

# 格点量子色动力学在中国

陈莹<sup>1</sup> 丁亨通<sup>2</sup> 冯旭<sup>3</sup> 傅子文<sup>4</sup> 宫明<sup>1</sup> 桂龙成<sup>5</sup> 荔宁<sup>6</sup>  
 刘川<sup>3</sup> 刘柳明<sup>7</sup> 刘玉斌<sup>8</sup> 刘朝峰<sup>1</sup> 马建平<sup>9</sup> 孙鹏<sup>10</sup>  
 吴佳俊<sup>11</sup> 吴良凯<sup>12</sup> 杨一玻<sup>9</sup> 张剑波<sup>13</sup>

(1. 中国科学院高能物理研究所 100049; 2. 华中师范大学粒子物理研究所 430079; 3. 北京大学物理学院 100871; 4. 四川大学原子核科学技术研究所 610064; 5. 湖南师范大学物理与电子科学学院 410081; 6. 西安工业大学理学院 710021; 7. 中国科学院近代物理研究所 730000; 8. 南开大学物理科学学院 300071; 9. 中国科学院理论物理研究所 100190; 10. 南京师范大学物理科学与技术学院 210023; 11. 中国科学院大学物理科学学院 100049; 12. 江苏大学理学院 212013; 13. 浙江大学物理系 310027)

## 1. 格点量子色动力学概述

经过多年努力,人们已经成功地将自然界四种基本相互作用(强、弱、电磁、引力)中的前三种统一在量子场论的框架之中,即粒子物理的标准模型(Standard Model, SM)。该模型中关于强相互作用部分的基本理论是量子色动力学(Quantum Chromodynamics, QCD),它在高能区和低能区呈现出迥然不同的特性:在高能区 QCD 呈现出渐近自由(asymptotic freedom)和部分可微扰的特性;在低能区则展现出手征对称性破缺和色禁闭等非微扰特性。由于 QCD 在低能区(通常指几个 GeV 以下)具有非常强的非微扰特性,因此研究这个能区的物理必须利用非微扰的量子场论方法。目前已知最系统的非微扰理论方法就是格点 QCD,如图 1 所示。

格点 QCD 从第一性原理出发,将 QCD 的基本自由度定义在离散的四维欧氏时空格子上。如图 2 所示,夸克和反夸克场被定义在格点上,而规范场则定义在相邻两格点间的链接上。超立方格子的体积为  $(Na)^3 \times (Na)$ , 其中格点间距  $a$  和空间方向上长度  $Na$  提供了量子场论的紫外和红外截断。利用路径积分量子化进行表述,格点 QCD 形式上类似于一个统计物理模型。如果将所有的场变量集中

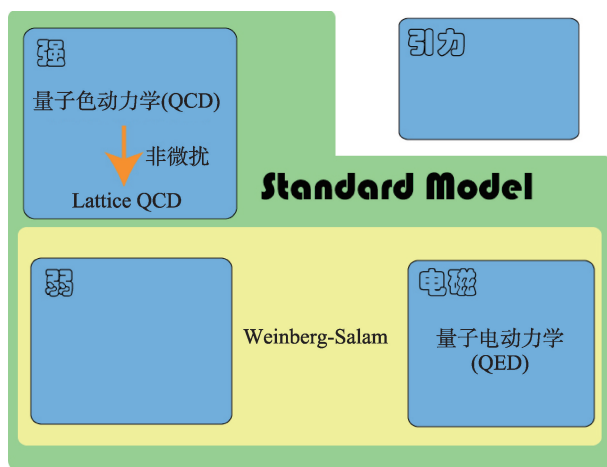


图 1 格点 QCD 在标准模型中的相对位置的示意图

量子色动力学拉格朗日量

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} \mathbf{F}^{\mu\nu} \mathbf{F}_{\mu\nu} + \sum_{q=u,d,s,c,b,t} \bar{q} \left[ i\gamma^\mu (\partial_\mu - ig\mathbf{A}_\mu) - m_q \right] q$$

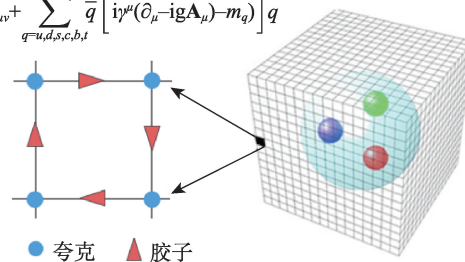


图 2 格点 QCD 中,夸克和反夸克场被定义在格点上,而规范场则定义在相邻两格点间的链接上

记为 $\phi$ , 相应的有效作用量记为 $S[\phi]$ , 则我们感兴趣的任何一个物理量 $O[\phi]$ 的期望值 $\langle O \rangle$ 可以表达为,

$$\begin{aligned} \langle O \rangle &= \int D\phi O[\phi] P[\phi], \\ P[\phi] &= \frac{1}{Z} e^{-S[\phi]}; Z = \int D\phi e^{-S[\phi]}. \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $P[\phi]$ 是场应当服从的玻尔兹曼分布。这非常类似于一个统计系统中的系综平均值, $Z$ 即为配分函数——包含了系统所有的物理。正是这种相似性使得 Monte Carlo 方法的使用成为可能。相应的, 典型的格点 QCD 数值计算也可以分为两大步骤: 第一, 利用 Monte Carlo 算法产生正确分布的规范场组态; 第二, 从正确分布的组态中取样对感兴趣的物理量 $O[\phi]$ 进行测量。以目前典型的计算规模 $32^3 \times 64$ 来看, 这相当于进行一个约两千万维的数值积分; 如果不使用超级计算机, 这样高维积分的计算是无法实现的。

