

宇宙中的变色龙

李学潜¹ 沈彭年² 丁亦兵³ 译

(1 南开大学 300071; 2 中国科学院高能物理研究所 100049; 3 中国科学院大学 100049)

半个多世纪前，蓬泰科尔沃有两个至关重要的认识，它们是解决太阳中微子之谜的关键。第一个深刻的认识是，存在不止一种类型的中微子。他在检验一个被称为 μ 子的不稳定粒子的衰变时得出了这个结论。 μ 子属于轻子家族，这个家族中还有电子和中微子。轻子不参与强相互作用，它们是物质的基本构建模块。 μ 子也带负电荷，但质量是电子的约 200 倍，并且在碎裂之前，只有一百万分之二秒的寿命。蓬泰科尔沃提出 μ 子和电子各有一种不同类型的中微子与之相对应。

1962 年，哥伦比亚大学的三位物理学家——莱德曼 (L. Lederman)、施瓦茨 (M. Schwartz) 和施泰因贝格尔 (J. Steinberger)——用粒子对撞机做实验时确认了两类中微子的存在，证明了蓬泰科尔沃在这一点上是正确的。当斯坦福大学的佩尔 (Martin Perl) 和他的同事发现了轻子家族的第三个成员、一种质量更大的、被称为 τ 子的粒子时，研究人员预期应该有第三类中微子与之相对应。2000 年，位于芝加哥附近的费米实验室的物理学家最终观测到了 τ 子型中微子。我们使用古怪的术语“味”来描述这三个中微子类型。

蓬泰科尔沃的第二个深刻的认识是，中微子可能是变来变去的。他发现量子力学的定律允许中微子在各种类型之间变换，或“振荡”，但这只有在它们的质量不为零时才会发生。他意识到，中微子的质量可能是极小的，甚至只是电子质量的几千万分之一，但它不能为零。他也知道，太阳中的核反应只产生一种味的中微子——电子型中微子，这是唯一在戴维斯的基于氯的实验中可以探测到的中微子。在戴维斯 1968 年首次报告太阳中微子亏缺之后不久，蓬泰科尔沃和他的苏联同事格里博夫 (V. Gribov) 提出：在从太阳来到地球的路上，中微子从一种味振荡到另一种味就可以解释太阳中微子亏缺。这个理论听起来就好像他

们在提议说，巧克力冰淇淋可以变成香草冰淇淋，尽管这个理论听起来很奇怪，但他们的提议为太阳中微子亏缺提供了一种简单而又漂亮的解释：产生于太阳的电子型中微子有三分之二在它们漫长的旅途中可能变成了其他类型的中微子，从而逃脱了检测。

他们的提议在古怪的量子力学世界里很好理解，在那里确定性让位于概率。在量子力学中，我们也可以用波描述粒子，波长依赖于粒子的质量和速度。从数学上讲，存在着描述每一种味的中微子的“波函数”。如果三种味的中微子各有不同的质量，则三种波长也会不同。事实上我们认为，中微子粒子是三种味的中微子的混合物。在冰淇淋的类比中，就好像我们有巧克力、香草和草莓三种味道混合在一起的螺旋状冰淇淋。当一个中微子穿过空间时，与三种味相对应的波以不同的速率前进。一路上这些波相互混合，所以在空间的不同的点，你将得到不同的混合味。有时你尝到的主要是巧克力味的，而在其他时间香草味或草莓味则是主要的。所以，一个出生时为电子型中微子的中微子在一段距离之后会作为 τ 子型中微子出现。就像蓬泰科尔沃和格里博夫提出的，这就是为什么中微子在从太阳传播到地球的时候会在味之间振荡。

问题是，他们的提议与物理学家的传统知识背道而驰，这些物理学家中的大多数都假定中微子是无质量的，并以光速传播，就像同样没有质量的光子一样。如果是那样的话，这些粒子就不能在味之间振荡。事实上，在 20 世纪 70 年代建立并被此后众多实验证明其正确性的粒子物理学标准模型，就认为中微子的质量为零。鉴于标准模型在对亚原子世界的描述上取得了辉煌的成就，几乎没有物理学家愿意放弃该模型中关于中微子的信条和接受蓬泰科尔沃激进的提议。

