



中国格点量子色动力学的  
历史、现状和未来

劉川

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

# 中国格点量子色动力学的 历史、现状和未来

劉川

北京大学物理学院理论物理所

2021 年 10 月 30 日



# 声明



中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

目录

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

## 1 感谢

- 华南师大 (王恩科校长) 的支持
- 高能所的王贻芳所长、协会理事长的支持
- 国内格点届的年轻人的努力筹办 (特别是梁剑、刘柳明)
- 全国关心格点发展的各位同仁多年来的大力支持

## 2 致歉.....



# 提纲



中国格点量子色动力学的历史、现状和未来

目录

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

## 1. 格点 QCD 简要介绍

- 格点量子色动力学 (Lattice QCD) 的位置
- What, Why, Who and How
- 格点研究的特点和优势

## 2. 国内格点研究的历史与现状

- 历史及目前的现状

## 3. 目前我国格点研究聚焦的方向

- 强子谱学
- 强子结构
- QCD 相结构
- 标准模型的精确检验
- 相关的计算软件的开发

陈莹、刘柳明等  
季向东、杨一玻等  
丁亨通等  
冯旭等  
宫明等

## 4. 总结与展望





# 提纲



中国格点量子色动力学的历史、现状和未来

目录

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

- 1. 格点 QCD 简要介绍
  - 格点量子色动力学 (Lattice QCD) 的位置
  - What, Why, Who and How
  - 格点研究的特点和优势
- 2. 国内格点研究的历史与现状
  - 历史及目前的现状
- 3. 目前我国格点研究聚焦的方向
  - 强子谱学
  - 强子结构
  - QCD 相结构
  - 标准模型的精确检验
  - 相关的计算软件的开发
- 4. 总结与展望

陈莹、刘柳明等  
季向东、杨一玻等  
丁亨通等  
冯旭等  
宫明等



# 提纲



中国格点量子色动力学的历史、现状和未来

目录

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

- 1. 格点 QCD 简要介绍
  - 格点量子色动力学 (Lattice QCD) 的位置
  - What, Why, Who and How
  - 格点研究的特点和优势
- 2. 国内格点研究的历史与现状
  - 历史及目前的现状
- 3. 目前我国格点研究聚焦的方向
  - 强子谱学
  - 强子结构
  - QCD 相结构
  - 标准模型的精确检验
  - 相关的计算软件的开发
- 4. 总结与展望

