

Le sfide interdisciplinari delle scienze naturali e sociali. La teoria dei sistemi complessi come metodo di indagine

Andrea Gabrielli

Università degli Studi Roma Tre

Centro Studi e Ricerche «Enrico Fermi»

Sommario

- Cos'è un Sistema Complesso
- Proprietà caratteristiche di un sistema complesso
- Illustrazione di sistemi complessi in fisica
- I sistemi complessi come un ponte verso altre discipline scientifiche
- Due esempi: il cervello umano e la competitività economica

Programma “classico” in Fisica

Approccio riduzionista - costruttivista

- Studio delle interazioni tra componenti fondamentali del sistema e della dinamica conseguente
- Estensione a un piccolo numero di componenti con tecniche di approssimazione
- Estrapolazione a un numero grande di componenti al fine di trovare i comportamenti macroscopici e «termodinamici» tramite le leggi della probabilità

Ma ...

Molti sistemi presentano comportamenti collettivi che sfuggono a questo schema

Formalizzazione di sistema complesso e nascita di un nuovo approccio (PW Anderson, 1972)

More Is Different

Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science.

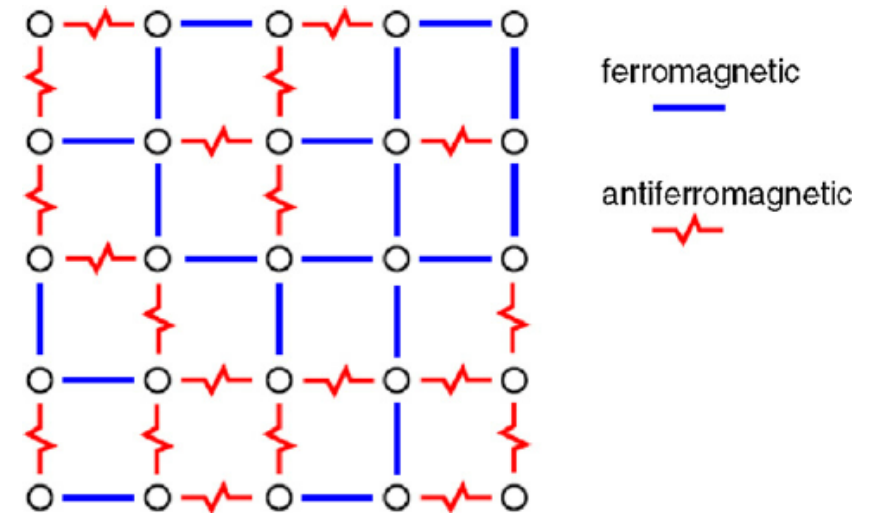
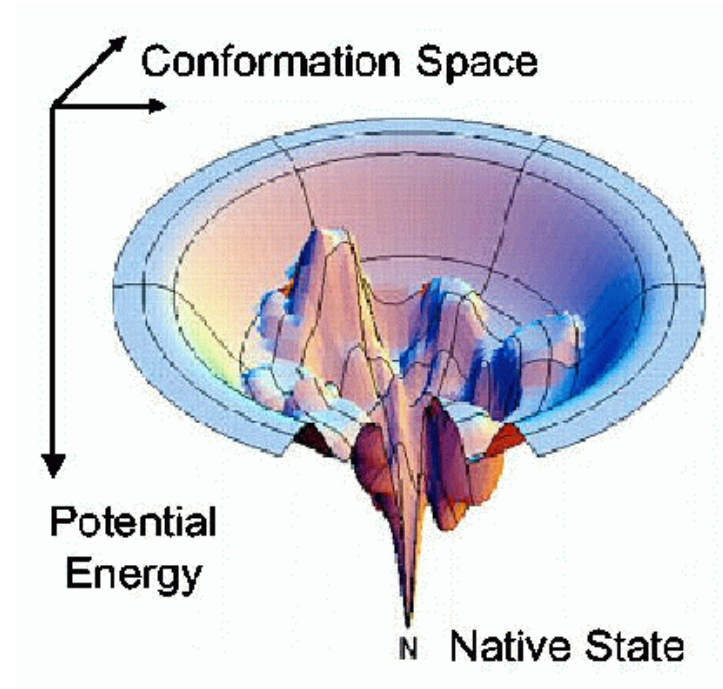
P. W. Anderson

The constructionist hypothesis breaks down when confronted with the twin difficulties of scale and complexity. The behavior of large and complex aggregates of elementary particles, it turns out, is not to be understood in terms of a simple extrapolation of the properties of a few particles. Instead, at each level of complexity entirely new properties appear, and the understanding of the new behaviors requires research which I think is as fundamental in its nature as any other. That is, it

Proprietà fondamentali dei sistemi complessi (1):

M. Mezard, G. Parisi, M.A. Virasoro, *Spin glass theory and beyond*

Disordine e «frustrazione»



Gerarchia complessa di configurazioni «localmente» stabili in cui il sistema può rimanere intrappolato. Tantissime «soluzioni» quasi ottimali.

Esempio: Invitati a cena

- N invitati a cena
- Ogni invitato ha una sua lista di simpatie ed antipatie (reciproche) conosciute agli organizzatori
- $n < N$ tavoli
- Se due invitati mutualmente simpatici si trovano vicini livello di soddisfazione S aumenta di 1
- Se due invitati mutualmente antipatici si trovano vicini livello di soddisfazione S diminuisce di 1

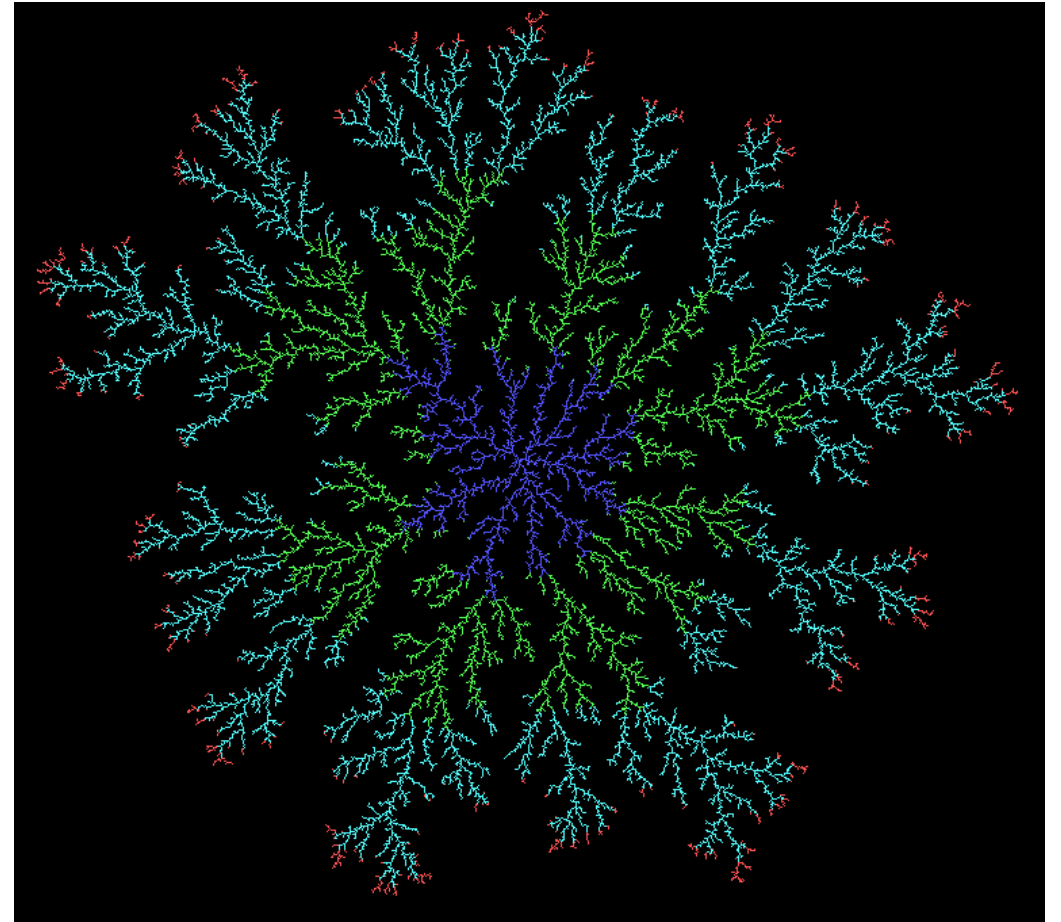
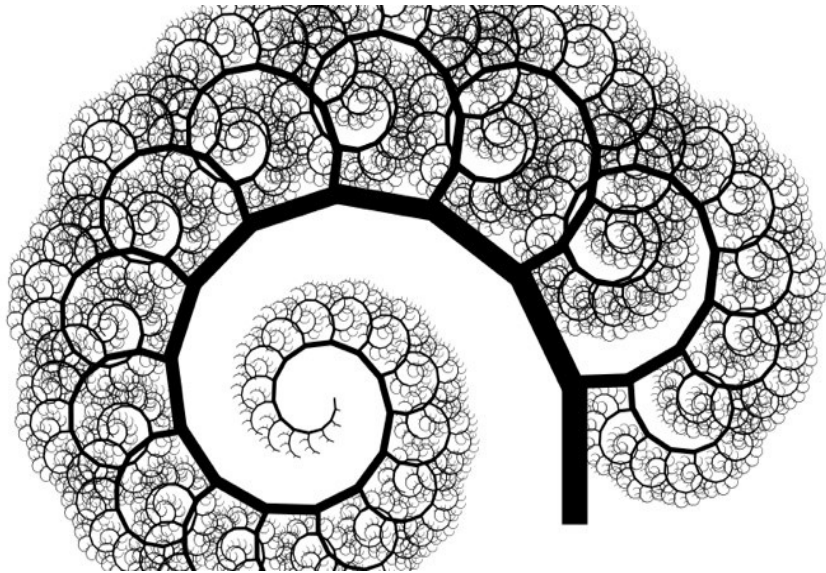
Problema: trovare il miglior «matching» nei tavoli in maniera da massimizzare S

Proprietà fondamentali dei sistemi complessi (2): Geometria complessa su molte scale di lunghezza

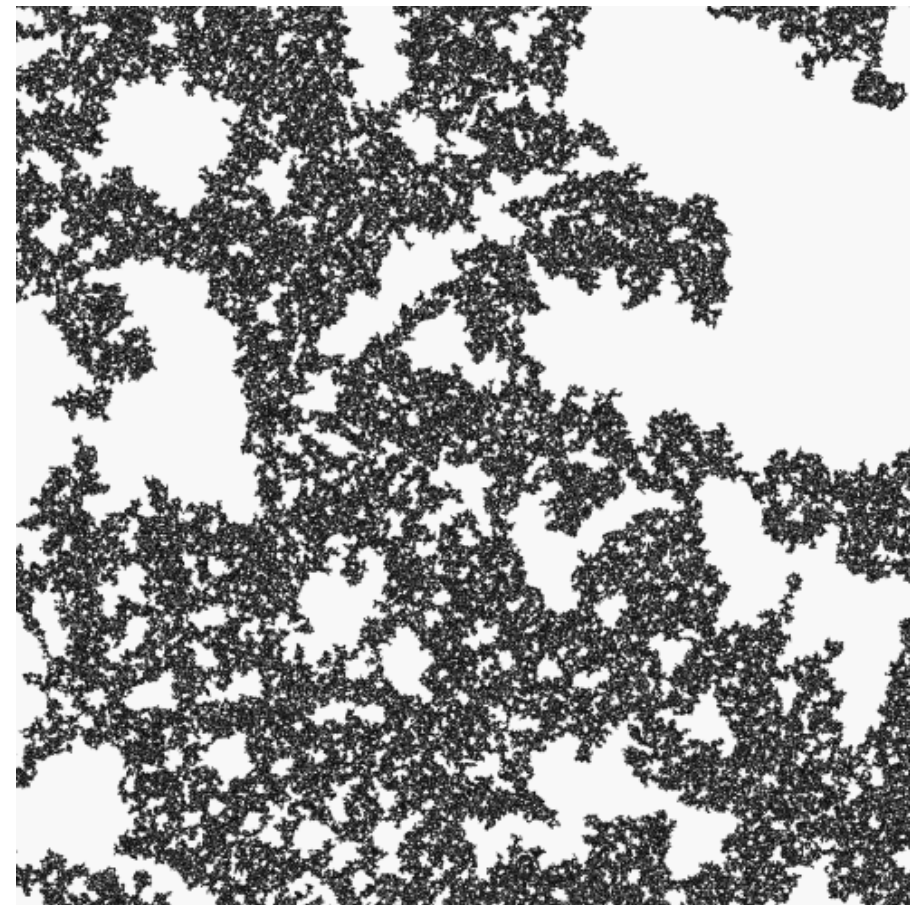
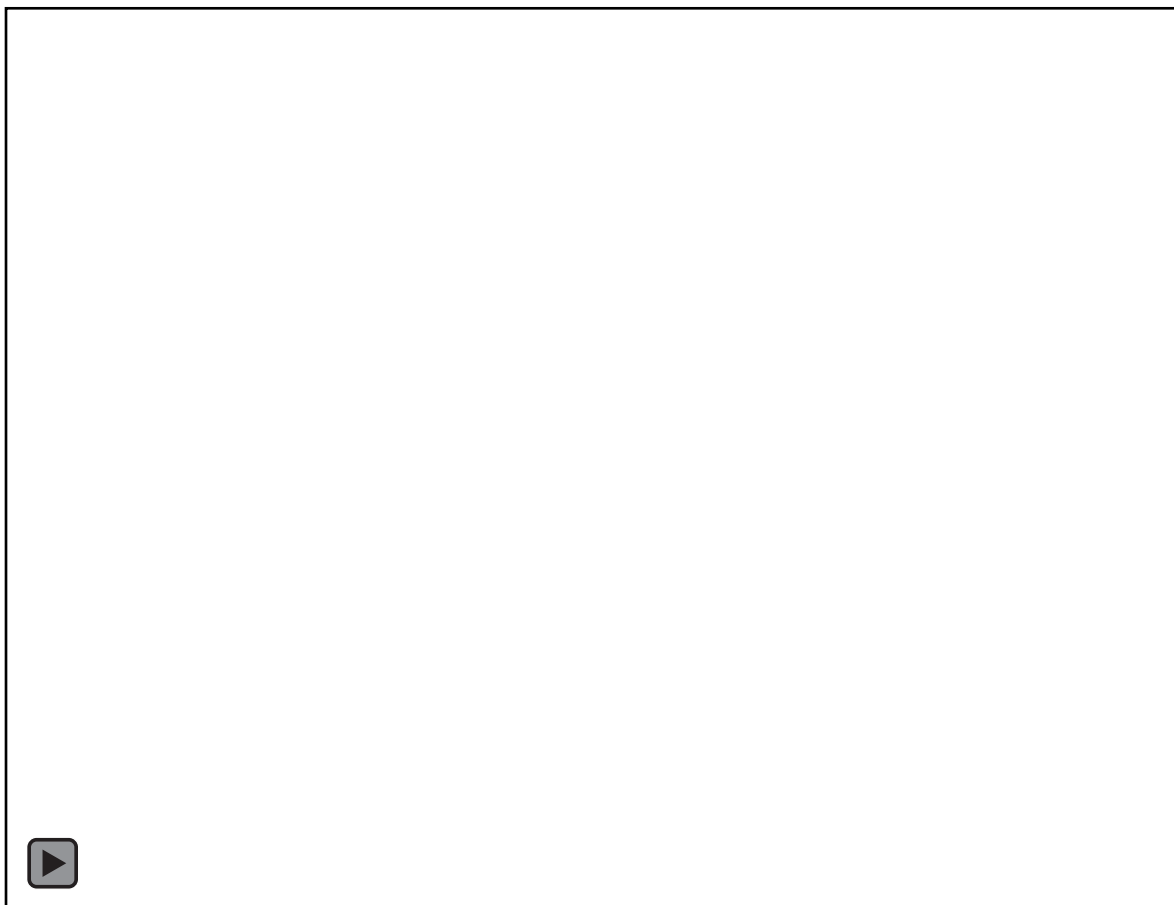
(J.F. Gouyet, *Physics and Fractal Structures*)

