

网络科学与统计物理之间的联系与挑战

方锦清

(中国原子能科学研究院 102413)

前言

世纪之交国际上诞生了一门新兴交叉学科——网络科学，在国内外遍地开花，迅猛发展。研究方兴未艾。网络科学的两大主要理论基石——图论数学与统计物理发挥了极其重要的作用。我们一直面对一个值得思考的问题：网络科学和统计物理（平衡和非平衡态）之间究竟有何内在联系？它们的主要前沿课题是什么？无标度网络理论的创立者艾伯特·拉斯洛·巴拉巴希 (Barabasi) 在其科普名著《链接》一书里的回答是：“寻找或发现网络的动力学普适规律及其网络拓扑结构、功能的关系就是前沿课题之一。”“我们需要攻克下一个前沿问题，就是理解在网络中发生的动力学过程。……是否有这样的可能：这些动力学过程有着一些共同的特征？”大家确信：动力学共性肯定是存在的，只是迄今尚未完全构建其普遍性的理论框架。复杂网络必然存在丰富多彩的平衡态和非平衡态统计物理过程，寻找复杂网络及广泛的复杂系统的理论基础离不开统计物理方法。与网络拓扑结构的普遍性相比，发展网络动力学共性的理论基础不可能离开统计物理方法的创新和发展，特别是非平衡统计物理将大有作为。进而，理论上自然提出的问题是，网络科学是否存在或需要建立一套包括动力学方程在内的网络科学的统一的基本理论体系？回答是肯定的。本文将分四部分来讨论上述问题。

一、生动的联系实例：复杂网络中的玻色 - 爱因斯坦凝聚现象

首先，究竟网络科学的理论基石是什么？几十年来，人们一直把数学领域的图论作为网络科学的主要理论基石。巴拉巴希在《链接》一书里，首先揭开了这个基本问题。巴拉巴希团队除了发现无标度网络特

性外，并揭开了一大类真实网络动态演变特性与统计物理的内在联系，特别是，他们发现网络中出现了类似于玻色 - 爱因斯坦凝聚 (BEC) 现象。众所周知，BEC 是科学巨匠爱因斯坦 1924 年首先从理论上预言的一种新物态，一种非常普遍存在的物理现象。发现理想玻色气体在一定临界温度 T_c 下会发生凝聚，即宏观数量的原子将占据动量为零的基态，在一定临界温度下，无相互作用的玻色子会在最低能量量子态上突然凝聚，达到可观的数量。其他原子组成饱和理想气体。玻色 - 爱因斯坦凝聚的体系可是气体，液体，固体，也可是原子核和基本粒子，甚至还可是中子星或超新星中的物质。实验上观察到 BEC 现象要选择一种合适的特定体系，其温度要足够低，以至于粒子的德布罗意波长 (λ_{db}) 大于粒子间的平均距离。但是，很长时间由于找不到合适的实验体系以及实验技术的限制，BEC 的早期实验研究进展极为缓慢。20 世纪 80 年代末以来，BEC 之所以成为物理研究中的热门课题，完全是因为实验技术取得了突破性进展。1989 年，威曼 (Wieman) 和楚 (Chu) 等人提出采用碱金属原子气体进行 BEC 实验。对于碱金属原子而言，如果要使其原子间的相互作用很弱，则原子的密度必须很小，温度必须足够低，这就需要寻求一种新的冷却方法。可喜的是，1997 年华人物理学家朱棣文因“发明了用激光冷却和俘获原子的方法”荣获诺贝尔物理学奖。正是激光冷却与囚禁中性原子的技术迅速发展为 BEC 的研究提供了及其优越的现代实验条件。终于在 1995 年从实验上观察实现了气相原子的 BEC 现象。美国科罗拉多大学实验天体物理联合研究所 (JILA) 和国家标准技术研究所 (NIST) 的威曼小组于 1995 年 7 月首先报道了在实验上观察到的 ^{87}Rb 原子的 BEC 现象；

统计物理与复杂系统研究前沿进展专题 II

同年 8 月，美国莱斯大学（Rice University）的布拉德利（Bradley）小组报道了 ^7Li 原子的 BEC 的观察结果；11 月，美国麻省理工学院（MIT）的戴维斯（Davis）等人又报道了 ^{23}Na 原子的 BEC 的实验结果。这三个实验宣告了实验实现了 BEC，这在物理界引起了强烈反响，成为 BEC 研究史上的一个重要里程碑。那么，玻色-爱因斯坦凝聚与复杂网络究竟有什么关系呢？

