

研究快讯

对天体等离子体中铝发射谱的理论研究*

金 展 张 杰

(中国科学院物理研究所光物理实验室 北京 100080)

(2000 年 7 月 21 日收到)

超强超短脉冲激光产生的高温、高密、强磁场等离子体与天体等离子体在许多方面都有很强的相似性,这使得某些天体物理过程的实验室模拟成为可能.对天体等离子体中的铝发射谱进行了理论模拟,结果显示,利用激光等离子体的发射光谱,可以在实验室获得天体上难于观测的光谱范围并为天体物理学研究提供丰富的信息.

关键词:实验室天体物理,激光等离子体,发射谱

PACC: 9530, 5250J

1 引 言

近年来超短脉冲激光放大技术的重大突破,使得激光强度提高了 5—6 个数量级,其聚焦光强高达 10^{20} W/cm³,而且超强超短脉冲激光与固体靶相互作用可以产生大于 10^{11} Pa 的超高压, 10^4 T 的超强磁场,高于 10^9 度的黑体辐射温度等一系列无法用其他手段获得的极端条件^[1].

超强超短脉冲激光与固体靶相互作用产生的高温、高密、强磁场的等离子体与太阳及其他许多星体中的环境非常相似.通过激光等离子体,可以在实验室里模拟一些天体物理过程,如对于天体物质不透明度的研究,状态方程的模拟,辐射输运过程的模拟等^[2,3].

高能天体物理主要研究那些远离热平衡状态的类星系和那些正在不断喷射着 X 射线和 γ 射线的星系.天体物理学家非常希望能够有细致的 X 射线和 γ 射线光谱来研究这些等离子体光谱所反映的发射物体的本质.由于大气层的存在,天体发射的 X 射线不能在地面上直接观测到.通过对激光等离子体光谱的研究可以获得比天文观测更加精细的谱线,同时,可以方便地观测到 X 射线区域的光谱.

天体物质的主要成分为 H, He, 但是随着观测水平的提高,对 Al, Mg, Fe 等含量比较丰富的元素谱线的研究也越来越具有意义.本文主要讨论的是

对天体等离子体中铝发射谱的理论模拟.下一步我们将结合激光等离子体的实验数据与理论模拟结果及与天体等离子体的结果对照,希望通过实验室模拟来为天体物理提供更加准确和精细的信息.

2 模型描述

下面,我们将介绍在模拟中使用的获得各能级粒子数的主要算法.

首先,讨论最简单的低不透明度非局域热动平衡稳态(Non-LTE Steady-State Solution In Optically Thin Limit)解.速率方程可以表示为矩阵形式

$$\frac{d\bar{n}}{dt} = \bar{R}\bar{n},$$

其中 \bar{n} 是能级粒子数向量, \bar{R} 是速率矩阵.

对于稳态解的情况,要求 $\frac{d\bar{n}}{dt} = 0$, 也就是说 $\bar{R}\bar{n} = 0$. 加入约束方程

$$\sum_{i=0}^Z z_i n_i = N_e,$$

其中 Z 是原子序数, z_i 是与 n_i 对应的能级的电量.我们可以解得能级粒子数矩阵.

为了获得跃迁谱线,假设观测到的谱线发射来自层状的具有一定温度和密度的等离子体,则谱线强度为

$$I_\nu = S_\nu(1 - e^{-\tau}) \text{ erg/cm}^2/\text{s}/\text{Hz}/\Omega$$

* 国家自然科学基金(批准号:19825110, 10005014)和国家高技术激光核聚变主题资助的课题.

这里

$$S_\nu = \frac{\epsilon_\nu}{\kappa_\nu} (\text{erg/cm}^2/\text{s/Hz}/\Omega)$$

$$\tau_\nu = \kappa_\nu L$$

L 是层的几何厚度, κ_ν 为发射率, ϵ_ν 为不透明度^[4,5].

对于跃迁光谱的形状, 我们使用了 Voigt 方程, 同时也计算了各种情况下的 Stark 线形来获得综合线形^[6-9].

