



地核的未解之谜

——*Mind Concert Academic Salon* 学术讨论侧记

王清晨[†]

(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

1 从“天问”到“地问”

“路漫漫，其修远兮，吾将上下而求索”，此诗句出自我国古代爱国主义诗人屈原的《离骚》，既是屈原一生追求理想的写照，也是人类探索科学历程的缩影。2300年前，屈原写下了充满强烈探索精神的《天问》，他问道：“曰遂古之初，谁传道之？上下未形，何由考之？冥昭瞢闇，谁能极之？冯翼惟像，何以识之？”其中既有对宇宙形成演化的好奇与疑问，又有对研究方法的疑惑与思考，令人读后拍案叫绝。

好奇是人类的天性，也是科学研究的源动力，正是人类的好奇心驱动了科学的发展。随着人类社会的不断进步，科学逐渐被融入生产力中，对社会发展起到不可替代的推动作用。许多

关乎人类生活和生存的新学科应运而生，地球科学就是其中之一。

大家都知道，人类生活所需的煤、石油、天然气等化石能源和各类金属、非金属矿产的形成都是板块运动的产物，而岩石圈板块运动的驱动力就来自地核外层。地核的活动形成了强大的地球磁场，有效地保护大气圈免受太阳风的侵蚀，进而保护了我们人类。然而，关于地核至今尚有许多未解之谜。如：地核的温度是多少？地核的成分是什么？地核的性质如何？地核为什么具有复杂的各向异性？地核的电导率和热导率是多少？诸如此类的问题依然困惑着地球科学家们。3月20日，中国科学院地质与地球物理研究所朱日祥院士在 *Mind Concert Academic Salon* 科学沙龙主题报告中发出了这一系列“地问”。

朱日祥院士长期从事地球物理学基础理论和实验研究，在极性转换期间地磁场形态学、地质时期地磁场古强度变化与地球深部过程的相关

2015-03-30收到

[†] email: qcwang@mail.liggcas.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20150411

性、以及沉积盆地古地磁定年等领域取得了系统的创新性的成果。他论证了地磁极性倒转频率与地磁场强度呈负相关性。此外，在国内主持创建了集成岩石磁学、古地磁学和地磁场古强度研究的综合实验室，开拓了新的实验技术和方法，把古地磁学的研究范畴拓展到认识地球内部过程。朱老师的报告妙语连珠，以“地核中的困惑”为题，深入浅出地介绍了关于地核研究的最新成果，引发了大家的浓厚兴趣。

2 地核是怎么发现的？

作为地球科学的一个分支，地球物理学是20世纪迅速崛起的一门年轻学科，物理学得到非常广泛的应用，尤其是地震学的发展，使我们逐渐认识到地球内部的结构与性质。

报告首先介绍了地核的发现过程。现在大家都知道，地核位于2900 km深度之下，地核半径约3480 km，略大于地球半径(约6371 km)的二分之一。地核体积只有地球的16%。地核又分为液态的外核和固态的内核，内核的体积不到地球的1%，约为0.7%。然而，200多年前，人们对这些一无所知，甚至不知道地球的结构是分层的。1797—1798年，英国人 Lord Henry Cavendish 用

非常简单的扭秤测量了地球密度^[1]，得到的数值为 $5.448 \pm 0.033 \text{ g/cm}^3$ ，这跟我们现在用多种方法测量出来的结果(5.516 g/cm^3)相差无几。几十年后，德国人 Emil J. Wiechert 做了个实验^[2]，他在地上抓了一把碎石块，一称，发现碎石块的密度远小于地球的总密度。后来他又在博物馆看到密度极大的铁陨石，受到启发，于1879年提出双层地球模型，他认为地球里面一定有一层密度更高的东西，是个铁镍核。19世纪，人们在研究天然地震时发现，震源会产生在地下传播的体波和沿地表传播的面波，其中体波又分为压缩波(P波)和剪切波(S波)两类，P波总是比S波快，而且，S波不能穿过液体传播。1897年，英国人 Richard Dixon Oldham 首先在地震图上识别出了P波和S波^[3]，拉开了用地震波研究地球内部结构的帷幕。1906年，Oldham从地震记录中的地震相研究中发现，地震波速度随深度增加到一定深处后开始降低，表明地球确实是双层的，内部存在一个致密的液态地核^[3]。1909年，南斯拉夫地震学家 A. Mohorovicic 发现，在地下30—60 km深处存在一个地震波速度突增界面，这个界面就是地壳与地幔的界面^[4]，后人以 Mohorovicic 的名字命名，称为莫霍(Moho)面。再后来，德国人 B. Gutenberg 于1914年公布了一个著名的计算结果，指出地幔与地核的界面位于地下2900 km深处^[5]。至此，确立了地球的“地壳—地幔—地核”三层结构模型。

