



从对称性看世界



郑志鹏 江向东

(中国科学院高能物理所)

对称是美的,因为它和谐;和谐是美的,因为它对称。大自然是美的,因为它如此和谐和对称。

美的概念可分两种,一种是外在的即表现的美,一种是内涵的即素质的美。对称性也可以分为两类,一类是比较直观的时间或空间配置上的对称性,叫时空对称性,一类是指比较抽象的内在的和谐和协调,叫内部对称性。

一、时空对称性

人类最早认识的对称性,即通常所说的对称性,多指几何空间配置上的对称性。这种空间对称性,是指被观察的对象的空间位置经过某种变换后,看起来还像没有变过一样。这样的对称性明显地符合对称的字义,即相对相配相仿相称。例如人的左手相当于镜像的右手,假如改变左和右的定义,即把左看成右,把右看成左之后,人与镜像的“左相当于右”的关系仍然不变。显然,人与镜像具有左右对称性,或者说具有左右变换下的不变性。

最为人所熟悉的一些作周期变化的自然现象,例如日出日落、花开花谢等等,则体现了时间的对称性。这些现象的产生和变化状况都有着固定的时间周期,在不同周期中的任意一个相对应的时刻,它们的状况都完全相同。因此,无论向前还是向后推移一个或多个周期的时间,其状况都不会改变。这种在周期变换下的不变性,是时间对称性的一种。我们从日常经验中获悉了日月经天的时间对称性,从而能预知未来之日的朝阳和夕照的图景。这个浅显的例子表明,从已知的对称性可以推测未知的东西。这便是物理学家探索自然界的对称性的思想动机。

概括来说,所谓对称性,实质上是在某种变换下的不变性。而时空对称性,则是在时间、空间位置(或说坐标)变换下的不变性。

20世纪物理学的辉煌成就,引起了人们的时空观和认识论等观念上的变革。物理学家们越出了以物质为中心的旧框架,树立了用自然界的对称性来解释大自然这一新的宇宙观。人们不仅意识到对称性是物质的形态和属性及其运动规律的基本特征,而且考察对称性的完美或破缺程度,并深究产生或破坏它们的根源。

在时空对称性中,至今公认完美的几种重要的对称性例如为:导致能量守恒的时间平移不变性,导致动量守恒的空间平移不变性,导致角动量守恒的空间转动不变性,保证了物理规律在不同惯性系中都协调一致的洛仑兹不变性。这几种对称性,不论在宏观世界还是在微观世界都存在,由它们产生的守恒定律在物理学的各个领域普遍成立。

时空对称性中的左右对称性,也叫空间反射不变性。所谓空间反射,是指把坐标轴的方向反过来。这种一下子就使空间完全反向的变换,不能够一点点地连续变过来,所以叫作分立变换。而那些像平移和转动那样的变换,能由变动任意大小的长度或转角来连续地实现,因而叫连续变换。由于力学和电磁学规律都具有空间反射不变性,因而人们一度以为所有自然规律都具有这种对称性。

表征空间反射变换(简称P变换)性质的特征量(术语叫量子数)叫作空间宇称或简称宇称。宇称只有正负而没有大小之分,即只有正宇称或负宇称。

20世纪50年代中期的实验发现,一种可以衰变为3个 π 介子(负宇称)的粒子和一种可

以衰变为 2 个 π 介子(正宇称)的粒子,其质量和寿命都一样,很像是同一种粒子。这在当时是个谜。因为,若将它们看作不同粒子,则很难解释它们为何有那些相同点;若将它们视为同一种粒子,则违反“天经地义”的宇称守恒定律。

1956 年,美籍中国物理学家李政道和杨振宁对此谜做了详细研究。他们发现,上述衰变是弱力引起的,而在弱力过程中,从未有过实验证据能证明宇称守恒,这与强力和电磁力过程的情形不一样。于是,他们认为那两种粒子实际上是同一种粒子即 K 介子,并指出在弱力过程中宇称不守恒,即左右对称性被破坏。这个预言在次年就被吴健雄等人的 β 衰变的左右不对称性实验所证实。