基于以上算法, 在理论上模拟高温、高密度天体等离子体中铝的发射谱线.

3 主要结果

图 1 为计算所得的铝的类氢、类氦离子谱线图. 在这里我们使用了与天体等离子体相似的条件: 10^{19} cm^{-3} 的电子密度、1000 eV 的电子温度、100 eV 的离子温度. 图 2 为相同条件下铝的类氢、类氦的 Lyman 系谱线图.

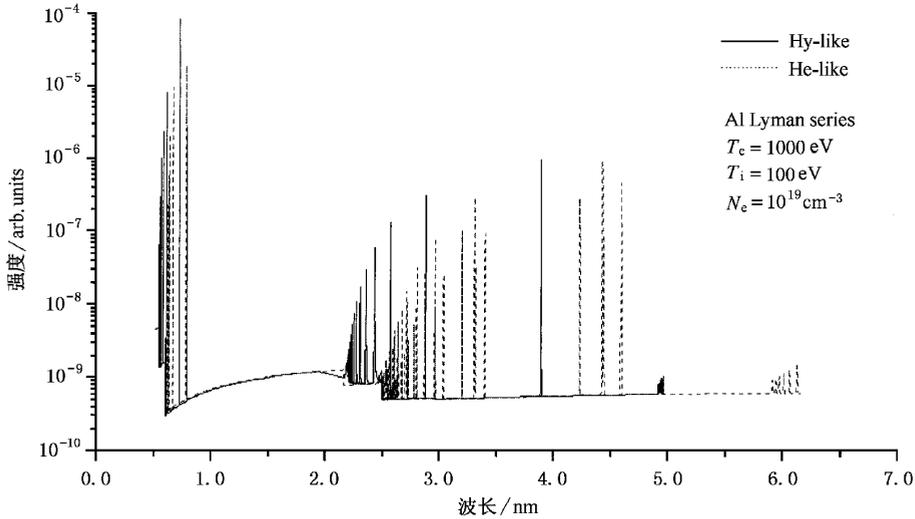


图 1 铝元素类氢、类氦离子发射谱线

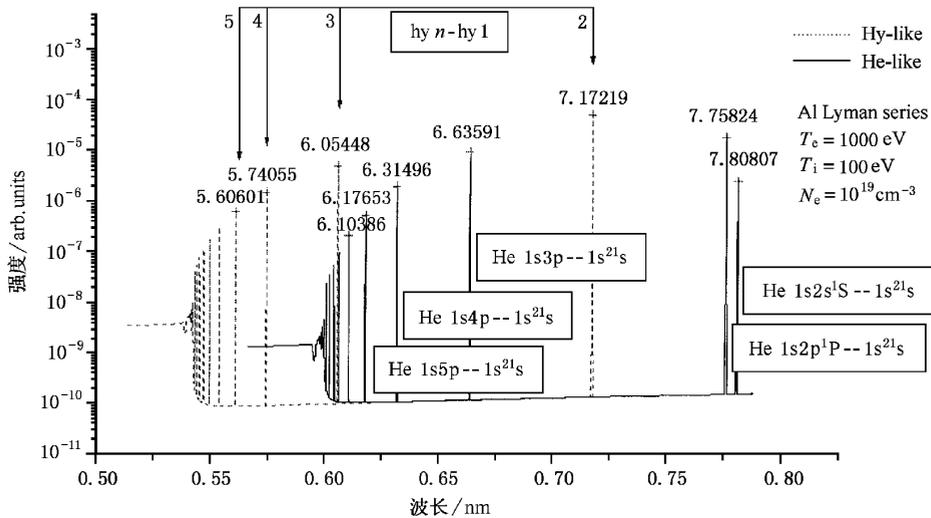


图 2 铝的类氢、类氦离子的 Lyman 系谱线图

同时我们注意到, 如果仔细研究类氢离子与类氦离子的谱线强度就会发现, 类氢与类氦离子谱线的强度比实际上包含着温度的信息, 温度越高, 类氢

离子的发射谱就越强. 我们取从 600eV—2000eV 的温度范围做计算, 得到以下结果.

