

黑子旋转多波段观测研究及影响因素分析*

向超^{1,2} 徐稚^{1†} 赵明宇¹ 朱冰茜^{1,2}

(1 中国科学院云南天文台 昆明 650216)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 黑子是太阳表面磁场高度集中的区域,多波段观测可提供有关黑子在不同大气层次的磁场或动力学信息,有利于研究非势磁场位形的形成.基于羲和卫星(Chinese H α Solar Explorer, CHASE)在H α 窗口进行多波段观测的优势(空间对齐和时间相同),4组具有亮桥结构的太阳黑子被用于分析其在光球层和色球层的旋转特性,以黑子亮桥作为示踪体的同时,关注了亮桥演化对旋转速度判断的影响.主要结论是:(1)4个样本分析均发现,黑子旋转的角速度在线翼(与H α 线心之间的波长间隔 $\Delta\lambda = -0.8 \text{ \AA}$)与连续谱波段($\Delta\lambda = -2.8 \text{ \AA}$)是一致的,且角速度处于大约 $0.5 \text{ (}^\circ\text{)/h}$ 到 $2 \text{ (}^\circ\text{)/h}$ 的范围内;(2)其中有3个样本显示,黑子在线心波段(色球层)表现出比线翼更快的旋转速度,速度差异 $0.1 \text{ (}^\circ\text{)/h}$,但包括亮桥形态和亮度在内的动力学演化会明显影响测量结果;(3)其中3个样本黑子具有沿着径向贯穿本影的亮桥结构,分析显示一侧的亮桥在各个波段上显示出旋转速度随半径呈现“慢-快-慢”的特征,而另外一侧则显示出速度随半径逐渐增加的趋势,充分显示了黑子旋转的非刚性特征.建议在进行多波段黑子旋转研究时,应当特别关注不同波段中黑子演化对结果的影响.

关键词 太阳:活动,太阳:黑子,技术:成像光谱

中图分类号: P182; **文献标识码**: A

1 引言

太阳黑子结构的内禀旋转通常定义为单个黑子围绕垂直于太阳表面且以本影为中心轴的自行旋转,也被称为黑子自转.早在20世纪初Hale^[1]和Evershed^[2]分别利用单色像和光谱观测数据粗略地发现太阳黑子的运动呈现出一定的旋转特征.随着高空间分辨率以及高时间连续性的地面或空间观测设备的出现和发展,例如:SOHO (Solar and Heliospheric Observatory)^[3]、TRACE (Transition Region and Coronal Explorer)^[4]以及SDO (Solar Dynamics Observatory)^[5]等,关于太阳黑子

旋转的案例或统计研究才得以展开. Brown等^[6]首次基于TRACE卫星的白光像数据研究了7个太阳黑子旋转的运动特征.观测发现,黑子旋转速度缓慢(约 $1 - 3 \text{ (}^\circ\text{)/h}$),持续时间长,有的太阳黑子持续旋转长达6 d,总旋转角度可达200多度,旋转速度沿半径向外呈现出“慢-快-慢”的变化趋势.作者还阐明,在他们所研究的样本中,多数在后期出现了耀斑爆发现象,支持了黑子旋转是活动区自由能积累的一种重要方式^[7-10].然而,根据统计研究,具有旋转特征的黑子相对罕见. Yan等^[11]曾利用SOHO和TRACE卫星的白光像数据分析了第23个

2025-03-20收到原稿,2025-04-15收到修改稿

*中国科学院战略先导研究项目(XDB0560000),国家自然科学基金项目(12127091、12473054、11973086),云南省太阳物理和空间科学重点实验室项目(202205AG070009),云南省学术和技术带头人后备人才项目(202105AC160085)资助

† xuzhi@ynao.ac.cn

太阳活动周中的2959个活动区,并报告仅有153个活动区里的太阳黑子出现可探测的旋转运动,占活动区总数目的5.2%. Brown等^[12]也强调过,当采用不同的预处理或旋转运动探测方法时,结果会明显的不同.

除了白光像之外,研究者也试图利用色球波段或紫外波段的图像来分析黑子的低层旋转所造成的高层大气的响应.但与白光像分析不同,判断黑子高层大气旋转的参照物不尽相同,例如Yan等^[13]选择了1600 Å波段观测到的黑子上方的亮环结构,而Hardersen等^[14]则追踪的是H α 波段观测到的黑子附近的暗条.不同的波段往往来自不同的设备,所以在进行多波段观测综合分析时,通常会遇到设备的空间分辨率不同、波段空间配准误差、参照物选择不一致等问题.为了克服上述问题,本工作的多波段分析选择使用我国羲和卫星(Chinese H α Solar Explorer, CHASE^[15])搭载的H α 成像光谱仪.该光谱仪利用狭缝扫描,能在46 s内完成一次全日面的光谱观测,可同时获得Si I (6560.58 Å)、H α (6562.8 Å)、Fe I (6569.21 Å) 3条谱线的光谱信息,光谱分辨率为0.072 Å,像元光谱分辨率为0.024 Å^[16].我们选择了其中光学厚谱线H α 线,关注其 $\Delta\lambda = 0.0 \text{ \AA}$ 、 -0.8 \AA 、 -2.8 \AA 的3个波段.根据谱线形成机制和大气辐射转移理论计算得知^[17-19],这3个波长点的基本形成高度间隔约1500多千米,覆盖了高色球、中低色球和光球3个不同的太阳大气高度.扫描得到的光谱数据经过预处理后,可以合成所关注的波长点的单色像,每幅单色像的空间分辨率约为1'',时间间隔46 s(需要注意的是,受到载荷储存和数传能力的限制,羲和连续观测时间通常只能维持约半个小时,中断约1 h后再进行连续观测).最终,再利用一系列合成的单色像探测并分析黑子的旋转运动.这样不仅可以保证不同波段的图像具有相同的空间采样和观测时间,更重要的是不需要特殊算法却能保证不同波段之间在空间上严格对齐.为了保证多波段判断旋转的参考物一致,我们选择了在H α 的线心、线翼以及连续谱上都能观测到亮桥结构作为示踪体^[20-21].

这里作为对比,我们注意到除了光球或色球

强度图像之外,还有部分研究工作使用了SOHO卫星的纵向磁图^[22],利用 DAVE (Differential Affine Velocity Estimator)算法^[23]计算磁结构的运动.和本工作研究内容明显不同的是,这些工作关注的是活动区在其浮现过程中所表现出来的大尺度活动区旋转,而非单个黑子本身的旋转.此外,一些太阳黑子形态的瞬变从视觉上类似于太阳黑子旋转,例如Liu等^[24]发现当耀斑带跨越太阳黑子时,造成了光球图像中太阳黑子顺时针的运动,但是这种运动持续时间短并且戛然而止,这并不完全符合太阳黑子旋转的特点(持续时间长).

当基于强度图来判断黑子旋转运动时,常见方法有光流法^[25-26]或椭圆法^[27]等.光流法的使用需要图像具有较高的空间分辨率,而且对参数的选择(例如平滑系数、迭代次数等)有较高的依赖性,参数选择不当会导致光流估计错误;使用椭圆法则需要黑子形态接近椭圆,圆形黑子则无法探测.本工作中,我们使用的方法是:首先将图像从直角坐标系转化为极坐标系^[6, 12],即获得“ $r - \theta$ ”图像,再进行“ $\theta - \text{时间}$ ”切片分析,从而计算得到旋转的角速度.相较于线速度和半径的关系,角速度随半径的变化更能直接反映出旋转是否是刚体旋转.

本文第2部分介绍了黑子的筛选和旋转速度的计算方法.第3部分阐述了4组黑子在多波段旋转分析中所展现出的特性.第4部分给出结论和讨论.

2 观测数据与方法

2.1 观测数据的筛选

本文在羲和卫星2023年的观测数据中一共筛选出了4个符合要求的旋转太阳黑子.筛选的主要条件有:(1)黑子行经日面中心区域,即日心角在 40° 范围内,这样太阳半径方向上(即大气高度方向上)1 km的差距在日面上的投影间隔偏移量小于羲和卫星的空间分辨率($\approx 1''$),这样就可以忽略投影效果的影响;(2)黑子本影内部具有亮桥结构,且多个波段均可以识别出来.

我们在表1中列出了4组黑子所在的活动区、观测时间跨度以及旋转方向,并在图1中综合展示了它们在起始时刻时位于全日面(Solar X、Solar Y)上的位置以及亮桥的结构.

