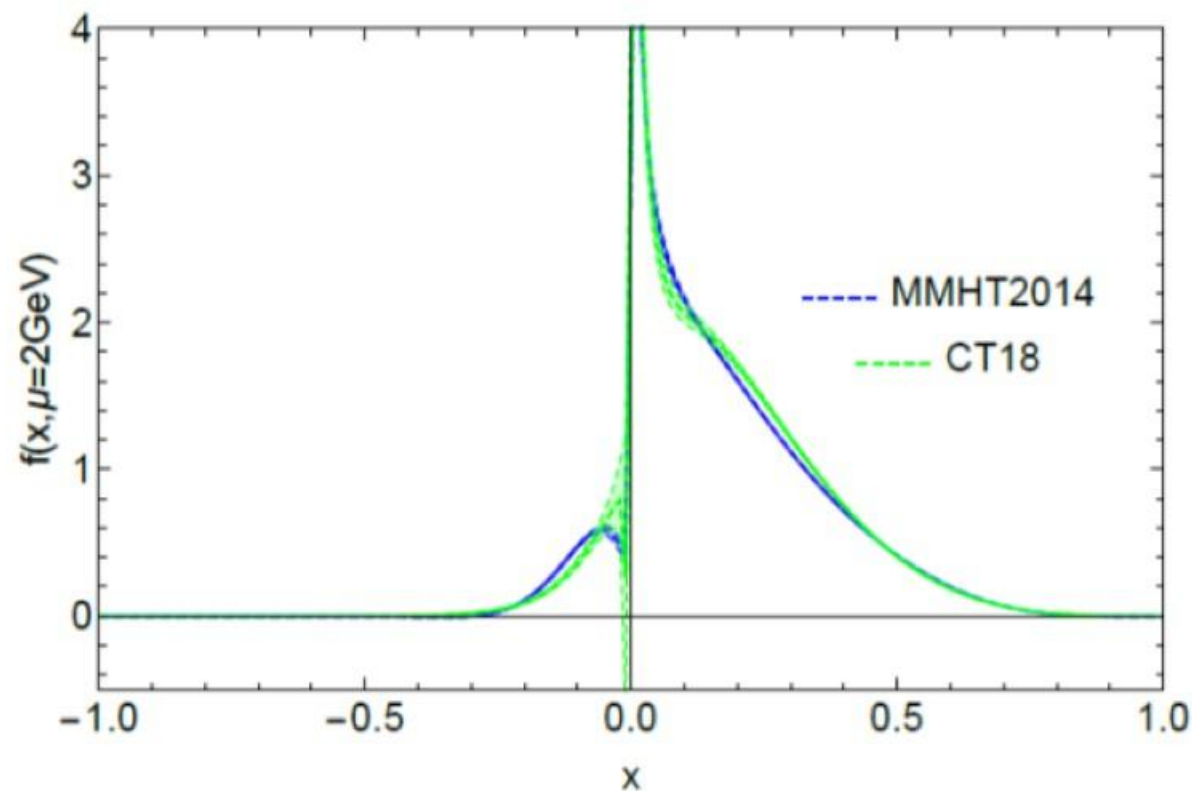
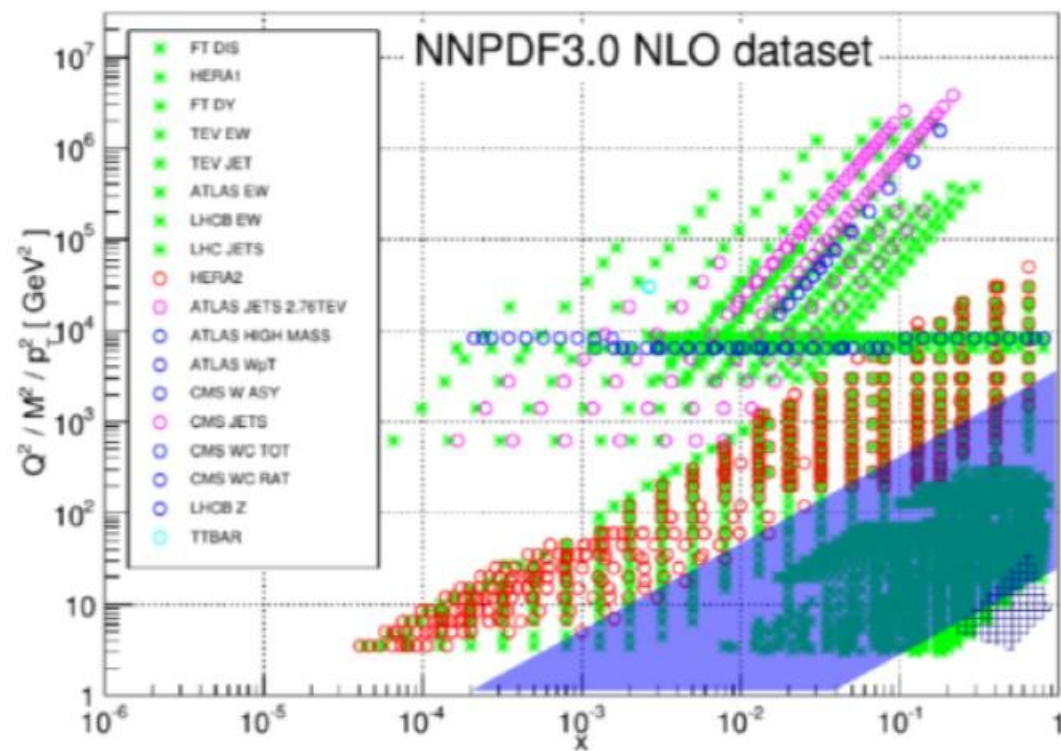
PDF: 想要的光锥关联物理量

