

Physical Significance of the Distance Law of Planets and Regular Satellites

Jinbao Li

Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an
Email: jinbaol@chd.edu.cn

Received: Jan. 21st, 2013; revised: Feb. 28th, 2013; accepted: Mar. 12th, 2013

Copyright © 2013 Jinbao 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: In this paper, the nebula during the solar system formation period is assumed to be distributed in disk form, and the nebula material was rotating around the sun following Kepler's laws. If the distance of a rotating planetary fetal from the sun is R and its period of revolution is T , the period of revolution of the nebula material at a distance of $1.5874R$ should be $2T$ following Kepler's third law. Therefore, 1) the locations, where the collisions and the superior conjunctions for the planetary fetals at distances $1R$ and $1.5874R$ to occur, should keep invariant; 2) when their included angle is 180 degree, the disturbing force on the nebula at distance $1.5874R$ caused by the planetary fetal at distance R will appear at the same radius vector; 3) during the same evolution period, the number of collisions and superior conjunctions for them will be the most. Due to the integrated combining actions by the three factors mentioned above, the nebula disk at distance $1.5874R$ will form gaps to contract towards the planetary fetal at distance R , resulting to the fact that the distance ratios of two neighboring planets or satellites are usually around the constant 1.5874. The gaps in the rings of Saturn, Uranus and Neptune were just caused by disturbing forces of satellites based on the rules found, *i.e.*, a ring gap at R usually corresponds to a satellite at distance $1.5874R$. According to deduction from Kepler's third law, the distance law of planets and regular satellites are decided by three factors, *i.e.*, the constant 1.5874, the orbital eccentricity and the mass of the planet or satellite. The larger for the orbital eccentricity, the larger for the distance ratio; the larger mass for a planet or satellite, the larger distance from the planet or satellite inside and therefore closer to the ones outside.

Keywords: Planet; Regular Satellite; Distance Law; Kepler's Third Law; Nebula Disk

太阳系行星、规则卫星距离规律的物理意义

李金宝

长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 西安
Email: jinbaol@chd.edu.cn

收稿日期: 2013年1月21日; 修回日期: 2013年2月28日; 录用日期: 2013年3月12日

摘要: 太阳系形成演化过程中星云成盘状分布, 在星云盘中星云绕太阳做开普勒运动。如果一个绕转体行星胎离中心天体的距离为 R , 它的公转周期为 T , 依据开普勒第三定律推导可证明位于 $1.5874R$ 处的星云绕中心天体的公转周期恰好等于 $2T$, 因此: 1) R 处的行星胎与 $1.5874R$ 处的星云发生“冲”、“上合”的位置将相对保持恒定; 2) 两者之间的夹角 180 度时, 轨道为 R 处的行星胎对轨道为 $1.5874R$ 处星云摄动力总是在同一向径出现; 3) 在相等的演化时间里, R 处的行星胎与 $1.5874R$ 处的星云在同一向径发生“冲”、“上合”的次数最多。在这三种因素的综合累积作用下, 使星云盘在 $1.5874R$ 处出现空隙并向轨道 R 处收缩, 被行星胎吸积, 因此两相邻行星、规则卫星距离比值在 1.5874 这个常数左右摆动。土星、天王星、海王星的光环缝是由于卫星的摄动形成,

当一条光环缝距中心天体的距离为 R ，那么在 $1.5874R$ 处存在一个对应的卫星。根据开普勒第三定律的准确表达式推导论证出太阳系行星、规则卫星距离规律由 3 个因子决定，1) 常数项 1.5874；2) 行星、规则卫星轨道的偏心率(偏心率大者，则相邻外侧行星、规则卫星与其距离比值大)；3) 行星、规则卫星自身质量(质量大者，则远离内侧行星、卫星，靠近外侧行星、卫星)。

关键词：行星；规则卫星；距离规律；开普勒第三定律；星云盘

1. 引言

1766 年德国物理教师提丢斯(J.D.Titius)研究了行星与太阳距离的分布规律，他首先提出用下述方法来表示行星和太阳的平均距离：取一个数列 0,3,6,12,24,... 在每个数上加 4 以后再除以 10，就得到以天文单位表示的各个行星到太阳的平均距离。1772 年德国波得(J. E. Bode)较详细地研究了这个问题。因此，这一规律称为“提丢斯-波得定则”。把这条规律写成公式就是

$$a_n = 0.4 + 0.3 \times 2^{n-2} \text{ 天文单位}$$

在此公式中，当 $n = 1$ 时，即对于水星， $n - 2$ 不能取 -1 ，而应当取 $-\infty$ ，即公式的右边第 2 项完全不要^[1]。“提丢斯-波得定则”说明，在太阳系中行星到太阳的距离应当存在一定的分布规律。

在过去的几十年间，不断有人针对行星轨道距离提出不同的经验公式^[2-6]。但是，不论这些公式如何精确，人们对于这些经验公式所蕴含着的物理规律却没有能够给出合理的解释。最近，有人利用最新的太阳系外行星系统的数据，也发现了类似我们太阳系的行星距离的经验公式^[6,7]。这一发现揭示了：行星与母恒

星的距离分布的确不是随机的，是宇宙中普遍存在的规律。很可惜，目前国际上在此领域的研究非常匮乏。人们虽然发现了其中的一些规律，却不能给出令人满意的解释，尤其是不能与行星起源和演化问题进行有效结合。可以说，行星(也包括规则卫星)的距离规律一直是研究太阳系起源演化的热门话题，但其蕴含的物理意义基本没有被揭示。大多数工作始终停留在寻找经验公式的初级阶段。在关键问题上，如太阳系是如何演化导致今天的行星分布规律等，至今未取得公认的结论。

与以前的研究者不同，本文试图对其中物理意义做出如下探讨和研究。

2. 行星胎与星云盘中星云“冲”、“上合”位置不变的周期关系

如图 1 所示，太阳系形成演化时，构成行星、卫星的物质成盘状分布，这是公认的事实。在图 1(c)中，太阳(M_t)、行星胎(M_x)、各个星云质点 m_1, m_2, \dots, m_n 分布在一条直线上，此时行星胎(M_x)对各个星云质点的摄动力最大。

为了做解剖性推导论证，设定以图 1(c)直线为起

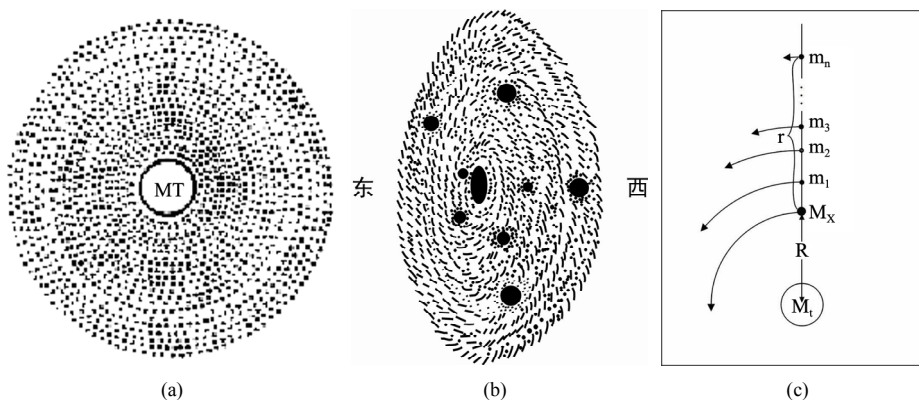


Figure 1. The Solar nebula disk schematic diagram: (a) The solar nebula disk early view; (b) The solar nebula disk side view; (c) The solar nebula's angular velocity is different according to it's distance from the sun

