



中微子: 组成宇宙的幽灵粒子

Art McDonald*

女王大学, 物理、工程物理与天文学系 (加拿大, 安大略省, 金斯顿)

少年审稿人



RYAN

年龄: 15

在粒子天体物理学领域, 科学家们试图理解宇宙是如何起源的, 在基础层面上是如何运作的。利用来自天体物理源的粒子, 我们在尽可能小的物质尺度上研究物理规律, 并创造出数学公式, 来描述基本粒子如何相互作用而构成出我们的宇宙。我和我的同事一直在研究中微子——宇宙的基本组成部分之一。这有助于理解宇宙自大约 138 亿年的大爆炸以来是如何演化的。在本文中, 我将向你介绍被称为中微子的“幽灵粒子”——它们是什么, 我们如何测量它们, 以及为什么我们的发现要求对测量方法进行重大改变。在这个过程中, 你将了解到我们周围最难以捉摸的东西, 有时也是最重要的。

阿瑟·麦克唐纳 (Arthur McDonald) 教授, 因发现中微子震荡, 并且因此证明中微子具有质量, 与田隆章共同获得 2015 年的诺贝尔物理学奖。

中微子: 基本粒子

宇宙是由什么构成的, 自大爆炸以来是如何演化的, 这些是我们自己的一些最有趣的问题。为了科学地回答这些问题, 我们可以使用各种方法和途径。我来自粒子天体物理学领域——这是一个相对较新的研究领域, 研究在太空中游荡的基本粒子, 特别是那些到达地球的粒

基本粒子

(Fundamental particles)

构成所有其他粒子的最小粒子。

基本粒子标准模型

(Standard model of fundamental particles)

描述基本粒子及其通过自然力相互作用的模型。

中微子

(Neutrinos)

通过引力和弱相互作用力相互作用的基本粒子。

图 1

基本粒子。(A)根据标准模型,宇宙创生之初产生了被称为夸克、电子和中微子的基本粒子。夸克有几种类型,其中有上夸克(u)和下夸克(d),以及三种中微子(ν_x ,其中 ν 表示中微子,x代表三种类型中的一种)。(B)夸克是质子和中子的组成部分。中子和质子构成了原子核,而电子围绕着原子核转。(C)中微子有三种类型,或称味,它们能与三种基本粒子相互作用:电子、 μ 子和 τ 子。

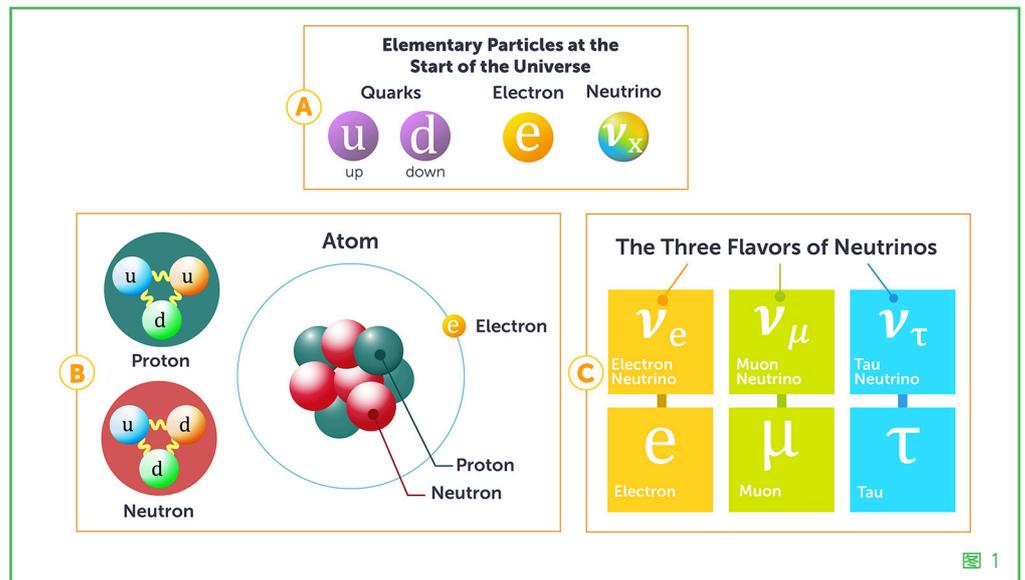


图 1

放射性

(Radioactivity)

