

## 圣菲研究所与复杂性研究

郝柏林\*

2009年2月9日

美国新墨西哥州的“沙漠”，并非不毛之地。在两条南北走向的山脉之间，广袤起伏的缓坡上错落有致地生长着孤单的树木。新墨西哥州的首府圣菲城 (Santa Fe) 更像一座没有高层建筑的乡镇，周围常青树和灌木覆盖的丘陵伸向更高更远的滑雪胜地。在西北郊外一座散布着松杉的小丘顶部，有一处比多数住宅显得更大的平房。这里原是曾经以罗斯福总统私人代表身份在 1944 年访问过延安的赫尔利 (Patrick J. Hurley, 1883-1963) 特使的别墅。它被 1984 年建立的圣菲研究所买下来以后，又顺山势往稍低处延建了三层。

笔者 1999 年在“复杂性的刻画与‘复杂性科学’”<sup>1</sup> 一文中曾经提到这个圣菲研究所 (Santa Fe Institute 以下简称 SFI<sup>2</sup>)。进入新世纪以来，又先后以资深国际成员和外聘教授身份多次访问这个研究所。2004 年复旦大学和 SFI 在上海共同组织了生物复杂性研讨会。后来，笔者又协助 SFI 在国内组织每年一度的“复杂系统夏季学校” (CSSS2004-2008)。这些活动使笔者对于 SFI 的指导思想和运作方式有了更多了解。愿以此文再做些介绍，并对我国复杂性研究的某些方面发表一点意见。

以所在城市命名的圣菲研究所，从一开始就避免以名限实、“作茧自缚”。他们自己的定位是非赢利的私人研究机构，大方向是跨学科的复杂性和复杂系统研究。SFI 只有十几位常驻研究人员和大致同等数目的博士后，但是有一批来自世界各国的外聘教授和大量期限不等的访问者。到 SFI 工作或访问的人们大都有自己的专门领域，相当深入地从事着具体的课题研究。他们或者在 SFI 松散自由的环境中切磋，或者通过 SFI 形成在世界其它地方的合作，实践着跨学科的交流与研究。跨学科一词在英文中的说法有 interdisciplinary, multi-disciplinary, cross-disciplinary, transdisciplinary 等等。SFI 的现任所长 Geoffrey West 博士说他比较喜欢最后一个词，它更能体现从一门学问做进另一个领域的努力。

---

\* 中国科学院院士、第三世界科学院院士，复旦大学教授、中国科学院理论物理研究所研究员、圣菲研究所外聘教授。

<sup>1</sup> 《科学》杂志第 51 卷第 3 期，1999，3-8。此文曾收入《混沌与分形：郝柏林科普文集》，上海科学技术出版社，2004。

<sup>2</sup>SFI 的网页：<http://www.santafe.edu>。



Figure 1: 从附近山坡上俯视圣菲研究所 (作者摄)。

SFI 的年度预算在 1990 年代末约为 500 万美元，近来已经翻了一番。经费来源是多方面的：政府资助、企业赞助和个人捐款都有。然而，他们努力使来自政府机构（主要是国家科学基金 NSF、国家健康署 NIH 和能源部 DOE 三家）的经费不超过总预算的三分之一，最多不超过 40%。这样做，就是不让政府机构左右其研究方向。然而，他们确实也有能力获得相当特别的政府资助。例如，SFI 在 2007 年得到了 NSF 的一项跨学科资助，它的内容从人类学、考古学、经济学，跨越生物医学、生命科学，直到数学、计算机科学和物理学。其实，美国 NSF 和中国自然科学基金会一样，通常只资助学科归属明确的单个课题，而不喜欢内容广泛的“口袋”项目。SFI 之所以获得此项资助，正是以二十多年来所取得的成绩和获得了广泛承认的影响做后盾。不过，这项资助总额也只占到 SFI 年度预算的十分之一。

