

Look Back on History (130 Years) of Observational and Theoretical Research of Solar Differential Rotation (1855-1985)

Linsen Li

School of Physics, Northeast Normal University, Changchun
Email: dbds-lls@163.com

Received: Dec. 20th, 2012; revised: Jan. 22nd, 2013; accepted: Feb. 3rd, 2013

Copyright © 2013 Linsen Li. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The history of observational and theoretical research of solar differential rotation is investigated from 1855 to 1985 year for 130 years. The results given by a lot of authors on this topic are reviewed including solar latitudinal and radial differential rotation and its mechanism, evolution and stability. In the last section, the author listed the formation for the law of solar latitudinal and radial differential rotation given by some astronomical workers from observational and theoretical research in the different era.

Keywords: Solar Differential Rotation; History of the Observational and Theoretical Research (1855-1985); Look Back

太阳较差自转 130 年(1855~1985)的观测和理论研究史的回顾

李林森

东北师范大学物理学院, 长春
Email: dbds-lls@163.com

收稿日期: 2013 年 6 月 5 日; 修回日期: 2013 年 6 月 25 日; 录用日期: 2013 年 7 月 3 日

摘要: 本文对太阳较差自转从 1855 年到 1985 年 130 年的观测和理论研究史做了回顾。回顾了天文工作者对太阳较差自转的观测和理论研究结果, 其中包括纬向较差自转的表面观测和理论研究, 也包括了径向较差自转(内部较差自转)以及产生较差自转的机制, 稳定和演化的研究结果。在最后一节中作者还列出了在不同年代一些作者从观测和理论研究给出的太阳的纬向和径向较差自转定律的形式。

关键词: 太阳较差自转; 观测和理论研究史(1855~1985); 回顾

1. 引言

在太阳物理学发展史上对太阳自转的观测和理论研究占有重要一页。太阳自转问题是一项有研究意义的课题, 而且也是一项比较复杂的问题。对此课题研究的重大意义不仅对太阳物理本身的了解, 同时对研究其它天体的自转(恒星自转)和演化也有启发意义。由于太阳本身不是固体而是气体, 因此, 它的自

转和刚体自转有所不同。太阳表面自转角速度和表面纬度有联系。纬度愈高, 自转角速愈小, 愈接近赤道, 角速愈大, 这种现象称为赤道加速现象或称纬向较差自转现象。此外, 太阳内部不同的深度也在自转, 称为径向较差自转。人们对太阳这种自转的特性经历了一百多年的观测和理论研究了。本文只对天文工作者在过去 130 年期间从 1855 年到 1985 年所做出的观测研究结果做下回顾。

2. 太阳表面纬向较差自转百年观测研究史的回顾(1855~1985)

世界各国天文工作者从 1855 年开始从各方面着手研究此问题。最初, 由观测太阳黑子确定纬向较差定律的形式, 以后又从太阳光斑, 谱斑, 日冕, 色球层和表面上的暗条以及各种标志测定较差自转, 最后发展用现代分光方法测定。目前又开始用射电和星际场方法研究此问题。

1) 由观测太阳黑子确定纬向较差定律的形式

最早从观测证实太阳有较差自转现象是英国 Carrington 从 1855 年到 1863 年观测太阳黑子得到太阳自转角速随纬度变化的经验式子^[1-3]

$$\omega = 14.42^\circ - 2.75^\circ \sin^{7/4} \phi$$

随后 Faye 于 1865 年又从理论上解释了较差自转理论式子^[4]

$$\omega = a - b \sin^2 \phi$$

式中 a 和 b 是两个待定常数。

从此以后无论用上述那种观测方法各研究者均以上述公式的形式作为太阳较差自转公式的基础。其中从太阳黑子观测着手深入研究此问题者有: Sporer (1874), Maunder(1905), Newall(1922), 外目秀清(1927), 野附诚天(1929), Abett(1934), Newton(1934), Becker(1954), Kippenhahn(1963), Durner(1974), Deubner 和 Vazquez(1975)以及 Chistyakov(1976), 特别, 长年跟踪太阳黑子的观测的作者们 Newton & Nunn(1951), Ward(1966), Lustig(1983), Howard(1984), Lustig & Dvorak(1984), Balthasar, et al.(1985), Ward (1966), Godoli & Mazzucconi(1979), Balthasar & Wohl (1980), Arev-alo et al.(1982), Howard et al.(1984), Balthasar et al.(1982)其中 Newton 和 Nume 以及 Balthasar 等人在英国 Greenwich 天文台通过观测太阳黑子对太阳较差自转做了长期研究。他们观测的结果可见文献^[5-29]和第 4 节中的纬向较差自转的观测式子。

2) 从太阳光斑、谱斑、暗条、日冕、色球层和分光谱线位移观测纬向较差自转

天文工作者除上述跟踪太阳黑子外还观测太阳光谱, 谱斑和暗条着手研究此问题有 Wilsing(1888), Cheralier(1910~1911), Wlof(1896), Hale(1908), Kempf (1916), Fox(1921), D'azaambuja(1948)等人, 特别