原子核分解导致的高能粒子的自发发射。

子。粒子物理学家试图理解构成物质的基本粒子以及控制这些粒子之间相互作用的力。一般来说,我们试图发展实验方法来寻找最小的粒子,即所谓的**基本粒子**——不能再细分的粒子。然后,根据我们的发现,我们建立出所谓的理论模型,即思想和方程的集合,解释物质是如何从这些基本粒子中产生的。我们从不说我们的模型是最好的,因为每个模型都基于当前对事物的理解水平,以及仪器的灵敏度或分辨率。随着时间的推移,仪器会变得越来越敏感,关于物质和我们所生活的宇宙的基本组成部分,我们因此会了解到很多新鲜而令人兴奋的东西。

长期以来,人们用**标准模型**来描述粒子和它们之间的相互作用力[1]。(点击[这里](#),了解更多关于标准模型的信息)根据标准模型,所有物质,包括构建我们身体的原子、我们呼吸的空气以及我们从太阳接收到的光,都由基本粒子组成的。这些粒子是在约 138 亿年前的大爆炸以及随后的宇宙演化过程中产生的。

基本粒子包括电子、夸克和**中微子**(图 1A),以及你可能听说过的其他粒子,如光子、玻色子、胶子和希格斯粒子。本文将重点介绍中微子。所有的基本粒子都通过四种基本力来相互作用,分别为强相互作用力、弱相互作用力、电磁力和引力。夸克构成了质子和中子。质子和中子则构成了原子核,周围环绕着电子(图 1B)。

中微子由天然**放射性**物质放射出来,也可以通过在被成为加速器的科学装置中的某些反应来产生。然而,(地球上检测到的)中微子大部分来源于太阳,通过太阳内部的核聚变产生。在核聚变中,两个原子核结合成一个更重的原子,同时释放出大量能量和包括中微子在内的粒子。这些中微子需要 2 秒钟才能离开太阳,大约需要 8 分钟才能到达地球。它们的数量是惊人的——据估计,在 1 秒内,地球表面的 1 平方厘米土地上,有 650 亿个太阳中微子穿过!

中微子是一种不同寻常的基本粒子，因为它们仅通过四种基本力中的两种来与物质相互作用，即引力和弱相互作用力（弱相互作用力可以使中微子将中子变成质子和电子）。由于中微子几乎没有质量，它们自身的引力极小，几乎无法检测到。至于弱相互作用力，中微子必须与其他质子、中子或电子非常靠近才能与它们相互作用。这些特性使得中微子极难被检测到 [2]。中微子穿过一般物质，似乎它们就是透明的一样。实际上，中微子只有在直接撞击原子核或绕核旋转的电子时才会与物质相互作用，而这种情况相当罕见，因为原子内部非常空旷。在其他所有情况下，中微子都能够毫不受阻地穿过物质——包括每秒钟穿过我们身体的数十亿个中微子！由于中微子与我们的探测器的相互作用极其微弱，因此极其难以观察和测量它们的性质。由于它们与物质很少发生相互作用，因此有人将中微子称为“宇宙中的幽灵”。

尽管中微子很难被探测到，但它们在宇宙的形成中扮演着核心的角色。它们协助构建了恒星和星系等体系，还帮助创造了一些在大爆炸后形成的基本元素。

中微子有三种类型，或味，分别是电子中微子、 μ 子中微子和 τ 中微子。每种味的中微子都只与相应的基本粒子（即电子、 μ 子和 τ 子）相互作用（图 1C）[3]。我们不确定为什么只有三种类型的中微子，但这些都是我们迄今为止发现的类型，而且它们符合标准模型的预测。下面将要介绍的，我和梶田隆章教授共同获得 2015 年诺贝尔物理学奖的重要发现，就与中微子从太阳核心到达地球时味的变化有关。

