

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2013.03.01

# 太阳半径测量与研究进展

屈智宁<sup>1,2</sup>, 李可军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 云南天文台, 昆明 650011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 太阳半径是指从太阳球心到光球层外边界的距离。测量太阳半径历史悠久, 系统性测量始于 19 世纪, 其标准值为 959.63"。主要有以下几种测量方法: (1) 子午圈测量; (2) 日食和水星凌日; (3) 望远镜漂移扫描技术; (4) 等高方法; (5) 卫星角距离测量。对于太阳半径的研究, 主要集中在以下三类观点: 一是认为太阳半径在缩小; 二是认为太阳半径基本没有变化; 三是认为太阳半径变化与一些太阳活动指数有关联, 并具有自身的运动规律。太阳半径是否变化, 如何变化, 目前尚无定论。首先介绍了太阳半径, 回顾了太阳半径的观测方法; 接着介绍了目前太阳半径的主要研究观点; 最后对将来的研究提出一些看法。

**关键词:** 太阳物理; 太阳半径; 半径测量; 半径变化

**中图分类号:** P145.2      **文献标识码:** A

## 1 引言

太阳是原始星云由于引力坍缩形成的, 太阳形成后进入主序星阶段。图 1 简要展示了太阳的演化过程, 太阳从形成到目前有 46 亿年历史。太阳进入主序星到红巨星阶段, 半径和光度随时间的增长而变大。太阳不像岩石类行星那样有一个具体明确的边界。太阳半径是指从太阳球心到光球层外边界的距离。对于太阳模型, 太阳半径是指波长  $\lambda = 5000 \text{ \AA}$  时光学深度  $\tau_{5000} = 1$  所对应的层次<sup>[1]</sup>。2000 多年前, 我国古代《周髀算经》中记载了测量太阳直径的方法<sup>[2]</sup>。这是世界上第一次测量太阳直径。19 世纪末, Auwers<sup>[3]</sup> 测得太阳半径为 959.63", 这个值后来被 IAU 公布为标准太阳半径值。从 19 世纪系统性测量太阳半径开始, 人们就用不同的仪器和方法对太阳半径究竟有多大和是否发生变化进行了研究。随着仪器精度的不断提高和测量数据的不断丰富, 人们逐步发现了太阳半径变化的一些规律。太阳半径变化涉及到太阳内部构造、辐射机制和演化等重大太阳物理问题, 同时, 它对日地关系、大气物理、空间天气等许多科学问题的研究也有着重要的理论意义和实际意义<sup>[4]</sup>。如果太阳半径变化, 那它变化的规律是什么? 变化的起因是什么? 驱动它变化的物理机制又是什么? 这些都有待深入

收稿日期: 2013-01-28; 修回日期: 2013-05-02

资助项目: 国家自然科学基金 (11273057, 11221063); 973 项目 (2012CB957801, 2011CB811406)

研究。

第 2 章回顾了历史上测量太阳半径的主要方法,介绍了各种方法的优缺点;第 3 章详细讨论了太阳半径研究的三个方面,其中重点对太阳半径变化的周期性作了分析;第 4 章对目前研究太阳半径存在的问题进行了总结,并对将来的研究提出了需要加强的几个方面。

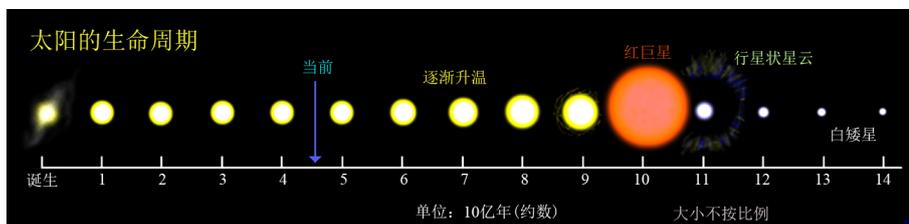


图 1 太阳主序星演化过程<sup>①</sup>

## 2 太阳半径的测量历史与方法

我国是世界上首个测量太阳直径的国家。《周髀算经》<sup>[2]</sup>中测量太阳直径的方法是:“即取竹空径一寸。长八尺。捕影而视之。空正掩日。而日应空之孔。由此观之。率八十寸。而得径一寸。故以句为首。以髀为股。从髀至日下六万里。而髀无影。从此以上至日。则八万里。以率率之。八十里得径一里。十万里得径千二百五十里。故曰。日晷径。千二百五十里”。取一根八尺长,内径为一寸的空竹竿,用这根竹竿对准太阳。当太阳过子午线时量竿影长度,此时太阳圆面刚好充满竹竿内管。当影长正为六尺时,竹管的内径和竹竿长度的比例是一寸八尺,因而认为太阳直径是日地距离的八十分之一。这个值和太阳直径是日地平均距离的一百零八分之一,非常接近。张衡在《灵宪》描述了太阳和月亮的角直径<sup>[5]</sup>:“悬象着明,莫大乎日月。其径当天周七百三十六分之一”。转换为现行的 360 度制,即  $29'.21''$ ,这与近代天文测量所得的日和月的平均角直径值  $31'.59''$  和  $31'.5''$  相比,误差仅有  $2'$ 。在当时的科学技术水平及观测条件下,这个数值是相当精确的。

法国天文学家 Picard 在蒙德极小期比较准确地测量了太阳半径,为了表彰其对太阳半径研究的贡献,法国 2010 年发射的一颗测量太阳直径的卫星以其名字命名。系统测量太阳半径始于 19 世纪,1891 年, Auwers<sup>[3]</sup>测得太阳半径为  $959.63''$ ,这个值后来被 IAU 公布为标准太阳半径值。测量太阳半径主要是通过几何原理,常用的测量方法有:(1)子午圈测量;(2)日食和水星凌日;(3)望远镜漂移扫描技术;(4)等高方法;(5)卫星角距离测量。

### 2.1 子午圈测量

通过记录太阳穿过子午圈的时间和测量天顶到太阳上边缘和下边缘的角度,这种方式是格林威治皇家天文台早期测量太阳半径的一项工作<sup>[6]</sup>。该项工作从 1836 年一直持续到

<sup>①</sup>[http://zh.wikipedia.org/wiki/File:Sun\\_Life\\_Hant.png](http://zh.wikipedia.org/wiki/File:Sun_Life_Hant.png)