表 1 筛选出的黑子列表
Table 1 List of sunspots in this study

Active Region Number	Time Span/h	Hemisphere	Rotation Direction
NOAA 13217	2023-02-11UT00:53—2023-02-12UT11:15 (~35)	South	clockwise
NOAA 13310	2023-05-22UT06:25—2023-05-23UT09:13 (~27)	South	contrary clockwise
NOAA 13490	2023-11-23UT01:10—2023-11-24UT23:22 (~47)	North	clockwise
NOAA 13531	2023-12-24UT02:19—2023-12-25UT13:01 (~35)	South	clockwise

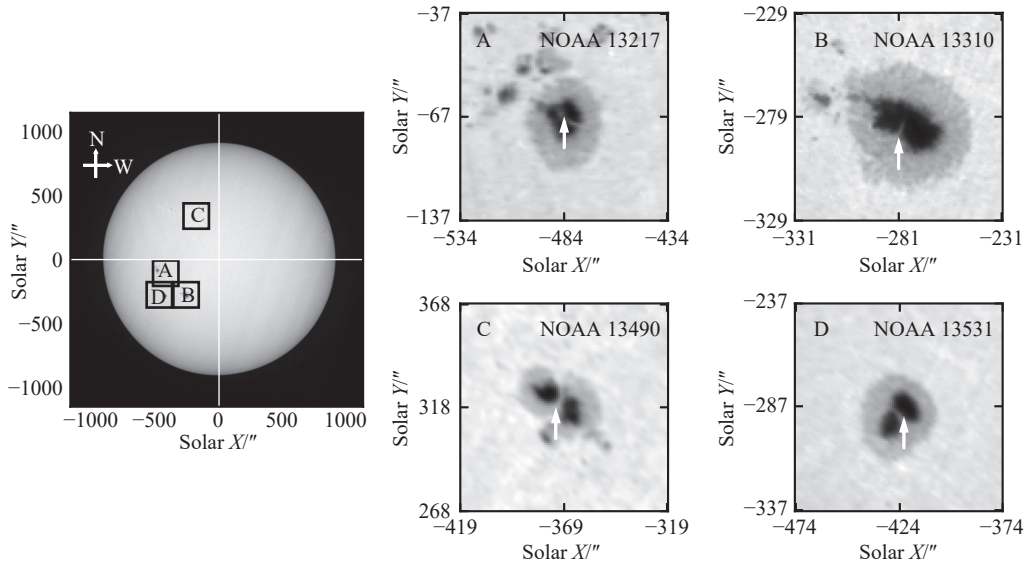


图 1 筛选出的 4 个旋转黑子. 左图: 综合显示初始时刻 4 个黑子的全日面位置. 右图: 4 个黑子的局部图, 箭头示意亮桥结构.

Fig. 1 Four rotating sunspots involved in this work. Left: a synthesis of the initial positions of the sunspots on the full solar disk. Right: local views of the sunspots. The arrows indicate the light bridge structures.

2.2 极坐标转换

本工作首先要将图像由直角坐标转为极坐标 (r, θ) , 包括两个问题: 极坐标原点的确定和像素采样.

2.2.1 极坐标系原点的确定

通常认为太阳黑子旋转是以本影质心(强度质心)作为旋转中心, 所以极坐标系的原点被设定为太阳黑子本影的质心. 计算黑子质心位置, 我们选择了连续谱的合成图(即 $\Delta\lambda = -2.8 \text{ \AA}$ 波段). 参考 Brown 等^[12]的工作, 我们选取 0.6 作为区域生长法的阈值参数, 即在特定时刻当某像素的强度值 $I_i(x_i, y_i)$ ($I_i(t)$ 与之定义相同), 满足 $I_i(x_i, y_i) \leq 0.6I_{\text{mean}}$ (I_{mean} 是周围宁静区的平均强度值)时, 则认定该像素点属于太阳黑子本影区. 设共探测到

N 个像素点, 那么利用以下质心法便可得到某个时刻的黑子本影质心位置:

$$x_{\text{cen}}(t) = \frac{\sum_i^N x_i I_i(t)}{\sum_i^N I_i(t)}, \quad y_{\text{cen}}(t) = \frac{\sum_i^N y_i I_i(t)}{\sum_i^N I_i(t)}, \quad (1)$$

同时, 考虑到黑子演化会造成质心位置的空间变化, 我们采用了质心位置的时间平均值, 即 $x_{\text{cen}}(\bar{t})$ 和 $y_{\text{cen}}(\bar{t})$, 作为极坐标转换的原点位置. 需要注意的一点是, 线心和线翼波段 ($\Delta\lambda = 0.0 \text{ \AA}$ 和 -0.8 \AA) 合成图像的极坐标转换也是用该位置作为原点, 换句话说, 我们假设了不同大气高度上的太阳黑子具有相同的旋转中心.

2.2.2 极坐标系的像素采样

首先为了提高精度,我们将原图进行二维插值,像素点增加10倍.在坐标转换时,在 r 方向上我们保持与原坐标系相同的空间采样(1个像素),若在 θ 方向角度采样为 $\Delta\theta$,那么原图中像素采样与极坐标系下 θ 方向上每个像素采用的对应关系为:

$$\frac{360^\circ/\Delta\theta}{2\pi r} \text{ pixel}^{-1}. \quad (2)$$

这个关系强烈依赖于半径 r ,且与 r 成反比.图2中以NOAA 13531黑子为例,根据黑子大小设极坐标下半径方向范围为25个像素, θ 方向采样 $\Delta\theta = 0.25^\circ$.这个角度采样可以让我们在极坐标系下也能很好观测到原图中的半影纤维等精细结构.这样我们就可以获得该黑子的“ $r - \theta$ ”图(图2下).由于该亮桥在径向方向上贯穿黑子本影,因此在“ $r - \theta$ ”图中亮桥分为了两部分,分别位于 $100^\circ < \theta < 200^\circ$ (Arm1)以及 $250^\circ < \theta < 350^\circ$ (Arm2)范围附近.当然,原图中起始角 0° 的位置可改变亮桥在“ $r - \theta$ ”图中的位置.

2.3 角速度计算

坐标系转换之后,原亮桥的旋转运动变为极坐标系下的水平方向(θ 方向)运动.在图3(a)和(b)中,我们展示了两个不同时刻连续谱的“ $r - \theta$ ”图像.首先,在某半径 r 位置处取亮桥结构(如红色所示)并按照观测时间进行等间距顺序排列则获得“ $\theta - \text{时间}$ ”图,即图3(c).其中黑色区域代表CHASE卫星无观测.其次,确定不同时刻亮桥在 θ 方向上的位置.常用方法有极值法^[27]和质心法.当强度分布不均匀时极值法不能准确给出亮桥的整体位置,所以通常采用质心法^[28].质心法需要采用合理的计算范围.我们的方法是先利用极值对亮桥进行初步定位,随后对称截取特定宽度范围,所选的范围能够完全包括亮桥结构并且尽可能分离其他结构(如图中绿线所示).最后在该范围内利用质心计算获得亮桥位置(如红点所示).这里值得注意的是:(1)该宽度范围要保证能包括所有波段上的亮桥结构,不同的波段的数据采用相同的计算范围;(2)因为亮桥结构随 r 发生变化,所以不同的半径位置的极值位置以及宽度范围是不同的.最后,对亮桥结构在 θ 方向上的质心位置(简称亮桥的质心位置)随时间的变化进行线性拟合从而计算得到角速度

ω (即 $\theta = \omega t + \theta_0$, θ_0 是初始的亮桥质心位置).当选取不同的 r 进行上述分析时,我们便可以得到旋转速度随半径的变化.

