

太阳噪暴

刘绪昭

(中国科学院北京天文台)

提 要

本文简单地介绍了噪暴的发现过程和它的繁多而复杂的特征。作者用较多的篇幅介绍噪暴理论的发展过程和各种理论模型,并且还较深入地讨论了各种模型的特点。最后作者指出了当前应继续研究的噪暴的主要问题。

一、简 介

最早的太阳噪暴辐射是在第二次世界大战时由雷达接收机发现的。1942年2月27、28日 Hey 发现在4米和8米波段接收机遭到的严重干扰原来发源于太阳。那时(28日),正有一个特别的活动区通过日心径。他的发现到战争结束后才得以发表(Hey, (1946)^[1])。自此开始了一些太阳射电的先驱研究,如Reber(1946)^[2], Martyn(1946)^[3]。由于噪暴记录与磁暴非常相似, Allen(1947)^[4]将它命名为“噪暴(noise storms)”。尔后, Wild 和 McCready(1950)^[5]根据频谱观测将爆发分类时,它被划为I型辐射。当高分辨率观测揭示出噪暴源位于黑子上空的局部区域时,它又被称为“I型源”。

自1946年起,战时的发现掀起了太阳射电物理的蓬勃研究,当然包括噪暴。随着太阳射电天文和等离子体物理的迅猛发展,一些射电爆发(例如II、III、IV型爆发)的研究获得了根本性的突破,发现它们分别由激波、电子流线和等离子云抛射所产生。唯独噪暴,尽管观测与理论研究日益深入,它的基本问题仍隐藏在令人不解的面纱之下。例如,噪暴的驱动源是什么? I型爆发的辐射机制是什么? 从1976年至今,欧洲的一些太阳射电天文学家举行了4次太阳噪暴研讨会掀起了噪暴观测和理论研究的热潮。这些活动也吸引了美国、澳大利亚和其他地区的天文学家。在最近一个峰年(1980—1981年),欧洲太阳射电天文学家协会组织了两次全球噪暴协同观测,包括光学、X射线、远紫外等所有波段。北京天文台分米波射电望远镜也参加了这两次协同观测(Hen等人(1983)^[6])。

太阳噪暴有极复杂的特征,它由两个成份组成,噪暴连续谱和I型爆发。I型爆发更是令人迷惑不解,它具有极高的亮温度,很窄的辐射角,频带窄而持续时间短。噪暴与许多其他太阳现象有联系,例如黑子群、冕环、活动区磁场、日珥抛射、耀斑等。然而有趣的是,在很多研究者的观测分析后,对噪暴与太阳上最壮观的现象——耀斑——间的关系却无一致的结论。噪暴的物理过程更是众说纷云。于是一些学者认为,噪暴问题的解决将是射电天文

的一个里程碑。

在第二节中,介绍了噪暴的主要观测结果。在第三节中则依时间序列介绍了各种理论并作了分析和讨论。最后第四节中提出和讨论了当今噪暴研究的几个主要问题。

二、主要观测特征

经过21周峰年,在各波段天文学家的共同努力下,噪暴的观测结果更加丰富了。本节中只能介绍主要的观测特征。详细介绍可见Elgarøy(1977)^[7], (1983)^[8]。

