

一、微扰量子色动力学的成功与困难

我们已经知道，用来描写强相互作用的理论——量子色动力学取得了很大的成功。这主要指从它出发得到的关于高能散射过程的许多预言都在定性和半定量方面与实验结果一致。粒子物理界为之倍受鼓舞，因为人类对强作用的认识终于获得了十分重要的进展。

不过，到目前为止，我们还只能说，量子色动力学是一个完整的强作用理论的最好候选者。因为要作为一个真正完整的理论，它还必须要能同时解释另一大类强作用现象，并且把所有的强作用现象统一起

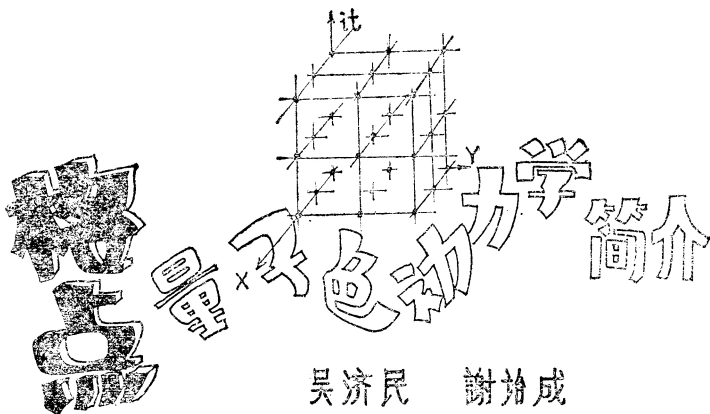
来加以解释。这一大类现象常被称为“非微扰现象”。虽然，关于“非微扰现象”还没有一个明确的定义，这些现象是相对于那些可以用理论上的微扰论方法得到解释的现象而言的。几十年来，在非微扰现象的研究方面，一直没有得到根本性的突破，因为作为理论处理的基本出发点仍然局限在微扰处理方法范围之内。

微扰论是一种近似方法，在粒子物理中用这种方法处理电磁和弱相互作用过程是很成功的。通常，描写一个有相互作用的体系，首先要写下它的作用量 H 。从它出发，可以计算出体系的各种性质。在一定的条件下，它可以被分成两部份：

$$H = H_0 + g^2 H_1$$

其中 H_0 给了这个体系能量的主要部分，它相应的本征状态通常有较多的对称性质， H_1 描述了体系中相互作用是怎样进行的， g 是耦合常数，它代表了相互作用的强度。如果 g 大大小于 1，我们就可以把 H_1 看作扰动，按 g 的幂次对理论计算作出逐级的修正，这就是所谓的微扰论方法。但是，在量子场的微扰处理中会出现无穷大项，于是理论上又发展起来一整套复杂的“重整化”方法来处理无穷大问题，最后得到有限的与实验符合的物理结果。如果一个体系的作用量不能按上述方式分为两个部份处理，或者 g 接近于 1，甚至远远大于 1，微扰论就无能为力。

量子色动力学之所以能解释高能散射现象，是因为在越来越高的能量下，夸克和胶子之间的等效相互作用强度越来越小（渐近自由性质），这时，就可以用微扰论方法处理问题。这里所反映的是夸克-胶子在越来越近距离上的效应。但是夸克-胶子在中等的和远距离上的相互作用又会产生什么效应呢？这种情况下，夸克-胶子之间的等效相互作用强度并不小，微扰论方法根本不可应用。这时在夸克-胶子体系中，交换着大量小动量的胶子和夸克，这就产生了各种“非微扰量”。因此，我们必须重新认识理论和发展相应的计算原则。



强作用中的非微扰效应表现出十分重要的物理结果，让我们举些例子。

粒子的质量当然是它们的一个很基本的物理量。自然界为什么赋予质子的质量恰好是 938MeV，而 Δ 粒子的质量是 1236MeV， π^0 介子的质量又为什么只有 135MeV 呢？如此等等，这是强作用的非微扰效应产生的结果。我们希望强作用理论对此作出定量的解释。也许有人会问，不是已经有了诸如口袋模型那样的理论了吗？固然，这类理论假设粒子象一个口袋，里面装着核物质，虽然它也能预言出粒子的质量谱。但是，我们再追问一下，这口袋又是从何而来的呢？原来，这里已经把从现象中总结出来的一部分规律人为地先放入理论中去了，这是一种现象性理论。我们现在要求的却是从最基本的理论原则（称为第一性原则）出发，推演出整个理论体系和它的预言。

