

格点QCD在中国

陈莹

中国科学院高能物理研究所

“第二届中国格点QCD年会”
上海交通大学李政道研究所，2022年10月7-10日

目 录

- 一、一点历史
- 二、研究方向
- 三、总结和展望

一、一点历史

1. 奠基与拓荒（大约1985-大约2000）

- 格点规范场论的解析研究方法——**变分累积展开**

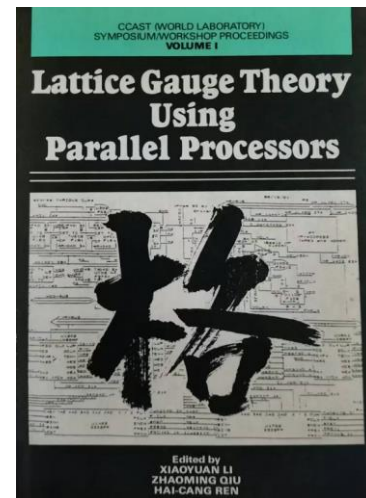
郑希特（川大）、陈天仑（南开）和洗鼎昌（高能所）首先提出
X.T. Zheng, T.L. Chen and D.C. Xian, Phys. Lett. B 153 (1985) 166

郭硕鸿（中山）、吴济民（高能所）、朱允伦（北大）、赵佩英等老师利用该方法做了许多工作，相关论文在**PRD, PLB**等期刊发表。

- **数值计算**：关于规范场-Higgs场耦合系统的相变性质
Y. Zhu（朱允伦），Commun. Theor. Phys. 12 (1987) 311;
Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 26 (1992) 552.

- **李政道先生大力推动在国内开展格点QCD研究**

- ① 1986年中国高等科学技术中心（CCAST）成立；
- ② 第一个研讨会就是格点规范相关的；
- ③ 到会的“大佬”有 N. Christ, M. Creutz, M. Fukugita, R. Gupta, J.B. Kogut, O. Martin, G. Parisi (2021年诺奖得主), D. Weingarten 等。



2. 筚路蓝缕 (1995-2013)

- 2000年前后，一批优秀的海外学者回国开展格点研究

罗向前 (中山, 95-96年回国)、刘川 (北大, 96年回国)

马建平 (理论所, 98年回国)、刘玉斌 (南开, 2003年回国)

- 国内培养的格点研究人员

应和平 (浙大)、张剑波 (浙大)、陈莹 (高能所) 等

- **中山大学组**：中大和广东省大力支持，罗向前建立了研究队伍，2000年前后构建PC机群开展了多方面的格点研究。

第一个基金委格点方向的重点项目；
“杰青”；广泛开展国内外合作。

2006年10月英年早逝，中山大学的格点研究的发展受到很大影响。



- **北大**：刘川1996年个人出资购买一台HP工作站，并携带回国，作为他开展格点数值研究工作的基本设备。他率先在国内开展关于强子物理的数值模拟研究。
- **理论所**：马建平购买高配置个人电脑开展格点计算工作；格点团队建设。
- **高能所**：除个人电脑外，陈莹从2000年开始在“曙光2000”超级计算机（32个计算核心）进行格点并行计算。
- **南开**：2004年邓越凡建造“南开之星”超级计算机，刘玉斌为格点研究争取该机的计算资源。
- 马建平、刘川和陈莹等各方争取计算资源（国家气象中心、北方计算中心等）
- **浙大**：肯塔基大学刘克非教授和中国格点研究对接，协助培养人才，浙大是基地之一。
- 马建平、刘玉斌、刘川、张剑波和陈莹等发起建立“中国格点QCD合作组”
- **人才培养**：吴良凯、刘柳明、冯旭、宫明、孟祥飞、杨一玻、荔宁、桂龙成、梁剑、毕玉江、孙玮、孟雨、张克龙等

3. 蓬勃发展 (2013-2022)

- 2010年后，一批优秀的新生代格点研究人员成长起来

付子文 (四川大学, 2010年回国, 强子-强子散射)

刘朝峰 (高能所, 2010年回国, 强子物理及标准模型精确检验)

宫明 (高能所, 2013年回国, 强子物理及格点QCD软件)

丁亨通 (华中师范大学, 2013年回国, QCD相变)

冯旭 (北京大学, 2016年回国, 强子物理及标准模型精确检验)

