

# 接棒爱因斯坦，德物理学家今揭开光子动量的奥秘，或解决 30 余年争议

原创：杨大可 [DeepTech 深科技](#) 2019-10-06

又一年诺贝尔奖即将迎来发布，作为历史上最伟大的科学家之一——**阿尔伯特·爱因斯坦**（Albert Einstein）一生却只获得过一次诺贝尔物理学奖。而他的诺贝尔奖获奖理由，或许是他为人类科学进步提供的众多发现中“最小”的那个——解释了光电效应。**如今，来自德国的物理学家，站在巨人的肩膀上，进一步发现了光子动量的奥秘。**光电效应是物理学中十分重要而又很神奇的一种现象。当光照射到某些物质上时，会引起物质的电性质发生变化（即光生电），这类现象被人们统称为光电效应。这种现象最初由德国物理学家海因里希·鲁道夫·赫兹（Heinrich Rudolf Hertz）在 1887 年发现，他在证实光就是一种电磁波的实验中，注意到这种奇怪的现象。那时，电子还没有被发现。当时，爱因斯坦还只是伯尔尼专利局里的一个年轻职员，他在 1905 年的论文中给出了光电效应的正确解释。他的理论指出，光是由粒子（光子，photons）组成的，它们只向物质原子中的电子传递量子化的能量。如果光子的能量足够大，它就能把电子踢出原子，进而改变物质的电性质。**但在这个过程中，光子的动量会发生怎么样的变化，**受限于那个年代的科研条件，爱因斯坦并没有给出进一步的细节理论。本月初，德国法兰克福大学（又称歌德大学）的物理学家表示能够解答这个问题了。他们为进一步研究光与物质的相互作用，开发并建造了一种新的分光计（spectrometer），其分辨率是以前远远无法达到的。**依靠新的设备，他们的实**

实验展示出光子和电子相互作用后动量是如何分布的，并通过灵敏的测量证实了动量的预期守恒，从而证实了相对论。至此，光电效应的发现、理论解释和当代的实验证实，均被德国科学家或曾经的德籍科学家（爱因斯坦出生在德国）所包揽。研究团队的论文发表在最新的 *Nature Physics* 杂志上，该实验或许解决了困扰物理学家们 30 多年的问题。科学界一向有着“谁证明了爱因斯坦，甚至他的一部分，谁就能成为当代著名物理学家”的梗，所以法兰克福大学研究团队的这个新发现，引起了物理学界的广泛关注。而作为开创了现代科学技术新纪元的爱因斯坦，其“神话”地位或将在后人的不断证明中愈发提高。

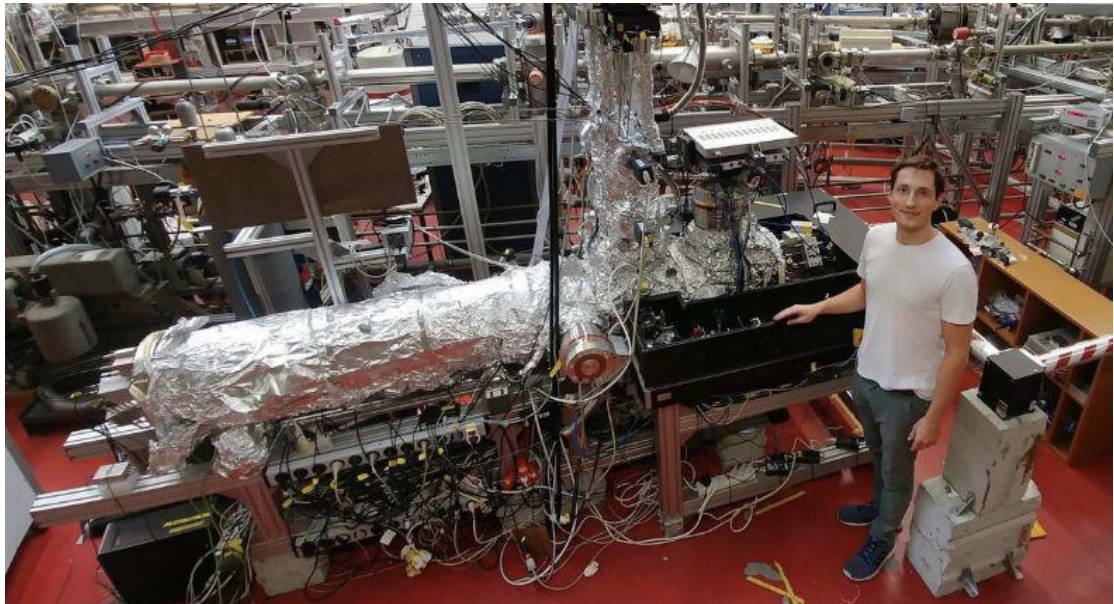


图 | 法兰克福大学发明的基于“COLTRIMS”原理的实验室设备与论文主要作者 Alexander Hartung（来源：A. Hartung） **特别的实验设备与方法**