1953年。在1851年以前,通过听钟摆的声音来记录太阳穿过子午圈的时间。1854年后,这种用“眼睛和耳朵”观测的方法被 chronograph 方法所取代——这种方法可以自动地记录太阳穿过子午圈的时间;该方法的引入也导致了数据具有非连续性。1891年和1906年,望远镜的物镜两次抛光,这可能会影响到观测太阳半径的图像。1915年,“impersonal micrometer”被安装到望远镜,这个装置会影响到水平太阳半径的测量。由于不同观测者测量带来的人为误差也会影响到测量值,在1861—1883年期间,有9个观测者;他们观测的垂直直径平均值误差范围达到 $4.8''$ ,水平直径误差范围达到 $2.2''$ 。1915—1949年共有7名观测者,其中5人的测量结果没有明显的变化趋势,2人的结果存在比较大的、不稳定的个人误差;因此,7人测量的平均值是逐渐减小的,给出了一个虚假的太阳半径减小的趋势。此外,该方法受天气和观测条件的限制,比如“云层遮挡 (through cloud)”,“不稳定性 (unsteady)”,“定义不明确 (ill defined)”,“糟糕的图像 (poor image)”,“定义极其不好 (definition extremely bad)”等因素。因此,子午圈测量不适合研究太阳半径的可能变化。

## 2.2 日食和行星凌日

日食和行星凌日现象测量太阳半径的原理类似,都是利用月球、地球和行星公转运动原理进行测量。日食是月球运动到太阳和地球中间,三者正好处在同一条直线时,月球挡住太阳射向地球的光,月球身后的黑影正好落到地球上,这时发生日食现象。假定太阳、月球都是理想的球体,由于它们的距离已知,通过精确测定4次接触时刻,可以计算出太阳半径大小。太阳及月球边缘的相对距离,以每秒 $0.5''$ 的速率运动,接触时刻的测量精度如果能达到十分之一秒的量级,则太阳半径的测定精度就会高于 $0.1''$ <sup>[7]</sup>。利用日食现象测量太阳半径,运用最多的是贝利珠事件。贝利珠 (Baily's beads) 是发生日食期间,当月球遮掩太阳光球时,由于月球表面凹凸不平,日光仍可透过凹处发射出来,形成类似珍珠的明亮光点,因英国天文学家贝利于1836年首先观测而得名。通过测量贝利珠出现和消失的时间可以估算太阳半径的变化,并且精度能达到 $0.01''$ 。 $0.1''$ 在月面上的线长度约为190 m,但在月面上,真实边缘与平均边缘的最大偏差可达 $\pm 2''$ ,远大于190 m。因此,测量太阳半径,需要精确知道月球边缘地形,精度要高于190 m,一般这是难以实现的。但在食带界限附近来进行测量,情况能得到极大改善,因为:(1)由于几何上的原因,月球光学天平动对接触时刻的影响,在月球极区比月球其他地区的影响要低得多;(2)最近几十年来,长期的擦边月掩星的观测,使得对月球极区地形的改正有了很大的提高。因此,当日全食或日环食时,在食带南、北界限附近来进行观测,可以为太阳半径变化的测定提供宝贵的资料<sup>[7]</sup>。Dunham<sup>[8]</sup>分析了1715, 1976及1979年所发生的3次日食,发现从1976年到1979年,太阳半径几乎没有变化;但1715—1979年,半径减小了 $0.34'' \pm 0.2''$ 。Parkinson等人<sup>[6]</sup>在1980年系统研究了1715, 1842, 1851, 1878, 1900, 1925和1966年的日食。1987年9月23日的日环食,上海天文台的两个观测队在环食带的南、北界限附近进行测量;他们把太阳半径改正数的测量值和之前4次日食作了比较,结果表明从1715到1987年,太阳半径有缩小的趋势<sup>[7]</sup>。Adassuriya等人<sup>[9]</sup>研究了2010年1月15日的日环食,结果显示半径改正数为 $0.26'' \pm 0.18''$ ,和太阳活动周没有关联。Kilcik<sup>[10]</sup>系统地总结了1715—2006年主要的日食观测太阳半径的改正数,见表1。

表 1 太阳半径改正数<sup>[10]</sup>

日期	日食类型	半径改正数
3 May 1715	Total	0.48'' ± 0.2''
24 Jan. 1925	Total	0.51'' ± 0.08''
20 May 1966	Hybird	-0.22'' ± 0.2''
7 Mar. 1970	Total	0.11'' ± 0.008''
30 June 1973	Total	0.21'' ± 0.0015''
23 Oct. 1976	Total	0.04'' ± 0.07''
26 Feb. 1979	Total	-0.11'' ± 0.05''
16 Feb. 1980	Total	-0.03'' ± 0.03''
16 Feb. 1980	Total	0.21'' ± 0.012''
4 Feb. 1981	Annular	-0.02'' ± 0.03''
11 June 1983	Total	0.09'' ± 0.02''
30 May 1984	Hybrid	0.23'' ± 0.04''
30 May 1984	Hybrid	0.09'' ± 0.04''
23 Sep. 1987	Annular	-0.11'' ± 0.03''
11 July 1991	Total	0.09'' ± 0.10''
11 July 1991	Total	0.25'' ± 0.008''
10 May 1994	Annular	-0.27'' ± 0.02''
24 Oct. 1995	Total	0.14'' ± 0.03''
26 Feb. 1998	Total	0.16'' ± 0.05''
11 Aug. 1999	Total	-0.06'' ± 0.06''
4 Dec. 2002	Total	-0.21'' ± 0.05''
29 Mar. 2006	Total	-0.41'' ± 0.04''

水星凌日 (transit of Mercury) 和金星凌日 (tansits of Venus) 发生的原理与日食相似。水星或金星运行到太阳和地球之间, 三者恰好一条直线上时, 水星或金星挡住部分日面, 在地球上可以观察到太阳上有一个小黑斑在缓慢移动, 这种现象称为水星或金星凌日。测量者通过记录水星或金星经过太阳圆面的时间, 利用日地距离, 水星到地球距离等参量可以计算出太阳半径。水星凌日大约每百年发生 13 次, 通过水星凌日方法测量太阳直径有超过 300 年的历史。Morrison 和 Ward<sup>[11,12]</sup> 在 1975 年总结了过去 250 年里发生的 30 次水星凌日。过去测量太阳直径的历史中, 主要是通过水星凌日现象测量的。水星凌日是一种精度很高的测量太阳半径的方法, 根据地球和水星公转轨道, 水星凌日现象发生在 5 月或者 11 月, 并且在 5 月最长的持续时间 (穿越太阳圆面) 是 8 小时, 在 11 月是 6 小时。如果记录水星刚接触太阳边缘的时间能精确到 1 s, 那么获得的太阳半径的分辨率能达到 0.1''。但是, 由于观测者分辨水星第一次接触太阳边缘的难度高, 每次观测值的标准偏差能达到 0.5'' ~ 1''<sup>[6]</sup>。

