

量子场论通俗入门

QCD 揭秘

维尔切克 著

丁亦兵 乔从丰 李学潜 沈彭年 任德龙 译

俗称为 QCD 的量子色动力学是强相互作用的现代理论。从历史上看，它源于原子核物理及对常规物质的描述——理解质子和中子是什么以及它们是如何相互作用的。如今 QCD 被用来描述大部分高能加速器中发生的现象。

二十或者十五年前，这类工作通常被称为“检验 QCD”。这个理论是如此的成功，以致我们现在把“计算 QCD 背景”改称为对更特殊现象的研究。例如，假如人们缺乏对那些由 QCD 支配的、更普遍的过程的精确性和可靠性的认识，发现传递弱相互作用的重的 W 和 Z 玻色子以及顶 (top) 夸克就可能会有更大的困难和更多的不确定性。至于那些仍有待发现的对象，诸如 Higgs 粒子以及超对称性表现形式的探测计划也都依赖于对借助 QCD 计算得到的产生机制和背景的详尽的了解。

量子电动力学的物理内容被概括为一种运算法则，它联系着时空中每一个可能物理过程的概率振幅。这些费曼图通过把图 2 一类的相互作用顶角连接在一起构成，它代表着一个带电的点粒子（轻子或夸克）辐射出一个光子。将每一条线对应的运动学传播子因子与每个顶角对应的相互作用因子乘起来就可得到振幅。反转一条线的方向等价于把粒子替换为它的反粒子。

量子色动力学可以类似地概括，但是有着一组

如图 1 所示的更复杂的组分和顶角。夸克（反夸克）带有一个单位的正（负）色荷。如下所示九种可能的、胶子颜色的线性叠加形成了 8 种物理胶子的一个 SU(3) 八重态。

QCD 的一个定性的新特点是存在描写带色胶子之间直接相互作用的顶角。与之相反，光子只与电荷耦合，而它们自身不带有任何电荷。

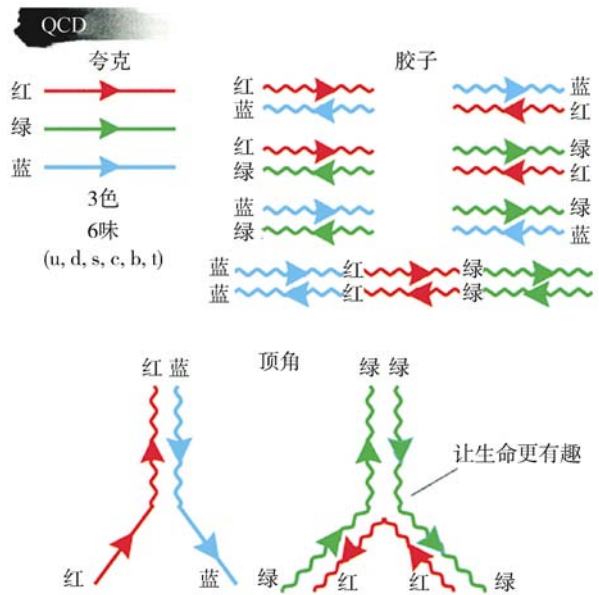


图 1 QCD 图形描述



设备、空气净化设备、保健光照设备、计算机控制系统和起居健身设备等组成。保健舱可以建在医院、宾馆饭店、别墅、高级住宅、办公室、会议中心、学校、商场等处。还可以根据需要，设计保健汽车、保健火车、保健飞机等。

行文至此，我想写下几句结束语。

人们生活在大气层中，谁也离不了大气科学。

天气预报是大气科学服务于社会的主要产品。了解一些大气科学知识，对于充分应用天气预报，

保证自己的业务活动正常进行和提高生活质量，大有裨益。

全球变暖已成为世界瞩目的热点，注意区分关于这个问题的事实、理论和科研成果，有助于理性地看待这一问题。

气象异常会引发各种灾害，但有些异常也有对人有利的方面。

呵护大气，就是呵护人类自己。

（中国科学院大气物理研究所 100029）

量子色动力学是一个精确美妙的理论。其简洁精确的一种映像是 QCD 的本质可以没有严重畸变地用图 1 来描绘。为了对照，我首先提醒你们，作为 QCD 前辈的量子电动力学 (QED) 的本质用图 2 就可以描绘，它代表一个相互作用的顶角，在该顶角一个光子对电子的存在或运动做出响应。这不仅仅是一个比喻。计算物理过程的十分确定和精确的运算法则是与 QED 的费曼图联系在一起的，构筑这些联系的正是这些相互作用顶角。

