

2023 诺贝尔物理学奖解读

胡茜婕 刘阳阳 张金伟

(华中科技大学 430074)

1. 前言

2023年10月3日,众人瞩目的诺贝尔物理学奖颁发给了“阿秒科学”领域的三位科学家 Anne L'Huillier、Pierre Agostini 和 Ferenc Krausz(图 1),以表彰他们在阿秒脉冲产生以及研究物质中电子动力学的实验工作^[1]。他们的杰出成果将时间分辨率推进到了阿秒时代,也为科学家打开了揭秘原子和分子内部电子世界的大门。

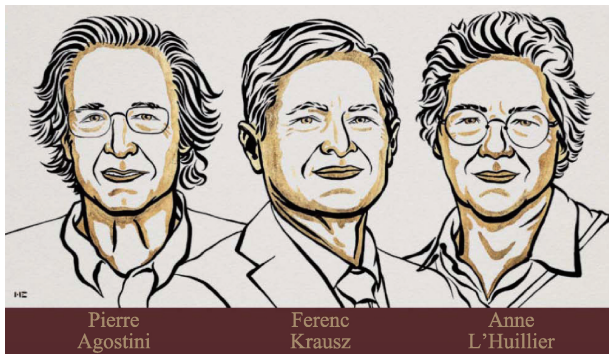


图1 2023年诺贝尔物理学奖得主
(图片来源:诺贝尔奖委员会官网)

三位获奖人中,Anne L'Huillier于1958年出生于法国,现于瑞典隆德大学任原子物理学教授,也是第五位获得诺贝尔物理学奖的女性得主。1987年,Anne L'Huillier发现将超快激光注入到稀有气体中可以产生高次谐波^[2,3],是最早通过实验证明高次谐波产生的人之一。该发现为阿秒光脉冲的产生奠定了基础。在阿秒领域,不少同行将其称为“阿秒之母”。曾经与她一同研究高次谐波现象的同仁们大多数已经选择了其他领域,而她依然坚守在这个研究方向上。

Pierre Agostini, 1941年出生于突尼斯,是法国

物理学家,现为美国俄亥俄州立大学名誉教授,致力于高次谐波产生、飞秒激光产生、激光与物质相互作用、多光子过程等研究。2001年,Pierre Agostini团队利用所发明的利用双光子干涉的阿秒拍频重构(Reconstruction of Attosecond Beating by Interference of Two-photon Transitions, RABBITT)技术,首次在实验上实现了对阿秒脉冲的测量,得到了脉冲宽度250阿秒的阿秒脉冲串^[4]。早在20世纪七八十年代,Pierre Agostini就着手进行关于强光原子电离和阿秒激光的研究,毫无疑问,他是阿秒激光研究的先驱之一。

Ferenc Krausz,生于1962年,是匈牙利莫尔人,现任马克斯普朗克量子光学研究所(Max Planck Institute of Quantum Optics, MPQ)所长,同时担任慕尼黑大学实验物理学—激光物理学系主任。同样在2001年,Ferenc Krausz团队首次在实验上产生并测量到脉冲宽度为650阿秒的孤立阿秒脉冲^[5]。不仅如此,Ferenc Krausz同样也是利用阿秒激光研究电子动力学过程的先驱。

阿秒脉冲的出现是激光技术及超快科学研究领域具有里程碑意义的重要成果,随着阿秒世界大门的打开,越来越多的学者加入到阿秒激光产生和应用的研究中。阿秒脉冲成为人们通过电子动力学认识物质微观世界并发现新现象、揭示新规律的重要手段,在光物理、凝聚态物理、化学、生物、材料科学、信息及能源等研究领域表现出广泛的应用前景,为此本文在简述超快过程及阿秒激光原理的基础上,综述了激光发展的有关历史及其产生的系列诺贝尔奖成果,特别是与阿秒激光相关的内容和故事,并重点介绍了女性科学家在诺贝尔物理奖中的

突出贡献,展望了超快科学与技术的未来发展。

2. 阿秒激光为什么这么重要?

首先我们要了解阿秒是什么?阿秒(Attosecond, as)是一个时间单位, $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$,也就是将1秒均匀地划分为1000000000000000000份。1阿秒之于1秒,就相当于1秒之于317亿年,这比宇宙的年龄还要长。光在1秒的时间内可以行进30万公里,然而在1阿秒的时间内只能行进0.3纳米。人的头发丝一般是0.02~0.012毫米,光在1阿秒内行进的距离约为头发丝的一亿分之一。这意味着阿秒激光的诞生,极大地提升了人们对于微观世界的探测能力。

为了观测一个运动过程,所使用工具的时间分辨率必须远高于运动本身的时间尺度。脉冲激光领域有一个经典的例子,即观测“赛马奔跑”,如图2所示,生动地阐释了时间分辨率对于观察运动物体的重要性。在高速照相机的应用下,通过将曝光时间限制在极短的时间范围内,使观察者能够捕捉到马在高速奔跑时的静态画面。这例子揭示了一个普遍规律,即物体运动速度越快,为了清晰捕捉其运动状态,所需时间分辨率就必须越高。对于微观

世界,构成物质的分子、原子、电子等微观粒子无时无刻不处于快速运动之中,为了研究这些微观粒子的状态和行为,特别是如化学反应和原子尺度下的电子动力学过程,就需要极高的乃至阿秒量级的时间分辨率。

