

ISSN 1000-8349

天文学进展

PROGRESS IN ASTRONOMY

第 6 卷

Vol. 6

第 3 期

No. 3

1988

天文学进展编辑部编辑
知识出版社出版

PROGRESS IN ASTRONOMY

(Quarterly)

Vol. 6, No. 3 Sept. 1988

Edited by Editorial Board of Progress in Astronomy
(Addressed to 80 Nandan Road, Shanghai,
People's Republic of China)

Published by Knowledge Press
(Addressed to 650 Gubei Road, Shanghai)

Printed in Shanghai 12th Printing Factory

Distributed by Shanghai Distribution Office of
Xinhua Bookstore

天 文 学 进 展

第 6 卷 第 3 期

目 录

述 评

- 太阳耀斑中快速射电起伏的高时间分辨率研究..... 傅其骏 金声震(171)
- 天体 H_2O 分子谱线的观测和研究..... 向德琳 俞志尧(180)
- VLBI 天体物理课题概观 南仁东 吴盛殷(192)
- 对射电源的 VLBI 巡天..... 康连生 吴盛殷 南仁东(204)
- 星系相互作用..... 黄松年(214)
- 地球自转速率在千年尺度下长期变化的研究..... 谢丽林 赵 铭(222)
- 星表零点改正的确定工作..... 魏 学(232)

研 究 简 讯

- 一种工程型氢原子钟..... 中国科学院上海天文台氢钟组(243)

PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 6 No. 3

CONTENTS

REVIEWS

- Radio Astronomical Investigation with High Temporal Resolution on Rapid
Fluctuations in Solar Flares.....*Fu Qijun, Jin Shengzhen* (179)
- The Observations and Studies about the Spectra of Celestial H_2O Molecule
..... *Xiang Delin, Yu Zhiyao* (191)
- General Survey of Essential Studying Activities in VLBI-Astrophysics
..... *Nan Rendong, Wu Shengyin* (203)
- VLBI Surveys of Radio Sources
.....*Kang Liansheng, Wu Shengyin, Nan Rendong* (212)
- Interacting Galaxies..... *Huang Songnian* (221)
- A Review on the Research of the Variation of Earth Rotation in Thousand
Year Scale..... *Xie Lilin, Zhao Ming* (231)
- Determinations of the Zero Points of Star Catalogues..... *Wei Xue* (242)

RESEARCH NOTES

- A Kind of Transportable Hydrogen Maser
..... *Hydrogen Maser Group, Shanghai Observatory Academia Sinica* (247)

太阳耀斑中快速射电起伏 的高时间分辨率研究

傅其骏 金声震

(中国科学院北京天文台)

提 要

本文综述了微波波段上太阳爆发精细时间结构研究方面的新进展和新动向。总结了我国从1981年以来在这一领域内取得的成果,并结合我国的条件,提出下一活动峰年中可能开展的观测及研究课题。

一、前 言

太阳耀斑辐射中快速起伏现象的探测,为研究耀斑过程中太阳大气磁等离子体结构和过程提供了一个极为有力的手段,近年来已引起普遍的重视。射电波段快速起伏的研究开始于六十年代,而毫秒级射电尖峰(我们用“尖峰”(spike)称时标为毫秒或数十毫秒的快速起伏,而用“脉冲”(impulse)称时标为秒或数十秒的起伏)尤其是微波波段毫秒尖峰(MMS)是近十年来发展极为迅速的太阳射电领域。它引起太阳物理学家兴趣的原因是:单个尖峰能在短至1 ms的时间内达到 10^{15} K的亮温度;它与具有重要意义的硬X射线爆发(HXB)密切相关;与耀斑过程中的电子加速过程紧密相关。人们在木星、土星、耀星射电及X射线辐射中也发现有快速变化,因而它也作为研究宇宙其他天体的快速高能过程提供了一个有利的样品。

已有若干文章^{[1], [2]}对MMS作了全面介绍,本文仅就这一领域目前国内、外新的成就和动向、我们已有的工作以及在下一太阳活动峰年中可能进行的研究课题等方面作一概括的叙述。

二、太阳射电爆发高时间分辨率研究的新动向

1. 可以归纳为如下几点

(1) 新的高时间分辨率、高频率分辨率、高灵敏度设备的出现。

(2) 取得了大量内容丰富包括多种信息的资料。这包括较高可靠性的频谱仪资料,极为珍贵的多波段共同观测的事件资料,特别是X射线的资料。尤其值得一提的是美国SMM卫星上的HXRBS,在29—500keV内有15个通道,时间常数为128ms,若以一个通道工作时可达

1988年2月1日收到。

5ms^[6]。

(3) 注意到快速起伏现象在全波段上的表现及相互关系,它在耀斑理论中的地位。它为太阳耀斑研究开创了一个全新的局面。

(4) 在机制探讨上,除原有的理论模型需要继续深入探讨外,更有从观测事例出发,提出与耀斑活动整体有关的模型。

2. 几个重要小组的工作

(1) 巴西Itapetinga射电天文台^[5]:该台有一具直径13.7米的毫米波天线,工作频率22GHz,44GHz(后来有变动),时间常数1ms,灵敏度0.03sfu。在22GHz可同时测左旋及右旋偏振,两波段同时使用时只能测强度。另有一7GHz偏振计,时间常数100ms作配合。从1979年开始,这一设备用30%的时间开展太阳毫米波段高时间分辨的低强度活动研究的观测。发现在厘米波-毫米波段的太阳爆发上存在丰富的短时标结构,有很多令人惊异的特征,它与整个太阳的活动性及硬X射线爆发密切相关。现分述如下:

