

太阳中微子失踪案和中微子振荡

彭 秋 和

(南京大学天文系 江苏 210093)

(续前)

五、“中微子振荡”是物理学家的法宝

按照粒子物理的标准模型,中微子质量为零,它们以光速运动。存在着3种不同类型(即3种“味”)的中微子:电子型中微子(记为 ν_e), μ^- 中微子(记为 ν_μ)和 τ^- 中微子(记为 ν_τ),它们之间彼此不相关,分别只同电子、 μ 轻子和 τ 轻子密切相关。不过,早在戴维斯等人公布首批氦探测器的探测结果的1968年,庞托科沃就提出了这3种“味”的中微子很有可能互相来回地转化,称为“中微子振荡”。在太阳内部的热核燃烧过程中产生的中微子都是 ν_e 。但它们在从太阳到地球的漫长行进过程中, ν_e 不断地转化为 ν_μ 和 ν_τ 。后两味中微子也不断互相转化,或转化回来变成 ν_e 。这样,当它们到达地球上的中微子探测器时,平均而言,大约这3味中微子的数量各占1/3。而前面介绍的所有中微子探测器探测的都仅仅是 ν_e ,因而它的实测流量当然只有太阳内部发出时的 ν_e 流量的1/3。物理学家利用“中微子振荡”的假说,似乎很自然地解释了1995年以前Homestake 氦探测器的探测结果(即探测到的太阳中微子流量仅为理论预言值的1/3)。这种很自然的解释立即得到大多数物理学家的赞同。有关“中微子振荡”问题在20世纪70年代以来成为粒子物理学的一个非常热门的研究课题。这个研究浪潮一直持续到今天。

物理学家最初研究的是真空中的中微子振荡现象。但是很快发现真空中的中微子振荡幅度不大,难以合理地解释上述太阳中微子矛盾。按照现代粒子物理学理论, ν_μ 同电子之间的散射(碰撞)时只是通过一条叫做“中性流”的微弱纽带来进行的。但是当 ν_e 同电子散射时,它不仅可以通过中性流弱作用这条纽带来进行,而且还会通过被称为带正电和带负电两种荷电流弱作用这两条纽带来进行。因此,太阳核心区域内产生的 ν_e 在太阳等离子体物质内的行进过程中, ν_e , ν_μ 同物质中的电子相互作用是不相同的。其总效果是,处于等离子体状态的太阳内部物质可以使这种中微子振荡明显地加强放大。这

种效应称为MSW(它是3位物理学家姓氏第一个英文字母的并写)效应。它可以较好地解释氦探测器发现的太阳中微子矛盾。我们也参与了这个问题的研究。南京紫金山天文台的一位年轻的博士同笔者合作考察了太阳等离子波耗散之后,更加肯定了太阳等离子体内中微子振荡的加强与放大。

至今我国物理学界都普遍认为,太阳中微子探测结果与理论计算的矛盾已经被“中微子振荡”理论很圆满地解释了,剩下的问题就是在物理实验室里验证这个漂亮的“中微子振荡”理论。实质上它同中微子是否有质量的问题是一致的。物理学家的“中微子振荡”理论很可能是正确的,这个“法宝”确实可以在1995年以前简单地解释当时仅有Homestake 氦探测器一家的探测资料的分析结果。但是我们还应该强调指出,它却无法解释2000年前后的全部中微子探测器探测的结果—— ^7Be 和CNO中能中微子哪里去了?笔者认为,惟一剩下的可能途径是应当重新计算与分析氦、镓探测器中的主要原材料 ^{37}Cl 和 ^{71}Ga 吸收中微子的反应速率以及太阳内部 ^7Be 中微子的产生过程—— ^7Be 的电子俘获反应速率。笔者猜测,呈电中性的原子(例如 ^{37}Ar 和 ^{71}Ge)内的束缚电子对原子核的屏蔽效应可能会明显地使电子俘获过程反应率下降。当入射电子能量接近反应能阈值附近时,这种效应更加明显。而 ^{37}Cl 和 ^{71}Ga 吸收中微子的反应过程正分别是 ^{37}Ar 和 ^{71}Ge 的电子俘获过程的逆过程。人们在归算和处理氦镓探测器的探测资料时,并未计及这种效应。这个问题的严格计算是相当复杂的,但我相信物理学家总是有办法的。至于 ^7Be 原子核(由4个质子和3个中子组成),我们有一定的理由猜测它的形状是扁率较大的椭球体,这是因为实验室已发现它的镜象原子核 ^7Li (由4个中子和3个质子组成)是很扁的椭球体。人们在计算原子核的电子俘获反应速率时往往是把原子核当作球对称的球体来处理的。而扁椭球体的原子核电子俘获反应速率,即 ^7Be 中微子的产生速率显然是同球形原子核情形不同,应当重新计算。不过,当前原子核物理学要严格进行这种计算还是非常困难的。

