

● 全国地震台站观测岗位资格培训系列教材

地球物理学概论

(试用本)

中国地震局监测预报司 编

地震出版社

全国地震台站观测岗位资格培训系列教材

地球物理学概论

(试用本)

中国地震局监测预报司 编

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地球物理学概论: 试用本/中国地震局监测预报司编. —北京: 地震出版社, 2007. 10
(全国地震台站观测岗位资格培训系列教材)

ISBN 978 - 7 - 5028 - 3072 - 4

I. 地… II. 中… III. 地球物理学—技术培训—教材 IV. P3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 022734 号

地震版 XT200500213

地球物理学概论 (试用本)

中国地震局监测预报司 编

责任编辑: 江 楚

责任校对: 宋 玉

出版发行: 地震出版社

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: 68467991

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: 2007 年 10 月第一版 2007 年 10 月第一次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

字数: 432 千字

印张: 17

印数: 0001 ~ 2000

书号: ISBN 978 - 7 - 5028 - 3072 - 4/P · 1314 (3706)

定价: 42.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

《全国地震台站观测岗位资格培训系列教材》编委会

主 编：李 克

副主编：赵仲和 宋彦云 李 明

编 委：钱家栋 吴忠良 刘耀炜 吴 云 滕云田

余书明 杨心平 孙为民 王 峰 熊道慧

《地球物理学概论》（试用本）执笔：张少泉

序

20 世纪 90 年代以来,中国地震局先后在“九五”、“十五”期间实施了数字化、网络化的改造和建设项目,地震监测基本实现由模拟观测向数字化、网络化的重大转变。面对大量数字化设备和新技术的综合应用,如何保障观测网络正常、可靠、稳定、连续地运行,从而提供可靠观测资料,这是广大地震台站工作人员面临的现实挑战。毋庸置疑,只有通过继续教育,领会和接受新技术、新装备,才能熟练应用并使之充分发挥作用。

众所周知,防震减灾事业和地震科学的发展,有赖于观测的创新与拓展、监测技术的革命与进步,地震监测的基础地位与作用是十分重要的,地震台站的首要任务是监测,以便及时获得可靠的观测信息。当然,仅仅如此还不够,应当促进台站监测同科研、预测的有效结合。为此,许多关注和从事地震台站观测工作的同志逐渐达成一种共识,地震台站观测人员需要具备相当的有关学科知识,不断增强自身的业务素质,提高工作的综合水平。另外,许多年轻人员进入地震观测岗位后,要求接受继续教育来学习和掌握相关地学知识的愿望也十分迫切。

同样重要的是进入新世纪以来,国家行政和科技体制改革要求,事业单位今后须实行岗位考核竞争上岗以促进事业的良性发展。中国地震局认真贯彻国家要求,决定逐步推行“观测岗位资格考核制度”,以实现地震监测规范化管理,达到规范观测队伍、提高人员素质、保障监测质量的目的。观测岗位资格考核是一项系统性的工作,在岗位资格考核前,对被考核人员进行必要培训,是保障考核工作顺利开展的重要环节。作为地震观测岗位资格考核与考前培训的基本保障,需要有一套适于培训工作的教材。

基于以上诸多目的,中国地震局监测预报司组织编写了地震监测岗位培训系列教材,包括:《地球物理学概论》、《地震地质学》、《防震减灾法律法规》、《地震台站公用技术》、《计算机基础与网络》、《数字信号处理的 MATLAB 实现》、《地震学与地震观测》、《地震地下流体理论基础与观测技术》、《地震电磁学》、《地形变测量》。此套系列教材力求内容与地震监测实际工作紧密结合,符合台站技术的需求,理论深入浅出,内容较新、较详尽,既适合作为岗位资质考核的考试用书,也可以作为广大地震

监测一线工作人员的自学教材。

我相信，该教材的出版，将为台站观测岗位考核制度的逐步推行，为提高地震台站人员的业务素质，为奠定地震台站可持续发展的人才基础起到积极的保障和促进作用。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '陈建平' (Chen Jianping), written in a cursive style.

