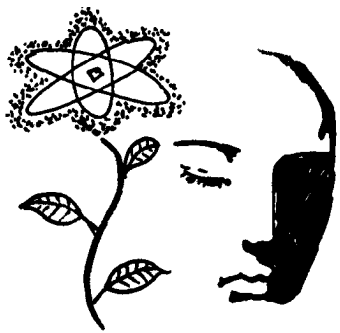


从弱电统一 看费米的物理直觉

杨建辉 厉光烈



德国著名物理学家劳厄曾说过：“新生的科学在开始时是不可能没有完备的基础的，它们的创造者的伟大在于他们以直觉的预感击中了正确的目标”。爱因斯坦也明确指出：“我相信直觉和灵感”。由此可见直觉在科学研究中的重要地位。

回顾 20 世纪，我们可以看到物理学界的一位伟人在科学创造过程中曾利用他的直觉预感做出了重大成就，他就是恩里科·费米。费米是美籍意大利物理学家，1901 年出生于罗马，1918 年进入比萨大学，1922 年获得博士学位，1938 年荣获诺贝尔物理学奖，1954 年逝世。1933 年，费米在他提出的 β 衰变理论中指出，弱相互作用和电磁相互作用都是矢量相互作用。但是按照相对论，普适的弱相互作用应该包括五种相互作用，即标量相互作用(S)、矢量相互作用(V)、张量相互作用(T)、赝矢量相互作用(A)和赝标量相互作用(P)。后来，经过许多科学家近 30 年的实验和理论研究，终于证明弱相互作用确实和电磁相互作用都是矢量相互作用。费米的这一想法最终导致了弱电统一理论的建立。

本文将通过弱相互作用和电磁相互作用走向统一的研究历程，介绍费米的物理直觉是如何指引他走向真理的。

弱电统一的历程

人类在探索自然界奥秘的过程中，逐步认识到主宰宇宙间物质运动的是四种基本力(或称四种基本相互作用)，即一切物体(包括星体)之间的引力相互作用、带电(磁)物体之间的电磁相互作用，以及微观粒子之间的强相互作用和弱相互作用。科学家一直期盼统一这四种基本相互作用：17 世纪，牛顿发现“万有引力”，将“天上的力”和“地上的力”统一起来；19 世纪，奥斯特、法拉第和麦克斯韦等经过长时间努力终于将“电力”和“磁力”统一起来；20 世纪，爱因斯坦在提出狭义相对论和广义相对论之后，一直试图统一它们，但至死未能如愿。令他没有想到的是，经过众多科学家的不懈努力，电磁相互作用却与 20 世纪初刚刚认识的弱相互作用统一了起来。

人们对弱相互作用的认识是从研究 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 衰变的研究曾对原子核物理和粒子物理的发展做出过巨大贡献，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，后来泡利提出的中微子假说终于成功解释了 β 连续谱，从而“挽救”了能量守恒定律；另一次是在 1956 年，为了解释“ $\theta-\tau$ ”之谜，李政道和杨振宁提出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 ^{60}Co 的 β 衰变实验证实了他们的预言。

β 衰变对物理基本规律的两次冲击，使人们对弱相互作用的物理本质有了深入理解。1933 年，费米根据泡利的中微子假说提出 β 衰变理论。他认为 β 衰变与原子发光类似，也是一种跃迁过程。在这种跃迁过程中，原子核内的一个中子转变为质子、电子和中微子(现在我们知道不是中微子，而是反中微子)。在原子发光过程中，跃迁是通过电磁相互作用发生的；在 β 衰变过程中，跃迁是通过 4 个费米子之间的一种弱相互作用发生的(人们后来称其为费米相互作用)。费米以量子力学的辐射理论为依据，假设从一个中子态跃迁到质子-电子-中微子态的几率正比于波函数 Ψ_n 、 Ψ_p 、 Ψ_e 和 Ψ_ν 乘积的平方。由于波函数 Ψ 是具有 4 个分量的旋量，因此有各种各样的组合方式可以将它们相乘在一起。一般地讲，这 4 个波函数可以组成 5 种相对论不变的组合，即标量耦合(S)、矢量耦合(V)、张量耦合(T)、轴矢耦合(A)和赝标耦合(P)，但是费米本人从来不喜欢有 5 种耦合的线性组合构成普遍的四费米子相互作用的想法。他在建立 β 衰变理论时只选用了矢量耦合，甚至当实验数据不利于这种选择时，他仍坚持：“我还是相信它是矢量作用。”当时他的这一想法曾被大多数物理学家否定。那么，费米的这一物理直觉究竟能否被实验验证呢？后来的实验和理论研究给了我们明确的答案。

