

标准模型和蒙特卡洛模拟

何常

20多年来,理论物理学家应用量子场论来建立关于宇宙在亚原子层次上如何运作的“标准模型”。他们想用这个模型计算出按照自然规律应该可以观察到的值,以便拿它去同实验结果相比较。可是标准模型中的许多细致计算非常困难,物理学家无法直接去做这种计算,因此他们转而在计算机上进行模拟,以获得有关初期宇宙的各种信息,来改进和深化对标准模型的理解。一种叫蒙特卡洛模拟的新技术能告诉有关初期宇宙的大量知识。

两种计算方法

用计算机作科学上的计算有两种不同的方法:一种是写出一组能完全描述你所关心的现象的方程,然后用计算机把这组方程解出来;另一种是写出一个程序来“虚拟”你所关心的现象,这对于研究大而复杂的问题,显得比前面那种方法更为重要。

例如,如果你想调查一下田野里狐狸和兔子的数目依赖于它们相互关系的变化规律。第一种方法是用一个程序来解一组描述下述关系的方程:狐狸数和兔子数的相互关系;狐狸捕捉兔子的本领;狐狸和兔子的繁殖率。但是,要是这些方程很复杂,你就无法把它们解出来。这样,你就不妨转向应用模拟,即写出各个狐狸和兔子活动规律的程序。它的优点是只须写出各个动物的活动规律,这比写出支配大量动物相互活动的规律往往要简单得多。它的缺点是模拟程序可能比解方程的程序要大得多,因而计算机计算出结果所需的时间也就长得多。

标准模型及其计算

按照标准模型,宇宙包含着许多不同类型的粒子,这些粒子组成物质和传递基本力。每

类粒子由其量子数所确定的唯一的一组性质来识别。这同用街道的地址来辨别住宅的办法有些相似。各种粒子间最基本的区别是以一种叫自旋的量子数为基础的。自旋只能取诸如0, 1, 2等整数中的唯一值的粒子叫做玻色子;取半整数(如1/2)自旋的粒子叫费米子。玻色子和费米子的行为是十分不同的。

人们最熟悉的玻色子是光子,它是光波和无线电波等电磁现象的成因。玻色子有一个重要性质:宇宙法则允许许多同类玻色子处在相同的能量状态。这就是激光的工作原理——晶体或气体加上脉冲,激光器就能够把许多光子在相同的能量状态下快速地堆积起来,以产生集中的光脉冲。然而,宇宙法则却不允许两个费米子在相同的能量状态下存在。任何两个相同类型的费米子不是处于不同位置,就是有某种不同的量子数。费米子的这种基本性质叫做泡利不相容原理,这是造成标准模型计算如此困难的原因之一。

大家知道,基本的费米子要么是轻子,要么是夸克。费米子因交换玻色子而相互作用,见图1a。基本力的传递者是玻色子:光子是电磁力的媒介子,电磁力影响所有带电粒子的电现象;胶子是强力的媒介子,它与夸克相联系,等等,见图1b。

正像伴随光子产生电磁场一样,伴随另外几种玻色子也产生规范场。这是波粒二象性的一个事例。物理学家要在很小尺度上描述宇宙行为,必须应用数学去处理粒子,好像处理抛向空中的一把小石子;同时还要应用数学去描述粒子所产生的波,好像描述那些小石子落到池塘里激起的水波一样。电子和一切粒子如同作为电磁场成因的光子一样,既是粒子又是波。

量子力学的最重要特性是决定论和不确定性的结合。费米子和玻色子的实际交换并没有

固定的时间和次序。相反，与各类事件相联系的是一种几率，粒子正是按照那些几率相互作用。的确，特定事件何时发生是不确定的，但是把发生事件的统计性质集中起来必然服从某种法则。最重要的是，不同类型的各个事件能够相互干扰。如果一特定事件能在两种途径之一中发生，发生这一事件的总几率不是简单地二中取一加起来。因为两种几率可以相加，也可以相减，这跟湖面上的水波可以相长和相消的情形相同。

