

参 考 文 献

- [1] 吉田秀雄など,《真空》19-1(1976), 13.
[2] 木村贺勇など, Omron Technics, 14(1974), 121.
[3] J. L. Bosnell et al., *Thin Solid Films*, 15(1973), 141.
[4] 堀芳郎など,《应用物理》34(1965), 507.
[5] J. L. Vossen, RCA Rev., 32(1971), 289.
[6] 大畑豊など,《应用物理》46(1977), 43.
[7] John C. C. Fan et al., *J. Electro. Chem. Soc.*, 122(1975), 1719.
[8] W. W. Molzen, *J. Vac. Sci. Technol.*, 12(1975), 99.
[9] J. L. Vossen et al., *Thin Solid Films*, 13(1972), 281.
[10] IZV, Akad. Nauk SSSR, *Neorgan Mat.*, 5(1969), 551.
[11] 佐伯博など,《真空》19-12(1976), 8.
[12] 铃木坚吉など,《应用物理》44(1975), 247.
[13] J. M. Eldridge, *Thin Solid Films*, 12(1972), 447.
[14] J. A. Marley et al., *Phys. Rev.*, 140A(1965), 304.
[15] 武藤隆二郎など,《应用物理》41(1972), 134.
[16] J. H. W. Dewit et al., *J. Phys. Chem. Solid*, 38(1977), 819.
[17] N. F. Mott et al., *Phil. Mag. Suppl.*, 10(1961), 107.

超高压研究与地球科学

谢 鸿 森

(中国科学院贵阳地球化学研究所)

引 言

地球和星体内部具有很高的压力和温度。空间科学的发展获得了木星、金星、火星及月球的大量资料,表明这些行星内部是超高压世界。木星的中心压力为 140 兆巴,温度为 30000K。土星的中心压力和木星相近。地球的中心压力估计为 3.89 兆巴,温度约为 5000K。水星、火星和金星都分异出幔和核。水星和火星还具有金属核。空间探测获得了地球外空场存在有磁层和地冕,这些都是研究地球演化的重要资料。

对地球整体来讲,它应当包括磁层、电离层、大气层、水圈及固体地球——地壳、地幔和地核。组成地球的物质有气态、液态和固态,还有等离子体——第四态以及超高密度等离子体——第五态。在地球统一体中,各部分的物质运动是相互联系而又相互作用着。人们对地球的认识已经观察到许多宏观现象,这些宏观现象是地球物质的微观运动结果。所以,地球科学发展到今天,要求研究处于极高压下的地球内部物质的微观运动过程和进行模拟实验

及理论推导,从而把宏观现象和微观运动综合起来,这是地学基础研究的重要内容。钱学森同志从物理力学的观点阐述地核不是铁镍组成的^[1],而是岩石在超高压下出现的一种新物态——超高密度等离子体态,被称为物质的第五态。这一观点对研究地磁成因、磁层与地核的耦合关系以及研究核幔演化动力学问题是非常重要的。

一、地球科学的发展概况

地球科学是由研究地质现象开始的,已有过三次重大的发展:(1)从十八世纪末开始,由于对地层中古生物化石的研究,从生物的进化来确定地层时代的演化,使地质学由地壳宏观物质的空间分布性研究而进入到时间性的演化规律方面;(2)从二十世纪初开始,由于化学的发展及其在地学中的应用,开始研究地壳中的化学组成和演化,从而来推断地壳中的物质运动规律;(3)与此同时,还由于力学的引入而发展了地质力学,这主要是李四光同志的贡献,也由于物理学引入到地学中来,开始进行了一些

宏观地球物理量的测量,大大促进地球物理学的发展.到六十年代,发现了海底扩张,在此基础上复活了魏格纳(Wegener, Alfred)的大陆漂移学说.大约在四亿年前到二亿五千万年前,整个地球似乎只有一个统一而巨大的马蹄形大陆,各大陆是从一亿年前开始从一个整体分离,逐渐形成现在的形态,从而提出板块构造学说.以上这些成果是以引入生物、化学、物理学及力学等学科为特征三个发展阶段.在最近一段时期内,有关地学的国际协作是很多的.范围最大的是国际地球物理年(1958—1960年),上地幔计划(1961—1971年),地球动力学计划(1972—1977年).上地幔计划取得最大的成果就是提出“板块构造”学说.为了解释板块运动的能量问题,进行了地球动力学计划.

