

中国科学院国家天文台天体物理丛书

天体物理中的微波谱线诊断

曾 琴 毛瑞青 裴春传 著



中国科学技术出版社



中国科学院国家天文台天体物理丛书

天体物理中的微波谱线诊断

曾 琴 毛瑞青 裴春传 著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

天体物理中的微波谱线诊断/曾琴,毛瑞青,裴春传著. —北京:
中国科学技术出版社, 2006.9

(中国科学院国家天文台天体物理丛书)

ISBN 7-5046-4411-0

I.天... II.①曾...②毛...③裴... III.天体物理学-微波-诊断
IV.P141.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第084461号

自2006年4月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书。

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街16号 邮政编码:100081

电话:010-62103210 传真:010-62183872

科学普及出版社发行部发行

北京长宁印刷有限公司印刷

*

开本:787毫米×1092毫米 1/16 印张:17.5 字数:280千字

2006年12月第1版 2006年12月第1次印刷

定价:48.00元

《中国科学院国家天文台天体物理丛书》编委会

主 编 王绶琯

副主编 赵 刚 邹振隆 李宗伟

内 容 简 介

微波窗口的逐步被打开,展示给人们一个不为光学仪器观测所知的冷宇宙。本书阐述如何透过在源区形成后,经长距离输运过程到达观测仪器的纷繁多姿的原子、离子和分子微波谱线对有关天体的物理状态作出诊断。重点是如何通过谱线观测取得的结果来了解宇宙中原子、离子和分子的分布;研究低质量星与大质量星的形成过程;分析拱星包层内中央星的情况和探讨河外星系物理等。本书涉及近 140 种(不包括稀有同位素取代物,但 H 的同位素 D 的取代样品例外)分子样品的上千条谱线。谱线的辐射机制有热与受微辐射之分。微波受微辐射线(MASER)光度高、谱线窄,提供了恒星诞生与死亡的珍贵信息,对于河外活动星系核的研究更有其独到的功能。CO 分子广泛分布,且丰度仅次于氢分子,它和它的稀有同位素分子的转动热线在分子天文学的研究中倍受关注。

处于学习阶段的读者可能被要求对某一频率的微波谱线作观测,本书希望读者不仅了解谱线的频率而且知道是哪个原子、分子或离子的哪两个能级之间的跃迁导致谱线的生成以及谱线形成所需要的物理条件。进入研究阶段的读者可能想要研究某个或某类天体,本书希望读者知道应选择哪些原子、分子或离子的哪些谱线进行观测,并通过在适当模型下的理论计算来达到他们的研究目标。

本书比较适合已有量子力学及其在原子与分子结构方面应用的基本知识的读者。为方便读者,书后备有附录,以便查阅。

《中国科学院国家天文台天体物理丛书》序

我国组织出版系列的天体物理丛书，滥觞于二十几年前戴文赛先生的倡导，当时改革开放伊始，为了适应研究生制度的恢复，他策划了一个天体物理各个分支学科配套的丛书撰写方案，这在当时以及接下来的一段时间里，为我国天文学的重整旗鼓起了重要的作用。随后的这许多年中，学科高速发展，包括研究生教材在内的国际上的天文佳作源源引进，加上我国科学图书出版的种种变数，使我国天体物理书籍的出版不断自我调整以立足于新的背景，同时各自不断寻求可供依托的机遇。其间逐步淡化了系列化，突出了个性化，这是必然的，也可说是一种进步。但也增加了课题领域的随机性质，少了整体布局。

现在，在断的接局下，国家天文台着手组织一系列天文学丛书，我们接受要托编纂天体物理部分，为了和前面的衔接，这部丛书侧重于专著形式，首先邀请为我国天体物理各个不同分支的研究打下基础的主要科学家们，把他们的长期和累整理成有自己特色的专著。我们相信，这些著作，对于目前站在这些基础上工作和培养新生力量的学者们，将是有益的参考。同时它们也将表征着一个时期我国天体物理著述硕果的收结。

