



谈谈几个粒子的预言过程

张印杰 赵树民

阿·热在他的《可怕的对称》一书中说道：“预测到存在一个具有某些特性的基本粒子，是理性头脑的一种最高行动，狄拉克和泡利做到了这一点，几年后，汤川秀树也做到了这一点。”他在这里指的是狄拉克预言了正电子、泡利预言了中微子以及汤川秀树预言了介子。下面就简短叙述这几个粒子的预言及其发现过程。我们将发现，作出预言需要高超的智慧、非凡的勇气和正确的判断，而实现预言的过程也不会一帆风顺。

一、正电子的预言与发现

1905年，爱因斯坦发表了著名论文《论动体的电动力学》，创立了狭义相对论。1925~1926年间，海森伯、薛定谔、玻恩、泡利等人发表的一系列论文确立了量子力学的非相对论形式。于是，在几十年内就确立了现代物理学的两大理论支柱——相对论和量子力学的形式体系。起初确立起来的量子力学形式是非相对论性质的，其方程的时间坐标和空间坐标地位明显不同，而狭义相对论要求时间坐标和空间坐标处于同等地位，这就要求人们把非相对论量子力学相对论化。在相对论化的道路上迈出的第一步是克莱因-戈登方程。1927年在索尔维会议上，玻尔问狄拉克：“你现在在忙些什么呢？”狄拉克说：“我正在尝试得到一种电子的相对论理论。”玻尔说：“但是克莱因已经解决了那个问题。”狄拉克不同意，因为克莱因-戈登方程在解释上存在一个困难，即由该方程得到的负的几率与量子力学的正几率要求是相悖的。

1928年，为了避免克莱因-戈登方程遇到的“负几率”困难，狄拉克提出一个波函数对时间坐标和空间坐标都是一次导数的方程——狄拉克方程。方程中时间坐标和空间坐标的地位相同，并且不存在负几率的困难。于是在确信方程必须满足量子力学正几率要求的前提下，20世纪物理学最高成就之一的相对论电子波动方程诞生了。引导狄拉克达到目的是有关泡利自旋矩阵的一个漂亮的数学结

果，狄拉克因为这个漂亮的数学结果非常激动，他说：“看起来它必定有些重要的东西。”泡利自旋矩阵是一个二行二列的矩阵，在对其观察和思考一段时间之后，狄拉克“突然意识到不需要把矩阵固定在刚好二行二列上，为什么不想到四行四列呢？”经过这种思考，狄拉克得到了以他名字命名的方程。因此，狄拉克方程很自然地包含了电子的自旋，换句话说，电子的自旋和内禀磁矩是方程的必然结果。很快人们就得到了狄拉克理论中精细结构的精确处理方法，方程取得巨大的成功。并且很快引起了数学家的兴趣，因为狄拉克方程的解代表一种新的数学上的量——旋量，这样狄拉克方程有了数学基础。

但在成功背后，狄拉克方程也存在着问题。克莱因-戈登方程除了负几率的困难之外，还存在负能量的困难，这在狄拉克方程中也依然存在。狄拉克方程给出的状态是所要求的两倍那么多。海森伯后来回忆说：“那时候我一直有这个印象，在量子理论中我们回到了港口，回到了码头。狄拉克的论文又把我们再次扔进海里。”从这句话里我们可以体会到这个问题是多么重要。于是，狄拉克开始寻求方程的解释。他最初的文章也包含了对这个效应的思考，“负能解可能与所带电荷与电子电荷相反的粒子相联系”。经过几年的研究，狄拉克得出结论：负能量是存在的，真空是所有负能态都被填满的状态，即电子海。由泡利不相容原理，在真空中运动的正能态的电子便不允许跃迁到负能态上去。如果一个电子从电子海中被移走，它将在原来的分布中留下一个空穴，对实验物理学家来说，这是一种新的未知粒子，它具有与电子相同的质量和与其相反的电荷。狄拉克最初称它为反电子。

很快地，安德森于1932年就在宇宙线中发现了一个“正电荷的粒子，其质量与电子的质量差不多”，并将该粒子命名为正电子。这样，第一个反物质粒子——反电子（也就是正电子）就被发现了。安德森发现正电子给了人们一个重要的启示：既然电子存在反粒子，那么其他粒子是否也各有其反粒子呢？答案是肯定的。1955年，西格雷和张伯伦发现了反质子；1995年，欧洲核子研究中心的科学家在世界

