

· 专题 19: 月球的形成和演化——基于嫦娥工程的新认识 ·

月核形成数值模拟: 对大碰撞理论的修正

周游, 刘耘

中国科学院 地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002

月球形成的大碰撞理论自 1974 年提出以后, 由于它能较好的解释地月系统间的一系列观测事实和数据, 逐渐成为月球起源的各种理论中最被广为接受的一种。大碰撞事件直接决定了月球的物质组成、初始状态以及早期演化, 研究迄今, 大碰撞的数值模拟已经成为月球起源与早期演化中不可或缺的一个环节。

月核是月球内部层状构造中最深的一层, 长期的观点一般认为月球具有很小的月核或者没有月核, 这是月球的一个重要观测事实, 也是现行的大碰撞模拟中非常重要的一个约束条件。然而目前的大碰撞模拟关于月核的通用约束条件为: 代表月核的金属铁粒子占吸积盘总粒子数小于 10%, 但随着近年来在计算技术的进步和月球探测的新认识, 这一重要的约束条件具备了进一步修正的空间。新的认识和进展包括:

(1) 月核的大小逐渐形成了一致的认识, 即月球存在半径为 250 ~ 350 km 核, 这一新的认识将使得我们得到可以重新构造月核的制约条件。

(2) 超级计算机计算能力的大幅提高, 使得采用高分辨率精确计算参与铁核形成的粒子数量成为可能。如果将数值模拟的分辨率提高到 100 万时,

则构成月核的粒子数将达到 300 万左右时, 才开始具备准确模拟月核的能力。增加月核模拟粒子数, 是一个提高精度的现实可行方法。

(3) 近年来对月球金属铁液与硅酸盐在两相间的分配, 以及高温高压下金属铁气化问题都有新的进展, 这些新的信息, 为大碰撞模型的成核过程提供了进一步的限制。

目前大碰撞理论的最主要模拟方法为 SPH (光滑粒子流体动力学) 方法。此外, 随着近年来计算技术的飞速发展, AMR-CTH 等方法也得到一些应用。SPH 方法是一种无网格、自适应、具有拉格朗日性质的动力学求解方法, 方法的实质是利用一组任意分布的粒子来对偏微分方程的求解域进行离散化, 再利用离散点来构造近似函数, 从而将偏微分方程转化为一系列离散化、只与时间有关的常微分方程, 最后通过传统的数值解法求解这些常微分方程。SPH 方法核心的 2 个步骤是核函数近似和粒子近似。我们的研究方法细节是:

(1) 采用高分辨率模型 (100 ~ 1000 万) 模拟月球的形成过程。

(2) 采用新的月核制约条件 (250 ~ 350 km) 重新验证目前广为接受的 5 个数值模型。

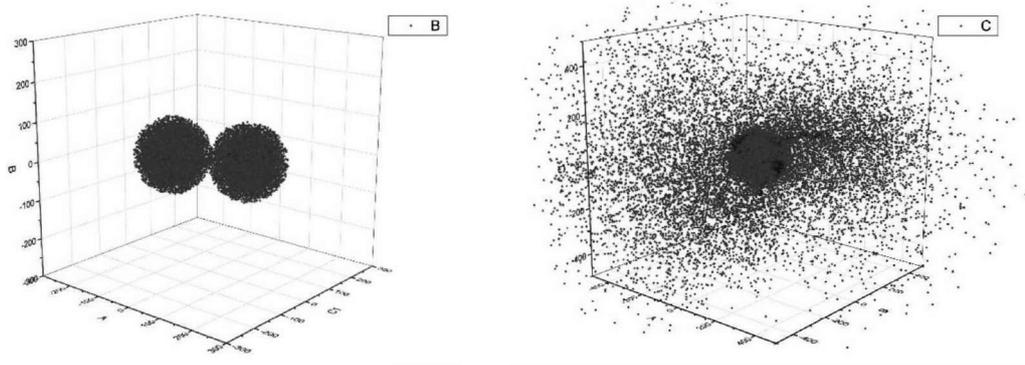


图 1 模拟过程示例

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (41490630); 中国科学院专项 B 项目 (XDB18010100)

第一作者简介: 周游 (1980-), 男, 副教授, 研究方向: 天体与地质过程的数值模拟. E-mail: zhouyou@mail.gyig.ac.cn.

(3)引入金属铁与硅酸盐两相间分配研究的最新成果,减小月核成核过程对大碰撞模型的影响。

目前存在的困难在于世界范围内专门开展大碰撞的课题组较少,尚无开源的程序可以使用,需立足于自主开发。图1为我们目前的模拟程序运行示例。但这一程序仍在状态方程上存在问题,原因在于大碰撞模拟目前公认最好的状态方程(M-ANEOS)无法获取。状态方程对模拟结果最大的影

响表现在对大碰撞理论组份制约的影响,而对物理制约的影响相对较小,如Canup在2001年提出了Canonical模型时,采用的也仅仅是Tillotson状态方程,被质疑后于2004年改用M-ANEOS状态方程,但在物理制约的结论上,并未产生重要影响。因此目前我们的程序仍然可以初步开展铁核形成的模拟,但更高精度的程序进展有待于更先进和精确的状态方程问题的解决。