

以“水”解密中微子

□ 文 何锐思 (Richard de Grijs) / 翻译 程思淼



何锐思
(Richard de Grijs)

北京大学科维理天文与天体物理研究所 (KIAA) 教授, 国际天文学联合会天文发展办公室东亚分站负责人。

每个世纪在我们的银河系中爆发的超新星只有三到四颗。这种高能爆发事件会释放出以光速飞行的中微子。中微子是一种电中性的粒子, 它的静止质量接近于零。宇宙大爆炸, 太阳, 或者宇宙射线轰击地球大气, 都能产生大量的中微子。中微子非常微小, 几乎不与其他粒子相互作用, 因此虽然每秒钟都有数万亿中微子穿过我们的身体, 却不会引起任何人的注意。研究中微子能够帮助我们了解恒星 (包括我们的太阳) 是怎样工作的。

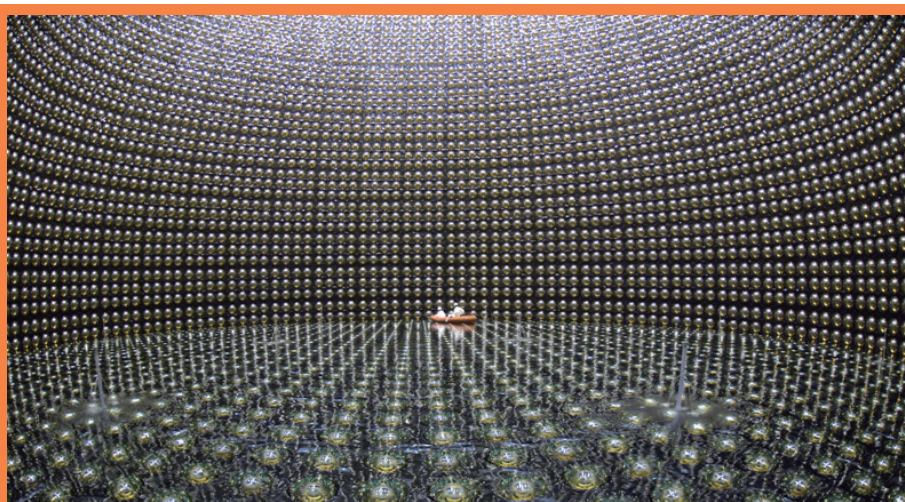
在日本中部岐阜县飞驒市神冈町池之山地下1千米的一个矿坑中, 科学家建造了一个盛有5万吨超纯水的巨大圆柱形水罐, 并在罐壁上装满了光电倍增管。这就是“超级神冈” (Super-Kamiokande, 其中NDE指Nucleon Decay Experiment或Neutrino Detection Experiment), 它的主要目标之一是探测来自附近超新星的中微子。由于超新星爆发相当罕

见, 国际上研究超新星的学者希望借助与“超级神冈”的合作, 使他们在这一罕见现象发生时有所准备。中微子就像是坍塌恒星和黑洞发出的信使, 提前为我们送来超新星爆发的口信。为此, 科学家建造了一台“监视器”, 时刻等候着超新星的“口信”, 一有消息立刻向科学界通报。

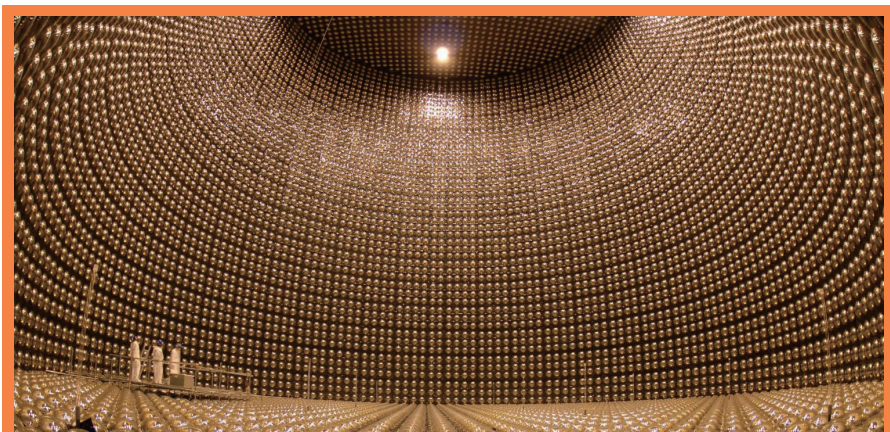
“监视器”所需的新计算机系统于本月安装并开始运行。

“这个计算机系统能够在矿坑中实时地分析仪器的观测记录, 一旦探测到中微子流量的异常上升, 它将立刻向在控制室里进行监视的物理学家发出报警。”来自西班牙马德里自治大学的物理学家、“超级神冈”合作研究者路易斯·拉巴尔加 (Luis Labarga) 解释道。

