

“冰立方”： 南极冰层下的巨型中微子望远镜

李 良

南极冰立方中微子天文台 (IceCube Neutrino Observatory, 简称为“冰立方” IceCube) 是由美国国家自然科学基金会资助的, 正在南极冰下建设的大型中微子探测装置 (图 1, 图 2), 其大小规模有 1 立方千米。这项由美国、日本、英国、德国、比利时、荷兰、瑞典和新西兰 8 个国家参与的科学探索计划, 从 2005~2006 年南极的夏季开始实施, 预计 2012 年完全建成。该计划大约投资 2.57 亿美元, 其中美国承担 80%, 其余 20% 由其他七国分担。目前该计划安装完成的部分检测仪已经投入观测工作。一旦这台探测器完全正式投入运行, 它可能在未来 10 年内记录下百万次以上的宇宙深处高能中微子事件。这将为科学家们提供一个巨大的数据库, 用来分析研究一些剧烈的天体事件, 这对于探索宇宙和天体的起源、演化均有着极不寻常的意义。



图 1 “冰立方”工程俯视照片。
图中左侧即建设中的冰立方实验室

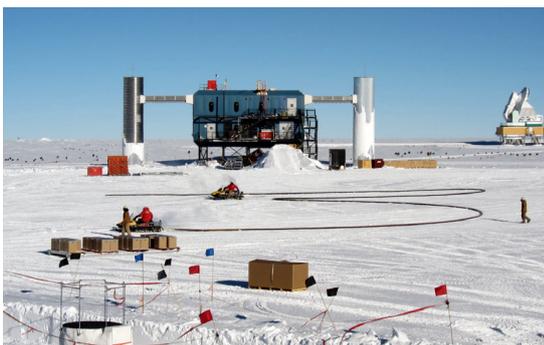


图 2 正在建设中的南极点附近的“冰立方”实验室
冰层下面就是“冰立方”中微子探测器阵列

中微子 (neutrino) 又译作微中子, 是组成自然界的最基本的粒子之一。这是一种不带电荷, 且质量几乎近于零的粒子, 其运动速度接近光速。中微子是现代科学界所知道的质量最接近于零的一种微小粒子, 它也是一种黑暗的物质。中微子可被用来观测宇宙中那些遥不可及的天体。中微子产生的途径有很多, 例如, 恒星内部热核反应、超新星爆发、宇宙射线与地球大气层的撞击, 以及地球上岩石等各种物质的衰变; 此外, 也可以使用高能加速器人工产生中微子。由于中微子与其他粒子的相互作用极弱, 只参与弱相互作用和万有引力相互作用, 不参与电磁和强相互作用, 因此, 它们可不费吹灰之力就能跨越整个宇宙, 把天体的信息传递给科学家们。“性情孤僻”的中微子, 能够揭示恒星核心及宇宙中用其他手段根本无法探究的十分隐秘地点的机密。正因为中微子可以自由地穿过各种天体而很少留有痕迹, 故很难发现和探测它们, 必须有足够大的探测阵列, 才能找到数量足够多的中微子。

科学家认为, 一台大型中微子望远镜必须具有千米的探测物质尺度才能有效探测来自宇宙的中微子, 探测物质还必须要足够透明, 以便光线可以在传感器阵之间传播, 还应有足够深度以屏蔽来自地球表面的干扰。于是, 人们想到了漆黑的湖底或深海才能满足这些要求。在花费了多年的心血之后, 科学家们首先在夏威夷建造深海水下 μ 子和中微子探测器 (DUMAND), 它虽然没有成功, 却为日后研发现今所采用的技术开创了新路。目前, 世界上建在水中的中微子望远镜包括贝加尔湖中微子探测器 (BAIKAL)、中微子天文学望远镜与深海环境研究 (ANTARES) 工程和海洋学研究中微子扩展水下望远镜 (NESTOR), 这两者均位于地中海。

ANTARES 由英国、法国、俄罗斯、西班牙和荷兰等国科学家联合设计, 安装地点位于距法国马赛东南海岸 40 千米处。望远镜在海面 2.4 千米以下, 由 13 根垂入海中的缆状物组成, 每个缆状物上将带有 20 个足球大小的探测器。据参与该国际合作项目