Cheralier 在中国佘山天文台 1911 年做了观测研究工作, 对于他们的研究结果和所得到的经验式子可见文献^[30-37]及本文的附表。此外, 对于用分光仪根据都普勒原理的谱线位移确定太阳较差自转的研究者就更多了。早期分光测量是由 Duner(1891, 1909)和 Halm (1904)用目视所做成的^[38-41]。用分光法研究太阳自转的第一个近代研究者当算是 Adans 和 Lasby(1911)^[42-44]在 Wilson 山天文台进行的。他们用在反变层用钙和氢线进行测量的。继他们之后, St. John 于 1914~1931 年也完成了此项工作^[45]。在此之后, 另一些重要的分光研究已由 Schlesinger 在美国 Allgheng 天文台, Plaskett^[48]、Delury 和 O'Connor 等人在加拿大的 Ottawa 天文台以及 Eversched 和 Royds^[52]在印度的 Kadai-Kanal 天文台所完成^[46-49]。以后野附诚夫(1930)根据前人的研究, 特别是 Eversched 的观测得到较差自转的一般式子^[50]。最近几年来用分光研究此问题者值得提出的有 Livingston(1969)测定了太阳包层的较差自转^[51]。Hansen 等人(1969)测定了日冕的较差自转^[52]。Simon(1972)测定了色球层和日冕的较差自转^[53], Belvedere(1972), Dupree(1973)测定了色球层和日冕的较差自转^[54,55]。特别是 Scherrer(1972)利用射电和星际场方法测定了日冕和光球的自转并得到两者有同步自转的结果^[56]。自从 1972 年以后又有好些天文工作者从观测太阳色球层和日冕构造研究太阳纬向较差自转, 例如 Milosevie(1950)、Schroter et al.(1975~1976)、Dupree & Henze(1972~1973)、Simon & Noyes(1972)、Liu & Kundu(1976)、Anto-mucci et al.(1977)、d'Azambuja(1948)、Wagner(1975)、Adams(1976)、Timothy et al.(1975)以及 Snodgrass(1976~1984)做了大量的观测研究, 尤其 Snodgrass 在 Wilson 山天文台通过谱线位移对较差自转的长期观测。他们的观测结果可见参考文献^[57-68]以及第 4 节中给出的观测式子。

以上, 从各种观察方法所确定的经验定律, 其中绝大部分符合前述的 Faye 的理论式子, 但也有些比那个理论式子更复杂的式子, 不仅包括纬度的正弦的平方项, 也包括四次项, 如由 M.d'Azambuja 所得到的较差自转^[69]

$$\omega = \text{const} \left[1 - 0.124 P_2(\cos \theta) - 0.022 P_2(\cos \theta) \right]$$

Howard. R 和 Harver(1970)得到比上式更具体的式子^[70]:

$$\omega = 2.57 \times 10^{-6} \left[1 - 0.189 P_2(\cos \theta) - 0.0394 P_4(\cos \theta) \right]$$

从 1970~1984 年又有好些天文观测者从太阳光球等离子体所观测到的具有三次项的较差自转式子, 如 Howard 等人(1970, 1980, 1983), Scherrer 等人(1980), LaBotte 等人(1982), Snodgrass 等人(1984)和 Pierce 等人(1984)都给出太阳较差自转三项式子。他们的工作可见文献^[71-76]和附录给出的观测式子。

从观测所得到的较差自转的三次项式子也给研究太阳内部较差自转理论提供了良好基础。

最后, 值得提出的是自 70 年代以后在人造卫星上用空间探测器通过 x 射线和远紫外谱线研究太阳色球层和日冕的较差自转取得了有价值的结果, 特别用空间飞行器 Skylab 对日冕洞的观测给出了良好的纬向较差的式子(Timothy et al.(1975)^[67]:

$$\omega = 14.23 - 0.4 \sin^2 \phi$$

关于太阳纬向较差自转的观测结果可详见 R. Howard 1984 年发表的论文 Solar Rotation 和 Schroter 1985 年发表的论文: The Solar differential rotation present status of observation^[77,78]。

3. 对太阳较差自转(表面纬向较差自转和内部径向较差自转)的理论研究史的回顾 (1855~1985)

为了说明以上对太阳较差自转的观测事实, 有不少研究者从各种理论来解释由观测所得到的较差自转的经验定律。从理论上发展来看, 主要是从流体力学出发研究此问题, 此外也有从太阳的电磁场和太阳风等方面研究此问题的。

自从 Faye(1865)首先用流体力学研究此问题后还有, Wilsing(1891)、Harzer(1891)、E. J. Wilczinski(1897)等人在不考虑流体内部对流情况下从理论推出各种不同的较差自转公式, 所得到的较差自转也与纬度有关^[79-81]。在他们所研究的流体内部虽然没考虑对流情形, 但考虑了流体内部的摩擦阻力问题。

以后 Jeans(1928~1929)和 Rosseland 也从流体力学出发在不考虑内部摩擦阻力的流体力学方程时也得到较差自转的式子, 但他们所推出的式子含有三次项^[82,83]。此外, Emden(1936)用流体力学研究了太阳光球层的自转规律可用 Faye 公式来代替^[84]。荒川秀

目(1940)根据 Bjerkner 的太阳大气环流理论和 A. Oberback 的地球大气环流相结合而得到同 Faye 式子相同的式子^[85]。Biermann(1947)也用 Bjerkner 的大气理论研究太阳赤道加速现象, 也得到同观测相一致的结果^[86]。Synge(1963)从理论上研究了太阳自转随纬度变化的事实是流体力学的结果^[87]。

以上各研究者均未考虑流体内部的复杂过程, 如对流, 粘滞性, 各向异性等。如果采用的流体力学是各向同性的粘滞性流体力学, 那么在球壳内的流体就不会有热补充, 其转动接近刚体转动。但对于太阳并非如此, 对流层内的涡粘性应该是各向异性的。Wasiutynsky(1946)首先考虑了各向异性的粘滞性^[88]。Bierman(1951)指出: 在各向同性粘滞性的情形中流体球有固体自转的稳恒态解, 在各向异性粘滞性的情形中运动是比较复杂的^[86]。Kippenhahn(1960)利用 Wasiutynsky 的各向异性粘滞性计算了太阳较差自转和环流流动的关系。他在 1963 年研究粘滞性球壳的自转时也假定流体是各向异性的^[89,90]。樱井健郎(1966)利用对流深度对太阳半径之比的幂次的展开研究了由粘滞性的各向异性所产生的运动^[91]。