每当物理学家要做量子力学计算时，他们必须考虑事件发生的所有可能途径。例如，在

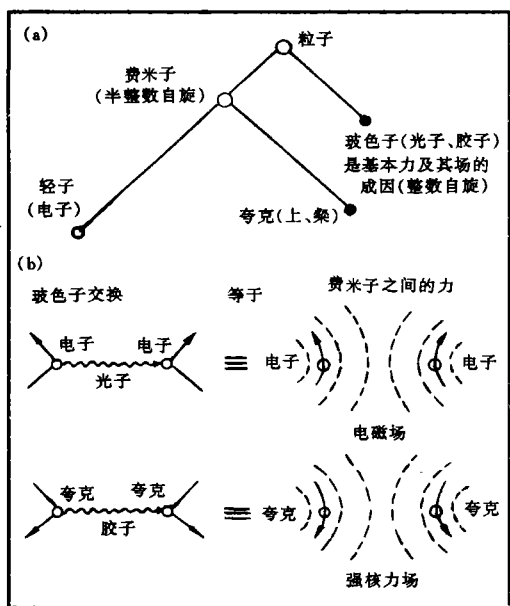


图 1

一盏灯和一张纸之间，一个光子可以取所有可能的路径。这种对所有可能性求和的方法，是50年代美国物理学家里查德·费曼建立起来的。不过，由于这些选择是相互干扰的，物理学家无法先独立地计算出每一种选择的几率，再把结果相加在一起。因此，除了日常问题，要对其他任何问题作出准确计算非常困难，甚至是不可能的。

克服这些困难的传统方法是把一种相互作用发生的可能途径加以分类，这种分类是按照所涉及的粒子间发生相互作用的可能次数来做的，

然后再略去那些不大可能发生的事件的几率。这同计算公路上发生交通事故相像。假设两辆汽车有一次相撞，它们在这次旅途中就不大可能再次相撞。更准确一些的模型考虑两次相撞，但略去三次相撞，如此等等。在每次计及较大次数的重复相撞的可能性时，就使先前的答案出现一个小小的扰动。这种分析叫做微扰理论。

比如，两个电子相互作用，是由交换一个、两个或更多个光子来进行的，这种可能性可以用费曼图来说明(见图1)。电子和光子之间的相互作用强度叫做电磁耦合常数，它有一个近似值 $1/137$ 。费曼图出现一个特定几率与发生事件数成反比，所说的事件数也就是图上那些顶点的数目。双光子发生相互作用的机遇是 $1/137$ 乘以单光子相互作用机遇数；三光子相互作用的机遇更小。因为 $(1/137)^2$ 已经很小， $(1/137)^3$ 就更小了。物理学家应用微扰分析可以得到非常精确的结果。

为了便于计算，物理学家必须引入一个叫做截止(Cutoff)的值，这是一个电子所允许的最大能量。虽然截止的应用是一种近似，但是带有很大能量的电子很少，把它们删除掉不会影响结果；另一方面，如果不用这样的截止，在中间计算中就会产生大得难以想象的结果。

电磁耦合常数的值取决于一个你无法从实验中测得的量，这个参量叫做裸耦合常数。由于观察不到它，物理学家可以为它选取一个数值，这个值取决于图的组成，可以应用它来反推出正确的可观察的耦合常数。如果做得准确，则这样的计算结果既不取决于所选取的裸耦合常数值，也不取决于截止。这种使结果与任何任意选取的参量无关的方法叫做重正化。

如果我们只限制在量子电动力学(QED)上，并且只考虑电子和光子，那末标准模型能够很好地预示特定的物理常数到小数点后十位。但是当我们把注意力转到核子时，应用这个模型来计算就非常困难了。

蒙特卡洛模拟

核子(如质子)是由三个夸克组成，由胶子把它们结合到一起的。玻色子是强核力的成

因。正像电子有电荷那样，夸克都有色荷，它支配着夸克的作用方式。由于引入色荷，这个领域就定名为量子色动力学，即 QCD。很遗憾，把夸克结合在一起的胶子也带有色荷。这就是说，胶子不仅与夸克作用，它还同别的胶子作用。这就使 QCD 远比 QED 复杂。因为在 QED 中，光子只同电子作用，不同别的光子作用。