SFI 有一个董事会，它的成员包括一些企业家、诺贝尔奖获得者及一些著名学者、SFI 现任和过去的所长等等。这不是一个名誉组织，它每年开会讨论有关 SFI 的大事。科学委员会和教授会议 (Faculty Meeting) 则处理更具体的研究计划和招聘工作，特别是后者，基本上每月开一次会，外聘教授也可以用电话会议方式参与讨论。SFI 还有一个企业网络 (Business Network)，象波音飞机公司、谷歌公司等都是企业网络的成员。SFI 并不为企业做具体的项目，但它经常向企业界的领袖人物介绍复杂性研究中形成的新概念，象新性质的突现 (emergence)、复杂系统的鲁棒性 (robustness) 与脆弱性、多样性与进化的关系，

等等。每年 11 月在圣菲城举行的企业网络大会已经成为一项重要活动。SFI 最近每年还要为企业组织十次左右专题讨论会。一个大企业的负责人曾说，正是在访问 SFI 后返航的飞机上，他想好了改组整个企业的新方案。

SFI 成功的秘诀何在？West 所长说他遵从曾经多年领导剑桥分子生物学实验室的 Max Perutz 的“简单公式”。剑桥实验室造就了 12 位诺贝尔奖获得者，而那简单公式就是：“没有政治、没有报告、没有评估，只有一批由少数具备良好判断能力者所挑选出来的、有才能的、富于进取精神的人”。SFI 通过各种形式的学术活动吸引着来自全球的、具有广泛兴趣和研究能力的人群，其中一些人在彼此充分了解的基础上，在一段时间里成为 SFI 的核心成员，更多的人则在不同层次上是 SFI 的长期朋友与合作者。许多过去的成员还以科学委员会或外聘教授的身份继续促进着 SFI 的工作。研究所成立 24 年来，“领导班子”已经更换多次，SFI 的研究却一直向上，并没有发生明显的摇摆起落。他们的“班子”不由“上面”任命，而是由遴选委员会 (Search Committee) 广泛征询建议，在“几厢情愿”的基础上确定，由董事会认可。SFI 没有“铁饭碗”，他们的所长、副所长都有自己的原来单位，结束在 SFI 的服务即返回原处，并且继续做 SFI 的朋友，对研究所的活动做积极贡献。

### 圣菲研究所工作举例

SFI 的研究工作不是从概念到概念的空洞议论，而是基于大量数据或实地考察，辅以模型研究和计算机模拟，并且尽可能提炼出一些理论思想。我们举几个例子。

早在 1932 年瑞士生物学家 Max Klieber 就发现，不同种类的哺乳动物，从小鼠到大象，他们的代谢速率  $B$  (可以通过能量消耗量度) 与个体平均质量  $M$  满足幂次律  $B \sim M^\beta$ ,  $\beta = 3/4$ 。SFI 的学者们发现，类似的幂次律还适用于许多其他特征量。例如，哺乳动物的平均寿命和脉搏也满足类似的幂次律，但分别为正、负幂。因此，两者的乘积为一个普适的常数。平均说来，大小哺乳动物终生心跳约 15 亿次。小鼠心跳快、寿命短；大象脉搏慢、寿命长。从生物大分子、大肠杆菌到生态系统，幂次律的成立范围可以跨越 20 个数量级。然而，这个发现长达 70 年、内涵不断丰富的经验规律，一直没有透彻的理论解释。这里的主要困难在于指数  $\beta$  的分母 4。如果从体积、表面积等简单的几何考虑出发，容易得到 3 而不是 4。然而，以循环系统为例，为了把营养传送到每一个细胞，血液要从主动脉分配到支动脉……等等，最终到达毛细管一样的微血管。无论大小动物，最底层的微血管差异不显著，大体都是只容许单个红细胞鱼贯通过的毛细管。这是一类以尺寸大致相同的毛细管做终端的分形。体形硕大的动物，要把较多的营养送到组织细胞，就要在终端之前具备层次较多的分形网络。血液从粗管分流进两个细管时，必须畅通无阻、没有“反射”。正是这个分形网络上流体力学的阻抗匹配问题，给出分母 4。从经验规律到数学理论，SFI 的学者们终于解开了这一长期悬疑。

幂次律的指数  $\beta$  如果等于 1，就是简单的线性依赖、正比例关系。如果

$\beta < 1$  (亚线性), 则表明存在某种“节约”。前面的 Klieber 幂次律就是如此。如果是超线性的  $\beta > 1$ , 则表明某种比线性更快的增长。