水星凌日测量太阳半径的研究, 结论没有得到统一的认识。Shapiro<sup>[13]</sup> 认为太阳半径缩小。Parkinson 等人<sup>[6]</sup>, Parkinson<sup>[14]</sup> 以及 Gilliland<sup>[15]</sup> 认为太阳半径变化 100 年不超过 0.1'', 半径的变化具有一个 80 年的周期。Sveshnikov<sup>[16]</sup> 发现太阳半径变化具有 80 年和 11 年变化周

期。Emilio 等人<sup>[17]</sup>用 Michelson Doppler Imager (MDI) 对 2003 年 5 月 7 日和 2006 年 11 月 8 日的水星凌日测量了太阳半径, 这是水星凌日测量太阳半径历史上第一次从太空高精度测量, 他们的测量值为  $960.12'' \pm 0.09''$ 。通过水星和金星凌日现象测量太阳半径记录的历史较长, 但是受观测时间的限制, 无法进行频繁的测量, 所得数据是零星的。

### 2.3 望远镜漂移扫描技术

望远镜漂移扫描 (drift-scan) 技术, 也称为时间延迟积分 (time delay integration, TDI) 读出技术。利用 CCD(charge-coupled device) 电荷逐步转移的原理, 通过时序电路控制电荷沿列方向并行转移的速度 (由垂直时钟 V-CLOCK 实现) 和沿行方向串行读取数据的速度 (由水平时钟 H-CLOCK 实现), 使得并行转移的速度和目标漂移速度的大小相匹配; 在电荷累积的同时实现电荷跟踪的目的, 由于 CCD 光敏面上的目标像和 CCD 的电子图像之间没有相对运动, 这样就使得在 CCD 光敏面上所成的像跟随目标一起漂移, 从而可得到运动天体良好的圆星像<sup>[18]</sup>。Wittmann 等人将该技术运用于测量太阳半径<sup>[19-21]</sup>。Wittmann 等人<sup>[22]</sup>在 1990 年 7 月到 10 月测量太阳半径 1122 次 (其中在 Izana 测量 472 次, 在 Locarno 测量 650 次), 测得平均太阳半径  $R = 960.56'' \pm 0.03''$  (Izana:  $960.51''$ , Locarno:  $960.59''$ )。他们的研究表明太阳半径变化的振幅不会超过  $0.3''$ 。Wittmann<sup>[23]</sup>运用 CCD 和 visual 漂移扫描技术测量了 1996 年 4 月 30 日到 1996 年 7 月 20 日的太阳半径, 其中 CCD 漂移扫描技术测得的值为  $R = 959.73'' \pm 0.05''$ , 和用光电测量太阳半径的值吻合得很好: Maier 等人<sup>[24]</sup>测得  $R = 959.60'' \pm 0.12''$ , Neckel<sup>[25]</sup>测得  $R = 959.62'' \pm 0.03''$ ; visual 漂移扫描技术测量值为:  $R = 960.53'' \pm 0.02''$ , 这个值和 Wittmann 等人<sup>[26]</sup>1990—1992 年在 Izana 测得太阳半径值  $R = 960.57'' \sim 960.61''$  一致。Wittmann 等人<sup>[27]</sup>对太阳半径进行了长期测量, 其中在 Izana (1990—2000 年) 测得的平均值为  $R = 960.63'' \pm 0.02''$ ; 在 Locarno (1990—1998 年) 测得的平均值为  $R = 960.63'' \pm 0.02''$ 。望远镜漂移扫描技术的优点是可以连续观测太阳半径, 缺点是观测受大气扰动、大气折射和测量太阳边缘方法的影响, 所得结果弥散度大。

### 2.4 等高方法

法国 Calern 天文台的 Laclare<sup>[28,29]</sup>从 1976 年开始用 Danjon 等高仪对太阳半径进行了测量。徐家岩等人<sup>[4]</sup>概括其测量原理: 在同一等高圈上分别观测太阳上边缘和下边缘过该等高圈的时刻。为提高观测精度, 应在太阳的每个边缘过等高圈前后上边缘和下边缘进行多次记录, 并把这些记录都归算到其边缘与等高圈相切的时刻, 再取它们的平均值。假定太阳的上边缘过等高圈的平均时刻为  $T_u$ , 下边缘过同一等高圈的平均时刻为  $T_d$ , 通过下式就可以得到  $T_u, T_d$  时刻太阳中心的天顶距:

$$\begin{cases} Z_u = \arccos(\sin \phi \sin \delta_{\odot u} + \cos \phi \cos \delta_{\odot u} \cos t_{\odot u}) \\ Z_d = \arccos(\sin \phi \sin \delta_{\odot d} + \cos \phi \cos \delta_{\odot d} \cos t_{\odot d}) \end{cases}, \quad (1)$$

这里,  $t_{\odot u} = \alpha_{\odot u} - S_u$ ,  $t_{\odot d} = \alpha_{\odot d} - S_d$ ,  $S_u, S_d$  为与  $T_u, T_d$  相对应的地方恒星时,  $\alpha_{\odot u}, \delta_{\odot u}$  和  $\alpha_{\odot d}, \delta_{\odot d}$  为与  $T_u, T_d$  时刻相对应的太阳的视赤经和视赤纬。由式 (1) 可得太阳的直径:  $d_{\odot} = Z_u - Z_d$ 。

在计算式 (1) 时, 除了考虑大气折射的影响外, 还要对星径曲率进行改正。虽然太阳的视圆面很大, 但由于测量的是太阳的上、下边缘过同一等高圈的时刻, 所以大气折射改正是对

同一天顶距进行的,故大气折射系数误差的影响是较小的,可忽略。在此基础上,徐家岩等人<sup>[4]</sup>提出用光电等高仪测量太阳半径的两种方案(单像方案和双像方案),并进行了模拟计算,结果表明两种方案都能优于 $0.1''$ 的精度。

