

# 强激光天体物理学研究<sup>\*</sup>

## ——在强激光实验室中模拟某些天体物理过程( I )

夏江帆 张 杰

(中国科学院物理研究所光物理实验室 北京 100080)

**摘 要** 用激光等离子体相互作用对天体物理过程进行模拟研究已成为当前世界物理和天文学家深感兴趣的重要前沿领域. 文章比较了强激光作用下产生的等离子体与天体物理条件下的等离子体之间在内部物理过程的相似性, 论述了由前者模拟后者的物理依据, 即相似性原则和定标规律. 在此基础上, 回顾和评述了当前已经在高离化态光谱学、类天体等离子体状态方程和辐射不透明度以及流体动力学不稳定性等方面开展的强激光天体物理学研究, 这些研究对于理解超新星、白矮星、中子星以及巨行星、褐矮星等领域的天体物理过程起到了极大的作用, 并正在成为联系天体物理理论模拟和观测的中间桥梁.

**关键词** 强激光, 激光等离子体, 天体物理学, 实验模拟

### INTENSE LASER ASTROPHYSICS( I )

XIA Jiang-Fan ZHANG Jie

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

**Abstract** The use of a state-of-the-art laser facility makes it possible to produce materials in the laboratory similar to those in astrophysical systems. The introduction of the astrophysics-related ideas in laser-plasma interaction experiments is vital to the understanding of astrophysical phenomena. We compare the plasmas produced by intense lasers and those produced under astrophysical conditions, pointing out their inherent similarity, which provides the physical grounds for modeling astrophysical plasma by laser plasmas, i. e., the similarity principle and scaling laws. Then we review the most recent research in intense laser astrophysics, including highly ionized ion spectroscopy, the equations of state and radiation opacity of astrophysical plasmas, and hydrodynamic instabilities. These studies have greatly improved our understanding of the astrophysical processes in supernovae, white dwarfs, neutron stars, giant planets and brown dwarfs, thus allowing the creation of experimental test beds where observations and models can be quantitatively compared with laboratory data.

**Key words** intense laser, laser-plasma, astrophysics, experimental modeling

一直到最近为止, 天文学的进步主要取决于观测手段的更新. 在伽利略之前, 人类凭肉眼直接观察天体的运动, 大量的星图与星表记录着古代天文学家积累下的丰富知识. 建立在第谷长年累月肉眼观察基础上的开普勒三定律引出了万有定律, 并进而奠定了天体力学的基础. 在光学天文学时代, 除了对天体运动的认识越来越深入之外, 人们开始着重于研究天体发生的光辐射, 主要是原子发射的可见或红外光谱. 而从 20 世纪 40 年代末以来, 特别是 60 年代四大天文发现之后, 随着射电观测手段的引入和逐渐发展, 对于天体内部等离子体过程的研究开

始占据重要地位. 对射电频谱的解释是与同一时期在等离子体物理领域取得的成就相辅相成的.

20 世纪 90 年代以来, 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, 产生了功率、脉宽和强度都接近极限的激光脉冲<sup>[1]</sup>, 从而给整个物理学都带来了极大的冲击和崭新的机遇<sup>[2]</sup>. 这种强大的激光在亚毫米尺度上所集中的能量密度比采用其他任何手段所获得的要高得

<sup>\*</sup> 2000-06-29 收到初稿, 2000-09-11 修回

多.采用这种强有力的激光装置,可以获得与天体物理系统中条件相同或相似的物质,因此成为激光等离子体物理学家深感兴趣的研究内容,也同时成为天体物理学家关注的问题.现在它不仅正在成为世界各主要的激光实验室研究的中心内容之一<sup>[3,4]</sup>,事实上也逐渐成为天体物理的新学科生长点,成为天文观测、理论模拟之外的第三种手段<sup>[5]</sup>.人类由此获得了在实验室环境中定量地检验天文观测与模型的能力.

## 1 天体物理学的实验室模拟

天体物理学开始了对支配天文现象的物理规律的研究.在其最广泛的意义上,天体物理学的主要问题是分析天体的光谱.对原子光谱的分析要求对原子与分子物理的深入了解.在光学天文学时代,天体物理学广泛地应用了原子物理学的大量理论与实验结果,而另一方面,天体物理学也提供了许多资料帮助了解原子过程,例如禁戒跃迁与亚稳态的研究.在射电天文学时代,天体物理学是以等离子体物理的理论为基础的<sup>[6]</sup>.深入分析天体的射电谱必须考虑到等离子体的物理性质,例如韧致辐射机制(自由-自由跃迁辐射)、磁韧致辐射以及种类繁多的等离子体集体过程.天体物理学不仅采用等离子体物理学中的材料,它本身就能得出对于等离子体物理学来说具有重要意义.随着天体物理观测手段延伸到更多的波段,等离子体天体物理学成为天体物理学中重要的核心领域之一<sup>[7]</sup>.

