



基本粒子不基本——实验上的现象

柯之

玲：上次说今天要讲“基本”粒子的内部结构，这里头一定又有不少有趣的事吧？

吕：是啊，有趣的事确是不少。可是小玲，你可曾弄清楚为什么说“基本”粒子不基本吗？

玲：嗯，你说过物质无限可分，既然物质无限可分，“基本”粒子也就可分，当然它就不基本啦。

吕：小玲，问题不是这么简单。物质无限可分，这是辩证唯物主义对于物质结构的一个基本观点。它是从大量的科学实验的实践中总结出来的，反过来它又对科学的发展有着重要的指导意义。但哲学可不能代替科学。它也不会告诉你“基本”粒子怎么样一分为二，怎么样有内部结构，……，只有通过科学实验的实践，才能够解决这些问题。

玲：前几个月我看到过一篇文章，就说不能用哲学来代替科学。

那么，叔叔，你说说，有些什么科学实验的事实说明“基本”粒子可分呢？

吕：讲起这个来话就长了。

玲：是吗？叔叔，那你快讲呀！

吕：好，我们就先来讲质子是不是一个点粒子。

质子不是点粒子，它有一定大小

玲：点粒子是不是前次讲重正化的时候讲过的，没有大小，没有体积的粒子？

吕：是的。

玲：没有大小、没有体积的点，那它还能有什么内部结构啊？

吕：小玲，你说的一点也不错。现在实验事实已经证实了质子和中子都不是点粒子，它们都有一定的大小。

玲：哦！这些实验是怎么做的呢？

吕：你还记得以前我们讲的 α 粒子打原子核的实验吧？如果原子核的正电荷是分散地分布的， α 粒子就很难反弹回来，因为

这些正电荷对 α 粒子的作用力的方向是分散的，互相抵消的。反之，如果原子核的正电荷都集中在原子的中心（原子核里），那末，这些集中的电荷对 α 粒子的作用力就不再自相抵消了， α 粒子就可以由于受到一个集中的排斥力而反弹回来。假如质子是一个点粒子，那它的电荷就该集中在一点上。

玲：是不是用 α 粒子去打质子检验一下。

吕：不能用 α 粒子， α 粒子是由两个质子和两个中子组成，用这样复杂的炮弹去打质子，只能使问题更加复杂化！

玲：那用什么去打呢？

吕：用高能电子去打。电子是目前我们知道的最“简单”的带电粒子炮弹。而且电子可以在加速器里获得很高的能量。

玲：以前讲电子显微镜时讲过，电子的能量越高，波长就越短，越便于观察微小的东西，对吗？

吕：对，原子核的半径不超过 10^{-12} 厘米，组成原子核的质子和中子的半径当然就更小。如果要用电子来分辨 10^{-14} 厘米大小的结构，相应的电子能量就要在二十亿电子伏以上。

玲：叔叔，用这么高能量的电子去打质子的结果怎样呢？

吕：结果发现电子和质子相遇以后，如果是弹性散射（就是碰撞后质子仍旧是质子，不产生介子，也不变成别的粒子），电子飞行方向的偏转非常明显，绝大部分几乎不偏转。这就是说，电子在穿过质子时，所受

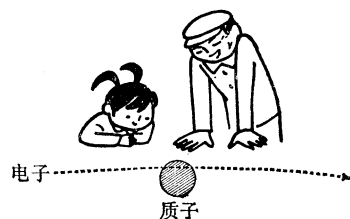


图1 高能电子与质子弹性碰撞后，电子的飞行方向很少偏转

的力并不都是来自一个点的(图1)。

玲:这说明质子中的正电荷并不集中在一个点,而是散成一团的。

吕:所以说质子不是一个点粒子。

玲:能不能知道质子的半径多大?

吕:根据实验上电子稍有偏离的程度来估算,质子的电荷分布半径是 0.8×10^{-13} 厘米。

玲:哦:和原子核的平均半径相差不到十倍。叔叔,我还想问一下,用高能质子去打质子,是不是也能显出质子有大小呢?

高能质子-质子碰撞 有衍射现象

吕:是有这样的实验,是用高能质子去轰击液氢靶中的质子(氢原子核),并且只观察弹性散射的结果,……

玲:质子与质子的弹性散射又是什么意思呢?

吕:质子与质子的弹性散射就是碰撞后仍旧是质子与质子,质子没有变成其他粒子,也没有产生别的粒子。

玲:是不是还有非弹性散射呢?

吕:有,比方说,质子和质子碰撞后,产生 π 介子或其他粒子(也包括质子变成中子或超子等),这就叫非弹性散射。(图2)

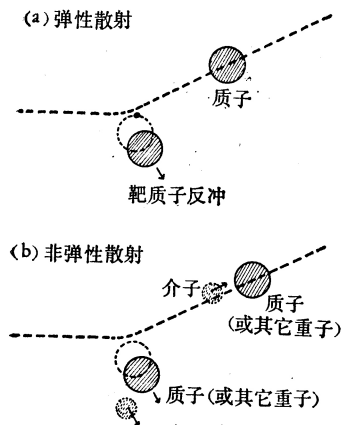


图2 (a) 质子与质子弹性散射后仍是质子与质子。(b) 质子与质子非弹性散射后,出现初始没有的一些粒子

玲:那末,高能质子与质子的弹性散射证明了什么?