刘柳明 (中科院近物所, 2017年回国, 强子物理)

杨一玻 (中科院理论所, 2018年回国, 强子结构及格点算法、程序)

桂龙成 (湖南师大, 2013年毕业, 强子谱学和强子结构)

荔宁 (西安工业大学, 2014年毕业, 强子谱学和强子-强子散射)

梁剑 (华南师范大学, 2020年回国, 强子结构)

毕玉江、孙玮 (高能所, 2018年毕业, 强子谱学、程序和数据)

李胜泰 (华中师大, 2019年毕业, QCD相变、程序和数据)

孟雨 (郑州大学, 2020年毕业, 强子谱学)

- 理论粒子物理学家的参与和加盟:

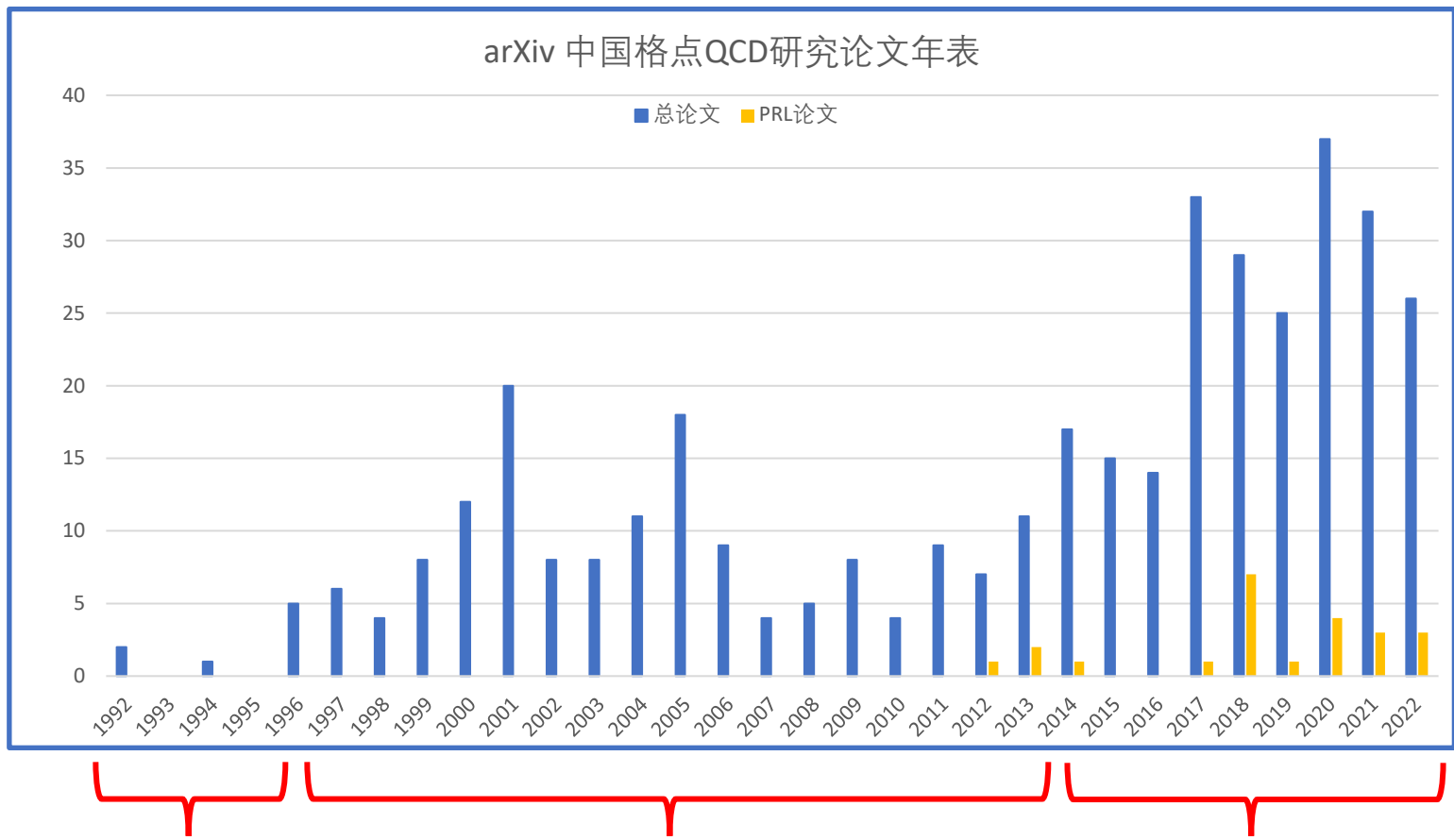
季向东教授的“**大动量有效理论**”开辟了格点QCD研究强子结构的新方向。

王伟 (上海交通大学, 2014年回国)