与宏观网络不同，量子网络系统的基本特征是其节点可由粒子能级或可观粒子组成，它们从物理上反映微观粒子的动力学和拓扑性质的演化。例如，量子玻色（Bose）网络，尽管它可能是非平衡的或不可逆的；值得注意的是网络的演化可映射为玻色气体的变化，特点是：网络节点对应于能级，其连线表示粒子。这时一个节点吸引了大量的连接线（反映能级大小），其演化的结果可导致类似于玻色-爱因斯坦凝聚现象。

我们来看玻色-爱因斯坦凝聚与复杂网络之间的

联系。图 1 示出复杂网络与玻色-爱因斯坦凝聚映射相互类比及对应关系。

从图 1 可见：理论模型的特点是网络中的链接对应气体中的粒子，每个特定的能级代表粒子具有不同的粒子数，能量由下面最低向上增加。图 1 (a) 左上方为一个 5 个节点的网络图示意图，每个节点用一个圆圈表示对应于能级，节点之间连线表示粒子。各个圈里各有不同适应度 η_i （或称适应性）大小。网络演化由每个时间步 t 加入一个新节点，应用虚线链接表示，新节点与 m 个节点相连接，节点 i 与节点 j 的链接分别对应于 ε_i 能级和 ε_j 能级上的粒子数。随着时间增加，网络规模不断随 η_i 增加而增长，从图 1 (a) 上方网络向下方 (b) 网络演化成 FGR（适应性）态。 η_i 越大，所处的能级越低，即网络链接概率 Π 与适应度 η_i 大小成正比。适应度越大的节点被链接的越来越多，并处在越来越低的能级上，从图 1 (a) 下方网络演化到图 1 (b) 下图出现网络 BEC 现象，因为明显

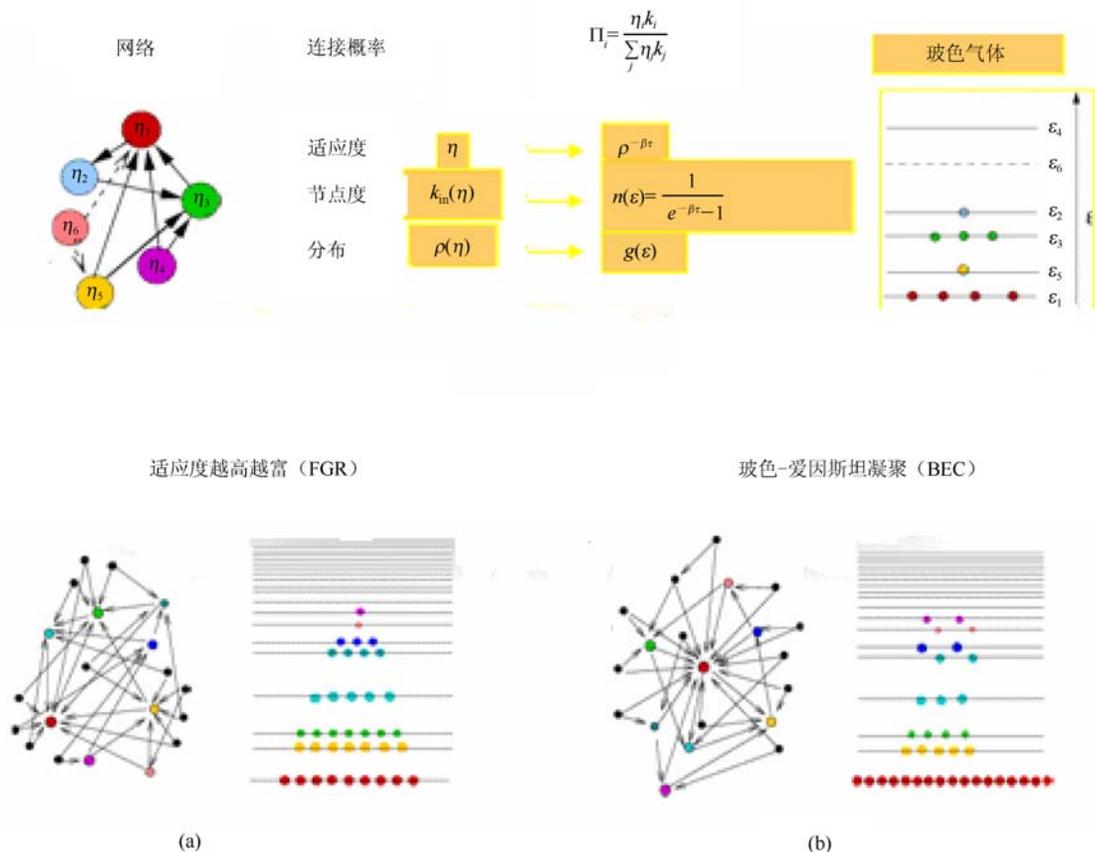


图 1 网络与玻色-爱因斯坦凝聚类比的示意图

出现星形结构形式，即出现极大部分粒子凝聚在下面最低能级水平上，如同在玻色-爱因斯坦凝聚态一样。复杂网络中的最适应度的节点吸引了几乎所有对应于密集低能级的连线，因此产生“适者越富”现象，并使高能级变得越来越稀疏。根据爱因斯坦 1924 年预测的 BEC 现象，于是，巴拉巴希小组发现在复杂网络中竟然对应地出现类似的 BEC 现象，令人惊奇和十分有趣。这种现象表明：在一些实际复杂网络中存在胜者通吃，某节点会获得所有链接，使其变成星状网络，因而具有 BEC 特征。

