

地震：一个惊天大案的七条线索* 与物理学家谈地震预报

吴忠良[†]

(中国地震局地球物理研究所 北京 100081)

2015—07—27收到

[†] email:wuzl@cea-igp.ac.cn

DOI :10.7693/wl20150810

1 引言 从地下核试验到黑洞

一次地下核试验也可以看成是一次地震。以爆心为中心，在“一定范围”之外，地球介质中地震波的传播、衰减等过程，可以用连续介质中的声波传播理论很好地理解。这个“范围”的尺度，一般称为“弹性半径”。换句话说，“弹性半径”之外的问题，现在基本上不用物理学家操心，地震学家已经可以做得很好。地震学给出的关于核试验的一些信息，可以“落实”到“弹性半径”上的一些性质的描述，例如爆炸当量有多大。但在“弹性半径”里面的物理过程，地震学是无能为力的。例如，现在很难找到一个可信的地震学判据，来判断一次爆炸试验究竟是核爆炸，还是当量很大的化学爆炸。解决这个问题，只能靠放射性核素测量等其他的手段。

天然地震的情况与此类似，只是一次地震不能被看成是一个球形的源，而更像是一个面状分布的源，即地质学家所说的“地震断层面”。如果围绕这个面状分布的源也定义一个“弹性范围”的话，那么可以说在此“弹性范围”外面的地震现象，从地震波的辐射到地震波的反射、折射、散射、衰减，再到地震波引起的地面运动，再到地面运动引起的工程结构破坏等，都至少在理论上有很好的理解(当然，在实际操作层面把这种理解落实，也绝不是简单的事情)。

这种理论上的理解，可以集中表达成地震学的“第一原理”^[1]：

$$\mathbf{u} = \mathbf{G} * \mathbf{S} \quad ,$$

* *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。本期沙龙由欧阳颀院士主持，参加成员有：曹则贤研究员、方忠研究员、高原宁研究员、韩秀峰研究员、姜晓明研究员、姬扬研究员、李丽研究员、王赤研究员、吴忠良研究员、袁亚湘院士、朱日祥院士

其中 \mathbf{u} 是地震记录， \mathbf{G} 是格林函数， $*$ 表示卷积，格林函数是由地球介质的性质决定的，地震记录是由地震观测设施记录的(图1)。“地震观测设施”倒不一定非要地震仪不可。现代地震学对例如GPS记录、次声记录等能够记录到地震信号的“其他的”观测手段，甚至对公众的有感地震因特网信息报告，也都有非常好的包容性。

震源函数 \mathbf{S} 在这里实际上起到了边界条件的作用。它相当于在“弹性范围”的边界上地震学所能得到的关于地震震源的性质的一些描述。这种描述包括地震的“强度”、地震震源的“方向性”特征、地震的“震源时间函数”，等等。这些性质对减灾救灾很有用。

因此，一定意义上说，这里和物理学家谈的地震的问题，有点像黑洞的物理问题。在“弹性视界”外面的事情，就不麻烦物理学家了。但在“弹性视界”里面的事情，现在的知识并不多。所以第一次见面时我说“我是地震局地球物理研究所的——如果地震有物理的话”，大家都笑了。的确，如果看“弹性视界”之外的事情，那么地震不但有物理，而且做得不错，像现在大家知道的地震早期预警，核试验地震监测，



图1 这是在位于北京西郊白家疃的北京国家地球观测台(NEOBJI)的山洞里，可以说，这是地震台网的“触角”。在这个安静的山洞里，安放地震传感器，记录来自遥远的地震所辐射的穿过地球内部的地震波。您正在看的筒状的小东西(图中左下角)，就是三分量一体的宽频带地震传感器。地震观测对环境的要求很高，在山洞里放置传感器是一种办法，在深井里放置传感器是另一种方法

用地震波探测地球内部找矿找油等等，都属于这个方面。但如果看“弹性视界”之内的事情，那就不好说了。地震预报的难，恐怕就难在这里。

物理学家有个好习惯，就是落实不到观测或实验的证据，一般不作为思考的基点。因此跟物理学家谈地震问题，一个最方便的切入点，就是现在有哪些可以成为证据的观测，以及这些观测作为证据还有什么问题。如果说地震预报问题是一个“惊天大案”的话（想想地震给人类社会的冲击，把地震比作一个“恐怖组织”恐怕也没什么不妥），那么，我们关于这一“惊天大案”现在有哪些重要线索呢？

2 第一条线索 浅源地震与深源地震

前面说过，地震学可以给出“弹性视界”上的很多有用的关于地震震源的描述，地震业内称之为“地震参数”。每次地震后，尽可能快、尽可能准确地测定这些参数，从而最大限度地帮助进行救灾决策，这一直是地震机构努力在做的事情(图2)。

