



中国格点 QCD 的  
发展及未来

劉川

从 QCD 到格点  
QCD

中国的格点 QCD

总结与展望

# 中国格点 QCD 的发展及未来

QCD 五十年论坛

劉川

北京大学物理学院理论物理所

2023 年 8 月 12 日



# 声明



中国格点 QCD 的发展及未来



从 QCD 到格点 QCD

中国的格点 QCD

总结与展望

## 50 Years of Quantum Chromodynamics

Franz Gross<sup>a,1,2</sup>, Eberhard Klempt<sup>b,3</sup>,

Stanley J. Brodsky<sup>c,4</sup>, Andrzej J. Buras<sup>c,5</sup>, Volker D. Burkert<sup>c,1</sup>, Gudrun Heinrich<sup>c,6</sup>, Karl Jakobs<sup>c,7</sup>, Curtis A. Meyer<sup>c,8</sup>, Kostas Orginos<sup>c,1,2</sup>, Michael Strickland<sup>c,9</sup>, Johanna Stachel<sup>c,10</sup>, Giulia Zanderighi<sup>c,11,12</sup>,

Nora Brambilla<sup>5,12,13</sup>, Peter Braun-Munzinger<sup>10,14</sup>, Daniel Britzger<sup>11</sup>, Simon Capstick<sup>15</sup>, Tom Cohen<sup>16</sup>, Volker Crede<sup>15</sup>, Martha Constantinou<sup>17</sup>, Christine Davies<sup>18</sup>, Luigi Del Debbio<sup>19</sup>, Achim Denig<sup>20</sup>, Carleton DeTar<sup>21</sup>, Alexandre Deur<sup>1</sup>, Yuri Dokshitzer<sup>22,23</sup>, Hans Günter Dosch<sup>10</sup> Jozef Dudek<sup>1,2</sup>, Monica Dunford<sup>24</sup>, Evgeny Epelbaum<sup>25</sup>, Miguel A. Escobedo<sup>26</sup>, Harald Fritzsch<sup>d,27</sup>, Kenji Fukushima<sup>28</sup>, Paolo Gambino<sup>11,29</sup>, Dag Gillberg<sup>30,31</sup>, Steven Gottlieb<sup>32</sup>, Per Grafstrom<sup>33</sup>, Massimiliano Grazzini<sup>34</sup>, Boris Grube<sup>1</sup>, Alexey Guskov<sup>35</sup>, Toru Iijima<sup>36</sup>, Xiangdong Ji<sup>16</sup>, Frithjof Karsch<sup>37</sup>, Stefan Kluth<sup>11</sup>, John B. Kogut<sup>38,39</sup>, Frank Krauss<sup>40</sup>, Shunzo Kumano<sup>41,42</sup>, Derek Leinweber<sup>43</sup>, Heinrich Leutwyler<sup>44</sup>, Hai-Bo Li<sup>45</sup>, Yang Li<sup>46</sup>, Bogdan Malaescu<sup>47</sup>, Chiara Mariotti<sup>48</sup>, Pieter Maris<sup>49</sup>, Simone Marzani<sup>50</sup>, Wally Melnitchouk<sup>1</sup>, Johan Messchendorp<sup>51</sup>, Harvey Meyer<sup>20</sup>, Ryan Edward Mitchell<sup>52</sup>, Chandan Mondal<sup>53</sup>, Frank Nerling<sup>51,54,55</sup>, Sebastian Neubert<sup>3</sup>, Marco Pappagallo<sup>56</sup>, Saori Pastore<sup>57</sup>, José R. Peláez<sup>58</sup>, Andrew Puckett<sup>59</sup>, Jianwei Qiu<sup>1,2</sup>, Klaus Rabbertz<sup>60</sup>, Alberto Ramos<sup>61</sup>, Patrizia Rossi<sup>1,62</sup>, Anar Rustamov<sup>51,63</sup>, Andreas Schäfer<sup>64</sup>, Stefan Scherer<sup>65</sup>, Matthias Schindler<sup>66</sup>, Steven Schramm<sup>67</sup>, Mikhail Shifman<sup>68</sup>, Edward Shuryak<sup>69</sup>, Torbjörn Sjöstrand<sup>70</sup>, George Sterman<sup>71</sup>, Iain W. Stewart<sup>72</sup>, Joachim Stroth<sup>51,54,55</sup>, Eric Swanson<sup>73</sup>, Guy F. de Téramond<sup>74</sup>, Ulrike Thoma<sup>3</sup>, Antonio Vairo<sup>75</sup>, Danny van Dyk<sup>40</sup>, James Vary<sup>49</sup>, Javier Virto<sup>76,77</sup>, Marcel Vos<sup>78</sup>, Christian Weiss<sup>1</sup>, Markus Wobisch<sup>79</sup> Sau Lan Wu<sup>80</sup>, Christopher Young<sup>81</sup>, Feng Yuan<sup>82</sup>, Xingbo Zhao<sup>53</sup>, Xiaorong Zhou<sup>46</sup>