吕:说来也有意思,高能质子和质子弹性散射后,一部分高能质子会偏转,如果用探测器来接收这些质子,就会发现这些高能质子的角分布很有点像光波被一个小园屏挡住时出现的偏转光的分布。由于光的波动性,小园屏引起的偏转光,随偏转角度的不同而一圈亮一圈暗,和以前讲过的干涉现象中的条纹很类似,这是一种光的衍射现象。在质子与质子的弹性散射中,接收不到质子或接收很少质子区域,也是一圈一圈的,就是说,也有衍射现象。(图3)。小玲,你想想,这现象说明了什么?

玲:嗯,第一,这说明高能质子和电子一样,它的运动也有波的性

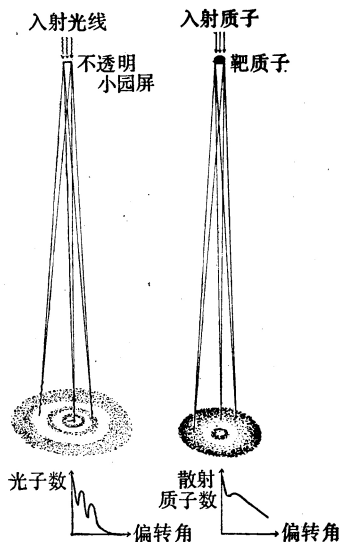


图3

图3 (a) 不透明小园屏的存在,可以使光线偏转,随偏转角度的不同,在屏上会交替出现暗环与亮环,中心是亮点。(b) 高能质子与静止靶质子弹性散射后,方向也会偏转,随偏转角度的大小,出现质子较多(用亮区来表示)和质子较少(用暗区来表示)的环形区,与(a)中偏转光的分布相似。下面是散射光子数和散射质子数随偏转角的不同而改变的示意曲线

质,不然就不会出现环形的有明有暗的波的干涉现象了;第二,说明被轰击的质子很像一个小园屏,它挡住了入射的高能质子的波,否则也不会出现这种干涉现象。

吕:对,质子既然像一个小园屏,也就证明了它必定有一定的大小,不是一个点粒子。

玲:可是质子-质子弹性散射的干涉图象上为什么只有一个暗环呢?

吕:最新的实验显示出还可能第二个暗环。但质子的衍射和光的衍射终究不大一样。这反映了质子还有一定的内部结构,以后我们还要谈到。

玲:叔叔,那些被“挡”住的高能质子跑到哪里去了呢?

吕:物质是不会消灭的,那些被“挡”住的高能质子也和靶质子发生了相互作用,结果是出现了刚才说的非弹性散射。不过在这个实验里,非弹性散射的事例是不记录下来的。

玲:这两个实验倒都是挺巧妙的哩!中子是电中性的,也能用高能电子来探测它的大小吗?

吕:也能。中子虽然电中性,但其中可能有正电荷(或负电荷)聚集的局部区域,而且它还带有磁矩,因此,用高能电子去轰击中子的时候,由于电磁相互作用,也可能使电子的飞行方向发生偏转。但探测的结果并没有发现中子里面有正电荷(或负电荷)聚集的局部区域。由磁矩引起的电子飞行方向的偏转也非常不明显,绝大部分电子几乎不偏转。这说明中子的磁矩也不是集中在一点的,而是分散成一团的。

玲:可哪里去找中子做的靶呢?

吕:可以用重氢来做靶,重氢的原子核就是氘核,由一个质子和一个中子所组成。用高能电子去打氘核,扣除质子与电子相互作用的效应,就可以求出中

子与电子相互作用的效应。

玲：哦，原来是这样。这就证明中子也不是点粒子啦，它的半径有多大呢？

吕：半径大致是 0.8×10^{-13} 厘米。

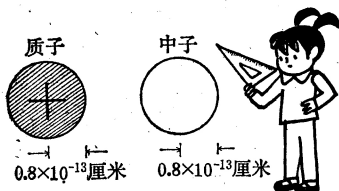


图4 质子和中子的大小

玲：原来和质子一样大小。现在我知道了，质子、中子都不是点粒子，都有一定的大小，而且这是有实验根据的。但是，叔叔，有一定大小的东西也可以是模糊一团，不一定有什么内部的结构哩，是不是？

强子的“周期表”

吕：对了，这是一个值得进一步追问的问题。现在就来讲另一类实验事实，说明强子——参与强相互作用的粒子，包括重子和介子——都是有内部结构的。小玲，你先想想看，我们都讲过哪些强子？

玲：多啦，有核子（质子和中子），有 Δ 超子、 Σ 超子、 Ξ 超子、 Ω 超子，……它们都是重子；还有介子，包括 π 介子、 K 介子、 ρ 介子，……等等。

吕：好，现在我们就把这些强子按不同的自旋，奇异数和电荷排列起来。先排自旋为0的介子。

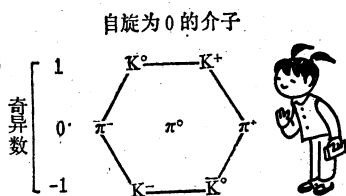


图5

玲：让我看看，第一排奇异数都是+1，第二排奇异数都是0，第

三排奇异数都是-1。右边斜线上电荷都是+e，左边斜线上电荷都是-e，中间斜线上电荷都是0，不错，确是很有规则。

吕：这种排列不仅在奇异数和电荷方面是规则的，在质量方面也是规则的。比方说，第一排的 K^0 和 K^+ 的静止质量分别是 $497.7 \text{ MeV}/c^2$ 和 $493.7 \text{ MeV}/c^2$ (MeV/c^2 是质量的一种单位，相当于 1.8×10^{-27} 克)，只相差不到1%。第二排 π^+ 和 π^0 的静止质量分别是 $139.59 \text{ MeV}/c^2$ 和 $134.96 \text{ MeV}/c^2$ ，也几乎相等。第三排的 \bar{K}^0 和 K^- 又是 $497.7 \text{ MeV}/c^2$ 和 $493.7 \text{ MeV}/c^2$ 。而且 K^0 和 \bar{K}^0 质量相同， K^+ 和 K^- 质量相同。

