

中国科学院高能物理研究所“小粒子 大宇宙”系列课程

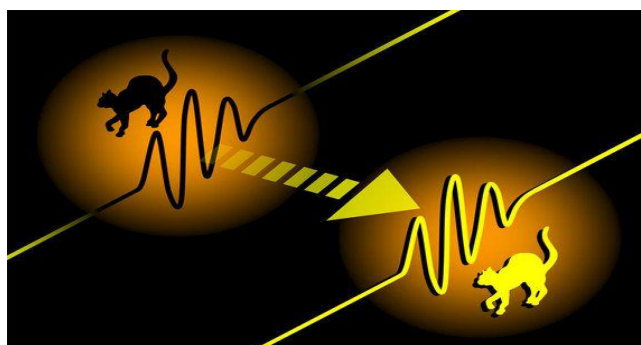
第三讲：中微子是薛定谔的猫

邢志忠

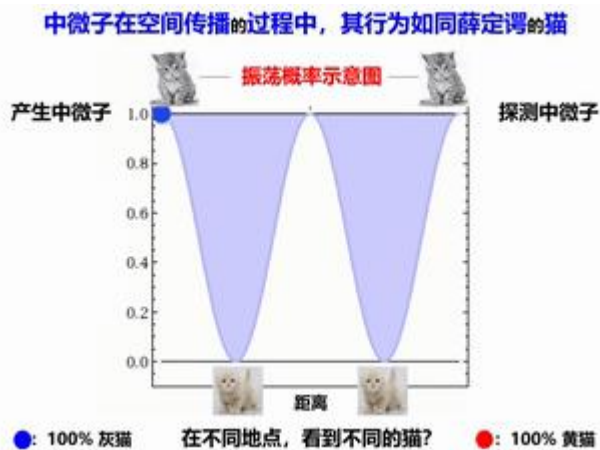
大家好！欢迎来到“小粒子 大宇宙”系列课程。

这里是中国科学院高能物理研究所，我是邢志忠。

这次科学公开课，我们大家一起来学习和探讨一种神秘的基本粒子，它们的名字叫做中微子。顾名思义，中微子就是电中性的微小粒子。很多同学可能从来没有听说过中微子，但是我相信，很多同学应该听说过薛定谔的猫。其实中微子和薛定谔的猫有很多相同之处，它们都和量子力学有非常紧密的关系。

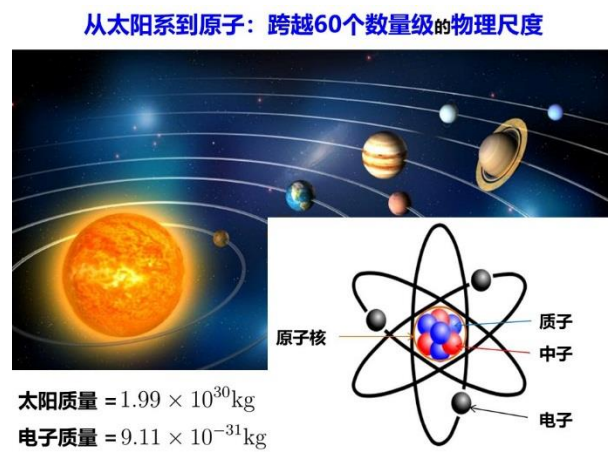


首先，我们看一看什么是薛定谔的猫。大家知道，薛定谔的猫是奥地利物理学家、量子力学的创始人之一薛定谔在 1935 年提出的一种假想实验。什么是假想实验呢？就是你不需要在实验室做真正的实验，而是发挥你的想象力来假想一个物理过程。大家都知道，知识就是力量。但是爱因斯坦曾经说过：“Imagination is more important than knowledge”（想象力比知识更重要）。现在我们就像薛定谔那样发挥自己的想象力，做一个薛定谔的猫的实验。假设有一个封闭的盒子，里面放进去一只活猫，再放进去一瓶毒药，然后放入一种放射性原子。放射性原子的用途就是为了打开毒药的瓶子，这样毒药就可能毒死猫。同学们可能会好奇，为什么要选择放射性原子，而不是普通的开关？因为放射性原子不稳定，它们会分解，或者说会衰变。我们利用放射性原子的衰变作为开关就有它的好处。什么好处呢？我们不知道这种原子什么时候会衰变，所以就具有了不确定性。如果你打开了盒子发现猫还活着，就说明这种原子还没有开始衰变；如果你发现猫已经死了，那毫无疑问原子已经衰变，打开了毒药瓶。但是如果你没有打开这个盒子，你就不知道猫是死是活，这时候猫就处在两种可能的状态：要么死、要么活，我们就把这种状态叫做量子叠加态。也就是说，在你没有打开盒子的时候，猫处在半死不活、不知死活的状态。所以这种不确定性恰好就反映了量子力学非常令人困惑又非常令人着迷的一面。但是大家都知道量子力学是对的，它是描述微观物理规律最成功的理论之一。



