

# 理论物理研究的典范之作

倪光炯

1956年10月,美国物理评论杂志发表了一篇长仅五页的文章:“弱作用中的宇称守恒问题”,立刻震动了世界物理学界。作者李政道、杨振宁和紧接着在实验上证明宇称不守恒的吴健雄这三位青年物理学家的名字,顿时传遍全球。

## 从实验矛盾出发

李、杨二位象当时许多物理学家一样,对当时高能物理实验中一个问题感到困惑: $\theta^+$ 介子衰变为二个 $\pi$ 介子, $\tau^+$ 介子衰变为三个 $\pi$ 介子,据此由达立兹(Dalitz)等人作出的分析表明, $\theta^+$ 的宇称为正而 $\tau^+$ 的宇称为负;另一方面,它们的质量和寿命却在实验精确度内相等,又象是同一种粒子( $K^+$ 介子)。为了解释这一矛盾( $\theta$ - $\tau$ 之谜),李、杨在考虑了种种方案都觉得不理想之后,便深深地被一种想法吸引住了:那就是假设在衰变过程(这是受弱作用支配的)中宇称并不严格守恒,因此 $\theta^+$ 和 $\tau^+$ 是同一种粒子(因而有同一质量和同一寿命)的两种不同的衰变方式。这当然是一种大胆的想法,因为宇称守恒定律是一个公认的自然界基本定律,决不能单凭一个 $\theta$ - $\tau$ 实验矛盾就可以认真地作出宇称不守恒的论证的,更何况那时对 $\theta$ 、 $\tau$ 这些奇异粒子的性质知之甚少。所以李、杨认为, $\theta$ - $\tau$ 之谜只能作为一种刺激或动力,促使他们把宇称在弱作用过程中是否守恒的问题提出来。这样,他们把大胆与谨慎两方面结合起来,迈出了坚实的第一步。

## 已往实验的回顾

当时,人们一听说宇称可能不守恒时自然会问:作为一个定律,宇称守恒难道不是早已被无数实验证明过了吗?而李、杨高明之处就在于把混在一起的问题分解开来,首先把在衰变过程中的弱作用同其它强作用和电磁作用区分开来,然后逐一地分析在各自的领域内,宇称守恒究竟已被验证到何种程度?他们指出:如果宇称不守恒,那些原子或原子核的定态,将不再是通常标定的宇称纯态,而是混杂有相反宇称的混合态,后者混合的程度就是宇称不守恒(破坏)的一种量度。然而,根据原子光谱中存在选择定则这个事实,可以估计混合的程度约为 $10^{-6}$ 。在核反应中实验精确度要差一些,混合程度 $<10^{-4}$ 。由质子特别是中子的电偶极矩的实测上限又可判定混合程度 $<3 \times 10^{-13}$ 。所有这些实验事实都表明,在强作用和电磁作用过程中,

宇称守恒定律确实以很高的精确度成立。可是,在弱作用中的情况又怎样呢?

## 转到 $\beta$ 衰变上来

弱作用的实验(包括涉及 $\theta$ 、 $\tau$ 的衰变实验)远比强作用和电磁作用的实验难做,精确度也差得多。当时唯一做过很多实验的领域是 $\beta$ 衰变(吴健雄就是这方面的专家),同时这方面也有相当精确的理论,即费米在三十年代提出的四个费米子在一处作用的唯象模型。据此可以相应地具体考察许多过程:允许跃迁的能谱,各种禁戒跃迁的能谱, $\beta$ -中微子关联和 $\beta$ - $\gamma$ 关联等等。按照费米理论,李、杨进一步推广写出 $\beta$ 衰变的哈密顿密度如下:

$$\begin{aligned} H_{int} = & (\phi_p^+ \gamma_s \phi_n) (C_s \phi_e^+ \gamma_s \phi_\nu + C_s' \phi_e' \gamma_s \phi_\nu) \\ & + (\phi_p^+ \gamma_s \gamma_\mu \phi_n) (C_v \phi_e^+ \gamma_s \gamma_\mu \phi_\nu + C_v' \phi_e' \gamma_s \gamma_\mu \phi_\nu) \\ & + \frac{1}{2} (\phi_p^+ \gamma_s \sigma_{\lambda\mu} \phi_n) (C_T \phi_e^+ \gamma_s \sigma_{\lambda\mu} \phi_\nu \\ & + C_T' \phi_e' \gamma_s \sigma_{\lambda\mu} \phi_\nu) + (\phi_p^+ \gamma_s \gamma_\mu \phi_n) \\ & \times (-C_A \phi_e^+ \gamma_s \gamma_\mu \phi_\nu - C_A' \phi_e' \gamma_s \gamma_\mu \phi_\nu) \\ & + (\phi_p^+ \gamma_s \phi_n) (C_p \phi_e^+ \gamma_s \phi_\nu \\ & + C_p' \phi_e' \gamma_s \phi_\nu) \end{aligned} \quad (1)$$