根据费米理论，允许 β 跃迁的能谱分布应该给

现代物理知识

出直线的库里标绘。但不幸的是,当时人工放射性原子核还应用得很少, RaE(现在称为 210Bi) 仍然是研究 β 能谱形状的唯一 β 放射性源, 而这个原子核的 β 能谱形状极其特殊, 它的特性一直到 20 世纪 60 年代才弄清楚。因此, 早期 β 能谱的实验研究没有给出直线的库里标绘, 也就是说并不支持费米理论。1939 年, 劳森和科克研究了 ^{14}N 的 β 能谱, 泰勒研究了 ^{64}Cu 的 β 能谱, 都得到了大体上是直线的库里标绘, 只是在低能部分(小于 200keV) 往往出现偏离。一直到第二次世界大战后, 吴健雄和阿尔伯特才解释了低能部分的这种偏离。他们仔细研究了 ^{35}S 和 ^{64}Cu 的 β 能谱, 发现这种偏离主要是由于 β 粒子在有一定厚度的不均匀的放射源和衬托中的吸收和散射引起的, 放射源越薄、越均匀, 偏离越小。他们的实验结果与理论预言符合得很好, 从而验证了费米理论。

在费米理论得到实验证实以后, 人们进一步考虑在 β 衰变过程中起作用的究竟是五种基本相互作用(即 S、V、T、A 和 P) 中的哪几种。首先, 在这五种基本相互作用中, 实验上已经发现 P 的贡献极小, 因此可以排除它。而其余四种可以根据它们的选择规则分为两类: 表征 S 和 V 的选择规则称为费米选择规则, S 和 V 称为费米型相互作用, 表征 T 和 A 的选择规则称为伽莫夫-特勒(G-T) 选择规则, T 和 A 称为 G-T 型相互作用。1936 年伽莫夫和特勒首先在 ^6He 的 β 衰变中确认存在 G-T 型相互作用。后来, 谢尔和格哈特, 以及阿尔伯特斯特哈林在 1953 年又从 ^{14}O 和 ^{10}C 原子核的 β 衰变中确定了费米型相互作用的存在。那么, 在费米型相互作用中 S 和 V, 以及在 G-T 型相互作用中 T 和 A, 是否同样重要呢? 回答是否定的。实验上已经发现在 S 和 V 或 T 和 A 中只能有一个较强, 另一个很弱。结合 β 能谱形状的一些其他实验数据, 在这四种基本相互作用中只允许有两种组合, 即 S-T 和 V-A。那么, 究竟是哪一种呢? 后来, 艾伦和他的合作者作了人们期待已久的纯费米型 β^+ 放射源 ^{35}Ar 的 β - ν 角关联实验, 发现在费米型相互作用 S 和 V 中应选择 V。随后他们又作了 ^6He 的 β - ν 角关联实验, 发现在 G-T 型相互作用 T 和 A 中应选择 A。进一步, 伯吉等通过极化中子 β 衰变实验又弄清了 V 和 A 有相反的位相, 即 V-A。这样, 就确定了在 β 衰变中起作用的是 V-A。另一方面, 理论研究指出: 如果