然而，当三位理论家在他们的计算中偶然发现了

一个有趣的可能性时，物理学家们的态度开始发生了变化了。以美国的沃尔芬斯泰因 (L. Wolfenstein) 的深刻见解为基础，苏联的米赫耶夫 (S. Mikheyev) 和斯米尔诺夫 (A. Smirnov) 意识到物质的存在会大大地增强中微子的振荡。所以如果产生于太阳核心的中微子在出发时有互换身份的轻微倾向，那么当它们到达太阳表面时，其最终的身份就会完全改变。许多物理学家发现这一现象的数学描述相当令人信服，该现象被称为 MSW 效应，以其发现者姓名的首字母冠名。就像巴考尔告诉记者的：“MSW 效应是一个漂亮的想法。假如大自然不采用这个解决方案，那看上去就像是一个宇宙错误。”

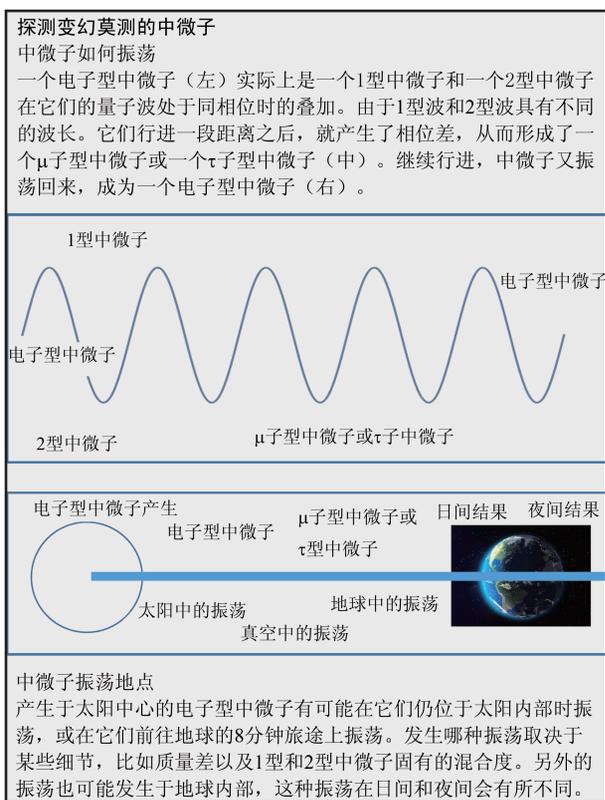


图1 中微子如何振荡

但仅仅理论上的考虑还不足以让物理学家们相信蓬泰科尔沃关于中微子振荡的说法是正确的。因此，20世纪90年代，当中微子在味之间来回变换的清晰的实验证据被发现时，许多研究人员都激动不已。那时，日本的中微子猎手已经把他们的探测器（现在称为超级神冈探测器或超级-K）升级到比原来的神冈探

测器灵敏数倍的水平。像它的前身一样，超级-K不仅能记录太阳中微子，也能记录由宇宙线撞击地球高层大气而产生的中微子。这些所谓的大气中微子的能量是那些太阳中微子的数百甚至数千倍，所以它们更容易被捕获。科学家估计，在宇宙线碎屑中， μ 子型中微子的常见程度应该为电子型中微子的两倍。幸运的是，超级-K探测器能够区分这两类中微子：撞击水的电子型中微子会产生一个模糊的光圈，而 μ 子型中微子的相互作用会导致一个清晰的环。观察了两种类型的大气中微子将近两年之后，超级-K团队报告了一个令人惊讶的结果：他们发现这两种类型中微子的数量大致相等， μ 子型中微子的数量并非电子型中微子的两倍。他们推断，一种可能性是，一半的 μ 子型中微子变成了第三种类型的中微子： τ 子型中微子。这种中微子不是很容易被超级-K识别。