qPDF: 格点可算的准物理量

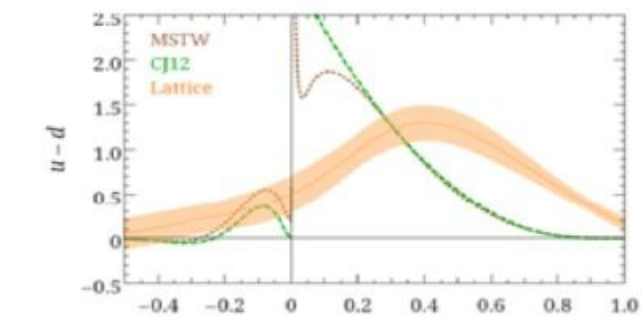
C: 微扰可算趋近临界点区的跑动



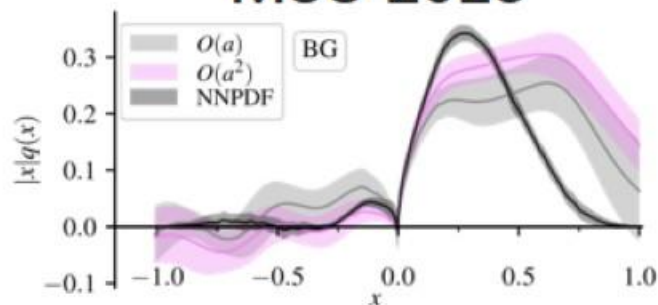
格点计算验证实例: $u(x)-d(x)$



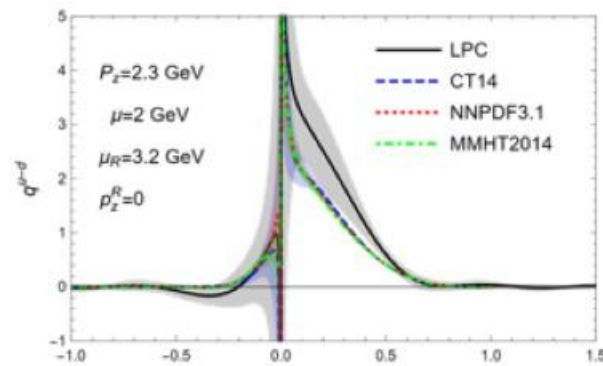
u(x)-d(x) PDF 早期结果与最新分析



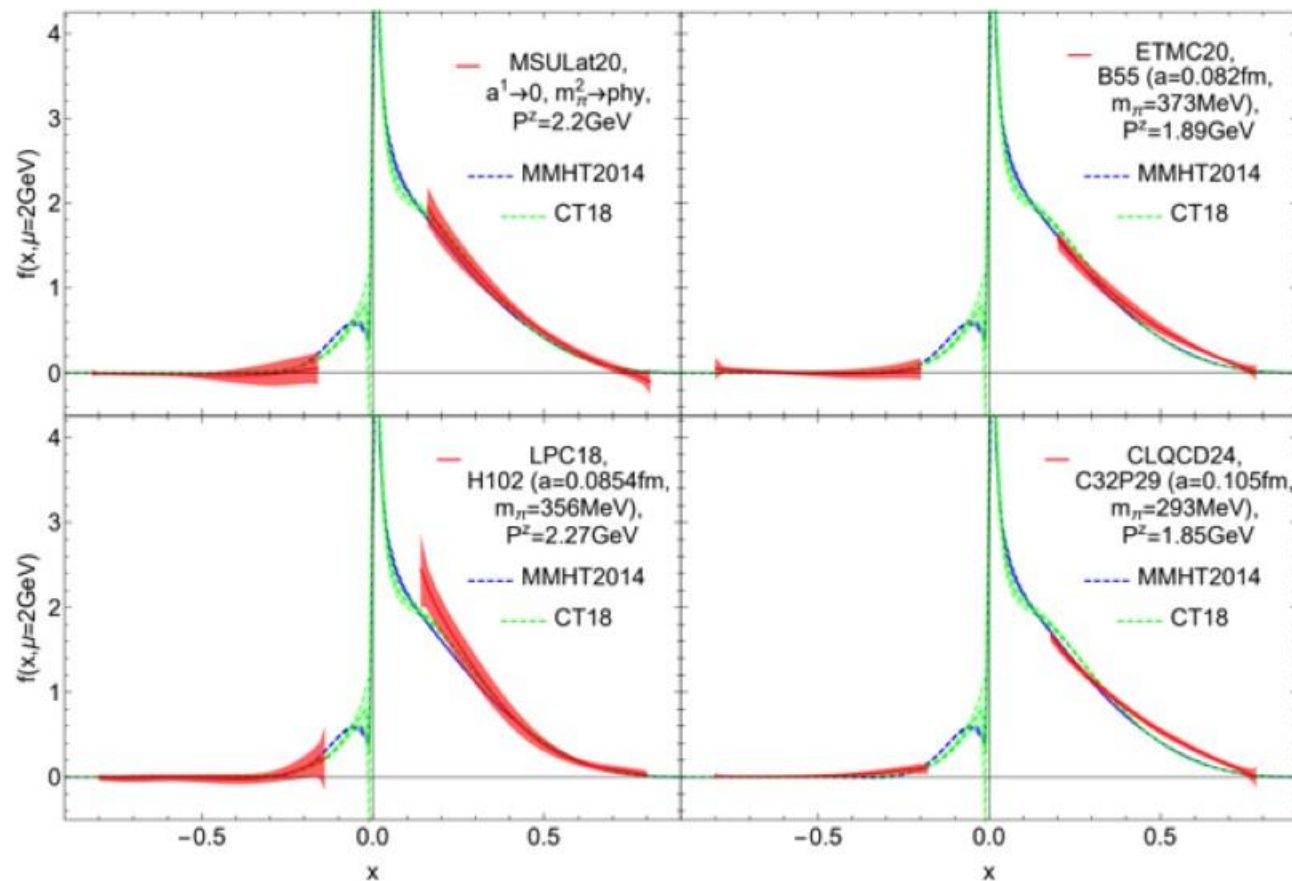
MSU 2015



ETMC 2021

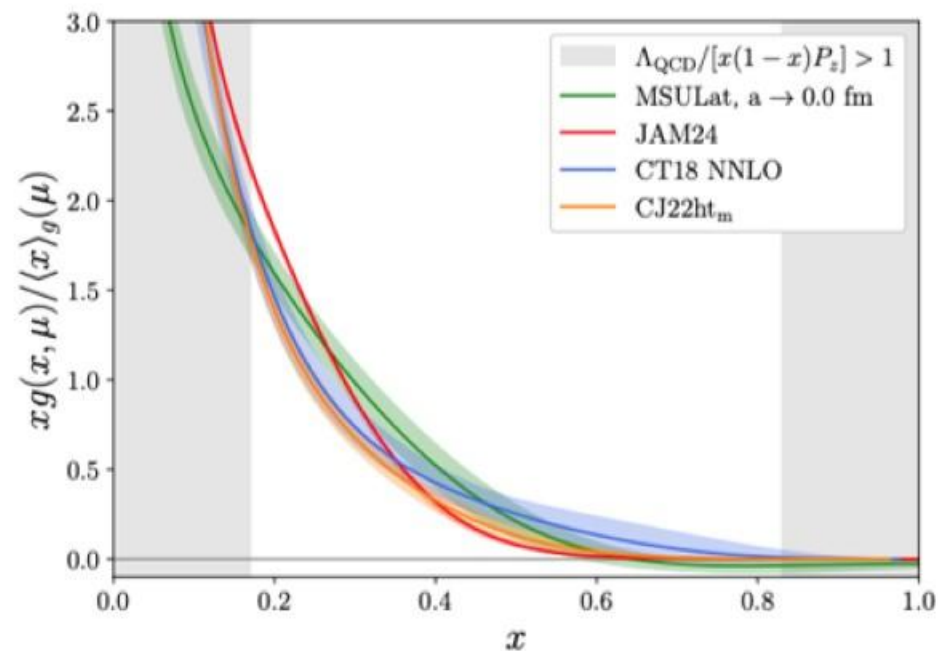


LPC 2020



X. Ji and Y. Su, arXiv:2606.22224 (2026)

胶子PDF



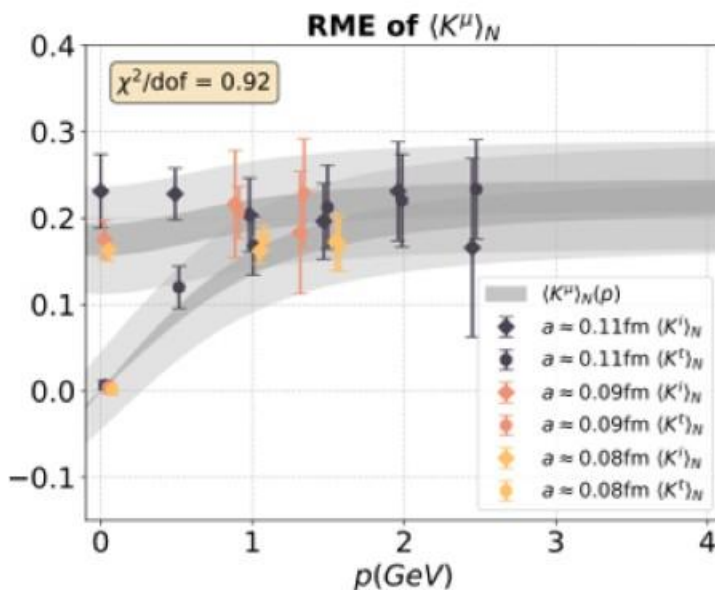
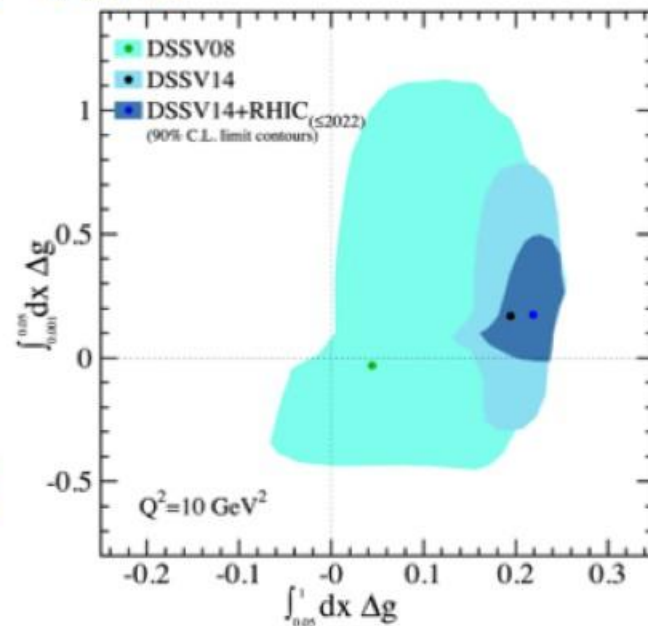
A. NieMiera et al., MSU
arXiv:2510.17758

