

# 射电星

刘绪昭

(中国科学院北京天文台)

## 提 要

本文介绍了射电星研究的发展过程和恒星射电天体物理的初步知识,并按如下四个方面评介了射电星观测研究最前沿的成果:星风的射电辐射(OB型星,沃尔夫-拉叶星,早型发射线星,共生星,金牛T型星,晚型巨星和超巨星);活动双星和dMe型星(猎犬RS型星,dMe型星,大陵五,激变变星,大熊W型星,活动超巨星);X射线星;新星和超新星。为了更好地理解观测结果,文中也介绍了初步的理论解释。

## 一、简 介

自本世纪四十年代后期,天文学家就开始探测太阳以外天体的射电辐射。射电星指已发现的具有射电辐射的恒星。当时一些学者多次宣称发现了射电星,实际上以后都被证认为射电星系、类星体、超新星遗迹。直至1963年还有人相信,类星体是射电星。不过,就在1963年,尽管探测阈比预期值要高两个数量级,Lovell et al.<sup>[1]</sup>还是探测到鲸鱼座UV型星的辐射,紧接着探测到了猎户座V317<sup>[2]</sup>和蝎虎座EV<sup>[3]</sup>的射电辐射。这些星都是M型矮耀星。这些意外的发现并未激起人们研究这个新领域的热情,甚至还没有得到承认。这可能是因为如下三个原因:1. 在六十年代,大多数天文学家没有充分估计这些发现;2. 资料获得相当慢。天文学家必须耗费相当多的观测时间才能获得有限的资料;3. 可信度太低。恒星爆发的偶发和瞬态本质使它难以与其他干扰区分开来。

根据恒星的角径、亮度和流量关系的一般知识,一些天文学家把射电望远镜指向邻近的红巨星。果然,在1966和1967年天文学家相继接收到两颗红巨星(猎户座 $\alpha$ 和御夫座 $\alpha$ )的射电辐射<sup>[4],[5]</sup>。接着其他类型星的射电辐射也被接收到,例如X射线源<sup>[6]</sup>和一些红矮星<sup>[7-9]</sup>。

尽管有上述研究,射电星天文学的兴起还是在七十年代。1970年,两个适用于射电星研究的干涉仪,分别在美国绿堤NRAO和荷兰Westerbork天文台建成。由于前者在观测和处理资料方面有极大的灵活性,因此在3.7和11.1厘米波段取得了许多成功的资料。干涉仪可以得到射电星的精确位置,且灵敏度高,特别是能确定射电辐射是否确实来自恒星。从1970年起,开始了对射电星的系统研究。

1987年1月17日收到。

1987年9月25日收到修改稿。

时至今日, 不仅单天线、干涉仪, 而且 VLA 和 VLBI 都已投入了对射电星的研究。射电星的研究成了射电天文研究的一个活跃的课题。自然, 射电星与太阳射电辐射的研究之间有不解之缘, 几乎主要的太阳射电天文学家都已致力于射电星的研究了。

本文介绍射电星天文学的最前沿的研究, 侧重于射电星的观测特征。

在本文评述观测之前, 为使读者能更好地理解资料, 先简介一些恒星射电天体物理的知识<sup>[10]</sup>。射电通量密度  $S_\nu$  的测量以央计。谱指数是在不同的观测波段处通量密度的对数比:

$$\alpha = \frac{\ln(S_{\nu_1}/S_{\nu_2})}{\ln(\nu_1/\nu_2)} \quad (1)$$

因此, 负(-)谱指数指非热现象。偏振既以圆偏振又以线偏振测量, 通常用百分比偏振

$$\Pi \equiv \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \quad (2)$$

来表示, 其中下标 1, 2 相应于  $R$ ,  $L$  或  $\parallel$ ,  $\perp$ 。但总通量定义为  $S = (S_1 + S_2)/2$ 。早期的射电天文学家无法想象高的偏振度, 因此, 目前出现偏振通量比总通量大的表现情况。最后亮温度  $T_B$  等效于在光学厚的热源中的电子温度。它与恒星参数的关系为

$$T_B = 2.12 \times 10^7 S_\lambda \lambda^2 d_*^2 / R_*^2 \quad (3)$$

$\lambda$  是观测波长(以厘米计),  $d_*$  是到恒星的距离(以秒差距计),  $R_*$  是源的半径(以太阳半径计)。因此, 太阳型星能以目前最灵敏的仪器 VLA(工作在 6 厘米波段)在 10 秒差距处被探测到,  $T_B > 8 \times 10^6 \text{K}$ 。

简单地考察  $S_\nu(t)$ ,  $\alpha$ ,  $\Pi$  和  $T_B$ , 并记住  $n_e \lesssim 1.1 \times 10^{13} \lambda^{-2} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。一些经验规则如下:

1. 若源迅速地变化( $\tau < 10$  分钟), 它可能是非热的。相反, 如果源在日一月的尺度上维持在相同的水平上, 那么它可能是热的, 或至少是由热背景控制的。

2. 若  $\alpha < -2$  或  $\alpha > +2$ , 辐射机制可能是相干的。在  $0 < \alpha < +2$  的区域, 源可能是光学厚的, 但是若没有其他资料(如迅速的时间变化性), 是难于区分源是热的或非热的。

