

玻色子和费米子

谢治成

在微观世界中，至少有几百种粒子已为我们所认识。这成百种粒子性质各异，有的质量大，有的质量小；有的带电，有的中性；有的稳定，有的寿命极短，……。另一方面，就某种物理性质而言，一些粒子有相同之处，据此，我们可以把粒子分类。例如，按照相互作用性质，粒子可分为强子、轻子和媒介子。如果按照粒子的自旋量子数来分类，那么成百种粒子就归结为两大类。一类是自旋量子数为整数的，即 $s = 0, 1, 2, \dots$ ，叫做玻色子。另一类是自旋量子数为半整数的，即 $s = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$ ，叫做费米子。不论粒子的其它性质如何复杂，其自旋量子数不是整数就是半整数，至今还未发现一种粒子可能具有别的

类型的自旋量子数，因此，一种粒子不是属于玻色子就是属于费米子。例如，光子， π 介子等属于玻色子，电子、质子、中子等属于费米子。把粒子分为玻色子和费米子，有什么物理意义呢？让我们

从泡利不相容原理说起

二十世纪初，一批年轻的近代物理先驱者们从对原子光谱及其它现象的研究中开始建立量子力学。一九二五年，泡利发现一个适合于所有原子光谱的简单的经验规则，他指出假如每个电子具有四种固有量子数，而在原子态中任两个电子的这四种量子数不能完全相同，就可以很好地描述已知的光谱线现象。也就是说，在原子态中如果一个电子具有一组确定的量子数，其它电子就不可能具有与前者完全相同的一组量子数，至少必须有一个量子数与之不相同。这个规则就叫泡利不相容原理。同年，乌伦贝克等尝试用这个原理对原子谱线作理论分析，得到了电子必须是自旋量子数为 $\frac{1}{2}$ 的推论，这样，泡利猜测的四种量子数就应解释为电子的总自旋及其分量。

在量子力学中，一个粒子体系的状态是用波函数来描述的，泡利不相容原理这一经验规律导致了对量子力学理论的要求，即描述一个体系状态的波函数必须是对所有电子反对称的。设想一个原子中如有两个电子处在完全相同的量子态，那么从物理上看，把这两个电子交换一下，不会改变体系的状态，但是如果波函数对电子是反对称的，一旦两个电子交换，波函数的绝对值虽然不变，却要改变符号，也就是说这个波函数

变为原来波函数的负值。而根据物理要求，前后两个波函数必须相等，因此这个波函数必须为零，这表明这种物理状态不存在。

如果把泡利原理对波函数的反对称要求用于自由电子体系，就等价于费米提出的经实验证实了金属电子气理论。费米理论的基础是一种以他的名字命名的

全同粒子体系统计性质

我们称质量、电荷、自旋等固有性质完全相同的微观粒子为全同粒子，所有的电子是全同粒子，所有的光子也是全同粒子。

如有相当数量的全同粒子组成一个体系，当该体系达统计平衡时，粒子以一定的形式分布于各种可能的运动状态上，分布的规律由粒子的统计性质决定。

一九二四年，在对光子体系的研究基础上，玻色和爱因斯坦首先提出了全同粒子体系波函数的一种统计性质，因为对全同粒子来说，一个体系中某一粒子被另一粒子所替代，物理状态不会改变。另外，把体系中两个粒子互相交换二次，这个体系当然不改变，波函数也不应改变，因此第一次交换以后的波函数，最多只能与原来的相差一个负号，如果交换后的粒子体系波函数与原来波函数大小、符号都相同，就称波函数对粒子交换对称，这种波函数中如有两个全同粒子处于完全相同的状态，那么当这两个粒子交换一下后体系状态是不变的，波函数的对称性也确实保证状态不改变，所以这种波函数所描述的体系中可能有两个以上的粒子处于同样状态，叫做服从玻色-爱因斯坦统计。

