

月球起源研究进展

许英奎^{1,2}, 朱丹¹, 王世杰³, 刘耘¹

1. 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; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100040; 3. 中国科学院地球化学研究所 月球与行星科学研究中心, 贵阳 550002

摘要:月球是地球唯一的天然卫星, 早期学者认为地月系统是普遍存在的行星-卫星系统的一员, 但是月球又有许多特征, 如质量异常大, 挥发分和 Fe 元素亏损等, 传统理论难以解释这些特征。因此, 针对月球的起源提出了四种学说: 捕获理论, 共增生理论, 分裂理论和大碰撞假说。目前对大碰撞假说研究较多, 但研究者们始终无法较好解释地月系统氧同位素的高度一致等特征。本文试探性提出新的月球起源分裂模型, 能较好的解释某些月球特征, 引起研究者们对月球起源新的思考。

关键词:月球; 捕获理论; 共增生理论; 分裂理论和大碰撞假说

中图分类号: P184.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2012)05-0516-06

Recent Advances of Lunar Formation Theories

XU Ying-kui^{1,2}, ZHU Dan¹, WANG Shi-jie³, LIU Yun¹

1. *The State key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002 China;* 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;* 3. *Lunar and Planetary Science Research Center, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*

Abstract: The moon is the only satellite of the Earth, which was conventionally believed to be common in solar system. But many characters of the moon, such as large size, lack of volatile substance and iron element, are difficult to be interpreted by conventional theory. Based on these characters, scientists have suggested four theories, capture model, coaccretion theory, Earth fission theory and collision ejection model, among which collision ejection model is widely accepted currently. Collision ejection theory suggests that the moon was assembled from a disk of ejected material of the Earth during its collision with another planet. Researchers have done many physical simulations to support this collision ejection theory, but some features, like identical oxygen isotopic composition between Earth and the moon, cannot be explained well. A new model is raised in this paper and it may throw some light on the lunar formation.

Key words: moon; capture; coaccretion; Earth fission and collision ejection

月球的起源可以追溯到 1879 年 Darwin 的分裂说, 他认为地球的自转周期和由太阳引起的潮汐周期引起共振, 部分物质变形脱离地球形成月球, 地球上广阔的大洋就是遗留痕迹^[1]。1930 年, Jeffreys^[2]指出摩擦阻尼作用会遏制共振造成振幅扩大, 也不会导致地球物质的分裂抛出。但之后很少有人探讨月球起源的问题。1952 年, Harold Urey 成为第一个真正关注月球起源的人, 他认为月球由太阳系原始星尘汇聚形成, 然而阿波罗计划带来的样品证明月球是一颗经过了分异的星球, 并不由冰冷的、未经

分异的原始物质组成^[3]。阿波罗计划前后, 月球研究者针对月球起源提出了共增生理论^[4]、捕获理论^[5]及修正的分裂理论^[6], 但都不能独立解释月球的全部特征。1975 年, W. Hartmann 和 D. Davis 提出了大碰撞分裂假说, 认为地球受到一个卫星大小的天体撞击, 地壳和地幔的一部分被抛掷出去, 这些物质的一部分慢慢降回地球, 另一部分则吸积形成绕地球转动的月球^[7]。1976 年, Cameron 和 Ward^[8]也发表了相似的观点, 并根据角动量的大小估算了撞击体的体积近似于火星。之后, 大碰撞分

收稿日期: 2011-07-21 收到, 09-16 改回

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2010AA1222)

第一作者简介: 许英奎(1987-), 男, 博士研究生, 地球化学专业. E-mail: xuyingkui83@163.com.

通讯作者: 朱丹(1970-), 男, 博士, 研究员, 主要从事岩浆岩和岩浆动力学研究. E-mail: zhudan@vip.gyig.ac.cn.