在人类追求高时间分辨率的征程中,激光是最前沿的手段,在相当长的一段时间里,实验室所能产生的最短脉冲纪录为6飞秒^[6],并被认为是激光脉宽的极限。尽管飞秒激光在观测分子振动、分子旋转以及氢键动力学等过程方面表现出色,但对于价电子、导带电子等极快速的阿秒量级过程,飞秒激光却无能为力。但是如果我们有了阿秒探测技术,相当于我们有能力给电子的运动“照相”,观察电子运动的规律和特性。通过阿秒技术我们能够真正更加深入地研究和理解微观世界中发生的极短时间尺度的物理过程。例如,通过阿秒瞬态吸收谱^[7-11],可以实时追踪多个电子态的超快动力学演化过程。

阿秒脉冲是目前人类能产生并操控的最短时间尺度,为人类提供了探索原子和分子内部电子世界的新工具。阿秒激光的产生标志着极短时间尺度的新时代,在光学和原子物理学领域引起了革命

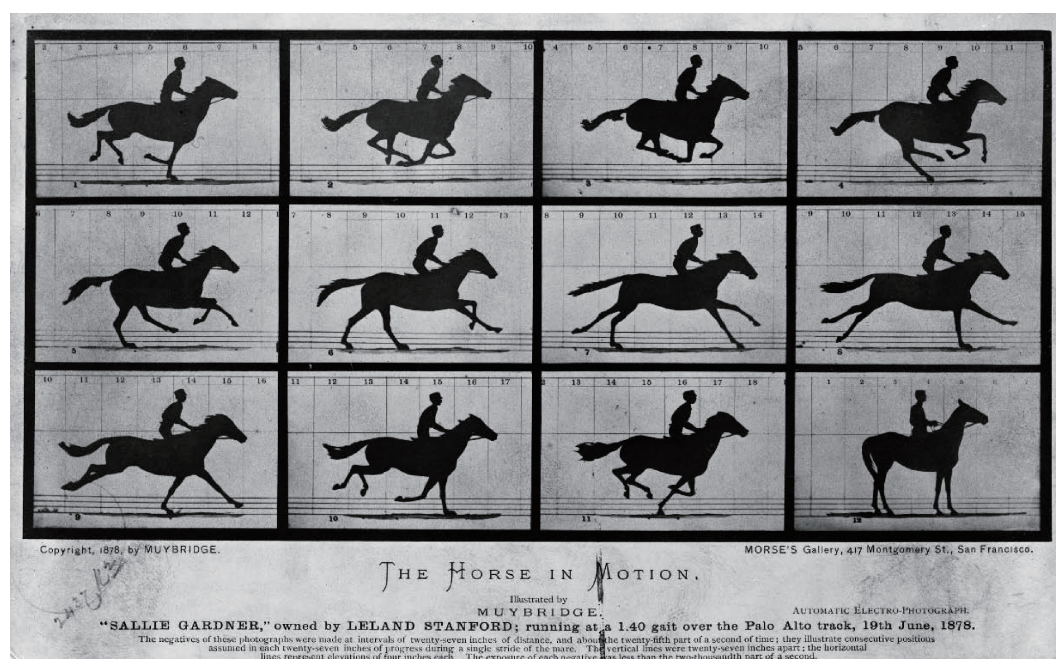


图2 《运动中的马》(1878年由Eadweard Muybridge拍摄)

性的变革。通过使用阿秒激光,研究者能够实时捕捉和操纵微观现象,为我们对物质行为的理解提供了全新的维度。此外,阿秒激光的应用还涉及到超高分辨率成像、精密光谱学、生物医学成像等领域,为科学研究和技术应用带来了巨大潜力,推动了前沿科学和技术的新发展。阿秒激光的出现对于深入理解自然界的微观过程,推动科学和技术的创新至关重要,能获2023年的诺贝尔物理学奖,可以说是实至名归。

3. 阿秒激光是怎么产生的?

不同于飞秒、皮秒等激光脉冲,阿秒脉冲不能

通过常规的激光锁模技术产生。根据已有的理论,通过高次谐波、飞秒激光相干合成、自由电子激光等方式,可以实现阿秒光脉冲。目前人们在实验室中产生阿秒激光脉冲并且取得广泛应用的主要方法是气体高次谐波方法,实验装置图如图3所示。阿秒激光技术经过二十多年的发展,基于少周期、载波包络相位稳定的飞秒激光脉冲作为驱动源的气体高次谐波方法,结合振幅选通、偏振选通、电离选通、阿秒灯塔效应、时间选通、时空选通、偏振电离选通等选通技术,已在多个实验室实现了孤立阿秒脉冲的产生。阿秒激光产生的过程可以简述为高强度的驱动激光与惰性气体、固体或等离子体相