法国 Calern 天文台测量的太阳半径数据在测量太阳半径历史上是最长的,有相对比较连续的一组数据(1976—2006年),这组数据被广泛用于太阳半径周期性分析(见后文)。Golbasi 等人<sup>[30]</sup>主要总结了漂移扫描方法和等高方法测量太阳半径的结果,见表 2。

## 2.5 卫星角距离测量

目前主要有两颗卫星在测量太阳半径,它们是 SOHO/MDI<sup>[44,45]</sup> 和 Picard 卫星。卫星观测的优点是避免了大气扰动和季节性因素的影响,因此观测值更加精确,连续性更好。MDI 利用太阳理论模型,通过观测太阳  $f$  模振荡,得到日震半径。MDI 测量的数据具有高稳定性、低噪声的特点,测量的日震半径对应于光球层以下 5000 ~ 10000 km 的高度范围,不同于太阳球心到光球层表面测量的太阳半径,两者不能直接进行比较<sup>[46]</sup>。Schou<sup>[47]</sup> 分析了 MDI 观测的  $f$  模频率,指出用 MDI 观测的太阳日震半径为  $R = (695.68 \pm 0.03) \text{ Mm}$ ,这个值比太阳半径标准值  $R = (695.99 \pm 0.07) \text{ Mm}$  小了近 300 km。Emilio 等人<sup>[48]</sup> 将傅里叶平滑过的黑子数, CERGA 天文台的地面望远镜观测的太阳半径和用 SOHO/MDI 观测的太阳半径做了对比,发现 MDI 观测的太阳半径的振幅远小于 CERGA 天文台地面望远镜观测的太阳半径。Sofia 等人<sup>[49]</sup> 指出光球层半径变化远大于光球层以下 5 Mm 的太阳半径变化。Kuhn 等人<sup>[45]</sup> 研究 MDI 太阳半径数据得出,太阳半径的年变化不会超过  $15 \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1}$ 。同样, Bush 等人<sup>[50]</sup> 研究表明日震半径变化不超过  $1.2 \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1}$ 。Emilio 等人<sup>[51]</sup> 用 MDI 测得太阳半径  $R = 959.28'' \pm 0.15''$ ; 这个值比地面望远镜测得的值略微偏小,但和 Schou<sup>[47]</sup> 测量的值吻合得很好。Picard 卫星于 2010 年 6 月 15 日发射,其主要目标是为了更精确地同步测量太阳辐照度(TSI)、太阳半径和太阳边缘轮廓,并且通过日震方法研究太阳内部情况。Picard 卫星里面的太阳直径和表面成像仪每分钟测量一次太阳直径,其精度能达到几个千分之角秒<sup>[46]</sup>。我们也期待 Picard 卫星测量的数据能精确地给出太阳半径变化的特征。

## 3 太阳半径变化的研究现状

对于太阳半径变化的研究,归纳起来主要有以下 3 类。

### 3.1 太阳半径在缩小

Eddy 和 Boornazian<sup>[52]</sup> 在 1979 年指出太阳半径从 1836 年到 1953 期间,每百年减小  $2.25''$ 。Dunham<sup>[8]</sup> 分析了 1715, 1976 及 1979 年发生的 3 次日食,发现 1715—1979 年,半径减小了  $0.34'' \pm 0.2''$ 。1987 年 9 月 23 日的日环食,上海天文台的观测结果和之前 4 次日食作比较,结果表明 1715—1987 年,太阳半径有缩小的趋势<sup>[7]</sup>。Dziembowski<sup>[53]</sup> 研究 MDI 测量的  $f$  模,发现 1996—2001 年,日震半径每年减小 1.5 km。Sigismondi<sup>[54]</sup> 通过研究日食方法测量的太阳半径,指出从 1925 年到现在,太阳半径减小了  $-0.50''$ 。

表 2 不同仪器和方法测量的太阳半径值<sup>[30]</sup>

仪器	备注	个数	年份	结果	参考文献
Solar Diameter Monitor (photoelectrical) FFTD			1981—1987	$959.68'' \pm 0.02''$	[31]
Limb-Darkening Scans		72	1981—1990	$959.62'' \pm 0.03''$	[25]
Solar Disk Sextant		1 fly	1990	$959.60'' \pm 0.12''$	[24]
FFTD		1 fly	1992	$959.53'' \pm 0.09''$	[32]
Solar Visual Astrolabe Malatya Observatory		34 16	1993 1994	$959.51'' \pm 0.09''$ $959.38'' \pm 0.15''$	[33]
Solar Visual Astrolabe Malatya Observatory	2 prisms	170	1993—1996	$959.44'' \pm 0.05''$	[34]
Drift-Scan CCD		126	1996	$959.73'' \pm 0.05''$	[23]
Drift-Scan Visual		427	1996	$960.53'' \pm 0.02''$	
Solar Visual Astrolabe Santiago Observatory	2 prisms	123 120	1996 1997	$959.85'' \pm 0.03''$ $960.00'' \pm 0.03''$	[35]
Solar CCD Astrolabe	East	3500	1996—1997	$959.20'' \pm 0.02''$	[36]
Variable Angle Prism without rotating shutter Rio de Janeiro Observatory	West	2600	1996—1997	$959.14'' \pm 0.03''$	[37]
Calern Solar Astrolabe					
CCD Derivative		348	1996—1997	$959.45'' \pm 0.01''$	[38]
CCD Wavelet+Derivative		348	1996—1997	$959.53'' \pm 0.01''$	[39]
CCD Model		409	1996—1997	$959.64'' \pm 0.02''$	[40]
CCD Derivative		409	1996—1997	$959.63'' \pm 0.08''$	[38]
CCD Derivative		592	1996—1998	$959.59'' \pm 0.01''$	[38]
Visual		418	1996—1998	$959.60'' \pm 0.01''$	[41]
Solar CCD Astrolabe full pupil(without shutter) San Fernando Observatory	optical square	100	1998	$959.33'' \pm 0.04''$	[42]
Solar CCD astrolabe Rio de Janeiro Observatory		1997 2280	1998 1999	$959.19'' \pm 0.03''$ $958.94'' \pm 0.03''$	[43]
Antalya Solar CCD astrolabe					
CCD derivative		94 392	1999 2000	$958.60'' \pm 0.04''$ $958.68'' \pm 0.02''$	
CCD derivative		486	1999—2000	$959.03'' \pm 0.07''$	[30]

