







# 0 基本研究背景—粒子物理标准模型

## 基本构成和相互作用

近年格点 QCD 进展综述

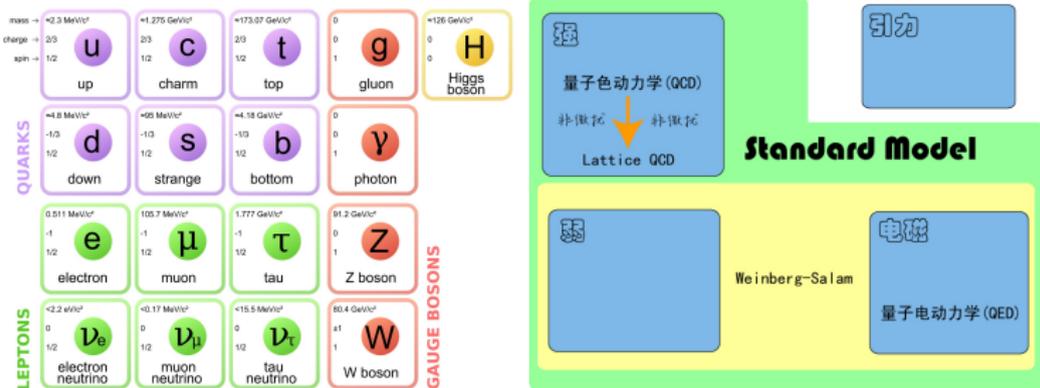
刘川

基本研究背景

传统方向的成果

新的科学范式

总结



# 粒子

# 场论

- 当能量变小, QCD 进入非微扰能区, 如何研究? 格点量子色动力学 (Lattice QCD)
- 当能量很高, 是否有超出标准模型的新物理?



# 0 基本研究背景—格点量子色动力学

破解非微扰问题的钥匙

近年格点 QCD 进展综述

刘川

基本研究背景

传统方向的成果

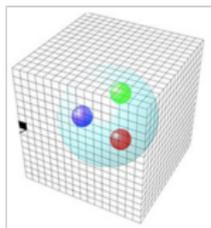
新的科学范式

总结

- Wilson 于 1974 年创立格点 QCD



K. G. Wilson



格点QCD



超算实现精确计算

- 格点 QCD: 研究非微扰能区的最系统的方法

第一性原理 非微扰 精确计算 误差可控



# 0 格点场论研究问题的分类

传统方向与新涌现方向—以 Lattice 2024 & Lattice 2025 为例

近年格点 QCD 进展综述

刘川

基础研究背景

传统方向的成果

新的科学范式

总结

Sessions
Plenary
Algorithms and Artificial Intelligence
Applications outside particle physics
Hadronic and Nuclear Spectrum and Interactions
Particle Physics Beyond the Standard Model
QCD at Non-zero Density
QCD at Non-zero Temperature
Quantum Computing and Quantum Information
Quark and Lepton Flavour Physics
Software Development and Machines
Standard Model Parameters
Structure of Hadrons and Nuclei
Tests of Fundamental Symmetries
Theoretical Developments
Vacuum Structure and Confinement
Lattice data session



42<sup>ND</sup> INTERNATIONAL SYMPOSIUM  
ON LATTICE FIELD THEORY

Tata Institute of Fundamental Research  
Mumbai, India

02-08 November, 2025

## TOPICS

Algorithms and Artificial Intelligence  
Hadronic and Nuclear Spectrum and Interactions  
QCD at Non-zero Temperature and Density  
Quantum Computing and Quantum Information  
Quark and Lepton Flavor Physics  
Software Development and Machines  
Standard Model Parameters  
Structure of Hadrons and Nuclei  
Tests of Fundamental Symmetries  
Theoretical Developments  
Applications Beyond the Standard Model  
Vacuum Structure and Confinement

## REGISTRATION DEADLINE

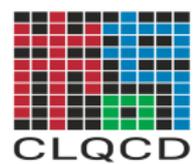
Aug 15, 2025 (Early bird)  
Sept 30, 2025 (Late Reg.)

## ABSTRACT SUBMISSION

June 01-Aug 31, 2025







# 1.1 强子谱学方面的进展

谱学:  $0^{-+}$  胶球的实验进展

近年格点 QCD 进展综述

刘川

基础研究背景

传统方向的成果

新的科学范式

总结

## Discovery of a Glueball-like Particle $X(2370)$

金山  
南京大学

第七届粒子物理天问论坛  
武汉, 2025年9月19日

BESIII: PRL 132 (2024) 181901

Yanping Huang, Shan Jin, Peng Zhang, 2503.1328

# 1.1 强子谱学方面的进展

谱学:  $0^{-+}$  胶球实验与格点计算的对比

近年格点 QCD 进展综述

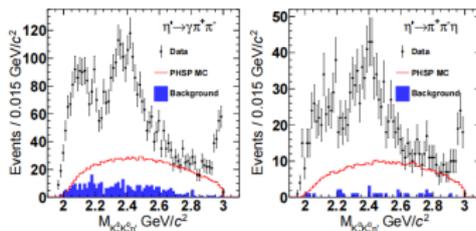
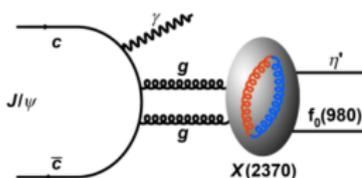
刘川