1. 噪暴的一般特征

(1) 太阳噪暴现象主要出现在米波段。图1给出了噪暴频段的起始频率高端的分布图。

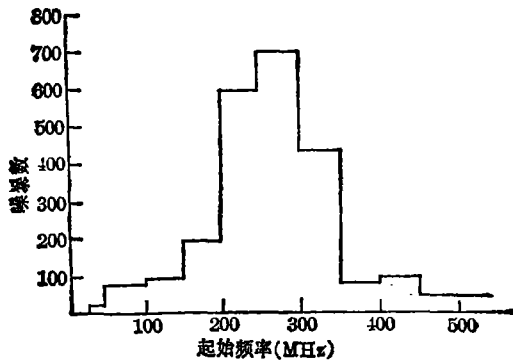


图1. 噪暴高频端的频率分布(Malville, 1961^[9])。

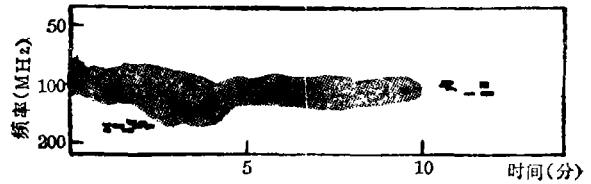


图2. 噪暴动频观测图例。

(2) 噪暴由宽带(约几百兆赫)连续谱和大量叠加在其上的窄频短持续时间的I型爆发组成。图2是噪暴频谱观测的示意图。

(3) 每次噪暴持续几小时到几天。由于噪暴现象的方向性,应存在更长期的噪暴。

(4) 源的位置接近对应黑子群的径向延长线。不同频率源的高度与活动区的等离子频率高度相当。源时常呈现小幅度的位移(见Mercier (1983)^[11], Hen等人 (1983)^[6]和Liu等人 (1985)^[12])。

(5) 在太阳活动峰年时,噪暴出现频繁而强;而在低年则少而弱。

2. 连续谱

(1) 连续谱的频段从小于50兆赫一直延伸到500兆赫以上,极大频率在100—150兆赫。它的强度随时间变化。

(2) 连续谱有强烈的正常模式圆偏振。

(3) 连续谱的流量呈现明显的中心-边缘变化和东西不对称性。中心-边缘变化表明连续谱发射束的半功率点宽度约为 60° 。而东西不对称性则指出发射束向东倾斜 10° 。

