

文章编号: 1000-8349(2012)03-267-17

日震学研究进展

李 静^{1,2}, 张 枚¹, 张洪起¹

(1. 中国科学院 国家天文台 太阳活动重点实验室, 北京 100012; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 日震学旨在通过对太阳震荡的观测和分析来研究太阳内部的结构和动力学。回顾了日震学产生和发展的历史过程, 简单介绍了太阳震荡的基本性质和部分观测仪器, 综述了全球日震学与局部日震学的研究方法和近年来取得的部分重要进展, 指出了日震学研究是理解太阳内部结构不可替代的工具, 其研究成果具有极其重要的意义。

关 键 词: 太阳; 日震; 对流层; 磁场

中图分类号: P182.9 **文献标识码:** A

1 引 言

爱丁顿爵士在《恒星内部的规律》一书中曾惋惜道:“由于受不透明度的影响, 太阳以及其他恒星的内部成为了宇宙中最难以探测到的部分”。然而, 过去几十年中, 日震学的发展使人们对太阳有进一步的认识, 为了解太阳内部结构、动力学以及演化提供了前所未有的研究方法。日震学通过观测太阳表面大气振动, 分析日震波在太阳内部的传播性质, 以推测太阳内部的结构和演化。

早在 1916 年, Plaskett^[1] 在测量太阳转动速度时, 就发现太阳表面多普勒速度场具有波动现象。1956 年, Hart^[2, 3] 确定该现象来源于太阳本身, 而不是由地球大气的波动引起。Leighton^[4] 以及 Leighton 等人^[5] 发现了太阳大气的 5 min 振荡现象。当时的研究者认为, 这种振荡只局限于太阳光球层和色球层, 并致力于研究它与能量传输之间的关系。Ulrich^[6] 以及 Leibacher^[7] 分别独立地提出, 太阳的 5 min 振荡现象是太阳内部的声学波被束缚在球形壳腔中所形成。Deubner^[8] 的观测证实了该假说; 并且发现对于任意给定的水平波数, 太阳振动的频率都是分离的。后续的研究发现这种振荡是全球的, 且可以用来探测太阳内部的结构^[9]。日震学研究从此展开。

第 2 章将介绍太阳振荡 (solar oscillation) 的基本性质, 以及目前日震学的主要观测仪

收稿日期: 2011-12-23; 修回日期: 2012-04-06

资助项目: 国家自然科学基金 (10733020, 11125314, 10921303, 41174153, 10978003); 科学院方向性项目 (KJ CX2-EW-T07); 973 项目 (2011CB811401)

器;第3、4章将分别介绍全球日震学以及局部日震学的一些研究方法和现阶段的成果;第5章将介绍局部日震学中声波与磁场的相互作用;第6章是总结和展望。

2 太阳振荡

太阳大气时时刻刻都在振动着。这些振动,即太阳振荡,被认为是太阳上的强烈对流所激发,是日震学的研究对象。

2.1 基本性质

日面上每一点产生的振动都向四面八方传播,形成日震波。相应地,日面上任意一点的振动,都是该点产生的以及各个方向传播过来的波的叠加。这些各个方向传播过来的日震波,具有不同的频率、不同的波长,以及不同的振动模式。

2.1.1 分类

基于不同的回复力(restoring force),日震波被分为3种模式:(1) p 模,即声学波(acoustic wave),以压力作为回复力。 p 模振动的频率大于1 mHz,在频率2~4 mHz处振幅达到最大。(2) g 模,也叫重力波(gravity wave),以重力作为回复力。 g 模振动的频率为0~0.4 mHz,在对流层下存在。(3) f 模,或称表面重力波(surface-gravity wave),是重力波的一种。

目前太阳表面观测到的振荡是声学波和表面重力波的叠加,主要在频率2~5 mHz之间,对应周期为3~8 min。在周期5 min处,振幅最大,也就是最早观测到的5 min太阳振荡。

2.1.2 描述方式

日震波通常用其本征模式的线性叠加来表示。例如,将太阳表面振动的径向位移表示为:

$$\delta r(r, \theta, \phi, t) = \sum_{n,l} \sum_{m=-l}^l a_{nlm} \xi_{nl}(r) Y_l^m(\theta, \phi) e^{i\omega_{nlm}t}, \quad (1)$$

其中 r 是日心距, θ 和 ϕ 是日球坐标中的纬度和经度,时间为 t , Y_l^m 是球谐函数, a_{nlm} 为复振幅, $\xi_{nl}(r)$ 是频率为 ω_{nlm} 的径向本征函数。下标 n 为径向级(radial order),代表了径向本征方程的节点数; l 为阶(degree),代表了球面上的节线数; m 是方位角次(azimuthal order),代表这些节线穿越赤道的次数。

在球对称假设下, m 是简并的,即拥有相同 n 、 l 模式的波具有相同的频率。可以认为,太阳振动是声学波在一个谐振腔中的传播。这个腔的上边界接近太阳表面,而下边界取决于波的频率与阶数 l 。 l 越小,其下边界越深,即日震波穿越了太阳内部较深层区域; l 越大,其下边界越浅,即日震波在太阳较浅区域传播。选择研究不同 l 的日震波,可以获得太阳内部不同深度的信息。

2.1.3 观测

通过观测太阳表面(光球层或色球层)谱线的夫琅和费暗线的多普勒移动,推导出来的视线方向速度图叫做多普勒速度图(dopplergram)^[10]。多数日震学数据为多普勒速度图的一个时间序列。取日面上的一小块区域,忽略日面曲率,则视向速度 v 可以表示为时间 t 以及

平面直角坐标系下日面位置 (x, y) 的函数, 傅里叶变换 f 被定义为:

$$f(k_x, k_y, \omega) = \int v(x, y, t) [e^{i(k_x x + k_y y + \omega t)}]^* dx dy dt, \quad (2)$$

其中 $f(k_x, k_y, \omega)$ 为傅里叶空间波数频率域中描述的太阳振荡, $k_x = 2\pi/x$ 、 $k_y = 2\pi/y$ 分别是 x 、 y 方向上的波数, $\omega = 2\pi/t$ 为圆频率。由此, 可以得到功率谱为:

$$P(k_x, k_y, \omega) = f f^* . \quad (3)$$

当研究的区域大小可以与日面大小相比拟, 日面曲率不可忽略时, 则应使用球面坐标系。

图 1^[11] 为理论太阳振荡功率谱 (a) 与 MDI (Michelson Doppler Imager)^[12] 观测的功率谱 (b) 比较。其中, 纵轴为频率 $\nu = \omega/2\pi$, 横轴为阶 l 。 l 与水平波数 k_h 的关系为: $k_h r_\odot = [l(l+1)]^{1/2}$, 其中水平波数 $k_h = (k_x^2 + k_y^2)^{1/2}$ 。图中, 频率低的是 g 模, 频率高的是 p 模, p 模下方直线是 f 模。从下往上不同的脊 (ridge) 代表不同的径向阶 $n = 0, 1, 2, \dots$ 。 $n = 0$ 的脊表示 f 模, 往上依次分别为 p_1, p_2, \dots 模。观测上目前只能探测到 p 模和 f 模。

