

太阳中微子之谜

卢昌海

爱丁顿和贝特的理论能很好地说明太阳为什么可以长时间发射如此惊人的能量，从这个意义上讲，它已经受住了初步的观测检验。但这种检验毕竟是很间接的，如果打个比方的话，有点像是通过测量一个黑箱的输出功能来检验有关它内部结构的猜测，哪怕检验合格，也未必能让所有人都信服，因为它终究不如打开黑箱直接窥视里面的结构来得确切。科学家们想要的正是像打开黑箱直接窥视那样的确切性。

粗看起来，这胃口似乎有点贪婪，谁能打开一只被 2500 亿个大气压所包围着的，具有 1570 万度高温的黑箱呢？但幸运的是，在这貌似不可能的任务上，大自然却很慷慨地为我们准备了一件能让我们直接窥视太阳核心奥秘的工具。

只不过窥视的结果却让科学家们足足困惑了 30 年。

我们先来说说那件“工具”。我们介绍过，“第一类质子-质子链”提供了 85% 左右的太阳能量，而它的第一步是“两个质子聚合成氢的同位素氘核”。细心的读者也许早已注意到了，那样的反应其实是不可能发生的，因为反应前后的电荷数目不同：两个质子带两个单位的正电荷，而一个氘核却只带一个单位的正电荷。那样的反应如果发生的话，现代物理学中最可靠的守恒定律之一的电荷守恒就泡汤了。很明显，“两个质子聚合成氢的同位素氘核”那样的简略提法只关注了反应过程中的原子核部分，而忽略了反应产物中必须包含的另一个带正电的粒子。那个粒子叫做正电子，它是电子的反粒子，它的出现保证了电荷守恒。

但这还不够，因为有一样重要性不在电荷之下的东西还不守恒，那就是能量。只不过这一点不是仅凭细心就可以发现的，而必须通过实验。但早在那样的实验成为现实之前的 20 世纪 20 年代末，物理学家们就已经注意到了在与之类似——即反应产物中有一个电子或正电子——的核反应过程中能量似乎是不守恒的。1930 年，泡利提出了一个想法，

他认为貌似不守恒的那部分能量，其实是被一种尚未被观测到的细小的中性粒子带走了。那种中性粒子起初被称为“中子”，后因该名称被一种大质量的中性粒子——即我们如今所说的中子——所霸占而改称为中微子。在“两个质子聚合成氢的同位素氘核”这一反应中，如果把中微子和正电子一起加入到反应产物中去，电荷与能量就都守恒了。

这个由泡利提出的中微子就是能让我们直接窥视太阳核心奥秘的工具。

中微子这个细小的家伙为什么有那样的神通呢？那是因为它与物质的相互作用极其微弱，由此导致的一个直接后果，就是穿透能力超强。在物理实验室里，人们常常用铅来屏蔽辐射，但中微子却可以不太困难地穿越整整一光年厚的铅。正因为有如此超强的穿透能力，它才能在早年的实验中携带能量轻松逃离，给物理学家们留下一个能量不守恒的犯罪现场。也正因为有如此超强的穿透能力，它才能让我们直接窥视太阳的核心奥秘，因为厚达 70 万千米的太阳物质对它来说几乎是完全透明的。

工具既然有了，那么接下来的问题就是：我们想窥视什么样的奥秘？在这方面，科学家们的胃口倒是并不贪婪，他们只想确认太阳的核心是不是真的发生着大规模的核聚变反应——如恒星核聚变理论所预言的那样。确认的方法就是探测核聚变反应中必然会产生的那些中微子，即所谓的太阳中微子。

在介绍那些探测之前，让我们首先估计一下，假如恒星核聚变理论成立，太阳每秒钟会产生多少个中微子？这个估计并不困难，因为太阳上的核聚变反应虽然有很多类型，最终结果却都是将四个质子和两个电子结合成一个氦原子核，每个这样的结合过程都将发射两个中微子。简单的比较表明，四个质子和两个电子的总质量比一个氦原子核大了 26.7MeV。这表明太阳核心每产生 26.7MeV 的能量，就会发射两个中微子。由于太阳的光度约为 384 亿亿瓦，即每秒钟产生 384 亿亿焦耳的能量。由此不难算出太阳每秒钟发射的中微子数量约为 180

