سامانه‌های پیچیده و تفکر سیستمی

فرهاد شهبازی
دانشکده‌ی فیزیک
دانشگاه صنعتی اصفهان

سامانه چیست

- گروهی از اجزای مرتبط که در **برهمکنش** با یکدیگر هستند و **کل واحدی** برای **مقصود معینی** را به وجود می‌آورند یک سامانه را تشکیل می‌دهد.

مثال: خودرو، یخچال، ظرف میوه، مدرسه، اداره، وزارت‌خانه، ازدواج

- برهمکنش نکته‌ی کلیدی در ایجاد سیستم است. بدون برهمکنش فقط **مجموعه**‌ای از اجزا داریم. ترتیب اجزا در مجموعه مهم نیست.

مثال: جعبه‌ی ابزار، پایگاه داده، آشپزخانه

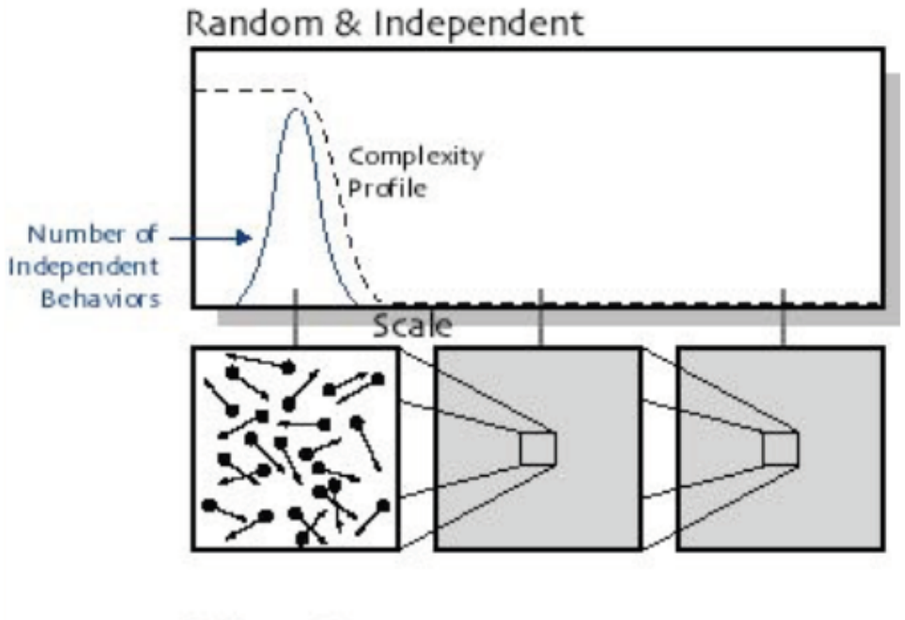
پیچیدگی

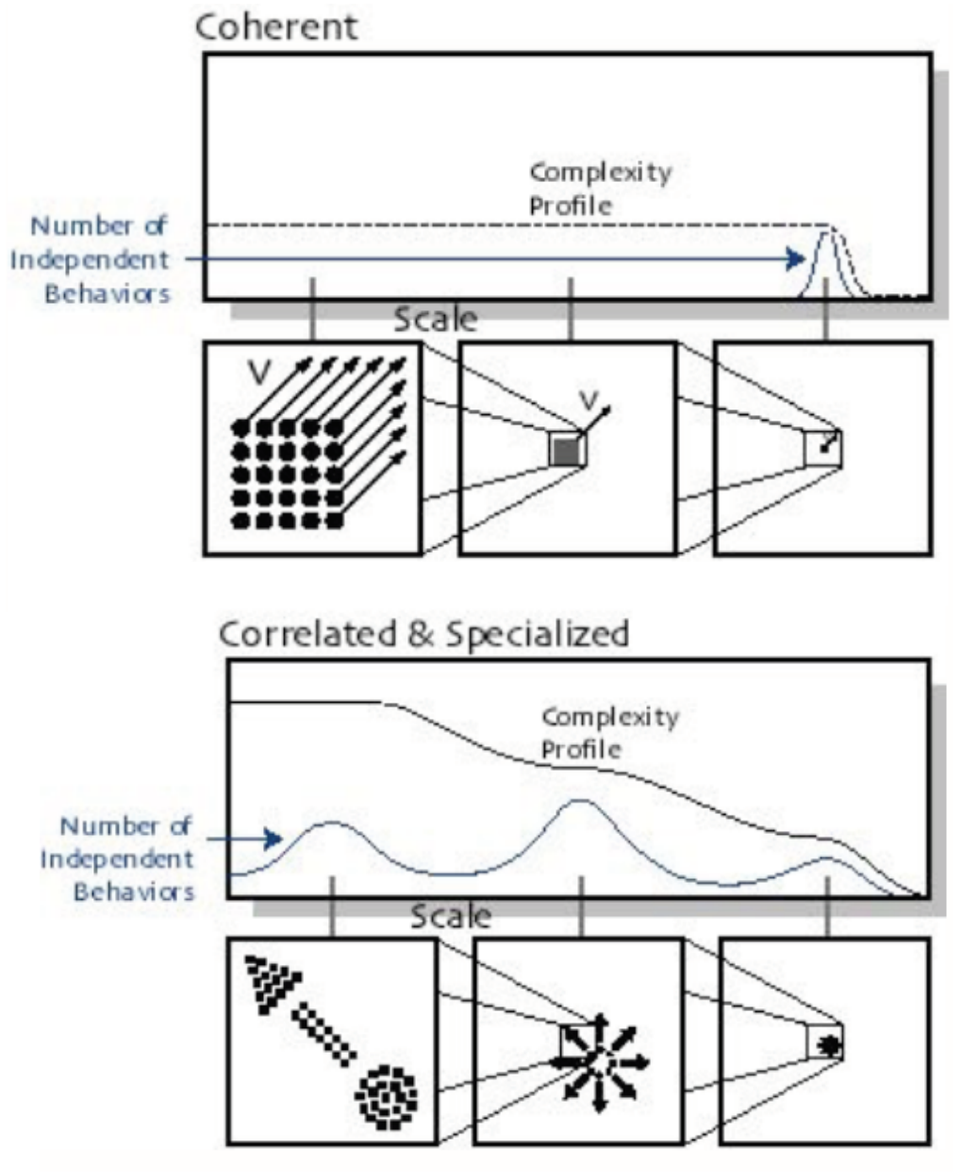
- حدود ۴۵ تعریف برای پیچیدگی وجود دارد که در دو گروه طبقه‌بندی می‌شوند:

- پیچیدگی محاسباتی:
  میزان عملیات لازم برای محاسبه‌ی یک مساله.

- پیچیدگی توصیفی:
  میزان اطلاعات لازم برای توصیف یک سیستم.

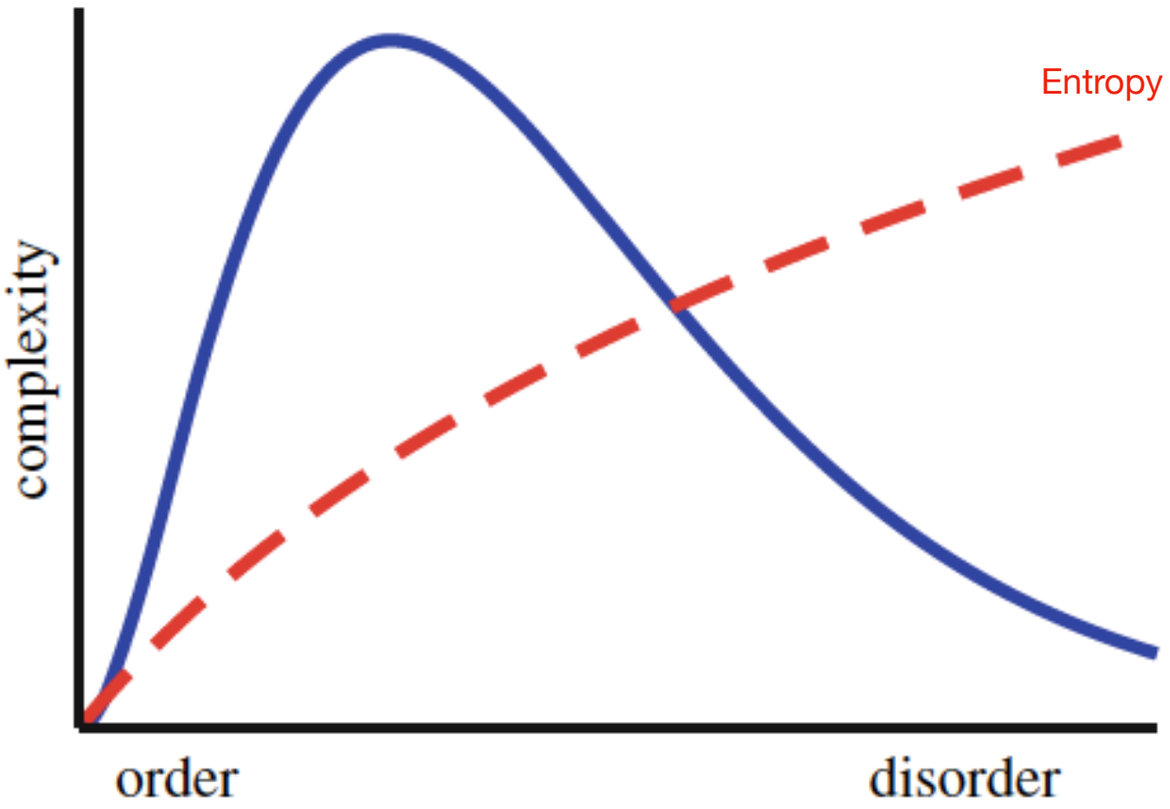
پیچیدگی به مقیاس وابسته است





Yaneer Bar-Yam, Complexity rising: From human beings to human civilization, a complexity profile, in *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, (EOLSS Publishers, Oxford, UK, 2002).

پیچیدگی کل (سطح زیر نمودار پیچیدگی بر حسب مقیاس)



دسته‌بندی سامانه‌های پیچیده

دسته‌بندی از دیدگاه برهمکنش:

۱ـ سیستم‌های پیچیده‌ی فیزیکی (Complex Physical Systems):

برهمکنش در این سیستم‌های محدود و ثابت هستند.

جریان اطلاعات (علیت) در این سامانه‌ها از پایین به بالاست

۲ـ سیستم‌های پیچیده سازوار (Complex Adaptive Systems):

برهمکنش در این سیستم‌ها گوناگون و متغیر با زمان هستند. این سیستم‌های دارای حلقه‌های بازخوردی (مثبت یا منفی) هستند و قابلیت سازگاری با شرایط محیطی خود را دارند.

جریان اطلاعات در این سامانه‌ها دوری است (علیت دوری)

دسته‌بندی سامانه‌های پیچیده

دسته‌بندی از دیدگاه شیوه‌ی تشکیل:

۱- طراحی هوشمند یا طراحی از بالا به پایین:

در این شیوه سامانه دارای نقشه‌ی طراحی و مهندسی دقیق است. سامانه دارای هدف معین و ثابتی است. ورودی یکسان همواره منجر به خروجی یکسان می شود.

۲- طراحی خودسامانده یا پایین به بالا:

نقشه‌ی دقیقی برای چنین سامانه‌های وجود ندارد یا در صورت وجود ما اطلاعی از آن نداریم. دانش ما از این سامانه‌ها به صورت سعی و خطا است. هدف سامانه می‌تواند با زمان تغییر کند. ورودی یکسان منجر به خروجی‌های متفاوت می‌شود

توصیف سامانه

- توصیف کاهش‌گرایانه (Reductionism):

در این شیوه سامانه به اجزای تشکیل دهنده‌ی آن تجزیه می‌شود و اجزاء به صورت مستقل مطالعه می‌شوند.

- توصیف کلی‌نگر (Holism):

در این شیوه سامانه به صورت کل واحد و با در نظر گرفتن برهمکنش بین اجزا مطالعه می‌شود. در این شیوه، کل فراتر مجموع اجزاء در نظر گرفته می‌شود.

