

中 微 子 振 荡

江 尚 东

振荡现象,是存在于自然界中的普遍现象.最直观的要算机械振动.钟表里面摆的运动,弹簧振子的运动等,都是物体在一定位置附近的来回重复的运动.我们最熟悉的还有电磁振荡.交流电的电压和电流、瞬变电磁场的电场和磁场,也总是在某一数值附近来回重复变化.概括来讲,凡是物质的运动状态按照一定的规律,在某种状态附近,往返重复出现的现象,都称为振荡.广义地说,只要某一描述物质状态的物理量,在某一固定数值附近来回变化,这种物质状态的变化,也称为振荡.所谓中微子振荡就是不同种类的中微子互相转化的现象.例如电子中微子 ν_e 和 μ 介子中微子 ν_μ 这两种中微子相互转变的现象,即 $\nu_e \rightleftharpoons \nu_\mu$, ν_e, ν_μ 及其反粒子 $\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu$ 的相互转化 $\nu_\alpha \rightleftharpoons \bar{\nu}_\beta$, (α, β 可取 e, μ, τ) 等都称之为中微子振荡.

这种振荡效应,意味着中微子带有一定的质量.因此,要想弄清中微子振荡假说的具体内容,就得从中微子质量这个问题入手.

理论上需要中微子质量

中微子,自 β 衰变初露头角后,一直被视为静止质量为零的粒子.实验上只能提供中微子质量的上限.如通过测氚的 β 谱,发现电子中微子质量的上限为 35 eV; 通过研究 K 介子的三体衰变,发现 μ 介子中微子质量的上限为 0.65 MeV. 理论上把中微子当作零质量的粒子看待,计算各种物理过程的结果与实验惊人地符合,使得中微子不带静止质量的印象在人们脑海里根深蒂固.那么为何又要给“干净利落”的中微子载上质量的负荷呢? 原因有二: 一是某些自然现象不能被现有的理论所解释,随着对客观世界认识的深化,物理理论必将不断地修正和发展.例如,“太阳中微子谜”,即太阳中微子“失踪”的现象,若用中微子振荡理论去解释,则比其它解释自然得多.又如,反应堆上的中微子与氦的碰撞实验以及氦的 β 衰变谱,都表明中微子可能有微小的质量.二是一些尚未成熟但很吸引人的理论,需要中微子有微小的质量.例如在一些大统一理论里,轻子数一般是不守恒的.要探索统一场论所暴露的轻子数破坏问题,中微子质量是一个非常灵敏的探针.因此,近几年来,不少理论模型给中微子构画出一幅幅携带质量的图案,使这个参与弱作用的常客,又添新颖.

理论上,中微子质量有两类,一是狄拉克 (Dirac) 质量,一是马约拉纳 (Majorana) 质量.一种中微子可

以有其中一类质量,也可以二者兼而有之.下面分别作一简单介绍.

狄拉克质量和马约拉纳质量

放弃现有的关于中微子只有一种手征态的实验依据,假定中微子有两种手征态且将左手态与右手态组合给出的质量项称为中微子的狄拉克质量; 置轻子数守恒而不顾只用一种手征态组成的质量项称为中微子的马约拉纳质量.

狄拉克中微子混合假说认为: 自然界存在着带有一定质量的两种中微子 ν_1 和 ν_2 , 它们象层子混合的形式一样,以正交迭加的形式混合成通常的中微子 ν_e 和 ν_μ :

$$\nu_e = \nu_1 \cos \theta + \nu_2 \sin \theta; \quad \nu_\mu = -\nu_1 \sin \theta + \nu_2 \cos \theta$$

其中 θ 是混合角. ν_1 和 ν_2 都是具有四个分量的狄拉克场,且各具有两种手征态.它们与所有费米子完全一样,其质量项为左、右手场的组合:

$$m_1 \bar{\nu}_{1R} \nu_{1L} + m_2 \bar{\nu}_{2R} \nu_{2L} + \bar{h} \cdot c$$

这就是狄拉克质量项,这样描述的中微子便称为狄拉克中微子.

