

与日本的差距不算很大。由于林彪、“四人帮”的干扰、破坏，差距拉大了。今天，在英明领袖华主席的领导下，我们要把失去的时间夺回来，在有条件的领域迎头赶上去。

近几年，高山乳胶室研究给出的信息很吸引人。我们应该不失时机地把  $10^{14}$ — $10^{15}$ eV 能区的现象作为主要努力目标之一，认真作些研究，把大面积高山乳胶室作为当务之急搞起来。一九七二年，我们曾经找到一个可能的重质量荷电粒子事例，由于仪器的限制，至今还没有得到进一步的结果。我们应当用乳胶室把找重粒子、找层子以及研究新型相互作用的工作继续做下去。

更高能量的加速器出来之后，乳胶室工作的能区就缩小了，但是，广延大气簇射有广阔的天地可供驰骋。应该准备条件，特别是注意研制大面积的、价廉的、效率高的计数器探测系统。一旦条件成熟，就容易上。

还有宇宙线超高能  $\mu$ 、 $\nu$  的探测，既可研究  $\mu$ 、 $\nu$  本身在超高能区的作用性质，也可研究超高能强作用中产生粲粒子及其它新粒子的规律，特别是研究中微子的意义更大，因为它直接来自宇宙，可以研究天体物理的有关问题。这个领域的工作应该受到更多的重视。

如果说宇宙线高能物理的研究愈来愈受限制的话，“山穷水尽疑无路，柳暗花明又一村”，宇宙线天体物理则是一个新的储量丰富的宝藏，极待开采。要开采这种宝藏，一靠核物理探测手段，二靠运载工具。所以要把运载工具搞起来。没有它，只能“望天兴叹”。

总的来说，宇宙线主要是做探路工作的。探路很重要。就像一场大的战斗，总要有侦察部队了解敌情；一项宏伟工程，少不了地质尖兵踏勘钻探。我们学日本及其他国家宇宙线同行的经验，学他们的先进技术，目的只有一个：洋为中用，作好我们的“侦察”、“踏勘”工作。



## “基本”粒子不基本——对结构的探索

柯之

吕：上次讲了很多实验上的现象，说明强子不但有大小，有内部结构，而且里面还有更基本的东西。可是什么是更基本的东西，内部结构又是怎样的呢？这是个很重要的问题，也很有趣。不过，又是一个还没有结尾的故事。

玲：又重要，又有趣，那快讲吧！

**$\pi$  介子是由质子和中子组成的吗？**

吕：从前有一个时期，人们曾经以为“基本”粒子只有光子、电子、阳电子、质子、中子这么几种。后来发现了  $\mu$  子和  $\pi$  介子，这就产生了一个问题： $\mu$  子和  $\pi$  介子是不是由质子、中子等“基本”粒子组成，还是它们自身也是“基本”粒子呢？人们在科学实验中反复分析了  $\mu$  子，证实它不参与强相互作用，很多性质和电子差不多。……

玲：对，你以前讲过，因为  $\mu$  子质量重，所以又被称为重电子。

吕：既然如此，就容易接受  $\mu$  子也是“基本”粒子的说法。因为电子就是一个“基本”粒子呀！可

是， $\pi$  介子就不一样了，它虽然和  $\mu$  子差不多重，但却是参与强相互作用的，而且  $\pi$  介子自旋是 0，又有  $\pi^+$ 、 $\pi^0$ 、 $\pi^-$  三种带电状态，和参与强相互作用的“基本”粒子——质子、中子大不一样。于是，人们设想  $\pi$  介子可能是由参与强相互作用的质子、反质子、中子、反中子所组成。<sup>1)</sup>

玲：怎么组成呢？

吕：先考虑电荷，在  $\pi^+$  里面必须有一个质子； $\pi^-$  里面必须有一个反质子。然后考虑自旋， $\pi$  介子的自旋是 0，质子的自旋是  $\frac{\hbar}{2}$ 。所以，如果要组成  $\pi^+$  介子，那就必须还有一个自旋为  $\frac{\hbar}{2}$ 、电荷为 0 的粒子与质子相配合。自旋为  $\frac{\hbar}{2}$ ，就可以保证总的角动量（即  $\pi^+$  的自旋）为 0。电荷为 0，就可以保证  $\pi^+$  的电荷和质子的电荷相同（+e）。这

1) 1949 年费米和杨振宁提出的费米—杨模型，认为  $\pi^+$ 、 $\pi^0$ 、 $\pi^-$  由  $p$ 、 $n$  和  $\bar{p}$ 、 $\bar{n}$  组成。

个自旋为  $\frac{\hbar}{2}$ 、电荷为 0 的粒子是什么呢？是中子还是反中子？如果是中子，有些事就解释不通。如果是反中子，就是说，如果  $\pi^+$  是由质子和反中子组成，倒是还可以解释一些其它的现象。

玲：什么现象？

吕：比方说， $\pi^+$  和  $\pi^-$  互为反粒子，若是  $\pi^+$  是由质子和反中子组成，那末， $\pi^-$  就是由反质子和中子组成，这正好保证了  $\pi^-$  带一个单位的负电 ( $-e$ )，也保证了  $\pi^-$  的角动量(自旋)为 0。另外，由于质子、中子的重子数是

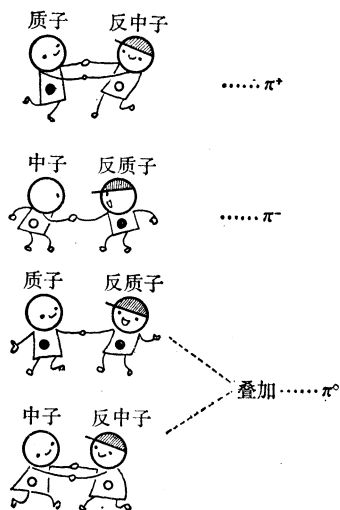


图 1 质子、中子和反质子、反中子共有四种组合

+1, 反质子、反中子的重子数是 -1, 所以又保证了  $\pi^+$ 、 $\pi^-$  的重子数为 0。

玲：这倒有点巧妙，还有呢？

吕：质子、中子和反质子、反中子共有四种组合：质子加反中子得  $\pi^+$ ，中子加反质子得  $\pi^-$ ，另外还有质子加反质子，中子加反中子。

玲：质子加反质子、中子加反中子，这两种组合的电荷都等于 0。

吕：所以正好解释  $\pi^0$  的存在(图 1)。现在我们可以列出一个

表：

$\pi^+$	$\pi^0$	$\pi^-$
$p\bar{n}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(p\bar{p} - n\bar{n})$	$n\bar{p}$

