

搜寻宇宙中的不可见质量——中微子 质量和中微子振荡的一些实验现状

陆 昌 国

在上一期的“物质世界的砖块是不稳定的吗？”一文中,我们说了一些中微子的坏话,它是使搞质子衰变实验的科学家大伤脑筋的捣蛋鬼。为了不致冒犯可能是整个宇宙大家庭中人人最兴旺,势力最强大的成员,在这里将专文介绍一些有关中微子的传奇。

一、不露声色的神秘伙伴

事情还得从放射性初为人知说起。1895年伦琴在进行气体放电实验时,发现放电使仪器旁的荧光物质产生辉光,从而多少有点侥幸发现了X射线。1901年创设诺贝尔奖金,他成为第一位物理学奖的获得者。X射线的发现,刺激了多方面的研究,一年后贝克勒尔发现了铀盐的放射线,其后几年以内就搞清了 α 、 β 、 γ 这三种类型的放射性。经过二十多年的非常仔细的

测量,对 β 射线的了解越来越多,而对它的疑问也越来越大。人们弄清了 β 粒子即是电子,但是测量这些电子的能谱却令人惊讶地发现是连续的,而不是分立的。那时候量子力学的突飞猛进已经使大家普遍接受了微观世界能级的量子化概念,所以由连续的 β 能谱所引起的第一个疑难就是:为什么 β 粒子能谱不是量子化的分立谱?几年以后,当人们认识了在原子核内部并不存在电子时,第二个疑难问题又提了出来: β 粒子是从何而来的?

1930年泡利给一些正准备去参加都宾根物理会议的朋友写信,说他因想出席瑞士联邦技术学院著名的年度舞会而不能参加那次物理会议了,就在那封信中,他提出了中微子假设,为解决上述的第一个疑难铺平了道路。由于 β 衰变的始态与终态原子核能级之差

将在3个终态粒子—终态核,电子和中微子—之间分配,所以 β 粒子的能谱必然是连续的。在今天看来,粒子表上已经有了那么多成员,谁提出一种新粒子并不是一件什么稀罕的事情,但是当时人们只知道两个基本粒子:电子和质子(中子是1932年才发现的),所以泡利的假设无疑是富有革命性的思想。但在当时没有多少人将这个想法看得很认真,只有费米慧眼独具,不同凡响,他采用了泡利的中微子假设,解决了上述的第二个疑难,提出中微子和电子都是在 β 衰变中产生出来的,正如原子或原子核的激发态跃迁到基态时发出光子一样。费米的 β 衰变理论取得了巨大成功。

尽管三十年代初就提出了中微子假设,但是由于它的质量可能非常小,中性、穿透力非常强,所以其后很长一段时间内实验上并没有直接发现它,称它为不露声色的神秘伙伴一点也不过分。直至五十年代中,才在实验上直接证实了中微子的存在。此后,莱德曼等人又发现了两种类型的中微子,一种是与电子相关,称为电子中微子,另一种与 μ 子相关,称为 μ 子中微子。

二、谁是宇宙的主宰——中微子?

对于人们已经注意到的物质世界的客观实体,理论家总会做出一些理论去描写它,对于中微子也不例外。有一种所谓二分量的中微子理论,假设中微子的质量为零,总是以光速运动,由这个理论可推断中微子都是呈左手螺旋态,而反中微子则是右手螺旋态(螺旋态指的是粒子的自旋方向与它们的运动方向之间的关系,如果这种关系象你在拧紧一个螺丝时的情况一样,按顺时针方向越拧越紧,这就是右手螺旋,反之则是左手螺旋),这一切都与迄今为止的实验一致,所以似乎并不存在什么危机,理论家完全可在这片被征服的国土上休息一下了。然而情况恰恰相反,关于中微子的质量问题,近年来飞快地发展着,它引起了许多学科的强烈关注,诸如宇宙进化学,宇宙学,天体物理学,紫外和射电天文学,星体理论,宇宙线物理学,地质学,大统一理论,原子物理和核物理,化学粒子物理学等等,等等。