3. 若观测到偏振, 则辐射机制是非热的。非常高的圆偏振百分比( $\Pi_c > 50\%$ )通常要求相干辐射过程。

4. 假定某些激发现象有特征速度, 根据辐射的变化性可以合理地估计源的大小。另外, 如果我们了解电子能量分布的某些知识, 并假定磁场结构是缠绕的或径向的, 根据圆偏振的百分比也可合理地估计源的大小。从源的大小和流量可以推断辐射源的亮温度  $T_B$ 。若  $T_B \lesssim 3 \times 10^8 \text{K}$ , 辐射机制可能是相干的。复杂的变化性加上非常高的圆偏振(百分比), 几乎可以肯定辐射机制是相干的。亮温度  $T_B > 10^{12} \text{K}$  是与不相干辐射机制不相容的。

## 二、星风的射电辐射

在射电波段, 恒星的热辐射提供了星风的温度和质量损失率的极有力的证据。但也有一些星风是强有力的非热辐射源。Abbott (1985)<sup>[11]</sup>提出了区分星风辐射的判据(表 1)。目前探测到有星风辐射的恒星类型有: OB 型, 沃尔夫-拉叶型, 金牛 T 型, 早型发射线星, 共生星及几个晚型巨星和超巨星。

### 1. OB 型星

明亮的早型星实际上是射电波段热星风辐射的强烈的发射体。根据紫外、光学和红外的资料, 所有比  $L_* \sim 10^4 L$ 。更明亮的 OB 型星都有强星风。由观测计算的星风模型表明, 在微波波段射电光球直径可达光球直径的 10 倍之多。图 1 表明 OB 型星质量损失率和恒星光度间的关系。已探测到射电辐射的 OB 型星有十几颗, 其中有一些判定为非热辐射<sup>[11], [12]</sup>。例如 9 Sgr(04V) 和 Cyg OB2 No. 9(05f), 根据它们的射电质量损失率和其他波段估计的质量损失率及射电谱指数, 我们可以断定这两颗星的射电辐射是非热的<sup>[12-14], [20]</sup>。

表 1 区分星风射电辐射的判据

1. 确定的热星风发射体	可分辨的射电辐射 $S_\nu = \nu^{0.6}$ $S_\nu$ 与 $\dot{M}$ (取自紫外、光学、红外) 一致
2. 可能的热星风发射体	无观测的频谱 $S_\nu$ 与 $\dot{M}$ (取自紫外、光学、红外) 一致
3. 可能的非热星风发射体	无观测的频谱 $S_\nu$ 的变化性超过 $\dot{M}$ (取自紫外、光学、红外)
4. 确定的非热星风发射体	不可分辨的射电辐射 $S_\nu \propto \nu^2$ , $\alpha \leq 0.0$ 具有实质的偏振

\* 表中的  $\dot{M}$  为质量损失率, 是最基本的星风参数。

另外还可举一些 OB 型星有非热射电辐射的例子。令人感兴趣的是, 这些非热辐射的表现形式都不一样, 很可能产生这些非热辐射的物理过程也各不相同。例如  $\rho$  Cyg 的射电辐射呈现月或更短时间的变化<sup>[14]</sup>。Van den Oord et al. (1985)<sup>[18]</sup> 将其解释为星风中电离度的变化。

### 2. 沃尔夫-拉叶星(W型星)

另一类早型星——沃尔夫-拉叶星的星风是密而不透明的。几乎对所有的射电波段, 射电光球直径超过可见光球的一千倍! 紫外、光学或红外的频谱复杂, 不能得到质量损失率。V444 Cyg(WN5+06) 是个例外<sup>[15]</sup>, 因而无法判定射电辐射属于热的或非热的。但一些学者(例如 Dickel et al. (1980)<sup>[16]</sup> 和 Abbott et al. (1985)<sup>[17]</sup>) 测量了七颗 W 型星的多频射电辐射和进行了高分辨率观测, 因而确认了它们的辐射是热的。

已判明部分 W 型星是或可能是非热射电辐射源。例如 MR 93 和 HD 193793 肯定是非热辐射源<sup>[11], [19]</sup>。

### 3. 早型发射线星

自从  $\alpha$  Sco B<sup>[21]</sup> 和 MWC 349<sup>[22]</sup> 的射电辐射被发现以来, 早型发射线星成为射电研究的对象。Purton et al. (1982)<sup>[23]</sup> 普查了 325 颗早型发射线星, 他们探测到其中 85 颗的射电辐射。据信, 这些辐射都是热的。大部分情况中频谱都是平的, 可解释为光学薄气体的韧致辐射。但这些天体中可能有一种新的射电辐射谱, 近似为  $S \propto \nu$  的形式, 可解释为具有反平方密度轮廓的球对称壳的辐射。这样的壳由中心星延伸的连续物质流形成。

