

β 衰变对物理学基本规律的两次冲击

厉光烈

(中国科学院高能物理研究所)

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正(或负)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。 β 衰变的研究对原子核物理和粒子物理的发展作出了巨大的贡献,特别应该指出的是,它曾经两次冲击物理学的基本规律:一次是在查德威克发现 β 射线能量的连续分布以后,尼尔斯·玻尔怀疑在 β 衰变中能量是否仍然守恒,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作用中宇称不守恒的假说,后来吴健雄等人通过极化 ^{60}Co β 衰变实验证实了李、杨的预言。

一、第一次冲击

查德威克发现 β 射线能量的连续分布

早期 β 衰变的研究工作主要是测定 β 放射性原子核的半衰期和 β 射线的能谱。最先测量得到的 β 射线能谱是梅特纳(L. Meitner)和哈恩(X. X. Hahn)利用磁偏转谱仪发现的线谱。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,它们是由于伴随着 β 射线从原子核里发射出的 γ 射线在轨道电子上的内转换引起的。实际上它们只占原子核发射的 β 射线的一小部分,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。一直到 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,并发现其能谱呈连续分布。

梅特纳和埃利斯(C. D. Ellis)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,梅特纳在 1922 年提出,量子化的原子核不应当发射具有可变电量的电子。那么, β 射线能量的连续分布是怎样引起的呢?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。当时包括梅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,因此衰变电子的平均能量应当等于 β 能谱的平均能量。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)作了这样的实验:他们将一定数量的 RaE 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 RaE 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 RaE β 能谱的平均能量 $(390 \pm 60)\text{keV}$ 符合得甚好。而按照梅特纳等人的看法,结果应为 1050keV 。显然实验结果支持埃利斯的看法。但是,梅特纳并不服输。泡利在 1958 年给吴健雄的信中曾经生动地描述了梅特纳当时的态度,他说“我们的好莱士”¹⁾在谈及埃利斯和伍斯特的实验结果时说:“我不相信它。我将更好地重作这个实验。”三年后,梅特纳和奥斯曼(W. Orthmann)发表了他们的实验结果,与埃利斯和伍斯特得到的完全一样,从而结束了这场争论。

尼尔斯·玻尔怀疑在 β 衰变中能量是否守恒

埃利斯和伍斯特的实验,以及后来的梅特纳和奥斯曼的实验,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,尼尔斯·玻尔 1930 年在他的法拉第讲座中对 β 衰变中能量是否仍然守恒提出了疑问。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 ^{14}N 为例,按照原子核是由质子和电子组成的假说,它应该包含有 14 个质子和 7 个电子。这 21 个粒子都服从费米-狄拉克统计,根据厄伦费斯特-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 年间,实验上发现原子核 ^{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原子核组成的质子-电子假说,可是当时并没有找到可以取代它的更好的假说。虽然早在 1920 年卢瑟福就猜测存在一种由质子和电子组成的核尺度的中性

1) 梅特纳的全称是莱斯·梅特纳。

复合粒子,他的追随者也曾 在氢原子放电中找寻过这种粒子,但是一直没有发现。

泡利提出中微子假说

尼尔斯·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月给正在蒂宾根参加物理会议的盖革和梅特纳的公开信中写道:在 β 衰变中不仅能量看来不守恒,自旋和统计也不守恒。在同一封信中,他提出了一个在当时看来是相当古怪的观念,即只要在 β 衰变中不仅放出电子,而且还同时放出一个穿透力极强、质量几乎为零和服从费米-狄拉克统计的中微子¹⁾,问题便可迎刃而解。

以著名的 RaE 的 β 衰变为例:



衰变前后的原子核 RaE 和 RaF 都有确定的能量。如果在衰变过程中只放出一个 β^- 粒子,它的能量又是可变的,那么在此衰变过程中能量显然是不守恒的。同样,原子核 RaE 和 RaF 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 $1/2$,其轨道角动量又只能为整数,因此,如果在衰变过程中只放出一个电子,那么角动量(或者说自旋和统计)显然也是不守恒的。但是,如果在 β 衰变中放出的不只是一个电子,还有另一个穿透力极强、质量几乎为零和内禀自旋为 $1/2$ 的中性粒子的话,能量以及自旋和统计不守恒的问题便可得到解决。这就是泡利当时的想法。现在我们很容易接受他的看法。但是在五十多年前人们关于基本粒子的知识是很有限的,只有质子、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²⁾,因此,当泡利在1931年6月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态度。1932年查德威克发现了中子³⁾,随后伊凡宁柯和海森堡分别提出了原子核是由质子和中子组成的假说,成功地解释了核的自旋和统计性质。这一重大发现激励泡利在1933年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们讨论和接受了他的假说。

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,费米提出了它的 β 衰变理论,开始了 β 衰变和弱作用的理论研究。

二、第二次冲击

马赫原理和拉波特 (O. Laporte) 的实验观测

过去有很长一段时间,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。宇称的概念最早是由威格纳 (E.P.Wigner) 引入的。1924年拉波特从实验观测中发现;复杂原子的能

