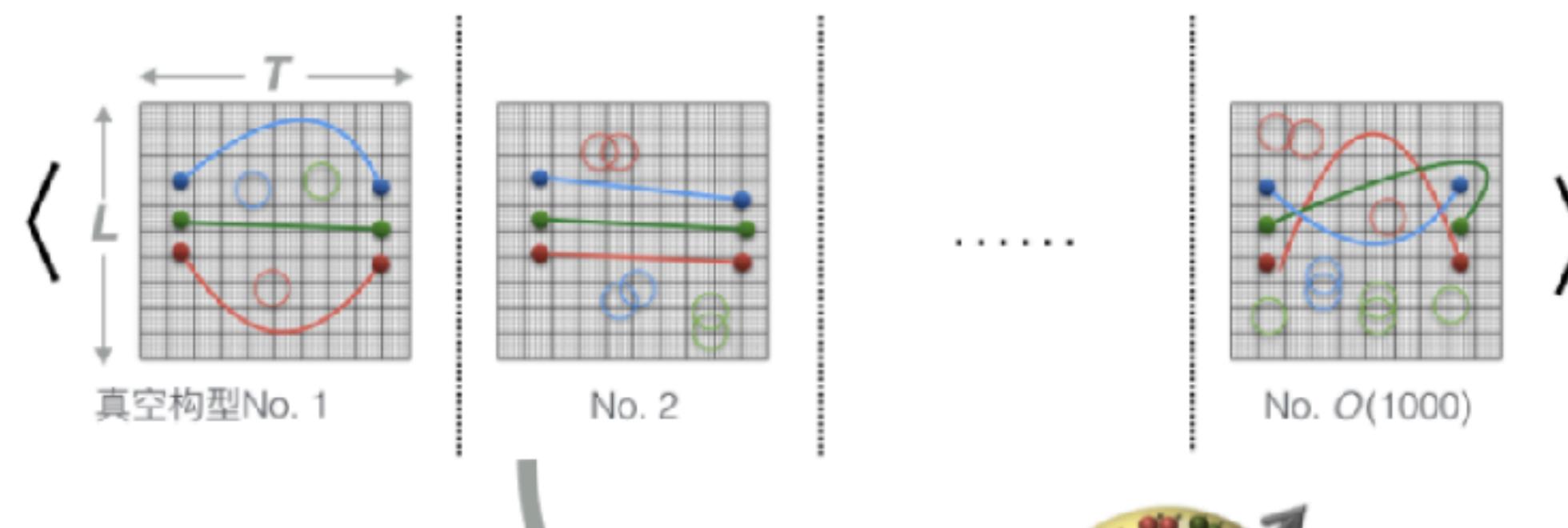
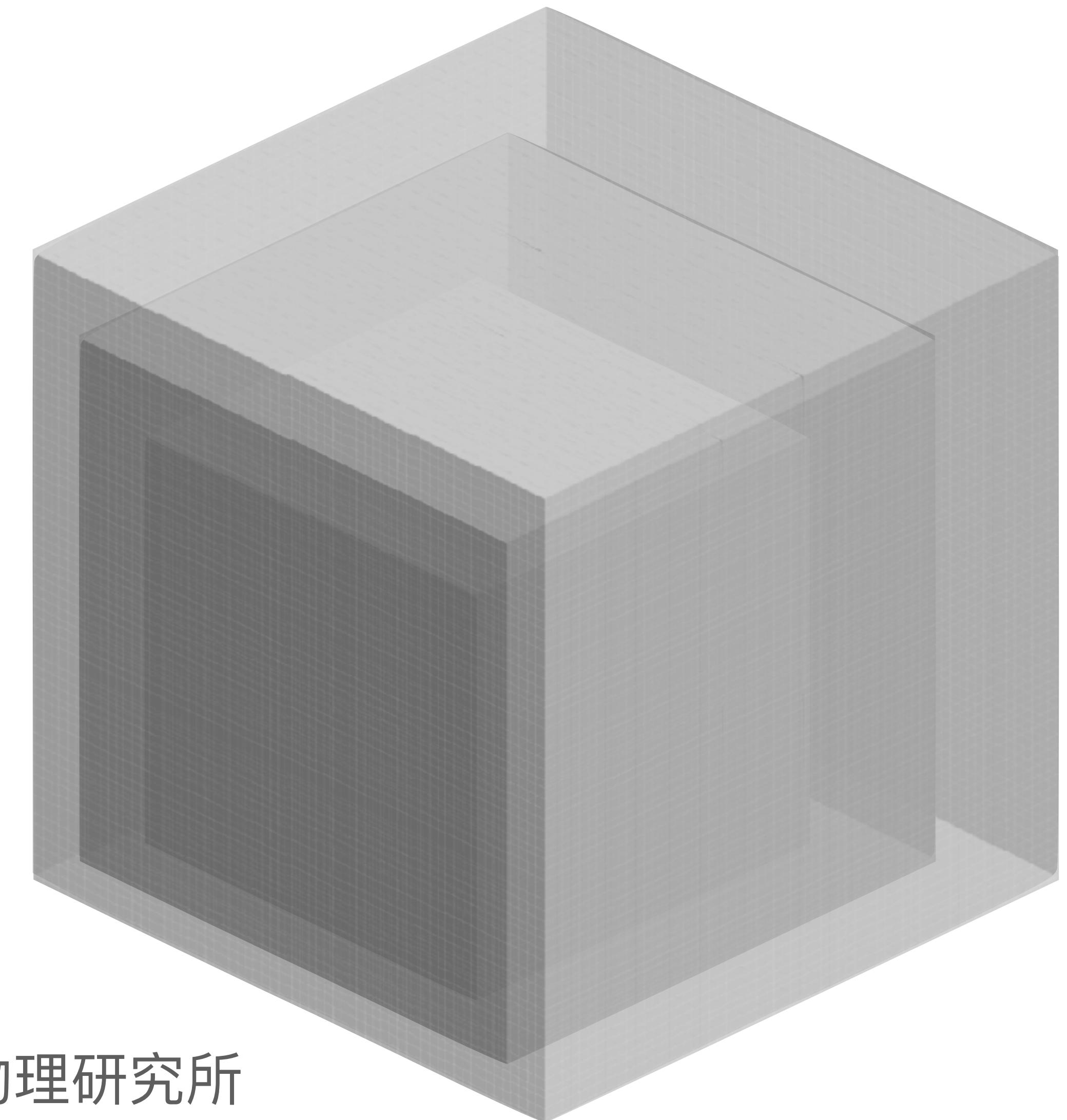


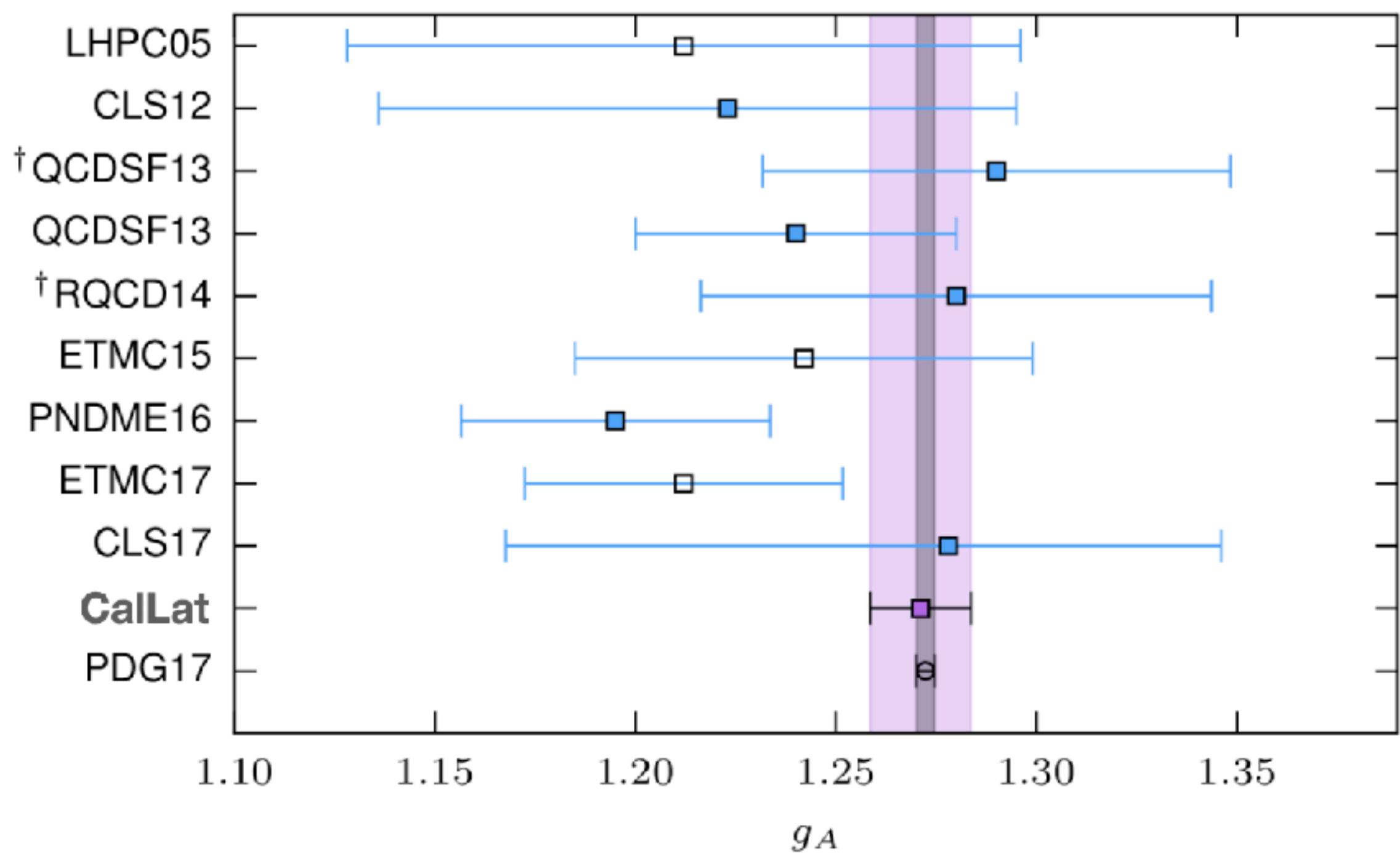
格点QCD研究进展



杨一玻
中国科学院理论物理研究所

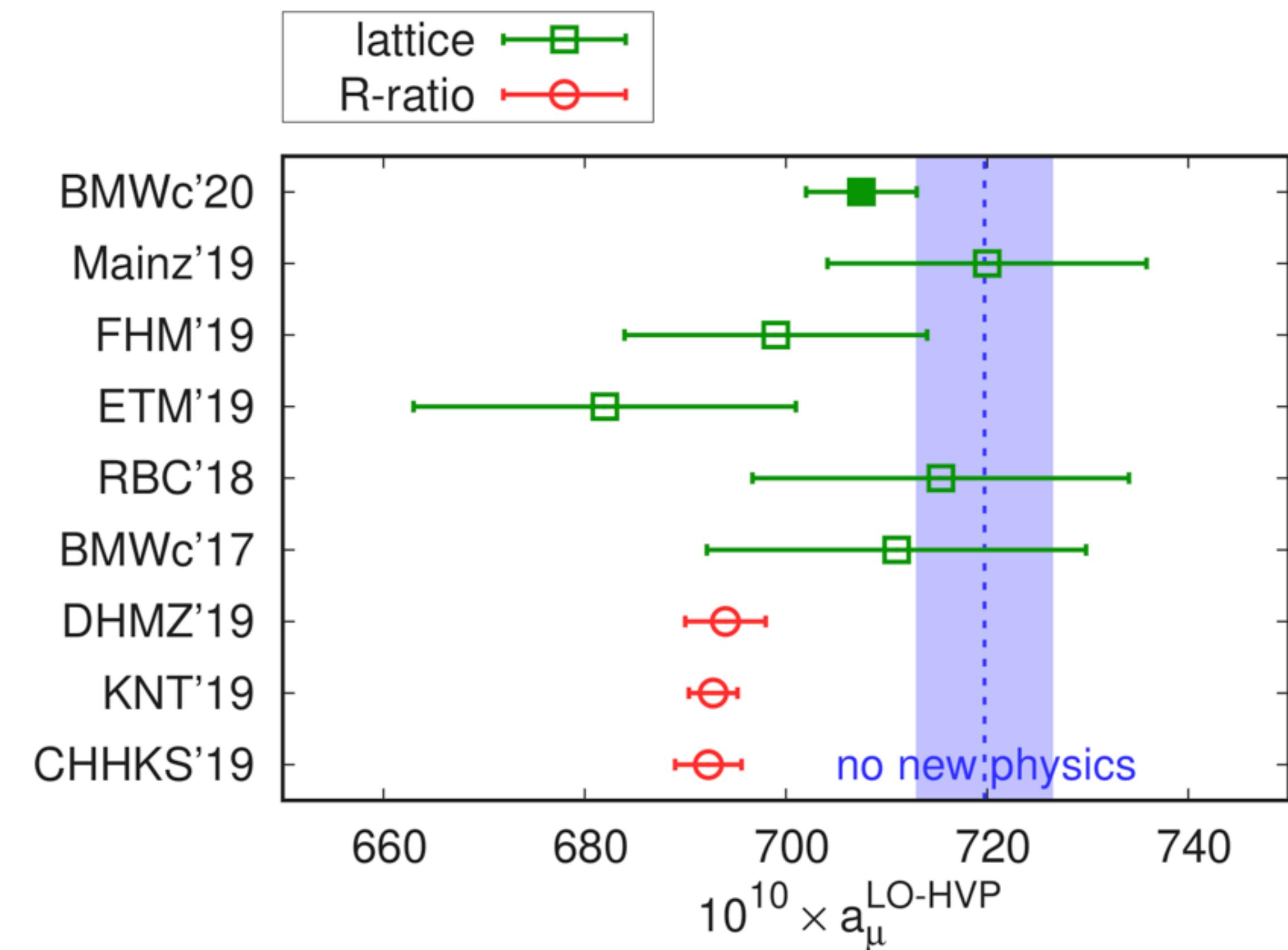


格点QCD国际前沿一瞥



C.C.Chang, et.al. CalLat, Nature 558 (2018) 7708

核子轴矢流耦合强度

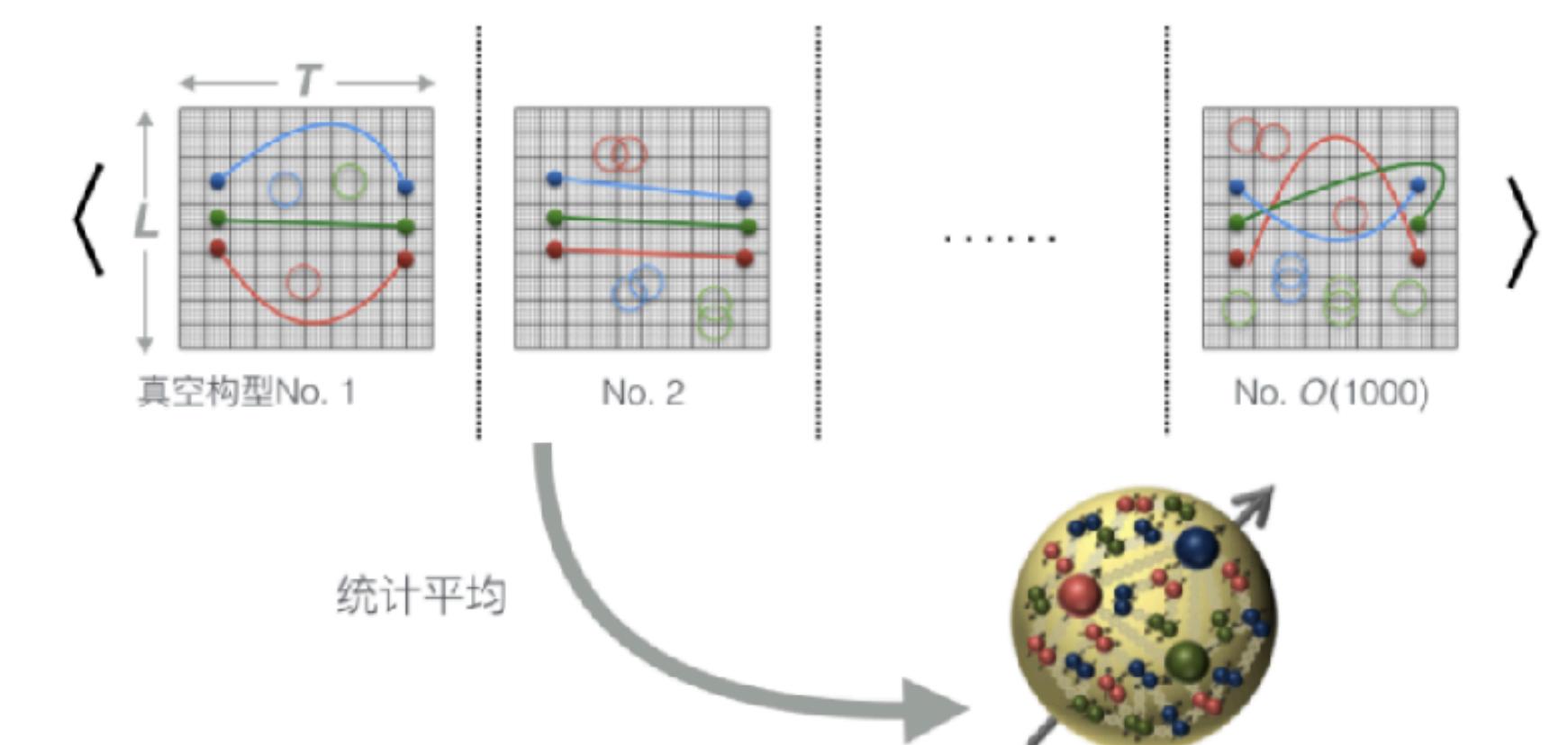
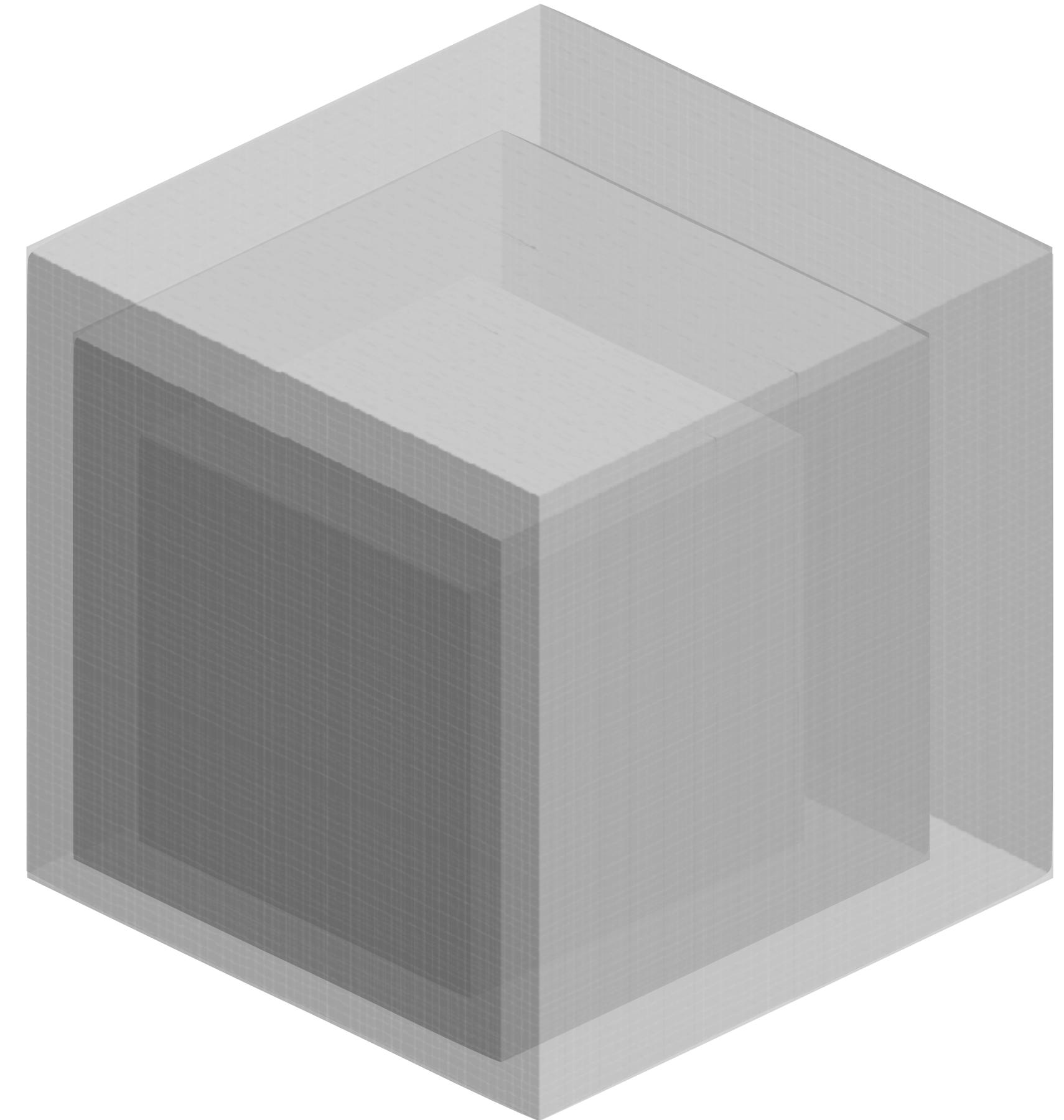


Sz. Borsanyi, et.al. BMWc, Nature 593 (2021) 7857

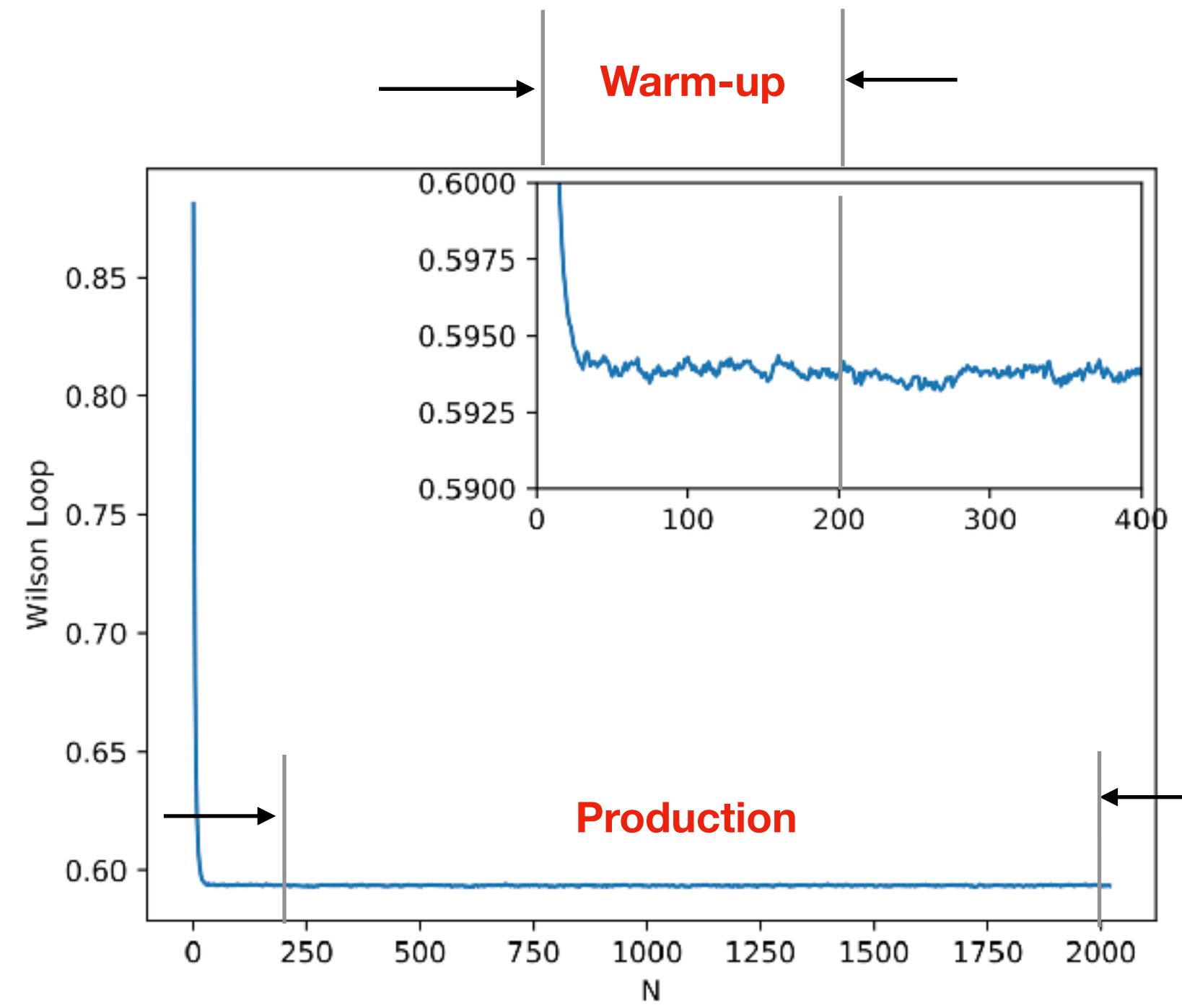
缪子反常磁矩的强子真空极化贡献

格点QCD模拟的基本思想

- 将四维时空离散化为有限体积，有限格距的格子；
- 按照QCD作用量给定的权重，对可能的QCD真空构型进行重点采样；
- 在多种格距和体积的格子上重复计算，得到无穷大体积、连续极限下的计算结果。