مثال‌هایی از سامانه‌های پیچیده

- آب و هوا
- تلاطم در شاره‌ها
- جابجایی پوسته زمین و شکل‌گیری زلزله
- سامانه‌های زیستی (ویروس، باکتری، سلول، فوتوسنتز و ...)
- اقتصاد (بازاربورس، توزیع درآمد و دارایی، تعیین نرخ کالا، مدیریت خطرپذیری، ...)
- زندگی اجتماعی (انسان‌ها، مورچه‌ها، زنبورها و...)
- شکل‌گیری و رشد شهرها
- ترافیک وسایل نقلیه و افراد پیاده
- اکوسیستم
- مغز

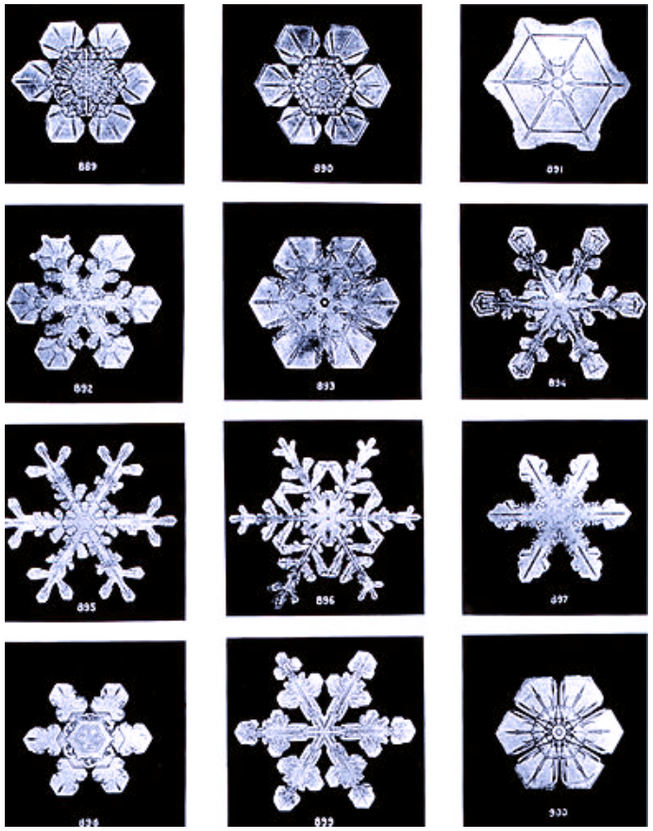
مشخصه‌های سامانه‌های پیچیده سازوارپذیر

- تعدد و تنوع در اجزاء و خاص بودن برهمکنش بین آنها
- توانایی رسیدن به سطح جدیدی از رفتار برآمده‌ی گروهی از طریق خودسازماندهی بدون رهبری مرکزی
- رفتار غیر خطی: رفتار جمعی آنها به صورت برهم‌نهی رفتار اجزای آنها نیست. بنابراین رهیافت کاهش‌گرایانه توصیف کاملی از این سامانه‌ها نمی‌دهد.
- توانایی سازگاری، پویایی و شکل‌دادن حلقه‌های بازخورد را دارند.
- می‌توانند حافظه داشته باشند و بنابراین حلقه‌های پسماند در دینامیک آنها مشاهده شود.
- دور از تعادل ترمودینامیکی هستند.
- باز هستند، بنابراین با محیط خود در مبادله‌ی ماده، انرژی و اطلاعات هستند.
- دارای ساختار تودر تو و سلسله‌مراتبی هستند.
- پایداری در برابر اختلالات

برآیش (Emergence)

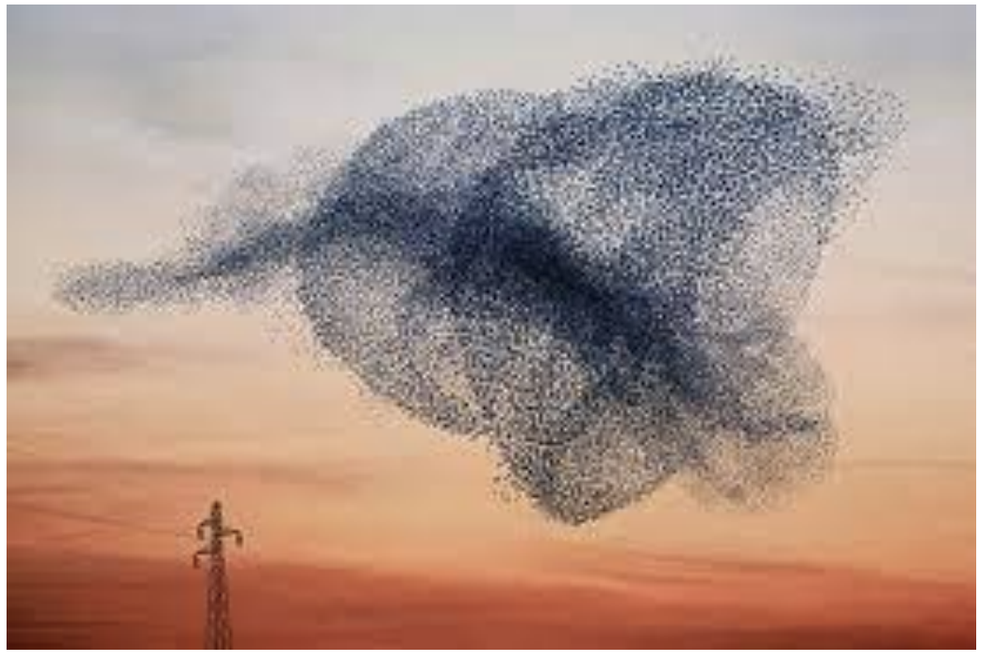
- رفتار یا ویژگی از سامانه که آن را نمی‌توان آن را به مجموع رفتارها یا ویژگی‌های اجزای آن، به صورت مستقل، نسبت داد را رفتار یا ویژگی برآینده (Emergent) می‌نامند.
- به عبارتی کل فراتر از مجموع اجزا است.

مثال‌هایی از برآیش در طبیعت



The formation of complex symmetrical and fractal patterns in snowflakes

Honey comb



Flock of birds

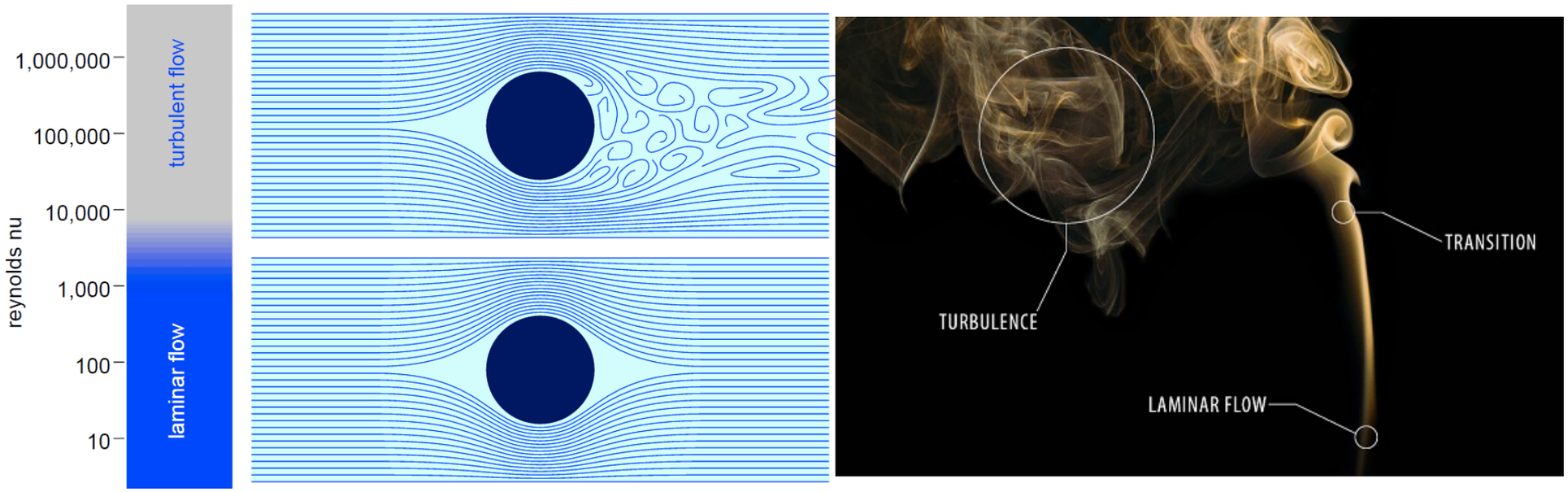
توصیف الگوریتمی و توصیف تحلیلی

- سامانه‌های پیچیده‌ی سازوار را معمولا نمی‌توان مانند سامانه‌های فیزیکی به صورت تحلیلی (معادله محور) توصیف کرد.
- روش مناسب برای توصیف این سامانه‌ها توصیف الگوریتمی (عامل محور) است.

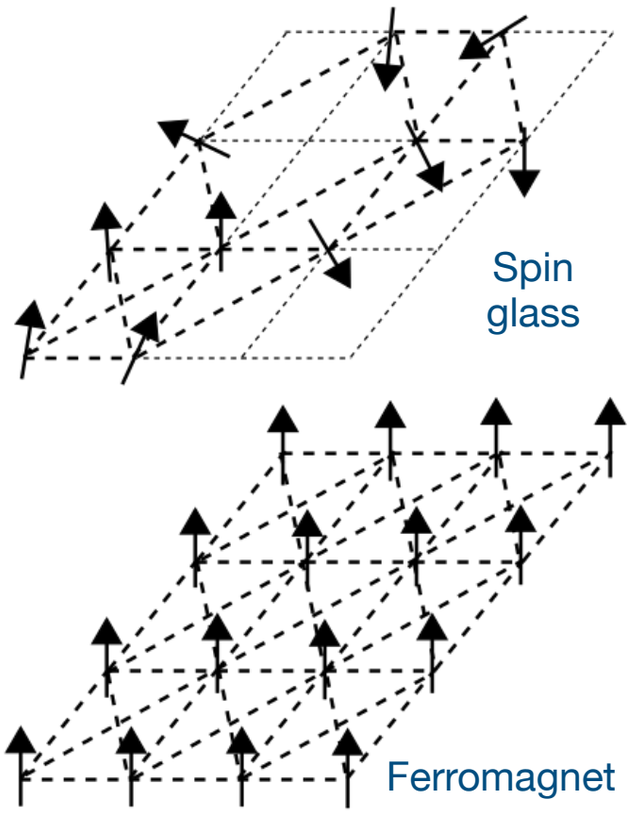
سامانه‌های پیچیده‌ی فیزیکی

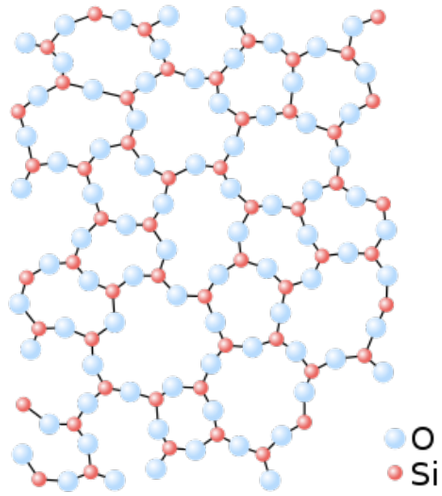
Complex Physical Systems (CPS)

جریان لایه‌ای و متلاطم در شاره‌ها

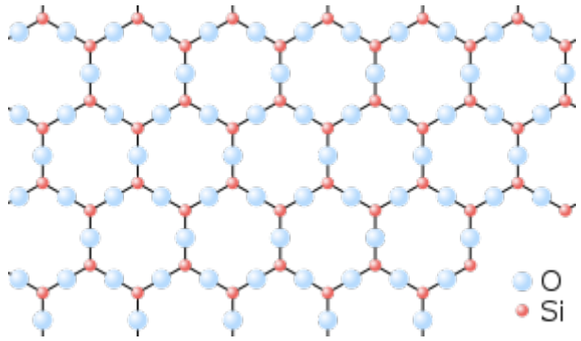


شیشه و شیشه‌ی اسپنی





Glass (amorphous SiO_2)

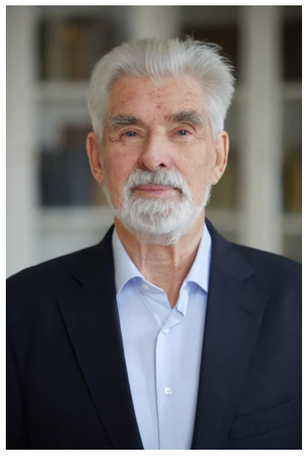


Quartz (crystalline SiO_2)

“Glass is very familiar in nature, and also a complex object that we normally see but we don’t recognize as complex,” said Parisi by phone during the Nobel announcement in Stockholm.

جایزه‌ی نوبل فیزیک سال ۲۰۲۱

The Nobel Prize in Physics 2021 was awarded "for groundbreaking contributions to our understanding of complex systems" with one half jointly to
Syukuro Manabe and **Klaus Hasselmann**
"**for the physical modelling of Earth's climate, quantifying variability and reliably predicting global warming**"
and the other half to
Giorgio Parisi
"**for the discovery of the interplay of disorder and fluctuations in physical systems from atomic to planetary scales**."



