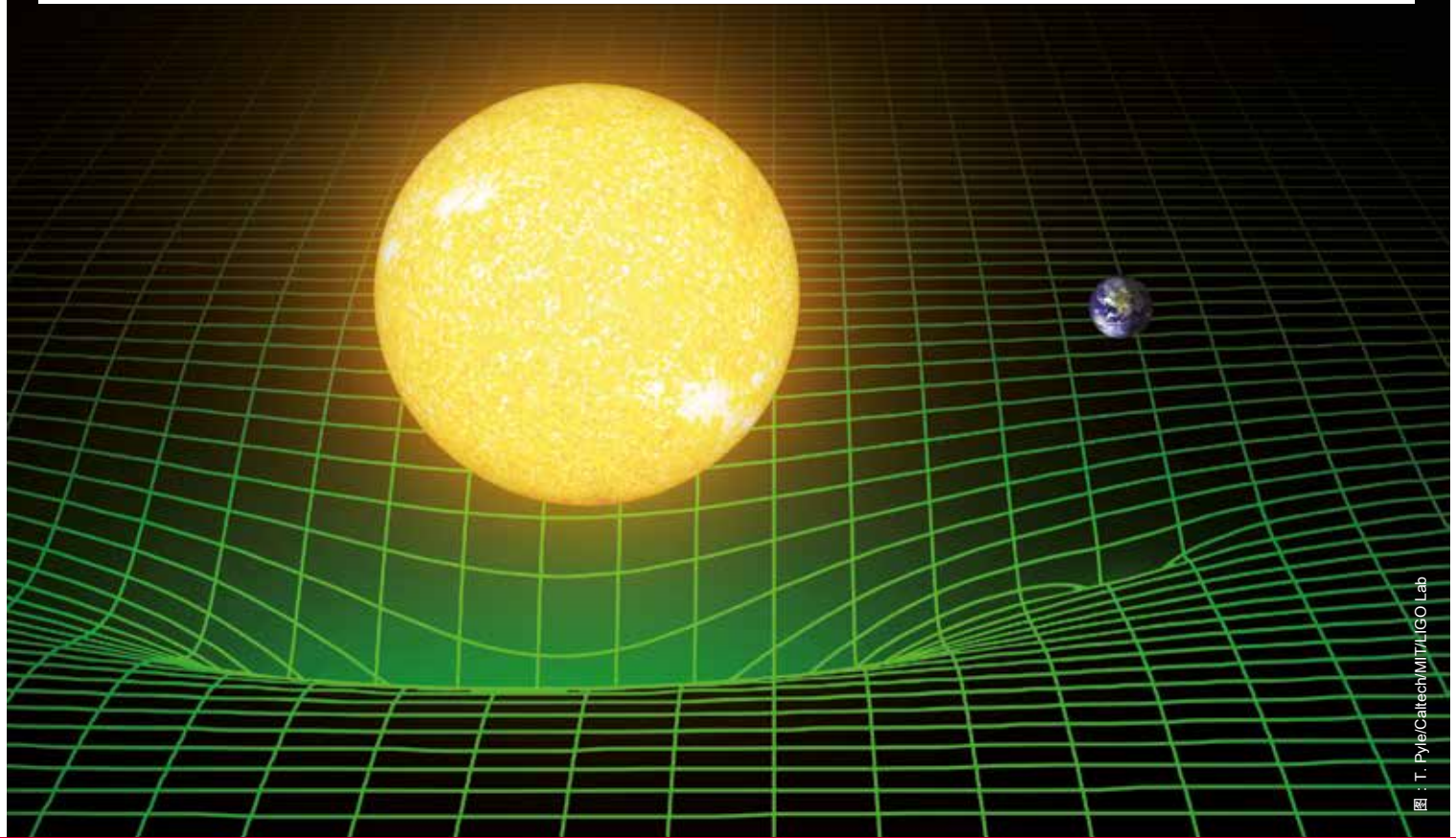




图：T. Pyle/Caltech/MIT/LIGO Lab

用真空技术追随爱因斯坦的脚步

采访 Rainer Weiss 博士教授，LIGO 创始人之一。

2015 年9月，美国路易斯安那州和华盛顿州的 LIGO (激光干涉引力波天文台，Laser Interferometer Gravitation Wave Observatory) 首次直接在地球上探测到了引力波，从而从源头证实了爱因斯坦关于强引力场极限的理论，成为天体物理学的一大突破。真空技术在 LIGO 壮观的测量中起到了关键作用。普发真空的方案涉及 LIGO 及相关基础实验的测量。在采访中，Rainer Weiss 博士教授，同时也是 LIGO 的创始人之一，谈到了 LIGO 成立的经过和普发真空解决方案的作用。