2007 年 8 月

前 言

《地球物理学概论》是中国地震局地震监测岗位系列培训教材中的一门综合课。该系列培训教材共计 10 门，包括 6 门综合课和 4 门专业课，是专为地震监测岗位在岗或准备上岗的工作人员参加考试编写的教材。

本课程属 6 门台站培训综合课程之一。综合课程教学是地震监测专业岗位培训的基础组成部分。地震监测专业岗位共设置 4 个：地震观测、地形变观测、地电地磁观测和地下流体观测。每个专业设置专业课程，分别为：地震学与地震观测、地形变观测、地电地磁理论与观测和地下流体观测。

地震监测岗位培训的目的是使上岗人员在一定程度上了解地震监测基础知识和掌握专业基本技能，并能通过综合统一考试从而达到上岗条件。

而本课程的设置是为使学员掌握从事地震监测工作所需的地球物理学基本理论知识和基本研究方法，本课程与其他有关综合课程一起，为学员学习专业理论和掌握专业技能、并通过考试达到上岗条件奠定必要的知识基础。

根据本课程的设置目的和地球物理学学科所涵盖的范畴，本教材包括“地球的整体物理特征”、“地球的基本物理性质”和“地球物理学应用”三个方面的内容。

(1) 有关“地球整体物理特征”方面的教学要求是，了解和理解以下四个方面的基本概念和研究方法，它们是：地球的起源、地球的年龄、地球的自转和地球的形状。

(2) 有关“地球的基本物理性质”方面的教学要求是，掌握和基本掌握以下四个方面的基本概念和研究方法，它们是：地球的速度分层、地球的电磁性质、地球的密度分布和地球的热学性质。

(3) 有关“地球物理学应用”方面的教学要求是，结合地震预报和板块运动学说，从以下三个应用环节对实际应用有一般性的了解，它们是：了解要解决的目标，即应用对象对地球物理学科的基本要求，了解所用地球物理相关概念和方法，了解目前的应用进展和存在的问题。

为了实现地震监测培训的教学总目标，本课程与其他几门综合课一起，为专业课教学提供基础理论和背景知识。在联合完成各课程教学的总任务中，本课程

承担让台站观测人员了解和理解地球物理学基本理论、掌握或基本掌握地球物理学基本方法的教学任务，并且要求通过考核达到台站监测岗位的资质要求。

为此，本课程教学包含一系列教学环节，其中包括教材编写（含有足够数量的、并且动态调整和更新“考核题库”）、教师面授、学员完成思考题与作业题、参加综合与专业的统一考试，使参加培训的学员既掌握知识技能又能实现达标上岗的教学终极目标。

本课程教学主要参考《地球物理学概论》（张少泉，1987年版本和1988年版本，地震出版社出版）的内容，并结合近年来该学科的最新发展成果，加以适当调整和扩充，以适应地震台站人员从事地震、地电地磁、地形变和地下流体观测的专业培训需要。

《地球物理学概论》（1987、1988）曾先后被采用为中国科学院研究生院地球科学研究生公共基础课教材（共13届）和中国地震局科技骨干培训教材（共15期），最近（2004~2005年）被采用为地震台台长班培训教材（共3期）。本课程在利用《地球物理学概论》（1987、1988）提供的理论框架基础上，吸收了一些新的进展，并根据不同教学对象调整教案内容和传授方式，如在教材中选登《地球物理十讲》（科普材料），在教授中选用最新的资料和观点，如《固体地球物理学概论》（滕吉文，2003年，地震出版社出版）。

地球物理学的基本理论是成熟的。但地球物理学作为一门应用科学进展和变化很大，因此讲授重点不得不放在基本理论和基本技术方面。一些新的变化和进展虽然有所触及，但限于时间和个人精力，难免挂一漏万，敬请读者谅解。

在本教材编写过程中，先后得到何铸文教授、曾融生教授、孟晓春教授、熊仲华教授和滕吉文教授的大力支持和鼓励，以及中科院研究生院魏东平博士、防震减灾技术高等专科学校武晔硕士在本书修订工作中的辛勤劳动，在此谨致以衷心感谢！

张少泉

2007年8月

目 录

第一编 地球的整体物理特征

第一章 地球的起源及其研究方法	(1)
第一节 历史回顾和主要进展	(1)
第二节 戴文赛的新星云假说	(4)
第三节 若干观测事实的解释	(9)
第四节 地球早期的演化轮廓	(13)
参考文献	(16)
第二章 地球的年龄及其研究方法	(18)
第一节 历史回顾	(18)
第二节 放射性衰变原理	(21)
第三节 样品年龄的测定	(28)
第四节 地球年龄的估计	(34)
参考文献	(39)
第三章 地球的自转及其研究方法	(40)
第一节 历史回顾与主要进展	(40)
第二节 地球自转速度的变化	(43)
第三节 自转轴在空间的运动	(48)
第四节 自转轴在地面的运动	(53)
参考文献	(61)
第四章 地球的形状及其研究方法	(62)
第一节 基本概念	(62)
第二节 马古拉公式和克莱罗方程	(64)
第三节 地球扁率的测定方法	(73)
第四节 地球形状的精确研究	(77)
第五节 固体潮汐和负荷潮汐	(81)
参考文献	(88)

