

文章编号: 1000-8349(2005)03-0205-10

太阳剩余磁场研究进展

宋文彬, 汪景琇

(中国科学院 国家天文台, 北京 100012)

摘要: 太阳剩余磁场是指形成于太阳主序星阶段之前, 深藏在太阳辐射核内部的原始磁场。由于太阳内部高电导率和准静态等因素, 其剩余磁场耗散相当缓慢, 而得以保留至今。太阳剩余磁场的存在不仅能够解释太阳活动的很多不对称性现象, 如南北不对称性、活动经度与活动穴、低纬度冕洞和 Maunder 极小期等, 还能通过改变自激发电机模型的边值条件而影响整个太阳表面磁场的分布与演化。从观测结果和理论模型两方面评述了太阳剩余磁场的研究成果及最新进展, 并简单讨论了进一步努力的方向。

关键词: 天体物理学; 剩余磁场; 综述; 太阳; 表面磁场; 发电机

中图分类号: P182.7 **文献标识码:** A

1 引 言

自从 Hale^[1] 发现太阳黑子拥有很强的磁场, 首次揭示太阳活动的磁场本质以来, 磁场这一因素在很多太阳活动的解释模型中都占有十分重要的角色。比如小的光斑、长的日珥、快的耀斑和大的日冕物质抛射 (Coronal Mass Ejection, CME) 等, 都是磁场演化或者磁能释放造成的^[2]。目前大家一致认为, 太阳表面磁场主要来源于强剪切层 (tachocline 层, 位于对流层与辐射层之间很薄的一层, 也有学者直接将其划归到对流层) 的自激发的磁场发电机作用^[3]。这种自激发电机机制实现了太阳表面磁场的环向分量与极向分量之间不停相互转化的循环。发电机理论能够较好地解释诸如 11 yr 太阳活动周、Spörer 定律 (描述黑子群在日面的浮现位置随太阳活动周变化的特征)、Hale-Nicholson 极性定律 (描述双极黑子群前导黑子与后随黑子在每次太阳活动周结束期间极性都发生反转的现象) 和 Maunder 蝴蝶图 (指以时间为 x 轴, 黑子群出现的平均纬度为 y 轴作出的连续多个太阳活动周的黑子群在日面的分布图样, 因酷似一只只展翅飞舞的蝴蝶而得名) 等一系列观测现象^[4]。

但随着观测手段的不断进步和观测资料的日益积累, 人们发现太阳磁活动除了上述很具规律性的特征外, 还存在越来越多的复杂因素与不确定因素, 这主要表现在太阳活动的各种

收稿日期: 2004-11-22; 修回日期: 2004-12-20; 特约稿

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10233050); 国家重点基础研究资助项目 (G2000078404)

不对称性现象中, 比如南北不对称性与东西不对称性(指各种太阳活动现象在南半球(或东半球)和北半球(或西半球)出现具有相当统计规律的不对称情形)、活动经度与活动穴(指在很长一段时间内, 通常有半年到一年, 某些经度带和固定区域总出现剧烈的太阳磁活动)、低纬度冕洞以及 Maunder 极小期(指在 17 世纪后半叶太阳活动反常性的持续低迷)等, 这些现象都是目前发电机理论难以解释的。于是, 人们开始猜测在太阳辐射核内部可能还存在着一个微弱的磁场, 它影响了发电机的正常运作, 造成了许多反常现象。其实, 早在 1945 年, Cowling^[5] 就已经提出存在太阳剩余磁场 (Relic Magnetic Field, RMF) 的可能, 只不过其目的并不是为了解释太阳活动的反常现象, 而是为了解释当时观测到的太阳表面磁场。

2 RMF 的提出

20 世纪中叶, 人们对太阳表面磁场的了解基本来自于美国威尔逊山观测站 Hale 及其同事们的工作。当时太阳表面磁场的观测理论及手段十分有限, 观测结果的人为因素特别明显, 大家只知道太阳表面磁场的轴同太阳自转轴约存在 6° 的倾角, 其磁场强度大概在 25 G 左右, 而且随着距离光球表面的高度增加可能会很快衰减到零。但在恒星演化方面, 由于狭义相对论已经得到广泛的接受, 核反应理论与核技术也趋于成熟, 人们对太阳的形成过程有着越来越清晰的认识, 于是不禁要问: 太阳磁场从哪儿来? 那时候人们提出了各种各样的可能模型, 比如: 有人认为, 太阳表面磁场可能是太阳内部许多带电粒子自转产生的, 但这种理论没经得起 Brunt 的推敲, 仅仅只能解释 10^{-15} 的太阳表面磁场; 也有人认为, 在太阳子午面内可能存在着一个由太阳表面磁场激发的电流, 这个电流反过来支撑着太阳表面磁场, 但这一想法很快被 Cowling 否决了, 理由是这种物理机制对支撑住整个太阳表面磁场根本就毫无用处。1945 年 Cowling^[5] 提出太阳表面磁场可能早在太阳进入主序星阶段之前就形成了, 由于太阳内部电导率特别高, 因此其耗散十分缓慢, 一直保留到今天。