$E = mc^2$ ：这一公式或许是最著名的物理学公式了。它是阿尔伯特·爱因斯坦在 1905 年所阐明的相对论的一部分，描述了质量和能量的等价关系。多年后，这位世界闻名的物理学家将观察扩展到引力，并从数学上描述了引力波的存在，成为他在 1915 年发表的广义相对论的一部分。100 年来，该理论已为物理学界认可。

借助于美国华盛顿州和路易斯安那州的激光干涉引力波天文台，科学家们首次得以探测到一对黑洞撞击时产生的辐射。随后，双黑洞系统的存在被证实，其动力学被证明遵守爱因斯坦的方程。

引力波 — 时空的变形

当中子星或黑洞等大质量物体加速并相互环绕时，便产生引力波。它们相撞时，其速度相当于接近光速。而当它们环绕时放射出的引力波压缩并拉伸空间，使时空变形。这种变形极其微小，而且是振动的。用比喻说明的话，类似扔进水里的石头在水面上产生的涟漪。

爱因斯坦理论的显著证据

2015 年9月，LIGO 首次探测到 13 亿光年之外的星系中两个黑洞合并时产生的引力波。这不仅再次证实了爱因斯坦的理论，而且这些发现也首次能够证实成对黑洞的存在。对于研究者，这一发现标志着天文学的新纪元，堪比伽利略在 17 世纪开始进行的天文学研究。

而这一步全靠美国境内 LIGO 的两个探测器实现。它们一个在汉福特（位于华盛顿），另一个在列文斯顿（位于路易斯安娜），相距 3000 千米。对引力波记录进行研究和实验的项目始于 1992 年。今天，来自 16 个国家、数以千计的科学家在这里工作。

探测器按迈克尔逊 (Michelson) 干涉仪原理运行。在干涉仪中，一束激光被分束器分开，经两条尽可能长的光路穿过一个光学镜面系统。随后，激光束在探测器中结合。通过这种方法可以测量引力波产生的激光束的最小飞行时间差。即使在相隔 4 千米的镜面上，重力波所导致激光束间的距离变化也只有原子核尺寸的 $1/1000$ (10^{-18} 米)。



图 1：LIGO 探测器的两条 4 km 长真空管悬臂之一的俯视图（路易斯安娜）

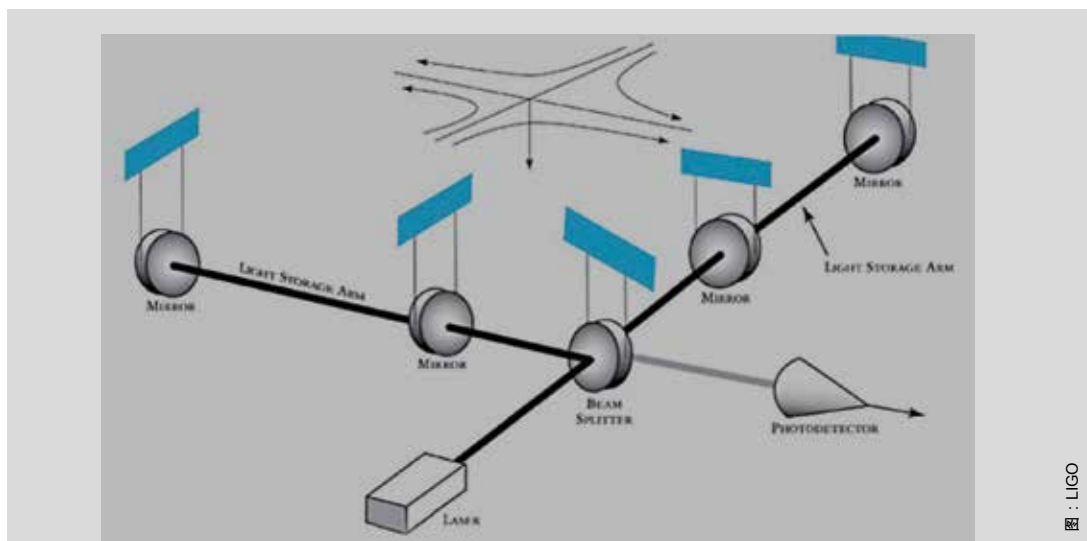


图 2：用于探测引力波的 LIGO 干涉仪示意图

普发真空的真空技术用于 LIGO

这项实验，亦即在地球上证实引力波的存在，需要真空技术。为了保证功能正常，激光的两条光路不得受到扰动影响。因此，激光束和光学镜面放置在超高真空系统中。为了保证该系统的质量和可靠性，从而使实验能够顺利完成，需要进行长达十年的准备。作为准备工作的一部分，在世界各地的物理研究所为准备引力波实验而进行了深入的基础研究。