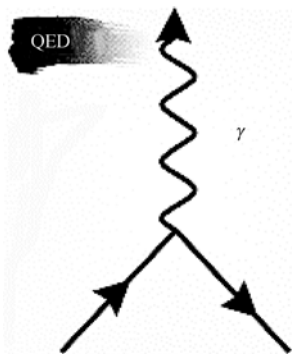


图 2 QED 图形描述

在相同的图形语言中，QCD 看上去好像是 QED 的一种扩充的版本。尽管在 QED 中只有一类荷，QCD 中具有三种不同的荷，它们标记为“色”。为避免沙文主义，我们可以选择红、绿和蓝。但 QCD 的色荷与物理学的颜色自然没有任何关系。相反，它们具有类似于电荷的性质。特别是，色荷在一切物理过程中都是守恒的，并且存在一些类光子的无质量粒子，称为色胶子，它们以适当方式反应了色荷的存在或运动，非常类似于光子对于电荷的响应。

夸克和胶子

带有色荷的粒子中有一类是夸克。我们知道有六种不同的，或“味道”，夸克：它们是上 (up)、下 (down)、奇异 (strange)、粲 (charmed)、底 (bottom) 和顶 (top) 夸克，分别用 u 、 d 、 s 、 c 、 b 和 t 表示。当然，只有 u 和 d 夸克在常规物质的结构中起重要作用。其他重得多的夸克都是不稳定的。一个具有六种味道中任意一味的夸克还可以携带一个单位的三种色荷中的任意一种色荷。尽管不同味道的夸克都有着不同的质量，该理论对三种色是完全对称的。这种色对称性由李群 $SU(3)$ 描述。

夸克像电子一样都是自旋为 $1/2$ 的点粒子。但是它们携带色荷而不是电荷 (译者注：这里是英文原文：But instead of electric charge, they carry color charge 的直译，含义并不准确，因此作者又补充下面一句)。更精确地说，除了它们的色荷之外，夸克还带有分数电荷 (对于 u 、 c 和 t 夸克为 $+2e/3$ ，对 d 、 s 和 b 夸克为 $-e/3$)。

然而，除了它们所有的相似性，在 QCD 和 QED 之间还有着几个至关重要的区别。首先，用 QCD 耦合常数标志的胶子对色荷的响应比光子对电荷的响应强得多。其次，正如图 1 所示，除了只对色荷做出响应之外，胶子还可以把一种色荷变成另一种。这类所有可能的改变都是允许的，而且迄今为止色荷是守恒的。例如，如果吸收一个胶子能把一个蓝夸克变成一个红夸克，则这个胶子本身一定带有一个单位的红色荷和负一个单位的蓝色荷。

所有这一切似乎要求有 $3 \times 3 = 9$ 种不同的色胶子。但是，胶子的一种特殊组合—— $SU(3)$ 色单态——与其他的态不同，它对所有的荷具有同等的响应。如果我们想有一个完全色对称的理论，就必须去除这种组合。这样我们剩下的只有 8 个物理的胶子态 (形成一个 $SU(3)$ 色八重态)。幸运的是，这个结论被实验所证实。

QCD 和 QED 之间的第三个区别，也是最深刻的区别，来自上述第二个区别。因为胶子对色荷的存在及运动发生响应，并且携带未被抵消的色荷^①，因而胶子完全不像光子，它们彼此之间也有直接的响应。光子当然都是电中性的。因此，你在“星球大战”中曾看到的激光刀的搏击不会出现。但它是一部关于未来的电影，也许他们正在使用色胶子激光。

借助于 QCD 基本方程 (图 3) 我们甚至可以更紧凑地展示 QCD。你不必太在意这个方程。别忘了，理查德·费曼 (Richard Feynman) 曾经展示过，只用一行就可以写下宇宙方程： $U=0$ ，其中的 U 是一个完全超脱的、确定的函数。它是来自一切物理定律贡献的总和：

$$U = U_{\text{牛顿}} + U_{\text{高斯}} + \dots$$

其中，例如， $U_{\text{牛顿}} = (\mathbf{F} - m\mathbf{a})^2$ 和 $U_{\text{高斯}} = (\nabla \cdot \mathbf{E} - \rho)^2$ 。

这样我们就可以用一个统一的方程式，描述所有已知的物理定律以及所有尚未发现的定律。当然这完全是骗局，因为不存在拆解 U 的有用的算法，除非回到它的各个组成部分。图 3 显示的 QCD 方程式与费曼嘲讽的统一很不一样。它们的完整内容都摆在面前，拆解他们的算法产生于没有歧义的对称性的数学。