另一方面, 太阳较差自转的机制是由甚么来维持的问题也有不少人做了研究。在一些研究中均涉及到对流, 湍流以及环流流动, 特别与子午环流分量有关。Kippenhahn(1963)将问题的解表示成在球壳中的子午环流和较差自转^[90]。Plaskett(1966)指出子午圈流动指向赤道, 在南北两半球表示出自转之差, 这些较差速度是子午圈压力梯度和惯性葛力奥力之间的平衡运动的结果^[92]。Cocke(1967)利用轴对称的不依赖时间的流体力学方程研究了太阳较差自转和大尺度的子午环流并得到较差自转随半径变化的式子^[93]。Roxburgh(1969)指出: 自转和湍流对流的相互作用引起纬度依赖湍流能量运输。能量守恒支配着在太阳外对流带中的缓慢的子午环流。他所构造的模型给出在太阳上所观测到的赤道加速现象^[94]。Kohler(1974)研究了在球壳中子午环流对依赖角速度径向的影响并以此研究太阳的较差自转^[95]。Durney(1974)提出太阳较差自转是由对流带中大尺度的子午圈运动所维持的, 在自转和对流带相互作用影响的假设下所计算的太阳角速度为深度和纬度的函数。自转和对流带的相互作用的主要影响推动着在整个对流带上的子午圈运动, 而该

子午环流引起太阳的较差自转^[96,97]。

除此之外,在由甚么维持较差自转时,加藤、中川等人(1969)提出了太阳较差自转可以被 Rossby 类型波的水平非球体对流环流所维持^[98]。他们在 1971 年又进一步发展了这种理论,并指出在大尺度对流运动存在时,球壳的自转是不同的。Nickel(1969)研究了太阳较差自转是由两元湍流所维持的数值模型^[99]。Gierash(1974)也讨论了在太阳对流带中的大尺度的流动,所推出对流带的流动是自转引起的,子午圈流动受摩擦所控制,同时并对表面较差自转做了计算^[100]。

以上各研究者均没有考虑各种外部物理因素,如太阳磁场,太阳风等对太阳自转不均匀性的影响。实际上这些影响,特别太阳的电磁场的影响不能忽视。

Gunn(1930)首先指出了在太阳表面的离子同太阳的电磁场相互作用引起的大气运动对自转的不均匀性的影响^[101]。他认为太阳大气中离子的累加漂移表示着自转的不均匀性,并且计算的角速度随纬度的变化符合观测的形式。最后他给出考虑电磁场在内的太阳较差自转定律的 Faye 形式。但是太阳的电磁场对太阳自转的影响不仅限于太阳表面大气,更主要是对它内部的等旋自转的影响,即我们可将太阳分为绕着轴对称的壳,每个自转体的壳以它自己的角速变而自转着。因磁场冻结在气体里,在同一条磁力线上物质具有相同的自转角速度,此即等旋自转。对于这类问题早已由 Ferraro(1937)、Alfvén(1943)、Walen(1949)、Chapman(1948)、Lundquist(1948)、Sweet 和 Cowling(1953)等人加以研究过^[102-107]。Alfvén(1943)曾指出:太阳附近的离子云通过电磁效应可以阻碍太阳的自转^[103]他给出由太阳表面向下深度所计算的太阳各层的自转。Lundquist 和 Ferraro 给出了在考虑磁场存在时等旋定律的较差自转是真的形式。Sweet 和 Ferraro 的工作扩充到 Hall 电流对较差自转速度的影响。

关于太阳风对太阳较差自转的影响也是存在的。这种影响的机制可能是太阳风用扭转磁场同太阳相耦合,而转矩是产生较差自转的原因。此外也推出在太阳风和日冕中的角动量转换造成了太阳较差自转现象。太阳风对较差自转的影响已由 Clark 和 Thomas(1969)、Schatten(1973)、Howard(1975)、Dicke(1969)和樱井健郎(1975)等人做过探讨^[108-111]。

最后也应该考虑到行星的联合起潮力对太阳较

差自转也会有一定影响,尽管此影响甚小,特别当各大行星运行到太阳一侧时这种联合影响是存在的。这种影响主要在于行星的联合起潮力对太阳内部子午环流运动有影响。因为子午环流推动较差自转,故联合起潮力通过子午环流的径向分量影响内部角速,使得角速和无起潮力时完全不同。作者李林森(1981)研究了这个问题,但此影响甚微^[112]。

从太阳自转研究发展史来看,人们开始只注意到太阳表面较差自转情况的研究,且对这方面的研究也较详细些,但随着对此问题的深入研究以后就不局限于太阳表层的较差自转,而逐渐深入到它的内部较差自转的探讨并将此问题同太阳内部物理相联系起来。

首先从理论上讨论此问题者要算 Jeans、Rosseland 和 Schwarzschild 等人。Jeans 认为角速度随深度而增加。Jeans(1928)和 Rosseland(1930)等人都把太阳看成具有对流的 Roche 模型的流体星,其核以等角速度而自转着,并将角速度展开成核的表面的偏心率和纬度的正弦的四次函数。在太阳内部区域中较快的自转层是椭圆形,而外测的不快的自转层近于球形^[82-83]。与此相反, Schwarzschild 认为太阳的角速度随深度向下而减小。Paul(1935)推出了和太阳构造有关的自转定律。他所给出的方程式可以得出用刚体核自转角速度来表示的不同深度和纬度的自转时间。这个核以 35 日自转着。角速度向光球外而增加,然后在那里减小。公式给出观测随纬度变化的规律^[113]。此后,Chapman(1948)也研究过内部角速度变化的情形,也给出在纬度中的角速度公式^[105]。

