

走向统一的自然力

弱力和电磁力的统一(I)

厉光烈 鹿桂花

弱力, 又称弱相互作用(简称弱作用), 因其强度, 在微观世界起作用的三种基本相互作用中, 比强相互作用和电磁相互作用都要弱, 故而得名。

认识弱力是从研究原子核 β 衰变开始的。 β 衰变是一种放射性衰变过程, 在此过程中原子核放出一个电子, 或者吸收一个在轨道上的电子而衰变成另一种原子核。描述弱作用的第一个理论就是费米为了解释 β 衰变而提出的“ β 衰变理论”, 他在这一理论中首先指出: 弱作用和电磁作用一样, 是矢量相互作用。也就是说, 传递弱作用的粒子和传递电磁作用的光子一样, 都是自旋为1的矢量粒子。但是, 按照相对论, 普适弱相互作用应该包含5种相互作用, 即标量相互作用(S)、矢量相互作用(V)、张量相互作用(T)、赝标量相互作用(P)和赝矢量相互作用(A)。后来, 经过许多科学家近30年的实验和理论研究, 终于证明了弱作用确实和电磁作用一样是矢量相互作用。费米的这一想法最终导致格拉肖、温伯格和萨拉姆建立了“弱电统一理论”。这个理论随后得到了实验验证: 由鲁比亚领导的UA1实验组和由德勒拉领导的UA2实验组在欧洲核子中心的质子-反质子对撞机上发现了理论上预言的传递弱

作用的中间玻色子 W^+ 和 Z^0 。

这一讲, 我们介绍弱力和电磁力走向统一的研究历程。

1. 两次冲击物理学的基本规律

通过 β 衰变揭示弱力本质的实验和理论研究曾对原子核物理和粒子物理的发展做出过重大贡献, 特别是, 它曾两次冲击物理学的基本规律: 一次是在查德威克(J. Chadwick, 1891~1974)发现 β 射线能量的连续分布以后, 玻尔怀疑在 β 衰变中能量是否守恒, 后来泡利提出中微子假说, 成功地解释了 β 连续谱, “挽救”了能量守恒定律; 另一次是在1956年, 为了解释“ θ - τ ”之谜, 李政道和杨振宁提出了在弱相互作用中宇称不守恒的假说, 后来吴健雄等人通过极化钴60的 β 衰变实验证实了李、

