

天体力学的展望

易照华

(南京大学天文学系)

提 要

现代天体力学范畴除包含经典天体力学外,还包括天文动力学和星系动力学(其中不用统计力学)。现代天体力学的研究课题可归纳为三类:①具体天体的运动理论,其中的天体包括经典天体力学的研究对象月球,天然卫星,大行星,小行星和彗星,还有人体天体,双星,聚星和星系;②天体力学在地学和空间科学中的应用以及天体力学与其他学科或天文学分支的边缘领域中的课题;③天体力学的基础理论课题。

最后提出,太阳系的结构和演化、天体力学与其他学科或天文学分支的边缘领域,以及三体问题的定性和分析理论,有可能在近期内获得较快进展。

从本世纪五十年代起,由于电子计算机和空间探测技术的迅速发展,天体力学也同其他学科分支一样,进入了一个新的时期。可称为现代天体力学时期,同以前相比,情况有很大变化。主要变化之一是研究对象大大增加了。除了因空间探测增加的大量人造天体外,还有因计算技术发展而可以用天体力学方法研究成员多的天体集团,如聚星,星团,星协以及星系等。变化之二是精度要求提高。这是因为无线电和激光观测技术的发展,近距天体的定位和测速的精度大大提高,要求理论工作相应提高。这就必须改进传统的理论和研究方法。因此,现代天体力学除了传统的天体力学内容(这部分也要更新)外,还包括了研究人造天体运动为主要内容的天文动力学(Astrodynamics),以及研究恒星集团运动的恒星和星系动力学(Stellar and Galactic Dynamics)。当然,后者同天体物理学中提到的星系动力学有所不同。在天体力学中,是根据一定的力学模型讨论恒星集团中某些成员的运动和整个集团的动力学特征,而不用统计方法进行研究。在有的国家中,如美国就把这个分支叫做动力天文学(Dynamical Astronomy)。我国当前的天体力学工作,实际上已包括了上述的全部内容。

根据当前的情况,现代天体力学的选题大致可分为三类:一是研究天体运动的理论课题;二是为其他学科或工程项目服务的应用课题;三是本学科内逐步形成的基础理论课题。这三类课题之间也是有联系的,下面分别说明。

一、天体运动的理论课题

研究天体的运动(包括自转)是天体力学的基本任务。天体有各种类型,要求它们的运动

理论所达到的精度也不同。有的天体要单个研究, 有其特殊的理论和方法; 有的可以分类研究, 有共同的研究方法。按当前的特点, 天体力学所研究的天体运动, 可分为下面九种类型来讨论。

1. 月球 这是长期以来单独研究其运动的天体, 在天体力学中, 研究它的运动形成了一门的小学科——月离理论(Lunar Theory), 也就是月球运动理论。虽然在天文历书中, 已决定从 1984 年起采用 ELP2000 理论^[1], 但因月球离地球近, 运动周期短, 有必要建立月球运动的分析理论, 以适应较长时期的历书需要。现在正进行的分析理论尚未达到实用阶段^[2,3]。

另外, 由于大量的激光观测和月面综合探测结果, 研究月球物理天平动、月球重力场以及地月系的演化已成为提到议事日程的课题。

2. 大行星 研究它们的运动虽然是传统天体力学的主要课题, 但解决得并不满意。1984 年起, 天文历书开始采用数值方法结果^[5]。但内行星(水, 金, 地, 火)周期短, 建立它们的分析或半分析理论, 仍为必需解决的课题。

冥王星的运动理论是天体力学中的一个难题, 现有的各种方法都难于讨论。但是它处于目前所知的太阳系边缘, 因而地位很重要^[5]。最近有人提出冥王卫星是冥王星本体的看法是值得重视的, 可找寻冥王星掩其他天体的机会来予以证实。

3. 天然卫星 行星际探测得到了大量天然卫星资料, 故近十年来又形成研究天然卫星运动的热潮^[6]。轨道相互接近以及周期共振的卫星间的摄动问题, 也是当前难题之一。近距卫星的相对论效应较大, 开始引起人们重视。远距逆行卫星一般认为由俘获产生或容易逃逸, 但天体力学定性理论和数值计算表明, 逆行轨道比顺行轨道的稳定性更好。需要更精确地讨论远距卫星的运动。

