

编者按 2008年5月12日14点28分,在四川汶川发生了8.0级大地震,给四川及周边地区造成了罕见的巨大灾害,秀美河川被破坏,数万同胞遇难,举国同哀.在四川汶川大地震震后一周年之际,《物理》特组织出版这一纪念专题,涉及地震预测预报、地震震源研究及地震物理的科学实验、地球深部流体状态研究、重力与粘弹性对地震同震及震后变形的影响、汶川地震堰塞体及相关力学问题、深源地震机理、地动仪等地震物理学各相关方面的内容,分两期刊登,意在部分反映物理学家在地震物理学研究方面所做的工作,进一步促进地震物理学的研究更好地服务于防震减灾,同时纪念在地震中逝去的人们.

与地震预测预报有关的几个物理问题

吴忠良[†] 蒋长胜 彭汉书 朱传镇

(中国地震局地球物理研究所 北京 100081)

摘要 文章简要介绍了与地震预测预报有关的几个物理问题,包括地震活动性问题、地球深部物质的物理性质及其变化问题、地球深部的流体问题、地震破裂问题、地球深部的形变和应力问题.这些问题的研究涉及当代物理学的一些前沿领域,唐山大地震后30年来有诸多重要进展.

关键词 地震预测预报 地震活动 地球内部物质结构 地震破裂动力学

The physics of earthquake prediction

WU Zhong-Liang[†] JIANG Chang-Sheng PENG Han-Shu ZHU Chuan-Zhen

(*Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*)

Abstract A review is presented of the physical problems related to earthquake predictability, including the physics of seismicity patterns, the physical properties and changes of matter and fluidity within the Earth, earthquake rupture, and deformation and stress. These studies touch the frontiers of modern physics, and have had significant advances in the three decades since the Tangshan earthquake.

Keywords earthquake prediction, seismicity, structure of the Earth, seismic rupture dynamics

唐山大地震后的30多年来,关于地震问题、特别是地震预测预报问题的研究,有诸多实质性的进展,呈现出与30年前很不相同的面貌.世纪之交,与地震预测预报有关的物理问题的研究,直接涉及当代物理学的一些前沿领域.检索一下Phys. Rev.和Phys. Rev. Lett.杂志,以及Nature和Science杂志上的相关文章,这一点就会看得十分清楚,至少不会由此得出“国际上并不关心和研究地震预测预报问题”、“一些科学家认为‘地震不可预报’,主张不可知论”这样令人惊诧的结论,更不会把与地震有关的物理研究概括为“寻找地震前兆”这样简单化的技术路线.

爱因斯坦说过:正确地提出问题,常常是解决问

题的一半.目前我国在地震预测预报研究与其他科技领域的“交叉部位”上一个比较显著的差距,实际上并不是研究条件不够,而是没有提出合适的科学问题.2008年汶川地震后充斥于我国新闻媒体的关于地震预测预报的科学问题的报道,大部分(如果不是全部)还停留在30年前唐山大地震前后乃至更早的时候,这是一个令人遗憾的情况.针对这种情况,我们试图对目前与地震有关的几个物理问题做一个概略性的介绍.

2008-12-22 收到

[†] 通讯联系人, Email: wuzhl@gucas.ac.cn

1 地震活动性

在地震研究领域,再没有比地震活动性更令人困惑的物理现象了。20世纪地震研究的一个巨大成就,是基本搞清楚了地震的全球分布,并且把大多数地震与岩石圈板块的边界联系在一起。对板块内部的地震,也有一些可以落实到观测的假说。但是,为什么汶川大地震恰在此时而不是在一百年前发生,汶川地震的发生与2001年11月14日昆仑山口西8级地震有什么关系,2008年3月21日发生在于田的7级地震对汶川地震的发生是否有影响,汶川地震后的“下一个”又将在哪里、将在什么时候发生,我们完全说不出来。

地震统计物理 地震的发生肯定不是遵守泊松分布的随机过程。不同的地震,不可能是彼此毫无联系的独立事件。这一点,看一看地震活动的 Gutenberg-Richter 定律就会非常清楚。这个定律说,地震的发生率 N 与地震的辐射能量 E 之间呈现 $N \sim E^{-B}$ 的关系,其中 B 是常数。世纪之交,一些地震学家和物理学家把这一定律与自组织临界性(SOC)联系在一起,由此而得出的“地震不能预报”的说法^[1],在物理上固然是可以推敲和批评的,但在认识论上却与“不可知论”完全不是一回事。相反,倒是现代物理学的进展,第一次使地震学家认真地思考地震到底是否“可预报”的问题。现在,颇有一些原来做过物理的地震学家,借鉴适用于其他复杂系统的计算和预测工具,例如模式识别方法、图像信息(pattern informatics)方法,来探讨地震的预测预报问题^[2]。地震学家 D. Sornette 同时还在用统计物理研究金融危机。