普发真空为许多这样的基础实验提供了真空设备。LIGO 探测器中的真空也是由普发真空的分析系统监控的。普发真空的 HiPace 涡轮分子泵及大量质谱仪被用于保障质量和检测泄漏，以对巨型光束管道的烘烤进行诊断。这些设备用于保持管道系统中的必需的真空条件，为成功进行实验提供必要的环境条件。

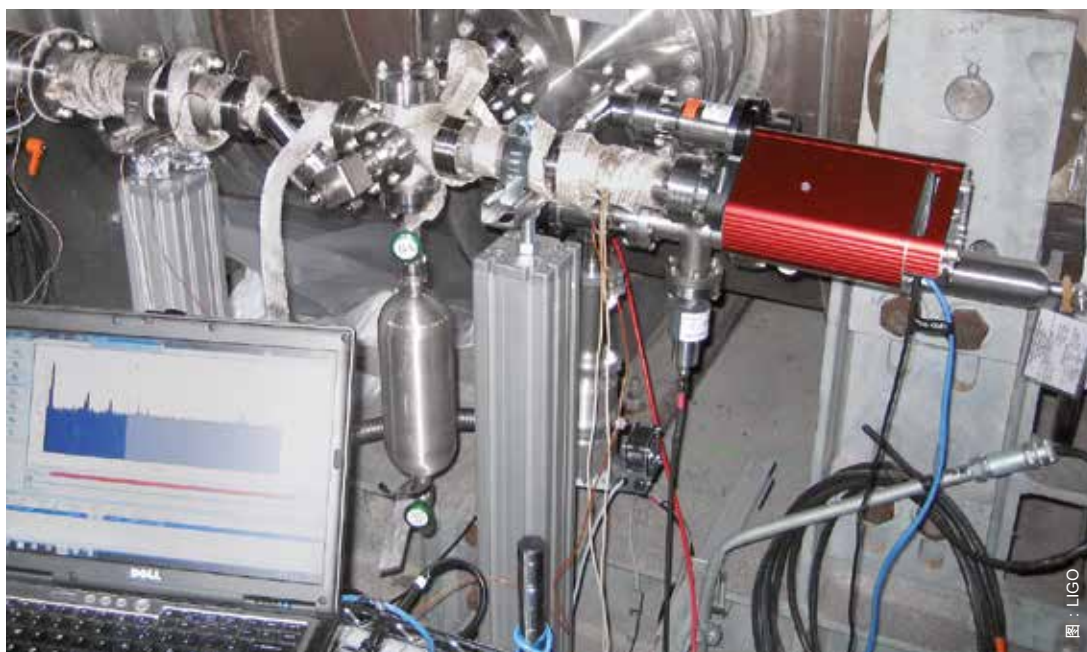


图 3：用于 LIGO 实验的普发真空真空方案 — HiPace 涡轮分子泵和 Prisma Plus 质谱仪

采访 RAINER WEISS 博士教授， LIGO 创始人及科学带头人之一。



图：MIT News / Bryce Vickmark

Rainer Weiss 博士教授，LIGO 创始人之一。

Weiss 博士，您是 LIGO 项目的创始人及科学带头人之一，而且已经在探测器上工作了 25 年多了。请告诉我们，一切从何而起：是什么促使您从事这一项目，它又是如何发展的？

说来话长。当我在麻省理工学院开始做教员的时候，让我去教广义相对论。那是 1968 年，我刚开始在物理系成立了一个新研究小组，研究实验引力和观测宇宙学。我对广义相对论知之甚少，只比我的学生们略多那么一点儿。说实话，他们在丈量计算上可能比我还领先。同学们想进一步了解韦伯实验。约瑟夫·韦伯（Joseph Weber）是研究爱因斯坦引力波的先驱，他在二十世纪六十年代利用铝棒的激发对引力波进行测量。我费了很大力气去理解铝棒和引力波的相互作用。我觉得我可以理解并计算一对沿相邻测地线运动

的物体在引力波经过时如何改变它们的距离。接下来的想法就是利用光走过两个物体之间所需的时间来测量其距离。计算相当的简单。我把这个问题留给了学生。后来我又琢磨起这个问题，然后意识到，其实按照这种方法可以造出一台敏锐的引力波探测器来。这就是我设想中 LIGO 的开始。