等离子体物理效应在天体物理学的许多领域都具有极其重要的作用.从宇宙的结构和组成来看,宇宙等离子体中的磁流体动力学湍动决定了宇宙条件下天体物理对象的结构、形态、能量以及运动特征,对于恒星或星系的形成具有重要的影响,而高频的、小尺度的本征等离子体湍动则决定了极强的等离子体电磁辐射和对粒子的加速,这对于解释天体物理中的许多高能现象具有重要意义.从宇宙的发展过程来看,大爆炸三秒钟之后开始了最早的核合成,此时整个宇宙主要由费米(Fermi)分布的电子、正电子、三种中微子、反中微子以及黑体辐射光子组成,温度极高,重子密度很低,对于这一时期,不考虑等离子体效应获得的理论是不正确的.从核合成时期到复合期之前,由于引力相互作用,等离子体趋向于向高密度区集中并为增长起来的光压所平衡,由此导致声波振荡,到复合期之后,原始等离子体冷却成

为中性原子,声波振荡被固定下来,这使得宇宙空间布满了密度极大区与极小区,此时形成的宇宙微波背景(CMB)辐射提供了大爆炸30万年之后宇宙的信息,而它的温度起伏则反映出早期原始宇宙中的等离子体起伏.显然,对于CMB的理论分析,等离子体物理的内容是不可或缺的.在复合期之后,初始物体(first objects)是从原始密度起伏中成长起来的.在通常的理论模型中,当原始星云质量大于Jeans质量,其引力足以导致坍缩,并与引起扩张的热压力平衡.随着密度起伏的增长,星云坍缩并形成原始恒星.研究表明,从复合期开始的初始物体的形成过程中,等离子体过程的重要性不亚于引力的作用.虽然迄今依然没有关于星系形成的完整理论,但星系的形成涉及到等离子体星云的坍缩、裂成碎片、失去能量与角动量而形成许多恒星,可以设想,等离子体过程在这样的理论中将非常重要.

无论是对于宇宙磁场、大尺度结构这种宇宙学的内容,还是对于星系团、星系、活动星系核(AGN)、黑洞以及恒星这些天体物理中的重要对象,甚至对于高能宇宙线、 $\gamma$ 爆发以及相对论性的粒子喷注这些重要的天体物理现象,等离子体物理学的知识都是十分重要的.在所有这些天体物理的研究中,每一个考虑到等离子体效应的自治理论都是必须的.

在传统上,天体物理学可分为观测与理论两大方面.天文观测的可能性决定着理论研究达到的深度与广度,并为之提供最终的判据.然而,在天体物理观测上,存在着某些特殊的困难,我们常常无法观察到要获得现象的清晰图像所必需的资料,甚至无法观察到那些至关重要的基本特征,我们只能使用现有精度的观测手段.许多天体物理现象的初态与末态并不清楚,这大大增加了天体物理理论模型成功的难度.历史上屡见不鲜的情况是某些更重要的观测资料的获得使已有的理论站不住脚.因此,在实验室环境中建立定量地检验观测与理论模拟的能力与手段是在天体物理学中取得可靠进展的重要前提.

事实上,等离子体天体物理这一概念的提出本身就意味着对天体物理过程进行实验室模拟的可能.我们在实验室中所研究的等离子体的性质与过程,不仅构成了实验等离子体物理本身,它的基本概念也成为描写在实验室中难以实现的宇宙等离子体特征过程的理论基础.因此,从广义上来讲,在实验室从事的一切等离子体物理的实验研究工作,都在某种程度上参与了天体物理学的研究.不仅如此,在

实验室从事的原子分子光谱的研究,也为天体物理光谱学研究打下了理论解释的基础.在地面实验室中的研究与对地外空间的观测和解释原本是息息相关的.