玲：为什么有减号呢？

吕：这是为了保证  $\pi^+$ 、 $\pi^0$ 、 $\pi^-$  三种介子可以用同一个同位旋陀螺的三个不同的旋转方向(见对话⑦)来代表它们。具体求出这个减号，不免要用到较多的数学，我就不讲了。

### 很大的结合能和吸引力

玲：这儿有一个问题，质子、反中子的静止质量都是电子的一千八百多倍，加起来三千六百多倍，而  $\pi$  介子静止质量才是电子的二百七十多倍，那么多的质量都跑哪里去了？

吕：小玲，你可真能提问题。好吧，我们先来说一说能量。拿氦核作为例子，它是由质子和中子组成的，质子的固有能量是 938.26MeV，中子的固有能量是 939.55MeV，它们在结合成氦核时要放出 2.23MeV 的能量，所以氦核的固有能量不是  $938.26 + 939.55 = 1877.81$  MeV，而是还要减去 2.23MeV，即 1875.58MeV。

玲：这和质量有什么关系呢？

吕：以前讲过(见对话⑧)，固有能

量减少，静止质量也就相应地减少。所以氦核的静止质量要比质子、中子的静止质量之和少 2.23 MeV/c<sup>2</sup>。这减少的固有能量一般称为结合能，就是结合(这里指质子和中子结合)时所放出的能量。反过来，如果给氦核提供 2.23MeV 或更多的能量，氦核就会散开，成为一个自由的质子和一个自由的中子。由此可见，结合能越大，就结合得越紧。

玲：质子和反中子组成  $\pi^+$  介子，放出的结合能一定很大吧？

吕：是的，质子与反中子的固有能量之和也是 1877.81MeV，而  $\pi^+$  的固有能量是 139.57MeV，所以质子和反中子组合成  $\pi^+$  时，要放出的结合能是  $1877.81 - 139.57 = 1738.24$ MeV，也就是说 92.6% 的固有能量都放掉了。

玲：是吗？这么大的结合能？这怎么解释呢？

吕：只有一种解释，就是核子(质子、中子)和反核子(反质子、反中子)之间必须有极强的吸引力才能结合这样紧。

玲：叔叔：极强的吸引力同结合能难道有什么关系吗？

吕：有密切的关系。粗浅地说，吸引力越强，结合能就越大。

玲：就是说，吸引力越强，越不容易散开，结合能就越大。是不？

### 奇异数和奇异数携带者的引入 ——预言 $\eta$ 和 $\eta'$

吕：基本上是这样。好，我们现在继续谈介子由什么组成的问题。后来，又发现了 K 介子、 $\Delta$  超子等等奇异粒子，它们都带有奇异数。这就比以前复杂了，光靠核子、反核子组不成自旋为 0 的  $K^+$ 、 $K^0$ 、 $K^-$ 、 $\bar{K}^0$ ，因为核子、反核子都是不带奇异量子数的。

玲：那该怎么办呢？

吕：有一个粒子，它既带有奇异量

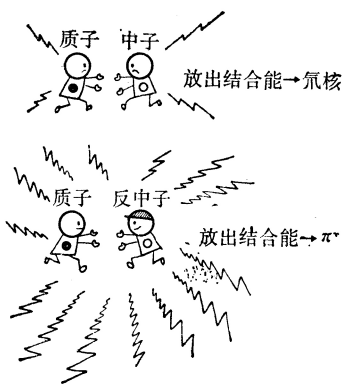


图 2 如果说  $\pi^+$  是由质子和反中子组合的，那末组合成  $\pi^+$  时放出的结合能，要比质子和中子组合成氦核时放出的结合能大将近 800 倍



子数,自旋又是  $\frac{\hbar}{2}$ 。

玲: 叔叔, 你是说  $\Lambda$  超子吧? 它的质量也和质子、中子最相近(图 3)。

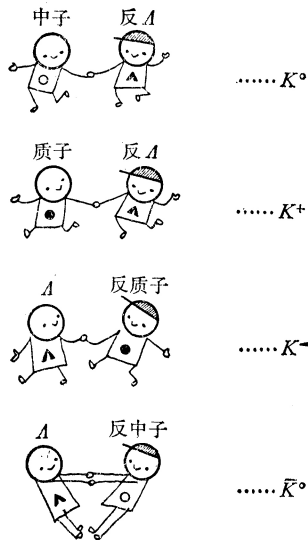


图 3 起初又认为  $\Lambda$  超子和反  $\Lambda$  超子可以与质子、反质子、中子、反中子组成带奇异数的  $K$  介子

吕: 对了,  $\Lambda$  超子带有奇异数  $-1$ ,  $\bar{\Lambda}$  (反  $\Lambda$  超子) 带有奇异数  $+1$ , 可以设想带奇异数  $+1$  的  $K^+$ 、 $K^0$  介子里面包含  $\bar{\Lambda}$ , 带奇异数  $-1$  的  $K^-$ 、 $\bar{K}^0$  介子里面包含  $\Lambda$ . 这样, 我们就可以用内部组成的成分来解释为什么自旋为 0 的介子的“周期表”是上次讲的那种六角形了<sup>1)</sup>. 小玲, 你看这个图(图 4),  $p, n, \Lambda$  和  $\bar{p}, \bar{n}, \bar{\Lambda}$  正好可以组成这样的六角形。

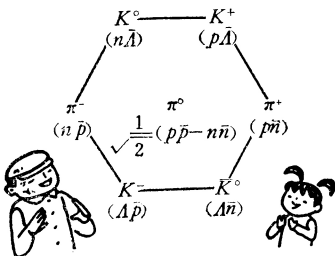


图 4

玲: 真是有意思!