总结同时又是开端的准备，我们期待着在若干年后的新版和断辑里，将看到又一个新的开始。

王绶琯

2002年1月于北京

前 言

宇宙在全波范围内,以谱线或连续谱的形式向我们不断发送丰富的信息。当代科学的发展正从地面和空间向全波接收宇宙信息挺进。由于各波段谱线形成条件不同,可诊断天体的物理条件和接收系统之技术的绝然不同,科学家在不同波段上有分工地或逐段地攻克全波观测这样一个目标。

射电望远镜大致工作于 15MHz ($\lambda \approx 20\text{m}$)到 600GHz ($\lambda \approx 0.5\text{mm}$)的大气窗口范围内。射电窗口首先在较长波段被打开,此后随着技术的发展,打开的才是微波波段。本书主题定位于通过原子、离子和分子射电谱线(但以分子微波谱线为主)对有关天体的物理条件进行诊断。微波窗口涉及的跃迁所对应的上下能级的差大约从 $7 \times 10^{-4} \sim 29\text{ K}$,由于该窗口的逐步被打开,20 世纪 50 年代后人们才得以了解不为光学仪器观测所知的冷宇宙。

在微波窗口可以接收到连续谱和谱线,本书所关注的是天体物理的微波谱线诊断。1951 年 Ewen & Purcell 在微波波段观测到第一条天文谱线。那是一条波长为 21cm 的发射线,是由处于氢原子基态的两个精细结构子状态间的跃迁而形成的。此后射电天文学家通过这条谱线取得了银河系以及河外星系的原子云的许多信息。然而原子只占中性气体的不到一半,其余都是分子。自从第一条星际分子微波谱线(自由基 OH 的 $\lambda = 18\text{cm}$ 双重线跃迁)于 1963 年被 Weinreb 等观测到,到 20 世纪末已有近 140 种(不包括稀有同位素取代物,但 H 的同位素 D 的取代样品例外)分子样品的上千条谱线在星际空间和拱星包层中通过微波窗口被观测到。这些谱线的辐射机制有热与受激辐射之分。微波受激辐射线(MASER)光度高、谱线窄,提供了恒星诞生与死亡的珍贵信息,对于河外活动星系核的研究更有其独到的功能。星际 CO 分子因广泛分布,且丰度仅次于氢分子,它和它的稀有同位素分子的转动谱线在分子天大学的研究中倍受关注。1959 年 Kardashev 提出在 H II 区可以观测到射电复合线的预言之后,射电复合线不仅在 H II 区而且在 H II 区临近的部分电离区、行星状星云和河外星系都已观测到。原子、分子和离子的微波谱线为我们提供了大量星际空间、拱星包层以及河外星系中各种原子、分子和离子过程的知识。

微波谱线可以诊断有关天体的基本物理条件如动能温度、总粒子数密度、速度、磁感应强度和有关样品的丰度等。对于分子云与恒星形成区取得谱线数据后，要通过适当的近似方法来求解统计平衡辐射转移方程，从而得到上述基本物理条件。最简单的但又是相当偏离天体真实情况的是局部热平衡（LTE）近似。大速度梯度（LVG）和微观湍流（microturbulent）近似分别反映两种极端，而真实的分子云的情况介于真中。两种方法至今在某些情况下仍然很有用，但是它们正逐渐被更灵活的使用 Monte Carlo 技术或 Λ -迭代的辐射输运程序所取代。本书的重点是如何通过谱线观测取得的结果来了解宇宙中原子、离子和分子的分布；研究低质量星与大质量星的形成过程；分析拱星包层内中央星的情况和探讨河外星系物理等。

处于学习阶段的读者可能被要求对某一频率的微波谱线作观测，本书希望读者不仅了解谱线的频率而且知道是哪个原子、分子或离子的哪两个能级之间的跃迁导致谱线的生成以及谱线形成所谱要的物理条件。进入研究阶段的读者可能想要研究某个或某类天体，本书希望读者知通应选择哪些原子、分子或离子的哪些谱线进行观测来达到他们的研究目标。本书希望读者能透过在源区形成后，经长距离输运过程到达观测仪器的纷繁多姿的谱线对天体的物理状态做出诊断。

