

陨石成因 与地球起源

侯 渭 谢鸿森 著



地震出版社

国家自然科学基金重大基金资助项目 (10299040)

中国科学院地球化学研究所

陨石成因与地球起源

侯 涓 谢鸿森 著

地震出版社

图书在版编目 (CIP)

陨石成因与地球起源/侯渭, 谢鸿森著. —北京: 地震出版社, 2003. 5

ISBN 7-5028-2199-6

I. 陨… II. ①侯…②谢… III. ①陨石-成因 ②地球起源假说 IV. ①P185.83②P311

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 105527 号

陨石成因与地球起源

侯 渭 谢鸿森 著

责任编辑: 张友联

责任校对: 庞娅萍

出版发行:

北京民族学院南路 9 号 邮编: 100081
发行部: 68423031 68467993 传真: 88421706
门市部: 68467991 传真: 68467972
总编室: 68462709 68423029 传真: 68467972
E-mail: seis@ht. rol. cn. net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印厂

版 (印) 次: 2003 年 5 月第一版 2003 年 5 月第一次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

字数: 506 千字

印张: 19.75

印数: 0001 ~ 1500

书号: ISBN 7-5028-2199-6/P·1151 (2767)

定价: 50.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

目 录

| | |
|---------------------------------|-------|
| 第一章 宇宙时空中的太阳系 | (1) |
| 第一节 引 言 | (1) |
| 第二节 太阳系的 空间位置 | (2) |
| 第三节 恒星和太阳的演化轨迹 | (7) |
| 第四节 星系的演化和星系物质循环 | (11) |
| 第五节 关于星系起源的假说 | (12) |
| 第二章 太阳星云的起源和演化 | (18) |
| 第一节 太阳系起源的星云说 | (18) |
| 第二节 从太阳星云到行星的演化框架 | (22) |
| 第三节 太阳星云盘的物理化学特点 | (24) |
| 第四节 太阳星云成分的不均匀性 | (28) |
| 第三章 星云凝聚作用理论和实验研究 | (32) |
| 第一节 星云凝聚过程中的化学-岩石学问题 | (32) |
| 第二节 星云中矿物和金属的凝聚顺序 | (34) |
| 第三节 关于星云高温凝聚方式的讨论 | (42) |
| 第四节 蒸发-凝聚实验的主要装置和方法 | (46) |
| 第五节 硅酸盐和难熔氧化物的蒸发-凝聚实验研究 | (48) |
| 第六节 与橄榄石有关的蒸发-凝聚实验研究 | (54) |
| 第七节 小结和讨论 | (57) |
| 第四章 太阳星云盘小行星区物质演化的产物——陨石概述 | (62) |
| 第一节 总 述 | (62) |
| 第二节 球粒陨石的一般特点和关于球粒成因的争论 | (63) |
| 第三节 非球粒陨石(无球粒陨石、铁陨石、石铁陨石)及分异成因说 | (71) |
| 第四节 陨石是太阳星云盘小行星区物质演化的产物 | (77) |
| 第五章 陨石矿物 | (83) |
| 第一节 总 述 | (83) |
| 第二节 无水和高度还原类陨石中的矿物 | (94) |
| 第三节 无水和中等氧化类陨石中的矿物 | (94) |
| 第四节 含较多含水矿物的碳质球粒陨石中的矿物 | (98) |
| 第五节 铁陨石和石铁陨石中的矿物 | (100) |
| 第六节 无球粒陨石中的矿物 | (102) |
| 第六章 陨石氧同位素及其成因讨论 | (104) |
| 第一节 引 言 | (104) |
| 第二节 球粒陨石的氧同位素组成 | (106) |
| 第三节 关于球粒陨石氧同位素成因的讨论 | (111) |
| 第四节 非球粒陨石的氧同位素组成及其成因解释 | (117) |

| | |
|--|-------|
| 第五节 小 结 | (121) |
| 第七章 陨石中的惰性气体及其成因意义 | (123) |
| 第一节 引 言 | (123) |
| 第二节 陨石中惰性气体的不同来源 | (126) |
| 第三节 陨石中核过程成因惰性气体的年代学意义 | (130) |
| 第四节 陨石中的太阳型惰性气体 | (132) |
| 第五节 陨石中原始型惰性气体的主要组分——Q 气及其携带物特征 | (140) |
| 第六节 前太阳颗粒及其所携带的惰性气体原始同位素异常 | (149) |
| 第七节 陨石中原始型惰性气体总述 | (155) |
| 第八章 球粒陨石的凝聚成因 | (159) |
| 第一节 引 言 | (159) |
| 第二节 支持球粒凝聚成因说的主要理由 | (162) |
| 第三节 球粒成分结构特征的凝聚成因解释 | (167) |
| 第四节 基质的特点及其与球粒的成因关系 | (173) |
| 第五节 碳质球粒陨石中的含水物质和星云水化作用 | (177) |
| 第六节 球粒陨石的凝聚形成模式 | (184) |
| 第九章 非球粒陨石的成因讨论 (I) | (191) |
| 第一节 引 言 | (191) |
| 第二节 顽火辉石无球粒陨石 (AE) 的多种成因说 | (194) |
| 第三节 顽火辉石无球粒陨石 (AE) 的凝聚成因解释 | (197) |
| 第四节 AL 系列陨石的分类命名和成分结构特征 | (200) |
| 第五节 AL 系列陨石的成因讨论 | (204) |
| 第六节 橄辉无球粒陨石的成分结构特征和多种成因观点 | (208) |
| 第七节 橄辉无球粒陨石的凝聚成因解释 | (211) |
| 第十章 非球粒陨石的成因讨论 (II) | (217) |
| 第一节 HED 无球粒陨石的结构构造分类 | (217) |
| 第二节 HED 无球粒陨石的成分分类 | (220) |
| 第三节 HED 无球粒陨石的分异成因说: (一) HED 各陨石的成因关系 | (223) |
| 第四节 HED 无球粒陨石的分异成因说: (二) Euc 陨石的若干成因模式 | (230) |
| 第五节 HED 无球粒陨石的分异成因说: (三) HED 陨石的年龄、 冲击作用、热变质作用和母体 | (234) |
| 第六节 HED 无球粒陨石的凝聚成因解释 | (237) |
| 第七节 HED 系列其他陨石的成因讨论 | (247) |
| 第十一章 太阳星云类地行星区凝聚成岩模式和地球不均匀吸积模型 | (256) |
| 第一节 理论和实验基础 | (256) |
| 第二节 小行星区星云凝聚作用 | (257) |
| 第三节 小行星区星云凝聚成岩模式 | (260) |
| 第四节 类地行星区星云凝聚成岩模式 | (266) |
| 第五节 地球的不均匀吸积形成和原始成分估算 | (270) |