2212.11107

- 更多关于中国格点 QCD 的详细内容参见：  
格点量子色动力学在中国，陈莹等，现代物理知识，  
2020.6



- 1. 从 QCD 到格点 QCD
  - QCD 作为规范理论
  - QCD 与色禁闭
  - 格点 QCD 的诞生及发展
- 2. 中国的格点 QCD
  - 几代中国格点人
  - 中国格点合作组的成立
  - 五大特色方向
- 3. 总结和展望



# 1. 从 QCD 到格点 QCD

作为规范理论的 QCD 以及渐进自由

中国格点 QCD 的  
发展及未来

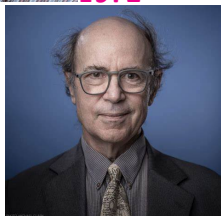
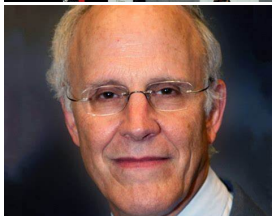
刘川

从 QCD 到格点  
QCD

中国的格点 QCD  
总结与展望



1972



1973

- 作为规范理论的 QCD 诞生于 1972-1973 年



# 格点 QCD 理论框架的提出—解决禁闭问题

中国格点 QCD 的发展及未来

新刊

从 QCD 到格点 QCD

中国的格点 QCD

总结与展望



PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 10, NUMBER 8

15 OCTOBER 1974

## Confinement of quarks\*

Kenneth G. Wilson

Laboratory of Nuclear Studies, Cornell University, Ithaca, New York 14850

(Received 12 June 1974)

A mechanism for total confinement of quarks, similar to that of Schwinger, is defined which requires the existence of Abelian or non-Abelian gauge fields. It is shown how to quantize a gauge field theory on a discrete lattice in Euclidean space-time, preserving exact gauge invariance and treating the gauge fields as angular variables (which makes a gauge-fixing term unnecessary). The lattice gauge theory has a computable strong-coupling limit; in this limit the binding mechanism applies and there are no free quarks. There is unfortunately no Lorentz (or Euclidean) invariance in the strong-coupling limit. The strong-coupling expansion involves sums over all quark paths and sums over all surfaces (on the lattice) joining quark paths. This structure is reminiscent of relativistic string models of hadrons.

- 仅仅过了一年**1974**，格点场论 (格点 QCD) 诞生

K. Wilson, Phys.Rev.D10, 2445-2459, 1974

- 强耦合展开  **Wilson loop** 的面积律



# 格点 QCD 理论框架的研究

## 两种主流费米子方案的提出

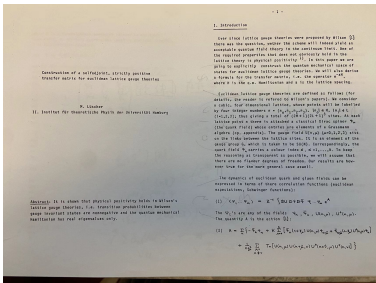
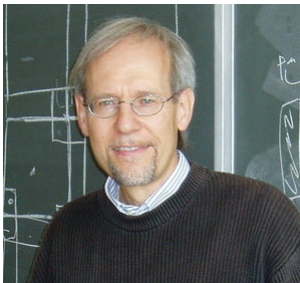
中国格点 QCD 的发展及未来

卅三

从 QCD 到格点 QCD

中国的格点 QCD

总结与展望



### ■ Kogut-Susskind (staggered) fermion 提出 (1975)

Kogut and L. Susskind, Phys. Rev. D 11 (1975) 395.