但是，这些参数似乎有一个很大的问题。我们知道，地震既可以发生在地下几千米、十几千米的深度，也可以发生在地下600 km以上的深度。可以想象的是，发生在几千米深度处的地震，和发生在600 km以上深度的地震，它们所处的温度、压力环境是十分不同的，地震发生的原因和过程都不可能是相同的。长期以来，一些地震学家一直在探讨，从现在地震学所能测到的“地震参数”的角度(这里指的是，由前面S项给出的“微观的”参数)，浅源地震与深源地震有什么不同。探讨的结果是，迄今还找不出显著的差别^[2]。

这说明我们现有的用来约束地震成因模型的测量，是不够的；甚至我们关于地震成因的理论本身，也是不完整的。

而为什么地震的深度止于670 km左右，为什么有些地方在中源地震和深源地震之间有一个深度范围没有地震，这些数字本身就是值得重视的线索。

3 第二条线索 时间范围与空间范围

物理学家会讲：不对呀。你们不是有“弹性回跳模型”吗？不是有“板块构造学说”吗？

不错，从一个比较大的空间范围看，地震的过程就是，由板块构造运动提供能量，然后以某种方式通过地震释放掉这些能量。因此全球地震的分布是有规



图2 (a)地震之后，利用传感器记录到、传输到数据中心的地震信号，地震部门可以很快地给出关于地震震源的描述，这些信息对减轻地震灾害十分重要

(b)网页截屏 (<http://www.igp-cea.ac.cn>)。地震之后的在线地震参数快速测定信息

律的，主要分布在板块边界带上。从一个比较长的时间尺度看，地震的过程就是，在“地震断层带”上形变积累起来，然后以某种方式通过地震释放掉这些形变。因此地质学家讲，如果断层的哪个部位长时间没有活动了，那么它发生下一次地震的危险性就增加了。

问题在于这“某种方式”。什么“方式”呢？并不清楚。就是说，如果我们把眼光放到千年时间尺度的话，那么可以说绝大多数(当然不是所有)的地震都是可预报的。可是，那解决不了我们的现实问题。

就是说，在一定时间尺度之下的问题，我们现在并不清楚。而这个时间尺度，恐怕是和我们前面提到的那个“弹性视界”的空间尺度有关的。

4 第三条线索 地震前兆困境

按照一般的想象，既然地震的发生可以被认为是一个“地震断层”或者“候选地震断层”上形变增加，然后形变增加到一定程度的时候地震断层最终发生破裂的过程，那么在这种形变达到一定程度的时候，总可以看到一些“现象”。你用力掰一根竹棍，直到它断，就是这个物理过程。这个想法，正是1960年代地震预报研究刚刚开始起步时的想法。

但是几十年下来，得到一个强的结论，一个弱的结论。强的结论是，迄今报道和研究的所有“地震前兆”，几乎都没有达到预期的效果(地震学倒是发展了一套工具，可以严格地检验一个“前兆”是不是真正有效)^[3,4]。弱的结论是，似乎存在这样的规律性，时间尺度越短，预测能力就越低。还有一个值得注意的、也许可以引起物理学家一些联想的线索就是似乎是短时间尺度的“前兆”现象，它的空间范围就越大。

你也许会说，这条线索严格说来并不能称为一条“像样的”线索。我却觉得，也不一定这么理解。想想当年测“以太”的运动，怎么测怎么别扭。但你能说那些结果是没用的吗？

5 第四条线索 地震释放的能量与地震波的辐射能量

前面提到的地震参数，尽管存在一些实质性的缺陷(借用黑洞物理的语言，从地震参数的角度看，似乎“深震无毛”)，但还是有一个极其重要的结果。这就是，一次地震通过“弹性回跳”所释放的能量，只有不大的比例是通过地震波辐射出去的。

为什么呢？地震的震源，并不是一个“点”。所以在地震学文献中经常看到“点源”的描述，是因为在那里，地震的大小远小于所讨论的地震波的特征波长；或者，尽管地震本身是有大小的，但人们只关注地震“起始”的那个“点”；或者，尽管地震是有大小的，但人们描述的是地震的“重心”——地震学中讨论的常常是“矩心”。新的“地震断层面”形成，需要能量；克服“地震断层面”上的“摩擦”，也需要能量。

地震问题复杂，复杂在什么地方呢？新的“地震断层面”形成或者“地震断层面”扩展，是一个非线性过程；“地震断层面”上的“摩擦”，是一种非线性的行为。

这里讲的“摩擦”^[5,6]，既包括普通物理中的机械摩擦，也包括其他的与此有关的现象。实验室实验的结果和诱发地震的结果启发地震学家，当我们把水引入地震断层面的时候，这种“幽灵似”的物质(你知道，水大概是我们身边性质最复杂的物质了)在地震过程中的作用，就变得极其耐人寻味。

地震波辐射的能量，有办法可以测出来(当然，也不容易)。可是，另两部分能量，得到直接的观测证据，却不是那么容易的事情。所以你会理解，为什么地震学家要在发生过地震的断层上打钻——他们想从地震的“发案现场”得到一些直接的线索(图3)。想想

