

# 微波爆发区的日冕磁场研究

周爱华<sup>1</sup> 傅其骏<sup>2</sup> 马春玉<sup>1</sup> 张和祺<sup>1</sup>

(1. 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2. 中国科学院北京天文台 北京 100080)

## 摘 要

回顾了日冕磁场的研究历史,介绍了我们首次提出的日冕磁场的微波诊断方法及其应用所带来的启迪,提出进一步开展日冕磁场及其相关研究的建议。

**关键词** 太阳;日冕—太阳;射电辐射

## 1 引 言

日冕磁场和结构是日冕大气中的最为重要的物理量之一,它也是理解太阳耀斑起源、日冕加热过程和日冕结构演化的关键。由于冕线的塞曼效应太小,不能用光学方法测定日冕磁场,所以通过射电辐射测定日冕磁场成了唯一的方法。微波发射是由高能电子与日冕磁场相互作用而产生的,因此微波发射携带着日冕磁场的信息。另外,微波爆又是高能电子被加速的直接反映,这些高能电子又携带着耀斑的绝大部分能量沉降到色球,以致引起色球线发亮,所以微波发射观测又不仅可作为高能电子加速机理的研究依据,而且可以对耀斑能量释放和色球耀斑的热与非热机理的诊断提供定量判据。

Newkirk(1967)<sup>[1]</sup>和Dulk, Mclean(1978)<sup>[2]</sup>对用射电方法来决定日冕磁场的研究作过评述,最近Krüger和Hildebrandt(1993)<sup>[3]</sup>详细讨论了应用于活动区宁静态和耀斑态的日冕磁场的基本诊断方法。从以往所提出的方法来看,多数是用于活动区宁静态时的日冕磁场的诊断,而适用于耀斑态磁场测定的方法,多数依赖于射电分米波和米波波段的结构的研究。但这些波段的射电波的发射结构常与难以确定的等离子体密度 $n_e$ 有关,以致所测定的磁场强度 $B$ 误差很大。在微波发射方面,长期以来没有提出一种满意的方法测定日冕磁场,以致高能电子的一系列信息也无法求得,这几乎是共知的事实<sup>[3]</sup>。在本文中给出有关这一方面的最新进展情况,即我们最近提出的用微波爆发谱诊断日冕磁场的方法的特点及其应用所带来的启迪。

## 2 历史回顾

60年代末人们在研究周围电离介质对低频同步加速辐射的影响时,发现在

$$\nu_R \cong 20n_e/B_{\perp} \quad (1)$$

的频率上,同步加速辐射受到强烈抑制,即所谓的 Razin 效应。利用这个判别式,可以估计频率为几百 MHz 的日冕高度上的磁场强度  $B$ , Boishot 和 Clavelier(1967)<sup>[4]</sup> 曾得到  $n_e$  为  $10^7\text{cm}^{-3}$  的日冕高度上的  $B$  为 0.5G。Holt 和 Ramaty(1969)<sup>[5]</sup> 认为只要在  $\nu_B < \nu_p/3$  处,甚至在微波波段 Razin 效应也可能存在,但未见有人用它来推测微波爆发区的日冕磁场。

70年代初, Guidice 和 Castelli<sup>[6]</sup> 用统计方法研究得出微波谱反转频率  $\nu_{\text{peak}}$  与光球磁场强度  $B$  呈正相关。Takakura<sup>[7]</sup> 认为厘米波谱的反转频率  $\nu_{\text{peak}} \cong 3.5\nu_B$ 。根据这些关系也可粗略地估计  $B$ 。

在理论上有许多作者用微波爆发强度与偏振特性来研究日冕磁场,但1968年以前的工作常常忽略了重要的回旋共振机制和自由-自由吸收机制。Ramaty 等人(1972)<sup>[8]</sup> 指出了这些吸收机制的重要性,并得到  $n_e$  为  $2 \times 10^{10}\text{cm}^{-3}$  处的磁场  $B$  值为 100—180G。Takakura(1972)<sup>[9]</sup> 得到 9.4GHz 的有效辐射高度 ( $1.3 \times 10^4\text{km}$ ) 上的磁场为 220—370G。这些结果是用严格理论进行复杂的数值计算后,再与观测资料比较得到的。当时他们还没有(也不可能)从严格理论中导出磁场估计的解析式来。