在实验室开展的等离子体物理研究的一项重要内容就是对宇宙等离子体现象进行实验室模拟.早在 20 世纪六七十年代,物理学家就已经开始了与天体物理有关的等离子体实验研究.例如与宇宙线有关的粒子加速的实验.在等离子体与束相互作用<sup>[8]</sup>以及强高频场作用于等离子体<sup>[9]</sup>时,分别观察到高达 100keV 的电子以及 10keV 的离子.这些实验确定了等离子体中快粒子产生的普遍性,并证实了实验室与宇宙的现象之间深刻的相似性.此外,在托卡马克这样的磁约束等离子体装置中观察到的等离子体反常电阻率效应<sup>[10]</sup>起源于等离子体中电子与粒子之间的相对定向运动,这一效应对于理解太阳色球耀斑、太阳风湍动是很重要的.而对高密度等离子体区的等离子体湍动反常辐射<sup>[11]</sup>和散射<sup>[12]</sup>的实验研究则对于模拟类星体、脉冲星等天体中等离子体过程有极大的重要性.

然而,对于宇宙等离子体过程的准确模拟是不可能的,所能做到的只能是一个十分受到限制的模拟.在实验室等离子体与天体等离子体之间存在的差别正是这些限制的物理基础.首先,常规等离子体与辐射之间的相互作用较弱,这与天体等离子体中的情况是不同的.其次,天体等离子体对于高能的对论粒子(宇宙射线)的形成起着极大的作用,而在常规等离子体中难于观察到这一点.最后,天体等离子体没有边界,这与等离子体物理的基本问题——热核装置的建造(磁约束)——所要达到的目标正好是相反的.

所有这些困难,都在通过超短脉冲强激光与等离子体相互作用来对天体物理现象进行模拟这一新的途径中得到了不同程度的解决.这是因为强激光等离子体相互作用对天体过程的模拟具有与其他等离子体模拟完全不同的崭新的特点.它对最后一个困难的解决,正好类似于惯性约束对磁约束概念的突破.与磁约束努力将等离子体约束尽可能长的时间不同的是,惯性约束的思想是不约束,在高温等离子体还来不及飞散之前实现点火.同样,在超短脉冲激光与等离子体的相互作用中,激光等离子体至少在极短的时间内是不必考虑边界和约束问题的,这样,通过快速的时间分辨就解决了约束等离子体的困难.其次,在激光等离子体实验中,不仅观察到了

极强的超快 X 射线<sup>[13]</sup>和  $\gamma$  射线<sup>[14,15]</sup>,而且观察到高达 10MeV 的相对论超热电子<sup>[16,17]</sup>和高达 MeV 的离子<sup>[18]</sup>.因此,虽然实验室中利用超短脉冲激光产生的等离子体比天体等离子体在尺度上小许多量级,也比磁约束等离子体小许多,但利用它却有可能产生类似于宇宙线的发射.最后,与磁约束等离子体不同的是,激光等离子体与辐射发生极强的相互作用,尽管这种相互作用是在极短的时间内完成的.所有这一切,都使得激光等离子体成为更加合适的用于模拟天体物理现象的工具.随着强激光天体物理学的提出,对于天体物理现象的实验室模拟进入了一个崭新的阶段.

## 2 相似性与定标律

高功率激光与物质相互作用所产生的激光等离子体覆盖了极大的温度与密度范围.然而,利用激光等离子体模拟天体物理过程并不仅仅是因为这两种等离子体的实际条件有多么接近.事实上,即使在很小的空间与时间尺度上准确地重现天体等离子体即意味着受控核聚变的实现,而这迄今仍然是不可能的.强激光天体物理学的目标仅仅在于,通过在激光等离子体实验中引入与天体物理相关的思想,力求利用激光等离子体相互作用取得有利于理解天体物理过程的物理信息.而实现这一目的的关键基础在于,激光等离子体物理或激光聚变的原理与天体物理具有相同的物理规律,即高能量密度物理<sup>[19]</sup>.

大爆炸三分钟之后的天体物理可以分为以下四个方面的内容:

- (1) 原子物理与辐射传输;
- (2) 流体动力学与磁流体力学;
- (3) 核反应;
- (4) 引力相互作用.

显而易见,利用强激光或超强激光,对于(1)—(3)的内容可以通过模型实验来进行研究,而它们也正好大致对应着恒星物理所感兴趣的三个层次.此外,最近有人在理论上提出利用超强激光与电子的相互作用来验证弯曲(引力)空间的量子场论<sup>[20]</sup>,因此事实上按照基本物理特征来划分的天体物理学的所有重要内容都有可能利用超强激光与物质相互作用来进行模拟.