陈莹、刘柳明等  
季向东、杨一玻等  
丁亨通等  
冯旭等  
宫明等



# 1. 格点 QCD 简要介绍

中国格点量子色动力学的历史、现状和未来

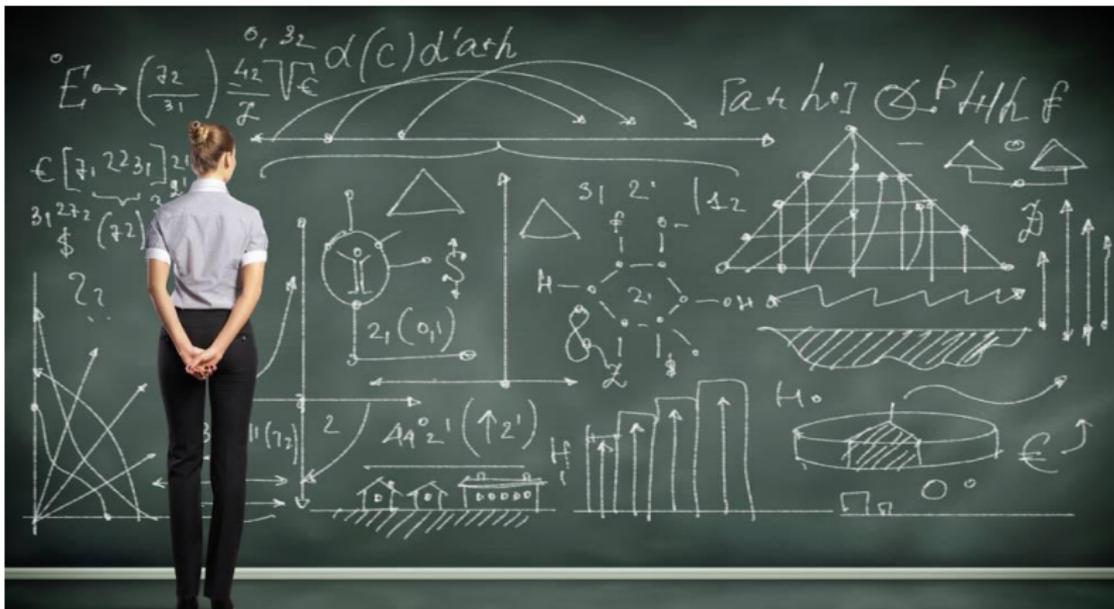
第 III

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望





# 自然界的基本相互作用

中国格点量子色动力学的历史、现状和未来

第三

格点 QCD 简介

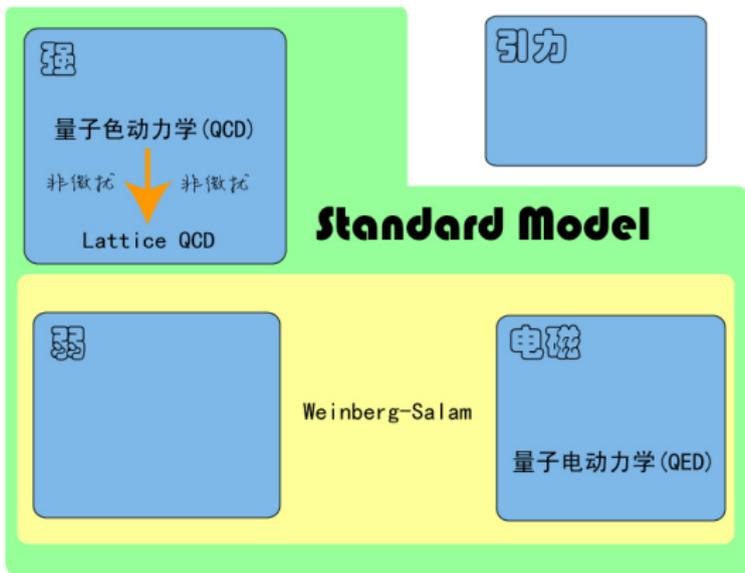
中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

## 核子 (强子)

## 星系、宇宙



## $\beta$ 衰变

## 日常生活



# 量子场论

Theory of almost everything, except gravity

中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

第 11

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的  
历史

国内主要研究方向

总结与展望

## 量子场



粒子

波

波、粒、场之三位一体性 (Trinity)



# 格点上的量子场与 Monte Carlo 模拟

中国格点量子色动力学的历史、现状和未来

第三讲

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

- 定义在四维欧氏格点  $x \in \Lambda$  上的量子场：  
 $\phi(x) = \{q(x), \bar{q}(x), U_\mu(x)\}$       夸克、反夸克、胶子场
- 作用量  $S[\phi] = \sum_{x,y} \bar{q}(x) \mathcal{M}[U_\mu]_{x,y} q(y) + S_g[U_\mu]$
- 配分函数 (生成泛函)  $\mathcal{Z}$  & 物理观测量  $\langle \mathcal{O}[\phi] \rangle$

$$\begin{cases} \mathcal{Z} = \int \mathcal{D}\phi e^{-S[\phi]}, \\ \langle \mathcal{O}[\phi] \rangle = \int \mathcal{D}\phi \mathcal{O}[\phi] e^{-S[\phi]} / \mathcal{Z}. \end{cases} \quad (1)$$

- 费米场 (Grossmann)

$$\mathcal{Z} = \int \mathcal{D}U_\mu e^{-S_g[U_\mu]} \det \mathcal{M}[U_\mu] \equiv \int \mathcal{D}U_\mu e^{-S_{eff}[U_\mu]}. \quad (2)$$

- Monte Carlo 模拟在没有符号问题 ( $e^{-S_{eff}[U_\mu]} \in \mathbb{R} \geq 0$ ) 时是非常有效的数值手段。



# Lattice: What, Why, Who and How

中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

第 11

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

- What: 欧式空间定义的量子场论
- Why: 非微扰的定义和计算
- Who: 格点人 (lattice people  $\in$  hep-lat)
- How: 大规模数值模拟计算

格点 (量子) 场论  $\simeq$  格点 QCD



格点





# Lattice QCD 研究的物理问题

历年国际格点年会主题一览

中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

目录

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

- 1 spectrum & hadronic interactions
- 2 hadron structure
- 3 weak decay & matrix elements
- 4 finite temperature and density
- 5 SM parameters & renormalization
- 6 BSM physics
- 7 Algorithms & machines