玲：哦，原来排在同一排的粒子不但奇异数相同，而且静止质量也基本相同哩。

吕：可是奇异数不相同的介子的静止质量却相差很大，例如 K 介子的静止质量是 π 介子的三倍半还多。

玲：第一排和第三排奇异数不同，但质量却又是相同的，这是因为 K^+ 、 K^- 互为反粒子， K^0 、 \bar{K}^0 互为反粒子，对吗？

吕：是的。

玲：叔叔，这种排列不会是凑巧吧？

吕：这不是凑巧。不信再看自旋为 $\frac{1}{2}$ 的介子，也按奇异数和电荷排列起来(图6)。它们都是共振

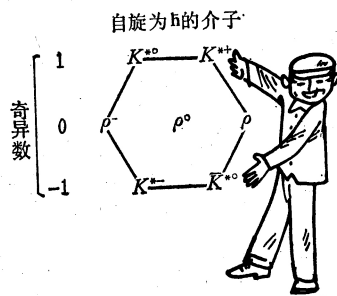


图6

态介子，寿命都极短。 ρ^+ 、 ρ^0 、 ρ^- 的静止质量都在 $770 \text{ MeV}/c^2$

邻近，上面一排的 K^{*0} 、 K^{*+} 和下面一排的 \bar{K}^{*0} 、 K^{*-} 的静止质量都在 $892 \text{ MeV}/c^2$ 邻近。所以又是排在同一排的（奇异数相同的）粒子的静止质量基本相同，带奇异数的和不带奇异数的粒子的静止质量则相差较大，大约相差 $120 \text{ MeV}/c^2$ 。

玲：那么重子呢？

吕：重子也一样。让我们先把自旋为 $\frac{1}{2}$ 的核子、 Σ 超子、 Ξ 超子按

奇异数和电荷排列起来(图7)：

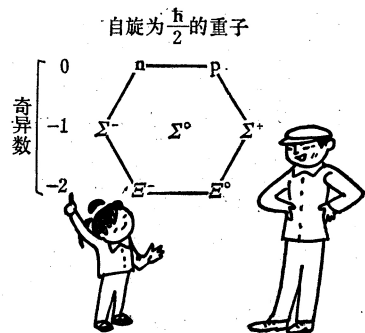


图7

玲：原来也是六角形，但和刚才有点不一样，第一排奇异数是0，第二排奇异数是-1，第三排奇异数是-2。

吕：但是电荷的排列还是照旧，右边斜线上电荷都是+e，左边斜线上电荷都是-e，中间斜线上电荷都是0。

玲：在这个图里，奇异数相同的重子的静止质量也基本相同吗？

吕：是的，奇异数为0的质子的静止质量为 $938.3 \text{ MeV}/c^2$ ，中子静止质量为 $939.6 \text{ MeV}/c^2$ ，只相差千分之一；奇异数为-1的 Σ^+ 、 Σ^0 、 Σ^- 的静止质量分别是 $1189.4 \text{ MeV}/c^2$ ， $1192.5 \text{ MeV}/c^2$ ， $1197.3 \text{ MeV}/c^2$ ，相差不到千分之八；奇异数为-2的 Ξ^0 、 Ξ^- 的静止质量是 $1314.9 \text{ MeV}/c^2$ 和 $1321.3 \text{ MeV}/c^2$ ，相差也不到千分之七。

玲：质子、中子的奇异数都是0，质量又基本上一样，看起来真像

是一家“人”， Σ^+ ， Σ^0 ， Σ^- 也像是一家“人”，它们的奇异数都是-1，质量也几乎相同。

吕：可是 Σ 这一家比核子（质子和中子）这一家重上二百五六十 MeV/c^2 呢！

玲：就是啊，这也和刚才一样，带奇异数的比不带奇异数的重一大截。……还有， Ξ^0 ， Ξ^- 也是一家，奇异数都是-2，质量也几乎相同。哦， Ξ 这一家比 Σ 这一家还要重上一百二十多 MeV/c^2 哩。还有呢，叔叔，你忘了把 Λ 超子画上啦， Λ 超子的自旋也是 $\frac{\hbar}{2}$ ，奇异数是-1，和

Σ 超子应该放在一起，是不是？

吕： Λ 超子是应该画在这个表上，它的奇异数和电荷都同 Σ^0 一样，应该和 Σ^0 并列在一起。但是 Λ 和 Σ 并不是一家，它是一个单身汉，一个“人”一家。 Λ 的静止质量是 $1115.6 \text{ MeV}/c^2$ ，比核子家族重约一百八十 MeV/c^2 ，比 Σ 超子家族轻约 70—80 MeV/c^2 。为了避免误会 Λ 和 Σ 是一家“人”，所以我故意没有把 Λ 画上去。 Λ 和 Σ^0 的内部结构是不同的，以后我们还要说到这一点。

玲：叔叔，在这个表里，奇异数（绝对值）大的强子也比奇异数（绝对值）小的强子要重呢！这也不是凑巧吧？

吕：不是凑巧。我们可以再来看自旋为 $\frac{3}{2}\hbar$ 的重子，其中除 Ω^- 超子外，都是寿命极短的共振态重子，也可以把它们按奇异数和电荷排列起来，(图 8)。