21 世纪最初的两三年, 人类社会跨越了一个历史转折点: 全球城市总人口超过了农村人口。城市是创新能力和生产效率的集中地, 是财富之源; 城市也是污染、疾病和犯罪的渊藪。认识城市的组织发展和动力学, 成为人类必须面对的迫切课题。SFI 的科学家们搜集了全球大量城市的种种指标, 发现它们与城市大小 (以人口量度) 的关系也遵从幂次律。这里有三种情形。与城市居民个人需求有关的指标, 如职业数目、住房、生活用水, 与人口呈线性关系 ( $\beta = 1$ )。城市的支撑体系, 如道路面积、电缆线长度, 则与人口呈亚线性关系 ( $\beta \approx 0.8 < 1$ ), 表明城市越大越“节约”。这一点与生物个体遵从的 Klieber 幂次律类似: 一座城市有些像一个庞大的生物个体。然而, 人类活动特有的许多指标, 如创新能力 (以专利数衡量)、工资总额、犯罪率、乃至包括步行速度的生活节律, 却表现出随人口数超线性增长 ( $\beta = 1.1 \sim 1.3 > 1$ )。城市发展越来越大, 只有不断创新才能维持其超线性增长的需求。怎样才能做到可持续的稳定增长, 避免无限制膨胀导致的弊病, 是另一个迫切课题。West 等人发表在《美国科学院院报》<sup>3</sup> 上的论文及其附件所列举的大量数据, 值得研究全球城市化和城市发展的人们参阅。

犯罪使人们联想到恐怖活动。SFI 的一个小组从 1968 年以来的全球恐怖事件数据库中, 提取了造成一人以上死亡的全部 10 878 个事件, 发现事件频度与事件严重性 (以死亡数计) 的关系并不是通常设想的平均值附近的“钟状”分布, 而是遵从幂次律。像 911 那样的严重事件偏离平均值 (死亡 5 人) 很远, 却和大量“小”事件落在同一条曲线上。这说明, 大小恐怖事件可能有共同的原因。有效地消除小恐怖事件的措施, 很可能也会减少大恐怖事件的发生。这显然是符合常理的推断。然而, 此类统计观察无助于对个别事件的预测和防范, 它只是提供了另一种认识问题的角度。

SFI 科学活动的另一个好例子是考古学。美国科学院院士 Henry Wright 是一位活跃的 SFI 外聘教授。由于现代工农业的迅猛发展, 正在高速破坏着大量考古遗址, Wright 同中国考古工作者合作趁农闲季节在河南进行过大规模的抢救性踏勘。他们从大面积土地上捡拾陶瓷碎片, 作出年代鉴定; 不同年代的碎片分布清楚反映出从早期没有中心村镇的“平等”居住点, 转变到具有中心城镇的层次结构。这是一种对称破缺。世界四大古文明发源地, 都经历了类似的出现中央政权的对称破缺过程。

考古学“现代化”的另一个方面是与数学模型研究的结合。任何考古遗址实地发掘所提供的只是历史和地理空间中某些离散点上的采样, 而考古学希望揭示一个地域历史变迁的整体图象。SFI 的合作者们对美国西部四州交界地区 (所谓 Four Corners) 古印地安人早已废弃的遗址, 进行了多年的考察发掘。他们同时根据气候变化 (例如由树木年轮推测的年降水量曲线)、水土流失的各种资料, 提出数学模型。要求模型的“输出”在特定的离散时空点上与

<sup>3</sup> L. M. A. Bettencourt 等, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 2007 年第 104 卷 7301-7306 页。