尽管如此,在解决太阳中微子失踪案问题上,中微子振荡理论仍然起着重要作用。此外,它的提出大大地推进了中微子物理的研究。

六、中微子振荡与中微子质量

“中微子振荡”是粒子物理学的一种“非标准模型”,但它却愈来愈受到物理学家的认可。它是建立在量子力学基础上的一种理论。依照这个理论, ν_e , ν_μ 和 ν_τ 这 3 种“味”的中微子只是在它们参加 β 衰变、电子俘获等弱相互作用过程中表现的 3 种形式。它们并不是最基本的中微子,而是由另外 3 种称为“质量本征态”的中微子混合组成。这好比我们通常看见(感觉到)的五光十色的各种颜色实际上是由红、黄、蓝 3 种基本色素混合而成的一样。这 3 种“本征”中微子才是真正基本的中微子,它们的质量并不为零。依其质量从小到大的顺序我们分别用 ν_1 , ν_2 和 ν_3 来表示它们。当这 3 种本征中微子混合呈现为 ν_e , ν_μ 和 ν_τ 时,其混合系数却时而变小、时而变大地随时间周期地变化。例如,电子型中微子由这 3 种本征中微子组成的混合系数我们分别用 x_1 , x_2 和 x_3 (它们都是复数)表示:

$$\nu_e = x_1 \times \nu_1 + x_2 \times \nu_2 + x_3 \times \nu_3.$$

而混合系数 x_1 , x_2 和 x_3 分别是时间的周期振荡函数。在某一瞬间发现它仍为电子型中微子的概率为

$$\begin{aligned} |\nu_e|^2 &= |x_1|^2 + |x_2|^2 + |x_3|^2 \\ (|x_1|^2 + |x_2|^2 + |x_3|^2 &\leq 1). \end{aligned}$$

在太阳内部产生的中微子,开始时都是电子型中微子,混合系数 x_1 , x_2 和 x_3 假定取某种“适当”的最大值,即模的平方之和为 1。当它们经过日地空间飞行(约需 8 分 20 秒)后,混合系数 x_1 , x_2 和 x_3 变化使得模的平方之和变为小于 1。这样,在地球只能探测 ν_e 的探测器上探测到的中微子流量自然地减少。那些未能“看见”的 ν_e 已经转化为 ν_μ 和 ν_τ 了。由于这 3 种本征中微子具有非零的质量,因而 ν_e , ν_μ 和 ν_τ 这 3 种“味道”中微子的质量也不为零。根据 1987 年大麦哲仑云超新星爆发时美国 IMB 和日本神冈中微子探测器探测到的近 20 个超新星中微子的到达地球的时间差来进行分析,人们估计 ν_e 的质量大约为电子质量的百万分之几。人们估计 ν_μ 和 ν_τ 的质量分别比 ν_e 的质量要大几千倍和几百万倍。

按照爱因斯坦著名的能量-质量公式,粒子的静止能量等于它的质量乘以光速的平方。物理学家常用粒子的静止能量(mc^2)表示它的质量(m)大小。

例如,电子的静止能量为 0.511MeV。而电子型中微子的静止能量估计可能约为 $(4-7)eV$ 。本文开头提到的 2000 年 6 月在加拿大卡尔加里召开的国际中微子科学会议上美、日、韩三国科学家联合的实验分析肯定了中微子具有质量是指电子型中微子的质量肯定大于零。至于具体数值,目前实验误差较大,而且不同研究小组给出的数值也不同。将来肯定会获得较准确的结果。