### ■ M. Lüscher 证明 Wilson LQCD 对应一个良好定义的量 子场论 1977

M. Lüscher, Commun.Math.Phys. 54 (1977) 283



### No-go theorem for chiral fermions

H. B. Nielsen and M. Ninomiya, Nucl. Phys. B 193, 173; Phys. Lett. B 105, 219 (1981).



# 结合数值模拟

数值算法方面的进展：规范场和费米子

中国格点 QCD 的发展及未来

新刊

从 QCD 到格点 QCD

中国的格点 QCD

总结与展望



PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 21, NUMBER 8

15 APRIL 1980

## Monte Carlo study of quantized SU(2) gauge theory

Michael Creutz

Department of Physics, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973

(Received 24 October 1979)

Using Monte Carlo techniques, we evaluate path integrals for pure SU(2) gauge fields. Wilson's regularization procedure on a lattice of up to  $10^4$  sites controls ultraviolet divergences. Our renormalization prescription, based on confinement, is to hold fixed the string tension, the coefficient of the asymptotic linear potential between sources in the fundamental representation of the gauge group. Upon reducing the cutoff, we observe a logarithmic decrease of the bare coupling constant in a manner consistent with the perturbative renormalization-group prediction. This supports the coexistence of confinement and asymptotic freedom for quantized non-Abelian gauge fields.

- 直到**1980**，M. Creutz 数值模拟了纯 SU(2) 规范场

M. Creutz, Phys. Rev. D 21, 2308, 1980

👉 标志着**结合数值模拟**的格点 QCD 正式诞生！

- **Hybrid Monte Carlo**

S. Duane, A. D. Kennedy, B. J. Pendleton, and D. Roweth, Phys. Lett. B195 (1987) 216-222

# 既是世界观，又是方法论



# 1. 格点 QCD 的几个发展阶段

中国格点 QCD 的  
发展及未来

新川

从 QCD 到格点  
QCD

中国的格点 QCD

总结与展望

- 初期的研究 (1974-1981): 以近似方法、理论框架讨论为主并开启数值算法研究 [K. Wilson, Phys.Rev.D10, 2445-2459, 1974](#) [M. Creutz, Phys. Rev. D 21, 2308,1980](#)
- 淬火近似下的 QCD 研究 (1981-2003): 理论研究并结合算法研究及淬火近似下的定量研究 [H. Hamber and G. Parisi, Phys.Rev.Lett. 47 \(1981\) 1792.](#) [F. Butler et al, Phys.Rev.Lett. 70 \(1993\) 2849-2852.](#)
- 非淬火近似的 QCD(2003-今): 全面 QCD 的数值模拟研究 [BMW Collab., Science 347:1452-1455,2015](#)
- 未来走向 (与机器学习、量子计算等结合)





# 1. 格点 QCD 在物理学理论中的地位

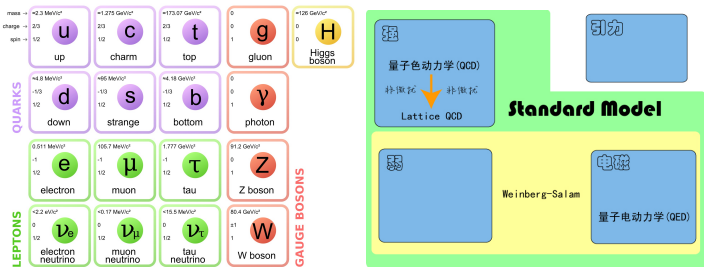
中国格点 QCD 的发展及未来

新川

从 QCD 到格点 QCD

中国的格点 QCD

总结与展望



- 四种基本相互作用：引力、电磁、弱、强；后三种统一在粒子物理标准模型的框架之下；
- 量子色动力学 (QCD 包含夸克、反夸克、胶子的非阿贝尔规范场论) 是描写强相互作用的基本理论框架；
- 👉 格点量子色动力学 (Lattice QCD, LQCD) 则是研究强相互作用的非微扰理论方法



# 1. 格点量子色动力学的特点

中国格点 QCD 的发展及未来

新刊

从 QCD 到格点 QCD

中国的格点 QCD

总结与展望

- 作为描写强相互作用的基本理论，QCD 在低能和高能区体现出不同的特性：
  - 高能区：渐近自由  $\Rightarrow$  部分可微扰
  - 低能区：色禁闭、手征对称性破缺  $\Rightarrow$  非微扰
- LQCD：研究强相互作用非微扰物理的最系统的方法
  - 从最基本自由度出发，从头计算 (ab initio calculation)
- LQCD 必须结合大规模数值模拟计算