实地考察资料尽可能一致，使得模型给出的更大时空范围的变迁图象具备较多的可信性。

农业和畜牧业的起源也是全球气候变化的后果。原来在人口不多而天然动植物资源丰富的时代，采集和狩猎是十分安逸的生活方式。现在地球上还有少数孤立的人群，过着采集和狩猎生活，他们不理解为什么要从事辛苦的农耕和畜牧。距今一万多年前的全球变冷，迫使先民不得不储备可食种子和驯养动物。于是在互相不通消息的世界各地，几乎同时开始了农业和畜牧业。不同地域的先民为人类贡献了各种作物和牲畜。例如，黄河流域和美索布达米亚平原各自贡献了两种粟。长江以南地区驯养了家猪。正是 SFI 的活动使笔者同考古工作者交上了朋友。2007 年在复旦大学举行的“稻作文明的起源和粳籼分离问题”学术研讨会，国内考古学家、生物学家和农学家们同堂切磋，各有收获，可以说是 SFI 活动的余波。

## 教育和出版活动

科学研究资助部门对学科的划分、高等学校的专业设置，乃至研究机构的方向和分工，都落后于实际的科学发展。对于跨学科的研究方向，这种局限的负面影响更为严重。因此，SFI 活动的一个重要方面，是对现在的青年人、未来科学技术的主力军，进行交叉科学和复杂性思维的宣称教育。

SFI 针对从高中生、大学本科生、研究生到科学工作者的不同群体，开展拓宽对复杂性认识的教育活动。每年夏天有不少高中学生来圣菲城参加夏令营式的活动。他们每年为社会科学工作者举办讲授数学方法的小规模研讨班。SFI 针对社会、科学和技术领域人们有普遍兴趣的问题，每年组织若干次公众演说。SFI 教育活动中最重要的事件，当推每年在美国和其它地方组织的复杂系统夏季学校，我们在后面再专做介绍。

SFI 出版《复杂性》(Complexity) 和《研究所通报》(SFI Bulletin) 等刊物，会议文集序列和学术专著。20 多年来，已经形成了复杂性研究的重要信息资源。SFI 的常驻、访问和外聘人员，把处于不同阶段的研究结果写成文稿，以工作论文 (SFI Working papers) 形式非正式出版。许多这样的工作论文最终发表在正式学术刊物上。从 1989 年以来的工作论文，都可以通过 SFI 的网页查得电子文件。它们在相当程度上反映了 SFI 在各个时期的研究领域和课题变化。

## 中国与圣菲研究所

在 1999 年以前，中国学术官员或学者个人时有对 SFI 的拜访，也有年轻人到 SFI 做过博士后。2000 年早春，SFI 派了一个小组来华，主动接触了更多的单位和学者。当年 8 月，一个约由 10 人组成的中国小组到 SFI 举行了为时 5 天的双边学术会议，探讨进一步合作。2002 年中国科学院数学和系统科学研究院同 SFI 在北京举行了“复杂系统的干预和适应”的国际会议，与会者



Figure 2: 2006 年秋作者 (右) 同博士生汪浩访问圣菲研究所时合影。

有多位中美之外的 SFI 朋友。笔者在 2002–2003 年度应聘担任 SFI 的资深国际成员，但由于“911 事件”访问未能成行。复旦大学和 SFI 原定 2003 年在上海组织的“生物复杂性”研讨会，因“非典”而推迟到 2004 年举行。同年，SFI 和青岛大学及该校复杂性研究所合作，在青岛组织了第一次复杂系统夏季学校。这个夏季学校从 2005 年开始由中国科学院理论物理研究所和 SFI 合作每年在北京组织，迄今已经举行四届。由于复杂系统夏季学校很能反映 SFI 的学术作风，我们更为详细地介绍一下。

原来 SFI 从 1988 年开始在圣菲城组织每年一度的复杂系统夏季学校，积累了不少经验。有些夏季学校的早期学员，后来成为 SFI 的博士后或进入其研究团队。通常每年年底之前，全世界的年轻研究生、博士后和一些刚刚开始走上研究之路的青年学者都可以通过 SFI 的网页报名，通过竞争获得参加夏季学校的资格。这几年的北京夏季学校，每期录取学员约 50~60 人，其中来自中国大陆者略少于半数。他们的专业背景十分广泛，从社会科学到数理科学都有。夏季学校为期四周，开学伊始，学员们互相介绍之后，每个人提出想要研究的课题。经过几天酝酿归并，形成若干小组，每组 3 至 6 人。鼓励不同专业、不同地域的学员结伴成组。各个小组的研究活动与夏季学校的教学同步进行。第一周课程的主要内容是复杂性和复杂系统的基本概念，以及研究复杂性的方法。以后各周，各有一两个主题，例如自适应系统、网络动力学，基于代理人的模型，遗传算法和进化算法，考古和社会发展，生物系统的复杂性，语言的进化，等等。每年的主题有所不同。到了第四周，各个小组的研究课题有了初步结果，大家登台演讲交流。许多课题在夏季学校结束之后，还可以继续以电子邮件等方式继续进行，甚至作出可以发表的成果。