为了建造出这个特别的实验设备，研究团队花费了大量的时间和精力；而作为论文的主要作者、这项研究的负责人 Alexander Hartung，他在设备的建造过程中做了两回父亲。最终，这个实验新设备的体积达到了 3 米长、2.5 米高，其内部

包含的零部件大概和一辆汽车一样多。目前该设备坐落在法兰克福大学 Riedberg 新区的物理教学楼的实验大厅中，其周围被一个不透明的黑色帐篷所覆盖，里面则有一个性能十分强悍的激光器。激光器发出的光子与设备中的单个氫原子发生碰撞，进而从每个原子中移除一个电子。这些电子出现时的动量，在仪器的长管中会被极其精确地测量出来。该实验设备是在法兰克福大学发明的 COLTRIMS ( Collision Optical Laser Testing Reaction Interacting Momentum System，碰撞光学激光测试反应相互作用的动量系统) 原理上进一步发展设计而成的，该系统随着新发表的研究发现而闻名世界。它由电离单个原子或破坏分子组成，然后精确地测定粒子的动量。然而在此之前，通过理论计算预测的光子动量向电子的转移量级是极其小的，以至于过往所有的测量手段都无法实现。因此，Alexander Hartung 在 COLTRIMS 的基础上建立了“超级 COLTRIMS”。应用该设备，Hartung 和他的同事们进而设计了利用两个反向传播的激光脉冲的实验方法，从而满足研究团队对光子动量在强场电离中的作用进行详细的研究。

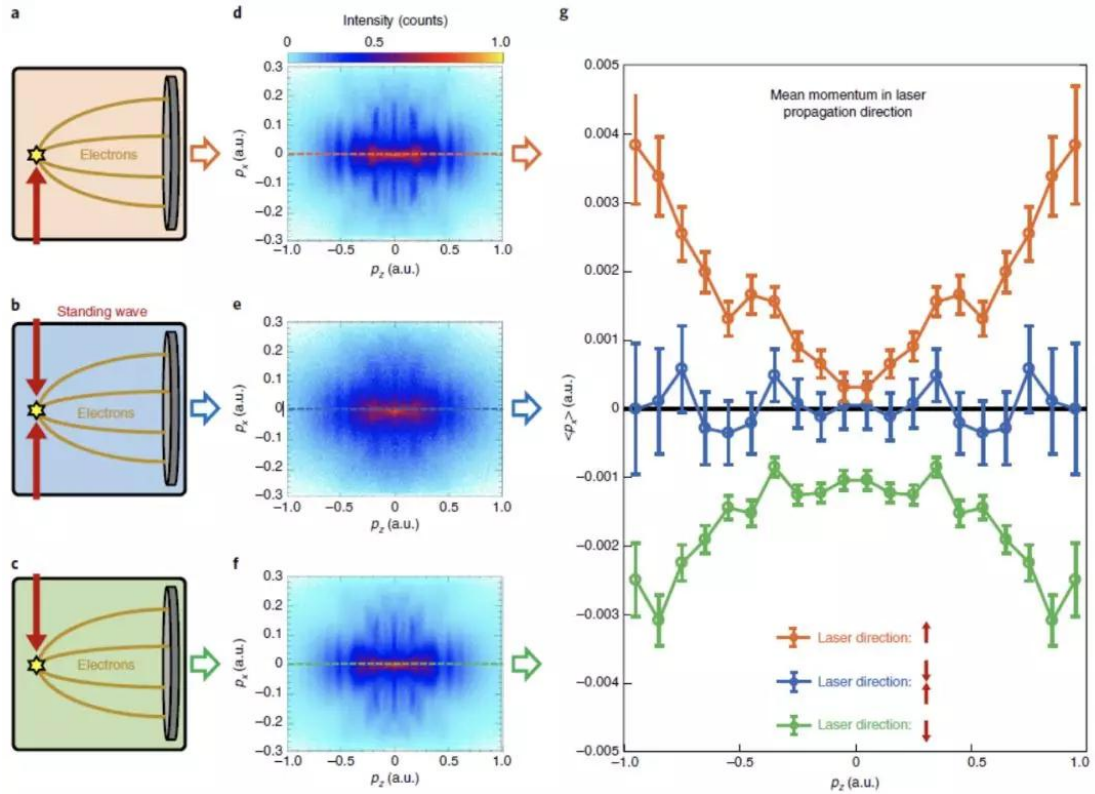


图 | 实验方案 (来源: A. Hartung)