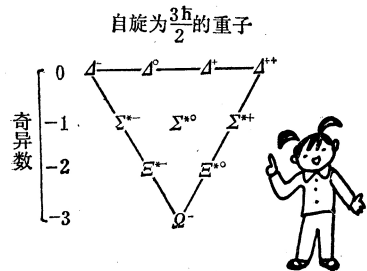


图 8

玲：让我看，左边第一条斜线上的粒子的电荷都是 $-e$ ，第二条斜线电荷都是 0，第三条斜线电荷都是 $+e$ ，最后是右上的 Δ^{++} ，电荷是 $+2e$ 。哦，叔叔，我还以为粒子都是排成六角形的呢，原来也有排成正三角形的。这些重子的质量怎样呢？

吕： Δ 这一家族的质量都在 $1236 \text{ MeV}/c^2$ 附近， Σ^* 这一家族的质量都在 $1385 \text{ MeV}/c^2$ 附近， Ξ^* 这一家族的质量都在 $1530 \text{ MeV}/c^2$ 附近， Ω^- 也是一个单身汉，质量是 $1672.5 \text{ MeV}/c^2$ 。

玲：看来也是奇异数（绝对值）越大，粒子也越重呢！

吕：对了，这说明这种排列的规律性，包括质量的规律性，都不是偶然的现象。小玲，你说这些排列图形反映了什么问题？

玲：我说不出来，不过倒使我想起化学元素周期表，各种元素也是一行行，一列列排起来的。

吕：可是化学元素周期表事实上反映了什么呢？

玲：化学老师讲过，化学元素周期表事实上反映了原子的结构，特别是反映了各种不同元素的原子核周围的电子的排列和运转情况。

吕：是啊！强子的这些排列图形事实上就是强子的“周期表”。

玲：叔叔，我明白你的意思了，强子的“周期表”同样是强子有内部结构的一种反映，对不对？

强子也有能级和能级跃迁

吕：你说的不错。此外还可以再举出一些实验事实，也说明强子是有内部结构的。例如，共振态和强子的衰变就很可能说明一些问题，小玲，你还记得吗？咱们以前讲过氢原子中的电子能级和能级跃迁。

玲：记得，以前讲过，如果较低的能级是空着的，那末处在较高能级的电子就会跃迁到这较低的能级去，同时放出光子。

吕：好，原子核也是有能级结构的，在有些情况下，原子核里的质子从较高能级跃迁到较低能级时，也要放出光子。

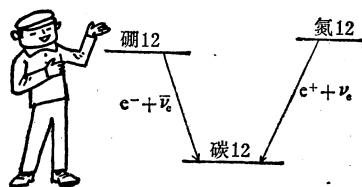


图 9 原子核的跃迁不仅可以放出光子，还可以放出电子和反中微子，或阳电子和中微子

玲：哦，和原子的情况一个样。

吕：不完全一个样，而是花样更多(图9)。比方说，碳 12 是 6 个质子，6 个中子，它的基态是稳定的，不会再衰变，但是硼 12 和氮 12 的基态就不稳定：硼 12 是 5 个质子，7 个中子组成的，中子太多了些，它的基态能级比碳 12 的基态能级高出不少，所以其中的一个中子必定要衰变成为质子，同时放出一个电子和一个电子型反中微子。这样，硼 12 的原子核(5 个质子，7 个中子)就变成了碳 12 的原子核(6 个质子，6 个中子)。这也是一种跃迁(中子变质子的跃迁)，从硼 12 的基态(相对来说是较高能级)跃迁到碳 12 的基态(较低能级)。你看，这不是比原子要复杂吗？原子中的电子在能级跃迁时，放出的是光子；原子核的能级跃迁，不但可以放出光子，而且还可以放出电子和反中微子。

玲：刚才还提到了氮 12。

吕：氮 12 也相仿，它由 7 个质子、5 个中子组成，质子太多了些，它的基态能级也比碳 12 的基态能级高，所以其中的一个质子必定要衰变成为一个中子，同时放出一个阳电子和一个电子型中微子。你看，在这个跃迁过程里，放出的是阳电子和中微子。

玲：确是花样更多了。哦，我想起来了，以前讲过，这种放出电子或阳电子的跃迁过程又叫做 β 衰变，对吗？

吕：对的。

玲：叔叔，强子的衰变是不是也是能级跃迁？它的花样多不多？

吕：强子的衰变也是一种能级跃迁，它的花样就更多了。小玲，你来看这个图（图10），可以看到质子是重子的基态，中子是与它最邻近的激发态，此外， Δ 、 Σ^+ 、 Σ^0 、 Σ^- 、 Ξ^0 、 Ξ^- 、 Ω^- 都是更高一些的激发态。从较高能级的激发态跃迁到较低能级，除了放出光子的方式（例如 Σ^0 衰变成 Δ 时放出光子）和 β 衰变方式（例如中子衰变成质子时放出电子和反中微子）外，又大量地出现了一种新的方式，就是放出 π 介子的方式。 Ω^- 超子衰变成 Δ 超子时还放出 K^- 介子。

玲：嗨，花样真是更多了！

吕：其实，能级远远不止这些，还有

吕：就是，因为从原子和原子核来看，正是由于原子和原子核有内部结构，它们才能有很多能级，才会出现能级之间的跃迁，并在跃迁中放出光子，以至电子……。那末，强子既然也有能级和能级跃迁现象，这种现象当然反映了强子内部也有服从某种规律的结构。否则就不好理解了。

玲：刚才我还在纳闷，强子即使有大小，也不一定有什么内部结构啊，现在我明白了，原来不但强子不是点粒子，而且有内部结构，这都是实验根据的。

吕：这还没完，还有一类实验说明强子里有更基本的东西哩！

玲：是吗？

出现了“部分子”

