

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)

《科技日报》公布的 2000 年国际十大科技新闻的第 5 条“中微子质量已成定论”报道说：“2000 年 6 月 17 日，在加拿大卡尔加里召开的国际中微子科学会议上，日本和美国的科学家小组发表论文，阐述了太阳中微子有质量的理论和实验报告，受到会议的肯定，结束了中微子有无质量的长期争论。7 月 17 日，美、日、韩 3 国科学家发表最新实验结果，确认中微子有质量的概率达 95%”。中微子有质量意味着什么？为了使读者了解它，本文首先介绍著名的“太阳中微子失踪案”，然后进一步介绍与中微子质量问题密切相关的“中微子振荡”问题。最后，我们介绍同中微子质量密切相关的“宇宙暗物质问题”。

一、太阳是一个巨大的中微子源

我们的太阳是一个质量和体积都非常巨大的恒星。它的质量为地球的 33 万倍，直径为地球的 107 倍。其平均密度是水的一半。不过它的很厚的外层大气比地球大气还要稀薄。由于它自身强大的重力（即使在太阳表面上，它的重力也要比地球表面重力强 30 倍），使得太阳质量主要集中在它的内部。在它的中心附近，物质密度相当于水的 100 倍。太阳是一个非常炽热的气体火球，它的表面温度就高达 5760K。它的中心区域温度更是高达 1500 万度左右。我们地球上的生命都离不开太阳的光和热，从太阳向太空发出的光和热的速率（称为太阳光度）为每秒 3.8×10^{26} 焦耳。太阳巨大的热和光来自它的中心区域内持续不断的高温下的热核燃烧。实际上，太阳内部每时每刻都有大量自然的“氢弹”在持续不断地爆炸，在这种核爆炸过程中每 4 个氢原子核结合成一个氦原子核，同时释放 26.73MeV 的能量。每 4 个氢转化为一个氦的过程中同时要放出两个正电子和两个中微子。正电子同物质中的电子相结合湮灭转化为一对光子。正电子连同电子的能量都一齐转化为光子能量被物质吸收而存留在太阳内部，使物质加热。至于放出的中微子，携带着 2% 的由热核反应所释放的能量立即离开太阳。太阳内部每秒钟都有 7750 万吨的氢在这种热核爆炸过程中

转化为氦，正是由于这种热核燃烧维持着太阳巨大的光度。太阳内部这样规模的热核燃烧已经持续了 45 亿年。天文学家估计它还可以这样稳定地再燃烧 50 亿年左右。

太阳内部这种由 4 个氢原子核结合转化为氦原子核的过程实际上是通过一系列核反应来实现的。释放出的中微子也可能具有不同的能量。用化学元素符号代表与它相应的原子核，其左上角的数字表示该种原子核的原子量。 e^+ 表示正电子， $\bar{\nu}_e$ 表示电子中微子。第 1 个核反应为两个氢原子核（即质子）碰在一起结合成氘。氘由一个质子和一个中子组成，它常以符号 D 表示。在这种核转化过程中，同时放出一个正电子和电子中微子。后者的能量很低，常称它为低能中微子，科学文献中更常称为 pp 中微子。在这个反应中放出的中微子的能量可能不相同，其能量连续分布，我们称它具有连续谱。其最大能量为 0.420MeV，平均能量为 0.265MeV。第二个反应是 ${}^7\text{Be}$ （铍 7），这个原子核俘获一个电子转化为 ${}^7\text{Li}$ （锂 7），同时放出一个中能中微子，常称为 ${}^7\text{Be}$ 中微子，其能量为 0.86MeV（90% 的可能性）或为 0.38MeV（10% 的可能性）。第三个反应是 ${}^8\text{B}$ （硼 8）的 β^+ 衰变，它放出的中微子能量是连续的，它的极大能量为 14MeV，平均为 7.2MeV。它被称为高能中微子，或 ${}^8\text{B}$ 中微子。从太阳中微子流量的理论预言值可以看出，从太阳发射出来的中微子主要是低能中微子。而中能中微子的流量只占低能中微子流量的 1/17，而高能中微子流量只有低能中微子流量的 1/27000。