最有趣的线索与中微子到达的方向相关。数量大致相等的宇宙线应该从各个方向撞击地球的大气层，因此由这些粒子碰撞产生的中微子的数量在全球各地也应该是相等的。果然不出所料，超级-K的研究人员发现，从天上落下来的和从地球的另一面穿过地面而来的电子型中微子的数量是相等的。但对 μ 子型中微子来说，情况却并非如此：来自地下的中微子的数量只有从天而降的中微子的一半。在超级-K团队看来，似乎 μ 子型中微子在穿过地球的旅途中不知何故消失了。就像超级-K合作组的一个成员、波士顿大学的卡恩斯 (E. Kearns) 所说的：“这是确凿的证据。”他们推断，最有可能的是 μ 子型中微子改变了身份，变成了超级-K无法很容易地检测到的 τ 子型中微子。由于这些发现，到20世纪90年代后期，更多的物理学家都愿意接受中微子振荡是造成大气中微子反常及太阳中微子亏缺的原因。

然而，仅仅指出有些 μ 子型中微子中途消失了还不足以证明它们蜕变成了不同的类型。为了确认这种解释是正确的，物理学家需要测量来自太阳的电子型中微子变成了什么，或者至少要把电子型中微子同其他味的中微子区分开来，单独进行测量。这就是萨德伯里中微子观测站 (SNO)* 的主要目标，该观测站

* Sudbury Neutrino Observatory, observatory 中文直译为天文台，但在本书中的大部分情况下，它的含义与传统的天文台不同，可以理解为中微子观测站。——译者

是为了一劳永逸地解决太阳中微子之谜而在安大略北部一个还在运行的镍矿内建造的。该实验室后来扩展成了一个更大的设施，称为 SNOLAB。实验室主任史密斯（N. Smith）同意带我去那儿参观，所以在 2010 年 11 月下旬的一个下午，我冒着时不时飘落的小雪，驱车向北行驶了 4 小时，从多伦多来到了萨德伯里。次日早晨，在没有 GPS 导航的、黎明前的黑暗中，我在从歇脚的提供住宿和早餐的家庭旅馆开车前往 SNOLAB 所在地的途中几乎迷了路，但最后还是想办法及时赶上了早上 7 点的最后一班下井电梯。

在地面上的一个更衣室内，史密斯穿上蓝色工作服和钢制靴头的靴子，把灯和电池组分别固定在他的安全帽上和挂在安全带上，并要求我也这么做。为了在紧急情况下可以更容易地清点人数，我们将两个标签——一个是史密斯，另一个是“访问者”——挂在墙上的挂钩上，之后我们走进一个用一条几乎和我的手臂一样粗的缆绳悬挂着的、黑暗的、叽叽嘎嘎作响的电梯。24 位矿工与我们一起挤进这个开放的罐笼。我们开始慢慢地下降到矿井中，但下降速度不久就加快了。头上的矿灯提供了刚刚够用的光线，使我能够辨认出矿井的石壁正迅速地从我前面滑过。罐笼在下降的途中停了几次，以便放下一组组的矿工，我瞥见每一层点燃灯光的隧道通向远处。大约下降到一半的路程时，我的耳膜感到了压力的变化，于是我不得不活动活动我的下巴并打个哈欠。在最后一站，正好在地面下大约 2000 米的地方，史密斯和我连同剩下的矿工一起走了出去。我们的下降，包括沿途的停靠，耗时大约 10 分钟。

然而，我们的旅程远未结束，因为我们还要艰苦跋涉，穿过前面一条 1600 多米长的泥泞隧道才能到达 SNOLAB。幸好，混凝土支撑、锚杆和钢屏的组合防止了头上方的岩石在压力下塌落，通风系统产生的习习凉风使我们免于汗流浹背。矿工转向侧隧道寻找镍矿（挖掘矿井的主要原因），史密斯和我则继续沿着为矿车铺设的铁轨往前走。最后我们抵达了一个代表 SNOLAB 的指示牌：开采知识，这个指示牌传递的信号是：我们已经来到了世界上最深的地下实验室。*

