

〔美〕E. H. 阿弗雷特 主编

天体物理学前沿

天体物理学前沿

[美] E. H. 阿弗雷特 主编

李致森 等 译

黄 磷 校

科 学 出 版 社

1 9 8 2

内 容 简 介

本书阐述太阳系的形成、太阳物理、恒星演化、气体星云、星际物质、星系和宇宙论等主要天体物理分支,并着重介绍六十年代以来这些领域的最新进展。本书的最大特点是对射电、红外、光学、紫外及X射线天文学提供的观测资料进行综合分析,因而有助于对各种现象的全面理解。

本书可作为天文学或对天文学感兴趣的物理专业大学生的课本或补充读物,也可供有关研究人员参考或作为进入天体物理研究领域的入门书。

E. H. Avrett, editor
FRONTIERS OF ASTROPHYSICS
Harvard University Press; 1976

天体物理学前沿

〔美〕E. H. 阿弗雷特 主编

李致森 等译

黄 磷 校

责任编辑 玉昌泰

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1982年7月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1982年7月第一次印刷 印张: 18 1/4

印数: 0001—2,500 字数: 417,000

统一书号: 13031·1925

本社书号: 2810·13—3

定价: 2.80 元

译者的话

近二十年来,天体物理学有了迅速的进展。一方面,发现了一系列的新天体和新现象,其中包括被誉为六十年代四大发现的类星体、脉冲星、星际有机分子和微波背景辐射。这些新天体和新现象向理论工作者提出了大量的研究课题。另一方面,观测技术的突飞猛进,特别是从飞机、气球、火箭及空间飞船上的观测,大大扩充了人类的视野,开辟了从 γ 射线直到射电辐射的全电磁波谱天文学时代,使观测资料有了爆炸性的增加。在这种情况下,人们普遍感到需要有一本专著,从观测和理论两方面综合介绍天体物理学的最新进展和今后课题,以便于一般读者了解全貌。《天体物理学前沿》一书正是为了满足这种需要而编写的。就我们所知,它至今仍是能够满足这种需要的唯一的专著,因为尽管原书脱稿于1976年初,但在四年多以后的今天,从总体上看,它的基本理论框架并无多大改变,它所依据的基本观测事实仍然成立。

当然,书中引用的某些数据已经陈旧,译者已根据最新资料作了注释。

原书中一些错误,凡是发现的,都作了改正,其中有些涉及概念或公式的较大错误,在相应部位加了注释。本书翻译分工如下:第一章李致森;第二章叶式辉;第三、第四章翁士达;第五章肖兴华;第六章郝允样;第七、第十章黄磷;第八章范英;第九章吴盛殷;第十一、第十二章许梅。

由于水平有限,译文中难免有缺点和错误,希读者批评指正。

1980年4月

原 序

天体物理学是用物理学解释天文现象的一门科学，这一领域目前正在迅速发展之中。依据来自空间飞船、飞机、火箭、气球和地面天文台的观测资料，每年人们得到了越来越多的令人振奋的重要发现。因此，有必要编著一本最新的中等程度的课本，向有关读者介绍天体物理学研究的前沿领域。本书即为此目的而写的。

原稿写于1975年10月至1976年1月，在此期间曾用作哈佛大学天文系学生的选修课教材。全书共十二章，每章都由在天体物理学一个分支积极从事研究的一名专家撰写，对该分支领域的最新工作做了叙述和评价。各章的目标虽然一致，但它们却反映了各个课题的不同要求和作者的不同风格。

本书以读者对基础物理学相当熟悉作为出发点，它可供高年级学生用作普通天文学课程的补充读物，也可作为高级课程的教本。对于研究物理学和天文学的毕业生或专业工作者，本书也可当做天体物理学研究的一本有趣的入门书。