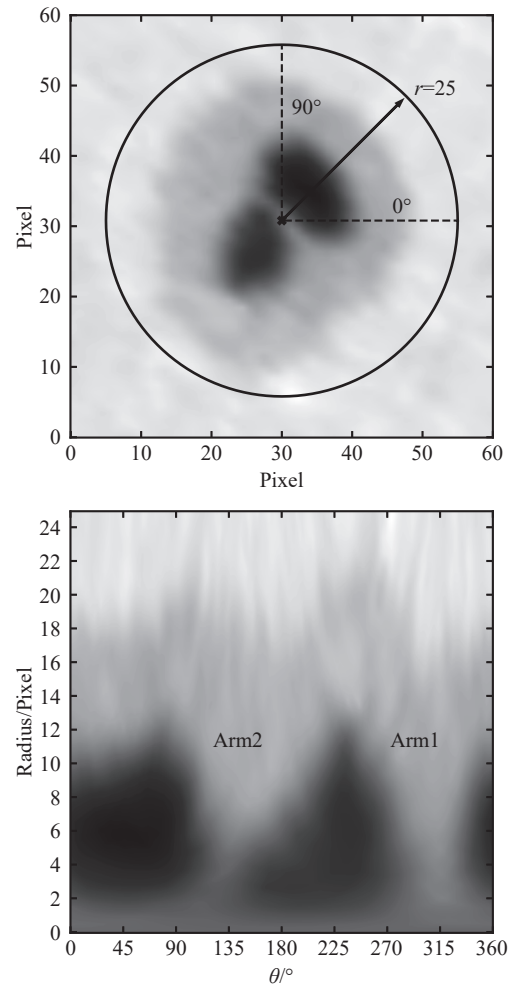


图2 以黑子NOAA 13531为例示意坐标系转换.上图: $x - y$ 坐标中的太阳黑子NOAA 13531.黑点为黑子本影质心位置. 0° 表示 $r - \theta$ 中 θ 变量的起始位置,半径方向取值范围25个像素.下图:黑子“ $r - \theta$ ”图.

Fig. 2 Taking sunspot NOAA 13531 as an example to illustrate coordinate system transformation. Top: the sunspot in $x - y$ coordinate. The black dot represents the centroid position of the sunspot umbra. 0° indicites the starting position of θ in the $r - \theta$ coordinate, with a radius range of 25 pixels. Bottom: the sunspot in “ $r - \theta$ ” coordinate.

为了分析黑子旋转在多波段上的差异,我们对所关注的3个波段进行了上述工作.然而在对不同黑子分析时,我们发现不同波段上角速度的差异并不仅仅是由拟合误差造成的,更多的是受到

黑子演化及其多波段响应的影响. 我们在结果中

将详细阐述.

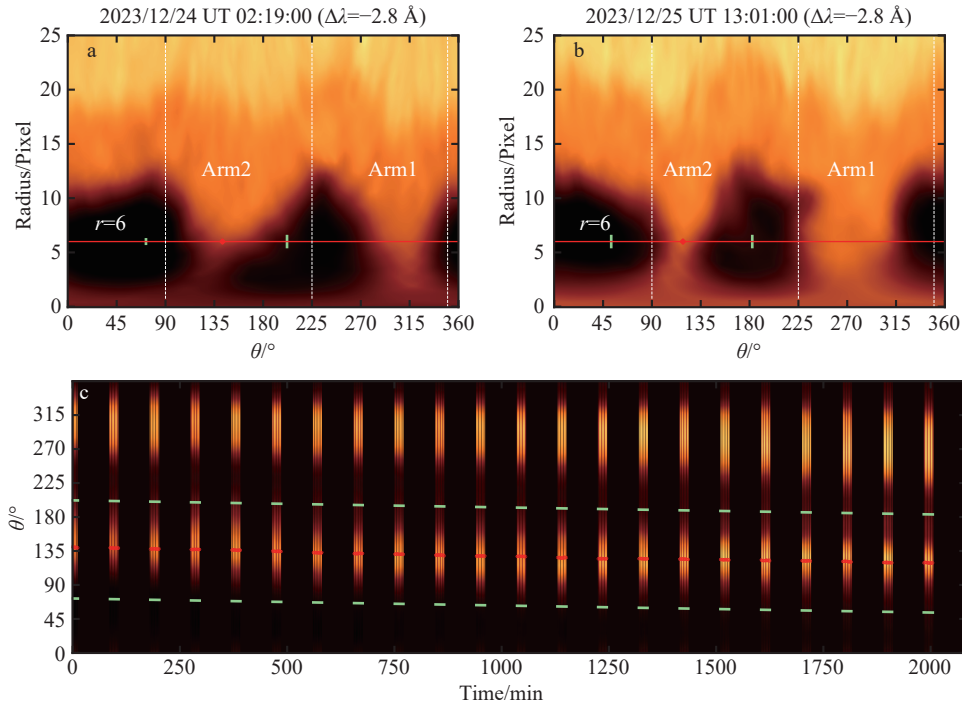


图 3 亮桥位置判断. (a)和(b): 旋转初始时刻与结束时刻时连续谱波段的“ $r-\theta$ ”图. 亮桥的两部分分别命名为Arm1和Arm2. 作为参考, 图中用竖线标记了 $\theta = 90^\circ$ 、 225° 和 350° 3个度数. (c): $r = 6$ 处的“ θ -时间”图. 绿线为不同时刻计算质心的范围, 红点表示计算得到的亮度质心位置.

Fig. 3 Determination of the light bridge position. (a) and (b): the $r-\theta$ diagram in the continuum at the initial and final times of rotation. The two parts of the light bridge are named Arm1 and Arm2, respectively. Three angles $\theta = 90^\circ$, 225° and 350° are marked by three vertical lines. (c): the “ θ -time” diagram at the radius of $r = 6$. The green lines represent a range to calculate the centroid of the light bridge, and the red dots indicate the centroid.

3 结果展示

3.1 NOAA 13531

NOAA 13531黑子位于南半球, 顺时针旋转35 h, 总旋转角度约 50° . 主要特点是亮桥结构持续可见并沿径向贯穿黑子本影. 黑子以及亮桥结构没有明显形态变化和爆发现象.

3.1.1 Arm1和Arm2多波段旋转速度差异

图4显示了初始时刻 $\Delta\lambda = 0.0 \text{ \AA}$ 、 -0.8 \AA 、 -2.8 \AA 3个波段的“ $r-\theta$ ”图. 为了获得不同半径、不同波段的旋转速度差异, 对3个波段我们均分析了 r 分别为6、7、8、9、10、11共6个半径位置. 图5展示了Arm1在不同半径位置上亮桥质心位置随时间的变化. 注意为了方便起见, 此时纵坐标 θ 是与初始时刻的角度差的绝对值, 所以无论顺时

针还是逆时针旋转, θ 值都为正. 为了突出波段之间的差异, 我们同时计算了波段之间的相对角度 $\Delta\theta$ ($\Delta\theta_\lambda = \theta_\lambda - \theta_{\lambda_c}$, 即线心和线翼探测到的角度 θ_λ 与连续谱探测出的角度 θ_{λ_c} 相减, 相减前后波段颜色保持不变). 虽然通过对 θ 进行线性拟合可以获得它们的角速度 ω 及其差异, 但是 $\Delta\theta$ 可以体现出 ω 随时间变化的更多细节.

通过分析图5 Arm1的运动情况, 我们发现3个显著特征: (1) 3个波段均显示出旋转速率 ω 随半径而变化, 不同半径上 θ 随时间变化的斜率不尽相同; (2) 黑子旋转速度在线翼和连续谱波段上几乎一致, 图中近线翼 $\Delta\theta$ (浅蓝色)在整个时间段内都趋近于0 ($\Delta\theta \approx -0.01^\circ \pm 0.105^\circ$); (3) 在6个半径上都判断出黑子旋转在线心波段要比在线翼波段转得快(差异小于 $0.1^\circ/\text{h}$). 线心 $\Delta\theta$ (红色)随时间呈单调递增, 单调性在接近“本影-半影”边界时(即 $r =$

10, 11) 出现波动. 图 6 为 Arm2 的运动情况. 与 Arm1 结果相比最明显的不同在于: 在 6 个半径位置处, 线心的 $\Delta\theta$ 不再呈现单调递增趋势, 说明线心与连续谱中黑子旋转速度的相对快慢在时间进程中发生了变化.