检查癌症的方法，你就不会再用讥讽的语调，说这么做是“一孔之见”了吧。

说到这儿，有一个概念也许不得不提一下：不仅地震不是一个点，而且“地震断层面”也不是一个面。实际情况是，“地震断层面”是有结构的(有点像分形)，围绕地震断层面的则是一个宽度约为千米量级的“地震断层带”。现代地震学有办法实地测量“地震断层带”的宽度、结构，以及地震发生之后断层带的“愈合”过程(图4)。

再强调一下，“地震波辐射的能量只是地震释放的能量的一部分”这个概念，对目前的工作也许是重要的。因为近年来地震观测领域的一个重要发现是，在辐射地震波的“看得见”的地震之外，还存在一类几乎不辐射(我们原来熟悉的)地震波的“地震”。这类“看不见”的地震，虽早在20世纪中叶就有理论讨论，但落实为可靠而系统的观测，却只是世纪之交的事情^[7]。“看不见”的地震与“可见的”地震之间如何“相互影响”，这个问题对地震预报的重要性是显而易见的。现在还无法预料，这一新的研究领域是不是会有X射线天文学之于宇宙学研究的效果。

6 第五条线索：“能 还是不能 这是个问题”

在北京大学上统计物理课的时候，黄灼教授说过一句特别有趣的话，她说热力学和统计物理是一种“敲门砖”性质的工具，就是对一个物理问题实在没办法的时候，不妨考虑一下热力学和统计物理。

想想也是这样。如果想一想地球的深部，我们也许永远没有办法对其进行直接的测量(图5)，那么不从热力学和统计物理的角度提问题，还真是没有更好的办法。同时，热力学和统计物理是不是也能在一定程度上帮助我们哪怕是暂时缓解一下“弹性视界”的困难。

这个问题可表述为Keilis-Borok问题^[8](V. I. Keilis-Borok是地震预测预报研究的积极的推动者之一)。他说，如果地球是一种“层次性”的结构：板块、构造块体、断层带……，那么这种“层次性”的结构会产生什么样的地震活动呢？进一步，为了了解这种地震活动的规律，我们需要把握这个系统中的哪些“关键”参数呢？再进一步，我们知道人类对地球的了解永远是有限的，那么靠这种有限的了解，我们究竟能在地震预报这个方向上走多远呢？

这问题提得一点都不“玄妙”。既然没有任何一位物理学家认为必须解出约 $N \times 10^{23}$ 个方程组成的方程

组,才能预测一杯水是不是会结冰,我们为什么一定要在“地球内部的不可入性”(据说这最初是古希腊人的说法)上过于纠结呢?

实际上,前面提到的“摩擦函数”^[5,6]就是类似于温度、压力的东西。自从1990年代提出“速率—状态摩擦函数”之后,这方面的研究便成了突破“弹性视界”问题的一个重点。如果把地震断层作为一个“系统”,把断层的应力状态和边界条件作为“输入”,把地震断层的“反应”(可用滑动位移和滑动速率描述)作为“输出”,那么“摩擦函数”就是地震断层的“系统函数”,它依赖于滑动位移和速率,因此带有“反馈”的性质。显然,“摩擦函数”是一个像一些热力学函数那样的“宏观的”函数,它可以给出系统的“相图”和“临界点”的位置,只是这里的控制参数不是温度和压力,而是地震断层的一些物理参数,或者确切地说,一些物理参数的组合。

基于对地球的极为有限的观测,究竟能在地震的预测上走多远,这是任何一个严肃的地震物理理论都无法回避的问题。这个问题之基本、之深刻,已在很大程度上超越了地震研究本身。遗憾的是,随着 Keilis-Borok (和前面所说的“地震学第一原理”的提出者 L. Knopoff)等“大师级”专家的去世,这种入木三分的思考和力透纸背的讨论,一时颇显疲软和后继乏人。实际上,物理学应用于地震问题的研究,更为实质性的贡献,与其说是在“术”的层面,不如说是在“道”的层面。仅从这个意义上也许就不得不承认,世纪之交关于地震的可预报性问题的一些工作和思考,尽管问题很多,且颇多误读,却具有迄今仍未被超越的高度。

7 第六条线索：“自组织临界性”与“间歇式临界性”

地震学中早就知道 Gutenberg—Richter 定律^[9],其中 C. F. Richter 就是广为(并不确切地)使用的“里氏震级”的说法中的那个“里”(实际情况是,震级概念确实是 Richter 引入的,但现在使用的震级并不都是原来的“里氏震级”)。GR 定律写成物理学家感到“亲切”的形式,就是地震的辐射能量 E 和辐射能量为 E 的地震的频度 N 之间的关系,可以表示为^[10]

$$N \sim E^{-B},$$

其中 B 是一个常数。这个标度律 (scaling law) 使一些物理学家提出,地震是否具有“自组织临界性”(self-organized criticality, SOC),而上述关系是一种“ $1/f$ 噪



图3 2008年5月12日汶川8.0级大地震后,科学家在地震断层带上实施科学钻探,通过在断层带上采集岩心和随钻进行的各项物理测量,理解地震发生时在断层上究竟发生了什么。如图是在龙门山断裂带中北段实施的汶川科钻三号孔的现场作业情况



