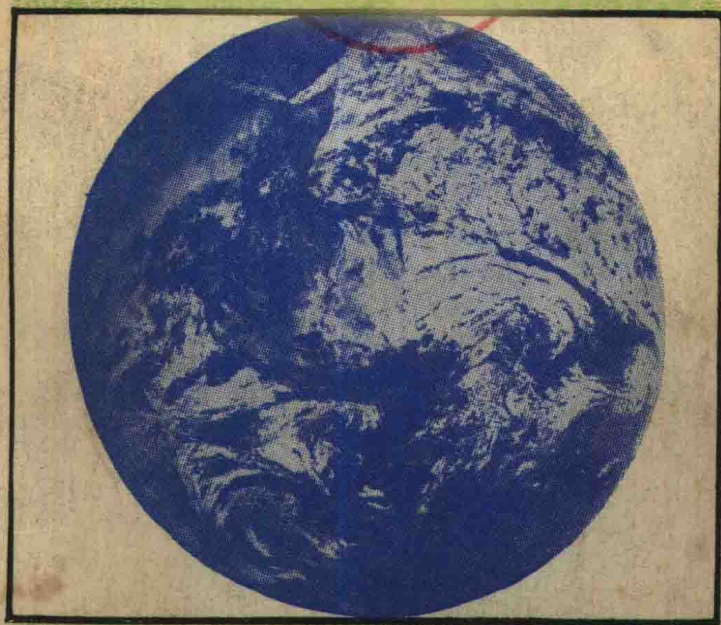


地球物理学

〔澳〕FRANK D. STACEY 著



地震出版社

地 球 物 理 学

〔澳〕 Frank D. Stacey 著

中国科学技术大学 译
地球物理教研室
傅 承 义 校

地质出版社

1981

内 容 简 介

本书从物理学角度论述了固体地球物理学的基本问题，其中包括各种地球物理场、地球内部物理状态、性质和运动特征等问题。概述了一些重要问题的研究现状，如地震预报、极移、磁极倒转、板块构造等。本书反映了六十年代以来地球物理学的重要成就，是一本简明扼要的专著。

本书可供从事地震学、地磁学、地球内部物理学、地质学的科研工作者和教学人员参考。

Frank D. Stacey
Physics of the Earth

Second Edition

1977

John Wiley & Sons, Inc.

地 球 物 理 学

[澳] Frank D. Stacey 著

中国科学技术大学 译

地球物理教研室

傅 承 义 校

地 震 出 版 社 出 版

(北京复兴路83号)

北 京 印 刷 二 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

850×1168 1/32 11³/₁₆ 印张 296 千字

1981年4月第一版 1981年4月第一次印刷

印数：0,000—5,500

统一书号：13180·89 定价：1.45元

为中文版写的前言

在介绍作为今后基础的基本原理时，我尽力向学习地球物理的学生提出激励人的课题尖端。英文版受到的好评已经验证了这种做法，但也必须看到还存在一定的困难。按常规总是向物理系的学生讲授不会产生问题的基本事实和原理，然而越接近新的进展，就越发感到没有把握。我写入书中的部分内容，至少在次要的支节上，将不可避免地被证明是错误的，但若只包括我确信无疑的东西，就会使书的内容既枯燥无味又不平衡。我请自己的学生对我所写的内容提出问题，问题提得最深刻的才是最好的学生。不过，这对他们来说总有些不自然。我希望读这本中文版书的学生能批判地阅读，这样学习要比简单地接受我所写的更为有效。

地球物理学正在迅速地发展，它日益成为科学中一门更为重要的学科，更为定量，更为依据传统物理学和数学的牢靠基础。实际上，地球物理学在昆士兰大学是物理系学生最后一年的课程，作为一门进修课是很有效的，它把已经初步理解的物理原理广泛地汇集起来，提供一些明显重要的实例。