对于太阳内部多层较差自转的研究首先是由 Парийский (1955)研究过^[114]。他研究了具有核和外壳的两层太阳模型的较差自转,同时也研究了太阳的多层模型的较差自转的问题并给出核的角速式子。以后,樱井健郎(1967)对太阳内层自转也分为两层加以研究,即对流层和层流层两区域。两个区域的自转状态通过热的交换以不同角速度而自转着,由于子午圈流动使赤道附近自转加速,由此作用形成内部的较差自转^[114,115]。

Jager(1958)假定太阳内部一直到 $r = \frac{6}{7}R$ 的地方是无对流部分,它如钢体一样转动, $\omega = 0.74\omega_0$ 粘滞性部分的角速度每年为 19° , 在对流区域中对流使角动量在半径方向转移角速度 ω 和 r^2 或反比^[116]。戴文

赛(1960)断定非对流区的形状是一个旋转椭球体, 然后又将它化成圆柱体, 最后计算出在非对流表面处自转角速为 $19^{\circ}57'$, 在极处为 $15^{\circ}8'$ 。他假定对流区是在 $r = 0.85 R$ 到 $r = R$ 处^[117]。

对于太阳内部氢的对流带以下的自转, 特别核的自转有不少人加以研究。Plaskett(1966)计算出在太阳的氢对流带下面可以在 12.5 小时内完成自转一周^[47]。Clark(1969)等人通过太阳的研究指出: 太阳内部有刚体的自转核^[108]。Dicke(1967)也假定太阳有急速均匀的自转核, 较差自转限于 $0.05R_{\odot}$ 厚度的带, 位于对流带下面大约 $0.05R$ 处^[118]。在 1969 年他指出: 核的自转周期小于 2 日^[111]。此后他在 1974 年指出深的内部自转比表面自转快 20 倍, 核的自转周期为 1.35 日, 核应该产生太阳的四极矩^[119]。但是 Schatten(1975)指出: 太阳核的自转周期为 0.7 日, 所观测到的扁平度是由于快速自转核引起的^[120]。此外他从广义相对论出发提出太阳较差自转的新模型。Rood 和 Vllrich(1974)在研究带有转动核的太阳模型时指出: 太阳的辐射核开始是以不变角速度而自转着^[121]。因有感应的环流流动, 角动量由表面向外转换。由于整个太阳角动量守恒, 故当表面层缓慢自转时, 内层区域必须转动加快。

1973 年以后人们又研究快速的较差自转和中微子流量的关系, 即太阳发射大量中微子对较差自转有怎样影响呢? Demarque 等人(1973)指出: 从快速自转核的太阳模型中可获得低的中微子流是可能的^[122]。此外 Rood 等人(1974)也提出这种主张^[121]Demarque 等人假定太阳模型有非自转的包层和 $0.9M_{\odot}$ 的自转核, 在其内部离心力对重力之比 $\frac{\omega^2 r^3}{GM_r} = 1 - F$ 的值是均匀的。

这个相当于具有向中心增加速度和减少角动量的较差自转的状态。此后 Roxburgh(1974~1975)指出: 假定离心力对重力之比 $\frac{\omega^2 r^3}{GM_r} = 1 - F$ 的值在太阳中向外减少, 则快速自转可减少中微子流量^[123]。本杉一郎(1974)在研究太阳中微子流量和自转核的角速关系时, 给出高速自转核的质量和自转核角速度的上限^[124]。

关于太阳较差自转的稳定性和演化理论的研究也有些研究者给出有意义的结果。首先对太阳较差自转的稳定性研究由 Dicke 加以讨论过。Dicke(1964)指

出: 较差自转的太阳模型是稳定的^[125]。但是 Goldreich 和 Shubert(1967)求得同 Dicke 观测相一致的较差自转的太阳模型是稳定的^[126]。Goldreich 等人证明: 在均质化学成分区域中稳定的必要条件是: 每单位质量的角动量是离自转轴的距离的增函数。在圆柱坐标 (ϖ, φ, z) 中此条件是:

$$\frac{\partial \omega^2 \Omega}{\partial \omega} > 0, \quad \frac{\partial \Omega}{\partial z} = 0$$

他们将此结果应用于太阳较差自转上, 证明较差自转的太阳模型是不稳定的。此外, 他们还指出微观粘滞率不可能改变太阳的较差自转状态。

Goldreich 等人(1968)在研究太阳扁平度时又进一步研究了较差自转的太阳模型的稳定^[127]。他利用上述第二个方程推论: 太阳外部的化学均质部分必须是均匀自转的, 因为对流带均匀地自转着。

对于太阳较差自转的演化理论, 樱井健郎从 1972 年到 1975 年对这方面做过详细研究。樱井健郎(1972~1975)研究了在太阳风转矩的影响下由于 Eddington-Sweet 型环流的作用产生太阳内部自转的演化^[128,129]。他在研究太阳的辐射内部的轴对称的自转的演化时从 Eddington-Sweet 的摄动理论推出基本方程。在解问题时考虑了质子-质子反应所建立起来的分子量梯度和太阳风转矩的影响。计算的结果表明: Eddington-Sweet 环流所带来的角动量在深的内部向内自转加速。对流带受着双重角动量提取: 一个角动量是被 Eddington-Sweet 环流内部上面运输, 而第二个角动量来自太阳风转矩。因此, 表面角速度的现在的下降比只有对流带自转缓慢下去较快些。

樱井健郎以后(1975)在研究太阳内部自转的演化时又略去了分子量梯度的影响, 但考虑了涡流粘滞率和太阳风的影响。同时他又给出势方程组的开始边界问题的新公式和较高阶非线性扩散方程。他利用公式解决了 Eddington-Sweet 理论的困难, 其中子午圈速度在辐射区域和对流区域之间的分界面变成无限大^[129]。

