

一个还没有结束的故事

——纪念CP不守恒发现十周年

陆昌国

在基本粒子家族中,最富有传奇色彩的成员应当首推K介子。由于它神秘难测的特性,吸引了几代物理学家的注意。从1947年罗切斯特和布特勒首先在宇宙线中发现 V^0 粒子(即现称的 K_S^0 , $V^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$)以来,它已经几易其名,它为人们提出的一连串疑难、详谬,经过理论和实验物理学家的缜密的思索、严格的检验和不懈的努力,终于变成一把打开科学真知大门的钥匙。著名的 τ - θ 之谜,导致对宇称守恒定律的大胆的怀疑,继而实验很快验证了这一思想,李政道、杨振宁因此而获得1957年的诺贝尔物理学奖。随着P宇称、C宇称不守恒的发现,人们猜测在弱作用中CP联合交换也许守恒。在检验了中性K介子后,也指出了一些对称性破坏的信号,怀疑CP联合守恒。当时已经认识到,由于量子力学么正极限,即使存在CP不守恒,它也将是一个很小的效应。其后很长一段时间内,没有一个实验观察到了CP不守恒,直至1964年来自美国普林斯顿大学的克劳宁和非奇等四人实验小组在布鲁克海文交变梯度回旋加速器(AGS)上完成了一个相当成功的实验,终于第一次发现了CP不守恒。他们的文章“ K_S^0 介子 2π 衰变的实验例证”在《物理评论通讯》上发表后十六年,瑞典皇家科学院将当年度的物理学奖授予克劳宁和非奇教授,当时非奇是普林斯顿大学物理系系主任,克劳宁已离开普大,到芝加哥大学任教。笔者和叶铭汉同志那时正好在普大物理系工作,有幸目睹了科学界的这一盛典。普林斯顿大学素以她的数学和物理学的优秀传统为荣,在从物理系大楼通向数学系大楼的走廊墙壁上,悬挂着长长一串曾在普大学习或工作过的诺贝尔物理学奖金获得者的大幅照片,这一次又增添了两位。在宣布得奖的那几天,物理系师生们兴奋地谈论着CP,曲曼教授专门撰写的介绍这个实验及其意义的文章张贴在门厅中,热情的同事们在非奇的办公室门上贴了一张大纸,用大字书写了向他表示的祝贺,并留下了各人的签名。在全系师生参加的香槟酒会上,大家庆祝着十六年前那个“就像聆听鲁道夫·斯厄金演奏贝多芬乐曲那样优美绝伦的实验”,但是人们没有忘记,即使过去了十六年,CP不守恒的本源问题仍如骨鲠在喉,理论家提

出过众多的理论来解释,实验家不断改进着实验方法,以期得到更加精确的实验数据,对理论进行判决,至今,我们还是不知道它的真正的解释,它仍旧是一个没有结束的故事,吸引着科学思维的遐想。

盖尔曼-派斯理论——奇异的 K^0 - $\bar{K}^0$ 振荡

K^0 和它的反粒子 $\bar{K}^0$ 有着一个非常独特的性质: K^0 与 $\bar{K}^0$ 之间唯一的区别在于它们的奇异数, K^0 的奇异数为+1,而 $\bar{K}^0$ 为-1。而我们知道,在弱作用中奇异数是可以不守恒的,所以 K^0 和 $\bar{K}^0$ 可以通过弱作用的虚跃迁过程连接起来,如

$$K^0 \leftrightarrow \pi^+ \pi^- \leftrightarrow \bar{K}^0.$$

对其它正、反粒子对,它们所具有的一个或几个可区别的量子数(如电荷,重子数,轻子数)在弱作用中仍必须守恒,所以就不可能出现上述的情况。

上述的跃迁产生的一个奇特的后果是,一旦在强作用过程中产生了纯粹的 K^0 粒子后,如 $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$,它们将逐渐地改变自己的类属,束流中将会产生出 $\bar{K}^0$ 。基于这种观察,盖尔曼和派斯在1954年提出的理论中,在C守恒的假定下,预言有两个不同寿命的粒子, θ_1^0 短寿, θ_2^0 长寿,它们也就是今天所称的 K_S^0 和 K_L^0 。然而,C守恒的假定并不是必要的,当1957年实验证实C宇称在弱作用中并不守恒后,认识到选择CP联合宇称守恒更好。这个理论可简述如下。

C宇称变换的作用是将正、反粒子互换,所以我们有

$$CK^0 = \bar{K}^0, \quad C\bar{K}^0 = K^0,$$

考虑到 K^0 , $\bar{K}^0$ 粒子的P宇称均为负,所以它们的CP联合变换有

$$CPK^0 = -\bar{K}^0, \quad CP\bar{K}^0 = -K^0.$$

如果我们暂时假定CP在弱作用中也守恒,则我们可以用 K^0 和 $\bar{K}^0$ 的线性组合得到CP的本征态 K_1^0 和 K_2^0 ,

$$K_1^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (K^0 - \bar{K}^0),$$

$$K_2^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (K^0 + \bar{K}^0),$$

显然, $CPK_1^0 = +K_1^0$, $CPK_2^0 = -K_2^0$.

