



## ——弱相互作用的故事

柯 之

### 相互作用是通过 $\pi$ 介子 ……传递的吗？

吕：今天我们来讲弱相互作用的故事。

玲：叔叔，你说弱相互作用还有一些原则性的问题没有弄清。可是，前几次不是讲了弱相互作用的很多古怪有趣的性质吗？还有什么没有弄清呢？

吕：比方说，电磁相互作用的机制已经弄清楚，两个带电粒子不会直接发生相互作用，而是必须以电磁场作为媒介。但弱相互作用就不那么清楚。这些年来，人们在这方面做了一些有意义的探索。

玲：大概又有一些曲曲折折的故事了吧？

吕：对了，让我按事情发生的先后来讲。开始，人们曾经以为弱相互作用和强相互作用都是由同一种介子场传递的，就好比电磁作用是光子场(电磁场)传递的一样。

玲：叔叔，我先问一下，“传递”弱相互作用是什么意思？两个电子或两个核子发生相互作用，它们相互之间可以传递个什么东西？可是中子的衰变， $\mu$  子的衰变这种弱作用衰变，到底是谁传递给谁呀？

吕：画一下图就好懂了。首先，我们画两条带箭头的线，代表两个运动着的电子。以前我们讲过，带电粒子和周围的电磁场是要发生相互作用的(电磁相互作用)，即使和真空的电磁场(没有光子的电磁场)也是会发生相互作用的(见对话⑤)。带电粒子和周围电磁场发生相互作用的具体形式就是放出光子和吸收光子。现在画在图上的两个电子当然也要放出光子和吸收光子。譬如说，第一个电子放出光子，被第二个电子所吸收，或第二个电子放出光子，被第一个电子所吸收。这样，光子就可以把第一个电子的一部分能量和动量传递给第二个

电子，或者把第二个电子的一部分能量和动量传递给第一个电子。通过这样的传递，两个电子交换了能量和动量，各自改变了运动的方向和速度，就好像两个弹球发生了碰撞一样。但是这两个电子并不是直接相碰，而是通过交换光子来传递相互作用。因此，在两条带箭头的线当中画一条波纹线，代表传递电磁相互作用的光子。

玲：看了这个图使我想起来有一次我跟着哥哥去钓鱼。我调皮，拿一根木棍去搅水，激起了水波，水波使得浮标一晃一晃的，鱼也赶跑了。是不是也可以说，木棍和浮标发生了相互作用，而水波是这个作用的传递者？

吕：在传递作用的形式上确是很类似，但也有些不同之处，例如水波不是量子化的，不象

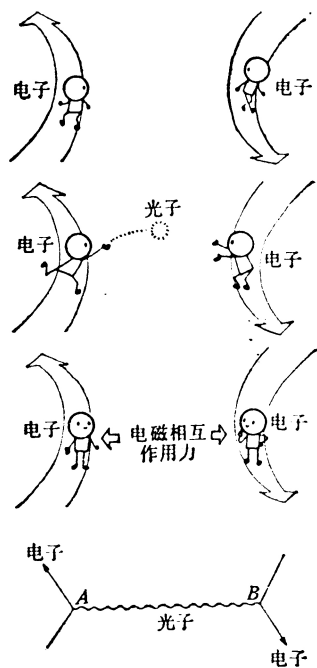


图 1

光子场。小玲，你想到吗？引力也不是直接相互作用，它是靠引力场来传递的，例如太阳对

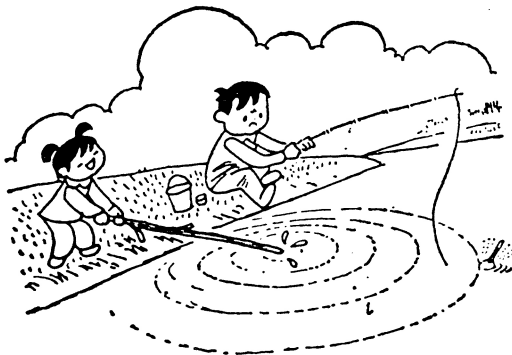


图2 木棍激起水波,水波使浮标起伏运动

地球的吸引,就是靠引力场传递的。

玲: 图上的 A 点和 B 点什么意思呢?