最初，人们认为地核是液态的，地震波的剪切波不能穿过，所以地球表面有一个大的剪切波影子区。由于折射关系，压缩波也有一个影子区。1936年，丹麦女科学家 Inge Lehmann 在压缩波影子区中发现了新的震相^[6]，她提出，这一定是地核中另一个介质层面的反射，从而，她提出地核具有双层结构，外核为液态，内核为固态。在 Lehmann 之后，双层地核模型成了公认的模式。

液态外地核的活动会在核幔边界形成热地幔柱，从2900 km深处一直上升到地表，造成了一系列火山活动，驱动着板块运动。研究表明，地球的磁场是在地球诞生之初的3亿年中形成的，

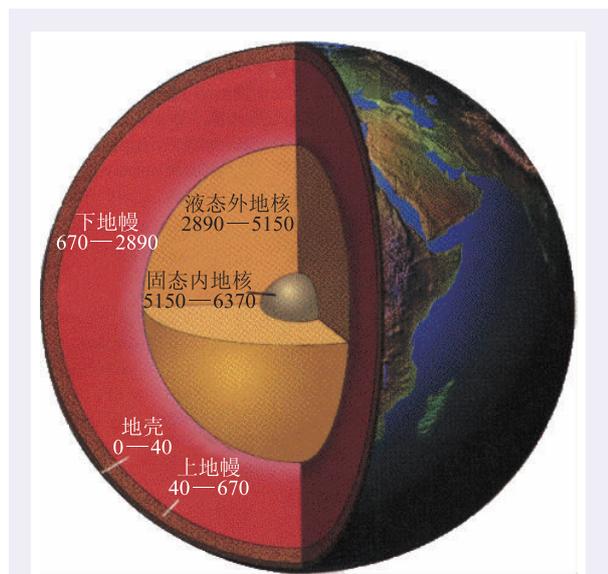


图1 地球内部结构(图中数字的单位均为 km)

但磁场较弱，大概在35亿年前，地球有了内核，磁场变强了，成为了最富有生命的一个星球。

3 地核有多热？

地球内部的热状态是认识地球本体和研究关乎人类生存的资源、能源、灾害及环境变化的基本地球物理场之一。在原始地球分异过程中，温度起着决定性作用。甚至可以说，整个地球的发展史就是地球的热演化史。大约在1887年，著名的英国物理学家 Lord Kelvin 依据地球表面附近的温度梯度推算出，地球的年龄约为4亿年。他还计算过，如果没有额外的热源，再过几百万年地球就会冷下来^[7]。Kelvin的计算显然与实际有很大出入。根据现代的地球科学研究，地球的年龄为46亿年，并且还会有50亿年的寿命。那么，地核究竟有多热？朱老师针对这个问题介绍了近年来国际上关于地核温度的研究进展。

通常都假定地核是由铁组成的，既然外地核是液体铁，内地核是固态铁，那么，内、外地核界面处的温度就应该是那里压力下铁的熔点。由于大家公认内、外核界面的压力约为330 GPa，问题似乎变得简单了，只要知道铁在330 GPa压力条件下的熔点就行了。于是科学家们“八仙过海，各显神通”，有的进行实验室测定，或用金刚石压砧技术进行静态实验，或用冲击波技术进行动力学实验，有的则进行理论计算，或采用密度泛函理论计算，或采用经典分子动力学理论计算。结果，大家给出了大相径庭的数值。

