

宇称不守恒问题及其逻辑结构

舒国萱 刘远明

1956年,李政道(T. D. Lee)和杨振宁(C. N. Yang)提出了弱相互作用中宇称不守恒假说,1957年,吴健雄(C. S. Wu)及其同事完成了假说的实验证实工作,随后,李政道和杨振宁共获当年的诺贝尔物理学奖。李、杨二人从提出假说到获得诺贝尔奖前后只用了两年的时间,创造了获诺贝尔奖历史上的最短周期。李政道、杨振宁和吴健雄三个名字,也因此成了宇称不守恒问题的代名词。问题真是这么简单吗?粒子物理学领域真有一蹴而就的事情?吴健雄等人的实验为何有如此大的功效?如果情况真是这样,当同为高能物理学家的阿兰·弗兰克林(Allan Franklin)问及李政道,是否知道20世纪20年代末期已有两组实验能够显示弱相互作用中宇称不守恒时,李政道坦率地承认,直到后来才知道。这又是怎么回事呢?其实,宇称不守恒问题有很深的历史渊源和它自身的逻辑结构。

一、宇称不守恒问题的理论原由

宇称(Parity)是波函数的一个性质,用来表征微观粒子的波函数在空间反射(反演或镜像)变换下的变换性质。如果把波函数的所有空间坐标通过坐标原点同时进行空间反射变换,即 $x \rightarrow -x$, $y \rightarrow -y$, $z \rightarrow -z$, $\Psi(r, t)$ 变成 $\Psi(-r, t)$ 。如果 $\Psi(-r, t)$ 与 $\Psi(r, t)$ 完全不同,则此波函数没有反射对称性。如果 $\Psi(-r, t)$ 与 $\Psi(r, t)$ 仅差一个正负号,则该波函数具有空间反射对称性,并有一定的宇称值,即:

①如果 $\Psi(r, t) = \Psi(-r, t)$, 有偶宇称, 即 $P=1$;

②如果 $\Psi(r, t) = -\Psi(-r, t)$, 有奇宇称, 即 $P=-1$ 。

粒子除了有以上所描述的空间运动的波函数之外,也有内部运动的波函数,所以也有内部宇称——内禀宇称。在空间反射变换下,内部波函数的变换性质确定它的内禀宇称。粒子系统的总宇称等于空间宇称和内禀宇称的乘积。通常情况下,由于守恒粒子的内禀宇称不起作用,所以可以略去。

宇称守恒是空间反射对称性的结果。如果所有物理定律在这一变换下保持不变,我们就认为它们具有反射或空间反演的对称。在这种情况下,也就是宇称是守恒的。因此,空间反演下的守恒,即宇称守恒,等同于左右不分。其实,这种对称经常在

经典物理学系统中出现,在讨论电流和磁场的相互作用时就存在左右不分。比如,给定一个电流的方向,我们可以运用“右手定则”找出由该电流所产生的磁场的方向。如果想进一步找出该电流产生的磁场加在另外一个给定电流上的力的方向,可以运用第二个“右手定则”。如果讨论仅仅局限在可观察的量,即电流和力,我们可以发现用两个“左手定则”能够得出同样的结果。可见,在电磁作用中左右之间是对称的。虽然这一左右对称可以用在经典物理系统中,但意义不大,其更为重要的作用体现在量子系统之中。

宇称守恒定律指粒子系统反应前后的总宇称保持不变。为了叙述和论证的方便,可以假定存在着由两个粒子构成的粒子系统。两个粒子系统的总宇称等于两粒子的宇称相乘,再乘以 $(-1)^L$,其中 L 是两粒子的相对轨道角动量的量子数。设 A 和 B 是粒子系统反应前的两个粒子, C 和 D 是粒子系统反应后的两个粒子,如果存在反应式: $A+B \rightarrow C+D$,根据宇称守恒定律,则有: $P_A \cdot P_B \cdot (-1)^{L_1} = P_C \cdot P_D \cdot (-1)^{L_2}$ 。这里的 P_A 、 P_B 分别是反应前粒子 A 和 B 的宇称, L_1 是 A 、 B 两粒子相对轨道角动量的量子数; P_C 、 P_D 分别是粒子 C 和 D 的宇称, L_2 是 C 、 D 两粒子相对轨道角动量的量子数。现已证明,在微观物理范围内,空间反射变换对称性的这一宇称守恒规律仅在强相互作用和电磁作用过程中成立,在弱相互作用中不成立。