吕: 角动量为  $\hbar$  的介子也可以用类似的方法来解释。

玲: 这和自旋为 0 的介子的内部组

成成分有什么区别呢?(图 5)

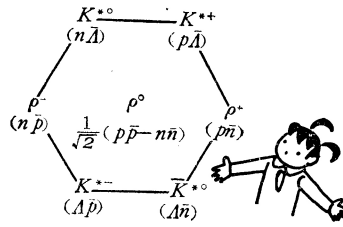


图 5

吕: 区别不在于组成成分, 而在于自旋: 例如  $\pi^-$  里面的  $n$  和  $\bar{p}$  的自旋是反方向的, 合起来是零, 所以  $\pi^-$  的自旋为 0;  $\rho^-$  里面的  $n$  和  $\bar{p}$  的自旋是同方向的, 合起来是  $\hbar$ , 所以  $\rho^-$  的自旋是  $\hbar$ . 其他也可以类推. 另外, 如果  $n$  和  $\bar{p}$  互相绕着转, 有较大的轨道角动量, 那末, 在这种情况下, 就组成有较大自旋(较大的角动量)的介子. 有很多共振态介子都是这种大角动量的介子(图 6)。

玲: 这么说, 这种六角形可以有好多好多啦?

吕: 是的. 这种结构还可以解释和预言更多的东西. 第一,  $p, n, \Lambda$  和  $\bar{p}, \bar{n}, \bar{\Lambda}$  有  $3 \times 3 = 9$  种组合, 可是这个六角形里只有七种组合, 所以可以预言还有两种组合. 而且这两种组合都是电中性的。

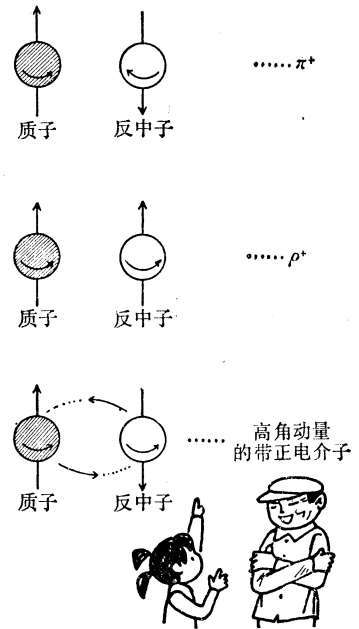


图 6 质子与反中子, 自旋方向相反——组成  $\pi^+$ , 自旋方向相同——组成  $\rho^+$ , 互相绕着转——组成高角动量带正电介子

玲: 为什么是电中性的?

吕: 因为  $p\bar{p}, n\bar{n}, \Lambda\bar{\Lambda}$  可以组成三种互相独立的电中性、不带奇异数的组合, 而六角形里只给出了一种电中性、不带奇异数的介子(即  $\pi^0$ )。

玲: 是不是当初预言了还有其他的自旋为 0 的电中性、不带奇异数的介子?

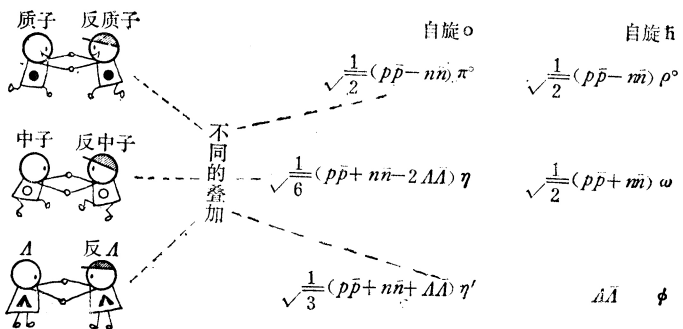


图 7 三种电中性、奇异数为 0 的组合, 可以有三种不同的叠加方式,  $\pi^0$  之外, 还有电中性的介子  $\eta$  和  $\eta'$ .  $\rho^0$  之外, 还有  $\omega, \phi$

1) 1956 年坂田昌一提出坂田模型, 认为物质结构有无限层次, 强子由  $p, n, \Lambda$  和  $\bar{p}, \bar{n}, \bar{\Lambda}$  组成,  $p, n, \Lambda$  和  $\bar{p}, \bar{n}, \bar{\Lambda}$  属于比其他强子更深的层次。

吕：是的，而且后来果然找到了，它们是：

$$\eta: \sim \frac{1}{\sqrt{6}}(p\bar{p} + n\bar{n} - 2A\bar{A})$$

$$\eta': \sim \frac{1}{\sqrt{3}}(p\bar{p} + n\bar{n} + A\bar{A})$$

$\eta$  的质量是电子的一千零七十倍， $\eta'$  的质量是电子的一千八百七十倍。小玲你看， $\pi^0$ 、 $\eta$ 、 $\eta'$  都不是纯粹的  $p\bar{p}$ 、 $n\bar{n}$ 、 $A\bar{A}$ ，而是  $p\bar{p}$ 、 $n\bar{n}$ 、 $A\bar{A}$  的三种不同的叠加。(图 7)

玲：对照起来，是不是应该还有两种自旋为  $\hbar$  的中性介子呢？

吕：是的，而且也在实验上找到了，它们是：

$$\omega: \sim \frac{1}{\sqrt{2}}(p\bar{p} + A\bar{A})$$

$\varphi: \sim A\bar{A}$ ——就是上次讲过的。

玲：真是有趣得很。

吕：还有第二，如果说，介子都是由一个粒子和一个反粒子组成，那就可以预言并不存在奇异数

定是( $n_p$  是其中的质子个数， $n_{\bar{p}}$  是反质子个数， $n_n$  是中子个数，……等等)：

$$B = n_p - n_{\bar{p}} + n_n - n_{\bar{n}} + n_A - n_{\bar{A}} \quad (ii)$$

玲：这都是合理的。

吕：另外还有同位旋，你来看这个表：

同位空间给定方向 的同位旋分量			
质子	中子	反质子	反中子
$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
核子同位旋陀螺		反核子同位旋陀螺	

