

行星自转动力学的有关问题

张 承 志

(南京大学天文系)

提 要

本文介绍了国外有关行星自转动力学的研究概况,对1968至1981年期间发表的结果做了评述。

主要内容有:水星的3:2轨旋共振的理论解释;水星自转运动中的液核效应;金星缓慢逆向自转的机制问题;火星自转速率的季节性变化以及火星自转轴的运动(发差和章动);类木行星和冥王星的自转问题等。

前 言

六十年代雷达天文学崛起后,关于太阳系行星的自转运动,曾获得了不少新的发现。其中,水星的非同步轨旋共振以及金星的缓慢逆向自转最引人注目。这就为行星自转动力学的理论研究提出了一些新课题。Goldreich和Peale^[1]在1968年以《行星自转动力学》为题发表了一篇评述文章,对该领域的研究成果做了总结。

近十几年来,随着行星际空间探测器的发射成功,对行星的研究又活跃起来。关于行星自转的课题也出现了不少新突破,譬如说,美国发射的“水手10号”于1974年3月至1975年3月曾三次飞临水星,发现了水星的磁场^[2-3]。这一发现使得人们有根据假设水星有一个大的液核,因此在其自转运动中必定会呈现液核效应;此外,通过分析火星探测器(于1985年夏发射的“海盗号”)所获得的资料,发现了火星自转速率的季节不均匀性^[4]等。

本文将就近年来行星自转动力学研究的有关问题做一简要评述。

一、水星的非同步轨旋共振

1965年曾根据地面雷达观测定出水星的自转周期约为57天^[5],而不是与其轨道平均运动同步的88天。随后更精确的雷达测定给出的自转周期为 58.65 ± 0.23 天^[6-7]。

通过分析“水手10号”所获得的高分辨率照片,定出水星的自转周期为 58.6461 ± 0.005 天^[8]。已知水星的公转周期是87.96935天^[9],而

$$87.96935 \text{ 天} \times 2/3 = 58.6462 \text{ 天,}$$

这与自转周期的测定值符合得甚好。这种自转周期和公转周期间存在可通约性的现象称为轨旋共振(又称第一类轨旋共振), 可表为:

$$\dot{\psi} = pn \quad (1)$$

式中 $\dot{\psi}$ 为自转角速度, n 为轨道平均运动, p 为一半整数。在水星的情况下, 有 $p=3/2$, 即非同步轨旋共振。若 $p=1$, 就是同步轨旋共振, 月球和大多数天然卫星均属此例。

早在 1965 年 Colombo^[10] 就对水星的 3:2 轨旋共振作出了初步解释, 随后的许多研究工作都从理论上肯定了这种轨旋共振是潮汐演化的必然结果, 是一种稳定的自转状态, 文献^[11] 曾就此做了总结。下面对这些理论研究的梗概做一介绍。

假定水星的自转轴垂直于其轨道面(即自转轴的倾角为零), 并与最大主惯量矩 $[C]$ 轴重合。在太阳的起潮力扭矩作用下, 水星过近日点时, 其长轴(即最小主惯量矩轴)将与太阳—水星间的连线重合^[11-12]。当水星沿轨道运动时, 其长轴与太阳—水星连线的角偏离为 γ , 可以证明 γ 满足下列摆的运动方程^[11]:

$$C\ddot{\gamma} + \frac{21}{4}(B-A)n^2e \sin 2\gamma = \langle T \rangle \quad (2)$$

式中 n 为水星的轨道平均运动, e 为轨道偏心率, $A < B < C$ 为水星的主惯量矩, $\langle T \rangle$ 为起潮力扭矩在一个公转周期内的平均值。(2)式表明, $\langle T \rangle$ 只要不大于恢复扭矩的最大值 $\frac{21}{4}(B-A)n^2e$, 水星的 3:2 轨旋共振就是稳定的。进而可估算出只要 $(B-A)/C \gtrsim 10^{-9}$, 就足以保证轨旋共振的稳定性^[11]。另外, 2:1, 2.5:1, 3:1 等更高阶的轨旋共振也可以是稳定的。

至于水星为什么会陷入 3:2 轨旋共振的状态? 尚需计算通过每一次共振时的俘获概率。由文献^[11] 中的计算结果可知, 对于 $e=0.206$ 的水星, 3:2 轨旋共振的俘获概率最大。这从理论上证明了, 水星有可能已通过 2:1 轨旋共振, 并进入了自转潮汐演化的最终阶段。