(4) 源的角径约1—10角分,随波长的增加而增大。各波段的源连接起来很像号角。

(5) 源的亮温度小于 10^{10}K ,但仍有一些不确定因素,这对于选择辐射机制是至关重要的。

3. I 型爆发

(1) I 型爆发的持续时间为 0.1—5 秒。图 3 给出了 I 型爆发的平均持续时间和持续时间弥散随频率的变化(Elgarøy, (1977)^[7])。

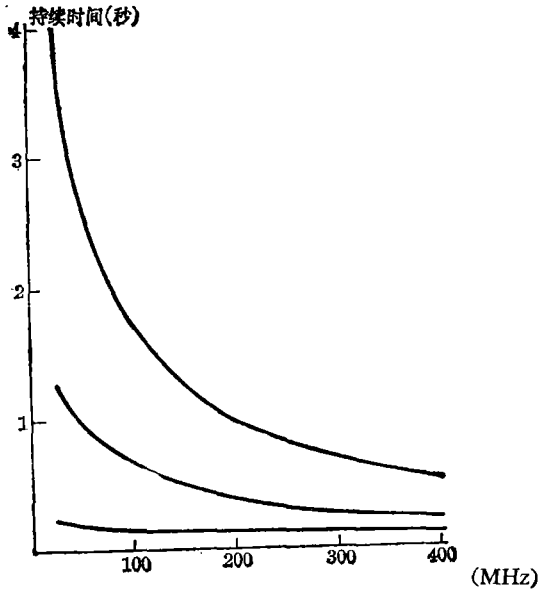


图 3. 在不同频率处 I 型爆发的平均持续时间, 及持续时间的上限和下限。

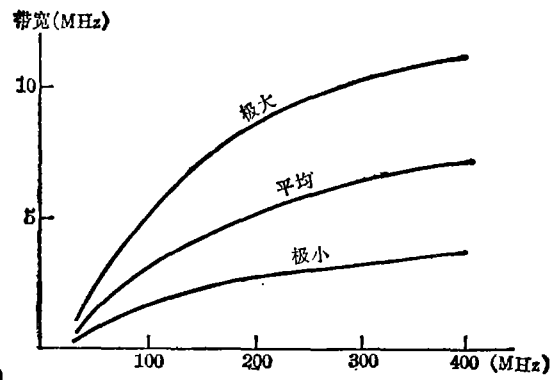


图 4. 在不同频率处 I 型爆发的平均带宽及带宽的上限和下限。

(2) I 型爆发的相对频宽 $\Delta f/f \approx 0.02$ 。图 4 中给出了 I 型爆发带宽随时间的变化^[7]。

(3) 源的角径从小于 1 角分到几角分。波长愈大、源的角径也愈大。因为散射的作用, 一般认为真实的源比视源小。

(4) 爆发的偏振是强烈的正常模式圆偏振。但是也观测到部份偏振, 甚至无偏振的爆发, 详见 Zlobec 和 Messerotti (1982)^[13]。

(5) 空间飞船与地球上同时的观测确定了 I 型爆发的强烈的方向性, 爆发束的半功率点宽度仅 25° 。

(6) 二次谐波在可探测的灵敏度之下, 亦即 $(I_{2f}/I_f) < 10^{-3}$ 。

(7) I 型爆发的亮温度极高, 可达 10^{11} — 10^{13} K。

(8) 在 250 兆赫以下的频谱观测中, 有成串的 I 型爆发出现, 称为 I 型爆发链。每个链的持续时间为几秒到几分, 频率漂移率在每秒 ± 0.5 兆赫之间。

4. 与其他现象间的关系

(1) I 型源通常位于强磁场的大黑子径向延长线附近, 而且一般出现在伴随新磁通量出现的黑子群生长相时。

(2) 噪暴现象与耀斑的关系至今尚无令人信服的结论。不同的作者举出的证据和由此得到的结论是相互矛盾的。

(3) 日冕中不同尺度的不均匀结构都将影响源的大小、方向性等参数的确定, 甚至于对某些理论解释也有决定性的影响。但很多因素是不确定的。

(4) 噪暴出现在联接不同活动中心的热冕环中(House和Dulk, 1983^[14])。但它与日浪、爆发日珥、日冕瞬态现象的关系尚不明确。

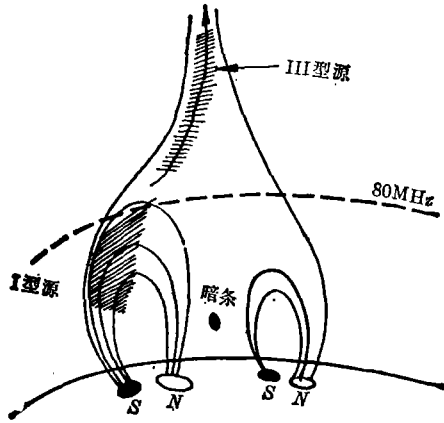


图5. 噪暴发生环境示意图。

(5) 噪暴与其他波段的射电现象也有着密切的关系。噪暴活动与厘米波缓变成份有密切的关系,在缓变成份迅速增加约二天后,强噪暴活动出现了。

在射电现象中与噪暴联系最密切的或许是III型爆发了。在一些噪暴理论中,也把III型爆发当作噪暴现象的派生物。III型爆发常伴随I型噪暴而产生。特别有意义的是,III型爆发的高频端与I型爆发的低频端是相衔接的。由此可构成广泛接受的观测模型,见图5。

太阳射电的毫秒级活动也曾在噪暴中发现。该现象尚有待于进一步研究。

三、理论模型

尽管众多的观测结果已向理论工作者展现了一幅相当完整的图景,可是即使对其中一些基本问题,理论工作者也未能取得一致的见解。

噪暴可分为连续谱和爆发两个成份。理论工作者的兴趣更多地集中在I型爆发的解释上,其实,连续谱辐射机制也是个谜。

1. 早期的工作

很显然,热辐射是无法解释噪暴现象的。早在1946年,Kiepenheuer^[15]就提议,用快速电子的回旋辐射解释噪暴。但是,回旋电子只辐射异常波,而在 $Y=1-X$ ($Y=\omega_H/\omega$, $X=\omega_p^2/\omega^2$) 高度以下发生的异常波是不能逃逸的。

为克服上述困难,Kruse等人(1956)^[16]建议,除在平行于磁场和垂直于磁场方向上外,高能回旋电子将既辐射正常波,又辐射异常波。这里假定了回旋电子在等离子体中将比在自由空间中辐射更多的能量。

