



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  $1.3 \times 10^{51}$  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  $\gamma$ -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
2.2.1 偏振数据处理 .....	3
2.3 射电偏振分析 .....	4
2.4 羟基谱线分析 .....	4
2.5 讨论 .....	4
附录 A 中国科学院大学学位论文撰写要求 .....	5
A.1 论文无附录者无需附录部分 .....	5
A.2 测试公式编号 .....	5
A.3 测试生僻字 .....	5
参考文献 .....	7
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果 .....	9
致谢 .....	11



## 图形列表

- 2.1 左侧图像中，彩色背景是 1.4GHz 的来自 VGPS 的连续谱图像，黑色的箭头代表磁场，箭头长度代表偏振强度 (mK)，最强处为 1581mK，箭头方向代表磁场方向。右侧图像中彩色背景是在 2695MHz 处的偏振度，白色的箭头代表磁场，箭头长度代表偏振度，最强处为 2%，箭头方向代表磁场方向。 ..... 4





## 表格列表



## 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	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
$\tau_{ij}$	viscous stress tensor	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
$\delta_{ij}$	Kronecker tensor	1
$I_{ij}$	identity tensor	1

## 算子

Symbol	Description
$\Delta$	difference
$\nabla$	gradient operator
$\delta^\pm$	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  $\text{\LaTeX}$  使用经验，`ucasthesis` 将  $\text{\LaTeX}$  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  $\text{\LaTeX}$  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  $\text{\LaTeX}$  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  $\text{\LaTeX}$  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  $\text{\LaTeX}$  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  $\text{\LaTeX}$  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  $\text{\LaTeX}$  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  $\text{\LaTeX}$  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  $\text{\LaTeX}$  组件的  $\text{\LaTeX}$  编译系统。`ctex` 宏包如同 `ucasthesis`，是  $\text{\LaTeX}$  命令集，其维护状态活跃，并被主流的  $\text{\LaTeX}$  编译系统默认集成，是几乎所有  $\text{\LaTeX}$  中文文档的核心架构）。推荐的  $\text{\LaTeX}$  编译系统和  $\text{\LaTeX}$  文本编辑器为

操作系统	L <sup>A</sup> T <sub>E</sub> X 编译系统	L <sup>A</sup> T <sub>E</sub> X 文本编辑器
Linux	<a href="#">T<sub>E</sub>XLive Full</a>	<a href="#">Texmaker</a> 或 Vim （已集成于 Linux 系统）
MacOS	<a href="#">MacT<sub>E</sub>X Full</a>	<a href="#">Texmaker</a> 或 Texshop （已集成于 MacT <sub>E</sub> X Full）
Windows	<a href="#">T<sub>E</sub>XLive Full</a> 或 <a href="#">MiK<sub>T</sub><sub>E</sub>X</a>	<a href="#">Texmaker</a>

L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 编译系统，如 T<sub>E</sub>XLive（MacT<sub>E</sub>X 为针对 MacOS 的 T<sub>E</sub>XLive），用于提供编译环境，L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 文本编辑器（如 Texmaker）用于编辑 T<sub>E</sub>X 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<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 编译系统和 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 编辑器分别安装成功后，即完成了 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 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<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 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<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 的知识性问题，请查阅 [ucasthesis 知识小站](#) 和 [L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 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<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X，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  $5 \text{ kpc} \sim 8 \text{ kpc}$  (Genzel 等, 1981; Schneps 等, 1981; Xu 等, 2009; Sato 等, 2010; Tian 和 Leahy, 2013), 而 SNR W51C 的距离是  $4.3 \text{ kpc}$  (Tian 和 Leahy, 2013) 到  $6 \text{ kpc}$  (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

#### 2.2.1 偏振数据处理

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

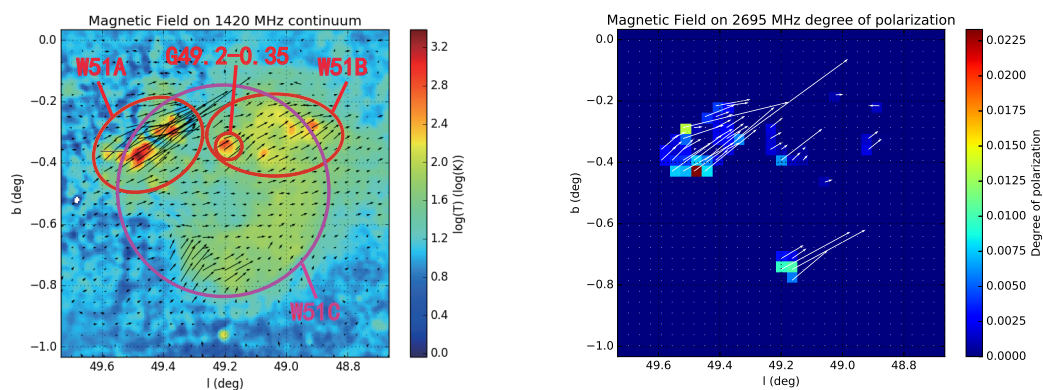


图 2.1 左侧图像中，彩色背景是 1.4GHz 的来自 VGPS 的连续谱图像，黑色的箭头代表磁场，箭头长度代表偏振强度 (mK)，最强处为 1581mK，箭头方向代表磁场方向。右侧图像中彩色背景是在 2695MHz 处的偏振度，白色的箭头代表磁场，箭头长度代表偏振度，最强处为 2%，箭头方向代表磁场方向。

### 2.3 射电偏振分析

### 2.4 羟基谱线分析

### 2.5 讨论



5

[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).
- 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 H<sub>2</sub>O 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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 H<sub>2</sub>O maser sources. III - W51NORTH[J/OL]. *ApJ*, 1981, 249:124-133. DOI: [10.1086/159267](https://doi.org/10.1086/159267).
- Subrahmanyan 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).
- 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,  $\text{\LaTeX}$  菜鸟的我是无法完成此国科大学位论文  $\text{\LaTeX}$  模板 `ucasthesis` 的。在  $\text{\LaTeX}$  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  $\text{\LaTeX}$  社区的贡献者表示感谢!

`ucasthesis` 国科大学位论文  $\text{\LaTeX}$  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  $\text{\LaTeX}$  撰写学位论文提供便利和高效这一目标成为可能。

