



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

复杂星周环境中超新星遗迹的磁流体模拟

作者姓名: 张孟飞

指导教师: 田文武 研究员

学位类别: 理学博士

学科专业: 天体物理

培养单位: 中国科学院国家天文台

2019 年 6 月

**Magnetohydrodynamics (MHD) Simulation for Supernova
Remnants (SNRs) in Complex Circumstellar Environment**

**A Dissertation submitted to the
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Philosophy
in Astrophysics**

By

Zhang Mengfei

Supervisor: Professor Tian Wenwu

**National Astronomical Observatories of China
Chinese Academy of Sciences**

June, 2019

中国科学院大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日 期：

中国科学院大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院大学有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院大学有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：

摘 要

超新星遗迹 (SNR) 是超新星爆发后与周围星际介质相互作用的产物, 其产生过程涉及天体物理、粒子物理、分子化学等多个领域, 是目前天文研究中的前沿课题之一。通过观测分析其中元素丰度、动力学特性, 我们可以估算其前身星类型, 为超新星爆发模型提供参考; 同时基于其多波段能谱 (SED), 我们可以剖析其中粒子加速机制, 为宇宙线的起源找到更加合理的解释; 而对其分子谱线的观测研究, 也让我们能偶进一步理解星系中分子生成与破坏的过程。这些问题都与超新星遗迹的演化密不可分, 可是其具体演化过程其实直到现在也并不清楚。

研究超新星遗迹演化主要的困难在于具体的情况非常复杂, 单一的解析模型无法解释很多遗迹的观测结果。因此, 我们需要一个基于简洁明了的理论, 又能梳理清楚复杂情况的方法来研究超新星遗迹的演化, 而磁流体模拟正是最佳选择。磁流体模拟的重点在于对初始条件的选取, 可因为初始条件实质上就是过去发生的事, 所以理论上我们永远无法得知一个过去未被观测到的遗迹的准确初始条件。实际上, 有一些爆发时就观测到的历史超新星遗迹可以得到较为可靠的爆发能量及抛射质量, 尤其是 SN 1987A, 可以说是研究超新星遗迹演化的范本。但是这些遗迹数量很少, 不具有普适性, 对于银河系中已经观测到的 300 个左右的遗迹, 大部分其前身星的性质并不清楚。此外, 更为棘手的是, 超新星遗迹的演化受到星周介质的巨大影响, 而通常星周介质初始的密度、磁场等性质更难得到。于是, 很多对超新星遗迹的模拟都基于均匀星周介质分布, 或者假设线性、幂律、指数型的分布, 这与实际复杂的介质分布相差甚远, 所以也解释不了很多观测结果。

本文尝试寻找更好的方法解决这两方面的困难, 主要的工作有:

- 基于 X 射线的元素丰度、电子密度估计, 结合射电波段对超新星遗迹的 HI 测距, 估算较为可靠前身星爆发能量、抛射物质量, 结合磁流体模拟, 互相验证参数估计。我们选择观测研究较多的 SNR W51C 为例, 以方便检验模拟结果。前人已经粗略估算出其前身星质量和爆发能量, 可是我们经过初步模拟发现, 这样的参数无法模拟这颗遗迹, 同时也违背了最近通过观测得到的超新星爆发质量-能量的经验模型。通过检验, 我们发现其估算爆发能量使用的距离并不合理, 最终我们建议使用更合理的距离 4.3 kpc 和爆发能量 $1.3 \times 10^{51} \text{ ergs s}^{-1}$ 。

- 为了得到 SNR W51C 的单边厚壳层, 我们采取了普遍使用的设置磁场梯

度的方法，偶然发现了 SNR W51C 应该存在一个新的壳层。超新星爆发时如果星周介质存在一个磁场梯度，那么最终演化结果可能会是一个单壳层的超新星遗迹。而 SNR W51C 一直被认为是一个单壳层的遗迹，而我们的模拟结果显示其存在一个可能暗弱一些但仍应该被观测到的壳层。通过查看射电图像我们认为，这一新壳层是因为与周围电离氢区在视线方向重合，所以一直没有被注意到，而后来对射电偏振图像的分析也证实了我们的猜测。

- SNR W51C 同时也是一个伽马射线源，被认为与分子云 (MC) 相互作用。我们模拟了其沿视线方向与分子云相互作用，结果显示这种相互作用可能导致局部磁场放大，射电流量增强，从而可能在遗迹的中心区域观测到射电辐射。而对临近 SNR W51C 中心区域的射电偏振、非热辐射及羟基 (OH) 谱线图的分析，证实了这种相互作用方式的存在。

- 我们认为一个大质量恒星晚期的星风对其最终成为超新星时的星周介质有很大影响。通过模拟星风，并以星风模拟结果作为星周介质的初始条件，我们更准确地模拟了超新星遗迹演化，以此为基础我们可以解释很多之前无法解释的遗迹形态，比如八字形和大弧度单边遗迹。

- 以考虑星风的超新星遗迹模拟为基础，我们认为前身星星风可以大大影响遗迹局部的磁场及介质分布。前人曾经通过观测超新星遗迹的磁场来估算银河系大尺度的磁场分布，而我们的这一工作表明，这种估算磁场的方式有的时候会出现问题。

本文不仅涉及天体物理的研究，也包括大量具体磁流体模拟的理论及程序编写的内容。其中，磁流体模拟理论主要介绍一个模拟中需要考虑的各种因素，以及如何找到最适合解决某个问题的模拟方式。而程序编写部分包括对个人用过的磁流体模拟软件的介绍、编写逻辑及编写过程中可能遇到的问题。

关键词： 星际介质：超新星遗迹 - 磁流体模拟 - 星际介质：SNR W51C - 方法：数值模拟

Abstract

Supernova remnant (SNR) is the result of interaction between shock wave of supernova and circumstellar medium (CSM), a process related to astrophysics, particle physics and molecule chemistry, etc. This is one of the most forward projects in astronomical researches. By observing and analyzing the abundance and the kinetic nature in an SNR, we can derive the type of its progenitor, which will provide reference for models of supernova explosion. Meanwhile, based on its spectral energy distribution (SED) at multiband, we can disentangle the acceleration mechanism inside, and explain the origin of cosmic rays more reasonably. In addition, the observations on its molecular spectra, can help us understand the formation and destruction of molecule in a galaxy. The evolution of SNR is the key to figure out these subjects, but the detailed evolution is still ambiguous.

The practical situation is complex in evolution of SNR, so it is difficult to study the details and an analytical model cannot well explain many observations. Therefore, we need a model-based method that can get the situation sorted, and magnetohydrodynamics (MHD) simulation is the best choice. The key point of MHD simulation is to choose initial conditions. However, initial conditions are actually the past things, so we theoretically will never know the accurate initial conditions of the evolution of an SNR undetected in the past. In fact, we can estimate reliable initial conditions of some historical SNRs, if we observed them carefully when they exploded as supernovae. In particular, SN 1987A is even known as a gift of universe in this area. Nevertheless, there are only few historical SNRs which cannot be used as samples to explain most of about 300 SNRs in Milky Way. Moreover, the evolution of SNRs is strongly influenced by CSM, but it is more difficult to estimate the initial density and magnetic field of CSM. As a result, many simulations for SNRs are assumed to have homogeneous, liner, power-law or exponential density distribution, which is completely different from the reality, so they cannot explain many observational phenomena.