第二编 地球的基本物理性质

第五章 地球的速度分层及其研究方法	(89)
第一节 基本概念	(89)
第二节 确定速度分布的方法	(95)

第三节	计算密度和弹性参数的方法	(101)
第四节	全球速度结构的地震学研究	(106)
第五节	地壳速度结构的地震学研究	(112)
参考文献		(119)
第六章	地球的电磁性质及其研究方法	(120)
第一节	历史回顾与基本概念	(120)
第二节	地球磁场的球谐分析	(124)
第三节	地球磁场的长期变化	(133)
第四节	地球磁场的成因解释	(137)
第五节	地球电性的研究方法	(140)
参考文献		(149)
第七章	地球的密度分布及其研究方法	(150)
第一节	基本概念	(150)
第二节	重力均衡和均衡异常	(155)
第三节	重力测深的解释方法	(163)
第四节	重力的有效探测深度	(167)
参考文献		(171)
第八章	地球的热学性质及其研究方法	(172)
第一节	热流测量和热流分布	(172)
第二节	热源分布和传热机制	(178)
第三节	地球温度分布	(188)
第四节	地球的热历史	(195)
参考文献		(199)

第三编 地球物理学应用

第九章	地球物理学与地震预报研究	(200)
第一节	地震成因	(200)
第二节	震源机制	(205)
第三节	地震预报的物理基础	(212)
第四节	地震预报方法的探索	(215)
参考文献		(223)
第十章	地球物理学与新地球观形成	(224)
第一节	历史回顾	(224)
第二节	地震学证据	(227)
第三节	地磁学证据	(231)

第四节 重力学证据	(236)
第五节 地热学证据	(238)
第六节 评价、问题与展望	(241)
参考文献	(247)
附录 《话说地球——地球物理知识十讲》(讲座)	(248)

第一编 地球的整体物理特征

这是本书的第一个层次，包括第一章至第四章，介绍地球的整体特征，即从地球起源、地球年龄、地球自转和地球形状四个方面，给读者一个有关地球整体的完整的时空概念。

第一章 地球的起源及其研究方法^[1]

地球起源问题，不仅是地球科学，而且是自然科学中一个基本理论问题。

由于地球的长期演化，地球形成初期的痕迹现在已经看不到了。那么，怎么去重建几十亿年前的地球初期及其形成过程呢？人们只能从地球物理学、天文学、地球化学、地质学以及其他各个学科的有限观测中，运用已知的自然科学规律进行探索和研究。显然，问题的难度是很大的，而且看法并不统一。

本章首先对各种地球起源学说及其发展予以简略介绍，然后以我国戴文赛教授的新星云说为例，说明解决这一问题的思路和处理方法，最后作为地球起源的继续，补充一点有关演化的知识。

第一节 历史回顾和主要进展

一、历史回顾^[2]

因为地球是太阳系的成员之一，所以地球的起源和太阳系的起源基本上是一个问题。

地球及太阳系起源问题的讨论，可以追溯到 17 世纪。1644 年，法国哲学家和数学家笛卡尔（R.Descartes）在《哲学原理》中提出涡流学说。他认为，在宇宙的混沌中，物质微粒获得涡流运动，在旋涡流中形成了太阳、地球、行星和卫星。1745 年，法国动物学家布峰（G.L.Buffon）提出第一个激变说。他认为，曾有一颗彗星撞到太阳上，撞出的一部分物质形成了行星。以上笛卡尔和布峰的假说虽没有什么科学价值，但却给宗教势力很大震动，为自然科学从神学的桎梏下解放出来冲出一条生路，在地球起源问题上，也起到启蒙作用。

第一个科学的太阳系起源假说是康德的星云说。1755 年，康德 31 岁时匿名出版《自然通史和天体论——根据牛顿定律试论整个宇宙的结构及其力学起源》（1972 年中译本为《宇宙发展史概论》）一书，提出太阳系是由一个统一的系统渐渐地演化而成的，该书在当时并