Klaus Hasselmann

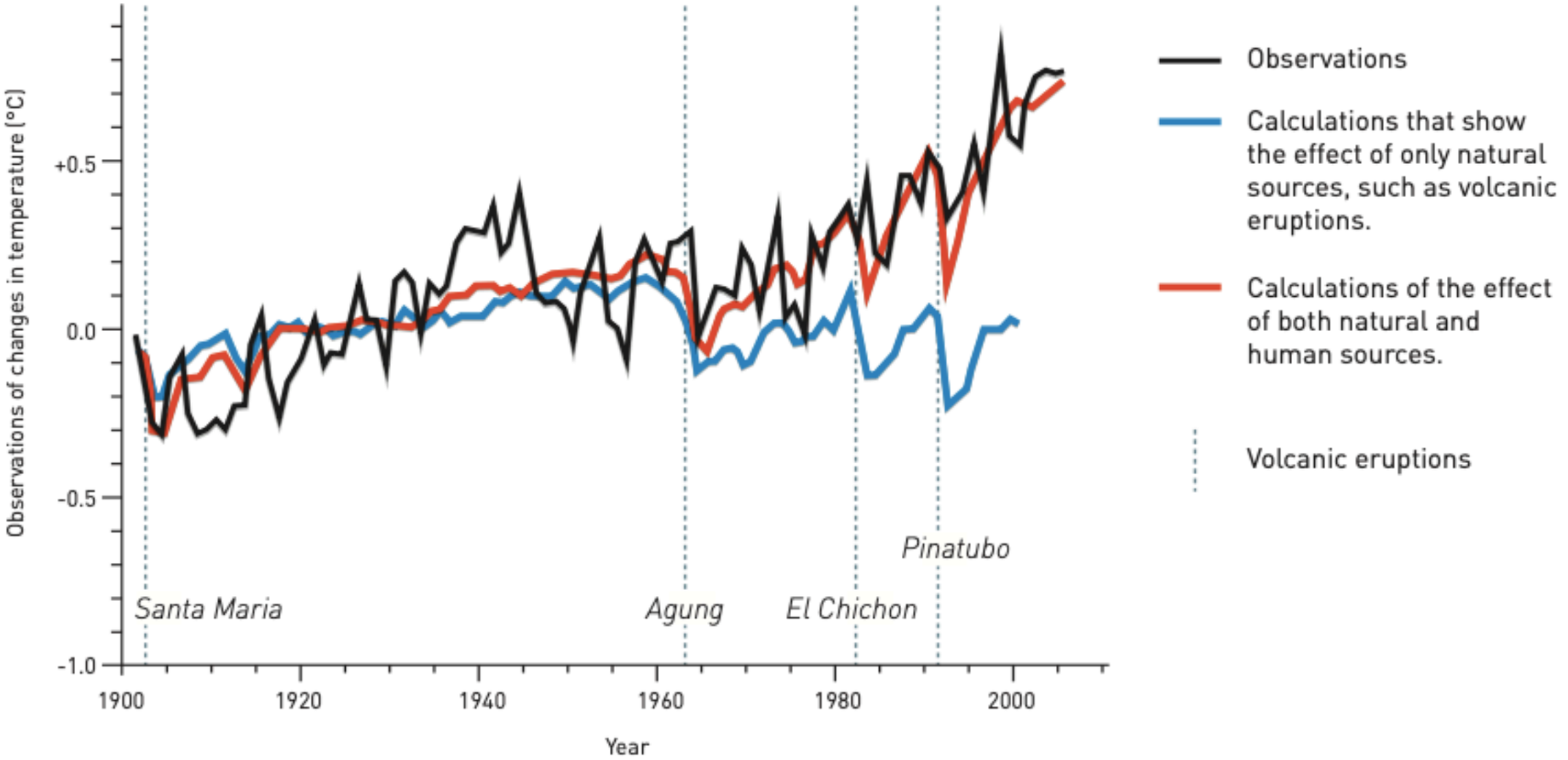
Syukuro Manabe

Giorgio Parisi

تایید تاثیر فعالیت‌های بشری در افزایش گازهای گلخانه‌ای

Identifying fingerprints in the climate

Klaus Hasselmann developed methods for distinguishing between natural and human causes (fingerprints) of atmospheric heating. Comparison between changes in the mean temperature in relation to the average for 1901–1950 (°C).



سامانه‌های پیچیده‌ی سازوار

Complex Adaptive Systems (CAS)

History: cybernetics and system theory

- The idea that systems in **different scientific disciplines** follow **similar principles**, and that models for one might be useful for others, was formulated in the **theory of cybernetics.**
  Norbert Wiener and Arturo Rosenblueth coined the term '**cybernetics**' in 1947 as the theory of control and communication in living and nonliving systems.
  The notions of **feedback** and **self-organization**, now central to the study of complex systems, were already present in their work.

  Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine (Wiener 1961).

Norbert Wiener (1896-1964)

Arturo Rosenblueth (1900-1970)

- The biologist Ludwig von Bertalanffy became one of the pioneers of the general systems theory. In 1945 he introduced *models, principles, and laws that apply to generalized systems or their subclasses, irrespective of their particular kind, the nature of their component elements, and the relation or 'forces' between them.*

General SystemTheory: Foundations, Development, Applications (Bertalanffy 1969).

Ludwig von Bertalanffy (1901-1972)

Warren Weaver

1894–1978

Simplicity
Disorganized Complexity
Organized Complexity

SCIENCE AND COMPLEXITY

By WARREN WEAVER
Rockefeller Foundation, New York City

"Science and Complexity", American Scientist, 36: 536 (1948).
Based upon material presented in Chapter 1' "The Scientists Speak," Boni & Gaer Inc.,1947. All rights reserved.

SCIENCE has led to a multitude of results that affect men's lives. Some of these results are embodied in mere conveniences of a relatively trivial sort. Many of them, based on science and developed through technology, are essential to the machinery of modern life. Many other results, especially those associated with the biological and medical sciences, are of unquestioned benefit and comfort. Certain aspects of science have profoundly influenced men's ideas and even their ideals. Still other aspects of science are thoroughly awesome.

How can we get a view of the function that science should have in the developing future of man? How can we appreciate what science really is and, equally important, what science is not? It is, of course, possible to discuss the nature of science in general philosophical terms. For some purposes such a discussion is important and necessary, but for the present a more direct approach is desirable. Let us, as a very realistic politician used to say, let us look at the record. Neglecting the older history of science, we shall go back only three and a half centuries and take a broad view that tries to see the main features, and omits minor details. Let us begin with the physical sciences, rather than the biological,

The rise of complexity science

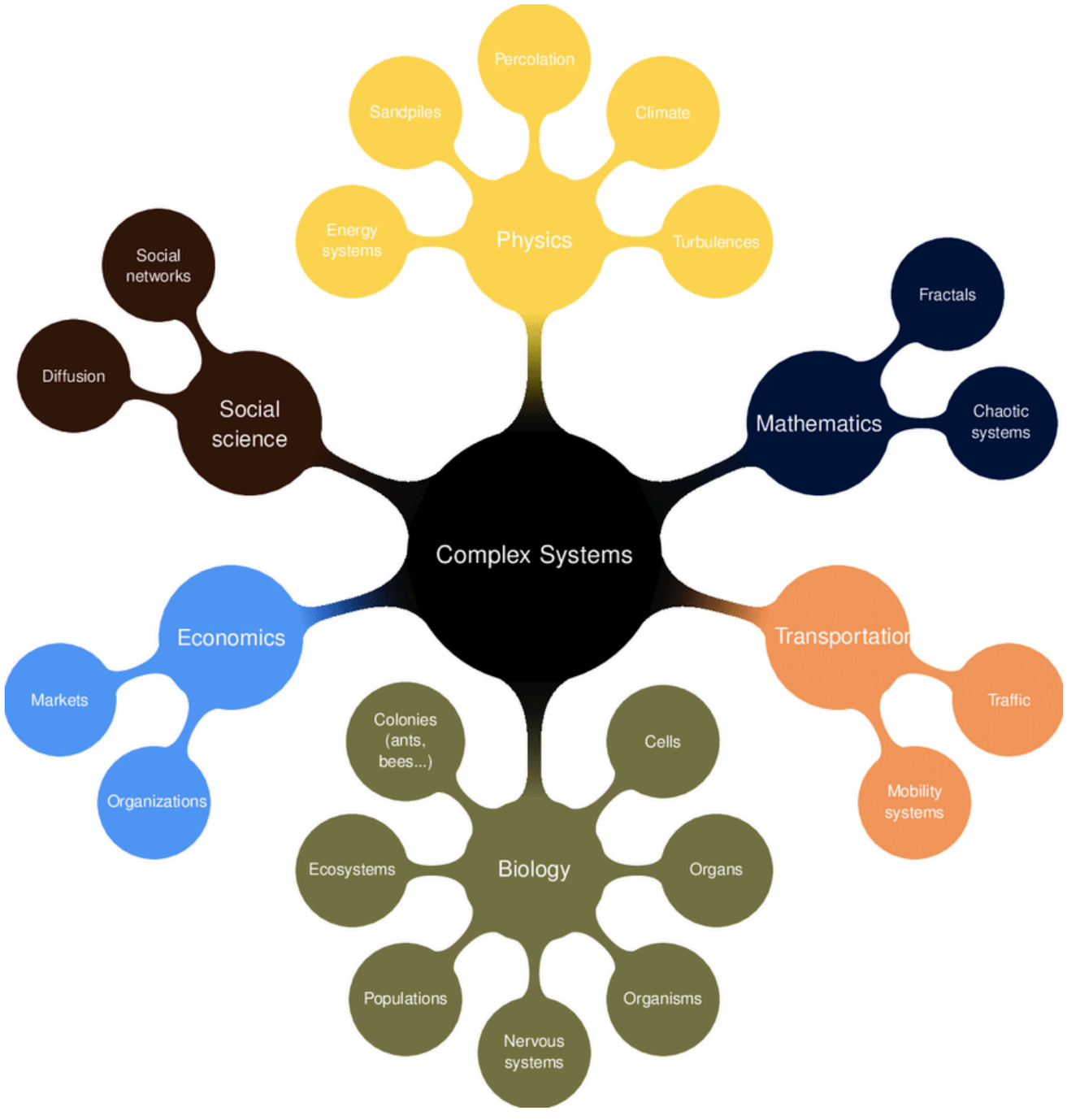
Santa Fe Institute (1984)

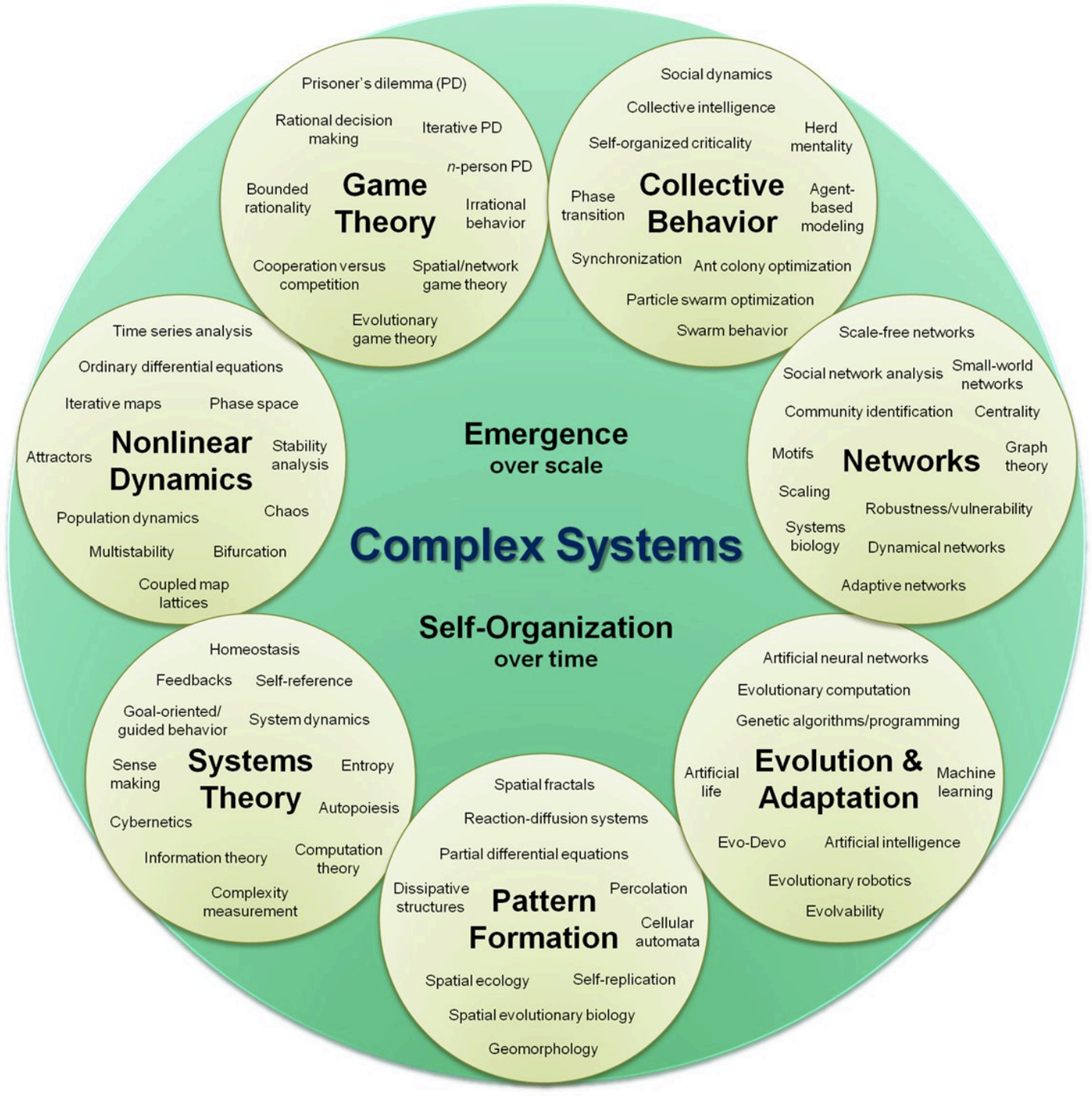
- In the 1980s John Henry Holland, Murray Gell-Mann and others coined the term "**complex adaptive system**" at the interdisciplinary Santa Fe Institute.