如何探测中微子？

当我们开始对中微子进行研究时，粒子天体物理学中存在一个悬而未决的问题，即太阳中微子问题 [4]。为了探测中微子，人们已经建造了特殊的探测器。结果表明，与基于对太阳燃烧的可靠计算相比，人们探测到的来自太阳的电子中微子的数量比预期值要低得多。从太阳到达地球的中微子数目的测量值和预期值之间存在差异，这意味着要么我们需要修正基本粒子的标准模型并改变我们对中微子的理解方式，要么需要改变从太阳抵达的中微子数目的计算方式。不管是哪种情况，都对我们对宇宙的理解有重大影响。因此许多粒子天体物理学家一起，致力于设计一个能够解决太阳中微子问题的实验。

正如前面提到的，我们难以通过与探测器的直接相互作用来测量中微子。不过，人们通常使用基本粒子在放射性过程中发射时产生的效应来间接测量中微子。例如，可以使用称为 β 衰变的放射性过程来测量电子中微子，该反应过程会发射电子。我们可以测量发射出来的电子的能量，科学家们最初认为在这个过程中只会发射电子，所以他们期望测量到所有发射电子的单一能量值。但实际上，他们得到了一系列低能量的发射电子（译者注：即一个连续的能量谱，而非预期的尖锐单峰）！为

中微子的味 (Neutrino flavor)

定义中微子类型的特征。中微子有三种不同的味——电子中微子、 μ 子中微子和 τ 子中微子。

重水 (Heavywater)

含有氘原子而非氢原子的水。氘核中有一个质子和一个中子，而氢原子只有一个质子。它的化学性质类似氢。

图 2

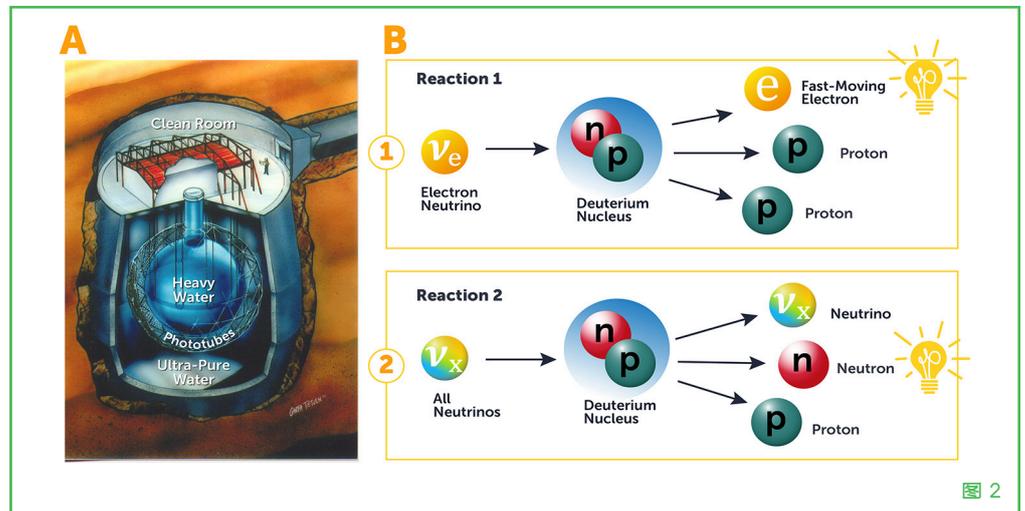
用于探测中微子的地下萨德伯里中微子天文台。(A) SNO 中微子实验在地下约 2.1 千米处进行。它的目的是通过太阳中微子与重水的相互作用来探测它们。这个天文台里有一个洁净室，科学家们可以从这里将设备放入测量区域，测量区域里充满了高纯度水，用来阻挡周围岩石的放射性。中间放置了一个灌满重水的丙烯酸球体，周围环绕着一个装有光电管的球体，用于测量中微子撞击重水时的效应(图源:McDonald 教授)。(B)我们测量了两个反应:(1) 电子中微子与氘核的相互作用，以及 (2) 三种味的中微子与氘核的相互作用。