图 1. 太阳系星云盘示意图：(a) 早期太阳系星云盘正视图；(b) 行星形成中星云盘侧视图；(c) 星云离太阳距离不同而自转角速度不同

始点，位于直线上的行星胎(M_x)、各个星云质点 m_1, m_2, \dots, m_n 绕太阳(M_t)做开普勒运动。显然行星胎离太阳最近，公转角速度最快，随着离太阳半径的增大，星云 m_1, m_2, \dots, m_n 的公转角速度越来越慢，即公转周期越来越长。当轨道 R 处的行星胎绕太阳公转一周回到起始点位置时，在直线上的 m_1, m_2, \dots, m_n 中，总存在一个 m 点，占据特殊的轨道 $R+r$ ，在这个轨道 $R+r$ 上的星云 m 恰好公转到起始点相反的方向，与回到起始点的行星胎出现“上合”，即星云质点-太阳-行星胎3个天体在一条直线上，出现摄动力最大；当行星胎公转完成第2周回到起始点时，位于轨道 $R+r$ 上的星云 m 恰好公转到起始点，与行星胎出现第2次“冲”，因此位于轨道 $R+r$ 上的星云 m 公转周期是行星胎公转周期的2倍。

轨道 $=R+r$ 处的星云与轨道 R 处的行星胎出现“冲”、“合”最大摄动力的位置将相对保持恒定。

轨道 $>R+r$ 处的星云与轨道 R 处行星胎发生第2次“冲”的时间是从行星胎公转的第2周开始，到第2周结束(不包括第2周)，但是发生“冲”的位置都发生了变化。

轨道 $<R+r$ 处的星云与行星胎发生第2次“冲”的时间是从行星胎公转的(第2周结束)第3周开始。离行星胎的距离越近，出现“冲”的周期越长，但是位置都发生了变化。

结论：如果星云盘中位于轨道 $R+r$ 上的星云公转周期是行星胎公转周期的2倍，则这个星云与行星胎出现“冲”、“上合”的位置将相对保持恒定，并且在一条直线段上，即“冲”、“上合”的夹角始终是 180° 。在相等的演化时间里，轨道 $R+r$ 上的星云与行星胎在同一位置出现“冲”、“上合”的次数最多。其它位置上的星云与行星胎出现“冲”、“上合”的位置都在变化；在相等的演化时间里，星云与行星胎在同一位置出现“冲”、“上合”的次数都少于2倍周期轨道处的星云。

根据上述论证得出的结论可以看出，行星胎吸引星云最快的区间位于它的2倍周期轨道处。

3. 确定与行星胎为2倍周期的轨道 r

设同一时刻有 $R+r_1, R+r_2, \dots, R+r_n$ (R 是行星胎到太阳的距离)不同轨道处的星云 m_1, m_2, \dots, m_n 与行星

胎 M_x 从起始点均作开普勒运动(图1(c))，下一次各个星云质点(m_1, m_2, \dots, m_n)、行星胎(M_x)、太阳(M_t)三点在一直线上时，行星胎 M_x 转过的时间 t 可用下式表示：

$$t = \frac{360^\circ}{\omega_{M_x} - \omega_m} (\omega_{M_x} > \omega_m) \quad (\text{距离是} 360^\circ) \quad (1)$$

上式中： ω_{M_x} 是行星胎 M_x 绕太阳公转的角速度， ω_m 是星云 m 绕太阳公转的角速度。

设行星胎的周期为 T_x ，星云的周期为 T_m 。
行星胎的角速度：

$$\omega_{M_x} = 360^\circ/T_x \quad (2)$$

星云的角速度：

$$\omega_m = 360^\circ/T_m \quad (3)$$

将(2)、(3)式代入(1)式：

$$t = \frac{1}{1/T_x - 1/T_m} \quad (4)$$

根据克普勒第三定律：

$$\frac{T_m^2}{T_x^2} = \frac{(R+r)^3}{R^3}$$

(r 是行星胎 M_x 轨道外侧星云 m 到行星胎的距离， R 是行星胎 M_x 距太阳 M_t 的距离)

$$T_m = \frac{(R+r)^{3/2}}{R^{3/2}} \cdot T_x \quad (5)$$

把(5)式中 T_m 代入(4)式：

$$\begin{aligned} t &= \frac{1}{1/T_x - 1/\left(\frac{(R+r)^{3/2}}{R^{3/2}} \cdot T_x\right)} \\ t &= \frac{T_x}{1 - 1/\left(\frac{(R+r)^{3/2}}{R^{3/2}}\right)} \\ t &= \frac{T_x}{1 - [R/(R+r)]^{3/2}} \end{aligned} \quad (6)$$

设行星胎的自转周期 $T_x=1$ ，代入(6)式

$$t = \frac{1}{1 - [R/(R+r)]^{3/2}} \quad t > 1 \quad \text{时间以周期为单位} \quad (7)$$

在(7)式的方程左边，令 $t=2$ ，解出 $r=0.5874R$ ，行星胎距离太阳为 R ，仅有位于行星胎轨道外侧 $r=$

0.5874R(即 $R + r = 1.5874R$)处的星云绕太阳公转的周期是行星胎公转周期的 2 倍。

在(7)中代入不同系数 $r = x \cdot R$, 计算出行星胎与不同 r 处星云相邻两次发生“冲”所转过的周期(角度), 列于表 1。

由表 1 可以看出:

当 $r > 0.5874R$ 时, 行星胎与星云相邻两次“冲”出现时, 行星胎公转的角度 $< 720^\circ, > 360^\circ$;

当 $r = 0.5874R$ 时, 行星胎与星云相邻两次“冲”出现时行星胎公转的角度 $= 720^\circ$;

当 $r < 0.5874R$ 时, 行星胎与星云相邻两次“冲”出现时行星胎公转的角度 $> 720^\circ$ 。

4. 影响行星距离规律的 3 个因子

牛顿根据万有引力定律得出克普勒第三定律的准确表达式:

$$\frac{a^3}{T^2(M_T + M_x)} = \frac{G}{4\pi^2} \quad (8)$$

上式中 M_T 是太阳的质量, 由于太阳系形成演化过程是一个星云盘, 所以各个行星胎轨道内侧的质量 M_T 是一个变量, 离太阳中心越远, M_T 越大。设第一个行星水星轨道以内太阳的质量加星云盘的质量总和为 M_{T1} , 由(8)式可知下式:

$$T_1^2 = \frac{a_1^3 \cdot 4\pi^2}{G(M_{T1} + M_{x1})} \quad (9)$$

(9)式中 a_1 是水星轨道半长径, M_{x1} 是水星胎的质量, M_{T1} 是太阳质量加水星轨道以内星云盘的质量。

设轨道 $a_1 + r$ 处的星云 m 绕太阳公转的周期为 T_2 , T_2 是水星周期 T_1 的 2 倍:

$$T_2 = 2T_1 \quad T_2^2 = 4T_1^2 \quad (10)$$

Table 1. The planetary embryo's revolution period when the three celestial which are different r nebula (m), planets tire (M_x) and the sun (M_T) adjacent twice in a line
表 1. 不同 r 处星云(m)、行星胎(M_x)与太阳(M_T)三个天体相邻两次在一直线上时, 行星胎公转的周期