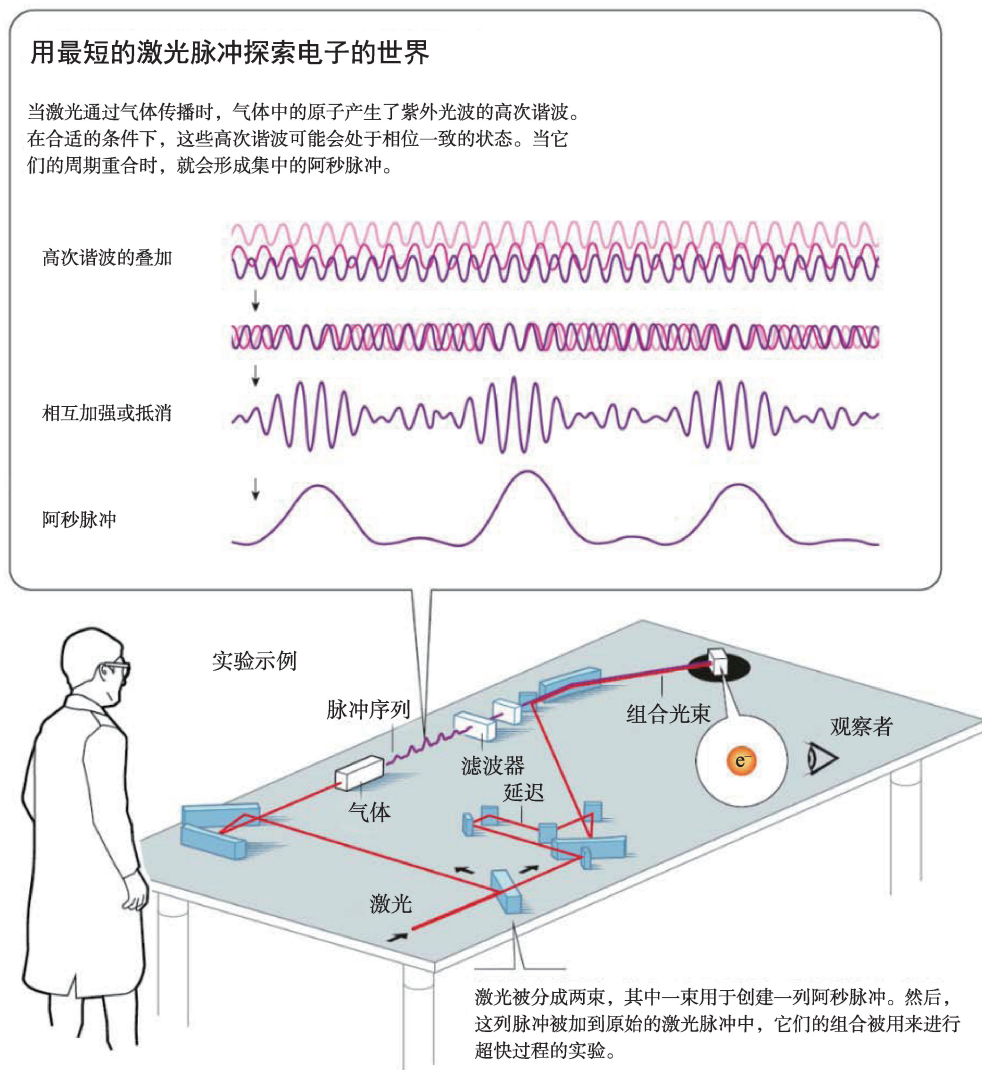


图3 阿秒实验装置示意图^[12]

相互作用的强场非线性过程。

1993年,针对高次谐波^[13,14]在内的一系列由多光子电离产生的现象,加拿大物理学家Paul Corkum提出了著名的经典三步模型,清晰地解释了其中的

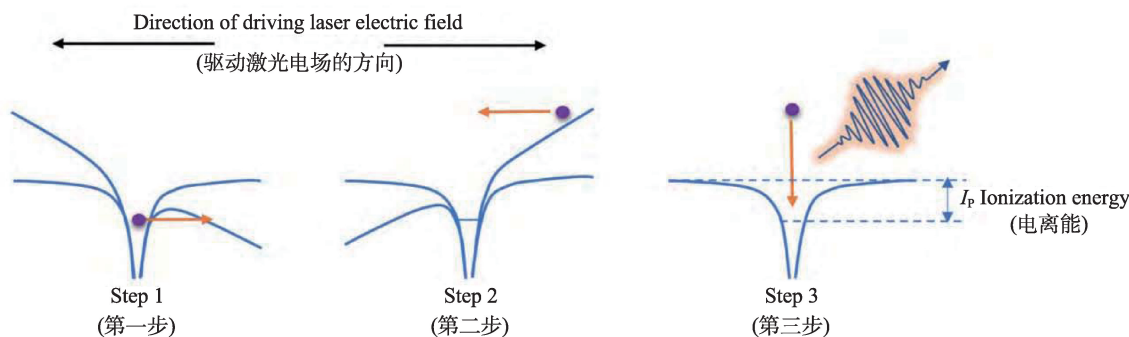


图4 三步模型^[16]

第2步:电子在激光场中漂移(Drift in the Laser Field):电离产生的自由电子在激光场中受到电场力的作用,开始在电场中漂移。由于激光场的周期性变化,电子在光电场中运动,并在这个过程中积累能量。

第3步:高次谐波产生(High Harmonic Generation):在自由电子漂移的过程中,一部分电子有可能与原子核再次相遇并且重新结合到原子或分子中,同时释放出高次谐波。