我们用水管把靴子上的泥巴冲掉，拉开一扇鲜艳的蓝色大门。我立刻就被镇住了：洁净的实验室内那一尘不染的地板、闪亮的墙壁和无尘的空气与我们刚刚走过的、肮脏的矿井之间的反差是如此巨大。在前往更远的地方之前，我们洗了个澡，换上一套新的工作服、靴子和头套。我们进入内室前的这套复杂的清洁程序的最后一步是，通过空气淋浴清除任何残留的污垢或灰尘粒子，以保持封装在 SNOLAB 中的敏感实验的完美性。整个实验室就像一个净化室一样，空气被连续不断地过滤；进入室内的每一个人和每一件东西都必须彻底地清洁，以除去矿尘中丰富的放射性元素的任何痕迹，否则就会干扰对中微子信号的测量。

一旦进入内部，走过装着一闪一闪的电子设备的架子或与几个科学家在餐厅里吃快餐，你很容易就忘了头上有 1600 多米厚的岩石。即使你在升降罐笼或隧道内感到幽闭恐惧，在这里你大概就不会有这种感觉了。但你可能会注意到，这里没有窗户让阳光洒进来。所以，也许具有讽刺意味的是，这个实验室建在第一个为了凝视太阳的地方。20 世纪 80 年代中期，16 名科学家聚集在一起，提出建造 SNO 去捕获几个从太阳喷射出来的、穿过岩石比阳光透过窗玻璃还要容易的中微子。

时为普林斯顿大学教授的麦克唐纳（A. McDonald）也在其中。麦克唐纳在新斯科舍省布雷顿角岛东部边缘附近长大，总是对事情的来龙去脉感兴趣。小时候，他喜欢把钟拆散，然后尝试把它们重新组装回去。后来，作为一个物理学家，他喜欢用数学去理解大自然是如何运作的。1989 年，他回到加拿大，在女王大学担任教授并领导 SNO 项目。两年后，他和同事们获得了足够的资金，把他们关于一个强大的地下中微子观测站的梦想变成了现实。

SNO 中微子探测器的中心部件是一个巨大的用透明的丙烯酸纤维制成的球形容器。研究人员在里面注入的不是普通的水，而是 1000 吨重水，其中含有一个质子和一个中子的氘原子替代了只有一个单独质子的氢原子。他们纯化重水，不仅去除灰尘，而且还清除掉所有残存的放射性气体。一个在其内壁安装了

* 目前，我国的锦屏山地下实验室上面的岩石覆盖层已经比 SNOLAB 的还要厚了。——译者

9600 个光传感器的用张力式轻质构件制造的球环绕着丙烯酸纤维容器，时刻监视着中微子的相互作用。整个装置被埋在矿井内部一个很深的教堂大小的洞内。当我参观这个地点的时候，我可以从平台上面窥视到它。建造 SNO 花费了 9 年多的时间和 7000 万加元，价值 2 亿加元的重水还没有计算在内，这些用于实验的重水是向加拿大原子能有限公司借的。尽管一路走来遇到了一些小问题，但 SNO 还是在 1999 年夏天开始了数据采集。

两年后，在对中微子与重水间的相互作用进行了 241 天的记录之后，麦克唐纳宣布了他们实验的第一批结果。经过比较 SNO 和超级-K 检测到的中微子数量，他的团队确认：一些中微子肯定改变了它们的味。当时他告诉媒体：“我们已经解决了太阳中微子失踪这一 30 年未解的谜团。”他说：“现在我们高度确信，差异不是由于太阳模型的问题引起的，而是在中微子从太阳的核心传播到地球的途中，由其自身的变化造成的。”他们的研究结果支持了中微子振荡和中微子至少具有一点点质量的看法。

这当然是重要的一步，但问题还未到圆满解决的时候。对 SNO 本身来说，最明确的检验将是测量所有未混合在一起的三种味的中微子，并与超级-K 的测量相比较——这正是研究人员下一步所要做的。除了其他升级措施之外，他们还把 2 吨氯化钠（也称为纯盐）加到重水中。他们知道，盐中的氯会提高捕获中微子和区分不同类型中微子的机会。他们的聪明技巧得到了回报。2002 年，团队宣布单靠阶段性的 SNO 结果就可确认，太阳中微子在它们的旅途上从一种类型转换成了另一种类型。一年后，他们报道了中微子数量的确切结果。其总数与巴考尔太阳模型的预言完全一致。果然，到达地球的太阳中微子只有三分之一是电子型的。其他三分之二是 μ 子型和 τ 子型的。这就证明了在太阳中产生的电子型中微子在中途变成了其他味的中微子。就像波士顿大学的物理学家卡恩斯解释的：“超级-K 告诉我们的只是银行的余额，但实际上 SNO 可以看到的是存款与取款的记录。”