的英国舍菲尔德大学科研人员介绍说，来自宇宙的中微子能畅行无阻地穿越包括地球在内的很多物体。虽然中微子无法直接探测到，但它在穿透地球过程中，偶尔会产生少量的高能 μ 中微子，并发射出特殊辐射光——切伦科夫光。ANTARES 主要通过高灵敏度探测器检测该辐射来研究中微子。由于 ANTARES 面向海底，绝大部分宇宙射线会被厚厚的地层屏蔽掉，大大减少了观测过程中的本底噪音。后来科学家又有了新的创意：利用南极冰原厚达数千米的天然冰层建造中微子天文台。

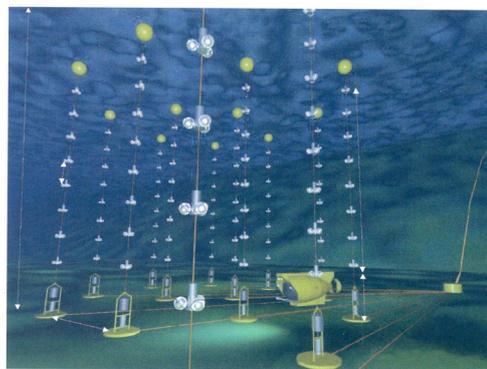


图3 中微子天文学与深海环境研究 (ANTARES) 探测器

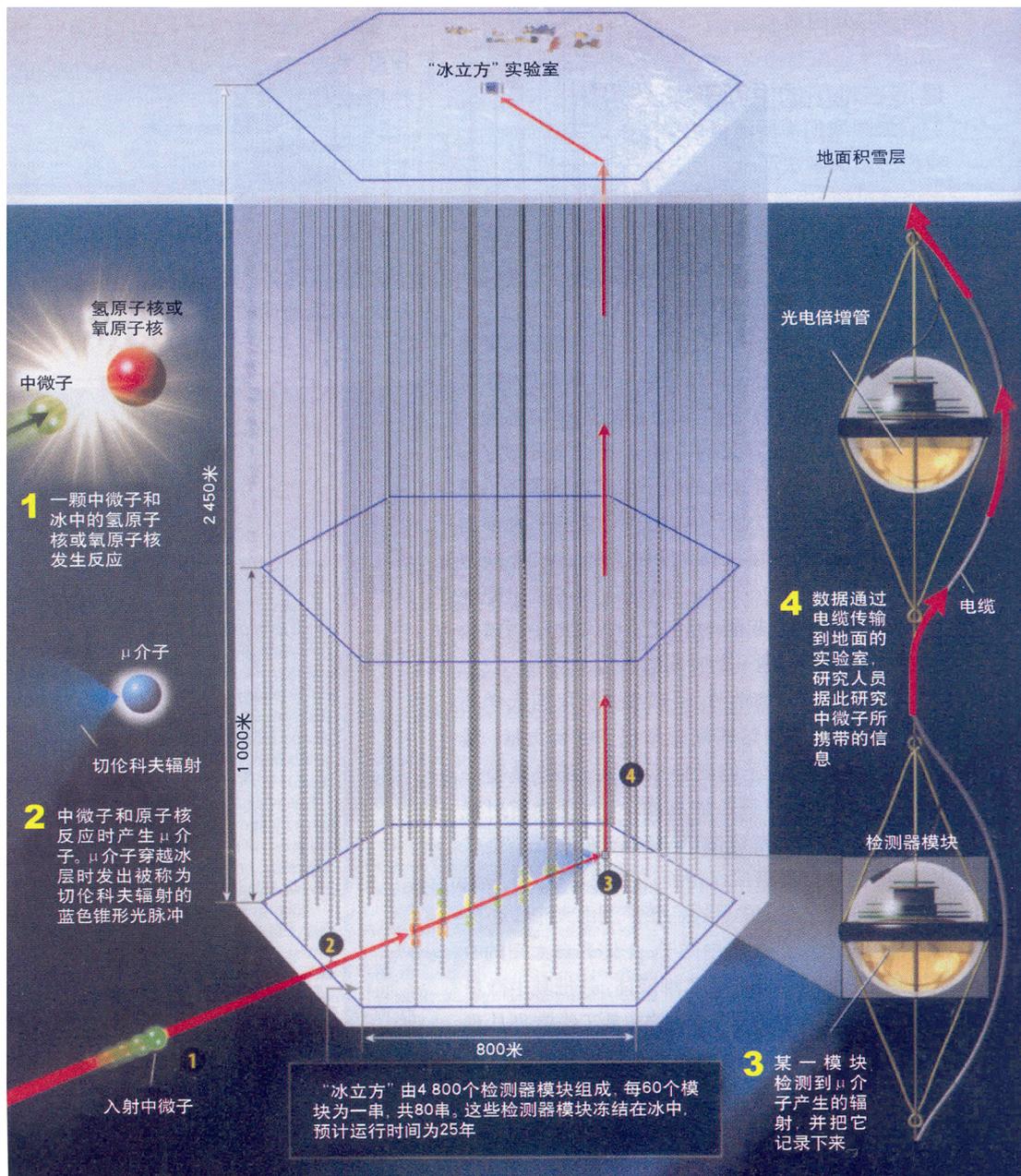


图4 冰立方中微子探测器整体内部构造示意图

数年前，由美国国家自然科学基金会资助的南极 μ 子和高能中微子探测器阵列（AMANDA），建造在南极冰层深处。AMANDA 由 700 多个感应器构成，它们被安装在一个高约 1000 米、直径 200 米的圆筒内，其位置设在南极阿蒙森-斯科特站附近的冰下 1400 米处。当中微子产生于宇宙中最激烈的事件或物体，例如伽马射线爆发或其中心有特大质量黑洞的活跃星系，它们同物质微弱的相互作用使它们成为理想的宇宙信息传递者。同光和带电粒子不同，它们在穿过宇宙的时候不会被尘埃吸收，也不会因为磁场而发生偏转。这可以反映出本来可能被隐藏起来的物体的真实面目。一小部分中微子与南极冰层中的氧原子核发生撞击，使原子残骸四处飞散。这些残骸大部分被吸收，但一些粒子飞行了几百千米，发出的光穿过南极冰层到达 AMANDA 的感应器，这些感应器悬在冰盖上。虽说中微子与物质相互作用非常罕见，即通过 AMANDA 的一百万个中微子中仅有一个能发出信号，但是巨大的探测容量可大大增加发现中微子的机会。AMANDA 率先用冰层代替了水，它从 2000 年开始运转，证明在南极冰层下建设千米尺度中微子天文台的可行性。