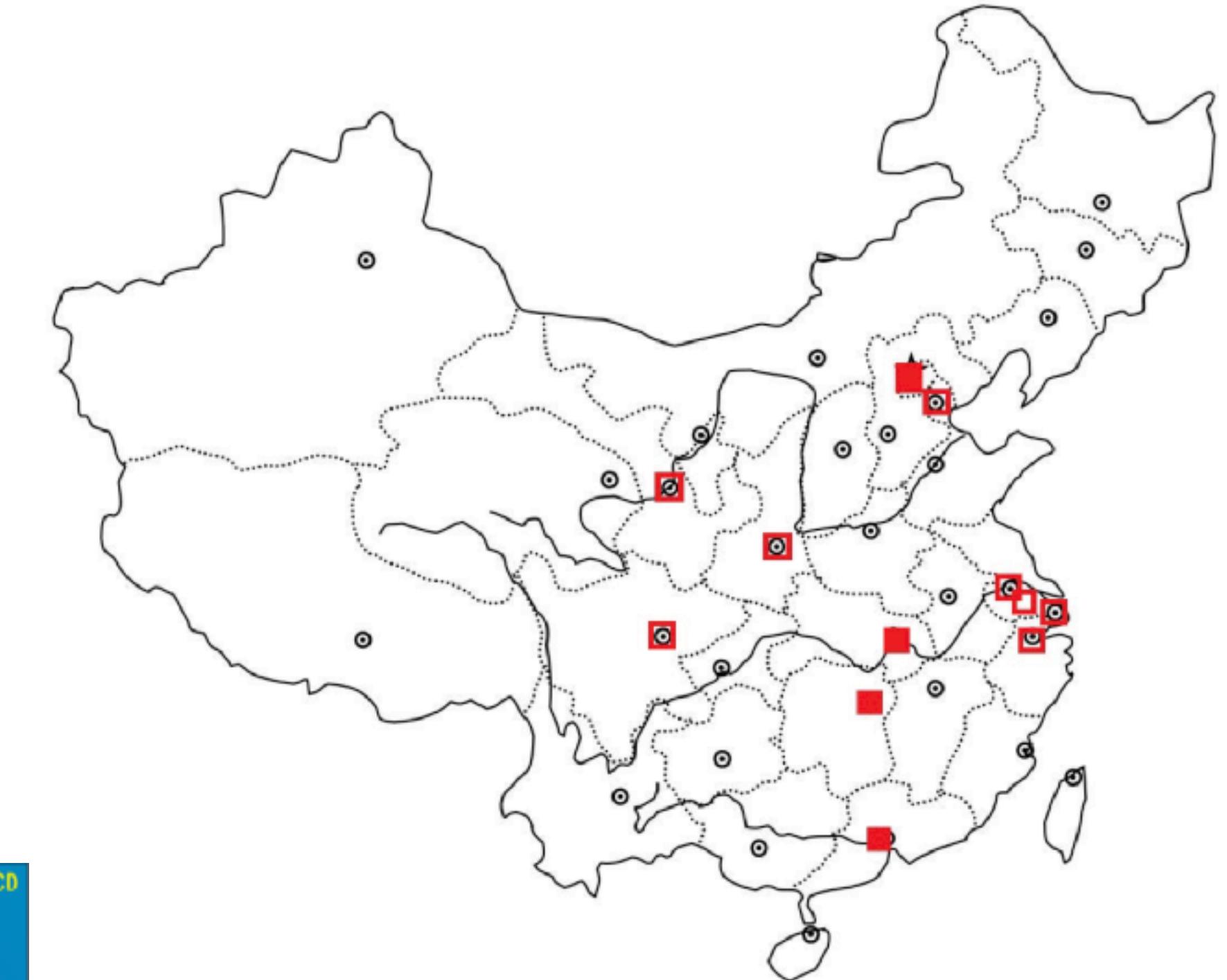
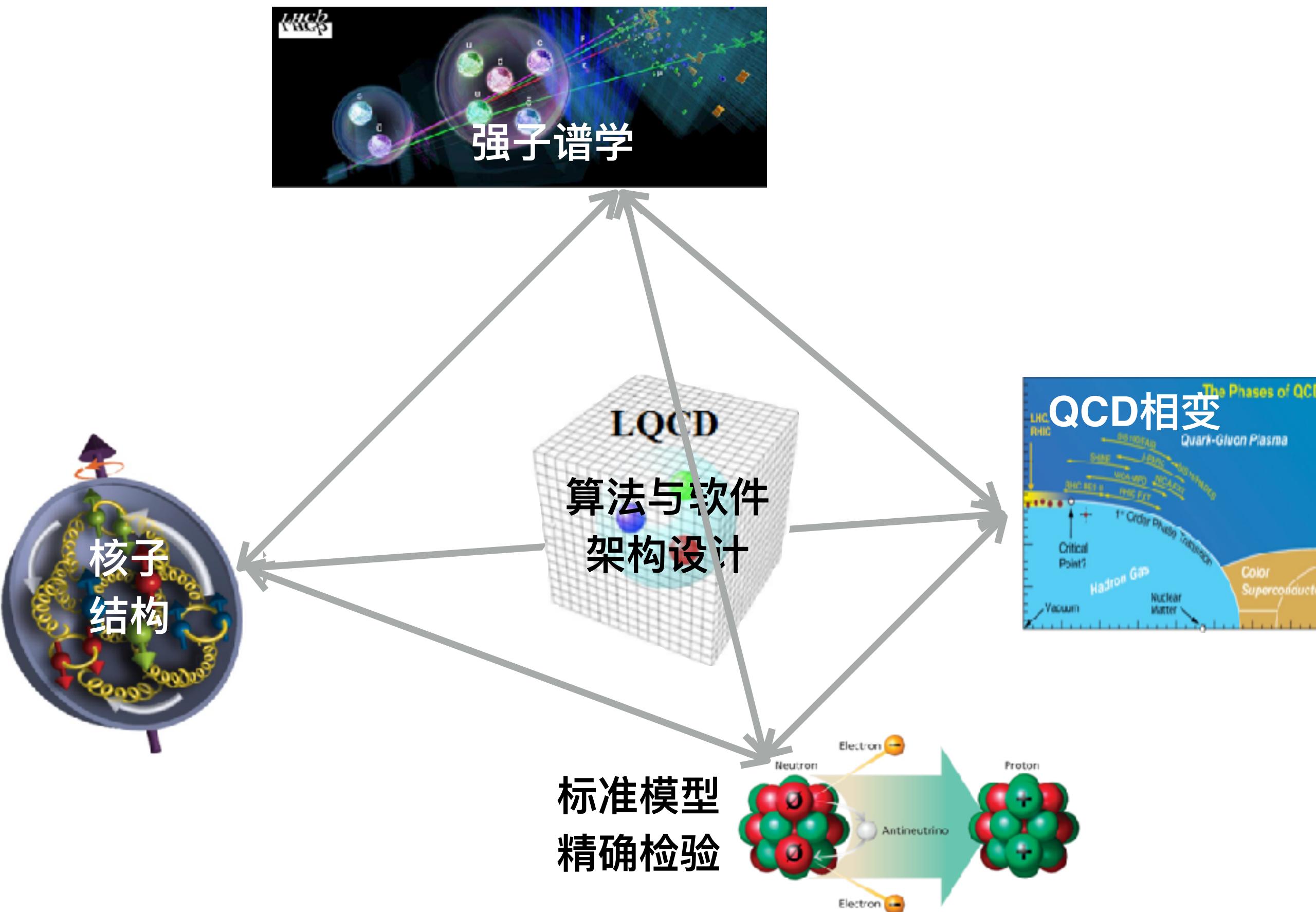


格点QCD产生组态的成本 (不包括计算实际物理问题的成本)



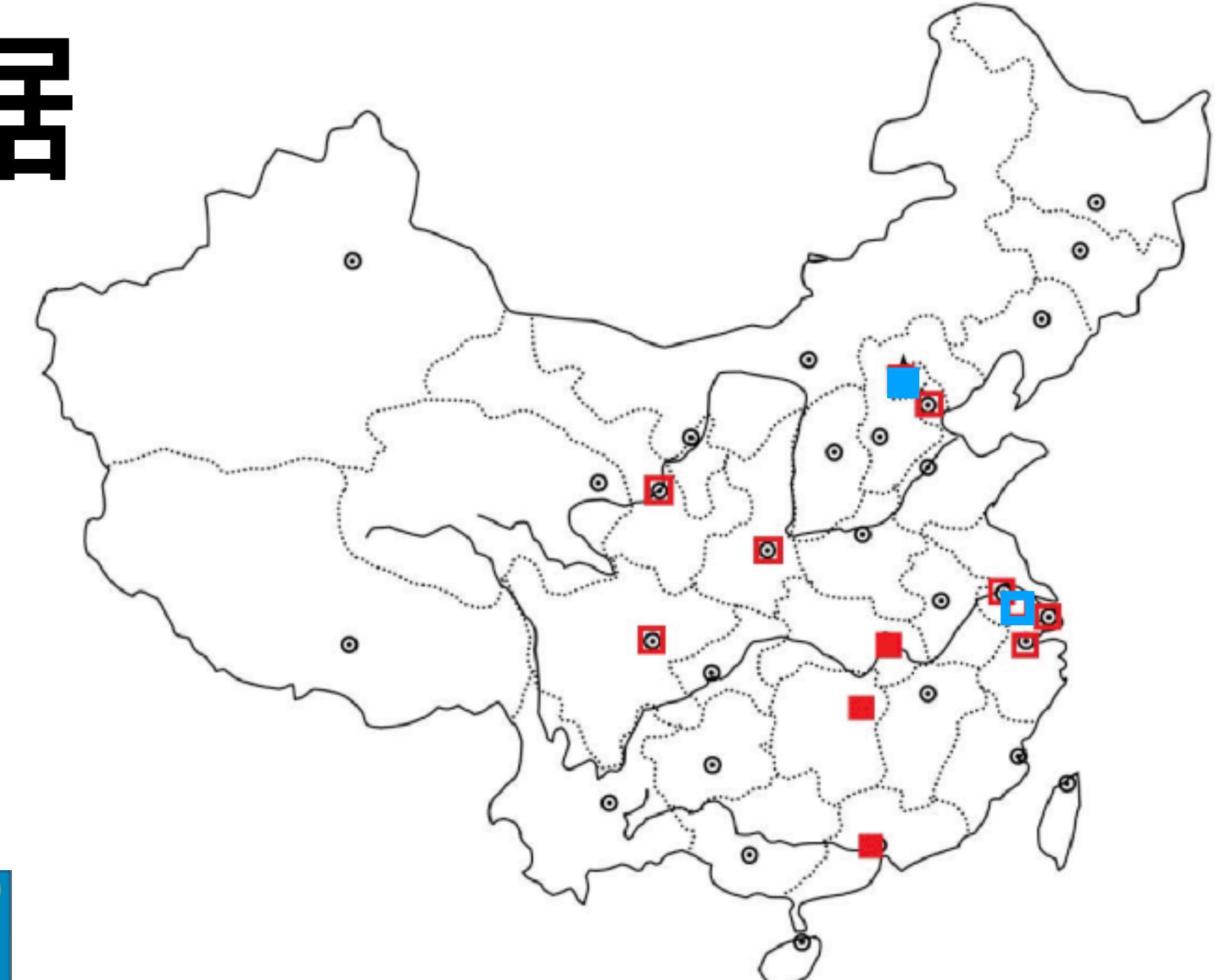
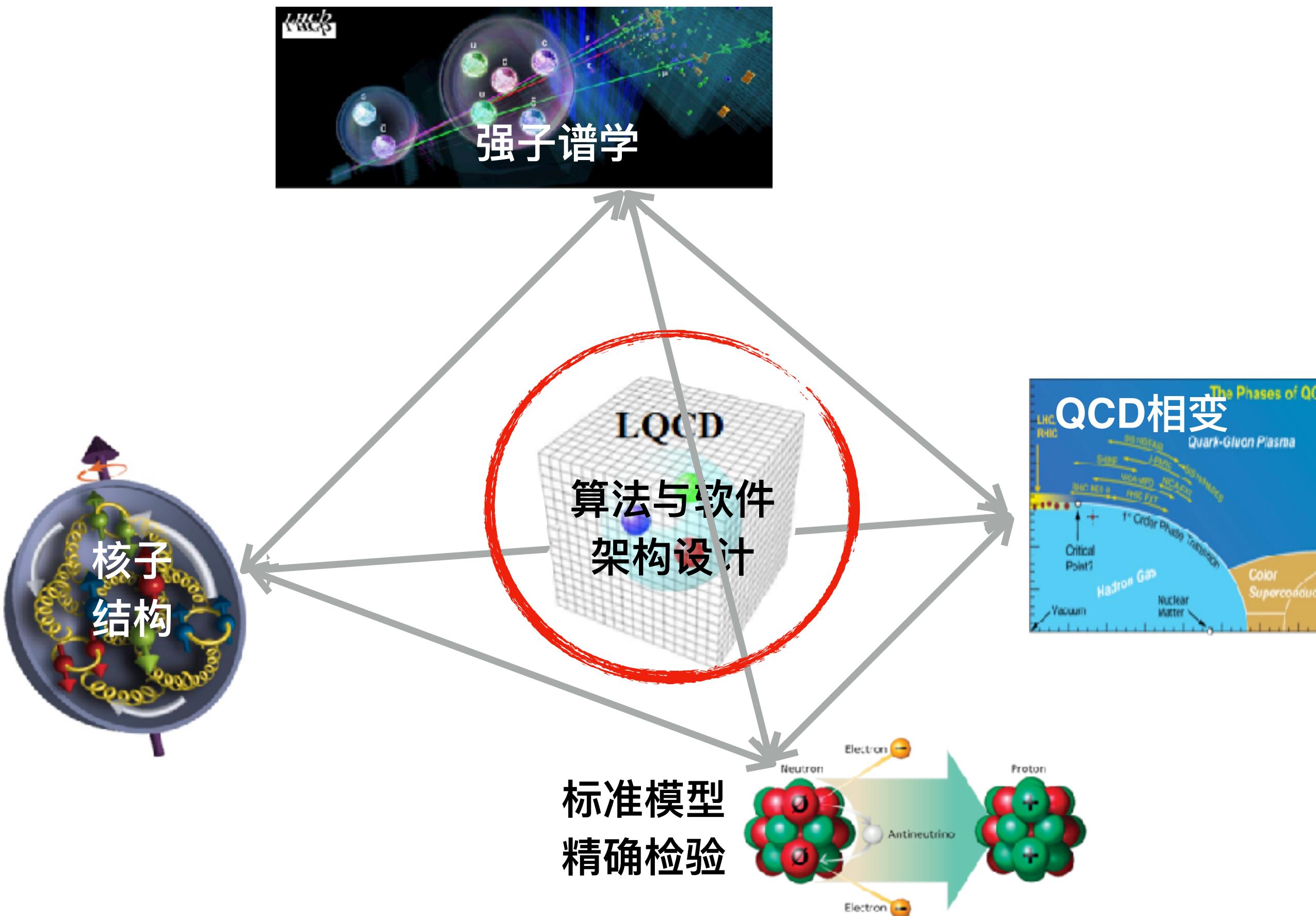
- 探索性研究所需的组态:
 - Clover+Symanzik,
 - $24^3 \times 72$, $a=0.108$ fm, $m_\pi=300$ MeV,
 - 8 V100 GPUs:
 - 预热需要 一周;
 - 产生200 configurations (5 traj. per conf.) 也需要 一周;
 - 以及 13 GB 的存储。
 - 约合 数万人民币 (按市价每V100小时6元计算)。
- 目前世界最高水平的组态:
 - Mobius DWF+Iwasaki,
 - $96^3 \times 192$, $a=0.071$ fm, $m_\pi=140$ MeV,
 - 512 V100 GPUs:
 - 预热需要 一年;
 - 产生200 configurations (5 traj. per conf.) 也需要 一年;
 - 以及 2,278 GB 的存储。
 - 约合 五千万人民币 (按市价每V100小时6元计算)。

格点QCD在中国



北京大学, 江苏大学, 湖南师大, 华南师大, 华中师大, 南京师大, 南开大学, 清华大学, 四川大学, 西安工大, 浙江大学, 中国科学院大学/高能物理所/理论物理所/近代物理所.....

格点QCD在中国：软件与数据



Lattice ensembles generation with Clover actions

孙鹏, Tue, 11:55 - 12:10

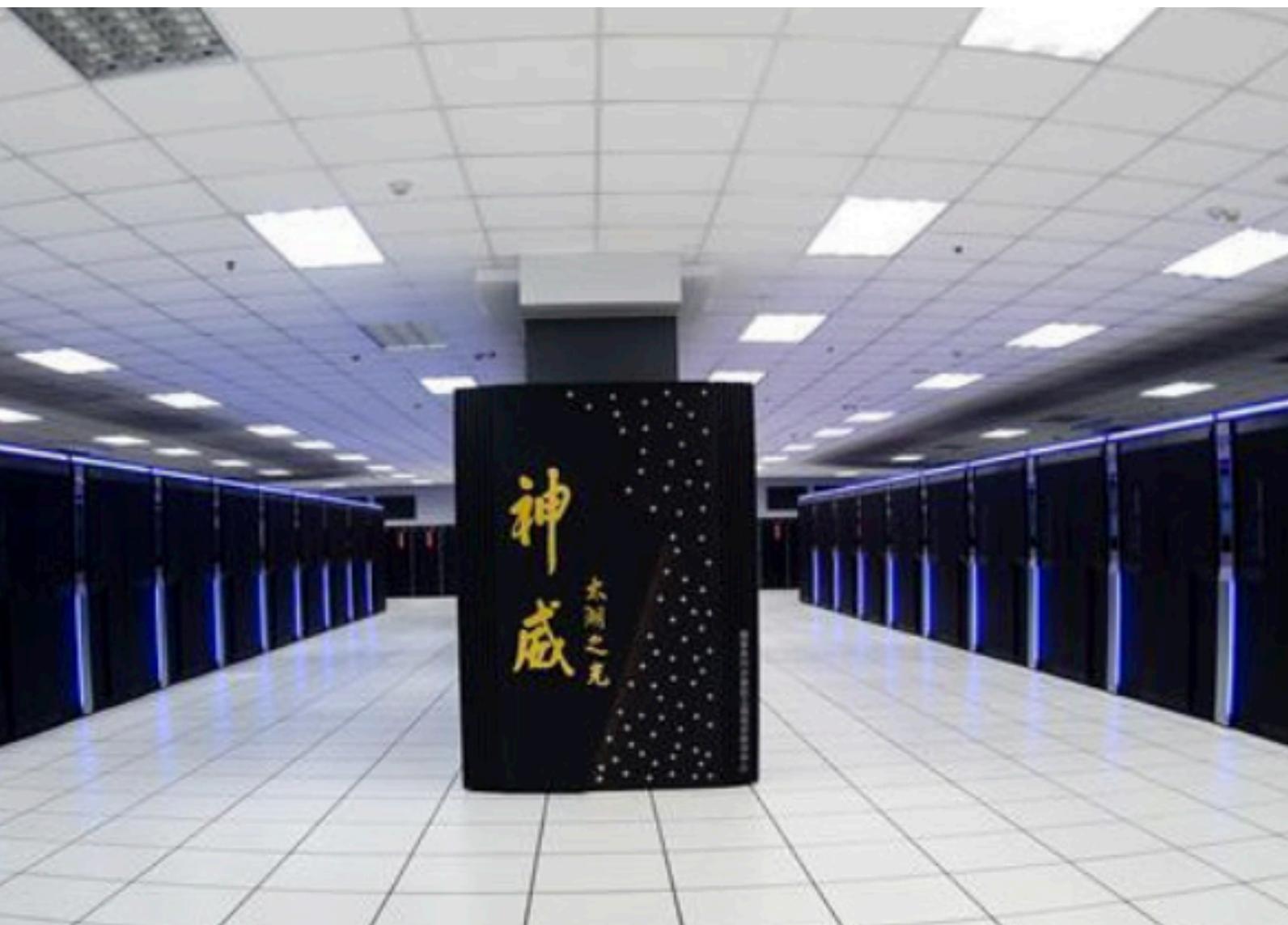
Propagator generation with Chroma+QUUDA for various fermion actions