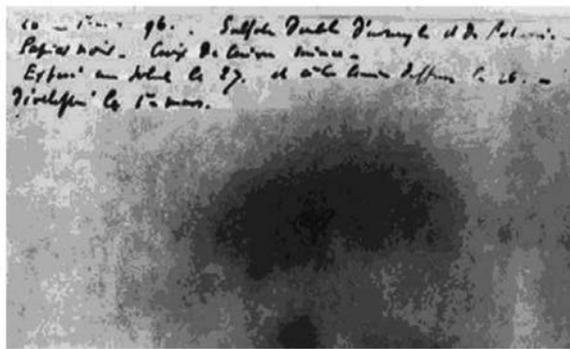
杨的预言。

下面, 我们较为详细地介绍这两次冲击。

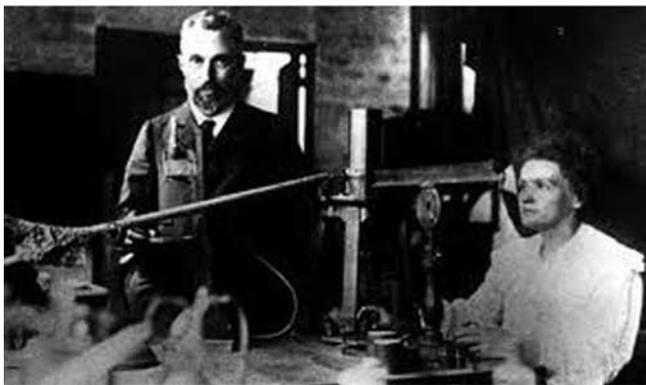
(1) 第一次冲击

天然放射性的实验发现

1896年, 法国物理学家贝克勒尔(A. H. Becquerel, 1852~1908)在研究铀盐的荧光现象时, 发现含铀物质能够发射穿透力很强的不可见射线。这些射线不仅能贯穿不透光的黑纸, 而且能穿透0.1 mm厚的铜片, 使照相底片感光。这种现象被称为天然放射性。随后, 玛丽·居里(M. S. Curie, 1867~1934)和她的丈夫皮埃尔·居里(P. Curie, 1859~1906)在极端困难的条件下, 花了整整3年时间, 从天然沥青铀矿中分离出放射性比铀强得多的两种新元素: 钋和镭。由于镭的放射性强度比铀高200万倍, 它的发现有力地推动了



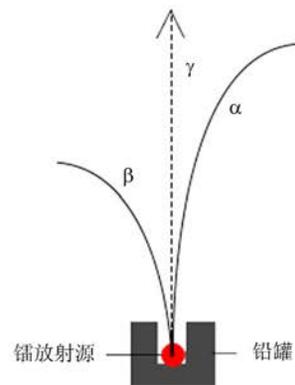
贝克勒尔及其第一张放射性照片



居里夫妇在测试镭盐的放射性



卢瑟福在演讲



磁场中镭源发射的 α 、 β 、 γ 射线

放射性现象的研究。因此，居里夫妇与贝克勒尔一起荣获了1903年度诺贝尔物理学奖。

为了进一步弄清这些不可见射线是什么，卢瑟福和居里夫妇等进行了10多年的研究，终于发现它们是由3种成分组成的：1) 高速运动的 α 粒子（即氦核）流，称为 α 射线；2) 高速运动的电子流，称为 β 射线；3) 能量比X射线还要高的电磁波，称为 γ 射线。有趣的是，这三种射线刚好分别是原子核内强、弱和电磁相互作用过程的产物。因此，天然放射性的发现，打开了微观世界的大门，为原子核物理和粒子物理的诞生和发展奠定了基础。

查德威克发现 β 射线连续谱

早期 β 衰变的实验研究主要是测定 β 放射性原子核的半衰期和 β 射线的能谱。最先测得 β 放射性原子核半衰期的是哈恩(O. Hahn, 1879~1968)和迈特纳(L. Meitner, 1878~1968)，1908年，他们发现物质对 β 粒子的吸收遵循指数法则，并由此得出 β 射线具有确定的能量。但是，1909年，威尔逊(W. Wilson, 1875~1965)

却得出了相反的结论： β 射线具有参差的能量，也就是说， β 衰变不具有确定的能量。随后不久，冯·拜尔(O. von Baeyer, 1877~1946)和哈恩利用磁偏转谱仪发现了 β 射线能谱中的线谱，证实了 β 射线确实具有参差能量。后来知道，这些单值能量的 β 射线不是从原子核里发射出来的，而是从原子的电子轨道上发射出来的，它们是伴随 β 射线从原子核里发射出的 γ 射线在核外敲出的轨道电子。实际上，它们只是一小部分的 β 射线，而大部分真正来自原子核内部的 β 射线在照相底板上难以看到。直到1914年，查德威克才用计数器和电离室观测到这一部分 β 射线，并发现它们的能谱呈连续分布。

