

量子场论六十年

李 洽 宽

众所周知,量子电动力学是量子场论中最成功的部分,它奠定了量子场论的基础。而量子电动力学基础的奠定则是始于一位年青人的工作——年仅 25 岁的狄拉克所撰写的论文。这篇著名论文发表距今已整整六十余年了,我们简单回顾六十年来量子场论发展的历史,也许不无裨益。下面我们先看一看狄拉克的著名论文发表前的大体情况。

100 多年前,麦克斯韦在研究法拉第电磁感应定律和场的概念的基础上,用数学方法总结出一组电磁场运动方程,后经亥维赛简化成现在大家熟知的形式,即麦克斯韦方程组。这是场的概念在物理学中第一次广泛地应用。赫兹于 1886 到 1887 年间,制造了发射和接收电磁波的仪器,证实了电磁波的存在。从而验证了麦克斯韦理论的正确性。整整一个世纪以来,麦克斯韦方程的应用范围日益广阔,它的成功是惊人的,从根本上说,它是电磁器械的设计基础,包括象加速器、电视机和电子计算机这样一些现代设备。

然而,远在本世纪初,经典电磁理论在许多新现象面前却发生了困难。如由实验观察到的电磁辐射的能谱与理论所预示的不一样。又如原子的线状光谱,原子的稳定性,理论都不能解释。1900 年,普朗克提出能量子的概念,解决了当时电磁辐射能谱的“紫外灾难”。普朗克指出,电磁辐射的能量交换只能是量子的。不久爱因斯坦更深刻地指出:能量的不连续性应该反映着电磁辐射的“粒子”结构,正象质量的不连续性反映着实物的粒子结构一样。这个观点不久由光电效应的实验证实。1913 年,玻尔提出的原子模型在处理氢原子和类氢离子光谱的成功使人们相信,原子系统的能量也象电磁辐射的能量一样,具有不连续性。1925 年建立起来的量子力学可以统一地来描述电磁场和实物粒子运动的能量不连续性。但是场和实物粒子在量子力学中所处的地位是不同的,实物粒子的波动性只是意味着几率分布的周期性;场的粒子性也只是代表能量的不连续性,并不是上述爱因斯坦指出的电磁辐射的“粒子”结构。

1927 年 2 月,狄拉克发表了“辐射的发射和吸收的量子理论”的著名论文,开创了一个新的认识进程。若将电磁场看作是无数简谐振子的叠加,再应用薛定谔方程处理时,即可得到振子的能量表达式:

$$\varepsilon_n^{(k)} = \left(n_k + \frac{1}{2} \right) h\nu_k \quad n_k \text{ 可取零和正整数。}$$

电磁场的总能量为 $E = \sum_k \left(n_k + \frac{1}{2} \right) h\nu_k$

上式包含了两个重要的结果:电磁场的“能级间隔”是一个与能级无关的常量 $h\nu_k$, 此即为普朗克的能量子,也就是频率为 ν_k 的光子的能量;当 $n_k = 0$ 时,

$$E_0 = \sum_k \frac{1}{2} h\nu_k,$$

因简谐振动 k 的数目无限,故 $E_0 = \infty$ 。通常把 $\frac{1}{2} h\nu_k$ 称为谐振子的零点振动能。

把 $n_k = 0$ 的电磁场的状态称为基态,亦称真空态。无穷大的能量不引起任何观察上的效应。这里我们看到,真空态并不是“空无一切”而是有其物理内容。电磁场的能态发生变化时,就要放出或吸收光子,光子是电磁场的传递者,由此看出场的粒子性结构,粒子与场统一在一起。

当有原子或其它带电粒子存在时,场与粒子之间的相互作用为:

$$H' = e \int \mathbf{j} \cdot \mathbf{A} dV$$

整个系统哈密顿量的形式可以写为:

$$H = H_c + H'$$

$$H_c = H_f + H_a.$$

式中: H_f 是电磁场的哈密顿量

H_a 是粒子的哈密顿量

H' 看作 H_0 的微扰。

H_0 的稳定态由 $(\dots n_i \dots a)$ 描述, n_i 是振子的占有数, a 是原子的定态,当考虑 H' 时,整个系统已不是稳定态,将有光子的吸收或发射。

维格纳和约当在 1928 年研究费米子场量子化时,得到了电子场。这种将一种粒子与场对应,再将场进行量子化处理的方法,就是所谓的量子场论。量子场论中能量最低的基态称为真空态。