Twiss和Roberts(1958)^[17]进一步研究了回旋辐射问题。他们指出,辐射主要是异常波,但正常波也被微弱地激发。为与观测一致,就必需假定,或是异常波的吸收大大超过O-模式,或是辐射源处等离子频率足够高。即使这样,还需要负吸收来提高辐射的能通量。I型爆发的窄带仍无法解释。

试图解释高强度的主要途径涉及到相干等离子辐射。Shklovsky (1946)^[18]提议,增强的太阳射电辐射是由在等离子频率 $f_p=(N_e e^2/\pi m)^{1/2}$ 处日冕等离子体的宏观振荡所引起,而振荡则是由荷电粒子流所引起。Martyn(1947年)^[19]也认为等离子振荡是可能的原因。不过,他认为振荡由湍动运动破坏电学偏振所激发。Bohm和Gross (1949)^[20], (1950)^[21]讨论了

有关问题, 他们发现, 在日冕环境中, 当存在磁场时, 有利于激发等离子振荡, 辐射也易于逃逸。

一些研究指出电离气体中存在放大机制: 飘动的电子流线的的作用如同电场放大器; 以不同速度运动的电子流线能放大纵波; 交叉电磁场作用下波可以被激发和放大。但是在日冕条件下它们如何起作用呢?

Denisse和Rocard (1951)^[22]在理论中引进了冲击波。他们研究了无磁场电离介质中传播的激波的特征, 发现等离子振荡可以被激发。它的带宽是窄的。爆发的持续时间短可认为是由于激发过程的内在的不稳定性。

Ginzburg和Zheleznyakov (1959)^[23]分析了产生 I 型爆发的不同的可能性。他们得出结论: I 型爆发可能由带磁等离子体中发生的相干辐射所产生。爆发的时间尺度为日冕等离子体的自由振荡的阻尼时间。激发机制可能是磁流体力学激波。

Denisse (1960)^[24]证明, 观测的方向性是由于源位于临界频率的日冕层中时折射效应所产生的。以后知道, 这解释了连续谱的方向性。他认为, 快速电子激发纵向等离子波产生噪暴辐射。这些快速粒子可以从耀斑事件中产生, 其中一些被束缚在合适的位形中并激发等离子波。当有利条件出现时, 它们可以耦合为正常波。Denisse用在窄频段的偶发镜面反射(聚焦)解释 I 型爆发的窄带和短的持续时间。

2. 等离子波理论

为了得到足够高亮度的辐射, 一些射电天体物理学家研究了等离子波的相干辐射。整个物理过程都包括如下三点: 激励物(包括波); 产生等离子波的不稳定性; 等离子波转化为可逃逸的电磁波的机制。

在表1中, 笔者就5个理论模型列出了上述三因素, 并列出了模型所需要的磁场和过热电子温度。

表1 5个等离子波理论的特征

模型作者 (发表年份)	激励源	产生等离子波的机制	转换为 t 波机制	磁场(高斯)	过热电子 特征速度
Takakura(1963) ^[25]	相向而行的阿尔文波包加速电子产生几倍于日冕电子热速度的电子流线	当电子速度分布在 $v \geq \sqrt{3} v_e$ 外有隆起时等离子波增长	Raleigh 散射	15—50	$v \geq \sqrt{3} v_e$
Trakhtengert (1966) ^[26]	磁流体波	磁流体动力学不稳定性	组合散射	5—10	$v \geq v_e$
Sy(1973) ^[27]	沿磁场几倍于声速的电子流线	电子流线产生沿磁场传播的等离子波	离子的非线性散射及感应放大		$v \sim 6v_e$
Zaitsev 和 Fomichev (1973) ^[28]	无碰撞激波	在激波波前, 电子与离子相对漂移速度大于电子的热速度, 等离子波发生	等离子波被激波波前的电磁扰动散射	强磁场 $\omega_H \geq \omega_p$	$v > v_e$
Vereshkov (1974) ^[29]	磁流体脉冲	电流不稳定性	等离子波与声波耦合产生电磁波	30	$v > \sqrt{3} v_e$

上述5个模型都是由过热电子产生等离子波, 然后各位作者采用了不同的机制将等离子波转换为可逃逸的电磁波。除了Sy的理论没有指明快速电子的来源外, 其余模型都采用某种