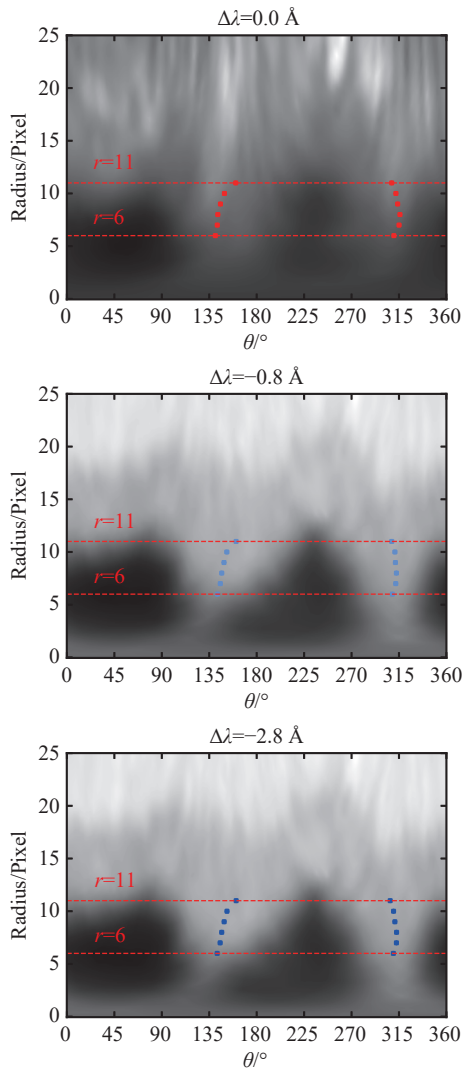


图 4 NOAA 13531 黑子初始时刻在 $\Delta\lambda = 0.0 \text{ \AA}$ 、 -0.8 \AA 、 -2.8 \AA 3 个波段的“ $r - \theta$ ”图. 亮桥在 H α 线心、线翼 ($\Delta\lambda = -0.8 \text{ \AA}$) 和连续谱 ($\Delta\lambda = -2.8 \text{ \AA}$) 上从 $r = 6$ 到 $r = 11$ 不同半径处的质心位置分别用红、浅蓝和蓝 3 种颜色表示.

Fig. 4 The “ $r - \theta$ ” diagrams of NOAA 13531 sunspot at three wavelengths of $\Delta\lambda = 0.0 \text{ \AA}$, -0.8 \AA , -2.8 \AA at initial time. The centroid positions of the light bridge at different radii from $r = 6$ to $r = 11$ in H α line core, line wing ($\Delta\lambda = -0.8 \text{ \AA}$) and continuum ($\Delta\lambda = -2.8 \text{ \AA}$) are represented by three colors: red, light blue, and blue.

3.1.2 多波段旋转速度的半径差异

在图 7 中我们对比了 Arm1 和 Arm2 在不同波段、不同半径处的速度结果, 并发现: (1) 对 Arm1 来说, 3 个波段上的旋转速度随半径的变化均呈现出“慢-快-慢”的趋势: 线心最快速度出现在 $r = 8$ 处, 约为 $1.43 (\text{^\circ})/\text{h}$. 但在同一半径上, 线心旋转速度比线翼略高(最大差异小于 $0.1 (\text{^\circ})/\text{h}$); (2) 对 Arm2 来说, 3 个波段的旋转速度随半径的变化均呈现出逐渐增加的现象, 而且同一半径上各波段上速度几乎一致; (3) Arm1 和 Arm2 的旋转速度随半径的变化呈现出不同的趋势, (导致或起因于) 亮桥随时间出现的形态变化.

3.2 NOAA 13310

NOAA 13310 黑子同样位于南半球, 逆时针持续旋转 27 h, 最大旋转角约 50° . 亮桥基本沿着半径方向到达本影质心位置, 但并未贯穿黑子.

图 8 为 3 个波段在旋转初始(2023-05-22UT06:25)与结束时刻(2023-05-23UT09:32)的“ $r - \theta$ ”图. 对比发现: 初始时刻亮桥在 3 个波段的形态基本一致, 但是随着黑子的演化, 亮桥在线翼波段明显分为长、短两部分(用 L_1 和 L_2 标记), 这与线心的单一亮结构形成了对比. L_1 与 L_2 在相对亮度和长度上存在的差异势必会影响亮桥在半径方向上的质心位置计算. 我们共计算了 $r = 7$ 到 $r = 12$, 共 6 个半径的质心位置. 在线心波段亮桥质心位置与单一亮结构吻合, 但在线翼和连续谱波段, 以最后时刻为例, 当 $r = 7, 8, 9$ 时质心位置更靠近 L_1 结构, 当 $r = 10, 11, 12$ 时, 质心位置的计算开始受到 L_2 结构不可忽视的影响.

图 9 显示了不同波段旋转速度随半径的变化. 主要特点是: (1) 3 个波段均显示出了“慢-快-慢”的趋势. 最快速度在 $r = 9$, 大小约 $1.98 (\text{^\circ})/\text{h}$, 在“本影-半影”交界处速度降为小于 $1.68 (\text{^\circ})/\text{h}$; (2) 线心与线翼(或连续谱)旋转速度的相对快慢与半径有关, 半径较小时线翼波段略快, 半径增加时线翼波段略慢, 这是由亮桥在线翼波段的分裂以及黑子的旋转方向导致. 以 r 偏小时为例, 此时线翼波段的亮桥位置由 L_1 决定(其角度位置偏大), 又考虑黑子呈现逆时针旋转(旋转方向由小向大角度方向移动), 两个因素综合导致线翼的速度偏大.

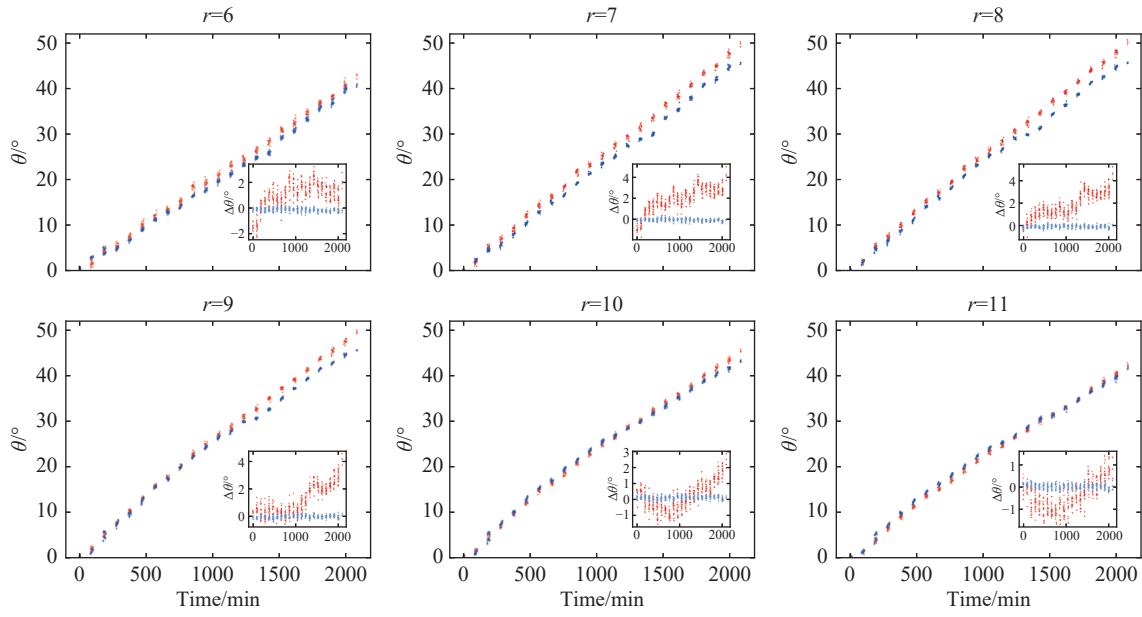


图 5 NOAA 13531黑子的亮桥Arm1结构在不同半径处的质心位置 θ 随时间的变化(相对于起始时刻的位置). 每个子图中的小图表示不同波段之间的相对质心位置 $\Delta\theta$ 随时间的变化(参见正文中对 $\Delta\theta$ 的定义). 线心: 红色、线翼: 浅蓝色、连续谱: 蓝色.

Fig. 5 Temporal variation of the light bridge position of Arm1 in sunspot NOAA 13531 at different radii over time with respect to the initial position. In the small graph of the subgraph, we show the relative centroid positions of a certain wavelength with respect to the continuum (see the definition of $\Delta\theta$ in the main text). Line core: red, Line wing: light blue, Continuum: blue.