光电管 Phototubes

帮助我们测量中微子与重水相互作用时产生的光的光传感器。

了解这个能谱，他们假定另一种粒子（电子中微子）也被释放出来。通过这种方式，他们利用 β 衰变时发射电子的“缺失能量”间接测量了电子中微子。

在加拿大萨德伯里中微子天文台(SNO)的实验中(见图 2A 和附录)，我们使用类似的方法，通过中微子对一种特殊的水（称为重水）产生的效应来间接测量中微子。如你所知，普通水 (H_2O) 由 1 个氧原子 (O) 和 2 个氢原子 (H) 组成。氢原子核中有 1 个质子。相比之下，重水 (D_2O) 则包含 1 个氧原子和 2 个氘原子 (D)。氘原子核中有 1 个质子和 1 个中子（换句话说，它是一个带有额外中子的氢原子）。这使得它的重量增加了 10%，但化学性质变化不大。重水是天然存在的，每 6400 个水分子中就有 1 个是 D_2O 。



在我们的 SNO 实验中，我们用纯重水填满了一个大容器，并测量了太阳中微子与重水碰撞的效应。基本上，我们测量了中微子与重水碰撞时发生的两种反应。在第一种反应中，电子中微子与重水的氘原子相互作用。这种相互作用会将原子核中的中子变成质子和能产生光的快速运动的电子(图 2B，反应 1)，我们测量了这个电子所产生的光。在第二种反应中，所有三种味的中微子（电子、 μ 子和 τ 子）与氘原子相互作用。在这种相互作用中，氘原子的原子核会分裂成一个质子和一个游离的中子。游离的中子穿过重水，在实验装置的三个阶段以不同的方式被探测到。在第一阶段，中子被另一个氘原子俘获，产生了与反应 1 不同特性的光(图 3B，反应 2)。

因此，我们有了两种中微子与重水反应发光的方式，我们可以使用光传感器（称为光电管）来测量这些反应，因此我们可以间接地检测中微子的存在。

为确保我们只测量到中微子，而没有其他辐射源的影响，我们付出了大量的努力。我们必须将来自外太空的放射线屏蔽，这就是我们要将

探测器放置在被岩石环绕的地下约 2 公里处的原因 (图 2A)。我们还必须确保没有测量到岩石本身的辐射。具体来讲, 我们必须将重水区域与岩石中存在的两种放射性元素 (铀和钍) 隔离开来。为此, 我们将重水容器浸泡在高纯度水中——就放射性元素而言, 这种水比自来水干净数十亿倍。这种超洁净的水捕获了来自岩石的放射性产物。我们还使用精心挑选的低放射性材料制造了探测器, 并配备了超洁净的空气和工人, 他们每次都要淋浴并要穿着无尘服。

为了测量中微子与重水相互作用时发出的光, 我们在重水容器周围放置了许多光电管。建造这个实验装置非常具有挑战性——它既是一项重要的工程任务, 也是一项复杂的物理实验。(要了解有关项目工程方面的更多信息, 请参阅附录)。

缺失的中微子去哪儿了?

如上所述, 我们面临的挑战是解决太阳中微子的问题, 即为何到达地球的电子中微子数量仅为预期数量的三分之一。实验或理论 (或两者) 可能是不正确的, 或者太阳发出的电子中微子可能在前往地球的过程中改变了味, 从而逃脱了仅对 (或主要对) 电子中微子敏感的探测器。

