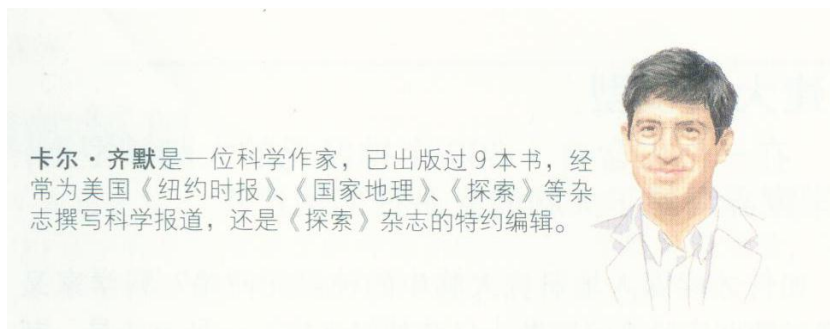




本文 来自《环球科学》2011.2 月刊

仅作为（集智俱乐部 [www.swarmagents.cn](http://www.swarmagents.cn) 内部讨论用）



# 百万亿神经连接编织意识

近百万亿大脑神经细胞相互传递的信息，隐藏着思维与意识的秘密。

撰文 卡尔·齐默（Carl Zimmer）

翻译 栾兴华

## 培

养皿里，一个充满活力的神经元孤独而欢乐地生存着。有时，它会自动放电，让电流流遍全身。如果你在神经元的一端施加一个电脉冲，由于受到刺激，它发放的电脉冲的电压会突然出现一个波峰。如果把把这个神经元放入不同的神经递质中，它放电的强度和时间也会发生相应的变化。就这一个神经元来说，在培养皿里，它能做的也就只有这么多了。但是，把 302 个神经元聚在一起，就能构成一个神经系统，让一条秀丽隐杆线虫（*Caenorhabditis elegans*）焕发勃勃生机——感知周围的环境，作出判断，向身体发出各条指令。当 1000 亿个神经元聚在一起，彼此建立起 100 万亿个神经连接时，你就拥有了一个人类大脑，可以做很多事情了。

我们的思维和意识如何有一群神经元产生，始终是科学界的一个巨大谜团，也是神经科学家因为技术条件的限制，一直没能解决的问题。有些科学家致力于研究单个神经元的工作机制。有些着眼于高一级的神经组织，比如对海马区进行研究，弄清楚这个由数百万神经元构成的大脑区域如何编码记忆。还有些科学家甚至着眼于整个大脑，观察人们的阅读、感到恐惧时而变得活跃的所有脑区。但是，几乎没有人同时从多个层面对大脑进行研究。或许，这是因为做这样的研究将面临难以逾越的障碍。几个神经元间的相互作用就能产生错综复杂、让人抓狂的反馈信息。如果把神经元数量增加到 1000 亿个，我们得到的将会是一本天书！

不过，一些神经科学家认为，现在是时候面对这个难题了。他们指出，如果始终单独研究大脑的各个区域，我们永远无法真正弄清楚神经系统如何产生意识。只有单独研究大脑的某个区域，就像通过研究单个水分子来阐释水结冰的机理。对于单个水分子而言，“冰”不过是一个毫无意义的词汇。只有当无数水分子相互作用，共同形成晶体结构时，冰才会出现。

幸好，神经科学家可以从其他科学家那里获得灵感。从股票市场、计算机网络到一个细胞中相互作用的基因和蛋白质，几十年来很多科学家都在研究不同形式的复杂系统。细胞与股票市场似乎风马牛不相及，但科学家已经发现，他们研究过的每个复杂系统实质上都有些相似之处。他们还开发了一些数学工具，可以用于分析复杂系统。现在神经科学家开始拾起这些工具，用它们来阐明大脑的复杂性。这类研究虽然刚刚起步，却让人看到了希望。神经科学家正在探索神经网络的组织方式——在某些规律的指引下，数十亿神经元形成了一个神经网络，这些网络又相互协作，组成一个单一的、高度统一的网络，这就是我们的大脑。正是有了这种网络式的组织机构，我们才能感知和认识这个千变万化的世界。精神分裂症、痴呆症等最严重的神经疾病，在一定程度上可能就是由患者大脑中神经网络崩溃引发的。