这些结论都只是按照天文学家公认的太阳标准模型和粒子物理学关于中微子的标准模型计算出来的理论预言值。它们果真是这样的吗？这需要实验检验，最好是能够直接探测到从太阳射来的各种中微子，并且测定它们的流量。

二、2/3 的太阳中微子神秘地失踪了

早在中微子被实验证实之前的 1946 年，物理学家 B. Pontecorvo 就提出了利用氦探测器来探测中微子的建议。其原理大致如下：如果用电子中微子流

轰击 ^{37}Cl (它是氯的两种稳定同位素之一在地球物质中, ^{37}Cl 占24.23%,而 ^{35}Cl 占75.77%),它会吸收中微子而转化为氩的一种不稳定的同位素 ^{37}Ar ,同时放出一个电子。反应产物 ^{37}Ar 将通过电子俘获过程再还原为 ^{37}Cl (同时再放出一个中微子)。不过放射性核素 ^{37}Ar 的半衰期为35天。一段时间以后,用化学提纯的方法把 ^{37}Ar 提取出来,然后测量它的放射性。通过这种方法可以记录打在探测器上入射中微子的数目。这种探测中微子的方法称为放射性化学方法。后来人们又提出了许多与 ^{37}Cl ^{37}Ar 类似的放射性化学方法来探测太阳中微子。例如,利用 ^{71}Ga (镓)(吸收中微子并放出电子) ^{71}Ge (锗)反应来探测太阳中微子的镓探测器。氯探测器只能探测中能和高能中微子,探测不到低能中微子。镓探测器的优点在于它可以同时探测到低、中、高能3种中微子。不过,由于镓是价格极其昂贵的稀有金属,难以大量收集它来建造中微子探测器。而 ^{37}Cl 则可由海盐直接大量提取,价廉物美。人们自然地首先想到利用氯来制造中微子探测器。由于中微子与反中微子的性质不同,所以应该使用不同的探测器。氯和镓制作的探测器只能用来探测中微子,至于反中微子,可以利用我们后面要介绍的水探测器来探测。

自1956年物理实验证实中微子是真实存在的实物粒子以后,探测强大的太阳中微子就成为物理学家迫切的任务。Davis等物理学家从1958年开始筹建国际上第一个氯探测器来探测太阳中微子,测定它的流量。其主要目的是检验上述太阳核心热核产能理论是否正确。通过中微子探测,人们可以直接“看”到太阳内部的热核聚变反应。人们通过太阳中微子流量和能谱(指流量随其中微子能量的分布)的测定来推断太阳核心的温度和化学成分。在美国南达科他州Homestake的地下废矿井中,采用 455m^3 的 C_2Cl_4 作为探测材料建立了一个大型的中微子探测器。

中微子同物质相互作用非常微弱,理论上定义一个太阳中微子单位(以符号SNU表示)是每秒钟太阳中微子与 10^{36} 个靶原子相互作用产生一个事例,即 $1\text{SNU} = 1 \text{事例}/(\text{秒} \cdot 10^{36} \text{靶原子})$ 。理论预言,Davis等人的探测装置可以探测到的太阳中微子事件数为 $(7.9 \pm 2.6) \text{SNU}$ 。1968年Davis等人公布了他们对太阳中微子首批探测结果,发现实际测量到的结果为 $(2.1 \pm 0.3) \text{SNU}$ (据2000年发表的30年累

积探测的平均结果为 $(2.56 \pm 0.23) \text{SNU}$,相差不大)。即实测结果仅有理论值的 $1/3, 2/3$ 的太阳中微子确实实地“失踪”了。这就是1995年以前20多年间国际科学界著名的太阳中微子失踪案的惟一但可靠的实验依据。这个结果立即震惊了全世界,曾被新闻媒体炒得特别红火。

三、 ^7Be 中微子哪里去了

理论预言和实验探测结果的这种巨大差异,促使严肃的实验物理学家计划筹建不同的探测器进一步探测太阳中微子,也促使天体物理学家重新审查已经被认为研究得比较清楚的太阳(内部状况)标准模型。它更促使活跃的粒子物理学家认真地审查我们对于中微子性质的了解是否正确。