4. 小行星和彗星 除某些有实用意义的特殊小行星的精确定轨和位置预报外, 小行星环的结构和演化是天体力学中的重要课题之一。从近年得到的资料看来, 小行星环的层次比预计的要复杂, 很可能在木星轨道外还有几层。另外, 大量暗弱小行星的发现, 会改变目前的分布状态; 而且密集和空隙的标准, 不仅看小行星个数, 还要看质量大小。近年来发现的小行星卫星(实际上是双星), 很可能成为研究太阳系的前沿课题^[7]。

彗星在太阳系结构和演化方面的重要性是众所周知的。太阳系中离太阳最远的天体实际上是彗星, 离太阳约十几万天文单位的奥尔特(Oort)彗星云的假说有待证实。彗星运动中的所谓“非引力效应”, 彗星同小行星以及流星群的关系, 都有很多天体力学课题。

5. 环状天体 土星环的复杂结构以及天王星环和木星环的发现, 是近几年天文学中重大成果之一^[8]。研究环状天体的结构, 形成和演化就成为—一个重要课题。只用传统的洛希极限来解释就很不够了。目前所知土星环外层已达土卫五轨道之外, 还有径向复杂分布都是未解决的课题。另外, 小行星环, 恒星世界中的环状天体, 也存在类似的问题。

6. 人造卫星 在天体力学中讨论人造卫星在被动阶段内的运动。数值方法可以解决短时间内的实际要求, 但近地卫星的分析或半分析运动理论必需建立得更准, 这就要克服各种摄动因素联合作用造成的困难。

7. 行星际探测器 飞往月球或其他大行星的各种探测器, 在被动阶段内的运动仍为天体力学研究的课题。主要任务是进行轨道设计, 选定各种优化的轨道。

8. **双星和聚星** 成员不多的聚星(包括双星)的运动,已完全可以用天体力学的方法来讨论。其中双星,特别是密近双星,是近年来热门课题,已同引力波的验证相联系。如能在已建立的力学模型上,用严格的天体力学方法来讨论,会得到更可靠的结果。聚星运动的精确讨论,可能会得到与传统看法完全不同的结果。苏联的杜波兴(Дубошин)等人讨论猎户座四边形(讨论了六颗星组成的系统),结果表明这个系统在不断作膨胀和收缩的振动,振动周期约二十万年^[9]。这与星协理论不符。

9. **团和星系** 现代电子计算机已可以用天体力学方法研究成员为几千甚至上万个星团的运动。对于成员更多的星系,则建立各种引力势的模型来讨论^[10,11]。希腊人康托普罗斯(Contopoulos)提出的“第三积分”^[12]就是讨论星系引力场的。此项成果获1982年的布劳威尔(Brouwer)奖金。。

二、应用课题

为某些工程项目或其他学科服务,以及同其他科学交叉的边缘课题,这里统称为天体力学的应用课题。

1. **星际航行方面** 人造天体的轨道理论(被动段)可为星际航行工程服务。此外,人造天体的轨道设计,人造天体在发射段、回收段以及过渡段的运动,都有天体力学的应用课题。这些课题也是天体力学同火箭飞行力学以及航空气力学相交叉的课题。

2. **地球科学方面** 人造卫星上天以后,在地球科学中有广泛应用。其中人造卫星的轨道变化规律,可直接用于研究地球形状,大气密度分布和变化规律,地球内部密度分布规律,地球重力场的细节等。这些都是天体力学的应用课题。

3. **天文学内部** 天体力学在天文学其他分支中也有广泛应用,有些小学科实际上就是天体力学同其他天文分支的边缘学科。

天体力学与天体测量学是长期合作的伙伴。天体测量学中大多数研究领域都可以同天体力学合作。其中历书天文学是这两门学科的边缘学科。惯性参考系也要用到一些太阳系内天体的精确位置,如美国的空间望远镜仍在利用小行星建立参考系^[13]。基本天文常数也是要用天体力学,地球和行星的自转也要两门学科共同来解决。我国正在开展的天文地球动力学研究,待力学模型比较明确后,天体力学也在其中有用武之地。