万亿亿亿个。这是一个什么概念呢？它相当于每秒钟——不分白天黑夜——都会有几百亿个中微子穿过你身上每平方厘米的面积！这就是爱丁顿和贝特等人的这个恒星核聚变理论所预言，而我们将要去收集证据加以验证的“某些其他事情”。不过大家不必为这个巨大的数字而担心，虽然你一生都会“沐浴”在汹涌的中微子洪流中，却很可能一生都不会有一个中微子与你发生任何相互作用——当然，微不足道的万有引力除外。

数量如此巨大的中微子在地球附近除了来自太阳核心的核聚变反应外，再没有第二种可能了，因此只要能从实验上证实它们的存在及数量，就将对恒星核聚变理论的判决性支持。但问题是，要想从实验上证实中微子的存在，必须让它们在我们的探测器里留下踪迹。可中微子既然能穿透整个太阳，穿透整整一光年的铅，当然也能不留丝毫踪迹地穿透我们的探测器。它的这种超强的穿透力既是为我们提供信息的前提，同时却也是对实验技术的最大挑战。

但物理学家们还是有办法的。办法很简单，那就是“人海战术”，这其实是对付小概率事件的通用办法。我们知道，让一个人掷 30 次硬币要想全都掷出正面几乎是不可能的（概率只有十亿分之一），但如果让全中国十几亿人每人都掷 30 次硬币，那么一轮下来就会有很大概率出现一个掷出 30 次正面的人，这就是“人海战术”的威力。科学家们对付中微子的办法也是如此，只不过是把“人”换成物质。中微子与物质的相互作用虽然微弱，但只要有合适的探测物质，并且数量足够多，当大量的中微子与它们擦身而过时，还是会有个别中微子留下踪迹的。

那么什么样的物质适合做探测物质呢？1946 年，出生于意大利的核物理学家庞蒂科夫研究了这个问题。他提出了探测物质所应具备的一系列条件，比如：

1. 不太昂贵——因为所需数量很大，太昂贵了负担不起。
2. 与中微子反应后必须生成放射性元素，以便我们能通过放射性来推断反应的发生。
3. 所生成的放射性元素必须有合适的半衰期，以便我们既有时间分离它们，又不必等太久。
4. 除中微子外，其他因素造成同样反应的可能

性必须很小，以免干扰结果。

在这样一些条件下，庞蒂科夫推荐了几种探测物质，其中最重要的一种是氯的同位素 ^{37}Cl 。它与中微子反应后会生成氩的同位素 ^{37}Ar （同时放出一个电子以平衡电荷）。 ^{37}Ar 是一种放射性元素，半衰期约为 35 天。

20 世纪 50 年代，美国物理学家戴维斯率先展开了这方面的实验研究。考虑到氯在常温常压下是气体，体积过于庞大，戴维斯采用了常温常压下呈液态的四氯化碳。他的实验室位于地下五米左右，使用的四氯化碳约为 3800 升。在这样简陋的条件下，他只能得到一个有关太阳中微子数量的很宽松的上限，比理论值高出了好几个数量级。

结果虽然比较寒碜，但毕竟是开山之作，戴维斯还是写成一篇论文发了出去。不料论文在审稿人那里遭到了“温柔一刀”。审稿人在审稿意见中很幽默地指出：像这种缺乏精度的研究，就好比是站在山顶上，用自己的手去碰月亮，然后得出结论说月亮要比自己的手能碰得到的地方更高。审稿人的结论是：这样的研究是不应该写成论文的。