本书的内容从太阳系及其中心天体太阳谈起，接着讲恒星和星际现象，最后以河外天文学和宇宙论作为结束。这是随意安排的顺序；各章自成独立单元，可按任何次序阅读。（下略）

目 录

第一章 太阳系的形成 W.R.Ward	(1)
化学凝聚的顺序.....	(2)
引力不稳定性.....	(18)
吸积动力学.....	(27)
小结.....	(36)
附录.....	(37)
参考文献.....	(43)
第二章 太阳研究的新进展 R.W.Noyes	(45)
太阳的内部.....	(47)
对流、波动和炽热的日冕.....	(53)
太阳活动和磁场.....	(76)
耀斑.....	(87)
摘要和结论.....	(96)
参考文献.....	(98)
第三章 恒星形成和恒星早期演化 S.E.Strom	(102)
当前的理论图象.....	(102)
新近的恒星形成“路标”.....	(106)
年青星体的性质.....	(112)
主序前演化的一种方案.....	(119)
河外星系中恒星的形成.....	(120)
参考文献.....	(125)
第四章 恒星演化的终点 A. G. W. Cameron	(126)
恒星结构的方程式.....	(128)
核能的产生.....	(132)

物态方程式·····	(136)
较小质量的恒星的演化·····	(139)
大质量恒星的演化·····	(145)
双星系统的演化·····	(149)
参考文献·····	(151)
第五章 中子星、黑洞和超新星·····	H. Gursky (153)
坍缩星的历史背景及其理论·····	(154)
中子星和(也许还有)黑洞的发现·····	(164)
超新星·····	(169)
脉冲星和中子星的发现·····	(178)
X射线双星·····	(189)
结束语·····	(208)
参考文献·····	(209)
第六章 红外天文学·····	G.G.Fazio (213)
红外天文学的观测方法·····	(214)
红外观测结果及其解释·····	(231)
未来展望·····	(265)
参考文献·····	(268)
第七章 气体星云及其星际环境·····	E.J.Chaisson (270)
基本概念·····	(271)
星云的连续辐射·····	(295)
星云波谱学·····	(312)
星云的环境·····	(338)
参考文献·····	(364)
第八章 星际物质化学·····	A.Dalgarno (366)
分子结构·····	(368)
弥漫星际云·····	(369)
稠密云的化学·····	(392)

星际云的能量平衡·····	(396)
参考文献·····	(399)
第九章 银河微波激射源的射电观测 ·····J. M. Moran	(400)
历史·····	(405)
射电天文测量·····	(409)
分子的能级·····	(420)
观测和解释·····	(427)
微波激射源模型·····	(439)
结语·····	(452)
参考文献·····	(453)
第十章 活动星系 ·····K. Brecher	(457)
活动星系的观测到的性质·····	(460)
活动星系的物理性质·····	(475)
关于活动星系的理论·····	(484)
小结·····	(488)
附录·····	(489)
参考文献·····	(490)
第十一章 星系和宇宙论 ·····M. Davis	(493)
星系·····	(493)
宇宙论·····	(515)
小结·····	(543)
参考文献·····	(544)
第十二章 宇宙的质量：星系际物质 ·····G. B. Field	(546)
关于星系团中存在星系际物质的证据·····	(551)
星系际物质的含意·····	(561)
星系团之间的气体·····	(568)
小结·····	(571)
参考文献·····	(571)

第一章 太阳系的形成

W. R. Ward

在本书所讨论的课题中，最古老的问题大概是太阳系的形成了。确实，现代的理论在很大程度上应归功于十七世纪R·笛卡儿的著作，他提出了我们现在所说的星云假说，即认为行星和卫星是由围绕原始太阳的尘气旋转圆盘形成的。大多数现代的理论均是从这一论点而来的变种；但是，如同本书讨论的其它许多问题一样，太阳系形成问题近些年来取得了异乎寻常的迅速进展，其主要原因是通过对陨星和月面样品的化学分析和行星探测器的最新应用，有关太阳系的资料有了爆炸性的增加。