这些发现证明戴维斯和巴考尔都是正确的。戴维

斯对太阳中微子的测量和巴考尔对太阳中微子的计算自始至终都是对的。事实上，巴考尔的预测和 SNO 捕获的数目出奇的一致。被证明是正确的巴考尔兴奋不已，他向记者表示，现在感觉就像是在跳舞。正如巴考尔后来解释的：“30 年来人们一直指着这个家伙说，他就是那个把太阳中微子的通量算错了的家伙，然后突然间人们说那不是这么回事。这就像一个人被宣判说犯了十恶不赦的罪行，然后人们对他做了一个 DNA 测试，发现他是无罪的。这正是我的感受。”天文学家终于可以宣称真正地了解了太阳是怎样产生能量的。此外，他们在数百万英里*外的太阳的核心有了一个新的温度探针，因为每秒钟产生的太阳中微子的数目对太阳核心的温度非常敏感。也许对物理学家来说最重要的是，事实证明蓬泰科尔沃的预言是正确的：中微子在味之间振荡并具有非零的质量，与标准模型的假定正好相反。

同时，或许受到了这些发现的鼓舞，诺贝尔奖委员会对两位中微子狩猎先驱所取得的重要成就给予了崇高的荣誉。他们把 2002 年物理学奖的一半授予了戴维斯及神冈探测器的小柴昌俊，“因为（他们）对天体物理学，特别是对宇宙中微子探测开创性的贡献”。巴考尔被遗漏了，尽管他的太阳模型预测戏剧性地被确认了。他的很多同事都认为这非常令人遗憾。

许多物理学家认为，诺贝尔奖委员会已为一个未来的奖项——正式认可关于中微子振荡的发现——敞开了大门。毕竟，2002 年的奖表彰的是中微子探测对天体物理学的贡献，而不是对中微子变色龙般性质的确定。卡恩斯就是持这种看法的人之一，他认为“这只是个时间问题”。猜测谁有可能获奖，是物理学家们乐此不疲的一个游戏。卡恩斯和其他几位物理学家认为，SNO 团队的领导人麦克唐纳应该占有一席之地。不那么清楚的是，谁会获得超级-K 所应分享的那部分奖，因为首席科学家户冢洋二（Yoji Totsuka）已于 2008 年去世。接下来的似乎是铃木洋一郎（Yoichiro Suzuki）和梶田隆章（Takaaki Kajita），这两人都在超级-K 中扮演了主要的角色。卡恩斯对我说：“如果这三个人全都能获奖就太好了。每年 10 月份我一觉

* 1 英里约等于 1.6 千米。——译者

醒来的时候都会疑惑它是否已经发生了。”夏威夷大学的勒尼德同意卡恩斯所说的三个竞争者中的两个，麦克唐纳和梶田，但他说第三份分享奖金应该给予进行神冈流体闪烁体反中微子探测器（KamLAND）实验的铃木厚人（Atsuto Suzuki），该实验使用来自反应堆的中微子确认中微子振荡。^{*}

中微子振荡的发现产生了几个意义深远的结果。其中一个结果是，它证明了中微子不是无质量的，这与标准模型的预期相反。因此，它是证明标准模型可能并不完美的第一个决定性的证据。另外一个结果是，对这些振荡的测量提供了一种探索“新物理学”的方法，物理学家用“新物理学”一词描述标准模型解释不了的现象。就像威斯康星大学麦迪逊分校的物理学家黑格（Karsten Heeger）告诉我的：“传统的粒子物理学只确认了标准模型。中微子振荡是存在某种超越标准模型的东西的第一个信号。那个发现极大地推动了这个世界的发展。”

发现中微子有质量也是宇宙学家感兴趣的事情。由于中微子是仅次于光子的宇宙中第二多的粒子，所以尽管每个粒子都只有一点点的质量，但其总质量可以达到一个很大的数字。因此某些宇宙学家希望中微子能解释大量神秘的暗物质，暗物质的存在只能通过它对星系和星系团的引力影响而被“看到”。但中微子的质量已被证明实在是太小了，所以不能用它解释暗物质。这意味着必然存在着某种或某些其他的、物理学迄今未知的粒子。猎捕仍在继续，但是至今还未出现很好的候选目标。