强子谱学

强子结构

精确测量

有限温有限密

强子结构

**BSM** 模型

算法机器



# 典型的例子： $\mu$ 子的反常磁矩

中国格点量子色动力学的  
历史、现状和未来

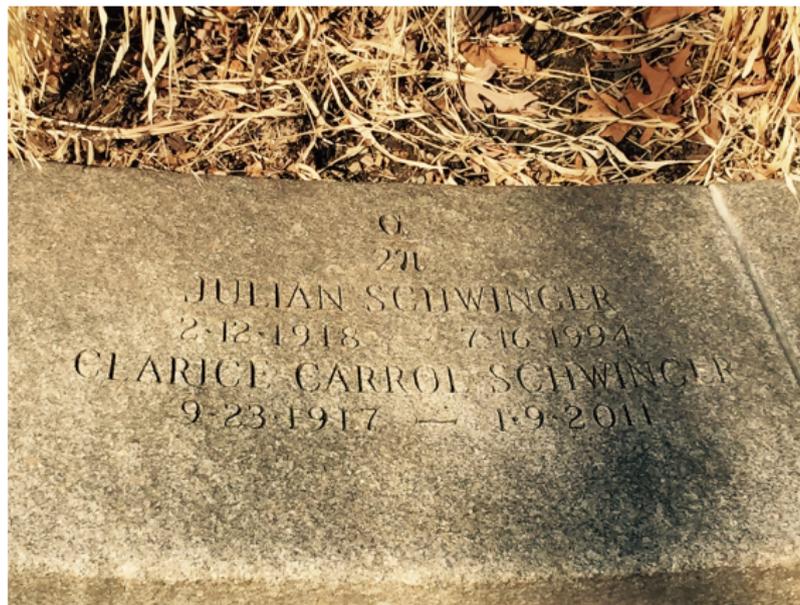
五

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望



参考冯旭、靳路昶、刘朝峰《现代物理知识》  
9月2日推送的文章

用超级计算机破解缪子反常磁矩之谜-格点量子色动力学



# 典型的例子： $a_\mu$

see, WP, arXiv:2006.04800

中国格点量子色动力学的历史、现状和未来

第 11

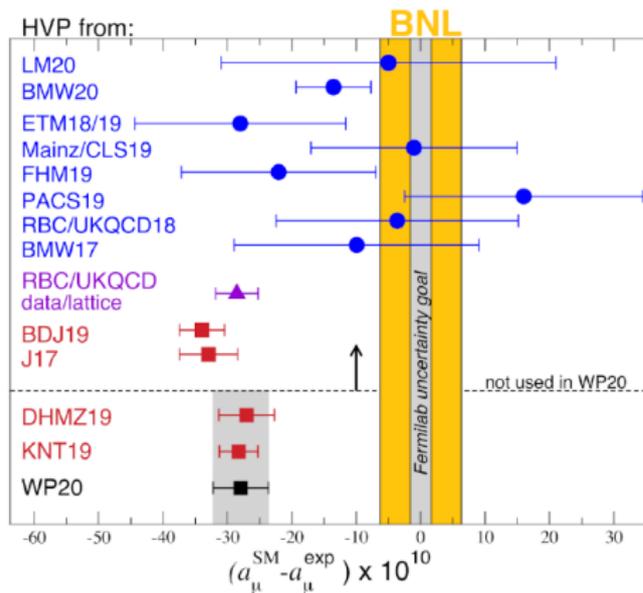
格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

## 👉 4.2 $\sigma$ deviation from SM remaining



Ab-initio lattice QCD(+QED) calculations are maturing

Difficult problem: scales from  $2m_\pi$  to several GeV enter; cross-checks needed at high precision

Hybrid window method restricts scales that enter from lattice/dispersive data

Dispersive,  $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$  (20+ years of experiments)

参见 11 月 2 日上午路昶的报告



# 格点计算可持续改进的原因

中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

第三

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

这是一个全方位、综合的理论研究方法。涉及多个方面：

- 理论上的理解
- 算法的改进
- 机器硬件的改进
- 规模的扩大（人员 + 机器）

☞ 需要多方位的人员合作！



## 2. 中国格点 QCD 的历史

中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

彭川

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望



大体分为 **CLQCD** 之前、之后两个阶段



# 国内格点早年的发展

早年的历史 (1995 年之前)

中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

目录

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

- 上世纪八十-九十年代，国内主要有如下的一些高校、研究所开展格点规范方面的研究
  - 中科院高能所：冼鼎昌、吴济民
  - 北京大学：朱允伦
  - 中山大学：郭硕鸿、罗向前
  - 南开大学：陈天伦
  - 浙江大学：李文铸、董绍静、应和平、张剑波等
  - 四川大学：郑希特
- 早年囿于国内计算机水平的落后，主要的研究集中于理论方法的探讨。
- 中国自古就是一个十分重视计算的国度



# 国内格点早年的发展

早年的历史 (1995 年之前)

中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

目录

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

- 上世纪八十-九十年代，国内主要有如下的一些高校、研究所开展格点规范方面的研究
  - 中科院高能所：冼鼎昌、吴济民
  - 北京大学：朱允伦
  - 中山大学：郭硕鸿、罗向前
  - 南开大学：陈天伦
  - 浙江大学：李文铸、董绍静、应和平、张剑波等
  - 四川大学：郑希特
- 早年囿于国内计算机水平的落后，主要的研究集中于理论方法的探讨。
- 中国自古就是一个十分重视计算的国度



# 计算之重要性

世界级的影响

中国格点量子色动力学的历史、现状和未来

III

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

- 朱载堉 (1536 -1611, 郑王长子) 的故事: <sup>1</sup>

$$2^{1/12} = 1.059463094359295264561825 \quad (3)$$

🗨 这个神秘的数字导致了十二平均律 (12-ET) <sup>2</sup>



<sup>1</sup>注意:  $2^{7/12} \approx 1.4983 \sim 3 : 2$ .

<sup>2</sup>《律学新说》, 朱载堉, 1584.



# 计算之重要性

世界级的影响

中国格点量子色动力学的历史、现状和未来

第 11 讲

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

- 朱载堉 (1536 -1611, 郑王长子) 的故事: <sup>1</sup>

$$2^{1/12} = 1.059463094359295264561825 \quad (3)$$

👉 这个神秘的数字导致了十二平均律 (12-ET) <sup>2</sup>



<sup>1</sup>注意:  $2^{7/12} \approx 1.4983 \sim 3 : 2$ .

<sup>2</sup>《律学新说》，朱载堉，1584.