难道原子核发射的电子的能量是可变的吗？

迈特纳和埃利斯的争论

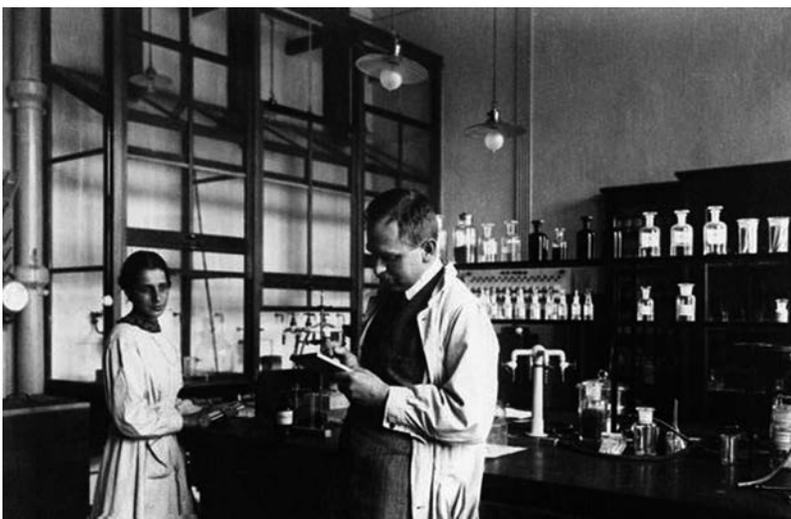
β 连续谱的发现给物理学带来了危机。当时，量子理论，特别是分立能级的观念，已经深入人心。因此，迈特纳在1922年提出，量子化的原子核不应当发射具有可变能量的电子。那么， β 射线能量的连续分布是怎么引起的呢？一种可

能的解释是， β 射线在离开原子核后与其他电子碰撞而失去了能量，当时包括迈特纳在内的大多数物理学家都倾向于这种解释。可是埃利斯(C. D. Ellis, 1895~1980)坚持认为， β 连续谱是由原子核 β 衰变的初级电子引起的。究竟谁是谁非，显然只能通过实验来裁决。

按照前一种解释，所有衰变电子在离开原子核时都应该具有相同的能量，即 β 连续谱中的能量上限；而按照埃利斯的看法，电子从原子核里衰变出来时就带有不同的能量。这样，只要测量一个能谱已知的 β 放射源的平均衰变能便可判断上述两种看法哪一种正确。埃利斯和伍斯特(W. A. Wooster)做了这样的实验：他们将一定数量的铋210原子放在一个量热器里，这个量热器的壁相当厚，可以吸收掉铋210原子发射出的全部 β 射线。然后，他们测量因 β 射线被吸收而产生的热量。这热量当然就是衰变电子的平均能量。他们得到的结果是 $(350 \pm 40)\text{keV}$ ，与铋210的 β 能谱的平均能量 $(350 \pm 60)\text{keV}$ 符合得甚好。而按照迈特纳等人的看法，结果应为 1050keV 。显然，实验结



查德威克



哈恩和迈特纳在做实验

果支持埃利斯的想法。但是，迈特纳并不服输。泡利在 1958 年给吴健雄的信中曾经生动地描述了迈特纳当时的态度，他说：“我们的好莉泽（迈特纳的名字莉泽）在谈及埃利斯和伍斯特的实验结果时说：‘我不相信它，我将更好地重做这个实验。’”3 年后，迈特纳与奥斯曼（W. Orthmann）发表了他们的实验结果，这个结果与埃利斯和伍斯特得到的完全一样。这表明，衰变电子在离开原子核时就带有不同的能量。这场争论由此才得以平息。

玻尔质疑能量守恒定律

埃利斯和伍斯特的实验，以及后来的迈特纳与奥斯曼的实验，虽然结束了有关 β 连续谱来源的争论，但是仍然没有弄清衰变电子为什么会有不同的能量。一个令人困惑的问题是，既然衰变电子带有不同的能量，而 β 衰变前后原子核的能级又是确定的，那么能量如何守恒呢？为了解答这个问题，1930 年，玻尔在他的法拉第讲座中对 β

衰变中能量是否守恒提出了质疑，他说：“在原子理论的现阶段，我们可以说，无论是从经验上还是从理论上，都没有理由坚持在 β 衰变中能量一定守恒。原子的稳定性迫使我们放弃的也许正是能量平衡的观念。”