这个三步模型提供了一种清晰的理论框架,有助于理解高次谐波发生的基本机制,并在实验中得到了验证。这个模型的提出对于高次谐波产生和阿秒技术的发展有重要的指导意义。

4. 本次诺贝尔物理学奖的遗珠

对于本次诺贝尔物理学奖,诺奖评选委员会(瑞典皇家科学院)给出的官方文件中的颁奖理由是“for experimental methods that generate attosecond pulses of light for the study of electron dynamics in matter.”因此本次诺贝尔物理学奖主要看重的是实验以及应用而非理论。阿秒激光的理论科学家们非常遗憾地没有获得本次的诺贝尔物理学奖。

在20世纪末,全球许多科学家积极投入对高次

原理与过程^[15]。三步模型如图4所示,分别是:

第1步:强场电离(Strong-Field Ionization):当激光场的强度足够大时,激光场使得原子或分子中的电子从束缚态中电离出来,形成自由电子。

谐波产生的理论和实验研究。早在1987年,苏联科学院约费物理技术研究所的M. Yu. Kuchiev提出了一种原子外层电子在激光场中电离后的二次散射的两步模型。这模型旨在解释在阈上电离过程中产生的光电子为何能够具有如此高的能量。根据这个理论,电子首先被激光场电离,然后在电场的作用下经历二次散射,获得显著的额外能量。这一模型为理解光电效应中电子动力学的复杂性提供了一种有力的框架,为当时激光与原子相互作用的理论研究贡献了重要的见解,为理论物理学家深入研究激光与物质相互作用的基本原理奠定了基础。

1993年,美国劳伦斯利弗莫尔和布鲁克海文国家实验室的K. J. Schafer、B. Yang、L. I. DiMauro以及K. C. Kulander提出了一个关键性的多次散射的两步模型,用以解释激光场中的电子行为。该模型也是两个步骤,首先是初始电离,即电子被激光场解离出原子。接着,在激光场的影响下,电子经历多次加速,这使得它能够在激光周期内多次穿越电场,并获得额外能量。由于激光场是一个交变电场,电场方向的变化为电子提供了返回被电离的原子(或离子)的机会。这个模型的提出解释了阈上电离和高次谐波现象,为理解在强激光场中的复杂电子动力学行为奠定了基础。

同年稍晚,加拿大国家研究委员会的Paul Corkum提出了强场电离的半经典三步模型,为解释强激光场中电子行为提供了更加完善的理论框架。模型的头两步仍然是电离和电子在激光场中的加速。增加的第三步涵盖了三种紧密相关的现象。首先是双电子电离,即第一个电子回到离子附近时撞出第二个电子。其次是弹性散射,解释了阈上电离现象,电离出的电子未与离子再次发生能量交换。最后便是电子与离子复合成原子,电子携带的能量转化为光子释放,形成了高次谐波。当使用飞秒激光轰击惰性气体时,整个过程在飞秒激光的半个周期内发生一次,导致大量原子辐射出的高次谐波光子形成了一个亚飞秒或阿秒时间尺度的光脉冲。Corkum的三步模型为解释强激光场中的非线性光学效应和高次谐波产生提供了直观清晰的物理图象,为阿秒光学奠定了理论基础。

凭借“三步模型”,Paul Corkum与Anne L'Huillier和Ferenc Krausz共同获得了2022年的沃尔夫物理学奖。沃尔夫物理学奖被誉为“诺奖风向标”,在今年诺奖公布之前,不少人预测Corkum将是得主之一。但是今年的诺奖更关注实验方面,致使Paul Corkum成为本次诺奖的最大遗珠。

5. 激光的发展历史

激光产生的理论最早由爱因斯坦在1917年首次提出^[17]。其英文laser一词来自于受激发射光放大“Light amplification by stimulated emission of radiation”的缩写。受激发射是指原子处于激发态时,在外部辐射的作用下发射光子的现象。爱因斯坦指出由于受激发射的过程,光可以在介质中传播并且得到放大。这就意味着,如果有足够多的粒子处于激发态,并且受到外部辐射的作用,就能够在这个介质中形成一个光子群,其振幅和能量比输入的外部辐射光更大,从而为后来激光技术的发展提供了理论基础。

1960年,美国科学家Maiman成功研制世界上第一台红宝石激光器^[18],不久IBM实验室的Sorokin

和Stevenson利用CaF₂中的三价铈制成了第一台四能级固体激光器,同年12月,伊朗裔美国科学家A. Javan等人成功研制出了世界上第一台气体激光器氩氦激光器。此后不久,我国中国科学院长春光学精密机械研究所也成功研制出中国的第一台激光器,国际上激光技术的研究发展也开始进入了快车道。刚开始的时候,激光就像水龙头一样,水流不断,这就是所谓的连续波激光。后来,科学家们发现,把这个水流弄成一小滴一小滴的,这就是脉冲激光了,如将水龙头变成水枪,在短时间内瞬间发出的一小滴水,这就是超快激光了,当这个瞬间仅为飞秒或阿秒尺度,那就是飞秒或阿秒激光了。随着激光技术的不断发展和应用需求的不断扩展,激光脉冲也是一部宽度不断变窄的历史。第一台脉冲激光器的脉宽在微秒(μs)量级。1962年,F. J. McClung和R. W. Hellwarth研发了激光器调Q技术,使激光脉冲宽度进一步缩至纳秒(ns)级别,推动了脉冲激光测距、激光雷达、高速全息照相等应用的发展。但是,调Q激光器因其原理的限制,无法再输出更短的激光脉冲宽度。这时锁模技术脱颖而出,通过锁模技术,科学家们成功将脉冲宽度从皮秒推进至飞秒(fs)量级。然而,人们的追求并未止步,他们渴望着更短的激光脉冲,以探索更加深入的微观世界。随着本世纪的曙光,人类终于迎来了阿秒(as)脉冲的时代。