我提请使用本书的教师注意，还有一本与本书配套的习题解析，给出了附录 J 中全部习题的解答，这些习题可供课堂练习用。

Frank D. Stacey

于澳大利亚，布里斯班

原 序

这部书原来的目的是引起物理系的高年级大学生和研究生对于固体地球物理基本问题的注意。研究地球有一种天然的魅力，但对从未接触过地球科学的物理学者来说，将碰到各式各样的新概念。为了使物理论点清晰，数学处理尽量简化；有的移至附录内，有的只略提出其要点，但引出原始文献以备参考。这样做的意图，是使地质及有关学科的学生们也较容易地理解本书内容。

课题所涉及的领域非常之广，以致要作全面的论述不是哪一位作者能够胜任的，因此在课题选择上不可避免地带有个人的一些偏爱。我的选择有一部分是基于这样的考虑，即预料到某些课题的重要性将会与日俱增。而且，还有必要介绍现代有争议的课题。因此极为重要的是介绍各个论点所涉及的关键性引证，以便读者对任何一个课题作更广泛探索时能作为参考。我希望从现有大量文献中经过仔细挑选的文献目录以及作者索引，将对查阅文献成为一个有用的起点。

由于课题的迅速发展以及我理解上的深入，虽然这一版已完全改写，但原理上、风格上与第一版基本相同。针对某些意见和要求，加进一些学生的习题（附录 J），还采用了国际单位制。在磁学中国际单位制的优点并不明显，在地磁有关章节里采用另一种单位制，就可以使公式中带括号的因子省去。

我要感谢一些作者和出版者，他们应我的请求，允许我用他们的图表。图表的来源在注解中都有说明。仔细校阅第一版、这一版或两个版本底稿的同事们有 A.E.Beck 等等，对他们的关怀和帮助谨致深切的谢意。

Frank D. Stacey

于澳大利亚，布里斯班

目 录

第一章 太阳系	(1)
1.1 行星	(1)
1.2 陨石及其成份	(6)
1.3 陨石的宇宙线辐照	(14)
1.4 Poynting-Robertson 效应	(17)
1.5 类地行星的成份	(20)
第二章 放射性和地球年龄	(24)
2.1 放射性未发现前的年龄问题	(24)
2.2 放射性元素和放射性测年原理	(26)
2.3 大陆生长和大气氦的累积	(34)
2.4 地球和陨石的年龄	(40)
2.5 测定核合成的年龄	(45)
第三章 地球自转	(49)
3.1 地球的形状	(49)
3.2 岁差	(58)
3.3 Chandler 晃动	(62)
3.4 转动起伏与Chandler 晃动的激发	(66)
第四章 重力与潮汐	(74)
4.1 重力——重力位的梯度	(74)
4.2 卫星大地水准面	(77)
4.3 地壳结构和地壳均衡原理	(85)
4.4 潮汐	(92)
4.5 潮汐摩擦和月球轨道史	(99)
第五章 地震活动性和地震机制	(110)
5.1 地球的地震活动性	(110)
5.2 震源机制	(117)

5.3	地震预报问题	(134)
5.4	脉动	(141)
5.5	海啸	(145)
第六章	地震波和地球内部构造	(148)
6.1	弹性波和地震射线	(148)
6.2	体波走时和地球的速度结构	(156)
6.3	自由振荡	(166)
6.4	内部的密度和成份	(172)
第七章	地球内热	(188)
7.1	地热流	(188)
7.2	地幔热状态	(197)
7.3	地核温度和能量平衡	(203)
7.4	对流——地球发电机和板块构造的能源	(209)
第八章	地磁场	(216)
8.1	基本磁场	(216)
8.2	长期变化和西向漂移	(227)
8.3	地核和地幔的导电性	(233)
8.4	基本磁场的产生	(242)
第九章	古地磁学	(252)
9.1	岩石的磁性	(252)
9.2	考古地磁学和长期变化	(260)
9.3	古地磁极和轴向偶极假说	(263)
9.4	地磁场倒转	(265)
9.5	极移和大陆漂移	(272)
9.6	古地磁场强度	(276)
第十章	大地构造和滞弹性	(279)
10.1	板块大地构造	(279)
10.2	地幔的应力—应变特性	(286)
10.3	对流能量估算	(298)
10.4	振动的阻尼和地震波的衰减	(303)
附录A	轨道动力学 (Kepler 定律) 和行星参数	(311)