上制成了第一批反物质——反氢原子。

二、原子核 衰变与中微子

1909年,卢瑟福的学生盖革和马其顿在 粒子 穿射重金属箔的散射实验中发现了 粒子的大角度 散射。1911年,卢瑟福提出了原子结构的核式模型。量子论的提出解决了核式结构的稳定性问题,于是原子结构被认识清楚:原子是由居于其中心的很小但却占有绝大部分质量的核和一些核外电子组成的。此外卢瑟福还发现,放射性现象中的 粒子和 粒子都来自原子核。随后,核电荷(质子)数 Z 被引入核物理,人们认识到原子核包含着质子并且在衰变中有电子从原子核中发射出来。根据这个事实,人们很自然地构造了一个原子核的“显而易见”的模型,即原子核的质子-电子模型,也就是说,假定一个质量数为 A 、电荷数为 Z 的原子核由 A 个质子和 $A - Z$ 个电子组成。

随着实验的进一步发展,这个“显而易见”的核模型出现了许多难以解释的困难,像如何解释核的大小、核磁矩以及核自旋问题,特别是核统计问题。在量子力学建立后,人们认识到存在两种统计:玻色-爱因斯坦统计和费米-狄拉克统计。这两种统计都与自旋量子数相关,因此存在两种自旋量子数,它们分别是整数自旋($J = 0, 1, 2, 3 \dots$)和半奇数自旋($J = 1/2, 3/2, 5/2 \dots$)。这两种自旋量子数分别对应不同的统计:整数自旋的粒子服从玻色-爱因斯坦统计;半奇数自旋的粒子服从费米-狄拉克统计。自旋的叠加有以下规则:任意个整数自旋粒子的总自旋仍是整数,偶数个半奇数自旋粒子的总自旋也是整数,而奇数个半奇数自旋粒子的总自旋则是奇数。这样,任意个整数自旋的粒子或者偶数个半奇数自旋的粒子组成的系统服从玻色-爱因斯坦统计,而奇数个半奇数自旋的粒子组成的系统服从费米-狄拉克统计。然而,实验上测得的原子核 N^{14} 服从玻色-爱因斯坦统计,而根据原子核的质子-电子模型, N^{14} 由 14 个质子和 7 个电子组成,已知质子和电子的自旋都是 $1/2$,那么由 21 个自旋 $1/2$ 的粒子组成的 N^{14} 就应该服从费米-狄拉克统计,这与实验产生了矛盾。

与此同时,实验上确立了原子核 衰变的连续能谱,这又引起了混乱。按理,原子核 衰变是释放一个电子并产生另一个原子核的二体衰变过程,释放的电子也就是 射线应该具有单一的或者分立的

能谱,而实验上观察到的却是连续能谱。为了解决这一矛盾,泡利在 1930 年大胆提出可能存在一种中性粒子,它的质量很小,不大于质子质量的 1%,按照现在的名称,这个粒子叫作中微子。这样,原子核 衰变不仅放出电子,而且还要放出中微子,两体衰变变成了三体衰变,能谱就应该是连续的了。而原子核由质子、电子和中微子组成,又可以用加入中微子自旋的方式来解释 N^{14} 的统计问题。海森伯和玻尔不喜欢这个假定,希望通过核物理中的这些困难来放弃能量守恒定律以发现新的物理定律。实际上,泡利的理论也存在着固有困难:按照泡利的想法,电子和中微子是在 衰变过程中从原子核里发射出来的,因此它们必须束缚在核物质里,那么“是什么力作用在中微子上关系重大,因为如果没有这些力或者如果这些力太弱,中微子就不能停留在原子核里。”但这个问题迟迟得不到解决。

这时,实验上有了新进展,查德威克发现了中子并测得其自旋是 $1/2$ 。随后海森伯等提出,原子核是由质子和中子组成的。这样, N^{14} 的自旋统计矛盾就可以解释为: N^{14} 由 7 个质子和 7 个中子组成,14 个粒子的自旋均为 $1/2$,因此 N^{14} 应该服从玻色-爱因斯坦统计。但是,衰变连续能谱的问题仍然没有解决。利用量子力学,海森伯研究了由质子和中子组成的原子核,他假定“在适当的情况下中子能分解为一个质子和一个电子,这时能量和动量的守恒定律或许就不适用了。”泡利不相信能量不守恒的说法,并为自己的中微子理论进行了辩护,他说:“一个中子……能够分解,不过要以一种更加复杂的方式,例如分解成一个质子、一个电子和一个中微子。”然而,中子是怎么分解成质子、电子和中微子的呢?泡利对此却一无所知。

当费米了解到中微子的想法之后,做出了突破性的工作:他利用光子的产生和湮灭作类比,假定中子到质子的转变伴随着一个电子和一个中微子的产生,即电子和中微子在原子核中根本不存在,它们是在 衰变过程中产生的,就像光子是在原子发光时产生的一样。利用量子场论,费米建立了他的 衰变理论。自此,关于核的构成以及 衰变的机制才算比较清楚了,原子核由质子和中子组成,质子和中子都是自旋 $1/2$ 的粒子,原子核内没有电子和中微子,电子和中微子是在 衰变过程中产生的。