没能引起注意。1796年，法国赫赫有名的数学家和力学家拉普拉斯在《宇宙体系论》一书中，提出另一个星云说。由于拉普拉斯在学术上的声望，该书广为流传，人们这才想起41年前康德的书，重又再版。虽然康德和拉普拉斯两个星云说有许多不同点，但他们的主要观点相似，即都认为整个太阳系是由同一个原始星云渐渐演化而成。在此后半个或多个世纪里，人们普遍赞同星云说。

但是，星云说在当时不能解释如角动量特殊分布的观测事实。在这种情况下，又出现一系列新的假说。由于星云说属于渐变说，那么，这种新的假说被称为激变说。在19世纪到20世纪40年代，是各种激变说盛行时期。

著名的激变说有：1878年，新西兰天文学家毕克顿（A.W. Bickerton）认为，两颗恒星碰撞产生类似新星的爆炸，抛出的物质形成行星；英国的靳斯（J.K. Jeans）提出风靡一时的“潮汐说”，他认为有一颗恒星从太阳近旁一掠而过，使太阳涨出了隆起的潮，分离出物质形成行星；杰弗瑞斯的“碰撞说”，更认为是另一颗恒星擦边碰了太阳，才形成行星；罗素（H. Russell）、里特顿（R.A. Lyttleton）和干恩（R. Gurne）的“双星说”，认为太阳原来是双星，因受第三颗恒星作用而抛出物质，形成行星；匈牙利的艾估艾得（L. Egged）提出“分出说”，认为万有引力常数随时间减少，使得太阳将分几次抛出物质。虽然这些激变说阐述的激变方式不同，但是都承认形成地球等行星的物质是从太阳分离出来的。然而，从太阳分出的炽热物质容易扩散，不会聚成行星。因此，这些激变说又从根本上遇到了困难。

任何假说都是为解释观测事实而提出的。当经典的渐变说和激变说相继碰壁之后，人们才意识到，建立起源假说的观测事实仅仅靠太阳系的天文学观测现象是不够的，还应对我们人类定居的地球以及卫星的物理性质和化学性质，认真给予应有重视。实际上，在地球和月球上存在着极重要的建立地球起源学说的线索。地球化学研究工作表明，在地球里存在着大量的碳、氮、氧三种元素，在高温下容易挥发的硫、汞、砷、镉、锌并不富集在地球表面，而地面的岩石成分和性质也都表明地球从未完全熔化过。因此，从化学观点看，地球更可能由低温的固体积聚而成，而不是由高温气体和熔融液体凝固而成。在月球表面有比地球上最高峰珠峰还要高的山，要长时间承担这样的大的压力，内部岩石的强度必须很大。这个现象也表明，月球和地球一样，也有一个低温的起源。因此，经典的高温起源观点值得怀疑。

从20世纪40年代起，许多人都从高温气体凝固观点转入低温固体积聚观点。这里著名的有：1944年，苏联地球物理学家施密特（О. Ю. Шмидт）提出“俘获说”，认为当太阳通过一个暗星云时，俘获了它的部分物质，形成绕太阳转动的星云盘，在盘中的质点频繁碰撞，结合成较大的凝结物——流星体（陨星），陨星碰撞结合成行星和卫星；同一年，德国的物理学家魏扎克（C.E. Von Weizsacker）提出“旋涡说”，认为太阳形成后，被一个气体尘埃云环绕着，因转动云环变扁，盘中出现湍流，形成旋涡的规则排列，并且在相邻两环之间的次级涡流里形成行星。在上述的“俘获说”或“旋涡说”中，行星的物质来源不再是太阳分出来的高温气态物质，而是尘埃云。

在地球起源学说的研究中，最困难的问题依然是角动量问题。角动量是转动的一种量度，它大致等于质量、速度和轨道半径的乘积。在太阳系里，太阳的质量约为行星总质量的750倍，占全系统的99%以上，但它的角动量却只有全系统的2%，因为行星的质量虽小，但角动量却很大。以单位质量所具有的角动量而言，这种分布是极不公平的。通过一种什么作用，才能导致这样一个转动系统？如果行星和太阳是同一起来源，就必须找出一个使角动量重新分