太伤自尊了。

看来必须把实验做大。从 20 世纪 60 年代中期开始，戴维斯与美国天体物理学家巴克合作，开始在美国南达科他州一座名为 Homestake 的金矿的矿井里建造一个巨大的中微子探测器。巴克是研究太阳模型的专家，他对太阳中微子流量的理论计算，在几乎所有太阳中微子探测实验中都是最重要的参照之一。戴维斯的这个新实验被称为 Homestake 实验（图 1），它的探测器位于地下 1500 米深处。这种“深挖洞”的做法是太阳中微子实验中的标准做法，目的是减少其他因素——比如宇宙线——的干扰。为了便于相互比较，人们往往用等效水深来表示中微子探测器的深度。Homestake 实验中的这个 1500 米的深度用等效水深来表示大约为 4200 米。在 Homestake 实验中，探测物质是近 40 万升（约 600 吨）的四氯乙烯。

1967 年，戴维斯的实验装置基本建成。1968 年，他得到了第一批观测结果，但误差很大。直到 1970 年，经过各种改进，他才得到了具有统计价值（即不至于被误差淹没）的结果。这结果是一个好消息和一个坏消息的混合。好消息是他的确探测到了太阳中微子，坏消息则是他探测到的中微子流量



图1 Homestake 探测器

明显小于理论预言。这个结果催生了一个新名词：太阳中微子问题。

Homestake 实验持续进行了 25 年(1984 年之后改由宾西法尼亚大学主持),检测到的平均中微子流量约为理论预言的 1/3。这是一个令人尴尬的结果,因为尽管检测到的流量只有理论预言的 1/3,却依然是一个除恒星核聚变理论外,绝无任何其他机制可以在地球附近产生的巨大流量,从这个意义上讲,它足以作为恒星核聚变理论的铁证。但另一方面,1/3 毕竟不是 1,连四舍五入都入不到 1。它作为定性证实虽然马马虎虎,从定量上讲,却是一个很糟糕的结果。这一点令戴维斯和巴克尔深感不安。自第一批论文发表之后,他们对实验和理论的各个方面都进行了仔细复核,试图缩小观测与理论的差距,却始终无法如愿。1989 年,他们在一篇文章中写道:“对我们来说很惊讶,也许还相当失望的,是意识到自那些论文发表以来,尽管对细节进行了十几年的复核及持续改进,却无论在观测还是标准理论上都没什么定性的改变。”

既然自己的努力遇到了挫折,那就看看别人是怎么做的吧。物理学上的任何实验都必须能够重复,而且要尽可能由不同的实验小组、不同的实验设备、不同的实验方法、在不同的地点来重复,这样可以最有效地减少单一小组、单一设备、单一方法所可能存在的从心理因素到系统误差在内的各种不足。这种研究规范是物理学能够令人信赖的一个重要原因。

探测太阳中微子的不同方法其实早在 Homestake 实验开始运作之前就已经有人在研究了。1966 年,俄国物理学家库兹明提出了一种新的

探测方法,利用镓的同位素 ^{71}Ga 作为探测物质。 ^{71}Ga 与中微子反应后会生成锗的同位素 ^{71}Ge (同时放出一个电子以平衡电荷)。 ^{71}Ge 是一种放射性元素,半衰期约为 11 天。

利用 ^{71}Ga 来探测太阳中微子有一个 Homestake 实验无法比拟的优势,那就是能够探测到的中微子能量范围要宽广得多。我们在前文介绍过,在太阳核心所产生的能量中,第一类质子-质子链的贡献占了 85%左右。毫无疑问,这是太阳核心最重要的核聚变反应,也是太阳中微子的最大来源。但这类反应所产生的中微子的最大能量只有 0.423MeV (平均能量为 0.267MeV),而 Homestake 实验所能探测到的中微子的最低能量——即所谓的阈能——却是 0.814MeV,大大高于第一类质子-质子链所产生的中微子的能量。这就意味着 Homestake 实验对太阳中微子中数量最庞大的那部分是“视而不见”的。考虑到检测中微子的极端困难性,这种巨大的“浪费”无疑是极大的缺陷。而利用 ^{71}Ga 来探测太阳中微子的最大好处就是能弥补这一缺陷,因为它所能探测到的中微子的最低能量为 0.233MeV,从而涵盖了很大一部分来自第一类质子-质子链的中微子。除这一点外,利用 ^{71}Ga 来探测太阳中微子还有一个很大的好处,那就是在理论上,人们对第一类质子-质子链的研究要比对那些所占比例小得多的其他反应彻底得多,因而能提供更可靠的理论数据。

