

# 日震学

熊大闰

【天文及天体物理中心, CCAST (World Laboratory)】

(中国科学院紫金山天文台)

## 提 要

本文就以下三个问题,对日震学近十年来的发展进行了简短的评述:1)日震学提供的太阳内部结构和运动的信息;2)日震学存在的主要理论问题;3)日震学的发展趋势和近期的发展计划。

## 一、前 言

Leighton 和他的合作者首先发现太阳大气速度场存在一种周期约5分钟的振荡成份 [1]。最初它被认为是太阳大气对来自光球之下对流运动无规冲击的一种瞬时响应。Ulrich [2] 和 Leibacher、Stein [3] 各自指出它们是俘获在太阳亚光球区的一种共振声波。自 Deubner [4] 得到第一张太阳5分钟振荡色散关系的功率谱图后,以上的理论推断就得到充分的证实。从此,太阳振荡就得到人们的广泛重视,它的理论也因此而迅猛地发展起来,并预示着良好的发展前景,成为当今天体物理学中最活跃的研究领域之一。近十年来,几乎每年都有一次大型的日震学国际讨论会,或者是相关讨论会的重要专题。表1刊列了1979年以来有关的重要国际学术讨论会。

表1 重要的日震学及相关的国际学术讨论会一览表

- [1] Nonradial and Nonlinear Stellar Pulsation; Lecture Notes in Physics 72, held in Tucson, Arizona, 1979. 3.
- [2] Proceedings of I. A. U. Collq. 66: Problems in Solar and Stellar Oscillations, *Solar Phys.*, 82. held in Crimean Astrophys. Obs., 1981. 9.
- [3] Proceedings of the Conference on Solar Oscillations; Oscillations as a Probe of the Solar Interior, *Mem. Soc. Astron. Ital.*, 52, held in Catania, Italy, 1983. 6.
- [4] Proceedings of the Conference on Solar Seismology from Space, held in Snowmass, Colorado, U. S. A., 1983. 8.
- [5] Proceedings of the 25th Liege International Astrophys. Colloq.: Theoretical Problems in Stellar Stability and Oscillations, held in Liege, Belgium, 1984. 7.
- [6] Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Seismology of the Sun and Distant Stars, held in Cambridge, U. K., 1985. 6.
- [7] IAU Symposium No 123: Advances in Helio- and Astero- seismology, held in Aarhus, Denmark, 1986. 7.

在日震学诞生之前,恒星和太阳内部结构的知识主要是以恒星演化的理论为基础的。由

于我们对恒星内部的核反应、不透明度以及恒星对流等众多的物理过程并未完全了解,因此,虽然说我们对恒星早期演化的认识基本上是正确的,但在具体细节上仍存在很大的不确定性并有待精细化。日震学发生的根本性变化就是因为太阳5分钟振荡包含了约 $10^4$ 个不同的振动模式引起的。不同模式的声波在日面之下沿着不同的弓形弧线传播,因而探测了太阳内部不同的层次。诚然,一种模式驻声波的频率,只提供声波传播弓形弧线所经区域的某种平均性质,而分析众多沿不同弓形弧线传播声模的频率,就有可能得到太阳内部不同层次的结构和运动情况。

日震学提供了一种探测太阳内部结构和运动的强有力的手段,从而成为检验恒星演化和恒星对流理论的重要实验手段。此外,日震学同引力理论和太阳中微子短缺等重大物理及天体物理基础理论密切相关,从而引起人们强烈的兴趣。图1大致勾勒了日震学所涉及的几个主要问题及其间的关系。

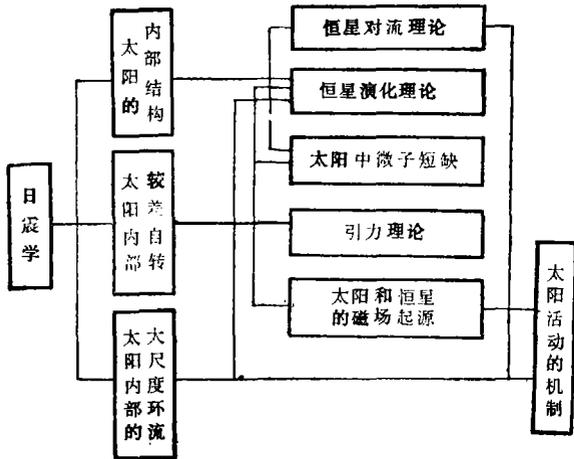


图 1

的非径向脉动。较之太阳,遥远恒星是太暗弱了,这就妨碍了对恒星小振幅非径向脉动的探测。在所有恒星中,太阳是迄今为止唯一一颗探测到具有如此众多的非径向脉动模式的恒星。尽管星震学近年来也获得了很大进展,但在今后很长一段时期内,日震学仍将保持它的特殊地位。

