

# 复杂网络研究概述\*

周涛 柏文洁 汪秉宏<sup>†</sup> 刘之景 严钢

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

**摘要** 近年来,真实网络中小世界效应和无标度特性的发现激起了物理学界对复杂网络的研究热潮.复杂网络区别于以前广泛研究的规则网络和随机网络最重要的统计特征是什么?物理学家研究复杂网络的终极问题是什么?物理过程以及相关的物理现象对拓扑结构是否敏感?物理学家进入这一研究领域的原因和意义何在?复杂网络研究领域将来可能会向着什么方向发展?文章围绕上述问题,从整体上概述了复杂网络的研究进展.

**关键词** 复杂网络,小世界,无标度,拓扑性质

## A brief review of complex networks

ZHOU Tao BAI Wen-Jie WANG Bing-Hong<sup>†</sup> LIU Zhi-Jing YAN Gang

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract** In recent years the discovery of small-world effects and scale-free properties of real-life networks has attracted a much interest among physicists. Which are the most important statistical characteristics for complex networks that are known from regular networks and random networks? What is the ultimate goal of the study of complex networks? Are physical processes sensitive to the topological structure of networks? What are the reason and meaning for physicists to enter the research field of complex networks? What are the directions for future research? In this paper we concentrate on the above questions and present a general overview of complex networks.

**Keyword** complex networks, small-world, scale-free, topological characters

## 1 引言

自然界中存在的大量复杂系统都可以通过形形色色的网络加以描述.一个典型的网络是由许多节点与连接两个节点之间的一些边组成的,其中节点用来代表真实系统中不同的个体,而边则用来表示个体之间的关系,通常是当两个节点之间具有某种特定的关系时连一条边,反之则不连边.有边相连的两个节点在网络中被看作是相邻的.例如,神经网络可以看作是大量神经细胞通过神经纤维相互连接形成的网络<sup>[1]</sup>,计算机网络可以看作是自主工作的计算机通过通信介质如光缆、双绞线、同轴电缆等相互连接形成的网络<sup>[2]</sup>.类似的还有电力网络<sup>[1]</sup>、社会关系网络<sup>[1,3,4]</sup>、交通网络<sup>[5]</sup>等等.

数学家和物理学家在考虑网络的时候,往往只关心节点之间有没有边相连,至于节点到底在什么位置,边是长还是短,是弯曲还是平直,有没有相交等等都是他们不在意的.在这里,我们把网络不依赖于节点的具体位置和边的具体形态就能表现出来的性质叫做网络的拓扑性质,相应的结构叫做网络的拓扑结构.那么,什么样的拓扑结构比较适用于描述真实的系统呢?两百多年来,对这个问题的研究经历了三个阶段.在最初的一百多年里,科学家们认为

\* 国家重点基础研究发展计划项目,国家自然科学基金(批准号:70271070,70471033,10472116)、中国与加拿大大学工业联合基金(批准号:CCUIPP-NSFC 70142005)、高等教育博士点专项基金(批准号:SRFDP 20020358009)资助项目  
2004-06-30 收到初稿 2004-08-07 修回

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: bhwang@ustc.edu.cn

真实系统各因素之间的关系可以用一些规则的结构表示,例如二维平面上的欧几里德格网,它看起来像是格子体恤衫上的花纹;又如最近邻环网,它总是会让你想到一群手牵着手、围着篝火跳圆圈舞的姑娘。到了20世纪50年代末,数学家们想出了一种新的构造网络的方法,在这种方法下,两个节点之间连边与否不再是确定的事情,而是根据一个概率决定。数学家把这样生成的网络叫做随机网络,它在接下来的40年里一直被很多科学家认为是描述真实系统最适宜的网络<sup>[6-8]</sup>。直到最近几年,由于计算机数据处理和运算能力的飞速发展,科学家们发现大量的真实网络既不是规则网络,也不是随机网络,而是具有与前两者皆不同的统计特征的网络。这样的一些网络被科学家们叫做复杂网络(complex networks),对于它们的研究标志着第三阶段的到来。

遗憾的是,就目前而言,科学家们还没有给出复杂网络精确严格的定义,从这几年的研究来看,之所以称其为复杂网络,大致上包含以下几层意思:首先,它是大量真实复杂系统的拓扑抽象;其次,它至少在感觉上比规则网络和随机网络复杂,因为我们可以很容易地生成规则和网络,但就目前而言,还没有一种简单方法能够生成完全符合真实统计特征的复杂网络;最后,由于复杂网络是大量复杂系统得以存在的拓扑基础,因此对它的研究被认为有助于理解“复杂系统之所以复杂”这一至关重要的问题。