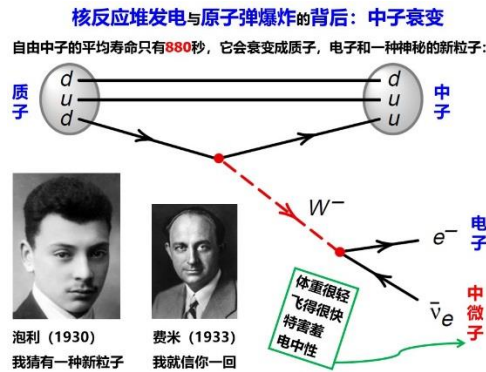
(这个是个动图，放到 word 里面就不动了，原图请看 ppt。
 预览好后也请发给党蕾检查一下，她对内容更加熟悉)

然后我们再看中微子，中微子和薛定谔的猫非常像，也具有量子属性。中微子有三种不同的类型，它们在空间传播的过程中，一种类型会转化成另外一种类型。现在打个比方，一种类型的中微子是灰颜色的猫，另外一种类型的中微子是黄颜色的猫。当你通过实验制备出这样一种中微子束流，你在什么地方来测量它就成了问题的关键。如果你选的地方合适，你发现中微子还是原来的类型，灰猫还是灰猫。如果你选的地址不合适，你可能就会发现灰猫已经变成了黄猫。那么在不同的地点，甚至有可能中微子就是灰猫和黄猫的叠加态。所以从这一点来说，中微子的行为就和薛定谔的猫非常类似。我们做实验，其实是要确定中微子处在不同类型的概率，或者说猫处在不同颜色的概率的大小。



为了向同学们解释清楚什么是中微子，以及它们有哪些属性，我从大家熟悉的太阳系入手。大家都知道，太阳系非常大，太阳的质量特别巨大，地球和其他行星围绕着太阳做近似的圆周运动。为什么呢？因为它们之间存在万有引力。大家学过万有引力，也知道牛顿和苹果的故事，但是同学们有没有问过自己：砸在牛顿头上的苹果有多重？如果你问了这样一个问题，虽然看起来很傻，但其实是个好问题。这说明你很好奇苹果和牛顿以及地球之间的内在关联，这就是万有引力。原子系统其实和太阳系非常相似。我们知道氢原子的结构是电子围绕着原子核运动，也是近似的圆周运动，更重、更复杂的原子也呈现出类似的图像。原子核是由质子和中子构成的，质子带正电荷，中子不带电，因此带正电的原子核和

带负电的电子之间就形成了电磁吸引力，这与地球和太阳之间的万有引力是类似的，保证了原子系统和太阳系长得非常像。电子的质量特别轻，从质量的角度来说，从太阳系到原子其实跨越了约 60 个数量级的物理尺度；两者虽然是宇观和微观之间的差异，但在结构上有很大的相似性。这一点显得特别神奇！



质子是稳定的，电子也是稳定的，但是中子不稳定。科学家已经探测到自由中子的平均寿命只有 880 秒，也就是说不到 15 分钟的寿命。它会衰变，会变成质子、电子和一种神秘的新粒子，这种新粒子就是我们今天要讨论的中微子。

