

# 吸积盘的 X 射线辐射对周围星际物质的离化研究<sup>\*</sup>

王 薇<sup>1,2,3)</sup> 张 杰<sup>2)†</sup> 赵 刚<sup>1)</sup>

1) (中国科学院国家天文台, 北京 100012)

2) (中国科学院物理研究所光物理实验室, 北京 100080)

3) (首都师范大学物理系, 北京 100037)

(2005 年 3 月 9 日收到, 2005 年 5 月 16 日收到修改稿)

利用辐射流体力学程序对三倍频纳秒激光与靶物质相互作用进行了模拟研究, 得到了可以产生黑体辐射谱分布的激光等离子体 X 射线辐射靶的最佳厚度, 数值模拟研究了黑体谱分布的 X 射线辐射场对等离子体系统平均离化度分布的影响, 它有助于深入理解天体物理中吸积盘对它周围星际物质的离化影响.

关键词: 辐射流体力学, 激光等离子体, X 射线辐射, 吸积盘, 离化

PACC: 5225, 9530

## 1. 引 言

众所周知, 宇宙间的大多数物质是以离化气体或等离子体的形式存在. 星际间的介质是低温、低密度等离子体, 而星球内部则是高温、高密度等离子体, 同一星体中也可以存在不同的等离子体状态. 因此在实验室环境下产生与天体有相似特征的等离子体是实验室进行天体物理学研究的重要保证. 近年来以掺钛蓝宝石飞秒激光器为代表的超短脉冲锁模激光的出现极大地改变了激光技术的面貌; 与啁啾脉冲放大(CPA)技术相结合, 可以产生功率和强度都接近极限的激光脉冲. 这种新型超短脉冲激光的聚焦光强高达  $10^{20} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 它与固体靶相互作用可以产生大于  $10^{16} \text{ Pa}$  的超高压、 $10^4 \text{ T}$  的超强磁场、高达  $10^9 \text{ }^\circ\text{C}$  (远高于太阳中心的温度) 的黑体辐射温度等一系列无法用其他手段产生的极端条件, 从而给整个物理学都带来了极大的冲击和崭新的机遇<sup>[1,2]</sup>. 由于超短脉冲强激光与固体靶相互作用所产生的高温、高压、高密度、强磁场、大加速度的等离子体与太阳及其他许多恒星中的环境非常相似, 由此通过强激光等离子体实验, 天体物理学中感兴趣的许多物理过程如物质不透明度、高温、高压、强磁场下的物质状态方程、超新星的爆发以及超新星遗迹演化动力学过程、恒星中的核反应速率等都可以在实验室

里进行模拟和验证, 从而成为检验天体物理观测和理论模拟能力的一种重要手段.

吸积盘在吸积过程中产生的 X 射线波段的黑体辐射场对周围星际介质的影响一直是天体物理学中研究的热点<sup>[3-8]</sup>. 本文利用 NIMP 程序<sup>[9]</sup>与辐射流体力学程序 MULTI 相结合<sup>[10]</sup>, 借助于长脉冲高能激光等离子体实验模拟研究了吸积过程中强的黑体谱分布的 X 射线辐射场对于周围等离子体物理环境的影响, 所得到研究结果对于利用激光等离子体 X 射线辐射加热实验模拟研究天体等离子体的微观物理过程, 进一步理解吸积过程对周围星际物质的影响具有非常重要的实际意义.

## 2. 吸积盘对周围星际物质的影响的实验室模拟研究

吸积过程主要是指致密天体通过引力俘获周围物质的过程. 吸积过程主要发生在白矮星、中子星或黑洞等致密天体与正常恒星组成的双星系统以及大尺度的类星体和其他活动星系核中. 图 1 为双星系统中的吸积现象的模拟图.