(i) 发现毫米波段上超快速尖峰的重复率与爆发的平均流量成正比。Kaufmann等^[7]提出,爆发的能量注入是准量子化的可能的解释,这隐含着元爆发的思想。

(ii) 准周期振荡:发现一个爆发^[8]在22GHz、44GHz上的强度变化都有周期为1.5秒的振荡。前者为幅度变化5%,后者为20%并推迟0.3秒。这可解释为电子产生的回旋辐射受磁场变化的调制。

(iii) 微波尖峰与硬X射线爆发中尖峰之间存在时延^[8-11]。发现两者有密切关系。在尖峰出现的时间次序上存在令人感兴趣的构造。

(iv) 微爆发:文[14]、[19]发现持续时间约1秒、幅度约1sfu的微爆发,类似缩小了的1S型爆发。其形态仅是简单的上升和下降,还分为微脉冲型和微渐变型,它不同于形态复杂的快速结构。爆发脉冲相时的精细结构可能是众多的、以不同速率产生的微爆发的叠加。令人感兴趣的是硬X射线高灵敏度观测也发现了微爆发^[20],其峰值低于通常HXB 10—100倍,持续约1秒,大约每5分钟出现一个。它表明在日冕中脉冲电子被加速到20keV以上是很通常的现象,在日冕中是一种基本的(主要的)瞬间能量释放过程。两者可能存在某种联系。

(2) 瑞士天文研究所的研究工作:该所有一台名为“IKARUS”的0.11—1GHz多通道频谱仪^[3]。频距1MHz,Δf:1MHz,时间常数1ms,可同时测强度、圆偏振,每秒2000次取样,动态范围50db。正在研制中的新一代设备为0.1—2.0(4.0)GHz,1000通道,Δf为150kHz。所得重要结果如下:

(i) Benz^{[12], [13]}对分米波段的各种时间结构的爆发作了全面分析、研究。发现在分米波段存在丰富的快速尖峰结构,有成群的,也有离散的。发现在600例事件中,有36例只有尖峰辐射而没有慢爆发的背景。分米波尖峰多出现在脉冲相前。单一尖峰的频宽为中心频率的1.5%,约6—12MHz。Ⅲ型爆发中10—20%在靠近起始频率处有尖峰精细结构。在Ⅰ、Ⅳ型爆发中也发现有毫秒级精细结构,但认为不同于前者。一个事件可能由1000—10000个尖峰组成。

(ii) 与HXB的相关:文[15]发现分米波中所谓大群尖峰事件(DCIM)的71%与HXB有关^[23],而米波Ⅲ型爆发与HXB事件相关仅3%^[24],分米波Ⅲ型爆发与HXB的相关为

45%。

(3) 瑞士Bern大学应用物理研究所^{[4], [22]}: 有一个频率范围 $3470 \pm 100\text{MHz}$ 、30通道频谱仪, Δf 为 $0.5\text{—}30\text{MHz}$, 时间常数 5ms ; 另有多单频偏振计: 3.1GHz 、 5.205GHz , 时间常数 5ms ; 8.4 、 11.8 、 19.6 、 35.0 、 50.2 、 92.5GHz , 时间常数 100ms 。Stähli和Magun^{[21], [22]}发现在 3.2GHz 上大约13.4%的爆发有尖峰精细结构, 在 5.2GHz 为7.4%, 在 8.4GHz 仅0.2%。并发现持续为数秒小脉冲的基波和二次谐波的谐波结构。

3. 值得进一步讨论的几个问题

(1) 时延问题^{[8], [10], [11], [16], [17]}: 对快速结构中各射电波段峰值间的延迟及与HXB峰的延迟事例的分析已有多个。Takakura et al.(1983)^[25]分析了一个在射电及X射线(7.0 、 10.6 、 22 、 44GHz 和 $30\text{—}40\text{keV}$)同时有快速取样资料的爆发(至今只有几个), 发现在秒级结构中没有明显的相关, 而叠加在其上的精细结构几乎一一对应, 虽然各波段之间有时延。各观测事例都证明各种时标上时延关系是十分复杂的。有的向低频推迟, 也有的向高频推迟, 还有几乎一致的。有些时延与尖峰的幅度有关, 与离极大频率的距离有关。Costa et al.^[9]发现在一次爆发中, 22GHz 时间结构比HXB的推迟 $0.2\text{—}0.9$ 秒, 不同的爆发结构有不同的时延, 表明它们彼此是独立的; 22GHz 的偏振峰早于强度峰 $0.1\text{—}0.5$ 秒。至今尚未发现有射电峰先于HXB峰的事例。以上说明造成时延的原因是复杂的, 可能是由多个发射节点造成的卷积效应^[16], 也可能是微波发射源在变化磁场中运动的结果^[10], 或是传播效应及源本身固有的因素^[9]。倘若认为源由数目极多、彼此独立的小区域组成, 将使问题易于解释。至于某些微波与X射线之间长时间的推迟(若干秒), 则可能是因为两者起源于不同群的电子^[26]。总之, 无论从观测上和分析解释上, 仍需进一步的努力。基于不同条件下的时延现象可能起源于不同的原因, 因而在窄频段上(频谱仪)和宽频段上同时观测以及与其他波段上高时间分辨率的同时观测, 是十分必要的。

(2) 类周期性的振荡: Kaufmann^[7]认为, 微波尖峰辐射本身是一种能量周期性释放的现象。在某些事例中这种振荡表现为一连串的脉冲(几个或几十个)。Kiplinger^[49]发现一个振荡同时存在于 17GHz 、硬X射线及 γ 射线的事件。他把这解释为空间并排存在若干小磁环(组成磁拱), 并为某种传播因子连续激发。Zodi和Kaufmann^[8]的例子前已叙述。考虑到振荡现象广泛地存在于各种太阳活动中^[29], 振荡现象在解释太阳大气内各种活动的机制的研究中, 其重要性是显而易见的。高时间分辨率观测手段所具有的特点, 为研究振荡现象(尤其是短周期的)提供了极好的武器, 而且它对MMS辐射机制的研究也是极为重要的一个侧面。

(3) 微爆发(微耀斑): 早期的工作者把持续时间若干秒的爆发称为微爆发。随着观测设备时间分辨率的提高, 发现若干秒持续的爆发是由持续时间更短的爆发组成的。这里我们把最小最简单的独立爆发称为“微爆发”, 有几个吸引人的问题:

(i) 是否所有的爆发(耀斑)都是由微爆发组成的?

