

小玲和老吕的对话 ③

——“基本”粒子大家庭的一些故事 (上)



柯 之

在有加速器以前， α 粒子是唯一可以用来轰击原子核的炮弹

吕：上次说的是两百多种“基本”粒子的两个代表——电子和光子，他们是“基本”粒子大家庭中最早被发现的两个成员。今天我们谈一谈“基本”粒子大家庭中其他一些成员的故事，好吗？

玲：好极了。两百多种“基本”粒子，真可以算得上是一个“大”家庭哩！该有多少故事啊。

吕：故事可不少，我们只能挑主要的讲。小玲，你知道怎样用实验的方法来验证原子核比原子小得很多吗？

玲：不知道。

吕：那就先从这个实验讲起吧。实验的安排是用天然放射性物质放射出来的高速（每秒一万五千到两万公里）的 α 粒子（氦原子核）去轰击很薄的金箔（或银箔），观察它们透过金箔后飞行的偏转情况。实验的结果表明：有些粒子的飞行方向发生了明显的偏转。偏转角度越大， α 粒子数目越少，但确是出现一定数量的大角度偏转的 α 粒子，甚至有少数粒子几乎是反弹回去的。

玲：这是什么意思呢？

吕：首先， α 粒子比电子重七千多倍，很重的高速的东西碰上很轻的东西，是不会偏转方向的，这就是说， α 粒子的偏转肯定不是电子的作用引起的。其次，原子中的正电荷对深入原

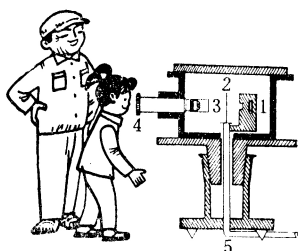


图1 1. α 粒子源 2. 金箔 3. 硫化锌荧光屏 4. 观察荧光屏上闪光的显微镜 5. 抽气管 1, 2 固定在抽气管上, 3, 4 可绕抽气管旋转。

子内部的带正电的 α 粒子有排斥力，但如果这些正电荷是散开的（最初人们曾以为正电荷是散开的，是均匀分布在原子中的），排斥力就分散，它们的作用就会前后左右互相抵消，无法解释为什么粒子有大角度偏转。反之，只有正电荷集中在原子的中心，对 α 粒子的排斥力才不会分散，才能加强起来，并且 α 粒子越深入原子中心，排斥力也越大。这才能解释 α 粒子的大角度偏转。同时，这些带正电荷的东

西必须有很大的质量，不象电子那样轻，否则很重很快的 α 粒子碰上去也不可能偏转。科学家们放弃了正电荷分散的图象，改用正电荷和质量都集中在原子中心的图象，计算了 α 粒子穿透金箔后的偏转角度的分布，结果与实验数值符合得出乎意外地好。这就令人信服地证明了在原子中心确实有一个核，它集中了原子的全部正电荷和绝大部分的质量，这个核就叫做原子核。

玲：这些 α 粒子碰上原子核了吗？

吕：没有，每秒两万公里速度的 α 粒子，最近可以冲到距原子核的中心只有 2.7×10^{-12} 厘米的地方。

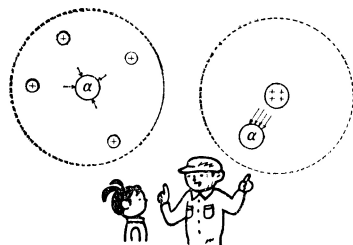


图2 左： α 粒子处于很多正电荷之中，这些正电荷对它的排斥力不在同一方向。右：正电荷都集中在原子中心，它们对 α 粒子的排斥力都在相同的方向（虚线的圆代表原子的大小）。