多亏了这个中微子监视器, 控制室的专业人员能够在几分钟之内判断出信号的重要性, 看它是否真的是由我们附近的一颗银河系内超新星发出的。如果是, 他们就向全世界所有有兴趣的研究机构发布预



▲ “超级神冈”探测器位于日本神冈町附近地下1000米深的一个矿坑内。图片来源: Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo, Japan (日本东京大学宇宙线研究所神冈地下观测所, 现更名为“神冈宇宙基本粒子研究设施”)



▲ 科学家站在世界最大地下中微子探测器“超级神冈”中的一个平台上。图片来源：Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe, Japan

报，并给出这个中微子源的信息和天球坐标。这样，全世界的科学家就可以把他们的光学观测设备指向目标，因为超新星爆发的电磁信号会比中微子晚到一点。

“超新星爆发是宇宙中最高能的现象之一，而它的主要能量是以中微子的形式释放的。”拉巴尔加说。

“这就是为什么探测和分析它们发出的中微子非常重要，（比太阳或其他中微子源重要得多，）它们能帮助我们理解恒星残骸——中子星和黑洞——的形成机制。”

“另外，”他补充道，“超新星爆发时，大量的中微子是在极短的时间（几秒钟）内产生的——这就是我们为什么要随时做好准备。这样，我们就能够研究这些迷人粒子的基本性质：它们的相互作用，它们的等级，它们质量的绝对值，半衰期，当然还有我们现在甚至都想不到的其他性质。”

拉巴尔加说，除了必要的调校和维修时间，“超级神冈”时刻都在准备着捕捉中微子。每一天都可能给我们带来惊喜。

不过“超级神冈”探测器不仅要观测我们附近的超新星。在日本

工作的另一支由多国科学家组成的研究团队正准备对它进行改造，通过向水罐中的纯水里加入一种金属，增强它对中微子的捕获能力。这将使它成为世界上第一个能够分析离银河系较远的超新星发出的中微子的探测器。

迄今，所有被探测到的超新星中微子都来自我们银河系的附近。没有人知道远在天边的古老星系发出的中微子，是否跟地球附近的中微子有着相同的行为，或者，是否存在一种新型的微小粒子等待我们去发现。

“超级神冈”还能不能进一步升级？在日本东京附近的科维里宇宙数学物理研究所（Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe）工作的实验物理学家马克·维根斯（Mark Vagins）和美国俄亥俄州立大学的理论家约翰·比科姆（John Beacom）想尝试一下。他们的一个想法是，在探测器的水罐中加入稀土金属钆。钆原子核具有捕获中子的能力，因此，如果附近有中微子反应形成的中子，水中的钆就能将其吸收，并且发出闪光释放出多余的能量。这一闪光信号将被灵敏的光电倍增管探测到。不过在他们的想法放到探测器上测试之前，两位科学家先要弄清，他们的

想法在科学上是否有意义，以及他们有什么困难需要克服。

首先，探测器中的水需要是透明的。中微子与水发生相互作用，产生的微弱闪光被罐壁上排列的光电倍增管捕获。如果加入的钆使水变浑浊，那么光电倍增管将无法探测到任何闪光。其次，钆需要均匀地分布在水罐内，以保证中微子与水相互作用的附近总能有钆原子存在，以放大它们反应的信号。

“这两条要求——均匀和透明——意味着钆必须溶解在水里。”维根斯博士说，“十几年来我们一直在思考这要怎样做。”

