

破解太阳中微子失踪之谜

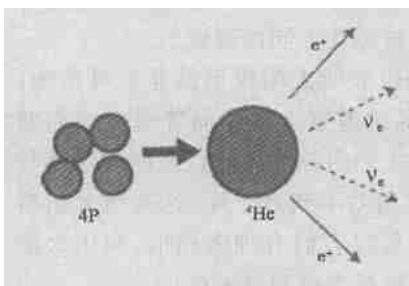
张 贺 邢志忠

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

2001至2003这3年时间里,太阳中微子的研究进入了一个黄金时期。在这个时期中,一个困扰了物理学家40年的难题被漂亮地解决了。这个难题的解决对于物理学和天文学来说都非常重要。本文将简要回顾3年来关于太阳中微子研究的惊人进展。

太阳中微子的产生

20世纪上半叶,物理学家们普遍相信太阳发光是



是由于其内部不断发生从氢到氦的核聚变反应。根据这一理论,在太阳内部每4个氢核(即质子)转化成1个氦核

图1 太阳内部的典型核聚变反应

(${}^4\text{He}$)、2个正电子(e^+)和2个神秘的中微子(ν_e),见图1所示。太阳正是由这种核聚变反应释放出来的能量发光发热,哺育着地球上的万物。随着热核反应的进行,中微子被源源不断地释放出来。由于4个质子的质量大于1个氦核加上2个正电子和2个中微子的质量,图1所示的反应要释放出大量的能量。这些能量的一小部分最终以阳光的形式到达地球。这种核反应是太阳内部最频繁出现的反应。中微子可以轻易地从太阳内部逃离出去,其能量并不以光和热的形式出现。有的时候热核反应产生的中微子能量比较低,带走的能量比较少,则太阳就获得了更多的能量。如果中微子的能量比较高,太阳得到的能量就会相对少一点。

中微子不带电荷,且没有内部结构。在基本粒子物理学的标准模型中,中微子是没有质量的。每秒到达地球表面每平方厘米的太阳中微子大约为1000亿个,但我们却感受不到它们,因为中微子与物质发生相互作用的概率很小。每1000亿个太阳中微子穿过地球时只有1个与组成地球的物质发生相互作用。由于中微子与其他粒子相互作用的概率微乎其微,它可以轻易地从太阳内部逃逸出来并直接带给我们关于太阳内部核反应的重要信息。

自然界中存在3种不同类型的中微子,太阳内

部核反应产生的中微子是电子型中微子(ν_e),这种中微子的产生是与电子相关联的。另外两种中微子是 μ 子中微子(ν_μ)和 τ 子中微子(ν_τ),它们可以在加速器或者爆炸的星体中产生,分别与带电的 μ 子和 τ 子相关联。

中微子失踪之谜

1964年,雷蒙德·戴维斯(Raymond Davis)和约翰·白考(John Bahcall)(图2)提出了一个实验方案来检验提供太阳能量的核反应到底是不是图1所描述的聚变反应。约翰·白考和他的同事利用一种精细的计算机模型计算了不同能量的太阳中微子数量。由于太阳中微子会与氯元素发生反应释放出放射性氩原子(${}^{37}\text{Ar}$),所以他们还计算了在一个盛满四氯乙烯的巨桶中观测到 ${}^{37}\text{Ar}$ 的个数。尽管这个想法在当时看来有些不切实际,戴维斯还是相信用一个游泳池大小的盛满纯四氯乙烯的容器作探测器能够测出来理论所预言的每个月产生的 ${}^{37}\text{Ar}$ 的数量。



图2 戴维斯(左)和白考,1967年摄于美国

Homestake中微子实验室

戴维斯最早的实验结果发表于1968年。他所探测到的 ${}^{37}\text{Ar}$ 事例数只有理论预言值的1/3。这种理论预言事例数与实验不一致的问题后来被称为“太阳中微子难题”,更流行的说法“中微子失踪之谜”。

为了解释太阳中微子难题,人们曾提出来3种可能的方案。第一种方案认为理论计算也许有问

题,可能在两个地方出了错:或者理论所预言的太阳中微子数量不对,或者计算出来的 ^{37}Ar 产生率有问题。第二种解释认为或许戴维斯的实验出了错。第三种方案是最大胆的一种,也是讨论最多的一种。它认为太阳中微子本身在从太阳到地球穿过宇宙空间的过程中发生了变化。

在接下来的20年中,许多人又重新仔细计算了太阳中微子的产生数量。计算所用的数据精度在不断地提高,得出的结果也更加准确。最终发现,从太阳模型得出的中微子数量和对戴维斯的实验装置所能探测到的中微子事例数的计算都没有明显的错误。与此同时,戴维斯提高了实验精度,并进行了一系列不同的测试来确认他并没有忽略某些中微子。在他的实验装置上面也没有发现什么错误。实验与理论不一致的问题仍然没有得到解决。