冰立方是在先前的 AMANDA 的基础上研制，其整体内部构造如图 4 所示。冰立方探测器实验利用了南极冰层下大范围的纯净透明的自然冰作为探测器的载体，依照一定的间距布置了大量光学感应器，用以观测超高能中微子进入探测器后与组成冰的原子所发生的反应。令人关注的是，覆盖在一立方千米的体积上的光电感应器数目为 4800 个，是 AMANDA 的 6 倍！其基本探测器是装在篮球大小玻璃压力容器内的光电倍增管（图 5）。通过光电效应，光电倍增管可以把由中微子相互作用产生的切伦科夫光信号转换成电信号。这些电信号会被计算机芯片捕捉到并且数字化，进而传输到冰面上的计算机中。计算机根据记录下来的数据，可以重新构建出每一个中微子的特性，并确定它们的能量及其来向。

虽然即便是超高能中微子在穿过探测器时也不会留下一丝痕迹，但如果其中一个中微子正好与冰的氢原子核或氧原子核发生碰撞，将会有带电的 μ 子通过弱相互作用而产生出来。在极度透明的冰中， μ 子在行进过程中会发出可见的蓝光——切

伦科夫光，从而被光学感应器探测到并记录下来。光电感应器将光信号转换成电信号，通过电缆传输到地面实验室。研究人员利用这些信息，从 μ 子的路径可以反推出 μ 中微子的入射方向，科学家们进而就会判断出 μ 中微子究竟来自哪个遥远的天体源。简而言之，中微子望远镜的探测原理就是通过探测光信号来重建带电轻子的径迹，从而推断出相应的超高能中微子从何而来、能量大小和它们所携带的其他物理信息。



图 5 冰立方科学家手里捧着篮球大小的带有电缆的光感应器模块

制定计划的科学家们认为，纯净、高透明度并且不具有放射性的南极冰川是探测中微子的理想介质；同时，美国自然科学基金会的阿蒙森-斯科特南极站所提供的基础设施上的便利，也为建造大型中微子探测器扫除了障碍，特别是 AMANDA 成功证明在南极建设千米级中微子天文台——冰立方的可行性。

冰立方项目计划在南极点附近间隔 125 米共钻 80 个深达 2500 米的深洞，每个深洞中在 1400 米至 2500 米深度放置用电缆连接的，间隔 17 米，每 60 个为一串的探测模块，总共 80 串的探测装置构成了体积约 1 立方千米的中微子望远镜，是迄今为止建造的最壮观的天文探测器之一。这座奇特的望远镜的 4800 个感应器好似望远镜的镜头（图 6、图 7），时刻监视着切伦科夫辐射的蓝色闪光，当出现中微子（主要是来自北极方向穿过地球的宇宙中微子）与冰层撞击时所产生的微弱之光，就意味着一个中微子已经成功从地球中逃逸出来，受到南极冰层的阻挡。