玲：哦，这么近还没有碰上原子核，怪不得上次你说原子核的半径不到 10^{-12} 厘米。

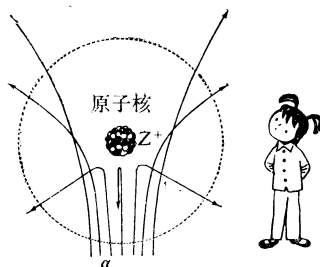


图3 这些 α 粒子都进入了原子，但却没有和金原子核碰上。

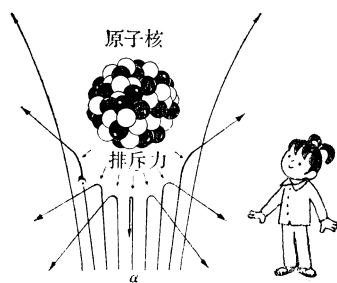


图4 这是图3的放大。每秒两万公里

从原子核里打出了质子 又打出了中子

吕：用这个办法也可以让粒子去“摸”着原子核呢。

玲：是不是用加速器增加α粒子的速度，去克服原子核对α粒子的排斥力？

吕：这是一种办法。但在没有加速器的情况下，还有一种办法，就是用较轻的元素。如：铝原子、氮原子、硼原子分别只有13、7、5个正电荷，排斥力小。用每秒两万公里的α粒子去打铝、氮、硼原子，可以冲到离原子核中心分别为 4.5×10^{-13} 厘米、 2.4×10^{-13} 厘米、 1.7×10^{-13} 厘米的距离。

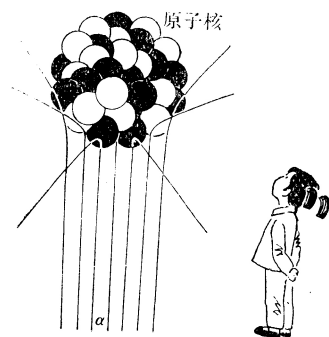


图5 α粒子可以碰上或进入铝、氮、硼原子核(α粒子距原子核中心的距离小于原子核半径)。

玲：这么近呀，那么“摸”着了原子核没有呢？

吕：不但摸着了，而且α粒子与原子核还发生了反应，结合成为

一个新的原子核，并且把一个质子打了出来。因此，这一个实验就说明了两件事。第一件，说明了铝、氮、硼原子核的半径不小于 4.5×10^{-13} 厘米、 2.4×10^{-13} 厘米、 1.7×10^{-13} 厘米；第二件，说明了质子确实是原子核的组成部分，而且可以把它从原子核里打出来。

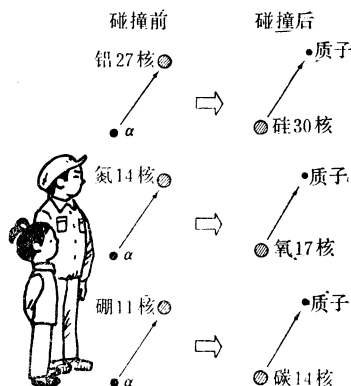


图6 α粒子进入原子核，打出质子，并形成新原子核。铝27核是有13个质子，14个中子的铝原子核。其它核也有同样的反应。碰撞前后中子加质子总数是不变的(α有两个质子、两个中子)。