因为,从理论上讲,某一频率  $\nu$  发出的流量密度  $S_{\nu}$  为,

$$S_{\nu} \propto \int \int \int \eta_{\nu} e^{-\tau_{\nu}} dV + \int \int \int \eta_{\nu^+} + e^{-\tau_{\nu^+}} dV \quad (2)$$

其中光学厚  $\tau_{\nu^{\pm}} = k_{\nu^{\pm}} \times l$ 。

一般认为微波爆是由回旋同步加速辐射产生的,在电子具有各向同性的螺距角和能量为密律分布的简单情况下,它们的发射系数  $\eta_{\nu}$  和吸收系数  $k_{\nu}$  为<sup>[10,11]</sup>

$$\eta_{\nu^{\pm}} = \frac{G\pi e^2}{c} \frac{\nu}{2\cos\theta} \sum_n \int_{p_1}^{p_2} \frac{(\sqrt{1+p^2}-1)^{-\delta}}{1+p^2} (A \mp B)^2 dp, \quad (3)$$

$$k_{\nu^{\pm}} = \frac{G\pi e^2}{mc} \frac{1}{2\nu\cos\theta} \sum_n \int_{p_1}^{p_2} \left\{ p^{-2} (1+p^2)^{-1/2} (\sqrt{1+p^2}-1)^{-\delta} + (1+p^2)^{-3/2} (\sqrt{1+p^2}-1)^{-\delta} + (1+p^2)^{-1} \delta (\sqrt{1+p^2}-1)^{-(\delta+1)} \right\} (A \mp B)^2 dp \quad (4)$$

上两式中的  $B$  和  $A$  分别包含有贝塞尔函数或其导数,其余均为等离子体常用参量,而  $G$  为,

$$G = (\delta-1)E_0^{\delta-1}N \quad (5)$$

磁场被隐含在与谐波系数  $S (= \frac{eB}{2\pi mc})$  有关的贝塞尔函数宗量中,故要想根据(2)式结合射电流量谱的观测严格导出  $B$  的解析式,几乎是不可能的。

直到1982年 Dulk 和 Marsh<sup>[12]</sup> 提出一组回旋同步加速辐射的近似表达式后,人们才开始利用其中的射电谱反转频率  $\nu_{\text{peak}}$

$$\nu_{\text{peak}} \cong 2.72 \times 10^{3+0.27\delta} (\sin\theta)^{0.41+0.03\delta} (NL)^{0.32-0.03\delta} B^{0.68+0.03\delta} \quad (6)$$

公式来估计日冕磁场  $B$  [13-18]。但一个方程中有  $B$  和非热电子柱密度  $N(> E_0)L$  两个未知数, 必须先假定一个已知, 再求第二个。这样所得的解在数学上称为不定解。另外,  $NL$  项常常结合硬 X 射线爆资料求得, 这在物理上不一定能代表微波源的情况, 因而所得解的误差很大, 而且此法未考虑磁场强度  $B$  对亮度温度  $T_{b\nu}$  的依赖关系, 因此可以说长期以来人们并未解决如何利用微波爆观测资料来求解日冕磁场强度的问题。

### 3 我们的方法的提出及应用

1994 年我们在回旋同步加速辐射理论上提出利用微波爆的谱参数来诊断日冕磁场的方法, 即建立一个柱密度  $NL$  与发射系数  $\eta_\nu/BN$  和光学薄处 ( $\tau_\nu \ll 1$ ) 的亮度温度  $T_{b\nu}$  的关系式

$$NL = \frac{k\nu^2}{c^2} \left( \frac{\eta_\nu}{BN} \right)^{-1} B^{-1} T_{b\nu} \quad (7)$$

将上述关系式分别代入  $\nu_{\text{peak}}$  方程 [19] 或在  $\nu_{\text{peak}}$  频率上的光学厚公式

$$\tau_{\nu_{\text{peak}}} \cong k_{\nu_{\text{peak}}} L \cong 1 \quad (8)$$

中, 得 [20]

$$B \approx \left[ \frac{c}{kT_{b\nu} A_1} \nu_{\text{peak}}^{1.3+0.98\delta} \nu^{-0.78-0.90\delta} (2.8 \times 10^6)^{-2.52-0.08\delta} \right]^{\frac{1}{0.52+0.08\delta}} \quad (9)$$