2001 年毕纳茨尼 (Binanconi) 与巴拉巴希在著名《物理评论通讯 (PRL)》上提出网络适应度模型，解释了复杂网络出现的 BEC 现象 (其理论推导和证明从略)。可喜的是，物理学家发现了真实网络是快速演变的动态系统后，某些网络出现了 BEC 现象，即在某些网络中最适应的节点会吸引所有链接，其他节点一个也得不到。结局就是胜者通吃，最终对应的网络出现星型结构。理论完全证明在适应性模型和玻色气体之间确实存在图 1 所示的精确对应关系。这意味着，网络和玻色气体在控制行为的原理上是相同的。复杂网络的一些特性将微观和宏观世界有机地联系在一起，这种内在联系令人信服。请注意：当对应所有的能级都取 $\epsilon=1$ 时，适应度模型就退化为无标度模型，即网络又出现无标度特性。

人们终于认识到，根深叶茂和博大精深的物理学，尤其是统计物理学，确实成为网络科学的重要的理论基础和有力的武器之一，也成为推动交叉科学创新的用武之地。

当代的爱因斯坦——霍金指出：“21 世纪将是复杂性科学的世纪”。网络科学与许多新兴科学交叉发展，必将共同促进世界科学的繁荣昌盛。

二、统计物理的主要理论武器及其在网络科学中的广泛应用

2001 年阿尔伯达和巴拉巴希在《现代物理评论》上发表了《复杂网络的统计力学》的长篇综述，既系统地评述了复杂网络的研究进展，又精辟介绍了统计物理的主要理论和方法在网络科学中的应用，特别是关于网络拓扑特性及动力学的统计力学研究所取得的

一系列成果和重要进展，很好阐明了统计力学在网络科学的应用概况。其主要理论武器涉及：主方程、福克-普朗克 (Fokker-Planck) 方程、平均场理论方法、自组织理论、谱理论、临界和相变理论、率方程、熵理论、渗流理论、相变理论等。下面略加说明。

1. 网络科学与众多科学的广泛交叉

网络科学的两大理论支柱是数学图论与统计物理学，也涉及众多学科，如图 2 所示。主要包括，非线性科学、复杂性科学、数学理论、系统科学和现代控制理论等。而每个学科包含更详细的基础知识，如数学上涉及随机图理论、概率论与随机过程分析、马尔可夫过程与马尔可夫链方法，随机微分方程解法，组合分析方法，拓扑学，优化理论，常微分和偏微分方程，等等。网络科学正是在继承和发展许多科学成就和体系的基础上，进行整体性、交叉性和综合性的研究，进而揭开复杂网络系统的结构、功能和动力学性质之间奥秘关系，发现客观世界更深层次的新规律，更好地服务于人类。

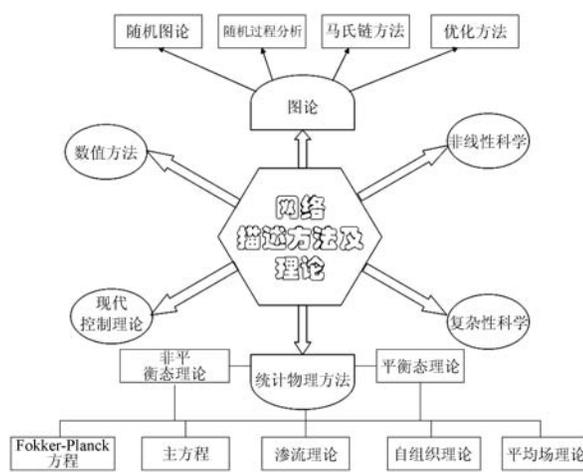


图 2 网络科学与统计物理等相关理论方法的联系

关于网络科学的主要理论成果，我们以具有代表性的小世界网络、无标度网络和统一混合网络等略作简介。

2. 小世界网络

1998 年瓦茨 (Watts) 和斯特罗迦茨 (Strogatz) 提出了小世界 (WS) 网络模型，它介于完全规则网络和完全随机网络之间，图 3 示出三种网络与随机概率关系。他们发现了小世界特性 (现象或效应)，小

