

太阳物理研究的新成果

章振大

太阳是一颗普通的恒星，离我们最近，并且光很强，使人们能够对其细节进行观测研究。太阳又是一个炽热的气体球，其核心温度高达一千五百万度，在表面也有六千度，因而可把它看作巨大的天体物理实验室。它的温度、密度、磁场和很大的特征尺度相结合，所提供的物理条件是地球实验室无法比拟的。在太阳发生剧烈活动(如大耀斑)时，它发射包括射电波，可见光，紫外线，X射线， γ 射线和各类高能粒子，还出现各种爆发现象。这些辐射过程对日地空间物理和地球物理效应以及气候等都会产生直接或间接的影响，引起人们的高度重视。因此，今天的太阳物理研究，已由从前的单纯可见光观测变为全波段的观测。为此，世界各国(包括我国)在地面上先后建立了太阳望远镜、射电望远镜、磁场望远镜和高山日冕仪等现代观测仪器。由于比紫外线波长更短的辐射不能穿过地球大气到达地面，因而发射了各类卫星进入太空从事紫外线，X射线， γ 射线和高能粒子辐射的探测。此外，地面接收系统的改善和计算机的投入分析，使太阳物理研究获得不少重要的新成果，简要介绍如下。

一、太阳内部和大气

1. 中微子之谜 太阳在其自身引力作用下，物质向核心区聚集，从而形成高温($1.5 \times 10^7 \text{K}$)和高压(2.5×10^{11} 大气压)的状态，并导致连续不断的热核反应。这些核反应释放出大量的能量以维持太阳连续地向宇宙空间辐射，同时也发射中微子和正电子。由于中微子不带电，质量又极小，与其他物质发生相互作用的概率极小，因而它们从核心区向外发射时几乎不与物质发生作用而直达地球，人们便可进行直接的测量。Davis等(1983年)用 ^{37}Cl 中微子探测器测得太阳中微子流量比由标准的太阳模型所预测的要少1/2至1/3。这就出现了所谓中微子失踪之谜，它对现有的太阳内部模型的可靠性提出了严重的挑战。因为对中微子的探测是我们对太阳内部的重要诊断方法之一，也是对太阳模型的关键性检验，所以，如果不能消除谜中的矛盾，那么，或是太阳模型不正确，或是太阳中微子流量的探测方法有问题，或是产生中微子的物理过程可能有变化。最近，Basu分析 ^{37}Ar 原子产率的资料得出，太阳中微子流量随时间而变化，并与太阳风流量成正比。Toutain根据Phobos卫星的行星际日震学辐射测量实验，得到的结果与太阳标准模型很符合，

从而认为解决中微子矛盾必须从粒子物理本身着手。Christensen-Dalsgaard又提出，如果减小太阳模型核心的温度梯度和中心温度，便可消除观测的和计算的太阳中微子流量间的差额，而太阳核心的一部分能量传输是由假想粒子的运动引起的。通过适当选择假想粒子的参数就可得到与观测资料相符合的模型。已有一些间接的证据支持这一概念，即在银河系中存在着的不可见物质(所谓暗物质)，可能是由这种假想粒子构成的。

2. 太阳振荡 早在60年代，Leighton等首先发现太阳表面气体不断发生起伏运动，其振荡周期约5分钟，振幅约1公里/秒，称为5分钟振荡。后来Severny等又发现太阳上也存在着周期长达160分钟的速度振荡，也称太阳脉动。这些研究导致了日震学的出现，它是太阳物理的一个新分支。目前已在全球建立了观测网(包括在南极洲建立长期的观测站)进行联合观测；同时也开展大量的理论探讨。研究表明，太阳存在着两种振荡模式，即由声波(压力波)所产生的振荡模式称为

p

模，它们表现为短周期(3分钟至1小时)振荡；而由重力波所产生的振荡模式称为

g

模，它们表现为周期较长(40分钟以上)的振荡。

p

模产生于太阳内部离中心约0.7太阳半径以外区域，而

g

模则来自太阳核心区。这些波能向外传输到大气层而被人们探测到，并且能输运能量和动量，对于外层大气的加热可能是很重要的。详细分析这些扰动频率，可提供有关太阳内部结构的重要信息，是太阳内部物态的新诊断手段。迄今已发现上千种声波振荡模式。通过理论分析，得出在对流层内角速度几乎与深度无关，并存在环向磁场。由于观测的困难，