前几年已经发表过几篇关于太阳系形成的各方面问题的评述性文章 (Williams 和 Cremin, 1968; Woolfson, 1969; Anders, 1971; Grossman 和 Larimer, 1974)。Cameron (1973)、Cameron 和 Pine (1973)、Alfvén 和 Arrhenius (1970 a, 1970 b, 1973, 1974) 以及 Öpik (1973) 等人又提出了最新的详细模型。俄国天文学家 V. S. Safronov (1969) 就此题目撰写了一部优秀的专著，1972 年在法国的尼斯举行过一次太阳系起源的讨论会，其会议文集业已出版 (Reeves, 1972)。Ward (1975) 编辑了一套极为完整的、包括近四年的研究论文的目录。

本章并不是要提供一幅太阳系形成过程的完整图象，而是想采用一种比较省力而又易于掌握的方法对现代研究的下述三个重要领域作一入门性的阐述：(1) 太阳星云中的化学凝

聚;(2)由引力不稳定性造成的固态物质的积累;(3)行星吸积过程的动力学。化学凝聚的计算就是要确定哪些矿物是从具有太阳化学组成的冷却气体中凝聚出来的。这些计算可与陨星的化学分析相比较,从而推断在它们形成时星云中的条件。然而,直接的化学凝聚只能产生大小不超过几厘米的天体,而由这些小屑粒长成较大的天体,早已是关于固态物质积累的最令人迷惑费解的问题之一。显然能解答这一疑难问题的一个机制,就是薄薄的凝聚屑粒圆盘中引力不稳定性的发展。但是,这个过程看来不可能形成半径超过几公里的天体——远比行星要小得多。积累的最后阶段似乎要求这类星子间发生相互碰撞,而且碰撞速度应低到足以使吸积超过剥离,这就是人们设想的由星子圆盘的引力弛豫所产生的一种状态。

我们下面更详细地讨论一下这些过程。

化学凝聚的顺序

近年来对太阳系起源研究最有成效的一个领域便是宇宙化学,尤其是在确定冷却的太阳星云中矿物凝聚顺序方面更为突出。表 1.1 列出了相对于星云中的硅而言的二十种元素的相对丰富度,这里假定星云具有太阳的化学组成(氦元素予以忽略,是因为氦在化学上是惰性气体)。在这样一种气体中,当温度降到 $\sim 1700\text{K}$ 以下,便开始有固体凝聚出来。哪种矿物在什么温度下凝聚,必须根据化学运动学的详细计算来确定。我们将扼要讨论各个研究者采用的计算方法(例如, Lord, 1965; Larimer, 1967; Lewis, 1972 a; Grossman, 1972),然后再介绍一些所得的结果。