在图 3 中我们看到的 QCD 一个显著的特点是 该理论只需要很少几个可调的参数。即，只有一个整体耦合常数 g 和六个夸克味的夸克质量参数 m_j 。

正如我们将看到的，耦合强度是一个相对的概念，而且在很多情况中质量参数并不重要。例如，那些比较重的夸克在常规物质的结构中仅仅起到极小的作用。因此，QCD 近似于这样的一种理论思想：从很少的几个纯概念元素出发，构造出大量忠实地描写自然的物理结果。

图 3 这里展示的 QCD 拉格朗日量原则上是强相互作用的一个完整的描述。但是实际上它导致了一些众所周知难解的方程。这里 m_j 和 q_j 分别是第 j 味夸克的质量和量子场， A 是带有时空指标 μ 和 ν 以及色指标 a, b, c 的胶子场。数值系数 f 和 t 保证了色的 SU(3) 对称性。除了夸克质量之外，耦合常数 g 是该理论唯一的自由参数。

描写现实

乍一看来，建议图 3 的方程或图 1 中那些等价的图可用以描述强相互作用粒子真实世界显得令人无法接受。没有一个我们真正看到过的粒子出现在图 1 中，且没有一个出现在图 1 中的粒子曾经被观测到过。特别是，我们从来没有看到过粒子带有分数电荷，然而我们却把它赋予了夸克。而且我们肯定没有见过任何像胶子一样的东西，——一种传递长程强力的无质量的粒子^②。因此，如果 QCD 是对这个世界的描写，就必须解释为什么夸克和胶子不能作为独立的粒子存在。这就是所谓的禁闭问题。

除了禁闭之外，在观测的现实与夸克和胶子的幻想世界之间还有另一个定性的区别。这个区别描述起来是很微妙的，但同样是基本的。在这里我不可能对唯象论据完全公平的对待，但我能够以其最终和净化了的理论形式来阐述这个问题。唯象学表明，如果 QCD 是对这个世界的描写，那么 u 和 d 夸克应该具有非常小的质量。然而，如果这些夸克确实具有非常小的质量，那么 QCD 的方程就具有一些附加的对称性，称之为手征对称性 (chiral symmetry) (源于“手”的希腊字 *chiro*)。这些对称性允许在右手夸克间 (其旋转方向相对于运动方向像一个普通的右手螺丝) 和在左手夸克间分离变换。

但是观测到的强相互作用粒子之中并不存在这样的对称性；不出现相反宇称的粒子对。因此，如果 QCD 是真实世界的描写，则手征对称性一定是自发破缺的，非常像铁磁体中转动对称性是自发破缺的一样。

显然，在构成 QCD 基础的漂亮的简单概念与观测的现象世界之间建立起联系是一项重大的挑战。应对这一挑战有三种基本方法：

1. 第一种方法是不畏艰难地直接求解方程。这样做并非易事。它之所以不太容易，是因为这个解必须展示与该方程似乎朴素地建议的那些极不相同的性质 (禁闭、手征对称性破缺)，并且它必须能描述丰富而复杂的唯象学。幸运的是，强大的现代计算机已经使得计算 QCD 的一些关键预言成为可能。一些基准结果显示于图 4，在那里把算出的在一个令人印象深刻范围内的强子的质量与它们的观测值作了比较。其符合程度令人鼓舞。

这类计算清楚地证明，禁闭和手征破缺都是求解 QCD 方程得到的结果。这些计算向我们展示既没有无质量的胶子，也没有任何带有分数电荷的粒子，更没有表明手征对称性没有破缺的扩大了的多重态。只有那些观测到的有着正确性质的粒子——既不多也不少^③。