https://www.santafe.edu

John Henry Holland (1929-2015)

Murray Gell-Mann (1929-2019)


Complex Systems
Physics
Percolation
Sandpiles
Climate
Energy systems
Turbulences
Social science
Social networks
Diffusion
Mathematics
Fractals
Chaotic systems
Economics
Markets
Organizations
Transportation
Traffic
Mobility systems
Biology
Colonies (ants, bees...)
Cells
Ecosystems
Organs
Populations
Organisms
Nervous systems

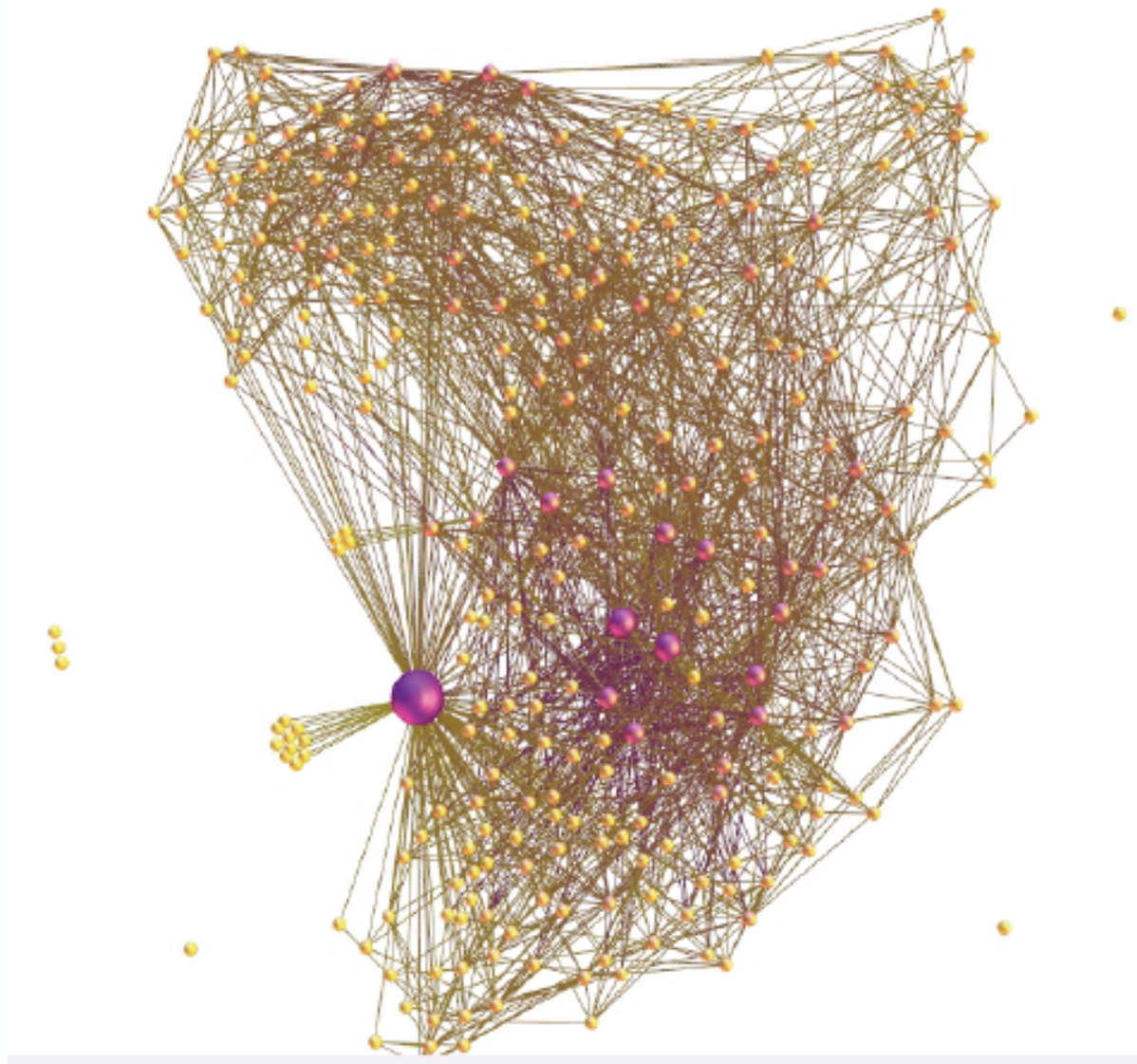

Complex Systems
Emergence
over scale
Self-Organization
over time
Game Theory
Prisoner's dilemma (PD)
Rational decision making
Iterative PD
n-person PD
Bounded rationality
Irrational behavior
Cooperation versus competition
Spatial/network game theory
Evolutionary game theory
Collective Behavior
Social dynamics
Collective intelligence
Herd mentality
Self-organized criticality
Phase transition
Agent-based modeling
Synchronization
Ant colony optimization
Particle swarm optimization
Swarm behavior
Nonlinear Dynamics
Time series analysis
Ordinary differential equations
Iterative maps
Phase space
Attractors
Stability analysis
Chaos
Population dynamics
Multistability
Bifurcation
Coupled map lattices
Networks
Scale-free networks
Social network analysis
Small-world networks
Community identification
Centrality
Motifs
Graph theory
Scaling
Robustness/vulnerability
Systems biology
Dynamical networks
Adaptive networks
Systems Theory
Homeostasis
Feedbacks
Self-reference
Goal-oriented/ guided behavior
System dynamics
Sense making
Entropy
Autopoiesis
Cybernetics
Information theory
Computation theory
Complexity measurement
Pattern Formation
Spatial fractals
Reaction-diffusion systems
Partial differential equations
Dissipative structures
Percolation
Cellular automata
Spatial ecology
Self-replication
Spatial evolutionary biology
Geomorphology
Evolution & Adaptation
Artificial neural networks
Evolutionary computation
Genetic algorithms/programming
Artificial life
Machine learning
Evo-Devo
Artificial intelligence
Evolutionary robotics
Evolvability

شبکه‌های پیچیده

- شبکه‌ها مجموعه‌ای از گره‌ها (کنش‌گران) و یال‌ها (برهمکنش‌ها) هستند و در ریاضیات با نظریه‌ی گراف مطالعه می‌شوند.

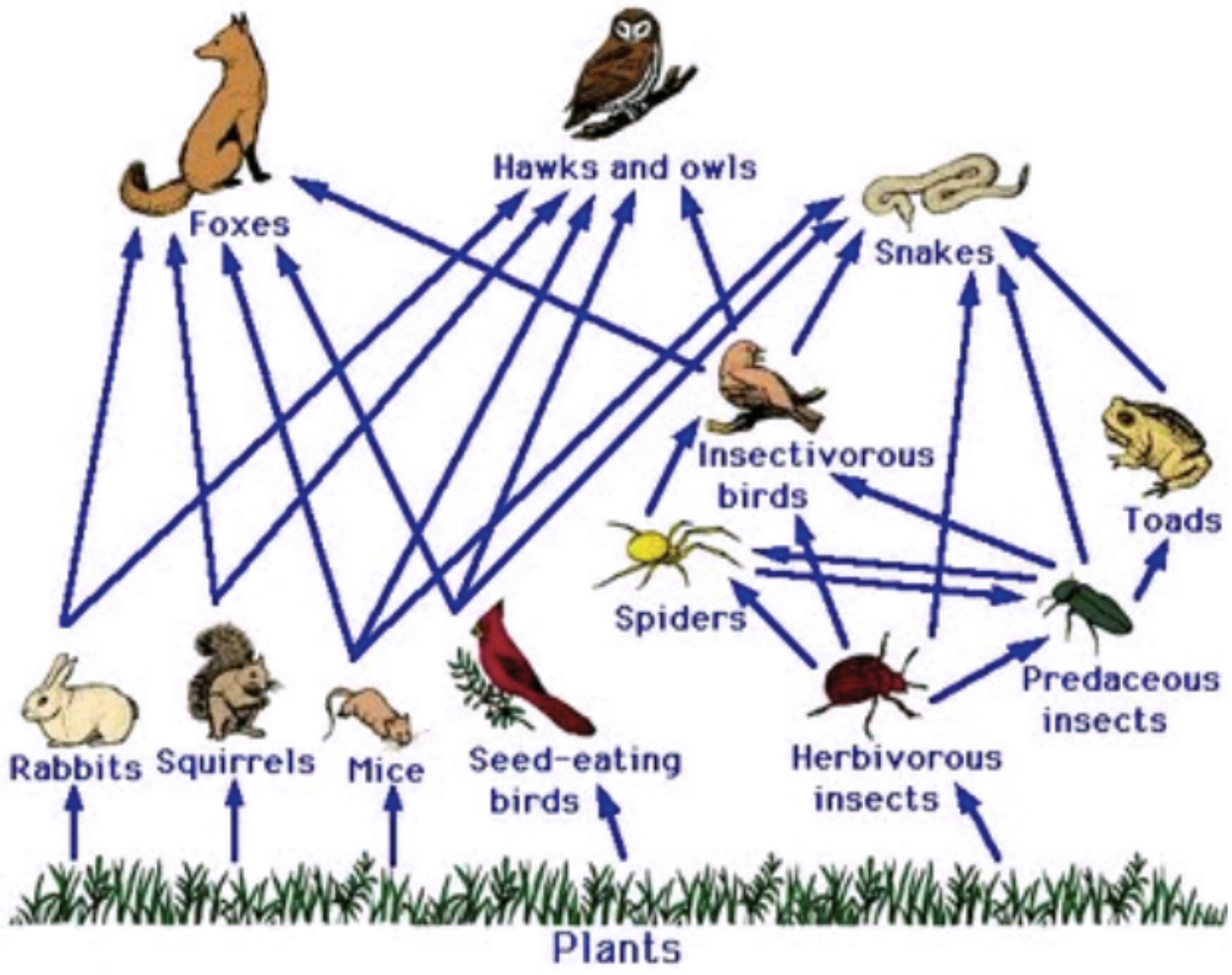
- شبکه‌ها ابزار طبیعی توصیف سامانه‌های پیچیده هستند.

- یک سامانه‌ی پیچیده معمولا با یک شبکه‌ی چندلایه دینامیکی توصیف می‌شود. اجزا روی دینامیک شبکه و شبکه روی دینامیک اجزا تاثیرگذارند (هم‌تحولی).



