

一个正在探索中的自然之谜——中微子振荡

李世鸣

厉光烈

引言

五十多年前，奥地利物理学家泡利为解释 β 衰变能谱中的“能量不守恒”提出了中微子假说。他所“发明”的中微子是一种中性、无质量的粒子，以光速运动，并且只参与弱相互作用，所以可以毫无阻碍地穿过地球。在当时的实验条件下，这样的粒子是很难观测到的，因此人们称其为难以捉摸的粒子。泡利本人对提出这个假说也一直感到不安，觉得自己干了“一个理论物理学家不该干的事——预言存在一种不能被实验探测到的粒子”。直到二十五年以后美国物理学家柯可和雷尼斯小组探测到由中微子引起的反应，才无可辩驳地证明了中微子的客观实在性，同时也证实了泡利非凡的洞察力和预见。后来，实验又进一步弄清楚了伴随电子、 μ 子和 τ 子产生的中微子是不同的。于是，中微子又被赋予三种不同的“味道”，用符号来表示，就是 ν_e 、 ν_μ 和 ν_τ 。就在人们感到对中微子性质的认识越来越清楚的时候，1980年美国物理学家所作的一次有争议的实验给人们带来了新的困惑。这个实验表明，中微子穿过空间时会发生“振荡”，或者说会不断地、自发地改变其“味道”——这差不多就象苹果从树上掉下来在碰到牛顿的头顶之前变成了梨子一样！这个实验在物理学界引起了普遍的激动与争论，因为这个实验如果被证明是正确的，那将意味着长期以来被认为无质量的中微子实际上带有微小的静止质量，这将给我们对自然界的认识带来强烈的冲击。为了验证这个实验的结果，世界各地的许多实验室都在竞相设计新的实验，在这篇文章中我们将介绍在美国洛斯阿拉莫斯介子物理工厂和内华达试验场等地所作的中微子振荡实验。

那么，中微子振荡是怎样发生的呢？要弄清楚这个问题，就必须从大统一理论谈起。

大统一理论中的中微子

近年来，人们试图对三种基本相互作用（即强作用、弱作用和电磁作用）作统一描述，在粒子物理中发展了大统一理论。这些理论的建立主要依据以下的实验事实：夸克和轻子可以按质量递增地分为三族，电子及其中微子， μ 子及其中微子， τ 子及其中微子分别与上、下夸克，奇异和粲夸克，顶和底夸克对应。在大统一理论中，夸克和轻子的这一平行结构是有动力学原因的，这就是存在着可使夸克和轻子互相转化的相

互作用。按照这些理论，基本相互作用分为强作用，弱作用和电磁作用，这些只不过是在不同能量下观察粒子之间相互作用的结果，夸克和轻子的差别也仅在于，在目前所能达到的能量下，夸克参与强作用而轻子则没有。和在量子电动力学中一样，大统一理论中的粒子是通过交换规范场的量子而相互作用的，只不过所交换的不是光子，而是称为中间矢量玻色子的粒子，而且它有质量。将夸克变为轻子的规范玻色子具有极大的质量，理论预言为 10^5 GeV 到 10^{15} GeV。在大于这一质量的能量下，夸克和轻子之间的差别消失了，所有三种相互作用都变成了同一种相互作用的不同成份。然而遗憾的是，在可以预见的未来还不可能在实验室中得到这么高的能量，如果从今天的技术为基础建造一台能量如此之高的加速器，它的体积就将比整个太阳系还大！显然，要直接验证大统一理论是不可能的。在判断它的正确性必须寻找间接的证据，于是，难以捉摸的中微子又成了人们注意的对象。

这些理论有一个自然的结果——中微子应有不为零的静止质量。因为在大统一理论的框架中，夸克和轻子以相似的机制被赋予质量，中微子也不应该例外，它和其他轻子及夸克一样，应该有静止质量。另外，实验已经观察到不同夸克之间有混合的效应，那么与它完全对称的不同中微子之间会不会也发生混合呢？物理学家们就希望寻找由于“混合”而带来的，不同中微子“味”之间的振荡，以此研究中微子质量问题，并从一个侧面验证大统一理论。

中微子振荡的机制

中微子从一种“味”变到另一种，然后又变回来，这似乎太离奇了，不禁使人想到物质象魔术师手中的东西一样一会儿突然消失，一会儿又重新出现在目瞪口呆的观众眼前。但物理学毕竟不是变戏法，要了解这个量子力学现象，我们可以将它与能量在双摆的两个小球之间传递的经典现象作一个类比。

从经典力学知道，如果只推动双摆中的一个球，片刻之后第二个球就开始运动，第一个球静止下来，其后第二个球静止，第一个球又重新摆动，如此周而复始地继续下去。以 ν_e 和 ν_μ 之间的振荡为例。一个电子中微子变成 μ 中微子，然后又变回来，这正类似于两个小球之间周期性的能量传递。