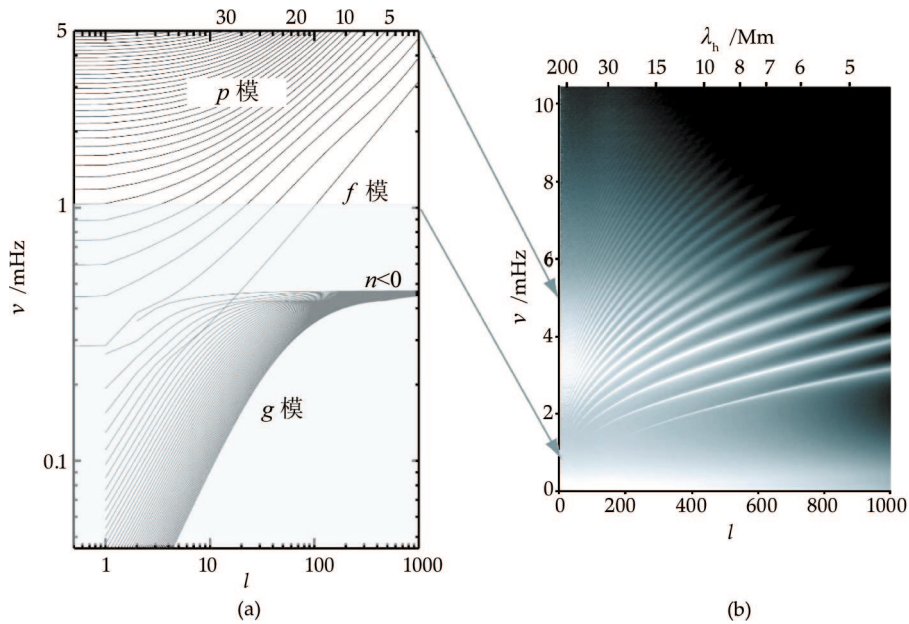


图 1 太阳振荡功率谱^[11]。横轴为阶 l , 纵轴为频率 ν , 上方横轴对应的是波长。(a) 为理论谱, (b) 为观测谱。

2.2 主要观测仪器

随着空间望远镜的大力发展以及密切的国际合作, 对太阳的观测不但可以持续很长时间, 甚至可以不间断, 达到真正的日不落。日震数据是多普勒速度图的时间序列, 时间序列的长度直接影响到能探测到的日震波的最小频率与频率间隔。例如, 设 Δt 为望远镜记录数

据的时间间隔,若连续记录了 N 张图,那么时间序列的长度为 $T = N\Delta t$,则观测到的最小频率与频率间隔为 $\nu_{\min} = \Delta\nu = 1/T$ 。

伴随着 CCD 技术的革新,观测图像的空间分辨率也越来越高。这里介绍目前常用的几个日震学观测系统。

2.2.1 GONG

GONG(Global Oscillation Network Group)^[13] 是一个国际化的旨在利用日震学详细研究太阳内部结构和动力学的网络观测系统。

为了进行不间断的观测,以获得较高的频率分辨率,位于美国亚利桑那州图森市的国立太阳天文台(National Solar Observatory)在全球 6 个不同经度的观测台站布置了观测仪器。这 6 个台站分别是:美国加利福尼亚州的大熊湖太阳观测站,夏威夷的莫纳罗亚太阳观测站,澳大利亚的利尔蒙思太阳观测站,印度的乌代布尔太阳观测站,加纳利群岛的泰德观测站和智利的塞罗托洛洛泛美天文台^[14]。

GONG 的每个观测仪器都是 1 个相移干涉仪,每 1 min 记录 1 张图片。通过太阳光谱中的 Ni I 6768 吸收线,来测量多普勒速度。GONG 1995 年开始工作时,使用照相机,像素为 256×256 。2001 年改用 CCD,全日面多普勒速度图的像素提高为 1024×1024 ^[15]。GONG 同时每 20 min 提供 1 张太阳视线方向磁场图。

2.2.2 MDI

MDI 是搭载在由 ESA(欧洲宇航局)和 NASA(美国宇航局)1995 年 11 月发射的 SOHO(Solar and Heliospheric Observatory)飞行器上的一架观测仪器^[12]。SOHO 环绕太阳地球联线上的第一拉格朗日点飞行。SOHO 上的太空望远镜不仅可以完成不间断的观测,还具有很好的视宁度和较小的卫星相对太阳的运动速度。

MDI 上两个可调的迈克尔逊干涉仪,能够测量半峰全宽为 $94 \text{ m}\text{\AA}$ 的单色像。通过像素为 1024×1024 的 CCD,MDI 每分钟记录 Ni I 6768 吸收线周围 5 个波长处的 20 张单色像,可以计算出分辨率为 $4''$ 的全日面速度图和光度图。

MDI 可以在全日面模式($2''$)和高分辨率模式($0.6''$)之间切换。虽然高分辨率模式可以让空间分辨率提高 3 倍,但视场缩小到原来的 $1/3$ 。由于信号传导率的限制,1996 年以来,常规数据传输为,将全日面图像进行平滑处理,使空间分辨率降低到像素 200×200 。不间断的 1024×1024 像素的全日面图,每年只传输 2 个月的资料。

SOHO 卫星上除了 MDI 以外,还搭载了其他两个日震学观测设备:GOLF(Global Oscillations at Low Frequencies)和 VIRGO(Variability of solar Irradiance and Gravity Oscillations),致力于获得高灵敏度的 p 模振动观测特性,并试图探测 g 模振动过程。

2.2.3 TON

TON(Taiwan Oscillation Network)是一个预计由 6 个相同望远镜组成的地基观测网络^[16],以测量太阳高阶和中阶 p 模振动。TON 的 6 个望远镜是口径为 9 cm 的马克苏托夫望远镜,配置像素 1080×1080 的 CCD,每分钟记录一张色球层全日面 K 线(即波长为 393.4 nm 、频宽 1 nm 的宽频带 Ca II 线)图像。

TON 总部设在台湾新竹清华大学物理系, 目前已有 4 架望远镜分别放在加纳利群岛的泰德观测站、北京的怀柔太阳观测站、加利福尼亚的大熊湖太阳观测站, 以及乌兹别克斯坦的塔什干观测站。

2.2.4 HMI

HMI(Helioseismic and Magnetic Imager) 是 NASA 在 2010 年 2 月 11 日发射的 SDO(Solar Dynamics Observatory) 上的一个载荷, 测量太阳表面光球层的振动和磁场, 以研究太阳变化的起源、机制以及磁场在其中所起到的作用^[17]。

HMI 使用波长为 6173 \AA 的 Fe I 线, 每 45 s 记录一张光球层全日面多普勒图, 像素为 4096×4096 。HMI 进行高空间分辨率 ($1''$) 的太阳全日面观测, 这使得太阳临边局部日震学的研究成为可能。HMI 的设计与 MDI 相似。