吕：刚才我们讲的用高能电子去打质子的实验里，所考察的只是弹性散射的情况，质子被打以后，只是反冲一下，它并不变成别的粒子，也不产生别的粒子。

质子也不只是反冲了，它的内部似乎被搅得大乱，以至在反冲的同时，还要放出一些别的粒子（例如介子）、质子本身也可能转变成其他的重子。

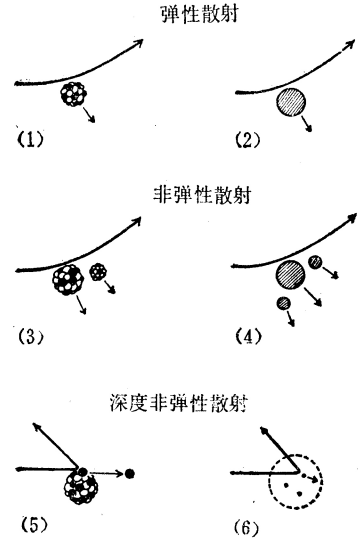


图11 (1)原子核反冲 (2)质子反冲 (3)原子核裂开 (4)产生原先没有的粒子 (5)与原子核中的个别核子发生弹性散射。(6)与质子中的个别带电颗粒发生弹性散射

玲：刚才不是讲质子里面的电荷并不集中在一点，而是分布成一团吗，那末，电子经过这一团的时候能够和什么东西发生剧烈碰撞呢？

吕：如果分析电子在偏转前后（也就是碰撞前后）的能量、动量，就会明显地看到，它好象是和质子里的一些小东西发生了弹性散射，（散射之后这个小东西没有被打碎，也没有变成别的东西）。由此可见，质子里的电荷虽然分布成一团，但这一团并不是均匀的，而是由一颗一颗很小的带电颗粒所组成的。正是因为入射电子能量提高了，波长更短了，这种小颗粒的存在才逐渐显露出来。

玲：这就奇怪啦！刚才还说在这个实验里，电子和质子的散射并不是弹性散射，而是非弹性散

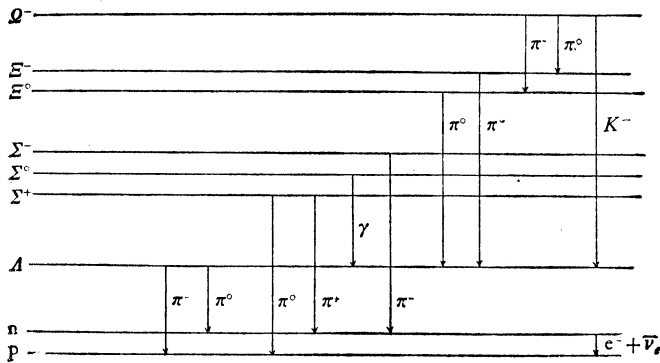


图10 重子的各种能级跃迁方式，例如中子跃迁到质子时放出 $e^- + \bar{\nu}_e$ ， Ω^- 跃迁到 Δ 时放出 K^- ， Ξ^- 跃迁到 Δ 时放出 π^- ， Σ^0 跃迁到 Δ 时放出 γ ，等等

很多（强作用衰变的）共振态的能级没有画上去。这些共振态衰变时，多数情况也是放出 π 介子或 K 介子，少数情况甚至可以放出更重的介子、如 ρ 介子、 η 介子……等等。

玲：叔叔，强子的这些能级跃迁现象也说明了有内部结构吧？

如果电子的能量再提高，提高到4.5 GeV以上，以至到20多GeV，就会出现一种新的现象，就是非弹性散射越来越突出了。在这种非弹性散射中，电子的飞行方向有很明显的偏转，说明它在质子里面和什么东西发生了剧烈的碰撞。而且，

射，又怎么知道电子是和质子里的一些很小的带电颗粒发生了弹性散射呢？

吕：表面上看的确是非弹性散射，因为碰撞过程中产生了介子，质子也可能变成别的中子或超子。但是经过进一步的分析就可以看到，如果引入能量动量传递（电子传递给质子的能量动量）的平方（ q^2 ）与碰撞前后电子的能量差（ $\nu = E'_e - E_e$ ）的比值 x （ $x = -\frac{q^2}{2M\nu}$ ， M 是质子静止质量）（图 12），

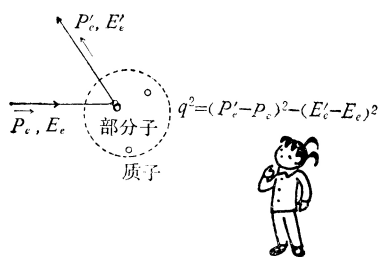


图 12

那末，在初始质子静止的情况下，不管入射电子的能量有多高，不管电子与质子进行非弹性散射时，传递给质子的能量动量有多大，令人惊奇的是，大范围的电子与质子非弹性散射的实验数据，竟都可以归并为以这个比值（ x ）为唯一变量的一条单独的曲线。这一般叫做无标度性现象（无标度性是说与 q^2 ， $M\nu$ 的实际大小无关，而只与它们的比值 $x = -\frac{q^2}{2M\nu}$ 有关），它反映电子和一些带电的小颗粒发生了弹性散射！

