

北京師範大學

硕士学位论文

论文题目：用中性氢吸收谱测银河系内超新星遗迹的距离

作者： 苏洪全

导师： 李庆康、田文武

系别、年级： 天文系 2009 级

学科、专业： 天文学、天体物理学

完成日期： 2012 年 4 月

北京师范大学研究生院

北京师范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。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文使用授权书

学位论文作者完全了解北京师范大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属北京师范大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。保密的学位论文在解密后适用于本授权书。

本人签名：_____ 日期：_____

导师签名：_____ 日期：_____

用中性氢吸收谱测银河系内超新星遗迹的距离

摘要

中性氢 21-cm 谱线分析是研究星际中性氢分布、银河系结构的重要手段。早在上世纪中期, 银河系中性氢观测就开始了, 随后被用来测量超新星遗迹的距离。但是, 受到当时望远镜观测能力的限制, 测得的弱源的距离有很大的不确定性。随着近十年来射电望远镜观测能力的飞速发展, 银河系中性氢研究已经进入了一个崭新的时代, 更好测量超新星遗迹的距离变得可能, 比如, 最近完成的银道面中性氢巡天为研究银河系内超新星遗迹提供了高质量的观测数据。本文主要研究内容是测量银河系内超新星遗迹的距离。测量其距离的重要性在于可帮助分析发生在这些天体内部和相关联(即相互作用)的星际介质中的物理过程, 进而深入了解恒星的形成过程和理解银河系如何进行动态演化。目前只有约 1/6 的超新星遗迹的距离范围已测定, 因此更多遗迹的测距成为亟待解决的问题。

本文介绍了用中性氢吸收谱线测银河系内超新星遗迹的运动学距离的相关理论和方法, 使用新近完成的 VLA 银道面巡天的观测数据, 对三个超新星遗迹进行了测距和相关研究, 得到如下结果:

- (1) 超新星遗迹 G31.9+0.0 (3C 391) 的距离约为 7.2 ± 0.3 kpc (前人仅把 7.2 kpc 模糊地定为该源的距离下限), 并且得到基于此距离的其他参数: 遗迹半径 5.4 pc, 动力学年龄 4.1-3.6 kyr, X 射线光度 $2.2 \times 10^{36} \text{ ergs s}^{-1}$ 。
- (2) 超新星遗迹 G34.7-0.4 (W44) 的距离约为 3.3 ± 0.4 kpc (前人测得的距离范围是 2.5~2.6 kpc), 遗迹半径约 14 pc。
- (3) 超新星遗迹 G24.7-0.6 的距离应该处在 7.5~13.7 kpc 范围内, 它的半径约 28.4~51.8 pc。

关键词: 中性氢, 吸收谱, 银河系, 超新星遗迹, 运动学, 距离

Distance Measurement of Galactic Supernova Remnants by Neutral Hydrogen Absorption Spectrum Observations

ABSTRACT

The 21-cm spectra of neutral hydrogen observations help us understand the distribution of interstellar neutral hydrogen and the Galactic structure. The Milky Way neutral hydrogen observations have been used for measuring the distance of supernova remnants (SNRs) since 1970. However, due to the low resolution and sensitivity of HI data, distance measurements of many SNRs have large uncertainties. Therefore, the reliability of the known distances is questionable. With the rapid development of radio observational capabilities over the past decades, the Milky Way neutral hydrogen research has entered a new era. The recently completed Galactic Plane Neutral Hydrogen Surveys provide high-quality observational data for the study of supernova remnants in the Milky Way. This thesis mainly aims at the measurements of some SNRs' distances in the Milky Way.

Distance measurements can help to understand the physical processes of SNRs and to analysis the associated interstellar medium, and then better to understand the star formation process. However, only about 1/6 of SNRs have been measured so far, it is essential and possible to determine more SNRs' distances by using the high-quality survey data.

The first part of the thesis provides the relevant knowledge and methods of the kinematic distance measurements of the SNRs in the Milky Way by building absorption spectra of neutral hydrogen. The revised distances of three SNRs by using the observational data of recently completed VLA Galactic Plane Survey (VGPS) and Southern Galactic Plane Survey (SGPS) are analyzed in chapter 2. The main results are as follows:

(1) The distance of SNR G31.9+0.0 (3C 391) is about 7.2 ± 0.3 kpc (previous researcher only gave a lower limit distance of 7.2 kpc). The radius of this SNR is about 5.4 pc. Its kinematic age is 4.1-3.6 kyr and X-ray luminosity is about $2.2 \times 10^{36} \text{ ergs s}^{-1}$.

(2) The distance of SNR G34.7-0.4 (W44) is about 3.3 ± 0.4 kpc (previously measured distance is 2.5 ~ 2.6 kpc). Its radius is about 14 pc. Our measurement is more accurate and

reliable than the previously measured distance of $2.5 \sim 2.6$ kpc.

(3) The distance of SNR G24.7-0.6 is in the range of $7.5 \sim 13.7$ kpc. Its radius ranges from 28.4 pc to 51.8 pc.

KEY WORDS: neutral hydrogen, absorption spectrum, Galaxy, supernova remnants, distance measurement

目 录

论文题目：用中性氢吸收谱测银河系内超新星遗迹的距离.....	i
用中性氢吸收谱测银河系内超新星遗迹的距离.....	I
摘要.....	I
前 言.....	3
1 中性氢吸收谱测距的原理.....	5
1.1 21-cm 处连续谱和谱线的辐射机制.....	5
1.2 吸收谱线的形成	9
1.3 亮温度的表达式	10
1.4 吸收谱的表达式	12
1.5 银河系的旋转模型	13
1.6 视向速度和距离的关系	15
1.7 与分子云的相互作用	17
1.8 用 CO 谱线观测限制距离	17
1.9 误差分析	18
1.10 小结	19
2 测距研究结果.....	19
2.1 所用数据	19
2.2 超新星遗迹 G31. 9+0. 0.....	19
2. 2. 1 用吸收谱分析距离.....	20
2. 2. 2 与分子云的相互作用.....	22
2. 2. 3 与他人结果的比较.....	25
2. 2. 4 新距离下的其他参数.....	25
2.3 超新星遗迹 G34. 7-0. 4 (W44).....	26
2. 3. 1 用吸收谱分析距离.....	26
2. 3. 2 别人的测距结果.....	29
2.4 超新星遗迹 G24. 7-0. 6	31
2. 4. 1 用吸收谱分析距离.....	31
2. 4. 2 别人的测距结果.....	32
总结与展望.....	32
硕士期间完成的工作.....	34
参考文献.....	35
致谢.....	47

前 言

银河系内广泛分布着星际介质 (Interstellar Medium, 简称 ISM)。银河系中的星际介质可能有几十亿个太阳质量, 是银河系可见恒星质量的百分之几。因此, 恒星之间的介质是不可忽视的。然而, 和恒星比起来, 星际介质显得很难观测。因为它们非常稀薄地分布在星际空间。这些弥漫的介质比地球上制造出的所谓“真空”还要稀薄得多。星际介质包括星际气体、星际尘埃和各种星际云, 还包括星际磁场和宇宙线。它们主要分布在银道面上, 尤其集中分布在银河系的旋臂中[1]。

星际介质对银河系的形成和演化至关重要。气体云坍缩形成星系和第一代恒星。从此以后, 恒星和星际介质开始物质和能量交换。星风把物质和能量传给星际介质。超新星爆发时, 把大部分的物质抛向星际空间, 这个过程增加了星际介质的重元素丰度。下一代恒星就在这种富金属的介质中形成。由此可见, 了解星际介质对研究银河系结构、演化和恒星的形成、年龄分布等方面起重要作用。

星际介质和超新星遗迹之间强烈地相互作用常常发生在银河系的旋臂上。超新星遗迹的激波和分子云相互作用, 会产生 OH 脉泽辐射。因此, 脉泽往往是超新星遗迹和分子云相互作用的证据。Maser 是 Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的缩写, 是指微波辐射因受激发射而得到放大。当发生跃迁的高能级比低能级有更多的分子, 也就是出现粒子数反转的情况下, 受激发射将超过吸收。光子通过这种状态的分子云时不会衰减反而增加。这样就增强了通过它的光, 后者又能与更多激发态原子相互作用, 于是产生一个具有极其一致的单一频率的强大辐射脉冲。要产生脉泽不仅要有足够的分子, 并且需要某种机制使微波激射跃迁的高能级产生过剩的粒子数。天体系统里面有很多天然的脉泽。在某些分子云中, 恒星把附近的分子激发到高能态。如果这些分子的一部分自发地将它们的能量以微波形式发射出去, 这些微波就能引起其他同一种激发态分子通过级联跃迁发射它们的能量, 于是就产生频率精确一致的强辐射束。脉泽的种类有水脉泽 (H_2O)、羟基脉泽 (OH)、一氧化硅脉泽 (SiO) 和甲醇 (CH_3OH) 等。在分子云和年老恒星大气中都发现了这些脉泽, 其中, 发射羟基脉泽的分子云有上百个。1965 年首次在猎户座星云发现了羟基脉泽源。

星际介质的柱密度通常可以用等效的中性氢的柱密度来表示。星际介质中的重元素会引起 X 射线的消光, 通过观测 X 射线就可用模型拟合出等效的中性氢的柱密度 N_{H} 。统计关系表明, 银河系中由同样的重元素引起的光学消光 A_{V} 和相应方向的氢的柱密度 N_{H} 有着简单的线性关系。不同文献给出大体一致又稍有不同的结果。比值 $N_{\text{H}}/A_{\text{V}}$ 的变化范围从 $(2.22 \pm 0.14) \times 10^{21} \text{ cm}^{-2} \text{ mag}^{-1}$ [2] 到 $(1.79 \pm 0.03) \times 10^{21} \text{ cm}^{-2} \text{ mag}^{-1}$ [3]。最近 Tolga Güver 和 Feryal

Özel (2009) 统计了 22 个超新星遗迹的柱密度和消光，给出的比值是 $(2.21 \pm 0.09) \times 10^{21} \text{ cm}^{-2} \text{ mag}^{-1}$ [4]。田文武等人(2012) [5]统计了 39 个超新星遗迹的柱密度和消光值，得到二者的比值为 $(1.69 \pm 0.07) \times 10^{21} \text{ cm}^{-2} \text{ mag}^{-1}$ ，并且将结果用来求 Ia 型超新星遗迹的视星等，并得到了若干超新星遗迹的距离（附录 3、附录 4 和附录 5）。

星际介质中的中性氢是银河系内广泛分布的重要成分。对它的研究是星际介质结构和演化整体图像的关键一环。银道面附近的中性氢最为集中。中性氢是银河系质量分布和整体动力学的重要影响因素。借助中性氢可以很好地限制银道面上超新星遗迹和其他射电天体的距离。

中性氢的 21-cm 辐射是研究银河系结构和动力学性质的重要谱线。在过去十年，几个主要银道面 21-cm 中性氢巡天的数据已经释放。甚大阵银道面巡天（VGPS）[6]，南天银道面巡天（SGPS）[7]，加拿大北天银道面巡天（CGPS）[8]。这些巡天虽然只覆盖了银道面上几度的天区，但是它们有高的角分辨率（大约 1 角分），非常适合研究银道面上延展天体的小尺度结构，比如超新星遗迹的吸收谱和其内部的物质分布[9]。

银河系内广泛分布的中性氢云可以用来限定超新星遗迹的距离，进而结合其演化模型，更好的了解这些遗迹所处的状态。超新星遗迹的演化近似地分为 4 个阶段[10] [11] [12]：（1）自由膨胀阶段：超新星爆炸后抛射物往外自由的扩张，抛射物质质量远超激波扫描过的星际介质的质量，即 $M_s \geq \frac{4}{3} \pi r_s^3 \rho_1$ 。这个阶段大约持续两百年。（2）绝热扩展阶段或者称为 Sodov 阶段：周围的气体被绝热的激波往外推，扫荡的物质质量已经超过了初始质量。但是热辐射损耗远小于超新星产生的总能量，可以近似认为能量守恒。此阶段 $R \propto t^{2/5}$ 。（3）动量守恒阶段或者称为扫雪机阶段：激波扫过的气体冷却，形成密度较高的中性壳层，并且这个壳层像扫雪机一样的往外推周围的星际介质。数值计算表明，在氢的密度 $n_0 = 1 \text{ cm}^{-3}$ 的情况下，超新星遗迹的壳层形成发生在 $t_{sf} = 36 \text{ kyr}$ 。壳半径约 20 pc，速度 $180 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。壳层迅速冷却，由内部的热气体的压力推动。这被称为“压力驱动的扫雪机阶段”[13]。 $t > t_{sf}$ 时，预期能观测到快速扩张的 SNR 壳中的中性氢 21-cm 线。如果中性氢线是光学薄的，则发射线的轮廓将是两个分开的窄峰或者一个宽的矩形波，这取决于望远镜的谱线分辨率。这个阶段膨胀能量不再守恒，但是径向动能仍然守恒，并且近似的有 $R \propto t^{1/4}$ 。（4）逐渐消逝阶段：SNR 的膨胀速度逐渐变得与周围介质的随机速度相同，大约是 $10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。SNR 逐渐消失，直到观测不到。此阶段大约发生在超新星爆发后 10^5 年。

中性氢吸收谱测距方法是一种有效的测量超新星遗迹距离的方法。该方法最先由

Hughes 等人使用[14]。近年来田文武和 Leahy 合作, 将这个方法进行了改进, 并引进了 CO 的观测. 用这种方法成功的测出了几个有高关注度的超新星遗迹的距离, 如 Kes 75 [15][16]、W41 [17]、kes 69[18]和 G21.5-0.9 [19]。另外, 可以用中性氢吸收谱测距的天体还包括行星状星云、分子云、HII 区、脉泽源等。

测定超新星遗迹的距离有助于了解银河系的运动和动力学特性, 可以帮助我们更好的理解与超新星遗迹有关的物理问题和它们与银河系其他天体的相互作用。距离测量可以帮助我们更好的理解超新星遗迹的演化模型。准确测定出超新星遗迹的距离就可以根据演化模型得知它们的尺度, 从而可以推断它们所处的演化阶段, 反之, 还可以用观测结果限制超新星遗迹演化的模型。

测定超新星遗迹的距离有助于分析和超新星遗迹有关的高能现象。超新星遗迹产生的激波可以把电子加速到很高的能量 (比如: 宇宙线谱的“膝区” [20])。超新星遗迹是宇宙线加速的可能来源之一。因此研究超新星遗迹, 确定它们的距离可以帮助我们更好的了解与高能射线和宇宙线等有关的问题[21]。比如, 距离确定后, 就可以用来协助判定超新星遗迹是否和某些高能天体成协[22]。

尽管前人已经给出银河系内许多超新星遗迹的距离值, 但这些值因当时数据质量和测距方法的限制有相当的不确定性。最近完成并释放的有较高分辨率和灵敏度的HI巡天数据, 让我们有机会改进前面这些测量的结果, 并可以测定更多还没有很好距离的弱超新星遗迹的距离。

综上所述, 测定超新星遗迹的距离虽有很大的挑战性, 但又意义深远。期待更高质量的中性氢观测, 从而得到更精确的测距结果。

本论文第一章介绍中性氢吸收谱测距的原理, 第二章主要讲述测距结果并和别人的结果进行了比较。

1 中性氢吸收谱测距的原理

本部分主要介绍基于银河系均匀转动模型的中性氢吸收谱测距方法。包括与这种测距方法相关的理论和该方法的应用, 阐述借助 ^{13}CO 谱线观测确定距离上限的方法, 还探讨了借助天体间的相互作用来进一步限定目标源的距离。

1.1 21-cm 处连续谱和谱线的辐射机制

天体中, 大量原子、离子或者分子受到碰撞而激发到高能态, 甚至电离。当它们回到低能态时, 就辐射出相应波长的光子。各种波长的辐射叠加在一起就是观测到的热的连续谱。但是, 对超新星遗迹而言, 产生其连续谱的主要机制是同步辐射 (相对论电子在磁

场中的辐射)。谱线是在连续谱上明亮或者黑暗的线条。起因于一个狭窄频率范围内的光子数明显多于或者少于附近频率的光子数。

中性氢的 21-cm 谱线在星际介质研究中起重要作用。该谱线是由中性氢基态的两个超精细能级间的跃迁产生的。该跃迁概率很小，但是星际空间里广泛分布的中性氢足以产生可观测的谱线。并且该谱线对应的波长较长，不易受到尘埃吸收的影响，特别适合用它来研究银道面上的天体。21-cm 波长的射电观测已经广泛用来研究银河系的自转和旋臂结构，并且用它建立了银河系的运动学模型。

连续谱起源于被加速的自由电子。自由电子可以交换的能量是连续的。这不同于电子在分立能级间的跃迁形成尖锐的吸收或者发射线。自由电子只在被加速时才会发出辐射。

宇宙中大多数非热射电辐射来自同步辐射(如超新星遗迹、类星体、射电星系、正常星系、太阳的射电辐射等)。有些天体的部分可见光或 X 射线辐射也可能来自于同步辐射。下面介绍同步辐射原理[23]。相对论电子围绕磁力线运动，它的同步辐射的总功率：

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{2r_0^2 c}{3} \gamma^2 (\boldsymbol{\beta} \times \mathbf{B})^2 \quad (\text{式1-1})$$

其中 $r_0 = \frac{e^2}{m_0 c^2}$ 是电子的经典半径。 γ 是洛伦兹因子，代表粒子无量纲的能量值。 $\boldsymbol{\beta} = \mathbf{v} / c$ 。