图4 2001年11月14日昆仑山口西8.1级大地震后,地震学家在地震断层带(如图中左上角线状的带所示,注意它并不是像教科书上画的那样是一条简单的直线)上通过观测断层带的“围陷波”来研究断层的“愈合”过程



图5 地球物理学家的困难是,完全没有办法跑到地球的里面去,像这样直接地看它到底是怎么回事……

声”的反映^[11]。

不过，上面的标度律只对一定能量范围的地震成立，对于更大的地震，这个幂律关系出现偏离。考虑这种偏离后，另一些物理学背景的地震学家和对地震感兴趣的物理学家通过“熵函数”等，认为地震问题并不是一个“自组织临界性”问题，而是一种“间歇式临界性”(intermittent criticality)问题^[12]。

无论是“自组织临界性”的想法还是“间歇式临界性”的想法，都提供了两个思考地震问题的新的可能。一个可能是，能不能充分利用与临界现象有关的一些“普适性质”，从那些原来地震学家根本就不认为是地震模型的“玩具式”模型中得到一些启发。这方面比较“经典”的是“弹簧—滑块”模型^[13]，比较“好玩”的可能是“元胞自动机”(CA)模型，比较“时尚”的则应该是“数值地震预报”模型。无论是哪种，模型中最具实质性物理意义的无非是三个内容。借用 Ising 模型的语言，这三个内容分别是：外界驱动，相当于“外场”；不同单元之间的相互影响，相当于“相互作用项”；作为能量释放过程的“地震”，相当于“相变”。

另一个可能是，能不能充分利用与临界现象有关的一些“普适性质”，克服地震问题中一些观测根本无法实现的困难。因此物理领域中的一些分析和预测方法，比如“图像信息学”(pattern informatics)方法，也开始进入地震活动性的分析。在地震活动性分析中，也有人“煞有介事”地定义“地震熵”、“构造温度”、“长程关联”这些“物理味”十足的概念，甚至还有“地震统计物理”的说法^[14]。关于这些方法的效能和物理基础，一直颇多争论。物理上的原因，说来也并不复杂：“临界现象”理论是一个“普适”的理论，因此不奇怪的是，它可以在一定程度上适用于地震现象的解释。但也正因为它“普适”，那些一般性的概念，也很难落实到地震的一些特殊情况，例如，如何考虑一次具体地震的构造环境。这种情况，可谓“成也普适，败也普适”。也许应该指出的是，这类“普适的”物理理论或物理概念的应用，正确的方法应该是注重它们的建设性和启发性，而不是苛求它们解决一个具体学科中的所有问题。的确，没有“临界现象”的理论背景，一些地震现象还真是不好解释。一个例子是地震“触发”。在“地震触发”的计算中，由过去的地震、无震滑动或由其他因素导致的库仑破裂应力(CFS)的变化，通常只有地震应力降的百分之几，如此小的应力变化如何能够“触发”一次地震，是一个尚无定论的问题。“临界现象”理论却可以给出一个简洁的解释：接近

“临界点”的时候，小的变化往往也可以作为“压倒骆驼的最后一根稻草”，导致整个系统的“灾变”。

至于广为报道的从地震的“自组织临界性”出发认为“长期地震预报不可能”，恐怕是一个概念上的“三岔口”。因为地震学中的“长期预报”，从来是指“从现在开始20年内此地有可能发生最大为多大的地震”，而不是“20年后(加减一年时间内)此地会发生能量多大(加减多大)的地震”，后者才是“自组织临界性”模型中认为“不可能”的那种长期预报。而把前述“长期地震预报不可能”再推广到“地震预报不可能”^[15]，逻辑链条上的“断点”就更多了。这里，也许有一个需要注意的问题值得一提——把一些类似于哲学的“隐喻性”物理模型(而不是真正的模型)应用到具体的应用科学问题的时候，一定要注意这些模型本来的意义和这种“隐喻”的限度。例如，关于预报，一个经常谈论的话题是“确定性混沌”(deterministic chaos)，模型认为，洛杉矶的一只蝴蝶扇动一下翅膀，就会引起北京的一场暴风雨。在模型中，这不仅是对的，而且是有趣的。但模型不是现实世界，实际情况是，无数只蝴蝶在世界各地不停地扇动翅膀，所以气象局还是能预报北京的暴风雨。

如果说这个讨论有些扯远了，那么与“蝴蝶的故事”有关，有一个极为重要的研究方向值得一提。理解地震，一个重要的事情是要理解地下的结构及其变化(图6)。传统上，这只能靠分析地震的记录去实现。现代地震学的鼻祖 B. B. Galitzin 用诗一样的语言“忽悠”我们说，“可以把一次地震比作一盏灯，它点燃的时间很短，却为我们照亮了地球的内部”。但“靠地吃饭”总是有限度的；“人造”的地震(例如爆破)则成本很高，且同样不易实现连续的、重复的、成片的、精确的测量，而这种测量正是地震预报研究所需要的。近年来，利用“噪声相关”技术，地震学家理论上可以得到地球上任意两点间的格林函数。物理图像是，把两个台站记录到的足够长时间的噪声进行互相关，最后的结果是，噪声源的作用相互抵消，“水落石出”，剩下的是两个台站之间的格林函数^[16]。一些地震学家还试图通过进一步的“波场相干”去约束地球介质的时间变化。这就使得对地球内部结构及其时间变化的研究进入到了一个新的阶段。