Neural Network
(C. Elegans)

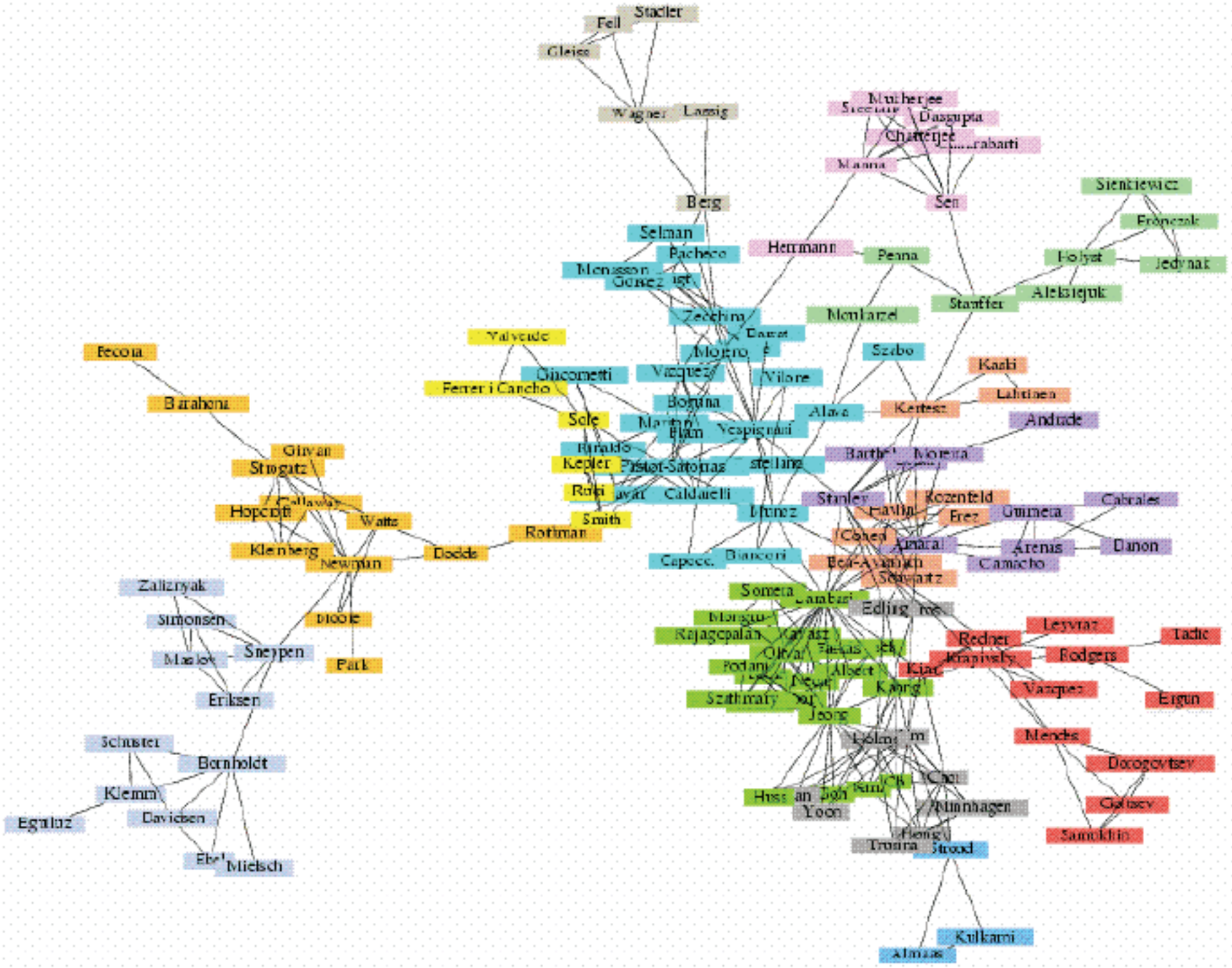
http://gephi.org/wp-content/uploads/2008/12/screenshot-celegans.png



Food Web

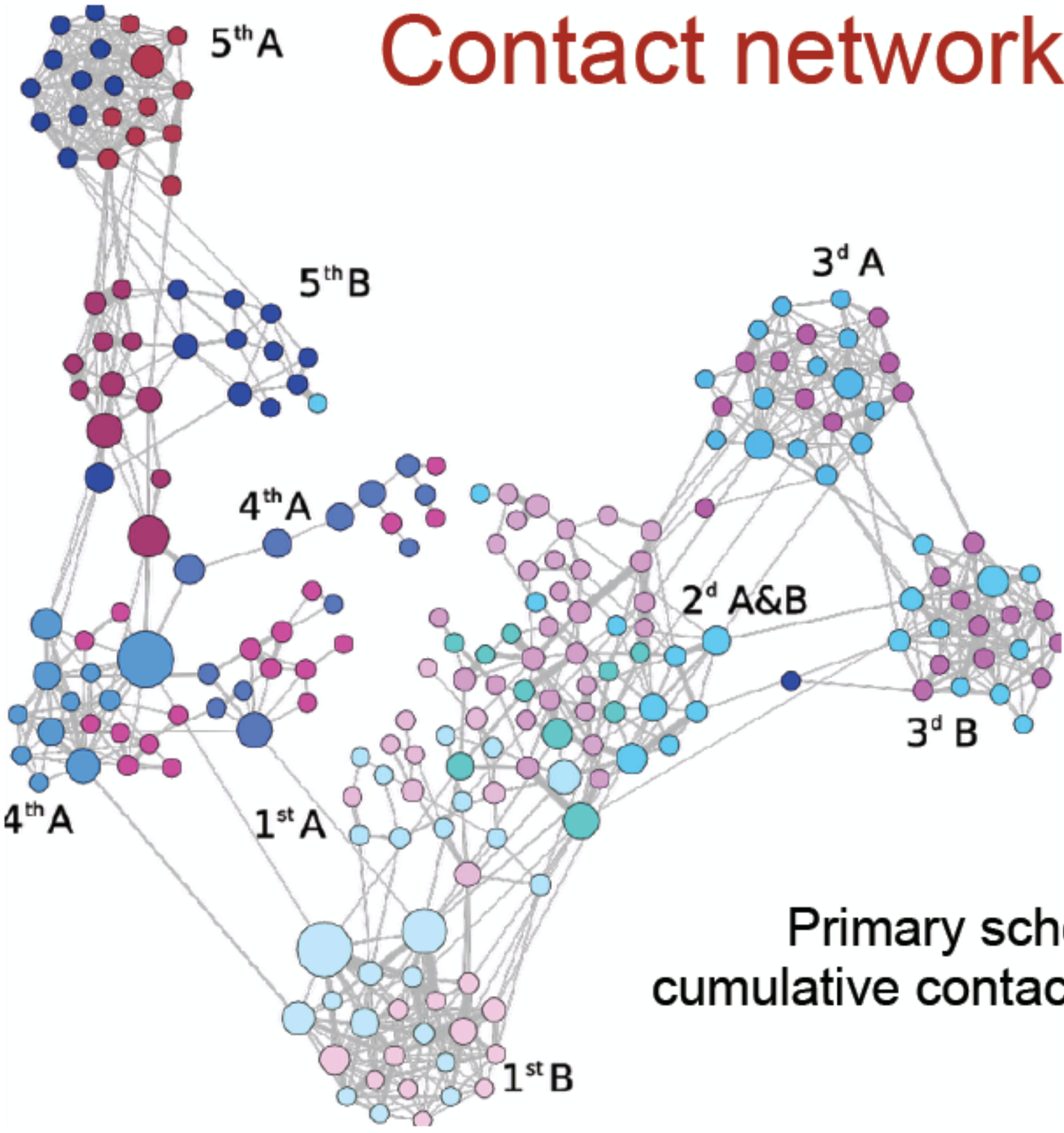
http://1.bp.blogspot.com/_vIFBm3t8boU/SBhzqbchIeI/AAAAAAAAAXk/RsC-Pj45Avc/s400/food%2Bweb.bmp

Scientific collaboration networks



M. E. J. Newman and M. Girvan, *Physical Review E* **69**, 026113 (2004).
Image: MEJ Newman, http://www-personal.umich.edu/~mejn/networks/

Contact networks



Primary school,
cumulative contact network

Online (virtual) social networks

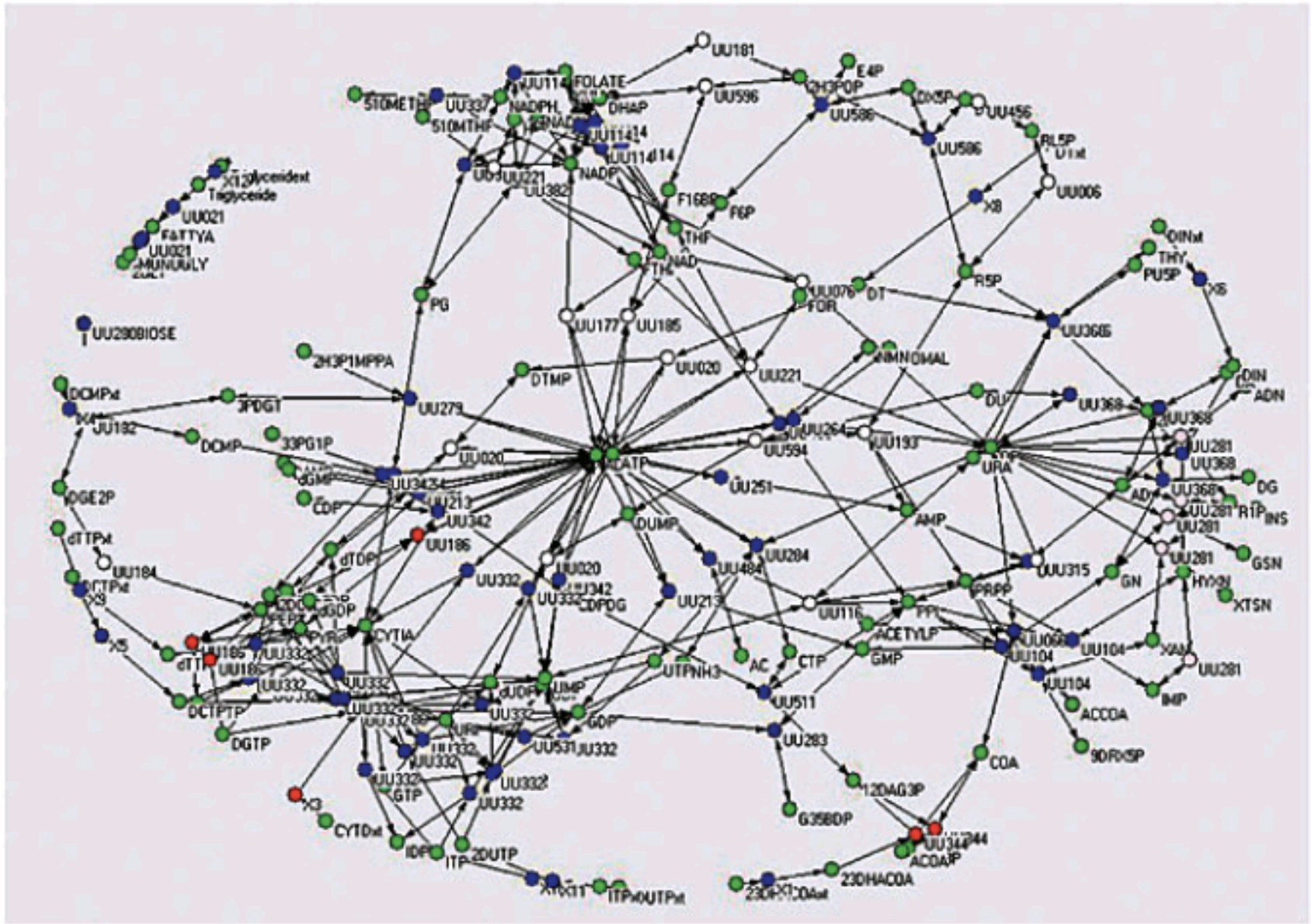


Figure 2. Bipartite graph of the metabolic network of *Ureaplasma urealyticum*. Dark gray and white nodes represent enzymes and light gray nodes represent metabolites (Lemke et al., 2004).