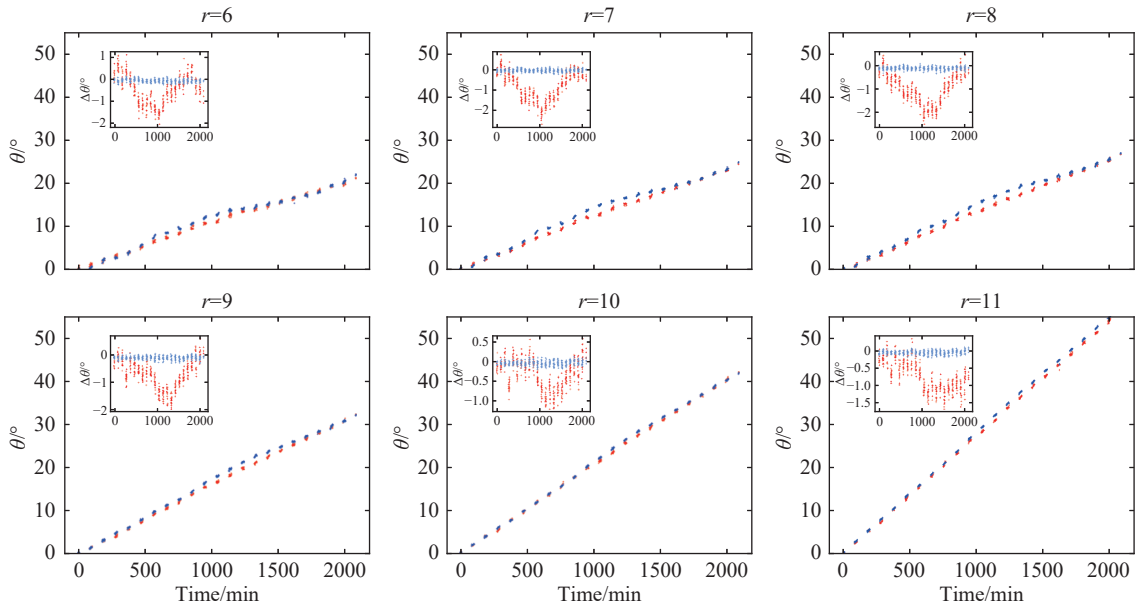


图 6 NOAA 13531黑子的亮桥Arm2在不同半径处的相对质心位置随时间的变化

Fig. 6 Temporal evolution of relative centroid positions at varying radial distances within the light bridge (Arm2) of sunspot NOAA 13531

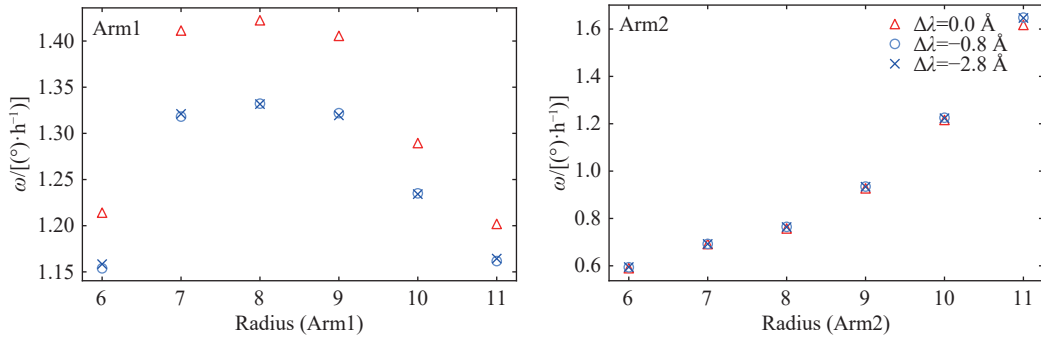


图 7 NOAA 13531 黑子亮桥的两部分旋转速度随半径变化的对比. 波段的颜色表示不变, 只是符号不同.

Fig. 7 Comparison of the rotational speed changing with radius between two parts of the light bridge of NOAA 13531. The color representation of the wavelengths remains unchanged, only the symbol is different.

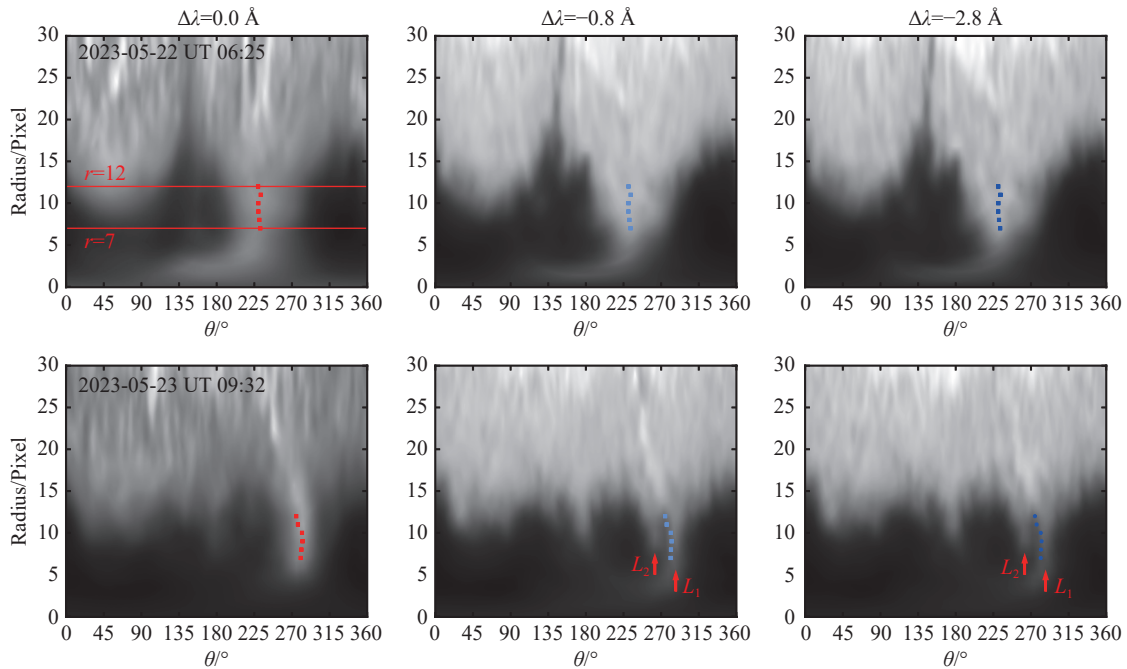


图 8 NOAA 13310 黑子在旋转初始时刻(上)和结束时刻(下) 3 个波段的“ $r - \theta$ ”图. 点示意了从 $r=7$ 到 $r=12$ 亮桥的位置. L_1 和 L_2 示意了线翼和连续谱波段上亮桥的分裂结构.

Fig. 8 The “ $r - \theta$ ” diagrams of sunspot NOAA 13310 at the initial time (upper) and final time (lower) for three wavelengths. The dots show the centroid positions of the light bridges at different radii ranging from $r = 7$ to $r = 12$. L_1 and L_2 illustrate the splitting structures of the light bridges in the line wing and continuum.

3.3 NOAA 13490

NOAA 13490 黑子位于北半球, 顺时针持续旋转 47 h, 黑子本影狭长, 亮桥沿着短半径方向贯穿

黑子. 与前两个单极黑子相比, 该黑子一侧存在几个磁异性的卫星小黑子, 导致该侧半影在旋转过程中出现明显的形态变化.

图10中我们展示了3个不同时刻(初始时刻 T_1 , 两个中间时刻 T_2 和 T_3) 3个波段的“ $r - \theta$ ”图. 贯穿黑子的亮桥呈现为两部分(Arm1和Arm2), 每个亮桥都分析了 r 分别为4、5、6、7共4个半径位置. 我们主要发现: 亮桥Arm1的形态在线心波段变化最明显, 线翼次之, 连续谱最稳定. 图11为不同时刻, 3个波段中黑子亮桥两部分(Arm1、Arm2)相对质心位置和旋转速度的对比结果. 图11 (a)和(b)给出了Arm1在 $r = 4$ 和 $r = 6$ 两个半径处亮桥质心位置随时间的变化. 无论是 θ 还是 $\Delta\theta$ 在某些时刻都出现了波段之间差异较大的现象. T_1 时, 黑子在3个波段中形态几乎一致. 我们以 T_2 为例(对应图10的第2行), 在“ $r - \theta$ ”图中可见: 亮桥在线心波段出现分裂(箭头所示), 使得短半径处亮桥结构变窄且主要位于大角度位置, 又考虑黑子整体呈顺时针旋转(旋转由大向小角度方向运动), 因此线心计算得到的 θ 值(旋转角)自然偏小; 在线翼波段, 亮桥虽然没有裂开, 但是和连续谱相比, 其结构也呈现出明显不均匀性, 导致质心位置仍然偏大角度方向, 所以结果与线心类似. 总之, 亮桥的形态和亮度在不同波段上的演化导致了在 T_2 时刻出现了明显的 $\theta_{\lambda_c} > \theta_{\lambda_w} > \theta_{\lambda_0}$ 的情况(黑子在连续谱的旋转角度 θ_{λ_c} , 在线翼的旋转角度 θ_{λ_w} , 在线心的旋转角度 θ_{λ_0}). 从 T_3 时刻起, 线心波段的分裂结构开始逐步向黑子中心延伸并逐渐增亮(箭头所示)使得长半径处($r = 6$)的亮桥质心位置向小角度靠近, 根据上面的分析, 这导致了 θ 角度的增加. 因为亮桥在线翼以及连续谱波段保持稳定, 因此线心较线翼的 $\Delta\theta$ 值明显变大(约 5° 左右). Arm1在3个波段都显示出旋转速度随半径呈“慢-快-慢”的趋势; 当半径一定时, 线心旋转速度比线翼要快, 最快达 $1.1^\circ/\text{h}$, 比线翼速度快 $0.1^\circ/\text{h}$. 对于Arm2结构来说, 亮桥结构在3个波段上没有明显的形态或亮度演化, Arm2的旋转速度随半径变化的情况如图11 (d)–(f)所示. 对比图11 (c)和(f), 我们发现在两个Arm都揭示出线心的旋转速度略高于线翼.