世纪之交关于地震预测预报的那场“一个概念引发的争论”，在科学史上颇有戏剧性，在基本思路上则颇有启发性。SOC，这个曾经很“热”的模型给了地震研究很大的启发。“悲观的”启发是，地震活动是否

也应具有某种“物理的不可预测性”，至少，应该先从物理上反思一下，地震预报究竟面临着怎样的限度；“乐观的”启发是，由于“长程关联”的存在，寻找可能的“地震前兆”的范围，不应受传统地震理论的限制，而应更大。此外，如果没有SOC的概念，那么地震危险性分析中“将古论今”的方法其实是没有多少理论依据的。对SOC模型的见仁见智，加上针对如何评估一种地震预测究竟有没有“瞎猫碰上死耗子”问题的统计方法的见仁见智，以及与此相关的关于如何评估过去近40年来地震预测研究与实践的得失的见仁见智，引发了20世纪末围绕“地震能否预报”的国际争论。争论的结果是：没有足够的证据证明地震是不可预报的；也没有足够的证据证明地震是可预报的。那么地震预报研究还要不要继续搞下去？结论是：愿意搞的，可以搞下去；不愿意搞的，也可以不再搞了。

8 第七条线索 主震和余震

2013年芦山地震后，关于芦山地震是不是2008年汶川大地震的“余震”的问题有很大争议。这个问题，在另一种语言环境下至少不是很尖锐，因为如果像在日本那样，把aftershock译成“后震”，那么mainshock与aftershock之间的物理的联系，便未必像“余”字所反映的那样强了。

但这绝不是说这种争论是“无事生非”。关于余震，也有一个让人困惑的问题。从统计上看，主震序列具有某种类似于平稳随机过程的时间分布。可以用统计物理方法(例如1990年代提出的TM函数)来“鉴定”，去掉了余震序列的地震活动，往往具有很好的“各态遍历性”(ergodicity)^[17]。余震序列却是一个典型的“弛豫过程”。大森定律^[18]说，余震的数目 n 与距主震的时间 t 之间的关系大致是

$$n \sim t^p,$$

其中 p 是常数。因此，主震和余震，无论如何应该有一些物理上的差别。但问题是，迄今的地震学研究结果给出，主震和余震这两类遵从着完全不同的统计规律的地震，在前面所说的“地震参数”方面，还真看不出什么“像样的”差别。因此，近年来的一个新的想法是，既如此，是不是就不要再“纠结”一次地震究竟是主震还是余震的问题，而是在某种统一的“规则”的约束下，给出一次地震有多大的概率是一次独立事件。但另一方面，和“深震无毛”问题一样，“余震无毛”问题再次说明，我们关于地震震源的测量，



图6 流动地震仪就安装在这样的井里。数百个流动地震仪同时部署，组成了面向地球内部的“望远镜”阵列，通过地震波来研究地球内部的情况。所以地球物理学业内有个玩笑话：地震学家在野外干什么活？答，挖“坑”；地震学家在室内干什么活？答，量“数”

甚至关于地震震源的理解，可能是不完整的。

有一个现象却可以为“弹性视界”里面到底发生了什么，提供有限的却可能是有用的线索。主震的发生，通常可以导致连续介质中的库仑破裂应力(CFS)的变化，这种变化(不仅是静态CFS的变化，而且是地震波所引起的动态CFS的变化)往往与余震的发生联系在一起。目前很多工作是把这方面的观测与地震断层面上的“摩擦函数”的行为联系在一起。

9 结束语 大案尚没有定论

这里讨论了地震的物理问题的七条线索。既是“线索”(而不是“证据”)，就很可能存在两个问题。一个问题是，这些线索可能可靠也可能不可靠。分析线索，还需要“去粗取精、去伪存真”。特别是，在有些方面，现在线索还很少，需要有新的技术，而这正是我们“有求于”物理学家的地方。另一个问题是，这些线索可能有用也可能没用。从线索出发，进一步分析“案情”，形成“证据链”，还需要“由此及彼、由表及里”。特别是，是不是还有更好的分析这些线索的方法(物理学家经常讲，想压碎一个核桃，最好不要从设计压机开始做文章)，而这正是我们想和物理学家探讨的地方。

最后，为什么选七条，为什么选这七条，并没有什么道理。在“案子”还没有实质性突破的阶段，这是一个不可克服的限度。有意不去区分“预测”(forecast)和“预报”(prediction)，就是这个考虑；有意不把七条搞得很平衡，也是这个考虑。不过，这种处理反映了我自己的一个很可能是弄巧成拙的尝试，就是不能用与大家熟悉的文献和教科书^[4]有所不同的角度，