吕: 第一个电子放出或吸收光子的时间地点我们把它写作 A 点,第二个电子吸收或放出光子的时间地点我们把它写作 B 点。

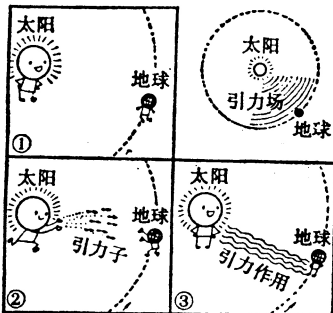


图3 太阳对地球的引力是靠引力场传递的

玲: 哦,不错,两个带电粒子交换一个光子,必定既有放出光子的时间地点,又有吸收光子的时间地点。

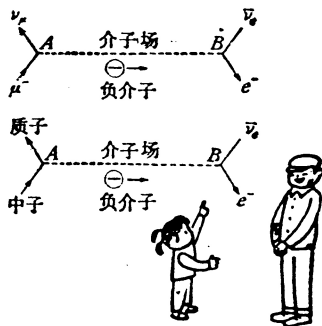


图4 介子场传递弱作用示意

吕: 我们再看图4,图4和图1非常类似,只是当中的波纹线改成虚线,它代表传递弱相互作用的介子。也有A、B两点,A点代表 $\mu^-$ 子(或中子)放出一个介子的时间地点,放出这个介子后, $\mu^-$ 子(或中子)就

变成 $\nu_\mu$ (或质子),放出的这个介子又在B所代表的时间地点变成电子和 $\bar{\nu}_e$ (电子型反中微子)。从这个图里你可以看到, $\mu^-$ (或中子)的衰变就是通过负介子从A到B的传递来实现的。这个过程也可以通过从B到A传递正介子来实现。

玲: B点原先什么粒子都没有啊,怎么会发出正介子呢?

吕: 我们以前说过,没有自由粒子的真空的场也是物质的(见对话⑥),也是能起作用的。真空的介子场、真空的电子场和真空的中微子场在相互作用下可以不断地有真空起伏,即不断地有正介子和 $e^-$ 、 $\bar{\nu}_e$ 产生,又不断地消灭。如果旁边没有 $\mu^-$ (或中子),产生的正介子和 $e^-$ 、 $\bar{\nu}_e$ 很快就会消灭,是探测不到的。但是如果旁边有一个 $\mu^-$ (或中子),情况就不一样了,因为它可以吸收正介子,变成 $\nu_\mu$ (或质子),这样一来, $e^-$ 和 $\bar{\nu}_e$ 就不可能再和正介子一起消灭,就可以成为自由粒子,并且可以探测到了。

玲: 原来弱相互作用的传递是这个意思。叔叔,我记起来你在“基本”粒子大家庭的故事里曾经讲过,当初想寻找一种传递强相互作用的介子,找了好久找到了 $\mu$ 子,但是找错了,因为发

现 $\mu$ 子不参与强相互作用。

吕: 是的,先还以为 $\mu$ 子就是既能传递强相互作用,又能传递弱相互作用的一种介子。但是后来发现 $\mu$ 子更象是一种重的电子,它不参与强相互作用,也不是弱相互作用的传递者。以后,在科学实验中又发现了 $\pi$ 介子,证实了 $\mu$ 子是 $\pi^\pm$ 介子的弱作用衰变产物,又证实了 $\pi^\pm$ 介子是在高能碰撞下通过强相互作用产生的,所以它们确实是既参与强相互作用,又参与弱相互作用的介子。

玲: 这么看来, $\pi^\pm$ 介子大概是既传递强相互作用,又传递弱相互作用的传递者了。是吗?

吕: 不是,原先有人这样猜想,但后来发现这个猜想不能解释原子核 $\beta$ 衰变的一些实验事实。后来,又发现了K介子、 $\rho$ 介子、……等等。

玲: 它们是弱相互作用的传递者吗?

吕: 也不是,因为也通不过实践的检验。

玲: 照这样说,强相互作用和弱相互作用都由同一种介子场传递的图象就被实验事实否定了?

吕: 对了。

### “虚”粒子不虚

玲: 刚才讲的图我还有点不懂。图上 $\mu^-$ 走到A处就消失了,却转化成中微子和比 $\mu$ 重的介子(例如 $\pi^-$ 介子),轻的东西怎么转化成为重的东西呢?质量不是不守恒了吗?这可是一个严重的问题呀!

吕: 不错,质量要守恒,所以 $\mu^-$ 不可能衰变成带负电的介子(例如 $\pi^-$ )和 $\nu_\mu$ 。但是在图4里面,虚线所代表的东西,与其说它是一个粒子,倒不如说它是介子场中激起的带电的并带有相应的量子数的一种“扰动”,一般把它叫做“虚”粒子,对介子场来说就是“虚”介子。“虚”介

子和“实”介子的质量不一样， $\mu^-$ 转化为一个“虚”介子和一个 $\nu_\mu$ 中微子是并不违背质量守恒的，反之，“虚”介子不但可以传递能量、动量、电荷……，而且还能保证能量、动量、电荷……都守恒。