Boehler于1993年在*Nature*发表了他进行金刚石压砧实验的结果^[8]，指出内、外核界面的温度接近5000 K，Laio在2000年采用经典分子动力学理论进行计算^[9]，得到的结果与Boehler金刚石压砧工作吻合得很好，指示着一个较低的地核温度，其成果发表在*Science*上。然而，Belonoshko等于2000年采用经典分子动力学理论计算的结果为6500 K^[10]，在200—300 GPa压力下进行的冲击波实验结果^[11]与Belonoshko等的计算十分接近，比Boehler等的结果高出1500 K。2013年，Anzel-

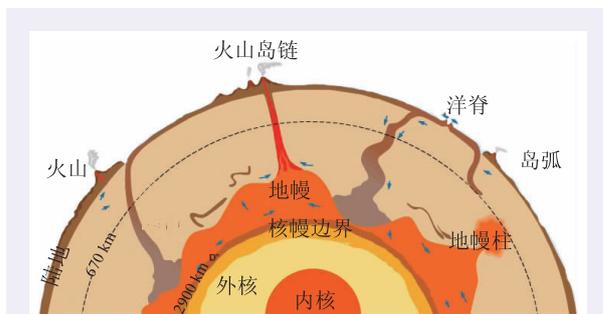


图2 流体外核的存在，导致地球是一个复杂的、各向异性的、充满生机的球体

lini等在*Science*发表论文^[12]，他们在金刚石压砧工作中采用新的熔化判别标志，指出地核温度高于6000 K，支持地核温度较高的结论。

朱老师指出，千万不要认为这一研究已经完成了，恰恰相反，问题还很多。大家目前的工作都假定地核是由纯铁组成的，上述工作所确定的只是纯铁在地核中的熔化温度，而地核实际上并不是纯铁的，杂质的存在将会降低纯铁的熔化温度，不同杂质对纯铁的熔化温度的影响也不一样。因此，我们要解决这个问题，还需要知道地核的确切成分。

4 地核里有什么？

报告还指出，综合利用地震波和地球自由振荡等观测数据，我们已经初步了解了地球内部速度和密度的分布情况，并可进一步推导出地球内部不同圈层的压强、重力加速度等参数。这些参数将有助于我们推测地核的成分。我们今天已经知道，外地核的密度为10—12 g/cm³，内地核的密度约为13 g/cm³。Birch在20世纪40—50年代就发现，无论是外地核还是内地核，密度都小于纯铁，从而Birch提出地核密度缺失和地核中有轻元素的概念^[13]，即地核中必须含有比铁轻的元素。自那以后，对地核成分的研究一直是地球深度研究的热点。

首先，地核中轻元素的存在会改变内外核边界的温度，从而影响地核的热结构和内核生长历史。从二元系相图上可以知道，轻元素的存在会

降低内外核边界的温度，也导致内核更晚结晶。

其次，地核中轻元素的存在为地核发电机提供了重要的能源。大家都知道，地球磁场已经工作了数十亿年。驱动地磁场工作的地核发电机能量源一直是重点研究对象，到目前为止，人们已经提出了4种驱动源。这就是：(1)地核冷却、内核结晶和潜热释放；(2)轨道进动；(3)放射性元素；(4)轻元素释放。

再有，地核中轻元素的种类和含量还与地球形成历史密切相关，通过对地核轻元素成分和含量的研究，可以探索地球早期形成历史。我们知道地球早期有大撞击和岩浆洋事件，其中最后一次大撞击形成了月球，在地球表面造成了广泛的岩浆分布。地核中氧的含量能够指示岩浆洋的深度，因为氧只有在高压下才溶于铁，如果地核含有大量氧，就表示当时的岩浆洋比较深，当然也表示当时核幔分异的环境是偏氧化的。岩浆洋深度和氧化还原条件的不同决定了大量元素在地核和地幔之间的分配，从而影响到地核和地幔的成分，并进而影响到从地幔分异出来的地壳的成分。