1928 年,狄拉克又发表了有关电子相对论性波动方程的论文,成功地得到了电子的自旋, g 因子,氢光谱精细结构的索末非公式等重要成果。但同时也存在困难,方程有能量为负值的解。这个负能解还将导致原子不可能有稳定的状态,电子将一再向更负的能态跃迁,不断放出电磁波等。面对着负能困难,狄拉克没有简单地以不合理为由把它们除掉,而是巧妙地把负能描述为真空态!这个真空态是由“负能电子海”组成,所有负能级都被电子所占据,根据泡利原理,正能态上的电子就不能跃迁到负能态上去。一个负能电子可吸收一定的电磁辐射跃迁到正能态上去,这样就在原负能态上留下了一个其它性质与电子相同的“带正电荷的空穴”。伟人的思想在这个关键时刻也有点畏缩了,狄拉克试图把带正电荷的空穴看作质子,然而,韦尔,奥本海默和狄拉克本人很快认识到,这将再次导

致氩原子的不稳定性。狄拉克根据方程式的对称性，提出了反粒子的概念。狄拉克所预言的正电子，于1932年由安德逊在宇宙线中发现。

这里有一段狄拉克后来的回忆，是很值得我们来回味的。“存在一种带正电荷的具有电子质量的新粒子，我当时觉得相当不可思议。我曾推想，如果这种粒子确实存在，实验工作者肯定地早已发现它们了。为什么当时并没有发现它们呢？因为他们抱有否定它们的成见。那时人们对粒子在磁场中沿着曲线运动已做了大量实验，如已知粒子的电荷符号、轨道的弯曲情况就指明粒子沿径迹运动的方向。人们习惯地看到，电子从一个源出来，其径迹相应地弯曲。然而，他们有时也看到了反向弯曲的径迹，他们就把这些径迹解释为偶然有一些电子朝着源运动的，而不认为是从源发射出的带正电荷的粒子。大约1930年以后，对于新粒子见解的气氛完全改变了，许多新粒子被发现了，实验工作者和理论工作者都非常愿意提出新粒子，哪怕只有最微薄的证据”。（引自《现代物理学参考资料》第一集，“物理学家自然概念的发展”一文）

上述狄拉克负能电子吸收辐射跃迁到正能态上去，实质是光子转化成正负电子对的过程。反物质概念的提出，加深了人们对物质世界的认识。狄拉克曾说：“更多的概念隐藏在方程中，这比我所预料的要多”。“他的方程比它的作者更高明。”当将狄拉克方程用量子场论方法处理时，负能困难不复存在，所得结果与空穴理论相同。

由上面的空穴理论，我们看到真空态的物理内容是很丰富的。它包含了正负电子对的产生和湮灭，与电磁场相似，无穷大的电荷密度不引起测量效应，但存在电荷的零点涨落。类似于经典电动力学里的情况，介质中电荷 q 会引起介质的极化一样，量子场论中，真空态中的电荷也会引起“电荷的重新分布”。致使真空产生极化。例如一个质子会改变真空中虚的正负电子对的分布，造成所谓外电荷产生的真空极化。探讨真空的奥秘，也是现代物理学中的一个重要课题。李政道教授在《场论与粒子物理学》中写到：“根据相对论，人们知道，真空是洛伦兹不变的，这意味着观察者运动和变换参考系并不改变真空。然而，洛伦兹不变性并不表示真空必须是简单的，从狄拉克的空穴理论知道，虽然真空是洛伦兹不变的，但它是颇为复杂的”。（上册 p. 226）

用来处理电子的电磁相互作用的量子场论称量子电动力学(QED)。QED是场论中非常成功的部分。下面我们来看两个典型事例，1947年，在美国《物理评论》上同时发表了两项精密实验结果：(1) 兰姆和卢瑟福观察到氢原子的 $2^3S_{1/2}$ 和 $2^2P_{1/2}$ 能级有一个1057.8兆赫($4.37 \times 10^{-6} \text{eV}$)的裂距，这与狄拉克的相对论量子力学的结果不符，因此理论所得到的能

级公式知，主量子数 n 和总角动量子数 j 相同的两能级在能量上无差别，即两能级是重合的。（上述二能级 $n=2, j=1/2$ 是相同的，故应重合）

(2) 库什和弗利测量到电子的 g 因子不是狄拉克理论中给出的2，而是有一微小的偏差，这称为反常磁矩。

为了解决狄拉克相对论量子力学所遇到的这些困难，促进了QED理论的发展。当用微扰理论计算时，取低次项近似，计算值与实验值一致，取高次项计算时，计算结果反而是无穷大(发散困难)，这显然与实验精度的日益提高不相容。这一困难于1948年由许温格提出的“重整化方法”得到了解决。重整化后的微扰计算可到六级，计算结果与实验结果一致。如下表：（取自韦斯科夫：“五十年来场论的发展”一文，见《今日物理》1981年11期 p. 69）

1. 兰姆位移：(约10%是由于真空极化，其余是零点振动作用)

$$\Delta\nu(2S_{1/2} - 2P_{1/2}) = \begin{matrix} 1057.862(20) \text{ MHz} & (\text{实验值}) \\ 1057.864(14) \text{ MHz} & (\text{理论值}) \end{matrix}$$