七、大气中微子探测实验的矛盾和呆傻的中微子

在肯定中微子质量的各类实验中,大气中微子探测实验及其矛盾的分析占据着重要地位。因此我们有必要介绍它。物理学家早就认识到当高能宇宙线进入地球大气层时,其中的高能质子和反质子同大气中的原子核相互作用会产生带电的 K 介子和带电的 π 介子。它们会衰变为 μ 轻子和一个 μ^- 中微子(或反中微子)。而衰变产生的 μ 轻子又会很快地衰变为电子,同时放出一个 μ^- 中微子和电子型中微子(或反中微子)。这样,如果不同味中微子之间互不相关,互不转化,那么地面中微子探测器上接收到的 μ^- 中微子(包括它的反中微子)数量应该为接收到的电子型中微子(包括反中微子)数量的两倍。如果不同味中微子互相转化,出现中微子振荡现象,那么探测的结果就会有所不同。

此外,如果我们用 U 表示从地面上方(包括所有可能方向)射到探测器的中微子事件数,用 D 表示从地面以下(即从地球另一侧,包括所有可能方向)射到探测器的中微子事件数。如果不存在中微子振荡,则从地面上方射来的中微子数量应该同从地面下方射来的中微子数量基本相等,即 $U = D$, 或 $(U - D)/(U + D) = 0$ 。如果存在中微子振荡,而且振荡幅度与快慢同介质密度有关的话,这个比值就明显不为零。

由于宇宙线在地球大气中产生的中微子能量一般很高,从几十个 MeV 开始,甚至达到了 GeV 以上。只能利用水切连科夫中微子探测器探测来自地球大气层的中微子。日本神冈和超神冈的以及美国 IMB 实验室分别独立地进行了连续不断的监测。它们探测的结果是:

对电子型中微子来说, $(U - D)/(U + D) \approx 0$;

对 μ^- 中微子来说, $(U - D)/(U + D) < 0$ 。

大气中微子的这些探测结果似乎表明了 ν_μ 确实发生了 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 的振荡,而且振荡性质同介质密度有关。但 ν_e 似乎没有出现振荡。

结合太阳物质密度分布模型和太阳等离子体使

中微子振荡放大的观念,从太阳中微子振荡理论的研究可以估计组成 ν_e 的最主要两种本征中微子的质量(或静止能量)平方之差,其数值约为

$$(m_2^2 - m_1^2)c^4 - (10^{-10} - 10^{-6})(\text{eV})^2$$

但是从地球大气中微子探测实验分析发现,高能宇宙线产生的中微子可能同时有 ν_e , ν_μ 和 ν_τ 。在组成它们的3种本征中微子中,最重的和最轻的两种中微子质量的平方差为

$$(m_3^2 - m_1^2)c^4 - (10^{-4} - 10^{-2})(\text{eV})^2。$$

这些年来,美国洛斯阿拉莫斯实验室的 LSND 合作研究组也在进行中微子振荡的实验。他们早已声称发现 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振荡,但迟迟得不到物理学家们的认可。最近的实验研究表明,他们的实验基本上也是可靠的。他们发现,在基本的本征中微子中,最重和最轻的质量平方差可能比大气中微子的上述数值还高几个数量级,即达到 $1(\text{eV})^2$ 左右。