最短孤立阿秒脉冲的发展如图5所示^[19]。2001年,Pierre Agostini团队首次在实验上产生了脉冲宽度仅为250as的阿秒脉冲串^[4]。同年,Ferenc Krausz团队首次在实验上产生了单个阿秒脉冲,其脉冲宽度为650 as^[5]。至此实验终于突破了飞秒的瓶颈,把超短激光脉冲和超快光学研究推进到了阿秒量级,开启了阿秒光学的新纪元。2004年,Krausz组利用高强度的少周期激光脉冲(脉宽 $\tau=5\text{fs}$,波长 $\lambda_L=750\text{nm}$,周期 $T_0=2.5\text{fs}$)电离氖原子产生的高次谐波结合振幅选通技术,产生了孤立阿秒脉冲。经过阿秒条纹相机测量,其脉冲脉宽为250 as^[20]。2006年意大利M. Nisoli团队成功将脉宽进一步缩短到了130as^[21]。

2008年, Krausz团队进一步获得了80 as的孤立脉冲^[22]。2012年美国常增虎团队利用双光学选通技术获得了67 as的孤立脉冲^[23]。2017年常增虎团队使用脉宽12 fs、中心波长1.7 μm 的红外激光作驱动光源获得了53 as的孤立脉冲^[24],刷新了其团队之前67 as的世界记录。同年瑞士的H. J. Wörner团队使用与常增虎团队类似的驱动光源,获得了脉宽仅43 as的激光脉冲^[25],成果刷新了最短脉冲宽度的世界记录并保持至今。与此同时,我国阿秒研究也在奋力追赶国际最高水平。2013年,我国中国科学院物理所魏志义研究员的课题组使用3.8 fs的钛宝石飞秒驱动激光并结合振幅选通技术,首次在国内获得了160 as的孤立脉冲^[26]。

超快激光技术的发展和脉冲宽度的不断刷新极大地改变了我们认识微观世界动力学的能力,为

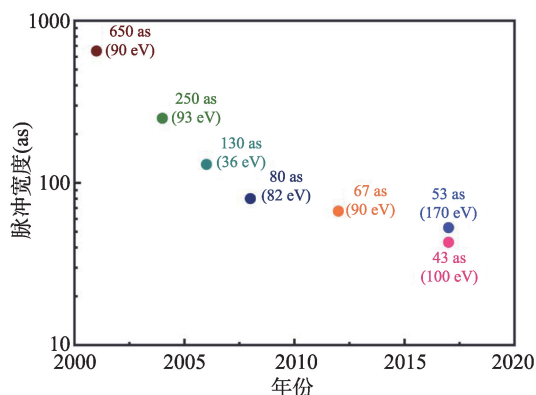


图5 最短孤立阿秒脉冲的发展历史^[19]
(括号中参数为中心光子能量)

超快科学的研究提供了前所未有的手段。在这些进展之上发展起来的先进激光器不仅在基础研究领域开拓了许多创新的应用,也在医疗、工业、通信和娱乐等领域掀起了革命,这束独特的光芒,如同一把钥匙,打开了通往未来科技世界的大门,塑造了一个全新的世界。

6. 激光与诺贝尔奖的羁绊

激光的出现极大地促进了基础物理和现代科技的发展,并导致了多项诺贝尔奖的成果。最早的例子是1964年的诺贝尔物理学奖,一半授予美国马萨诸塞州坎布里奇的麻省理工学院的Charles H. Townes(1915~2015),另一半授予苏联莫斯科苏联科学院列别捷夫物理研究所的Nicolay G. Basov(1922~2001)和Aleksandr M. Prokhorov(1916~2002)(图6),以表彰他们在量子电子学领域取得的基础研究成果,这些工作促进了基于微波激射器的激光器的诞生。激光的概念实际上由Charles H. Townes于1951年首次提出,并在1954年成功研制出第一台微波激射器,被称为“MASER”(微波激射放大器)。这项工作对后来激光的发展起到了重要的启示作用。Nicolay G. Basov和Alexander M. Prokhorov也独立于Townes进行了类似的工作。他们在1954年首次提出激光的理论,并在次年成功制造了第一台光学激射器,为激光技术的发展提供了另一种路



Photo from the Nobel Foundation archive.
Charles Hard Townes



Photo from the Nobel Foundation archive.
Nicolay Gennadiyevich Basov



Photo from the Nobel Foundation archive.
Aleksandr Mikhailovich Prokhorov

图6 1964年诺贝尔物理学奖得主^[27]

径。令人惊讶的是他俩联名发表有关微波激光器的开创性论文时,Nicolay G.Basov 还未取得博士学位。

1997年的诺贝尔物理学奖颁发给了三位物理学家,分别是法国物理学家 Claude Cohen-Tannoudji、美国华裔物理学家朱棣文 Steven Chu 和美国物理