## 二、日震学提供的太阳内部结构与运动的信息

### 1. 太阳对流区的厚度

恒星对流是天体物理中一个重要的基础理论问题。对流与较差自转可能是恒星与太阳磁场的起因。磁场与各种机械运动的相互耦合,导致恒星和太阳的大气活动。不幸的是,至今恒星对流理论的发展仍很不完善。以太阳为例,过去理论推算的太阳对流区的厚度就极不确定,从几百公里到几十万公里不等。

高阶( $l \gg 1$ )低次( $n \ll l$ )的太阳5分钟振荡是俘获在太阳对流区的P模。因此它是探测太阳对流区结构极理想的工具。对高阶低次P模,有如下近似的色散关系:

$$\omega_{n,l} = 4\pi^2(2n+3)\frac{GM}{R^2}k_n \quad (1)$$

其中  $k_h = \sqrt{l(l+1)}/R$  为水平波数。因此高阶P模的色散关系近似呈一抛物线。

将标准太阳模型的理论预期频率同观测得到的实测频率作比较，发现它们大致相符。但是其间存在不大而又明显的(大于观测误差) 差异(见图2)。理论频率系统高于实测的频率。因为频率反比于共振声波穿过其俘获区的渡越时间，即正比于声速。这就暗示太阳包

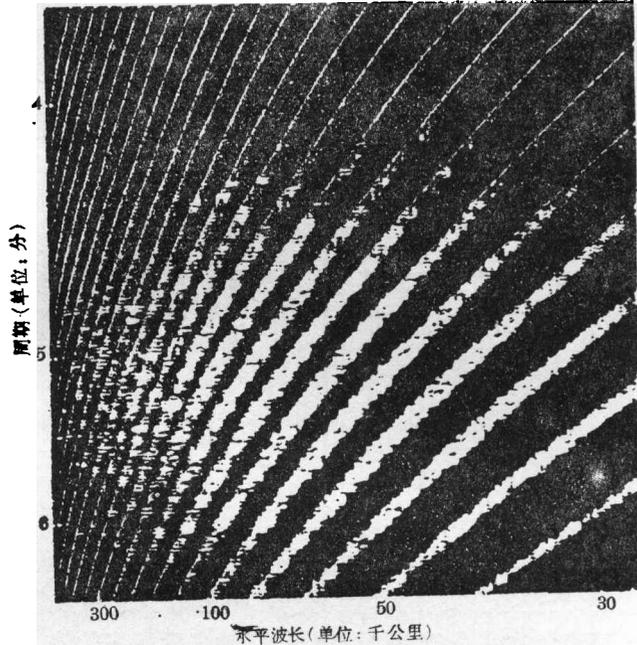


图2. 太阳高阶模5分钟振荡的功率谱图。图中亮脊是根据T. L. Duvall和J. W. Harrey 6天的太阳表面速度观测, 而实线是标准太阳模型的理论本征频率。(图取自J. W. Leibacher et al., *Scientific American*, 253(1985), No. 3)

层温度向内增加要比传统的太阳理论模型平缓。因此Gough[5]和Ulrich[6]等人认为, 太阳对流区比以前所估计的更深, 达到整个太阳半径的三分之一左右[7], [8]。为使这种延伸对流包层的太阳具有目前的半径, 太阳中心的氦含量和温度也要增大, 这将进一步加剧现存的太阳中微子矛盾。

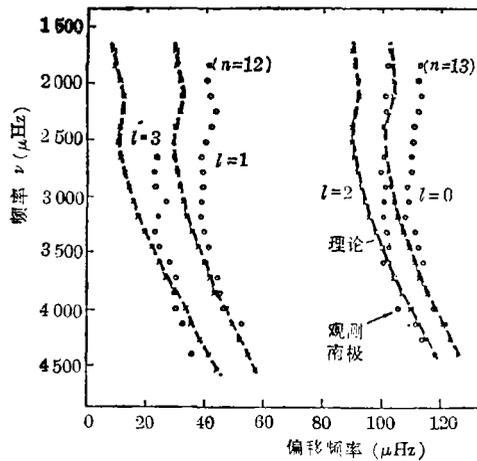


图3. 太阳低阶P模的Echelle图。图中圆圈是G. Grec和 E. Fossat南极连续5天积分太阳多普勒观测得到的。折线是标准太阳模型理论频率。余详见正文解释。