玲：质子取  $\frac{1}{2}$ ，反质子取  $-\frac{1}{2}$ ，这是因为它们互为反粒子吧？

吕：不错，中子和反中子也一样，现在就可以看到，由于在同位空间的给定方向，质子和反中子的同位旋分量都是  $\frac{1}{2}$ ，反质子和中子的同位旋分量都是  $-\frac{1}{2}$ ，所以一个强子在同位空间给定方向同位旋分量( $T_3$ )应是：

$$T_3 = \frac{n_p - n_{\bar{p}}}{2} - \frac{n_n - n_{\bar{n}}}{2} \quad (iii)$$

玲：为什么没有  $n_A, n_{\bar{A}}$  呢？

吕：因为  $A$  和  $\bar{A}$  没有同位旋。根据 (i)，(ii)，(iii) 三个式子，可以得到：

$$T_3 + \frac{B + S}{2} = n_p - n_{\bar{p}} \quad (iv)$$

玲：这是什么意思？

吕：小玲你想，在  $p, n, A$  和  $\bar{p}, \bar{n}, \bar{A}$  中，只有  $p$  和  $\bar{p}$  的电荷不为 0， $p$  带  $+e$ ， $\bar{p}$  带  $-e$ 。那末，一个强子(如果有  $n_p$  个  $p$ ， $n_{\bar{p}}$  个  $\bar{p}$ )所带的电荷岂不是正好是

$$Q = (n_p - n_{\bar{p}})e,$$

吗？所以利用 (iv) 式，立刻知道：

$$Q = \left( T_3 + \frac{B + S}{2} \right) e.$$

这就是从前讲过的经验公式(对话①、②)。多巧，按照我们

现在讨论的  $p, n, A$  和  $\bar{p}, \bar{n}, \bar{A}$  组成强子的物理图象，就可以自然而然地导出这个经验公式。

玲：真是巧得很！

吕：但是，这个物理图象并不是没有问题的！

### 重子出了问题， $p, n, A$ 并不比 $\Sigma, \Xi$ 更深入一个层次

玲：有什么问题？

吕：首先，假设  $\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \Xi^0, \Xi^-$  和  $p, n, A$  一样，比介子更基本，那么， $p, n, A, \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \Xi^0, \Xi^-$  和它们的反粒子就应该可以组成  $8 \times 8 = 64$  种自旋为 0 的介子，其中还有带  $2e$  电荷的带奇异数的介子(例如质子与反  $\Sigma^-$  的组合)，但这显然是与事实不符的(图 9)。

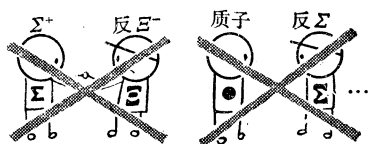


图 9

玲：那末，有没有可能  $\Sigma, \Xi$  也是由  $p, n, A$  和  $\bar{p}, \bar{n}, \bar{A}$  组成呢？

吕：我们来试试看。  $\Sigma$  和  $\Xi$  的自旋都是  $\frac{\hbar}{2}$ ，所以要由三个自旋为  $\frac{\hbar}{2}$  的粒子才能组成 (两个组不成  $\frac{\hbar}{2}$ )，其中有一个自旋和另

两个自旋反向。再考虑到  $\Sigma, \Xi$  的奇异数、电荷和重子数，它们有可能是如下组成的：

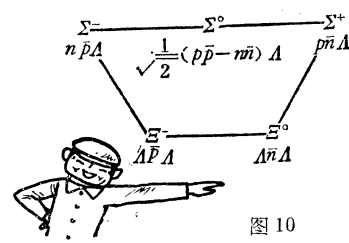


图 10

这样组成的  $\Sigma^-, \Sigma^0, \Sigma^+$  也可以用同一个同位旋陀螺的三个不同的旋转方向来代表它们。

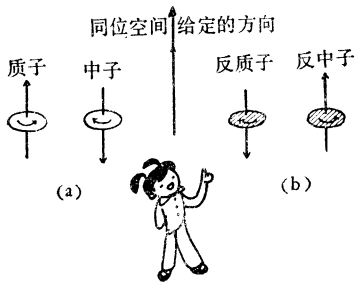


图 8 取  $1/2$  时，同位旋陀螺的旋转方向(按右手规则)是指向同位空间的给定方向；取  $-1/2$  时，是指向相反方向

为  $\pm 2$  的介子。因为  $p, n, A$  和  $\bar{p}, \bar{n}, \bar{A}$  无论如何组不成奇异数为  $\pm 2$  的介子。

玲：这个预言对不对呢？

吕：对的。还有第三，因为只有  $A$  的奇异数为  $-1$ ， $\bar{A}$  的奇异数为  $+1$ ，所以如果一个强子含有  $n_A$  个  $A$ ， $n_{\bar{A}}$  个  $\bar{A}$ ，这个强子的奇异数( $S$ )就一定是：

$$S = n_{\bar{A}} - n_A \quad (i)$$

另外，因为  $p, n, A$  各有重子数  $+1$ ， $\bar{p}, \bar{n}, \bar{A}$  各有重子数  $-1$ ，所以一个强子的重子数( $B$ )一

玲：奇异数、电荷、重子数、同位旋和自旋都对头，那怎么会出了问题呢？

吕：问题是如果这个图象是对的，那就应该还有很多种其它的组合，例如  $p\bar{u}\Lambda$ ,  $n\bar{u}\Lambda$ , …… 就是说，还应该有更多种其它的  $\frac{\hbar}{2}$  自旋的重子。甚至还应该有  $pp\bar{u}$  组成的奇异数 +1、电荷为  $2e$  的重子(图 11)。但是，世界上根本没有这样的重子。

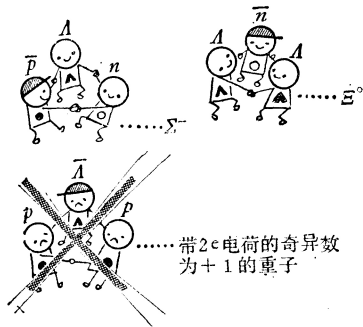


图 11 如果说  $\Sigma^-$  是  $n\bar{p}\Lambda$  组成,  $\Xi^0$  是  $\Lambda\bar{n}\Lambda$  组成, …… 那末就应有电荷为  $+2e$ 、奇异数为  $+1$  的重子, 这与事实不符

玲：结果又与实验事实不符。……  
 吕：现在还剩下一种可能性，就是  $p, n, \Lambda$  并不比介子更基本！  
 玲：那更基本的东西是什么呢？

### $u, d, s$ 的提出

吕：我们现在可以尝试一下，认为有三种更基本的自旋  $\frac{\hbar}{2}$  的粒子和它们的反粒子，写成  $u, d, s$  和  $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$ 。  $s$  和  $\bar{s}$  带奇异数，相当于刚才的  $\Lambda$  和  $\bar{\Lambda}$ ；  $u, d$  可以用同位旋  $\frac{1}{2}$  的陀螺的两个相反旋转方向来代表它们，相当于刚才的  $p, n$ 。经过这样的代替，自旋、同位旋、奇异数都是对的(图 12)。<sup>1)</sup>

