

阿秒物理浅谈

——2023 年诺贝尔物理学奖解读

李 辉 吴 健 (华东师范大学 上海 200241)

摘 要 原子是组成物质的基本单元之一,原子核外电子的超快运动发生在阿秒时间尺度,这一无处不在的微观过程之前一直未能被直接观测到,阿秒脉冲的出现使得人们可以直接观测到原子核外电子的超快运动,极大拓展了人类对微观世界的认知。文章将介绍阿秒物理的发展脉络、阿秒脉冲产生的基本原理以及应用等,讨论阿秒技术的重要意义及未来发展前景。

关键词 阿秒脉冲 飞秒光场 高次谐波 电子动力学

文章编号 1002-0748(2023)12-0002

中图分类号 G633·7

文献标识码 A

今年的诺贝尔物理学奖于 2023 年 10 月 3 日公布,授予皮埃尔·阿戈斯蒂尼(Pierre Agostini)、费伦茨·克劳斯(Ferenc Krausz)和安妮·勒惠利尔(Anne L'Huillier)三位科学家(见图 1),以表彰他们“为研究物质中的电子动力学,而产生阿秒激光的实验方法”方面所作出的贡献。阿秒脉冲的产生基于超快激光和物质间极端非线性相互作用,它的成功是以往几十年的尖端技术发展的结晶,是在很多诺贝尔奖技术的基础之上诞生的,这其中包括 1964 年的激光理论、1981 年的非线性光学与高分辨电子光谱、2005 年的光频梳技术、2018 年的飞秒啁啾脉冲放大技术等,是集大成者之表现。阿秒物理研究工作引领科学和技术前沿,鼓舞人们向新的极限提出挑战。

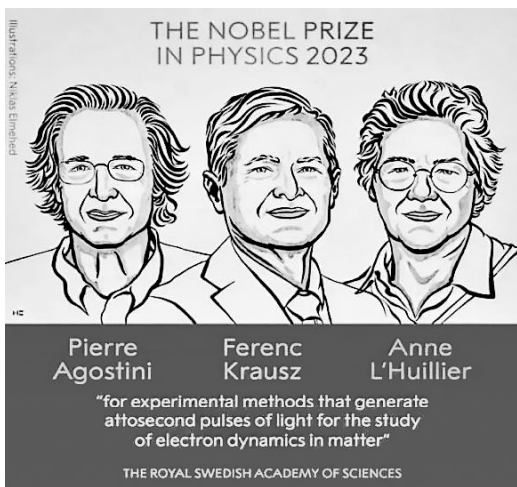


图 1 2023 年诺贝尔物理学奖得主,从左到右:皮埃尔·阿戈斯蒂尼(Pierre Agostini), 费伦茨·克劳斯(Ferenc Krausz)和安妮·勒惠利尔(Anne L'Huillier)

1 阿秒物理的发展脉络

阿秒(attosecond)是一个时间单位,1 阿秒等于 1×10^{-18} 秒,这是一个非常非常短的时间。做一个类比,我们人类的心脏跳动大概是 1 秒一次,如果 1 阿秒是现实生活中的一秒钟,那么心脏跳动一次的时间就相当于整个宇宙的寿命。所以,从我们自身的时间尺度出发,往宏观发展 18 个数量级达到宇宙的寿命,往微观发展 18 个数量级,就达到了阿秒,这是原子内电子运动的本征时间尺度。这是一个非常不可思议的尺度!日常生活中能见到的最快的高速摄影,时间分辨也就在微秒(1×10^{-6} 秒)量级,阿秒比它还要快上 12 个数量级。在原子内部的极微小空间尺度内,电子的运动是非常之快的,发生在几十到几百阿秒。在这个极端的时空尺度下,我们的经典物理概念不再适用。实际上,原子内部的世界是个量子力学统治的世界,原子核外电子是以“电子云”的形式存在,有些地方密度高,对应于发现电子的概率相对高些。要测量电子运动的极端超快过程,必须有一个特别快的工具。拍照时,我们利用瞬时的闪光捕捉运动物体,在闪光辐照到运动物体时,如果光照足够短,这段时间里物体几乎没有动,就可以拍到清晰的照片。如果曝光时间长,由于时间平均后的多个状态叠加,得到的图像将是模糊的。这个原理同样适用于给快速运动的电子“拍照片”,这就需要“阿秒脉冲”来做闪光灯。

