

微观粒子的

相像与不像

谢谔成

人类窥探在原子尺度以内的物质世界发端于整整一个世纪以前。1885年瑞士中学教师巴耳末发现氢光谱的规律,为若干年后玻尔引入“量子化”概念提供了实验素材。1897年汤姆孙证实了电子是最小的荷电单位,每个电子的质量与电荷量之比为常数。接着人们发现当光照射到金属表面时,有电子从表面逸出,称此现象为光电效应。进一步研究逸出电子的动能与入射光的关系得到了与当时关于光的性质的认识相悖的结果。

既不象粒子也不象波

十九世纪物理学

的一个重大成就是证明了光是电磁波,并观测到了光

的干涉衍射现象,从而否定了牛顿关于光由微粒组成的说法.按照波动说的观点,似乎很容易推得逸出电子的动能与入射光强有一定联系,而事实相反,逸出电子的动能与光的强度无关,却与光的频率有简单的线性关系.这就是说光在与电子作用时并不象水波与物体作用一样,光的能量是一份一份传给电子的,携带一份能量的物质叫光子,频率为 ν 的光子能量为 $E = h\nu$ (h 称为普朗克常数),因而它的动量大小为 $p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$ (c 为光速, λ 为波长).这样光电效应作为证实光的粒子性的一个重要实验而被载入史册。

面对看起来互相矛盾的两类实验事实,人们必须改变自己过去从许多经验所得到的观念.在很小的尺度下,不能把光看作以前所熟悉的任何东西,它不象一个小球,也不象水波,不象弹簧上的振子,也不象……

无独有偶,电子从它被发现的那时起始终被人们当作小球样的微粒,1924年起却有人对此提出疑问,德布罗意假设一个能量为 E 、动量为 p 的电子可用一个频率为 $\nu = \frac{E}{h}$ 和波长为 $\lambda = \frac{h}{p}$ 的平面波来描

写。1927年实验上观测到了电子从单晶体表面散射时产生衍射的现象,证实了电子确实有波动性。无疑,人们的观念又经受了一次大震动。在这里与光的情况相反,电子不象粒子,而象波!那么我们究竟能否判断光和电子是波还是粒子呢?

然而，我们为什么必须把新现象纳入自己旧经验的框架呢？物理学界的前辈们从迷惘进而反思，领悟到光子和电子的行为不象任何司空见惯的东西，说明它们恰好体现了原先不为人知的物质的属性，即在很小范围内的物质既有粒子性的一面，又有波动性的一面。尽管我们还是将光子、电子这类物质称做“粒子”。有时为了与子弹、小球之类的粒子相区别，特别冠之以“微观”两字。除了光子和电子外，被称作微观粒子的还有质子、中子、 π 介子、 μ 子、中微子等。

所有微观粒子的行为彼此很相像

微观粒子主要的共同点之一就是波粒二象性。每一种粒子都可用一个物质波来描写，其频率、波长与能量、动量的关系均由德布罗意公式给出。

这一特征的直接推论是微观粒子的动量和位置不能同时被精确测定。对于由一把手枪发射的子弹来说，要同时办到这两件事易如反掌，谁都可想出不错的法子来。例如让手枪对着有一小孔的大钢板（图1），在钢板另一边隔开一段距离放置一个靶，当手枪瞄准小孔时，子弹一定从小孔穿过打到靶上，从子弹的飞行时间和距离可推算出子弹的速度，对于已知质量的子弹也就得到了子弹的动量。显然所有瞄准小孔的子弹不管其速度大小，落点集中在靶上正对小孔的靶心，而没有瞄准小孔的子弹必将被钢板阻挡，不可能达到靶上，因而小孔既用来选定被测子弹的位置，又用来确定子弹动量。若要对电子做同样的试验将会得到什么结果呢？让手枪换成电子枪，靶换成收集电子的器件（图2）我们将发现，无论如何设法使电子枪瞄准小孔，