裂理论经过修改和发展逐渐为大多数学者接受,成为月球起源的主导思想。

1 经典理论分论

月球是地球的天然卫星,相对太阳系其它行星的卫星,月球的质量明显偏大,绝大部分卫星与其主星质量之比小于 1/1000,而月球占地球质量的 1/81;地月系统角动量异常大,偏离太阳系较为标准的动量-质量分布;月球亏损挥发性元素和铁元素;地月系统氧同位素组成一致;月球形成早期的岩浆洋事件等。任何关于月球起源的理论都应解释以上月球的特征,分别介绍如下。

1.1 共增生理论

Schmidt^[9]在 1959 年首先提出共增生理论,20 世纪 70 年代盛行,随后被 Ruskol、Harris、Kaula 和 Weidenschilling 等发展^[4,10,11]。该理论认为月球和地球由太阳系星子碰撞汇聚形成。在太阳系演化的初期,许多星子在以太阳为中心的轨道运动,它们彼此碰撞增生形成太阳系内的各大行星。当以太阳为中心运转的星子群经过正在增生的原始地球时,它们的轨道受原始地球的吸引转变为以地球质量为中心的近似双曲线轨道,其中一部分星子群的运转方向同地球一致,而另外一些则相反。两种运转方向的星子群发生碰撞,角动量彼此抵消,一部分碰撞碎屑物质会被原始地球吸引捕获,另外一部分由于速度较大、仅转变为以地球为中心的环绕轨道而不被地球捕获,从而形成了围绕地球的原始月球星子群(PLS)。通常认为围绕太阳公转的星子群接近地球时,多数与地球旋转方向相同,因此它们相互撞击形成的月球星子群与地球旋转方向相同。一旦月球星子群形成,就会捕获围绕太阳运行的星子,使质量迅速增大。之后,由于重力不稳定性,月球星子群在很短时间内就会结合成一个或多个原始月球胚胎。不过这样的原始月球胚胎很难“存活”,因为形成原始月球胚胎的时间很短,围绕太阳运转的星子依然很多,这些星子与月球胚胎的猛烈撞击必将导致原始月球胚胎的破坏^[4]。Ruskol 的研究认为:当地球质量为现今质量的一半时,原始月球胚胎有两个或三个。它们通过吸积月球星子群物质而生长,当半径达到 1000 km 时,就能经受围绕太阳运行的高速太阳星子的撞击,所以此时原始月球胚胎生长的主要物质源于太阳星子,而不是月球星子群。这些原始月球胚胎最终结合成月球。

形成地球和月球的太阳星子群离太阳的距离相近,所以两者的氧同位素组成相同。月球星子群是

星子之间高速撞击形成的,这些高速撞击必然导致挥发性元素的蒸发,组成月球星子群的物质丢失了挥发性元素,因此月球亏损挥发性元素。

月球亏损 Fe 元素,Ruskol 认为是硅酸盐矿物与金属铁的强度和延展性有很大的差别,撞击作用使得硅酸盐颗粒变得更小、动量更低、更容易保留下来形成原始月球星子盘或被月球星子盘捕获,而富含 Fe 的星子或碎片由于动量较大则不易被捕获,然而这种月球星子盘的“过滤”作用在原始月球胚胎形成后就失去作用了,因此仍不能完全解释月球的 Fe 亏损特征;Harris 和 Kaula 认为^[10],形成月球的物质有三分之一或者一半来自月球星子群,不过这仍然不能完全解释月球铁元素亏损的程度。

在解释月球岩浆洋成因方面,共增生理论认为是由于星子碰撞过程,势能向热能的转化,造成了月球的广泛熔融,但是形成月球的碰撞作用经历的时间较长,热能释放是个逐渐的过程,这对于形成月球岩浆洋所需的热能是远远不够的。

共增生理论最大的问题仍然在于不能解释地月系统的角动量,与太阳系其他行星相比,地月系统角动量异常大为 $3.45 \times 10^{41} \text{ rad} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$,Giuli^[11]模拟计算出原始地球通过星子生长时的角动量变化。结果表明,如果地球增生的撞击使地球的角动量增加,就要求这些增生星子带的轨道参数范围非常窄。即便 Harris 把几乎所有有利于原始地球角动量增加的因素都考虑到,增加的地球角动量也只能达要求的 10%^[12]。同理,原始月球星子群通过捕获围绕太阳运行的星子而获得足够的角动量也要求这些星子的轨道参数范围非常窄,因此共增生理论不能解释地月系统的角动量特征。

