

量子场论简介

徐德之

人们对物质的认识是不断发展、深化的。最早人们认为电磁场和普通的实物是两种截然不同的物质,电磁场具有波动性,而实物具有粒子性。但 20 世纪以来,人们逐渐认识到电磁场也具有粒子性,而通常的粒子也具有波动性,这就是物质的波粒二象性。就这一性质上来说,电磁场和实物是完全一样的。但由于认识次序上有差别,所以在量子力学中描写它们的方式是不一样的,它们所处的地位也是不一样的。我们用波函数来描写粒子的波动性,并认为这种波是几率波。但对电磁场则用一个场 A_μ 来描写,它不是光子的波函数,而是描写电磁场强度的力学量。在量子力学中,力学量是一个对波函数进行某种运算的算符。当电磁场和带电粒子处于一个体系中时,我们讨论的是在电磁场中带电粒子的状态,两者的地位也是不一样的。这种描写上的差别,说明我们还没有很好地抓住它们的本质。我们应该使对它们的描写统一起来。问题在于如何统一。电磁场的量子化对解决这个问题提供了很好的启示。

普朗克最早提出电磁场的能量子概念。原来,爱因斯坦认为这就是电磁场的粒子性的表现。1927 年狄拉克从电磁场出发,将其量子化,从而得到了电磁场的粒子性。他的方法是将电磁场的经典波动分解成无穷多个不同频率的简谐振动,他发现每一个简谐振动状态都满足薛定谔方程,此方程的解是量子化的,具有确定频率 ν 的简谐振动可取的能量值是 $h\nu$ 的整数倍,最小的能量就是 $h\nu$,这就是一个光子所带的能量。能量为 $nh\nu$ 的态中有 n 个光子。不同的态中有不同数目的光子,当电磁场受到激发时,它就由低能态跳到了高能态,这表示产生了一些光子;反之,就湮没了一些光子,所以在这样的理论中,光子是可产生和湮没的,这正和我们日常所观察到的事实相符。

1928 年约当和维格纳将这种处理方法用到电子上,这就导出了电子场概念。他们的思想是把量子力学中的波函数 ψ 不看成粒子所处的状态,而把它和 A_μ 一样,看成一个经典场量。它所满足的方程,如薛定谔方程或克莱-高登方程、狄拉克方程,也看成经典的场方程,它和电磁场的麦克斯韦方程相当。然后对此经典场应用狄拉克的电磁场量子化方法,就得到了电子。对其它的粒子也可通过对相应的场进行这种量子化而得到。这就是自由场的量子理论,也就是量子场论。在此理论中,物质的基本形态是场。每一种物质相应于一种场。它有各种状态,能量最低的状态称为真空态,在此状态中一个粒子也没有,所以没有粒子并不表示没有物质,只表示这时物质处于和有粒子的状态不同的状态中。当场被激发时,它就处于能量较高的状态中,这就产生了粒子,反之,就湮没了粒子。所以量

子场论从理论上预言了所有的物质都可象光子一样产生和湮没。1932 年以后,实验上的确发现了所有的粒子都可产生和湮没,这是任何其它理论所不能解释的,量子场论充分显示了它的生命力。

在量子场论中,粒子之间的相互作用也是以产生和湮没粒子的形式表现出来的。初态中的粒子在某一个时空点上激发了与它作用的场后,自己湮没了,或改变了能动量,而被激发的场则在该时空点产生了一些粒子。不过,也有时被激发的场并没有直接在该时空点产生粒子,而将这扰动传到了另一时空点才产生粒子,这样的过程称虚过程。下面我们以电子场和电磁场的相互作用为例来谈

谈相互作用的量子场论。

电磁相互作用的量子场论称量子电动力学,简称 QED。电磁作用在经典理论中已研究得很透彻了,所以它的数学形式是清楚的。在场论中,电子和光子的相互作用可表示为 $ie\bar{\psi}\gamma_\mu\psi A_\mu$, 其中 ψ 为电子场量, A_μ 为电磁场量。从此表达式我们可以看到,此电磁作用表现为在一点上两个电子(或反电子)及一个光子的吸收和放出。我们可以将它具体地表示成图 1 所示的四类基本过程(它们称为费曼图): 图 1a 表示一个电子在一点上放出或吸收一个光子变成另一个电子;图 1b 表示一个反电子在一点上放出或吸收一个光子变成另一个反电子(注意:反电子行进方向和所标示的箭头方向相反);图 1c 表示一个光子转化成一正反电子;图 1d 表示一对正反电子湮没成一个光子。不过,这些