前面提到的第三种解释是由前苏联科学家布鲁诺·庞特克威(Bruno Pontecorv)和弗拉基米尔·格利鲍夫(Vladimir Gribov)在1969年提出的。这种想法认为中微子的性质并不像物理学家原先想象的那样简单。中微子可能具有静止质量并且不同类型的中微子可以相互转化,后者即所谓的中微子振荡。这一想法最初被提出来时,并没有得到大多数物理学家的接受。但是随着时间的推移,越来越多的证据开始倾向于中微子振荡的存在。这是一种超出了标准模型框架的新物理。

1989年,在第一个太阳中微子实验结果发布20年以后,一个由小柴昌俊和户洋二领导的日美实验组(神冈合作组)报告了他们的实验结果。他们在巨大的探测器内装满纯水,用以探测水中的电子与来自太阳的高能中微子之间的散射率。这个实验装置精度很高,但只能探测到高能量的太阳中微子。这种高能中微子来自太阳内部热核反应中一种相对稀少的过程,即 ^8B 元素的衰变。戴维斯最初的实验装置使用的是氦,但也能探测到这个能区的中微子。神冈实验证实了观测到的中微子数目的确少于太阳模型的理论预言值,但其揭示出来的理论与实验不一致程度比戴维斯的实验要小一些。

在接下来的10年中,3个新的太阳中微子实验使中微子失踪问题变得更加复杂。由德国人缙尔·克斯坦(Till Kirsten)领导的GALLEX实验室和弗拉基米尔·格利鲍夫领导的SAGE实验室分别用装满镓的探测器来探测低能太阳中微子,发现低能中微子同样存在丢失的问题。另外,由户洋二和铃木

洋一郎领导的超级神冈实验使用了总共包含5万吨水的巨大探测装置对高能太阳中微子进行了更加精确的测量,证实了戴维斯的实验和神冈实验观测到的中微子丢失现象。这样,无论是高能太阳中微子还是低能太阳中微子都存在失踪现象,只是丢失的比例不同。

在上个世纪的最后10年里,越来越多的证据表明太阳中微子在从太阳内部到达地球的旅途中发生了变化。解释这种变化需要超出标准模型的新物理,同时这种新物理还必须解释戴维斯的氦实验装置和神冈实验的水实验装置观测结果不一致的问题。分析表明,这种不一致是由于两种实验装置对中微子能量和数量敏感性不同而造成的。

新的实验证据也表明太阳模型是非常可信的。1997年,物理学家通过考察太阳表面普通光的周期性涨落精确测量了太阳内部的声速。观测的结果与太阳模型的理论值相差不到0.1%,这表明太阳模型是非常准确的。所以人们有理由相信,利用太阳模型预言的中微子数量也应该是准确的。

为了建立更加完善的基本粒子物理理论,需要解决太阳中微子失踪之谜。但是直到上个世纪末,这一问题仍然没有得到圆满的解决。

难题的最终解决

2001年6月18日中午12时15分,由加拿大人亚瑟·麦克唐纳(Arthur McDonald)领导的美国、英国和加拿大科学家组成的中微子实验组宣布了一个激动人心的消息:他们解决了太阳中微子难题。这个国际合作小组使用了1000吨重水来探测中微子。探测器放置在加拿大南部城市萨德伯里地下2000米深的一个矿井中。他们用一种不同于神冈实验和超级神冈实验的新方法探测高能区的太阳中微子。这个实验被称为SNO(Solar Neutrino Observatory)实验(图3)。

在SNO最初的实验中,他们使用的重水探测装置处在一种只对电子中微子敏感的状态。科学家们在SNO观测到的电子中微子数量大约是标准太阳模型预言值的三分之一,而先

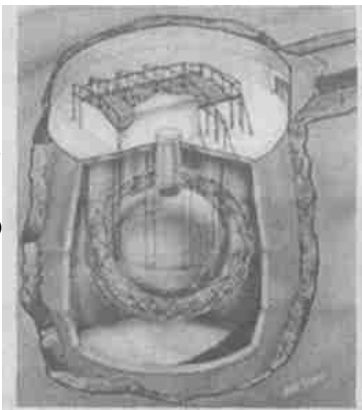


图3 加拿大SNO中微子实验所用的重水探测器

前的超级神冈实验不但对电子中微子敏感,还对其其他类型的中微子也有一定的敏感性,所以观测到的中微子数目大约超过了理论预期值的一半。如果标准模型是正确的,则 SNO 的实验结果应该与超级神冈的一致,即来自太阳的中微子都应是电子中微子。两个实验的结果不一致,表明描述中微子性质的标准模型有问题,至少是不完备的。

