

实验室天体物理学中的标度变换*

夏江帆 张杰

(中国科学院物理研究所光物理开放实验室 北京 100080)

摘要 采用当前最先进的激光装置,可以获得与天体物理过程中相同或相似的条件,因此实验室天体物理学已成为激光等离子体物理学家们深感兴趣的研究内容,也同时成为天体物理学家所关注的问题.然而,激光等离子体为微米级的空间尺度和纳秒或更短的时间尺度,而天体物理的对象则为宇宙学的极大的时间与空间尺度.文章讨论了在物理上和实际操作上将这两种表面上存在巨大差异的物理过程对应起来,从而为利用激光等离子体研究天体物理过程提供了可能性.

关键词 超强激光,实验室天体物理学,标度变换

SCALING LAWS IN LABORATORY ASTROPHYSICS

XIA Jiang-Fan ZHANG Jie

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

Abstract The use of state-of-the-art lasers makes it possible to produce, in the laboratory, the extreme conditions similar to those in astrophysical processes. The introduction of astrophysics-relevant ideas in laser-plasma interaction experiments is propitious to the understanding of astrophysical phenomena. However, the great difference between laser-produced plasma and astrophysical objects makes it awkward to model the latter by laser-plasma experiments. This article presents the physical reasons for modeling astrophysical plasmas by laser plasmas, connecting these two kinds of plasmas by scaling laws. This allows the creation of experimental test beds where observation and models can be quantitatively compared with laboratory data.

Key words intense lasers, laboratory astrophysics, scaling transformation

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^[1],从而给整个物理学带来了极大的冲击和崭新的机遇^[2].这种强大的激光在微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多.因此,采用这种强有力的激光装置,可以获得与天体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^[3,4],事实上也逐渐成为天体物理学的重要分支领域,成为在天文观测、理论模拟之外的第三种手段^[5].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.

大爆炸三分钟之后的天体物理可以分为原子物理与辐射传输、流体动力学与磁流体力学、核反应以及引力相互作用等四个方面的内容.由于激光等离

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^[6],因此,利用强激光或超强激光,对于前三个方面的内容都可以进行实验研究.

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)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^[7].我们必须认识到,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

* 国家自然科学基金(批准号:19825110)、国家高技术 863 - 416 核聚变主题资助项目

2000 - 07 - 31 收到初稿,2000 - 09 - 27 修回

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 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,在一般情况下,不可能同时严格满足所有的标度规律,必须作某些修正,例如,最重要的参数作精确的标度变换,而次要的变量则允许偏离.

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,向内传播	SNR 及 RT 不稳定性, MHD 湍流	高压、高加速度,接近固体密度

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^[8,9],这是一个经过具体的物理研究建立起来的成功典范.

超新星是高度演化恒星的灾难性爆炸^[10].其中,中心核塌缩的超新星被认为是大质量恒星中量子力学简并压与引力相互竞争的结果.这种超新星是由强大的冲击波驱动的,强大的冲击波同时也是引起流体动力学不稳定性的基础.在理论上,超新星(SN)中的流体动力学情况与实验室实验之间可以用一种精确的一一对应关系来描写,这正是所谓的标度变换关系.另一个标度变换指出的对应关系例子是 SN 中 1600s 的 He-H 界面与激光实验中 20ns 的 Cu-CH 界面.在天体环境和实验室的条件下,雷诺数(即惯性力与粘滞力的比率)及 Peclet 数(即对流与热传导率的比率)都很大,这样,粘滞力与热扩散可忽略不计,界面上的动力学可用多维气体中的

欧拉方程来描写^[8].

