

# 太阳射电研究四十年

M. R. 孔 杜

(美国马里兰大学天文系)

## 提 要

本文概述了太阳射电天文学的历史,从早期的失败到1942年Hey对太阳射电波的偶然发现为止。文中讨论了太阳射电研究在米波-十米波、千米-百米波和厘米波所取得的主要进展。同时讨论了与射电爆发共生的耀斑的观测以及用等离子体辐射和回旋同步加速辐射对这些观测所作的解释。从空间对与Ⅱ型爆发有关的等离子体振荡和一维电子速度分布的测量,业已证实了用等离子体辐射对观测所作的解释。Ⅱ型爆发的米波-十米波射电日像仪测量和千米-百米波的飞船测量表明,Ⅱ型电子束流是沿着浓密的日冕流和沿着阿基米德螺旋轨道运动的。在厘米波段利用角秒分辨率的大天线阵对活动区和射电爆发所作的高空间分辨率观测,表明了它在观测日冕磁场、了解冕环的物理性质、测量耀斑附近磁场结构,从而在研究太阳耀斑起源方面有着巨大的威力。

## 早期的历史(1942年以前)

太阳射电天文学开始于1942年,那一年Hey发现了与太阳黑子有关的太阳射电辐射。实际上,对太阳射电辐射的探索可以追溯到1890年,在H. 赫兹于1883年发现射电辐射后的年份里,几次试图检测来自太阳的射电波。事实上,最早的射电天文学概念是首先由富有创造性的Thomas Edison所想到的。他真称得上第一位太阳射电物理学家。1890年,Edison认为很可能存在由太阳发出的射电干扰。他试图去寻找它们。当时,他没有射电望远镜,没有无线电接收机,没有无线电技术;可是,即使在那时他似乎已意识到射电望远镜的尺寸必定是很大的,因为他当时决定利用在新泽西州矿山中发现的一块质量很大的铁矿石。他想太阳扰动可在这块矿石中感应出可检测的电流,于是他着手在矿山周围安装巨大的线圈,并将其与电话相连,把射电波转换成声音。这是一个令人惊奇的想法,但是,由于电离层的存在,它注定是要失败的。

1894年,利物浦大学物理教授Sir Oliver Lodge继续搜索太阳射电辐射。他试图利用不透明的物质作挡板滤掉寻常光波以检测太阳的长波辐射,由于利物浦工业城市的地面干扰太严重,这个实验未取得成功。

后来,1910年法国的一位研究生Nordam又作了一次未成功的尝试,他在博士论文中参考了Scheiner和Wilsing于波茨坦进行的未成功的实验。Nordam使用一条175米长的天线,并

1985年3月29日收到英文稿。

此文的英文稿将刊登在“昆明国际太阳物理学术讨论会文集”内。

将他的实验移至3,100米高度。因为他错误地认为大气吸收可以影响他的实验。Nordam已正确地预计到射电辐射的强扰动可能与太阳黑子活动有关。总之,由于电离层的影响,他的实验也以失败而告终。

在1900到Karl Jansky发现了来自银河系的射电波的1932年之间,人们普遍缺乏进一步研究太阳射电辐射的兴趣。这有两点原因:由于以前的失败而失去信心;其次,在那时人们愈来愈意识到,高层大气电离后的反射截断了 $\lambda > 20$ 米的地外辐射。总之,当射电接收机高频灵敏度可以检测到宇宙射电波时,Jansky的发现就可能发生了,如果那时不是处于太阳活动极小期或米波-十米波段宁静太阳的射电热辐射强度不是太低的话,那么,他也许已经检测到太阳的射电辐射了。在Jansky的发现以后,曾多次报道太阳活动高峰期间在短波接收机中出现高强度噪声,可是并未认识到它们的真正意义。例如,1936年H. W. Newton曾在一篇文章中提到短波通讯线路中的“无线电嘶声”,在通讯中断以前已知伴随有太阳大耀斑。1938年,D. W. Heightman(一位业余爱好者)在发现通信中断期间主要在20MHz上接收到特殊辐射时,几乎得到了近于正确的解释,他把这种辐射描述为很强的嘶声,并解释为由来自太阳的带电粒子到达所引起的。1939年,日本的两位研究工作者Nakagami和Miya,在测量了23米、17米波长的噪声到达方向(包括仰角)后,几乎也可以立即发现这种辐射的真正性质;虽然到达方向与太阳的方向相一致,但是他们却得出错误的结论:认为这种噪声可能起源于或接近于电离层E层。

1942年2月份,Hey<sup>[1]</sup>发现了太阳射电辐射。Hey自己架设起米波段的高度定向雷达天线。配备了良好的接收机;最重要的是他具有首创精神和想象力,他把他的雷达天线发生故障的原因归结于存在太阳异常活动。同年,Southworth<sup>[2]</sup>在一项特殊设计的实验里,利用微波雷达装置,检测到太阳的微波热辐射。Reber<sup>[3]</sup>也报道在~2米波长检测到太阳射电辐射。令人惊异的是:Edisor、Lodge和Nordam都在寻找太阳射电波,但是由于干扰都失败了,而Jansky和Hey当时正在研究这种干扰,却发现了银河系和太阳的射电波。来自太阳的强射电辐射的发现过程,与Jansky发现的宇宙射电噪声的过程具有某些共同的特征,两者都是以研究未知现象为目的的观测事例。在两个事例中,目标是研究限制实际系统有效性的干扰的类型。

Hey的发现标志着用于研究太阳的方法的根本变化。直到那时,我们对太阳的了解仅仅来自光学观测,这些观测主要与可见表面薄层内发生的事件有关。从那之后,关于太阳射电性质的发现相继出现。这些新结果导致一系列的新技术。每一项新技术产生新的结果,反过来,又启迪了下一代的技术进展。

## 米波-十米波太阳射电天文学

在Hey<sup>[1]</sup>、Southworth<sup>[2]</sup>和Reber<sup>[3]</sup>发现太阳射电波后的头几年,我们对射电太阳物理的了解取得了几个重要进展。

1. 澳大利亚射电天文学的先驱者Pawsey<sup>[4]</sup>在1.5米(图1)波长进行了常规的太阳噪声纪录,他发现即使对应于宁静太阳的最低的基本水平都具有一百万度的亮温度。Martyn<sup>[5]</sup>

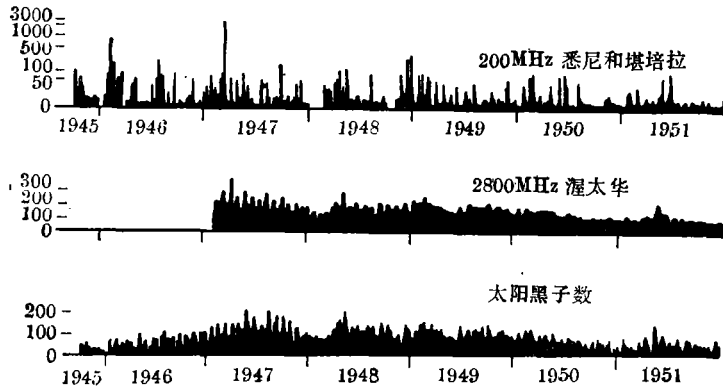


图 1. 太阳流量在 200MHz ( $\lambda=1.5\text{m}$ ) 的第一批常规纪录(顶图); 在 2,800MHz ( $\lambda=10\text{cm}$ ) 相似的纪录 (中图); 太阳黑子数(底图); 注意顶图记录上在 50 以上出现非线性尺度。