\mathbf{B} 是磁感应强度。电子由于辐射失去大部分能量。因此电子的辐射有一定的寿命。电子的辐射寿命 t_{sy} ：

$$t_{sy} = \frac{8.7 \times 10^{11}}{B^{3/2} \cdot \nu_m^{1/2} \cdot \sin^{3/2} \alpha} \quad (s) \quad (\text{式1-2})$$

其中 ν_m 是辐射的峰值频率，单位为 Hz； B 的单位是高斯； α 为投射角，即电子速度方向与磁场方向的夹角，单位是弧度。

有些遗迹的年龄比电子的辐射寿命长很多。这说明源中存在某种连续产生高能电子的机制，来维持辐射继续进行。如蟹状星云($B \sim 10^{-4} G$)，产生 X 射线辐射($\sim 10^{18} \text{ Hz}$) 的相对论电子的辐射寿命 ~ 20 年。而蟹状星云的年龄 ~ 1000 年。这是因为源中有一颗中子星，能连续的产生高能电子（图 1）。

一个“能量”为 γ 的电子的同步辐射可看成单色辐射(准单色近似)，其频率近似的正比于能量 γ 的平方。如果电子能谱是幂律的，则产生幂律辐射谱。同步辐射功率 $P \propto \gamma^2$ ，即高能电子有更强的辐射。对具有陡的幂律能谱分布的电子系，尽管 γ 值大的高能电子数下降很快，但它们产生的辐射较强，故辐射随频率增大而较为平缓地下降。当辐射频率显著

超过最高能量电子的峰频时，同步辐射谱以指数形式随频率迅速下降（如图 2）[24]。

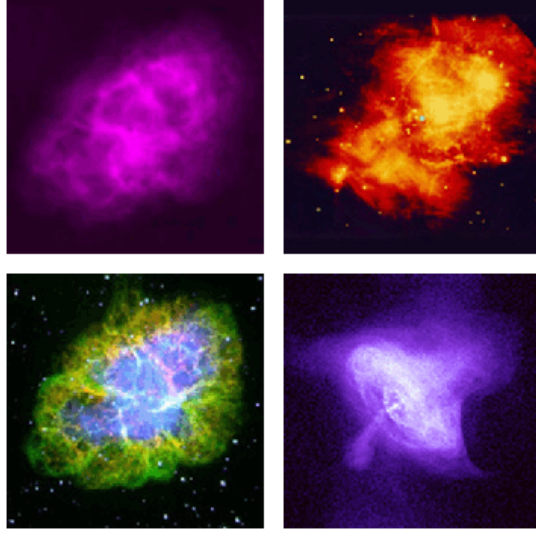


图 1 蟹状星云在射电、红外、光学和 X 射线波段的图像。图片来自：

<http://chandra.harvard.edu/photo/0052/what.html>

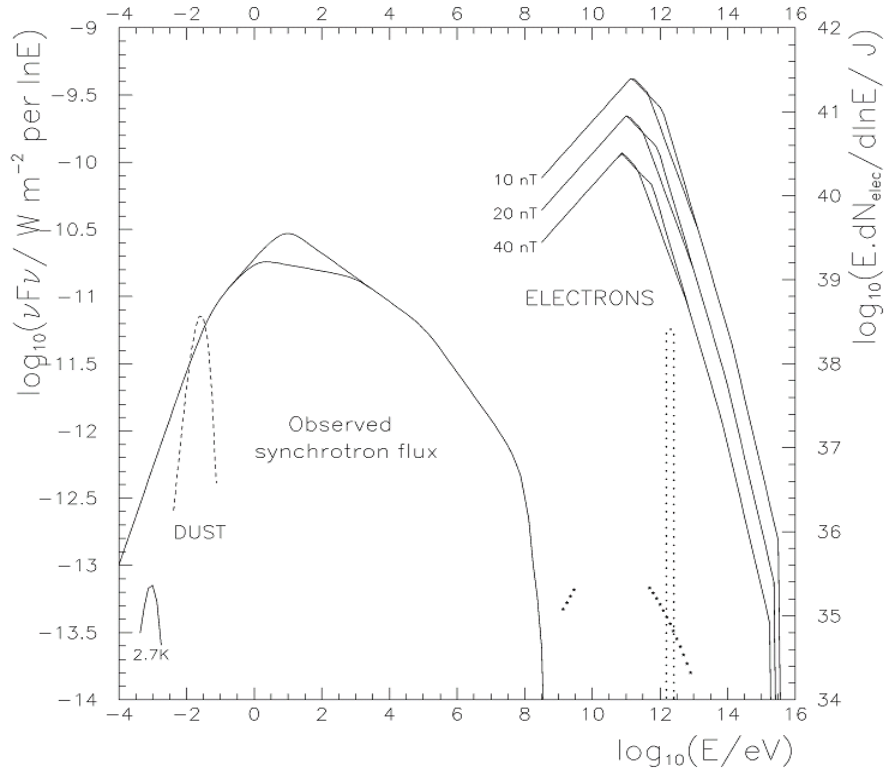


图 2 观测到的蟹状星云同步辐射的流量（对应的纵坐标在左边，表示单位面积单位 $\ln E$ 的功率）和假设不同的磁场强度后推断出的电子能谱（对应的纵坐标在右边，表示单位 $\ln E$ 包含的能量）。nT 表示纳特，是国际单位制中的磁感应强度的一个单位，1 纳特= 10^{-9} 特。虚线表示热辐射的谱。颜色较深的点线表示 10^9 到 10^{13} eV 的非同步辐射成分。该图说明了观测到蟹状星云的流量来自同步辐射，且其中的电子具有幂律能谱分布。

目前在许多超新星遗迹中,发现了具有幂律的非热辐射谱,谱指数一般在 0.3~2 之间,平均值为 0.7[25][26][27]。普遍认为这一幂律谱形来自于电子的同步辐射。由于高能(大 γ) 电子的辐射越强,其能量减少越快。随时间推移,能谱指数 n 会逐渐变大,能谱变陡。另外,大部分超新星遗迹的辐射是偏振的。而偏振特性正是同步辐射有别于其它辐射机制(如黑体辐射、韧致辐射、逆 Compton 散射等)的最主要特点之一。

实际观测到的宇宙射电源的辐射谱常常不是简单的幂律谱。有四种典型射电谱型(图 3) [23],产生的原因还无定论(尤其是谱型 d)。下面给出谱型 a、b、c 的可能解释: 谱型 a: 源中电子能谱分布为稳定的幂律形式: $N(\gamma, t) = N_\gamma \gamma^{-n}$, 导致幂律辐射谱。

谱型 b: 一般认为是辐射耗散造成的电子能谱改变所致。同步辐射时电子的能量损失率为

$$\left(\frac{d\gamma}{dt} \right)_{sy} = -3 \times 10^{-8} \gamma^2 U_{mag} \quad (\text{式1-3})$$

其中 $U_{mag} = \frac{B^2}{8\pi}$ 为磁能密度。

谱型 c: 其特点是低频部分出现极大值, 低频端流量 $F(\nu)$ 下降。可能解释: (1) 同步辐射自吸收: 对致密光学厚辐射源, 自吸收系数 k_ν 随频率 ν 的下降而增大, 使低频段光深 τ_ν 变大, 流量 $F(\nu)$ 下降。(2) 等离子体的自由-自由吸收效应。频率减小时, 该吸收增大。

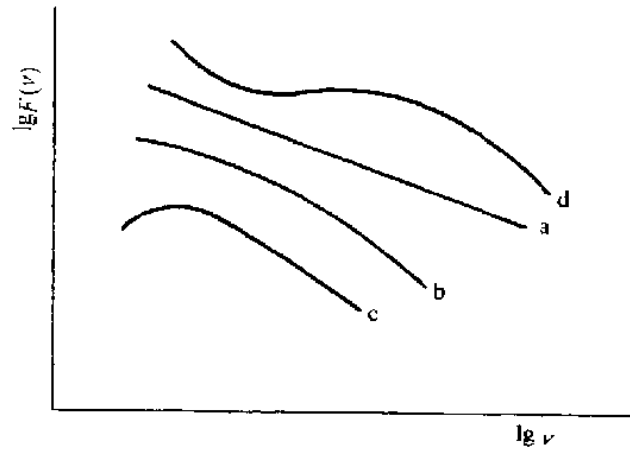
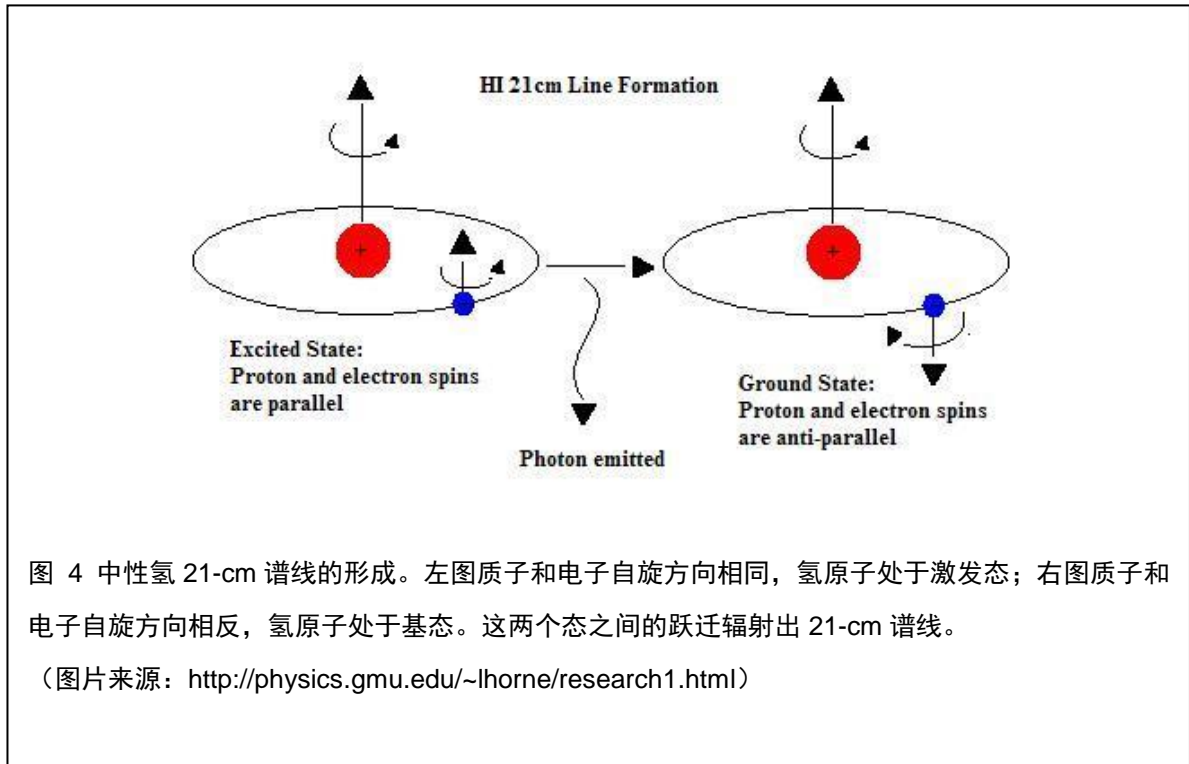


图 3 观测到的 4 种典型的射电谱型, 分别由 a、b、c、d 所示。横坐标表示频率的对数, 纵坐标是流量的对数。

下面介绍 21-cm 谱线的辐射机制。氢原子的基态分裂为能量相隔约 $6 \times 10^{-6} \text{ eV}$ 的两个能级。这是由质子的磁矩和电子的磁矩相互作用造成的[28][29]。这个能量差对应于频率为 1420.405 MHz 即波长为 21.11-cm 的光子（图 4）。实际上这个跃迁是禁戒跃迁，跃迁时间大约是 10^7 年。尽管如此，由于星际气体中氢元素含量十分巨大，因此产生了丰富的 21-cm 辐射。



谱线发射（或者吸收）源与望远镜的相对视向速度可以通过比较谱线的实测频率与其静止频率得到。为了更方便的了解目标源在银河系中的运动，通常将这个视向速度通过消除地球自转、地心相对于太阳系质心的运动等影响，转化成目标源相对于局域静止标准（LSR）的视向速度。

1.2 吸收谱线的形成

下面介绍存在吸收线的条件。如果处于热平衡状态的介质在连续谱区是光学薄的（ $\tau_c \ll 1$ ），并且线心处的 Planck 函数 $B_L(T)$ 的值大于近邻连续区的辐射强度 I_c ，则介质产生发射谱线。当 $B_L(T) < I_c$ 时，出现吸收线[23]。在存在超新星遗迹或者其他强的射电连续背景源时， I_c 就比较大，因而容易观测到吸收。用一定的数据处理方法就可以得到某一观

测方向上的吸收谱，即吸收强度随着视向速度的分布。如果连续谱背景源的辐射比较弱，就很难得到吸收谱。不过采取一定的处理技巧还是有可能得到部分源的吸收谱。

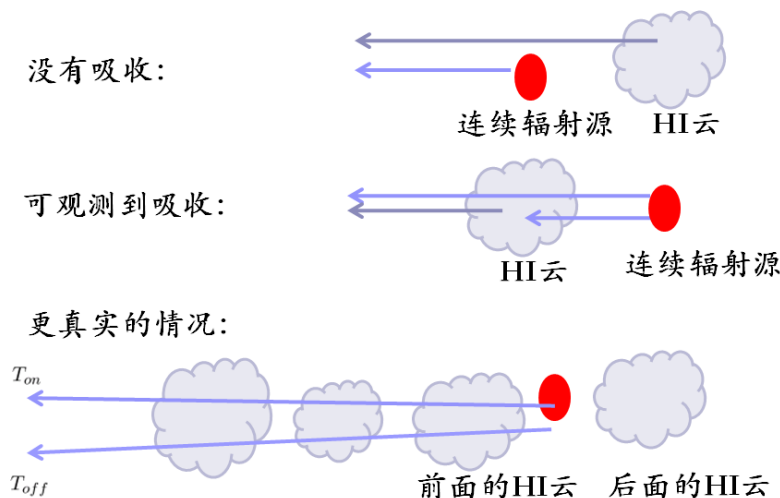


图 5 是否存在吸收的示意图。第一种情况下，亮温度较高的连续谱源处在冷的中性氢云的前面，因此中性氢云不能产生吸收；第二种情况，二者交换了位置，可以产生吸收；第三种情况，连续谱源周围有很多中性氢云。这时，连续谱源前面的氢云都会产生吸收。又因为银河系内不同距离处的中性氢云有不同的视向速度，所以就可以观测到不同速度处的吸收，即吸收谱。

1.3 亮温度的表达式

这部分从标准方程出发，推导出亮温度作为光深的函数，为下一节得到光深和视向速度的关系打下基础[23] [28]。标准辐射转移方程：

$$\frac{\partial I_{\nu}}{\partial t} + c \hat{\mathbf{k}} \cdot \nabla I_{\nu} = \text{sources} - \text{sinks} \quad (\text{式1-4})$$

其中的 I_{ν} 和 $\hat{\mathbf{k}}$ 分别是频率 ν 附近的辐射强度和波矢。源（sources）和汇（sinks）分别指使辐射强度增加和减少的因素（见图 5）。该方程说明辐射源和汇决定了观测到的辐射强度的空间和时间变化。

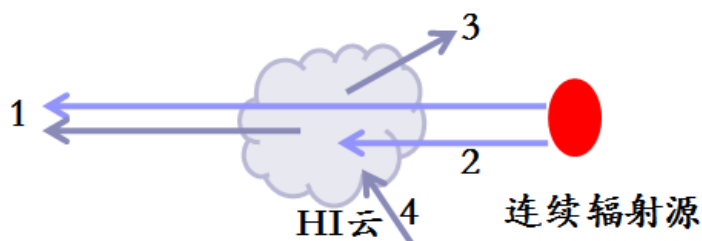


图 5 中性氢云对背景连续辐射源的透射、吸收、散射。

下面引入谱发射系数、吸收系数和散射系数。谱发射系数 j_ν 定义为单位体积介质在单位时间沿某方向单位立体角所发射的频率为 ν 的单位频率间隔中的能量 $dE_\nu = j_\nu d\nu d\Omega dt$ 。谱发射系数一般是位置、方向、时间和频率的函数。吸收系数 k_ν 是指单位强度的辐射束穿过单位长度的吸收介质后强度的负增量 $dI_\nu = -k_\nu I_\nu ds$ 。介质散射也会造成辐射传播过程中强度的变化，其中最重要的过程是自由电子对光子的散射，包括弹性散射（elastic scattering）和康普顿化（Comptonization）。考虑到发射、吸收和散射后，将（式 1-4）改写为：

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_\nu}{\partial t} + \hat{\mathbf{k}} \cdot \nabla I_\nu = \frac{1}{4\pi} \rho j_\nu - \rho \kappa_\nu^{abs} I_\nu - \rho \kappa_\nu^{sca} I_\nu + \rho \kappa_\nu^{sca} \oint \phi_\nu(\hat{\mathbf{k}}, \hat{\mathbf{k}}') I_\nu(\hat{\mathbf{k}}') d\Omega' \quad (\text{式 1-5})$$

