

物理学中的宇称守恒

及其它对称定律

1957年12月11日诺贝尔讲演

杨振宁

有此机会同诸位讨论宇称守恒及其它对称定律,我感到莫大的高兴和荣幸。我将先概括地谈谈物理学中守恒定律的作用。其次,谈谈导致推翻宇称守恒定律的发展过程。最后,讨论物理学家由经验知悉的某些其它对称定律。这些定律尚未形成一个完整而概念上简单的格局。李政道博士将在他的演讲中谈及宇称守恒定律被推翻以来的一些饶有兴味而且激动人心的发展。

(一)

对称定律完全符合我们的日常生活经验。其中最简单的一种,即空间的各向同性和均匀性,可以追溯到人类思想的早期历史。运动定律在匀速运动的坐标转变中的不变性(即“伽利略变换”不变性)是一种比较复杂的对称性。物理学者很早就知道这种对称性,它构成了牛顿力学的基石之一。上世纪的物理学家深入研究了这些对称原理所引起的结论,并推出了许多重要的后果。一个好例子就是在各向同性固体中只有两个弹性常数的定理。

对称定律的另一类后果与守恒定律有关。今天大家都知道,一般说来,一个对称原理(或者,一个相应的不变性原理),产生一个守恒定律。例如,空间位移下物理定律不变性的结果是动量守恒,空间旋转下不变性的结果是角动量守恒。这些守恒定律的重要性虽然早已得到人们的充分了解,但它们同对称定律间的密切关系似乎直到二十世纪初才被清楚地认识。(请参看图1,见下页)。

随着狭义相对论和广义相对论的出现,对称定律获得了新的重要性:它们与动力学定律之间有了更完整而且相互依存的关系,而在经典力学里,从逻辑上来说,对称定律仅仅是动力学定律的推论,动力学定律则仅仅偶然地具备一些对称性。并且在相对论里,对称定律的范畴也大大地丰富了。它包括了由日常经验看来决不是显而易见的不变性,这些不变性的正确性是由复杂的实验推理出来或加以肯定的。我要强调,这样通过复杂实验发展起来的对称性,观念上既简单又美妙。对物理学家来说,这是一个巨大的鼓舞。大家认识到有理由希望自然界具有一种我们可以企求了解的秩序。

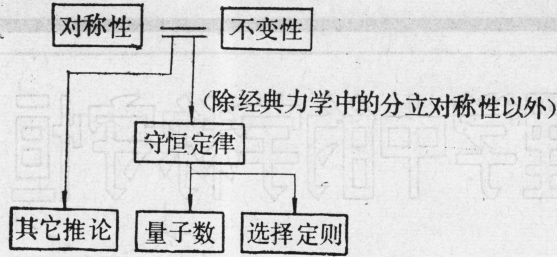


图 1

然而,直到量子力学发展起来以后,物理学的语汇中才开始大量使用对称观念.描述物理系统的状态的量子数常常就是表示这系统对称性的量.对称原理在量子力学中所起的作用如此之大,是无法过份强调的.且举两例:周期表的总结构,本质上是库伦定律各向同性的直接结果.反粒子(如正电子、反质子、反中子)的存在,是根据洛伦兹变换的对称性而理论地预料到的.在上述两例中,造化看来利用了对称定律的简单数学表述方式.当人们仔细考虑这过程中的优雅而完美的数学推理,并把它同复杂而意义深远的物理结论加以对照时,一种对于对称定律的威力的敬佩之情便会油然而生.

对称原理之一,即左右对称,是与人类文明一样古老的观念.自然界是否具有这样一种对称性,过去的哲学家们一直争论不休.当然,在日常生活中,左右是明显可分的.例如,我们的心脏处在身体左侧,我们的语言甚至还有这样的内涵:不论在东方还是在西方,右边都意味着美好,而左边意味着邪恶.然而,物理定律过去却一直显示出左右之间的完全对称性,日常生活中的不对称性被归咎于周围环境或有机生命体初始条件的偶然的不对称性.为了再进一步解释这一点,假定存在这样一个镜中人,他的心脏在身体的右侧,其它内脏也处在同我们相反的一侧,而构成他身体的分子(例如糖分子)也是我们身体分子的镜像,再假定他所吃的食物也是我们所吃食物的镜像,那么,按照过去物理定律,他的身体机能就应该和我们的完全一样有效地进行.