地震触发 在对地震活动性图像(seismicity pattern)的研究中,一个目前还不能理解的现象是,一次地震的发生究竟对另一次地震的发生有什么影响,或者说,一些地震的发生,是否可以构成使另一些地震“推迟”或“提前”的原因。对下一次地震的发生有显著影响的,究竟是地震引起的静态应力变化,还是地震辐射出的地震波所引起的动态应力变化,仍是一个有很大争论的问题。重要的是,这些争论不是基于空洞的概念,而是基于具体的计算,例如库仑破裂应力(CFS)的计算^[3]。

一个也许稍微能说清楚一些的问题是余震。很多余震的分布,可以用主震引起的应力变化(例如CFS变化)来加以说明。此外,被称为大森定律的余

震数目 n 随距主震时间 t 的变化规律 $n \sim t^{-p}$ (其中 p 是常数),究竟在物理上意味着什么,也是一个颇费思量的问题。但大森定律告诉我们,在我们所看到的地震中,实际上有两种类型的丛集(clustering)。余震遵从大森定律,但主震具有什么样的分布,例如,是否具有周期性,却还有待进一步的研究。

传统的“地震统计”,一般只对地震的“时空强”序列做工作。但实际上,描述一次地震的性质,只有“时空强”参数是不够的。考虑到地震的震源机制、辐射能量、地震矩等“现代的”地震参数后,地震活动的图像呈现出更多的复杂性和更多的规律性。对此,物理学家目前似乎还关注不多。

人类活动可以对自然界中的地震活动性产生有限的影响。水库诱发地震就是一例(另一个相似的例子是矿山地震),这是地震研究中一个“半可控”的过程。也正因为如此,对水库诱发地震的研究,目前得到的科学认识还算比较清楚(我国对三峡工程的诱发地震问题的信心,至少部分地建立在这些科学认识的基础上),世界上也有若干成功预测水库诱发地震的实例。但是,也千万不要认为这是一个已经得到彻底解决的科学问题。

2 地球深部物质的物理性质及其变化

地震是发生在地球深部物质中的一个现实的物理过程。地球深部的物质是什么,它在地球深部高温高压状态下的“性能”又是什么,这直接决定了地震的“可预报性”和探索地震预测预报方法的技术路线。迄今,我们对地球结构的探测,例如通过地震波得到的地震波传播速度的分布,通过重力资料得到的密度分布,还必须经由若干“推理”过程,才能“猜出”那里究竟是什么、究竟处在什么样的物理状态。这种推理有3个“技术环节”:一是直接的对地观测,这是所有“推理”的基础;二是通过实验室实验,得到关于物质性质的规律;三是通过凝聚态物理的理论和计算,把观测结果和实验结果联系起来。这项工作,一百多年来一直在进行。这项工作的思路,跟天体物理的思路有异曲同工之处。科学家告诉我们,地球内部的“不可入性”是地震预测预报很难的一个原因,这是对的。但是,天体物理学家无法登上太阳,他们对太阳的很多物理性质,还是可以得到很多有用的知识。所以,问题不在“可入”与“不可入”,而在能否对其进行有针对性的观测。

所以,观测地球,通过观测来推测地球内部到底

在发生着什么,是地震预测预报研究的一个主要的技术路线。近年来,在这个领域的突出进展是,探测地球内部的地球物理观测系统——这架面向地球内部的“哈勃望远镜”;性能“越来越好。而跟天体物理一样,每一次观测能力的提高,都能导致科学认识的重要进展。但从另一方面说,就目前情况而言,就理解地震、预测地震的需求而言,我们在对地球内部的观测方面,还有很大差距,主要问题是分辨率还不够,或者说“看”得还“不清楚”。因此,美国正在实施一个“野心勃勃”的计划:用地震台网,像“地毯式轰炸”一样,把北美大陆从西到东“横扫”一遍,以探明北美大陆下面的岩石圈结构^[4]。