吴佳俊 (中国科学院大学, 2018年回国)

张建辉 (北京师范大学, 2019年回国)

孙鹏 (近物所, 2018年回国)



国内网络
还不发达

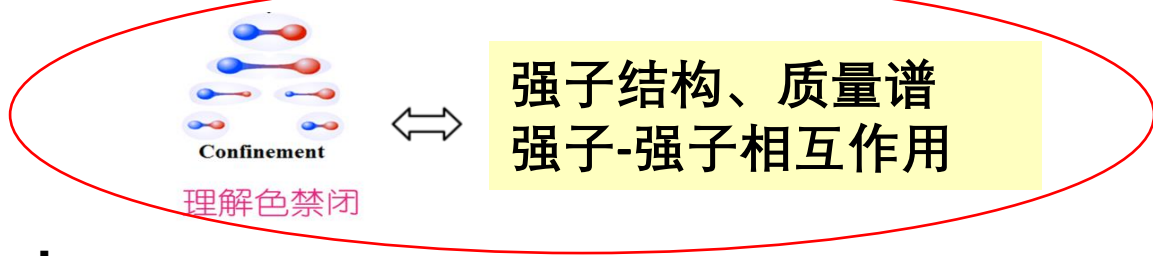
筚路蓝缕

蓬勃发展

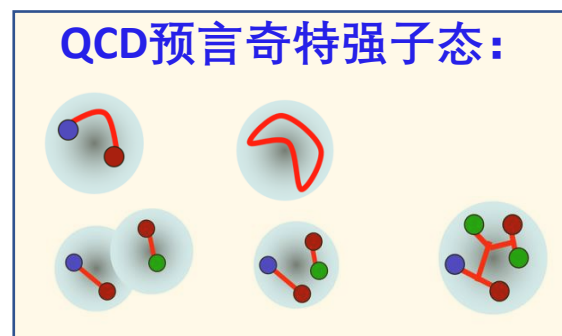
arXiv 的 hep-lat 每年文章数大致400-600篇

二、研究方向

1. 强子谱学研究

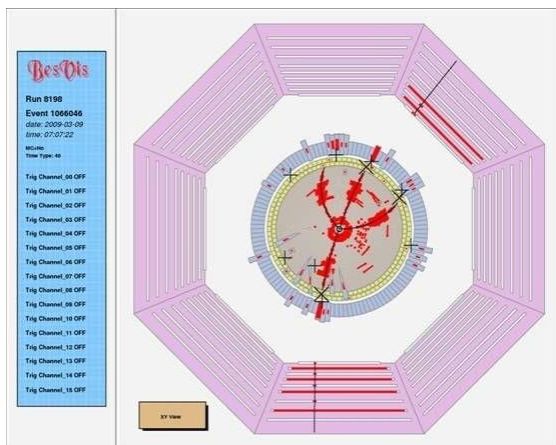


- **研究队伍**（固定人员）：
刘川、陈莹、刘柳明、荔宁（西安工大）、
吴佳俊、付子文（川大）、桂龙成（湖师大）
- **研究内容**：主要针对奇特强子态开展格点QCD研究，其中包括胶球、混杂态和多夸克态，以及XYZ粒子和 P_c 态等。
- **研究手段**：谱学研究，通过强子-强子散射研究强子-强子相互作用，探索强子内部动力学性质。
- 该方向的国内格点研究和唯象研究都有丰富的积累，可以合作研究，产出重要成果。