从现有的精确太阳表面磁场综合磁图来看, Cowling 提出的 RMF 理论用于解释太阳表面磁场的产生是不正确的, 但对对流层以下的辐射层仍然有重要的参考价值。事实上, 即使在今天, 人们对太阳辐射核内部信息的了解也只是停留在理论模拟阶段。一般认为, 辐射层的电导率特别大, 辐射层内的物质基本上处于一种没有相对运动的稳定状态, 这两个条件对于原始磁场的完整保留极为有利。如果太阳真的在其演化阶段将磁场捕获到内部的话, 那么按照 Cowling 的计算, 太阳原始磁场的耗散年龄 $\tau = 4\pi R^2 \beta^{-1} \approx 10^{10}$ yr, 其中 R 为太阳半径, $\beta = 2 \times 10^5$ cm²/s 为一依据瑞利原理求得的相关系数(详见文献 [5])。可见原始磁场的耗散年龄同太阳今天的实际年龄在数量级上是相当的。因此, RMF 在理论上是有可能存在的。但困惑的是, 人们目前还无法确切知道太阳是否真的曾经捕获过磁场并在其内部保存着。从数值模拟的结果来看, 如果要捕获磁场, 太阳在其形成阶段至少要将其内部部分物质重新抛出来多次, 才有可能截获外边靠强烈的对流和剪切等作用形成的磁场。

3 理论与观测

上世纪 80 年代以来, 关于 RMF 的研究较多, 但都不算很成熟。这主要是因为它藏在太

阳内部, 基本没有直接的观测证据。人们在构造 RMF 理论模型时, 也都力行简单化原则, 比如假设 RMF 为偶极场; 假设 RMF 为四极场; 认为 RMF 的轴同太阳自转轴微有倾斜, 或根本没有倾斜等。在观测论证方面, 人们基本遵循这样一种模式: 先假定某种性质的 RMF, 然后通过模拟其对发电机磁场 (Dynamo Magnetic Field, DMF) 的影响, 预言在观测上将会造成哪些现象, 再设法利用真实的观测资料进行对比, 从中达到验证 RMF 存在和检验模型的目的。

3.1 太阳活动的 22 yr 周期

目前, 在检验 RMF 是否存在的所有太阳活动现象中, 太阳黑子应该算用得最多也最典型了。Levy 和 Boyer 在上世纪 80 年代初期论证了当 RMF 同 DMF 存在一个好的方位角时, 对流层总磁通量会增加许多, 从而可能导致黑子增多; 而等到下一个太阳活动周时因为 DMF 方向反转了 (Hale-Nicholson 极性定律), 对流层总磁通量又会因为 RMF 的存在减少许多, 从而不利于黑子产生^[6,7]。因此, 他们认为黑子多寡的 22 yr 周期可以成为 RMF 存在的证据之一。

1982 年和 1983 年 Sonett^[8,9] 发现, 在给每奇数次太阳活动周的 Wolf 黑子相对数序列加载一个负信号后, 仅用 22 yr 和 90 yr 两个周期及其谐频就能较好地拟合过去 150 多年来的 Wolf 黑子相对数序列。他认为这样一个较小的负信号很可能同 RMF 有关。但是, 令人疑惑的是, 当他拟合 18 世纪到 19 世纪中叶等早些时候的 Wolf 黑子相对数时, 所用的这个附加信号开始变符号了, 这使得他之前的结果以及他关于 RMF 的论断变得有些难以置信。后来, Mursula 等人^[10,11] 解释说其中的问题可能归结为 19 世纪中叶前的 Wolf 黑子相对数本身的统计误差较大。

