

Influence of Solar Mass-Lose on the Change of Rotation of the Sun on the Pre-Half Time of the Main Sequence

Linsen Li

School of Physics, Northeast Normal University, Changchun Jilin
Email: lils653@nenu.edu.cn

Received: Jul. 5th, 2015; accepted: Jul. 20th, 2015; published: Jul. 23rd, 2015

Copyright © 2015 by author and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The influence of solar mass-lose due to solar wind and photo-radiation upon the change of the rotational angular velocity of the sun on the pre-half time of main sequence is studied. The theoretical formulae are derived for the decrease of mass and angular velocity with time. The theoretical results show that mass and angular velocity of the sun decrease with time and its decrease of the solar mass and angular velocity are very slowly on the main sequence phase. The numerical values for the decrease of solar mass and the angular velocity in 1×10^9 yr, 2×10^9 yr, 3×10^9 yr and 4×10^9 yr are given in **Table 1**. Discussions are drawn.

Keywords

Solar Mass-Loss, Retardation of Rotation, Long-Term Effects, Pre-Half Away on Main Sequence

太阳在主序前半程质量流失对自转角速度改变的影响

李林森

东北师范大学物理学院, 吉林 长春
Email: lils653@nenu.edu.cn

收稿日期：2015年7月5日；录用日期：2015年7月20日；发布日期：2015年7月23日

摘要

本文研究了太阳在主序前半程质量损失对自转角速度改变的影响。给出了太阳因太阳风和光子辐射造成的质量损失对自转角速减慢的影响理论式子。理论结果表明太阳自转角速随质量损失和时间变化逐渐减慢。计算结果也表明太阳在主序前半程自转角速度减慢很慢。表1给出了太阳在主序前半程 1×10^9 , 2×10^9 , 3×10^9 和 4×10^9 年时自转角速减慢的数值。最后做了简要讨论。

关键词

太阳质量损失, 自转减慢, 长期影响, 主序前半程

1. 引言

原始太阳是在星际气体云中杂乱无章的气体分子相互碰撞时在统计力学和概率作用下使气体分子规一化形成了在同一方向转动的原始星云中诞生的。原始转动方向也是由上述因素决定的。原始星云有了转动后, 原始太阳才从无形状的气体云中形成扁球形的原始太阳。随后开始引力塌缩。塌缩使转动加快。最后太阳进入主序前的演化阶段。此时内部产生引力能使半径开始收缩渐小, 转动角速逐渐加速。从主序前阶段进入主序阶段后核能代替引力能太阳开始几乎停止收缩, 而半径变化很小, 在光子辐射和太阳风作用下质量逐渐减少造成自转角速逐渐变慢。大约在 100 亿年核能由氢全部转化成氦后半径膨胀进入红巨星阶段。由于较大的星风使质量损失更大, 再加半径增大, 这比在主序阶段更使自转减慢。关于太阳在主序前的演化细节在文献[1]做了研究和数值计算; 在主序阶段的演化细节在文献[2]已经给出; 在后主序阶段的演化细节在文献[3]做了研究和数值计算, 但他们没有研究太阳自转在三个阶段角速改变的演化。

太阳是气体星, 不是固体星, 它的自转比固体星(行星)的自转更较复杂些。太阳自转分为整体自转, 这是以赤道自转速度为度量的。另一是较差自转, 在不同纬度处有不同的自转角速度。较差自转分为表面较差自转和内部径向较差自转。作者在文[4]做了概述。本文主要研究太阳整体自转理论, 即太阳质量因太阳风和光子辐射造成的质量损失对太阳整体自转速减。对于太阳整体自转, 本文作者在文[5]中曾研究了太阳风螺旋磁场对其自转产生角速减慢的情形并给出理论结果和对自转角速减慢的估计。本文利用

Table 1. Numerical results for the change of the rotational angular velocity of the sun due to mass-loss on each stages of pre-half time of main sequence