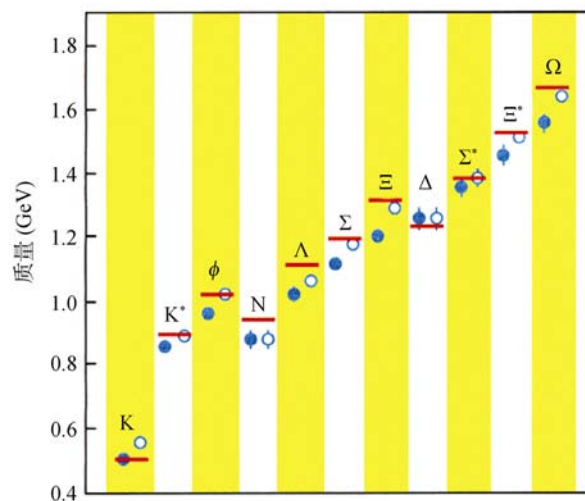


图 4 由 QCD 预言和大规模数值计算得到的介子和重子质量谱。在这个计算过程中只有两个可调参数：耦合强度和奇异夸克质量 (通过 K 或 ϕ 介子，二者都包含有奇异夸克)。上和下夸克的质量都可以近似取作零。实的圆点标记依赖于观测到的 K 介子质量的计算值，而空心圆点标记依赖于观测到的 ϕ 介子质量的计算值。与观测质量 (红线) 的符合在 10% 的精确水平。随着计算机的能力和技术的提高，这类计算正在改进。

在这些以及其他一些巨量的数值计算给出了令人印象深刻而又有用的结果的同时，它们并不是所有期望的终点。有许多物理上感兴趣的有关 QCD 的问题，已知的数值计算技术变得不可行。再有，使我们的计算机充当神示，只发布答案而不加解释，着实不能令人满意。

2. 第二种方法是放弃求解 QCD 本身，转而集中精力于一些模型，这些模型处理起来更简单，但仍与真实世界有某些重要的共同之处。例如，理论家们研究了一些低维度的类 QCD 模型，或纳入超对称性或者不同规范群的模型，以及一些其他的简化变种。很多有启发性的深刻见解就是以这种方式得到的。然而，就其本质而言，模型给出的见解并不适合于与物理现实不讲情面的冲突。

3. 第三种方法，也是本文余下部分的主体，就是考虑一些物理环境，在那里将设法使这个方程变得简单一些。

异乎寻常的虚度

图 5 展示了 QCD 的最基本的简化。在图 5 左半部分我们看到对撞事例中的类喷注的出现，在这种事例中高能电子-正电子湮灭产生了强相互作用粒子（强子）。人们发现在末态有很多粒子，但它们中的绝大多数清晰地集中在几个共线的粒子喷注中，喷注中的粒子享有一个共同的方向。这些强子

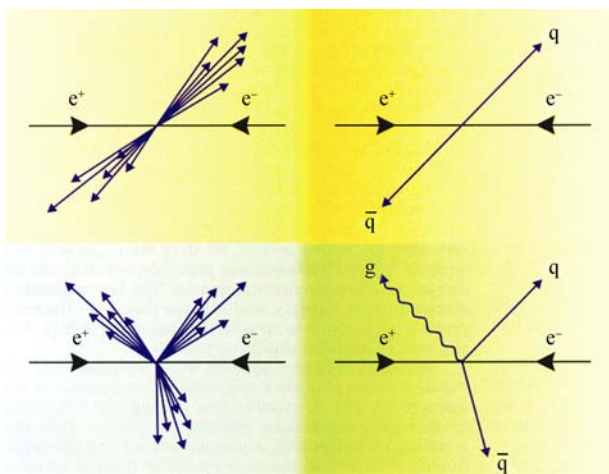


图 5 在高能 e^+e^- 湮灭成强相互作用粒子中，人们观测到（图左）多粒子末态，它们由两个或偶而三个（或者极其稀少的四个或更多的）“喷注”组成，每个喷注中的粒子粗略地沿着相同方向飞离对撞点。通过假定每个喷注都是由一个单独的原始夸克或胶子形成的，QCD 预言了这些喷注的产生几率及角度和能量的分布。喷注可以用渐近自由解释，它告诉我们，发射一个剧烈地改变能量动量流的夸克或胶子的几率很小。

产生事例中大约 90% 只有两个喷注，它们沿相反方向喷射出来。人们偶而看到三个喷注，它们大约占强子末态的 9%。

把那些产生多重粒子的强子事例与产生轻子，如 μ 子的对撞做比较。在后一种情况下，大约 99% 的时间观测到的只是沿相反方向飞出的一个 μ 子和一个反 μ 子。但是偶而——大约 μ 子末态的 1%——还发射出一个光子。

假如历史以不同的顺序发生，类喷注强子末态的观测肯定会物理学家们提出，它们清楚地表明其基本现象就如同图 5 右边所显示的那些一样。它们与轻子散射和 QED 太相似了以致不能忽略。