| | |
|--------------------------------|-------|
| 第十二章 试论地球早期演化 | (272) |
| 第一节 引 言 | (272) |
| 第二节 地球最初的演化——外核形成机制的探讨 | (274) |
| 第三节 地球演化的第二阶段——第一次全球性熔融和原始地壳形成 | (277) |
| 第四节 撞击成坑和最初的水岩相互作用 | (280) |
| 第五节 结语：水对地球物质演化的控制作用——待回答的问题 | (285) |
| 参考文献 | (292) |

序

“陨石成因”和“地球起源”是两个古老的而极富探索性的课题。本书作者在综合分析了有关太阳系和陨石的大量理论、实验和观察资料的基础上，对陨石成因进行了新的解释，并从陨石成因很自然地引申到地球起源的讨论。所以，本书是对以上两大科学问题的一个新鲜而具体的解答。

本书提出的一些观点颇有新意。比如，在太阳系演化理论、凝聚实验研究和陨石成分和结构观测资料的基础上，提出了陨石的凝聚成因，建立了小行星区和类地行星区的星云凝聚岩石学模型。在此基础上，估算了原始地球的物质组成，提出了地球中水的运移趋势，以及地球物质演化中水的作用。这些观点具有丰富的矿物学和岩石学内容，在学科上跨越了两大学科——天体化学和地球科学的范畴。这些观点应该说还处于假说阶段，还需要在今后的研究中经受检验。但它们的提出对于促进陨石学、天体化学和地球科学的交叉、合作和发展将会有一定的作用。

本书对近 20 多年来天体化学和陨石学的一些研究成果作了较系统的介绍。比如，有关实验凝聚岩石学的研究、陨石的氧同位素研究和惰性气体研究都是这个领域近年来的热门课题，也是国内地学界较少关注的内容。因此，该书的出版，也是对已往有关陨石学和天体化学著作的一个补充。

该书的作者是在边缘学科中进行探索的地学工作者。20 多年前，他们从矿床地球化学和实验地球化学的研究领域，分别开始了陨石学和地球深部物质的研究。此后，他们进行了高温高压下球粒陨石的熔融实验研究，并依据实验结果对地球的初期演化提出了自己的看法。因此，长期以来，他们的研究思路不断穿梭于天体化学和地球科学之间，从陨石的成因到地球起源自然也成为了他们的探索目标。这本专著既是两位作者合作的成果，也是天体化学、陨石学和地球科学相互交叉的产物。

从陨石研究获得有关太阳系早期演化和地球起源的信息，从而对地球物质的来源和早期演化做出解释，这一直是陨石学和地球科学家的愿望。本书的出版就是实现这个愿望的具体体现。尽管在某些方面还刚刚起步，但它毕竟在这条探索的道路上迈出了重要的第一步。

徐光灿

2003 年 3 月 7 日

前 言

20世纪60年代,地球板块学说的建立和宇宙飞船对行星表面的探测,被称为地学领域的两场革命。40多年来,沿着这两场革命所引领的探索之路,地球科学得到了迅速的发展。在这40多年地学研究的成就中,最重要的是两个新观念的确立,以及在此基础上建立起来的地球各学科之间,地球科学与其他科学之间最新的交叉和合作关系,它们是地球科学继续向前发展的基础。

一个新的科学观念是太阳系整体形成和发展的观念。从这个观念出发,地球被作为太阳系行星家族中的普通一员,以及太阳星云演化过程中的一个产物来进行研究。因此,地球科学必须不断地从天体物理学、天体化学、陨石学和比较行星学等相关科学的研究成果中获取新的启示,为解决地球形成和演化等重大问题提供依据。

另一个新的科学观念是地球整体性的观念。从这个观念出发,地表和近地表观测到的地质现象,都与整体地球,特别是地球深部物质的成分和运动状态密切相关。因此,必须加强地质学与地球物理学,以及实验科学之间的交流与合作,开展地球深部——地幔和地核的探索和研究。从而对板块构造的成因和驱动机制,以及众多地质现象的本质作出解释。