In this paper, we try to find better method to solve the problems in the two aspects. The primary results are shown as follows:

- Based on the estimation of abundance and electron density from X-ray data,

we can combine the HI distance measure to estimate the explosion energy and ejecta mass of progenitor. Then we can check the parameters by comparing observations and simulations. We choose the well-studied SNR W51C as an example, so that we can know whether we perform the simulation correctly. Some researchers have estimated its progenitor mass and explosion energy, but we cannot simulate this SNR by applying such parameters. We find these parameters also disobey the derived mass-energy model based on recent observation. After checking their method, we think the distance used to estimate the explosion energy is not reasonable. Finally, we suggest a distance of 4.3 kpc and an explosion energy of 1.3×10^{51} ergs s^{-1} .

- To simulate the thick unilateral shell, we set a gradient of magnetic field, a method often used to obtain such shell. By analyzing the results, we find there should be a new shell of SNR W51C. A supernova will evolve to an SNR with unilateral shell, if there exists a magnetic field gradient. SNR W51C is believed to only have one edge, but our simulation shows there is possibly another new edge which is much darker but should be detected by previous survey. We investigate its radio images and think this new edge overlaps with a surrounding HII region, which is why we do not notice it before. Further analysis on radio polarization map also confirm our hypothesis.

- SNR W51C is also a γ -ray source, known to interact with molecular clouds (MCs). We simulate it interacts with an MC along the line of sight (LoS), which shows this process can amplify the magnetic field and enhance local radio flux. As a result, we can detect radio radiation next to the center of this SNR. Meanwhile, we study the radio polarization, non-thermal radiation and OH spectral map in this region, which confirms such an interaction.

- We think the stellar wind of a massive progenitor will largely change the circumstellar magnetic field and density distribution. We simulate the stellar wind, and take the result as initial conditions for SNR simulation, which can help us obtain more accurate simulation. This simulation shows a clue to explain many unsolved radio morphologies of SNRs, such as bilateral asymmetric and unilateral large-radian SNRs.

- Based on the simulation of stellar wind, we notice the stellar wind of progenitor will strongly influence local magnetic field. However, some researchers try to estimate large-scale magnetic field distribution by observing the magnetic field of SNRs, which will be a little unreasonable if our simulation is correct.

In this paper, we do not only focus astrophysics, but also involve MHD theories and practical coding. We here introduce various factors we need to consider in a simulation and explain how to find suitable simulation method for one particular problem. In addition, we also introduce the features of different codes, the logic of coding and some unexpected problems.

Keywords: ISM: supernova remnants – magnetohydrodynamics (MHD) - ISM: individual objects (W51 C) - method: simulations

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.2 系统要求	1
1.3 问题反馈	2
1.4 模板下载	2
第 2 章 对超新星遗迹 W51C 的磁流体模拟及观测分析	3
2.1 研究历史及意义	3
2.2 数据处理	3
2.3 模拟模型	5
2.4 模拟及观测分析结果	9
2.5 羟基谱线分析	12
2.6 讨论	12
附录 A 中国科学院大学学位论文撰写要求	13
A.1 论文无附录者无需附录部分	13
A.2 测试公式编号	13
A.3 测试生僻字	13
参考文献	15
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	17
致谢	19

图形列表

- 2.1 左图中彩色背景是来自 VPGS 的 1.4 GHz 连续谱图像。黑色的箭头代表没有扣仪器偏振的在 2695 MHz 的磁场方向，箭头长度代表偏振强度 (mK)，其中最大的强度是 1581 mK。下图中，彩色背景是扣除仪器偏振后的 2695 MHz 的偏振度，白色箭头代表磁场方向，箭头长度代表偏振度，其中最大的偏振度是 2%。 4
- 2.2 模拟的密度-磁场图像。所有的图都是沿着一个三维立体图像沿着中心切片后得到的从不同方向看的结果。背景彩色图像是密度分布，白色箭头显示了磁场的方向和强度。上面三幅显示的是初始条件，下面三幅显示了经过 18000 年演化后的结果。上面三幅图中，中心磁场的强度是 $9\mu G$ 。 6
- 2.3 SNR W51C 演化 18000 年后的相对射电流量密度。右侧图像是 $\sigma=2$ 的高斯平滑结果。这里设定距离为 4.3 kpc，所以 1 pc 对应着 $0.8'$ 。 10
- 2.4 这是图 2.3 的右图中左上到右下的流量切线图。 10
- 2.5 这是 $\sigma=2$ 时不同参数下的相对射电流量密度图。顶部两幅图为将初始爆发动能改为 2.0 和 3.0×10^{51} ergs 的结果, 下面两幅图为将平均介质密度改为 0.13 cm^{-3} 和 0.3 cm^{-3} 的结果。 11

表格列表

2.1 用于 W51C 模拟的参数	8
-------------------------	---

符号列表

字符

Symbol	Description	Unit
R	the gas constant	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
C_v	specific heat capacity at constant volume	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
C_p	specific heat capacity at constant pressure	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
E	specific total energy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
e	specific internal energy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
h_T	specific total enthalpy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
h	specific enthalpy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
k	thermal conductivity	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
S_{ij}	deviatoric stress tensor	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
τ_{ij}	viscous stress tensor	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
δ_{ij}	Kronecker tensor	1
I_{ij}	identity tensor	1

算子

Symbol	Description
Δ	difference
∇	gradient operator
δ^\pm	upwind-biased interpolation scheme

缩写

CFD	Computational Fluid Dynamics
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy
EOS	Equation of State
JWL	Jones-Wilkins-Lee
WENO	Weighted Essentially Non-oscillatory
ZND	Zel'dovich-von Neumann-Doering

第 1 章 引言

1.1 研究背景

考虑到许多同学可能缺乏 \LaTeX 使用经验，`ucasthesis` 将 \LaTeX 的复杂性高度封装，开放出简单的接口，以便轻易使用。同时，对用 \LaTeX 撰写论文的一些主要难题，如制图、制表、文献索引等，进行了详细说明，并提供了相应的代码样本，理解了上述问题后，对于初学者而言，使用此模板撰写学位论文将不存在实质性的困难。所以，如果你是初学者，请不要直接放弃，因为同样为初学者的我，十分明白让 \LaTeX 简单易用的重要性，而这正是 `ucasthesis` 所追求和体现的。

此中国科学院大学学位论文模板 `ucasthesis` 基于中科院数学与系统科学研究院吴凌云研究员的 `CASthesis` 模板发展而来。当前 `ucasthesis` 模板满足最新的中国科学院大学学位论文撰写要求和封面设定。兼顾操作系统：Windows，Linux，MacOS 和 \LaTeX 编译引擎：`pdflatex`，`xelatex`，`lualatex`。支持中文书签、中文渲染、中文粗体显示、拷贝 PDF 中的文本到其他文本编辑器等特性。此外，对模板的文档结构进行了精心设计，撰写了编译脚本提高模板的易用性和使用效率。