既然组成太阳气体中的主要组分是氢分子,氢的分压力 p_{H_2} 便大致地决定了总压力 p 。根据理想气体定律,氢分子

表 1.1 在2000K和1200K之间, 在公共组分元素的总量中
贡献超过 10^{-7} 的气体分子

元素	丰 度 ($\text{Si}=10^6$)	气 体 分 子
氢	2.6×10^{10}	$\text{H}_2, \text{H}, \text{H}_2\text{O}, \text{HF}, \text{HCl}, \text{MgH}, \text{HS}, \text{H}_2\text{S}, \text{MgOH}$
氧	2.36×10^7	$\text{CO}, \text{SiO}, \text{H}_2\text{O}, \text{TiO}, \text{OH}, \text{HCO}, \text{CO}_2, \text{PO}, \text{CaO}, \text{COS}, \text{MgO}, \text{SiO}_2, \text{AlOH}, \text{SO}, \text{NaOH}, \text{MgOH}, \text{PO}_2, \text{Mg}(\text{OH})_2, \text{AlO}_2\text{H}$
碳	1.35×10^7	$\text{CO}, \text{HCN}, \text{CS}, \text{HCO}, \text{CO}_2, \text{COS}, \text{HCP}$
氮	2.44×10^3	$\text{N}_2, \text{HCN}, \text{PN}, \text{NH}_3, \text{NH}_2$
镁	1.05×10^3	$\text{Mg}, \text{MgH}, \text{MgS}, \text{MgF}, \text{MgCl}, \text{MgO}, \text{MgOH}, \text{Mg}(\text{OH})_2$
硅	1.00×10^3	$\text{Si}, \text{SiS}, \text{SiO}, \text{SiO}_2$
铁	8.90×10^3	Fe
硫	5.06×10^3	$\text{SiS}, \text{CS}, \text{S}, \text{HS}, \text{H}_2\text{S}, \text{PS}, \text{AlS}, \text{MgS}, \text{NS}, \text{S}_2, \text{COS}, \text{SO}, \text{CS}_2, \text{SO}_2$
铝	8.51×10^4	$\text{Al}, \text{AlH}, \text{AlF}, \text{AlCl}, \text{AlS}, \text{AlO}, \text{Al}_2\text{O}, \text{AlOH}, \text{AlOF}, \text{AlO}_2\text{H}$
钙	7.36×10^4	$\text{Ca}, \text{CaF}, \text{CaO}, \text{CaCl}_2$
钠	6.32×10^4	$\text{Na}, \text{NaH}, \text{NaCl}, \text{NaF}, \text{NaOH}$
镍	4.57×10^4	Ni
磷	1.27×10^4	$\text{P}, \text{PN}, \text{PH}, \text{P}_2, \text{PH}_2, \text{PS}, \text{PO}, \text{PH}_3, \text{PO}_2, \text{HCP}$
铬	1.24×10^4	Cr
锰	8800	Mn
氟	3630	$\text{HF}, \text{AlF}, \text{CaF}, \text{F}, \text{MgF}, \text{NaF}, \text{NF}, \text{KF}, \text{PF}, \text{CaF}_2, \text{AlOF}, \text{TiF}_2, \text{MgF}_2, \text{MgClF}, \text{TiF}$
钾	3240	$\text{K}, \text{KH}, \text{KCl}, \text{KF}, \text{KOH}$
钛	2300	$\text{Ti}, \text{TiO}, \text{TiF}_2, \text{TiO}_2, \text{TiF}$
钴	2300	Co
氯	1970	$\text{HCl}, \text{Cl}, \text{AlCl}, \text{NaCl}, \text{KCl}, \text{MgCl}, \text{CaCl}_2, \text{MgCl}_2, \text{AlOCl}, \text{MgClF}$

引自Grossman(1972)

的数密度 N_{H_2} 为

$$N_{H_2} \approx \frac{P}{kT}, \quad (1.1)$$

式中 k 为玻耳兹曼常数, T 是温度。由于分子氢是双原子的,

故氢原子的数密度 $N_{H, \Sigma} \approx 2 N_{H_2}$ 。若 α_i 是元素 i 相对于氢的丰富度, 则有

$$N_{i, \Sigma} \approx \frac{2 \alpha_i p}{kT}. \quad (1.2)$$

一般说来, 元素 i 将存在于许多种气体分子 j 之中。表 1.1 列出了 Grossman (1972) 所得到的最重要的分子品种。因为每种元素都有一个质量平衡方程, 使公式 (1.2) 与每种分子的贡献的总和相等。利用分压力 $p_{ij} = N_{ij} kT$, 可把质量平衡方程写成

$$2 \alpha_i p = \sum_j \gamma_{ij} p_{ij}, \quad (1.3)$$

其中 γ_{ij} 为元素 i 的原子在分子 j 中的数目。例如, 对元素氮, 我们有

$$2 \alpha_N p = 2 p_{N_2} + p_{HCN} + p_{PN} + p_{NH_3} + p_{NH_2} + p_N + \left(\begin{array}{c} \text{微小} \\ \text{贡献} \end{array} \right). \quad (1.4)$$