噪声相关函数和波场干涉技术 21世纪以来,地球深部物质的物理性质及其变化的研究主要是借鉴物理学中的“兄弟学科”的思路。地球物理研究中有两方面的进展特别值得关注:一是传统的用地震观测“反推”地球内部结构的工作,必须得有地震才行。地震学家或者需要“等待”天然地震,或者需要自己制造“人工地震”,这样,工作效率就很低。近年来,声学中用噪声波场的相关性(NCF)来计算格林函数的工作,打破了这一局限性^[5]。二是“波场干涉”技术的应用,使人们“跟踪”监测地球深部结构随时间的变化逐步成为可能^[6]。

而这就涉及到物理学有可能做出贡献的另一个领域:还有没有更效率的、更经济的观测方法?技术的进步,往往给科学发展带来可观的影响。传统的垂直形变测量,需要一点一点地进行,效率很低,而且从“点”到“场”的“演算”颇为复杂。但是,合成孔径雷达干涉测量(IN SAR)技术应用之后,“形变场”可以自然地测出。我们前面说,探测地球内部的地球物理观测系统这架面向地球内部的“哈勃望远镜”现在“性能”越来越好,越来越好的原因,是数字化技术和宽频带地震观测技术的应用。

3 地球深部的流体

在地球深部的物质组成中,最“不可捉摸”的,也许是地球深部的流体,特别是超临界流体。很多专家认为,正是这些“幽灵一样”的东西,造成了地震现象的复杂性。你只要在倒啤酒之前使劲晃一晃酒瓶,就会明白为什么一次地震辐射出的地震波,居然能在很远的地方“激发”起另一次地震。地下流体的观测是一个挑战性问题:它随时间变化,它与局部地质紧密相关,它受环境变化影响很大,它涉及非常小

的空间尺度。所以我们可以明白,对地下流体的研究提上日程,也是与观测技术的发展分不开的。

地震深钻 经典的地震学教科书告诉我们,地震与断层有关。而现代地震研究的一个重要的概念上的进展就是,真实世界中的“断层”,其实并不是一个几何意义上的“断层面”,而是一个有“内容”的“断层带”。在断层带里,最令人着迷的东西之一,便是流体——地震产生的流体,产生地震的流体。物理学家最关心的是,对它们的直接观测是否可能?现在已经有很多办法,其中地震深钻正是为了应对这一挑战^[7]。所以不难理解,为什么地质学家出身的温家宝总理,在震后日理万机的情况下,几乎是在第一时间,毫不犹豫地签批了汶川断裂带科学深钻(WFSD)项目。对于汶川,那是刑事案件发生后的尸体解剖,那是飞机失事后对黑匣子的检验,那是可以给出地震成因的重要线索的直接观测。以往,地震深钻在圣安德烈斯断层做过,在野岛断层做过,在车笼埔断层做过,但是,汶川深钻是“响应”地震最快的深钻。

说到流体,就不能不想起火山。实际上,火山区的地震,往往可以给地震研究以很大的启示。最近几年,还有一个有趣的成果,人们发现,大地震的发生,似乎可以“触发”一些火山的喷发^[8]。不过,现在国内流行的科普材料中,动不动把地震分成三类:“火山地震、陷落地震、构造地震”。不能说不对,但那是1880年左右的说法。

4 地震破裂

地震的预测预报问题现在还是一个很难的科学问题,部分原因是,目前即使在地震发生之后,我们对地震的发生过程也还不能做到十分了解。我们感受到的、地震仪或强震仪记录下来的,是从地震震源辐射出来的能量。但实际上,一次地震的能量消耗或能量释放还包括两部分:一部分用来克服已经存在的断层上的“摩擦”,而使地震滑动得以“发生”,另一部分则用来形成新的断层。这三部分能量究竟是怎么分配的,至今也不是十分清楚的一笔帐。地震研究,常常像破案,用地震波得到的“地震辐射能量”是可以直接测量的,但后两部分能量,只能靠考察断层上的“遗迹”来推断了。

所以,对地震之后人们频繁问起的“这次地震究竟释放了相当于多少颗原子弹的能量”的问题,实际上并不是一两句话就说得清楚的。

地震破裂问题中一个颇有争议的问题是,地震破裂是否可以以超剪切波速度传播^[9]。目前的一个结果是,超剪切波速度传播的破裂,比较容易发生在那些穿透地表的走滑型断裂带上。有专家声称,2001年11月14日昆仑山大地震就是一次超剪切波速传播的破裂事件。但反对的证据同样很强,同样也有很大的不确定性。

