

强场物理新进展

——强激光在等离子体中加速电子的新机制*

盛政明[†] 张杰

(中国科学院物理研究所光物理实验室 北京 100080)

摘要 相对论强激光与等离子体相互作用中高能电子的产生机制是近年来一直被广泛重视的课题. 文章扼要介绍了其中主要的几种加速机制, 并特别介绍了作者最近提出的电子在对撞激光场中的随机加速机制.

关键词 相对论强激光, 电子加速, 电子随机运动

A NEW MECHANISM OF ELECTRON ACCELERATION WITH RELATIVISTIC-INTENSE LASER PULSES IN PLASMA

SHENG Zheng-Ming[†] ZHANG Jie

(Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Studies on the mechanisms of energetic electron generation with relativistic-intense laser pulses in plasma has been a subject attracting a great deal of interest owing to the advent of ultra-short intense laser pulses. In this communication, we introduce a new mechanism of electron acceleration proposed recently, the stochastic acceleration in colliding laser fields.

Key words relativistic-intense lasers, electron acceleration, stochastic motion of electrons

十多年前,一种叫啁啾脉冲放大的技术发明给激光技术带来一场革命. 它使我们可以获得聚焦光强超过 10^{18} W/cm^2 的超短激光脉冲, 由此开创一个新的物理学分支——相对论等离子体物理学^[1]. 电子在这种激光场中振荡速度非常接近真空中的光速, 其振荡动能可达到兆电子伏量级 $T = 0.511[(1 + I_{18}\lambda^2/1.37)^{1/2} - 1] \text{ MeV}$, 这里光强 I_{18} 以 10^{18} W/cm^2 为单位, 光波长 λ 的单位是微米. 这种只需放置在台面尺度上的激光系统上产生的超短激光脉冲, 在等离子体中传播时会产生横向尺度只有几个激光波长量级的自聚焦通道, 并在通道中把电子加速到非常高的相对论的能量. 快点火激光聚变方案就是基于强激光与等离子体作用过程中产生的大量高能电子作为快点火过程的能量载体的. 在稠密物质中, 高能电子触发级联的 γ 射线喷射、正负电子对产生等一系列核物理、粒子物理过程, 这些也是近年来人

们广泛研究的课题. 因此, 用超短脉冲强激光与等离子体作用产生高能电子是强激光等离子体物理的核心问题之一. 由于在强激光与等离子体相互作用过程中存在大量复杂的波与粒子作用的过程, 高能电子的产生往往包含较复杂的物理过程. 迄今为止, 人们提出了多种激光在等离子体中加速电子的机制, 这些机制的有效性与等离子体的状态, 包括等离子体密度及其标尺长度有极大关系.

在激光等离子体中, 我们可以把电子加速机制分成等离子体波加速(纵向场加速)、激光直接加速(横向场加速)以及纵向场与横向场混合加速. 这是因为按照电子在电磁场中的运动方程, 可以推知

* 国家自然科学基金(批准号:10105014, 19825110, 10075075)和国家“八六三”高技术惯性约束核聚变基金资助项目

2002-05-10 收到初稿, 2002-05-16 修回

[†] 通讯联系人. E-mail: zmsheng@aphy.iphy.ac.cn

$dK/dt = -\alpha(E_{\parallel}v_{\parallel} + E_{\perp}v_{\perp})$, 这里 K 是粒子的动能, E_{\parallel} 和 E_{\perp} 分别是等离子体中的纵向和横向电场分量, v_{\parallel} 和 v_{\perp} 分别是粒子的纵向和横向速度分量. 其中的等离子体波加速, 按照等离子体波产生的方式又可以分成(由高能电子束驱动的)等离子体尾波场加速器、激光拍频波加速器、激光尾波场加速器及激光自调制尾波场加速器等. 激光直接加速包括激光有质动力加速及逆自由电子激光加速等. 有时在等离子体中的电子可能同时从纵向的等离子体波和横向的激光场获得能量. 我们把它称为混合加速. 在激光与固体靶作用中^[2,3], 通过所谓真空加热(vacuum heating)和共振吸收机制产生的高能电子也可以归类到混合加速机制中.

在强激光与低密度长标尺长度下等离子体中高能电子的产生一直没有很好的理论解释. 通常人们认为是其中激光激发了大振幅的等离子体波加速了电子, 而大量实验和理论研究表明, 即使没有等离子体波激发, 电子也可被激光加速到非常高的能量, 它远大于激光有质动力势对应的能量或电子在激光场中的振荡能. 因此, 激光直接加速必然会起作用. 但是, 众所周知, 在单一的激光场中, 电子通过有质动力加速获得的能量只具有电子在激光场中的振荡能的量级, 在单一的平面电磁波中, 电子在与波作用前后获得的净能量为零^[4]! 只有破坏其中的对称性, 电子才能从电磁波获得能量. 若有第二个场介入其中, 那么电子与平面电磁波相互作用中的对称性就可能被破坏^[5,6]. 1999年, 我们提出了一种激光直接加速的机制, 叫电子感应共振加速(betatron resonance acceleration)^[7]. 目前这已被广泛认为是一种在激光自聚焦通道中起主导作用的电子加速机制. 在激光自聚焦通道中自生的准静态电场和磁场起到了和自由电子激光器中的摇摆场类似的作用. 因此它类似于逆自由电子激光加速.