和 Ginzburg<sup>[6]</sup>独立地对这一基本观测作了正确的解释,即宁静太阳辐射是从日冕发出的,在那里电子密度将足以使日冕在米波段变成不透明。这一结果的含义是很重要的,因为它意味着人们可以用不同的波长来探测太阳大气的不同区域,而且不必在很高的地方来观测日冕。可是射电天文学家不得不等待将近20年才能取得实时的日冕射电图像。这几乎像光学天文学家以低一个量级的分辨率得到太阳图像一样容易,但是,射电图像是在常规工作基础上得到的。

2. 利用有限角分辨率的单面射电望远镜在厘米波长所作的早期射电观测<sup>[2]</sup>表明,未受扰动的宁静太阳射电辐射是缓慢变化的。此外,在受扰动期间,称作爆发的瞬变辐射与太阳耀斑一起发生。从 1946 年日食期间射电太阳的分米波观测, Covington<sup>[7]</sup>证认出与黑子共生的缓变分量(图 2)。

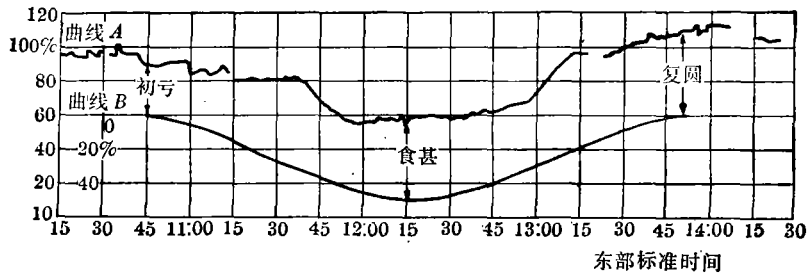


图 2. 曲线 A, 1946 年 11 月 23 日日食期间在 2,800MHz 太阳流量的变化; 曲线 B, 太阳的掩食面积<sup>[7]</sup>。

3. 1946 年, 以 Pawsey 为首的澳大利亚小组和以 Ryle 为首的剑桥小组, 在射电天文学中第一次使用干涉仪, 并且独立地发现米波噪暴辐射起源于黑子附近很小的区域<sup>[8], [9]</sup>。

因此, 这一阶段建立了对太阳射电辐射三种主要成分(即宁静太阳、缓变成分和爆发)的认识。与此同时, Payne-Scott, Yabsley 和 Bolton<sup>[10]</sup>发现, 大爆发突然出现的时刻与频率有确定的关系, 较高的频率超前于较低的频率, 而耀斑开始又在两者之前(图 3)。已经提出这种效应可能是由于扰动作用向外通过太阳大气进入电子密度减小的区域, 从这个区域可以发

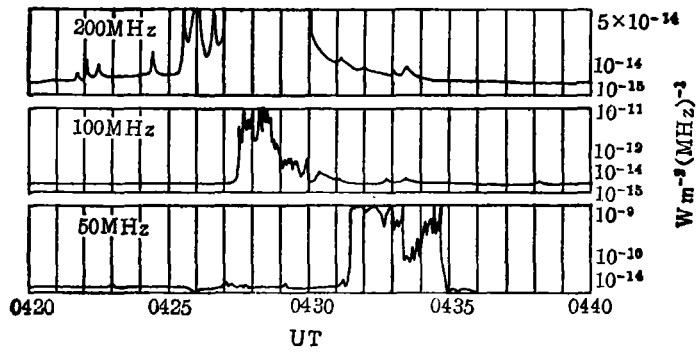


图 3. 1947 年 3 月 8 日在 60、100 和 200MHz 太阳爆发的记录。注意到从  
高频率到低频率爆发的起点逐步推迟<sup>[10]</sup>。

射出逐渐降低的频率所引起的。因此，等离子体假说的看法就已经在起作用了。

其后几年，即四十年代末和五十年代初，在射电波段掀起一阵观测日食的热潮。射电天文学家率领许多个日食观测队，观测的目的是得到宁静太阳的亮度分布。在米波段发现太阳的形状是椭圆的<sup>[11], [12]</sup>。这并不是什么新结果，光学天文学家早已知道了这一特征；新了解到的东西只是太阳的椭率在太阳峰年比在太阳活动极小年份要大这一事实。迄今为止，尚未出现解释这些现象的理论尝试。但肯定不是由于冕流的出现或消失所引起的，因为宁静期间的二维射电日像图表明，亮温度局部增强达几百万度(K)，这与K-冕的增强和冕流密切相关。在厘米波发现太阳具有临边增亮现象(图4)。—Haddock<sup>[13]</sup>，Hagen<sup>[14]</sup>—观测结果大体上是真实的，除了在3厘米和更短的波长外，在3厘米和更短波长临边增亮的存在已经受到高分辨锥形束观测的怀疑，例如在埃弗尔斯堡用100米天线望远镜所得到的结果那样。而宁静太阳的高空间分辨率观测证实了在6厘米波长临边增亮的存在<sup>[15]</sup>。在理论方面，亮度分布的解释导致了太阳大气电子密度分布和亮度分布模型的建立。

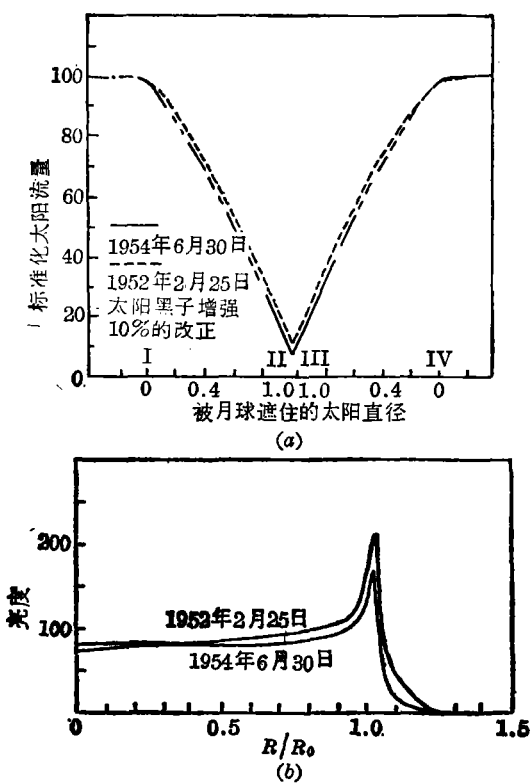


图 4. 1954 年 6 月 30 日和 1952 年 2 月 25 日日食<sup>[13]</sup>的比较。  
(a) 日食曲线；(b) 在波长 9.4cm 计算得出的射电亮度分布。