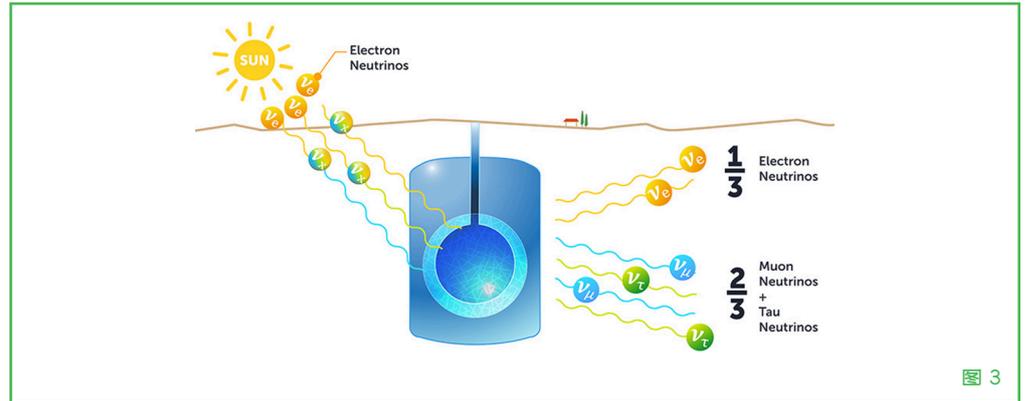
在我们的实验中, 我们想要探究中微子是否在到达地球之前就改变了味。我们知道, 太阳核心中只会产生电子中微子 (μ 子和 τ 子比电子重, 因此产生它们及相关的中微子需要比太阳更多的能量)。这意味着, 如果一些来自太阳的中微子不是电子中微子, 那么它们在从太阳核心到地球的过程中一定改变了味。(中微子可以通过一种称为中微子振荡的量子现象周期性地改变味。点击[这里](#)可以了解到更多相关信息) 通过将我们的探测器调整到一个特定能量范围, 便可以检测到来自太阳的中微子产生的效应, 而不受其他发射源 (如能发射更高能量中微子的宇宙射线) 的影响。在我们研究的能量范围内, 太阳是目前到达地球的中微子的主要来源。

在我们探测器的一次测量中, 我们观察到电子中微子与氘原子相互作用, 并释放出一个高速运动的自由电子, 如上所述。在另一次测量中, 我们观察到三种味的中微子与氘原子相互作用, 并释放出一个自由运动的中子。换句话说, 第一个测量告诉我们有多少个来自太阳的电子中微子, 而第二个测量告诉我们来自太阳的所有中微子总数。将两者进行比较, 我们发现来自太阳的中微子中仅有三分之一是电子中微子。因此, 三分之二的中微子从电子中微子变成了 μ 中微子和 τ 中微子 (图 3) [2, 5]。我们的实验表明, 电子中微子在旅途中可以改变味——这就是太阳中微子问题的答案!

作为基本粒子标准模型的一部分内容, 人们最初假定中微子没有质量并以光速行进。根据爱因斯坦的相对论, 中微子振荡的发现意味着中

图 3

中微子在从太阳内核发射到地球时会改变味。



微子具有质量。至于中微子通过空间改变味意味着它们具有质量的详细解释，已经超出了本文的讨论范围。但总的来说，爱因斯坦的狭义相对论决定了：味的周期性变化表明，从中微子的角度看，时间在流逝。会经历时间意味着中微子的速度比光速慢，因此具有质量（译者注：以光速运动的粒子，时间会停止，因此不会经历时间）。我们的实验以及与我们共享诺贝尔奖的日本超级神冈实验所做的测量，为超越标准模型的物理学提供了第一个证据。标准模型的扩展将使我们在非常基本的层面上对我们的宇宙有更完整的了解。大量人员付出了长期的努力，才使得这一伟大成就成为可能。我深深感激参与这个重要项目的每个人，我很幸运能够参与其中。被授予诺贝尔奖，我认为自己代表了所有使这个项目成功的技术高超、恪尽职守的同事。

给小读者的建议

我在加拿大一个很小的钢铁制造城市长大。虽然那里的人们都很重视教育，但没有人会预料到当地的居民会获得诺贝尔奖。这意味着，如果你努力工作并与真正优秀的人合作，任何一个人都可能在生活中做出非常重要的贡献，甚至可能会获得像诺贝尔奖这样的奖项。

