

冕洞观测研究的近期进展

堵 锦 生

(北京师范大学天文系 北京 100875)

摘 要

简要介绍了在 1988—1995 年期间冕洞观测研究的主要进展。文中共分五个方面：1. 冕洞磁场观测研究的新进展；2. 冕洞在太阳活动周不同位相时的规律性；3. 冕洞区高速太阳风观测的新结果；4. 冕洞加热问题；5. 存在问题。

关键词 太阳：日冕 — 太阳：磁场 — 太阳风

自 1987 年发表了《冕洞磁场研究的现状》^[1]，至今 9 年过去了。在这段时间中，冕洞的观测研究又取得了一些新进展。在本文中分五个部分对主要成果作简要介绍和评述。

1 冕洞磁场观测研究的新进展

冕洞磁场的直接测量，仍是个没有解决的问题。冕洞磁场的间接测量，即通过测定冕洞边界所包围的光球磁场来反推冕洞的磁场。汪景琇等人^[2]、Bumba 等人^[3]作了间接测量。其中 Bumba 等人不但作了测定，还进行了较全面的分析研究工作^[3]。

1.1 冕洞区浮现磁通量的测定

汪景琇等人于 1989 年 9 月 26 日至 30 日用怀柔站的磁场望远镜、大熊湖天文台的磁场望远镜联测了一个冕洞区的浮现磁通量，得到如下的几个结果：在长达 81h 的连续观测中，没有发现大尺度的浮现磁通量，所有新磁通量都来自浮现的瞬现区 (ephemeral regions)；对视宁度相当好的两次观测，证认出大小是 $5' \times 4'$ 的范围内每 24h 有 10—20 个瞬现区；证认出冕洞内的 31 个瞬现区的样品表明，在大于 $1.5 \times 10^4 \text{km}$ 的瞬现区中有平行于自转轴、指向极的先导极性，指向赤道的后随极性；在任一时间冕洞中约有 15% 的总磁通量是在瞬现区内形成的^[2]。林元章用上述同样资料分析了冕洞内小尺度磁场的特性，他得到的结论是：冕洞内网络场具有的磁通量密度 $\geq 20\text{G}$ 的磁小峰的数密度是 $0.16/(10'' \times 10'')$ ，磁小峰的 $1/3$ 有 $\geq 100\text{G}$ 的磁通量密度；冕洞中的平均磁通量对应的磁场强度是 $6.5 - 7.5\text{G}$ ，比具有混合极性的一般宁静区要低些；冕洞内瞬现区的平均寿命在 10h 内，比有混合极性的宁静光球的瞬现区寿命短些，就单个瞬现区平均磁通量而言，在冕洞里和宁静光球内是近似相等的^[4]。

国家自然科学基金资助项目

1996 年 7 月 22 日收到

Bumba 等人于 1991—1992 年在 Ondrejov 天文台用该台的光电磁像仪对冕洞内 $5' \times 3'.3$ 的区域进行了磁通量的测定工作^[3]。他们的测定结果表明: 冕洞附近的活动区内正、负极性纵向分量的磁通量, 在大的活动区里可高达 10^{13}Wb 的几十倍, 在所研究的区域里正极性通量和负极性通量之差很少超过 $10 \times 10^{13}\text{Wb}$ 。冕洞内的磁通量在 10^{13}Wb 的几十分之一到几之间变化着。他们测量了 1992 年的 4 个赤道冕洞 (SESC 号 43、44、47、48), 主导极性都是正极性, 其中 3 个冕洞的磁通量只有 10^{13}Wb 的几倍, 与汪景琇等人测定的结果 $3.1 \times 10^{13}\text{Wb}$ 一致, 唯独 47 号冕洞磁通量有相对较快的变化, 主正极性磁通量可达 $10 \times 10^{13}\text{Wb}$ 。

1.2 冕洞与背景磁场的关系

Bumba 等人基于对冕洞磁场的一段时间的观测研究, 提出如下的思想: 冕洞的形成与太阳磁场整体分布的动力学有关。在每个活动经度带冕洞的发展是一个整体过程, 此过程取决于背景磁场和局部磁场的整体发展和分布, 也取决于太阳活动周的位相^[3]。