能量从双摆的一个球传递到另一个球的时间取决于双摆两个简正振荡模式的频率差，而一种中微子

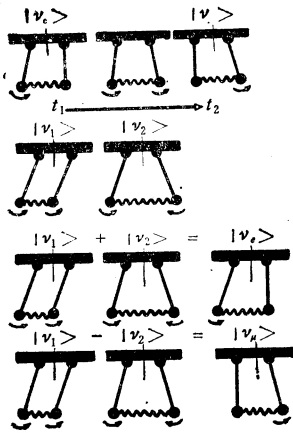


图 中微子振荡与双摆中周期性的能量传递之间的类比

“味”振荡到另一种所需要的时间则取决于两种中微子本征质量的平方差。注意，双摆的简正模式不同于任何一个小球的单独运动，而中微子的本征质量也并非电子中微子或 μ 中微子的真实质量。

现在我们把这一类比上升到数学的高度，让电子中微子和 μ 中微子波函数： $|\nu_e\rangle$ 和 $|\nu_\mu\rangle$

($|\dots\rangle$ 为量子力学符号)由具有质量 m_1 和 m_2 的两个中微子波函数 $|\nu_1\rangle$ 和 $|\nu_2\rangle$ 的线性组合来描述，即

$$|\nu_e\rangle = \cos\theta|\nu_1\rangle + \sin\theta|\nu_2\rangle \quad (1)$$

$$|\nu_\mu\rangle = -\sin\theta|\nu_1\rangle + \cos\theta|\nu_2\rangle \quad (2)$$

其中 θ 是混合角，这是大统一理论中的一个重要的参数，它描述使 μ 子族和电子族相混合的新相互作用在多大程度上混合了 ν_e 和 ν_μ 。若 m_1 和 m_2 不等， ν_e 和 ν_μ 之间的振荡就会发生，即在传播中， $|\nu_e\rangle$ 的 $|\nu_1\rangle$ 分量和 $|\nu_2\rangle$ 分量之间的相对位相将发生变化，于是 $|\nu_e\rangle$ 态和 $|\nu_\mu\rangle$ 态交替地消失和出现。

再与双摆相比较，将 $|\nu_e\rangle$ 和 $|\nu_\mu\rangle$ 与一个摆球或另一个摆球的单独运动联系起来，而把 $|\nu_1\rangle$ 和 $|\nu_2\rangle$ 看作两种简正模式，这两种简正模式就是两个摆球完全同相或完全反相运动的定态。一个摆球或另一个摆球的单独运动就分别相当于两个简正模式相等部份相加或相减(方程(1)和(2)中 $\theta = \frac{\pi}{4}$)。但是，两个简正模式的频率不同，于是它们之间的相对位相是随时间变化的，因此描述一个摆球运动的相加结合(方程(1))变成了描述另一个摆球运动的相减结合(方程(2))。

对于电子中微子演化的分析与此类似。由量子力学的计算很容易得到在距离中微子源 x 处找到一个电子中微子的几率为

$$P_{ee}(x) = 1 - \left(\frac{1}{2} \sin^2 2\theta\right) [1 - \cos(2\pi x/L)] \quad (3)$$

可以看出， $P_{ee}(x)$ 是随 x 振荡的。式中，

$$L = 2.5E_\nu/\delta m^2 \quad (4)$$

是振荡长度，以米为单位。其中 E_ν 是以 MeV 为单位的中微子能量， δm^2 是以 (eV)² 为本征质量差 $m_1^2 - m_2^2$ 。

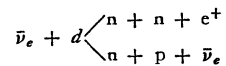
中微子振荡实验的设计

要得到中微子振荡的证据，最有说服力的应该是通过改变源和探测器距离使得某种中微子的数量随之发生变化的那些实验。在 $P_{ee}(x)$ 的方程中可以看出，振荡效应在 L 的半整数倍时达到最大，因此实验中探测器和中微子源间的距离起码应该与 L 同数量级，但由于 δm^2 是未知的， L 的大小也无法确定。理论上的考虑认为 δm^2 非常小，这样 L 就会很大，所以探测器必须在能得到可测信号的前提下放置在尽可能大的距离上，还应该尽量用低能中微子源，以减小 L 。

尽管目前探测器的尺寸已相当大，但可以期待的中微子反应的计数率却仍然相当低。例如美国洛斯阿拉莫斯介子工厂(LAMPF)典型的中微子通量为每秒 10^{10} 个中微子入射到一百米外的50吨探测器上，在这样高的通量下，我们希望看到的反应仅在三到四个小时才有一次！要确定本来就如此之低的反应率的变化的是严峻的挑战，实验中需要严密的屏蔽以消除本底事例，还要用特殊的探测器将本底和有效事例加以区分，探测器是多单元的，用现代电子学线路控制，这是一件大规模的极其精细的工作，其艰巨性是不言而喻的。