由图 1 可以清晰地看到在由致密星体和正常恒星组成的双星系统中, 来自致密星体的强大引力将俘获正常恒星的包层物质, 将它扭曲成为一个梨形, 而被俘获的物质则在致密星周围形成一个巨大的扁

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 10374116, 10433010 和 10573024)及首都师范大学北京市纳米光电子实验室开放课题(批准号: D40006)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: jzhang@aphy.iphy.ac.cn



图 1 双星系统中的吸积现象的模拟图

平状的吸积盘<sup>[11]</sup>.从已知的 X 射线双星系统所估计出的吸积盘的大小介于月亮轨道直径与太阳轨道直径之间,即介于  $80 \times 10^4$  km 到  $140 \times 10^4$  km.吸积盘在向内盘旋过程中将在强大的引力势能作用下不断地掉入致密星中,同时向外发射很强的近似黑体谱分布的 X 射线辐射.为此,整个吸积盘可以看成是一个很强的黑体辐射环<sup>[12,13]</sup>.它是比天体物理中许多其他能源(如热核聚变)更为有效的能源<sup>[11]</sup>.

利用激光等离子体 X 射线辐射加热实验可以模拟研究吸积盘对周围星际物质光离化等微观物理过程的影响.图 2 为利用激光等离子体实验室模拟研究吸积盘对周围星际物质的影响实验示意图.

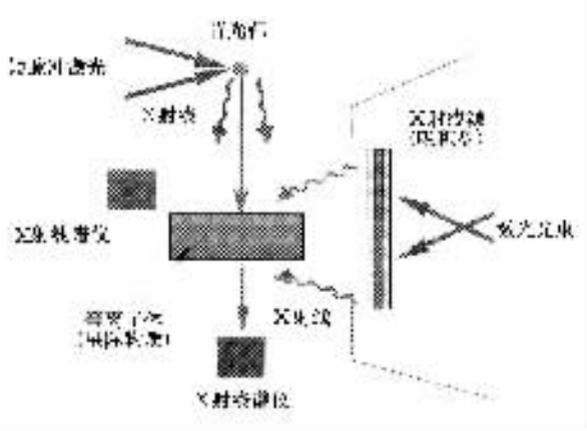


图 2 激光等离子体实验模拟吸积盘对周围星际物质影响的示意图

激光打在一个很薄的高  $Z$  固体靶上,靶由金箔以及两边的塑料薄膜层构成.靶中的金箔可以吸收大多数激光能并以 X 射线的形式再发射<sup>[14-26]</sup>.未被金箔吸收的激光能可以由塑料薄膜层吸收;而塑料薄膜对于 X 射线基本上是透明的.金箔与塑料薄膜共同作用的结果是将脉冲激光能转换为具有大致相同的脉宽但强度要低许多的 X 射线辐射.通过对靶

的厚度进行优化,可以在靶的背面得到较强的 X 射线辐射.该 X 射线能谱具有近似黑体谱的性质,其辐射温度为 100 eV 左右.由于 X 射线辐射为近似普朗克谱分布,该辐射场可以将样品等离子体中的粒子数分布调制到接近统计平衡状态,它类似于星体内部的状况.

实验中我们将这个很强的 X 射线辐射源靶视为吸积盘的 X 射线辐射,样品等离子体视为吸积盘周围的星际等离子体.通过研究辐射源靶所产生的接近黑体谱分布的 X 射线辐射场对样品等离子体的光离化等微观物理过程的影响可以进一步理解吸积盘所产生的 X 射线辐射对周围星际物质微观物理过程的影响.

### 3. 数值模拟研究

#### 3.1. 激光等离子体 X 射线辐射源靶厚度的优化与 X 射线辐射能谱的特征

激光等离子体中被热电子加热的一层薄层烧蚀区是一个极强的 XUV 和 X 射线发射源,它在实验中已经有许多的应用.如将其辐射加热另一个样品靶可以产生比较均匀的等离子体条件;也可以将 X 射线源靶沉积在某些材料上,用来研究热 X 射线在这些材料中的辐射输运过程.实验中作为 X 射线辐射源靶厚度的优化的基本思想是选择靶的厚度大小既能保证可以吸收所有入射的激光能同时还能保证在靶的后表面有足够高的 X 射线辐射能.为此我们利用辐射流体力学程序 MULTI 对靶的厚度进行了优化<sup>[27]</sup>.