除了由 Monte Carlo 方法所带来的统计误差, 我们也需要面对来自于有限小的格距 $a$ 和有限大的单元格子数 $N_s, N_t$ 带来的系统误差, 从而需要在更大的格子上进行计算, 即需要利用更加强大的计算资源。同时, 格点 QCD 的计算以标准模型已有的参数(如各味夸克质量和强相互作用耦合参数等)作为基本输入, 通过调整这些基本参数的值, 还可以更加全面地理解 QCD。

概况地说, 结合大规模数值模拟的格点 QCD 是研究 QCD 最为系统的非微扰理论方法, 它同时满足了以下两个方面的要求:

- 具有一个数学上严格的非微扰的定义;
- 能够以可操作的方式进行非微扰的计算。

就研究强相互作用的理论方法而言, 格点 QCD 的这两个优势是其他任何理论方法所不具备的。这两个方面实际上都非常重要, 缺一不可。第一点保证了我们所追寻的目标具有良好的定义; 而第二点则保证了原则上可以持续地改善已有的计算, 并最终给出与实验可对比的物理结果。格点量子色动力学的更多理论框架方面的信息, 读者可参见相关的专著<sup>①</sup>。

物理学是实验科学。所有的理论研究归根结

底需要获得相关实验的验证。目前国内正在积极探索, 准备建造一系列大型的实验设施以研究与强相互作用相关的物理。这大致可以分为加速器物理和非加速器物理两个方面。在加速器物理方面包括 CEPC, Tau-Charm 工厂, EicC 等; 非加速器物理方面则包括暗物质的探测、江门中微子实验等。同时国际上也有类似的设施, 这里不再赘述。我们下面会看到, 对于这些物理过程的深入研究, 相应的格点 QCD 的计算结果必不可少。

在加速器物理方面, 无论在高能量还是高亮度前沿的重大实验, 都需要格点 QCD 的理论支撑: 显然, 如果要寻找超出标准模型的新物理, 我们首先需要能够将标准模型的预言准确地计算出来。这无疑需要格点 QCD 提供关于强相互作用的准确信息。在非加速器物理方面, 我们往往需要知道一些未知的粒子与核子之间的相互作用以确定信号的性状(例如, 暗物质探测、无中微子双贝塔( $0\nu 2\beta$ )衰变等等), 这也离不开格点 QCD 提供的矩阵元的信息, 其中相当一部分矩阵元是无法或很难从其他实验直接测量的。

因此我们可以说, 格点 QCD 是解决粒子物理、核物理各种重大物理科学问题的关键理论支撑之一。本文将在随后的两节中分别论述格点 QCD 的现状 & 国内格点 QCD 研究的发展趋势。

## 2. 格点 QCD 的现状

我们首先罗列国际上格点 QCD 研究的主流的方向。我们会看到, 这些方向都与上节中提及的重大实验密切相关。更多关于格点 QCD 与相关物理的计算的总结, 读者可以参见最新的 FLAG review<sup>②</sup>以及那里所引用的文献。

### 1) 强子谱学<sup>③</sup>

强子谱学从一开始就是格点 QCD 发展的重要方向。谱学的研究大致集中于两个方面: 传统的强子谱学研究 and 奇特强子态的研究。在传统的强子谱学方面, 格点 QCD 研究日益精确, 已经可以精细地计算来自于同位旋破缺、电磁修正等效应地影响(如图 3 所示质子中子质量差); 而关于强子-强子散

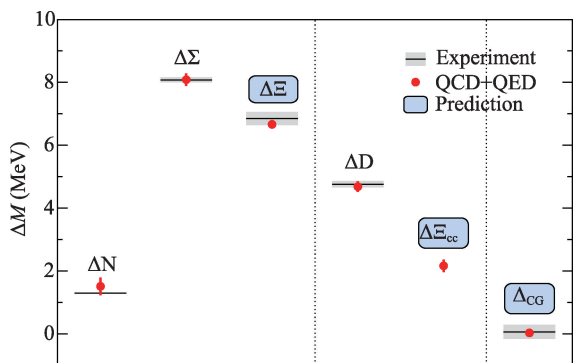


图3 格点QCD计算的同位旋破缺效应(包括u、d夸克质量差和电磁修正)所引起的强子质量差,结果发表在《科学》(Science 347:1452-1455,2015)。其中质子中子的质量差 $\Delta N$ 与实验值吻合,精度达到300 keV。图中也显示了其他强子质量差的格点计算和实验值的比较。蓝色标记的几种情形中格点计算的精度高于实验值的精度