最终，通过研究能量在喷注中间如何分配的细节以及它们之间的不同角度的相对几率，物理学家们就将会直接从实验导出存在轻的自旋为 1/2 的客体和无质量的自旋为 1 的客体以及这些隐蔽的客体如何相互耦合。通过研究那些稀少的 4 喷注事例，他们甚至可以知道自旋为 1 的粒子间的耦合。这样我们所知道的 QCD 中所有的基本耦合都可以或多或少直接地从实验推断出来。但是仍然存在一个很大的谜团：为什么出现的是喷注而不简单地是粒子？

答案是意味深长的，并且有着丰硕的推论。那就是胶子耦合的强度完全依赖于它们的能量和动量。“硬胶子”，带有很多的能量和动量，耦合很弱；而能量较低的“软胶子”有强的耦合。这样，一个快速运动的色夸克或胶子仅能罕见地发射出明显重新赋予能量和动量流方向的“辐射”（一个胶子）。它解释了在喷注中见到的共线的流。另一方面，可能存在大量的能解释喷注中含有的丰富的粒子的软胶子。因此，从严格的和非常确凿的意义上讲，我们实际上已经看到了夸克和胶子——但是只是能量流，而不是独立的粒子。

我们把硬胶子的弱耦合及软胶子的强耦合现象称为渐近自由。尽管它的名字挺古怪，这个概念却体现在了精确的方程中。它使我们能对在不同能量下诸多种类型强相互作用过程中硬辐射事例发生的频繁程度做出定量的预言。正如我们在图 6 中看到的，到现在为止，对胶子的耦合强度随能量和动量增加而减小的核心预言有着大量的直接证据。请注意，图 6 中每个单独的点都汇总了上百次观测结果，所有这些都必须是——也正是——用唯一的一个可调参量（在 Z 玻色子质量处观测到的夸克胶子耦合强度）来拟合的。

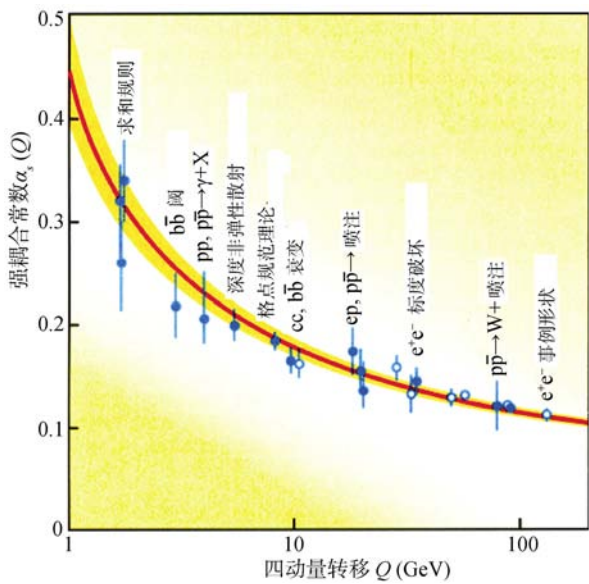


图 6 按照 QCD 预言，强相互作用的跑动耦合“常数” α_s 随着能量和动量的增加而减小。这就是渐近自由。实的曲线是预言的 α_s 对 Q 的依赖关系，Q 是在 QCD 顶点处 4-动量转移的大小。实验输入值是在 Z 玻色子质量处测到的夸克对与一个虚胶子的耦合；灰色的狭长区域反映了它的不确定性。理论预言与大量的实验结果都符合得非常好，这些实验结果用数据点及其误差标志出来。一些空心圆点表示的是基于动量空间多粒子终态的一般形状得到的结果。

实际的历史是另一种样子，描述强相互作用时所需要的渐近自由是从很多间接的线索推导出来的，并且原来提出 QCD 作为强相互作用的理论就是因为它实质上是具有渐近自由性质的唯一的量子场论。从这些思想出发，喷注的存在以及它们的主要性质都是在实验发现之前预言的。

高温 QCD

QCD 在高温时的行为显然是令人感兴趣的。它对一个如果让一种东西越来越热会怎么样的天真问题提供了答案。它也描写了就在大爆炸发生之后那段关键时期物质的行为。而且它正是可以用重原子核之间高能对撞实验研究的一个课题。即将开展实验（实验已经开始进行，并已取得了一些瞩目的成果——译者注）的布鲁克海文国家实验室的相对论重离子对撞机（RHIC）就是专门用于这类物理研究的（图 7）。

为了避免混淆，我应该声明，在这篇文章中，当我讨论高温 QCD 时，我假定了净重子密度（夸克减反夸克）非常小。相反，当我讨论高密度 QCD 时，我指的是低温下一个很高的净夸克密度，它远高于通常冷核物质的夸克密度。通常把温度和净重子密度取作强子物质相图的两个独立变量。

