

宇称不守恒的

实验验证

朱永生

(一) 对称性和守恒定律

物理学的研究表明,自然界中的过程遵循一些守恒定律,比如人们熟悉的能量守恒、动量守恒、角动量守恒、电荷守恒等等,就是宏观或微观过程都必须遵守的守恒定律。守恒定律与客观世界的对称性密切相关,或者说守恒定律是自然界对称性的一种反映。物理规律具有时间平移对称性(不变性),即物理规律在时刻 t 成立,在另一时刻 t' 也应成立,与这种对称性相联系的是能量守恒定律。物理规律显然也不因空间位置的平移而变化,与这种空间平移对称性(不变性)相联系的是动量守恒定律。空间具有各向同性,即物理规律不会因空间转动而改变,与空间转动不变性相关联的是角动量守恒。电磁场在所谓规范变换下的不变性(对称性)导致电荷守恒。

还有一些守恒定律,只在原子核或基本粒子的过程中有意义,例如重子数守恒,轻子数守恒,奇异数守恒,同位旋守恒等等。这些守恒律有的是一切基本粒子过程中都须遵守的,有的则只在某一类相互作用过程中成立。后一种情形表明这种守恒律只是近似地正确。当然这些守恒律也反映了基本粒子世界中存在着与之对应对称性或近似对称性(不变性)。

现在来说明我们要着重介绍的宇称和宇称守恒概念。

宇称是描写基本粒子在空间反射下的变换性质的物理量。所谓空间反射,就是将实际过程中的坐标 x 、 y 、 z 变换为它的负值 $-x$ 、 $-y$ 、 $-z$ 。在量子力学中,一个粒子的状态可以用它的波函数 $\varphi(x, y, z)$ 完整地加以描述,换句话说,只要粒子的波函数 $\varphi(x, y, z)$ 的形式确定了,粒子的状态就唯一地确定了。这样,在空间反射下粒子波函数的变换性质也就反映了粒子在空间反射下的变换。如果 $\varphi(x, y, z) = \varphi(-x, -y, -z)$,即粒子波函数在空间反射下不变,则粒子具有正宇称,用 $P = +1$ 表示。相反,若 $\varphi(x, y, z) = -\varphi(-x, -y, -z)$,则粒子具有负宇称, $P = -1$ 。两个以上粒子组成的粒子系统,其性质、状态除了与各组成粒子的种类、状态有关,还与各粒子相互之间的轨道运动有

关。设轨道运动角动量用 L 表示,则轨道运动的宇称 P_L 由轨道角动量 L 在空间反射下的变换性质决定,经过推导知道 $P_L = (-1)^L$ 。粒子系统的宇称等于各粒子宇称的乘积再乘上轨道宇称 P_L 。所以一定状态下的粒子系统具有确定的宇称。所谓宇称守恒就是粒子(系统)的宇称在相互作用前、后不改变,作用前粒子系统宇称为正(负),作用后宇称仍为正(负)。若相互作用前后宇称改变了,则宇称不守恒。宇称守恒实际上反映了物理规律在空间反射下的不变性(对称性),也就是说,一个实际的粒子(系统)的状态,经过空间反射后的状态仍是实际存在的。

许多宏观的物理规律具有空间反射下的不变性。设质量 m 的物体在力 F 的作用下沿直线 AB 作匀加速直线运动。据牛顿定律知物体加速度 a 为

$$a = F/m,$$

a 、 F 、 AB 有相同的方向。如果对物体的运动作空间反射,则其运动轨迹变为 $A'B'$ (见图1),作用力变成 F' ,其方向与 $A'B'$ 一致,物体质量 m 在空间反射下不变。这样物理规律(牛顿定律)

$$a' = F'/m$$

依然成立,也就是说牛顿定律在空间反射下具有不变性。可以证明,电磁原理同样具有这种不变性。

在基本粒子系统的许多过程中,人们也发现相互作用前后的宇称是不变的。因此长期以来,宇称守恒被认为是基本粒子过程中的普遍规律而深深地留在人们的观念中。

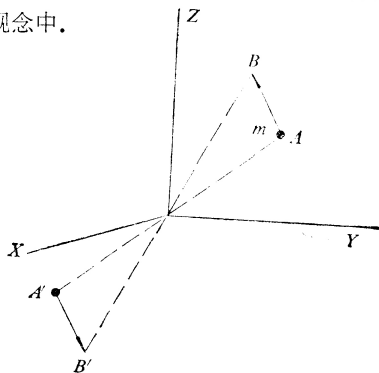
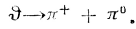
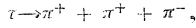