质子自旋

实验结果

$$\Delta G^{[0.05,1]}(\mu^2 = 10 \text{ GeV}^2) = 0.218 \pm 0.027$$

T. Lin [STAR],
arXiv:2402.16256 (2024)



LaMET 结果

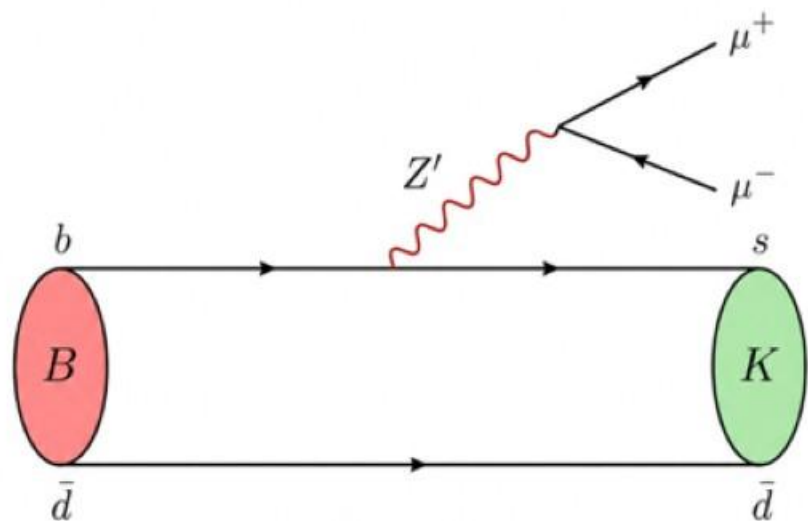
$$\Delta G^{\overline{MS}}(\mu^2 = 10 \text{ GeV}^2) = 0.231(17)_{\text{stat}}(33)_{\text{sys}}$$

D. J. Zhao et al. [CLQCD],
arXiv:2512.24315

B介子衰变新物理

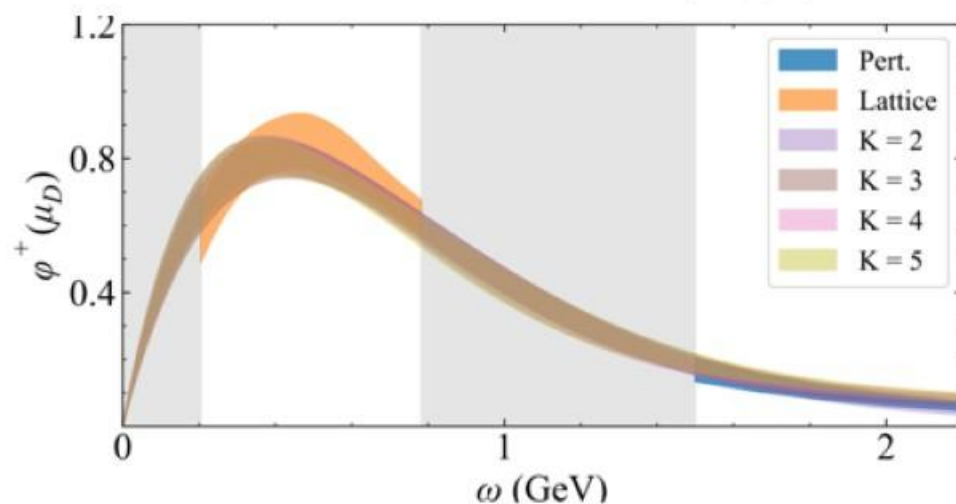
$$\mathcal{V}_{B \rightarrow K^*}(0) = 0.359 \begin{matrix} +0.141 \\ -0.085 \end{matrix} \bigg|_{\lambda_B} \begin{matrix} +0.019 \\ -0.019 \end{matrix} \bigg|_{\sigma_1} \begin{matrix} +0.001 \\ -0.062 \end{matrix} \bigg|_{\mu}$$

$$B \rightarrow K \mu^+ \mu^-$$



主要误差

$$\begin{matrix} +0.010 \\ -0.004 \end{matrix} \bigg|_{M^2} \begin{matrix} +0.016 \\ -0.017 \end{matrix} \bigg|_{s_0} \begin{matrix} +0.153 \\ -0.079 \end{matrix} \bigg|_{\varphi_{\pm}(\omega)}$$



$$\lambda_B(\mu = 1 \text{ GeV}) = 0.340(20) \text{ GeV}$$

$$\sigma_B^{(1)}(\mu = 1 \text{ GeV}) = 1.685(63)$$

$$\mathcal{V}_{B \rightarrow K^*}(0) = 0.359 \begin{matrix} +0.034 \\ -0.029 \end{matrix} \bigg|_{\lambda_B} \dots$$

圈图诱导的味改变中性流过程，
是寻找新物理的重要窗口

H. F. Gao et al. [LPC], arXiv:2604.25802

LaMET2026 | 克拉科夫, 波兰



主要合作组和研究团队 (部分)

ETMC | LP³ | LPC | BNL | MSU | MIT | Fermilab

代表性综述:

K. Cichy et al., AHEP, 2019 (2019)

X. Ji et al., RMP 93 (2021)

M. Constantinou, EPJA 57 (2021)

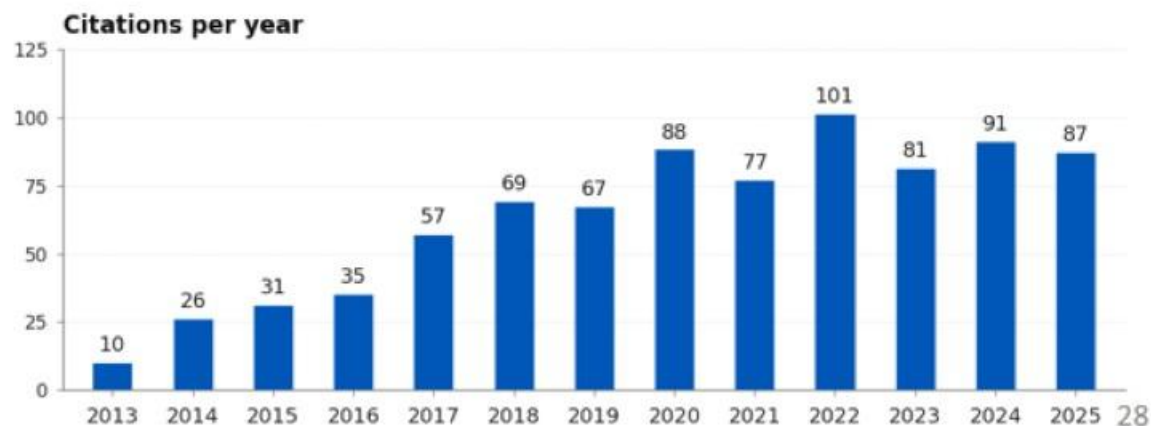
M. Constantinou et al., PPNP 121 (2021)

H.-W. Lin, PPNP 144 (2025)