统计物理与复杂系统研究前沿进展专题 II

世界网络同时具有小的平均路径长度和高的群聚系数两个特性。对于左边规则网络的随机连接概率 $p=0$ ，而右边随机网络 $p=1$ 。中间为小世界网络 ($0 < p < 1$)，其生成方法：从一个规则网络开始，它是具有 N 个节点的规则圆环，圆环上每一个节点与两侧各有 m 条边相连，然后以连接概率 p 对每条边进行随机化重连，但必须除去自我连接和重边，这些随机重连的边叫“长程连接”，正是依靠随机地“长程连接”才大大地减小了网络的平均路径长度，从而提高了网络的群聚系数（抱团程度）。

现实世界的大量实际网络都表现出小世界特性，但它们的形成机制具有多样性。

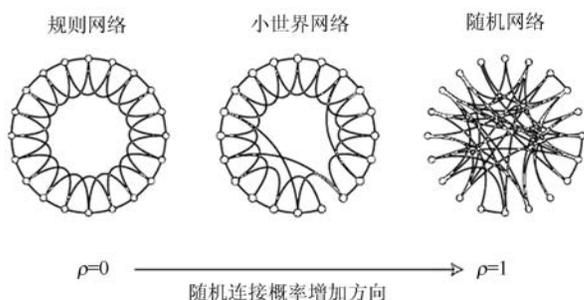


图3 三种类型的网络结构图随着随机概率增加的关系比较图

实际上，一个网络的结构对于一个网络系统的集体动力学行为能具有诱人的影响。只要稍微修改网络的结构（链接方式）就可能导致动力学行为明显变化，有时改变某个网络特性只需调整网络的局域知识或信息即可。例如流行疾病传播等就是一个典型例子。

其实在 20 世纪 60 年代，为了验证一个小世界猜测：社会网络中的任何两个人之间都可通过少数的朋友关系而联系起来。美国心理学家斯坦利·米尔格拉姆 (Stanley Milgram) 进行了“六度分离”的通信实验，该实验结果中有近 1/4 的信最终送达了目标人。统计这些成功送达的信件传递次数后发现其平均传递次数是 6 次，由此提出了“六度分离”理论假设。由此实验推断：社会网络具有小世界特性，几乎任意两人（节点）之间都存在一条连通的短路径，而且人们可通过各自的朋友来找到这条短路径。这就是所谓“可导航性”。随后人们根据统计理论研究提出了一个定理：基本的随机网络模型几乎都可产生大量丰富的短路径。并且给出了一个判断小世界特性的“黄金

准则”，即所谓的小世界网络通常是指规模为 n 的网络中几乎所有节点对都存在长度为 n 的对数多项式的路径——取其对数的结果。这就是“可导航性”的判据。在 2006 年世界数学家大会上，克莱因伯格 (Kleinberg) 因对网络可导航研究作出突出贡献而获得了奈旺林纳 (Nevanlinna) 奖，他在大会报告中指出：“构造出一个动态的且网络中结点度分布满足幂律分布的可搜索网络是以后研究网络的一个重要方向”。

一千多年前，我国唐朝著名诗人王勃名诗：“海内存知己，天涯若比邻”，这种“若比邻”的小世界提法，与现在互联网通信恰如“地球村”的感觉何其相似，充分表明中国人从人文和哲学上最先认识到了小世界现象。只是到了 20 世纪 60 和 90 年代现代科学能通过社会调查和互联网实验等手段证实罢了。

3. 无标度网络

1999 年，巴拉巴希和阿尔伯达首先提出无标度 (SF) 网络模型，简称 SF 或 BA 模型，这是复杂网络的一个突破性进展。他因此在 2006 年荣获了匈牙利计算机学会颁发的冯·诺依曼金质奖章，他是建立基于网络共性的统一科学理论的先行者。

BA 模型形成无标度特性的主要机制有二条规则：一是网络增长性，规模随时间不断增加；二是择优链接或偏好连接度大的节点。这样只有少数节点度越来越大，大多数节点的度比较小，整个网络的节点分布极不均匀。当在网络中选择节点与新增节点连接时，假设被选择的节点与新节点连接的概率与被选节点的度成正比，因此，新结点 n 与老结点 i 的随机优先连接概率正比于节点度 k 大小：

$P_{n \rightarrow i}^{\text{BA}} = \frac{k_i}{\sum_j k_j}$ 这样，BA

模型的度 k_i 度变化满足率方程：

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = m\pi(k_i) = m \frac{k_i}{\sum_{j=1}^{n-1} k_j}$$