还有，描述胶子-夸克相互作用强度的耦合常数比描述光子-电子相互作用的耦合常数大得多。这就是说，在 QCD 中与在 QED 中不一样，对于夸克与胶子行为来说，很复杂的费曼图与简单图形同样重要。面对这种情况，物理学家采用一种不同类型的计算方法，即求助于巨大的超级计算机。

首先把粒子在其中作用的四维“时-空”分解成离散的网格。这样，用一个程序就可以记录下网格中各点的费米子。在这一方法中，把费米子聚集到一起的规范场被看成是连接网格各点的连线的值。计算机程序不是把可能的费曼图加起来，而是把可能的网格构形加起来，并按它们的几率加权。

传统方法和网格方法的区别在图 2 中作了说明。在 QED 中，近似方法是忽略所有比某一定限度更复杂的图，仅仅把比较简单的图加在一起。而在 QCD 中，近似方法是把系统的各种可能的构形样本都加在一起。QCD 可以安全地忽略的构形数比 QED 少得多，这是 QCD 的计算步骤之所以比 QED 多得多的原因所在。

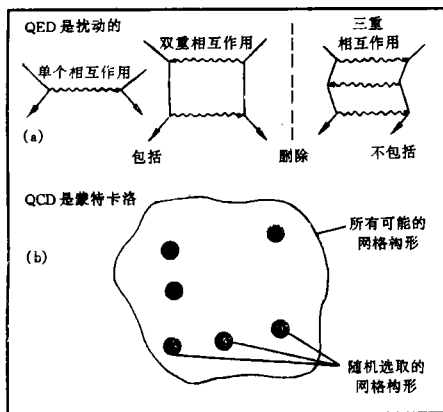


图 2

抽样过程是这样的：模拟程序以适当的几率随机地产生构形，然后把它们统统加起来。因为是用“掷骰子”的办法来产生网格构形，所以把它称作蒙特卡洛模拟（蒙特卡洛在摩纳哥，是世界闻名的赌城）。由于每一不同的网格构形是作为大量相似的真实构形的代表被取用的，所以与网格构形相联系的加权，必然以某种方式反映它所代表的真实构形的多少，反映它们有多大的可几性。

简化量子色动力学

由于不相容原理，费米子使蒙特卡洛计算产生问题。在每个网格构形产生之后，程序必须保证没有两个相同的费米子。实现这种保证的最容易的办法是引入矩阵，它能囊括各网点的场之间的相互作用。每当我们变换一次矩阵，计算第二个矩阵时，则矩阵的各个值取决于第一个矩阵中的各个值。这么做就给每个费米子以同其他各个费米子相作用的机会。这种计算是很费事的，使 QCD 无可奈何地只有渴求计算机的高运算次数——一个每边 8 个网点的网格，总共包含有 $8^4 = 4096$ 个网点（因为时-空是四维的）。因之矩阵就包含有 4096×4096 ，即大约 1600 万个值。

做这些矩阵计算，正好对应产生构形时忽略费米子而只用规范场；在规范场中胶子只同别的胶子相互作用。这样一种模拟叫做“抑制”（quenched）。比如，对 QED 的抑制近似不允许光子在两点间通过时分裂成一个电子和正电子。这就是说，光子之间不能相互作用。在许多情况下这是一种好的近似。

要区别抑制计算和非抑制计算，可以用图 3a 所示的弹子球玩具来帮助理解。小弹子从玩具顶部一个一个地释放，被小钉子随机地弹开，最后堆积在底部的盒子里。如果有足够数量的小弹子，盒子里小弹子的堆积状况就非常接近于正弦曲线（见图 3b）。如果我们把小弹子看作夸克，把小钉子的区域看作充满胶子的网格，这就与抑制近似相当。

非抑制模型就是小弹子与小钉子相碰时允许小钉子产生弯曲，使接着的小弹子来到时发

现环境有了少许改变;这个小弹子就趋向于以一种稍稍不同的路线被弹开,并且使小钉子弯曲得更厉害.这样一来,小弹子在盒子里的最后分布就同抑制模型很不相同了(见图 3c).