玲：真有意思，这个实验原来目的是为了“摸”原子核，结果却把质子打出来了。那中子呢？

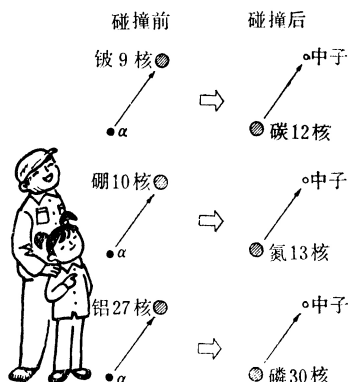


图7 α粒子进入原子核，打出中子，并形成新原子核。

吕：中子也打出来了。例如用α粒子打铍9原子核，就结合成为碳12原子核，并且把一个中子

放了出来。这就说明了中子也是原子核的组成部分。
玲：中子是电中性的，怎么知道打出来的是中子呢？

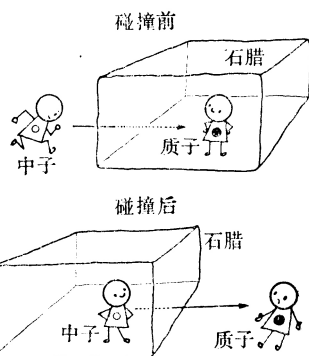


图8 中子从石蜡中把质子打出来。

吕：刚打出来的时候，人们不认识它，以为是一种“r射线”。然而这种“r射线”却能够从石蜡中打出高速的质子来。这个现象很象打弹球，比方说，有两个一样大小的弹球，一个停在地上(相当于石蜡里的质子——氢原子核)，另一个拿在手中(相当于中子)，用它来打地上的弹球，如果打个正着，跑着的弹球就会立刻停下来(中子停在石蜡中)，原来停在地上的弹球就会被打跑(质子从石蜡中跑出来)。这种本领用“r射线”是解释不通的。反之，如果认为不是“r射线”，而是一种电中性的和质子一样重的粒子(中子)，立刻就解释通了。现在，原子核由质子和中子组成已经是公认的科学事实了。

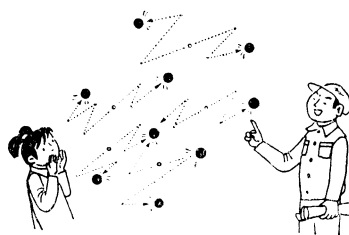


图9 电子在原子核里横冲直撞，会把原子核冲散。(黑点是质子，曲折线的小点代表横冲直撞的电子)。

玲：原子核里为什么没有电子呢？

吕：发现中子以前，人们也猜想过原子核是不是由电子和质子组成的，但是这个猜想在量子力学里说不通。因为如果要把电子关在原子核里，电子的波长就必须很短，能量就必须很大，这样大能量的电子完全可以把原子核打散。另外原子核的自旋也解释不通。

中子扮演着一些重要的角色

玲：叔叔，你给我说说，质子、中子和电子有什么相似之处和不同之处。

吕：好，质子、中子也都像小陀螺，自旋的大小和电子一样，是 $\frac{h}{2}$ ；

质子、中子也都带有磁性，都像小磁针，只是磁性比电子弱得多；另外，质子、中子的运动都服从波动的规律，……等等。不同之处就很多了，例如质子、中子都比电子重一千八百多倍；质子带正电，中子电中性，电子带负电；质子、中子有强相互作用，电子没有，……等等。

玲：上次你告诉我电子的磁性是由于有电荷，电荷迅速绕自转轴转圈就产生磁性。可是中子是电中性的，怎么也有磁性呢？

吕：中子是电中性的，但它不是没有电荷，它所带的正电荷与负电荷大小相等，因此电荷恰好抵消。同时，正电荷和负电荷都在迅速转圈，但它们不是按相同的方向转圈，结果产生的磁性就不会抵消了。

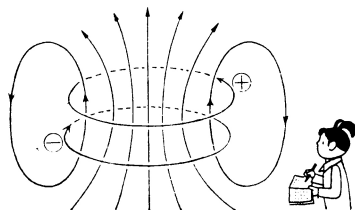


图 10 因为正电荷与负电荷绕圈的方向相反，所以他们产生的磁力线是在相同的方向，是互相加强的。

玲：原来是这样！

吕：小玲，你知道吗？天上有一种恒星，叫做中子星，密度极大，它的质量和太阳差不多，但直径只有十几公里，是由极大量的中子紧密聚合在一起而形成的。中子星的磁场非常强，估计可高达一万亿高斯。我们目前用人工方法产生的磁场最高只有几十万高斯，相差约千万倍。中子星还日日夜夜地发出脉冲电波，这种脉冲电波可以用射电望远镜接收到。