附录 B	月球引力稳定性的 Roche 极限	(316)
附录 C	球谐函数	(322)
附录 D	球形层状地球中速度剖面的积分方程的解	(329)
附录 E	热力学的 Grüneisen 参数	(331)
附录 F	地球物理学常用的常数及有关资料	(335)
附录 G	地球模型	(340)
附录 H	放射性元素	(346)
附录 I	地质年表	(348)
附录 J	习题	(349)
参考文献 (略)		

第一章 太阳系

1.1 行星

多年来, 太阳系起源理论, 都是依据所观测的行星轨道规律性而提出的。最近, 研究的侧重点转移到化学方面, 即对行星密度以及地球和陨石中同位素丰度引起了注意。现在看来地球同其它行星有共同的起源, 即大约于46亿年前, 当太阳还年轻的时候, 围绕太阳的气体尘埃云形成了这些行星。气体尘埃云中元素的丰度与核合成理论所预期的结果相近, 因而太阳系的形成并不需要特殊的条件。我们推测, 甚至在我们所在的银河系内, 就可能有数百万个类似的行星系统。

在附录 A 中的 A.1 表内, 列出了行星密度和轨道半径的数值。获得可靠的密度数值比得到轨道数据晚得多。这是由于精确测量行星直径很困难, 而在密度估算中, 它又以三次方的形式出现。此外, 各行星成份存在显著差异, 即使在基本相似的四个类地行星间也是如此。这无疑给密度的估算带来另外的误差。关于行星成份的差异问题, 将在 1.5 节讨论。

把行星轨道半径近似地表示为几何级数, 此即为著名的 Bode 法则 (Roy, 1967), 或更确切地称为 Titius-Bode 法则。这个法则的原始形式, 把第 n 颗 (由里朝外数起) 行星的轨道半径表示为

$$R_n = a + b \cdot 2^n \quad (1.1)$$

式中 a 和 b 分别为适当的常数。在评论太阳系起源理论时, Ter Haar 和 Cameron (1963) 提出, 用以下简单的几何级数

$$R_n = R_0 m^n \quad (1.2)$$

更合适一些。当包括冥王星在内，把小行星看作为一颗行星时，取 $m=1.71$ 为最佳；若把小行星看作两颗行星，则应取 $m=1.59$ 。如果不包括冥王星，要获得最佳结果， m 值应取得稍大一些。我们还记得，Kepler 第三定律将轨道周期与轨道半径联系起来〔式 (4.41) 或 (A.17)〕，因此轨道周期服从类似式 (1.2) 的定律，但有 $m^*=m^{3/2}$ ，相应的数值是 $m^*=2.235$ 或 2.012 。从共振干涉的结果，曾提出 (Roy and Ovenden, 1954) 相邻行星轨道周期有可能成 2 与 1 之比，但 Dermott (1968) 对此表示怀疑。关于 Bode 法则新近的讨论受 Weizsacker 涡旋太阳星云模式的影响。在这个模式中，行星积聚在涡旋间的边界附近，它的体积由太阳向外有规则地增加（增加的范围限于吸积物质的自引力能抗衡太阳引力梯度）。

从历史上看，Bode 法则意味着这样的结果：内部的四颗类地行星的轨道符合式 (1.1) 或 (1.2)，大行星（从木星到海王星）的轨道也是如此，但是上述两组行星只是在把它们之间“失踪”的行星也算入之后，才能遵从这个共同的法则。为了探寻“失踪”的行星，结果就发现了许许多多小行星，它们的轨道集中于火星和木星轨道之间。在表 A.1 中，为了满足 Bode 法则，小行星合起来以行星数“5”计算。把“失踪”行星分别算为一颗或两颗行星所得的两条曲线加以比较，就得到表示 Bode 法则近似性质的图 1.1，而火星和木星之间的空隙如此之大，以致我们或许应将类地行星和大行星视作两个不同的行星组，它们独自满足不同的 Bode 法则。