Bumba 等人比较了 1991—1992 年太阳主磁活动经度带与赤道冕洞的经度分布带。1991—1992 年太阳负极性磁场的主活动经度带在日面经度 90° 处, 正极性磁场的主活动经度带在日面经度 180° 处。他们发现赤道冕洞分布也集中于两个经度带, 第一个经度带似乎与负极性场主活动经度在 1991 年开始是一致的, 到 1992 年延伸到日面经度 90° — 120° 处; 第二个经度带在 1991—1992 年属正极性场主活动经度带, 在日面经度 270° 处。为什么太阳正极性磁场的主活动经度带与赤道冕洞经度带相差 90° , Bumba 等人没有给予解释^[5]。

Stepanian 用统计分析法研究了 1977—1987 年冕洞与太阳背景磁场的关系。他的结论是: 在太阳极磁场极性反转后的 5—10 个太阳自转周中, 处在背景磁场中的冕洞的磁极性显示出与所在半球相同的磁极性; 冕洞的自转率和背景磁场的自转率在接近赤道处是几乎相等的; 背景磁场的自转率随日面纬度的升高而下降比冕洞快些; 冕洞的自转率在太阳活动极小时高纬处有增加, 背景磁场没有这种增加。他从这种研究中提出: 冕洞的磁场源位于太阳内部比背景场源更深些的层中^[6]。

1.3 冕洞和局部磁场

McIntosh 的统计研究 (1973—1993 年) 表明: 最大冕洞的发展在时间和位置上是与太阳活动周中最强烈的耀斑区一致的。他称这样的耀斑活动区为超活动区 (super-active region)^[7]。一个超活动区需满足 X 射线耀斑指数 (X ray flare index, 缩写 XRI) 大于 20 ^[7]。Bumba 等人关于冕洞及与其相关活动区磁通量的测量结果, 支持 McIntosh 的结论^[3]。从冕洞区光球磁场的测量结果来看, 冕洞在每个活动经度开始发展的时间似乎是在同一经度间隔内大黑子活动开始后约 10—11 个太阳自转周内。1991—1992 年测量的几个冕洞的磁通量表明: 冕洞的磁场不仅与背景磁场的很老的磁单极区有关, 而且也与一个黑子活动区或多个黑子活动区的先导部分或尾随部分的磁场有关。这些黑子活动区处于极冕洞延伸的低纬端和冕洞边界附近。对大冕洞来说, 局部磁场只影响冕洞磁场的空间分布。而对小冕洞来说, 局部磁场有较大的影响。

1.4 冕洞边界区的磁结构

这是既有意义又有吸引力的课题。说它有意义, 是指冕洞边界的磁结构涉及到冕洞边界的延伸和缩退, 是冕洞演化问题的一部分, 冕洞边界的宽度、速度梯度涉及到高速太阳风流边界区的宽度、速度梯度。说它有吸引力, 是指冕洞中心区是开场区, 其边界区是日冕开场和闭场的汇合区, 它既是行星际扇形区的太阳源, 又是太阳风快速流与慢速流的分界区。但

这个问题有其困难性,困难在于至今尚不能直接测定冕洞的磁场。需通过测冕洞下光球磁场来取得冕洞边界区的磁场资料,就很难对准冕洞边界在光球上的投影。除上述困难之外,冕洞边界变化的间断特点,也增加了测定的困难^[8]。

我们根据1987年8月16日、18日、1989年4月4日、4月5日的冕洞下光球磁场的观测资料的分析,得到如下的结论:就冕洞边界内外加强网络而言,冕洞边界内,加强网络少,冕洞外加强网络多;冕洞边界足根线离磁中线有一定的角距离,1987年被分析的两个冕洞角距离约为 10° — 20° ^[9]。由太阳活动20、21周冕洞资料的分析得到:日球磁中线扭曲程度的大小与冕洞位置有密切的关系^[10]。

Sheeley等人分析了伴随有高速太阳风的磁场位形,他们发现:最小的日冕膨胀产生在局部磁场最小的地方^[11]。Kahler等人研究了冕洞边界区的间断变化,研究表明:X射线亮点在冕洞边界的膨胀和收缩中起关键性的作用;冕洞边界变化的空间尺度是 $2 \times 10^4 \text{ km}$,时间尺度约3h^[8]。他们提出了如下几个问题:光球磁通量的随机扩散和冕洞大尺度边界的变化关系是什么?冕洞边界变化的特征时标是什么?浮现磁通量起什么作用?冕洞大尺度边界有位移时磁力线情况如何?对上述问题中的浮现磁通量,汪景琇、Bumba等人进行了测定,但对浮现磁通量对边界的作用问题,仍没有分析过。

