

我们将给下一世纪的下一代人留下什么？

——李政道谈“真空作为一种物理媒质”

丁亦兵

5月26日，诺贝尔物理奖得主，著名华裔物理学家，美国哥伦比亚大学教授李政道院士，应邀在中国科学院研究生院做了一个题为“真空作为一个物理媒质”的学术报告。精辟地论证了当前物理学面临的两大疑难，并在这世纪之交的激动人心的时刻，提出了发人深思的问题：“我们将给下一世纪的下一代人留下什么？”

报告首先从李政道教授在50年代曾经做出过巨大贡献的，粒子物理学中左和右的不对称性(宇称不守恒)讲起。他给听众举了日常生活中这样一个例子：假定有两辆同样牌号的汽车(如图1所示)，区别仅在于一辆车司机坐在左前座位，用右脚控制油门，而另一辆车司机坐在右前座位，用左脚控制油门。或者说一辆车是另一辆在镜中成的像。如果他们使用完全相同的汽油，在完全相同的操作下，它们会不会跑得同样的快？听众们不加任何思索，回答都是肯定的。李政道教授指出，大家和1956年以前的物理学家的想法是一样的。两种东西，如果除了一个是另一个的镜像以外，所有的其它方面都相同，那么，它们的行为应该没有任何差别。或者说，它们的差别仅仅只是左和右的差别。因此，我们把哪一个称为左，哪一个称为右，完全是相对的。这就是物理学中的左-右对称性原理。

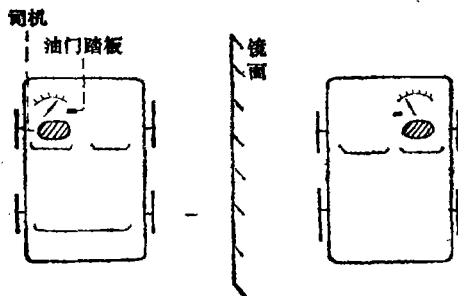


图 1

李政道教授接着指出，令人惊讶的是，人们发现这个想法并不对。1956年吴健雄等研究了极化钴60原子核衰变放出电子的实验。所谓的极化是使原子核的自旋的旋转方向彼此平行而指向同一个空间方向。实验分成两次，它们的区别仅在于使原子核的极化方向相反，即使它们的自旋旋转方向换成相反方向，其它都

不变。这就是说，两次钴60的原子核彼此成为镜像。实验家们发现，这两次实验得到的终态电子的分布情况彼此不是镜像。简言之，初态彼此是镜像，而未态彼此不是镜像(如图2所示)。回到前面所举的两辆汽车的例子，这就相当于两辆彼此成镜像的汽车，在同样

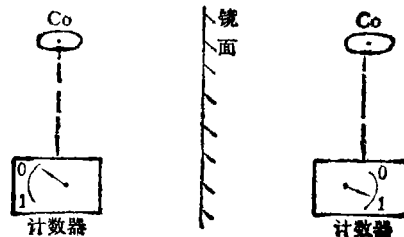


图 2

的操作下，跑得一样快，甚至一辆向前行驶的同时，另一辆却在后退。这就是左右不对称或宇称不守恒的发现实质所在。

在这之后，李政道教授讨论了另一个对称性，即电荷的正号与负号之间的对称性。其实电荷的符号只是一种约定。电子被看成是带负电的粒子，其原因在于我们碰巧把质子看成了一个带正电的粒子，反之亦然。那么，在不对称性被发现之后，能不能给电荷符号下一个绝对的定义呢？能不能象在左和右那样，找到正电荷与负电荷之间的某种绝对差别呢？

