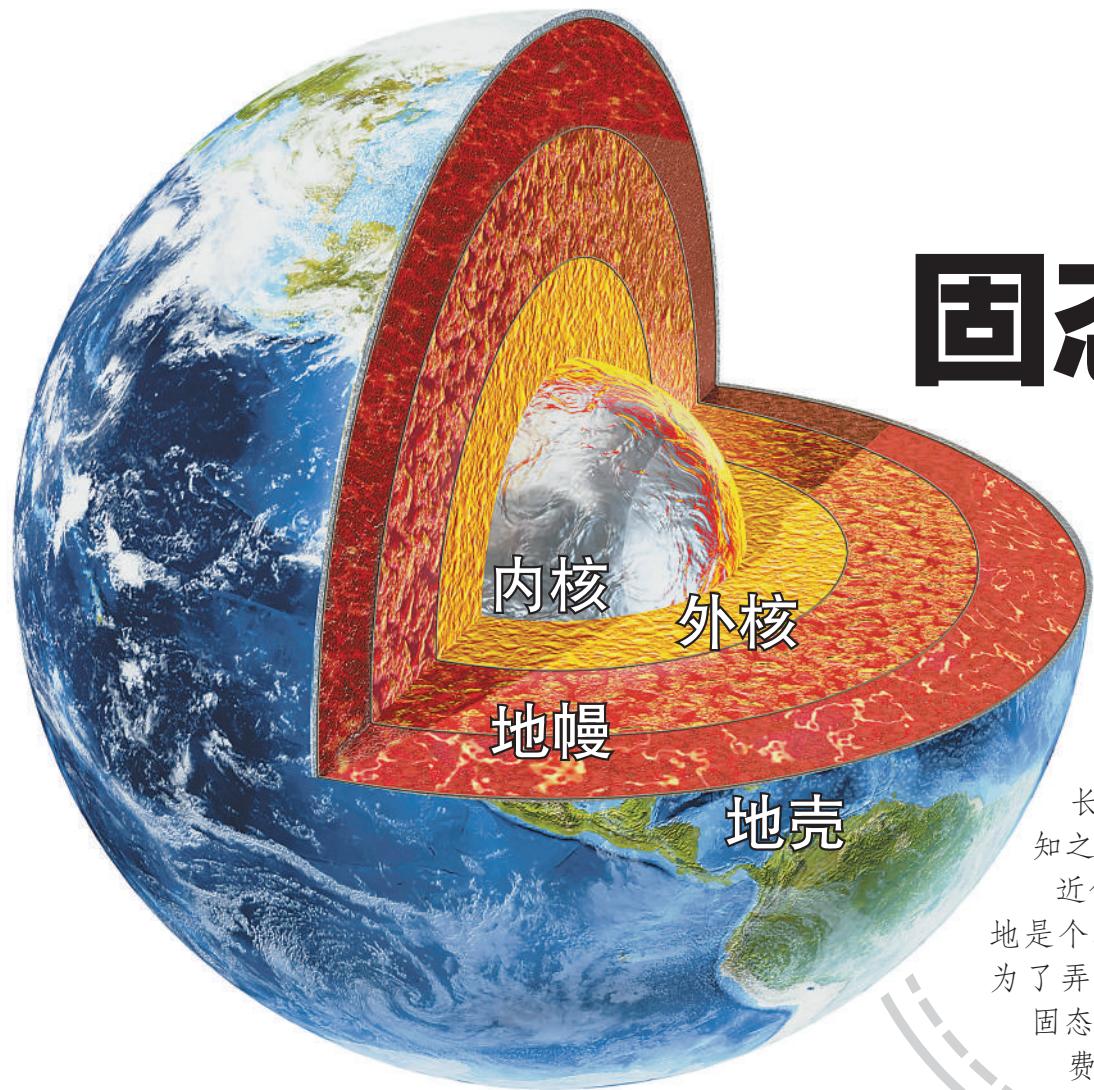


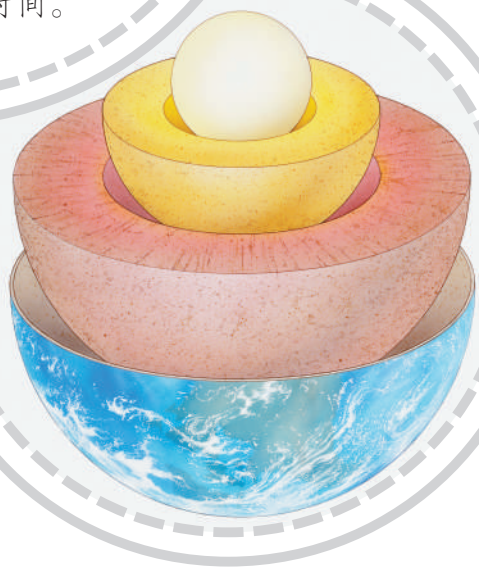
地心探索： 固态液态争论百年

贾斌



我们人类祖辈生活在脚下这片大地上。那么,这片大地上到底有什么?在漫长的历史时期里,人类对此知之甚少。

近代的地理大发现,确立了大地是个球形的结论。然而,仅仅为了弄清楚地球内部到底是固态还是液态,科学家就花费了几百年的时间。



1. 也许地球内部有一个液态的“海洋”

人类虽然只是生活在地表,但是来自地下的力量却给人带来了巨大的震撼,比如火山、地震等。古代的中国人认为,地下有一条地龙,一翻身就会有地震;而1864年法国小说家儒勒·凡尔纳出版的《地心游记》,将地球内部描写成为一个拥有风暴、海洋甚至巨兽的精彩世界,令人浮想联翩。那么,地下到底有什么?

在古代不同的文化中,对地球的形状都有不同的想象,球形的地球在东西方的文化中都曾出现过。在两千多年前的古埃及,地理学家埃拉托斯特尼曾根据夏至日高塔影子的长度计算了地球的直径,与现代测量的地球直径非常相近。中国唐朝的天文学家僧一行也曾计算过地球的直径。