除了在3厘米和更短的波长外，在3厘米和更短波长临边增亮的存在已经受到高分辨锥形束观测的怀疑，例如在埃弗尔斯堡用100米天线望远镜所得到的结果那样。而宁静太阳的高空间分辨率观测证实了在6厘米波长临边增亮的存在<sup>[15]</sup>。在理论方面，亮度分布的解释导致了太阳大气电子密度分布和亮度分布模型的建立。

在四十年代末和五十年代初，射电天文学的另一特征是：这一时期许多开创天文学家的注意力转向探测宇宙——银河系、河外源和宇宙论。但是，对于许多无线电物理学

家来说, 太阳仍然是一个令人感兴趣而激动人心的研究目标, 因为它代表一个唯一的天体物理实验室, 近到可以仔细研究各种同宇宙中其他天体上发生的许多物理过程有关的高温磁等离子体现象。因此, 为了研究特殊现象, 特别要强调设计新的仪器设备。在那个时候最重要的仪器进展是频谱分析仪或射电频谱仪的出现, 1950年Wild和McCready<sup>[16]</sup>把这种仪器首次引进到射电天文学中。在米波段某些射电爆发归因于电子流(Ⅲ型)或激波(Ⅱ型)所激发的等离子辐射, 这一观点就是用这种仪器观测才得到确证的(图5)。

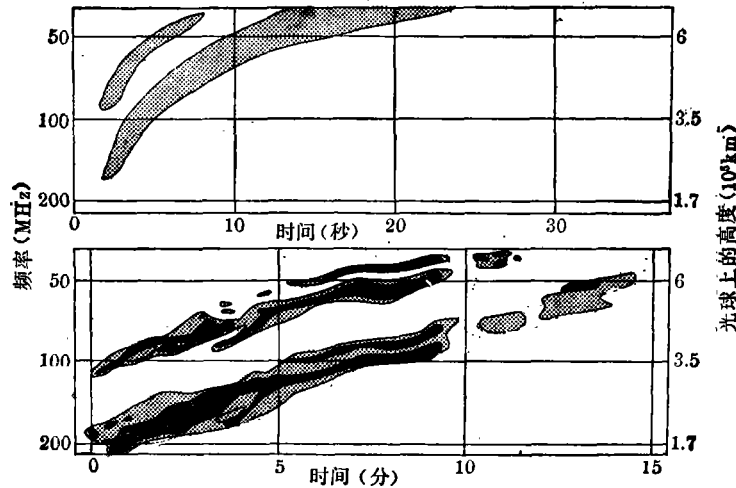


图5. Ⅲ型(上图)和Ⅱ型(下图)漂移爆发的动态谱。注意到上图(秒)和下图(分)的时间尺度以及从高频到低频率爆发起点的推迟<sup>[16]</sup>。

可是, 直到大约二十年之后, 实际上才在1AU附近观测到伴随Ⅲ型爆发的电子和等离子体振荡。根据我本人的看法, 这是空间射电天文学对太阳物理学作出的最重要的贡献之一。

再一个新仪器是在国际地球物理年期间建成了观测太阳活动的169 MHz栅干干涉仪, 法国小组(Boischot<sup>[17]</sup>)利用这种新仪器在1957年发现了Ⅳ型爆发——Ⅱ型爆发后的宽带光滑连续辐射(图6)。解释为由回旋同步加速辐射引起这类爆发, 它以2,000—3,000公里/秒的速度在运动, 显然代表了激波后面的等离子体团。这是第一次看到日冕碎片高速进入行星际空间。因此, 在很长时期内Ⅳ型爆发对日-地物理学家是一个很重要的发现。Ⅱ型和Ⅳ型爆发与日冕物质喷射有关的看法得到了证实, 后者首先由地面K-日冕仪观测到, 在七十年代初空载日冕摄影仪再次观测到这一现象<sup>[18-20]</sup>。

第一架二维射电日像仪在1968年于Culgoora建成<sup>[21], [22]</sup>。利用这架仪器进行的观测, 不但证实和改进了以前的许多结果, 而且还得到了一些新结果。例如人们可以清晰地看到日

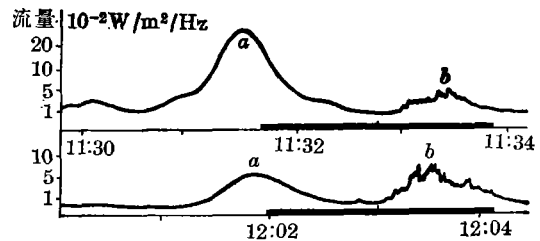


图6. 与耀斑有关的Ⅳ型源“a”和与黑子群有关的噪声中心“b”, 系用Nancay 160MHz干涉仪以3'分辨率观测到的。“b”的流量大致为常数, 而“a”的流量在30分钟内减小10倍<sup>[17]</sup>。

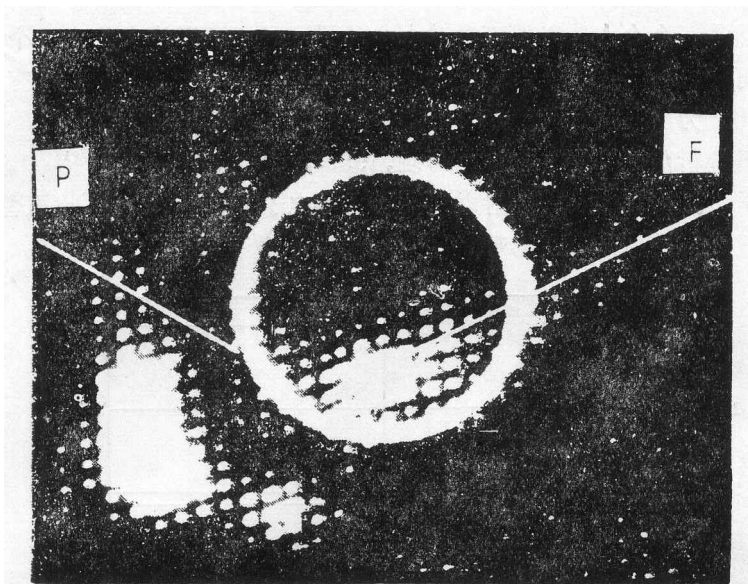


图7. 1968年2月25日太阳爆发期间的射电太阳图(80MHz)。F处是一个H $\alpha$ 耀斑, 开始于3<sup>h</sup>46<sup>m</sup>UT, 伴随着I型爆发, 开始于3<sup>h</sup>57<sup>m</sup>, 在太阳射电图上显示为右旋源。P处的日珥在4<sup>h</sup>0<sup>m</sup>喷出, 4<sup>h</sup>05<sup>m</sup>开始引起IV型爆发(左旋源)。射电太阳图拍摄于两个源同时出现的时候。