$r = x \cdot R$	0.3R	0.4R	0.5R	0.5874R	0.7R	0.8R	0.9R
发生“冲”的周期 t	3.07	2.25	2.19	2	1.822	1.71	1.62
公转角度 ($360^\circ \times t$)	1106.5	908.3	790.1	720	655.92	614.4	582.36

将(9)式 T_1^2 代入(10)式:

$$T_2^2 = \frac{16a_1^3 \cdot \pi^2}{G(M_{T1} + M_{x1})} \quad (11)$$

设 $a_1 + r = a_2$, 由克普勒第三定律的准确表达式(8)式可知:

$$a_2^3 = \frac{GT_2^2(M_{T2} + m)}{4\pi^2} \quad (12)$$

上式中 m 表示星云质点, M_{T2} 是星云 m 轨道以内星云盘质量加太阳质量。将(11)式 T_2^2 代入(12)式:

$$a_2^3 = \frac{M_{T2} + m}{M_{T1} + M_{x1}} \cdot 4a_1^3$$

$$a_2 = \left(\frac{M_{T2} + m}{M_{T1} + M_{x1}} \right)^{1/3} \cdot 4^{1/3} a_1 \quad (13)$$

a_1 是水星轨道半长轴, 设 q 为行星的近日距, e 为轨道偏心率, 则有:

$$a_1 = \frac{q_1}{1 - e_1} \quad (14)$$

将(14)式代入(13)式

$$a_2 = \left(\frac{M_{T2} + m}{M_{T1} + M_{x1}} \right)^{1/3} \times 1.5874 \frac{q_1}{1 - e_1} \quad (15)$$

(15)式中 m 更换为行星的质量 M_x , 现在行星距离规律的准确表达式如下:

$$a_{n+1} = 1.5874^n \frac{q_n}{1 - e_n} \left(\frac{M_{Tn+1} + M_{xn+1}}{M_{Tn} + M_{xn}} \right)^{1/3} \quad (16)$$

($n \neq 0$, 是正整数)

上式中:

1.5874: 是一个常数($4^{1/3} = 1.5874$);

a_n : 是第 n 个行星或规则卫星椭圆轨道长半轴;

q_n : 是第 n 个行星的近日距、或者是规则卫星在轨道上离中心天体最近的距离;

e_n : 是第 n 个行星或规则卫星椭圆轨道的偏心率;

M_{Tn} : 是第 n 个行星或者卫星轨道以内星云盘的质量加中心天体的质量;

M_{Tn+1} : 是与 n 相邻外侧的行星或者卫星轨道以内星云盘质量加中心天体的质量;

M_{xn} : 是第 n 个行星或者卫星的质量;

M_{xn+1} : 是与 n 相邻的外侧行星或者卫星的质量。

4.1. 第一个因子: (16)式中 1.5874 常数

4.1.1. 行星、规则卫星距离规律与 1.5874 常数的相关性

在(16)式中, 不考虑第 3 个因子, 当 $n=1$ 时, $a_2 = 1.5874a_1$, $[a_1 = q_1/(1-e_1)]$, a_1 是水星轨道半长轴, a_2 是金星轨道半长轴。

如果距离规律用天文单位来表示, 第一个绕转体水星离太阳的距离是 $a_1 = 0.4$ 天文单位, 行星距离规律表达式如下:

$$a_{n+1} = 0.4 \times 1.5874^n \text{ (天文单位)} \quad (17)$$

(17)式中 $n=0$ 时, $a_1 = 0.4 \times 1.5874^0 = 0.4$, 是水星到太阳的距离。当 $n=1$ 是, 金星到太阳的距离 $a_2 = 0.4 \times 1.5874^1 = 0.635$, 在(17)式中代入数据计算数值与提丢斯-波德定则经验公式计算数值进行比较, 列于表 2。

到木星以外的行星误差比较大, 参阅后文用第 3 个因子来说明。

金星到太阳的距离:

$$0.4 + 0.3 \times 2^0 = 0.7 > 0.4 \times 4^{1/3} = 0.635 \text{ 参阅后文第 2 个}$$

因子来说明。

土星由于轨道偏心率大, 因此天王星轨道远大于土星轨道的 1.5874 倍, 请参阅后文讨论的第 2 个因子。

天王星与海王星之间符合 1.5874 常数关系, 天王星到太阳的距离 19.2 (天文单位) $\times 1.5874 = 30.48$ 天文单位, 恰好与海王星到太阳中心的距离 30.2 天文单位接近。

火星到太阳的距离是 0.4 乘以 $4^{3/3}$ 次方, 即为 $0.4 \times 4 = 1.6$ 天文单位, 与提丢斯-波得定则完全相等。

笔者发现如果以太阳半径为初始值, 行星距离规律与常数 1.5874 的关系如下: 已知太阳的半径 $R_{\odot} = 6.9599 \times 10^{10} \text{ cm}$, 行星到太阳的平均距离可用如下公式表示 $a_x = 1.5874^n \times R_{\odot}$ (太阳半径)(n 为正整数), 水星到太阳的距离 $n=9$ (是太阳半径的 64 倍); 金星到太阳的距离 $n=11$; 地球到太阳的距离 $n=12$; 火星到太阳的距离 $n=13$; 小行星带到太阳的距离 $n=14$; 木星到太阳的距离 $n=15$; 土星到太阳的距离 $n=16$; 天王星到太阳的距离 $n=17$; 海王星到太阳的距离 $n=18$ (参阅表 3)。

木卫系统中, 以木星半径(R_m) $7.14 \times 10^4 \text{ km}$ 为初

Table 2. The comparison between theoretical calculation value and the experience formula calculation value under Titius Bode's law
表 2. 理论计算值与提丢斯-波德定则经验公式计算值比较

提丢斯-波德定则经验值 ($a_n = 0.4 + 0.3 \times 2^{n-2}$)	理论计算值 ($a_{n+1} = 0.4 \times 1.5874^n$)	对应的行星
初始值: 0.4	初始值: $a_1 = 0.4 \times 1.5874^0$	水星到太阳的距离
$0.4 + 0.3 \times 2^0 = 0.7$	$0.4 \times 1.5874^1 = 0.635$	金星到太阳的距离
$0.4 + 0.3 \times 2^1 = 1$	$0.4 \times 1.5874^2 = 1.008$	地球到太阳的距离
$0.4 + 0.3 \times 2^2 = 1.6$	$0.4 \times 1.5874^3 = 1.6$	火星到太阳的距离
$0.4 + 0.3 \times 2^3 = 2.8$	$0.4 \times 1.5874^4 = 2.53$	小行星带到太阳的距离

