

发现“超快卡皮查—狄拉克效应”

刘昕鑫¹ 顾远¹ 梁昊² 林康^{1,*}

(1 浙江大学物理学院 全省微纳量子芯片与量子调控重点实验室 杭州 310027)

(2 马克斯普朗克复杂系统物理研究所 德国德累斯顿 01187)

2024-05-03收到

* email: klin@zju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20240507

1923年，德布罗意在光子波粒二象性的启示下，提出其他微观粒子也具有波动性的假说^[1]。随后，戴维孙和革末通过镍晶体衍射电子束的实验^[2]证明了电子的物质波假说。物质波的衍射或干涉实验是粒子波动性的最直接证据。受到戴维孙—革末实验的启发，卡皮查和狄拉克在1933年提出^[3]，当电子束经过驻波光场时，同样也会发生衍射，这就是传统的卡皮查—狄拉克效应。在该效应中，粒子和波的角色发生了两次转换：电子从粒子变成了波，而光栅则从实体材料变为非实体的光场。

卡皮查—狄拉克效应对驻波光场的强度以及电子束的单色性有着较高的要求，因此直到2001年才由Freimund等人在实验上验证^[4]。其实验方

案如图1(a)所示，先用电子枪产生电子束，经狭缝准直后被连续驻波光场衍射得到衍射条纹。从波动图像上来讲，正入射的电子束被驻波场衍射，出射角满足光栅公式 $d \sin \theta_n = n\lambda, n \in \mathbb{Z}$ ，这里 d 为驻波光场的半波长，而 λ 为电子的德布罗意波长。而从粒子图像上讲，自由电子可以与光场发生受激康普顿散射，吸收某一方入射的光子，同时受激放出一个对向传播的光子，共计获得了两倍的光子动量 ($2\hbar k_y$)。此类过程反复发生，会使电子束在动量空间形成间隔为 $2\hbar k_y$ 的衍射条纹。可以看到，不管是从粒子图像还是波动图像出发，都可以很好地解释卡皮查—狄拉克效应。不过，由于该效应中不包含任何时间相关的信息，因而不能直接利用该效应来测量电子波函数的动力学演化。