马约拉纳中微子理论认为中微子象中性 π 介子一样,自身的反粒子还是自身.因而用左手中微子场的双线性形式: $m \bar{\nu}_L \nu_L = \frac{1}{2} m \varepsilon_{\alpha\beta} \nu_L^\alpha \nu_L^\beta$, $\alpha, \beta = 1, 2$ 作

为中微子场的质量项.人们称之为马约拉纳质量项.显然,它破坏轻子数守恒规则.另外,马约拉纳中微子场是个二分量子场,这把众多费米子中的中微子摆在一个特殊的位置.与狄拉克中微子混合理论一致的是,二者都同样认为 ν_e 和 ν_μ 是带质量中微子 ν_1 和 ν_2 的混合态.在描述中微子振荡现象上效果相当.

模拟 K^0 振荡

五十年代中期,中性 K^0 介子及其反粒子 \bar{K}^0 之间的振荡,曾引起物理学界的震动.今天,它对于中微子振荡的研究,大有启发.

中性 K 介子 K^0 和它的反粒子 \bar{K}^0 , 带有不同的超荷(重子数+奇异数)量子数. K^0 的超荷为 1, \bar{K}^0 的为 -1. 它们都是长寿命的粒子 K_L^0 和短寿命的粒子 K_S^0 的混合物.正因为 K^0 和 \bar{K}^0 都是由 K_L^0 和 K_S^0 混合而成的,所以, K^0 和 \bar{K}^0 这两种粒子态可以相互转变,即产生 $K^0 \rightleftharpoons \bar{K}^0$ “跃迁”. 严格一点应该这样说,一个超荷为 1 的粒子态,经过一段时间后,它将部分地跃

迁到超荷为-1的反粒子态。这就是中性K介子的超荷振荡。它是先由理论预言，后经实验证实了的。对中性K介子的衰变行为的进一步观测，导致了一个重要的发现，即CP(电荷共轭和空间反射联合宇称)不变性的破坏。

中微子振荡与中性K介子的振荡很相似。 ν_e 和 ν_μ 相当于 K^0 和 \bar{K}^0 ，狄拉克中微子或马约拉纳中微子 ν_1 和 ν_2 相当于 K_L^0 和 K_S^0 。由于 ν_e 和 ν_μ 都是由 ν_1 和 ν_2 组合的混合物，因而这两种混合物可以相互转变，即产生 $\nu_e \rightleftharpoons \nu_\mu$ “跃迁”。比方说，某个中微子源发射的电子中微子，离开“产生地”一定距离后，它就变成了 μ 介子中微子。理论上计算出这种变化的可能性，即跃迁几率，与中微子的混合程度(混合角 θ 的大小)、与不同中微子的质量平方差($|m_1^2 - m_2^2|$)、与中微子的动量以及离开“产生地”的距离都有关系。离中微子源越远、中微子动量越小，则“跃迁”几率就越大。也就越容易观测到振荡效应。因此，在探测中微子振荡的实验设施中，必须让中微子的动量尽可能小，让中微子源到探测器的距离尽可能大。

通常来说，如果不同中微子的质量平方差大于 $10^{-2}(\text{eV})^2$ 时，那么，通过探测从反应堆中或加速器中出射的中微子，就能揭示振荡现象。如果这个值远小于 $10^{-2}(\text{eV})^2$ ，此时反应堆和加速器便无能为力，就只能依赖宇宙中微子尤其是太阳中微子实验。