图 3 给出了功率为  $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>、脉冲宽度为 1 ns、波长为 350 nm 的强激光脉冲辐照厚度范围为 0.15—1.0  $\mu$ m 的平面 Au 靶时激光吸收能和靶后 X 射线辐射能  $E_{\text{rad}}^-$  以及靶后 X 射线转换效率  $\eta_{\text{rad}}^-$  随靶厚度的变化趋势.结果表明当靶的厚度小于 0.25  $\mu$ m 时,激光吸收能和靶后 X 射线辐射能流随厚度的增加而增加,但此时由于靶很薄,激光与靶相互作用产生的等离子体将迅速向真空膨胀形成密度非常低的等离子体,使得整个等离子体对于入射激光而言基本上是透明的,导致激光与靶的耦合效率很低.尽管靶后 X 射线转换效率很高(0.18  $\mu$ m 时,靶后的 X 射线转换效率可高达 37.2%),靶后实际得到的 X 射线辐射能流并不高,因此此情形不适宜作为 X 射线

## 辐射源靶.

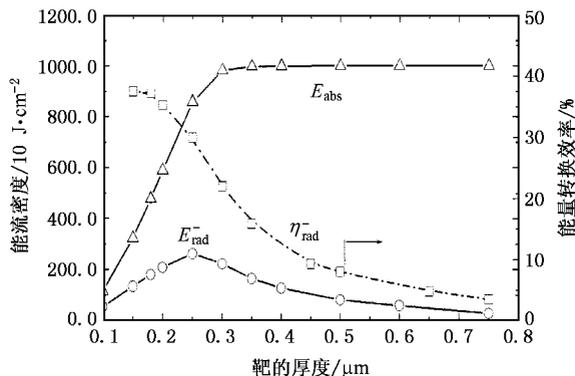


图 3 靶的厚度对能量转化的影响

当靶的厚度大于  $0.25 \mu\text{m}$ , 激光吸收能随靶厚度的增加开始趋于饱和. 此时由于冲击压缩在靶的后表面附近的等离子体密度很高, 接近甚至大于固体靶的密度 ( $> 1 \text{ g/cm}^3$ ). 在该情形下, 高密物质区不但吸收了全部的激光能而且也吸收掉了大多数的 X 射线辐射能, 此时靶后 X 射线转换效率很小 ( $< 3.5\%$ ) 因此靶后的 X 射线能流很低. 从图 3 可以看到当靶的厚度大于  $0.25 \mu\text{m}$ , 靶后 X 射线能流随厚度增加迅速衰减. 该场合也不适合作为 X 射线辐射源靶.

当靶的厚度为  $0.25 \mu\text{m}$  时, 可以看到此时激光吸收开始趋于饱和, 靶后 X 射线辐射能也达到最高. 这主要是由于此厚度下激光与靶相互作用产生的等离子体区主要是由转换区和很窄的再发射区组成. 很窄的再发射区足够高的密度 ( $> 0.1 \text{ g/cm}^3$ ) 即可以保证吸收几乎全部的激光能, 同时又能保证了靶后 X 射线的转换效率足够高 ( $30.2\%$ ).

综上所述, 通过模拟研究, 我们得到了在所给定的激光和靶参数条件下作为强 X 射线辐射源靶的

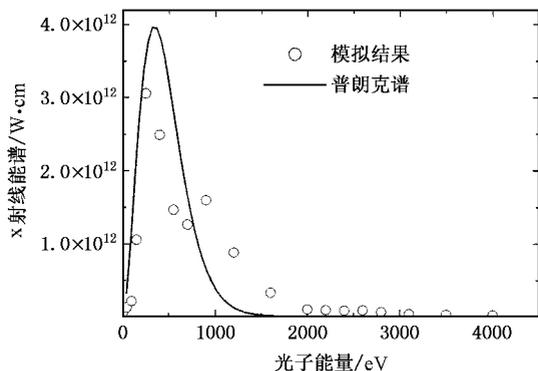


图 4 激光等离子体 X 射线辐射谱与黑体谱的比较

最优厚度为  $0.25 \mu\text{m}$ , 其对应的靶后 X 射线转换效率为  $30.2\%$ .