张宽, Wed, 17:10 - 17:25

软件：

重点研发计划/先导专项支持下的软件研发

- 国产E级超级计算机即将（已经）到来；
- 国际上现有的格点QCD软件，无法直接高效地支持国产E级超级计算使用的硬件架构；



基于科技部重点研发专项No.2017YFB0203202的支持：

- 从零开始设计和编写申威架构上的格点QCD程序；
- 历时五年，兼容神威太湖之光和下一代申威架构处理器。

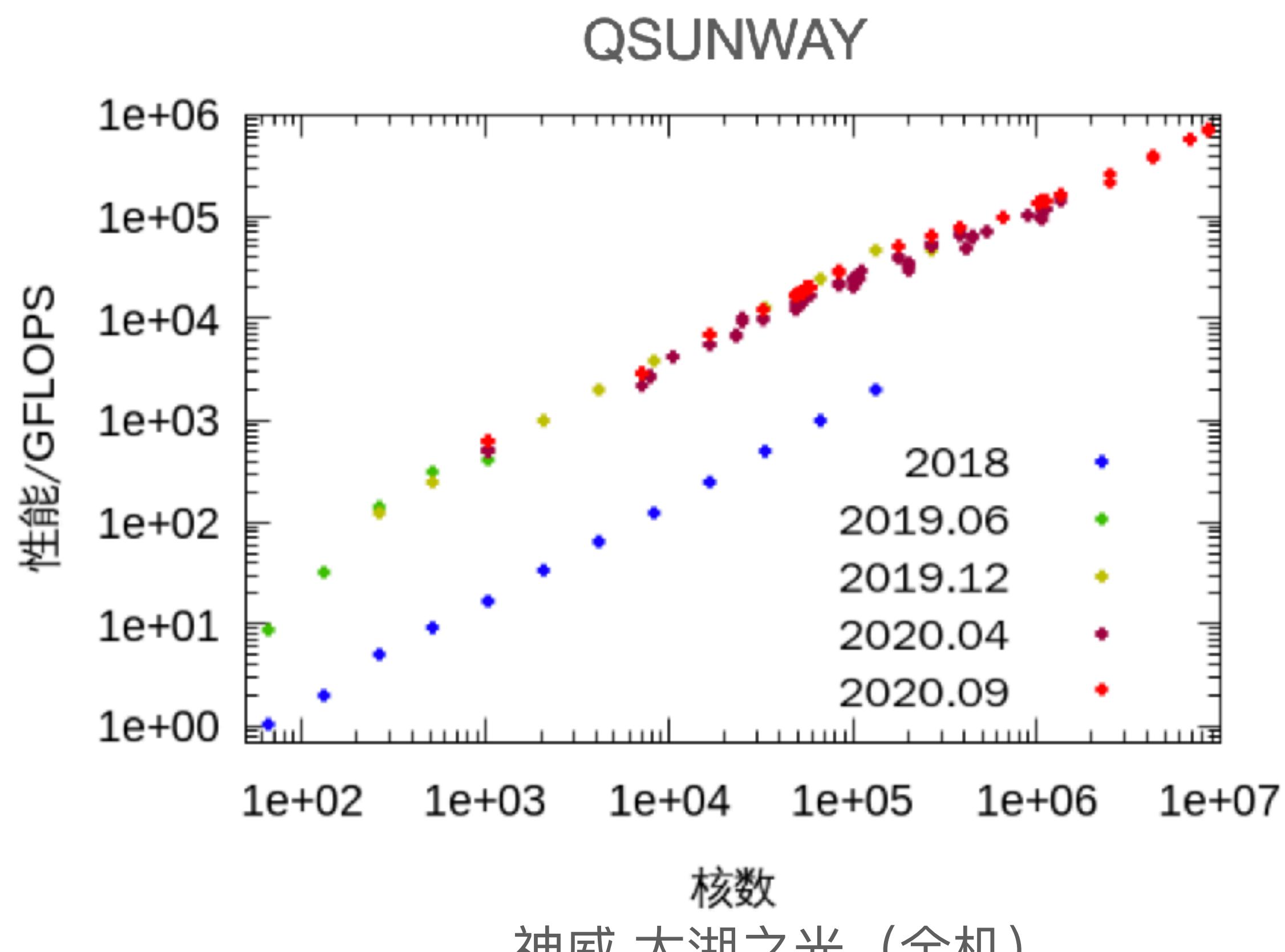
基于中科院先导专项XDC01040100的支持：

- 移植开源GPU软件QUADA（代码超过10万行）到曙光7000架构上；
- 历时两年，完整支持从组态产生到高效费米子传播子计算的各种功能。

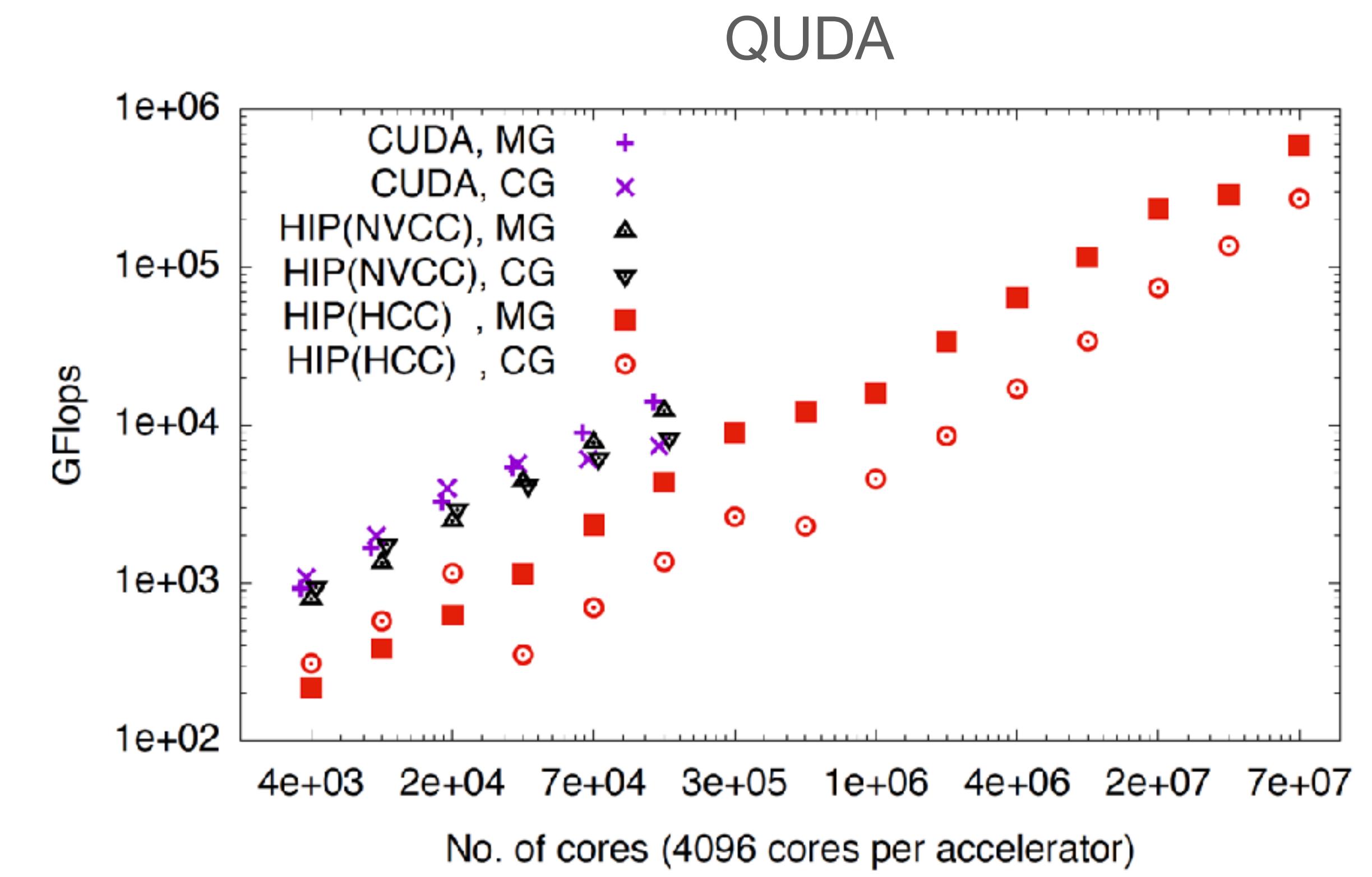


软件：

国产异构超算上的性能



神威·太湖之光（全机）



中科先导1号

面向全国格点QCD用户的解决方案

- 基于开源软件Chroma+QUUDA/QSUNWAY
- 支持多种费米子作用量
- 面向物理目标的统一用户界面
- 支持曙光和申威架构的国产超级计算机

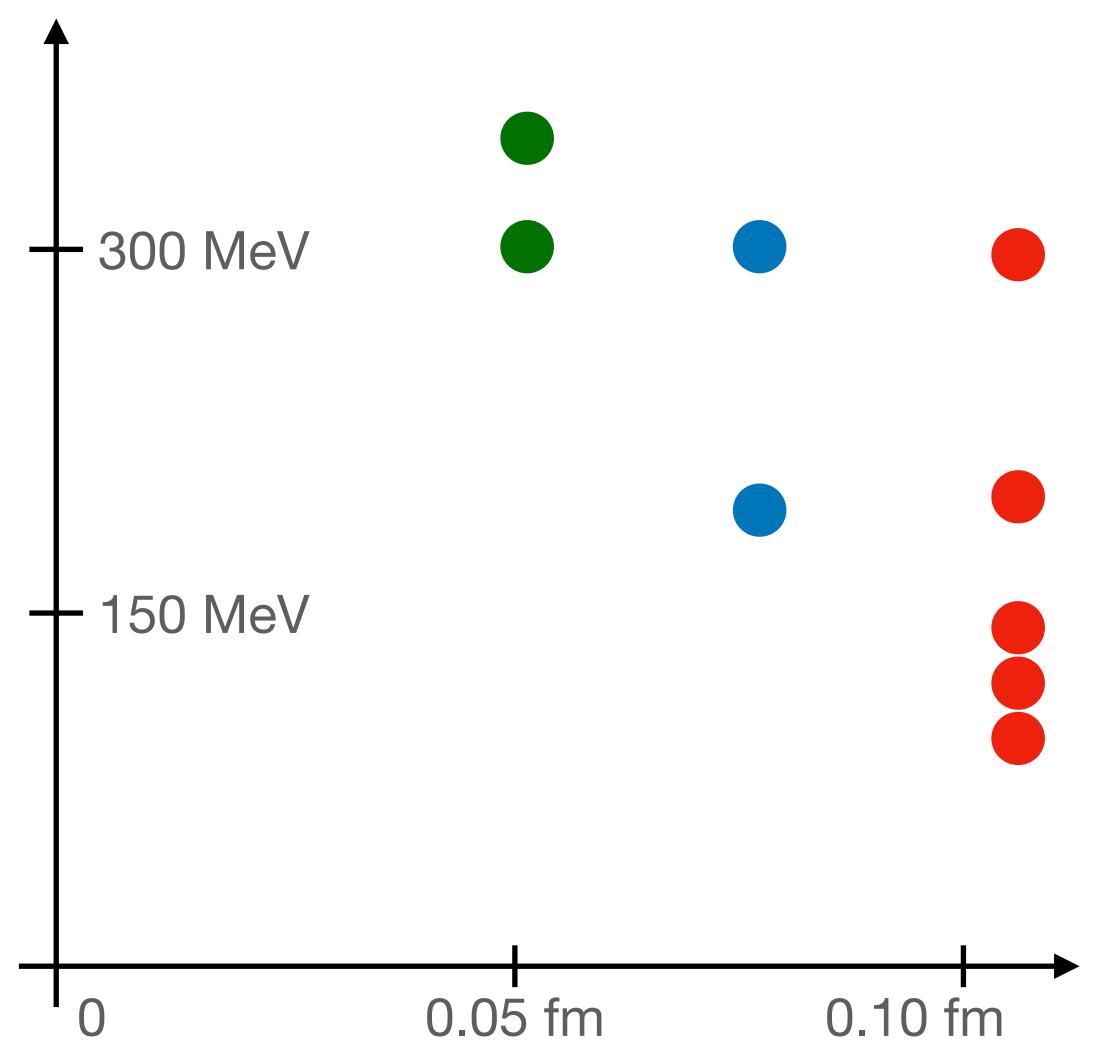
Fermion actions	Propagator	Configuration generation	Current domestic users
Clover	Done (Multgrid)	Done (Multgrid)	ITP, IHEP, SJTU, NJNU, SCNU, HNNU
Twisted mass	Done (Multgrid)	N/A	PKU, NWPU
Staggered	Done (Multgrid)	TODO	CCNU, JSU, SCU
Domain wall	TODO	Based on CPS+QUUDA	PKU
Overlap	Done (Deflated CG)	N/A	ITP, IHEP, IMP, NJNU, SCNU, HNNU, ZJU

真空组态

Lattice ensembles generation with Clover actions

孙鹏, Tue, 11:55 - 12:10

- Clover费米子作用量
- 正在依托国内超算资源(南方核科学计算中心, 理论所, 高能所等), 产生国际先进水平的统计样本
- 面向两种国产E级超算架构(曙光, 神威)移植开源软件, 准备产生国际先进水平的统计样本。

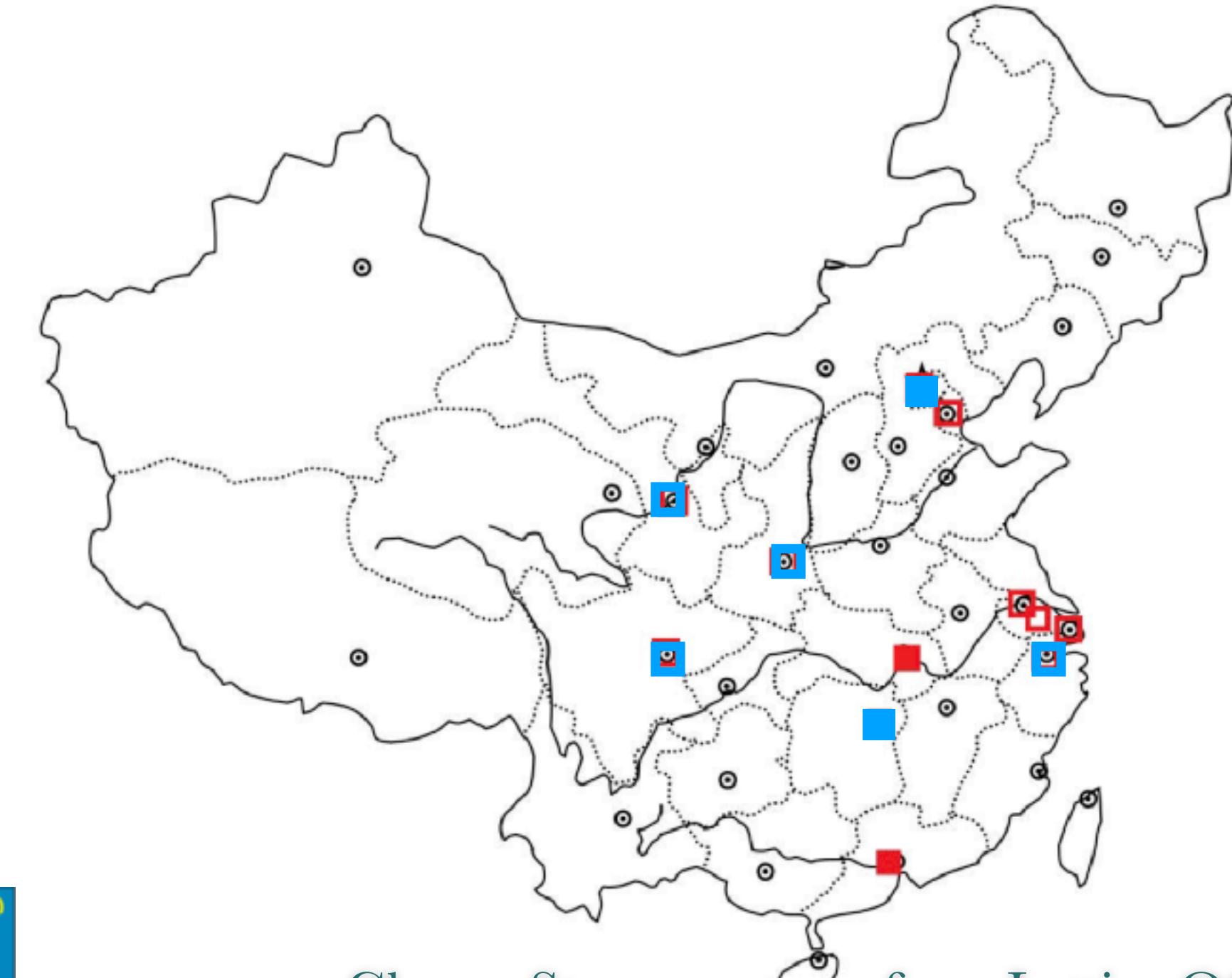
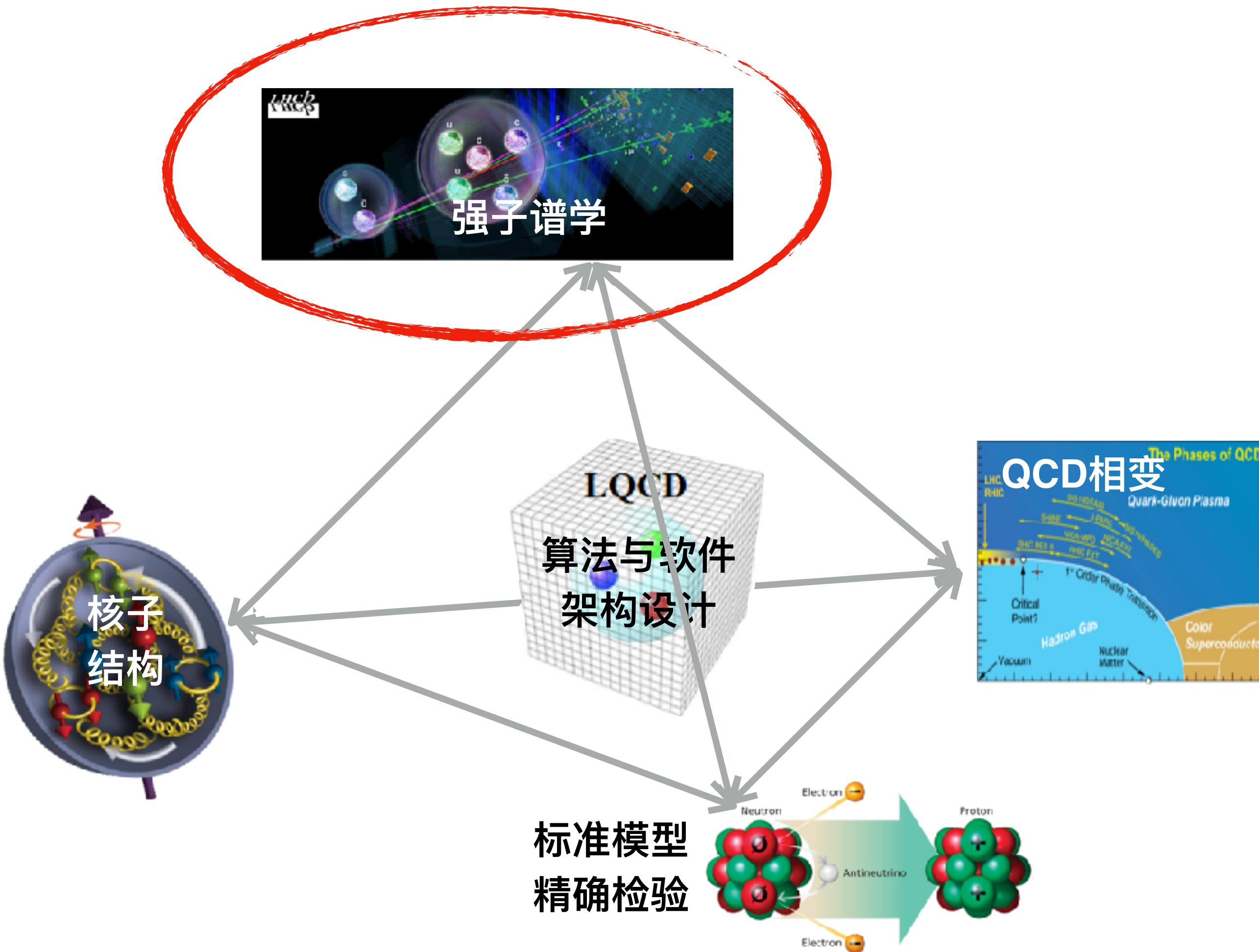


- 格点量子色动力学FLAG国际先进水平(“绿星”)标准:

- 三种不同的 m_π 而且最轻 m_π 的小于200 MeV, 或一个 $m_\pi \sim 135$ MeV而另一个 $m_\pi < 200$ MeV;
- 三种不同格距 a , 其中两个 $a < 0.1$ fm, 而且 $(a_{max}/a_{min})^2 \geq 2$;
- $(m_{\pi,\min}/M_{\pi,\text{phys}})^2 \exp\{4 - m_{\pi,\min}L\} < 2$, 或者至少三种体积。

name	$V = L^3 \times T$	Lattice spacing a	β	m_π	m_{η_s}	L	$m_\pi L$	Trajectories
C11P29S	$24^3 \times 72$	0.108fm	6.20	290MeV	640MeV	2.6fm	3.8	13000
C11P29M	$32^3 \times 64$	0.108fm	6.20	290MeV	640MeV	3.5fm	5.0	10000
C11P22M	$32^3 \times 64$	0.108fm	6.20	220MeV	640MeV	3.5fm	3.9	10000
C11P22L	$48^3 \times 96$	0.105fm	6.20	220MeV	640MeV	5.4fm	5.6	1000
C11P12L	$48^3 \times 96$	0.105fm	6.20	120MeV	700MeV	5.4fm	3.1	1000
C11P15L	$48^3 \times 96$	0.105fm	6.20	145MeV	700MeV	5.4fm	3.7	400
C11P14L	$48^3 \times 96$	0.105fm	6.20	135MeV	700MeV	5.4fm	3.4	producing
C08P30S	$32^3 \times 96$	0.08fm	6.41	300MeV	650MeV	2.6fm	3.9	11000
C08P22M	$48^3 \times 96$	0.08fm	6.41	210MeV	650MeV	3.8fm	4.1	1000
C06P36S	$48^3 \times 144$	0.055fm	6.72	360MeV	670MeV	2.6fm	4.8	650
C06P30S	$48^3 \times 144$	0.055fm	6.72	300MeV	650MeV	2.6fm	4.0	producing

格点QCD在中国：强子谱学



Charm-Strange meson from Lattice QCD and Hamiltonian Effective Field Theory

杨智, Mon, 17:10-17:30

The mixing of η_c and the Pseudoscalar Glueball

张仁强, Tue, 9:10 - 9:30

Dibaryon with highest charm number near unitarity from lattice QCD

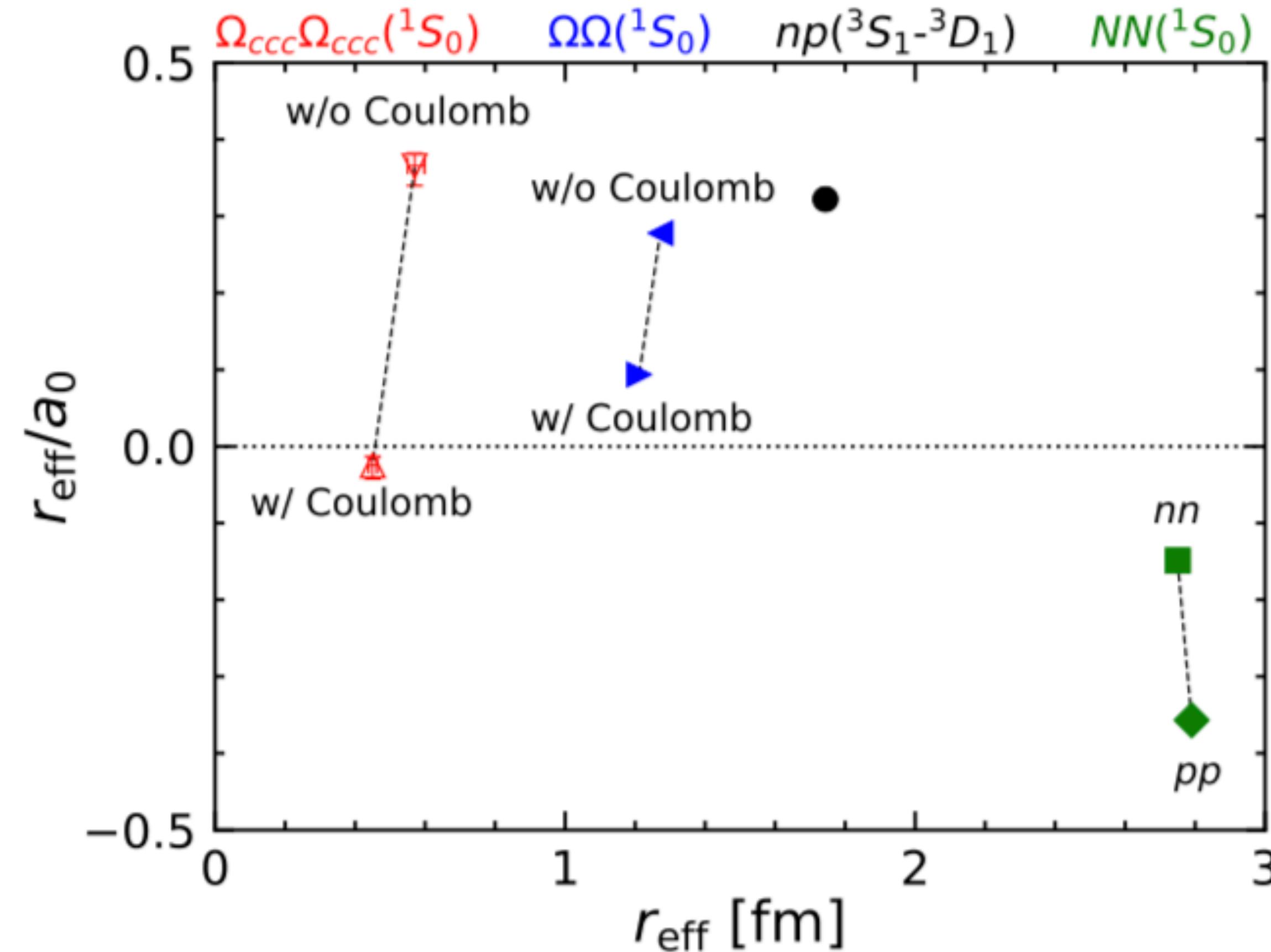
童辉, Tue, 9:30 - 9:50

Hamiltonian effective field theory in elongated or moving finite volume

李严, Wed. 17:25-17:40

纯粲双重子系统散射

Dibaryon with highest charm number near unitarity
from lattice QCD
童辉, Tue, 9:30 - 9:50



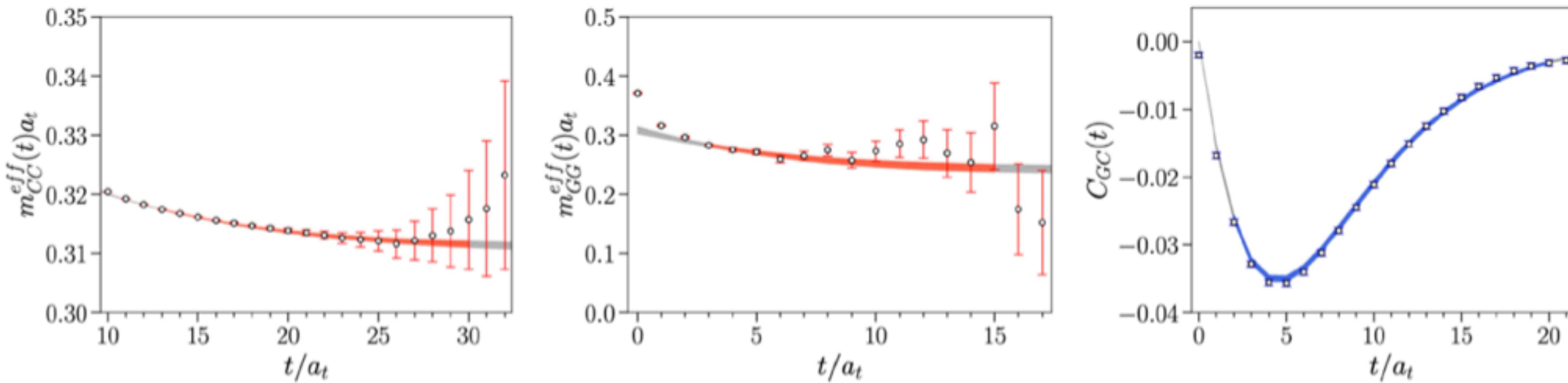
- PKU & HAL QCD
- 日本PACS的 96^4 2+1味clover费米子组态, $a \simeq 0.085$ fm;
- 基于粲偶素质量确定charm夸克质量;
- 库伦排斥势的效应和强相互作用的吸引彼此抵消。

