

Kapitza – Dirac 效应的最新进展*

郭东升[†]

(Department of Physics , Southern University and A & M College , Baton Rouge , La 70813 , USA)

摘要 自由电子束经光的驻波散射服从布拉格(Bragg)定律的设想由 Kapitza 和 Dirac (KD)于 1933 年提出. 这一效应在近 70 年以后的 2001 年经 Batelaan 等人用实验证实. 近日, 电子束的 KD 衍射的理论以中国物理学家为主用非微扰量子电动力学做出. 新理论不但解释了 Batelaan 的实验, 还预言了若干新现象. 由于玻色 – 爱因斯坦凝聚的发展及高科技领域的需要, 原子和电子形成的物质波须由 KD 效应进行控制. 巨大的应用前景正在使 KD 效应的研究由冷门变为热门.

关键词 Kapitza – Dirac(KD)效应, 激光, 驻波, 电子, 散射, 衍射, 玻色 – 爱因斯坦凝聚

New progress in studies of the Kapitza-Dirac diffraction effect

GUO Dong-Sheng[†]

(Department of Physics , Southern University and A & M College , Baton Rouge , La 70813 , USA)

Abstract A nonperturbative quantum electrodynamics theory has been developed by Li *et al* (Phys. Rev. Lett. 2004 92 :233603) to describe the Kapitza-Dirac (KD) diffraction effect. The theory gives a unified explanation of the electron diffraction by standing laser waves recently observed by Batelaan *et al* (the full KD effect) and the photoelectron angular distribution splitting observed by Bucksbaum *et al*. (the half KD effect). The theory also predicts the minimum ponderomotive parameter and the sidebands in the electron momentum spectra of the KD diffraction effect. These studies present a new optical means for controlling matter waves made by Bose-Einstein condensates and electrons.

Key words Kapitza-Dirac effect , laser , standing wave , electron , scattering , diffraction , Bose-Einstein condensates

1 背景与前景

2001 年 9 月 13 日, 英国出版的《自然》杂志刊登了美国内布拉斯卡大学林肯分校物理学家 Batelaan 等人的一项实验结果: 电子束穿透激光驻波分裂形成衍射条纹^[1]. 名气不大的 Batelaan 因这一发现而一举成名: 与物理有关的媒介纷纷报道, 哈佛等著名大学及欧洲多国都邀请他去讲学, 多家教科书出版社要把他的结果写进教材, 美国物理学会请他作了年会的主题报告, 美国国家科学基金会无条件地延续了他的科研经费…… 这一实验结果首次

由李晓峰、张敬涛、徐志展、傅盘铭、郭东升和 Freeman R R 等人从理论上予以证实, 其研究结果发表在 2004 年 6 月 11 日出版的著名物理刊物 Physical Review Letters^[2]上. 该理论还预言了若干新现象, 有待实验去进一步验证.

这一实验的源头是 1933 年 Kapitza 和 Dirac (KD) 一个大胆设想^[3]: 当电子穿过由两束行波构成的光驻波时, 有可能在一束行波里吸收一个光子并在另一束行波里放出一个光子, 从而使电子束分

* 2004 - 07 - 08 收到初稿, 2004 - 08 - 11 修回

[†] E-mail: dsguo@grant.phys.subr.edu

裂,电子的入射和出射角度满足 X 射线对晶格衍射的布拉格定律。这时,电子的德布罗意波长相当于 X 射线的波长,驻波相邻两波峰间的距离即行波的半波长相当于晶格常数。当时这个设想的一大兴趣在于将为尚无实例的、已被爱因斯坦提出的受激辐射提供实例;而另一大兴趣在于波粒二重性中波与粒子角色的反串。Kapitza 和 Dirac 两人日后,并非因此,却因其他成就分别获诺贝尔奖。然而,KD 效应的实验观测在激光技术发明之前却无进展,发明之后仍进展缓慢。

1966 年,Altshuler^[4]等人指出,如激光的频率和原子的某一跃迁频率相近或相符,这原子在这激光中可被视为两能级原子,这两能级原子在驻波光中可在一束行波中吸收一个光子,并在另一束行波中放出一个光子,使原子束分裂,恰如电子的 KD 效应。原子的 KD 效应于 1986 和 1988 年由 Pritchard 等人的实验证实^[5,6]。原子的 KD 效应显示出布拉格散射式和衍射式两种。

电子的 KD 效应的早期证据是 Bell 实验室的 Bucksbaum 等人于 1988 年发表的氦气原子在激光驻波电离观测数据^[7]。光本为横波,光电离产生的电子本应沿电场方向,即与光路垂直的方向出射。但观测表明,出射的光电子向两侧分裂,与光路垂直的中间方向却是空的;分裂后的两侧光电子动量差为 500—2000 个光子的动量。Bucksbaum 等人指出,这就是 KD 效应,然而 Kapitza 和 Dirac 原来提出的仅是一个双光子过程。由于初始粒子是原子而非自由电子,这一现象可称为后半部 KD 效应。