## 2. 太阳中心区的结构和太阳中微子短缺

太阳高中阶5分钟振荡提供的是太阳外部约 $0.5R_{\odot}$ 区域的信息。而低阶( $l \lesssim 3$ )5分钟振荡模则更深地进入太阳内部,因而观测低阶太阳5分钟振荡,可提供太阳中心某些有用的信息。对于低阶P模,从渐近理论可得到如下色散关系(落在5分钟振荡频率,则必然是高次的,即  $n \gg l$ ):

$$\nu_{n,l} = \left(n + \frac{l}{2} + \epsilon\right) \nu_0 - [l(l+1) + \delta] A / \left(n + \frac{l}{2} + \epsilon\right) \quad (2)$$

$\epsilon$ 是一个相位常数,它依赖于折转点附近的结构。 $A$ 是一个依赖太阳中心附近声速的另一个常数。 $\nu_0$ 为声波在太阳内部的渡越时间的倒数:

$$\nu_0 = 1/2 \int_0^R \frac{dr}{c_s} \quad (3)$$

显然, $\nu_0$ 不仅依赖于太阳中心,而且依赖其外层的性质。然而相邻两个低阶P的频率差,外层公共的影响大部分被抵消了。从(2)式可知,指标为 $(n, l)$ 的P模与指标 $(n-1, l+2)$ 的P模有大致相近的脉动频率,其脉动频率差为:

$$\begin{aligned} \delta\nu_{n,l} = \nu_{n,l} - \nu_{n-1,l+2} &\approx (4l+6) \frac{A}{n+l/2+\epsilon} \\ &= (4l+6) D_0 \end{aligned} \quad (4)$$

$D_0$ 正比于 $A$ ,因此可用来测定太阳中心部分的性质。从(2)式可见,低阶P模频率近乎是等间距排列的。对于太阳, $\nu_0 \approx 136 \mu\text{Hz}$ 。对于低阶模,我们不能再像高阶模那样来绘制其色散图了。图2显示得很明显,图左下角的低阶P模都挤在一起而不易分清。因此,对低阶P模,常用所谓Echelle图来显示其色散关系(如图3)。图的纵轴表示频率的绝对值,而横轴表示从某一任意频率为起点,以 $\nu_0 = 136 \mu\text{Hz}$ 为步长分成等间距离的网格点,观测的频率到最近网格点的频率差 $\Delta\nu$  ( $\Delta\nu > 0$ )就取为横坐标。根据(2)可知,在这样的图上, $l=0, 1, 2$ 和3的模就很好地被分开了,这对振动模式的证认也很方便。图3是尼斯天文台Grec和Fossat<sup>[9]</sup>根据在南极得到的128小时连续全日面多普勒观测而绘制的Echelle图。理论频率<sup>[10]</sup>同观测结果是大致相符的,其间差异可达 $20 \mu\text{Hz}$ ,平均差异 $\sim 5 \mu\text{Hz}$ 。而观测的频率不确定性约为总观测时间的倒数 $1/\tau \sim 2 \mu\text{Hz}$ 。因此从观测的角度来看,其间的差异还是明显的。提出了各种可能的解释,但目前似乎还没有一种能同时符合日震和中微子观测要求的模型;符合日震频率的模型,中微子矛盾加剧了;而符合中微子试验的模型,又偏离日震观测的要求。这是当前日震学中最有趣的问题。其中原因尚不十分清楚,但它不外乎有以下几种:

(1) 现今理论太阳本征振动频率的不确定性(详见第三节)。

(2) 传统的太阳演化理论需要修改,如初始太阳化学的不均匀性,元素的非局部混合,目前太阳不处在热平衡等等。

(3) 中微子矛盾来自粒子物理本身,即太阳中心核反应产生的中微子,在抵达我们探测器之前,已平均变为三种类型中微子。其中仅仅三分之一为中微子试验所检测。

还要指出,太阳中微子来自仅占太阳总质量5%的最核心部分,而对各种太阳P模本征振动频率的贡献主要来自太阳外层。因此太阳5分钟振荡并不是探测太阳中心区结构敏感的手段。重力模是俘获在太阳中心辐射核的共振模,它敏感地依赖于该区的重力分层性质(参