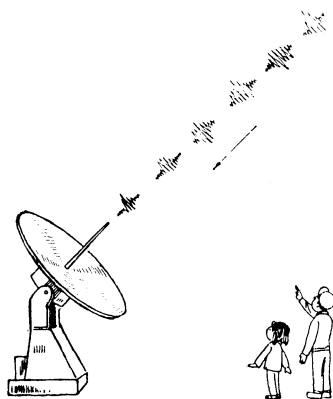


图 11 用射电望远镜接收中子星发出的脉冲电波。

玲：真有趣！这么说，中子在天文学上还扮演着重要角色哩！

吕：中子还有一个和电子不同的特点，就是它会衰变。自由中子衰变后，变成一个质子，一个电子，一个反中微子，它的寿命大致是 1000 秒。

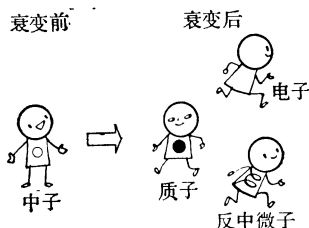


图 12 中子的衰变。

玲：中子会衰变！？如果原子核里的中子都衰变成质子，原子核岂不就要散了吗？

衰变前

衰变后

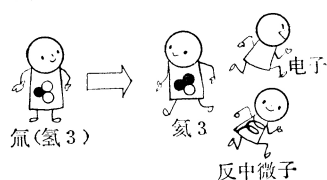


图 13 在中子多的原子核里，中子会衰变成质子，放出电子和反中微子。

吕：这倒不会。中子衰变是需要能量的，在稳定的原子核里，中子数和质子数有一定比例，它不会衰变。但是，在不稳定的原子核里，如中子过多，个别中子就会衰变，放出电子和反中微子。不稳定原子核经过衰变后，失去了能量，恢复了中子数和质子数的稳定比例，就变成稳定原子核。如质子过多，例如 α 粒子打硼10、铝27而产生的氮13、磷30（见图7）的原子核里，其中的个别质子也会衰变成中子，并放出正电子。但是自由质子是稳定的，不能衰变成中子。

衰变前

衰变后

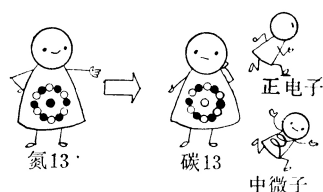


图 14 在质子过多的原子核里，质子会衰变成中子，放出正电子和中微子。

玲： β 射线有用吗？

吕：放出 β 射线的同位素有多种，它们在工农业、国防和医学上都有不少用途。另外，很多稳定的原子核在吸收了中子之后，也会变成放射性的原子核。所以在制备放射性同位素方面，中子也扮演了重要的角色。

玲：这些中子从哪儿来呢？

吕：从原子反应堆中来。其实，反应堆的运转，核武器的爆炸，以及原子能发电，都要靠中子。

玲：中子真是一个扮演重要角色的“基本”粒子啊！

传递强相互作用的量子 —介子,和假的 π 介子 — μ 子的发现

吕: π 介子扮演的角色也是很重要的。寻找 π 介子有一个故事。小玲,你记得吗? 前次讲过,在研究原子核的结构时,遇到了前所未有的强相互作用。人们为了了解它的性质,就拿它和已经熟悉的电磁相互作用去比较。电磁相互作用,是通过电磁场来传递的(或者说,以电磁场作为媒介)。强相互作用是不是也通过某种强相互作用场来传递呢? 电磁场的量子是光子,强相互作用场的量子又是什么呢?



图 15 电磁场传递电磁相互作用。
电磁场的量子是光子。 A, B 是两个电荷。

玲: 结果怎样呢?

吕: 首先需要找出这个场量子的质量。以前说过,强相互作用力是短程的(只在 $\sim 10^{-13}$ 厘米的短距离内起作用。这个距离叫短程力),按照狭义相对论和量子力学的道理,传递相互作用的场的量子的质量(这质量是指它静止时的质量)必定反比于作用范围的半径,作用范围



图 16 π 介子场传递强相互作用。
 π 介子场的量子是 π 介子。 A, B 是两个核子。

的半径越短,场量子的质量就越大。根据强相互作用的力程算出来场量子的质量(静止质量)大致为电子质量的二百多倍。

玲: 它在实验上验证了吗?

吕: 对于这个理论实验验证却是一个曲折的过程。当时只知道质子、中子的静止质量大致是电子质量的一千八百多倍,到哪儿去找质量介于核子(质子和中子的统称)和电子之间的这种粒子呢?

玲: 是啊,找到了没有?