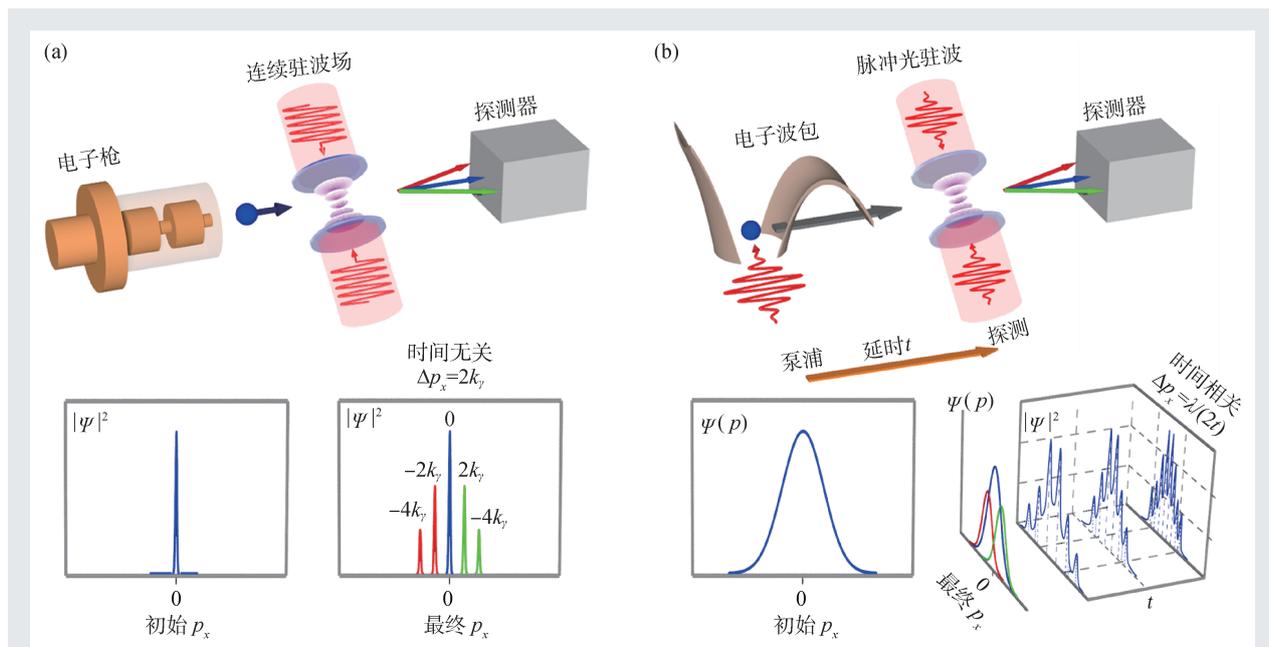


图1 传统和超快卡皮查—狄拉克效应的动量空间视图 (a)传统卡皮查—狄拉克效应：通过电子枪产生的电子束，可以近似为一个动量空间分布接近于 δ 函数的平面波；(b)超快卡皮查—狄拉克效应：利用激光场电离原子产生的电子波包在动量空间中具有很宽分布

随着超快激光技术的发展,尤其是啁啾脉冲放大^[5]和高次谐波产生^[6]等技术的发明,人们得以在实验室中产生飞秒(1 fs = 10⁻¹⁵ s)甚至阿秒(1 as = 10⁻¹⁸ s)尺度的超短、超强光脉冲,以分辨相应时间尺度下电子的动力学行为。相关的工作以及应用获得了2018年与2023年的诺贝尔物理学奖,《物理》期刊也载有相关的专题介绍^[7, 8]。

借助超快激光脉冲,我们首次将卡皮查—狄拉克效应的研究拓展到时间域^[9]。如图1(b)所示,相比于传统的卡皮查—狄拉克效应,我们做出了两个较大的改变:首先,初态电子是一束较强的驻波光脉冲电离原子产生的电子波包,而非电子枪产生的单色电子束;其次,衍射光场是仅持续数十飞秒的脉冲光驻波,而非连续的驻波场。这样,作为一个典型的泵浦—探测实验,电离光场和衍射光场之间的延时提供了明确的时间信息,而飞秒衍射脉冲作为“快门”则提供了相当高的时间测量精度。最后,我们利用动量谱仪来测量末态电子的动量分布^[10]。值得注意的是,衍射驻波的光强相对电离光场较弱,从而被前者电离的电子可近似忽略。此处飞秒衍射光场同样通过受激康普顿散射将动量传递给电子。然而,不同的

是,由于初始电子波包(图1(b)中蓝色高斯波包)的动量分布很宽,远大于 $2\hbar k_y$,这会使初始电子波包和散射电子波包(图1(b)中红色和绿色高斯波包)之间发生干涉而形成条纹。

在上述实验方案中,我们选取了中心波长为800 nm、持续时间为60 fs的脉冲驻波来产生和衍射电子波包。我们观察到了如图2所示的电子动量分布随时间变化的衍射条纹。通过增加泵浦脉冲与探测脉冲之间的延时,得到的干涉条纹间距不断减小。这一结果与传统卡皮查—狄拉克效应完全不同,后者的衍射条纹在动量空间显示出恒定的双光子动量间隔。

图2(a)—(d)给出了电子动量在 x (光传播方向)和 z (光偏振方向)方向上的分布。图2(a)、(e)给出了在-1 ps延时下的电子动量分布,-1 ps延时指的是衍射光场先于电离光场,因此电离电子波包没有受到衍射。此时的电子动量在 x 方向上接近于高斯分布。而在正延时下(图2(b)—(d)),电子动量分布在光传播方向上出现了衍射条纹。在1 ps、2 ps和3 ps延时下,电子衍射条纹的间距分别为0.18、0.09和0.06 a.u. (a.u.表示原子单位)。为了定量地得到延时与衍射条纹间距的关系,