基础研究背景

传统方向成果

新的科学范式

总结



## Compared with LQCD Prediction on Lightest $0^{-+}$ Glueball

$X(2370)$  measurements: [PRL 132 \(2024\) 181901](#)

$J^{PC} = 0^{-+}$  with significance  $>9.8 \sigma$

$M = 2395 \pm 11^{+26}_{-94}$  MeV

$\Gamma = 188^{+18}_{-17} +^{124}_{-33}$  MeV

$B(J/\psi \rightarrow \gamma X(2370)) B(X(2370) \rightarrow f_0(980) \eta')$   
 $B(f_0(980) \rightarrow K^0_s \bar{K}^0_s) = (1.31 \pm 0.22^{+2.85}_{-0.84}) \times 10^{-5}$

LQCD prediction on lightest pseudoscalar glueball:

$J^{PC} = 0^{-+}$  [PRD 100 \(2019\) 054511](#)

$M = 2395 \pm 14$  MeV

$B(J/\psi \rightarrow \gamma G_{0^{-+}}) = (2.31 \pm 0.80) \times 10^{-4}$

- + The measurements are in a agreement with the predictions on **lightest pseudoscalar glueball**
- + The spin-parity of the  $X(2370)$  is determined to be  $0^{-+}$  for the first time
- + Mass is in a good agreement with LQCD predictions
- + The estimation on  $B(J/\psi \rightarrow \gamma X(2370))$  and prediction on  $B(J/\psi \rightarrow \gamma G_{0^{-+}})$  are consistent within errors (assuming  $B(X(2370) \rightarrow f_0(980) \eta') \sim 5\%$  decay rate,  $B(J/\psi \rightarrow \gamma X(2370)) = (10.7^{+22.8}_{-7}) \times 10^{-4}$ )

BESIII: [PRL 132 \(2024\) 181901](#); 桂龙成/董佳美/陈莹/杨一玻, [PRD 100 \(2019\) 5, 054511](#).



# 1.1 强子谱学方面的进展

谱学:  $0^{++}$  的寻找寻找历史 JMPA Vol: 40 Iss: 19 2530007 (2025) , 2503.13286

近年格点 QCD 进展综述

刘川

基础研究背景

传统方向成果

新的科学范式

总结

## Historical Glueball Candidates

### • $0^{++}$ scalar glueball candidates

- $f_0(1500)$ 
  - Discovered by Crystal Barrel in 1990's as a unique  $0^{++}$  candidate since  $f_0(1710)$  was  $f_2$  at that time.
  - Difficulty: compared with  $f_0(1710)$ , much lower production rate than  $f_0(1710)$  disfavors its interpretation as a scalar glueball.
- Mixing between  $f_0(1500)/f_0(1710)$ , or even with  $f_0(1790)$ 
  - Difficulty: dynamic mixing mechanism needs to be understood from the first principle of QCD (not just phenomenological understanding).

BESIII:

$$B(J/\psi \rightarrow \gamma f_0(1500)) \sim 0.29 \times 10^{-3}$$

$$B(J/\psi \rightarrow \gamma f_0(1710)) \sim 2.2 \times 10^{-3}$$

**$0^{++}$ 胶球寻找困难:**  
**在J/psi辐射衰变中**  
**1.5GeV-1.8GeV区域**  
**太多的 $0^{++}$**

相关格点计算: Jintao Zou et al, Sci.China Phys.Mech.Astron. 67 (2024) 11, 111012.

$f_0(1370)/f_0(1500)/f_0(1710)/\dots$  中必有一个是标量胶球 ?



# 1.1 强子谱学方面的进展

谱学:  $2^{++}$  的历史 JMPA Vol: 40 Iss: 19 2530007 (2025), 2503.13286

近年格点 QCD 进展综述

刘川

基础研究背景

传统方向的成果

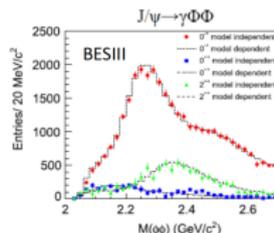
新的科学范式

总结

## Historical Glueball Candidates

### • $2^{++}$ Tensor Glueball Candidates

- $\xi(2230)$ 
  - First observed by MarkIII is  $J/\psi \rightarrow \gamma KK$  in 1980's, then by BES I in 1990's in  $J/\psi \rightarrow \gamma KK, \gamma \pi \pi, \gamma p \bar{p}$  with very narrow mass peak.
  - It was a tensor glueball candidate due to good flavor symmetric decay property.
  - **Difficulty: it was not confirmed by BES I, nor BES III.**
- $f_2(2340)$ 
  - Many wide  $f_2$  mesons in the mass region of 2.3 GeV from the LQCD predictions
  - **Difficulty: no clear mass peak of these  $f_2$  mesons can be directly observed in  $J/\psi$  radiative decays due to large overlaps among various wide resonances. They can only be seen as PWA components.**
  - $f_2(2340)$ : its large production rate in  $J/\psi$  radiative decays favors its interpretation as a tensor glueball candidate.
  - More PWA studies are needed to check the consistency among various decays modes. However, due to large overlaps again, no independent mass and width scan can be performed in PWA, i.e., the masses and widths of these  $f_2$  mesons have to be fixed to previous measurements.