## 2 复杂网络的统计特征

如前所述,复杂网络具有很多与规则网络和随机网络不同的统计特征,其中最重要的是小世界效应(small-world effect)<sup>[1-9]</sup>和无标度特性(scale-free property)<sup>[10,11]</sup>。

在网络中,两点间的距离被定义为连接两点的最短路所包含的边的数目,把所有节点对的距离求平均,就得到了网络的平均距离(average distance)。另外一个叫做簇系数(clustering coefficient)的参数,专门用来衡量网络节点聚类的情况。比如在朋友关系网中,你朋友的朋友很可能也是你的朋友,你的两个朋友很可能彼此也是朋友。簇系数就是用来度量网络的这种性质的。用数学化的语言来说,对于某个节点,它的簇系数被定义为它所有相邻节点之间连边的数目占可能的最大连边数目的比例,网络的簇系数 $C$ 则是所有节点簇系数的平均值。研究表明,

规则网络具有大的簇系数和大的平均距离,随机网络具有小的簇系数和小的平均距离。1998年,Watts和Strogatz通过以某个很小的概率 $p$ 切断规则网络中原始的边,并随机选择新的端点重新连接,构造出了一种介于规则网络和随机网络之间的网络(WS网络),它同时具有大的簇系数和小的平均距离,因此既不能当作规则网络处理,也不能被看作是随机网络<sup>[1]</sup>。随后,Newman和Watts给出了一种新的网络的构造方法,在他们的网络(NW网络)中,原有的连边并不会被破坏,平均距离的缩短源于以一个很小的概率在原来的规则网络上添加新的连边<sup>[12]</sup>。后来物理学家把大的簇系数和小的平均距离两个统计特征合在一起称为小世界效应,具有这种效应的网络就是小世界网络(small-world networks)(见图1)。

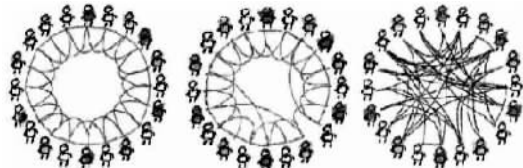


图1 小世界网络拓扑结构示意图(左边的网络是规则的,右边的网络是随机的,中间的网络是在规则网络上加上一小点随机的因素而形成的小世界网络,它同时具有大的簇系数和小的平均距离)

大量的实验研究表明,真实网络几乎都具有小世界效应<sup>[1-5,13]</sup>,同时科学家还发现大量真实网络的节点度服从幂率分布<sup>[2,4,13-15]</sup>,这里某节点的度是指该节点拥有相邻节点的数目,或者说与该节点关联的边的数目。节点度服从幂律分布就是说,具有某个特定度的节点数目与这个特定的度之间的关系可以用一个幂函数近似地表示。幂函数曲线是一条下降相对缓慢的曲线,这使得度很大的节点可以在网络中存在。对于随机网络和规则网络,度分布区间非常狭窄,几乎找不到偏离节点度均值较大的点,故其平均度可以被看作是某节点度的一个特征标度。在这个意义上,我们把节点度服从幂律分布的网络叫做无标度网络(scale-free networks),并称这种节点度的幂律分布为网络的无标度特性。1999年,Barabási和Albert给出了构造无标度网络的演化模型<sup>[10,11]</sup>,他们所用的方法与Price的方法类似<sup>[16,17]</sup>。Barabási和Albert把真实系统通过自组织生成无标度的网络归功于两个主要因素:生长和优先连接,而他们的网络模型(BA网络)正是模拟这两个关键机制设计的。

除了小世界效应和无标度特性外,真实网络还

有很多统计上的特征,例如,混合模式特性<sup>[18]</sup>,度相关特性<sup>[19-21]</sup>,超小世界性质<sup>[13]</sup>等等.限于篇幅,本文不再赘述,有兴趣的读者可以参考相关文献.