SFI 风格的复杂性研讨会和夏季学校，已经逐步扩展到欧洲、印度和南美地区。

### 对我国复杂性研究的一些感想

复杂性“科学”和复杂性研究在中国不可谓不热。早在 1991 年中国科学院就在北京举办了复杂性讨论会，会后由科学出版社印行了题为《复杂性研究》<sup>4</sup> 的专集。17 年过去了，查一查文集中的作者们对复杂性研究给出多少新的科学贡献，就可以少许体验“复杂性研究”的某些中国特色。这种特色也反映在许多类似的书中，例如《开创复杂性研究的新学科》<sup>5</sup>。这一时期还有过“老三论”（控制论、信息论、系统论）已经不行时了，而被“新三论”（“耗散结构论”、“协同论”、“混沌论”）代替的说法——这曾是北京某电视台的一道知识测验题。事过境迁，除了几本译著和科普读物、几篇介绍文字，“新学科”的许多热情鼓吹者们又留下了多少具体的科学成果？认真的读者翻阅一些这类书刊文章，不难得出自己的结论。

从 1980 年代初“混沌”潮与“耗散结构”热的兴而复衰，到如今“系统生物学”在大江南北走红，我们在国内的一些学术会议上，经常能听到要把现代“系统论”，以及“复杂性”、“非线性”方法用于传统医学研究、以整体论的观点认识中草药的功能等种种高谈阔论，却极少见到具体的科学实践和成果。有人说，西方的还原论已经走投无路，现在到了发扬东方整体论的时候。其实，还原论和整体论并不是对立的观念。把狗的某些内脏逐个切除，观察其生理后果；偶然看到苍蝇聚集在切除了胰脏的狗所排尿液上，最终认识到胰岛素与糖尿病的关系，这可以算是还原论吧？然而西方医学已经发展到对糖脂代谢综合症的全面研究和治疗，这难道不包含整体论的思维？其实，对还原论并没有做过多少实质性贡献的人们，也缺少奢谈整体论的资格。以老祖宗的哲学是“整体论”而自豪，不过是一种阿 Q 精神——剪掉了辫子的阿 Q 成了阿 O。

与复杂性研究密切相关，“系统生物学”一词在中国也受到特别青睐。有人认为我国传统文化富含“系统”观点。于是，系统生物学一词在国际上出现不久，国内许多单位就忙于建立“研究中心”、“研究所”或在大学中设置系统生物学系，把国外系统生物学的倡导者请来演讲，担任顾问或名誉主任。笔者几年前参加过成立仪式的几家，似乎一直没有在国际上显现出可见度。当然，国内也有脚踏实地、开始做出成绩的单位。位于上海交通大学的上海系统生物医学研究中心，在人类肠道菌群和代谢组学方面的研究，这两三年已经在重要的国际学术刊物和会议上开始初露头角。那是生物学家、医学家和生物信息学工作者们多年具体实践、密切合作的结果。他们背后还有着数以亿计的投资和长远规划。只有真正把一批活跃的实验和理论工作者，团聚到同一个屋