1.2 捕获理论

捕获理论盛行于 20 世纪 60 年代,得到 Urey、MacDonald 和 Singer 的支持^[5,13,14]。该理论认为,月球本来处于太阳系的其它位置,围绕太阳旋转,后来因为轨道接近地球,被地球强大的引力吸引,转变为地球的卫星。

这一捕获行为的动力学过程可以参考太阳-地球-月球的限制性三体问题的探讨。限制性三体问题模型是三体中有一体质量 $m \ll m_1, m_2$ 的特殊三体问题模型。该问题仅研究第三体 m 在两主天体引力下的运动,故至多是 3 自由度系统。尽管该系统仍不可积,但一般的常微分方程可能有一类非常简单的特解,即不动点解。对于圆型限制性三体问题,由于其存在(多)一个积分(雅可比积分),并存在五个平动解[对应五个拉格朗日点,分别标记为 L_1 、

L_2 (L_2 是嫦娥 2 号探月任务完成后第二个运行点, 进行对地和太阳探测)、 L_3 、 L_4 、 L_5], 这些点在共动坐标系中是静止的, 换句话说, 它们以与 m_2 同样的周期(角速度)绕 m_1 作圆周运动(图 1)。月球、地球和太阳组成的三体系统中, 月球的质量远远小于地球和太阳的质量, 在讨论月球运动时可采用限制性三体问题作为近似。

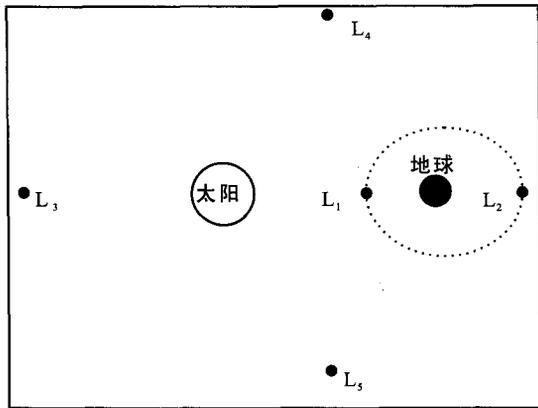


图 1 限制性三体问题示意图

Fig. 1 Restricted three-body problem for the Sun, the Earth and the Moon

要理解捕获理论的动力学解释, 我们先来认识月球为什么绕地球转, 而不直接绕着太阳转? 在圆形限制性三体问题中有一个结论, 如果第三体(在这里也就是月球)的雅可比常数 C_J 小于 L_1 点处的雅可比常数 C_1 , 那么第三体只能在图 1 所画的近似椭圆形的封闭区域内运动。更直接的说, 第三体(月球)会被地球束缚住。那么现实情况怎么样呢? 对于太阳-地球-月球这样一个圆形限制性三体问题而言, 月球运动的雅可比常数 $C_J = 2.842938967$, L_1 点处的雅可比常数 $C_1 = 3.009064235$ 。 $C_J < C_1$, 所以月球会被地球束缚住, 而不至于在数十亿年的演化时间内由于太阳的引力作用而脱离地球。

我们考虑什么情况下月球可以被地球捕获。 L_1 点定义一个临界边界表面(零速度面)。当月球速度很小时, 月球无法从太阳系其他位置穿越零速度面进入地球轨道; 当月球速度很大时, 月球很容易穿过零速度面, 但是地球却没有能力将它捕获为自己的卫星; 只有月球速度适当时, 月球才有可能从太阳系其它位置偶然的进入零速表面中, 它可以围绕地球转动很多圈, 不过最终它会从出口中离开地球, 重新回到以太阳为中心的轨道上。

20 世纪 70 年代, 捕获理论的支持者认为, 月球被捕获时动量较大, 零速度面开口较大。月球被捕获后, 由于一些消耗效应(潮汐作用、小行星撞击等)

