
量子电动力学简介

北京大学物理系 胡 宁

量子电动力学的研究对象是发现了微观世界的量子现象以后,在经典电动力学的基础上通过进一步的科学实验而揭示出来的新的运动规律。

人们从雷电现象以及磁针的指向性,开始了对电磁现象的认识,经过漫长的岁月逐步掌握了电磁现象的规律,制造了发电机和电动机等新的生产工具,并发明了电灯、电话和无线电……,从而对宏观的电磁现象的规律性获得全面的认识。十九世纪以来,工业技术的突飞猛进,都是和电气化分不开的。经典电动力学就是人们对宏观电磁现象认识的总结。

稍为具体一点说,经典力学研究的是由原子所组成的各种形态(固态、液态、气态)的东西的机械运动的规律;而经典电动力学研究的则是电磁场的运动和电磁场与原子所组成的各种形态的东西的相互作用。电磁场和我们常见的各种形态(固态、液态、气态)的东西在形式上很不一样,但它也是物质的一种形式,是人们认识客观世界的过程中出现的新的物质存在形式。电磁波是电磁场中的波动,无线电波、光波、X射线等,都是不同波长的电磁波。

作为二十世纪物理学重大发现的量子现象,也

是最先在电磁现象中看到的。人们发现电磁波的能量放出和吸收是不连续的,只能一份一份地放出和吸收。每一份的能量都固定,其大小等于 $h\nu$, h 是一个常数,通常称为普朗克常数, ν 代表电磁波的频率,即每秒钟电磁场振动的次数。这样具有固定能量的一份电磁波就叫做光子,又叫做电磁场中的量子,或光量子。刚才说,电磁场是物质的一种存在形式,电磁波是电磁场中的波动,所以光量子的存在,说明了电磁场这种物质存在形式也是有微粒结构的,就好象普通看到的東西都是由原子微粒组成一样。

在我们熟悉的宏观世界里,波动和粒子是两个互相排斥的概念,波动是一种连续的变化,粒子则是一颗一颗的,是不连续的。但是,到了微观世界,电磁场中的波动却同时具有粒子性了。也就是说,作为电磁场的量子的光子,它既有粒子

性,又保持了电磁波的波动性。不仅如此,实验上还证实了原子是由带负电的电子和带正电的原子核组成的,原子核又是由带正电的质子和电中性的中子组成的,电子、质子、中子都是粒子,但也都有波动性。作为粒子(包括光子在内),它们都有动量 p 和能量 E ; 作为波动,它们又都有波长 λ 和频率 ν 。在 p 和 λ 之间, E

和 ν 之间有如下的关系:

$$p = h/\lambda, \quad E = h\nu$$

这就有力地说明了在微观世界里,粒子性和波动性既是对立的,又是统一的。毛主席教导我们:“**对立统一规律是宇宙的根本规律。**”微观世界也毫不例外。

光子的波动性来源于电磁场具有波动性,光子实际上是电磁场的一种激发状态。与此相类似,电子的波动性来源于电子场具有波动性,电子实际上是电子场的一种激发状态。电子场的激发,不但可以出现电子,而且还可以出现带正电的阳电子,或叫反电子。

电磁场是一份一份地激发的,每一份是一个光子。我们把电磁场的这种性质称为电磁场是量子化的。同样,电子场也是一份一份地激发的,每一份是一个电子,或一个反电子。我们也把电子场的这种性质称为电子场是量子化的。

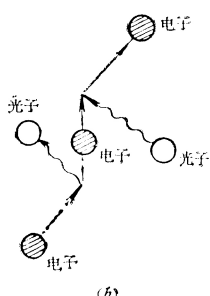
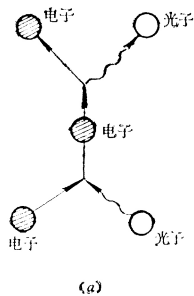


图1 光子和电子散射的两个方式。方式 a 先吸收光子然后再放出光子,方式 b 先放出光子然后再吸收原有的光子。

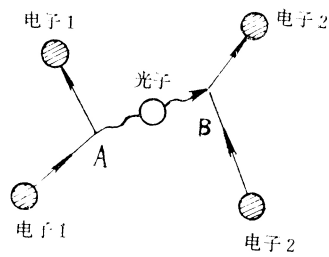


图2 电子和电子的散射

量子电动力学所研究的规律性，就是量子化的电子场（还有其他带电粒子的场）和量子化的电磁场，以及它们之间相互作用的规律性。下面我们举三个例子：

(i) 光子和电子的碰撞：在量子电动力学里，这个过程可以描绘成图 1：(a) 是电子先吸收与它相碰的光子，然后再放出碰撞后出现的新光子。(b) 是电子先放出新光子，然后再吸收与它相碰的光子。电子的吸收光子和放出光子，都是电子场和电磁场相互作用的结果。量子电动力学根据这样的图象计算碰撞后出现的出射光子在各个方向的分布，理论结果与实验完全一致。

(ii) 电子与电子的碰撞：这个过程可以描绘成图 2：第一个电子在 A 处给电磁场一个扰动，把一部分能量和动量交给了电磁场，电磁场的这个扰动传播到 B，又使第二个电子受到一个扰动，它吸收了电磁场传递过来的那一部分能量和动量。相仿，第二个电子也可把能量和动量传给第一个电子。总的效果是第一个电子和第二个电子之间发生了相互作用(碰撞)，第一个电子和第二个电子之间相互交换了能量和动量，这个相互作用是通过量子化的电磁场传递的。根据这个图象计算出来的碰撞后电子飞行方向的分布，也是和实验符合得很好的。