见公式5—7),因而它是探测太阳中心区最理想的工具。但太阳对流区是g模的消散区,因此g模振荡需要穿透非常延伸的太阳对流区才能达到太阳表面,其振幅是太小了,以至难以观测到。

对于低阶高次g模,有如下的近似色散关系:

$$P_{n,l} \approx \frac{1}{\nu_{n,l}} \approx \frac{n+l/2+r}{\sqrt{l(l+1)}} P_0 \quad (5)$$

其中

$$P_0 = 2\pi^2 \int_0^R N \frac{dr}{r} \quad (6)$$

$$N^2 = \left[ \frac{1}{\Gamma_1} \frac{d \ln P}{dr} - \frac{d \ln \rho}{dr} \right] \frac{GM_r}{r^2} \quad (7)$$

与P模不同,g模是按周期等间距排列的。对于标准太阳模型, $P_0 \approx 35.37$ 分钟。克里米亚天体物理台 Severny和他的合作者[11-13]以及伯明翰大学Brookes[14]等人各自独立发现太阳的160分钟振荡。以后斯坦福大学Scherrer和Wilcox[15],[16],以及尼斯天文台Grec和Fossat[9]在南极的太阳整个视圆面积分光的多普勒观测等,都证实了他们的发现。现在再也没有人怀疑太阳发生160分钟振荡这个事实了。

太阳最长的P模不可能超过1小时。因此160分钟振荡很可能是低阶的g模振动。但因缺乏足够空间分辨的观测,又只出现孤立的单个频率,因此不可能确切证认它的振动模式。这也就妨碍我们用它去探测太阳中心区的结构。克里米亚天文台[17],[18]、斯坦福大学[19]以及太阳峰年卫星的太阳总辐射测量[20]分别报道它们检测到周期从几十分钟到370分钟的振荡。它们的周期是近乎等间距分开的,因此被认为是太阳的g模振动。然而背景噪声太大,观测资料间断引入讨厌的旁瓣,使得它的置信度很小。为证实它们确是太阳真实的振动,至少应该有两个以上的独立观测来证实。遗憾的是还没有见到这样的报道。比较它们各自得到的 $P_0$ ,相差也甚大(参见表2)。因此,所谓探测到的g模,还有待证实。较之P模,g模有长得多的周期。为取得相同的分辨率,观测g模要累积更长时间的观测资料。大气不透明度的噪声随着频率的降低,近似与频率成反比地迅速增大,这也是造成地面探测g模的另一困难。

表2 理论与观测的太阳振荡频率

理论模型/观测值	$\nu_0$ ( $\mu\text{Hz}$ )	$D_0$ ( $\mu\text{Hz}$ )	$P_0$ (分钟)	备 注
太阳标准模型	136.3	1.595	35.37	
Shatzman混合模型	136.5	2.045	56.85	
Grec et al. [9]				南极,共振散射技术
Duvall,Harrey [21]	136	1.43		成像太阳多普勒观测
Severny et al. [17], [18]			37.4	差分太阳多普勒观测
Delache,Scherrer [19]			38.6	差分太阳多普勒观测
Frohlich,Delache [20]			38.9	太阳峰年卫星总辐射测量
Isak,et al. [22]			41.2	共振散射技术

### 3. 太阳内部的较差自转和大尺度环流

太阳除纬度方向存在较差自转外,在径向方向也可能存在较差自转。广义相对论正确解释了水星近日点的进动。然而Dick认为,太阳中心存在一个高速自转核,因此太阳呈一

椭球形。椭球引力场的四极矩也可以解释水星近日点的进动。因此太阳中心是否存在一个快速自转核是检验爱因斯坦引力理论和 Dick 标量张量理论的一个重要判据。

当忽略恒星的自转时, P 模的本征值与角指数  $m$  无关。当考虑恒星自转时, 则本征频率分裂成  $2l + 1$  个等间距分裂的分量。当自转仅仅依赖于  $r$  时, 则分裂的本征值可表为:

$$\begin{aligned} \nu_{n,l,m} &= \nu_{n,l,0} + \frac{m}{2\pi} \int_0^R K_{n,l}(r) \Omega(r) dr \\ &= \nu_{n,l,0} + \frac{m}{2\pi} \Omega(n\bar{r}, l) \end{aligned} \quad (8)$$