太阳自转演化的另一问题是关于自转向快速方向演变成向慢方向演变的问题。美国海尔天文台的 Howard(1975)根据他的观测研究指出: 太阳自 1967 年以来绕其自转轴的速度逐渐加快^[110]。这种加速的大小是根据威尔逊天文台所观测到的, 在近赤道处其转

动速度增减 3% 或者从每秒 2.011 米增加到每秒 2.123 米, 转速增加得最大处不在赤道而在赤道两侧 10° 到 15° 处, 并且由此向两极逐渐变小。产生太阳自转加快的原因可能和太阳活动 11 年周期有关, 它是一种正常的太阳活动现象。产生这种加快现象只是限于太阳的外层气壳, 而不是整个太阳自转都在加快。此外太阳自转的演变也并非只限于加快, 有时也会减速。Howard 认为在今后若干年内太阳的转动还要有减小的倾向。

对于太阳较差自转理论的详细研究可详见文献 [130]。RR Durney, On theories of solar rotation 1976 年的论文。

4. 根据观测给出的太阳纬向较差和径向较差自转定律的形式

$\omega = A + B \sin^2 \phi + C \sin^4 \phi$ 的形式和 A, B, C 的数值(ω, A, B, C 的单位是度/日)。

1) 根据观测太阳黑子所确定的较差自转定律较差自转定律的形式; 研究者; (年代); 文献

$$\omega = 14.42^\circ - 2.75^\circ \sin^{7/4} \phi; \text{ Carrington}(1863)^{[3]}$$

$$\omega = 8.55 + 5.80 \cos \phi; \text{ Spörer}(1874)^{[5]}$$

$$\omega = 14.43 - 2.13 \sin^2 \phi; \text{ Maunder}(1905)^{[6]}$$

$$\omega = (a - b \sin^2 \phi) \cos \phi; \text{ Newall}(1901 \sim 1913)^{[7]}$$

$$\omega = 14.44 - 2.31 \sin^2 \phi; \text{ 外目清秀}(1927)^{[8]}$$

$$\omega = 14.37 - 2.61 \sin^2 \phi; \text{ 野附诚夫}(1927)^{[9]}$$

$$\omega = 14.37 - 3 \sin^2 \phi; \text{ Newton}(1934)^{[12]}$$

$$\omega = \text{const} [1 - 0.137 P_2(\cos \phi)]; \text{ Kippenhahn}(1963)^{[14]}$$

$$\omega = a - b \sin^2 \phi; \text{ Chistyakov}(1976)^{[17]}$$

$$\omega = 14.36 - 2.69 \sin^2 \phi; \text{ Newton \& Nunn}(1951)^{[18]}$$

$$\omega = 14.378 - 2.69 \sin^2 \phi; \text{ Ward}(1966)^{[19]}$$

$$\omega = 14.38 - 2.57 \sin^2 \phi; \text{ Lustig}(1983)^{[19][20]}$$

$$\omega = 14.393 - 2.95 \sin^2 \phi; \text{ Howard et al.}(1984)^{[21]}$$

$$\omega = 14.23 - 2.36 \sin^2 \phi; \text{ Lustig \& Dvorak}(1984)^{[22]}$$

$$\omega = 14.34 - 0.00 \sin^2 \phi; \text{ Balthasar et al.}(1982)^{[23]}$$

$$\omega = 14.523 - 2.69 \sin^2 \phi; \text{ Ward}(1966)^{[24]}$$

$$\omega = 14.58 - 2.84 \sin^2 \phi; \text{ Godoli \& Mazzucconi}(1979)^{[25]}$$

$$\omega = 14.525 - 2.83 \sin^2 \phi; \text{ Balthasar \& wöhl}(1980)^{[26]}$$

$$\omega = 14.626 - 2.70 \sin^2 \phi; \text{ Arévalo et al.}(1982)^{[27]}$$

$$\omega = 14.552 - 2.84 \sin^2 \phi; \text{ Howard et al.}(1984)^{[28]}$$

2) 用太阳光斑, 谱斑, 暗条和日冕, 色球层以及分光都普勒原理的谱线位移所观测到的纬向较差自转。

$$\omega = 14.47^\circ - 2.27^\circ \sin^2 \phi; \text{ Cheralier}(1910 \sim 1911)^{[31,32]}$$

$$\omega = 14.56 - 2.298 \sin^2 \phi; \text{ Fox}(1921)^{[36]}$$

$$\omega = 14.48 - 2.16 \sin^2 \phi; \text{ D'azambuja}(1948)^{[37]}$$

$$\omega = 14.81 - 4.21 \sin^2 \phi; \text{ Duner}(1891)^{[38]}$$

$$\omega = 14.53 - 2.50 \sin^2 \phi; \text{ Halm}(1907)^{[40,41]}$$

$$\omega = 14.63 - 4.04 \sin^2 \phi; \text{ Adams}(1908)^{[42]}$$

$$\omega = 14.9 - 2.4 \sin^2 \phi; \text{ Adams}(1908)^{[43]}$$

$$\omega = 15.4 - 13 \sin^2 \phi; \text{ John}(1913)^{[45]}$$

$$\omega = 14.24 - 3.71 \sin^2 \phi; \text{ Plaskett}(1915)^{[47]}$$

$$\omega = 2.57 \times 10^{-6} [100.189 P_2(\cos \theta) - 0.0394 P_2(\cos \theta)];$$