图2 无标度网络的拓扑结构示意图(本图展示了有130个节点的BA网络,其节点度服从幂指数为-3的幂律分布.图中标注的5个节点是网络中度最大的5个节点)

### 3 复杂网络上的物理过程

对于物理学家而言,研究复杂网络的终极目标是理解网络拓扑结构对物理过程的影响.在以前的研究中,物理学家往往忽略了网络的拓扑性质,在讨论逾渗、传播、同步等物理过程时,他们自然地选择了最容易模拟和分析的规则网络或随机网络,而没有仔细思考和研究这种选择是不是应该的,不同的选择会不会对物理过程产生不可忽略的影响.以网络上的传播动力学模型为例,由于传统的网络传播模型大都是基于规则网络的,因此,复杂网络不同统计特征的发现使科学家面临更改既有结论的危险.当然,如果理论研究和实验结果都说明复杂网络上的传播动力学行为与规则网络别无二致,那么我们至少暂时还可以心安理得地使用以前的结论.但是,不幸的是,复杂网络上的传播行为与规则网络相比确实存在根本上的不同.类似的情况还出现在其他的物理过程中,下面我们将简略地介绍网络拓扑性质对某些典型物理过程的影响.

#### 3.1 逾渗模型与疾病传播动力学

之所以在这里把逾渗模型和网络上的疾病传播动力学问题归在一起讨论,是因为网络上的疾病传播模型可以等价于键逾渗模型<sup>[22,23]</sup>.以前的基于规则网络的研究表明,疾病在网络中的平均波及范围与疾病的传染强度正相关,而疾病的传染强度有一个阈值,只有当其值大于这个阈值时,疾病才能在网络中长期存在,否则感染人数会呈指数衰减<sup>[24-26]</sup>.根据这个理论,疾病若是持久存在,则必然波及大量

个体.但实验研究表明,计算机病毒、麻疹等一般仅波及少数个体但能够长期存在<sup>[27,28]</sup>.这一理论与实验的矛盾在很长时间里一直困扰着科学界.近年来的研究表明,在无标度网络中,没有正的传播阈值<sup>[29-31]</sup>,也就是说,即使疾病的传染强度接近零,只波及非常少的个体,也能在网络中长期存在.由于大部分真实网络是无标度网络,因此该结论很好地解决了上面的矛盾.

#### 3.2 混沌同步

近十余年来,混沌动力系统在网络上的同步性能吸引了大量科学家的关注.早期的研究主要是针对以最近邻环网为代表的规则网络,研究表明,对于给定的非零耦合强度,当节点数目很大时,网络无法实现同步<sup>[32]</sup>.最近几年的研究却表明,尽管小世界网络只是在规则网络进行一个非常小的修正的结果<sup>[1,12]</sup>,但其实现混沌同步的能力却远远好于规则网络<sup>[33,34]</sup>.对于小世界上的广义混沌同步<sup>[35]</sup>与超混沌同步<sup>[36]</sup>的研究同样表明,小世界网络有明显好于规则网络的同步能力.物理学家还考察了无标度网络,研究表明,其混沌同步的能力与星形网络几乎是一样的,这可能是因为它与星形网络都具有很不均匀的节点度分布<sup>[37]</sup>(见图3).

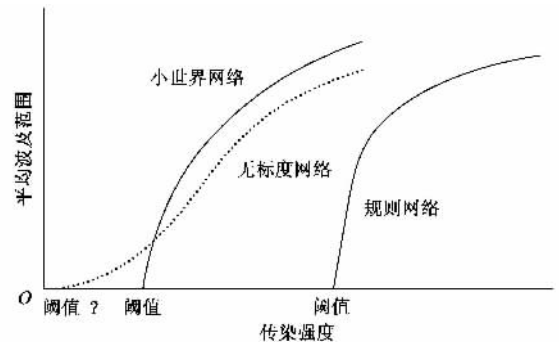


图3 网络中疾病平均波及范围与传染强度关系的示意图(图中位于右侧的实线表示疾病在规则网络中传播的情况,位于左侧的实线表示疾病在小世界网络中传播的情况,虚线表示疾病在无标度网络中传播的情况.可以看到,疾病在无标度网络中没有正的传播阈值,而小世界网络的传播阈值明显小于规则网络.注意,图中的曲线只是为了帮助我们定性理解,并不是通过数值模拟得到的定量的曲线)

#### 3.3 沙堆模型与自组织临界性

网络拓扑结构是否会影响到沙堆模型中的自组织临界现象,一直就是该领域争论的焦点<sup>[38-43]</sup>.Zhou和Wang对复杂网络上沙堆模型的研究表明,沙堆模型中的雪崩动力学性质对网络拓扑结构非常敏感,相比规则网络,无标度网络上大雪崩发生更为频