本书就是在上述这两个新观念的指导下完成的一项研究成果。

使作者深感庆幸的是,在我们作为学生开始进入地学领域至今的40多年里,正值地学迅速发展的新时期。特别是最近的20多年来,我们曾分别涉足了陨石学、天体化学和地球深部物质科学领域,然后又在地球深部物质科学研究中进行了合作研究。从而使我们的研究思路不断穿梭于天体化学与地球科学之间,并在长期的研究实践中产生了探讨以下两个问题的渴望:①太阳系-陨石-地球的成因关系;②地球缺乏最早8亿年历史记录的原因。本书就是针对上述两个问题交出的一份答卷。

全书共十二章。前三章主要介绍了探讨陨石和地球成因的一些背景资料,包括介绍太阳系在宇宙中的时空位置;地球和陨石源区——小行星带在太阳系中的位置;太阳系演化的星云说的内容;以及星云凝聚理论和实验凝聚岩石学的研究成果,这些内容也是后面章节中讨论问题的重要依据。第四至七章,在概括介绍陨石分类和主要成因观点的基础上,对陨石的矿物、氧同位素组成和惰性气体作了较详细的介绍。这些内容是探讨陨石成因的依据,同时也可以作为了解陨石学最新研究成果的一个窗口。第八章和第九、十两章从太阳星云凝聚成岩的角度出发,分别讨论了球粒陨石和非球粒陨石(包括无球粒陨石、铁陨石和石铁陨石)的成因。第十一章在综合第八至十章提出的陨石凝聚成因观点的基础上,建立了太阳星云小行星区的凝聚成岩模型,

然后外推至整个类地行星区。最后，以地球的不均匀吸积模型和原始地球的物质组成估算作为结束。第十二章中，以本书建立的地球不均匀吸积模型和原始地球物质组成模式为依据，结合比较行星学的研究成果，对地球缺失最早8亿年历史记录的原因提出了一些看法，自然也就描绘出了一幅新的地球形成和演化图景。在第十二章的最后一节中，以探讨水对于地球物质演化的控制作用作为全书的结语，同时也将地球最初8亿年和后来38亿年的历史衔接了起来。

由于作者有多年从事地球岩石和矿物研究的经历，在进行陨石学研究过程中，我们一直将陨石理解为一种在太阳星云条件下形成的特殊岩石，直至本书经过大量的综合分析推理得出了一个具有矿物成分和结构构造特征的陨石形成模型、太阳星云凝聚模型和地球不均匀吸积模型。本书的这种特点（或者可以称为优点）可能会使地学工作者对这些模型发生兴趣，从而引起大家对陨石学研究成果的关注。书中对于“地球早期演化历史”和“水对于地球物质演化的控制作用”方面的论述，具有较强的探索性和不确定性，但作为一种尚能自圆其说的思路，发表出来或许能引起读者对比较行星学和地球早期历史的研究热情，从而起到抛砖引玉的作用。如果本书的出版能获得上述两方面的效果，作者几年来的劳作也就得到了最大的回报。

本书中作为理论依据使用的一些有关太阳系演化学、星云凝聚理论等方面的结论，实际上大多还属于假说和推论。加上作者有关方面知识水平的限制，特别是有关太阳星云盘的多种物理参数，只能选用前人的估算结果，因而所建立的模型基本上仍是一个定性的结果，有待于进一步从数学模拟和实验研究两方面改进和提高。本书中难免出现错误和不当之处，敬请读者批评指正。

作者在从事陨石学研究的过程中曾得到王道德教授和欧阳自远院士的指导和帮助，书中提出的某些模式和构想曾得到欧阳自远院士的支持。涂光炽院士在百忙中为本书作了序。中国科学院地球化学研究所地球深部物质研究室的周文戈研究员和郭捷研究员在近年来给予作者多方面的帮助，特别是分担了作者近几年承担的基金课题的研究工作，使作者有更多的时间安心于本书的写作。刘永刚博士和马麦宁博士帮助收集了部分资料。张友联女士为本书作了审定和编辑工作。在此表示衷心感谢。

作者
2002年7月

第一章 宇宙时空中的太阳系

第一节 引言

本书是在大量陨石学的研究成果和凝聚实验研究的基础上，建立了一个太阳星云凝聚成岩模型，从而对地球的起源作出推论；这实际上直接涉及到了有关太阳系的起源问题。因此，本书在探讨问题的过程中，必然要把视线从地球和太阳系向宇宙空间扩展，了解地球和太阳系在宇宙空间中的位置，划定太阳星云凝聚作用在太阳和恒星演化历史中所处的时间范围。这便是设立本章的目的，也是本书讨论问题的重要前提条件。