阿秒脉冲,顾名思义,就是时间尺度在阿秒量级的光脉冲。从傅里叶变换原理出发,要想得到时间

上非常窄的脉冲,在频率维度上则要有非常宽的分布。所以,产生阿秒脉冲的先决条件是产生一个非常宽的频率分布。在超快激光技术领域,人们一般通过复杂的“非线性”过程实现频谱展宽。非线性过程需要有比较强的驱动光源,与物质发生非线性相互作用,从而使得新的频率被制造出来。飞秒(1×10^{-15} s)激光领域,人们能够将百飞秒或者几十飞秒的激光脉冲通过频率展宽和脉冲压缩,变成更短的脉冲。但是,这个技术路线在上个世纪末遇到了瓶颈。人们用它最短能够产生大概 4 飞秒宽度的脉冲,这已经接近了光场振荡的周期量级(对于中心波长 800 纳米的钛宝石激光来说,一个光场振荡周期大概是 2.67 飞秒)。如果能够突破周期量级,就有希望实现亚飞秒脉冲,也就是阿秒脉冲。当然,光场调控是一条路径。十几年前,人们尝试将一个非常宽的光谱,按照频率大小分成三份之后分别进行精确的波形控制,再将这三份光相干合成,最终合成了亚飞秒脉冲,并将其用于研究氮原子中的电子运动^[1]。此外,基于高阶受激级联拉曼散射过程,产生覆盖很宽频谱范围的等间距分立频谱成分,其相干叠加能够获得脉冲宽度在百阿秒量级的阿秒脉冲串^[2]。但是,这些技术路径较为复杂,其可行性和可靠性在当时的技术基础上略显不足。

宽频成分的产生是基于强激光场与原子的极端非线性过程。当光场足够强时,原子系统能够同时吸收多个光子,发生多光子电离。1987 年,L'Huillier 和同事们在法国的巴黎-萨克莱实验室,将一束红外波段的强激光照射到氙原子气上,发现有很多奇数级次的高频光产生,这被称为“高次谐波产生”(High Harmonic Generation,简称 HHG)^[3]。HHG 的特征是,随着高次谐波级数增加,谐波的强度先下降,然后到达平台区,再到达截断区(见图 2)。随后,研究者们发现(这里包括 2005 年诺贝尔奖获得者 Hansch 教授),HHG 提供了宽谱,可以通过傅里叶合成叠加成更短的脉冲。

值得一提的是,阿秒脉冲真正产生之前,很多理论物理学家为理解 HHG 机制做出了卓越贡献。Paul Corkum 给出了一个半经典模型,即“3 步模型”^[4](见图 3)。第一步,强激光场作用到原子体系时,改变了电子原来所处的电场(库仑场),使得电子能够克服原子核的吸引力,被电离,向外运动。第二步,因为激光的电场来回振荡,电子远离核之后有可能再被激光场拉回原子核附近,在此过程中,电子从激光场中获取了很多能量。第三步,回来的电子以

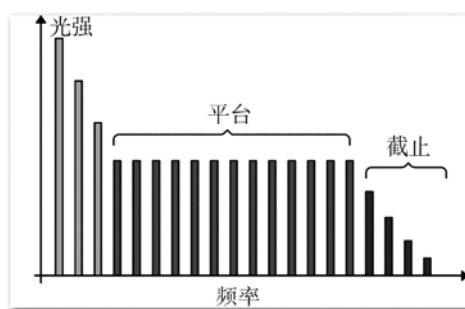


图 2 能够合成阿秒脉冲的高次谐波示意图。横轴是频率,对应不同级次,纵轴是谐波信号的强度。从低频开始,随着频率变大,黄色区域谐波信号逐渐减弱,进入红色区后信号基本保持不变(平台区),最后的蓝色区域是高频段截止区