### 3.2 太阳半径不变

Parkinson 等人<sup>[6]</sup>认为 Eddy 和 Boornazian 的结果是由于不同观测者造成的,他们分析的结果认为太阳半径没有变化。Wittmann<sup>[55]</sup>应用光学和光电漂移扫描技术于 1972—2002 年间分别在 Locarno 和 Izana 测量了太阳半径,结果显示不论长期或者短期,半径的波动都没有超过  $\pm 0.05''$ 。Neckel<sup>[25]</sup>分析了基特峰国家天文台 1981 年和 1986—1990 年太阳半径数据,得出太阳半径几乎没有发生变化。Bush 等人<sup>[50]</sup>研究表明日震半径变化不超过  $1.2 \text{ mas} \cdot \text{a}^{-1}$ ,如此小的波动表明太阳半径几乎没有发生任何变化。

太阳半径变小和不变的观测结果主要是观测误差、大气扰动、人为误差和使用不同观测仪器造成<sup>[45,56]</sup>。

### 3.3 太阳半径变化与太阳活动指数有一定关联,并具有自身运动规律

Parkinson 等人<sup>[6]</sup>, Parkinson<sup>[14]</sup>, Gilliland<sup>[15]</sup>根据 1736—1980 年 30 次水星凌日,发现太阳半径变化有一个 80 年的周期,和 Gleissberg 周期同相位。Sveshnikov<sup>[16]</sup>在 2002 年做了类似的工作,他研究了 1631—1973 年的水星凌日,发现太阳半径变化具有 80 年和 11 年周期;其中,80 年周期的振幅为  $0.24'' \pm 0.05''$ ,11 年周期的振幅为  $0.08'' \pm 0.02''$ 。

土耳其 TUBITAK 天文台在 2000—2007 年观测太阳半径,每年得到 550 个独立观测值。2005 年, Kilic 等人<sup>[57]</sup>对 2001—2003 年的数据进行系统性修正 (Fried 参数和定点距离)后,得到太阳半径均值为  $959.29'' \pm 0.01''$ ;把太阳半径和黑子数月平均数据对比研究后发现,它们呈反相位关系,太阳半径每年增加  $0.017''$ ,而黑子数每年递减。

2011 年, Kilic 和 Golbasi<sup>[58]</sup>分析 TUBITAK 天文台 2000 年 2 月 26 日到 2007 年 10 月 26 日数据,对太阳半径变化做了短周期研究,他们用日期补偿离散傅里叶变化方法对数据进行了频谱分析,太阳半径的功率谱给出一个显著的 25.7 天周期,  $0.034''$  振幅。这个周期与太阳黑子数自转周期的 26.2 天和太阳黑子面积自转周期的 26.7 天很接近;此外,这个周期与太阳活动基本周期 25.5 天也是一致的。由此,他们认为太阳半径变化具有和太阳黑子数、黑子面积类似的周期。

Kilic 和 Golbasi<sup>[59]</sup>同年用相同的数据比较了太阳半径和黑子、耀斑指数的长期趋势,计算了太阳半径和黑子、耀斑的线性相关系数。结果表明:太阳半径和太阳黑子、黑子面积、 $H_{\alpha}$  耀斑指数呈明显的线性反相关关系。其中,太阳半径和黑子数呈现最强烈的反相关,相关系数为  $-0.7676$ ;与黑子面积的相关系数为  $-0.6365$ ;与  $H_{\alpha}$  耀斑指数的相关系数为  $-0.4975$ 。

2002 年, Reis Neto 等人<sup>[60]</sup>研究了 Rio de Janeiro 天文台 1998—2000 年太阳半径 9112 个独立观测数据,数据排除孤立观测值和系统误差后,呈现很好的正态分布,标准偏差为 0.566,运用傅里叶变化卷积算法得到太阳半径变化具有显著的 515 天周期,振幅为  $0.06''$ 。

法国 Calern 天文台从 1975 年开始测量太阳半径,一直持续到 2006 年,横跨了近 3 个太阳周。测量者 Laclare<sup>[29]</sup>分析了 1978—1994 年的数据,得出太阳半径具有 1000 天周期和 10.4 年周期,两个周期的振幅均为  $0.2''$ ;其中 1000 天周期为准两年振荡,10.4 年周期和太阳周吻合,其相位与太阳磁场活动呈反相位。Moussaoui 等人<sup>[60]</sup>在 2001 年利用最小二乘法 (least-squares) 和去卷积 (deconvolution) 两种方法对 1975—1996 年数据进行了周期研究,其

中最小二乘法计算结果为: 3823 d(10.47 a), 348, 946, 1863 和 121.9 d; 去卷积方法计算的结果为: 4096 d(11.22 a), 2048, 910, 357, 264.3, 122.3, 52.1 和 27.7 d。屈智宁等人<sup>[61]</sup>选取了 1975—2006 年整个观测数据中最好的一段 (1978—2000 年) 进行研究。首先, 用 Dixon 准则剔除异常数据; 其次, 将处理后的太阳半径月平均数据与太阳黑子月平均数据进行相关性分析, 结果表明呈反相关关系; 最后, 运用 Lomb-Scargle 和日期补偿离散傅里叶变化方法对每日太阳数据值进行了周期性分析, 得出具有统计意义的 3 类主要周期: 1 a, 2.6 a, 11 a。并对 3 类周期进行了物理原因的解釋: 1 a 周期可能是地球公转引起的; 2.6 a 是准两年振荡现象 (QBO), 这个周期可能是由对流层底层引起的; 11 a 周期可能是由于对流层底层磁流管磁压的周期变化引起的。

2005 年, Lefebvre<sup>[62]</sup> 等人用日震学研究了太阳表层以下的分层结构。他们的数据来源于 SOHO/MDI。以前的研究认为在太阳表面以下, 半径变化随深度是不变的, 但是他们认为半径变化在不同深度的改变量是不一样的。他们运用 Dziembowski 和 Goode<sup>[63]</sup> 在 2004 年建立的  $f$  模相对频率变化  $\delta\nu/\nu$  和太阳半径次表层 Lagrangian 扰动  $\delta r/r$  关系:

$$\left(\frac{\delta\nu}{\nu}\right)_l = -\frac{3l}{2\omega^2 I} \int dl \frac{g}{r} \frac{\delta r}{r}, \quad (2)$$