从七十年代开始,地球科学进入一个新的时代,把近代物理的一些理论引进到地学中,开始把地球物质的微观运动规律和地球及行星空间物质的宏观运动规律结合起来,研究地球整体性的运动规律.如资源卫星的发射,促进了岩石矿物波谱学的研究;空间探测卫星的发射,使近地空间物理学和行星科学的研究有了新的发展.这些资料为地磁学、磁极倒转、地球极移和地球自转问题提供了新的资料.美国宇航局最近制订了一项“地球与海洋应用物理计划”,通过卫星观察板块位移、构造断裂活动以及地壳的变形,使地壳运动规律的研究和观测扩展到更大范围.

在微观结构的研究上,从六十年代末开始把晶体场理论应用到矿物学中,从而,量子力学和量子化学的理论引进到地学中来,研究矿物的精细和超精细结构,促进了矿物物理的发展.与此同时,开始了高压矿物物理的研究,包括有高压下的矿物相变及物性的研究.如用穆斯堡尔谱,核磁和顺磁共振谱、X衍射和中子衍射、喇曼光谱和光吸收等方法研究高压下的矿物结构和性质.这些研究对揭示地球内部的物质运动规律提供

了实验依据.另外,同位素地质年代学的发展,为地壳运动的时间性规律的研究提供了可靠的数据.正因为近代物理和数学的不断引进,使得地球科学在研究物质的时间和空间的运动规律上进入新的时代.

二、地球的物质结构模型

人类生活在地球上,和电离层、大气层、水圈及岩石圈发生着直接的联系.对地球的物质结构模型,本文主要介绍固体地球模型中与高压有关的部分.

关于地球内部结构模型见图1^[2].这些结构模型可归纳为三种观点:一种认为地球的现状结构是由各壳层的化学组分不同而引起的;另一种观点认为地球内部的化学成分是相当均匀的,不同壳层的存在是由于硅酸盐矿物在超高压条件下受到强烈压缩而产生的密度不同而形成的.此外,卡普斯金斯基(A. Ф. Кану-тинский)从热力学和高压化学的观点提出独特的结构模型^[3].该模型分为三个圈:外圈近似于岩石圈,中间圈是榴辉岩壳层.由于该圈处于很高压力下,发生了电子向未满的内层——d