我们利用一维辐射流体动力学程序 MULTI 模拟研究了强激光与固体 Au 靶相互作用产生的 X 射线谱<sup>[28]</sup>. 图 4 给出了功率密度为  $10^{14} \text{ W/cm}^2$ 、脉宽为  $1 \text{ ns}$ 、波长为  $0.35 \mu\text{m}$  的激光辐照厚度为  $0.25 \mu\text{m}$  的 Au 靶时, 靶后 X 射线能谱与等效温度的黑体辐射谱进行了拟合. 结果表明 X 射线能谱与相应的黑体辐射谱基本上符合, 为此靶后 X 射线辐射谱为一个准黑体辐射谱.

### 3.2. 普朗克谱分布的 X 射线辐射场对激光等离子体系统的影响

激光等离子体系统是由光子、电子(包括自由电子和束缚电子)以及不同离化态的离子组成. 这些粒子之间的相互作用可以分为粒子与粒子之间(离子-离子、离子-电子、电子-电子)的碰撞相互作用以及粒子与光子之间的辐射相互作用. 等离子体的激发和离化过程是这些相互作用的结果. 对于不同的元素, 不同的力学状态, 起重要作用的微观物理过程不同, 导致等离子体处于不同的平衡态模式. 一般描述等离子体系统的主要模式有局域热力学平衡 (LTE) 模式和非局域热力学平衡 (NLTE) 模式.

等离子体系统是否处于 LTE 状态, 主要取决于粒子相互作用过程中由弹性碰撞引起的热化时间是否比非弹性碰撞时间更为迅速. 设自由电子的非弹性碰撞时间近似为  $\tau_i = Z^* (dZ^*/dt) / Z^*$  ( $Z^*$  为平均离化度) 而弹性碰撞引起的特征热化时间近似为  $\tau_e = \frac{5 \times 10^{-15} (kT_e) A}{\rho Z^*}$ . 当两者的比值为  $\Gamma = \tau_i / \tau_e < 1$  时, 系统处于 LTE 状态;  $\Gamma = \tau_i / \tau_e \geq 1$ , 系统偏离 LTE 状态<sup>[10]</sup>. 由此可知当等离子体的密度较高、温度较低时, 等离子体系统处于 LTE 状态, 而随着密度降低, 温度升高, 系统逐渐偏离 LTE 状态.

强激光产生的等离子体一般是远离局域热力学平衡状态的, 通过在等离子体中加入普朗克谱分布的辐射场, 使得等离子体的微观物理过程发生改变, 从而使处于 NLTE 状态的等离子体趋于 LTE 状态.

图 5 为利用 NIMP 程序模拟了辐射场温度对电子温度分别为  $100 \text{ eV}$  和  $500 \text{ eV}$  的 Fe 等离子体的平均离化度分布的影响.