图1 质量 m 作匀加速运动的空间反射

(二) τ - ϑ 之谜

五十年代 K^+ 介子衰变的实验研究, 使得宇称守恒的观念遇到了挑战。当时人们发现一种称为 τ 介子的粒子衰变为三个 π 介子, 另一种称为 ϑ 介子的粒子衰变为两个 π 介子, 它们的衰变方式可表示为



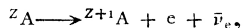
令人惊异的是 τ 、 ϑ 具有相同的质量和寿命。现在已经清楚, τ 、 ϑ 是同一种粒子 K^+ , 但当时人们对这一点感到疑惑。从质量和寿命看, 它们应当是同一种粒子, 只不过有不同的衰变方式。但如果认为宇称是守恒的, 那么在分析这两个衰变末态的宇称时就陷入困境了。

如果 τ 和 ϑ 是同一种粒子, 那么它们有相同的自旋和宇称。实验迹象表明, τ 、 ϑ 介子的自旋都等于 0, 但它们的衰变末态的宇称却相反。已经知道 π 介子宇称为负, 分析 τ 、 ϑ 的 3π 和 2π 末态系统的轨道角动量表明, 3π 末态宇称为负, 而 2π 末态宇称为正。如果认为 τ 、 ϑ 是同一种粒子, 则上述两种衰变过程中必有一种过程宇称不守恒, 这与当时的观念相冲突。如果认为 τ 、 ϑ 是不同的粒子, 则难以解释它们何以有相同的质量、寿命和自旋。这个问题成为当时基本粒子物理中一个难解的谜, 称为 τ - ϑ 之谜。

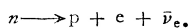
一开始人们囿于传统的成见, 不愿意放弃宇称守恒的观念, 想方设法寻找 τ 、 ϑ 的某种区别以证明它们不是同样的粒子, 但是劳而无功。1956 年夏季, 李政道、杨振宁在仔细分析了已有的实验资料后, 发现在基本粒子弱作用领域中, 宇称守恒并没有得到实验的证实。他们突破了宇称守恒是普遍规律这一框框, 提出了弱作用中宇称可以不守恒的假设, 并建议了一系列可以进行的实验对该假设进行验证。

(三) β 衰变中的宇称

李政道、杨振宁建议的实验之一是关于原子核的 β 衰变。所谓 β 衰变, 是原子核自发放射电子(也称 β 粒子)的现象。原子核放射电子后失去了电子所带的负电荷, 核本身增加了相应数量的正电荷。例如一个含 Z 个质子、 A 个核子(质子+中子)的原子核, 它的 β 衰变可表示为



其中 ${}^Z_A \text{A}$ 表示含 Z 个质子、 A 个核子的原子核, e 表示电子, $\bar{\nu}_e$ 表示电子反中微子。 β 衰变的净效应是原子核里的一个中子衰变为质子、电子和电子反中微子:



原子核可以看成是一个处于转动状态的“陀螺”, 我们用自旋角动量 J 来表示核的“转动”。将右手四个手指顺着转动方向弯曲, 则竖起的大拇指就指向 J 的方向(见图 2)。核的 β 衰变中, 在某一方向上发射电