提出了这个问题之后，李政道教授介绍了中性、长寿命的 K_L^0 介子衰变的一个实验研究情况。这个粒子不带电，没有任何种类的电磁矩。它没有自旋，是球对称的，大约比电子重1000倍。它是一个不稳定的粒子，可以衰变成一个电子 e^- 、一个反中微子 $\bar{\nu}$ ，和一个 π^+ 介子，或者衰变成一个正电子 e^+ 、一个中微子 ν ，和一个 π^- 介子。利用磁场使 e^+ 和 e^- 偏转，很容易把这两种衰变模式区分开来。尽管母粒子 K_L^0 是电中性的，人们发现这两种衰变的几率却是不同的，实验测量的结果是：

$$\frac{K_L^0 \rightarrow e^+ + \pi^- + \nu \text{ 的几率}}{K_L^0 \rightarrow e^- + \pi^+ + \bar{\nu} \text{ 的几率}} = 1.00648 \pm 0.00035$$

这的确是一个出人意料的结果，因为它意味着依据几率记数可以把 e^+ 和 e^- 区分开来。这样一来，相反

符号的电荷之间出现了绝对的差别。只要你稍微认真地想一想,就会对这个极不寻常的结果感到惊奇。因为 K_L^0 粒子是不带电的,所以它不会偏爱正电荷,也不会偏爱负电荷。可是它衰变成正电子 e^+ 却比衰变成负电子快!

如果用 P 代表左和右之间的交换, C 代表粒子和反粒子之间的交换,由于任何粒子的电荷符号都与其反粒子相反,所以 C 也意味着电荷符号的交换。 K_L^0 到 e^- 粒子的衰变过程,经过镜面反射,然后再把粒子与反粒子交换,即得到 K_L^0 到 e^+ 的衰变过程。如果 K_L^0 的衰变过程有 C 和 P 联合作用下的不变性,则到 e^+ 和 e^- 的两个衰变过程的几率应当是相同的。因此,这个实验证明了在左和右与粒子和反粒子变换的联合作用下的不对称性,即 CP 破坏。

可以证明,在以下三种似乎无关的对称性之间存在着密切的关系,它们是:

C: 改变电荷的符号,

P: 镜像反射,

T: 时间反演。

正如上面指出的,自然界在 C 或 P 变换下是没有对称性的。对 K 介子衰变做更细致的研究,人们发现,在时间反演下,自然界也不是对称的。然而,众所周知,这三种变换的联合作用,似乎是一种准确的对称性。换句话说,如果我们把粒子与反粒子互换,继而把左和右互换,最后,再把过去与未来互换,所有的物理规律都是对称的。人们称此为 CPT 对称性。

对称性受到破坏的起源是物理学家遇到的主要的挑战性问题之一。下面将会看到,这些现象的发现以及在粒子物理学中观测到的其它一些性质,都导致人们产生一种疑问:真空是否可以看作是一种物理媒质。

报告讲到这里,李政道教授把听众拉回到上世纪末。当时物理学存在两大疑难问题:

1. 由 1887 年迈克尔逊-莫雷实验所表明的,没有绝对的惯性参考系存在,

2. 由 1900 年普朗克解释黑体辐射规律所建立的公式表明有波-粒二象性存在。

这两个看来很深奥的问题,从根本上动摇了经典物理学。第一个成为爱因斯坦相对论理论的基础,第二个奠定了量子力学产生的基础。本世纪所有的现代科学和技术的发展,包括核能、原子物理学、分子结构、激光、X 射线技术、半导体、超导体及超级计算机等之所以会出现,根本原因就是有了相对论和量子力学。

李政道教授深有感触地说,现在,20 世纪末即将来临,我们必须问一问:我们将给下一世纪的下一代人留下些什么?