(ii) 所有的微爆发是否都是一样的(同一机制产生, 或同一机制在不同条件下产生)? 什么是产生微爆发的机制?

(iii) 与高时间精细结构(微爆发、尖峰辐射)对应的精细能量结构和精细空间结构是什么?

Sturrock et al. (1984)^[14]把爆发按时标分为四类:(i) 亚爆发(sub-burst):有亚秒级时标,这是毫米波段低强度太阳活动中显著的特征。当然别的波段上不一定无此特征。

(ii) 元爆发(elementary-burst):时标为若干秒,它是硬X射线记录中显著的特征。

(iii) 脉冲爆发:若干分钟的时标。

(iv) 渐变爆发:几十分钟的时标。

早已发现耀斑的硬X射线脉冲相是由大量持续时间较短的小爆发组成的^[27]。虽然至今仍未有直接从空间位置分辨出微爆发的源,但若干观测现象,如精细时间结构各波段时延和这种时延的若干不规则性,都支持在空间和时间分布上存在多个微源的事实^{[5], [7], [9], [18]}。Benz^[18]认为尖峰就是微耀斑,每一微耀斑放出 10^{26} 尔格的能量,尖峰源的直径在磁场梯度方向上小于200公里。尖峰源在能量释放区附近,每一尖峰的频宽仅是总事件频宽的2%,可知尖峰源散布在很大的范围内,尖峰是微耀斑能量短暂的释放,它在耀斑形成理论中具有重大的作用。千万个由MHD不稳定性形成的“碎片”组成耀斑辐射的元源。非常重要的问题是这些碎片(尖峰源)是原始的还是在耀斑发展中次生的。

Sturrock^[14]指出,近年来发现的日面磁场的不均匀性极为重要。从最小(可发现)的几高斯的磁场到几千高斯的磁场,都是不连续的,由直径为500公里左右、强度为1000—1500高斯光球上的“节点”组成。一个区域的场强弱弱取决于所含节点数的多少^[28]。日冕中的磁场由“元流管”(elementary flux tubes)阵组成,节点为管的足点。在光球层活动区平均场强为100高斯的假设下,各节点约距1500公里,每一元流管中的自由能的释放形成一元爆发。脉冲相可能由众多元爆发组成。在一种撕裂模不稳定性理论中,两个磁流管接触处相反模式的磁力线形成多个“磁岛”,进一步又分裂为更多二级“磁岛”。当不稳定性引起能量释放时,则出现因一连串磁岛能量释放而引起的爆发,一个磁岛对应一个亚爆发。这种引起亚爆发的小单元也可能起因于激波。

可见尖峰活动并不罕见。但它并不能在每一个耀斑中观测到,其原因之一是目前观测只在分米波段才有频谱仪,其他都是点频,而尖峰的频宽极窄;还因一般观测设备的时间分辨率不够高,未能使很多尖峰事件分解开。因而覆盖全频段(至少上达6GHz左右)高时间分辨率的观测是十分必需的;此外源区的传播效应可能限制了MMS的外逸,特别严重的是同步脉泽辐射与磁场成较大角度时吸收特别强烈。

这种耀斑碎片能量释放模型需要观测证实,用硬X射线及Ⅲ型爆发都不是好手段,前者为高能电子在远离加速区的高密度区能量的释放,后者又是多种元加速过程的混合,而MMS观测是一个合适的手段。因此今后除比较射电尖峰与其他波段的尖峰外,尖峰源与HXR、耀斑的相对位置是十分重要的。理论研究应该在目前耀斑理论的方框内去考虑并建立起MMS辐射过程的模型。

三、国内在这一研究领域中已开展的工作

1. 概况

自1981年4月北京天文台建立了我国第一个时间常数为1ms的十厘米波段总强度射电望

远镜, 1981年5月至1982年9月, 共记录到205个有毫秒级结构的事件。自1982年冬天起, 北京天文台、云南天文台、南京大学、北京大学、北京师范大学等单位共同筹建联合观测网。现有波长为2.0, 3.2, 8.0, 10.6, 21厘米时间常数为1ms的总强度望远镜, 云南天文台的230—300MHz频谱仪也具有快速取样观测的能力。若干高性能的设备正在研制中。

2. 观测结果和资料分析^[31-47]

由于时间常数比在同一频段上 Slottje^[30] 的高出一个量级, 因而观测到的尖峰形态与文[30]中的结果有较大的不同。我们发现^{[31-34], [47]}:

(1) 最大的尖峰幅度达 $5 \times 10^4 \text{sfu}$, 约 10^{15}K 。大事件中多数尖峰的持续时间小于4ms, 某些小于1ms(设备的分辨率), 最密处可达每秒300个左右。1981年5月16日事件中, 尖峰幅度与慢速爆发背景之比达100—500。