玲：那么电荷呢？

吕：我们等一下再说电荷，现在先说重子。刚才已经看到，如果假设重子由两个自旋  $\frac{\hbar}{2}$  的粒子

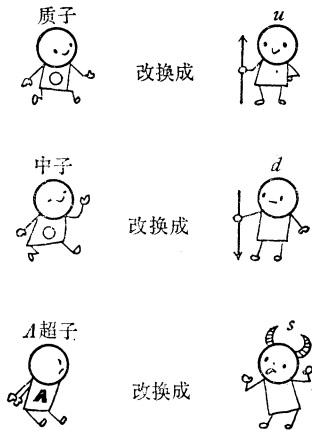


图 12  $p, n, \Lambda$  改换成  $u, d, s$ 。由  $u, d, s$  和  $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$  组成不带粲数的重子(包括质子和中子)和介子, 就可以同时解释介子的“周期表”和重子的“周期表”

和一个自旋  $\frac{\hbar}{2}$  的反粒子所组成, 就会出现困难(它预言并不存在的奇异数 +1 的重子)。因此, 要改成三个(自旋  $\frac{\hbar}{2}$  的)粒子组成重子的图象。以质子作为例子, 它没有奇异数, 在同位旋空间给定方向同位旋分量又是  $\frac{1}{2}$ , 所以它必定只能是由  $u, u, d$  组成。中子也相仿, 它没有奇异数, 同位旋分量是  $-\frac{1}{2}$ , 所以必定只能是由  $u, d, d$  组成。

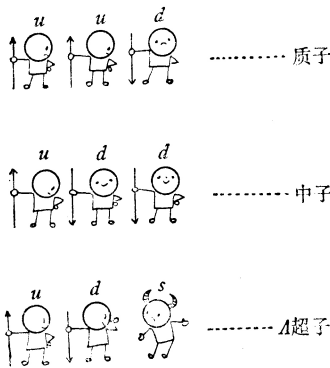


图 13

玲：那末  $\Lambda$  超子呢？

吕： $\Lambda$  超子的同位旋是 0，奇异数是 -1，所以只能是由  $u, d, s$  组

成。现在根据  $p, n, \Lambda$  的电荷, 就可以把  $u, d, s$  的电荷定下来。例如, 设  $u$  粒子带电荷  $Q_u$ ,  $d$  粒子带电荷  $Q_d$ ,  $s$  粒子带电荷  $Q_s$ , 按照刚才的组成, 应该是:

$$\text{质子: } 2Q_u + Q_d = e$$

$$\text{中子: } Q_u + 2Q_d = 0$$

$$\Lambda \text{ 超子: } Q_u + Q_d + Q_s = 0$$

小玲, 这又是简单的代数, 你解解看。

玲：这好解, ……  $Q_u = \frac{2}{3}e$ ,  $Q_d = -\frac{1}{3}e$ ,  $Q_s = -\frac{1}{3}e$ 。叔叔, 怎么都是分数电荷呀？

吕：对了, 如果只有  $u, d, s$  三种粒子组成  $p, n, \Lambda, u, d, s$  就必须是分数电荷。另外  $u, d, s$  的重子数都必须为  $1/3$ , 这样才能保证重子的重子数为 1, 介子的重子数为 0(图 14)。

玲：刚才那(i), (ii), (iii), (iv)几个公式呢？

自旋	$\frac{\hbar}{2}$	$\frac{\hbar}{2}$	$\frac{\hbar}{2}$
电荷	$\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$
奇异数	0	0	-1
重子数	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
同位旋	$\frac{1}{2}$		0

图 14

注：1964 年盖尔曼提出夸克模型，把带有分数电荷的  $u, d, s$  称为组成强子的三种“夸克”。“夸克”一词出自西方的一本颓废派小说，原意是梦幻里的海鸟的嘎嘎叫声。为什么起这样讽刺性的名称呢？事实上它反映了当时国际物理学界的一种思潮——“基本”粒子不可分。盖尔曼自己就再三声称：“夸克”可能只是一种数学符号，“夸克”模型则只是一种代数表示，并无现实意义，最高能量的加速器将帮助证实“夸克”是不存在的！

吕: (i) 改写成:

$$S = n_s - n_{\bar{s}} \quad (i')$$

(ii) 因为取重子数为  $\frac{1}{3}$ , 改为:

$$B = \frac{n_u - n_{\bar{u}}}{3} + \frac{n_d - n_{\bar{d}}}{3} + \frac{n_s - n_{\bar{s}}}{3} \quad (ii')$$

(iii) 改成:

$$T_3 = \frac{n_u - n_{\bar{u}}}{2} - \frac{n_d - n_{\bar{d}}}{2} \quad (iii')$$

根据以上三个式子, 就得到:

$$T_3 + \frac{B + S}{2} = \frac{2}{3} (n_u - n_{\bar{u}}) - \frac{1}{3} (n_d - n_{\bar{d}}) - \frac{1}{3} (n_s - n_{\bar{s}}) \quad (iv')$$

小玲, 你看,  $u$  的电荷是  $\frac{2}{3}e$ ,  $d$

的电荷是  $-\frac{1}{3}e$ ,  $s$  的电荷是

$-\frac{1}{3}e$ , 任何一个包含有  $n_u$  个

$u$ ,  $n_{\bar{u}}$  个  $\bar{u}$ ,  $n_d$  个  $d$ , …… 的强子的总的电荷不就是

$$Q = \left[ \frac{2}{3} (n_u - n_{\bar{u}}) - \frac{1}{3} (n_d - n_{\bar{d}}) - \frac{1}{3} (n_s - n_{\bar{s}}) \right] e$$

吗? 所以利用 (iv'), 仍得到

$$Q = \left( T_3 + \frac{B + C}{2} \right) e$$

换句话说, 仍旧可以导出这个经验公式。

### 预言和找到了 $\Omega^-$

玲: 哦! 叔叔, 你能不能把介子和重子的  $u, d, s$  组合画成表?

