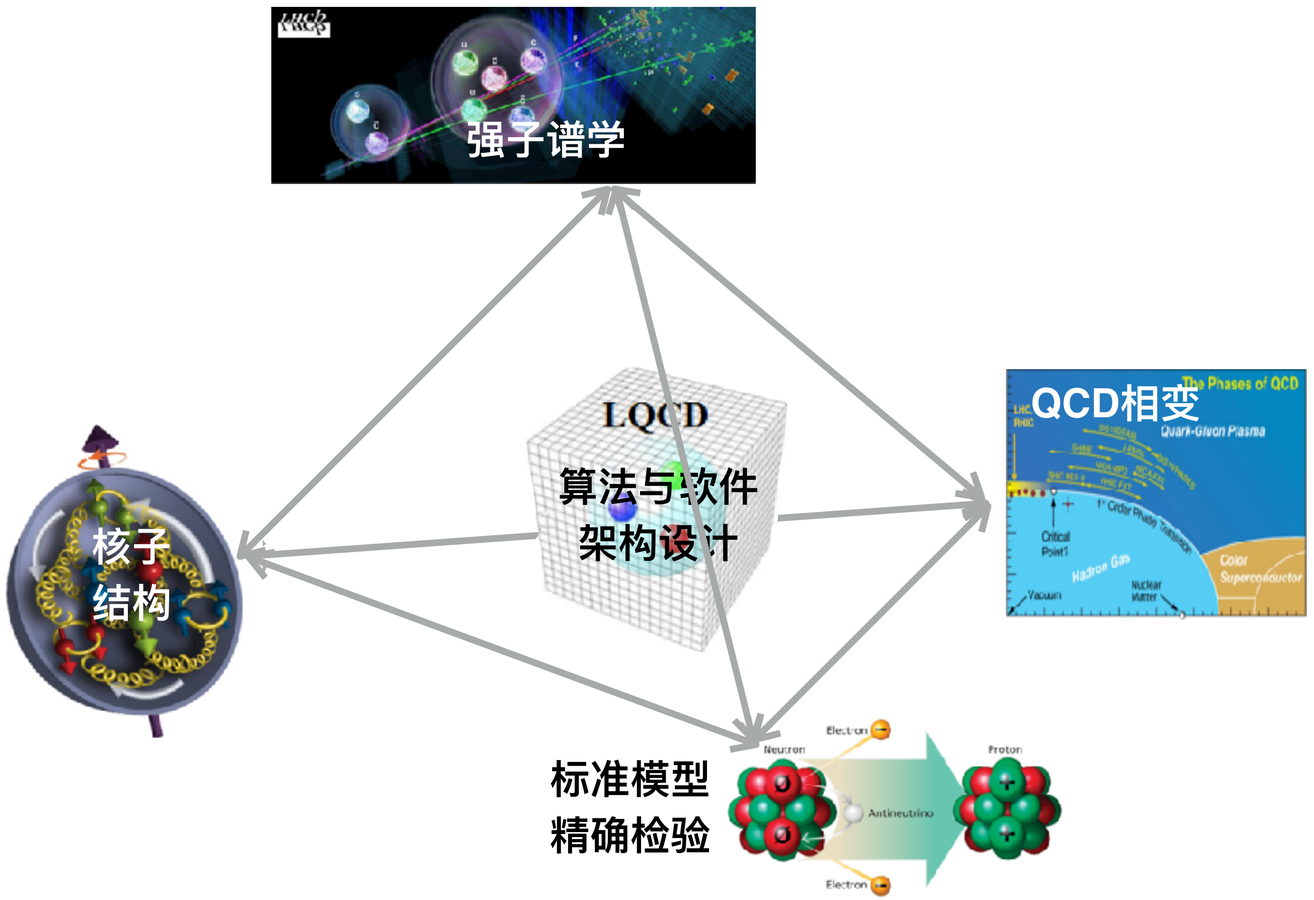
中国格点QCD第一届年会

Hadron structure in China

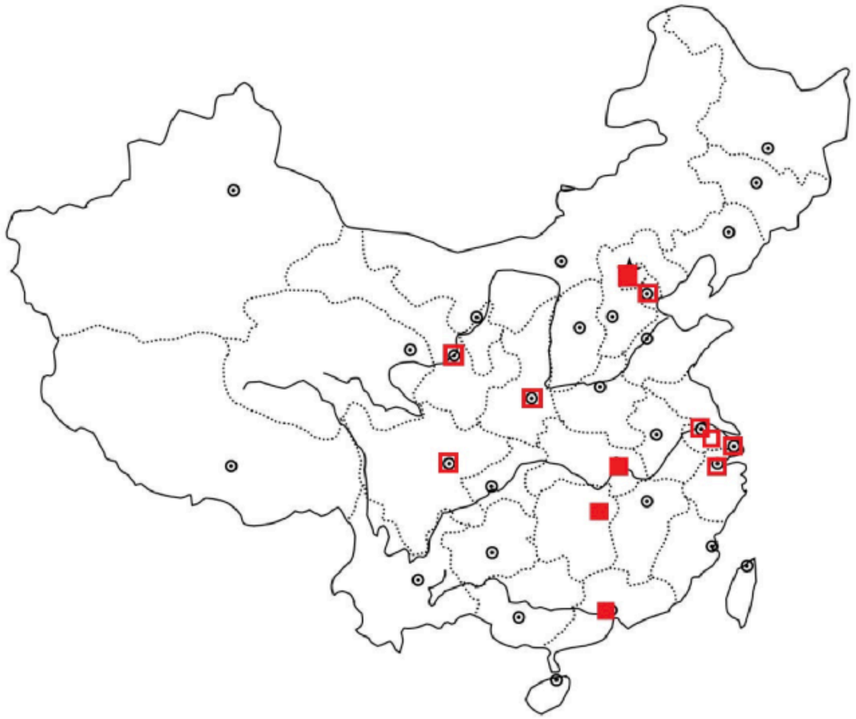
CLQCD

杨一玻
中国科学院理论物理研究所

格点QCD在中国

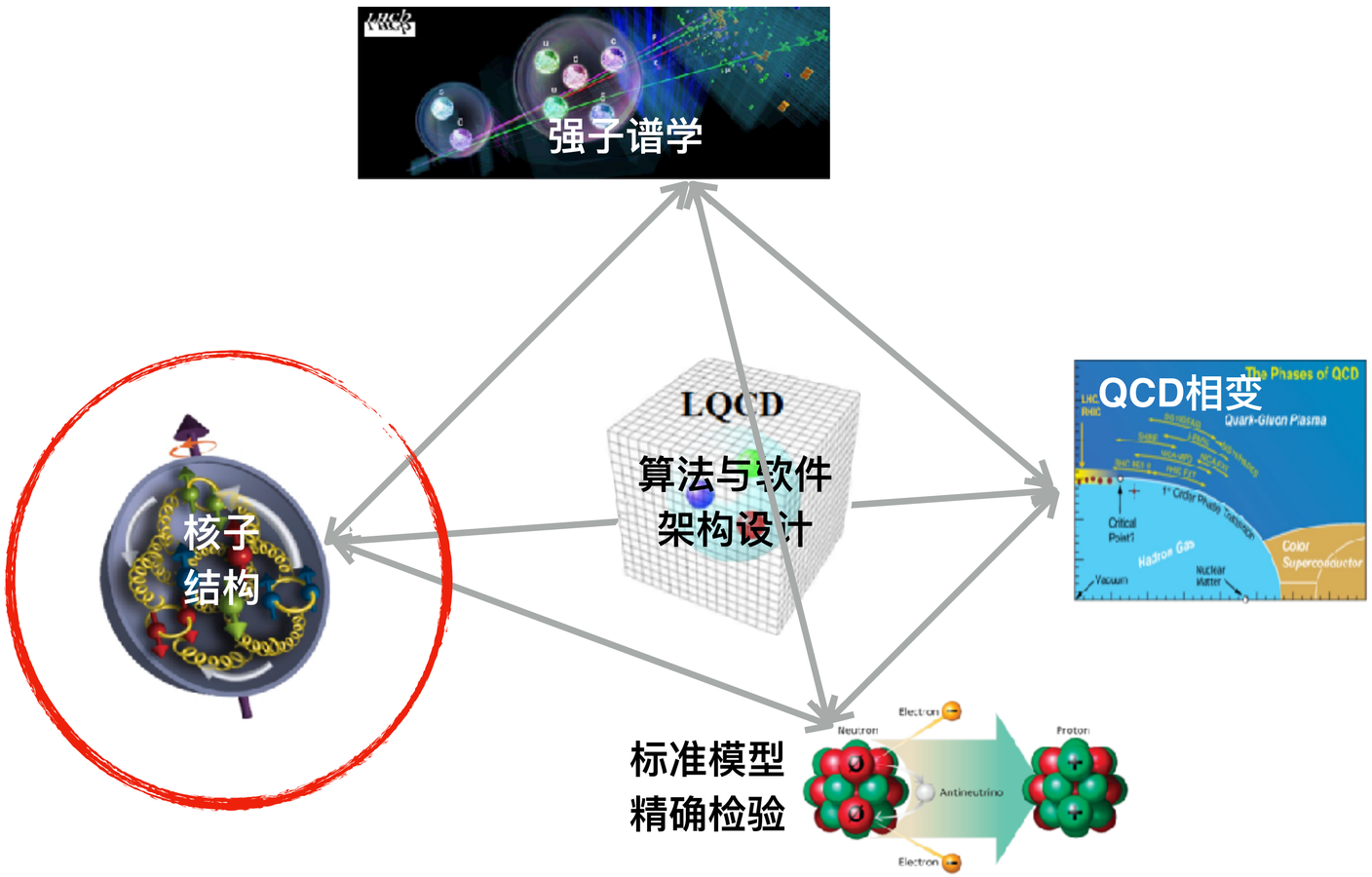


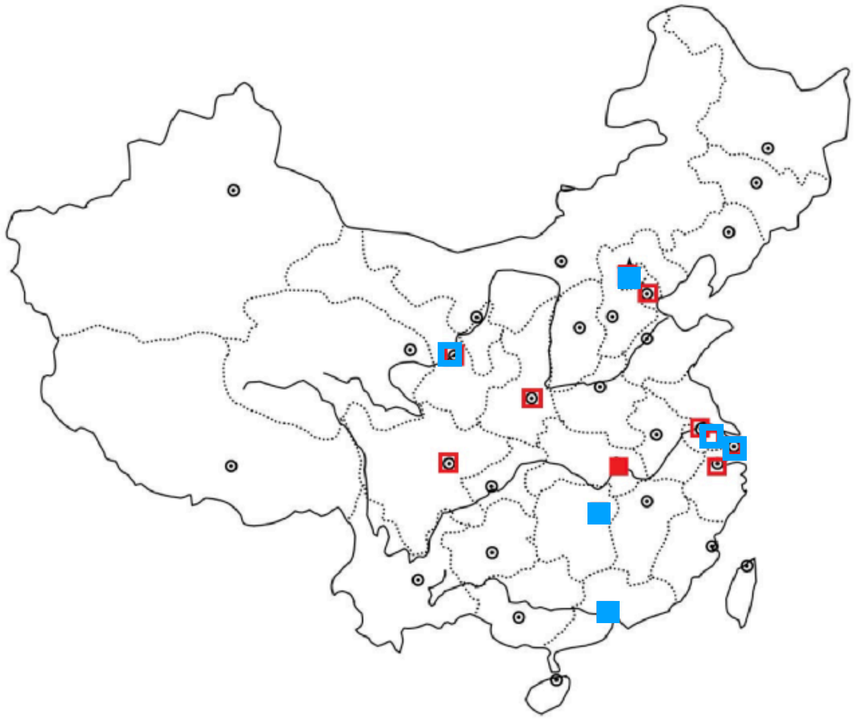
现代物理知识，2020年1期



北京大学，北京航空航天大学，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，上海交大、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……