各种分子的分压力不是独立的, 而是通过不同的化学平衡联系在一起。比如, 氮与其单原子成分之间存在平衡



而它们在大气中的相对分压力是借一平衡常数 K 联系起来的:

$$\frac{p_{NH_3}}{p_N p_H^3} = K_{NH_3}. \quad (1.6)$$

平衡常数是根据吉布斯自由能的变化 ΔG^0 计算的:

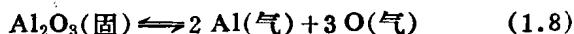
$$K_i = \exp\left(\frac{-\Delta G_i^0}{RT}\right), \quad (1.7)$$

式中 ΔG_i^0 系平衡式右端(生成物)与左端(反应物)两者的自由能在一个标准大气压下的差值; 而 R 为普适气体常数, 等于

1.987 卡·K⁻¹·摩尔⁻¹。这些数值可在实验室中用实验确定。JANAF¹⁾ (1960) 热化学用表是这方面资料的一个重要来源。

各种分子彼此处于平衡状态, 这一状态是由各种可能的化学反应来维持的。当然, 并非全部反应都能提供独立的信息, 因为一个平衡常数往往可用其他平衡常数来表示。Grossman 选取的一组独立反应就是类似于式 (1.5) 的分子离解反应, 它把每种分子分裂成它的单原子成分。对于每一相应的平衡方程, 分子的分压力用其组分分压力表示, 即由式 (1.6) 有 $p_{\text{NH}_3} = K_{\text{NH}_3} p_{\text{N}} p_{\text{H}}^3$ 。这样一来, 在质量平衡方程 (1.3) 中, 各种分子全被消去, 而只剩下二十个联立的非线性方程 (表 1.1 中每个元素有一个方程), 其中的未知量就是二十种单原子成分元素的分压力。然后可用数值法求解这些方程, 最庞大的程序已经考虑了近三百种气体分子。

为了确定何时由这样的气体发生凝聚, 需要用到各种结晶相发生离解反应时的平衡常数。对于金刚砂 Al_2O_3 , 有



和

$$\frac{p_{\text{Al}}^2 p_{\text{O}}^3}{A(\text{Al}_2\text{O}_3)} = K_{\text{Al}_2\text{O}_3}, \quad (1.9)$$

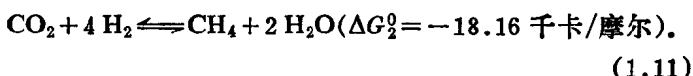
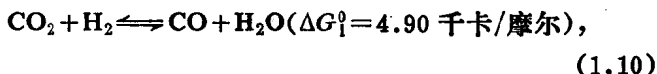
式中 $A(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 是金刚砂的活性, 对纯晶体相它等于 1。只要代入单原子组分分压力计算出的左端量数值超过右端的平衡常数, 矿物便会凝聚出来。

当然, 一旦发生了凝聚, 各种气体组分分压力也就改变了。随着温度下降和更多物质凝聚出来, 必须反复求解这些分压力。此外, 平衡常数依赖于温度, 其典型关系为 $\log K, \propto 1/T$ 。最后, 固态物质能不断地与蒸气相发生反应, 如 Mg_2SiO_4

1) 系 Joint Army-Navy-Air Force 之首字母缩写, 意为“陆海空三军联合”。——译者注

的情况,后者在较低温度下消耗反应过程中的气态 Si 而变成 MgSiO_3 .