而且在绝大多数半径位置上, 两个Arm的旋转速度和变化趋势基本一致, 仅仅在 $r = 7$ 处(靠近“本影-半影”边界)略有区别, 这与NOAA 13531黑子两个Arm的情况不同.

3.4 NOAA 13217

NOAA 13217黑子位于南半球, 如图12所示, 黑子形态接近圆形, 其一侧周围也存在若干磁异性的卫星小黑子. 亮桥并不沿径向而且演化的非常快, 持续35 h后完全消失. 和其他黑子不同的是, 亮桥与半影相连的一端出现瞬变现象. 具体来说, 在图12 (a)中, 箭头所指的一端先逐渐消失, 约15 h之后(即图12 (b))逐渐重新连接, 即位置出现了接近 90° 的顺时针转动. 如果时间分辨率不够高, 则不能观测到该位置的瞬变现象, 我们可能会得到接近 $6^\circ/\text{h}$ 的高速旋转结果. 与之形成对比的是亮桥的另外一端. 始终保持稳定的亮度和形态. 为了分析黑子整体的旋转速度, 而非局部的瞬变现象, 我们主要关注稳定的这一端. 图12 (c)展示了这一端在 $r = 8$ 处亮桥质心位置随时间的变化情况. 我们注意到, 在初始阶段(第1条竖线之前), 亮桥以较低的速度旋转 $0.71^\circ/\text{h}$. 之后的一段时间内(第1条和第2条竖线之间), 即在另一端快速演化期间, 该半径处的亮桥质心位置却并没有明显位置改变. 最后阶段(第2条竖线之后), 在该半径处可以探测到大约为 $1.75^\circ/\text{h}$ 的旋转速度, 且3个波段没有明显变化.

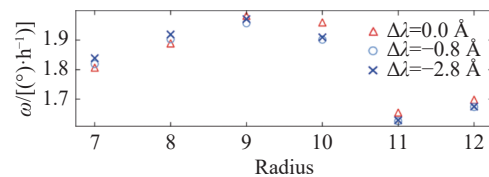


图9 NOAA 13310黑子旋转速度随半径的变化情况. 符号和颜色与图5一致.

Fig. 9 The variation of rotational speed with radius of NOAA 13310 Sunspot. The symbols and colors are consistent with those in Fig. 5.

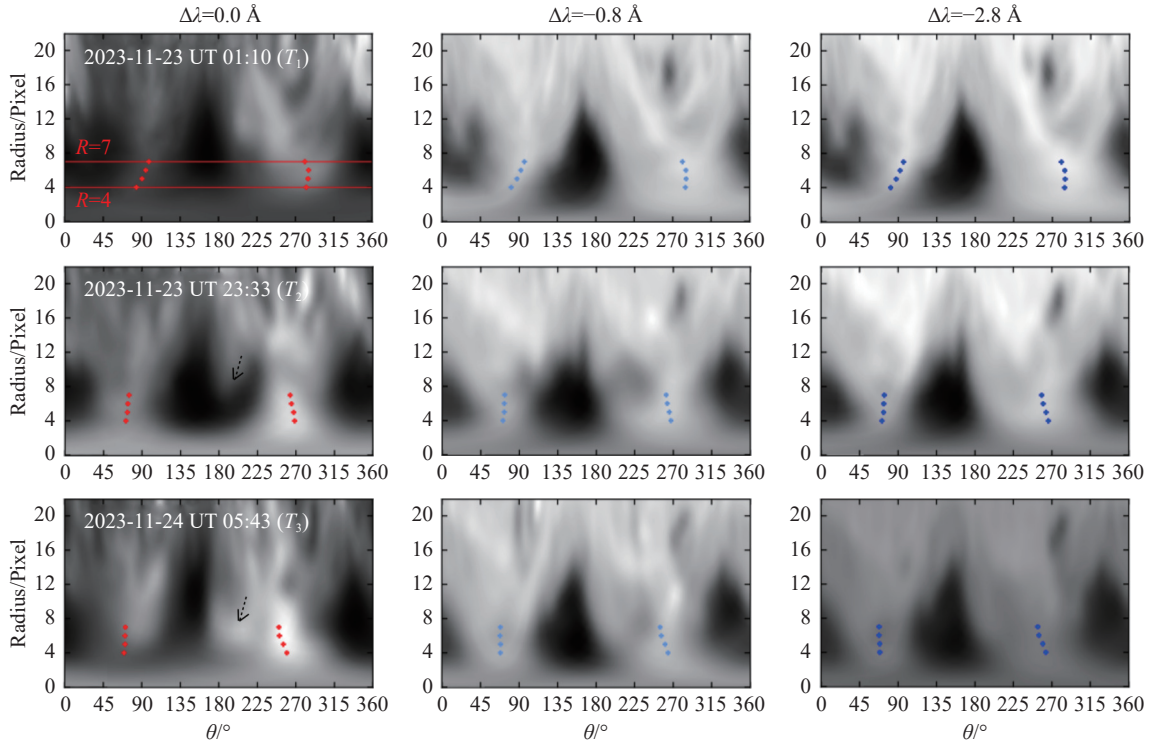


图 10 NOAA 13490黑子在3个时刻3个波段的“ $r-\theta$ ”图. 速度分析半径范围为 $r=4$ 到 $r=7$. 箭头突出分裂和增亮结构. 符号和颜色与图4一致.

Fig. 10 The “ $r-\theta$ ” diagrams of sunspot NOAA 13490 at three time in three wavelengths. The radius range for rotation analysis is from $r=4$ to $r=7$. Arrows highlight the splitting and brightening structures. The symbols and colors are consistent with those in Fig. 4.

4 总结与讨论

为了研究黑子旋转在不同大气高度上的差异, 本工作采用了羲和卫星在 $H\alpha$ 波段的光谱数据, 选择了3个形成高度差异显著的波段: $H\alpha$ 线心、线翼($\Delta\lambda = -0.8 \text{ \AA}$)和连续谱($\Delta\lambda = -2.8 \text{ \AA}$), 并利用这3个波段的扫描合成图像进行黑子多层次旋转运动的分析. CHASE的观测模式确保了3个波段的单色像在空间上的精确对齐, 时间上的严格同步以及像素采样的一致性. 我们共筛选了4个带亮桥的黑子并且在连续谱中可以发现其明显的旋转运动特征, 3个黑子做顺时针旋转, 一个黑子做逆时

针旋转. 通过在极坐标下测量太阳黑子亮桥的水平运动, 获得太阳黑子在不同大气高度上旋转的角速度, 重点关注了太阳黑子旋转在太阳大气不同高度上的相对快慢以及相对快慢是否随半径发生变化. 主要结论包括:

(1) 4个样本的分析一致反映出, 当半径一定时, 黑子旋转的(角)速度在线翼和连续谱上基本一致. 其角速度最低速度约 $0.5 (\text{°})/\text{h}$, 最快接近 $2.0 (\text{°})/\text{h}$. NOAA 13217由于亮桥的一端经历了消失再重新连接, 如果使用这一端追踪太阳黑子旋转, 会导致测量的旋转速度高达 $6 (\text{°})/\text{h}$.

