

·成果简介·

太阳耀斑演化的数值模拟与可视化

方成 陈鹏飞 狄晓华

(南京大学天文系, 南京 210093)

[关键词] 太阳耀斑, 磁流体力学, 磁重联, 数值模拟

太阳耀斑是太阳大气中的剧烈活动之一, 它常伴随日冕物质抛射、射电爆发及高能粒子辐射等, 并可能影响日地空间环境。因此, 太阳耀斑研究不仅在天体物理中有重要的意义, 同时也有利于空间物理、航天技术等学科的发展。现在已普遍认为太阳耀斑是磁场重联产生的爆发活动, 对其动力学演化的研究主要有 2 种途径: 一种是研究磁重联释放能量后在磁流管中的响应过程, 被称为耀斑动力学模型研究^[1]。它可以和光谱诊断相结合, 研究耀斑大气模型及能量的传输过程; 另一种是将磁场重联和太阳大气耦合起来研究的磁流体力学(MHD)^[2], 它在 2—3 维空间内研究耀斑的触发机制及演化结构等。我们在这 2 方面都做了大量的工作, 本文主要介绍后一种, 即磁流体力学(MHD)方面的研究进展。

由于 MHD 方程组是高度非线性的, 解析求解存在数学上的困难, 目前仅找到几个简单的特解, 人们便求助于数值模拟。由于数值模拟是非常“廉价”的实验, 可以选择很多参数及物理条件进行大量的研究, 因此, 在过去的 20 多年里取得了很大的进展。数值模拟结果的可视化作为一种新兴的科研辅助手段, 能将物理量的分布映射为人们可直接接受的颜色或亮度分布, 从而在计算机上形象地再现活动演化现象。

2 年多以来, 我们在以下 4 个方面开展了研究工作, 并取得了新的成果:

1 开拓网络的伪重联

MHD 数值模拟通常是将感兴趣的局部活动区经过有限网格点离散化后将 MHD 方程组作差分处理, 然后通过某种计算格式求解。由于差分会产生

截断误差, 因此数值模拟有时会引入非物理结果, 如数值不稳定性等。我们在研究中首次发现在数值模拟中被广泛采用的开拓网格会产生强数值电阻, 并导致伪重联。

数值网格有 2 类: 拉格朗日网格和欧拉网格。欧拉网格又有很多种, 其中开拓网格被广泛用于存在对称边界的情况。我们的研究表明当磁中性线位于对称轴上时, 采用开拓网格会在关于磁通量函数的磁扩散方程中产生“削波”现象, 从而引起强数值电阻。在考虑有限电阻的磁重联模拟中, 这种数值电阻将和有限电阻一起对结果产生影响; 而在理想 MHD 模拟中, 这种数值电阻能导致磁力线发生重联, 如图 1 所示, 其中模型 A 为正常网格, 模型 B 对应开拓网格。我们把这种与磁流体力学冻结理论相矛盾的重联称作伪重联(也是数值重联)。

2 耀斑环的演化

双带耀斑是一类大规模的活动现象, 在日冕中表现为软 X 射线及 H α 亮环的上升, 同时在日面上可看到逐渐分离的 H α 亮带。光谱研究表明耀斑环的这种运动不是物质真正的运动, 它源于新的环不断在更高处形成以及旧环的不断冷却。耀斑环的运动是磁重联理论的直接证据之一, 任何模型必须能解释这种运动。在理论上, 人们唯象地提出了双带耀斑的磁重联模型, 也称作 Kopp-Pneuman 模型, 其正确性有赖于观测和理论研究的证实并进一步加以完善。

我们数值模拟了在无力场电流片位形中发生的磁重联过程, 其中电流片沿重力方向。我们的数值模拟结果表明, 引入局部反常电阻后, 在局部电阻区

形成了 X 型重联位形,在 X 点上下方分别产生 2 股喷流,同时在 X 点两侧自发形成重联入流,在入流与出流的界面上出现磁流体慢激波。根据 Petschek 理论,该慢激波能迅速将磁能转化为等离子体的热能和动能。向上的喷流与冻结的磁力线一起被抛离太阳表面,有可能成为日冕物质抛射的一部分;在 X 点下部的闭合磁力线由于固结于光球层(系连效应)而比较稳定地在日冕低层形成磁环。向下的喷流与

