

场是怎样传递相互作用的

——小张探望董老师的对话

舒恒杞

小张：董老师，今天来向您请教一些问题。在校时，我对近代物理不怎么重视，认为教中学用不了那么多。但在教学中，我联想到，任何两个电荷或两个磁极之间都要发生“同性相斥、异性相吸”的相互作用；任何两个物体、两个天体之间都有万有引力的相互作用。显然，超距作用观点是被批判了，我也向学生强调了这种电磁相互作用和引力相互作用必须经过媒介物的传递，并且指明了，前者是通过电磁场的作用，后者是通过引力场的作用。

董老师：这是对的。

小张：我理解场是物质，只是不同于由原子、分子组成的实体物质而已。正因为如此，我感到困惑的是：场是怎样传递这种相互作用的呢？

董老师：这个问题，你提得好！就拿电磁场来说，它的基本量子是光子，或叫光量子；两个电子或其它带电粒子之间传递电磁作用的过程就是交换光子的过程。也就是说，光子是电磁场的基本作用量子。

小张：那么，在交换过程中有能量交换吗？

董老师：有啊。频率为 ν 的光子具有 $h\nu=E$ 的能量，可见光子本身是能量的携带者，所以交换光子的过程中就伴随能量的迁移；不仅如此，还可从爱因斯坦质能关系式 $E=mc^2$ 知道，也有质量的迁移。对于电磁场来说，由于没有静止的光子存在，场也就不可能有能量、质量大量集中的表现。

小张：那么，电磁相互作用靠光量子传递，但万有引力相互作用又靠什么来传递呢？

董老师：万有引力存在于一切物体之间。也就是说，引力场存在于一切有质量的物质之间。引力的量子理论认为引力场的基本量子是“引力子”，引力作用过程是物体间交换引力子的过程。

小张：“引力子”没听说过，它有什么特性呢？

董老师：这是理论上推论中的引力场量子，常用 g 表示。这是假设中的。把爱因斯坦的引力场方程，在一定条件下进行量子化可以推出：如果这种粒子存在，将是零电荷和零静质量的，自旋为2，以光速 c 运动的玻色子。目前，引力子还没有在实验中被发现，但引力波的存在，有人已间接证实，从而为证实引力子存在提供了基础。

小张：这样说来，引力子和光量子的作用对象不同喽？

董老师：是的，这两种作用分别与具有某种属性的物质作用。与电磁作用有关的物质属性是电荷，电磁场只能在带电体间有作用，实质上，光子就只能在带电体间被交换。而与引力作用有关的物质属性是质量，引力子在有质量的物体间被交换。

小张：那它们的作用范围可以比较吗？

董老师：这两种相互作用的范围都是无限远的，因此说这两种力是长程力。

小张：董老师，由以上的解说，是否可以得出这样一个结论：凡是相互作用都是通过交换某种“媒介子”进行的了？

董老师：对了，就所谓“基本”粒子来说，具有令人惊异的多样性，但它们之间的相互作用，只限于四种。

小张：就是引力相互作用、电磁相互作用、加上原子核场即核子间的相互作用和强相互作用、对吧？

董老师：不完全对。引力作用、电磁作用不错，不过核力是属于强相互作用。另一种相互作用是弱相互作用力。

小张：啊，组成原子核的质子和中子都称核子，任何两个核子之间都要发生相互作用，这在核内，表现为核力。这种相互作用也必然经过中间媒质的传递。记得书上这样说，日本物理学家汤川秀树提出的核力介子论，认为传递强相互作用的过程就是两个核子交换介子的过程，是这样的吧？

董老师：过去汤川秀树的理论是这么认为的。直至六十年代研究核子之间的强相互作用时主要是采用汤川的理论。例如中子放出一个 π^- 介子变为质子；质子吸收一个 π^- 变为中子；至于中子和中子、质子和质子之间是靠交换中性 π^0 介子。

小张：记得过去学过，交换带电的介子和不带电的介子对核力有不同的贡献。

董老师：是的，在用汤川理论讨论核子之间的强作用时把交换带电介子引起的核力叫交换力，因为两个核子经相互作用交换了电荷。交换不带电(中性)介子引起的核力叫非交换力。近廿年来，对强相互作用作深一层研究后已认识到：核子和介子都是强子，它们都由夸克(国内也叫层子)组成。强相互作用本质上是夸克之间的相互作用，强子的强相互作用应归结为强子内部的夸克之间的这种作用。所以，传递强相互作用的

不是由夸克组成的介子,而是强相互作用场的量子,叫做“胶子”。强相互作用过程就是夸克与夸克之间交换胶子的过程。1979年报纸上报导过,丁肇中领导的一个国际物理学家小组发现了“三喷注”现象,这个现象证实了胶子的存在。

小张:“三喷注”的发现怎么和“胶子”的存在联系起来呢?