Khentov^[13] 在更一般的情况下讨论了行星轨旋共振的问题。对于起潮力扭矩平均值 $\langle T \rangle = 0$ 的情况, 可得下述结论: 如果轨道偏心率 $e=0$, 则会出现 1:1 的轨旋共振(月球自转类型); 而 $e \approx 0.3$ 时, 就是 3:2 轨旋共振(水星自转类型)。

在上面的讨论中, 假定水星自转轴的倾角(即自转轴与轨道面法线的交角)为零。实际上, 在自转速率的潮汐演化过程中, 倾角同样经历了潮汐演化^[14]。

大家知道, 月球的自转可用卡西尼定律来描述:

1) 月球的自转与其轨道运动同步;

2) 月球的自转轴与黄道面成一不变的交角;

3) 自转轴、轨道面法线以及黄道面法线三者共面。

进一步的研究^[15-17] 表明, 卡西尼定律可推广到太阳系的其它天体, 特别是水星的情况。可以证明, 广义卡西尼定律与自转能量的极值状态是等价的。在第三定律所描述的共面配置(自转矢量、轨道面法线以及轨道进动角速度矢量三者共面)中, 自转轴的取向可能有四种(分别称为卡西尼状态 I—IV)^[16]。对水星自转轴方位的检测^[18] 表明, 水星的自转轴处于卡西尼状态 I(自转轴与轨道面法线几乎重合)。理论研究^[16] 表明, 这种状态是稳定的。

二、水星自转运动中的液核效应

Peale^[18]首次指出,水星的轨旋共振状态与水星有一个液核是相容的。由于固体幔和液核间的相互作用(又称耗散性耦合)所造成的能量耗散,将有助于水星陷入3:2轨旋共振。

但是,利用潮汐摩擦理论已足以解释当前水星的自转状态,且在1975年前认定水星有一个液核论据尚嫌不足,因此对液核效应未作出定量讨论。

在“水手10号”飞船发现了水星的磁场后,就完全有根据设想水星存在一液核了,并且因水星的平均密度较大(5.433 ± 0.012 克/厘米³[19]),故需假定水星有一个相当大的熔融了的铁合金核,其半径约为水星赤道半径的3/4。

Peale和Boss^[20-21]采用上述的水星液核模型,定量地讨论了水星自转中的液核效应。研究结果表明,水星从2:1轨旋共振状态逃逸,要求其液核的运动粘滞率与水的值相近(即等于0.01厘米²/秒);同时,在核-幔边界层为片流的情况下,尚要求潮汐耗散因数 $Q \lesssim 100$,而对于湍流边界层,应有临界雷诺数 $Re \gtrsim 500$, $(B-A)/C \lesssim 10^{-5}$, $Q \lesssim 40$ 的约束。

看来,对水星自转液核效应的研究尚处于起始阶段,随着空间探测结果的不断丰富,有可能会提出更多的课题来。

三、金星缓慢逆向自转的机制

金星被一层浓密的大气复盖着,这给用光学方法测定其自转周期造成了困难。1962年开始用雷达技术来测定金星的自转周期,早期的测定结果精度不高。1970年Carpenter^[22]根据1962至1967年的雷达观测资料,定出金星的自转周期为 242.982 ± 0.04 天。

1979年Shapiro等^[23]重新处理了1964至1977年的雷达观测资料,得出金星的自转周期为 243.01 ± 0.03 天。

金星除了自转异常缓慢外,它还是太阳系内唯一的逆向自转的大行星,其自转轴与轨道面法线成约 180° 的交角。

理论研究^[1]表明,如果金星逆向自转的周期为243.16天,那么在地球和金星每次下合时,金星将以同一面朝着地球。这种一个行星的自转与另一个行星的公转相互制约的现象,称为会合共振(或第二类轨旋共振)。

如果在金星上只存在太阳起潮力所产生的固体潮,那么金星的自转将由于潮汐摩擦而长期减慢,直到进入第一类轨旋共振。但是,对于金星来说,还必需考虑大气潮以及地球的引力矩所起的作用。金星的大气潮恰好与固体潮相反,它会起加速作用。当金星的自转速率达到某一个特定值后,固体潮和大气潮扭矩相互平衡,此时地球的引力矩将使金星陷入第二类轨旋共振状态^[24-25]。