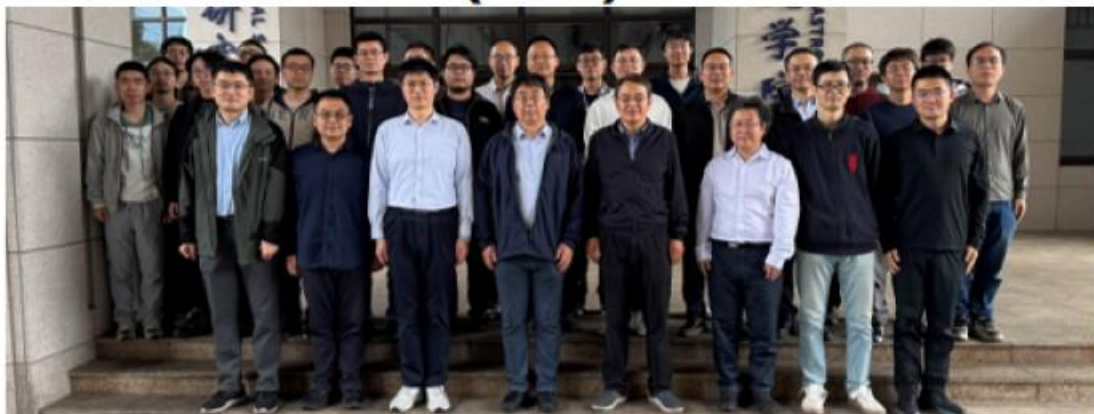
原始文献引用持续增长

X. Ji, PRL(2013); 中国科学 (2014) 引用1300余次

LaMET2025 | 纽约州立石溪分校



Lattice Parton Collaboration (LPC)



PRL等文章

Q.-A. Zhang et al., PRL 125 (2020)

J. Hua et al., PRL 127 (2021)

K. Zhang et al., PRL 129 (2022)

J. Hua et al., PRL 129 (2022)

F. Yao et al., PRL 131 (2023)

上海交通大学：季向东、王伟

中科院理论所：杨一玻（发言人）

中科院近代物理所：孙鹏、刘柳明

华南师范大学：华俊、梁剑

港中大（深圳）：张建辉（发言人）

北京航空航天大学：张其安

湖南师范大学：桂龙成

中南大学：熊小努

雷根斯堡大学：Andreas Schäfer

Y.-S. Liu et al., PRD 101 (2020)

Y.-K. Huo et al., NPB 969 (2021)

M.-H. Chu et al., PRD 106 (2022)

M.-H. Chu et al., JHEP 08 (2023)

J.-C. He et al., PRD 109 (2024)

M.-H. Chu et al., PRD 109 (2024)

K. Zhang et al., PRD 110 (2024)

X.-Y. Han et al., PRD 111 (2025)

M.-H. Chu et al., PRD 111 (2025)

C. Chen et al., PRD 111 (2025)

L. Walter et al., PRD 111 (2025)

L. Ma et al., JHEP 08 (2025)

H. Bai et al., PRD 112 (2025)

J.-X. Tan et al., PRD 113 (2026)

M.-H. Zhang, 2604.12419 (2026)

H.-F. Gao et al., 2604.25802 (2026)

X.-Y. Han et al., 2605.10946 (2026)

M.-H. Zhang et al., 2606.29597 (2026)

M.-H. Zhang et al., 2606.30387 (2026)

质子三维GPD成像和 电子离子对撞机(EIC,EicC)

半个多世纪质子结构研究的黄金时代 (1968-)



SLAC (美国, 1966)



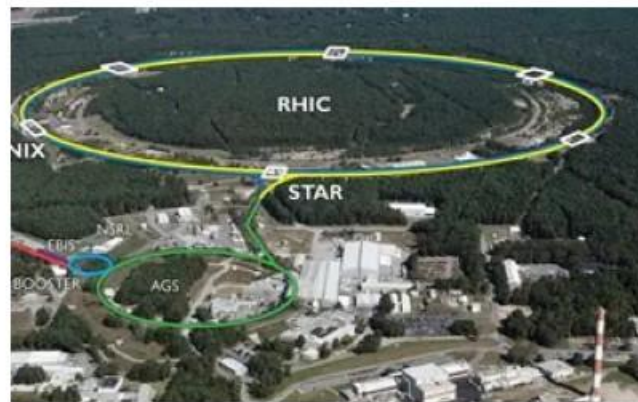
Tevatron (美国, 1985)



HERA (德国, 1992)



CEBAF (美国, 1995)



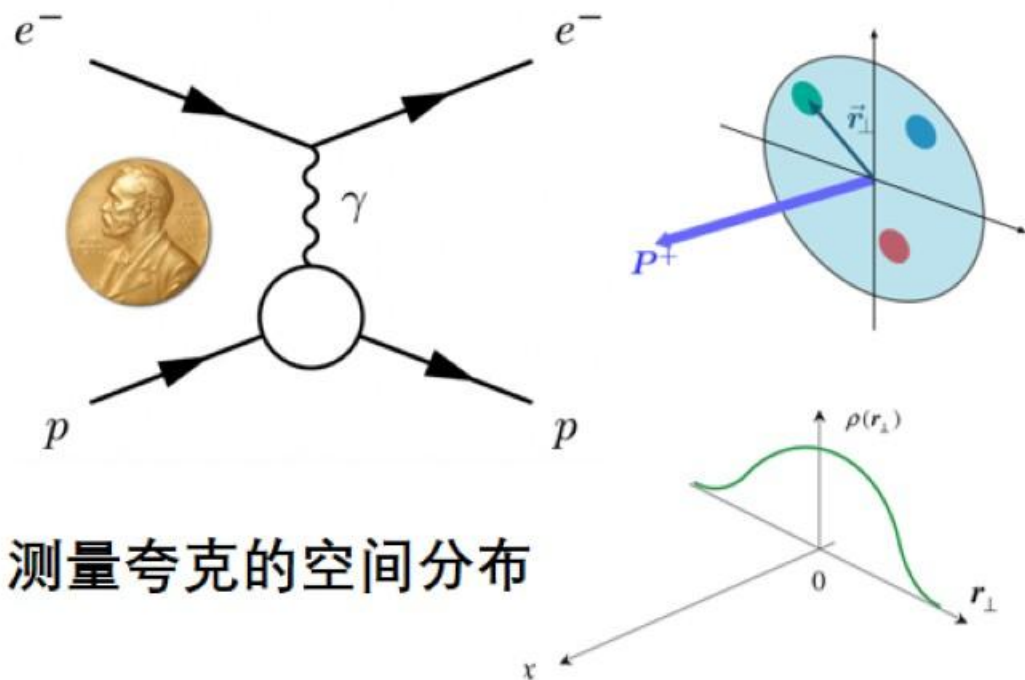
RHIC (美国, 2000)



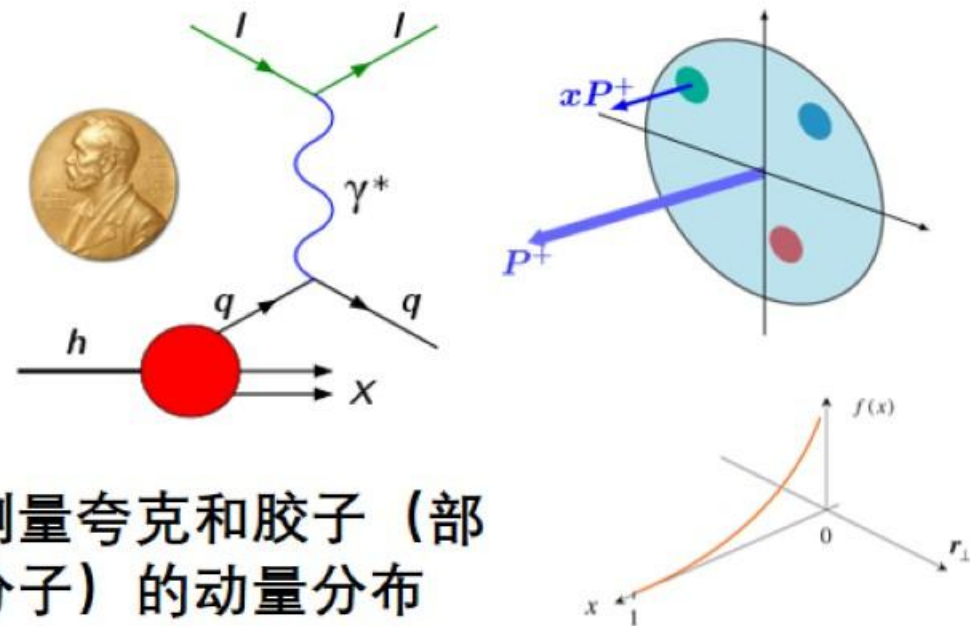
LHC (欧洲, 2010)