当时，原子核物理可以说是危机重重，不仅能量守恒受到了冲击，原子核组成的质子-电子假设也受到了冲击。以原子核氮 14 (^{14}N) 为例，按照原子核是由质子和电子组成的假说，它应该包含 14 个质子和 7 个电子。这 21 个粒子都服从费米-狄拉克统计，根据埃伦费斯特-奥本海默定理，原子核 ^{14}N 也应当服从费米-狄拉克统计。可是，在 1928 ~ 1929 年，实验上发现 ^{14}N 服从玻色-爱因斯坦统计。这些实验迫使人们不得不放弃质子-电子假说。虽然早在 1920 年卢瑟福就猜测，在原子核里存在一种由质子和电子组成的中性复合粒子，他的追随者也曾经在氢原子中寻找过这种粒子，但是却一直没有

发现。

泡利提出中微子假说

玻尔的上述看法遭到了他的学生，当时年仅 30 岁的泡利的反对。泡利在 1930 年 12 月给正在德国图宾根参加物理会议的盖革（H. Geiger, 1882 ~ 1945）和迈特纳的公开信中写道：在 β 衰变中不仅能量看来不守恒，角动量（或者说自旋和统计^①）也不守恒。在同一封信中，他还提出了一个在当时看来相当古怪的观念，即只要在 β 衰变过程中不仅放出电子，同时还放出一个穿透力极强、质量与电子同数量级、自旋为 $\frac{1}{2}$ （即服从费米-狄拉克统计）的中微子^②，问题便可迎刃而解。

以著名的原子核铋 210 (^{210}Bi) 衰变为钋 210 (^{210}Po) 的 β 衰变为例： $^{210}\text{Bi} \rightarrow ^{210}\text{Po} + e$ ，衰变前后的原子核 ^{210}Bi 和 ^{210}Po 都有确定的能量。如果在衰变过程中只放出一个电子，它的能量又是可变的，那么在上述衰变过程中能量显然是不守

恒的。同样，原子核 ^{210}Bi 和 ^{210}Po 的总角动量（也就是核自旋）也是确定的，分别为 1 和 0，在衰变过程中核自旋的改变应当为 $\Delta J=1$ ，

而电子的内禀自旋为 $\frac{1}{2}$ ，其轨道角动量又只能为整数，因此，在上述衰变过程中，角动量（或者说自旋和统计）显然也是不守恒的。但是，如果在 β 衰变过程中不只放出一个电子，还有另一个穿透力极强、

质量几乎为零和内禀自旋为 $\frac{1}{2}$ （即服从费米-狄拉克统计）的中性粒子的话，能量以及自旋和统计不守恒的问题便可迎刃而解，这就是泡利当时的想法。现在，我们很容易接受他的看法，但是，在 80 多年前，人们关于基本粒子的知识是很有限的，只知道有质子、电子和光子，而泡利所预言的“中微子”又是穿透力极强的、实验上难以捕捉到的粒子，因此，1931 年 6 月，当泡利在美国物理学会的帕萨迪纳会议上公开提出他的这一假说时，

大多数物理学家都持怀疑的态度。1932 年，查德威克发现了卢瑟福猜测的“中子”，随后伊万年科（D. D. Ivanenko, 1904 ~ 1994）和海森伯（W. K. Heisenberg, 1901 ~ 1976）分别提出了原子核是由质子和中子组成的假说，成功地解释了原子核的自旋和统计性质。这一重大发现激励泡利在 1933 年的索尔维会议上再次提出了他的中微子假说，这次到会的物理学家讨论并接受了他的假说。