易于证明^[27],当金星完全处于会合共振状态时,其自转周期 P_S 可按下式计算:

$$P_S = \frac{P \cdot P_m}{(p+1)P_\oplus - pP_\oplus} \quad (3)$$

式中 P_{\oplus} 和 P_{\otimes} 分别为金星和地球的公转周期, 即 $P_{\oplus}=224.7$ 天, $P_{\otimes}=365.256$ 天, p 为一半整数。在(3)式中取 $p=-5.0$, 可算出 $P_s=-243.16$ 天。

金星自转周期的观测值为 243.01 天^[23], 与 P_s 相差约 0.2 天。这一差异使得 Carpenter^[22] 曾提出过金星是非共振自转的看法。Shapiro 等^[23] 近来又重新提出这一问题, 但论据并不十分充足。

至于对金星自转稳定性的研究, 与水星的情况相类似, 一般都认为金星是稳定的会合共振。Beletskij 等^[34-35] 在三维情况下, 就金星的会合共振进行了较系统的理论研究, 得出金星自转同样服从广义卡西尼定律:

1. 金星绕其最短的惯量主轴匀速自转, 自转周期接近共振值中的一个 (即在(3)式中取 $p=-5.0$ 时的 P_s 值);
2. 金星的自转轴与其轨道面法线的交角为一常数。就金星的具体情况, 可算出此交角等于 $180^{\circ}-51' \pm 17'$;
3. 金星的自转轴、轨道面法线以及轨道进动角速度矢量位于同一平面内;
4. 金星每次与地球下合时, 金星的最长的惯量主轴与交点线所构成的角度等于地球—金星连线与交点线间的夹角。

Beletskij 等^[34] 还研究了金星会合共振的稳定性, 得到了肯定的结论。

对金星逆向自转的机制, 存在两种看法: 一种认为金星曾经是顺向自转的, 在演化过程中, 自转方向倒转^[27]。这种说法似难以提出令人信服的论据。另一种看法认为金星的逆向自转有其宇宙的成因, 问题在于要找出维持这种逆向自转的机制。

1970 年 Goldreich 和 Peale^[36] 曾证明过, 金星自转轴的倾角只要在起初就大于 90° , 那么核—幔间的摩擦耦合将使这一交角逐渐朝 180° 演化。看来, 维持当前的金星逆向自转状态的正是这种核—幔耦合作用。

Yoder 和 Ward^[37] 提出, 金星自转轴可能具有一个周期长达 10^5 年的自由摆动 (相当于地球的张德勒摆动), 其振幅有可能较大。因此, 如能检测出金星的自由摆动, 那么就有可能进一步推论金星的动力学特征。

四、火星自转速率的季节性变化以及自转轴的运动

1976 年 6 月和 8 月美国发射的两艘“海盗号”飞船相继到达火星, 把两个着陆舱降落到火星表面上。

通过分析“海盗号”飞船的无线电跟踪资料, 定出火星自转的恒星周期为 $24^{\text{h}}37^{\text{m}}22^{\text{s}}.6631 \pm 0^{\text{s}}.0013$ ^[4]。这与最近 de Vaucouleurs^[38] 根据过去 300 年来地面观测资料所求得的 $24^{\text{h}}37^{\text{m}}22^{\text{s}}.662 \pm 0^{\text{s}}.002$ 非常接近。

对火星上的着陆舱的跟踪资料进行分析后, 发现着陆点的气压有明显的季节性变化^[4], 这说明在火星极冠与火星大气间存在着二氧化碳的交换。显然, 质量的这种周期性交换必将造成火星自转速率的季节性变化。Michael 等^[4] 利用着陆舱 1 号的气压资料, 检测到了自转速率的季节性变化。

Cazenave 等^[39]利用着陆舱的气压资料,在火星的自转速率中检测出了周年和半年的变化,其变幅分别为 0.2×10^{-8} 和 0.1×10^{-8} 。这对火星日长的影响分别达 0.17ms 和 0.09ms。在秋分到冬至(北半球)期间,火星日长的最大变幅可达 0.44ms。

同时,对检测火星自转轴的运动也做了一些尝试^[40-42]。大家知道,早在七十年前 Lowell^[48]就给出了火星的岁差常数为 $-708''$ /世纪,即火星的春分点约每年向西进动 $7''$,183000 年进动一周。1979 年 Reasenber 等^[41]利用“海盗号”着陆舱的跟踪资料,对一个新的火星质量分布模型,估算出岁差常数为 $-(7''.58 \pm 0''.03)$ /年。

除岁差外,火星自转轴还有章动。1980 年 Borderies 等^[42]利用着陆舱的跟踪资料,检测出主章动(周期为 343 天)及其它章动项的振幅,如下表所示。