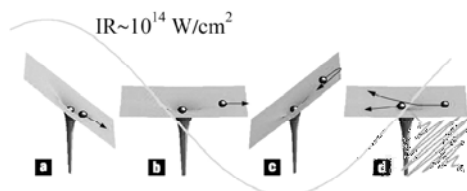
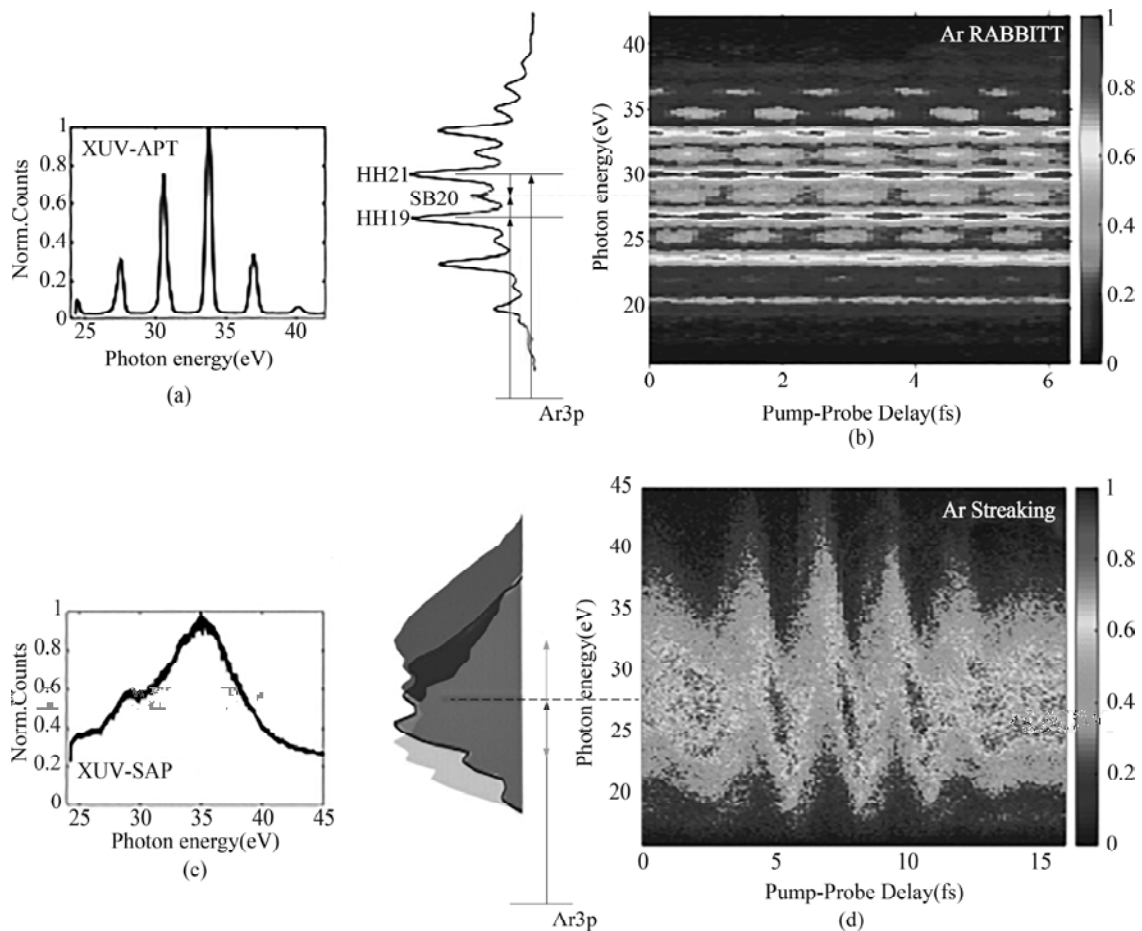


