

# 1999年诺贝尔物理奖

林 晓 满

根据瑞典皇家科学院10月12日发布的消息,瑞典皇家科学院已决定把1999年度的诺贝尔物理奖授予两位荷兰科学家赫拉尔杜斯·霍夫特(Gerardus 't Hooft)和马丁努斯·韦尔特曼(Martinus J. G. Veltman)。这两位研究者是由于他们为粒子物理理论提供了更加坚实的数学基础而获奖的,尤其是揭示了用他们的理论如何精确计算物理量。欧洲和美国的粒子加速器近来进行的实验已经证实了他们的许多计算结果。

## 数学基础更加坚实的粒子物理理论

我们周围的一切物体都由原子构成,而原子又由电子和原子核组成。在原子核中有质子和中子,它们又都由夸克组成。为了研究夸克这一最深层次的情况,需要大型加速器,本世纪50年代制成的第一台粒子加速器标志着现代粒子物理学的诞生,第一次使人们有可能研究新粒子产生和它们之间的相互作用力。

大约在本世纪50年代中期,提出了现代理论的第一个方案,经过多年的工作才得到现在的粒子物理标准模型。这个标准模型把所有基本粒子分成三代夸克和轻子,它们借助于若干交换粒子而产生强相互作用力和弱——电相互作用力(如图1所示)。

然而,标准模型的理论基础是不完整的,特别是还不清楚能否用来详细地计算物理量。把本年度的诺贝尔物理奖授予赫拉尔杜斯·霍夫特和马丁努斯·韦尔特曼就是因为他们为这个理论建立了坚实的数学基础。他们的工作还为其它研究者提供了一种很好运作的“理论机器”,尤其是可以用它来预言新粒子的特性。

## 适用于旧理论的新名称

在粒子物理标准模型中,描述粒子相互作用

的现代理论都是规范理论。规范这个术语是与规范对称性相联系的,规范对称性是规范理论中的一个特殊性质,它已经被研究者看成是最基本的物理性质。早在19世纪60年代,麦克斯韦建立的电磁理论把电场和磁场统一起来,并预言了电磁波的存在,在今天看来这个理论就是一种规范理论并仍然保持有效。

下面我们来说明规范对称性的概念,电场和磁场可用势函数来描述,按一定规则对它们进行变换(规范变换)时不会改变原来的电场和磁场,最简单的一种变换就是在电势中加上任一常数。大家都知道,电势的零点是可以任意选择的,只有电势差才是有意义的。这就是为什么一只松鼠能在高压线上行走而不会被伤害的原因。物理学家从理论上把电势零点按这种方式的平移理解为对称性,这就是一种规范对称性。



图1 物质的基本粒子有六种轻子和六种夸克。在粒子物理标准模型中,它们的作用力由量子场论的非阿贝尔规范理论来描述。弱-电相互作用力是以四种交换粒子作媒介的,它们是无质量的光子和三种场粒子 $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ 。强作用力是由八个无质量的胶子 $g$ 传递的,除了这十二个交换粒子外,理论还预言了一个很重的希格斯粒子,所有粒子的质量都是由希格斯粒子的场产生的。

人们可以按不同的次序完成两个规范变换,而次序是无关紧要的.通常说电磁学是一种阿贝尔规范理论,这是以挪威数学家阿贝尔(1802—1829)的名字命名的.(阿贝尔变换的一个简单例子是平面旋转.读者可以用一支铅笔按照图2的方法试一试.)