Resonance	M (MeV/c <sup>2</sup> )	$\Gamma$ (MeV/c <sup>2</sup> )	B.F. ( $\times 10^{-6}$ )	Sig.
$\eta(2225)$	$2216^{+4+21}_{-4-21}$	$185^{+12+43}_{-12-43}$	$(2.40 \pm 0.10)^{+2.47}_{-2.18}$	28 $\sigma$
$\eta(2100)$	$2050^{+30+75}_{-34-26}$	$250^{+36+181}_{-33-64}$	$(3.30 \pm 0.09)^{+0.18}_{-0.04}$	22 $\sigma$
$X(2500)$	$2470^{+15+105}_{-19-23}$	$230^{+64+56}_{-25-33}$	$(0.17 \pm 0.02)^{+0.02}_{-0.01}$	8.8 $\sigma$
$f_0(2100)$	2101	224	$(0.43 \pm 0.04)^{+0.34}_{-0.03}$	24 $\sigma$
$f_2(2010)$	2011	202	$(0.35 \pm 0.05)^{+0.26}_{-0.15}$	9.5 $\sigma$
$f_2(2300)$	2297	149	$(0.44 \pm 0.07)^{+0.09}_{-0.04}$	6.8 $\sigma$
$f_2(2340)$	2339	319	$(1.01 \pm 0.14)^{+0.52}_{-0.21}$	11 $\sigma$
$0^{+-}$ PHSF			$(2.74 \pm 0.15)^{+0.11}_{-0.08}$	6.8 $\sigma$

**$2^{++}$  胶球寻找主要困难:  $J/\psi$ 辐射衰变中2.0-2.4GeV区域多个 $2^{++}$**

$f_2(2340)/\dots$  中必有一个是张量胶球?



# 1.1 强子谱学方面的进展

谱学:  $X(2370) = 0^{-+}$  胶球 ?? *IJMPA Vol. 40 Iss: 19 2530007 (2025) , 2503.13286*

## 唯一性

- $X(2370)$  粒子是在  $J/\psi$  辐射衰变中  $>10^{-4}$  产额的唯一一个与  $0^{-+}$  胶球质量一致、与粲偶素  $\eta_c$  衰变性质高度相似的粒子

→ 唯一一个与胶球产生、衰变性质都一致的  $0^{-+}$  粒子

→ We are facing a situation: Either we finally identify  $X(2370)$  as  $0^{-+}$  glueball, or LQCD may face a big challenge in the glueball predictions  
—— similar to the situation before the Higgs boson discovery

1 首先,  $X(2370)$  的确挺像的.....

2 其次, 我们需要进一步核实信息

- 不要重蹈当年标量胶球和张量胶球的历史 (见下页)
- **【个人建议】**: 格点可以做一些事情, 就像我们对于  $0^{++}/2^{++}$  胶球所做过的那样!

近年格点 QCD 进展综述

刘川

基础研究背景

传统方向的成果

新的科学范式

总结



# 1.1 强子谱学方面的进展

谱学:  $X(2370) = 0^{-+}$  胶球 ?? *IJMPA Vol. 40 Iss: 19 2530007 (2025) , 2503.13286*

## 唯一性

- $X(2370)$  粒子是在  $J/\psi$  辐射衰变中  $>10^{-4}$  产额的唯一一个与  $0^{-+}$  胶球质量一致、与粲偶素  $\eta_c$  衰变性质高度相似的粒子

→ 唯一一个与胶球产生、衰变性质都一致的  $0^{-+}$  粒子

→ We are facing a situation: Either we finally identify  $X(2370)$  as  $0^{-+}$  glueball, or LQCD may face a big challenge in the glueball predictions  
—— similar to the situation before the Higgs boson discovery

**1** 首先,  $X(2370)$  的确挺像的.....

**2** 其次, 我们需要进一步核实信息

- 不要重蹈当年标量胶球和张量胶球的历史 (见下页)
- **【个人建议】**: 格点可以做一些事情, 就像我们对于  $0^{++}/2^{++}$  胶球所做过的那样!