	周 期 (天)	理 论 计 算 值	检 测 值
黄 经 章 动	687	$-0''.6034$	$-0''.73 \pm 0''.4$
	229	0.2278	0.29 ± 0.5
	343	1.0431	1.07 ± 0.6
交 角 章 动	229	0.1072	0.10 ± 0.15
	343	0.4908	0.47 ± 0.15

五、类木行星和冥王星的自转问题

类木行星(木星、土星、天王星和海王星)的自转较快,近年来对测定它们的自转周期做了一些初步工作^[44]。

与其它大行星(水星和金星除外)相比,冥王星的自转周期要长得多,这很早就引起了天文学家的注意。

下面对木星和冥王星自转的有关问题做一简单介绍。

1. 木星的自转

行星探测器“先驱者”10 号和 11 号在木星附近飞行时获得的资料表明,木星是一个没有固体表面的液态氢球。外面的一层液体称为木星幔,中心有一个固体核。木星幔又可细分为两层。对木星引力场的探测结果表明,木星在很大程度上处于流体静力学平衡状态中^[44]。

木星赤道区的自转最快,平均自转周期为 $9^h50^m30^s.003$ ^[45],比高纬度区的自转周期短 5^m钟。

木星具有射电辐射。对木星的十米波段射电辐射的长期(约 12 年)观测,得到木星射电自转周期的平均值为 $9^h55^m29^s.689 \pm 0^s.005$ ^[46]。

通过观测发现木星的自转周期起伏较大,这说明木星的幔与核之间存在着角动量的大规模交换,这种现象在其它行星的自转运动中是较为罕见的。

2. 冥王星的自转

1973 年 Andersson 等^[47]定出冥王星的自转周期为 6.3867 天,并估计其自转轴的倾角大于 50° 。

由于冥王星距太阳十分遥远, 太阳起潮力的扭矩不足以使它自转减慢, 因此早就提出了冥王星的自转与其起源有关的假说^[48]。这个假说认为冥王星原是海王星的一颗卫星, 与海卫一同时绕海王星顺向公转, 在演化过程中曾一度与海卫一相遇, 在引力作用下海卫一变成了逆向公转, 而冥王星的公转速度则超过了逃逸速度, 结果脱离海王星系统而进入目前的轨道, 成了太阳系的第九颗行星。

1978 年 Harrington 等^[49]提出一个新假说, 认为海王星系统曾与太阳系的一个大质量天体相遇, 致使海王星系统解体, 海王星的一颗卫星成了现在的冥王星。

上述的冥王星起源假说能较好地解释冥王星自转周期偏长的事实。

1978 年发现冥王星有一颗卫星——冥卫一(Charon), 通过冥卫一可估算出冥王星质量的上限值约为海卫一的 $1/10^{1501}$ 。显然, 这样小的质量是难以改变海卫一公转方向的, 而冥王星起源的假说也因此碰到了困难, 成了一个悬案。看来, 冥王星的自转周期暂时还是一个难解之迷。