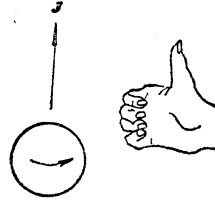


图 2 原子核自旋角动量 J 的方向

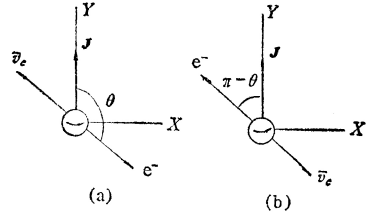


图 3 核的 β 衰变及其空间反射的图解

子的可能性(即概率)的大小, 与该方向同 J 之间的夹角 θ 有关。用比较学术性的语言, 这种现象叫做电子的发射服从一定的角分布。这种角分布的形式可以反映出 β 衰变中宇称是否守恒。设想有一原子核发生 β 衰变, 它发射电子的方向与核自旋 J 成 ϑ 角(参见图 3(a))。为了保持动量守恒, $\bar{\nu}_e$ 大致沿着与电子相反的方向飞出。现在来看看这一过程空间反射后的情形。为简单起见, 假定核处于坐标原点, J 沿着 y 轴, e^- 、 $\bar{\nu}_e$ 都在 xy 平面之内。经过空间反射后, 自旋 J 方向保持不变, 而 e^- 和 $\bar{\nu}_e$ 改变方向, 于是电子飞出方向与 J 的夹角变成 $\pi-\vartheta$ (见图 3(b))。如果 β 衰变中核在角度 ϑ 和 $\pi-\vartheta$ 方向发射电子的可能性(概率)一样大, 或者说, 电子的角分布对于 $\vartheta = \pi/2$ 的平面对称的, 那么核的实际衰变过程(以某种概率在 ϑ 方向发射电子)经过空间反射后的过程(以相同的概率在 $\pi-\vartheta$ 方向发射电子)是实际存在的。这样, β 衰变中存在着空间反射下的对称性(不变性), 即宇称守恒。反之, 若电子的角分布对于 $\vartheta = \pi/2$ 的平面对称, 则宇称不守恒。因此, 测量 β 衰变中电子的角分布便可确证宇称是否守恒。

在 1956 年之前, 对 β 衰变的实验研究已经进行了几十年了, 为什么没有注意到这个问题呢? 原来, 所有这些实验中, β 放射性的大量原子核在平常状态下其自旋是杂乱无章的, 这就无法确定衰变电子的飞行方向与核自旋方向之间的关系, 也就无法测量电子的角分布, 因此无法回答宇称是否守恒的问题。要想利用 β 衰变来验证宇称守恒与否, 关键是要使大量 β 放射性原子核有相同的自旋取向。

(四) 吴健雄的实验

根据上述思想, 以吴健雄为首的实验小组完成了用 $\text{Co}^{60}\beta$ 衰变检验宇称守恒的著名实验。为了使 Co^{60} (钴 60)核的自旋取向相同的方向, 他们采取了双重措施, 将 $\text{Co}^{60}\beta$ 放射源置于 0.01°K ($0^\circ\text{K} = -273.15^\circ\text{C}$) 以下的低温环境中, 并加上几百高斯的磁场。低温可

减弱原子和分子的热运动,有利于核自旋按一定方向排列。由于 Co^{60} 核有磁矩(与核自旋方向一致),外加磁场使得核磁矩(即核自旋)的方向倾向于跟磁场方向一致。实际情况中,大量 Co^{60} 核的自旋不可能顺着同一方向,但顺着磁场方向的核多于反方向的核,因此顺着磁场方向是核自旋取向的优势方向。在这种情形下,如果宇称守恒,电子的角分布应该对于 $\vartheta = \pi/2$ 的平面对称(磁场方向 $\vartheta = 0^\circ$),在 $\theta < \pi/2$ 和 $\theta > \pi/2$ 的两个半球中飞出的电子数相等。若电子数不相等,则宇称不守恒。

吴健雄的实验装置见图 4。 β 放射源 Co^{60} 薄层铺在硝酸铈镁晶体表面,放射源的小室处于低温容器中,周围的螺旋管线圈中通以电流产生轴向磁场。 Co^{60} 放射源上方的萘晶体记录 β 衰变放出的电子,当一个电子射入晶体,便在其中产生一次闪烁光,通过光导后被光电倍增管记录,由此知道测到了多少个电子。当线圈通电流产生轴向磁场时, Co^{60} 核产生极化(即核自旋顺着磁场方向排列);若将电流反向,核极化方向也反向。怎样知道发生核的极化效应了呢?这里巧妙地利用了 Co^{60} 核衰变后产生的 Ni^{60} 核的性质, Ni^{60} 放射 γ 射线。如果 Co^{60} 源的大量核自旋是杂乱无章的,那么 γ 射线的分布是各向同性的;如果 Co^{60} 核自旋是极化的,则 γ 射线分布各向异性。通过放置在 Co^{60} 源“赤道”和“极地”附近的两个 γ 射线计数器记录到的 γ 光子的多少,可确定 Co^{60} 放射源中的极化程度。