图 3 高次谐波的产生原理——3 步模型^[5]

一定的概率与母核重新复合,电子之前获得的动能需要通过某种途径转换掉,因为整个过程遵从能量守恒定律。这些能量有可能转换为一个高能的光子,以极紫外光(XUV)脉冲的形式放出,这就是几百阿秒的 XUV 光脉冲。之后,Corkum 还从量子力学角度给出了 HHG 过程的解释。2022 年,Corkum 教授与本次诺贝尔奖的两位得主 Krausz 和 L'Huillier 被授予了沃尔夫物理学奖,这个奖有“诺贝尔奖风向标”之称。由于本次诺贝尔奖聚焦到了阿秒脉冲的产生技术,Corkum 教授未能得奖,但他提出的解释阿秒脉冲产生及相关复杂现象的直观模型,为相关实验技术的迭代升级奠定了重要基础。

其实,产生阿秒脉冲并不是最困难的,难的是要证明这是一个阿秒量级的光脉冲,也就是测量阿秒脉冲的时间长度。我们知道,要测量一个很快的过程,需要一个更快的“标尺”。但是,阿秒脉冲已经是这个世界上人类能够获得的最快标尺了,怎么测量它呢?本年度诺贝尔物理学奖的两位获奖者,Agostini 和 Krausz 在怎样测量阿秒脉冲方面给出了答案。

Agostini 教授和合作者们,将产生的阿秒脉冲与驱动光场相干合成,再聚焦到惰性气体原子上,分析所产生的光电子的能量与两束光时间延迟的关系,发展了 RABBIT(Reconstruction of Attosecond Beating By Interference of two-photon Transitions)技术^[6](见图 4)。整个过程中包括原子与强激光场

图 4 阿秒脉冲串和孤立阿秒脉冲示意图^[10]

(a)阿秒脉冲串的频谱;(b)阿秒脉冲串的 RABBIT 测量结果;(c)孤立阿秒脉冲的频谱;(d)条纹相机测量结果

相互作用中的多光子电离、双色光子跃迁干涉等过程,比较复杂,这里不再赘述。由于是用多周期飞秒脉冲驱动的,驱动光场的每个振荡周期内会产生两个阿秒脉冲。这也符合 HHG 是由奇次谐波组成,每个谐波之间的间隔是两倍的驱动光频率,这种“频率梳”,傅里叶变换得到的时间维度信号也像一个梳子一样,是一串脉冲信号,它们在时域上的间隔就是半个光周期。至此,Agostini 测量到他们产生了每个宽约 250 阿秒的“阿秒脉冲串”。

如果用阿秒脉冲串去给电子拍照,会一下子得到多个“频闪”后的照片,最终的测量信号将是这些状态相干叠加的结果。一次闪光才能得到清晰的照片,要实现真正意义上的拍照,就需要产生一个独立的阿秒脉冲。Krausz 教授最先解决了这个问题。他想到,既然多脉冲的飞秒光驱动会产生一串阿秒光,那么如果驱动光在时间上足够短,比如只有一个振荡周期,那么是不是有可能产生一个阿秒脉冲呢?首先,把驱动光脉冲做到时间上足够短,已经用到了

飞秒激光领域的顶级技术。在与意大利米兰 Nisoli 组的合作攻关下,Krausz 教授得到了接近 4 飞秒的脉冲^[7],这已经接近了光的一个振荡周期(2.67 飞秒)。基于这种“少周期脉冲”,并精确控制它的载波包络相位(carrier envelop phase, CEP),Krausz 教授等人制造出一个非常宽的光谱,这个光谱与之前的 HHG 频率梳不一样,它是一个接近连续分布的光谱,通过傅里叶变换,得到的是一个“孤立阿秒脉冲”。孤立阿秒脉冲的测量用到的方案名为“阿秒条纹相机”(见图 4)。现如今条纹相机是一种比较高端的科研仪器,用来测量非常快的动力学过程。目前商用条纹相机最高时间分辨刚刚突破皮秒(10^{-12} 秒)量级,它是将一个快速变化的信号,通过电场偏置,使得不同时间的信号在空间维度上被散开,这样就可以分别测到不同时间的状态,从而绘制出一整个快速变化的过程。Krausz 教授等人在类似的原理基础上发展了阿秒条纹方法,这里的条纹相机电场偏置,是通过超强光场实现的。因为光实际上是