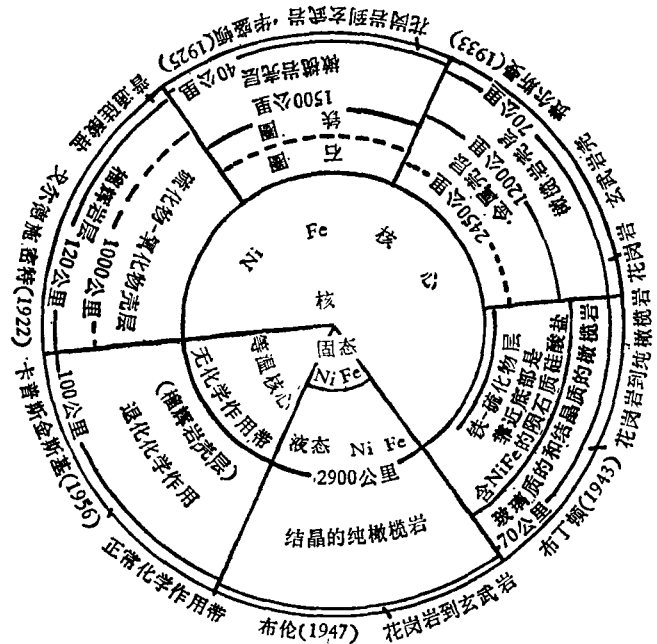


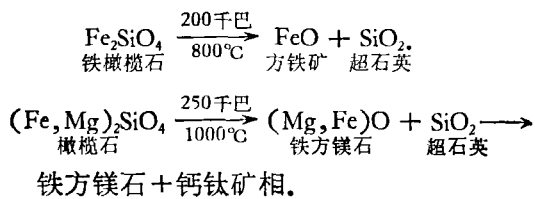
图1 不同作者提出的固体地球结构

表 1 固体地球的分层及其物理参数

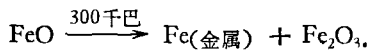
壳 层	深度(公里)	密度(克/厘米 ³)	压力(10 ⁶ 巴)	体积(%)	质量(10 ²⁷ 克)
地壳 (A)	0—33	2.6—3.32	0.009	1.55	5
地幔	(B)	33—413	0.141	16.67	62
	(C)	413—1000	0.392	21.31	98
	(D)	1000—2900	1.37	44.28	245
地核	(E)	2900—5000	3.17	15.16	188
	(F)	5000—5100	3.27	0.28	
	(G)	5100—6371	3.89		

层和 f 层迁移,产生了原子的电子异构现象,从而使它们的化学性质发生变化。处于中心圈的原子电子壳层完全被压破,已经不存在电子交换的化学作用,被称为无化学作用的金属态。关于固体地球的某些物理参数列于表 1 中。

近些年来,由于超高压实验技术的发展,对硅酸盐进行了许多动高压和静高压的实验研究,这些实验资料尽管没有得出完全统一的认识,但证实了地幔和地核的矿物成分发生了相变,从而引起物质的分异作用,并且发现矿物在超高压下产生电荷迁移和光吸收密度增加等高压矿物的性质。静高压矿物相变的实验表明:在下地幔(D)条件下,无论具有橄榄石化学计量的混合氧化物,还是具有辉石和石榴石化学计量的混合氧化物,都是不稳定的。目前已知镁橄榄石在 151 千巴和 1200℃ 时转变为尖晶石结构^[4],尖晶石为立方晶系,六八面体。晶格参数 $a_0 = 8.143 \pm 0.007$ 埃。随着压力的增加,铁橄榄石不成比例的分解为方铁矿和超石英。



在更高压力下,



总之,随着压力的增加,在橄榄石系列中发生的相变为: 橄榄石 → 尖晶石相 → 铁方镁石 + 超石英 → 铁方镁石 + 钙钛矿相。因此,提出下地幔矿物结构为钙钛矿相。

成分为 95% (重量) 的 $(\text{Mg}_{0.75}\text{Fe}_{0.25})\text{SiO}_3$ 和 5% (重量) 的 Al_2O_3 的玻璃,这个组分相当于 93.7% 克分子的辉石和 6.3% 克分子的石榴石,加压到 260 千巴,加温到 1500℃,淬火后由高压 X 衍射数据证实有如下相变^[5]:

石榴石 → 尖晶石相 + 超石英 + Al_2O_3 (?) → 钙钛矿相,在 280 千巴和 1500℃ 下观察到的辉石相变为:

辉石 → 尖晶石相 + 超石英 → 钛铁矿相 → 铁方镁石 + 超石英 → 钙钛矿相,其钙钛矿相的克分子体积为 24.78 ± 0.06 (厘米³/克分子),晶格参数为:

$$\begin{aligned} a_0 &= 4.805 \pm 0.004 \text{ 埃;} \\ b_0 &= 4.949 \pm 0.004 \text{ 埃;} \\ c_0 &= 6.922 \pm 0.006 \text{ 埃。} \end{aligned}$$

比其化学计量的混合氧化物的克分子体积小 4%。

由以上的实验,刘林根 (Liu L.-G.)^[5]提出地幔矿物结构模型(见表 2)。

毛和光 (Mao H.-K.) 和贝尔 (Bell)^[6]做了核幔界面的物理模式实验。地震和实验资料证明这里的矿物是由氧化物和金属组成。他们在 0.9 兆巴压力下,对 ϵFe 和 MgO 进行压缩实验,模拟了核幔界面的物理状态,测定的压力和压缩系数列于表 3 中。