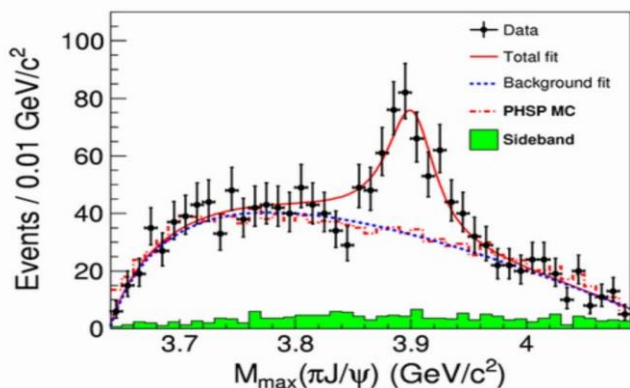
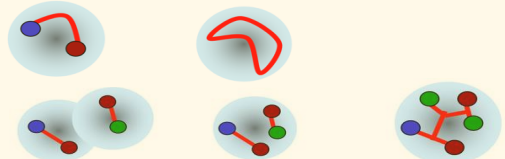
(10.8日下午的“Exotic hadrons” session)

该方向研究与BEPCII/BESIII上相关物理密切相关——

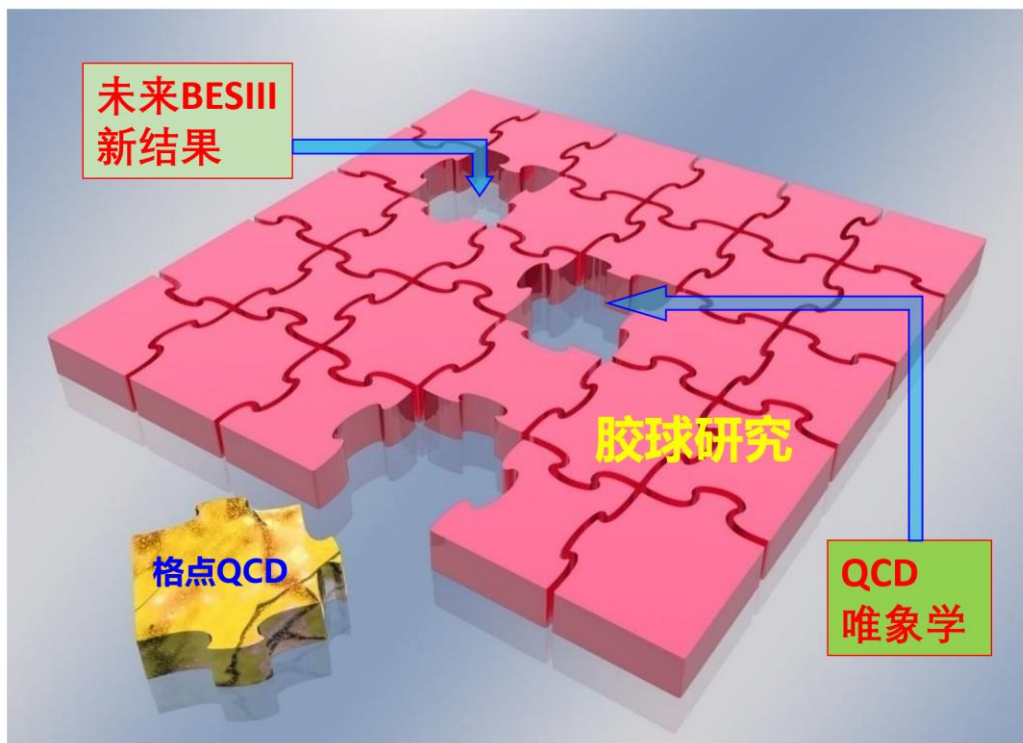


- BEPCII/BESIII是国际上独一无二的运行在粲夸克物理能区的实验装置；
- 奇特强子态的寻找（胶球、XYZ粒子等）是BESIII重要的物理目标之一；
- 有潜在的重大科学发现，但需要理论指导。
- 在格点QCD框架下研究胶球和XYZ粒子的性质，可以为BESIII实验提供理论判据。