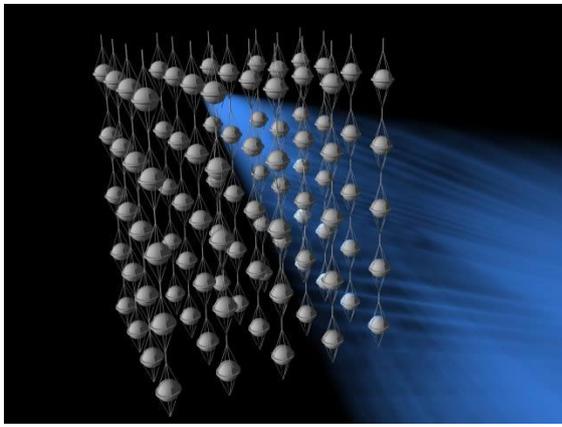


图 6 这些中微子感应器好似望远镜的镜头时刻监视切伦科夫辐射的蓝色闪光

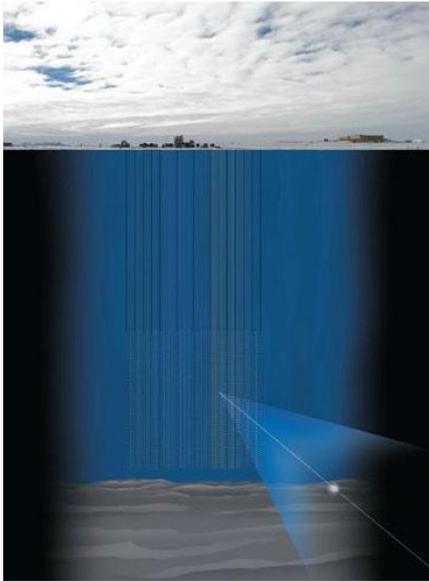


图 7 南极冰层深处的冰立方中微子探测器

建造这个中微子天文台的技术并非很难。人们可用高压热水在南极冰层中钻一些深达 2450 米的洞（每钻一个洞大约需 40 小时）（图 8）；然后把一条带有连成一串的 60 个感应器模块的电缆放进这个洞里（图 9），接着往这个洞里注满水并让它重新冻结。最初，当研究人员把第一串感应器往下放到冰中以后，它们完全没有起作用。原来，在闪光到达感应器之前，留在冰中的微小气泡散射了这些光线。幸好科学家们发现在深度超过 1400 米时，冰的压力高得使气泡消失，研究人员所需要的清晰信号就出现了。因此，在接下来的实验中，感应器串就降到了 1450 米以下。科学家们最终将把深度在 1450 米到 2450 米之间的 1 立方千米冰层变成了一个观测宇宙中微子的天文台。



图 8 施工人员正在南极冰原上使用专门的热热水钻孔设备打洞

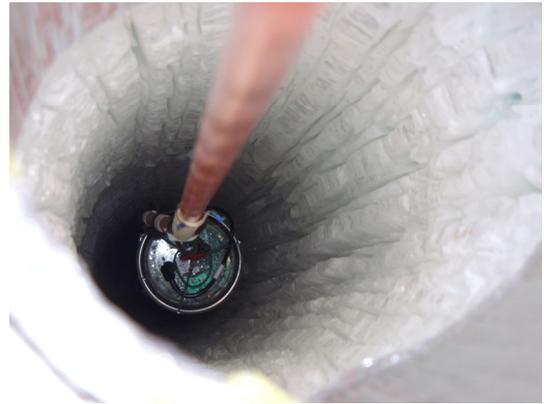


图 9 冰立方工程正在用热水钻开凿后的冰洞里架设光学感应器

科学家们至今还在研究测定中微子的质量，因为已有实验表明中微子具有质量，而对其质量的测定可能使人们对宇宙的演化有进一步认识。科学家已知宇宙的组成中有 5%~10% 的可见物质，90% 以上是不发光的暗物质，而中微子是这些暗物质的重要组成部分。因此，尽管中微子很轻，但它对研究宇宙的质量构成有着重要作用。有不少现代物理学家认为，中微子的质量可能关系到宇宙平衡，宇宙中如果弥漫这种东西，而且是相对比较一致的，那么我们的宇宙就是一个均衡态的宇宙；由于中微子比其他物质粒子的总数多十几亿倍，因此整个宇宙中中微子质量的总和大大超过其他物质的质量总和，占宇宙总质量的 99% 以上，中微子可能是控制宇宙运动变化的关键性因素。但也有科学家认为，根据场的本质是相对时空的观点，上述的说法是不正确的。究竟谁是谁非？人们期盼着进一步的科学