### 量子力学发生的问题

1925年左右,在量子力学建立后,物理学家就试图把量子力学的波函数和电磁场统一成

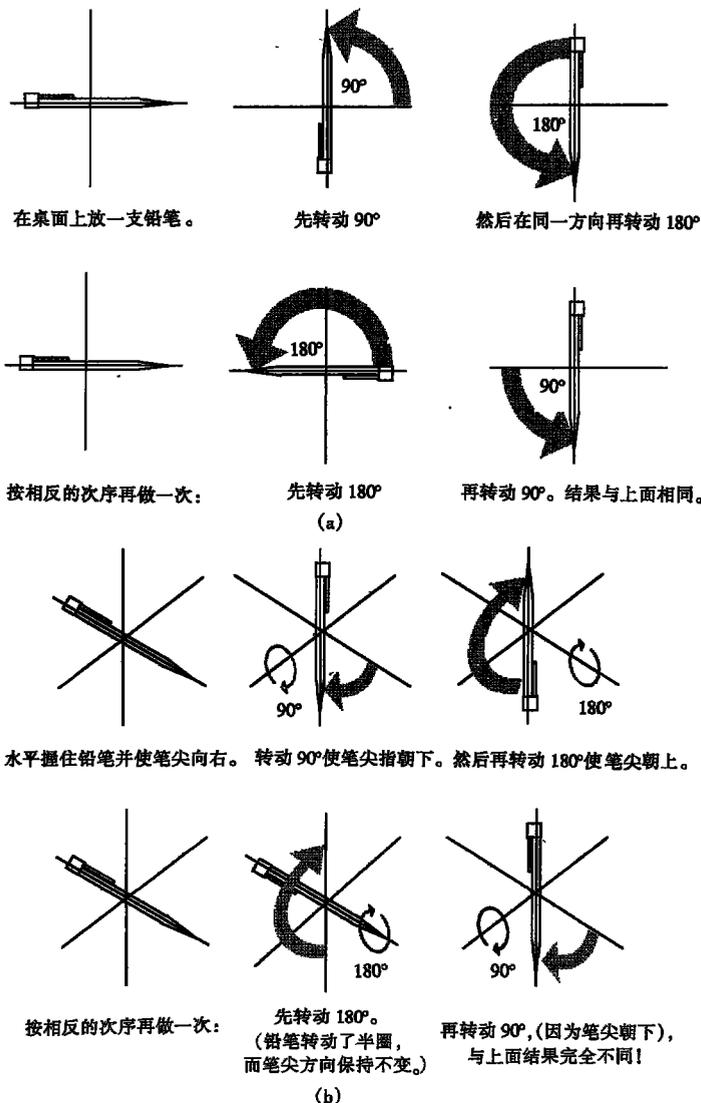
量子场论.但是问题出现了,新的量子电动力学变得更加复杂,并且所完成的计算又常常给出不合理的结果.这是因为量子论预言:电磁场在电子或质子附近能自发地产生大量寿命很短的粒子和反粒子,称为虚粒子(图3).这样,本来只是单个电子的系统突然就变成了一个多粒子系统.

在本世纪40年代,朝永一郎、施温格和费曼已经解决了这个问题(因他们的贡献而荣获

1965年度诺贝尔物理奖).他们三个人提出的方法简称为重整化,这意味着单个粒子在“远处”是可以被观察的.在这种方法中,没有必要再单独考虑那些虚粒子对,可以认为中心的原始粒子被虚粒子“云”所遮掩,而使原始粒子获得了新的电荷和新的质量.用现代术语来说:朝永一郎、施温格和费曼重整化了一个阿贝尔规范理论.量子电动力学已经得到高精度的检验,并且比其他任何物理理论都要高.例如德梅尔特(获1989年度诺贝尔物理奖)用离子收集器成功地把电子磁矩测量到12位的精度,其中前10位与计算结果完全一致.

### 统一的电磁相互作用和弱相互作用

本世纪前半期,放射性的发现和后来原子物理学的进展产生了强相互作用和弱相互作用的概念.简单地说,强相互作用把原子核约束在一起,而弱相互作用却允许某些原子核发生放射性衰变.最初关于弱作用的量子场理论是本世纪30年代初期建立的.这个理论遇到的问题甚至比量子电动力学的问题更严重,就连朝永一郎、施温格和费曼的重整化方法也不能解决它们.