这类探测器都有一个最低的灵敏极限。能量低于这个极限值的中微子不能引起探测器的仪器起反应。这好比一个细微的尘埃轻轻地碰撞到人体上,人不会有感觉一样。只有当具有一定速度或能量的沙粒打在我们身上,我们才会感觉到沙粒的存在。这个最低的灵敏极限能量叫做“能阈”。也就是说,中微子探测器只能探测能量高于探测器能阈值的中微子。上述氯探测器的能阈值为 0.814MeV 。从太阳射出的低能中微子的能量远低于这个能阈,因而它们不能引起探测器的反应。而太阳中微子中的具有能量为 0.86MeV 的中能中微子能量刚好超过这个能阈。当然,太阳的高能中微子能量远远超过它。因此,Davis等人建造的上述氯探测器并不能探测太阳中微子中数量最多的太阳低能中微子。它对只有低能中微子流量三十万分之一的高能中微子却非常敏感。氯探测器上记录中微子事件的77%是来自高能(^8B)中微子,15%来自中能(^7Be)中微子。还有8%来自太阳内部更为次要的核反应过程(碳、氮、氧循环)产生的中微子,简称为CNO中微子,属于中能中微子。

为了探测流量最多的太阳低能中微子,人们不得不花费极其昂贵的代价建立能阈价值达 0.233MeV 的镓探测器。为此,欧美合作建造了GALLEX装置,美苏合作建造了SAGE装置,美国加拿大合作建造CNO装置等镓探测器来探测中微子。自1995年以来这些中微子探测器就开始陆续投入持续不断的探测工作。按照太阳标准模型理论预言,在这种镓探测器上可以探测到的太阳中微子事件数应为 124SNU 。其中,太阳低能(pp)中微子在镓探测器的贡献约为 74SNU ,高能(^8B)中微子在镓探测器

上的贡献应为 16SNU , ${}^7\text{Be}$ 中微子和 CNO 中微子在镓探测器上的贡献分别为 34 和 10SNU 。迄至 2000 年底,在 GALLEX 和 GNO 的镓探测器上实际探测到的中微子事件数为 $(74 \pm 7)\text{SNU}$,而在 SAGE 的镓探测器上探测的中微子事件数为 $(75 \pm 8)\text{SNU}$ 。不同的镓探测器上的测量值很相近,约为理论预言值的 60% 。

前面已提到,氦、镓等放射性化学探测器只能探测中微子,不能探测反中微子。为了探测来自宇宙线中的中微子和反中微子,日本在神冈,美国 IMB (一个科学研究合作组的简称)分别建造了可以直接探测入射中微子或反中微子方向的水切连柯夫装置作为中微子探测器。其原理是,能量较高的中微子或反中微子同物质中的电子相碰撞发生弹性散射时,会把很高的动能传递给电子,电子因此沿着中微子入射方向高速运动,其速度超过物质中的光速(低于真空中的光速)。速度超过介质中光速的电子会发光,称为切连柯夫辐射。只要探测这种切连柯夫辐射,就可以确切地判断中微子事件的发生。通常是在很大的容器中灌满纯水作为这种背景物质,其中安置许多特制的闪烁器可以探测和记录这个快速反弹电子发出的切连柯夫辐射。这种根据中微子与电子弹性散射而建造的实验至少有两个优点:其一是由反弹电子运动方向可以确定入射高能中微子的方向,另一优点是由反弹电子的能谱(指具有一定能量的电子数目随能量的变化曲线)可以确定入射高能中微子的能谱。