在 Hartung 研究团队设计的实验方案中,所有面板的横坐标表示光偏振轴  $z$ , 纵坐标表示光传播轴  $x$ 。图中 a、b、c 的设置可以实现三种不同形式的氙的强场电离: a 和 c 可以让激光从一侧进入交互空间,而 b 则可同时从两侧产生驻波。中间的图 d、e、f 表示获得相应的电子动量分布结果,对于线性光来说,并没有表现出任何由光子动量引起的偏移(也就是说,它们在光中没有表现出任何不对称特征)。由于实验在光偏振轴  $z$  上的对称性,因此数据在该维度上也是对称的。图 d、e、f 中通过颜色变化以线性比例地描述出收集的计数值。同时, d~f 中的虚线表示光传播方向的平均动量,这在图 g 进一步得到了解释:通过计算三种电离情形下光传播方向上的平均动量,并将其放大约 100 倍,清晰的非偶极子特征变得可见。在驻波电离的情况下,由于实验安排的空间对称性,不会产生显著的动量偏移。而在两种单脉冲电离的情况下,当改变激光脉冲的传播

方向时，抛物线形状会产生翻转。而随后，研究人员则需要通过复杂的公式来计算圆偏振光和线性偏振光在光传播方向上的平均电子动量与径向动量、光偏振轴 z 方向上的动量之间的关系。

**或将终结 30 余年的争议** 当强激光脉冲诱导原子电离时，动量守恒决定吸收的光子将其动量转移给电子及其母离子。因该实验方法所特有的高精度和固有的零动量，可以使研究人员能够清楚地证明光的**磁场在电子处于隧道势垒下时对电子产生的作用**。此前，在理论上当束缚电子通过原子势和电场叠加形成的势垒时，两个粒子之间的光子动量共享及其在强场电离中的潜在机理，历经多年的理论研究却仍存有争议。例如，当来自激光脉冲的大量光子轰击氦原子时，它们会使氦原子电离；其中，原子的分裂消耗了光子的部分能量，而剩余的能量则被转移到释放的电子上。但是，哪一个反应部分（电子或原子的原子核）能保持光子的动量，正是这个问题已经困扰了物理学家们 30 多年。而 Hartung 研究团队的结果，以及他们设计建造的实验设备将有助于物理学家们解决相应问题。“最简单的想法是这样的——只要电子附着在原子核上，动量就会转移到较重的粒子上，例如原子。而一旦它打破束缚，光子的动量就会直接传递给电子。” Hartung 的导师、核物理研究所的 Reinhard Dörner 教授解释说。“这就好比风把它的动量转移到船帆上，只要帆牢牢地系在船上，风的动量就能推动着船前进。然而，一旦系帆的绳索断了，风的动量就被单独地转移到帆上。”



图 | 该研究负责人的导师 Reinhard Dörner 教授（来源：[uni-frankfurt.de](http://uni-frankfurt.de)）

尽管解释起来比较简单，但 Hartung 通过实验发现的答案实则很令人惊讶，对于量子力学来说也是典型的表现。**电子不仅获得了预期的动量，而且还接受了大约三分之一的实际上应该进入原子核的光子动量。这就好像，船帆在绳索断裂之前就“预感”到了即将发生的事故，并窃取了一点船的动量。**为了更精确地解释这个结果，Hartung 使用光波来作为电磁波的概念，他说：“我们知道电子会通过一个小的能垒。在此过程中，它们会被激光的强电场从原子核中拉离，而磁场会将这种额外的动量传递给电子。”而上文介绍的可以实现三种不同形式氙的强场电离的方法，正是 Hartung 在实验中的巧妙设计。这样，可以确保电子所获得的十分微小的额外动力不是偶然的、或者是由不对称的设备而带来的。他首先让激光从右边或左边分别脉冲气体，然后再用激光同时从这两个方向对气体进行脉冲，这是有着极大挑战的设计思路。当然，挑战越大，回报越丰厚。Hartung 设计的这种精确测量的新方法，在未来有望使人们更深入地了解

激光的磁性成分在原子物理学中所扮演的角色，还可以进一步证明爱因斯坦的相关理论。至于这不是一种超越？或许前方的道路依然漫漫无期，需要物理学家们上下而求索。

-End-

参考：

<https://phys.org/news/2019-10-einstein-physicists-mystery-photon-momentum.html>. Hartung et al, Magnetic fields alter strong-field ionization, Nature Physics (2019). DOI: 10.1038/s41567-019-0653-y