所有行星的轨道近于共面，其轨道运动都沿相同方向，且同太阳的轴向转动方向一致，于是无可置疑地得到这一明显的结论：所有行星均同时由围绕当时还年轻的太阳的气体尘埃云盘所形成。冥王星轨道的倾角和椭率最大，它的轨道与海王星的轨道相交，要受到海王星的强烈摄动。甚至有人提议，与其把冥王星当作一颗独立的行星，倒不如视它为海王星的一颗逃逸的卫星。由

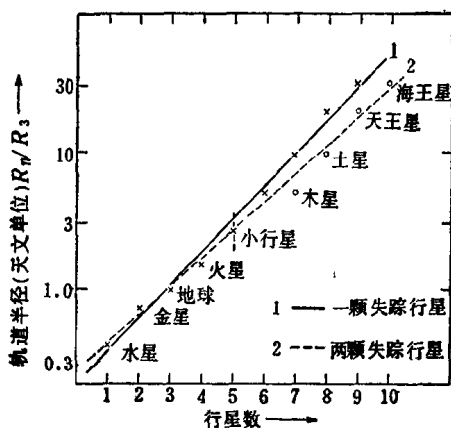


图1.1 行星的轨道半径近似成几何级数 (Bode 定则)。叉点和实线应用于只假定有一个“失踪”行星的情形。圆点和虚线是重新计数，以考虑在火星和木星之间有两个“失踪”行星所得到的

于这个理由，在表 A. 1 和图1.1中，没有把冥王星算作计数的行星。

行星的自转及它们的卫星轨道的规律性要差一些，虽然大多数行星的自转与其轨道运动同方向。但是即使如此，转动轴相对于轨道面的法线也有显著的偏离。对地球而言，这个偏离的角度 ($23\frac{1}{2}^\circ$) 称作黄道交角 (也就是轨道面相对赤道面的倾角)。特殊的情况是，天王星的转动轴几乎在轨道面内，金星则很缓慢地作逆向转动。〔水星是一种特殊情形，其转动受潮汐控制，58.6天的自转周期恰等于其沿椭圆轨道公转周期的三分之二，而且由于太阳在水星上所引起的潮汐和轨道共振，使得这个周期处于稳定状态 (Colombo, 1965; Colombo and Shapiro, 1966; Goldreich and Peale, 1966).〕行星转动轴的无规则取向表明，来自不同方向并冲入行星的大碎块，产生晚期吸积作用，于是给行星的角动量带来了一些随机性。在月球、火星和水星上撞击成的环

形山说明，这种晚期吸积碎块在太阳系形成的最初几亿年常常出现。水星的情况特别有意义，因为它的高密度说明它具有一个在比例上很大的铁心，但是其表面环形山却呈现出石质（硅酸盐）性质，在晚期的撞击发生以前，石质材料应已形成稳定的外壳（Murray et al., 1974）。在解释地-月系统的历史方面，晚期的撞击是十分重要的（4.5节）。

虽然太阳大约占太阳系总质量的99.9%，但它的自转角动量仅为总角动量的2%。如果我们假定整个太阳系由某个共同的同轴旋转的气体尘埃云凝聚而成，那么就需要着重解释角动量的分布状况。Alfvén (1954) 强调了角动量从收缩的太阳向星云外部传递的必要性。他认为在称为金牛座T型星阶段上，即年轻恒星还处于早期演化阶段时，太阳具有很广阔的磁场（由强烈的粒子流往外喷射所形成），该磁场对周围星云中的离子气体施加作用力，加速了外部的运动，同时减缓了太阳的转动。一些后继的研究工作（如：Hoyle, 1960; Sonett et al., 1970）对地球或小行星带的距离附近的磁场强度进行过估算，大约是0.1到1高斯（ 10^{-5} 到 10^{-4} 特斯拉）的范围。这与大约46亿年前，即显然在球粒陨石形成时期使之磁化的磁场量级相符合。然而，也存在一种可能性，即在金牛座T型星阶段，有其他恒星紧挨着太阳，这些恒星后来又散逸开。这种情况，也可以解释角动量分布状况。