早在 1930 年，为了解释中子衰变的末态电子的能量好像丢失了一部分这样一个实验事实，奥地利物理学家泡利——就是提出泡利不相容原理的那个泡利——假设有一种新粒子在中子衰变过程中产生，然后又偷偷地逃逸了，携带走了一部分能量。所以，你如果做实验，只测量反应末态的电子能量，你会发现能量丢失了一部分。泡利设想这样的一种新粒子具有一些很奇特的性质：它的体重特别轻，远远地轻于电子；它飞得非常快，接近于光速；它的性格非常内向、特别害羞，也就是说它一般不和其他粒子或其他物质交朋友（相互作用），它特立独行；另外，它还是电中性的粒子。有了这样一些特殊的性格，在实验上要想探测或捕捉到中微子就变得非常困难。

1933 年底，泡利的好朋友、意大利物理学家费米接受了泡利提出的中微子假说，发展出一套中子衰变的有效场论，能够计算出中子衰变的概率。这一点很重要，因为只有理论物理学家算出来核裂变的概率，实验物理学家才能做实验去检验泡利的假说对还是不对。到了 1956 年，美国科学家在核反应堆实验中终于发现，确实存在泡利所假设的那种新粒子——神秘的中微子及其反粒子。

中微子重要吗？非常重要！没有中微子的世界是不可想象的。也就是说，自然界和人类都离不开中微子，也离不开中子衰变。我给大家举两个例子，大家都会有亲身感受的例子。

没有中微子的世界不可想象：自然界离不开中子衰变

太阳为什么发光发热？ $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + 26.73 \text{ MeV}$ 你相信吗？

1968年，科学家探测到了太阳中微子！而且还发现，每秒钟有超过一万亿个太阳中微子穿过你的身体！你相信呢还是相信呢还是相信呢？

第一个例子，你从小到大有没有问过自己：太阳为什么会发热发光？可能有老师、有大人告诉你，太阳之所以发光发热，是因为它的内部一直在发生核聚变反应。核聚变反应的过程就是四个质子聚变成氦四核，放出两个正电子和两个电子型中微子，再放出一部分能量。有一小部分能量从太阳中心传到太阳表面，然后再传遍整个太阳系，我们人类在地球上就能感受到来自太阳的光和热。但问题是，这样一个物理学机制你相信吗？你说我信了，因为我感受到来自太阳的光和热了，所以太阳中心肯定有某种反应。但那不一定是核聚变反应，其他的化学反应、物理反应也可能会发出光和热。你要是一个好奇心特别重、特别喜欢刨根问底的学生，可能就想：是不是有其他办法测量这种核聚变的末态产物？比如说测量氦四核或正电子，来验证太阳中心真的发生了这样的核聚变过程。但是很遗憾，我们在地球上没有办法测量上述核聚变反应所产生的氦四核和正电子。为什么呢？因为这些粒子带电，它们的自由程非常短，它们没有办法从太阳中心飞到太阳表面，所以唯一的希望就是去探测核聚变反应产生出来的电子型中微子。

刚才说了，中微子性格很害羞，它一般不和其他小朋友打交道，所以它的自由程特别长，有可能从太阳中心顺利到达太阳表面，再从太阳表面传播到地球。如果你在地球建造一台合适的探测器，你就有可能探测到来自太阳的中微子。如果你既感受到了光和热，又看到了来自太阳的中微子，你是不是就会认为科学家告诉你太阳中心发生了核聚变这件事更可信？我想是。

1968年，科学家真的在地球上探测到了来自太阳的中微子，而且他们还发现，每秒钟有超过1万亿个太阳中微子穿过你的身体。你说这怎么可能？我一点感觉都没有！这是怎么算出来的？科学家可以在地球上探测太阳中微子的通量，就是每秒钟每平方厘米能测量到多少个中微子。然后你算一下自己身体的表面积是多少，乘上太阳中微子的通量，你就会得出一个非常惊人的数值：每秒钟竟然有不止1万亿个太阳中微子穿过你的身体。但是它们不会对你造成任何伤害。原因很简单，就是因为太阳中微子太害羞了，它们虽然从你的身体穿过去，但是基本不会与你身体中的原子核以及电子发生反应，也不会让你感受到任何不适。