(2) 在10ms时间常数记录中无规则、类似噪声的图形, 在1ms的时间常数记录中被分解为一组分辨清晰的尖峰, 尖峰的幅度增加一倍, 慢速爆发背景明显下降。

(3) 从我们的观测资料可以发现, MMS活动的基本单元是单个尖峰, 单调迅速的上升和单调较慢的下降, 单个尖峰的持续时间从小于1ms到几十或上百ms。当它出现的时间间隔远大于它本身的持续时间时, 形成类似于米波噪爆的疏散型尖峰群, 当它出现频繁时, 上千尖峰聚集在一起, 形成总持续时间从几十、几百毫秒到10秒以上的尖峰群; 当分辨率不够高时, 变成类似噪声的无规则群。我们从实际观测中归纳得出的结论^{[32], [33]}以及“元尖峰”的概念, 与文[14]、[18]中提出的“元爆发”、“元耀斑”的概念是一致的。作为文[14]依据的巴西13.7米天线的资料, 多数为幅度小、持续为数十以至数百毫秒的尖峰。我们取得的是真正具有毫秒级结构的尖峰, 它更接近“元爆发”。这对复杂爆发是起源于众多微(元)爆发的叠加和耀斑的基元说, 是有力的支持。

(4) 由于使用每分钟记录尖峰个数N的程序作巡视观测, 取得了相当数量的MMS事件, 并取得了有价值的统计分析结果:

(i) 耀斑总数的8.6%与MMS事件(十厘米波段)有关, 而所有10厘米波段秒级爆发中17%具有时间精细结构, 特别是脉冲性最强的8S型爆发与MMS有很强的相关, 它们极可能是一群MMS的叠加^[38]。一小部份MMS事件在同一频率慢速记录上无反应, 但与耀斑或其他波段慢速爆发有关, 这与Benz的结果类似, 可能因为两者不同的机制或不在同一区域产生。

(ii) 所有与MMS有关的耀斑, 50%发生在 δ 或 $\delta\gamma$ 磁型的黑子群中, 86%产生于大于2000高斯的活动区内。

(iii) 与硬X事件相关: 所有MMS事件的49%与HXB相关, 但对某些特殊的活动区, 这一比例大大上升。1981年10月8日—24日期间, 在28个MMS事件中26个对应HXB, 相关率高达93%。

(iv) 与太阳活动性的关系:

时 段	1981年5—12月	1982年1—3月	1982年3—9月	1983年1—6月
MMS个数	153	69	55	15
产生率(个/100小时)	11.2	10.8	4.6	2.3

由上表可知, MMS产生率与太阳活动性相关。

3. 国内在这一领域中的研究工作

(1) “空心束”模型^{[36], [37]}: 分析1981年5月16日事件, 提出在爆发源区向上升的磁环顶端注入由爆发加速产生的高能非热电子, 产生电子的空心束(hollow beam)不均匀性分布, 从而激发起回旋脉泽辐射。这较好地解释了5月16日事件产生的原因。

(2) 尖峰源的整体运动^[38]: 使用同一事件的资料及日本TYKW1.0, 2.0, 3.75, 9.7 GHz的资料, 发现产生尖峰辐射的源区整体不断上升, 而产生MMS的电子束从低频漂向高频运动(从100MHz/秒到4750MHz/秒), 并在8厘米高度与10厘米高度间强烈衰减。

(3) 理论工作^[39]: Zhao和Shi(1986)在同步脉泽机制中, 考虑电子的相对论性效应以及在电子回旋频率下Landau阻尼和同步阻尼, 由非线性的密度波作为触发机制来解释MMS现象, 得出源区直径约10公里, 尖峰流 10^5-10^5sfu , $T_e \geq 10^{14}-10^{16} \text{ K}$ 等。

(4) 周期性振荡: 金声震发现^[46], 在尖峰辐射的振幅上有周期约1.5秒的振荡调制, 这与[8]、[48]的分析是一致的。

4. 其他波段上的工作^[40-43]

云南天文台、北京师范大学、南京大学先后取得了若干例在21厘米, 10厘米, 3.2厘米, 2.0厘米上的MMS事件资料。特别有意义的是, 谢瑞祥等^[44]观测到可能是谐波结构同时在21厘米及10厘米两个波段出现的1987年5月19日事件; 龚元芳等^[45]用不间断采样观测到的分米波段各种时标事例的全过程。

四、关于可能开展的研究课题的建议

1. 应注意的若干问题

(1) 要兼顾不同时标结构的研究。一个爆发过程中各种不同时标的现象是一个整体, 注意不同时标结构之间的关系。

(2) 分米波段具有极为丰富而多样的时间精细结构。长厘米波段中MMS的一大部份可能是分米波MMS的延伸。厘米波段的MMS因尚未系统研究过而引起人们的注目, 但它在出现的次数上比分米波段少得多。根据文[22]的统计, 8.4GHz MMS出现的几率仅为3.2GHz上的1.5%左右, 提高灵敏度是一条必须注意的途径。

(3) 太阳耀斑中快速起伏现象必然在全波段上有反映, 与粒子加速有关, 是整个耀斑过程中的一部份。因而要注意各种共生现象, 特别是与HXB的关系, 要在整个太阳耀斑模型的框架中来看待射电精细时间结构现象。

(4) 搞清尖峰源的位置、大小以及与其他波段源的相对位置十分重要。

2. 可能开展的研究课题

(1) 尖峰辐射频谱研究: 频谱仪资料提供较细的结果, 覆盖范围大的点频观测提供宽频段上的结果, 这对辐射机制的研究是至关重要的。但至今仍未弄清尖峰辐射的偏振特性的规律, 应该特别重视。

(2) 与尖峰辐射有关活动区的研究: 是否存在特别易于产生MMS的活动区, 这对于高

速能量释放所要求的磁场空间精细结构及能量贮藏精细结构的研究是很重要的。

(3) 尖峰源的角径及角径在整个发展过程中的变化: 角径是一个重要的参数, 对尖峰源模型很重要。倘若小角径源的出现意味着尖峰源的形成, 则小角径源出现的时间、演化、消失等信息, 对元耀斑以及耀斑“碎片”是原始的、还是二次的问题的解决, 将是十分有用的。

