

Rainer Weiss: 引力波探测的50年

(北京大学 梁迪聪、邵立晶 编译自 Sidney Perkowitz. *Physics World*, 2022, (11): 35)

作为构思和实现历史上最大实验之一的核心的实验物理学家，诺贝尔奖获得者 Rainer Weiss 通往成功的路径是不同寻常的。

2015年，在爱因斯坦提出广义相对论一百年后，位于美国的激光干涉引力波天文台(LIGO)首次探测到引力波，证实了广义相对论的最后一个预言。2017年，Rainer Weiss 由于对 LIGO 探测器与引力波探测的决定性贡献，与 Barry Barish 和 Kip Thorne 共享了诺贝尔物理学奖。

尽管爱因斯坦预言了引力波的存在，但由于引力波太微弱了，他本人一度怀疑其能否被探测到。Weiss 利用激光干涉仪的想法非常具有突破性，使得引力波探测成为可能。首例被探测到的引力波由距离地球 13 亿光年的两个黑洞并合产生。如今 LIGO 已经探测到了越来越多的引力波信号。这些探测建立在 Weiss 和很多科研工作者数十年的努力上。引力波的代表了物理学研究上的一个高峰，也引领了天文学的一个新时代。在观测天文学中，我们首先通过可见光对宇宙进行了扫描，随后拓展到了更宽频率的电磁波。现在，引力波提供了一种新的方法来探测宇宙学现象。引力波天文学诞生 7 年以来，我们已经获得了很多有价值的新认知。

从纳粹德国经布拉格到美国

Weiss 的成功道路展示了一位有天赋的实验物理学家是怎么炼成的，新的科学想法是怎么从意料之外的方向到来的，以及一个大型物理实验获得成果是多么需要坚韧不拔的精神。

1932年，Weiss 出生于德国柏林，那时正是纳粹开始掌权的时期。Weiss 的父亲是个犹太医生，曾被纳粹扣留，被释放后逃往布拉格。Weiss 出生后，母亲就带着他与父亲在捷克斯洛伐克会合，并于 1939 年移民美国。

Weiss 在纽约市长大，他从当地的难民救济组织获得奖学金，得以进入哥伦比亚语言学校学习。音乐、科学和历史是 Weiss 最喜欢的科目。当他在少年时，就制造出了高保真度的音响系统。为了完美地重现声音，Weiss 尝试去掉唱头针在划过唱片凹槽时产生的背景噪声，但他失败了。所以他决定去上大学，通过学习去解决这个问题。1950年，他开始在麻省理工学院接受教育。

从电子学绕道到物理学

刚开始 Weiss 在麻省理工学院主修电子工程专业，但第二年就转到了物理学专业。1952年 Weiss 爱上了一位年轻的女钢琴家，但这段关系让他心碎。Weiss 所有的功课都不及格，不得不离开麻省理工学院。幸运的是，一切并没有到此为止。1953年春天他重返麻省理工学院，作为原子束实验室的技术员，在发明原子

钟的物理学家 Zacharias 的手下工作。Weiss 完成了他的物理学本科学业，并在 1962 年获得了博士学位。随后，Weiss 在普林斯顿大学的 Robert Dicke 手下做研究助理，希望用现代的技术去做厄特沃什(Eötvös)实验，来检验惯性质量和引力质量的等价性。尽管这个研究没有成功，但 Weiss 学到了 Dicke 那些领先的实验技术，这对于后来的 LIGO 以及其他物理学实验至关重要。1964年，Weiss 作为助理教授加入麻省理工学院，开始做一个宇宙学项目，测量宇宙微波背景的能谱。

在教室里测量引力

Weiss 一直在考虑着引力波，特别是他在麻省理工学院教广义相对论期间。那时，马里兰大学的韦伯(Joseph Weber)尝试通过大型铝制共振棒的长度变化来探测引力波。当学生问起 Weiss 这个实验时，他想到了一个思想实验：在自由空间里

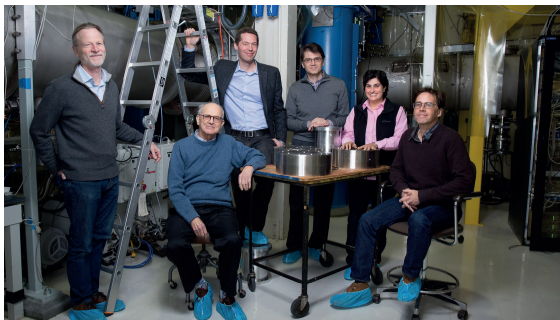


图1 LIGO背后的人。麻省理工学院 LIGO 团队成员(从左到右): David Shoemaker, Rainer Weiss, Matthew Evans, Erotokritos Katsavounidis, Nergis Mavalvala 和 Peter Fritschel