学家 William D. Phillips(图 7)。他们因为在激光冷却和捕获原子方面的开创性实验而共同分享这一荣誉。通过他们的工作,激光冷却技术成为实验物理学和冷原子物理学中的一项重要工具,为研究极低温条件下原子和分子的行为打开了新的可能性,并进一步促进了量子信息和量子计算等研究的发展。



Photo from the Nobel Foundation archive.
Steven Chu



Photo from the Nobel Foundation archive.
Claude Cohen-Tannoudji



Photo from the Nobel Foundation archive.
William D. Phillips

图7 1997年诺贝尔物理学奖得主^[28]

1999年的诺贝尔化学奖授予埃及化学家 Ahmed H. Zewail(图 8),以表彰他利用飞秒激光对化学反应过渡态的研究。自 20 世纪 70 年代后期开始,Zewail 就致力于利用超快激光技术进行化学反应研究。在 20 世纪 80 年代,他进行了一系列具有开创性意义的工作,并且创立了“飞秒化学

(femtochemistry)”这门全新的化学物理学科。Zewail 的工作推动了超快激光技术在化学和物理研究中的广泛应用,使得超快激光技术在化学和物理研究中成为一种强大的工具。

2005年的诺贝尔物理学奖再一次颁给了激光领域,其一半授予美国科学家 Roy J. Glauber 以表彰他对光学相干性量子理论的贡献,另一半共同授予美国科学家 John L. Hall 和德国科学家 Theodor W. Hänsch,以表彰他们对包括光频梳技术在内的激光精密光谱学发展所做出的贡献(图 9)。Glauber 的光学相干性量子理论为量子光学的发展提供了坚实的理论基础,并且为解释和理解光的相干性提供了重要的理论工具。Hall 与 Hänsch 一同开发了光学频率梳,革命性地提高了光学频率的测量精度,推动了光学频率梳技术的发展,为新的科学和技术领域的探索打开了新的方向。



Photo from the Nobel Foundation archive.
Ahmed H. Zewail

图8 1999年诺贝尔化学奖得主^[29]

2018年诺贝尔物理学奖授予“激光物理学领域的突破性发明”,其中一半授予美国科学家 Arthur



Photo: J. Reed
Roy J. Glauber

Photo: Sears. P. Studio
John L. Hall

Photo: F. M. Schmid
Theodor W. Hänsch

图9 2005年诺贝尔物理学奖得主^[30]

Ashkin以表彰光镊及其在生物系统中的应用,另一半共同授予法国科学家 Gérard Mourou和加拿大科学家 Donna Strickland,以表彰他们发明的产生高强度超短光脉冲的方法——啁啾脉冲放大技术(Chirped Pulse Amplification, CPA)(图10)。Arthur Ashkin的光镊为生物系统研究开辟了全新的篇章。为了最大限度地减少对生物样本的损伤,他将激光定位在红外波段。通过光镊,成功实现了对病毒、细菌和活细胞的囚禁和操纵,其在细胞内的操作不仅不破坏细胞膜,还能深入细胞内部,精确测量细胞器微观运输的驱动力。这项技术为生命科学提供了一项革命性的工具,广泛应用于对生物物质进行各种精密操控,使得科学家能够深入研究生物体内部许多微观过程,特别是各种微小机器在生物体内的物理过程。这一创新不仅推动了技术的发

展,也为深入对生命的理解和探索未知的生物学奥秘铺平了道路。Gérard Mourou和Donna Strickland的CPA技术革命性地改变了放大超短脉冲激光的方法,其通过先展宽激光脉冲,放大后再将其压缩的思想,大大提升了人们所能获得的激光强度,并且推动了材料科学、粒子加速器、高精度光谱学等多个领域的研究发展。

时间的齿轮来到2023年,诺贝尔物理学奖再一次颁发给激光领域——阿秒激光技术。激光,特别是与超快激光相关的成果多次荣获诺贝尔奖,凸显了激光在科学和技术发展中不可替代的重要作用 and 位置。如今激光技术的应用成果已涵盖了医学、通信、材料科学等领域,为社会带来了革命性的变革和影响。在人们感叹激光技术不断演进的同时,也由衷地对这一领域做出杰出科学与技术成就的



© Arthur Ashkin
Arthur Ashkin

© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
Gérard Mourou

© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud
Donna Strickland

图10 2018年诺贝尔物理学奖得主^[31]

科学家们深感敬佩,他们创造的奇迹推动着人类文明前进的脚步。诺贝尔奖不仅是对重大科学与技术突破的褒奖,也是对无数激光工作者不懈努力的激励。

7. 物理学界的“花木兰”

截至2023年,国际上共有5位女科学家获得了诺贝尔物理学奖,包括本次因阿秒激光获奖的Anne L'Huillier(图11),其他四位分别是Marie Curie、Maria Goeppert Mayer、Donna Strickland和Andrea Ghez。

当我们提起诺贝尔物理学奖时,脑海里首先想到的是改变世界的前沿科技,是万人敬仰的至高荣誉,还是那笔丰厚的高额奖金?对于诺贝尔本人而言,正如他遗嘱中说的那样,这是用于表彰那些在物理学、化学、和平、生理学或医学以及文学上“对人类作出最大贡献”的人士。而对于诺贝尔奖得主本人来说,这又意味着什么呢?2023年10月3日,正在瑞典隆德大学上课的Anne L'Huillier教授接到了一个电话,几分钟后她挂掉电话,淡定自若地继续讲课。但教室里的学生们能感受到课堂上洋溢着快乐的气息。此时门外已经围拢了一层又一层的老师和学生,他们期待着见到这位2023年诺贝尔