Frattalità ed invarianza di scala:

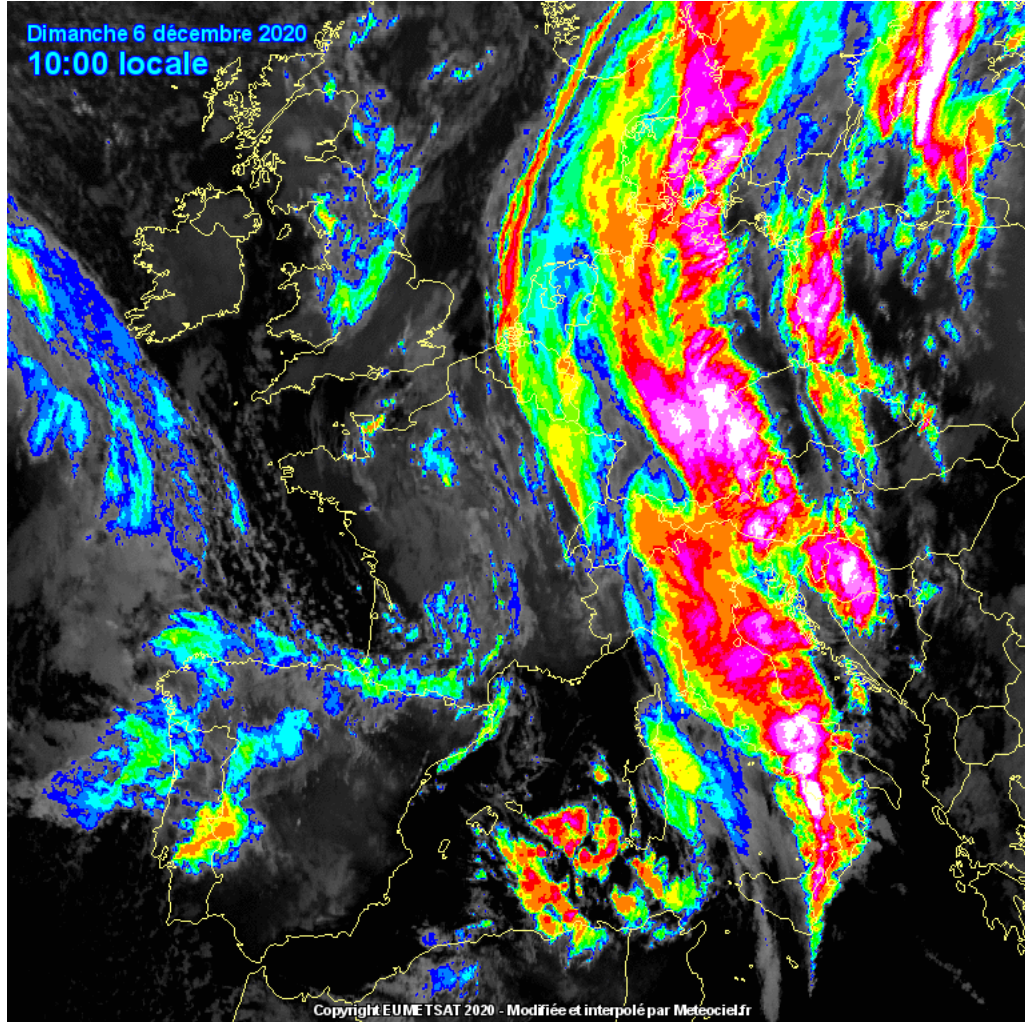
il livello di complessità rimane lo stesso
sotto l'effetto di una lente d'ingrandimento,
 $M \sim L^D$ con $D < d$, D = dimensione frattale



Proprietà fondamentali dei sistemi complessi (2): Geometria complessa su molte scale di lunghezza



Proprietà fondamentali dei sistemi complessi (3): Dinamiche con molte scale temporali intrinseche



Fenomeni con evoluzioni a valanga
senza una taglia caratteristica



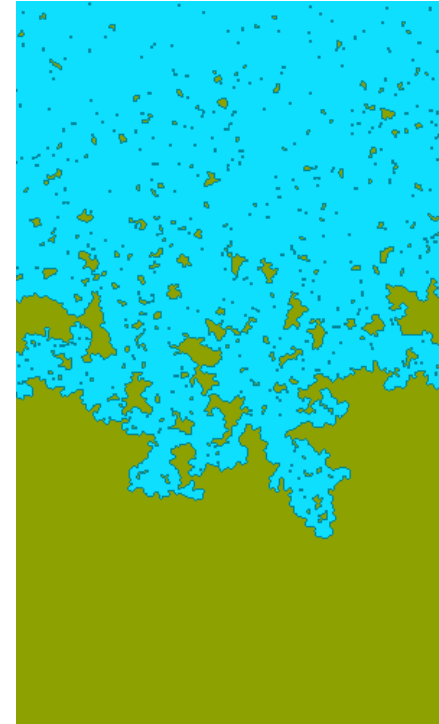
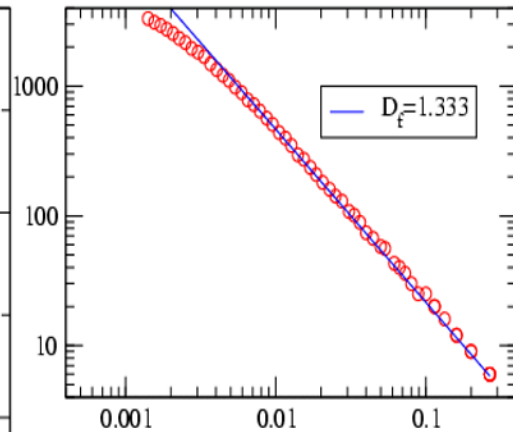
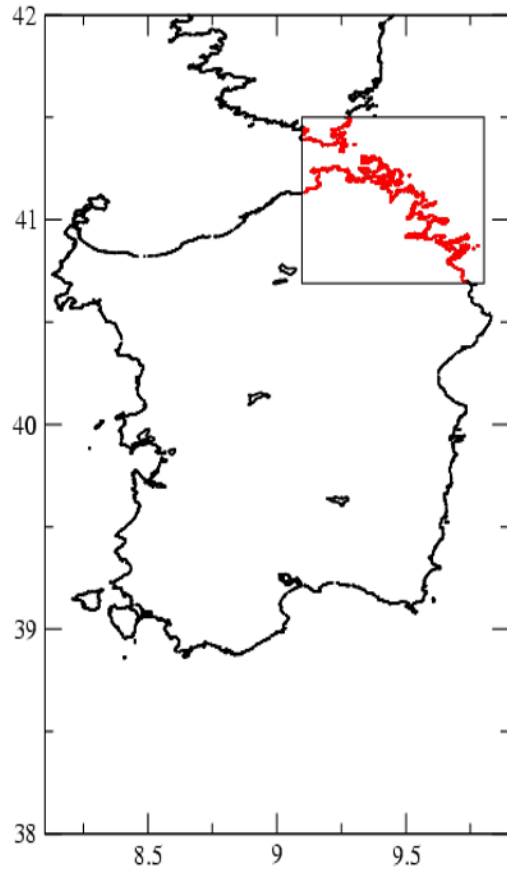
Esempio: la percolazione invasiva

Invasione di un mezzo poroso
da parte di un fluido per
capillarità:

- Evoluzione per valanghe
invarianti di scala
- Formazione di una struttura
frattale



Esempio: la formazione di coste frattali

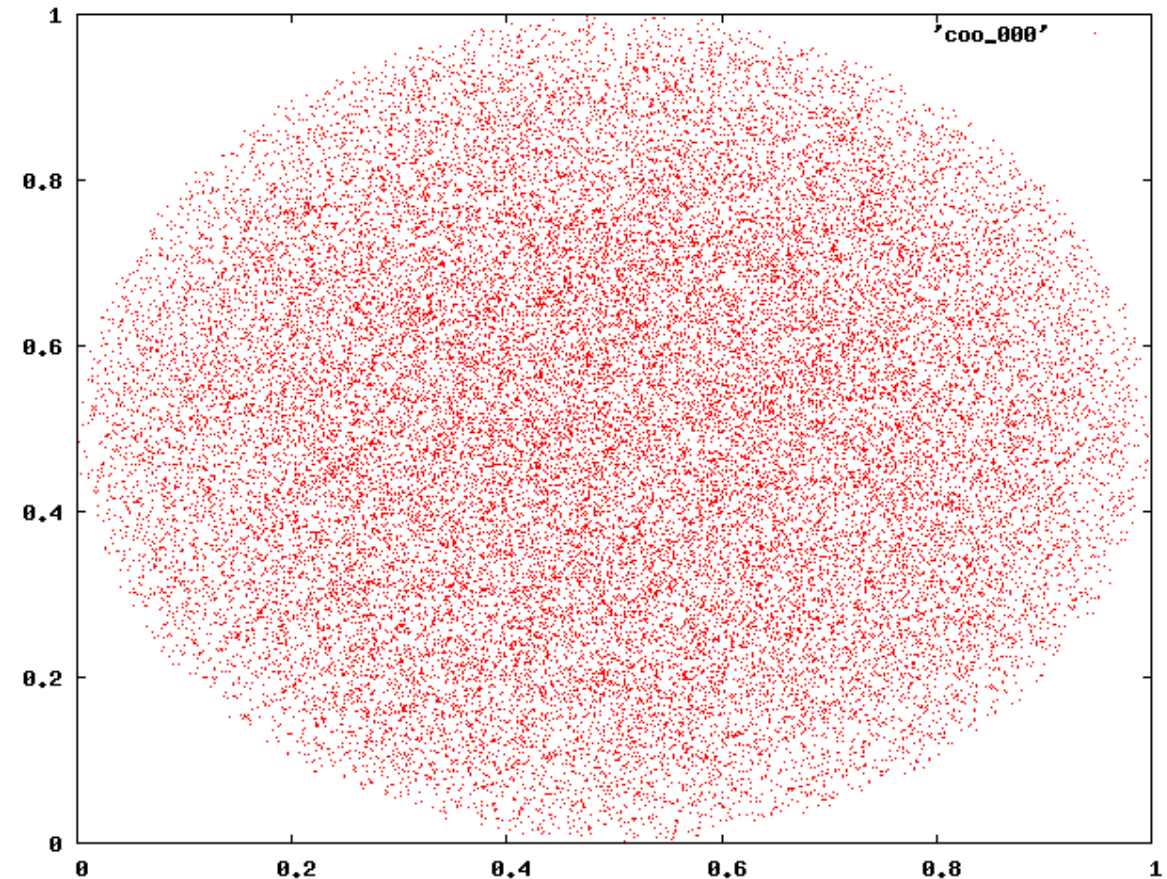


Proprietà fondamentali dei sistemi complessi (4): Interazioni a lungo raggio tra elementi e disordine

Ad es. particelle massive distribuite in maniera
stocastica con interazione gravitazionale

Accoppiamento tra tutte le scale spaziali e temporali

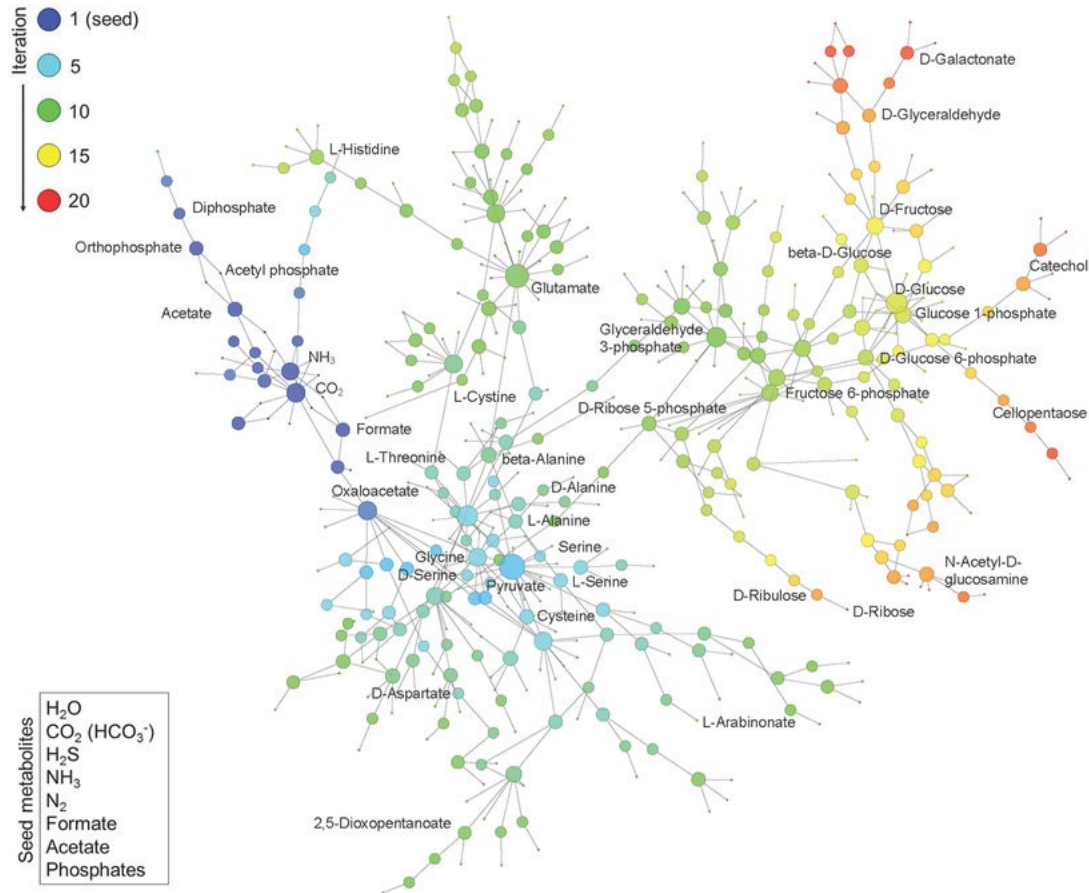
Formazione di una struttura «quasi-stazionaria» in
funzione del disordine iniziale