由图 5(a) 的计算结果可知, 在电子温度不是很高的情形下 ( $T_e = 100 \text{ eV}$ ), 各种密度下的等离子体

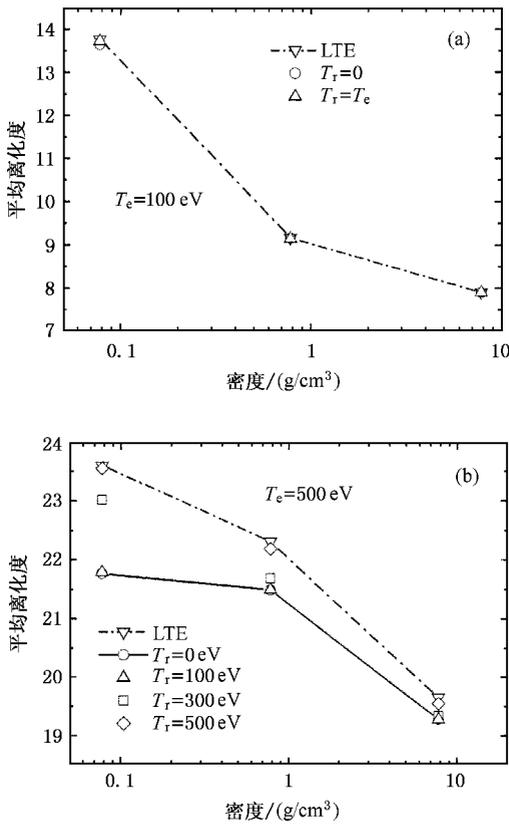


图 5 X 射线辐射场温度对 Fe 等离子体的离化度的影响

的平均离化度分布基本上接近于 LTE 分布. 外加的辐射场对等离子体的平均离化度分布并未产生明显的影响.

随着电子温度的升高, 可以看到在高温下(见图 5(b))等离子体的平均离化度分布状态对密度的大小开始变得敏感. 对于低密度等离子体, 由于辐射复合与光电离、谱线发射与吸收过程之间不可能达到平衡, 导致离化是远离局域热力学平衡分布的. 此时, 在等离子体中加入一个近似黑体谱分布的环境辐射场非常有用, 它能驱使平均离化度由 N-LTE 分布接近 LTE 分布.

对于高密度等离子体, 由于碰撞速率与辐射速率相比占绝对优势, 等离子体接近于局域热平衡状态, 此时无论是否存在环境辐射场, 等离子体的平均离化度分布均接近 LTE 分布.

此外我们还研究了不同辐射温度的辐射场的驱动效果. 图 5(b) 给出了辐射温度分别为 100 eV, 300 eV 和 500 eV 的辐射场对等离子体的驱动效果. 模拟结果表明当所加入的辐射场的温度越接近于等离子体的电子温度, 辐射驱动效果越好.

图 6 模拟研究了辐射场的强度对电子温度为

500 eV 的 Fe 等离子体的平均离化度分布的影响. 结果显示当加入的辐射场强度完全等于  $I_0 = B(T)$ , ( $B(T)$  为等效温度的黑体谱的辐射强度), 可以看到此时辐射场的驱动效果非常好, 它可以将等离子体由 N-LTE 完全驱动到 LTE (见图 6(a)).