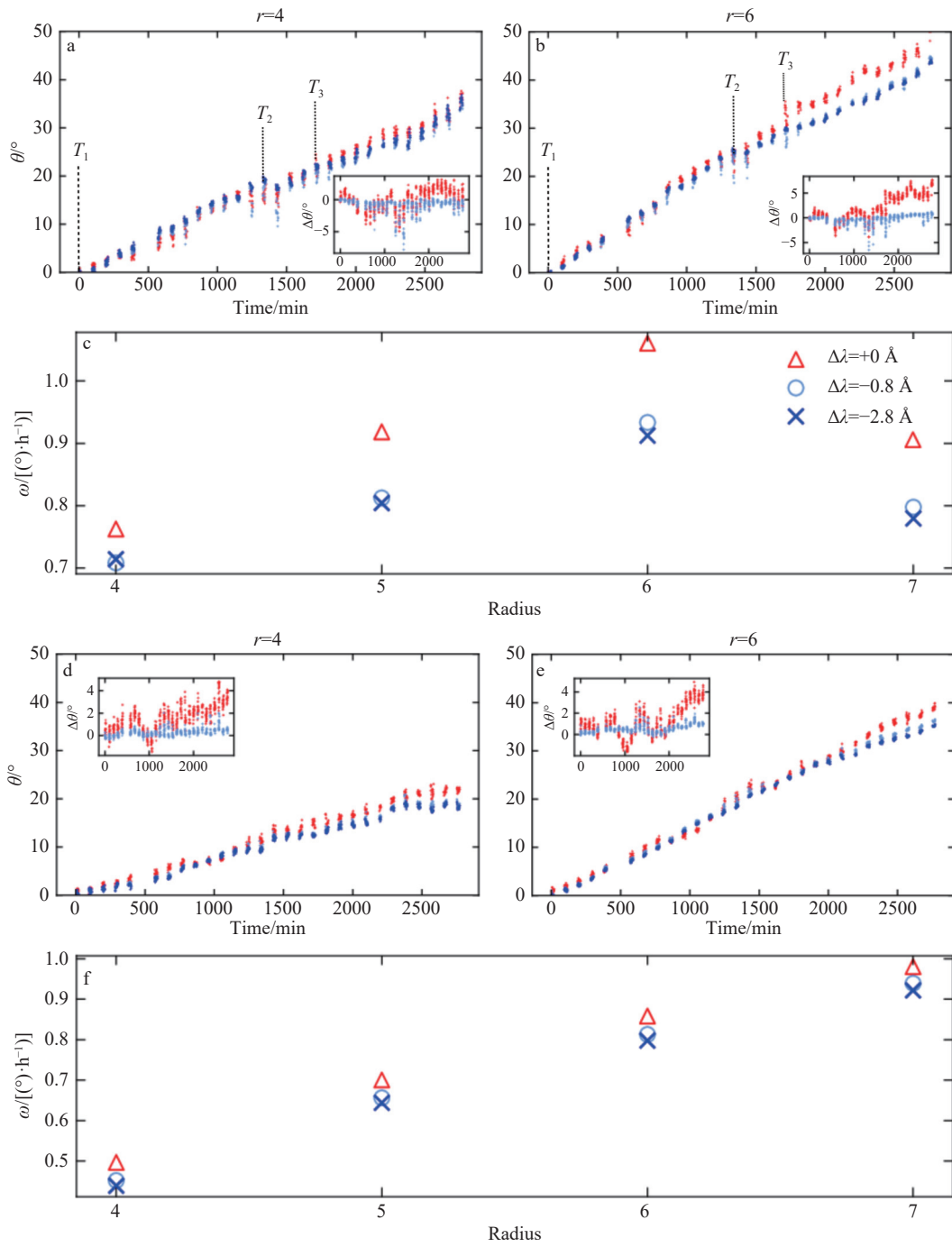


图 11 NOAA 13490 旋转速度随半径的变化。(a)和(b)为 Arm1 在 $r = 4$ 和 $r = 6$ 处亮桥质心位置随时间的变化; (d)和(e)为 Arm2 在 $r = 4$ 和 $r = 6$ 处亮桥质心位置随时间的变化; (c)和(f)为 Arm1 和 Arm2 在三个波段上旋转速度随半径的变化。符号和颜色与图 5 一致。

Fig. 11 Variation of the rotational velocity of NOAA 13490 with the radius. (a) and (b) show the variation of the centroid positions of Arm1 of light bridge at $r = 4$ and $r = 6$ over time; (d) and (e) show the variation of the centroid positions of Arm2 of light bridge at $r = 4$ and $r = 6$ over time; (c) and (f) show the variation of the rotational velocities of Arm1 and Arm2 with the radius in three wavelengths. The symbols and colors are consistent with those in Fig. 5.

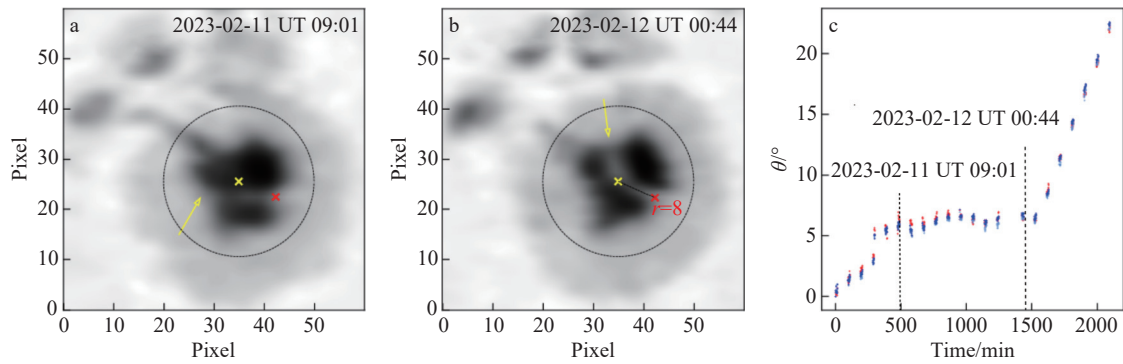


图 12 NOAA 13217 的旋转过程. (a)和(b)为两个不同时刻的黑子图像. 黄点为黑子质心位置, 红点为距离黑子质心8个像素的半径位置. 箭头指示出现瞬变现象的亮桥的一端. (c): $r = 8$ 位置处亮桥质心位置随时间的变化. 两条竖线示意了(a)、(b)图的观测时间.

Fig. 12 Rotation of NOAA 13217 sunspot. (a) and (b): sunspot images at two different time. The yellow dot represents the centroid position of the sunspot, and the red dot represents the position at a radius of 8 pixels away from the sunspot centroid. The arrow indicates one foot-point of the light bridge where a transient position-change occurs. (c): the variation of the light bridge centroid position at $r = 8$ over time. Two vertical lines indicate the observation time of panels (a) and (b).

(2) 4个样本中, 3个太阳黑子表现出其在线心的旋转速度比线翼快, 最大差异约 $0.1 (^{\circ})/h$. 但是这3个样本的情况不尽相同. 亮桥的动力学演化在其中起着关键性作用. NOAA 13310亮桥的动力学演化最为明显, 其在线翼和连续谱的合成单色像中出现了分裂并一直保持, 而亮桥在线心中保持一个完整的亮结构. NOAA 13310在3个波段上太阳黑子旋转速度的相对快慢随半径发生了变化, 这是由于分裂导致了在低半径处线翼和连续谱测量结果偏快. 在更大半径处, 其测量结果受分裂的影响降低之后, 太阳黑子在色球层上具有最快的旋转速度. 与NOAA 13310相反的是, NOAA 13490的亮桥演化发生在线心和线翼. 在特殊时刻(图10, 第2行), 亮桥Arm1在线心的缺失让黑子旋转在线心的测量结果变为最慢(太阳黑子的顺时针旋转在极坐标中为水平向左运动, 亮桥的缺失使得线心的结果短暂偏右, 对连续谱没有影响)以及(图10, 第3行)亮桥的左侧逐渐增亮, 使得线心测量得到的亮桥质心向左移动, 导致测量的黑子旋转速度较线翼和连续谱偏快. 值得一提的是, NOAA 13490中存在另一种可能影响短期测量结果的因素, 即亮桥上方的局部增亮. 这种局部增亮可能和异磁性卫星黑子引起的局部喷流相关^[29]. 作为同样被亮桥贯穿本影的太阳黑子NOAA 13531, 其Arm1和Arm2的测量结果却表明太阳黑子在多层次间的旋