波(阿尔文波、MHD波、激波)产生过热电子。Takakura 首先开创了这样思路的工作。

在表2中,笔者列出了这5个模型在解释 I 型爆发主要特征的成功之处。这里有必要指出 Sy 的模型在解释偏振特征上也不是成功的。在他的模型中,只有当辐射与磁场交角超过 30° 时,才成为强烈的 O-模式圆偏振波。这明显地与 I 型爆发的强烈的方向性相矛盾。

表 2 5 个等离子波模型对 I 型爆发的解释

作 者	I 型 爆 发 的 特 征						其 他
	高亮度	偏 振	短持续时间	窄 带	方向性	链	
Takakura	<	<	<	<	<		在波前的电荷分离将阻止不稳定电子束形成。源的尺度太大。过于定性。
Trakhtengert		<	<	<	<	<	不稳定性产生非常低频等离子波
Sy	<	?					没有指明电子流线来源
Zaitsev 和 Fomichev		<	<	<		<	二次谐波处也有辐射
Vereshkov			<	<		<	同 Trakhtengert

有必要说明,一些等离子理论中对磁场要求为 $\omega_H \gtrsim \omega_P$, 恐怕是不能被接受的。

3. 电子回旋辐射

这是由环绕磁力线回旋运动的电子束所激发的电磁不稳定性。

Fung和Yip (1966)^[30]用在大黑子群上的日冕磁场中回旋的电子流线辐射解释噪暴现象。他们的电子流线分布函数为 δ 函数

$$f_0(\mathbf{p})\delta\mathbf{p} = \left(\frac{1}{2\pi p_{\perp 0}}\right)\delta(p_{\perp} - p_{\perp 0})\delta(p_{\parallel} - p_{\parallel 0})d\mathbf{p}$$

在他们使用的模型中,噪暴发生区域(光球之上 $0.2-0.5R_{\odot}$) 磁场相当强,值 $A = \omega^2_P / \omega_{ci}^2$ 在 0.2到5之间。于是在噪暴区域磁场将达几十到几百高斯。

Fung和Yip的计算结果惊人地与观测相吻合。但有如下问题:电子流线分布函数为 δ 形式是不稳定的;为了解决短的持续时间,必须与 I 型爆发一样频繁和同步地产生电子束;磁场过强。

Melrose (1973)^[31]在类线性近似下研究了相干回旋辐射问题。他使用双麦克斯韦分布函数作为电子的分布函数:

$$f(p, \phi) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} m^3 c^3 \beta_{\perp 0}^2 \beta_{\parallel 0}^2} \cdot \exp\left[-\frac{\beta^2 \sin^2 \phi}{2\beta_{\perp 0}^2} - \frac{(\beta \cos \phi - \beta_{\parallel 0})^2}{2\beta_{\parallel 0}^2}\right]$$

Melrose得出结论,除非 $\omega \approx \omega_H \gg \omega_P$ 的条件被满足,相干回旋辐射将是 X-模式圆偏振的。因而它不是产生噪暴的机制。

Mangenev和Veltri (1976)^{[32], [33]}进一步研究了这种不稳定性。他们指出,线性不稳定的哨声波和高频 X-模式波与低频 MHD波的非线性耦合有效地抑制了这两种波,因而余下的 O-模式波的不稳定性则解释了 I 型爆发的偏振、带宽和方向性。

在该模型中,要求源区域的磁场为 10—30 高斯。电子流线中的分布函数形式为

$$f(\mathbf{p}) = a \exp \left[\left(\frac{p_{\perp} - v_{\perp 0}}{I' p_{\perp 0}} \right)^2 + \left(\frac{p_{\parallel} p_{\parallel 0}}{I' p_{\parallel 0}^2} \right)^2 \right]$$

在 I 型爆发的情况中, $\Gamma \approx 10^{-2}$, 束密度足够小 $n_b \lesssim 10^{-5} n_e$ 。另外, 该模型还要求背景等离子体中存在宽频扰动。