除恒星和星系动力学外,天体力学同天体物理学也还有不少合作项目。特别是天体演化学和引力理论方面合作得更多些。各种类型天体的演化过程都有力学因素为主的阶段,此阶段用天体力学方法研究是很自然的,已形成一个小学科——动力演化论。即使在力学与其他物理因素作用相同的阶段,天体力学也可在其中发挥作用。如恒星物理中的多层球模型,彗尾形状等研究中,若用天体力学方法会得到更好的结果。引力理论是天体力学的基础,尽管现代天体力学仍以牛顿引力理论为依据,但天体实际运动规律同按牛顿引力理论得到的结果的偏差,就是建立新引力理论的客观标准。有些结论还值得更细致地研究。例如水星近日点进动问题,一般认为用广义相对论已完满地解决了(实际上是用后牛顿改正),实测值与牛顿理论的偏差值为 $43''.11/\text{百年}$,后牛顿修正值为 $43''.03/\text{百年}$ 。可是偏差值中还未考虑太阳扁

率, 介质阻尼, 岁差常数误差等的影响, 它们有可能达到 $5''$ /百年左右。另外, 只用后牛顿修正是否够了, 高阶修正值是多大? 这些都值得更深入地研究。

三、基础理论课题

天体力学诞生已有三百多年, 在大量具体课题研究过程中, 逐渐形成了一些本学科的基础理论课题。这主要指共同性的和方法性的理论课题, 也就是用不同的方法对一些力学模型的研究。这些课题所取得的任何进展, 都会推动本学科前进。

1. 多体问题 由牛顿提出来的力学模型。除二体问题和个别特殊三体问题(如双不动中心问题)已解决外, 其余至今都未解决。三体问题研究得最多, 研究论文已超过五千篇, 但甚至较特殊的限制性三体问题都未解决。这里所谈的解决, 是指两个方面: 一是求出这种动力系统的一般解, 用它可计算任何时刻的每一体的精确位置; 二是完全掌握此系统的运动特征(如运动范围, 轨道变化规律, 长时期后或以前的行为等)。近来有很多进展, 分别在下面几类问题中一起介绍。

2. 摄动理论 由拉普拉斯等人建立, 是用分析方法研究多体问题的理论。后来又加入了天体形状及其他动力学因素(如介质阻尼等)。现代的主要成果之一是对人造卫星建立了较完整的摄动理论, 并从中提出带有普遍性的平均化方法和变换理论^[14]。另外是建立起用电子计算机研究摄动理论的技术, 称为计算机化的摄动理论^[15]。但对天体相互接近、轨道交叉、偏心率大、相对倾角大、共振等情况等都还解决得不好。

3. 天体力学定性理论 就是用定性方法直接讨论多体问题的运动特征, 是邦加雷(H. Poincaré)首先提出的。自本世纪六十年代出现 КАМ理论(由苏联人 Колмогоров, Арнольд 和美国人 Moser 建立的理论)后, 解决了平面圆型限制性三体问题的三角解的稳定性^[16], 促进了定性理论的发展。特别对三体问题的定性研究, 很多人作了大量工作, 对限制性三体问题和一般三体问题的运动区域, 周期解存在性和稳定性, 碰撞和正规化, 俘获和交换, 终结运动, 可积性和各态历经性等方面进行了大量研究, 成果很多。美国的塞比赫利(V. Szebehely)也因对三体问题的贡献^[17]而获布劳威尔奖金, 并在1982年被推选为美国科学院院士。

三体以上的多体问题的定性研究成果少, 主要在推广三体问题的成果。

4. 天体力学数值方法 自电子计算机广泛应用于天体运动的研究以后, 数值方法发展迅速。大多数天体在时间不长(相对轨道周期而言)的位置, 都可用数值方法相当精确地算出, 符合实际需要。近十几年来, 数值方法本身也有很大变化。数值计算中出现回代改正, 正规化^[18], 稳定化^[19]等技术, 使计算精度提高很多。

同时, 数值方法也开始同分析方法相结合形成半分析半数值方法, 解决了实际问题(人造卫星及月球运动)。上面提到的计算机化的摄动理论, 也是把数值方法技术用于分析方法的结果。近年来, 数值方法也用于定性研究。上述三体问题的定性研究成果中, 大多数是与数值方法相结合而取得的。在定性研究中又叫做数值探索^[20], 可对定性预测用数值方法试探, 得到较可靠结果后再从理论上深入讨论, 得到最后结果。有人认为, 天体力学的数值探索相当于实验, 电子计算机成为天体力学工作者的实验室, 还是有道理的。正因为如此, 熟练使用

电子计算机,是天体力学工作者的基本功之一。

天体力学的基础理论课题,通常也是应用数学或一般力学的课题。数学家和力学家参加天体力学研究,从来是天体力学发展的重要条件。但现代数学和力学都发展得非常庞大,要求他们很多人来参加工作也有困难。这就需要天体力学工作者提高数学和力学的水平。