转速度差存在角分布并随时间发生改变(Arm1的结果指出太阳黑子在色球层旋转最快, 而Arm2并不存在这一规律). 这可能是因为Arm2在观测时间段内发生了非旋转因素造成的亮桥扭曲(扭曲程度在不同高度上不统一). Rezaei^[21]对比了亮桥结构在光球、高色球以及过渡区的空间位置和形态, 发现亮桥质心位置的差异偏离了投影效应所造成的影响, 暗示了亮桥在太阳大气不同高度上发生了不同的演化. 我们的分析结果显示, 若不同高度上的亮桥存在因投影效应而导致的亚像素位置偏移, 不会对多层之间旋转速度的相对快慢产生影响. 如果亮桥的寿命长, 可能如同NOAA 13490的Arm1, 非旋转因素造成的亮桥演化对速度差测量的影响得以降低. 虽然亮桥的演化会对太阳黑子在太阳大气不同高度上旋转速度的测量产生影响, 但是我们认为对比Hardersen等^[14]利用黑子周围的暗条演化来判断黑子在高层大气的旋转速度来说, 采用不同高度上均可见的亮桥获得的结果更加稳定. 即使通过追踪亮桥获得的结果更加的稳定, 但是亮桥的动力学演化依旧对测量产生了影响. 因此在理想情况(太阳黑子发生的形态改变均由旋转造成)下, Cheung等^[30]提出磁张力可以驱动太阳黑子旋转. Sturrock等^[31]做了相关模拟, 并发现光球层上太阳黑子的旋转速度随初始场磁张力的变化而改变^[32]. 因此太阳黑子在太阳大气不同高度旋转

速度的差异可能与各个高度磁场以及等离子体参数的不同有关.

(3) 4个样本中3个黑子在3个波段上显示出旋转速度随半径出现“慢-快-慢”的趋势, 这与Brown等^[6]以及Grimes等^[33]结论一致. Brown等^[6]与Grimes等^[33]分别使用了极坐标时间序列以及椭圆拟合两种方法得到了相同的结论, 因此极大地降低了因方法的选择而导致这一特殊结果的可能性. 我们所使用的方法与Brown等^[6]相同, 但是我们的结果与其存在一点差异. 以NOAA 13531与NOAA 13490的黑子为例, 亮桥都沿着径向贯穿了黑子本影, 而上述变化趋势只出现在黑子中心一侧的亮桥上(Arm1), 另外一侧的亮桥则体现出旋转速度随半径逐渐增加的趋势. 同时还需要强调的一点是, 对比Brown等^[6]的工作, 我们的半径选择只截至到亮桥足点(即“本影-半影”交界处). 我们的结果暗示黑子旋转并不是刚体旋转, 这可能是导致黑子结构出现径向剪切的一个原因. Grimes等^[33]提出上述随径向的变化特征可能是由于黑子本影边缘受到了周围等离子体阻力的影响.

致谢 感谢云南天文台屈中权研究员关于太阳黑子多层旋转的重要意见.

参 考 文 献

- [1] Hale G E. *ApJ*, 1908, 28: 100
- [2] Evershed J. *MNRAS*, 1909, 69: 454
- [3] Domingo V, Fleck B, Poland A I. *SoPh*, 1995, 162: 37
- [4] Handy B N, Acton L W, Kankelborg C C, et al. *SoPh*, 1999, 187: 229
- [5] Pesnell W D, Thompson B J, Chamberlin P C. *SoPh*, 2012, 275: 3
- [6] Brown D S, Nightingale R W, Alexander D, et al. *SoPh*, 2003, 216: 79
- [7] Yan X L, Qu Z Q. *A&A*, 2007, 468: 1083
- [8] Stenflo J O. *SoPh*, 1969, 8: 115
- [9] Barnes C W, Sturrock P A. *ApJ*, 1972, 174: 659
- [10] Xu Z, Yang K, Guo Y, et al. *ApJ*, 2017, 851: 30
- [11] Yan X L, Qu Z Q, Xu C L. *ApJ*, 2008, 682: L65
- [12] Brown D, Walker A. *SoPh*, 2021, 296: 48
- [13] Yan X L, Qu Z Q, Kong D F, et al. *ApJ*, 2012, 754: 16
- [14] Hardersen P S, Balasubramaniam K S, Shkolnyar S. *ApJ*, 2013, 773: 60
- [15] Li C, Fang C, Li Z, et al. *SCPMA*, 2022, 65: 289602
- [16] Qiu Y, Rao S H, Li C, et al. *SCPMA*, 2022, 65: 289603
- [17] Venazza J E, Avrett E H, Loeser R. *ApJS*, 1981, 45: 635
- [18] Qu Z Q, Xu Z. *ChJAA*, 2002, 2: 71
- [19] Rao S, Li C, Ding M, et al. *NatAs*, 2024, 8: 1102
- [20] Toriumi S, Katsukawa Y, Chueng M. *ApJ*, 2015, 811: 137
- [21] Rezaei R. *A&A*, 2018, 609: 73
- [22] Zhu C, Alexander D, Tian L. *SoPh*, 2012, 278: 121
- [23] Schuck P W. *ApJ*, 2006, 646: 1358
- [24] Liu C, Xu Y, Cao W, et al. *NatCo*, 2016, 7: 13104
- [25] Yan X L, Qu Z Q, Xu C L, et al. *RAA*, 2009, 9: 596
- [26] Min S Y, Chae J C. *SoPh*, 2009, 258: 203
- [27] Wang R, Liu Y D, Wiegmann T, et al. *SoPh*, 2016, 291: 1159
- [28] Li A, Liu Y. *SoPh*, 2015, 290: 2199
- [29] Chen J, Su J T, Yin Z Q, et al. *ApJ*, 2015, 815: 71
- [30] Cheung M, Isobe H. *LRSP*, 2014, 11: 1
- [31] Sturrock Z, Hood A W. *A&A*, 2015, 582: 76
- [32] Sturrock Z, Hood A W. *A&A*, 2016, 593: 63
- [33] Grimes R, Pinté B, Morgan H. *SoPh*, 2020, 297: 85

Multi-Wavelength Observations of Sunspot Rotation and Analysis of Influencing Factors

XIANG Chao^{1,2} XU Zhi¹ ZHAO Ming-yu¹ ZHU Bing-qian^{1,2}

(1 *Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT Sunspots represent regions of highly concentrated magnetic fields on the solar surface. Multi-wavelength observations enable the acquisition of magnetic and dynamical information across different atmospheric layers, thereby facilitating investigations into the formation of non-potential magnetic field configurations. Based on observations from the Chinese H α Solar Explorer (CHASE), which offers the advantage of multi wavelengths observations within the H α spectral window (featuring spatial co-alignment and temporal simultaneity), four sunspots exhibiting light bridge structures were analyzed to investigate their rotational characteristics in both the photosphere and chromosphere. While employing the light bridges within sunspots as tracers, particular attention was paid to the influence of light bridge evolution on the determination of rotational velocities. Key findings include: (1) analysis of all four samples revealed that the angular velocity of sunspot rotation in the line wing ($\Delta\lambda = -0.8 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda$ is the wavelength interval between the H α line core and other wavelengths) and continuum ($\Delta\lambda = -2.8 \text{ \AA}$) is consistent with angular velocities ranging approximately from $0.5 \text{ (}^\circ\text{)/h}$ to $2 \text{ (}^\circ\text{)/h}$; (2) three of the samples exhibited faster rotational velocities in the line core (chromosphere) compared to the line wing, with a velocity difference of $0.1 \text{ (}^\circ\text{)/h}$, however, dynamic evolution (e.g., morphology and brightness variations of light bridges) significantly influenced the measurements; (3) three sunspots featured radially penetrating light bridges traversing the umbra. Analysis demonstrated that one side of the light bridges displayed a rotational velocity profile characterized by “slow-fast-slow” variations with increasing radial distance across all wavelengths, while the opposite side exhibited a gradually increasing velocity trend, highlighting the non-rigid rotational nature of sunspots. It is critical to consider the effects of sunspot evolution across different spectral wavelengths for multi-band researches of sunspot rotation.

Key words Sun: activity, Sun: sunspots, techniques : imaging spectroscopy