吕: 一开始似乎很幸运,发现宇宙线中有一种带电的粒子,质量是电子的二百多倍。但是不久以后就令人有点失望地发现,这并不是传递强相互作用的场的量子,因为这种粒子与核子的相互作用一点也不强,而是一种很微弱的相互作用。后来就把这种粒子称为 μ 介子或 μ 子。它的电荷和电子一样,自旋也和电子一样($\hbar/2$),所以又称为重电子。 μ 子是不稳定的,它要衰变成电子,并放出正反两个中微子,平均寿命很短,只有百万分之二秒。 μ 子的衰变也是通过一种微弱的作用,后来把这一类微弱的作用都称为“弱相互作用”。

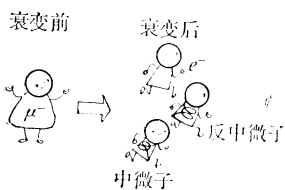
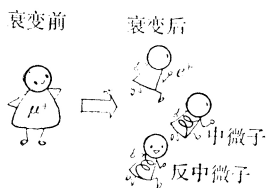


图 17 μ^+, μ^- 的衰变。

玲: 哟,原来是假冒的,找错了。

吕: 虽然找错了,但还是找到了一种过去不知道的“基本”粒子—— μ 子。

玲: 所以应该说仍然是一个不小的收获,对吗? 那么后来怎样呢?

吕: 后来人们用乳胶片去探测宇宙线,发现宇宙线中有一种带电粒子,它在乳胶中速度逐渐减慢,并很快地衰变成速度较大的 μ 子, μ 子在乳胶中速度也逐渐减慢,最后衰变成速度较大的电子。经过详细的考察,这最先出现的带电粒子就是刚才所说的传递强相互作用的量子,它与核子有很强的作用。人们把它叫做 π 介子,介子的意思是它的质量介于核子和电

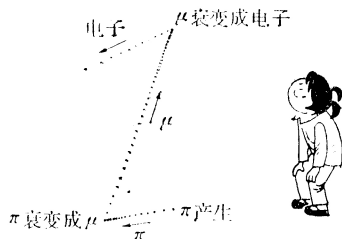


图 18 显微镜下看到的乳胶片显示的径迹(示意图)。速度越大,黑点越疏,速度越小,黑点越密。

子之间。 π 介子的质量是电子的 273 倍。 μ 子的质量是电子的 207 倍。

可以治癌的 π^-

玲: π 介子还有什么性质呢?

吕: π 介子有三种,一种带正电叫 π^+ ,一种带负电叫 π^- ,一种电中性叫 π^0 。 π^+ 主要衰变成 μ^+ (即反 μ 子), π^- 主要衰变成 μ^- (即 μ 子),寿命都是一亿分之二秒多一点,只相当于 μ 子寿命的百分之一。 π^0 主要衰变成两个 γ 光子,寿命更短,是亿亿分之一秒还不到一点。 π^+, π^-, π^0 的自旋都是 0,也都没有磁性。

玲: 叔叔,你上次说过,只有带电的粒子可以看到径迹,可是 π^0 电中性,它衰变成两个 γ 光子也

不带电,那怎么探测呢?

吕: π^0 衰变出来的每一个 γ 光子都是能量很大的,都可以转变成一对电子和阳电子,它们都带电,都可以看到径迹。

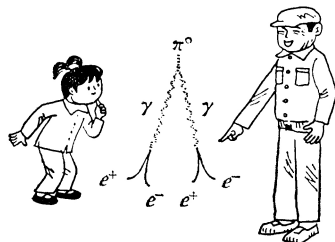


图 19 π^0 的探测: e^+e^- 可以看到径迹。 π^0 和 γ 不能看到径迹。

玲: 刚才说 π 介子是传递强相互作用的粒子,那么, π 介子与核子应该有很强的相互作用吧?

吕: 是的,可以举一个例子,当 π^- 介子停留在原子核旁边时,它会被原子核所吸引,像电子一样,绕原子核转若干圈,随即由于它与核子有很强的相互作用而被原子核所吸收。吸收后原子核就沸腾起来,立刻放出来好几个高速度的重的粒子(中子、质子、 α 粒子、重离子)。这种现象在乳胶中表现为辐射形的“星”。

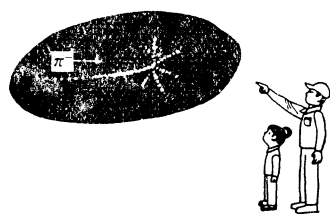


图 20 π^- 介子被原子核吸收后,在乳胶中形成辐射状的“星”。

玲: 这样看来,大量的 π^- 介子可以破坏大量的原子核,岂不是很危险吗?