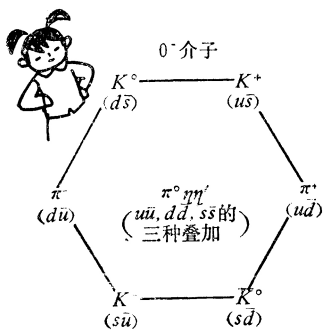


图 15

吕: 行, 自旋为 0 的  $\pi, K, \eta, \eta'$  和自旋为  $\frac{1}{2}$  的  $\rho, K^*, \omega, \phi$  是这样组成的(见图 15、16), 自旋为  $\frac{1}{2}$

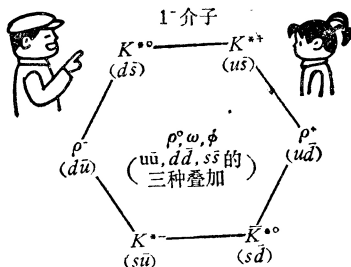


图 16

的  $p, n, \Lambda, \Sigma, \Xi$  是这样组成的(见图 17), 另外, 如果三个粒子的自旋方向都相同, 就可以

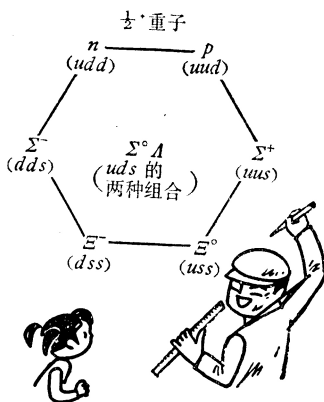


图 17

有如下的组合, (见图 18), 都是自旋  $\frac{3}{2}$  的重子(除  $\Omega^-$  外, 都是重子共振态)。这个三角形

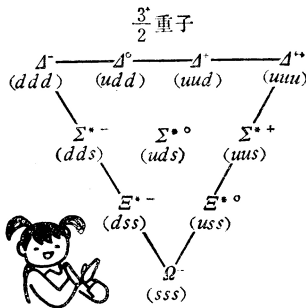


图 18

的“周期表”预言了奇异数为  $-3$  的  $\Omega^-$  的存在。

玲: 后来就在实验上找到了, 是吗?

吕: 是的, 对  $\Omega^-$  的质量的预言也是对的。但是, 对于  $u, d, s$  是什么, 有着两种相反的看法: 其中有一种看法曾经一度广泛流传, 认为  $u, d, s$  只是用以解释“周期表”的一种“数学实体”, 一种“代数表示”, 它们只反映了强子的一些对称性质(例如: 三角形、六角形的“周期表”就在一定程度上显示出来这种对称性), 但并不是实际存在的东西。因此, 重子和介子谈不上有什么内部结构, 也不存在更深的层次, 更深的规律性。

玲: 另外一种看法呢?

吕: 认为不能停留于  $u, d, s$  所反映的强子的对称性质的研究, 还应该向着强子有结构、存在着更基本的东西的方向, 继续深入探索有结构的强子的各种运动转化规律!

### 引入了强子内部的层子的波函数

玲: 我赞成第二种观点, 它符合毛主席的矛盾普遍存在, 物质无限可分思想。叔叔, 你继续往下讲!

吕: 但是, 要想用强子内部有结构的观点来探索强子的运动转化规律可并不很简单。

玲: 怎么不简单?

吕: 第一,  $u, d, s$  这些东西还没有在实验上找到, 它们的性质(例如质量、电荷)并不清楚; 第二,  $u, d, s$  之间有些什么相互作用力, 它们是怎么束缚起来成为强子的, 这些也并不清楚; 第三, 在  $u, d, s$  这个层次, 量子力学、量子场论的理论还能不能适用, 这又是不清楚的。

玲: 哦, 原来还有这么多基本的东西没弄清楚!

吕: 面对着这些困难, 又曾经有过两种不同的看法: 一种认为  $u, d, s$  这种物理图象看来是对的, 但由于目前有这么多东西不清楚, 所以按照强子有内部结构的观点去探讨强子的运动转化

规律，只有等待将来了。另一种看法不这么悲观，认为可以先用现有的理论来进行计算，通过理论计算和实验的比较，来验证强子的内部结构图像是不是正确，并由此找出矛盾，发展理论，逐步解决这些没有弄清楚的问题。

玲：我赞成这种看法，毛主席说过实践出真知嘛！

吕：层子模型理论就是按照这种观点去探讨有结构的强子的运动转化规律的。

玲：叔叔，你刚才不是说一些基本的东西还不清楚吗？那么，层子模型是怎样进行计算并和实验对比的呢？

吕：不清楚并不是毫无线索。前面讲过从实验事实概括出来的 $u$ 、 $d$ 、 $s$ 和 $\bar{u}$ 、 $\bar{d}$ 、 $\bar{s}$ 组成强子的物理图像。在层子模型里也采用了这个物理图像，认为介子是由一个层子和一个反层子组成，重子是由三个层子组成，反重子是由三个反层子组成；层子的自旋为 $\frac{\hbar}{2}$ ， $\pi$ 、 $K$ 、 $\eta$ 、 $\eta'$ 等0自旋介子中，层子与反层子自旋反向， $\rho$ 、 $K^*$ 、 $\omega$ 、 $\varphi$ 等自旋为 $\frac{\hbar}{2}$ 的介子中，层子与反层子自旋同方向。

玲：这么说，还可以猜到， $p$ 、 $n$ 、 $\Lambda$ 、 $\Sigma$ 、 $\Xi$ 这些自旋为 $\frac{\hbar}{2}$ 的重子里面，必定有一个层子的自旋方向和另外两个层子的自旋方向相反； $\Delta$ 、 $\Sigma^*$ 、 $\Xi^*$ 、 $\Omega^-$ 这些自旋为 $\frac{3}{2}\hbar$ 的重子里面，三个层子的自旋方向必定相同，是不是？

吕：不错，此外还有很重要的一点，就是层子模型认为在自旋为0的 $\pi$ 、 $K$ ……和自旋为 $\frac{\hbar}{2}$ 的 $\rho$ 、 $K^*$ ……这些介子里面，描述层子与反层子的相对运动的波函数基本上是相同的。

