



# 300多年过去了，“三体问题”有解了吗

“它是三体纪念碑，也是一个墓碑。”

“墓碑？谁的？”

“一个努力的，一个延续了近二百个文明的努力，为解决三体问题的努力，寻找太阳运行规律的努力。”

“这努力终结了吗？”

“到现在为止，彻底终结了。”

“已经确切地证明，三体问题无解。”

……

在刘慈欣的小说《三体》里，“三体问题”作为“三体人”远征的原初动力，推动了小说的发展。确切地说，正是由于“三体问题无解”，“三体人”才不得不向地球出发。

随着《三体》动画版及真人版相继播出，既古老又崭新的“三体问题”也再度进入大众视野。如今，“三体问题”已提出300多年，《三体》问世也十年有余，科幻在进步，科学家求解“三体问题”有哪些进展？

“二体问题”解决了，然后呢

“三体问题”究竟是什么？它为何如此重要，让无数科学家为之着迷？

在小说《三体》里，“三体人”生活在由三颗恒星组成的三体系统中，恒纪元与乱纪元毫无规律地交替出现。换句话说，在“三体人”的地球上，三颗太阳并不会“照常升起”，而是时有时无，不定时出现。无法破解“三体问题”奥秘的“三体人”只能不断脱水、浸泡，艰难生存。

“三体人”的困境是“三体问题”的一个极端案例。从科学角度说，“三体问题”是天体力学中的基本力学模型。它是指三个质量、初始位置和初始速度都是任意的可视为质点的天体，在万有引力作用下运动的规律问题。

想理解“三体问题”必须回到问题的起点，回到牛顿时代，回到更基础的“二体问题”——两个天体如何运动？有何规律？

300多年前，据说因一个苹果落地，牛顿发现了万有引力。在万有引力定律、牛顿力学定律的基础上，牛顿解决了“二体问题”，行星绕太阳运动的轨迹是一个能够用数学公式表示的椭圆轨道。

“在牛顿之前，人们从几何学的角度理解行星的运动——只有图像，没有物理。通过天文观测，人们知道地球绕着太阳沿椭圆轨道运动，但无法解释它为什么沿着椭圆轨道运动。”南京大学天文与空间科学学院教授周礼勇表示，牛顿解决了两个天体沿椭圆轨道运动的问题，而约翰·伯努利则给出了两个天体在万有引力作用下的轨道形状，这类轨迹在数学上被称为圆锥曲线。

解决了“二体问题”，“三体问题”乃至“N体问题”开始进入科学家的视野。

一场长达数百年的探索正式拉开帷幕。

“三体问题”无解，为什么

无论是“二体问题”，还是“三体问题”“N体问

题”，原本都是天文学的问题，倘若将天体抽象为只有质量，没有大小、体积、形状的质点，这一问题就可以转化为数学问题。

“根据抽象模型写出来的运动方程，完全可以脱离天文学的背景。如果我们去检索在‘三体问题’或者是‘N体问题’上有比较重要贡献的那些人，会发现他们基本上都是数学家。”周礼勇说，“所以其实它基本上就是一个数学问题。”

周礼勇介绍，在数学上，“三体问题”被表达为一个常微分方程组。力学系统中常常有一些守恒量，如能量守恒、动量守恒等。这些守恒量对系统的运动构成特定的限制，当这些限制条件足够多时，系统的运动就能确定下来，换句话说，这个系统的运动就被“解出”了。这意味着，科学家可以用已知的函数显式地表达出任意时刻天体的位置和速度。

对由N个常微分方程描述的力学系统，这样的限制条件被称为“首次积分”。1843年，数学家雅可比证明，只要找到N-2个首次积分，就可以完全解出N阶力学系统。

而“三体问题”正是一个18阶的力学系统。为了寻找常微分方程组的首次积分，找到“三体问题”的解析解，一代代数学家使出“十八般武艺”，试图从不同途径靠近答案。

1897年，瑞典与挪威的皇帝奥斯卡二世设立了奥斯卡二世大奖，列出了若干科学难题，其中一个就跟“三体问题”有关。该问题要求科学家给出“N体”中每个质点在任意时间上由已知函数构成的、一致收敛的级数解。