了解地球和太阳系在宇宙空间的位置，涉及天文学甚至于宇宙学的范畴。此领域内容广泛、推理复杂，是远非用一章篇幅能说清楚的。本章仅对有关研究成果进行最简要的介绍，以便读者对宇宙中天体的分布有一个大致的了解，同时也希望从中体现出本书所持有的宇宙观：地球仅仅是宇宙中一个普通恒星——太阳的一个行星，太阳所在星系中有千亿(10^{11})个与太阳类似的恒星，宇宙中则存在着千亿个星系。假定所有的星系中的行星数量和恒星一样多，地球将是宇宙中 $10^{11} \times 10^{11} = 10^{22}$ 个行星之一。因此，必须承认，与浩瀚和神秘的宇宙相比，我们的地球和太阳是非常的普通，并显得十分渺小。然而，对于人类来说地球和太阳作为宇宙天体的一员，可以说又是非常的特殊和珍贵。“因为宇宙空间的大部分处于广袤和寒冷的真空状态，如果把我们随意搁置于宇宙之中，我们附着或旁落在了一颗行星上的机会将是偶然的无法想像。”“人类有幸诞生在地球这个行星上。这里有充满氮气的蓝天，有碧波荡漾的海洋，有凉爽的森林，还有柔软的草地。这无疑是一个生机勃勃的星球。从整个宇宙看，它不仅风景迷人，天下稀有，而且到目前为止，在我们的行程所经历的时空当中，只有这个行星上的人类开始对宇宙进行探索。”（萨根，1989）。因而作为现代人，我们应该感到十分幸运！

太阳系只是宇宙中恒星-行星体系的一个特例，其特殊之处在于地球上的人类已经对太阳系进行了最详尽的观测和研究。天文学家深信，天空中有无数个类似于太阳系的恒星-行星系统，最近就公布了一批具有行星的恒星名单（详见第三节）。这些恒星-行星系统由于距离我们太远，目前对其起源和演化特征还知之甚少，太阳系起源和演化问题的研究则弥补了这种不足。因此，太阳系的起源和演化问题，实际上是一个恒星-行星体系的起源和演化问题，它既与恒星、星系和宇宙起源和演化问题密切相关，也是宇宙演化史中不可忽略的一步，其研究结果也必将对整个宇宙起源和演化理论产生影响。为此，本章在说明太阳和太阳系起源和演化的时间定位时，也介绍了宇宙、星系和恒星的起源和演化问题。这样，一方面在时间上给出一个完整的轮廓；另一方面读者可通过阅读最少的篇幅了解有关宇宙、星系，以及恒星起源和演化方面的知识。表面看来似乎有点离题，但我们毕竟把地球科学问题和宇宙联系在一起了，这也是将地球科学家的目光向天文学、天体物理学、天体化学等相关科学延伸的一种尝试吧！

第二节 太阳系的空间位置

一、天体的电磁辐射

几乎所有的天文资料都是通过对宇宙中各种电磁波的观测得到的。20世纪50年代之前,天文观测主要是通过光学天文望远镜进行的,观测到的天体主要是能发出可见光的恒星。60年代以后兴起的射电天文学、X射线天文学和红外天文学等新的天文学分支,使天文观测的精细程度增强了,观测范围扩大到了宇宙更深远的地域。许多新天体和新现象的发现,大大加深了人类对天体乃至宇宙物质演化的认识。比如,在一些恒星附近观测到了发出脉冲式射电辐射的中子星,另一些恒星附近发现了X射线源后证实了黑洞的存在,由此完善了有关恒星的演化理论。对星际云和星际气体尘埃物质的观测增进了对其化学成分的了解,为探讨恒星的起源提供了依据。活动星系和遥远的类星体的发现将宇宙的历史向上追溯到100亿年以前。目前,天文观测已经扩展到了电磁辐射的各个波段:γ射线、X射线、紫外、可见光、红外、微波和射电波(无线电波)。不同波长电磁波的能量不同,可通过接收到电磁波的波长和强度来判断宇宙中天体的温度和性质。表1-2-1列出各波段电磁波的波长、能量、辐射源的温度,表1-2-2列出本章中提到的天体类型及所发射的电磁辐射波段。

表 1-2-1 天体电磁辐射及观测方法

| 射 线 | 波长/m | 能量/eV | 辐射源温度/K | 观 测 方 法 |
|------|-----------------------------|----------------------|--------------------|---------|
| γ 射线 | 1.2 | 10^7 | 3×10^{11} | 卫 星 |
| X 射线 | 1.2×10^{-9} | 10^4 | 3×10^7 | 卫 星 |
| 紫外 | 1.5×10^{-7} | 8.3 | 24500 | 地面望远镜 |
| 可见光 | $(4 \sim 6) \times 10^{-7}$ | 3.1~2.0 | 9150~5900 | 地面望远镜 |
| 红外 | 1×10^{-6} | 0.62 | 1850 | 气球、飞机 |
| 微波 | 3×10^{-4} | 0.004 | 9.3 | 气球、飞机 |
| 射电波 | 1 | 1.2×10^{-6} | 0.003 5 | 射电望远镜 |

根据西普门(1987)的资料制作。

二、恒星、星系、星系团和星际物质

恒星能发出可见光,一般常见的恒星相对位置比较稳定(相对于人类历史而言),因而恒星的观测为天文学研究提供了参照点和距离标尺。恒星由较稠密的物质组成,据估算恒星的平均密度为 10^{22} 原子/ cm^3 。

恒星有群集的特性,大量的恒星以及周围的星际云组成星系。太阳所在的星系——银河系中大约有 10^{11} 颗恒星和大量的星际云,宇宙中大约有 10^{11} 个星系。美国天文学家哈勃根据星系的结构将星系划分为以下几类:旋涡星系(旋涡星系又分为正常旋涡星系和棒旋星系)、椭圆星系和不规则星系。如果将许多小的和低光度的椭圆星系计算在一起的话,