其中  $l$  是  $f$  模的自由度,  $I$  是内核的动量,  $\omega$  是本征频率,  $g$  是重力加速度。

他们使用了  $l$  范围从 150 到 250 的模式, 限制了数据的输入。这样的做法比其他模式更精确, 所得结果很有趣 (图 2):

(1) 日震半径在太阳次表层  $0.97 R_\odot$  以内没有显著的变化。

(2) 在  $0.975 R_\odot$  到  $0.99 R_\odot$ , 太阳半径变化和太阳活动 11 年周期呈正相关; 在  $0.99 R_\odot$  到  $0.995 R_\odot$ , 太阳半径变化和太阳活动 11 年周期呈强烈的反相关。

(3) 表层的变化与太阳活动呈反相关, 具有 2 km 的振幅。

对太阳半径变化周期性的研究, 其显著性的周期, 概括起来讲, 主要有以下几类:  $25.7 \text{ d}$ <sup>[58]</sup>,  $1 \text{ a}$ <sup>[29, 60, 61]</sup>,  $1000 \text{ d}$  ( $2.6 \text{ a}$ )<sup>[29, 60, 61]</sup>,  $11 \text{ a}$ <sup>[16, 29, 60, 61]</sup>,  $80 \text{ a}$ <sup>[6, 14, 15]</sup>。而类似的一些周期, 在其他一些太阳活动指数中也被发现过,  $25.7 \text{ d}$  与黑子数的  $26.2 \text{ d}$  和黑子面积的  $26.7 \text{ d}$  非常接近;  $1 \text{ a}$  周期在总太阳黑子面积, 黑子 blocking 函数, 射电辐射流量, zurich 黑子<sup>[64, 65]</sup>, 太阳辐照<sup>[66]</sup> 中也曾发现;  $1000 \text{ d}$  ( $2.6 \text{ a}$ ) 周期在太阳磁场<sup>[67]</sup>, 太阳暗条<sup>[68]</sup>, 太阳黑子数<sup>[69]</sup>, 太阳半球耀斑活动区<sup>[70]</sup> 有所发现;  $11 \text{ a}$  也在长周期的年黑子群数, 黑子面积<sup>[71]</sup>, 太阳辐照<sup>[66]</sup> 中被发现。这表明太阳半径变化具有和一些太阳活动指数相同或者类似的周期, 尤其与太阳黑子数, 黑子面积, 辐照具有很多相同的周期。太阳半径变化与它们之间的联系还有待进一步研究。

另一方面, 太阳作为一个自转的流体球, 距离太阳中心不同距离处, 密度和自转角速度等都不一样, 高速的旋转使得太阳具有一定的扁率。假定太阳是一个均匀、各向同性的, 并且绕对称轴旋转的理想流体球, 李增林<sup>[72]</sup> 计算得到太阳表面方程为:

$$\frac{GM_\odot}{R} + \frac{\omega^2 R^2 \sin^2 \theta}{2} = \frac{GM_\odot}{R_0}, \quad (3)$$

其中  $M_\odot$  为太阳质量,  $\theta$  为太阳表面任一点的矢径 (以太阳中心为原点) 与极轴间的夹角,  $R_0$

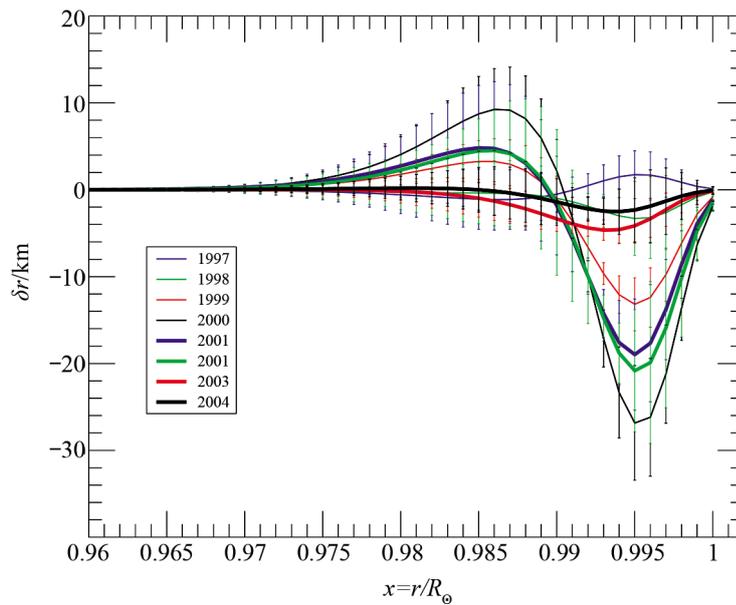


图2 半径的变化 ( $\delta r$ ) 与半径分数  $x = r/R_{\odot}$  的关系<sup>[62]</sup>

为太阳表面极点半径。在上式中, 如果太阳不自转, 即  $\omega = 0$ ,  $R = R_0$ , 说明在这种情况下, 太阳为正圆球。在太阳以角速度  $\omega$  自转情况下, 则太阳表面方程为:

$$R = R_0 \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{\omega^2 R_0^3}{GM_{\odot}} \sin^2 \theta \right), \quad (4)$$

这表明, 由于太阳的自转, 使得它成为一个旋转椭球。可以算得其半长轴和半短轴为:

$$\begin{cases} a_{\odot} = R_0 \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{\omega^2 R_0^3}{GM_{\odot}} \right) \\ b_{\odot} = R_0 \end{cases}, \quad (5)$$

从而太阳的扁率为:

$$\varepsilon_{\odot} = \frac{a_{\odot} - b_{\odot}}{b_{\odot}} = \frac{1}{2} \frac{\omega^2 R_0^3}{GM_{\odot}}. \quad (6)$$

观测结果表明太阳表面以  $\omega = 2\pi/25$  d 转动, 将此数据及其它数据代入式 (6), 求得  $\varepsilon_{\odot} = 1.108 \times 10^{-5}$ 。对太阳扁率的研究可以追溯到 1865 年<sup>[73]</sup>, 早期的观测由于测量仪器、人为误差等原因, 有的结果与理论计算不符, 即太阳赤道半径小于极区半径<sup>[74]</sup>; 有的测量结果数量级明显高了一级:  $1.78 \times 10^{-4}$ <sup>[75]</sup>,  $5.63 \times 10^{-4}$ <sup>[76]</sup>。从 20 世纪 60 年代到现在的半个世纪, 地面仪器和空间设备的观测结果也没有得出统一的认识。一些学者对这一期间的测量数据做了研究。Damiani 等人<sup>[77]</sup> 对 1967 年到 2009 年太阳扁率数据做了研究, 把数据分为两组, 其中一组观测时间为 1967 年到 1996 年, 另外一组观测时间为 1996 年到 2009 年。第一组研究结果

