

实验室天体物理学简介*

张 杰

赵 刚

(中国科学院物理研究所 北京 100080) (中国科学院北京天文台 北京 100012)

摘 要 超短脉冲强激光与固体靶相互作用产生的高温、高压、高密、强磁场、大加速度等性质与太阳及其他许多恒星中的物理条件非常相似。通过实验室里模拟研究这种等离子体中的辐射输运、大尺度流体不稳定性、热核反应等过程,对于天体物理学家了解太阳和其他恒星中的物理过程提供了极好的实验手段。

关键词 天体物理,激光,等离子体,不透明度

INTRODUCTION TO LABORATORY ASTROPHYSICS

ZHANG Jie

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

ZHAO Gang

(Beijing Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

Abstract The plasmas generated by the new generation of chirped pulse amplification lasers can create an extreme physical environment of high temperature, high pressure, high density, extremely strong magnetic field and violent acceleration, which are very close to conditions inside the Sun and other stars. It is fascinating to recreate such an astrophysical environment governed by large scale hydrodynamic instabilities, radiation transport and gravitational interaction in the laboratory, which will help our understanding of the physical processes inside the Sun and other stars.

Key words astrophysics, laser, plasmas, opacity

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,这种新型超短脉冲激光的聚焦光强高达 $10^{20} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,所产生的电场强度远大于原子的内电场,而且超短脉冲强激光与固体靶相互作用可以产生大于 10^{11} bar 的超高压, 10^4 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,比地球引力大 10^{23} 倍的加速度,接近光速的电子振荡速度等一系列无法用其他手段产生的极端条件。

超强超短脉冲激光与固体靶相互作用产生的这种高温、高密、强磁场、大加速度的等离子体与太阳及其他许多恒星中的物理条件非常相似(见图1)。研究这种高温、高密、高压、强磁场、大加速度条件下

的等离子体中的辐射输运、大尺度流体不稳定性、热核反应等过程,对于天体物理学家了解太阳和其他天体中的物理过程提供了极好的实验手段,越来越多的天体物理学家对此表示了极大的兴趣^[1]。

天体物理学中感兴趣的许多物理量,如物质不透明度、高温、高压下的物质状态、超新星的爆发、恒星中的核反应速率等都可以用超强超短脉冲强激光在实验室里进行模拟和验证。恒星中的核反应速率随物质密度的变化而变化。超高压下的金属物理学可以帮助我们了解恒星中的氢的金属化和结晶化的过程,这个过程与支配超新星、恒星和星云的物理机制有直接的关系。在激光场的有质动力的作用下,电子在极端的时间里被加速到接近光速,这种剧烈的

* 国家自然科学基金资助项目,国家“八六三”高技术惯性约束核聚变计划基金资助项目

1999-10-11 收到初稿,1999-11-30 修回

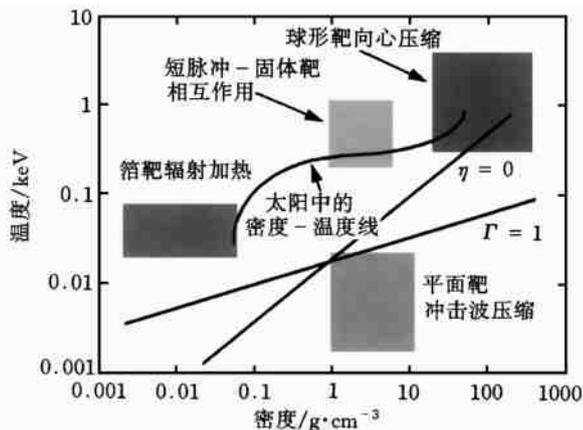


图1 超短脉冲激光产生的等离子体覆盖的温度-密度的范围(从中还可以看出恒星中的温度-密度变化的重要部分与超短脉冲激光产生的等离子体覆盖的温度-密度的范围有重叠)

加速与宇宙中的黑洞附近的加速度类似.超短脉冲激光与物质相互作用还可以验证用于广义相对论以及真空的结构.

2 天体辐射不透明度的研究

恒星内的气体物质是由原子、离子和电子组成,气体物质对辐射的吸收是通过原子、离子和电子与光子相互作用的微观过程而实现的,每种微观过程都对气体物质的总吸收有贡献.我们引入吸收系数 κ_{ν} (或称不透明度)来描述这种辐射与物质的相互作用.不透明度起因于两种物理过程:第一是真吸收,这时光子在与物质粒子相互作用中发生湮灭,其能量全部转变为物质粒子热能;第二是散射,这时光子改变方向而偏离到所考察的立体角之外,在这种情况下,光子本身仍然存在,没有因为相互作用而消失.不透明度实际上起着消光作用.