# 明代的超级计算机

- 朱载堉用于开平方、开立方的 81 档大算盘



中国格点量子色动力学的历史、现状和未来

第 11

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望



# 国内格点早年稍后的发展

九十年代末-本世纪初

中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

刘川

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

- 九十年代末-本世纪初：
  - 新生力量的加入：刘川 (96)、陈莹 (97)、马建平 (98)、刘玉斌 (02)
  - 与国内的相关教师罗向前、张剑波等一道，商讨新世纪国内格点规范的未来发展。
  - 在 2000-2005 间逐步达成了两条共识：
    - 1 尽全力开展数值模拟方面的工作
      - 充分利用已有的工作站、PC 等资源
      - 努力寻找超算的资源：南开之星、国家气象局、九所、不便透露的地方...
    - 2 尽快成立格点合作组



# 国内格点早年稍后的发展

九十年代末-本世纪初

中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

目录

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

## ■ 九十年代末-本世纪初:

- 新生力量的加入: 刘川 (96)、陈莹 (97)、马建平 (98)、刘玉斌 (02)
- 与国内的相关教师罗向前、张剑波等一道, 商讨新世纪国内格点规范的未来发展。
- 在 2000-2005 间逐步达成了两条共识:

### 1 尽全力开展数值模拟方面的工作

- 充分利用已有的工作站、PC 等资源
- 努力寻找超算的资源: 南开之星、国家气象局、九所、不便透露的地方...

### 2 尽快成立格点合作组



# 国内格点早年稍后的发展

九十年代末-本世纪初

中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

目录

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

- 九十年代末-本世纪初：
  - 新生力量的加入：刘川 (96)、陈莹 (97)、马建平 (98)、刘玉斌 (02)
  - 与国内的相关教师罗向前、张剑波等一道，商讨新世纪国内格点规范的未来发展。
  - 在 2000-2005 间逐步达成了两条共识：
- 1 尽全力开展数值模拟方面的工作
  - 充分利用已有的工作站、PC 等资源
  - 努力寻找超算的资源：南开之星、国家气象局、九所、不便透露的地方...
- 2 尽快成立格点合作组



# CLQCD 的成立

中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

刘川

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的  
历史

国内主要研究方向  
总结与展望

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





# 国内 Lattice 的发展的总结

中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

目录

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

时间一晃就是十几年.....

参见全新出炉的

《格点量子色动力学在中国（上）》

《格点量子色动力学在中国（下）》

《现代物理知识》



# 国内 Lattice 的发展的总结

中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

目录

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

时间一晃就是十几年.....

参见全新出炉的

《格点量子色动力学在中国（上）》

《格点量子色动力学在中国（下）》

《现代物理知识》



# 近年来国内格点 QCD 的发展

可喜的变化

中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

第 11 讲

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

## 1 整体队伍的规模的扩大和能力的增强：

- 专门研究格点 QCD 的年轻才俊的加入：刘朝峰、丁亨通、宫明、冯旭、刘柳明、孙鹏、吴佳俊、杨一玻、梁剑、孙玮等
- 国内成长起来的年轻一代：吴良凯、桂龙成、荔宁
- 转而从从事格点研究的人员：王伟、张建辉等 **特别感谢向东在上交大和北大高能中心时的努力！**
- 与格点研究密切相关的人员的增多：郭凤坤、郭志辉等
- 粒子物理核物理界也更加重视格点 QCD 的研究 (国际上、国内两方面)

## 2 计算设施的进一步完善 (两个层次：硬件 + 软件)

- 硬件上：(大算盘 + 中算盘 + 小算盘)
  - 与国家超算中心的合作 (大算盘)
  - 格点专属机器的构建 (中算盘)
- 软件上：(使用方法)
  - LQCD 的专门软件包在各个超计算机型上的开发调试
  - 自主格点组态的产生



# 近年来国内格点 QCD 的发展

可喜的变化

中国格点量子色动力学的  
历史、现状和未来

第 11 讲

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

## 1 整体队伍的规模的扩大和能力的增强:

- 专门研究格点 QCD 的年轻才俊的加入: 刘朝峰、丁亨通、宫明、冯旭、刘柳明、孙鹏、吴佳俊、杨一玻、梁剑、孙玮等
- 国内成长起来的年轻一代: 吴良凯、桂龙成、荔宁
- 转而从从事格点研究的人员: 王伟、张建辉等 **特别感谢向东在上交大和北大高能中心时的努力!**
- 与格点研究密切相关的人员的增多: 郭凤坤、郭志辉等
- 粒子物理核物理界也更加重视格点 QCD 的研究 (国际上、国内两方面)

## 2 计算设施的进一步完善 (两个层次: 硬件 + 软件)

- 硬件上: (大算盘 + 中算盘 + 小算盘)
  - 与国家超算中心的合作 (大算盘)
  - 格点专属机器的构建 (中算盘)
- 软件上: (使用方法)
  - LQCD 的专门软件包在各个超计算机型上的开发调试
  - 自主格点组态的产生



# 国内超算资源的发展

大算盘们...

中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

目录

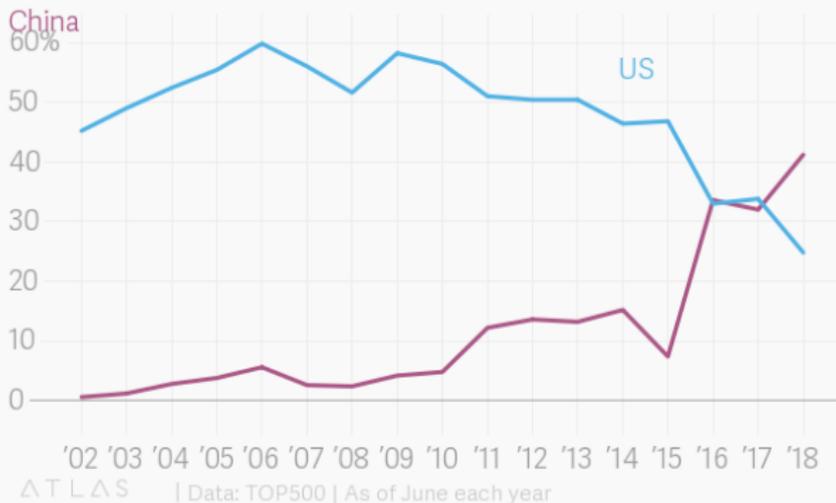
格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