η_c 中的胶球成分

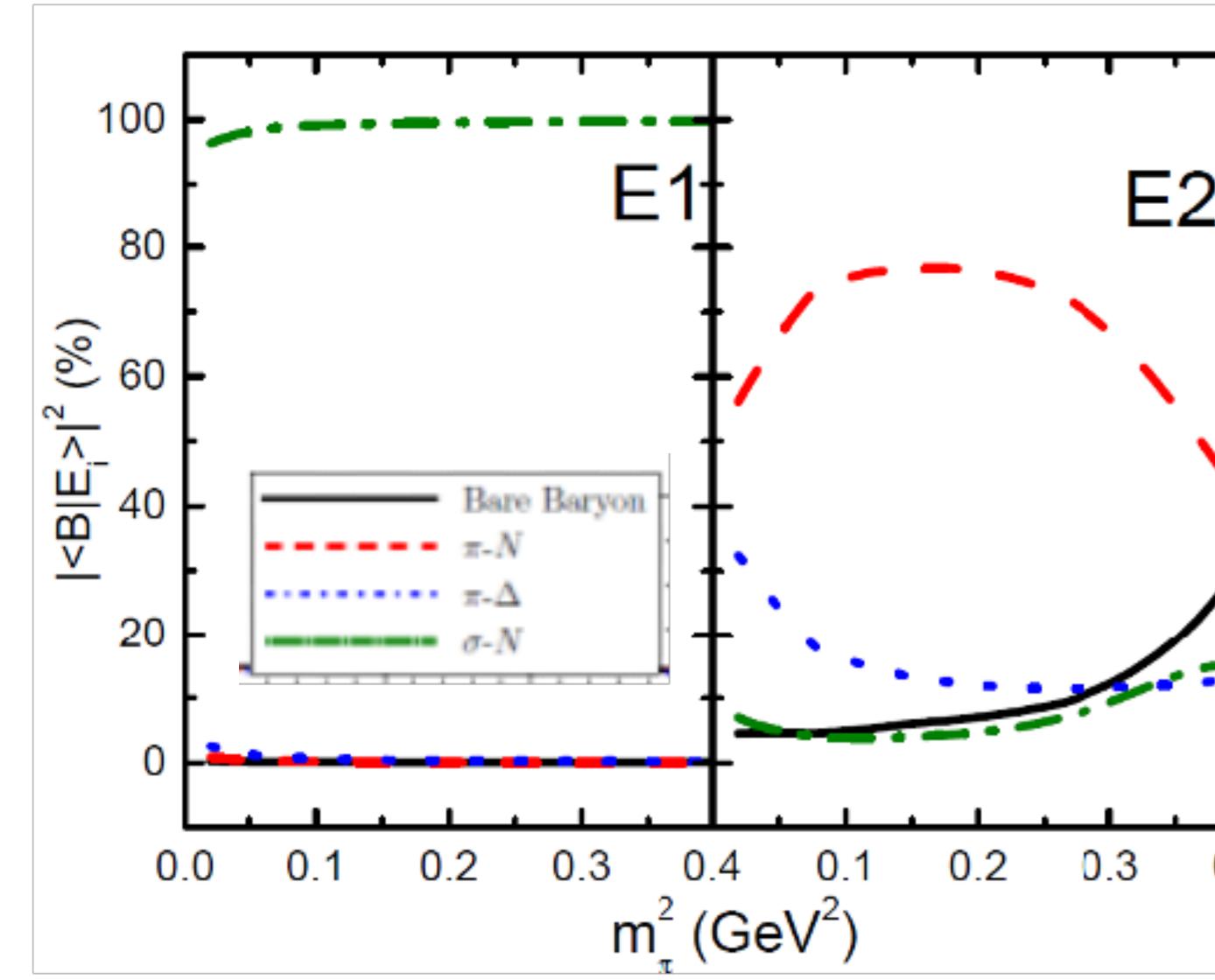
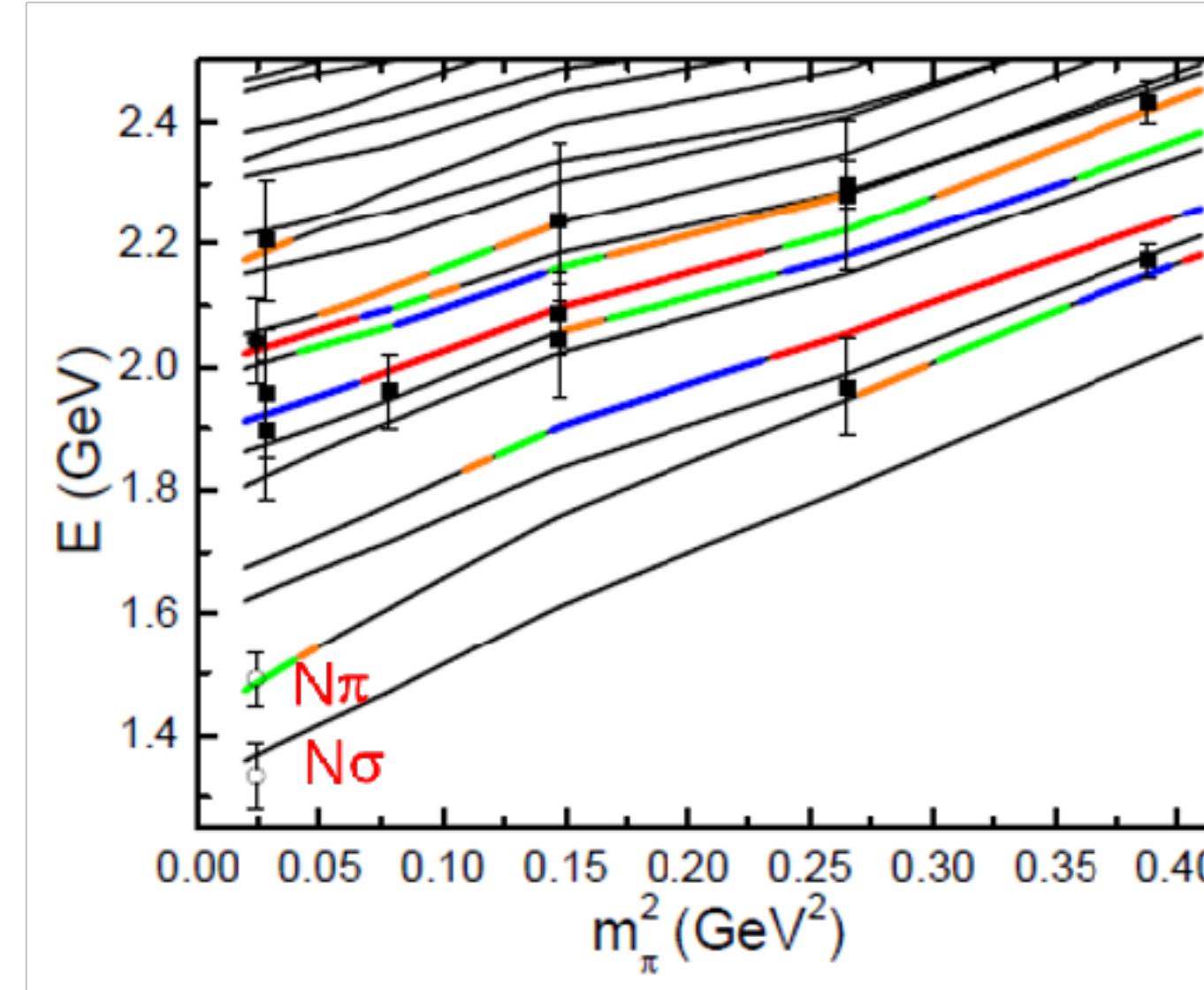
The mixing of η_c and the Pseudoscalar Glueball
张仁强, Tue, 9:10 - 9:30

- IHEP
- 2味纯粲的非对称格子组态;
- 混合角 $\theta = 4.3(3)^\circ$, 混合能 $49(6)$ MeV。
- 将显著影响 η_c 的质量和衰变宽度。

Ensemble	$L^3 \times T$	β	$a_s(\text{fm})$	ξ	N_{cfg}	$m_{J/\psi}(\text{MeV})$
I	$16^3 \times 128$	2.8	0.1026	5	~ 7000	2743
II	$16^3 \times 128$	2.8	0.1026	5	~ 6000	3068



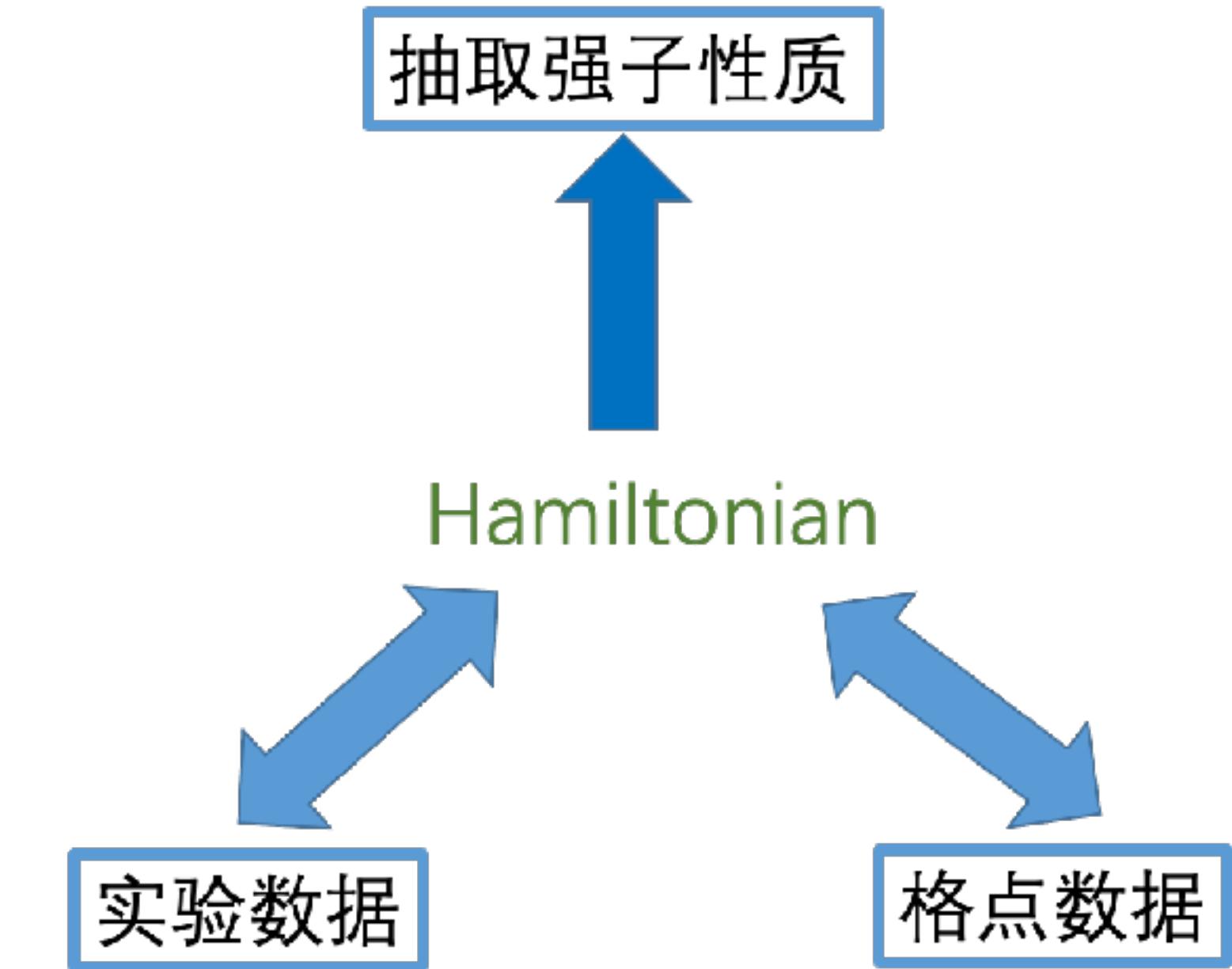
结合格点QCD数据的哈密顿量有效场论研究



- 通过离散的动量空间的哈密顿量，能够把格点数据和有效模型联系起来，从而实现利用格点数据和实验数据来约束模型。
- 如上图通过对N*(1440)的格点数据的研究发现，N*(1440)主要是N π , N σ 和 $\Delta\pi$ 耦合道效应产生的共振态。
- 除了哈密顿有效场论研究以外，也可以利用有效理论研究三体系统的有限体积效应。

Z.-W. Liu et.al., PRL116(2016) 082004,
Z.-W. Liu et.al., PRD95(2017) 014506,
Z.-W. Liu et.al., PRD95(2017) 034034
J.-J. Wu et.al., PRD97 (2018) 094509

J.-Y. Pang et.al., PRD99 (2019) 074513
J.-Y. Pang et.al., PRD102 (2020) 114515



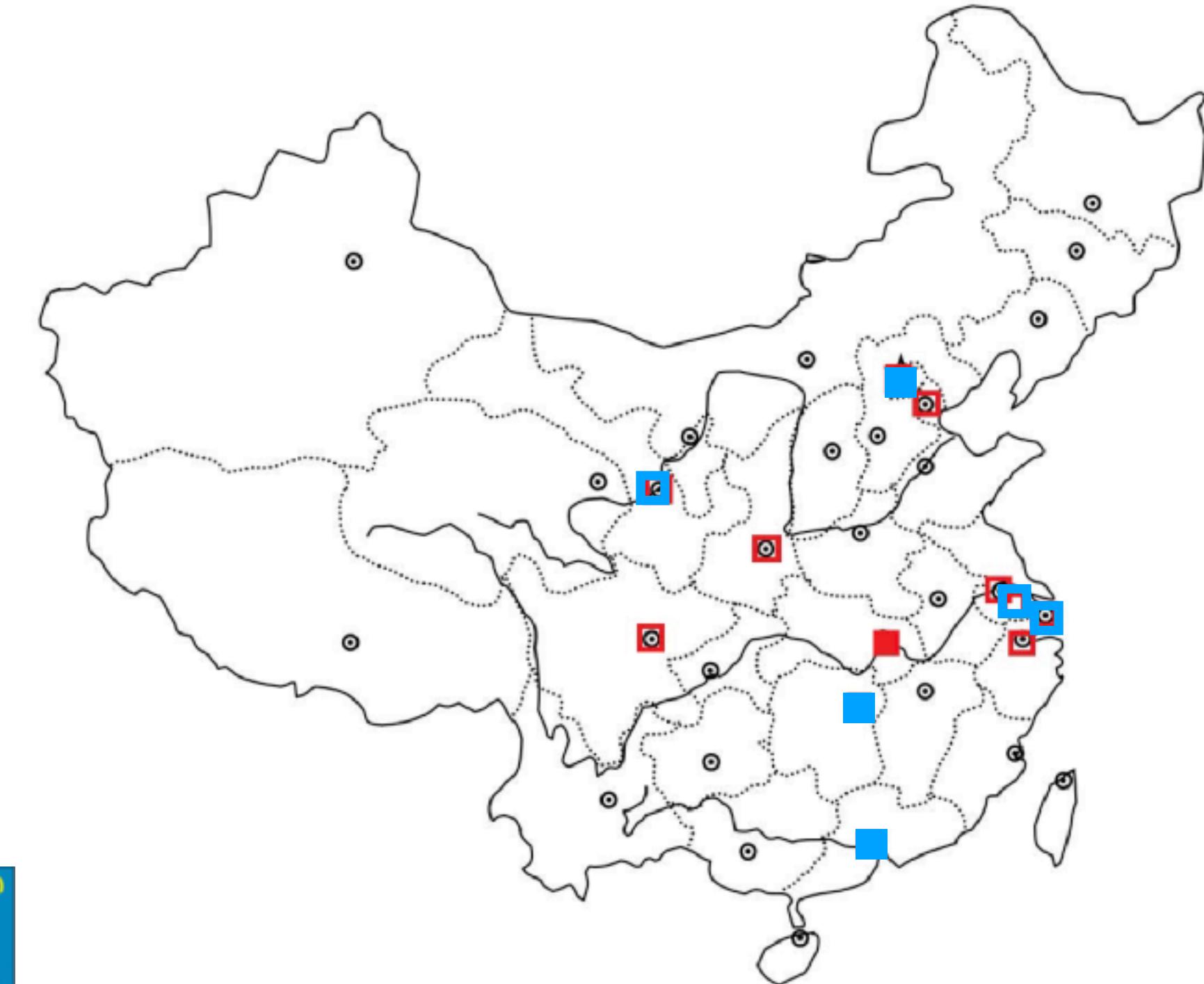
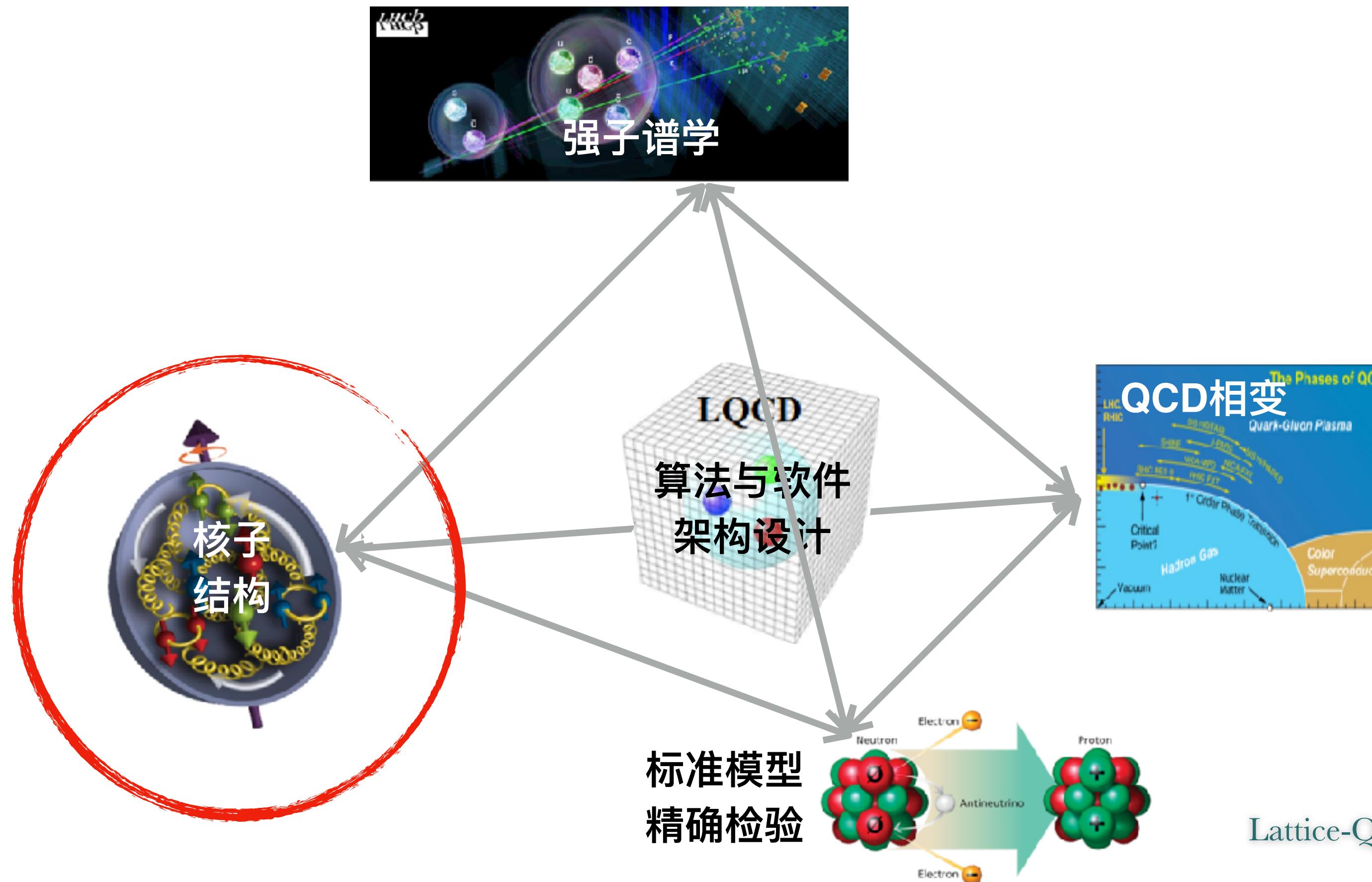
Charm-Strange meson from Lattice QCD and Hamiltonian Effective Field Theory

杨智, Mon, 17:10-17:30

Hamiltonian effective field theory in elongated or moving finite volume

更多的细节和相关工作参见：
Y. Li, et.al., PRD101 (2020) 114501
Y. Li, et.al., PRD103 (2021) 095418
Z. Yang, et.al., arXiv: 2107.04860
.....

格点QCD在中国：强子结构



The contribution of QCD trace anomaly to hadron mass
何方成, Tue, 8:30 - 8:50

Towards precision calculations of partonic structure of hadrons
张建辉, Tue, 10:40 - 11:00

Distribution Amplitudes of K^* and ϕ from Lattice QCD

华俊, Tue, 10:40 - 11:00

Lattice-QCD Calculations of Collins-Soper Kernel through TMD Wave Function

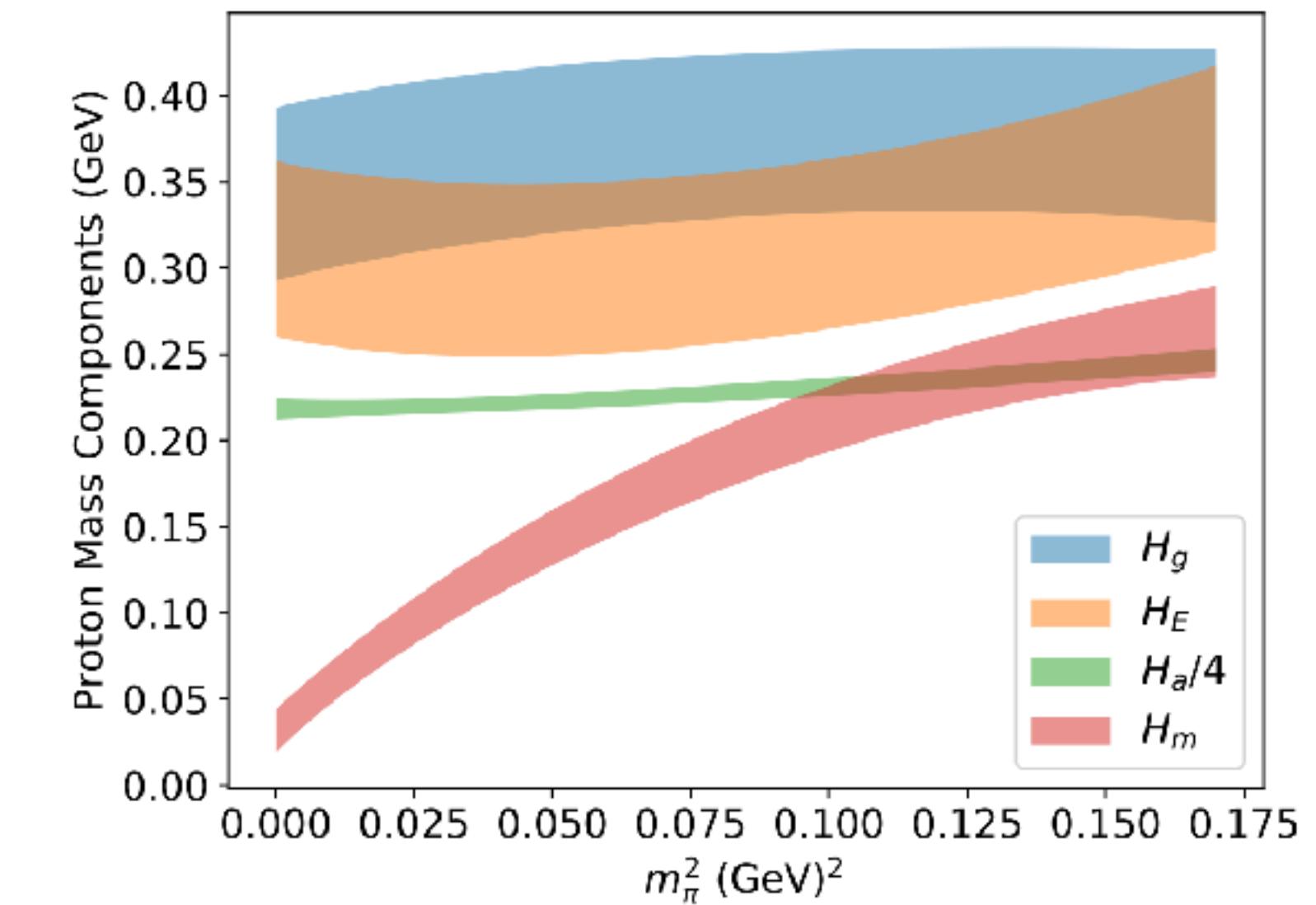
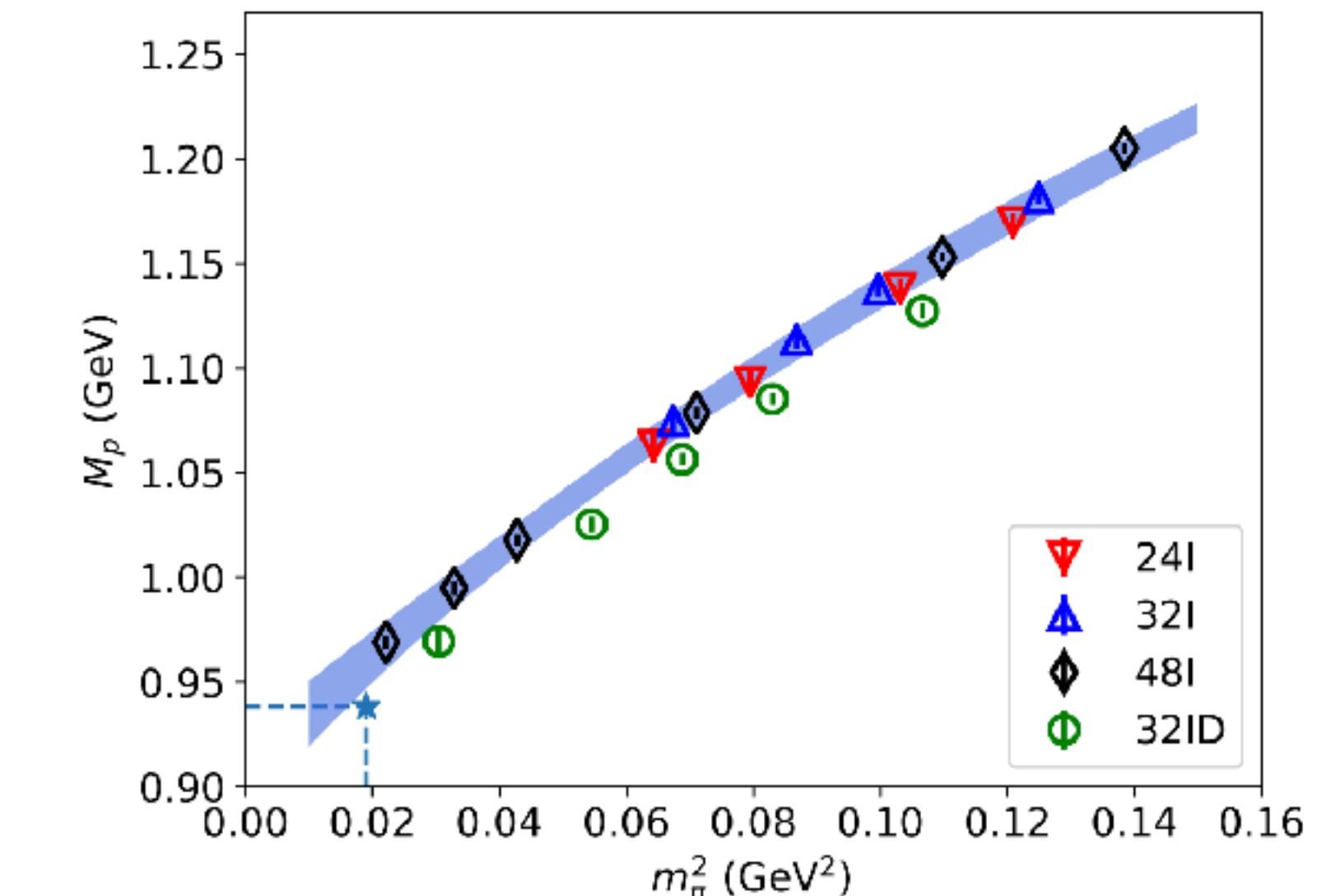
楚曼寰, Tue, 11:40 - 11:55