我们今天理论的状况可以概括为:

QCD (强相互作用),

$SU(2) \times U(1)$ 理论(电-弱统一),

广义相对论(引力)。

然而,为了把这些理论应用于现实世界,我们需要差不多 17 个参数,它们的起源都是不知道的。因此,不可能把这样的理论体系看成是完备的。

今天,摆在我们面前的两大疑难问题是:

1. 丢失的对称性。目前的所有理论都是在对称性的基础上建立起来的,但是很多与对称性相对应的量子数是不守恒的。

2. 看不到夸克。所有的强子都是由夸克组成的,但是没有任何单独的夸克可以被人们看到。

正如以下的分析所表明的,这两大疑难问题的解决很可能都与我们的物理真空的结构密切相关。

接着,李政道教授分析了第一个疑难问题。他指出,丢失对称性之谜意味着存在着一种新的基本的力,它造成了对称性的破坏。对于这种新的力,我们只知道它应该存在,其它的几乎一无所知。由于所有已知的粒子的质量都破坏这些对称性,所以知道了使对称性破坏的力必将导致对于所有已知粒子的质量的解释。一个大有前途的研究方向是自发对称性破缺机制。在这种机制下,人们假定物理的定律仍是对称的,但物理真空却不再是对称的,如果情况果真如此,这个疑难问题的解决,必然与物理真空的结构密切相关。物理真空的激发可能会导致发现希格斯类型的介子。于是,真空尽管是洛仑兹不变的(因此不是以太),但却可能是相当复杂的。

关于第二个疑难问题,李政道教授指出,在一些教科书中,都采用与磁铁类比的方法来解释。一块磁铁有两个磁极,一个是北极,一个是南极。每当你把一个磁铁棒分成两半时,则每半块都变成了有两个磁极的完整的磁体。通过这种使磁铁分裂的办法,你绝不可能得到一个单独的磁极(磁单极)。于是,在通常对磁单极的描述中,或者认为它是一个虚构的客体,因而不可能看到;或者虽然认为它是一个真实的客体,但其质量极大,超出目前可以探测的能量范围,因而也看不到。对于夸克,我们相信它们是真实的客体,除了顶夸克外,它们的质量也并不是太重,而且,它们的相互作用在高能下又极弱。如果情况果真如此,我们为什么看不到自由夸克呢?显然,这是一个真正的谜。

当前对夸克禁闭之谜的解释也离不开真空。假定我们把真空看成是胶子对及夸克-反夸克对的凝聚,这使得它成为一个很好的抗色电介质,也就是说,它的色介电常数 $k = 0$ 。它很类似于在 BCS 理论中用电子对的凝聚描写的一个超导体,其结果使超导体成为一个很好的抗磁体,即磁导率 $\mu = 0$ 。当把 QED 转换成 QCD 时,磁场 H 用色电场 E_u 来代替,超导体用 QCD 真空代替,与 QED 的真空对应的是强子的内部。与磁场被从超导体内部排斥到超导体外部相对

应, QCD 真空把色电场压挤到强子内部, 导致夸克禁闭, 或形成了强子(如图 3 所示)。

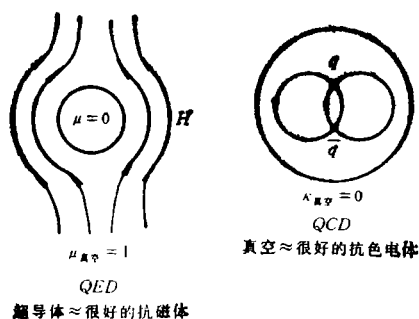


图 3

由此可见, 在解决这两个疑难问题时, 不能再把基本粒子看成是独立的单元。微观的粒子物理依赖于宏观世界的相关的性质, 这些性质可以用一个适当的算符在物理的真空态上的平均值来表示。

这是一个相当惊人的结论, 它是与粒子物理学的传统观念相反的。按照传统观念, 微观世界可以看做一个孤立系统。把微观世界分离出来, 认为它不受宏观世界的影响, 这只是一种非常好的近似。然而, 现在我们需要这些真空平均值, 它们是由态矢量之间的某种长程关联产生的。目前, 能够用来处理这种相干效应的理论技巧还远远没有建立起来。于是, 这些真空平均值的每一个都做为一个独立的参量出现, 它们解释了目前理论形式中所需要的大量的常数。

