



从星火光程实验室射向空中一点处的三条绿色激光束。

2023年诺贝尔物理学奖颁给

阿秒激光

这到底是个啥?

10月3日傍晚,2023年诺贝尔物理学奖正式揭晓,三位科学家以阿秒激光技术奠基人的身份共同获奖。

阿秒激光,顾名思义,是一种在阿秒(10的负18次方秒)时间尺度上闪烁的激光。

通过阿秒激光,科学家们可以像看电影的慢动作回放一样,观察电子在原子内部的运动,探究它们之间的交互作用。

阿秒激光是科学家们经过多年的研究和努力,利用非线性光学原理创造出的超快激光。它的出现,让我们有了观察和研究原子、分子甚至是电子动态的新窗口。

■ 相关新闻

阿秒科学走到哪一步了?

第一个阿秒脉冲串和第一个孤立阿秒脉冲都是在2001年在实验上实现的,经过20多年的发展,传统小型实验室的阿秒脉冲渐渐不能满足科学家的需求,科学家们开始寻求参数更好的阿秒脉冲以及实验条件更好的综合科学装置。

在杰哈·莫罗教授(2018年诺贝尔物理学奖获得者)的倡导下,欧盟2010年左右就开始规划建设基于超快激光的综合实验设施ELI。其中位于匈牙利的ELI-ALPS设施就是一个大型的综合性阿秒光源,供全世界的科学家进行新一代的高性能的阿秒脉冲实验研究。该设施的实验楼2017年建成,目前设施已经开始运转。

当时(2019年)在超快光脉冲的发展路线上,最新的一块石头是杰哈·莫罗教授2018年的诺奖(因发明产生超短超强激光脉冲的啁啾脉冲放大技术获奖),现在石头可以再加上一块了。

获得2023年诺贝尔物理学奖的法国科学家安妮·吕利耶的研究小组就参与了ELI-ALPS中新一代阿秒脉冲产生的工作,负责其中的一条阿秒束线。安妮·吕利耶表示,在大型的阿秒设施中,她计划探索小型实验室中无法探索的阿秒脉冲产生的参数空间,比如高能量的阿秒脉冲及其应用,部分结果已发表。

在美国,俄亥俄州立大学的阿戈斯蒂尼-迪莫罗研究小组由皮埃尔·阿戈斯蒂尼和Louis DiMauro两位教授领导。相对年轻的Louis DiMauro教授近年来在推进大型的装置NeXUS Facility,目的同样在于提供新一代的高性能超快阿秒光源。

2023年诺奖得主皮埃尔·阿戈斯蒂尼和安妮·吕利耶都参与了大型的综合性阿秒设施的建设,另一位诺奖得主匈牙利科学家费伦茨·克劳斯没有直接参与大型装置的建设,他目前在推进阿秒脉冲的应用。

2013年,中国科学院物理研究所魏志义团队产生了国内的第一个阿秒脉冲,之后国防科技大学、中国科学院西安光学精密机械研究所、华中科技大学等单位也开始产生阿秒脉冲。近年来,随着国家及相关研究机构对阿秒科学的重视,相信我国科研工作者不但能够产生和国际先进水平相比拟的阿秒脉冲,而且能将其应用于阿秒化学、超快电子器件、超灵敏医学检测等领域。

据中国科学院官方科普平台

阿秒激光是一种怎样的激光?

按波长分类,激光可以分为紫外激光、可见光激光、红外激光等。阿秒激光通常是在紫外至软X射线波段的激光,换句话说,它的波长比一般的激光要短。

按输出模式分类,激光可分为连续波激光和脉冲激光。阿秒激光属于脉冲激光,具有极短的脉冲持续时间。至于什么是连续波,什么是脉冲,我们可用手电筒来进行比喻。长按开关让手电一直发光就是持续波,而不停按下开关让手电筒在亮和暗间交替变化就是脉冲。说白了,阿秒激光并不连续,在亮暗之间连续变化,只是这种变化的频率快得惊人,它的闪烁可以在阿秒量级实现。

按功率分类,可以将激光分为低功率激光、中功率激光和高功率激光。阿秒激光因其极短的脉冲时间而能具有高峰值功率。

按应用领域分类,有工业激光、医疗激光、科研激光等。阿秒激光主要应用于科学研究,特别是在物理和化学的研究中,用以探究微观世界的快速动态过程。

按激光介质分类,可分为气体激光、固体激光、液体激光和半导体激光。阿秒激光的产生通常依赖于气体激光介质,并利用非线性光学效应产生高次谐波。

总的来说,阿秒激光是一种特殊的短波脉冲激光,脉冲持续时间极短,通常在阿秒量级,因而能用于观测和控制原子、分子和固体中电子的超快动态过程。

如何才能产生阿秒激光?