除了测量多普勒速度场, HMI 还提供连续谱的太阳单色像、视线方向的磁场图和矢量磁场图。SDO 每天的数据流量为 1.5 TB, 这庞大的数据量不管是对地面接收系统, 还是对数据的存储和分析都是一个挑战。

3 全球日震学

日震学研究可以分为三个阶段, 即日震学研究的 3 种方法^[18]。

第一阶段, 将太阳作为一颗恒星来研究。此阶段观测到的日面可以没有空间解析度, 主要研究低阶模式的振动 ($l \leq 4$), 以探测太阳最深层的信息。这些方法被广泛应用于目前星震学的研究。

第二阶段, 全球日震学研究阶段。在观测上, 需要有一定的空间解析度。主要研究中阶模式 ($l \leq 300$) 的振动, 以探测太阳内部, 尤其是对流层的信息。

第三阶段, 局部日震学研究阶段。为目前最流行的研究方式。在观测上, 需要较高的空间分辨率。主要利用高阶模式 ($l \geq 200$) 的振动, 以研究太阳近表面, 如活动区下方以及对流层上层十几兆米内的空间结构。

当然这种分类并不是绝对的, 各种方法之间没有严格的界限。

本章和下一章, 将从研究方法与主要结果两个方面, 分别介绍全球日震学与局部日震学。

3.1 研究方法

全球日震学对太阳物理性质的描述是二维的, 即以日心距离和不区分南北半球的纬度为自变量, 来描述太阳的特性如声速、密度以及角速度等。

值得一提的是, 经典的星震学理论^[19] 是通过测量振动模式的频率, 来寻找与观测振动模式相符的太阳模型^[20]。但是, 将太阳标准模型^[21] 预言的 $k-\omega$ 图与观测得到的进行比较, 发现对于相同的水平波数 k_h , 频率越高, 理论预言的频率与观测到的差距越大^[22]。

造成此现象的原因可能有多种。首先, 这可能反映了太阳标准模型对太阳表面的描述还不精确。大多数的太阳和恒星模型, 对流层的处理都采用了混合程理论。这种理论对于太阳

表面尤其不适用。其次,大多数的太阳模型不考虑对流引起的湍流效应。考虑湍流效应,可以减少理论与观测之间的频率差^[23]。

因此,在全球日震学中,通常使用反演方法来研究太阳内部的结构,而不是直接对比标准模型与观测的频率值。太阳振动频率是由太阳内部结构决定,知道了振动频率便能推导出其内部结构^[24]。在反演方法中,通常将太阳模型中的频率差(而不是频率本身)反演,比较观测值和模型值之间的差异^[25]。这样得到的太阳模型通常被称为日震(seismic sun)模型^[20]。

3.2 主要结果

利用全球日震学方法,科学家们确定了太阳内部较差自转轮廓,发现了差旋层(tachocline)的存在^[26],同时发现了大尺度子午流(meridional flow)和带谐流(zonal flow)的存在,进一步确定了对流层底部位于^[22] $(0.712 \pm 0.001) R_{\odot}$ 处^[27, 28],确定了太阳对流层的氦丰度^[29, 30] 为 0.2485 ± 0.0034 ^[31],并且发现太阳震荡的频率随太阳周变化^[32]。

其中,太阳内部较差自转轮廓的测定和差旋层存在的发现,冲击了传统的太阳发电机模型,迫使人们提出新的符合日震观测的发电机模型^[33]。下面对其中一些结果进行简要介绍。

3.2.1 太阳内部较差自转轮廓

太阳自转的角速度对纬度有很强的依赖性:越靠近赤道,自转速度越快,两极的转动速度最慢。这种现象被称为太阳的较差自转。太阳表面的较差自转,可以利用太阳黑子等特征物,通过示踪方法来获得。然而只有通过日震学,才能得到太阳内部不同深度处自转的角速度^[34],即太阳内部较差自转轮廓。

在图 2^[35] 中,竖直的虚线代表对流层底部,圆圈和虚线代表不同的反演方法,误差棒均为 1σ 。可以看出,在对流层中,太阳自转速率对深度的依赖性较小,即同一纬度不同深度处的转动速度与太阳表面的转动速度基本一致;而在对流层底部,同一纬度的转动速率随深度变化的梯度很大,这个区域被称为差旋层。

由于传统 $\alpha - \omega$ 发电机模型需要自转速度随深度的变化,因此,日震学的发现迫使发电机模型将磁场产生区域从传统的整个对流层推到对流层底部,即差旋层所在之处。在差旋层以下,太阳像刚体一样转动。差旋层自转速率的大幅改变也可能是湍流产生的原因。

3.2.2 带谐流(zonal flow)

带谐流描述的是太阳表面某一纬度的流体运动速率减去该纬度处的平均转动速率后,得到的流体相对于平均流场呈现出的前进或倒退的运动态势。

带谐流的流速约为 $\pm 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[36]。带谐流出现的位置,随着太阳活动周的变化呈现出分别向赤道和两极迁移的态势。从中纬度开始,一部分带谐流随着太阳活动周向赤道迁移,而高纬度区的部分则向两极迁移^[37, 38]。这种带谐流的迁移现象被称作扭转振荡(torsional oscillation)^[39]。

扭转振荡存在于对流层的大部分区域。在高纬度区域,甚至可以延伸到对流层底部^[40]。

3.2.3 随太阳活动周的变化

利用 GONG 与 MDI 数据,发现太阳振动频率随太阳活动周变化^[41, 42]。图 3^[43] 显示了 GONG 观测到的太阳振动中阶模式平均频率随太阳活动周的变化,纵轴为纬度的正弦值,轮

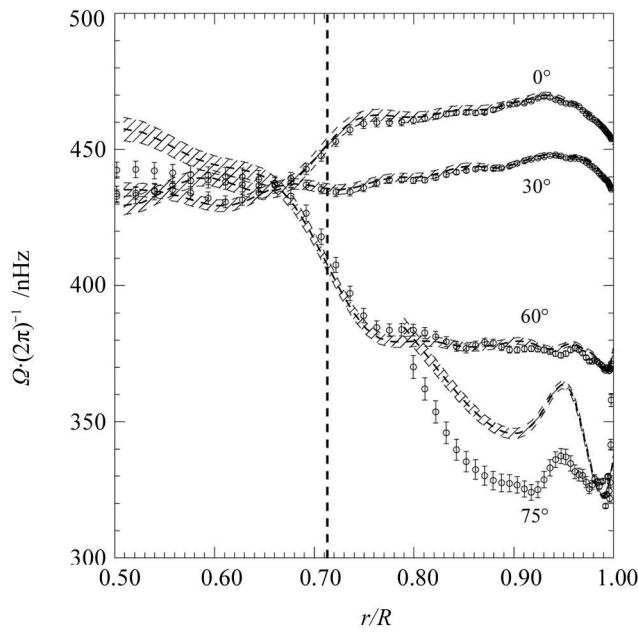


图 2 MDI 144 天观测数据反演得到的太阳内部自转角速度轮廓^[35]。图中显示了纬度分别为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 四种情况下太阳自转频率随深度的变化。