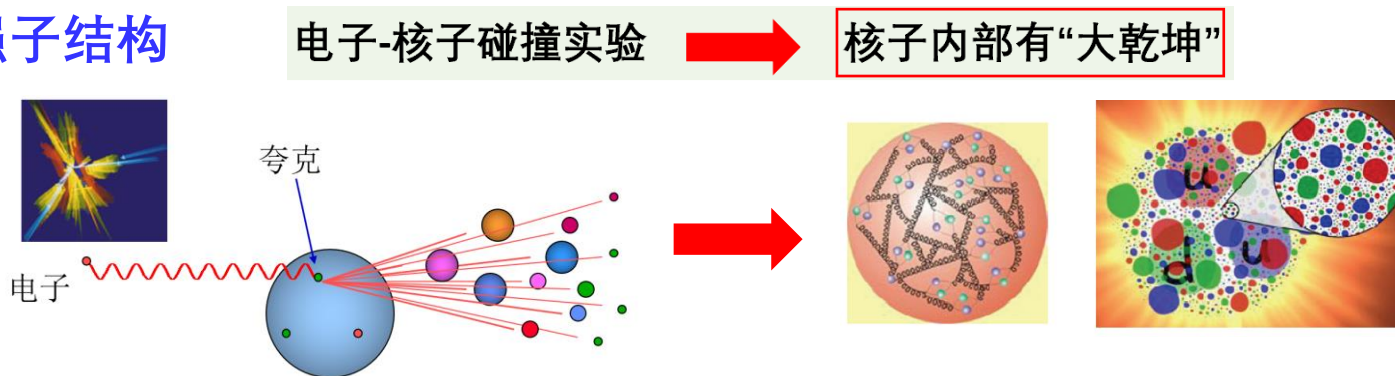
QCD预言奇特强子态：



BESIII在2013年“发现Zc(3900)”



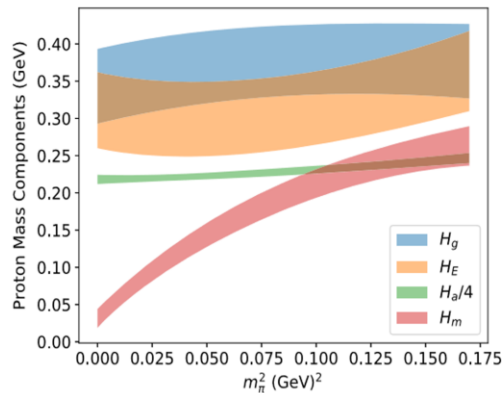
2. 强子结构



- **研究队伍** (固定人员)：王伟、杨一玻、张建辉、孙鹏、梁剑、张其安 (北航)、熊小努 (中南) 和华俊 (华南师大) 等 (Lattice Parton Collaboration, LPC)
- **研究内容**：1) 强子质量组成、强子自旋角动量组成等；
2) 在LaMET 框架下研究强子的部分子分布函数、分布振幅等。
- **研究手段**：1) QCD能动量算符分解及其矩阵元；
角动量算符分解及其矩阵元
2) 从LaMET下的准部分子分布函数匹配到光锥坐标系的部分子分布函数。
- 已经建立合作紧密的研究团队。

(10.9日上午的“Hadron structure” session)

- 强子是由夸克和胶子的构成，但**强子的质量来源**仍不清楚。
比如：**质子质量**为**938MeV**，而**夸克质量**只有**几个MeV**
剩余的质量是从哪里来的？
- 核子（质子和中子）是最常见的强子，但**核子内部结构**仍是一个需要研究的最基本物理问题。
- 美国科学院已经把**核子质量起源**问题列为计划中的电子-离子对撞机 (Electron-Ion Collider, 简称EIC) 的**首要问题** (<http://www.nap.edu/read/25171/chapter/9#92>)。
- 中国的**EicC** 方案

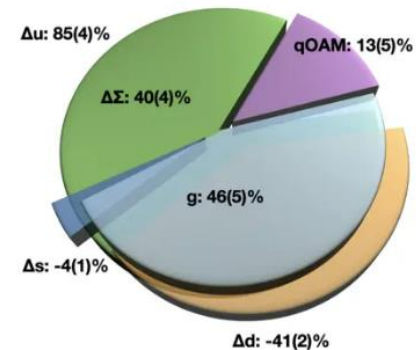


$$\frac{H_g}{M} = 36(5)(4)\%$$

$$\frac{H_E}{M} = 32(4)(4)\%$$

$$\frac{H_a}{4M} = 23(1)(1)\%$$

$$\frac{H_m}{M} = 9(2)(1)\%$$



Yi-Bo Yang *et al.*

Phys. Rev. Lett. **121**, 212001 (2018)