Metabolic Network

http://www.funpecrp.com.br/gmr/year2005/vol3-4/wob01_full_text.htm

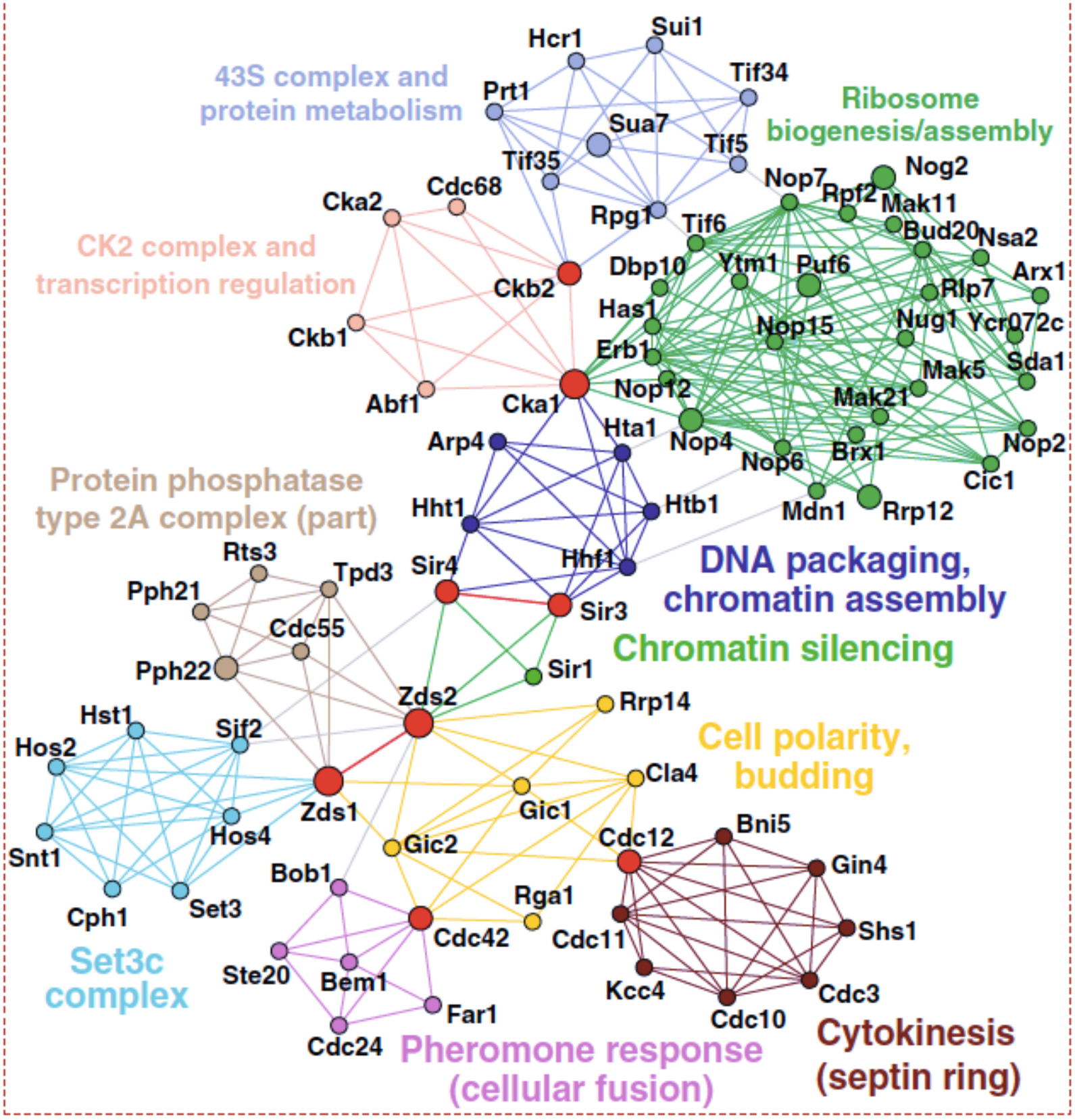
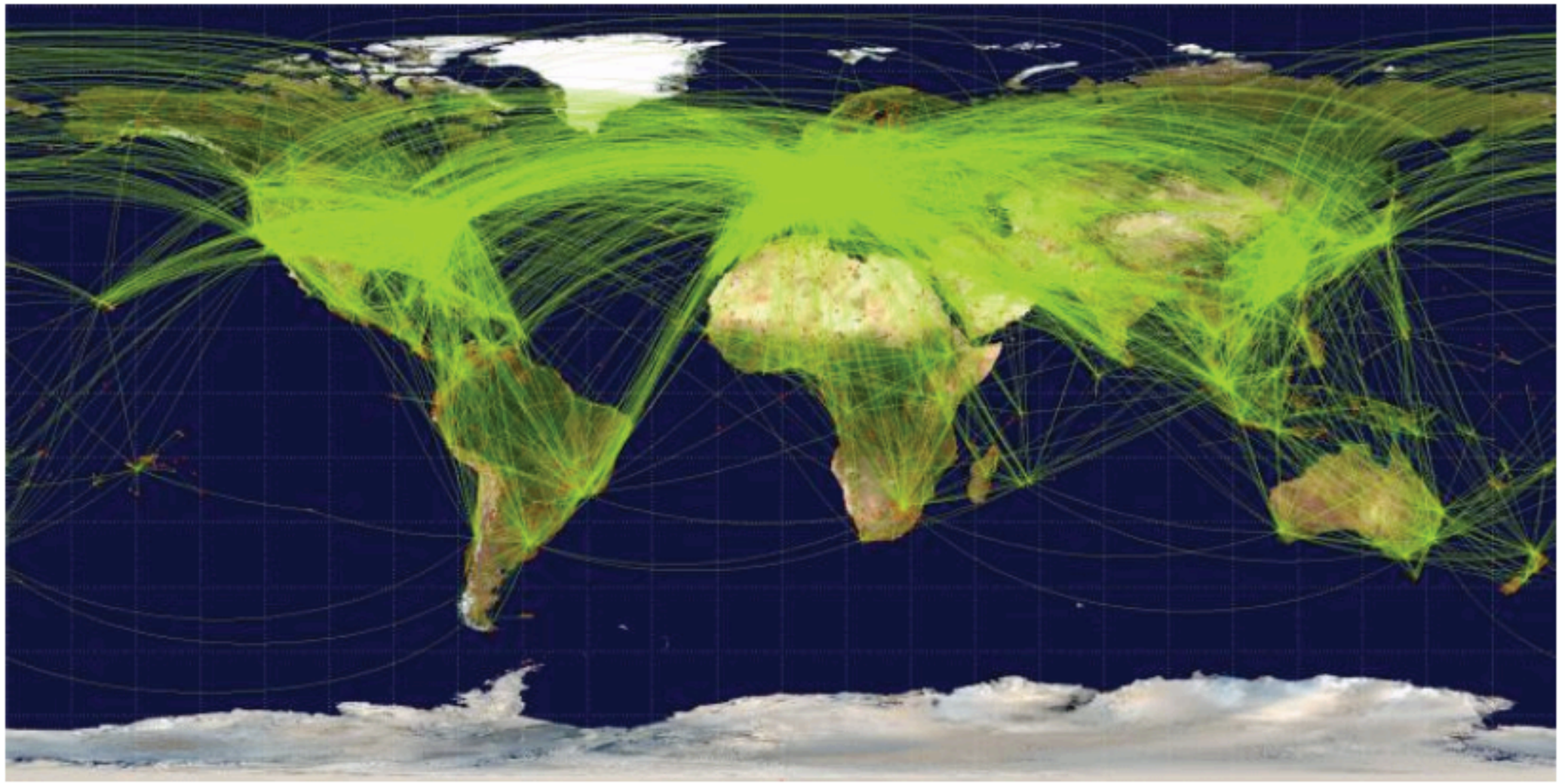
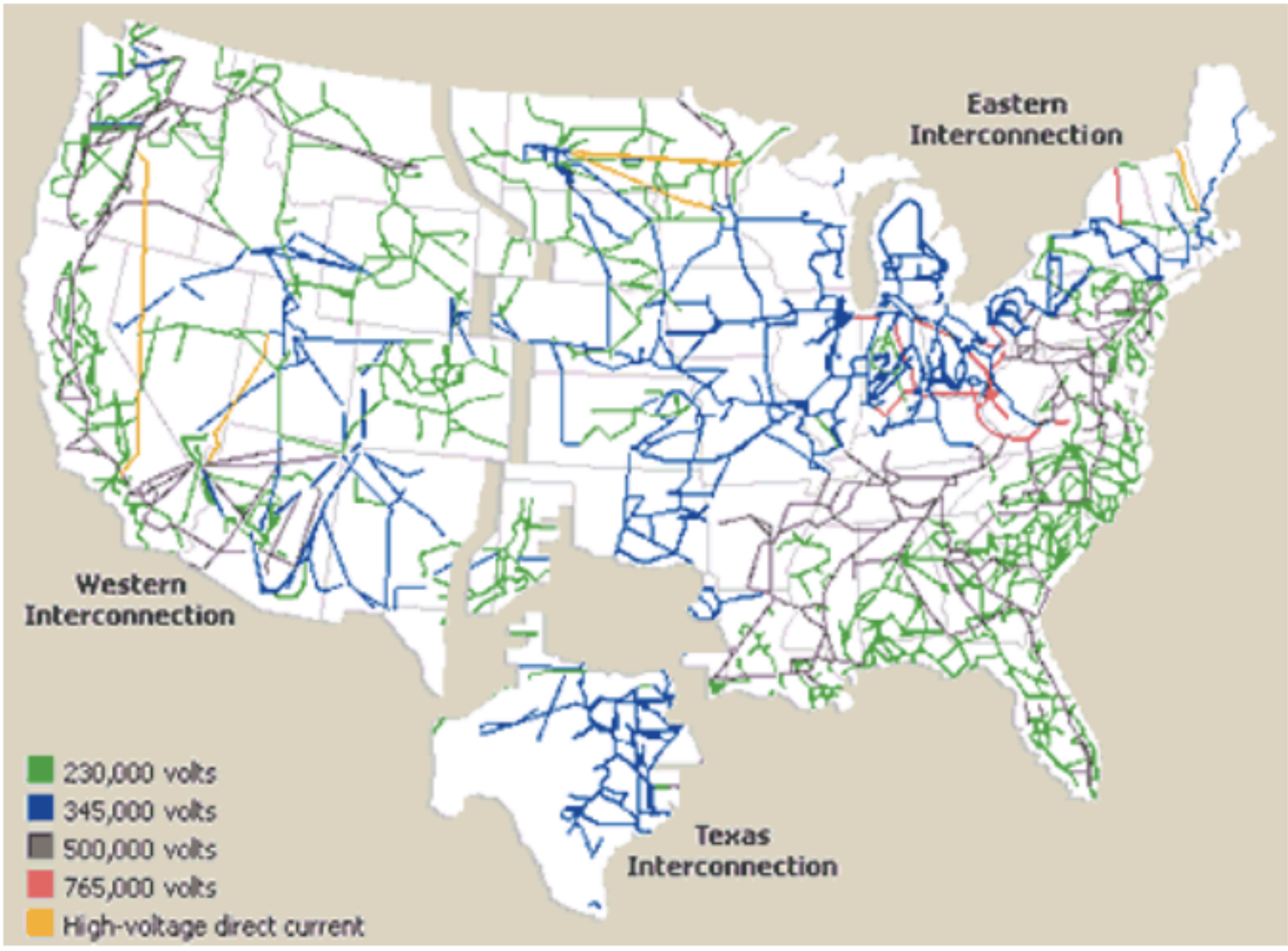


Fig. 1.2 A protein interaction network, showing a complex interplay between highly connected hubs and communities of subgraphs with increased densities of edges (From Palla et al. (2005))