廓显示了间隔为 10^{-3} T 的磁通量密度结构。可以看到, 强磁场区域的太阳振动中阶模的平均频率较高, 太阳振动频率随太阳活动周的变化也有类似黑子蝴蝶图的效应。

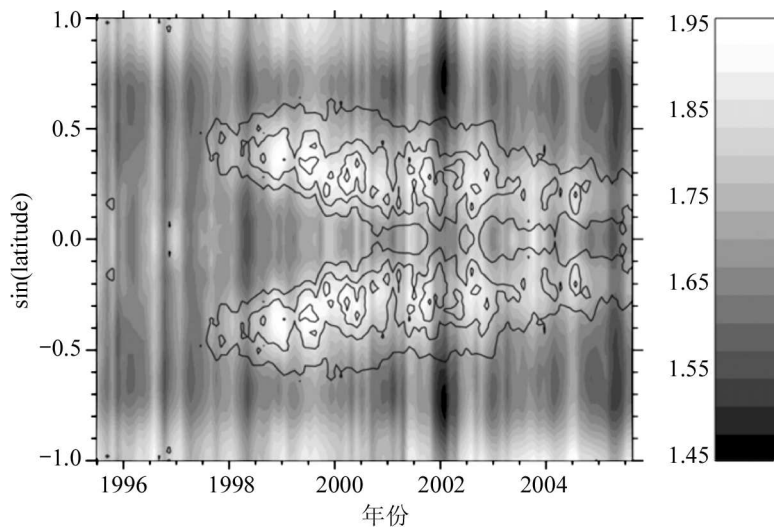


图 3 GONG 观测到的太阳振动中阶模式的平均频移随太阳活动周的变化图^[43]。图中的中阶模式选取了 $8 \leq n \leq 10$ 和 $40 \leq l \leq 80$ 区间。

频率随着太阳活动周变化的原因可能有: 太阳外表面 ($r > 0.98R_\odot$) 的结构随着太阳活

动周的变化而变化^[44]，赤道与高纬度区域的声速差随着太阳活动周的变化而变化^[45]。

4 局部日震学

基于全球日震学模式的频率反演，既得不到经度方向的信息，也不能分辨南北半球的差异，更不能研究子午流的细节以及更为复杂的流场。同时，日震波毫无疑问地会与太阳黑子或者其它局部强磁场相互影响，这些因素都没有清晰地反映在全球日震学的反演中。

在高分辨率望远镜支持下的局部日震学^[46]，以太阳经度、纬度以及深度为自变量，探测太阳内部的三维结构，使研究太阳表面局部特征和南北两个半球的不同结构以及各种流场成为可能。局部日震学通过分析局部区域的振动信号，研究三维流场、热与结构的不均匀性，甚至是磁场本身。

4.1 研究方法

局部日震学的研究方法有很多，这里简单地介绍3种。

4.1.1 环图分析

环图分析(Ring-diagram analysis)^[47]是一种全球日震学方法的延伸。它利用太阳上局部振荡的三维功率谱 $P(k_x, k_y, \omega)$ ，即色散关系，来研究该区域的信息。对于给定的 ω ，每一张功率谱都是由 (k_x, k_y) 平面的一组同心圆组成，如图4^[48]所示。图中最外圈代表了 f 模，往里面接着是 p_1 模、 p_2 模、 p_3 模等，每一个圆都代表一个径向阶 n 。这些圆的位置与形状，提供了太阳表面以下的水平流场与热结构信息。这种方法已经被用来研究太阳活动区的流场以及大规模的子午流和带谐流^[50-52]，并且得到了非常重要的太阳流动模式图^[53]。

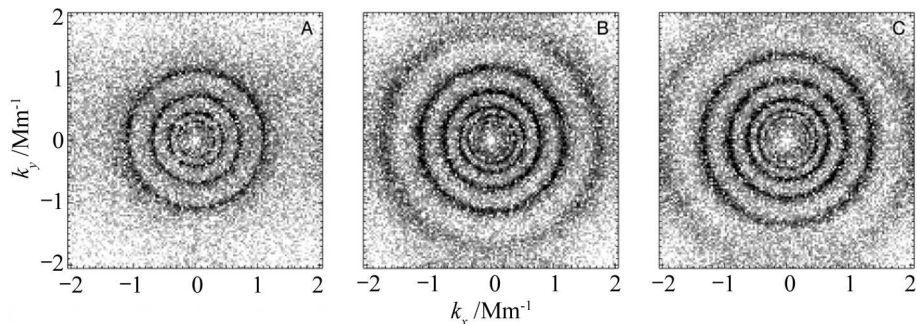


图4 三维功率谱中所对应的 (k_x, k_y) 平面环图^[48]。灰度代表傅里叶空间中水平波数平面 (k_x, k_y) 的功率，越黑代表功率越大。从左到右，频率分别为：2.8 mHz、3.5 mHz、3.8 mHz。

4.1.2 时距日震学

时距日震学(Time-distance helioseismology)研究方法是色散关系的一个补充，即研究在时空域中的色散关系。这种方法被广泛地运用于地震学中，Duvall于1993年^[54]首次将其运用于日震学。

通过计算太阳表面任意两点的振荡信号之间的交叉协方差函数(Cross-Covariance

Function, 简称 CCF), 可以得到太阳振动在这两点之间的传播时间。由于两点之间的传播时间受振波传播路径上的热扰动、磁场以及流场所调制, 因此, 从对两点之间传播时间的分析中, 可以得到太阳内部的结构信息。

时距日震学被用于研究磁场诱发的扰动^[55]、太阳表层下的较差自转^[56]、对流层的子午流^[57]和高阶模式的波包寿命^[58, 59]等。

4.1.3 日震全息术

Chou 等人在 1997 年提出的声学成像 (acoustic imaging)^[60], 以及 Lindsey 等人在同年提出的日震全息术 (helioseismic holography)^[61], 都是利用全息技术来研究太阳。

日震波是传播的。观测太阳表面某区域在某时刻的波动场, 并假设该区域的波动是由太阳上某一点的振动经过时间 t 传播而来, 或在 t' 时刻后向另一点汇聚, 那么, 根据观测到的太阳表面的振动, 就可以反推出太阳上任意点任意时刻的振动信息^[62], 从而构建任意时刻太阳内部三维图像^[63]。

4.2 主要结果

局部日震学解释了太阳的很多细节, 例如: 在活动区, 太阳表面 7 Mm 内声速低于宁静区, 而深层的声速较高^[31, 64]。更为细致地研究了子午流^[51, 57, 65], 研究了与活动区有关的流场^[48, 49, 66], 以及研究太阳背面的活动区^[67]。

4.2.1 子午流

子午流在太阳发电机模型^[68]以及较差转动的产生和变化模型^[69]中占有重要地位。因此, 对其大小和方向的准确探测十分重要。

子午流, 是太阳子午方向上的流动。在太阳表面上, 由赤道流向两级。子午流的流速, 随太阳活动周, 以及不同的深度和纬度而改变^[70]。在纬度 40° 左右, 流速达到最大, 约为 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[71, 72]。