现代物理学对宇称守恒的研究开始于1924年奥特·拉波特(Otto Laporte)的工作——对铁原子发射光谱的研究。通过对铁原子发射的光谱的实验分析,拉波特发现,可以把铁原子划分为两种不同的状态,他把它们称之为gestrichene和ungestrichene,或者“隔绝(stroked)态”和“未隔绝(unstroked)态”,也即“正(positive)状态”和“负(negative)状态”。并且,拉波特还发现,只有铁原子从一种状态变成另一种状态的时候(例如从“正状态”向“负状态”的转变)才发生辐射现象。当时,虽然这一规则被作为“拉波特定理”写进了物理学文献中,但拉波特不能对这种选择规则提供

正确的解释。1927年,尤金·魏格纳(Eugene Wigner)在宇称守恒概念的基础上重新解释了拉波特规则。魏格纳认为,拉波特所说的“正状态”和“负状态”,就是“正宇称”和“负宇称”。由于铁原子所发射的光子的内禀宇称是负的,为了保持系统的总宇称守恒,原子状态的宇称也必须改变。因此,辐射现象只发生在原子状态的转变之中,即从正宇称状态到负宇称状态,或从负宇称状态到正宇称状态。根据宇称守恒,相同的宇称状态,转变禁止发生。从此,宇称守恒概念迅速成为物理学中的一个稳定规则。

“ θ - τ 疑难”源于对 β 衰变和弱相互作用的检查。具体的说,源于 β 衰变中对 θ^+ 介子和 τ^+ 介子的衰变过程的研究。 θ^+ 介子也称 $K_{\pi 2}^+$ 介子, τ^+ 介子也称 $K_{\pi 3}^+$ 介子。如果对两种介子的衰变从衰变方式、质量、平均寿命以及在 K 介子中所占衰变的百分比进行研究,可以得出, θ^+ 和 τ^+ 是同一种粒子(K),只是衰变方式不一样。然而,达利兹(R. H. Dalitz)通过对 τ^+ 介子的衰变过程进行精细的研究后指出, θ 和 τ 有相反的宇称! 粒子物理学天空中漂来的这朵“乌云”,无疑掀起了粒子物理学的一场革命。根据弗兰克林的考查,1956年初,李政道和杨振宁就对“ θ - τ 疑难”有了清楚的认识,但成熟的解决设想却直到1956年的10月份才以题目《弱相互作用中宇称守恒问题》发表在美国的《现代物理评论》杂志上。可见,李政道和杨振宁对问题的调查和研究是非常谨慎的。

起初,李政道和杨振宁同别的物理学家一样,试图在传统的守恒理论框架内解决这一疑难。为此,他们提出了好几个挽救性假说,但都被实验证明是不存在的。李政道和杨振宁调查和研究以往的关于宇称守恒的实验资料,让他们觉得惊讶的是,虽然在强相互作用和电磁相互作用中宇称守恒有精确度很高的实验证据作支持,但弱相互作用中的全部实验资料,没有支持宇称守恒的证据。弱相互作用中的宇称守恒,只是一个理论上的想当然推论!

接着,他们对已有的关于宇称破缺的数据重新做全面计算。李政道本人是这样回忆他和杨振宁的研究经历的,他说,“随后我从吴健雄那里借来一本由西格班(K.Siegbahn)编写的关于‘ β 衰变’的权威性著作,和杨振宁一起对所有宇称破缺现象进行了系统的计算。……在我们把西格班的书通读了一遍之后,重新用新的相互作用推导了所有的那些旧