$$\begin{aligned} \rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right] &= - \nabla P, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) &= 0, \\ \frac{\partial P}{\partial t} - \gamma_a \frac{P}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla P - \gamma_a \frac{P}{\rho} \mathbf{v} \cdot \nabla \rho &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 ρ 为密度, \mathbf{v} 为流体速度, t 为时间, P 为气压, γ_a 为绝热系数.以上方程分别表示动量、质量及能量守恒.直接在(1)式中替换可看出在以下的标度变换下,(1)式是不变的:

$$\begin{aligned} h_{\text{SN}} &\rightarrow a h_{\text{lab}}, \\ \rho_{\text{SN}} &\rightarrow b \rho_{\text{lab}}, \\ P_{\text{SN}} &\rightarrow c P_{\text{lab}}, \\ t_{\text{SN}} &\rightarrow a (b/c)^{1/2} t_{\text{lab}}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 h, ρ, P 及 t 分别是特征空间、密度、压强和时间尺度.将标度变换(2)式代入(1)式, a, b, c 常数正好一一抵消,因此,由欧拉方程(1)式描写的动力学在 SN 及激光实验中是完全等价的,在激光实验中获得任何认识可以通过投影(2)式直接应用到 SN 中去,一组有关的对应关系如表 2 所示.

表 2 超新星爆发物理过程与激光等离子体物理过程的标度变换

	超新星	激光等离子体实验
h	10^{11} cm	$50 \mu\text{m}$
ρ	$8 \times 10^{-3} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$4 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
P	40 Mbar	0.6 Mbar
加速度 $g = \frac{\nabla P}{\rho}$	$10 g_0$ (g_0 为地球表面重力加速度)	$10^{10} g_0$
t	2000s	20ns

冲击波(SW)动力学支配着超新星遗迹(SNR)的演化.从 SN 喷出的快速扩散的喷流驱动的 SW 向前进入周围介质,同时喷流受积累物质的减速作用,形成了一个反向的 SW.喷流与周围介质接触点即接触间断点(contact discontinuity),出现流体动力学不稳定.当前,最受关注的 SNR 是 SN1987A,它不仅包括向环境介质扩展的标准 SN 喷流,还有一个神秘的内部核和 2 个外部类似于星云的环,而且很明显在 SN 爆炸之前就已经存在.关于这些环已经提出了许多模型,但没有一种理论能够完满地解释其起源. SN 的喷流速度很快,约 10^4 km/s,而内环则是相对静止的,约 10 km/s,其直径约为 1 光年,因此预计向前喷注的 SW 喷流将在大约 5 年内影响内环的内部边界,其结果将发射一个强的 SW 到环上,将其加热到 100—300eV,其发射波长从可见光到 X 射线,对这一效应的观察将有望阐明其结构、组成,并可能推测其

起源.最近对内环的摄影显示出一个迅速明亮起来的局域化的热斑,似乎表明正向 SW 与环的碰撞实际上已经发生.对 Lyman - α 辐射的光谱成像表明,反向 SW 已经穿过了从环到恒星距离的 80%.

激光实验能产生类似于 SNR 中的 SW 结构^[8,11-13].至少在一维方向上,实验室获得的结果与 SNR 形成的基本动力学是相似的:由 SW 引起的快速运动的喷流进入了周围低密度的静态环境中,这将发射一个正向 SW 进入环境介质,同时发射一个反向 SW 进入停滞的喷流,这与 SNR 形成的动力学类似,如图 1 所示.因此利用自相似模型^[14],实验室的实验可用于模拟 SNR 的一维动力学.