玲：叔叔，这是不是说，在这个实验现象里，电子不是和整个质子发生了弹性散射，它是和质子之中的某一小部分（带电的小颗粒）发生了弹性散射，对吗？

吕：对了。由于每个带电小颗粒都是组成质子的一部分，所以就把它叫做“部分子”。经过对电子散射数据的分析，还可以

看出，“部分子”的自旋也是 $\frac{\hbar}{2}$ ，和电子的自旋一样。

玲：可是我还没有弄懂，电子与“部分子”发生弹性散射的同时，为什么又出现电子与质子的非弹性散射呢？

吕：可以这样来看：高能电子与某一个“部分子”发生了弹性散射之后，“部分子”由于受到激烈的冲撞，获得了很大的动能，它把动量和能量再传递给其他的“部分子”，使得整个质子处于激发状态，结果就产生了一些介子，同时质子本身也可能转变成其他的中子，你看，在这个过程中里，电子与质子碰撞之后，并不是只有反冲的质子，而是出现了原先没有的粒子（介子、其他的中子），这不就是非弹性散射了吗？（图 13）

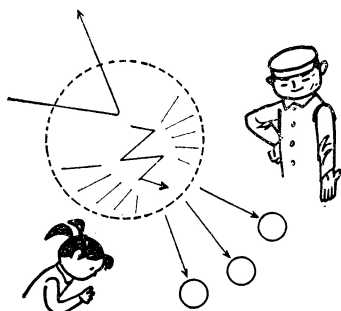


图 13 部分子在弹性散射中获得很大的能量和动量，从而使整个质子受到激发，并产生了原先没有的粒子

玲：噢，原来是这么回事。不过还有一个问题，就是为什么只有在非弹性散射的情况下，才能显示出“部分子”的作用？

吕：因为在电子与质子的弹性散射过程中，观测到的只能是整体的质子与电子的相互作用，而不是质子的某一部分（“部分子”）与电子的相互作用，所以“部分子”的存在是显示不出来的。

玲：哦，我说呢，怪不得高能电子与质子的弹性散射实验里发现不了“部分子”，而在非弹性散

射实验里，才发现了“部分子”。

吕：在高能中微子（或反中微子）与质子的深度非弹性散射实验中，也显示出来质子里面有“部分子”。

玲：哦，叔叔，还有别的证明强子里面有更基本的东西的实验事实吗？

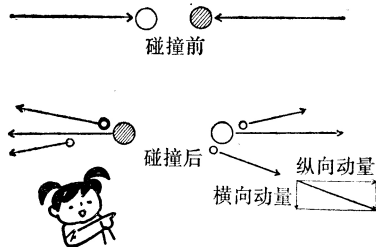


图 14 箭头代表粒子动量，碰撞后产生的粒子的动量基本上集中于两个相反方向，横向动量很小

出现了大横向动量的“射流”

吕：还有！比方说，用高能（十几个或几十个 GeV）的质子与质子对撞，一般都可以产生好多个 π 介子。我们把 π 介子的动量都分解成两个分量，一个是平行于入射质子飞行方向的分量，叫做纵向动量；一个是垂直于入射质子飞行方向的分量，叫作横向动量。我们就会看到，这些 π 介子的纵向动量都是很大的（可大到若干个 GeV/c），而横向动量都是很小的，不超过 400 MeV/c。

玲：这说明什么呢？

吕：这说明形成介子的物质原来就存在于高能质子之中，它们也有惰性，即使转化为 π 介子后，仍倾向于保持原来的运动方向。但是在一些很少见的事例中，却出现了带有很大的横向动量的介子，它们的横向动量竟可以大到若干个 GeV/c。

玲：形成这些介子的物质为什么不保持原来的飞行方向呢？它们没有惰性了吗？

吕: 不是的,后面还有新鲜事哩!进一步还发现,如果在一个事例中出现了个横向动量很大的介子,那末,顺着这个介子的运动方向去找,就能发现其他的横向动量很大的介子.不但如此,在与此相反的方向,也同样能找到其他的横向动量很大的介子.

玲: 好像横向动量很大的介子要就是不出,要就是成群出现的哩!

吕: 而且它们都几乎沿着同一条直线,分别集中于两个相反的方向飞出去(图15),给人一种向相反的两个方向喷射出去的印象,所以又叫“射流”.由于这些“射流”中的介子的横向动量都很大,所以又被称为大横向动量的“射流”.

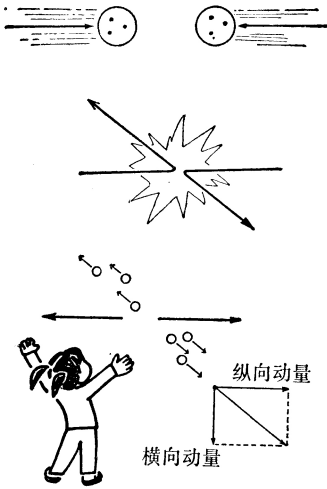


图15 (i)两个质子相向高速飞行. (ii)质子里面的小颗粒猛烈对撞(没有画出质子)之后大角度偏转. (iii)对撞引起质子的激发,结果在小颗粒对撞后偏转的方向,出现两个大横向动量的射流

玲: 这说明什么问题呢?

吕: 你想想看,在多数情况下,质子与质子似乎是可以互相穿透的,虽然在穿透的过程中,由于相互作用引起质子的激发,产生了一些介子,但这些介子基

本上仍保持原来的运动方向.可是,在很少见的一些事例里,又好像是不能互相穿透的了,而且很像两个相向高速飞行的弹球,在激烈的冲撞中,它们不但飞行方向大大地偏转,而且还裂成了碎片.

玲: 这大概又是“部分子”表演的把戏吧?