通常认为, 太阳内部的子午流会在对流层底部, 由两极流回赤道。返回赤道的子午流在太阳平均场发电机中有着极其重要的作用。但是, 全球日震学给出的太阳深层信息的灵敏度, 不足以探测流速很小的子午流^[73]。虽然局部日震学仔细研究了太阳表面以下 15 Mm 内的子午流^[74], 但对较深层次的探测, 还没有比较系统的研究和分析。总之, 目前探测到的子午流均保持极向, 对流层底部的反向子午流还未探测到。

4.2.2 活动区下方流场

局部日震学不仅可以仔细研究子午流、带谐流等大尺度流场, 还可以用时距日震学方法研究太阳黑子附近以及下方流场。

图 5^[75]显示了使用时距日震学方法, 得到的黑子及其下方流场的分布图。背景图像显示的是垂直于纸面方向的流场; 箭头显示的是水平流场, 最长的箭头代表 $0.5 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的流速。图 5 (a), (c), 来自 2000 年 8 月 7 日的的数据; 图 5 (b), (d), 来自 2000 年 8 月 8 日的的数据。图 5 (a), (b) 为深度 $0\sim 3 \text{ Mm}$ 的流场, 图 5 (c), (d) 为深度 $9\sim 12 \text{ Mm}$ 的流场。图中等值线代表视线方向的磁场绝对值, 由外到内的数值分别为: 0.06、0.08、0.1、0.12、0.14 和 0.16 特斯拉。可以看到, 在太阳表面, 流场方向是指向黑子的; 而在黑子下方 $9\sim 12 \text{ Mm}$ 处, 流场方向是黑

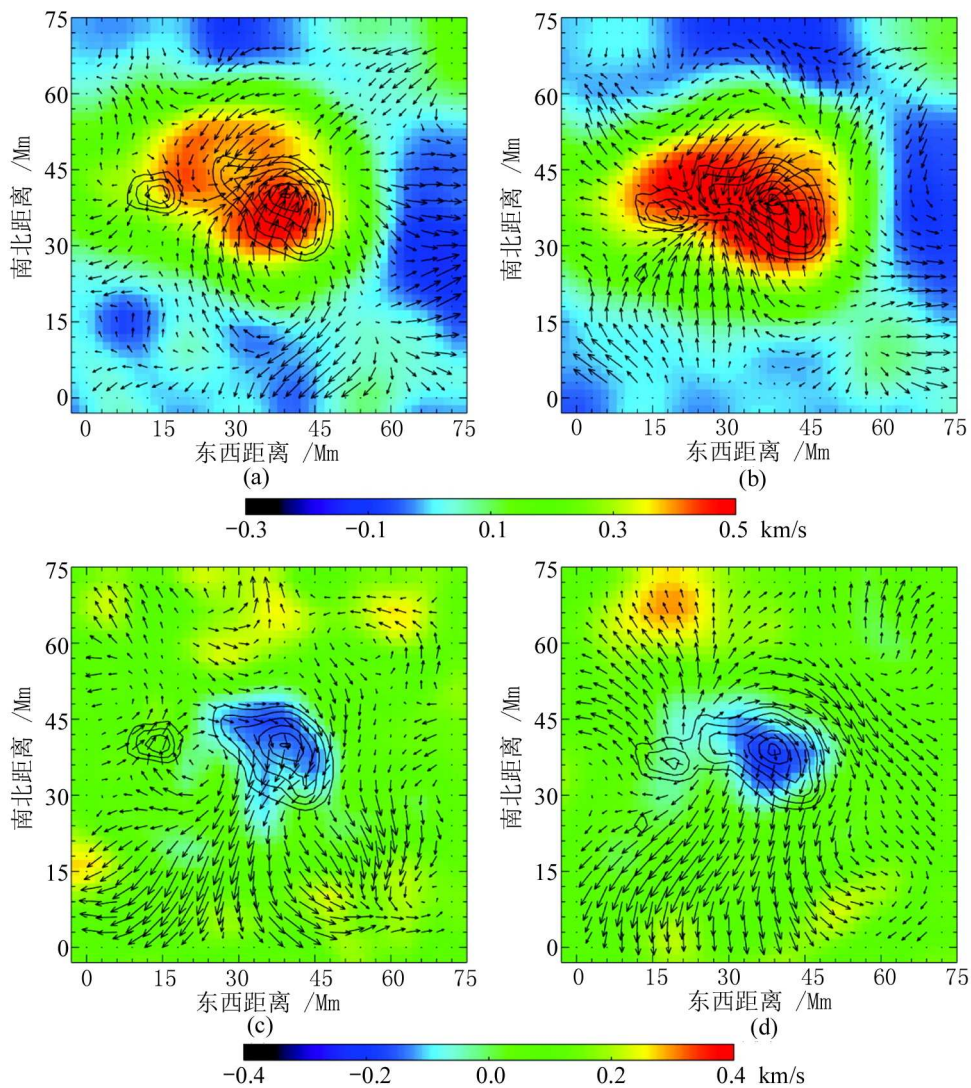


图5 MDI数据得出的黑子及下方流场图^[75]

子指向周边的。

4.2.3 动力学螺度的探测及与太阳爆发的关系

有些太阳爆发活动,比如耀斑以及日冕物质抛射,与太阳黑子的转动^[76]以及剪切运动有关^[77]。Brown等人^[78]研究了数个旋转黑子,计算了磁场螺度以及产能,发现转动的黑子可以扭曲冕环并且诱发耀斑。

对流层及表层大气的竖直流很可能是引起磁场变形的原因^[79]。针对2003年10月29日活动区10486的X10级耀斑,Komm等人^[80]利用环图分析方法,计算了活动区附近及下方的流场,并进一步计算了动力学螺度。他们发现,在耀斑爆发时,活动区下方5 Mm范围内有很强的动力学螺度信号。这一强信号在耀斑发生前后都没有出现。

4.2.4 磁浮现过程

太阳黑子是太阳表面的强磁场低温区域,也是许多太阳耀斑和太阳风暴发生的源泉。如果能够预报太阳黑子的出现,就能够有效地预测大型活动区的浮现,以更好地预报太阳风暴,为空间天气服务。

Ilonidis 等人^[81]利用 SOHO/MDI 观测数据,用局部日震学时距分析方法,测量了太阳表面下 42~75 Mm 深度处 p 模波的传播时间,计算了 p 模波传播时间相对于宁静太阳区的扰动。他们发现,在活动区浮现前的一两天,扰动值达到极大。因而,可以将这种扰动作为磁场浮现的信号。