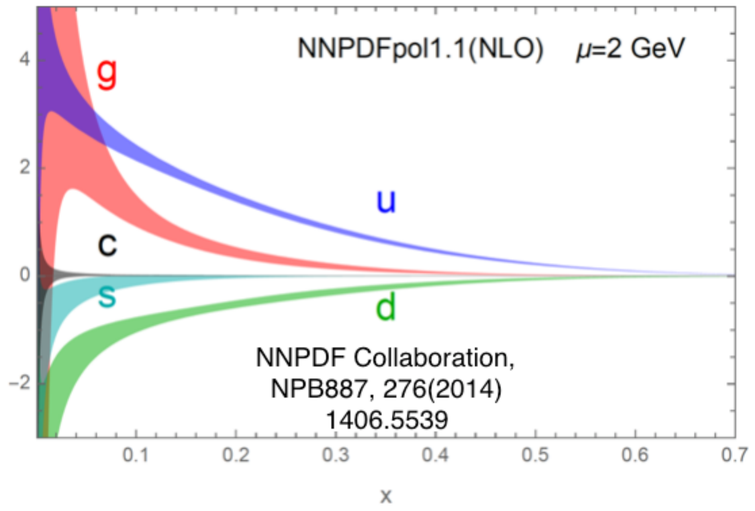
格点QCD在中国：强子结构





- 深入理解强子中各部分子的性质
- 通过各种分布函数理解胶子在强子形成中的作用
- 面向核物理与高能物理的高强度前沿

强子结构的LQCD计算

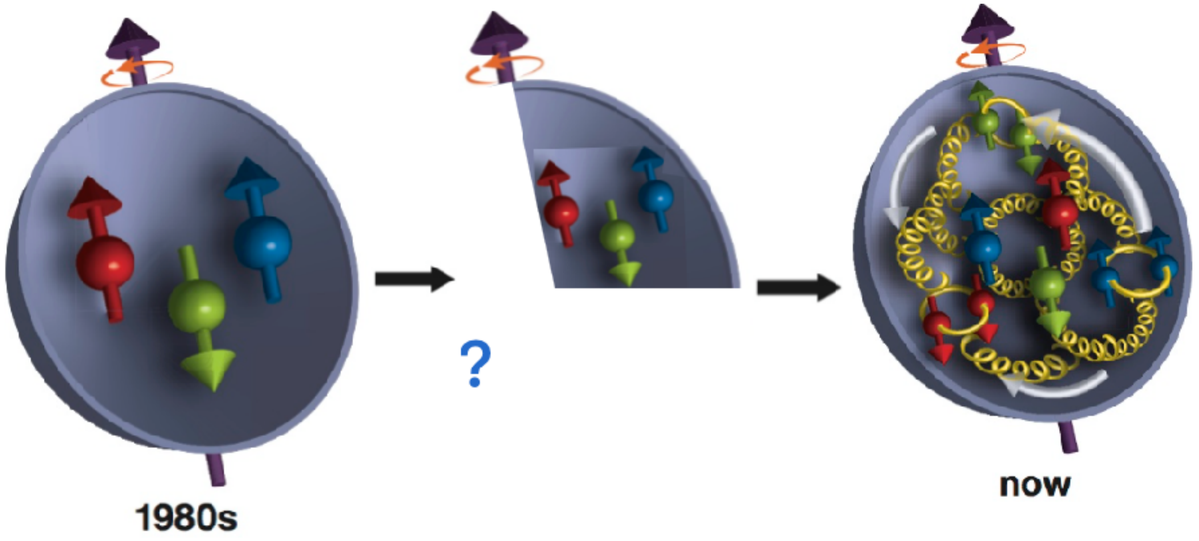


强子结构LQCD的计算的核心在于理解部分子在强子尤其是核子中的分布：

- 径向分布函数、横向分布函数，广义分布函数……
- 以及他们的积分（对应于定域算符的矩阵元）。

胶子在强子形成中的作用：

- 在核子质量/动量和自旋中的贡献都接近50%
- 在其他强子中有多少贡献，为什么？

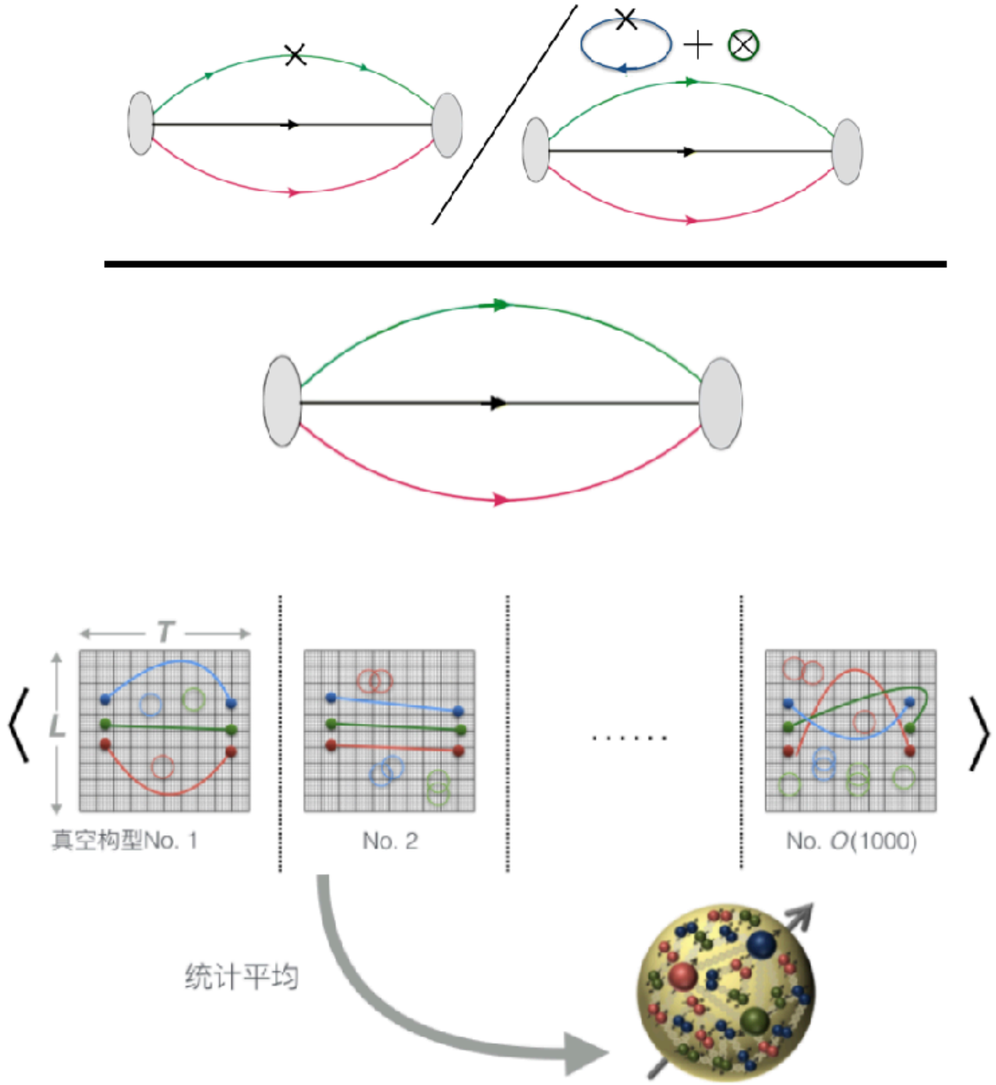


Proton momentum and angular momentum decompositions with overlap fermions,
Gen Wang, 10/31, 15:00

强子矩阵元

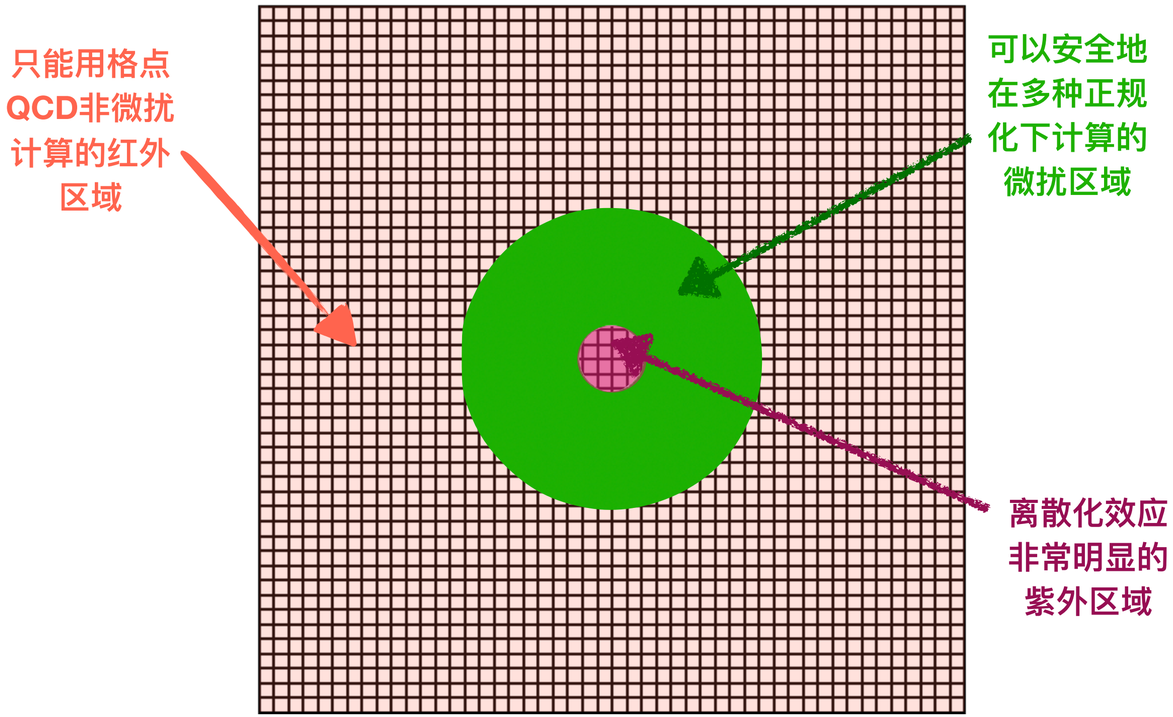
夸克流与胶子流的强子矩阵元是强子结构计算的核心：

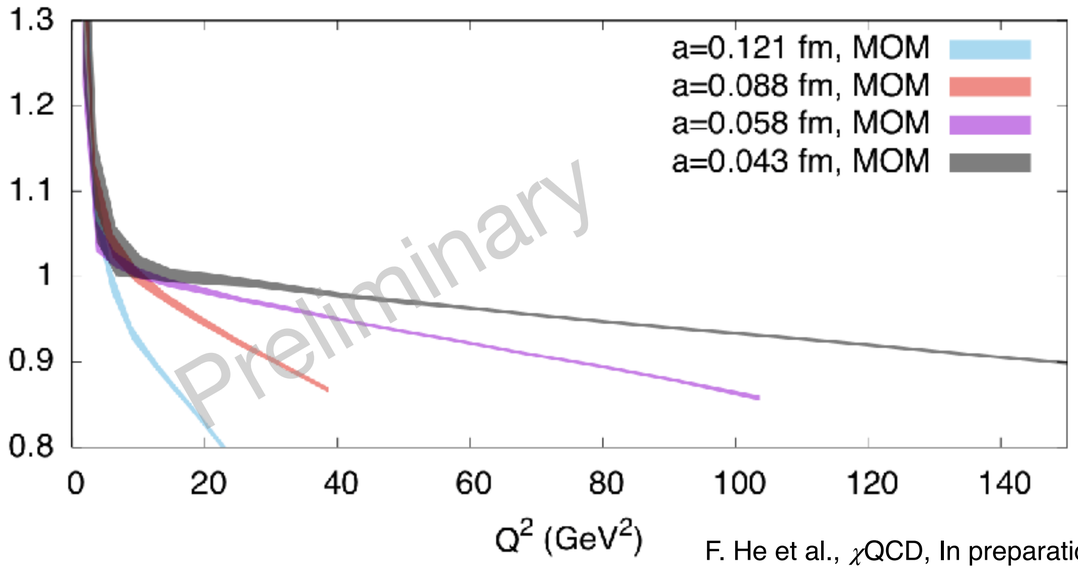
- 相比$m_\pi \simeq 300$ MeV的情形，$m_\pi \simeq 135$ MeV的情形需要上百倍计算量才能达到差不多的信噪比；
- 海夸克和胶子的矩阵元需要数百倍的统计量，才能达到与价夸克矩阵元差不多的信噪比；
- 对于物理点的核子，$P \sim 2$ GeV的情形也需要数百倍的统计量，才能达到$P \sim 0$的情形差不多的信噪比。