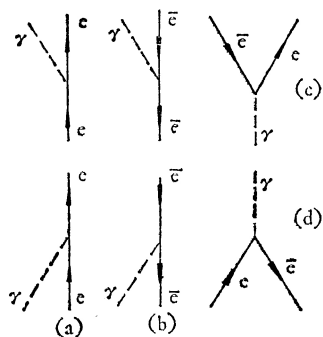


图 1

基本过程不能作为独立的过程出现,因为它们的能动量是无法守恒的。我们以图 1a 的一个电子放出一个光子变为另一个电子的过程为例来说明这点。选一个和初始电子一起运动的座标架。在此座标架中初始电子是静止的,故动量为零,于

是根据相对论的能动量关系式 $E^2 = p^2 + m_e^2$, 体系的能量等于电子的静止质量 m_e 。(在自然单位制中)。当电子放出光子后,体系中有两个粒子了,所以为了使总动量仍为零(在我们选的座标架中),电子和光子应有大小相等,方向相反的动量。这时根据上面的能动量关系,单是电子的能量已大于初始体系的总能量 m_e 了,所以能量是无法守恒的。其它的过程也可用同样的方

法证明是不可能的。但这些过程可以作为一个实际过程的一部分。这时，至少有一个粒子的吸收和放出是虚过程。对虚过程中出现的粒子没有关系式 $E^2 = p^2 + m^2$ ，所以就不会出现能量不守恒的问题了，只要整个实际过程能量守恒就可以了。下面我们举两个具体的例子来谈谈在 QED 中是怎样描写实际的相互作用过程的。

第一个例子是电子和电子的散射。我们可用图 1 中的基本过程组合成图 2a 的费曼图。它表示一个电子在 A 点放出了一个虚光子，此虚光子在 B 点被另一个电子吸收，在吸收和放出虚光子的同时，两个电子的动量都改变了。在实验上我们只观察到两个电子碰了一下后改变了它们的动量，而虚光子的放出和吸收并没有被观察到，但这个虚过程对散射截面却是做贡献的。代表初、终态粒子的线称为外线，代表虚过程的线称为内线，每一个时空点称为一个顶角。它们都有确定的表达式，所以费曼图画出来后，就可写下整个过程的数学表达式以进行数学计算。由基本过程还可组合成图 2b 那样的电子-电子散射费曼图，这是交换两个

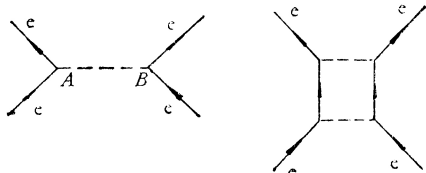


图 2

光子的过程，但它的贡献比图 2a 的小得多，这是因为碰两次的机会显然要比碰一次的机会小得多。从数学上看也是很简单的，因为每一个顶点的表示式中有因子 ier_μ （这是将电磁作用表达式中的三个场量去掉后留下的部分），所以图 2a 有因子 e^2 ，而图 2b 有因子 e^4 。 $e^2 = 1/137$ ，所以图 2b 是图 2a 的 $1/137$ 。算几率时还要将它平方，所以图 2b 的几率几乎是图 2a 的 $1/20000$ 。当然还会有交换三个光子……等等的费曼图，它们的贡献就更小了。

第二个例子是康普顿散射。实验上我们观察到的只是一个电子和一个光子发生了碰撞，但用图 1 的基本费曼图却可组合成图 3 所示的两个费曼图。图 3a 表示电子先吸收一个光子，再放出一个光子，图 3b 则表示电子先放出一个光子，再吸收一个光子。两个图对碰撞截面都有贡献，所以总的贡献应是它们的和。

QED 在作低级近似计算时，和实验符合得很好，但当我们进一步作精确计算时，却出现了严重的困难。如讨论电子-电子散射时，若只计算低级近似时只要考虑图 2a 就可以了，但要计算较高级近似时，除了要考虑图 2b 外，还要考虑图 4 的费曼图。因为它们都有四个顶点，所以我们可以期望它们和图 2b 一样为 e^4 的