来讨论这个大家并不陌生的问题。更涉嫌狂妄的是，能不能不把诸如青藏高原的形变速率是约 10 mm/yr 这样的定量概念作为讨论的重点，而是在讨论中强调一下那些更简单的、但也许是更基本的问题。

以上报告引发了与会者的热烈讨论。记录这场讨论，不是为了考证其中引用事实的精准性(相信读者也不会将其简单地作为公开报道的成果加以引用)，而是为了从这种“随意漫谈”式的讨论中得到启发。为此，《物理》编辑部尽量保持讨论的原貌，将录音进行了整理。笔者改变了其中一些发言的顺序，以组成若干个相互关联的“故事”。

(1) 重整化

地震是一个宏观现象，如果从宏观现象直接到微观的测量，过程跨度太大。这个跨度怎么处理？在物理学方面有好的办法。我们在处理很多非常复杂的体系的时候，常常使用这些办法。比如宏观量子现象，本来电子是一个很微观的事情，但凝聚态材料是完全宏观测量。所以很微观的过程怎么样导致宏观现象的出现？凝聚态物理很多都是在做这件事情。要处理这件事情，很重要的前提就是可重整化。怎样从一个很高能量的事件逐步地降低能量，就是一个重整化过程。重整化“流”从一个高能不断演化到低能。假如有一个非常复杂的哈密顿量，没有办法解。可是，只要这个哈密顿量是可重整化的，就有办法处理。可以从一个很高的能量尺度把很多细节都先忽略掉。不断地降低能量，小的细节就不断出现。降低到最低能量，就得到一个微观的模型。这是做物理比较常用的方式。如何建立从宏观地震到微观测量的纽带，这个过程也许可以考虑重整化手段。不一定选能量重整化，也可以选时间重整化。现在要考虑的，不是由一些直接微观的测量去判断宏观事件，而是考虑微观测量的数据和宏观事件之间可以通过重整化“连接”起来。把这个关系搞清楚，或许下一步真的可以做到地震预测。用能量做重整化可能是一个很好的方式，因为每次的微观测量是建立在地震波的基础上的。开始可以有一些非常粗糙的模型，然后不断降低能量尺度，在这中间不断地加入细节，就会逐渐知道微观过程和宏观过程的联系。

应力积累到一定程度，要破裂，引发地震，这个逻辑关系是没问题的。现在的问题是，如果介质完全是弹性的，是一种情况，如果完全是塑性的，是另一种情况。而地球的真实情况，肯定既不是弹性的，也不是塑性的。但是现在很多模型都是做弹性的，因为弹

性好做。能不能做一个物理模型，从最简单的开始，比如说，先从弹性的开始，然后开始变化，在弹性和塑性之间找一个状态。模拟一个状态，或许就可以模拟出来一个新物理。

只要是小尺度，就是没有问题的。小尺度可以做得非常准确。从微观分子做成小微粒，这里面应力的过程，到底是粘性的还是弹性的，可以清清楚楚。但是，要做一个宏观的样品，这就出现困难了。

可以在小尺度从粘性做到弹性连续变化的过程吗？

这个可以做清楚。重整化的问题，宏观量子现象，并不是永远都有的。一定要在体系大到一定程度，才会出现一些宏观量子现象。把微观的做清楚，并不表示能理解宏观量子现象。并不是所有系统都是可重整化的。如果是可重整化的，这个事情就可以做。

大约 20 年前，P. Bak 和 C. Tang 提出自组织临界现象(SOC)。我们知道，在临界点的时候，一定可以找到重整化方法。做地震研究和做地质研究的人指出，这个 power law 或者 scale invariance，是有问题的。一个能量的 scale 和另一个能量的 scale，它的机制完全不一样。Bak 和 Tang 的砂堆模型，“雪崩”的大小和频率之间有 power law 关系，这个关系后来又引入了股市波动，又被引到生物进化、物种灭绝上面。可是就具体问题，谁都不认。应用到地震，地震不认。应用到股市，股市也不认。如果 SOC 是一个机制，是天然可重整的，应用到具体，可能都不是可重整的，只有砂堆可重整。这种模型应用不到任何具体的事物中去。不过生物学家倒是发现一些符合这个 power law 关系的系统，比如说一大群鸟在飞，我们可以盯着拍它们的运动。它的关联尺度是整个群。现在生物的蛋白质的那些现象，我们要看它的关联，也可以扩展到整个生物尺度去，它好像是可重整的。但要跟生物学家说这是可重整的，从人的 1 m 的尺度到 1 μm 的尺度，服从同一个规律，那也是笑话，就是重整化这件事对这种系统来讲还缺点什么东西。在不同尺度上，可能规律不一样，但是我还是可以重整。从微观到宏观量子态的重整，是越来越粗粒化，然后就给它重整了，好像这里面还缺点东西。不过，如果要解出来了，地震的预测解决了，股票的事也解决了。