减小了月球的动能, 月球相对地球速度减小, 也就是零速表面收缩, 零速表面开口也收缩减小, 使得被捕获的月球不能逃离地球, 最终成为地球的卫星。

月球被地球捕获并成为地球卫星的机率非常低, 距离太近可能就会撞上, 过远又可能捕捉不到。而且经由阿波罗计划探测的结果显示, 月球缺乏 Fe、Ni 等成分, 而这和小行星或其它太阳系中星体的成分很不相同。另外, 这一理论也难以解释地球和月球有几乎相同的氧同位素比值。由于我们所在的太阳系各位置氧同位素比值具有高度的不均一性, 捕获理论不能解释地球与月球的氧同位素特征, 这是捕获理论的致命弱点, 并且它太依赖一些小概率事件, 这个理论已逐渐被抛弃。

1.3 分裂理论

当分裂理论被摒弃之后^[2], Ringwood 和 Wise 于 20 世纪 60 年代重新研究了分裂学说, 指出旋转导致的不稳定是分裂的原因^[6, 16]。他们重新计算了未分裂前地球的旋转周期为 2.6 天, 这个旋转速度使地球处于分裂的临界条件, 当地球核幔分异之后, 由于质量的重新分布, 使得旋转地球的转动惯量变小, 地球的转速加快, 旋转周期变为 2.1 天, 这导致本来处于分裂边缘的地球发生了分裂。分裂初始, 地球几何变形逐渐变大, 直到连接最薄弱的地方发生断裂。之后, 地球慢慢恢复之前的形状, 而随后的地球-月球的潮汐作用使得月球的轨道半径逐渐变大。上世纪 80 年代随着数值模型的发展, 一些学者的计算结果表明, 地球分裂出来的月球最初只是形成一个碎片盘, 月球是在此基础上进一步演化形成。

分裂理论在解释地月氧同位素比值一致和亏损 Fe 元素特征上有很大优势, 因为分裂的部分主要是核幔分异后的地幔部分, 继承了地球的氧同位素和亏损铁元素的特征。另外, 由于地球分裂的物质先形成碎片盘, 碎片盘之间的碰撞及挥发元素的挥发也使月球在形成之前亏损挥发性物质。

分裂理论的最大缺陷是无法解释地月系统的角动量异常及岩浆洋的成因。如果月球是分裂形成, 那么要求分裂前原始地球的角动量至少是现今地月系统的四倍。如此巨大的角动量的来源及去向, 分裂理论都无法给予解释。同样, 月球大尺度的熔融需要的热量, 分裂理论也无法给予解释。

2 大碰撞假说

Safronov^[17] 1966 年提出太阳系起源星子假说。在此基础上, Hartmann 和 Davis 于 1975 年提出了“大碰撞”理论, 认为是卫星大小的星体撞击原始地

球, 抛射出许多贫 Fe 地幔物质, 月球就是由这些撞击抛射物形成的。基于当时的行星增生模型, 他们认为撞击体大小和目前的月球相仿, 且高能量的碰撞是导致月球挥发分较少的主要原因^[7]。随后 Cameron 和 Ward 也提出了类似的观点。他们根据地月系统角动量计算出碰撞体的大小和质量, 指出一个大约地球质量 1/10 的火星大小的原始行星 Theia 撞击原始地球抛射出大量物质。这些抛射物由于高能造成的气化作用引起加速, 为防止与地球发生再次碰撞, 最终在地球的洛希临界线(卫星自身重力与行星潮汐力相等, 当卫星处于行星洛希临界线之内会被行星潮汐力撕碎)附近形成月球碎片盘, 逐步形成月球^[8]。在大碰撞理论提出后的近十年里, 该理论并没有得到重视。1983 年, Thompson 和 Stevenson^[18]进行了大撞击后碎片盘形成月球的模拟计算。直到 1984 年, 在夏威夷召开了月球起源国际会议后, 大碰撞假说才逐渐成为占主导地位的月球起源假说。1985 年, Wetherill 在研究类地行星形成过程中指出: 类地行星的形成主要分三个阶段, 在晚期阶段, 数十到数百个行星大小的胚胎之间的撞击形成行星。这从理论上支持了月球的形成是由撞击事件导致。