Table 3. The comparison between the distance theoretical calculation value of the planets from the sun and actual value
表 3. 行星离太阳的距离理论计算值与实际值对比

行星	$a_x = 1.5874^n \cdot R_{\odot}$	计算结果 S_1	实际距离 S_2	偏差率 $1 - \frac{S_1}{S_2}$
水星	$1.5874^9 \cdot R_{\odot}$	$4.454 \times 10^{12} \text{ cm}$	$4.59 \times 10^{12} \text{ cm}$	0.03
金星	$1.5874^{11} \cdot R_{\odot}$	$1.122 \times 10^{13} \text{ cm}$	$1.09 \times 10^{13} \text{ cm}$	-0.029
地球	$1.5874^{12} \cdot R_{\odot}$	$1.78 \times 10^{13} \text{ cm}$	$1.52 \times 10^{13} \text{ cm}$	-0.17
火星	$1.5874^{13} \cdot R_{\odot}$	$2.828 \times 10^{13} \text{ cm}$	$2.49 \times 10^{13} \text{ cm}$	-0.135
小行星带	$1.5874^{14} \cdot R_{\odot}$	$4.489 \times 10^{13} \text{ cm}$	$4.25 \times 10^{13} \text{ cm}$	-0.056
木星	$1.5874^{15} \cdot R_{\odot}$	$7.126 \times 10^{13} \text{ cm}$	$7.4 \times 10^{13} \text{ cm}$	0.007
土星	$1.5874^{16} \cdot R_{\odot}$	$1.13 \times 10^{14} \text{ cm}$	$1.347 \times 10^{14} \text{ cm}$	0.16
天王星	$1.5874^{17} \cdot R_{\odot}$	$2.85 \times 10^{14} \text{ cm}$	$2.869 \times 10^{14} \text{ cm}$	0.0066
海王星	$1.5874^{18} \cdot R_{\odot}$	$4.52 \times 10^{14} \text{ cm}$	$4.537 \times 10^{14} \text{ cm}$	0.004

注: 本表中的实际距离; 小行星带据参考文献[1]87 页, 行星离太阳的实际距离见参考文献[9]40 页。

始值, 乘以 1.5874 的 n 次方, $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$, 理论计算的距离与实际距离比较接近(参阅表 4)。

土卫系统中, 以土星半径(R_t) 6×10^4 km 为初始值, 乘以 1.5874 的 n 次方, $n = 1, 2, 3, 4, 5$, 理论计算的距离与实际距离比较接近; 以土星光环内缘 $R_g = 7.3 \times 10^4$ km 为初始值, 乘以 1.5874 的 n 次方, $n = 1, 2, 3$, 理论计算的距离与实际距离比较接近, 法兰西环缝半径 $R(9 \times 10^4$ km) 的 $1.5874R$ 处, 有土卫十五、土卫十六、土卫十七 3 个卫星占据同一轨道(参阅表 5)。

天王星系统中, 以天王星半径 $R_T = 2.59 \times 10^4$ km 为初始值, 乘以 1.5874 的 n 次方, $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$, 理论计算的距离与实际距离比较接近(参阅表 6)。

海王星系统比较复杂, 海王星半径 2.5×10^4 km, 乘以 1.5874 的 1 次方是光环内缘, 乘以 1.5874 的 2 次方是海卫六; 海卫三的轨道 4.8×10^4 km, 乘以 1.5874 的 1 次方是海卫七, 乘以 1.5874 的 2 次方是海卫八;

海王星光环内缘与海王星半径(海王星表面)之间距离的中点, 距海王星中心的距离为 $(4.18 - 2.5)/2 + 2.5 = 3.34 \times 10^4$ km, 乘以 1.5874 的 1 次方, 正好是海卫五的轨道; 相邻两个光环之间距离的中点到海王星中心的距离为 4.75×10^4 km, 乘以 1.5874 的 1 次方是海卫七, 乘以 1.5874 的 2 次方是海卫八(参阅表 7)。

4.1.2. 行星光环缝与卫星的对应关系

同样可以证明, 如果在距离行星中心 $1.5874R$ 轨道处有个卫星在绕中心天体公转, 它与轨道为 R 处星云的“下合”、“上合”总是在同一位置发生; 对 $1.5874R$ 轨道处的卫星来说与 R 处星云“下合”、“上合”之间的夹角为 180° 。因此轨道为 $1.5874R$ 处的卫星对轨道为 R 处的星云最大摄动力总是在同一向径出现; 在相等的演化时间里, $1.5874R$ 处的卫星与 R 处的星云在同一位置发生“下合”、“上合”次数是最多, 这几

Table 4. The correlation between the distance rule of Jupiter, satellites system and the 1.5874 constants
表 4. 木星系统距离规律与 1.5874 常数的相关性

初始值	$a_n = 1.5874^n R_m$	计算结果(10^4 km)	实际距离(10^4 km)	存在天体
木星半径: $R_m = 7.14 \times 10^4$ km	$1.5874 R_m$	11.33	12.64	木卫十五、木卫十六
	$1.5874^2 R_m$	17.99	18.13	木卫五
	$1.5874^3 R_m$	28.56	22.24	木卫十四
	$1.5874^4 R_m$	45.34	42.16	木卫一
	$1.5874^5 R_m$	71.96	67.09	木卫二
	$1.5874^6 R_m$	114.24	107	木卫三
	$1.5874^7 R_m$	181.34	188	木卫四
	$1.5874^{11} R_m$	1151.45	1111	木卫十三

注: 卫星实际距离据参考文献[10]258 页表 5.6。参考文献[11]320 页表 5.17, 325 页表 5.18, 328 页表 5.19。

Table 5. The correlation between the distance rule of Saturn, satellites system and the 1.5874 constants
表 5. 土卫系统距离规律与 1.5874 常数的相关性

初始值 R	$A_n = 1.5874^n R$	计算距离(10^4 km)	实际距离(10^4 km)	存在天体及光环缝
土星半径 $R_t = 6 \times 10^4$ km	$R_t \times 1.5874$	9.52	9.5	光环缝
	$R_t \times 1.5874^2$	15.12	15.14	土卫 11、10
	$R_t \times 1.5874^3$	23.999	23.8	土卫 2
	$R_t \times 1.5874^4$	38.09	37.74	土卫 4、12
	$R_t \times 1.5874^5$	60.47	60	G 环
	$R_g \times 1.5874$	11.59	12	土卫 18, 卡西尼环缝
光环内缘 $R_g = 7.3 \times 10^4$ km	$R_g \times 1.5874^2$	18.39	18.55	土卫 1、
	$R_g \times 1.5874^3$	29.20	29.47	土卫 3、13、14
法兰西环缝 $R_h = 9 \times 10^4$ km	$R_h \times 1.5874$	14.28	14.17	土卫 17、16、15

注: 土卫系统参考文献[11]325 页表 5.18, [10]258 页表 5.6, [12]http://zhidao.baidu.com/question/42087024.html。

Table 6. The correlation between the distance rule of Uranus, satellites system and the 1.5874 constants
表 6. 天王星系统距离规律与 1.5874 常数的相关性