远在等离子体天体物理建立起来之前,即远在使用等离子体的概念描写天体物理过程之前,在以原子分子物理理论为基础的光学天文学时期,激光

等离子体的知识已经在天体物理中得到了广泛的应用。物理学家利用激光等离子体来产生那些在常态下不易见到的发射谱,这些发射谱平时只是在某些天体辐射源上才能看到。早在 20 世纪 60 年代中期,利用强激光辐照固体靶的实验中产生的高离化态原子在超紫外或 X 射线区的线谱,使我们得以辨认天体辐射源中的元素组成。例如对  $2s^2 2p^n - 2s 2p^{n+1}$  及  $2s 2p^{n+1} - 2p^{n+2}$  的跃迁的研究,在 FeXIX、FeXX 及 FeXXI 特征谱线的分辨中起到了作用<sup>[21]</sup>。

激光等离子体中的线谱分辨实验不仅本身就是天体物理有兴趣的研究对象,而且它还构成了另一个更有意义的实验的基础:对高离化态原子的线谱分辨实验在不透明度的测量中具有极其重要的地位。不过,与高离化态光谱学主要是定性的研究有所不同的是,对不透明度的测量是与天体物理学有关的激光等离子体实验中定量测量的开端<sup>[22]</sup>。

不透明度的测量最早是作为等离子体诊断的手段而提出的。利用 X 射线谱仪提供谱分辨,由背照射 X 射线脉冲的脉宽决定时间分辨,通过直接照射固体靶,采用点投影背照射技术可以测量等离子体的密度分布<sup>[23]</sup>。对时间与空间分辨技术的应用大大增进了我们对激光等离子体的理解<sup>[24]</sup>。将这一技术应用到天体物理上来的主要困难在于这两种等离子体之间是否具有足够的相似性。最大的疑问是激光等离子体往往具有较大的温度与密度梯度,离子激发与离化远离平衡态,这与主要的天体等离子体的特点是不同的,因此常常被认为是与天体物理无关的<sup>[25]</sup>。为此,实验者改进了靶层设计<sup>[26,27]</sup>,将样品置于薄层(  $\sim 0.1 \mu\text{m}$  )塑料(CH)之下,并且,类似于惯性约束核聚变(ICF)中间接驱动相对于直接驱动的改进,利用第二束激光产生的接近普朗克分布的 X 射线波段连续谱辐射加热等离子体,消除样品中的温度与密度梯度,同时有助于将等离子体维持在统计平衡。这些技术使得对局域热动平衡(LTE)下等离子体中的 X 射线吸收谱的精确测量成为可能,而它对于天体物理的重要性也大大增加了。此外,研究还表明<sup>[28]</sup>,具有较大速度梯度的等离子体也是天体物理感兴趣的对象。这些工作使得对于不透明度的实验研究不仅在早期而且在当前一直是激光等离子体对天体物理作出重要贡献的领域。

如果说在不透明度问题中激光等离子体实验对天体物理学重要性的基础主要在于激光等离子体覆盖了极大的温度与密度范围,激光等离子体的温度、密度等许多特性接近于天体等离子体的话,那么,在

流体动力学和磁流体力学以及核反应的领域,内部过程的一致性则成为实验室模拟天体物理过程的理论依据。毫无疑问,与辐射传输领域不透明度的测量中主要关注的是这两种等离子体的物理参数(温度、密度、压力等等)的相似性不同的是,在流体动力学领域我们主要关注的是标度变换的可能性。天体等离子体与实验室等离子体的长度、时间与密度等尺度存在明显的差别,因此必须通过标度变换将这两种等离子体联系起来<sup>[29]</sup>。我们必须认识到:首先,并不存在普适的变换规律,不可能利用激光等离子体复制空间等离子体的所有细节;其次,标度变换本身必须通过针对具体现象进行研究来确定,例如,对于可由磁流体动力学(MHD)方程或弗拉索夫(Vlasov)方程描写的碰撞或无碰撞等离子体,标度变换可以通过将方程无量纲化来进行,由无量纲变量来定义标度关系。最后,一般情况下,不可能同时严格满足所有的标度规律,必须做某些修正,例如,最重要的参数做精确的标度变换,而次要的变量则允许偏离。最近,激光等离子体物理学家与天体物理学家密切合作,建立了超新星(SN)、超新星遗迹(SNR)的流体动力学与强激光等离子体相互作用的流体动力学之间的标度变换<sup>[30,31]</sup>,这是一个经过具体的物理研究建立起来的成功典范。一般说来,标度变换主要是针对具有相同内部过程的等离子体进行的。从物理过程来看,通过激光-靶相互作用有可能产生的激光等离子体与天体等离子体的对应关系可由表 1 描写。