还有一种分立变换叫时间反演变换(简称 T 变换)。这是一种将时间逆转的变换,即把将来和过去颠倒过来。在 T 变换下,产生一个粒子变成消灭一个粒子。这种变换没有相应的量子数。T 变换下的不变性叫作时间反演对称性。

还有一种与时空对称性并列的分立对称性叫正反粒子共轭对称性。正反粒子共轭变换(简称 C 变换,也叫电荷共轭变换)。顾名思义,指的是粒子和反粒子的互相变换,即粒子变为自身的反粒子,而反粒子变成粒子。表征 C 变换性质的量子数叫 C 宇称,也只有正负之分。像空间反射变换的宇称一样, C 宇称也是在强力和电磁力的情况下才守恒,而在弱力下不守恒。

空间反射和正反粒子共轭这两种对称性在弱力的情况下都被破坏了,然而,二者联合起来却使对称性得到很大幅度的恢复。它们联合起来的变换叫电荷共轭及空间反射联合变换(简称 CP 变换)。绝大多数弱力过程的物理规律在 CP 变换下都具有不变性,只有个别弱衰变过程的 CP 对称性有轻度的破坏,通常叫 CP 破坏。在发现宇称不守恒的 1956 年就有人讨论过 CP 破坏的可能性,由于破坏的幅度很小,直到 1964 年在中性 K 介子的衰变实验中

才首次得到验证。经实验证实,CP 破坏的幅度的确很小,只是千分之一的量级。30 余年来,粒子物理学家们在实验和理论两条路线上探索新的 CP 破坏现象和 CP 不守恒的起源,都未取得突破性的进展。看来,这也是 21 世纪粒子物理学的重大研究课题之一。

把电荷共轭 C,空间反射 P 和时间反演 T 这三种分立变换联合起来的变换叫 CPT 变换。这虽然是个相当复杂的变换,但从现代物理学的基本原理可以导出 CPT 不变性。而且,这是一个非常普遍而又极其完美的对称性。这个对称性能告诉我们很多有用的东西,例如从它能导出正反粒子的如下关系:有相同的质量,有相同的总寿命,有符号相反但量值相等的电荷,等等。实验上对这些关系的验证也是十分有力的。例如,实验测得中性 K 介子和它的反粒子的质量差为 7×10^{-15} ,这在粒子物理学中要算最精密的测量之一。人们公认,CPT 对称性是自然界的一个十分精确的对称性。

二、内部对称性

在研究微观物理学的进程中,物理学家们遇到了很多与日常经验和传统看法相差甚远的东西,在经典物理学中很难找到这些东西的对应物。每当遇到一个全新的概念或特征量(量子数),物理学家们总是在严格的数学表述的基础上,将它们与已知物理图像作类比或引伸。内部空间和一些内部特征量就是这种类比或引伸的结果。

微观粒子的自旋,就是一个内部特征量。1925 年,为了解释原子中电子的壳层结构,泡利提出了不相容原理。同年,乌伦贝克和高德斯密特认为,若采用不相容原理解释电子的满壳层,则需要增加一个描述电子自旋的量子数,于是用电子具有自旋来解释原子光谱。从此,人们便将自旋认作微观粒子自身固有的角动量,并将这种角动量想象成是由粒子的某种内部运动引起的。引起粒子自旋的这种内部运动虽然是假想的,但描述这种运动是在带有时间和空间坐标的普通空间里进行,这与以后发