月球作为行星的卫星，相对于地球而言显得过大了，以致我们可以有理由将地-月系统看作一个双行星系统，而不把它们看作行星加卫星的系统。因此，为了同其他行星的密度和成份作比较，与其单独考虑地球的值，倒不如把地球和月球的值一并考虑可能更适宜一些。在表 A. 1 中就是这样做的。月球和较小的类地行星在体积和密度方面都近似于木星和土星的内卫星。木卫一的体积很近于月球，但平均密度约为 $4600 \text{ 千克} \cdot \text{米}^{-3}$ ，比月球平均密度 $3300 \text{ 千克} \cdot \text{米}^{-3}$ 显然要大。木卫一的成份确实与类地行星相似。对行星的所有卫星的质量和直径进行比较（Blanco和

McCuskey 于1961年把它们列成一个方便的表格)表明,木星和土星的内部卫星都遵从密度由里往外逐渐减少的模式,相似于行星未压缩的密度由里往外减少的模式。这大概是在它们中间曾发生过相似的元素分离过程。

木星最外面的七个小卫星应划作特殊的一类,因为几乎肯定它们是被俘获的小行星。Bailey (1971 a, b) 指出,离木星约 11.5×10^6 千米处,沿顺行轨道上运动的三颗卫星,是在木星围绕太阳运动轨道的近日点处被俘获;而离木星约 23×10^6 千米处沿逆行轨道运动的四颗卫星,是当木星在远日点处被俘获。卫星俘获现象对于别的行星或许也是很重要的。对于海王星来说,由于同冥王星相互发生作用的可能性,俘获情况发生了紊乱,使得海卫一有一逆行轨道,海卫二有一偏率大的轨道。Singer (1970a) 提出,用俘获大卫星而进入逆行轨道,紧接着由于潮汐摩擦而盘旋内进(如4.5节讨论的),就能最好地解释金星极缓慢的逆转。

(组合的)金星最后的角动量是它起始的顺转角动量与俘获的逆转角动量之和,而且恰巧近乎于零。有人曾经认真考虑过把月球当作地球的俘获物来处理(其理由在4.5节讨论),但这种想法现在得不到支持了。

可以明显地把行星按体积和密度划分为两组。由木星到海王星的四个大行星体积较大,离太阳较远,但密度却比水星到火星的四个较小的类地行星为小,也比应当归入此组的小行星要小。类地行星和小行星主要由非挥发性物质,特别是不同氧化状态下的铁和硅所组成。相反,大行星的密度这样低,以致它们大部分由轻的挥发性物质,特别是氢所组成;非挥发性物质只占极小但是未知的含量。我们推测,轻的气体在太阳星云中到处都有,但并不是大量地吸积到内部的类地行星中。很可能,由于气体的电离,它们与太阳处于金牛座T型星阶段时的磁场相互耦合,因而被拖入比非挥发性物质更广阔的轨道,而非挥发性物质则留下来,吸积到类地行星中。Woolfson (1969) 曾评论过关于行星吸

积的物理过程的各种理论。

1.2 陨石及其成份

陨石是少数落向地球上的铁质体和石质体。它显然是从火星外小行星带的椭圆轨道伸展到地球轨道附近而落到地球上来的。陨石穿过大气时，具有火焰般的光亮轨迹，与一掠而过的较暗淡的流星光迹不同。流星起源于低密度的易碎小粒子（流星体）。许多流星体的轨道与彗星碎片轨道相同，但不能到达地面。尽管陨石与少数偶现流星可能有相同的来源，但陨石的坠落同地球穿过彗星碎片轨道带时所观测的流星雨事件没有关系（Jacchia, 1963）。已观测到坠落并找到实物的陨石数超过1000颗，它为研究陨石提供了重要依据。未见坠落而确实为陨石的总数是可供研究的陨石的两倍。陨石含有太阳系早期历史的线索，这样就使它成为最引人注目的科学样品，它们已是大量涌现文献的课题。Mason (1962)，Anders (1964)，Wood (1968) 和Wasson (1974) 等对此作过综合的评论。