传统实验的局限性

弹性散射：电子衍射 (1954)



深度非弹性散射 (1968)



缺乏同时对部分子（夸克和胶子）动量和空间的完整描述：
无法对角动量，质量结构和夸克禁闭现象等进行定量研究

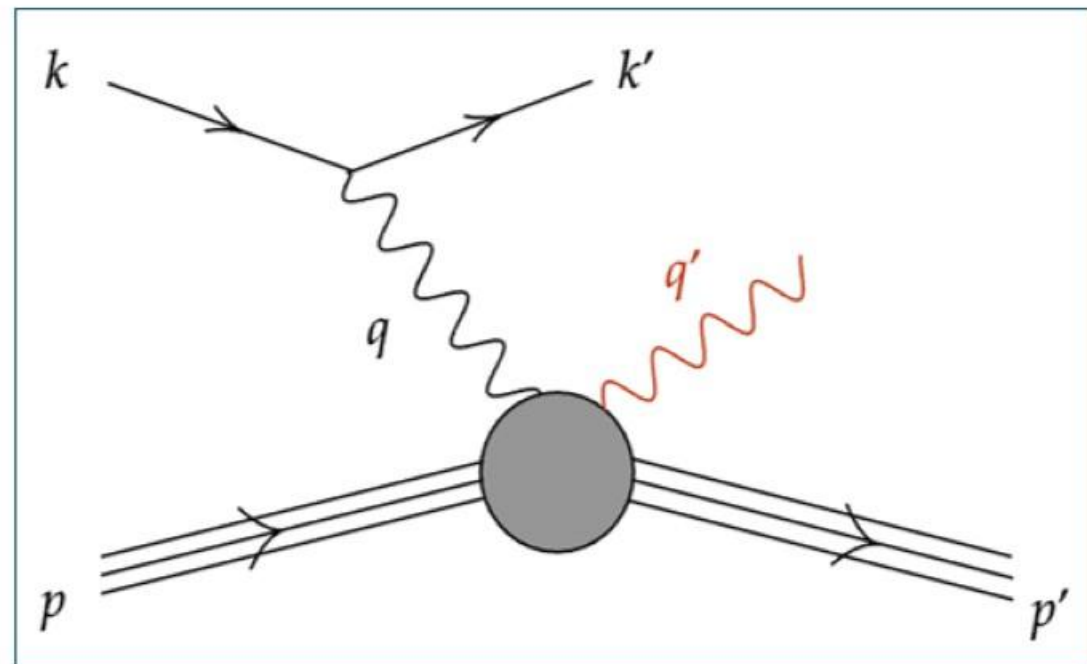
新的实验研究方法

“深虚衍射过程”对质子进行结构研究

深虚光子衍射DVCS过程 (DVCS)

- 通过深度非弹的高能电子来测量夸克动量信息
- 需要保持质子状态的完整来测量空间结构, 所以必须把高能/动量通过光子或介子进行即时输出

X. Ji, PRL 78, (1997); PRD 55, (1997)
总引用达4000余次



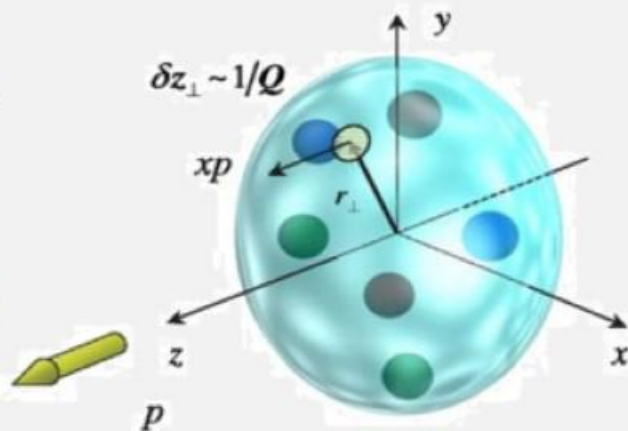
深虚衍射过程同时依赖于部分子的**动量**和**位置**信息

质子GPD层析成像

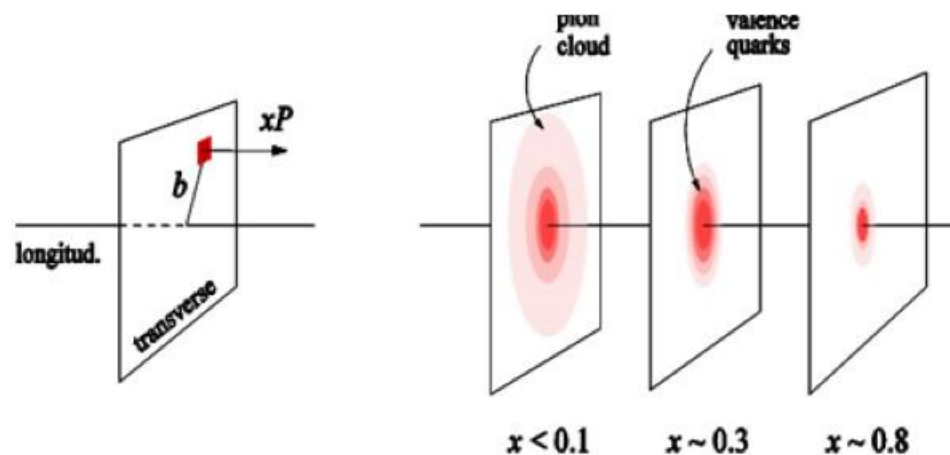
广义部分子分布函数 (GPDs)