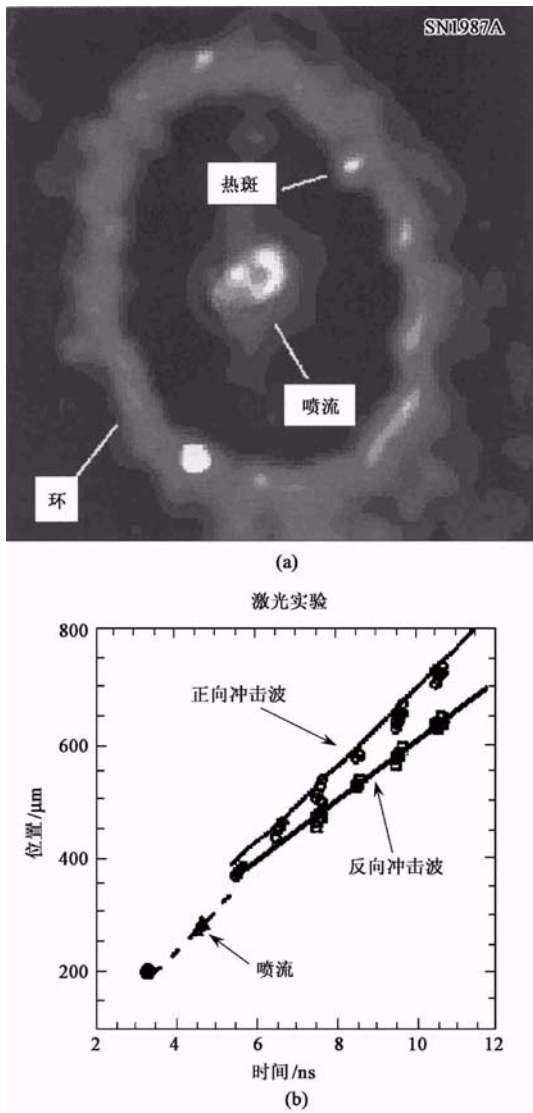


图1 对 SNR 的演化动力学的天文观测与实验模拟
(a) SN1987A 内部环的照片;(b) 激光实验研究的强冲击波动力学

估计在喷流与环境等离子体相遇的接触间断点是流体动力学不稳定的,因此有必要进行二维的实验模拟.研究 SN1987A 中的 SNR 物理的一个主要动

机就是研究 SN 冲击波与内环的碰撞.显然,SW 与环相互作用是一个三维的强 SW 效应.目前正在设计相应的激光实验研究强冲击波与局域高密度球形物质相互作用的三维特性.三维发展强烈地影响着相互作用,例如,三维的方位角模式的发展与增强将“撕碎”球体.在研究 SN1987A 的冲击波与内环相互作用以及 SW 与星云相互作用中都发现了相似的三维效应^[15].

在 SN1987A 当前的条件下,基于欧拉方程的标度变换规律同样适用.要满足标度变换的条件还必须考虑 SW 是否为辐射性的,以及环境磁场是否足以约束等离子体.对 SN1987A 而言,等离子体密度足够低,SW 并不是辐射性的,因此辐射致冷时间尺度 τ_{rad} 比流体动力学时间尺度 τ_{hydro} 大得多, $\tau_{\text{rad}}/\tau_{\text{hydro}} \gg 1$.同时,环境磁场 $B \sim 100\mu\text{G}$ 足够大,离子的 Larmor 半径比感兴趣的空间尺度小得多.因此,等离子体可由流体动力学欧拉方程描写,这样,它满足相同的尺度变换规律(2)式,从 SNR 到实验室的一维变换中,其标度变换为

$$\begin{aligned} 0.031\text{ly} &\rightarrow 100\mu\text{m}, \\ 10^4\text{km/s} &\rightarrow 60\text{km/s}, \\ 1\text{yr} &\rightarrow 1\text{ns} \quad (\text{SNR 上的 13 年相当于实验室中的} \\ &\quad 8\text{ns}). \end{aligned}$$

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.观测上的见树不见林往往导致理论上捡了芝麻丢了西瓜.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拟成功的难度.但是,通过标度变换,我们将极大的空间尺度和极长的时间尺度上的天体物理问题搬到实验室中,通过激光等离子体实验来进行模拟研究.由于激光等离子体相互作用的物理过程可以通过对实验条件的控制来改变,其初态与末态是可以严格描写的,因此标度变换大大提高了我们认识天体物理现象的能力.另一方面,我们必须认识到,标度变换并不是万能的.标度变换的建立本身就是研究工作的结果,不存在抽象的普适的标度变换.也不要盲目夸大已经建立的标度变换的应用范围.对于某些重要的物理量适用的变换,往往在一些次要的物理量上并不适用.标度变换的物理本质是物理过程的内在一致性,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.因此,我们使用标度变换的原则是,利用激光等离子体实验,增进我们对天体物理内部过程的理

参 考 文 献

- [1] Perry M D *et al.* Opt. Lett., 1999, 24:160
- [2] 张杰.物理, 1997, 26:643 [Zhang J. Wuli (Physics), 1997, 26:643 (in Chinese)]
- [3] Farley D R *et al.* Phys. Rev. Lett., 1999, 83:1982
- [4] Takabe H *et al.* Plasmas. Phys. Control Fusion, 1999, 41:A75
- [5] Remington B A *et al.* Science, 1999, 284:1488