Lattice QCD calculations of TMD soft function through large-momentum effective theory

张其安, Wed, 16:55 - 17:10

核子质量分解

- 美国RBC的2+1 domain wall组态
- 能动量张量的迹的求和规则给出：
 $m_H = \langle H_m \rangle_H + \langle H_a \rangle_H;$
- 基于能量分量的求和规则可以进一步分解
 $\langle H_a \rangle_H: \frac{3}{4} \langle H_a \rangle_H = \langle H_E \rangle_H + \langle H_g \rangle_H.$
- 从而给出强子能量的完整分解：
 $m_H = \langle H_m \rangle_H + \langle H_E \rangle_H + \langle H_g \rangle_H + \frac{1}{4} \langle H_a \rangle_H$
 $\langle H_q \rangle_H$

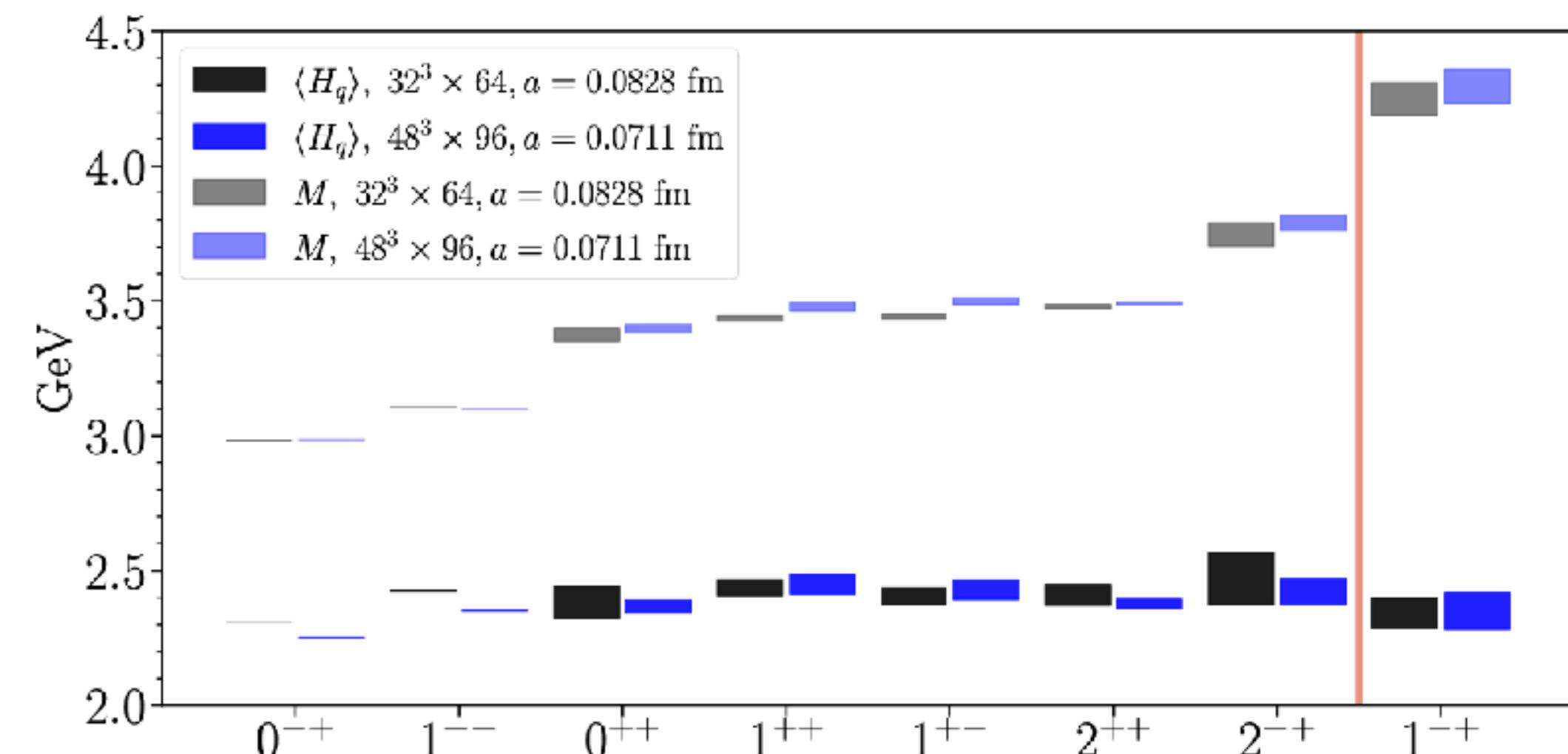


YBY, et.al., χ QCD, PRL 121 (2018) 242001

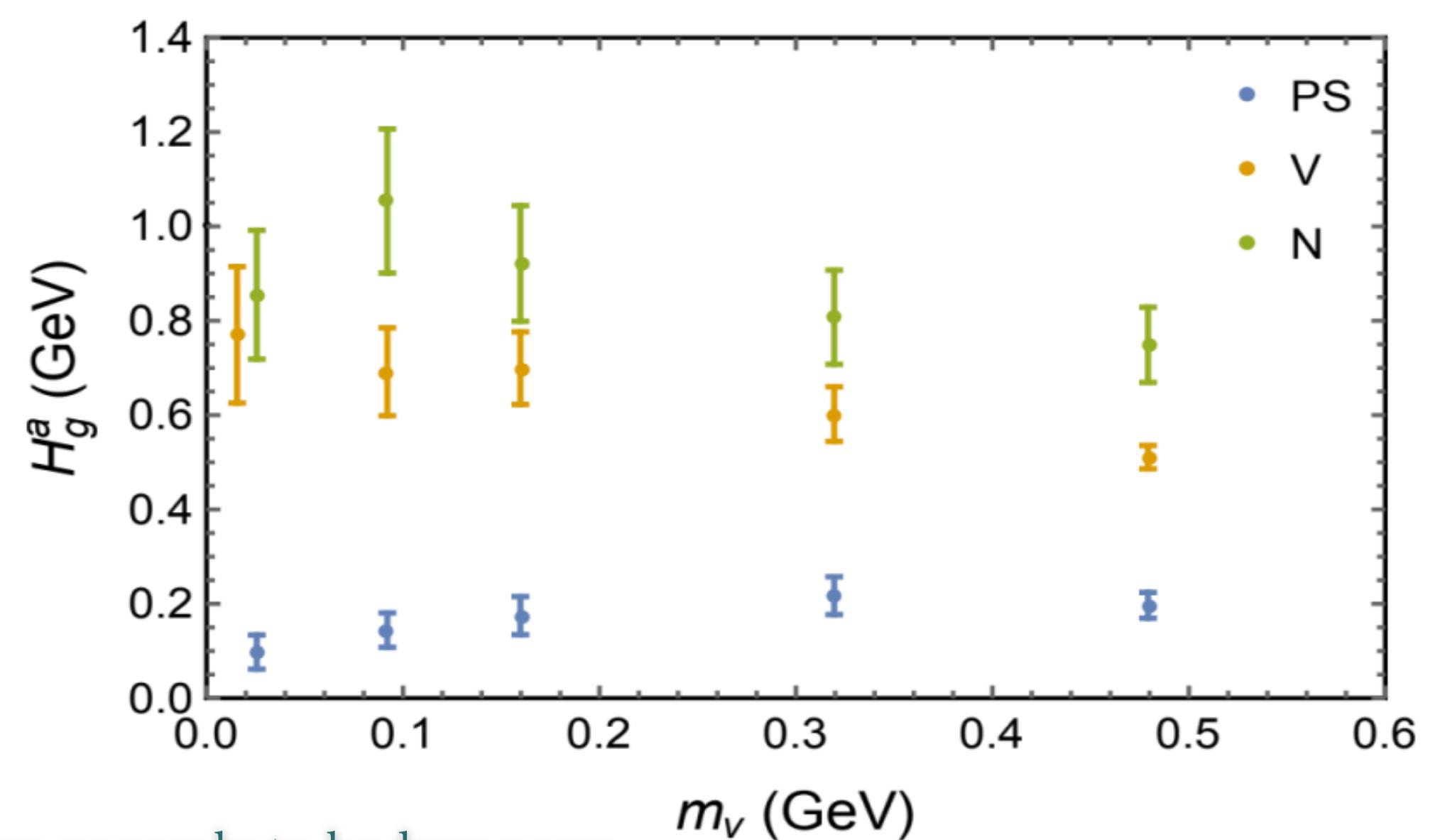
强子质量分解与标度反常

进一步的研究表明：

- 在各种粲偶素中，夸克总能量 $\langle H_q \rangle_H = \langle H_m \rangle_H + \langle H_E \rangle_H$ 几乎不依赖于强子态；
- 直接计算显示胶子的标度反常项 $\langle H_a^g \rangle_H$ 确实是核子质量的主要来源。

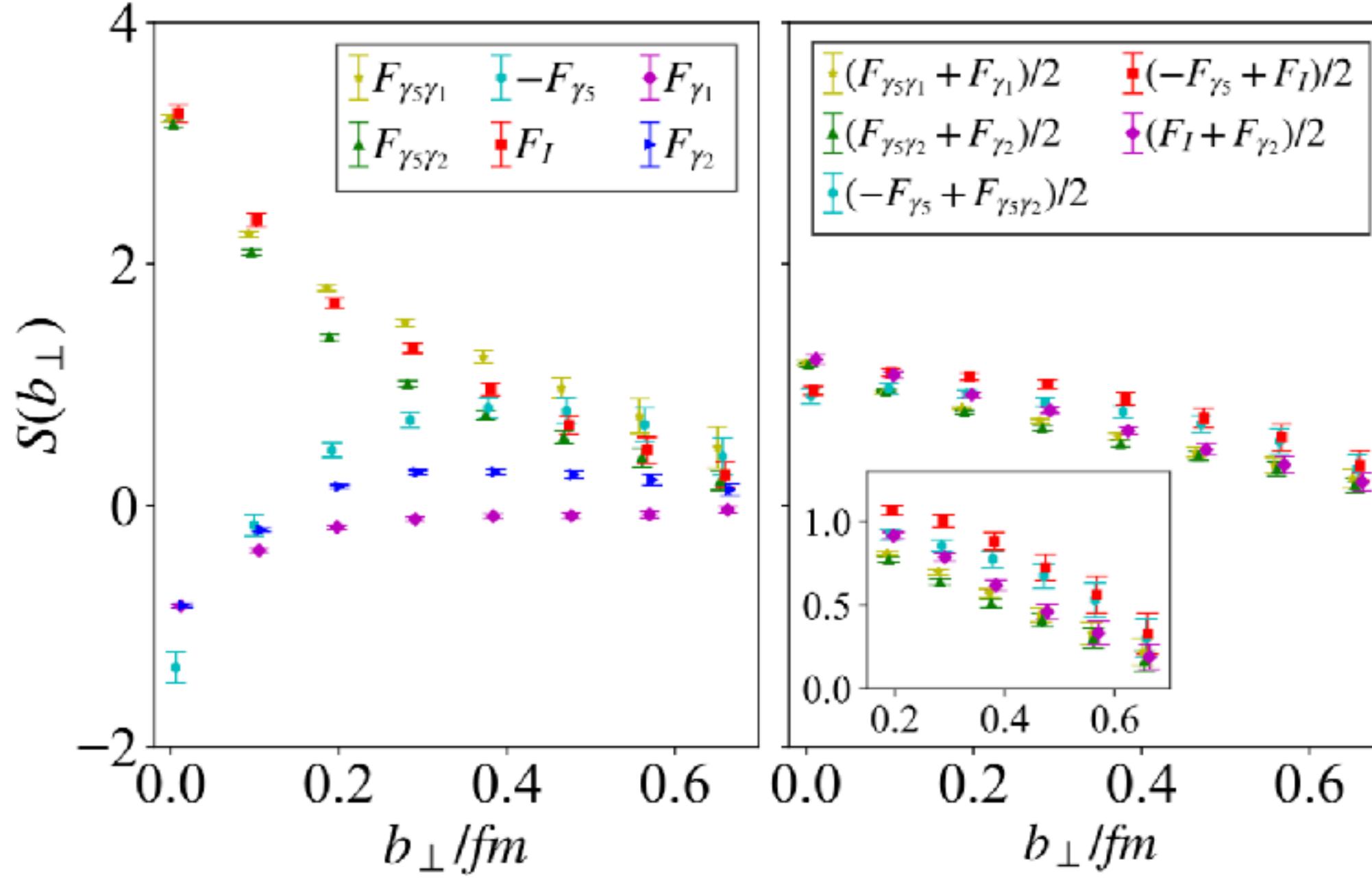


W. Sun et.al., χ QCD, PRD 103 (2021) 094503

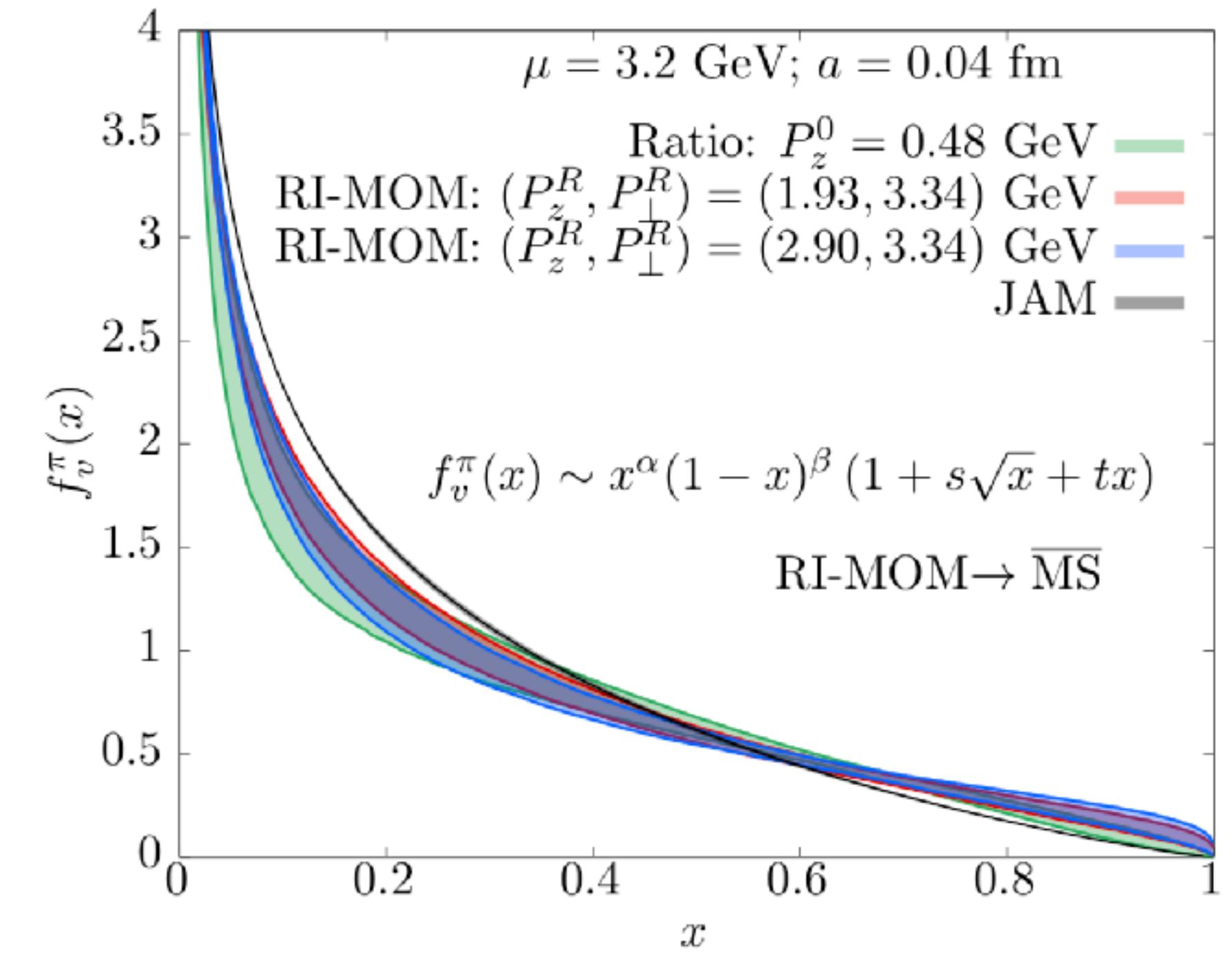


大动量有效理论与核子结构计算

- PKU&ETMC
- 2味ETMC组态;
- 系统地考察了使用不同算符得到胶子的横向分布软函数;
- 发现适当地组合算符可以显著地改善大动量收敛性。
- Tsinghua&BNL
- 2+1味HotQCD的HISQ组态;
- π 介子的价夸克分布函数;
- 系统考察了各种系统误差并计算了各阶矩。



Y. Li, et.al., arXiv:2106.13027



X. Gao, et.al., PRD 102(2020)094513

张建辉, Tue, 10:40 - 11:00

Distribution Amplitudes of K^* and ϕ from Lattice QCD

华俊, Tue, 10:40 - 11:00

Lattice-QCD Calculations of Collins-Soper Kernel through TMD Wave Function

楚旻寰, Tue, 11:40 - 11:55

张其安, Wed, 16:55 - 17:10

Lattice Parton合作组

基于格点量子色动力学理解强子结构

- 2019年秋季成立

- 固定成员

- Xiangdong Ji (SJTU)
- Peng Sun (NJNU)
- Andreas Schaefer (U. Reg.)

- Wei Wang (SJTU)

- **Yi-Bo Yang (ITP/CAS, 发言人)**

- Jian-hui Zhang (BNU)

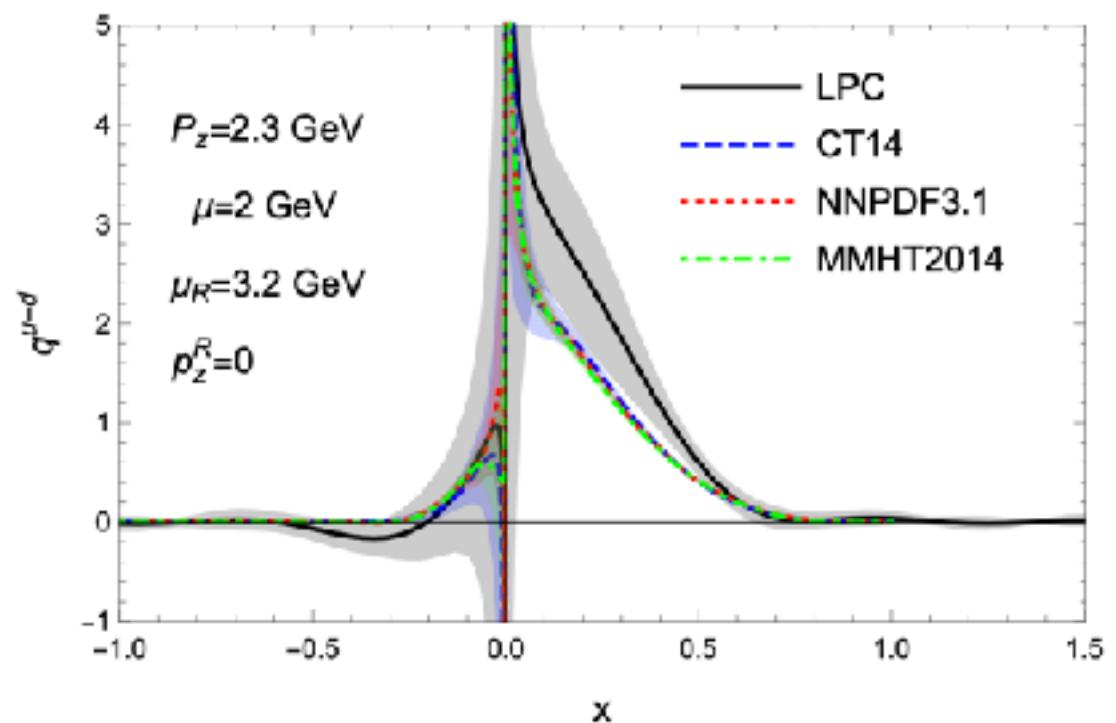
- 去年以来的新成员

- Long-Cheng Gui (HNNU)
- Jian liang (SCNU)
- Liuming Liu (IMP/CAS)
- Xiao-Nu Xiong (CSU)