方程假设辐射场是各向同性的，使得单位质量单位立体角的辐射可以写成 $\frac{1}{4\pi} j_\nu$ 。第二项 $\rho \kappa_\nu^{abs} I_\nu$ 代表由真吸收造成的沿光束传播方向单位长度上从辐射束移出的辐射。第三项 $\rho \kappa_\nu^{sca} I_\nu$ 代表散射出辐射束的影响。最后一项是从其他方向散射到辐射束中的能量。 $\phi_\nu(\hat{\mathbf{k}}, \hat{\mathbf{k}}')$ 是归一化的散射几率密度。通常，星际介质中某区域内物理变化的时间尺度远大于光穿过该区域的时间。因此可以忽略方程中的时间微分项，得到稳态辐射传输方程：

$$\hat{\mathbf{k}} \cdot \nabla I_\nu + \rho \kappa_\nu I_\nu = \rho \left(\frac{j_\nu}{4\pi} + \kappa_\nu^{sca} \Phi_\nu \right) \quad (\text{式 1-6})$$

其中 $\kappa_\nu = \kappa_\nu^{abs} + \kappa_\nu^{sca}$ ， $\Phi_\nu(\hat{\mathbf{k}}, \mathbf{x}) = \oint \phi_\nu(\hat{\mathbf{k}}, \hat{\mathbf{k}}') I_\nu(\hat{\mathbf{k}}', \mathbf{x}) d\Omega'$

假设各向同性散射，则 $\hat{\mathbf{k}} \cdot \nabla = \frac{d}{ds}$

定义源函数：

$$S_\nu(\hat{\mathbf{k}}, \mathbf{x}) \equiv \frac{1}{\kappa_\nu} \left(\frac{j_\nu}{4\pi} + \kappa_\nu^{sca} \Phi_\nu \right) \quad (\text{式 1-7})$$

由以上假设， I_ν 存在简单的一阶微分方程：

$$\frac{dI_\nu}{ds} + \rho \kappa_\nu I_\nu = \rho \kappa_\nu S_\nu \quad (\text{式 1-8})$$

沿着 s_0 到 s 引入光深： $\tau_\nu \equiv \int_{s_0}^s \rho \kappa_\nu ds$ 或者 $d\tau_\nu = \rho \kappa_\nu ds$ （ s_0 是离观测者最远的点）。

将上面的一阶微分方程乘上积分因子 e^{τ_ν} ，得到 $\frac{d}{ds} [e^{\tau_\nu} I_\nu] = e^{\tau_\nu} \rho \kappa_\nu S_\nu$

沿着视向距离 s 积分，得

$$I_\nu(\hat{\mathbf{k}}, \tau_\nu) = I_\nu(\hat{\mathbf{k}}, 0) e^{-\tau_\nu} + e^{-\tau_\nu} \int_0^{\tau_\nu} S_\nu e^{\tau_\nu} d\tau_\nu \quad (\text{式 1-9})$$

要继续解这个方程要求 S_ν 可积分。这通常很难做到，但是可以做些简化假设。

先建立辐射强度和介质温度的关系。假设辐射接近黑体谱。温度为 T 的黑体的亮度由普朗克辐射定律给出：

$$B(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (\text{式1-10})$$

问题是星际介质中的云都接近黑体分布吗？为了产生完美的黑体谱，气体必须与周围环境保持热平衡。总体来看，星际介质当然不是这样。然而假设星际介质满足局域热动平衡（LTE）是合理的。LTE 是指非常小的区域内气体处于热平衡，但是相邻区域间的平衡态有不同的温度和密度。只要气体中的温度和密度梯度不是太大就可以满足这个条件。在静态的星际介质（没受激波或其他激烈的能量释放过程影响）中这个近似可以很好地满足。因此可以使用黑体辐射定律。黑体辐射的源函数 $S(\nu) = B(\nu)$ 。在中性氢的 21-cm 波段，满

足瑞利-金斯近似： $h\nu \ll kT$ ， $B(\nu) \approx \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{1 + h\nu/kT - 1} = \frac{2\nu^2 kT}{c^2} = \frac{2kT}{\lambda^2}$ 。它给出温度和亮度的线性关系。此处的温度 T 就是亮温度 T_B ，是直接测量辐射亮度得到的。

下面引入自旋温度。自旋温度 T_s 用来表征自旋朝上和朝下的态分布，定义为：

$$\frac{n_2 / g_2}{n_1 / g_1} = e^{-E/kT_s}$$

其中 n_1 ， n_2 分别为处于自旋朝上和朝下的原子数目。 g_1 ， g_2 是相应能级的统计权重。在 21-cm 跃迁的情况下 $g_1 = 1$ ， $g_2 = 3$ ， $\frac{E}{k} = 0.07$ 。在热平衡时 $T_s = T$ ；LTE 情况下， $T_s \approx T$ 。实际上测得的自旋温度是气体中实际温度的平均值。

将以上假设和近似带入方程 $I_\nu(\hat{k}, \tau_\nu) = I_\nu(\hat{k}, 0)e^{-\tau_\nu} + e^{-\tau_\nu} \int_0^{\tau_\nu} S_\nu e^{\tau_\nu'} d\tau_\nu'$ ，得到辐射转移方程的解：

$$T_B(\tau_\nu) = T_B(0)e^{-\tau_\nu} + T_s(1 - e^{-\tau_\nu}) \quad (\text{式1-11})$$

这就是要得到的亮温度的表达式。

1.4 吸收谱的表达式

将上面亮温度的表达式应用在沿着 ON 和 OFF 两个方向上，分别得到这两个方向的亮温度[30] [31]：

$$T_{B,on}(\nu) = T_s(\nu)(1 - e^{-\tau_\nu}) + T_c e^{-\tau_\nu} - T_c \quad (\text{式1-12})$$

$$T_{B,off}(\nu) = T_s(\nu)(1 - e^{-\tau_\nu}) + T_{bg} e^{-\tau_\nu} - T_{bg} \quad (\text{式1-13})$$

以上两式中 $T_{B,on}(\nu)$ 是在谱线观测数据中，朝着亮温度为 T_c 的连续源方向（ON 方向），所有具有视向速度为 ν 的中性氢的亮温度。 $T_{B,off}(\nu)$ 为稍微偏离源方向（OFF 方向）相应的亮温度。这两个量可以从谱线观测数据中得到。 $T_s(\nu)$ 是视向速度为 ν 的中性氢的自旋温度。 τ_ν 是视向速度为 ν 的中性氢到观测者之间的光深。 $\langle T_c \rangle$ 和 $\langle T_{bg} \rangle$ 分别是 ON 和 OFF 方向平均的连续谱亮温度，是从连续谱的观测数据中得到的。 τ_ν 是速度 ν 对应的位置处到观测者之间的光深。

以上两式相减，就可以得到 $e^{-\tau_\nu}$ 的表达式：

$$e^{-\tau_\nu} = 1 + \frac{T_{B,on}(\nu) - T_{B,off}(\nu)}{\langle T_c \rangle - \langle T_{bg} \rangle} \quad (\text{式1-14})$$

表达式 $e^{-\tau_\nu}$ 随着视向速度 ν 的变化曲线，就是经常说的吸收谱。选择 $e^{-\tau_\nu}$ 而不用 τ_ν 是因为理论上 $e^{-\tau_\nu}$ 在 0 到 1 之间变化。实际观测中 $e^{-\tau_\nu}$ 可能小于 0 或者大于 1，这就暗示可能是 ON 和 OFF 区域选择不合理或者其他原因。

1.5 银河系的旋转模型

银河系统通过银心与银盘垂直的轴做较差转动。距离银心 R 处的天体以一定的速度绕银心旋转，这个速度称为环绕速度。环绕速度随着银心距 R 的变化曲线就是银河系的旋转曲线。

内银河系（太阳圈以内）的旋转曲线可以通过观测不同银经 l 方向的中性氢云的最大视向速度 ν_{\max} 获得。银经 l 方向具有最大视向速度的中性氢云所对应的银心距由公式 $R = R_{\min} = R_\odot \sin l$ 得到（如图 6），其中 R_\odot 为太阳到银心的距离。银心距为 R_{\min} 处的环绕速度 $V(R)$ 就可以由公式 $V(R) = \nu_{\max} + V_\odot \sin l$ 得到，其中 V_\odot 是太阳的环绕速度。国际天文联合会（IAU）推荐的值是 $R_\odot = 8.5 \text{ kpc}$ ， $V_\odot = 220 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。把射电望远镜指向不同的银经方向，就可以得到不同银心距处的环绕速度 $V(R)$ 。

外银河系（太阳圈以外）没有相应的切点，所以需要用其他方法测出视向速度 v 处的银心距。这通常可以用巨分子云和 HII 区的复合体来测。巨分子云可以用一氧化碳（CO）的谱线来示踪。视向速度 v 就可以由观测到的 CO 辐射谱线定出。而该复合体的银心距可以通过光度学的方法测出来。这样就可以定出外银河系的旋转曲线。

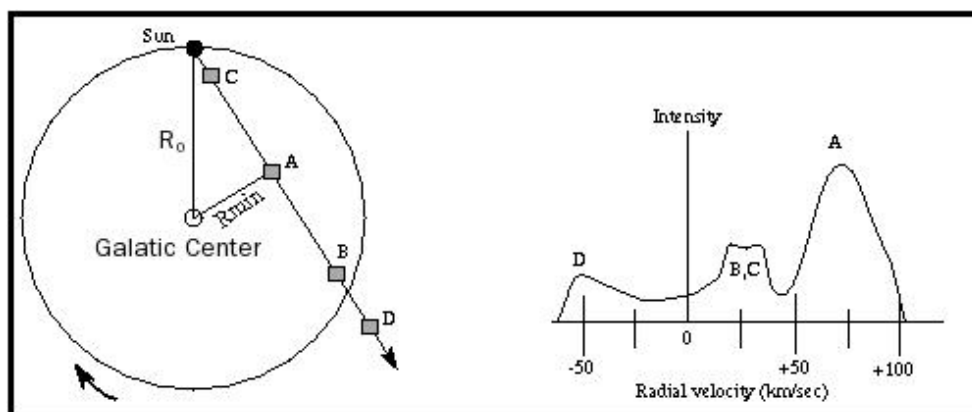


图 6 左图：银河系旋转的简化模型。天体绕着银心沿着同样的方向旋转。右图：不同视向速度处中性氢的辐射强度分布示意图。沿着视向方向，不同位置处的天体 A、B、C 和 D 的辐射有不同的视向速度。其中，A 处有最大的视向速度，B 和 C 处有相同的视向速度，D 处具有负的视向速度。

（图片来自 http://ircamera.as.arizona.edu/astr_250/Lectures/Lec_22sml.htm）

由测得的旋转曲线衍生出了不同的银河系旋转模型：

（1）均匀转动模型[9]

银河系的旋转曲线在银心距 $R > 5 \text{ kpc}$ 时，近似可看做平坦的（图7）[32]。银河系的均匀转动模型假定银河系内的天体都以相同的环绕速度绕银心旋转。这个环绕速度通常取为 $v_0 = 220 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ，而太阳到银心的距离 $R_0 = 8.5 \text{ kpc}$ 。

（2）流体转动模型[33]

Pohl (2008) 等人基于 CO 谱线的观测数据，得到了银河系中分子气体的三维分布。该模型与银河系的均匀转动模型给出的测距结果很接近，但是它更好地描述了气体的运动（图 8）[31]。两个结果整体的差异是由于使用了不同的 R_0 。在太阳圈以内，Pohl (2008) 曲线的曲折是由内银河系旋臂和棒结构的非圆运动引起的。在太阳圈以外，两个模型都使用了平的转动曲线。因此，在负的视向速度处二者有相同的趋势。图 8 以银经 $l = 25^\circ$ 方向为例，比较了这两种模型给出的速度-距离曲线。

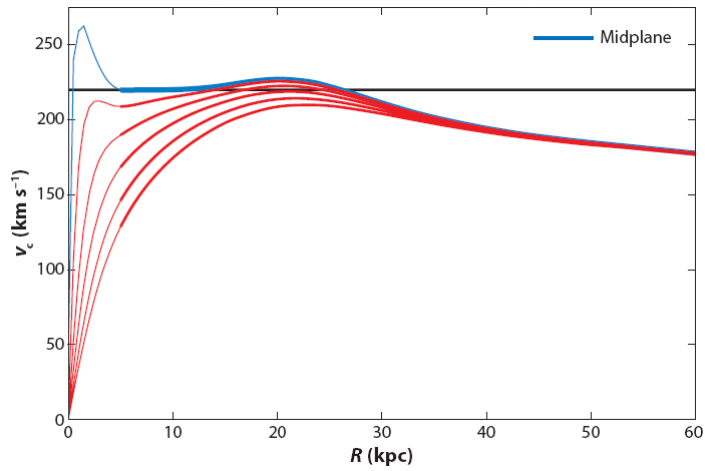


图 7 Kalberla 等人在 2007 年给出的银河系的转动曲线。最上面的蓝线代表银河系中间平面的转动曲线。从上至下的五条红线分别表示距银河系中间平面 1 到 5kpc 处的环绕速度。银心距 $R < 5$ kpc（细线）时，环绕速度随着银心距增加而迅速变大。而银心距 5 到 15 kpc 范围内，中间平面上的环绕速度非常接近黑线所示的 $220 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

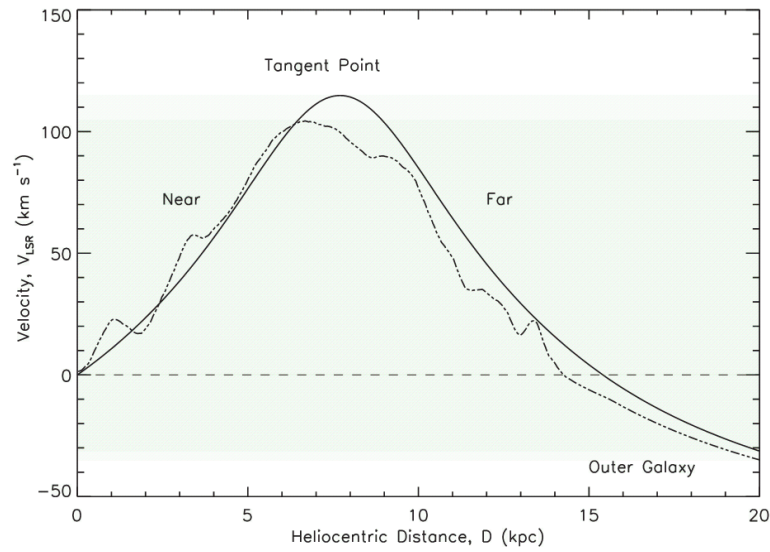


图 8 银经 $l = 25^\circ$ 方向的速度-距离曲线。实线是均匀转动模型的结果，点划线是 Pohl（2008）给出的流体转动模型的结果。

1.6 视向速度和距离的关系

太阳几乎与它周围的恒星和气体云一起运动，因此这些物质看起来就像静止的。因此

可以由太阳周围的物质运动确定出本地静止标准¹。相对于本地静止标准，太阳有微小的运动。在用中性氢吸收谱测距时用到的视向速度都是指天体相对于局域静止标准的视向分量。与相对太阳的速度有微小差异。在假设银河系中物质以相同的线速度绕银心运动的条件下，该视向速度与天体到我们的距离之间存在一定的关系。根据图 9 可以得到以下三个关系式：

$$v = V \cos \alpha - V_{\odot} \sin l \quad (\text{式1-15})$$

$$\frac{\sin(90^\circ + \alpha)}{R_{\odot}} = \frac{\sin l}{R} \quad (\text{式1-16})$$

$$R^2 = R_{\odot}^2 + d^2 - 2R_{\odot}d \cos l \quad (\text{式1-17})$$

其中： l 是银经方向， v 是位置 P 处天体的环绕速度， R 是某天体到银心的距离， d 是位置 P 处的天体到太阳的距离， v 是该天体的视向速度。从以上三个式子就可以得到视向速度和距离 d 的关系（参考图 12）。

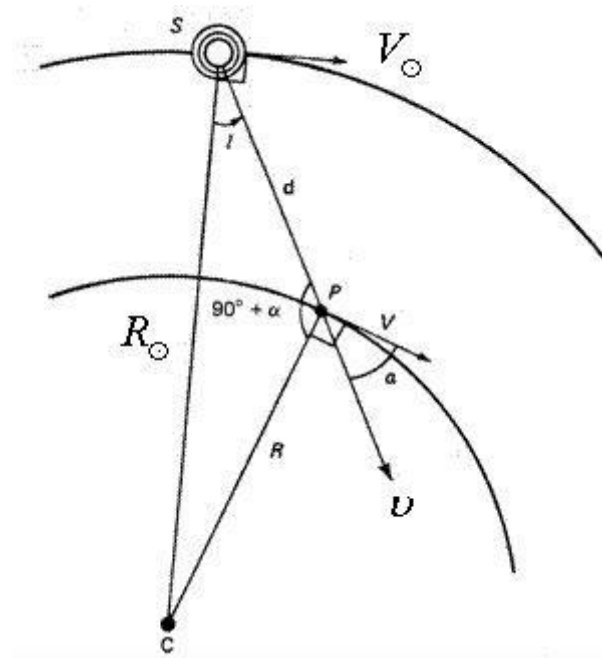


图 9 银河系中天体转动的示意图。通常，不同位置处的天体相对我们有不同的视向速度。

图片来自：http://ircamera.as.arizona.edu/astr_250/Lectures/Lec_22sml.htm

综上所述，用中性氢吸收谱测超新星遗迹的距离，首先要从连续谱数据中分别得到 ON 和 OFF 两个方向的亮温度 $\langle T_c \rangle$ 和 $\langle T_{bg} \rangle$ ，然后从谱线数据中分别得到这两个方向的亮温度