在激光与等离子体相互作用中也激发别的场, 包括电磁场, 它们也可以破坏电子与单一光场作用中的对称性, 从而使电子可以从入射激光中不断获取能量. 最近我们提出一种在对撞激光场中的随机加速机制^[8]. 它也是一种激光场直接加速机制. 在等离子体中, 电子与两个相向传播的电磁场相互作用的情况是普遍存在的. 在不均匀等离子体中, 当入射光从高密度区域被部分反射, 低密度区的电子即受到两个相向电磁波场的作用. 当强激光在低密度等离子体中传播时, 一种叫受激拉曼背散射不稳定产生的电磁波很快地增长起来, 并达到饱和. 因它的

传播方向与入射光相对, 这也构成电子与相向传播的电磁场相互作用.

为解释电子如何与对撞激光场作用, 我们需要用到力学中的一些术语. 我们考虑带电粒子与电磁场构成的系统. 假定这个系统有 N 个自由度, 而相对应的哈密顿-雅克比方程可以分拆成 N 个独立的方程, 每个方程对应一个自由度, 那么我们就说这个哈密顿量以及粒子的运动是(完全)可积分的. 相应地存在有 N 个独立的运动不变量. 否则, 粒子的运动是不可积分的, 粒子将出现随机运动. 在单一的平面电磁场中, 电子的运动是可积分的, 甚至是可以解析求解的. 但是对于存在有多波场的系统一般是不可积分的. 在这样的系统中, 若电子在相空间运动的初始条件有细微的改变, 就完全改变它在相空间的轨迹. 因此我们也可以说这样的系统存在不稳定性, 粒子在系统中作随机运动. 衡量一个系统是否稳定或者粒子在相空间是否作随机运动, 人们有一个用以定量描述的参数, 这就是所谓的李雅普诺夫指数(Liapunov exponent), 它是根据粒子运动轨迹计算出来的. 如果这个指数接近于零或小于零, 那么系统是稳定的, 粒子不作随机运动. 反之, 如果这个指数大于零, 那么系统是不稳定的, 粒子存在随机运动. 李雅普诺夫指数越大, 粒子运动随机性越强.

在多波场系统中, 粒子是否作随机运动与多波场的位形有关. 如果两个电磁波同向传播, 那么电子随机运动就不容易触发, 反之如果两个电磁波传播有一夹角, 电子的随机运动就比较容易触发. 随机运动是否触发显然还与场的振幅有关. 通过计算李雅普诺夫指数, 我们可以获得触发电子作随机运动所需的电磁场振幅阈值. 超过阈值, 电子完全作随机运动, 它可能出现在相空间的任何地方. 在低于阈值时, 系统是近可积分的, 电子的运动轨迹在相空间的截面图(surface of section plot)仍是条光滑的曲线. 数值计算表明, 只有电子随机运动出现后, 电子才能从激光场获取较大的能量(见图1).

在我们考虑的对撞激光场与电子的作用中, 如果两个激光场的振幅是一样的, 那么电子在动量空间是对称地被加速. 如果前向激光场大于反向传播激光场, 那么电子主要在前向获得加速. 加速的物理过程可以这样理解. 我们知道当只有一个前向传播激光场时, 电子在前半个激光周期获得加速后, 在后半周期就被减速. 但是, 如果存在另一个反向传播的激光场, 它就可能改变某些电子的运动轨迹, 使这些电子在前向传播的激光场的加速相位滞留更长时间