由于陨石稀少且无规律性，所以很难测定其坠落前的轨道。只有一颗坠地的陨石是用比较科学的方法（从几个距离足够远的测点对轨迹进行摄影）观测的，能够可靠地计算它的轨道。此事于1959年发生在捷克斯洛伐克普日布拉姆（Příbram）。这个陨石是熟知的类型之一——球粒陨石。图1.2翻印了Z. Ceplecha计算的轨道。这种轨道也可从未坠落到地的陨石火球摄影记录，或从看到火球径迹的见证人报告中推出来（Wood, 1968）。这些报道增强了这个论断：至少陨石的大多数是小行星碎片，碎片轨道的远地点在小行星带内，轨道形状相当扁椭以致能够横穿地球轨道。尺寸比1千米还小的小行星或小行星碎片，在天文上是不可检测的，但是在可观测的范围内，从小行星数目有随体积减少而增加的事实，可推想它们的数量是相当多的（Blanco and McCuskey, 1961, pp. 262—268）。

Wetherill (1968) 指出，下午陨落是上午陨落的两倍。这就意味陨石穿过地球时，运行速度比地球显著要快，不仅它们的轨道远日点应靠近木星，而且它们的轨道运动应与行星的轨道运动同方向（相反，流星和彗星来自各个方向，且不局限在太阳系平面内）。

虽然为了方便，将陨石按结构和化学型式分成几类，但各类间并没有截然的界线，而且在不同的时间采用稍有不同的分类系统。广泛采用的四个基本类型是：球粒陨石，非球

粒陨石，陨铁石和陨铁（如Mason, 1962; Wood, 1968; Wasson, 1974）。Kaula 列出了各类陨石性质的方便的对照表（1968, pp. 380—382）。

陨铁主要含金属铁，其中铁与平均约为10%的镍组成固溶体。陨铁中含少量硫化物和石墨，偶尔也发现有硅酸盐。其中有两种金属相出现：约含5.5%镍的体心立方 α 相（铁纹石）和镍含量可变且一般超过27%的面心立方 γ 相（镍纹石）。正常情况下两相同时存在，当某一相自固结后的熔融体中析出时，另一相也从固溶体析出。第三相——合纹石——也是普遍存在的，实际上它是铁纹石和镍纹石的很精细的脱溶（相的分离）相。陨石断面上晶体的共同取向表明，原生的金属晶体很大，至少直径有1米。这说明冷却是极缓慢的。由跨过铁纹石—镍纹石相界区域的成份变化，可得到冷却速率的定量数据。相分离时形成特征花纹，对

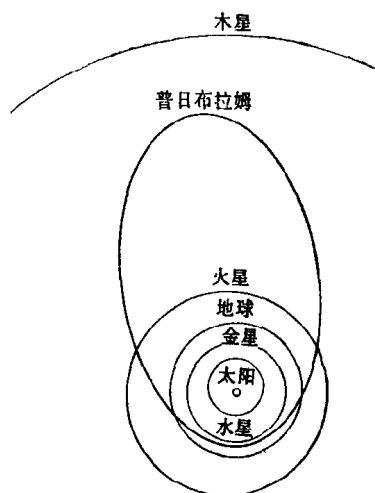


图1.2 Ceplecha 计算的 1959 年 4 月在捷克斯洛伐克普日布拉姆坠落的陨石轨道，图翻印自 Mason (1962)

磨光过的断面进行腐蚀，花纹变得明显易见，此即通常所说的韦氏交纹构造 (Widmanstätten Structure)。图1.3是这种构造的一个好图例。这种脱溶可以用镍铁相图去了解 (图1.4)。