玲：电子—电子相互作用时，传递的也是“虚”光子吗？

吕：是的。“虚”光子的“静止质量”和“实”光子不一样。“虚”光子实际上也是在电磁场中激起的



图5 “虚”光子一种“扰动”。

玲：噢，原来都是些“虚”的粒子在传递相互作用呀！可是，在反映客观世界的物理图象里，怎么能允许有不实在的“虚”的东西呢？

吕：小玲，你放心，虽然名称是“虚”粒子，其实它是实在的东西，“虚”粒子不虚。因为第一，“虚”粒子是传递相互作用的量子化的场中激起的“扰动”，量子化的场是物质的，是实在的东西，

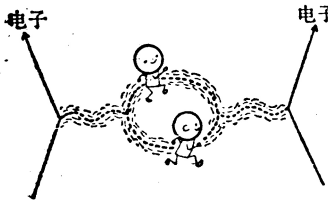


图6 “虚”的正负电子

它的“扰动”也是实在的东西。第二，这种“扰动”，不但可以传递能量、动量、电荷……等等，而且可以保证能量守恒，动量守恒，电荷守恒……。在这里，能量、动量、电荷都是实在的东西，作为这些实在的东西的携带者和传递者的“虚”粒子，自然也不可能是不实在的东西。

还有第三，以前讲过真空的作用，那也是通过“虚”粒子来实现的。既然真空的作用是实在的，那末，实现真空的作用的“虚”粒子又怎么能不是实在的东西呢？科学上有些名词起得并不科学，“虚”粒子这个名词也是一个例子。

玲：原来是这么回事，怪不得说“虚”粒子不虚！好啊，以前讲过“真空”不空，现在又是“虚”粒子不“虚”，唯心主义者和形而上学者在这里可捞不到什么稻草！

吕：就是啊，所以“虚”粒子问题没有什么严重。事实上前面讲的那些传递相互作用的粒子（如光子、介子），都是不虚的“虚”粒子。

玲：这么说，眼前的问题还是科学实验的实践否定了强相互作用和弱相互作用都由同一种介子来传递的物理图象，那么，用什么图象来代替它呢？

### 直接相互作用——不要传递者

吕：代替的图象之一就是直接相互作用——不要传递者。可是现在知道的相互作用有四种，除弱相互作用外，另外三种相互作用都是有传递者的，它们是引力作用——传递者是引力场、电磁作用——传递者是光子场、强相互作用——传递者是介子场（或以后要讲到的胶子场）。

玲：为什么直接相互作用就不要传递者，不是直接相互作用就需要传递者？

吕：直接相互作用不要传递者是很清楚的，因为有了传递者，就不是直接相互作用了，是不是？至于不是直接相互作用为什么需要有传递者，这有一个认识过程。在古时候，人们曾经以为引力是不需要传递者的，譬如说，地球可以不需要传递者而直接感觉到太阳的引力。

玲：怎么样直接感觉呢？我们感觉到太阳能够发光发热，是因为有太阳发出的光线把光和热传递到地球上来的。如果没有阳光，我们恐怕连有没有太阳都不知道呢？

吕：同样的道理，如果引力没有传递者，地球为什么隔着这么遥远的距离而能够感觉到某个地方有个太阳在吸引它呢？这不是一种很神秘不可解的感觉吗？

玲：对了，是有点神秘。

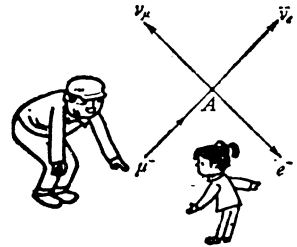


图7 直接相互作用图象。 $\mu^-$ 的衰变

吕：后来，人们研究了电磁场，发现电磁场是电磁相互作用的传递者。转回来再研究引力和引力场，就发现引力作用也有传递者，就是引力场。广义相对论就是研究引力场的一种理论。

玲：原来是这样，怪不得只有直接相互作用才是不需要传递者的。可是怎么样直接作用呢？

吕：我们可以举一个例子。图7表示 $\mu^-$ 的直接相互作用衰变。 $\mu^-$ 有 $\mu$ 子场，衰变产物有电子， $\mu$ 型中微子和 $e$ 型反中微子，它们各自有电子场， $\mu$ 型中微子场和 $e$ 型中微子场。直接相互作用就是 $\mu$ 子场和电子场， $\mu$ 型中微子场、 $e$ 型中微子场直接在某一个时间地点发生相互作用，使得 $\mu^-$ 转变成电子， $\mu$ 型中微子和 $e$ 型反中微子。发生相互作用的时间地点我们在图上用A点来代表。

玲：哦，直接相互作用就是几个场在同一个时间地点A发生相互作用。

吕：对了，你再和刚才有传递者的

图比较一下,就可以看到,要完成一个传递的过程,总是要有两个时间地点(A和B),简称两个点,其中一个点是放出传递者,一个点是吸收传递者.直接相互作用就不是这样,只要一个作用点(时间地点)就可以完成一次相互作用.

玲:还能举两个例子吗?