- 博士后与学生

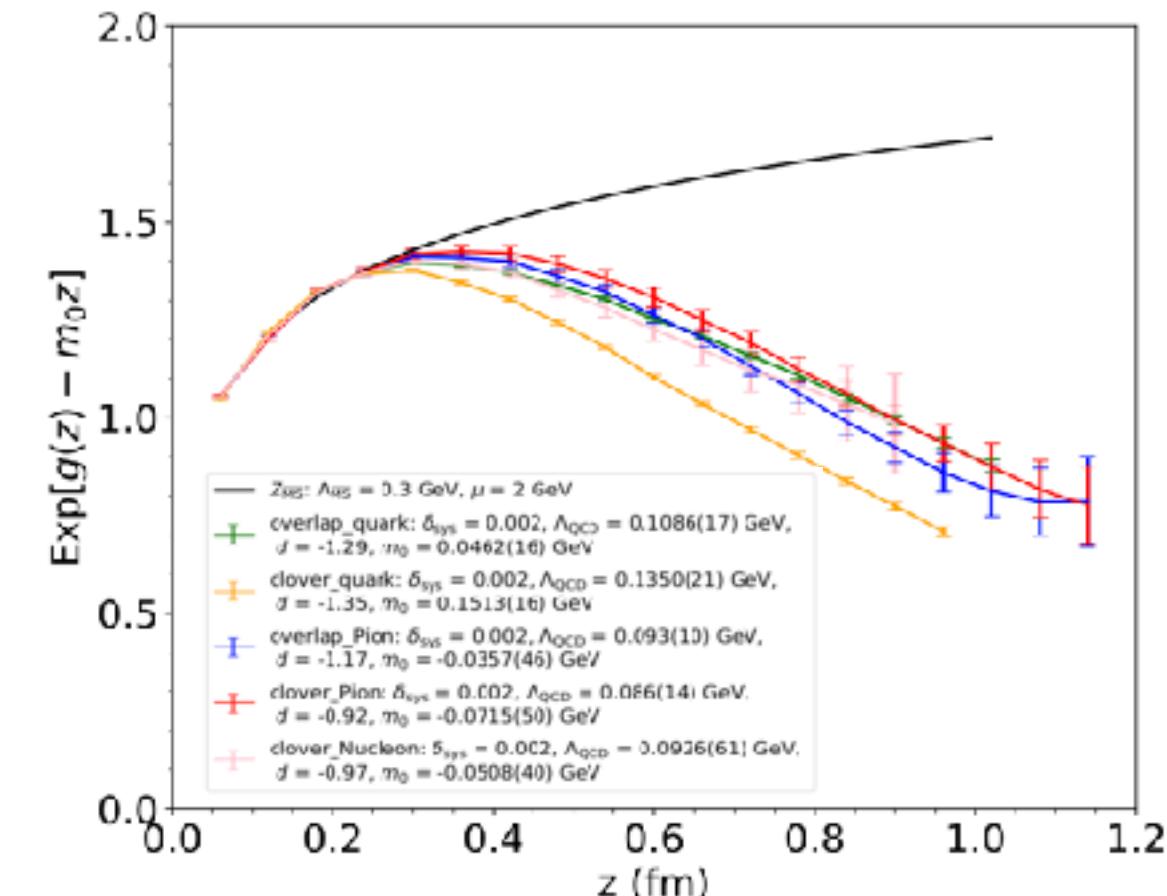
- Min-Huan Chu (SJTU)
- Jun Hua (SJTU)
- YiKai Huo (SJTU)
- Yuan-Yuan Li (NJNU)
- Yizhuang Liu (SJTU)
- Yu-Sheng Liu (SJTU)
- Maximilian Schlemmer (U. Reg.)
- Hai-Tao Shu (U. Reg.)
- Ji Xu (SJTU)
- Kuan Zhang (ITP/CAS)
- Qi-An Zhang (SJTU)
-

- 合作组的研究进展



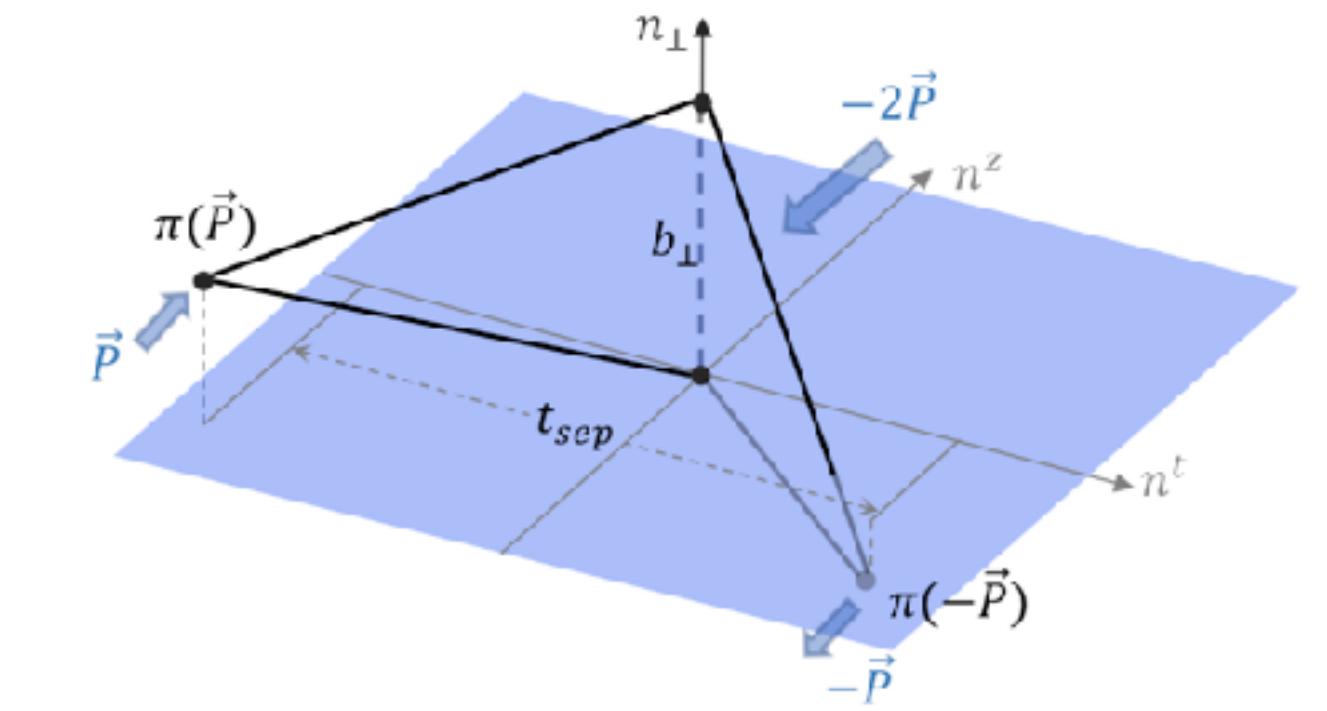
核子中夸克的非极化分布函数

Y. Liu, et.al., LPC, PRD101(2020)034020



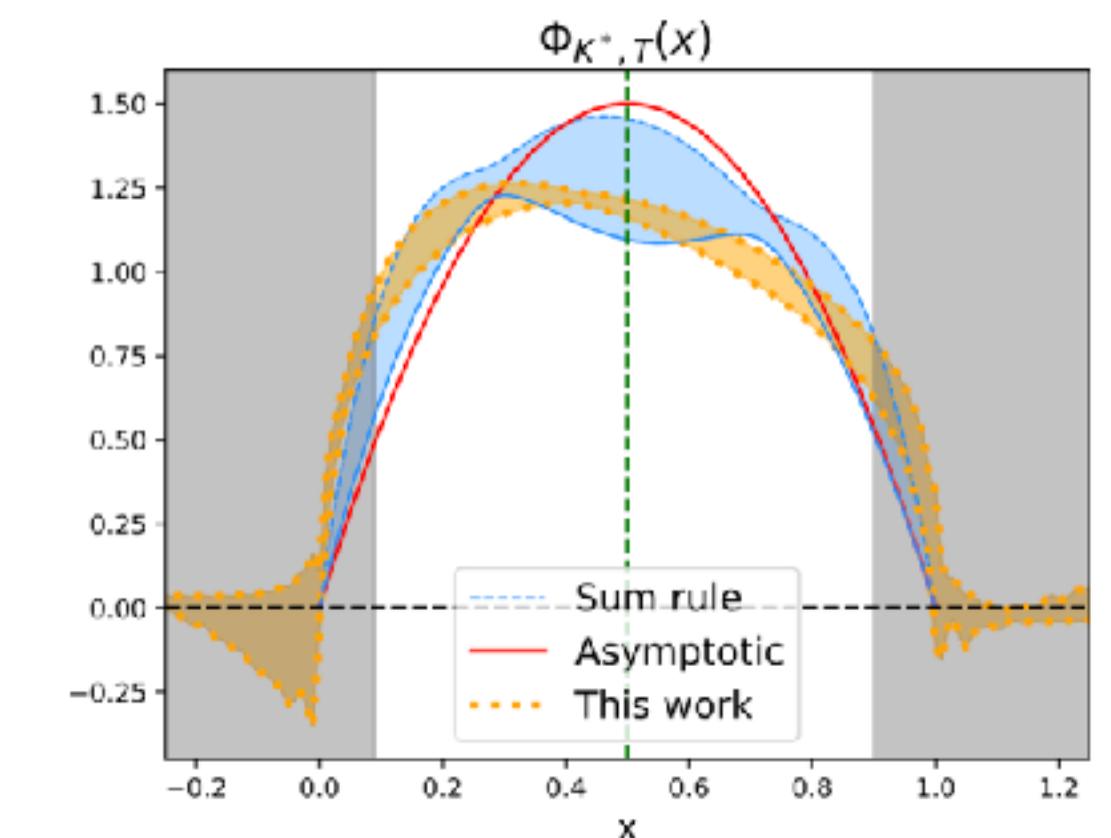
准光锥关联函数的自重整化

Y.-K. Huo, et.al., LPC, NPB969(2021)115443



胶子的横向分布软函数

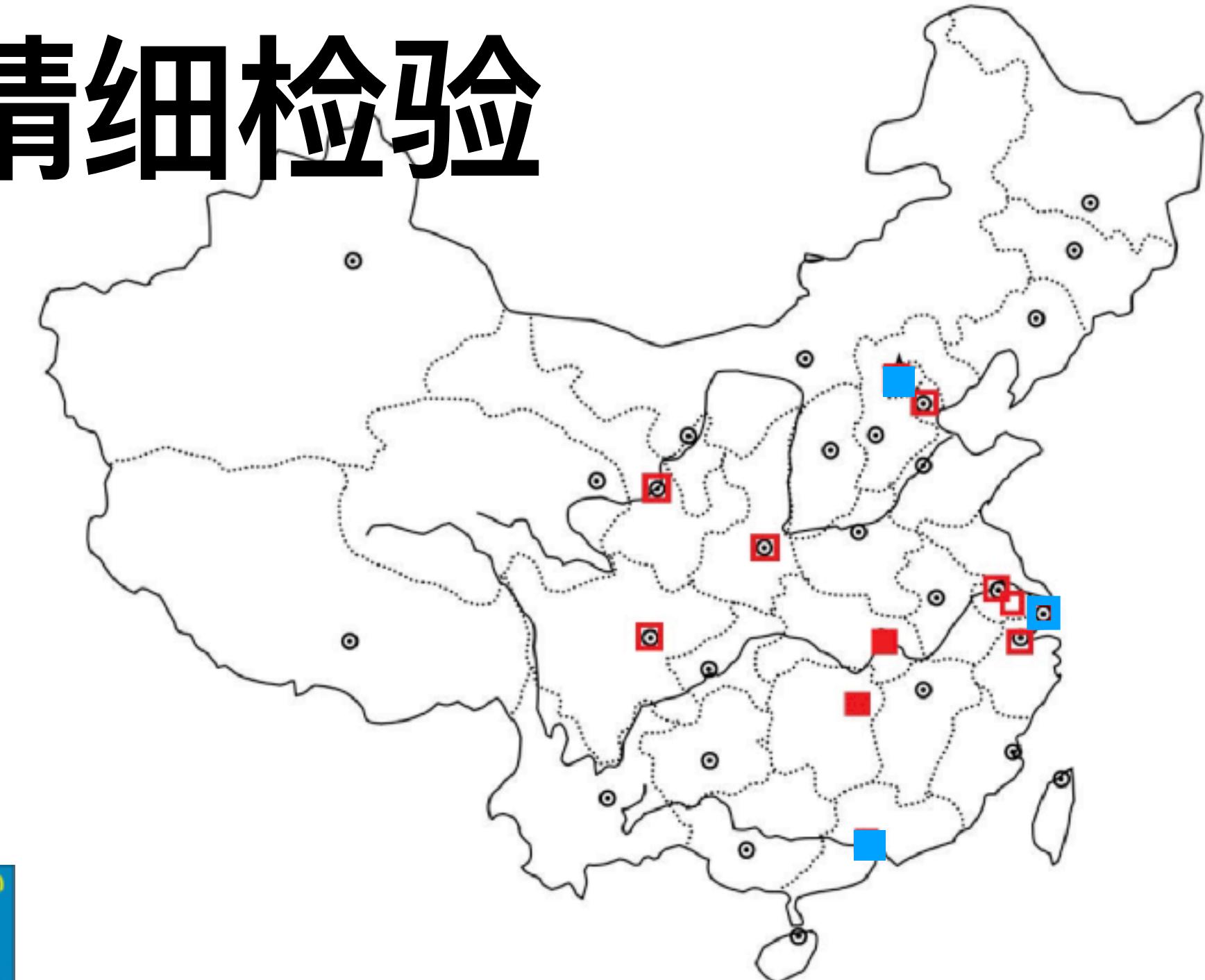
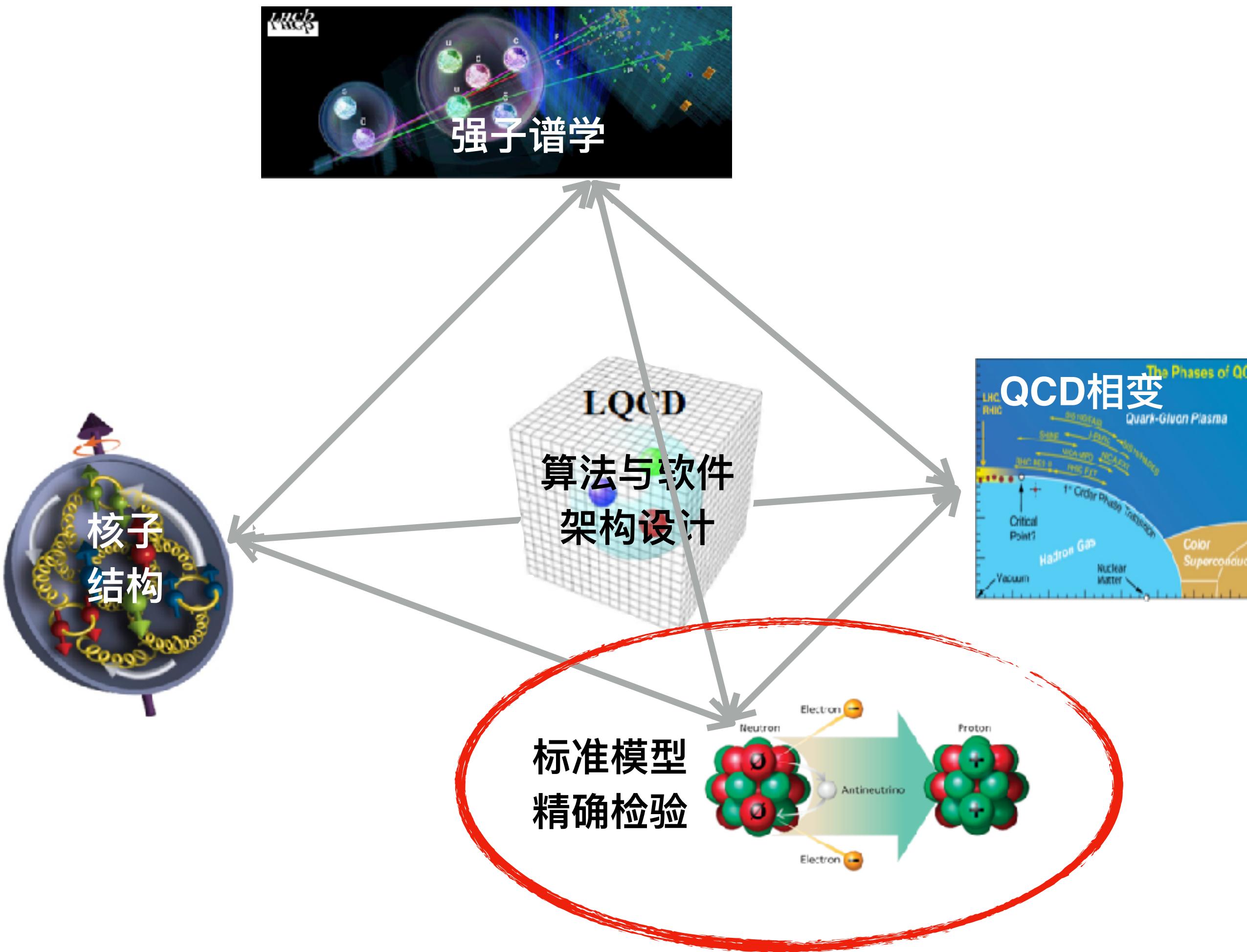
Q.-A. Zhang, et.al., LPC, PRL125(2020)192001



介子的光锥分布函数

J. Hua, et.al., LPC, PRL127(2021)062002

格点QCD在中国：标准模型精细检验



Determination of some quantities and mixed action effect in lattice QCD

赵殿君, Tue, 8:50 - 9:10

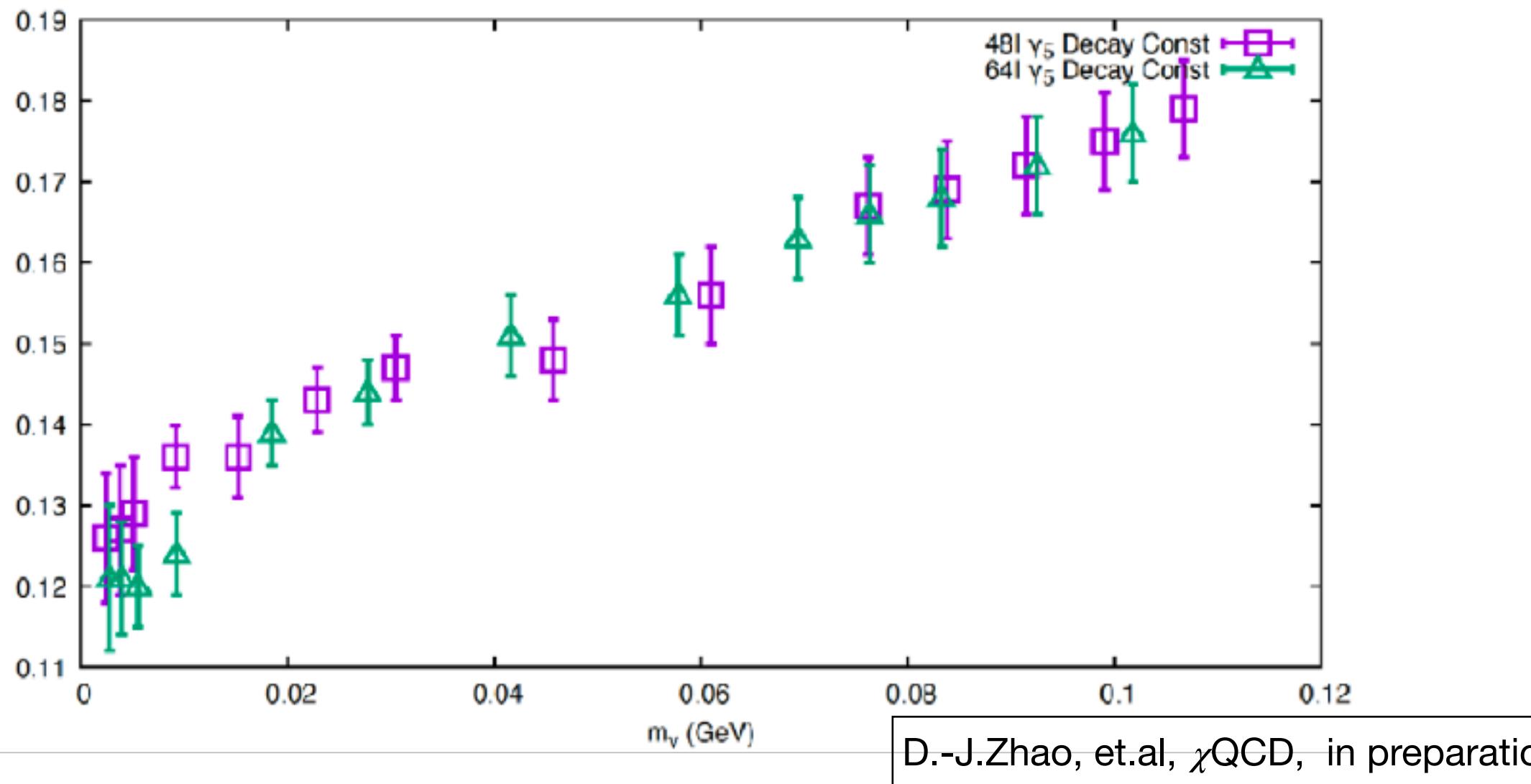
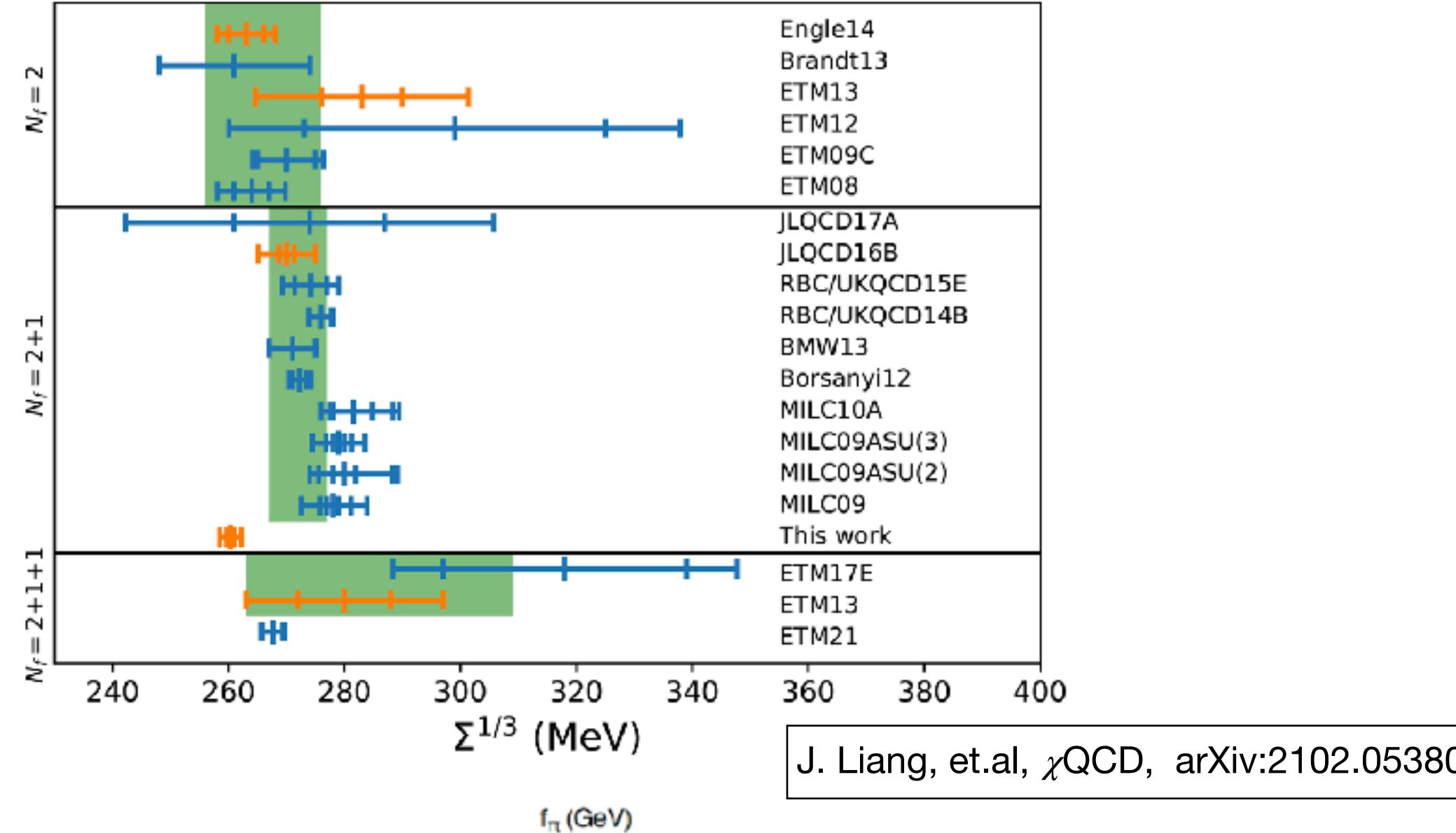
A new method for a lattice QCD calculation of $\eta_c \rightarrow 2\gamma$