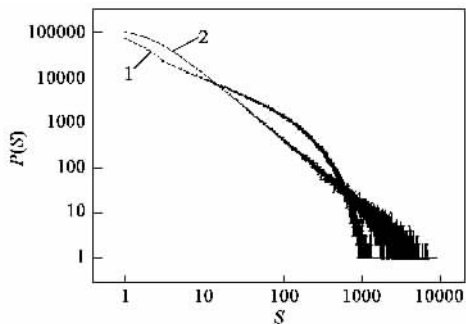


图4 雪崩规模分布图[ 曲线1和曲线2分别代表在二维欧几里德格网和无标度网络上雪崩规模的分布,其中 $P(S)$ 表示在100万次微扰中规模为 $S$ 的雪崩出现的次数.试验中,欧几里德格网和无标度网络的节点数均为4900,平均度均为4.在无标度网络中,最大的雪崩规模为8829,而在欧几里德格网中相应的值仅为1799.]

繁,最大雪崩的规模也大得多<sup>[44]</sup>(见图4).

物理性质明显依赖于网络拓扑结构的物理过程还很多,例如随机游走<sup>[45-48]</sup>、玻色-爱因斯坦凝聚<sup>[49-51]</sup>、XY临界模型<sup>[52,53]</sup>等等.在此我们无法一一介绍,读者可以参阅相关文献.总的来说,物理学家已经开始学会把网络拓扑性质看作影响系统行为的一个特征量,这也在很大程度上改变了我们对很多物理过程原有的认识.

## 4 总结与展望

关于网络的研究,数学家早在两百多年前就开始了,他们已经发展出了成体系的理论与技术,而物理学家的进入只有五年左右的历史!到底是什么鼓动物理学家来趟这塘浑水,他们的到来有意义吗?在我们看来,研究对象特殊的尺度效应是召唤物理学家到来的根本原因.数学家经典的网络理论,要么是分析包含几十数百个顶点,可以画在一张纸上,从而形成直观印象的网络;要么是讨论不含有限尺度效应,可以精确求解的网络性质.“随机移走一个顶点会对网络的性能产生什么样的影响?”这个问题对于研究有限规则网络的数学家是有意义的,但对于拥有几千万个节点,连接方式复杂多样的真实网络而言,或许“随机移走3%的顶点会对网络性能产生什么样的影响?”这个问题更有意义.这个尺度的网络,是被物理学家称作“足够大”的网络,对它们的研究,需要使用统计物理的方法.有的读者可能会问,数学家除了经典的网络理论外,还构造了一套随机图论的理论,这套理论就是专门对付“足够大”的网

络的,统计力学的方法到底能不能得到随机图论不能得到的新的有意义的结果呢?需要强调的是,随机图论的方法的确在复杂网络的研究中扮演了不可或缺的角色,但是,数学家的“足够大”和物理学家的“足够大”完全不是一个概念,虽然他们都使用顶点数趋于无穷的假设.对于物理学家而言,平均场的近似,主方程的求解,在网络顶点数达到百万甚至只需几万时,误差就已经可以接受了,而随机图的大量有意义的结果,要求节点数在连续求取3次常用对数后还要比10大<sup>[8]</sup>,在我们的宇宙中,目前还没有任何一个有物理意义的数值达到如此的量级.

从前面的介绍中我们已经看到,物理学家不仅在方法论上为网络研究注入了新的活力,而且大大地拓展了网络研究的视野.他们不仅和数学家一样关心网络自身的拓扑性质,而且关注网络上进行的各种物理过程和动力学行为,诸如传播、同步、自组织临界、玻色-爱因斯坦凝聚等等,他们发现了网络拓扑结构对各种动力学行为的影响,并给出了很多虽不严谨但很美妙的解释.这些工作很有可能会推动相关数学物理理论的发展.

近几年来,大量关于复杂网络的文章发表在Science, Nature, PRL, PNAS等国际一流的刊物上,从一个侧面反映了复杂网络已经成为物理界的一个新兴的研究热点.香港城市大学的陈光荣教授统计了几年来被SCI收录的关于复杂网络的文章数量(见图5),从中可以看出明显的增长趋势. Evans统计了6年来在arXiv:cond-mat上提交的标题含有“network”的文章数,也同样发现了逐年递增的趋势(见图6).复杂网络的研究刚刚起步,前景看好,我国科学家应当尽快加入这个行列,争取做出原创性质的工作.