射的研究使得格点计算不仅仅可以处理基态的强子,还可以处理共振态强子,大大拓宽了格点研究的领域。在奇特强子态研究方面,格点QCD则是通过强子之间的散射的研究瞄准近年来实验上发现的新的奇特强子态,例如所谓的XYZ粒子和五夸克态粒子等。

### 2) 强子结构<sup>④</sup>

强子结构包括强子的各种形状因子的计算(例如如图4所示的中子-质子轴矢流耦合常数),以及近年来发展起来的利用格点QCD对强子中部分子分布函数(Parton Distribution Function, PDF)的计算。这些物理量反映了夸克与胶子等基本粒子如何影

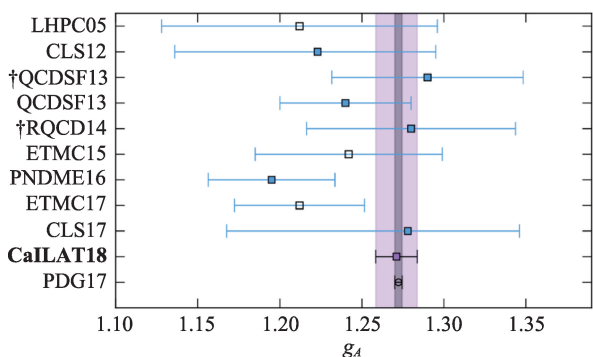


图4 CalLAT合作组依托美国超级计算机“顶点(summit)”计算的中子-质子轴矢流耦合常数,与其他格点QCD结果(LHPC05-CLS17)和试验结果(PDG17)的比较。相关文章发表在《自然》(Nature 558, 91-94 (2018), arXiv:1805.12130)并入围世界超级计算机大会戈登-贝尔奖

响强子的基本性质,例如质量、半径、自旋等;也直接与LHC、EIC等实验的测量相关。在计算精度上相比强子谱学还有待提高,也主要集中于研究基态强子的性质。

### 3) 极端条件下的QCD<sup>⑤</sup>

这部分研究包含了高温/高密/强磁场等极端条件下的强相互作用核物质在平衡态及近平衡态的热力学性质,能为研究在美国的RHIC和在欧洲的LHC等重离子碰撞实验中产生的夸克胶子等离子体的性质提供重要的理论指导。目前研究的热点问题包括:高温下手征反常及手征对称性的破缺与恢复,QCD临界点的位置及其奇异行为,热密物质中强子的性质,QGP(Quark Gluon Plasma)电磁信号及输运系数,强磁场下QCD的相结构等。

### 4) 味物理和超出标准模型的新物理研究<sup>②·⑥</sup>

为了精确检验标准模型并探索超出标准模型的新物理,需要从理论上提供强相互作用效应的精确预言。具体而言,味物理的研究包括夸克味物理和轻子味物理两部分,前者主要研究与CKM矩阵元有关的物理,而后者瞄准与中微子物理相关的各种强矩阵元的计算。如果超出标准模型的新物理模型是一个类似QCD而能标更高的理论(例如类Technicolor理论),那么对于它的研究就需要运用格点场论的非微扰方法。

### 5) 格点QCD相关软件架构研发<sup>⑦·⑧</sup>

随着中国和国际上的E级超算的建设,格点QCD相关软件架构也处于更新换代的重要阶段,针对国产新超算平台的代码也正在积极研发中。近年来,国际上已经普遍使用物理的轻夸克质量进行完整的格点QCD研究,格子的规模也增长到约 $64^3 \times 128$ 的水平,在系统误差和统计误差的控制方面也有了长足的进步。世界各大格点QCD合作组也正对不同的研究目标有针对性地产生规范场组态,积累PB级的基础数据以支持各类物理问题的研究。

### 6) 格点QCD与其他领域的交叉研究

格点QCD的计算结果等价于在超级计算机上的实验数据,可以被用于更好地构建唯象模型和理

解 QCD 的非微扰性质。同时,将这些结果联系到唯象研究,也需要相关的解析微扰重整化和匹配计算。此外,格点 QCD 与有效场论、粒子物理唯象学和少体核物理等学科也有交叉和互鉴的关系。

主要挑战:我们看到,格点 QCD 研究的方向涉及与强相互作用相关的粒子物理、核物理、计算机科学等学科的方方面面。格点 QCD 多年来已经在上述研究方向取得了诸多成就,但是依然存在一些尚未彻底征服的核心挑战,例如符号问题和含时问题。

Monte Carlo 方法本质上是一种基于概率的数值方法,概率必须是正定的。因此, Monte Carlo 方法无法有效抽样具有复的“概率”的场的位型空间。这就是著名的符号问题。这类问题会出现在有限密度格点 QCD 问题中。类似的,如果需要计算明显含时的问题,这时候会涉及复的函数的数值积分问题,也无法进行有效的 Monte Carlo 数值计算。