表 1. 太阳在主序前半程各阶段因质量损失对自转角速度改变的数值结果

$t(10^9 \text{ yr})$	M/M_0	$\delta M/M_0$	Ω/Ω_0	$\delta\Omega/\Omega_0$
0	1	0	1	0
1	0.99990	-0.00010	0.99972	-0.00028
2	0.99983	-0.00017	0.99949	-0.00051
3	0.99972	-0.00028	0.99916	-0.00084
4	0.99963	-0.00037	0.99888	-0.00112

$\Omega_0 = 2.865 \times 10^{-8} \text{ rad/s}$, $M_0 = 1.9892 \times 10^{33} \text{ g}$ 。

另一方法给出太阳在主序前半程 40 亿年间自转角速随时间改变的数值。

2. 太阳质量损失对自转角速长期影响的理论研究

太阳质量损失对自转角速度 Ω 产生的长期影响通过角动量 J 的改变的理论式子由下式给出[6]。

$$\frac{dJ}{dt} = \frac{2}{3} \Omega R^2 \frac{dM}{dt} \quad (1)$$

$\frac{dJ}{dt}$ 和 $\frac{dM}{dt}$ 是角动量和质量的损失率。 R 是太阳半径。 Ω 是表面自转角速度。角动量 J 可用 $KMR^2\Omega$ 表示。将 $J = KMR^2\Omega$ 代人(1)式后微分之, 可得

$$\frac{d\Omega}{dt} + \frac{\Omega}{M} \frac{dM}{dt} + 2 \frac{\Omega}{R} \frac{dR}{dt} = \frac{2}{3} \frac{R^2 \Omega}{KMR^2} \frac{dM}{dt} \quad (2)$$

太阳在主序前阶段因引力收缩能使半径 R 产生收缩变化, 故 $\frac{dR}{dt} \neq 0$, 而在红巨星阶段因体积膨胀 $\frac{dR}{dt} \neq 0$, 但在主序阶段核能代替引力收缩能, 故半径很少变化, 可以认为半径几乎不变, 所以 $\frac{dR}{dt} = 0$ 。根据文[2]的计算和文[7]给出的半径演化曲线, 太阳在主序前半程 50 亿年前半径变化很小, 只有在 50 亿年以后特别在 60~70 亿年后半径有所增大变化。据文[3]太阳在 100 亿年主序阶段结束时半径增大 $1.37 R_{\odot}$ 。所以本文只研究太阳从现在到 40 亿年间角速演变时

可以认为太阳在此阶段半径不变 $\frac{dR}{dt} = 0$ 。

(2)式化为

$$\frac{d\Omega}{dt} = \left(\frac{2}{3K} - 1 \right) \frac{\Omega}{M} \frac{dM}{dt} \quad (3)$$

令 $N = \frac{2}{3K}$, 故(3)式可写成

$$\frac{1}{\Omega} \frac{d\Omega}{dt} = (N-1) \frac{1}{M} \frac{dM}{dt} \quad (4)$$

积分此式后得

$$\ln \frac{\Omega}{\Omega_0} = (N-1) \ln \left(\frac{M}{M_0} \right) = \ln \left(\frac{M}{M_0} \right)^{N-1}$$

由此可得质量变化和角速度改变的关系公式

$$\Omega = \Omega_0 \left(M/M_0 \right)^{N-1} \quad (5)$$

这是太阳质量变化和太阳自转角速度的关系式。

以下推出自转角速度 Ω 变化随时间演变的关系式。

恒星质量损失的 Jeans 公式给出[8]

$$\frac{dM}{dt} = -\alpha M^k, \quad 3 < k < 4 \quad (6)$$

一些文献[9] [10]取 $k = 3$

$$\therefore \frac{dM}{dt} = -\alpha M^3 \quad (7)$$

积分此方程：
$$\int_{M_0}^M \frac{dM}{M^3} = -\alpha \int_0^t dt$$

得

$$M = M_0 / \left(1 + 2\alpha M_0^2 t\right)^{1/2} \quad (8)$$

将(7)式写成

$$\frac{1}{M} \frac{dM}{dt} = -\alpha M^2$$

将(8)式代人上式右端，即得

$$\frac{1}{M} \frac{dM}{dt} = -\alpha M_0^2 / \left(1 + 2\alpha M_0^2 t\right) \quad (9)$$