$K_{n,l}(r)$  是自转分裂的核函数, 它大致正比于本征模脉动动能密度。 $\Omega(r)$  是太阳较差自转速率, 而  $\bar{r}_{n,l}$  是  $l$  阶  $n$  次本征模的有效形成层。 $l$  愈低,  $n$  愈大, 则有效形成层愈深。因此, 测定不同  $n$  和  $l$  的 P 模频率分裂, 就可以测得不同深度的太阳自转速度。Ulrich 和 Rhodes [23-25] 等人首先提出测定太阳 5 分钟振荡的频率分裂, 就可以测得太阳内部的较差自转。他们最初的观测得出, 太阳 2 万公里深处的自转比表面要快 104 米/秒。以后更精确的观测又否定了他们自己最初的结论 [26]。图 4 是 Gough [27] 综合了当今最可靠的观测资料求得的太阳角速度  $\Omega$  半径的变化。

图 4. 太阳赤道面自转角速度  
随深度的变化。 [27]

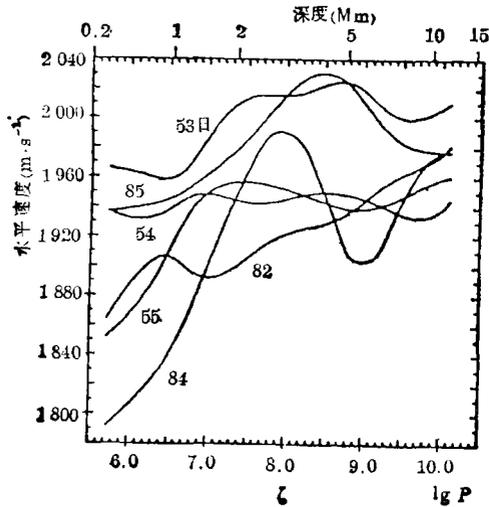
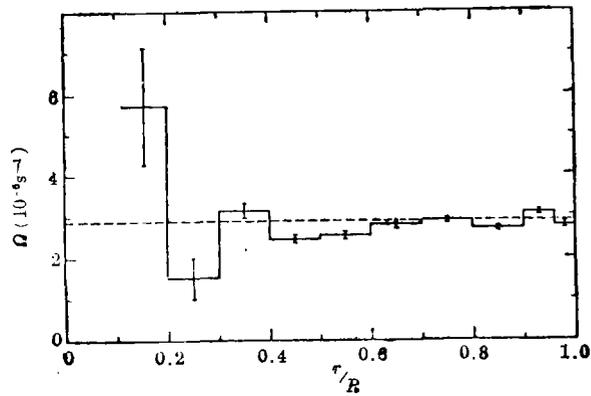


图 5. 6 个不同的日期得到的太阳水平速度随深度的变化。在 1000 公里深处, 速度测定误差估计为  $\pm 20$  米/秒; 在 15000 公里处, 增大到  $\pm 40$  米/秒。(F. Hillet et al., *Mem. Soc. Astron. Italiana*, 55(1984), 153)

图 5 绘出 6 个不同观测日得到的太阳自转随深度的变化曲线。不同日期的水平速度的变幅达到 $\sim 100$  米/秒, 远远大于估计的观测误差。这似乎显示大的活动区或大的对流胞经过日面中心。

### 三、日震学的理论问题

#### 1. 太阳 P 模频率理论与观测值差异的起因

太阳 5 分钟振荡的理论与观测频率间存在数量虽小(平均约 $\pm 0.5\%$ )然而从观测精度来看却是明显的差异。查明其原因无疑是当今日震学最紧迫和最有趣的理论问题。产生这种差异的可能原因有:

##### (1) 非绝热效应

现在所谓的理论太阳振荡本征频率大都是根据线性绝热脉动计算得到的。根据恒星径向脉动理论计算的的经验, 非绝热脉动的振动频率比绝热脉动振动频率可低达 $\sim 1\%$ 。笔者认为这可能是观测与理论差异的一个重要来源。

##### (2) 大气层和边界条件的影响

众所周知, 太阳大气是高度不均匀的。向着太阳表层, 磁场越来越成为一种重要的控制力。这些都是目前理论难以处理和精确计算的。这可能是引起理论与观测差异的另一个重要原因。

数值计算的外边界常常取在光球或大气温度极小点。Christensen-Dalsgaard 和 Gough [29] 曾表明, 外边界取在光球上, 不同的边界条件对本征频率的影响可达 $0.7\%$ 甚至更大。随着外边界向外推移, 边界条件对脉动频率的影响迅速减小 [10], [30]。