中子、质子和电子都可看作是和中微子一样的没有静止质量的狄拉克粒子, 那么波函数 Ψ_n 、 Ψ_p 和 Ψ_e 就会和 Ψ_ν 一样在手征变换($\Psi \rightarrow \gamma_5 \Psi$) 下不变, 从而 $V-A$ 也就变换为 V。这样, 就证实了费米当初的预言——在 β 衰变中起作用的基本相互作用是矢量相互作用。后来, 电子俘获、 μ 俘获、 μ 衰变和其他粒子的弱衰变等方面的实验也都证实了 V-A 的普适性, 因此人们称其为普适 V-A 费米相互作用。

在普适 V-A 费米相互作用的进一步研究过程中, 费曼和盖尔曼提出同位旋三重态矢量流假说, 统一描述了 β^\pm 衰变和电磁跃迁, 即把它看作同位旋三重态矢量流的三个分量:

$$\beta^- \text{ 衰变, } J_{\mu}^{\dagger} = \Psi_N^{\dagger} \gamma_4 \gamma_{\mu} \tau_{+} \Psi_N + i [\phi_{\pi}^* T_{+} \nabla_{\mu} \phi_{\pi} - (\nabla_{\mu} \phi_{\pi})^* T_{+} \phi_{\pi}] ;$$

$$\text{电磁跃迁, } J_{\mu}^Z = \Psi_N^{\dagger} \gamma_4 \gamma_{\mu} \tau_Z \Psi_N + i [\phi_{\pi}^* T_Z \nabla_{\mu} \phi_{\pi} - (\nabla_{\mu} \phi_{\pi})^* T_Z \phi_{\pi}] ;$$

$$\beta^+ \text{ 衰变, } J_{\mu}^{-} = \Psi_N^{\dagger} \gamma_4 \gamma_{\mu} \tau_{-} \Psi_N + i [\phi_{\pi}^* T_{-} \nabla_{\mu} \phi_{\pi} - (\nabla_{\mu} \phi_{\pi})^* T_{-} \phi_{\pi}] .$$

这里的 Ψ_N 和 ϕ_{π} 分别为核子和 π 介子的波函数: $T_{\pm} = 1/2(\tau_x \pm i\tau_y)$ 、 $T_{\pm} = 1/2(T_x \pm iT_y)$, τ 和 T 分别为核子和 π 介子的同位旋矢量, ∇ 为梯度算符。在这一理论提出后不久, 吴健雄等通过精确测量 ^{12}B 和 ^{12}N 的 β 能谱实验验证了这个假说。

费曼和盖尔曼提出的三重态矢量流假说被实验成功验证, 使人们猜测弱相互作用和电磁相互作用可能像电和磁一样, 是一种作用的两种表现。这种猜测促使温伯格和萨拉姆各自独立地提出了弱电统一理论。考虑到电磁相互作用是通过一种规范场——电磁场来传递的, 他们认为弱相互作用也可以通过规范场来传递。他们应用杨振宁和米尔斯 1954 年提出的规范场理论, 选用 $SU(2) \otimes U(1)$ 群作为统一描述弱相互作用和电磁相互作用的规范群, 并引入希格斯机制使这 4 个规范场重新组合成 3 个有静止质量的规范场, 其量子为中间玻色子 W^{\pm} 和 Z^0 , 以及一个没有静止质量的规范场——电磁场, 其量子为光子。这样, 他们就统一地描述了弱相互作用和电磁相互作用。

1983 年 1 月在欧洲核子中心的质子-反质子对撞机上工作的两个实验小组——由鲁比亚领导的 UA1 实验组和由德勒拉领导的 UA2 实验组, 分别发现了 W^{\pm} , 并测得其质量分别为 $81.70 \pm 6.44 \text{ GeV}$

相对论的先驱——马赫

杨永超

侯新杰

爱因斯坦创立的广义相对论是现代物理学的重要基石,是20世纪自然科学的伟大发现,对物理学、天文学乃至哲学都有着深远影响。爱因斯坦是如何创立相对论的?他曾受到哪位物理学家思想的启发?要回答这个问题,我们就不得不提到著名的物理学家和哲学家恩斯特·马赫(Ernst Mach)。