从理论上证明：网络最终演化成标度不变状态，即节点度服从度指数等于 3 的幂律分布。

最生动的例子是，通过追踪万维网的动态演化过程，万维网的页面数量不断增加，1990 年整个万维网只有一个网页，而到今天它的网页数已超过上百亿了。

人们可从数十亿个网站中进行选择，大部分人只熟悉整个万维网的一小部分，其中往往包含那些拥有较多链接的站点，这样的站点更易为人所知。只要链接到这些站点，就等于加强了对它们的偏好链接。增长和偏好链接的过程，导致发现了大多数复杂网络的节点度服从幂律函数分布，因为这分布没有网络系统的特征长度，因此称为无标度网络。许多实际网络也有类似的增长演化过程。典型的例子有整个因特网， k 开始只有几个路由器，随着新的路由器与网络原有的路由器相连接，如今路由器的数量已高达成百上千万了，那些链接较多的路由器通常还拥有更大的带宽，因而新用户就更倾向于链接到这些路由器上。同样，好莱坞演员网中链接关系较多的影星更易受到新秀们的重视。类似地，在科学家合作网中，被引用较多的科学文献，会吸引更多学者去阅读和引用。这种“富者逾富”的过程，也叫“马太效应”，这使得早期老节点更有可能成为网络的中心节点。

无标度特性的理论研究在不断深化。除了平均场、率方程方法分析度分布，还用主方程方法等统计物理分析方法，给出了一大类增长演化网络模型的动态特性的精确解。特别是，巴拉巴希称赞波洛巴西 (Bollobas) 等人在 2001 年发表一篇具有里程碑式的论文中，从数学上严格证明了无标度特性。

网络模型及其生成机制一直是复杂网络研究的一个重要方向。实际上形成无标度网络的机制具有多样性。已揭示了产生幂律度分布的内在驱动机制，包括：富者愈富、好者变富、优化设计、哈密顿动力学驱动、聚生机制、稳定性限制和共同邻居驱动机制等。

在现实世界网络中，采用加点、加边、去点、去边、边的重连等一系列基本的细微拓扑结构的变化形成网络的演化，实际上，网络的任何局部拓扑变化都可由前四个做法或其组合得到。在许多复杂网络中，节点获得新连接的能力除了与节点度相关外，还与其固有的竞争能力有关，如适应度。适应能力强的节点，可能比那些连接度高但适应度低的节点获得更多的边，从而变成连接度大的节点，这就是所谓的“适者变富”。复杂网络中出现 BEC 现象就是如此。

十多年来各种复杂网络模型及其相关理论与应用

蓬勃发展，有兴趣读者请看专著《网络科学与统计物理方法》(2011, 北京大学出版社)。

4. 一种统一混合网络理论框架

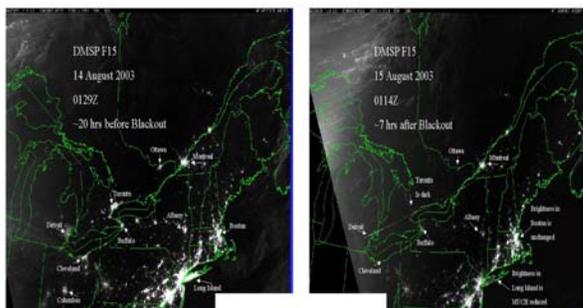
自然界和人类社会是随机性与确定性的统一和谐的世界。基于此基本事实，完善和发展网络的混合理论模型是网络科学研究的重要方向之一。不论是物理网络、还是生物网络和技术网络，确定性和随机性两者的混合总是自然地和谐地共存于自组织复杂网络系统之中。多种混合和择优链接方式在自然界和人类社会中具有普遍性和广泛性，理论研究应该尽可能符合自然的、社会的、物理的、技术的以及生命的实际网络情况。已发现许多实际网络兼有小世界特性和无标度性质。随机性与确定性混合链接方式的网络模型是否能更符合实际网络？它能否揭示新的特点和规律？为此，原子能科学研究院网络科学小组提出和发展了一种统一的混合网络理论框架，分析结果表明，它不仅能涵盖大多数网络理论模型，而且揭示了随四个混合比变化涌现若干新特点、新现象，并已应用于一些复杂网络演化研究，获得更接近于实际网络的特性。本刊 2015 年第 3 期的文章《复杂系统的一大类典型的自组织形式》已有介绍。我们在《力学进展》2008 年 38 卷 6 期发表的论文《网络科学中统一混合理论模型的若干进展》2013 年和 2014 年两度蝉联被选入中国科学技术信息研究所的《领跑者 5000- 中国精品科技期刊顶尖学术论文》(F5000)，得到同行好评。随着研究的深入，更符合实际网络的统一理论体系必将会进一步发展和完善。