Nesterov (1984)<sup>[24]</sup> 测量了 5 颗发射线星在 13.5 毫米和 8.5 毫米波段的射电辐射, 发现

MWC 349 流量有变化, 幅度为 1—2 倍, 时间尺度为年。

#### 4. 共生星

共生星的光谱表明存在 M 型巨星和发射受激发射线的星。一些学者在不同波段进行了共生星的射电研究<sup>[26-27]</sup>, 他们用 VLA 在 4.9 千兆赫波段观测了 59 颗共生星, 灵敏度约 0.5 毫央, 探测率为 30%, 其中最引人注目的例子是 V1016 Cyg, MH Sge 和 AG Peg, 它们的射电频谱不呈现强的变化, 产生辐射的区域比双星轨道大 1,000 倍之多。其辐射可能是产生于电离星周围云的热辐射。射电光度与 M 型巨星相关, 这表明星风可能出自 M 型巨星, 而由热伴星使气体电离。

#### 5. 金牛 T 型星

迄今, 人们只探测到少量金牛 T 型星的连续自由-自由辐射<sup>[28]</sup>。这样的辐射被认为是电离星风的特征。这些源经常出现在 H-H 天体邻域。射电谱线(<sup>12</sup>CO J=1—0 跃迁)有宽的不对称翼, 显示出存在高超声速的物质流。一些该类型星辐射的高分辨率观测表明, 在辐射区域存在延伸的结构——喷流<sup>[29],[30]</sup>。

T Tau 的低光度红外伴星是比 T Tau 本身要强的射电连续辐射源<sup>[31]</sup>。很可能, 这颗演化上更年轻的星体是这个区域分子物质流的源。

一颗典型的金牛 T 型星(V410 Tau)还呈现类耀斑活动<sup>[29]</sup>。

#### 6. 晚型巨星和超巨星

一些学者声称探测到来自晚型巨星和超巨星(GO—M5)的色球和日冕的射电辐射<sup>[11],[32],[34],[35]</sup>。这些辐射缺乏变化和偏振, 观测到的谱指数表明, 射电辐射区域存在速度和/或温度梯度。射电辐射很可能来自部分电离的膨胀色球。Drake 和 Linsky (1983)<sup>[33]</sup>估计  $\alpha^1$  Her 的射电发射区域的电离度为 0.2—2%。

另外, 一些包含巨星或超巨星的双星系统的星风辐射也已探测到了, 例如某些仙王 VV 型恒星系统, HM Sag 等<sup>[36],[37]</sup>。

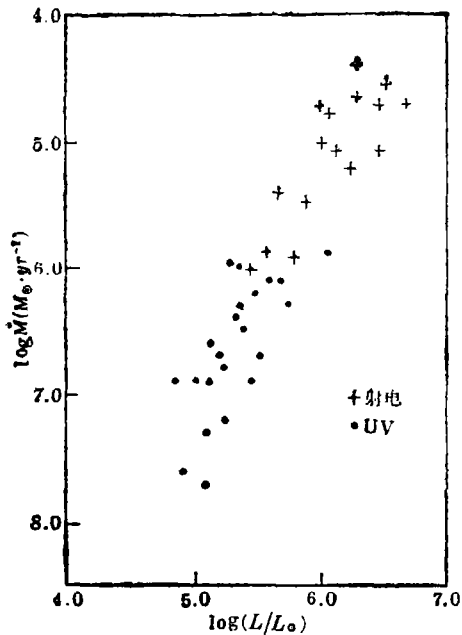


图 1

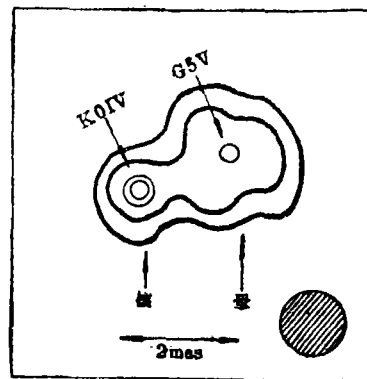


图 2

### 三、活动双星和耀星

部分双星和晚型星呈现的爆发比太阳上的射电活动猛烈千百倍，其中包括猎犬 RS 型星、dMe 型星、大陵五、激变双星。

#### 1. 猎犬 RS 型星

这是最受重视的呈现射电活动的一类恒星。现已探测到 36 颗猎犬 RS 型星的射电辐射<sup>[38]</sup>，其中被广泛研究并取得大量资料的是 V711 Tau (HR 1099)，AR Lac 和 UX Ari。

Gibson 和 Hjellming(1974)<sup>[39]</sup>首次观测到猎犬 RS 型星的射电辐射。该类星的射电辐射是高度变化的，且经常有明显的圆偏振，射电谱较平。