吕:行,再举两个例子,图8就代表

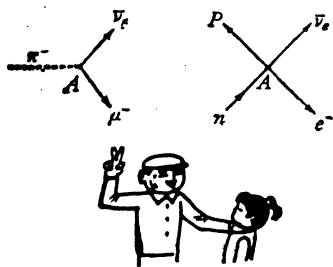


图8 直接相互作用图象的  $\pi^-$  衰变和中子的衰变

$\pi^-$  的直接相互作用衰变和中子的直接相互作用衰变.在  $\pi^-$  的直接相互作用衰变中,  $\pi$  介子场和  $\mu$  子场、 $\mu$  型中微子场直接在一个时间地点A发生相互作用;在中子的直接相互作用衰变中,是中子场和质子场、电子场、 $e^-$  型中微子场直接在一个时间地点A发生相互作用.小玲,你看到图上的A点了吧?

电子和中微子碰撞截面

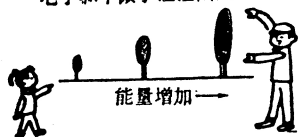


图9 电子、中微子碰撞截面随能量的平方而上升

玲:看到了.直接相互作用的图象能够通得过实践的检验吧.

吕:直接相互作用的图象可以在一定程度上较好地解释  $\mu^\pm$  的衰变,  $\pi^\pm$  的衰变,以及中子和各种原子核的  $\beta$  衰变现象.

玲:这不是很好吗?

吕:但是这个直接相互作用的图象也有严重的缺点.

### 不要传递者的图象也有严重缺点

玲:什么严重缺点?

吕:第一个严重缺点:它会导致矛盾的结果.譬如说,一个高能电子  $e^-$  和一个高能的中微子  $\nu_e$  迎面相遇,按照直接相互作用理论来计算,发生碰撞的机会,也就是碰撞截面的大小(见对话④),是随着能量的平方而增加的.粒子能量高十倍,碰撞机会就增加一百倍,也就是碰撞截面增加一百倍……等等.

玲:嗨!如果弱相互作用真的是直接相互作用,那末,能量增加到一定程度以后,准会超过强相互作用,这不就变成超强相互作用了!

吕:可是另一方面,假定没有传递

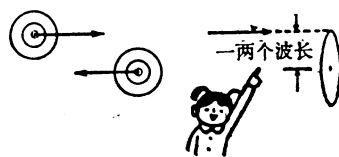


图10 能量越高,波长越短,没有传递者,电子和中微子越不容易发生相互作用

者,那么,直观地来看,电子和中微子  $\nu_e$  迎面相遇时,它们之间靠得最近时的距离必须小于一两个波长才能发生相互作用(也就是发生碰撞).小玲,你说,碰撞截面的半径应该有多大?

玲:如果说,迎面相遇时,必须靠近到一两个波长的距离以内才能发生相互作用(发生碰撞),碰撞截面的半径大致也只能是一两个波长,对吧?

吕:不错.由此可见,随着粒子能量的增加,波长越来越短,碰撞截面的半径也会随着波长越来越小.

玲:嗨,这不是相互矛盾了么?刚才还说碰撞截面随着粒子能量的平方而上升,现在碰撞截面怎么又随着粒子能量的上升而

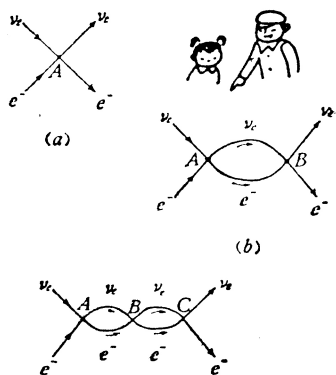


图11  $\nu_e$  与  $e^-$  碰撞(a)一次相互作用,(b)二次相互作用,(c)三次相互作用越来越小了呢?

吕:这就是刚才说的第一个严重缺点:它导致矛盾的结果.

玲:第二个严重缺点呢?

吕:直接相互作用理论只能计算一次相互作用,可是事实上还有二次相互作用.

玲:什么叫二次相互作用?

吕:你看图11(b),  $e^-$  和  $\nu_e$  相互作用一次以后,再相互作用一次,就叫二次相互作用. A 点代表第一次相互作用的时间地点, B 点代表第二次相互作用的时间地点.

玲:还有三次相互作用吗?

吕:有,而且还有高次相互作用.

玲:怎么样呢?