将(9)式代人(4)式右端，即得

$$\frac{1}{\Omega} \frac{d\Omega}{dt} = -(N-1)\alpha M_0^2 \left(1 + 2\alpha M_0^2 t\right)^{-1}$$

积分之

$$\int_{\Omega_0}^{\Omega} \frac{1}{\Omega} \frac{d\Omega}{dt} = -(N-1)\alpha M_0^2 \int_0^t \frac{dt}{1 + 2\alpha M_0^2 t}$$

得

$$\ln \frac{\Omega}{\Omega_0} = -\frac{1}{2}(N-1) \ln \left(1 + 2\alpha M_0^2 t\right)$$

故得太阳自转角速度随时间变化的关系式

$$\Omega = \Omega_0 \left(1 + 2\alpha M_0^2 t\right)^{-(N-1)/2} \quad (10)$$

$$\delta\Omega = \Omega - \Omega_0 = \Omega_0 \left[\left(1 + 2\alpha M_0^2 t\right)^{-(N-1)/2} - 1 \right] \quad (11)$$

另外，将(8)式代人(5)式可得(10)式的同样结果

$$\Omega = \Omega_0 (M/M_0)^{N-1} = \Omega_0 \left[\left(1 + 2\alpha M_0^2 t\right)^{-1/2} \right]^{N-1}$$

即： $\Omega = \Omega_0 \left(1 + 2\alpha M_0^2 t\right)^{-(N-1)/2}$ 。

3. 太阳在主序前半程质量损失对自转角速度长期改变的数值估计

首先计算常数 N 的值。

太阳多层球指数 n 根据文[11]： $\Gamma = \gamma = 5/3$ ， $n = 1.5$ ，又根据文献[6]可计算 K 的值

$$\frac{1}{K} = \frac{3}{2} \left(n + \frac{5}{2} \right)$$

将 $n = 1.5$ 代人后可得 $K = 1/6$ ，将 K 的值代入下式

$$N = \frac{2}{3K} = 4, \quad N - 1 = 3$$

故公式(5)式和(10)式均化为

$$\Omega = \Omega_0 (M/M_0)^3 \quad (12)$$

或者

$$\Omega = \Omega_0 (1 + 2\alpha M_0^2 t)^{-3/2} \quad (13)$$

故

$$\delta\Omega = \Omega - \Omega_0 = \Omega_0 \left[(1 + 2\alpha M_0^2 t)^{-3/2} - 1 \right] \quad (14)$$

以下确定(7)式中的 α 数值。

根据作者在文献[12]中给出的目前太阳质量损失率的估计, 太阳因星风的质量损失率 $-2.38 \times 10^{-14} M_\odot/\text{yr}$ 和因光子辐射造成的质量损失率 $-6.95 \times 10^{-14} M_\odot/\text{yr}$, 两者之和的总损失率为

$$\left(\frac{dM}{dt} \right)_0 = -9.33 \times 10^{-14} M_\odot/\text{yr} \quad (15)$$

这是目前太阳的质量损失率。

由(7)式给出 α 的常数数值可写成:

$$\alpha = -\frac{1}{M^3} \frac{dM}{dt} = -\frac{1}{M_0^3} \left(\frac{dM}{dt} \right)$$

将(15)式代人上式并令 $M_\odot = M_0$, 则有

$$\alpha = +9.13 \times 10^{-14} / M_0^2 (\text{yr}^{-1}) = 2.30 \times 10^{-80} (\text{g}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}) \quad (16)$$

或者

$$\alpha M_0^2 = 9.13 \times 10^{-14} / \text{yr} \quad (17)$$

将 αM_0^2 值代人(8)式中, 可得太阳质量损失随时间变化的公式

$$M = M_0 \left[1 + (2 \times 9.13 \times 10^{-14} / \text{yr})(t) \right]^{-1/2} \quad (18)$$