近年格点 QCD 进展综述

刘川

基础研究背景

传统方向的成果

新的科学范式

总结

# 1.1 强子谱学方面的进展

谱学：标量胶球的混合问题 PoS(LATTICE2024)004 Morningstar & arXiv:1909.07306

近年格点 QCD 进展综述

刘川

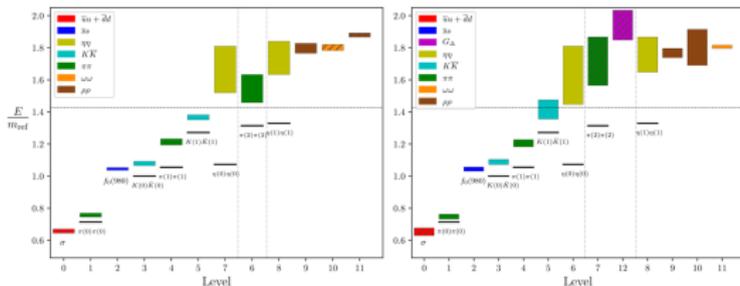
基础研究背景

传统方向的成果

新的科学范式

总结

- 1 胶球仅在纯规范场理论中具有严格的定义；
- 2 在包含夸克的 QCD 中，并不存在“纯的胶球”；



$24^3 \times 128$  anisotropic lattice,  $m_\pi \sim 390\text{MeV}$

Left: w/o glueball operator

Right: w/ glueball operator



# 1.1 强子谱学方面的进展

谱学：标量胶球的混合问题 PoS(LATTICE2024)004 Morningstar & arXiv:1909.07306

近年格点 QCD 进展综述

刘川

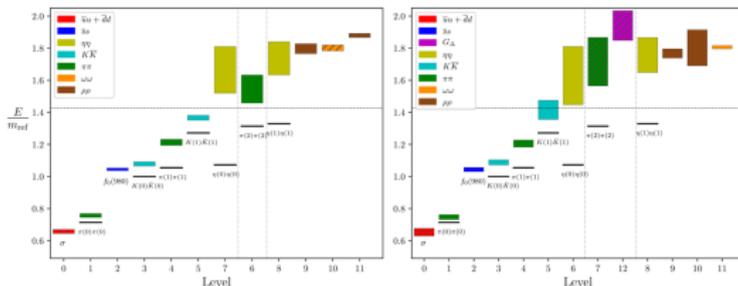
基础研究背景

传统方向成果

新的科学范式

总结

- 1 胶球仅在纯规范场理论中具有严格的定义；
- 2 在包含夸克的 QCD 中，并不存在“纯的胶球”；
- 3 给定  $J^{PC}$  的一个胶球态，它必定会与所有 QCD 所允许的、具有相同量子数的态混合！



$24^3 \times 128$  anisotropic lattice,  $m_\pi \sim 390\text{MeV}$

Left: w/o glueball operator

Right: w/ glueball operator



# 1.1 强子谱学方面的进展

谱学：标量胶球的混合问题 PoS(LATTICE2024)004 Morningstar & arXiv:1909.07306

近年格点 QCD 进展综述

刘川

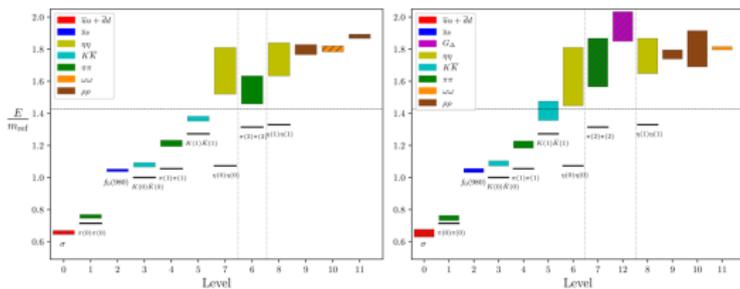
基础研究背景

传统方向成果

新的科学范式

总结

- 1 胶球仅在纯规范场理论中具有严格的定义；
- 2 在包含夸克的 QCD 中，并不存在“纯的胶球”；
- 3 给定  $J^{PC}$  的一个胶球态，它必定会与**所有**QCD 所允许的、具有相同量子数的态混合！
  - 这首先包括单强子态



$24^3 \times 128$  anisotropic lattice,  $m_\pi \sim 390\text{MeV}$

Left: w/o glueball operator

Right: w/ glueball operator



# 1.1 强子谱学方面的进展

谱学：标量胶球的混合问题 PoS(LATTICE2024)004 Morningstar & arXiv:1909.07306

近年格点 QCD 进展综述

刘川

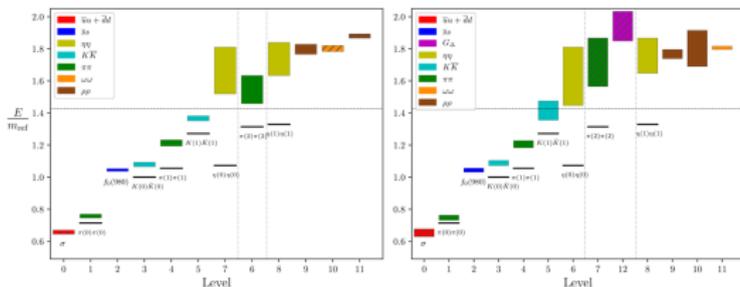
基础研究背景

传统方向成果

新的科学范式

总结

- 1 胶球仅在纯规范场理论中具有严格的定义；
- 2 在包含夸克的 QCD 中，并不存在“纯的胶球”；
- 3 给定  $J^{PC}$  的一个胶球态，它必定会与所有 QCD 所允许的、具有相同量子数的态混合！
  - 这首先包括单强子态
  - 同时也包括双强子态、多强子态、混杂态、分子态等等