Neugebauer早就注意到冕洞边界的特殊性^[12]。他根据空间飞船的观测资料,对极冕洞发出的高速太阳风流的速度梯度进行了研究,计算表明在0.3AU处,速度梯度约为 $100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{deg}^{-1}$,可能靠近日冕底部,有更大一些的速度梯度^[13]。对发自小赤道冕洞区的太阳风流边界区的速度梯度,至今尚未被人们研究过^[13]。极冕洞磁场径向分量的平均值,在 $R = R_\odot$ 处是1.5G,在1AU处是 $3.2 \pm 1.5^{-5} \text{ G}$ ^[13]。小赤道冕洞区磁场径向分量的平均值至今尚未被研究过。

2 冕洞在太阳活动周不同位相时的规律性

1992年Sanchez-Ibarra和Barraza-Paredes编辑出版了《冕洞目录》,此目录收集了1970—1991年期间观测到的冕洞资料,它对研究冕洞在太阳活动周中的演化,提供了较完整的素材^[14]。

2.1 冕洞数目随太阳活动周的变化

《冕洞目录》中,把冕洞分为两类:一类是极冕洞,包括延伸到赤道附近的极冕洞;另一类是赤道冕洞,包括除极冕洞外的所有冕洞。Insley等人计数了从1978—1991年每年的冕洞数目,他们得到^[15]:

太阳活动21周:极冕洞数的最大值是46个(1982年,属下降相),极冕洞数的最小值是2个(1980年,属极大相);赤道冕洞的最大值53个(1983年,属下降相),赤道冕洞的最小值是10个(1986年,属极小相)。

太阳活动22周:极冕洞数的最大值是50个(1987年,属上升相),极冕洞数的最小值是0个(1990年,属极大相);赤道冕洞的最大值73个(1989年,属极大相),赤道冕洞的最小值,尚待观测确定。

由太阳活动21周、22周冕洞的计数结果可以看出:极冕洞数随太阳黑子沃尔夫数增大、减小的变化是反比关系,赤道冕洞数的变化几乎是正比关系。

2.2 冕洞沿日面纬度、经度的分布规律

冕洞沿日面纬度的分布: Insley 等人用 1978—1991 年的冕洞观测资料, 对每个赤道冕洞求出其日面纬度范围的中值, 作为该冕洞的纬度, 研究它们在太阳活动 21 周、22 周的纬度分布。图 1 给出赤道冕洞沿日面纬度的分布图。由图 1 看出: 赤道冕洞沿日面纬度的分布显示出与太阳黑子沿日面纬度分布的类似规律性, 即蝴蝶图。在太阳活动周的大部分期间, 赤道冕洞分布在赤道南北宽 30° 的范围内; 在太阳活动极小时, 赤道冕洞只分布在宽 5° — 10° 的纬度带内。极冕洞沿日面纬度的分布, 无蝴蝶图的特征。极冕洞向赤道的延伸多数发生在极小年。这时, 极冕洞向赤道延伸达到赤道旁 5° — 10° 宽的范围, 而在太阳活动极小年之前或之后极冕洞的赤道延伸达到赤道旁 30° — 40° 宽的范围。

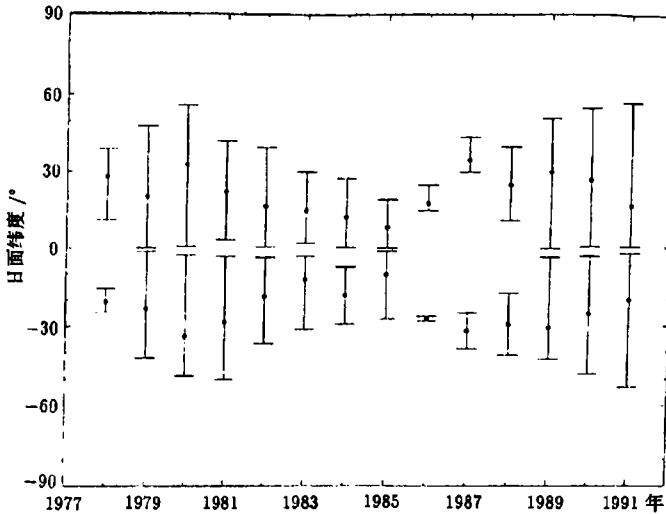


图 1 赤道冕洞纬度分布图^[15]