如今，引力波确实在物理上被探测到了。您最初得知这一探测结果时有何感想？

当时我正和家人在缅因州度假。我们跟雪城大学 LIGO 工作团队的 Peter Saulson 和他妻子约好，沿着缅因海岸线划船。碰巧 Richard Isaacson 也加入了我们。Richard 是 Charles Misner 的学生，他写过一篇很重要的论文，论证了引力波带有能量，并且是物理上真实存在的东西。在提议用干涉仪探测引力波的关键时刻，他是国家科学基金会 (NSF, National Science Foundation) 引力物理学科的负责人。就是在他的主导下，基金会同意碰碰运气研发并资助 LIGO。得到 LIGO 董事会的许可后，Peter 和我把这一“事件”告诉了 Richard。他显得十分怀疑，以无懈可击的理智连番质问我们：“你们如何知道不是因为……才……”——但在看到数据并彻底地“拷问”后，我们出去爆搓了一顿，以纪念这一“事件”，还谈起了经历过的起起落落。

总的说来，真空技术在 LIGO 的实验工作中起了怎样的作用？

在 4 km 的悬臂中，需要级别低于 10^{-9} torr 的真空，以避免残留气体分子的前向散射造成干涉仪输出中的相位噪声。最严重的相位噪声来自大分子，他们的极化性较大，并且移动缓慢。

而在测试质量舱里则需要级别低于 10^{-8} torr 的真空，以免由于残余气体原子碰撞导致测试质量的动量波动。同样，较重的原子所产生的噪声比轻一些的原子更严重。

真空系统必须满足哪些具体要求？

除了上述压力要求以外，真空系统必须一次连续数月可靠运行。而且，真空泵的振动也不应影响测试质量。

有哪些普发真空的产品用在 LIGO 上，你们选择这些产品的原因是什么？

总的说来，我们使用的真空部件由不同厂家生产。我们使用了普发真空的残余气体分析仪，因为当我们在 LIGO 碰到两个极其困难的问题时，该公司驻美国的代表给我们提供了丰富的信息和卓绝的建议。一个是在验收前验证 LIGO 的光束管道是否符合残余气体压力规格时。第二个是当我们在 4 千米长的管道上查找泄漏的焊接点的时候，这些泄漏是由于鼠尿里含有的盐酸侵蚀造成的。这两个问题都需要稳定、无漂移并且敏锐的残留气体分析仪。

您如何评价与普发真空的合作？

一直以来，与普发真空长期、信任的协作十分有效而有益。无论是残余气体分析仪或涡轮分子泵的相关问题还是后续的进程，我们都能及时联系。

引力波的存在已被证实，随之也证明了爱因斯坦相对论的正确。这对 LIGO 实验工作的意义在于？它将如何进行？

伟大的目标尚未实现。目前只前进了一小步。随着设计精度的改进，LIGO 将打开引力波天文学的领域。这是天体物理学的新领域，通过观测整个宇宙中加速物质而放射出的引力波来探索黑暗的宇宙。我们知道有双黑洞系统和 neutron 星。但它们还有待我们进一步了解。黑洞的质谱将提供关于它们构造的信息，并揭示它们在天文学中重要性。中子星则会给出核物质状态的方程的信息，还可能告诉我们宇宙中的重元素是如何形成的。如果我们能够观测超新星，则引力波将揭示恒星坍缩的内部过程。或许引力波还有我们尚未想到的新来源。

非常感谢您接受这次采访！



图：Caltech/MIT LIGO Lab

我们提供一站式真空解决方案

普发真空代表着为客户在世界范围内提供创新的、定制化的真空解决方案，完美的技术，全方位的支持和可靠的服务。

完整的产品线

从一个配件到复杂的真空系统：

我们是唯一能提供完整的产品线和技术服务的供应商。

理论与实践的完美结合

得益于我们的专业技术和完善 的培训体系！

我们提供给您完整的生产技术提升方案和全球统一的一流的现场服务。

您是否正在寻找
完美的真空解决方案？
请联系我们：

普发真空技术（上海）有限公司
Pfeiffer Vacuum
(Shanghai) Co., Ltd.
T +86 (21) 3393 3940
info@pfeiffer-vacuum.cn

Pfeiffer Vacuum GmbH
德国总部
T +49 6441 802-0
info@pfeiffer-vacuum.de

www.pfeiffer-vacuum.com

All data subject to change without prior notice. P10431PZH (April 2016/0)