三、网络科学面临着的最新挑战

1998 年以来，网络科学理论主要是基于单个网络拓扑结构和动力学理论，这是一种相对简化的网络科学理论框架。实际上，现实世界总是存在着大量相互关联和彼此依存的复杂网络系统。于是，最值得关注的是，现实广泛存在的“网络的网络 (NON)”、或称“超网络”已引起广泛关注，成为网络科学最富挑战性的课题。NON 至少具有下列“诸多”特点之一：多层性、多维性、多属性、多重性、多目标、多参数、多准则、多选择等。NON 是相互嵌套、相互依存、彼此关联和相互影响的。怎么从单一网络的理论发展

统计物理与复杂系统研究前沿进展专题 II

到 NON 的理论，我们面临前空前的挑战。目前还缺乏 NON 统一的理论框架和丰富的成果。取得的进展之一是，相互依存的 NON 中的级联故障效应，一旦它发生在复杂电力网中，就会导致电网崩溃现象，就像 2003 年 8 月 14 日发生在北美的空前大停电（图 4），美国和加拿大东部广大地区遭遇了历史上最大规模的停电，1000 万人在黑暗中度过。多伦多和渥太华的地铁运输全部停顿。停电还袭击了美国东部地区，纽约、底特律和克利夫兰电力传输全部中断。纽约市地铁全部瘫痪，随即进入紧急状态。美加大停电造成了至少 8 人死亡。



停电前的卫星图 停电时的卫星图

图 4 北美大停电前后卫星图亮度比较

北美大停电发生后，起初说法如天方夜谭，怀疑是外星飞船引起的，有人则怀疑是恐怖袭击，但最后研究发现：这并不是一次有组织的攻击，它来自电线受热会膨胀引起的相互依存电网之间的级联故障效应。因为两个依存和相互作用的网络之间存在部分重叠，虽完全自主的节点的功能并不直接依赖于另外一个网络，但一旦自主节点的相互作用超过一定阈值时，就马上出现一级相变的特征在一定的耦合强度下不依赖的网络就会发生级联故障，突变到连续二级相变，导致崩溃。这次大规模停电暴露了全美电网脆弱不堪，并警示电网是反恐的一个薄弱环节。

另一个典型例子是互联网，它与电网、电信网和金融网等密切关联、相互依赖，因为互联网需要电信联系，而银行全部登陆互联网互通信息，存在多种网络交集。1996 年 10 月就出现一次互联网大崩溃，速度突降到原来 1% 以下。其实，互联网大崩溃不时发生，造成巨大损失。例如，2015 年 7 月，互联网安全事故频出，支付宝崩溃的消息还没在网络上彻底消停，国内在线旅游业携程旅行网和艺龙网突然也“跟风”陷

入瘫痪。其后专车平台优步以及若干券商，也都先后出现网络故障。互联网金融系统的安全性成为了人们关注的话题。而黑客就正是利用互联网的这种脆弱性进行攻击。

现实网络世界里级联故障无处不在。例如，生物体系系统也会出现类似的级联故障。不仅能影响到生物栖息地，而且能影响到细胞生长。细胞内分子聚集一旦出现了巨大变化，会导致级联反应，最终致使细胞死亡。

总之，现实世界面临无处不在的“网络的网络”的空前挑战。在 2014 年第 10 届全国复杂网络会议上，提出了今后网络科学面临的十大课题：

1. 探寻“网络的网络”（NON）普适的统一理论框架
2. 探索 NON 的动力学完全同步及广义同步的全过程及中微观层次网络之联系与统一
3. 非结构大数据的收集、挖掘和反挖掘、传输及可视化一条龙处理技术
4. 探索具有多层次复杂的动态时空网络的分析方法及揭开其时空演化特性
5. 对 NON 系统整体性能评估和刻画，需进一步引入哪些新概念、新指标和新方法？
6. NON 系统的鲁棒性、脆弱性、抗毁度、级联效应及其产生机制研究
7. 探索 NON 的可控性、能观性及其控制新的理论方法及其应用
8. 加强防御性和进攻性“网络武器”等网络空间安全技术的研究
9. 重视社交网络与人类行为动力学及其影响的研究
10. 开展国家和国防领域的重大网络基础工程和军民应用项目研究

其中第一个最大挑战就是 NON，特别是 NON 统一的网络理论框架，以及 2、3、5、6 和 7 问题。无疑，这些课题将成为今后网络科学深入研究与应用的的重要方向。