马赫是著名的物理学家、哲学家、生物学家和心理学家,1838年2月18日出生于奥地利摩拉维亚地区布尔诺附近的切尔利斯·图拉斯,自幼受到良好教育,在维也纳大学学习5年后,于1860年以放电和感应的论文获得博士学位。他精通拉丁文、希腊文、法文、意大利文和英文。1864~1867年在格拉茨大学先后任数学教授和实验物理学教授,1867~1895年在布拉格大学任实验物理学教授,曾经两度被选为校长。1901年退休后,在家继续从事科学著述。1916年2月19日在德国特斯特逝世。

马赫作为唯心主义哲学家而广为人知,他是维也纳学派的先师和逻辑经验论的始祖,是经验批判主义的创始人,在哲学上颇有建树。然而,大多数人

可能并不知道他曾对经典物理学理论进行过深刻的批判,从而拉开了20世纪物理学革命的序幕,他的思想直接或间接影响了很多物理学家,比如玻尔、海森堡等哥本哈根学派的一些主要成员。受马赫思想影响最大的当属爱因斯坦,马赫对牛顿的绝对时间、绝对空间的批判及对惯性的理解,他那坚不可摧的对经典力学的怀疑态度,以及对经典力学基础的深刻洞察无一不给爱因斯坦以激励和启迪。

马赫一生主要致力于实验物理学和哲学的研究。他在声学、电学、空气动力学、光学、热力学等物理学的各个领域成就斐然,一生共发表了100多篇关于力学、声学和光学的研究论文及科学报告。有不少物理学术语以其姓氏命名,如空气动力学中广泛使用的马赫数、马赫波、马赫角等。他研究了物体在气体中的高速运动,发现了激波,确定以物速与声速的比值(即马赫数)来描述物体的超音速运动。他还首先用仪器演示了声学多普勒效应,并提出 n 维原子理论等。马赫在视觉、听觉和运动感觉方面的研究也卓有建树,发现了以他姓氏命名的“马赫带”。

和 $83.05 \pm 7.05 \text{ GeV}$,这与温伯格、萨拉姆的预言值极其符合。同年5月4日,UA1实验组又发现了 Z^0 ,并测得其质量约为 100 GeV ,也与理论预言值符合得很好。中间玻色子 W^\pm 和 Z^0 的发现,成功验证了弱电统一理论。

启示

在弱电统一理论的建立过程中,费米的物理直觉主要表现在两个方面:一是在 β 衰变的费米理论中,他凭直觉指出:在 β 衰变中起作用的是矢量相互作用;二是在研究 μ 衰变和 μ 俘获的过程中,他凭直觉指出:“ μ 衰变、 μ 俘获和 β 衰变耦合常数之间的类似不是偶然的,而是有深刻意义的。”正是费米的物理直觉指引后来的物理学家确立了普适 $V-A$ 费米相互作用,并最终导致弱电统一理论的建立。

那么,究竟什么是直觉呢?历史上有许多学者曾给出过不同的定义。目前,许多科学家把直觉看作是从事到理论、从旧理论到新理论转变的一种思维工具,而这种思维工具是非逻辑的。广义地说,

直觉是包括直接的认识、情感和意志活动在内的一种心理现象;狭义地说,直觉是人类一种基本的思维方式,包括直觉的判别、想象和启发,是非逻辑或超逻辑的。直觉来源于知识的积累和日常的实践,直觉是在实践经验基础上依赖高级思维活动而形成的对客观事物的一种比较迅速的、直接的综合判断。我们在了解费米的学术生涯后会发现,他的物理基础非常扎实,不仅在理论物理方面有很高的造诣,而且也是一个杰出的实验物理学家,他领导建立了世界上第一个核反应堆,被誉为物理学史上最后一位既是理论物理学家又是实验物理学家的科学家。

费米的物理直觉给我们的启示是,只有具有渊博的科学知识和丰富的实践经验,才能在科学研究过程中做出正确的预见。

(国家自然科学基金资助项目,批准号10575028;杨建辉,江苏省南京市晓庄学院物理系210017;厉光烈,北京市中国科学院高能物理研究所100049)