级可以分为两类:偶能级和奇能级。在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,威格纳在1927年引入了宇称的概念。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中宇称守恒。威格纳当时就指出,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也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 ”之谜和李、杨提出在弱作用中宇称不守恒

在1954—1956年间,出现了一个令人困惑的问题,即所谓的“ θ - τ ”之谜。现在我们知道, θ 和 τ 是同一种粒子(即 K 介子)的两种衰变方式,而在当时人们仅仅知道有一种粒子衰变为两个 π 介子,另一种粒子衰变为三个 π 介子,它们分别被称为 θ 和 τ 介子。后来,随着实验精确度的提高,人们又进一步发现, 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。

为了揭开“ θ - τ ”之谜,物理学家们发生了很大的争论。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。但是李政道和杨振宁对宇称守恒定律并不盲目地信从,他们认为:问题或许并不在于 K 介

1) “中微子”这个名字是费米后来起的。在泡利最初的论文中把中微子称为中子,当费米写他的 β 衰变理论论文时,真正的中子已经发现,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,费米的一位同事建议把泡利预言的粒子称为“中微子”,即小的中性粒子。

2) 一直到1956年柯万(C.Cowan)和莱因斯(F.Reines)才从实验上发现泡利所预言的中微子,现在习惯上称为反中微子。他们的实验是通过反中微子吸收反应($\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$),测量正电子湮灭所放出的两个光子,以确定反中微子的存在。这个实验在1955—1956年间做了好几个月,每小时最多只能测量到 2.88 ± 0.22 个反中微子。由此可见,观测中微子是何等困难!

3) 1930年,玻特和贝克发现用 α 粒子轰击铍原子时会产生一种穿透力极强的射线。约里奥·居里夫妇对这种射线进行了研究,但他们把它误认为是 γ 射线。一直到1932年,早年在卢瑟福实验室工作过的查德威克根据卢瑟福的猜想,对这种射线进行了更细致的研究,发现这种射线就是卢瑟福所预言的中性复合粒子,并称它为中子。中子的发现开辟了原子核物理的新纪元。

于,而是在于宇称守恒定律本身.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:虽然在强作用和电磁作用中宇称守恒已为实验所证实,但是在弱作用中宇称守恒定律仅仅是一个推广的“假设”而已,并没有被实验证实.如果左右对称在弱作用中并不成立,那么宇称的概念就不能应用在 θ 和 τ 粒子的衰变机制中.这样, θ 和 τ 就可以是同一种粒子的两种衰变方式,“ 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证实弱作用中左右对称是可以不成立的.

吴健雄等通过实验证实李、杨的预言

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($r \rightarrow -r$)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_p 表示原子核的取向和电子动量之间的夹角,那么 θ_p 处和 $(180^\circ - \theta_p)$ 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,吴健雄等作了极化 ^{60}Co β 衰变实验,这个实验是在极化 ^{60}Co 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(C. J. Gorter)-罗斯(M. E. Rose)方法来极化 ^{60}Co 的原子核,即先用绝热退磁方法把含有放射性的 ^{60}Co 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 ^{60}Co 原子核的自旋随着电子自旋取向.由于温度对物质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 原子核,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,加温(R. L. Garwin)等测量了 $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \rightarrow e^\pm$ 衰变中放出的电子的角分布,发现在这些弱作用衰变中宇称也不守恒,于是再次证实了李、杨的预言.

发现弱作用中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不容置疑的普遍原理.李、杨的发现首先打破了这一观念,推翻了三十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作用和电磁作用的一般规律.李、杨的发现表明了弱作用中不存在左右对称,这说明确对称性不是普遍的,有时是可以被破坏的.因此,李、杨的发现促使人们重新检查在弱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轭不变性(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).实际上吴健雄等的实验不仅证实了在 β 衰变中宇称(P)不守恒,而且证实了电荷共轭(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(J. M. Christenson)等在1964年又发现,在长寿命的中性K介子的弱作用衰变中CP混合宇称也不守恒.根据粒子物理中的CPT守恒定理(即物理规律在C、P、T同时变换下不变),由CP不守恒可以导出时间反演(T)也不守恒.到了1970年T不守恒也得到了实验证实.这样,在弱作用中只剩下CPT守恒了.另外,李、杨的发现对 β 衰变理论和实验的研究工作也是一个促进,它加速了人们认识 β 衰变的基本规律和弱作用本质的进程.

[306—730⑨] 斥力在宇宙学中的应用

物理学类 冯天岳著

32开 58千字 84页 平装 定价2.90元

1994年1月出版 ISBN7-80554-206-6/N·1

自从爱因斯坦提出宇宙斥力之后,在宇宙学中开辟了对斥力的研究.本书给出斥力的计算公式和斥力常数的数值.应用斥力建立起后星系宇宙模型,从而解释了类星体的高红移;计算出类星体哈勃图中的拟合曲线,并且预言类星体的红移值不大于8.附录给

出使用袖珍程序计算器的详细计算方法和全部数据,读者可自行验算.

读者对象:理工科大专学生.

邮购地址:北京朝内大街135号,科学书店.

邮编:100704. 电话:4017892.