四、平衡与非平衡统计物理的可能统一之路

1. 网络平衡态系综的一个框架

研究复杂网络的理论可从两大方面入手，一是探

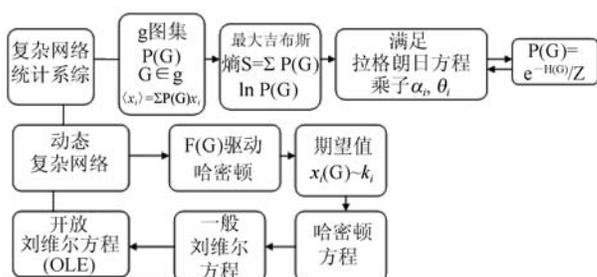


图5 复杂网络的平衡态统计方法的理论框架和基本路线示意图
(Park J. and Newnan M E J, Phys Rev E2004, 70, 066117)

讨网络理论模型及其拓扑与动力学特性；二是探索复杂网络系统理论及其应用。前者上述已作了基本介绍。后者这里略作说明。图5为复杂网络系统的平衡态统计方法的一个理论框架示意图。

从图5第一行表示：复杂网络系统可是g图集 $P(G)$ ，通过研究吉布斯（Gibbs）系综的最大熵考察网络系统的有序与混乱的变化程度。由于拉格朗日（Lagrange）方程是动力学普遍方程，可进一步用它来研究网络的动力学特性。

图5左列下来是研究复杂网络的一条基本路线，应用统计系综的理论方法，应考虑动态（时间-空间）复杂网络，必须从开放的刘维尔方程（OLE）入手，由于从平衡态到非平衡态的理论并不成熟，为此，需要探索复杂网络系统的哈密顿函数（Hamiltonian）合适的表达形式，才能提供一般的刘维尔方程形式，一般很难得到；有时在有系统外力驱动下可得到网络系统的哈密顿函数形式，然后可求得网络系统的统计平均值（期望值）。从图5说明，这些对于深入理解和探索复杂网络的统计系综理论是必要的，只有这样才能把统计物理理论方法逐步具体应用到复杂网络的研究中。

2. 平衡与非平衡统计物理的统一之路

自从吉布斯综合出一般平衡态统计系综理论以后，许多理论学者都试图将吉布斯理论推广到非平衡领域，尽管许多学者做了大量的工作，然而非平衡现象理论的建立不可能像吉布斯系综理论那样成熟和牢靠。迄今，如何建立非平衡和平衡统计系综的一个统一框架，一直是国内外面临的一大挑战性课题。

搞清楚从平衡态向非平衡态发展的物理过程、现象和规律，统计物理具有责无旁贷的责任。统计物理包含平衡态和非平衡态两部分。平衡态统计物理，是以吉布斯（Gibbs）平衡态统计系综理论为代表，历经

一百多年数代科学家的研究和发展，其基本概念和方法已趋于成熟和稳定，尽管在如何应用到具体网络模型上，还需要磨练。如何提炼出网络模型的哈密顿函数，一直是一大难点。另外，怎么把统计物理概念同网络概念进行协调融合贯通的问题，也需要创新。非平衡态统计物理作为一个独立活跃的学科，从一开始就是从大量微观粒子的貌似杂乱的运动规律中揭示和理解非平衡态系统的宏观运动和演化规律，进而理解系统不可逆的实质，达到理解宇宙的演化，控制、甚至克服物理或生命系统衰老的理想目标。然而在长达几十年的奋斗中，它还远没有达到胜利的彼岸。

迄今统计物理的基本矛盾仍然是：经典力学和量子力学，乃至爱因斯坦场方程都是时间演化对称的，可逆的；然而热力学第二定律所描述的自然界和社会所有实际系统都具有时间演化的破缺性，是不可逆的。宏观热力学第二定律和微观动力学的这种矛盾称为不可逆性佯谬，这个矛盾当然也是世界顶级科学家，包括诺贝尔奖得主普里高津为首的布鲁塞尔-奥斯汀（Brussels-Austin）学派一直关注和研究的重要问题。它在现代统计物理中的具体表现为：时间反演对称的刘维尔方程，长期被认为是统计物理基本方程，它与平衡态统计物理中微正则、正则和巨正则三个统计系综分布函数是协调的，可用它来计算平衡态的熵。然而，当用它来推算和解释非平衡态宏观系统及其不可逆性、解释以混沌、分形和孤立子等复杂性系统的不可逆性时，就可产生错误。这对网络科学的发展尤为重要，因为绝大部分网络如果具有复杂性，应是开放的、不可逆的、非平衡的和可演化的，包含着随机性和确定性、非线性、混沌和自相似等。非平衡态统计物理才是较适合的理论武器和处理手段。

人们自然提出网络科学的发展同样需要探索：什么是不可逆性佯谬的起源？为什么自然界似乎是用两个头脑思考，在动力学基础上是演化对称的、可逆的（时间反演不变），而在热力学第二定律基础上是演化对称破缺的、不可逆的？难道统计热力学规律本质上有别于动力学规律吗？这些值得思考啊！因为统计热力学必然同随机性、概率性的因素有关，但是这些随机性、概率性的因素是我们认识经验的不完备造成的吗？还是自然界固有的本质所在？