其中

$$A_1 = 4.42 \times 10^{14+0.30\delta} (\sin \theta)^{0.34+0.07\delta}$$

能谱指数  $\delta$  与射电谱指数  $\alpha$  的关系在回旋同步加速辐射情况下为

$$\delta = (1.22 - \alpha)/0.9 \quad (10)$$

文献 [19, 20] 表明, 射电爆发源区的日冕磁场可利用一套微波爆发的完整参数 ( $\nu_{\text{peak}}$ , 射电谱指数  $\alpha$  及亮度温度  $T_{b\nu}$ ) 求得, 其他资料的配合不再需要。若我们使用 Owens Valley Radio Observatory 的观测资料来推算  $B$ , 其估计精度达  $\pm 48\%$ , 且随着观测精度的提高还可改善, 而以前用硬 X 射线求得的  $NL$  代入  $\nu_{\text{peak}}$  方程中引起  $B$  的估计误差可能很大, 因为硬 X 射线爆发和微波爆发虽然常常是由同源电子产生的, 但前者所需的总电子数比后者常高出 3—5 个数量级以及谱指数比后者高 2—3。如不考虑谱指数的差别而当单考虑  $NL$  值用 X 射线爆估计时要偏大一个数量级, 则引起的  $B$  的误差要偏小 3 倍 [21]。另外, 忽略  $T_{b\nu}$  对  $B$  的影响所导致的误差可能有  $\pm 5$  倍以上 [19]。

一旦求出  $B$ , 则可求出电子发射系数  $\eta_\nu/BN$  (利用它的近似式 [12]); 利用 (3) 式可求出  $NLy$ 。在有高分辨观测的情况下, 源大小  $L$  是可知的, 则也可从  $NL$  值中求出  $N(> E_0)$  的值。然后分别可以得知电子能谱分布  $n(E)$  和它们携带的能流  $\epsilon_F$  [22]

$$n(E) = GE^{-\delta}, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_F &= \frac{176G}{25-\delta} (E_m^{2.5-\delta} - E_0^{2.5-\delta}), & (\delta \neq 2.5); \\ \epsilon_F &= 1.76G \ln E_m, & (\delta = 2.5); \end{aligned} \quad (12)$$

因为这时的  $G$  根据 (5) 式定义已可求出。上式中的  $E_m$ 、 $E_0$  为高能电子能量的上下限。

我们曾将这种方法应用于 1993 年 10 月 2 日 0739UT 产生的一个耀斑爆发的研究<sup>[23]</sup>，假设该爆发是由脉冲爆发分量及慢变爆发分量组成的，则产生脉冲分量的磁场和产生慢变爆发分量的磁场平均值分别为 158G 和 531G。且后者磁场在爆发期间呈马鞍形变化，即在爆发极大时的  $B$  值反而比爆发上升相及下降相约低 50%，这打破了原先利用  $\nu_{\text{peak}}$  单参数估计  $B$  时<sup>[7]</sup>，认为在极大相时的  $\nu_{\text{peak}}$  一般都上升，则估计  $B$  也上升的传统看法。由我们的方法表明，日冕磁场是由爆发谱参数  $\nu_{\text{peak}}$ ，光学薄处谱指数  $\alpha$  及亮度温度  $T_{b\nu}$  联合决定的， $T_{b\nu}$  对  $B$  也有强烈影响。任何忽略其一来诊断  $B$  的方法都是偏面的。

我们还从上面这个爆发的脉冲爆发成分的谱求得非热电子柱密度  $NL$  在爆发期间在  $10^{15}$ — $10^{16}\text{cm}^{-2}$  之间变化， $\epsilon_F$  在  $10^{11}\text{erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  上下变化，这些结果与这个爆发对应的光学耀斑所需要的能量流输入相一致<sup>[24]</sup>。这个例子表明，利用本方法不仅可计算日冕磁场，也可获得非热电子的确切信息，这一切都是前人从来没有得到的。它为耀斑的非热形成机制提供了直接的定量的判断依据。

需要指出的是，考虑到  $B$  和  $\delta$  的关系，文献[20]比文献[19]所给出的公式更好些，可为今后进一步的研究引用，但由于 Dulk 和 Marsh<sup>[12]</sup> 给出的  $\eta_\nu$  和  $k_\nu$  的近似式精度，对求  $B$  尤其是对高能电子信息的诊断来说仍显不足，我们正在设法改进它们的精度。另外，我们的方法不适合光学厚情况和横传播的情况。