本书比较适合已有量子力学及真在原子与分子结构方面应用的基本知识的读者。为方便读者，书后备有附录，以便查阅。

目 录

第一章 天体的原子微波谱线	(1)
1.1 氢原子的微波谱线——H 的 21 cm 线	(1)
1.1.1 21cm 发射线的观测	(2)
1.1.2 21cm 吸收线的观测	(2)
1.1.3 H I 柱密度	(3)
1.1.4 氢原子与分子的相互关系	(4)
1.1.5 H I 21cm 线的 Zeeman 效应	(5)
1.1.6 河外 H I 21cm 线	(6)
1.1.7 其他有关研究课题	(6)
1.2 其他原子射电谱线	(8)
第二章 射电复合谱线	(10)
2.1 射电复合线的研究基础	(10)
2.1.1 射电复合线的非 LTE 辐射转移方程	(10)
2.1.2 辐射转移方程的求解	(11)
2.1.3 离化气体云的光深	(12)
2.1.4 射电复合线的外形	(13)
2.2 射电复合谱线提供的物理信息	(14)
2.2.1 由射电复合谱线观测量推导 T_e	(14)
2.2.2 He 复合线的观测与 He 丰度	(14)
2.2.3 C 与其他重元素的复合线区与分子云	(16)
2.2.4 H II 区的射电复合线	(17)
2.2.5 河外射电复合线	(19)
第三章 星际与拱星微波受激辐射 (MASER, 脉泽)	(20)
3.1 辐射转移和统计平衡方程	(21)
3.2 SiO 脉泽	(24)
3.2.1 恒星形成区的 SiO 脉泽	(25)
3.2.2 拱星包层的 SiO 脉泽	(27)
3.3 OH 脉泽	(28)

3.3.1 星际 OH 脉泽	(30)
3.3.2 拱星包层的 OH 脉泽	(30)
3.3.3 OH 脉泽的偏振与磁场	(31)
3.4 H ₂ O 脉泽	(31)
3.4.1 水的 22GHz 及其他脉泽	(31)
3.4.2 22GHz H ₂ O 脉泽的抽运机制	(34)
3.4.3 22GHz H ₂ O 脉泽的时变	(34)
3.5 CH ₃ OH 脉泽	(35)
3.5.1 I 类 CH ₃ OH 脉泽	(36)
3.5.2 II 类 CH ₃ OH 脉泽	(38)
3.6 脉泽综合研究一例	(40)
3.7 河外巨脉泽	(44)
3.7.1 河外 OH 巨脉泽	(45)
3.7.2 河外 H ₂ O 巨脉泽	(46)
第四章 分子云与恒星形成及其微波谱线诊断	(48)
4.1 分子云与恒星形成的基本概念	(48)
4.1.1 分子云的基础知识	(48)
4.1.2 小质量恒星形成	(60)
4.1.3 大质量恒星形成	(65)
4.2 分子云中的微波谱线诊断方法	(75)
4.2.1 谱线的临界密度	(76)
4.2.2 物理条件的 LTE 近似方法诊断	(77)
4.2.3 物理条件的非局部热动平衡(NLTE)模型诊断	(88)
4.2.4 化学条件的诊断: 谱线巡测	(98)
4.3 CO 分子转动谱线: 银河系巡天与分子外向流	(108)
4.3.1 银河系中的 CO 转动谱线巡天	(108)
4.3.2 已探测到的 CO 转动谱线	(110)
4.3.3 从 CO 的转动谱线计算分子云物理量	(111)
4.3.4 高速分子外流	(115)
4.4 分子云概的常见研究手段	(119)
4.4.1 NH ₃ 的反演线	(119)
4.4.2 CS 分子转动谱线	(140)
4.4.3 HCO ⁺ 的转动线	(148)
4.4.4 CH ₃ CN 的转动谱线系	(157)