超级-K和SNO的发现也为其他的中微子实验打好了基础，这些实验专注于对不同味的中微子如何相互转换进行精确测量。物理学家喜欢用称为“混合角”的参数来描述这些振荡的特性，这有点类似于你可以用俯仰、偏航和横滚来描述飞机动力学。通过超级-K和SNO，他们能够确定三个角度中的两个，但不能确定称为 θ_{13} （读作“西塔-1-3”）的第三个角度。对所有这三个角度的测量将使得研究人员可以敲定这三种

类型中微子之间的质量差。更重要的是，他们可以从中微子转化的具体细节中收集有趣的新物理学。物理学家热衷于弄清楚的一件事情是，中微子和它们的反物质孪生兄弟的行为方式是否相同。如果不相同，那这很可能就是理解宇宙如何演变成被超越了反物质的物质所主宰的关键，我将在第七章讨论这一问题。还有一个不断烦扰物理学家的问题是，是否真的只有三种味的中微子。一些奇特的理论已经提出了第四种中微子，称为惰性中微子（sterile neutrino），它绝对不会与物质发生相互作用，但可以通过间接的方式被显露出来。这将是最新冷的一类中微子，极难确定，然而如果它的质量大到了能够解释暗物质的话，那么它对宇宙学来说就是极其重要的。

最近的振荡实验大多依赖于来自诸如核反应堆和粒子加速器等人工源的中微子，而不是那些源于地球上层大气或太阳的中微子，就像超级-K和SNO所做的那样。发现太阳中微子振荡后不久，日本物理学家通过测量来自神冈周围的商用反应堆的反中微子，确认了这一现象是真实的。的确，只有一部分中微子到达了探测器，其他的中微子似乎在途中都演变成了不同类型的中微子。在加速器中产生的中微子束流向实验家提供了控制所研究粒子的数量、类型和能量的最好机会。美国的MINOS实验也发现了中微子振荡的证据，该实验是从芝加哥附近的费米实验室向一个大约724千米远的安装在废弃的苏丹铁矿中的探测器发射中微子束流，该矿位于明尼苏达州北部。

目前正在进行的最大的中微子振荡实验之一是被称为T2K（Tokai to Kamioka，即“东海至神冈”）的实验。该实验需要发送一束强中微子束流穿过日本本州岛。产生中微子的粒子加速器位于东海岸的东海，而神冈探测器在大约290千米以外的岛的西部。[东海在日本非常有名，因为在几部《哥斯拉》（Godzilla）电影中它是怪兽袭击的地点。]该实验由来自12个国家的近500位科学家组成的大型国际合作组筹建并运行，于2010年1月开始取数。原本设想在2011年3月11

^{*} 梶田隆章和麦克唐纳分享了2015年的诺贝尔物理学奖。另外，由中国的王贻芳院士和美国的陆锦标领导的大亚湾中微子合作组、麦克唐纳的SNO合作组、日本的西川一郎的K2K和T2K（长基线中微子实验）以及铃木厚人和梶田隆章的K和超级-K实验一起分享了2015年共300万美元的突破奖（Breakthrough Prize）。——译者

日当地时间下午 3:00 在东京的一个讨论会上宣布第一批结果，但未能实现。正好在预定的公布时间之前的 14 分钟，一次强烈的地震袭击了日本的东北海岸。这次地震达到了里氏 9 级，是日本有记录以来最强烈的一次地震，它引发了一场毁灭性的海啸。据后来的估计，地震和海啸共造成 15 000 多人死亡，总经济损失超过 2000 亿美元。那时最令人担忧的是福岛核电站的熔毁，海啸巨浪使核电站用于冷却设备的电力供应全部瘫痪，甚至备用的柴油发电机也被摧毁了。