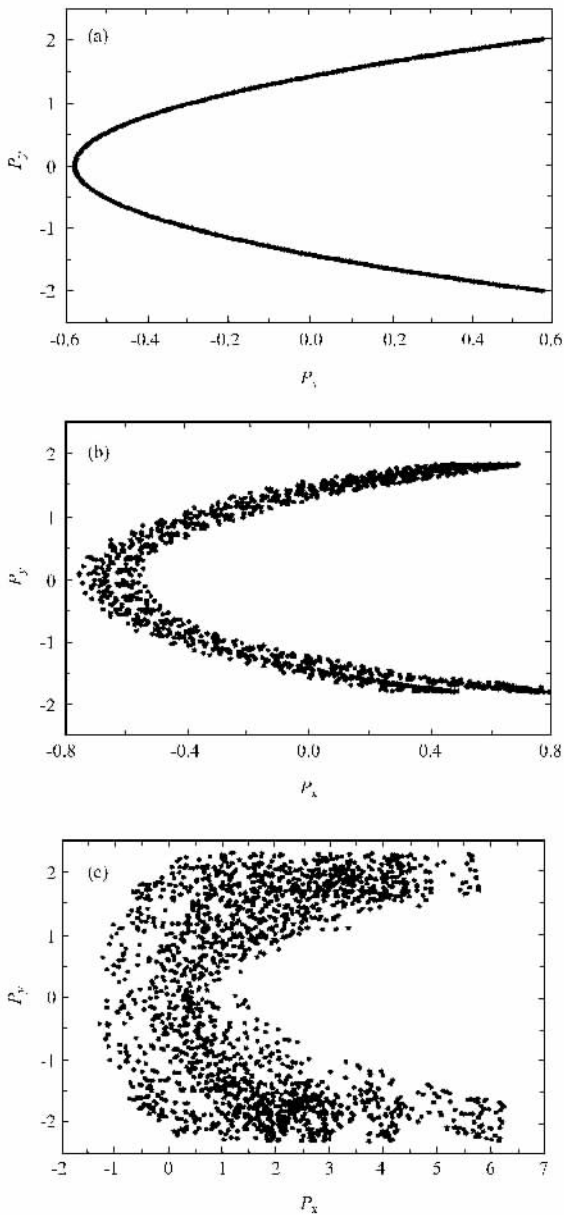


图1 电子在对撞激光场作用下在动量相空间的轨迹 (a) 只有一个激光场作用 (b) 两个激光场的振幅分别为 $a_{10} = 2, a_{20} = 0.2$ (c) 两个激光场的振幅分别为 $a_{10} = 2, a_{20} = 0.3$, 这里激光场的矢量势 a_{10} 和 a_{20} 被归一化到 mc^2/e

间, 从而获得能量. 通过利用粒子模拟程序, 我们发现很多电子可以在对撞激光场中获得很大的能量 (见图2). 这里所谓的粒子模拟是等离子体物理中的重要数值模拟方法, 它自恰求解麦克斯韦方程组, 并跟踪大量的等离子体粒子的运动. 大量的数值模拟表明, 我们提出的这种随机加速机制在强激光与等离子体相互作用中广泛存在. 这种加速机制更具一般性, 它突破了前面所述的电子感应共振加速机制的某些局限. 有关这种加速机制, 还有很多相关问

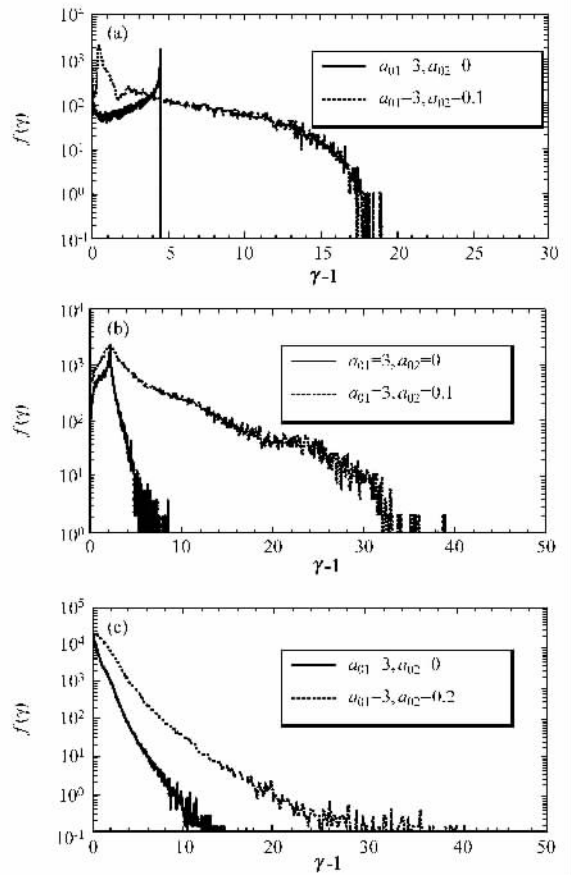


图2 在对撞激光场作用下电子的能量分布 (a) 用单电子计算的结果 (b) 和 (c) 分别是用一维和二维粒子模拟程序计算的结果. 这些计算表明, 一个较弱的反向传播的激光可以触发电子的随机运动, 从而很有效地加速电子

题正在研究之中.

参 考 文 献

[1] 张杰. 物理, 1999, 28 : 143 [Zhang J. Wuli (Physics), 1999, 28 : 143 (in Chinese)]; Mourou G, Umstadter D. Scientific American, 2002 (5) : 81; Mourou G, Barty C P J, Perry M D. Physics Today, 1998, 51 (1) : 22

[2] Sheng Z M, Sentoku Y, Mima K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 85 : 5340

[3] Chen L M, Zhang J, Li Y T *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 87 : 225001

[4] Sarachik E S, Schappert G T. Phys. Rev. D, 1970, 1 : 2738

[5] Meyer-ter-Vehn J, Sheng Z M. Phys. Plasmas, 1999, 6 : 641

[6] Yu W, Bychenkov V, Sentoku Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 85 : 570

[7] Pukhov A, Sheng Z M, Meyer-ter-Vehn J. Phys. Plasmas, 1999, 6 : 2847

[8] Sheng Z M, Mima K, Sentoku Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 2002, 88 : 55004