图上点表示赤道冕洞纬度年平均值, 竖细线表示赤道冕洞的纬度最大、最小延伸范围, 横短线表示纬度延伸截止处

冕洞沿日面经度的分布: Sanchez-Ibarra 用统计方法研究了太阳活动 21 周期间黑子日面经度的分布与冕洞沿日面经度分布的关系^[16]。研究表明: 太阳活动 21 周中黑子群的经度分布与冕洞数、大小、特别是极冕洞向赤道的延伸有一个强的反比关系。黑子群集聚在无冕洞存在的经度带, 约占黑子群总群数的 59%, 冕洞分布经度带是与黑子群分布经度带是一致的, 约占黑子总群数的 31%。常常是黑子群分布在北半球某个经度带, 而冕洞分布在南半球同一经度带。Bumba 等人定义赤道冕洞为赤道南北 $\pm 20^\circ$ 纬度间的冕洞, 他们用 22 周下降相 1991—1992 年赤道冕洞资料, 发现赤道冕洞沿日面经度的分布, 存在两个集聚经度带^[3]。我们曾用 22 周 1991—1992 年日面纬度 $\pm 20^\circ$ — $\pm 60^\circ$ 间冕洞, 绘出其沿日面经度的分布, 没有找到明显的经度集聚带。这说明冕洞沿日面经度的分布还是个值得探讨的问题。

2.3 冕洞的较差自转

Insley 等人用 1978—1991 年的冕洞观测资料, 测定了冕洞的较差自转^[15]。他们的结果表明: 赤道冕洞的较差自转比起光球来, 刚性更好些。总的来说, 赤道冕洞显示出可观的较

差自转,赤道区较差自转率是 $13^{\circ}.30/d \pm 0^{\circ}.04/d$, 在纬度 45° 处是 $12^{\circ}.57/d \pm 0^{\circ}.13/d$ 。极冕洞自转显示出与赤道冕洞不同的情况。在太阳活动周中,两类冕洞表现出不同变化(包括数目、纬度分布、较差自转),原因可能是,赤道冕洞与光球磁场、以及伴随的活动性有关;而极冕洞可能涉及到太阳表面下更深些的层,即日球磁场源。

3 冕洞区高速太阳风的观测新结果

Ulysses 飞船于 1992 年 2 月—1993 年 8 月飞越了日面纬度 $-6^{\circ}.4$ — 38° 的区域。1993 年 9 月—1994 年 5 月飞越了日面纬度 -40° 以南的日面高纬区域。1994 年 6 月—9 月飞越了太阳南极区。图 2 给出 Ulysses 飞船所观测到的 1992 年 2 月到 1993 年 8 月太阳风速度时平均值的变化曲线。图 2 中太阳风速度最高峰值对应于一个日冕物质抛射 (CME), 此 CME 伴随有 1992 年 11 月 14 日的 3B 级耀斑^[13]。

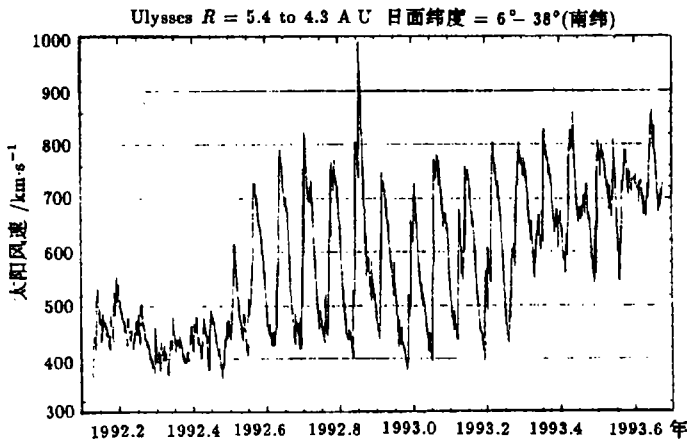


图 2 太阳风速度变化曲线^[13]

