

Physics World 评出2016年度物理学10项突破性进展

(中国科学院理化技术研究所 戴 闻 编译自 *Physics World*, 2017, (1): 6)

Physics World 2016年度突破奖授予“LIGO科学合作组，由于他们革命性地首次直接观察到引力波”(图1)。其他9项成就也获高度评价，涵盖的主题包括：核物理、材料科学等。在下面的介绍中，其他9项突破性进展，排名不分先后。

10项突破性进展的评选，是由 *Physics World* 的4名编辑和记者组成的小组完成，评判标准包括：研究的基本重要性；显著的知识进展；理论与实验间的紧密关联；所有物理学家的普遍兴趣。

引力波被直接观察到

正巧是在100年前，爱因斯坦在他的广义相对论中第一次假定了引力波的存在。引力波在2016年入选头条新闻，是因为位于美国的LIGO合作组，利用先进激光干涉引力波天文台(Advanced Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, aLIGO)检测到了两个独立的引力波事件。第一次观察是在2015年9月14日，并于2016年2月公布。第二组引力波掠过LIGO探测器是在2015年12月26日，这个所谓的“节礼日事件”于2016年6月宣布。引力波是空间—时间结构的涟漪，LIGO成功的观察，标志着一个长达数十年的星际起伏“狩猎”，有了一个句号。

测量还预示着引力波天文学和多信使天文学时代的开始：引力波观测与光学、射电望远镜以及其他宇宙探测器相结合。事实上，不久，LIGO孪生探测器将因多台新

建成设施的加入，形成全球引力波探测网络。

上述两次观察到的引力波是源于遥远宇宙的灾难事件——两个黑洞碰撞并最终并合。在第一个事件中，两个黑洞分别是36和29个太阳质量，并合形成单一快速旋转着的(具有62个太阳质量)黑洞，距离我们大约13亿光年远，该事件被称为GW150914。

GW150914引力波被探测时，正值仪器升级工程。孪生的aLIGO探测器分别设置在华盛顿州的汉福德和路易斯安那州的利文斯顿。事实上，当信号到达观测台，两探测器仍在校准。尽管如此，GW150914的信号是如此强烈和清晰，以至于截获的引力波数据，其背后隐藏的物理内容，仅凭肉眼就可以“看到”，具有 5.1σ 的统计确定性。

“节礼日事件”——称GW151226——其引力波也是由黑洞碰撞产生的。两者重量分别是14和8个太阳质量，并合成单一的21倍太阳质量的旋转黑洞，大约有14亿光年远。2015年10月LIGO记录了第三个可能事件——称为LVT151012。虽然没有达到足以确认为发现的统计学指标，该小组认为，这一事件也是源于两个正在并合的黑洞。

在4个月的观察

中，LIGO探测到3次事件，这是一件了不起的事。这些仪器足够灵敏，能够探测到在4 km长的两条干涉臂间不到质子直径千分之一的长度变化。这是一个令人难以置信的工程壮举。

LIGO已经改变了我们对宇宙的看法，这些观察是黑洞存在的第一批直接证据。此外，在这两个事件中，所见到的恒星质量黑洞，并不符合我们目前对黑洞的理解。天文学家曾认为，这样的双星体要么根本就不能形成，要么如果它们形成，它们相距将会太过遥远，以至于在宇宙年龄才能并合。另外，LIGO合作团队曾预计，其第一次引力波探测，会来源于中子星双星并合，而非耦合的双黑洞，后者被认为是罕见的。但是，从最近发现归纳出的数据表明，双黑洞并合的速率高于预期。

薛定谔猫在两个箱中同时生与死

上榜者：Chen Wang, Robert Schoelkopf以及他们在耶鲁大学和法国国家信息与自动化研究所(INRIA



图1 赢家在白宫：LIGO团队成员2016年2月24日在国会听证会(图片由LIGO Collaboration提供)