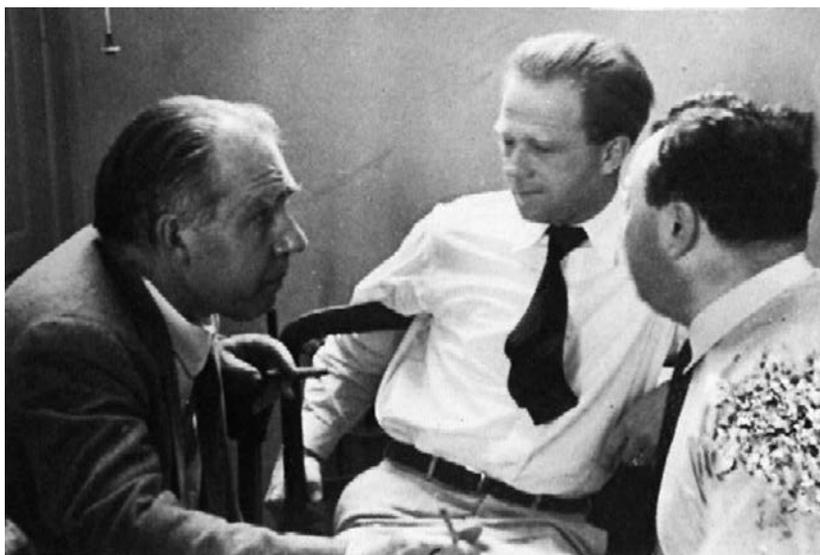
泡利的中微子假说成功地解释了 β 连续谱，“挽救”了能量守恒定律。正是在泡利提出中微子假说以后，费米提出了他的 β 衰变理论，开始了 β 衰变和弱相互作用的理论研究。

(2) 第二次冲击

马赫原理与宇称守恒定律

历史上有很长一段时间，人们相信物理学规律显示出左右之间的完全对称，这就是马赫原理。这种对称，用现代物理的术语来

说，就是空间反射不变。它在量子力学中可以形成一种守恒定律，即宇称守恒定律。1924 年，拉波特（O. Laporte, 1902 ~ 1971）在研究铁原子辐射光谱时发现：铁原子的能级可以分为两类，他将其称为受折（gestrichene）和不受折（ungestrichene）能级，也就是现在所谓的偶能级和奇能级。他还发现：在原子吸收或放出一个光子的电磁跃迁中，能级的改变总是从偶到奇，或从奇到偶。为了解释拉波特发现的这个经验规律，1927 年，维格纳（E. P. Wigner, 1902 ~ 1995）引入了宇称的概念。用现在的说法，就是拉波特定义的偶能级带有正宇称，奇能级带有负宇称，而在原子的允许（电偶极）跃迁中吸收或放出的光子带有负宇称，因此，拉波特发现的经验规律正好反映了在原子的电磁跃迁过程中宇称是守恒的。维格纳当时就指出，宇称守恒正是左右对称或空间反射不变的直接结果。宇称的概念



玻尔、海森伯和泡利



维格纳

和宇称守恒定律在原子物理中取得的成功，促使人们将其进一步应用到原子核物理、介子物理和奇异粒子物理的现象中去。在这些领域中，宇称的概念和宇称守恒定律都被证明是非常有效的。这些成功使人们确信，宇称守恒定律是物理学中的一个基本规律。

“ θ - τ ”之谜

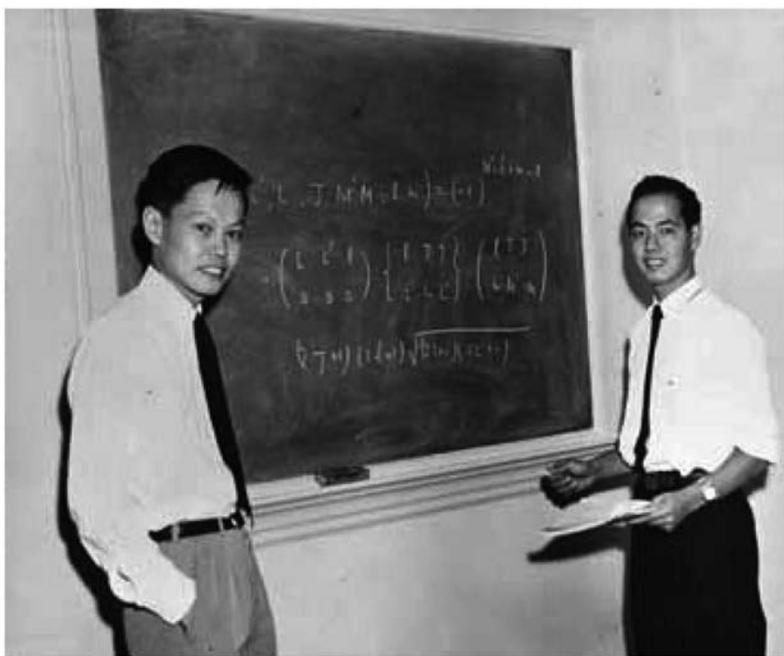
在1954~1956年，出现了一个令人困惑的问题，即所谓的“ θ - τ ”之谜。人们发现：有一种粒子衰变为2个 π 介子^③，另一种粒子衰变为3个 π 介子，它们分别被称为 θ 介子和 τ 介子。由于 π 介子带有负宇称，所以这两种粒子分别带有正宇称和负宇称。后来，随着实验精确度的提高，人们进一步发现， θ 和 τ 除了宇称不相同外，其他物理性质（例如质量和寿命）都完全相同。这就出现了一个疑难：如果说它们是不同的粒子，它们的物理性