Share of world's fastest 500 supercomputers, by country



- LQCD 是国际上公认的计算密集型研究之一；
- 我国超算资源近十几年年来的爆发式增长 (图片来自 Top500 相关网页<sup>3</sup>的介绍)。

<sup>3</sup>参见 Top500: <https://en.wikipedia.org/wiki/TOP500>



# 国内超算资源的发展

中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

目录

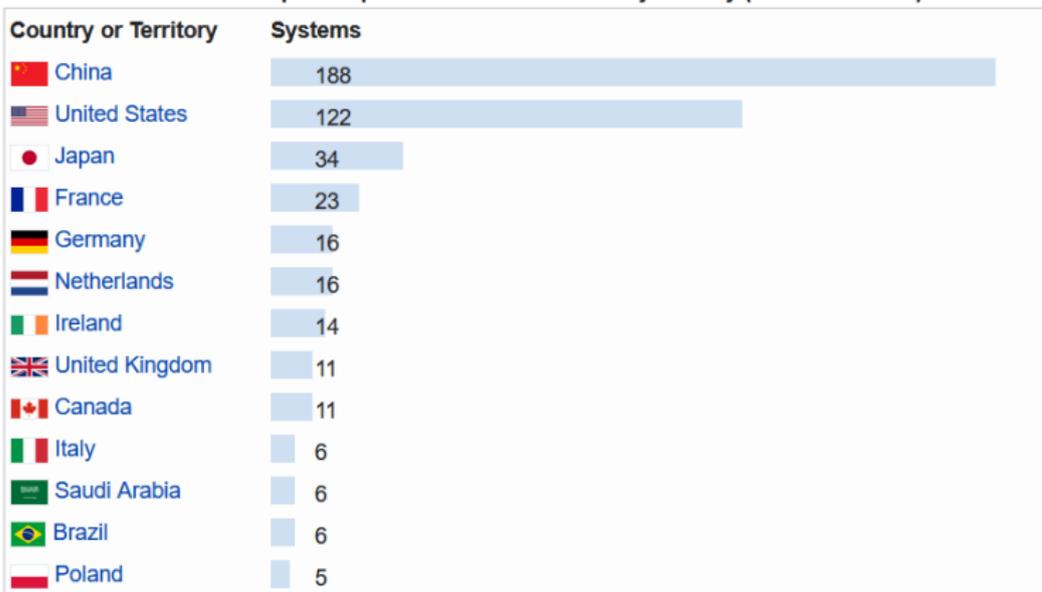
格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

Distribution of supercomputers in the TOP500 list by country (as of June 2021)<sup>[40]</sup>



■ top500 中各国所占的比例



# 国内超算资源的发展

中国格点量子色动力学的历史、现状和未来



格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

Top 10 positions of the 57th TOP500 in June 2021<sup>[33][needs update]</sup>

Rank (previous)	Rmax (PFLOPS)	Name	Model	CPU cores	Accelerator (e.g. GPU cores)	Interconnect	Manufacturer	Site country
1	442,010 537,212	Fugaku	Supercomputer Fugaku	158,976 × 48 A64FX @2.2 GHz	0	Tofu interconnect D	Fujitsu	RIKEN Center for Computational Science ● Japan
2▼ (1)	148,600 200,795	Summit	IBM Power System AC922	9,216 × 22 POWER9 @3.07 GHz	27,648 × 80 Tesla V100	InfiniBand EDR	IBM	Oak Ridge National Laboratory United States
3▼ (2)	94,640 125,712	Sierra	IBM Power System S922LC	8,640 × 22 POWER9 @3.1 GHz	17,280 × 80 Tesla V100	InfiniBand EDR	IBM	Lawrence Livermore National Laboratory United States
4▼ (3)	93,015 125,436	Sunway TaihuLight	Sunway MPP	40,960 × 260 SW26010 @1.45 GHz	0	Sunway <sup>[24]</sup>	NRCC	National Supercomputing Center Wuxi China <sup>[24]</sup>
5▲ (new)	64,590 89,795	Perimutter	HP	7 × 64 Epyc 7763 @2.45 GHz	7 × 108 Ampere A100	Slingshot-10	Nvidia	NERSC United States
6▼ (5)	63,460 79,215	Selene	Nvidia	1,120 × 64 Epyc 7742 @2.25 GHz	4,480 × 108 Ampere A100	Mellanox HDR Infiniband	Nvidia	Nvidia United States
7▼ (6)	61,445 100,679	Tianhe-2A	TH-IVB-FEP	35,584 × 12 Xeon E5-2692 v2 @2.2 GHz	35,584 × 128 Matrix-2000 <sup>[35]</sup>	TH Express-2	NUDT	National Supercomputer Center Guangzhou China
8▼ (7)	44,120 70,980	JUWELS (booster module) <sup>[36][37]</sup>	BullSequana XH2000	1,872 × 24 AMD Epyc 7402 @2.8 GHz	3,744 × 108 Ampere A100	Mellanox HDR Infiniband	Atos	Forschungszentrum Jülich Germany
9▼ (8)	35,450 51,721	HPC5	Dell	3,640 × 24 Xeon Gold 6252 @2.1 GHz	7,280 × 80 Tesla V100	Mellanox HDR Infiniband	Dell EMC	Eni Italy
10▼ (9)	23,516 38,746	Frontera	Dell C6420	16,016 × 28 Xeon Platinum 8280 @2.7 GHz (subsystems with e.g. POWER9 CPUs and Nvidia GPUs were added after official benchmarking <sup>[42]</sup> )	0	InfiniBand HDR	Dell EMC	Texas A&M University United States