$$F(x, t, \xi)$$

- x : 部分子纵向动量信息
- t : 部分子横向坐标信息
- ξ : 部分子纵向空间信息



质子结构的3D层析成像



不同动量的夸克空间分布

广义部分子分布函数体现了夸克的**动量**和**位置**信息，30年来成为核子结构研究的**黄金工具**。

深虚衍射过程实验进展

2001年，第一个深虚衍射过程
DVCS在HERA和Jlab被三个不同实
验组同时发现

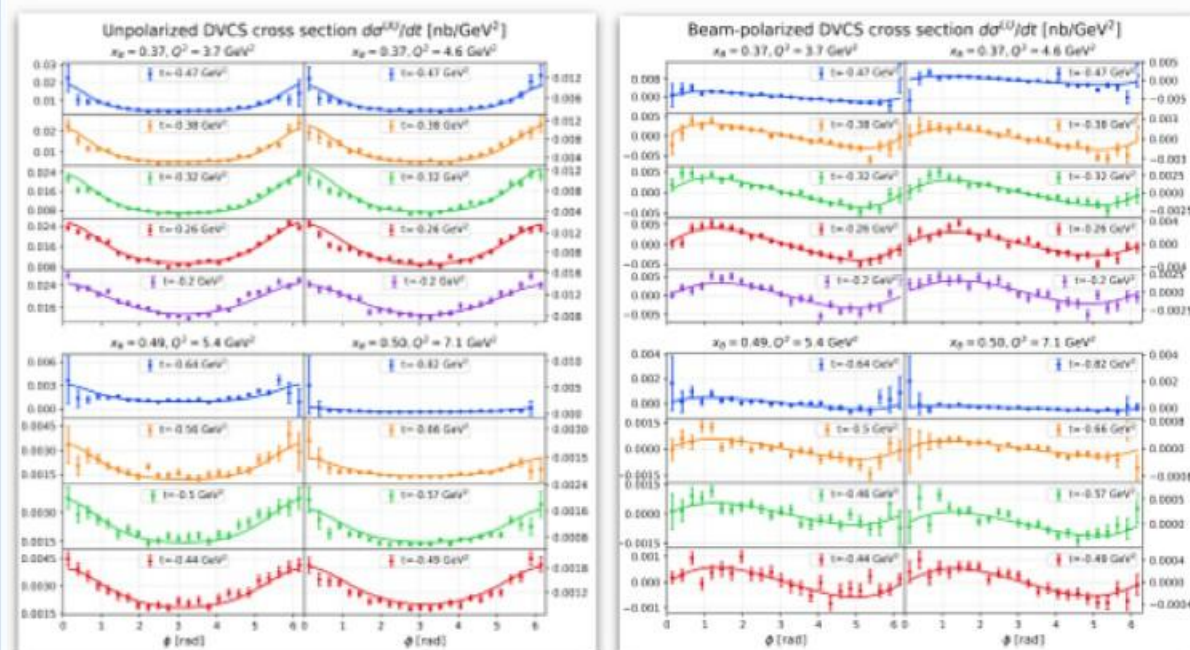


HERMES, PRL87,2001
H1, PLB517, 2001



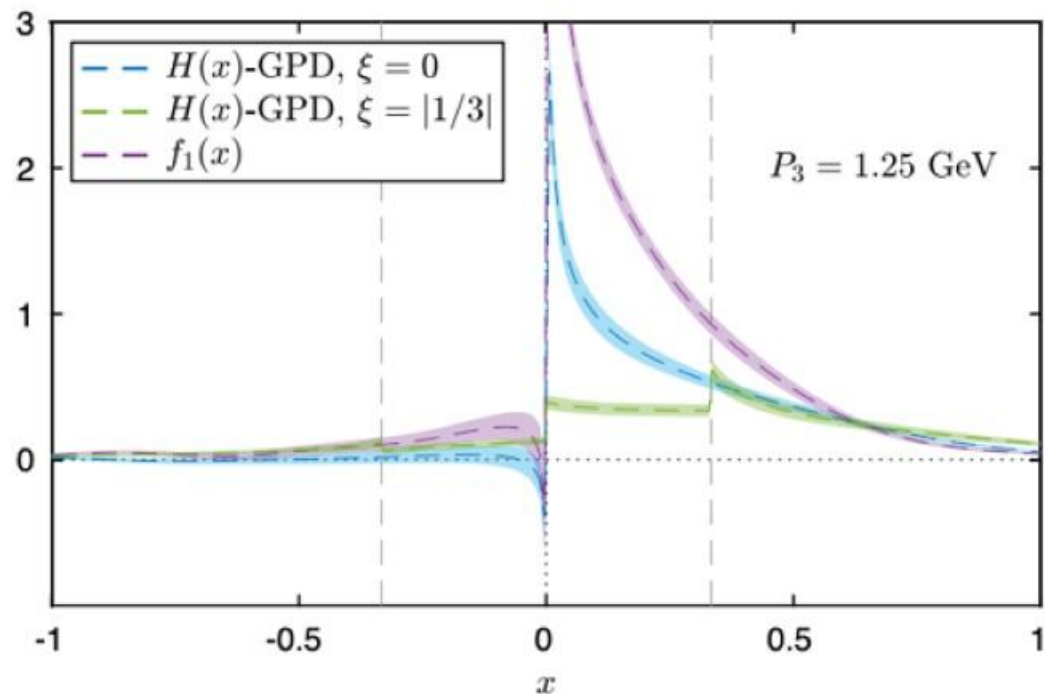
CLAS, PRL87, 2001

20多年来积累了大量的实验数据

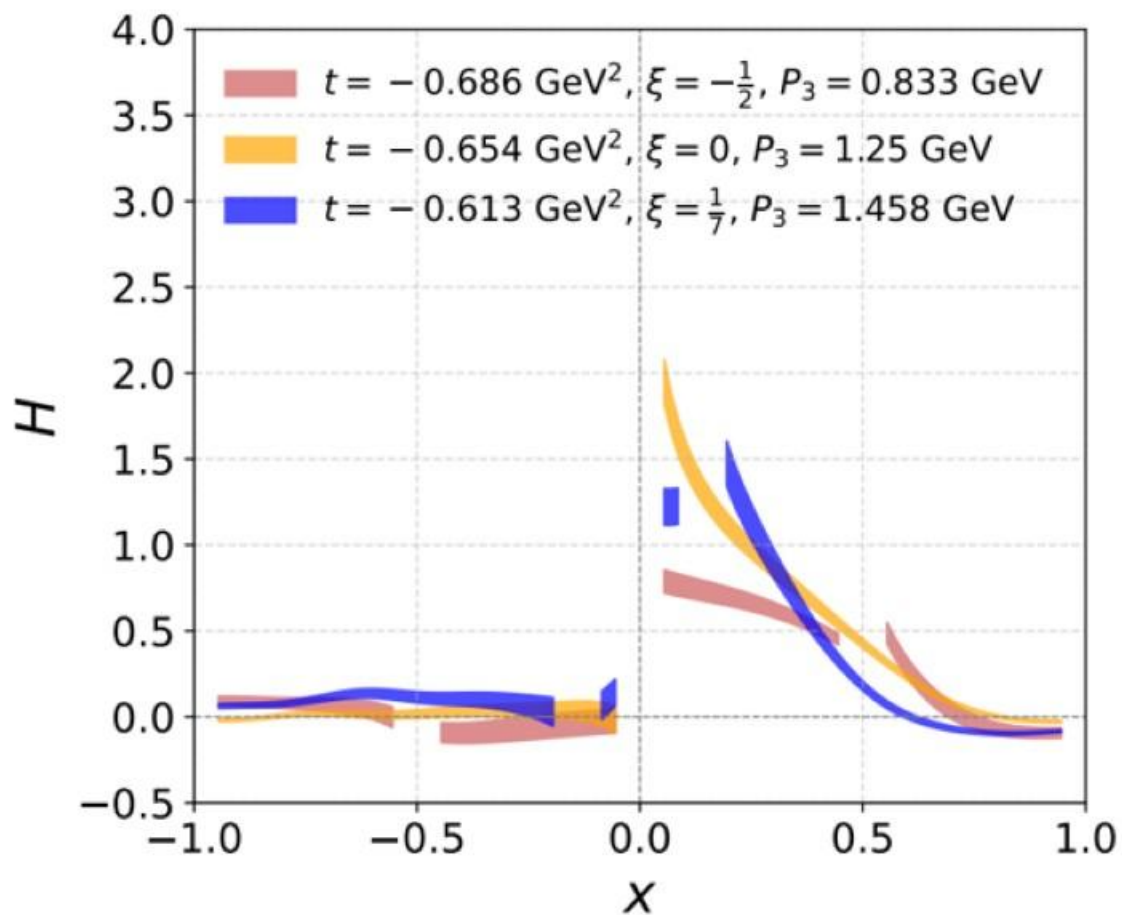


实验上已经积累了大量数据，但**理论上存在挑战**

GPD的LaMET计算



C. Alexandrou et al., PRL 125 (2020)



M.-H. Chu et al., PRD 112 (2025)