初始值 R	$A_n = 1.5874^n R$	计算距离(10^4 km)	实际距离(10^4 km)	存在天体及光环缝
天王星半径 $R_T = 2.59 \times 10^4$ km	$1.5874R_T$	4.11	4.22	天王星光环内侧
			6.3	天卫十
	1.5874^2R_T	6.53	6.4	天卫十一
			6.6	天卫十二
	1.5874^3R_T	10.36	12.94	天卫五
	1.5874^4R_T	16.45	19.1	天卫一
	1.5874^5R_T	26.11	26.63	天卫二
	1.5874^6R_T	41.44	43.59	天卫三
	1.5874^7R_T	65.78	58.39	天卫四

注：卫星实际距离据参考文献[11]328 页表 5.19，参考文献[10]258 页表 5.6，[13]http://www.starparadise.net/solar/html/solar_system/nineplanets/uranus/uranus.htm。

Table 7. The correlation between the distance rule of Neptune, satellites system and the 1.5874 constants^[14]
表 7. 海王星系统距离规律与 1.5874 常数的相关性^[14]

初始值 $R(10^4$ km)	$A_n = 1.5874^n R$	计算距离(10^4 km)	实际距离(10^4 km)	存在天体及光环缝
海王星半径 2.5	2.5×1.5874	3.96	4.18	光环内缘
	2.5×1.5874^2	6.299	6.2	海卫六
海卫三轨道：4.8			4.8	海卫三
	4.8×1.5874	7.62	7.4	海卫七
光环内缘与海王星半径之间： $(4.19 - 2.5)/2 + 2.5 = 3.34$	7.4×1.5874	11.75	11.8	海卫八
	3.34×1.5874	5.301	5.3	海卫五
两光环中间距海王星距离 $(5.32 - 4.18)/2 + 4.18 = 4.75$	4.7×1.5874	7.54	7.4	海卫七
	4.7×1.5874^2	11.84	11.8	海卫八

本表数据来源：[14]<http://www.astron.sh.cn/sun/haiwang.html>。

种因素的综合累积效应，使 R 处的光环出现缝隙。这些光环物质通过相互碰撞，在光环缝外侧形成小卫星，如卡西尼环缝中就有土卫十八。可以得出结论：如果距中心天体 R 处存在光环缝，那么在 $1.5874R$ 处必定存在一颗对应的卫星，例如卡西尼环缝距土星中心 12 万公里 $\times 1.5874 = 19.05$ 万公里，在 18.55 万公里处是土卫一、19.31 万公里处是“土卫 S/2004S1”^[15](参阅表 8)。

根据土星光环缝与规则卫星之间的对应关系，1997 年笔者在陕西省内部刊物曾发表论文指出：“恩克环缝距土星中心 13.53 万公里，这个环缝周期的 2 倍周期轨道是 $13.53 \times 1.5874 = 21.48$ 万公里，在距土星中心 21.48 万公里的轨道上应有一个卫星(目前未见报道)”，文章发表 7 年之后，2004 年 6 月 1 日美国发射的“卡西尼号”土星探测器在距离土星 21.1 万公里的轨道上发现了这颗卫星，它的直径只有 4 公里，被

正式命名为土卫三十三，理论预言与美国探测的轨道距离误差仅有 0.38 万公里。

关于光环物质受卫星吸引形成光环缝的原理，做如下讨论：在以 R 为半径的圆周上，北侧(上)是红点；东侧(右)是绿点；南侧(下)是蓝点；西侧(左)是黄点，这四个方位不同颜色的质点都在环绕中心逆时针做开普勒运动。要是有一个人在半径为 $1.5874R$ 处的轨道上，从北侧看到红点的位置为起始点，也逆时针做开普勒运动，那么这个人观察到这 4 个不同颜色质点是“静止不动”的，因为他在西侧永远看到的是绿色点；南侧永远看到的是蓝色点；东侧永远看到的是黄色点；北侧永远看到的是红色点。这种关系可以说明卫星对红色质点的最大摄动永远朝北、对绿色质点的最大摄动永远朝西、对蓝色质点的最大摄动永远朝南、对黄色质点的最大摄动永远朝东。这样在同一向径的反复吸引，使 R 处的光环物质离开原来的轨道形

Table 8. The correlation between the Saturn aura joint and the 1.5874 constants
表 8. 土星光环缝与 1.5874 常数的相关性

光环缝名称及半径 R	环缝半径 $R \times 1.5874(10^4 \text{ km})$	2 倍周期 1.5874R 处的卫星		
		计算距离(10^4 km)	实际距离(10^4 km)	对应卫星
$R = 7.3 \times 10^4 \text{ km}$ 处盖林缝	7.3×1.5874	11.59	12	卡西尼环缝, 土卫 18,
$R = 9 \times 10^4 \text{ km}$ 处法兰西环缝	9×1.5874	14.28	14.17	土卫 17、15、16
$R = 9.5 \times 10^4 \text{ km}$ 处环缝	9.5×1.5874	15.08	15.14	土卫 11、10
卡西尼环缝 $R = 12 \times 10^4 \text{ km}$	12×1.5874	19.05	19.31 18.55	土卫 S/2004 S1, 土卫 1(半径 390 km)
恩克环缝 $R = 13.53 \times 10^4 \text{ km}$, 土卫 18	13.53×1.5874	21.48	21.08 ^[15]	土卫三十三
先驱者环缝 $13.63 \times 10^4 \text{ km}$	13.63×1.5874	21.62	?	未知卫星
F 环的外缘 $R = 14.06 \times 10^4 \text{ km}$	14.06×1.5874	22.32	23.8	土卫 2(半径 500 km)

本表数据来源: 参考文献[11]25 页表 5.18, 参考文献[10]258 页表 5.6。其中“土卫三十三”、“土卫 S/2004S1”据网址 [15]http://www.cnsa.gov.cn/n615708/n620172/n677078/n751579/59588.html, [16]http://dili.geonet.cn/Photo/1047.shtml。

成光环缝, 并且在轨道 R 附近凝聚成规则卫星。行星光环缝与卫星的对应关系实际资料如下:

距土星中心 $7.3 \times 10^4 \text{ km}$ 处盖林缝, 在其轨道的 1.5874 倍处, 是土卫十八; 法兰西环缝轨道的 1.5874 倍处, 对应有 3 颗卫星, 土卫十五、土卫十六、土卫十七; 卡西尼环缝轨道的 1.5874 倍处, 对应的卫星是土卫一; 恩克环缝轨道的 1.5874 倍处, 对应的卫星是土卫三十三; 先驱者环缝的 1.5874 倍处, 应有一颗未被发现的卫星, 待将来后人去验证(参阅表 8)。

天王星光环缝相互之间距离很近, 在每个环缝半径 R 的 1.5874R 处均存在对应的卫星, 如天卫九、天卫十、天卫星十二、天卫十三、天卫十四。依据光环缝与卫星的对应关系, 笔者预言在距天王星中心的距离 $7.17 \times 10^4 \text{ km}$ 、 $7.37 \times 10^4 \text{ km}$ 、 $7.8 \times 10^4 \text{ km}$ 处有 3 个未知的卫星, 待将来后人去验证(参阅表 9)。