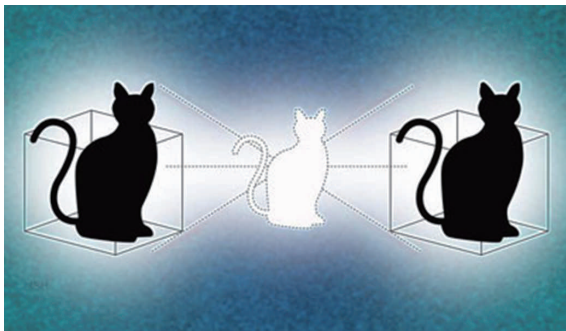


图2 两次生与死：在两个箱中的薛定谔猫

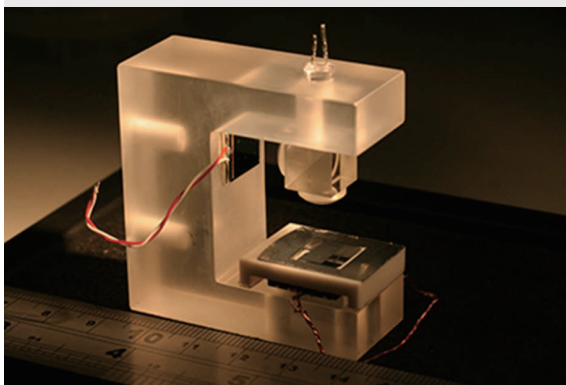


图3 称重：新的重力仪



图4 勇敢的新世界：艺术家对“比邻星b”的印象

Paris—Rocquencourt)的同事们。研究者创造了一只薛定谔猫，该猫在两个箱子中同时活着并死去——一个全新的令人喜爱的量子悖论(图2)。在新的绞合中用于容纳薛定谔猫的箱子是一对相互纠缠的微波谐振腔。所谓猫则是存在于每一腔中的大量光子之系综。这些光子系综可以是两个量子态之一：活着(不妨理解为光子的水平方向偏振态)或死

去(不妨理解为光子的竖直方向偏振态)。研究团队设法让整个系统进入一个状态，在这个状态下两只猫(在两个箱子内)是既活又死，直到一个开箱测量被做出。上述实验提供了一个新颖例证，薛定谔猫可以同时出现在两个地方，进而大量光子处于这样的“猫态”，可以提供存储量子信息的强有力方法(使用纠错协议)。

钷-229中发现难以找到的核时钟跃迁

上榜者：Lars von der Wense, Peter Thirolf 和同事们(德国路德维希—马克西米利安慕尼黑大学，位于美因茨的赫姆霍兹重离子研究中心和约翰内斯—古腾堡大学)。研究者检测到难以找到的钷-229核时钟跃迁。长期以来，计量界一直致力于，通过将激光锁定到一个少有的低能核跃迁，来产生一个“核钟”。原则上，这样的核钟比传统的原子钟要稳定得多，因为原子核不容易受到杂散电磁场的干扰。对于钷-229预测的7.8 eV的跃迁，被看作是一个理想的候选跃迁。但是，物理学家一直无法实际探测到它。通过做涉及钷-229原子和离子的实验，该团队证实所寻找的跃迁确实存在，能量范围是6.3—18.3 eV。研究人员的下一

步工作是改进他们的测量，使能量定位于meV精度。这将允许跃迁使用激光光谱技术进一步研究。

建于芯片之上的新型重力仪——微小但极为灵敏

上榜者：Giles Hammond 和格拉斯哥大学的同事们。研究者构建了一台高灵敏的重力仪，既价廉又小巧(图3)。他们的微小装置可以非常精确地测量地球的重力，并可以部署在无人机或多传感器阵列，执行一系列任务，包括矿产勘探、土木工程和监测火山。这台重力仪的灵敏度不如市场上的最优传感器，但它可以减少成本至千分之一，并且比目前的设备更小、更轻。该装置基于“校验质量”(proof mass)，这是一块约10 mm长的硅片，坐落在两个柔性支柱的顶部。校验质量、支柱和框架都使用标准的半导体工艺制造。

在石墨烯中发现电子的负折射

上榜者：Cory Dean, Avik Ghosh 和同事们(哥伦比亚大学、弗吉尼亚大学、康奈尔大学、日本国立材料科学研究所、沈阳材料科学国家实验室和IBM)。他们测量了石墨烯中的电子负折射。负折射的是一些人工超构材料(metamaterials)的属性，可以用来创建新颖光学装置(如完美透镜)。材料中的电子可以表现为波，负折射也应发生在n型和p型半导体(p-n结)之间的界面上。事实证明，在传统半导体中，这种效应是不可能被看到的，因为大多数电子在p-n结反射。Cory Dean和他的同事在石墨烯中创建了一个p-n结，并确保界面非常光滑，以尽量减少反射；这允许他们测量电子的负折射。负折射可以用来将发散的电子束转变成一个尖锐的聚焦，这可以成为某种电子开关(消耗极小能量)的基础。

在太阳最近邻之宜居区内发现岩质行星

上榜者：Pale Red Dot 合作组。他们发现了清晰的证据：在半人马座比邻星(这是距太阳系最近的恒星)的宜居带内有一颗岩质的系外行星在运行(图4)。这颗行星被称为比邻星 b，它的质量约为地球的 1.3 倍，因此最像是一颗具有岩石表面类地行星。比邻星 b 位于其恒星的宜居区内，这意味着在理论上它可以保持液态水在其表面，甚至可能有一个大气层。半人马座比邻星(注意，这里没有 b)是一颗红矮星恒星，距离太阳仅仅 4.2 光年。虽然比邻星 b 可能受到的紫外线和 X 射线辐射远比地球更为强烈，但研究团队称，这并不排除大气层的存在。该团队表示，这颗行星是否含有液态水，是否最终包含生命，取决于它是如何形成的。