$T_{B,on}(\nu)$ 和 $T_{B,off}(\nu)$ 。将这些亮温度带入（式 1-14），就可以得到该遗迹的吸收谱。从该吸收谱分析出遗迹前面和后面的云的视向速度。再由视向速度和距离的关系，就可以推断出超新星遗迹的距离范围。

1.7 与分子云的相互作用

如果超新星遗迹和它周围的分子云发生相互作用，则这个分子云与该超新星遗迹就应该有相近的视向速度，也就对应相同的距离。于是就可以借助超新星遗迹和分子云的相互作用来进一步限制超新星遗迹的距离。这首先要求有足够的观测证据证实二者在相互作用。

下面列出几个常用的超新星遗迹和分子云可能相互作用的判据[34]：

(1) $^{12}\text{CO}(J=2-1)/(J=1-0)$ 的比值。对速度区间（大约是 $1.5\text{-}2\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ）内该比值的积分值可以作为超新星遗迹-分子云是否存在相互作用的判据[35]。这个比值越大，越有可能存在相互作用[36]。

(2) 羟基(OH)脉泽。通常，激波在分子气体内传播时，会压缩和加热气体分子（比如 H_2 ）。

如果激波有足够高的速度（ $v_s > 45\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ），它还会使氢气分子分解。激波过后的氢和氧可能复合成 OH，这就增加了 OH 的密度。较密的 OH 因碰撞而受到激发，更有可能产生 OH 脉泽。因此 OH 脉泽（1720 MHz）是超新星遗迹和分子云相互作用的有力证据。然而没有探测到 OH 脉泽（1720 MHz）并不能排除存在相互作用的可能，因为脉泽是非线性物理现象，灵敏地依赖气体所处环境物理条件[37]。需要注意的是，除超新星遗迹外，还有恒星和恒星形成区等 OH 脉泽源。在用 OH 脉泽判别超新星遗迹和分子云是否有相互作用时，应该确认该区域是否有恒星或恒星形成区发出 OH 脉泽。

(3) 存在 CO， HCO^+ ，CS 等分子线的致宽。

(4) 探测到近红外辐射。例如： $[\text{Fe II}]$ 线或者激波激发的氢气的震动/转动线。

(5) 分子云和超新星遗迹的形态一致（比如：有相互作用的交界面，弧形，壳形等）。

1.8 用 CO 谱线观测限制距离

人们不断发展尝试新方法进一步提高超新星遗迹的测距可信度。最近田文武和 Leahy [19] 针对射电天体所在方向采取中性氢和 $^{13}\text{CO } J=1-0$ 谱线同时观测的方法来测定该天体（特别是超新星遗迹）的距离。银河系中气体分子和尘埃的比例以及各种气体分子之间的比例大体上是固定的。 $^{13}\text{CO } J=1-0$ 的发射谱线通常认为是由 ^{13}CO 和 H_2 相互碰撞激发了 ^{13}CO 的转动跃迁而产生的。若某区域观测到 ^{13}CO 的发射谱线，说明该处可能有一个含有

大量 ^{13}CO 、 ^{12}CO 、 H_2 等气体分子组成的密云核，并且该云核周围很可能弥漫着大量的中性氢，且形成包层结构。在一个连续谱源的方向上，我们通常可以同时得到其 ^{13}CO 的辐射谱和中性氢的吸收谱。如果某个 ^{13}CO 辐射峰值对应的速度处没有观测到相应的中性氢的吸收，则有理由认为该连续谱源位于 ^{13}CO 示踪的云核前面，即该连续谱源比 ^{13}CO 离观测者更近。需要注意的是，通常不用 H_2 作为密云核的示踪分子，因为 H_2 在射电波段内没有辐射。

实际上， H_2 密度不同的区域， CO 不同同位素发出的辐射的光深并不相同。密度小于 10^2 cm^{-3} 的区域 $^{12}\text{C } ^{16}\text{O}$ 是光学薄的；略微密一点的区域 ^{13}CO 光深更小； $n(\text{H}_2) > 500 \text{ cm}^{-3}$ 的区域 $\text{C } ^{18}\text{O}$ 光深更小。因此最好根据氢气分子体密度的不同选择 CO 的不同同素异形体的分子谱线来限制目标源的距离。

1.9 误差分析

用中性氢吸收谱测距有很多方面可能导致误差。首先，望远镜的温度灵敏度和速度分辨率的限制会带来直接的测量误差，我们称之为仪器误差。其次，做吸收谱的时候目标源和背景虽然靠的很近，但二者还是分开的。我们选取的背景并不是 ON 方向的背景，这也会造成误差，我们称之为空间分离误差。这两种误差都反应在 $e^{-\tau}$ 的变化上。最后，中性氢云的运动可能并不完全符合我们采用的银河系均匀转动模型（ $R_\odot = 8.5 \text{ kpc}$ ， $v_\odot = 220 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ）。具体到某个中性氢云，它可能不完全随着银河系一起转动，出现偏离均匀旋转的随机运动，这样的现象产生的误差我们称为随机运动误差。

我们一一估计了以上各个误差。为了估计仪器误差，我们选取中性氢发射谱线两端没有辐射的速度区间，求出 $e^{-\tau}$ 波动的标准差 $\sigma_{\text{仪器}}$ 。对于空间分离误差，我们在遗迹周围选取没有连续辐射的区域，用与做吸收谱同样的方法，得到一个“吸收谱”。我们用这样的“吸收谱”的波动估计出目标源和背景分离导致的误差 $\sigma_{\text{空间分离}}$ 。实际上，这个误差包含了仪器误差。我们选取 $3\sigma_{\text{仪器}}$ 和 $\sigma_{\text{空间分离}}$ 中较大的一个作为 $e^{-\tau}$ 的误差。并且认为只有在这个误差范围之外的吸收才是可信的。要估计随机运动误差就困难得多，因为很难确切知道某个具体的中性氢云的运动与所用的均匀转动模型偏离了多少。通常认为随机运动的速度弥散为 $\langle v_i^2 \rangle^{1/2} \approx 6.9 \text{ km s}^{-1}$ [38]。

1.10 小结

本章主要介绍了 21-cm 连续谱和谱线的辐射机制。也介绍了银河系均匀转动模型，及以此为基础的中性氢吸收谱测距方法。总结了超新星遗迹和分子相互作用的判据。最后简单介绍了用 CO 谱线观测帮助确认或者进一步限定天体的距离。

2 测距研究结果

2.1 所用数据

本文所用的中性氢谱线和连续谱数据来自新近完成并释放的甚大阵银道面巡天 (VLA Galactic Plane Survey, 简称 VGPS [6])。VGPS 覆盖的银经范围从 18^0 到 67^0 , 银纬范围从 $|b| \leq 1.3^0$ 变化到 $|b| \leq 2.3^0$ 。中性氢谱线数据的分辨率是 $1' \times 1' \times 1.56 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 每个通道的均方根噪声是 2K。连续谱图像的分辨率 (半高全宽) 是 $1'$ 。

本文所用的 CO 谱线数据来自美国波士顿大学-五大学联合天文台的银河系环巡天 (Galactic Ring Survey, 简称 GRS[39])。这是一个对银河系内 ^{13}CO ($J=1-0$) 谱线辐射的巡天, 其角分辨率是 $46''$ 。在银经范围 $l < 40^0$ 内, 其速度覆盖范围是 -5 到 $135 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; 在银经范围 $l > 40^0$ 内, 其速度覆盖范围变为 -5 到 $85 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。它的速度分辨率是 $0.21 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 典型的均方根灵敏度是 0.13 K。

数据处理主要用到的是射电天文常用的 karma 软件中的一个子程序 kvis[40]。结合自己编写的 C 程序 (见附录 1 和附录 2), 画出了本文随后所用的这些图。

2.2 超新星遗迹 G31.9+0.0

G31.9+0.0 是一个射电亮的具有明显的“突破式 (breakout)”形态的超新星遗迹 (如图 10)。这个遗迹的上部是形状比较规则的弧形, 下半部分亮温度较低, 没有规则的外形和确定的边缘。

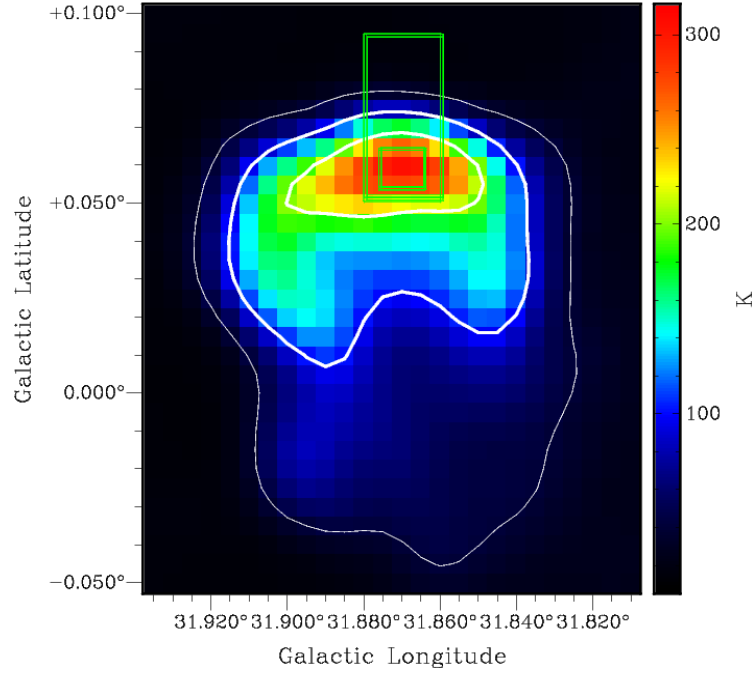


图 10 超新星遗迹 G31.9+0.0 (3C 391) 的 1420 MHz 连续谱图像。轮廓线由外向内分别是 40 K、100 K、200 K。图中小的和大的矩形区域分别是用来得到吸收谱的 ON 和 OFF 区域。大矩形的上半部分是用来画出下图 ^{13}CO ($J=1-0$) 辐射的区域。

2.2.1 用吸收谱分析距离

下面从 G31.9+0.0 的吸收谱（如图 11）来分析它的距离。从 HI 发射谱线和吸收谱可以看出，最高的中性氢吸收速度达到了切点位置的视向速度 ($\sim 106 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)。该速度对应的距离是 7.2 kpc。这说明 G 31.9 + 0.0 的距离应该大于或者等于 7.2 kpc（参考图 12）。从吸收谱还可以看出，有较高亮温度 ($\sim 70 \text{ K}$) 的中性氢辐射但是没有相应吸收的最大速度约为 $70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这说明该速度处的云很可能位于 G31.9+0.0 的后面。这给出 G31.9+0.0 的距离上限为 10.4 kpc。下面从这个源与分子云相互作用的角度进一步限定它的距离。

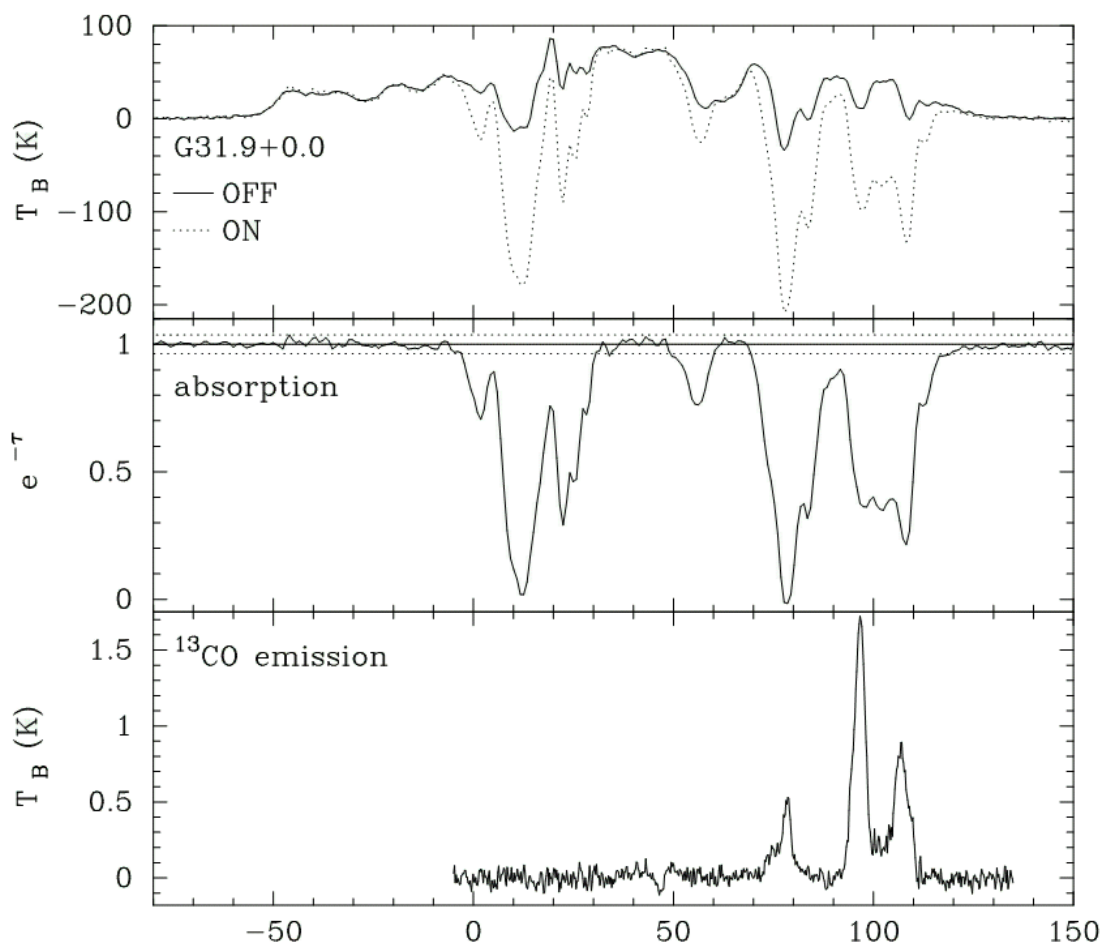


图 11 从上至下依次是沿着 G31.9+0.0 所在方向的中性氢辐射，中性氢吸收谱和 ^{13}CO ($J=1-0$) 辐射谱。中性氢吸收谱图中的两条虚线表示该吸收谱 3σ 的误差范围。 σ 是没有中性氢辐射的速度范围内， $e^{-\tau}$ 的标准差。可见， ^{13}CO 辐射峰通常对应着吸收谱的峰值。 $78 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 对应的位置处因为有更冷的中性氢云，因而有很强的吸收。但是该处的 ^{13}CO 辐射并不很强，原因可能是该处的 ^{13}CO 比较少。和 $78 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 处相比， $97 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近的中性氢温度较高，因而吸收没有前者强，但是该处的 ^{13}CO 辐射很强，可能是因为该处有更密集的 ^{13}CO 分子。而没有 ^{13}CO 辐射的速度处也可能对应着很强的吸收，因为吸收是由较冷的中性氢引起的，而该中性氢内部不一定含有比较多的 ^{13}CO 分子。

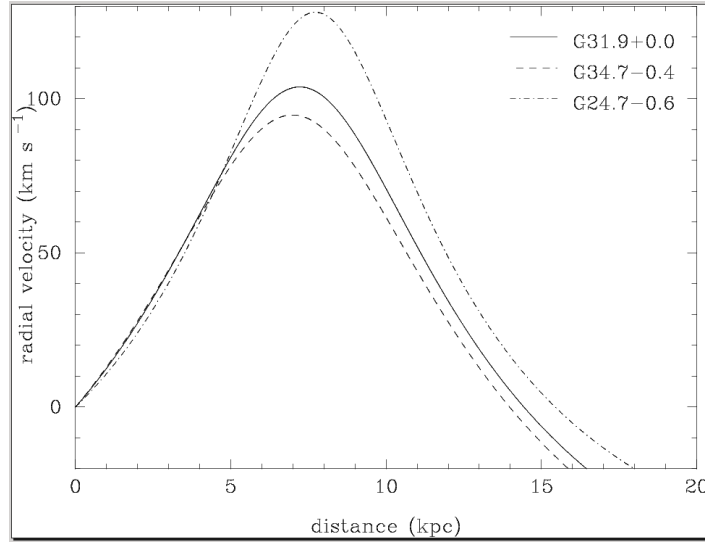


图 12 G31.9+0.0, G34.7-0.4 和 G24.7-0.6 所在位置处的视向速度-距离关系。

所用的银河系模型参数: $R_{\odot} = 8.5 \text{ kpc}$, $v_{\odot} = 220 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2.2 与分子云的相互作用

^{13}CO 辐射谱显示在该方向的最大视向速度附近有 ^{13}CO 的发射峰。该发射峰的存在说明该处有一个密的云核。该云核有没有可能和 G31.9+0.0 发生相互作用呢? 如果能进一步确认这一点, 则可以确定 G31.9+0.0 就在 7.2 kpc 附近。

下面列出了 G31.9+0.0 和分子云相互作用的证据:

- (1) 在切点速度附近 ^{13}CO 和 ^{12}CO 的分布形态和 G31.9+0.0 的形态相关很好。图 11 展示了 G31.9+0.0 上方一个小区域的 ^{13}CO ($J=1-0$) 辐射谱。在 $105\sim110 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近, 有高亮温度的辐射峰。这说明这个速度范围对应的距离处有比较密的云核。通常认为这样的云核周围环绕着大量的中性氢。这些中性氢导致了我们在这个速度范围内所看到的中性氢吸收。从 ^{13}CO ($J=1-0$) 谱线数据的通道图可以看出, ^{13}CO 出现的位置和 G31.9+0.0 的形态符合的很好 (如图 13)。这也支持 G31.9+0.0 和其周围的云有发生相互作用的可能性。Wilner (1998) 等人[41]观测了这个源所在方向的 ^{12}CO $J=1-0$ 辐射, 同样发现这个超新星遗迹位于一个分子云的边缘, 切点速度处的 ^{12}CO 辐射出现的位置和 3C 391 的形态一致。他们认为 3C 391 的前身星很可能在一个密的分子云里面爆炸, 其冲击波已经冲出云的边缘。
- (2) Frail 等人[37]在 G31.9+0.0 所在的区域探测到 OH 脉泽 (1720 MHz) 辐射, 且该脉泽的视向速度恰好在 $105\sim110 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近。通常认为, 探测到 OH 脉泽是超新星遗

迹和分子云相互作用的有力证据。观测到的视向速度重合可以解释为 G31.9+0.0 产生的激波在它周围的分子云中传播时，激发了 OH 脉泽。有可能该 OH 脉泽是由其他天体产生的激波激发的。在没有找到确切的证据表明附近的其他天体发出激波的情况下，G31.9+0.0 和分子云相互作用产生 OH 脉泽的假设是最有可能的。

(3) William (1996) [42]发现 G31.9+0.0 上方区域的[O I] $63\ \mu m$ 辐射显著增强。这可以解释为超新星遗迹的激波加热遗迹和它周围的分子云中的分子、原子、电子或者离子，使得这些粒子之间的相互碰撞显著增强。激波过后，遗迹和分子云发出亚稳态的精细结构谱线[O I] $63\ \mu m$ ，逐渐冷却。因此[O I] $63\ \mu m$ 暗示该超新星遗迹和它周围的分子云有相互作用。

(4) 另外，宽的 CS 的谱线也和 OH 脉泽源有相同的视向速度[43]。

(5) 氢的柱密度从上半部分到下半部分逐渐减小。比如用 X 射线观测数据得到氢的柱密度从上至下由 $(3.33 \pm 0.15) \times 10^{22}\ cm^{-2}$ 变化到 $2.70^{+0.16}_{-0.06} \times 10^{22}\ cm^{-2}$ 。这与该遗迹的上方存在密的 CO 云一致。

以上观测证据表明 G31.9+0.0 很可能和周围的分子云成协，即它们位于相邻的位置且有相互作用。因此 G31.9+0.0 可能位于最大视向速度处，即距离为 $\sim 7.2\ kpc$ 。考虑到所用银河系参数带来的误差约 $0.3\ kpc$ ，得到 G31.9+0.0 的距离范围是 $7.2 \pm 0.3\ kpc$ 。

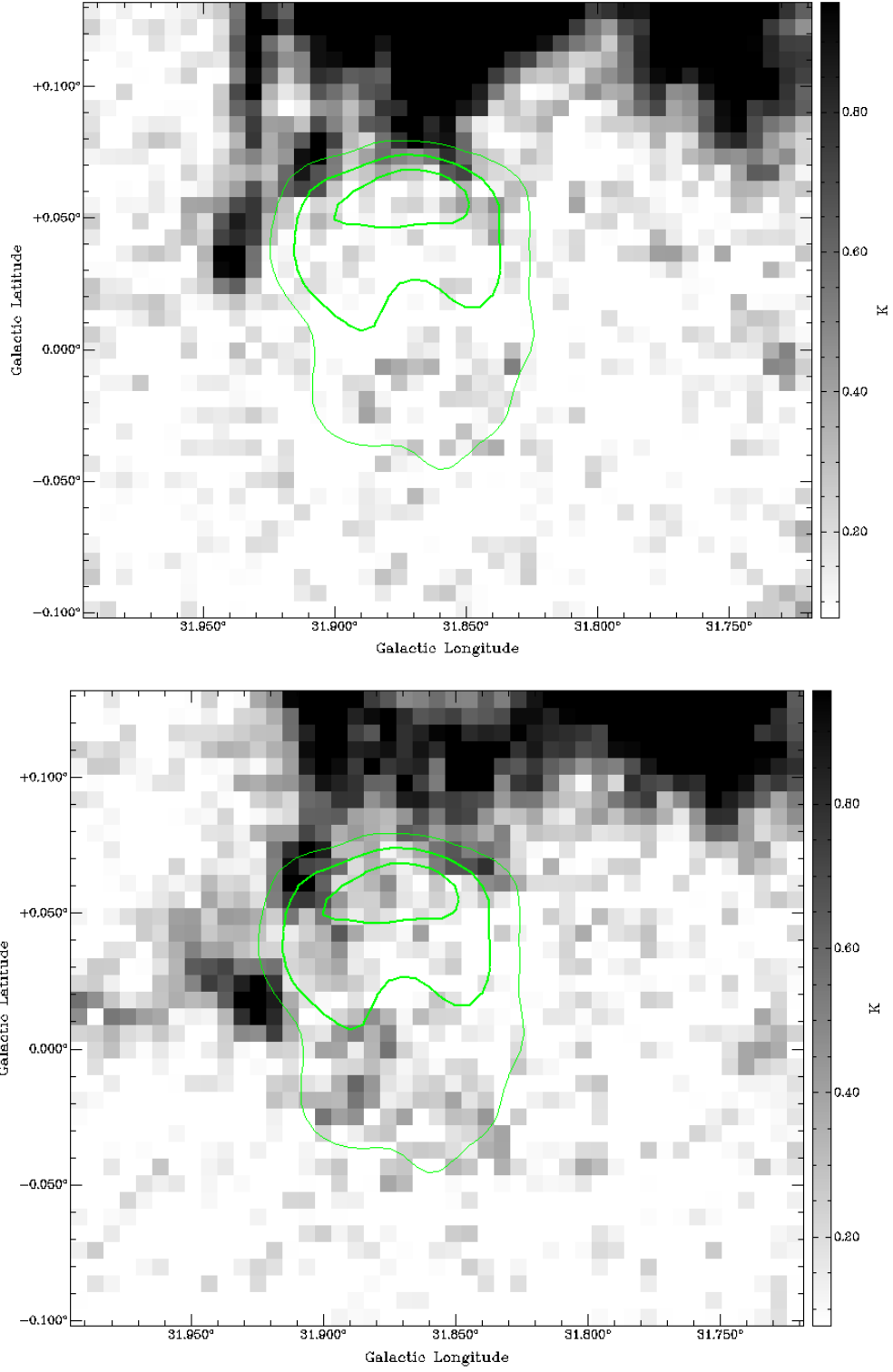


图 13 G31.9+0.0 附近 ^{13}CO ($J=1-0$) 的通道图。上下两个图对应的速度分别是 $107.05 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $108.11 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。轮廓图和前面 21-cm 连续谱的轮廓图一样。 ^{13}CO 出现的位置(黑色区域)和 G31.9+0.0 的形态(轮廓线所在处)符合的很好。

2.2.3 与他人结果的比较

这个测距结果比他人的结论更精确。Caswell et al. (1972) [44] 通过 Parkes 望远镜的 21-cm 谱线观测，根据在 $\sim 105 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 处有中性氢吸收和 $35\text{-}60 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 处没有吸收这两个特征，推断出 G31.9+0.0 的距离是 8.5-13.4 kpc。所用的太阳到银心的距离是 10 kpc。如果使用 IAU 推荐的银心距离 8.5 kpc，则 Caswell 等人测出的 G31.9+0.0 的距离应该是 7.2-11.4 kpc。

Chen 和 Slane[45]用另外一种方法给出 G31.9+0.0 的距离上限。他们使用 G31.9+0.0 所在方向单位距离的消光 $\langle E_{B-V} \rangle / d \sim 0.6 \text{ mag kpc}^{-1}$ [46]并且假定沿着银心方向，与太阳距离超过 2 kpc 时消光变大，又用了关系式 $N_H = 5.9 \times 10^{21} \langle E_{B-V} \rangle \text{ cm}^{-2}$ [3]给出距离 $d \leq 8.5 \text{ kpc}$ 。他们的方法用了两个经验关系式，是不同于中性氢吸收谱测距的另一种距离估计方法。

2.2.4 新距离下的其他参数

表 1 G31.9+0.0 的距离改变对其它参数的影响¹

G31.9+0.0 的物理参数	新参数值	以前的参数值[45]
距离 d (kpc)	7.2 ± 0.3	8
遗迹半径 r_s (pc)	5.4	6
动力学年龄 t (kyr)	4.1-3.6	4.6-4.0
X 射线光度 L_x ($10^{36} \text{ ergs s}^{-1}$)	2.2	2.7
$fn_e n_H V$ (10^{59} cm^{-3})	~ 0.9	~ 1.0

从表 1 看出，在应用新的距离下，遗迹 G31.9+0.0 的半径更小，更年轻。

¹遗迹半径是在角半径 2.5 角分的情况下得到的； $fn_e n_H V$ 是指最佳拟合体辐射量度，其中的 f 是填充因子， v 是体积。

2.3 超新星遗迹 G34.7-0.4 (W44)

G34.7-0.4 是一个射电亮的超新星遗迹，大小约 0.5° 。有一个丝状的壳，中间有热的 X 射线辐射，具有典型的“混合形态”。

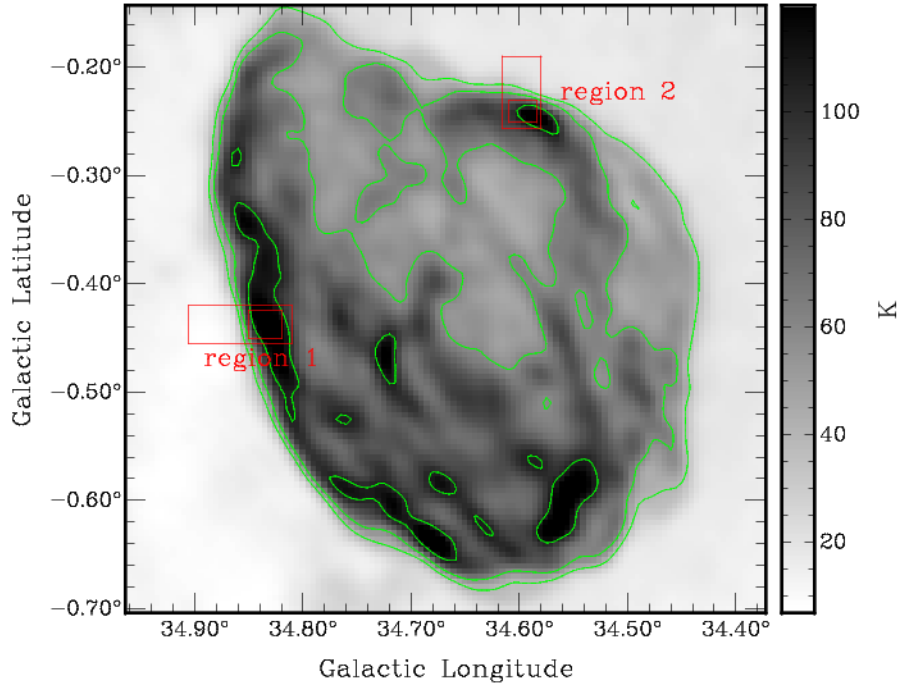


图 14 G34.7-0.4 的 1420 MHz 连续谱图像。该连续谱图像的轮廓线 40 60 105 K。

从图 15 和图 16 看出吸收在 $50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 处截止，这给出 G34.7-0.4 的距离下限 $\sim 3.3 \text{ kpc}$ （参考图 12）。图 17 展示了 G34.7-0.4 所在方向在视向速度 $49.65 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 处的中性氢通道图。从该图看出，该遗迹左下部分温度较周围的环境低。这应该是由中性氢对 G34.7-0.4 连续辐射的吸收造成的。而大于该速度的通道图里面看不到这样的吸收。从而有力的说明了 $\sim 50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度对应的距离正是 G34.7-0.4 的距离下限。从图 16 看出，在 $55 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 处有 HI 辐射峰，且有 ^{13}CO 辐射峰，但是没有中性氢吸收，这给出距离上限 ~ 3.6 或者 $\sim 10.4 \text{ kpc}$ 。（ $55 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 对应的近端距离 $\sim 3.6 \text{ kpc}$ ，远端距离 10.4 kpc ）。

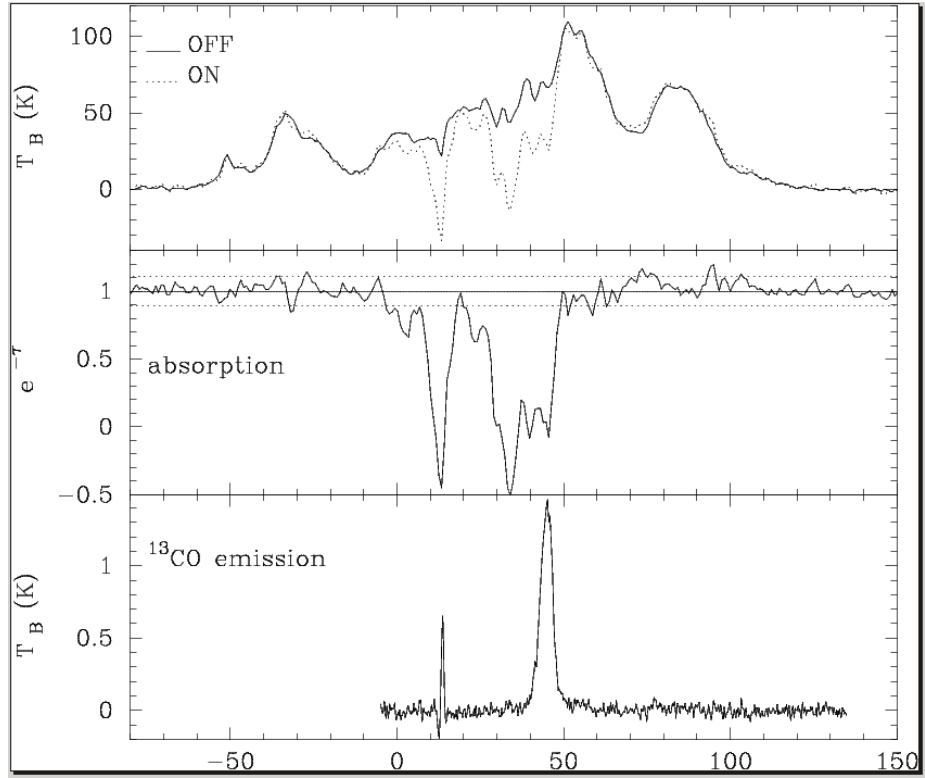


图 15 区域 1 的中性氢 21-cm 辐射谱、吸收谱和 ^{13}CO 辐射谱。 $\sim 45 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 对应的位置处有较强的 ^{13}CO 辐射。可能该处的 ^{13}CO 受到了超新星遗迹 G34.7-0.4 的激波作用，使其辐射显著增强。吸收谱图上的两条虚线分别代表 $1 \pm 3\sigma_{\text{仪器}}$ 。