超级计算机上进行的虚拟实验；



理论 实验 计算

- 都需要硬件条件 (超算 vs. 加速器 & 探测器)
- 都需要处理统计误差、系统误差等；
- 都需要多方面的人才贮备和多学科的交叉与融合；
- 👉 合作组的作用 ( $10^1$  人 vs.  $10^2 - 10^3$  人)



# 1. 历史、发展现状及趋势

格点量子色动力学的过去、现在和未来

中国格点 QCD 的  
发展及未来

第三

从 QCD 到格点  
QCD

中国的格点 QCD

总结与展望

- 对粒子物理的影响：
  - 2012 年起 PDG 中开始出现 LQCD 专门的综述文章并一直持续至今。
  - LQCD 已经成为研究强相互作用的非微扰效应最有效的理论方法。
- 几个典型的例子
  - 质子-中子质量差 (QCD+QED, 千分之 1.4)<sup>1</sup>;
  - $g_A$  的计算<sup>2</sup>, PDF 的格点计算;<sup>3</sup>
  - QCD 相变的格点研究: 物态方程<sup>4</sup>
  - 标准模型的精确检验:  $K \rightarrow \pi\pi$ .<sup>5</sup>
  - .....

<sup>1</sup> Science 347:1452-1455, 2015

<sup>2</sup> Nature 558, 91-94, 2018

<sup>3</sup> Phys.Rev.Lett. 121, 242003, 2018

<sup>4</sup> Phys.Rev.D 90 094503, 2014

<sup>5</sup> Phys.Rev.Lett. 115 212001, 2015



## 1.4 国内面临的机遇与挑战

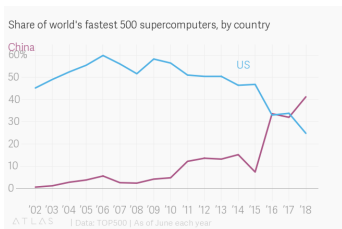
中国格点 QCD 的发展及未来

新刊

从 QCD 到格点 QCD

中国的格点 QCD

总结与展望



- LQCD 是国际上公认的计算密集型研究之一；
  - ☞ 以美国为例，其超算资源的 ~ 10% 用于 LQCD 相关的计算 (日本、欧洲比例类似，我国  $\ll 1\%$ )
- 我国超算资源近十几年年来的爆发式增长



## 2. 中国的格点 QCD

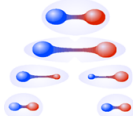
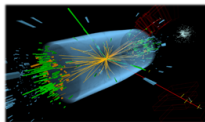
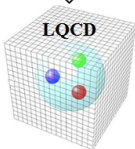
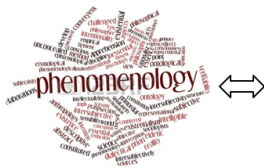
中国格点 QCD 的发展及未来

新刊

从 QCD 到格点 QCD

中国的格点 QCD

总结与展望



Confinement

理解色禁闭



## 2. 中国的格点 QCD

历史：几代中国格点 QCD 的研究者

中国格点 QCD 的  
发展及未来

新刊

从 QCD 到格点  
QCD

中国的格点 QCD

总结与展望

### 1 格点规范的早年研究

- 李文铸、冼鼎昌、郭硕鸿、
- 吴济民、陈天伦、郑希特、朱允伦
- 董绍静、应和平、张剑波、季达仁、赵佩英、罗向前

### 2 21 世纪初 (2000-2010), 国内数值模拟的艰难起步

- 刘川、马建平、刘玉斌、陈莹、张剑波等人, 在 2005 年倡议成立了 CLQCD 合作组
- 罗向前也表示会积极加入, 但不幸英年早逝

### 3 21 世纪 (2010-2023), 国内计算能力的提升; 新鲜血液的加入

- 丁亨通、刘朝峰、宫明、冯旭、杨一玻、刘柳明
- 桂龙成、梁剑、荔宁、刘航、孟雨等
- 王伟、郭凤坤、孙鹏、张建辉、郭志辉等等
- 季向东在北大和上交大的努力



## 2. 中国的格点 QCD

情况概览

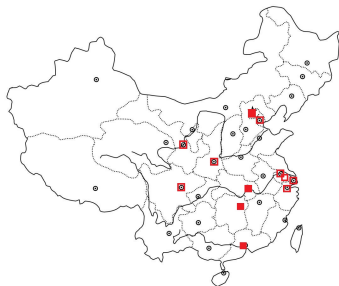
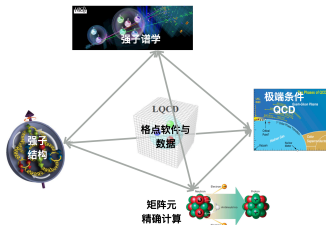
中国格点 QCD 的发展及未来