关于中微子可不可以有质量,有这样两种意见。一种意见认为:(1)实验上只观察到了右旋的反中微子和左旋的中微子;(2)如果费米子的质量不为零的话,必定能有两种螺旋态,因为既然质量不为零,它的运动速度必定比光速小。所以对于一个呈右旋态的粒子,我们总能找到一个参考系,它的运动速度比这个粒子要快一些,这样,在新的参考系中,该粒子的运动方向相反了,但其自旋方向不变,所以其螺旋态就从右旋变为左旋了;(3)因为右旋的中微子从来没看到过,它有可能不存在,于是就认为它不存在;(4)要使(2)与(3)协调一致,唯一的出路是让(2)对中微子不适用,即令中微子质量为0,这样中微子总将以光速运动,不可能

找到合适的参考系使中微子改变螺旋态。这种意见的结论是:中微子质量为零。

另一种意见认为中微子可能是马约喇纳粒子,即它的反粒子就是它自己,于是所观察到的右旋的反中微子也就是右旋的中微子,这样中微子可以有右旋和左旋两种螺旋态,它也可以有质量。

在上述的第一种意见中,我们之所以不能把左旋的中微子与右旋的反中微子合二为一,因为有这样一种传统的观念,即轻子数应守恒,中微子轻子数为+1,反中微子为-1。带质量的费米子的两个螺旋态,既然是同一粒子,如果轻子数守恒,那它们必须具有相同的轻子数。为什么我们相信轻子数守恒呢?因为有许多实验对这一点进行了检验,如没有能观察到 $\mu \rightarrow e \gamma$ 这样的衰变过程(初态 μ 子轻子数为+1,末态电子轻子数为+1,因为这两种轻子数是不同类的,应分别守恒,在这过程中则都不守恒),实验给出的这种过程的分支比上限为 1.7×10^{-10} ,非常之小。你可以说,即使如此也不能说明轻子数绝对守恒,只是实验精确度还不够罢了。对,说得有理。但是你必须回答这样一个问题,如果轻子数不是自然界的一种严格的对称性,为什么它是那样地接近于守恒呢?

大统一理论给出了一种可能的回答。在这种理论中,基本的费米子——夸克和反夸克,轻子和反轻子——都统一在一个大的规范群中,有一些称为规范玻色子的粒子在不同的费米子态的跃迁中起媒介作用。从夸克到反夸克的跃迁违反重子数守恒,将引起质子衰变。从轻子到反轻子的跃迁违反轻子数守恒,这就允许中微子带有质量。然而,重子数和轻子数不守恒的跃迁几率非常之小,因为大统一理论中的那些规范玻色子的质量非常之大。

由此可见,质子会衰变和中微子有质量都是大统一理论的推断,关于质子衰变的寿命,在上一期的文章中已介绍过,约为 10^{31} 年,中微子质量约在1eV左右几个数量级(对于中微子质量的估计远远不如质子寿命那么确定,各种模型的估算值相差很大,从10eV到 10^{-6} eV),这个质量范围很有意思,因为在实验上是有可能测量的,而且正是这一点点质量,可能对宇宙学有十分重要的意义,与质子衰变的情况相似。

天体物理学家早就知道在宇宙中存在着不发光的物质。星系(包括我们所在的银河系)的引力场要比只考虑组成星系的星球所造成的大得多。在1930年人们估算一群星系的总质量时已经注意到了这一点。把这群星系的动能和势能全部加起来,其总能量竟是正的,而不是负的(这群星系束缚在一起,总能量应该是负的)。要解决这一矛盾,人们设想星系的质量要比我们“看”得到的星系大得多,因为动能的大小随质量成线性增加,而势能的绝对值则是按平方规律增加。所以如果真正的质量大得多的话,势能就可能超过动能,