吕: 可是这种性质对治癌很有利呢! π^- 治癌与其他的放射性治癌相比较,有两个明显的优点。一个优点是它的行动是可控制的,可以使它正好停留在癌区,让癌区的原子核吸收它们,放

出中子、质子、 α 粒子、重离子,大量杀伤癌区的癌细胞,而很少影响健康组织(π^- 介子在穿透到身体深部的癌区之前,要在健康组织中经过,引起一些电离,但这是很微量的,不致造成损伤)。另一个优点是杀灭缺氧的癌细胞的本领很大,要知道缺氧的癌细胞在放射治疗中是最顽固的、最不容易杀灭的。其他的放射治疗也各有优点,但只有 π^- 兼有这两个重要的优点。

玲: π^- 介子治癌有这么大的优点啊! 你前次告诉我以后会建造 π 介子工厂,我真希望它快点建起来。叔叔, π 介子工厂是什么样的?

吕: π 介子工厂中的主要设备是一个中等能量(500—1000兆电子伏)的强流质子加速器,使加速出来的质子去轰击一个靶,就可以得到很多的 π 介子。当然,能量更高的高能质子加速器,也可以产生很多的 π^- 介子,此外,高能电子加速器也能产生 π^- 介子。 π 介子的用途不仅限于治癌,在很多与物理、化学、生物等有关的科学技术工作中它都有应用。

能量到哪里去了

玲: 叔叔,刚才你讲 μ 子要衰变成电子,并放出正反两个中微子。中微子也有故事吗?

吕: 中微子也有故事。这要从原子核的 β 衰变说起。最初发现 β 衰变这种现象时,人们不知道有中微子,只注意到在衰变以前原子核有确定的能量,衰变后的原子核能量加上电子能量却是不确定的了,也就是说,一部分能量不知哪去了。这个事实使人们觉得很惊奇:因为在宏观世界里,任何运动过程都是能量守恒的;在微观世界里, α 衰变(原子核放出 α 粒子)是能量守恒的,放出来的 α 粒子

有确定的能量, γ 衰变也是能量守恒的,放出来 γ 光子有确定的能量。唯独 β 衰变能量不守恒,这岂不是怪事? 当时有两种看法,一种看法认为在微观世界里,可能能量就是不守恒的;另一种看法客观地分析了 β 衰变的能量,看到电子的能量有一个最大值,而且有如下关系:

$$\begin{aligned} & \text{衰变前原子核能量} \\ &= \text{衰变后原子核能量} \\ &+ \text{电子能量的最大值} \end{aligned}$$

这就是说,很可能不是能量不守恒,而是衰变中除放出了电子外,还放出了一个未知的粒子,是它把能量带走了。如果把它的能量也算上,能量就应守恒:

$$\begin{aligned} & \text{衰变前原子核能量} \\ &= \text{衰变后原子核能量} \\ &+ \text{电子能量} \\ &+ \text{中微子能量} \end{aligned}$$

当电子能量为最大值时,未知粒子的能量就等于零。人们把这个未知粒子叫做中微子,因为第一,在 β 衰变中 没有看到它,它一定是电中性的,第二,它的质量极微小。

玲: 我猜一定是第二种看法胜利了。

吕: 是的,后来越来越多的人在事实面前相信了中微子的存在。预言中的中微子的角动量(自旋)也是 $\frac{\hbar}{2}$,有了中微子,能量守恒可以保证,角动量守恒也

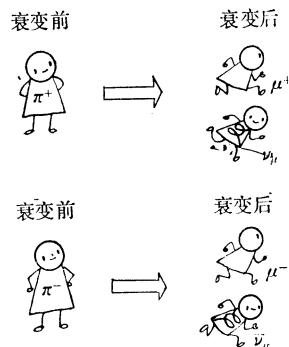
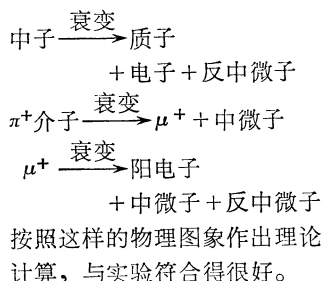


图 21 π^+ 、 π^- 的衰变。

不会破坏。从中微子存在的前提出发,中子衰变、 π^+ 衰变、 μ^+ 衰变的过程分别是:



找到了中微子 而且是两种中微子

玲: 在实验上什么时候才找到中微子的呢?