海王星光环内缘与海王星半径(海王星表面)之间距离的中点, 距海王星中心的距离为 $(4.18 - 2.5)/2 + 2.5 = 3.34 \times 10^4 \text{ km}$, 乘以 1.5874 的 1 次方, 对应的卫星是海卫五; 光环外缘半径 R 的 1.5874R 处对应的卫星是海卫六; 相邻两个光环之间距离的中点到海王星中心的距离 R 的 1.5874R 处, 对应的卫星是海卫七; 距离海王星中心半径 $R = 9 \times 10^4 \text{ km}$ 处有环缝, 依据光环缝与卫星的对应关系, 笔者预言在距海王星中心 $9 \times 10^4 \text{ km} \times 1.5874 = 14.29 \times 10^4 \text{ km}$ 处应有 1 个未知的卫星, 待将来后人去验证(参阅表 10)。

4.2. 第二个因子是(16)式中 $[q_n/(1-e_n)]$ 的物理意义

这个因子是行星、卫星椭圆轨道的长半轴 $a = q_n/(1-e_n)$, 其物理内涵是在近日距 q_n 不变、轨道偏心率 e 值增大时, 椭圆轨道的长半轴 a 值将相应增大, 公转一周的时间 T 值也将增大。相应地, 在星云盘中与行星胎为 $2T$ 关系的星云周期将增加, 轨道半径将增大, 因此与行星胎出现“冲”、“上合”位置保持恒定、并且在一条直线上的星云轨道距离将增加, 其实质是行星胎吸引星云的范围向外延伸。因此凡是偏心率大的行星、卫星其相邻外侧行星距离比值大。如两个相邻的行星或卫星, 其内侧天体到中心天体的距离为 R_1 , 外侧天体到中心的距离为 R_2 , 那么: R_2/R_1 比值的大小, 与其相邻内侧轨道 R_1 处行星、卫星的偏心率 e 值具有正相关趋势: 可以看出凡是偏心率 e 值大者, 相应的 R_2/R_1 比值大(参阅表 11)。

类地星:

水星的偏心率 $e = 0.20563$ 最大; 距离比值: $=1.87$, 最大(R_2 是金星距离, R_1 是水星距离)。

火星的偏心率 $e = 0.09338$ 居第 2 位; 距离比值: $=1.77$, 居第 2 位(R_2 是小行星带平均距离, R_1 是火星距离)。

地球的偏心率 $e = 0.01672$ 居第 3 位; 距离比值: $=1.52$, 居第 3 位(R_2 是火星距离, R_1 是地球距离)。

金星的偏心率 $e = 0.00679$ 最小; 距离比值: $=1.38$, 最小(R_2 是地球距离, R_1 是金星距离)。

Table 9. The correlation between the Uranus aura joint and the 1.5874 constants^[17]
表 9. 天王星光环缝与 1.5874 常数的相关性^[17]

光环缝距离 R (10^4 km)	$A_n = 1.5874^n R$	2 倍周期 1.5874R 处的卫星		
		计算距离(10^4 km)	实际距离(10^4 km)	对应卫星
3.8	3.8×1.5874	6.03	6.2	天卫九
3.992	3.992×1.5874	6.34	6.3	天卫十
4.262	4.262×1.5874	6.765	6.6	天卫十二
4.36	4.36×1.5874	6.929	7.0	天卫十三
4.52	4.52×1.5874	7.17		未知卫星
4.643	4.643×1.5874	7.37		未知卫星
4.796	4.796×1.5874	7.61	7.5	天卫十四、1986U10
4.91	4.91×1.5874	7.8		未知卫星
	5.058×1.5874	8.02	8.6	天卫星十五

[17]http://baike.baidu.com/view/3092.htm(注: 天王星光环缝的确定是: 相邻外侧光环距天王星中心距离减去相邻内侧光环距天王星中心距离除以 2, 再加内侧光环距离)。

Table 10. The correlation between the Neptune aura joint and the 1.5874 constants^[14]
表 10. 海王星光环缝与 1.5874 常数的相关性^[14]

初始值 R (10^4 km)	$A_n = 1.5874^n R$	2 倍周期 1.5874R 处的卫星		
		计算距离(10^4 km)	实际距离(10^4 km)	对应卫星
光环内缘与海王星半径之间 $(4.19 - 2.5)/2 + 2.5 = 3.34$	3.34×1.5874	5.301	5.3	海卫五
光环外缘 4.19	4.19×1.5874	6.65	6.2	海卫六
两光环中间距海王星离距 $(5.32 - 4.19)/2 + 4.19 = 4.755$	4.75×1.5874	7.55	7.4	海卫七
环缝 $R_n = 9$	9×1.5874	14.29	?	未知卫星

[14]http://www.astron.sh.cn/sun/haiwang.html。

Table 11. Planetary orbit eccentricity (e) showed a positive correlation with R_2/R_1 value
表 11. 行星轨道偏心率(e)与 R_2/R_1 值呈现正相关性

行星	类地星			类木星				
	水星	火星	地球	金星	土星	木星	天王星	海王星
偏心率 e	0.20563	0.09338	0.01672	0.00679	0.05565	0.04845	0.04724	0.00585
R_2/R_1	1.87	1.77	1.52	1.38	2.02	1.83	1.57	1.31

注: 本表中 e 值据参考文献[10]238 页, R_2/R_1 值据[10]239 页。

类木星:

土星的偏心率 $e = 0.05565$, 最大; 距离比值: $=2.02$, 最大(R_2 是天文星距离, R_1 是土星距离)。土星由于轨道偏心率大, 因此天王星轨道远大于土星轨道的 1.5874 倍。

木星的偏心率 $e = 0.04845$, 居第 2 位; 距离比值: $=1.83$, 居第 2 位(R_2 是土星距离, R_1 是木星距离)。

天王星的偏心率 $e = 0.04724$, 居第 3 位, 距离比值: $=1.57$, 居第 3 位(R_2 是海王星距离, R_1 是天王星距离)。

海王星的偏心率 $e = 0.00585$, 最小。

木卫系统中偏心率 e 与 R_2/R_1 比值呈正相关(参阅表 12)。

木卫一偏心率 $e = 0.000$, $R_2/R_1 = 1.59132$ 。

木卫二偏心率 $e = 0.000$, $R_2/R_1 = 1.59487$ 。

木卫三偏心率 $e = 0.001$, $R_2/R_1 = 1.75700$ 。

土卫系统中偏心率 e 与 R_2/R_1 比值呈正相关(参阅表 12)。

土卫十五偏心率 $e = 0.002$, $R_2/R_1 = 1.0124$ 。

土卫十六偏心率 $e = 0.003$, $R_2/R_1 = 1.0165$ 。

Table 12. Satellite orbital eccentricity (e) showed a positive correlation with R_2/R_1 value
表 12. 卫星系统轨道偏心率(e)与 R_2/R_1 值呈正相关性