重整化

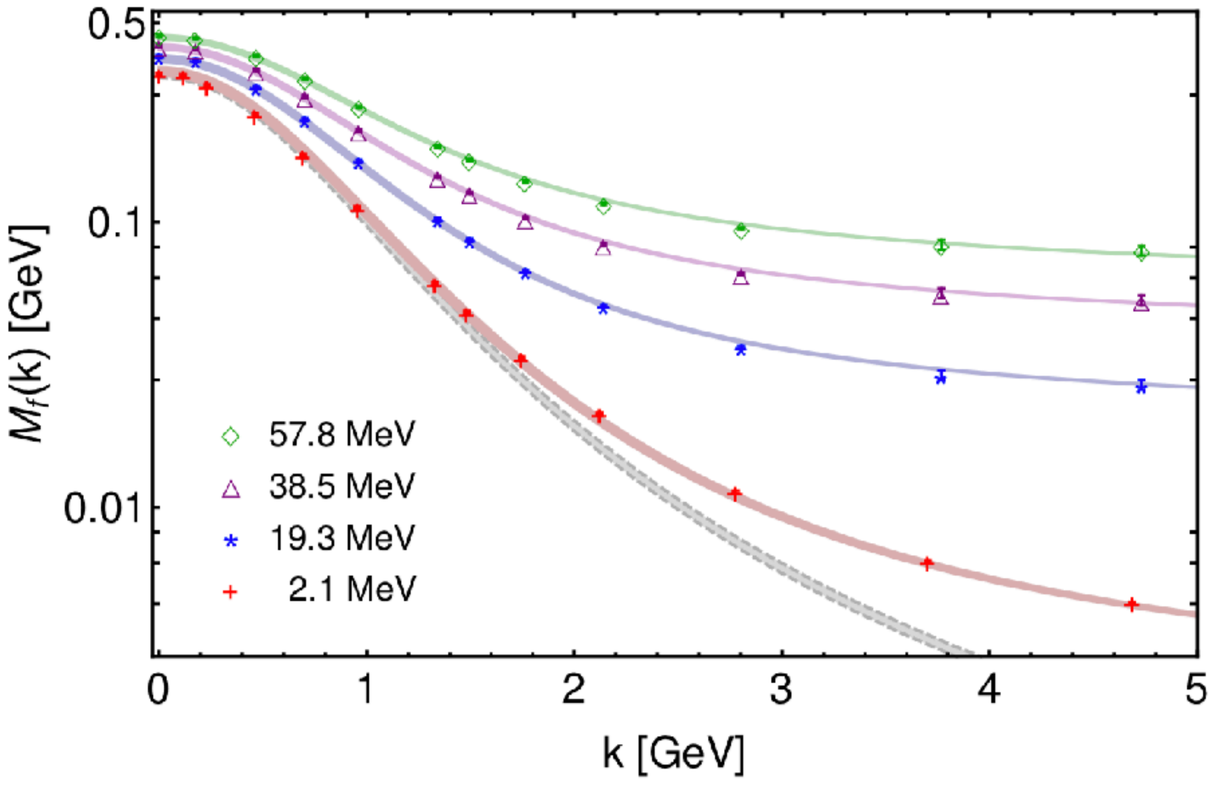
- 格点QCD的短程行为显著地依赖于离散化。
- 而通常的实验唯象分析是在修改维度的MS-bar方案下进行的。
- 不改变维度的格点正规化无法直接引入这个维度，从而无法直接得到MS-bar下的结果。
- 但是可以有一个“安全的区域”，在这个区域内不同正规化可以得到一样的计算结果。





F. He et al., χQCD, In preparation

夸克“动力学”质量



L. Chang, et.al, arXiv:2105.06596, accepted by PRD

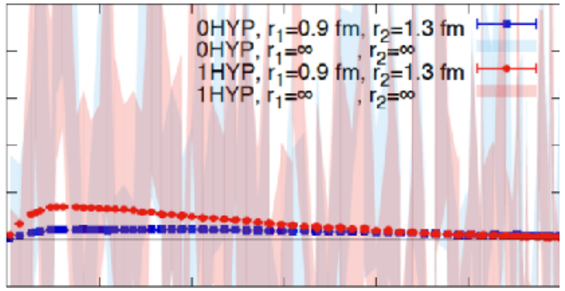
- 当标度低到无法使用微扰计算的区间，会发现quark在朗道规范下有一个大约320 MeV的“动力学质量”；
- Dyson-Schwinger方程的参数化方案可以在要求反常色磁矩系数为$\eta \in [1.27 - 1.32]$的区间，很好地解释格点的结果。
- 需要进一步地研究，以深入理解这个质量如何联系到强子质量，并解释强子结构！

新的挑战

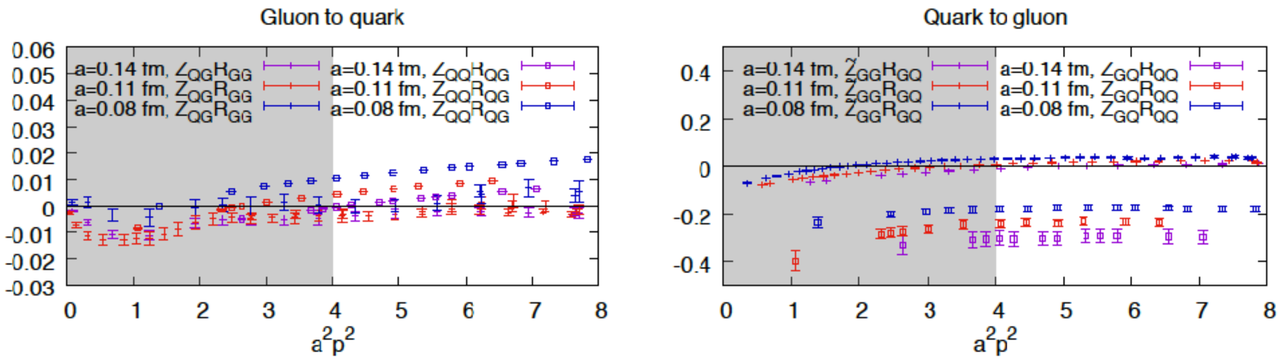
进一步我们期望计算完整的分布函数而不只是他们的积分：

- 大动量有效理论（更复杂的重整化计算）
- 四点函数以及各种非定域矩阵元（更复杂的强子矩阵元计算）

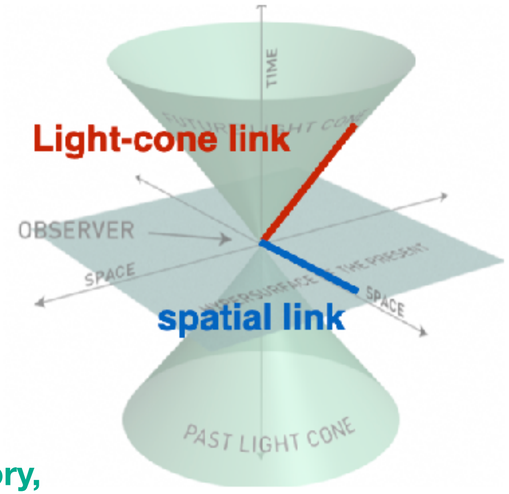
Lattice calculation powered by factorization theory, Yan-Qing Ma, 11/01, 09:30

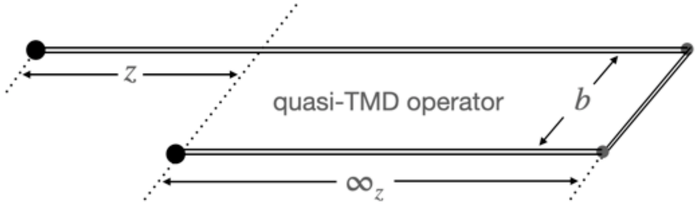


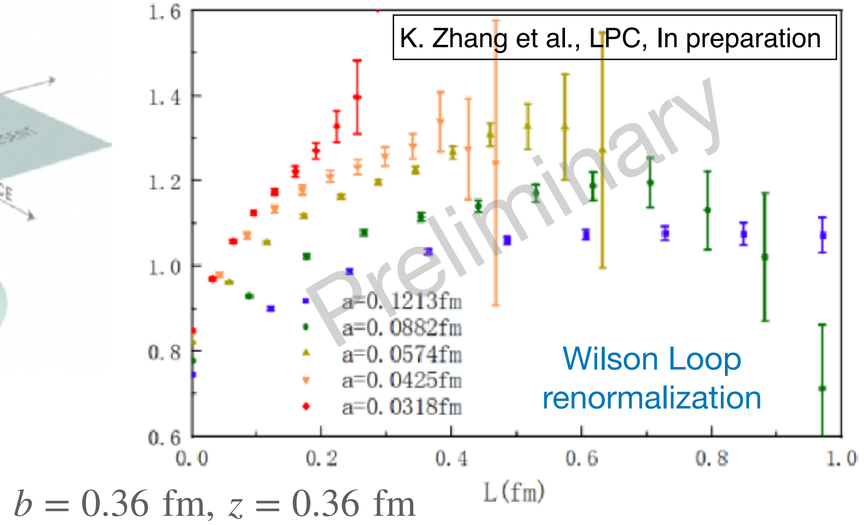
YBY, et. al., PRD98(2018) 074506



YBY, J. Liang, et. al., χQCD, PRL121(2018)212001, **ViewPoint and Editor's suggestion**







$b = 0.36$ fm, $z = 0.36$ fm

以及更多地了解胶子在强子中的矩阵元与PDF：

- 更大的计算量需求
- 夸克与胶子之间的混合

Lattice QCD Calculation of TMD Soft Function Through Large-Momentum Effective Theory,
Qi-An Zhang, 10/31, 15:30
Distribution amplitudes from lattice QCD,
Jun Hua, 10/31, 16:00

Collins-Soper kernel from transverse momentum-dependent wave functions in LaMET,
Min-Huan Chu, 16:30
Renormalization and extrapolation strategies for parton physics from lattice QCD,
Jianhui Zhang, 11/01, 9:00
Transverse Momentum Dependent PDF Calculation,
Yu-Jie Pan, 11/01, 11:30

Lattice Parton合作组(LPC)

基于格点量子色动力学理解强子结构

- 2019年秋季成立

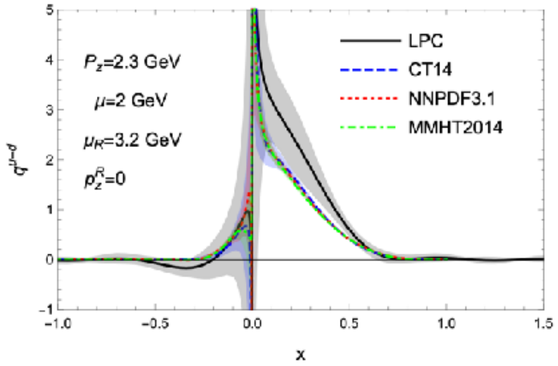
- 固定成员
  - Xiangdong Ji (SJTU)
  - Peng Sun (NJNU)
  - Andreas Schaefer (U. Reg.)
  - Wei Wang (SJTU)
  - **Yi-Bo Yang (ITP/CAS, 发言人)**
  - Jian-hui Zhang (BNU)
- 去年以来的新成员
  - Long-Cheng Gui (HNNU)
  - Jian liang (SCNU)
  - Liuming Liu (IMP/CAS)
  - Xiao-Nu Xiong (CSU)

- 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)