阿秒激光是非常前沿的技术,与一般的激光相比,它的产生条件相当苛刻。

阿秒激光的产生过程主要依赖于高次谐波生成技术。首先,一束高强度的飞秒(10至15秒)激光脉冲被聚焦到气体靶材料上(飞秒激光其实和阿秒激光类似,都具有脉冲持续时间短且峰值功率高的特点)。在强激光场的作用下,气体原子的电子会被拉离原子核,短暂进入自由电子状态。随着激光场的振荡,这些电子会在一段时间后返回并重新与原子核结合,形成了新的高能量状态。

在此过程中,电子会以极高的速度运动,当它们与原子核重新结合时,会释放出其携带的额外能量,以高次谐波的形式发射出高能光子。

这些新产生的高能光子的频率是原始激光频率的整数倍,形成了高次谐波(谐波其实就是原始频率整数倍的含义)。为了得到阿秒激光,需要再对这些高次谐波进行滤波和聚焦,选取特定的高次谐波,然后将它们集中到一点。如果需要,还可以通过脉冲压缩技术来进一步减短脉冲的持续时间,从而得到阿秒级别的超短脉冲。

由此可见,阿秒激光的产生是

一个精密而又复杂的过程,需要高度的技术水平和设备支持。我们尝试用一个生活中的场景来类比阿秒激光产生的主要步骤。

高强度飞秒激光脉冲:想象你有一个超级强力的投石机,它能够在瞬间把石头以极高的速度投向湖面。高强度飞秒激光脉冲就扮演了投石机的角色。

气体靶材:想象一处原本平静的湖面,它扮演的就是气体靶材的角色,其中的水滴代表着无数的的气体原子。将石头射向湖面的过程,就好比利用高强度飞秒激光来轰击气体靶材。

电子的运动和再结合(物理学上叫跃迁):当飞秒激光脉冲轰击气体靶材中的气体原子,使得不少原子的外层电子暂时被激发至脱离原子核的状态(形成等离子体)。当体系能量降低(既然是脉冲就有中断的时候,此时能量就会降低),这些外层电子重新回归原子核附近时,它们就会向外释放高能光子。

我们用比喻来形容上述过程:当石头(飞秒激光脉冲)砸入湖面(气体靶材)时,它会把水滴(气体原子)打散,水珠(外层电子)被弹出,然后在一段时间后又回落到湖面(气体原子核)。

阿秒激光为何能看清瞬间发生的物理化学过程?

很多的物理化学过程,持续时间都在阿秒级别,换句话说,这些现象发生在一瞬间,以至于我们曾经无法清晰地观测这些过程。而阿秒激光的出现,让我们拥有了和这些瞬间发生的事物同样快的观察和研究手段。

在原子和分子内部,电子的运动和状态转换可以在阿秒时间尺度上发生。例如,电子的跃迁、电子的电离和再结合过程等。类似的例子还有:化学反应的某些初期阶段,如电子转移;光与物质相互作用,例如光诱导的电子激发、电离和其他非线性光学效应;在量子系统中,相干和去相干过程可能会

在阿秒时间尺度上进行,影响系统的量子态演化。

我们以光诱导的电子激发过程为例,看看研究人员是如何利用阿秒激光来观察这种转瞬即逝的电子动态过程的。

在阿秒激光研究氢分子的光电离过程的实验中,一束阿秒激光脉冲射向氢分子,使得其中一个电子摆脱原子核的束缚,形成光电子。通过测量这个光电子的动能和发射角度,研究人员可以了解光电离过程的微观机制,例如电子是如何从分子中被释放出来的,以及电子和剩下的离子核之间的相互作用等。该实验不仅揭示了光诱

高次谐波产生:每当水珠回落到湖面时,它会激起一圈圈的波纹,这些波纹就像是阿秒激光的高次谐波,波纹的大小和频率都比原来的波纹(原始飞秒激光脉冲)要高。在高次谐波生成的过程中,我们用一束非常强的激光(就像连续扔石头的动作)照射在气体上(就像湖面)。这束强激光会使气体中的电子(就像波纹)被推离原子核,然后又被拉回来。

每次电子被拉回原子核时,它都会发出一束新的激光,这束新激光的颜色(或者说频率)比原来的激光更高(就像更大或更复杂的波纹图案)。

滤波和聚焦:当我们把所有这些新产生的激光束合在一起,就得到了一束包含很多不同颜色(频率或者说波长)的激光,而其中的一些激光就是阿秒激光。如果你只想看到特定大小和频率的波纹,你可以用一个特殊的筛子来挑选出你想要的波纹,并用一个放大镜来把这些波纹聚焦到一个特定的区域,这个过程就是滤波和聚焦。

脉冲压缩:如果你想让波纹传播得更快更短,你可以通过一个特殊的装置来加速波纹的传播,使得每个波纹的传播时间变得更短。

导电子动态过程的微观机制,也为探究其他分子系统和更复杂的光-物质相互作用过程提供了重要的实验技术和理论基础。

此外,阿秒激光也可用于研究快速化学反应的过程,例如观测和控制化学反应的键断裂和键形成过程,从而为理解和控制化学反应提供了新的可能,也为开发新材料和新技术提供了重要的信息。

总之,阿秒激光技术为我们打开了一个全新的窗口,使我们能够在前所未有的时间尺度上研究和控制物质的微观过程,进而揭示和理解物质的基本性质和行为规律。

据科普中国