为了解释太阳中微子探测实验,地球大气中微子探测实验以及 LSND 中微子振荡实验之间上述结论的巨大差异,某些物理学家提出一种奇特的方案:基本的本征中微子不是3种,而是4种(分别以 ν_1, ν_2, ν_3 和 ν_4 标记)。例如,2000年6月在加拿大国际中微子科学会议上斯米诺夫就认为,它们的质量大小次序与关系为 $m_1 \ll m_2 \ll m_3 \ll m_4$, 而 $m_1 c^2 \sim 10^{-3} \text{eV}$ 。组成 ν_e, ν_μ 和 ν_τ 这3种味的本征中微子主要还是前3种。 ν_e 主要由约占(60—70)%的 ν_1 和约占(30—40)%的 ν_2 组成。 ν_e 中包含的 ν_3 和 ν_4 极少。在 ν_μ 的组成成分中, ν_1, ν_2 和 ν_3 分别约占(20—25)%、(40—50)%和(30—40)%。而在 ν_τ 的成分中, ν_1, ν_2 和 ν_3 分别占(15—20)%、(20—30)%和50%以上。它们包含的 ν_4 都比较少。太阳中微子主要是由 ν_1 和 ν_2 两种最轻本征中微子的贡献。地球大气中微子则是由 ν_1, ν_2 和 ν_3 3种本征中微子贡献之和。但是,LSND 实验中的中微子则是由4种本征中微子全体贡献之和。这似乎可以解释前述3种不同的中微子源探测实验关于 $(m_{\text{重}}^2 - m_{\text{轻}}^2)c^2$ 的巨大差异。

现代粒子物理学的标准模型中,参与强相互作用的基本费米子有6味3代夸克(以及反夸克):(u, d), (s, c)和(b, t)夸克。对应的参加弱电相互作用的轻子也有6味3代:(e, ν_e), (μ, ν_μ)和(τ, ν_τ)。按照现代粒子物理学的标准理论,参加弱相互作用的

中微子只能有上述 ν_e, ν_μ 和 ν_τ 这3种“味”。这第四个本征中微子的引入打破了现代粒子物理学的标准模型的对称格局。可以预料,它可能再一次引起粒子物理学的研究高潮或革命。

物理学家认为,这第四味的中微子的性质很奇怪。除了它有质量而参与万有引力外,它既不参与强相互作用,也不参与任何弱相互作用。人们把它叫做“呆傻中微子”(sterile neutrino)。虽然如此,人们猜测它可能在两个方面起着重要作用:

1. 这种呆傻中微子虽然不参与同其他粒子的(强,电磁和弱)相互作用,但是它却可能在太阳中微子振荡或地球大气中微子振荡过程中扮演关键核心作用。最近研究表明,为了较好地同时解释太阳中微子探测流量的大幅度减少(但仍未能解释 Be 中微子失踪的探测实验结果)和地球大气中微子探测实验结果,人们需要下述3种设想之一:1) 太阳中微子振荡的主要方式可能是 ν_e 转化为这种呆傻中微子。2) 地球大气中微子振荡的主要方式可能是 ν_μ 转化为这种呆傻中微子。3) 极端情形是,这种呆傻中微子对太阳中微子振荡和地球大气中微子振荡各贡献一半。

2. 这种呆傻中微子的质量相当大,有人猜测它的静止能量可能达到几个或几十个 GeV。这样,它会参与万有引力的作用。天文学家根据最先进的地面最大的(射电,红外,光学)望远镜,哈勃空间望远镜、最新发射的 X 射线空间卫星等先进设备获取了有关宇宙大尺度结构、宇宙早期演化以及有关星系(包括早期星系和我们银河系)的极为丰富的天文观测数据与资料。结合有关星系和现代宇宙学理论,天文学家肯定地断言,我们整个宇宙,包括我们银河系在内的几乎所有星系,85%~90%的物质是由一类被称为“暗物质”的物质组成。经反复研究,这些暗物质既不是通常人们熟悉的原子、分子、质子、中子,也不是尘埃、陨石、行星或熄灭了的白矮星、中子星和黑洞。它们是我们迄今尚未知晓的物质。宇宙和星系处处都充满了这种暗物质。它们不发光。我们知晓它存在的唯一依据就是通过它的宇宙大尺度结构上以及在决定星系结构和它的整体旋转运动方面这些暗物质整体呈现出来的万有引力。三四十年以来,天体物理学家一直猜测它们可能就是有质量的中微子。但是,通过近10多年反复详细的理论分析以及同丰富的宇宙学观测资料相比较,发现那些

红外测温

金永君

(黑龙江科技学院基础部 鸡西 158105)