利用量子力学的基本知识可知, 由 K 介子衰变得到的 2π 介子系统的 CP 总是为+, 而衰变得到的 $3\pi^0$ 介子系统的 CP 总是为-, $\pi^+\pi^-\pi^0$ 终态处在最低的角动量态中 CP 也是一。于是可得出结论, 如果 CP 严格守恒, K_1^0 可以衰变为 2π 和 3π (但 3π 不能处在最低的角动量态), K_2^0 只能衰变为 3π , 不能为 2π 。由于衰变到 2π 的相空间比 3π 要大得多, 所以 K_1^0 的寿命要比 K_2^0 短。这一理论的奇特之处在于, 通过强作用产生的 K^0 介子, 可以看作是 K_1^0 和 K_2^0 的线性组合,

$$K^0 \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (K_1^0 + K_2^0),$$

而一旦 K^0 产生后, K_1^0 和 K_2^0 就开始衰变, K_1^0 很快就衰变殆尽, 于是遗留下的全部是 K_2^0 , 可是 K_2^0 又是 K^0 和 $\bar{K}^0$ 的等量混合, 所以在原先是纯粹的 K^0 束流中, 会自动地再生出 $\bar{K}^0$ 来!

盖尔曼和派斯理论的这一预言不久就为莱德曼等人在云室的实验中得到了证实。他们在 K^0 介子产生后飞行了 6 米距离后(为 K_1^0 平均寿命的 100 倍以上), 利用云室确实看到了许多 K_2^0 所特有的 $\pi^+\pi^-\pi^0$ 事例。

克劳宁-菲奇实验

尽管早在 1956 年已经有人开始怀疑 CP 变换的守恒性, 并做了不少实验来检验 CP 守恒性, 但是直至 1964 年, 实验家始终未能观察到 K_2^0 衰变为 2π 的证据, 于是人们又开始相信 CP 联合守恒, 并认为物理学已经最终揭开了弱作用的全部奥秘。所以当克劳宁-菲奇实验宣称观察到了 K_2^0 衰变为 2π , 这新闻就“似光速一般迅速传遍了全世界”, 物理学界抱着不无怀疑和保留的态度欢迎着它。实验者本人在获得 80 年度的诺贝尔奖金以后回顾 64 年那篇文章发表前的历史时说, 当他们从成卷成卷的火花室照片的分析中刚发现 K_2^0 介子衰变出的 $\pi^+\pi^-$ 事例在束流方向上出现一个异常的前向峰时, 他们自己都不相信这是真的, 当时严守秘密, 想方设法从各种可能的实验原因着手, 企图消灭这个前向峰, 但是绞尽了脑汁, 排除了他们能想到的所有实验误差, 这个前向峰依然存在, 他们才认识到新的物理出现了, 终于将文章送交发表。他们作这个实验的本意并不是想验证 CP 不守恒, 而是被阿台尔

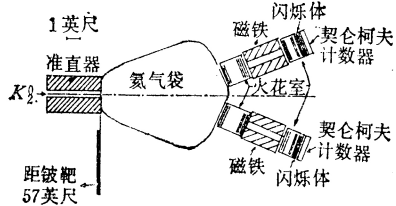


图 1 克劳宁-菲奇实验的装置平面图

等人在研究 K_1^0 介子在 K_2^0 介子中的再生现象时发现的反常再生所吸引, 想验证一下阿台尔等人的结果, 同时给 CP 守恒设

置新的下限。当时克劳宁、菲奇和阿台尔进行了讨论, 讨论中发现, 检验这种反常再生现象的更理想的探测器已经存在——克劳宁在布鲁克海文的实验中用过的火花室, 这在当时是一种新的探测器。他们立即行动, 将克劳宁的探测器全部从布鲁克海文的老的 Cosmotron 加速器搬至新运行的 AGS 加速器, 许多工作甚至在还没有得到布鲁克海文实验室的正式同意之前就开始进行, 并完成的。他们的实验装置平面图如下。

