

揭开了太阳系稳定性之谜？

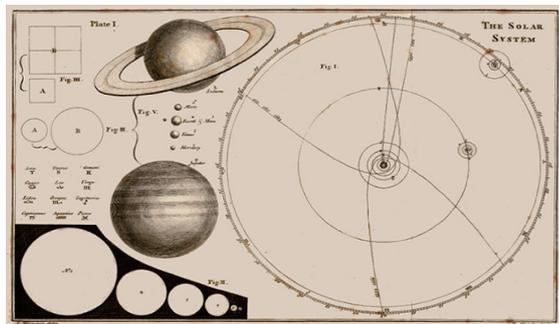
(北京大学 徐仁新 编译自 Katherine Wright. *Physics*, May 3, 2023)

加州理工学院行星科学家 Batygin 说：“在过去的四个世纪里，太阳系稳定性问题号称被多次解决；我敢打赌，这项新工作并非问题的终点。”不过他补充道，新进展确实将我们的理解提升到“一个新高度”。

早在 17 世纪，牛顿就提出太阳系各大行星运动是否稳定这一问题，不过未给出答案。拉普拉斯、拉格朗日、高斯、庞加莱和泊松等人也设法解决过该问题。最近巴黎天文台的 Mogavero 及其同事提出一个理论，并期待它经得起时间的考验。Batygin 说，该结果可能会终结数百年的太阳系稳定性研究。

自古以来，科学家和哲学家们一直在思考太阳系天体的运行。不过，直到牛顿开始研究这个问题，物理工具(包括运动、力和引力等定律)才被用于刻画行星运动。当时发现了太阳系内的六颗行星。根据牛顿定律，当一颗行星沿其轨道运行时将周期性地对其他行星施加引力。虽然每颗行星只受到微小的引力扰动，但在行星围绕太阳运行的数十亿年里，这些影响会累积。

牛顿想知道会发生哪一种情形：



1756 年 James Ferguson 《天文学》一书中太阳系的插图

这些周期性引力变化的净效果为零，使得行星运动在长时间内保持稳定？平均引力非零导致行星轨道发生变化，从而破坏太阳系的稳定？牛顿未能回答，但他推断行星的运动是不稳定的，太阳系有时会瓦解。他认为这种情形一旦发生，上帝定会介入并恢复秩序，让行星回到起点。

一个世纪后，拉普拉斯和拉格朗日开始挑战这一问题。他俩独立工作但保持书信交流，使用微扰论研究该问题并得到结论：当行星受其他行星引力扰动时，其轨道半长轴保持不变，即太阳系是稳定的。

但理论结果跟行星运动观测结果矛盾。早在牛顿、拉普拉斯和拉格朗日研究天体力学之前，开普勒就已经注意到木星和土星的运动。开普勒比较了自己和此前天文学家的观测结果，发现太阳系最大的这两颗行星的轨道有些偏离。该行为不符合稳定太阳系的预期。拉普拉斯起初将轨道的偏离归因于彗星的引力作用，但后来发现这些变化源于两颗巨行星的引力场的扰动。

在接下来的 150 年里，科学家在太阳系稳定性问题上摇摆不定。对于足够小的行星质量，庞加莱得到否定的结论，而阿诺德的结论却是肯定的。1980 年代计算机登场了，出现了转机。

随着计算机的出现，求解复杂方程组

以及大规模的数值实验都成为可能。科学家们又以全新的活力来钻研太阳系稳定性问题了。

今天，一般认为地球及其附近行星的运动是不稳定的。要给出确切答案，需考虑行星轨道的混沌行为(这是未知的)。包括庞加莱在内的科学家都清楚必须考虑混沌效应，但直到数十亿年的行星运动能够在计算机上展示出来，这一影响才被充分认识。

过去四十年来，Laskar 和 Batygin 等人回答了诸如这样的问题：在多久时间内我们可以确切预测太阳系行星的运动？答：六千万年。太阳系开始瓦解时会是什么样子？答：水星变得异常。水星与木星的轨道锁定，拉伸内行星的半长轴，并使水星碰撞金星或者太阳。

还有一个问题有待解决。理论和模拟表明，类地行星各自的运动在几百万年内会变得不稳，但太阳系在数十亿年内却保持完好。那么，如何调和这两个时间尺度？

目前似乎找到了这个问题的答案。Laskar 及其同事表明，类地行星混沌运动时存在一个隐藏结构，它可以控制快速失稳，以免每颗行星在某个方向偏移太远。“快速混沌体现在行星特定轨道位置，而非轨道形状”，行星科学家 Morbidelli 说，并补充道：“这意味着，总体而言行星维持在各自轨道上，因而不会碰撞。”Laskar 表示赞同：“如果没有这种结构，太阳系将更不稳定，可能就没我们了。”