Harver(1970)^[70]

$$\omega = 14.54 - 249K - [3.63^\circ + 174.7K] \sin^2 \phi; \text{ 野附诚夫}(1930)^{[50]}$$

$$\omega = 14.37 \cos^{0.135} \phi; \text{ De Lury}(1939)^{[48]}$$

$$\omega = 14.14 - 3.18 \sin^2 \phi; \text{ Milosevie}(1955)^{[57]}$$

$$\omega = 13.93 - 2.90 \sin^2 \phi; \text{ Schrötor \& wöhl}(1975 \sim 1976)^{[58,59]}$$

$$\omega = 13.54 - 1.5 \sin^2 \phi; \text{ Dupree \& Henze}(1972 \sim 1973)^{[60]}$$

$$\omega = 14.7 \pm 0.2 - 7.1 \pm 1.1 \sin^2 \phi; \text{ Simon \& Noyes}(1972)^{[61]}$$

$$\omega = 14.5 \pm 0.27 - 4.19 \pm 3.0 \sin^2 \phi; \text{ Liu \& Kundu}(1976)^{[62]}$$

$$\omega = 14.09 - 0.37 \sin^2 \phi; \text{ Antonucii et al.}(1977)^{[63]}$$

$$\omega = 14.48 - 2.16 \sin^2 \phi; \text{ d'Azambuja}(1948)^{[64]}$$

$$\omega = 14.33 - 0.39 \sin^2 \phi; \text{ wagner}(1975)^{[65]}$$

$$\omega = 14.48 - 0.29 \sin^2 \phi; \text{ Adams}(1976)^{[66]}$$

$$\omega = 14.23 \pm 0.03 - 0.4 \pm 0.1 \sin^2 \phi; \text{ Timothy et al.}(1975)^{[67]}$$

$$\omega = 14.05 - 1.49 \sin^2 \phi - 2.60 \sin^4 \phi;$$

$$\text{Snodgrass}(1967 \sim 1984)^{[68]}$$

3) 由光球等离子体所观测到的四次项较差自转式子:

$$\omega = 13.76 - 1.74 \sin^2 \phi - 2.19 \sin^4 \phi ; \text{ Howard \& Harvey(1970)}^{[70]}$$

$$\omega = 13.95 - 1.61 \sin^2 \phi - 2.63 \sin^4 \phi ; \text{ Howard et al. (1980)}^{[71]}$$

$$\omega = 14.44 - 1.98 \sin^2 \phi - 1.98 \sin^4 \phi ; \text{ Scherrer et al. (1980)}^{[73]}$$

$$\omega = 14.23 - 1.54 \sin^2 \phi - 2.80 \sin^4 \phi ; \text{ LaBonte \& Howard(1982)}^{[74]}$$

$$\omega = 14.19 - 1.70 \sin^2 \phi - 2.36 \sin^4 \phi ; \text{ Howard et al. (1983)}^{[72]}$$

$$\omega = 14.11 - 1.69 \sin^2 \phi - 2.35 \sin^4 \phi ; \text{ Snodgrass et al. (1984)}^{[75]}$$

$$\omega = 14.07 - 1.78 \sin^2 \phi - 2.68 \sin^4 \phi ; \text{ Pierce \& Lopresto(1984)}^{[76]}$$

4) 太阳内部较差自转和径向较差自转的理论式子:

$$\omega = a + b \sin^2 \phi ; \text{ Faye (1865)}^{[4]}$$

$$\omega = a + b \sin^2 \phi ; \text{ Wilsing(1891)}^{[79]}$$

$$\omega^2 = a + b \sin^2 \phi ; \text{ Harzer(1891)}^{[80]}$$

$$\omega^2 = \lambda + \mu r^2 ; \text{ Wilczinski(1897)}^{[81]}$$

$$\omega^2 = a - b \sin^2 \phi + C \sin^4 \phi ; \text{ Jeans(1928~1929)}^{[82]}$$

$$\omega = \omega_0 (1 - \alpha \sin^2 \phi + \alpha^4 \sin^4 \phi + \dots) ; \text{ Rosseland (1930)}^{[83]}$$

$$\omega = a - b \sin^2 \phi ; \text{ 荒川秀俊(1940)}^{[85]}$$

$$\omega = \omega_0 - \omega_1 \cos^2 \phi ; \text{ Chapman(1948)}^{[105]}$$

$$\omega_0 = 14.4^\circ (\text{每日}), \omega_1 = 2.6^\circ (\text{每日})$$

$$\omega = (\omega_a - \omega' \cos^2 \phi) R_o^2 / r ; \text{ Lundquist(1948)}^{[106]}$$

$$\omega = a + A b \sin^2 \phi / r ; \text{ Ferraro(1949)}^{[102]}$$

$$\omega = \omega'_0 + (E/H_o R) \sin^2 \phi ; \text{ Gunn(1930)}^{[101]}$$

$$\omega = \text{const} \cdot r^{-2(1-s)} ; \text{ Biermann(1951)}^{[86]}$$

$$\omega^2 a^3 / m = \delta_2 p_2(\mu) + \delta_4 p'(\mu) / \mu + \dots ; \text{ Syngge(1963)}^{[87]}$$

$$\omega = u + u_r / a \cos B ; \text{ Plaskett(1966)}^{[92]}$$

$$\omega = \omega(0) \left[1 + \frac{s-1}{s} \left(\frac{R}{R_i} \right)^2 \right] ; \text{ Cocke(1967)}^{[93]}$$

其中, $R_i = R - \Delta R$

$$\omega = (a - b \cos^2 \phi) R^2 / r^2 ; \text{ 戴文赛(1960)}^{[117]}$$

$$\omega^2 r^2 = B_o + B_2 P_2(\cos \phi) ; \text{ Dicke (1967)}^{[118]}$$

$$\omega = \omega_0 [1 + \omega_{10}(r) + \omega_{12}(r) P_2(\cos \theta)] ; \text{ Durney}$$