物理学奖得主,同时也是第五位获得诺贝尔物理学奖的女性科学工作者。

就像她在获奖后的采访中所说的那样,满心欣喜又心怀感激。自己的科研成果得到了充分的认可,所耕耘的领域也得到了进一步关注。而这一切离不开三十年来坚持不懈地探索,离不开对激光深厚的热爱。科学的魅力就在于它没有边界,永远都有崭新的知识与技术等待着我们去学习和研究。

正是这永不满足的好奇心和不屈不挠的意志力,助力着每一位杰出的科研工作者在尖端科技的高峰上攀登。1903年,居里夫人Marie Curie(图12)因为对“辐射现象”的研究而成为了第一位获得诺贝尔奖的女性,她和她的丈夫在极其困难的条件下,对沥青铀矿进行分离和研究,终于发现了两种放射性元素钋(Po)和镭(Ra)。就连爱因斯坦在评价居里夫人时都这么说过:“她一生中最伟大的功绩——证明放射性元素的存在并把它们分离出来——之所以能够取得,不仅仅是靠大胆的直觉,而且也靠着难以想象的和极端困难的情况下工作的热忱和顽强”。而这也激励着无数的后进者。

也正是基于对物理学的热爱,让Maria Goeppert Mayer(图13)冲破层层阻碍,最终提出了新的原子核结构,于1963年成为了第二位获得诺贝尔物理学

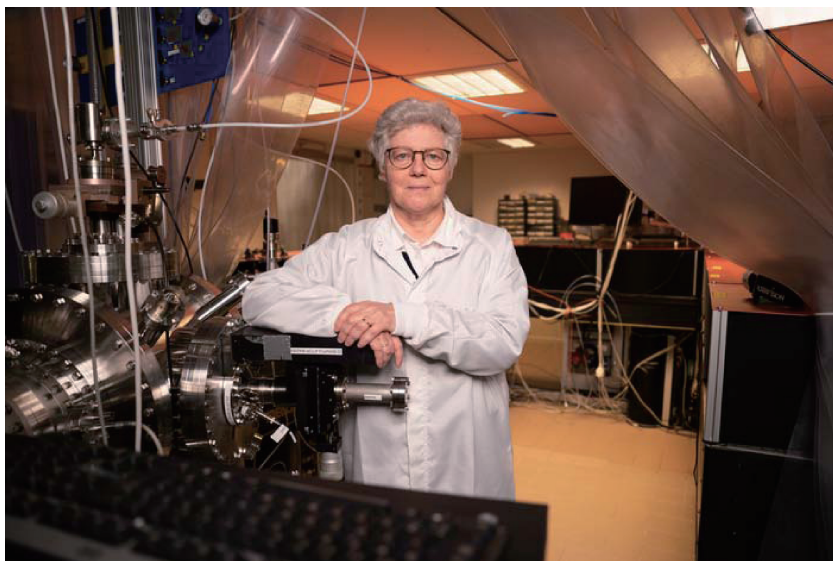


图11 Anne L'Huillier的生活照^[32]

图12 Marie Curie的生活照^[33]图14 Donna Strickland的生活照^[31]图13 Maria Goeppert Mayer的生活照^[34]图15 Andrea Ghez的生活照^[35]

奖的女性。在她职业生涯的大部分时间里,她只是为了物理学的乐趣而工作,没有薪水,没有地位,也没有终身职位,在她成为正教授时,她已经58岁了,但她所提出的核壳模型,反映了核子分布在不同的能级上,这一模型对核物理学的贡献举世瞩目。

第三位女性诺贝尔物理学奖得主Donna Strickland(图14)也是这样,凭借着对激光领域的热情和非常努力的工作,成功找到了一种可以产生高强度激光脉冲的方法,而这种技术一啁啾脉冲放大技术,首先通过展宽激光脉冲来降低峰值功率,放大后再进行压缩,从而大幅提高放大脉冲的能量。这一技术大大拓宽了激光的应用领域,于2018年获得诺贝尔物理学奖。

Andrea Ghez(图15)凭借着自己的努力工作,开

发并改进了研究恒星运动的技术,通过对银河系中部人马座周围区域的恒星观测发现了一个超大质量黑洞。这一伟大的科学成果也让她于2020年成为了第四位获得诺贝尔物理学奖的女性科学家。

在科研的高峰上,有许多具有里程碑意义的名字,他们通过自己的努力在科学史上留下了浓墨重彩的一笔。诺贝尔奖的颁发不仅仅是奖励这些成果本身,同时也是表彰她们孜孜不倦,数十年如一日献身科学的精神。

8. 结语

阿秒激光的研究成果在科学界产生了深远的影响,引起了广泛的关注和重视,诺贝尔奖就是对其最好的嘉奖。展望未来,科学家们将承承诺贝尔

精神,继续在超快光学和阿秒激光领域不断创新。随着阿秒激光技术的不断演进,将为基础科学研究和技术创新开辟崭新的方向,激光脉冲宽度也将继续朝着越来越短的方向发展,仄秒(zs, 10^{-21} s)激光或将成为新的研究前沿。期待着在不久的将来,能够见证“仄秒激光”因其卓越贡献而获得诺贝尔物理学奖的辉煌时刻。

