

数值模拟辐射场对激光等离子体中物理过程的影响^{*}

王 薇^{1)B)} 张 杰¹⁾ S. J. ROSE²⁾

¹⁾中国科学院物理研究所光物理开放实验室 北京 100080)

²⁾Rutherford Appleton Laboratory Chilton, Didcot, Oxon, OX110 QX, UK)

³⁾首都师范大学物理系 北京 100037)

(2001 年 2 月 5 日收到)

利用研究非局域热力学平衡态下等离子体的程序包 NIMP, 就辐射场对等离子体中的激发和离化过程的影响进行了数值模拟研究, 这对于未来研究辐射输运对天体物理过程影响的相关实验的设计具有一定的理论价值.

关键词: 激光等离子体, 离化态, 局域热力学平衡

PACC: 5225, 9530

1 引 言

九十年代以来, 超短脉冲激光放大技术^[1]有了重大的突破, 采用这样的强激光装置可以获得与天体物理系统中条件相同或相似的等离子体^[2], 使得强激光等离子体实验成为研究天体物理学过程的重要手段.

用激光等离子体模拟天体等离子体的关键是这两种等离子体中的物理过程之间是否有足够的相似性. 天体等离子体与激光等离子体在关键性的物理条件如压力和温度分布等方面上都存在相似性, 更为重要的是支配这两类等离子体的是相同的物理机理. 利用相似性原理和标度转换^[3,4], 使得利用激光等离子体实验来增加对天体物理内部过程的理解成为可能.

值得注意的是利用激光等离子体并不能再造天体物理等离子体. 它们之间有相似但也存在着明显的差异: 激光等离子体尺度很小(通常尺寸大约为几百微米), 寿命很短(几个纳秒), 特别是激光等离子体往往具有较大的温度和密度梯度, 使得激光等离子体只能展示远离热力学平衡的激发、离化、辐射场过程以及电子和离子的速度分布. 尽管在某些天体等离子体中也有类似的情况发生, 但与主要的天体等离子体特点是不同的. 大多数天体等离子体是满足局域热动平衡(LTE)条件的. 为此, 可以利用激

光产生的接近 Planck 分布的 X 射线辐射加热产生等离子体, 从而消除了样品中的温度和密度梯度, 同时有助于将等离子体维持在统计平衡^[5,6]. 这使得对于 LTE 下的等离子体中的 X 射线吸收谱的精确测量成为可能^[7], 从而使其对于天体物理过程研究的重要性大为增加.

本文利用 NIMP 程序与相关的辐射流体力学程序相结合, 就辐射场对等离子体中的激发和离化过程的影响进行了数值模拟研究, 它对于未来研究辐射输运对天体物理过程作用的相关实验的设计具有一定的理论价值.

2 辐射场对激光等离子体的物理过程的影响

2.1 Non-LTE ionised material package (NIMP) 程序简介

强激光产生的等离子体一般是由远离局域热力学平衡状态的. 这样的等离子体中的离子的分布是无法用统计平衡方程(Saha/Boltzmann)来描述的. 通常粒子数不是处于稳态, 粒子数分布不仅依赖于等离子体的局域状态而且也依赖于随时间的演化.

NIMP 程序包是利用平均原子模型^[8]来研究处于非局域热力学平衡(non-LTE)状态下等离子体中的激发和电离过程. 平均原子模型的核心是近似认

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 19825110 和 10004015)及中国科学院实验室天体物理专项研究经费资助的课题.

为在不同的主量子壳层上的电子之间是不相关的. 该方法通常用来计算处于 non-LTE 下系统的激发和电离分布, 以求解各种重要的离化态的速率方程. 可以描述电子温度、电子密度和不同离化态的时间演化. 由于双电子复合对研究非热动平衡状态下离子能级布居是必不可少的一个原子过程, 因此在最新版的程序包中考虑了双电子复合过程.