设想是有了,将它变为现实却不是一件容易的事情,利用 ^{71}Ga 作为探测物质的太阳中微子实验直到 20 世纪 90 年代初才开始出结果。从事此类实验的有两个研究小组,一个是由前苏联和美国科学家联合进行的,称为 SAGE 实验(图 2),地点在前苏联高加索山区的一条四千米深的隧道内,等效水深约为 4700 米;另一个是由美、德、法、波兰、意大利、以色列等国科学家联合进行的,称为 GALLEX 实验,地点在意大利阿布鲁佐大区的一个等效水深约 3200 米的地下实验室内。在实验手段上,SAGE 采用的实验物质是 30 吨液态镓(1991 年增加到 57 吨),GALLEX 采用的则是 101 吨三氯化镓溶液。

那么这两组新实验的结果如何呢?它们是“A.找到了全部的太阳中微子”呢?还是“B.证实了 Homestake 实验那缺斤短两的结果”?答案是:“C.以上都不对”。这两组新实验探测到的太阳中微子流量既不是 1/3,也不是 1,而大约是理论流量的 60%。



图2 SAGE(左)和 GALLEX(右)实验所在的山区

有点盲人摸象的意味了，你摸到一个脑袋，我摸到一条大腿。真相到底如何呢？还得再摸摸看。

另一组“摸象”的“盲人”是日本人，他们的实验结果其实比 SAGE 和 GALLEX 出得更早，他们的实验地点在日本神冈町的一座等效水深约 2700 米的地下矿井内，称为神冈观测站，原先从事的是一度很热门的质子衰变研究。自 1985 年开始，该观测站经过扩建后改称为神冈核子衰变实验 II 期。自 1987 年起，该实验室的探测器——神冈探测器——开始进行太阳中微子探测。

神冈探测器探测太阳中微子的方式与 Homestake、SAGE、GALLEX 等实验都不相同，它核心部位的探测物质是 2142 吨高度纯净的水，所利用的反应过程则是中微子与电子的碰撞。这种碰撞当然是小概率事件（因此要用几千吨水），但如果发生了，就有可能使电子获得能量，如果入射中微子的能量很高，电子所获得的能量也会很多，运动速度甚至可以超过光速——别紧张，只是超过水中的光速。当电子在水中的运动速度超过水中的光速时，就会发射一种特殊的辐射，叫做切伦科夫辐射。通过观测这种辐射，物理学家们就可以确定反应的发生。

神冈探测器的这种与众不同的探测原理使它具有一种 Homestake、SAGE、GALLEX 等实验都不具有的优势，那就是可以确定中微子与电子发生反应的时间、位置、入射方向、入射能量等细节。这些细节对于统计太阳中微子的数量来说虽不是必须的，但对于深入探索太阳核心的其他奥秘却有很大价值。不过有得就有失，神冈探测器也有一个很大的问题，那就是阈能特别高。为了使碰撞后的电子能够“超光速”，并且发射足够强劲的切伦科夫辐射，入射中微子的最低能量要达到 7.2MeV ，只有极少数

太阳中微子能具有如此高的能量。

从 1987 年到 1990 年，神冈探测器在积累了 1040 天的数据后得到了一个结果：它探测到的太阳中微子流量约为理论流量的 46%。1995 年，在积累了 2079 天的数据基础上，上述结果被修正为 55%。1996 年，神冈观测台耗资一亿美元建造了更大的探测器，称为超级神冈探测器（图 3），它的探测物质增加到了 50000 吨高度纯净的水，它对切伦科夫辐射的探测灵敏度达到了可以探测到月亮上一支烛光的惊人程度，而它的阈能则降低到了 5.5MeV 。一句话，它在各方面都有了长足的改进。自 1998 年起，超级神冈探测器开始发布探测结果，它所探测到的太阳中微子流量约为理论流量的 47%，与其他各组实验都不相同。