就读于加拿大不列颠哥伦比亚大学（UBC）的研究生柯比（B. Kirby）因为要在控制室值两周的班，提前一天到达了东海。3 月 11 日下午大楼突然开始震颤，他和其他几个人蹲到了桌下。“摇晃持续了相当长的一段时间。”他回忆道。很快就断电了。震颤一停下来，柯比就和同事马上冲到了外面。“有几分钟的余震，感到地面在摇晃。”他说。他不知道地震的震中离东海有多远，也不清楚地震给北面只有 200 千米远的仙台市及周边地区造成了多大的灾难。等形势稍微平稳一点之后，他和同事们立刻骑车回到了他们在附近租的房子，并趁冰箱中的食物还未因断电而变坏赶紧吃了一顿烧烤。

再回到温哥华看看。在地震发生几小时后，奥泽（S. Oser）的妻子叫醒了他，告诉他日本发生了地震。UBC 的奥泽教授是 T2K 合作组的加拿大发言人，柯比的博士生导师。奥泽查看了网上地图，看到震中离东海不远。然后，他打开他的电子邮箱，希望能收到他的学生的信件。收件箱中有很多日本以外的 T2K 合作者发来的信件，其中最后一封邮件来自柯比的忧心忡忡的母亲。他把柯比在日本的手机号码发给她，并且自己也试着给柯比打电话。令他吃惊和安慰的是，柯比接了电话。除了没电、不能上网以及手机电量不足之外，柯比一切都很好。T2K 协作组安排他们在东海的同事撤离到了较远的内陆，然后再离开这个国家。几天之后，柯比离开了日本。

没有人知道实验的情况。“我们没有期望什么东西能在 9 级地震后留下来。”奥泽告诉我，“道路不通，几个星期没有电，所以还要等一段时间才可以派人去

检查东海实验室。”幸运的是，损坏比所担忧的要小得多。被牢牢固定在基层岩石上的建筑大部分都完整地保留了下来，但周围的道路已经坍塌，几条电力电缆断裂了，供冷却设施所用的水供应也已经中断。多亏了海啸护堤的保护，海浪没有到达实验室。但是，修理还是花了一年多的时间。2012 年 4 月，T2K 实验再次开始取数。

与此同时，T2K 在地震前收集的并在 2011 年 6 月宣布的数据表明，一些 μ 子型中微子变成了电子型中微子。SNO 和超级-K 以前的研究已经展示了另外两种中微子振荡，但这一次是科学家第一次发现第三种转换类型的直接证据。在东海产生的许多 μ 子型中微子中，有 88 个被记录在将近 298 千米外的神冈探测器中。尽管原始的粒子束流中只有 μ 子型中微子，但这 88 个中微子中的 6 个是以电子型中微子的形式到达的，所以它们的味必然在途中发生了改变。就像卡恩斯解释的：“尽管我们研究中微子振荡已经有好几年了，但看到这 6 个事件仍然是一件令人兴奋不已的事。”麻省理工学院（MIT）的温斯洛（Lindley Winslow）认为，对中微子物理学来说，这些探测标志着激动人心的里程碑，他把它们描述为“6 个有史以来最受欢迎的中微子事件”。由于记录的振荡如此之少，T2K 的结果还没有精确到可以测量第三个混合角的实际数值，但它们显示 θ_{13} 不为零。这一结果给出了这样的可能性：中微子和反中微子在与物质相互作用的方式上的确是不同的。

其他 3 个追逐 θ_{13} 的实验也紧跟着 T2K 热了起来。其中一个实验位于法国东北部的休茨村，它测量商用核电站在其常规运行的过程中产生的中微子。物理学家在紧靠核反应堆的地方安装了一台探测器，并在离它 1000 米（0.62 英里）远的地方安装了另外一台探测器，以便探测电子型中微子的消失率。2011 年秋天，他们报告了从双休茨（Double Chooz）前 100 天的数据得到的结果（因为该实验涉及两个探测器，所以被称为双休茨）。他们的测量独立地确认了 θ_{13} 不为零，但未能很好地敲定它的数值。^{*}另一个位于中国大亚湾的实