NIMP 程序既可以作为一个独立的软件包, 又可以作为一个界面与流体力学程序(如 MULTI 或 MEDUSA)联合使用, 以计算各离化态上的粒子数分布、辐射场对于等离子体中的激发和电离过程的影响, 以及在复合等离子体中的粒子数反转等问题.

2.2 辐射场对等离子体中激发和电离过程的影响

直接用一个长脉冲(纳秒级)强激光照射固体靶所产生的等离子体具有很高的温度梯度和密度梯度. 由于大多数天体等离子体是满足局域热动平衡的, 为了增加激光等离子体与天体等离子体的相关性, 需要在实验室中产生的等离子体具有均匀的电子温度和密度, 从而使得对处于热动平衡下的等离子体中的 X 射线的吸收谱的精确测量成为可能. 这在实验中可以通过辐射加热的方法来实现. 即用另一个激光等离子体产生的 X 射线间接加热样品来实现.

利用 NIMP 可以数值模拟研究等离子体的激发和电离过程, 以确定环境辐射场对等离子体的影响. 在理论模拟中, 我们可以借助于一维辐射流体力学程序如 MULTI^[9]或直接利用实验测得的等离子体的电子温度和材料的密度以及 X 射线辐射能流, 作为 NIMP 的输入参量得到相应的不同的离化态上的粒子数, 以及平均离化度随时间的演化等. 将模拟结果与实验测量的结果相比较, 对于靶的设计和改进行都是十分有意义的.

1. 辐射场对不同壳层上粒子数分布的影响

图 1(a) 和 (b) 分别为样品为 Al 靶在有外加 Planck 分布的辐射场 ($T_r \neq 0$) 和不加辐射场 ($T_r = 0$) 两种情形下, 在电子温度 T_e 为 40 eV 下 L 壳层和 M 壳层的粒子数随靶物质密度的分布. 其中 p_2 和 p_3 分别表示 L 和 M 壳层上的粒子数, p_2^0 和 p_3^0 分别在局域热力学平衡状态下表示 L 和 M 壳层上的粒子数.

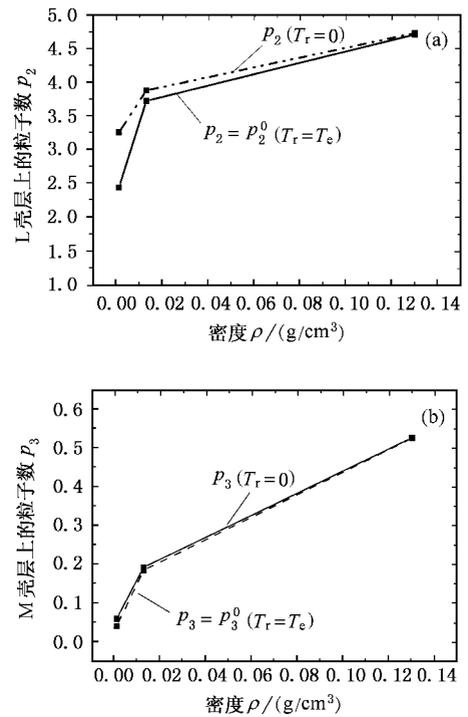


图 1 稳态下壳层粒子数随靶物质密度 ρ 的变化

结果表明:

(1) 由计算结果还可以看到, 加有一个近似 Planck 分布的辐射场可以将一个稳态壳层粒子数分布由 non-LTE 驱动到 LTE 平衡分布见图 1(a). 这表明利用软 X 射线加热样品是相当有用的, 只要辐射场是一个 Planck 分布, 那么即使在等离子体密度很低的情形下, 仍可以保证为 LTE 分布.

(2) 随着等离子体密度的增大, 在 non-LTE 情形中可以看到, 粒子数分布越来越接近 LTE 分布情形. 这是由于密度越大, 对于开壳层而言, 碰撞速率与辐射速率相比将是主要的.

