



引力波, 宇宙的一扇新窗

Barry Barish*

加州理工学院, LIGO 实验室 (美国, 加利福尼亚州, 帕萨迪纳市)

少年审稿人



JIARUI

年龄: 13

想象一下, 你可以选择一双新的眼睛, 帮助你看到以前从不能看到的东西。也许你会选择超人的 X 射线视觉, 或者你更愿意将微小的事物放大, 看到微观世界的奇妙。科学界最近获得了一双新的眼睛——一种观察宇宙奥秘的新方法——引力波, 即由引力本身产生的波。本文将带你认识引力波。首先, 我们将解释一下引力——从牛顿的经典观点到爱因斯坦的现代观点, 后者也是更复杂的观点。然后我将解释大质量天体的运动如何产生引力波, 也就是空间和时间的涟漪, 以及它们可能如何被用来解释宇宙的一些奥秘, 甚至帮助我们了解地球的起源。

巴里·巴里斯 (Barry Barish) 教授因对 LIGO 探测器和重力波的观测做出了决定性贡献, 于 2017 年与雷纳·韦斯 (Rainer Weiss) 教授、基普·索恩 (Kip Thorne) 教授共同获得诺贝尔物理学奖。

引力——从牛顿到爱因斯坦

1687 年, 伟大的英国数学家和物理学家艾萨克·牛顿爵士出版了他的名著《自然哲学的数学原理》[1], 简称《原理》。他在书中提出了他的引力理论——科学中的第一个“宇宙”理论。牛顿理论证明, 两个物体之间的引力与它们的质量的乘积成正比, 与它们之间的距离的平方

引力

(Gravity)

让物体向另一个物体运动的一种力。

成反比。这听起来很复杂，但它意味着物体的质量越大，彼此越近，它们对彼此的引力作用就越强。虽然这是真的，但事实证明，牛顿的美妙理论存在着一些局限。

首先，你有没有想过，为什么当苹果从树上掉落时，它是往下而不是往上？当你跳跃时，为什么你最终会落回地球，而不是继续往上飞？牛顿的理论实际上并没有回答这些简单的问题。它只告诉了我们，两个物体之间相互施加的引力大小，比如苹果和地球之间或你和地球之间的引力。该理论没有考虑物体之间的力的方向（朝向对方或远离对方），也没有解释引力到底是从哪里来的（图 1）。

图 1

牛顿成功的引力理论具有不少局限。**(A)** 你有没有想过，为什么当你跳起来之后会落回地球，而不是飞向天空？是什么吸引你回到地球？牛顿理论无法回答这个问题。**(B)** 当一个苹果从树上掉下来时，观察者需要时间才能知道这个事情的发生，因为信息是以光速传播的。牛顿理论假设了观察者在苹果落下的同一时刻看到它瞬间落下。这两个局限都被爱因斯坦的引力理论解决了。