……

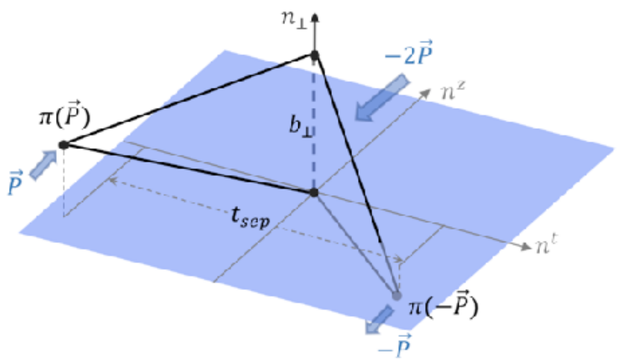
基于中科院战略先导专项C类No. XDC01040100的支持

- 合作组的研究进展



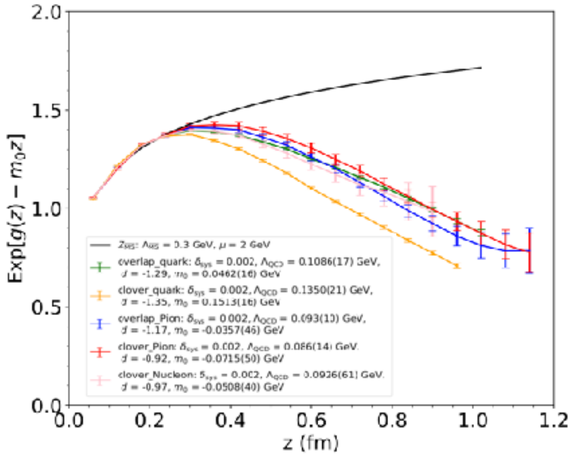
核子中夸克的非极化分布函数

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



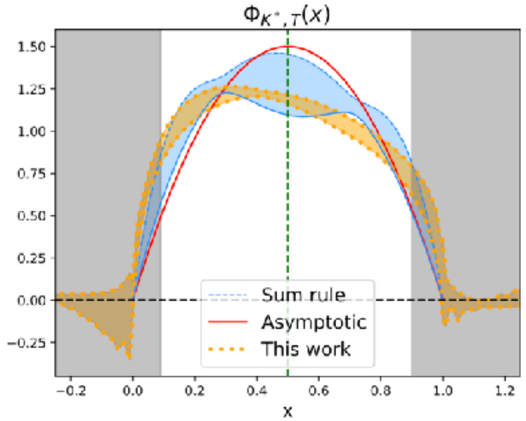
胶子的横向分布软函数

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



准光锥关联函数的自重整化

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

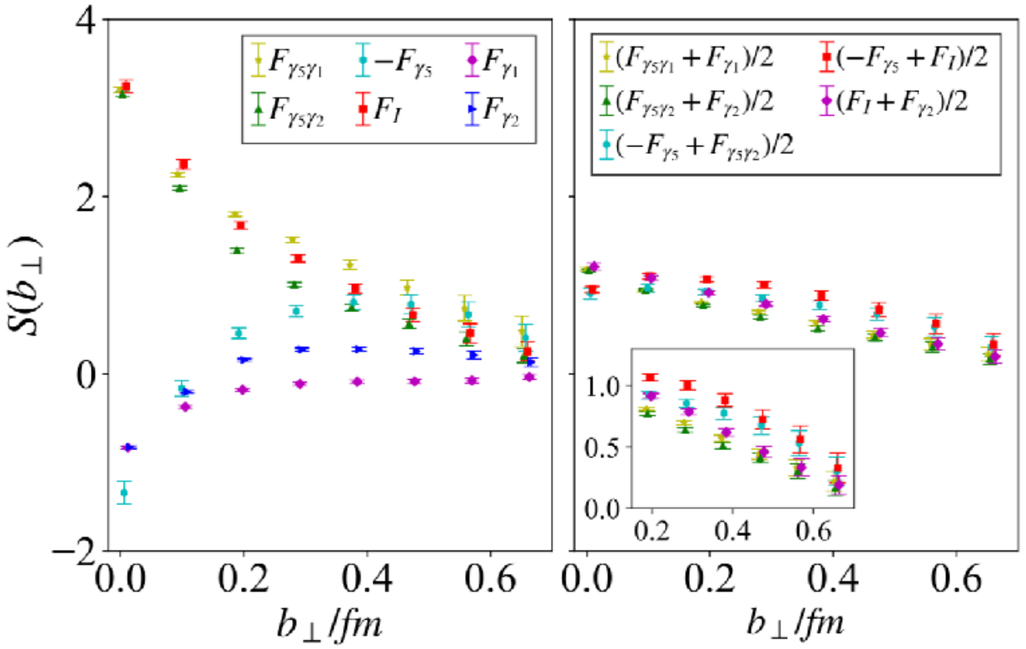


介子的光锥分布函数

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

国内其他强子结构计算

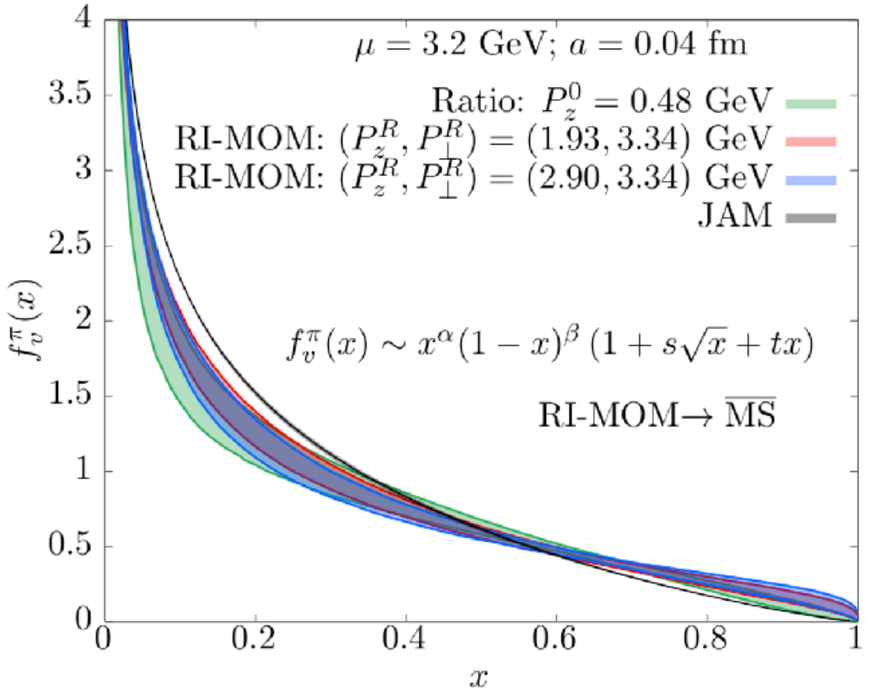
- PKU&ETMC
- 2味ETMC组态;
- 系统地考察了使用不同算符得到胶子的横向分布软函数;
- 发现适当地组合算符可以显著地改善大动量收敛性。



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

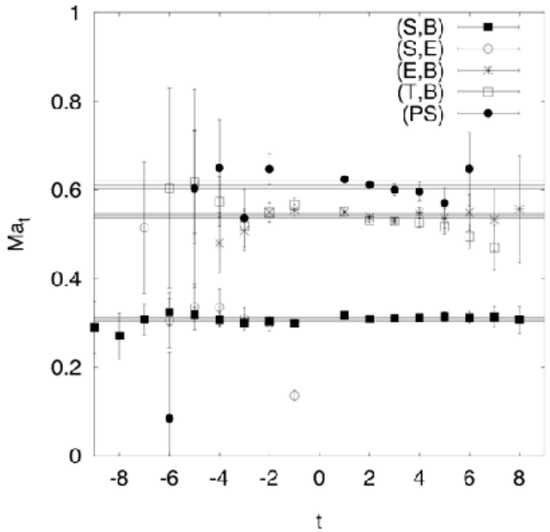
Valence parton distribution of pion from lattice QCD at physical point,
Xiang Gao, 10/31, 14:30

- 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。

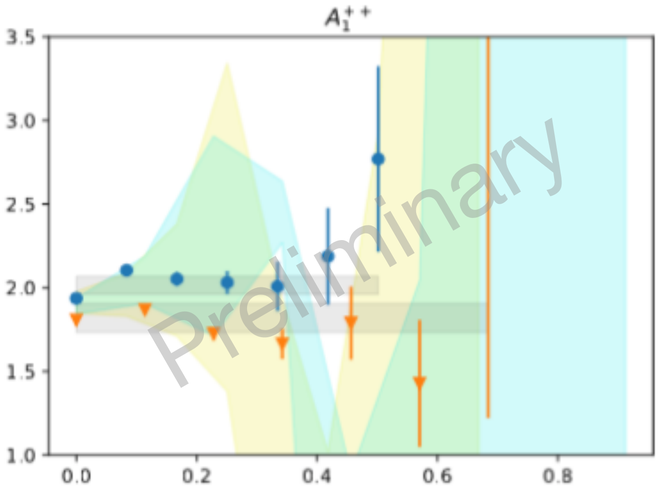


X. Gao, et.al., PRD 102(2020)094513

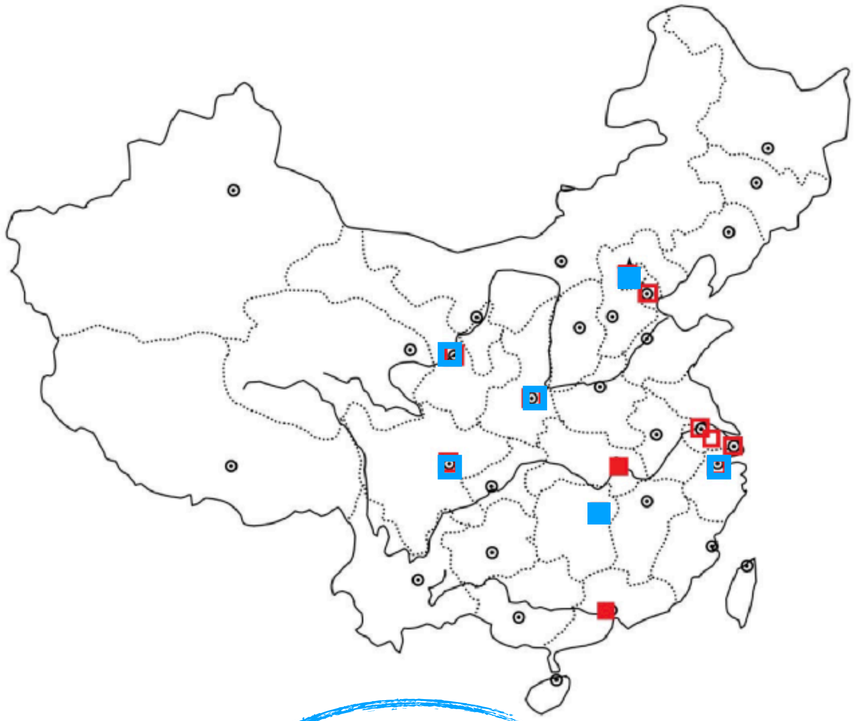
强子结构 与 强子谱学



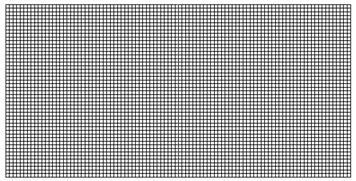
Y. Chen et al., PRD 73 (2006) 014516



F. Chen et al., χQCD, in preparation



$24^3 \times 72$, 2.4^4 fm^4 box
Quench



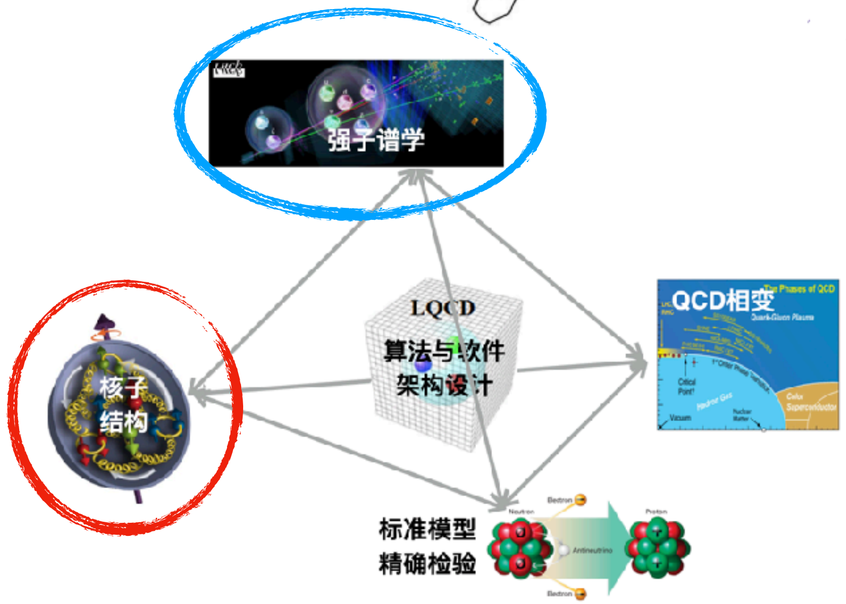
$48^3 \times 96/64^3 \times 128$
$5.5^3 \times 11$ fm^4 box
$m_\pi = 139$ MeV

胶球质量分解

TABLE XIX: The matrix elements of operator $O_\pm$ (Type-II) in glueball states are listed. S represents the scalar glueball state, while $T(E)$ and $T(T_2)$ denotes the tensor glueballs in E and T_2 irreps, respectively. The renormalization constants extracted from these matrix elements are given also.

$\|G\rangle$	$\langle G\|O_+\|G\rangle_{\rm lat}$	Z_S	$\langle G\|O_-\|G\rangle_{\rm lat}$	Z_T
S	32(9)	1.1(3)	13(5)	0.7(3)
$T(E)$	102(16)	1.0(2)	51(15)	0.53(15)
$T(T_2)$	101(16)	1.0(2)	53(15)	0.51(15)

?