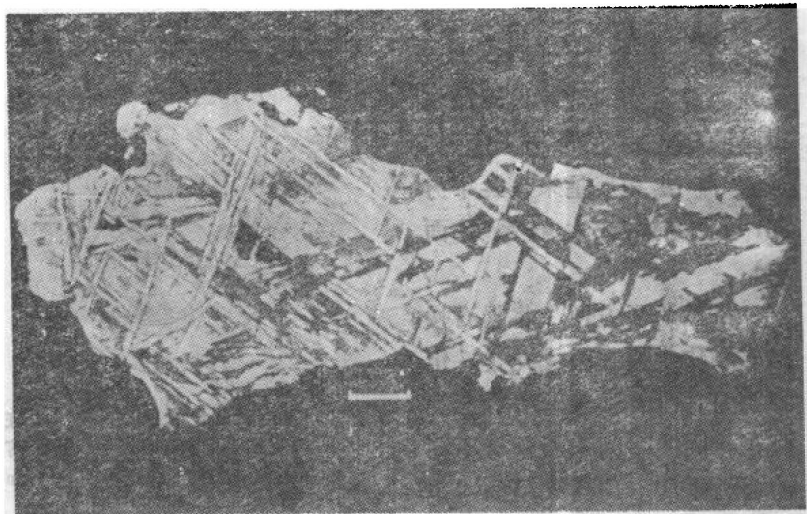


图1.3 在格洛列塔 (Glorietta) 山的橄榄陨铁 (石铁陨石) 中，金属相的韦氏交纹构造，比例标尺是1厘米。此照片由 J.F.Lovering 提供

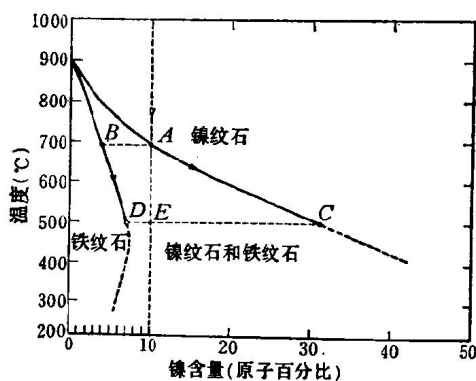


图1.4 Goldstein 和 Ogilvie (1965) 作的镍铁相图。在作为铁陨石代表的含10%Ni的合金中，表示出铁纹石和镍纹石脱溶所沿的路径

相当于铁陨石平均成份的10%镍的镍铁合金，当它冷却到690°C（图1.4A点）之前，凝结为镍纹石，并一直以单相固体出现。在A点附近，它进入两相区域，铁纹石（成份以B点表示）在镍纹石晶体点阵沿{111}晶面脱溶出来*。再冷却到500°C时，镍纹石相沿着路径A→C，镍含量增加，但该相比例部分减少，同时铁纹石面厚度增加，沿着路径B→D镍含量也增加。当然，平均镍含量仍是10%（以点E代表），所以在这个温度附近，铁纹石变成主要的部分。进一步冷却，镍在铁纹石中的溶解度开始降低，镍扩散出铁纹石带的边界进入镍纹石带，但是扩散变得很慢以维持相平衡。图1.5将进一步说明成份的不均匀性。镍在铁纹石内比在镍纹石内扩散得更有效，因此只是铁纹石的边缘比其核心区域，镍的丢损略多一些。但是来自铁纹石的镍并不深深渗入镍纹石带，只以高镍带缘停留在镍纹石上，而在镍纹石核心部分可能溶脱出很精细的合纹石。

利用Widmanstätten扩散带的宽度，Wood（1964），Short和Anderson（1965），Short和Goldstein（1967）估算了铁陨石的冷却速率，Wood（1967）估算了球粒陨石的冷却速率。通过从650°C到350°C这个扩散有效的临界范围时，估算的冷却率为每百万年0.4°C到40°C的范围。这些缓慢的冷却率是同铁陨石及通常球粒陨石中的含铁相两者的大晶粒尺寸和粗韦氏交纹构造相一致的，意味着陨石作为子体隐埋在半径为100千米或更大的母体中。冷却速率变化范围较宽表明，存在着不同尺寸的各种母体。

四种类型的陨石中最常见的是球粒陨石，它占观测到的落体总数的90%以上，虽然铁陨石一般较大，而且空间中陨石物质的质量属于球粒陨石的大概少于90%。球粒陨石的特征是有粒状体出现，即在硅酸盐和镍-铁基质中，分布有平均直径约1毫米的硅酸盐玻璃球状体，而且它们部分地失去玻璃光泽（图1.6）。但在

*{111}面形成八面体花纹，带有发育相当好的韦氏交纹构造的陨铁，称之为八面体式陨铁。