现的一些内部对称性所在的假想空间是大不一样的。

同位旋对称性，就是出现在一个假想的同位旋空间，指的是在这个抽象的空间具有转动不变性。有关同位旋概念的设想，最早出现在海森堡 1932 年的一篇论文中。在这篇论文里，他提出了原子核是由质子和中子组成的假说，并且建议用一种具有两个特征值的算符来描述质子和中子。1936 年，卡森和康登根据当时实验上初步显示的核力的电荷无关性，明确地提出了同位旋的概念和同位旋守恒定律。事实上，质子和中子的自旋、宇称都相同，质量相仿，只有电荷的差别，而强力支配的过程与粒子所带的电荷没有关系。因此，人们试图把这两种粒子看作是同一种粒子（核子）在某个内部空间所处的两种状态，就像自旋为 $1/2$ 的电子在普通空间有两种自旋取向的状态一样。这个内部空间是个假想的三维空间，叫作同位旋空间。质子和中子被视为该空间的一个二重态，在此空间做旋转变换时，只是使核子的这两种状态互相变换，而它们感受到的核力不变。核子在这个假想空间转动的“角动量”叫同位旋。核力的转动不变性导致了核子的同位旋守恒。核子的两个状态即质子和中子的区别仅在于它们的同位旋的取向不一样。同位旋概念现已推广到核子以外的粒子中并有所引伸。同位旋守恒在所有受强力支配的反应过程中都成立。

凭借深邃的洞察力和丰富的想象力，近代和现代物理学家预言了很多种反映微观世界特性的内部对称性的存在。这些内部对称性，有的已被实验证实，有的正在经受检验，有的还有待于未来的研究。实际上，各式各样的内部对称性都可以概括地称为规范不变性，它们的不同表现形式对应着规范变换的不同种类。

掌握和采用一门叫作群论的数学工具，是对称性理论或者说规范理论得以迅速发展的重要因素。对于那些极其抽象而又复杂的对称性，不要说准确描述，就连想象它们的存在方式，也比已知的时空对称性要困难得多。在什么样的空间，按什么样的法则变换？这些有关

对称性的一些具体问题，假如不用群论会如何解答，是难以想象的。也正是因为现代数学的广泛应用，粒子物理学中的数学色彩日渐浓郁，粒子物理理论与数学的关系更为密切。

应用群论之后，有关对称性的研究则变得非常方便而又十分严谨。无论是分立变换还是连续变换，在数学上都能找到一个变换群。考虑某种对称性的时候，只要选择一个合适的群，把粒子放到群空间的特定位置上，而后按照群的运算法则作变换。如果变换后的结果不改变粒子原有的运动规律，就表明这个规律在该群下是不变的，即具有相应的对称性。例如，同位旋空间的转动不变性，相当于在二维幺模幺正群 $SU(2)$ 变换下的不变性。因此，同位旋对称性可以说成 $SU(2)$ 同位旋对称性。

人们已经认识到，内部空间的变换和相应的对称性，分别是规范变换和规范对称性。规范变换分两类：一类是变换时不涉及时空点，称作整体规范变换；另一类是变换时依赖时空点，称作定域规范变换。相应的对称性，前者叫整体规范对称性，后者叫定域规范对称性。将整体规范对称性扩充为定域规范对称性的时候，必须引进规范粒子，相应的场叫规范场。人们最早认识的规范粒子是光子，相应的电磁场是 $U(1)$ 规范场，它是通过将自由电子的整体 $U(1)$ 规范对称性扩充为定域的时被引进的。

1954 年，杨振宁和密尔斯引进定域 $SU(2)$ 规范对称性，建立了一种新型的规范场理论，即一直享有盛誉的杨-密尔斯理论。近半个世纪以来，这一理论对发掘一些支配微观世界的对称性，起了难以估量的指导作用。

60 年代，格拉肖、温伯格和萨拉姆，将同位旋空间的定域 $SU(2)$ 对称性和超荷空间的定域 $U(1)$ 对称性结合起来，即选择了 $SU(2) \times U(1)$ 对称性，成功地建立了统一描述弱力和电磁力的规范理论。1971 年特霍夫论证了这种具有真空自发破缺机制的规范理论是可以消去理论计算时出现的没有物理意义的无穷大（消去无穷大叫重整化），这大大提高了弱电统