格点 QCD 多年的发展之中,曾经也有过不少物理量被认为是复“概率”的问题,因此无法利用格点 QCD 进行有效的处理。但是不少问题后来实际上部分地被解决了。例如在有限密度下的格点 QCD 研究中,可以通过计算密度为零时的泰勒展开系数来规避符号问题。再例如强子之间的散射问题,通过计算两个强子的能量,可以间接地抽取出相应的两个强子的散射相移,从而不必计算两个强子的具体散射过程。最近的例子是 PDF 的格点计算,通过计算类似的空间关联函数,然后利用大动量展开有效理论方案,将其匹配到涉及光锥坐标的 PDF。但是,这类问题到目前为止还没有通用而非常有效的方法,尽管人们仍在尝试。

从业人员:格点 QCD 研究领域目前在全球范围内,约有三百余名专业研究人员(仅包括正/副教授或相当级别的固定职位)活跃在这一研究方向上。其中,在美国约有 150 名,欧洲约 100 名,日本约有 40 名。

中国的格点 QCD 研究最早是从 20 世纪 80 年代初开始的,距 K.G. Wilson 提出格点规范理论并不远。李政道先生对格点规范理论有浓厚的兴趣,认

为其在强相互作用研究方面有很大的发展前景并着力组织和培养中国的格点研究队伍。中国也逐渐形成了以李文铸(浙江大学)、郭硕鸿(中山大学)、洗鼎昌(中科院高能所)、吴济民(中科院高能所)、陈天伦(南开大学)、郑希特(四川大学)等老一辈科学家为代表的第一代格点研究队伍。他们在进行格点理论研究和探索的同时,也为中国培养了一批格点研究人才,如朱允伦(北京大学)、董绍静(浙江大学)、季达人(浙江大学)、应和平(浙江大学)、张剑波(浙江大学)、赵佩英(中科院高能所)和罗向前(中山大学)等。但是,受国内当时的计算条件的限制,中国格点研究在数值模拟方面发展相对缓慢,除少数人员赴国外合作研究和学习外,研究队伍没有迅速壮大。

随着国内计算条件的改善,本世纪初中国逐渐开始开展格点 QCD 的数值模拟研究。2005 年,马建平(中科院理论所)、刘川(北京大学)、刘玉斌(南开大学)、张剑波(浙江大学)和陈莹(中科院高能所)等发起成立了中国的格点研究组织——中国格点合作组(China Lattice QCD Collaboration, 简称 CLQCD),开展了卓有成效的格点数值模拟研究。这些年来,中国格点组的主要研究内容是奇特强子态,在胶球、XYZ 粒子性质方面做了不少工作,取得了一些国际影响。近些年来,一批在国际上崭露头角的优秀年轻研究人员回国,大大充实了国内的格点 QCD 研究力量。他们包括刘朝峰(中科院高能所)、丁亨通(华中师范大学)、宫明(中科院高能所)、冯旭(北京大学)、刘柳明(中科院近物所)、孙鹏(南京师范大学)、吴佳俊(中国科学院大学)、杨一玻(中科院理论所)等,研究兴趣涵盖强子谱学、强子结构、QCD 相变、高精度前沿、软件架构研发等方面,并与国际上重要的格点研究团队有密切的合作关系。目前,国内已经形成以中青年研究人员为骨干的研究队伍,具有一定规模并于 2009 年(北京大学)和 2019 年(华中师范大学)两次承办国际格点场论大会。

### 计算资源:

以产生典型的  $64^3 \times 128$  体积的蒙特卡洛规范场

组态并进行物理计算为例,需要每年数亿CPU核小时的计算资源,以及PB(1000 TB)级别的硬盘/磁带存储空间。目前美国格点QCD计算每年的计算量为几十亿CPU核小时,最大的格点体系为 $144^3 \times 288$ ,计算规模为数万核或十多万核。预期到2025年格点QCD计算的格点大小可以到 $256^3 \times 512$ ,计算规模可以达到百万核量级,所需计算资源为千亿CPU核小时,这只能由E级超级计算机提供。美国已经将格点QCD数值模拟研究列为未来E级计算机的主要应用之一。

中国的超级计算机近十年来有很大的发展。例如,天津国家超算中心的“天河-1A”、广州国家超算中心的“天河二号”和无锡国家超算中心的“神威-太湖之光”等机器曾多次名列超级计算机集群世界500强的第一位。但是,国内超算中心的计算资源用于格点QCD的比例远低于欧美日的平均水平。目前在华中师范大学、湖南师范大学、中国科学院高能物理研究所、理论物理研究所等单位也建有用于格点QCD的专用机群,可为中国的格点计算提供百万CPU核小时量级的资源。

综上所述,中国格点QCD的研究队伍已经形成了一定规模,年龄结构合理,充满活力;计算资源在近年来也有一定改善,预期未来会有较大提高。中国的格点QCD研究有必要进行认真的规划,整合格点研究队伍,凝练科学目标,拓展计算资源,冲击本领域的国际前沿,并和国内相关的实验研究和唯象研究密切配合,以期实现重大的科学发现。