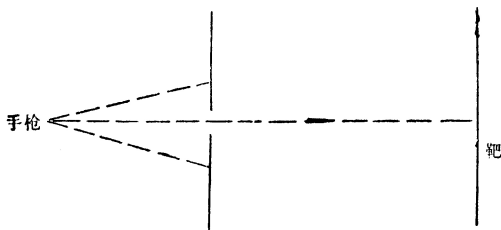


图1 子弹通过小孔打在靶上同一点

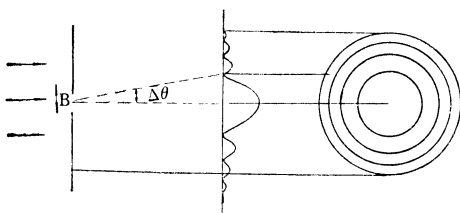


图2 电子通过小孔的衍射。B 为小孔宽度。曲线表示收集器接收到电子数。

电子不会都集中在正对小孔的靶心，而是分别落在围绕靶心的附近区域，依照落点与靶心的距离形成一系列同心圆。这种现象与光的小孔衍射很相象，这正说

明了电子的波动性。既然有的电子落点与靶心有偏离，表明穿过小孔后的电子动量不再与原发射方向一致，所以当我们把小孔做得极细，想要选定电子的准确位置时，就失去了准确测定电子动量的可能性，而且小孔越细，衍射花纹分布的范围越大，动量就越不确定。详细研究此类现象所得到的规律是：在某一方向测量粒子坐标的不确定程度 Δx 与测量动量的不确定程度 Δp 必定满足 $\Delta x \cdot \Delta p \geq h$ 这个由海森堡提出的公式叫测不准关系。

微观粒子另一个特点是物理量取不连续值。例如各种粒子的电荷量有正、负；大、小之别，但都是一个最小电荷单位，即电子电量的整数倍。又如原子内运动的电子能量和角动量（动量矩）都只能取某些不连续值，其中每一种能量值与一个正整数 n 相联系，每一种角动量值与一个正整数 l 相联系。表达微观粒子物理量取不连续值特性的术语就是“量子化”，电荷的倍数， n 或 l 等整数称为量子数。

许多微观粒子除了在有心力场运动中有角动量以外，还有一个自身的固定角动量，好象不停旋转的陀螺，这种角动量叫“自旋”，自旋角动量也是量子化的，是某个最小单位的倍数，这个倍数即自旋量子数的值可能是 $0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2, \dots$ 等。电子、质子、中子的自旋量子数都是 $\frac{1}{2}$ ，光子自旋量子数是 1。

此外，每种微观粒子都有一个“对立面”——反粒子，简单说来，粒子与反粒子之间电荷量大小相等，符号相反，而质量、自旋都相同，在某种意义上说它们的关系好比一张相片与底片之间的关系。电子的反粒子叫正电子，当电子和正电子分别以同样速度在均匀磁场中运动时，它们都将受到磁场作用力，以同样的曲率半径偏转，但由于两者电荷符号相反，偏转的方向恰好相反。用此方法很容易识别正反带电粒子。实际上正电子就是在磁场中由于偏转方向与电子相反而被发现的。

带相同电荷的粒子可能有不相像的性格

我们知道两个电子靠近时会互相排斥，这可用库仑定律来说明。质子与电子所带电量相同，只是电性相反，因而两个质子靠近时也有库仑斥力。那么原子核中的质子为什么不互相排斥，反而紧紧地聚拢在一起呢？

原来电荷只表现了粒子在参予电磁相互作用方面的能力，相等电荷的粒子在电磁场中会受到相同的力。但存在于粒子之间的力不只是来源于电磁作用。原子核的大小约为 10^{-13} 厘米，在这个范围内，质子之间虽有互相排斥的电力，但还存在某种力程较短的强力。在原子核内，强力使质子彼此强烈地吸引，由于吸引力远大于库仑斥力（近千倍），合力表现为质子间的吸力。在

质子与中子、中子与中子间也存在着同种强力,它的来源是强相互作用。

实验证明,电子与强相互作用无缘。电子与任何带电粒子都会发生作用,也可与光子作用,但不会发生强作用。然而,有许多粒子象质子、中子一样,能参予强相互作用,人们称它们为强子。电子和另一些自旋量子数为 $\frac{1}{2}$ 的粒子(如 μ 子、中微子)不参予强作用,则称为轻子。

质量相同电荷不同的强子在强相互作用中十分相像

质子的质量与中子十分相近,自旋也相同。但质子带正电,中子是中性的,所以在电磁作用方面这两种粒子完全不同,譬如在均匀磁场中运动的质子会如电子一样偏转,中子却不会,以此可以区分它们。但在强相互作用方面,质子与中子仿佛是同一种粒子。

让高能中子射向质子靶,中子与质子之间的强力使中子发生散射。另一方面质子与质子之间既存在强力也存在电磁力,当高能质子射向质子靶时,引起质子散射的是两种力共同的作用。用库仑力来处理质子之间的电磁作用,可推算出质子之间强力的作用范围及大小,结果发现与利用中子-质子散射数据算出的中子-质子之间强力几乎相同。还有其它一些实验事实也证明质子与中子在强相互作用方面没什么区别,故可把质子和中子看作同种粒子,叫核子。由于电性不同,核子在电磁作用中又分别呈两种状态:带一个正电单位的质子和中性的中子。于是把核子称作同位旋二重态。