表 1-2-2 主要天体类型的特征电磁辐射

| 天体类型 | 特征电磁辐射波段 ^① | | | | | | 简要特点 | |
|-----------------|-----------------------|-----|----|-----|----|----|------|--|
| | γ射线 | X射线 | 紫外 | 可见光 | 红外 | 微波 | | 射电波 |
| 主序星 (最常见的恒星) | | | √ | √ | √ | | | 表面温度为 1500 ~ 100000 K, 密度不等 (太阳密度为 1.41 g/cm ³) |
| 红巨星 | | | √ | √ | √ | | | 表面温度约为主序星的 1/2, 体积为主序星的几十至几百倍 |
| 白矮星 | | | √ | √ | √ | | | 表面温度为 50000 ~ 4000 K, 密度为 10 ⁵ 原子/cm ³ , 物质呈简并态 |
| 中子星 | | | | | | | √ | 密度为 10 ¹⁴ 原子/cm ³ , 以脉冲射电源的方式被发现, 也称为脉冲星, 物质呈简并态 |
| 黑洞 | | √ | | | | | | 黑洞本身无辐射。周围的气体向着黑洞旋转落下时, 气体被压缩, 发射 X 射线 |
| 活动星系 | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | 活动星系是一个总称。不同活动水平的星系, 其发射恒星波段以外的辐射的类型不同。如旋涡星系是低水平的活动星系, 只有弱的射电辐射和弱的红外辐射, 有的有 X 射线辐射 |
| 类星体 | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | 发射全波段的电磁辐射。近于光速的电子在磁场中作旋转运动产生射电和其他波段的辐射 (同步加速辐射) |
| 星际云 | | | √ | √ | | | | 密度为 10 ² ~ 10 ⁶ 原子/cm ³ , 靠反射恒星光或吸收恒星紫外光发出可见光。由 H、He、N、O 等元素的气体和尘粒组成。有的不发光只散射来自恒星的光, 称为暗云 |
| 星际气体和尘埃 | | | | √ | | | | 密度为 1 原子/cm ³ , 借助对蓝光的散射效应或恒星光谱中的星际吸收线来证明它们的存在 |
| 星际分子 | | | | √ | √ | √ | √ | 已发现的星际分子有: CN、CH、H ₂ O、CO、NH ₃ 、H ₂ CO、OH 等 |

据西普门 (1987), 英格利斯 (1979), 戴文赛 (1979) 资料制作。

①只对天体在天文观测中的特征辐射波段划“√”, 但不意味在其他波段没有辐射。例如恒星主要发射可见光, 在微波和射电波段的辐射很弱。观测证明太阳是一个强的射电源, 是因为太阳距离我们很近的缘故。

各类星系数量的比是: 旋涡星系 (包括棒旋星系) 约占 30%; 椭圆星系约占 60%; 不规则星系占 10% (卡夫曼, 1985)。后来又分出了一个介于椭圆星系和旋涡星系之间的 SO 型星系, 观测结果是: 旋涡星系约占星系总数的 50%; SO 型星系约占星系总数的 20%; 椭圆星系约占星系总数的 10%; 其余为不规则星系 (阿弗雷特, 1982)。观测表明, 星系中的恒星除了随星系整体运动外, 同时还按照各自的轨道作开普勒运动 (类似于行星围绕太阳的运动)。

若干星系构成星系团, 大的星系团中可包含约 10 万个星系。根据星系团中星系的多寡分别称它们为富星系团和贫星系团。有的天文学家将星系团分为两类: 规则状星系团和不规则状星系团。规则状星系团大多是球对称的, 多为富星系团, 星系团中心星系的密度较大, 聚集了大量的椭圆星系, 旋涡星系和不规则星系多分布于星系团的外部区域。研究

较多的后发座星系团就是一个规则星系团。不规则星系团有的属于富星系团，有的属于贫星系团。银河系所在的本星系群是一个不规则的贫星系团，而距离本星系群最近的室女星系团是一个不规则的富星系团。星系团作为一个整体在宇宙空间漂移，星系团内部星系也有各自的运动。

弥漫在恒星之间的是稀疏的星际物质，其平均密度为 $1 \text{ 原子}/\text{cm}^3$ 左右，星际物质主要由气体和固体尘埃组成。星际物质分布是不均匀的，密度较大的地方 ($10^4 \sim 10^6 \text{ 原子}/\text{cm}^3$) 形成星际云。从银河系星际物质的观测结果看，星际云以及星际气体和尘埃的化学成分与太阳和大多数恒星没有什么区别，都是氢和氦占绝对优势。由于氢和氦以外的重元素是在恒星内部合成的，它们除少量被抛射出恒星之外，大多数被保留于恒星内部，因此星际物质中的重元素含量要比恒星中少。据估算，银河系中星际云（密度在 $10^2 \text{ 原子}/\text{cm}^3$ 以上者）占银河系气体（主要指氢和氦）质量的 60% 以上。红外、微波和射电波段的天文观测发现，星际云和星际物质中有 CH、CN、OH、CO、 H_2 、 H_2O 、 NH_3 、 H_2CO 等分子存在，所以也将星际云称为分子云（卡夫曼，1985；英格利斯，1979）。

观测表明，星系之间和星系团之间有星系际物质和星系团际物质存在，其成分以氢和氦为主。根据宇宙膨胀理论（见第五节），星系际物质的密度和温度应低于星际物质，星系团际物质的密度应低于星系际物质。然而目前观测到在星系之间和星系团之间有热的气体存在（约 10^8 K ），有的科学家认为星系际热气体可能是从星系抛射出来的，星系团际热气体可能是冷气体被类星体爆发而加热的（阿弗雷特，1982）。