冕等离子粒团——有时候是以长环的形式附着在太阳上(图7), 有时则作为孤立的抛射物射入到行星际空间。在Nançay已建成高时间分辨率的射电日像仪, 它以每秒50幅图像的速率给出二个一维(东—西和南—北)太阳图像。利用这架仪器的观测揭示出III型爆发的复杂结构, 它是由在短于1秒钟内相对强度发生变化的基本源构成的<sup>[23]</sup>。靠近Clark湖, 我们建成了多

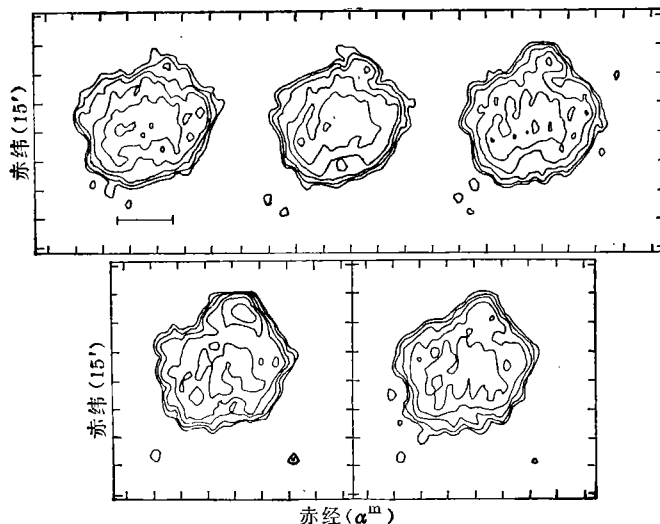


图8. 1981年11月26日发生的III型爆发的一系列发展。在此系列中每张图代表2.65秒的积分时间。大约在7.5秒时爆发达到最大强度, 大约在5.0秒后强度下降到爆发后水平。第一张图中的粗实线表示光学圆的位置。

频率射电日像仪, 自 1982 年后投入运转<sup>[24]</sup>。Clark 湖射电日像仪第一次在低至 $\sim 20\text{MHz}$ 的频率上得到具有亚秒级时间分辨率的二维太阳图像。这些图像可以显示出弱的爆发, 甚至太阳宁静期间发生的 III 型爆发(图 8)。在 Nançay 和 Clark 湖的仪器揭示出产生 III 型爆发的电子流沿着密集的冕流传播。

表 1 综合了米波-十米波段太阳射电历史中的主要事件。

表 1 米波-十米波

1942年	1946年	1947—1952年	1957年
Hey; Reber; Hey 发现太阳射电辐射; Reber 发现米波射电辐射。	Pawsey; Ryle: 1.5 米辐射的监测; 1 百万度的日冕; Martyn 和 Ginzburg 的理论解释, 起源于黑子附近的暴辐射的首次观测。	Payne-Scott 等人; Wild 等人: I、II 型漂延爆发; 太阳爆发中等离子体辐射的第一个概念。	法国小组(Boischot): 169MHz 栅干涉仪; IV 型爆发进入行星际空间, 速度 $\sim 2,000\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 回旋同步加速辐射; 日地物理。
1968年	1976年	1982年	
澳大利亚小组(Wild 等人); Culgoora 射电日像仪; 早期结果的精化, 激波-等离子粒团深深进入行星际空间; 日冕磁拱等。	法国小组 (Pick 等人): 169MHz 一维射电日像仪; 爆发源的高时间分辨率 (50 次/秒) 图。	马里兰小组 (Kundu 等人): Clark 湖多频射电日像仪; 在冕流中的 II 型电子。	

## 空间太阳射电天文学

1964年 Hartz<sup>[25]</sup>在频率区间 1.5—10MHz 从 Alouette-1 卫星进行了对太阳射电爆发 (III 型爆发) 的第一次甚低频观测。1967年 Slysh<sup>[26]</sup>在 0.2、1 和 2MHz 利用 Zond-3 和 Venera-2 卫星对太阳射电爆发作了进一步观测。1968年 Stone 及其小组<sup>[27]</sup>利用 RAE-1 (0.2—9MHz) 卫星, Haddock 和 Graedel<sup>[28]</sup>, Haddock 和 Alvarez<sup>[29]</sup> 利用 OGO-III 卫星在频率低至 25kHz, 以及 Kellogg 等人<sup>[30]</sup>利用 IMP-6 卫星在频率低至 10kHz 上完成了从空间对 III 型爆发进行的最系统的研究, 这些频率的辐射来自离太阳若干个太阳半径至 1AU。人们从空间飞船的观测必定会注意到两个重要的结果: 首先, 利用 IMP-6 卫星所作的电子和 1965 年 Van Allen 和 Krimigis<sup>[31]</sup>及 1965 年 Anderson 和 Lin<sup>[32]</sup>所作的米波 III 型太阳爆发的同时观测表明, III 型爆发射电辐射的开始时刻对应于 10—100keV 电子到达时刻。因此, 百米波和千米波 III 型爆发的空间观测意味着电子流必然是从太阳一直到地球附近沿开放磁力线运行的。实际上, 利用由 IMP-6 飞船转动得到的爆发包络的自转调制进行的 III 型爆发定向观测, 表明行星际磁场的螺旋性质(图 9)。利用几颗卫星 (Helios-1 和 2, IMP-8, Hawkey-1 和 RAE-2) 所作的立体定向测量, 证实了 III 型爆发源的阿基米德螺旋轨道。空间观测也提供了以等离子振荡作为 III 型爆发产生机制的最终证据。Frank 和 Gurnett<sup>[34]</sup>, Gurnett 和 Anderson<sup>[35]</sup>利用 Helios-1 和 2 型飞船, 检测到持续几秒钟的高脉冲的等离子振荡。这些测量是根据 Papadopoulos 等人<sup>[36]</sup>的模型预计进行的。最后, Lin 等人<sup>[37]</sup>利用 ISEE-3 飞船第一次得出了平行速度  $v_{\parallel}$  的一维电子速度分布