致谢: 本文的部分素材取自南京大学天文系 1978 级学生马际昭、王苏的学士论文, 特表谢意。

参 考 文 献

- [1] Goldreich, P., Peale, S. J. *Ann. Rev. Astron. Astrophys* 6 (1968), 287-320.
- [2] Ness, N. F. et al. *Science*, 185 (1974), 151-160.
- [3] Ness, N. F. et al. *J. Geophys. Res.* 80 (1975), 2708-2716.
- [4] Michael, W. H., Kelly, G. M., *Ref. Coord. Syst. Earth Dyn. Proc. 56th Colloq., Warsaw*, 325-328 (1980).
- [5] Pettengill, G. H., Dyce, R. B. *Nature*, 206 (1965), 1240.
- [6] Dyce, R. B., et al., *Astron. J.*, 72 (1967), 351-359.
- [7] Goldstein, R. M., *Astron. J.*, 76 (1971), 1152-1154.
- [8] Klaasen, K. P., *Icarus*, 28 (1976), 469-478.
- [9] Hoff, D. B., Schmidt, G., *Sky and Telesc.*, 58 (1979), 219-221.
- [10] Colombo, G., *Nature*, 208 (1965), 575.
- [11] Goldreich, P., Peale, S. I., *Astron. J.*, 71 (1966), 425-438.
- [12] Colombo, G., Shapiro, I. I., *Astrophys. J.*, 145 (1966), 296-307.
- [13] Khentov, A. A., *Soviet Astron.*, 20 (1976), 633-636.
- [14] Peale, S. J., *Astron. J.*, 79 (1974), 722-744.
- [15] Colombo, G., *Astron. J.*, 71, (1966), 891-896.
- [16] Peale, S. J., *Astron. J.*, 74 (1969), 483-489.
- [17] Beletskij, V. V., *Celest. Mech.*, 6 (1972), 356-378.
- [18] Peale, S. J., *Icarus*, 28 (1976), 459-467.
- [19] Gault, D. E. et al., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 15 (1977), 97-126.
- [20] Peale, S. J., & Boss, A. P., *J. Geophys. Res.*, 82 (1977), 743-749.
- [21] Peale, S. J., & Boss, A. P., *J. Geophys. Res.*, 82 (1977), 3423-3429.
- [22] Carpenter, R. L., *Astron. J.*, 75 (1970), 61-66.
- [23] Shapiro, I. I. et al., *Astrophys. J. (Letters)*, 230 (1979) L123-L126.
- [24] Gold, T., & Soter, S., *Icarus*, 11 (1969), 356-366.
- [25] Gold, T., & Soter, S., *Icarus*, 14 (1971), 16-20.
- [26] Ingersoll, A. P., & Dobrovolskis, A. R., *Bull. American Astron. Soc.*, 9 (1977), 467.
- [27] Kundt, W., *Astron. Astrophys.*, 60 (1977), 85-91.
- [28] Dobrovolskis, A. R. *Bull., American Astron. Soc.*, 10 (1978), 544.

- [29] Ingersoll, A. P., & Dobrovolskis, A. R., *Nature*, 275 (1978), 37-38.
[30] Gold, T., & Soter, S., *Nature*, 277 (1979), 280-281.
[31] Lago, B., & Cazenave, A., *Moon Planets*, 21 (1979), 127-154.
[32] Dobrovolskis, A. R., & Ingersoll, A. P., *Icarus*, 41 (1980), 1-17.
[33] Dobrovolskis, A. R., & Ingersoll, A. P., *Icarus*, 41 (1980), 18-35.
[34] Beletskij, V. V. et al., *Astron. Zh.*, 57 (1980), 158-167. (*Soviet Astron.*, 24 (1980), No.1.)
[35] Beletskij, V. V. et al., *Astron. Zh.*, 58 (1981), 198-207. (*Soviet Astron.*, 25 (1981), No.1.)
[36] Goldreich, P., & Peale, S. J., *Astron. J.*, 75 (1970), 273-284.
[37] Yoder, C. F., & Ward, W. R., *Astrophys. J. (Letters)*, 233 (1979), L33-L37.
[38] de Vaucouleurs, G., *Astron. J.*, 85 (1980), 945-960.
[39] Cazenave, A. et al., *Geophys. Res. Lett.*, 8 (1981), 245-248.
[40] Mayo, A. P. et al., *J. Geophys. Res.*, 82 (1977) 4297-4303.
[41] Reasenberg, R. D. et al., *J. Geophys. Res.*, 84 (1979), 6231-6240.
[42] Borderies, N. et al., *Moon Planets*, 22 (1980), 191-200.
[43] Lowell, P., *Astron. J.*, 28 (1914) 169-171.
[44] Ferrari, A. J., & Bills, B. G., *Rev. Geophys. Space Phys.*, 17 (1979), 1663-1677.
[45] Hide, R., *Mathematical Problems in the Geophysical Sciences I*, 289-308 (1971).
[46] May, J. et al., *Icarus*, 40 (1979), 87-93.
[47] Andersson, L. E., & Fix, J. D., *Icarus*, 20 (1973), 279-283.
[48] Lyttleton, R. A., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 97 (1936), 108-115.
[49] Harrington, R. S., & Van Flandern, T. C., *Icarus*, 39 (1979), 131-136.
[50] Farinella, P. et al., *Moon Planets*, 20(1979), 415-421.

On Some Problems of the Dynamics of Planetary Rotations

Zhang Cheng-zhi

(Department of Astronomy, Nanjing University)

Abstract

In this article, a survey on the study of the dynamics of planetary rotations abroad is presented. The works published from 1968 to 1981 are reviewed.

The following principal aspects are included the theoretical interpretation of the 3:2 orbit-spin resonance of Mercury, the effect of the liquid core in Mercury's rotation, the mechanism of the slow retrograde rotation of Venus, the seasonal variations of the rate of Mars' rotation and the motion of Mars' rotating axis (precession and nutation), the rotations of the Jovian planets and Pluto, et cetera.