(3) 由计算结果还可以看到, 对于高的主量子数的壳层的稳态粒子数分布, 有无外加的 Planck 分布的辐射场, 粒子数分布相差很小, 这是由于对于高的主量子数壳层, 碰撞速率越高, 而辐射速率越低.

2. 辐射场的强度对稳态粒子数分布的影响

图 2(a)(b)(c) 分别为不同的外加辐射场强度对 Fe 样品在电子温度为 50 eV 的稳态下 M 壳层的粒子数分布的影响.

由模拟结果可以看到:

(1) 图 2(a) 为辐射场强度为 $I = B(T)$ 时, 加有辐射场可以将粒子数分布由 non-LTE 完全驱动到

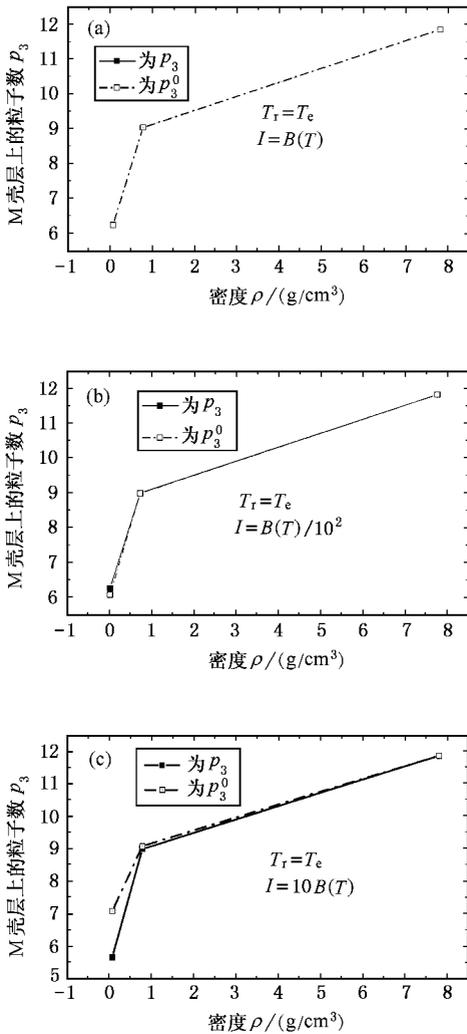


图2 不同辐射场强度下稳态粒子数随密度 ρ 的变化

LTE 的分布情形. 即有 $p_3 = p_3^0$.

(2) 图 2(b) 为辐射场强度为 $I = B(T)/10^2$ 时, 加有辐射场不能完全将粒子数分布由 non-LTE 驱动到 LTE 的情形. 此时有 p_3 略大于 p_3^0 .

(3) 图 2(c) 当辐射场强度为 $I = 10B(T)$ 时, 加有辐射场不能完全将粒子数分布由 non-LTE 驱动到 LTE 的情形. 此时有 p_3 小于 p_3^0 .

3. 辐射场对平均离化度的影响

图 3 为密度为 1.0 g/cm^3 的 Al 靶在电子温度分别为 100 和 500 eV 下平均离化度随时间 t 的分布. 由模拟结果可以看到, 平均离化度主要是由碰撞速率来决定的, 辐射场所起的作用很小. 在低温下, 由于碰撞占主要的优势, 因此无论是否加有辐射场, 平

均离化度近似处于局域热力学平衡状态. 而当温度升高时, 如当电子温度为 500 eV 时, 由于碰撞速率与辐射速率相比不再占主要优势, 此时平均离化度分布偏离局域热力学平衡分布, 辐射场的加入并不能将非局域热力学分布驱动到局域热力学平衡分布.