`ucasthesis` 的目标在于简化学位论文的撰写，利用 \LaTeX 格式与内容分离的特征，模板将格式设计好后，作者可只需关注论文内容。同时，`ucasthesis` 有着整洁一致的代码结构和扼要的注解，对文档的仔细阅读可为初学者提供一个学习 \LaTeX 的窗口。此外，模板的架构十分注重通用性，事实上，`ucasthesis` 不仅是国科大学学位论文模板，同时，通过少量修改即可成为使用 \LaTeX 撰写中英文文章或书籍的通用模板，并为使用者的个性化设定提供了接口。

1.2 系统要求

`ucasthesis` 宏包可以在目前主流的 \LaTeX 编译系统中使用，如 `TEXLive` 和 `MiKTEX`。因 `CTEX` 套装已停止维护，**不再建议使用**（请勿混淆 `CTEX` 套装与 `ctex` 宏包。`CTEX` 套装是集成了许多 \LaTeX 组件的 \LaTeX 编译系统。`ctex` 宏包如同 `ucasthesis`，是 \LaTeX 命令集，其维护状态活跃，并被主流的 \LaTeX 编译系统默认集成，是几乎所有 \LaTeX 中文文档的核心架构）。推荐的 \LaTeX 编译系统和 \LaTeX 文本编辑器为

操作系统	L ^A T _E X 编译系统	L ^A T _E X 文本编辑器
Linux	T_EXLive Full	Texmaker 或 Vim （已集成于 Linux 系统）
MacOS	MacT_EX Full	Texmaker 或 Texshop （已集成于 MacT _E X Full）
Windows	T_EXLive Full 或 MiK_T_EX	Texmaker

L^AT_EX 编译系统，如 T_EXLive（MacT_EX 为针对 MacOS 的 T_EXLive），用于提供编译环境，L^AT_EX 文本编辑器（如 Texmaker）用于编辑 T_EX 源文件。请从各软件官网下载安装程序，勿使用不明程序源。**L^AT_EX 编译系统和 L^AT_EX 编辑器分别安装成功后，即完成了 L^AT_EX 的系统配置**，无需其他手动干预和配置。若系统原带有旧版的 L^AT_EX 编译系统并想安装新版，请**先卸载干净旧版再安装新版**。

1.3 问题反馈

关于 L^AT_EX 的知识性问题，请查阅 [ucasthesis 知识小站](#) 和 [L^AT_EX Wikibook](#)。

关于模板编译和样式设计的问题，请**先仔细阅读此说明文档，特别是“常见问题”（章节 ??）**。若问题仍无法得到解决，请**先将问题理解清楚并描述清楚，再将问题反馈至 [Github/ucasthesis/issues](#)**。

欢迎大家有效地反馈模板不足之处，一起不断改进模板。希望大家向同事积极推广 L^AT_EX，一起更高效地做科研。

1.4 模板下载

[Github/ucasthesis](#): <https://github.com/mohuangrui/ucasthesis>

第 2 章 对超新星遗迹 W51C 的磁流体模拟及观测分析

2.1 研究历史及意义

SNR W51C 存在于 W51 复合区中,除了这个遗迹,这个区域还包括两个电离氢区 W51 A/B。这两个电离氢区尺寸都很大,而且包括很多小一些的电离结构,比如 G49.2-0.35。SNR W51C 有很厚的半圆形的单壳层,射电图像尺寸大约为 $14' \times 20'$ (Copetti 和 Schmidt, 1991; Subrahmanyam 和 Goss, 1995)。而且 SNR W51C 一侧与电离氢区 W51B 相邻,最近的观测显示在此处有明显的高能特征 (Abdo 等, 2009; Aleksić 等, 2012), 因此我们认为这个遗迹是与分子云相互作用的。在 W51B 的东侧,也就是临近 W51C 的爆发中心,我们探测到了 OH 的 1720MHz 脉泽 (Hewitt 等, 2008; Brogan 等, 2013), 这是支持相互作用的另一个证据。W51A 是一个活跃的恒星形成区,但是并没有任何迹象表明与 W51C 相关,不过和 W51B 在一氧化碳 (CO) 和红外图像上看是互相关联的 (Kang 等, 2010; Parsons 等, 2012; Ginsburg 等, 2015)。两个电离氢区的距离是 5 kpc ~ 8 kpc (Genzel 等, 1981; Schneps 等, 1981; Xu 等, 2009; Sato 等, 2010; Tian 和 Leahy, 2013), 而 SNR W51C 的距离是 4.3 kpc (Tian 和 Leahy, 2013) 到 6 kpc (Koo 等, 1995)。这三者的空间关系让我们思考是否它们也有一定物理联系。

之前对这个复合体的观测已经有很多,可是其中主体结构之间的联系依然不清楚。因此,为了研究遗迹和电离氢区的物理联系,我们决定模拟这个遗迹的磁流体演化,并通过分析射电偏振数据和 OH 谱线数据来理解模拟的结果。

2.2 数据处理

我们使用的偏振数据来源于 Effelsberg 11cm (2.695GHz) 巡天 (Duncan 等, 1999)。这个巡天其实已经展示了 W51 复合区的偏振图像,可是他们为了图像可以覆盖更大片区域,使用了较低的分辨率,从而导致一些小结构模糊不清。原本的分辨率是 $5'$, 实际展示的是 $12'$ 。在图 2.1 中,我们展示了原始分辨率的偏振图,并旋转偏振方向 90° 得到一个大概的磁场走向。因为 11cm 巡天数据存在 $0.7\% \pm 0.25\%$ 的仪器偏振 (Junkes 等, 1987), 我们不得不先扣除仪器偏振以得到真实偏振强度。首先,我们在总强度图中扣除了小于一个标准差的值,我们认为这些区域只是不相干的背景,与目标源无关。然后我们通过 $I_{pol}^{final} = I_{pol}^{primary} - I_{total} * 0.007$ 来计算真实偏振强度,如果得到负值,我们设其为零,因为这证明这个区域并没有偏