左右对称定律在经典物理中已被应用,但它并不显得特别重要.其中一个原因是,左右对称是一种分立对称性,不像旋转对称是连续的.而在经典力学中,连续对称一定导致守恒定律,分立对称则不然.但是,随着量子力学的引入,分立对称性与连续对称性的这种差别消失了.因而,左右对称定律也导致一种守恒定律,即宇称守恒定律.

这个守恒定律的发现可以追溯到1924年,当时拉波蒂发现,复杂原子的能级可以分为“*Gestrichene*”和“*Ungestrichene*”两类.或者,用后来的名词来说,即偶能级和奇能级两类.在这些能级之间跃迁,如果只发射或吸收一个光子,拉波蒂发现,能级总是由偶变奇,或由奇变偶.能级的这种奇偶性后来就叫做能级的宇称.偶能级定义为具有+1宇称,奇能级定义为具有-1宇称.另外,光子的宇称定义为-1.因此拉波蒂规则可以表述如下:在发射一个光子的原子跃迁过程中,初态的宇称等于终态的总宇称.(在计算宇称时要把所有粒子的宇称乘起来.)换句话说,在跃迁过程中宇称守恒,即不改变.

1927年维格纳采取了关键且意义深远的一步.他证明拉波蒂的经验规则是原子中电磁力的反映不变性,即左右对称性的后果之一.这一基本思想被迅速地吸收到物理学的语言中.因为在其它相互作用中左右对称性也是毫无疑问的,这种思想进一步被推广到其它新的物理学领域,诸如核反应、 β 衰变、介子相互作用及奇异粒子物理中.原子宇称以及核宇称都变成常用观念,而

且人们开始讨论和测量介子的内禀宇称。通过这些发展，宇称的概念及宇称守恒定律成果累累。这些成功又被看作是验证了左右对称性。

(二)

在这种背景上，所谓 ϑ - τ 之谜在最近几年里发展起来了。在解释什么是 ϑ - τ 之谜以前，最好稍为先谈一谈亚原子粒子之间相互作用的分类问题。这种分类是物理学家通过近五十年来的经验而获得的。四类相互作用表列于下。

1. 核力	1
2. 电磁力	10^{-2}
3. 弱力(衰变相互作用)	10^{-13}
4. 万有引力	10^{-38}

这些相互作用的强度由表中右边一列数字表示。最强的是核相互作用，包括把核子结合在一起的力以及核子和 π 介子之间的相互作用，也包括产生奇异粒子的相互作用。第二类相互作用是电磁相互作用，物理学家对此已有许多知识。事实上，十九世纪物理学界最辉煌的成就便是对于电磁力的详尽了解。随着量子力学的出现，对电磁力的这种了解原则上为日常生活所遇到的几乎所有物理、化学现象提供了一种精确、完整和详细的描述。第三类力即弱力是本世纪初首先在核的 β 衰变中发现的。近二十五年来，对核的 β 衰变进行了大量实验研究。随着 π - μ ， μ - e 衰变以及 μ 俘获的发现，克莱茵、蒂欧姆诺和惠勒以及李政道、罗森布鲁思和我各自独立地注意到这些相互作用与 β 衰变具有大约相同的强度。它们叫做弱相互作用。过去几年，随着与奇异粒子衰变有关的其它许多弱相互作用的发现，这一类相互作用的事例不断增加。它们的强度几乎一样，这个无例外而且引人注目的规律今天仍是最使大家感兴趣的现象之一。我稍后还要回过头来谈这个问题。至于最后一类相互作用即万有引力，我们只需提及一点，即它们在原子相互作用和核相互作用中是如此之弱以致在用现有技术进行的各种观测中可以完全被忽略掉。

现在回到 ϑ - τ 之谜。1953 年达利兹和法布芮指出，从 ϑ 介子和 τ 介子衰变过程

$$\vartheta \longrightarrow \pi + \pi$$

$$\tau \longrightarrow \pi + \pi + \pi$$

中，可以获得 τ 介子和 ϑ 介子的自旋和宇称的信息。他们的论证可以简介如下。原来早已确定 π 介子的宇称是奇的(即 $=-1$)。让我们先忽略 π 介子的运动。在 ϑ 介子衰变的过程中为使宇称守恒， ϑ 介子的宇称必须等于两个 π 介子的总宇称(即宇称积)，即必须为偶(即 $=+1$)。同样地， τ 介子必须具有三个 π 介子的总宇称，即它的宇称是奇的。但实际上，因为 π 介子的运动，事情并不像上面所说的那样简单明确。为了使论证严谨可信，必须测量研究 π 介子的动量分布和角分布。许多实验室做了这方面的研究。到了 1956 年春天，积累的实验数据看来毫不含糊地指出，用了上面所提到的推理方法， ϑ 和 τ 并不具有相同的宇称，因而不可能是同一种粒子。然而这个结论与差不多在同一个时候做出的其它实验的结果明显地互相矛盾。这种矛盾称之为 ϑ - τ 之谜，它被广泛地讨论。为了说明当时的气氛，让我引述 1956 年 9 月在西雅图举行的一次国际理论物理会议上我所作的题为“有关新粒子的当前知识”报告中的一段话，这段话涉及断定 ϑ 与 τ 不是同一种粒子的结论：