<sup>4</sup> 中国科学院复杂性研究编委会，《复杂性研究》，北京：科学出版社，1993。

<sup>5</sup> 魏宏森、宋永华等编著，《开创复杂性研究的新学科——系统科学纵览》，成都：四川教育出版社，1991。

顶下，具体合作、长期奋斗，才能在“复杂”和“系统”研究方面作出一些经得起时间考验的具体结果。

说到“具体”二字，这才是复杂性研究的关键词。其实，复杂性和具体性、特殊性沿同一方向延伸。唯其具体，所以复杂。人们都承认生命现象复杂。然而，生命现象只在一定历史时期、一定温度范围内出现在这个小小地球上的特定深度和高度以内的生物圈里。迄今为止，还没有在其它天体上发现存在类似生命活动的确切证据。即使将来有所发现，也不会像星体、星系、星际物质、可测能量和暗能量那样普遍存在。各态历经、定态稳恒，是物理学描述自然现象时常用的近似，而生物进化可以说是各态历经的破缺。地球上的生命进化是人们能够研究的唯一的进化样本。只有通过具体研究，才能揭示和认识生命现象的复杂性。其实，形式逻辑学中的概念外延与内涵的反比定律，早就告诉我们，外延无穷大的范畴，其内涵为零。用抽象概念堆砌而成的“复杂性理论”，科学含量甚微。研究各种具体的复杂系统，可以发现它们显现出许多普适性质。具体系统研究得多了，也可能发现新的普适概念。反映普适概念的一些新词，可以用来修饰研究论文，却不宜作为研究的起点。有人宣称，研究复杂系统的方法，就是“定性分析与定量分析相结合”。试问，这样的原则性议论，能指导那一位博士生发现和解决新问题，得出新的科学结果？

企图用普适性的理论和概念，去预测具体事件的发生，是另一种值得反思的倾向。例如，用“混沌理论”去预测地质灾害，用“复杂性理论”促进中医药研究。这类提法，容易误导学子，但便于在我国的科学管理和资助体系下骗取经费。这种课题，到头来往往是无疾而终，顶多留下些空洞的议论文章。统计性质和宏观表现的普适规律，和每一个别事件的具体性与特殊性，都是研究复杂系统必须关注的方面，而且后者往往比前者更具启发性，更能成为新认知的源泉。

许多从大量具体研究中提炼出来的普适概念和规律，例如标度不变性、分形和分维、无标度网络、幂次律等等，都有其适用范围。在普适规律“指导”下的研究工作，首先要解决的重要问题，就是阐明它们的适用范围。分析对于普适规律的偏离，有时反而会带来更有益的知识。普遍性的规律往往是对无限时空外推的结果，而具体的被研究的对象则总是有限的。

既然笔者在上文中提到了一些自己不认同的现象，就必须回答读者的可能问话：“你又做了什么具体贡献？”从1990年代初着手研究动力学导致的符号序列的复杂性<sup>6</sup>，经过与数学家谢惠民的多年切磋与合作，到应用“可因子化语言”分析DNA和蛋白质序列，前后近20年。2008年与谢惠民联名《非线性科学与复杂性》英文文集撰写的专章<sup>7</sup>中所介绍的工作，部分地反映了我们所做过的努力。应当指出，这些并不是我们这几年的研究主线，而是分析基因组数据的“副产品”。

<sup>6</sup>Bailin Hao, Symbolic dynamics and characterization of complexity, *Physica D*51 (1991), 161-176.

<sup>7</sup>Bailin Hao, Huimin Xie, Factorizable language: from dynamics to biology, Chapter 5 in *Reviews of Nonlinear Science and complexity*, ed. by Heinz Georg Schuster, Wiley-VCH, Weinheim, 2008, 147 – 186; SFI Working Paper No. 07 08 16.



在结束本文之前，还想触及一个问题：究竟有没有“复杂现象”和“复杂性科学”？早在 1950 年代中期，物理学家玻恩 (Max Born, 1882 - 1970) 就曾指出，如果各自以相应的自然时间单位测量，微观世界远比宏观世界“长寿”。我们看到，在长寿乃至永恒的微观世界里，物理学不断揭示出“简单”的运动和相互作用规律；人类对这些规律的认识也是一个永无止境的渐近过程。在有限甚至“短命”的宏观世界里，处处涌现出有待认识的复杂现象和行为。基本物理规律的内秉简单性和宏观世界的表型复杂性形成鲜明对比。它们发生在不同的时空尺度上，也要求用不同质的方法加以分析。具体分析具体问题，从特殊性中抽提出普遍性，而不是从定义出发，以概念游戏代替艰苦的科学劳动——这是复杂性研究的要义。