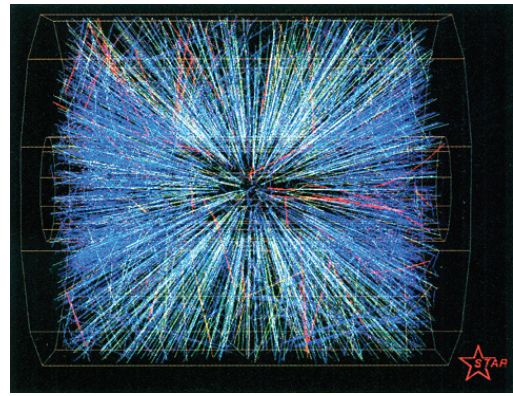


图 7 2000 年 6 月份用星光（Star）探测器记录下来的布鲁克海文新的相对论重离子对撞机中最早一批高能金原子核对撞中的一个事例。在该探测器的这幅重建侧视图（side view）中，两束每核子 28 GeV 的金原子核束流分别从左和右射入，然后在中心处对撞。从这一次对撞中发生的大约一千个带电粒子的踪迹被记录了下来。当 RHIC 运行直到每核子 100 GeV 的设计束流能量时，预期还会有高得多的多重性。

渐近自由意味着 QCD 物理在很高温下变得更简单。似乎试图通过能够解释所有那些在高温下能量许可的、不同的介子和重子共振态的产生和相互作用来构建高温相是不可能的。我们采用理论物理中常用的一种步骤，以期绕过这些杂乱的障碍。我把它称之为耶稣徒策略，它是从我所知道的一个修道会的信条中得到的启发：“请求宽恕比请求允诺更得到保佑。”这一信条告诉你要做一些明确的简化假设，推出它们的结果，然后检测以确认没有产生矛盾。

按照这种精神，我们暂时假定我们可以从自由的夸克和胶子出发描写高温 QCD。在这种（无相互作用的）夸克、反夸克和胶子的理想的高温气体中，绝大部分的能量和压强源于大能-动量粒子的贡献。相互作用会怎样影响这些粒子呢？明显地探测这样的粒子要求具有大动量转移的相互作用。然而这样的相互作用是很稀少的，因为，正像渐近自由告诉我们的，它们是由相当弱的耦合所支配的。于是相互作用不会使整体的图像全然失效。换一种说法，如果我们把由夸克、反夸克或胶子引起的强子喷注视为穿上强子服装的准粒子，我们就会有一个几乎理想的准粒子气体。因此，忽略相互作用似乎是一个有效的起点。耶稣徒的策略成功了。

引人注目的是，QCD 的热力学行为作为温度函数是另外一类可以通过方程用大型计算机直接计算的量。图 8 给出了显然证明了的定性的预期。低温时（ $\leq 150\text{MeV}$ 或 $1.5 \times 10^{12}\text{K}$ ），唯一重要的粒子是

无自旋的 π 介子： π^+ 、 π^- 和 π^0 。它们标志着三个自由度。但是从夸克-胶子描述出发，我们预期有更多的自由度，因为轻的自旋为 1/2 的夸克有三种味，它们中的每一种又有三种色。然而如果你包括了两种自旋取向、反夸克和八种胶子，而后的每一个都有两种极化状态，最终代替 π 介子的三种自由度你会有 52 种自由度。于是我们预期，在一个给定的温度下，当你从一个强子气体过渡到一个夸克-胶子等离子体时，能量密度会有一个非常大的增长。这正是显示在图 8 中的计算所给出的。