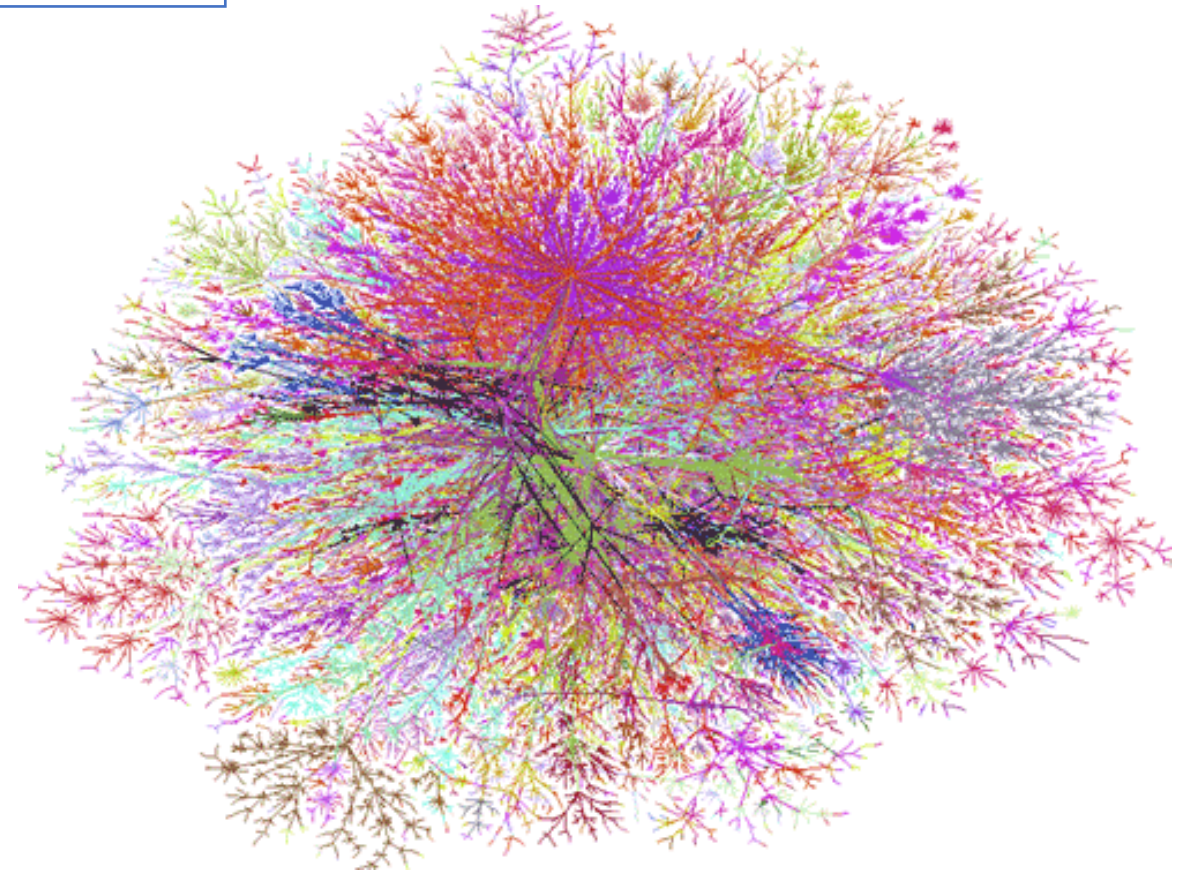
Proprietà fondamentali dei sistemi complessi (5): connettività estremamente eterogenea

Teoria delle reti complesse
Statistica e teoria dei grafi

Rete metabolica



Internet

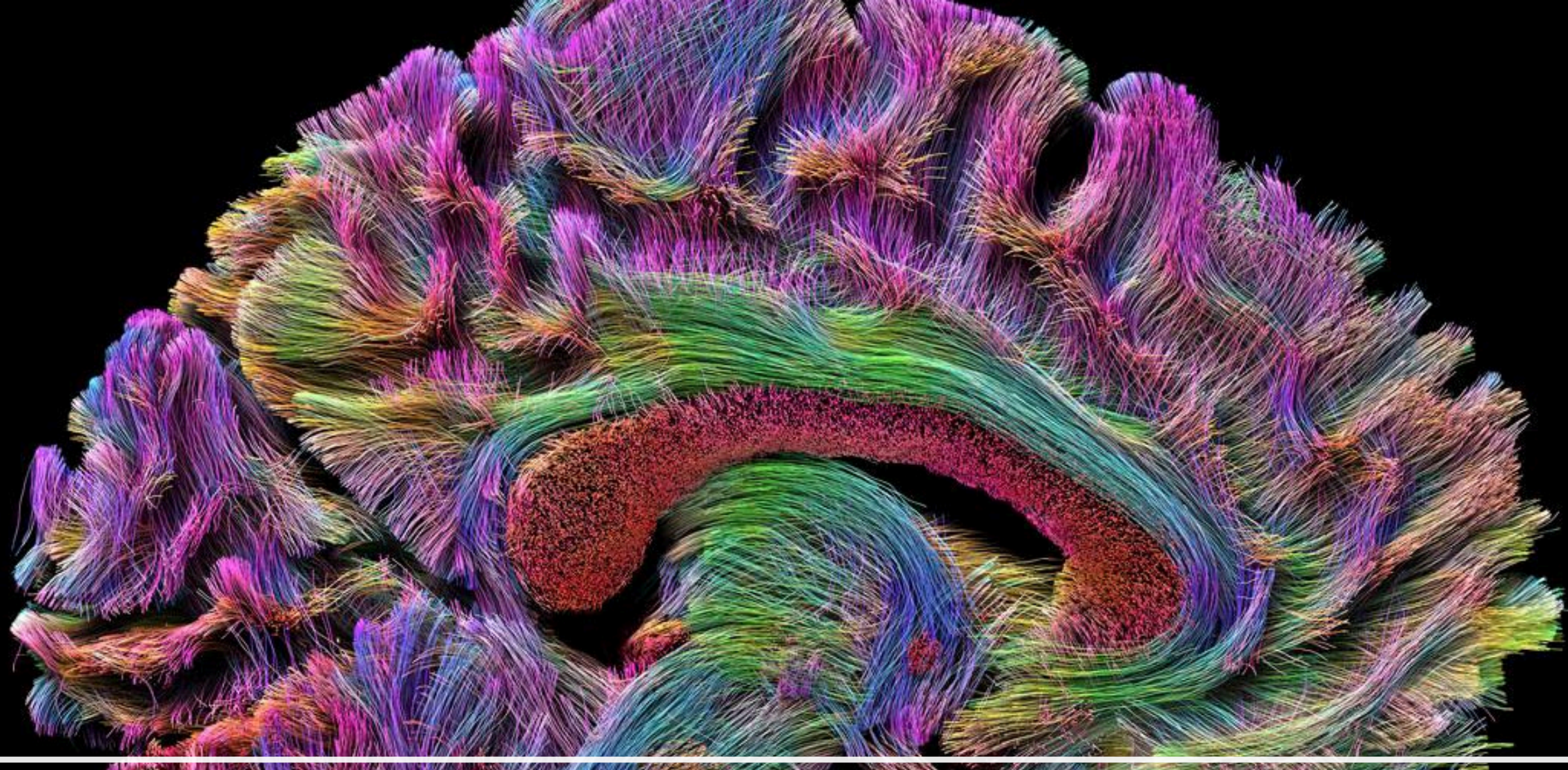


Percorso storico: Trovare nuove regolarità nella complessità

- Anni 1963– 1990: Sistemi caotici
- Anni 1940 – oggi: Turbolenza
- Anni 1965 - 1985: Transizioni di fase (fenomeni critici) e gruppo di rinormalizzazione
- 1975– oggi: Fisica statistica dei sistemi disordinati
- 1980 – oggi: Fisica statistica fuori equilibrio delle interazioni a lungo raggio. Frattali cosmici.
- 1985 - 2000: Criticità auto-organizzata e dinamiche di crescita frattale
- 2000 – oggi: Teoria delle reti complesse e fisica statistica delle reti di interazione



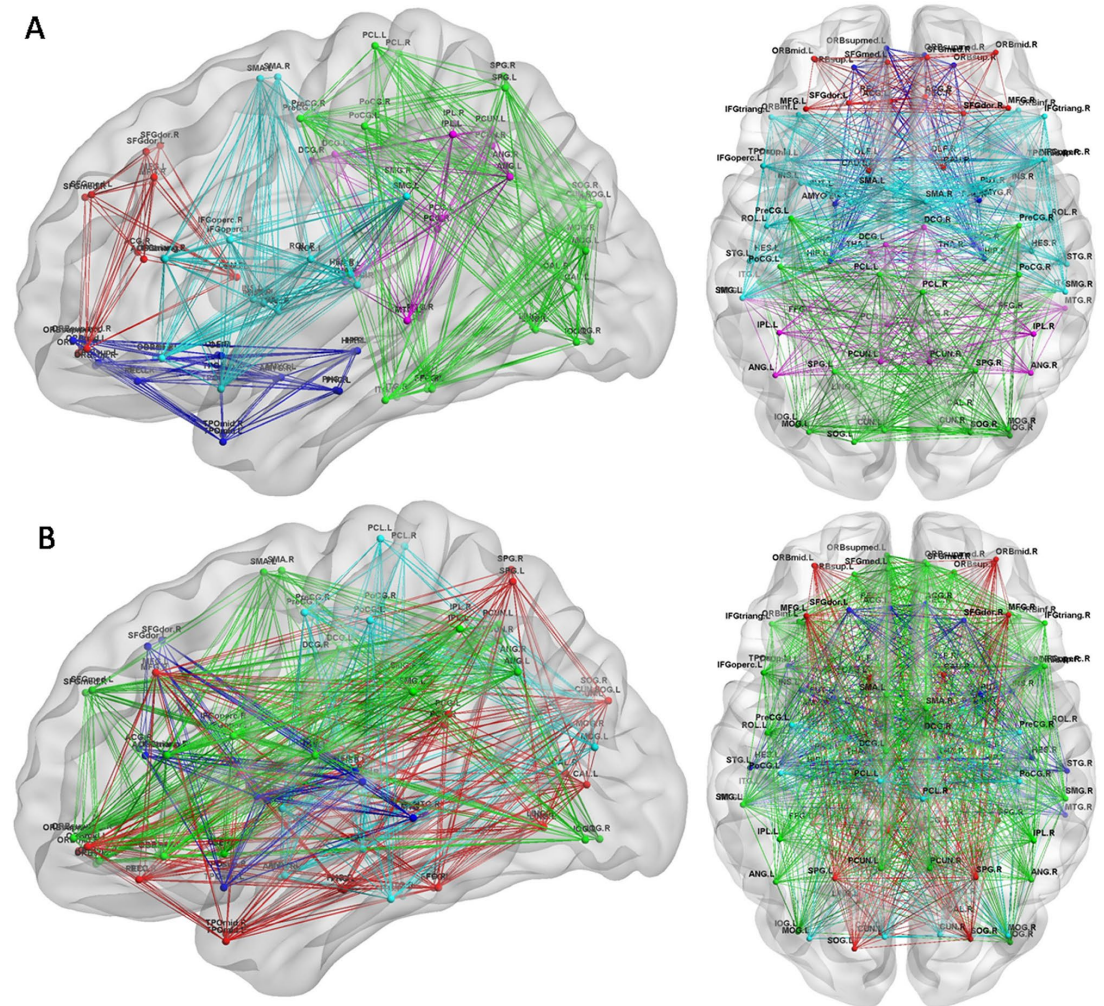
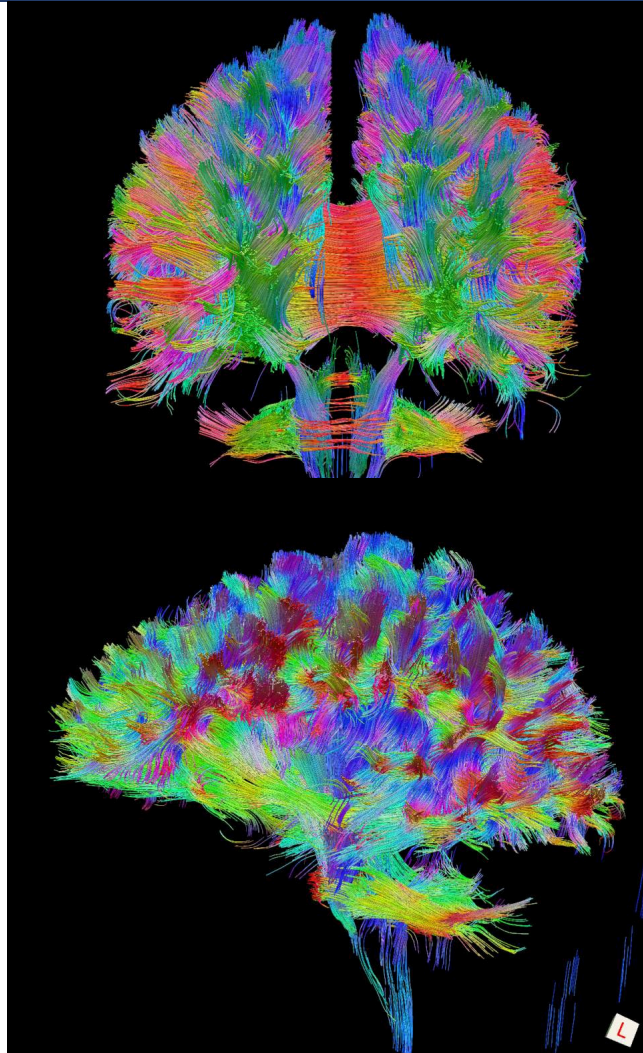
Applicazioni interdisciplinari in ambito biologico e sociale