电磁振荡,一个强激光场的电场能够在飞秒时间尺度内产生快速的振荡变化,孤立阿秒脉冲的形貌从而得以显现,这个孤立阿秒脉冲的宽度是 650 阿秒^[8]。其实,这里还涉及复杂的理论反演计算,感兴趣的可以继续深入探索,Krausz 教授早期在一篇综述文章中详细介绍了阿秒物理的知识^[9]。

综上,2001 年,阿秒脉冲被两个科研团队实现,一种是阿秒脉冲串,一种是孤立阿秒脉冲。在阿秒技术发展的历程中,中国科学家们也做出了卓越的贡献。比如,2012~2017 年,常增虎老师课题组保持了长达 5 年的吉尼斯世界纪录,脉冲宽度 67 阿秒^[11]。这一纪录直到 2017 年才被苏黎世联邦理工学院的 Woerner 课题组打破,将脉冲宽度进一步缩短到了 43 阿秒^[12]。立足国内相关科研平台,中科院物理研究所、上海光机所、西安光机所、北京大学、国防科技大学、华中科技大学、吉林大学、上海交通大学、华东师范大学等科研院校都掌握了阿秒技术,并用它来探索微观的未知世界。

2 阿秒脉冲观测电子超快动力学

光电效应中,物体以光量子形式吸收能量,释放出光电子。光电子的产生是不是瞬时发生的?如果需要时间,这一时间有多长?这些都是物理领域悬而未决的基本问题。阿秒脉冲的产生为大家提供了探索这些过程的工具。2010 年,Krausz 团队利用孤立阿秒脉冲,结合阿秒条纹技术,测量了氦原子电离过程中,2s 和 2p 轨道电子的发射时间差,大概是 20 阿秒^[13]。然而,这个实验结果与众多理论计算存在差异。随着阿秒物理研究的不断发展,人们逐渐发现了电离中的 Shake-up 等过程,解开了电离时间的迷惑。除了研究简单的原子体系,阿秒脉冲还被应用到更加复杂的液相、固相物质^[14, 15],以及新奇的纳米结构^[16]中,从基本层面揭示了不同物相中微观运动的本质。

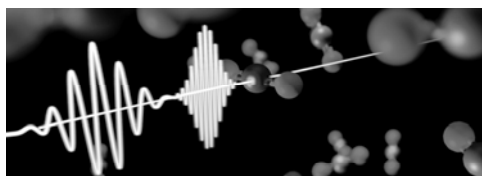


图 5 利用阿秒脉冲观测电子超快过程

3 阿秒物理展望

物质的宏观属性或器件的宏观性能,归根结底

是由其微观动力学决定的。在对基本物理性质深入认识的基础上,进一步,人们就可以对微观过程进行控制。阿秒技术经过几十年已经得到了长足发展,但是,目前能够产生的 XUV 光子数量很有限,如果能通过技术改进提高 XUV 光子产量,开展阿秒泵浦-阿秒探测实验,就能达到更高的时间分辨。也可以将阿秒脉冲与功能强大的加速器光源相结合,探索原子尺度下的阿秒超快过程。阿秒作为非常灵敏的探针,有望在精密测量领域发挥重要的作用。阿秒物理已经在引领颠覆性技术的开拓。例如,Krausz 组利用 CEP 精密控制的少周期飞秒脉冲,在纳米结构中通过光场驱动电子运动,使得固体中的电子以光频振荡^[17],相比于现今硅基芯片中对电子的驱动速度(GHz)高了至少 6 个数量级,有望使信息处理技术取得飞跃式发展。Krausz 教授近几年还开拓了阿秒生物医学等新领域,希望实现具有超高灵敏度的肿瘤细胞检测,将癌症扼杀在摇篮中。