过去假设宇称守恒,只有 $C_s$ 、 $C_v$ 、 $C_T$ 、 $C_A$ 和 $C_p$ ,分别叫做标量、矢量、张量、赝矢量和赝标量的耦合常数,而 $H_{int}$ 永远是标量。现在加上了带撇的 $C'$ 的项,它们是赝标量,这样才可能破坏宇称守恒。然而李、杨经过计算证明,过去所有的观察量,例如 $\beta$ 衰变几率的表示式中,只是以 $|C|^2 + |C'|^2$ 代替原来的 $|C|^2$ ,而这是实验上无法区分的。于是他们得出结论:过去做过的所有 $\beta$ 衰变实验,没有一个涉及宇称是否守恒的问题。这真是惊人之语。

## 画龙点睛之笔

读者会问:“这,道理何在呢?”这正是当时其他物理学家迫不及待地要问的问题。李、杨经过深思熟虑,反复讨论后,恍然大悟,要肯定(1)式中 $C'$ 项的存在,必须测量出正比于干涉项 $CC'$ 的观察量,而这些量必须是在空间反演下变号的赝标量。过去测量的量,没有一个是赝标量,因此与宇称守恒就毫无关系了。

他们很快想到, $\beta$ 衰变中一个可能测量的赝标量是电子相对于极化核的角分布。核的自旋 $\sigma$ 是一个轴(赝)矢量,电子动量 $p$ 是一个矢量,记两者的夹角为

$\theta$ , 则标积  $\mathbf{p} \cdot \boldsymbol{\sigma} (\sim \cos \theta)$  就是一个赝标量. 将角分布写成

$$I(\theta)d\theta = (\text{常数})(1 + \alpha \cos \theta) \sin \theta d\theta \quad (2)$$

则经计算后可见,  $\alpha$  确实正比于各  $CC'$  干涉项.  $\alpha \approx 0$  就是宇称不守恒的确定证据. 在实验上只要测量  $\theta < 90^\circ$  (朝上) 和  $\theta > 90^\circ$  (朝下) 两个半球的出射电子数的不对称性, 便可以直接测出  $\alpha$ :

$$\alpha = \alpha \left[ \int_0^{\pi/2} I(\theta)d\theta - \int_{\pi/2}^{\pi} I(\theta)d\theta \right] / \int_0^{\pi} I(\theta)d\theta \quad (3)$$

李、杨与戈尔特哈勃 (M. Goldhaber) 和吴健雄讨论后, 具体建议用在低温下极化的  $^{60}\text{Co}$  核做这种实验. 吴健雄立即动手, 与美国标准局的几位物理学家合作, 抓紧研究, 于 1956 年底就得出肯定结论: 电子角分布上下不对称, 而且不对称的程度达到极大. 她把这消息告诉了李、杨, 李、杨立即写出了二分量中微子的论文.

必须从实验中测量的量构成赝标量. 这句话在李、杨文章中真是画龙点睛之笔. 于是笔走龙蛇, 他们除极化核  $\beta$  衰变的角分布外, 还列举出一系列可能做的实验, 例如有三个动量  $\vec{P}_1, \vec{P}_2$  和  $\vec{P}_3$ , 则可测量  $\vec{P}_1 \cdot (\vec{P}_2 \times \vec{P}_3)$ , 它也将正比于  $CC'$  干涉项. 这些实验不久也陆续由许多实验组做出来了. 在此不再赘述.

这里讲一句插曲. 在历史上最早提出中微子存在的著名物理学家泡利 (Pauli), 看到李、杨文章后, 于 1957 年 1 月 17 日写信给韦斯科夫表示不相信, 他说敢打赌, 电子角分布一定是上下对称的 (就是说, (2) 式中出现的  $\cos \theta$  将是偶幂次的, 如  $\cos^2 \theta$ , 它不是赝标量而是标量了, 极化核的  $r$  角分布就是如此). 而当吴健雄等的实验结果的预印本到他那里时, 泡利大吃一惊, 于 1 月 27 日再写信给韦斯科夫, 说自己幸而没有真打赌, 不然要损失一大笔钱了.