■ 目前世界上公布的前 10 个计算系统





# 人员和专用机器的分布情况

中国格点量子色动力学的  
历史、现状和未来

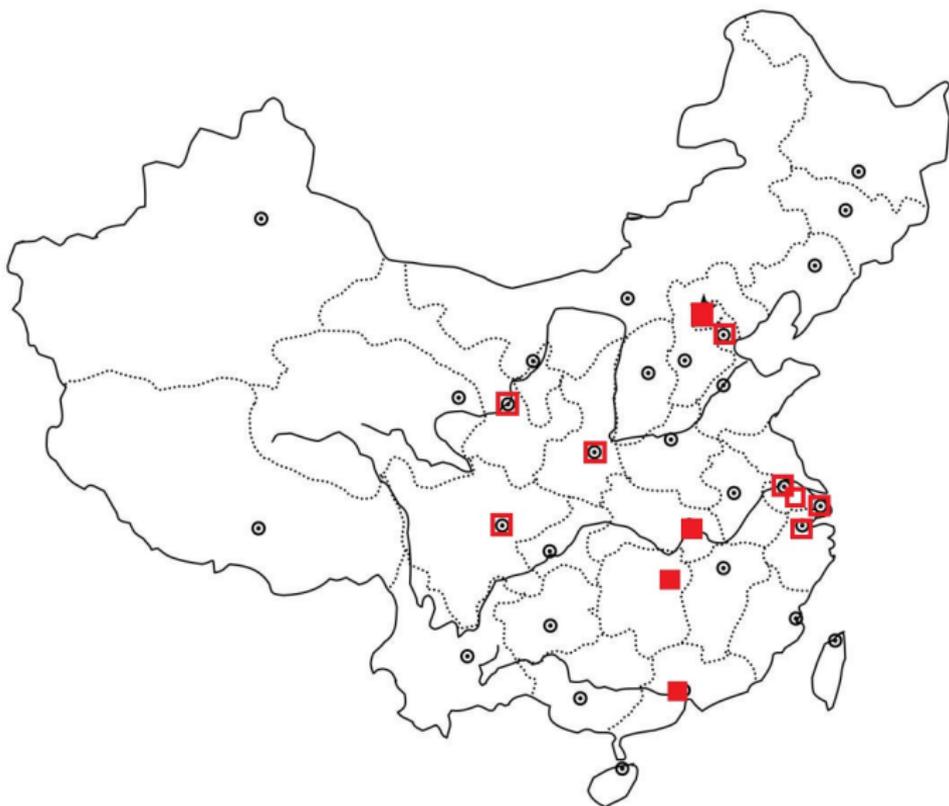
目录

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望





# 国内 Lattice 的发展情况

## 总结

中国格点量子色动力学的历史、现状和未来

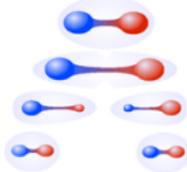
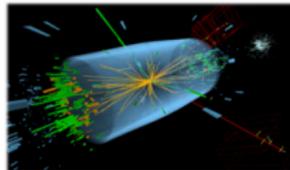
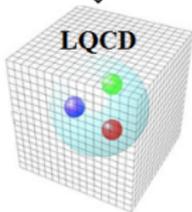
张川

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望



Confinement

理解色禁闭



### 3. 国内 LQCD 主要研究方向

中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

卷三

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望



五大基本研究方向，均与实验密切相关！



# 国内 Lattice 研究的主要方向

及其相关的实验设施

中国格点量子色动力学的历史、现状和未来

目录

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

## 利用超算数值求解与色禁闭相关的问题

### 1 强子谱学

BESIII, LHCb

- 传统强子态: 介子  $q\bar{q}$ 、重子  $= qqq$
- 奇特强子态: 胶球、四夸克、五夸克

### 2 核子结构

EicC, EIC

- 质子的结构:  $uud + g + q\bar{q} + \dots$
- 但是它们究竟是如何构成质子的?