选择职业时，我建议选择让你每天早上醒来都感到开心的一些事情，然后去尝试。然后，看看你擅长哪些领域——这就是我所做的！我认为这是选择职业的一个非常好的方法。选择了某个领域后，你需要一直努力工作，并与周围的人保持积极友好的关系——这对你的成功非常重要。

同时，保持好奇心也非常重要，因为整个世界，特别是科学领域，一直在快速变化着。说出来你可能不信，当我在 1964 年上大学时，学校才有了第一台电脑。它又大又重，必须用起重机吊起来，然后从屋顶降到物理楼里！如今，你们中的很多人可能都拥有比那些早期电脑更强大、更小的便携式电脑甚至是手机（图 4）。这是我的职业生涯中科学发生巨大变化的一个例子，我认为这种惊人的趋势将会持续下去。因此，保持好奇心，学习新事物，并适应新的进展非常重要。此外，请记住，

你们年轻人最擅长使用和开发新技术，所以你们可以做出很多贡献！因此，请不要犹豫，尽可能地了解最新的技术，并尝试将这些知识传授给其他人，甚至包括年长的同事。

图 4

保持好奇心，因为世界正在迅速变化。自从我在 20 世纪 60 年代当学生以来，科技已经有了飞跃式的发展，我相信这种高速发展将持续到未来。

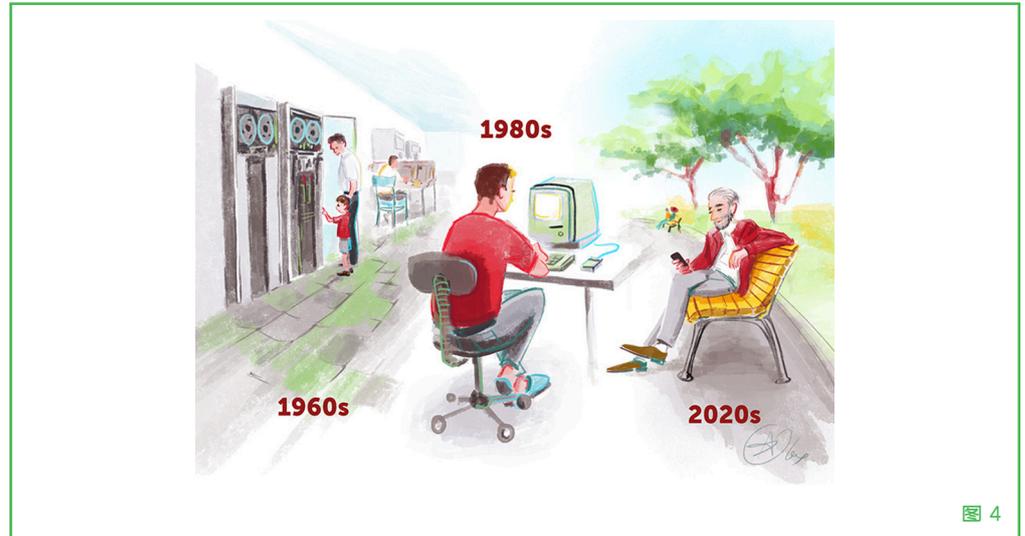


图 4

扩展阅读

Ain't no stopping them now with Art McDonald (Nature video).

致谢

感谢 Noa Segev 进行的采访，为这篇文章奠定了基础，同时她也是本文的合著者。感谢 Alex Bernstein 为本文提供了图 1-4。感谢“赛先生”公众号及其译者赵金瑜、陈晓雪对本文中中文翻译的贡献。

参考文献

1. Cottingham, W. N., and Greenwood, D. A. 2007. *An Introduction to the Standard Model of Particle Physics*. New York, NY: Cambridge University Press.
2. McDonald, A. B. 2016. Nobel lecture: the Sudbury Neutrino Observatory: observation of flavor change for solar neutrinos. *Rev. Modern Phys.* 88:030502. doi: 10.1103/RevModPhys.88.030502
3. Acker, A., and Pakvasa, S. 1997. Three neutrino flavors are enough. *Phys. Lett. B* 397:209–15. doi: 10.1016/S0370-2693(97)00174-3
4. Haxton, W. C. 1995. The solar neutrino problem. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 33:459–503.
5. Ahmad, Q. R., Allen, R. C., Andersen, T. C., Anglin, J. D., Barton, J. C., Beier, E. W., et al. 2002. Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral-current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory. *Phys. Rev. Lett.* 89:011301. doi: 10.1103/PhysRevLett.89.011301