布的物理过程。最明显的能使角动量转移的物理过程，就是磁场对于带电粒子的作用。

从 1942 年以来，瑞典磁流体学家阿尔芬特别注意太阳系起源的电磁作用，提出了“电磁说”，他提出用磁耦合机制说明角动量的特殊分布。1962 年，法国天文学家沙兹曼（E.Schatzman）提出太阳演化早期抛射带电粒子，并在太阳磁场作用下运动的学说。1962 年，霍伊尔（F.Hoyle）从经典的星云假说出发，考虑星际空间的磁场作用，定量地计算了太阳和行星的角动量，从而有效地解释了太阳系特殊的角动量问题。

霍伊尔的假说其要点是^[3]：假定太阳系开始是一团凝缩的低温星云，转动速度因急剧收缩而加快。当这团星云的半径收缩到一定程度时，由于流体力学作用，它的转动就达到失稳状态，两极渐扁，赤道凸起，并发展成一个尖税的边缘。星云物质从此边缘向外抛出，形成一个圆盘（圆盘质量只有太阳的 1%）。中心体与圆盘脱离后，前者继续收缩，形成太阳；后者质量不再增加，聚成行星。当它们脱离时，由于星际空间存在磁场，太阳与圆盘的内缘就发生一种电磁流体力学的作用而产生一种磁致力矩。通过这个力矩，太阳对圆盘作功，从而将太阳的角动量转移到圆盘上。圆盘因角动量增加而向外扩张，但太阳因为继续收缩和角动量减小，可以使它的角速度变化不大。这样就解决了太阳转得慢的问题。为了保证上述过程的进行，太阳与圆盘分离时的磁场强度只需 0.3T，但要求圆盘内缘有千万分之一的原子处于电离状态。当圆盘冷却时，不易挥发的物质先凝成固体。这些固体被气体带动，在圆盘扩展过程中，直径小的固体被气体推向前去，而直径大的固体被抛在后面，它们以后各自形成内行星和外行星。这就是霍氏假说的概貌。

问题似乎完全解决了。其实不然，正如傅承义教授所说，霍伊尔的假说“只是在大体轮廓上为人们所接受，还远远不是确定的。”^[4]

傅承义的这段评价，不仅适用于霍伊尔假说，笔者认为，它也适用于对地球起源问题研究现状的评价。为了使这一问题的“轮廓”逐渐变得明朗，为了使这一问题的某些“不确定”因素逐步得以解决，地球物理学应该与地球化学、天文学等学科更进一步结合起来。

二、主要进展

从上面的历史回顾中不难看出，地球起源问题的研究总是在两种对立观点的交锋中得到发展的。例如，形成过程是渐变还是激变，物质来源是高温气体还是低温固体，作用力完全是机械力（重力和热力）还是兼有电磁力等等。这些对立观点的发展和解决，主要靠新的观测事实（如月球探测）和新的物理定律（如磁流体力学）的推动。

星际航行以来，天体物理学家发展迅速，地球和太阳系起源的有关资料大量增加。地球和太阳系起源问题的研究，从一般的定性假说向定量分析发展，从探讨个别问题进入到对大量资料作全面、系统的综合研究的新时期。目前虽然没有出现一个统一的地球起源学说，但在以下几个方面取得了一致意见：

(1) 稳定性问题。地球起源假说首先要解释的观测事实是行星的轨道分布。由天体力学得知，大行星轨道 20 亿年以来一直没有很大变化；相反，小天体（小行星、彗星、流星体）轨道则变化显著。

(2) 年龄问题。由恒星起源和演化得出，太阳是约 50 亿年前由星际云瓦解出来的一块原始星云塌缩形成的。由太阳系的同位素丰度得出，这些元素在 50 亿~58 亿年前形成。从地球和月球的古老岩石的放射性分析得出，它们约在 46 亿年前形成（见本书第二章）。因此，太阳系应在距今 46 亿~50 亿年前形成。

(3) 地质变化问题。大行星发生过像地球史所显示的那样的地质变化，因此行星的现状与它形成时不同；另一方面，小天体形成以来变化小，它们较多地保留了形成时的信息，因此近年来特别注意小天体的研究，其中陨石研究表明，它形成时的温度为 $400\sim 500\text{K}$ ，形成时间为 $10^6\sim 10^7$ 年。

(4) 化学组成问题。碳质陨石的重元素相对丰度与太阳大气相同，木星的化学组成与太阳相同，这些都支持同源形成说（及渐变观点），而不利于多源形成说（及激变观点）。当然，有些陨石存在同位素异常，表明原始星云中可能有小于 2% 的外来组成。各行星的组成，最初是均一的，由于化学分馏，才导致各行星组成的差异。