欧洲人的地理大发现大大加深了人类对地球形状的认识,球形且可以自转成为了地球的基本特征。1687年,牛顿出版了巨著《自然哲学的数学原理》一书,在书中他考虑了地球自转、引力等因素,假设地球内部是液体,计算了地球的偏心率,也就是地球偏离正球形的程度。他认为,因为地球自转,地球的赤道突出,两极略扁。在计算中,牛顿假设地球内部是液体,但并未说明原因。

另一个支持地球内部是液体的证据,来自于高山。牛顿根据他的力学理论,计算了地球的平均密度,认为大约是水的五到六倍,和现在的测量值十分接近。但是,这个值要比地表的岩石大两到三倍,那么只能是地球内部的物质密度更高,即外轻内重。牛顿发现的万有引力,在地球上就表现为重力,可以简单地认为,密度越大,物质就越多,引力也越大。所以,如果我们假设地球的密度分布从内到外逐渐增加,同样的层位具有同样的密度,那意味着高山多出来的物质会有额外的引力。正常情况下,如果自由悬挂一根柱子,它应该指向地心。但是,如果在高山的旁边,由于高山水平方向的引力,这根柱子就应该偏向山的方向。

在18世纪,法国地球物理学家布格在南美洲安第斯山脉做了这样一个实验。实验结果显示,柱子确实偏向山的方向,但是偏离的程度要比原来的估算值小很多。19世纪前期,英国地质学家在印度的喜马拉雅山做同样的实验得到了同样的结果。这说明,高山的引力要比原来的预想小很多。那么只有一个解释,山区的物质比我们原来估计的要少。如果我们把一根木头扔到水里,它一部分沉入水中,一部分露出来,露出来的这部分看作是山。在计算的