作为一个例子,我们来考虑在 500 K 和 10^{-4} 大气压下的气体,其组分为最丰富的三种元素 H, C 和 O, 它们结合成分子 CO , CO_2 , CH_4 , H_2 和 H_2O (见 Kaula, 1968)。我们认为最重要的化学反应是:



因此平衡时的分压力(以大气压为单位)满足关系式:

$$\frac{p_{\text{CO}} p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{CO}_2} p_{\text{H}_2}} = e^{-\frac{\Delta G_1^0}{RT}} = K_1, \quad (1.12)$$

$$\frac{p_{\text{CH}_4} p_{\text{H}_2\text{O}}^2}{p_{\text{CO}_2} p_{\text{H}_2}^4} = e^{-\frac{\Delta G_2^0}{RT}} = K_2. \quad (1.13)$$

而质量平衡方程为

$$2 p = 2 p_{\text{H}_2} + 2 p_{\text{H}_2\text{O}} + 4 p_{\text{CH}_4}, \quad (1.14)$$

$$2 \alpha_o p = p_{\text{CO}} + 2 p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (1.15)$$

$$2 \alpha_c p = p_{\text{CO}} + p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CH}_4}. \quad (1.16)$$

将 p_{H_2} 和 $p_{\text{H}_2\text{O}}$ 作为独立变量, 方程(1.14)–(1.16)可对 p_{CO_2} , p_{CO} 和 p_{CH_4} 求解。把它们代入方程(1.12), 后者变成

$$p_{\text{H}_2\text{O}}^2 + \frac{1}{2} \left[pA + p_{\text{H}_2} \left(1 + \frac{3}{2} K_1 \right) \right] p_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{1}{4} K_1 p_{\text{H}_2} [p_{\text{H}_2} - 2 pB] = 0, \quad (1.17)$$

而代入方程(1.13)再除以方程(1.12), 则得

$$p_{\text{H}_2\text{O}}^2 - [p - p_{\text{H}_2} - 4 K_3 p_{\text{H}_2}^3] p_{\text{H}_2\text{O}} + 2 K_3 p_{\text{H}_2}^3 [pA + p_{\text{H}_2}] = 0, \quad (1.18)$$

式中 $A = 4\alpha_c - 2\alpha_o - 1$, $B = 2\alpha_o - 2\alpha_c + \frac{1}{2}$, 而 $K_3 = \frac{K_2}{K_1}$ 。注意到表1.1中的相对丰富度, 我们预期 $p_{H_2} \approx p$, 并且 $p - p_{H_2} = \Delta p$ 将是一个与其它分压力同级的小量。于是我们可把方程(1.17)和(1.18)改写成

$$p_{H_2O}^2 + \frac{1}{2} \left[(4\alpha_c - 2\alpha_o + \frac{3}{2}K_1) p - \Delta p \right] p_{H_2O} - \frac{1}{4} K_1 p [\Delta p + 4(\alpha_o - \alpha_c) p] = 0, \quad (1.19)$$

$$p_{H_2O}^2 - (\Delta p - 4K_3 p^3) p_{H_2O} + 2K_3 p^3 [(4\alpha_c - 2\alpha_o) p - \Delta p] = 0. \quad (1.20)$$

有关量的数值是 $\alpha_c = 5.19 \times 10^{-4}$, $\alpha_o = 9.08 \times 10^{-4}$, $K_1 = 7.21 \times 10^{-3}$, $K_3 = 1.20 \times 10^{10}$ 和 $p = 10^{-4}$ 大气压。于是方程(1.20)可以写成

$$\Delta p = 2 p_{H_2O} + 2.60 \times 10^{-8} + \frac{p_{H_2O}(p_{H_2O} - \Delta p)}{2.40 \times 10^{-2}}. \quad (1.21)$$

由于 p_{H_2O} 和 Δp 的数量级为 $2\alpha_o p \sim 0(10^{-7})$, 故方程(1.21)中的末项与首项相比可以忽略不计。将(1.19)和(1.21)两式联立, 就能解出 p_{H_2O} 和 Δp 。于是, 可用方程(1.14)求出 p_{CH_4} , 而由方程(1.12)和(1.13)又可分别得到 p_{CO} 和 p_{CO_2} 。读者不妨作为一次练习来完成这一计算。

