

经典物理图像。她解释，在强激光场中，一个电子从原子中被“拽出”、加速、最后撞回原子核并释放高能光子，在这一过程中，每次回撞会产生一个阿秒光脉冲。

发现高次谐波效应之后，吕利耶发表了一系列文章，继续探索这一现象。它像一个意外的礼物，让吕利耶等科学家拥有了阿秒光脉冲，得以逐步创造出梦寐以求的“超高速相机”。

随着近 20 年科技的快速发展，尤其是飞秒和阿秒激光技术以及相关探测技术的发展，科学家们已经具备了非常先进的阿秒脉冲产生和测量技术，实验室可以获得脉宽接近甚至短于 20 阿秒的光脉冲。

“通过神奇的阿秒光脉冲，我们得以看见并认识微观世界。”然而，从观察微观世界的粒子运动，到理解规律，再到利用这些规律来改造微观世界，仍然是一个漫长的过程。正如吕利耶所言：“我从事这个领域的研究工作已经大约 40 年了，在这个过程中，我们不断看到并学习新事物。未来，我们还将朝着阿秒物理学的更深处迈进。”

## 一场深刻的“超快革命”

在阿秒级光脉冲发现之前，

科学家对微观世界超快过程的观测极限，停留在“飞秒”尺度。

1 飞秒又有多快？它是 1 秒的一千万亿分之一。凭借飞秒激光这一“超级快门”，科学家得以“拍摄”化学反应中原子核的振动、化学键的断裂与形成。正是这项突破，为哈迈德·泽维尔（Ahmed H. Zewail）赢得了 1999 年的诺贝尔化学奖，掀起了第一次“超快革命”。

然而，在原子内部，电子的运动速度比原子核快千倍，其运动的时间尺度是更短的“阿秒”级别。用飞秒“快门”去捕捉电子，得到的只是一片模糊的拖影。想要真正捕捉电子的动态，时间分辨率必须实现从飞秒到阿秒的三个数量级的终极跨越。

阿秒激光脉冲的诞生，正是一场更深刻的“超快革命”。其最深远的影响，不只在突破观测极限，更在于它将百年物理难题，即光电效应中电子的“瞬时”发射，转变为了一个可观测、可测量的科学课题。

通过阿秒精度的“泵浦—探测”实验，科学家证实光电效应并非绝对瞬时，不同条件下电子逸出存在几十至几百阿秒的延迟。这一延迟源于电子与原子核的复杂相互作用及量子隧穿效应。如今，电子发射时间已成为可精确量化的物理参数。阿秒技术不仅将爱因斯坦的“光子”概

念拓展为动态过程，更让微观世界的时间维度真正向人类敞开。

“阿秒脉冲就像一台超级相机，能让我们观测到许多电子运动的现象。”吕利耶指出。这不仅仅是观测工具的升级，更是对物质基本相互作用认知的颠覆。

与飞秒技术带来的革命一样，阿秒技术也或将改变世界。

“阿秒物理学的理念是，首先能够‘观看’原子分子在电子发射初始阶段的运动。一旦我们能‘观看’，也许下一步就能去‘控制’它们。”这意味着，人类对微观世界的干预，正从被动观察迈向主动操控的新境界。

如今，阿秒科学已成为汇聚多学科智慧的前沿阵地，持续驱动源头创新。在物理学中，它正帮助科学家破解高温超导、量子材料背后的电子奥秘；在化学与生物医学领域，它让直接观测电荷转移、DNA 辐射损伤机制成为可能，为理解生命过程和研发新药提供了革命性的工具；在工业领域，基于阿秒的极紫外光源已开始用于纳米级半导体结构的无损检测，为下一代电子产品的制造保驾护航。

面对未来，吕利耶充满期待，也保持着科学家的审慎。她表示，从观察到理解，再到最终控制与利用，这是一个需要不断探索新事物的过程，而这正是科学研究最核心、最持久的驱动力。