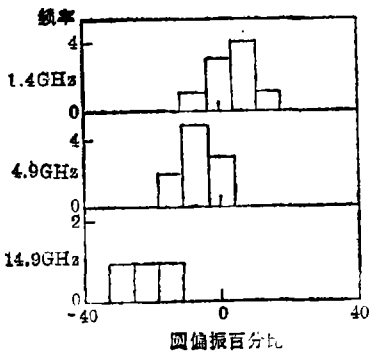


图 3

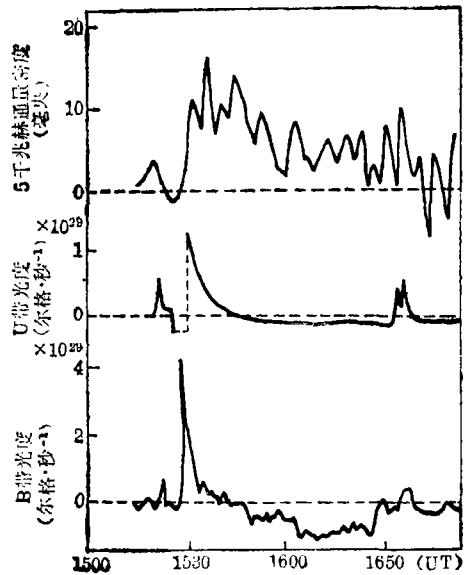


图 4

猎犬 RS 型星的射电爆发的极大光度可达几千流明<sup>[40]</sup>，Lestrade et al. (1985)<sup>[41]</sup>的 VLBI 观测表明，该类星的线尺度约  $10^{12}$  厘米，相应地，该类星的射电爆发的极大亮度约  $10^{10}$  K。Lestrade et al.<sup>[40]</sup>还发现该类星有可变的核晕结构。图 2 是 UX Ari 在 1983 年 7 月一次强爆发的 5 千兆赫高分辨率图<sup>[44]</sup>。

在该类星的爆发中，只有很少短持续时间的强爆发是近乎 100% 圆偏振的<sup>[42]</sup>。Mutel et al. (1985)<sup>[43]</sup>用 VLA 在 1.4, 4.9 和 15 千兆赫处测量了 UX Ari 和 HR 1099 的圆偏振，结果清楚地揭示出在 1.4 和 4.9 千兆赫之间偏振发生反转(参见图 3)。资料取自二年期间，这表明许多双星中磁场位形十分稳定。尽管高通量密度的观测还很少，但已可初步得出结论，猎犬 RS 型星的射电爆发的总光度与圆偏振反相关。

Mutel 和 Lestrade (1985)<sup>[38]</sup>找到了猎犬 RS 型星的极大射电光度与双星旋转周期间的关系： $L_R \propto P^{-0.7}$ 。他们猜测，在短周期时，射电光度的减少是由于能量在色球中沉积饱和所致。

综合猎犬 RS 型星的射电光度、结构、偏振等结果，可以认为它们的射电辐射是由中等

相对论电子( $E > 1\text{MeV}$ )产生的回旋同步加速辐射。

## 2. dMe 型星

该类星是最早被探测到射电波的恒星<sup>[1],[2]</sup>,迄今大约接收到 10 颗 dMe 型星的射电辐射,其中最典型的是 UV Cet 和 YZ CMi。dMe 型星的射电亮温度是如此之高( $T_B > 10^{12}$ ),以至于辐射机制必须被认为是相干的。Lang et al. (1983)<sup>[45]</sup>探测到流量变化的时间尺度小于 0.2 秒的射电爆发(AD Leo)。这意味着源的尺度小于 0.3 恒星半径,亮温度高将达  $T_B > 10^{13}\text{K}$ 。

dMe 型星的射电耀斑,除了有强烈的圆偏振外,还有线偏振。在 430 兆赫波段处,Spangler (1975)<sup>[46]</sup>观测到偏振度高达 60—70% 的 dMe 型星。这意味着该类星的射电爆发辐射机制很可能是由电子(能量达 10—20MeV)产生的同步加速脉泽。

dMe 型星的射电爆发与光学事件间的对应是不好的(例如 Nelson et al., 1986<sup>[48]</sup>),爆发的谱指数在  $-5 < \alpha < -1$  之间<sup>[47]</sup>。爆发的另一个显著特征是高脉冲,例如 AT Mic 在 1983 年 8 月 3 日发生的一次事件中就是如此<sup>[48]</sup>(图 4)。而且在 196—430 兆赫波段,爆发的持续时间一般为几秒到几十秒<sup>[46]</sup>。从该类星爆发中的 0.2 秒的精细结构<sup>[45]</sup>可以看到,它们在爆发时不规则地、猛烈地甚至脉冲式地释放能量。

除了猛烈的爆发外,观测<sup>[49-52]</sup>还发现了一些 dMe 型星的宁静辐射,例如 UV Cet, YY Gem, Wolf 630 AB 和 AU Mic。这些辐射通量每次测量都有变化,可能是因为在低水准的耀斑或反映了活动区的消长。这些辐射的稳定成份也比星冕热辐射所预期的要强一个数量级以上。Kundu 和 Shevgaonkar (1985)<sup>[51]</sup>认为辐射的“稳定成份”可归因于具有幂律能量分布的非热电子的回旋同步辐射。按此辐射机制估计,恒星光球磁场应达几千高斯,与相应的磁场观测相符<sup>[53]</sup>。在厘米波段辐射源直径可达 2—6 个恒星直径。

## 3. 大陵五

大陵五是继  $\alpha$  Sco 之后第二个被发现的射电双星<sup>[54]</sup>和第一个用 VLBI 观测的射电星<sup>[55]</sup>。