Mangeney 和 Veltri 的模型没有要求太高的磁场, 但为了满足 I 型爆发的短持续时间, 就必须要求与此相当的电子流线。这样的电子流线不仅持续时间短, 而且也与 I 型爆发一样频繁。他们没有指明这种电子流线的来源。

4. 在太阳 21 周峰年的工作

经过太阳射电物理学家们持久的努力, 几乎花费了一代人的时光, 特别又经过了 21 周峰年的努力, 对于噪暴这样复杂的现象终于取得了相对精确的观测结果。加之, 等离子体物理取得的进步, 又有一些理论模型问世了。

看来, 多数学者都已认为, 噪暴现象是由等离子体辐射产生的。在这一峰年前后所提出的模型都是基于等离子体波向电磁波转换的机制。

Kattenberg 等人 (1980)^[34] 提议的模型中, 连续谱是由 Langmuir 波与低频哨声波结合产生的, 而爆发成份则是由强 MHD 脉冲 ($\delta B/B \sim 1$) 中发生的上混杂不稳定性产生的。在他们的模型中, 他们仅仅粗略地提出了一些想法, 而没有具体讨论涉及哨声的三波相互作用的共振条件, 又没有进行必要的计算以便与观测特征比较。

Suzuki (1981)^[35] 使用了 Hasegawa (1974)^[36] 指出的 Langmuir 波蜕变机制构造了他的模型。在该模型中要求源区域的磁场满足 $\omega_H/\omega_p \sim 0.2$ 和存在电子流线 (在该模型中没有特别指明对电子速度的要求)。

在 Suzuki 模型中, 首先由电子流线产生 Langmuir 波, 然后通过离子的感应散射或蜕变过程 (蜕变为离子声波和 Langmuir 波) L 波转移到小波数区域。最后, Langmuir 波蜕变为左、右旋电磁波。仅有左旋电磁波可逃逸, 这就是 I 型爆发。

Suzuki 的模型可以解释 I 型爆发的高亮度、带宽、偏振和方向性。但该模型对每次 I 型爆发也要求一个电子流线。另外, 在解释方向性时他利用传播效应和日冕散射。这似乎难以解释为什么日心与日缘的爆发具有相同的方向性。根据他的机理, 日缘处难于出现 I 型爆发。

Benz 和 Wentzel (1981)^[37] 首先提出把日冕磁场的演化作为噪暴现象的驱动力。这是根据噪暴现象常出现在黑子群的生长相, 有时明显地与光球磁场变化相联系 (Sakurai, 1975^[38])。另外, 噪暴现象的持续时间也与日冕磁场变化的时间尺度相应。尔后, Wentzel (1981)^[39], Spicer 等人 (1982)^[40] 也都以日冕演化为驱动力构成了各自的模型。首先, 日冕演化引起激波或反常电阻, 它们加热局部区域中的部份电子。然后由此产生等离子体不稳定性, 产生等离子体波和其他波。最后, 通过 Langmuir 波与离子声波结合或上混杂波与下混杂波结合产生电磁波。这些模型对一些等离子体过程作了仔细的计算, 得到了与观测相吻合的结论。但很遗憾, 它们都不能合理地解释 I 型爆发的强烈的方向性。

笔者^[41]的模型也认为日冕磁场的演化是噪暴现象的驱动力。在模型中还假定日冕活动区中存在强磁场纤维。当日冕演化引起的弱激波通过强磁场纤维时可产生过热电子。过热电子在强磁场中形成损失圆锥分布, 由此再产生 Langmuir 波和哨声波, 它们的耦合产生 O-模式

波, 即 I 型爆发。该模型首次将方向性作为爆发辐射机制的本质特征。尽管冕环中存在纤维结构已为许多学者所接受, 可是, 该模型中的强磁场纤维假设还有待于其他观测所证实。另外, 该模型的一些细节还应进一步计算。

四、讨 论

太阳噪暴无论从观测上或理论上都显示出比其他类型爆发复杂得多。目前, 普遍认为, 它不能被归结为如 II、III 型爆发那样的简单过程。笔者以为当前需要解决如下一些问题。或许, 它们被弄清之日, 就是噪暴问题解决之时。

1. 辐射过程

人们已逐渐接受这样的观点: 在太阳米波噪暴区域中, $\omega_P \gg \omega_H$, 所以对爆发和连续谱成份作出贡献的物理过程应是某种等离子过程, 波波互作用过程。

在日冕条件下, 高频波很容易出现, 但哪一种低频波对 I 型爆发起作用呢? 而又是哪一低频波对连续谱起作用呢?