KD 效应的重要意义在于它潜在的巨大应用前景^[8,9]。2001 年诺贝尔物理学奖授予了实验上做出玻色-爱因斯坦凝聚的物理学家。这意味着一个新的伟大的物质时代即将到来。新物质是由高度密集的重原子或分子组成的宏观量子态,并具有激光的特性,其意义和应用远超过现有的材料。普通光和激光的关系犹如乌合之众与训练有素的军队的关系,而构成世界的固态、液态、气态和等离子态实为乌合之众,而新的物质态是宏观量子态,其威力和应用远超过激光,可称为原子“激光”、“激射”和分子“激光”、“激射”等。新物质将在国防、工业、农业、医疗、科研中发挥巨大的作用,将改变整个世界的物质面貌。试想,如果用这种高密度的物质制成“激光”武器,其准确度和威力都大有提高,因其波长远短于光波长,在计算机微芯片和微线路的激光刻制造过程中将极大地提高现有的精度,为下一代计算机提供

了工艺基础;做成原子干涉仪,精度将超过所有的激光和各种光学的干涉仪,将成为探索物质奥秘的主要科研仪器,如引力波探测器等;并可应用于导航和军事制导中;用于医疗可做成手术刀,其准确性和可操作性将远超过伽玛刀。因为没有镜片和透镜等光学设备可操纵和控制这种新“激光”,新的“光学”尚待发展。

Batelaan 用实验演示出电子束的 KD 效应,成功地实现了电子束的分流。此前,已有利用 KD 效应进行原子束的分流的实验结果。KD 效应将成为新“激光”的分流和叠加的主要手段。因此,对于 KD 效应的研究将成为新“光学”的基础,在控制和应用玻色-爱因斯坦凝聚方面将发挥重大的作用。在未来若干年内,这种新物质态在工业上的应用极有可能形成新的重要产业。

2 KD 效应理论研究上的进展

KD 效应的理论研究也如同实验一样长期以来属于冷门。早期的寥寥无几的文章几乎全是经典场理论,结论并不突出^[10,11]。

当前的 KD 效应理论是建立在 1989 发表的 Guo - Aberg - Crasemann (GAC) 散射理论基础上的^[12]。GAC 理论是用非微扰量子电动力学研究多光子电离时得到的,但也适用于一般的散射问题。在此之前,Keldysh^[13]曾假定多光子电离的末态是电子与光波的相互作用态,即 Volkov^[14]态。Keldysh 的理论经 Faisal^[15]和 Reiss^[16]的弘扬后又合称为 KFR 理论。因其非微扰和简洁两大特性而成为当代激光原子物理的主流理论。GAC 从形式散射理论作非微扰的推导,得出:Volkov 态不是光电离的末态而是中间态,真正的末态是光子和电子分开的平面波态。换句话说,GAC 理论认为,光电离是一个两步过程。第一步,原子中的电子在光场电离形成 Volkov 态,即 KFR 过程。第二步,光电子与光场分离,即出场过程。(注意:这两步过程不同于早期提出的先电离再加速的两步过程,早期的两步已被 KFR 证实仅为一过程。GAC 的两步是 KFR 再外加一步。)GAC 理论还认定了有质动力(ponderomotive)动量的存在^[17],与有质动力能形成一个不可分的类光 4 动量。如果不知有质动力动量的存在,却谈有质动力能可以加速电子是没有任何根据的。