神经元会伸出轴突与其他神经细胞相连，进而形成神经网络。一个神经元发出信号，就能刺激网络中的其他神经元放电。由于每个神经元都可以与其他数千个神经元组成一个网络——不论这些神经元是在附近还是在大脑的另一侧，因此神经网络几乎有无限多种组成方式。你的大脑中特定神经网络如何构成，会对大脑的功能产生巨大影响。

## -----解码大脑-----

一个神经元作用有限，但几百个神经元聚集在一起，就能形成一个初级的神经系统，功能足以支撑一条线虫的生命活动。

生命越复杂，拥有的神经元也越多。神经科学的主要目标就是弄清楚数十亿神经元如何产生人类思维和意识。

通过研究从电脑芯片到股票市场之类的其他复杂系统，神经科学家已开始解开大脑复杂性的一角。

弄清楚大脑中复杂神经网络的工作机制，有助于了解精神分裂症、痴呆症等严重疾病的发生机理。



## 构建大脑模型

在一个仅含有 1600 个神经元的大脑模型上，科学家弄清楚了大脑的复杂性如何产生。

如何才能深入地研究大脑中的神经网络？科学家又该通过哪些实验来追踪数十亿个神经连接？一种方法是，制作一个简化的大脑模型，观测神经元以不同方式发生相互作用时的情况。美国印第安纳大学的奥拉夫·斯波恩斯（Olaf Sporns）和同事就构建了这样一种模型。他们制作了 1600 个模拟神经元，把它们分布在一个球体表面，然后让每个神经元彼此相连。任何时刻，每个神经元都有极小的概率自发放电，而某个神经元一旦放电，就有一定的机会促使与它相连的其他神经元也开始放电。

斯波恩斯和同事不断改变神经元间的连接方式，观察模型大脑有什么变化。最初，他们只把每个神经元与直接相邻的神经元连接在一起，结果这种“神经网络”只能产生随机的小幅阵发性活动。一个神经元自发放电产生电流传播不了多远的距离。接着，斯波恩斯和同事把每个神经元与模拟大脑上的其他所有神经元都连接起来，这是产生的“大脑活动”就截然不同了——整个“大脑”开始有规律地发放电脉冲或终止放电。

最后，这些科学家再次改变设置，使模拟大脑的情况介于前两次之间，神经元连接既有局部的，也有远距离的——“大脑”变复杂了。随着神经元开始放电，“大脑”上会游弋着大块的耀眼光斑，有些光斑会相互碰撞，有时则绕着大脑环行。

斯波恩斯的模型大脑演示了大脑的复杂性如何产生，给神经科学家上了重要一课。神经网络的结构决定了它自身的活动模式。模型大脑给了斯波恩斯和其他科学家一些启示，现在他们正在人类大脑的真实神经网络中寻找类似的活动模式。遗憾的是，科学家不可能对真实大脑中的每一个神经元都进行监控。因此，他们只好使用一些巧妙的技术，来记录相对较少的神经元的电活动，然后根据结果推断出一些重要结论。

## 神经规律

神经网络的电活动与地震、心跳、流行病的发生具有相似的规律。

迪特马尔·普伦茨（Dietmar Plenz）是美国国立精神卫生研究所（National Institute of Mental Health）的神经科学家，通过在培养皿中培养芝麻大小的脑组织，他与同事一直在研究大脑结构。他们在培养的组织上放置了 64 根电极，监测神经元的自发放电。电极探测到了一种快速的、不连续的电活动，这种现象叫做（神经元雪崩）（neuronal avalanche）。

最初，这种现象似乎只是神经元随机发出的“噪声”。如果真是如此，每种“神经元雪崩”的出现频率就应该相同——要么都很少见，要么都很常见。但是，普伦茨和同事观测到的现象并非如此。低强度的“雪崩”是最常见的，高强度的相对少见，更高强度的更为罕见了。在一张图表上，各种强度的“雪崩”现象出现的频率形成了一条光滑的下行曲线——强度越高，出现频率就越低。

科学家对这样的曲线并不陌生。比如说，每个人的心跳频率就并不相同。大多数人的心跳频率都稍高或稍低于平均值，高很多或低很多的人只占少部分。心跳频率与平均值相差越远，人数也就越少。地震也遵循相同的模式：板块漂移会产生很多次小规模地震，而大地震则很少。流行病的发生也是如此，每天都可能新增少量病例，只有偶尔会出现大批病例。如果把每个人的心跳频率、大小地震的出现次数或者每日出现的新增病例数绘制成一张图表，这些数据就会形成一条呈指数下降的曲线。