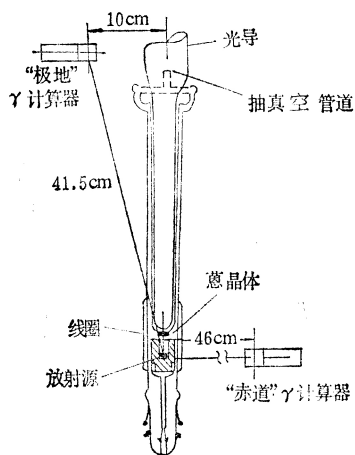


图 4 吴健雄 $\text{Co}^{60}\beta$ 衰变实验装置

实验结果示于图 5。图中横坐标是时间,随着时间标度的增大,低温容器中的温度逐渐升高。图 5(a) 是 γ 射线各向异性的测量值,在存在外加磁场 H , 温度很低时,“赤道”和“极地”计数器的计数率相差很大,表示 Co^{60} 核存在自旋取向的极化现象;随着温度的升高,由于原子、分子的热运动使极化度逐渐减小以至最后消失(两个 γ 计数器计数率相等,表示 γ 射线各

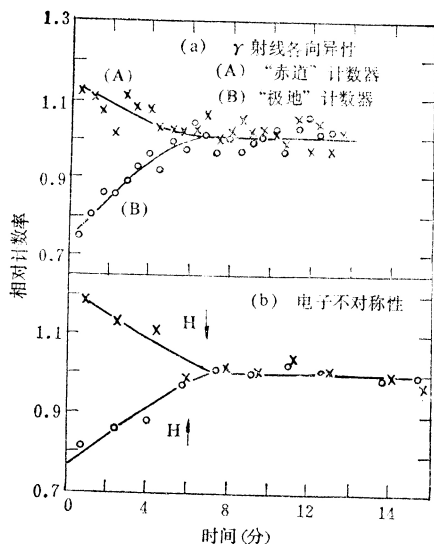


图 5 $\text{Co}^{60}\beta$ 衰变的实验结果

向同性分布)。图 5(b) 表示 $\text{Co}^{60}\beta$ 衰变中电子角分布的不对称性。磁场方向(即核自旋方向)向下用 $H \downarrow$ 表示,这时萘晶体记到的是与核自旋相反方向的电子。当磁场方向向上(用 $H \uparrow$ 表示)时,萘晶体记到的是与核自旋方向相同的电子。由图 5(b) 可以清楚地看到,在低温、核极化效应显著(γ 各向异性大)时,与核自旋相反方向的电子数明显地多,这种不对称性清楚地表明了 β 衰变中宇称是不守恒的。随着温度的升高,热运动使核极化逐渐减小以至消失,这种不对称性也趋于消失。

这一实验结果当时使基本粒子物理学界感到震惊和意外。许多人觉得宇称守恒遭到破坏使得自然界变得不怎么好了。事后一位名为维格纳的教授回忆道:“我记得那时没有一个人对这个结果感到很高兴”。没有多久,就有二十几位物理学家独立地对吴健雄的实验作出重新解释,企图拯救这个反射对称性原理。可惜这些重新解释只是纯粹的推测,无法实验地加以验证。而吴健雄的实验设计是这样精巧,实验结果是如此地不容置疑,在此基础上导出的宇称不守恒的结论具有巨大的说服力,使得这篇发表于 1957 年 2 月份核和粒子物理权威性国际学术刊物《物理评论》上,篇幅仅仅两页的论文成为实验确证 β 衰变中宇称不守恒的传世之作。还应当强调的是,1956 年夏季在李政道、杨振宁提出他们的假设仅仅几个月之后(1956 年 12 月),吴健雄就完成了难度极高而意义重大的这一实验,她因这一杰出贡献而在核和粒子物理学界享有盛名。在若干年后吴健雄当之无愧地当选为声誉很高的美国物理学会主席,1976 年被授予美国国家科学技术奖章,这是美国政府对有卓越成就和杰出贡献的科学家的最高奖励。

β 衰变中宇称不守恒得到实验的证实后,自然要探究其原因。李政道、杨振宁等人于 1957 年提出了中微子二分量理论,其要点是中微子的自旋方向与其运动方向相反,这种现象称为左旋;反中微子自旋方向与其运动方向相同,称为右旋。这种现象如图 6 所示。这一理论假设很快为实验所证实。