吕:问题在于计算二次和二次以上的相互作用时,必定要出现无穷大的碰撞截面.就是说,粒

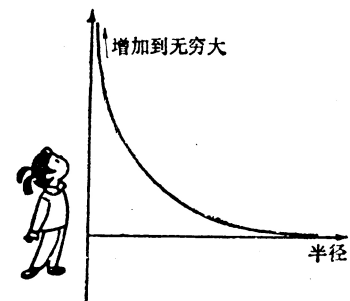


图12 经典电动力学:一个带电的球周围的电磁场能量随球的半径减小而增加.半径减到零(点粒子),电磁场能量就增加到无穷大

子与粒子发生碰撞后,前进方

向偏转一定角度的几率（可能性）为无穷大。

玲：这又是什么意思呢？

吕：比方说，你用一个弹球去打另一个弹球，如果你技术很高，你一定是百发百中，这就是打中的几率是100%。要是有人用一个理论算出来你每打一百次，可以打中一百次以上，或者说每打一次都可以打中两次，打中的几率超过100%，你一定会说这是不可能的。现在，对于粒子与粒子的碰撞也是一样，各种几率都不能超过100%。如果有一个理论计算出来某个碰撞的几率是无穷大，那就说明了这个理论不可靠。

玲：为什么理论计算会出现无穷大？

吕：在没有量子力学以前，人们在研究电子周围的电磁场的能量时，就遇到过无穷大。譬如说，一个带电球体周围的电磁场的能量，应该和球体的半径成反比：半径越小，能量越大，半径无限减小，能量就无限增大，半径等于零，能量就是无穷大。

玲：电子的半径是零吗？

吕：如果电子的半径是零，那它就是一个点粒子，就是没有内部结构的。但是电子也可以一分为二，它怎么会是没有内部结构的点粒子呢？所以如果由于假定电子是点粒子而计算出无穷大来，这无穷大的数值就是虚假的。

玲：二次相互作用的无穷大也有类似的情况吧？

吕：对了，二次相互作用出现无穷大也是因为假定了粒子为点粒子。如果真正要解决这些无穷大，就必须考虑粒子的内部结构。但在目前我们对电子的内部结构还一无所知。

玲：那怎么办呢？

吕：量子电动力学里有一种办法就是通过重新定义带电粒子的质

量和电荷，来把无穷大去掉，这叫做“重整化”。“重整化”的办法也并没有具体考虑电子的内部结构，但它在能量不太高时是很好的，因为能量不太高时，粒子波长较长，电子的内部结构不会显示出来。可是，如果粒子能量很高，波长很短，不能忽略电子的内部结构，“重整化”方法就不会令人满意了。不过目前的高能实验还远远没有达到这样高的能量。

玲：在能量不太高时，“重整化”的方法好到什么程度呢？

吕：我们可以举电子的磁矩为例。用“重整化”的办法计算了高次的电磁相互作用之后，可以求得电子磁矩的理论值是：

$$1.0011596553 \pm 0.0000000030 \frac{e\hbar}{2m_e c}$$

而实验值是：

$$1.0011596577 \pm 0.0000000030 \frac{e\hbar}{2m_e c}$$

$(\frac{e\hbar}{2m_e c})$  是电子的磁矩单位， $m_e$

是电子质量。如前所说，电子象个小磁针，磁矩代表其磁性的强弱。你看，这个理论计算得多么精确。但是弱相互作用的直接相互作用理论就不能用“重整化”的办法消除无穷大。所以它在原则上不能计算多次的相互作用。这就是弱相互作用的直接相互作用理论的第二个严重缺点。

### 似乎需要很重的中间玻色子

玲：看来，直接相互作用的理论的缺点还是很严重的，那末，有了传递者之后是不是就可以克服这些缺点呢？

吕：刚才讲的两个严重缺点，既来源于没有传递者，又来源于把微观粒子当做没有内部结构的点粒子。因此如果要想弄清这些问题，就必须一方面探讨

电子和各种粒子的内部结构，一方面寻找弱相互作用的传递者。

玲：这两个方面都不简单。

吕：目前，关于弱相互作用的传递者，倒是已经有了一些线索。

玲：叔叔，那就请你讲一讲这些线索吧。

吕：如果假定自旋为0的介子（例如 $\pi$ 介子）传递弱相互作用，那么，中子或原子核 $\beta$ 衰变出来的电子的能量分布和飞行角度分布就不好解释了。所以人们设想传递弱相互作用的介子的自旋是 $\hbar$ 。

玲：自旋为 $\hbar$ ，那就和光子一样了，传递电磁作用的光子的自旋不也正是 $\hbar$ 吗？

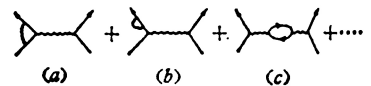


图13 电子与电子碰撞的几个四次相互作用图。a) b) 中包含电子与真空光子场的相互作用，c) 中包含光子与真空电子场的相互作用。都可用重整化方法去掉无穷大

吕：对了，提出这种设想时多少也受到一些电磁作用理论的启发。这种传递弱相互作用的介子又被称为“中间玻色子”。“中间”是指中间传递者，“玻色子”是因为它的自旋为 $\hbar$ ，是 $\hbar/2$ 的二倍。以前讲过，凡是自旋为 $\hbar/2$ 的偶数倍的粒子都属于玻色子。光子也是玻色子。