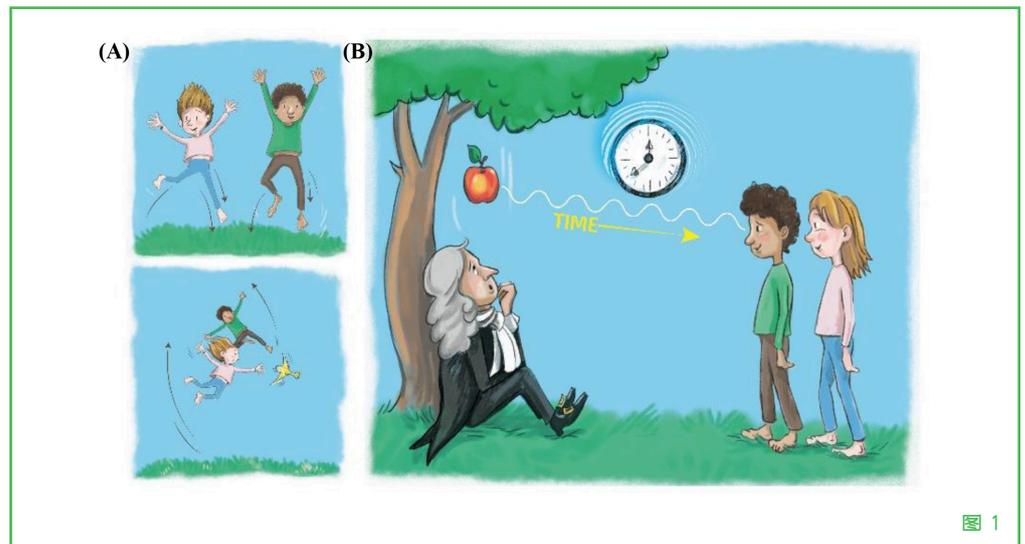


图 1

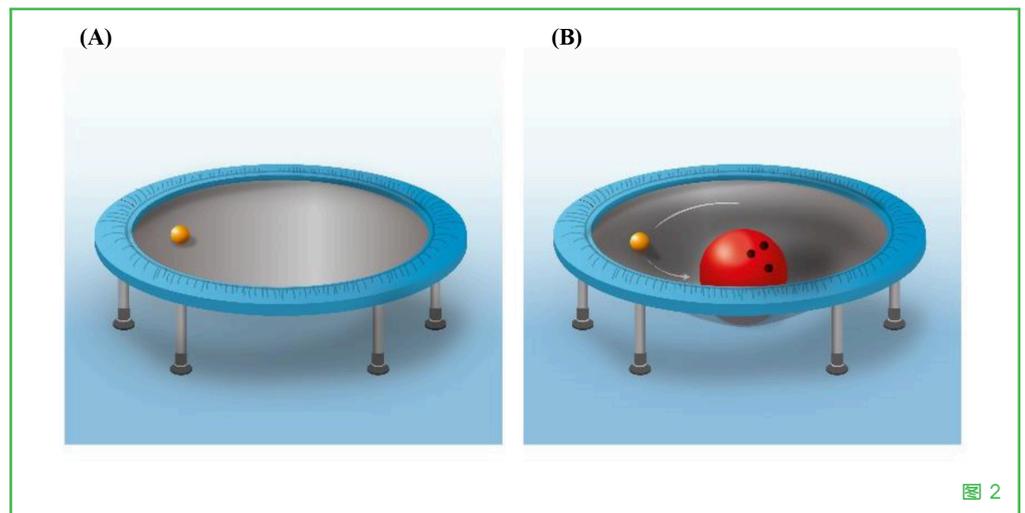
牛顿理论的第二个困难有点难以把握。想象一下，太阳突然消失了。如果它现在消失，我们需要 8 分钟后才能看到它已经不在那里了，因为光从太阳到达我们这里需要 8 分钟的时间。宇宙中发生的其他任何事情也是如此，信息从事件（发生的地方）传输到观察者（所在的地方）需要时间。因此，当一个苹果从树上掉下来时，应该过了一些时间（即使只是一秒钟的极小一部分）之后，观察者才能知道发生了什么事（图 1）。牛顿理论没有考虑这个时间间隔，因此根据他的理论，观察者就是在苹果掉落的那一时刻看到这一事实的。我们知道，现实并非如此；因此，我们可以认为牛顿理论中缺了些什么。

我们如何才能解决牛顿理论存在的这两个难题呢？幸运的是，在牛顿时代 200 多年之后，可爱的物理学家阿尔伯特·爱因斯坦提出了一个解决方案。1915 年，爱因斯坦发表了关于引力的一个新理论，称为广义相对论 [2]。爱因斯坦理论以一种完全不同的方式看待引力，并帮助我们理解牛顿理论无法解释的事情。这并不表示牛顿理论是错误的或是没用的——只意味着它是不完备的，而新理论帮助我们以更深刻的方式理解这个世界。爱因斯坦理论说，在任何大质量物体周围，空间和时间都被影响，变得扭曲或者弯曲，这产生了朝向该物体的拉力。