自 1986 年开始, Willy Benz, Alastair Cameron 以及他们的团队开始使用平滑粒子流体动力学技术 (SPH) 模拟月球形成的大碰撞事件。Benz, Slattery 和 Cameron 于 1986 年第一次在花岗质成分的假设下完成了撞击造成的轨道物质就位的流体动力学演示。1987 年他们设计了 9 次试验, 每次试验中撞击体体积各不相同, 模拟粒子流追踪 10~25 hr。最后得出结果: 在 $1.06 \leq L_{\text{IMP}}/L_{\odot-M} \leq 1.35$ 情况下, 轨道物质的质量为 $0.1M_L \sim 2M_L$, 其中 L_{IMP} 为撞击体角动量, $L_{\odot-M}$ 为地月系统角动量, M_L 为月球的质量, 并且轨道物质的 84%~92% 来自撞击体。他们还发现, 质量小的撞击体撞击形成的轨道物质为铁富集型, 而大的撞击体撞击造成的物质贫 Fe^[20]。随后, Stevenson 发现模拟中使用的 Tillotson 状态方程无法精确的描述撞击过程中物质的相变过程, 气液混合相中的物质内能也无法得到解释, 并且无法区别重力作用和压力梯度在物质变化中的重要性^[21]。

为了解决上述问题, Benz, Cameron 和 Melosh 将 ANEOS 状态方程引入 SPH 模拟, 试图更好地解决气化和混合相问题。ANEOS 状态方程研究物质的 Helmholtz 自由能、温度和密度作为自由变量, 在假定各温压平衡下描述单个粒子内部的气液混合相

状态, 各相的质量和分压也能得到计算^[22]。但是相比 Tillotson 方程, 使用 ANEOS 计算得出的轨道物质更少, 为了增加轨道物质的质量, 他们采用增加撞击体质量和角动量的方法, 但这样使得铁含量合适的情况下, 轨道物质的质量变得过大^[23]。

1997 年, Canup 等^[23]指出, 撞击产生的碎片并没有立即形成一个完整的月球, 而是之后逐步吸积才形成。Ida 等^[24]的模拟实验说明, 如果月球是从月球碎片盘中汇聚形成, 那么碎片盘的质量最少是月球质量的 2 倍以上。平滑粒子流体动力学模拟显示, 多次撞击模型造成的环绕地球的月球碎片盘的质量对于形成月球是足够多的, 并指出在行星形成的晚期阶段, 这种撞击是经常发生的。Cameron^[25]提出一种新的 SPH 方法, 其中的粒子可以自动调整平滑长度, 避免因为撞击的持续过程物质向空间弥散造成的彼此孤立现象。在此基础上, Cameron 又进行了 10 次试验, 最终提出一种撞击模型: 一个较大的撞击体(撞击行星的质量与地月总质量比例 $\gamma = 0.3$) 与一个较小的目标 ($0.55M_{\odot} \leq M_T \leq M_{\odot}$) 发生碰撞, 碰撞的角动量可以减小到大约 $L_{\odot-M}$ 。这就要求形成月球的撞击发生在地球形成的早期阶段, 这也就是早期撞击模型^[25]。或者撞击质量相当的情况下, 角动量大约是现在的两倍。但是这两种模型都存在弊端, 早期撞击模型中, 需要月球在形成后增生较多的质量, 这就无法解释增生物质的贫 Fe 特点; 高角动量撞击模型, 则需要后期的大撞击来减小过多的角动量, 使得本来约束条件就很多的模型变得更受约束。

在 1998 年 12 月的地球-月球起源大会上, 确定撞击模型为: 撞击体和原始地球之间的比例为 3:7, 撞击发生在地球形成早期, 当时原始地球为现在的一半大小。但这个大小的撞击体模型不能通过一次撞击得到最终的地球和月球质量, 以及对应的角动量。不过随后有人提出多次撞击模型解决了以上问题, 即形成月球撞击事件后的若干次小撞击导致最终的地球和月球质量及与之对应的角动量^[26]。