##### (3) 物态方程和配分函数的影响

标准的太阳振动理论计算是采用简单的理想气体物态方程。考虑配分函数和静电修正等效效应, 理论的本征振动频率可能修正几个微赫兹甚至更高, 但并不能完全消除理论与观测的差异 [10], [30], [31]。

##### (4) 恒星对流理论的不确定性

目前对流理论的发展仍很不完善。在恒星深层, 对流传能效率高, 温度梯度总是非常接近绝热温度梯度而与所采用的对流理论无关。然而在对流区上层, 密度低, 对流传能不十分有效, 因而存在一个所谓超绝热对流区。超绝热对流区的结构与所采用的对流理论很有关系。另一方面, 在对流区上部, 对流不仅通过改变静态模型的结构来影响太阳振动的性质, 对流同脉动的热力学和动力学的耦合, 也将影响其本征振动频率和脉动稳定性。后者则更难处理。

##### (5) 太阳演化理论本身的缺陷

所谓标准太阳模型, 是假定从一个等于目前表面化学成分的化学均匀的零龄主序太阳开始, 经过现今标准的恒星演化理论计算到太阳目前的年龄( $\sim 45$  亿年)、半径和光度。计算中假定中心辐射核没有任何混合, 对流是按局部的混合长理论来处理, 不透明度是根据 Cox 和 Tabor 的不透明度表内插得到。

为了解释太阳中微子矛盾和日震观测,提出了各种初始化学不均匀和非局部混合的非标准演化模型,但没有同时符合日震和太阳中微子的模型。

## 2. 太阳振荡的激发机制

太阳振荡的激发机制无疑是一个未获解决的最重要的理论问题。Ando和Osaki[32]根据非绝热脉动理论计算,得到在很大的 $l$ 范围内,周期5分钟左右的P模是脉动不稳定的。辐射的 $\kappa$ 机制是脉动的激发源。Ando和Osaki是采用Unno和Spiegel[33]推广的Eddington近似来处理辐射传输的。在构成平衡模型时,简单假定 $J_0 = B_0$ 。然而在太阳对流区上部, $J_0 \neq B_0$ ,这个区域正是 $\kappa$ 机制开动的重要的氢电离区。Christensen-Dalsgaard和Frandsen[34]指出,当考虑对辐射平衡的偏离时,所有的P模是脉动稳定的。

以上的研究均忽略了对流与脉动的耦合。然而,在太阳的对流区,对流传能占太阳总能流的99.9%以上,因此对流与脉动的耦合可能远远超过辐射的作用。一些简单的对流处理,得到截然不同的结果。Antia等人[35]认为所有5分钟左右的P模是脉动不稳定的;而Goldreich[36]和Berthomieu[7]等人却得到所有的P模都是脉动稳定的结果。

研究对流与脉动耦合的困难在于缺乏一个可靠的非定常对流理论。现在广泛用于计算恒星内部结构与脉动的是混合长理论。它是一个唯象的理论,其最大缺点在于它对湍动对流的动力学过程缺乏精确的数学描述。在处理对流与脉动耦合等对流的动力学问题时,它的缺点就变得尤为显著。为此作者曾发展了一种适用于径向和非径向脉动的非定常对流的统计理论[37],并将Unno和Spiegel[33]的理论推广到适用于非辐射(即存在对流)平衡的情况(待发表)。因此,可望能更精确地处理对流与脉动的耦合。

另一种非常有前途的太阳5分钟振荡的激发机制是湍动对流的随机激发机制[38]。它还处于初始阶段,它难以定量计算湍动对流与脉动之间的耦合积分。根据粗略估计出来的振幅,同实际观测到的太阳5分钟振荡大致是相符的[39],[40]。

## 四、太阳振荡观测的研究动向

从观测来讲,目前最大的问题是观测资料的间断,它影响频率的分辨率并出现讨厌的旁瓣,给本征模的证认和谱线自转分裂的测定带来困难。因此,目前的倾向是建立全球太阳振荡观测网,以克服单站观测的周日性间断。英国伯明翰大学在加那利岛和夏威夷群岛建立了第一个双站太阳振荡观测网。法国尼斯天文台也着手计划建立一个类似的观测网。他们都是采用共振散射技术观测整个太阳积分光的多普勒速度,因而只限于研究低阶模( $l \leq 3$ )的太阳振荡。