在中微子实验发现方面,我国物理学家王淦昌

做了重要工作,他于1942年首次在美国《物理评论》上发表了关于中微子探测的文章,提出原子核 ${}^7\text{Be}$ 从自己的K壳层俘获一个电子转变成 ${}^7\text{Li}$ 的同时会放出中微子,因此可以用探测核反冲的方法来探测中微子。美国物理学家艾伦按照这一思想进行实验,取得了预期结果。他谨慎地把实验结果表述为,如果有中微子存在的话,其质量不会大于电子质量的1%。1956年以前,关于中微子存在的证据都是通过观察参与衰变的其他粒子(电子和反冲核)间接得到的。虽然,实验结果与中微子假设一致,但在逻辑上不能完全令人信服。因为这不过是重复在衰变中能量和动量守恒而已。1956年,美国科学家莱因斯发现了中微子,并证明它与其他基本粒子一样是现实的粒子。莱因斯因此与佩尔分享了1995年的诺贝尔物理学奖。

三、核力与介子

在费米提出衰变理论之后,海森伯等认识到:像带电粒子之间交换虚光子可以产生电磁力一样,通过电子-中微子对的虚交换,在质子和中子之间也能够产生一种“交换力”。但进一步研究却发现,这个交换力相对于核力来说实在太小了。这时,汤川秀树了解到这些理论及其所面临的困难,他接受了“交换力”的想法,他说:“我被否定的结果所鼓舞,它打开了我的眼界,因此我想:别在已知的粒子中寻找属于核力的粒子……如果我把注意力集中在核力场的特征上,那么我所寻找的粒子的特征就会显露出来。”经过艰苦的思考之后,汤川秀树根据测不准关系得出:如果核力是由交换一个粒子引起的话,那么这个粒子的质量大约是电子质量的200倍。1934年10月汤川秀树在日本物理数学学会上介绍了这一理论,而且预言可在宇宙射线中找到这种粒子。汤川理论的成功之处在于首先把强核力与弱力分开处理,这与以前海森伯等的二费米子交换力不同;其次是合理估计了介子的质量,并注意到大质量粒子可能与宇宙射线产生的簇射有一定联系。

汤川理论提出后,并没有引起很大反响。他把论文寄给美国科学家奥本海默,没有得到任何回复。1937年玻尔访问日本,汤川秀树向玻尔介绍了他的介子理论,然而玻尔并不感兴趣,他问汤川:“你为什么要创造这样一个新粒子?”玻尔的态度使汤川和日本拥护介子理论的人感到沮丧。可是,玻尔还没回国,就传来了美国安德森等人在宇宙射线中发现一

种新粒子的消息,这种新粒子的质量恰好在汤川秀树预言的范围之内,这时奥本海默想起了两年前汤川秀树寄给他的文章,于是他发表论文指出这个新的粒子早在两年以前就被预言了。但是进一步的实验发现,把安德森等发现的粒子(现在称为 μ 子)看作是汤川秀树预言的粒子存在一些问题:它的平均寿命太长,且不参与强相互作用,因此它不应该被看作是汤川秀树预言的粒子。一直到1947年,英国物理学家鲍威尔在宇宙射线中发现了一个被他们称之为介子的新粒子,汤川秀树的预言才真正得到了实验验证。

综上所述,物理学中往往存在许多困难、冲突,甚至充满矛盾。为了解决这些困难,人们通过不断探索,逐渐拨开迷雾,找到正确方向。在寻找正确方向的过程中,相信什么和坚持什么往往是非常重要的。例如狄拉克相信量子力学关于正几率的要求;泡利相信能量守恒定律,在这一点上,玻尔和海森伯就选错了进攻的方向(然而值得注意的是玻尔和海森伯的想法似乎更具有革命性);汤川秀树相信核力是由交换某种粒子引起的。我们还可以看出实验对于物理理论的重要性,正是由于狄拉克方程与实验数据的精确符合,才使人们确信其正确性,最终导致了正电子的预言;正是由于核物理中实验与理论的许多矛盾,才导致泡利提出新粒子存在的可能性;正是实验上已经确立了强相互作用的许多特征,汤川秀树才得以根据这些强相互作用的特征预言了介子的质量。这反映了实验对理论的三种作用:如果理论与实验符合得很好,人们就会花费很多时间和精力来研究和发展这一理论;如果理论与实验发生矛盾,那么就意味着可能出现新的物理理论,包括修改旧的物理理论和提出新的物理内容;如果新理论的特征还没有完全显现出来,那么往往需要丰富实验内容来找出新理论的关键特征。

(保定市河北大学物理科学与技术学院 071002)