笔者以为^[41], 对 I 型爆发而言, 辐射过程的方向性是爆发过程本身特征的反映, 于是哨声波是可取的低频波。

在 21 周峰年, 更高分辨率的观测表明, 噪暴连续谱具有比通常认为的温度 ($\leq 10^{10} \text{K}$) 更高的亮温度, 若此事实得到进一步证实, 那末, Melrose 以及其他一些作者 (包括笔者) 的意见——间隙电子分布或各向同性快速电子分布产生连续谱——将不成立。因为各向同性电子分布至多只能产生亮温度为 10^{10}K 的等离子波。另外, 与连续谱有关的等离子波如何转化为电磁波的过程更为人鲜知, 这方面的研究工作也很少。

激波模型是很有吸引力的。但仅用激波加上静态的均匀の日冕活动区恐怕是不能解释噪暴的。日冕活动区应是不均匀的和动态的。噪暴现象可能是这样一个日冕的很好的写照。

2. 偏振

噪暴现象是高度偏振的 ($\sim 100\%$)。这与等离子辐射预言的相一致。然而, 我们应如何解释部份偏振的爆发, 或部份偏振的连续谱呢? 一些来自非常小区域的部份偏振源是难于用两个区域辐射的混合来解释的。或许, 部份偏振的爆发可以用传播过程解释。

3. 方向性

噪暴连续谱的方向性 (半功率点宽度 60°) 可以合理地用传播效应解释。而 I 型爆发束的半功率点宽度仅为 25° 。一些理论家将 I 型爆发的强烈的方向性解释为日冕中不均匀结构 (例如纤维) 产生的波导现象。笔者以为, I 型爆发的方向性是难于用波导现象解释的。波导解释对日冕结构有奇特的要求, 要求存在号角状的中空结构。依笔者之见, I 型爆发的方向性是波波互作用过程的直接结果。

4. 日冕的不均匀性

根据噪暴现象以及其他太阳日冕现象的观测, 可以推断日冕是不均匀的, 日冕活动区是不均匀的。但是现在还没有可靠的手段定量地确定日冕活动区中的不均匀性。对于日冕中的不均匀性的尺度、形状 (磁场和密度的) 等参数, 我们只有推测性的结果。

5. 与其他现象间的关系

在近年来, 人们终于弄清, 噪暴源位于连接不同活动区的热冕环上, 而且它很可能发生在新磁通量浮现的阶段。但是噪暴与日珥(爆发日珥)、日浪、日冕等瞬态现象的关系还有待于进一步研究。噪暴与新磁通量浮现的关系, 有待于进行定量的研究。