$24^3 \times 128$  anisotropic lattice,  $m_\pi \sim 390\text{MeV}$

Left: w/o glueball operator

Right: w/ glueball operator









# 1.2 结构与矩阵元方面的成果

缪子反常磁矩 T. Aoyama et al, Phys. Rept. 887 (2020) 1-166

近年格点 QCD 进展综述

刘川

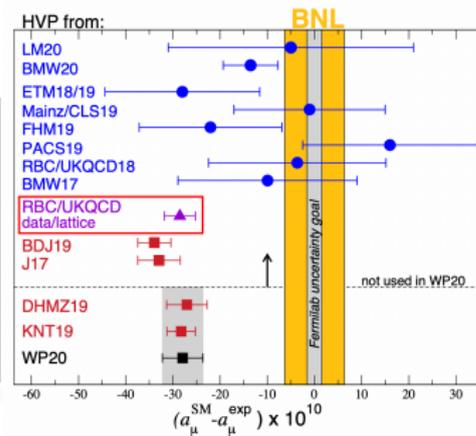
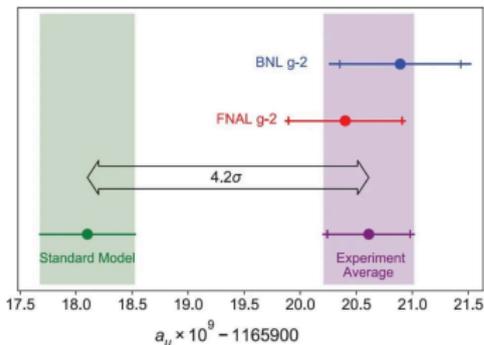
基础研究背景

传统方向的成果

新的科学范式

总结

- 近几年缪子反常磁矩是探索新物理的重要前沿



- 主要贡献：电磁；主要误差：LOHVP
- 格点 + Data-driven 方法相结合可与实验对比



# 1.2 结构与矩阵元方面的成果

$a_\mu$  更新 PoS(LATTICE2024)019.& Eur.Phys.J. A47 (2011) 148 & WP25: 2505.21476

近年格点 QCD 进展综述

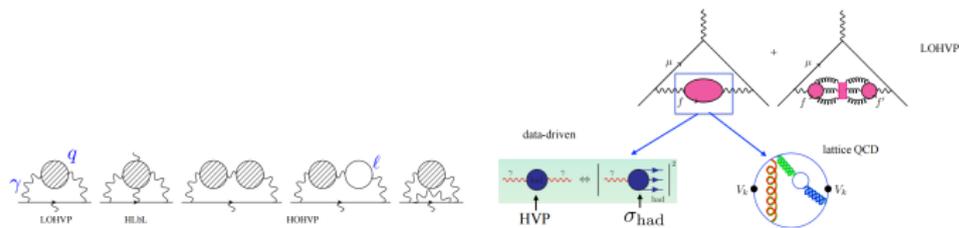
刘川

基础研究背景

传统方向成果

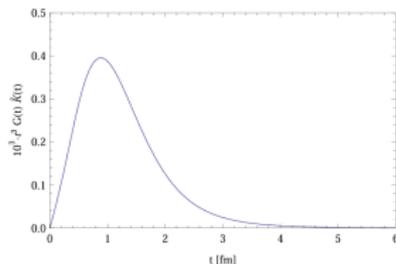
新的科学范式

总结



$$a_\mu^{LOHVP} = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 \int_0^\infty dt G(t) K(t), \quad (1)$$

$$G(t) = \int d\vec{x} \langle V_i(0, \vec{0}) V_i^\dagger(t, \vec{x}) \rangle,$$



被积函数 =>

# 1.2 结构与矩阵元方面的成果

缪子反常磁矩更新 PoS(LATTICE2024)019.& WP25: 2505.21476

近年格点 QCD 进展综述

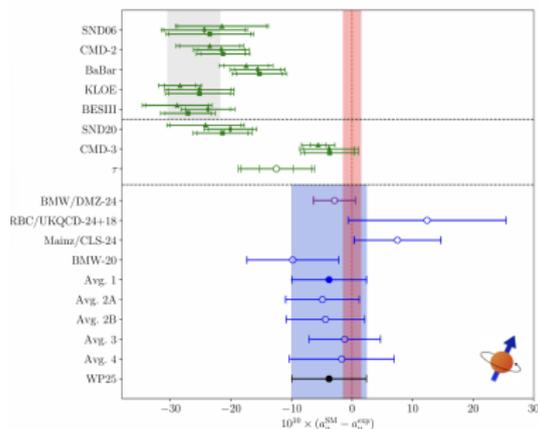
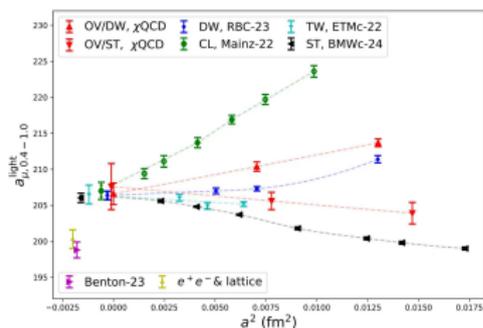
刘川