三、银河系中的太阳

太阳是一个恒星，太阳和周围的行星及其他小星体（如彗星）组成太阳系，太阳系所在的星系称为银河系，银河系所在的星系团称为本星系群。本星系群中包括了约 17 个星系，除银河系外，最重要的成员是大麦哲伦云星系、小麦哲伦云星系和仙女座星系等。

银河系是一个旋涡星系。银河系可分为两部分：银盘和银晕。银盘指银河系中央平面（也称为银道平面）附近的部分，为对称的扁平状，由银核和旋臂组成。银晕为球状，分散于银盘上下两侧。恒星群集的特点也表现在银河系内部。在银河系千亿颗恒星中，大多数恒星是以两个或几个、几十个、几百个乃至几千个一起运行的。两个一起运行的恒星，称为双星。数量更多的恒星集结在一起称为星团，银河系中的星团分为两类：疏散星团和球状星团。疏散星团由 20 多颗至数千颗恒星组成，这种星团的形态不定，结构松散，并且都分布在中央平面附近的银盘内。球状星团的形态十分稳定，多呈球状或椭球状，星团内恒星密集，多的达十多万颗。25% 的球状星团集中在银核附近，其余 75% 的散布在银盘上下形成了银晕。

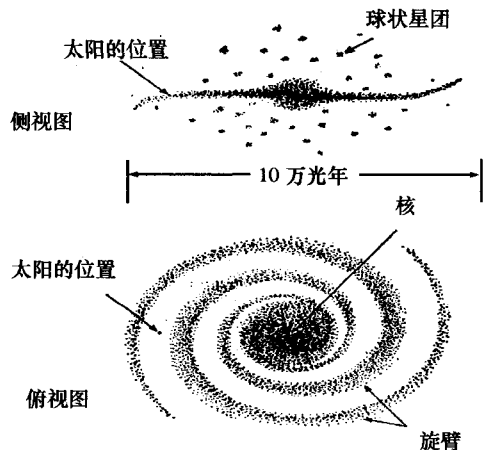


图 1-2-1 太阳系在银河系中的位置
(据卡夫曼, 1985)

太阳是银河系中占比例较少的以单颗形式

太阳是银河系中占比例较少的以单颗形式

运行的恒星之一，太阳既不是双星，也不是上述星团的成员。太阳位于银盘中央平面附近，离银核较远的两条旋臂之间（图 1-2-1）。太阳附近银盘的厚度为 5×10^3 光年，太阳距中央平面约 40 光年；银盘直径约 10^5 光年（1 光年 = 9.46×10^{12} km），太阳与银核距离约为银盘半径的 $2/3$ 。

银河系中的天体既随整个银河系一起运动，也各自绕银核运动。太阳绕银核运动的周期为 2 亿多年，目前估计太阳年龄为 50 亿年，所以太阳从形成至今已绕银核运行了 20 多次（英格利斯，1979；卡夫曼，1985）。

四、作为太阳系类地行星之一的地球

在太阳和九大行星为主要成员的太阳系中，太阳质量占整个太阳系质量的 99.86% 以上，而行星质量的总和小于 2%。太阳系中，以太阳为中心，九大行星：水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星、冥王星依次分布，并围绕太阳公转（图 1-2-2）。根据各行星的质量、体积、密度以及它们与太阳的距离将行星划分为三大类：水星、金星、地球和火星统称为类地行星；木星和土星称为巨行星或类木行星；而天王星、海王星和冥王星称为远日行星。

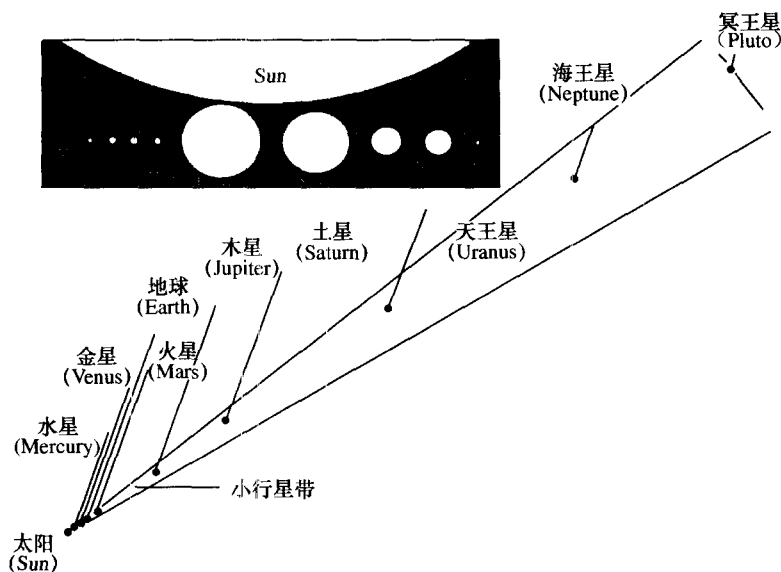


图 1-2-2 太阳系行星分布图

表 1-2-3 中列出了以地球与太阳距离（1 个天文单位（AU）），地球的质量、体积和密度为标准，计算出各行星的参数。除太阳、九大行星以及它们的卫星外，太阳系中还分布着许多小的星体，其中最引人注目的是小行星和彗星。小行星分布于小行星带中，小行星带位于类地行星（火星）与类木行星（木星）之间。小行星带由 2000 颗以上的小行星组成（还有未编号的小行星达几十万颗），其总质量还不到整个行星总质量的百万分之一，但所占据的太阳系空间却非常大（轨道半径分布宽度约占了两个多 AU）。近来天文学家观测到在海王星轨道外有一个称为 Kuiper 的带，此带具有冰的散射谱，被认为可能是木星族