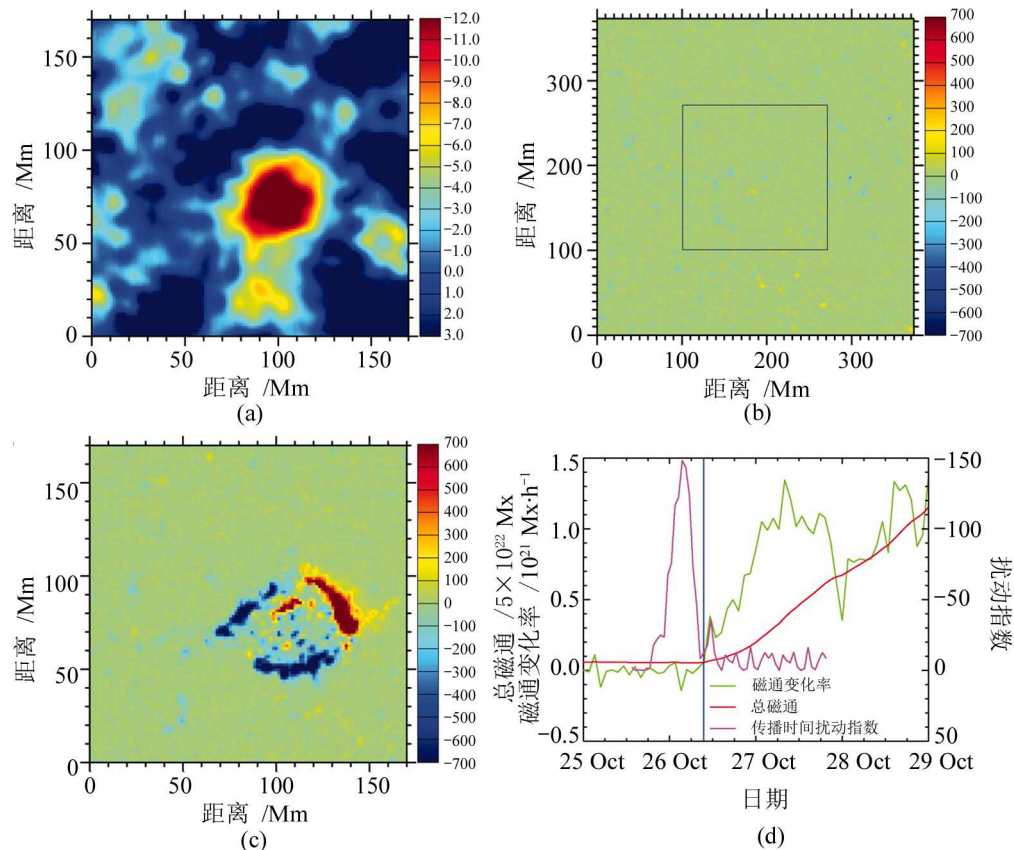


图6 利用局部日震学提前 1~2 d 探测到了活动区 NOAA10488 的浮现^[81]。

图6显示了一个活动区浮现被提前探测到的案例^[81]。其中,图(a)显示的是,通过分析以2003年10月26日03:30 UT为中心8 h数据,得到的以秒为单位的平均传播时间扰动图;图(b)为同一时间段同一太阳表面区域观测到的磁图,以高斯为单位;图(c)为同一区域24 h后,太阳表面观测到的磁图。可以看到,在原来没有磁场的区域(图(b)),有了新活动区浮现,而这在24 h前的图(a)中就被探测到;图(d)中,竖直的蓝线标志着活动区开始浮现,红线代表总磁通量变化,绿线代表磁通变化率,粉线代表 p 模波传播时间的扰动指数。

以上案例, 以及 Ilonidis 等人研究的多个活动区, 均显示了相似的结果: 在大型黑子浮现前近两天, 磁场的浮现可以使这一区域下 42~75 Mm 深度处的声波获得十几秒的加速。Ilonidis 等人还研究了太阳表面下不同深度的声波传播时间, 发现只有深度 42~75 Mm 区域, 可以得到明显的结果。

利用这一结果, 只要监视太阳表面下 42~75 Mm 深度处的声波传播时间扰动, 就可以提前至少一天预测出活动区的浮现。

4.2.5 太阳背面探测

远端成像 (Farside imaging) 是一种利用太阳可观测面的数据, 运用日震全息术^[67] 或时距日震学方法^[82] 来推测太阳背面信息的技术。图 7 展示了一组利用远端成像技术的结果^[83]。深色部分为 GONG 观测到的日面磁场图, 浅色部分为推测出的太阳背面图像。可以看到活动区 NOAA 9503 在 28 日转到可观测日面前 12 d 就被远端成像探测到了它的形成。由于可以提前两周预测到太阳背面大型黑子的出现, 远端成像技术的应用对日冕物质抛射和太阳耀斑等强活动现象的预测十分重要。

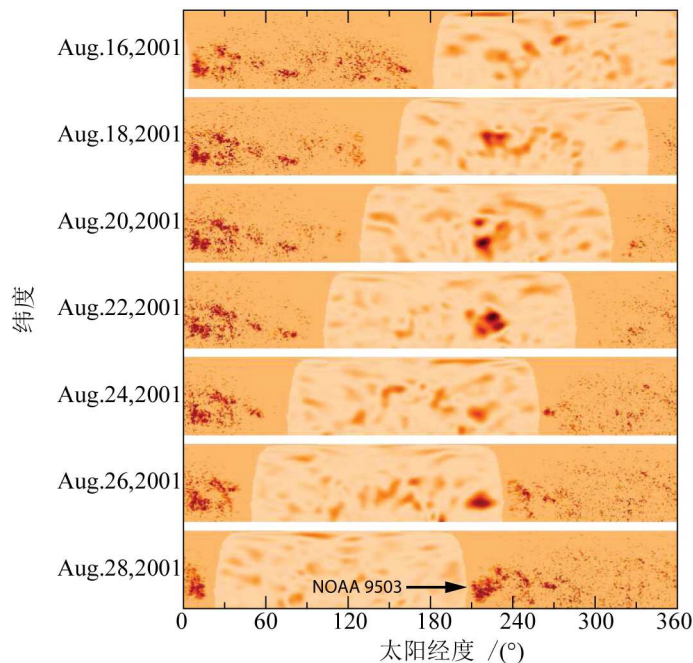


图 7 太阳远端成像结果展示^[83]。从上往下 7 张图, 分别代表了从 2001 年 8 月 16 日到 2001 年 8 月 28 日, 观测到的太阳正面黑子图以及远端成像推测出的太阳背面黑子图。

5 声波与磁场的相互作用

日震波在太阳内部, 尤其是活动区下方, 传播时必然会与磁场发生相互作用。只有知道

了日震波和各种磁结构是如何相互作用的, 才能利用日震波探测太阳内部磁场结构的信息。这一章分别讨论日震波在宁静区与强磁场区域的传播特性。

5.1 宁静区

波在介质中传播, 总会有耗散。日震波在太阳宁静区中各处的振动能量总是差不多, 这是因为宁静区下的太阳对流在时时刻刻为日震波的耗散补充能量, 也就是说在太阳宁静区振动的耗散与辐射是相等的。

5.2 黑子区

日震波与太阳磁场的相互作用会改变日震波的性质, 利用这一点可以研究太阳磁场的结构。太阳黑子区域有强达上千高斯的磁场和较低的气压与密度, 日震波的性质在其通过黑子区域后有着非常显著的改变。