我们连续扫描了2—10 ps延时下的衍射条纹间隔,结果如图3(a)所示。我们发现条纹间隔 Δp_x 随着延时 t 的增大连续变小,两者之间的关系为

$$\Delta p_x = m_e \frac{\lambda_{sw}}{2t},$$

其中 λ_{sw} 是驻波激光波长, m_e 是电子质量。我们将这个现象称为超快卡皮查—狄拉克效应。

超快卡皮查—狄拉克效应可以通过初始电子波包与经驻波光场散射的电子波包(动量发生 $\pm 2\hbar k_y$,偏移)之间的干涉来理解。自由电子在无外场条件下

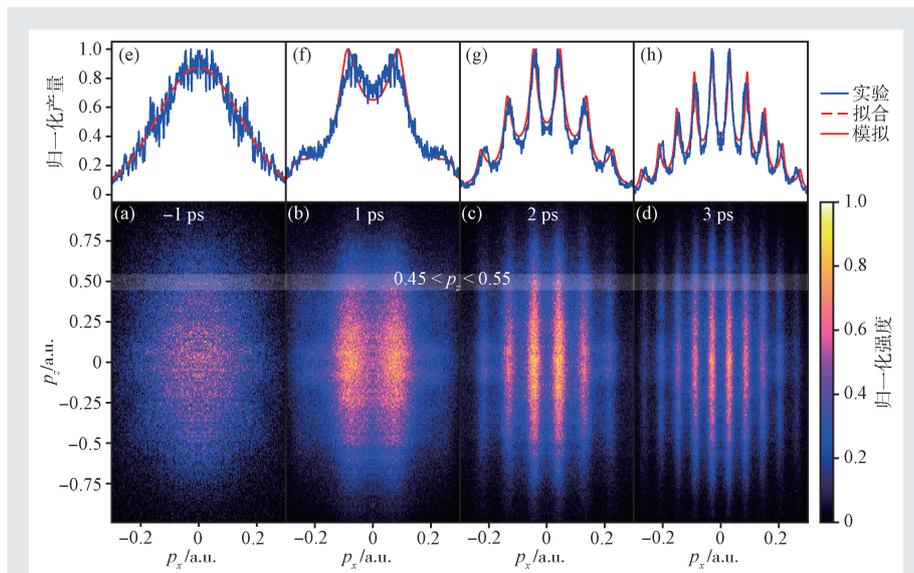


图2 超快卡皮查—狄拉克效应衍射条纹 (a)—(d)分别显示了在-1 ps、1 ps、2 ps和3 ps的不同延时下所获取的数据,其中a.u.是原子单位(atomic units)的缩写;(e)—(h)中的蓝色线为选择了 $p_z \in (0.45, 0.55)$ 原子单位进行积分((a)—(d)中的阴影区域)得到的沿光传播方向的一维动量分布。其中,(c)中红色虚线通过拟合高斯分布得到,(f)—(h)中的红色实线展示了在不同延时下与驻波相互作用的一维电子波包的数值模拟结果