- (a) 一组阿贝尔变换的例子是二维的旋转。  
 (b) 一组非阿贝尔变换的例子是三维空间的旋转。

图 2

到本世纪 50 年代中期,有些研究者找到了非阿贝尔规范理论的第一个例子,这是一个具有新特点的量子场理论.它与阿贝尔变换不同,在以任意次序进行的规范变换下,非阿贝尔变换的结果与次序有关.这样,使得该理论有着更加复杂的数学结构,同时也展现了新的可能性.(非阿贝尔变换的一个简单例子是空间的旋转,读者可以用一支铅笔按照图 2 的方法试一试.)

直到本世纪 60 年代,这种新的可能性才得到充分的开发利用,几个合作研究非阿贝尔规范理论的科学家格拉肖、萨拉姆和温伯格把电磁相互作用和弱相互作用统一为一种弱-电相互作用(获 1979 年度诺贝尔物理学奖).1983 年由这个量子场理论预言的新粒子 W 和 Z 在日内瓦欧洲核子研究中心(CERN)的加速器实验室被发现了(鲁比亚和米尔因此而获得 1984 年度诺贝尔物理学奖).

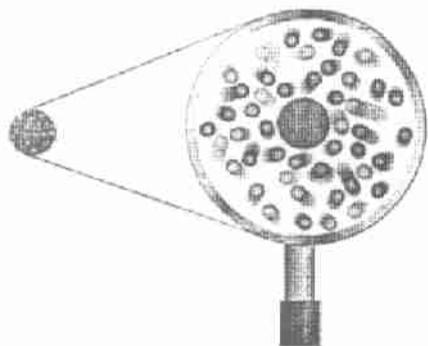


图 3 按照量子场论,一个真实的“物理”粒子是由“裸露”的中心粒子和“包裹”着它的“虚”粒子云组成的。

### 历史的重复

本世纪 60 年代建立起来的弱-电相互作用,尽管把理论向前推进了一大步,但这项研究却难以被人们接受,这是因为当他们用这个理论更详细地计算新粒子 W 和 Z 的性质及其它物理量时,给出的结果是不合理的.这和本世纪 30 年代朝永一郎、施温格和费曼在重整化量子电动力学取得成功之前的情况完全类似.当时,好多研究者对于进一步推进这个理论的可能性持悲观态度.

对非阿贝尔规范理论能够重整化抱有希望的一个人就是马丁努斯·韦尔特曼,本世纪 60 年代末期,他是乌得勒支大学新任的一位教授.韦尔特曼研制的计算机程序可以用符号将复杂表达式进行代数简化,并完成了当时量子场论所有结果的定量计算.实际上,费曼在二十年以前就已经把这种计算问题进行了系统化,他引入的费曼图很快就被研究者所接受,但当时还没有计算机来进行这些计算.韦尔特曼坚信:一定能够找到把这个理论重整化的方法,他的计算程序就是检验各种思想的墙角石.

1969 年春天,韦尔特曼遇到了年仅 22 岁的学生赫拉尔杜斯·霍夫特,当时他就表示要研究高能物理.霍夫特写了一篇十分简短的文章后就被接收为那一年秋季的博士研究生.他的任务就是帮助研究非阿贝尔规范理论重整化的方法.霍夫特终于获得了成功并超出了上面的所有期望,他在 1971 年发表的两篇文章中说明了这个研究方案中的一个重大突破.

借助于韦尔特曼的计算程序,霍夫特的部分计算结果得到了验证,他们又共同制定了一个更加详细的计算方案.这样,弱-电相互作用的非阿贝尔规范理论就成了一台运转着的理论机器,开始进行着各种精确的计算,这和 20 年前量子电动力学发展的情况十分相象.

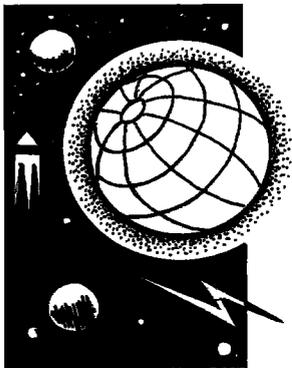
### 理论预言的实证

正如上面所述,虽然弱-电相互作用从一开始就正确地预言了新粒子 W 和 Z 的存在.但是,更加精确预言包含 W 和 Z 性质的物理量却只能通过霍夫特和韦尔特曼的工作才能开始进行.最近,在欧洲核子研究中心(CERN)的 LEP 加速器上可以产生大量的 W 和 Z 粒子.测量结果和计算结果一直是非常一致,完全支持着理论上的预言.