2000 年, Mursula 等人^[10,11] 利用经 Hoyt 等人重新整理后的黑子相对数, 发现了明显的 22 yr 周期, 并且指出 22 yr 周期贯穿了整个 Hoyt 黑子相对数的记录时段 (从 1610~1995 年), 其幅度约为平均黑子活动水平的 10%。具体结果如图 1 所示。在图 1(b) 中, 太阳活动周的周平均黑子相对数活动指标 $I_{GO}(k) = \frac{1}{132} \sum_{j=J(k)}^{J(k+1)-1} R_g(j)$, 其中 k 表示太阳活动周的编号, $J(k)$ 表示每个太阳活动周的起始月份, $R_g(j)$ 表示 Hoyt 黑子相对数的月均值, 132 个月刚好代表了 11 yr 太阳活动周的长度。从 I_{GO} 曲线可以看出, 除了 Maunder 和 Dalton 两次极小期以外, 奇数次太阳活动周的平均黑子相对数活动水平都要略高于前方偶数次太阳活动周的平均黑子相对数活动水平, 形成所谓的 Genevyshev-Ohl (G-O) 规则^[13], 这充分说明了在除两次极小期外的这些时段内存在显著的 22 yr 周期。图 1(c) 中参数 $D(k) = I_{GO}(k+1) - I_{GO}(k)$, 表示形成 G-O 规则的两相邻太阳活动周的 I_{GO} 差值。从图中可以看出 $D(k)$ 曲线大致水平, 说明它总是表现为一个稳定的常数 (介于 10~20 之间), 其中还包括 Maunder 极小期前的一个样本点。我们认为, $D(k)$ 的稳定性不但说明了在 G-O 规则中隐藏有一个稳定的 22 yr 周期 (其幅度约为平均黑子活动水平的 10%), 而且还预示着这个周期很可能同某种定常的物理因素相联系, 比如 RMF。为了进一步说明 22 yr 周期同样在 Maunder 和 Dalton 两次极小期期间存在, Mursula 等人又对 Hoyt 黑子相对数的月均值序列作了如下标准化处理。首先鉴于上世纪 80 年代 Sonett 的工作, 利用平滑方法剔除黑子相对数序列中存在的 30 yr 周期变化 (30 yr 周期是 90 yr 周期的三次谐频, Mursula 等人认为太阳活动极小期可能是由比 22 yr 周期更长的其他周期波动引起的), 令过渡参数 $U_g(i) = R_g(i) - \frac{1}{361} \sum_{j=-180}^{180} R_g(i+j)$, 其中 i 指具体的月份, 361 指 361 个月, 正好对应 30 yr 时间长度, 由此 U_g 表示剔除了 30 yr 周期变化后的黑子相对数序列。

然后在整个太阳活动周周期内进行平均, 令 $I_R(i) = \frac{1}{132} \left[\sum_{j=-65}^{65} U_g(i+j) + \frac{1}{2} U_g(i \pm 66) \right]$, 结果如图 1(d) 所示。可以看出 I_R 在全部时间范围内都存在着明显的 22 yr 周期波动。

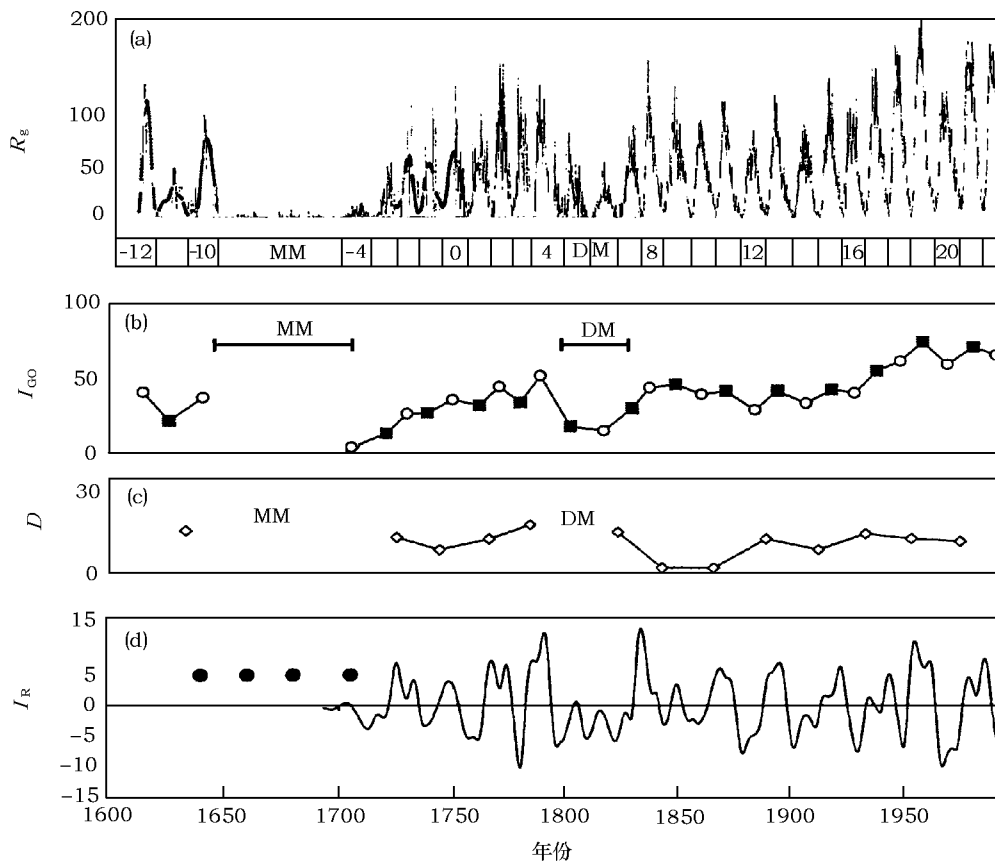


图 1 太阳活动的 22 yr 周期^[10]