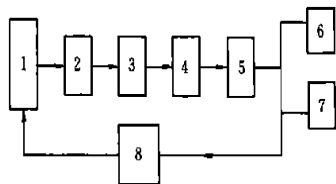


图1 红外测温系统

1. 被测物 2. 光学系统 3. 检测系统 4. 电子线路
5. 计算机 6. 温度显示 7. 温度记录 8. 温度控制

一、红外测温的理论基础

我们知道,自然界的一切物体都不断地辐射着红外线,它是由物质内部分子或原子的能级发生跃迁时产生的电磁辐射。随着人们对光学研究的深入,建立了基本的辐射定律,为红外科学奠定了理论基础,红外测温成为应用的一个重要方面。

红外测温是辐射式测温的一种,是利用物体的热辐射来测量物体温度的。红外辐射的基本定律是斯忒藩-玻尔兹曼-普朗克等人的黑体辐射定律。黑体是一种理想模型,它能吸收全部入射的辐射而没有反射,是计算热辐射理论最简单的情况。辐射定律就是根据黑体研究出来的。其形式为:

$$E_0(T) = \sigma T^4$$

式中, $E_0(T)$ 是温度 T 时单位时间内从物体单位面积上发射出的各种波长的总辐射能, σ 是斯忒藩-玻尔兹曼常量, T 是物体温度。

上式表明,黑体的总发射本领和绝对温度的4次方成正比。在实际应用时,一般被测物体并非理想黑体,需要予以适当的修正。

设被测物体温度为 T 的总发射本领 E 等于黑体在温度为 T_F 时的总发射本领 E_0 ,

$$\sigma T_F^4 = \varepsilon \sigma T^4 \quad \text{即} \quad T = T_F \sqrt[4]{1/\varepsilon}$$

式中, ε 是发射率(全辐射黑度系数), $0 < \varepsilon < 1$, T_F 是被测物体的辐射温度,即全辐射高温计的指示值, T 是物体的真实温度。

因为 $0 < \varepsilon < 1$, 故 $T > T_F$, 即被测物体的真实温度大于仪器读出的温度值。且 ε 愈小, 偏差愈大。

二、红外测温系统

红外测温系统大体由以下几部分组成:一是聚集目标红外辐射能量的光学系统;二是将红外辐射转化为电信号的检测系统;三是将电信号还原成温度值的电信号处理系统(如图1)。

红外信号检测系统的关键部件是红外传感器,它是整个测温仪的心脏,其作用是接收红外辐射并将其转变为电信号。从探测器输出的电信号,被送进电子线路系统进行处理。

三、红外测温的特点

红外测温是利用接受物体的红外辐射来确定其温度的,它具有许多其他测温方法无与伦比的优点。主要有:

(1) 红外测温可以进行远距离和非接触测量。因此,它可以用于温度过高或热容量过小的区域、高压大电流导线、正在旋转的机器、以及远距离难于接近的物体的温度测量。

(2) 红外测温响应速度快。因为它不像热电偶、温度计那样需要与被测对象达到热平衡,而只要接受到目标的红外辐射即可定温。反映时间一般都在毫秒级至微秒级。

(3) 红外测温灵敏度高。因为物体的辐射能量与温度的4次方成正比,因此,只要温度有微小变化就会引起辐射能量的明显变化。

(4) 红外测温精确度高。由于是非接触测量,不破坏物体原来的温度场,故测定的温度真实、准确。

(5) 红外测温范围广。从理论上讲,红外测温仪表的测温上限是不受限制的,它可测从摄氏零下几十度到零上几千度的温度。但一般根据测温范围将测温仪分为3种类型:低温测温仪在 100°C 以下;中温测温仪在 $100 \sim 700^\circ\text{C}$ 之间;高温测温仪在 700°C 以上。

四、红外测温的应用

我们知道,凡是温度高于绝对零度的物体都能辐射出红外线。红外辐射存在的普遍性,决定了红外测

参与弱作用的中微子,即使有质量也难以充当宇宙暗物质的主角。那么,近年来物理学家设想的这种呆傻中微子似乎是天文学家几十年来梦寐以求的宇

宙暗物质的最佳候选者。这个设想正是2001年3月在美国召开的有关学术会议中人们讨论的中心议题之一。(完)