实验与理论联合分析

格点数据

- x 依赖 GPD
- 广义形状因子
- 高阶梅林矩

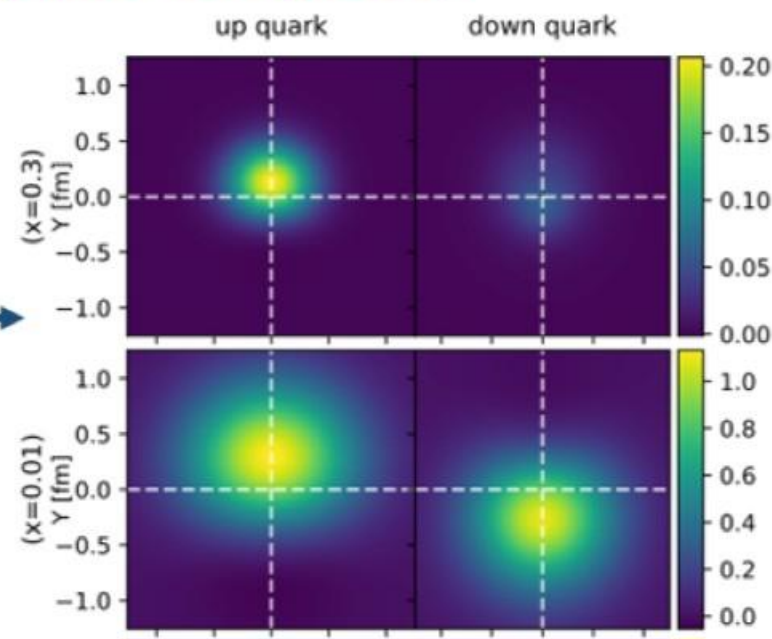
实验数据

- DVCS / DVMP
- 非极化与极化 PDF
- 电磁形状因子

GUMP1分析: X. Ji et al., PRL 135 (2025)

利用GUMP框架

- 普适矩参数化
- 全局联合拟合
- GPD $F^{q,g}(x, \xi, t)$



质子中夸克的三维层析成像

把格点和实验放入统一拟合框架，降低模型依赖、
优化全局拟合结果

质子自旋与角动量结构

质子结构的两个图像

- Jaffe-Manohar, 1990

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + \Delta G + \ell_q^z + \ell_g^z$$

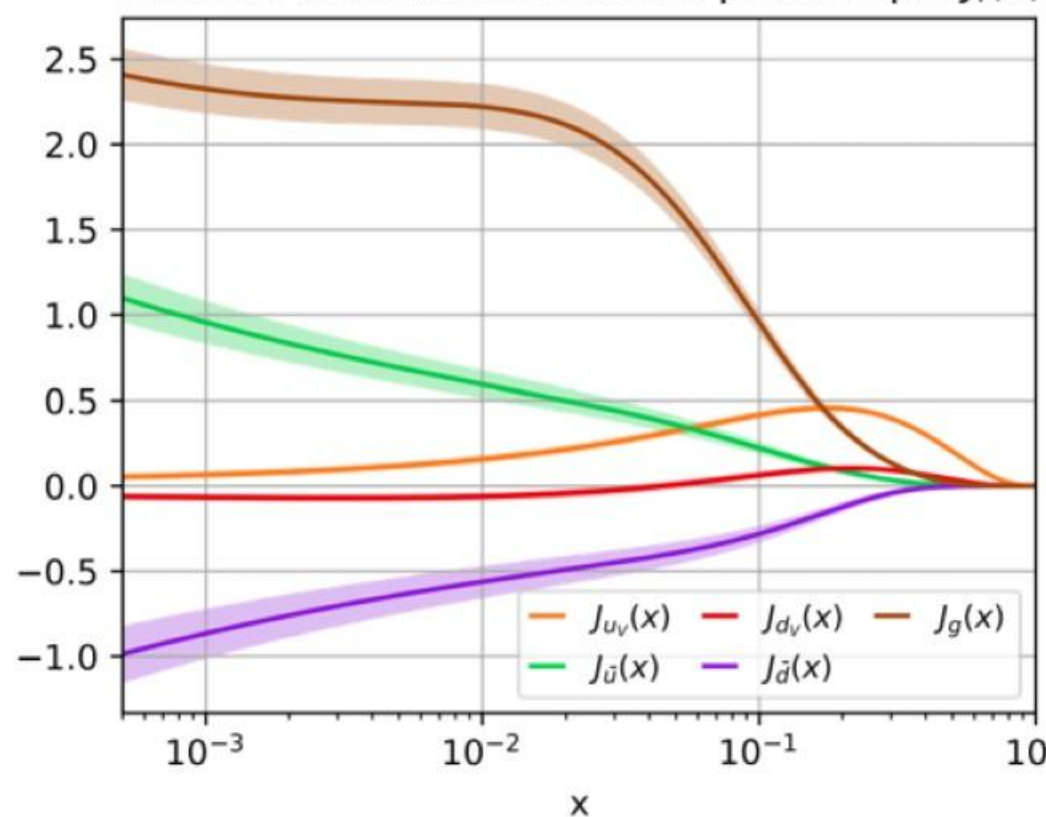
自旋危机:

夸克模型 $\Delta\Sigma = 1$, 实验测量 $\Delta\Sigma \sim 0$

- X. Ji, 1995

$$\frac{1}{2} = J_q + J_g = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + L_q^z + J_g$$

Partonic contributions to the proton spin $J_i(x)$



$$J_{q/g}(x) = \frac{1}{2} (H_{q/g} + E_{q/g}) (x, \xi = 0, t = 0)$$

能量分布与质子半径

能量密度分布:

$$G_m(Q^2) = M \left[A(Q^2) - B(Q^2) \frac{Q^2}{4M} + C(Q^2) \frac{Q^2}{M} \right]$$

标量场密度分布:

$$G_s(q^2) = MA(q^2) + B(q^2) \frac{q^2}{4M} - C(q^2) \frac{3q^2}{M}$$

质子/中子半径

$$\langle r^2 \rangle_{s,m} = -6 \frac{d}{dQ^2} \left[\frac{G_{s,m}(Q^2)}{M} \right] \Big|_{Q^2=0}$$

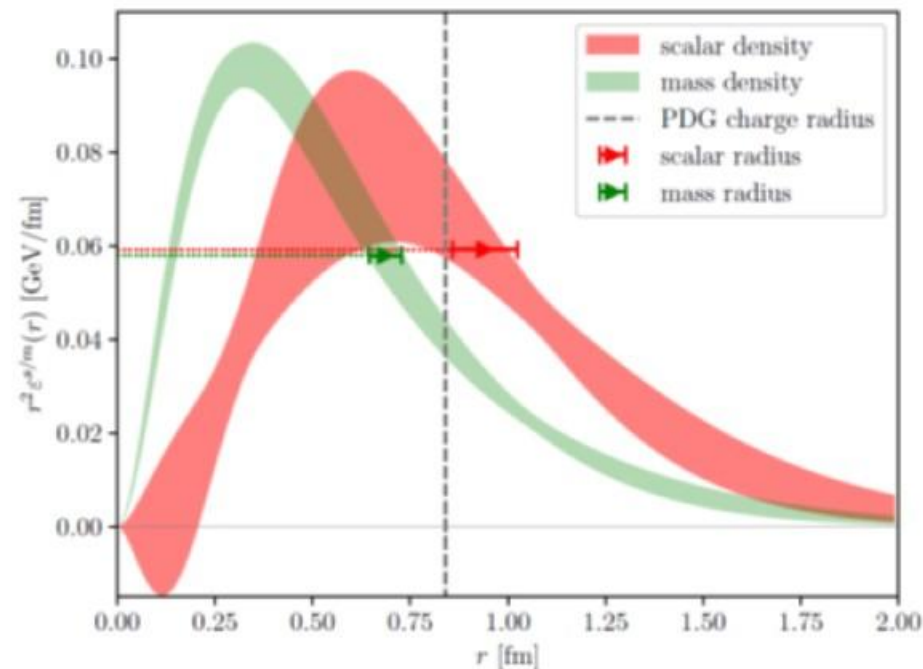


Figure 2: Densities and radii of the proton.

A comparison of different measures of the proton size; the scalar and mass radii, with their corresponding scalar ($\epsilon^s(r)$) and mass ($\epsilon^m(r)$) density profiles, are obtained by combining gluon contributions extracted from a global analyses near-threshold J/ψ photoproduction and with quark contributions from a Bayesian GFF analysis (42). These are compared against the canonical proton size measure, its electric charge radius (0.8409 ± 0.0004 fm), using the latest PDG average (60). The scalar strong-interaction radius (0.94 ± 0.08 fm) is the largest of the three, reflecting the realistic spatial extent of the nucleon size.