图 3 为类氢离子的 Lyman α 线与类氦离子

$1s2p^1P-1s^2S$ 跃迁的强度比随温度变化的曲线.

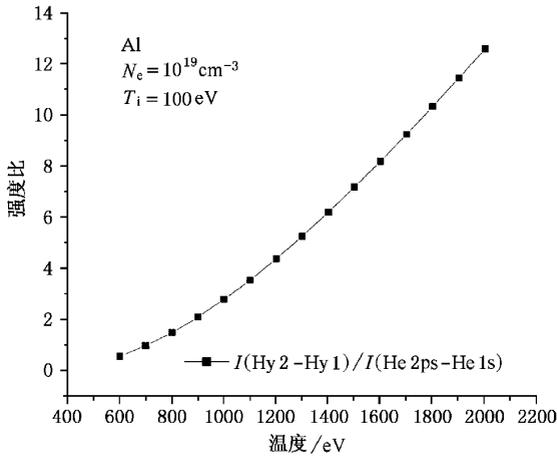


图 3 类氢离子的 Lyman α 线与类氦离子 $1s2p^1P-1s^2S$ 跃迁的强度比随温度变化的曲线

如果我们的计算和激光等离子体的实验测量吻合,那么我们将可以从天文观测的谱线强度比对照计算所得的曲线对星体的温度进行初步判断.

4 结 论

利用超强超短脉冲激光与固体靶相互作用产生的等离子体,可以从多个角度模拟各种不同的天体现象,有利于深入研究天体等离子体中的细致物理过程.激光等离子体具有极大的温度和密度参数范围,在很多地方与天体等离子体具有相似性,可以通过建立严格的标度转换规律而相互对应.

本文介绍了利用原子物理模型对于天体等离子体中铝发射谱进行的理论模拟过程.我们除了对谱线强度进行了计算之外,还做出了类氢与类氦谱线的强度比随电子温度变化的曲线.希望在理论上获得对星体温度进行判断的方法.

同时,我们在理论上进行的模拟也证明了对一些天体物理过程进行实验室模拟是可行的.可以预计,随着激光等离子体和天文学观测的进展,可以通过激光与物质相互作用来研究的天体物理现象将越来越多,天体过程的实验室模拟也将会越来越丰富.

[1] J. Zhang, G. Zhao, *Laboratory Astrophysics, Physics* (Accepted).

[2] J. S. Wark *et al.*, *Phys. Plasma* **A**(1999) 2004.

[3] B. A. Remington *et al.*, *Science* **284**(1999) 1488.

[4] D. Mihalas, *Stellar Atmospheres*, second edition, Chapter 4 (W. H. Freeman, San Francisco), 1978.

[5] W. J. Karzas, *R. Letter, Appl. J. Suppl.* **55**(1961) 167.

[6] J. Drayson, *J. Q. S. R. T.* **16**(1976) 611.

[7] R. W. Lee, *J. Q. S. R. T.* **40**(1988) 561.

[8] C. A. Iglesias *et al.*, *Phys. Rev. A* **28**(1983) 1667; **31**, 1698 and (1985) 1681.

[9] G. Olsen, LANL (private communication).

STUDY OF ALUMINUM EMISSION SPECTRA IN ASTROPHYSICAL PLASMAS^{*}

JIN ZHAN ZHANG JIE

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

(Received 21 July 2000)

ABSTRACT

High temperature , high density and strong magnetic fields in plasmas produced by ultra-high intensity and ultrashort laser pulses are similar to the main characteristics of astrophysical plasmas. This makes it possible to simulate some astrophysical processes at laboratories. This paper presents our theoretic simulation of aluminum emission spectra in astrophysical plasmas. It can be concluded that using laser produced plasmas , we can obtain rich information on astrophysical spectroscopy , which is unobservable for astronomer.

Keywords : Laboratory astrophysics , laser plasmas , emission spectra

PACC : 9530 , 5250J

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19825110 , 10005014).