另一个更雄心勃勃的计划是美国的GONG(Global Oscillation Network Group)的六站全球观测网计划。它属于具有空间分辨率的成像太阳多普勒观测。采用迈克尔逊干涉技术(傅利叶测速仪)作多普勒分析器,用二维探测器作接收器,可以研究中低阶模( $l = 0 - 150$ )的太阳振荡。观测网计划在1990年开始,整个计划耗资约1200万美元。

观测的误差不外乎以下三个来源:

- (1) 太阳自身的噪声;

- (2) 仪器噪声和系统差;
- (3) 地球大气的噪声和歪曲。

太阳表面活动区、米粒和超米粒组织、巨胞等等都对多普勒频移作出贡献, 从而构成太阳背景噪声, 在观测结果中无法扣除这些噪声的影响; 同时, 声波穿过这些不均匀的结构时, 将产生附加的相移, 也会影响最终的探测精度。

通过技术改进, 可将仪器噪声压低到理论极限。

至于大气的噪声和歪曲, 对不同的观测影响是不同的。对测光观测, 在最佳的站址, 大气噪声约为太阳本征模振幅的 3—4 倍, 因此不能用地面测光来研究太阳振荡。多普勒测速几乎是目前唯一的地面光学观测手段。太阳自转的赤道速度约为 2 公里/秒, 它比单个太阳本征模振幅大 4 个量级, 大气透度的不均匀性是太阳积分多普勒和较差多普勒观测的主要噪声源。

大气视宁度对于太阳中低阶模振荡的观测并不重要, 但对于  $l \geq 300$  的高阶模振荡的观测却会造成严重干扰。我们知道, 高阶模对探测太阳最外层(占太阳半径的 5%)至关重要, 而最外层区域对所有中低阶 P 模振荡都产生影响。为消除大气视宁度的影响, 美国宇航局和欧洲空间局计划在九十年代联合发射一颗成像太阳振荡观测卫星, 以期对太阳内部结构有更深入的了解。

## 五、结 束 语

日震学当前的发展情况可以概括如下:

(1) 目前观测测定太阳 5 分钟振荡频率已达到相当高的精度 ( $\sim \pm 2\mu\text{Hz}$ ), 不同观测者的测定彼此符合得相当好。

(2) 太阳 P 模的振动频率, 观测与理论预期值大致相符; 然而其间仍存在明显的系统差异。非绝热效应、外层大气的影响、对流理论的不确定性、状态方程以及数值方法, 可能是引起这种矛盾的几个重要因素, 必须对它们进行仔细研究。在未彻底查明这些不确定因素之前, 对观测与理论矛盾的实质还难作定论。

(3) 太阳 5 分钟振荡并不是探测太阳核心结构和自转最有效的手段。重力模是一个潜在的最有效的手段。太阳 160 分钟振荡是目前唯一得到确认的长周期振荡。它的性质仍很不清楚, 很可能是一种  $l=2-3, n=6-10$  的重力模。

(4) 地面单站观测已达到其理论的极限分辨率。探测太阳内部较差自转和大尺度环流, 要求有更高的频率分辨率。因此, 建立全球地面观测网是当前日震观测的一个主要发展趋势。下一步的研究计划是太阳振荡的空间观测。

日震学提供了探测太阳内部结构和运动的强有力手段。尽管离达到我们最终目标的距离还很远, 但其前景是非常光明的。无论是从理论上, 还是从当前技术发展的水平来看, 其间并不存在不可克服的困难和障碍。预期在最近一、二十年内, 日震学能取得较大的突破和获得一批重要的结果。