第二个例子可能更令有些同学感到惊奇，就是我们人体自身是具有放射性的。而放射性就是核裂变，我们身体中某些中子会发生裂变，释放出中微子，甚至会释放出光子。释放出多少呢？如果你的体重在50公斤到60公斤之间，你体内含有的微量放射性元素，比如说钾四十，大概有十毫克左右。这样的放射性原子发生核裂变，每秒钟有多少中微子释放出来？你可以做一个计算，最后你会发现，每天每夜可以放出几亿个中微子以及几千万个光子。放出光子的过程和放出中微子的过程略有差别，科学家已经用非常精密的仪器探测到了来自人体自身的光子。但是中微子太害羞了，所以我们目前还没有可靠的办法来探测人体自身所产生的中微子。喜欢吃香蕉的同学要注意咯，香蕉是富含钾四十的，所以它有可能帮助

你补钙，因为从钾四十衰变到钙四十就会放出中微子。



我们已经知道了中微子有这么多神奇的特性，但是这还不够，它们还有两个神秘的性质。一方面，它们不是孤单的一种粒子，它们其实有三种类型，相当于三姐妹。其实电子也不是孤单的一种，它也有三姐妹，我们分别称之为电子、缪子和陶子。有些科学家喜欢用狗来描述电子和它的三姐妹，我们不妨称它们为带电轻子狗，轻子的意思就是质量比较轻的基本粒子。既然电子和它的小姐妹们可以用狗来描述，中微子又总是和电子以及其他带电轻子一起产生，那么我们何不用猫来描述中微子呢？因此自然界也存在三种中微子，我们称之为中微子猫，即电子型中微子猫、缪子型中微子猫和陶子型中微子猫。

刚才已经说了，中微子的质量特别小，但它们轻到什么程度呢？大家想象一下，每个自由中微子的体重都不超过电子体重的 500 万分之一，非常非常轻，因此它们在空间飞行的速度特别接近光速。由于它们的体重太轻了，现有的任何科学实验装置都没有办法探测到具有确定质量的中微子。我们只能通过弱相互作用，也就是中微子参与的相互作用，或者说中微子可以与其他物质发生关系的反应过程，来探测中微子质量态的量子叠加态，后者就是我们上面所说的电子型、缪子型和陶子型中微子。

你可能会问，不是说用任何办法都不能直接探测到中微子吗，那科学家怎么做实验呢？没错，你质疑得对，我们其实在具体实验中，是通过探测和中微子一起伴生的带电粒子来判断中微子的存在及其类型的。比如说我看到了电子，我可以判断与之相关、但看不见的粒子是电子型中微子，以此类推。



既然了解了中微子这么多性质，现在来看看它们为什么和薛定谔的猫长得特别像，这就是中微子振荡现象。有质量的中微子还具有一种神秘的量子相干属性，它们和薛定谔的猫的属性非常类似。我先给同学们介绍两个概念，其实前面已经提到了，一个是中微子质量态，另外一个是中微子相互作用态。中微子的质量态就是中微子具有确定质量的时候所处的状态，那么相互作用态就是它和其

他小朋友打交道的时候所处的状态，两者是不相等的。你可能会问，为什么不相等？大家想一下：如果你一个人呆在家里，周围没有其他人，你可以穿着睡衣来测量你的体重，这时候你就处在质量态；但是你如果到了学校来上课，周围有老师和同学，在众目睽睽之下你就不能太随便了，因为这时你和其他人在发生相互作用。所以你穿睡衣的状态和你穿校服的状态是不一样的，这一点非常容易理解。

中微子作为基本粒子也是这样，因此我们发现中微子的相互作用态其实就是质量态的量子叠加态。中微子不同的类型之间会有混合，然后在空间传播的时候，一种类型有可能转化成另外一种类型。在传播的过程中，不同质量的中微子的飞行速度当然就不一样，有大有小，然后它们就会发展出不同的相位，这一点和光的双缝干涉实验有相似之处。你在空间的某一距离处设置了探测器，想要探测中微子，但由于中微子的质量特别小，你其实没有办法测量它们的质量态，而只能测量它们的相互作用态。这时候，在探测器中，发展出不同相位的中微子质量态会重新进行量子叠加，形成新的相互作用态。你做一下计算，算出能看到哪种类型的中微子，以及看到的概率有多大。你会发现，你所探测到的中微子类型，可能和最初源处所产生的中微子类型不太一样，这一点与薛定谔的猫很相似。科学家在实际的研究中，用量子力学的语言可以写出中微子的质量态和相互作用态之间的关联，用混合角来描述这种关联，可以算出来一种类型的中微子保持不变或者转化成另外一种类型的中微子的概率有多大。等将来同学们长大了，学了量子力学和中微子物理学，你自己就会做这种计算了。你算出来之后发现，这样的概率是和正弦函数有关系的，因此你就会画出一个图来，纵坐标是中微子存活或者转化的概率，横坐标就是中微子在空间传播的距离。你把探测器放在不同的位置会看到不同类型的中微子，或者好几种类型的中微子的一种叠加，相当于薛定谔的死猫和活猫的叠加。这就是神奇的中微子振荡现象。