放射性同位素电池在月球上

蔡善钰



1969年7月20日“阿波罗-11号”宇航员阿姆斯特朗激动地打开着陆舱门，缓缓走下舷梯，踏上宁静而又神秘的月球，首次留下了人类的足印。在这一激动人心而又具有里程碑意义的时刻，对太空人来说，只是迈出了一小步，可对整个人类来说却是跨出了一大步，实现了人类千百年来登月的梦想，也开创了人类从地球登上另一颗星球的历史。

1957年10月4日前苏联发射成功第一颗人造地球卫星 Sputnik-1 号，揭开了太空时代的序幕。紧接着，苏联宇航员加加林于1961年4月12日乘坐载人飞船东方-1号，实现了人类首次太空飞行。面对在空间技术方面存在的不小差距和承受的巨大压力，时任美国总统的肯尼迪决心实施一项宏大的登月计划，即后来所谓的“阿波罗计划”（阿波罗在古希腊神话中意为“太阳神”），旨在十年内把人送上月球，并安全返回。该计划历时11年，耗资250亿美元，直接参与的工作人员多达420万。经过几次无人探月飞船飞行之后，接连发射了7艘载人飞船，自“阿波罗-11号”至“阿波罗-17号”（其中“阿波罗-13号”发射失败）。先后有6批计21名宇航员参与了登月飞行。其中有12人踏上月球，带回了381kg月球岩石和土样，留下了3辆月球车，安置了一座“早期月面科学试验站”和5座“月面科学试验站”。后者各有一台放射性同位素电池供电，分别带动5台仪器工作，在设计寿命为一年多

的时间内把测试数据源源不断地传回地球。

在月球上为什么要使用这种放射性同位素电池呢？他们又是怎样工作的呢？

从现有获得的知识表明，月球上有着漫长的黑夜（相当于地球的14天），又昼夜温差悬殊，白天温度高达120℃，夜间温度降至零下180℃。月球上没有空气，既不能传导热量，也不能传播声音。为了了解月球及其环境，需要利用多种仪器长期地、自动地观察，这就需要解决能源的问题。显而易见，在如此严峻的环境中化学电池是不能工作的；而太阳能电池必须有日照时方能发电。在这种情况下，放射性同位素电池显示出独特的优越性：它无需依靠外来能源而能长期地、自持地、可靠地提供动力，且对环境具有良好的适应能力和生存能力。

放射性同位素电池(以下简称同位素电池)是一种新型的电池。它是利用放射性同位素衰变时放射出来的高速带电粒子(如 α 粒子、 β 粒子)或 γ 光子与物质相互作用，射线的动能被阻止或吸收后转变为热能，再通过换能器转变为电能的一种装置。图1展示了原型同位素电池的结构。其中心部分是用放射性同位素制成的热源，外围紧贴着换能器，当热量通过换能器时，一部分热转变为电能而输出，

实验和宇宙观测结果。

冰立方能够同时看到北半球和南半球的天空，因为除了那些能量最高的中微子，地球对其他中微子来说几乎是透明的。读者还可把“冰立方”想象成4800台独立工作的计算机，它们时刻向表面传输着它们探测到的光信号。其传感器里的时钟彼此的误差始终控制在纳秒以内。这些信息使得科学家可以重建中微子事件，并且可以推算出它们的到达方向和能量。从2005年南极的夏季开始，科学家在AMANDA的基础上开始建造冰立方，2006年2月

在建造过程中首次探测到了大气中微子事件，按照计划，冰立方将于2012年全部完工。

一旦这台探测器完全正式投入运行，它可能在未来10年内记录下百万次以上的宇宙深处高能中微子事件。这将为科学家们提供一个巨大的数据库，利用这个中微子源，分析一些剧烈的天体事件，人们对宇宙起源和演化的认识必将迈上一个新台阶；此外，冰立方中微子望远镜也将为粒子物理学谱写崭新的篇章。

(北京天文馆 100044)