(a) Hoyt 太阳黑子相对数月均值 (细线) 和用内插法填补的部分空缺数据 (粗线)。下方方格内标明了太阳活动周编号、Maunder 极小期 (MM) 和 Dalton 极小期 (DM); (b) 太阳活动周周平均的黑子相对数活动指标 I_{GO} 。实心方块表示每奇数次太阳活动周的 I_{GO} 值, 空心圆圈表示每偶数次太阳活动周的 I_{GO} 值; (c) 形成所谓 G-O 对的两相邻太阳活动周的 I_{GO} 差值; (d) 经标准化处理后的周平均的黑子相对数活动指标 I_R 。小圆点为引用文献 [12] 的结果, 表示在 Maunder 极小期期间黑子相对数出现最大的时间位置。

2002 年 Usoskin 等人^[14] 借助一个拥有 22 yr 周期的 DMF、一个恒定的 RMF 和一个随机变化的微弱磁场, 成功地模拟了近 400 yr 的 Hoyt 黑子相对数序列, 其中包括 Maunder 和 Dalton 两次极小期。图 2 显示了他们部分模拟结果。从实际观测和理论模拟的两条曲线对比中可以看出, 无论是黑子相对数波峰与波谷出现的时间点, 还是每个太阳活动周黑子活动水平的相对强弱, 都表现出显著的一致性, 所以基本上同时验证了黑子活动的 22 yr 周期和 RMF 的存在。另外, 即使在太阳活动尤其微弱的 Maunder 极小期, 模拟的黑子相对数虽然很小, 但依然是存在着的, 这得益于 RMF 的影响。

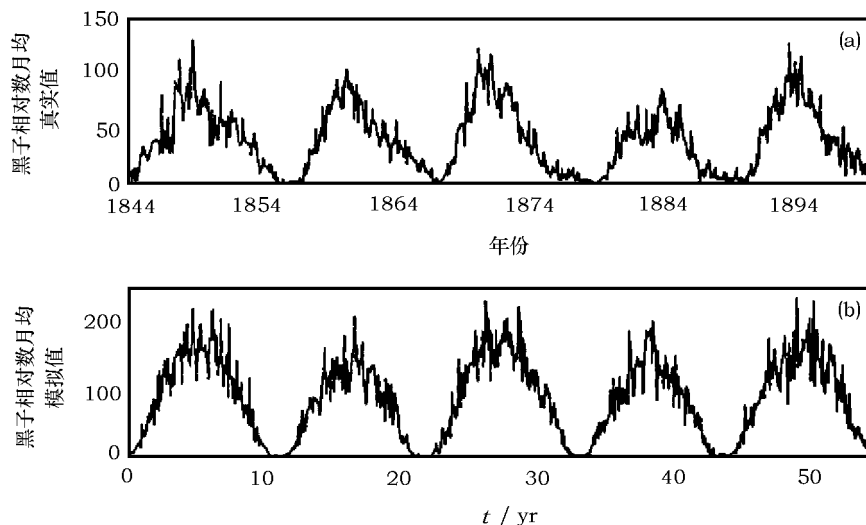


图 2 Hoyt 所得的太阳黑子相对数序列^[14]

(a) 真实的黑子相对数月均值；(b) 模拟的黑子相对数月均值。

2003 年 Temmer 等人^[15]通过统计发现，每奇数次太阳活动周期间耀斑活动在时间相位上总要明显落后于黑子活动，而在每偶数次太阳活动周期间却没有发现任何类似的规律，这似乎也间接说明了太阳磁活动的 22 yr 周期和 RMF 的存在。

3.2 太阳活动的不对称性

目前，人们对具有不对称性的各类太阳活动的解释存在许多争议。比如，有的认为可能与太阳内部的磁结构有关^[16]，有的认为与太阳对流区元胞有关^[17,18]等。发展一个不对称特征的磁场发电机理论可能是今后这方面研究的重点^[19]，而 RMF 的存在正好为这种发电机模型的构造提供真实依据，下面主要从观测方面总结 RMF 是如何引发这些太阳活动不对称因素的。

1988 年，Stenflo^[20]利用 1959 年以来威尔逊山观测站和 1976 年以来基特峰观测站的太阳综合磁图资料，研究了整个太阳表面磁场纬度分布（每幅综合磁图的精度为 36×30 ，即将整个日面在经度方向上等分成 36 份，纬度方向上按正弦值等分成 30 份，南北半球各 15 份，将所有磁图按时间顺序连接起来组成一张新的长磁图序列，再进行较差自转改正，为去掉经度上的分布特征在经度方向上作了 16 个太阳自转周的平滑）的演化特征，并采用 14 个轴对称 ($m=0$) 的球谐函数的叠加形式，模拟了大尺度磁场结构的纬度分布及演化图样。结果如图 3 所示。图 3(a) 是模拟的 7 个 l 值为奇数的特征模相互叠加的情形，可以看出它们都是关于太阳赤道反对称的，并且强磁场有明显的向赤道和两极移动的趋势；图 3(b) 是模拟的 7 个 l 值为偶数的特征模相互叠加的情形，可以看出它们都是关于太阳赤道对称的，Stenflo 猜测这些对称模量的起源很可能同 RMF 有关。一个微弱的对称磁场分量（经统计大小约为反对称分量的 $1/10 \sim 1/5$ ）加载到一个反对称的发电机磁场分量之上，就造成了具有统计意义的南北不对称性现象，如文献^[21~23]等。