有一个简单的方法来理解爱因斯坦的引力思想。想象把一个小弹珠放在一个平坦的蹦床边上。这个弹珠保持静止不动（图 2A）。然而，如果你在蹦床的中间放一个大保龄球，它就会使蹦床卷曲，小弹珠就会向蹦床的中间滑去（图 2B）。这个重保龄球的存在以这样一种方式扭曲了蹦床所在的空间：使小弹珠朝向保龄球运动，就像被它吸引一样。这基本上就是爱因斯坦的广义相对论所说的事情。任何质量的存在都扭曲了它周围的空间，在两个有质量的物体之间产生了吸引。这幅引力图景回答了牛顿无法回答的问题：引力为何（以及如何）产生吸引力，以及为什么你跳起来之后会向地球坠落？第二个问题与时间有关，也被爱因斯坦解决了，因为他的理论计入了光速。在下一节，我们将看到一个有趣而重要的现象，即引力波，这是被爱因斯坦的引力理论所预测的。

图 2

根据爱因斯坦的引力理论。(A) 当你把一个弹珠放在一个平坦的蹦床上，它保持在原地。这代表了没有大质量物体存在时的空间状况。(B) 当你把一个重的保龄球放在这个蹦床的中间，蹦床变成卷曲的。如果你现在把弹珠放在蹦床上，它将向中心运动。这代表了爱因斯坦模型中的引力，一个大质量的物体（如恒星）卷曲了空间和时间，因此吸引其他物体（如苹果，或你自己）。



引力波

(Gravitational waves)

大质量天体的运动对空间和时间造成的扰动，以光速扩展。

什么是引力波

爱因斯坦的广义相对论的预言之一是，引力应该具有波动性——引力波 [3, 4]。思考引力波的一个简单方式是，想象自己在一个静止的池塘边……然后你往池塘里扔一块石头。这块石头溅起了水花，然后掉到了池塘的底部。虽然石头现在静止在池塘底部，但你仍然可以看到它对水面产生的影响，即水波从中心向外运动（图 3A）。这也是直观理解引力波的方法，只是形成引力波的不是那块落入池塘的石头，而是空间中大质量天体的运动或碰撞（图 3B）。

探测引力波的挑战和胜利

在爱因斯坦预言了引力波的存在之后，实验物理学家们就开始尝试探测它们，我自己为开发探测引力波的方法已经投入了 20 多年的时间——并且还将继续。事实上，面对引力波，我们同时拥有一个“不幸”和一个“幸运”。不幸的是，我们目前无法在实验室里制造引力波，因为对于我们现有的探测技术而言，我们所能制造的引力波太微弱了。这

图 3

引力波。(A) 当你把一块石头扔进一个平静的池塘时, 你可以看到涟漪(波动)在横穿水面运动, 即使当石头已经静止在池塘底部时还能看到。根据爱因斯坦的广义相对论, 这与大质量天体碰撞时形成引力波的方式相似。(B) 两个大质量天体相互碰撞就产生了引力波。即使在碰撞已经发生后, 引力波仍继续行进穿过空间。

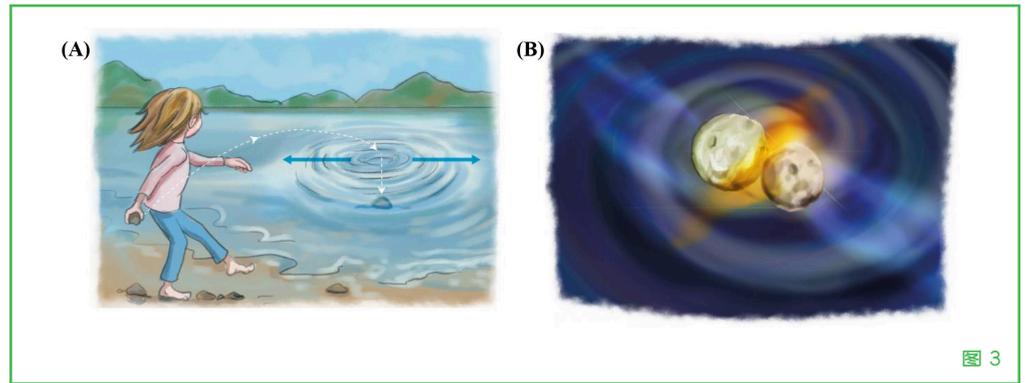


图 3

是个不幸, 因为好的实验是那些让我们理解全部发生细节的实验, 而这些细节在实验室中更容易实现。

超新星

(Supernova)