## 参 考 文 献

- [1] Leighton, R. B. and Noyes, R. W., *Simon, G. W.*, *Ap. J.*, **135** (1962), 474.  
[2] Ulrich, R. K., *Ap. J.* **162** (1970), 993.  
[3] Leibacher, J. W. and Stein, R. F., *Astrophys. letter*, **7** (1971), 191.  
[4] Deubner, F-L., *A. Ap.*, **44** (1975), 371.  
[5] Gough, D., *IAU Colloq. No. 36*, p. 3, (1977).  
[6] Ulrich, R. K. and Rhodes, E. J., *Ap. J.*, **218** (1977), 521.  
[7] Berthomieu, G. et al., *Lecture Notes in Physics*, No. **125** (1980), 307.  
[8] Lubow, S. H., Rhodes, E. J. and Ulrich, R. K., *ibid.* 300.  
[9] Grec, G., Fossat, E. and Pomerantz, M., *Nature*, **288** (1980), 541.  
[10] Ulrich, R. K. and Rhodes, E. J., *Ap. J.*, **265** (1983), 551.  
[11] Severny, A. B. and Kotov, V. A., Tsap, T. T., *Nature*, **259** (1976), 87.  
[12] Kotov, V. A., Severny, A. B. and Tsap, T. T., *MNRAS*, **183** (1978), 61.  
[13] Kotov, V. A. et al., *Solar Phys.*, **82** (1983), 9.  
[14] Brookes, J. R., Issak, G. R. and van der Raay, H. B., *Nature*, **259** (1976), 92.  
[15] Scherrer, P. H., Wilcox, J. M. et al., *Nature*, **277** (1979), 635.  
[16] Scherrer, P. H. and Wilcox, J. M., *Solar Phys.*, **82** (1983), 37.  
[17] Kotov, V. A., Severny, A. B. and Tsap, T. T., *Mem. Soc. Astron. Ital.*, **55** (1984), 117.  
[18] Severny, A. B., Kotov, V. A. and Tsap, T. T., *Nature*, **307** (1984), 247.  
[19] Delache, P. and Scherrer, P. H., *Nature*, **306** (1983), 651.  
[20] Frohlich, C. and Delache, P., *Mem Soc Astron Ital.*, **55** (1984), 9.  
[21] Duvall, Jr. T. L. and Harrey, J. W., *Nature* **302** (1983), 24.  
[22] Issac, G. R. and van der Raay, H. B., *Mem. Soc. Astron. Ital.*, **55** (1984), 91.  
[23] Rhodes, E. J., Deubner, F-L. and Ulrich, R. K., *Ap. J.*, **227** (1979), 629.  
[24] Ulrich, R. K., Rhodes, E. J. and Deubner, F-L., *Ap. J.*, **227** (1979), 638.  
[25] Deubner, F-L., Ulrich, R. K. and Rhodes, E. J., *A. Ap.*, **72** (1979), 177.  
[26] Deubner, F-L., *Solar Phys.*, **82** (1983), 101.  
[27] Duvall, Jr. T. L. et al., *Nature*, **310** (1984), 22.  
[28] Brown, M., *Seismology of the Sun and the Distant Stars*, 199.  
[29] Christensen-Dalsgaard, J. and Gough, D. O., *Nature*, **288** (1980), 544.  
[30] Noels, A., Scufilaire, R. and Gabriel, M., *A. Ap.*, **130** (1984), 389.  
[31] Shibahashi, H., Noels, A. and Gabriel, M., *A. Ap.*, **123** (1983), 283.  
[32] Ando, H. and Osaki, Y., *P. A. S. J.*, **27** (1975), 581.  
[33] Unno, W. and Spiegel, E. A., *P. A. S. J.*, **18** (1966), 85.  
[34] Chrictensen-Dalsgaard, J. and Frandsen, S., *Solar Phys.*, **82** (1983), 165.  
[35] Antia, H. M. and Chitre, S. M., Narasimha, D., *Solar Phys.*, **77** (1982), 303.  
[36] Goldreich, P. and Keeley, D. A., *Ap. J.*, **211** (1977), 934.  
[37] 熊大闰, *天文学报*, **25** (1984), 215.  
[38] Goldreich, P. and Keeley, D. A., *Ap. J.*, **212** (1977), 243.  
[39] Gough, D. O., *Lecture Notes in Phys.*, **125** (1980), 274.  
[40] Christensen-Dalsgaard, J. and Frandsen, S., *Solar Phys.*, **82** (1983), 469.  
[41] Fossat, E., *Mem. Soc. Astron. Ital.*, **55** (1984), 47.

(责任编辑 林一梅)

---

## Helioseismology

Xiong Darun

*Center of Astronomy and Astrophysics, CCAST (World Laboratory)  
(Purple Mountain Observatory, Academia Sinica)*

### Abstract

We describe the basic information of the internal structure and dynamics of the Sun derived from helioseismology. There are small, but systematic discrepancies between the theoretical and the observed eigenfrequencies. We discuss the theoretical uncertainties resulted from 1) the nonadiabatic effects, 2) the influences of solar atmosphere and the outer dynamic boundary conditions, 3) the equation of state, and 4) the treatment of convective energy transport. Fundamental advances in helioseismology will require networks of ground-based observations to ameliorate the severe effect of day-night gaps in the data. The ground-based networks must be complemented by observations carried out from space to avoid the effect of the atmospheric seeing on the measurements of high-degree modes.