(4) 多频段(2.0, 3.2, 6.0, 8.0, 10.6, 21cm)联测网对尖峰辐射的整体研究将有重大贡献:

(i) 事例的总貌, 验证MMS是否普遍存在, 是否耀斑都伴随着微爆发。

(ii) 宽频段内MMS的时延, 它在不同条件下的不同规律性。

(iii) 适当的频率配置可以检测谐波现象。这对MMS模型及尖峰源环境等离子体的研究是十分有用的。由此可以推出电流片所在地的磁场及运动温度等参数。

(5) MMS事件综合分析: 多波段、多手段的联合观测, 在更大范围内分析MMS与其他事件的关系(不是统计的关系, 而是一一对应的具体分析), 特别是与HXB的关系, 则是揭开MMS本质的重要手段。

(6) 分米波段时间精细结构的研究: 它与微波波段MMS的关系, 是同一起源还是不同的起源。认为Ⅲ型爆发是耀斑电子加速区向上抛射的高速电子形成的, 因而Ⅲ型爆发已成为高速电子的指示器, 而Ⅲ型爆发的起始频率为电子加速地点的良好指示, 测量Ⅲ型爆发起始频率与MMS的关系, 对MMS机制的研究有极大的重要性。21厘米波段的MMS与分米波的尖峰最相近, 最相关。共生的Ⅳ型爆发与MMS的关系也值得注意。

(7) 类振荡现象: 无论在MMS的幅度及尖峰的出现率上, 调制的周期性现象都是十分令人感兴趣的。这也是快速取样观测设备的长处。

(8) 理论工作: 在研究磁等离子体不稳定性并寻找可能产生高速、集中的能量释放的物理机制的同时, 结合各种观测现象而给出一种近似的物理模型, 则是另一条重要途径。

(9) 实现各波段联测中的技术问题:

(i) 时间同步: 这是能把各别的射电资料以及其他波段的资料, 作为一个整体来研究的重要一环。要求达到毫秒级或更高的时间同步。

(ii) 软件的研究: 这不仅包括观测软件的一致, 保证所测量的都是同一范围内的现象, 而且要发展观测及数据处理软件, 以便更好地发挥设备的作用和找出资料中含有的有用信息。

参 考 文 献

- [1] Benz, A. O., *Solar Phys.*, 104 (1986), 99.
- [2] 李春生: 自然杂志, 10 (1987), No. 6, 413.
- [3] Perrenoud, M. R., *Solar Phys.*, 81 (1982), 197.
- [4] Stähli, M., Mikrowellen-Spektrum Von Solaren Millisekunden-Spikes, Diploma Thesis, Institute of Applied Physics, Bern, Switzerland, (1983).
- [5] Kaufmann, P. et al., *Solar Phys.*, 78 (1982), 389.
- [6] Kiplinger, A. et al., *Astrophys. J.*, 265 (1983), L99.
- [7] Kaufmann, P. et al., *Astron. Astrophys.*, 87 (1980), 58.
- [8] Zodi, A. M. et al., *Solar Phys.*, 92 (1984), 283.

- [9] Costa, J. E. R. et al., *Solar Phys.*, **94** (1984), 369.
- [10] Costa, J. E. R. and Kaufmann, P., *Astron. Astrophys.*, **119** (1983), 131.
- [11] Brown, C. et al., *Astron. Astrophys.*, **123** (1983), 10.
- [12] Benz, A. et al., in *Kunming Workshop on Solar Physics and Interplanetary Travelling Phenomena*, p. 597, ed. by C. de Jager and Chen Biao, Science Press, Beijing, (1985).
- [13] Wiehl, H. J. et al., *Solar Phys.*, **95** (1985), 167.
- [14] Sturrock, P. A. et al., *Solar Phys.*, **94** (1984), 341.
- [15] Aschwanden, M. J., Wiehl, H. J., Benz, A. O. and Kane, S. R., *Solar Phys.*, (1986).
- [16] Mac Kinnon, A. L. and Brown, J. C., *Astron. Astrophys.*, **132** (1983), 229.
- [17] Gaizauskas and Tapping, *Astrophys. J.*, **241** (1980), 804.
- [18] Benz, A. O., *Solar Ppys.*, **96** (1985), 357.
- [19] Kaufmann, P. et al., *Solar Phys.*, **95** (1985), 155.
- [20] Lin, R. P. et al., *Astrophys. J.*, **283** (1984), 421.
- [21] Stähli, M. and Magun, A., *Solar Phys.*, **104** (1986), 117.
- [22] Stahli, M., Magun, A. and Schanda, E., *Solar Phys.*, **111** (1987), 181.
- [23] Benz, A. O. and Kane, S. R., *Solar Phys.*, **104** (1986), 179.
- [24] Kane, S. R., *Astrophys. J.*, **247** (1981), 1113.
- [25] Takakura, T. et al., *Nature*, **302** (1983), 317.
- [26] Tandberg-Hanssen, E. et al., *Solar Phys.*, **90** (1984), 41.
- [27] de Jager, C. et al., *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, **A281** (1976), 507.
- [28] Sheeley, N. R., in *Solar Active Region*, p. 17, ed. by F. Q. Orrall, Colorado University Press, Boulder.
- [29] Parks, G. K. and Winckler, J. R., *Astrophys. J.*, **155** (1969), L117.
- [30] Slottje, C., in *IAU Symp. No. 86*, p. 195, (1980).
- [31] Solar Radioastronomy Group, Beijing Observatory, *Proceeding of Kunming Workshop* (1985), 528.
- [32] Fu, Qi-jun and Li, Chun-sheng, 同上, 516.
- [33] Jin, S., Zhao, R. and Fu, Q., *Solar Phys.*, **104** (1986), 391.
- [34] 赵仁扬、金声震、傅其骏, *天文学报*, **26** (1985), 114.
- [35] Zhao, R. and Jin, S., *Scientia Sinica*(Series A), **25** (1982), 422.
- [36] 李春生, 傅其骏, 严玉华, 江淑英, 李宏伟, *Proceedings of Kunming Workshop* (1985), 549; *天体物理学报*, **5** (1985), 9.
- [37] 李宏为, 李春生, 傅其骏, 同上, 579.
天体物理学报, **5** (1985) 300.
- [38] 傅其骏、李春生、金声震, 同上, 560.
- [39] Zhao, R. and Shi, J., *Solar Phys.*, **104** (1986), 137.
- [40] 范英等, *紫金山天文台台刊*, (1985), No. 10, 22.
- [41] 高正民等, 同上, (1985), No. 10, 99.
- [42] 秦志海等, 同上, (1985), No. 10, 63.
- [43] 谢瑞祥, 杨开平, 同上, (1985), No. 10, 82.
- [44] 谢瑞祥, 杨开平, 李维华, 陈国强, 纪树臣, 马媛, 张帆, 赵日昇, *太阳地球物理资料*, (1987), 7—8 月号, 30.
- [45] 龚元芳, 吕松泉, 施硕彪, 胡汉民, 尚琼珍, *天体物理学报* (已接受待发稿).
- [46] 金声震, *天体射电辐射高分时间分辨率观测方法* (博士论文), 北京天文台, (1987).
- [47] Fu, Q., Jin, S., Zhao, R., Zheng, L., Liu, Y., Li, X., Wang, S., Chen, Z. and Hu, C., *Rapid Fluctuations in Solar Flare*, *NASA Conf. Publ. No. 2449*, (1987), 237.
- [48] Ishkov, V. et al., *Bull. Astron. Inst. Czechos.*, **36** (1985), 81.
- [49] Kiplinger, A., Dennis, B., Frost, K. and Orwig, L., *Astrophys. J.*, **273** (1983), 783.