钆是提炼其他工业上需要的（比如用于制造彩色平板电视）稀土金属时得到的一种副产品。因此它的价格还不算太贵。要使“超级神冈”探测来自遥远超新星的中微子需要100吨钆，这维根斯博士和他的团队还是买得起的。装在巨型水罐中的纯水可作为一系列粒子（包括中微子）轰击的靶子，它们与水作用发出的微弱闪光，将被罐壁上装的灵敏的光电倍增管捕捉到。1987年，同一矿坑中的“神冈”探测器第一次记录到来自超新星的中微子。这项研究由东京大学的小柴昌俊（Koshiba Masatoshi）主持，他因此于2002年获得诺贝尔物理学奖。1998年，“神冈”与“超级神冈”的结果证明了中微子具有质量。这项研究为梶田隆章（Kajita Takaaki）赢得了2015年的诺贝尔物理学奖。梶田曾是小柴的研究生。

事实上，2015年诺贝尔物理学奖同时颁给了两位科学家：一位是梶田，另一位是加拿大萨德伯里中微子观测站（SNO）的领导



▲ 加拿大萨德伯里中微子观测站 (SNO) 的探测器竣工：一名技术人员在直径12米的丙烯酸容器中俯身查看。由于容器透明度极高，几乎看不出它的存在。在这名技术人员的周围是将近1万个光电倍增管，它们能灵敏地探测到中微子与容器中将要盛满的重水作用所产生的闪光。图片来源：Lawrence Berkeley National Laboratory, USA

者亚瑟·B·麦克唐纳 (Arthur B. McDonald)。他们因“发现了中微子振荡现象，证明中微子具有质量”而获奖。

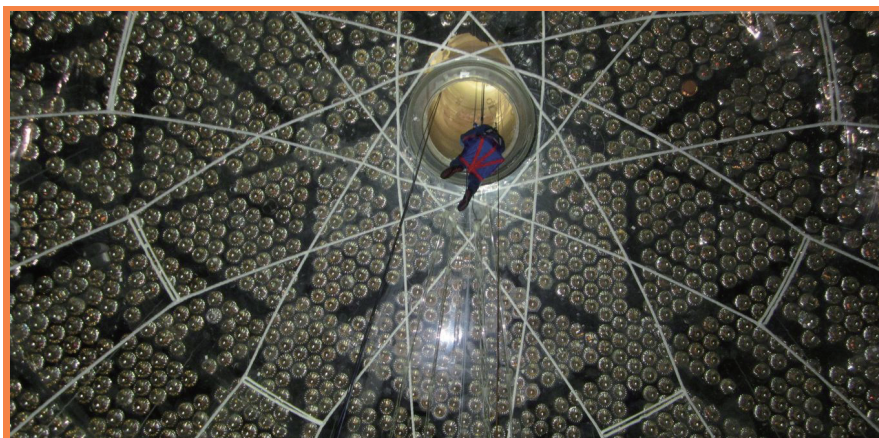
中微子振荡和质量的发现深刻地影响了我们对这种神秘粒子的认识，也改变了我们对它们在物理学基本理论框架和宇宙演化中扮演的角色的理解。这一发现戏剧性地证实了核物理理论对太阳产能过程的计算。不仅如此，它还为我们理解诸如“为何宇宙中的物质比反物质多”、“新的成功标准模型必须具有怎样的性质”等基本问题打开了新的大门。

长期以来，人们都认为中微子没有静止质量——这是粒子与场的标准模型所预言的。从20世纪60年代开始，小雷蒙德·戴维斯 (Raymond Davis Jr.) 着手测量了来自太阳的中微子流量。但他的测量结果——后来日本“神冈”、俄罗斯“巴克桑” (Baksan, 位于高加索山脉) 和意大利“格兰萨索” (Gran Sasso, 大萨索山) 的结果也都一样——远远小于预期。1985

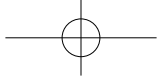
年，陈华生 (Herbert Chen, 美国华裔科学家) 提出，如果中微子发生了“振荡”，它们仍将到达地球，但是会变成戴维斯实验所探测不到的“味” (flavour)。中微子一共有三味 (简单地说不妨就理解为“三种”)：电子中微子、 μ 中微子 (μ 音同谬)、 τ 中微子 (τ 音同涛)。太阳只会产生电子中微子，因此戴维斯实验完全是为测量电子中微子而设计的。陈华生建议，可以利用重水 (水中的氢原子替换为氘原子) 来探测全部三味中微子。

加拿大的SNO探测器即是根据这一提议建造的。2001年，SNO实验证实，有三分之二的电子中微子转化为其他味的中微子。几乎同时，1998年“超级神冈”也发现了类似的效应：大气中产生的 μ 中微子可以转化为电子中微子。这些转化只有通过一种特定的量子力学效应才能实现，而这种效应要求中微子的质量不能为零。