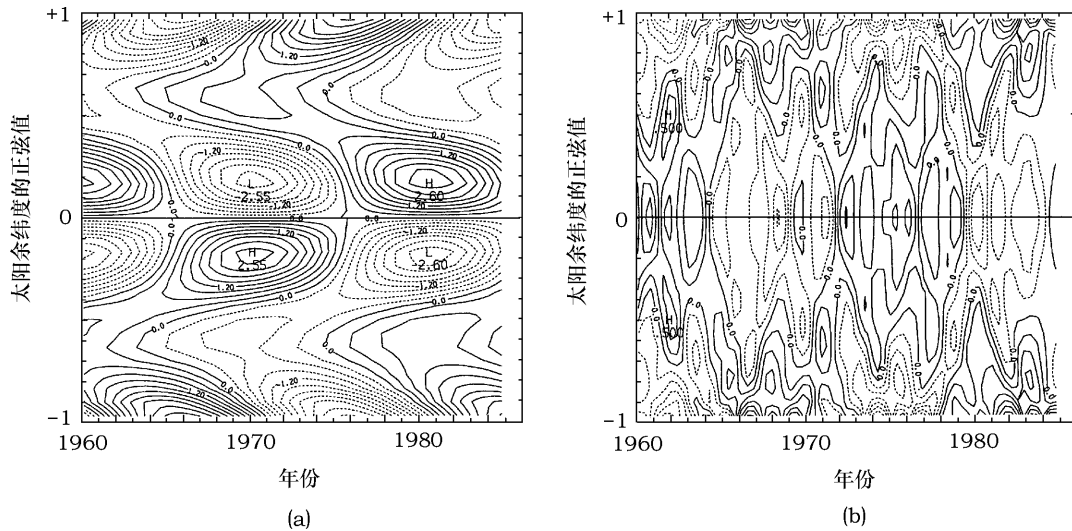


图 3 太阳大尺度磁场结构的纬度分布^[20]

(a) $l = 1, 3, \dots, 13$; (b) $l = 2, 4, \dots, 14$ 。

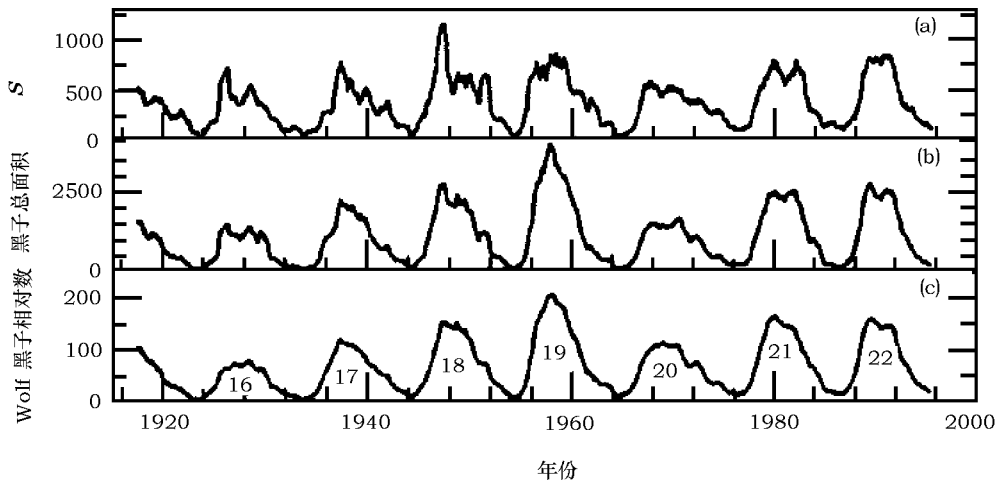


图 4 太阳黑子在日面分布的经度不对称性^[25]

(a) 日面黑子分布的经度不对称性系数 S ; (b) 太阳黑子总面积; (c) Wolf 黑子相对数。

1995 年 Bravo 和 Stewart^[24] 在研究了连续几个太阳活动周极小年期间日冕大气中南北两极区磁场差异的基础上, 推测可能存在一个相对于太阳自转轴倾斜约 0.07° 的偶极性质的 RMF, 其大小约为太阳活动极小年期间 DMF 偶极分量大小的 $1/7$ 。