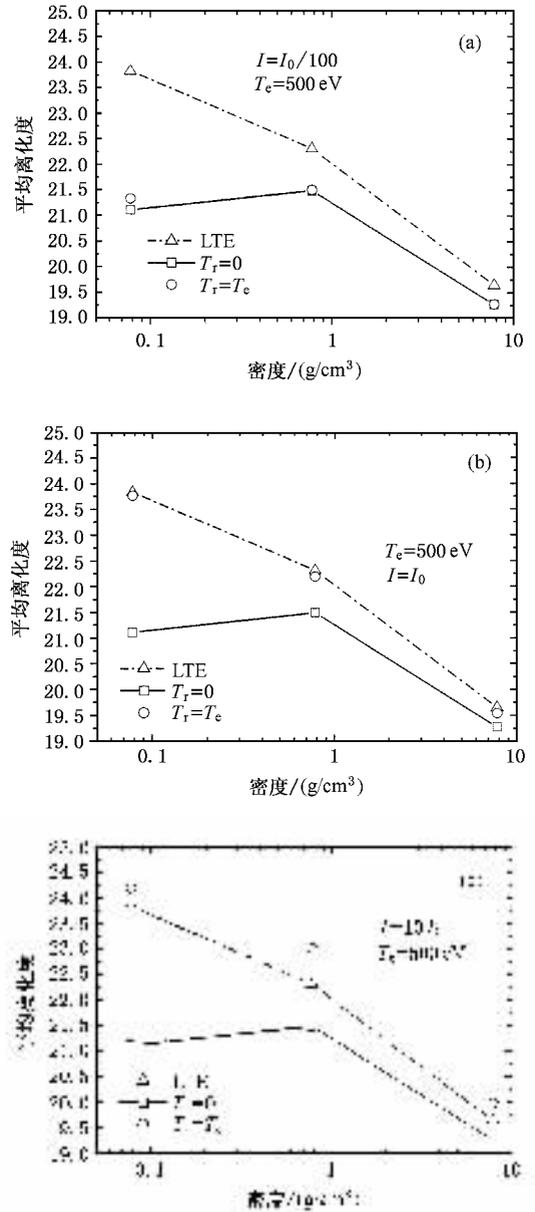


图 6 辐射场强度对等离子体平均离化度分布的影响

图 6(b) 和图 6(c) 给出的辐射场强度分别为  $I = B(T)/100$  和  $I = 10B(T)$ , 可以看到当辐射场的强度不完全等于  $I_0$  时, 驱动效果将受到很大影响, 此时辐射场的加入并不能完全将等离子体由 N-LTE 驱动到 LTE. 为此, 实验设计中为了保证外加的 X 射线辐射场对样品等离子体的平衡态起到很好的调制

作用,需要对 X 射线辐射源靶与样品靶之间的距离进行调试,以保证入射的 X 射线辐射强度刚好等于等效温度下的黑体谱的辐射强度。

我们模拟研究了电子温度分别为 100 eV 和 500 eV,密度分别为  $0.078 \text{ g/cm}^3$  和  $0.78 \text{ g/cm}^3$  的 Fe 等离子体的平均离化度随时间的演化(见图 7)。由模拟结果可以看到,在激光脉冲前期,各种温度和密度下的等离子体均是远离局域热力学平衡状态的。图 7(a)和(b)分别给出了在相同电子温度(100 eV)下等离子体的平均离化度,可以看到密度越低,对 LTE 的偏离就越厉害。图 7(b)和(c)给出了相同密度下( $0.78 \text{ g/cm}^3$ )的等离子体的平均离化度。结果表明高温等离子体相对低温等离子体对 LTE 的偏离更大。

由模拟结果还可以看到随着时间的演化,在低温情形下,等离子体开始近于局域热力学平衡状态(见图 7(a)和(b))。但是对于高温情形,如当电子温度为 500 eV 时(见图 7(c)),等离子体即使在演化后期仍然偏离局域热力学平衡分布,这是由于随着等离子体温度的升高,弹性碰撞引起的热化时间变得越来越慢,而电子的非弹性碰撞时间则变得越来越快,从而导致高温等离子体在整个时间演化过程中均处于非局域热力学平衡状态。

模拟结果还显示对于早期的等离子体,平均离化度主要是由碰撞过程来决定的,为此外加辐射场所起的作用很小。但随着时间的推移,辐射相互作用开始占优势,此时外加辐射场开始发生显著的作用。图 7(c)可以看到外加的辐射场对于后期等离子体具有明显驱动效果,它可以将等离子体由非局域热力学平衡状态驱动到局域热力学平衡状态。

通过比较还可以看到随着密度的变大或温度的升高,等离子体平均离化度到达稳态所用的时间会变得越来越长,图 7(a),(b)和(c)达到稳态的时间分别为 0.17 ps, 6 ps 和 9 ps。

## 4. 结 论

本文主要是利用高能激光等离子体实验模拟研究天体物理中吸积盘产生的强 X 射线辐射场对周围星际物质的影响。

1. 利用一维辐射流体动力学程序 MULTI 对作为激光等离子体 X 射线辐射源靶的厚度进行了优化,并将所得到的 X 射线辐射能谱与黑体辐射谱进行拟合,得到了作为近似黑体谱分布的 X 射线源靶的最佳厚度。

2. 研究了 X 射线源靶产生的近似 Plank 分布的辐射场对等离子体系统的结果表明:

1) 当等离子体的密度较高、温度较低时,等离子体系统处于 LTE 状态,而随着密度降低,温度升高,系统逐渐偏离 LTE 状态。此时若在等离子体中加入一个近似黑体谱分布的环境辐射场是相当有用的,模拟结果表明它能够将等离子体的平均离化度分布由 N-LTE 驱动到 LTE 分布。