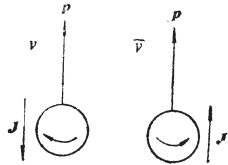


图 6 左旋中微子和右旋反中微子

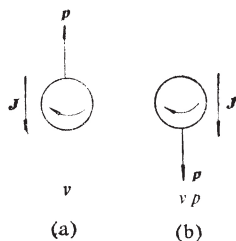


图 7 左旋中微子及它的空间反射变换

中微子的运动规律本身就不具有空间反射对称性。例如图 7(a) 是一个中微子的运动规律,它是左旋的;经过空间反射变换后,自旋方向不变,但运动方向相反,成为右旋的,如图 7(b) 所示。但自然界不存在右旋中微子,因此中微子运动本身就是宇称不守恒的。反中微子的情形也一样。进一步的研究表明,有(反)中微子参加的过程中宇称是不守恒的。由于中微子仅仅参与弱作用,故在弱作用中宇称不守恒;不出现中微子的强作用和电磁作用过程中宇称仍然守恒。

β 衰变中宇称不守恒实验开创了基本粒子世界中对称性研究的一个新阶段。另外一些对称性进一步用实验进行了检验,例如时间反演(将时刻 t 变为其负值 $-t$)下的对称性,电荷共轭变换(将过程中的粒子全部变换为对应的反粒子,过程中的反粒子全部变换为对应的粒子)下的对称性等等,这两种变换分别称为 T 变换和 C 变换。后来人们又研究 CP 和 CPT 联合变换下的对称性。实验研究的结果表明在弱作用过程中除了宇称不守恒外,电荷共轭 C 也不守恒。此外在弱作用的少数过程中宇称和电荷共轭联合变换(CP)下也不守恒。然而 CPT 联合变换下在所有物理过程中都是守恒的。

毫无疑问,弱作用中宇称不守恒的发现是五十年代基本粒子物理学最重要的事件之一,中微子的二分量理论, C 、 P 、 T 对称性的研究,都可以说是这一发现的自然延伸。这一领域的研究成果大大加深了人类对

客观世界的认识。

(五) 一些启示

从这一重要发现的前前后后,我们可以得到一些有益的启示。

宇称不守恒的发现可以说是科学的理论和实验研究相结合、相互推动的范例。李政道杨振宁受实验发现的 $\tau-\theta$ 之谜的启发,在已有实验资料分析的基础上得出了弱作用中宇称守恒没有得到实验证实的结论,提出了弱作用中宇称可以不守恒的假设。吴健雄从实验上证实了这一假设。李、杨又在此基础上进一步提出了中微子二分量理论假设,尔后又被实验所证实。理论、实验一环扣一环,层层推进,短短二三年内演出了基本粒子物理史上一幕幕威武雄壮的活剧,充分显示了科学理论与实验相结合,相互促进的巨大力量。这启发我们,必须自觉地推动理论与实验的这种结合,加强理论和实验工作者之间经常的学术思想交流和相互合作。无疑这将有助于推动科学事业的发展。

从实验的观点来看,仅仅能抓住好的物理思想是不够的,还要有实现物理思想的能力。这可从两方面加以分析。首先要有非常精巧的实验设计,使得你的实验结果无懈可击,具有充分的说服力。这种能力来源于对已有知识和实验方法的充分掌握和融汇贯通。吴健雄的实验就具有这样的特点。其次,要具备在短期内完成实验的手段和技能。现代科学实验往往是各种科学技术的综合体,而且往往对实验技术提出新的尚未解决的要求。以 $Co^{60}\beta$ 衰变实验为例,在当时 Co^{60} 核极化技术,电子探测器放在低温环境下工作,都是相当困难或以前未曾研究过的问题。因此必须有不同专长的科学家的通力合作,解决难题才能获得实验的成功。现今的基本粒子物理实验,无论是在实验规模和时间,困难程度、所需人员和资金各方面都是五十年代不可比拟的,物理实验已逐渐演变为科学工程,实验的参加者往往不是少数几个人,而是一个科学群体。在世界性的科技竞赛中要想捷足先登,必须加强科学群体中的集体努力与合作,并在各自的专业领域中站在前沿阵地,有所创新,有自己的拿手绝招。否则是难以取得国际先进水平的科学成就的。

(题图:程绍臣)