地震破裂动力学中有一个著名的佯谬。如果地震断层是“弱”的,那么地震时不可能释放出那么强的地震波能量。可如果地震断层是“强”的,那么地震时地震断层上的滑动肯定会因为克服摩擦而导致明显的“摩擦生热”。问题是,对地震断层进行热流测量,又找不到“摩擦生热”的明显迹象。因此,地震断层在地震之前到底发生了什么,这也是一个问题;地震过程是怎样“启动”的,这也是一个问题;地震在“开始”后又是怎么“停下来”的,这又是一个问题。所以,地震预测预报难,难在哪里?我们还不知道地震应该在哪里“开始”,所以地点报不准;我们还不知道地震什么时候或在什么条件下“开始”,所以时间报不准;我们还不知道地震“开始”后会去哪里“结束”,所以大小报不准!

地震预测预报的困难还体现在地震研究中的一个难题:“深震无毛”。从理论上讲,发生在地下20km深处的地震,发生在地下200km深处的地震,发生在地下600km深处的地震,肯定会很不相同。可是,你可以做个实验:把一次地震的震源描述(例如震源机制、震源时间函数、地震辐射能量、余震序列)给一个地震学家看,只是删除关于经纬度和震源深度的信息,然后问他,您看,这是深源地震,还是浅源地震?一般情况下,他是答不上来的。不过,请注意不要给他看地震图,因为地震图里可以“透露”地震深度的信息,但这些信息不是我们说的“震源性质”。

地震预警 这里说的物理问题看上去十分抽象,但对地震预测预报研究都是很关键的。而即使不考虑地震预测预报问题,这里的物理问题,也还是非常“有用”的。现在,大家都在关心地震早期预警(EEW)技术。这实际上是在用先到的、比较小的地震波中所包含的信息,来对后面跟着的、比较大的、造成破坏的地震波进行“预警”,从而采取必要的措施,例如关闭高速铁路。技术上,如何尽可能地缩短预警时间,是一个关键问题。一个7级地震至少要持续十几秒的时间,而现在地震学家在研究,能否利用地震波的前3秒,来估计地震到底有多大,或者至少

有多大。这个“疯狂”的想法,其实涉及一个严肃的物理问题^[10]:一次地震,究竟是在它开始发生时就知道“自己到底多大,还是‘走到哪里算哪里’?”

5 地球深部的形变和应力

地震是一种灾变性的能量释放,它肯定是地球内部的某种渐变性的能量积累的结果。一般把这种渐变表述为“形变”(deformation),这样表述不一定很准确,但好处是,可以把“渐变到突变”的研究具体化为可以进行的测量。这件事情,说起来容易做起来难,但还是有很多方法可用来测量地球表面的、地球内部的形变或者应变。测量形变本身就很难,不然决不会有牛顿、高斯这样的“大家”也来染指大地测量和形变问题的历史。但其实更难的,也许是如何用不够完整的、甚至非常不完整的“线索”,来勾画出“案情”的全部。这是地球物理的一个困难,同时也是地球物理的一个美妙之处——想想身高为米的数量级的人类,居然能够精确地测出半径为6000km以上的地球的大小和形状,这是多么了不起的事情。现在,地球物理学家正在书写着同样了不起的故事,而空间技术和现代计算技术则使他们在这个领域中如虎添翼。

考虑形变的时候自然会考虑应力。地球内部的应力状态的研究,一直是一个重要的地球物理问题^[11]。爱因斯坦曾得意地宣称,理论钻研得越深,所需要的实验和观测资料就可以越少。而对地震研究来说,科学家只能无奈地把这句话倒过来用:因为实验和观测资料不够,所以只能求助于理论研究。近年来比较重要的进展之一是计算技术的发展,使地球物理学家有条件在能够实现的观测所提供的约束下;推测“地球深部的应力状态及其变化”。

地球物理中的应力测量,表现出与实验室中的实验和测量很不一样的性质:在接近地球表面的地方进行的“直接”的测量,对推测地球深部的应力状态却只有“间接”的意义,因为地表和地球深部不是一回事,地球内的不同深度也不是一回事;另一方面,地球深部的应力状态的“直接”测量,却只能靠一些“间接”的手段(例如根据地震的信息或地球介质各向异性的信息)来实现。

从应力的观点看地震前兆,近年来有两个重要的基本思路上的进展。但这两个思路进展看来并没有引起人们的充分注意。一是尽管“弹性回跳”理论已有百年的历史,但“弹性回跳”理论中的一个基本