## 5 结束语

作为文章的结束,我们将为读者介绍一些重要的综述,希望这会有助于读者以更快的速度进入复杂网络研究的前沿阵地.

关于小世界网络的研究, Newman<sup>[54]</sup>和 Hayes<sup>[55,56]</sup>给出了不算太长的3篇综述,更短的1篇由 Strogatz完成<sup>[57]</sup>,发表在Nature上; Albert和 Barabási给出了一篇更像是教科书的综述<sup>[58]</sup>,他们讨论的重点是演化的无标度网络,这篇文献在两年之内已经被引用了近千次,最为详尽的综述是 Dorogovtsev和 Mendes给出的<sup>[59]</sup>,在这篇文章中,他们用

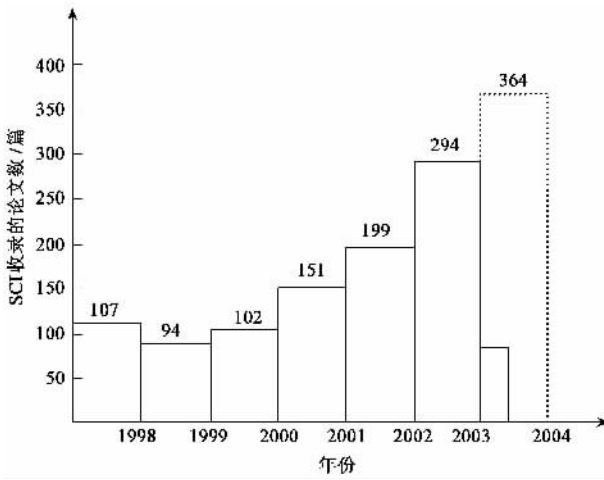


图5 SCI收录的关于复杂网络的研究论文数量(统计了从1998年到2004年第一季度的情况,从图中可以看出,复杂网络的研究方兴未艾)

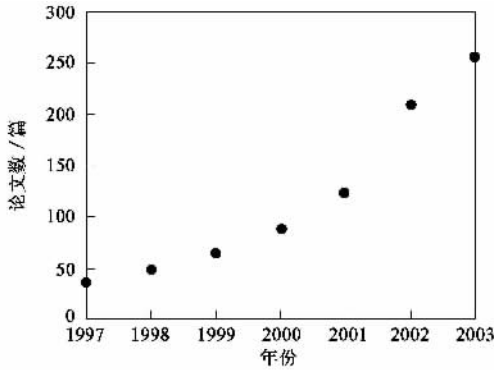


图6 arXiv:cond-mat上关于网络的研究论文数量(统计了从1997年到2003年cond-mat上标题含有“network”的文章数目,从图中可以看出,网络的研究在近6年来越来越受到物理学家的关注)

超过100页的篇幅穷举了在此之前几乎所有关于演化网络的结论,包括相当详细的实验与分析的过程;2003年Newman的综述堪称精品<sup>[60]</sup>,漂亮的组织结构,地道风趣的语言和独到的视角,使你在阅读时会忘掉是在读一篇学术文献,后面所附的400多篇参考文献,足以填饱任何人的肚子;Wang和Chen在IEEE期刊上的一篇短综述<sup>[61]</sup>,非常适合作为入门读物,一个完全不谙此道的人都可以通过一个下午的阅读对复杂网络的研究概貌有所了解;Wang的另一篇综述像是上一篇文章的扩展版<sup>[62]</sup>,在这篇文献中,Wang强调了复杂网络上的混沌同步,对这方面工作感兴趣的读者切不可放过该文献。最新的综述是Evans在2004年5月完成的<sup>[63]</sup>,这篇文献中包含了很多最新研究的结果。