(iii) 一个电子和一个阳电子转化为一对光子：图象是电子(或阳电子)先放出一个光子，然后它又与阳电子(或电子)相撞，转化为另一个光子。这个过程非常生动地说明

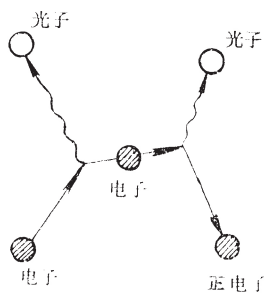


图3. 电子和反电子碰撞转化为一对光子

了电子场的激发可以转化为电磁场的激发。当然，如果能量足够的话，电磁场的激发也同样可以转化为电子场的激发(出现一个电子和一个阳电子)，按照这个图象作出的理论计算也是和实验相符的。(图 3)

从上面所举的三个实例，我们看到微观粒子相互作用的过程都可归结为这些粒子的产生(场的激发)、消灭(场的激发的消失)和相互转化(一种场的激发转化为另一种场的激发)的过程。从前，人们曾以为电子、质子等微观粒子是永恒不变的。现在，事实证明了这种形而上学的看法是不符合事实的。这些粒子都可以在相互作用的过程中被吸收(消灭)，被放出(产生)，或转化成别种微观粒子。所以，事实又一次证明了自然界本身就是蕴含着辩证法的。

量子电动力学实际上也是所有类型的微观粒子之间相互作用的一种模式。人们在处理核子间的强相互作用以及弱相互作用的衰变过程(如 β 衰变)时，也使用量子电动力学非常相似的处理方法——把每一种粒子看作是一种相应的量子化的场的激发，把粒子的吸收、放出和转化看作是这一种量子化的场与那一种量子化的场相互作用的结果。这样建立起来的理论叫量子场论，它是从大量的科学实验的实践中提炼出来的当前研究所所有微观现象的常用的理论方法。

人们也成功地使用量子电动力学的方法，计算了光子与原子、光子与分子的碰撞现象，从而阐明了

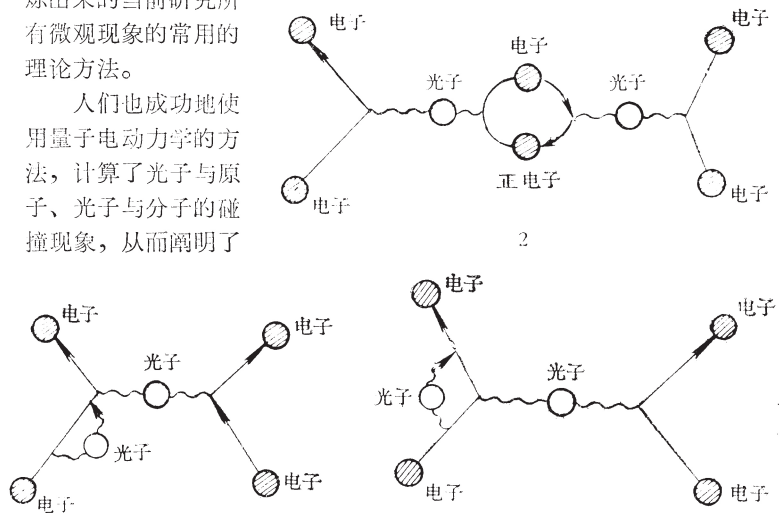


图4. 电子和电子散射的高次图

光电现象，荧光和磷光现象，并解释了非常复杂的光谱现象。关于后者，值得我们再多说几句：

二次大战后，由于微波技术的进展，人们发现可以用微波技术测出能量差异很小的两个能级之间的原子跃迁。原子结构中出现这种微小的能级差异，用旧的量子力学是不能解释的，但是量子电动力学可以给出合理的解释，就是说，它们是由于光子(电磁场)和电子(电子场)之间的多次相互作用而造成的(在上面介绍的三个实例里，我们只画出了低次作用，没有画出多次作用)。多次作用包括电子放出一个光子，然后再重新吸收这个光子；光子转化为一对正反电子，然后正反电子又重新转化为原来的光子。例如图 2 如果有多次作用，就可以画成图 4。当然还可以画出比图 4 更高次的图来。

这种多次的吸收、放出和转化的过程，在理论计算里都导致发散(无穷大)的积分，造成理论的困难，叫做发散困难。在相当长的时期内，人们只好认为这些多次作用的效应没有物理意义。但是微波技术测出了原子结构中的确存在微小的能级差异，这个发现使人们不能不认真对待这些高次相互作用，提出

了所谓重正化理论。按照这个理论,可以把发散的积分分成两部分,一部分仍然是发散的,它代表电磁作用所引起的电子质量和电荷的改变,这种改变不产生任何观察上的实际效果;另一部份是有限的量,它恰好给出上述的能级的微小差异。人们利用重正化理论的计算方法算出氢原子“2p”和“2s”态的微小能级差异与微波观测的结果完全相符。

任何科学理论都是有局限性的,都是有它的适用范围的,毛主席教导我们:“**人们对于在各个一定发展阶段上的具体过程的认识只具有相对的真理性。**”量子电动力学也不会例外。很多人都认为,量子电动力学在能量太高的时候不对,因为量子电动力学并没有考虑电子的内部结构。那末,多高的能量呢?目前已经用二百二十亿电子伏的高能电子作过一些验证量子电动力学的实验,但是仍没有发现量子电动力学不对。看来这个问题的解决还有待电子能量的继续提高。