(5) 陨石坑问题。月球、水星和火星上的大多数凹坑，是 39 亿年前陨石撞击形成的（在木星和土星的卫星上也有许多撞击坑），这些都支持星子集聚成行星的观点。

(6) 形成的物理过程问题。角动量分布问题已表明，仅靠动力学过程的研究是不够的，还要考虑原子的、电磁的、等离子体的和化学的过程。沙兹曼电磁机制只是其中的一种可能解释。

关于地球和太阳系起源的假说，虽然“诸子百家”，众说纷云，认为地球有不同的物质来源以及不同的形成方式，但是这些假说在上述六个方面基本是一致的。

近年来比较流行的星云假说其主要观点是：原始太阳星云来自大星际云瓦解的一块小云。它的温度不高，有一定的初始角动量和自转，在自吸引作用下收缩，中心部分形成太阳，外部扁化为星云盘。星云盘中含有气态、尘埃和冰的固体颗粒，主要由这些固态物质集聚成行星和卫星。

但是，关于原始星云的具体物理化学情况及行星的形成过程，各学说有不同的看法，明显地分为两大学派。一派以美国卡米隆（Cameron）为代表，认为原始星云有吸积和散失过程，形成大质量的星云盘（共约两个太阳现质量），星云盘不稳定而瓦解为巨气体原行星。原地球的凝降物向中心沉降形成核，外部气体被太阳潮汐撕掉，留下内部凝聚核成为地球。另一派认为原始星云质量较小（小于 1.3 倍现太阳质量），主要有日本的林忠四郎（Hayaohi）、前苏联的萨弗隆诺夫（Сафронов）、澳大利亚的普伦蒂斯（Prontice）和我国的戴文赛等提出假说。

第二节 戴文赛的新星云假说

戴文赛先生（1911~1979），天文学家，福建人，生前任南京大学天文系教授、主任。天体演化是他的研究方向，特别着重于太阳系起源问题。他在分析和评价国外和多种假说的基础上，提出自己的太阳系起源（其中包括地球起源）假说。该假说继承和发展了康德和拉普拉斯的星云说，较全面、较系统和有内在联系地论述了太阳系各种特征的由来，其中对波特定则的说明，对木星、土星、天王星的卫星和环带的说明以及角动量问题，都提出不同于前人的解释。

本节就戴先生学说中有关行星（地球）起源的部分加以介绍。戴先生认为：行星的形成要经过“原始星云→星云盘→尘层→星子→行星”这样几个主要步骤^[5]。

一、原始星云的形成

原始星云是由一块星际云塌缩并瓦解而成的。首先要考虑星际云的塌缩，这里要用到研究物质团收缩和膨胀的一个重要物理定理——维里定理。

维里定理所要分析的是，使其膨胀的能量（如分子热运动热能）和使其收缩的能量（如引力位势）和使其收缩的能量（如引力位势）是否平衡。如果把弥漫物质球团当成理想气体，则可使用流体静力平衡方程：

$$dp = -\rho \frac{GM_r}{r^2} dr$$

式中， p 、 ρ 分别为压力和密度； M_r 为距离中心 r 范围以内的物质质量； G 为万有引力常数。上式两边各乘以 $4\pi r^3$ ，并从0到 R （球团半径）积分，得

$$\int_{r=0}^{r=R} 4\pi r^3 dp = - \int_{r=0}^{r=R} \rho \frac{GM_r}{r^2} \cdot 4\pi r^3 dr$$

上式左边进行分部积分，利用 $r=R$ 时 $p=0$ 的条件（外边界稀薄），并考虑气体压力 $p=(K\rho T)/\mu m_H$ （式中， K 为玻尔兹曼常数； T 为温度； μ 为平均分子量， m_H 为氢原子质量）可变成反映热能（即内能）的式子。而上式右边可直接变成反映引力势能的式子。最后写成