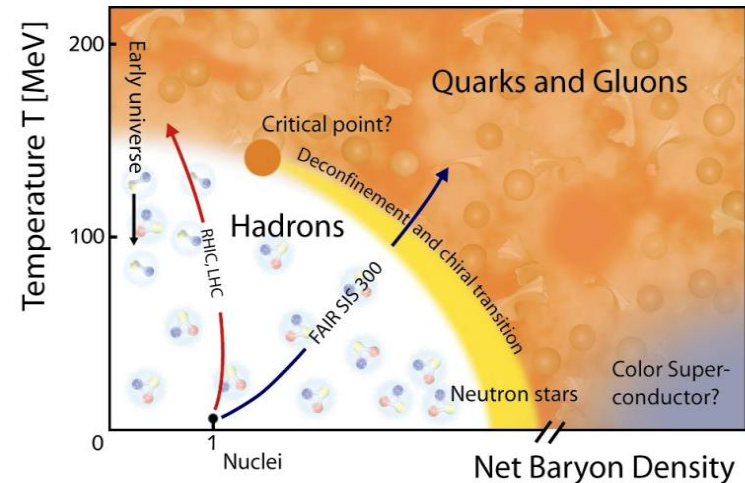
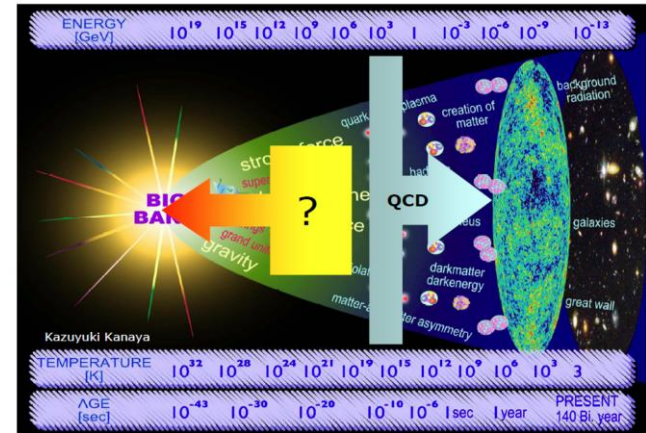
G. Wang, *et al.*

Phys. Rev.D106, 014512 (2022)

4. 极端条件下的QCD物质

- **研究队伍**（固定人员）：
刘玉斌、丁亨通、吴良凯（江苏大学）
李胜泰（华中师大）等
- **研究内容**：
 - 1) QCD相变性质：相图、临界点；
 - 2) 手征相变与手征反常；
 - 3) 手征磁效应；
 - 4) 各种极端条件下的QCD 立体相图。
- **研究手段**：
 - 1) QCD物质状态方程；
 - 2) 各种量子数的涨落；
 - 3) 极端条件下的强子关联函数。
- **国际上重要影响**的重要工作；
广泛的国际合作。

我们现在对宇宙的了解



温度和密度平面的 QCD 相结构示意图

(10.10日上午的“Finite temperature physics”session)

5. 格点QCD程序和基础数据



- **研究队伍** (固定人员) : 陈莹、宫明、杨一玻、孙鹏、毕玉江 (高能所)、孙玮 (高能所)、李胜泰 (华中师大)
- **研究内容**: 1) 为各个物理研究方向产生规范组态样本——基础数据;
2) 解决在国产超级计算机上进行计算的软件和算法问题。

(10.10日下午的“Software and developments” session)

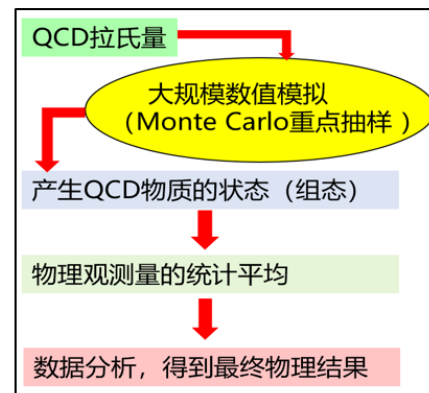
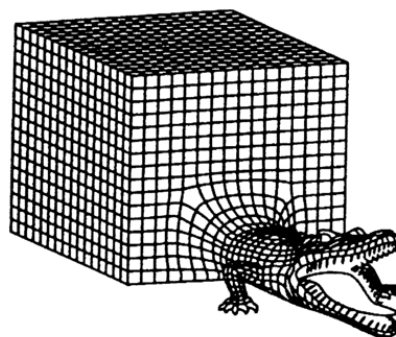
格点QCD是从**第一性原理**出发研究**QCD**低能特性的**非微扰方法**。