用霍夫特和韦尔特曼的计算方法得到的一个特殊量是顶夸克的质量,顶夸克是标准模型中两个第三代夸克中比较重的一个.1995 年,在美国费米国家实验室首次观察到这个夸克,而它的质量就是数年前理论预言的,并且实验和理论的一致性也同样是令人满意的.

# 全球电路

金 仲 辉



在晴天,接近地球表面处存在着一个垂直指向地面、大小为100—300V/m的电场。这表明地球表面带有负电

荷,而大气带有净正电荷。那么当一个人站在地面上是否在头部与脚底之间经受了—个200V以上的电势差呢?回答显然是否定的。在日常生活中,这个电场所以并未引起注意是因为我们的躯体和身旁的许多物体(例如树杆等)比之于空气都是良导体,它们短路了电场,使我们感受不到它的影响。但是晴天大气电场是客观存在的。

由于大气中存在着净正电荷,于是它们在晴天大气电场的作用下,形成方向垂直向下的晴天大气电流,将大气中的正电荷输送给地球表面,使全球大气携带的正电荷与地球携带的负电荷中和,造成晴天大气电场消失。然而,实际上晴天大气电场是相当稳定的,这说明全球大气携带的正电荷和地球携带的负电荷也是相当稳定的。因此,一定存在着一些与晴天大气电流相反的电荷输送过程,不断补充大气和地球被中和的电荷,使大气与地球间的电荷输送过程达到动态平衡。

为了解释大气晴天电场,W. Thomson提

出了球形电容器模型,将电离层和地球表面作为电容器的正、负极板。今天,我们知道这个电容器通过大气泄放电流,在全球范围内,这个平均电流约为1000A;而与这个晴天大气电流相反的电荷输送过程有三个,那就是雷暴、太阳风和磁层之间发电机作用以及热电离层中大气潮汐的发电机效应,这三个准直流电源驱动了全球电路,其中雷暴是最强大的电源,它是另二个电源的3倍。雷暴起了准直流电源的作用,首先由C. T. R. Wilson于1920年提出的。为了纪念他,将从雷暴向上流向电离层的电流称为威尔逊电流。威尔逊电流通过电离层扩展到全球,也通过磁层,沿着磁力线扩展到相反的半球,电流返回到地球表面,而如图1所示的云对地闪电,使电荷返回到雷暴,这样就接通了全球电路。图2概括了上述的全球电路过程,也说明了大气各层的位置。

除了上述直流以外,闪电还可激发出超低频电磁辐射,它们的频率是分立的,为8、14、

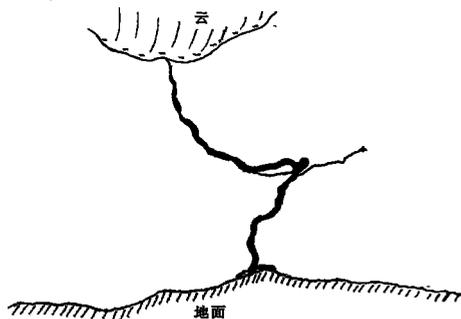


图 1

中国农业大学 北京 100094

## 我们期待何时能有下一个重大的发现

希格斯粒子是霍夫特和韦尔特曼理论中的一个重要组成部分(图1),至今还没有被实验所证实的。正如先有理论上预言,后被实验证实的其它粒子那样,研究者正等待着希格斯粒子的直接观察。与计算顶夸克质量类似的方法

所得到的计算结果表明,现存的加速器能产生一些希格斯粒子。但只有欧洲核子研究中心(CERN)正在建设中的大型强子对撞机(LHC)才有足够大的功率详细研究新粒子。这需要研究者耐心等待数年才能到来,因为估计到2005年LHC才可能建成。