一理论和规范理论的地位。

在人们研究 $SU(2)$ 同位旋对称性的时候,盖尔曼和纽曼认识到了这种群论方法的广泛应用价值。1961年和次年,他们各自将 $SU(2)$ 对称性推广到高一维的 $SU(3)$ 么正对称性,利用这个较高的对称性来给当时已发现的上百种强子分类。门捷列夫的元素周期表不仅能将所有的已知元素安放到适当位置,还能根据表中的空位预言未知元素的存在。盖尔曼和纽曼的 $SU(3)$ 么正对称性理论也是这样,除了把已知的各种重子和介子纳入一个个整齐对称的图案,还从图案中的空缺位置能看出当时尚未发现的粒子是怎样的。例如,他们不仅能预言带负电的欧美伽 (Ω^-) 粒子的存在,而且说它的质量应当是 1.67GeV 。而在1964年,美国布鲁克海文实验室果然发现了 Ω^- ,其质量为 1.672GeV 。 Ω^- 的发现是粒子物理发展中的重大突破之一。这一发现表明,从对称性看世界的路子走对了, $SU(3)$ 么正对称性是对的。同年,盖尔曼和兹韦格利用这个对称性构造了夸克模型。在夸克模型的发展中,人们又发现了另一种 $SU(3)$ 对称性即 $SU(3)$ 颜色对称性。

在对颜色空间的定域 $SU(3)$ 对称性有了比较清楚的认识之后,人们便尝试用这种对称性来描述强力。1973年,波利策、格罗斯和韦尔切克采用 $SU(3)$ 颜色对称性,建立了强力理论即量子色动力学。这个理论与弱电统一理论相结合,被公认为描述强力、弱力和电磁力的标准模型。

标准模型所取得的成功,不仅使人们几近确信:支配世界的对称性至少是 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 规范对称性,还激励着人们从更大更广义的对称性来看世界。例如,乔治和格拉肖于1974年提出了 $SU(5)$ 大统一理论。 $SU(5)$ 是个能包含 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 的规范群,在这个对称性下,强力、弱力和电磁力变为同一种力,只是当这个对称性破缺后,这些力才表现出不同的性质。这个理论模型虽然已被一系列的质子衰变实验所否定,但它在统一

自然力的方向上的开拓性意义,仍然不可忽视。

三、超对称性

超对称性,既不是单纯的时空对称性,又不是单纯的内部对称性,而是把时空对称性和内部对称性结合在一起的一种新型对称性。这个广义的对称性,是一种把不同自旋的粒子联系起来对称性,即让费米子(自旋为半整数的粒子)和玻色子(自旋为整数的粒子)互相变换的对称性。

超对称理论最早提出于1971年,当初纯粹是个形式理论,不能用来描述物理实在。例如,体现这个对称性的超规范变换,当时定义在二维时空中,而物理世界是四维的。1974年,韦斯和朱弥诺将这个二维对称性推广到四维,人们才开始重视超对称性并试图用它来描述现实世界。

就像同位旋变换要设想个同位旋空间一样,做超对称变换,或者说超规范变换,也要设计个空间,叫超空间。超空间是个在普通时空上增加些费米子性坐标的广义空间。这外加的坐标本身就带有粒子性,可见是很新奇的。为了让费米子性空间与普通空间对称,于是引进四个费米子性坐标来与四维时空相匹配。超空间的点是由时空坐标和费米子性坐标来共同确定。可见,超空间是个八维的东西,一半是普通时空,一半是更广义的内部时空。所以说,超对称性是个时空对称性与内部对称性相混合的对称性。

就像质子和中子是同位旋空间的一个二重态一样,费米子和玻色子被视为超空间的一个超多重态。超对称变换就是将超多重态中的各个状态互相变换,从而将费米子变为玻色子,将玻色子变为费米子。这些粒子对应的场叫超场。

在普通场论中,将整体规范变换扩充为定域规范变换时,为保持定域规范变换的不变性,需要引进规范场。在超对称理论中,随着场概念的推广,定域规范变换也要作相应的推广,此时引进的是一种新型的规范超场。很奇妙的