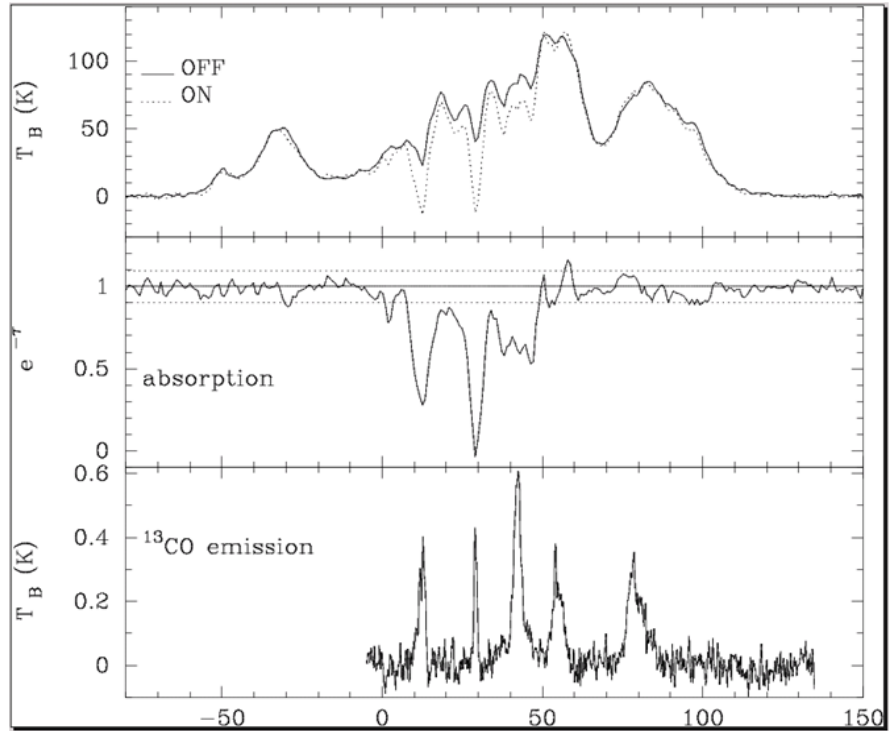


图 16 区域 2 的中性氢 21-cm 辐射谱、吸收谱和 ^{13}CO 辐射谱。

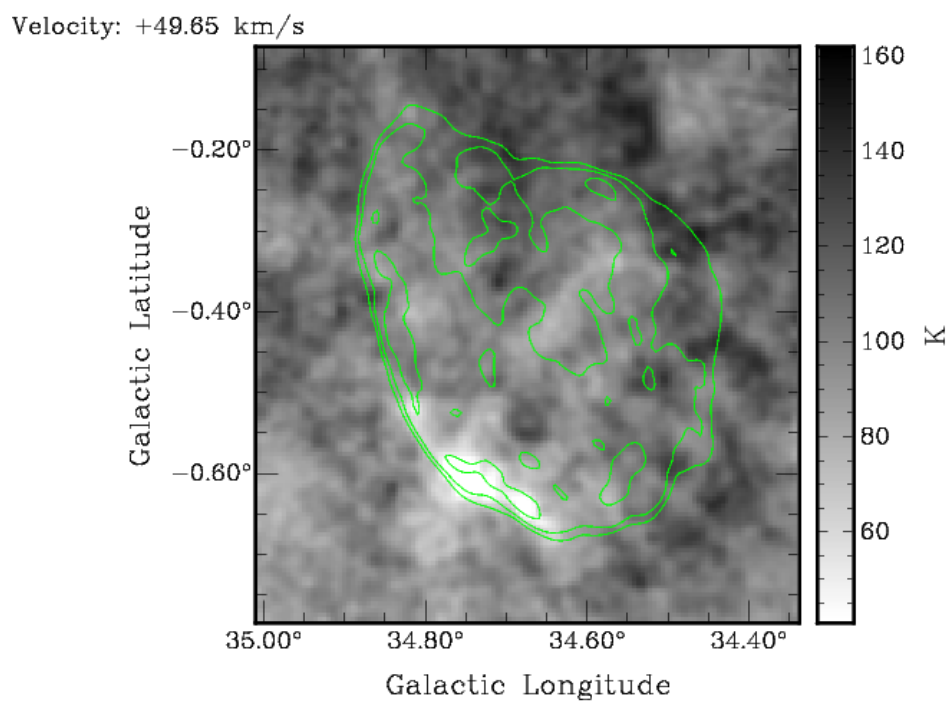


图 17 G34.7-0.4 在视向速度 $49.65 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的中性氢通道图。

下面用 G34.7-0.4 旁边的源 G34.255+0.14 的吸收谱进一步限制该遗迹的距离范围。

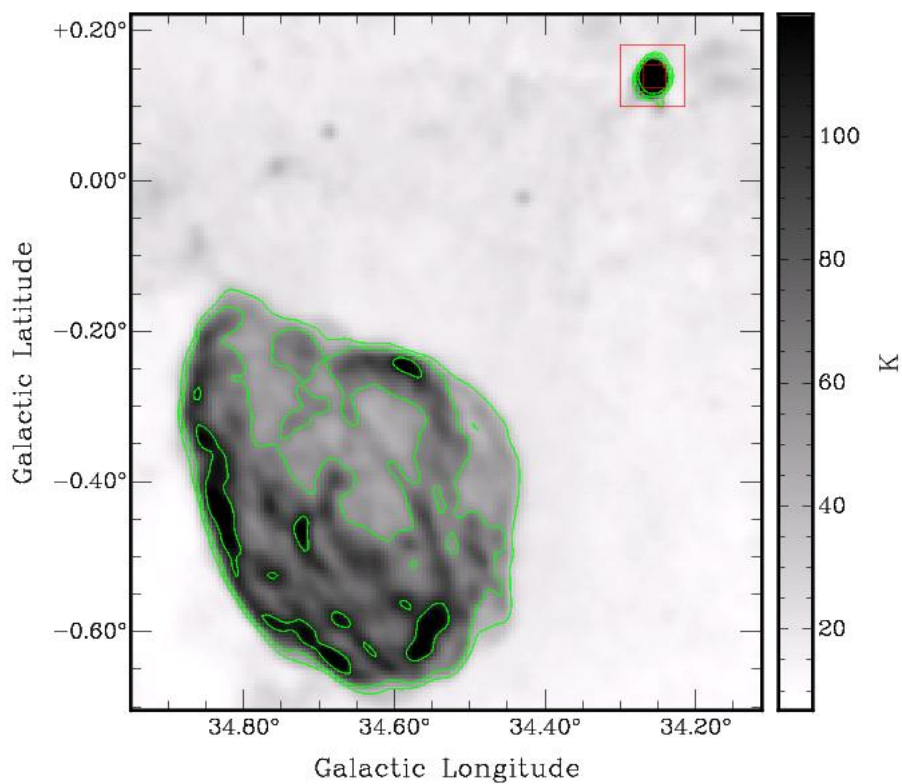


图 18 G34.7-0.4 旁边的源 G34.255+0.14 的 1420 MHz 连续谱图像（方框所在处）。

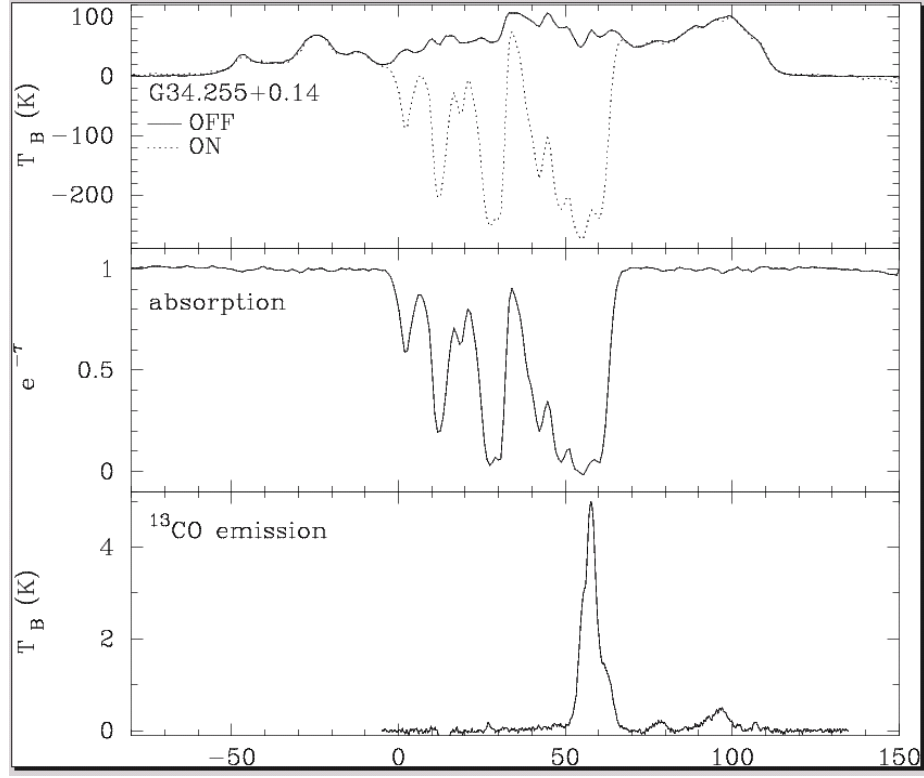


图 19 G34.255+0.14 的中性氢辐射谱、吸收谱和 ^{13}CO 辐射谱。

从图 19 看出，70-110 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内有中性氢辐射却没有吸收，说明该源位于切点位置以前。而该源在 50-60 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内有中性氢吸收，说明该速度范围对应的近端距离(~ 3.3 -3.9 kpc) 处有较冷的中性氢云。这些云对 G34.7-0.4 没有吸收，说明 G34.7-0.4 位于这些云的前面。因此知道 G34.7-0.4 正好位于 50 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 对应的近端距离处，即 3.3 kpc。从中性氢云的随机运动约 7 km/s，我们估计出该距离的误差约 0.4 kpc。即 G34.7-0.4 到与地球的距离是 3.3 ± 0.4 kpc。相应的遗迹半径约 14 pc。

2.3.2 别人的测距结果

Clemens (1985) [47]认为该遗迹位于 42 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 对应的近端位置，给出的距离为 2.5~2.6 kpc。所用参数 $R_{\odot} = 8.5$ kpc。他们是直接修改了 Caswell (1975) [48] 所用的参数 $R_{\odot} = 10.0$ kpc 得到的新距离。Caswell 在 12, 22, 30, 42 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近观测到吸收，且 42 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 处吸收迅速消失，说明 42 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 对应的近端距离 3 kpc 就是 G34.7-0.4 的距离。Goss (1971)

用 OH 的吸收谱测到相同的距离[49]。我们的测距结果明显比他们的要好。

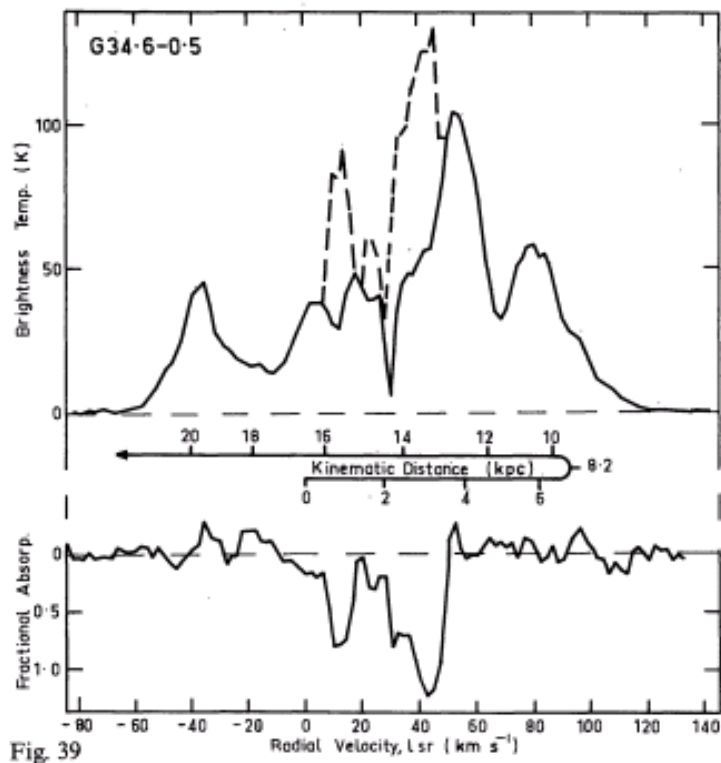


Fig. 39

图 20 Caswell 等人在 1975 得到的 G34.6-0.5 的中性氢辐射谱和吸收谱。

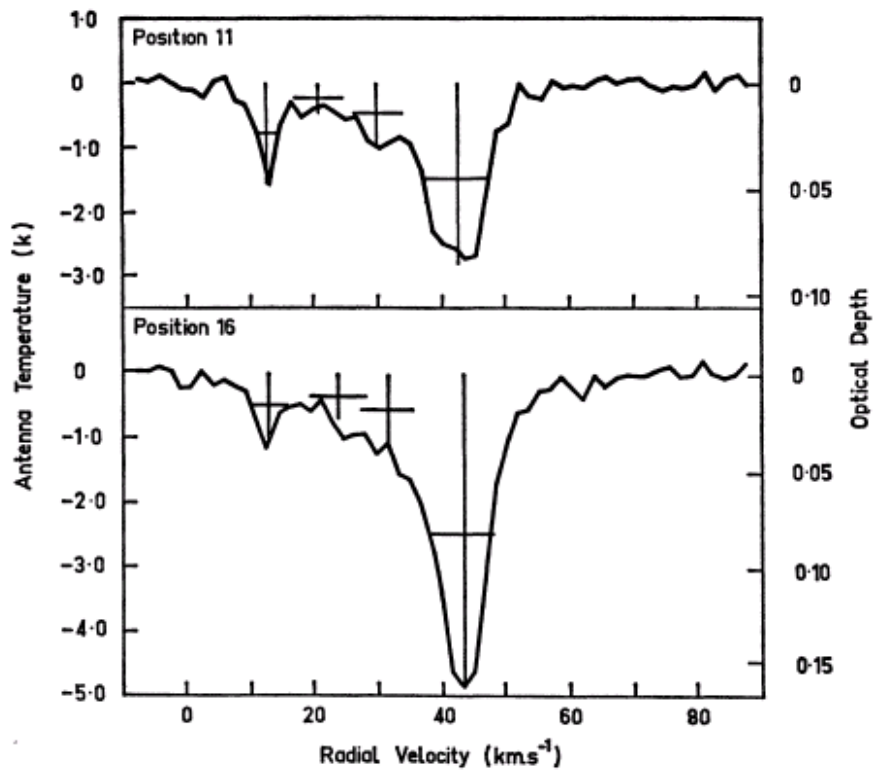


图 21 G34.7-0.4 (W44) 两个位置处的 1667 MHz 的 OH 吸收谱。

2.4 超新星遗迹 G24.7-0.6

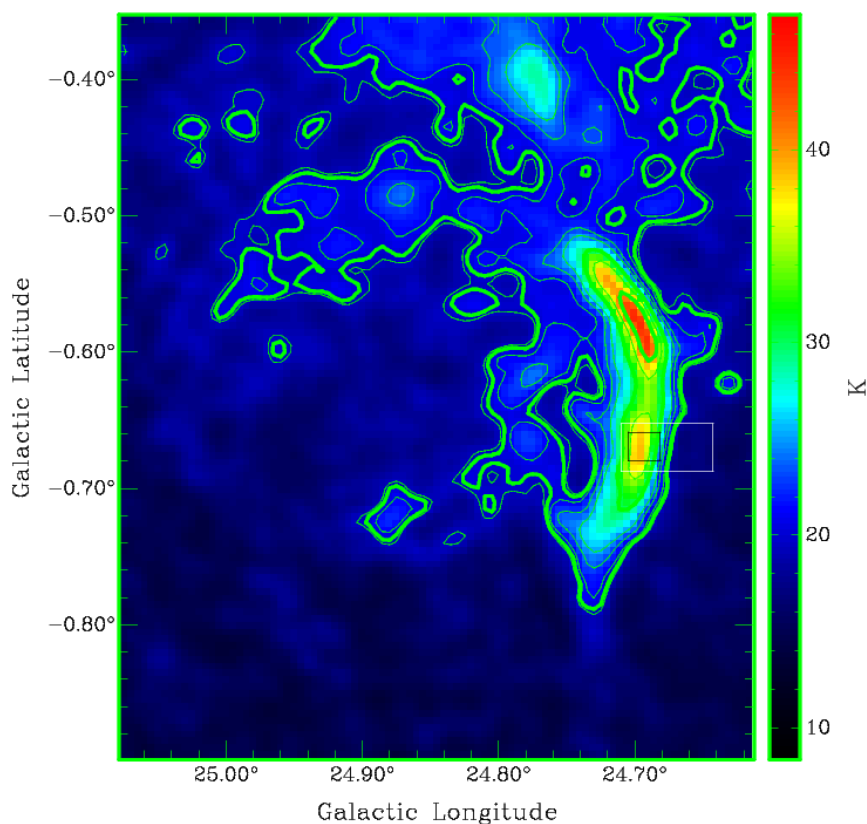


图 22 G24.7-0.6 的 1420 MHz 的连续谱图像。轮廓图的温度分别是 19.5 20 21 23 25 30 35 40 K。

G24.7-0.6 的形状像一个弯弓，是一个半壳形的超新星遗迹。该遗迹平均的角半径大约是 $13'$ 。从图中还可以看出，这个壳的右半部分的亮温度大约是左半部分的亮温度的 1.5 到 2 倍。且较亮的一半的形状更规则。下面先分析它的吸收谱。

2.4.1 用吸收谱分析距离

从图 23 看出， $20 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 对应的位置处有中性氢辐射但是没有对应的吸收，这给出 G24.7-0.6 的最大距离不会超过 13.7 kpc（参考图 12）。而有中性氢吸收的最大视向速度是 $\sim 115 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ，表明 G24.7-0.6 的距离应该大于 7.5 kpc。所以，该遗迹的距离应该是 7.5~13.7 kpc。G24.7-0.6 处在这个距离范围内时，它的半径约 28.4~51.8 pc。

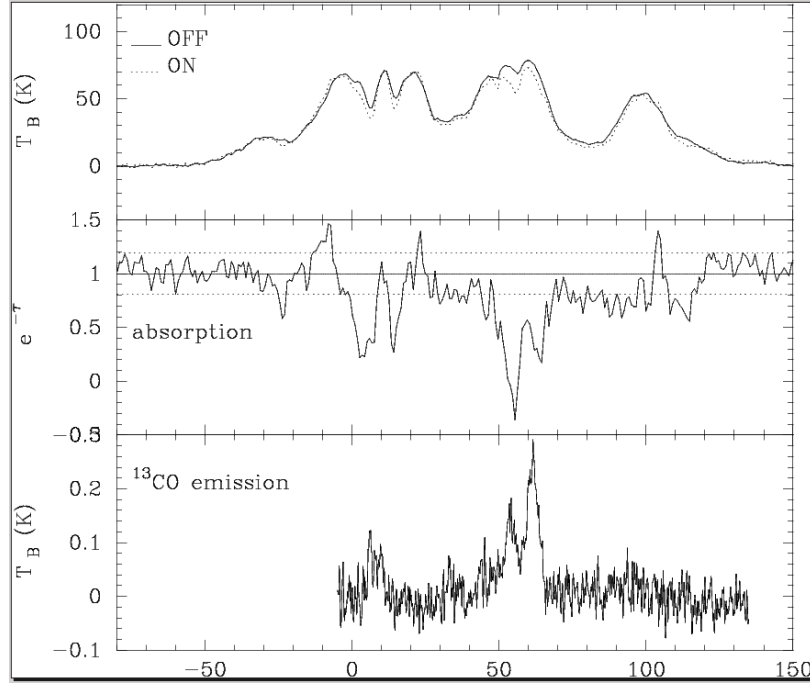


图 23 G24.7-0.6 的中性氢辐射谱、吸收谱和 ^{13}CO 发射谱。两条虚线分别表示 $1 \pm \sigma$ 空间分离。不用

$1 \pm 3\sigma_{\text{仪器}}$ 是因为该遗迹的附近的 $\sigma_{\text{空间分离}} > 3\sigma_{\text{仪器}}$ 。