对太阳中微子流量的预言得到证实，困扰了物理学家30多年的问题终于得到解决。这也表明，我们对太阳核心区域发生的核反应的理论认识其实相当准确。但同时，中微子质量的发现使我们不得不对粒子和场的基本模型做出修正。人们正在酝酿各种各样的新理论，但是如果没有更多的信息，决定性的选择尚无法做出。还有大量的实验工作要做：确定中微子的真实质量 (振荡实验并不能给出这一点)，鉴别中微子和反中微子是否是同一种粒子以及判断中微子是否服从自然的对称性，服从时间反演，等等。这一发现还意味着，中微子是宇宙中暗物质的一部分，虽然只是一小部分。但是它们庞大的数量和微小的质量意味着，它们对宇宙中大尺度结构和星系团的形成与演化起着重要的作用。



▲ 科学家进入SNO探测器内部对它进行升级。升级后的探测器将成为SNO+。图片来源：The SNO+ collaboration; James Sinclair, University of Sussex



从不起眼的起步开始，我们对中微子的研究已经走过了漫长的道路。事实上，物理学家花了80多年才达到今天这种对中微子物理性质的认识。下面的时间轴展示了人们认识中微子的过程中不断取得的成就：

- 1930年** ● 奥地利出生的量子物理学先驱沃尔夫冈·泡利 (Wolfgang Pauli) 假设了一种尚未探测到的电中性粒子的存在，意大利物理学家恩里克·费米 (Enrico Fermi) 后来将其命名为“中微子 (neutrino)”。不过，要探查这种粒子的踪迹非常困难，因为它很少与宇宙中的其他物质发生作用，只是径直穿过它们——我们的身体、地球，等等。
- 1956年** ● 两位美国科学家弗莱德里克·莱纳斯 (Frederick Reines) 与克莱德·科万 (Clyde Cowan) 首次确凿无疑地找到了中微子存在的证据。
- 1988年** ● 另外两位美国研究者莱昂·莱德曼 (Leon Lederman) 与梅尔文·施瓦茨 (Melvin Schwartz) 以及一位德国出生的科学家雅克·施泰恩贝尔格 (Jack Steinberger)，因在 60 年代发现至少存在两种中微子而获诺贝尔物理学奖。他们的工作成为统一解释宇宙中各种粒子与作用的粒子物理学标准模型中的关键一环。
- 1995年** ● 在科万去世 20 多年后，莱纳斯因他们的发现而获得诺贝尔物理学奖。他们当初用一个核裂变反应堆产生中微子，然后用一台灵敏的探测器捕获它们。该年诺贝尔奖由莱纳斯与另一位美国科学家马丁·佩尔 (Martin Perl) 分享。佩尔发现了另一种类型的粒子，暗示第三味中微子的存在。
- 1998年** ● 梶田和他的团队观测到，中微子在大气与超级神冈地下探测器之间飞行时，可以通过一种称为“振荡”的过程从一种转变为另一种。这种变化是很不平常的——就好像“手中的一个橙子突然变成了苹果。”牛津大学的中微子研究者阿尔丰·韦伯 (Alfons Weber) 在一次媒体采访中这样说道。
- 1999年** ● 麦克唐纳宣布，来自太阳的中微子并没有像很久以来人们怀疑的那样“消失”，而是在到达他们位于加拿大安大略省的萨德伯里中微子观测站之前变成了另一种形式。
- 2002年** ● 小雷蒙德·戴维斯与小柴昌俊因首次探测到来自地球之外——太阳和超新星——的中微子而获得诺贝尔物理学奖。
- 2011年** ● 欧洲科学家发表了一项实验结果，显示中微子可以超光速飞行，引起了科学界的一场风暴。因为这挑战了阿尔伯特·爱因斯坦 1905 年提出的狭义相对论。
- 2012年** ● 领导前一项研究的科学家承认他们的实验是有缺陷的，并且重申，中微子同其他粒子一样，也受到宇宙中极限速度的限制。
- 接下来呢？科学家相信存在着第四味中微子，并且已经在寻找。对中微子数量的测量结果比理论计算值稍低一些，这也许说明有一小部分中微子转化成了尚未发现的第四味。■

(责任编辑 冯翀)