表 1-2-3 太阳系各行星的相对参数

| 类型 | 行星 | 与太阳距离/AU | 与太阳距离 ^① (以水星与太阳距离为 1 计算) | 质量 | 体积 | 密度 |
|------|-----|-------------|--|--------|--------|-------|
| 类地行星 | 水星 | 0.387 | 1 | 0.0554 | 0.054 | 0.979 |
| | 金星 | 0.723 | 1.868 | 0.815 | 0.88 | 0.942 |
| | 地球 | 1 | 2.584 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| | 火星 | 1.524 | 3.938 | 0.1075 | 0.149 | 0.716 |
| 小行星 | | 2.06 ~ 4.29 | 5.322 ~ 11.085 | 0.0004 | | |
| 类木行星 | 木星 | 5.203 | 13.444 | 317.89 | 1334.8 | 0.238 |
| | 土星 | 9.539 | 24.649 | 95.18 | 746.0 | 0.128 |
| 远日行星 | 天王星 | 19.182 | 49.953 | 14.63 | 61.62 | 0.237 |
| | 海王星 | 30.058 | 77.669 | 17.2 | 57.17 | 0.301 |
| | 冥王星 | 39.44 | 101.912 | 0.0024 | 0.009 | 0.272 |

注：① 除此列外均以地球为单位计算。

彗星的源区 (Duncan and Levison, 1997)。

从本节得知，地球仅仅是广袤宇宙空间中一个普通星系团——本星系群中的一个普通的旋涡星系——银河系中的一颗极普通的小质量行星——太阳的行星。从整个太阳系来看，地球仅仅是 4 颗类地行星之一。地球的质量只占太阳系行星总质量的 2‰ 多一点，对于整个太阳系来说，地球更是微不足道的 (表 1-2-4)。

表 1-2-4 行星总质量为 1 时各行星所占比例

| | | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|--------|---------|-------------|
| 行星 | 水星 | 金星 | 地球 | 火星 | 小行星 | 类地行星和小行星总和 |
| 质量比 | 0.0001 | 0.0018 | 0.0022 | 0.0002 | < 百万分之一 | < 0.0044 |
| 行星 | 木星 | 土星 | 天王星 | 海王星 | 冥王星 | 类木行星和远日行星总和 |
| 质量比 | 0.711 | 0.213 | 0.033 | 0.038 | 百万分之五 | > 0.995 |

然而地球又是一颗非常特殊的类地行星，从宏观来看地球具有以下独特之处：

- (1) 地球是类地行星中体积、质量，密度最大的一个。
- (2) 地球是惟一的一个具有大质量卫星 (月球) 的类地行星，月球质量为地球的 1.2% 多。因此在地球演化过程中月球与地球的相互作用不能忽略 (除地球外，类地行星中只有火星有 2 颗小卫星，其总质量只有火星质量的一亿分之一左右)。
- (3) 地球是惟一的一个表面有液态水存在的类地行星。
- (4) 地球是经历了最复杂演化过程的类地行星，也是惟一的表层具有板块构造的类地行星。
- (5) 地球是惟一有生命和人类存在的类地行星。

为此, 在我们研究有关地球的起源和演化问题时, 一方面是要从整个太阳系的演化入手, 探讨太阳系云形成地球的那一部分如何随太阳系一起演化; 另一方面, 要充分考虑到地球在太阳系中的特定环境所引发的特殊演化过程。本书所论述的问题就是围绕上述方面展开的。

五、太阳系以外的行星

对太阳和太阳系九大行星的观测和研究, 使天文学家确信在恒星周围应普遍存在有行星系。然而, 由于行星自身不发光, 对于其他恒星周围行星的观测就要难得多。近年来, 随着探测技术的进步, 已确认了多个太阳系以外的行星, 表 1-2-5 中列出这些行星所属的恒星名称、与木星的质量比、公转周期、轨道半径和轨道的偏心率。从表中看出这些太阳系以外的行星中有的虽然质量较大, 但轨道半径却很小, 且大多为椭圆形的轨道。这些特点与太阳系行星的分布特征不同, 其形成原因在研究之中 (Boss, 1997)。

表 1-2-5 目前发现的太阳系以外的行星

| 所属恒星名称 | 质量 (木星质量为 1) | 公转周期/d | 轨道半径/AU ^① | 偏心率 |
|-------------------------|-----------------|--------|----------------------|------|
| 51 Pegasi | 0.45 | 4.23 | 0.05 | 0.0 |
| 55 ρ^1 Cancri | 0.84 | 14.7 | 0.11 | 0.04 |
| τ Bootis | 3.8 | 3.3 | 0.045 | 0.0 |
| Upsilon Andromedae | 0.61 | 4.6 | 0.057 | 0.15 |
| 47 Ursae Majoris | 2.4 | 1092 | 2.1 | 0.10 |
| ρ Coronae Borealis | 1.1 | 39.6 | 0.23 | <0.1 |
| 70 Virginis | 6.7 | 116.5 | 约 0.43 | 0.4 |
| HD 114762 | 10 | 84 | 约 0.3 | 0.3 |
| 16 Cygni B | 1.7 | 804 | 0.6~2.7 | 0.7 |