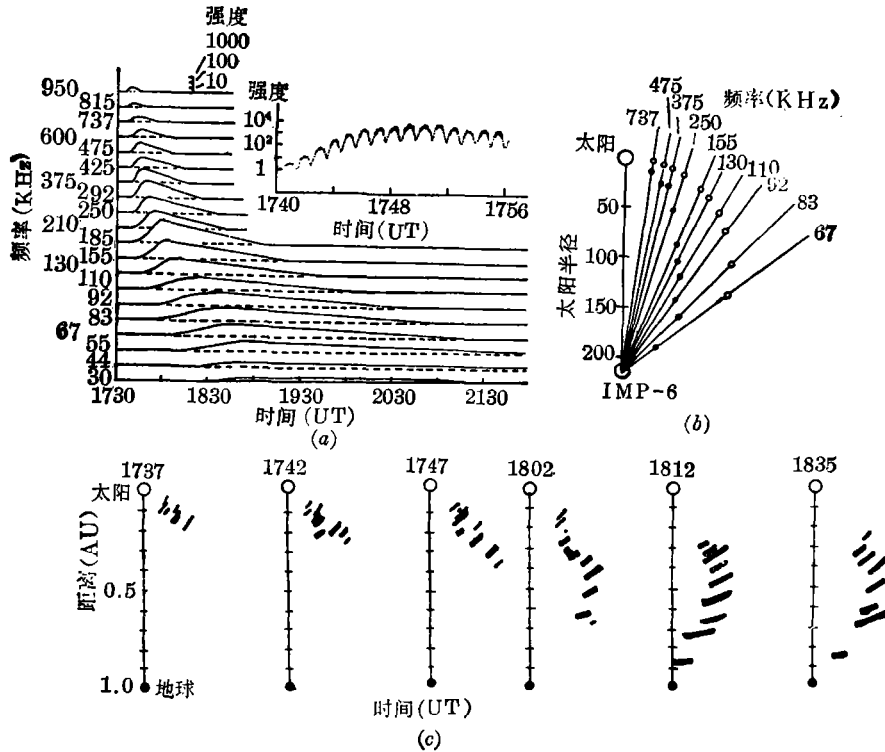


图 9. (a) 在30—950kHz所观测到的 III 型爆发强度包络。插图：详细标出在 250kHz 的一部份射电资料，以说明飞船转动引起的自转调制；(b) 在67—73.7kHz 频率，1971年6月19日由自转调制测量（在黄道面内）的到达方向。空心圆点表示的轨迹决定于到达方向所允许的最近点的距离。实心圆点表示的轨迹是由 RAE-1 密度尺度构成的图形。从两种轨迹都可看出行星际磁场的螺旋性质；(c) 在5分钟时间间隔内绘制的螺旋轨迹<sup>[55]</sup>。

函数  $f(v)$ 。值得注意的重要之点是：大的正斜率的起始时间与 Langmuir 波的起始时间对应得很好(图10和图11)。因为较快的电子比较慢的电子到达得早，形成了尾分布上的驼峰，这对 Langmuir 波的增长是不稳定的。第一次 II 型爆发在 1971 年被 Malitson 等人<sup>[88]</sup>在  $37R_0$  的距离(对应于 292kHz 的频率)处观测到。从那之后，观测到低频 II 型爆发，某些 II 型爆发是在同地与激波同时测量到的。表 2 摘要列出太阳射电天文学历史上百米和千米波长观测的主要事件。

表 2 百米-千米波的空间观测

1964—1967年	1965—1966年	1968—1973年
Alouette-1、2和3; Venera-2 (Hartz, Slysh); III 型爆发; 0.2—10MHz.	IMP-6; Iowa, Berkley: 发现 10—100keV 电子与 III 型爆发联系在一起。	RAE-1, OGO III, 1 IMP-6 (Stone, Haddock, Kellogg): 在 1AU 附近观测到频率低至 10kHz 的 III 型爆发，开放磁力线从太阳直到地球; III 型爆发电子为阿基米德螺旋轨道。
1971年	1975—1976年	1978年
IMP-6, GSFC 小组: 在 IMP 卫星上第一次检测到 III 型爆发。	Helios-1、2: 发现与 III 型爆发有联系的等离子波。	ISEE-3: 在 1AU 附近 III 型爆发电子速度分布的测量; 正斜率的起始时间对应于 Langmuir 波的起点。



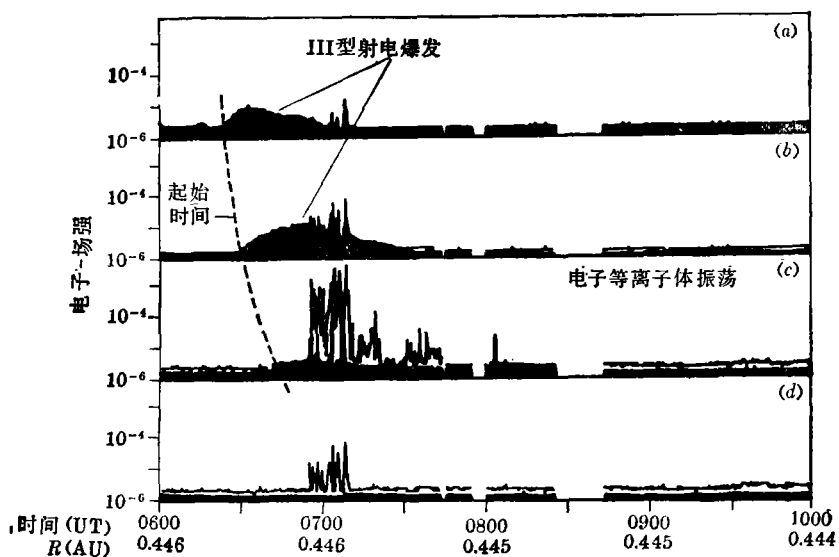


图 10. 1976 年 4 月 1 日在 Helios-2 卫星上检测到的强电子等离子体振荡的样品, 这些振荡与 III 型爆发有关。注意到 III 型爆发的起始时间随着频率降低而推迟; 及频率 56.2kHz 电子等离子体振荡的窄频带。由 Helios 上太阳风等离子体实验测定的电子等离子体频率  $f_p = 54\text{kHz}$ , 它很接近于电子等离子体振荡的观测频率。实线给出峰值电场强度, 实心黑色区域表示平均强度: (a) 178MHz( $\pm 8\%$ ), (b) 100kHz( $\pm 8\%$ ), (c) 56.2kHz( $\pm 8\%$ ), (d) 31.1kHz( $\pm 8\%$ )<sup>[56]</sup>。

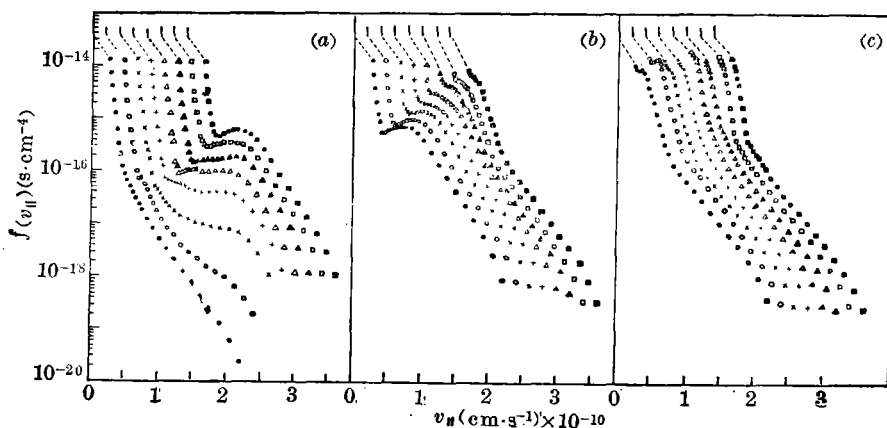


图 11. 从 ISEE-3 卫星上在 1979 年 2 月 17 日取得的资料, 根据能量和角度测量角 64 秒钟建立的一维电子速度分布函数。每一相继的分布向右漂移  $2 \times 10^9 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在事件发生前 20 分钟内的平均分布在 (a) 中用实心点表示。在事件期间 64 秒钟的分布测量, 每 5 分钟显示一次。注意到正斜率随着时间逐渐移向较低的速度。在  $\sim 20^{\text{h}}45^{\text{m}} - 20^{\text{h}}55^{\text{m}}$  UT 期间, 测量是不完整的。因为在电子检测器的视场内未包含磁场。21<sup>h</sup>00<sup>m</sup> UT 后, 在分布中很少再观测到正的斜率。时间(UT):