▼ 电影《地心游记》剧照



时候,把水下低密度的木头当作高密度的水,物质变多,结果肯定是引力要大。而实际上,高大的山脉,不仅高耸在地面,在地下也有很深的“根”,可以深过正常的地壳,到达高密度的地幔内。也就是低密度的地壳物质挤占了高密度的地幔,那么引力肯定会减少。所以,地球物理学家艾礼等人认为地壳就像木头一样漂浮在液态的地幔上。

液态说可以很好地解释诸多地质现象,比如山脉,就是坚硬的地球外壳在液体上横向漂动挤压形成的,地震也是因为挤压。火山则更简单,地球内部的液体沿着缝隙或缺口喷出来就行了。也正因为它如此成功,在牛顿之后将近两百年的时间内,液态说都是地质学界的主流理论。

2. 开尔文的反击

开尔文,很多读者都很熟悉,绝对温度的单位就是以他的名字命名的,19世纪的科学巨人,热力学定律的创立人,同时在材料形变方面也有很大的贡献。

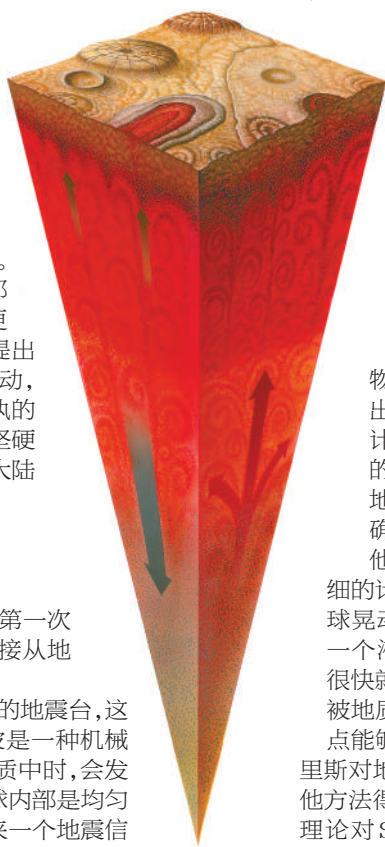
开尔文对我们认识地球也有非常大的贡献。在开尔文之前,大多数科学家都认为地球内部是液态的。相对固体,液态的物质非常容易受到外力影响。比如,月球和太阳的潮汐作用,可以让开阔的海水最高隆起将近一米高(靠近海岸或河口的高数米大潮是因为受到海水变浅或地形的影响),但是固体地球最大的形变也就三十厘米。考虑到海水的平均深度才4000多米,而地球的半径有6300公里,固体地球的形变量是非常小的。但是,如果地球内部是液体,根据开尔文的计算,这个形变量就非常可观了,里面的液体将会冲破外面的地壳。即使地壳强度很大,那它

在地内液体的带动下,变形幅度会非常大,这完全不符合现实。所以,他认为地壳内部不可能都是液体,应该是固态的,而且全部是固态的,“像铁一样坚硬”。

在开尔文之后,地质学家开始相信,地球内部确实是固体,但这种说法又有点儿矫枉过正。如果地球完全是固体,而且是非常坚硬的固体,那么地球内部就不会再有什么运动了,板块的漂移更不可能了。所以,当1912年德国科学家魏格纳提出大陆漂移假说以后,在地质学界引起了很大的轰动,但这没有成为主流学说。因为根据著名而又固执的地球物理学家杰弗里斯的计算,板块是不可能是在坚硬的岩石上面滑动的。既然在物理上不可能,那么大陆当然不可能漂移了。