表 1 激光等离子体与天体等离子体的对应关系

激光等离子体	产生机理	天体等离子体	物理特征
烧蚀等离子体	激光-靶相互作用,通过蒸发、离化与膨胀扩张直接产生	星风 超新星爆发	较高扩张速度
环境等离子体	通过在真空中注入低压气体,光电离与预电离等方式产生	星际介质(ISM)	低温、低密度 无定向速率
冲击波等离子体	激光等离子体冲击在靶内部形成冲击波后朝激光方向扩展的回流	超新星爆发等 天体物理喷流	与烧蚀等离子体相似,密度更高,速度略低
强耦合等离子体	激光辐射玻璃板上的金属薄靶	太阳内部、白矮星、巨行星内部	粒子平均动能小于粒子间平均势能
高加速度致密物质	激光辐照固体靶向里传播	SNR 及 RT 不稳定性, MHD 湍流	高压、高加速度,接近固体密度

我们知道,流体动力学不稳定性以及由此导致的物质的混合是宇宙中普遍存在的现象.无论是在超新星的爆发、天体物理中的辐射冲击波还是 ICF 内爆过程中,所涉及到的流体动力学不稳定性都是存在超强辐射场下在极端的温度和密度条件下成长起来的.最常见的流体动力学不稳定性包括由加速驱动的瑞利-泰勒[ Rayleigh - Taylor( RT )]不稳定性,由冲击波引起的 Richtmyer - Meshkov( RM )不稳定性和由于剪切力引起的开尔文 - 亥姆霍兹[ Kelvin - Helmholtz( KH )]不稳定性,特别是 RT 不稳定性和 RM 不稳定性,当前在 SN 和 SNR 的观测与理论解释中起着十分重要的作用,不仅受到天体物理学家的重视,也受到了激光等离子体物理学家的关注<sup>[30,31]</sup>.

RT 不稳定性,或称流体界面不稳定性或浮力不稳定性,是高密度的流体处于低密度的流体上部时引起的界面不稳定性.两种流体界面上的随机微扰将被迅速放大,较重的流体出现向下的尖峰,而较轻的流体则出现向上的“鼓泡”(bubbles).从宏观到微观,在许多领域都可以发现 RT 不稳定性的存在.一方面,在天体物理中,中子星<sup>[32]</sup>、恒星<sup>[33]</sup>以及星云<sup>[34]</sup>的模型中都必须考虑它. RT 不稳定性最壮观的表现恐怕就是位于大麦哲伦星云的中心核坍缩的超新星 SN1987A,研究人员认为由 RT 不稳定性导致的混合可用于解释其光变曲线<sup>[35]</sup>.另一方面,RT 不稳定性是 ICF 研究的中心内容之一.从 70 年代以来,在内爆动力学的研究中由界面不稳定性导致的流体动力学混合是最关键的技术问题,研究人员在激光聚变实验中对此进行了大量研究,积累了十分丰富的经验. RM 不稳定性是 RT 不稳定性在冲击波与环境介质相互作用中的类似,通常我们可将前者视为脉冲式地加速流体,而在后一种情况下,对流体的加速是连续的.在 SN 爆炸过程的非线性增长阶段和 SNR 的形成过程中,RT 不稳定性和 RM 不稳定性都起着极其重要的作用.近期成为热点的 SN1987A 的喷流即将与周围环形物质碰撞<sup>[36]</sup>,对这一现象的观察与模拟不仅是 SNR 早期物理的重要内容,也成为激光等离子体实验在流体动力学领域模拟天体物理现象的试金石<sup>[37]</sup>.

核反应是整个宇宙的能量来源,受控热核聚变则是激光等离子体物理研究的根本目标和最大动力.强大的激光器已经可以使我们获得具有极高温度和密度的等离子体,而一旦达到点火条件(  $T \geq 10\text{keV}$ ,  $\rho \geq 100\text{gcm}^{-3}$  ),由于核聚变反应所带来的能

量密度的迅速增益将产生更高温度的物质,辐射进一步加强,中子以及各种超热粒子流量迅速提高.如此产生的聚变等离子体将使我们可以直接研究恒星内部的核反应,而对天体物理现象更为真实的模拟正是建立在这一基础上的.正因为如此,核反应不仅是核物理与核天体物理研究的主要对象,也成为激光等离子体物理学家和等离子体天体物理学家梦寐以求的最高目标.不仅如此,利用超短超强的激光脉冲与固体靶相互作用可引发光核反应<sup>[38]</sup>.其大意是相互作用中产生的高达数十个 MeV 的超热电子通过韧致辐射产生的定向  $\gamma$  射线,当  $\gamma$  光子能量高于 1.02MeV 时,在韧致转换层上即可实现正负电子对的产生,更高的  $\gamma$  光子能量将引发光核裂变,通过  $(\gamma, n)$  反应产生中子,甚至诱导<sup>238</sup>U 的裂变.其中,光核反应产生的正负电子对等离子体,有可能成为在解释  $\gamma$  射线爆( GRB )提出的火球模型<sup>[39]</sup>中关键性的因素.