- (a) ● 19<sup>h</sup>20<sup>m</sup>—19<sup>h</sup>40<sup>m</sup>, ○ 19<sup>h</sup>45<sup>m</sup>, × 19<sup>h</sup>50<sup>m</sup>, + 19<sup>h</sup>55<sup>m</sup>, △ 20<sup>h</sup>00<sup>m</sup>, ▲ 20<sup>h</sup>05<sup>m</sup>, □ 20<sup>h</sup>10<sup>m</sup>, ■ 20<sup>h</sup>15<sup>m</sup>;
- (b) ● 20<sup>h</sup>20<sup>m</sup>, ○ 20<sup>h</sup>25<sup>m</sup>, × 20<sup>h</sup>30<sup>m</sup>, + 20<sup>h</sup>35<sup>m</sup>, △ 20<sup>h</sup>40<sup>m</sup>, ▲ 20<sup>h</sup>45<sup>m</sup>, □ 20<sup>h</sup>50<sup>m</sup>, ■ 20<sup>h</sup>55<sup>m</sup>;
- (c) ● 21<sup>h</sup>05<sup>m</sup>, ○ 21<sup>h</sup>10<sup>m</sup>, × 21<sup>h</sup>10<sup>m</sup>, + 21<sup>h</sup>15<sup>m</sup>, △ 21<sup>h</sup>20<sup>m</sup>, ▲ 21<sup>h</sup>25<sup>m</sup>, □ 21<sup>h</sup>30<sup>m</sup>, ■ 21<sup>h</sup>35<sup>m</sup><sup>[57]</sup>。

## 厘米波太阳射电天文学

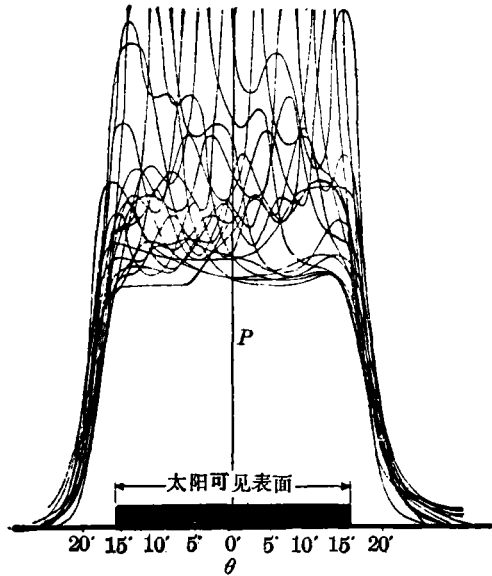


图 12. 常规多元干涉仪记录的迭加, 表明宁静太阳的贡献。p 是以任意单位表示的接收功率<sup>[39]</sup>。

自 1946 年 Covington 发现缓变成份 (SVC) 后, 直到 1953 年前在厘米波段没有多大进展, 在那时, Christiansen<sup>[39]</sup> 在 20 厘米波长引入了栅形或多元干涉仪, 它大大发展了研究宁静太阳和 SVC 的常规观测技术(图 12)。此后, 一个法国研究小组<sup>[40], [41]</sup> 于 1957 年在研究 SVC 中获得了一次重要的进展。这个小组第一次采用一维地球自转综合孔径在 3 厘米波长得出活动区的亮度分布, 既包括总强度又包括圆偏振(图 13), 并建立了与源有联系的太阳黑子的核-晕结构, 这导致通过回旋谐振吸收过程<sup>[42], [43]</sup> SVC 新理论的建立。自 1957 年后, 在厘米波长利用大型干涉仪例如 NRNO 三元和 Owens Valley 三元干涉仪, 已经对 SVC 作了各别的测量, 证实了先前的结果。作为一个太阳射电天文学家, 在 1974 年能够得到 Westerbork 综合孔径射电

望远镜 (WSRT) 的观测时间是个重要的成功。我们获得了开展很好的研究工作的机会; 最重

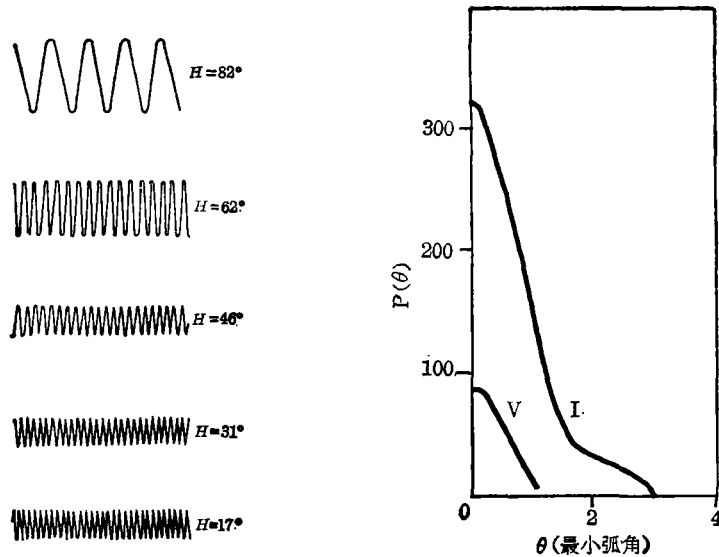


图 13. 左图: 在各种时角观测到的干涉条纹, 这是由缓变成份源造成的。右图: 总强度一维亮度分布图 (I) 和圆偏振一维亮度分布图 (V), 表明与 3cm 源有关的缓慢变化黑子的核-晕结构<sup>[41]</sup>。

要的是它使我们打破了大天线阵只局限于做宇宙射电天文研究工作的迷信。我们得到了与活动区<sup>[44]</sup>有关的太阳黑子的二维图,这可解释为日冕磁图(图14)。显然,这个结果是重要的,