又例如，各种粒子大部份是不稳定的，它们按一定的规则衰变成更轻的粒子，因而有确定的寿命和衰变方式。粒子的寿命、衰变宽度、分支比等等当然也是粒子的重要性质，以往，对于强子我们总要引入一些诸如“衰变常数”、“粒子在相对坐标原点波函数”等等概念，才能完成理论计算。而这些量要从实验提供的信息中才能确定。也就是说，这里也要在半途中放入实验提供的知识才行。这些“衰变常数”、“零点波函数”也反映了夸克-胶子大距离上的作用效应，它们也都是“非微扰现象”。

按照量子色动力学的观点，高能散射过程可以用组成强子的夸克-胶子的子作用过程来解释，但是，这些子过程的终态是夸克、胶子，而在实验中观察到散射过程最终产生的还是强子，并不是夸克、胶子，由这些终态夸克、胶子“强子化”为强子是一个极其复杂的过程，这也远远不是用微扰论方法所能解释得了的，它又是一种非微扰现象。

我们还可举出很多这样的例子，诸如：粒子的磁矩、结构函数、真空结构等等。总之从理论观点上看，

这些现象在粒子物理中处于十分重要而又还属于未被开发的领域之列。

出路在哪里呢？我们还是把注意力集中在量子色动力学上。一方面是因为它已经作出的理论预言与实验结果在半定量水平上是一致的，至少也是自洽的，还特别是因为这是一种保持规范不变性的理论。规范不变原则作为一种基本原则已经在弱电作用理论以致部份强作用理论中得到了确认。

二、格点规范理论的提出和初步进展

1974年美国康奈尔大学的威尔逊提出了“格点规范理论”用以解释非微扰现象。10年来，由它给出的第一批理论预言是十分鼓舞人心的，特别因为这是首次从第一性原则出发得到的定量结果，与实验数据也是自洽的，所以含意深刻。人们注视着它的进展，那怕是很困难地获得的一点进展。

让我们设想把三维空间和时间（严格说是“虚”时间）部分成小格。为了形象地说明问题，我们试以图形表示。由于作图方法只能画出三维立体图形，我们假想一个二维的空间，再加一维“虚”时间，就可以把此三维时间空间分为如图的格点。真实的时空空间是在此外加一维空间。四维时间空间就是由无数的四维正立方体叠起来的，正立方体的各个角点叫做格点，正立方体的边线，也就是连结相邻两个格点的连线叫做键。我们规定胶子场只存在于键上，如果理论中还包括夸克场，它们只存在于格点上（既包括胶子又包括夸克的理论被称为格点量子色动力学）。还规定由这些场量组成的格点作用量也要有规范不变性，当格点间距 a 趋于零时，它也趋向于已有的量子色动力学的作用量。我们先在格点体系中计算各个物理量，然后，再把格点间距 a 趋于零，就期望能得到真正的物理量，特别是那些非微扰量。题图为在三维时空空间中的格点。

为什么这样处理的理论可以避免微扰论方法出现的麻烦又能给出非微扰量呢？这是因为在这里根本不需要把作用量中的一部份人为地分出来作微扰展开处理，耦合常数只不过以参数的身份出现在理论中，所以，避免了在微扰论中必然出现的无穷大项。这里需要讨论和计算的数学形式归结为一些“群积分”，在概念上说，也和普通积分一样，就是把在一定范围之内的结果相加，只不过这种相加的过程是在描写对称性的参数的取值范围（群空间）内进行罢了。事实上，微观世界本身是一个混然整体，所谓“微扰”与“非微扰”是人为地划分出来的，当人们的知识水平还不够时，只能先作这样的处理，并且只能讨论那些“微扰量”，所以格点规范理论的出现正说明了人们的认识正在向更高的水平发展。

人们很早就隐约认识到，粒子物理理论与统计物理之间有十分密切的联系与相似，因为两者都讨论有

无穷多自由度的体系。现在格点规范理论把这种相似性十分清楚地表现出来了。在统计物理中，格点理论被广泛地利用和发展起来。例如，铁磁体是一个最简单的例子。在那里，它们把三维空间也分成许多立方体小块，把铁磁体物理的电子安置在格点上，电子的自旋可以有向上或向下两种可能的取向，在温度不高时，它们之间的相互作用使得邻近的电子自旋都倾向于取同一方向，得到非零宏观可观察效应，但温度的大小会影响这种取向，当温度超过某个临界点（称为居里点）时，热运动使它们的取向完全是各向同性了，宏观可观察量为零，物质就发生了“相变”。威尔逊以及其他许多人发展了统计物理中的各种格点理论，成功地解决了这些临界现象问题，威尔逊因此获得了诺贝尔物理奖金。在粒子物理中，我们构成了格点规范理论，但是情况要复杂得多。这里讨论的对象包括胶子和夸克，它们的自旋不同，相互作用情况也要复杂得多。理论是规范不变的，最终还要求把格距 a 趋向于零，才得到所要的结果。但是两者的数学结构是相似的，基本的物理概念也是相通的。