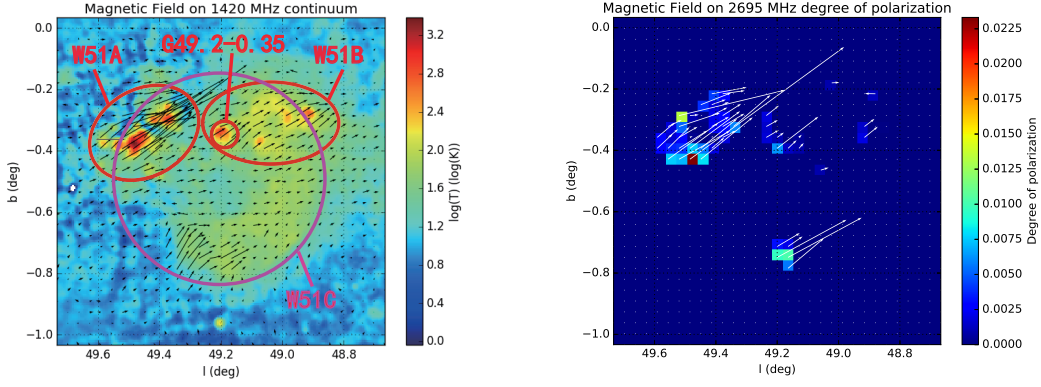


图 2.1 左图中彩色背景是来自 VPGS 的 1.4 GHz 连续谱图像。黑色的箭头代表没有扣仪器偏振的在 2695 MHz 的磁场方向，箭头长度代表偏振强度 (mK)，其中最大的强度是 1581 mK。下图中，彩色背景是扣除仪器偏振后的 2695 MHz 的偏振度，白色箭头代表磁场方向，箭头长度代表偏振度，其中最大的偏振度是 2%。

振流量。这里 I_{pol}^{final} 是得到的偏振强度， $I_{pol}^{primary}$ 是初始观测数据中的偏振强度， I_{total} 是总的辐射强度。最终，我们可以通过 $p = I_{pol}^{final} / I_{total}$ 得到偏振度。事实上，仪器偏振强度在部分区域可能少于 0.7%，所以扣除后的图像中有很多负值。这个巡天的总流量和偏振灵敏度分辨是 20 mK 和 11 mK，足以帮助我们找到很弱的偏振辐射。

我们使用分辨率较高的 THOR DR1 数据 (Beuther 等, 2016)，尝试对这个区域的 OH 辐射进行更详尽的研究。DR1 覆盖了银道坐标中 $15^\circ < l < 67^\circ, -1^\circ < b < 1^\circ$ 这大片区域，包含了 1.4GHz 连续谱图像，HI、OH (1612/1665/1720 MHz) 谱线图和射电复合线谱线图。其空间分辨率达到了 $20''$ ，这是对这一区域的射电巡天项目中最高的分辨率，而其 OH 谱线的速度分辨率达到 1.5 km s^{-1} ，也是非常高的。因为这一区域有的 OH 脉泽谱线非常强，以至于我们无法将其与其他有意义的谱线用同一标度画在一张图上，所以在脉泽区域我们修改了强脉泽的标度，它们的谱线强度都被人为地除了 20。

文中用到的 1.4GHz 连续谱图像来自于 VGPS (VLA Galactic Plane Survey) (Stil 等, 2006)。因为 Effelsberg 数据的分辨率较低，无法呈现这个区域的细节，而 THOR 数据因为是射电阵观测，损失了大尺度结构的流量，所以我们才使用 VGPS 的图像。这个巡天的空间分辨率是 $1'$ ，灵敏度是 2K。

2.3 模拟模型

这里我们使用三维磁流体模拟，忽略了粘滞度、电阻、热传导等耗散效应，引力和辐射冷却也不予考虑，而具体的参数大多来源于前人的观测。Sasaki 等 (2014) 使用 6 kpc 作为距离估计 SNR W51C 前身星的质量超过 $20 M_{\odot}$ 。这个距离是一个上限，所以真实的质量可能更小。在这个模拟中，我们取 $20 M_{\odot}$ 为前身星质量，这样其爆发时抛射物的质量就是 $11 M_{\odot}$ (Sukhbold 等, 2016)。Koo 等 (1995) 也使用 6 kpc 为距离估计其爆发能量为 $3.6 \times 10^{51} \text{ ergs s}^{-1}$ ，这个完全超出了典型的爆发能量， $1 \sim 3 \times 10^{51} \text{ ergs s}^{-1}$ (Poznanski, 2013)。根据 Poznanski (2013) 的工作，对于 W51C，爆发能量大约为 $1.0 \times 10^{51} \text{ ergs s}^{-1}$ 是比较合理的。虽然 Poznanski (2013) 只是估计了通过估计一些 SNRs 的动能得出这样的经验关系，可是他用的遗迹都非常年轻，或者更合理的说是刚爆发的超新星，所以其动能几乎等于其总爆发能量。而在我们的模拟中也是如此认为，即使如今观测到的遗迹热能与动能相当，我们认为爆发时总能量几乎全部来自动能，爆发时的动能就是如今热能与动能的总和。在对 W51C 的流体模拟中，我们认为对结果起作用的主要是动能，热能导致的辐射耗散影响不大。实际上，W51C 是一个中等年龄的遗迹，因此他的爆发能量应该是现如今动能和热能之和。Koo 等 (1995) 根据 X-ray 观测先推出热能，然后根据 Sedov 模型估算总的爆发能量 (Sedov, 1959)。采用最近测量的 4.3 kpc 的距离 (Tian 和 Leahy, 2013)，我们采取了与 Koo 等 (1995) 相同的方法得到了 $1.3 \times 10^{51} \text{ ergs s}^{-1}$ 的爆发能量，这是一个相对来说更合理的结果。当然，SNRs 的爆发能量其实变化很大，所以这并不能作为一个决定性的证据说明哪个距离就是正确的。4.3 kpc 在目前看来只是更可靠一点，所以我们在模拟中取其为 W51C 的距离。我们选择 $48.89^{\circ} < l < 49.51^{\circ}$, $-0.81^{\circ} < b < -0.19^{\circ}$ 这一区域作为模拟研究的目标。这样对于这个大约角直径有 37，其真实直径是 46 pc。如果采用 Koo 等 (1995) 推导的平均激波速度 490 km s^{-1} ，其年龄为 18000 年。

我们通过一个用于模拟 SNR 解析演化的 Python 计算器 (Leahy 和 Williams, 2017) 估计得到介质平均密度为 0.21 cm^{-3} 。为了模拟出介质的随机分布，我们采用了幂律的介质分布模型 $N(\rho) = N_0 \rho^{-\alpha}$ ，这里 $N(\rho)$ 是像素数，表征了有某一个密度的格点的个数， N_0 是一个常数，用来保证最终结果满足平均密度估计， α 是一个幂律指数。 α 是正数，也就是说低密度的区域比高密度的区域更多更大。举个例子，在我们的模拟中，共有 $256 \times 256 \times 256$ 个格点，那可能有一千万个点密度低于 0.21 cm^{-3} ，而只有 100 个点密度高于 21 cm^{-3} 。Parsons 等 (2012) 研究了 SNR W51C 周围的分子团块（包括致密团块），发现它们的质量分布满足一个