图 1.1 给出了化学组成与太阳完全相同的气体在 10^{-4} 大气压下的凝聚顺序。首批凝聚者是一组钨(O_2)、铈(R_2)和锆(Zr)之类的耐熔微量元素, 它们在温度高于 Al_2O_3 的凝聚温度 1680 K 时就完全凝聚了。大多数的 Ca 和全部的 Ti 到 1500 K 附近就已经凝聚成 $CaTiO_3$ 和 $Ca_2Al_2SiO_7$ (常见的矿物名称列于表 1.2)。铀(U)、钷(Pa)、钍(Th)、钽(Ta)和铌(Nb)凝聚为 $CaTiO_3$ 中的固溶体。在 1387 K 时出现 $CaMgSi_2O_6$,

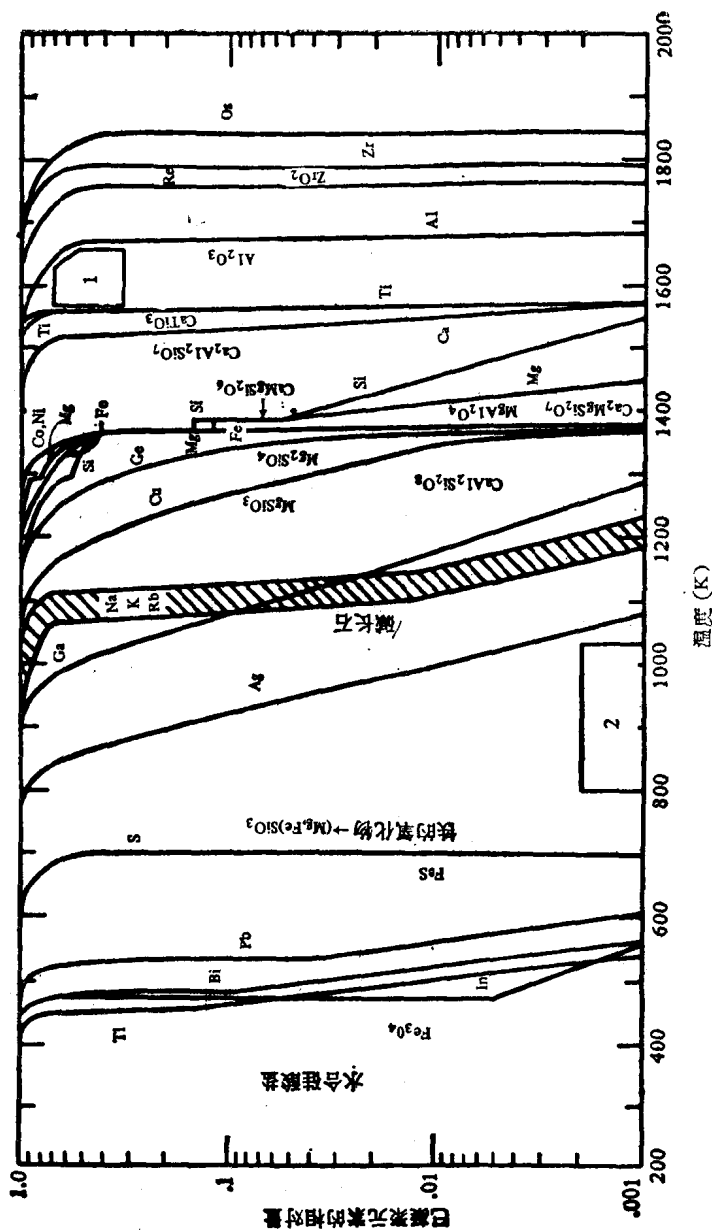


图 1.1 化学组成与太阳相同的气体在 10^{-4} 大气压下元素的凝聚。稳定凝聚相的化学式标在它们变成稳定时所需的温度之下。本图引自 Grossman 和 Larimer (1974)。

1. 稀土元素 Ta, Nb, U, Pu, Th; 2. 平衡 $P_{总} = 1 \times 10^{-4}$ 大气压。