从目前的 ϵFe 的压缩系数资料,能拟合一个 $\xi = 0$ 的等温 Birch 方程:

$$P = 1.5B_0(V/V_0)^{-7/3} - (V/V_0)^{-5/3},$$

其中 $B_0 = 1.86$ 兆巴, $V_0(\epsilon\text{Fe}) = 6.72$ 厘米³/克分子。从而证明地幔和地核是球状和放射状的非均一体。

表 2 地幔矿物结构模型

壳层	深度(公里)	主要矿物相		
上地幔(B带)	33 橄辉石带	橄辉石	辉石+Al ₂ O ₃	柘榴石
过渡带(C带)	350 尖晶石带	β相+尖晶石	柘榴石+Al ₂ O ₃ ;尖晶石+超石英钛铁矿相	铁方镁石,未知矿物(I)
	650 氧化物带	铁方镁石+超石英	铁方镁石+超石英	铁方镁石,未知矿物(II)
下地幔(D带)	1000 钙钛矿带	钙钛矿+铁方镁石	钙钛矿	钙钛矿
	2800			

表 3 MgO 和 cFe 的压力和压缩系数的测量

实验号	P _{红宝石} (千巴)			MgO		Fe	
	中心	边缘	平均	V/V ₀	P(千巴)	V/V ₀	c/a
4C1	528	495	520	0.8120	510	0.7772	1.5999
5C1	702	630	684	0.7802	670	0.7519	1.592
5C2	806	759	794	0.7696	730	0.7411	1.593
5C3	878	807	860	0.7473	865	0.7233	1.592

三、极端高压下的物态方程与地核

现代自然科学中的一个重要的研究领域,是对极端状态下物质性质的研究。在这里介绍一下极端高压下的物态方程以及由此推导的地核模型。超高压和高温使物质处于被束缚状态,其主要性质取决于原子和分子的不同电子结构和重迭波函数。目前从理论和实验两个方面都非常重视把电介质变为金属态的问题。当物质被高度压缩时,其原子的电子同核的相互作用就变得无关紧要了。因此可以把这种物质看成是“电子的简并化理想费米子气体”至于原子核气体,则由于质量很大,所以达到简并化的状态需要压力更高。

当压力达到物质呈“自由电子气”状态时,其物态方程为

$$P = \frac{1}{5} \left(\frac{3}{8\pi} \right)^{2/3} \frac{h^2}{m_e} n_e^{5/3}, \quad (1)$$

这里 h 为普朗克常数, m_e 为电子质量, n_e 为电子数密度。 n_e 与密度 ρ 的关系为

$$\rho = \frac{n_e W}{Z \tilde{N}}, \quad n_e = \rho \frac{Z \tilde{N}}{W}, \quad (2)$$

其中 Z 为原子序数, W 为原子量, \tilde{N} 为阿佛加德罗常数,则式(1)可写成

$$\rho = \frac{1}{5} \left(\frac{3}{8\pi} \right)^{2/3} \frac{h^2}{m_e} \left(\frac{Z \tilde{N}}{W} \right) \rho^{5/3}, \quad (3)$$

因为 $\frac{Z}{W} \cong 2$, 则

$$P \cong 3.119 \times 10^6 \rho^{5/3}, \quad (4)$$

地壳岩石的平均密度为 2.6 克/厘米³, 则岩石出现自由电子气的压力为 $P \cong 1.53 \times 10^7$ (大气压)。从目前已知的资料,其体积被压缩了 78.8%。

电子的平均动能随着压力的增加而增加,当压力使它变得与 mc^2 相近时,相对论效应成为非常重要的了。这种状态被称为完全简并化的超相对性的电子气。如果进一步提高密度,则产生电子俘获的物态,即:

$$A_z + e^- = A_{z-1} + \gamma, \quad (5)$$

其中 A_z 是原子序数为 Z 的质量, γ 为中微子。这种反应从热力学观点上认为是可能的。这样使得原子核的电荷减少,结合能减少。

当密度为 $\rho \approx 3 \times 10^{11}$ 克/厘米³ ($P \approx 10^{11}$ 大气压)时,中子就其数目来讲超过了电子。当 $\rho \approx 10^{12}$ 克/厘米³时,则中子就其压力来讲超过了电子,出现中子过多而导致蜕变。中子简并化物态方程为

$$P = \frac{(3\pi)^{2/3} h^2}{5 m_n^{8/3}} \rho^{5/3}, \quad (6)$$

其中 m_n 为中子的质量。当 $\rho \gg 6 \times 10^{14}$ 克/厘米³ 时，简并化的中子气变成超相对性的，因此物态方程为

$$P = \frac{(3\pi^2)^{1/3}}{4} hc \left(\frac{\rho}{m_n} \right)^{4/3}, \quad (7)$$