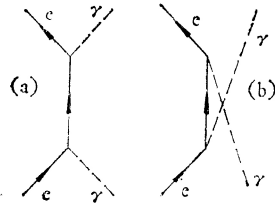


图 3

数量级。但实际却算得为无穷大。显然无穷大来自图中方框内的部分，图 4a 中的方框部分称自能图，图 4b 中的称真空极化图。由于不知道如何解决此困难，所以开始时人们只能简单地抛弃这些图。但后来

实验的精确度越来越高，只考虑低级近似已不能和实验相符了，所以人们想方设法要解决这个困难。1948 年薛温格提出了重整化方法来解决这个困难。他把图 4a 中的自能图解释为电子放出了光子，接着又吸收了光子。这样不断放出和吸收光子的结果，就在电子周围形成了一层光子云。我们无法把这层云和电子分开，所以我们测到的电子质量不仅是电子本身的质量（称裸质量），还包括了云的效应。当然作为一个物理效应，它应该是有限的，但由于在计算上有些缺点，

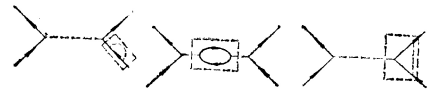


图 4

所以得到了无穷大数值。不过此效应是无法单独测量到的，实验上测到的质量是裸质量和云的效应之和，所以理论上也不必单独地正确计算它，只要把这部分表达式笼统地和裸质量值合并，并将合并后的量代以物理质量值就可以了。这种手续称质量重整化。不过，将此自能图插入到具体的过程中去时（这时电子线变成内线），除了分出这部分无穷大以外，还留下了一部分很小的有限修正，称为辐射修正。正是这部分有限修正，构成了高级修正项，使计算更为精确。

对图 4b 中的真空极化图，他解释成光子转化成一正一反电子偶，接着又湮没了。由于电子偶的出现，增加了额外的电荷。这部分电荷同样是不能单独测量的，我们实际测到的电荷值是它和裸电荷的和。所以我们可以将它笼统地和裸电荷加在一起，并代以实际电荷值。这种手续称为电荷重整化。

对图 4c 的顶角无穷大，也解释成对原来裸顶点因子 e 的修正，所以也重整了电荷。

当将真空极化图和顶角无穷大图插入具体过程中去时，除了分出上述无穷大外，也都留下了一部分极小的有限修正项，这就是高级修正，这种修正使计算更为精确。

重整化方法曾用来计算电子的反常磁矩和蓝姆位移，结果和实验符合得非常惊人。根据狄拉克的理论，一个自旋为 $1/2$ 的电子的磁矩应为一个玻尔磁子 $\mu_0 = e/2m_0$ ，但实验上测得的要比它大一些。这称

反常磁矩。1947年物理学家用微波技术测得为 $(1.001167 \pm 0.000005)\mu$ 。(目前测得的更精确的值为 $(1.00115965241 \pm 0.00000000020)\mu_0$),而重整化方法的计算值为 $(1.00115965238 \pm 0.00000000026)\mu_0$ 。两者到第九位小数都还是一致的。又如根据狄拉克的理论,氢原子的两个状态 $2^2S_{1/2}$ 和 $2^2P_{1/2}$ 的能量是相等的,但1947年蓝姆测得 $2^2S_{1/2}$ 状态的能量比 $2^2P_{1/2}$ 的高 $\Delta E = (1057.8 \pm 0.1)$ 兆周/秒。用重整化方法则算得此蓝姆位移为 (1057.9 ± 0.2) 兆周/秒。这样精确的符合不可能是偶然的巧合,这只能证明量子电动力学是正确的。而重整化方法则是在克服发散困难的道路上前进了一大步。

弱相互作用的量子场论也是用粒子的产生和湮没来描写的。但对弱作用没有经典的理论可循,我们只能从微观现象来研究它。首先看到的弱作用过程是中子的 β 衰变 $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$ 和 μ 子的衰变 $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$ 。这些过程都涉及四个粒子,且都在小于 10^{-13} 厘米的范围内发生,所以好像四个场在一点上直接发生了相互作用。为了描写这种相互作用,费米于1934年提出四费米子弱作用模型。他把此相互作用写成

$$\frac{G}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_1 O_\mu \psi_2 \bar{\psi}_3 O_\mu \psi_4,$$