- [6] Campbell F M *et al.* Laser & Part. Beams., 1997, 15:607
- [7] Ripin B H *et al.* Laser & Part. Beams., 1990, 8:183
- [8] Ryutov D *et al.* Astrophys. J., 1999, 518:821
- [9] Kane J *et al.* Phys. of Plasmas, 1999, 6:2065
- [10] Borrows A. Nature, 2000, 403:727
- [11] Drake R P *et al.* Astrophys. J., 1998, 500:L157
- [12] Kane J *et al.* Astrophys. J., 1999, 511:335
- [13] Drake R P *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 81:2068
- [14] Che Valier R A. Astrophys. J., 1982, 258:790
- [15] Klein R *et al.* Astrophys. J., 1994, 420:213

• 前沿和动态 •

地球内部物质运动的物理学和化学问题研讨会简讯

地球内部物质运动的物理学和化学问题研讨会于 2001 年 1 月 20 日在中国高等科学技术中心举行.出席研讨会的有来自南开大学、北京大学、中国科学院高能物理研究所、化学研究所、国家地震局地质研究所、中国地质学会、中国地质科学院地质研究所、中国地质科学院矿产资源研究所、国土资源部(原地质矿产部)地球化学动力学开放实验室等单位的 16 名代表.此次研讨会同时是国土资源部地球化学动力学开放实验室学术年会.

研讨会不仅安排了学术报告,而且在发言过程中展开了热烈的讨论,内容涉及地球内部极端条件下的物质基本性质,高温高压对物质的相变、状态和键的改变和物质运动的规律等物理学家和化学家感兴趣的问题,以及跨学科研究怎样介入地球深内部的问题等.会议还介绍了国际的发展趋势和我国的科学家在这一领域所取得的一些最新成果.

高压科学的迅猛发展,开拓了认识物质的新疆界,可以实现百万大气压和几千度的条件,相当于实验模拟地幔、地核压力温度的范围,能对物质进行原位谱学和 X 射线直测.实现了透过金刚石窗口探测地球深内部,取得了划时代的进步.已发现在超高压下,气体元素可形成金属,范德瓦尔斯键、氢键、共价键、离子键及状态结构亦随压力而改变.

地球化学动力学实验室介绍了他们的研究工作进展,介绍了使用金刚石压砧在 850 °C 和 3 GPa 范围观测氯化钠水溶液的实验,发现在近临界态时,分离为气液两相不混溶区的新现象.高温高压的原位直测的实时过程录像显示,这是一个十分重要的科学发现.高温高压的原位测量水溶液红外谱中发现在近临界态时水分子氢键的破坏.地球深内部流体的结构性质,临界态性质(涨落)如何影响流体/矿物材

料的反应,是一个让人关注的问题.深内部超临界流体在减压时会分离出气与液相,而气相内可以携带金属迁移.这是深部物质进入地表的一种方式.

研究地球深内部的基本方法是极端条件下的化学物理方法.如,发展高压高温原位直测方法和高温高压物质的波谱学原理,表征高压高温下物质的结构及变化.从本质上说,高温高压物质的波谱可以反映高温高压下分子间原子间的相互作用和压力对键态的影响.现代理论物理用状态方程讨论物质被压缩的过程,可预测更广温压范围的物质状态.

地球深部的压力会诱导地球各圈层内物相结构变化.如果在有水参与的情况下,物质的化学和物理参数的变化,物相结构的变化就会不同.因此,研究地壳运动也应考虑有水的活动,地震是否与深部岩石圈内的水溶液的临界态性质有关等等,都应进一步探索.

地球内部的极端条件下的物质运动涉及了物理学和化学的许多基本问题.运用高压高温下物性、物态方程和流体力学理论,结合实验与观测数据,可全面开展高温高压下物质形态及运动规律的研究,例如,高温高压下固体的性质(如相变等);超临界流体和地球内部流体在极端条件下的化学反应动力学;理论物理方法预测高压高温下物质性质变化和运动规律等.

研讨会开得很成功,不仅达到了预期的目的,而且与会代表一致表示会将继续加强交流与合作研究.研讨会对中国高等科学技术中心的大力支持和关心表示衷心的感谢.

(国土资源部地球化学动力学开放实验室 张荣华 胡书敏)