证实, 20 世纪 60 年代到 90 年代末一些观测者的测量结果与光斑面积指数之间呈现相同相位关系; 第二组结果得出, Pic du Midi 天文台的数据表明太阳扁率与太阳活动相位相同。Fivian 等人<sup>[78]</sup>也做过类似的研究。Kuhn 等人<sup>[79]</sup>分析了长时期高空间分辨率的空间设备数据, 认为太阳扁率形状是稳定的, 基本不受太阳活动周影响, 并且测量的太阳扁率比理论预期的要小。

## 4 总结与展望

以上简要介绍了历史上测量太阳半径及研究太阳半径变化的一些进展, 人们使用了不同的仪器测量太阳半径值, 并用不同的方法研究分析了太阳半径的可能变化, 以便弄清楚太阳半径的变化规律。由于早期测量设备精度不高, 加上人为误差等原因, 测量太阳半径的早期数据可信度不高。在现代, 一些精度相对较高的地面望远镜也用于观测, 但是由于季节性因素, 观测的数据连续性不好, 并且还受到大气扰动等因素的影响。不同仪器测量的太阳半径结果有的彼此矛盾。比如, 法国 Calern 天文台的数据结果表明太阳半径变化与太阳活动呈反相关, 而智利 Santiago 天文台以及阿根廷 San Fernando 天文台的数据结果表明太阳半径变化与太阳活动呈正相关。造成这样的差异有多种因素: 地球大气层的扰动, 观测谱域, 仪器的稳定性, 人为误差, 数据过滤技术等。

为尽量克服这些困难, 提高测量精度, SOHO/MDI 和 Picard 等卫星相继发射升空, 其中一个重要任务就是高精度测量太阳半径。MDI 已经观测了近一个太阳周的日震半径数据, 对了解太阳内部做出了重要贡献; 但日震半径与传统的太阳半径不能直接进行比较, 它们之间的区别和联系还有待进一步研究。2010 年发射的 Picard 卫星上的太阳直径和表面成像仪每分钟测量一次太阳直径, 精度能达到几个千分之角秒; 这也标志着太阳半径的观测进入高精度时代。另一方面, 对于太阳半径的研究, 以往主要是通过测量其具体值来研究半径的变化规律。这样做法是把半径作为一个“刚性值”, 即认为太阳半径表面以下, 半径不会随深度而改变。而近年来日震学对日震半径的研究, 则认为半径变化在太阳内部不同深度的改变量是不一样的, 即日震半径的值是各个深度改变量的累加结果。每个深度的小尺度改变量都会影响到日震半径值, 从这个角度讲, 太阳半径的研究也进入了一个更深入、更细分的层次。要从历史数据和近年来短期观测中总结出太阳半径变化的规律, 是很困难的。我们需要进行更长时间的高精度观测, 并与太阳振荡、日震学、太阳辐照 (TSI) 等参量联系起来, 寻求彼此之间相关性的物理依据, 这样才能总结出太阳半径变化的规律。

### 参考文献:

- [1] 林元章. 太阳物理导论. 北京: 科学出版社, 2000: 252
- [2] 周髀算经. 上海图书馆藏宋代嘉定六年本影印. 文物出版社, 1980: 32
- [3] Auwers A. Astron.Nachr, 1891, 128: 361

- [4] 徐家岩, 徐劲, 胡辉等. 天文学报, 1993, 34: 385
- [5] 张衡. 灵宪. 东汉, 引于后汉书, 刘昭著
- [6] Parkinson J H, Morrison L M, Stephenson F R. *Nature*, 1980, 288: 548
- [7] 万籁, 赵君亮, 储宗元等. 中国日环食观测研究文集. 北京: 科学出版社, 1990
- [8] Dunham D W, Sofia S, Fiala A D, et al. *Science*, 1980, 210: 1243
- [9] Adassuriya J, Gunasekera S, Samarasingha N. *Sun and Geosphere*, 2011, 6: 17
- [10] Kilcik A, Sigismondi C, Rozelot J P, et al. *Sol. Phys*, 2009, 257: 237
- [11] Morrison L V, Ward C G. *Royal Greenwich Observatory Bulletins*, 1975, 181: 359
- [12] Morrison L V, Ward C G. *MNRAS*, 1975, 173: 183
- [13] Shapiro I I. *Science*, 1980, 208: 51
- [14] Parkinson J H. *Nature*, 1983, 304: 518
- [15] Gilliland R L. *ApJ*, 1981, 248: 1144
- [16] Sveshnikov M L. *Astronomy Letters*. 2002, 28: 115
- [17] Emilio M, Kuhn J R, Bush R I, et al. *ApJ*, 2012, 750: 135
- [18] 毛银盾, 唐正宏, 郑义劲等. 天文学进展. 2005, 23: 304
- [19] Wittmann A. *Sol. Phys*, 1980, 66: 223
- [20] Wittmann A. *Mitteilungen der Astronomischen Gesellschaft Hamburg*. 1980, 48: 25
- [21] Wittmann A D, Bonetime Navarro J A, Wohl H. *The Physics of Sunspots*. New Mexico: Sacramento Peak Observatory, 1981: 424
- [22] Wittmann A D, Alge E, Bianda M. *Sol. Phys*, 1991, 135: 243
- [23] Wittmann A D. *Sol. Phys*, 1997, 171: 231
- [24] Maier E, Twigg L, Sofia S. *ApJ*, 1992, 389: 447
- [25] Neckel H. *Sol. Phys*, 1995, 156: 7
- [26] Wittmann A D, Alge E, Bianda M. *Sol. Phys*, 1993, 145: 205
- [27] Wittmann A D, Bianda M. *The Solar Cycle and Terrestrial Climate, Solar and Space weather*, 2000, 463: 113
- [28] Laclare F, Merlin, G. *Academie des Sciences Paris Comptes Rendus Serie B Sciences Physiques*, 1991, 313: 323
- [29] Laclare F, Delmas C, Coin J P, et al. *Sol. Phys*, 1996, 166: 211
- [30] Golbasi O, Chollet F, Kilic H, et al. *A&A*, 2001, 368: 1077
- [31] Brown T M, Christensen-Dalsgaard J. *ApJ*, 1998, 500: L195
- [32] Sofia S, Heaps W, Twigg L W. *ApJ*, 1994, 427: 1048
- [33] Golbasi O, Kilic H, Chollet F. *Turkish J. Phys*, 2000, 24(2): 77
- [34] Kilic H. Ph.D. Thesis, Antalya: Akdeniz University, 1998
- [35] Noel F. *A&AS*, 1998, 132: 195
- [36] Jilinski E G, Puliaev S P, Penna J L, et al. *A&AS*, 1998, 130: 317
- [37] Jilinski E G, Puliaev S, Penna J L, et al. *A&AS*, 1999, 135: 227
- [38] Sinceac V. These de Doctorat, Paris: Observatoire de Paris, 1998
- [39] Irbah A. private communication, 1998
- [40] Chollet F, Sinceac V. *A&AS*, 1999, 139: 219
- [41] Laclare F, Delmas C, Sinceac V, et al. *C. R. Acad. Sci. Paris Serie B*, 1999, 327: 645
- [42] Sanchez M. private communication, 1999
- [43] Puliaev S, Penna J L, Jilinski E G, et al. *A&AS*, 2000, 143: 265
- [44] Scherrer P H, Bogart R S, Bush R I, et al. *Sol. Phys*, 1995, 162: 129
- [45] Kuhn J R, Bush R I, Emilio M, et al. *ApJ*, 2004, 613: 1241
- [46] Thuillier G, Sofia S, Haberleiter M. *Advances in Space Research*, 2006, 37: 439
- [47] Schou J, Kosovichev A G, Goode P R, et al. *ApJ*, 489: L197
- [48] Emilio M, Kuhn J R, Bush R I, et al. *ApJ*, 2000, 543: 1007
- [49] Sofia S, Basu S, Demarque P, et al. *ApJ*, L147: L150
- [50] Bush R I, Emilio M, Kuhn J R. *ApJ*, 2010, 716: 1381
- [51] Emilio M, Kuhn J R, Bush R I. *IAU Symposium*, 2010, 264: 21