大陵五的射电辐射可分为两类:宁静和爆发。宁静辐射的通量在 20—50 毫央,频谱几乎是平的。有时呈现时间尺度为日的变化。当爆发时,射电通量迅速而激烈地变化。在短波处,爆发幅度更大,亮温度可达  $10^{10}\text{K}$ 。Woodsworth 和 Hughes (1976)<sup>[56]</sup>认为宁静辐射是围绕着双星的巨大等离子云的热辐射。

多频观测<sup>[41]</sup>表明,在爆发过程中谱指数发生变化。爆发有明显的核晕结构。Mutel (1985)<sup>[44]</sup>记录到 1983 年的一次爆发:核( $l \leq 1.7 \times 10^{11}$  厘米)比双星中任何一个直径都小,而晕与双星系统的直径相当。核的辐射是无偏振的;而晕有 5% 的圆偏振,此辐射可能产生于电子回旋脉泽<sup>[57]</sup>。

## 4. 其他

近年来,天文学家用高灵敏度射电望远镜已探测到少数 AM Her 型激变变星, DQ Her 型激变变星,大熊 W 型星以及巨星和超巨星的射电活动<sup>[58-65]</sup>。但这些射电星的射电爆发的观测研究只是刚刚起步,有些工作甚至有待于进一步证实。由于缺乏这类射电辐射的系统知识,我们只能限于设想,这些射电耀斑应起源于强磁场的巨大恒星黑子。

#### 四、强 X 射线源<sup>[66]</sup>

一些强 X 射线源发射强而罕见的剧烈变化的射电辐射, 这些辐射与其说是类太阳的非热事件, 不如说是类似类星体的同步加速事件。辐射可能与以球或圆柱状膨胀的高能激波有关。自然, X 射线源的射电辐射形态各异, 可能涉及不同的辐射起源甚至辐射机制。

首次被探测到射电辐射的 X 射线源是 Sco X-1<sup>[6]</sup>。在表 2 中列出迄今已发现的主要的具有射电辐射的 X 射线源。

下面我们介绍几个重要的 X 射线源的射电特征。

Sco X-1 是个三重射电源, 两子源距中心源  $1'.2$ , 中心源是可变的<sup>[60]</sup>。高分辨率观测表明<sup>[82]</sup>, 在西南子源的外缘有热斑, 与河外射电双源相似。东北子源远离中心源的速度为 20 公里/秒。

表 2 已知发射射电波的主要的 X 射线源

名 称	射 电 特 征	参 考 文 献
Sco X-1	由双源环绕的可变射电源	[6],[67]
Cyg X-1	很少耀斑的最稳定的源, 射电辐射变化与 X 射线变化一致	[68],[72]
Cyg X-2	相对稳定的源	[69]
Cyg X-3	宁静辐射有起伏, 强的同步加速耀斑事件, 在南北向有 $0.2-0.4c$ 速度的喷流	[70],[71]
GX 17+2	可变源	[72]
GX 5-1	可变源	[73]
A0 620-003	与瞬时 X 射线源相联系的瞬时射电源	[73]
Cen X-4	瞬时 X 射线和射电源	[74]
LSI + 61°303	周期射电源	[75]
Cir X-1	周期和耀斑射电源	[76],[77]
SS 433	具有速度为 $0.26c$ 的进动相对论喷流的变源	[78],[79]

Cyg X-3 是个以产生强爆发而著称的耀斑源, 在强耀斑时, 极大射电通量大于 20 央<sup>[82]</sup>, 而在宁静时只有  $0.1-0.3$  央。一般认为它的强烈射电事件混合有电离热气体膨胀的同步加速辐射<sup>[83]</sup>。Cyg X-3 也呈现低水准(低于 1 央)的耀斑<sup>[81]</sup>。Geldzahler et al. (1983)<sup>[80]</sup>指出, Cyg X-3 在耀斑事件后, 显示出准直的相对论性膨胀——喷流, 在南北方向速度为  $0.2$

—0.4c。

Cir X-1 和 LSI + 61°303 的射电源是耀斑事件与低能量水平调制的混合辐射<sup>[84],[75]</sup>, 后者与双星周期相关。在 Cyg X-3 中偶尔也显示出这样性质的幅度调制<sup>[85]</sup>。

Ryle et al. (1979)<sup>[87]</sup>和 Seaquist et al. (1979)<sup>[88]</sup>独立地发现了 SS 433 (V1343 Aq1) 的射电辐射。在大尺度图上, 它是处于超新星遗迹 W50 内的致密源<sup>[89]</sup>。在所有波段, 中心源是高度可变的, 辐射幅度至少变化 4 倍<sup>[92]</sup>。射电延伸部分(喷流)具有 20% 的强偏振, 自行为每年 3", 周期为 164 天。该源的谱指数为 -0.6 到 -0.7<sup>[90]</sup>, 与其他射电星的自吸收或外吸收效应的行为相反。长寿喷流的物质严格处于预期的螺旋轨迹上。