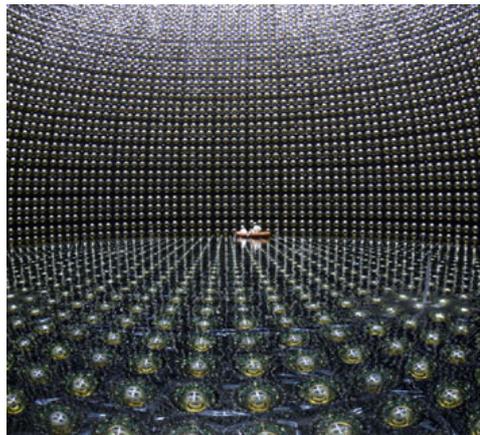


图3 超级神冈探测器

20 世纪就在这样忙忙碌碌的太阳中微子研究中走到了尾声。虽然在这类研究中，无论实验还是理论都存在不小的误差，但有一点已经可以确定，那就是探测到的太阳中微子流量明显小于理论预言。究竟是太阳原本就没有发射那么多中微子呢？还是有些太阳中微子失踪了？如果是失踪，那它们究竟跑到哪里去了呢？

这些问题就构成了所谓的太阳中微子之谜，或太阳中微子失踪之谜。不过严格来说，这最后一个名称是需要论证的，这就好比在现实世界中要把一个案件定性为失踪案，需要经过排查。现在我们就从那些排查说起。

我们要排查的第一种可能性是观测是否出问题。这种排查之所以必要，是因为中微子是一种相互作用极其微弱，从而在观测上极易“漏网”的粒子。这“漏网”达到一定程度，就有可能无中生有

地产生出“太阳中微子之谜”来，就像早年的核物理实验因为无法探测到中微子，而无中生有地闹出了能量不守恒的伪问题一样。

那么，太阳中微子问题是否也是那样的伪问题呢？答案是否定的。理由有两条：一是太阳中微子问题乃是几组独立实验的共同结果，这种结果的可靠性要比单一实验大得多。二是 GALLEX 和 SAGE 这两组实验都用流量已知的人工中微子源对探测器进行过校正，从而进一步确保了它们的可靠性。因此我们有充分的理由相信，太阳中微子问题并不是观测错误导致的伪问题。

既然不是伪问题，那就是真问题了；而既然不是观测问题，那就是理论问题了。因此接下来要排查的就是哪部分理论出了问题。我们知道，对太阳中微子流量的理论预言来自所谓的太阳模型，也称为标准太阳模型。这一模型以太阳的大小、光度、表面温度等可观测数据为约束，对太阳内部物态的分布、压强的平衡、能量的产生与传输、辐射的吸收与发射等主要因素及相互关系作了定量描述。但标准太阳模型并不是故事的全部，因为太阳中微子被产生之后，还必须穿越几十万千米的太阳物质以及日地之间将近一亿五千万千米的距离，才能进入我们的探测器。而描述后面这些过程的是有关粒子物理的模型，也叫做粒子物理标准模型。这一模型对目前已知的所有基本粒子及其相互作用，作了相当精密的描述。因此，与太阳中微子问题有关的理论有两个部分，它们拥有一个共同的名字叫“标准模型”。而所谓“哪部分理论出了问题”，归根到底是两个标准模型之争，即标准太阳模型 vs 粒子物理标准模型。

这两个标准模型哪个更可靠呢？在谜底揭晓之前如果让物理学家们押宝的话，我想绝大多数物理学家会把宝压在粒子物理标准模型上。因为这个模型自 20 世纪 60 年代后期建立以来，已经得到了无数的检验，其中包括所预言的新粒子及其参数得到证实那样堪称经典的检验。粒子物理标准模型所描述的虽然是肉眼无法看见的微观世界，但对物理学家们来说，实验室里数不胜数的粒子反应图片，无时无刻不在述说它的实在性。与之相比，标准太阳模型所受到的检验却少得可怜，其中被寄予厚望的太阳中微子实验偏偏又得出了令人尴尬的结果。而且与粒子物理标准模型所描述的相对纯粹的微观世