4.4.5 CH ₃ OH 的转动谱线系	(162)
4.4.6 HCN 和 CN 的超精细结构线	(167)
第五章 晚型星拱星包层	(175)
5.1 晚型星拱星包层的分子谱线	(175)
5.2 拱星包层谱线轮廓及其提供的结构信息	(176)
5.2.1 OH-1612MHz 脉泽线轮廓	(176)
5.2.2 CO 谱线轮廓	(178)
5.2.3 HCN $J=1 \rightarrow 0$ 超精细谱线轮廓	(179)
5.3 拱星包层基本参数的谱线诊断	(180)
5.3.1 分析包层谱线的模型	(180)
5.3.2 毫米与亚毫米波 CO 谱线	(181)
5.3.3 红外 CO 谱线	(182)
5.4 各种脉泽提供的拱星包层的信息	(184)
第六章 河外星系中的微波谱线诊断	(185)
6.1 河外星系 CO 巡测	(185)
6.1.1 单天线 CO 巡测	(186)
6.1.2 干涉阵 CO 巡测	(190)
6.2 星系中分子气体性质的分子谱线诊断	(196)
6.2.1 气体质量: CO 积分强度与 H ₂ 质量间的转拱因子	(196)
6.2.2 密度与动能温度——诊断工具: 谱线强度比	(199)
6.3 星系中的致密分子气体	(203)
6.3.1 HCN	(203)
6.3.2 NH ₃	(204)
6.3.3 其他分子谱线	(206)
6.3.4 星系中的层际化学	(206)
6.4 星系中的 C 原子谱线及射电复合线	(214)
6.4.1 CI/CII	(214)
6.4.2 H 射电复合线	(216)
6.5 高红移星系中的微波谱线观测	(221)
6.6 CO 分子谱线 SED	(224)
附录 星际与拱星的原子、离子和分子及其微波谱线概论	(227)
A.1 谱线基础	(227)
A.2 原子谱线	(231)
A.3 射电复合线	(234)

A.4 双原子分子.....	(235)
A.5 多原子分子.....	(240)
A.6 微波受激发射.....	(242)
A.7 星际与拱星分子.....	(242)
参考文献	(244)

第一章 天体的原子微波谱线

氢是宇宙中最丰富的元素,论质量,氢在宇宙中约占 73%,论原子数约占 92%。氢元素在宇宙中可能以氢原子、氢离子或氢分子形式存在,还可以与其他元素组成分子。本章主要讨论如何通过观测对氢原子微波谱线的观测与研究,了解天体物理条件 (Didkey & Lockman 1990),同时也讨论其他有关原子微波谱线的研究方法和意义。有关天体原子微波谱线的基础知识可参考附录 A.1 和 A.2 节。

1.1 氢原子的微波谱线——H 的 21 cm 线

H 原子中的电子处于基态 [$n=1, l=0$ 即 $(1s)^1$], 若电子与质子的自旋互相平行, 处于超精细分裂双能级的高能级 $(1) ^2S_{1/2} F=1$; 若电子与质子的自旋互相反平行, 处于超精细分裂双能级的低能级 $(0) ^2S_{1/2} F=0$ 。H. C. van de Hulst 1945 年首先指出在不太靠近热星的星际空间, 氢原子相对丰富, 且大多数处于原子基态, 因此可以探测到跃迁 $^2S_{1/2} F=1 \rightarrow 0$ (图 A.1)。该谱线 1950 年由物理学家在实验室生成, 并证认其频率 ν_{10} 是 1420.405MHz, 对应的波长为 21.11cm。1951 年 3 月, 哈佛大学 Ewen 和 Purcell 报道在星际空间探测到这条 H 谱线, 同年 5、6 月荷兰、澳大利亚科学家也报道了对这条谱线的成功观测。