公式后,我们就十分清楚了,在那个时候,在 β 衰变中,对于宇称守恒即便是一个支持的证据都没有。这说明我们是多么愚蠢!……当我们停止计算而思考时,在一个较短的时间里,我们渐渐地明白,缺少证据的原因就是这样一个简单的事实,就是没有人做过任何努力去从看来像左-右对称的安排中专门挑出赝标量进行研究。”(Allan Franklin. *The Neglect of Experiment*. New York: Cambridge University Press. 1986) 通过全面的调查和研究,他们认识到,也许,只有到旧的理论框架之外才能找到解决的办法。经过精细的理论分析和严格的数据计算之后,李政道和杨振宁大胆而谨慎地提出了弱相互作用中宇称不守恒假说。该假说提出,“最近,实验显示 θ^+ ($\equiv K_{\pi 2}^+$) 和 τ^+ ($\equiv K_{\pi 3}^+$) 的质量和寿命几乎完全一样。另一方面,基于角动量和宇称守恒,对 τ^+ 的衰变产物的分析强烈建议 θ^+ 和 τ^+ 是不同的粒子,……摆脱这种困境的一种方法是,假定宇称是不严格守恒的……”(T.D.Lee and C.N.Yang. *Question of Parity Conservation in Weak Interactions*. *Physical Review*, Volume, 104, Number 1, October 1, 1956) 在提出假说的同时,李政道和杨振宁也建议了一些可检验的实验。其中最重要的两组实验是: (1) 极化核的 β 衰变; (2) $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ 的序列衰变。

二、宇称不守恒问题的实验渊源

现今,标准的物理学教程都把1956年的“ θ - τ 疑难”当作是“宇称破缺”的标志。把1957年,由吴健雄(C.S.Wu)及其同事,伽温(R.L.Garwin)及其同事,费雷德曼(J.L.Friedman)与泰勒格第(V.L.Telegdi)等人所做的实验确定为是对弱相互作用中宇称不守恒最成功的检验。其实,能够显示宇称破缺的实验早已存在。

1. 20世纪20年代的两组实验

宇称破缺现象早已出现在20世纪20年代末期的文献中。关于这一点,可以从对宇称破缺的实验资料做过深入调查和研究的阿兰·弗兰克林的两段话中得到证明,“那时人们没有意识到,在1928年和1930年出版的文献中已经有两组实验结果发表了,这两组实验结果在相同的物理和逻辑背景下,显示了宇称破缺现象,但是它们的深远含义和重要性,一直到1957年,既没有被作者认识到,也没有被任何其他物理研究机构的成员所发现。”“即便我们不能检查1957年以前的每本教科书,但我们看到

过大量的教科书,可以说每本在 1957 年前写的粒子物理、核物理以及量子力学教科书都说宇称是守恒的。我们可以举海利代 (Halliday) 的《核物理导论》为例,这本教科书在 20 世纪 50 年代被广泛使用。吴健雄教授曾用来做哥伦比亚大学核物理的教材。” (Allan Franklin. The Neglect of Experiment. New York: Cambridge University Press. 1986)

20 世纪初期,在发现光具有粒子和波的双重性后不久,1923 年德布罗意 (de Broglie) 提出了“粒子波”的设想——粒子的波动特性。一系列的实验应运而生,力图探询电子波的矢量本性。1927 年,戴维孙 (C. Davisson) 和革末 (L. H. Germer) 完成的实验——电子对于晶体的衍射,很好地确证了德布罗意的设想。接着,乌仑贝克 (G. E. Uhlenbeck) 和高德斯密特 (S. Goudsmit) 把电子波和电子自旋概念结合起来,用它成功地解释了原子光谱的很多特性。加之随后达尔文 (C. G. Darwin) 对矢量电子的数学化贡献,一时,粒子物理学领域对电子波的研究变得如火如荼。

在对电子波研究的“繁荣”背景下,考克斯与他的同事设想,可能存在一种实验,在这种实验中,电子的双重散射能够为矢量电子理论提供证据,这类类似于与光和 X 射线有关的实验里,第一个散射极化了光,而第二个散射可以成为一个分析器。而且,与光学实验的横向矢量相类比,电子自旋也可能在这种实验中显示它的效应。尽管这一效应的一般本质已经从与光学类比中得到了了解,但详细的计算直到 1929 年才由莫特 (N. F. Mott) 完成。然而,莫特只讨论了初始未极化的电子束流的散射,而没有注意到初始纵向极化束流的散射情况,但他已认识到,电子的双重散射能有效的观察自由电子的自旋。遗憾的是,莫特忽略的“初始电子束流的纵向极化”能预示宇称破缺,因为 β 衰变中电子的纵向极化存在的本身,就是宇称不守恒的证据。不过,值得庆幸的是,莫特忽略的线索恰恰出现在考克斯等人的实验结果里,尽管结果是以不同的“身份”出现的,但事实终归是事实。