界不同，标准太阳模型涉及的是一个巨型天体的内部世界，只要想想我们脚底下的地球尚且如此复杂，我们对标准太阳模型的信心就很难不打上几分折扣。因此直到 20 世纪 90 年代，曾因研究大统一理论而闻名的美国物理学家乔治还在一篇论文中宣称太阳中微子问题与粒子物理无关，他并且很体贴地表示：天体物理学家们能够把太阳中微子的数目计算到只差两到三倍的程度，就已经很了不起了。言下之意，实验与理论的这点出入是不足为奇的，可以由标准太阳模型负全责，别来烦粒子物理。另一位知名的美国物理学家德雷尔也表示，粒子物理标准模型已经辉煌到了难以被放弃的程度。

既然“民意”如此，那我们就先考虑标准太阳模型出问题的可能性吧。我们在前文中介绍过，太阳核心核聚变反应的剧烈程度与太阳的核心温度有着极为敏感的依赖性。由于太阳中微子来自于核聚变反应，它的流量当然也与太阳的核心温度有着极为敏感的依赖性。因此，标准太阳模型出问题的最大可能性，就是它所预言的太阳核心温度出了错。如果太阳核心的实际温度比标准太阳模型所预言的低，那么太阳核心核聚变反应的剧烈程度，以及它所产生的太阳中微子的流量就会大幅降低。计算表明，托太阳核心温度与核聚变反应之间敏感依赖性的福，太阳的核心温度只要调低几个百分点，就足以使太阳中微子的流量减少几十个百分点，从而与观测结果定性相符。

初看起来，这是一种很大的可能性，因为在描述像太阳核心那样远离经验的环境时，出现几个百分点的温度误差不仅是完全可能的，甚至可以说是无可避免的。但细想一下却又不然，理由很简单：将太阳的核心温度调低几个百分点虽然能定性地调和中微子流量的理论与观测之间的差距，但同时也会导致太阳光度的大幅降低——因为核聚变反应的剧烈程度大幅降低了，而这却是完全有违观测的。

对标准太阳模型出问题的可能性构成更沉重打击的，是我们在后文中将要介绍的所谓日震学研究，那种研究证实了标准太阳模型的许多细节。事实上，标准太阳模型看似“五大三粗”，只用寥寥几个方程式来描述整个太阳的基本特征，但它对物理原理的运用却是相当缜密的，甚至达到了“牵一发而动全身”的精密性。比如要想调低太阳的核心温度，就必须同时调节太阳内部重元素比例之类的参数，那些参

数有不少是可以利用地震学手段进行检验的，而检验的结果几乎无一例外地支持了标准太阳模型。

自此，标准太阳模型出问题的可能性基本被排除了，而太阳中微子问题也确实可以定性为失踪案了，因为标准太阳模型既然没问题，就说明太阳中微子的流量确实要比实验探测到的大。

现在留给我们的就只有一条路了：修改粒子物理标准模型。粒子物理标准模型再是“辉煌到了难以被放弃的程度”，到了这地步，我们也只得在它头上动土了。不过在动土之前，我们先要对中微子的家世做一个彻查。据我们目前掌握的情况，中微子家族共有三兄弟，个个都是偷运能量的好手。我们前面所说的中微子只是最早落网的那个，它的全名叫做电子中微子。除电子中微子外，人们在 1962 和 2000 年又先后发现了另外两种中微子，分别叫做 μ 子中微子和 τ 子中微子。这种三兄弟结构为解决太阳中微子问题提供了一条新的思路，叫做中微子振荡。