轻介子质量分解

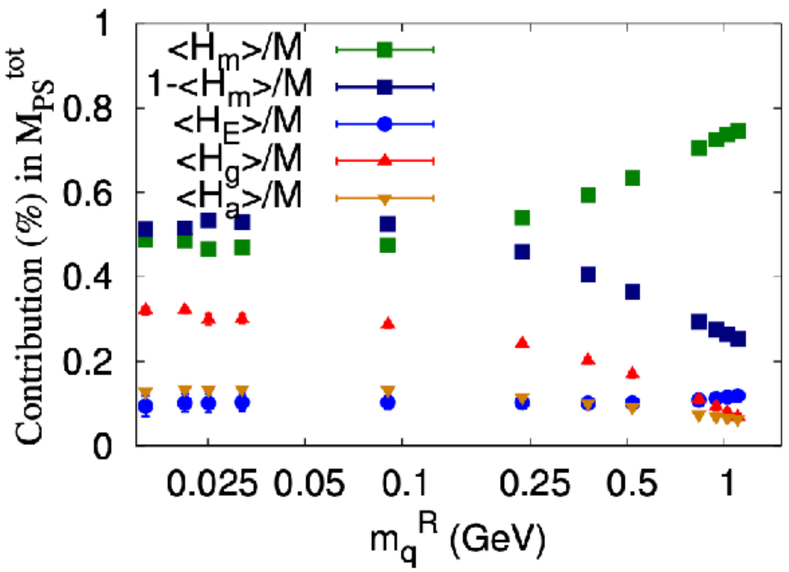
强子质量分解方案：

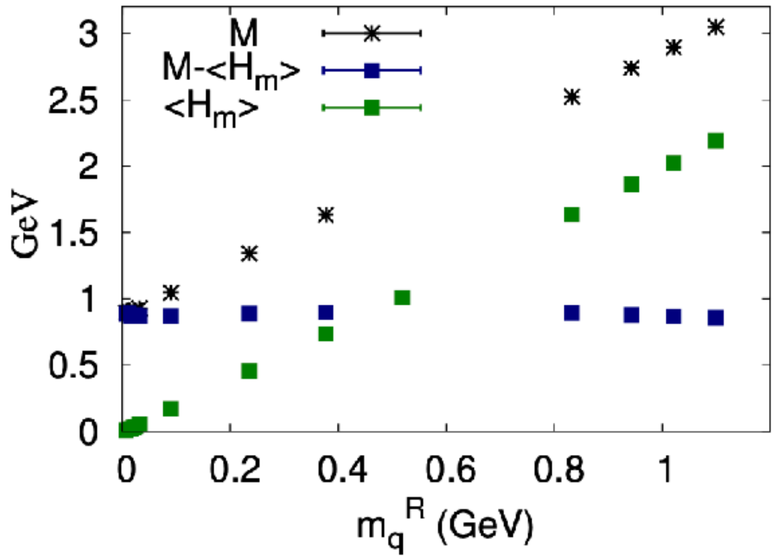
- 能动量张量的迹的求和规则给出：$m_H = \langle H_m \rangle_H + \langle H_a \rangle_H$；
- 基于能量分量的求和规则可以进一步分解$\langle H_a \rangle_H$：$\frac{3}{4}\langle H_a \rangle_H = \langle H_E \rangle_H + \langle H_g \rangle_H$。
- 从而给出强子能量的完整分解：

$$m_H = \langle H_m \rangle_H + \langle H_E \rangle_H + \langle H_g \rangle_H + \frac{1}{4}\langle H_a \rangle_H$$

通过LQCD在完整组态上计算强子质量分解的初次尝试：

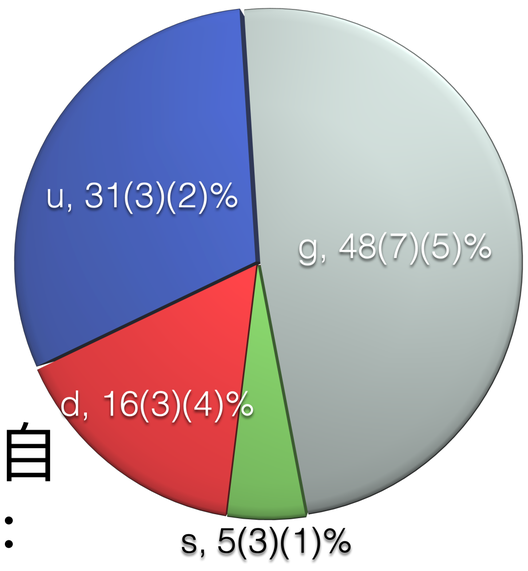
- 赝标介子在手征极限附近各组分贡献的**比例接近于常数；**
- 矢量介子除了质量以外其他部分的贡献**接近于常数。**

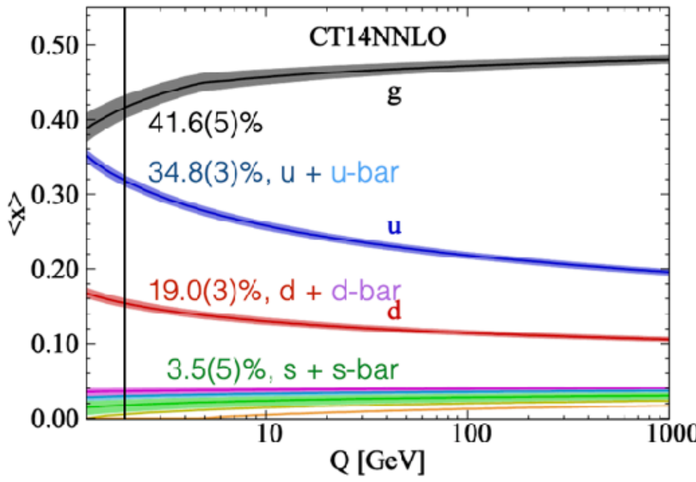




YBY, et. al., χQCD, PRD91(2015)074516

核子质量分解

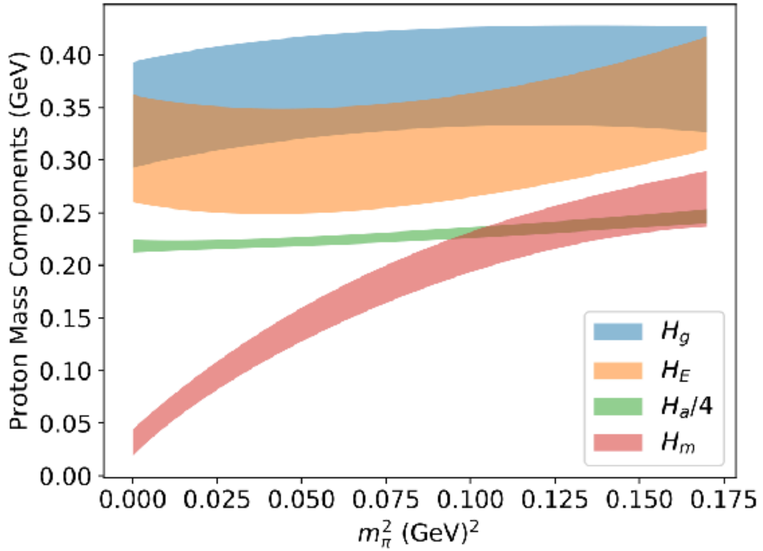




S. Dulat et al, PRD93(2016)033006

经过三年多的努力，更好地理解和控制了来自重整化、格距、pion质量等方面的系统误差：

- 预言了质子中各味夸克和胶子在MS-bar 2 GeV的动量分数，误差范围内与实验符合；
- 质子静能量中夸克动能、胶子动能与标度反常贡献对夸克质量的变化不敏感；
- 标度反常的贡献来源于求和规则的估计，而非直接计算。



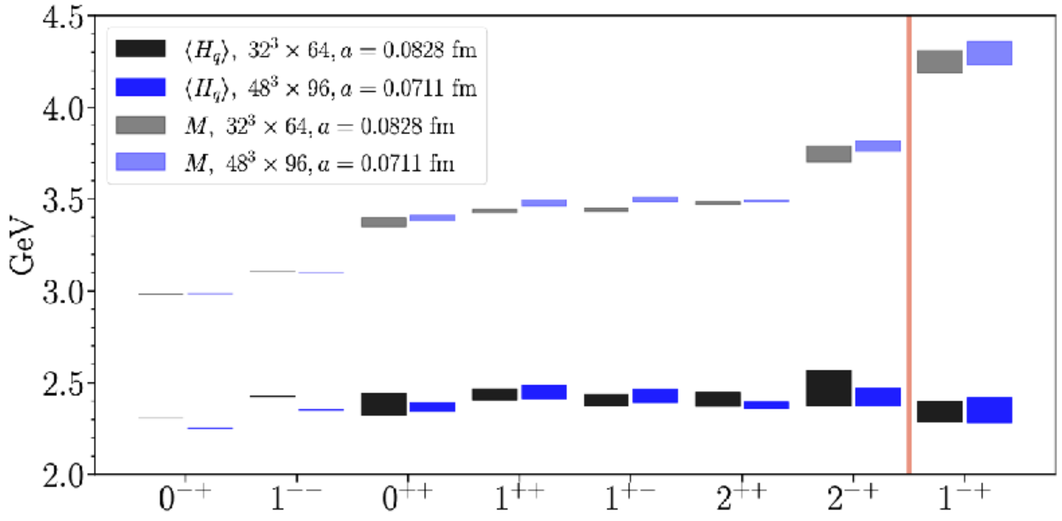
YBY, J. Liang, et. al., χQCD, PRL121(2018)212001, **ViewPoint and Editor's suggestion**

基于中科院战略先导专项C类No. XDC01040100的支持

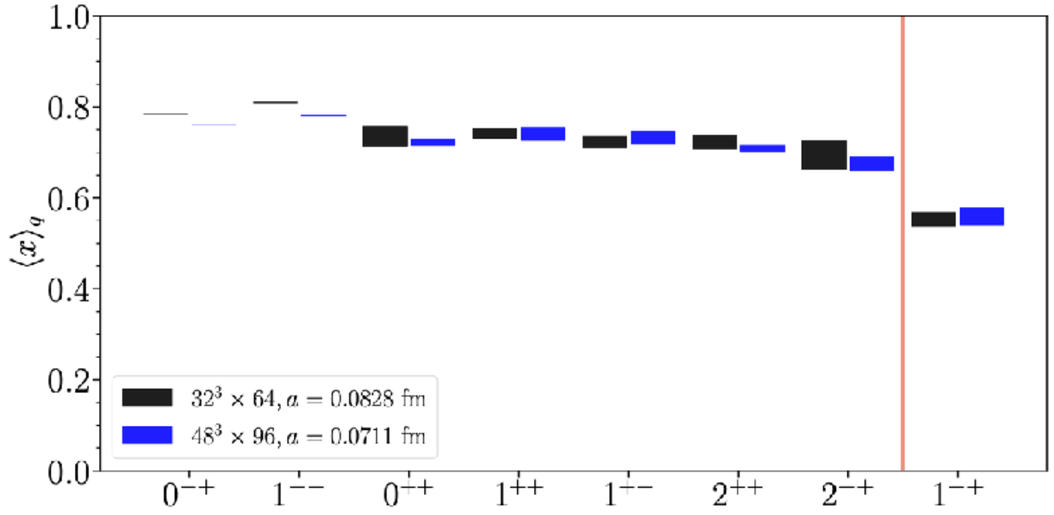
粲偶素质量分解

使用质量分解研究非基态粲偶素的初次尝试：

- 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；
- 奇异量子数(1^{-+})的类粲偶素中粲夸克动量分数明显偏低，可能是海夸克或者胶子的贡献。



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

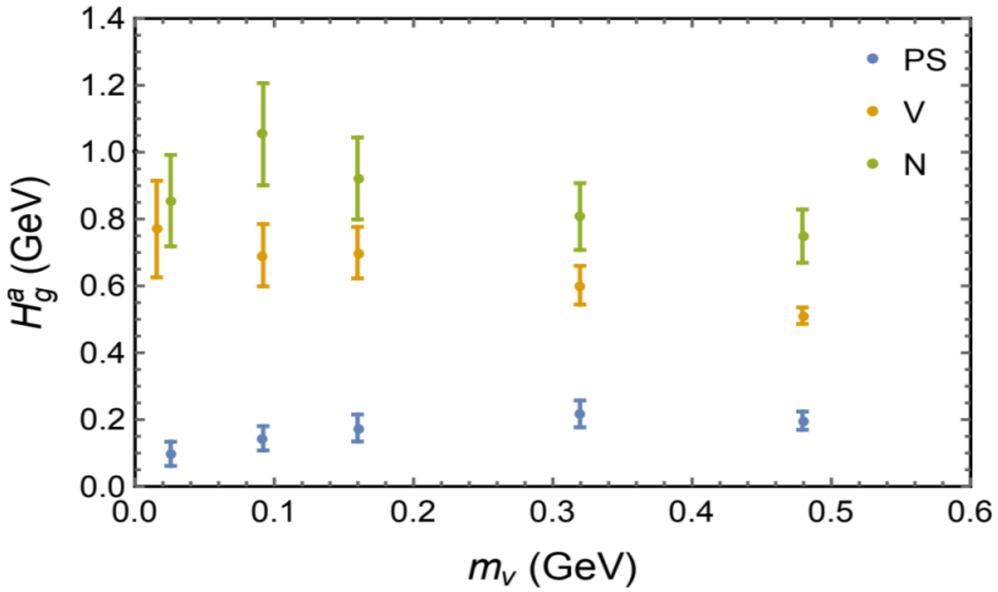


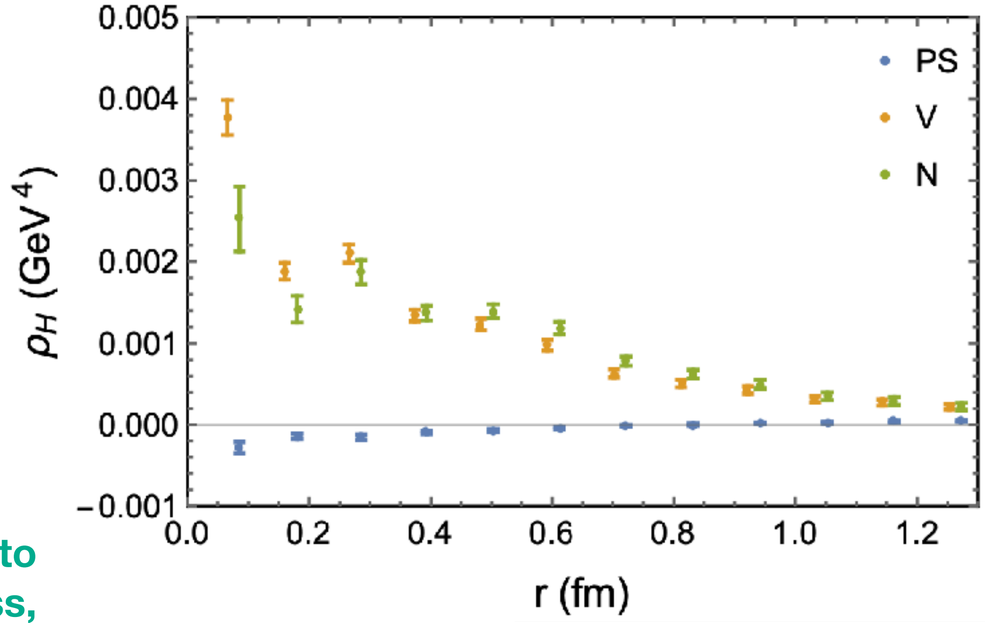
基于中科院战略先导专项C类No. XDC01040100的支持

标度反常

精确计算QCD标度反常贡献的初次尝试：

- 直接计算证实求和规则 $m_H = \langle H_m \rangle_H + \langle H_a \rangle_H$的系数与强子态无关，而胶子矩阵元的系数对应于耦合常数的反常量纲；
- 胶子的标度反常项$\langle H_a^g \rangle_H$确实是核子质量中主要的贡献。
- 胶子标度反常在pion中的分布与其他强子中的情形有显著差异，尤其在强子中心。