孟雨, Tue, 9:50 - 10:10

Charmed baryon $\Xi_c \rightarrow \Xi$ decays from lattice QCD

黄飞, Wed, 16:40 - 16:55

高精度低能常数



- 基于具有完美对称性的overlap手征费米子；
- 两个格距上的RBC2+1味具有物理夸克质量参数的组态；
- 高精度标定手征微扰论基本参数

$$\Sigma = - \langle \bar{\psi} \psi \rangle_{m_q \rightarrow 0};$$
- 对另一个基本参数

$$F = \frac{1}{\sqrt{2}} f_\pi |_{m_q \rightarrow 0}$$
 以及各种夸克质量的标定正在进行中。

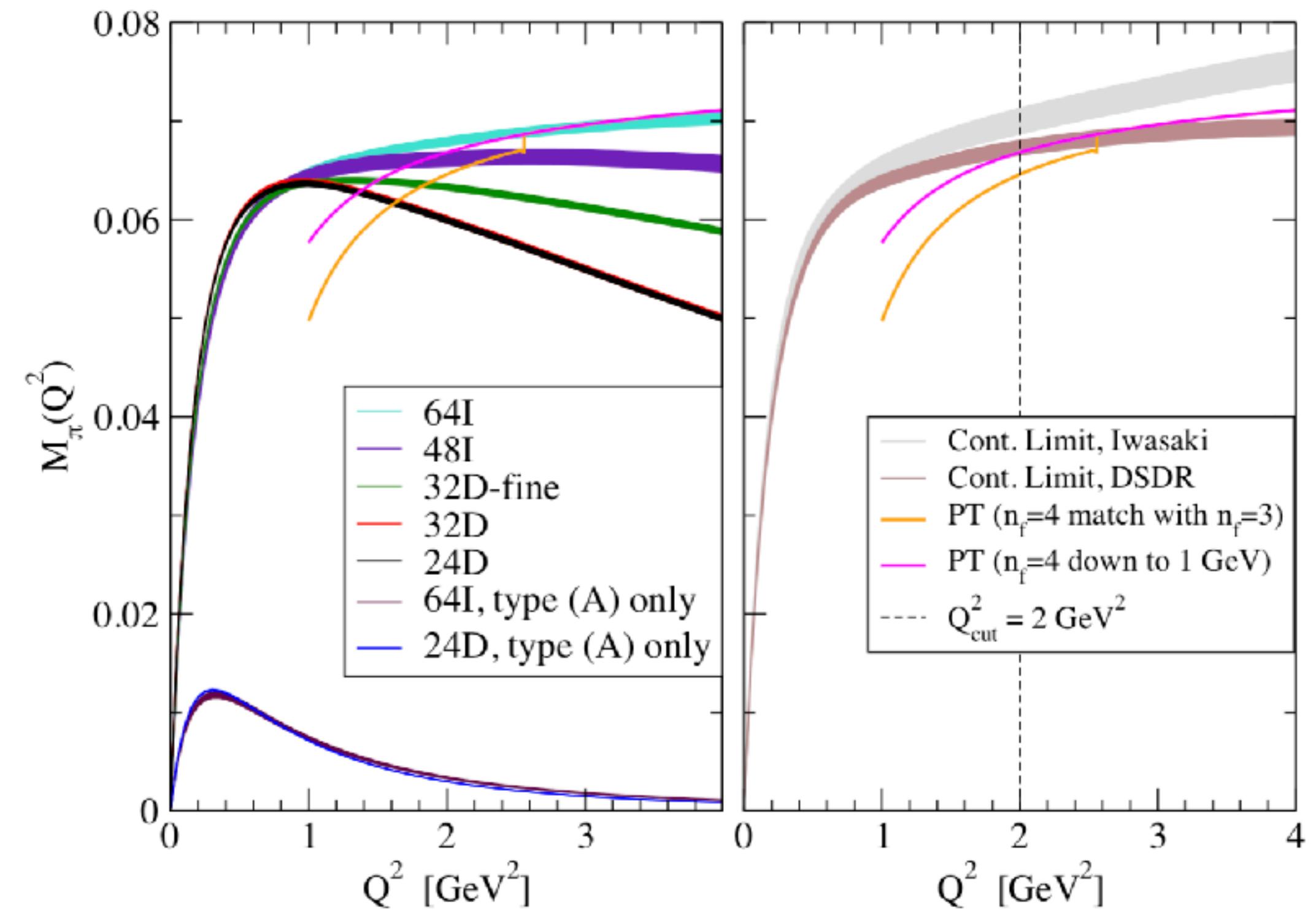
Determination of some quantities and mixed action effect in lattice QCD

赵殿君, Tue, 8:50 - 9:10

衰变常数与CKM矩阵元：

V_{ud}

- 多个格距的美国RBC的2+1 domain wall组态
- PKU&Mainz&U. Connecticut
- 电弱Box图的高精度计算，总和误差低至1%；
- 结合格点长程计算和微扰短程计算；
- 预言 $|V_{ud}| = 0.9739(28)_{exp}(5)_{th}$ 。



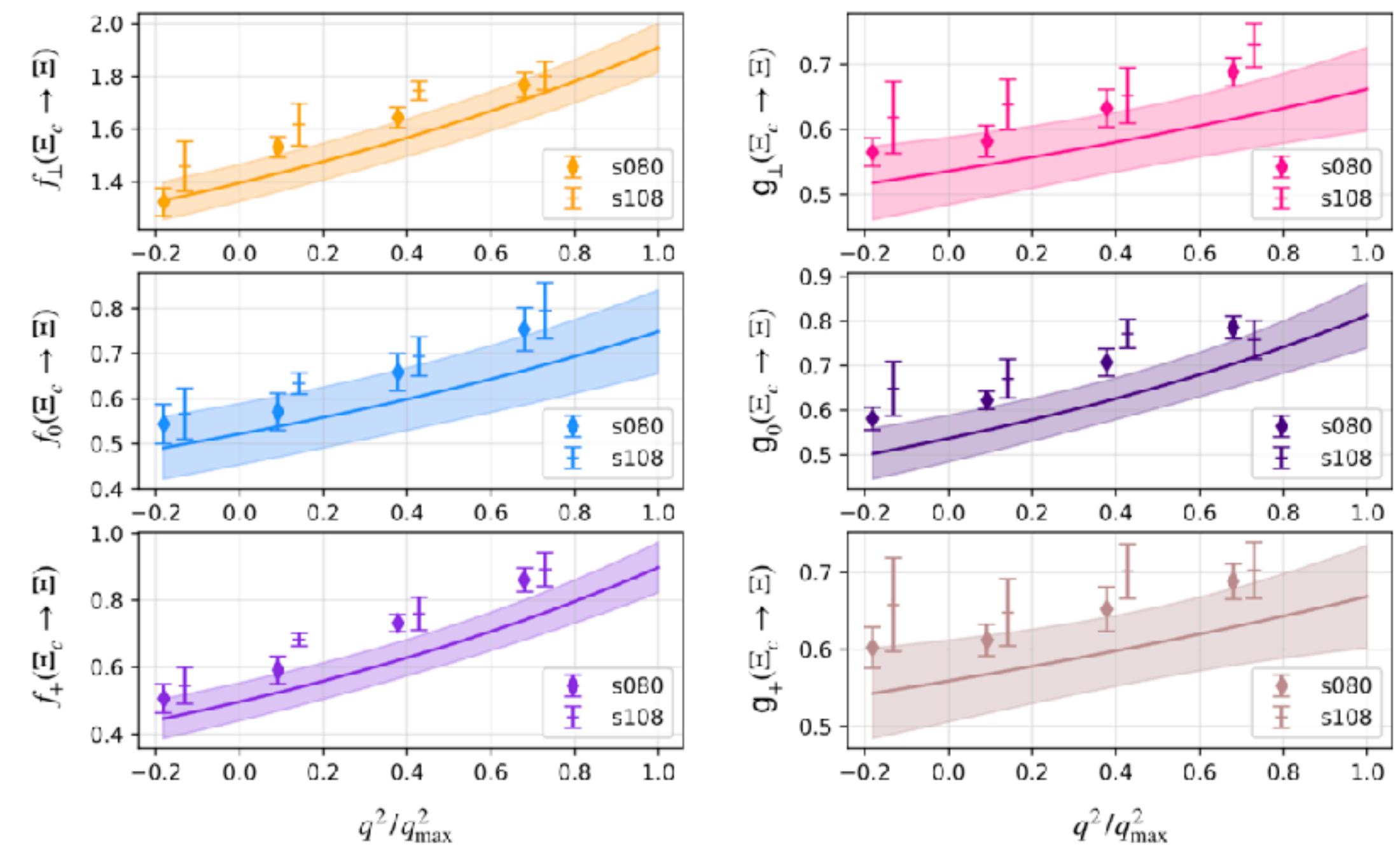
衰变常数与CKM矩阵元：

Charmed baryon $\Xi_c \rightarrow \Xi$ decays from lattice QCD
黃飞, Wed, 16:40 - 16:55

$$V_{CS}$$

- 完全自主的2+1味Clover组态,
 $a=0.11/0.08\text{fm}$;
- 首个关于 $\Xi_c \rightarrow \Xi$ 形状因子的理论计算。
- 结合Belle实验, 预言
 $|V_{CS}| = 0.834(127)_{exp}(74)_{th}$ 。

基于中科院战略先导专项C类No. XDC01040100的支持

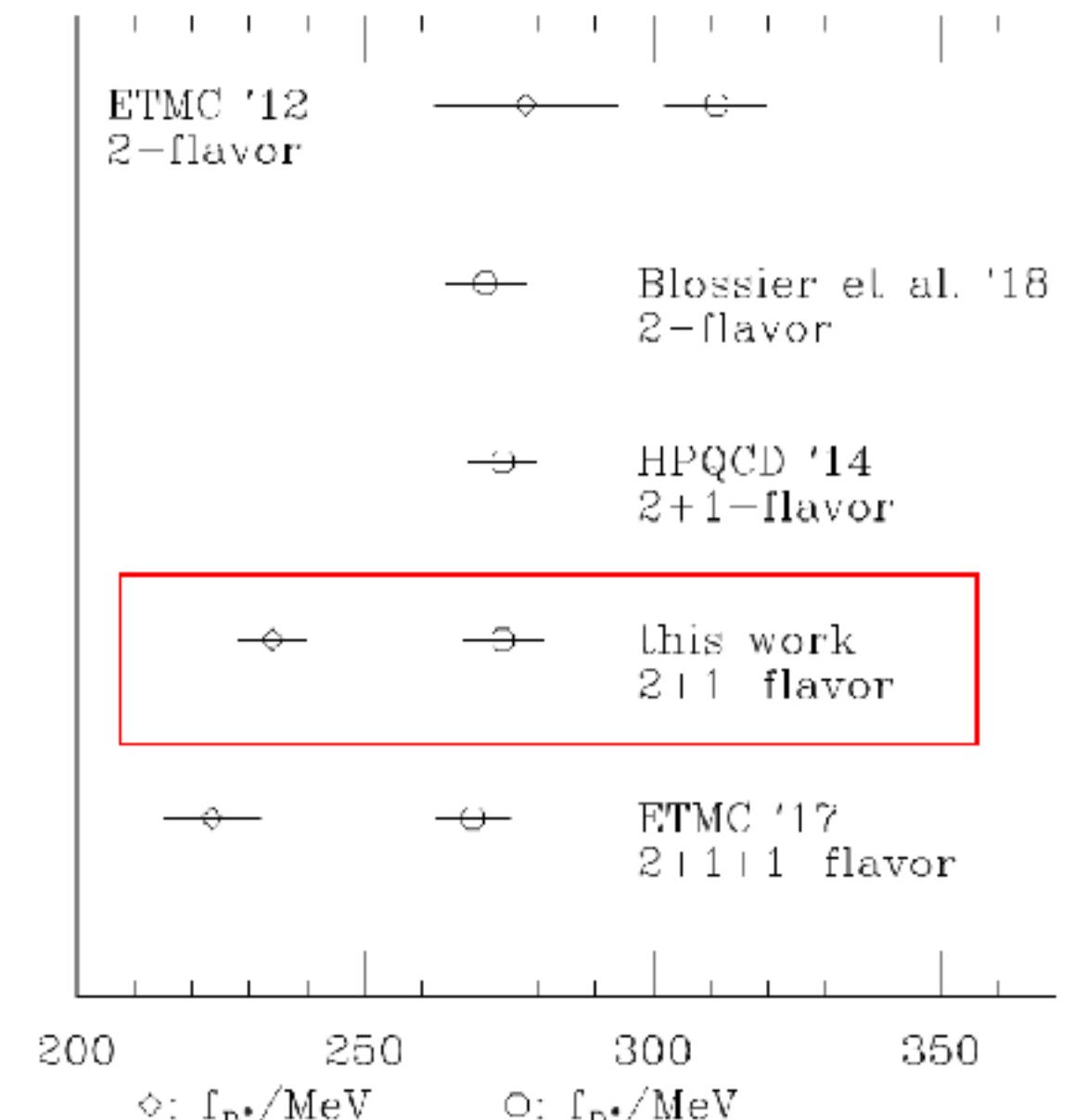


衰变常数与CKM矩阵元：

V_{cd}

	D	D^*	D_s	D_s^*	ϕ
f_M/MeV	213(2)(4)	234(3)(5)	249(5)(5)	274(5)(5)	241(9)(2)
f_V^T/f_V		0.91(3)(2)		0.92(3)(2)	

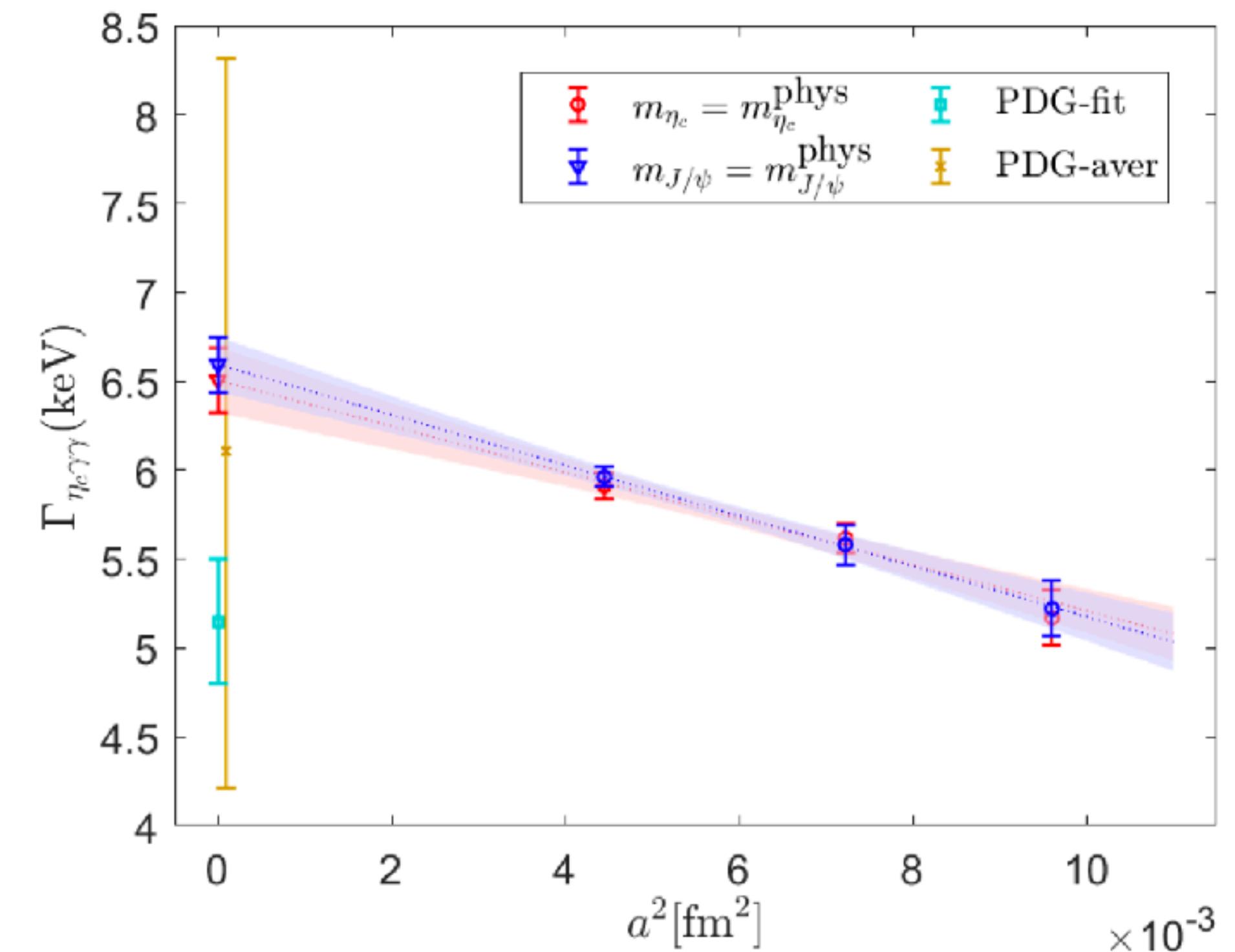
- 美国RBC的2+1 domain wall组态
- 首个 $f_{D_s^*}/f_{D_s}$ 的格点QCD结果;
- 重夸克对称性破缺效应~10%：
 $f_{D^*}/f_D = 1.10(2)(2), f_{D_s^*}/f_{D_s} = 1.10(3)(2);$
- SU(3)味道对称性破缺效应~17%：
 $f_{D_s}/f_D = 1.16(1)(2), f_{D_s^*}/f_{D_s^*} = 1.17(2)(2);$
- 利用 $f_{D^+} |V_{cd}| = 45.9(1.1) \text{ MeV}$, 可得 $|V_{cd}| = 0.326(5)_{\text{exp}}(5)_{\text{th}}$ 。



$\eta_c \rightarrow 2\gamma$ 衰变:

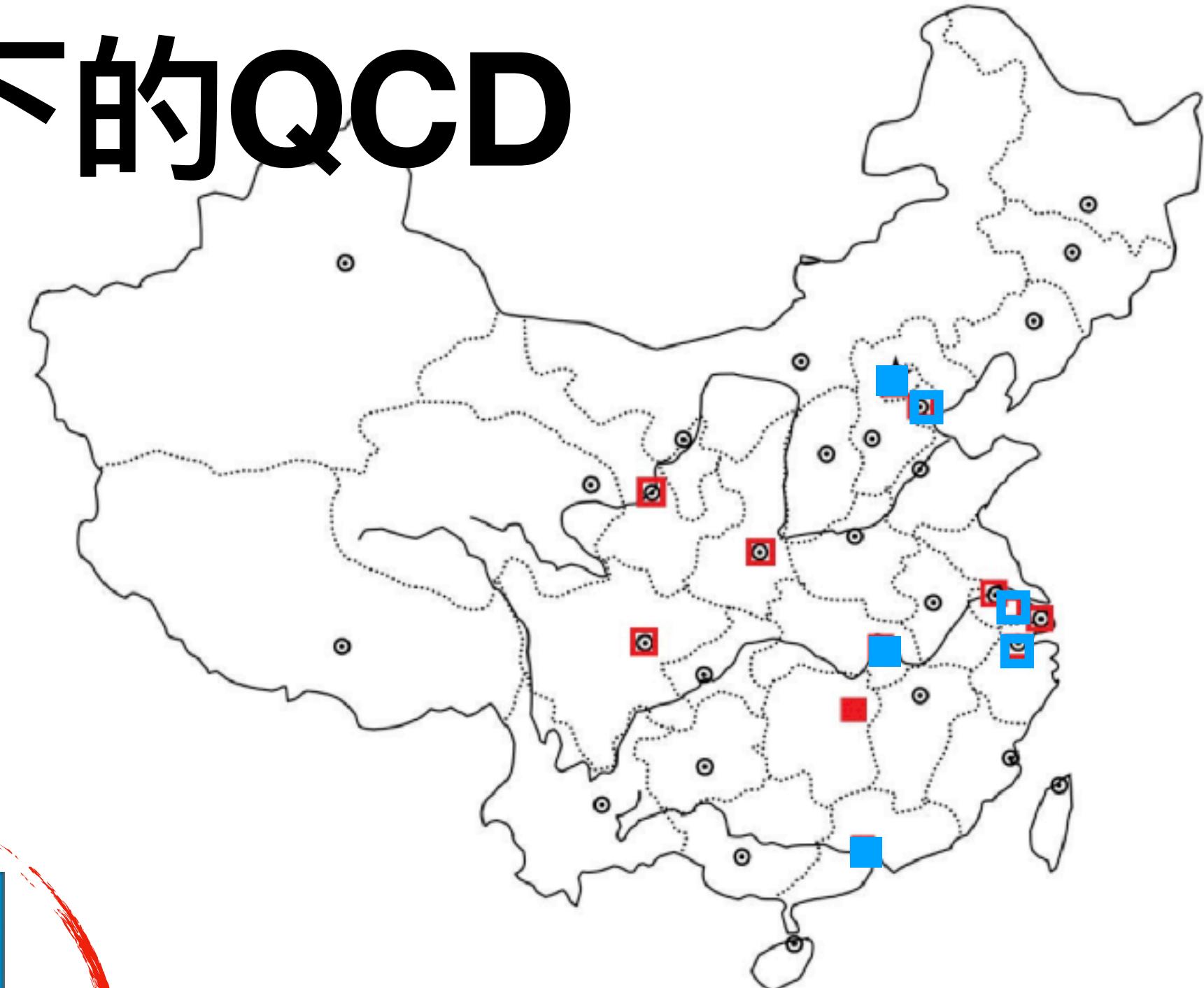
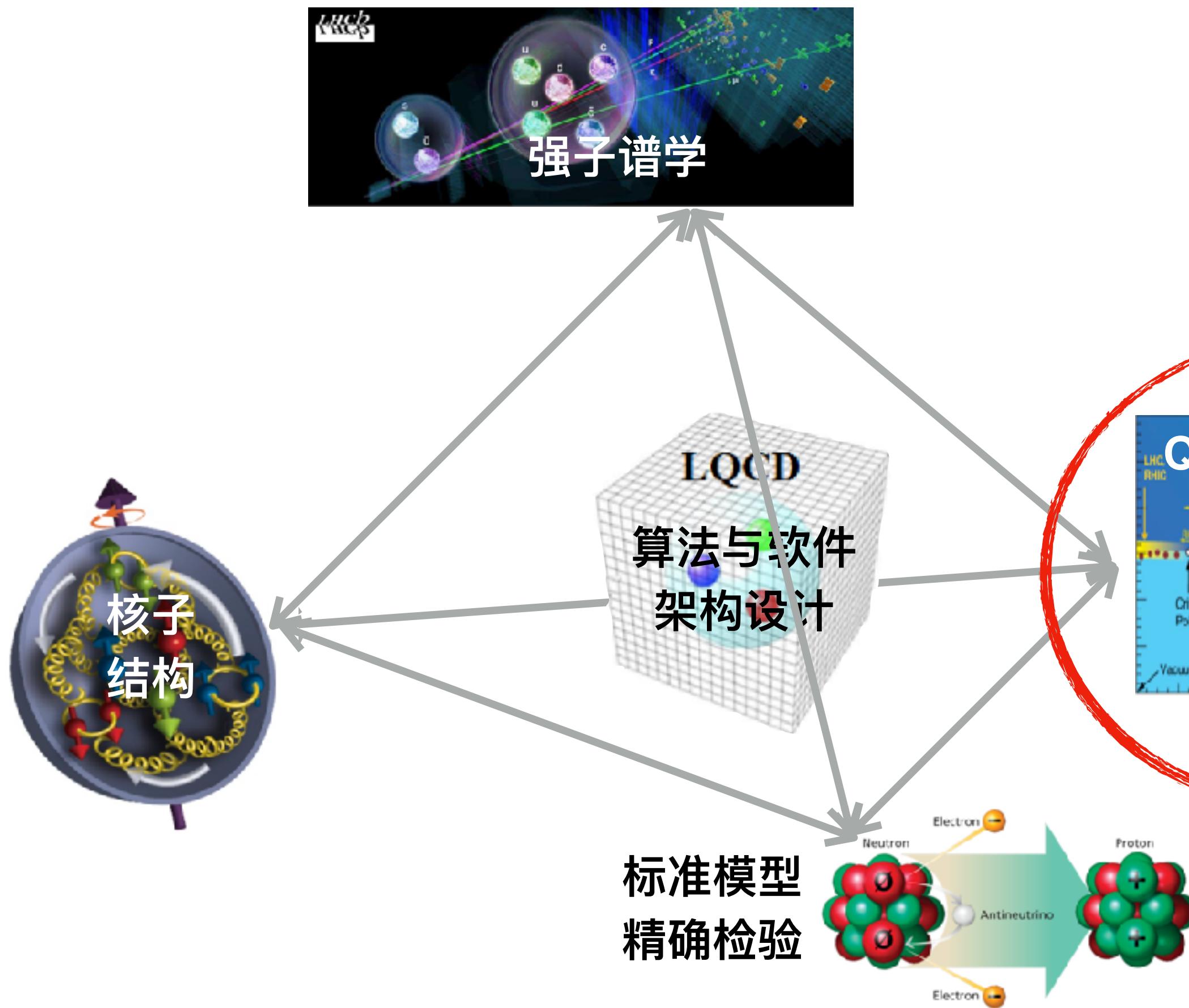
面向BESIII实验的格点QCD新前沿

- 首个基于两个以上格距进行连续外推的 $\eta_c \rightarrow 2\gamma$ 结果
- 已减除激发态效应
- 已考虑粲夸克定标方式带来的误差
- PDG结果主要基于联合拟合而不是实验平均