理论框架

$$Z = \int \mathcal{D}A_\mu \mathcal{D}\psi \mathcal{D}\bar{\psi} e^{-S}$$

$$Z = \int \mathcal{D}A_\mu \det M e^{\int d^4x (-\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu})}$$

$$\langle \mathcal{O} \rangle = \frac{1}{Z} \int \mathcal{D}A_\mu \mathcal{O} e^{-S}$$



路径积分量子化

时空离散化

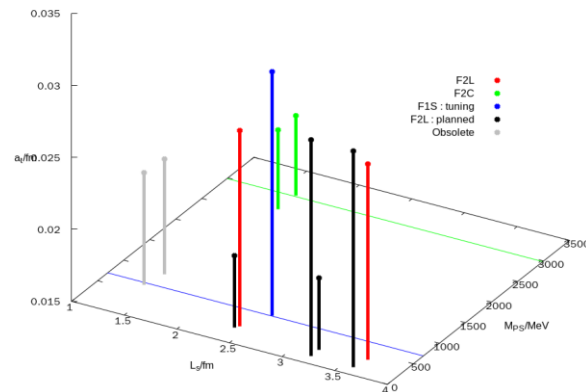
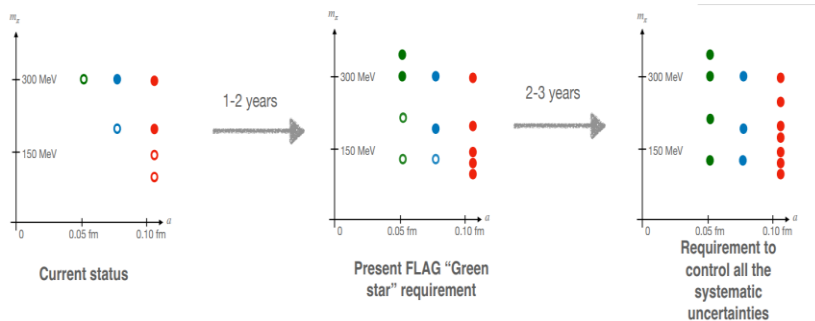
Monte Carlo模拟—
数值求解泛函积分

- 强烈依赖于计算资源，是高性能计算的重要应用领域。
- 统计误差和系统误差可以有效控制，计算结果可靠，是高能物理不可或缺的研究领域。
- 对**强相互作用研究**、**标准模型精确检验**和**新物理寻找**等有十分重要的理论意义。
- 尤其在**低能强相互作用研究方面**有不可替代的作用。

- 自有计算资源——各研究机构的GPU计算集群

华中师范大学的“核科学计算中心”（约**300 GPU** 规模）；
 华南师范大学和近物所的“南方核科学计算中心”（现有约**200 GPU**，可扩）
 高能所（本部及东莞分部）计算中心（约**200 GPU** 可用于格点）
 理论所“理论物理先进计算平台”（约**60 GPU**）
 湖南师范大学“湘江一号”（约 **40 GPU** ?）

- 已有和计划产生的规范组态——基础数据



各向同性 $N_f = 2 + 1$ Clover
 费米子的组态序列

各向异性组态序列

- 国产E级超算——机会与挑战



- ① 国产**百亿亿次（E级）**超算有多个技术路线在同时发展，目前包括**神威、天河、曙光**三种架构。
- ② **软件生态正在建设中**
- ③ 对于**曙光**系列（如中科院网络中心“**先导一号**”），现有格点程序移植可以移植
- ④ 对于**新天河**和**神威**架构，需要开发新程序（模块）。

三、总结与展望

- 格点QCD 研究在中国有**很长的历史**
- 此前大部分时间都受到**计算资源不足的制约**
- **近些年来，发展迅速：**
 - 人员队伍不断壮大
 - 计算资源逐渐增加
 - 物理成果在数量和质量上都有长足的进步
- 所以才开中国格点年会
 - 第一届 2021.10.30-11.02 华南师大承办
 - 第二届 2022.10.07-10.10 上海交大承办
 - ◦ ◦ ◦ ◦ ◦
- **明天会更好！**

谢谢大家！