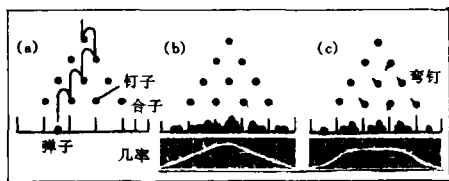


图 3

物理学家竟然能用抑制近似作出有用的模拟,这是颇饶兴味的.一个典型的抑制模拟比非抑制模拟快 100 多倍,而且在相同的情况下给出相同的答案.特别引起广泛兴趣的是有一个 QCD 相变.许多我们所熟悉的物质能从一种相转变到另一种相.如水变为冰,汽油变为蒸汽,等等.有趣的是 QCD 中的相变是在大爆炸之后立即发生的,这时宇宙诞生了.

在接近绝对零度或者在没有夸克时,胶子趋向于粘合在一起形成叫胶子球的物体.当系统被加热后,胶子球最后被“熔化”成胶子的海洋.确切地了解它的发生过程,就能告诉我们大量关于宇宙初期的情况,并且对宇宙为什么是现在这个样子给出启示;还有可能将相变计算同实验结果进行核对.如果两个很重的原子核(比如铀原子)高速碰撞,它们就可能达到足够的温度和密度来再现宇宙初期的状况.观察这样的碰撞所产生的粒子,就可望描绘高温降落时发生相变的性质.

高效能 QCD 机

计算中应用的网格越大,计算的结果越逼真.同样,网点间的间隔越小,计算也越准确.但是,对一特定的网格来说,计算所需时间的增长比网格大小的增长要快.网格大小增加两倍,计算时间要增加 16 倍以上.物理学家为计算需要所推动,从 80 年代初期就致力于设计制造用于 QCD 计算的超级计算机.

这些“QCD 机”有一个共同点,是应用它们的并行性来获得低成本高速率.普通计算机(从程序运算器到计算机主机)包括一单个的处

理机和一记忆存储器.这种类型的计算机通常叫做 Von Neumann 计算机,它是因计算机科学家和数学家 J. Von Neumann 命名的.现在研究制造的都是并行计算机,即对一个问题用许多处理器在一起并行工作.为什么并行机远比 Von Neumann 计算机成本低而效率高?可以设想用火车运送不断增长的旅客.解决这个问题的一种办法是集中一切技术力量去设计单行的高速火车.结果会达到某种火车速度的物理极限;即使没有达到极限,最后乘客化在上下车上的时间会比他们旅游的时间还要长.这不是一个好办法.较好的办法是在不同的轨道上同时开动许多辆火车.尽管这些火车比较慢,但是它们比较便宜,而且在多数情况下,旅游者化的总时间会减少.它带来大得多的交通容量.

有几家英国公司处于开发并行计算机的最前列.目前世界上功能最强大的计算机是纽约 Norman Christ 小组在哥伦比亚大学研制的 64—处理机计算机,它建立了 QCD 计算的标准程序.每秒钟几乎能做 65 亿次计算.另外,IBM 的瓦脱孙研究中心的 GH11 超级计算机制成后,计算速率会超过每秒 100 亿次.

QCD 研究人员领先发展了这一新型的科学方法,这种方法用模拟代替直接计算.标准模型是一种先进的物理理论,但是它不是光用纸和笔就能够作出检验实验结果的数字答案的;唯一的检验办法是做上面所说的那种又长又复杂和费时的计算.这件事已使许多物理学家变成程序编制员,正像 300 年前牛顿发明微积分使许多自然哲学家变成数学家一样.

封面照片说明:

这是我国第一座反应堆,迄今已运行了近 40 年.它是多用途反应堆,具有单位功率热中子通量密度高,辐照空间大,γ 射线本底低等优点,适合于热中子物理实验和生产放射性核素.多年来,这座反应堆为发展我国核科学技术,特别是对我国原子弹、氢弹爆炸成功、核潜艇下水、放射性核素生产,以及培养核科技人才,做出了贡献. (强家华 / 供稿)