2001 年, Canup 和 Erik Asphaug 对大撞击模型进行了修正。他们认为, 1998 年确定的撞击模型是不合适的。如果当时认为大碰撞形成的地月体系的角动量合适的话, 那么撞击发生时的地球增生到目前的一半大小, 而撞击体的质量较大。之前的小质量撞击体撞击模型就被否定了^[27], 主要是受限于当时的低分辨率 SPH 模拟, 前人的工作是用 3000 中的几十个粒子代表月球, 且粒子的平滑长度也是固定的, 这样就导致粒子溅射到轨道时彼此分离, 仅

靠重力演化而失去张力作用。Canup 和 Erik Asphaug 的模拟粒子数是 $N=3000$, 撞击角度的参数 $b=0.8$ ($b=0$ 代表迎头碰撞, $b=1$ 代表轻擦碰撞), 撞击行星的质量与地月总质量比例约 $\gamma=0.1\sim 0.11$, 所有物理量(月球的质量、铁含量和角动量)都能得到很好的解释^[19], 但是模型中使用的早期 Tilloston 状态方程。也有学者对 Canup 和 Erik Asphaug 的模型提出质疑, Cameron^[25] 认为模型中模拟撞击时间还不够长; 井田茂则认为, 如果计算分成更多的小块, 结果可能还会有大变化。

2004 年, Canup 应用修正后的 M-ANEOS 状态方程进行了撞击模拟实验, 重点观测撞击角度、速度, 撞击体目标体质量比以及撞击物体的热状态对撞击结果的影响。该模型支持小质量撞击模型, 认为撞击体初始速度小于 4 km/s , 角度为 45° 比较合适。观测发现, 那些撞击体在撞击过程中未和地球发生直接碰撞的部分, 即加热最少的部分最后会遗留在轨道上, 并且其中 30% 的物质发生了气化^[28]。

随着行星增生模式和大碰撞模型的确定, 一个问题摆在研究者们面前: 为什么和地球相撞的原始行星直到增加到火星大小才和地球碰撞? 两者处于到太阳距离相同的轨道上, 在增生到碰撞大小之前相撞的几率应该很大, 太阳系存在这样的位置让碰撞体稳定的增生吗? 2005 年, Edward Belbrund 和 J. Richard Gott 给出这样的解释: 和原始地球相撞的火星大小的星体是在到太阳 1AU 距离, 地球的 $L_4(L_5)$ 的位置上生长的, 该位置在地球前(后) 60° 的位置上, 和太阳、地球三者组成等边三角形。当宇宙星尘汇聚形成星子之后, 太阳系之内的众多星子之间以相互的引力作用主导它们向行星体的演化。限制性三体问题的研究表明, $L_4(L_5)$ 区域即使对于质量相对较大的星体仍然是稳定的。星子可以在 $L_4(L_5)$ 位置上碰撞聚集, 由于免于和地球相撞, 它有足够的时间发生核幔分异, 这就解决了碰撞形成月球亏损 Fe 元素的问题。由于 $L_4(L_5)$ 位置到太阳距离和地球相同, 所以它们具有一致的氧同位素组成也可以得到解释。直到后来其他生长的星子的引力作用使它偏离 L_5 位置, 轨道演化为马蹄形轨道, 并最终演化成为不规则的轨道而逃离 L_5 位置。当该星体逃离 L_5 位置后, 由于和地球相对太阳距离相同, 那么它和地球相撞的几率就很大了^[30]。

然而 Pahlevan 和 Stevenson^[31], 指出 SPH 方法模拟大碰撞模型结果显示, 月球的大部分物质来源于碰撞体而不是原始地球, 这样即使撞击体和原始地球氧同位素的细微偏差也是很容易辨别的, 这

让地月系统氧同位素的高度一致无法得到解释。他们认为, 在大碰撞发生之后到月球形成的时间间隔中, 原始地球物质和原始月球的碎片盘发生了扩散作用, 氧同位素分馏达到平衡, 这就消除了之前两者存在的任何偏差。但是地月分离相对物质的平衡过程来讲时间要短暂, 这样的解释显然无法令人满意。

目前大碰撞理论是月球起源的主导理论, 得到“星云说”及模拟实验数据的支持, 但是其不足之处也较多, 比如依赖小概率事件, 撞击体对月球地球化学特征的改变无法得到令人信服的解释等。

3 讨 论

我们对于月球的起源有以下几点看法:

(1) 太阳系中行星的卫星应该分两类考虑: 类地行星的卫星和类木行星的卫星。类地行星有很少或者根本没有卫星, 卫星形状也相对规则, 并且具有密度小(可能缺乏铁核心), 自转和围绕主星体公转周期一致等特征; 类木行星的卫星数量众多, 质量基本都在主星体的 $1/1000$ 之下。两类卫星很可能有不同的成因, 有待进一步研究。

(2) 在地月一致的地球化学特征方面, 分裂理论的优势是其它理论无法相比的。而其问题在于原始地球若要分裂出月球需要较大的转速(角动量)。对此, 我们设想: 原始地球形成早期(质量达到地月质量的 95%), 在岩浆洋阶段发生核幔分异, 核幔分异导致原始地球的转动惯量减小, 使得原始地球转动加快。随着原始地球内部逐渐冷却(原始地球表面仍然处于岩浆洋时期)体积收缩, 转动惯量进一步减小, 转速进一步加快。此外, 我们认为原始地球转动惯量减小还有另外一个过程的贡献: 随着原始地球内部温度降低, 下地幔的 Fe 会从高自旋状态变为低自旋状态, 下地幔总体积会减小约 6%^[32]。这样会更进一步减小原始地球的转动惯量, 转速进一步加快, 这是经典理论从来没有考虑过的。这些减小转动惯量的效应叠加在一起, 造成原始地球转速增大, 处于液态的地幔会部分甩离地球形成月球。另外, 由于处于分裂前的月球是地球的一部分, 其“自转”和相对地心的“公转”周期相等, 分裂后仍保留了这个特征, 故而月球总有面对地球的一面。至于分裂后地球的角动量如何降低到目前的值, 我们认为可能与后期的地球持续增生碰撞有关, 研究表明, 地球核幔分异后仍然会有不少于 5% 的质量增加^[33], 如果其中较多的碰撞导致角动量降低, 那么这个改变量也是不容忽视的, 有待进一步研究。

4 今后研究方向

(1) 行星起源的研究。行星是怎么形成的, 是否在形成行星的最后阶段发生了大规模的行星胚胎(星子)碰撞事件? 这些问题关系到月球起源于碰撞事件的可能性。

(2) 碰撞过程的化学演化。以往的工作大部分集中在动力学模拟中, 通过改变各种碰撞条件来迎合碰撞后两者的质量比, 角动量, 倾斜角度等, 而地月系统的化学异同来限制碰撞条件的研究很少。

(3) 地月的形成年龄测定。碰撞的动力学模拟显示, 早期撞击模型和晚期撞击模型都能在理论上形成当前的地月系统。如果能在地月系统的形成年龄上得出进一步精确的数据, 对于碰撞模型也能起到约束作用。

致谢: 感谢中国科学院地球化学研究所的朱成明研究员和白俊豪提出的宝贵意见。

参考文献 (References):