用 AGS 的 30 GeV 的质子束轰击铍内靶, 然后在 30° 处通过准直器得到中性 K 介子束流。经过长距离飞行后, 让 K_1^0 衰变完, 于是得到纯粹的 K_2^0 束流, 进入第二个准直器。

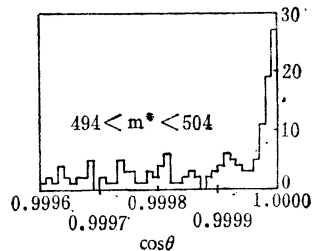


图 2

为了减少 K 介子与物质的相互作用, 纯 K_2^0 束流粒子的衰变是在 He 气中进行的。

利用火花室作为径迹探测器。在两个火花室之间间隔以 178 千高斯·英

时的磁场, 这样就能对带电粒子进行动量分析。

实验的数据分析是计算在衰变中观察到的两个带电粒子的动量以及它们的不变质量 (假设每个带电粒子都具有带电 π 介子的质量), K_2^0 衰变出两个带电粒子的反应道主要有以下几种: $K_2^0 \rightarrow \pi^\pm e^\mp \nu$, $K_2^0 \rightarrow \pi^\pm \mu^\mp \nu$, $K_2^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ 以及 $K_2^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$, 但是前三种衰变道在本探测器中将得到的不变质量谱分别为 $280 \sim 536 \text{ MeV}$, $280 \sim 516 \text{ MeV}$, $280 \sim 363 \text{ MeV}$, 可见要等于 K^0 的质量 (497 MeV) 的可能性是很小的。另外, 两个动量的矢量和以及它与束流方向之间的夹角也可定出。这个夹角对于两体衰变来说应为 0, 而对三体衰变来说, 一般不为 0。经过这样两重限制后, 本底可以扣除得很干净。如果将不变质量限制在 494 至 504 MeV 之内, 画出事例数随 $\cos \theta$ 的分布, 则在 θ 接近 0° 处出现明显的峰, 如图。他们在扣除本底后, 得到前向峰中的事例数为 45 ± 9 , 总的 K_2^0 衰变的事例数为 22700, 所以 $R = \frac{K_2^0 \rightarrow \pi^+\pi^-}{K_2^0 \rightarrow \text{所有带电粒子道}} =$

$(2.0 \pm 0.4) \times 10^{-3}$ 。为了彻底排除这些 2π 衰变事例是由 K_2^0 与氦气的相互作用中再生出来的 K_1^0 造成的可能, 后来又在真空中重复做这个实验, 结果仍旧观察到了 $K_2^0 \rightarrow 2\pi$, 所以结果是毋庸置疑的。

科学上的杰出成就往往伴随人们观念上的某种改变, CP 不守恒的实验证实, 使得物理学家对待对称性原理的态度逐渐翻了一个身。旧观念——先验地承认对称性的观念正在消亡, 过去人们总是习惯于在对称性原理破坏时去解释它为什么破坏, 但是现在你必须

解释为什么你要期望这种对称性的存在。

CP 不守恒的来源——期待着回答

随着 CP 不守恒的发现,各种企图解释它的模型和理论蜂拥而至,不下数十种。但是在越来越仔细的实验测量下,绝大多数都悄悄地消失了,经受住实验检验的,或至今实验还没有能够确实加以检验的理论,只是屈指可数的了。沃夫斯坦在 1964 年提出的一种超弱作用模型中,提出 CP 不守恒并不是由于普通的弱作用引起,而是由于第 5 种以前不为我们所知的超弱力的作用,它比普通弱作用的 10^{-8} 倍还弱。普通弱作用要服从奇异数的选择规则 $\Delta S = 0$ 或 $\Delta S = \Delta Q = \pm 1$,超弱作用则可以有 $|\Delta S| = 2$,所以它可以直接将 K^0 和 $\bar{K}^0$ 混合起来。于是具有确定衰变寿命的 K_S^0 和 K_L^0 不再纯粹是前文中给出的 CP 的本征态 K_1^0 和 K_2^0 ,而是在 K_S^0 中除 K_1^0 以外还混有极少量的 K_2^0 ,在 K_L^0 中则反之,即

$$K_S^0 = \frac{1}{\sqrt{1 + |\epsilon|^2}} [K_1^0 - \epsilon K_2^0],$$

$$K_L^0 = \frac{1}{\sqrt{1 + |\epsilon|^2}} [K_2^0 + \epsilon K_1^0],$$

$$(|\epsilon| \sim 2 \times 10^{-3})$$

所以我们在 K_L^0 衰变中,除了能看到 K_2^0 衰变为 3π ,也能看到少量的 K_1^0 衰变出的 2π 。

沃夫斯坦的模型提出了不少关于 CP 不守恒量的明确的预言,例如对于如下定义的一些物理量:

$$\eta_{00} \equiv \frac{K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \text{ 的振幅}}{K_S^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \text{ 的振幅}} = |\eta_{00}| e^{-i\phi_{00}},$$

$$\eta_{+-} \equiv \frac{K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \text{ 的振幅}}{K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \text{ 的振幅}} = |\eta_{+-}| e^{-i\phi_{+-}},$$