Il cervello come sistema complesso

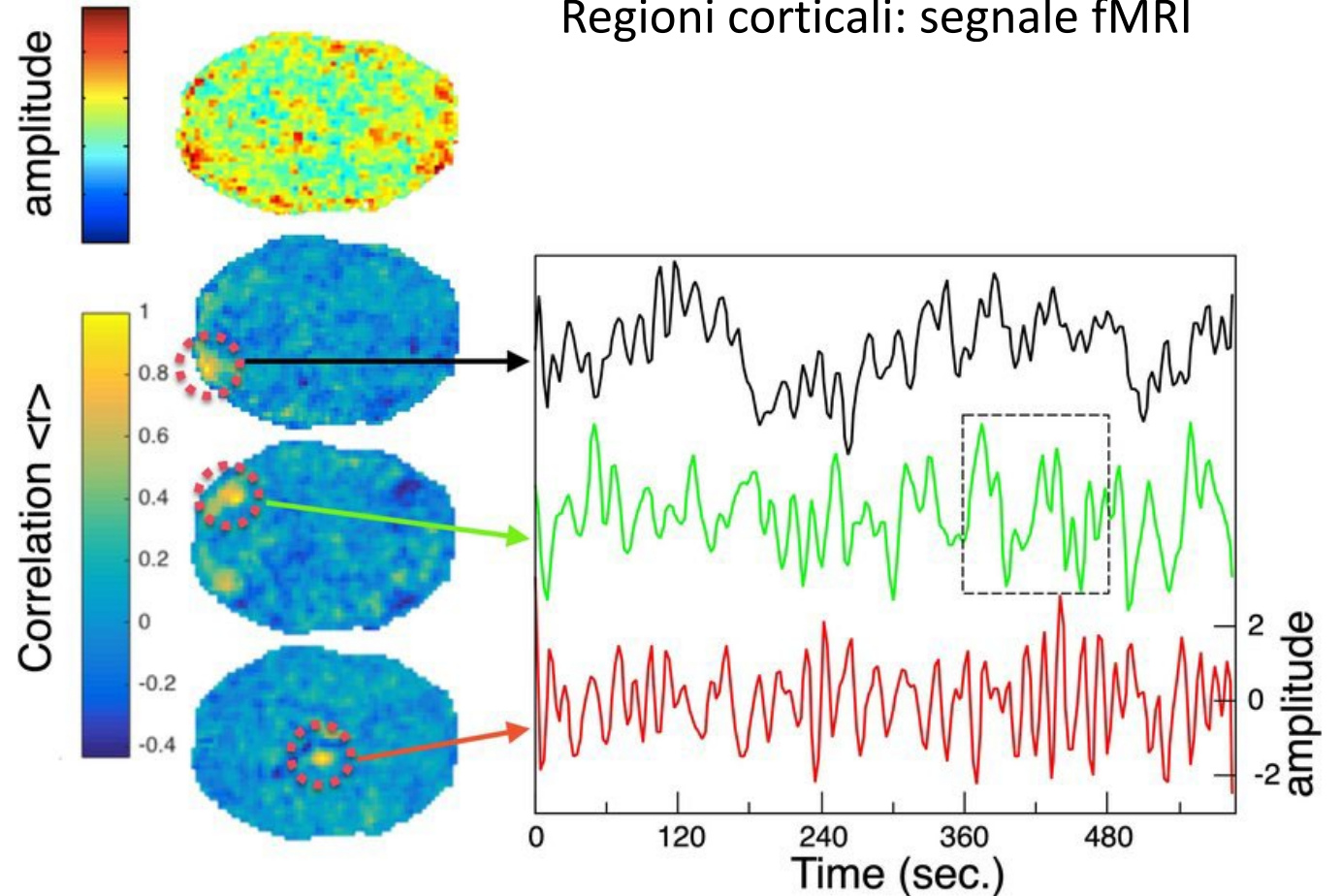
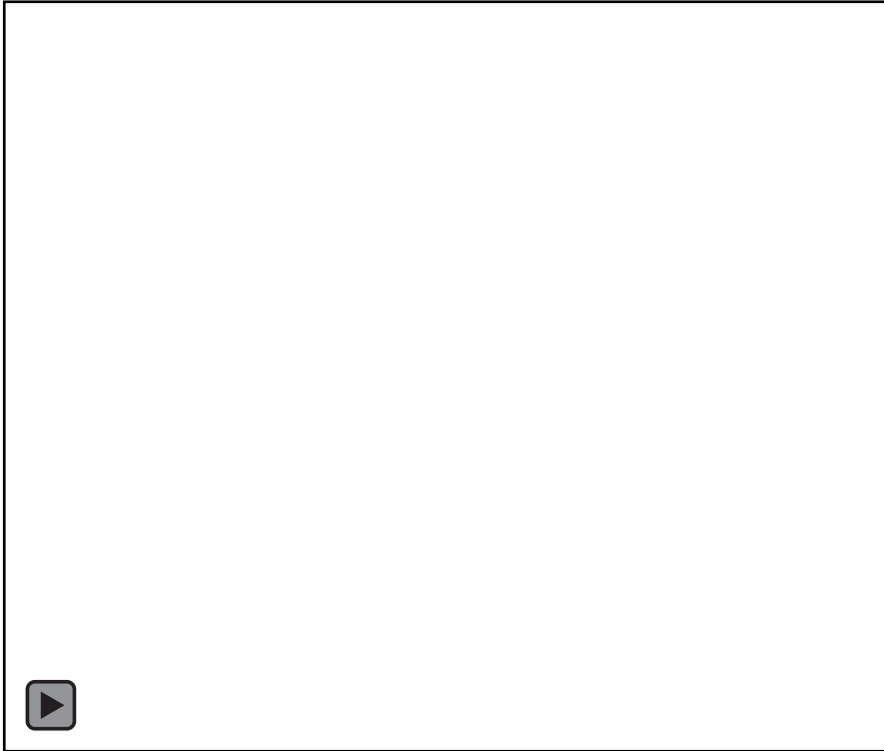


Complessità strutturale e complessità funzionale



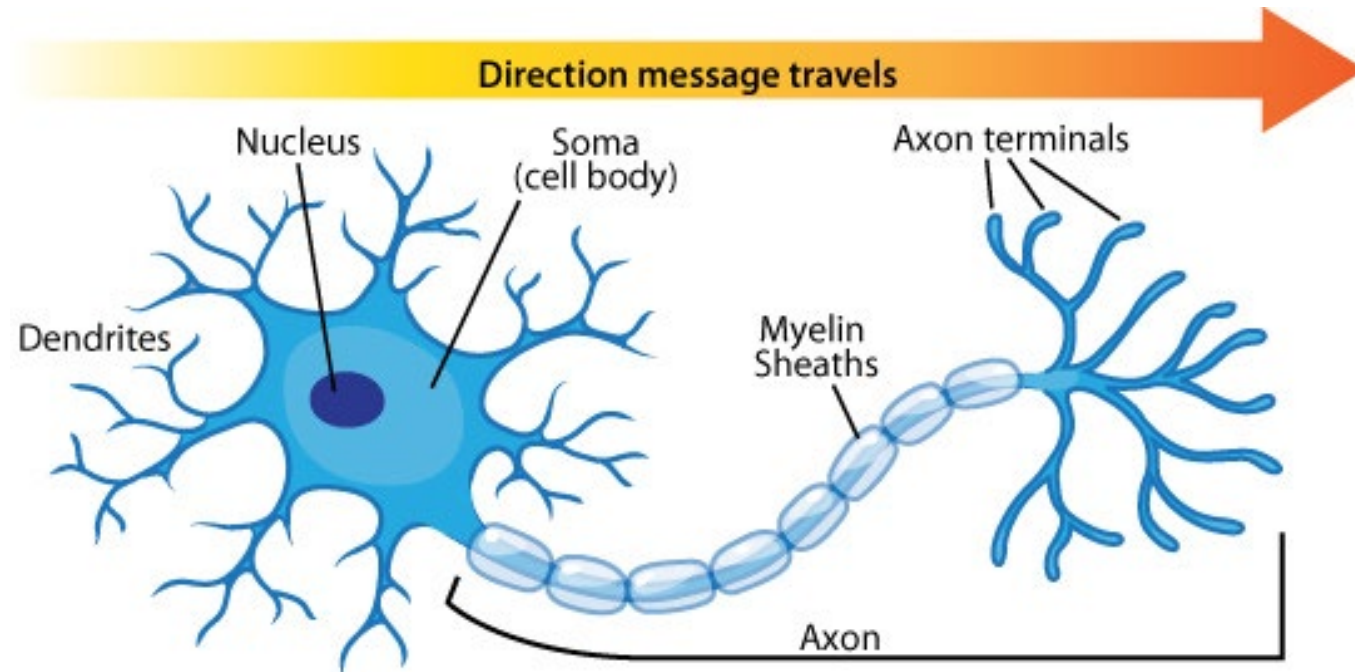
Complessità dinamica: attività multiscala

Dinamica a valanghe di singoli neuroni



L'elemento fondamentale: il neurone

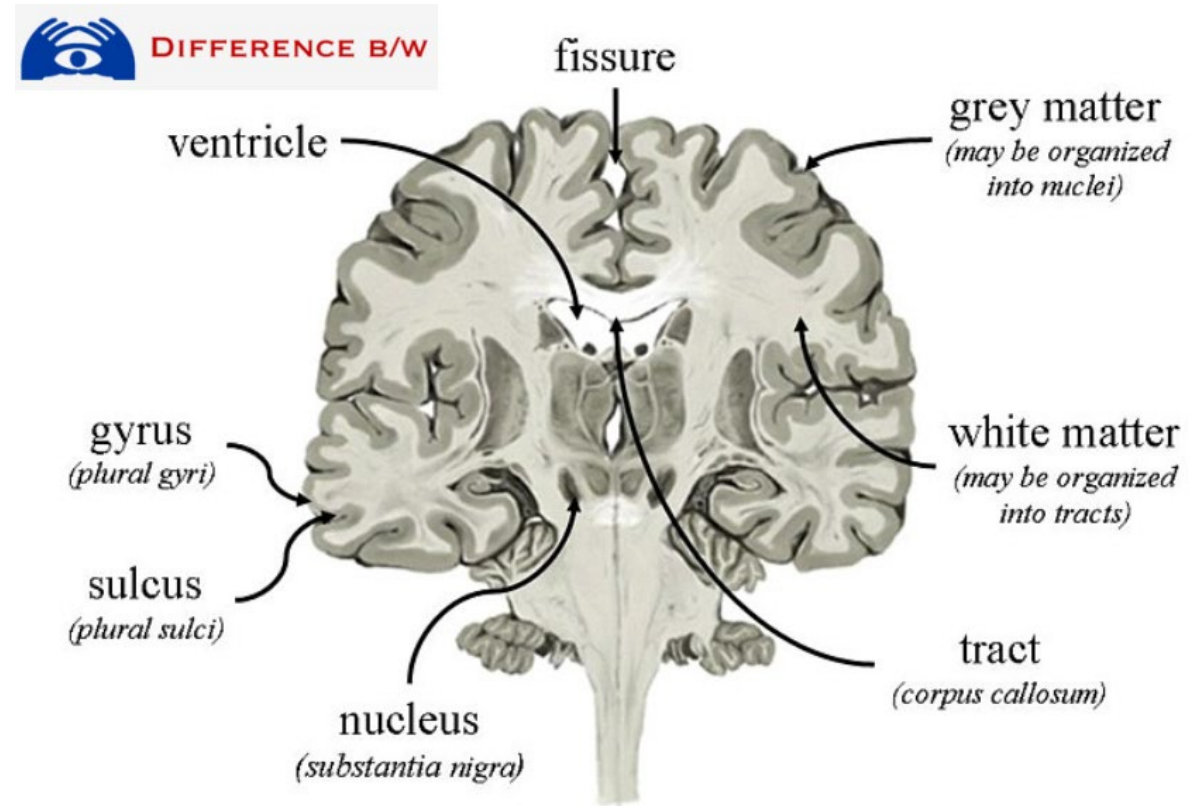
- Responsabile della percezione, elaborazione, creazione ed invio di "messaggi" da una parte all'altra del cervello e lungo tutto il sistema nervoso (Golgi, Ramón y Cahal, 1890)
- Messaggio = segnale elettrico (spike) generato da differenze di potenziale di origine chimica (polarizzazione – depolarizzazione delle membrane neuronali, Von Helmholtz et al.)
- Diametro 1-10 μm , lunghezza 100 μm – 1 m.
- Circa 100 miliardi di neuroni nel cervello e 100 mila miliardi di sinapsi



Percorso storico

Materia grigia: corpi neuronali, assoni amielinizzati, elaborazione e emissione di segnali al sistema nervoso centrale (40%)

Sostanza bianca: assoni neuronali mielinizzati, trasmissione di segnali tra diverse regioni della corteccia (60%)



Grey matter vs. White matter

Prime tracce di complessità: frenologia

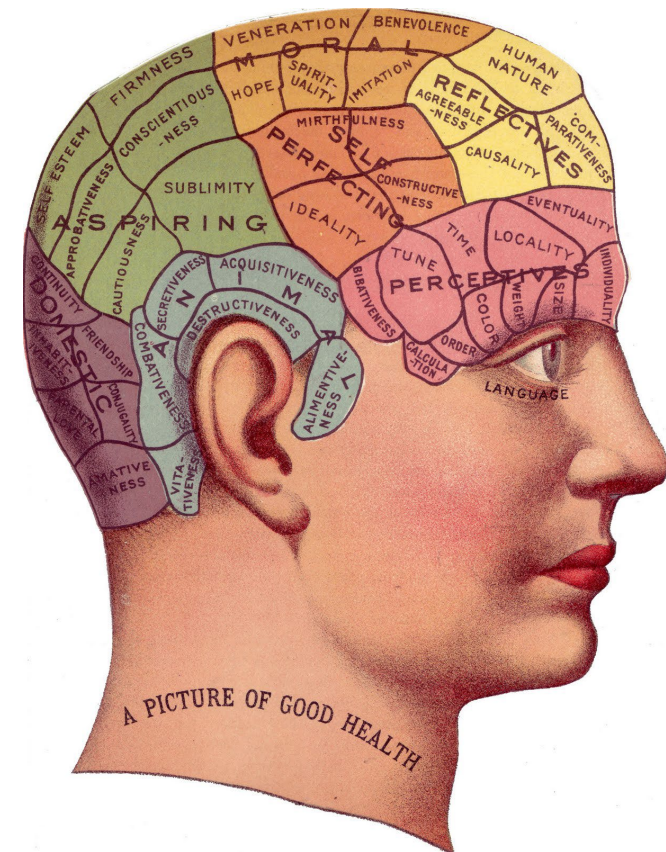
Franz-Joseph Gall (1758-1828, Vienna)

- 27 “organi” sulla superficie cerebrale che influenzano la forma del cranio (es. l'organo “assassino”): 10 condivisi con vertebrati, 9 con vertebrati superiori e 8 peculiari dell'uomo
- Gli organi più utilizzati crescono mentre gli altri si atrofizzano interessando la forma del cranio
- → La forma del cranio riflette le caratteristiche emotive e intellettuali dell'individuo
- Studi ex vivo, osservazioni criminali, no interazioni

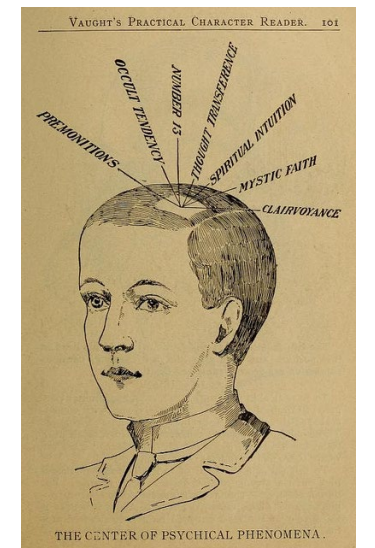
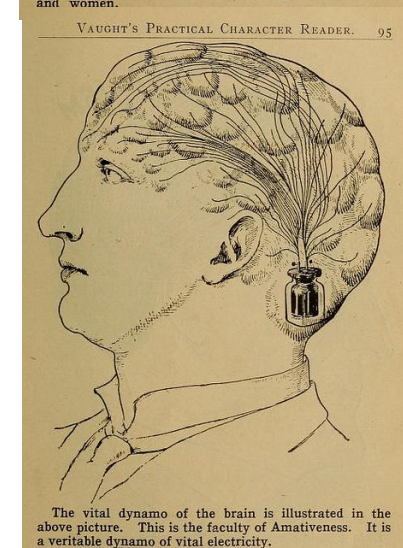
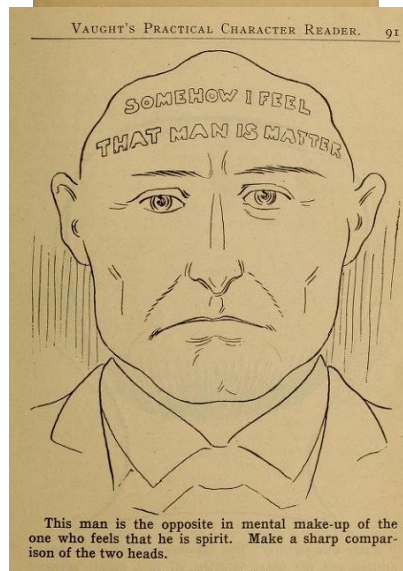
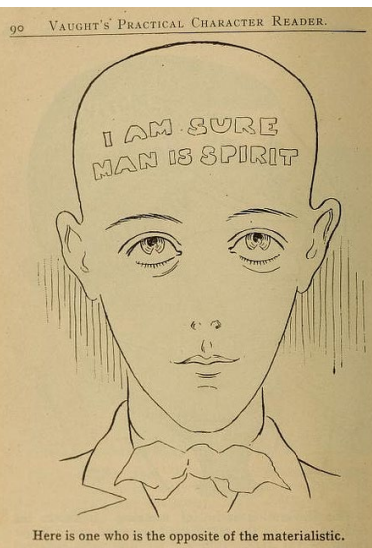
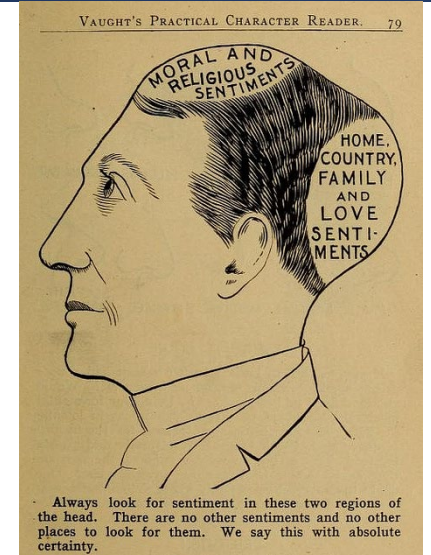
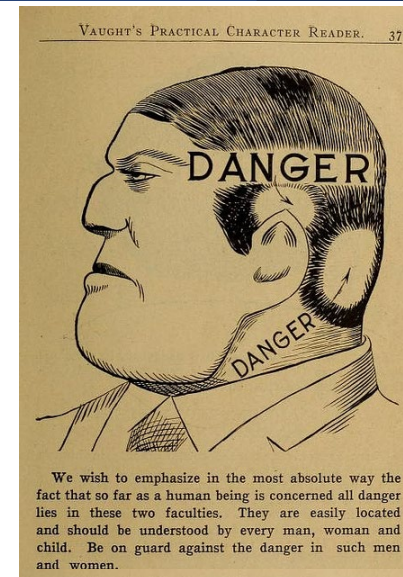
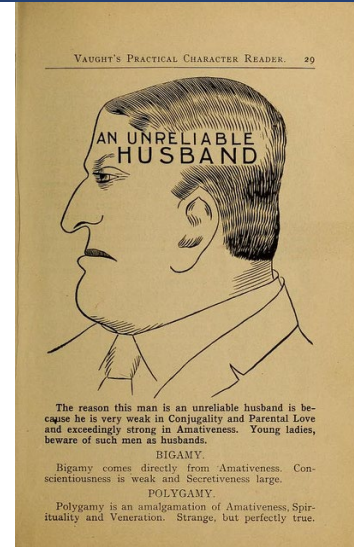
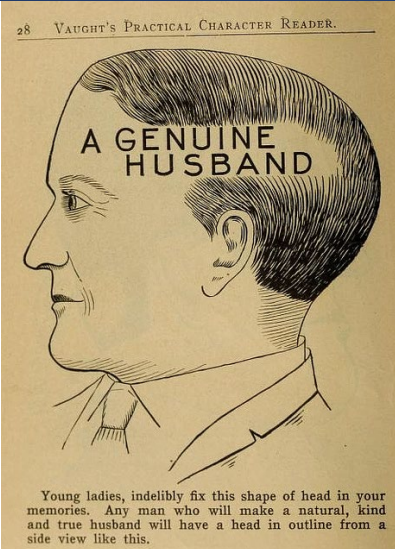
Johann Kaspar Spurzheim (1776-1832, →USA)