而使总能量变负。

这种不可见质量存在的猜测在七十年代测量所谓的星系的“转动曲线”时变得更加强烈了。如果星系的百分之九十以上是不可见的暗物质，究竟是什么东西组成了这种暗物质呢？它们是否可能是被星系的引力场所吸引住的带质量的中微子云呢？虽然乍看起来这是很奇特的想法，但引起了天文学家极大的兴趣。根据这种假设，人们用几种完全不同的方法对中微子质量进行了估算，结果却是出乎意料的接近，都在 $20\text{eV} \sim 100\text{eV}$ 的范围内。考虑到在物理学和天体物理学中出现的许多种不同的数量级，这种符合使得人们对“中微子主宰宇宙”的思想变得严肃起来。

当然以上对宇宙中暗物质的讨论，并不能肯定非得是中微子不可，也许存在其它轻的中性粒子，例如戈斯通费米子或一些目前尚未想象得到的粒子。但就目前人类的认识而言，中微子毕竟是最值得怀疑的。物理学家为测量它们的质量化费了巨大的努力，目前有四类实验在继续进行着：

(1) 对氚的 β 衰变谱的终端行为进行仔细的测量及分析，这是最经典的，也是最直接的测量中微子质量的方法。

(2) 测量无中微子的双 β 衰变，这种衰变中轻子数守恒明显地破坏了，这就意味着中微子可以有马约喇纳质量。

(3) 通过原子核对轨道电子的俘获，会出现 $Z \rightarrow (Z-1) + \gamma + \nu$ 。这样的过程，我们可以通过测量光子谱的终端的谱形来定出中微子的质量。

(4) 中微子振荡实验，这类实验原则上可以用来研究中微子质量非常小的情况。

三、测量中微子质量和中微子振荡的实验现状 ——结果还未能预料

与质子衰变的形势相似，尽管理论与实验都已经化费了巨大的势力，但有关中微子质量仍旧没有令人信服的最后结论，科学家们还在继续探索着。从目前的情况来看，打开中微子质量问题大门的钥匙是在实验家的手中。

这里我们首先介绍一下氚的 β 谱测量。三十多年前就有人开始了这项实验，以求得电子反中微子的质量，此后，许多人重复进行了这类实验，给出了越来越严格的中微子质量上限。1972 年斯德哥尔摩物理研究所的伯格维斯特采用了静电磁谱仪的方法使实验计数率比以往的实验提高了三个数量级，从而给出了更加令人信服，而且也大为严格的质量上限，在 90% 置信度下，中微子质量小于 55eV 。1976 年苏联理论和实验物理研究所的留皮莫夫等人在国际中微子会议上宣称根据他们的实验，中微子质量上限为 35eV ，1980 年该实验组又进一步声称，他们发现中微子质量不为

零，代替原来的质量上限，给出了中微子的质量范围为 $14 \sim 46\text{eV}$ 。同一个实验组，在 1984 年的第二十二届国际高能物理会议上又一次说，中微子的质量不为零， $M_{\nu e} \geq 20\text{eV}$ 。尽管没有人能完全否定这个结论，但普遍的态度是保持相当的审慎，实验者本人也承认对实验的某些关键环节还须作仔细的研究，他们估计在今后的 1~2 年内能得到解决*。

氚的 β 谱测量的基本思想是这样的：将测得的 β 粒子的能量与在该能量下记录到的 β 粒子数画成居里描绘的形式，应该如下图所示。如果中微子质量为零，则居里描绘将是一条直线，中微子质量不为零的话，在接近 β 粒子能量最大的区域，实验点将偏离直线。理论公式显示，假设 $m_\nu = 0$ 时， β 粒子可能的最大动能越小，则这种偏离效应越明显，人们之所以选用氚作为 β