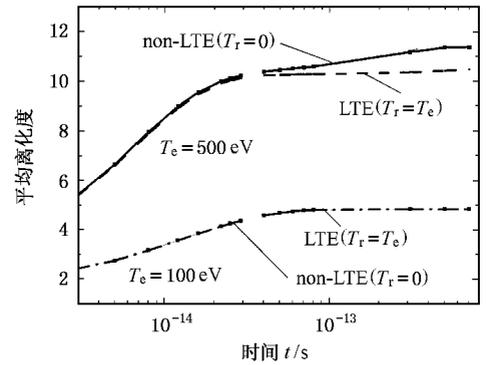


图3 辐射场对平均离化度的影响

3 结 论

本文利用 NIMP 程序与相关的辐射流体动力学程序相结合, 就辐射场对于等离子体中的激发和离化过程的影响进行了数值模拟研究. 结果表明, 利用一个近似 Planck 分布的辐射场加热样品是相当有用的, 它可以将等离子体中某一壳层的稳态粒子数分布由 non-LTE 驱动到 LTE 平衡分布. 由计算结果还可以看到, 对于高主量子数的壳层的稳态离子数分布, 有无外加的 Planck 分布的辐射场, 粒子数分布在 LTE 与 non-LTE 两种情形下相差很小. 由数值模拟结果还可以看出, 当辐射场强度不同时, 驱动的效果是不完全一样的. 此外, 平均离化度主要是由碰撞速率来决定的, 辐射场所起的作用很小. 在低温下, 由于碰撞占主要的优势, 因此为 LTE 分布. 当温度升高时, 由于碰撞速率与辐射速率相比不再占主要优势, 此时为非局域热力学平衡状态, 加入辐射场并没有将非局域热力学状态驱动到局域热力学平衡状态.

由于大多数天体物理过程是局域热平衡过程, 为此利用辐射加热产生的等离子体来模拟天体等离子体的辐射输运过程, 对于理解天体物理过程有非常重要的实际意义.

- [1] J. Zhang , G. Zhao , *Physics* **29**(2000) , 392 in Chinese [张 杰、赵 刚 *物理* **29**(2000) , 392].
- [2] B. H. Ripin *et al.* , *Laser & Part. Beam.* , **8**(1990) , 183.
- [3] J. Kane *et al.* , *Phys. Plasm.* , **6**(1999) , 2065.
- [4] D. Ryutov *et al.* , *Astroph. J.* , **518**(1999) , 821.
- [5] S. J. Rose , *Laser & Part. Beam.* , **9**(1991) , 869.
- [6] G. J. Tallents *et al.* , *Phys. Rev.* , **A40**(1989) , 2857.
- [7] G.H. Yang *et al.* , *Acta Phys. Sin.* , **49**(2000) , 2393 (in Chinese [杨国洪等 *物理学报* **49**(2000) , 2393].
- [8] W. G. Grasberger , Lawrence Livermore National Laboratory Internal Report UCRL-52276(1977).
- [9] K. Eidmann *et al.* , *Phys. Fluids* , **B2**(1990) , 208.

EFFECTS OF THE RADIATION FIELD ON THE PHYSICAL PROCESSES OF LASER-PRODUCED PLASMAS*

WANG WEI^{1,3)} ZHANG JIE¹⁾ S. J. ROSE²⁾

¹⁾*Laboratory of Optical Physics , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China)*

²⁾*Rutherford Appleton Laboratory Chilton , Didcot , Oxon , OX110 QX , UK)*

³⁾*Department of Physics , Capital Normal University , Beijing 100037 , China)*

(Received 5 February 2001)

ABSTRACT

A numerical simulation study was done on effects of an ambient radiation field on the processes of excitation and ionization in a plasma , using a non-LTE ionised material package NIMP. It has potential importance in the future experimental design to study the effects of the radiation field on the physical processes in the astrophysical research.

Keywords : laser-produced plasmas , state of ionization , local thermodynamic equilibrium(LTE)

PACC : 5225 , 9530

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 19825110 and 10004015) and by the Innovation for Laboratory Astrophysics of the Chinese Academy of Sciences.