一九二六年，费米和狄拉克提出了另一种统计，如果一种全同粒子体系波函数对粒子交换是反对称的，这种体系中就不允许有两个以上的粒子处于完全相同的状态，叫做服从费米-狄拉克统计。由于电子服从这种统计，自然就得到泡利原理。

一九四〇年，泡利全面研究了量子力学中对运动方程的物理要求，提出了粒子的。

自旋与统计关系的理论

泡利从相对论原理出发，为了解决半整数自旋粒子的负能问题，并要保证整数自旋粒子波函数的物理意义，提出：半整数自旋粒子服从费米统计，而整数自旋粒子服从玻色统计。后来的事实证明，所有的粒子都满足这个分类条件。

泡利提出的这种自旋与统计的关系在证明粒子体系的对称性中也有重要作用。物理系统的运动规律如果与观测参考系无关，这个系统的作用量就应在洛伦兹变换下不变的。在量子场论中，洛伦兹不变性和自旋与统计关系导致了 CPT 定理。这个定理的物理意义是：如果把粒子体系作镜象对称变换，同时把粒

子变为反粒子及时间反转,也就是过去变为将来,那么变换后的体系的运动规律与变换前一样.也就是说在空间反射、时间反演和电荷共轭联合变换下体系的作用量不变.这是粒子物理理论中的一个十分重要的定理,到目前为止,实验结果都是遵从这个定理的.

然而,在建立强子结构的夸克模型过程中,泡利的理论经历过一次考验.一九六四年前后提出的夸克模型中,重子由三个自旋为 $1/2$ 的夸克组成,但是要用三个这样的夸克组成具有实验所观测到量子数的重子,其波函数必须对夸克交换全对称,这样,就出现了与泡利理论相抵触的情况:属于费米子类的夸克似乎应当服从玻色统计.当时人们不能断定是泡利的条件在新的层次出现了例外,还是夸克模型不正确,曾做了各种尝试.但很快就有人提出了夸克有“颜色”量子数的假设,而夸克组成的重子是不带“颜色”的.在这个假设下,重子波函数是全反对称而不是全对称的,这样,夸克就服从费米统计.现在实验已证实了夸克有“颜色”量子数,也表明了泡利理论对夸克仍然是适用的.

随着粒子物理的发展,围绕着玻色子和费米子也出现了.

新的研究课题

按照目前的理论,粒子之间的电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用都是通过规范场进行的,规范场

的量子叫媒介子,电磁相互作用的媒介子是光子、弱相互作用的媒介子是 w^\pm 、 z^0 , 强作用的媒介子是胶子.我们发现,在规范场理论中物质场的粒子(轻子和夸克)都是费米子,而传递它们之间相互作用的规范粒子都是玻色子.有人描绘了这么一幅图象:费米子是构成世界上各种物质的“砖块”,而玻色子是在它们之间起“粘合”作用的“水泥”.但我们知道物质结构的层次是无穷的,这个图象是物质结构的最终模式吗?如果费米子的轻子、夸克和玻色子的光子、 w^\pm 、 z^0 及胶子有结构,下一层次的图象将是什么呢?这是值得探讨的一个问题.

目前,粒子理论界正在热烈讨论玻色子和费米子之间的对称性问题,这种对称性被称为超对称.如果超对称理论是正确的,那么每一种玻色子必有一个费米子“伴侣”,反之,每一种费米子也有一个玻色子“伴侣”.由于每对“伴侣”的存在,这种超对称粒子的场论中天然不存在无穷大项发散困难,而无穷大项是量子场理论中常常令人困惑的问题.超对称理论的另一个优点是有可能把引力相互作用与其它三种作用统一于一个理论中,这正是人们十分向往的前景.当然,超对称理论还在摸索之中,许多理论和实验上的问题都有待解决,特别是它缺少新的物理思想,目前还不能得到一个实际可用的物理模型.但无论如何,玻色子和费米子的对称性是一个有兴趣的新课题.