g

模的探测和确认尚未有很可靠的结论。

3. 磁场 太阳大气基本是高温等离子体，而磁场贯穿其中。磁场不仅控制着太阳大气中的各种活动现象，而且为它们提供了能源。在光球层大致可观测到三种磁场，即黑子磁场(磁场强度可达几千高斯，并可向上延伸，有时到达日冕高度仍可保持上千高斯)，小黑点磁场(约1500高斯)和磁元磁场。最近的观测发现，在无黑子的大部分太阳表面的所有磁通量集中成许多小的相距较远的强磁通量管。通过光球的大多数磁通量管被汇聚于太阳表面很小的区域。这些区域叫磁元，其半径为100—300公里，磁场强度为1000—

2000 高斯,而许多磁元也可组成凝聚块。此外,任何地方都还可能存在着强度为 1—3 高斯的起伏背景场。从光球向上延伸到色球层,还发现网络磁场和网络边界以及瞬变区等不同尺度的磁结构,已观测到网络边界有约 500 高斯的磁场,而网络内磁场仅 10—20 高斯。这些磁结构都可与同类或不同类的异极磁结构对消,对消磁结构两极间呈现系统的碰撞和挤压运动,其速度为每秒 0.3—0.6 公里,并出现较大的磁场梯度。磁场对消可能是太阳表面磁通量消失的重要观测模式。有人提出它可能是发生在光球高层或低色球层的稳定的磁场湮没和重联过程,对上层大气的加热有作用。

4. 日冕加热 太阳大气温度呈现反常分布,即在光球的 6 千度降至光球-色球交界的 4 千多度,然后缓慢上升到高色球层的几万度(距离约 2 千公里),最后陡升到日冕高度的百万度。这种反常增温(即加热)的机制是太阳物理学中仍未解决的重要问题之一。以前由日全食观测认为日冕是均匀的,但近年来空间 X 射线和地面高温日冕线等的单色光观测显示,日冕是不均匀的,而且主要由环状结构(冕环)组成,因而日冕加热便变为冕环的加热了。日冕加热理论可分为两个分支,即波加热和磁能或电流加热。空间探测表明,在太阳风(从日冕不断地向行星际空间发射出的稳定粒子流,由电子、质子和重离子组成,平均风速约为 468 公里/秒)中已探测到大振幅阿尔芬波,这样在开放场磁结构中等离子体加热就可能由波能耗散所引起,而一般认为,在封闭场磁结构中由电流耗散引起加热是日冕环加热的重要来源。最近 Beaufume 等研究了由电流引起冕环加热的机制。在此机制中包括了由磁场重联引起的不稳定激发,并且把与磁场有关的电流所伴生的能量直接转换为粒子动能,而设想加热过程是通过短暂的爆发进行的,Similon 等由研究阿尔芬波在太阳大气中的传播得出,磁扩展可把阿尔芬波能流从光球传至日冕并耗散,对开放场磁结构的加热很重要。在活动日冕中已观测到周期为几秒到几十秒的波脉动。这可能表示它们是波能耗散和日冕加热的重要因素。此外, Parker 提出,用 X 射线观测到的日冕是由大量小的强脉冲事件加热所致;Sturrock 等也认为日冕是由一系列单个爆发事件加热引起的,而不是由稳定连续加热造成的。

二、太阳活动

1. 太阳耀斑 它是发生在太阳大气高层的一种急骤不稳定过程。在短时间(10^2 — 10^3 秒)内释放大能量(10^{29} — 10^{33} 尔格),引起局部区域等离子体的瞬时加热和高能粒子加速,产生从 γ 射线, X 射线, 光学乃至射电波段的辐射以及物质抛射等现象,对日地空间和地球物理造成重大的影响。