(1974)^[97];

$$\omega_{10}(r) = \frac{2}{3\nu} \int_r^R (\phi / r^2 \rho) dr, \omega_{12}(r) = -0.189 + \frac{4}{3\nu} \int_r^R (\phi / r^2 \rho) dr$$

$$\omega = \omega_0 / [1 + 2t(\omega_0 / \omega_i)^2 / \tau_i]^{1/2} ; \text{ Durney(1976)}^{[130]}$$

$$\omega = \omega_0 [1 - 0.189 P_2(\cos \theta) + \delta]$$

$$\delta = K Q H F(\theta) \Psi(\phi, \lambda, b, l) \frac{m}{D},$$

$$F(\theta) = \left[\frac{1}{P_2(\cos \theta)} - 1 \right] ; \text{ 李林森(1981)}^{[112]}.$$

5. 展望

本文属于天文学史的研究课题。天文学史可分阶段性研究。本文对太阳较差自转的研究史是从 1855 年到 1985 年这一阶段的研究史的回顾。然而缺少自 1985 年以后近 20 年多年来的观测和理论研究史, 故期望以后有续文发表。

参考文献 (References)

- [1] Carrington R C. Results of astronomical observations made of the observatory of the University, Durham, 1855.
- [2] Carrington R C. MNRAS, 1859: 13
- [3] Carrington R C. Observation of Solar Spots. London: Williams and Norgate, 1863: 244.
- [4] Faye H. CR, 1865, 60: 138.
- [5] Spörer G. PAG, 1874, 13: 151.
- [6] Maunder A S D. MMRAS, 1905, 65: 813.
- [7] Newall M F. MNRAS, 1922, 82: 110.
- [8] Stom K (外目清秀). PIA, 1927, 3: 317.
- [9] Notuki M (野附诚夫). PPMSJ, 1929, 11: 102.
- [10] Abetti G. HDP, 1929, 4: 162.
- [11] Abetti G. ALA, 1934, 9: 863.
- [12] Newton H W. MNRAS, 1934, 95: 66.
- [13] Becker U. ZA, 1954, 34: 229.
- [14] Kippenhahn R. ApJ, 1963, 173: 309.
- [15] Durner B R. SoPh, 1974, 38: 309.
- [16] Deubner F L, Vazquez M. SoPh, 1975, 43: 87.
- [17] Chostyakov V F. BAICz, 1976, 27: 84.
- [18] Newton H W, Numm M. MNRAS, 1951, 111: 413.
- [19] Ward F. ApJ, 1965, 141: 534; ApJ, 1966, 145: 416.
- [20] Lustig G, Dvorak R. A&A, 1984, 141: 105.
- [21] Howard R, et al. ApJ, 1984, 283: 373.
- [22] Lustig G, Dvorak R. A&A, 1984, 141: 105.
- [23] Balthasar H, et al. SoPh, 1982, 76: 21.
- [24] Ward F. ApJ, 1966, 145: 416.
- [25] Godoli G, Mazzucconi F. SoPh, 1979, 64: 247.
- [26] Balthasar H, Wohl H. A&A, 1980, 92: 111.
- [27] Arèvolo M J, et al. A&A, 1982, 111: 266.
- [28] Howard R, et al. ApJ, 1984, 283: 373.
- [29] Balthasar H, et al. SoPh, 1984, 91: 55.
- [30] Wilsing J. AN, 1888, 119: 311.
- [31] Cheralier S. ApJ, 1910, 32: 388.
- [32] Cheralier S. AnZoc, 1911, 6: 47.