仪的记录对得上。这时他才意识到这是人类第一次记录来自地球另一端的震动,这个信号直接从地球内部穿过,走了大约9000公里。

之后几年,欧洲、美国和日本建立了大量的地震台,这为地震学家的研究提供了很多方便。地震波是一种机械波,由一种介质进入到另一种性质不同的介质中时,会发生折射,改变路径和速度。如果我们假设地球内部是均匀的或者是按照某种规律变化,就可以计算出来一个地震信号传到世界各地所需要的时间。如果实际测量值和计算值不一致,我们就可以说地球内部的性质发生了变化,改变了地震信号的传播路径,而且变化的深度是可以计算的,这就是利用地震信号研究地球内部构造的基本原理。利用这一原理,地震学家相继做出了一系列惊人的发现。1906年,英国地震学家奥尔德姆发现了地核的存在;1909年,克罗地亚地震学家莫霍洛维奇发现了莫霍面,莫霍面之上为地壳,之下一直到地核为地幔;1912年,德国地震学家古登堡确定地核的深度大约2900公里,因此地核和地幔的界面也被称为古登堡面。



4. 地球的“固液二相性”

在物理学中,有一个长达数百年的争论,即到底是波还是粒子。牛顿认为光是粒子,后来法国科学家托马斯·杨通过双缝干涉实验证明光是一种波。爱因斯坦则提出,光既表现为波,又能表现为粒子,从而解决了这个百年争端。

地球内部状态也是一个百年难题,液态说固态说相继登场,互有胜负。但孰是孰非,则需要地震学的证据做定夺。

地震波在地球内部传播的时候有两种,一种是P波,速度快,在固体和液体中都可以传播,但在液体中速度会变慢;另一种是S波,速度较慢,只能在固体中传播。两种波都可以在地幔中传播,证明地幔是固体,这没问题。但是奥尔德姆发现,地震波的速度在地核处突然下降,而且只留有P波,S波消失了,这就有点不可思议了。

起初,科学家并不能很好地解释这一现象,虽然他们知道S波不能在液体中传播这一特性,但是受到地球固态说的影响,他们不愿意承认地核内是液体。尽管如此,地核的发现者奥尔德姆在1913年还是改变了观点,认为地核是液态的,但古登堡显得更固执。古登堡认为,S波是能够穿过地核的,只不过地球从硅酸盐的地幔变成铁镍合金的地核以后,密度增加但强度下降,导致S波的速度突降,而且它实在是太慢了,慢到在地表几乎观察不到。当然,这种解释太牵强,实际上也是不对的。

对地核状态的确定还要等到另一个人,英国地球物理学家、数学家杰弗里斯的出现。上面提到,杰弗里斯利用计算,根据固态论否定了魏格纳的大陆漂移说。但对更深部的地核,他却有积极的贡献,正式确立了地核的液态说。1926年,他正式发表了一篇文章,通过精细的计算发现,地球的潮汐、刚性、地球晃动以及地震波特点等都可以用一个液态的地核来解释。这一观点很快就被古登堡接受了,随后很快也被地质学界普遍接受。当然,这一观点能够被很快接受的原因,一是杰弗里斯对地核性质的计算,可以与通过其他方法得到的结果相调和;二是当时的理论对S波在地核消失的原因解释太过牵强,不如用液体来解释简洁明了;三是地球物理学权威古登堡对他的支持。所以,到20世纪30年代,地球物理学界大都接受了地核是液体的观点。

地球外层的地壳和地幔是固体,深度大约2900公里,之下是液态的地核,地球壳、幔、核的基本结构框架已经确定。可以说地球既有固体,又有液体,这就是地球的“固液二相性”。但是,故事还没有结束。

5. 内核的故事

虽然杰弗里斯确定了地核的状态,但是用液态的地核并不能解决所有的问题。如果假设地核都是液体,且地震波的速度低于地幔,由于物质性质的不同,地震波将会在核幔边界发生折射,改变传播方向。一个地震发生后,如果地球是均匀的,那么地震波将会传遍地球的每个角落。但是,如果地震波在地核中改变了方向,地球的另一端某一区域内将不会监测到地震波,这个区域被称为“地震影区”。