基态氢原子 21cm 超精细结构线是其唯一的射电谱线。在 Gaussian 轮廓下, 21cm 线在谱线中心的不透明度 τ 由 (A.35) 式推演得

$$\tau = 5.2 \times 10^{-19} \frac{N_H}{\Delta \nu T_s} \quad (1.1)$$

其中 T_s 是自旋温度 (K), $\Delta \nu$ 是谱线的半峰全宽 (km s^{-1}), N_H 是 H 的柱密度 (cm^{-2})。典型情况下 $T_s \geq 50\text{K}$, $\Delta \nu \approx 10\text{km s}^{-1}$, 线中心没达到不透明, N_H 便要大于 10^{21}cm^{-2} 。通常 21cm 线具有中等或偏低的不透明度, 它的一个谱线有多个线分量, 包含令人炫目的运动学细目。

1.1.1 21cm 发射线的观测

氢原子在银河系中无所不在, 21cm 跃迁的低能量、长寿命及其在多数方向激发温度高于射电连续谱亮温度的特性, 使得它的发射线虽然透明度低, 仍能在每个方向探测到。21cm 线是射电天文中最强的热谱线。它的亮温度的峰值从不低于 0.5K, 在低纬度处会高达 125K。

一个连续口径单天线望远镜在 1 km s^{-1} 分辨率下, 噪音为 $\Delta T_b \approx 0.5t^{-1/2}\text{K}$ (t 是积分时间, 单位为秒)。一个现代单天线望远镜一分钟的积分, 对银极信噪比是 15, 对银道面可超过 1500。如果用射电干涉仪或综合孔径, 例如以 VLA 观测 21cm 发射线, 在 1 km s^{-1} 通道内亮温度噪音为 $\Delta T_b \approx 100 \times [\text{HPBW}(\text{arc min})]^{-2} (t^{-1/2})\text{K}$ 。由此可见, 提高综合孔径望远镜的角分辨率会降低望远镜对表面亮度的灵敏度。若 HPBW (天线射束的半峰全宽) 在 21cm 为 $1'$, 取得来自直径 $1'$ 的云中 1K 银河系 H I 21cm 线的 3 σ 结果, 需要 6 个小时。

射电望远镜在各非主瓣方向的旁瓣响应会影响 H I 21cm 线的发射测量, 这就是所谓杂散辐射 (stray radiation) 效应。大望远镜的设计中, 正力求减小杂散辐射。

如果在视线方向前面是一个高不透明度的冷云, 其后则是一个低不透明度的热云, 那么观测到的是一个自吸收的谱线轮廓。如果冷、热云的相对位置反过来, 观测到的将是两个谱的叠加。

1.1.2 21cm 吸收线的观测

指向亮连续射电源观测 H I 21cm 线可能得到吸收线。速度为 ν 的相对连续谱信号水平的 21cm 线亮温度 T_b 混有发射与吸收,

$$\Delta T_b = [T_s - T_0][1 - e^{-\tau(\nu)}] \quad (1.2)$$

其中 T_0 是连续源对射束的平均亮温度, T_s 是自旋温度 (附录 A.2)。如果 $T_0 > T_s$ 且光深 τ 又高, 则吸收占优势。多数望远镜测量点连续源在 21cm 的平均亮温度

$$T_0 \approx 100 \text{ S(Jy)} [\text{HPBW}(\text{arc min})]^{-2} \quad (1.3)$$

典型的亮河外射电连续源有几个 Jy, 假设单天线望远镜的射束约 $3'.2$, 因此 T_0 只有几十 K (特殊方向除外)。于是 T_0 要比典型的 T_s 值小, 单天线即使指向亮连续源也是测到一个被吸收降低了的发射谱线轮廓。

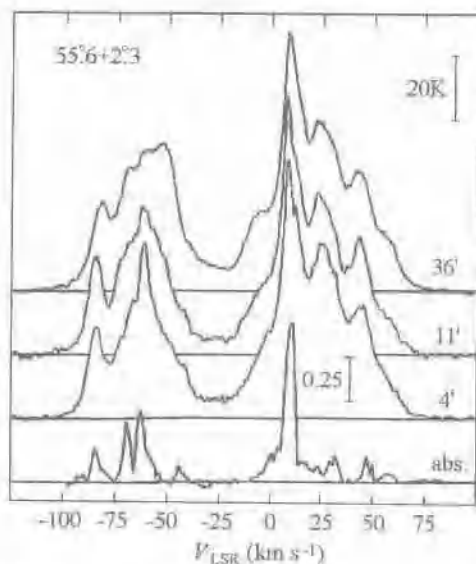


图 1.1 低银纬位置的 21cm 的发射与吸收谱线轮廓 (Dickey & Lockman 1990)