董老师:在正电子-电子对撞过程中,当达到一定能量时,正负电子对湮灭将产生一对正反夸克,夸克对又立即衰变为一些强子,这些强子基本上沿着夸克(或反夸克)运动方向出射,形似两个喷注。如果能量足够高,电子湮灭后,不但产生正反夸克对,还同时产生一个胶子,胶子也衰变为一些强子,形成两个夸克喷注和一个胶子喷注即“三喷注”。所以,有三喷注产生就预示着有胶子的产生。这是胶子存在的一个证据。

张:有无直接发现单独的自由胶子呢?

董老师:目前,在实验上还没有找到。不过在1983年美国有发现胶子球(即由几个胶子结成的集团)的报导。

小张:看来胶子是基本粒子大家庭里不可缺少的小兄弟喽!

董老师:可以这么看。由于胶子的发现,中子、质子或其它强子是由夸克构成的理论得到了有力支持。

小张:董老师,最新的高能实验有无发现自由的夸克呢?

董老师:也没有。夸克尽管已发现了五种,第六种(顶)夸克在实验上露出迹象,但单独存在的自由夸克一直没发现。至于它为什么不能被发现,可能它的质量太大,现有的高能加速器还没具备足以把它打出的能量;也有几种理论,如“弦模型”和“口袋模型”,形象地解释夸克被“囚禁”在强子中的现象。例如,“袋模型”是说夸克关闭在一个口袋或球泡里,袋内夸克的运动使袋膨胀到一定体积,袋外部又受到真空对它的压力。一般情况下袋的缩或胀达到平衡,这便是平常所见的强子。因为袋胀,需要能量,袋胀大到破裂程度必须有无穷大的能量。既然如此,无论如何也无法使袋胀破而把夸克解放出来,因此,夸克永远被幽禁起来了。

小张:那等于说,至今实验上仍未发现自由存在的夸克或胶子。

董老师:是这样的。到目前为止,关于强相互作用的研究还是初步的,要弄清其性质,还要走很长的路。

小张:我还有另一个问题。你前面已谈了三种相互作用,还有一个弱相互作用是怎么回事?它是通过交换什么来实现的呢?

董老师:粒子之间的相互作用的强度有强弱之分,表现在相互作用过程发生的几率有好几个数量级的差别,因而通过强弱不同的相互作用衰变的粒子平均寿命长短也会差好几个数量级。一般由弱相互作用衰变粒子的平均寿命为 10^{-10} 秒量级,而强作用衰变粒子

的平均寿命只有 10^{-23} 秒量级。弱相互作用中被交换的粒子称为“中间玻色子”(所谓“玻色子”就是遵守玻色-爱因斯坦统计律的粒子)例如,电子和中微子之间的弱相互作用,可通过交换中间玻色子 Z^0 实现;中子的 β 衰变通过放出带电的中间玻色子来实现的:中子中的d夸克放出中间玻色子 W^- 变成u夸克,因而中子变成质子, W^- 又变为电子(e^-)和反中微子($\bar{\nu}_e$)。

小张:中间玻色子还有带电和不带电之分?

董老师:有, Z^0 不带电,而 W^- 、 W^+ 是带电的。

小张:但我怀疑,这个中间玻色子是不是仅为理论物理学家手中的推测?

董老师:不能这么说。以前,中间玻色子只是由温伯格、萨拉姆他们提出弱相互作用和电磁相互作用统一理论的一个假定,而且是一个非常成功的假定。直到1982年设在瑞士的欧洲核子研究中心的质子-反质子对撞机运转(质心系能量540GeV),UAI和UAII两个实验组的物理学家经过几个月的实验寻找,已于1983年1月和6月分别找到 W^\pm 和 Z^0 了。

小张:这有什么重大意义呢?

董老师:那当然!可与十九世纪末在电磁学理论的验证相比拟。因为中间玻色子的发现,使格拉肖-温伯格-萨拉姆弱电统一理论得到完满的实验支持。所以,朔佩尔在宣布这一发现时说,这是25年前发明晶体管以来“在物理上最重要的发现。”这也是人们探索物质奥秘的重要里程碑。

小张:今天收获不小,谢谢老师的教诲。