吕: 是的,这种现象实际上是在明显地告诉我们“部分子”的存在:两个高速的“部分子”对撞,它们就可以像两个弹球相撞一样,飞行方向明显地偏转.由于动量守恒,由于惰性,碰撞后引起质子激发而产生的介子,必定也保持着碰撞后“部分子”的大偏转角的飞行方向.而且因为相撞以后,两个“部分子”是向相反的方向飞的,所以产生的介子也分成两组,向相反的方向飞行,它们就是刚才所说的飞行方向相反的、横向动量很大的两注“射流”.如果没有“部分子”,这种现象是很难解释的!

玲: 那么又怎么解释高能质子与质子的互相穿透呢?

吕: 粗浅地说,这是因为“部分子”是很小的,即使两个高能质子相撞,它们各自内部的单独的“部分子”也不容易相互碰在一起,所以结果就出现了互相穿透的现象(图16).但有的时候,

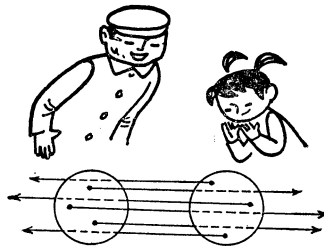


图16

这个质子中的一个“部分子”和那个质子中的一个“部分子”正好几乎走在一条直线上,它们就会发生激烈的冲撞,并产生

横向动量很大的两注“射流”.不过后一种情况是比较少见的.

玲: 听了发现“部分子”的实验和发现大横向动量“射流”的实验后,使人没法不相信强子不但有内部结构,而且里面还有更基本的东西哩.叔叔,这更基本的东西就是“部分子”吧?

有的更基本的东西是 奇异量子数的携带者

吕: 小玲,咱们先别忙下结论,再继续观察和分析一些实验事实.有一种电中性的介子,叫 φ 介子,它的静止质量是 $1019.6 \text{ MeV}/c^2$, 奇异数为0.从奇异数守恒和G宇称守恒来看,它通过强相互作用可以衰变成 K^+K^- , $K^0\bar{K}^0$, 也可以衰变成三个 π .再从质量守恒来看, φ 介子衰变成三个 π 介子,在质量上是很宽裕的.三个 π 介子合起来的静止质量才比 $400 \text{ MeV}/c^2$ 稍多一点,与 $1019.6 \text{ MeV}/c^2$ 相差约 $600 \text{ MeV}/c^2$.另外,两个K介子合起来的静止质量约 $990 \text{ MeV}/c^2$ 左右,和 φ 的静止质量 $1019.6 \text{ MeV}/c^2$ 才相差不到 $30 \text{ MeV}/c^2$.所以 φ 介子衰变成两个K介子,在质量上是并不宽裕的.一般情况下,质量越是宽裕,衰变的机会也越大,因此,如果只考虑质量是否宽裕这个因素, φ 介子衰变成三个 π 介子的可能性应该大大超过衰变成两个K介子的可能性.但实验事实恰好相反,每100个 φ 介子中,只有15个 φ 介子衰变成三个 π 介子,而衰变成 K^+K^- 和 $K^0\bar{K}^0$ 的 φ 介子却有82个之多.余下三个是其他的衰变(衰变成 γ 介子和光子,或衰变成 e^+e^- , $\mu^+\mu^-$ 等).

玲: 那就是说,还有其他的重要因素没有考虑,是吗?可是还有什么其他的重要因素呢?

吕：我们就来考察一下： φ 介子的奇异数为0， π 介子的奇异数也为0，但 K^+K^- 的奇异数都是+1， $K^-\bar{K}^0$ 的奇异数都是-1，看来问题出在奇异数上。

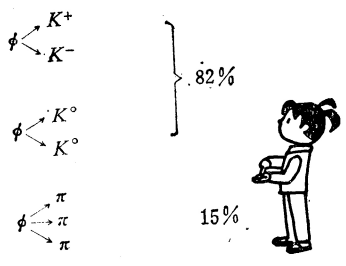


图 17 φ 比较不容易衰变成 3π

玲：是不是不带奇异数的介子（例如 φ 介子）有一种倾向，喜欢衰变成带奇异数的介子呢？

吕：不对， φ 介子的衰变是强相互作用的衰变，我们以前讲过，强相互作用的过程是奇异数守恒的。现在 φ 介子衰变成 K^+K^- ($\varphi \rightarrow K^+ + K^-$) 和 $K^0\bar{K}^0$ ($\varphi \rightarrow K^0 + \bar{K}^0$) 的过程，虽然总的奇异数守恒，但也是从不带奇异数的粒子衰变成带奇异数的粒子，很难令人相信强相互作用喜欢这种衰变方式。

玲：那又怎么理解呢？

吕：还有一种可能性，就是 φ 介子本来就隐含着正负奇异数，只是正负恰好抵消（就好像正负电荷相互抵消一样），所以 φ 介子并不显出有奇异数。

玲：哦，这倒有可能，如果 φ 介子本来就隐含着正负奇异数，那末， φ 介子衰变成 K^+K^- 或 $K^0\bar{K}^0$ 的时候，就不需要另外去找正负奇异数了。

吕：不错， φ 介子本身就可以给 K^+K^- 或 $K^0\bar{K}^0$ 提供正负奇异数。

玲：还有， φ 介子衰变成三个 π 介子的时候，倒反而要消灭掉它本身隐含着的一个正奇异数和一个负奇异数。这也许可以解释为什么 φ 介子不喜欢衰变成三个 π 介子了吧？（图18）