## 参考文献

- [1] Watts D J, Strogatz S H. *Nature*, 1998, 393 : 440
- [2] Faloutsos M, Faloutsos P, Faloutsos C. *Computer Communications Review*, 1999, 29 : 251
- [3] Liljeros F *et al.* *Nature*, 2001, 411 : 907
- [4] Ebel H, Mielsch L I, Borbholdt S. *Phys. Rev. E*, 2002, 66 : 035103
- [5] Sen P *et al.* *Phys. Rev. E*, 2003, 67 : 036106
- [6] Erdős P, Rényi A. *Publications of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Science*, 1960, 5 : 17
- [7] Erdős P, Rényi A. *Acta Mathematica Scientia Hungary*, 1961, 12 : 261
- [8] Bollobás B. *Random Graphs*. London : Academic Press Inc, 1985
- [9] Milgram S. *Psychology Today*, 1967, 2 : 60
- [10] Barabási A L, Albert R. *Science*, 1999, 286 : 509
- [11] Barabási A L, Albert R, Jeong H. *Physica A*, 1999, 272 : 173
- [12] Newman M E J, Watts D J. *Phys. Rev. E*, 1999, 60 : 7332
- [13] Zhou T *et al.* arXiv : cond - mat / 0405258
- [14] Jeong H *et al.* *Nature*, 2001, 411 : 41
- [15] Jeong H *et al.* *Nature*, 2000, 407 : 651
- [16] de Price D J S. *Science*, 1965, 149 : 510
- [17] de Price D J S. *J. Amer. Soc. Inform. Sci.*, 1976, 27 : 292
- [18] Newman M E J. *Phys. Rev. E*, 2003, 67 : 026126
- [19] Pastor-Satorras R, Vázquez A, Vespignani A. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 87 : 258701
- [20] Vázquez A, Pastor-Satorras R, Vespignani A. *Phys. Rev. E*, 2002, 65 : 066130
- [21] Newman M E J. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 89 : 208701
- [22] Grimmett G R. *Percolation*. Berlin : Springer - Verlag, 1989
- [23] Sander L M *et al.* *Math. Biosci.*, 2002, 180 : 293
- [24] Bailey N T J. *The Mathematical Theory of Infectious Diseases and Its Applications*. New York : Hafner Press, 1975
- [25] Anderson R M, May R M. *Infectious Diseases of Humans*. Oxford : Oxford University Press, 1992
- [26] Hethcote H W. *SIAM Review*, 2000, 42 : 599
- [27] Kephart J O. *Sci. Am.*, 1997, 277 : 56
- [28] Kephart J O *et al.* *IEEE Spectr.*, 1993, 30 : 20
- [29] Pastor-Satorras R, Vespignani A. *Phys. Rev. E*, 2001, 63 : 066117
- [30] Pastor-Satorras R, Vespignani A. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 86 : 3200
- [31] Barthelemy M *et al.* *Phys. Rev. E*, 2004, 92 : 178701
- [32] Wu C W, Chua L O. *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, 1995, 42 : 430
- [33] Gade P M, Hu C K. *Phys. Rev. E*, 2000, 62 : 6409
- [34] Wang X F, Chen G R. *Int. J. Bifurcation and Chaos*, 2002, 12 : 187
- [35] Barahona M, Pecora L M. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 89 : 054101
- [36] Jiang P Q *et al.* *Int. J. Mod. Phys. B*, 2004, 18 : 2674
- [37] Wang X F, Chen G R. *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, 2002, 49 : 54
- [38] Olami Z *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1992, 68 : 1244
- [39] Klein W, Rundle J. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 71 : 1288
- [40] Christensen K. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 71 : 1289
- [41] Carvalho J X, Prado C P C. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 84 : 4006
- [42] Christensen K *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 87 : 039801

- [ 43 ] Carvalho J X , Prado C P C. Phys. Rev. Lett. , 2001 , 87 : 039802
- [ 44 ] Zhou T , Wang B H. arXiv : cond-mat/0406575
- [ 45 ] Jespersen S *et al.* Phys. Rev. E , 2000 , 62 : 4405
- [ 46 ] Pandit S A , Amritkar R E. Phys. Rev. E , 2001 , 63 : 041104
- [ 47 ] Lahtinen J *et al.* Phys. Rev. E , 2001 , 64 : 057105
- [ 48 ] Lahtinen J *et al.* Physica A , 2002 , 311 : 571
- [ 49 ] Bianconi G *et al.* arXiv : cond-mat/0011224
- [ 50 ] Burioni R *et al.* arXiv : cond-mat/0104365
- [ 51 ] Burioni R *et al.* J. Phys. B , 2001 , 34 : 4697
- [ 52 ] Kim B J *et al.* Phys. Rev. E , 2001 , 64 : 056135
- [ 53 ] Medvedyeva K *et al.* Phys. Rev. E , 2003 , 67 : 036118
- [ 54 ] Newman M E J. J. Stat. Phys. , 2000 , 101 : 819
- [ 55 ] Hayes B. American Scientist , 2000 , 88 : 9
- [ 56 ] Hayes B. American Scientist , 2000 , 88 : 104
- [ 57 ] Strogatz S H. Nature , 2001 , 410 : 268
- [ 58 ] Albert R , Barabási A L. Rev. Mod. Phys. , 2002 , 74 : 47
- [ 59 ] Dorogovtsev S N , Mendes J F F. Advances in Physics , 2002 , 51 : 1079
- [ 60 ] Newman M E J. SIAM Review 2003 , 45 : 167
- [ 61 ] Wang X F , Chen G R. IEEE Circuits & Systems Magazine , 2003 , 3 : 6
- [ 62 ] Wang X F. Int. J. Bifurcation & Chaos , 2002 , 12 : 885
- [ 63 ] Evans T S. arXiv : cond-mat/0405123