总而言之,利用超强激光与物质相互作用产生的等离子体来模拟研究我们无法直接研究的天体物理现象的可能性不仅基于天体等离子体与实验室等离子体之间某种相似性的存在,例如关键性的物理条件的一致、相近的压力或相近的温度分布等等,更重要的是基于物理过程的内在一致性和可定标的可能性.在物理上表现为这两类等离子体中发挥主要作用的是相同的机理,而在数学上则是由相似的方程组来描写的磁流体动力学方程组.我们并不认为激光等离子体可以模拟一切天体物理过程、解决所有重要的天体物理学问题,但是,利用相似性原则和标度转换,增进我们对天体物理内部过程的理解是有可能利用激光等离子体实验来实现的.

### 3 激光等离子体物理与恒星的结构与演化

恒星物理是现代天体物理学的基础.恒星是行星世界的主宰,同时又是星系的主要成员.白矮星、中子星以及黑洞都可能是恒星演化的最终阶段.恒星内部的核反应是整个宇宙的能量来源,而恒星表面的光辐射则孕育出万物生命.在天体物理学上,对恒星性质的研究,其意义早已远远超出了恒星物理本身的范围.由于内容的丰富,恒星物理一直是现代天体物理学的核心内容.在对宇宙的年龄和密度的估计中、在理解大爆炸中的核合成问题上、在对星系的演化的研究中,甚至在确定星系间距离的观测方法上以及对非重子物质的探索等等领域,对于恒星

性质的了解都起着重要的作用。

在恒星物理中,关于恒星的结构与演化的知识与模型具有中心地位<sup>[40]</sup>。恒星的形成涉及到星际云的坍缩。由于引力非稳定性,气体星云坍缩形成原恒星,内部达到流体静力学平衡,并且处于完全对流状态。由于中心密度和温度还较低,原恒星尚未发生热核反应,恒星通过收缩来补偿向外的辐射并提高内部的温度。恒星质量越大,这一进程越快。经过开尔文-亥姆霍兹(K-H)时间,恒星进入主序。在主序阶段,恒星内部的核反应提供着恒星向外的能量辐射,同时还引起恒星内部化学组成的不断变化,从而导致恒星内部结构的不断演化。恒星的物理性质依赖于向恒星表面的能量传输,其结构和演化与产生于恒星内部的核能传输到表面的具体过程息息相关。传输的方式包括热传导、对流和辐射。除了电子气体简并的情况,热传导一般很小,可以忽略不计。因此,恒星的物理性质主要由辐射传输和对流决定。在辐射为主的区域,能量传输的效率直接与平均辐射不透明度有关。当恒星某一区域光度很大(例如,在恒星内部热核反应非常剧烈的区域)或平均不透明度很大(例如,在恒星外壳由于某些重元素的部分电离导致不透明度增大),由辐射传输无法将能量及时完全传出而满足施瓦氏(Schwarzschild)判据时将出现对流不稳定性,此时对流将成为更有效的能量传输方式。尽管如此,恒星依然维持着准静态状态直到内部的核燃料消耗殆尽。主序星是以氢燃烧为主的恒星,在其深层内部发生着将氢聚合成氦的聚变反应,因其位于 Herzberg-Russe(HR)图上的一条窄带上而得名,如图1所示。经过长达上百亿年的准静态燃烧,当内部的氢耗尽时,恒星的演化进入了反主序的阶段。首先燃烧不活动的中心氦核外部壳层中的氢,然后经由 $3\alpha$ 过程大多数恒星内部的He燃烧

成碳。当氢继续燃烧,恒星的亮度与表面温度不断变化,其详细的演进轨迹依赖于恒星的初始质量和元素成分。事实上,依据质量的不同,恒星将具有不同的内部结构性质和演化进程,最终的演化结果也各不相同,有可能形成白矮星,还有可能经过超新星爆炸而形成中子星或黑洞。