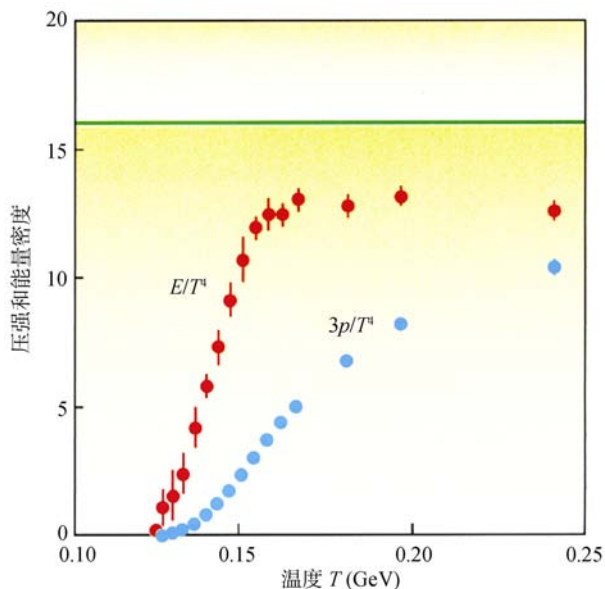


图 8 随着温度 T 增加超过 130MeV，压强 p （黑点）及能量密度 E （灰点）激增，它表明在这个非常热的核物质的热力学格点规范 QCD 的计算中，打开了很多夸克-胶子自由度。为简单化，在计算中假定只有两种味夸克。归一到 T^4 ，这两个变量都变成无量纲量（取自然单位），而且渐近地趋向图上部直线。

真实的实验又是什么样的呢？不幸的是，我们唯一可以接近夸克-胶子等离子体的途径是通过微小的短寿命的原子核火球的产生，且只能探测它们的碎片。解释这些数据要求复杂的建模。在寻找夸克-胶子等离子体的证据时，存在着两个人们可能追求的层次。在第一个层次，人们或许希望观测到一些在强子层次很难解释但基于夸克和胶子层次却可以有一种简单的定性解释的现象。近年来，一些这样的效应已经被 CERN 的重离子项目组观测到了。但是存在着第二个更严格的层次，它们对于未来仍然是个挑战。类似于那些我曾讨论过的与喷注相关的做法，利用 QCD 理论的那些基本方面，人们可

以对来自夸克-胶子等离子体的各种各样“硬”辐射的发射给出定量的预言。在这些预言中的部分被实验证实之前，我们将不能裁决一个微弱相互作用的夸克胶子等离子体概念的正确性^④。

高密 QCD

具有较大净重子密度（而且是低温）的 QCD 行为显然也是有兴趣的问题。它还回答了另外一个天真的问题：当你把东西挤压得越来越紧时将会发生什么呢？对中子星内部的描述也是有兴趣的。但也许最有意思和最令人惊讶的有关高密 QCD 的事情是，通过思考，人们发现了在禁闭及手征对称性破缺这类传统问题方面丰富的新前景。

我们为什么可以期望 QCD 在大密度极限下会简化呢？我们再一次利用耶稣徒的策略。假定我们可以忽略相互作用。然后作为起点，我们令所有的夸克都有较大的费米面（费米面限制了可以把所有那些费米子都放进去的最小的动量空间体积，哪怕是在零温时。）这意味着活跃的自由度——费米面附近的夸克激发——具有较大的能量和动量。因此本质上我们或许被诱导到曾在高温、低密度区使用过的同样的观点，并且再一次宣称取得了成功。

然而进一步思考时，我们发现这个观点过于随意。首先，它没有涉及胶子，它们毕竟都是些自旋为 1 的玻色子。所以它们绝不受泡利不相容原理的约束，而该原理阻止低动量夸克的激发。低动量的胶子相互作用很强，而且因为它们是随处可见的主要成分，因此达到高密度时问题会否真正大大简化并非显而易见。

当想到很多低温凝聚态体系的费米面对会剧烈改变物质物理性质的配对不稳定性敏感，第二个困难就出现了。而这现象成为了金属超导性和氦-3 的超流性的基础。每当在费米面相对的两边的粒子之间存在等效吸引力时，它就发生了。正如约翰·巴丁（John Bardeen）、利昂·库柏（Leon Cooper）和罗伯特·施里弗（Robert Schrieffer）所阐明的，原则上甚至一个任意小的弱吸引力都可以引起基态剧烈的重组。

表面上看似很小的微扰可以有这样大的一种效应是因为我们处于简并微扰论的范围内。费米面两边粒子对的低能激发，其总动量为零，可能会彼此散射。通过精心设计这种激发的相干混合，使它们都指向相同方向，系统将获得一种能量的优势。

在凝聚态物理中超导性的发生是一件困难且微妙的事。这是因为电子之间的基本相互作用是库仑

斥力。在经典的金属超导体中等效吸引源于包含光子的微妙的推迟效应。在铜酸盐超导体中，起因仍然模糊不清。

与之相反，在 QCD 中我们称之为“色超导性”的发生却相对地直截了当。这是因为与两个电子不同，两个夸克之间的基本相互作用总是吸引力！通过群论的论证人们可以看到这一点：夸克形成色 SU(3) 群的三重态表示。处于色反对称态的一对夸克，形成一个反三重态。因此，两个夸克放到一起时的等效色荷比它们分开时缩小了 2 倍。从它们发出的色流减少了，色场中的能量变小了。这暗示着一种吸引力。所以我们应当仔细地考虑色超导能能为我们做些什么。