据 Glanz, 1997; ①1AU (天文单位) = 地球至太阳的距离。

第三节 恒星和太阳的演化轨迹

一、恒星的星等、绝对星等、光度、温度和质量

为了方便对恒星的观测, 古希腊天文学家根据天空中恒星的亮度建立了一种称为星等的标度。最亮的恒星为一等星, 最暗的恒星为六等星。随着观测资料的增加, 不断发现新的恒星, 因而比一等星更亮的恒星的星等具有了负值, 而最暗的恒星大约为 23 等星。

恒星的星等是恒星的亮度标尺, 而亮度除了与恒星光度有关外, 还与恒星与观测者的距离有关。为了消除距离的影响, 使用绝对星等作为光度标尺。绝对星等代表的是恒星本身所辐射的光的总量, 而不是地球上所接收光的总量。光度越大的恒星, 绝对星等的数值越小。太阳的绝对星等近似为 5, 而光度为太阳光度 100 倍的恒星的绝对星等为 0, 光度

更大者的绝对星等为负值。以太阳作为参考点，将其光度定为 1，以此来衡量恒星的相对光度是一种更简便的方法。目前观测到最强光度的恒星是太阳光度的 10^5 倍，而光度最弱的恒星为太阳光度的 10^{-6} 。

恒星的光度与恒星的温度和大小有关。通过恒星光谱的分析可获得恒星温度，已知太阳温度为 5000~6000 K。最热恒星大约为 100000 K，最冷的恒星低于 1500 K，太阳被划为冷星一类。观测获得的最大恒星的直径可达到太阳直径的 460 倍，而最小的恒星的直径只有太阳直径的 1/50000。

如果将太阳质量定为 1，目前发现最大质量的恒星约为太阳质量的 50 倍，而最小质量的恒星还不到太阳质量的 0.1。恒星质量不同，其演化历程也不尽相同，为了讨论恒星的演化轨迹，可把恒星按质量进行大致的划分：质量为太阳质量 16~20 倍以上的恒星为大质量恒星，质量为太阳质量 8~16 倍的恒星为较大质量的恒星，质量为太阳质量 3 倍以下的恒星为小质量恒星，所以太阳是一颗小质量恒星（英格利斯，1979）。

二、恒星的赫罗图

恒星的光度与其温度和大小有关，以恒星的光度和温度分别为纵坐标和横坐标作图，就可把恒星按体积大小区分开来：温度相同，光度小的恒星体积较小，应分布于图的较下方；光度相同，温度低的恒星体积较大，应分布于图的较右方。以发明这种作图方法的天文学家赫兹伯隆和罗素命名的图称为赫罗图。从图 1-3-1 的赫罗图可以看出，大多数恒星位于从图左上角延伸至右下角的一个带上，这条带叫做主星序，在主星序上的恒星称其为主序星。太阳是一颗主序星。在主星序右上方分布着比主序星光度和体积都大的巨星和超巨星，而左下方是比主序星光度和体积小的白矮星。热的恒星和冷的恒星的光谱有很大的不同，因而在赫罗图上恒星的光谱类型依温度由高至低从左到右排列为：O、B、A、F、G、K、M。

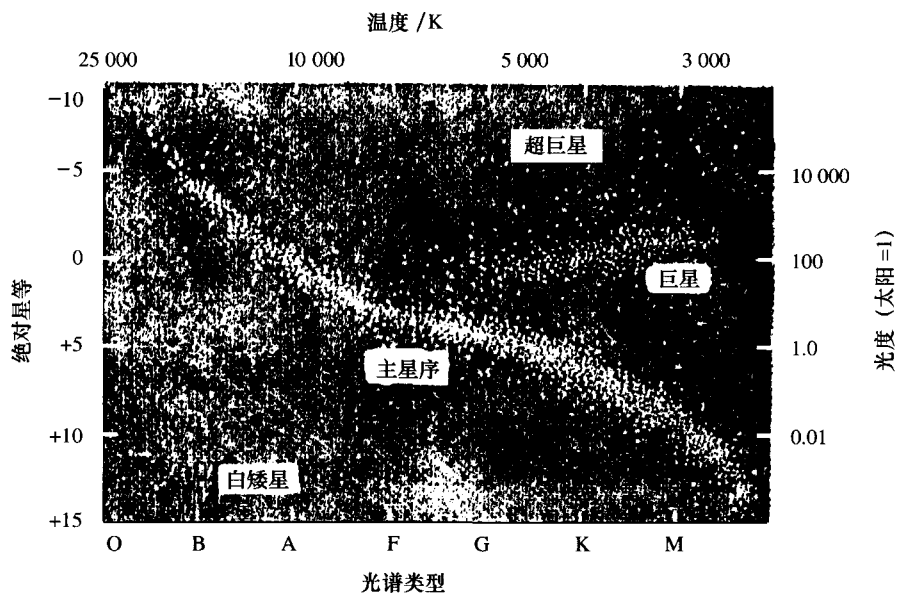


图 1-3-1 赫罗图 (据英格利斯, 1979)