实验结果被证明事实上显示了宇称破缺的两组实验,分别完成在 1927 年和 1929 年。第一组实验,由考克斯 (R. T. Cox) 及其同事完成,实验题目是《 β 射线束流中明显的极化证据》,实验结果发表在 1928 年第 14 期的《美国国家科学院学报》上;第

二组实验,由查斯 (C. T. Chase) 单独完成,实验题目是《金属对快电子的散射 II: 直角双重散射所导致的极化》,实验结果发表在 1930 年第 36 期的《美国国家科学院学报》上。两组实验的目的是为了显示电子波的矢量本性。

既然考克斯、查斯等人的实验结果已经预示了异常,为什么没有促使物理学家在实验上或是理论上去进一步工作,而是相反,考克斯、查斯等人的实验广泛地被物理学界所忽略?为什么标准教科书把发现弱相互作用中宇称不守恒的时间定格为 1956 年,而把对该发现的判决性实验确定为 1957 年的几组实验呢?对诸如这样的设问,答案不尽相同,但根据阿兰·弗兰克林的考察,似乎有两种解释颇为正统。第一,标准教科书的解释。曾有人用从热电子源发射出来的电子重做同样类型的实验,而不是用从 β 衰变源发射出来的电子,因而没能显示出同样的效应,以至不再注意考克斯、查斯等人的实验。第二,考克斯本人也认同的解释。20 世纪 20 年代末期,还没有特别的理论可以解释这些早期的实验,直到 1957 年李政道和杨振宁才提出清楚的理论预言。对于这一点,阿兰·弗兰克林表示赞同。

2. 1957 年的两组实验

李政道和杨振宁在提出弱相互作用中宇称不守恒假说的同时,也预言了一系列可检验的实验。其中“极化核的 β 衰变”和“ $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ 的序列衰变”是第一批完成的实验,被物理学界公认为对李、杨假说提供了决定性的证据。

(1) 吴健雄及其同事所完成的实验是由李政道和杨振宁建议的第一个实验——极化核的 β 衰变。

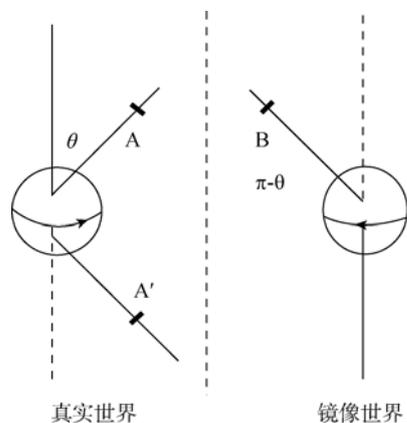
实验的基本思想:可以先假设一个定向的或极化的核存在,它的自旋向上。假设从这种核的 β 衰变出来的电子运动方向与核自旋的方向相反,那么电子的动量方向向下。如果执行一维反演,就可以得到,核自旋的镜像方向与电子的动量方向相同。由此可得,衰变的镜像与真实的衰变是不同的,宇称是不守恒的。

实验的主要的器材: ^{60}Co ; 一个电子计数器 (电子计数器安装在与定向核的方向或者平行或者相反)。

衰变反应式: $^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}_e$ 。

技术准备:“极化核的 β 衰变”是一个非常困难的实验。为了保证实验成功,吴健雄和她的同事做

了两点技术上的准备。第一，外加磁场。通常情况下，原子核是非极化的，即核自旋杂乱无章。为此，即便是每一个核所发射的 β 粒子有某种角度分布，由于核自旋的杂乱无章，也观察不到这种分布。因此，为了保证核的自旋有序，必须外加磁场使核极化；第二，低温保存样品。常温情况下，热运动对核的极化有干扰作用，为了减少热运动对极化的干扰，样品（极化 ^{60}Co ）还必须保存在低温（0.01K以下）的状态下。



实验示意图

极化核 ^{60}Co 的衰变及其镜像装置如上图所示。如果左、右对称有效，那么真实世界的A点与镜像中的B点测得的电子数应一样多。而B点对于核自旋的方位又相当于真实世界中的A'点，所以，若对称成立，A点与A'点测得的电子数也应一样。而B点（或A'点）又相当于A点对其反向磁场方向，所以，只需在A点测两次（磁场向下和向上）即可。