## · 物理新闻和动态 ·

### 用激光观察分子轨道

科学家们演示了一种观察简单分子周围的电子“云”的新方法。他们利用激光脉冲将氧和氮的分子解离成离子对，然后根据离子的轨迹重构出分子原来的电子云或“轨道”。发表在 2004 年 9 月 10 日的 PRL 上的结果证实了关于电场中分子的分裂可能依赖于其电子轨道的理论预言。这种技术可以帮助研究者探查在激光聚变系统、日冕和生物分子间所发生的反应。

当分子漂移进入一个强的电磁场(如太阳表面)时,就会被电离。研究人员可以在实验室中利用超短激光脉冲研究这一过程。激光的强电场迫使分子中的 2 个电子离开分子,只剩下 2 个离子。近期的实验表明,像  $O_2$  和  $S_2$  这类分子与像  $N_2$  这样的分子相比,更不易被电离。这是一种很奇怪现象,因为将这 3 种分子束缚在一起的化学键的强度相差无几。这一现象似乎可以从轨道的形状中找到解释。某些轨道形状有利于电子按激光的电场排列,这使得这些电子更易被电离。

在 Manhattan 的 Kansas 州立大学的 Lewis Cocke 的光学物理组,决定采用一种新的能更直接地对电子轨道进行观察的技术来检验这一想法。他们将氧和氮喷在激光通过的路径上,激光器调谐到能在 8fs 长的时间内发射出  $15\mu J$  的能量,这能量刚好能够分离一个单个的分子。安装在附近的探测器收集离子并记录它们的位置。然后他们重构出原来的分子相对于激光的电场的取向。

研究人员对每种分子的测量结果作图。将每一取向角度在图上标出一个点。该点到图的中心的距离对应于分子破裂的概率。例如,当激光电场与分子的长轴平行时,氮分子最容易被电离,在其他情况下则很难被电离。氮的图形看上去类似于一个长轴是沿零度方向的椭圆形。这种图形与由计算得知的氮的外层轨道的大体形状相符,外层轨道主要集中分布在沿连接两个原子的连线上。而氧分子当电场与分子轴线成  $40^\circ$  左右角度时,即分子外层轨道像四叶草的形状时,更容易被电离。

( 树华 编译自 Alnaser A S *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2004 , 93 : 113003 )

### 寻找脉络

为了能很好地管理静脉血液,在皮下寻找必要的脉络是一件不容易的事情。最近,美国田纳西大学健康科学中心的 H. Zeman 教授和他的同事们,在美国 Rochester 召开的“前沿光学会议”上,展示了他们所发明的一台新的仪器——脉络对比增长器( Vein Contrast Enhancer, 简称为 VCE)。这种仪器是利用灵敏的红外传感器去寻找皮下的脉络,然后投射为脉络图像,再明显地展示在病人的手腕上(如图 1 所示)。这种图像能使医务工作者们非常容易地进行各种注射。



图 1 病人手腕上的脉络图像

这台仪器的工作原理极为简单。它是由一组发光二极管将红外光照射在对象上,利用红外光对红血球与其周围的脂肪组织有着极不相同的散射性能,当散射光线通过滤光片后就被 CCD TV 摄像机接收,并转变为每秒可形成 30 帧画面的图像。这些经过细致矫正后就形成了解剖学所要求的皮下图像。H. Zeman 教授的研究组利用 VCE 进行了大量的临床试验,并且对投影能力也作了各种测试。现在, VCE 可探测到皮下 8mm 深处的脉络,并形成图像,图像的空间分辨率一般为 0.1mm。

( 云中客 摘自 Frontiers in Optics Meeting , 15 October 2004 )