Expect more precise analysis from BESIII with $10^{10} J/\psi$

格点QCD在中国：极端条件下的QCD



Chiral phase transition temperature in $N_f=2+1$ QCD

(晨光杯报告) 李胜泰, Mon, 14:45 - 15:00

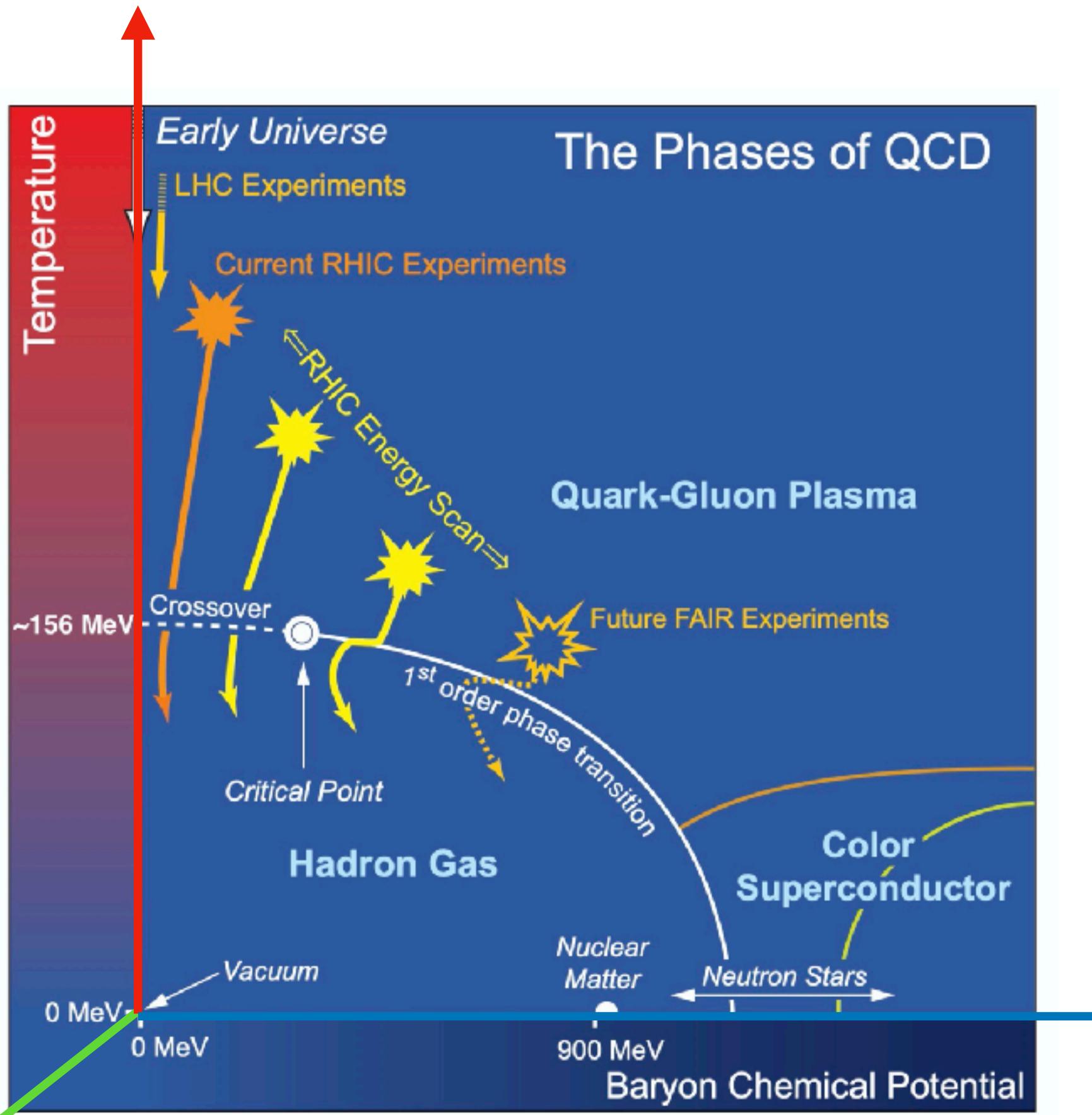
QCD axial anomaly & correlated Dirac Eigenvalue spectrum ρ

丁亨通, Tue, 08:30 - 08:55

Fluctuations and correlations of conserved charges in a background magnetic field

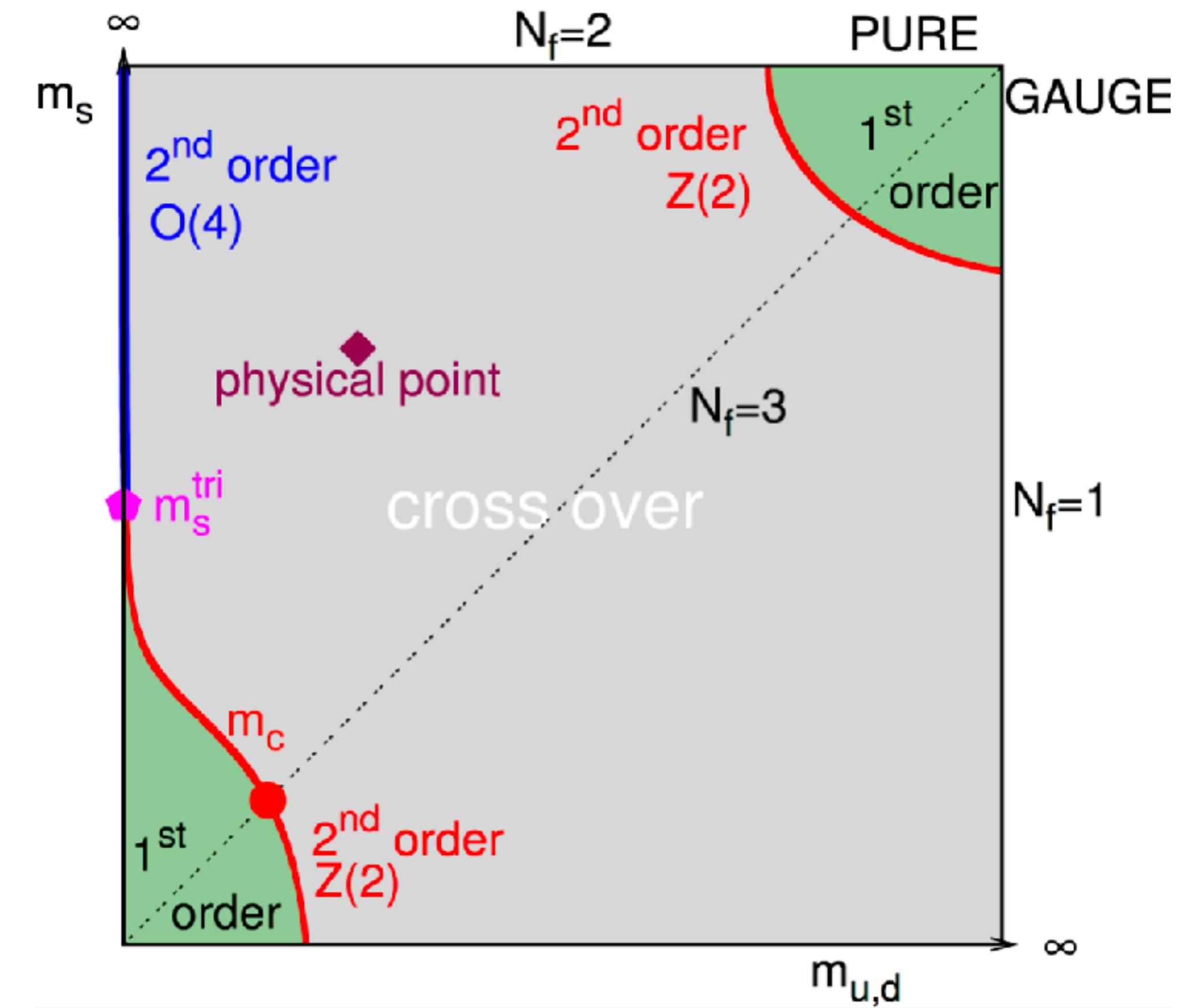
李胜泰, Tue, 10:20 - 10:35

QCD相图



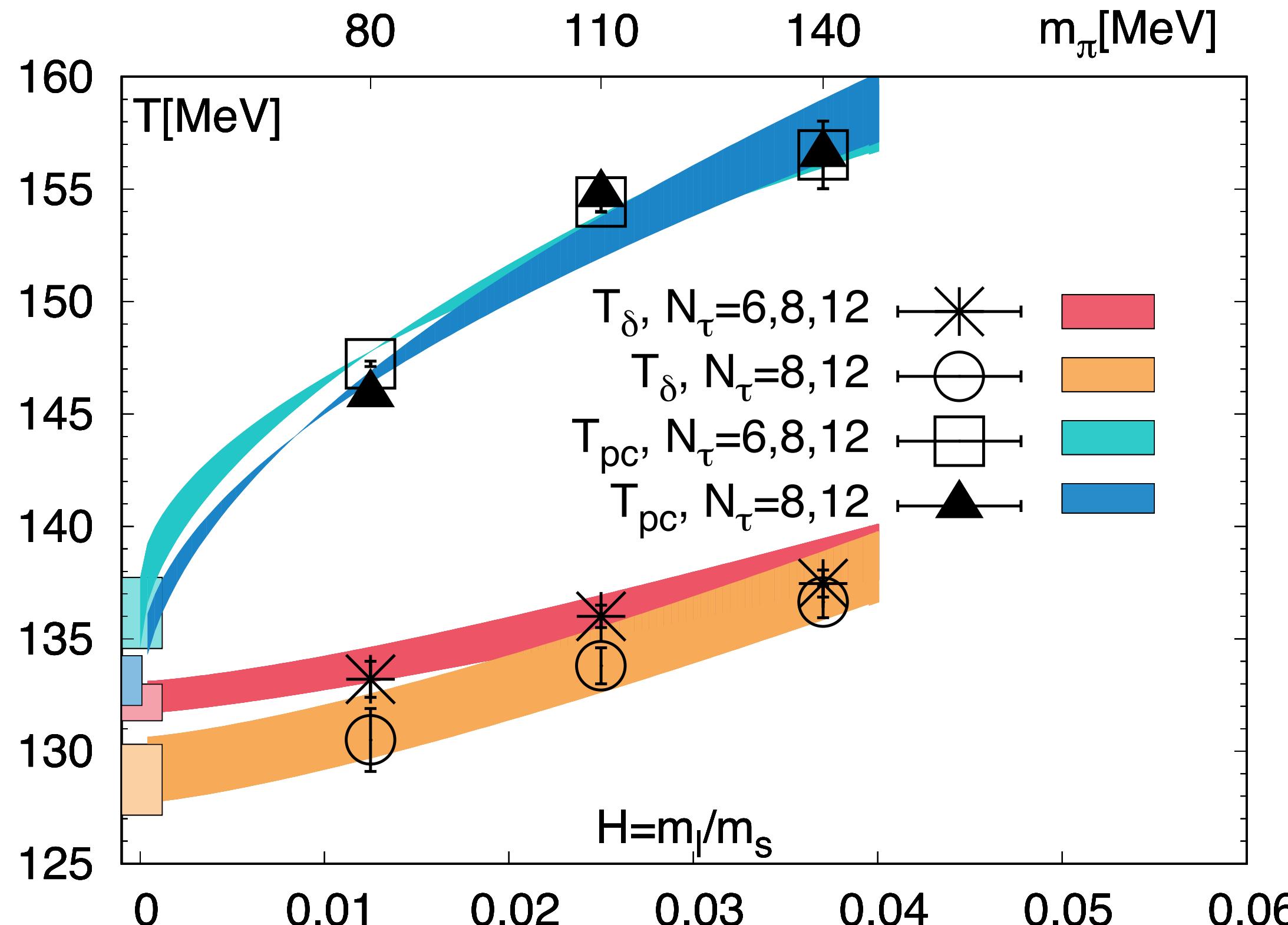
m_q, eB

- 随着重子化学势增加，色禁闭的解除是否会变成一级相变？
- 与无质量胶子的凝聚如何联系？
- 是否存在提高温度和重子化学势以外的方法，以解除色禁闭？比如强磁场？



手征相变温度

Chiral phase transition temperature in $N_f=2+1$ QCD
(晨光杯报告) 李胜泰, Mon, 14:45 - 15:00



- QCD基本标度;
- 临界终点温度的可能上限;
- 基于O(4)标度关系的手征/连续极限外推结果为：

$$T_c^0 = 132^{+3}_{-6} \text{ MeV}$$

H.-T. Ding, P. Hegde, O. Kaczmarek et al.[HotQCD],
Phys. Rev. Lett. 123 (2019) 062002

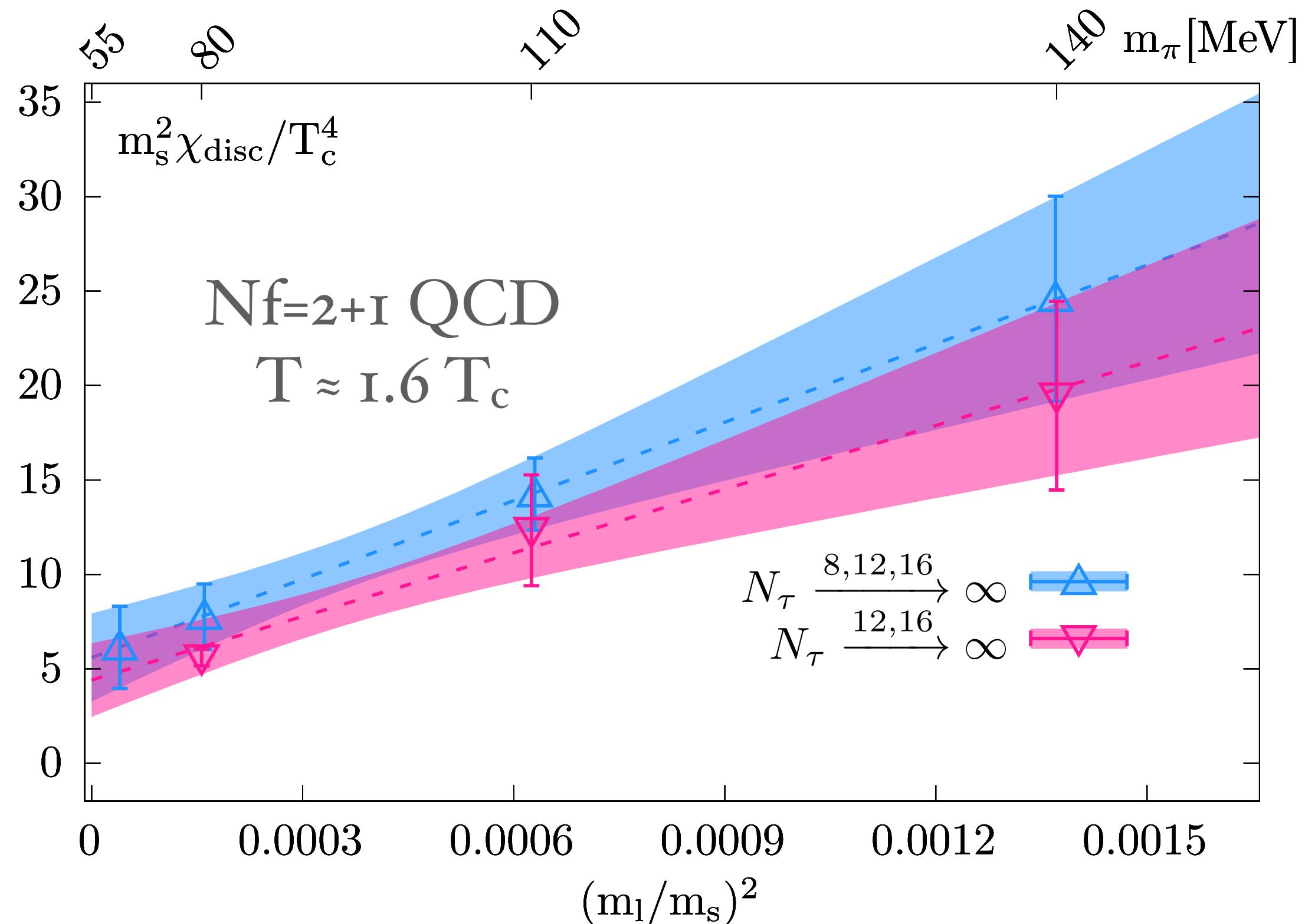
H.-T. Ding, Nucl.Phys.A 1005 (2021) 121940

QCD轴反常和Dirac本征值谱

QCD axial anomaly & correlated Dirac Eigenvalue spectrum ρ

丁亨通, Tue, 08:30 - 08:55

手征/连续极限外推后的非联通手征磁化率



轴反常的特性与手征相变的本质密切相关：

- 建立了单个夸克质量的Dirac本征谱与其对夸克质量的导数的关系；
- $U(1)$ 轴反常在1.6倍 T_c 的时候依然存在于非联通手征磁化率中。

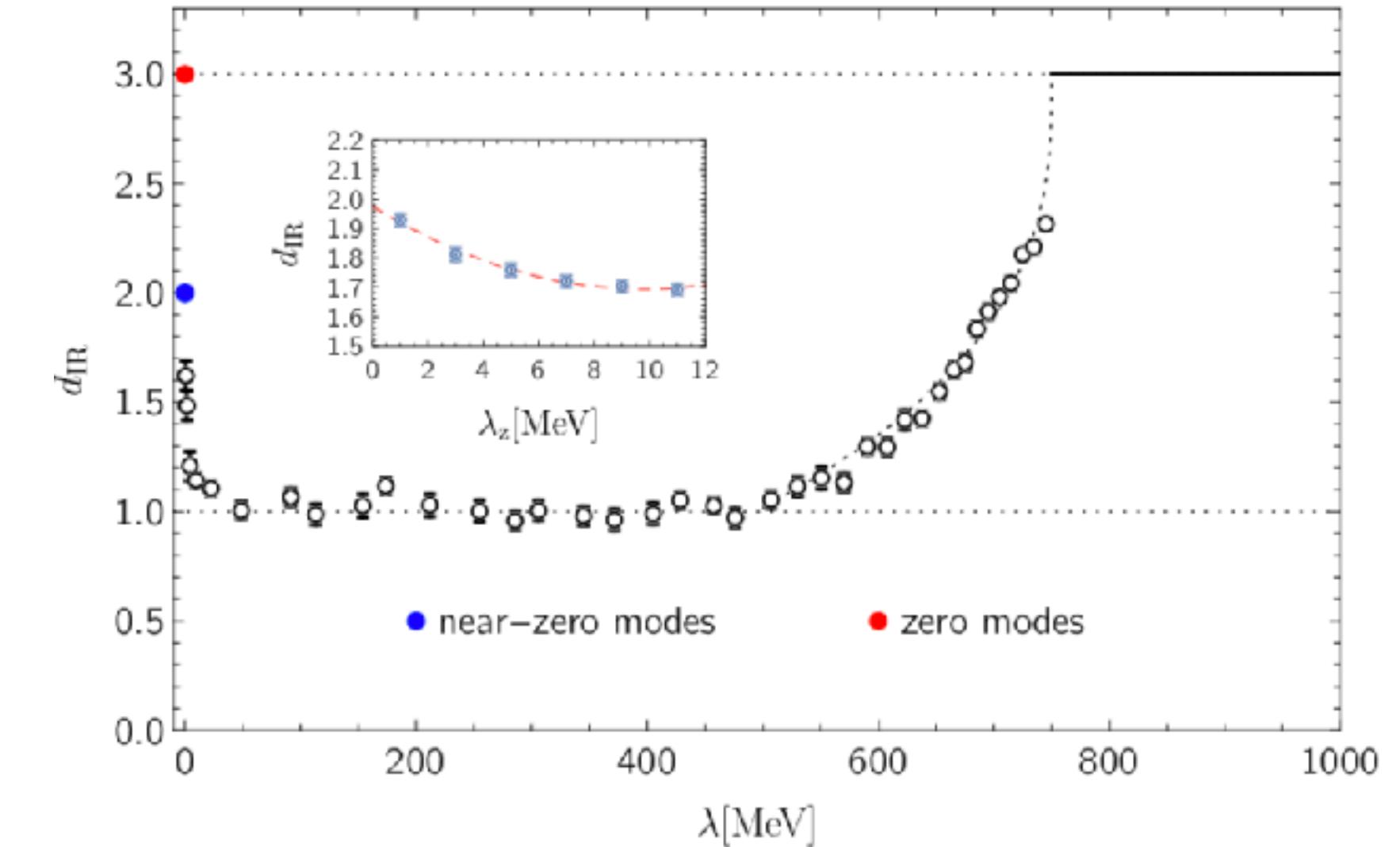
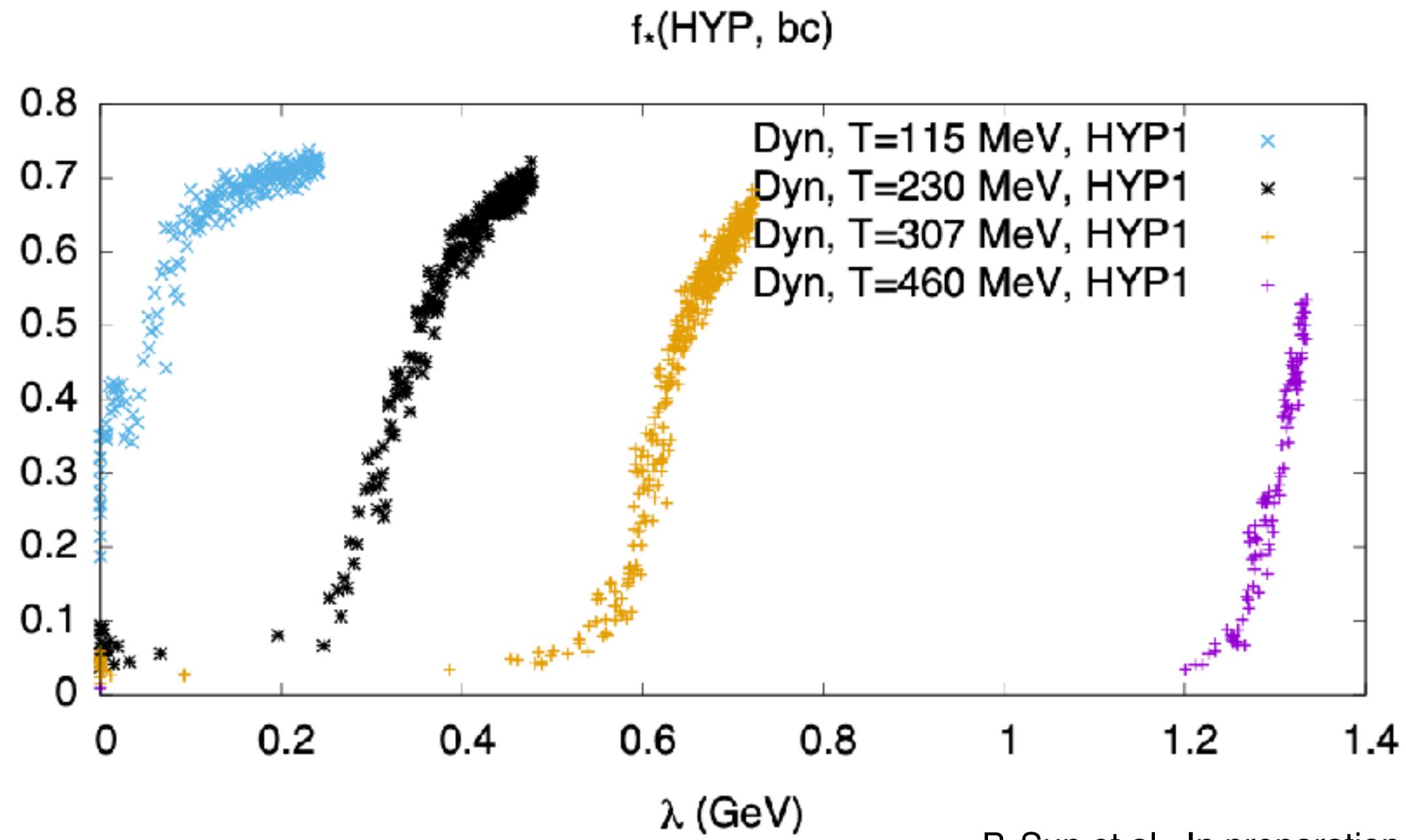
因而这是一个2阶 $O(4)$ 手征相变。

Dirac算符本征矢量的长程分形维度

淬火近似下的研究显示：

- 本征值为 $\lambda \sim \Lambda_{QCD}$ 的本征矢量的分形维度较低，能谱显示出红外/紫外分层的特性。

A. Alexandru, I. Horvath, PRL 127(2021)052303



基于自主的2+1味物理夸克质量动力学组态：

- 特性相似，而且红外/紫外之间的间隔随温度增加加速扩大。

总结

依托各高校与科研院所，以及科技部重点研发专项、中科院先导专项的支持，中国格点QCD事业近年来已经取得了长足的进步：

- 依托国产E级超算，即将实现世界先进水平的规范组态的自主化；
- 面向各大科学装置，强子能谱、强子结构、精细检验和QCD相变等方向都涌现出一批具有原创性和国际竞争力的进展；
- 即将举办第一届中国格点QCD年会。

<https://indico.ihep.ac.cn/event/11403/>



刘川，《中国物理学会高能物理分会第七届学术年会大会报告》，2006年



中国格点QCD第一届年会

9-12 October 2021
华南师范大学
Asia/Shanghai timezone