参 考 文 献

- [1] Hey, J. S., *Nature*, 157 (1946), 47.
- [2] Reber, G., *Nature*, 158 (1946), 945.
- [3] Martyn, D. F., *Nature*, 158 (1946), 303.
- [4] Allen, C. W., *MNRAS*, 107 (1947), 426.
- [5] Wild, J. P. and McCready, L. L., *Aust. J. Sci. Res.*, A3(1950), 387.
- [6] Hen Tie, Yu Ning, Li Yungyang, Wu Xiaotao and Liu Xuzhao, in *Noise Storm Coordinated Observations*, May 10—24, 1981, 63, ed. by E. O. Elgarøy et al., (1983).
- [7] Elgarøy, E. O., *Solar Noise Storms*, (1977).
- [8] Elgarøy, E. O., in *Proceedings of the 4th CESRA Workshop on Solar Noise Storms*, 1, ed. by A. Benz and P. Zlobec, (1983).
- [9] Malville, J. M., *Doctoral thesis (Univ. Colorado)*, (1961).
- [10] Wild, J. P. in *Radio Astronomy*, 321, ed. H. C. Van de Hulst, Cambridge, (1957).
- [11] Mercier, C., 同[6], 87, (1983),
- [12] Liu Xuzhao, Zhang Xizheng, Hen Tie and Zhong Shuxua, in *Proc. of Kunming Workshop on Solar Physics and Interplanetary Travelling Phenomena*, p.604, Sci. Press, China (1985).
- [13] Zlobec, P. and Messerotti, M., *Harv. Obs. Bull.*, 6 (1982), 135.
- [14] House, L. L. and Dulk, G. A., 同 [8], 332, (1983).
- [15] Kiepenheuer, K. O., *Nature*, 158 (1946), 340.
- [16] Kruse, U. E., Marshall, L. and Platt, J. R. *Ap. J.*, 124 (1956), 601.
- [17] Twiss, R. Q. and Roberts, J. A., *Aust. J. Phys.*, 11 (1958), 424.
- [18] Shklovsky, J. S., *Astr. J. USSR*, 23 (1946), 333.
- [19] Martyn, D. F., *Nature*, 159 (1947), 26.
- [20] Bohm, D. and Gross, E. P., *Phys. Rev.*, 75 (1949), 1864.
- [21] Bohm, D. and Gross, E. P., *Phys. Rev.*, 79 (1950), 992.
- [22] Denisse, J. F. and Recard, Y., *J. de Phys. et le Radium*, 12 (1951), 58.
- [23] Ginzburg, V. L. and Zheleznyakov, V. V., *IAU-URSI Paris Symposium on Radio Astronomy*, 123, ed. by R. N. Bracewell, (1959).
- [24] Denisse, H. F., *Inf. Bull. Solar Radio Obs.*, No. 4 and *URSI 13th General Assembly, London*, (1960), 1960.
- [25] Takakura, T., *Publ. Astr. Soc. Japan*, 15 (1963), 462.
- [26] Trakhtengert, V. Yu., *Soviet Astr.*, 10 (1966), 281.
- [27] Sy, W. N., *Proc. ASA*, 2 (1973), 215.
- [28] Zaitsev, V. V. and Fomichev, V. V., *Soviet Astr.*, 16 (1973), 666.
- [29] Vereshkov, G. M., *Soviet Astr.*, 18 (1974), 152.
- [30] Fung, P. C. W. and Yip, W. K., *Aust. J. Phys.*, 19 (1966), 759.
- [31] Melrose, D. B., *Aust. J. Phys.*, 26 (1973), 229.

- [32] Mangency, A. and Veltri, P., *Astr. & Astrophys.*, 47 (1976), 165.
[33] Mangency, A. and Veltri, P., *Astr. & Astrophys.*, 47 (1976), 181.
[34] Kattenberg, A., Van Hees, R. M. and Van Nieuwkoop, J., in IAU Symp. No. 86, *Radio Physics of the Sun*, 259, ed. by M. R. Kundu and T. E. Gergely, (1980).
[35] Suzuki, I., *Publ. Astr. Soc. Japan*, 33 (1981), 505.
[36] Hasegawa, A., *Phys. Rev. Letters*, 32 (1974), 817.
[37] Benz, A. O. and Wentzel, D. G., *Astr. & Astrophys.*, 94 (1931), 100.
[38] Sukurai, K., *Planetary Space Sci.*, 23 (1975), 1344.
[39] Wentzel, D. G., *Astr. & Astrophys.*, 100(1981), 20.
[40] Spicer, D. S., Benz, A. O. and Huba, J. D., *Astr. & Astrophys.*, 105 (1982), 221.
[41] 刘绪昭, 太阳噪暴——哨声模型, 未发表。

(责任编辑 刘金铭)

Solar Noise Storms

Liu Xuzhao

(Beijing Astronomical Observatory, Academia Sinica)

Abstract

In this paper, the discovery of a noise storm and its various and complex characteristics are briefly introduced. The developing process of the theories of noise storms and the various models of them are described in detail. And the characteristics of these models are deeply discussed. Finally, the main problems that should be further researched are indicated.