当一个大质量恒星衰老后, 它会耗尽燃料, 冷却, 向内坍缩。这会产生巨大的能量, 引发导致大爆炸的核聚变。

核聚变

(Nuclear fusion)

原子核融合形成更重原子核的反应, 它向周围环境释放大量能量。太阳的光和热就来自于核聚变。

¹ 了解“失控的核聚变”, 可参考 https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_runaway

黑洞

(Black holes)

黑洞是宇宙中已知的质量最大的天体, 其引力如此强大, 以致于任何东西甚至光都不能逃逸。

中子星

(Neutron stars)

超巨星耗尽燃料时坍缩后的残骸。中子星的典型直径仅 10 公里, 极端致密。

另一方面, 我们又被赐予了一个幸运——自然界本身创造的引力波, 比我们在实验室里制造的任何可能的引力波都强烈得多。这意味着一些产生引力波的天文事件——其中两个我将在下面提到——有可能被我们目前最先进的探测器探测到。尽管这些事件必须是宇宙中最剧烈和最高能的天文事件, 只有这样我们才可能探测到它们, 但它们发生的频次仍然很高, 足够我们研究。宇宙中最剧烈的事件是大质量天体的爆炸和碰撞。

我们探测引力波的一个可能极好的波源是超新星爆发。当一个大质量恒星衰老并急剧向内坍缩时就发生超新星爆发。这种坍缩使得温度和压力急剧提高, 能够加强核聚变, 也就是原子中的轻核组合成为重核并释放能量。这可以触发所谓的“失控的核聚变”¹, 从而导致恒星以巨大的能量爆炸, 根据爱因斯坦理论, 这会产生强烈的引力波。

对于太空中的猛烈碰撞, 其中最高能的发生在诸如黑洞和中子星的大质量天体之间。黑洞是宇宙中已知的质量最大的天体, 它们所具有的引力吸引强大到可以“吞噬”任何靠近它们的东西, 甚至恒星。没有什么能从黑洞内部逃脱, 甚至连光也不能, 这也是其名字的由来。中子星是坍缩后的超巨星的残骸, 密度极高, 主要由中子这种中性亚原子粒子组成。

2015 年, 人们首次探测到了引力波 [5]。仅仅两年后, 即 2017 年, 我和我的两位同事, 莱纳-魏斯和基普-索恩, 因这一发现获得了诺贝尔物理学奖。通常情况下, 科学家们做出杰出的研究工作后, 至少需要等待 20 年才能获得诺贝尔奖, 但引力波发现具有特殊的重要性, 原因我将在下面解释。探测到来自两个黑洞碰撞的第一批引力波之后, 我们后来又探测到了其他产生引力波的碰撞——一次是在 2017 年, 探测到的是两个中子星之间的碰撞 [6], 另一次是 2020 年, 探测到的是一个黑洞和一个中子星之间的碰撞 [7]。

质子

(Proton)

原子核中一种带正电的粒子。质子比人类头发丝的 10 亿分之一还小。

干涉术

(Interferometry)

一种利用激光束探测微小现象的测量技术, 比如探测本文介绍的引力波。

² 了解干涉仪以及它如何被用于探测引力波, 可参考 <https://kids.kiddle.co/Interferometer>; 更深入了解对引力波的探索, 可参考 <https://www.amazon.com/Gravitational-Waves-Einsteins-spacetime-universe/dp/1785783203>; 关于广义相对论和引力波的进阶书籍, 可参考 https://books.google.co.il/books?hl=en&lr=&id=t6_AXrEnVZYC&oi=fnd&pg=PP1&dq=gravitational+waves&ots=GEru24uiYE&sig=fEzjlqTuWKPypM1dBloLnu4SCkA&redir_esc=y#v=onepage&q=gravitational%20waves&f=false