然而，不应匆忙即下结论。这是因为在实验上各种 k 介子(即 τ 和 ϑ)看来都具有相同的质量和相同的寿命。已知的质量值准确到二至十个电子质量，也就是说，准确到百分之一，而寿命值则准确到百分之二十。我们知道具有不同自旋和宇称值而与核子和 π 介子有强相互作用的粒子不应该具有相同的质量和寿命。这就

迫使人们怀疑上面提到的 τ^+ 和 ϑ^+ 不是同一粒子的结论是否站得住。附带地，我要加上一句：要不是由于质量和寿命的相同，上述结论肯定会被认为是站得住的，而且会被认为比物理学上许多其它结论更有依据。

那时候，物理学家发现他们所处的情况曾被指出就好像一个人在一间黑屋子里摸索出路一样。他知道在某个方向上必定有一个能使他脱离困境的门。然而究竟在哪个方向上呢？

原来，那个方向就是，宇称守恒定律不适用于弱相互作用。但是，要从根本上推翻一个已被公认的概念，必须首先证明，为何原先支持该概念的那些证据是不充分的。李政道博士和我详细考察了这个问题，并在 1956 年 5 月得出下述结论：(A) 过去做过的关于弱相互作用的实验实际上与宇称守恒问题并无关系。(B) 在较强相互作用(即上面谈过的第一、二类相互作用)方面，确实有许多实验以高度准确性确立了宇称守恒定律，但准确度仍不足以揭示在弱相互作用方面宇称守恒或不守恒。

在并没有实验支持的情况下，长期以来，人们竟错误地相信弱相互作用中宇称守恒，这个事实本身是令人吃惊的。然而更令人吃惊的是，物理学家如此充分了解的一个空间时间对称定律可能面临破产。我们并不喜欢这种可能。我们是由于试图理解 $\vartheta-\tau$ 之谜的各种努力都遭到挫折，而被迫考虑此可能。

在后面将要提到，在物理学中已知有一条守恒定律，即同位旋守恒，在第一类相互作用下成立而当引入其他较弱的相互作用时则不成立。然而这不是与时间或空间的对称性有关的守恒。在涉及时空的问题上，没有人曾经相信对称性是不绝对准确的。事实上，今天既然在弱相互作用中宇称守恒定律已知不成立，那么是不是在描述这些现象时通常的时空概念应该认为是不完全恰当的呢？在我的发言之末尾，我将有机会回到一个与此密切相关的论题上来。

为什么在大量关于 β 衰变(在各种弱相互作用中， β 衰变是研究得最为透彻的)的实验中，竟没有关于弱相互作用下宇称守恒的信息呢？答案来自两个方面。首先，中微子没有被测量得到质量，这引起了模棱两可的情况，因而由 β 谱等简单实验得不到关于宇称守恒的间接信息。其次，要直接由 β 衰变研究宇称守恒，像以前那样只讨论核的宇称是不够的。必须研究整个衰变过程的宇称守恒。换句话说，必须设计一个能够测验衰变中左右对称性的实验。这样的实验以前还未做过。

一旦明白了这一点，就容易懂得，那种实验才能明确检验从未检验过的在弱相互作用下宇称守恒的假设。李政道博士和我在 1956 年夏提出了涉及 β 衰变， $\pi-\mu, \mu-e$ 及奇异粒子衰变的一系列这种实验。所有这些实验的基本原理全都一样：**安排两套实验装置，它们互为镜像且包含弱相互作用。然后检查这两套装置仪表上的读数是否总是相同。** 如果读数不同，就毫不含糊地证明左右对称性不成立。此想法示于图 2，它描述用以检验在 β 衰变中宇称是否守恒的实验。