目前普遍认为,由于耀斑与磁场的关系非常密切,

耀斑前磁场位形所贮存的能量是最可能的能量来源。例如,在边长为 L 的立方体内的磁能为 $E = L^3 \times B^2 / 8\pi$, B 为磁场强度;若在边长为 3×10^4 公里立方体内 500 高斯磁场的湮没,便可释放出一个大耀斑的特征能量 10^{32} 尔格。最近的空间和地面观测都有大量资料显示,耀斑可由磁环的相互作用而引起瞬时增亮。有些是二个(或几个)磁环相互接触而发亮,有些则是单环增亮,它们很可能由于磁环的相互作用或单环扭转,通过磁场重联而把磁能释放出来。此外,耀斑也可能由磁场切变或物质抛射等引起磁场重联而触发。理论研究得出,已知有三种磁重联过程,即稳定的,快速的和爆发的。所有这些磁重联过程都可根据磁流体力学原理在计算机数值模拟中看到。它们取决于引起磁重联时的耀斑区物理条件,并会产生不同的后果。目前这些理论机制已能说明耀斑的一些观测特征,如爆发等离子体加热,高能粒子加速和电磁辐射的准周期振荡等。例如, Sakai 和 de Jager 根据爆发式磁重联机制的研究得出,两个磁环结合过程的时标极短,即磁环相互接近的速度约每秒几千公里,而碰撞气体的热化将使温度升高;同时磁场的迅速变化所产生的强电场能够加速电子和离子。他们根据卫星资料得出二类 γ 射线/质子耀斑,即脉冲的和渐变的,产生 γ 射线或高能行星际质子。在脉冲耀斑中出现两个粒子加速相:第一相是在 1 秒内把电子和质子分别加速到约 10 MeV 和约 100 MeV;第二相是在几秒到 100 秒内电子被加速到 100 MeV,而质子则到 1 GeV。他们根据 3 维磁环结合的理论得出,在磁场重联引起的爆发可说明观测到的第一相加速,而引起的强等离子体爆发能激起快磁声激波,并进而把电子和质子同时加速到相对论性能量。此外,发生在爆发相移动 X 点磁场附近的加速可适用于渐变的 γ 射线/质子耀斑。这些被加速的高能粒子一部分将引起非热 X 射线辐射和射电辐射,一部分将在行星际空间被探测到。同时在爆发过程中温度高达 10^7 K 的热等离子体将产生热 X 射线辐射和可见光及其他电磁辐射。另外在一些特大耀斑中已探测到一些 γ 射线谱线,如 0.511 MeV, 2.23 MeV, 4.43 MeV 和 6.14 MeV 等,这说明在耀斑中也发生核反应。

2. 日珥 它是日面边缘的明亮突出物,当它投影在日面时便成为暗条。日珥具有各种形状,如浮云,喷泉,圆环和拱桥等等。日珥的寿命从几个月(宁静日珥)到 1 小时以下(活动日珥),常存在于日冕空间。最近的高分辨率观测显示,日珥有复杂的精细结构,一般由许多条细长的气流组成,而流线上还有亮块或亮点。日珥中也有周期从几十秒到几十分钟的振荡现象,它们可能是由波动引起的。

日珥是如何形成和支撑呢?分析表明,日珥可由日冕等离子体本身的凝聚和由色球物质向上喷射或蒸发到日冕而成。Priest 等的研究指出,热不稳定性可

使等离子体逐渐冷却,从而在一天或观测所需的时间内凝聚成日珥。Choe 等也得出,由磁力线扩展而把磁拱下部较为稠密的物质向上推动,引起辐射致冷的局部增强,从而导致热不稳定性和日冕等离子体的凝聚而形成日珥。其次,一部分日珥也可由下面物质的喷射而成。它们可能是从光球向上抛射的等离子体物质团块,或是带电粒子流经过日冕向外抛射。已提出一些机制来说明这些现象,例如 Severny 和 Schluter 等提出的抗磁效应,即带电粒子团可在磁场中被加速,假设喷射的物质没有被磁化,因而容易在磁力线之间运动。它们的加速可认为是一团非磁导电流体在有梯度的外磁场的磁压作用下,在磁力线间被挤压向梯度减小的方向,类似于紧夹在两手指中的一粒瓜子被压出去一样。这种机制可解释与耀斑有关的日珥喷射现象。Pikelner 和 Poland 等提出虹吸型喷射模型,认为物质从光球沿着磁流管向上输运到日冕区以形成日珥。至于日珥的支撑问题,已知温度只有 10^4K 的日珥有时能长期存在于温度 10^6K 的日冕中,其原因仍不完全清楚。一方面可能是日珥内部的磁场对周围的高温起着屏蔽作用;另一方面可能是日冕背景的磁场位形支撑着日珥。观测到的宁静日珥位于水平磁场区内。这表示流体与磁场的某种相互作用对日珥提供了撑持力。这种模型由 Kippenhahn-Schluter 提出,并被一些作者推广。