质又如此相似；如果说它们是同一种粒子，那么一会儿衰变为两个 π 介子，一会儿衰变为三个 π 介子，又违背宇称守恒定律。这就是“ θ - τ ”之谜。

李、杨提出弱作用中宇称不守恒

为了揭开“ θ - τ ”之谜，物理学家们产生了很大的争论。许多物理学家想在不违背宇称守恒定律的前提下解答这个难题，李政道和杨振宁就曾设想每一种奇异粒子都是宇称的双子，形成一种他们称之为“宇称共轭”的对称性，并认为 θ 和 τ 就是某种奇异粒子的宇称双子，但是，不久实验就发现另一种奇异粒子 Λ^0 并不存在这种宇称双子。就在第六届罗彻斯特会议上，李、杨提出宇称双子的建议后，费曼发言说，他和同室的布洛克(M. Block)讨论过好几夜，布洛克提出了一个想法： θ 和 τ 会不会是同一种粒子但具有不同的宇称态。杨

振宁回答说，他和李政道也曾考虑过，但还未做出定论。与会的维格纳也表示或许一种粒子就会有两种宇称。这两位著名物理学家的热情鼓励使李、杨意识到：问题或许并不在 θ 和 τ ，而在宇称守恒定律本身。假如宇称守恒定律有时也可以违背的话，“ θ - τ ”之谜便可迎刃而解了。1956年夏天，李、杨在检查了当时已有的关于宇称守恒的实验基础以后，得到了下述结论：虽然在强相互作用和电磁相互作用中宇称守恒已为实验所证实，但是，在弱相互作用中宇称守恒定律仅仅是一个推广的“假设”而已，并没有被实验所证实。如果左右对称在弱相互作用中并不成立，那么宇称的概念就不能应用在 θ 和 τ 的两种衰变机制中。这样， θ 和 τ 就可以是同一种粒子（即K介子^④）的两种弱相互作用衰变方式，“ θ - τ ”之谜也就不复存在了。显然，问题的关键在于如何从实验上去证实，在弱作用中左右对称是可以不成



杨振宁和李政道



吴健雄

立的。

吴健雄等实验证实李、杨预言

为了从实验上证实弱作用中宇称不守恒，李、杨建议人们测量由实验可以测量的物理量所组成的在空间反射 ($\mathbf{r} \rightarrow -\mathbf{r}$) 变换下改变符号的赝标量。例如，可以测量极化原子核在 β 衰变时放出的电子的角分布。如果 θ_β 表示原子核自旋的取向和电子动量之间的夹角，那么 θ_β 处和 $(180^\circ - \theta_\beta)$ 处分布的不对称性，就将是 β 衰变中宇称不守恒的无可置疑的证据。根据李、杨的建议，吴健雄 (C. S. Wu, 1912 ~ 1997) 等作了极化钴 60 的 β 衰变实验。这个实验是在极化钴 60 的 β 衰变中看向两边发射的电子数目是不是对称。他们采用戈特-罗斯方法来极化钴 60 的原子核 (^{60}Co)，即先用绝热退磁方法把含有放射性的钴 60 的顺磁盐冷却到绝对温度 0.01° 左右，以尽量减少破坏极化的热运动，然后用弱磁场把钴 60 的顺磁盐离子中电子的自旋排列起来。这些未满壳层的电子可以产生一个很强的内磁场 (约 10^5 高斯)，使原子核 ^{60}Co 的自旋随着电子自旋取向。由于温度对物体的放射性是没有什么影响的，因此那些冷却了的整齐排列的 ^{60}Co 仍旧继续衰变和发射电子。根据宇称守恒定律，这些电子应该沿着原子核的取向以同样数目朝着上、下两边发射。他们用电子闪烁计数器记录了向上、下两边发射的电子数目，结果发现上、下两边的电子数目是不相等的。这样，吴健雄等便通过实验发现了 β 衰变中的宇称不守恒，首次成功地证实了李、杨的预言。随后不久，伽温 (R. L. Garwin, 1928 ~) 等测量了 π 介