2. 电子 g 因子： $\left(a = \frac{1}{2}(g - 2)\right) \times 10^3$

$$a = \begin{matrix} 1.15965241 & (20) & (\text{实验值}) \\ 1.159652379(261) & & (\text{理论值}) \end{matrix}$$

3. 真空极化：(在 μ 氢原子中(α 粒子 + μ 子)，90%兰姆位移由真空极化引起)

$$\Delta E(2S_{1/2} - 2P_{1/2}) = \begin{matrix} 1.5274(0.9) \text{ eV} & (\text{实验值}) \\ 1.5251(9) \text{ eV} & (\text{理论值}) \end{matrix}$$

量子场论在处理弱相互作用，一直未得到满意的结果。最大的问题是不可重整化，排除不了发散困难。直到六十年代，才有了转机。人们发现，远在1954年由杨振宁和密尔斯发现的规范场是可重整化的例如QED就是最简单的一种规范场。1964年，Higgs等人研究规范场真空自发破缺（真空态破坏了运动方程的对称性）发现真空自发破缺可使规范场粒子获得质量(Higgs机制)从而使规范场理论适合于带质量中间玻色子传递的作用。1967年温伯格、萨拉姆等在规范场和Higgs机制的基础上，提出了弱电统一理论。在该理论中，有四种规范场：即电中性的 γ (电磁场)和 Z^0 (中性玻色子场)，两个带电的 W^\pm (带电玻色子场)。1973年，发现的中性流现象确认了 Z^0 的存在，1983年，发现了弱作用的传递子 Z^0 和 W^\pm ，由实验测量的静质量与理论值一致：

$$m_{W^\pm} = \begin{matrix} (83.0 \pm 2.5) \text{ GeV} & (\text{理论值}) \\ (81 \pm 2) \text{ GeV} & (\text{实验值}) \end{matrix}$$

$$m_{Z^0} = \begin{matrix} (93.7 \pm 2.1) \text{ GeV} & (\text{理论值}) \\ (95.2 \pm 2.5) \text{ GeV} & (\text{实验值}) \end{matrix}$$

弱电统一理论的成功，是继麦克斯韦把电场和磁场统一在一起的又一次重要而成功地统一。

现在把强相互作用看成是由层子(夸克)、反层子(反夸克)之间的作用来实现的。层子是自旋 $\frac{1}{2}$ 的费

米子,在研究重子的层子组成时,根据泡利原理,引入了新的量子数——色量子数,强子的层子结构模型与规范场结合的理论称为“量子色动力学”(QCD)。这种理论是可重整化的,其微扰计算结果可满意地说明一些实验事实。在弱电统一理论和 QCD 理论基础上,人们又试图把弱作用、电磁作用和强作用用统一的理论描述,即所谓“大统一理论”(GUT)。在这种理论中,有 24 种规范场,其中有光子场, W^\pm 、 Z^0 中间玻色子场, 8 种胶子场,其余还有 12 种是未知粒子场。但是迄今为止,实验还未证实 GUT 的预言,所以说 GUT 还不是一个成功的理论。

半个多世纪以来,量子场论取得了巨大成功,特别是 QED 在极高的精度内与实验结果一致,这是前所未有的。但重整化概念并不令人满意,它的根据是什么,这是个至今仍未解决的大问题。粒子的质量问题也未得到解释,在今天的场论中,不能导出和理解电子的质量,特别重轻子(如 μ 子和 τ 子,见《高能物理》1979 第 3 期 P_1 、“轻子和层子”一文的介绍)发现以来,问题变得更加尖锐,为什么存在质量不同而其它性质相似的几套轻子,至今仍是谜。对质子与电子质量之比 $m_p/m_e = 1836.15$ 也未作出解释。就获得很大成功的规范场论而言,有的科学家也提出了质疑,像 Higgs 机制不能纳入规范场理论等。杨振宁教授最近也说:“现在不能令人满意的地方在于 Higgs 机制似乎是某种特设性的东西,我们不能从规范理论中把它推导出来。但是, Higgs 机制与规范场论并不抵触,并不矛盾”。(见“从 π 介子到夸克”——记第二届粒子物理学史国际讨论会《自然辩证法通讯》1985 年第 5 期 p. 74)

尽管量子场论还有不完美之处,但由它所揭示出来的诸如每种粒子对应一种场,相互作用由场来实现;场的激发状态相应于该粒子,粒子数目可变,有激发、有湮灭;场的复共轭的激发状态对应反粒子;场的最低能量状态为真空态,真空态并非空无一切等的物理图景,已成功地应用到物理学的许多学科中。随着理论物理中量子场论这门基础理论学科的完善,必将对许多学科的“物理理论”产生更大的影响。例如自旋波、电子空穴、库珀对分别与磁性材料、半导体、超导之关系,已经是这种影响的结果了。