2) 分别对不同温度下的辐射场的驱动效果进行了模拟研究,结果表明辐射场温度越接近电子温度,驱动效果越好。

3) 模拟研究了不同辐射强度下辐射场对激光等

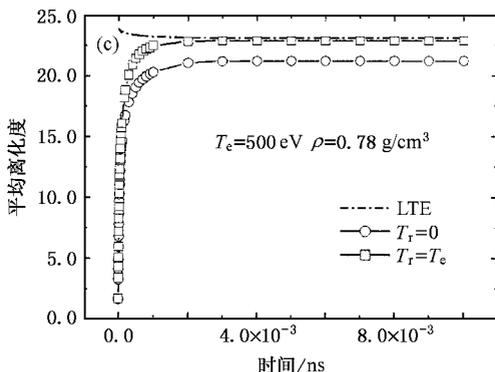
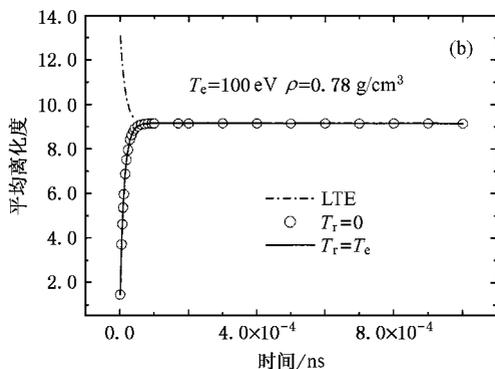
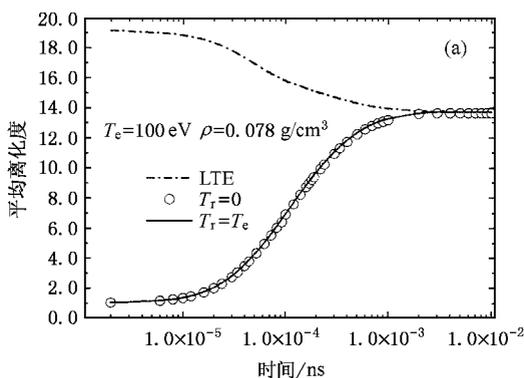


图 7 平均离化度随时间的演化

离子体系的影响. 结果表明当辐射场强度越接近  $I_0 = B(T)$  ( $B(T)$  为等效温度的黑体谱的辐射强度), 驱动效果越好, 当辐射场的强度等于  $I_0 = B(T)$  时, 可以将等离子体由 N-LTE 完全驱动到 LTE.

4) 同时, 我们还数值模拟了各种温度和密度下, 等离子体的平均离化度随时间的演化过程. 研究表明在等离子体演化过程的早期, 等离子体系统远离局域热力学平衡状态. 此时环境辐射场的加入并不

能对等离子体的平衡状态有很明显的影响. 但随着时间的演化, 环境辐射场的作用开始明显. 特别是在高温下, 辐射场可以将系统驱动到 LTE.

上述这些研究对于深入了解天体吸积盘所发出的近似黑体辐射谱的强 X 射线辐射对周围星际介质的影响具有十分重要的作用, 为相关的实验设计提供了理论依据. 对于最终实现在实验室条件下对吸积盘对周围星际物质的离化过程的影响的模拟研究具有一定的实际意义.