### 3. 发展方向

近年来格点QCD的研究在国际上已经取得了长足的进步,实现了对标准模型中强相互作用相关参数(物理的轻夸克质量与强相互作用耦合常数)的模拟,并对系统误差作出合理估计,得到了大量与物理实验可对比的结果。因此格点QCD已成为强相互作用相关物理问题的重要、有时甚至是唯一的研究手段。我国的格点QCD研究队伍已经初具规模,研究水平和国际竞争力也日益提高。结合国内

高能物理发展趋势和超算资源的部署,在未来若干年中,我们将主要集中在以下五个方向开展研究:

结合BESIII等实验,确定新强子态的性质和结构;结合EicC等实验,为质子质量起源和内部部分子结构给出答案;结合RHIC和LHC等实验,研究QCD相结构,寻找QCD临界点,并探索强磁场下的性质;结合LHCb和锦屏山地下实验等,计算与标准模型精细检验相关的非微扰强子矩阵元,研究 $0\nu 2\beta$ 衰变等超出标准模型的新物理。面向未来的E级超算,探索格点QCD在各种架构下的计算模型和代码实现。

#### 3.1 强子谱学

在过去十几年,实验上发现了很多新的强子态,其中很多无法用传统的夸克模型来解释(参见文献⑨等)。关于它们的结构有很多理论猜想,如图5所示的混杂态,四夸克态,五夸克态,分子束缚态,胶球等,但是目前还没有非常明确的结论。格点QCD可以从第一性原理计算帮助确认新强子态的结构信息。当前的发展方向主要有两点:

1) 谱学的高精度计算:格点QCD计算基态的强子谱已经可以达到和实验值相当的精度,对于激发态和不稳定共振态,通常信噪比要低于基态,尤其在很多情况下,相关的关联函数有非连通图的贡献,计算非连通图不仅耗时,而且噪声非常大,很难得到精确的信息。非连通图的计算一直是格点QCD研究中的一个难点。另外,格点计算中有限格距,有限体积和非物理的轻夸克质量引起的系统误差也必须得到很好地控制。提高计算精度依赖于计

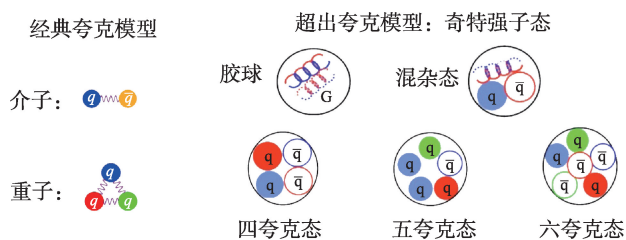


图5 强子结构示意图。左图为经典夸克模型,介子由一个夸克和一个反夸克组成,重子由三个夸克组成。右图为超出夸克模型的奇特强子态,包括胶球,混杂态,多夸克态等

算资源和算法的发展,这不仅对强子谱的研究意义重大,对其他物理量的格点计算也同样重要。

2) 更全面的谱学和强子散射研究:更好地探讨新强子态的各种不同的可能的结构,在计算强子谱时需要构造具有不同结构的尽可能完备的算符集,算符的结构在一定程度上可以反映强子的结构。另外对共振态的研究需要计算强子散射过程,在很多情况下会出现多个散射道的耦合。格点QCD中计算散射过程普遍的方法是Lüscher提出的有限体积方法。对多道耦合的情况,由于散射参数比较多,用有限体积方法确定这些散射参数还存在一些困难,在计算有限体积中的能级以及散射参数的分析方法上都需要进一步提高。

### 3.2 核子结构

在核子结构方面,我们将集中探索核子的质量、自旋、电磁半径等基本性质,核子三维结构和强子张量等:

1) 核子及原子核的基本性质:核子乃至原子核的质量、自旋、电磁半径等基本性质,都可以通过格点QCD进行直接计算,并考虑其电弱修正。其中受到实验与理论高度关注的有:a) QCD预言迹反常对核子质量有主要贡献并与QCD能量标度成正比,而在 $\pi$ 介子中随夸克质量变小而趋于零<sup>⑩</sup>。我们的格点QCD计算将精确检验这一预言,并计算迹反常的形状因子,为EIC/EicC上测量核子中的迹反常提供理论支持;b) 基于目前的实验数据,核子自旋只有大约30%来自夸克自旋,其他部分必须来自

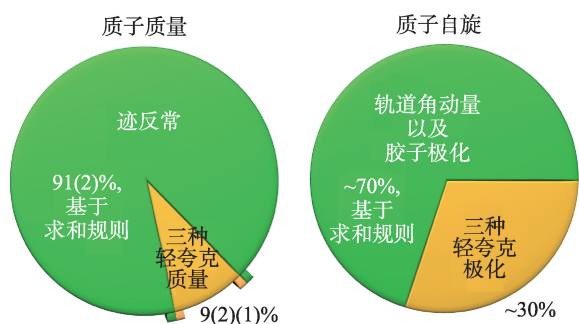


图6 对于质子的质量与自旋,三种轻夸克的质量和自旋并不是主要来源。格点QCD预言剩余部分来源于胶子或者与之强烈相关,格点QCD将与相关实验一同检验其预言

于轨道角动量以及胶子的自旋。结合对部分子分布函数的计算,格点QCD将为核子自旋的起源提供完整的理论预言;c) 核子电磁半径:目前基于 $\mu$ 子和电子得到的核子电荷半径有一定的偏差,在等待实验完整控制系统误差的同时,这一差异也是对理论预言能力的挑战。格点QCD的相关计算对格子体积、密度及其他系统误差来源有很高要求,同时也要求充分压低海夸克贡献的误差。我们期望这个方向上发出自己的声音。