恒星内部区域的物质状态是互不相同的。依据温度、密度、压力以及化学组成的不同,可能出现离子简并气、电子简并气、完全电离气体、部分电离气体等等;在外层,恒星大气有可能是具有局域热动平衡的(LTE),也有可能不满足局域热动平衡。不同区域的物质状态由相应的物态方程描写,而各自的物理过程更是千差万别。从强辐射的高温等离子体中占主导地位的物理机制来看,恒星中可大致分为核反应层、对流区和辐射传输区,分别发生着以相应的物理机制为主但并不排除其他机制的物理过程。恒星大气层主要是辐射传输层,观测得到的恒星光谱正是在恒星大气层内产生的,恒星光谱中所包含的连续谱的特性以及分立谱线的特性包含着恒星大气层内物理和化学结构的信息,同时也反映出恒星大气层内发生的物理过程。某些恒星,特别是晚型星,在大气层内不仅发生着辐射传输过程,同时由于金属丰度高,不透明度大,还存在强烈的对流。恒星的中心核主要是核反应层,恒星的能源乃至恒星演化的根本动力都来自于中心核,事实上,这正是核天体物理研究的内容,也是激光等离子体实验所试图达到的目标。然而,在中心核存在着普遍的对流,这正是前者所欠缺的地方,也是等离子体天体物理有可能作出重大贡献的地方。在中心核与恒星大气层之间,则是以核反应为主向辐射传输为主过渡的区域,这个区域仍然有核反应发生,也有能量通过光子的吸收与重新发射来进行的传递过程,但此时对流是占主导地位的过程,它不仅是更加有效的能量传递方式,同时还使这一区域的化学组成发生变化,改变恒星的内部结构。在所有这些领域,激光等离子体实验都可在一定程度上作出贡献。

毫无疑问,激光等离子体实验很难对恒星的结构与演化的认识作出直接的贡献。然而,通过对恒星物质的模拟,特别是对类恒星等离子体的内部物理过程的深入认识,不仅有助于我们理解恒星光谱,同时也对关于恒星结构与演化的理论有强有力的推动作用。简而言之,激光等离子体实验对恒星物质的模拟主要表现在以下几个方面:

### (1) 恒星物质物态方程的研究

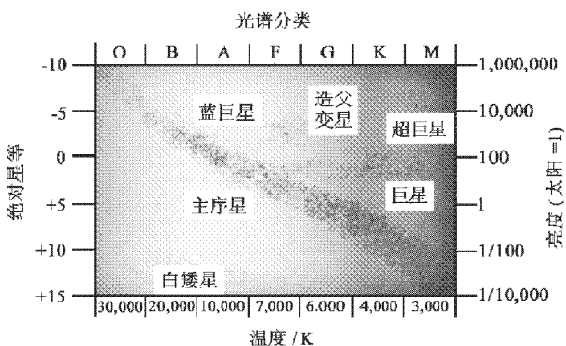


图1 恒星 H-R 图

它反映恒星表面温度(光谱分类)及其亮度(星等)的关系,在观测到的恒星中,90%以上的恒星处于主序星带

物态方程是密度与压强、温度及化学组成之间的函数关系,这一方程对于恒星的结构与演化模型是不可或缺的.物态方程给出的各个宏观量之间的关系,是我们对恒星最基本的认识,在辐射传输和流体动力学领域,广泛地使用了物态方程的知识.激光实验通常利用冲击波压缩获得高压下的物态方程.

### (2) 恒星物质辐射特性的研究

严格说来,包含以下三方面的内容 (a) X 射线连续谱辐射源对周围等离子体中的激发与离化过程的影响<sup>[41]</sup>,这一影响主要是通过直接的光激发和光离化进行的 (b) 受 X 射线辐射影响下等离子体的发射谱<sup>[42]</sup>,有可能解释 X 射线天文学上的某些奇特现象 (c) 本身具有强辐射等离子体中的辐射传输特性,即不透明度问题.

### (3) 恒星物质流体特性的研究

恒星的振动与对流均涉及到辐射流体的运动,不同的是,后者还是一种物质和能量的输运方式,它在改变恒星的组成成分和结构的同时也破坏了恒星的球对称结构.对于天文观测而言,辐射不透明度主要与恒星的静态性质有关,而振动与对流则主要与恒星的某些活跃性质有关,诸如太阳色球耀斑和偶发射电辐射以及恒星的某些周期性性质或准周期观测性质等等.

### (4) 热核反应以及其他核反应

热核反应在激光等离子体中已经实现,而光核反应、裂变反应也正在广泛开展研究.不过,要实现恒星内部条件下的核反应,对于激光等离子体仍然存在困难:要获得密度  $100\text{gcm}^{-3}$ 、温度  $5\text{—}10\text{keV}$  的高增益压缩靶,需要  $10\text{MJ}$  的激光能量.因此,对这一领域的深入研究,尚有待于进一步的努力.