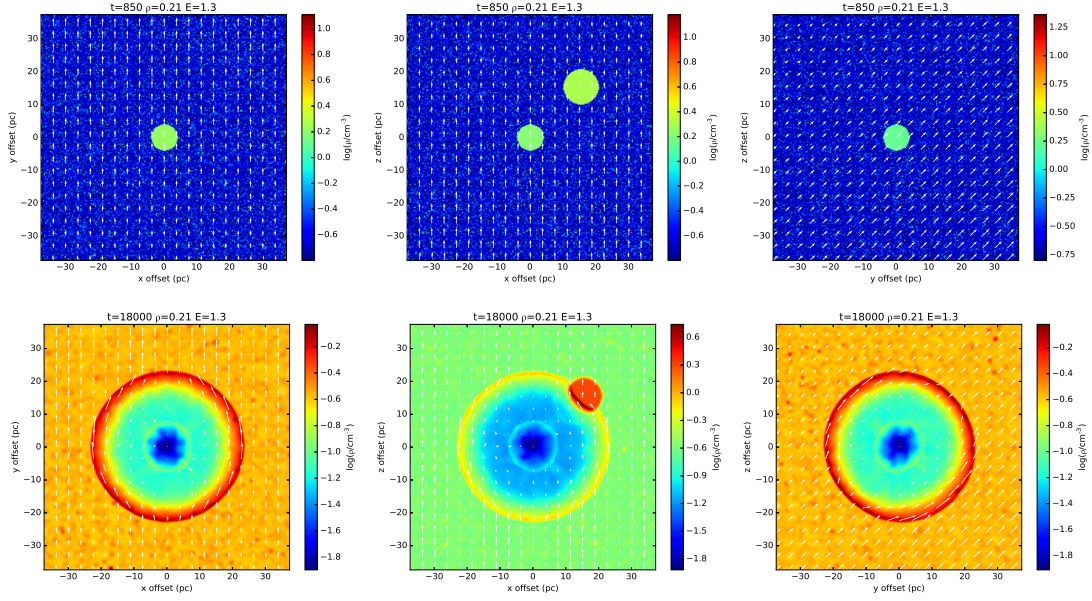


图 2.2 模拟的密度-磁场图像。所有的图都是沿着一个三维立体图像沿着中心切片后得到的从不同方向看的结果。背景彩色图像是密度分布，白色箭头显示了磁场的方向和强度。上面三幅显示的是初始条件，下面三幅显示了经过 18000 年演化后的结果。上面三幅图中，中心磁场的强度是 $9\mu\text{G}$ 。

指数 α 为 2.4 的幂律谱，这个结果暗含了真实的周围介质密度分布。因为目前对这个区域没有原子氢密度分布的研究，所以我们取 $\alpha = 2.4$ 作为初始介质密度分布。此外，为了模拟相互作用，我们在初始条件中加了一个密度为 2 cm^{-3} 直径为 11 pc 的分子云 (如图 2.2 中间两幅图)。

因为 W51C 的壳层倾斜方向基本与银道面呈 45° 夹角，所以我们在模拟中也设置了这样一个角度。我们在模拟中认为超新星爆发是球对称的，考虑到磁场，其遗迹的演化是柱对称的，所以为了产生一个单边亮的壳层，我们需要设置不对称的初始介质分布，从而保证遗迹有一个边非常暗以至于其流量低于射电望远镜观测灵敏度。因为在这一区域我们并没有观测到明显的密度梯度分布，所以在这个模拟中，我们通过设置较大的磁场梯度来保证一边流量大，一边流量小到观测不到。而银河系介质中平均磁场强度为 $4\mu\text{G}$ 到 $14\mu\text{G}$ (Haverkorn, 2015)，我们模拟的尺度为 $75 \times \sqrt{2}\text{ pc}$ 。所以，我们假设模拟中心磁场强度为 $9\mu\text{G}$ ，而磁场梯度为 $0.1\mu\text{G pc}^{-1}$ 。磁场梯度如果再大，最小磁场或者最大磁场就会超过比较合理的范围。

我们模拟了大小为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的区域，对于 4.3 pc 的距离实际尺度 $75\text{ pc} \times 75\text{ pc}$ 。对于这个区域，我们使用 $256 \times 256 \times 256$ 的网格来进行三维模拟，也就是说，其分辨率是 0.3 pc pixel^{-1} ($0.24'\text{ pixel}^{-1}$)。因为模拟时网格为立方体，为了得到近似

为球对称的爆发，我们需要设置较大的初始爆发半径。同时，早期的自由膨胀相的遗迹演化可以通过解析解得到，而超过自由膨胀相的演化就不太适合了，所以初始爆发半径又不能太大以至于演化到绝热膨胀相。所以，对于 W51C，我们选取初始爆发半径为 4 pc，对于这个遗迹，它需要花费 850 年达到这个半径，而他的绝热膨胀相起始于 3200 年 (Leahy 和 Williams, 2017)，所以它达到初始半径时仍处于自由膨胀相。在图 2.2 中，上面三幅图展示了模拟中采用的初始条件。

为了与真实的观测图像相比较，我们假设其射电辐射全部来自于同步辐射，并使用简化公式 $i(\nu) = C\rho B_{\perp}^{\beta+1}\nu^{-\beta}$ (Orlando 等, 2007) 得到相对射电流量体密度，这里 ν 是辐射频率， C 是一个常数， ρ 是密度， B_{\perp} 是垂直于视线方向的磁场， β 是同步辐射谱指数。通过沿视线方向积分， $\int i(\nu)dl$ ，我们可以获得可以与实际观测相比较的相对射电流量密度。在我们的三维模拟中， X 轴被定义为视线方向。对于相互作用区域，我们认为大约 10% 的介质对射电流量密度有贡献，也就是说 $i(\nu) = 0.1C\rho B_{\perp}^{\beta+1}\nu^{-\beta}$ 。 ν 取 1.4GHz， ρ 和 B_{\perp} 是模拟过程中的主要变量， β 对于 W51C 取 0.25 (Shaver 和 Goss, 1970)。然后我们可以获得一个相对射电流量密度的图像，而要获得绝对射电流量密度需要得知常数 C ，这个对于每个遗迹都不一样，因为其中包含了激波加速效率等变量，这些量对于每个遗迹都不一样，要获得 C 需要将观测与模拟相对比得到。但是相对射电流量已经能够告诉我们很多信息了。用于比较的 VGPS 射电连续谱的分辨率是 $1'$ ，而模拟结果分辨率高很多，如果要将其与模拟结果比较的话，需要将模拟结果分辨率平滑到与观测相近。分辨率其实指的是观测源的半高全宽 (the full width at half maximum, FWHM)，对于用于平滑的高斯方程：

$$G(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad (2.1)$$

其 FWHM 定义为 $2\sqrt{2\ln 2}\sigma$ 。对于 VGPS，其 σ 为 $0.42'$ ，我们模拟的分辨率是 $0.24' \text{ pixel}^{-1}$ ，所以用于平滑的 σ 为 $0.42' / 0.24' \text{ pixel}^{-1} = 1.75 \text{ pixel}$ ，作为简化，我们取 $\sigma=2 \text{ pixel}$ 。