George Combe (1788-1858, Edinburgh Phrenological Soc.)

Partizioni ancora più estreme (spirito metafisico)



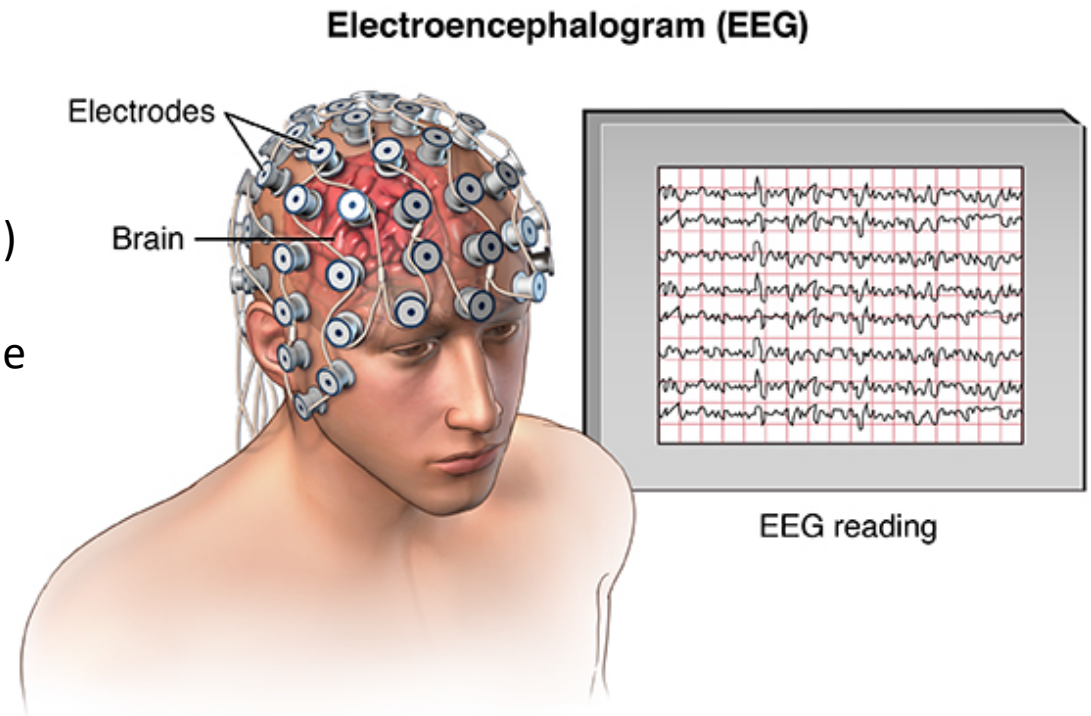
Prime trace di complessità: frenologia



Segnale elettrico: EEG – Hans Berger (1929)

EEG: differenze di potenziale (5-150 mV) tra le varie regioni del cranio nel range di frequenza (1-80 Hz)

- Onde α = 8-13 Hz, ~30 mV (occhi svegli e chiusi)
- Onde β = 13-30 Hz, ~19 mV (sveglia, occhi aperti, fase REM)
- Onde θ = 4-7 Hz, ~75 mV, (dominante in neonato, patologie e stress emotivi negli adulti, primi minuti di sonno)
- onde θ – σ = 12-14 Hz, ~5-50 mV (sonno)
- onde δ = 0,5-4 Hz, 150 mV (sonno pre-REM, alcune patologie, anestesia generale, disordine metabolico – azotemia)



Oltre il segnale elettrico: Risonanza Magnetica Nucleare (NMR)



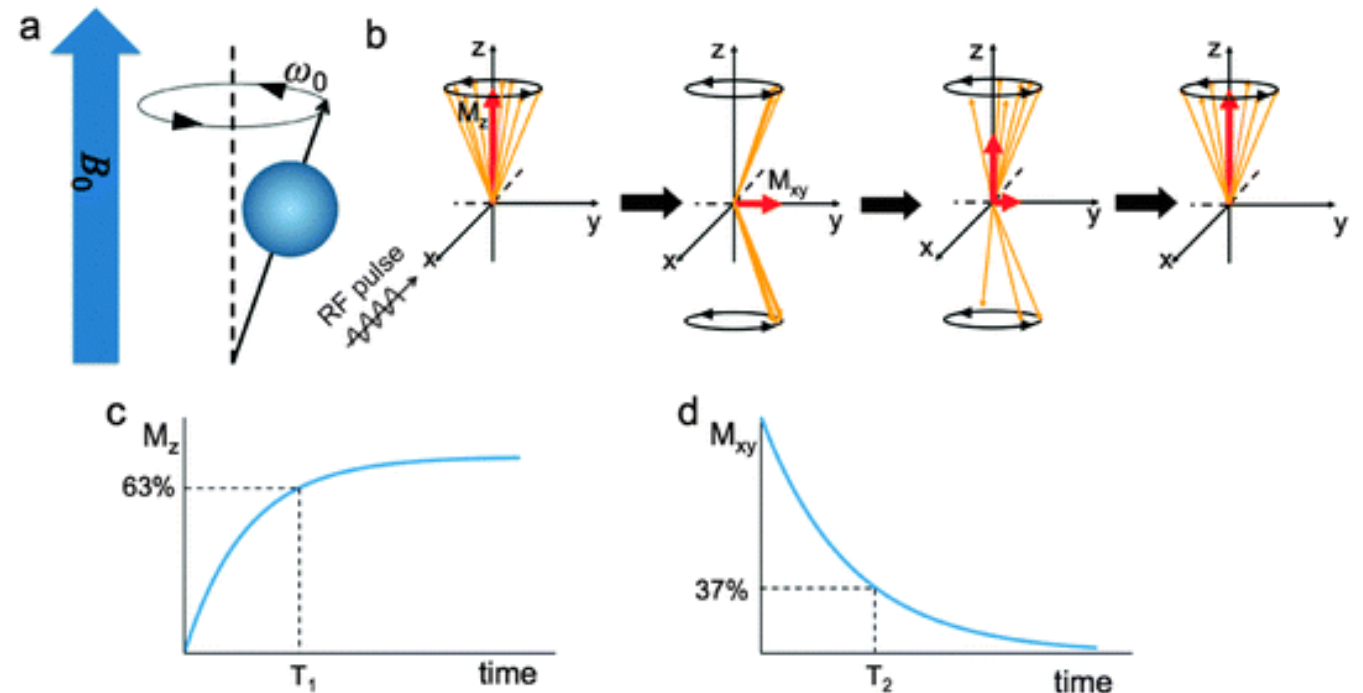
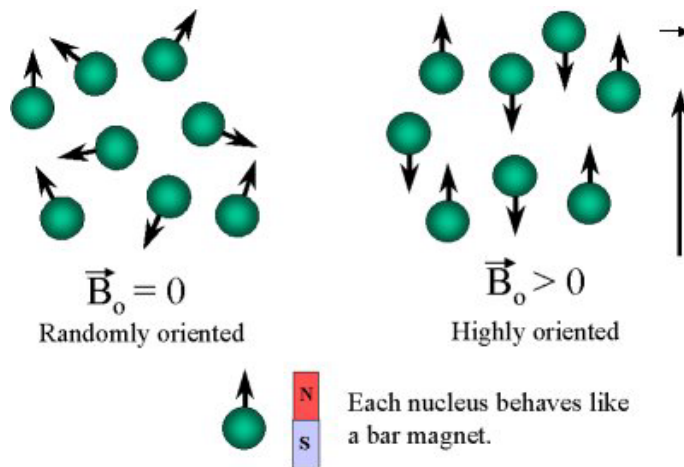
NMR per profani

B_0 = campo costante di polarizzazione →
→ **Precessione di Larmor**, $\omega_0 = \gamma B_0$ + equilibrio termico

B_1 = campo di perturbazione di radiofrequenza \perp a B_0

T_1 = tempo di rilassamento della componente \parallel a B_0

T_2 = tempo di rilassamento della componente \perp a B_0



Caratteristiche fondamentali dell'NMR

- **Bassa invasività** (radiazioni non ionizzanti); permette di misurare la densità dei momenti magnetici nucleari di diverse specie chimiche (H^+ , O_2 , ...) e la loro evoluzione temporale in tessuti e materiali biologici
- Si basa sulla misura della risposta dei momenti magnetici nucleari a peculiari **perturbazioni magnetiche risonanti** attorno a uno stato costante fortemente polarizzato lungo una direzione fissa
- Permette di ottenere **immagini 3d** degli organi in vivo e pesati in diverse proprietà fisiche.
- Consente inoltre il monitoraggio dinamico 3d delle grandezze legate al metabolismo