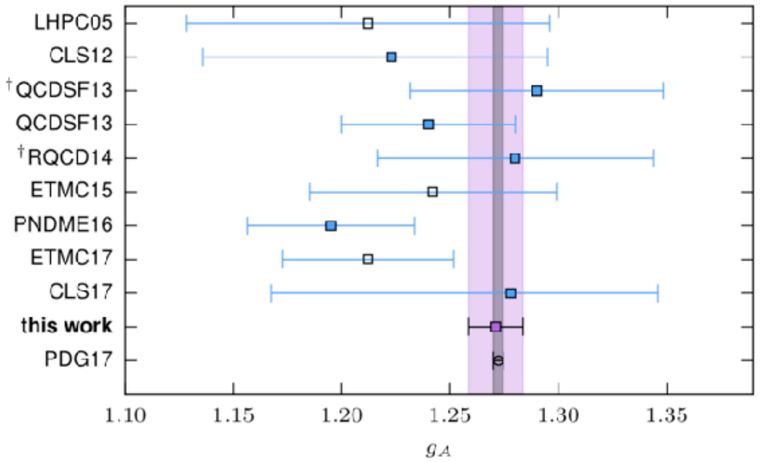




The contribution of QCD trace anomaly to hadron mass,
Fangcheng He, 11/01, 10:30

F. He, P. Sun, **YBY**, χQCD, PRD 104 (2021) 074507

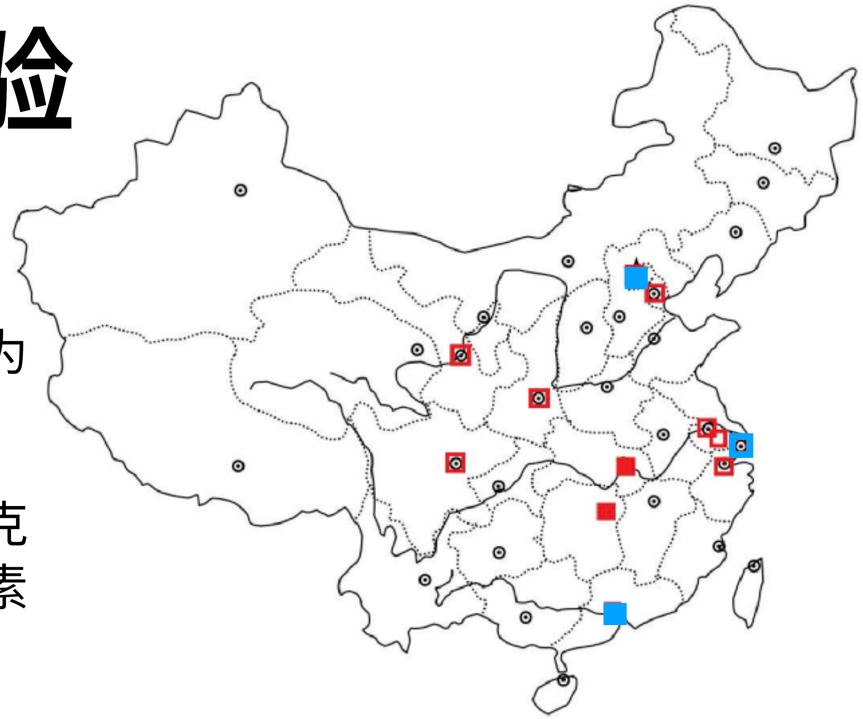
强子结构 与 标准模型精细检验

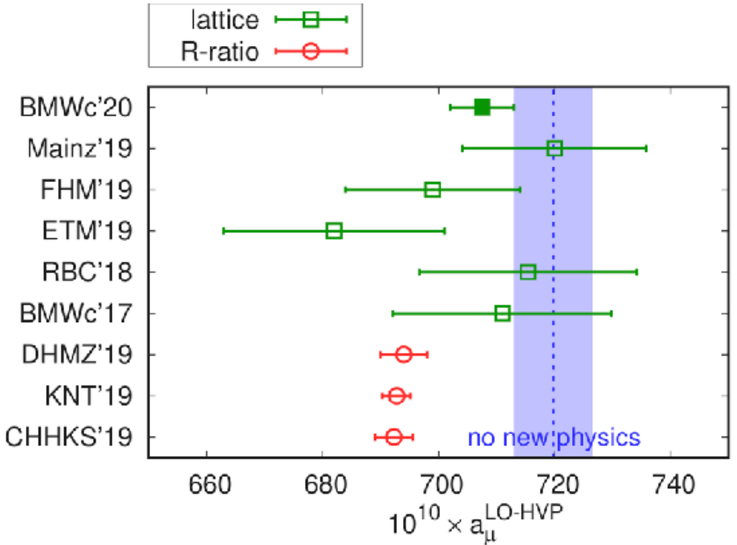


C.C.Chang, et.al. CalLat, Nature 558 (2018) 7708

核子轴矢流耦合强度

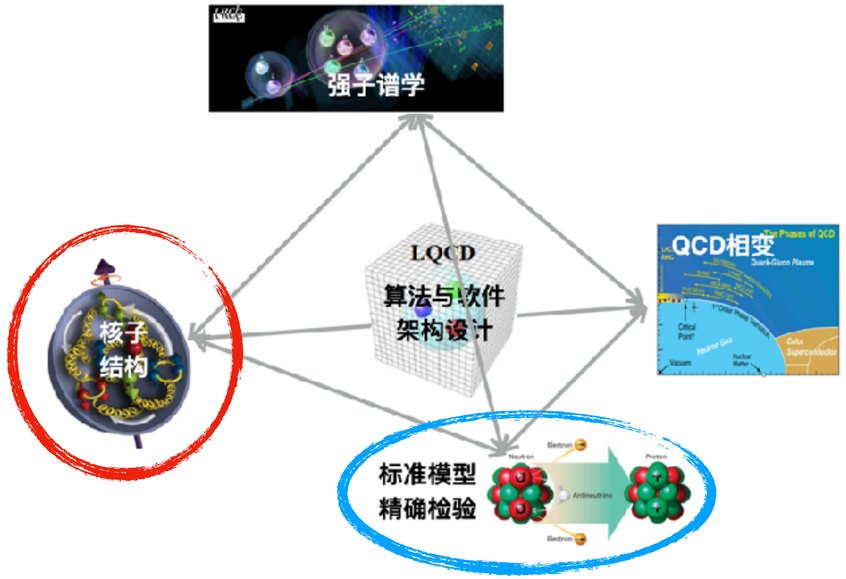
- 成熟的强子结构计算最终会成为精细检验标准模型的有效途径；
- 需要精确控制格距、体积、夸克质量、重整化、激发态等等因素的系统误差。



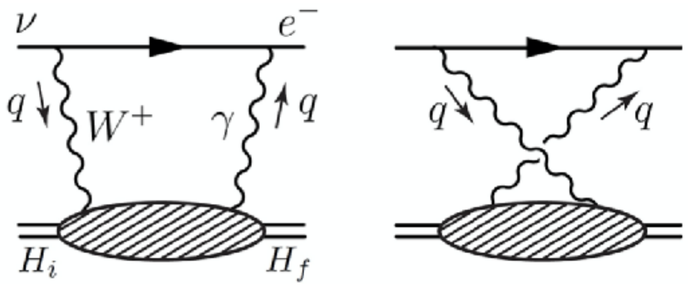


缪子反常磁矩的强子真空极化贡献

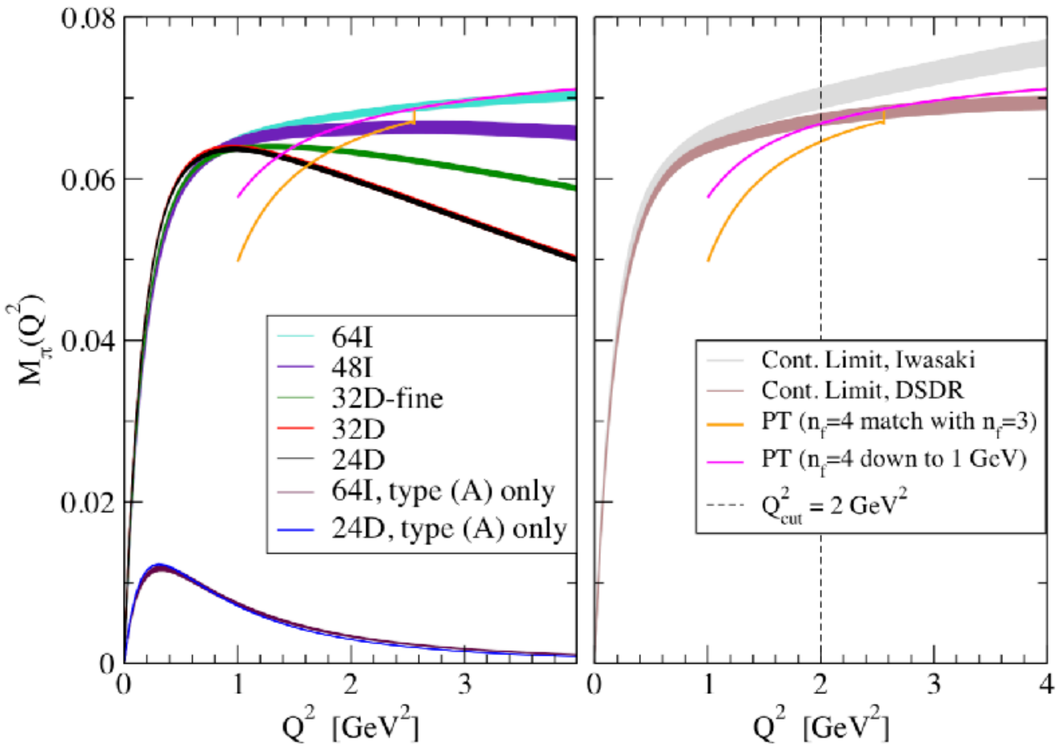
Sz. Borsanyi, et.al. BMWc, Nature 593 (2021) 7857



基于四点函数的CKM矩阵元精确计算



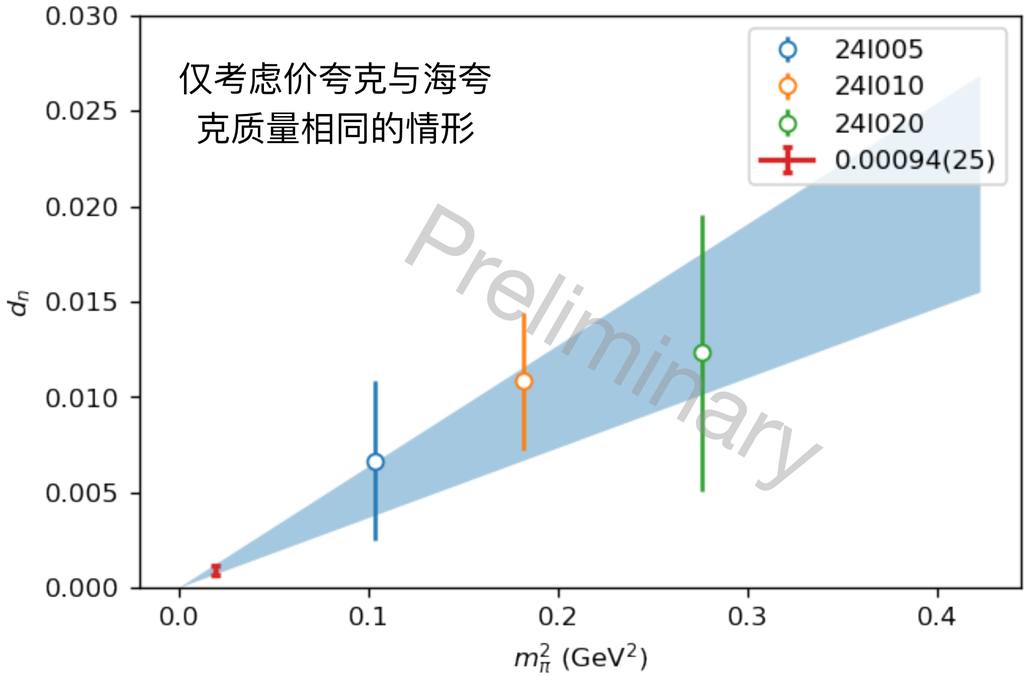
- 多个格距的美国RBC的2+1 domain wall组态
- PKU&Mainz&U. Connecticut
- 电弱Box图的高精度计算，总和误差低至1%;
- 结合格点长程计算和微扰短程计算；
- 预言 $|V_{ud}| = 0.9739(28)_{exp}(5)_{th}$。