子弱衰变中放出的电子的角分布，发现在这些弱衰变中宇称也不守恒，于是再次证实了李、杨的预言。

发现宇称不守恒的重要意义

长期以来，人们一直把与对称性相应的各种守恒定律视为毋庸置疑的普遍规律。李、杨的发现首次打破了这一观念，推翻了多年来一直奉为物理学基本规律的宇称守恒定律，把它下降为只适用于强相互作用和电磁相互作用的一般规律。李、杨的发现表明，在弱相互作用中不存在左右对称，这说明了对称性不是普遍的。因此，李、杨的发现促使人们重新检查在弱相互作用中其他守恒定律是否仍然有效。首先受到怀疑的是电荷共扼 (C) 不变性 (即物理规律在粒子 \rightarrow 反粒子变换下不变) 和时间反演 (T) 不变性 (即物理规律在时间倒向变换下不变)。实际上，吴健雄等人的实验不仅证实了 β 衰变中宇称 (P) 不守恒，而且证实了 C 也不守恒。但是，当时人们以为 CP 混合宇称是守恒的。后来，克里斯坦森等在 1964 年又发现，在长寿命的中性 K 介子的弱衰变中混合宇称也不守恒。根据粒子物理中的 CPT 守恒定律 (即物理规律在 C、P、T 同时变换下保持不变)，由 CP 不守恒可以导出 T 也不守恒。到了 1970 年，T 不守恒也得到了实验证实。这样，在弱相互作用中只剩下 CPT 守恒了。另外，李、杨的发现对 β 衰变实验和理论的研究工作也是一个促进，它加快了人们认识 β 衰变基本规律和弱作用物理本质的进程。

① 自旋，与质量、电荷等一样，是反映微观粒子内禀性质的物理量，其值 (以

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$ 为单位) 只能取半整数或整数，例如：质子和电子的自旋均为 $\frac{1}{2}$ ；光子的自旋为 1 等。研究发现：自旋为半整数的粒子服从费米-狄拉克统计；自旋为整数的粒子服从玻色-爱因斯坦统计。

② “中微子”这个名字是费米后来起的。在泡利最初的论文中，把他所预言的在 β 衰变过程中与电子一同放出的粒子称为“中子”。后来，费米在写“ β 衰变理论”论文时，真正的中子已经被查德威克发现，因此他不得不寻找一个新的名词。在意大利文中，中子叫做“neutrone”，即大的中性粒子。为了开玩笑，费米的同事庞蒂科夫 (B. Pontecorvo) 建议把泡利预言的粒子称为“neutrino”，即小的中性粒子，其中文译名为“中微子”。顺便说一句，在我国台湾地区，人们将其译为“微中子”，似乎更贴切原意。