玲：这个设想能够解释直接相互作用理论所能解释的各种现象吗？

吕：能，但是有一个条件，就是中间玻色子的质量必须很大。

玲：为什么？

吕：我们还是来看图14所表示的 $\pi^-$ 、 $\mu^-$ 和中子的弱衰变，每一个衰变都有两个图，一个是没有传递者的，是直接相互作

用；另一个是有传递者的，曲折的线代表中间玻色子场的“扰动”。小玲，你想想，如果这种中间玻色子的静止质量很大，会有什么后果呢？

玲：嗯，以前讲 $\pi$ 介子传递强相互作用时讲过，传递相互作用的粒子的静止质量越大，相互作用的有效半径(力程)就越短。

吕：不错。我们还讲过，动量越大，波长越短；动量越小，波长越长。

玲：叔叔，你讲的这些事情之间难道有什么联系吗？

吕：联系就在这里：如果中间玻色子很重，重到质子质量的几十倍，甚至更重，那末，弱相互作用有效半径(力程)就会等于或小于 $10^{-13} \sim 10^{-14}$ 厘米。

玲：那就只是强相互作用的有效半径(力程 $\sim 10^{-13}$ 厘米)的百分之一到千分之一啦！

吕：就是。另一方面，在 $\pi^-$ 、 $\mu^-$ 以及中子的衰变中，产生的粒子的

玲：这就是说，在 $\pi^-$ 、 $\mu^-$ 以及中子的衰变中，作为衰变产物的粒子的波长远远超过了很重的中间玻色子传递弱相互作用的有效作用半径(力程)，是不是？

吕：是的，你想，如果参与弱作用衰变的粒子(包括衰变前和衰变后粒子)的波长都远远超过了弱相互作用的力程，那末弱相互作用的有效力程岂不是可以忽略不计了吗？

玲：对啊！

吕：由此可见，如果中间玻色子的静止质量很大，那末，在 $\pi^-$ 、 $\mu^-$ 以及中子的弱作用衰变中，中间玻色子的效应和直接相互作用

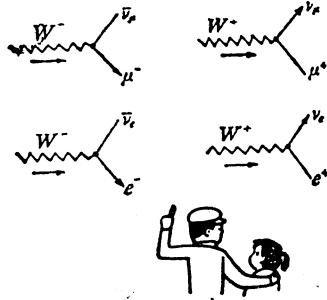


图15 中间玻色子图象里也有一次相互作用，例如 $w^\pm$ 的衰变

用的效应并没有明显的差别。事实上凡是直接相互作用理论可以解释的、涉及能量不超过几亿电子伏的弱作用衰变现象，中间玻色子理论也都能够解释。

玲：从图上看(图14)，似乎直接相互作用图象中的一次作用，到了中间玻色子图象里都变成了二次作用。

吕：是的，直接相互作用的一个作用点(时间空间点)，都在中间玻色子图象里拉开为两个作用点，其中一个点是中间玻色子被放出的时间地点，另一个点是中间玻色子被吸收的时间地点。不过，在中间玻色子图象里也有只有一个作用点的情况，例如中间玻色子 $w^\pm$ 的衰变(图15)。但 $w^\pm$ 是质量很大

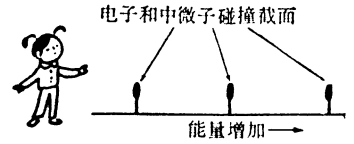


图16 如果有中间玻色子，低次微扰算出来电子、中微子碰撞截面随能量的上升而趋于常数

的粒子，现有的高能加速器还产生不出它们来(参考对话⑥能量守恒一节)，也没有在宇宙线中观察到 $w^\pm$ 的衰变。

玲：如果能量很高，动量很大，波长很短，中间玻色子图象和直接相互作用图象就不会一样了。

吕：说的对。刚才讲过，直接相互作用的图象在高能时要出现矛盾的结果。这个缺点在中间玻色子图象里就可以避免，因为一方面如果有了中间玻色子来传递弱作用，那么理论计算出来的电子——中微子的碰撞机会(截面)就不会随着能量而无限上升。另一方面，直观地来看，中间玻色子传递弱相互作用

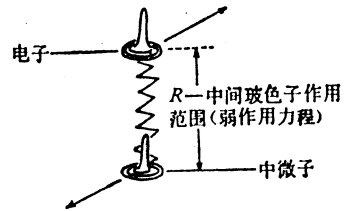


图17 如果有中间玻色子传递弱作用，电子与中微子能量再高，波长再短，只要它们能靠近到中间玻色子作用范围R(中间玻色子的平均波长)以内，就能发生碰撞。R不随着电子、中微子能量而变，所以碰撞的可能性不随着能量的升高而下降。图中电子和中微子在发生作用(碰撞)后改变运动方向