图 4

LIGO 引力波探测器 (美国路易斯安那州利文斯顿)。两个引力波探测器之一的鸟瞰图, 该探测器在 2015 年史上首次探测到了引力波。每个 LIGO 探测器由两条臂组成, 每条臂长 4 公里 (2.5 英里), 由两个 1.2 米宽的钢制真空管排列成 “L” 形, 并被 3 米宽、3.7 米高的混凝土罩覆盖, 保护真空管不受环境影响。LIGO 可以探测到来自任何方向的引力波, 甚至是从下方来的引力波 (图源: 加州理工学院/LIGO 实验室)。

测量引力波

当我们测量引力波时, 我们实际上是在测量它们在空间和时间中产生的扭曲 (涟漪)。当这些扭曲到达我们的探测器时, 它们小得令人难以置信, 比一个质子的尺寸还要小得多。为了测量如此小的信号, 我们的探测器必须具有比质子大小的 1/1000 更高的精度! 你可以想象, 这是一个极其难以达到的目标。它需要使用一种非常特殊的技术, 即干涉术。我不在这里详细描述它, 简单地说, 干涉术利用激光束之间的相互作用推断非常微小的空间收缩和膨胀²。为了进行如此灵敏的测量, 我们需要将仪器设备与周围隔离开来, 以便没有任何东西可以干扰我们的测量——即使是一个微小的运动也会淹没我们正在寻找的信号。一个干扰源是地球本身的运动, 它自转的时候会摇晃 (这种摇晃太轻微, 人类感觉不到, 但敏感的仪器却能探测到)。这意味着我们需要将我们的测量仪器漂浮起来, 让它不会接收到地球的运动。

建造测量引力波的仪器一直以来都是极具挑战性的。我们使用的仪器叫做 LIGO, 它是激光干涉仪引力波天文台的首字母缩写。LIGO 有几公里长 (图 4)。建造和运营它的费用超过 10 亿美元。我的大部分工作仍然涉及开发相关技术, 提高引力波探测的灵敏度, 排除一些外界的破坏我们测量的运动。许多人问我, 在同一个问题上工作了 20 多年, 是不是很令人沮丧。我的回答是, 绝非如此! 我在解决这个问题的路上获得了很多乐趣, 再说, 能够做一些前人没有做过的事情, 是一种莫大的荣幸。