(2) 相变

假设一个相变的过程，我们学的统计物理是有规律的，但是到底这个规律是在预测什么？真正能用非常精细的时间、微观尺度的时间，预测相变是什么时候完成了吗？

预测的是概率，是发生某件事情的概率。

我们的规律如果把时间放在这个方程里，把时间缩得足够近的话，这个事情是不可预测的。预测一个相变过程，我们能够真的写出随时间变化的运动方程，说出相变什么时候完成吗？

假设相变机制是地震问题的关键，我们怎么回答这个问题，我觉得要命的就是我们物理学自己的缺陷。如果想判定有没有时间的动力学问题，就是经典力学、量子力学，那里边有时间的东西，有动力学问题，而且所有的物理量都是关于作用量的东西去组织的，可是处理相变的東西又引用的是热力学的理论，而热力学里面的变量对是关于能量共轭的，干脆就是两个体系“风马牛不相及”。所以说，物理还真没法提供一个方法，告诉人家，假如这就是相变机制，某个地方的“地震”什么时候会发生。

如果这个时间在时间轴上允许几十年上千年的误差的话，方程可能是正确的，但这当中的过程我们是不知道的。我们必须把结构细节全部搞清楚，这个是不可能知道的。就像把这个话筒立在这儿以后，如果再差一点，我们知道它肯定要倒，但谁也不知道它什么时候要倒。

(3) 关联函数

假设能把地球表面所有的关联函数全部都知道，是不是就可以解决这个问题了，还是说这是另外一个问题。比如，一个系统，关联函数最重要，从一点到那一点的关联函数，如果有办法把地球表面上所有两点间的关联函数都估算出来，是不是基本上就可以准确预报地震了呢？

这得看尺度，关联函数要是到每一平方米，恐怕预测精度就更好一点，但不可能做到这么大。就是说，可能最后一根稻草就是一块石头震了一下。

如果发生地震了，后边会怎么样。既然这件事情可以做，通过后期的测量，就可以把所有的地球表面的任何两点之间的关联函数建立起来，一旦建立起来，这个事情是不是就可以解决？

最多是个边界条件。假使把这个关系建立起来，最多也就是把一个方程的边界条件建立起来。

关联函数是，在任何一个点有一个扰动，其他点的响应是什么。

如果知道在任意一点、任意时刻的扰动，关联就全知道了，应该可以。

当然有很多复杂性，但是这件事情只要我们能做，就可以不断细化，总有一天可以做到非常细，就

像我们做GPS，一颗卫星不行，就36颗卫星，总有一个途径来做。问题是，这件事情做起来是不是就能解决问题。物理上，一个黑匣子，原则上只要知道黑匣子的关联函数，那么系统所有的过程，都应该了解。在任意一点施加一个扰动，在另外一点的测量结果都应该可以预测。这个系统怎么演变，就完全知道了。

这里有一个问题，提请地震学家们关注一下。以前带学生实验，专门介绍受迫振动，一个振子自己能振动，现在用另外的源驱动它。那么地震波监测大概也是这样，这个地方不管什么机制发生地震了，通过地表这一段传播，这是个振动系统，就是受迫振动，其规律是很清楚的：当源加进去的时候，频率和振子本身的频率是不一样的，或者驱动的时刻也不一样，但只要时间足够长，得到的振动频率一定是振子本身振动频率偏一点点，那就是不规则的振动，这大概就是测量的问题，但是还有个问题，源本身的频率、强度以及它加载的时刻会决定这个系统到底是经过多少次乱七八糟的东西进入到规则的振动，就是地震台能够测到的信号。这样的现象是非常怪异的，碰巧的话，几个“回合”，这个振子就变成很规则的运动。那么问题就来了，地震波，没有选择，远处某个地方，不知道一个源什么时候冒出来了，就开始驱动接收振子，从受迫振动的典型驱动来说，测这段地震波的时候，到底哪些地方是有信息的，哪些信息是重要的。因为刚才说知道震了这才是有用信息，这肯定是没错的，不过，前面那一段，也就是“起步”那一段提取的频率加相位信息可能是更重要的。

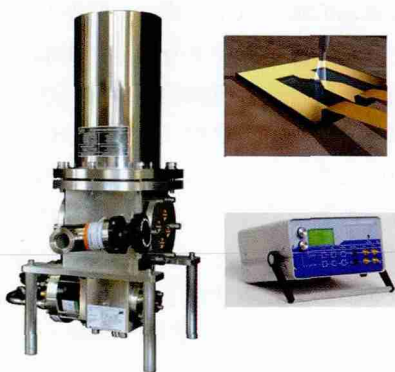
(4) 地震 大数据

现在的问题是，第一，理论上有些基本的东西还不清楚；另外，即使所有的机制都清楚，也没法得到特别细节的测量，所以就无法预测。现在好像有个新的概念，就是可以绕过第一个，把它看成一个黑盒子，黑盒子就是所谓“大数据”，指的是只把系统看成一个黑盒子，不管它的细节，给它一定输入，然后就会有些数据输出，然后去摸里面的规律。这个不知道跟地震有没有关系。“大数据”到底是怎么回事，就是一个系统，它原来是三层，input，output和转换函数。现在中间又放了几层，为什么呢？因为数据量大了，就有一些新的规律出来了。现在“大数据”在两个方向上比较热，一是在股票、金融的预测上，确实有一些成果；还有是在医学上，就是所谓“个性化医疗”上。人体的状态，是一个非常复杂的系统，没法知道细节，所以无法预测什么时候患病。但是数据量大了以后，出现一种症状，就会有一种对策，这是通过经验训练出来的。不知