这条曲线就是幂律（power law）曲线，它是复杂网络的一个标志，这类网络同时包含了短程和长程联系。地球上，当某个地方发生地震时，有时候只会影响到附近区域，只有在极少情况下会波及大范围地区。神经元的工作模式也是如此。有时，它们只激发邻近神经元，但在某些情况下，它们的电活动也可能影响大片神经元。

几个神经元间的相互作用，就能产生错综复杂、让人抓狂的反馈信息，如果再把神经元数量增加到 1000 亿个，我们得到的就会是一本天书。

幂律曲线的形状，能为科学家研究相应神经网络提供线索。普伦茨和同事测试了多种可能的神经元网络构成，想看看哪一种网络产生“雪崩”的方式与真实神经元一致。他们发现，最接近真实神经元网络的，是一个由 60 个神经元簇形成的网络。平均而言，每个神经元簇都与其他 10 个簇相连。神经元簇之间的连接并非随机：有些神经元簇具有多个连接，有的连接则很少。科学家把这种网络组织方式成为小世界网络（small-world

network)。

事实证明，这种神经网络或许使大脑对输入信号极为敏感，就像一个强大的扩音器能放大各种频率的声音一样。普伦茨和同事对神经元施加了不同强度的电刺激，观测神经元会作出何种反应。他们发现，轻微的刺激仅会使少量神经元作出反应，高强度刺激则会使更多细胞产生强烈反应。

为弄清楚神经网络的结构如何影响神经元的反应，普伦茨和同事向神经元施加了一种可以减弱神经连接的药物。结果，神经元不再对微弱的刺激信号作出反应。接着，他们换了一种药物，可以促使神经元对邻近神经元发出的信号作出反应。这次，他们得到了与想象不一样的结果：神经元会对微弱信号作出强烈反应，但太强了，以至于无法跟受到强刺激时的反应有所区别。这些实验揭示了神经网络内部调节有多少精细，还揭示了这种微调如何确保神经网络准确传递信号。如果神经元不是以这种方式组建成网络，那么它们只会作出毫无意义、互不相关的反应。

### 模型大脑的解剖

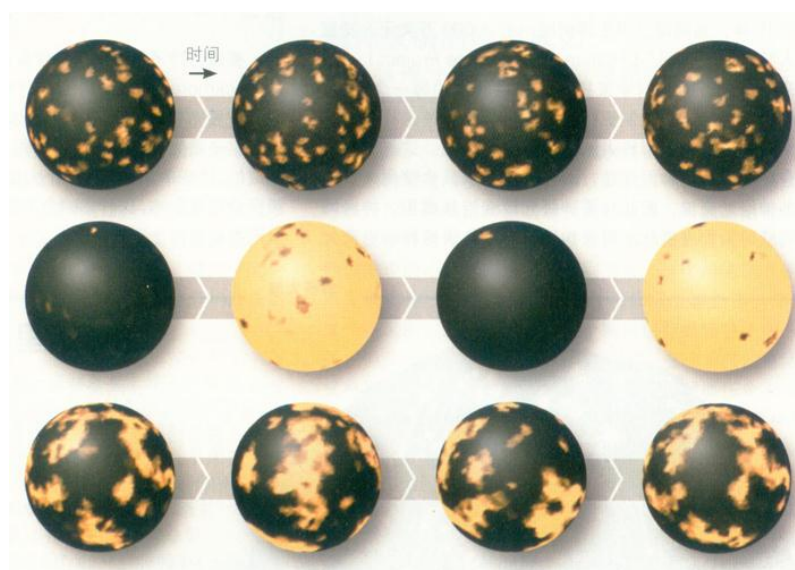
美国印第安纳大学的奥拉夫·斯波恩斯和同事构建了一个大脑模型：一个圆球上分布着 1600 个神经元，可以通过三种方式相互连接。模型中的部分神经元可自发放电（黄色区域），其他神经元