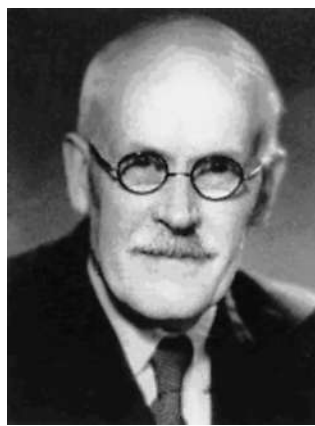
20世纪30年代,积累的地震观测数据越来越多,关于地球内部地震波传播的特征也越来越清晰,有些现象,比如影区,只用一个简单液态核解释不了。在1936年,丹麦女地震学家莱曼就引入了一个内核,直径大约1400公里,性质和液态的外核不一样,地震波在这里将会发生折射,改变路径,进入到理论上的“影区”。随即,古登堡和美国地震学家理查德里克特也在1938年发表论文,支持了这一观点。但是,这次科学家都比较谨慎,只是说地核内部还有一个性质不同的内核,但是不确定是固态还是液态。

对内核状态的研究刚开始都是理论推测。比如,一位美国科学家认为,越深压力越大,物质的熔点也会越高。在内核深处,地球的温度可能已经低于铁的熔点了,因此这里液态铁应该已经变成了固态。同样,在内核,地震波的速度再次突升,也应该与物质状态的变化有关,即由液态变成了固态。但是,这些证据都不那么直接。

确定内核状态的证据来自于地球的“钟声”。我们都听到过钟声,钟声悠扬,可以持续很久,就是因为钟被撞击之后,可以持续震动很长时间,称作自由震荡。地球也是一样的。在每一次大地震后,除了激发传遍全球的地震波外,还可以让地球像钟一样,往复地震动,持续很长时间,而且震动的周期也是有规律的。早在18、19世纪,关于自由震荡的物理数学模型已经建立起来了。到了20世纪中期,借助越来越精细的地震仪,地震学家可以观测到越来越弱的信号。在1952年苏联堪察加半岛9级地震、1960年智利9.5级地震等大地震以后,都观测到了类似的地球自由震荡的信号。得益于完善的震荡理论,地球物理学家可以据此计算地球内部物质的状态。他们发现,地球内核必须是固态,要不然地球的震荡周期将与观测值不符。这一重要结论,是由波兰裔美国科学家杰旺斯基在1971年才最终确定的,这时候距离1936年莱曼发现内核已经过去了35年。

延伸阅读

旧理论的遗民



科学的发展,新旧理论的交替,有时候感觉像是自然而然的事情。但实际上,新理论的萌芽、发展和壮大,多数时候要承受巨大的压力,旧理论的拥护者在新理论出现的时候,往往誓死捍卫,甚至不顾事实。

1926年,35岁英国地球物理学家、数学家杰弗里斯证明了地球的外核是液态的。不过根据他之前发表的论文,可能在1925年,他还是一位固态说的拥护者。但是,基于新的证据,他很快转变态度,承认新理论。

杰弗里斯是一个科学的多面手,在概率论、地球物理学和天文学等方面都做出了重要的贡献。他致力于用数学、物理理论解决地球内部问题,认为深部地球的任何问题都可以通过对地震学数据的计算来解决,是一位地球物理学权威。但是,这样一位成果卓著的科学家,却以固执而出名,尤其是终生顽固地反对板块理论。

杰弗里斯出过一本书,叫《地球:它的起源、历史和组成》,这本书第一版出版于1924年,最后一版即第六版,出版于1976年,中间跨度50余年。大约在1950年之前的各版本,每次都会有较大的更新,能够反映当时的最新进展。但是,在那之后的各版本却越来越保守。比如,在1970年前后,全球范围内的海洋钻探发现了越来越多的支持板块构造理论的证据。但是,他却却在书中对此大肆攻击,斥之为歪理。而且,最后一版出版的时候,人类已经登上了月球,地球与月球、火星的比较研究已经大大深化了我们对地球组成和演化的认识。但如果你看他的书,会发现航天革命就像完全没有发生过,对各种证据全然不见。他就像旧理论的遗民,至死不承认新的科学发现,十分令人遗憾。

本版部分图片/IC Photo