那么，地核中到底有没有氧呢？很遗憾，到今天为止，我们人类钻的最深的钻井只有12 km，

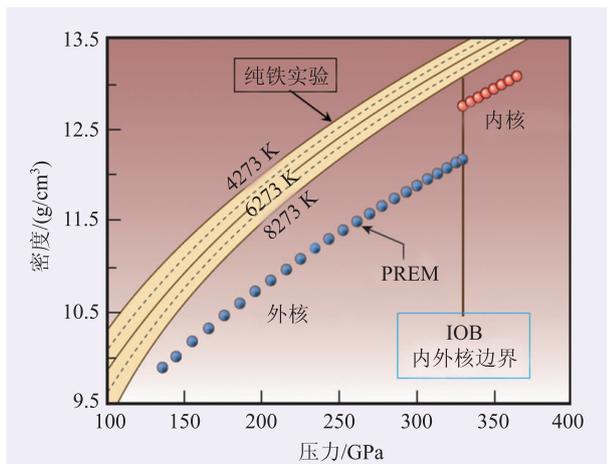


图3 纯铁试验的密度和内外核的密度与压力的关系图^[14]。上面浅黄色条带表示在不同温度下，纯铁的密度随压力的变化情况。下面圆点表示由地球物理方法所获得的内核和外核的密度随压力的变化情况。Birch在上世纪40—50年代发现地核密度小于纯铁，从而提出地核密度缺失和地核轻元素概念，即地核中必须含有比铁轻的元素

没办法取到数千千米之下地核的样品去直接进行化学分析。我们能够采用的确定地核成分的方法是地震学+矿物物理的方法，就是说，只能通过矿物物理确定不同成分物质的密度和波速，然后与地核相应的值进行比较，从而确定地核成分。不过，由于可选成分太多，各种组合都有可能拟合地核值，使得这种确定地核成分的方法遇到了很大挑战。

Huang 等于2011年在 *Nature* 上发表了他们的研究成果^[15]。他们把地核的密度和声速与各种成分不同的Fe-O-S 系统进行对比，发现只有含氧少的系统才能够与地核值匹配，由此，他们认为地核中氧含量很少。然而，Badro 等在2014年利用地震学给出的核幔边界密度和声速、内核边界密度和声速作为约束条件，采用密度泛函理论的第一性原理计算，却发现地核中氧是不可或缺的，而且含量可以很大^[16]。这显然与实验结果有很大的矛盾。

令人困惑的是，Badro 等计算出的密度和波速与实验得到的数值在误差范围内都有很好的一致性，但关于地核中氧含量的结论却截然相反。看来，这可能与许多的细节处理有关，包括所采用的假设，数据处理方法，采用的状态方程等等。总之，地核的含氧量仍然是未解之谜。

5 更多的地核之谜

朱老师在报告中指出，实际上，地核中还存在诸多未解之谜。例如：

(1) 通过地震波的研究表明，内核具有高泊松比和低剪切波速。内核的泊松比为0.44，类似于橡胶和铅，而其剪切波速只有3 km/s，比铁的剪切波速(5 km/s)低了40%。这是什么原因造成的？2007年，Belonoshko通过经典分子动力学研究认为，内核的低剪切波速是由晶体缺陷造成的，该成果发表在 *Science* 上^[17]。Martorell 等于2013年采用第一性原理分子动力学方法进行研究，认为低剪切波速是由强烈的熔化前效应造成的，其成果也发表在 *Science* 上^[18]。Prescher 等最近发表在 *Na-*

ture Geoscience 上的实验工作认为，碳元素的加入会形成 Fe_7C_3 ，而 Fe_7C_3 就具有高泊松比，这会导致内核的高泊松比，同时也暗示地核中含有大量的碳^[19]。显然，这造成了与地球化学和宇宙化学研究结果的新矛盾！