日本神冈和美国 IMB 的这两个中微子探测器在 1987 年 2 月几乎同时记录了太空中一颗超新星爆发时伴随的强大中微子暴的中微子流,这给科学家研究超新星爆发机制以及物理学家研究中微子(例如,确定中微子质量)提供了非常宝贵的观测数据。但遗憾的是,日本神冈探测器的时钟当时发生了故障,使记录的中微子流到达时间的误差达到了 1 小时左右,钟表大国日本的这种失误给天文学家研究超新星爆发带来了很大的不确定性。不过,根据当时探测记录的中微子流的方向,确定指向当时光学望远镜观测的超新星方向。这颗超新星位于大麦哲伦云(一个位于银河系近旁的河外星系)内,它距离地球约 170 万光年。我们今天观测到的光和中微子,实际上是在 170 万年以前发出的,也就是说,这颗超新星实际上是在 170 万年以前爆发的。

这种水切连柯夫中微子探测器的探测能阈值相当高。最初建造的探测器能阈值为 9MeV 。神冈中微子探测器扩建后,又新建规模更大的水切连柯夫中微子探测器,以提高探测效率和降低探测能阈值。例如,被称为“超神冈”的中微子探测器采用了 5 万吨纯水,使探测效率提高了 30 倍,并且使探测能阈值下降到 6.5MeV 。由于神冈和超神冈中微子探测器的能阈值太高,太阳低能和中能中微子不能引起它们反应,因而这类探测器探测到的中微子全部都是 ${}^8\text{B}$ 高能中微子。

神冈和超神冈的中微子探测器分别从 1993 年底和 1996 年 10 月开始正式对太阳中微子进行探测。几年来持续不断的探测已经累积了大量数据资料。从这些数据资料的分析发现,这些高能中微子的确来自太阳方向,而且,它们的能谱同太阳模型理论预言的能谱符合得很好。其实,不同的太阳模型预言的 ${}^8\text{B}$ 高能中微子流量可能有很大的差别,甚至可以相差 3 倍。不过,这些不同的理论模型预言的 ${}^8\text{B}$ 中微子能谱却相差不大,这表明这些理论模型的最主要框架基本上是相同的。

按照 1998 年标准模型的计算,理论预言在这种探测器上记录的中微子事件数应为 $(1.0 \pm 0.1)\text{SNU}$,迄至 2000 年夏天,神冈和超神冈的中微子探测器累积的实测记录分析结果分别为 (0.54 ± 0.07) 和 $(0.47 \pm 0.02)\text{SNU}$,约为理论预言值的一半。

我们已经介绍了上述 3 种不同类型(氦、镓和水切连柯夫)的中微子探测器实测结果分别为中微子事件数理论预言值的 $1/3$, 60% 和 50% 。这种明显的矛盾表明,我们对太阳中微子的认识肯定有错误。错误来自何方?是天文学家的太阳“标准模型”错了,还是物理学家关于中微子理论的“标准模型”错了?在讨论这个问题之前,我们还应当了解近年来有关 ${}^8\text{B}$ 高能中微子探测结果引发的更严重后果。

我们已经知道,神冈或超神冈探测器探测的全部都是 ${}^8\text{B}$ 中微子。 ${}^8\text{B}$ 中微子的平均能量为 7.2MeV ,但实际上它的能谱是连续的。即太阳产生的 ${}^8\text{B}$ 中微子可以具有不同的能量。从很低的能量(低于 0.1MeV)开始,直到最高达到 14MeV , ${}^8\text{B}$ 中微子的能量连续不断。但具有能量在 $(8 \sim 9)\text{MeV}$ 范围内的 ${}^8\text{B}$ 中微子数量最多。因而 ${}^8\text{B}$ 中微子的总平均能量为 7.2MeV 。因此,应该说,由于探测

器能阈值的限制,可能还有一小部分能量低于能阈值的 ^8B 中微子没有被探测器感受因而没有记录下来。在神冈和超神冈探测器上探测记录的太阳中微子只是到达地球的 ^8B 中微子流的大部分。人们自然地要想到这些 ^8B 中微子流也必然会对美国 Homestake 的氦探测器以及在位于意大利、苏联、加拿大等地的镓探测器起反应。也就是说,同样的 ^8B 高能中微子流也必定分别被氦和镓探测器所记录。通过 ^{37}Cl 吸收各种能量中微子的速率的计算,人们推断这个 ^8B 中微子流在 Homestake 氦探测器上的贡献应为 $(3.2 \pm 0.45)\text{SNU}$ 。这单独 ^8B 中微子流的贡献就已经明显超过了 30 年来 Homestake 的氦探测器测定的平均反应率。那末, ^7Be 和 CNO 等中能中微子对氦探测器实验不仅没有贡献,反而为负 (-0.66SNU) ,这显然是荒唐的结果!在理论上,这些中能中微子对氦探测器上的贡献应为总反应率的 $1/4$ 。