吕: 从提出中微子的设想到在科学实验中证实它的存在,中间经过了二十几年。因为中微子只有弱相互作用,不参与电磁相互作用,也不参与强相互作用,它穿透物质的能力极强,抓不住它,要探测它就非常困难。

玲: 用什么办法探测出它呢?

吕: 最先探测的是反应堆里产生的反中微子 $\bar{\nu}_e$, 方法是观察在反应堆旁边有没有如下的反应发生:

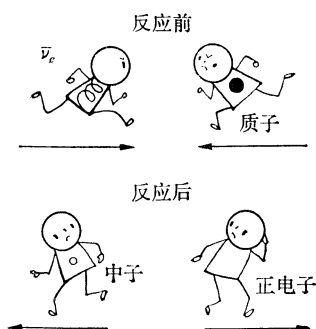
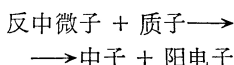


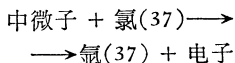
图 22 这个反应的出现,证实了反中微子 $\bar{\nu}_e$ 的存在。

结果果然观察到了个别的质子变成了中子,并产生了阳电子 e^+ 。刚才说过,自由的质子是会自动变成中子的,使质子发生这个变化的原因只能是反

中微子 $\bar{\nu}_e$, 因此观察到的现象证实了反中微子 $\bar{\nu}_e$ 的存在。

玲: 那么中微子呢?

吕: 中微子的探测是用如下反应:



氯(37)吸收一个中微子后就变成氩(37),并放出一个电子。曾经用这个方法在太阳辐射中找到了中微子 ν_e 。

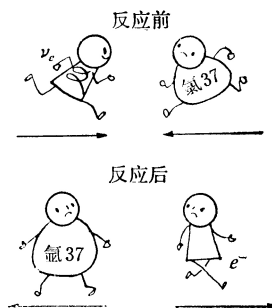


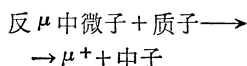
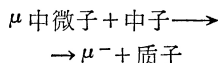
图 23 氯 37 中的一个中子吸收一个 ν_e , 变成质子,于是氯 37 变成了氩 37。

玲: 哦,太阳也会放出中微子?

吕: 太阳和很多天体都会放出中微子,宇宙空间中的中微子是很多。

玲: 叔叔,为什么有的中微子写成 ν_e , 有的中微子写成 ν_μ 呢?

吕: 因为有两种中微子和两种反中微子。实验上验证的方法是用高能质子打靶,产生 π^+ 、 π^- 介子束流。其中 π^+ 的 99% 以上衰变成 μ^+ 和 ν_μ , π^- 的 99% 以上衰变成 μ^- 和 $\bar{\nu}_\mu$ 。让这些中微子 ν_μ 和反中微子 $\bar{\nu}_\mu$ 进入火花室(也是一种探测带电粒子的探测器,在带电粒子经过之处,可出现放电火花,显出粒子径迹),它们就会和火花室中的中子和质子发生反应,使中子变质子,使质子变中子。同时,中微子 ν_μ 和反中微子 $\bar{\nu}_\mu$ 本身则变成 μ^- 和 μ^+ 。



值得注意的是在实验找不到中微子 ν_μ 变电子,反中微子 $\bar{\nu}_\mu$ 变阳电子的反应。这充分证实了中微子和反中微子都不是只有一种,而必定是都有两种: π 衰变中与 μ 子相伴出现的中微子、反中微子是 ν_μ 和 $\bar{\nu}_\mu$ (见图 21),它们只能变成 μ^- 和 μ^+ ,不能变成 e^- 和 e^+ 。反之,反应堆中产生的反中微子 $\bar{\nu}_e$ 则可以变成 e^+ (见图 22)。为了区别这两种中微子和两种反中微子,所以分别用 ν_e 、 $\bar{\nu}_e$ 和 ν_μ 、 $\bar{\nu}_\mu$ 来代表它们。