(2) 比地核具有低剪切波速和高泊松比更令人迷惑的是，地核具有极其复杂的各向异性和不均匀性。观测表明，内地核和外地核都对地震波传播方向和速度存在明显的各向异性。而且，无论是内地核还是外地核，这些各向异性全都分成东西两个半球，西半球的各向异性比东半球明显得多。对此，Alboussiere 等在 2010 年提出了一个天才的解释^[20]。他们认为，内核在一边熔化，一边固结，因而产生内核平移，并在表面形成均一层。他们的模型很好地解释了地震学所观察到的多种现象。Alboussiere 等的文章在 *Nature* 发表后得到了积极回应。Olson 和 Deguen 于 2012 年在 *Nature Geoscience* 上发表论文^[21]，说我们同意你们的解释，而且，我们还要告诉大家为什么地磁极和地球自转轴总是不重合。照理说作为一个对流体，二者应该重合在一起的，就是由于内核一边融化一边固结，才造成了不重合。最近，Wang 等刚刚在 *Nature Geoscience* 上发表论文^[22]，他们的最新结果指出，内核并不是均一的，还可以再分成内内核和外内核，内内核的各向异性与外内核完全不一样。这可真是“一波未平，一波又起”，要解释地核的这些复杂现象将是更大的挑战。

(3) 大家都知道外核流体运动产生了地磁场，而外核温度和压力条件下铁的电导率和热导率是地核发电机工作机制的决定性因素。那么，地核的电导率和热导率是多少？由于现在还无法直接测量如此高温高压下的数值，只能采用理论计算的方法。Pozzo 等于 2012 年通过密度泛函方法计算了铁在地核条件下的热导率和电导率^[23]，所给出的数值比前人的结果大很多。他们指出，地核发电机要工作，要么核幔边界的热通量需达到 15 TW，要么地核放射热源需达到 3 pWkg^{-1} 。但是，我们知道，核幔界面热通量是地表热流通

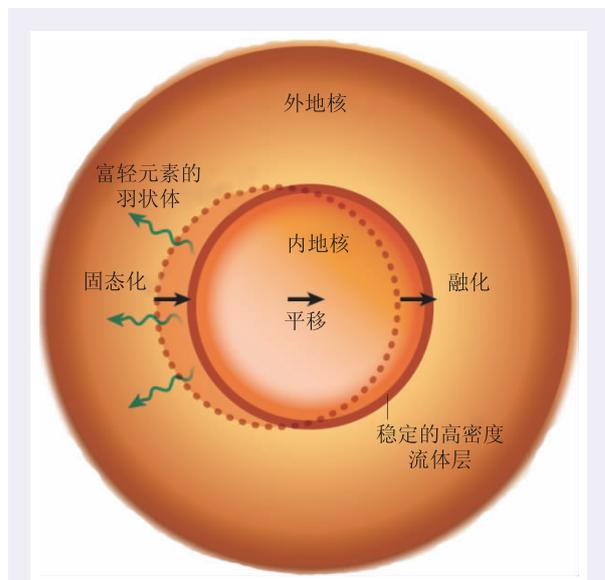


图4 Alboussiere 在 2010 年对内核的各向异性和不均匀性提出了一个天才解释^[20]。他认为内核在一边熔化，一边固结，产生内核平移，并在表面形成均一层，很好地解释了地震学所观察到的多种现象

量减去地壳放射性生热的值，只有 6 TW 左右，而作为放射性热源的钾是亲石元素，在地核内应该很少。Pozzo 等的工作给认识地核发电机的工作机制造成极大的困惑。最近，Zhang 等采用密度泛函加动态平均场方法，考虑了电子相互关联作用，计算了电子与电子间散射引起的电阻率，给出了一个低的热导率^[24]。该最新成果发表在 *Nature* 上，使得地核发电机的工作机制重回过去的认识，即通过外核流体对流就能工作，不需要额外的放射性热源，核幔边界热流值也与地球物理估算值一致。

朱老师在报告最后总结说，关于地核的困惑主要集中在三个方面：(1) 地核的物质组成是什么？(2) 该组成物质在地核高温高压下的晶体结构、各种物理性质是什么样的？(3) 具有该物理性质的物质在地球内部是如何运动的？真可谓，“上天不易，入地更难”。我国科学家“上天”已经取得了很好的成绩，揭开“地内”的秘密同样是我们的梦想。但这对地球科学家真是有点难啊！物理学在地核的探索研究中已经得到非常广泛的应用，它的每一项进展，不管是实验技术，还是理论计算，都将极大地推动我们对地核的认