2) 核子的三维结构:部分子分布函数(Parton distribution function, PDF)及其扩展,是高速运动的核子中各种部分子的动量以及横向位置的分布,提供了对核子完整的三维结构。尽管它们在极小尺度的形式完全确定,但是在核子半径的尺度上高度非微扰,无法通过解析计算得到。核子的各种基本性质,均对应于不同PDF及其扩展的适当积分。基于大动量有效理论的思想,我们可以计算各种价夸克的PDF并与实验比对,并有望在EIC/EicC建成之前,实现对海夸克PDF以及胶子极化PDF更精确的预言。这些计算都可以推广到对核子的广义分布函数以及横向动量分布的研究上,从而得到完整的核子三维结构。

3) 强子张量的直接计算:强子张量是核子与轻子的散射截面中强子的部分,与能标无关而依赖于散射的动力学。对强子张量在深度非弹性的动力学区间进一步因子化,就可以将其分解为微扰可算的部分,和非微扰的部分子分布函数。格点QCD基于对计算结果虚时间依赖的解析延拓,可以提供强子张量在各种动力学区间的信息:不仅可以在深度非弹性的动力学区间直接与实验比对,同时也可以在共振和浅非弹性区间提供理论预言,为中国的江门、美国的DUNE、日本的Hyper-Kamiokande的中微子实验提供中微子-核子散射的理论支持。

### 3.3 极端条件下的QCD

在非零温度/密度和强磁场下的QCD性质(如图7所示)方面,我们主要集中在三个方面进行研究:

1) QCD在非零重子数密度下临界点的寻找:

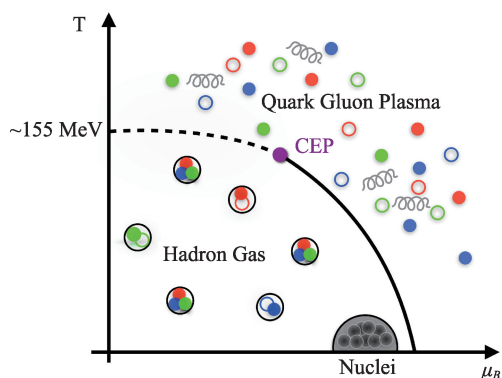


图7 QCD相图<sup>⑤</sup>。纵坐标为温度 $T$ ,横坐标为重子化学势 $\mu_B$ 。在 $\mu_B=0$ 时QCD相变是一个快速的平滑过渡(虚线表示),当温度变小、 $\mu_B$ 变大时有可能存在一个一阶相变曲线(黑色实线表示)的终点即二阶相变点(Critical end point, CEP)

QCD临界点的寻找是当前高能重离子碰撞领域一个重要热门的课题。美国布鲁克海文国家实验室的能量扫描等实验,及未来的德国CBM实验、俄罗斯NICA实验、日本J-PARC实验以及兰州CSR外靶CEE实验的主要任务之一就是寻找QCD的临界点。我们将确定在临界点附近可能存在的奇异行为。研究主要利用格点QCD计算在小重子数密度下高阶的重子数、奇异数、电荷数以及它们之间的涨落与关联。这些研究将能让我们更清楚的了解强相互作用物质在有限重子数密度下是否存在临界点,并预言其可能存在的位置。这将为实验提供重要的理论指导。

2) QCD手征相变:QCD手征对称性的破缺与恢复是一个很基本而重要的研究课题。人们确定了在物理夸克质量时强相互作用物质从强子相转变到夸克胶子等离子体相不是一个真正的相变而是一个平滑过渡。在手征极限下通过格点QCD的研究人们已经发现了一些二阶相变的证据,但是尚未确认。同时人们也不确定量子色动力学的手征反常对手征相变有多大影响。研究手征相变的性质对理解QCD理论本身有重要的意义。

3) QCD在强磁场下性质的研究:在早期宇宙和高能重离子非对心碰撞中均可能存非常强的(假设可达 $10^{18}$ 高斯)的磁场。这对强相互作用核物质的相结构和动力学演化都可能产生影响,由于QCD存

在着手征反常,因此可能存在手征磁、手征涡旋等效应。寻找这些手征效应亦是当前高能重离子碰撞领域的一个热点方向。在外磁场下格点量子色动力学的模拟不存在符号问题,因此可以直接利用常规方法进行研究。我们计划发展在强外磁场下格点量子色动力学模拟、计算和分析的方法,揭示在强外磁场、有限温度等极端条件下的量子色动力学物质的多维立体相结构并探索QCD相变与非平庸拓扑结构之间的密切联系;确定在强外场下手征反常输运电导系数,为相关唯象研究提供重要的输入。该研究将推进对QCD相结构的认识,特别是对未来数年重离子碰撞实验中寻找手征磁效应提供重要理论支持。