吕：对了，除了这种可能性外，实在

还找不出别的合理解释来。可是小玲，你想想， φ 介子怎么样才能既隐含着正的奇异数，又隐含着负的奇异数呢？

玲：嗯，刚才说强子里面有更基本的东西，大概这更基本的东西有的携带正奇异数，有的携带负奇异数吧？

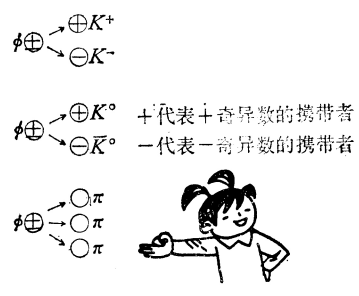


图 18: φ 里面有十、一奇异数的携带者， $\varphi \rightarrow 3\pi$ 的衰变必须消灭 φ 里面的十、一奇异数，这使得它比较不容易衰变成 3π

吕：是啊！正负奇异数总是要有携带者的（就好像电荷也要有携带者一样），它们怎么能凭空存在于 φ 介子之中呢！所以， φ 介子衰变的实验事实，说明了不但强子里面有更基本的东西，而且有些更基本的东西还是奇异量子数的携带者。

玲：这些更基本的东西也能携带别的量子数吧？

有的更基本的东西是粲数的携带者

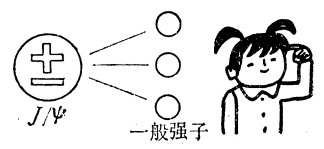
吕：也能。例如，以前我们讲过 J/ψ 粒子的发现，它的质量大致为 $3.1 \text{ GeV}/c^2$ （一个 GeV/c^2 相当于 1.8×10^{-24} 克），主要衰变成强子，但它的寿命比普通强作用衰变的共振态介子要大一千倍左右，小玲你说，这又是怎么回事？

玲：会不会是由于某种原因阻止了强作用衰变，只能实现弱作用衰变呢？

吕：不是，因为 J/ψ 粒子衰变成强子的过程既满足同位旋守恒和 G 宇称守恒，又满足奇异数守

恒，而弱相互作用的衰变过程是不满足这些守恒律的。

玲：既然不是弱作用衰变，可是寿命为什么这么长呢？



⊕ 代表 + 粲数的携带者
⊖ 代表 - 粲数的携带者

图 19 J/ψ 衰变成一般强子时，必须消灭掉它里面的十、一粲数，这使得它比较不容易衰变成普通强子

吕：这似乎是在告诉我们， J/ψ 粒子也不“喜欢”衰变成普通的强子，就好像 φ 介子不“喜欢”衰变成三个不带奇异数的 π 介子一样。

玲：那是不是 J/ψ 粒子里面也隐含着某种新的量子数呢？

吕：对了，这新的量子数就是上次

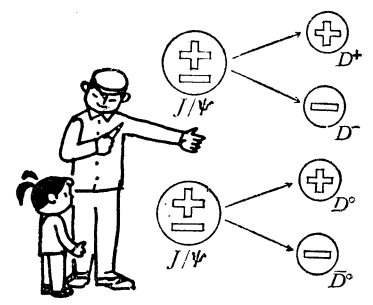


图 20 J/ψ 如果能衰变成 D^+D^- 或 $D^0\bar{D}^0$ ，就无须消灭掉它携带的十、一粲数。但由于静止质量不够， J/ψ 不可能进行这样的衰变

讲到的粲数， J/ψ 粒子里面同时隐含着正的粲数和负的粲数。

玲：这么说， J/ψ 粒子里面也应该有正粲数的携带者和负粲数的携带者了吧？不然的话，正的和负的粲数怎么能在 J/ψ 粒子中凭空存在呢？

吕：是的，这又说明了更基本的东西有各种各样，有的是奇异数

的携带者，有的又是粲数的携带者。

玲：还有一个问题，刚才讲 φ 介子更“喜欢”衰变成 K^+K^- 和 $K^0\bar{K}^0$ ，依此类推，为什么不看见 J/ψ 粒子也更“喜欢”衰变成带粲数的介子呢？

吕：不是 J/ψ 粒子不“喜欢”衰变成带粲数的介子，而是它的静止质量不够大，不足以衰变成两个带粲数的介子。

玲： J/ψ 粒子的静止质量是 $3.1 \text{ GeV}/c^2$ ，比质子静止质量的三倍还要多，这么大的静止质量还不够吗？

吕：不够。现在实验上已经查明，

即使是最轻的带粲数的介子 D^0, D^+ (粲数是 +1) 和 \bar{D}^0, \bar{D}^- (粲数是 -1)，它们的静止质量也都高达 $1.86-1.87 \text{ GeV}/c^2$ (是质子静止质量的两倍)，这就是说， D^+D^- (或 $D^0\bar{D}^0$) 合起来的静止质量大致为 $3.7 \text{ GeV}/c^2$ ，比 J/ψ 的静止质量大了 $600 \text{ MeV}/c^2$ 。由于质量守恒， $J/\psi \rightarrow D^+ + D^-$ 和 $J/\psi \rightarrow D^0 + \bar{D}^0$ 的衰变过程是根本不可能的。

玲：哦，怪不得 J/ψ 粒子的寿命比普通共振态介子的寿命长一千倍，原来它不能通过它不“喜欢”的方式进行衰变。叔叔，

今天你讲了这么多实验事实，令人不能不相信强子里面还有更基本的东西，这些更基本的东西有各种各样，有的是奇异数的携带者，有的是粲数的携带者。我听到这里，真好像它们就要从强子里面跳出来似的。

吕：可是，事情并不这么简单，这些更基本的东西不会自动地跳出来。好，我们下次接着讲。

(尉迟横插图)