识。最后，他热切地期待跨界交流与合作，希望大家能给些好建议，提高人类对地核的认知水平。

6 实践出真知

朱日祥院士的报告引发了与会专家、学者们的热烈讨论。大家时而竞相争先诘问，时而三五成群热议，讨论内容既包括了对地球形成演化的好奇与疑问，又包括了对科学研究方法的疑惑与思考。探讨中涉及最多的内容是“实践出真知”，要点如下：

(1) 关于地球内部的许多认识都是来自陨石的、天文的、地磁的资料，很多资料都是货真价实的，都是真实的数据、第一性数据，剩下有两种东西虚无缥缈，一个是温度，一个是压力。如果这两个基本状态参数只是靠一堆数学方程去套、去算，尽管能在 *Nature*, *Science* 上发表一些文章，但真理在哪儿？按照各种数学逻辑推出来的结论是数学家认为的真理，是不是物理学家的真理呢？物理学家和材料学家看到的真理，可能跟数学家的真理完全不是一回事。按照实践是检验真理的标准，什么东西看着了或者测着了，这才是真理的标准。关于等大球最紧密堆积问题，从理论上计算堆密度应该是 74.05%，但在实验室模拟时只能做到 64%，有时候到 60% 就上不去了。材料学家认为 60%—64% 就是真理。如果说实践是检验真理的唯一标准，那数学的唯一标准在哪呢？数学的标准和材料学的标准哪个是标准呢？

(2) 有一种理论和实验总结规律有关，还有一种理论是所谓第一性原理，如薛定谔方程。薛定谔方程是经过很多次考验以后才被相信的，在解薛定谔方程的时候，不做任何先行假定，这才是第一性原理。刚才说的那个密度泛函，考虑的是电子—电子相互作用，如果考虑电子—声子相互作用，结果就会不一样了。多考虑一个作用，就增加一个参数，他可以发表文章，但从科学发展角度看就不太值钱，只能参考，不要迷信。要把

现在所有的有关实验，包括逼真实验等等，搞得很清楚，然后去总结唯象规律。重要的是，第一掌握实验，第二搞唯象，第三把所有的理论联立，那样就会有更大贡献。

(3) 现在号称是第一性原理计算的，精度远远到不了做定量比较的程度。做定性的、趋势性的比较还是很重要的。趋势可能是对的，现在计算还到不了定量化程度，这不是说谁算错了，而是因为如果对量子力学原始写法不做简化，就解不了这个方程，但一简化，就必然会引入误差，而且，这个误差是无法知道的，对于原始的薛定谔方程，现在还解不了。

(4) 很多时候观测数据很重要，如果没有新的观测手段，多数研究就走不下去了。粒子物理研究现在也发展到了这个阶段。目前正在设计一个中微子实验，观测太阳中微子，主要目的是通过实验提供一些太阳模型。地球物理同样需要新的实验手段，得到新的第一手数据，才会有本质上的进步。如果还是和原来一样，就像我们的中医，只是靠号脉，而不增加新的诊疗手段，则很难提高水平。现在的中医院也有 X 光和 CT 检查了，这就是新中医，它进步了。

(5) 观测实验和理论计算哪个更重要？科学实验在认识中的作用非常重要，必须借助于实验，才能深入揭示自然的奥秘。实际上，进行计算所依据的理论也是根据长期观察总结出的规律性认识，已经经过了实践的检验。进行理论计算的过程应该是一种帮助我们梳理证据链的过程。因此，一般情况下，理论计算和实验观测往往具有异曲同工的作用，许多理论计算和实验观测会得出相同的结论就是明证。

(6) 把观测和实验结果总结上升为理论，这中间有很长的路要走。在研究地核温度的金刚石压砧实验中，Anzellini 等之所以得出和 Boehler 完全不同的结论^[8, 12]，是因为他们采用了新的熔化判别标志，想法不同了，结论也就不同了。面对同样的观测和实验结果，不同的人会给出不同的解释和结论，这种实例并不乏见，尤其当证据链不完整时，更是如此。面对罪犯留下的蛛丝马迹，