- [1] Darwin G H. On the precession of a viscous spheroid and on the remote history of the earth[J]. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, part 2, 1879, 170: 447-530.
- [2] Jeffreys H. The resonance theory of the origin of the moon (Second paper)[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1930, 91(1): 0169-0173.
- [3] Wood J A. Moon over Mauna: A review of hypotheses of formation of earth's moon[A]. Hartmann W K, Phillips R J, Taylor G J. *Origin of the Moon*[C]. Houston: Lunar And Planetary Institute, 1986: 17-55.
- [4] Ruskol E L. Origin of Moon 3: Some aspects of dynamics of circumterrestrial swarm[J]. *Soviet. Astronomy A J Ussr.*, 1972, 15(4): 646-654.
- [5] Urey H C. The capture hypothesis of the origin of the moon [A]. Marsden B G, Cameron A G W. *The earth-moon system* [C]. New York: Plenum, 1966.
- [6] Ringwood A E. Some aspects of the thermal evolution of the Earth[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1960, 20(3-4): 241-259.
- [7] Hartmann W K, Davis D R. Satellite-sized planetesimals and lunar origin[J]. *Icarus*, 1975, 24(4): 504-515.
- [8] Cameron A G W, Ward W R. The origin of the moon[A]. *Lunar science 7*[C]. Houston: The Lunar Science Institute, 1976: 120-122.
- [9] Schmidt O Y. A theory of the origin of the earth[J]. London: Lawrence and Wishart, 1959, 139.
- [10] Harris A W, Kaula W M. Co-accretional model of satellite formation[J]. *Icarus*, 1975, 24(4): 516-524.
- [11] Giuli R T. On rotation of earth produced by gravitational accretion of particles[J]. *Icarus*, 1968, 8(2): 301-323.
- [12] Harris A W. Analytical theory of planetary rotation rates [J]. *Icarus*, 1977, 31(1): 168-174.
- [13] Singer S F. Origin of moon and geophysical consequences[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1968, 15(1-2): 205-226.
- [14] Macdonald G J F. Origin of the moon; Dynamical considerations[A]. Marsden B G, Cameron A G W. *The earth-moon system*[C]. New York: Plenum, 1966: 165-209.
- [15] Heppenheimer T A, Porco C. New contributions to the problem of capture[J]. *Icarus*, 1977, 30(2): 385-401.
- [16] Wise D U. An origin of moon by rotational fission during formation of earth's core[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1963, 68(5): 1547-1554.
- [17] Safronov V S. Sizes of largest bodies falling onto planets during their formation[J]. *Soviet. Astronomy AJ Ussr.*, 1966, 9(6): 987-991.
- [18] Thompson A C, Stevenson D J. Two phase gravitational instabilities in thin disks with application to the origin of the moon (abstract)[J]. *Lunar And Planetary Science*, 1983.
- [19] Canup R M, Asphaug E. Origin of the moon in a giant impact near the end of the Earth's formation[J]. *Nature*, 2001, 412(6848): 708-712.
- [20] Benz W, Slattery W L, Cameron A G W. The origin of the moon and the single-impact hypothesis. 1[J]. *Icarus*, 1986, 66(3): 515-535.
- [21] Stevenson D J. Origin of the moon the collision hypothesis [J]. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1987, 15: 271-315.
- [22] Benz W, Cameron A G W, Melosh H J. The origin of the moon and the single-impact hypothesis. 3[J]. *Icarus*, 1989, 81(1): 113-131.
- [23] Cameron A G W, Benz W. The origin of the moon and the single-impact hypothesis. 4[J]. *Icarus*, 1991, 92(2): 204-216.
- [24] Ida S, Canup R M, Stewart G R. Lunar accretion from an impact-generated disk[J]. *Nature*, 1997, 389: 353-357.
- [25] Cameron A G W. The origin of the moon and the single-impact hypothesis. 5[J]. *Icarus*, 1997, 126(1): 126-137.
- [26] Agnor C B, Canup R M, Levison H F. On the character and consequences of large impacts in the late stage of terrestrial planet formation[J]. *Icarus*, 1999, 142(1): 219-237.
- [27] Benz W, Slattery W L, Cameron A G W. The origin of the moon and the single-impact hypothesis. 2[J]. *Icarus*, 1987, 71(1): 30-45.
- [28] Canup R M. Simulations of a late lunar-forming impact[J]. *Icarus*, 2004, 168(2): 433-456.
- [29] Canup R M. Dynamics of lunar formation[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2004, 42: 441-475.
- [30] Belbruno E, Gott J R. Where did the moon come from? [J]. *Astronomical Journal*, 2005, 129(3): 1724-1745.
- [31] Pahlevan K, Stevenson D J. Equilibration in the aftermath of the lunar-forming giant impact[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2007, 262(3-4): 438-449.
- [32] Lin J F, Gavriliuk A G, Struzhkin V V, Jacobsen S D, Sturhahn W, Hu M Y, Chow P, Yoo C S. Pressure-induced electronic spin transition of iron in magnesiowustite-(Mg, Fe)O[J]. *Physical Review B*, 2006, 73(11): 1-15.
- [33] Bottke W F, Walker R J, Day J M D, Nesvorný D, Elkins T L. Stochastic late accretion to Earth, the Moon, and Mars [J]. *Science*, 2010, 330(6010): 1527-1530.