什么是中微子振荡呢？简单地讲就是中微子三兄弟之间的相互转变。这种转变可以循环往复，因而称之为振荡。中微子振荡之所以有可能解决太阳中微子问题，是因为太阳核心所产生的全都是电子中微子，而我们前面介绍的那些中微子探测器所探测的也主要是电子中微子。因此假如来自太阳核心的电子中微子在飞往地球的途中有一部分转变成了 μ 子中微子或 τ 子中微子，就会逃过探测器的检验，而造成中微子失踪的假象。这就好比一位用几个笔名轮流发帖的网民，从 IP 地址上显示他一共发了一百个帖子，但你若只搜索其中一个笔名，就只能搜到一部分帖子。

有关中微子振荡的想法有着不短的历史。事实上，早在中微子的兄弟被发现之前，也早在太阳中微子问题出现之前，就有人提出了中微子振荡的想法（最初针对的是中微子和反中微子）。而当戴维斯实验让太阳中微子问题粉墨登场后，中微子振荡的想法被再次提了出来。

那么，中微子振荡需要从哪里入手修改标准模型呢？是从添加中微子的质量入手。在标准模型中，所有中微子都是无质量的。在理论上可以证明，如果所有中微子都是无质量的，中微子振荡就不可能发生。因此，要想有中微子振荡，就必须从添加中微子质量入手，修改粒子物理标准模型。

接下来我们想知道的是：在中微子振荡中，中微子相互转变的概率满足什么规律？这对于观测验证是至关重要的。简单的理论分析表明，那种概率与中微子的质量、能量、相互间的混合，以及飞行距离等因素都有关联。这些关联为拟合观测数据（包括几组观测得到不同结果这一特点）提供了许多可调节的参数。可惜的是，当人们更细致地研究了中微子振荡之后，却发现了一些问题。比如计算表明，要想用中微子振荡来解释观测结果，需要假定中微子的某些参数与像日地距离那样与中微子风马牛不相及的参数之间满足一定的巧合关系。这种有赖于巧合的解释是物理学家们素来不喜欢的，因此是一个不好的兆头。如果说这还只是口味问题，那另外的问题可就是“你死我活”的级别了。比如计算表明，由中微子振荡所导致的中微子失踪率应该呈现明显的季节变化（这是因为中微子相互转变的概率与飞行距离有关，而不同季节里，日地距离是不同的），但观测却并未发现与理论预期相符的变化。

这样一来，情况就又有些不妙了。如果连中微子振荡也不行了，那岂不是连最后一条路也要变成绝路？幸运的是，在中微子振荡中还有一个重要因素起着不可忽视的作用，那就是物质对中微子振荡的影响。虽然没有明说，我们前面提到的中微子振荡其实都是指真空中的振荡，但事实上，太阳中微子一出世就得穿越厚达几十万千米的太阳物质，这会对它们产生一定影响。有读者也许会问：我们不是说过，太阳物质对中微子来说几乎是透明的吗？是的，我们曾经说过。但透明不等于完全没有影响，玻璃对光来说也是透明的，却可以导致各种光学效应。太阳物质对于中微子来说也是如此，虽然透明，但会有一定影响。而且更重要的是，太阳物质对不同类型的中微子有不同的影响，对电子中微子的影响要比对 μ 子和 τ 子中微子大，由此导致的后果是对中微子振荡产生影响。这种影响早在 1978 年，就由美国物理学家沃芬斯坦研究过。1985 年，俄国物理学家米克耶夫和斯米诺夫推进了这一研究，并得到了一些重要结果。这种物质对中微子振荡的影响因此而被冠以他们三人的姓氏首字母，称为 MSW 效应。后来的定量计算表明，考虑了 MSW 效应后的中微子振荡与所有的太阳中微子观测都相容。