实验的结果：如果观测到在 θ 和 $180^\circ-\theta$ 之间的分布有任何不对称，它就提供了 β 衰变中宇称不守恒的证据。这种不对称现在已经在定向的 ^{60}Co 的实验中被观测到了。

(2) 伽温及其同事所完成的实验是由李政道和杨振宁建议的第二个实验——“ $\pi\rightarrow\mu\rightarrow e$ 的序列衰变”。

衰变反应式： $\pi\rightarrow\mu+\nu$ (1)； $\pi\rightarrow e+\nu+\nu$ (2)。

实验的基本思想：从静止的 π 出发，在(1)式和(2)式的衰变中，我们可以研究 μ 子的动量与在 μ 子的质心系中的电子动量之间的夹角 θ 的分布。如果(1)式和(2)式都满足宇称不守恒，一般来说，对于 θ 和 $180^\circ-\theta$ 之间的分布是不相同的。为了理解这一点，我们可以先考虑 μ 子自旋的方向。如果(1)式

中的宇称破缺，一般来说， μ 子会在它运动的方向被极化。在随后(2)式的衰变中，对 θ 角的角度分布问题则相似于前面所讨论的来自极化核的 β 衰变的角度分布问题。

主要的技术步骤：可以把伽温及其同事完成实验的主要技术概述为“碳块抑制技术”。其具体的步骤可以概括如下：第一步，用碳块阻挡 π 介子衰变中释放出来的 μ 子，使它被抑制在碳块中；第二步，测定由 μ 子随即衰变而释放出来的电子数；第三步，观测衰变角分布。值得一提的是，伽温及其同事并非按通常的移动电子探测器的办法去观察衰变角分布，而是让介子的自旋或者磁矩旋转并固定计数器来观测电子。

实验结果：

①在 $\mu^+\rightarrow e^++2\nu$ 中，发现了电子分布的大的不对称，表明 μ^+ 束流已被强极化；

②电子的角度分布满足 $1+a\cos\theta$ ， θ 是对入射 μ 的速度矢量测量出来的，在误差估计为10%的前提下， $a=-1/3$ ；

③在 $\pi^+\rightarrow\mu^++\nu$ 和 $\mu^+\rightarrow e^++2\nu$ 的衰变中宇称是不守恒的。

(3) 弗雷德曼和泰勒格第所做的实验也是“ $\pi\rightarrow\mu\rightarrow e$ 的序列衰变”，因此，在实验原理上与伽温等人的实验原理一样。鉴于更好的比较，我们也可以写出相应的实验思路。

衰变反应式： $\pi\rightarrow\mu+\nu$ ； $\pi\rightarrow e+\nu+\nu$ 。

实验的基本思想：弗雷德曼和泰勒格第实验的基本思想与伽温等人所做的实验的基本思想一样。

主要的技术步骤：弗雷德曼和泰勒格第实验的核心技术与伽温等人所用的技术完全不同。如上所说，如果把伽温等人的技术称为“碳块抑制技术”，那么弗雷德曼和泰勒格第的技术则可以概述成“核乳胶技术”。可以把弗雷德曼和泰勒格第的实验步骤概括为两步。第一步，他们使 π^+ 介子停止在核乳胶里，因此，由衰变产生的 μ^+ 也停止下来；第二步，观察衰变电子相对于 μ 子方向的分布。

实验结果：在 $\pi\rightarrow\mu\rightarrow e$ 的序列衰变中宇称是不守恒的。

三、宇称不守恒问题的应答域

通过对弱相互作用中宇称不守恒的历史考查，我们已清楚地知道了个中原因。宇称破缺的标志性

事件是“ θ - τ 疑难”。而“ θ - τ 疑难”的困难在于：如果基于质量和寿命几乎相同的标准， θ 和 τ 应是同一种粒子；然而，不同的是， θ 粒子衰变成两个介子，而 τ 粒子则衰变成了三个介子，而且有着不同的自旋和宇称，如果基于这一标准， θ 和 τ 又不是同一种粒子。到李政道和杨振宁正式提出弱作用中宇称不守恒的假说时，问题就更加明朗化了。此时，在弱相互作用中，事实上就存在着两种理论（假说），即宇称守恒理论和宇称不守恒假说。宇称不守恒假说的矛头直接指向宇称守恒理论。两种理论（假说）相互排斥，“你死我活”。尽管当时很多著名的物理学家对弱相互作用中宇称不守恒还不能接受，但混乱的局面已经成为事实。为了消解“ θ - τ 疑难”，当时的物理界基于已有的背景理论和实验证据，提出了五个挽救性假说，试图拯救旧的宇称守恒理论，即：