属于真吸收的微观过程主要有光致电离、光致激发、自由-自由吸收、碰撞电离等.属于散射的微观过程主要有光子在自由电子上的散射、光子在分子上的散射等.由于辐射与物质相互作用的微观过程很多,因此人们通常将不透明度分成四类进行处理:(1)自由电子与光子的 Thomson 或 Compton 散射;(2)自由-自由跃迁过程;(3)束缚-自由跃迁过程;(4)束缚-束缚跃迁过程.在计算总的透明度时,我们还须将受激发射引起的能量转移率加大对不透明度减小的影响考虑进来^[2].

以上所述各种过程对透明度的贡献与温度的依赖十分强烈.在恒星较冷的外表面,原子仅仅处于部分电离状态.不透明度主要由束缚-束缚和束缚

- 自由跃迁过程所支配.在恒星内部,原子几乎全部电离,此时自由-自由跃迁过程成为不透明度的主要来源.而在极高温下,由于过程(2)到(4)所产生的不透明度为受激发射所减弱,电子散射成为不透明度的主要来源.研究表明,大部分连续不透明度是由某种形式的氢造成的,这也是各种天体中氢在化学组成上占绝对优势的直接结果.尽管目前我们已经可以利用各种不同原子、分子模型近似计算它们与辐射的相互作用,并最终得到它们的不透明度,但通过上述方式获得的考虑了各种微观过程的总不透明度,与恒星大气模型、恒星结构与演化模型相结合所作的分析与实际的天文观测的差别尚无法解释之处.可能的原因是:(1)各类恒星中仍然存在尚未证认出的不透明源;(2)对某些微观过程的理论计算结果与实际偏差较大.由此可见,通过实验室模拟直接测量各种微观过程的不透明度对于研究各种恒星的化学组成、结构和演化都起着极为重要的作用.

恒星的结构、演化和不稳定过程对物质不透明度的哪怕很细微的差别都很敏感,特别是在几十万度至几百万度这个温度范围内^[3].如图1所示,超强超短脉冲激光与物质相互作用所产生的等离子体温度可以从几万度到几百万度,甚至更高,密度可以从很低到几百倍的固体密度.因此,可以方便地对恒星的物质不透明度进行细致研究.除不透明度外,用一个激光等离子体作光源对另一个激光等离子体进行“背照明”还可以用于测量 X 射线伴星和类星体等 X 射线源的散射截面.这些实验数据对于建立恒星的数值模拟程序和了解恒星内部的物理过程都具有决定性的作用.

3 表面大气对白矮星和中子星冷却影响的研究

白矮星和中子星的最外层有一层很薄的大气,这层大气质量很小,对子星约为 $10^{-19} - 10^{-20} M_{\odot}$,对白矮星约为 $10^{-7} - 10^{-8} M_{\odot}$.质量虽小,但对研究白矮星和中子星的冷却特别重要^[4].

这层大气的密度-温度正好落在超强超短脉冲激光与固体靶相互作用所产生的等离子体的温度-密度范围内($\sim 10^2 \text{ g/cm}^3$; $\sim 10^7 \text{ K}$; $\sim 1 \text{ keV}$),在这个范围内的物理过程至今还没有直接的实验验证.对白矮星进行的冷却研究几乎是测定白矮星年龄的唯一方法,对于密近双星的伴星(有时是中子星)的年龄的确定也至关重要.白矮星的冷却主要通过表面

辐射,能量传输要经过表面大气层,因此这层大气的透明度极为重要.目前这层大气的物理性能还只能靠理论确定,未经实验检验.因此,对这层大气进行直接的实验室模拟实验研究至关重要.中子星的冷却是通过内部中微子过程和表面的光子辐射进行的,内部热能向外传输也要经过表面大气.对有磁场的透明度,过去没有任何直接的实验检验.毫秒脉冲星的磁场约为 10^4 T,这也正是超强超短脉冲激光与固体靶相互作用所产生的等离子体所能达到的磁场.因此,天体物理中最强的磁场可以通过高密度的激光等离子体再现(见图2).