### 3 QCD 相结构

LHC, RHIC

- 低温低密区强子相高温高密区的 QGP 区
- 寻找相变临界点

### 4 SM 精确检验/BSM 物理寻找

BESIII, Belle2, FNAL

- 标准模型能否给出精确的理论预言, 往往取决于与强相互作用相关的非微扰强子矩阵元能否被精确的计算。
- CP 破坏、 $a_\mu$ 、B 反常等

### 5 相关算法与软件研发

国内各超算中心



更加详细和丰富的内容

中国格点量子色动力学的历史、现状和未来

五

格点 QCD 简介

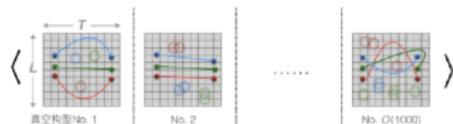
中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

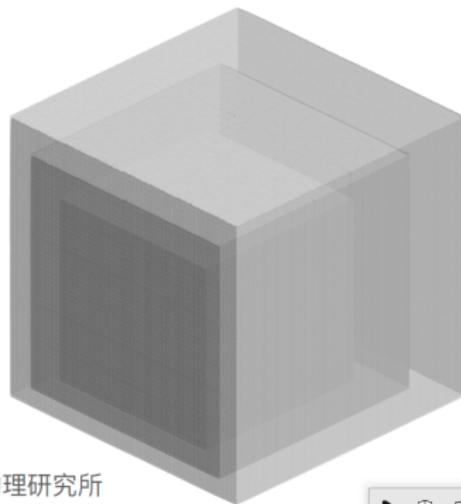
总结与展望

中国物理学会高能物理分会第十三届全国粒子物理学术会议 (2021)

# 格点QCD研究进展



杨一玻  
中国科学院理论物理研究所



参考今年杨一玻 8 月 19 日在第十三届粒子物理学术会议上的大会报告



# 强子谱学

$\eta_c$  中赝标胶球成分 arXiv:2107.12749

中国格点量子色动力学的历史、现状和未来

第 III

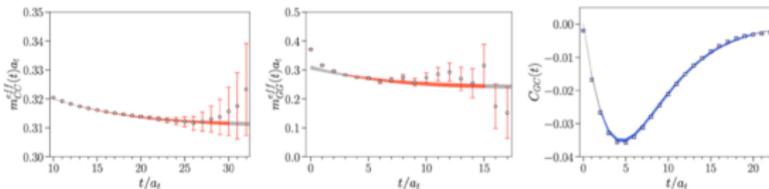
格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

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



- 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  $\eta_c$  的质量和衰变宽度。

**1** 这将有助于澄清关于  $\eta_c$  的宽度中多年遗留的问题...



# 强子谱学

双三粲重子的散射参数的确定 PRL 127 (2021) 072003

中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

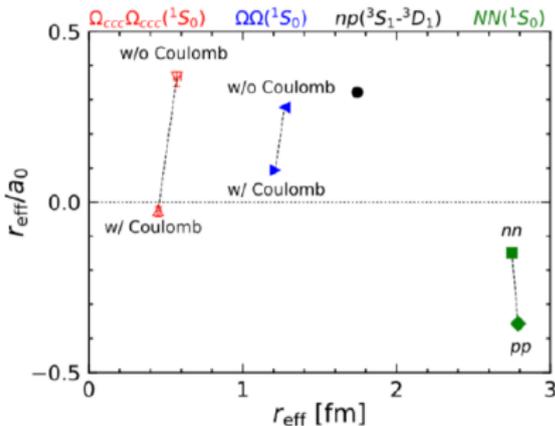
卷 III

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望



- 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。

- 1 格点 QCD 抽取有效的势
- 2 该系统十分接近所谓的 unitary limit

更多谱学方面的研究参见陈莹、柳明等人的报告



# 核子结构

## PDF 相关的格点计算与 LaMET

中国格点量子色动力学的历史、现状和未来

第三

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

# 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 Schaefler (U. Reg.)

Wei Wang (SJTU)

Yi-Bo Yang (ITP/CAS, 发言人)

Jian-hui Zhang (BNU)

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)

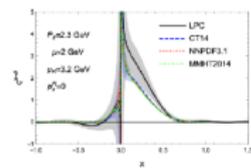
Kuan Zhang (ITP/CAS)

Qi-An Zhang (SJTU)

.....

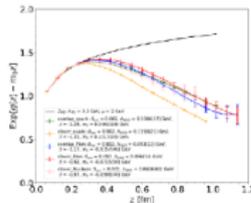
基于中科院战略先导专项C类No. XDC01040100的支持

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



准光锥关联函数的自重整化

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

Towards precision calculations of partonic structure of hadrons

张健科, Tsu, 10.461 - 11.000

Distribution Amplitudes of  $K^*$  and  $\phi$  from Lattice QCD

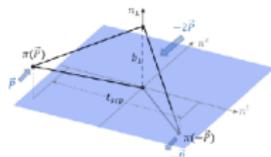
申俊, Tsu, 10.461 - 11.000

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

张健科, Tsu, 10.461 - 11.000

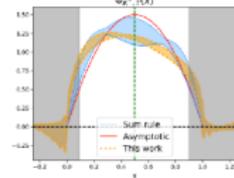
Lattice QCD calculations of TMD soft function through large-momentum effective theory

张健科, Tsu, 10.461 - 11.000



胶子的横向分布软函数

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



胶子的光锥分布函数

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

■ 参见随后向东的报告!