图 1.1 的指向是低银纬 $(l, b) = (55.6, +2.3)$ 。三条发射线的角分辨率分别为 36', 11' 和 4'。吸收线是对一个张角小于 0."1 的河外源测量的。发射线以亮温度为纵坐标, 并绘出 20K 标记。吸收线的轮廓已被倒置, 纵坐标是 $1 - e^{-\tau} \approx \tau$, 并绘出 $\tau=0.25$ 的标记, 它是用 VLA 经 1hr 积分得到的。虽然角分辨率不同, 三条发射线的差别不很大。吸收线却与它们有较大的差别, 这种差别并非渊源于角分辨率而是由于吸收谱偏重于最冷的 H I 区。

1.1.3 H I 柱密度

从 21cm 线的观测, 可以推导出的一个主要的物理量是 H I 的总柱密度或在特定速度、特定分量的 H I 的柱密度。如果在研究方向的 21cm 线是光学薄的, 柱密度可通过亮温度对速度的积分得到(A.37 式)。

若 T_b 只不过几十度或更低, 光学薄的假设不算太差。在对光深作一级修正时, 常对谱线采用一个常数 T_s 。在分析发射线的大尺度巡天数据时, 常采用的 T_s 值在 120~150K 范围内。采用光学薄近似, 在无需计入自吸收的情况 (a) 下, N_H 值会被低估了 10%; 在有前景冷云需要考虑自吸收的情况 (b) 下, 光学薄假设会使 N_H 值低估了 20%。作为修正, 若假设气体是等热的, $T_s=125K$, 对 (a) N_H 会被高估 5%; 对 (b) 会被低估 10%。

在多数方向, 若从光学薄出发推算所观测发射谱的 N_{H} 值, 为计入自吸收通常应乘 1.1~1.3 的因子。平均 H I 柱密度 N_{H} 值的百分比分布和平均 H I 柱密度的在银纬上的分布见图 1.2 和图 1.3。

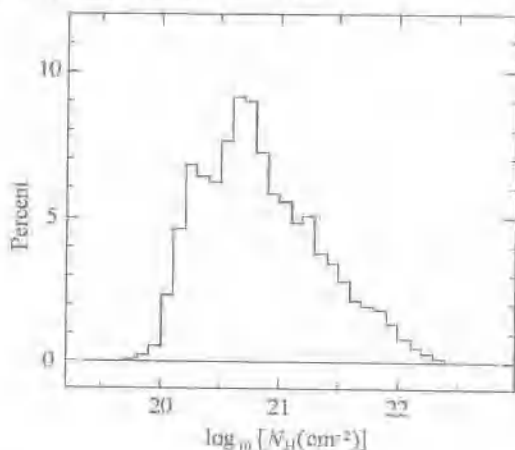


图 1.2 H I 天空的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的平均 H I 柱密度 N_{H} 值的百分比分布
(Dickey & Lockman 1990)

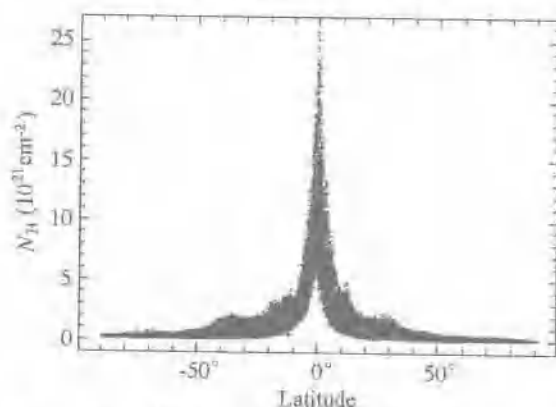


图 1.3 银纬上 $1^\circ \times 1^\circ$ 的平均 H I 柱密度的分布 (Dickey & Lockman 1990)