那么，这种现象是真的吗？是真的！科学家已经在不同的实验中探测到了中微子振荡。尤其是我们中国科学家在大亚湾反应堆中微子振荡实验中，完美地展现了中微子的这种神秘的量子属性。2011年底到2012年初，经过差不多两个月的运行取数，大亚湾国际合作组成功地探测到了来自大亚湾核电站、岭澳核电站、岭澳二期核电站的电子型反中微子在传播将近两公里的距离时消失了一部分，少了差不多6%。这6%去哪里了呢？它们转化成了其它类型的反中微子，即缪子

型和陶子型反中微子。我们的探测器对其他类型的反中微子不敏感，所以只看到了电子型反中微子的缺失。把这样一个重要的观测结果与我们通过量子力学计算的电子型反中微子存活概率相比较，你就能够确定相应的中微子混合角，也就是描述中微子质量态和相互作用态之间关联的混合角的大小，它恰好是 8.8 度加减 0.8 度（一共有三个 8）。特别巧的是，2012 年 3 月 8 号国际妇女节这一天，大亚湾合作组在北京高能所召开了新闻发布会，现任高能所所长、当时是大亚湾合作组中方发言人的王贻芳老师向全世界宣布：我们的实验看到了短基线反应堆中微子振荡现象，并测量到了最小的中微子混合角。这在国际学术界引起了很大的轰动。2012 年美国《科学》期刊评选出来的年度十大科学突破，就包含了大亚湾实验测量到反应堆中微子振荡和最小的中微子混合角。所以说这是一个非常了不起的发现，它恰好体现了在微观世界中，中微子这样一种神奇的粒子是具有薛定谔的猫的量子属性的。

接下来大亚湾实验的后续实验，我们称之为江门反应堆中微子振荡实验，会利用新的反应堆所释放出来的反中微子，在距离源处差不多 53 公里的地方进行探测，希望看到新的中微子振荡现象，从而确定中微子的质量顺序。什么是中微子的质量顺序呢？我们前面说中微子具有三种类型，对应三种不同的质量态。处于第一种质量态的中微子最重，还是第三种最重？现在科学家还不知道答案。中国的江门实验将精确测量中长基线的反应堆中微子振荡，来确定中微子的质量顺序，这也是一个非常重要的科学实验。等同学们长大了，还有机会加入江门实验组，因为江门实验的运行周期很长，可能会达到 20 年，不仅要测量中微子的质量顺序，还会探测太阳中微子、大气中微子和超新星中微子，以及研究宇宙其他的一些奥秘。毫无疑问，这是非常令人期待的一个大科学实验！

最后我留三道思考题，请大家想一想中微子和宇宙的关系：

1. 中微子是暗物质吗？
2. 中微子影响宇宙的演化吗？
3. 中微子和宇宙的反物质消失之谜有关吗？

大家可以查查文献思考一下。

今天的科学公开课就上到这里，谢谢同学们。再见！

问题一：中微子是暗物质吗？

答案：是的，但它们属于热暗物质。由于中微子的质量极小，因此在宇宙早期星系形成之初，它们的运动速度接近光速。

问题二：中微子影响宇宙的演化吗？

答案：是的，在宇宙大爆炸之后，年龄差不多一秒钟时，中微子开始退耦，不再干扰质子和中子，使得大爆炸核合成得以有效地进行，保证了物质世界的形成。

问题三：中微子与宇宙的反物质消失之谜有关吗？

答案：很有可能，如果它们在宇宙早期有超重的伙伴，其衰变会导致反物质消失。

科普参考书：《中微子振荡之谜》，邢志忠著，上海科技教育出版社，2019年。

注：本课程主要针对中小學生群体，因此部分内容和表述在通俗易懂与科学准确之间做了一定程度、甚至颇为艰难的平衡。