夸克禁闭

- 作用在夸克上色Lorentz力密度

$$\mathcal{F}_q^j \equiv \partial_\mu T_q^{\mu j} = g \bar{\psi} \gamma_\mu F^{\mu j} \psi = \sum_{c=1}^8 g(\rho_c \vec{E}_c + \vec{j}_c \times \vec{B}_c)^j ,$$

$$\vec{F}_q(\vec{r}_\perp) \equiv \frac{\vec{\mathcal{F}}_q(\vec{r}_\perp)}{\rho_q(\vec{r}_\perp)} = \frac{(M/4)\vec{\nabla}_\perp G_{s,q}(\vec{r}_\perp)}{3[F_1^p(\vec{r}_\perp) + F_1^n(\vec{r}_\perp)]} ,$$

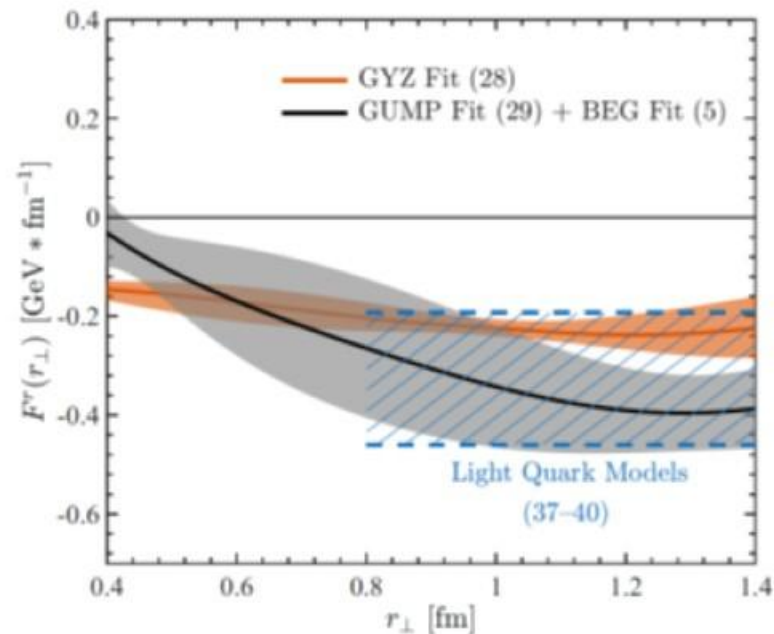
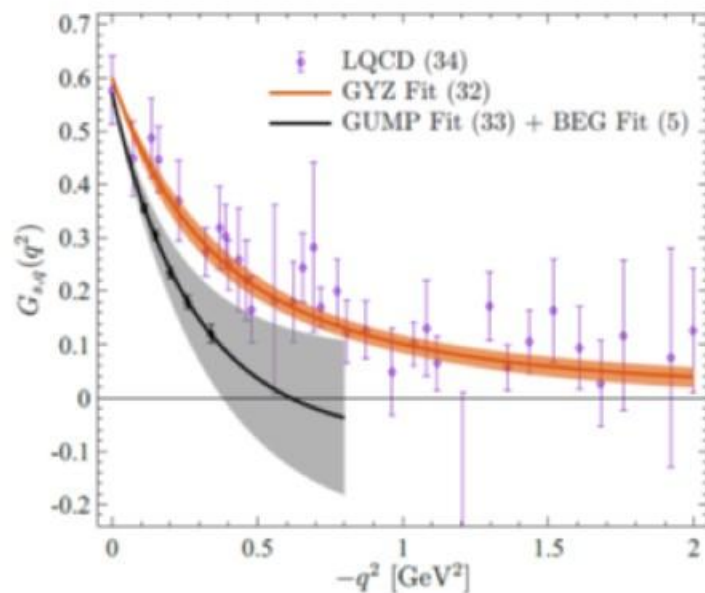
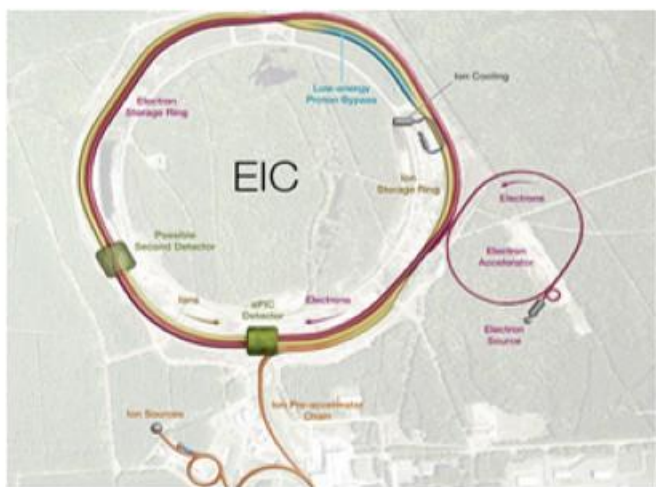


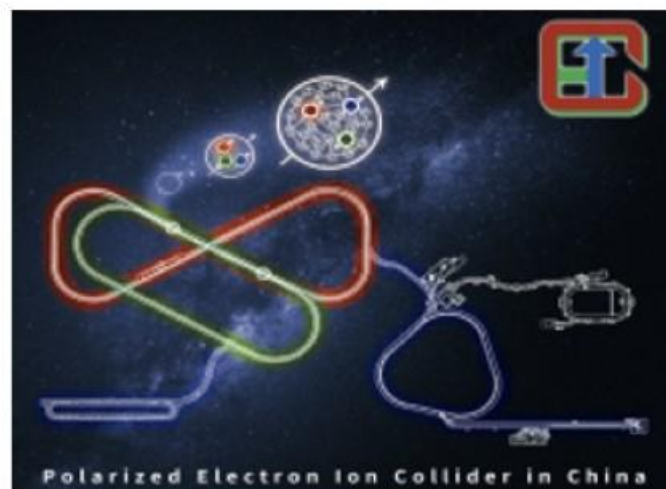
Figure 2: Strong force on quarks in the proton in the transverse plane of the IMF. The forces are obtained using the latest global analyses of the quark momentum current form factors (5, 28, 29). The figure shows the total force from experimental data (black curve and band) and from the fit dominated by LQCD calculations (orange curve and band). The blue hatched band shows the string tensions from several relativistic quark models (37–40).

未来机遇

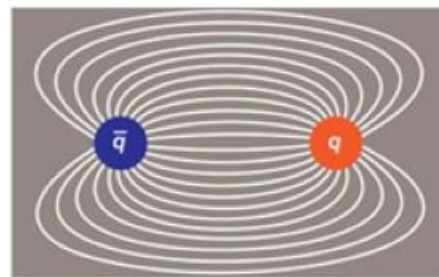
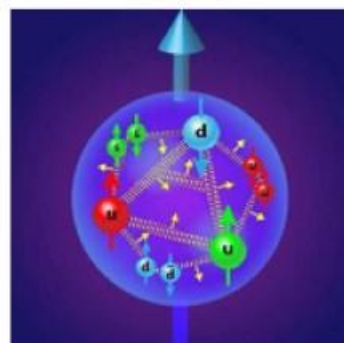
GPD 层析成像是下一代质子结构实验设施的重要研究目标之一。



国际上正在建造的电子离子对撞机 (EIC)



中国建议的EicC实验装置



质子质量，自旋起源之谜
与夸克禁闭机制

展望

- 强相互作用相关的高能与核物理精确计算的时代已经来临！
- AI & Quantum 为精确计算提供不可估量的未来
- 精密测量和精确计算一直会是推动（新）物理研究的重要前沿
- 中国格点QCD正走向世界，不断有更多的方向开始引领世界