磁环碰撞,在环顶产生快激波。慢激波沿磁力线传播至磁环并加热其中的等离子体形成软 X 射线增亮。随着重联的继续,新的磁环在更高处形成,从而出现软 X 射线环的上升及足点分离的表观运动,如图 2 所示。但磁环本身却在收缩,此即观测到的 Shrinkage 效应。环的表观运动速度约为每秒几十公里,与观测一致。

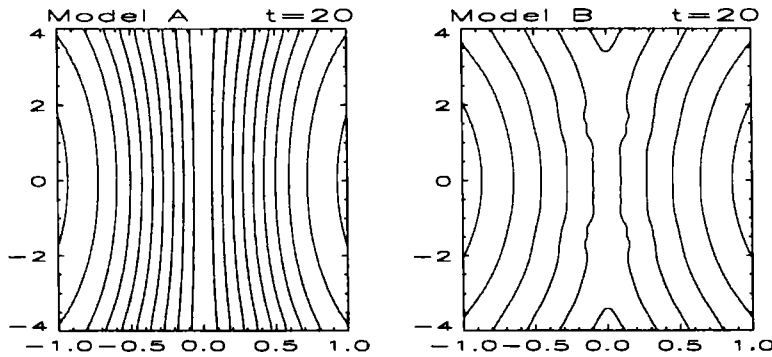


图 1 模型 A 和 B 在 $t = 20 \tau_A$ 时的磁位形,其中模型 B 在电阻为 0 的情况下仍发生磁重联

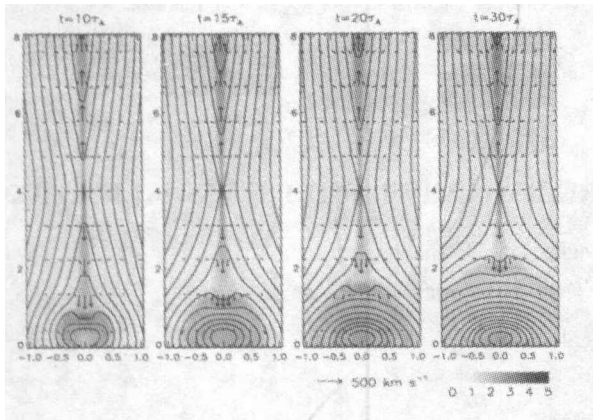


图 2 重联 X 点比较高的模型中温度(灰度表示)、磁力线及速度场(矢量箭头)的演化,其过程与双带耀斑相似

我们进一步的研究表明这种表观运动的速度主要与磁场强度有关,其次和等离子体的密度有关,而与等离子体的温度、长度标度及磁雷诺数无关。这表明耀斑爆发对应于快速磁重联,耀斑环的运动具有几何相似性。

3 太阳耀斑统一模型

太阳耀斑通常分为 2 类,即双带耀斑和致密耀斑。以前人们认为它们分别对应不同的机制,前者

由 Kopp-Pneuman 模型解释;而后者归因于新浮磁流模型。然而日本 Yohkoh 卫星发现的致密耀斑环顶的硬 X 射线源却表明这类致密耀斑中的磁重联过程与双带耀斑非常相似,因此有人建议将这 2 类耀斑统一在一个框架下。

我们的研究表明当电流片中的重联 X 点比较高时,磁重联表现为上一节描述的耀斑环的上升及足点分离运动,持续的时间也比较长。这些都是双带耀斑的典型特征。但是当重联 X 点比较低时,耀斑环的上升仅在重联脉冲相时比较明显;在此之后,环的上升速度迅速衰减,耀斑环也趋于稳定,因此只出现单环结构,如图 3 所示。这些与致密耀斑的演化特性非常相似。我们据此提出太阳耀斑的统一模型,认为 2 类耀斑源于几乎相同的电流片的磁重联过程,重联点高度的不同导致耀斑形态等观测特性