这个工作中我们模拟了 SNR W51C 演化 18000 年的结果，主要使用的参数都列在表 2.1 中，其中没有参考文献的参数都来自于我们的估计。当然，我们在模拟中也尝试过不同的参数，比如设置爆发能量为 2.0 和 $3.0 \times 10^{51} \text{ erg}$ ，设置平均密度为 0.13 cm^{-3} 和 0.3 cm^{-3} ，设置谱指数为 1.0 和 3.0。

表 2.1 用于 W51C 模拟的参数

参数	值	参考文献
抛射质量	$11 M_{\odot}$	1, 2
初始爆发动能	$1.3 \times 10^{51} \text{ ergs}$	3, 4
模拟初始半径	4 pc	
模拟起始时间	850 years	5
平均密度	0.21 cm^{-3}	4, 5
密度分布指数 (α)	2.4	6
磁场梯度	$0.1 \mu\text{G pc}^{-1}$	
中心磁场强度	$9 \mu\text{G}$	
平均原子质量	1.3	
绝热系数	5/3	
温度	100 K	
同步辐射谱指数 (β)	0.25	7
距离	4.3 kpc	8

(1)Sasaki 等 2014; (2)Sukhbold 等 2016; (3)Poznanski 2013; (4)Koo 等 1995;
 (5)Leahy 和 Williams 2017; (6)Parsons 等 2012; (7)Shaver 和 Goss 1970; (8)Tian 和 Leahy 2013

2.4 模拟及观测分析结果

主要的模拟结果在图 2.2 中，我们能看到两侧激波区和相互作用区域有明显的磁场放大。在 y - z 平面中，左上角和右下角壳层的磁场强度大于他们的周围区域，右下角的磁场大于左上角的。遗迹内部的密度和磁场强度都变得很低，外部壳层很致密，并有很强的磁场。此外，遗迹内部有一层磁场密度比外壳层低，但是明显比周围要高一些的薄薄的壳层。

图 2.3 是从密度图转化而来的相对射电流量密度图，用的谱指数是 2.4。我们也测试过谱指数为 1.0 和 3.0 的模拟。谱指数为 1.0 时，射电图像呈现更随机成分，但是别的特征与使用 2.4 时相似。谱指数为 3.0 时，射电图像与使用 2.4 时并无太大差别。因此，我们只在这里展示使用谱指数为 2.4 的图像。左侧是直接转化的图像，右侧是使用 $\sigma=2$ 高斯平滑后的图像。可见左上角的壳层弱了很多，但明显还是有一定辐射。图 2.4 是图 2.3 中右图沿着左上到右下的流量密度变化，这显示出左上角辐射流量密度大约是右下角的一半，而其实我们期待它应该更少。遗迹区域中心流量是最低的，此外相互作用区也有明显的辐射。图 2.5 展示了不同参数下的模拟结果。

图 2.1 是 W51C 实际观测到的磁场结构。我们能看到其中有四个区域有很强的偏振：东北 (NE)、中部 (M)、西北 (NW)、南部 (S)。这四个区域的磁场方向相近，只有东北的方向有点小混乱，同时东北区的偏振是最强的。去除仪器偏振之后，西北区域的偏振基本不见了，而其它三个区域的偏振仍然存在，这三个区域东北、中部、南部分别对应实际的三个源 W51A、G49.2-0.35、W51C。此外，去除仪器偏振后，东北区的偏振变得规则了，这可能意味着我们已经去除了足够的仪器偏振。

之前，对这个区域已经有高分辨率的 1720 MHz 的观测 (Brogan, 2005)，但是还没有与之对应的高分辨率的 1665/1612 MHz 观测。这几个频率是羟基分子 (OH) 在射电波段的主要跃迁频率，对于我们研究超新星遗迹与分子云相互作用有重要研究价值。而 THOR 数据极高的分辨率提供给我们绝佳的机会来揭示 1720 MHz 辐射与 1720/1665/1612 MHz 吸收的空间位置关系。图 ?? 是这个区域羟基 OH 的谱线图，彩色背景是 THOR 1.4 GHz 的连续谱图像，白色的谱线为每个黑色方格中的平均结果。其中，1720 MHz OH 脉泽非常强，而且明显距 W51B 中的小电离氢区 G49.2-0.35 一定距离。当然，这里我们要说明，我们模拟中的相互作用区域的射电辐射与这个小电离氢区的射电辐射不是一件事，实际观测到的射电辐射可能是电离氢区与相互作用区域在视线方向重合后相互叠加的效果。

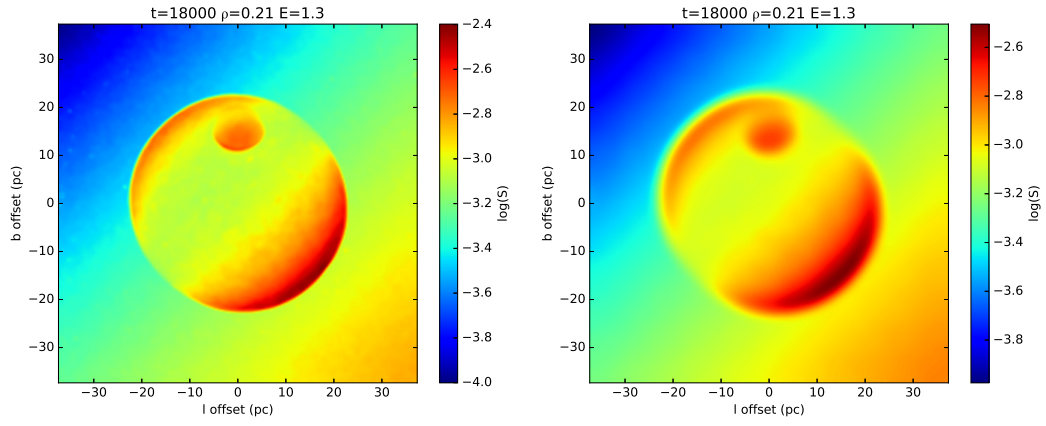


图 2.3 SNR W51C 演化 18000 年后的相对射电流量密度。右侧图像是 $\sigma=2$ 的高斯平滑结果。这里设定距离为 4.3 kpc，所以 1 pc 对应着 $0.8''$ 。