基础研究背景

传统方向的成果

新的科学范式

总结



- Window method points to a mismatch between lattice & data-driven approach, especially in the intermediate window  $t \in [0.4, 1.0]$ fm.
- lattice data supports the new CMD-3 data for  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  data



**Likely no new physics seen here!**

# 1.2 结构与矩阵元方面的成果

PDF 与 GPD—relevant for EICC & EIC

近年格点 QCD 进展综述

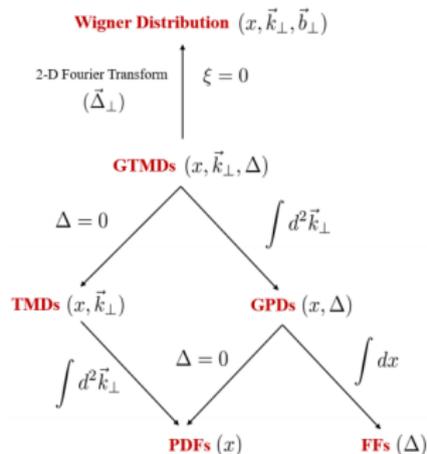
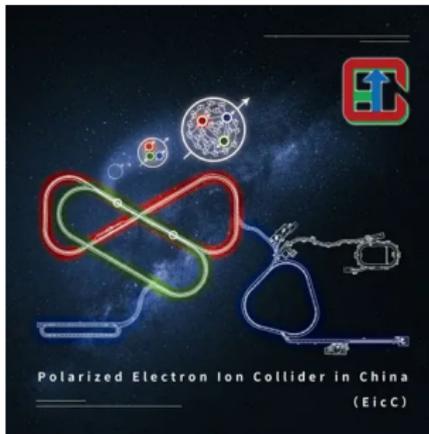
刘川

基础研究背景

传统方向成果

新的科学范式

总结



- 明天上午梁羽铁的报告 (HIAF-EICC)
- Huey-wen Lin 的报告
- 张其安 (TMD) 和华俊 (LCDA) 的报告
- 明天分会 1 的各个报告



# 1.2 结构与矩阵元方面的成果

## CLQCD ensembles

近年格点 QCD 进展综述

刘川

基础研究背景

传统方向的成果

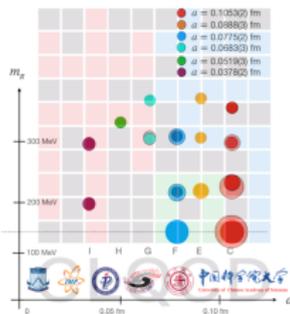
新的科学范式

总结

## CLQCD ensembles

	Country/Region	Smallest lattice spacing	No. of physical point ensembles	Largest spacial size	No. of fermion discretization
MILC	US	0.03 fm	5	5.8 fm	1
RBC	US	0.06 fm	3	5.5 fm	1
BMW	EN	0.05 fm	15	10 fm	2
CLS	EN	0.04 fm	2	5.5 fm	1
ETM	EN	0.05 fm	5	6.3 fm	1
PACS	JP	0.06 fm	3	10 fm	1
<b>CLQCD</b>	<b>CN</b>	<b>0.04 fm</b>	<b>3</b>	<b>6.7 fm</b>	<b>2</b>

## Current status



- The first ensemble set from China which can control most of the systematic uncertainties;
- Unique advantage on finite volume studies.

■ 明天上午杨一玻报告



# 1.2 结构与矩阵元方面的成果

味物理与 CKM 矩阵元

近年格点 QCD 进展综述

刘川

基础研究背景

传统方向成果

新的科学范式

总结

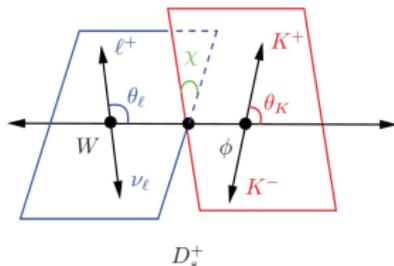
## $D_s \rightarrow \phi l \nu$

- 可用于确定  $|V_{cs}|$
- 除了与实验比较总截面, 还有角度依赖的微分截面,  $\phi \rightarrow K\bar{K}$
- 四个独立形状因子:  $V, A_2, A_1, A_0$

$$\begin{aligned} & \langle \phi(p', \varepsilon) | V^\mu - A^\mu | D_s(p) \rangle \\ &= \frac{2i\varepsilon^{\mu\alpha\beta}}{M_{D_s} + M_\phi} \varepsilon_\nu^* p'_\alpha p_\beta V(q^2) - (M_{D_s} + M_\phi) \varepsilon^{*\mu} A_1(q^2) \\ &+ \frac{\varepsilon^* \cdot q}{M_{D_s} + M_\phi} (p + p')^\mu A_2(q^2) + 2M_\phi \frac{\varepsilon^* \cdot q}{q^2} q^\mu A_3(q^2) \\ &- 2M_\phi \frac{\varepsilon^* \cdot q}{q^2} q^\mu A_0(q^2). \end{aligned}$$

$$A_3(q^2) = \frac{M_{D_s} + M_\phi}{2M_\phi} A_1(q^2) - \frac{M_{D_s} - M_\phi}{2M_\phi} A_2(q^2)$$

$$A_0(0) = A_3(0)$$



- 七套CLQCD组态: 四个格距,  $\sim 4$ 个  $m_\pi$ , 3个体积
- $D_s$ 静止, 改变  $\phi$  的三动量  $\vec{p} = \frac{2\pi}{La}(k_x, k_y, k_z)$
- $(k_x, k_y, k_z) = (0, 0, 0), (1, 0, 0), (1, 1, 0), (1, 1, 1), (2, 0, 0)$
- (轴) 矢量流重正化常数 [CLQCD, arXiv:2408.03548]
- 忽略非连通图贡献(OZI压低)
- 模拟中  $\phi$  不衰变;  $\phi$  宽度较窄, 预期阈效应小