Keldysh 的假设到底对不对?GAC 和 KFR 孰是孰非?虽然 GAC 的理论推导严格,如实验不作声则

仍属空谈. 前述的 Bucksbaum^[7]等人半 KD 效应的实验对这一难题作出了公正的判断. 在 1992 年的一篇文章中^[18], Guo 和 Drake 解出电子在驻波光子场中的波函数, 即推广了的 Volkov 态, 用以描述 Bucksbaum 观测到的光电子角分布分裂. 根据 KFR 理论, 当用 Volkov 态作末态时, 光电子角分布不会产生分裂. 根据 GAC 理论, 在 KFR 过程之后紧跟一个出场过程, Bucksbaum 观测到的分裂产生了! 半 KD 效应的实验否定了强光电离理论中的 Keldysh 假设, 在 KRF 理论和 GAC 理论中选择了 GAC. 由此可见, KD 效应对强激光场理论的重要意义. 由于有质动力动量在驻波中抵消, 光电子在出场过程吸收了有质动力能, 巨大的动量转移导致了 Bucksbaum 的分裂. Guo 和 Drake 的理论还预示了 ponderomotive 参数(有质动力能与光子能量之比)的正整数特性, 当激光强度增加跨越 ponderomotive 参数的正整数点时, Bucksbaum 的分裂呈多重. Bucksbaum 的分裂实际上还提供了有质动力动量存在的反证法的证明. Guo 和 Drake 对 Bucksbaum 分裂的成功解释已有 12 年, 至今尚无第二个成功的理论^[11]. 芬兰物理学家 Aberg, 作为 GAC 理论的作者之一, 将 GAC 理论和 Guo 与 Drake 的结果一并在诺贝尔委员会 1992 年于斯德哥尔摩举行的第 85 届诺贝尔专题报告会(Nobel Symposium 85)上宣读. 该文收录在诺贝尔委员会编辑的瑞典皇家科学院出版的专刊上^[19] (Guo 亦被推荐参加此会, 因故未能参加).

反转 GAC 对于粒子出场的描述, 即形成对于粒子入场的描述. 结合入场和出场描述, Guo 于 1996 年发表了对于全 KD 效应的理论描述^[20]. 那一描述是在理想情况下电子通过驻波激光场发生布拉格散射式的 KD 效应. 该文还预言了电子可能发生的折射及电子被光驻波加速的现象. Guo 在 GAC 理论的框架下对于全 KD 效应的描述坚持了在半 KD 效应中揭示的出(入)场中吸收(放出)有质动力能的机制, 与 KD 原来的描述在机理上已有极大的不同.

最近 Li 等人对 KD 衍射描述仍然沿用了 GAC 理论的框架和出(入)场中吸收(放出)有质动力能的机制. 取得的结论或成果有如下几点 (1) 电子衍射是由于聚焦的驻波激光束腰行为所至, 绝对平行的驻波激光不能使正入射电子产生衍射, 且只能是布拉格散射式 (2) 发现了有质动力参数的最小单位, 即光子能量与电子质量能之比. 依此可确定弱场

和强场的天然分界, 这也就确定了 KD 效应发生的最小场强 (3) 预言了 KD 衍射效应中电子动量谱的侧波段(side bands).

3 结束语

KD 效应从提出到现在已走过 71 年的路程, 在 20 世纪几乎深藏冷宫, 鲜为人知. 在新世纪初, 由于实验上的突破和玻色-爱因斯坦凝聚的发展而使 KD 效应初显峥嵘. 随着玻色-爱因斯坦凝聚的进一步发展, KD 效应将在新的“物质波光学”中发挥决定性的作用从而获得巨大的应用. 在此, 作者衷心地希望科技界的同行们共同努力, 使这一科学中的奇芭在新世纪科技和经济发展中绽放出灿烂的光辉.

参 考 文 献

- [1] Freimund D L, Aflatooni K, Batelaan H. *Nature (London)*, 2001, 413 : 142
- [2] Li X F, Zhang J T, Xu Z Z *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 92 : 233603
- [3] Kapitza P L, Dirac P A M. *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 1933, 29 : 297
- [4] Altshuler S, Frantz L M, Braunstein R. *Phys. Rev. Lett.*, 1966, 17 : 231
- [5] Gould P L, Ruff G A, Pritchard D E. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, 56 : 827
- [6] Martin P J, Oldaker B G, Miklich A H *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1988, 60 : 515
- [7] Bucksbaum P H, Schumacher D W, Bashkansky M. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, 61 : 1182
- [8] Batelaan H. *Contem. Phys.*, 2000, 41 : 369
- [9] <http://www.physics.ohio-state.edu/news/pritchard.php>
- [10] Fedorov M V. *Opt. Commun.*, 1974, 12 : 205
- [11] Rosenberg L. *Phys. Rev. A*, 1994, 49 : 1122
- [12] Guo D-S, Aberg T, Crasemann B. *Phys. Rev. A*, 1989, 40 : 4997
- [13] Keldysh L V. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 1964, 47 : 1945 (*Sov. Phys. -JETP*, 1965, 20 : 1307)
- [14] Wolkow D M. *Z. Phys.*, 1935, 94 : 250
- [15] Faisal F H M. *J. Phys. B*, 1973, 6 : L89
- [16] Reiss H R. *Phys. Rev. A*, 1980, 22 : 1786
- [17] Gao J, Bagayoko D, Guo D-S. *Can. J. Phys.*, 1998, 76 : 87
- [18] Guo D-S, Drake G W F. *Phys. Rev. A*, 1992, 45 : 6622
- [19] Aberg T. *Physica Scripta*, 1993, T46 : 173
- [20] Guo D-S. *Phys. Rev. A*, 1996, 53 : 4311