# QCD 相结构

中国格点量子色动力学的历史、现状和未来

第 11

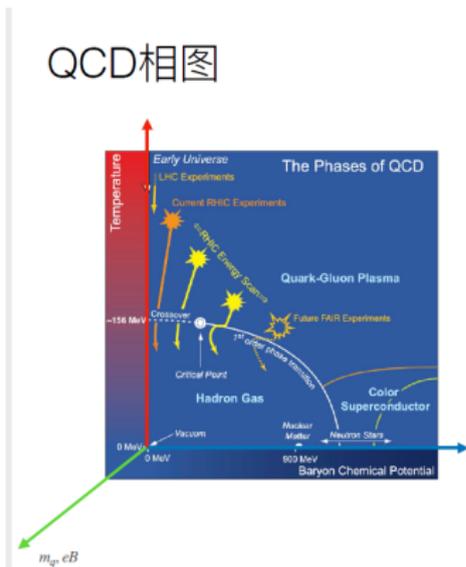
格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

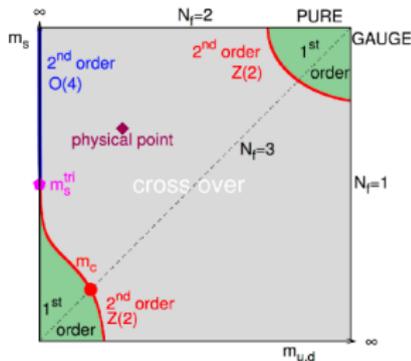
国内主要研究方向

总结与展望

## QCD相图



- 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？



■ 参见今天下午亨通的报告



# QCD 相结构

举一个例子...

中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

卷 III

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

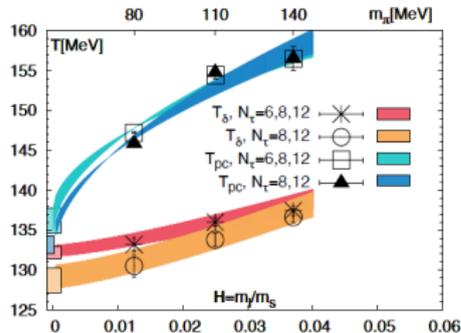
国内主要研究方向

总结与展望

## 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



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

H.-T. Ding, Nucl.Phys.A 1005 (2021) 121840

- 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:

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

NSC 依托华中师大核科学计算中心完成  
Nuclear Science Computing Center at CCNU

更多的例子请参见今天下午亨通的报告



# SM 精确检验/BSM 物理寻找

## 对 CKM 矩阵元的限制

中国格点量子色动力学的历史、现状和未来

第 11

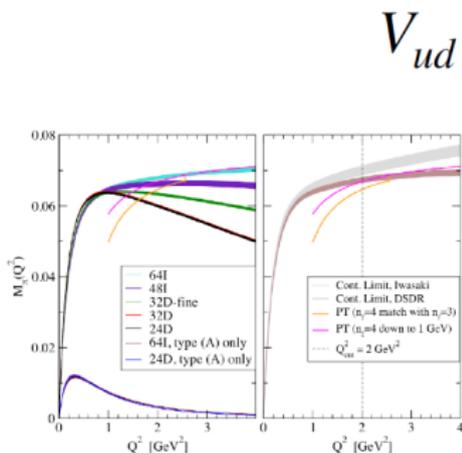
格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

- 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

### 1 CKM 矩阵元的限制

更多的例子请参见今天下午冯旭的报告



# 相关的算法研究

中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

卷三

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

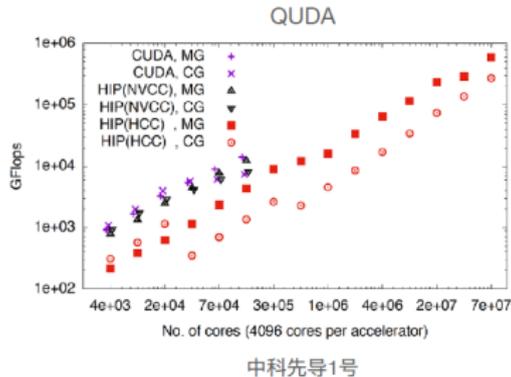
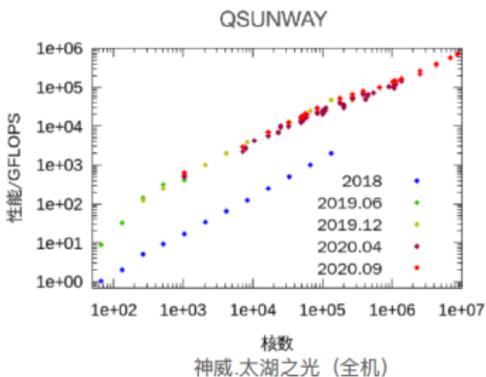
国内主要研究方向

总结与展望

## 1 太湖等机器上软件的研发 (取自一玻 8.19 报告)

软件:

国产异构超算上的性能



更多的信息参见今天下午宫明的报告



## 4. 总结与展望



中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

目录

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

- 1 简单介绍了 Lattice QCD(地位、作用、特点)
- 2 回顾了国内格点研究的历史、简介了其现状
- 3 安利了五大研究方向的近期进展 (请关注专门报告)

目前的人员和计算资源情况都达到了  
历史上最好的时期  
希望得到国内同行的大力支持和关注!

请各位同仁批评指正!







## 4. 总结与展望



中国格点量子色动力学  
历史、现状和未来

目录

格点 QCD 简介

中国格点 QCD 的历史

国内主要研究方向

总结与展望

- 1 简单介绍了 Lattice QCD(地位、作用、特点)
- 2 回顾了国内格点研究的历史、简介了其现状
- 3 安利了五大研究方向的近期进展 (请关注专门报告)

目前的人员和计算资源情况都达到了  
**历史上最好的时期**  
希望得到国内同行的大力支持和关注!

请各位同仁批评指正!