菜鸟侦探往往无功而返，福尔摩斯却总能使罪犯落网。从梳理真凭实据到得出科学理论的过程值得大家深思。

总之，正如大家在讨论中所说，如果没有新的观测手段，很多前沿科学的研究就会步履艰难。近代自然科学的重要特征就是实验和科学的思维方法，这两者是近代自然科学区别于中世纪经院科学的关键所在。对理论的创新和科学的进步，历史自有公论。

(Mind Concert Academic Salon 是“中关村科学沙龙”系列活动之一，由《物理》编辑部主办，得到了中国科学院科学传播局的大力支持。本期沙龙由高原宁教授主持，参加成员有：陈小龙研究员、曹则贤研究员、董宇辉研究员、傅媛燕教授、方忠研究员、郭雷院士、高原宁教授、韩秀峰研究员、黄学杰研究员、何玉梅研究员、姬扬研究员、李明研究员、林杨挺研究员、欧阳颀院士、郝秀书研究员、王赤研究员、王晋军教授、王清晨研究员、武向平院士、吴忠良研究员、翁羽翔研究员、魏勇研究员、杨国桢院士、杨元喜院士、叶大年院士、朱日祥院士、张毅刚研究员)

参考文献

- [1] Cavendish L H. Phil. Trans. Royal Soc. London, 1798, 88:469
- [2] Wiechert E J. Nachr. K. Ges. Wiss. Goettingen, Math-Kl., 1897, 221
- [3] Oldham R D. Q. T. Geol. Soc. London, 1906, 62:459
- [4] Mohorovicic A. Yearly report of the Zagreb meteorological observatory for the year 1909. 1910
- [5] Gutenberg B. Physics of the Earth's Interior. New York: Academic Press, 1959
- [6] Lehmann I. Publ. Int. Geod. Geophys. Union, Assoc. Seismol., Ser. A, Trav. Sci., 1936, 14:87
- [7] Burchfield J D. Lord Kelvin and the Age of the Earth. University of Chicago Press, 1990
- [8] Boehler R. Nature, 1993, 363:534
- [9] Laio A, Bernard S, Chiarotti G L *et al.* Science, 2000, 287: 1027
- [10] Belonoshko A B, Ahuja R, Johansson B. Phys. Rev. Lett., 2000, 84:3638
- [11] Nguyen J H, Holmes N C. Nature, 2004, 427:339
- [12] Anzellini S, Dewaele A, Mezouar M *et al.* Science, 2013, 340:464
- [13] Birch F. J. Geophys. Res., 1952, 57:227
- [14] Fiquet G, Guyot F, Badro J. Elements, 2008, 4:177
- [15] Huang H J, Fei Y W, Cai L C *et al.* Nature, 2011, 479:513
- [16] Badro J, Cote A S, Brodholt J P. PNAS, 2014, 111:7542
- [17] Belonoshko A B, Skorodumova N V, Davis S *et al.* Science, 2007, 316:1603
- [18] Martorell B, Vocadlo L, Brodholt J *et al.* Science, 2013, 342:466
- [19] Prescher C, Dubrovinsky L, Bykova E *et al.* Nature Geoscience, 2015, 8:220
- [20] Alboussiere T, Deguen R, Melzani M. Nature, 2010, 466:744
- [21] Olson P, Deguen R. Nature Geoscience, 2012, 5:565
- [22] Wang T, Song X D, Xia H H. Nature Geoscience, 2015, 8:224
- [23] Pozzo M, Davies C, Gubbins D *et al.* Nature, 2012, 485:355
- [24] Zhang P, Cohen R E, Haule K. Nature, 2015, 517:605



微弱信号检测

半个世纪的骄傲

Model 7230
数字锁相放大器

仪器小巧
成本优胜



Model 5184
超低噪声前置放大器



生产商：阿美特克商贸(上海)有限公司北京分公司
电话：010-85262111-10 传真：010-85262141-10
Email: info@ametek.cn
网址: www.signalrecovery.com.cn

中国代理商：北京三尼阳光科技发展有限公司
电话：010-65202180/81 传真：010-65202182
Email: sales@sunnytek.net
网址: www.sunnytek.net