## 参 考 文 献

[ 1 ] Perry M D *et al.* Opt. Lett. ,1999 24 :160  
 [ 2 ] 张杰. 物理 ,1997 ,26 :643 [ ZHANG Jie. Wuli ( Physics ) ,1997 , 26 :643 in Chinese ]  
 [ 3 ] Farley D R *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1999 83 :1982  
 [ 4 ] Takabe H *et al.* Plas. Phys. Control Fusion ,1999 41A :75

[ 5 ] Remington B A *et al.* Science ,1999 284 :1488  
 [ 6 ] Kaplan S A ,Tsytoich V N. Plasma Astrophysics , New York : Pergamon ,1973  
 [ 7 ] Opher R. Plas. Phys. Control Fusion ,1999 41A :209  
 [ 8 ] Kharchenko I F *et al.* Nucl. Fusion ,1962 ,Suppl.3 :1101  
 [ 9 ] Veksler V I *et al.* Atomic Energy ,1963 ,19 :14  
 [ 10 ] Artsimovich L A. Sov. Phys. Uspekhi ,1970 ,12 :810  
 [ 11 ] Fainberg Ya Bed. Interaction between Beams of charged particles in a plasma. Moscow :Naukova Dumka ,1965  
 [ 12 ] Demidov B A ,Fanchenko S D. JETP Lett. ,1965 2 :332  
 [ 13 ] Zhang J *et al.* Science ,1997 276 :1098  
 [ 14 ] Perry M D *et al.* Rev. Sci. Instrum. ,1999 70 :265  
 [ 15 ] Zhang P *et al.* Phys. Rev. E ,1998 57 :R3746  
 [ 16 ] Key M H *et al.* Phys. of Plas. ,1986 5 :1966  
 [ 17 ] Davies J D *et al.* Phys. Rev. E ,1997 56 :7193  
 [ 18 ] Borovskij A V , Prokhorov A M. Sov. Phys. JETP ,1994 79 81  
 [ 19 ] Campbell E M *et al.* Laser & Part. Beams ,1997 ,15 :607  
 [ 20 ] Chen P ,Tajima T. Phys. Rev. Lett. ,1999 83 :256  
 [ 21 ] Fawcett B C ,Cowan R D. Mon. Not. R. Astron. Soc. ,1975 ,171 :1  
 [ 22 ] Rogers F J ,Iglesias C A. Science ,1994 263 :50  
 [ 23 ] Lewis C L S ,Glinchey J M. Opt. Comm. ,1985 53 :179  
 [ 24 ] Balmer J *et al.* Phys. Rev. A ,1989 40 :330  
 [ 25 ] Rose S J. Laser & Part. Beam. ,1991 9 :869  
 [ 26 ] Davidson S J. Appl. Phys. Lett. ,1988 52 :847  
 [ 27 ] Tallents G J *et al.* Phys. Rev. A ,1989 40 :2857  
 [ 28 ] Wark J S *et al.* Phys. of Plas. ,1997 4 :2004  
 [ 29 ] Ripin B H *et al.* Laser & Part. Beams ,1990 8 :183  
 [ 30 ] Ryutov D *et al.* Astrophys. J. ,1999 518 :821  
 [ 31 ] Kane J *et al.* Phys. of Plas. ,1999 6 :2065  
 [ 32 ] Arons J ,Lea S M. Astrophys. J. ,1976 207 :914  
 [ 33 ] Cattaneo F ,Hughes D W. J. Fluids Mech. ,1988 196 :323  
 [ 34 ] Frieman E A. Astrophys. J. ,1954 120 :18  
 [ 35 ] Shigeyama T ,Nomota K. Astrophys. J. ,1990 360 :242  
 [ 36 ] Suzuki T *et al.* Astronomy & Astrophys. ,1992 274 :883  
 [ 37 ] Boriklwshi K J *et al.* Astrophys. J. ,1997 477 :281  
 [ 38 ] Laing E P *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1998 81 :4887  
 [ 39 ] Piran T. Phys. Rept. ,1999 314 :575  
 [ 40 ] 黄润乾. 恒星物理. 北京 :科学出版社 ,1998 [ HUANG Run-Qian. Star Physics. Beijing :Science Press ,1998 ( in Chinese ) ]  
 [ 41 ] Hatchett S *et al.* Astrophys. J. ,1976 206 :847  
 [ 42 ] Fabian A C *et al.* Mon. Not. R. Astron. Soc. ,1989 238 :729