则保持休眠状态。该模型有助于科学家探索不同类型的神经网络如何产生复杂电活动，其中一些活动模型与真是大脑中的神经网络几乎一样。

如果神经元只与直接相邻的神经元建立联系，随着时间的推移，只会产生一些孤立而随机的电活动。

每个神经元都彼此连接时，模型大脑会产生大范围的电活动，所有细胞都同时处于活跃或静息状态。

同时出现短程与长程连接的模型大脑中，会产生较难预测、类似真实大脑的电活动。



神经科学家最终想弄清楚，神经元中培养皿中的电活动与我们日常的精神过程到底有哪些联系。通过观测整个大脑，研究人员发现一些自发的神经活动，就像普伦茨在小块脑组织中监测到的一样。美国华盛顿大学圣路易斯分校的马库斯·E·赖希勒（Marcus E. Raichle）与合作者研究发现，即便我们正在休息，什么都不思考时，脑电波也会以某种复杂模式传遍整个大脑（详见《环球科学》2010年第4期《大脑暗能量》）。最近的研究表明，这种自发的电活动可能在我们的精神生活中扮演着重要角色。或许正是因为它们的存在，科学家才能研究处于休息状态的大脑的内部工作机制，我们才可以回顾过往，规划未来。

## 为神经网络画像

未来几年，神经科学家将研究神经元间的每一个连接，为大脑中的神经网络绘制更精细的图像。

为了弄明白自发性脑电波如何发挥作用，神经科学家正设法绘制整个大脑中神经元之间的连接。普伦茨在研究小块脑组织中的电活动时遇到重重困难，可想而知，把研究范围扩展到整个大脑，神经科学家会面临怎样的挑战。在众多大脑“测绘”项目中，斯波恩斯带领的团队最具雄心。他与瑞士洛桑大学的帕特里克·哈格曼（Patric Hagmann）及其神经成像小组合作，利用扩散频谱成像（diffusion spectrum imaging, DSI）技术对5名受试者的大脑进行了分析。DSI技术能轻松捕捉到被一层薄薄脂肪覆盖的神经轴突，它们长长的身躯（即大脑白质，white matter）连接着大脑皮层的不同区域。研究人员在大脑皮层上选择了近1000个区域，绘制出了这些区域的每一个轴突连接。

接着，研究人员构建了一个含有1000个区域的模拟大脑，对它进行实验，看它会产生哪种模式的电活动。模拟大脑上，每个区域产生的神经信号都能传送到相连区域，促使这些区域上的神经元发出类似信号。研究人员为这个虚拟大脑通电时，它开始产生一些发生着缓慢变化的脑电波。值得一提的是，这些脑电波与赖希勒及其他科学家在静息大脑中观察到的真实脑电波非常相似。

斯波恩斯和同事绘制的这个覆盖整个大脑的神经网络，在组织结构上像极了普伦茨在小块大脑组织上发现的小型网络——这也是一个“小世界网络”，其中含有少量连接着许多神经元的“通信枢纽”。这种“放大”了的“小世界网络”



可能有助于大脑节省资源，提高工作效率。大脑白质的生长与维护要耗费很多资源。有了这几个“通信枢纽”，大脑所需的白质就要比构建其他类型的神经网络少得多。而且，由于不同脑区间的连接较少，信息处理也更快。

2010年，美国国立卫生研究所出资3000万美元，发起了“人脑联络图项目”（Human Connectome Project）——在未来几年内，神经科学家将研究神经元间的每一个连接，为大脑中的神经网络绘制更精细的图像。但即使这样，仅凭这一个项目，也难以解释人脑的所有复杂性。这是因为大脑中有多种类型的神经连接，而神经元每次只会使用一种来和其他神经元交流，因此只要神经元改变连接类型，神经网络的构成时刻都在变化。想要构建一种能体现这种动态变化神经网络的大脑模型，就得考虑这种变化涉及的方方面面，而这又需要我们对大脑复杂性有充分了解。

## 股市与大脑

科学家把分析股市的方法挪到了大脑研究上，找出了神经活动的一些规律。

英国达特茅斯学院的数学家丹尼尔·N·罗克莫尔（Daniel N. Rockmore）和斯科特·D·保尔斯（Scott D. Pauls）正用研究股市的方式研究大脑，以此解析大脑的复杂性。不论是大脑还是股票市场，都是由很多基本单元（神经元和股民）组成的，这些单元会形成一个大型网络。在购买和抛售股票时，股民会相互影响，这种影响会不断扩大，直至影响到整个网络，从而推动股市上涨。

罗克莫尔、保尔斯及同事开发了一种数学工具，用来分析纽约证券交易所的网络结构。他们收集了1251天中，2547支股票的每日收盘价格，并寻找不同股票价格变化的共性——比如在同一天时间上涨或下跌的那种趋势。