3. 日冕物质抛射和瞬变 一次日冕物质抛射的质量为 10^{15} — 10^{18} 克,其能量高达 10^{30} — 10^{32} 尔格,并常常是耀斑现象的重要部分。但近来观测表明,它们也常发生在耀斑之前,并且核心区远离耀斑区。日冕瞬变现象是用日冕仪所看到的日冕结构的突然改变,是日冕大尺度扰动,并从太阳向外传播,这种扰动表现为电子密度的增强,且具有各种形态,如环状等。瞬变可由日冕物质抛射所引起,也可由波作用或其他机制所造成。已提出的日冕瞬变理论大致分为两类:一是整体模型,认为瞬变现象由日冕底部的压力脉冲驱动,其中包括由纯流体动力学和磁流体力学过程提供的动力;二是单结构模型,认为热压给瞬变现象提供了能量,而磁场则对瞬变现象的扩展起了抑制和引导的作用。驱动瞬变的热压脉冲是由耀斑感生的日冕底部温度从 10^4K 增至 10^7K 引起的。此外, Hundhausen 等提出慢磁流体力学激波也可导致日冕物质抛射。

4. 黑子和太阳活动周期性 黑子是光球上经常出没的暗黑斑点,是太阳活动的基本标志。黑子由本影和半影组成。本影的光强度仅为光球的 5—15%,其温度比光球要低 1 千多度。黑子有强达几千高斯的磁场

和 11 年的周期性等。尽管黑子的研究历史已达 2 千多年,但目前仅对它们的物理性质(如温度,密度,压力和磁场等)有较充分的了解,而对一些本质问题,例如黑子为何比周围光球暗?黑子是如何形成的?黑子活动规律的机制是什么?尚未获得解决。

近年来观测到黑子内还存有一系列的动力学现象,它们是:(1)本影耀斑(耀斑 H。辐射覆盖了大黑子), (2)逆埃弗谢德流(从外向内流入黑子), (3)半影颗粒(构成半影的要素), (4)升高的暗小纤维(组成半影的暗成分), (5)埃弗谢德流(产生于半影的水平流动), (6)本影点(出现于本影的颗粒), (7)本影振荡与闪耀(本影常出现振荡,而只有振荡足够强时才发生闪耀,是波动现象), (8)运行半影波和暗喷焰,等等。此外,有些复杂的本影还可分裂成几个核心。最近还发现最少有 30% 的黑子群发生在紧密活动小区域里,而且在活动峰年比活动谷年更为稠密。Thomas 等通过研究黑子与太阳声模振荡的相互作用来探讨光球下面的黑子结构而出现黑子日震学,这些研究有助于了解黑子本质。

太阳活动除了 11 年周期外,考虑到黑子磁场极性的分布特性又有 22 年的周期。此外还可能存在更长的周期,如有些人得出大约 323 天和 540 天的中周期性,但仍未定论。理论分析表明,太阳发动机能够在多重周期状态运转,并在对流层的不同深度同时产生几个周期。人们常用一个简单的对流层两层模型来说明这种多周期模式发动机。两层是由于湍动磁扩散率的不同引起的,而每一层所产生的模式的振荡周期近似等于横越该层的磁扩散的特征时间。人们观测到的磁场复杂周期性可能就是在这种情况下产生的二个(或更多)发动机模式联合的结果。最近 Arendt 根据空间探测得出,在 11 年活动周里,太阳辐照的变化约 0.1%,其主要原因是对流层大尺度流动的变化,以及活动周里磁场的重新排列所造成的。一些人已预测下一个太阳活动周(第 23 周)是从 1996 年开始,而在 2000 年左右达到活动极大,这对于研究太阳活动特性是有意义的。

从上述的研究情况可看出,太阳物理学在耀斑,振荡和磁场等方面确实取得不少进展,但仍有许多问题有待解决。进入九十年代后期及下一世纪,太阳物理将进入空间探测的新阶段。配合地面的观测,在高空间分辨率及高分光分辨率的大型仪器的投入使用,可望提供大量全新的资料。结合等离子体物理和磁流体力学等方面的理论研究以及大型计算机模拟,可能对太阳物理研究有重大的突破。