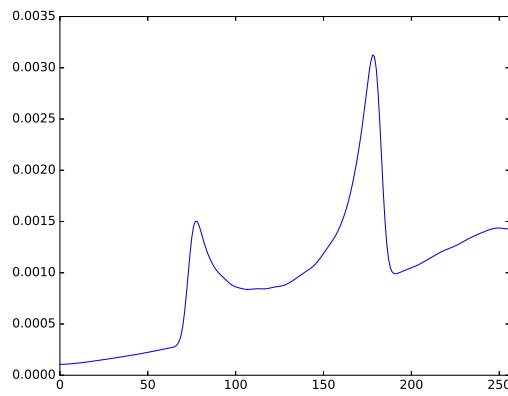


图 2.4 这是图 2.3 的右图中左上到右下的流量切线图。

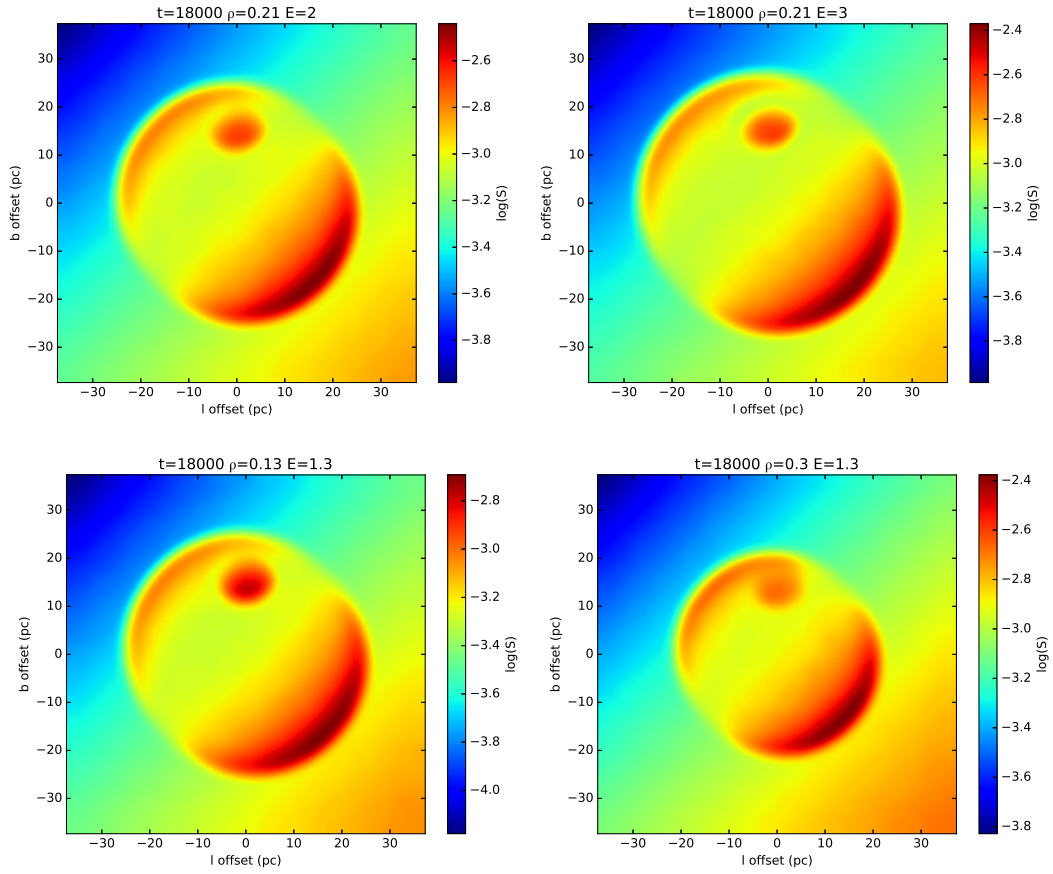


图 2.5 这是 $\sigma=2$ 时不同参数下的相对射电流量密度图。顶部两幅图为将初始爆发动能改为 2.0 和 3.0×10^{51} ergs 的结果, 下面两幅图为将平均介质密度改为 0.13 cm^{-3} 和 0.3 cm^{-3} 的结果。

事实上，我们并没有直接探测到相互作用区域的射电辐射，但是 1720 MHz OH 脉泽和微弱但确实存在的射电偏振辐射让我们认为它确实存在。G49.2-0.35 中射电亮的区域也呈现出明显的 1720/1665/1612 MHz OH 吸收线，然而射电暗的区域却呈现出较宽的发射线而且 1665 MHz OH 辐射非常强。同时，有一些发射和吸收特征明显远离这个小电离氢区，所以应该是与周围前景或背景有关，这让我们猜测 G49.2-0.35 的前景或背景会一定程度上影响我们看到的 G49.2-0.35 区域的谱线。不过，虽然谱线来源或许不同，但是其特征速度都相似，因此应该都来源于 W51 复合体。

图 ??展示了 G49.2-0.35 和 1720 MHz OH 脉泽的具体相对位置和谱线。

2.5 羟基谱线分析

2.6 讨论

附录 A 中国科学院大学学位论文撰写要求

学位论文是研究生科研工作成果的集中体现，是评判学位申请者学术水平、授予其学位的主要依据，是科研领域重要的文献资料。根据《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》（GB/T 7713-1987）、《学位论文编写规则》（GB/T 7713.1-2006）和《文后参考文献著录规则》（GB7714—87）等国家有关标准，结合中国科学院大学（以下简称“国科大”）的实际情况，特制订本规定。

A.1 论文无附录者无需附录部分

A.2 测试公式编号

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \\ \frac{\partial (\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \\ \frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E \mathbf{V}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{V}) \end{cases} \dots \text{(A.1)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} u \, d\Omega + \int_{\Sigma} \mathbf{n} \cdot (u \mathbf{V}) \, dS = \dot{\phi} \quad \dots \text{(A.2)}$$

A.3 测试牛僻字

[illegible]

[illegible]

参考文献

- Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. Fermi LAT Discovery of Extended Gamma-Ray Emission in the Direction of Supernova Remnant W51C[J/OL]. *ApJL*, 2009, 706:L1-L6. DOI: [10.1088/0004-637X/706/1/L1](https://doi.org/10.1088/0004-637X/706/1/L1).
- Aleksić J, Alvarez E A, Antonelli L A, et al. Morphological and spectral properties of the W51 region measured with the MAGIC telescopes[J/OL]. *A&A*, 2012, 541:A13. DOI: [10.1051/0004-6361/201218846](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201218846).
- Beuther H, Bühr S, Rugel M, et al. The HI/OH/Recombination line survey of the inner Milky Way (THOR). Survey overview and data release 1[J/OL]. *A&A*, 2016, 595:A32. DOI: [10.1051/0004-6361/201629143](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629143).
- Brogan C L. OH (1720 MHz) Masers Associated with Supernova Remnants[C]//Romney J, Reid M. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series: volume 340 Future Directions in High Resolution Astronomy*. 2005: 334.
- Brogan C L, Goss W M, Hunter T R, et al. OH (1720 MHz) Masers: A Multiwavelength Study of the Interaction between the W51C Supernova Remnant and the W51B Star Forming Region [J/OL]. *ApJ*, 2013, 771:91. DOI: [10.1088/0004-637X/771/2/91](https://doi.org/10.1088/0004-637X/771/2/91).
- Copetti M V F, Schmidt A A. Aperture synthesis observations of W 51 at 151 MHz[J/OL]. *MARAS*, 1991, 250:127-132. DOI: [10.1093/mnras/250.1.127](https://doi.org/10.1093/mnras/250.1.127).
- Duncan A R, Reich P, Reich W, et al. Polarimetric structure in the first Galactic quadrant from the 2.695 GHz Effelsberg survey[J]. *A&A*, 1999, 350:447-456.
- Genzel R, Downes D, Schneps M H, et al. Proper motions and distances of H₂O maser sources. II - W51 MAIN[J/OL]. *ApJ*, 1981, 247:1039-1051. DOI: [10.1086/159113](https://doi.org/10.1086/159113).
- Ginsburg A, Bally J, Battersby C, et al. The dense gas mass fraction in the W51 cloud and its protoclusters[J/OL]. *A&A*, 2015, 573:A106. DOI: [10.1051/0004-6361/201424979](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424979).
- Haverkorn M. Magnetic Fields in the Milky Way[C/OL]//Lazarian A, de Gouveia Dal Pino E M, Melioli C. *Astrophysics and Space Science Library: volume 407 Magnetic Fields in Diffuse Media*. 2015: 483. DOI: [10.1007/978-3-662-44625-6_17](https://doi.org/10.1007/978-3-662-44625-6_17).
- Hewitt J W, Yusef-Zadeh F, Wardle M. A Survey of Hydroxyl toward Supernova Remnants: Evidence for Extended 1720 MHz Maser Emission[J/OL]. *ApJ*, 2008, 683:189-206. DOI: [10.1086/588652](https://doi.org/10.1086/588652).
- Junkes N, Fuerst E, Reich W. A survey of linear polarization along the Galactic plane - The area L = 4.9 to 76 deg, B = -1.5 to 1.5 deg[J]. *A&AS*, 1987, 69:451-464.
- Kang M, Bieging J H, Kulesa C A, et al. A CO Line and Infrared Continuum Study of the Active Star-forming Complex W51[J/OL]. *ApJS*, 2010, 190:58-76. DOI: [10.1088/0067-0049/190/1/58](https://doi.org/10.1088/0067-0049/190/1/58).