2002 年 Mursula 等人^[25] 统计了太阳黑子在日面分布的经度不对称性 (Longitudinal Asymmetry, LA)。他们事先定义一个矢量化的黑子面积参数 S_{ik} , 其中 $i = 1, 2$ 表示黑子位于太阳南半球或者北半球, $k = 1, 2, 3, \dots, 27$ 表示 Bartels 太阳自转周对应的天数序号 (太阳自转

一周约 27 d)，由于太阳自转速率一定，因此每个 k 值都对应了日面上固定的一条经度带。 S_{ik} 的大小取 i 、 k 所对应日面区域内太阳黑子的总面积，再利用参数 $S = \sum_{i,k} S_{ik}$ 来具体度量平均每个太阳自转周日面所有黑子分布的 LA 程度。计算结果如图 4 所示。Mursula 等人发现，日面黑子的 LA 在每个太阳活动周的极大值较同期黑子总面积以及 Wolf 黑子相对数的极大值，基本保持一个恒定的常数，而与每个太阳活动周的实际黑子活动水平无关，由此猜测这种不对称性可能是太阳内部拥有一个恒定的 RMF 的外在体现。

2004 年 Mordvinov 和 Kitchatinov^[26] 研究了全日面磁场及其拓扑结构在经度上分布的演化规律，发现从第 21 到第 23 太阳活动周太阳的大尺度磁场结构可能由周期性的发电机模（关于太阳赤道反对称，自转轴轴对称，且每周表现有明显极性转换的强磁场部分）和恒定的 RMF（非轴对称的弱磁场部分，估计大小不超过 $8 \mu\text{T}$ ）相互叠加产生。这项工作似乎同前面介绍的 Stenflo^[20] 工作互补。

3.3 太阳内部磁场反演

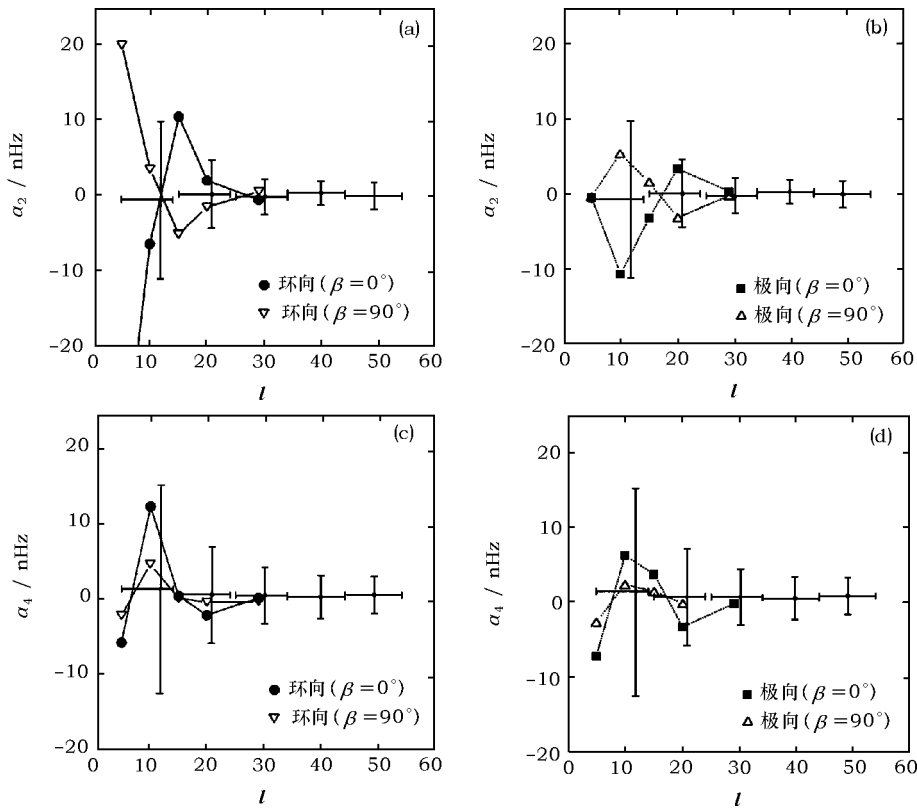


图 5 日震资料^[27]

(a)、(b) 为 α_2 系数 (α 系数在日震观测中十分常用，一般为 $\alpha_1 \sim \alpha_6$)；(c)、(d) 为 α_4 系数。图中空心圆点表示 1986 年日震观测值，由对所有振动模分量 n (径量子数) 和每相邻 10 个 l (角量子数) 所对应的 α 数值求平均得到，其误差棒为观测误差；实线和虚线连接的点分别表示理论上用 RMF ($B_0 = 30 \text{ MG}$) 环向场分量和极向场分量计算得到的相应 α 值； β 表示磁场与太阳表面自转轴之间的夹角。