新川

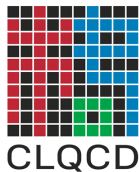
从 QCD 到格点 QCD

中国的格点 QCD

总结与展望



- 1 国内从事格点研究的单位和人员
- 2 中国格点合作组 (CLQCD)
- 3 Lattice 2009<sub>PKU</sub> & Lattice 2019<sub>CCNU</sub>
- 4 第 1 和第 2 届全国格点年会 (华南师大 + 上海交大) 召开





## 2 中国的格点 QCD

五大特色方向：均与粒子物理核物理实验密切相关

中国格点 QCD 的发展及未来

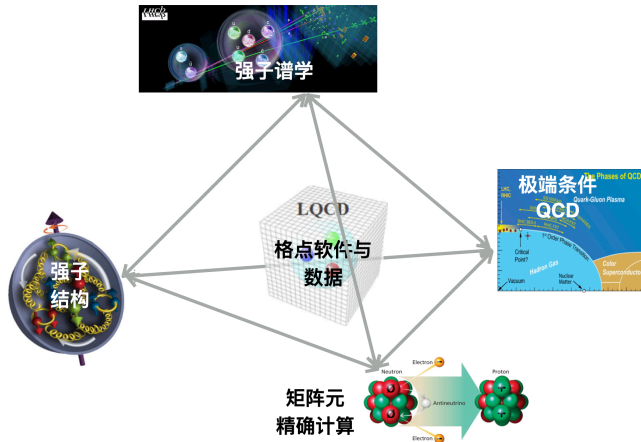
新 川

从 QCD 到格点 QCD

中国的格点 QCD

总结与展望

### QCD 非微扰性质的研究



五个课题相互关联，环环相扣，形成一个整体





## 2. 中国的格点 QCD

格点重大项目获批并启动

中国格点 QCD 的  
发展及未来

第三

从 QCD 到格点  
QCD

中国的格点 QCD

总结与展望

在我国格点从业者多年努力和国内同行的大力支持下

国家自然科学基金重大项目“基于国产超算的格点量子色动力学关键科学问题研究”启动会

2023.02.15 北京





## 2. 中国的格点 QCD

我国历年格点 QCD 发展回顾

中国格点 QCD 的发展及未来

三

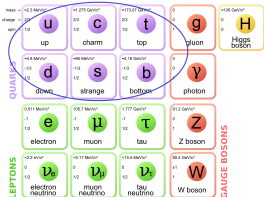
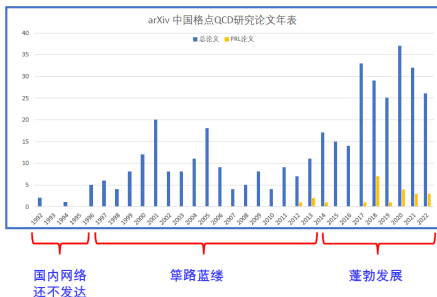
从 QCD 到格点 QCD

中国的格点 QCD

总结与展望

- 多名中国学者在国际格点年会中进入 IAC/大会报告等
- 成功举办两届国际格点年会 (2009 PKU, 2019 CCNU)

历年中国学者 hep-lat 论文数 (致谢陈莹!)



中国的格点 QCD 研究的影响日益增大





### 3. 总结与展望



中国格点 QCD 的发展及未来

五三

从 QCD 到格点 QCD

中国的格点 QCD

总结与展望

- 1 格点量子色动力学是研究强相互作用非微扰性质的系统理论方法
- 2 它需要与大型的超算结合才可能发挥出其特有的能力
- 3 随着我国 E 级超算的部署和重大项目的实施, 我国的 LQCD 也迎来了最好的发展契机

敬请各位专家指正!