观测发现太阳黑子区域的日震波能量小于宁静区^[84, 85]。导致这一现象的原因可能有三个方面: 磁场对震波信号的吸收、辐射率降低以及局部抑制作用^[86]。震波吸收的过程可能有: 振动和强磁场相互作用导致振动动能转化为热能^[87]; 日震波在经过磁场区域后转化为我们探测不到的模式^[88]; 在磁场区域截止频率改变了, 即更多的振动没有被太阳表面反射回去, 而是直接传播出去了等。辐射率降低指的是, 在黑子区域由于对流减弱, 而导致黑子区域激发的日震波不如宁静区激发的日震波的振动动能大^[89]。由于强磁场而导致日震波振幅的减小, 而不是振动动能真的减小, 就是磁场对日震波的局部抑制。

Chou 等人^[86, 90, 91] 利用在一点产生的日震波与其传播路径上产生的日震波不相关的特性, 研究了波包在传播方向上的损耗, 详细讨论了这 3 种机制下磁场对日震波的影响和作用。Zhao 等人^[92] 在 2011 年通过计算日面其他点与入射波之间的交叉协方差函数, 再利用消卷积的方法将交叉协方差函数还原成日面各点声学波的波函数, 以此来研究由于日震波与黑子相互作用而引起的黑子对日震波的散射作用。

6 问题和展望

迄今为止, 日震学的研究已经促进太阳、恒星和基础物理学中诸多问题的解决, 如修正太阳标准模型^[93], 为恒星的结构与演化理论提供最为精确的验证方法^[94], 在解决太阳中微子缺失问题^[49, 95]的同时, 修正粒子物理标准模型^[96]。

g 模频率很低, 需要较长时间不间断地观测, GOLF 对太阳低频振荡连续监测已达一个多太阳周期, 还没有得到确定的太阳 g 模振荡谱^[97]。虽然有学者称已经探测到特殊的模式^[98], 并且能够推导出一个转速较大的日核^[99]; 但是, g 模振荡可以在辐射转移层和太阳大气中传播, 而不能在对流层中传播, 所以, 探测到的 g 模是否来自太阳内部还存在争议。

虽然日震学结果显示太阳的内部结构与太阳标准模型相差不远, 但日核结构还不确定, 我们希望日震学可以减少这种不确定性。

利用局部日震学可以研究太阳近表面的性质, 比如在检测太阳活动区以及黑子下方的流场方面, 局部日震学已取得了显著的成绩。虽然利用日震学方法预测到了黑子的浮现, 但是,

以日震学现有的方法和手段还不能清楚地解释太阳黑子的形成与演化,因为黑子的形成区很可能是在对流层的底部,而日震学目前还没有足够的灵敏度来检测。

日震波的能量随着视向磁场的增强有减小的趋势,但是我们更关心日震波的能量与矢量磁场之间的关系。HMI 的高分辨率全日面多普勒速度图和矢量磁场图将帮助学者们在这一研究方向取得更多进展。

欧洲宇航局计划在 2015 年发射一个太阳轨道望远镜来更近距离地观测太阳^[100],其中将搭载一个可见光成像仪与磁像仪(Visible-light Imager and Magnetograph),简称 VIM。VIM 将首次观测到太阳极区的矢量磁场与速度场,这不能不让人期待。

利用日冕振荡来研究日冕结构,也无疑是一个十分有意义但却极具挑战性的课题。

致谢

衷心感谢台湾清华大学周定一教授对本文的建议和一年多以来对笔者的悉心指导,感谢赵辉博士和汪景琇研究员在本文修改上给予的帮助。

参考文献:

- [1] Plaskett H H. ApJ, 1916, 43: 145
- [2] Hart A B. MNRAS, 1954, 114: 17
- [3] Hart A B. MNRAS, 1956, 116: 38
- [4] Leighton R B. Proc. IAU Symp., 1960, 12: 321
- [5] Leighton R B, Noyes R W, Simon G W. ApJ, 1962, 135: 474
- [6] Ulrich R K. ApJ, 1970, 162: 933
- [7] Leibacher J W, Stein R F. ApJ, 1971, 7: 191
- [8] Deubner F L. A&A, 1975, 44: 371
- [9] Claverie A, Issak G R, Mcleod C P, et al. Nature, 1979, 282: 591
- [10] Scherrer P H, Bogart R S, Bush R I, et al. Sol. Phys., 1995, 162: 129
- [11] Kosovichev A G. Astro. Phys. SR, 2009, 1170: 547
- [12] Domingo V, et al. Sol. Phys., 1995, 162: 1
- [13] Leibacher J W. the GONG Project Team, GONG 1994: Helio- and Asteroseismology, Ulrich R, Rhodes E, Dappen W, eds. ASP Conference Series, 1995, 76: 381
- [14] Harvey J W, Hill F, Hubbard R, et al. Science, 1996, 272: 1284
- [15] Harvey J W. Sol. Phys., 1995, 376: 9
- [16] Chou D Y, Sun M T, Huang T Y. Sol. Phys., 1995, 160: 237
- [17] Borrero J M, Tomczyk S, Norton A, et al. Sol. Phys., 2007, 240: 177
- [18] Rachel H. Advances in Space Reserch, 2008, 846: 854
- [19] Ledoux P, Walraven T. Handbuch der Physik, 1958, 51: 353
- [20] Christensen-Dalsgaard J. Rev. Mod. Phys, 2002, 74: 1073
- [21] Bahcall J N, Serenelli A M, Basu S. ApJ, 2005, 621: L85
- [22] Christensen-Dalsgaard J, Gough D O, Thompson N J. ApJ, 1991, 378: 413
- [23] Robinson F J, Demarque P, Li L H, et al. MNRAS, 2003, 340: 923
- [24] Dziembowski W A, Goode P R, Pamyatnykh A A, et al. ApJ, 1994, 432: 417
- [25] Antia H M, Basu S. A&A, 1994, 107: 421
- [26] Spiegel E A, Zahn J P. A&A, 1992, 265: 106