综合 SNO 和超级神冈的实验, SNO 合作组不但确定了电子中微子的数量,还确定了来自太阳的三种类型的中微子的总量,结果与太阳模型的预言相一致。电子中微子占有中微子总数的三分之一。这样,问题的所在就清楚了:虽然在地面观测到的电子中微子数量只占太阳中微子总数的 1/3,但是后者并没有减少;丢失的电子中微子并没有“消失”,只是转变成了难以探测的 μ 子中微子和 τ 子中微子。

这个具有划时代意义的结果发表于 2001 年 6 月,并且很快就得到其他一系列实验的支持。SNO 合作组在他们的重水探测装置上测量了全部 3 种高能中微子的数量,这在当时是独一无二的。其实验结果表明:大多数中微子都是在太阳内部产生的,产生时都是电子中微子。到达地球时,部分电子中微子转变成了 μ 子中微子和 τ 子中微子。SNO 实验的关键在于对 3 种中微子总数的测量。正是由于确定了 3 种中微子的总量,物理学家才能够不依赖于具体理论模型令人信服地解释太阳中微子失踪之谜。

SNO 的实验结果很快被另一个非常精彩的实验确认,这就是由铃木厚人领导的 KamLAND 合作组。KamLAND 实验并没有去探测太阳中微子,它探测了日本及韩国的 20 多个核电站反应堆产生的核反应所释放出来的反电子中微子。实验结果表明来自核反应堆的反电子中微子在到达约 180 千米远的探测器后数量上出现了亏缺。中微子振荡理论不但可以漂亮地解释太阳中微子难题,而且可以很自然地得出 KamLAND 实验中出现的中微子亏缺现象。中微子的性质由一些基本参数(如中微子质量平方差与混合角)确定, KamLAND 实验同时显著地提高了我们对这些重要物理参数的认识。

在太阳中微子难题中,失踪的中微子其实并没有消失。它们由电子中微子转变成了 μ 子中微子和 τ 子中微子,而后两者很难被地面的实验装置探测到。无论是戴维斯的氦探测器, GALLEX 和 SAGE 实验的镓探测器,还是 SNO 早期的重水实验装置都不能探测出 μ 子中微子和 τ 子中微子,所以这些实验

都报告太阳中微子丢失了。另一方面,神冈及其后续的超级神冈水探测器以及 SNO 后期的重水探测器在对电子中微子敏感的同时又都对 μ 子中微子和 τ 子中微子有一定的敏感性,因此这些实验探测到的太阳中微子数目就多了一些。

中微子振荡及其物理意义

为了解释太阳中微子失踪之谜,布鲁诺·庞特克威(图 4)和弗拉基米尔·格利鲍夫早在 1969 年就提出了中微子振荡的想法。能量较低的阳光中微子在穿过太阳与地球之间的真空时会发生振荡,从电子中微子转变成其他类型的中微子,转变的数量取决于中微子的能量。在高能区,振荡过程会由于电子中微子与太阳或地球物质中的电子相互作用而增强。俄罗斯的斯塔斯·米凯耶夫(Stas Mikheyev)、阿里克赛·斯密尔诺夫(Alexei Smimov)和美国的林肯·沃芬斯坦(Lincoln Wolfenstein)首先提出电子中微子与太阳内部的电子相互作用会加剧中微子之间的混合效应,即媒质的存在有可能使不同类型的中微子之间的振荡变强。这就是人们通常所说的中微子振荡的 MSW 机制。

2002 年的诺贝尔物理学奖颁发给了雷蒙德·戴维斯和小柴昌俊以表彰他们在探测中微子方面的贡献。即使在 2001 年 SNO 实验以前,通过对太阳中微子实验数据的唯象分析,很多人就确信超出标准模型的新物理已经出现。SNO 和超级神冈实验得出的高置信度结果,表明太阳中微子在到达地球的旅途中确实发生了振荡。两个实验都涉及相同能区的高能太阳中微子,并且它们都使用了物理学家比较熟悉的探测技术。

在标准模型里面中微子是没有质量的。但是中微子之间发生振荡的前提之一是它们必须具有互不相同的静止质量。因此标准模型必须做一些修改。如何修改标准模型使之包容有质量的中微子便成为当今粒子物理理论家的热门研究课题。