不过，中微子振荡作为太阳中微子问题的正解，它的真正确立则是建立在更直接的实验裁决之上

的。这种裁决首先来自日本的超级神冈探测器。1998年，超级神冈探测器通过检测宇宙线在地球大气层中产生的 μ 子中微子与电子中微子的相对数目，首次直接证实了中微子振荡的存在。在太阳中微子研究中，神冈系列探测器可谓居功至伟，占据了不止一项第一。除首次直接证实中微子振荡外，我们在上节中提到的它能测定中微子入射方向这一特点（它对中微子振荡的证实也有赖于这一特点），还使它成为了第一个直接证实太阳中微子来自太阳方向的探测器（此前的其他探测器都只能从数量上间接推断中微子来自太阳，因为其他来源都不可能如此巨大）。

不过超级神冈探测器在证实中微子振荡时所观测的并不是太阳中微子，而是能量远高于太阳中微子的由宇宙线产生的中微子。因此对于解决太阳中微子问题来说还不够一锤定音。那么，对太阳中微子问题一锤定音的裁决来自哪里呢？来自加拿大的萨德伯里中微子观测台。这座位于等效水深6000米处的观测台有一个与以往任何探测器都不相同的特点，那就是可以探测所有类型的中微子，从而既验证标准太阳模型的预言，又检验中微子振荡。

2001年，萨德伯里中微子观测台发布了观测结果，非常漂亮地显示出中微子的总流量在实验精度范围内与标准太阳模型相符，而电子中微子所占的比例，则与中微子振荡所预期的一致。

这样，太阳中微子之谜就被解开了，谜底就是中微子振荡。在标准太阳模型与粒子物理标准模型的对决中，居然是标准太阳模型取得了胜利，这让很多人跌破了眼镜。此后，人们又通过大量其他实验（包括使用来自加速器及核反应堆的中微子）进

一步证实了中微子振荡。经过如此曲折的努力，我们终于完成了为恒星核聚变理论收集进一步证据的工作，使这一理论得到了牢不可破的确立。

2002年，那位半个世纪前被审稿人揶揄过的“站在山顶上，用自己的手去碰月亮”的太阳中微子探测先驱戴维斯以88岁的高龄，与超级神冈探测器的“头领”，日本物理学家小柴昌俊一同荣获了诺贝尔物理学奖。

2004年，戴维斯当年的合作者、太阳模型专家巴克尔撰写了一篇评述太阳中微子问题的文章。在文章的末尾，他这样写道：

当我回顾过去40年在太阳中微子研究领域所取得的成就时，我感到了惊讶。由数以千计的物理学家、化学家、天文学家和工程师组成的国际团队用他们的合作，展示了通过统计地下矿井里一个盛满纯净液体的游泳池里的放射性原子的数目，就能告诉我们有关太阳核心的重要事实，以及被称为中微子的奇异基本粒子的性质。若非亲身经历了太阳中微子的传奇，这对我来说将会是难以置信的。

一段传奇虽已落幕，但有关中微子还有许多值得人们探索的地方，比如中微子的质量从何而来？中微子的质量与电子等粒子的质量是否是同一类型？等等。一个小小粒子尚且有如此多的奥秘，更何况太阳呢？因此大家不要离开，我们的太阳故事还将继续。

作者简介

卢昌海，本科毕业于上海复旦大学物理系，后赴纽约哥伦比亚大学从事理论物理学习及研究，并获物理学博士学位。现旅居纽约。个人主页：<http://www.changhai.org>



（上接22页）造学说的提出作出了巨大贡献。为何环境磁学的发展直至弗兰克·奥德菲尔德教授的介入才得以诞生呢？也许是古地磁学在地球科学中所取得的巨大成功，使人们专注于古地磁学的研究，而忽略了磁性矿物作为地球磁场载体之外的其他用途。弗兰克·奥德菲尔德教授从自身的学科背景和研究兴趣出发，洞见了磁性矿物的更为广泛的应用价值。可以预见，地球

化学、矿物学和磁学、微生物学的结合，以及我们面临的地球科学和环境科学问题，将是未来环境磁学不断向前发展的动力。随着大家对古环境演变、物质来源追踪、环境污染、生物矿化等问题的关注，环境磁学在上述领域中将会发挥积极的作用。

（上海华东师范大学河口海岸学国家重点实验室 200062）