$$2U + \Omega = 0 \quad (1-1)$$

式中

$$U = \int_0^R (3/2)KT/(\mu m_H) dM_r$$

$$\Omega = \int_0^R (-GM_r)/r \cdot dM_r$$

式（1-1）第一项为两倍热能，第二项为引力势能。两项之和为零，表示总能量为零，该物质球团处于既不膨胀不收缩的平衡状态。

根据 U 、 Ω 的物理意义，不难得出：

$$\text{当膨胀时} \quad 2U + \Omega > 0 \quad (1-2)$$

$$\text{当收缩时} \quad 2U + \Omega < 0 \quad (1-3)$$

对于一个天体系统，同样要考虑维里定理。

根据维里定理，当忽略自转、磁场及湍流，只考虑引力势能和热能时，星际云聚集的条件如式（1-3）所示，即

$$2U + \Omega < 0$$

若星际是以半径为 R 、质量为 M 、温度为 T 、主要成分为氢的球体，则式中

$$\Omega = \frac{3}{5} \cdot \frac{GM^2}{R} \quad (1-4)$$

$$U = \frac{5}{2} \frac{M}{\mu m_H} KT \quad (1-5)$$

并令 $\rho = 3M/(4\pi R^3)$ ，将式中 R 由 M 和 ρ 代替。取 $\rho = 10^{-22} \text{g/cm}^3$ ， $T = 50\text{K}$ ， $\mu = 2.4$ ，并取 $M_0 = 1.99 \times 10^{33} \text{g}$ （太阳现质量），则可得同如下的星际云自吸引塌缩条件：

$$M > 2.44 \times 10^3 M_0 \quad (1-6)$$

该式表明，当星际云质量比太阳现质量大三个数量级时，它才会塌缩。

当星际云塌缩到密度为 10^{15}g/cm^3 时，内部会发生不稳定情况，即：出现扰动物时，会造成涡流，将星际云瓦解为上千个小云，其中之一则是太阳系前身——原始星云。原始星云其质量为 βM_0 ， $\beta=1\sim 1.3$ 。原始星云的角动量约为今日太阳系角动量的 158~200 倍。

原始星云在超新星爆发的促进下，氢元素进行大规模合成，形成重元素及其同位素。重元素的大规模合成，距今 54 亿~58 亿年。

二、星云盘的形成

原始星云继续塌缩，半径逐渐减小，因角动量守恒，造成自转速度增大。随着自转速度增大，在赤道面上的外边缘物质，当其惯性离心力与中心部分引力相抗衡时，便停下来，逐渐形成赤道面凸起的类似“铁饼”（中心薄、边缘厚）的星云盘。在星云盘形成的同时，云盘中心的原始太阳亦形成。为了对星云盘的温度、厚度和密度做出估计，需要介绍罗奇密度的概念。

首先，让我们看图 1-1 所示大小球吸引的例子，分析两个小球在大球作用下聚集的条件。

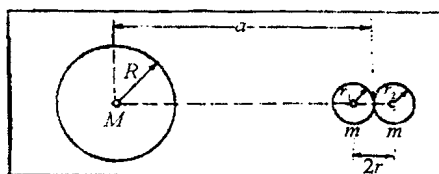


图 1-1 聚集条件分析示意图

大球作用于靠近它的小球 1 和远离它的小球 2 的引力，分别为

$$F_1 = \frac{GMm}{(a-r)^2}, \quad F_2 = \frac{GMm}{(a+r)^2}$$

因为 $F_1 > F_2$ ，若没有其他力的作用，这两个小球就要在共同靠近大球的过程中，彼此分开。但是，两个小球之间还存在引力，大小为

$$F_{12} = \frac{Gm^2}{4r^2}$$

这个力使两个小球彼此聚集。显然，使两个小球聚集而不致分开的条件是

$$F_{12} > F_1 + F_2 \quad (1-7)$$

将 F_1 和 F_2 式中的 $(a-r)^2$ 和 $(a+r)^2$ 作泰勒级数展开，并根据 $r < a$ 的条件，忽略 r 的高次项，从而得到

$$F_1 - F_2 = GMm \cdot 4r \cdot a^{-3}$$

将上式和 F_{12} 的表达式代入式 (1-7)，经整理后得

$$m \cdot r^{-3} > 16M \cdot a^{-3}$$

若小球密度为 ρ ，即 $m = (4/3) \pi r^3 \rho$ ，代入上式，经整理后变成

$$\rho > (3/\pi) 4M \cdot a^{-3} \approx 4 (M/a^3)$$

令

$$\rho_0 = 4 (M/a^3),$$

则有

$$\rho > \rho_0 = 4 (M/a^3) \quad (1-8)$$

式中， ρ_0 称为罗奇密度。式 (1-8) 是保证式 (1-7) 成立的条件，称为聚集条件。

上述关系是在一个大球和两个小球这种简单情况下导出来的。作为一般情况，除引力外，