现有的实验迹象

关于中微子振荡效应，从现有的实验资料也可以看到一些蛛丝马迹。这里例举二个实验。

大家知道，原子核的 β 衰变，就是核内一个中子变成一个电子和一个反电子中微子的过程。根据费米弱作用理论，在很大的电子能量范围(782keV)内， β 衰变的跃迁几率和电子能量有线性关系。表示这种关系的费米图(或Kurie图，附后)是一条直线。实验测量的结果与直线关系很相符，但在电子能量达到782keV的地方，发现跃迁率的实验值略高于理论值。在费米图上反映为这条直线段的末端有微小的弯曲。我们可以维持原有的理论，将这个很小的偏离看作实验的误差。也可以修正理论，加上中微子质量的贡献去分析实验。苏联科学家用高精度谱仪测了铯的 β 谱，就是基于这种分析，给出电子中微子质量的最可几数值是： $34 \pm 4\text{eV}$ 。

我们再看一下太阳中微子实验。

布鲁克海文研究所的戴维斯(Davis)及其合作

者，多年来进行一项探测太阳中微子的实验。他们假定太阳中微子经历如下反应过程：

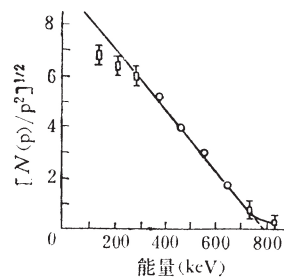
$\nu_e + {}^{37}\text{Cl}(\text{氯的同位素}) \rightarrow e^- + {}^{37}\text{Ar}(\text{氩的同位素})$
通过测量 ${}^{37}\text{Ar}$ 的产生率从而确定太阳中微子的通量。

从1970年到1975年，他们测得 ${}^{37}\text{Ar}$ 产生率的平均值为 1.3 ± 0.4 个太阳中微子单位。据目前的太阳标准模型计算，由太阳中微子产生的 ${}^{37}\text{Ar}$ 的数值应该是 6 ± 2 个单位。实际测得的太阳中微子的通量比理论预期的值要小得多。很多中微子在从太阳到地球间的旅途上“失踪”了。人们称这个“失踪”现象为“太阳中微子谜”。现有的粒子物理和天文物理都未能合理地解开这个谜。

解释这个谜，也是中微子振荡令人感兴趣的所在。按振荡假说，在只考虑两种中微子 ν_e 和 ν_μ 的情况下，可以认为由太阳发射的 ν_e 在旅途中有一半变成了 ν_μ ($\theta = \frac{\pi}{4}$)，因而在地面上所观察到的 ν_e 的通量应该比原来计算的值小一半。如果自然界存在的中微子多于两类，是N类，那么，这样计算的通量就是不考虑振荡时的通量的 $1/N$ 那样小。可见，中微子振荡假说能比较自然地解释“太阳中微子谜”。

以上可以看出，中微子振荡理论不是无故“创造”的。不过，由于中微子振荡的实验非常难做，现有的实验还不足以得出结论，要靠未来的实验来进一步检验。

如中微子振荡假说得到证实，那么，在广阔的科学领域，许多现有的理论图案将更新，许多实验数据将复核。如，原子核的热核反应，基本粒子的弱相互作用，天宇的质量密度，太阳的能量和恒星的演化，等，都与中微子性质密切相关。都将随之作出应有的修正了。



大家知道，原子核的 β 衰变，就是核内一个中子变成一个电子和一个反电子中微子的过程。根据费米弱作用理论，在很大的电子能量范围(782keV)内， β 衰变的跃迁几率和电子能量有线性关系。表示这种关系的费米图(或Kurie图，附后)是一条直线。实验测量的结果与直线

关系很相符，但在电子能量达到782keV的地方，发现跃迁率的实验值略高于理论值。在费米图上反映为这条直线段的末端有微小的弯曲。我们可以维持原有的理论，将这个很小的偏离看作实验的误差。也可以修正理论，加上中微子质量的贡献去分析实验。苏联科学家用高精度谱仪测了铯的 β 谱，就是基于这种分析，给出电子中微子质量的最可几数值是： $34 \pm 4\text{eV}$ 。

我们再看一下太阳中微子实验。

布鲁克海文研究所的戴维斯(Davis)及其合作