玲：重子怎样呢？

吕：层子模型也认为，在自旋为 $\frac{\hbar}{2}$

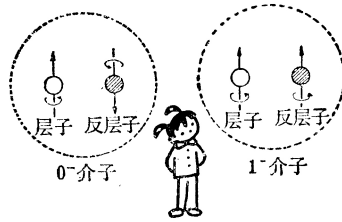


图19 在 $0^-$ 介子与 $1^-$ 介子中，层子与反层子的空间运动方式是基本相同的，但自旋状态不同

的 $p$ 、 $n$ 、 $\Lambda$ 、 $\Sigma$ 、 $\Xi$ 和自旋为 $\frac{3}{2}\hbar$ 的 $\Delta$ 、 $\Sigma^*$ 、 $\Xi^*$ 、 $\Omega^-$ 这些重子里面，描述三个层子的相对运动的波函数基本上也是相同的。

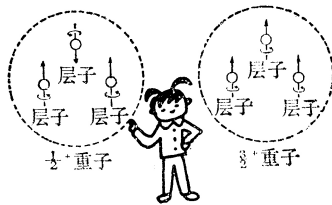


图20 在 $\frac{1}{2}^+$ 重子与 $\frac{3}{2}^+$ 重子中，层子的空间运动方式基本相同，但自旋状态不同

玲：这又是为什么呢？

吕：如果细心地分析 $\pi$ 、 $K$ 、 $\rho$ 、 $K^*$ 这些介子的行为，可以发现，它们的差别基本上都是来自它们的组成成分——层子、反层子的物理性质的差别（不同的层子有不同的电荷、奇异数、同位旋等），以及层子、反层子的自旋方向（同向或反向）的差别；而在另一方面，可以认为层子与反层子的相对运动方式基本上都是相同的。相仿，在 $p$ 、 $n$ 、 $\Lambda$ 、 $\Sigma$ 、 $\Xi$ 和 $\Delta$ 、 $\Sigma^*$ 、 $\Xi^*$ 、 $\Omega^-$ 这些重子里面，三个层子的相对运动的方式也都是基本上相同的，…

玲：因此，层子模型认为，自旋为0的 $\pi$ 、 $K$ 、 $\eta$ 、 $\eta'$ 和自旋为 $\frac{\hbar}{2}$ 的 $\rho$ 、 $K^*$ 、 $\omega$ 、 $\varphi$ ，这些介子有相同的（层子—反层子的）相对运动波函数，自旋为 $\frac{\hbar}{2}$ 的 $p$ 、 $n$ 、 $\Lambda$ 、 $\Sigma$ 、

$\Xi$ 和自旋为 $\frac{3}{2}\hbar$ 的 $\Delta$ 、 $\Sigma^*$ 、 $\Xi^*$ 、 $\Omega^-$ 这些重子也有相同的（三个层子的）相对运动波函数，对吗？

吕：对，这样一来，层子模型就可以把这些介子和重子的波函数全部写出来，其中有关介子的相对运动部分和重子的相对运动部分可以分别归结为个别的待定参数，它们可以在理论与实验的对比中来确定。不仅如此，整个波函数都是服从相对论不变性的要求的，满足研究高能粒子的需要。

玲：这应该说是前进了一步。

### 介子、重子的相互作用可以归结为介子、重子内部的层子、反层子的相互作用

吕：还有，层子模型认为，强子既然是层子、反层子组成，那末，强子的各种相互作用就应该归结为层子、反层子的相互作用。虽然暂时还不清楚层子服从什么力学，但不妨把“层子”也看作是某种量子化的场的量子，这种场可以叫做“层子场”。在这个物理图象的基础上，可以引用量子场论的方法来计算强子里的层子、反层子的各种相互作用，并和实验作比较。另外，在计算中，考虑到粒子是高速运动的，层子模型的计算方法还必须保证满足相对论不变性。

玲：这样做有些什么结果呢？

吕：有些很有趣的结果！比方说，有很大一批介子的衰变过程（衰变终态没有介子，或只有一个介子），可用以下的三类图来表示：

第一类：见图21，包括以下各种衰变（参考对话④的表）：

$$\begin{aligned} \pi^+ &\longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \pi^+ \longrightarrow e^+ + \nu_e, \\ K^+ &\longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu, K^+ \longrightarrow e^+ + \nu_e, \\ \pi^- &\longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu, \pi^- \longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e, \\ K^- &\longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu, K^- \longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e. \end{aligned}$$

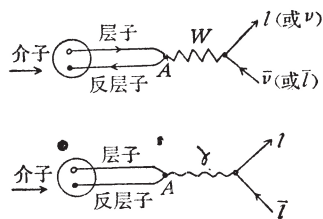
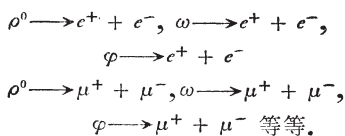


图 21 介子由层子和反层子组成,介子由左向右走,层子前进方向与箭头方向一致,反层子前进方向与箭头方向相反,轻子前进方向与箭头方向一致,反轻子前进方向与箭头方向相反

上面的图是通过中间玻色子 ( $W^\pm$ ) 场的媒介,衰变后产生了  $\bar{l}$  (包括  $e^-$  或  $\mu^-$ ) 和中微子 (见第一、二排的四衰变), 或衰变后产生了  $l$  (包括  $e^+$  或  $\mu^+$ ) 和反中微子 (见第三、四排的四衰变). 下图是通过电磁场的媒介,衰变后产生了  $e^+e^-$  或  $\mu^+\mu^-$  (见下面四排的六个衰变).

玲: 这两个图很有趣,象是长了两条触须的小虫。

吕: 更有趣的是,在这一类图里,总是要出现一个 A 点 (层子与反层子相遇的一点), 对应这个图的计算总是要出现一个因子, 就是层子与反层子相遇时的内部相对运动波函数的数值, 这个数值又叫做零点 (层子与反层子相遇, 相对距离为零) 波函数值, 它是有限的 (不是无穷大). 现在可以对比一下: 在旧的  $\pi$  介子没有结构的点模型理论里, 图 21 所代表的过程被画成如图 22 的样子. 有了这种带圈的图, 计算中就会出现无穷大 (见对话⑧). 所以如果考虑了  $\pi$  介子有内部结构, 理论上的这种无穷大就不会出现!

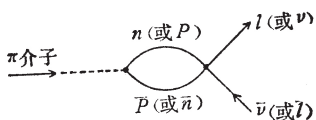


图 22

玲: 确是很有趣, 第二类图呢?