## 五、新星和超新星

按一般规律, 在研究射电星的初期, 人们就期望探测到新星和超新星的射电辐射。1970 年 6 月 Hjellming 和 Wade<sup>[93],[94]</sup>探测到新星 Del 1967 和 Ser 1970 的射电辐射。Hjellming 和 Wade (1979)<sup>[95]</sup>研究了 HR Del 1967, FH Ser 1970 和 V1500 Cyg 1975 的较完整的射电光变曲线, 发现新星的射电流量变化与膨胀的电离壳一致。

Padin, Davis 和 Bode<sup>[96]</sup>在 1985 年首次观测到再发新星的射电辐射, 估计亮温度为  $10^7\text{K}$ 。

在 1980 年以前, 许多探测超新星射电辐射的企图都失败了, 唯一成功的是 Gottesman et al. (1972)<sup>[97]</sup>对 1970g 的观测, 这是颗 II 型超新星。

以后 Weiler<sup>[98]</sup>用 VLA 在 2, 6 和 20 厘米波段对星系 NGC 4321 中的超新星 SN1979c、星系 NEC 6946 中的超新星 SN 1980 k 进行了 5 年之久的观测研究。这是两颗 II 型超新星。射电辐射流量随时间变化, 先上升, 尔后下降, 存在快速反转点。它们的谱指数随时间单调下降。射电辐射先在短波段成为光学上薄的。它们都是具有高亮温度和非热谱指数的发射源。

一直到 1983 年才发现了一颗发射射电辐射的 I 型超新星<sup>[99]</sup>, 它被称为 SN 1983n。1983 年 7 月 3 日首先在光学波段探测到该超新星。7 月 6 日由 VLA 测量的 6 厘米射电通量为 2.0 毫央, 谱指数为 -1.04。这表明辐射显然是非热的。I 型超新星衰减得比 II 型要快。

SN 1983n 可能不是单星<sup>[99]</sup>。计算的质量损失率( $2.7 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{年}$ )表明, 超新星爆发前星体的伴星可能是  $6.5 M_{\odot}$  的红巨星。在此图景中, I 型超新星的射电辐射要求一颗具有特别重的子星的爆发前双星。这暗示, 可探测的 I 型超新星射电辐射可能是十分罕见的。

VLA 在 5 千兆赫对 M82 观测的结果<sup>[100]</sup>更令人激动和有趣。在 M82 核中发现有 40 个分立源, 其中大部分明亮源在几个月到一年中强度下降。无论从分立源的射电亮度或从其变化性都表明它们是射电超新星。从 1981—1983 年的观测指出, 这些分立源中既有 I 型又有 II 型超新星, 还可能有尚未证认的新类型。

## 六、尾 语

随着射电天文仪器灵敏度的提高, 探测到射电辐射的恒星数和恒星类型在八十年代有了



迅速的增加。一些恒星得到了较多的观测时间, 如大陵五, SS 433、HR 1099 等; 一些类型的射电星得到了较多的关注, 如猎犬 RS 型星、dMe 型星; 因而也取得了较多的结果。而另一些类型的恒星的射电辐射研究(如射电活动超巨星、激变变星等), 仅刚刚开始或处于初级阶段。即使研究得较多的恒星类型, 也有明显不足的方面。甚至有些类型的恒星的射电辐射研究仅处于理论探讨阶段。

根据射电星研究的现状和当前的射电仪器设备, 下面几个方面的观测将是很有益的: 1. 为取得可靠而丰富的信息, 开展多波段多台站对射电星的同时观测; 2. 毫米波射电辐射的探测; 3. 高分辨率观测(VLA、VLBI、VLBA); 4. 高时间分辨率观测。