(1) 较重的两种粒子 θ 和 τ ，在衰变成更轻的粒子 π 的过程中，伴随有 γ 射线放出。

(2) 所有的奇异粒子能获得宇称对子，即存在着相等质量和寿命但宇称相反的粒子对。因此，除了粒子 θ 和 τ 之外，存在着一种由 Λ_1 和 Λ_2 组成的粒子对。

(3) 粒子 θ 和 τ 可能是高自旋的。

(4) 或许，粒子 θ 和 τ 在衰变过程中，放出了一种既无质量和电荷，又无能量和动量，仅仅携走了宇称的奇特粒子。

(5) θ 粒子在衰变过程中释放的 π^0 粒子是“接近真正的” π^0 粒子。

以上五个挽救性假说构成了一个假说整体，这一假说整体决定了每一假说可能为真，也决定了每一假说可能为假。当时的物理界认为，如果挽救性假说存在的话，就应该是求解问题的应答域，并认为，前三个假说最有可能，也最容易被测试。随后，阿尔伍兹(Alvarez)等人完成了前三个挽救性假说的实验检测工作，他们并未检测到所假想的可能情况。后两个挽救性假说的检测，难度较大，直到吴健雄、伽温等人直接测定宇称不守恒的实验完成时，才发现也并不存在。既然挽救性假说已被证明不存在，那么拯救宇称守恒理论的出路就只有一条了，即彻底改变背景信念——宇宙自身的对称性。显然，

在宇称守恒理论和宇宙自身的对称之间是无二选的，修改只能指向宇称守恒理论。

四、宇称不守恒问题的逻辑结构

宇称不守恒问题有它自身的逻辑结构，这种逻辑结构能够自然地呈现出实验对理论的判决性机制。为了清晰、直观地展示这种判决性机制，我们可以先做出符号上的设定，然后进行刻画。

设H表示“诸相互作用中宇称守恒”； H_1 表示“电磁相互作用中宇称守恒”； H_2 表示“强相互作用中宇称守恒”； H_3 表示“弱相互作用中宇称守恒”；E表示“诸相互作用中宇称守恒的实验证据”； E_1 表示“电磁相互作用中宇称守恒的实验证据”； E_2 表示“强相互作用中宇称守恒的实验证据”； E_3 表示“弱相互作用中宇称守恒的实验证据”。

通过考查宇称不守恒问题所获得的信息，可以得出如下结论：

(1) 真正的实验证据只有 E_1 和 E_2 ， E_3 并不存在，存在的只是 $\neg E_3$ （符号“-”表示“非”），E的获得是由 E_1 和 E_2 归纳得出的，显然没有必然的逻辑通道。

(2) E_1 能支持 H_1 ， E_2 能支持 H_2 ，但 E_1 和 E_2 既不能支持H，也不能支持 H_3 。

(3) H的获得，情形同(1)中的一样，也是从 H_1 和 H_2 的归纳得出的，从 H_1 和 H_2 到H之间没有必然的逻辑通道。

(4) H_3 的获得，有两条途径。第一条途径，从H演绎得出；第二条途径，从 H_1 和 H_2 的类比推理得出。第一条途径，形式上具有必然性，但因为H本身不是必然为真的，因此， H_3 也不可能必然为真。第二条途径，根本就构不成一条合法的推理规则，即便是在旧的归纳中，也不容许。如果硬要寻找理由，只能是想当然的假设。

(5) $\neg E_3$ 支持 $\neg H_3$ ，而反驳H。

(6) 从 $\neg H_3$ 能够得出 $\neg H$ 。根据(4)中的“第一条途径”，即：

$$[H \rightarrow (H_1 \wedge H_2 \wedge H_3)] \wedge H_1 \wedge H_2 \wedge \neg H_3 \rightarrow \neg H$$

这样，在宇称领域，由开始存在着的两个相互竞争且相互排斥的理论（假说），即 $\neg H_3$ 和H，经过实验的判决，最终被物理学界肯定的是： $\neg H_3$ ——弱相互作用中宇称不守恒！

(广州医学院人文社会科学学院 510182)