### 3.4 高精度前沿与探索新物理

在高精度前沿与新物理的探索方面,我们主要围绕以下三个方向进行研究:

1)  $0\nu2\beta$ 衰变:我国在中微子物理方面目前居于国际领先地位,率先发现了第三种中微子振荡模式。中微子振荡意味着不同味道中微子之间存在非零的静质量差,而无中微子双贝塔( $0\nu2\beta$ )衰变的探测,则可为中微子的绝对质量以及质量产生机制提供信息。一旦探测到 $0\nu2\beta$ 衰变,它不仅能够证明中微子是Majorana费米子,还能够帮助我们从轻子产生机制的角度出发,理解目前宇宙中的正反物质不对称。目前全世界有很多实验项目正围绕着探测 $0\nu2\beta$ 衰变展开,而我国锦屏地下实验室则为 $0\nu2\beta$ 衰变的探测提供了绝佳的实验环境。国内多家单位正在讨论建设测量 $0\nu2\beta$ 衰变的实验,而不同的核理论模型,对于 $0\nu2\beta$ 衰变的半衰期的预言,相差了10~30倍。我们期望从格点QCD出发,直接计算双中子到双质子的 $0\nu2\beta$ 衰变,在理论上建立从夸克尺度到核尺度的联系,从而更加精确地预言 $0\nu2\beta$ 衰变。

2) QCD+QED:强相互作用和电磁相互作用是自然界中存在的最基本的相互作用中的两种。在许多的物理过程中,这两种相互作用交织在一起,同时起着举足轻重的作用。像中子与质子微小的质量差,被认为是两种相互作用相消后的剩余效

应。尽管这个质量差只有电子质量的2.53倍,却决定了宇宙早期的中子、质子丰度比,给出了大爆炸核合成的重要初始条件。因此研究强相互作用与电磁相互作用的交织对于我们理解高能物理的世界非常重要。在高精度味物理领域,这两种相互作用的交织也扮演着关键的作用。以衰变常数比 $f_{\pi}/f_K$ 为例,格点计算已经能把误差降到0.16%,为精确检验标准模型提供了高精度的强相互作用输入。在这个精度下,我们必须要考虑电磁和强同位旋破缺带来的修正。在 $K$ 介子直接CP破缺 $\epsilon'/\epsilon$ 的计算中,电磁修正效应也成为主要的误差来源。从格点QCD出发,研究强相互作用与电磁相互作用的交织是未来发展的一个重要方向。

3) 重夸克味物理:在纯轻子和半轻衰变等过程中,我们的主要目标是精确确定标准模型中的CKM矩阵元,检验CKM矩阵的幺正性<sup>②</sup>。对于末态为矢量介子的衰变,如 $D_s \rightarrow \phi \ell \nu$ 过程,进一步提高强子矩阵元的精度需考虑矢量介子的宽度。另外近几年实验测量 $B$ 介子衰变过程中各种疑似反常,亟需格点QCD精确计算相关强子矩阵元予以核实。例如目前实验分别从 $B$ 介子的遍举和单举衰变过程中抽取了 $|V_{ub}|$ (以及 $|V_{cb}|$ ),两者有一定偏离;格点QCD对相关强子矩阵元计算精度的提高,对澄清这一偏离至关重要<sup>③</sup>。另外含粲重子的半轻衰变,也可以通过格点QCD进行计算并抽取CKM矩阵元。而重味物理圈图过程则对新物理敏感,很多味道改变中性流过程(如 $B_c \rightarrow D_s$ 和 $B_c \rightarrow D$ )中的强子矩阵元也需要格点QCD从第一性原理出发进行计算。

### 3.5 软件研发与数据积累

前述各项物理目标最终要落实在具体的计算上,这需要软件和数据的支持。我们需要基于国产超算环境、面向未来发展开发新一代格点QCD软件框架并做有针对性的优化,同时产生并积累有自主知识产权的基础数据资源。

1) 设计新的格点QCD软件框架:未来格点QCD研究项目的规模将越来越大,物理专家和计算

专家必须分工合作,需要新一代的软件框架来协调“物理图景-计算公式-算法实现-底层优化”等各层次的工作。因此,我们将面向未来的发展趋势,从零开始自主开发一套新的软件框架。这个框架将借鉴目前USQCD框架<sup>⑦</sup>、<sup>⑧</sup>的经验和教训,力图找到物理算法与计算优化之间最恰当的分层方案,并根据国产各超算架构的共性构建出若干方便扩展和移植的抽象层。在这个框架中,物理专家将可以集中精力,通过简洁直观的接口语言把计算公式编写为抽象代码,而不必考虑硬件平台与优化相关的问题。计算专家则将针对不同硬件平台的特点实现代码的优化编译,力图使任何抽象代码都可以顺畅高效地在任何平台上编译运行。