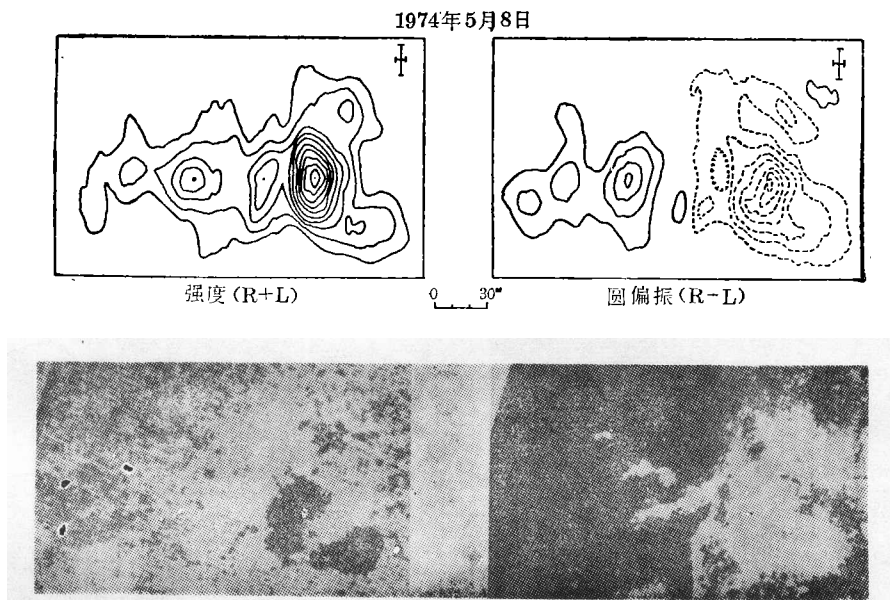


图14. 利用 WSRT 综合所得 1974年 5 月 8 日活动区的总强度和圆偏振图。方向东尺寸在右上角标出。等高线为 0.1, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00, 2.25, 2.50 ( $\times 10^6 \text{K}$ ) (对于R+L);  $-0.750, -0.625, -0.500, \pm 0.375, \pm 0.250, \pm 0.125, \pm 0.050$  ( $\times 10^6 \text{K}$ ) (对于R-L)。等高线用虚线表示正值。在R-L图中的影线表示偏振绝对值的减小。磁场用白色表示正值<sup>[44]</sup>。

因为在其他频段日冕磁场结构及其强度是不容易或不能直接测量的,在与6厘米源有关的太阳黑子中我们观测到环结构;我们还观测到厘米爆发源位于两个极性相反的区域之间<sup>[45]</sup>。自1979年以来,我们已经利用VLA证实了早期WSRT的结果;我们能够看到许多活动区环,而且由于产生快照图(10秒)的可能性,我们就能很仔细研究耀斑能量释放区的位置。因此,我们观测到微波爆发辐射区是位于环的顶部(图15)或者环的拱廊上<sup>[46], [47]</sup>。因为射电数据提供了能量释放处附近磁场结构信息,我们试图用现有的耀斑模型来解释VLA二维的总强度和偏振图。VLA的资料表明,在某些情况下孤立的环境模型是有利的,即在双极环的辐射起源于围绕环顶部的大部份区域。这些资料也表明,闭环之间的中性片,可能会触发耀斑的突然发生,恰象由四极结构的发展或由与新磁流管的浮现相关的中性平面取向变化所表示的那样<sup>[47]</sup>。

1978年,在太阳射电天文学中发生了令人惊奇的事情。Slottje<sup>[48]</sup>在Dwingeloo于11厘米波长观测到脉冲爆发的毫秒脉冲(图16)。理论研究表明,这些脉冲必定具有 $\sim 10^{15} \text{K}$ 的亮度。利用简单的非相干回旋同步加速机制来解释这些高亮度温度爆发是不可能的。在1979年,继Twiss 1958年解释太阳噪声暴的原始概念之后,我们提出回旋同步加速微波激射作为这些脉冲的可能机制<sup>[49]</sup>。也提出了一些其他的等离子体物理过程例如混合模式中的辐射<sup>[50]</sup>。就这一点来说,理论问题要比观测结果机灵得多。

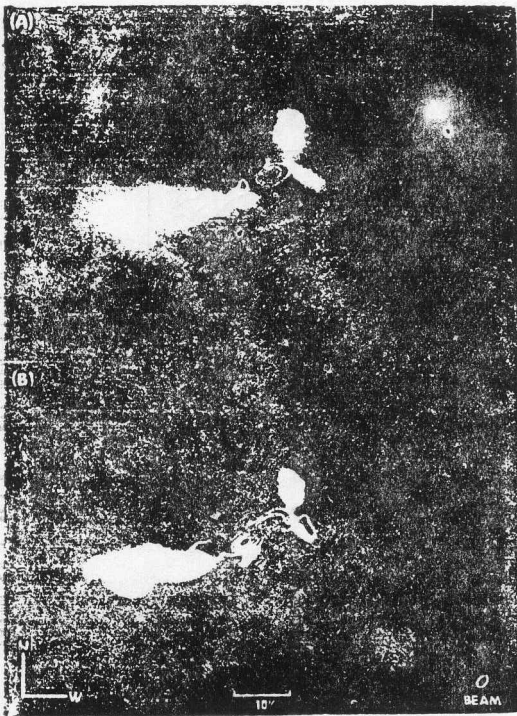


图 15. 耀斑的  $H\alpha$  照片, 与  $2\text{cm}$ - $\lambda$  甚大阵图, 此图是以  $0''.75$  分辨率利用 10 秒钟的资料得到的。等高线的间隔为峰值亮度温度的 20%。(a) 脉冲相峰值  $T_b = 2.5 \times 10^6 \text{K}$ ; (b) 渐变相峰值  $T_b = 5.2 \times 10^6 \text{K}$  [46]。

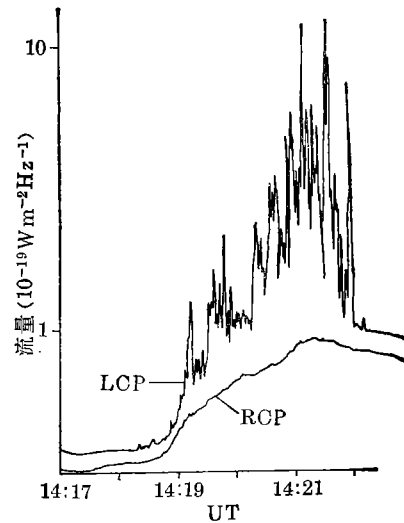


图 16. 微波爆发变化最迅速的部份, 左旋和右旋圆偏振 (LCP 和 RCP) 的流量密度, 此微波爆发与在 Dwingeloo 用  $2,650\text{MHz}$  观测到的重要的  $2\text{B } H\alpha$  耀斑有关。利用  $20\text{ms}$  时间分辨率不能分辨出精细结构 [48]。

表 3 摘录出太阳射电天文学中在厘米波段发生的主要事例。

表 3 厘米波长

1942年	1946年	1953年	1957—1958年
Southworth: 首次检测到微波辐射 (有计划的实验)。	Covington: 日食; 发现伴随着太阳黑子的 SVC; 宁静太阳和 SVC 的观测。	Christianson: 引入栅形干涉仪; SVC 源的常规性观测。	法国小组(Kundu): 一维地球自转综合孔径; SVC 源中的核-晕结构。
1962年	1974—1976年	1978年	1979—1982年
Zheleznyakov Kakinuma & Swarup: SVC 新理论; 回旋谐振吸收。	WSRT(马里兰小组): 第一张二维活动区图; 日冕磁图; 位于极性相反的两个区域间的爆发源。	Dwingeloo (荷兰小组): $T_b \sim 10^{15-16}\text{K}$ 的微波爆发毫秒结构; 回旋同步加速微波激射。	VLA (马里兰和其他小组): SVC 源的结构; 活动区环; 爆发源的快照图(10秒); 射电耀斑单环和环的拱顶; 耀斑模型的试验。

### 参 考 文 献

- [1] Hey, J. S., *Nature*, **157** (1946), 47.  
 [2] Southworth, G. C., *J. Franklin Inst.*, **239** (1945), 285.