物理学家实现超越全同离子的纠缠

上榜者：Chris Ballance 和他的同事们(牛津大学)，Ting Rei Tan 及其同事们(位于科罗拉多州玻尔得的美国国家标准与技术研究院)。他们创建和测量了两种不同类型的离子对态之间的量子纠缠。这项工作是由两个研究团队分别独立完成的。这是重要的一步——指向基于两种或多种不同离子的离子基量子计算机的创造。这样的混合系统将利用这样的事实：某种离子在执行特定量子计算任务时，比其他离子更适用。牛津组纠缠离子对是同一元素之不同同位素：钙-40 和钙-43；美国国家标准与技术研究院组则采用铍-9 和镁-25 离子。

新颖显微镜镜头结合高分辨率与大视场

上榜者：Gail McConnell, Brad

Amos 和斯特拉斯克莱德大学的同事们。他们创造的新颖显微镜镜头提供了大视场和高分辨率的独特组合(图5)，被称为 mesolens (介观镜头)。设备允许共聚焦显微镜产生 3D 图像，使用比以前大得多的生物样品，而在亚细胞水平提供细节。新设备能够在单一的图像中查看整个样品，这有助于许多生物过程的研究，并确保重要的细节不被忽视。研究者用一个定制的共聚焦显微镜对一个 12.5 日龄的小鼠胚胎进行成像。他们能够成像单个细胞、心肌纤维和亚细胞细节，不只是靠近样品表面，而是扩展到整个胚胎的深度。

量子计算机首次模拟基本粒子相互作用

上榜者：Rainer Blatt, Peter Zoller 和因斯布鲁克量子光学和量子信息研究所以及因斯布鲁克大学的同事们。他们利用量子计算机模拟基本粒子间的相互作用。研究组利用 4 个囚禁离子模拟了电子-正电子对产生和湮灭的物理过程。虽然结果可以很容易地使用传统的计算机算出，但如果研究对象被放大到包括约 30 个离子，即使是最强大的超级计算机也无能为力，只能靠量子计算机。该小组已经建立了一个系统，包含许多离子，但在此系统可以做实际的模拟之前，其性能必须得到显著改善——这可能需要 10 年。

单原子发动机

上榜者：Kilian Singer, Johannes Roßnagel 和德国美因茨大学的同事

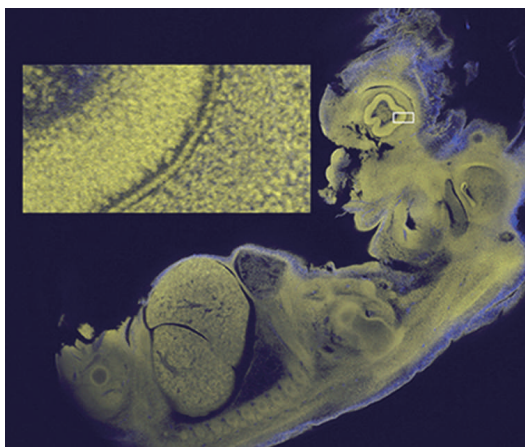


图5 小鼠胚胎的放大图像

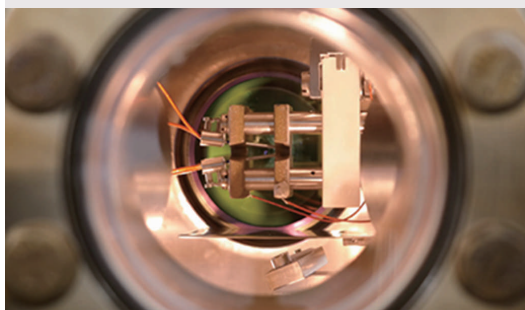


图6 带有被捕获钙原子的实验设施

们。他们创建了一台基于一个原子的发动机(图6)。热引擎把温差转换成机械功，同时限制单个钙原子在漏斗形的阱中。研究人员利用电噪声加热原子，随着温度的升高，它在径向方向上的振幅越来越大，导致它到达更高势能的区域，粒子被送至漏斗的大口端。通过周期性地调节加热噪声的开-闭，研究者得以使原子在捕获阱两个端口间振荡。这个运动被阻尼，以防止原子逃脱捕获阱。于是，为保持原子在阱中，所需的能量就是由发动机完成的功。该团队下一个研究目标是进一步冷却原子，更紧地束缚它，使它不再表现为一个经典粒子，而是作为一个量子波包。这将开启热力学和量子力学之间衔接研究的大门。