(责任编辑 刘金铭)

Radio Astronomical Investigation with High Temporal Resolution on Rapid Fluctuations in Solar Flares

Fu Qijun

Jin Shengzhen

(Beijing Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

This paper reviews the recent progress and new trends on research of fine temporal structure of solar microwave bursts. A summary of progress since 1981 in China is made. According to the conditions of our country, suggestions for researching on this field is made, too.

天体H₂O分子谱线的观测和研究

向德琳

俞志尧

(中国科学院紫金山天文台)

(空军气象学院)

提 要

本文评述了1968年发现天体H₂O分子谱线以来其观测和研究的进展。内容包括(1) 天体H₂O脉泽和正常H₂O分子的观测特征;(2) 在恒星早期和晚期演化过程中H₂O分子所起的作用和它们可能的状态;(3) 利用H₂O分子谱线的观测,研究晚型星拱星包层结构和速度流场、恒星质量损失率以及恒星早期演化过程中的分子云能量平衡等理论研究成果;(4) H₂O脉泽时变特征的观测和研究;(5) 银河系天体H₂O(6₁₆-5₂₃)脉泽源巡视和H₂O脉泽源星表以及河外H₂O脉泽源的探测。

一、引 言

天体H₂O分子谱线的观测和研究包括对天体正常H₂O分子谱线和脉泽H₂O分子谱线的观测和研究。已观测到的天体正常H₂O分子谱线的发射有3₁₃-2₂₀^{[1],[2]}以及4₁₄-3₂₁^[3]转动能级间的跃迁。跃迁频率分别为183和380GHz。宇宙中最强、最重要的脉泽有OH^[4]、H₂O^[5]和SiO^[6]脉泽。恒星形成的位置似乎可以容易地由H₂O脉泽发射来探测到(如同OH脉泽一样),并且还可以通过对恒星H₂O脉泽的观测来了解晚型星的较外层大气及其膨胀壳层。因此,对H₂O脉泽源的观测和研究确实显得很重要,天体H₂O脉泽分子是在1968年首次发现的^[5]。已观测到的天体H₂O分子的脉泽跃迁能级仅在6₁₆-5₂₃之间^{[7],[8]},跃迁频率为22.235080GHz。见图1。

天体H₂O脉泽具有其独特的观测特征^[8]:极高的亮温(10¹¹—10¹⁵K),极窄的线宽(0.5—2km·s⁻¹),诸多的脉泽特征峰(1—100),足够小的视尺度(10⁻⁴—1弧秒)和敏感的时变特性等,以致使天体H₂O脉泽源成为研究辐射源发射区的最好工具。大量的观测证实,天体H₂O脉泽通常具有成团或成块的特征。单个源斑的尺度最小只有一个天文单位(~10¹³cm),而最高的辐射功率在一个50kHz的谱特征峰上,甚至可超过10³³尔格/秒(1L_⊙)^[8]。因此,利用H₂O脉泽源的观测来

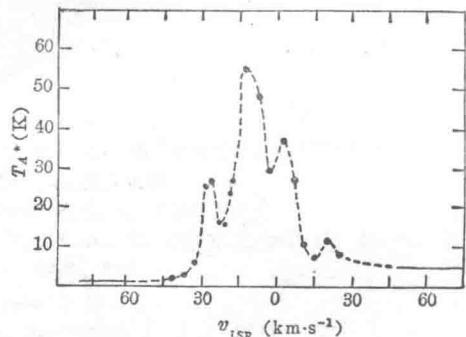


图1. 在W49方向观测到的H₂O 6₁₆-5₂₃跃迁的谱线强度
(A. C. Cheung et al. 1969)^[5]。

调查一个小尺度范围内的能量来源及物理条件, 可能是非常有效的。同时, 利用H₂O脉泽源的小尺度特征可以研究星际的散射和测量源的距离。

现代的观测指出, 所有观测到的天体H₂O脉泽源不是处在恒星形成区附近, 就是与充分演化了的恒星(如Mira变星, 半规则变星, 超巨星等)成协^{[8], [9]}。因此, 天体H₂O脉泽源的观测和研究与天体演化中最有兴趣的两个阶段——恒星演化的早期与晚期密切相关。