1.1.4 氢原子与分子的相互关系

H 的 21 cm 线为了解宇宙氢原子分布提供有效的途径, 科学家通过发展综合孔径技术, 大力开展巡天工作 (例如 Hartmann & Burton 1997, Higgs 1999, Dickey *et al.* 1999, 等) 以追求对该研究目标的更深入、更全面和更

精细地认知。然而宇宙氢原子分布,并不等同于宇宙氢分子、氢离子的分布。图 1.4 描述 H_2 和 H 的表面密度与银心距离 R 的函数关系[参考 Dame(1993)]。其中 H 的表面密度数据源于对 H 的 21 cm 线的直接观测。至于冷宇宙的 H_2 , 由于没有可供直接观测的射电谱线, 它的数据则是通过对 CO 分子的观测, 间接推算得到的。从 CO 推算 H_2 的表面密度, 用了一个熟知的 X -因子, $X = N(H_2) / \int T_b(CO) dv$ 单位为 $cm^{-2}/(K km s^{-1})$ 。用在图 1.4 的 X 值为 $2.3 \times 10^{20} cm^{-2}/(K km s^{-1})$ 。如果采用 X 值的近期研究结果 $(1.7 \sim 1.9) \times 10^{20} cm^{-2}/(K km s^{-1})$, 那么图 1.4 中, H_2 的柱密度在任何位置都低于原子氢。利用这个较低的 X 因子, 银河系的总 H_2 质量为 $1.0 \times 10^9 M_\odot$, 而总 H 质量为 $5 \times 10^9 M_\odot$ 。

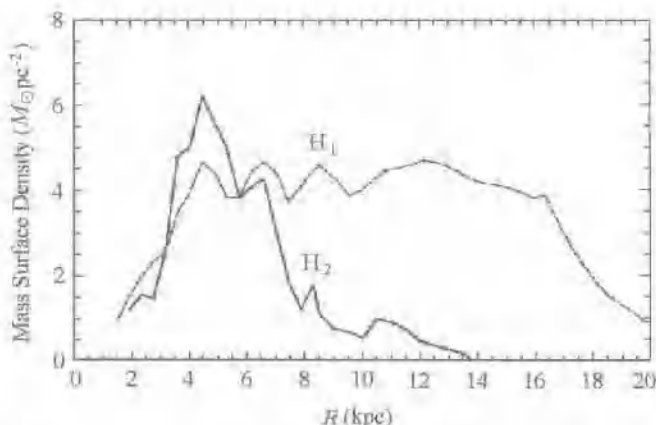


图 1.4 H_2 和 H 的表面密度与银心距离 R 的函数关系(参考 Dame 1993)

1.1.5 H I 21cm 线的 Zeeman 效应

鉴于氢原子在银河系中无所不在和 H I 21cm 线是射电天文中最强的热谱线, 自然要研究通过 H I 21cm 线的 Zeeman 效应来测星际磁场的可能性。但是星际磁场在视线方向的分量只会使 21cm 线的两个圆偏振产生很小的频率差 $2.8 Hz/(\mu G)^{-1}$ 。典型的几个 μG 的星际场造成的 Zeeman 谱线劈裂比 H I 21cm 线的线宽要小两个数量级。即使 $B_{||}$ 相对强, 例如有 $10 \mu G$, 圆偏振的较差信号幅度仅为总发射亮度的 10^{-3} , 因此测量 Zeeman 劈裂所需时间是测量 H I 21cm 线的 10^6 倍。这一切说明了测量 H I 21cm 线的 Zeeman 效应的难度。经过巨大的努力(例如 Troland & Heiles 1982, Heiles C. 1987), 一些望远镜能对圆偏振信号作仔细定标, 并能对一个频