近二十多年，有一部分探索围绕这些问题展开，力图发现统计物理新的基本方程。但是要获得普适的、

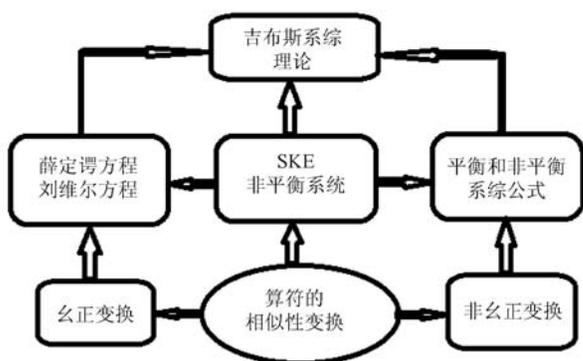


图6 平衡态与非平衡态的一种统一理论方案

广被接受的平衡态-非平衡态统计物理基本方程，谈何容易？如果在刘维尔方程后面添加新项，表现如同所有复杂系统，包括经典的、量子的系统相协调，目前尚无一个方程能达到这样的境地。在这一问题上基于子动力学方程和非平衡态系综理论，已初步提出平衡态与非平衡态的一种统一的研究方案，如图6所示。

研究表明：子系统的密度分布需要系统开放体系的自由哈密顿的本征投影算符加上总系统哈密顿的本征投影算符的共同作用才能获得，并且所满足的方程不是原来简单的刘维尔方程。基于布鲁塞尔学派独树一帜的子动力学理论，初步建立了一个适应于非平衡态统计物理新的基本方程。原来的刘维尔算子变成“中介（或碰撞）算符”，它们之间关系通过一个算符相似变换联系起来，并且对应于不可逆系统，这一变换是非么正的。这样一来，由对原来的刘维尔算子进行非么正相似变换而构造的“中介（或碰撞）算符”所带来的子动力学方程成为一个新的统计物理基本方程。这个相似变换为么正时，则退回到原来的刘维尔方程的等价表示，且“中介算符”同原刘维尔算子具有相同的谱结构。显然，这时它们所对应的三大统计系综的密度算子计算公式是相同的。

结 语

以普利高津为首的布鲁塞尔-奥斯汀学派始终强调，不可逆性是客观存在的，认为不可逆性是人类知识的不完备性所造成的幻觉，是违背非平衡统计物理所揭示的不可逆在形成新的耗散结构中所起的建设性作用的事实，也违背非线性科学所揭示的各种复杂性运动和演化的事实。因此原则上，自然界应该能找到描述非平衡态和平衡态的一个统一表述的理论框架，这样的统一表述框架是客观存在的。非平衡态统

计物理应该有基本方程。但是若有这样的方程，它是什么样的形式呢？难道它就是像人为地在刘维尔方程后面加上些新项作为补充吗？这一方程可否由非平衡熵演化方程导出？复杂网络的非平衡熵又遵守什么样的演化方程？熵产生率的微观物理基础是什么？开放网络的熵又如何推动网络演化？所有这些问题，首先归结为能否建立一个新的拓展了的刘维尔方程，使之不仅能适应于平衡态统计系统，而且也能适应于非平衡态统计系统。

致 谢

对于国家自然科学基金多项资助（批准号 Nos.61174151, 70431024），及诺贝尔奖得主普利高津教授为首的布鲁塞尔-奥斯汀学派长期的学术支持，与毕桥博士的合作，一并表示谢意。



科苑快讯

用激光束驯服闪电

划破长空的霹雳闪电可能看起来与点燃内燃机的火花大不一样，但它们最大的相同点是路径不可预测。闪电可以引到避雷针或风筝上的钥匙上，然而科学家却无法预测其行动路径。制造出电火花时，你一定希望精确到达目的地。科学家已经研究出一种方法，控制两个电极之间电火花产生的电弧路径，他们在《科学进展》（*Science Advances*）期刊上做了报告。

他们的做法是在两个电极间射出激光束，使空气过热并获得电荷转变为等离子体。等离子体吸引电火花指引其运动，好像电流在一个通道中移动。利用不同形状的激光束构造等离子体通道，研究者成功诱导电火花进入弧形甚至S形的路径。但是，绕过障碍物并不是唯一的选择。研究者也用电火花击中障碍物，在另一侧自我重组为先前观察到的某种类型激光束，而其中却并无电流。

新技术将能投入民用制造业以至电子干扰中，可在任何时间将电火花送达精确位置。虽然科学家对控制雷暴尚无可行方法，不过他们希望能够开展进一步的相关研究。

（高凌云编译自2015年6月19日 www.sciencemag.org）