图 4 布鲁诺·庞特克威, 1983 年摄于俄罗斯杜伯纳研究所

通常可以用两种等价的方式来描述中微子。一种描述方式与中微子的质量相关, 每种中微子对应一个确定的质量, 称为质量本征态。另一种描述方式与中微子的相互作用相关, 即电子中微子、 μ 子中微子和 τ 子中微子, 称为味道本征态。两种描述方式可以通过确定的混合角联系起来。测量这些混合角对于我们理解基本粒子的性质是非常重要的。很显然, 太阳中微子为我们建立一种更全面的基本粒子理论提供了非常有用的线索。

另一方面, SNO 和超级神冈实验观测到的中微子数量与太阳模型的计算结果一致, 这再次表明后者是正确的。太阳确实是由于发生了太阳模型中所描述的核反应而发光发热的。太阳中微子难题的解决也是天文学的一次胜利。40 年前, 当最初的太阳中微子实验结果发表时, 没有人想到会出现今天这种结局。

为了准确地计算太阳内部核反应所释放的中微子, 许多复杂的现象还需要更为详细的研究。比如: ①太阳内部发生的一系列热核反应, 这些反应很难从实验的角度观测; ②高温高密度下能量的传输机制; ③太阳内部物质的状态。因为太阳中心温度比地球上的温度高 5 万倍, 中心物质密度大约是水的 100 倍, 所以太阳内部物质的状态在地球上无法直接研究。④测量太阳表面重元素的丰度, 以及丰度随太阳半径的变化。所有以上提到的这些问题还有待进一步研究, 并需要准确的定量计算。

高能太阳中微子的数量可以通过量子力学计算

出来, 其结果对于太阳中心温度十分敏感。太阳中心温度 1% 的误差就会导致计算出来的高能中微子数量有 30% 的误差, 中心温度 3% 的误差就会使计算出来的中微子数量误差达到两倍。这种对温度的敏感性主要是由于带电粒子必须通过碰撞来产生高能中微子, 而带电粒子之间的排斥力非常强。这样一来, 只有一小部分核碰撞可以克服排斥力达到足够近的距离以产生核聚变反应。这一小部分核碰撞所占的比例对温度十分敏感。尽管太阳模型对温度特别敏感, 它还是相当精确地预言了产生高能中微子的数量。

过去的 40 年来, 通过全世界数以千计科学家的不懈努力, 人们已经弄清楚了太阳是如何发光的。人们可以利用对太阳的研究结果来解释观测到的遥远星系, 因为这些星系也都包含许多恒星。人们还可以由太阳发光和演化理论来研究宇宙的演化。

另外值得一提的是, 利用太阳中微子还可以测量太阳的总辐射亮度。目前对太阳总亮度的估计只考虑了光子。如果太阳内部的能量是唯一由图 1 所示的核反应释放的, 则对中微子和光子的测量所得出的太阳亮度应该一致。如果太阳内部存在着其他的能量来源, 其能量释放过程目前还不清楚, 则通过探测中微子和光子得出的太阳亮度就会有显著的不同。如果这一点被证实了, 将会是一个革命性的发现。

(本文根据约翰·白考(John Bahcall)的 *Solving the Mystery of the Missing Neutrinos* 一文编译改写, 有删节。)

科苑快讯

洛斯阿拉莫斯实验室研制
太空用核反应堆

美国宇航局准备在 2011 年向木星发射研究其 3 颗被冰层覆盖的卫星——木卫四、木卫三、木卫二的 Jupiter Icy Moons Orbiter(JIMO) 太空探测器上安装一台电离子发动机, 发动机能量将由核反应堆提供。选取这样的方案是因为, 太阳能电池板产生的电能(木星区域的太阳光远比地球上少) 不能满足 JIMO 探测器整个系统的完全需要。

显然, 对安装在太空探测器上的核反应堆在质量上有严格限制, 以便能使支载火箭将探测器送入预定轨道。此外, 太空核反应堆应足够安全(不能在发射火箭时产生像切尔诺贝利核电站灾难那样的事故) 和可靠(因为它要在开放太空和强烈木星辐射条件下运行 10 年以上), 可见 JIMO 探测器面临的一个

最主要问题就是核反应堆的质量问题。

为使 JIMO 探测器上的科学仪器能正常工作需要几千瓦的电功率, 需要离子发动机工作保持在 100 千瓦的功率, JIMO 探测器借助于离子发动机飞抵木星周围, 并能在木星卫星之间作机动飞行。不仅如此, 在 JIMO 探测器上还计划安装足够大功率的通讯系统, 以便将获得的科学信息传回地球。

但是应注意到, 美国最后一次向太空发射安装有核反应堆的探测器是在 1965 年, 因此研制新型探测器不得不几乎从零开始。这项研制工作已经由美国洛斯阿拉莫斯科学实验室承担, 按计划 JIMO 探测器上的核反应堆原型应在 2 年后完成。

(周道其译自俄《航天世界》2004/ 2/ 28)