# 1.2 结构与矩阵元方面的成果

## 味物理与 CKM 矩阵元

近年格点 QCD 进展综述

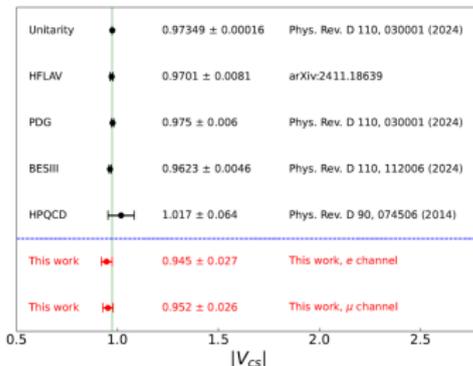
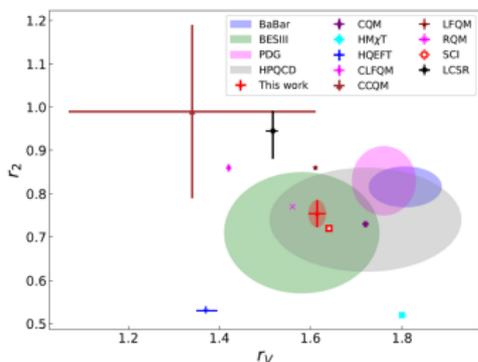
刘川

基础研究背景

传统方向的成果

新的科学范式

总结



形状因子比值 $r_1$ 和 $r_2$ , 以及 $|V_{cs}|$ 的比较

### 下午孟雨的报告

# 1.2 结构与矩阵元方面的成果

核子的极化率与  $\pi$  介子光生过程 PRL134 (2025) 171904.

近年格点 QCD 进展综述

刘川

基础研究背景

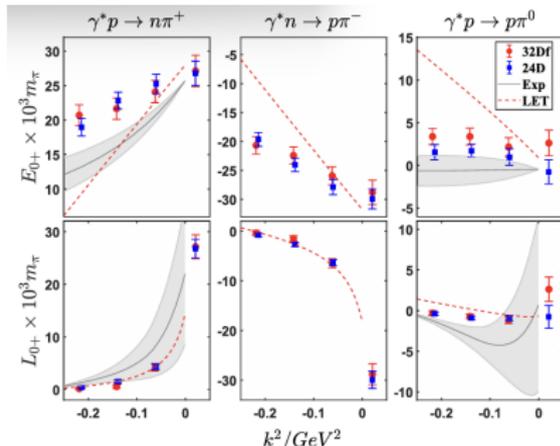
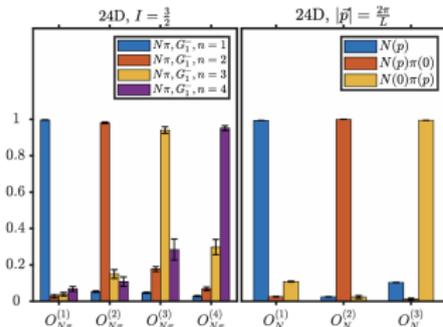
传统方向成果

新的科学范式

总结

$$\mathcal{J}_\mu^{em} = \langle N\pi | J_\mu^{em}(0) | N \rangle,$$

$$\mathcal{J}_\mu^{W(Z),A} = \langle N\pi | J_\mu^{W(Z),A}(0) | N \rangle.$$



- $N\pi$  态的重要性 (特别是对于轻的物理点处)
- 参见 12 日下午张兆龙的报告 (分会 5)

# 1.3 QCD 相结构

QCD 的相结构 PoS(LATTICE2024)005. Schmidt

近年格点 QCD 进展综述

刘川

基础研究背景

传统方向成果

新的科学范式

总结

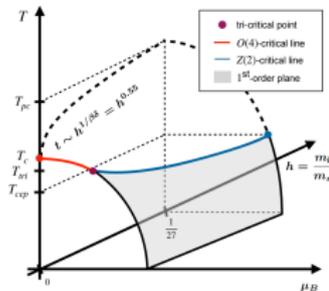


Figure 2: Schematic view of the (2+1)-flavor phase diagram in the parameter space spanned by temperature  $T$ , quark mass ratio  $m_l/m_s$ , and baryon chemical potential  $\mu_B$ .