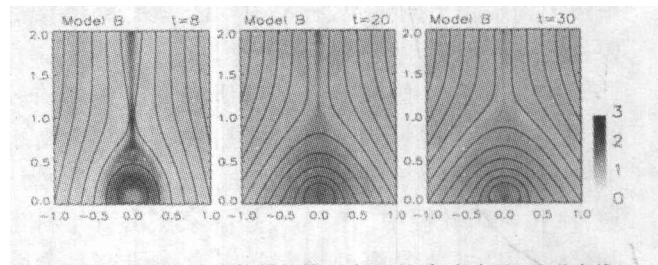


图 3 重联 X 点比较低的模型中温度(灰度表示)及磁力线的演化,其过程具有致密耀斑的典型特征

上的差异。对于双带耀斑而言,重联 X 点比较高,而致密耀斑的重联 X 点比较低。

4 其他

4.1 白光耀斑

白光耀斑是指在可见光波段有连续辐射增长的太阳耀斑。它在耀斑研究中占有非常重要的地位,因为它在很多方面和恒星耀斑相似,并且对太阳大气模型及能量传输机制提出了挑战。一般认为可能存在 2 类白光耀斑,其中 II 类白光耀斑可能源于低层大气的磁重联。我们对光球、色球层的磁重联过程进行了模拟,其结果显示磁重联模型可以在形态、寿命、光谱等许多方面自治地解释白光耀斑的观测特性。

4.2 快速磁重联

由于太阳耀斑的时标比较短,而磁场扩散时标却长得多,因此在耀斑模型中必须解决快速磁重联的问题。这也是重联理论中最基本的问题。曾经存在 2 种观点,一种认为边界条件(如驱动入流)能导致快速重联;另一种则认为边界条件应自治地给出,重联区的物理条件(如反常电阻)才是导致快速重联的重要因素。研究中假定入流边界为自由边界后,自治地得出了 Petschek 快速重联,这表明快速重联不必引入驱动入流,而由重联区(尤其是重联 X 点

附近)的物理性质(如反常电阻)决定。当然,外部条件也会影响重联的速率,如文献[3]认为磁力线的系连效应会减慢重联。

4.3 科学可视化

在二维及三维数值模拟中由于数据量大且在二维或三维空间中分布,数值结果的意义非常不直观,因此很难描述其中的现象及过程。科学可视化就是将数值结果映射到以颜色或亮度等表示的图像,从而使科研工作者能够直接分辨出具有空间结构的现像及其演化。更重要的是,某些物理量(如密度、温度等)的分布在可视化后可以直接和观测图像相比较,藉此验证数值模型的正确性。我们将耀斑演化的数值结果可视化后制作了 2 盒录像带,先后在国际太阳活动周研究(ISC)会议、国内太阳物理会议及空间物理会议上播放,给国内外同行留下了深刻的印象。这是国内天文界首次实现的可视化研究成果。

参 考 文 献

- [1] Gan W Q, Fang C, Zhang H Q. A hydrodynamic model of the impulsive phase of a solar flare loop, *A&A*, 1991, **241**: 618.
- [2] 陈鹏飞, 方成, 唐玉华等. 太阳大气中自发磁重联的数值模拟(II), *天文学报*, 1998, **39**: 381.
- [3] 邹利民, 唐玉华, 狄晓华等. 太阳大气中自发磁重联的数值模拟(I), *空间科学学报*, 1997, **17**: 294.

NUMERICAL SIMULATION OF SOLAR FLARE DYNAMICS AND ITS VISUALIZATION

Fang Cheng Chen Pengfei Di Xiaohua

(Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093)

Key words solar flare, MHD, magnetic reconnection, numerical simulation

(上接 216 页)

资助者十分珍惜国家杰出青年科学基金的荣誉,勤奋钻研,努力开拓,在原有工作的基础上做出了新的出色成绩。其中许多人已经成为或正在成为优秀的学科带头人。近年当选为中国科学院院士或中国工程院院士的陈竺、白春礼、王志新、刘德培都曾是国家杰出青年科学基金获得者。

在首批 15 个国家重点基础研究发展规划项目的 19 名首席科学家中,陈竺、张启发、严纯华、高小山榜上有名;在教育部确定的首批“长江学者奖励计划”73 位特聘教授中,有 38 人是国家杰出青年科学基金获得者,4 人是海外青年学者合作研究基金获得者;陈竺教授还获得了首届“长江学者成就奖”一

等奖。

广大资助者在基础理论研究方面取得了重要的进展。据统计,截至 1997 年 6 月,仅 1994、1995 年 2 届已圆满结题的 130 名资助者,共在国内外核心学术刊物上发表论文 1 520 篇,其中在国外刊物上发表 752 篇;出版专著 29 部;获专利 8 项;国际学术会议特邀报告、大会报告 47 篇。他们的成就受到了科技界的瞩目和好评,有的在国际上受到高度评价。

在报告会上,国家杰出青年科学基金获得者向会代表汇报了在国家杰出青年科学基金资助下取得的研究成果。

(办公室宣传处 供稿)