哈勃望远镜瞥见了阴云中的火星

陈礼忻 译

(台湾新庄市富国路 77 巷 25 号 3 楼)

本文谈的是有关火星的气候变化。自从维京号太空船于 1970 年在火星登陆,基地的无线电望远镜,就一直在监视火星上的气象,并作记录;它是一个气候非常恶劣,气温会骤然下降摄氏 20 度的寒冷地带。但最近一个月,地球接近它的附近时,哈勃望远镜所传回来的照片上,有寒冷增加的迹象。在靠近火星最高卷云笼罩下的稀薄空气外面,形成一层水气的霜雾。从由西飘过的特别浓厚的云层中露出那个二万五千公尺的火山顶峰,星星也显露在火星寒冷

的夜空。

这个骤然寒冷又多云的天气图像,同维京号太空船通常在白天里所拍到的尘灰相比较是很少有的。柯罗拉多大学的史蒂芬·李是参与处理哈勃望远镜所摄照片的会员之一,他提到,环绕火星的尘灰会扰乱测微器的尺度,红桔色的沙粒会直冲大气层并在那里吸收太阳能。维京号太空船到达火星前 19 年之内,火星上曾发生两次全球性风暴,使大气层温度升高。但最

(下转第 15 页)

是,定域超对称理论必然包含引力场,它自动地变成了超引力理论。这一妙处特别吸引人。

利用超对称性来构造现实模型的时候,其显著的特点是模型中增生了普通粒子之外的全新的超对称粒子。所有已知的费米子和玻色子都必然伴有各自的超对称伙伴(或称孪生粒子)。例如,普通夸克和轻子的孪生粒子为超夸克和超轻子。弱中间玻色子 W 和 Z 的,以及光子和胶子的孪生粒子,分别叫作超 W 粒子、超 Z 粒子、超光子和超胶子。此外,还有与希格斯粒子对应的超希格斯粒子。即使不计作超对称扩充时额外引进的物质场和希格斯场,粒子总数也翻了一番。

如果超对称性是自然界的一个严格的对称性,那么,就应该观察到带有相同质量的费米子和玻色子,即一对对的孪生粒子。而到目前为止,人们从未测到过普通粒子的孪生兄弟。因此,超对称性必须是一个破缺的对称性,才可能使得孪生粒子的质量与相应的普通粒子的质量不一样,从而避免与现有的实验相冲突。超对称粒子的质量有多大?这取决于超对称性破缺的质量标度,而这个标度却因模型而异很不确定。有的现象学模型预言这个标度为 10^{10}GeV 。假如破缺标度没有这么高,就能较早地得到实

验检验。不论怎样,只能等到实验上发现超对称粒子后,才能断言超对称性的真确性。

将超对称性用于统一描述强力、弱力和电磁力的理论叫超对称大统一理论。超对称性的引进,能解决这类理论中的部分问题。例如,超对称 SU(5) 模型能将大统一能量标度推移到 10^{16}GeV , 预言质子的寿命为 10^{35} 年,从而与目前的实验结果(大于 10^{33} 年)不矛盾。1990 年,欧洲核子研究中心正负电子对撞机上关于力的强度的测量结果,与超对称 SU(5) 模型的估算相符,而与普通 SU(5) 模型不符,这使得超对称理论更为人们所注意。

将超对称性用于弦理论,就是所谓超弦理论。在普通的粒子场论中,粒子是当作一个点来描述。而在超弦理论中,认为粒子是条长约 10^{-33} 厘米的弦,弦本身是六维的,它在一个十维空间内振动,一种振动方式对应一种粒子。迄今为止,超弦理论只是停留在纯理论研究阶段,离现实世界还很遥远。

从对称性看世界,看到的可能性实在太多了。美国物理学家费曼说得好:“可能性实在太多了。它们之中任何一个都可能是对的,也可能没有一个是真的。因此我们必须去探索,向尽可能广的方向去探索。”