类似地,通过 ^{71}Ga 吸收各种能量中微子的速率的计算,人们推断这同样的 ^8B 中微子流在 GALLEX 和 SAGE 镓探测器上的贡献应为 7SNU 。它的贡献加上太阳 pp 低能中微子流对这类镓探测器反应的贡献之和超过了 80SNU ,已经超过了镓探测器上记录的中微子事件反应率。同样也不需要 ^7Be 和 CNO 中能中微子流的贡献。综合上述分析,人们得出结论:这些实验探测结果几乎没有任何可调节的余额留给 ^7Be 中微子和 CNO 中微子。也就是说,从现有的太阳中微子探测器联合探测的最新结果推断的结论是: ^7Be 中微子和 CNO 中微子(都属于中能中微子)几乎不存在,或者说它们几乎完全失踪了。这是当今最严重的太阳中微子问题。

四、差错并不来自天文学家

1968 年当 Davis 等人公布他们的氦探测器实测结果仅有理论值的 $1/3, 2/3$ 的太阳中微子不知去向时,天文学界和物理学界立即沸腾起来,各种五花八门的理论与解释都提出来了。不少富于幻想的天文学家提出了各式各样的非标准甚至离奇古怪的太阳模型。例如,有人甚至提出,太阳巨大的热和光的能源并不是其内部的热核燃烧,而是在它的中心处有一个“黑洞”。它不断地吸积太阳内部的物质,物质下落时释放的引力势能转化为热能和辐射能来维持太阳在几十亿年几乎不变的热状态和光的辐射。当然,这些离奇的理论很快不攻自破。更多的人试图通过调节太阳内部的温度,化学成分

分布等物理环境来解释太阳中微子流量的降低。例如,有人假设太阳内部温度低于现在天文学家所公认的温度值,这样可以使 ^7Be 中能中微子的产生率大大降低。但是,天文学家发现,如果降低太阳内部的温度,则太阳 B 高能中微子产生率同 Be 中能中微子产生率的比值随着温度的 15 次方迅速下降。因而,如果这样人为地靠降低太阳内部核燃烧温度来解释为什么在地球上没有探测到 Be 中微子,那么,我们更不应该探测到太阳 B 中微子流。神冈和超神冈探测器的实验探测结果完全否定了这种理论。

利用近二三十年来发展起来的先进分析方法(例如,“快速傅立叶分析方法”)来分析地球上许多太阳观测站和地磁站的长期观测数据资料,在这基础上研究太阳的振荡理论(称为“日震学”)可以检验太阳的模型是否合理可靠。近年来日震学研究结果表明,天文学家建立的太阳标准模型基本上是正确的。

福勒(因为 1957 年提出恒星内部元素核合成具体方式而获得诺贝尔物理学奖)曾在 1970 年左右提出,如果某些比较轻的原子核存在着一些尚未探明的低共振能级,则太阳内部的某些热核反应速率将会改变,有可能会消除或缓解当时发现的太阳中微子理论与实际探测值的矛盾。他的建议大大促进了实验核天体物理学的发展。但从现在太阳中微子实验探测情况来看,这条路也难以解决严重而复杂的太阳中微子问题。太阳中微子探测揭示的一切矛盾都应归因于人们过去对中微子物理性质的认识有严重错误。

(未完待续)

作者简介



彭秋和,男,1938 年 9 月出生于四川省广安县。汉族,教授(博导)。1960 年毕业于南京大学天文系后在北京大学任教,1978 年调到南京大学天文系任教至今。发表学术论文约 150 篇,涉及 3 个不同领域:星系天文,高能天体物理,核天体物理。

现代物理知识