- Koo B C, Kim K T, Seward F D. ROSAT Observations of the Supernova Remnant W51C[J/OL]. *ApJ*, 1995, 447:211. DOI: [10.1086/175867](https://doi.org/10.1086/175867).
- Leahy D A, Williams J E. A Python Calculator for Supernova Remnant Evolution[J/OL]. *AJ*, 2017, 153:239. DOI: [10.3847/1538-3881/aa6af6](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa6af6).
- Orlando S, Bocchino F, Reale F, et al. On the origin of asymmetries in bilateral supernova remnants [J/OL]. *A&A*, 2007, 470:927-939. DOI: [10.1051/0004-6361:20066045](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20066045).
- Parsons H, Thompson M A, Clark J S, et al. Molecular clumps in the W51 giant molecular cloud [J/OL]. *MARAS*, 2012, 424:1658-1671. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2012.21106.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21106.x).
- Poznanski D. An emerging coherent picture of red supergiant supernova explosions[J/OL]. *MARAS*, 2013, 436:3224-3230. DOI: [10.1093/mnras/stt1800](https://doi.org/10.1093/mnras/stt1800).
- Sasaki M, Heinitz C, Warth G, et al. XMM-Newton observation of the Galactic supernova remnant W51C (G49.1-0.1)[J/OL]. *A&A*, 2014, 563:A9. DOI: [10.1051/0004-6361/201323145](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201323145).
- Sato M, Reid M J, Brunthaler A, et al. Trigonometric Parallax of W51 Main/South[J/OL]. *ApJ*, 2010, 720:1055-1065. DOI: [10.1088/0004-637X/720/2/1055](https://doi.org/10.1088/0004-637X/720/2/1055).
- Schneps M H, Lane A P, Downes D, et al. Proper motions and distances of H₂O maser sources. III - W51NORTH[J/OL]. *ApJ*, 1981, 249:124-133. DOI: [10.1086/159267](https://doi.org/10.1086/159267).
- Sedov L I. Similarity and Dimensional Methods in Mechanics[M]. New York: Academic Press, 1959.
- Shaver P A, Goss W M. Galactic Radio Sources III: Spectra and Physical Characteristics[J]. *Australian Journal of Physics Astrophysical Supplement*, 1970, 14:133.
- Stil J M, Taylor A R, Dickey J M, et al. The VLA Galactic Plane Survey[J/OL]. *AJ*, 2006, 132: 1158-1176. DOI: [10.1086/505940](https://doi.org/10.1086/505940).
- Subrahmanyam R, Goss W M. 330-MHz radio continuum imaging of the W51 complex[J/OL]. *MARAS*, 1995, 275:755-763. DOI: [10.1093/mnras/275.3.755](https://doi.org/10.1093/mnras/275.3.755).
- Sukhbold T, Ertl T, Woosley S E, et al. Core-collapse Supernovae from 9 to 120 Solar Masses Based on Neutrino-powered Explosions[J/OL]. *ApJ*, 2016, 821:38. DOI: [10.3847/0004-637X/821/1/38](https://doi.org/10.3847/0004-637X/821/1/38).
- Tian W W, Leahy D A. High-velocity H I is not Associated with the TeV Supernova Remnant W51C [J/OL]. *ApJL*, 2013, 769:L17. DOI: [10.1088/2041-8205/769/1/L17](https://doi.org/10.1088/2041-8205/769/1/L17).
- Xu Y, Reid M J, Menten K M, et al. Trigonometric Parallaxes of Massive Star-Forming Regions: III. G59.7+0.1 and W 51 IRS2[J/OL]. *ApJ*, 2009, 693:413-418. DOI: [10.1088/0004-637X/693/1/413](https://doi.org/10.1088/0004-637X/693/1/413).

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

本科生无需此部分。

作者简历

casthesis 作者

吴凌云，福建省屏南县人，中国科学院数学与系统科学研究院博士研究生。

ucasthesis 作者

莫晃锐，湖南省湘潭县人，中国科学院力学研究所硕士研究生。

已发表 (或正式接受) 的学术论文:

[1] ucasthesis: A LaTeX Thesis Template for the University of Chinese Academy of Sciences, 2014.

申请或已获得的专利:

(无专利时此项不必列出)

参加的研究项目及获奖情况:

可以随意添加新的条目或是结构。

致 谢

感激 `casthesis` 作者吴凌云学长, `gbt7714-bibtex-style` 开发者 `zepinglee`, 和 `ctex` 众多开发者们。若没有他们的辛勤付出和非凡工作, \LaTeX 菜鸟的我是无法完成此国科大学位论文 \LaTeX 模板 `ucasthesis` 的。在 \LaTeX 中的一点一滴的成长源于开源社区的众多优秀资料和教程, 在此对所有 \LaTeX 社区的贡献者表示感谢!

`ucasthesis` 国科大学位论文 \LaTeX 模板的最终成型离不开以霍明虹老师和丁云云老师为代表的国科大学位办公室老师们制定的官方指导文件和众多 `ucasthesis` 用户的热心测试和耐心反馈, 在此对他们的认真付出表示感谢。特别对国科大的赵永明同学的众多有效反馈意见和建议表示感谢, 对国科大本科部的陆晴老师和本科部学位办的丁云云老师的细致审核和建议表示感谢。谢谢大家的共同努力和支持, 让 `ucasthesis` 为国科大学子使用 \LaTeX 撰写学位论文提供便利和高效这一目标成为可能。