参考文献

- [1] Agostini, P., Krausz, F. & L' Huillier, A. The Nobel Prize in Physics 2023.
- [2] Li, X. F., L' Huillier, A., Ferray, M., Lompré, L. A. & Mainfray, G. Multiple-harmonic generation in rare gases at high laser intensity. *Phys. Rev. A* 39, 5751 - 5761 (1989).
- [3] Ferray, M. *et al.* Multiple-harmonic conversion of 1064 nm radiation in rare gases. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 21, L31 (1988).
- [4] Paul, P. M. *et al.* Observation of a Train of Attosecond Pulses from High Harmonic Generation. *Science* 292, 1689 - 1692 (2001).
- [5] Hentschel, M. *et al.* Attosecond metrology. *Nature* 414, 509-513 (2001).
- [6] Fork, R. L., Cruz, C. H. B., Becker, P. C. & Shank, C. V. Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation. *Opt. Lett., OL* 12, 483-485 (1987).
- [7] Goulielmakis, E. *et al.* Real-time observation of valence electron motion. *Nature* 466, 739-743 (2010).
- [8] Holler, M., Schapper, F., Gallmann, L. & Keller, U. Attosecond Electron Wave-Packet Interference Observed by Transient Absorption. *Phys. Rev. Lett.* 106, 123601 (2011).
- [9] Chini, M. *et al.* Subcycle ac Stark Shift of Helium Excited States Probed with Isolated Attosecond Pulses. *Phys. Rev. Lett.* 109, 073601 (2012).
- [10] Ott, C. *et al.* Lorentz meets Fano in spectral line shapes: a universal phase and its laser control. *Science* 340, 716-720 (2013).
- [11] Wang, H. *et al.* Attosecond Time-Resolved Autoionization of Argon. *Phys. Rev. Lett.* 105, 143002 (2010).
- [12] 中国科学院物理所. 2023年诺贝尔物理学奖官方解读: 脉冲光中的电子. 回答 <https://zhuanlan.zhihu.com/p/659463091> (2023).
- [13] Krause, J. L., Schafer, K. J. & Kulander, K. C. High-order harmonic generation from atoms and ions in the high intensity regime. *Phys. Rev. Lett.* 68, 3535-3538 (1992).
- [14] Macklin, J. J., Kmetec, J. D. & Gordon, C. L. High-order harmonic generation using intense femtosecond pulses. *Phys. Rev. Lett.* 70, 766-769 (1993).
- [15] Corkum, P. B. Plasma perspective on strong field multiphoton ionization. *Phys. Rev. Lett.* 71, 1994-1997 (1993).
- [16] 王虎山 *et al.* 阿秒脉冲产生和测量技术研究进展(特邀). *光子学报* 50, 9-33 (2021).
- [17] Einstein, A. Zur Quantentheorie der Strahlung. *Physikalische Zeitschrift*.
- [18] Maiman, T. H. Stimulated Optical Radiation in Ruby. *Nature* 187, 493-494 (1960).
- [19] 魏志义 *et al.* 阿秒脉冲产生的技术原理及进展. *科学通报* 66, 889-901 (2021).
- [20] Kienberger, R. *et al.* Atomic transient recorder. *Nature* 427, 817 - 821 (2004).
- [21] Sansone, G. *et al.* Isolated Single-Cycle Attosecond Pulses. *Science* 314, 443-446 (2006).
- [22] Goulielmakis, E. *et al.* Single-Cycle Nonlinear Optics. *Science* 320, 1614-1617 (2008).
- [23] Zhao, K. *et al.* Tailoring a 67 attosecond pulse through advantageous phase-mismatch. *Optics letters* 37, 3891-3 (2012).
- [24] Li, J. *et al.* 53-attosecond X-ray pulses reach the carbon K-edge. *Nat Commun* 8, 186 (2017).
- [25] Gaumnitz, T. *et al.* Streaking of 43-attosecond soft-X-ray pulses generated by a passively CEP-stable mid-infrared driver. *Opt. Express* 25, 27506 (2017).
- [26] Zhan, M.-J. *et al.* Generation and Measurement of Isolated 160-Attosecond XUV Laser Pulses at 82 eV. *Chinese Phys. Lett.* 30, 093201 (2013).
- [27] The Nobel Prize in Physics 1964. *NobelPrize.org* <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1964/summary/>.
- [28] The Nobel Prize in Physics 1997. *NobelPrize.org* <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1997/summary/>.
- [29] The Nobel Prize in Chemistry 1999. *NobelPrize.org* <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1999/summary/>.
- [30] The Nobel Prize in Physics 2005. *NobelPrize.org* <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2005/summary/>.
- [31] The Nobel Prize in Physics 2018. *NobelPrize.org* <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/summary/>.
- [32] Anne L' Huillier, winner of the Frontiers of Knowledge Award in Basic Sciences. *EurekAlert!* <https://www.eurekalert.org/multimedia/975429>.
- [33] The Nobel Prize in Physics 1903. *NobelPrize.org* <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1903/summary/>.
- [34] The Nobel Prize in Physics 1963. *NobelPrize.org* <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1963/summary/>.
- [35] The Nobel Prize in Physics 2020. *NobelPrize.org* <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/summary/>.