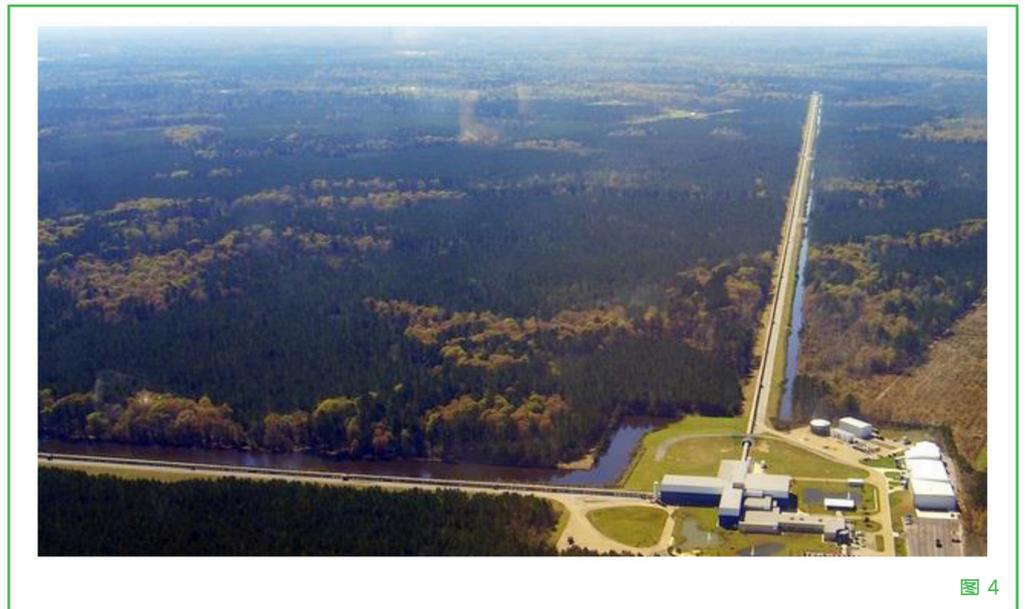


图 4

引力波：宇宙的新窗口

那么，引力波对于我们尝试了解宇宙有何重要性？首先，引力波帮助我们验证了爱因斯坦的广义相对论确实是正确的。尽管爱因斯坦的理论看似成立且非常准确，但它并不是预测引力波的唯一理论。为了证实爱因斯坦的理论是正确的，并能够解释引力是什么以及它如何发挥作用，我们需要所探测到的引力波的测量细节。

其次，引力波可以帮助我们了解宇宙的新事物。你可以把它看作是天文学的一个新时代，就像 400 年前著名的天文学家伽利略·伽利莱用望远镜观察天空开创的那个时代一样。我们可以利用引力波观察宇宙，这是前所未有的新方式——利用“引力望远镜”。研究引力波可以帮助我们更好地了解灾难性（指非常剧烈）的天文事件是如何发生的，例如黑洞和中子星之间的碰撞。这些信息可以让我们对于宇宙形成早期阶段所发生的事件形成新的见解，也可以帮助我们找到关于我们自己星球的有趣的问题的答案，如金和铂等重元素是如何到达地球的³。

然而，我们的引力波技术还不够高超，所以我们通常将从引力测量所得到的信息与从望远镜中得到的数据相结合。这使得我们能够建立宇宙事件的图景，这远超没有引力波时我们的理解。未来，随着我们能够更好地探测引力波，我们希望只用引力波就能“看”到宇宙现象。这是宇宙学中非常激动人心的时代，因为我们探测引力波的能力为宇宙学事件打开了一扇新的窗口，这将帮助我们更好地理解我们的宇宙。

给小读者们的建议

我在生活中学到了很多，其中一点是，人生中重要的事，是关注你们的梦想并努力实现它们。你们对未来的梦想告诉你们，你们在生活中想要什么——不管是成为一名物理学家还是艺术家，或者只是做一些自己喜欢的事情，比如旅行或追求你的爱好。你不一定要实现你的梦想所期望的一切，但你的梦想正在告诉一些关于你应该走哪条路的事情。

我学到的另一个要点是，我在生活中所做的一切都由一个词驱动：好奇心。年轻人是天生地非常好奇的，你们应该珍惜你们的好奇心，不要让任何事情削弱它——不管是你的老师，还是你的父母，或者其他任何人。因此，我的建议是跟随你的好奇心，享受乐趣，追寻你的梦想，并忽略一切可能限制你热情的东西。

对于你们当中对科学感兴趣的人来说，科学可以有很多乐趣。生命中没有比做自己喜欢的好事、同时享受乐趣还能挣钱养家更好的事情了。因此，对我来说，科学可真是一个好职业。

³ 我们知道，重元素是通过恒星中的核聚变反应而由轻元素产生的。但是，当我们研究恒星的生命周期时，我们看到以这种方式产生的最重的元素是铁（原子序数为 26）。在恒星燃烧并用完了他们所有的铁元素之后，它们就会坍缩，不再继续产生更重的元素。因此，应该存在另一种机制来创造更重的元素。目前，最广被接受的猜测是，更重的元素是在中子星的碰撞中产生的，而中子星碰撞可以用通过引力波探测到的（更多信息，见麻省理工学院新闻的这篇文章）。我们希望在未来几年里，利用 LIGO 和 Virgo 探测器收集到足够的信息，以更高的确定性验证这一假说。