2.4.2 别人的测距结果

Case 和 Dipen (1998) [50] 用表面亮度和距离的关系给出 G24.7-0.6 的距离是 7.4 kpc。

Koo 和 Heiles 假设这个遗迹和它周围的 HII 区有相同的平均视向速度 ($110 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)。据此得到这个源的距离是 9.3 kpc [11]。本文给出的距离是在没有假设该源的视向速度的情况下，得到的该源距离的合理范围，因而更可靠。

总结与展望

本文主要介绍了与中性氢吸收谱测量超新星遗迹距离相关的背景，重点讲述了对三个超新星遗迹的测距过程和结果。具体内容可以总结如下：

- 介绍了中性氢 21-cm 连续谱和谱线的辐射机制。并且分析了产生 21-cm 吸收谱的条件。
- 从辐射转移方程出发，推导出得到吸收谱所需的亮温度的表达式。进一步推导出光深和视向速度的关系，也就是获得吸收谱所需的基本关系式。
- 讲述了银河系的均匀转动模型，并且基于此模型得出了银河系中性氢的视向速度和距离的关系。

- 探讨了用 ^{13}CO 帮助进一步分析限定超新星遗迹距离的方法。并尝试通过判断超新星遗迹和分子云是否有相互作用，来限定遗迹的距离。进一步尝试用视线方向上与超新星遗迹比较近的其他连续谱辐射源的吸收谱来解决同一视向速度对应两个距离的问题。

- 最后，对三个具体的超新星遗迹进行了测距。得到了它们的吸收谱，并结合其他方法限定了它们的距离。得到如下测距结果：

- (1) 超新星遗迹 G31.9+0.0 的距离约为 7.2 kpc。而先前仅仅把此距离定为距离下限。因此，我们的结果大大改写了他人的结论。并且得到基于此距离的其他参数：遗迹半径 5.4 pc，动力学年龄 4.1-3.6 kyr，X 射线光度 $2.2 \times 10^{36} \text{ ergs s}^{-1}$ 。
- (2) 超新星遗迹 G34.7-0.4 (W44) 的距离约为 3.3 kpc，遗迹半径约 14 pc。有充足的证据表明这个距离比先前测得的距离 2.5~2.6 kpc 更精确，更可靠。
- (3) 超新星遗迹 G24.7-0.6 的距离应该处在 7.5~13.7 kpc 范围内。G24.7-0.6 处在这个距离范围内时，它的半径约 28.4~51.8 pc。该距离是在没有假设该遗迹的视向速度的情况下，得到的它的运动学距离的合理范围。

进一步的测距研究亟待进行。未来工作重点应该是尝试测量更多有兴趣的超新星遗迹的距离。用观测数据的结果对超新星遗迹的演化模型提出限制。期待未来对超新星遗迹的研究有大的进展。

硕士期间完成的工作

(1) **Hongquan Su**, Qing-Kang Li, Hui Zhu, Wen-Wu Tian. 78 pairs of possible PSR-SNR associations. Proceedings of The 11th Asian-Pacic Regional IAU Meeting 2011. NARIT Conference Series, Vol. 1 (已接收)

(2) Wen-Wu Tian, **Hongquan Su**, F Y Xiang. The Galactic N_H - A_V Relation and its Application to Historical Galactic SNRs. Proceedings of The 11th Asian-Pacic Regional IAU Meeting 2011. NARIT Conference Series, Vol. 1 (已接收)

(3) 测定了超新星遗迹 G31.9+0.0、G34.7-0.4 和 G24.7-0.6 的距离。论文正在准备中，准备投 RAA。

参考文献

-
- [1] 李宗伟, 肖兴华. 天体物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
- [2] Paul Gorenstein. Empirical relation between interstellar X-ray absorption and optical extinction[J]. *ApJ*. 1975, **198**:95-101
- [3] P Predehl, J H M M Schmitt. X-raying the interstellar medium: ROSAT observations of dust scattering halos[J]. *A&A*. 1995, **293**:889-905
- [4] Tolga Güver, Feryal Özel. The relation between optical extinction and hydrogen column density in the Galaxy[J]. *MNRAS*. 2009, **400**: 2050–2053
- [5] Wen-Wu Tian, Hongquan Su, F Y Xiang. The Galactic $N_H - A_V$ Relation and its Application to Historical Galactic SNRs[J]. *NARIT Conference Series*. 2012, 1 (accepted)
- [6] J M Stil, A R Taylor, J M Dickey, D W Kavaers, P G Martin. The VLA Galactic Plane Survey[J]. *AJ*. 2006, **132**:1158-1176
- [7] N M McClure-Griffiths, J M Dickey, B M Gaensler, A J Green, M Haverkorn, S Strasser. The Southern Galactic Plane Survey: H I Observations and Analysis[J]. *ApJS*. 2005, **158**:178-187
- [8] A R Taylor, S J Gibson, M. Peracaula, P G Martin, T L Landecker, et al. The Canadian Galactic Plane Survey[J]. *AJ*. 2003, **125**:3145-3164
- [9] M W Peter, Kalberla J ürgen Kerp. The HI Distribution of the Milky Way[J]. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 2009, **47**:27–61
- [10] L Woltjer. Supernova Remnant[J]. *ARA&A*, 1972, **10**:129-158
- [11] Bon-Chul Koo, Carl Heiles. A survey of HI 21cm Centimeter emission lines toward supernova remnants[J]. *ApJ*. 1991, **382**:204-222
- [12] K. Rohlfs, T. L. Wilson, 姜碧伪. 射电天文工具[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2008
- [13] Roger A. Chevalier. The evolution of supernova remnants. I. spherically symmetric models[J]. *ApJ*. 1974, **188**:501-516
- [14] M P Hughes, A R Thompson, R S Colvin. An absorption-line study of the Galactic neutral hydrogen at 21 centimeters wavelength[J]. *ApJS*. 1971, **23**:323-370
- [15] D A Leahy, W W Tian. The distance of the SNR Kes 75 and PWN PSR J1846-0258 system[J]. *A&A*. 2008, **480**:L25-L28
- [16] Yang Su, Yang Chen, Ji Yang, Bon-Chul Koo, Xin Zhou, Il-Gyo Jeong, Chun-Guang Zhang. Discovery of molecular shells associated with supernova remnants. II. Kesteven 75[J]. *ApJ*. 2009, **694**:376–386

-
- [17] D A Leahy, W W Tian. The distances of SNR W41 and overlapping HII regions[J]. AJ. 2008, **135**:167–172
- [18] Xin Zhou, Yang Chen, Yang Su, Ji Yang. Discovery of molecular shells associated with supernova remnants. I. Kesteven 69[J]. ApJ. 2009, **691**:516–524
- [19] W W Tian, D A Leahy. The distances of supernova remnants Kes 69 and G21.5–0.9 from HI and ^{13}CO spectra[J]. MNRAS. 2008, **391**:L54–L58
- [20] 田文武, 杨雪娟. 当前超新星遗迹研究中的若干热点问题[J]. Progress in Astronomy. Jun. 2010, **28**:97-111
- [21] W W Tian, D A Leahy, M Haverkorn, B Jiang. Discovery of the radio and X-ray counterpart of TeV γ -ray source HESS J1731-347[J]. ApJ. 2008, **679**: L85–L88
- [22] Samar Safi-Harb, Marc Ribó, Yousaf Butt, Heather Matheson, Ignacio Negueruela, Fangjun Lu, Shumei Jia, Yong Chen. A multiwavelength study of 1WGA J1346.5-6255: A new γ Cas analog unrelated to the background supernova remnant G309.2-00.6[J]. ApJ. 2007, **659**:407-418
- [23] 尤峻汉. 天体物理中的辐射机制[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- [24] A. M. Hillas, C. W. Akerlof, S. D. Biller, et al. The Spectrum of TeV Gamma Rays from the Crab Nebula[J]. ApJ. 1998, **503**:744-759
- [25] L Xiao, W Reich, E Fürst, J L Han. Radio properties of the low surface brightness SNR 65.2+5.7[J]. A&A. 2009, **503**:827-836
- [26] X Y Gao, X H Sun, J L Han, W Reich, P Reich, R Wielebinski. A Sino-German $\lambda 6$ cm polarization survey of the Galactic plane. VI. Discovery of supernova remnants G178.2-4.2 and G25.1-2.3[J]. A&A. 2011, **532**:1-7
- [27] X H Sun, P Reich, W Reich, L Xiao, X Y Gao, J L Han. A Sino-German $\lambda 6$ cm polarization survey of the Galactic plane. VII. Small supernova remnants[J]. A&A. 2011, **536**:A83
- 5
- [28] Simon T Strasser. Properties of HI in the Galaxy[D]. Calgary: Department of Physics and Astronomy, 2002.
- [29] 赵凯华, 罗蔚茵. 新概念物理教程·量子力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008
- [30] W W Tian, D A Leahy, Q D Wang. Radio and X-ray images of the SNR G18.8+0.3 interacting with molecular clouds[J]. A&A. 2007, **474**: 541–547
- [31] A K Johanson, C R Kerton. HI absorption spectra toward MAGPIS supernova remnant candidates[J]. AJ. 2009, **138**:1615–1621
- [32] P M W Kalberla, L Dedes, J Kerp, U Haud. Dark matter in the Milky Way II. The HI gas distribution as a tracer of the gravitational potential[J]. A&A. 2007, **469**:511–527
- [33] Martin Pohl, Peter Englmaier, Nicolai Bissantz. Three-dimensional distribution of molecular

-
- gas in the barred milky way[J]. *ApJ*. 2008, **677**:283-291
- [34] Bing Jiang, Yang Chen, Junzhi Wang, Yang Su, Xin Zhou, Samar Safi-Harb, Tracey DeLaney. Cavity of molecular gas associated with supernova remnant 3C 397[J]. *ApJ*. 2010, **712**:1147–1156
- [35] Masumichi Seta, Tetsuo Hasegawa, T M Dame et al. Enhanced CO J=2-1/J=1-0 ratio as a marker of supernova remnant-molecular cloud interactions: the cases of W44 and IC 443[J]. *ApJ*. 1998, **505**:286-298
- [36] Yang Su, Yang Chen, Ji Yang, Bon-Chul Koo, Xin Zhou, Deng-Rong Lu, Il-Gyo Jeong, Tracey DeLaney. Molecular environment and thermal X-ray spectroscopy of the semicircular young composite supernova remnant 3C 396[J]. *ApJ*. 2011, **727**:43
- [37] D A Frail, W M Goss, E M Reynoso, E B Giacani, A J Green, R. Otrupcek. A survey for OH (1720 MHz) maser emission toward supernova remnants[J]. *AJ*. 1996, **111**:1651-1659
- [38] P Belfort, J Crovisier. Kinematics of local interstellar clouds[J]. *A&A*. 1984, **136**:368-370
- [39] J M Jackson, J M Rathborne, R Y Shah, et al. The Boston University-Five College Radio Astronomy Observatory Galactic Ring Survey[J]. *ApJS*. 2006, **163**:145-159
- [40] R E Gooch. Space and the Spaceball[J]. in *Astronomical Data Analysis Software and Systems IV*, ASP Conf. Series. 1995, **77**:144-147 ed. R.A. Shaw, H.E. Payne, & J.J.E. Hayes, ASP, San Francisco, ISBN 0-937707-96-1
- [41] D J Wilner, S P Reynolds, D A Moffett. CO observation toward the supernova remnant 3C 391. *AJ*. 1998, **115**:247-251
- [42] William T Reach, Jeonghee Rho. Shockingly bright [OI] $63\ \mu m$ lines from the supernova remnants W44 and 3C391[J]. *A&A*. 1996, **315**: L277–L280
- [43] William T Reach, Jeonghee Rho. Excitation And disruption of a giant molecular cloud by the supernova remnant 3C 391[J]. *ApJ*. 1999, **511**:836-846
- [44] J L Caswell, G A Dulk, W M Goss, V Radhakrishnan, Anne J Green. The distance and spectrum of 3C 391[J]. *A&A*. 1971, **12**:271-277
- [45] Yang Chen, Patrick O Slane. ASCA Observation of the thermal composite supernova remnant 3C 391[J]. *ApJ*. 2001, **563**:202-208
- [46] P B Lucke. The distribution of color excesses and interstellar reddening material in the solar neighborhood[J]. *A&A*. 1978, **64**:367-377
- [47] D P Clemens. Massachusetts-Stony brook Galactic plane CO survey: The Galactic disk rotation curve[J]. *ApJ*. 1985, **295**:422-436
- [48] J L Caswell, J D Murray, R S Roger, D J Cole, D J Cooke. Neutral hydrogen absorption measurements yielding kinematic distances for 42 continuum sources in the Galactic plane[J].

A&A. 1975, **45**:239-258

[49] W M Goss, J L Caswell, B J Robinson. OH absorption in the direction of W44[J]. A&A. 1971, **14**:481-486

[50] L Gary Case, Bhattacharya Dipen. A new Sigma-D relation and its application to the Galactic supernova remnant distribution[J]. ApJ. 1998, **504**:761-772

附 录

附录 1 画银河系内视向速度和距离关系图的 C 程序

/*this codes plot the curve of distance and velocity at given Galactic longitude l. plot the horizontal and vertical lines at given velocity and give the distance value.*/

```
#include "stdio.h"
#include "cpgplot.h"
#include "math.h"
#include <stdlib.h>
#define n 2000
#define W0 220 //error occur when omit point
#define R0 8.5
#define l 34.7*3.1415926/180 //input
#define b -0.4*3.1415926/180 //input
#define Vr_const 42.0 //input
main()
{ int i;
  Float Vr[n],R[n],d[n],d_const_near,d_const_far,R_const,max;
  /*Vr: the radial velocity
    W0: the rotation velocity of the Sun
    R0: the distance from the sun to the Galactic center
    R: the distance from the HI cloud to the Galactic center
    l: the Galactic longitude
    b: the Galactic latitude
    d: the distace from the HI cloud to us
  */
  for(i=0;i<n;i++)
  { R[i]=pow(R0*R0+d[i]*d[i]*cos(b)*cos(b)-2*R0*d[i]*cos(b)*cos(l),0.5);
    Vr[i]=W0*(R0/R[i]-1)*sin(l)*cos(b); //ref: Schneider, 1983 (1983ApJS...52..399S)
    d[i+1]=d[i]+0.015;
  }
  R_const=R0/(Vr_const/W0/sin(l)/cos(b)+1);
```

```

    d_const_near=R0*(cos(l)-pow((R_const/R0)*(R_const/R0)-sin(l)*sin(l),0.5))/cos(b);
d_const_far=R0*(cos(l)+pow((R_const/R0)*(R_const/R0)-sin(l)*sin(l),0.5))/cos(b);
printf("near distance=%f far distance=%f",d_const_near,d_const_far);

//find the maximum velocity
max=0.0;
for (i=0; i<n; i++)
{
    if (Vr[i]>max)
    {
        max=Vr[i];
    }
}
printf("the maximum velocity is %f",max);

//plot curve
if(cpgbeg(0,"?",1,1)!=1)
    return EXIT_FAILURE;

cpgscf(2);    /*character font*/
cpgslw(1);    /*line width*/
cpgsch(1.2);  /*tex,graph marker height*/
cpgsvp(0.2,0.9,0.2,0.9); /*XLEFT, XRIGHT, YBOT, YTOP*/
cpgswin(0,16,-20,100); /*X1, X2, Y1, Y2 */ //velocity1
cpgbox("BCSNTV", 0, 0, "BCSNTV", 0, 0);
cpgline(n,d,Vr); /*num,x,y */
cpglab("distance (kpc)","Vr (km/s)","");
//,"The relationship between distance and Vr in the Galactic longitude 31.9\uo"
// plot horizontal line
//cpgrect(0,d_const_far,Vr_const,Vr_const+0.15);
// plot near vertical line
//cpgrect(d_const_near,d_const_near+0.015,-40,Vr_const);
//plot far vertical line
//cpgrect(d_const_far,d_const_far+0.015,-40,Vr_const);
cpgend();
}