吕: 第二类, 见图 23, 包括下列各种衰变:

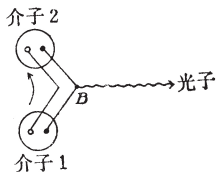
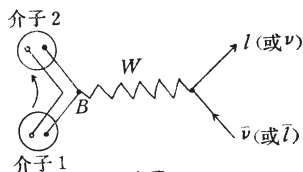
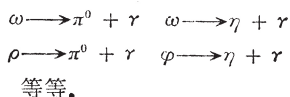
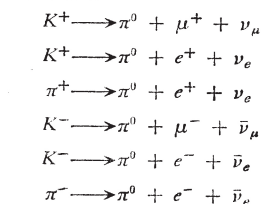


图 23 介子 1 衰变成介子 2 (弯箭头方向)

上图: 介子 1 中的层子 (或反层子) 在 B 点上与中间玻色子 ( $W^\pm$ ) 场发生相互作用, 产生一个带电轻子 ( $\mu^\pm$  或  $e^\pm$ ) 和一个中微子或反中微子 (见前六个衰变). 下图: 介子 1 中的层子 (或反层子) 在 B 点与电磁场发生相互作用, 产生一个光子 (见后面两排的衰变).

玲: 这类图衰变后仍有一个介子。

吕: 对, 所以对应于这类图的计算里总是要出现第一个介子 (衰变前) 与第二个介子 (衰变后) 的

内部相对运动波函数相乘的积分, 简称重叠积分函数。

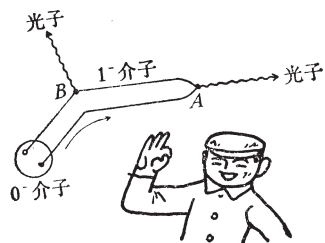
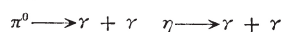


图 24

玲: 还有第三类呢?

吕: 第三类: 见图 24, 包括如下衰变:



图中  $0^-$  介子 (例如  $\pi^0, \eta$ ) 中的一个层子 (或反层子) 在 B 处放出一个光子, 于是  $0^-$  介子变成  $1^-$  介子 (例如  $\rho^0, \omega, \varphi$ , 这里 0、1 代表自旋角动量, 一代表负宇称.), 然后层子与反层子再在 A 处湮没, 并放出第二个光子. 你看, 这个图似乎是第一类图和第二类图组合而成的. 图中的 A 点相当于第一类图中的 A 点, 图中的 B 点相当于第二类图中的 B 点. 因此, 在计算  $\pi^0$  或  $\eta$  衰变成  $2\gamma$  的衰变率时, 既需要零点波函数的值, 又需要重叠积分的函数. 如果把第一类图所确定的零点波函数的值和第二类图所给出的重叠积分函数都用到第三类图的计算中去, 那末, 求得的  $\pi^0 \longrightarrow 2\gamma$  和  $\eta \longrightarrow 2\gamma$  的衰变率, 就都和实验值基本符合.

玲: 是吗? 这三类图所代表的衰变过程很不一样, 但它们的计算结果居然能够不互相矛盾, 这可不简单!

吕: 这也不是很偶然的, 它进一步说明了强子有内部结构, 是由更基本的东西——层子组成的这种物理图象是正确的。

玲: 那么重子呢?

吕: 重子是由三个层子组成的, 没

有反层子,不会发生湮没,只有和上面的第二类图相仿的图如图 25. 图中也出现重叠积分(衰变前和衰变后重子内部相对运动波函数的重叠积分).

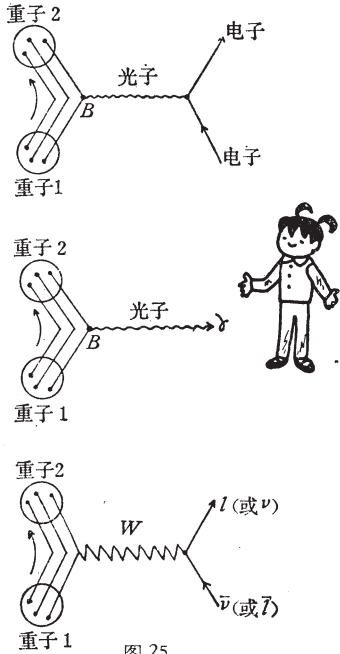


图 25

上面的图是一个层子在  $B$  点与电磁场发生相互作用,这种图可以用来计算重子的磁矩,重子与电子的弹性散射,也可以用来计算重子放出光子的能级跃迁的平均寿命. 下面的图是一个层子在  $B$  点与中间玻色子 ( $W^\pm$ ) 场发生相互作用,这种图可以用来计算  $n, \Lambda, \Sigma^-, \Sigma^+, \Xi^-, \Xi^0, \Omega^-$  放出轻子 ( $\mu^\pm, e^\pm$  和  $\nu, \bar{\nu}$ ) 的弱作用衰变率.

- 玲: 结果怎样呢?  
 吕: 结果是一部分和现有的实验数据基本一致, 另一部分目前还没有确切的实验数据.  
 玲: 看来, 重子的相互作用也可以归结为重子内部的层子的相互作用啦?  
 吕: 是的, 所以这也支持了重子有内部结构, 是由层子组成的物理图象, 支持了强子是可分的, 再一次说明层子模型的计算是有合理因素的.  
 玲: 叔叔, 我现在知道什么是“层子模型”啦, 它不仅探讨  $u, d, s$  模型所反映的强子的一些对称性

质, 而且还按照强子内部有结构的观点, 探讨强子的运动转化规律, 对吗? 不过我还有些问题不清楚, 比方说, 层子的电荷是不是和  $u, d, s$  一样, 也是分数电荷? 层子的质量有多大? 这些都是很有趣的问题. 小玲, 层子模型虽然在探讨 (i) 强子是否由层子和反层子组成, (ii) 强子的相互作用是否可以归结为层子、反层子的相互作用, 以及 (iii) 量子场论对于强子里的层子、反层子是否也适用等等问题上, 给出了一些有意义的结果, 比  $u, d, s$  的图象又前进了一步. 但是目前的层子模型理论还是粗线条的, 上面的那些计算都是在层子静止质量很大 (至少比质子大几十倍) 的假定下进行的. 层子的静止质量是不是很大呢? 这还是一个没有很好揭开的谜. 咱们下次再接着讲吧.

玲: 好. 叔叔, 再见!

(尉迟横 插图)