但是你必须记住，失败是科学的一部分，接受并非你所做的一切事情都会成功这个现实……而失败也可能是好事。当你站在科学的最前沿，做一些以前从未有人做过的事情时，有时会感到很沮丧。每一天，你都会处于这样一种情况：你没有把握是否会取得进展，或者甚至可能有新发现，或者你是否正在做一些白费力气的事情。对于像我这样的人来说，这种未知性就是做科学的乐趣！

致谢

感谢 Noa Segev 的采访并在此基础上合作了本文。感谢“赛先生”公众号及其译者瞿立建、余其身对本文中中文翻译的贡献。

参考文献

1. Newton, I. 1687. “Principia,” in *The Principia: The Authoritative Translation and Guide*, eds I. B. Cohen, and A. Whitman (University of California Press). doi: 10.1525/9780520964815
2. Einstein, A. 1915. Erklärung der Perihelionbewegung der merkur aus der allgemeinen relativitätstheorie. *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss.* 47:831–9.
3. Einstein, A., and Rosen, N. 1937. On gravitational waves. *J. Frank. Inst.* 223:43–54. doi: 10.1016/S0016-0032(37)90583-0
4. Barish, B. C., and Weiss, R. 1999. LIGO and the detection of gravitational waves. *Phys. Today* 52:44–50. doi: 10.1063/1.882861
5. Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Abernathy, M. R., Acernese, F., Ackley, K., et al. 2016. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys. Rev. Lett.* 116:061102. doi: 10.1103/PhysRevLett.116.061102
6. Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Abernathy, M. R., Acernese, F., Ackley, K., et al. 2017. GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys. Rev. Lett.* 119:161101. doi: 10.1103/PhysRevLett.119.161101
7. Abbott, R., Abbott, T. D., Abraham, S., Acernese, F., Ackley, K., Adams, A., et al. 2021. Observation of gravitational waves from two neutron star–black hole coalescences. *Astrophys. J. Lett.* 915:L5. doi: 10.3847/2041-8213/ac082e

线上发布: 2023 年 4 月 27 日

编辑: Joey Shapiro Key

科学导师: Jian Zhang

引用: Barish B (2023) 引力波, 宇宙的一扇新窗. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2022.858203-zh

英文原文: Barish B (2022) Gravitational Waves—A New Window on the Universe. *Front. Young Minds* 10:858203. doi: 10.3389/frym.2022.858203

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: © 2022 © 2023 Barish. 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者, 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。

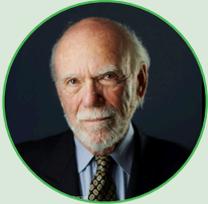
少年审稿人



JIARUI, 年龄: 13

我叫 Jiarui, 是一名中学七年级的学生。我获得了英语演讲比赛国家级奖项, 和编码州级奖项。我喜欢钢琴, 并且以优异成绩获得了 ABRSM 8 级证书。我对物理学很感兴趣, 也喜欢烘焙和烹饪。我喜欢狗, 有两只贵宾犬。

作者



BARRY BARISH

巴里·巴里斯 (Barry Barish) 教授是位于美国加州理工学院的 LIGO 实验室的物理学教授。巴里斯教授在加州大学伯克利分校获得学士和博士学位 (1962)。1963 年, 巴里斯教授加入加州理工从事粒子物理学。随后的 30 多年里, 他在多个粒子加速器实验室工作, 包括斯坦福大学 SLAC 加速器, 康奈尔大学 CESR 加速器。1994 年, 他加入加州理工的 LIGO (激光干涉仪引力波天文台) 计划, 从事引力波探测。巴里斯教授获得过诸多物理学专业学术奖项, 包括 Klopsteg 纪念奖 (2002), 恩里科·费米奖 (2016), Henry Draper 奖章 (2017), 和诺贝尔物理学奖 (2017)。巴里斯教授目前仍在继续为了更高的引力波探测分辨率而改进 LIGO 和 Virgo 探测器。巴里·巴里斯的夫人是 Samoan。他们有两个孩子, Stephanie 和 Kenneth, 还有三个外孙, Milo, Thea, 和 Ariel。*barish@caltech.edu