用的作用半径(力程)应等于中间玻色子的平均波长，只要相对飞行的电子和中微子最靠近时的距离小于这个平均波长，它们就可能传递中间玻色子而发生弱作用碰撞(通过中间玻色子来交换能量、动量以及电

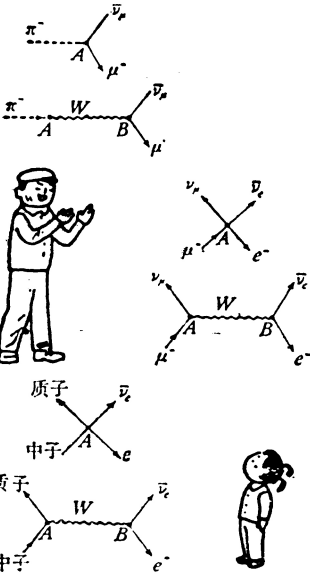


图14 点相互作用的衰变图象和中间玻色子传递相互作用的衰变图象

动量最多不超过几亿电子伏/c(电子伏/c是动量的一种单位，c是光速)，与此相对应的波长至少是 $10^{-13}$ 厘米，甚至还更长。

荷,这和普通意义的碰撞并没有两样)。中间玻色子的平均波长(弱作用力程)是一定的,并不依赖于电子、中微子的能量,所以在这个物理图象里,电子——中微子之间的碰撞机会(截面)也不会随着它们波长的变短(能量上升)而无限变小。

玲:这样看来,直接相互作用图象的第一个严重缺点——高能时出现的矛盾,在中间玻色子图象里就不出现了。这是中间玻色子图象的优点之一吧?

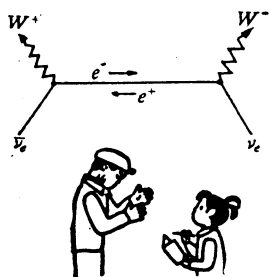


图18 在  $\nu_e + \bar{\nu}_e \rightarrow W^+ + W^-$  转化过程中交换  $e^\pm$

似乎还需要中性的中间玻色子  
也许还需要重的轻子  
——但是也不行

吕:去掉了一个缺点,但是出现了新的问题,就是高能中微子与高能反中微子相迁,通过交换  $e^\pm$  转化为一对正负中间玻色子  $W^+, W^-$  的跃迁振幅,又是随着能量而无限上升的(在量子力学里,跃迁振幅的平方代表跃迁几率,即转化的可能性)。

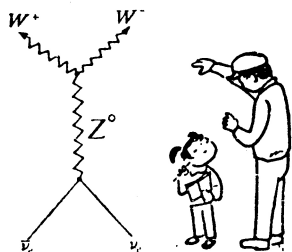


图19  $\nu_e$  和  $\bar{\nu}_e$  先转化为  $Z^0$ ,再转化为  $W^+, W^-$

这就是说,高能中微子与高能反中微子碰撞并转化为  $W^+, W^-$

的碰撞截面(转化几率)又是随能量而无限上升的(见图18)。

玲:这不又发生矛盾了吗?交换的  $e^\pm$  的“静止质量”不为零,按照以前讲过的力程与传递者的“静止质量”成反比的关系,也应该有个有限的力程(作用半径)和有限的碰撞截面吧,碰撞截面怎么可能无限增加呢?真是一波未平,一波又起。

吕:这的确是个困难,但并不太严重,因为除了带电的中间玻色子  $W^+, W^-$  外,还可以有中性的中间玻色子  $Z^0, \nu_e$  和  $\bar{\nu}_e$ 。也可以通过  $Z^0$  转化为  $W^+, W^-$ , 这也是二次作用(有两个时间空间作用点)(见图19)。这个二次作用在高能时正好可以抵消交换  $e^\pm$  的二次作用。由于抵消,  $\nu_e, \bar{\nu}_e$  在高能时相迁并

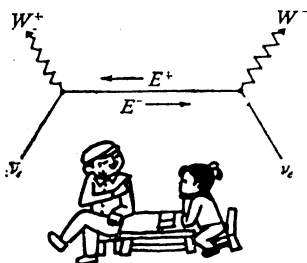


图20 如果有重轻子  $E^\pm$ , 在  $\nu_e + \bar{\nu}_e \rightarrow W^+ + W^-$  转化过程中可能交换  $E^\pm$

转化为一对  $W^+, W^-$  的碰撞截面(转化几率)就不致于随能量而无限上升了。

玲:怎么抵消的呢?