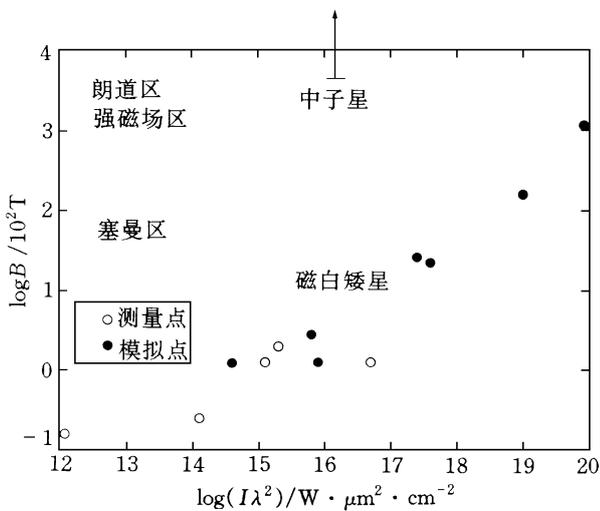


图2 天体物理中最强的磁场可以通过高密度的激光等离子体再现

即使无磁场的透明度,过去也只有 Los Alamos 透明度表和 OP 透明度表,实验直接研究也同样至关重要.透明度影响输出能谱,影响中子星的冷却计算.通过实验研究确定透明度对于冷却计算非常重要,更可改善 X 射线卫星观测数据比较中得到可靠结果.通过实验可测定密度在 $0.1-100$ (或几百) g/cm^3 、温度在 10^7 K 上下、有磁场(10^4 T 或以上)和无磁场的天体物质(包括氢、氧、碳等元素)的透明度.

4 恒星状态方程的研究

除了恒星辐射透明度的研究外,核反应速率和状态方程也对恒星的结构和演化起着重要的作用.恒星状态方程描述恒星中的温度、密度、压强、内能和比热等物理量之间的关系^[5].在很多情况下,恒星内部的状态方程非常简单.但是在恒星的中心附近,特别是在演化后期,恒星的密度非常高,那里

的等离子体变为强耦合等离子体,即等离子体中的离子之间有很强的相互作用,与此相伴的还有电子简并现象,即等离子体中的电子按照泡利不相容原理填充所有可能的状态,从而产生了某些能量极高的高能电子.这些高能电子决定着恒星的压力和内能,而离子则决定着恒星的比热.

以木星的结构为例,我们来看一下状态方程所涉及的内容.木星的外层主要由气体氢组成.同在地上一样,那里的氢气也是由单键相联的两个氢原子组成的分子.在木星更深一些的层次中,随着压强和温度的升高,那里的氢变为液态.再往内部深入,氢变为固态,形成导电性能极好的金属氢.在木星的核心部分,甚至连氢的分子键都会被强大的压力压断,氢原子被紧密地压在一起.超强超短脉冲激光等离子体实验可以对不同温度、密度区域的状态方程进行直接测量,在地面重现这一过程.

还有一种褐矮星,由于其质量较低,内部不会发生核反应,因此它的辐射很弱,探测它也极其困难.但是,这种恒星的数目却极多,在银河系中占有相当大的比例.这种恒星对于银河系的动力学过程起着重要的作用.决定这种恒星内部结构和冷却时间的是描述高密、低温等离子体的状态方程.利用超短脉冲激光,可以非常方便地产生这种等离子体并对其中发生的物理过程进行实验室模拟研究.

5 高能天体等离子体光谱的研究

高能天体物理主要研究那些远离热平衡状态的类星体和那些正在爆发并具有极强的 X 射线和 γ 射线辐射的星系.天体物理学家非常希望能够有精细的 X 射线和 γ 射线光谱来研究这些远离平衡态的等离子体光谱所反映的发射物体的本质.超强超短脉冲激光辐照下的非平衡等离子体辐射的 X 射线和 γ 射线光谱可以为这方面的研究提供大量的信息^[6,7].

6 超新星的不稳定性的研究

超新星是恒星演化的最终阶段,也是最激烈的天体现象.由于超新星与元素的演化、恒星的演化、高能粒子与物质的相互作用等许多天体物理的前沿课题有着密切的关系,因此对超新星的研究在天体物理中占有重要的位置.超新星爆发的能源机制,铁族元素后的重元素核合成过程,以及超新星的爆

炸、喷发过程等都是目前天体物理研究的热点^[8]。

1987年,在大麦哲伦星系中,发生了一次超新星的爆发,即 SNI 987A(图3)。它是近代离地球最近、视亮度最大的超新星^[9]。在这个超新星的喷发过程中,研究人员发现了不同组份喷出物的大尺度混合。这种喷出物的混合过程实际是恒星内部流体不稳定性的反映^[10]。