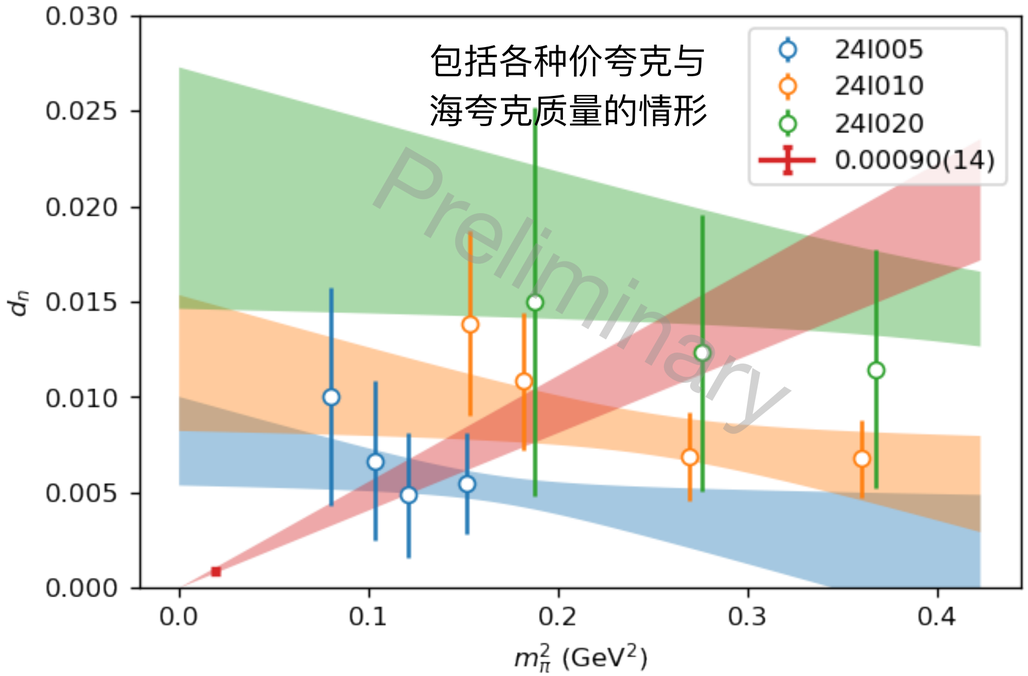


X. Feng et al., PRL124 (2020) 192002

基于手征费米子 θ 项的中子EDM

手征费米子保证了即使在有限格距上的手征极限下也有 $d_n \to 0$。所以可以用较重的夸克质量来研究EDM。





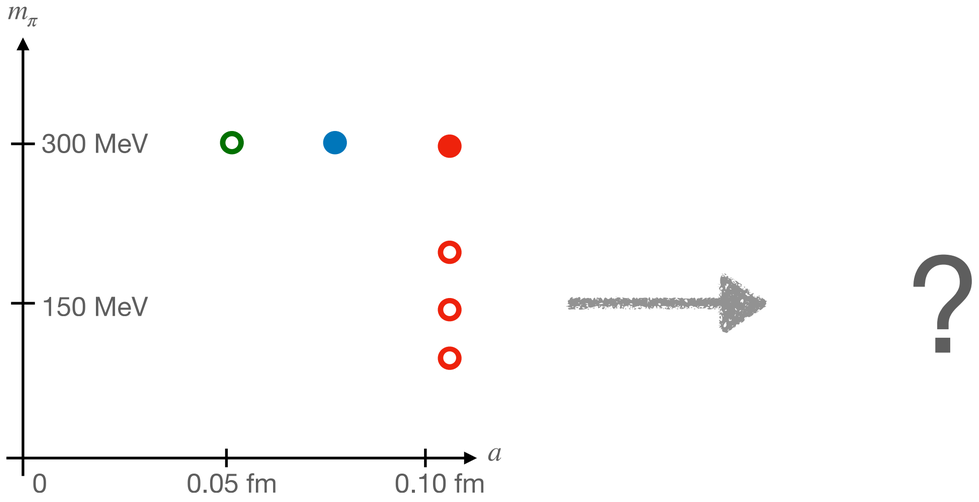
$$d_n^{(PQ)} = \frac{e\,\bar{\theta}\,m_{\rm sea}}{4\pi^2 f^2}\left[F_\pi \log\left(\frac{m_\pi^2}{\mu^2}\right) + F_J \log\left(\frac{m_J^2}{\mu^2}\right)\right] + \bar{\theta}\,\frac{e}{\Lambda_\chi^2}\left[\frac{m_{\rm sea}}{2}\,c(\mu) + d\,\underline{(m_{\rm sea} - m_{\rm val})} + f q_{jl}\,\underline{(m_{\rm sea} - m_{\rm val})}\right]$$

EDM对价夸克与海夸克的依赖有显著差异！

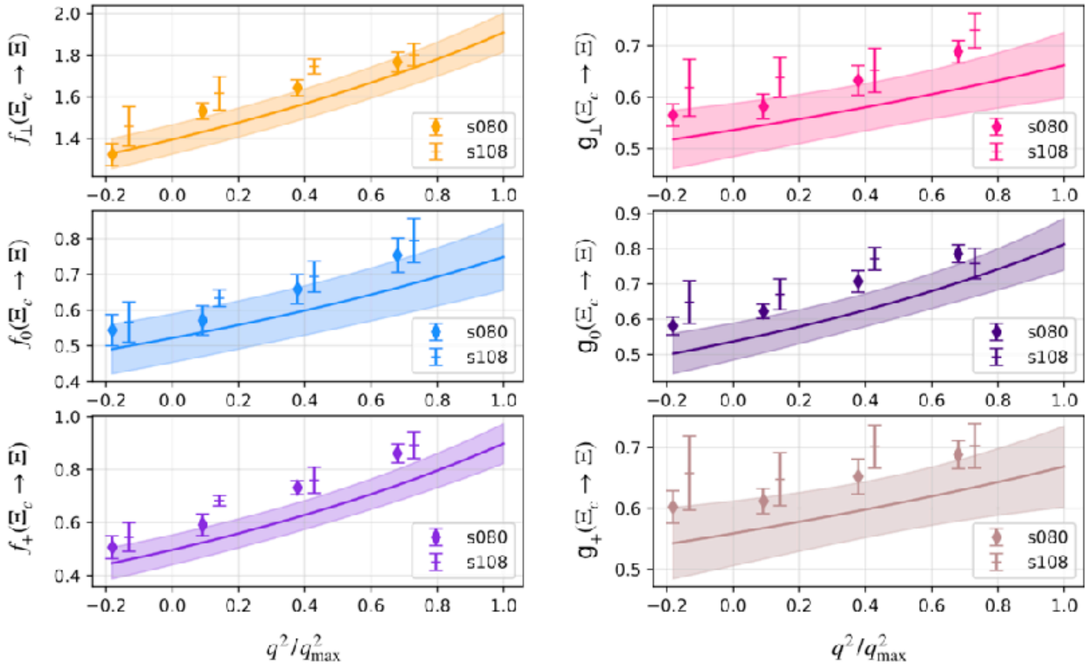
J. Liang et al., χQCD, In preparation

自主的精确检验计算

Weak Decays of Charmed Baryons from LQCD,
Wei Wang, 10/31, 14:00



- 完全自主的2+1味Clover组态，a=0.11/0.08fm;
- 首个关于$\Xi_c \to \Xi$形状因子的理论计算；
- 结合Belle实验，预言$|V_{cs}| = 0.834(127)_{exp}(74)_{th}$；
- 需要进一步控制来自格距和pion质量等方面的系统误差。