从实验上看, 对这些相干现象几乎没有进行过任何直接的研究。这是因为, 迄今为止在很多高能实验中, 能量越高, 可以探测的空间范围越小。

李政道教授认为, 要证实真空是不是可以看成是一种物理媒质, 最好是能找到一种办法, 使真空激发。在这方面, 相对论重离子碰撞开辟了一个重要的新方向。它的基本思想是让重离子, 比如金与金, 以很高的速度碰撞。碰撞前, 离子之间的真空就是通常的物理真空。在极高的能量下发生碰撞之后, 产生的重子向前后两个方向飞离开来。而在这两个方向飞行的产物之间的中心区域, 实际上没有任何重子存在。在一段很短的时间内, 它有着比普通物理真空高得多的能量

密度。因此, 这个中心区可能成为激发的真空(如图 4 所示)。或者说真空发生了相变, 由普通的物理真空变成了夸克-胶子等离子体。理论的估算表明, 由于总能量中只有很小的一部分留在了中心区, 所以要想对 QCD 真空进行研究, 至少需要一个 $100 \text{ GeV} \times 100 \text{ GeV}$ 的重离子对撞机。

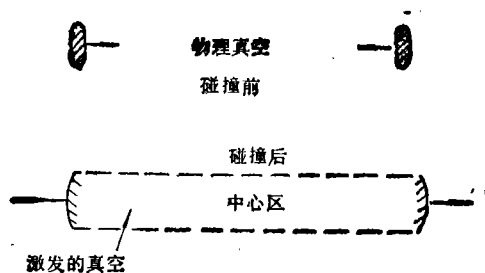


图 4

怎样来探测这种相变呢? 可以利用热力学方法进行一些讨论。假定中心区的夸克-胶子等离子体的熵密度为 S_P , 体积为 V_P 。经过一个短暂的时间, 它要经过强子化过程变成普通的强子物质。假定后者的熵密度为 S_H , 体积为 V_H 。根据热力学第二定律, 终态的熵 $S_H V_H$ 要大于初态的熵 $S_P V_P$ 。但由于 $S_P > S_H$, 所以

$$V_H > V_P,$$

即强子化以后体积要增大。测量 V_H 和 V_P 就可以证实真空是否发生了激发。目前的实验虽然有了些迹象, 但由于能量还不够高, 远不能给出任何明确的结论。美国布鲁克海文国家实验室正在兴建的一台 $100 \text{ GeV} \times 100 \text{ GeV}$ 的相对论重离子对撞机(RHIC), 将于 1998 年建成, 届时可以给物理学家提供一个激动人心的机会, 使物理学家们能够探索改变真空的可能性, 并考察它是否真的是一个物理媒质。

李政道教授最后指出, 如果真空是粒子物理微观世界中一些奇妙现象的根本来源, 那么它也必定会对宇宙中宏观的物质与能量的分布起着一定的作用。由于真空无处不在, 无时不在, 微观与宏观这二者一定是密不可分的、必须统一考虑的整体。未来的历史书将会记载, 我们这个时代是人类能够在科学的基础上锻造这一纽带的时代。

(上接第 42 页)

吉布斯还认真地研究过伽伐尼电池的实验工作。在他的热力学著作里, 还有过他亲自认真观察液滴周围空气膜的情况记载。

还有一种人认为, 卓有成效的理论创立时期应是在人们的青年时代。但吉布斯的创造活动却有力地说明了相反的情况——大器晚成。要知道, 吉布斯发表

第一篇有关热力学方面的论文已经 34 岁了, 而他创造天才最杰出的结晶——《统计力学的基本原理》从出版到他逝世才只有一年的时间: 1903 年 4 月 28 日, 经过短时间的生病以后, 伟大的科学家吉布斯便离开了人间。为了表示对他的崇高敬意, 1950 年, 纽约伟人纪念馆添置了吉布斯的半身像。