线上发布: 2024 年 6 月 03 日

编辑: [Idan Segev](#)

科学导师: [Kalee Tock](#)

引用: McDonald A (2024) 中微子: 组成宇宙的幽灵粒子. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2022.1034181-zh

英文原文: McDonald A (2023) Neutrinos: The Ghost Particles That Make Up Our Universe. *Front. Young Minds* 10:1034181. doi: 10.3389/frym.2022.1034181

利益冲突声明: 作者声明, 该研究是在没有任何可能被解释为潜在利益冲突的商业或财务关系的情况下进行的。

版权 © 2023 © 2024 McDonald. 这是一篇依据 [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](#) 条款发布的开放获取文章。根据公认的学术惯例, 在注明原作者和版权所有, 及在标明本刊为原始出处的前提下, 允许使用、传播、复制至其他平台。如违反以上条款, 则不得使用、传播或复制文章内容。

少年审稿人

RYAN, 年龄: 15

我非常喜欢编程、玩魔方、玩 Minecraft 游戏。



作者

ART MCDONALD

阿瑟·麦克唐纳 (Art McDonald) 教授是来自加拿大的一位天体物理学家, 1943 年出生于加拿大新斯科舍省的悉尼市——布雷顿岛上一座有大约 3 万人口的城市。悉尼是一个很棒的城市, 安全、有着丰富的社交生活、给予人支持, 有许多乐于助人的老师。麦克唐纳教授特别记得他的数学老师 Bob Chafe 先生。青少年时期, 麦克唐纳教授加入了一个俱乐部, 这个俱乐部每周六晚上在 YMCA 举办社区舞会。在那里, 他遇见了未来的妻子珍妮特。麦克唐纳教授在加拿大的达尔豪斯大学获得了物理学士和硕士学位, 在美国加州理工学院获得了物理学博士学位。从加州理工学院之后, 他接受了加拿大原子能公司 (AECL) Chalk River 核实验室的研究职位, 在加速器设施上进行基础研究。1982 年, 麦克唐纳教授搬到了美国新泽西州的普林斯顿大学, 成为一名教授。在上世纪 80 年代, 他加入了在加拿大安大略省建造萨德伯里中微子天文台 (SNO) 的项目, 旨在研究太阳中微子问题。1989 年, 他成为加拿大安大略省金斯顿女王大学的教授, 并成为 SNO 设施的主任。1999 年, SNO 天文台开始探测中微子, 这使麦克唐纳教授及其团队得出结论, 中微子会改变它们的“味”, 这意味着它们也具有一定的质量。这与标准模型的预测相矛盾。在其职业生涯中, 麦克唐纳教授获得了许多奖项, 包括本杰明·富兰克林奖章 (2007 年)、亨利·马歇尔·托里奖章 (2011 年)、诺贝尔物理学奖 (2015 年) 和基础物理学突破奖 (2016 年)。目前, 麦克唐纳教授是加拿大皇后大学的名誉教授。他继续从事关于中微子和暗物质的基础研究。在 2020 年春季的 COVID-19 大流行期间, 麦克唐纳成为以低成本批量生产供不应求的机械呼吸机项目的负责人之一。麦克唐纳教授和他的妻子珍妮特有四个孩子和九个孙辈。麦克唐纳教授的邮箱: *art@snolab.ca