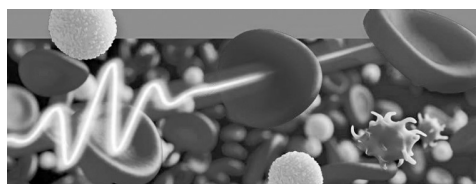


图 6 利用超快激光实现生物细胞的分子水平检测(摘自 <https://www.attoworld.de>)

4 本次诺贝尔物理学奖的重要意义

继 2018 年飞秒技术之后,时隔五年,诺贝尔物理学奖再一次花落“超快光学”领域。这一次,人类认识世界的极限水平推进到了阿秒量级,人们第一次看到了原子核外电子的超快过程。继续提高时间精度,我们会看到什么?时间是一个特殊的物理量,当到达最小的极限时,时间是连续的,还是一份一份的?弦理论中,时间的最小单位是普朗克时间,这个时间单位大概是 10^{-44} 秒。阿秒之下,还有广阔的时间维度有待探索。再小三个数量级,是仄秒(zeptosecond, 10^{-21} 秒)。一些科研工作者们正在向着这个新的极限努力。现有研究表明,通过探索新的极端过程有可能实现仄秒时间分辨,这其中包括高能加速器与原子系统的极端相互作用等^[18]。有一些理论工作者开展了相关的计算,但仄秒实验领域还有极大的探索空间。在这全新的时间尺度上,人类对物质世界的认识将更加深入。

参考文献

- [1] A. Wirth, M. Th. Hassan, I. Grguras, J. Gagnon, A. Moulet, T. T. Luu, S. Pabst, R. Santra, Z. A. Alahmed, A. M. Azzeer, V. S. Yakovlev, V. Pervak, F. Krausz, E. Goulielmakis. Synthesized Light Transients[J]. Science, 2011, 334:195.
- [2] J. Wu and H. Zeng. Subfemtosecond pulse generation and multiplicative increase of pulse spacing in high-order stimulated Raman scattering[J]. Opt. Lett., 2003, 28:1052.
- [3] M. Ferray, A. L'Huillier, X. F. Li, L. A. Lompre, G. Mainfray, C. Manus. Multiple-harmonic conversion of 1064 nm radiation in rare gases[J]. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 1988, 21, L31.
- [4] P. B. Corkum. Plasma perspective on strong field multiphoton ionization[J]. Phys. Rev. Lett., 1993, 71:1994.
- [5] P. B. Corkum and F. Krausz. Attosecond Science [J]. Nat. Phys., 2007, 3:381.
- [6] P. M. Paul, E. S. Toma, P. Breger, G. Mullot, F. Auge, Ph. Balcou, H. G. Muller, P. Agostini. Observation of a Train of Attosecond Pulses from High Harmonic Generation [J]. Science, 2001, 292:1689.
- [7] M. Nisoli, S. De Silvestri, O. Svelto, R. Szpöcs, K. Ferencz, Ch. Spielmann, S. Sartania, F. Krausz. Opt. Lett., 1997, 22:522.
- [8] M. Hentschel, R. Kienberger, Ch. Spielmann, G. A. Reider, N. Milosevic, T. Brabec, P. Corkum, U. Heinzmann, M. Drescher, F. Krausz. Attosecond Metrology [J]. Nature, 2001, 414:509.
- [9] F. Krausz, M. Ivanov. Attosecond Physics [J]. Rev. Mod. Phys., 2009, 81:163.
- [10] L. Cattaneo, J. Vos, M. Lucchini, L. Gallmann, C. Cirelli, U. Keller. Comparison of attosecond streaking and RABBIT [J]. Opt. Express, 2016, 24:29060.
- [11] K. Zhao, Q. Zhang, M. Chini, Y. Wu, X. Wang, Z. Chang. Tailoring a 67 attosecond pulse through advantageous phase mismatch (Spotlight on Optics) [J]. Opt. Lett., 2012, 37:3891.
- [12] T. Gaumnitz, A. Jain, Y. Pertot, M. Huppert, I. Jordan, F. Ardana-Lamas, H. J. Woerner. Streaking of 43-attosecond soft-X-ray pulses generated by a passively CEP-stable mid-infrared driver[J]. Opt. Express, 2017, 25:27506.
- [13] M. Schultze, M. Fiess, N. Karpowicz, J. Gagnon, M. Korbman, M. Hofstetter, S. Neppl, A. L. Cavalieri, Y. Komninos, Th. Mercouris, C. A. Nicolaides, R. Pazourek, S. Nagele, J. Feist, J. Burgdörfer, A. M. Azzeer, R. Ernstorfer, R. Kienberger, U. Kleineberg, E. Goulielmakis, F. Krausz, V. S. Yakovlev. Delay in Photoemission [J]. Science, 2010, 328:1658.
- [14] I. Jordan, M. Huppert, D. Rattenbacher, M. Peper, D. Jelovina, C. Perry, A. von Conta, A. Schild, H. J. Woerner. Attosecond spectroscopy of liquid water[J]. Science, 2020, 369:974.
- [15] A. L. Cavalieri, N. Müller, Th. Uphues, V. S. Yakovlev, A. Baltuška, B. Horvath, B. Schmidt, L. Blümel, R. Holzwarth, S. Hendel, M. Drescher, U. Kleineberg, P. M. Echenique, R. Kienberger, F. Krausz. Attosecond spectroscopy in condensed matter[J]. Nature, 2007, 449:1029.
- [16] M. Krueger, M. Schenk, P. Hommelhoff. Attosecond control of electrons emitted from a nanoscale metal tip[J]. Nature, 2011, 475:78.
- [17] A. Schiffrin, T. Paasch-Colberg, N. Karpowicz, V. Apalkov, D. Gerster, S. Muehlbrandt, M. Korbman, J. Reichert, M. Schultze, S. Holzner, J. V. Barth, R. Kienberger, R. Ernstorfer, V. S. Yakovlev, M. I. Stockman, F. Krausz. Optical-field-induced current in dielectrics[J]. Nature, 2013, 493:70.
- [18] S. Grundmann, D. Trabert, K. Fehrel, et al.. Zeptosecond birth time delay in molecular photoionization [J]. Science, 2020, 370:339.