2) 针对国产超算平台开发格点QCD计算代码:为了在国产的申威、天河、曙光等超算架构上进行高效的格点QCD计算,同时也为新的软件框架提供底层支持,我们将针对这些架构各自的特点,开发并深入优化格点QCD计算的基础代码。我们也将基于这三种异构模型提出新的数据传输的抽象接口,并分别在三个平台上实现,在更高的层面上把这三种架构统一起来。同时,我们也将把目前现有的代码移植到国产平台上,尽早形成生产力并投入开展研究工作。

3) 积累数据:规范场组态的产生,是所有格点QCD计算的基础,在此之上我们可以针对不同的物理目标对组态进行测量计算。这两者就像是高能物理实验中的加速器和各种探测器:前者是后者的基础设施。国际上较强的合作组可以根据他们的研究兴趣设计并调优组态参数,产生组态数据,这项工作动辄需要数亿核时以上的计算资源。无法负担这项开销的研究者只能通过合作协议借用其他组的组态,从而研究受到极大限制,无法开展最前沿的创新性研究。鉴于此,我们计划针对前述的各研究目标设计和调优适合的参数,产生拥有自主知识产权的组态数据。当我们积累了足够的较大规模的组态数据,就可以开展相关研究工作,力争取得世界领先水平的研究成果。



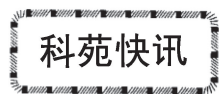
以上我们从五个不同的方面讨论了中国格点QCD未来的部分发展方向。事实上,这五个方面也存在着交叉和互补。我们的目标是以这五个方向为基点,以点带面,更全面更深刻地理解QCD的非微扰性质,构建格点QCD未来发展的良好生态。

综上所述,格点QCD已成为独立于理论、实验的第三种研究粒子物理和核物理的方法。它结合大规模Monte Carlo数值模拟,能够系统地研究QCD的各种非微扰问题。格点QCD的研究可以为粒子物理和核物理中许多重大物理问题的解决提供重要的理论支撑。目前来看,我国正在探讨若干个大实验项目的部署,同时我国已经准备部署E级超算,我们希望能够抓住这一双重契机,使我国的格点QCD研究在未来的几年中有一个较大幅度的快速发展。

### 参考文献

① Chuan Liu. *An Introduction to Lattice Chromodynamics (in Chinese)*. Peking University Press, 2017  
② S. Aoki et al. FLAG Review 2019. 2019

③ Chuan Liu. Review on Hadron Spectroscopy. *PoS, LATTICE2016*: 006, 2017  
④ Huey-Wen Lin et al. Parton distributions and lattice QCD calculations: a community white paper. *Prog. Part. Nucl. Phys.*, 100: 107-160, 2018  
⑤ Heng-Tong Ding, Frithjof Karsch, and Swagato Mukherjee. Thermodynamics of strong-interaction matter from Lattice QCD. *Int. J. Mod. Phys.*, E24(10): 1530007, 2015  
⑥ Luchang Jin. Review of Lattice Muon g-2 HLbL Calculation. *PoS, LATTICE2018*: 012, 2018  
⑦ Robert G. Edwards and Balint Joo. The Chroma software system for lattice QCD. *Nucl. Phys. Proc. Suppl.*, 140:832, 2005  
⑧ M. A. Clark, R. Babich, K. Barros, R. C. Brower, and C. Rebbi. Solving Lattice QCD systems of equations using mixed precision solvers on GPUs. *Comput. Phys. Commun.*, 181:1517-1528, 2010  
⑨ Stephen Lars Olsen, Tomasz Skwarnicki, and Daria Zieminska. Nonstandard heavy mesons and baryons: Experimental evidence. *Rev. Mod. Phys.*, 90(1):015003, 2018  
⑩ Mikhail A. Shifman, A. I. Vainshtein, and Valentin I. Zakharov. Remarks on Higgs Boson Interactions with Nucleons. *Phys. Lett.*, 78B:443-446, 1978  
⑪ Shoji Hashimoto. Hints and challenges in heavy flavor physics. *PoS, LATTICE2018*:008, 2018



## 北极海冰正在缓慢消失

研究人员已经确定了他们所说的“最后的冰区”,这是格陵兰岛西北一片2000千米的海洋,那里的北极夏季海冰可能还会存在几十年。

正如《地球物理研究快报》(*Geophysical Research Letters*)所报道的,北冰洋的海冰覆盖面积在1984~2018年间平均下降了1/3以上。研究人员说,只有在最后一块冰区的两个部分——其中一块紧靠格陵兰岛北部,另一块位于加拿大最北端岛屿以西1300多千米处的中心地带——这就是年复一年持续存在的全部海冰覆盖范围。

与北冰洋其他地区不同,这两个地区的冰层厚度最大可达4米左右。然而,该团队的最新分析还显示,那里冰的损失率是北冰洋其他地区的两倍。科学家们说,这两个地区(目前)持续存在的海冰,可能是主要依靠海冰生存的野生动物(如北极熊、海象和独角鲸)最后一个北部领域,使它们在变暖的世界中还能生存下去。

(高凌云编译自2019年11月12日 [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org))