其中 c 为光速。在这种情况下，总还有一定数量的质子和电子，这是中子蜕变的结果：

$$n = P^+ + e^- + \gamma \text{ (量子)}. \quad (8)$$

对地核来讲，许多学者认为是金属态核。地震波传播资料只观察到 P 波，而没有 S 波穿过地核。表明地核的刚性是微不足道的。因此，估计至少在 E 区域为液态。这点对从事超高压研究的地质工作者引起极大的兴趣。在 E 区域的超高压条件下存在“液体”是很难想像的，这种所谓“液体”很可能是第五态物质——自由电子气状态。那么内核为什么又呈现出某些固体核的性质呢？这是由于地核转动受到行星际磁场的作用，使得内核的自由电子更富集在 E 区域。天文学的现代观测资料认为，地球自转有十年至几十年之间的周期变化现象，这只能从地核的存在和地幔的活动来解释。这种影响自转变化的重要因素是地幔活动，因为地幔的转

动惯量大，但地幔的活动是受地核支配的。并且还提出地核生长和地核偏心的两种缓慢变化过程。但是用托马斯-费米方程推导的地核变成第五态的压力，比目前一般对地核压力的估计要高几倍，这是有待进一步研究的问题。

四、对地球电磁动力学过程的估计

地磁成因以及磁层和地核的电磁耦合过程，一直是有争议的问题。如果地核是第五态物质，则地核转动就必然会产生磁场，这是麦克斯韦电磁方程所决定的——运动着的电场产生磁场。而地球的偶极子磁场在强劲的太阳风^[7]（由日面溅射到行星际空间的大量等离子体流）吹拂下变形，成为如图 2 所示的磁层结构^[8]。受到形变的磁层必然会对地球物质产生反作用，特别是在太阳风参数发生很大变化时，这种反作用力也伴随着发生很大变化。因此，研究太阳周期性活动和随机活动对行星际磁场的影响，以及对地核物质产生的耦合作用，对研究地球物质的演化过程是非常重要的。这包括大陆漂移、海底扩张、板块运动以及造成全球构造的