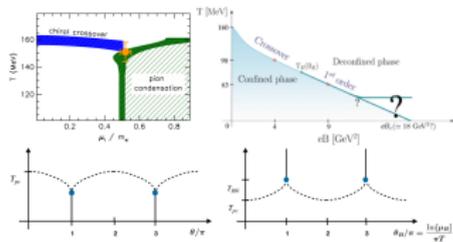
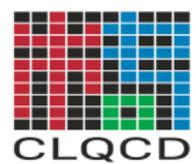


Figure 3: Different versions of the QCD phase diagram with temperature and one further control parameter, shown are isospin chemical potential  $\mu_l$  (top left), external magnetic field  $eB$  (top right), topological angle  $\theta$  (bottom left) and imaginary chemical potential  $\theta_H$  (bottom right). The top diagrams are taken from Ref. [18], and Ref. [19], respectively.

- 1 理解真实世界 [曾发生过/正在发生] 的 QCD 相变
- 2 格点 QCD 可以在更丰富的参数空间理解相变



# 1.3 QCD 相结构

小重子化学势时的相转变温度 [Bazavov, 丁亨通, Hegde et al., Phys. Lett. B 795 \(2019\) 15](#)

近年格点 QCD 进展综述

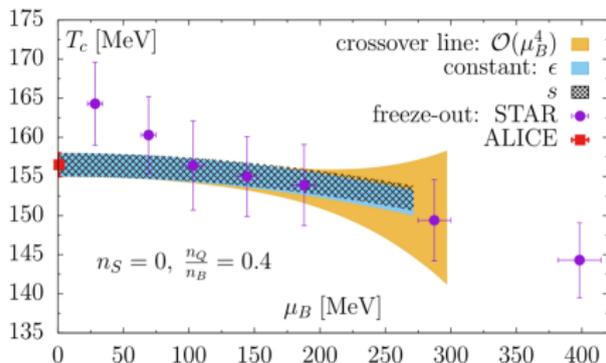
刘川

基础研究背景

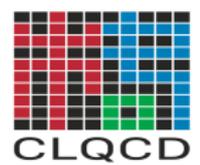
传统方向成果

新的科学范式

总结



- 真实物理世界中强子相到夸克胶子等离子体相的相转变温度是 QCD 相结构中重要的基本物理量，
- 这是该方向一个里程碑的工作。



# 1.3 有限温度密度 QCD

QCD 的相结构 Heng-Tong Ding et al, PRL132 (2024) 201903; PRD111(2025)114522.

近年格点 QCD 进展综述

刘川

基础研究背景

传统方向成果

新的科学范式

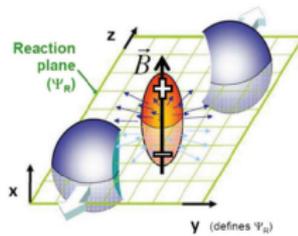
总结

## 极端条件QCD进展: QCD磁力计

丁亨通 顾锦彪, A. Kumar, 李胜泰, 刘俊宏,  
PRL132 (2024) 201903, PRD111(2025)114522

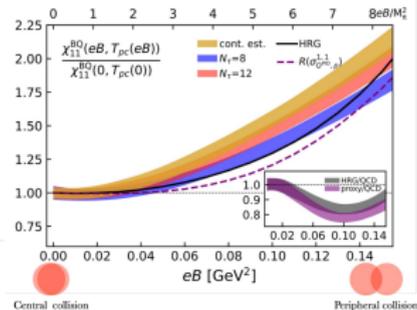
See talk by 顾锦彪

地球磁场磁力计



$10^{17-18}$  Gauss

提出探测重离子碰撞中磁场强度的探针  
QCD 磁力计: 重子数和电荷数的关联





# 1.3 有限温度密度 QCD

QCD 的相结构 Heng-Tong Ding et al, PRL132 (2024) 201903; PRD 111(2025)114522.

近年格点 QCD 进展综述

刘川

基础研究背景

传统方向的成果

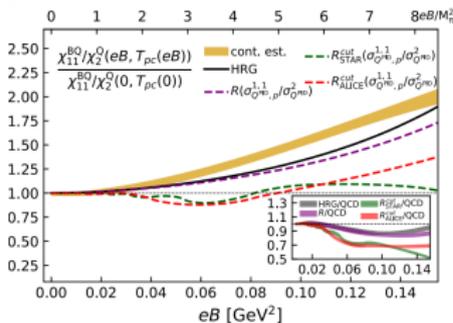
新的科学范式

总结

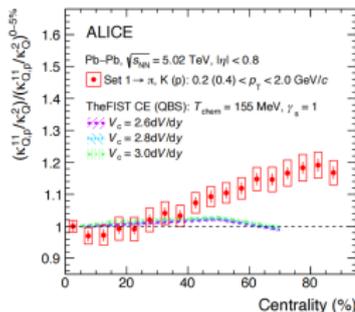
## 极端条件QCD进展:

See talk by 顾锦彪

ALICE实验组测量了我们提出的QCD磁力计观测量，发现与预言趋势一致



丁亨通, 顾锦彪, A. Kumar, 李胜泰, PRD111(2025)114522



ALICE Collaboration, arXiv:2503.18743 [nucl-ex]

- 11 日下午顾锦彪 (分会二) 的报告