World airport network





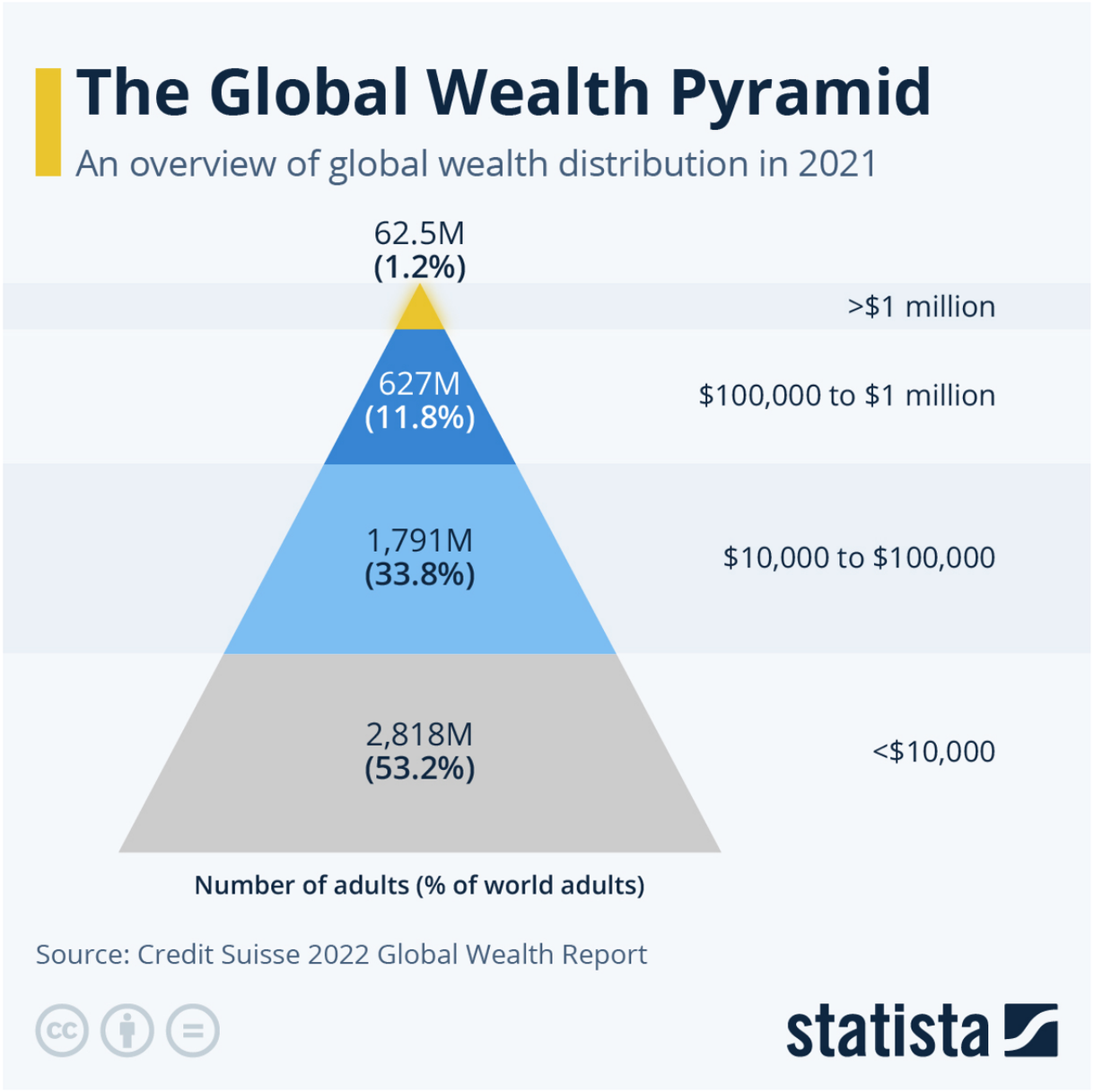
US Power Grid

http://images.encarta.msn.com/xrefmedia/aencmed/targets/maps/map/000a5302.gif

توزیع‌های ناهمگن (دم‌کلفت) در سامانه‌های پیچیده

- معمولا در سامانه‌های پیچیده توزیع کمیت‌ها به صورت ناهمگن است. بسامد وقوع پیشامدهای نادر در این توزیع‌ها بسیار بیشتر از خد نرمال است.

مثال: توزیع توانی (پرتو) در توزیع ثروت



قوی سیاه

- قوی سیاه یک پیشامد نادر پیش‌بینی‌ناپذیر با احتمالی فراتر از حد نرمال است که پیامدهای شگرفی به دنبال خود دارد.
- سامانه‌های پیچیده قابلیت ایجاد قوهای سیاه را دارند.

مثال:جنگ جهانی اول، رکود بزرگ، حادثه‌ی ۱۱ سپتامبر

علم پیچیدگی

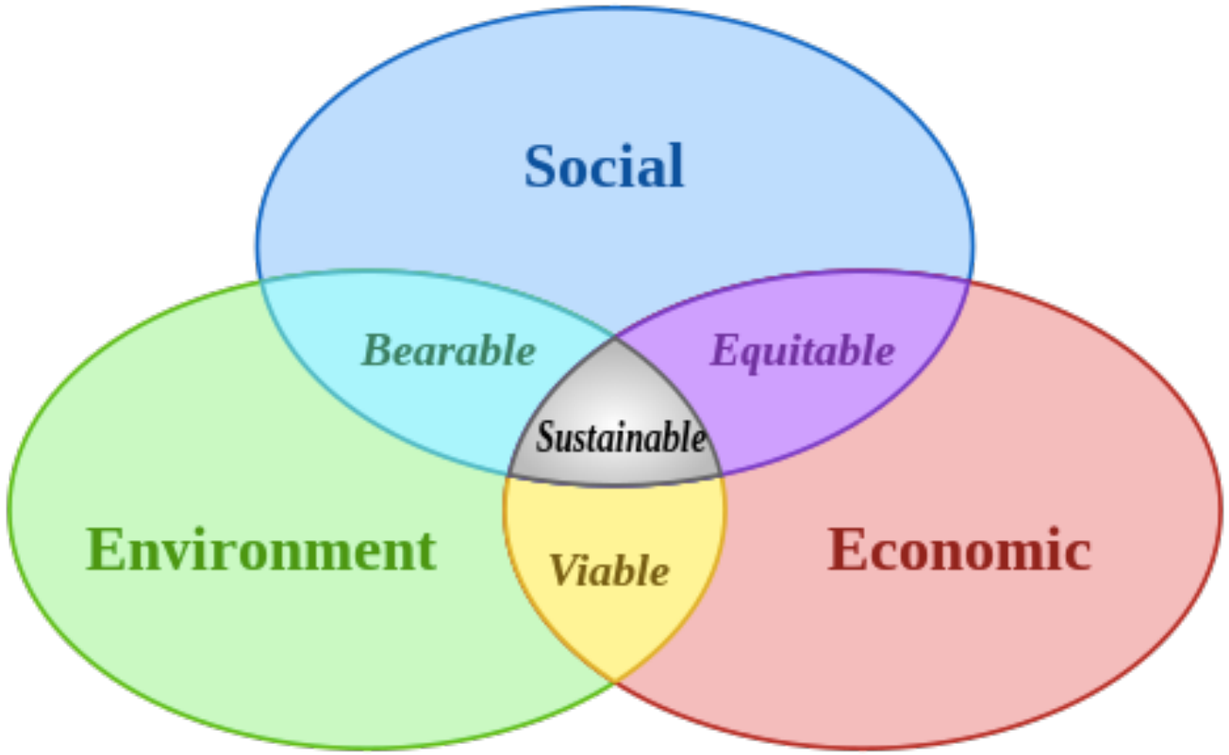
- نظریه‌ی علمی(کمی، با قابلیت پیش‌بینی و تایید یا ابطال تجربی) برای توصیف سامانه‌های پیچیده (ماده‌ی تعمیم یافته و برهمکنش‌های تعمیم‌یافته)

توسعه‌ی پایدار

Sustainable Development

توسعه‌ی پایدار

توسعه‌ی پایدار فرآیندی است در **استفاده از منابع**، هدایت **سرمایه‌گذاریها**، جهت‌گیری توسعه‌ئ فناوری و تغییرات نهادی، که با نیازهای حال و آینده سازگار باشد. توسعهٔ پایدار که از دهه‌ی ۹۰ میلادی بر آن تأکید شد جنبه‌ای از توسعهٔ انسانی و در ارتباط با محیط **زیست** و **نسل‌های آینده** است.



توسعه پایدار بسیار گسترده‌تر از صرفاً محیط زیست است. این همچنین در مورد اطمینان از یک **جامعه‌ئ قوی**، **سالم** و **عادلانه** می‌باشد. این به معنای رفع نیازهای متنوع همه افراد در جوامع موجود و آینده، **ارتقای رفاه شخصی**، **انسجام و شمول اجتماعی**، و ایجاد **فرصت‌های برابر** است.

هدف‌های توسعه‌ی پایدار (برنامه‌ی ۲۰۳۰)

تفکر سیستمی

System thinking

- **Systems thinking** is a way of making sense of the complexity of the world by looking at it in terms of **wholes** and relationships rather than by splitting it down into its parts.

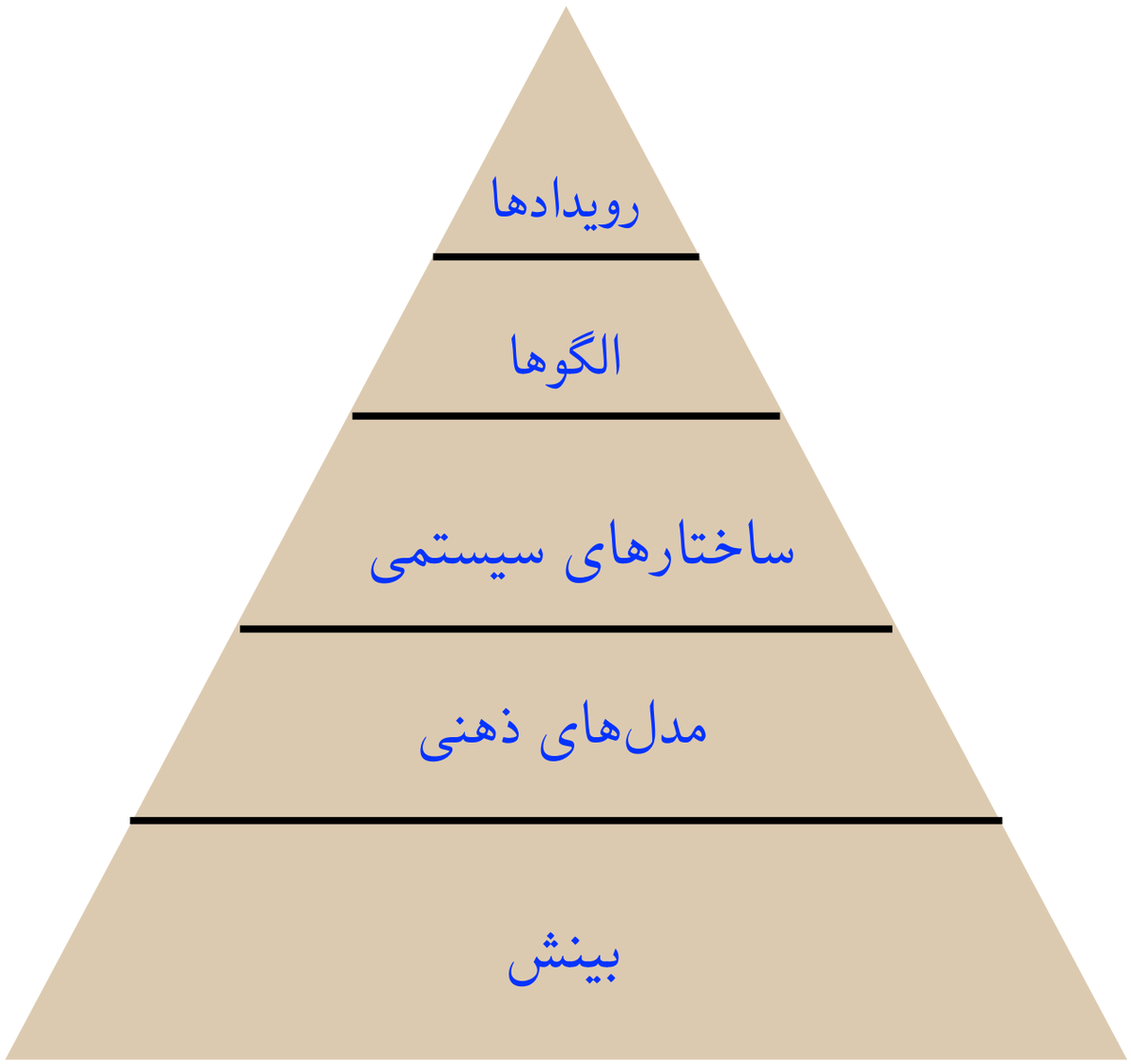
- The systems thinking approach **contrasts** with **traditional analysis**, which studies systems by **breaking them down** into their **separate elements**. Systems thinking can be used in any area of research and has been applied to the study of medical, environmental, political, economic, human resources, and educational systems, among many others.

- Attention to **feedback** is an essential component of system thinking.