(上接第 15 页)

球 Q 的平衡方程可知,拉力 F 也将减小。由于是同一根绳子,但可以发现,模型一与“晾衣服”模型所得绳子拉力的变化情况是相矛盾的,故小球 P 不会沿圆轨道向上移动。

③ 若小球 P 沿圆轨道向下移动,此时由模型一可知, α 减小,拉力 F 也随之减小。对于“晾衣服”模型而言,AQ 与 BQ 的长度之和会减小,即 l 减小,而 d 保持不变,故而 $\sin\beta = \frac{d}{l}$ 增大,即 β 增大。由小球 Q 的平衡方程可知,拉力 F 也将增大。由于是同一根绳,由模型一与“晾衣服”模型所求得的绳子拉力的变化情况也是相矛盾的,故小球 P 不会沿圆轨道向下移动。

综上所述,可知在绳的 B 端向上缓慢移动一小段距离时,小球 P 不会发生移动,故而选项 B 错误。

3 结 语

高中物理学习难度较大,这是教师和学生的普遍共识。究其原因,一方面在于高中物理知识需要深入理解,另一方面在于知识涵盖面广。数学作为一种重要的工具,不应忽略其在理解与运用物理知识、规律与模型等方面的重要作用。恰当地利用数学中的结论,将物理与数学知识结合起来,学生不仅能体会到数学给解决物理问题所带来的便利,更能感受到学习物理所带来的快乐。

参考文献

- [1] 李方. 教育知识与能力[M]. 北京:高等教育出版社,2011:11.
- [2] 中华人民共和国教育部. 普通高中物理课程标准(2017年版)[S]. 北京:人民教育出版社,2018.