超弱理论预言: $|\eta_{00}/\eta_{+-}| = 1$,

$$\phi_{+-} = \phi_{00} = (43.67 \pm 0.14)^\circ,$$

$$\epsilon \text{ 的实数部分} = (1.645 \pm 0.016) \times 10^{-3},$$

最新的实验值为: $|\eta_{00}/\eta_{+-}| = 1.023 \pm 0.036$,

$$\phi_{+-} = (44.6 \pm 1.2)^\circ,$$

$$\phi_{00} = (54.5 \pm 5.3)^\circ,$$

$$\epsilon \text{ 的实数部分} = (1.621 \pm 0.088) \times 10^{-3}.$$

可见,除 ϕ_{00} 外,其它量都与实验符合得很好。由于这种超弱作用非常微弱,所以他还预言 CP 不守恒只能在中性 K 介子的衰变中才能看到(至今的实验状况的确如此)。为此,有人曾认为“如果 CP 不守恒很小,而且只有在 K 介子衰变中才能观察到,它将并不会对物理学的其它方面产生很大的影响”。

当时,根据对 CP 不守恒来源的唯象分析,李政道提出它可能是一种毫弱作用的结果。所谓毫弱作用,就是它的强度约为普通弱作用的 10^{-3} 倍。这当然要比超弱作用强得多。如果这样,则就有希望在 K^0 - $\bar{K}^0$ 系统之外的其它地方,实验上发现 CP 不守恒,但目前

的实验精度要验证这一点还是颇有困难的。

七十年代,对 CP 不守恒的兴趣重新燃起,那是基本粒子的夸克和规范理论的年代,理论物理学家当然希望用这种新的十分成功的理论来探讨 CP 不守恒的更深刻的原因。1973 年,李政道根据规范理论的方法,对他的毫弱理论作了进一步的阐述。根据温伯格-萨拉姆的弱电统一理论,要求有希格斯玻色子的存在。李指出如果至少有 4 种这样的粒子,则就可能出现 CP 不守恒,而且是毫弱的。对毫弱还是超弱作用的一个可行的实验检验是测量中子的电偶极矩,毫弱作用的预计为 $d_N \sim 10^{-24} \text{cm}$,超弱作用的预计为 $d_N \sim 10^{-31} \text{cm}$,目前的实验精度达到 $d_N < 3 \times 10^{-24} \text{cm}$,所以与两者都不矛盾,要能真正作出判决,还需实验物理学家的艰苦努力。

CP 不守恒的另外一种理论解释是由日本物理学家小林和增川在 1973 年提出的。他们将卡比玻理论加以推广,提出将六种轻子组成三代 (ν_e, e) (ν_μ, μ) (ν_τ, τ) ,与之对应将夸克也分为三代(尽管当时只知道三种夸克),他们指出如果至少有六种夸克的话,弱作用将“自发地”破坏 CP 守恒,并不需要特殊的假设。后来果真发现了 c 夸克和 b 夸克,又猜想存在 t 夸克,于是他们的理论才认真地引起人们注意。

除了对 CP 不守恒的动力学原因作更深刻的探索外,人们也在努力地寻找 CP 不守恒的应用。七十年代有人提出了它与宇宙学和宇宙起源的大爆炸模型的关系。根据大爆炸模型,相等数量的正物质和反物质产生,在以后的扩张及冷却过程中,相等数量的正、反物质将湮灭。但实验上看到的宇宙几乎都是正物质,反物质只是来自于宇宙线和加速器。造成这种情况的一种可能的解释是由于 CP 不守恒,正、反物质不一定要以相同的速率进行相应的反应。这样,质子如果不稳定,则宇宙中的正、反物质就可能不相等。

CP 不守恒发现至今已有二十年了,这在科学技术日新月异的今天,是个不短的时期,尽管世界各大基本粒子实验室化了巨大的努力,取得了十分重大的进展,但是人们仍旧不识其庐山真面目。由于它的微弱效应,给实验工作者提出了严峻的挑战,但我们可以坚信,科学实验终于会以其至高无上的权威揭开重重帷幕的。