### “走出门了”

一个曾被视为天经地义、金科玉律的自然界基本定律——宇称守恒定律, 在经过一篇文章的深刻分析, 一个 (或最初几个) 实验的证实之后, 就被判定为并不普遍成立, 并且局部的破坏达到极大. 这在科学史上, 即使不算空前, 也恐怕是极为罕见的. 人们普遍感觉到, 粒子物理研究的一个新时代开始了. 奥本海默在得知实验结果后, 打电报给杨振宁说: “走出门了”. 因为杨振宁在 1956 年曾把高能物理学家的处境比做一个人在暗室里转. 当时高能物理中困扰人的不仅有  $\theta$ - $\tau$  之谜, 还有许多问题. 如 (1) 式所示 ( $C' = 0$ ) 的哈密顿中, 费米最初假定只有  $C_v$  项, 后来才加上另外四项, 但 56 年前的实验分析出现了一些混乱, 搞不清楚究竟是  $AV$  型呢? 还是  $ST$  型?  $P$  项有没有贡献? 等等. 仅仅在李、杨、吴等的新发现之后, 才有可能搞清楚. 苏达香和马谢克仔细分析实验, 指出有些实验可

能有错, 重做之后, 果然如此. 实验结果相当于 (1) 式中只有  $A, V$  两种作用, 而且宇称破坏达到极大:  $C_v = C'_v, C_A = C'_A$ , 这又相当于中微子场算符  $\psi_\nu$  前面要乘上投影因子

$$P_L = \frac{1}{2}(1 + \gamma_5),$$

这里

$$\gamma_5 = \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \gamma_4 = - \begin{pmatrix} 0 & I \\ I & 0 \end{pmatrix}.$$

$P_L$  的作用是选出左手的中微子和右手的反中微子 (自然界不存在右手的中微子和左手的反中微子). 1958 年, 苏达香-马谢克, 还有费曼-盖尔曼, 把这种二分量中微子的观念推广, 假定一切费米子都只以左手手征分量参与弱作用, 建立起弱作用的普适理论, 它显然具有最大的宇称破坏, 在与实验比较中获得极大的成功. 它的成功又进一步促使人们努力促进弱作用与电磁作用统一的研究, 到 1967 年, 格拉肖、温伯格、萨拉姆的弱电统一模型诞生, 在这模型和以后发展起来的各种大统一理论中, 采用自旋  $1/2$  费米子的左手手征分量成为不可缺少的因素.

很明显, 宇称不守恒的发现, 起了一种解放思想、开拓眼界的作用, 使物理学中关于对称性的研究进入到一个新的更高阶段. 人们日益认识到, 如  $P$  (宇称)、 $C$  (电荷共轭)、 $T$  (时间反演) 等分立对称性和规范变换等连续对称性, 在物理上有极其深刻的含义和关键性的作用. 李政道先生在他的专著“粒子物理和场论导引”一书中阐明了物理学中的一条真理: 一个不可观察量的对称性变换必定同一个可观察量的守恒律或选择定则联系在一起. 杨振宁先生也总结出理论物理中一条基本原理: “对称性决定相互作用”. 他在一次谈话中认为, 现在我们对这句话的理解决不是最后的理解. 他深信, 把对称性原理继续推广, 将是八十年代、九十年代或二十一世纪物理学的重要发展方向.

### 新的期待

三十年过去了, 作为物理学一个重要分支的高能物理, 有了迅速的发展. 但同时不可否认, 目前的高能物理学也面临着困境. 新实验需要新一代加速器, 投资极大, 因此实验数据不那么多, 实验上的矛盾又不那么尖锐. 另一方面, 理论文章非常之多, 但不少与实验没有什么关系. 许多文章中作了这样或那样的假设, 但透过复杂的数学公式仔细分析下来, 往往是一个假设给出一个结论. 基本问题的研究当然必须作假设, 或者说猜测, 这是理论的输入. 而经验已经表明, 一个输入、一个输出的猜测常常是错的; 一个输入, 有二个输出符合事实时, 对的可能性便很大; 而当一个输入有

三个以上的正确输出时，那就几乎一定是对的了。三十年前李、杨猜对了，一个输入，一下子产生了许多输出，给物理的发展以巨大的推动力，这是物理学中的一个里程碑。他们的工作无疑是理论物理研究的典范。现在的问题是：在当前的高能物理学的困境中，会不会再产生象三十年前的李政道、杨振宁和吴健雄那样的杰出人物、创造出新的不朽业绩呢？人们在期待着。