MAGNETIC DISCUSSION

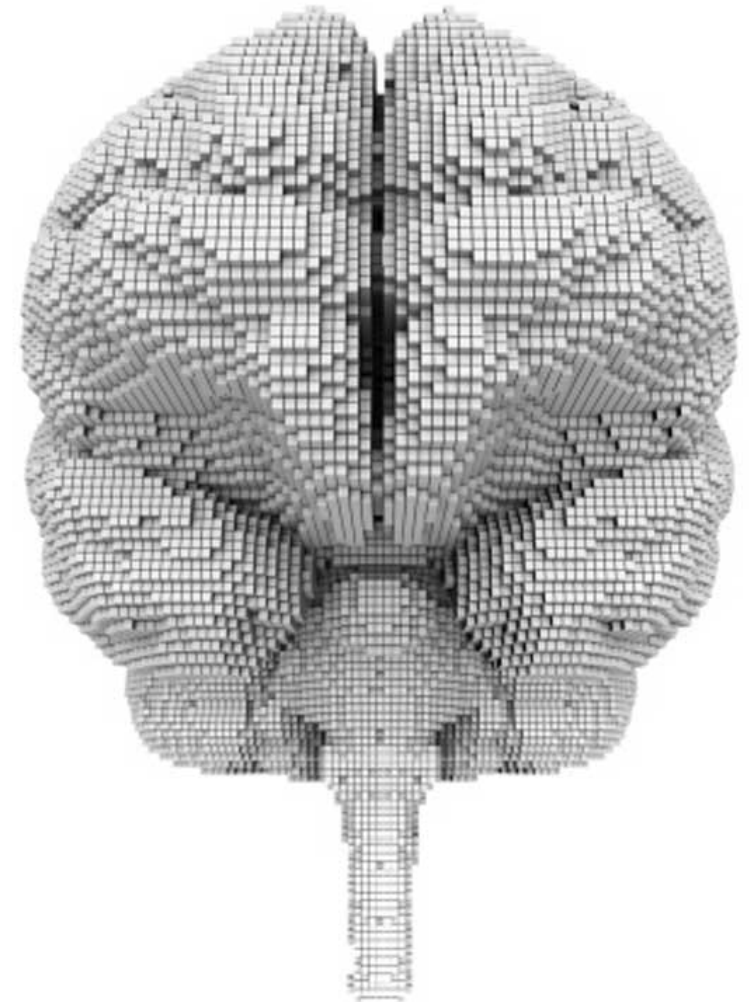
Andre Stenmark

Risonanza Magnetica per il cervello

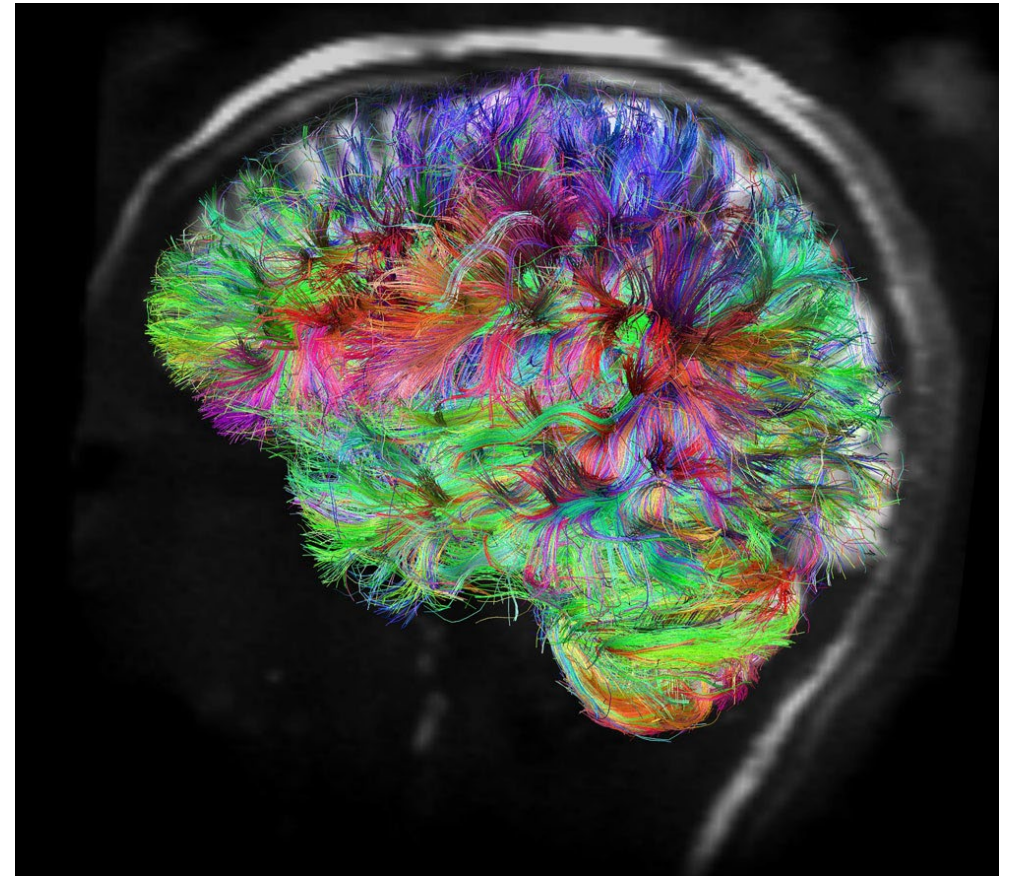
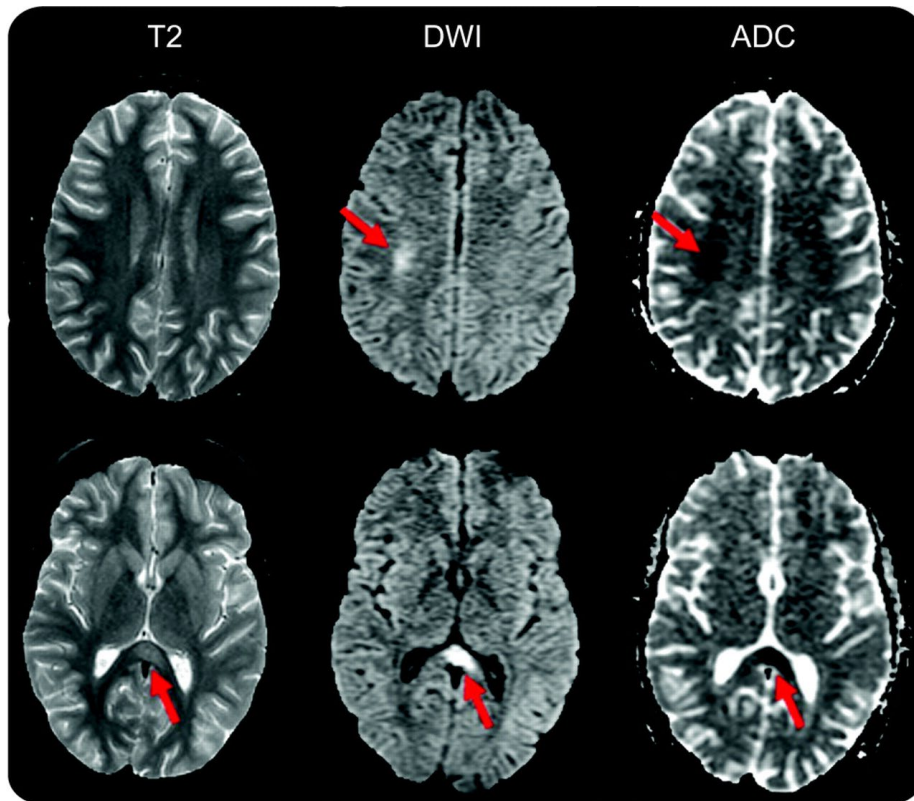
Segmentazione in voxels

In ogni voxel si possono misurare:

- Tempi di rilassamento T_1 e T_2 (imaging 3d, bw o colori);
- Parametri di diffusione delle molecole di H_2O (imaging, tracciatografia, connettoma);
- Densità dell'emoglobina ossigenata – BOLD (dinamica funzionale di diverse aree cerebrali e loro coordinazione/sincronizzazione in condizioni di riposo o di attività)

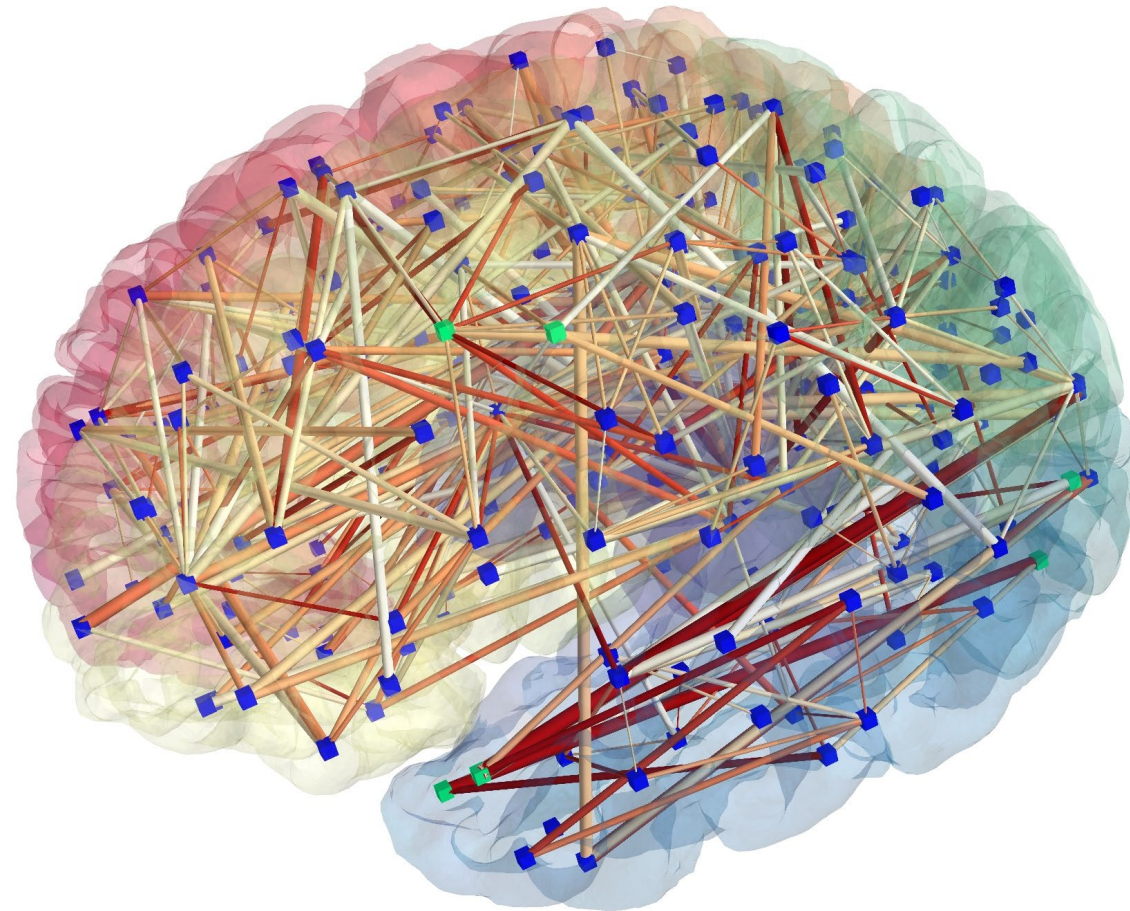


Applicazioni strutturali: imaging e connettoma

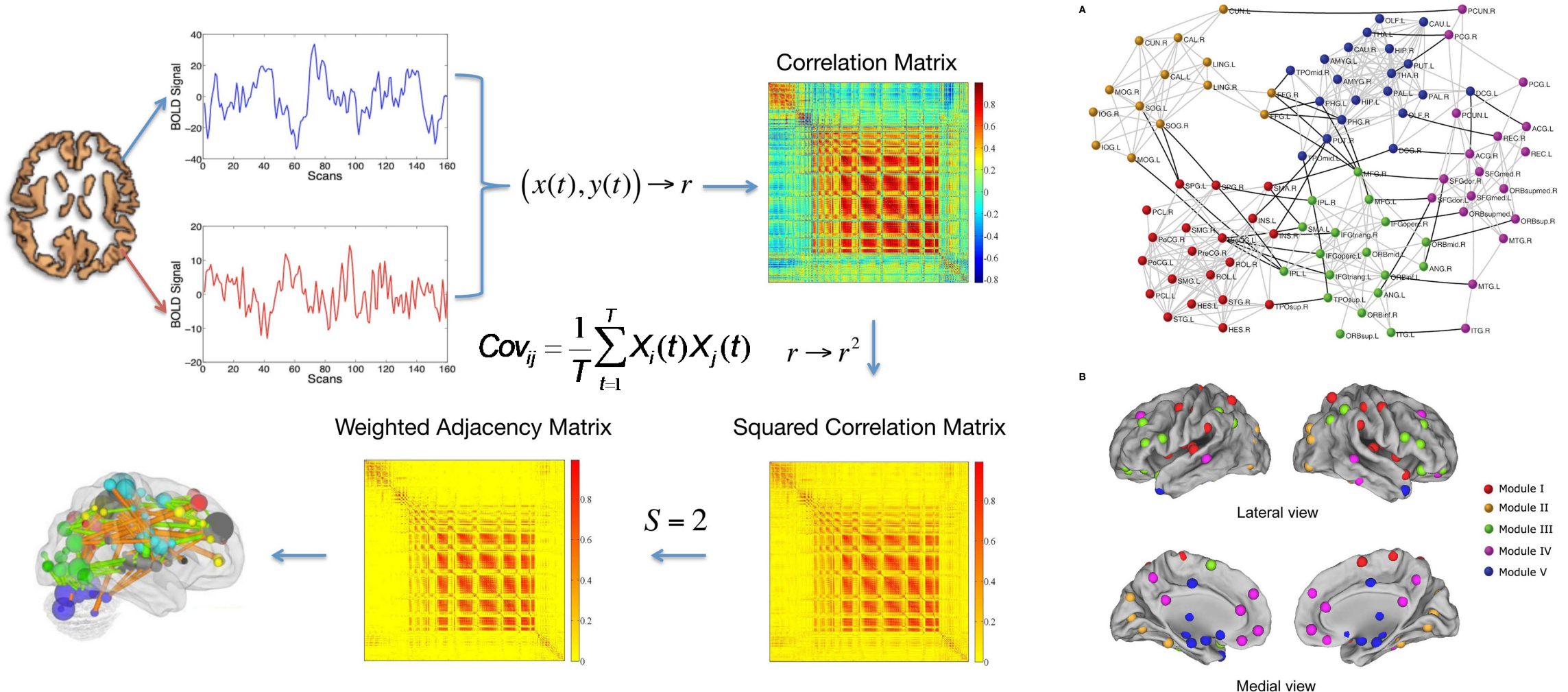


Risonanza Magnetica Funzionale (fMRI)

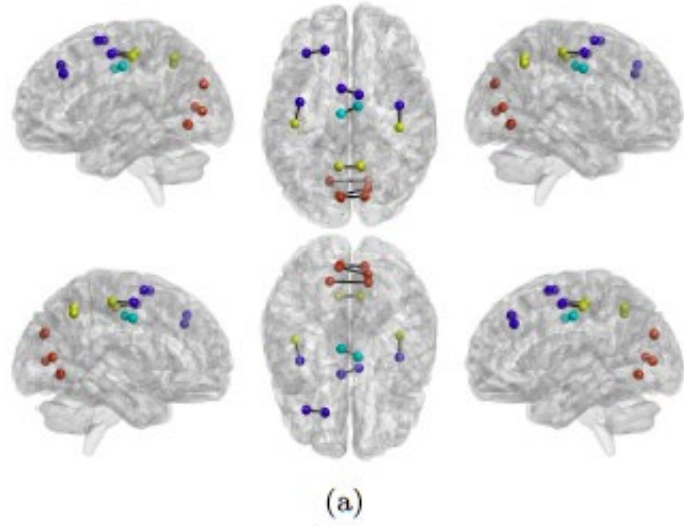
- L'fMRI può essere utilizzato per monitorare contemporaneamente nel tempo l'attività funzionale di diverse regioni del cervello al fine di costruire una rete di connessioni funzionali
- Segnale BOLD: densità di emoglobina ossigenata nel tempo ($\Delta t \sim 1$ sec) in voxel o regioni aggregate (ROI)
- Tra condizione di riposo e di attività: differenza solo intorno al 5-10% !!
- Il peso delle connessioni è una misura del livello di similarità dell'attività cerebrale in diverse regioni
- Analisi del coordinamento funzionale: comunità, moduli o cluster di diverse regioni → rilevamento della struttura gerarchica