木卫系统					土卫系统				
卫星	偏心率 e	R_2/R_1	质量(g)	半径 R (km)	卫星	偏心率 e	R_2/R_1	质量(g)	半径 R (km)
木卫十六、木卫十五	很小	1.40586		10~20	土卫十八	很小	1.1069		40
木卫五	0.003	1.22394		120	土卫十五	0.002	1.0124		19 × 13
木卫十四	很小	1.89995		55 × 45	土卫十六	0.003	1.0165		75 × 50 × 30
木卫一	0.000	1.59132	891×10^{23}	1815	土卫十七	0.004	1.0685		55 × 42 × 33
木卫二	0.000	1.59487	487×10^{23}	1569	土卫十一、土卫十	0.009	1.2244		70 × 57 × 50
木卫三	0.001	1.757	1490×10^{23}	2635	土卫一	0.020	1.2830	0.37×10^{23}	196
木卫四	0.007		1065×10^{23}	2500	土卫二	0.004	1.2382	0.85×10^{23}	250
天卫系统					土卫三				530
					土卫十三	0.000	1.2806	6.26×10^{23}	12 × 11 × 11
					土卫十四				15 × 12 × 8
					土卫四	0.002		11.6×10^{23}	560
					土卫十二	0.005	1.3938		17 × 16 × 15
天卫五	0.017	1.4760	2.8×10^{23}	200	土卫五	0.001	2.3188	18.2×10^{23}	765
天卫一	0.0028	1.3942	51×10^{23}	665	土卫六	0.029	1.2119	1401×10^{23}	2576
天卫二	0.0035	1.6369	15×10^{23}	555	土卫七	0.104	2.4045		175 × 117 × 100
天卫三	0.0024	1.3395	87×10^{23}	800					
天卫四	0.0007		67×10^{23}	815					

本表数据来源：木卫系统：参考文献[11]320 页表 5.17, [10]258 页表 5.6；土卫系统：参考文献[11]325 页表 5.18, [10]258 页表 5.6；天卫系统：参考文献[11]328 页表 5.19, [10]258 页表 5.6。

土卫十七偏心率 $e = 0.004$, $R_2/R_1 = 1.0685$ 。

土卫十一偏心率 $e = 0.009$, $R_2/R_1 = 1.2244$ 。

土卫十偏心率 $e = 0.009$, $R_2/R_1 = 1.2244$ 。

土卫一偏心率 $e = 0.020$, $R_2/R_1 = 1.2830$ 。

天卫系统中偏心率 e 与 R_2/R_1 比值呈正相关(参阅表 12)。

天卫五偏心率 $e = 0.017$, $R_2/R_1 = 1.4760$ 。

天卫二偏心率 $e = 0.0035$, $R_2/R_1 = 1.6369$ 。

天卫一偏心率 $e = 0.0028$, $R_2/R_1 = 1.3942$ 。

天卫三偏心率 $e = 0.0024$, $R_2/R_1 = 1.3395$ 。

从上述列举数据可以看出：凡是轨道偏心率 e 值大的行星，其与外侧行星距离比值大。如水星的偏心率大，那么出现金星到太阳的距离与水星到太阳的距离比值最大；金星的偏心率最小，那么出现地球到太阳的距离与金星到太阳的距离比值最小。类木星、规则卫星系统也有这种特征。

4.3. 第三个因子是(16)式中

$$\left(\frac{M_{Tn+1} + M_{xn+1}}{M_{Tn} + M_{xn}} \right)^{1/3} \quad (18)$$

这个因数是根据牛顿得出的开普勒第三定律准确表达式证明出的结果，牛顿得出开普勒第三定律的准确表达式：

$$\frac{a^3}{T^2(M_T + M_x)} = \frac{G}{4\pi^2}$$

a ：椭圆轨道长半轴； T ：是周期； M_T ：是太阳的质量； M_x ：是行星的质量； G ：是万有引力常数。

在上式中方程的右边是不变常数，方程左边的分母上 M_x 值增大时必然引起分子上椭圆轨道半长轴 a 值增大。

从(16)式可以看出：第 3 个因子与太阳的质量，行星轨道内侧星云盘的质量，行星的质量都有关，由于太阳系形成演化过程是一个星云盘，所以各个行星轨道内侧的质量 M_T 是一个变量，如果把星云盘的密度 ρ 、厚度 h 近似看做均匀，则星云盘质量表达式为：

$$M_T = \pi r^2 h \rho$$

M_{Tn} ：是第 n 个行星或者卫星轨道以内星云盘的质量 + 中心天体的质量。在行星系统，当 $n = 2$ 时，金星轨道之内星云盘质量： $M_{T2} = \pi r_2^2 h \rho$ (r_2 是金星轨

道)。

$M_{T_{n+1}}$ ：是与 n 相邻外侧的行星或者卫星轨道以内星云盘质量加中心天体的质量。在行星系统，与金星相邻的外侧行星是地球，地球轨道之内星云盘的质量： $M_{T_3} = \pi r_3^2 h \rho$ (r_3 是地球轨道)。由于 $r_3 > r_2$ ，因此 $M_{T_3} > M_{T_2}$ ，即随着离太阳中心距离增加，星云盘的质量增加，因此 $M_{T_{n+1}} > M_{T_n}$ ， $M_{T_{n+1}}/M_{T_n} \geq 1$ 。

在行星、卫星系统中，由于中心天体的质量 + 其轨道内侧星云盘的质量 ($M_{T_{n+1}}$ 、 M_{T_n}) 远远大于行星、卫星的质量 ($M_{x_{n+1}}$ 、 M_{x_n})，因此分子上的 $M_{x_{n+1}}$ 、分母中的 M_{x_n} 可以近似忽略不计。由于 $M_{T_{n+1}}/M_{T_n} \geq 1$ ，因此这个因数大于等于 1：

$$\left(\frac{M_{T_{n+1}} + M_{x_{n+1}}}{M_{T_n} + M_{x_n}} \right)^{1/3} \geq 1$$

在此以土卫六为例来讨论上述因数对距离规律的影响。土卫系统中，土卫六的质量最大，其对相邻内侧、外侧距离具明显的影响。

令 $K = \left(\frac{M_{T_{n+1}} + M_{x_{n+1}}}{M_{T_n} + M_{x_n}} \right)^{1/3}$ 假设条件：

$M_{T_{n+1}} \approx M_{T_n} = B$ 则有：

$$K_{\text{土卫六}} = \left(\frac{B + M_{\text{土卫六}}}{B + M_{\text{土卫五}}} \right)^{1/3}$$

由于 $M_{\text{土卫六}} \gg M_{\text{土卫五}}$ 、 $K_{\text{土卫六}}$ 比值大，因此：土卫六的距离是 R_2 /土卫五的距离是 $R_1 = 2.3188$ ，距离比值增大。

求 $K_{\text{土卫七}}$ 比值： $K_{\text{土卫七}} = \left(\frac{B + M_{\text{土卫七}}}{B + M_{\text{土卫六}}} \right)^{1/3}$ ，由于

$M_{\text{土卫六}} \gg M_{\text{土卫七}}$ ， $K_{\text{土卫七}}$ 比值小，因此：土卫七的距离是 R_2 /土卫六的距离是 $R_1 = 1.2119$ ，距离比值减小。

以上事实说明土卫六的质量远远大于其相邻的内、外侧天体，计算 $K_{\text{土卫六}}$ 值时， $M_{\text{土卫六}}$ 放在分子上 K 值增大，引起 $K_{\text{土卫六}}$ 比值大，实际是土卫六远离内侧天体土卫五； $M_{\text{土卫六}}$ 放在分母上求 $K_{\text{土卫七}}$ ，引起 $K_{\text{土卫七}}$ 比值小，实际是靠近外侧天体土卫七；