再将 αM_0^2 值代人(13)-(14)式可得太阳角速度随时间变化的公式

$$\Omega = \Omega_0 \left[1 + (2 \times 9.13 \times 10^{-14} / \text{yr})(t) \right]^{-3/2} \quad (19)$$

$$\therefore \delta\Omega = \Omega_0 \left\{ \left[1 + (1.826 \times 10^{-13} / \text{yr})(t) \right]^{-3/2} - 1 \right\} \quad (20)$$

太阳在主序阶段停留大约 100 亿年时间, 所以本文计算太阳在主序前半程 4×10^9 (40 亿)年间 1×10^9 年, 2×10^9 年, 3×10^9 年和 4×10^9 年各阶段太阳自转角速度的减速值。将各年代人上式(18)~(20)便得到表 1 中的 M/M_0 , Ω/Ω_0 以及 $\delta\Omega/\Omega$ 各值。

4. 讨论

1) 从表 1 中的计算结果可以看出太阳质量和自转角速随时间逐渐减少, 但减少很慢。当太阳到达 4×10^9 年(40 亿年)质量流失仅为现在太阳质量的 0.0045%, 而角速减速为目前角速的 0.023%, 所以减少值很小。

2) 本文给出的理论式和计算值是近似的, 因为在推导公式时, k 值取 3, 实际上 $3 < k < 4$ 此外, 正如文[7]所言, 太阳在主序前半程, 半径和光度只有很小变化, 所以在前半程 50 亿年以前半径几乎视为常

数。故本文取 40 亿年前 $\frac{dR}{dt} = 0$ 。这也是近似的

3) 使太阳自转产生变化有很多因素,除太阳质量流失使其角速产生减慢的机制外,还有太阳外部和内部电磁场使角速减慢的机制[7] [13]-[15]。这些机制在太阳从主序前演化到主序以及后主序阶段有不同机制作用。本文主要研究太阳在主序前半程阶段质量流失对自转产生的影响,至于其它机制将在以后讨论。

4) 作者在前文主要研究太阳风造成的螺旋磁场产生的磁转矩对太阳自转角速减慢的影响给出的理论值是 $\dot{\Omega}/\Omega$ 的相对值,而 Ω 和 Ω_0 成为指数关系的形式。本文主要研究太阳风和光子辐射造成的太阳质量损失对太阳角速产生的影响。给出的理论值是 Ω/Ω_0 的相对值,而 Ω 和 Ω_0 成为线性关系的形式。此外,本文在理论上的推导和出发点也同前文有所不同。

参考文献 (References)

- [1] Ezer D, Cameron G W. Canad. J. Phys, 1965, 43: 1497 <http://dx.doi.org/10.1139/p65-140>
- [2] Icko Jr. I. Astrophys. J, 1967, 147: 624 <http://dx.doi.org/10.1086/149040>
- [3] Schroder K P, Smith R C. MNRAS, 2008, 386: 155 <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13022.x>
- [4] 李林森. 天文与天体物理, 2013, 1: 45
- [5] 李林森. 空间科学学报, 1990, 4: 274
- [6] Schatman E. Star Evolution // Fermi E, Gratton. Proc. 28th Course International School of Physics. New York Acada Press, 1963: 177
- [7] 林元章. 太阳物理学. 北京: 北京科学出版社, 2000: 124, 128, 381
- [8] Jeans, J H. Astronomy and Cosmogony. Cambridge Univ. Press, 1929: 131
- [9] Jeans J H. MNRAS, 1924, 84: 912
- [10] 铃木敬信. 太阳の热源. 恒星社版, 1952: 51
- [11] 荒木俊马, 清永嘉一. 天文宇宙物理学总论 (恒星物理学). 宇宙物理学研究会出版, 1950: 262
- [12] Li L-S. MNRAS, 2013, 431: 2971 <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stt248>
- [13] Durney B R. On Theories of Solar Rotation, Basic Mechanisms of Solar Activity // Bumba, Kleczek. Proceeding IAU. 1976: 243
- [14] Alfvén H. Ark. f. Math. Astr. o Fysik, 1942, 6
- [15] Ferraro V C A. MNRAS, 1937, 97: 458 <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stt248>