^{*} 此处原文有误，Double Chooz 实验紧靠反应堆的探测器直到 2014 年 9 月才完成安装，2011 年报告的结果只有一台探测器的数据，并非如文中的两台，因此结果非常粗略，置信度仅为 1.7 倍标准偏差，尚不及 T2K 的精度，因而无法确认 θ_{13} 不为零，只能给出不为零的迹象。中国的大亚湾实验 2012 年 3 月首次确定了 θ_{13} 不为零，置信度为 5.2 倍标准偏差。——译者

验对转换更为敏感。该实验所依托的世界上最强大的核电站之一，以及深埋于地下的大型探测器，都有助于减少宇宙线撞击的次数。在分析了仅两个月的数据之后，大亚湾合作组在2012年3月宣布，他们首次很好地测出了 θ_{13} 的值。研究人员发现，大约6%的电子型中微子在反应堆和探测器之间穿行了2000米之后消失了。大约一个月后，设在韩国的称为RENO（Reactor Experiment for Neutrino Oscillations，中微子振荡的反应堆实验）的第三个实验证实了大亚湾的结果，尽管其精度较低。正如大亚湾合作组的美方发言人陆锦标所解释的：“最终证明 θ_{13} 是相当大的。这是一个惊喜。”他说，这个发现“为很多事情打开了防洪闸。这将使理论家深入到超越标准模型的新物理学”。

麻省理工学院参加双休茨实验工作的康拉德也对她所谓的“精确中微子物理学”的到来感到兴奋。在俄亥俄州北部长大的康拉德在孩提时期就看过《星际迷航》（*Star Trek*），还用一个朋友的望远镜盯着天上的星星看。她梦想成为一个天文学家或星际飞船上的科学官员。然而，在她开始阅读南茜·朱尔（Nancy Drew）和夏洛克·福尔摩斯（Sherlock Holmes）的推理小说之后，她的职业生涯计划就改变了：她想成为一名侦探。后来，一个美妙的景象又吸引她重新回到了科学。当时康拉德还是个十几岁的孩子，为了在花展上展示她那盆有望获奖的大丽花，她凌晨就爬起来给花喷洒温水，那时天都还没亮，这盆花是她和她那身为农业科学的父亲一起种的。在外面的花园里，秋天寒冷的空气拂过她的脸庞，她看到了极光，并被这一来自太阳的带电粒子撞击地球大气层而产生的五彩缤纷的奇景迷住了。她记得，极光是“如此难以置信的美丽，如此丰富多彩”。

后来，康拉德在斯沃斯莫尔学院读大学时选修了量子力学课程，并迷上了亚原子世界的趣事。她在哈佛大学得到了一份暑期工作，在实验室里使用来自回旋加速器的粒子束流治疗眼癌，但对康拉德来说，三年级时对费米实验室的参观决定了她的未来。今天，作为一个中微子猎手和麻省理工学院的教授，康拉德把她对科学的喜爱和对解决奥秘的钟爱结合在了一

起。正如她所说：“一个侦探不总是一个科学家，但一个科学家总是一个侦探。”她相信中微子是解开某些最大的宇宙之谜的关键，并对未来10年中会有重大突破的前景表示乐观。“我们正在进入一个令人兴奋的阶段。人们花费了很长的时间才走到这一步，不过现在我们可以用高精度测量来处理重要的问题了。”她补充道。

的确，自从蓬泰科尔沃首先提出中微子可能患有多重人格障碍以来，中微子猎手们已经走了很长的路。由于神冈探测器和SNO的发现，这些坚定的研究人员已经解决了太阳中微子失踪这一几十年来戴维斯和巴考尔甘冒名誉受损的风险而一直绞尽脑汁钻研的棘手问题。中微子猎手也发现了中微子确实有质量——第一个超越标准模型物理学的确凿证据——以及它们在三种味之间转换。现在，通过大量精确的实验，研究人员已经开始确定这些变色龙粒子的奇异特性。在此过程中，他们不仅推动了基础物理学前沿的发展，也为宇宙学和天体物理学提供了有价值的工具。事实上，接下来我们将转向天文学家如何利用中微子去探



图2 安装过程中的SNO探测器。（苏伦斯·伯克利国家实验室供图）

索宇宙中最大的爆炸。

（本文摘自《中微子猎手——如何追寻“鬼魅粒子”》第五章。雷·贾亚瓦哈纳著。）