由于中微子不带电，而且与物质相互作用属于弱相互作用，因此穿透力极强。例如，中微子能轻易穿透地球，只有十分之一的中微子会与地球物质中的质子和中子发生反应，故实验上极难捕捉到。我国物理学家王淦昌曾建议用原子核 ^7Be 的 K 电子俘获，也就是 ^7Be 俘获其原子最内层 (K 层) 电子变成原子核 ^7Li 并放出中微子的过程，通过测量 ^7Li 的反冲来检验中微子的存在。1941 年 1 月，他的文章在美国《物理评论》(Physical Review) 上发表后，6 月该刊就发表了美国物理学家艾伦 (J. S. Allen) 根据他的方案测量 ^7Li 的反冲能量所取得的肯定结果，但是，由于所用样品较厚以及存在孔径效应，没有观察到单能的 ^7Li 反冲。后来，又有几次实验，均未获成功。1952 年，罗德拜克 (G. W. Rodeback) 和艾伦终于从 ^{37}Ar 的 K 俘获实验中测到了 ^{37}Cl 的单能反冲。同年，戴维斯 (R. Davis) 测出了 ^7Li 的单能反冲能量，与王淦昌的预期相符，间接地证实了中微子的存在。直到 1956 年，美国洛斯阿拉莫斯国家实验室柯温 (C. L. Cowan, 1919 ~ 1974) 和莱因斯 (F. Reines, 1918 ~ 1998) 才从实验上直接观测到泡利所预言的“中微子”，现在我们称其为反电子中微子 ($\bar{\nu}_e$)。他们的实验是通过反电子中微子吸收反应： $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ ，



王淦昌

测量正电子 (e^+) 湮灭所放出的两个光子, 以确定反电子中微子的存在。这个实验在 1955 ~ 1956 年做了好几个月, 每小时最多只能测量到 (2.88 ± 0.22) 个反电子中微子。由此可见, 观测中微子是何等困难! 40 年后, 莱因斯因此荣获 1995 年诺贝尔物理学奖。

③ 1939 ~ 1945 年, 鲍威尔 (C. F. Powell, 1903 ~ 1969) 发展了用感光照相乳胶来记录宇宙线径迹的技术, 使原子核



柯温

摄影技术发展到了一个新的阶段。1947 年 10 月, 鲍威尔和他的合作者发表了《关于乳胶照相中慢介子轨迹的观测报告》的论文, 正式宣布发现了新粒子, 并将其命名为 π 介子。鲍威尔因发展核乳胶方法并用此法在宇宙线中发现了 π 介子而荣获了 1950 年度诺贝尔物理学奖。

π 介子的发现, 开创了物理学的一个新的分支学科——粒子物理学, 因此, 鲍威尔被誉为粒子物理学之父。



莱因斯

④ K 介子是罗彻斯特 (G. Rochester, 1908 ~ 2001) 和巴特勒 (C. Butler, 1922 ~ 1999) 于 1947 年在云室里发现的第一个也是最轻的一个奇异粒子。

(厉光烈, 中国科学院高能物理研究所 100049; 鹿桂花, 新疆伊宁市伊犁师范学院物理科学与技术学院 835000)



订阅《物理》得好礼 超值回馈《岁月留痕—— 〈物理〉四十年集萃》

阅读《物理》, 您将了解物理界大事, 博学多闻, 轻松掌握当代物理学发展脉动。

2012 年《物理》创刊 40 周年, 为答谢广大读者长期以来的关爱和支持, 《物理》编辑部特推出优惠订阅活动: 向编辑部连续订阅两年 (2014 ~ 2015 年)《物理》杂志的订户, 将免费获得《岁月留痕——《物理》40 年集萃》一本 (该书收录了从 1972 年到 2012 年在《物理》各个栏目发表的 40 篇文章, 476 页精美印刷, 定价 68 元, 值

得收藏)。欢迎各位读者订阅《物理》(编辑部直接订阅优惠价 180 元/年)

订阅方式

☆方式一:

邮局汇款

☆地址:

100190, 北京

603 信箱《物理》编辑部收

☆方式二: 银行汇款

☆开户行: 农行北京科院南路支行

☆户名: 中国科学院物理研究所

☆帐号: 250101040005699



(银行汇款请注明“《物理》编辑部”)

☆咨询电话: (010)82649266; 82649277

☆E-mail: physics@iphy.ac.cn