表1给出了与年轻恒星成协以及与晚型星成协的H₂O脉泽的特征^[10]。

表 1. 与年轻恒星及晚型星成协的 H₂O 脉泽特征

	与年轻恒星成协的H ₂ O脉泽	与晚型星成协的H ₂ O脉泽
已知脉泽数	170	100
线宽(km·s ⁻¹)	0.5—2	1—2
T _K (K)	100—1500	400—1500
特征峰数	1—200	1—10
速度范围(km·s ⁻¹)	1—400	5—50
偏振度(%)	线偏振(0—20)	无
特征寿命(s)	10 ⁶ —10 ⁸	>10 ⁷
斑点大小(cm)	10 ¹³ —10 ¹⁴	10 ¹⁴
T _B (K)	10 ¹³ —10 ¹⁵	10 ¹¹ —10 ¹²
成团大小	10 ¹⁶ —10 ¹⁷	10 ¹⁵
功率(crg/s)	10 ²³ —10 ²⁵	10 ²⁴ —10 ²⁶

可见, 天体H₂O脉泽源可以根据其成协关系被分为两大类。

由于H₂O的强脉泽活动必须发生在气体密度相当高($\sim 10^5$ — 10^{11} cm⁻³)又有足够的抽运能量($\geq 10^4 L_{\odot}$)的地方^[8]。因此与H II区成协的H₂O脉泽源常常也是与新形成的或正在形成的恒星(O, B)成协, 正是这些明亮天体提供了脉泽活动的高的抽运能量。而H₂O脉泽分子也正适合于处在这些正在形成天体的高凝聚的星际物质中。因此把这类H₂O脉泽称为“星际H₂O脉泽”。

与红外星(即晚谱型的红巨星、超巨星)成协的脉泽源有的处在湍动的恒星光球附近, 有的处于包围这些恒星的、温度相对低、密度相对高的壳层中^[11]。显然这类脉泽源是来自重新回到星际环境的恒星物质中, 所以把这类H₂O脉泽称作“恒星H₂O脉泽”, 或称为“拱星H₂O脉泽”^[9]。

二、天体H₂O脉泽

1. 星际H₂O脉泽

星际H₂O脉泽蒸汽分子在射电频率上的辐射是最强的天体脉泽辐射。

星际H₂O脉泽的射电频谱表现出非常迅速的时变(一周到一月内)和小的线偏振^[10]。Burke et al.^[11]和Johnston et al.^[12]对W49源的观测证明, H₂O源的亮温度超过10¹⁴K。根据星际H₂O脉泽的频谱和空间位形可以分为两类: 一类频谱被限制在很窄的速度范围内(~ 15 km·s⁻¹)。这些低速分量可以具有单线、双线或者是更复杂的特征峰形式。谱的对称形状表明发射

区有规则的运动学结构。例如, VY CMa的 H_2O 频谱的三峰结构起源于径向膨胀。中央峰来自具有恒星速度的脉泽, 另外两个是来自膨胀云相反两边的部分。另一类谱给出的谱形在低速分量有大的离散($20\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$), 而高速分量常常时变得更厉害, 而且比低速分量弱得多。高速脉泽云直径 δ 约为 $10^{16.5}$ 到 $10^{17.5}\text{cm}$ 。

具有低速和高速分量 H_2O 脉泽的年轻恒星的例子是W51(M)。其多数低速分量($55\text{--}70\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)是由高速分量的壳($\sim 3\times 10^{16}\text{cm}$)所包围的核区。Genzel et al.假设W51(M)是大质量的年轻的O型星, 它被不同的旋转和膨胀的致密盘($5\times 10^{15}\text{--}3\times 10^{16}\text{cm}$)所包围^[13]。当高速分量由强的恒星风驱动而密度增加并进入邻近的分子云中去时, 低速分量在盘上发生。

从观测来看, 星际 H_2O 脉泽并不和H II区准确地重合。在电离区域很小甚至探查不到时就发现有 H_2O 脉泽源出现, 其寿命约为 10^5 年。而OH脉泽往往要到电离区域扩大到 $3\times 10^{17}\text{cm}$ 才开始出现。因此很多演化模型认为星际 H_2O 脉泽是出现在恒星生命的最早阶段。由于它的异常演变, 必须要有高的能源, 所以它可能比其他任何脉泽源与恒星演化的早期阶段更密切。因此它也最能引起人们的兴趣。

星际 H_2O 脉泽频谱有从最简单的只包含一个特征峰的谱到可以包含上百个特征峰的非复杂的谱, 例如SGRB2。

在与致密的H II区成协的某些 H_2O 脉泽源中, H_2O 脉泽特征峰中速度相对低的速度分量一直延展到 $\pm 200\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[14]。而强的低速分量, 其范围约为 $\pm 10\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ (相对于成协分子云的速度)。 H_2O 脉泽这一频谱特征可以用运动学来解释。也就是说所观测到的径向速度是脉泽小云准确运动的反映: 这个大的速度离散和通过VLBI观测得到的脉泽特征区的空间分布结合在一起, 则支持了对 H_2O 脉泽是和高质量恒星形成的最后阶段中的质量损失现象有关的看法。许多文献对 H_2O 源的这种高速特征峰作非运动学解释。例如, 他们认为Raman散射或者非弹性的等离子散射, 可以把强的低速谱线的功率转移到其他频率上去。如果观测到的径向速度是运动学的, 那么这些脉泽在天空中应当是彼此相对运动的, 具有与径向速度离散相应的自行。因此, 脉泽特征峰的相对自行的测量可以决定观测速度是来源于运动学或非运动学的。再则, 如果运动学是简单的, 则许多脉泽的自行可以给出三维的速度场和源的三维结构。最后, 径向与横向运动比较(“统计视差”或“膨胀团视差”)将提供一个脉泽源距离的直接估计^[15]。