Neugebauer 综合了 1993 年前太阳风速度的观测资料指出: 高速太阳风来自大的极冕洞 (pCH), 小赤道冕洞 (seCH) 的粒子通量、能通量都小于极冕洞^[13]。

表 1 1AU 处来自 pCH 和 seCH 太阳风参量^[13]

太阳风参数	pCH	seCH
速度 $V(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	750—800	可小于 400
粒子通量 $nV(10^8 \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	2.5	2.0
能通量 ($\text{erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.0	1.7
质子、电子温度 (K)	$T_p > T_e$	T_p 能小于 T_e
波	向外传播的阿尔文波强通量	向外传播的阿尔文波强通量
α 粒子数密度 / 质子数密度 (n_α/n_p)	≈ 0.048	≤ 0.048 (随 V 增大)
一阶电离电势效应	小	小
$V_\alpha - V_p$	$\approx V_A$?
重离子温度	$T_i \sim m_i$	$T_i \sim m_i$
精细结构	超米粒尺度	?

Geiss 等人用 Ulysses 飞船的观测资料得到: 在高速太阳风中, 镁和氧的含量比是 0.08, 在慢速太阳风中高达 0.17, 相差 1 倍多^[17]。为什么高速太阳风中镁和氧的含量比低, 这是个值得探讨的问题。

根据 Neugebauer 的综合分析, 给出来自大极冕洞和小赤道冕洞的太阳风参量见表 1。

表 1 的结果与 Withbroe 给出的有关赤道冕洞的模式^[18] 有较大的出入。这说明以前认为赤道冕洞是高速太阳风源的观点, 需作一些修改。

关于 Ulysses 飞船探测太阳南极区的结果, 目前还没有看到详细报导。

4 冕洞的加热

Parker 评述了冕洞的加热问题^[19]。与宁静日冕加热问题相比较, 冕洞的加热问题包括高速太阳风粒子的加速问题。他把自空间飞船观测到冕洞到 1990 年为止的冕洞加热理论分为两类: 一类是波的加热理论; 另一类是磁加热理论。

传统的波加热理论认为加热能量来自光球对流运动所产生的阿尔文波。阿尔文波向外传播耗散, 转化波能为加热能。Parker 总结已提出的阿尔文波的耗散机制是位相混合机制、磁力线随机游动机制、等离子体湍动引起的反常电阻机制、粘滞耗散机制等^[19]。发射高速太阳风的冕洞需要从冕洞底部有能通量为 $5 \times 10^5 \text{erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的加热输入。多数过去提出的波耗散机制理论认为此加热能通量的大部分首先在 $1-2R_{\odot}$ 外向内抛射, 这里 R_{\odot} 为太阳半径, 也许在几个 R_{\odot} 处有 $1 \times 10^5 \text{erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 能通量提供给高速太阳风。Parker 指出冕洞加热所需要的阿尔文波不是产生在亚光球中的, 也不是首先在 $1-2R_{\odot}$ 处发生有意义的耗散。它是产生在色球层上方或日冕中的, 波的耗散只可能发生在 $5R_{\odot}$ 或大于 $5R_{\odot}$ 处。

代替波加热思想是小尺度磁场 — 网络和网络间磁场活动的加热思想。Parker 的估算表明, 网络和网络间磁场活动可能给冕洞底部提供适宜的能量输入, 并对远距离加速太阳风粒子提供足够的阿尔文波能。正是基于这样的分析, Parker 提出网络活动是冕洞加热的主要能源, 进而可以说网络活动是日球产生的基础。

Moore 等人提出网络微耀斑 (network microflares) 可能是冕洞加热的阿尔文波的源^[20]。它是磁加热的具体例证。

最近在美国威斯康星州 Madison 举行的美国天文学会第 188 届年会 (1996 年 6 月 9 日—13 日) 上, Gurman 等人报道了空间探测器 SOHO 观测到的 EUV 电影片 (包括波段: HII 304Å, FeXII 195Å, FeXV 284Å, FeIX 173Å) 的极冕洞中小尺度环细节的动力学性质, 有助于揭示出冕洞加热的物理实质^[21]。