中微子振荡实验的初步结果

前文提到的第一个宣布中微子具有振荡迹象的是美国加利福尼亚州立大学欧文分校的实验小组，时间是1980年4月底。他们的实验是在萨凡纳河反应堆上完成的，那里正是1956年首先捕捉到中微子的地方。而实验的负责人又正好是首先宣布发现中微子的实验小组的负责人之一雷尼斯。这真是很难得的巧合，而且无疑加重了他们所获得的结果的份量。雷尼斯等人用萨凡纳河反应堆上的中微子研究了电子反中微子 $\bar{\nu}_e$ 在氦核上引起的两种反应：



其中一种称为“带电流”反应，在反应产物中有正电子，另一种称为“中性流”反应。实验用268公斤重水构成探测器介质，中间放有10个充氦(³He)的正比计数器，以测量符合的和单个的中子计数。探测器离反应堆中心11.2米，用铅和镉加以屏蔽，周围安放液体闪烁反符合计数器。实验的基本想法是，因为中性流反应的截面与引起反应的中微子类型无关，而带电流反应却只能由电子反中微子引起。这样，如果存在中微子振荡，那么带电流反应就会比中性流反应少，于是实验中获得两个中子符合计数率(带电流反应的证据)相对于一个中子的计数率(代表中性流反应)就会减少。欧文小组定义了一个“比率之比”作为中微子

振荡是否发生的判据。所谓“比率之比”就是两种反应的实验截面之比被它们理论截面之比来除。对于无质量的中微子,这一“比率之比”的值应该是 1,而欧文小组用他们获得的数据推导出的结果却是 0.38 ± 0.21 ,于是他们宣称确实从实验上观测到了中微子振荡。

但是,1980年6月在意大利西西里岛召开的国际中微子物理会议上,一个由美国加利福尼亚州理工学院,法国格林诺布尔核科学研究所和西德慕尼黑技术大学的物理学家组成的联合实验组报告了一个不同结果的实验。根据他们对反 β 衰变几率的研究,没有发现与理论有任何分歧,因此他们的结论是没有发生欧文小组所看到的那种水平的中微子振荡。对于最大的混合(方程(1)和(2)中 $\theta = \frac{\pi}{4}$),由他们的实验数据给出的 δm^2 上限为 $0.16 (\text{eV})^2$ 。而欧文小组报告的结果是 $\delta m^2 = 1(\text{eV})^2$ 和 $\sin^2 2\theta = 0.5$ (即 $2\theta = \frac{\pi}{4}$)。

以上两个结果中最大的 π 确定性来自反应堆中中微子的能谱,在数据分析中能谱是由理论计算的,不同的计算方法给出的能谱不同,从而影响对实验数据的分析。所以,这两个小组都在进行实验以检验中微子能谱,并进一步搜集在中微子源-探测器距离不同的情况下得到的实验数据。

由耶鲁大学和洛斯阿拉莫斯的物理学家小组在LAMPF完成的另一个实验也得到了中微子振荡的信息。这个实验对于 $\bar{\nu}_\mu - \bar{\nu}_e$ 的转化给出 δm^2 的上限为 $0.9(\text{eV})^2$,对 ν_e 的转化反应给出 δm^2 的上限为 $3.0(\text{eV})^2$ 。

1981年7月完成的一次实验又给出了否定的结果。这次实验是由美国布鲁克海文实验室和哥伦比亚大学的二十一位物理学家在费米国家实验室完成的。实验中分析了134000张气泡室照片,没有发现有三种“味”的中微子互相转化的迹象。由实验数据给出的 δm^2 上限在 $\sin^2(2\theta) \cong 1$ 时对于 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 和 ν_e 转化反应分别为 $0.6(\text{eV})^2$, $3(\text{eV})^2$ 和 $8(\text{eV})^2$ 。

这互相矛盾的实验结果使中微子振荡和静止质量的问题仍然是一个谜。

结 束 语

还会有更多的关于中微子振荡的实验,这大概是可以肯定的。无论中微子振荡的证据得到确认或是被否定,这些实验已经极大地引起了科学家的兴趣。尤其令人激动的是,虽然由于高不可攀的能量范围使我们无法直接用实验检验大统一理论,但通过中微子振荡实验对中微子静止质量和混合角的研究,使我们在低能区获得了一个窥探宇宙基本法则的窗口。让我们期待着奇妙的中微子带来更多大自然的秘密吧!