和OH脉泽不同, 星际 H_2O 有快速的时变^{[16], [17]}。详见第四节。

如果来自天空的单一斑点, 有好几条谱线, 速度范围分布在 $2\text{--}30\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 那么这种速度的离散很可能是由于精细结构几何投影效应和湍动混合所引起的。这个湍动是由一个强的恒星风与致密分子云物质碰撞而产生的。

基于上述对星际 H_2O 脉泽谱的各种表现特征的分析, 文献[18]探索了一个详细的演化模型。

2. 恒星 H_2O 脉泽

晚型(大于M5)的恒星是处在恒星演化的后期阶段, 它们具有 10^{13}cm (巨星), 甚至更大($>10^{14}\text{cm}$, 超巨星)的半径, 输出能量分别在 $10^4\text{--}10^5 L_\odot$ 量级。与 H_2O 脉泽源成协的晚型星大多为LPV星, 也有半规则变星, 这类星的较外层是非常冷的, 温度为 $2000\text{--}2500\text{K}$ 。恒星 H_2O 脉泽是处在 $\leq 10^{15}\text{cm}$ 的膨胀包层内。这一图像的最有力的证据是由干涉仪观测取得的。他们得

到H₂O脉泽是在 2×10^{15} cm之间成团的, 而且处在 4.7×10^{16} cm内^[9]。因此对于恒星H₂O脉泽的观测和研究是了解晚型星的较外层大气以及膨胀壳层的有力工具。

中央恒星一般有 $\dot{M} \approx 5 \times 10^{-7}$ 到 $5 \times 10^{-4} M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ 的质量损失率。在它们的拱星包层里一般存在着尘埃颗粒和气体分子两种成分。由观测知前者(很可能是硅酸盐)会在外流的气体中形成, 它的发射线在离恒星中心大约不到5倍恒星半径 r 的地方就可观测到两者具有不同的外流速度^{[20], [21]}。在拱星包层中可以观测到H₂O、OH和SiO分子的脉泽辐射^{[22], [23]}。从微波和红外波段则可以观测到CO、NH₃、H₂O和SiO分子的吸收线和热的发射线^[24]。因此拱星包层中气体的成分是比较复杂的。

观测资料表明, 拱星包层在膨胀过程中由于脉泽分子的辐射和气体的膨胀是不断冷却的。由恒星表面附近($r \approx 6 \times 10^{13}$ cm)的 $T \approx 2000\text{K}$ 可以下降到在 $r \approx 10^{16}$ cm处的100K左右^[25]。俞(1984)^[26]得到了恒星H₂O脉泽是处在拱星包层多方膨胀的过程中, 它的速度频谱是由拱星包层的速度流场所决定的。俞(1986)^[27]还研究了拱星包层速度流场的二流模型, 得到包层中气体速度流场在多方膨胀过程中严格的形式解, 尘埃颗粒与气体之间的牵连速度以及尘埃颗粒的速度流场。

VLBI观测给出恒星H₂O脉泽典型的是在 10^{13} — 10^{14} cm范围内。在同一包层里这区域要比OH脉泽发射区更致密得多。在这一范围内, 除了因尘埃颗粒的存在而把H₂O脉泽的运动弄得复杂以外, Hill和Willson^[28]设想中央恒星的脉动可以使包层的这部分振动, 并且形成激波向外传播和使物质向里下落。没有下落的物质对H₂O脉泽有影响, 使其运动变得更复杂。孙等^[29]也研究了恒星脉动对拱星包层速度流场的扰动, 得到速度的扰动解。它是一个随着半径的增加而不断振荡的函数, 对恒星H₂O脉泽的速度频谱有影响。

从长基线干涉仪观测可以得到一些M型超巨星脉泽源的特征速度区的分布图。从M型超巨星H₂O脉泽源特征速度区的分布图, 可以分析出H₂O脉泽源在拱星包层中分布的情况。H₂O脉泽源处在拱星包层的膨胀壳层中。俞^{[30], [31]}在解释用长基线干涉仪得到的特征速度区分布图时, 提出了一个膨胀的多壳模型, 即H₂O脉泽源处在拱星包层膨胀的多壳层中。这是一种新的观点和方法。

红巨星的质量损失是回到星际介质的物质的主要来源, 对恒星H₂O脉泽的观测可用于估计质量损失率。它由密度 ρ , 膨胀速度 ν , 脉泽所在处半径 r 决定。通常 ρ 由红外观测得到, 或者由脉泽抽运所需要的理论来考虑。 r 从个别的脉泽成分的离散得到或者从光通过包层的时间直接测量得到。 ν 可由观测得到, 而文^[27]给出了理论计算的结果。

三、天体正常的H₂O分子谱线的观测研究及其在分子云中的能量平衡

天体正常H₂O分子谱线的观测研究虽然很少, 但发现和观测^{[5], [7]}到强跃迁 $6_{16}-5_{23}$ 之后, Phillips et al. ^[32]对Orion和DR21(OH)探测到星际H₂¹⁸O的 $3_{13}-2_{20}$ (203.4075GHz)跃迁, 从而估计了H₂O对H₂的相对丰度为 10^{-5} 。对如此高的值所作的解释由Elitzur^[33]用激波化学给出。 $3_{13}-2_{20}$ 的观测是对Orion BNKL进行的。有文献指出得到的平顶(plateau)谱线以及H₂的振动-