吕:以前讲过光波和电子波的干涉现象(见对话②),在一个波的波峰与另一个波的波谷相迁时,就可以出现抵消现象。现在这也是一样,交换  $e^\pm$  产生  $W^\pm$  的波和通过  $Z^0$  产生  $W^\pm$  的波,在高能时可以证明正好是波峰与波谷相遇,所以正好抵消。

玲:原来是这样。这么说,有了中性中间玻色子  $Z^0$ ,就可以保证  $\nu_e$  和  $\bar{\nu}_e$  相遇产生  $W^\pm$  的碰撞截面不至于随能量而无限增加了吧。

吕:是的,但还有一种可能性,就是存在一种很重的带正电的轻子  $E^+$ 。  $\nu_e, \bar{\nu}_e$  也可以通过交换  $E^+$  和  $E^-$ (反  $E^+$ )而转化为  $W^+, W^-$ 。这同样是二次作用(见图20),它在很高能时也能抵消图18的交换  $e^\pm$  的二次作用。

玲:很重的轻子是什么意思?

吕:说  $E^\pm$  是轻子,因为它和  $\mu$  子、电子一样,不参与强相互作用,只参与电磁相互作用和弱相互作用,而且它的重子数为0,轻子数为1。这些都是只有轻子才具备的性质,但另一方面,它的质量又很大,所以就把它叫做重轻子。

玲:中性的  $Z^0$  在实验上找到了没有呢?

吕:和  $W^\pm$  一样,  $Z^0$  的质量也很大,加速器还不能把它产生出来。

玲:那么重轻子呢?

吕:刚才说的带正电的重轻子并没有找到,但不久前找到了一种电荷与电子相同(带负电)的重轻子,叫  $\tau$  轻子。

玲:想找没有找到,没有想找的倒找到了。

吕:就是,这说明这方面还有许多工作需要做。

玲:不过,从刚才讲的看来,  $\nu_e$  和  $\bar{\nu}_e$  相遇产生  $W^\pm$  的可能性(截面)随能量无限上升的问题,终究不是中间玻色子图象的不可克服的缺点。对不对?所以可以说,中间玻色子图象终究比直接相互作用图象前进了一步。因为它既能解释直接相互作用所能解释的一切弱衰变现象,又在高能时没有产生矛盾的结果。

吕:但是,直接相互作用的第二个严重缺点——不能计算多次相互作用。也就是说,计算多次相互作用时出现的无穷大无法去掉这个缺点仍然没有克服,所以光有  $W^\pm, Z^0$  和  $E^\pm$  还是不行。

## 把第二种规范变换不变性扩充一下

玲：这问题不大好办。

吕：就电磁相互作用来说，它之所以能够重整化，主要是因为存在着第二种规范不变性。有了第二种规范不变性，有些发散项(即无穷大积分项)就自动地抵消了，这样一来，就可以通过重新定义带电粒子的质量和电荷来把剩下的少数的无穷大项去掉。重整化就成为可能的了。

玲：那么对弱相互作用是不是也可以来一个第二种规范不变性，使得重整化成为可能呢？

吕：这是一个很有趣的想法，前些年人们在这方面已经做了各种尝试。

玲：尝试有没有结果呢？在电磁作用里，规范场是传递电磁作用的电磁场(光子场)，在弱相互作用里，规范场又是什么呢？

吕：尝试的结果是，在弱相互作用里，规范场就是传递弱相互作用的  $W^\pm$  和  $Z^0$  的场。

玲：哟，在电磁作用里只有一种规范场，怎么在弱相互作用里却出来了好几个规范场？

吕：对了，所以说弱相互作用的第二种规范变换比电磁相互作用的第二种规范变换要更复杂。在电磁相互作用的规范变换中，带电粒子的场只改变相角，在弱相互作用的规范变换中，发生弱相互作用的粒子(例如电子、 $\mu$ 子、中微子……)的场就不能只是改变相角了。

玲：关于相角改变，我就费了很大劲才弄懂，现在却越讲越复杂了。

吕：还有一个问题，在电磁相互作用里，第二种规范变换的不变性要求光子的“静止质量”为零。而光子的“静止质量”的确是零，满足了第二种规范变换

不变的要求。但是，在弱相互作用里，第二种规范变换不变性要求  $W^\pm$ 、 $Z^0$  的“静止质量”也为零。而在中间玻色子图象里，偏偏  $W^\pm$  和  $Z^0$  都有很大的质量，这就破坏了规范不变性！

玲：刚才说要用第二种规范不变性来求得重整化的实现，现在  $W^\pm$ 、 $Z^0$  有很大的质量，破坏了规范不变性，岂不是重整化也没有希望了！

吕：对了，这些问题都是一些很基本的问题。这些年来，人们在这方面作了不少探索，取得了一些进展，并且指出弱相互作用和电磁相互作用有可能统一起来。

玲：是吗？那可有意思了！

吕：不过今天来不及讲了，下次接着讲吧。

玲：好！下次接着讲！

(尉迟横 插图)