在木卫系统中木卫一的质量远远大于木卫十四，求木卫一的第三因数 K 值为：

$$K_{\text{木卫一}} = \left(\frac{B + M_{\text{木卫一}}}{B + M_{\text{木卫十四}}} \right)^{1/3}$$

由于 $M_{\text{木卫一}} \gg M_{\text{木卫十四}}$ 、 $K_{\text{木卫一}}$ 比值大，因此：木卫一的距离是 R_2 /木卫十四的距离是 $R_1 = 1.89995$ ，距离比值大。

求木卫二的第三个因数 K 值为：

$$K_{\text{木卫二}} = \left(\frac{B + M_{\text{木卫二}}}{B + M_{\text{木卫一}}} \right)^{1/3}$$

由于 $M_{\text{木卫一}}$ 与 $M_{\text{木卫二}}$ 接近同等数量级(轨道偏心率也相等)，代入上式可知 $K_{\text{木卫二}} \approx 1$ ，所以木卫二与木卫一之间接近二倍周期轨道，如：木卫二的距离 R_2 /木卫一的距离 $R_1 = 1.59132$ 。

以上事实说明木卫一的质量远大于木卫十四的质量，因此距离比值大，实际是木卫一远离内侧天体。

前文讨论的木星到太阳的距离为

$$0.4 + 0.3 \times 2^4 = 5.2 \text{ 天文单位} > 0.4 \times 1.5874^5 \\ = 4.03 \text{ 天文单位}$$

就是由于木星的质量大，远离内侧天体(小行星带)所引起的。

5. 行星、规则卫星形成的初始条件

行星、规则卫星形成的初始条件可能是这样，当星云盘形成之后，星云绕中心天体做克普勒运动，一旦星云盘中有彗星闯入、或者是中心天体引力范围之外的大陨石、小行星胎闯入星云盘会出现四种情况，如果是逆行闯入，受星云的阻力失去环绕速度降落到中心天体表面；顺行闯入，占据离中心天体距离为 R 的轨道，在星云的阻力下轨道偏心率越来越小，成为行星、规则卫星的内核；垂直闯入就是彗星；与星云盘斜交闯入，随着绕中心天体公转周期的增加 e 、 i 值会逐渐变小，演化为规则行星、卫星。冥王星是后期闯入的，因此它的 e 、 i 值比其它行星大。它的近日点在海王星轨道的内侧，要是没有星云的阻力，它的 e 、 i 值逐渐变小，最后会演化成为和海王星占据同一轨道的行星，因此冥王星是一个不规则的行星。一旦在距中心天体 R 处有行星胎、卫星胎存在，就打破了星云盘内部的引力平衡系统，会发生一种“链式不平衡”反应：在 $R/1.5874$ 处形成环缝，环缝的内侧或者外侧可能形成规则行星、卫星，这些 $R/1.5874$ 处形成的行星、规则卫星的引力又对 $R/1.5874^2$ 处的星云盘产生同样的作用，形成环缝和行星，卫星，……一直到距中

心天体表面为止；在占据轨道 R 处的行星胎、卫星胎的外侧发生同样的“链式不平衡”，当行星胎、卫星胎吸积 $1.5874R$ 轨道以内的星云使其体积增大时，在 $1.5874R$ 处同样形成星云盘空隙，于是空隙外缘的星云受到中心天体的万有引力减弱，就远离中心天体与其他星云发生碰撞凝聚形成行星胎、卫星胎。 $1.5874R$ 处形成的行星胎、卫星胎对 1.5874^2R 处的星云盘产生同样的效果，这样的“链式不平衡”反应直到星云盘的边缘。这样太阳系的行星、规则卫星就有了距离规律。事实上距离规律受三种因素影响，因此行星、规则卫星距离规律的表达式不完全符合 $a_{n+1} = 1.5874^n a_1$ 这个规律，而是在 1.5874 这个常数之间摆动。

6. 结论

太阳系行星，规则卫星的距离规律由 3 个因子决定，第 1 个因子 1.5874 常数，其本质是互为 2 倍周期轨道，使行星胎、卫星对星云物质的“冲”、“上合”；“下合”、“上合”之间夹角是 180° ，并且位置相对保持恒定，因此最大摄动力始终在一个方向吸引。

第 2 个因子是行星、规则卫星轨道的偏心率大者周期长，那么出现 2 倍周期轨道距离增加，吸引星云的距离向外延伸，因此轨道偏心率大的行星、卫星，其与相邻的外侧行星、卫星距离比值大。

第 3 个因子是行星、卫星的质量大者远离中心天体，出现距离比值大，这是与牛顿得出的开普勒第三定律准确表达式相关。

太阳系行星、规则卫星距离规律就是这三种物理因素相互交织影响，逐渐演化形成的结果。

7. 致谢

论文中有关当前国际上对该学术领域研究的现状，由云南天文台刘煜研究员给予热心帮助提供，在此表示衷心感谢！

参考文献 (References)

- [1] 戴文赛. 天体的演化[M]. 北京: 科学出版社, 1977: 87.
- [2] L. Basano, D. W. Hughes. A modified titius-bode law for planetary orbits. *Nuovo Cimento C*, 1979, 2C(5): 505-510.
- [3] R. Neuhaeuser, J. V. Feitzinger. A generalized distance formula for planetary and satellite systems. *Astronomy and Astrophysics*, 1986, 170(1): 174-178.
- [4] J. J. Rawal. Planetary distance law. *Earth, Moon, and Planets*, 1989, 44(3): 295-296.
- [5] S.-I. Ragnarsson. Planetary distances: A new simplified model. *Astronomy and Astrophysics*, 1995, 301: 609.
- [6] J. J. Rawal. Planetary distance law and resonance. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 1989, 10(3): 257-259.
- [7] A. Poveda, P. Lara. The exo-planetary system of 55 cancri and the titius-bode law. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferencias)*, 2008, 34: 49.
- [8] K. P. Panov. The orbital distances law in planetary systems. *The Open Astronomy Journal*, 2009, 2(1): 90-94.
- [9] 戴文赛. 太阳系演化学(上册)[M]. 上海: 科学技术出版社, 1979.
- [10] 陈载璋, 胡中为. 天文学导论(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 1983
- [11] 张明昌, 肖耐园. 天文学教程(上册)[M]. 上海: 上海高等教育出版社, 1987.
- [12] 百度知道[URL].
<http://zhidao.baidu.com/question/42087024.html>
- [13] http://www.starparadise.net/solar/html/solar_system/nineplanets/uranus/uranus.htm
- [14] <http://www.astron.sh.cn/sun/haiwang.html>
- [15] 国家航天局. 土星卫星的新发现[URL], 2004.
<http://www.cnsa.gov.cn/n615708/n620172/n677078/n751579/59588.html>
- [16] <http://dili.geonet.cn/Photo/1047.shtml>
- [17] 百度百科. 天王星[URL].
<http://baike.baidu.com/view/3092.htm>