其中 G 是作用强度, $\psi_1 \sim \psi_4$ 是在一点上作用的四个场量, O_μ 的形式由实验确定。由于它的数学表达式中有四个场量,所以弱相互作用在每一时空点上涉及到四个费米子的产生和湮没(电磁作用中只涉及到三个粒子)。如 μ 子衰变(这是一种纯轻子衰变,过程前后的粒子都是轻子)和中子衰变(这是一种半轻子衰变,过程中既有轻子,也有强子)的费曼图如图5所示。和电磁作用中一样它的每一条线和每一个顶角都有一定的数学表达式,所以也可对它进行理论计算。计算结果和实验符合得很好。这个模型的最大的缺点是不能像电磁作用那样,通过重整化而将高级过程中无穷大计算值消除掉,并且还有几率不守恒困难,关于这些,我们不在这里详谈了。

强相互作用的量子场论一直没有很好建立,现在人们期望,在规范场理论基础上发展起来的量子色动力学(QCD)能成为描写强相互作用的,比较好的理论。

规范场理论是1967年以后发展起来的(五十年代初,杨振宁和 Mills 已提出了它的雏型,称为杨-Mills 场),当将它用于弱作用过程中时,可以解决发散困难和几率

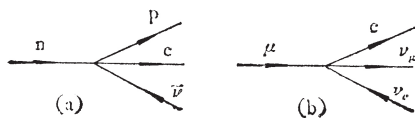


图 5

不守恒困难。这个理论的主要特点是所有的相

互作用分别由一种粒子来传递,与此粒子相应的场称为规范场,所以各种相互作用的形式很相似,都有图1形式的基本相互作用过程,每一个时空点上都涉及三个粒子的产生和湮没,但传递作用的粒子是不同的,或说对应不同的相互作用有不同的规范场。传递电磁作用的是光子,传递弱作用的称中间玻色子,传递强作用的称胶子,它们都是自旋为1的玻色子,中间玻色子有三种: W^+ 、 W^- 、 Z^0 , W 是带电的, Z 是中性的。它们和光子不同,都有巨大的质量,估计为 100GeV 左右。正因为它们的质量很大,所以当它们的动量很小时,传递弱作用的距离就很短。弱衰变过程正是这种情况。在这些过程中,初末态粒子的动量改变不大,即中间玻色子传递的动量不大,所以传递的距离就很短。从实验上看,就看不到这种传递过程,好像弱作用是直接发生作用的。但在散射过程中,当初态粒子的动量足够大时(高能散射过程),初末态粒子的动量改变可以很大,这时中间玻色子带的动量也很大,所以传递的效应就可观察到了。 Z^0 中间玻色子存在的较好的证明是中性流事件(关于弱作用规范场理论和中性流事例请参见《高能物理》79年第二期、第四期,80年第三期,81年第四期等有关文章,这里不赘述了)。 W^\pm 粒子也已于82年底在西欧核研究中心找到,并确定其质量为 81 GeV (见本期《高能物理》有关文章)。

胶子有八种,它们都是没有电荷的,但有不同的“色”荷。这种色荷是强作用的源(正如电荷是电磁作用的源一样),它们在层子之间传递着很强的作用,使层子结合成非常牢固的粒子(即通常的“基本粒子”,将层子分离出来需要无穷大的能量,因此实际上是无法做到的,这就是所谓“层子禁闭”),胶子之间也有很强的作用,所以虽然胶子的质量为零,但仍看不到单个胶子。胶子可以结合成胶球。1981年在实验上找到了一个质量为 1440MeV 、角动量为零、宇称为负的中性玻色子,经过物理学家们的分析,认为它是一个胶球。这从一个方面证实了胶子理论(即 QCD 理论)的正确性。另一个证明胶子存在的实验是三喷注事例(见《高能物理》79年第四期)。到目前为止,所有的实验都和 QCD 是不矛盾的,但要确立 QCD 理论,还要做大量的工作(有关 QCD 的理论可见《高能物理》79年第一期、第三期有关的文章)。