5 存在问题

由以上的阐述, 可以看出冕洞的观测研究虽然取得了不少的成就, 但也提出了一些需要进一步研究的问题。概括起来有如下几个问题:

- (1) 太阳主磁活动经度带与赤道冕洞的经度分布带有些什么关系;
- (2) 冕洞磁场与其附近背景磁场有些什么关系, 这两种场是如何形成的;
- (3) 赤道冕洞与光球磁场以及伴随的太阳活动之间有些什么关系;

(4) 赤道冕洞、极冕洞的数目、面积、在经度、纬度上的分布随太阳活动周的变化呈现出不同的特点, 形成这些不同特点的原因是什么;

(5) 若认为一些小赤道冕洞不是高速太阳风源, 是什么原因形成低速太阳风;

(6) 网络活动通过些什么途径、过程加速太阳风至高速, 它对赤道冕洞、极冕洞的影响有何异同点。

参 考 文 献

- [1] 堵锦生, 天文学进展, 1987, 5(4): 271
- [2] Wang Jingxiu et al. In: Harvey K L ed. The solar cycle, ASP Conference Series, Vol.27, Sunspot, NM, USA, 1991, San Francisco, ASP, 1992: 108
- [3] Bumba V et al. Astron. Astrophys., 1995, 298: 923
- [4] Lin Yuanzhang. In: Rusin V et al eds. Solar coronal structures, Proc. of IAU colloq. No.144, Tatranska Lomica, Slovak, 1993, [s.l.]: VEDA Publishing Company, 1994: 41
- [5] Bumba V et al. In: Rusin V et al eds. Solar coronal structures, Proc. of IAU colloq. No.144, Tatranska Lomica, Slovak, 1993, [s.l.]: VEDA Publishing Company, 1994: 65
- [6] Stepanian N N. In: Rusin V et al eds. Solar coronal structures, Proc. of IAU colloq. No.144, Tatranska Lomica, Slovak, 1993, [s.l.]: VEDA Publishing Company, 1994: 61
- [7] McIntosh P S. In: Hruska J et al eds. Solar-terrestrial predictions-IV, Proc. of a workshop, Ottawa, Canada, 1992, [s.l.]: Geological Survey of Canada, 1992: 20
- [8] Kahler S W. Ap. J., 1990, 362: 728
- [9] 堵锦生等. 北京师范大学学报(自然科学版), 1991, 27(1): 45
- [10] 堵锦生等. 天文学报, 1994, 35(4): 387
- [11] Sheeley N R et al. Solar. Phys., 1991, 131: 165
- [12] Neugebauer M. In: Neugebauer M ed. Solar wind V, Proc. of a conference, Woodstock, Vermont, 1982, NASA Conf. Publ., NASA CP-2280, 1983: 135
- [13] Neugebauer M. Space Sci. Rev., 1994, 70: 319
- [14] Sanchez-Ibarra A, Barraza-Paredes M. Catalogue of coronal holes, Report UAG-102, World Data Center A. Washington, DC: National Academy of Sciences, 1992
- [15] Insley J E, Moore V. Solar Phys., 1995, 160: 1
- [16] Sanchez-Ibarra A. Solar Phys., 1990, 125: 125
- [17] Geiss J et al. Space. Sci. Rev., 1995, 72: 49
- [18] Withbroe G. Ap. J., 1988, 325 : 442
- [19] Parker E N. Ap. J., 1991, 372: 719
- [20] Moore R L et al. Ap. J., 1991, 373: 347
- [21] Gurman J B et al. Bulletin AAS, 1996, 28(2): 880

(责任编辑 刘金铭)

Recent Progress of Observations and Investigations on Coronal Holes

Du Jinsheng

(Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract

This paper introduces briefly the main progress of observations and investigations on coronal holes during 1988—1995. It is divided into five parts: 1. The progress of observations and investigations on the magnetic fields in coronal holes; 2. The regularity of coronal holes in the different phases of the solar cycle; 3. The new results of high-speed solar wind from the regions of coronal holes; 4. The problem of heating coronal holes; 5. The problems to be solved .

Key words Sun: corona—Sun: magnetic field— Solar wind