常规超导性的两个核心现象是迈斯纳效应和能隙。迈斯纳效应是说磁场不能深深地穿透进一个超导体内部。超流的产生抵消掉了这些磁场。当然，电场也被电荷的运动所屏蔽。这样，电磁场通常变成短程的了。等效地看来仿佛光子获得了质量。的确，这正是从方程所显现的。于是我们可以预期在一个色超导体中，胶子将获得质量。这是一个非常好的消息，因为它消除了我们低能-动量胶子的问题。

能隙意味着要花费一个有限大小的能量将电子从它们的超导基态激发。它与我们在自由费米面时所遇到的情况完全不同。所以，按通常方式的原始配对的不稳定性就不再存在了。

现在随着对小微扰（配对不稳定性）的敏感性和桀骜不驯者（软胶子）的控制，相互作用的剩余效应实际上很小，且在很好的理论控制之中。耶稣徒的策略再次使我们受益。

色味锁定

对一个稍微理想化的真实世界 QCD，在那里设想仅有三种味道的无质量夸克：u、d 和 s 夸克，预言了色超导的最简单和最漂亮的形式。奇异夸克事实上比 c、b 和 t 夸克要轻得多。在极高密度时忽略较小的夸克质量是一种极好的近似。

在这里，我们发现了引人注目的色味锁定现象。通常，不同夸克的色之间完美的对称性是十分清晰的，且完全不同于并独立于不同夸克味之间的不完美的对称性。但在假想的色味锁定状态中，二者变成相互关联。色对称性和味道对称性，作为各自独立的对称性都是自发破缺的，而只有它们的某种混合才能不受影响地幸存下来。

高密 QCD 中的色味锁定剧烈地影响着夸克和胶子的性质。正如我们已经看到的，胶子变成有质量的粒子。由于色和味的混和，原来仅依赖于味的粒子电荷也被修正了。特别是，一些胶子变成带电的粒子，而夸克的电荷值也移动了。这些粒子的电荷都变成了电子电荷的整数倍。

这样，禁闭的最显著的特点——不存在长程色力和所有物理激发态具有整数电荷——都表现为色超导的简单而严格的结果。再有，因为左手和右手味对称性都与色连接起来，所以它们也都等效地彼此锁定。这样，要求夸克的左手和右手分量之间独立变换的手征对称性也自发破缺了。

总而言之，在 QCD 的高密度极限下计算得到的低能激发态的性质与预期的基于唯象经验和模型的中等密度强子物质的性质有着惊人的相似性。这使人们猜测：不存在把它们分离开来的相变。

不幸的是，这种猜测的数值和直接实验检验目前看来都做不到。所以我们不能肯定在可计算的高密度极限下的禁闭和手征对称性破缺机制与在中等密度或低密度下运作的机制是相同的。但我仍然认为，这些长期以来一直被视为神秘和难以驾驭的性质已经简单地——而且严格地——在 QCD 的一种物理上感兴趣的极限下展现出来是令人称奇的。

我力图让你相信两件事：其一，QCD 的基础是简洁且漂亮的，其二，这些基础步入了繁盛期，并且在各种各样的极端的条件下直接描写了物质的物理行为。

（丁亦兵、乔从丰、任德龙，中国科学院研究生院 100049；李学潜，南开大学物理学院 300071；沈彭年，中国科学院高能物理所 100049）

①译者注：作者在这里强调与不带电荷的光子不同，胶子带有色荷。

②译者注：按照场论，无质量的粒子传递的力，应该是长程力。而 QCD 作为强作用理论，无质量的胶子应该是传递长程强作用力的粒子。这显然不同于通常认为的强作用为一种短程力。后者指的是强子层次观察到的现象，由于 QCD 中的渐近自由与禁闭，它与强子层次的强相互作用的关系是非常复杂的。

③译者注：这类计算指的是利用格点 QCD 从第一原理出发计算强子谱。无质量的胶子场与带分数电荷的夸克以及它们之间由 QCD 描写的规范相互作用哈密顿量是计算的基本出发点。只不过连续的场近似地用分立的格点所代替，计算给出的是与实验数据相符合的强子质量。夸克与胶子不会出现在计算结果之中。

④译者注：这里的微弱相互作用指的是高温下由于渐近自由，夸克、反夸克以及胶子之间的相互耦合非常弱。