从上面可以看出,天体力学虽然是具有三百多年历史的老学科,但在本世纪五十年代以后又获得了新的生命力。在大量的天文学基础研究和很多应用研究中都能发挥自己的作用。从近年来的发展趋势看来,下面几方面的课题必需首先要加快进行。

1. 关于太阳系的结构和演化 由于空间探测技术迅速发展,已积累了大量有关太阳系天体的运动,行星物理以及彗星物理的观测资料,其中还有相当多资料未处理出来。可望不久会在太阳系结构和演化问题上有所突破,其中特别是小行星环的结构,外行星特性以及太阳系边界等课题。太阳系的稳定性和动力演化研究要结合进行。

2. 与天体测量学或天体物理学交叉的课题其中特别是星系动力学,引力理论和行星自转方面,可望在短期内有好结果。

3. 有关三体问题的定性和摄动理论研究 由于近年来从各方面都取得了很多成果。若能把这些成果进行系统地总结,再在这基础上继续研究,可能在不长的时间会得到有突破性成果。

另外,提高天体力学研究工作的水平也很迫切,主要是充分利用电子计算机的作用,凡是有可能使用电算机的过程,如日常资料处理,常规性天体位置预报,定型的理论推导,结果的整理等,尽量用电子计算机进行。这也算是科学研究工作现代化的标志之一,而我国的条件也是允许做到的。

参 考 文 献

- [1] Report on Astronomy, XVIII General Assembly of IAU (1982), p.4.
- [2] Chapront-Touze M. *Celest. Mech.*, 26 (1982), 53-62.
- [3] Deprit A; et al: *A. J.*, 76 (1971), 269.
- [4] Standish Jr. E. M.: *Celest. Mech.*, 26 (1982), 181-186.
- [5] Lin, D.N.C., *MN.*, 197(1981), 1081-1085.
- [6] Duriez L.: *Celest. Mech.*, 26 (1982), 231-255.
- [7] Van Flandern, T. C.: *Celest. Mech.*, 22 (1980), 79-80.
- [8] Всехвятский С. К.: *Проблемы Космической Физики*. 17 (1982), 15-19.
- [9] Дубошин Г. Н.: *Вестн. Астрон. Инст. Штернберг*. 175 (1971).
- [10] Contopoulos G.: *Astro. Astrophys.*, 104 (1981), 116-126.
- [11] Colin J., Athanassoula E.: *Astron. Astrophys.*, 97 (1981), 63-70.
- [12] Contopoulos G.: *A. J.*, 70 (1965), No.8, 526-544.
- [13] Hemenway P.: *Celest. Mech.*, 22 (1980), 89-109.
- [14] Deprit A.: *Celest. Mech.* 1 (1969), 12-30.
- [15] Davis M. S.: *A. J.*, 73 (1968), No.2, 195-202.
- [16] Siegel C. L; Moser J. K.: *Lectures on Celestial Mechanics*. Springer-Verlag (1971).
- [17] Szebehely V.; Mekenzie R.: *A. J.*, 82 (1977), 79.
- [18] Szebehely V.: *Long-time Prediction in Dynamics*, 17-44, R Reidel Publishing Company (1976).
- [19] Baumgarte J.: 同上, 153-163 (1976).
- [20] Szebehely V.: *Instabilities in Dynamical System*, 61-68, R Reidel Publishing Company (1979).

The Vistas of Celestial Mechanics

Yi Zhao-hua

(Department of Astronomy, Nanjing University)

Abstract

This article shows that the modern celestial mechanics contains the classical celestial mechanics, astrodynamics and stellar dynamics (in which the statistical mechanics don't be used). The research subjects of modern celestial mechanics can be classified as three sets: (1) the theory of motions of concrete celestial bodies, including moon, natural satellites, major planets, asteroids and comets which were the objects studied in classical celestial mechanics, and also artificial celestial bodies, circular bodies, binary and multiple stars as well as galaxies; (2) the application of celestial mechanics to earth and space sciences, as well as the frontier fields of celestial mechanics with other sciences or other astronomical branches; (3) the fundamental theory of celestial mechanics.

At last, it suggests that, the structure and evolution of solar system, the frontier fields of celestial mechanics with other sciences or other astronomical branches, as well as the qualitative and analytical theory of three-body problem may progress rapidly in the near future.