## 4 开展日冕磁场及其相关研究的展望

在理论研究上，我国太阳工作者对微波爆发的研究已积累了几十年的经验，也发表了一系列具国际水平的论文。近年来我们提出的利用微波爆发谱诊断日冕磁场的方法具有方法合理、精度较高的优点，已受到国内外同行好评，T.Takakura 称之为 ‘a valuable method’<sup>[25]</sup>。

在观测上，我们国内已具有青海毫米波高空间分辨率观测，可结合其他资料开展高色球—低日冕磁场研究。利用将要研制的毫米波太阳射电快速频谱仪可提供 1—8GHz 波段的快速磁场诊断。若利用上述射电方法所得的磁场信息与怀柔多通道磁场光学观测相结合，可建立我国对太阳磁场多波段立体式的研究模式。同时与南京大学太阳塔观测相结合，可开展耀斑的热与非热机理的量化讨论，为耀斑模型的深入研究作出贡献。因此可以说，我们抓住日冕磁场研究这个突破口，利用国内外各种资料，可以最大限度地理论和观测上进一步挖掘太阳研究工作的潜力。总之，微波爆发区日冕磁强度诊断工作所取得的突破，为上述所有工作都提供了一个坚实有力的基础。还需指出的是，我们的方法不仅可用于太阳研究，也可用于其他方面的研究。

**致谢** 感谢王欣东先生对本工作的帮助。

## 参 考 文 献

- [1] Newkirk G Jr. Annu. Rev. Astron. Astrophys., 1967, 5: 213  
 [2] Dulk G A, Mclean D J. Solar Phys., 1978, 57: 279

- [3] Krüger A., Hildebrandt J. In: Zirin H *et al* eds. The magnetic and velocity fields of solar active regions, ASP conference series, Vol.46, Proc. of IAU colloq. No.141, Beijing, 1992, San Francisco: ASP, 1993: 249
- [4] Boishot A, Clavelier B. *Astrophys. Letters*, 1967, 1: 7
- [5] Holt S S, Ramaty R. *Solar Phys.* 1969, 8: 119
- [6] Guilice D A, Castelli J P. In: *High energy phenomena on the Sun*, [s.l.]: [s.n.], 1972. 87
- [7] Takakura T. *Solar Phys.* 1967, 1: 304
- [8] Ramaty V R, Petrosian V. *Ap. J.*, 1972, 178: 241
- [9] Takakura T. *Solar Phys.* ,1972, 26: 151
- [10] Takakura T, Scalise E. *Solar Phys.*, 1970, 11: 434
- [11] 李春生, 郑兴武, 江淑英, 姚金兴, 周爱华. *天文学报*, 1979, 20: 153
- [12] Dulk G A, March K A. *Ap. J.*, 1982, 259: 350
- [13] Gary D E. *Ap. J.*, 1985, 297: 799
- [14] Kosugi T, Dennis B R. *Ap. J.* ,1988, 324: 1118
- [15] 周爱华. *天体物理学报*, 1992, 12: 148
- [16] Lim J, White S M, Kundu M R *et al.* *Solar Phys.*, 1992, 140: 343
- [17] Zhao Renyang. The magnetic and velocity fields of solar active regions, ASP conference series, Vol. 46, Proc. of IAU colloq. No. 141, Beijing, 1992, San Francisco: ASP, 1993: 295
- [18] Wang H, Gary D E, Lim J. *Ap. J.*, 1994, 433: 379
- [19] Zhou Aihua. *Astrophys. Space Sci.*, 1994, 222: 107
- [20] Zhou Aihua, Karlicky M. *Solar Phys.*, 1994, 153: 441
- [21] 周爱华. *天文学报*, 待发表.
- [22] 周爱华, 张捷, 张和祺. *科学通报*, 1996, 41(1): 44
- [23] 周爱华, 傅其骏, 张和祺, 王欣东. *天文学报*, 1996, 37: 212,
- [24] 黄佑然等. 待发表.
- [25] T. Takakura. 日冕磁场问题. 私人通讯, 东京: 日本东京大学, 1995-07-10.

(责任编辑 刘金铭)

## The Coronal Magnetic Field in Microwave Burst Regions

Zhou Aihua<sup>1</sup> Fu Qijun<sup>2</sup> Ma Chunyu<sup>1</sup> Zhang Heqi<sup>1</sup>

(1. Purple Mountain Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

(2. Beijing Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

### Abstract

The microwave diagnostics of the coronal magnetic fields and its applications are introduced. The suggestion in the further study of the coronal magnetic fields and its related subjects is presented.

**Key words** Sun: corona—Sun: radio radiation