- [ 3 ] Reber, G., *Astrophys. J.*, **100** (1944), 279.
- [ 4 ] Pawsey, J. L., *Nature*, **158** (1946), 633.
- [ 5 ] Martyn, D. F., *Nature*, **158** (1946), 633.
- [ 6 ] Ginzburg, V. L., C. R. (Doklady) de l'Academie des Sciences de l'URSS, **52** (1946), 487.
- [ 7 ] Covington, A. E., *Nature*, **159** (1947), 405.
- [ 8 ] Pawsey, J. L., Payne-Scott, R. and McCready, L. L., *Nature*, **157** (1946), 158.
- [ 9 ] Ryle, M. and Vonberg, D. D., *Nature*, **158** (1946), 339.
- [ 10 ] Payne-Scott, R., Yabsley, D. E. and Bolton, J. G., *Nature*, **160** (1947), 256.
- [ 11 ] Khaikin, S. E. and Tchikhatchev, B. M., C. R. (Doklady) de l'Academie des Sciences de l'URSS, **58** (1947), 1923.
- [ 12 ] Denisse, J. F., Blum, E. J. and Steinberg, J. L., *Compt. Rend.*, **234** (1952), 1597.
- [ 13 ] Haddock, F. T., IAU Symp. No.4, Radio Astronomy, 273, ed. by H. C. van de Hulst, Cambridge, Univ. Press, (1957).
- [ 14 ] Hagen, J. P., *Ibid*, 263, (1957).
- [ 15 ] Kundu, M. R., Erskine, F. T., Rao, A. P. and Bregman, J. D., *Astrophys. J.*, **234** (1979), 1122.
- [ 16 ] Wild, J. P. and McCready, L. L., *Aust. J. Sc. Res.*, **A3** (1950), 387.
- [ 17 ] Boischot, A., *Compt. Rend.*, **244** (1957), 1326.
- [ 18 ] Hansen, R. T., Garcia, C. J., Gregnard, R. J. M. and Sheridan, K. V., *Proc. ASA*, **2** (1971), 57.
- [ 19 ] Gergely, T. E. and Kundu, M. R., *Solar Phys.*, **34** (1974), 433.
- [ 20 ] Dulk, G. A., Smerd, S. F., MacQueen, R. M., Gosling, J. T., Magun, A., Stewart, R. T., Sheridan, K. V., Robinson, R. D. and Jacques, S., *Solar Phys.*, **49** (1976), 369.
- [ 21 ] Wild, J. P., *Proc. ASA*, **1** (1968), 137.
- [ 22 ] Wild, J. P., Sheridan, K. V. and Kai, K., *Nature*, **213** (1968), 536.
- [ 23 ] Pick, M. Raoult, A. and Vilmer, N., IAU Symp. No.86, Radio Physics of the Sun, 235, ed. by M. R. Kundu and T. E. Gergely, D. Reidel Publ. Co., (1980).
- [ 24 ] Kundu, M. R., Erickson, W. C., Gergely, T. E., Mahoney, M. J. and Turner, P. J., *Solar Phys.*, **83** (1983), 395.
- [ 25 ] Hartz, T. R., *Ann. d'Astrophys.* **27** (1964), 831.
- [ 26 ] Slysh, V. I., *Soviet Astron., A. J.*, **11** (1967), 72.
- [ 27 ] Stone, R. G., Malitson, H. H., Alexander, J. K. and Somerlock, C. R., in *Structure and Development of Solar Active Regions*, 585, ed. by K. O. Kiepenheuer, D. Reidel Publ. Co., (1968).
- [ 28 ] Haddock, F. T. and Graedel, T. E., *Astrophys. J.*, **160** (1970), 273.
- [ 29 ] Haddock, F. T. and Alvarez, H., *Solar Phys.*, **29** (1973), 183.
- [ 30 ] Kellogg, P. J., Lai, J. C. and Cartwright, D. G., *World Data Center A UAG-28, Part II*, (1973), 288.
- [ 31 ] Van Allen, J. A. and Krimigis, S. M., *J. Geophys. Res.*, **70** (1965), 5737.
- [ 32 ] Anderson, K. A. and Lin, R. P., *Phys. Rev. Letters*, **16** (1966), 1121.
- [ 33 ] Fainberg, J., Evans, L. G. and Stone, R. G., *Science*, **178** (1972), 743.
- [ 34 ] Frank, L. A. and Gurnett, D. A., *Solar Phys.*, **27** (1972), 446.
- [ 35 ] Gurnett, D. A. and Anderson, R. R., *Science*, **194** (1976), 1159.
- [ 36 ] Papadopoulos, K., Goldstein, M. L. and Smith, R. A., *Astrophys. J.*, **190** (1974), 175.
- [ 37 ] Lin, R. P., Potter, D. W., Gurnett, D. A. and Scarf, F. L., *Astrophys. J.*, **251** (1981), 364.
- [ 38 ] Malitson, H. H., Fainberg, J. and Stone, R. G., *Astrophys. J.*, **183** (1973), L35.
- [ 39 ] Christiansen, W. N. and Warburton, J. A., *Aust. J. Phys.*, **6** (1953), 262.
- [ 40 ] Alon, I., Kundu, M. R. and Steinberg, J. L., *Compt. Rend.*, **244** (1957), 1726.
- [ 41 ] Kundu, M. R., *Compt. Rend.*, **246** (1958), 2740.
- [ 42 ] Kakinuma, T. and Swarup, G., *Astrophys. J.*, **136** (1962), 975.
- [ 43 ] Zheleznyakov, V. V., *Soviet Astron. A. J.*, **6** (1962), 3.
- [ 44 ] Kundu, M. R. and Alissandrakis, C. E., *Nature*, **257** (1975), 465.
- [ 45 ] Alissandrakis, C. E. and Kundu, M. R., *Ap. J.*, **222** (1978), 342.
- [ 46 ] Marsh, K. A. and Hurford, G. J., *Astrophys. J.*, **240** (1980), L111.

- [47] Kundu, M. R., Schmahl, E. J., Velusamy, T. and Vlahos, L., *Astron. Astrophys.*, 103 (1982), 188.  
[48] Slottje, C., *Nature*, 257 (1978), 520.  
[49] Holman, G. D., Eichler, D. E. and Kundu, M. R., in IAU Symp. No. 86, *Radio Physics of the Sun*, 457, ed. by M. R. Kundu and T. E. Gergely, D. Reidel Publ. Co., (1980).  
[50] Vlahos, L., Sharma, R. R. and Papadopoulos, K., *Astrophys. J.*, 275 (1983), 374.

(刘金铭译 李春生 张云飞校)

## Forty Years of Solar Radio Research

M. R. Kundu

(Astronomy Program, University of Maryland, USA)