实验上还发现在高能质子碰撞时,产生许多质量为 $138 \text{ MeV}/c^2$ 的粒子,它们有三种带电状况,各带单位电荷的 ± 1 和 0 倍电量。大量事例的统计表明此三种带电状况不同的粒子产生机会均等,故而在强作用方面它们彼此没有差别,是同一种粒子,叫 π 介子。为表示它们不同的电性,在名称上角标上 $+$ 、 0 或 $-$ (π^+ 、 π^0 、 π^-),将这三个 π 介子称作同位旋三重态。

实验证明强子都可同样地分作质量相同、电荷不同的组,每组或为一个同位旋二重态(如质子、中子),或为一个同位旋三重态(如 Σ^+ 、 Σ^0 、 Σ^-),或为一个同位旋四重态(如 Δ^{++} 、 Δ^+ 、 Δ^0 、 Δ^-),通常用多重态的多重数减去 1 ,除以 2 ,来表征强子的多重态特性,得出的数叫做强子的同位旋。所以质子、中子同位旋为 $\frac{1}{2}$, π 介子同位旋为 1 ,等等。

从同位旋分类着手,人们逐渐掌握了存在于强子之间的对称关系,并由此提出强子由层子(夸克)构成的图象。

“四不像”的中微子

有些不稳定的原子核可通过放出电子而衰变成其它原子核,这个现象叫 β 衰变。在观测 β 衰变时,发现

反冲原子核和所产生电子的动量不平衡,可见还有一种中性粒子与电子同时产生。从角动量守恒知这种粒子的自旋是 $\frac{1}{2}$ 。它的名称叫中微子。

中微子是颇有点特别的粒子,从电性和自旋来看,与中子似乎相近,实际上两种粒子差别很大。中子与原子核碰撞时可引起相当强的核反应,而中微子与原子核发生反应的几率比前者小得多,至多是中子核反应几率的 $\frac{1}{10^{22}}$ 。所以中微子不可能是参予强作用的粒

子,它不属于强子而属轻子。另一方面中子质量约是电子的 1800 倍,中微子却几乎没有质量。

中微子既无质量,又不带电,与光子是否类同呢?也不然。与光子和电子散射相比,中微子与电子的散射要弱得多,所以中微子与光子不同,它不参与电磁作用。而且光子的自旋量子数是 1 ,与中微子完全不同。

唯一能引起中微子与物质反应的作用叫弱相互作用,这也是导致原子核 β 衰变的作用。由于弱作用强度只是电磁作用的 $\frac{1}{10^{11}}$,所以当中微子穿过物质时,与物质发生作用而被吸收的机会几乎为零,很难在物质中留下痕迹,使人们不太容易捕捉到它们。

质量差别很大的三套轻子何其相像

迄今为止,属于轻子一类的粒子有:电子(e)、 μ 子、 τ 子,中微子 ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ 及这些粒子的反粒子。如前所述,轻子的自旋量子数都是 $\frac{1}{2}$,都不会与物质发生强作用。

在电磁作用及弱作用方面,轻子明显地分为三套: e 、 ν_e 及它们的反粒子; μ 、 ν_μ 及反粒子; τ 、 ν_τ 及反粒子。虽然 μ 子质量约为电子的 200 倍, τ 子质量又约是 μ 子的 18 倍,三套轻子却极其相像。凡第一套轻子所发生的过程,第二、三套也能进行,且形式完全相同,只是轻子名称更换而已,例如氢原子由电子和质子组成,而 μ 子和质子也可由电磁力束缚成 μ 原子,又如三种中微子都有过程 $\nu_l + \text{中子} \rightarrow \text{质子} + l$ (l 代表 e 、 μ 、 τ)。另外,弱作用可使 τ 子衰变为 μ 子或电子,使 μ 子衰变为电子。看来这些现象很容易使人联想到处于不同能级的原子或原子核,处在激发态的原子可通过放光子跃迁到基态。但实验上从未观测到 τ 子或 μ 子放出一个光子变为电子的过程。那么为什么质量相差成百倍的粒子会有如此相似的性质,这是粒子物理中尚未解开的一个谜。

上面提出了微观粒子的某些共性和特性。在粒子物理中识别粒子种类和研究粒子之间的联系和对称都是具有相当重要意义的工作,通过这些分析,我们不仅能够了解微观粒子的各种属性和相互作用,也为进一步探索物质更深层次结构找到了实验依据。