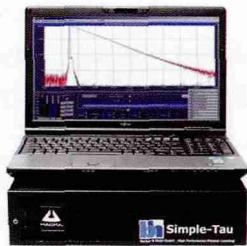


Count Photons

超导单光子探测系统
THz & Mid-IR探测系统



- ☑ 时间响应低至 **50ps**
- ☑ **10 cps** 超低暗噪声
- ☑ 高量子效率(高达**25%**)
- ☑ 标准单模光纤输入
- ☑ 多通道可选



时间相关单光子计数器
德国 **B&H** 公司 TCSPC 产品

北京鼎信优威光子科技
010-8350 3853
info@dyna-sense.com
www.dyna-sense.com

道地震的数据量增大的话,会不会有一些这种“大数据”的处理方法,就是,绕过mechanics。

还有一个方向的“大数据”就是社会稳定。北京大学有三个方向,医学“大数据”、金融“大数据”、社会“大数据”。实际上问题的实质就是,在不知道机制的情况下,怎么处理这些数据,怎么从这些数据挖掘出信息来。没准来个“地震大数据”,至少没坏处。

(5) 干预地震

还有一个问题是需要知道的,就是地震预测到底是为了什么。既然现在地震预报的问题还很难,还只能在概率上做文章,那为什么不能转变一下思路。比如,一定要坚持非预报地震不可吗?再比如,能不能用人工的手段把已经积累起来的地震的能量释放掉?

物理学家萨哈罗夫在上世纪50年代曾提出过这个设想,当时是想用核弹来完成这种能量的释放。地震学家 A. V. Nikolaev 甚至提出“地震武器”,即用核弹“远程触发”一次地震。现在看来,这些想法是不可行的。但是,人工手段(修水库、开矿山、往地下注水、注气)确实可以诱发一些地震的发生,核试验也有余震。它的确可以成为我们认识地震物理的一个非常好的渠道。

围绕只能知道概率的地震,用聪明的设计来减少、抵消、甚至存储地震造成的地面振动,从而使工程建筑“振而不坏”,这方面的一些创造性的想法,看起来甚至很“疯狂”,也是减轻地震灾害的重要的物理问题。

参考文献

- [1] Aki K, Richards P G. Quantitative Seismology. Freeman ,1980
- [2] Wiens D A. Phys. Earth Planet. Int. 2001 ,127 :145
- [3] Wyss M ,Dmowska R (Eds). Special Issue Pure Appl. Geophys. ,1997 ,149 :1
- [4] Jordan T ,Chen Y T ,Gasparini P *et al.* Ann. Geophys. ,2011 ,54 :316
- [5] Dieterich J. J. Geophys. Res. ,1994 ,99 :2601
- [6] Scholz C H. Nature ,1998 ,391 :37
- [7] Ide S ,Beroza G C ,Shelly D R *et al.* Nature ,2007 ,447 :76
- [8] Keilis-Borok V I. Rev. Geophys. ,1990 ,28 :19
- [9] Gutenberg B ,Richter C F. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena (2nd Ed). Princeton Univ. Press ,1954
- [10] Turcotte D L. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. Cambridge Univ. Press ,1992
- [11] Bak P ,Tang C. J. Geophys. Res. ,1989 ,94 :15635 ;Ito K, Matsuzaki M. J. Geophys. Res.,1990 ,95 :6853
- [12] Main I G ,Al-Kindy F H. Geophys. Res. Lett. 2002 ,29 :1121
- [13] Burridge R ,Knopoff L ,Bull. Seism. Soc. Amer. ,1967 ,57 :341
- [14] Main I. Rev. Geophys. ,1996 ,34:433 ;Rundle J B ,Gross S, Klein W *et al.* Tectonophysics ,1997 ,277:147 ;Rundle J B ,Turcotte D L ,Shcherbakov R *et al.* Rev. Geophys. 2003, 41 :4
- [15] Geller R J ,Jackson D D ,Kagan Y Y *et al.* Science ,1997 ,275:1616 ;Wyss M. Science ,1997 ,278 :487
- [16] Weaver R L ,Lobkis O I. Phys. Rev. Lett. 2001 ,87 :134301
- [17] Tiampo K F ,Rundle J B ,Klein W *et al.* Phys. Rev. E ,2007 ,75 :066107
- [18] Utsu T ,Ogata Y ,Matsu 'ura R. J. Phys. Earth ,1995 ,43 :1