- [27] Basu S, Antia H M. MNRAS, 1997, 287: 189
- [28] Basu S. MNRAS, 1998, 298: 719
- [29] Kosovichev A G, Christensen-Dalsgaard J, Däppen W, et al. MNRAS, 1992, 259: 536
- [30] Antia H M, Basu S. ApJ, 1994, 426: 810
- [31] Basu S, Antia H M. ApJ, 2004, 606: L85
- [32] Elsworth Y, Howe R, Isaak G R, et al. Nature, 1990, 347: 536
- [33] Parker E. ApJ, 1993, 408: 707
- [34] Thompson M J, Toomre J, Anderson E, et al. Science, 1996, 272: 1300
- [35] Schou J, Bogart R S. ApJ, 1998, 504: L131
- [36] Howard R, Labonte B J. Astro. J. Lett., 1980, 239: L33
- [37] Basu S, Antia H M. ApJ, 2000, 541: 442
- [38] Howe R, Christensen-Dalsgaard J, Hill F, et al. ApJ, 2000, 533: L163
- [39] Schou J. ApJ, 1999, 523: L181
- [40] Vorontsov S V, Christensen-Dalsgaard J, Schou J, et al. Science, 2002, 296: 101
- [41] Libbrecht K G, Woodard M F. Nature, 1990, 345: 779
- [42] Bhatnagar A, Jain, Kiran, et al. ApJ, 1999, 521: 885
- [43] Howe R. Advances in Space Reserch, 2008, 41: 846
- [44] Eff-Darwich A, Korzennik S G, Jimenez-Reyes S J, et al. ApJ, 2002, 580: 574
- [45] Basu S, Antia H M, Bogart R S. ApJ, 2007, 654: 1146
- [46] Gizon L, Birch A C. Living Rev. Sol. Phys., 2005, 2: 6
- [47] Hill F. ApJ, 1988, 333: 996
- [48] Hindman B W, Gizon L, Duvall T L, et al. ApJ, 2004, 613: 1253
- [49] Bahcall J N, Pinsonneault M H, Basu S, et al. Phys. Rev. Lett., 1997, 78: 171
- [50] Patron J, Hernandez G, Chou D Y, et al. ApJ, 1998, 506: 450
- [51] Basu S, Antia H M, Tripathy S C. ApJ, 1999, 512: 458
- [52] Haber D A, Hindman B W, Toomre J, et al. Sol. Phys., 2000, 192: 335
- [53] Haber D A, Hindman B W, Toomre J, et al. ApJ, 2002, 570: 855
- [54] Duvall T L Jr, Jefferies S M, Harvey J W, et al. Nature, 1993, 362: 430
- [55] Duvall T L Jr, D'Silva S, Jefferies S M, et al. Nature, 1996, 379: 235
- [56] Beck J G, Gizon L, Duvall T L Jr. ApJ, 2002, 575: L47
- [57] Giles P M, Duvall T L Jr, Scherrer P H, et al. Nature, 1997, 390: 52
- [58] Chou D Y, Dai D C. ApJ, 2001, 559: L175
- [59] Zhao H, Chou D Y, Yang M H, et al. Sol. Phys., 2011, 268: 363
- [60] Chang H K, Chou D Y, LaBonte B, et al. Nature, 1997, 389: 825
- [61] Lindsey C, Braun D C. ApJ, 1997, 485: 895
- [62] Lindsey C, Braun D C. Sol. Phys., 2000, 192: 261
- [63] Lindsey C, Braun D C. ApJS, 2004, 155: 209
- [64] Kosovichev A G, Duvall T L Jr, Scherrer P H. Sol. Phys., 2000, 192: 159
- [65] Schou J, Antia H M, Basu S, et al. ApJ, 1998, 505: 390
- [66] Zhao J, Kosovichev A G. ApJ, 2004, 603: 776
- [67] Lindsey C, Braun D C. Science, 2000, 287: 1799
- [68] Durney B R. ApJ, 1975, 199: 761
- [69] Spruit H C. Sol. Phys., 2003, 213: 1
- [70] Basu S, Antia H M. ApJ, 2010, 717: 488
- [71] Duvall T L Jr. Sol. Phys., 1979, 63: 3
- [72] Hathaway D H. ApJ, 1996, 460: 1027
- [73] Roth M, Stix M. Sol. Phys., 2008, 251: 77
- [74] Basu S, Antia H M. ApJ, 1999, 525: 517
- [75] Zhao J W, Kosovichev A G. ApJ, 2003, 591: 446

-
- [76] Knoska S. *Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia*, 1975, 26: 151
- [77] Tokman M, Bellan P M. *ApJ*, 2002, 567: 1202
- [78] Brown D S, Nightingale R W, Alexander D, et al. *Sol. Phys.*, 2003, 216: 79
- [79] Lopez Fuentes M C, Demoulin P, Mandrini C H, et al. *A&A*, 2003, 397: 305
- [80] Komm R, Howe F, Gonzalez H I, et al. in *SOHO 14-GONG 2004, Helio- and Asteroseismology: Towards a Golden Future*, Danesy D. Noordwijk: ESA SP, 2004, 559: 158
- [81] Ilonidis S, Zhao J W, Kosovichev A. *Science*, 2011, 333: 993
- [82] Zhao J. *ApJL*, 2007, 664: L139
- [83] Gizon L, Birch A C, Spruit H C. *ARA&A*, 2010, 48: 289
- [84] Woods D T, Cram L E. *Sol. Phys.*, 1981, 69: 233
- [85] Lites B W, White O R, Packman D. *AJ*, 1982, 253: 386
- [86] Chou D Y, Liang Z C, Yang M H, et al. *Sol. Phys.*, 2009, 255:39
- [87] Hollweg J V. *ApJ*, 1988, 335: 1005
- [88] Cally P S, Bogdan T J. *ApJ*, 1993, 402: 721
- [89] Parchevsky K V, Kosovichev A G. *ApJ*, 2007, 666: L53
- [90] Chou D Y, Liang Z X, Yang M H, et al. *AJ*, 2009, 696: L1
- [91] Chou D Y, Yang M H, Zhao H, et al. *AJ*, 2009, 706: 909
- [92] Zhao H, Chou D Y, Yang M H. *ApJ*, 2011, 740: 56
- [93] Pinsonneault M H, Bahcall, J N. *ApJ*, 2000, 529: 1084
- [94] Rogers F J, Nayfonov A. *ApJ*, 2002, 576: 1064
- [95] Antia H M, Chitre S M. *MNRAS*, 1997, 289: L1
- [96] Ahmad Q R, Allen R C, Andersen T C, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 89: 011301
- [97] Grec G, Provost J, Renaud C. *Solar-Stellar Dynamos as revealed by Helio- and Asteroseismology ASP Conference Series*, 2009, 416: 321
- [98] Gabriel A H, Baudin F, Boumier P, et al. *A&A*, 2002, 390: 393
- [99] Garcia R A, Jimenez A, Mathur S, et al. *Astrono Nachr*, 2008, 329: 476
- [100] Woch J, Gizon L. *Astron. Nachr.*, 2006, 88: 789

Recent Progress on Helioseismology

LI Jing^{1,2}, ZHANG Mei¹, ZHANG Hong-qi¹

(1. Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Over the past decades, helioseismology has produced unprecedented measurements on the Sun's internal structure, dynamics and evolution by using the properties of acoustic and surface-gravity waves that propagate through the interior and cause observable motions on the photosphere and lower solar atmosphere. The ability to determine the properties of solar interior is providing more stringent tests on stellar structure and evolution theory than those provided by the knowledge of just the global properties of the stars such as luminosity, mass, radius etc.

The purpose of helioseismology is to retrieve information about the structure and the dynamics of the solar interior. Global helioseismology has shown us how the Sun rotates differentially in the convection zone, forcing the traditional $\alpha - \omega$ dynamo model to revise. Recent progresses in local helioseismology are even more impressive: the meridional flow has been measured below solar surface, big sunspots on the farside of the Sun have been successfully detected, three-dimensional subsurface motions and temperature inhomogeneities below sunspots are now regularly being inferred. Here we present a brief introduction of the history, category, tools and recent results of helioseismology, to promote broader interests in this dynamical subject in China.

Key words: sun; helioseismology; convection zone; magnetic field