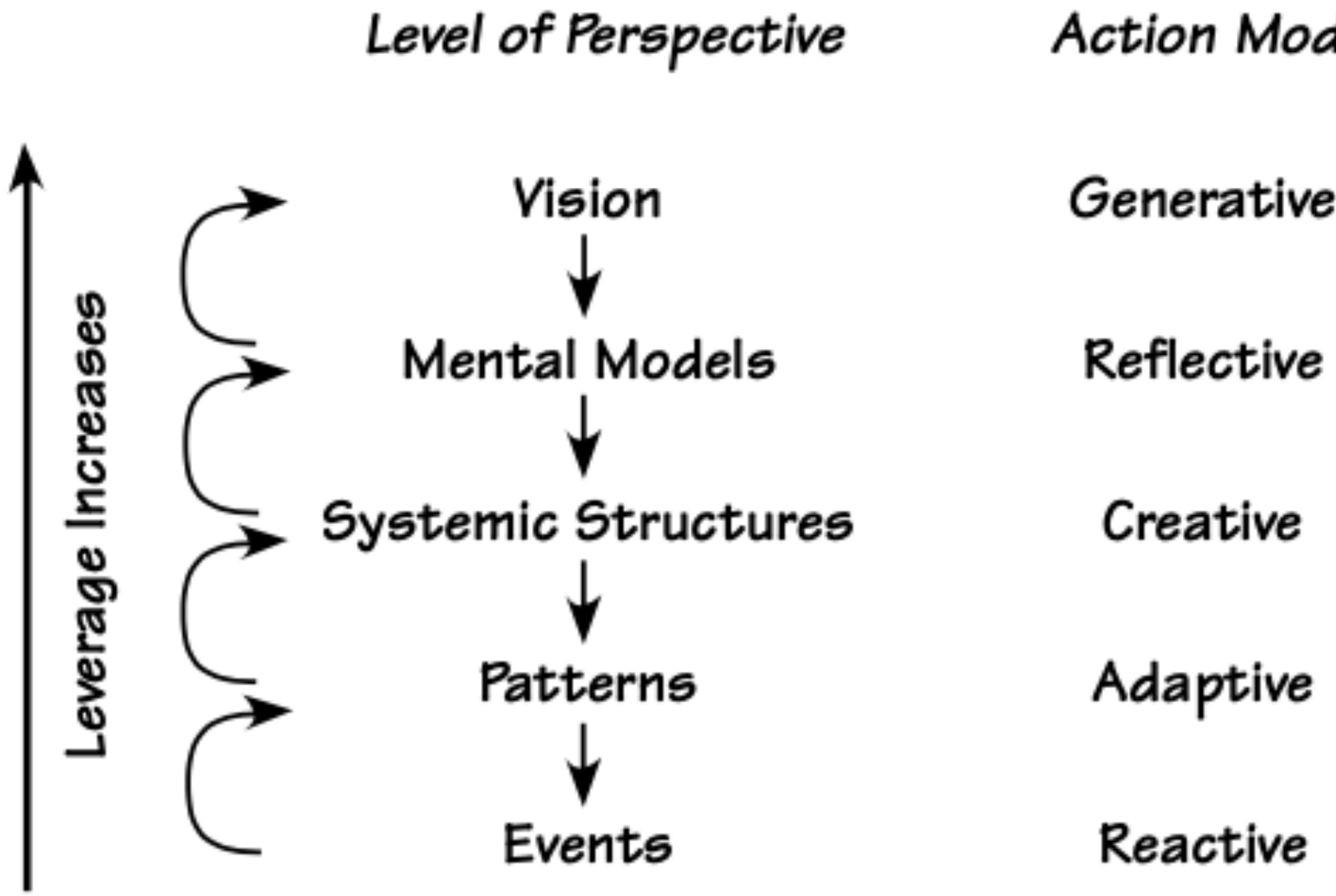
- Systems thinking originated in 1956, when Professor **Jay Forrester** founded the **Systems Dynamic Group** at **MIT's Sloan School of Management**.

Jay Wright Forrester (1918-2016)

استعاره‌ی کوه یخ



شیوه‌ی کنش در سطوح مختلف



حلقه‌های بازخورد (Feedback Loops)

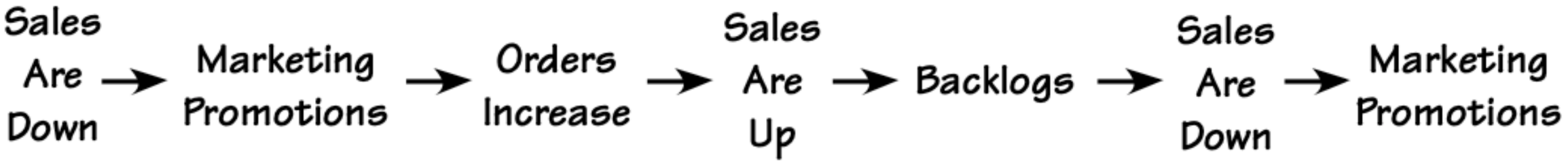
- یک ابزار مهم در تفکر سیستمی حلقه‌های بازخورد هستند.

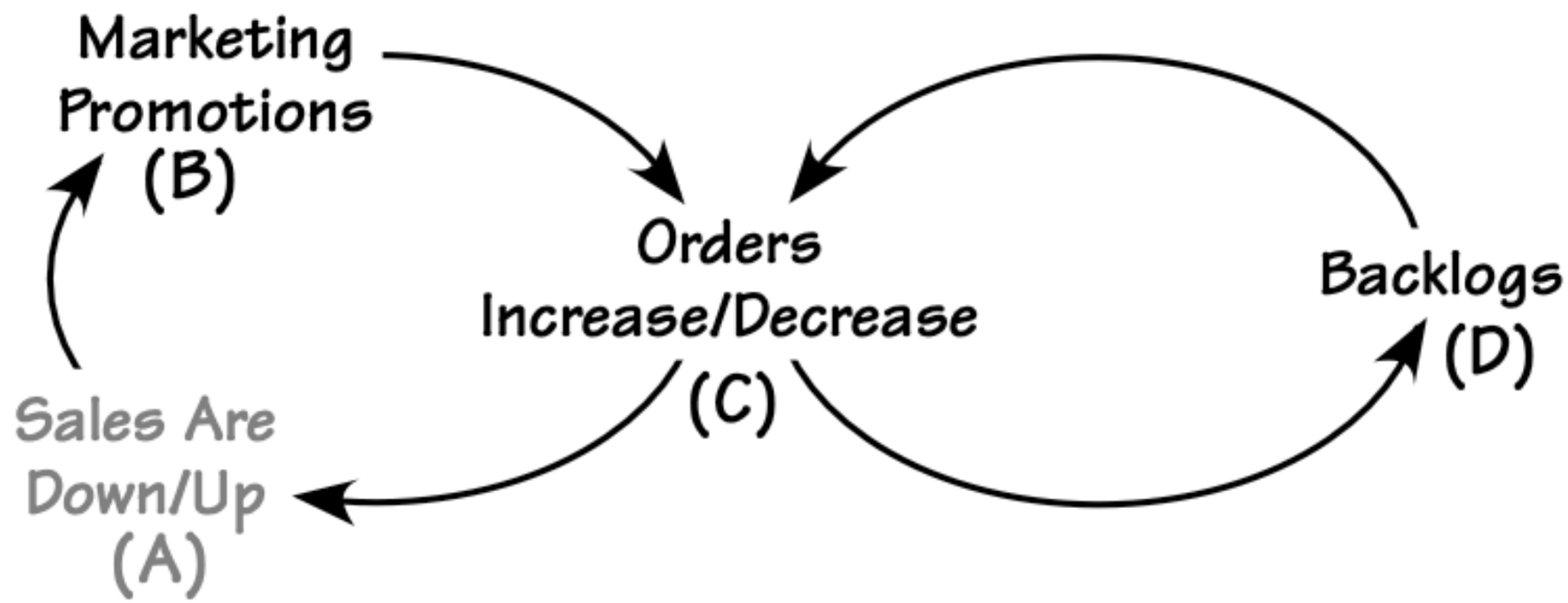
- حلقه‌ی بازخورد به معنای انتقال و بازگشت اطلاعات است.
  (علیت دوری در برابر علیت خطی)

- در این شیوه‌ی تفکر، تاثیر کنش تصمیم‌گیران بر رفتار سیستم بررسی می‌شود.

- دانستن شیوه‌ی تاثیر کنش افراد بر جهان، به دانستن چگونگی کنش افراد منجر می‌شود.

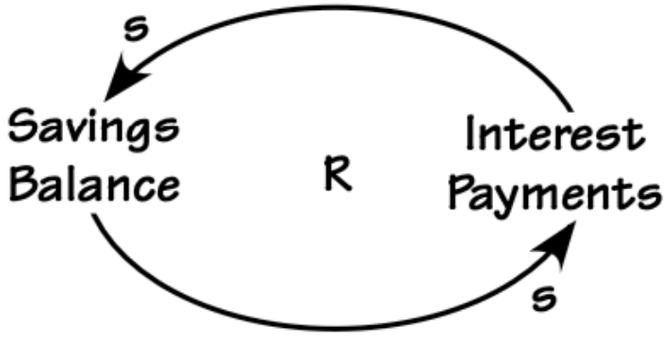
THINKING IN LOOPS





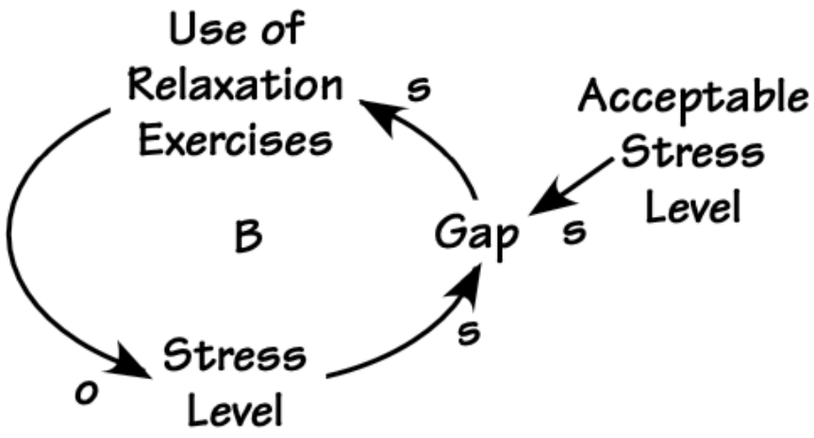
Thinking in loops helps us see the interrelationships among all the variables in the system.

دو نوع حلقه‌های بازخورد



- حلقه‌ی بازخورد تقویتی (بازخورد مثبت):

تاثیر این حلقه در جهت تقویت روند اولیه است.

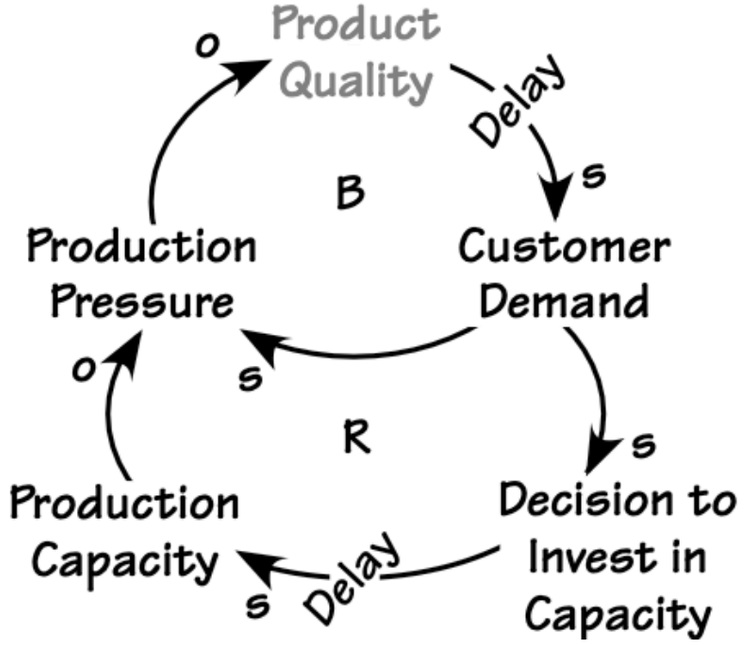


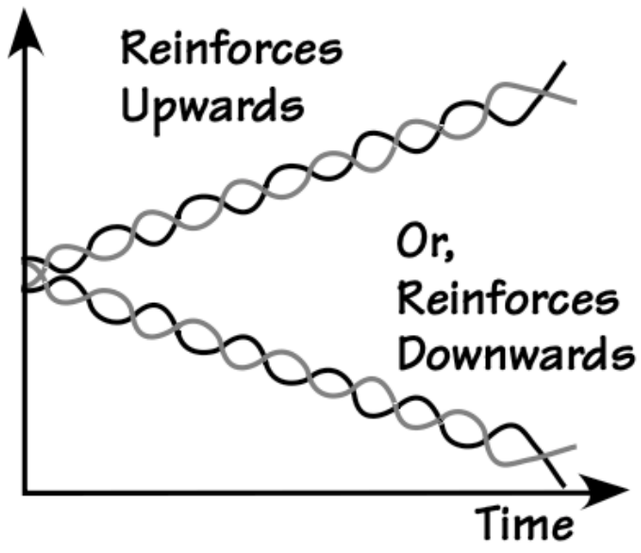
- حلقه‌ی بازخورد موازنه‌کننده (بازخورد منفی):

تاثیر این حلقه در جهت تعدیل روند اولیه است.

مارپیچ‌های رستگاری و تباهی

ترکیب حلقه‌های تقویتی و موازنه‌ای می‌تواند منجر به رشد سیستم (مارپیچ رستگاری) یا زوال سیستم (مارپیچ تباهی) شود.





تفکر حلقه‌ای

- تصویرسازی سیستم به صورت حلقه‌های بازخوردی منجر به درک بهتر روابط بین اجزای آن می‌شود.
- درک بهتر بین اجزای سیستم می‌تواند به تصمیم‌سازان در پیشگیری از رویدادهای نامطلوب کمک کند.

با سپاس از توجه شما