最终，他们搜索出49个股票群。在考察这些股票背后的金融信息时，他们发现在大多数情况下，股票群要么对应着特定的经济领域（如软件或餐饮行业），要么具有很强的区域性（比如来自拉丁美洲或印度的企业）。

只是分析数据，就找到了股票背后的一些规律，这让罗克莫尔和保尔斯对自己的方法信息倍增。事实

模拟股票买卖背后深层机制的数学模型，也能用于研究产生大脑活动的神经网络。



确实如此，毕竟互联网公司发行的股票基本上是相互关联的，倾向于同时上涨或下跌。一个危险的互联网蠕虫病毒便可将危机散布到涉及互联网的整个股票群中。

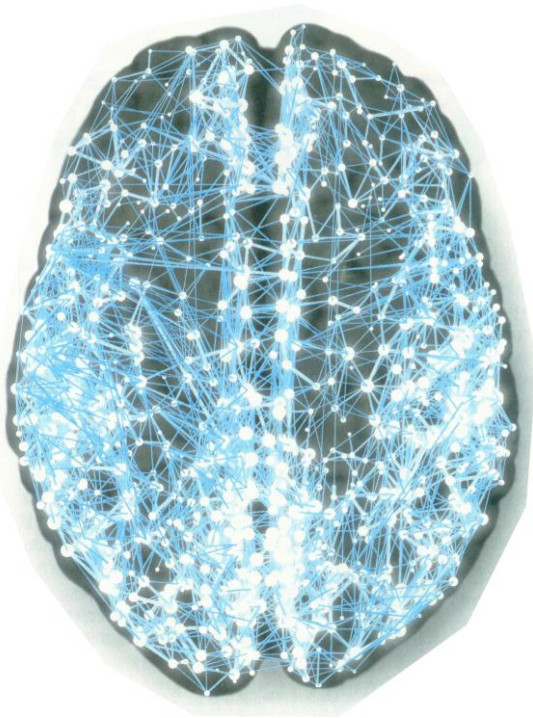
## 剖析大脑

### 大网络里的小世界

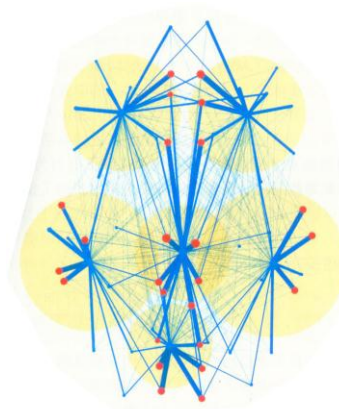
即便我们处于休息状态，脑电波依旧会在大脑中传播。很多研究都想弄清楚这些神经活动的模式，因为它们或许在人类的精神生活中起着重要作用。利用弥散张量成像技术

(diffusion tensor imaging), 瑞士洛桑大学的帕特里克·哈格曼和美国印第安纳大学的奥拉夫·斯波恩斯绘制了一张大脑图像。他们发现，在神经连接非常密集的网络(左图)中，存在少量连接着多种神经元的“通信枢纽”(红点)，许多连接都交汇于此(下图)。

“小世界网络”中的这些枢纽有助于我们的大脑更快地处理信息，更有效地维护大脑结构的完整性。



大网络



小世界网络

罗克莫尔和保尔斯还发现，这 49 个股票群又可分为 7 个系。在多数情况下，这几个股票系对应的行业存在一种相互依赖的关系，就好像商业街和建筑业的发展总是齐头并进。两位科学家发现，这些股票系会连成一个更大的关系环，这很可能是投资经理人经常使用板块轮替 (sector rotation) 操作法的结果：在几年时间里，这些经理人会将他们的资金从一个经济板块挪到另一个板块。

现在，罗克莫尔和保尔斯正用研究股市的数学方法，建立一个大脑模型。通过这个模型，他们观察的不再是流动于不同股市板块间的经济信息，而是在大脑不同区域间传播的“神经信号”。而且，就像金融市场具有不断变化的内部网络一样，大脑也可以随时重组神经网络。

为了测试这个模型，罗克莫尔和保尔斯分析了功能性核磁共振大脑成像图，

这些图像都是赖希勒及其同事在一名自愿者处于静息状态时记录到的。在大脑成像图上，每个像素点都代表一块胡椒粒大小的脑组织，这是 fMRI 能检测到的最小组织。两位科学家着重观察这些脑组织上电活动的变化，寻找不同脑组织中电活动变化模式上的相关性。就好像在股市中，股票可以分为不同类群，他们发现大脑成像图上的像素也可分为 23 个类群，这些类群又归属于 4 个更大的集群。值得一提的是，这 4 个集群竟然会上演神经系统中的“板块轮替”。它们相互作用，组成一个关系环，神经信号会在整个环内传播。