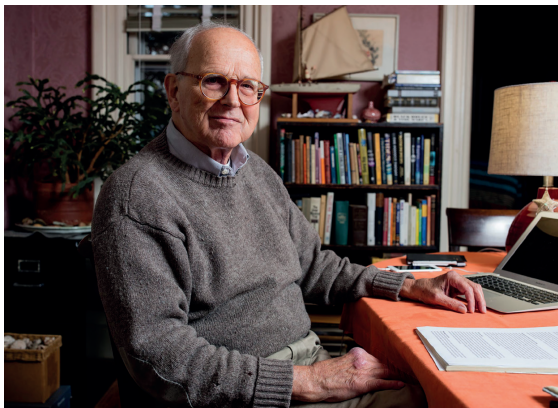


图2 从梦想到现实。Weiss花费了长达50年的职业生涯来找到方法去确定时空结构中的涟漪，为研究宇宙打开新的窗口，并迎接引力波天文学的到来

放置两块相隔很远的物体，一个带有激光，另一个带有镜子，通过测量激光的往返时间，可以得到距离。如果引力波改变了两个物体间的距离，那么足够精准的测量就能展示这个效应。

Weber在1969年宣称探测到了引力波，但实验并未能得到重复。而Weiss则改进了原来的想法，加入了第二条路径，与激光的第一条路径成直角，构成迈克耳孙干涉仪。在广义相对论中，当引力波垂直于干涉仪两臂传播时，两臂会分别伸长和缩短。Weiss总结道，这相比于测光走单条路径所需时间的方法要灵敏得多。

Weiss回想起1971年夏天，他是如何坐在一个小房间里计算所有可能对实验造成干扰的因素。他的研究显示，如果干涉仪臂长达到数公里，那么就有可能探测到因引力波弯曲时空而引起的大约 10^{-18} m的距离改变量，这是一个质子尺寸的一千分之一。

首次探测的试验床

尽管Weiss的一些同事对引力波持怀疑态度，但他继续发展他的想法。1975年，Weiss重新联系了

加州理工学院的理论物理学家Kip Thorne。Thorne看到了引力波研究的潜力，在加州理工学院大力声援Weiss。美国国家科学基金会在1979年资助了加州理工学院和麻省理工学院，以进行激光干涉测量的可行性研究；随后在1990年支持了LIGO作为两校的合作项目，并

给出了前所未有的大笔经费。在华盛顿州的汉福德以及路易斯安那州的利文斯顿建造了两个4 km长的探测器，这样可以通过一致性研究来确认所发现的信号。这里面包含了很多由加州理工学院实验物理学家R. Drever发展起来的技术理念。

LIGO在2002年运行时，就达到了其预期的灵敏度，但在9年中，并没有探测到引力波。随后，设备进行了意义重大的改造，最终在五年后升级为“高新LIGO”(aLIGO)。当灵敏度提高10倍后，aLIGO在2015年9月14日第一次探测到了引力波，它们来自于两个并合的黑洞。两年后，aLIGO首次探测到由双中子星并合产生的引力波；位于意大利的Virgo引力波探测器也参与了该发现。到2021年末，aLIGO已经发布了90个由双星并合产生的引力波事件，包括双黑洞(占大多数)、双中子星、黑洞—中子星系统。

回顾与展望

当思考这7年的引力波天文学时，Weiss欢欣鼓舞。他说，“我认为LIGO已经是个巨大的成功”，

并盛赞LIGO在检验广义相对论和研究黑洞天体物理时的重要作用。LIGO的结果表明，我们对黑洞的了解已经非常好，使得我们能够预言两个黑洞相互作用时的细节。

Weiss指出一个特别的引力波事件：2017年观测到的双中子星并合同时产生了从伽马射线到无线电波的电磁波，被世界上的多个电磁探测器探测到。这首个“多信使”天文学的例子使得我们可以对其方位进行精确测量，展示了能够产生金和铂的机制，确认了引力波是以光速传播的，并提供了一个新的方法来测量哈勃常数。

被问起引力波天文学的未来时，Weiss热情高涨。他强烈支持下一代探测器“宇宙探索者”，其臂长将达到40 km，灵敏度是aLIGO的10倍。同时，欧洲科学家们在考虑三角构型的10 km臂长的“爱因斯坦望远镜”，欧洲宇航局正在建造发射三角构型的激光干涉空间天线(LISA)。

每个探测器会对不同频段的引力波做出响应，就像天文学上利用不同频段的电磁波来研究天体现象一样，我们利用不同引力波探测器去观测不同类型的引力波事件。这些未来的探测器最让Weiss兴奋的地方在于它们可以做大科学，把各个领域带向宇宙学，也就是研究整个宇宙。

就像他那漫长的职业生涯以及研究反映的那样，Weiss并不希望只是简单地把事情加起来。他那长达数十年的对成功建立LIGO的奉献，对未来前沿引力波科学的嗅觉，以及那感染人的热情，已经雄辩地说明了所有他需要说的东西。