- [33] Wolfer A. VNG, 1896, 41: 100.
 [34] Hale E G. ApJ, 908, 7: 219.
 [35] Kempf P. POPot, 1916, 71: 36.
 [36] Fox P. PYerO, 1921, 3: 67.
 [37] D'azambuja M. AnApm, 1948, 6: 7.
 [38] Duner N C. Upsala: Sur la rotation du Soleil, 1891.
 [39] Duner N C. UGC, 1891, 3: 3.
 [40] Halm J. MNRAS, 1907, 173: 273.
 [41] Halm J. TRSE, 1981, 41: 89.
 [42] Adans W S, Lasby J B. Publications of Carnegie Institution of Washington, 1911: 1.
 [43] Adans W S. Rotation Periods of the Sun, 1911.
 [44] Adans W S. ApJ, 1910, 31: 30.
 [45] S t John C E. ApJ, 1913, 38: 341.
 [46] Schlesinger F. MNRAS, 1944, 104: 94.
 [47] Plaskett J S. ApJ, 1913, 37: 73; 1915, 42: 392.
 [48] Lury R E. JRASC, 1935, 35: 39.
 [49] Evershed J. MNRAS, 1913, 73: 554; 1935, 95: 503.
 [50] Notuki M. PPM SJ, 1930, 12: 264.
 [51] Livingston W C. SoPh, 1969, 29: 448.
 [52] Hansen R T, Hansen S F. SoPh, 1969, 10: 135.
 [53] Simon G W. SoPh, 1972, 1: 8.
 [54] Belvedere G, Godoli G, Smott L. MmSAI, 1972, 43: 637.
 [55] Dupree A K. SoPh, 1973, 33: 452.
 [56] Scherree P H. SoPh, 1972, 26: 15.
 [57] Milasevie K M. CzAS, 1950, 201: 666.
 [58] Schröter E H, et al. SoPh, 1975, 42: 3.
 [59] Schröter E H, Wöhl H. SoPh, 1976, 49: 19.
 [60] Dupree A K, Henze W. SoPh, 1972, 27: 271.
 [61] Simon G W, Noyes R W. SoPh, 1972, 22: 450.
 [62] Liu S J, Kundu R M. SoPh, 1976, 46: 15.
 [63] Antomucci E, et al. SoPh, 1977, 53: 519.
 [64] d'Azambuja M. AnPar, 1948, 6: 1.
 [65] Wagner W J. ApJ, 1975, 198: L141.
 [66] Adams W M. SoPh, 1976, 47: 601.
 [67] Timothy A F, et al. SoPh, 1975, 42: 135.
 [68] Sonodgrass H M. SoPh, 1984, 94: 13. .
 [69] d'Azambuja M. AnApm, 1948, 6: 7.
 [70] Howard R, Harvey J W. SoPh, 1970, 12: 23.
 [71] Howard R, et al. SoPh, 1980, 66: 167.
 [72] Howard R, et al. SoPh, 1983, 83: 321.
 [73] Scherrer P H, et al. ApJ, 1980, 241: 811.
 [74] LaBotte B J, Howard R. SoPh, 1982a, 75: 161; 1982b, 80: 361.
 [75] Snodgrass H M, et al. SoPh, 1984, 90: 199.
 [76] Pierce A K, Lopresto J C. SoPh, 1984, 93: 155.
 [77] Howard R. ARA&A, 1984, 22: 131.
 [78] Schröter E H. SoPh, 1985, 100: 14.
 [79] Wilsing J. AN, 1891, 127: 233.
 [80] Harzer P. ApNr, 1891, 127: 17.
 [81] Wilczinski E J. Hydrodynamische Untersuchungen mit Anwendung auf die Theorie des Sonnen Rotation. Berlin: Mayer and Muller, 1897.
 [82] Jeans H. MNRAS, 1926, 85: 328. .
 [83] Rosseland S. ZA, 1930, 1: 138.
 [84] Emden R. ZA, 1936, 12: 233.
 [85] 荒川俊秀. 科学, 1940, 10: 82.
 [86] Biermann B L. ZA, 1951, 38: 304.
 [87] Synge J L. MNRAS, 1963, 124: 275.
 [88] Wasiutynsky J. ApNr, 1946, 4: 1.
 [89] Kippenhahn R. MSRSL, 1960, 5: 249.
 [90] Kippenhahn R. ApJ, 1963, 137: 664.
 [91] Sakurai T. PASJ, 1966, 18: 174.
 [92] Plaskett H H. MNRAS, 1966, 131: 407.
 [93] Cocke W J. ApJ, 1967, 150: 1041.
 [94] Roburgh I W. Proc IAU COU on Stellar Rotation, 8-11 September 1969: 318-320. Edited by A Slettebak, Columbus: Ohio State University.
 [95] Kohler H. SoPh, 1974, 34: 11.
 [96] Durney B R. SoPh, 1973, 23: 3.
 [97] Durney B R. ApJ, 1974, 190: 211.
 [98] Kato S, Nakagawa Y. SoPh, 1969, 10: 476.
 [99] Nickel G H. SoPh, 1969, 10: 472.
 [100] Gierasch P J. ApJ, 1974, 190: 199.
 [101] Gunn R. PhRv, 1930, 35: 635; 1930, 36: 1251; 1931, 37: 283.
 [102] Ferraro V C A. MNRAS, 1937, 97: 458.
 [103] Alfven H. ArMAF, 1943, 29: 1.
 [104] Walén C. On the Vibratory Rotation of the Sun. Stockholm: Henrik Lindståhls Bokhandel, 1949.
 [105] Chapman S. MNRAS, 1948, 108: 410
 [106] Lundquist S. ArMAF, 1948, 35: 1.
 [107] Cowling F G. Solar Electro-Dynamics. Chicago: University of Chicago Press, 1953: 31.
 [108] Clark A, Thomas J H, Clark P A. Sci, 1969, 164: 290.
 [109] Schatten K H. SoPh, 1973, 32: 315.
 [110] Howard R. SciAm, 1975, 232: 106.
 [111] Dicka R H. Proc IAU Colloquium on Stellar Rotation, 8-11 September 1969: 289. Edited by A Slettebak, Columbus: Ohio State University.
 [112] 李林森. 东北师大学报(自然科学版), 1981, 4: 23.
 [113] Paul H M. GBzG, 1935, 44: 376.
 [114] Парийский Н Н. О моменме количества ужения Солнча в "ВОПРОСЫ КОСМГОНИЙ", 1955: том 4 edited by И А Н СССР, москва.
 [115] 櫻井健郎. 日本物理学会志, 1967, 22: 225.
 [116] de Jader C. HDP, 1958, B52: 80.
 [117] 戴文赛. 天文学报, 1960, 8: 1.
 [118] Dicke R H. ApJ, 1967, 149: 121.
 [119] Dicke R H. Sci, 1974, 184: 419.
 [120] Schatten K H. NZJS, 1973, 16: 659. Ap&SS, 1975, 34: 467; ApJ, 1977, 216: 650.
 [121] Rood R T, Vlrch R R. Natur, 1974, 252: 366.
 [122] Demarque P, Mengel J. Natur, 1973, 246: 33.
 [123] Roxbuvgh I W. Natur, 1974, 252: 209; MNRAS, 1975, 170: 35.
 [124] 杉本一郎. 科学, 1974, 44: 544.
 [125] Dicke R H. Natur, 1964, 202: 432.
 [126] Goldreich P, Schubert G. ApJ, 1967, 150: 571.
 [127] Goldreich P, Schubert G. ApJ, 1968, 154: 1005.
 [128] Sakurai T. PASJ, 1972, 24: 153.
 [129] Sakurai T. MNRAS, 1975, 171: 35.
 [130] Durney B R. Proc IAU, 1976, 71: 243-295.

附录

作者引用的期刊名缩写是按以下网址给出的:
http://adsabs.harvard.edu/abs_doc/journals.html