今天，人们已经知道，“三体问题”不存在这样的解析解，或者说不存在一般意义上的通解，然而数学家庞加莱却凭借对“三体问题”的研究获得了奥斯卡二世大奖。

“他获奖并不是因为找到了这个解，而是因为证明在绝大多数情况下，这样的解不存在。”周礼勇介绍，获奖后，庞加莱还证明不存在更多首次积分——此前已经有数学家找出了10个被称为“经典积分”的首次积分。科学家都在思考“三体问题”能不能解决，而庞加莱的答案是：不能解决。”

庞加莱以否定的方式解决了问题，宣告“三体问题”在通常意义下没有解析解。

1912年，芬兰数学家松德曼证明，除三体碰撞奇点的情况外，“三体问题”存在一个级数解。然而，这个级数收敛太慢，如果想要应用它，需要写下10的800万次方项——这意味着，松德曼给出的级数解完全不可能实现实际应用。

到庞加莱和松德曼的时代，“三体问题”似乎已经走到了终点，该告一段落了，但科学家不这么想。

借助超级计算机找周期解，有用吗

明知不可为而为之，有时正是科学的一部分。

数学家已经证明，“三体问题”没有解析形式的通解。但这并不意味着人们在这个问题上无路可

走——迄今为止，科学家已经发现了成千上万族周期解。

“三体问题”既不可解又可解。当它不可解时，宛如导向了科学的“死胡同”，当它可解时，又能“冒出”海量特解，这看上去似乎十分矛盾。其实，寻找通解和特解一直是“三体问题”的两个分支。通俗地说，通解是适用于所有条件的解，而特解则是在一个或多个条件下得到的解。

周礼勇表示，“三体问题”的一类特解是周期解。所谓周期解是指天体运动的一种特殊轨道，在这样的轨道上任选一点，天体在经过一个周期后必然会以同样的速度再次通过这个点。

最先找到“三体问题”周期解的是数学家欧拉。在三个天体总是处在一条直线上的条件下，他找到了3个周期解，它们被称为“欧拉解”。此后，数学家拉格朗日在三个天体呈等边三角形构型的条件下，找到了2个周期解，这一族周期解连同“欧拉解”被统称为“拉格朗日解”，而这5个特解所在的位置又叫作“拉格朗日点”。

在寻找周期解的路上，庞大的计算量是绕不开的“拦路虎”，在用纸笔计算的年代，这项工作很长一段时间里进展缓慢。进入计算机时代后，周期解的数量开始大幅增加：

2013年，塞尔维亚科学家利用计算机，成功找出了13族周期解。

2017年，上海交通大学廖世俊教授团队利用超级计算机，发现了695族周期解。此后，该团队发现了更多周期解。2022年，他们提出了求解“三体问题”周期解的路线图。

“超级计算机、机器学习、人工智能等工具会帮助‘三体问题’取得更多进展。”周礼勇表示，“人们求解‘三体问题’时，无非是要总结规律。这个规律在复杂的‘三体’系统里隐藏得很深，目前的人类大脑可能暂时无法找出这种规律。”

“使用超级计算机或人工智能或许能够找到规律，但想要理解规律，彻底解决‘三体问题’，还需要人类的理性。”周礼勇补充说。

找到更多周期解，探寻“三体”乃至“N体”的运动规律，对人类来说有用吗？

周礼勇说，研究“三体问题”有助于人类理解大规模、长时间尺度下天体的运动，了解太阳系外行星系统的形成和演化。当然，“三体问题”还是混沌系统的绝佳范例。

“实际上，‘三体问题’也是重要的数学问题，与拓扑学、几何学、动力系统数学分支紧密相关。此外，也有人将‘三体问题’的概念拓展至量子系统等领域中。”周礼勇补充道。

回过头来看《三体》里的“三体纪念碑”，那不是一座墓碑，而是一座丰碑——标记着科学家携带着人类的无穷好奇心和无限想象力，去挑战未知所付出的一切努力。它将持续书写着关于“三体问题”的勇气与荣光，过去与未来。

据《科技日报》