日震学研究是一种能直接有效地探测太阳内部信息的方法。与利用地震波传播特征研究地球内部信息一样,日震学主要通过观测太阳振动特征来推测太阳内部结构、运动和磁场等物理参量。由于 RMF 深藏在太阳内部,这种研究手段对于今后 RMF 的观测验证可能意义十分深远。1992 年 Goode 和 Thompson^[27] 研究了一个类似于四极场的 RMF 对太阳振动频率的影响。从日震资料(如图 5 所示)他们发现,如果 RMF 关于太阳自转轴轴对称的话,其大小不应超出 30 MG,所造成的太阳形状的扁率应大致为 $(5\sim 10)\times 10^{-6}$ (在目前观测误差范围之内,所以还无法检验);如果 RMF 轴相对太阳自转轴是倾斜的话,那么其大小则可以超出 30 MG,所引起的太阳形状的扁率也会随之变大。

另一方面,近年来 Sofia、Li 和 Lydon 等人对太阳内部磁场的形状、大小、深度和变化率与太阳全局参数(包括太阳半径、光度、黑子相对数、有效温度和 p 模震动频率等)的变化之间的关系有着系统的研究^[28~30]。利用这些关系,结合实时观测记录可反推出太阳内部的磁场信息,这与日震学研究在功能上是相同的。研究表明,一个深藏在对流层底部以下的强磁场分量(约 10^6 G)对这些全局参数的影响是不可或缺的。当然,还有其他许多与 RMF 相关的理论观测研究,这里不一一列举了。

4 讨论和展望

Cowling 首次提出 RMF 的概念是在 20 世纪 40 年代,当时人们正处在积极探索太阳表面磁场起源的阶段。其实,那时候已经出现了众多后来称之为自激发磁场发电机理论的雏形,Cowling 的 RMF 理论似乎过于“超前”而没有引起足够的重视。就当时情况来说,太阳表面磁场的观测手段尚很弱,其内部磁场的观测则更加不切实际,Cowling 的 RMF 理论没有可检验的基础;其次对恒星磁场的研究才刚刚起步,更别说研究恒星形成过程中的原始磁场了。随着太阳表面磁场发电机理论的成功,太阳表面磁场与磁活动的各种性质和规律也逐渐被揭示出来,而 RMF 基本上仍处在被遗忘的角落。直到 19 世纪 80 年代,人们发现了许多发电机理论无法解释的现象,还有太阳中微子亏损问题等,不得不重新考虑已趋成熟的发电机理论和太阳基本模型。于是,很多学者开始考虑和试图回答太阳是否真的存在或者曾经存在 RMF 这个问题,从而使对太阳 RMF 的研究由冷清慢慢走向火热。另外一个促进因素则可能是,在恒星磁场的研究领域内,大家基本公认类太阳恒星的辐射核内存在 RMF 其实是一种很普遍的现象^[31]。

目前,在理论方面,人们一方面极力探索 RMF 的产生机制和构造一个谐和的能够解释更多观测事实的新发电机模型,另一方面则通过模拟和反演方法将 RMF 与尽可能多的可观测的太阳活动现象以及变化指数关联起来,为观测验证奠定基础。比较典型的观测证据有太阳活动变化的 22 yr 周期性、南北不对称性和太阳光度变化等。在观测方面,人们一方面分析和提取太阳活动的各种不对称性行为(即排除传统发电机机制贡献的部分),并利用这些行为反推出 RMF 的相关性质,另一方面则是结合理论分析从资料中重新捕捉 RMF 的存在证据。文献[20]和文献[27]便是如此。表 1 简单罗列了部分文献所推测得到的 RMF 的几个基本性质,从中可以看出人们对 RMF 的理解是存在争议的,比如它的大小和方向、偶极场还是四极场,以及到底是怎样穿透辐射层进入对流层的。

表 1 RMF 相关参数统计

| 大小 | 倾角 | 形状 | 相关现象 | 参考文献 |
|--------------------------|-------|----------|-------------|------------|
| 1/10 DMF | | | 黑子 22 yr 周期 | [10,11] |
| 1/10~1/5 DMF | 0° | 轴对称, 四极为 | 磁场纬度分布演化 | [20] |
| 1/7 DMF | 0.07° | 偶极 | 日冕极区磁场 | [24] |
| < 8 μ T (光球表面) | | 非轴对称 | 磁场经度分布演化 | [26] |
| | 有无均可 | 四极场 | 日震探测 | [27] |
| 10 ⁶ G (对流层底) | | | 太阳光度等全局参量 | [28,29,32] |