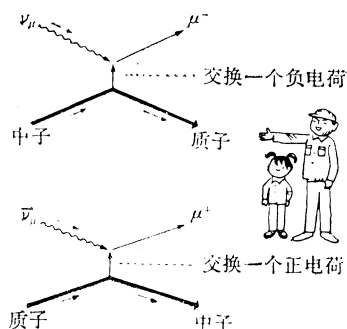


图 24 μ 中微子(ν_μ)只能变成 μ^- , 不能变成 e^- 。
反 μ 中微子($\bar{\nu}_\mu$)只能变成 μ^+ , 不能变成 e^+ 。

玲: 中微子的故事倒也是挺曲折的哩。

吕: 中微子的发现标志着能量守恒定律在微观世界的一次巨大的胜利。恩格斯曾指出,能量守恒定律反映了唯物辩证法基本规律的本质,即认为物质的一切运动形态都是可以互相转化的,而且运动是不灭的,它既不能创造也不能消灭。当然,今后随着物理学的发展,能量守恒定律也可能以其他新的形式出现,但是客观世界的“运动不灭”(既不能创造,也不能消灭)的实质是不会变的!

玲: 叔叔,中微子的性质……

吕: 哦,中微子的性质是相当古怪的: 它有的方面像光子,例如它和光子一样不带电,和光子一样永远以光速前进。

玲：还有呢？

吕：中微子在有的方面又像电子，例如它的自旋角动量是 $\hbar/2$ ，和电子的自旋一样。另外中微子和反中微子在前进的时候，总是像螺丝钉那样一边旋转一边走的。中微子的自旋方向永远和它的前进方向成左旋关系，像个左旋螺丝钉。反中微子的自旋方向永远和它的前进方向成右旋关系，像个右旋的螺丝钉。



图 25 中微子自旋与前进方向成左旋关系；反中微子自旋与前进方向成右旋关系。

玲：还有，刚才说中微子只参与弱相互作用，所以中微子可以穿透很厚的物质。叔叔，我还想

问质子、中子和 π 介子都扮演着一些重要的角色，可是中微子呢？

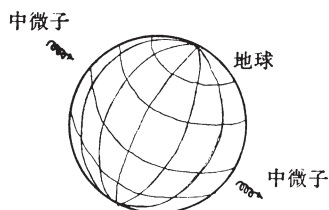


图 26 中微子穿透整个地球是很容易的事。

吕：中微子很孤僻，它很难和别的东西发生相互作用。正因为这个原故，在高温高压的恒星（例

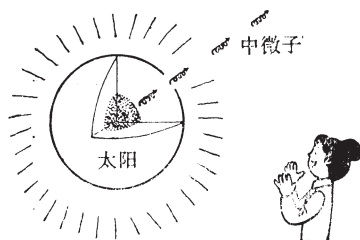


图 27 中微子可以很容易地从太阳（以及其他恒星）的核心部分跑出来，并把能量也带出来。

如太阳)中心所产生的中微子，可以几乎无阻拦地跑到外面来，并把能量也带出来。所以中微子在天体演化过程中扮演着重要的角色。

玲：孤僻的中微子真是有点不好“捉”、“摸”呢！

吕：革命导师列宁说过，“**电子也是不可穷尽的。**”这句话表达了物质是无限可分的。目前我们对中微子的知识还少得很，不能回答怎样去应用它这个问题。但是毛主席教导我们：“**人的正确思想，只能从社会的生产斗争、阶级斗争和科学实验这三项实践中来。**”人们通过社会实践，总有一天是会回答这个问题的。

玲：我相信这一点，而且我也相信人类对自然的认识是没有穷尽的。

吕：你说的很对。今天“基本”粒子大家庭的故事讲不完了，下次再接着讲吧！

玲：好。

(插图：尉迟横)