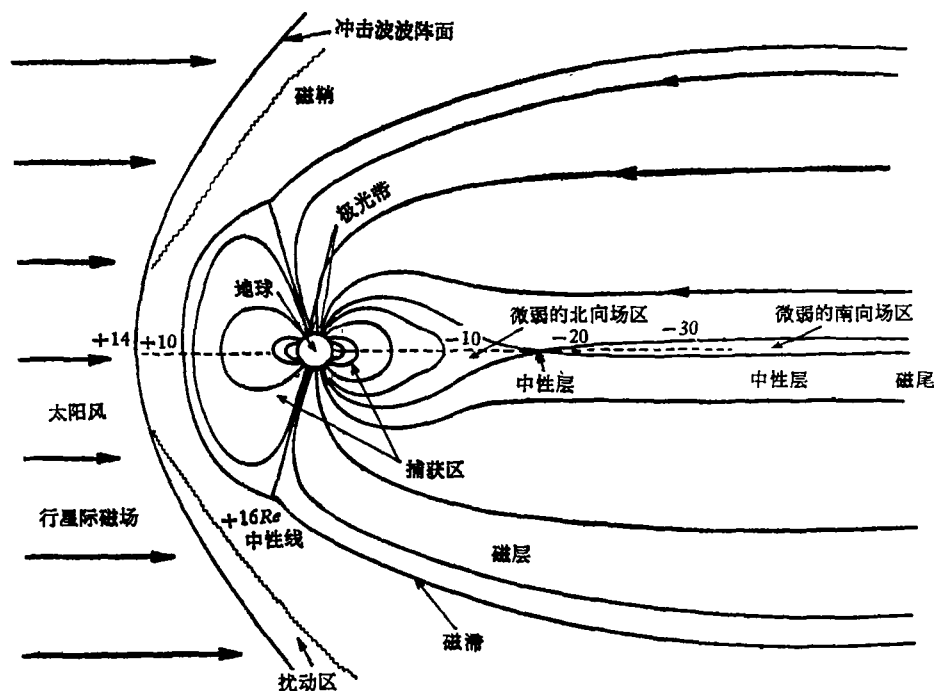


图 2 磁层结构

能量来源问题;地球极移问题;地球内部的热能积累、地幔对流和地幔柱的形成问题;磁极倒转问题;地球外空场的物理过程对地球内部物质的能量传递和能量转化问题等等。这些重大的地学理论问题都和处于极高压力下的地核物态有关。目前正在对这些内容进行深入的研究。

参 考 文 献

[1] 钱学森,《物理力学讲义》,科学出版社,(1962),167.

- [2] 中国科学院贵阳地球化学研究所编译,《简明地球化学手册》,科学出版社,(1977),5.
[3] A. Ф. 卡普斯金斯基《关于地球的理论》,《地球化学与矿物学问题》,科学出版社,(1958),40.
[4] L.-G. Liu, *J. Geop. Res.*, 78-17 (1973), 3501.
[5] L.-G. Liu, *Nature*, 258(1975), 510.
[6] H.-K. Mao and P. M. Bell, *C. I. W. Year Book*, (1976), 75.
[7] C. G. Fälthammar, *Magnetospheric Phys.*, 44 (1973), 93.
[8] L. P. Block, *Magnetospheric Phys.*, 44(1973), 103.

发展中的宇宙射线天文学

范钦敏 唐孝威

(中国科学院高能物理研究所)

1962年,罗西等人在火箭上放置了几个薄云母窗盖革计数器,本想研究太阳辐射引起的月面荧光X射线,然而观测的结果,却意外地发现,在银河系中心方向有一个奇特的能发射X射线的星体——天蝎座X-1。它发射X射线的本领十分巨大,其X射线辐射功率竟比太阳各种辐射功率的总和还大上千倍。天蝎座X-1的发现,揭开了天文学发展史上新的一页。从此,天文观测开始出现了一个崭新的发展方向。十多年来,已取得了很多重要的进展。

一、从光学天文到全波天文

六十年代以来,随着人造卫星、探空火箭和大型气球等运载工具的发展,突破了大气屏障。同时,把粒子探测技术不断地应用于天文观测,从而使观测波段逐步向短波方向推进,开创了空间X射线和 γ 射线的天文学研究,发现了诸如强X射线源、X射线脉冲星、空间 γ 射线爆发、中高能 γ 射线源等一系列新型天体或新的天体过程。与此同时,宇宙射线荷电粒子及中微子等的观测手段也不断地被引用到天文学研究中来,发现了诸如太阳中微子短缺、宇宙射线

重元素丰度偏高等一些重要的天体物理现象。由此诞生了天文学的一个新分支——宇宙射线天文学。宇宙射线天文学的兴起,又一次开拓了天文学的境界,把天文学研究极大地向前推进了一步。如今,宇宙射线天文学与光学天文学、射电天文学一起已成为现代天文学的三个重要组成部分。

随着宇宙射线天文学的出现,天文学研究开始进入了一个“全波天文”的新阶段。这里所谓“全波”,一方面意味着对空间电磁辐射的观测已经可以从很低的能量起一直延续到很高的能量;另一方面也表示当今天文观测所包罗的粒子种类已十分丰富。凡是从宇宙空间射来的几乎所有的可观测粒子,天文学都可以从中获取相应的信息。全波天文的创立,对于揭示天体过程及其演化规律无疑将是十分有益的。这是因为,通过全波观测,才有可能获得比较完整的天体信息。

宇宙射线天文学的兴起,不过是近十余年的事,但它的发展却很迅速。按照观测对象的不同,如今宇宙射线天文学可以划分为X射线天文学、 γ 射线天文学、中微子天文学以及荷电粒子天文学等。以下我们将分别对宇宙射线天