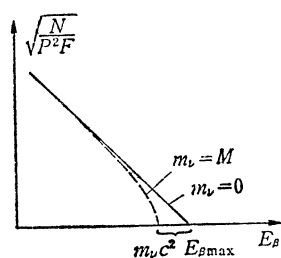


图 1

放射源，正是因为它

的 β 粒子最大动能最小，为 18.6keV 左右。尽管实验原理很简单，但是要

做好它决不是件容易的事，要求高动量分辨率、高亮度、低本底、非常薄的放射源、准确的能量刻度等等，这也就是几十年来从事这项实验工作的科学家们费尽心血仍未能得到肯定结论的困难所在。在这里值得一提的是这类实验仍旧是在一个小规模的实验室内所能完成的，它不同于质子衰变实验，也不同于以下将要讲到的中微子振荡实验，如果说这类实验果真克服了各种困难，为我们提供了明确可靠的结论的话，它将是一个可贵的典范，一个在小实验室内解决了粒子物理和宇宙学上具有重大价值的大问题的典范。

从上面的介绍我们可以看到，几十电子伏左右的中微子质量也许是这类实验的极限了，如果中微子质量比之小很多，那么我们只能依赖其它的手段来测量。这里将介绍另一类所谓中微子振荡的实验，从原则上说这后一类实验可以给出低得多的中微子质量极限。

中微子振荡的理论最早是由苏联联合核子研究所的邦德柯伏在 1967 年提出的。在此之前已经发现了有两种类型的中微子——电子中微子 ν_e 和 μ 子中微子 ν_μ ，所以这两种中微子之间的互变（或称振荡）并不是不可思议的，因为在粒子物理中已经有这类振荡现象的范例—— K^0 和 $\bar{K}^0$ 系统。中微子振荡理论认为中微子具有质量，我们所观察到的中微子是几个中微子质量本征态的混合。如果情况果真如此，则由某种粒子的衰变所产生的中微子束包含有不同类别的中微子，每类中微子有其各自的质量，所以在相同的能量下，将以不同的速度运动。当我们在束流的不同地方测量

时,应该发现这种中微子束的“振荡”,即束流成分的比例依其测量位置而变.假设中微子有两个质量本征态 ν_1 和 ν_2 ,其质量分别为 m_1 和 m_2 ,而我们观察到的电子中微子 ν_e 和 μ 子中微子 ν_μ 是 ν_1 和 ν_2 的混合态

$$\begin{aligned}\nu_e &= \nu_1 \cos \theta + \nu_2 \sin \theta \\ \nu_\mu &= -\nu_1 \sin \theta + \nu_2 \cos \theta,\end{aligned}$$

θ 为混合角.理论计算给出 ν_e 、 ν_μ 的质量应为

$$\begin{aligned}m_{\nu_e} &= m_1 \cos^2 \theta + m_2 \sin^2 \theta \\ m_{\nu_\mu} &= m_1 \sin^2 \theta + m_2 \cos^2 \theta,\end{aligned}$$

从 ν_μ 转换到 ν_e ,或从 ν_e 转换到 ν_μ 的几率为

$$\frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left(1 - \cos \frac{|m_1^2 - m_2^2| l}{2E_\nu} \right),$$

其中 l 为从中微子源到探测点的距离, E_ν 为中微子的动量.上面几个公式是中微子振荡实验的基本依据,由于转换几率中存在余弦项,显示出了振荡的特点,一旦实验上证实了这一点,则必然有 $m_1^2 - m_2^2 \neq 0$,这就是说,在 m_1 和 m_2 之间至少有一个不为零.假如 $0 < \theta < \pi/2$,则 m_{ν_e} 和 m_{ν_μ} 将都不等于 0.