- [ 1 ] Zhang J, Zhao G 2000 *Physics* **29** 392 ( in Chinese ) [ 张 杰、赵刚 2000 物理 **29** 392 ]
- [ 2 ] Xia J F, Zhang J 2001 *Physics* **30** 210 ( in Chinese ) [ 夏江帆、张杰 2001 物理 **30** 210 ]
- [ 3 ] Frank A, Noriega-Crespo A, Balick B 1993 *Astrophys. J.* **104** 841
- [ 4 ] Wardle M 1993 *Astrophys. J.* **410** 218
- [ 5 ] Vitello P, Shlosma 1993 *Astrophys. J.* **410** 815
- [ 6 ] Raymond J C 1993 *Astrophys. J.* **412** 267
- [ 7 ] Martin C L, Kennicett R C 1995 *Astrophys. J.* **447** 171
- [ 8 ] Igea J and Glassgold A 1999 *Ap. J.* **518** 847
- [ 9 ] Ramis R, Schmalz, Meyer-ter-Vehn J 1988 *Comp. Phys. Commun* **49** 475
- [ 10 ] Rose S J 1997 RAL-TR-97-020
- [ 11 ] Jimenez-Garate M A 2002 *Astrophys. J.* **581** 1297
- [ 12 ] Suleimanov V F 2002 *Astron. Lett.* **28** 745
- [ 13 ] Psaltis D 2002 *Astrophys. J.* **574** 306
- [ 14 ] Chen Z L, Zhang J, Teng H *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1081 ( in Chinese ) [ 陈正林、张 杰、藤 浩等 2002 物理学报 **51** 1081 ]
- [ 15 ] Goldstone P D, Goldman S R, Mead W C 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 56
- [ 16 ] Földes I. B, Edimann K, Veres G *et al* 2001 *Phys. Rev. E* **64** 016410
- [ 17 ] Jin Z, Zhang J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 365 ( in Chinese ) [ 金展、张 杰 2001 物理学报 **50** 365 ]
- [ 18 ] Eidmann K, Schmalz R F, Sigel R 1990 *Phys. Fluids B* **2** 208
- [ 19 ] Xia J F, Zhang J, Zhang J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 994 ( in Chinese ) [ 夏江帆、张 军、张 杰 2001 物理学报 **50** 994 ]
- [ 20 ] Sigel R, Eidmann K, Lavarenne F *et al* 1990 *Phys. Fluids B* **2** 199
- [ 21 ] Wang W, Zhang J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 590 ( in Chinese ) [ 王 薇、张 杰 2002 物理学报 **51** 590 ]
- [ 22 ] Peng X Y, Zhang J, Jin Z *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2625 ( in Chinese ) [ 彭晓昱、张 杰、金 展等 2004 物理学报 **53** 2625 ]
- [ 23 ] Alaterre P, Pepin H, Fabbro R *et al* 1986 *Phys. Rev. A* **34** 4184
- [ 24 ] Chan Y, Wang W, Zhang J *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1742 ( in Chinese ) [ 苍 宇、王 薇、张 杰等 2001 物理学报 **50** 1742 ]
- [ 25 ] Mead W C, Campbell E M, Estabrook K *et al* 1983 *Phys. Fluids* **26** 2316
- [ 26 ] Nishimura H, Matsuoka F, Yagi M *et al* 1983 *Phys. Fluids* **26** 1688
- [ 27 ] Wang W, Dong Q L, Zhang J 2002 *Physics of Plasmas* **9** 3978
- [ 28 ] Wang W, Zhang J, Senecha V K 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 967 ( in Chinese ) [ 王 薇、张 杰、Senecha V K 2004 物理学报 **53** 967 ]

# Simulation of the effects of X-ray emission from accretion disks on the interstellar materials<sup>\*</sup>

Wang Wei<sup>1,2,3)</sup> Zhang Jie<sup>2)†</sup> Zhao Gang<sup>1)</sup>

1) ( *National Astronomical Observatories , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100012 , China* )

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

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

( Received 9 March 2005 ; revised manuscript received 16 May 2005 )

## Abstract

The thickness of target for X-ray sources with approximate Planck 's spectral distribution from laser-produced plasmas is optimized using a one-dimensional radiation hydrodynamics code MULTI. The effect of X-ray radiation field with Planck 's distribution on the processes of excitation and ionization in a plasma is studied using a non-LTE ionized material package NIMP. These results are very important in the future experimental design to study the influence of X-ray emission from accretion disks on interstellar matter.

**Keywords** : radiation hydrodynamics , laser-produced plasmas , X-ray conversion , accretion disk , ionization

**PACC** : 5225 , 9530

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10374116 , 10433010 , 10573024 ) and Beijing Key Lab for Nano-Photonics and Nano-Structure Department of Physics Capital Normal University Open Programm ( Grant No. 040006 ).

<sup>†</sup> E-mail : jzhang@aphy.iphy.ac.cn