我们从太阳现象的复杂性, 可以推测射电星的辐射必定是千姿百态的。要增进我们对恒星射电现象的理解, 还有待于恒星射电天体物理的进一步发展。

### 参 考 文 献

- [1] Lovell, B., Whipple, F. L. and Solomon, L. H., *Nature*, 198 (1963), 228.
- [2] Slee, O. B., Solomon, L. H. and Patson, G. E., *Nature*, 199 (1963), 991.
- [3] Lovell, B., Whipple, F. L. and Solomon, L. H., *Nature*, 202 (1964), 377.
- [4] Kellerman, K. I. and Pauliny-Toth, I. I. K., *Ap. J.*, 145 (1966), 953.
- [5] Seaquist, E. R., *Ap. J. Lett.*, 148 (1967), L23.
- [6] Andrew, B. H. and Purton, C. R., *Nature*, 218 (1968), 855.
- [7] Lovell, B., *Nature*, 222 (1969), 1126.
- [8] Kunkel, W. E., *Nature*, 222 (1969), 1129.
- [9] Andrews, A. D., IAU Inform. Bull. Variable Stars, No. 325, (1969).
- [10] Gibson, D. M., in *Activity in Red Dwarf Stars*, 273, ed. by P. B. Byrne and M. Rodono, (1983).
- [11] Abbott, D. C., in *Radio Stars*, 61, ed. by R. M. Hjellming and D. M. Gibson, (1985).
- [12] Abbott, D. C., Bieging, J. H. and Churchwell, E., *Ap. J.*, 280 (1984), 671.
- [13] Rodriguez, L. F., et al., in *Radio Stars*, 127, (1985).
- [14] Abbott, D. C., Bieging, J. H. and Churchwell, E., *Ap. J.*, 250 (1981), 645.
- [15] Kornilov V. G. and Cherepaschuk, A. M., *Pis'ma Astr. Zu.*, 5 (1979), 398.
- [16] Dickel, H. R., Habing, H. J. and Isaacman, R., *Ap. J. Lett.*, 238 (1980), L39.
- [17] Abbott, D. C., Bieging, J. H. and Churchwell, E., *NASA Conf. Publ.*, 2358, p.47, (1985), in prepare.
- [18] van den Oord, G. H., et al., in *Radio Stars*, 111, (1985).
- [19] Becker, R. H. and White, R. L., in *Radio Stars*, 139, (1985).
- [20] Persi, P., et al., *A. Ap.*, 142 (1985), 263.
- [21] Hjellming, R. M. and Wade, C. M., *Ap. J. Lett.*, 168 (1971), L115.
- [22] Braes, L. L. E., Habing, H. J. and Schoenmaker, A. A., *Nature*, 210 (1972), 230.
- [23] Purton, C. R. et al. *M. N. R. A. S.*, 198 (1982), 321.
- [24] Nesterov, N. S., *Bull. Crimean Astrophys. Obs.*, 69 (1984), 67.
- [25] Wright, A. E. and Allen, D. A., *M. N. R. A. S.*, 184 (1978), 893.
- [26] Kwok, S., in *Proc. of the North American Workshop on Symbiotic Stars*, ed. by R. E. Seencel, 24, (1981).
- [27] Seaquist, E. R., Talor, A. R. and Button, S., *Ap. J.*, 284 (1984), 202.
- [28] Cohen, M., Beiging, J. H. and Schwartz, P. R., *Ap. J.*, 253 (1982), 707.
- [29] Bieging, J. H., Martin, C. and Scheartz, P. R., in *Radio Stars*, 105, (1985).
- [30] Brown, A., Mundt, R. and Drake, S. A., in *Radio Stars*, 105, (1985).
- [31] Edwards, S. and Snell, R. L., *Ap. J.*, 261 (1982), 151.

- [32] Drake, S. A. and Linsky, J. L., *A. J.*, 91 (1986), 602.
- [33] Drake, S. A. and Linsky, J. L., *Ap. J., Lett.*, 274 (1983), L77.
- [34] Newell, R. T. and Hjellming, R. M., *Ap. J. Lett.*, 263 (1982), L85.
- [35] Hjellming, R. M. and Newell, R. T., *Ap. J.*, 275 (1983), 704.
- [36] Hjellming, R. M., in *Radio Stars*, 151, (1985).
- [37] Kwok, S., Bignell, R. C. and Purton, C. R., *Ap. J.*, 279 (1984), 138.
- [38] Mutel, R. L. and Lestrade, J. F., *A. J.*, 90 (1985), 193.
- [39] Gibson, D. M. and Hjellming, R. M., *P. A. S. P.*, 86 (1974), 652.
- [40] Mullan, D. J., in *Radio Stars*, 173, (1985).
- [41] Lestrade, J-F. et al., in *Radio Stars*, 275, (1985).
- [42] Brown, R. L. and Crane, P. C., *A. J.*, 83 (1978), 1504.
- [43] Mutel, R. L., Lestrade, J-F. and Doiron, D. J., in *Radio Stars*, 259, (1985).
- [44] Mutel, R. L. et al., *Ap. J.* 289 (1985), 262.
- [45] Lang, K., et al., *Ap. J. Lett.*, 272 (1983), L15.
- [46] Spangler, S. R., PhD. dissertation, Univ. of Iowa, (1975).
- [47] Gibson, D. M. in *Activity in Red-Dwarf Stars*, 273, ed. by P. B. Byrne and M. Rodono, (1983).
- [48] Nelson, G. J. et al., *M. N. R. A. S.*, 220 (1986), 91.
- [49] Fisher, P. L. M. S., thesis, New Mexico Institute of Mining and Tec., (1982).
- [50] Linsky, J. L. and Gary, D. E., *Ap. J.*, 274 (1983), 776.
- [51] Kundu, M. R. and Shevgaonkar, R. K., *Ap. J.*, 279 (1985), 644.
- [52] Gary, D. E., in *Radio Stars*, 185, (1985).
- [53] Marcy, G. W., *Bull. A. A. S.*, 12 (1980), 834.
- [54] Wade, C. W. and Hjellming, R. M., *Nature*, 235 (1972), 270.
- [55] Clark, B. G., Kellermann, K. I. and Shaffer, D., *Ap. J. Lett.*, 198 (1975), L123.
- [56] Woodsworth, A. W. and Hughes, V. A., *M. N. R. A. S.*, 175 (1976), 177.
- [57] Melrose, D. B. and Dulk, G. A., *Ap. J.*, 259 (1982), 844.
- [58] Chanmuga, G. and Wagner, R. L., *Ap. J.*, 222 (1978), 641.
- [59] Chanmuga, G. and Dulk, G. A., *Ap. J. Lett.*, 255 (1982), L107.
- [60] Benz, A. O. Furst, E and Kiplinger, A. L., *Nature*, 302(1983), 45.
- [61] Bookbinder, J. A. and Lamb, D. Q., *Bull. A. A. S.*, 17 (1985), 589.
- [62] Furst, E. et al., *A. Ap.*, 154 (1986), 377.
- [63] Hughes, V. A. and McLeen, B. J., *Ap. J.*, 278 (1984), 716.
- [64] Hjellming, R. M. and Gibson, D. M., in *Radio Physics of the Sun*, 209, ed. by M. R. Kundu and T. E. Gergely, (1980).
- [65] Gibson, D. M., *Bull. A. A. S.*, 10 (1979), 63.
- [66] Hjellming, R. M. and Johnston, K. J., in *Radio Stars*, 309, (1985).
- [67] Fomalont, E. B. et al., *Ap. J.*, 275 (1983), 802.
- [68] Hjellming, R. M., *Ap. J. Lett.*, 182 (1973), L29.
- [69] Hjellming, R. M. and Blankenshia, L. C., *Nature Phy. Sci.*, 243 (1973), 81.
- [70] Johnston, K. J. et al., *Ap. J. Lett.*, 273 (1983), L65.
- [71] Geldzahler, B. J., in *VLBI and Compact Radio Sources*, 281, ed. by R. Fanti, K. Kellermann and G. Setti, (1985).
- [72] Hjellming, R. M. and Wade, C. M., *Ap. J. Lett.*, 168 (1971), L21.
- [73] Geldzahler, B. J., *Ap. J. Lett.*, 264 (1983), L49.
- [74] Hjellming, R. M., IAU Circular, No. 3369, (1979).
- [75] Taylor, A. R. and Gregory, P. C., *Ap. J.*, 255 (1982), 210.
- [76] Preston, R. A. et al., *Ap. J. Lett.*, 268 (1983), L23.
- [77] Nicolson, G. D., in *VLBI and Compact Radio Sources*, 285, (1985).