振荡实验可分为两大类:(1)消失型,是寻找某种确定类别的中微子随距离的变化是否出现反常的消失,(2)出现型,是寻找在原初中微子束流中并不存在的那些中微子类别在飞行一段距离后是否出现了.下图为这两类实验的原理示意图.消失型实验曲线代表 i 型中微子在经过距离 l 后仍旧保持为 i 型的几率,出现型实验曲线表示在原始 i 型中微子束流经过距离 l 后出现 i 型中微子的几率.其“振荡”波长显然与 $E/\Delta m^2$ 有关, E 为中微子能量, $\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$.

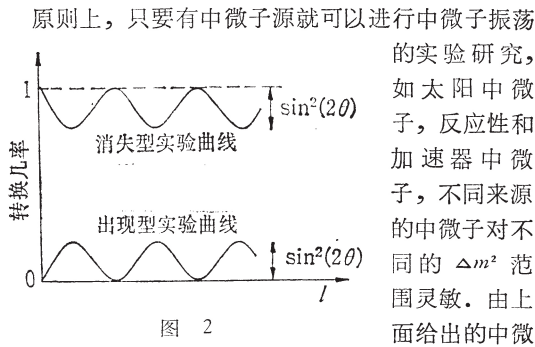


图 2

原则上,只要有中微子源就可以进行中微子振荡的实验研究,如太阳中微子,反应性和加速器中微子,不同来源的中微子对不同的 Δm^2 范围灵敏.由上面给出的中微子振荡的几率公式可知,最大的振荡效应将在

$$\sin \Delta m^2 \frac{l}{2E_\nu} \simeq 1$$

处出现,即 $\Delta m^2 \sim \frac{E_\nu}{l}$,由于不同的中微子源的 E_ν/l 不同,所以 Δm^2 的敏感范围也不同,如下表所示:

	太阳中微子	反应性中微子	加速器中微子
$E_\nu(\text{MeV})$	10	4	2500
$l(\text{m})$	10^{11}	10	1000
$E_\nu/l(\text{MeV/m})$	10^{-10}	1	3~50

$$\Delta m^2(\text{eV}^2) \quad 10^{-11} \quad 10^{-2} \sim 5 \quad 0.2 \sim 100$$

在太阳中微子实验中,美国布鲁克海汶实验室的戴维斯等人经过十多年的测量,发现由太阳发出的电子中微子通量只有标准太阳模型理论计算值的三分之一,一种解释就是中微子振荡,在太阳电子中微子到达地球之前,经过长距离的飞行已“消失”,转换为其它类别的中微子了.然而由于太阳的结构太复杂了,所以无法绝对相信理论计算值的正确,目前这仍旧是个谜,有待实验的进一步验证.

至于反应性、加速前实验,迄今为止还没有明确的、肯定的结论,尽管曾有过实验宣称他们观察到了中微子振荡,但没有被更多的实验所证实.在 1984 年的国际高能物理会议上,对此没有人作出使人吃惊的宣布.

这里的一幅漫画是西欧核子研究中心的理论物理学家德鲁丘拉的作品,那位唐·吉珂德骑士——中微子正在向整个宇宙挑战,天体物理学家和粒子物理

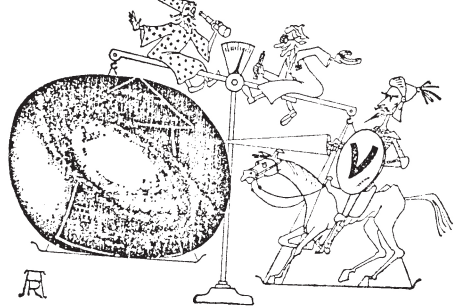


图 3

学家焦急地等待着战斗的结局,当然他们不会到塞万提斯的小说中去寻找答案,而是在各自的实验室中去搜索.德鲁丘拉本人也正积极参与一个利用钷 163 同位素的 K 电子俘获来测量中微子质量的实验,实验的基本思想还正是他本人提出来的呢.

* 在 1985 年的国际轻子光子会议上,有人提出了对他们的实验数据重新进行分析的结果,指出他们的实验结果也不与中微子质量为零的结论相矛盾.