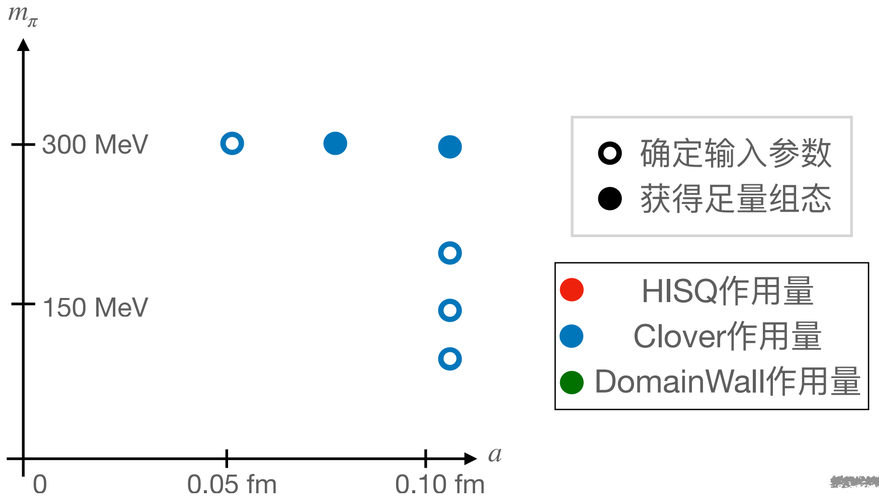


Q.-A. Zhang et al., arXiv:2103.07064

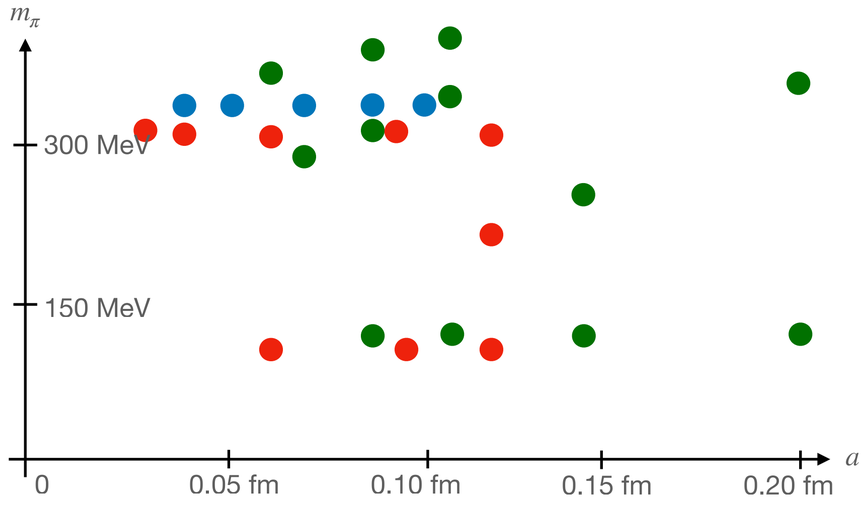
基于中科院战略先导专项C类No. XDC01040100的支持

强子结构 与 软件和数据

自主产生的完整组态



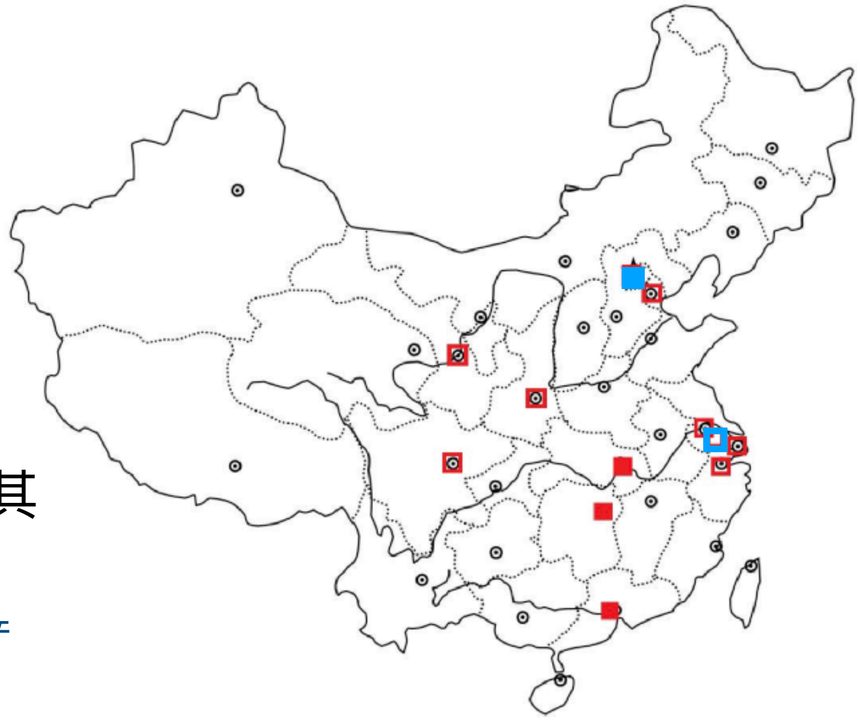
目前获得有限授权的国际组态

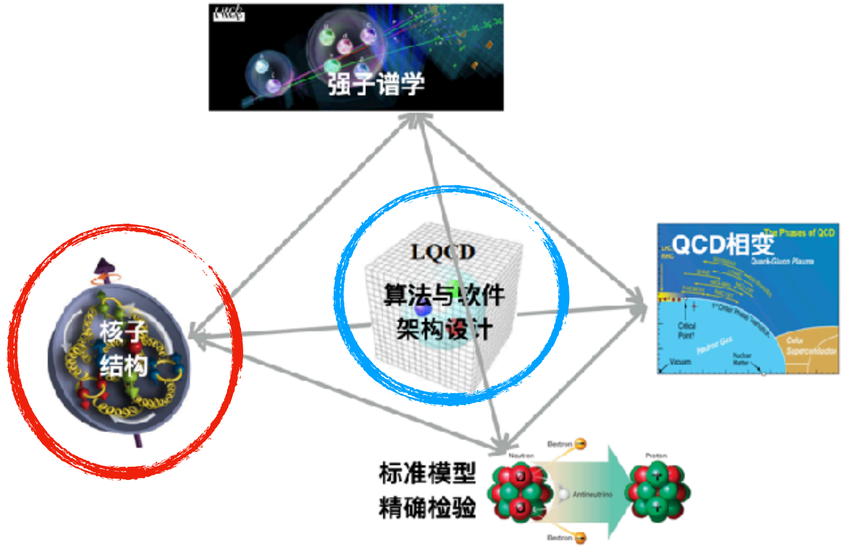


实现(强子结构计算所需的)组态自主化正当其时：

- Clover组态正在产生中；
- DomainWall组态软件已经开源并可以高效运行，但是还需要优化；
- 高效产生HISQ组态理论上可行，但还需要实际调试。

Propagator generation with Chroma+QUDA for various fermion actions,
Kuan Zhang, 11/02, 17:10





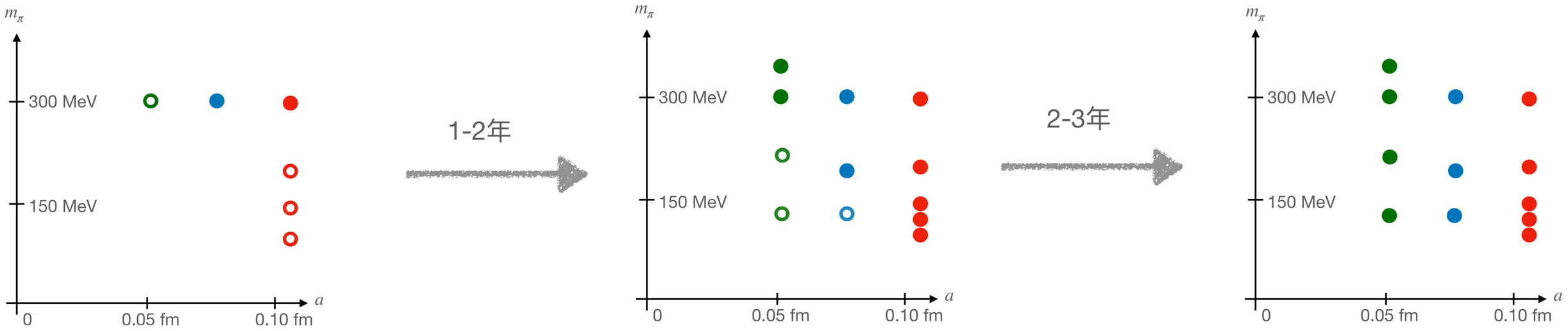
lattice ensemble generation with clover action,
Peng Sun, 11/01, 16:30
Lattice QCD gauge configuration generation at near physical point,
Wei Sun, 11/02, 16:00

格点量子色动力学FLAG国际“绿星”标准

- 组态自主化是计算精度具有国际竞争力的前提；
- 组态参数集合达到绿星标准是用于标准模型精细检验的基础。
- 主要贡献者：孙鹏、刘柳明、杨一玻、孙玮……

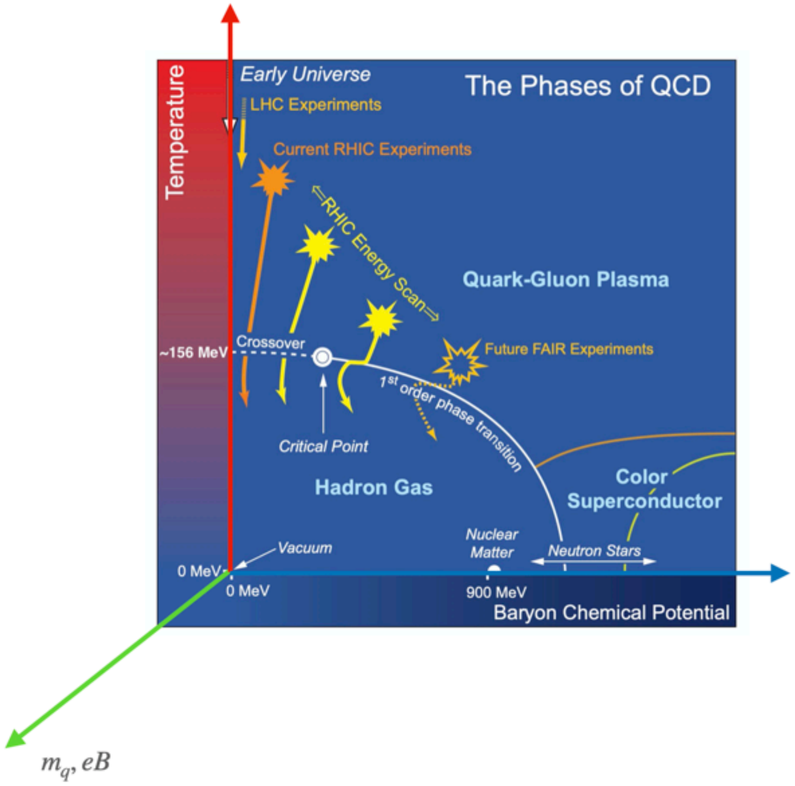
- 三种不同的m_π而且最轻m_π的小于200 MeV，或一个$m_\pi \sim 135$ MeV而另一个$m_\pi < 200$ MeV；
- 三种不同格距a，其中两个$a < 0.1$ fm，而且$(a_{max}/a_{min})^2 \geq 2$；
- $(m_{\pi,\mathrm{min}}/M_{\pi,\mathrm{phys}})^2 \exp\{4 - m_{\pi,\mathrm{min}}L\} < 2$，或者至少三种体积。

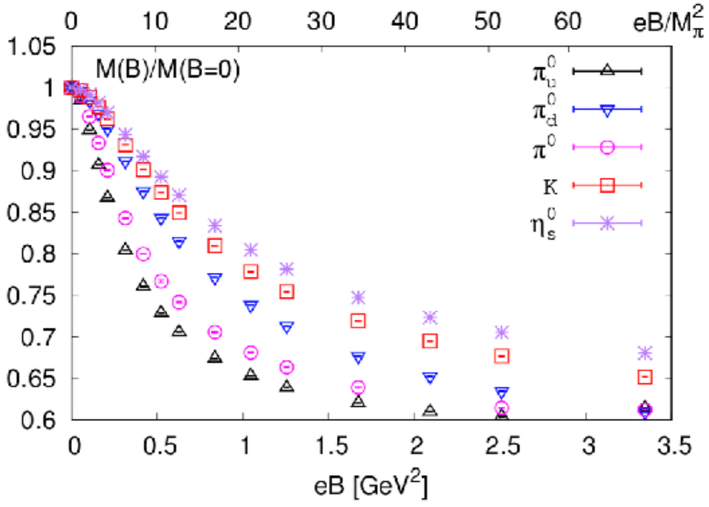
○ 确定输入参数
● 获得足量组态



当前状态　　当前绿星标准的要求　　完整控制连续手征极限系统误差的要求

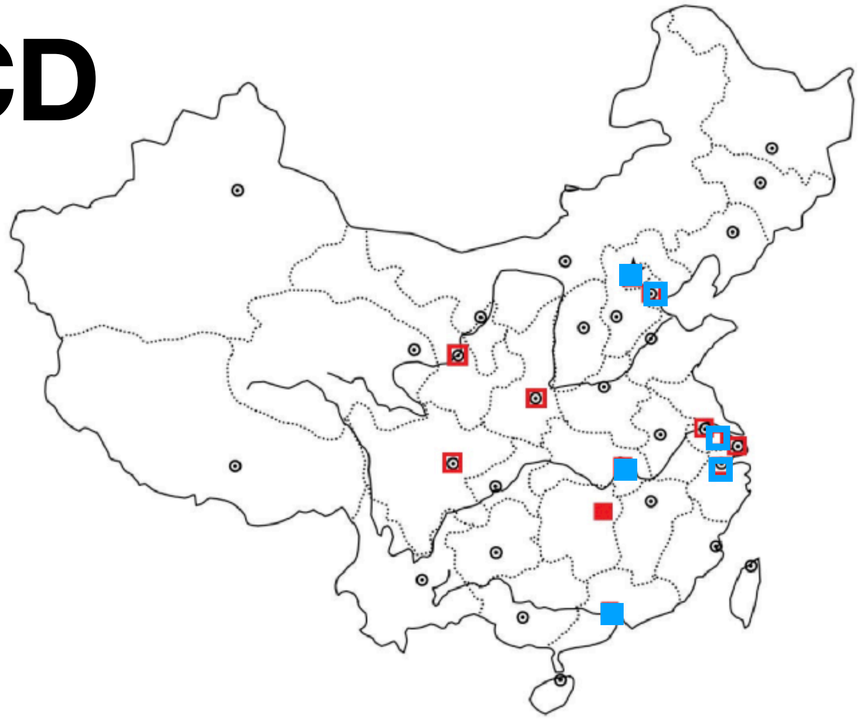
强子结构 与 极端条件下的QCD

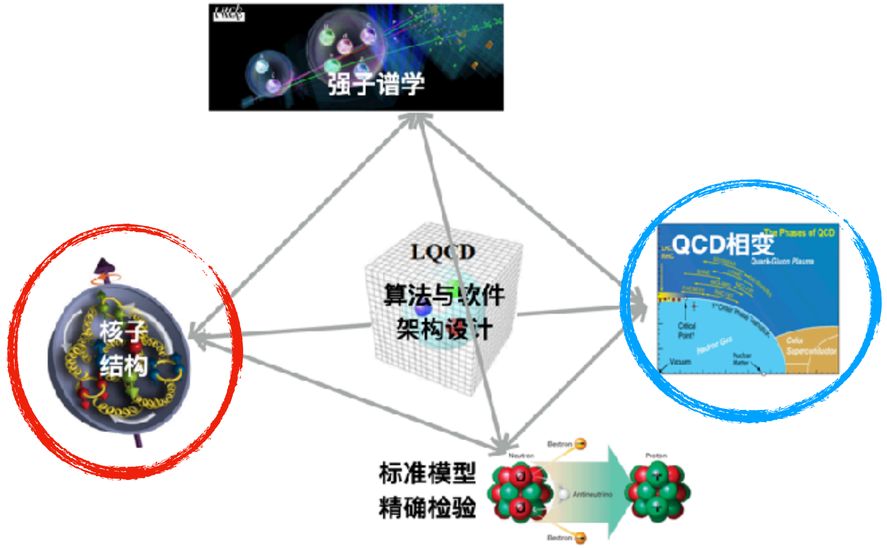




H.T. Ding, et al., PRD 104 (2021) 014505

- 介子质量在强磁场下会有显著变化；
- 这些改变来自于夸克质量/动能，胶子动能/反常中的那些部分？





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，格点QCD的强子结构研究近年来已经取得了长足的进步：

- 成立了LPC合作组针对部分子性质开展系统性研究；
- 为强子质量提供谱学以外的另一个视角；
- 以需求牵引推动QCD组态自主化，控制各种系统误差；
- 力争实现自主化的标准模型精细检验研究，并探索使用强子结构方法研究极端条件QCD的可能性。