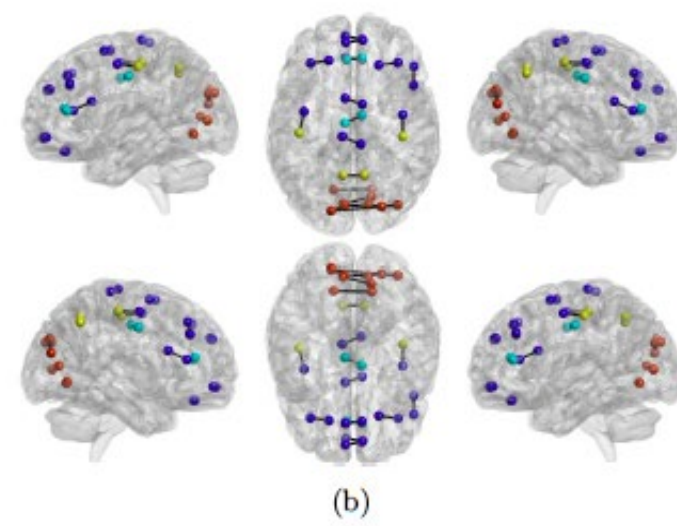
Reti complesse per fMRI cerebrale



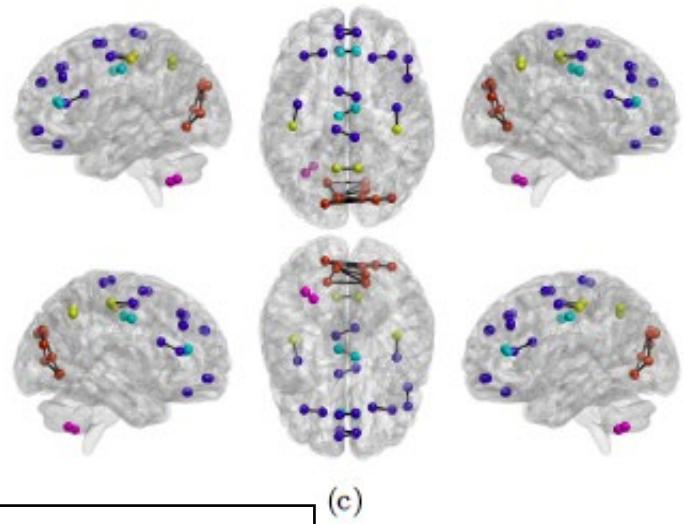
p_8



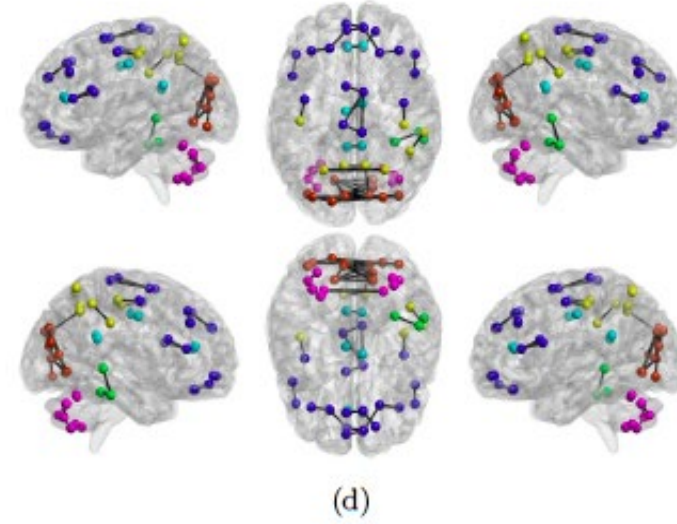
p_7



p_6

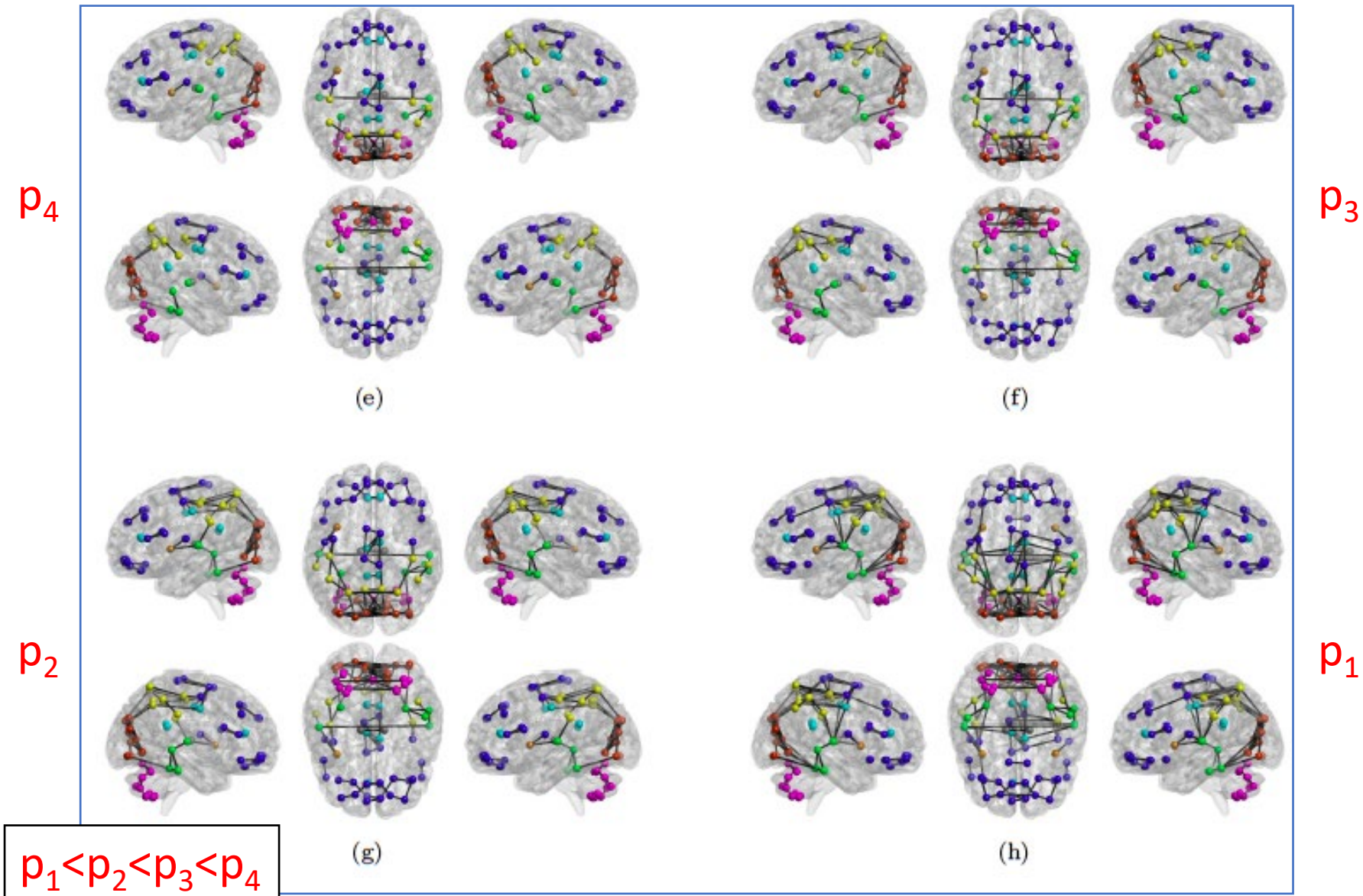


p_5



$$p_4 < p_5 < p_6 < p_7 < p_8$$

Frontal Lobe, Insula, Cingulate Cortex, Temporal Lobe, Occipital Lobe, Parietal Lobe, Deep Grey Matter, Cerebellum



Frontal lobe, Insula, Cingulate, Temporal Lobe, Occipital Lobe, Parietal Lobe, Deep Grey Matter, Cerebellum

Sistemi sociali e complessità: economia

Paul Romer (NYU, ex Economist Capo della Banca Mondiale)



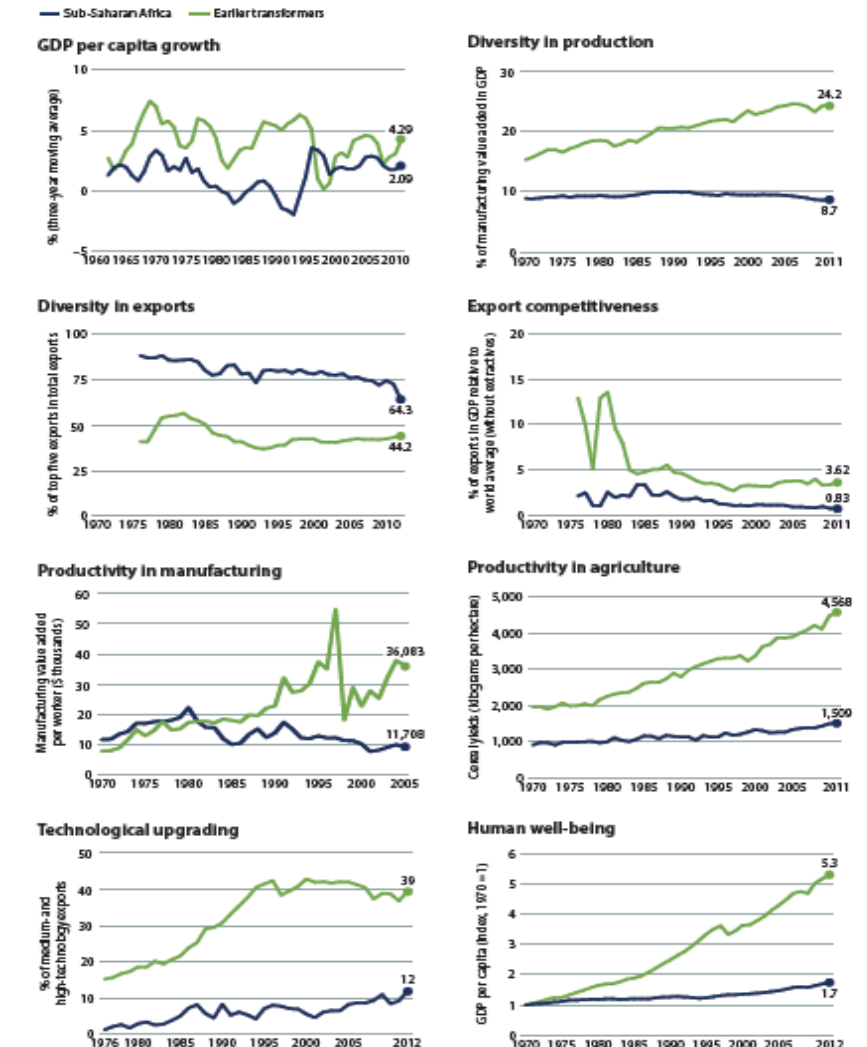
- **Approccio standard:** sistemi dinamici, punti di equilibrio e studio delle perturbazioni attorno all'equilibrio per variabili aggregate omogenee
- Concetti fondamentali per una nuova teoria economica: interazioni, eterogeneità, scalabilità, autorganizzazione, proprietà emergenti → **Complessità**

«Macroeconomia standard come Church of Scientology»

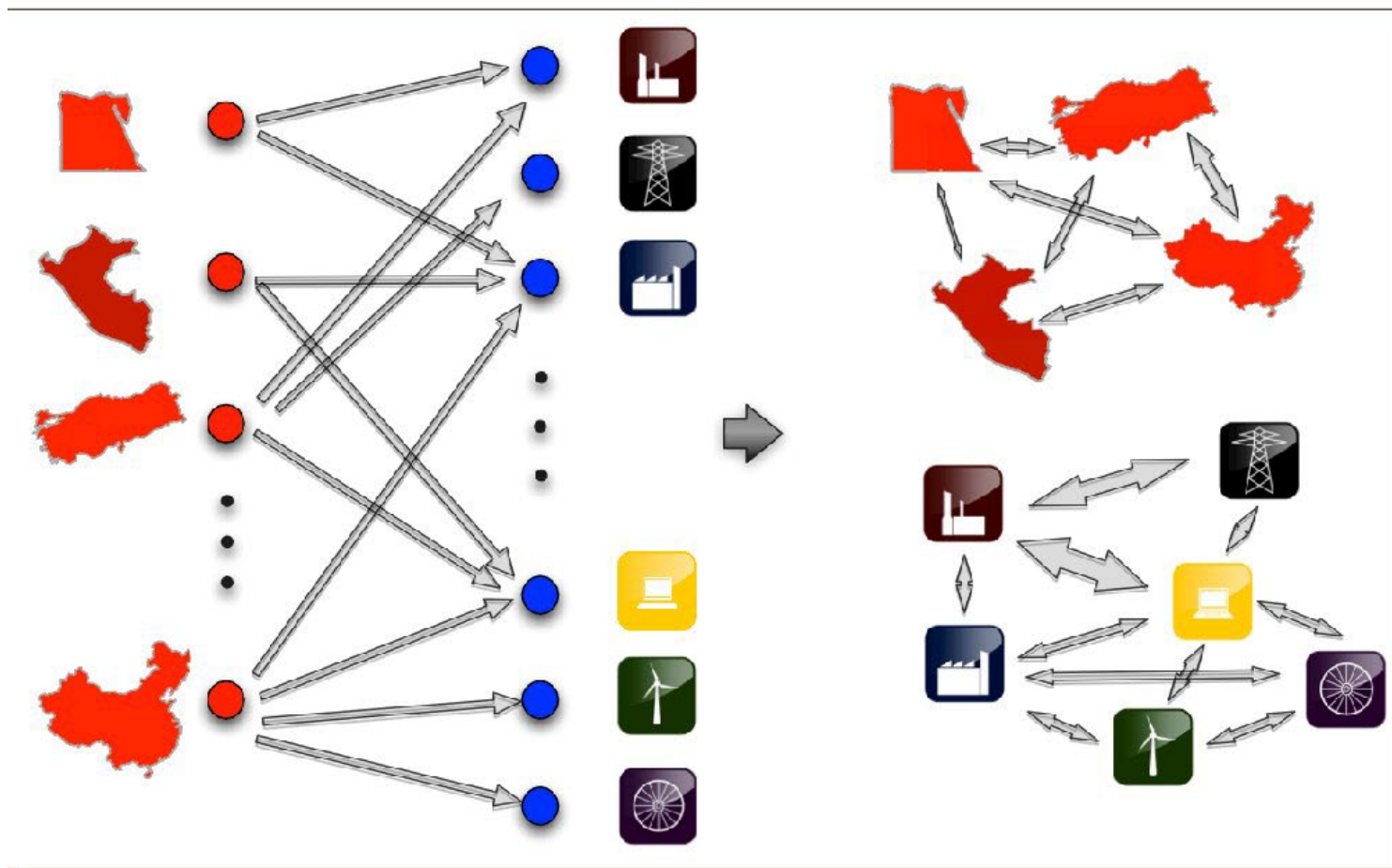
Approccio standard alla competitività internazionale

- Dati aggregati per i due gruppi di paesi
- Informazioni interessanti, ma a volte contrastanti. Quadro unitario difficile
- Difficile ottenere un quadro completo, unificato ed oggettivo

Figure 1 Growth with DEPTH for transformation



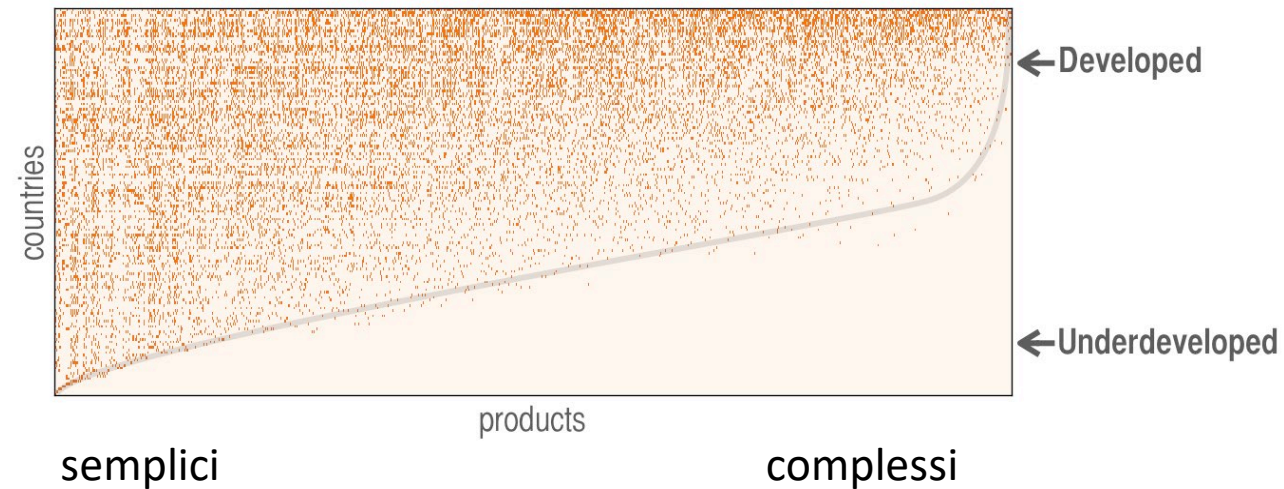
Approccio di reti complesse: Rete bipartita paesi - prodotti



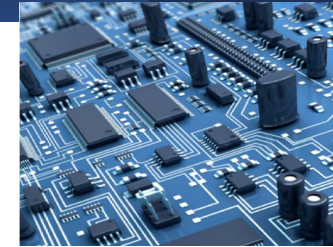
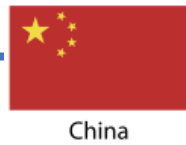
Struttura triangolare: diversificazione vs specializzazione

- La diversificazione appare molto più importante della specializzazione (D. Ricardo)
- I paesi più sviluppati fanno quasi tutti i prodotti compresi quelli fatti da pochi (i più complessi)
- I paesi meno sviluppati producono pochi beni prodotti anche da molti paesi (prodotti semplici)
- I prodotti fatti da pochi sono fatti solo da chi è capace di fare molte cose diverse

Struttura «nested» o triangolare



Misurare l'intangibile: misura delle capacità intrinseche dei paesi (capabilities)