- [52] Eddy J A, Bormazian A A. BAAS, 1979, 11: 437
- [53] Dziembowski W A, Goode P R, Schou J. ApJ, 2001, 553: 897
- [54] Sigismondi, C. American Institute of Physics Conference Series, 2008, 1059: 183
- [55] Wittmann A D. Astron. Nachr. 2003, 324: 378
- [56] Reis Neto E, Andrei A H, Penna J L, et al. Sol. Phys, 2003, 212: 7
- [57] Kilic H, Golbasi O, Choliet F. Solar Phys, 2005, 229: 5
- [58] Kilic H, Golbasi O. Ap&SS, 2011a, 334: 75k
- [59] Kilic H, Golbasi O. Sol. Phys, 2011b, 270: 437
- [60] Moussaoui R, Irbah A, Fossat E, et al. A&A, 2001, 374: 1100
- [61] Qu Z N, Xie J L. ApJ, 2013, 762: 23
- [62] Lefebvre S, Kosovichev A G. ApJ, 2005, 633: L149
- [63] Dziembowski W A, Goode P R. ApJ, 2004, 600: 464
- [64] Oliver R, Carbonel M, Ballester J L. Sol. Phys, 1992, 137: 141
- [65] Lean J L, Brueckner G E. ApJ, 1989, 337: 568
- [66] Li K J, Feng W, Xu J C, et al. ApJ, 2012, 747: 135
- [67] Obridko V N, Shelting B D. Astronomy Reports, 2001, 45: 1012
- [68] Li K J, Li Q X, Su T W. et al. Sol. Phys, 2006, 239: 493
- [69] Badalyan O G, Obridko V N. NewA, 2011, 16: 357
- [70] Deng L H, Gai N, Tang Y K, et al. Ap&SS, 2013, 343: 27
- [71] Li K J, Wang J X, Xiong S Y, et al. A&A, 2002, 383: 648
- [72] 李增林. 南京师大学报 (自然科学版), 1985, 8: 38
- [73] Newcomb S. Fundamental Constants of Astronomy. Wshington: US GPO, 1865: 111
- [74] Poor C L. ApJ, 1905, 22: 103
- [75] Noel F. The Sun's Surface and Subsurface: Investigating Shape, 2003, 599: 181
- [76] Emilio M. Masters Thesis, Brazil: IAG-USP, 1997
- [77] Damiani C, Rozelot J P, Lefebvre S, et al. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2011, 73: 241
- [78] Fivian M D, Hudson H S, Lin, R P, et al. Science, 2008, 322: 560
- [79] Kuhn J R, Bush R, Emilio M, et al. Science, 2012, 337: 1638

## Progress in the Measurement and Study of the Solar Radius

QU Zhi-ning<sup>1,2</sup>, LI Ke-jun<sup>1</sup>

(1. Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Solar radius is the distance from the center of the Sun to the outer boundary of the photosphere. The solar radius has been measured systematically since 19th century. The adopted standard value of the solar radius is 959.63'' published by Auwers in 1891. From ancient to now, a variety of instruments and different methods have been used to measure the solar radius: (1) Meridian circle measurements (Greenwich Royal Observatory); (2) Solar eclipse and Mercury transit; (3) Drift-scan technology; (4) Danjon solar style astrolabes (the Calern Observatory and the Tubitak National Observatory); (5) Satellite direct angular measurement (SOHO/MDI, Picard). Some researchers have reported that the solar radius shows a secular decrease. However, other researchers have reported

that the solar radius is stationary. Some researchers have studied the variation of the solar radius with solar activity, the results show that the variations of the solar radius occur over periods of some days to several tens of years.

Has the solar radius changed or not? If it changes, how it changes? Accompanied with data from ancient to now, lots of work has been done. It is believed that the variability of the solar radius is a critical probe for our understanding of solar interior stratification, radiation mechanisms, space weather and Earth's climate. In this paper, we present the history measurement and progress study of the solar radius. In Sect. 2, an overview about different solar radius methods is presented. Sect. 3 describes the different study results. Finally, Sect. 4, a proposal for future study is made.

**Key words:** solar physics; solar radius; radius measurement; variation of radius