```

附录 2 画 ON、OFF 区域的中性氢辐射和吸收谱的 C 程序

```
#include "stdio.h"
#include "cpgplot.h"
#include "math.h"
#include <stdlib.h>
#define Num 340
#define Ts 102.732
#define Tbg0 48.5394
#define onpoints 25
#define offpoints 182

#define N1 141 // N1: the right point
#define N2 276 // N2: the left point
//the first number in velocity is the maximum one (the most right one)
//the last number in velocity is the minimum one (the most left one)
main()
{
    int i,tmp;
    float HI_c_vel[Num],HI_c_km[Num],HI_c[Num],sum,sigma,average;
    float HI_bg_vel[Num],HI_bg_km[Num],HI_bg[Num],HI_bg0[Num];
    float tau[Num],line[Num],sigmaup[Num],sigmadown[Num]; // tau---> e-tau
    float Tbg;
    Tbg=(offpoints*Tbg0-onpoints*Ts)/(offpoints-onpoints);
    FILE * fp1;
    FILE * fp2;
    fp1=fopen("on","r+t");
    for(i=0;i<Num;i++)
    {
        fscanf(fp1,"%f\t%f",&HI_c_vel[i],&HI_c[i]);
        HI_c_km[i]=HI_c_vel[i]/1000.;
    }
    fp2=fopen("off","r+t");
    for(i=0;i<Num;i++)
    {
        fscanf(fp2,"%f\t%f",&HI_bg_vel[i],&HI_bg0[i]);
        HI_bg_km[i]=HI_bg_vel[i]/1000.;
        HI_bg[i]=(HI_bg0[i]*offpoints-HI_c[i]*onpoints)/(offpoints-onpoints);
        tau[i]=1-(HI_bg[i]-HI_c[i])/(Ts-Tbg);
        //get the sigma of e-tau
    }
    sum=0;
    for(i=0;i<Num;i++)
    {
        if(i<N1||i>N2)
            sum=sum+tau[i];
    }
}
```

```

        //sum=sum+pow((tau[i]-1),2);
    }
    average=sum/(Num-N2+N1-1);
    sum=0;
    for(i=0;i<Num;i++)
    { if(i<N1||i>N2)
        sum=sum+pow((tau[i]-average),2);
    }
    sigma=pow(sum/(Num-N2+N1-1-1),0.5);
    printf("sigma=%f\n",sigma);
    fclose(fp1);
    fclose(fp2);
    for(i=0;i<Num;i++)
    {
        line[i]=1.0;
        sigmaup[i]=1.0+3*sigma;
        sigmadown[i]=1.0-3*sigma;
    }
/*plot */
if(cpgbeg(0,"?",1,1)!=1)
    return EXIT_FAILURE;
cpgscf(2);    /*character font*/
cpgslw(1);    /*line width*/
cpgsch(1.2);  /*tex,graph marker height*/
cpgsvp(0.2,0.9,0.6,0.9); /*XLEFT, XRIGHT, YBOT, YTOP*/
cpgswin(-80,150,-30,120); /*X1, X2, Y1, Y2 */ //velocity1
cpgbox("BCST", 0, 0, "BCSNTV", 0, 0);
cpgsls(4);    //set line style: 1 (full line), 2 (dashed), 3 (dot-dash-dot-dash), 4 (dotted),5
(dash-dot-dot-dot). The default is 1 (normal full line).
cpgline(Num, HI_c_kM, HI_c); /*num,x,y */
cpgsls(1);
cpgline(Num, HI_bg_kM, HI_bg); /*num,x,y */
cpgsch(1.2);
cpglab(" ", "", " ");
cpgmtxt("L",4,0.5,0.5,"T\\d B\\u (K)");//*side, disp, coord, fjust, *text
cpgmove(-90,-130);
cpgdraw(-100,-130);
// cpgtext(-119,-135,"absorb spectrum");
cpgsls(1);
cpgmove(-90,-100);
cpgdraw(-100,-100);
// cpgtext(-119,-110,"G127.11+0.54(point S)");
cpgsls(1);

```

```

//plot absorption
cpgsvp(0.2,0.9,0.3,0.6); /*XLEFT, XRIGHT, YBOT, YTOP*/
cpgswin(-80,150,-0.0,1.2); /*X1, X2, Y1, Y2 */ //velocity2
cpgbox("BCNST", 0, 0, "BCSNTV", 0, 0);
cpgline(Num, HI_c_km, tau); /*num,x,y */
cpgline(Num, HI_c_km, line);
cpgsls(4);
cpgline(Num, HI_c_km, sigmaup);
cpgline(Num, HI_c_km, sigmadown);
cpglab("V\\d LSR\\u (km/s)", " ", " ");
cpgmtxt("L",4,0.5,0.5,"e\\u -\\((2145)\\d");/*side, disp, coord, fjust, *text
//      cpgaxis("N",-114,0,-114,1.0,0,1.0,0.2,1,0,0.5,0.5,-0.5,90);
/*opt, x1, y1, x2, y2, v1, v2, step, nsub, dmajl, dmajr, fmin, disp, orient
//      cpgaxis("N",-114,0,166,0,-114,166,50.,5,0.1,0,0.5,0.5,0);
cpgmove(-90,85);
cpgdraw(-100,85);
cpgtext(-85,82,"background");
cpgend();
}

```

附录 3 超新星遗迹的氢柱密度和消光的统计表

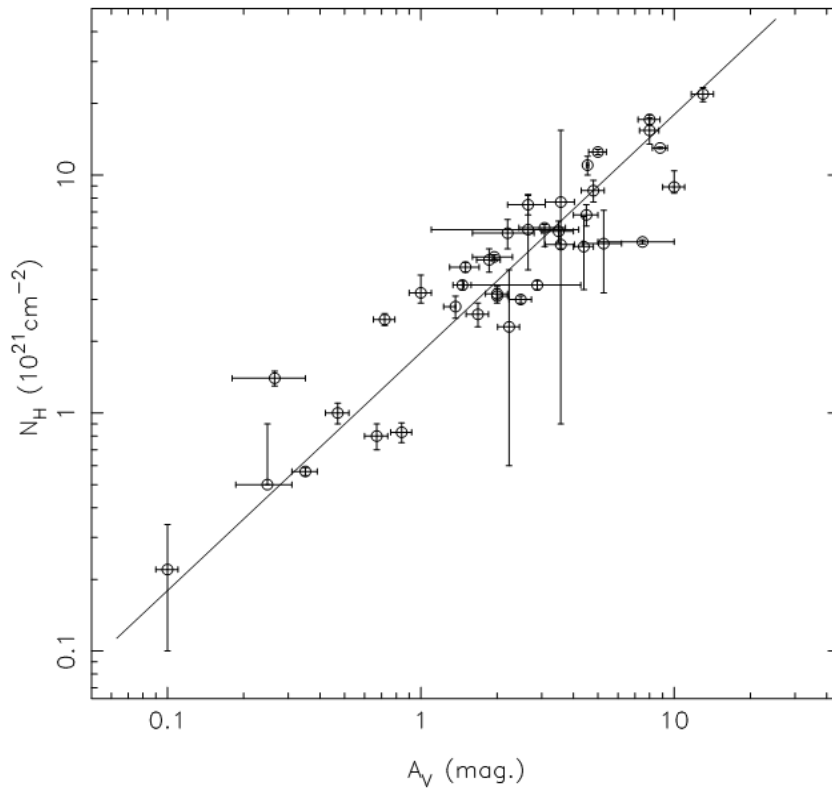
SNR 名称	N_H (10^{21}cm^{-2})	模型	A_v	方法
G4.5+6.8	5.7 ± 0.8	PL	2.2 ± 0.6	spectra
G6.4-0.1	$5.1^{+0.8}_{-0.2}$	NEI	3.57 ± 0.47	H_α/H_β
G11.2-0.3	$21.9^{+1.4}_{-1.6}$	NEI	13 ± 1.3	Fe II Ratio
G13.3-1.3	1.0 ± 0.1	Two temperate	0.47 ± 0.05	H_α/H_β
G34.7-0.4	$8.9^{+2.3}_{-0.5}$	NEI	10 ± 1	--
G39.7-2.0	$5.9^{+2.3}_{-1.9}$	PL	2.65 ± 1.55	H_α/H_β
G43.3-0.2	$5.24^{+0.10}_{-0.11}$	Two-CIE	7.5 ± 2.5	--
G49.2-0.7	17.1 ± 0.8	PL	8.0 ± 0.8	--
G53.6-2.2	$7.7^{+7.7}_{-6.8}$	TP	3.57 ± 0.47	H_α/H_β
G54.1+0.3	$15.4^{+2.0}_{-1.9}$	TB	8.0 ± 0.7	--
G65.3+5.7	1.4 ± 0.1	--	0.265 ± 0.085	H_α/H_β
G65.7+1.2	2.3 ± 1.7	BB+PL	2.23 ± 0.22	R-D
G67.7+1.8	5.15 ± 1.95	TP	5.27 ± 0.93	H_α/H_β
G69.0+2.7	3.0 ± 0.1	PL	2.48 ± 0.25	H_α/H_β
G74.0-8.5	$0.5^{+0.4}_{-0.0}$	CERSM	0.248 ± 0.062	R-D
G78.2+2.1	11 ± 1	STTE	4.55 ± 0.05	H_α/H_β

G89.0+4.7	$3.1^{+0.3}_{-0.2}$	Spectral	$2^{+0.2}_{-0.0}$	Near IR color
G94.0+1.0	13 ± 0.1	On-Off method	8.8 ± 0.6	EM
G109.1-1.0	$6.0^{+0.2}_{-1.0}$	Spectral	3.08 ± 0.64	H_{α}/H_{β}
G111.7-2.1	12.5 ± 0.3	BB	5.0 ± 0.4	S II ratio
G116.9+0.2	$7.5^{+0.8}_{-0.7}$	Spectral	2.65 ± 0.45	H_{α}/H_{β}
G119.5+10.2	2.8 ± 0.3	PL+Thermal	$1.37^{+0.00}_{-0.14}$	Far-IR emission
G120.1+1.4	4.4 ± 0.5	PB	1.86 ± 0.20	NS
G130.7+3.1	4.53 ± 0.09	PL+TP	1.95 ± 0.35	H_{α}/H_{β}
G166.0+4.3	2.6 ± 0.3	RS	1.68 ± 0.17	H_{α}/H_{β}
G180.0-1.7	$2.47^{+0.15}_{-0.14}$	BB	0.72 ± 0.07	H_{α}/H_{β}
G184.6-5.8	3.45 ± 0.15	--	1.46 ± 0.12	S II +2200Å
G189.1+3.0	5.8 ± 0.6	--	3.5 ± 0.5	--
G205.5+0.5	0.8 ± 0.1	--	0.67 ± 0.07	H_{α}/H_{β}
G260.4-3.4	4.1 ± 0.2	BB	1.5 ± 0.2	--
G263.9-3.3	0.22 ± 0.12	RS	0.10 ± 0.01	R-D
G266.2-1.2	3.45 ± 0.15	BB	2.88 ± 1.40	EM
G284.3-1.8	5.0 ± 1.7	PL	4.4 ± 0.4	--
G292.0+1.8	3.17 ± 0.15	PL	2.0 ± 0.2	--
G315.4-2.3	$3.2^{+0.6}_{-0.3}$	PL	1.0 ± 0.1	--
G320.4-1.2	8.6 ± 0.9	PL	4.8 ± 0.5	--
G327.6+14.6	0.568 ± 0.021	TP+PL	0.35 ± 0.04	--
G332.4-0.4	6.8 ± 0.7	Nebula NEI	4.5 ± 0.5	--
G332.5-5.6	0.83 ± 0.08	RS	0.84 ± 0.08	H_{α}/H_{β}

模型说明:

AE: 吸收边缘模型 (Absorption Edge model), BB: 黑体模型 (Blackbody), CERSM: Combined Edge Region Spectral Model, EM: Emission Measurement, NEI: non-equilibrium ionization model, NS: near stars, PB: Pure Bremsstrahlung model, PL: Power-Law, R-D: Reddening vs. distance plot, RS: Raymond-Smith model, STTE: single-temperature thermal emission, SII+Å: average of the two values obtained from the SII emission line ratio and 2200 Å interstellar absorption, TB Thermal bremsstrahlung TP: Thermal Plasma, Vmekal: thin thermal model with variable cosmic abundance.

附录 4 银河系内氢的柱密度和消光的关系图



附录 5 将附录 4 所得关系用来求银河系内的 3 个超新星遗迹的距离

SNR Name	N_H 10^{21} cm^{-2}	Our A_V mag.	Other's A_V mag.	m mag.	M mag.	Our dist. kpc	Other's dist. kpc	method
Tycho 1572	4.4 ± 0.5	2.60 ± 0.19	1.86 ± 0.2	-4.25 ± 0.25	-19 ± 0.3	2.69 ± 0.11	2.7 ± 1.0	HI abs.
SN1006	0.568 ± 0.02	0.336 ± 0.001	0.35	-7.75 ± 1.75	-19 ± 0.3	1.52 ± 0.14	2.18 ± 0.08	SVPM
Kepler	5.7 ± 0.8	3.4 ± 0.3	2.7 ± 0.3	-3.0 ± 0.5	-19 ± 0.3	3.31 ± 0.02	2.9 ± 0.4	SVPM

注: (1) SVPM: 激波速度和自行运动 (2) 表中第三列的消光值是通过应用我们的关系式 $N_H / A_V = (1.69 \pm 0.07) \times 10^{21} \text{ cm}^{-2} \text{ mag}^{-1}$, 从第二列氢的柱密度值得到的。 (3) 我们使用 $M - m = 5 - 5 \log d - A_V$ 关系式得到从别人测得的视星等和绝对星等得到第七列超新星遗迹到我们的距离。

致 谢

在这硕士论文完成的时刻，想起即将毕业离开学习生活了三年的北师大天文系，实在有太多的感慨以至于一时想不起从何说起。要感谢的人很多，包括所有在这期间关心、支持和帮助过我的老师、同学和朋友们。我在这里对他们表示衷心的感谢并送上最美好的祝愿。

首先，感谢我的导师李庆康教授。他帮助我从基本的天文知识起步，逐渐适应现在的科学研究，最终完成这篇论文。李教授学识渊博，治学严谨。他讲述的研究生课程内容丰富，思路清晰，为我以后的研究打下了良好的基础。对待全校的公共课李老师也充分准备，力求生动精彩。他的这种认真负责的态度对我是一种无形的教育，产生更深刻更深远的影响。李老师要求我把做人的道德放在首位，科研上要足够的刻苦。他对我生活上无微不至的关怀令我感动。为我未来的出路出谋划策。李老师的慷慨资助让我摆脱了生活上的困窘。李老师充分尊重我的个人选择，给予了我足够的自由，给我创造了宽松的科研、生活环境。总之，李老师为我付出了很多心血，给了我莫大的关怀和帮助。感激之情溢于言表！

同时，要感谢我的联合培养导师田文武研究员。从 2010 年暑假认识田老师至今，他一直指导我做与超新星遗迹有关的研究。田老师给了我自由宽松的学术氛围。田老师耐心的讲解、清晰的思路、幽默的语言对我的学习研究起了重要作用。他鼓励我出国开会，正是那次 IAU 的会议让我近距离接触到了国际水平的天文学家。这无疑激发了我对天体物理的热爱。田老师鼓励我在学术会议上作报告。至今还清晰的记得第一次在会上作报告的紧张心情。他细心的指出毕业论文初稿里的错误，帮助完善。没有他的悉心指导，这个论文工作是没法完成的。他不厌其烦地教导我如何用科学的方法做科研，并非常乐意地与我分享他在科研过程中遇到的各种有意思的事。当然，有时候也有误解。开始时田老师让我做一些统计工作。当时心里感觉这工作没多大用途，后来才慢慢感觉到它的意义和价值。同时，田老师在生活上给予了我无私的关心和帮助。借此机会向田老师致以我最诚挚的谢意！

特别感谢同组的朱辉同学。他基础扎实、思维敏捷。和他的讨论使我受益很多。他给了我很多的帮助。有了他的帮助，这篇文章才顺利完成。感谢同组的吴丹师姐的帮助。

其次，要感谢姜碧沔老师和她带领的团组。姜老师给了我很多热情的帮助。每次向姜老师请教问题，她都能给予清晰满意的回答。姜老师积极帮助我写推荐信。在姜老师的组会上学习和了解了很多其他方向的研究进展。感谢该组田浩、刘佳明同学，与他俩的讨论使我对问题的理解逐步深入。感谢该组的高健老师、杨明师兄、陈丙秋师兄、聂俊丹师姐。

感谢天文系的付建宁老师、朱宗宏老师、张同杰老师、陈黎老师、赵娟老师、陈阳老师、孙艳春老师、杨志良老师、毕少兰老师、杨静老师、张燕平老师及其他老师三年来给予我的谆谆教诲和学习生活上的无私关心、支持和帮助；感谢张竹梅老师、张琳老师、魏静萍老师和吕卫青老师，对我平日工作生活的关心帮助。感谢戴岩同学即时通知我有关的

信息。感谢毛春花、李艳艳、于浩然、曹鑫同学。感谢学长汪浩、陈云、曹硕、张明建、赵开羿、李游、黄跃、肖雁琴、李春、武朝剑、李坦达、姜晨、陈荣、杨小虎、刘康、李兆升、吴建清、卢利根以及天文系的其他同学，不会忘记与你们相处的每一个难忘瞬间以及在北师大生活的点点滴滴；感谢天文系所有师生营造的一个美好的家。

感谢国家天文台的韩金林研究员和他领导的团队。感谢高旭阳师兄的热情帮助，感谢洪涛、王陈、王伟、文中略、王鹏飞。感谢徐钧、白建勇、董斌、温雅宏、韩军、许文峰同学。感谢南京大学的陈阳老师。

最后，我要深深地感谢二十多年来一直关心支持照顾我的父亲、母亲和姐姐，感谢你们给予我的一切！由衷地感谢我的女朋友陈丽对我生活和工作上的巨大支持！没有她的帮助和鼓励，这篇论文也是无法得以顺利完成的。感谢所有其他限于篇幅没有提及的同学和朋友们.....

苏洪全

2012 年 4 月