注: 表中“倾角”和“形状”均相对自转轴。

关于 RMF 的理论很多, 但如果缺乏观测方面的有利支持, 它们都是不确定的。日震学的发展为 RMF 在观测上的论证提供了可能, 也许在不久的将来, 通过观测拥有更小 l (角量子数) 值的振动模 (这种振动模能够穿透到太阳更深的内部) 真的可以了解到辐射层的真实磁场信息。诚然, 利用太阳全局参量的变化特征来推演太阳内部磁场信息的方法也是值得关注的。发展一个成熟的受 RMF 影响的不对称磁场发电机理论意义十分深远, 它不但为正确理解太阳活动的不对称性现象提供契机, 而且对于太阳活动预报也有着重要的参考价值。一则 RMF 对于辐射层与对流层不同速率自转间的耦合十分重要^[6,7]; 其次, RMF 本身也许很弱, 但是通过对流层磁流体运动的放大作用^[33,34], 能够融入到磁场发电机里头, 并调制发电机磁场的产生和演化, 从而带来可观测到的效应。一个完整的太阳磁活动理论应该综合考虑太阳上各层的相互影响。相信通过对太阳辐射核内 RMF 的研究, 人们能够理解许多不对称的太阳磁活动, 揭示许多未知的太阳磁活动的内在规律。

参考文献:

- [1] Hale G E. ApJ, 1908, 28: 315
- [2] Wang J X. Fundam. Cosmic Phys., 1999, 20: 251
- [3] Babcock H W. ApJ, 1961, 133: 572
- [4] 林元章. 天文学进展, 2001, 19: 436
- [5] Cowling T G. MNRAS, 1945, 105: 166
- [6] Levy E H, Boyer D. ApJ, 1982, 254: L19
- [7] Boyer D, Levy E H. ApJ, 1984, 277: 848
- [8] Sonett C P. GRL, 1982, 9: 1313
- [9] Sonett C P. Nature, 1983, 306: 670
- [10] Mursula K, Usoskin I G, Kovaltsov G A. In: Wilson A ed. Proceedings of the 1st Solar Cycle and Space Weather Euroconference, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, 2000: 387
- [11] Mursula K, Usoskin I G, Kovaltsov G A. Sol. Phys., 2001, 198: 51
- [12] Usoskin I G, Mursula K, Kovaltsov G A. A&A, 2000, 354: L33
- [13] Genevyshev M N, Ohl A I. Astron. Zh., 1948, 25(1): 18
- [14] Usoskin I G, Mursula K, Kovaltsov G A. In: Wilson A ed. Proceedings of the 10th European Solar Physics Meeting, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, 2002: 863
- [15] Temmer M, Veronig A, Hanslmeier A. Sol. Phys., 2003, 215: 111
- [16] Verma V K. In: Harvey K L ed. The Solar Cycle, San Francisco: Book Crafters Inc., 1992: 429
- [17] Li K J, Schmieder B, Li Q S. A&AS, 1998, 131: 99

- [18] Garcia H A. Sol. Phys., 1990, 127: 185
- [19] 李可军, 李秋莎, 陈学昆等. 天文学进展, 2000, 18: 312
- [20] Stenflo J O. Astrophys. Space Sci., 1988, 144: 321
- [21] Maunder E W. MNRAS, 1904, 64: 747
- [22] Ozguc A, Ucer C. Sol. Phys., 1987, 114: 141
- [23] Oliver R, Ballester J L. Sol. Phys., 1996, 169: 215
- [24] Bravo S, Stewart G. ApJ, 1995, 446: 431
- [25] Mursula K, Vernova E S, Tyasto M I *et al.* In: Huguetta S-L ed. Proceedings of the 2nd Solar Cycle and Space Weather Euroconference, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, 2002: 249
- [26] Mordvinov A V, Kitchatinov L L. Astron. Rep., 2004, 48: 254
- [27] Goode P R, Thompson M J. ApJ, 1992, 395: 307
- [28] Lydon T J, Sofia S. ApJS, 1995, 101: 357
- [29] Li L H, Sofia S. ApJ, 2001, 549: 1204
- [30] Sofia S, Li L H. JGR, 2001, 106: 12969
- [31] Kitchatinov L L, Jardine M, Cameron A C. A&A, 2001, 374: 250
- [32] Dziembowski W A, Goode P R. ApJ, 1989, 347: 540
- [33] Charbonneau P, McGregor K B. ApJ, 1992, 343: 526
- [34] Charbonneau P, McGregor K B. ApJ, 1993, 417: 762

Progress in the Studies on a Relic Solar Magnetic Field

SONG Wen-bin, WANG Jing-xiu

(*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China*)

Abstract: It is really possible that the Sun possesses a relic magnetic field of the pre-main sequence epoch in its radiative core. Due to a stably stratified fluid and an extremely high electrical conductivity in the solar interior, a relic solar magnetic field can survive for a very long time. A relic field can help us to explain many asymmetries in solar activities, such as the north-south asymmetries of solar magnetic activities, active longitudes and holes, low-latitude coronal holes, Maunder minimum, etc. In addition it can affect the distribution and evolution of solar surface magnetic field by changing the boundary conditions of solar dynamo. This paper focuses on the introduction of recent progress and issues in observations and theories of relic solar magnetic field. Some unresolved problems and highlights are also discussed.

Key words: astrophysics; relic solar magnetic field; review; Sun; surface magnetic field; dynamo