附录

萨德伯里中微子天文台实验

SNO 实验是一个伟大的协作项目，用于测量中微子及其味。在任何时候，都有超过 150 人参与实验，每个人负责特定的部分。首先，我们必须在加拿大萨德伯里的一座废弃矿山地下 2 公里的地方挖一个巨大的洞穴。施工队不得不在洞穴地面上钻孔并放置炸药。然后他们必须将所有设备吊出洞穴，并引爆炸药以加深和扩大空腔。之后，他们必须清除由爆炸产生的碎片。这个 34 米高（相当于 10 层楼高），22 米宽的空腔耗时两年半，进行了 8 轮爆破才得以建造完成。

附图 1

施工队放置炸药为 SNO 建造空腔。



附图 1

在建造了空腔之后，我们需要建造一个能容纳重水的丙烯酸球体。这个球体由 120 个小部件构成，每个部件都足够小，可以使用电梯将其放入到地下矿井中。

接下来，我们需要在丙烯酸球体周围建造一个圆顶，用于安置光电探测器，用来测量中微子与重水反应的效应。总体而言，我们使用升降机在球体上安装了 1 万个光电探测器。

最终，我们用 1000 吨纯重水 (D_2O) 填满了丙烯酸球体。这种水的纯度非常高，每吨水每天只有不到一次自发性放射性衰变，比自来水的纯度高出十亿倍。尽管已经用了巨量的纯重水，我们每小时还是只能探测

附图 2

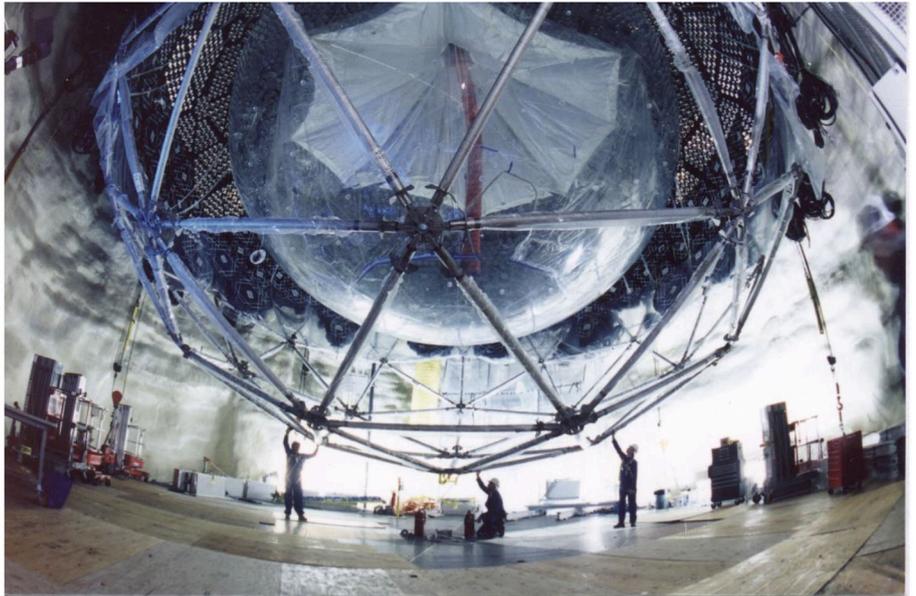
放置前 60 个 (共 120 个) 包含重水的丙烯酸球体。



附图 2

附图 3

在安装用来检测中微子的光电传感器之前, 在丙烯酸球体周围建造一个圆顶。



附图 3

到 1 个来自太阳的中微子的效应, 因为中微子很少与物质发生相互作用。

如你所见, 这个项目既是一项复杂的工程任务, 也是一项基础物理实验。许多技术娴熟、敬业的人们通力合作, 朝着一个他们认为具有重大意义的目标而努力。我们经常不得不选择如何进行实验, 我们通过详细交流探讨各种备选方案, 直到小组一致赞成一种备选方案为止。幸运的是, 在充分的讨论后我们总能够达成意见一致。通过以这种合作的方式一起

工作，我们的实验取得了成功，因此，我们学到了一些关于宇宙基本组成部分的新的和重要的东西。

附图 4

俯视丙烯酸球体 (红色) 底部的广角照片, 周围环绕着 1 万个用于检测中微子存在的光电传感器。