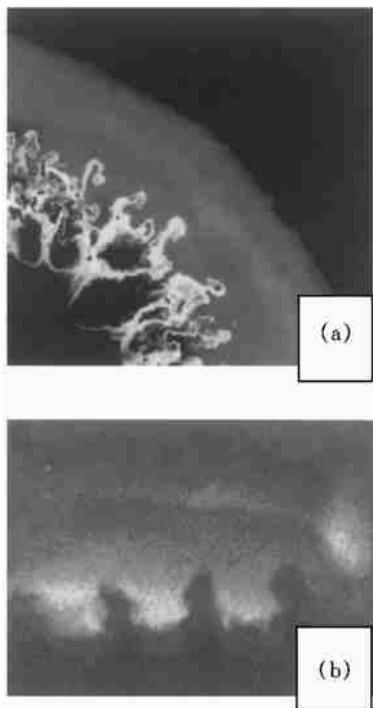


图3

(a) 超新星 SNI 987A 中的大尺度流体动力学混合;
(b) 测量流体动力学混合的实验室模拟

超新星内部爆炸时产生的冲击波在穿过超新星不同组份的界面(氧/硅、氧/碳+氧和氢/氦界面)时,会造成界面的不稳定。英国牛津大学-美国利弗莫尔实验室的联合实验组利用巧妙的实验设计,用 X 射线激光对这种等离子体中的流体不稳定性的发展过程成功地进行了高空间分辨、高时间分辨的测量^[11-13]。

7 正负电子对等离子体的研究

热核反应产生的正负电子对等离子体在中子星、黑洞、类星体以及活动星系核等天体演化过程中都起着极为重要的作用。超短脉冲激光的飞速发展使得激光脉冲产生相对论电子,并在光场和有质动力的联合作用下对这些电子进行约束成为可能。当激光光强大于 $1.4 \times 10^{18} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^2$ 时,电子的有质动力能将大于 $2 mc^2$,这时的电子和离子的碰撞将

会产生正负电子对。这些正负电子对湮灭时会产生时间展宽的湮灭 γ 射线标识线谱。这条谱线的线型和康普顿致辐射连续谱是这种正负电子对等离子体的最重要的诊断标准^[14]。

8 结束语

实验室天体物理学是一门正在创立之中的新学科,它建立于目前激光技术的最新进展基础之上,是交叉于激光等离子体物理学与天体物理学之间的一个新的学科生长点,可能有助于解决目前天体物理研究中的一些关键问题,从而带来重大突破。因此,美、英、日等国家投入巨大的人力和物力,开始对实验室天体物理学进行研究,并已取得了一系列阶段性的进展。最近,美国政府批准的 NIF 计划(国家点火装置计划)也把实验室天体物理学当作一个重要的研究方向。我国在这方面的研究尚是空白,因此利用国内刚建成的具有国际先进水平的超强超短脉冲激光装置和国内其他长脉冲大能量激光装置,尽快开展对实验室天体物理学的研究,对于推动我国超强超短脉冲激光技术与物理的发展,以及促进实验室天体物理、激光等离子体物理等前沿学科的研究,具有重大的学术和应用价值。

参 考 文 献

- [1] Remington B A, Arnett D, Drake R P *et al.* Science, 1999, 284:1488
- [2] Harwit M. Astrophysical Concepts, New York: Springer Verlag, 1998
- [3] Luo G. Astro. Astrophys, 1994, 281:561
- [4] Shapiro S L, Teukolsky S A. Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars. John Wiley & Sons Inc., 1983
- [5] Luo G, Astro. Astrophys, 1994, 281:460
- [6] Pallavicini R. European astrophysics doctoral network. Astrophysics School VII: Plasma astrophysics, 1996, 241-283
- [7] Favre M, Silva P, Chuaqui H *et al.* Astrophys. Space Sci., 1997, 256:473
- [8] Arnett D. Supernovae and Nucleosynthesis. Princeton: Princeton University Press, 1996
- [9] Arnett W D, Bahcall J N, Kirshner R P *et al.* Annu. Astro. Astrophys, 1989, 27:629
- [10] Kane J, Arnett D, Remington B A *et al.* Phys. Plasmas, 1999, 6:2065
- [11] Remington B A, Kane J, Drake R P. Phys. Plasmas, 1997, 4:1994
- [12] Kalantar D *et al.* Phys. Plasmas, 1997, 4:1985
- [13] Wolfrum E *et al.* Phys. Plasmas, 1998, 5:227
- [14] Franck A C, Bogdanov S Y, Kyrie N P. Czech. J. Phys, 1998, 48:166