1.81

Q



0.0099

Fitness:

$$\tilde{F}_c^{(n)} = \sum_p M_{cp} Q_p^{(n-1)}$$

$$F_c^{(n)} = \frac{\tilde{F}_c^{(n)}}{\langle \tilde{F}_c^{(n)} \rangle_c}$$

F_c : diversificazione pesata dalla complessità

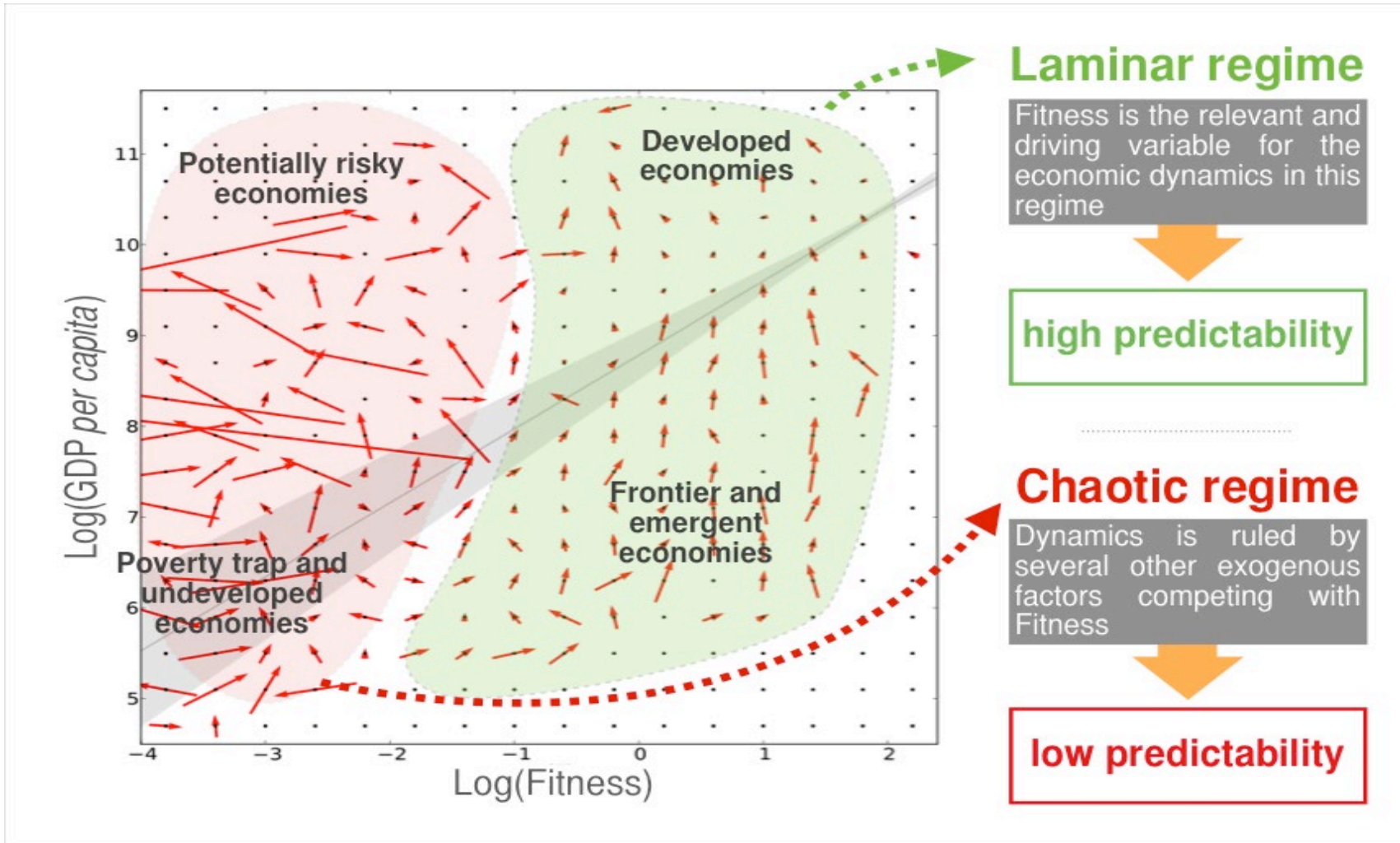
Complexity:

$$\tilde{Q}_p^{(n)} = \frac{1}{\sum_c M_{cp} \frac{1}{F_c^{(n-1)}}}$$

$$Q_p^{(n)} = \frac{\tilde{Q}_p^{(n)}}{\langle \tilde{Q}_p^{(n)} \rangle_p}$$

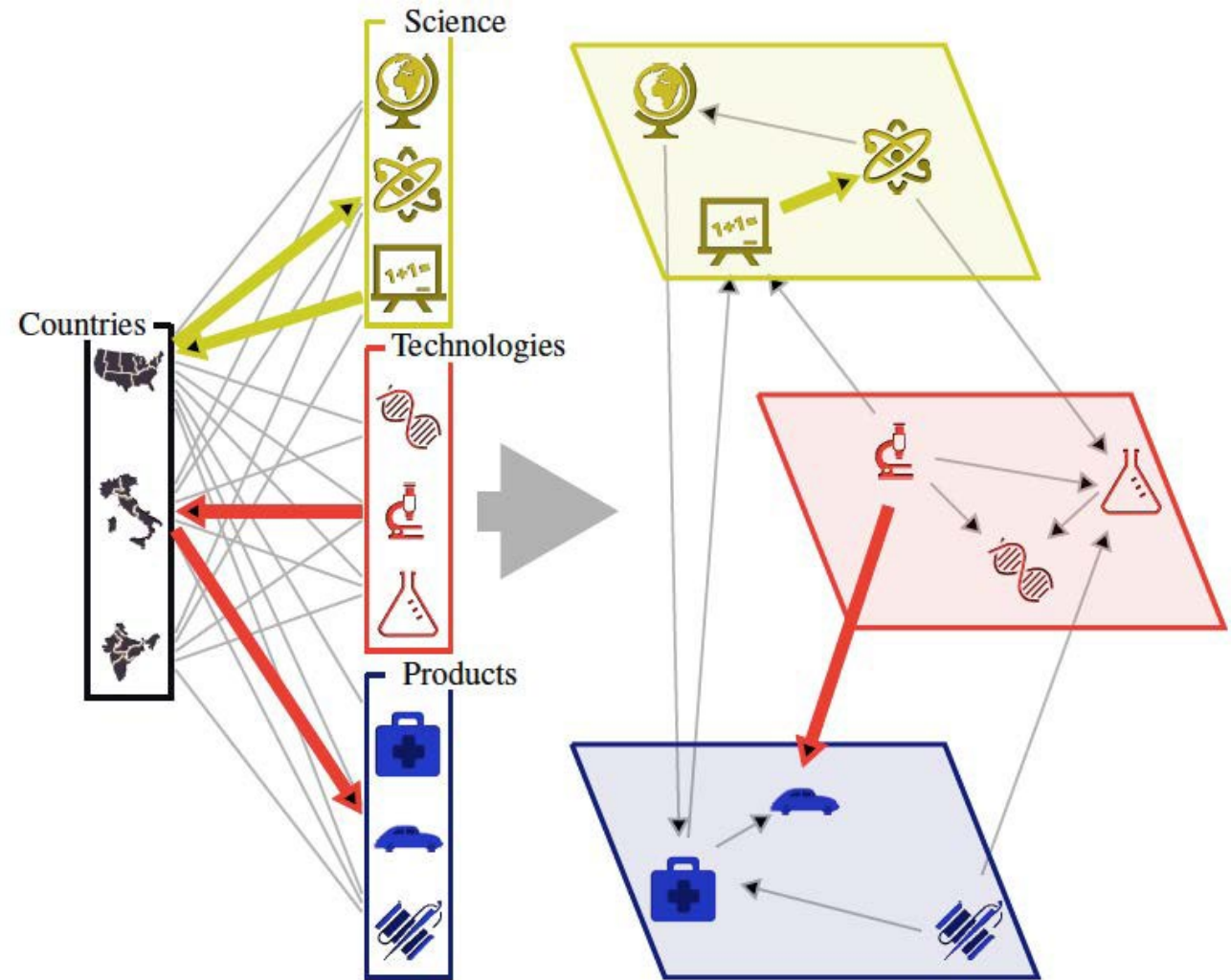
Q_p : dipendenza quasi estrema dalle F_c .
Un solo produttore scarso abbatte la complessità

Dinamica dello sviluppo industriale (Commissione Europea e Banca Mondiale)



Estensione a spazi più ampi di produzione (innovazione)

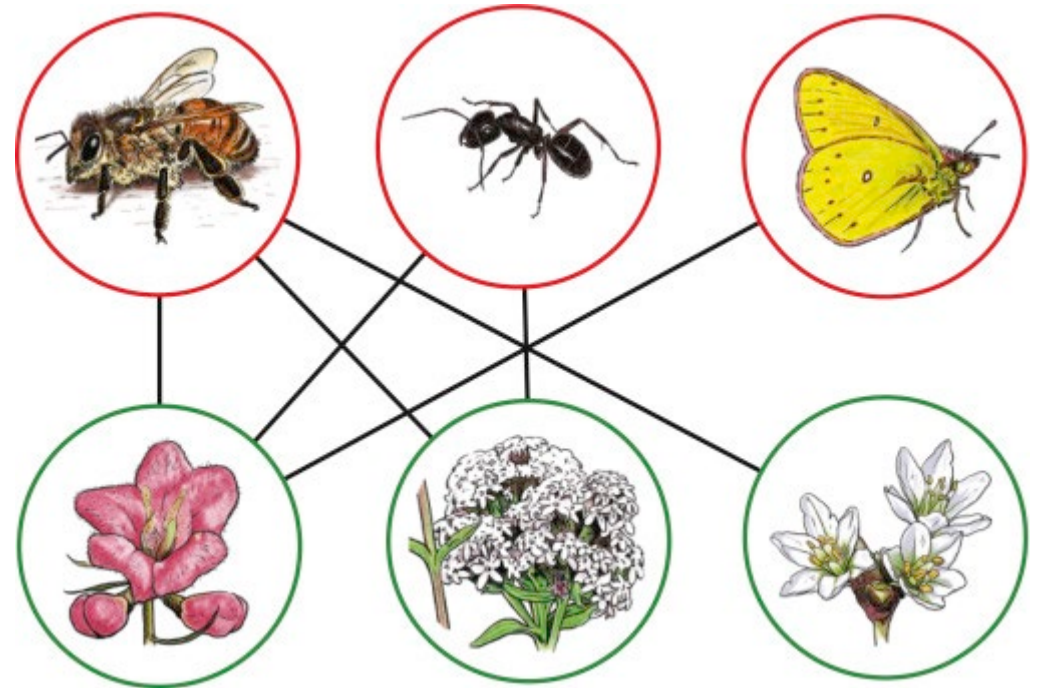
- Costruzione di uno spazio dell'innovazione
- Studio del flusso delle innovazioni



La complessità unifica le scienze

Ecosistemi mutualistici

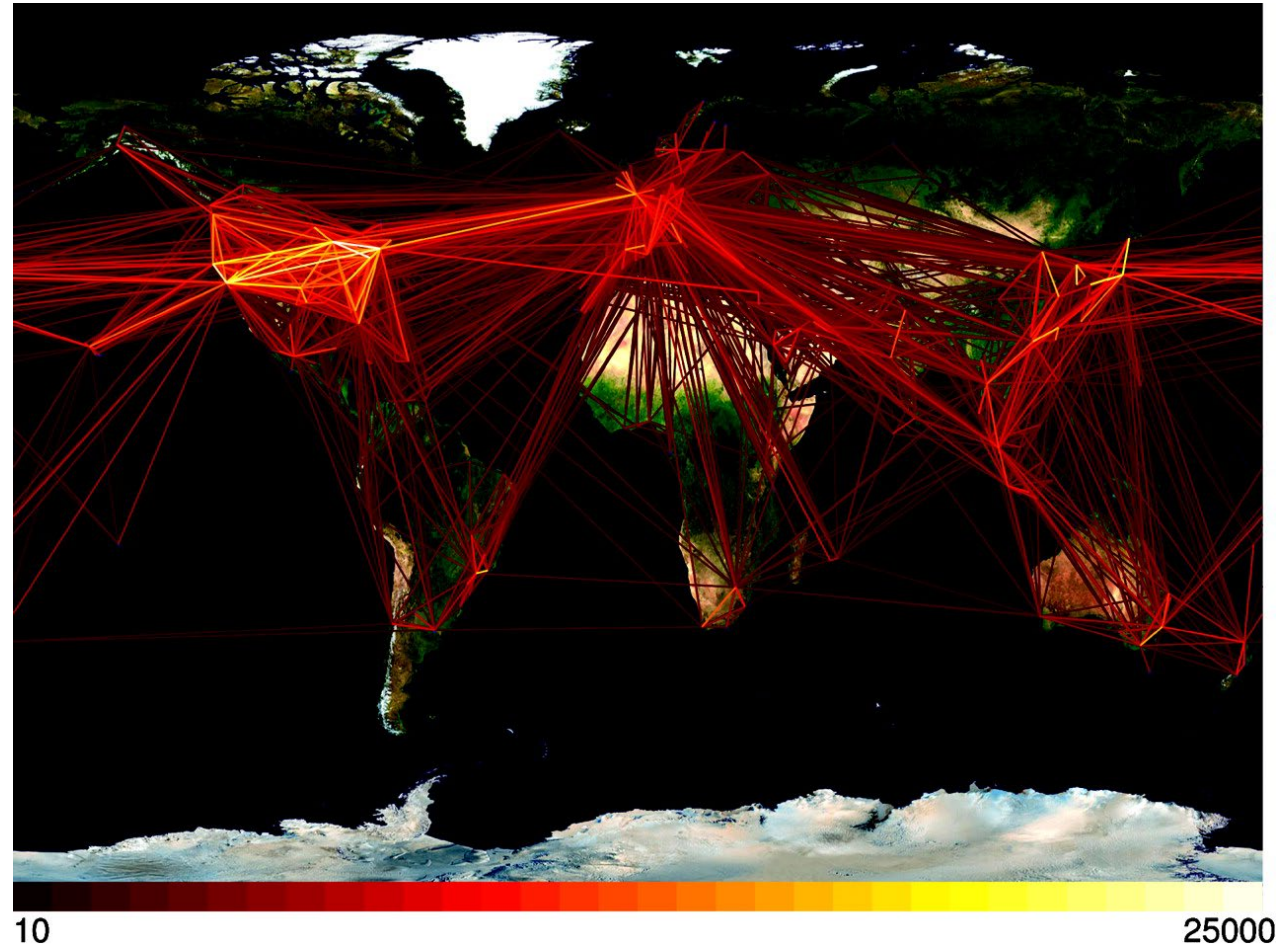
- Lo stesso approccio può essere applicato alle reti bipartite degli *ecosistemi mutualistici* che presentano una struttura analoga alla rete paesi prodotti
- Lo stesso algoritmo è stato dimostrato essere il migliore a classificare la centralità delle specie nell'ecosistema
- Centralità = grandezza della valanga di estinzioni provocate dall'estinzione della specie



Le reti complesse come strumento fondamentale

I modelli epidemici più avanzati per costruire scenari sull'evoluzione di una pandemia si basano oggi fortemente sulla teoria delle reti complesse e sulle transizioni di fase dinamiche:

Reti di mobilità e di contatti
+ modelli epidemici percolativi



Conclusioni

- Lo studio di sistemi fisici macroscopici con comportamenti collettivi non banali ha dato il via alla nascita di una teoria dei sistemi complessi
- Lo studio di tali sistemi va visto come uno studio di carattere fondamentale
- La chiave è cercare un nuovo spazio di «regolarità» del fenomeno
- Ha esteso i metodi di indagine tipici della fisica (modelli teorici + esperimenti) ad ambiti fuori da essa
- Scienza fortemente interdisciplinare (fisici + matematici + biologi + computer scientists + neuroscienziati etc)