假定,却从未证实,而且越来越多地被证明是成问题的。现实世界中,从来没有像我们折断一根竹棍那样,具有“应力增加——断裂发生——应力释放”的“理想”过程。事实上,地球内部的应力一直是存在的,使地震发生并不需要太大的应力增量;同时,地震的“效果”也决不是把积累起来的应力彻底“释放掉”。这正是地震的“自组织临界性”模型所提供的的一个重要线索。而这就意味着地震前兆信息的强度,比我们原来所认为的要小得多。第二个思路进展是,如果地震前兆的原因是地震前的应力变化,那么地震前兆信息的特征,理论上也应该比我们原来假定的要复杂得多,至少,对前兆的考察和对前兆的检验一定要有应力变化的背景作为“参照”才行。

说到“应力”的时候,实际上是在假定地球是一种连续介质。我们要记住这种假定不是在任何情况下都成立的。现在,与地震预测预报研究有关的一个修正的概念是,地球介质可以看成是一种非均匀的、有损伤的介质。地震孕育过程的很多性质,都与这一特点有关。不过,我们不要“看不上”这种“失真”或者简化。这种简化,其实是科学认识的一个组成部分。我们都知道,在大自然的基本相互作用力中,其实并没有一种称为“摩擦力”的相互作用。可是,在考虑宏观问题的时候,“摩擦”却是一个很不错的概念。

慢滑动。慢滑动与地球内部的形变测量有关,是近年来大地测量与地球物理的交叉领域中的一个重要进展。人们观测到,在地球内部的一些“部位”,可以发生并不辐射高频地震波的“地震”。与那些决定星系性质的“暗物质”相似,这些以往并不为人所知的“寂静地震”、“悄悄”地决定着那些“可见的”地震活动。关于这类“地震”的理论设想,实际上在20世纪60年代前就有了。但是,真正能够落实到可信的观测上,还是世纪之交的事情。而重要的是,当最终可以拿到比较多的观测资料的时候,人们突然发现,这些“地震”的性质,比如它的标度(scaling)性质,与“可见的”地震完全不同,并且比最初想象的要复杂得多。目前,甚至还没有一个恰当的、为大多数人所接受的“静地震”、“慢滑动”、“深低频脉动”等的分类,来描述这一全新的“地震家族”^[12]!

6 结束语

我们简单介绍了与地震预测预报有关的五个物理问题。但与地震预测预报有关的物理问题,决不只是上面五个。与防震减灾有关的物理问题,涉及的范围就更大。

也许人们要问,有这么多问题,那地震预测预报研究究竟还有没有希望。这个问题,要科学地看。从物理的角度看,这么多问题摆在这儿,恰恰是科学研究的希望;逐渐明确这些问题,则是30多年来地震研究的重要进步。因为这里提出的都是具体的物理问题。在物理研究中,只要问题是具体的,就总有办法解决。物理学家反倒是“怕”那些“大”而“玄”的问题。物理学发展的历史,实际上就是不断地把一些“摸不着”的问题具体化为观测问题、实验问题和理论问题的历史。

我们正在试图解决这些科学问题。但在这么多问题解决之前,人们也决不是在实际应用方面无所作为。从实际应用的角度看,现实主义的策略是:在科学上,要通过探索,尽可能地拓展现有的科学认识的疆土;在技术上,要通过研发,尽可能地使现有的科学认识得到最大程度的应用;在工程上,要通过设计,尽可能地考虑所有的科学、技术、经济和社会的因素,以实现防震减灾工作的“全局最优”。所谓“实事求是”、“脚踏实地”,落实到地震预测预报的物理问题的研究上,其实就是这么做的。

参考文献

- [1] http://www.nature.com/nature/debates/earthquake/equake_frameset.html
- [2] <http://www.cseptesting.org/>
- [3] Stein R S. Nature, 1999, 402: 605
- [4] <http://www.earthscope.org/>
- [5] Weaver R L, Lobkis O I. Phys. Rev. Lett., 2001, 87: 134301
- [6] Niu F, Silver P G, Daley T M *et al.* Nature, 2008, 454: 204
- [7] <http://www.earthscope.org/data/safod>
- [8] Hill D P, Pollitz F, Newhall C. Physics Today, 2002, 55(11): 41
- [9] Bouchon M, Vallée M. Science, 2003, 301: 824
- [10] Olson E L, Allen R M. Nature, 2005, 438: 212; 争论见: Rydelek P, Horiuchi S. Nature, 2006, 442: E5
- [11] <http://www.world-stress-map.org/>
- [12] Ide S, Beroza G C, Shelly D R *et al.* Nature, 2007, 447: 76