- [78] Hjellming, R. M. and Johnston, K. J., *Ap. J. Lett.*, **246** (1981), L141.  
[79] Schilizzi, R. T., Romney, J. D. and Spencer, R. E. in *VLBI and Compact Radio Sources*, 289, (1985).  
[80] Mason, K. O. et al., *Ap. J.*, **207** (1976), 78.  
[81] Fomalont, E. B. et al., *Ap. J.*, **275** (1983), 802.  
[82] Hjellming, R. M., *Science*, **182** (1973), 1039.  
[83] Marsh, A. P. and Brown, R. L., *Ap. J.*, **200** (1975), 719.  
[84] Whelan, J. A. J. et al., *M. N. R. A. S.*, **181** (1977), 259.  
[85] Hjellming, R. M., in *X-Ray Binaries*, NASA SP-389, 233, (1976).  
[86] Geldzahler, B. J. et al., *Ap. J. Lett.*, **273** (1983), L65.  
[87] Ryle, M. et al., *Nature*, **276** (1979), 571.  
[88] Seaquist, E. R. et al., *A. J.*, **84** (1979), 1037.  
[89] Geldzahler, B. J., Pauls, T. and Salter, C., *A. Ap.*, **84** (1980), 237.  
[90] Hjellming, R. M. and Johnston, K. J. (1985), in prepare.  
[91] Molar, L. A., Reid, M. J. and Grindlay, J. E., *Nature*, **310** (1984), 662.  
[92] Margon, B., *Ann. Rev. A. Ap.*, **22** (1984), 507.  
[93] Hjellming, R. M. and Wade, C. M., *Ap. J. Lett.*, **162** (1970), L1.  
[94] Hjellming, R. M. and Wade, C. M., *Ap. J. Lett.*, **168** (1970), L115.  
[95] Hjellming, R. M. and Wade, C. M., *A. J.*, **84** (1979), 1619.  
[96] Padin, S., Davis, R. J. and Bode, M. F., *Nature*, **315** (1985), 306.  
[97] Gottesman, S. T. et al., *Ap. J.*, **174** (1972), 383.  
[98] Weiler, K. W. in *Supernovae as Distance Indicators*, 65, ed. by H. Araki et al., (1984).  
[99] Sramek, R. A., Panagia, N. and Weiler, K. W., *Ap. J. Lett.*, **285** (1984), L63.  
[100] Kronberg, P. P. et al., *Ap. J.*, **291** (1985), 693.

(责任编辑 谢应纯)

## Radio Stars

Liu Xuzhao

(Beijing Astronomical Observatory, Academia Sinica)

### Abstract

The development of researches on radio stars and an introduction to stellar radio astrophysics are given in this paper. The frontiers of the observations on radio stars are reviewed in terms of the following four respects: radio radiations of star winds (O-, B-Type stars; Wolf-Rayet star; early-type emission line stars; symbiotic stars; T Tau stars; and late-type giants and supergiants); active binaries and dMe stars (RS CVn stars; dMe stars; Algol; cataclysmic variables; W UMa stars; active supergiants); X-ray stars; Novae and Supernovae. The preliminary theoretical explanations of them are also mentioned for the understanding of the observational results.