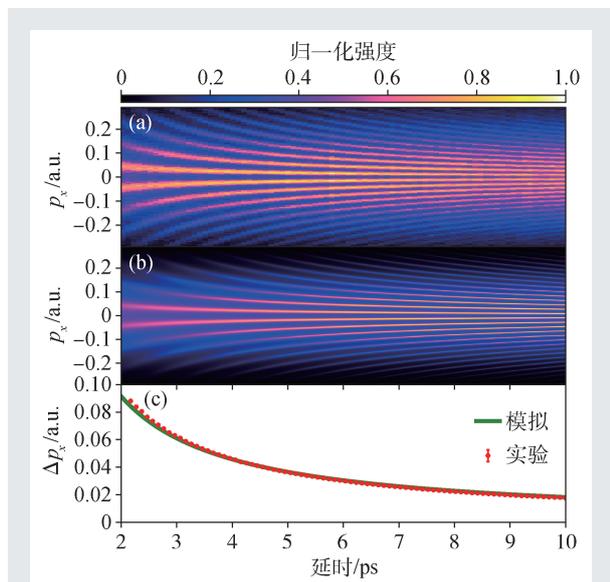


图3 连续扫描延时得到的衍射条纹 (a)实验数据; (b)数值模拟; (c)从(a)和(b)拟合的衍射条纹间隔随延时的函数

自由演化的相位可以表示为 $\varphi = p_x^2 t / (2m_e \hbar)$, 而被光子动量散射的电子波包相位为 $\varphi' = (p_x \pm 2\hbar k_y)^2 t / (2m_e \hbar) + \varphi_{sw}$, 其中 $\varphi_{sw} = \pi$ 为电子波包与衍射光场的相位差。当初始波包和散射波包发生干涉时, 它们的相位差要满足 $\varphi' - \varphi = 2\pi n$ 。由于 $k_y \ll p_x$, 略去高阶项, 得到衍射峰位置 $(p_x)_n = m_e \left(n + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda_{sw}}{2t}$, 而衍射条纹间隔为 $\Delta p_x = m_e \frac{\lambda_{sw}}{2t}$, 与实验测量相符。反过来理解, 我们通过对电子受到驻波光场衍射后动量条纹间距的测量, 获得了其在自由空间演化的动力学相位 $\varphi = p_x^2 t / (2m_e \hbar)$

信息。

作为电子波包相位的精确诊断工具, 超快卡皮查—狄拉克效应在电子衍射成像和自由电子激光领域存在非常乐观的应用前景。通过这一方法, 我们有望在电子运动的本征时间尺度上追踪电子的相位演化, 并通过电子相位信息开发出精度更高的成像技术。例如, 在电子衍射成像领域, 利用电子束衍射样品, 通过衍射图案能够反演出样品的结构信息。现在, 借助超快卡皮查—狄拉克效应, 科学家们能够进一步通过驻波脉冲读取或者整形电子的相位信息, 为材料科学和纳米技术的发展提供新的工具。在自由电子激光领域, 这一效应可以被用来调控电子束的性质。最简单的, 驻波脉冲可以被用来当作电子束的分束片或者光栅^[11], 通过实现电子束的分束来增加自由电子激光多用户线程。

参考文献

- [1] De Broglie L. Nature, 1923, 112: 540
- [2] Davisson C J, Germer L H. Phys. Rev., 1927, 30: 705
- [3] Kapitza P L, Dirac P A M. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1933, 29: 297
- [4] Freimund D L *et al.* Nature, 2001, 413: 142
- [5] Strickland D, Mourou G. Opt. Comm., 1985, 56: 219
- [6] Ferray M *et al.* J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 1988, 21: L31
- [7] 魏志义, 王兆华, 滕浩 等. 物理, 2018, 47: 763
- [8] 葛佩佩, 李靖, 刘运全. 物理, 2023, 52: 807
- [9] Lin K, Eckart S, Liang H *et al.* Science, 2024, 383: 1467
- [10] Dörner R, Mergel V, Jagutzki O *et al.* Phys. Rep., 2000, 330: 95
- [11] Batelaan H. Rev. Mod. Phys., 2007, 79: 929

订阅《物理》得好礼

《物理》编辑部现推出优惠订阅活动: 向编辑部连续订阅2年《物理》杂志, 将获赠《岁月留痕—〈物理〉四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇经典之作, 值得收藏。

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

(1) 邮局汇款

收款人地址: 北京市中关村南三街8号中科院物理所, 100190

读者和编者

收款人姓名: 《物理》编辑部

(2) 银行汇款

开户行: 农行北京科院南路支行

户名: 中国科学院物理研究所

帐号: 11 250 1010 4000 5699

(请注明《物理》编辑部)

咨询电话: 010-82649029; 82649277

Email: physics@iphy.ac.cn