三、格点量子色动力学的数值计算

由于问题的复杂性，我们目前还不会用解析方法讨论其中的许多问题。但是由于理论的规范不变性，使得这里所讨论的对象是“群积分”，这可以用数值计算方法进行。于是人们求助于计算机，但是问题也不因此能迎刃而解。我们知道，每个格点在四个正方向上共伸出四个键，在 su_3 规范不变条件下，每个键有八个独立变量；每个格点上又有正反夸克场，每个夸克场有四个Dirac分量，有三种颜色，又要考虑至少有四种味道的夸克，试想对一个每边有十六个格点的四维立方体来说，独立变量就是200万个之多，所以我们必须采用大型电子计算机，并且只好采取抽样计数的方法计算这些群积分，这就是目前在格点规范理论中普遍使用蒙特卡罗数值计算方法的原因。

1981年帕瑞西等人利用布鲁克海文的大型计算机按照上述方法第一次计算得到强子的质量，包括 π 、 ρ 、 δ 、 Λ 、 B 等粒子以及质子、 Δ 粒子的质量等等。与实验数值相比，介子质量约有20%的误差，重子质量误差更大些。他们还计算得到 π 介子的衰变常数值为 $(150 \pm 50)\text{MeV}$ ，（实验值是 93MeV ）得到了标志手征对称性自发破缺的不为零的数值。后来又有人分别计算得到了一些十分有意义的结果，例如：在两个重夸克之间的位势随着他们之间距离的增加确实表现出由库仑位势向线性位势变化，这从一个方面表明当夸克之间距离越大时，存在一种越来越大的作用使它们禁闭起来。当温度增加到一定程度时（相当于粒子之间以更高能量碰撞时），夸克的自由能突然增加，表示在高能散射中它们又能从禁闭状态下“解放”出来，还

有人大量地研究并预言了各种胶子球的质量谱，这是目前唯一能从理论上定量预言胶球质量的途径，正在与实验情况比较之中。近来又有人在计算机上用数值方法找到了纯规范场情况下属于最低能量状态（真空状态）的纯规范场分布情况。虽然这些结果是很初步的，但是，我们特别要强调这是从第一性原则出发得到的结果，所以意义重大，尽管在数值计算过程中暂时不得不作一些近似，但是那些是非本质的。我们还要强调的另一点是，计算机在粒子物理理论发展中表现出了新的重要作用。大家早就知道，在高能物理实验中，各种类型计算机是实验设备中必不可少的一个组成部份。最近几年来，理论学家利用计算机又有了新的进展，这就是在格点规范理论中使用蒙特卡罗数值计算方法，得到了许多非微扰量，这些结果目前暂时看来还无法用解析方法得到，它对量子色动力学的发展提供了十分重要的定性和定量的结果，它表明，量子色动力学是可以用来完整地描写整个强相互作用现象。

四、展 望

目前，在格点量子色动力学的发展中还有不少难题。在使用计算机的课题中，由于计算机容量大小的限制，还不能在格点数目很大的体积上做计算，格点间距也并不能做得很接近于零，通常还要忽略从真空中产生的夸克对的影响等等，这都会带来种种误差。特别是，在用解析方法的研究方面，明显地缺乏重要的手段，这样阻碍了我们对物理本质作更深的了解。

和对待任何一种发展中的事物一样，对格点量子色动力学的前景、发展速度等等问题，也有持乐观和悲观两种态度。然而，大多数人对它是有希望的。格点量子色动力学用数值计算方法已经给出了十分鼓舞人心的结果，它第一次从第一性原则出发给出了对许多非微扰量的理论预言，初步结果也与实验事实自洽。尽管现在我们对它的了解还是很初步的，但是预计从数值计算和解析研究两方面同时入手，相互配合，会出现崭新的局面。道路可能是漫长的，在科学的入口处就象在地狱的入口处一样，它要求我们拿出百倍的勇气去迎接客观世界的挑战，去建立新概念，发现新方法，最终创造新的理论体系。