这个实验首先由吴健雄、安伯勒、海涅德、霍卜斯和哈德逊在 1956 年下半年着手进行而于今年初完成。实际的实验装置非常复杂。因为要消除外界干扰的影响，实验必须在极低的温度下进行。把 β 衰变的测量和低温装置结合在一起是前所未有的，这是主要的困难之一。这个难题被吴健雄她们成功地解决了。过去一年中关于宇称守恒问题的惊人的重大发展，应归功于她们的勇气和技巧。

吴健雄博士、安伯勒博士及她们的合作者的实验结果是，图 2 中两个仪表的读数差别非常之大。既然她们的实验装置的其它部分是符合左右对称的，则不对称性必须是由钴的 β 衰变所引起的。得悉这个实验的结果后，人们很快地就做了许多其它实验，它们都证明了各种弱相互作用下宇称不守恒。李政道博士在他的演讲中将谈到这些令人感兴趣的重要发展。

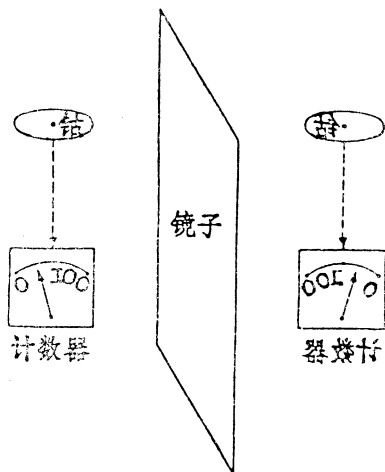


图 2

(三)

宇称守恒定律的崩溃使涉及物理学中对称定律的一系列问题显得突出了。现在我们就来概括性地简单讨论一下这些问题。

(A) 正如李政道博士将要讨论的，吴健雄、安伯勒和她们的合作者的实验也证明了的，对 β 衰变来说，电荷共轭不变性也不成立。对弱相互作用来说，另一类对称性即时间反演不变性目前正在实验研究。

三个分立不变性——反映不变性，电荷共轭不变性和时间反演不变性——是通过一个重要的称为 CPT 的定理联系起来的。应用此定理，可以证明许多有关在弱相互作用下这三种对称性被破坏的现象。

特别令人感兴趣的是，时间反演不变性在弱相互作用下可能是不受破坏的。倘若如此，由 CPT 定理就会得出，虽然宇称不守恒，但在取镜像时如把所有粒子变为反粒子，左右对称性仍然成立。用图 2 来说，这意味着，倘若时间反演不变性成立，则把构成右边装置的物质**全部**转变成反物质，两边仪表的读数便变成相同了。注意下面这一点是重要的：在反映的通常定义中，电场是个矢量而磁场是个赝矢量。而在这个改变了的定义中，电场和磁场的变换性质被反转了过来。电荷和磁荷的变换性质也相互调换。宇称不守恒和电场、磁场的对称或不对称，这中间可能存在的关系，将是饶有兴味的研究题目。

在过去的一年里，对于连续的时空对称定律是否正确的问题，已经有了某种程度的讨论。有很好的证据表明，在弱相互作用中，这些对称定律并没有被推翻。

(B) 另一个被广泛讨论的对称是引起同位旋守恒的对称。近年来，应用这个对称定律，在涉及奇异粒子的现象中已经产生了引人注目的经验规律。然而它肯定是在所有对称定律中被了解得最少的一个。与洛伦兹不变性或反映不变性不同，它不是一个与时空不变性质有关的“几何”对称定律。与电荷共轭不变性不同，看来它并不起源于出现在量子力学中的复数的代数性质。在这些方面，它类似于电荷和重粒子守恒律。但是，后述的定律当引入电磁相互作用和弱相互作用时仍是准确的，而同位旋守恒那时就被破坏了。了解同位旋守恒的起因以及如何把它纳入整体对称

系统,无疑是今天高能物理学所面临的突出问题之一.

(C) 我们前面已提及,各种各样的弱相互作用的强度几乎一样.过去一年关于宇称不守恒的实验工作揭示出,它们很可能也都不遵守宇称守恒和电荷共轭不变性.因此,一旦人们分好质子与反质子的名称后,用这些弱相互作用就可以区分左和右了.反过来,一旦人们确定了左右的定义后,也可以用弱相互作用来区分物质和反物质.如果时间反演不变性不正确,更可用弱相互作用来区分左右,同时也区分物质和反物质.在这里人们察觉,弱相互作用的起源可能与左右的可区分性及物质与反物质的可区分性等问题密切相关.

(转自“读书教学四十年” 三联书店 香港分店出版)

(题图: 密建林)