由于已能重建静息大脑中的神经网络，罗克莫尔和保尔斯开始把注意力投向思考中的大脑。为了解大脑如何改变神经网络的构成，他们给受试者展示了一系列实物，同时用 fMRI 观察受试者的大脑，随后对大脑成像图进行分析。如果他们构建的模型能反映真实情况，这两位科学家就可以预测，受试者看到老朋友的面孔等特定刺激物时，神经科学家能够从大脑扫描中得到什么结果。这一成就将把神经科学推向真正意义上的预测性科学。

这类研究仍然无法在短时间内让科学家阐明大脑的复杂性。秀丽隐杆线虫就是一个典型例子。线虫仅有 302 个神经元，科学家早在 20 多年前就弄清楚这些神经元间的每一个连接。然而时至今日，研究者仍然不知道，这些简单的神经网络如何形成一个运行良好的神经系统。

## 精神疾病的网络成因

精神分裂症、自闭症等精神疾病很可能与大脑神经网络崩溃有关。

或许，只有研究一些重要实例之后，科学家才能画出一张大脑神经连接的全景图。多项研究表明，有些脑部疾病并不是任何一块特定脑区功能失常的结果，可能是由神经网络本身出现异常所致。斯波恩斯和同事惊讶地发现，如果关闭他们发现的小世界网络中的不同节点，这个网络就发生截然不同的变化。如果某个脑区只与相邻区域建立少量连接，这个脑区的功能被抑制后，整个网络仍能继续像往常一样运转。但是，如果关闭一个“通信枢纽”，整个网络的电活动模式将发生巨大改变。这一发现或许能解释脑损伤令人费解的不可预测性。有时，脑部肿瘤或中风仅损伤了少量神经元，就会严重危害大脑健康。而在其他时候，这些疾病会破坏更多神经结构，却不会对大脑运转造成明显影响。

很多脑部疾病都可以归结于神经网络障碍。英国剑桥大学的神经科学家埃德·布莫 (Ed Bullmore) 和同事一直在探索大脑神经网络与精神分裂症之间的关系。在最近一项研究中, 他们让 40 名精神分裂症患者和 40 名健康受试者安静平躺, 双眼睁开, 并且用 fMRI 扫描两组受试者的大脑, 记录了静息大脑的神经网络中仍处于活跃状态的区域。结果发现, 在精神分裂症患者的静息大脑内, 神经网络上的一些区域中产生电活动时同步程度高于正常大脑。

科学家还不清楚, 这种变化与精神分裂症存在怎样的相关性。至少有一点可以肯定, 这一发现或许有助于开发高灵敏度的检测方法, 用来诊断精神分裂症、自闭症、小儿多动症等一系列大脑神经网络出现异常的病症。医生也可以观察患者大脑的神经网络有没有恢复正常, 据此来判断医疗进展。尽管我们还得走很长的路才能完全阐明大脑的复杂性, 但取得这些进步还是值得高兴的。

本文译者

栾兴华是北京大学医学部神经病学博士, 现任职于上海市瑞金医院神经内科, 她的主要研究方向为神经肌肉液、遗传性脑血管病以及神经病理学, 自 2007 年开始为《环球科学》翻译神经科学类稿件。

扩展阅读

- ◆ Theoretical Neuroanatomy: Relating Anatomical and Functional Connectivity in Graphs and Cortical Connection Matrices. O. Sporns, G. Tononi and G.M. Edelman in *Cerebral Cortex*. Vol.10.No.2,pages 127-141; February 2000
- ◆ Mapping the Structural Core of Human Cerebral Cortex. Olaf Sporns et al. in *PloS Biology*. Vol.6.No.7. e159; July 2008.
- ◆ Efficient Network Reconstruction from Dynamical Cascades Identifies Small-World Topology of Neuronal Avalanches. Sinsia Pajevic and Dietmar Plenz in *PLoS Computational Biology*, Vol.5.No.1, e 1000271; January 2009
- ◆ *Networks of the Brain*. Olaf SPORNS. MIT Press. 2010
- ◆ Read from zimmer's new e-book [www.ScientificAmerican.com/e-zimmer](http://www.ScientificAmerican.com/e-zimmer)