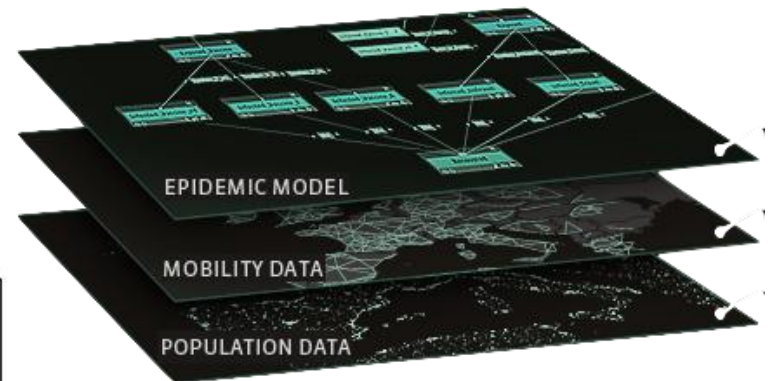
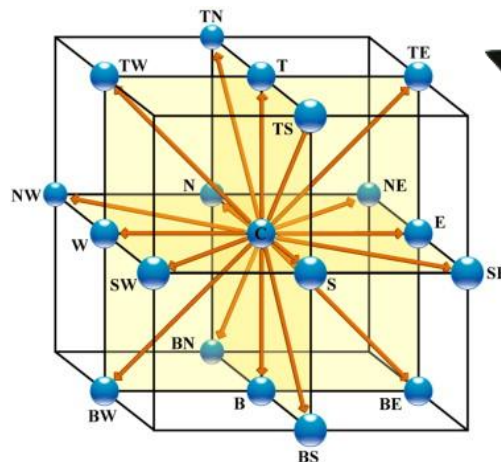
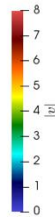
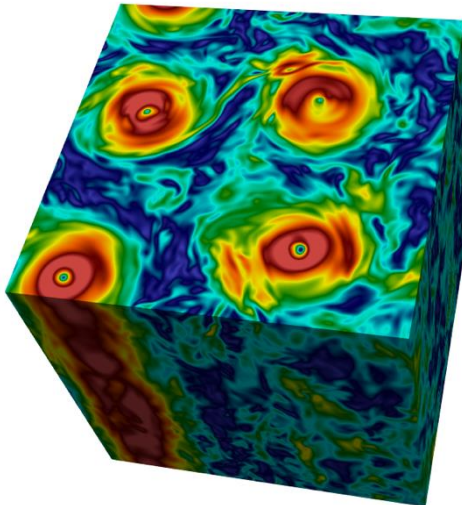




# Corso di Laurea Magistrale in Fisica

## Fisica Teorica Statistica

## Physics of Complex Systems and Big Data



*Prof. Giulio Cimini  
Dr. Michele Buzzicotti*



# Corso di Laurea Magistrale in Fisica

1. Astrophysics and Space Science
2. **Fisica**
3. Fisica dell'Atmosfera e del Clima e Meteorologia
4. Physics of Fundamental Interactions and Experimental Techniques
5. **Physics of Complex Systems and Big Data**

(5 Curricula)

1. Elettronica e Cibernetica
2. Fisica dei Biosistemi
3. Struttura della Materia
4. **Fisica Teorica**

(4 Piani di Studio)

1. Alte Energie
2. **Meccanica Statistica**

(2 Percorsi)



## Studiare Meccanica Statistica & Fisica dei Sistemi Complessi

- Fornisce gli **strumenti teorici e computazionali** per studiare e comprendere i **sistemi complessi (caotici, stocastici, emergenti)** a diverse scale
- Inserisce lo studente in **tematiche e ambienti di ricerca di punta** nel panorama italiano e internazionale
- Fornisce gli strumenti per una **carriera quantitativa in (Big) Data Analytics e Machine Learning**

### Requisiti Formativi

- Analisi Matematica e Geometria
- Probabilità e Statistica
- Metodi Matematici per la Fisica
- Fisica Classica e Moderna
- Meccanica Statistica
- Calcolo Numerico e Informatica

### Attitudini

- Capacità di **astrazione e sintesi**
- Attitudine all'uso simultaneo di **modelli analitici, metodi numerici, analisi dati**
- Interesse a lavorare in ambiti **multidisciplinari**



## Fisica Teorica Statistica

Piano di studi del Percorso di Meccanica Statistica (da Guida allo Studente LM)

<b>I Anno I Semestre</b>	Metodi Matematici della Fisica 2 (FIS/02)	9 CFU	<b>I Anno II Semestre</b>	Fisica Teorica 1 (FIS/02) *	6 CFU
	Meccanica Quantistica 2 (FIS/02)	9 CFU		1 Corso FIS/02	6 CFU
	Struttura della Materia 2 (FIS/03)	6 CFU		1 Corso FIS/05 o FIS/06	6 CFU
	<b>Meccanica Statistica 2</b>	6 CFU		1 Corso FIS/03, FIS/04, FIS/05	6 CFU
				1 Corso scelta libera **	6 CFU
<b>I Anno II Semestre</b>	Fisica Computazionale (FIS/01)	8 CFU	<b>II Anno II Semestre</b>	<b>Tesi</b>	<b>38 CFU</b>
	2 Corsi scelta libera **	12 CFU			
	Lingua Inglese	2 CFU			

\*: Se non già sostenuto, altrimenti un corso a scelta libera (FIS)      \*\*: Vedi slide successive sui corsi consigliati

\*\*\*: **Attività a scelta/Stage:** dà diritto a 6 CFU e sostituisce 1 esame a scelta libera. Lo stage può essere svolto presso docenti e laboratori di ricerca UTov, laboratorio di ricerca esterno o azienda italiana, una istituzione estera.



## Le basi di un Fisico Teorico moderno

**Metodi Matematici della Fisica 2:** Funzioni di Variabile Complessa - Sviluppi Asintotici - Funzioni di Green - Trasformate di Fourier e Laplace - Spazi di Hilbert - Teoria Spettrale ....

**Meccanica Quantistica 2:** Postulati Meccanica Quantistica e Rappresentazioni - Metodi Variazionali - Pacchetti d'onda, Sezioni d'urto - Equazione di Dirac - Limite non relativistico .....

**Struttura della Materia 2:** Struttura Cristallina - Diffrazione - Fattori di Forma - Struttura elettronica - Hartree Fock - Struttura Fononica - Semiconduttori - Proprietà Ottiche ...

**Meccanica Statistica 2:** Transizioni Fase - Modello di Ising - Gruppo di Rinormalizzazione - Leggi di scala, esponenti critici - Dinamica dei Fluidi - Equazione di Boltzmann ....

**Fisica Teorica 1:** Relatività e Trasformazioni di Lorentz - Meccanica Relativistica - Equazioni Maxwell in forma covariante - Dualità elettro-magnetica - Onde elettromagnetiche ....

**Fisica Computazionale:** Algoritmi numerici di base - Quadrature - Equazioni differenziali ordinarie - Attrattori e Caos - Metodi Spettrali - Equazioni di Navier-Stokes ....

\*: Per i programmi dettagliati consultare la guida allo studente



## Focus su: Meccanica Statistica, Sistemi Dinamici, Metodi Computazionali

FIS/01 **Fisica dei Fluidi Complessi e Turbolenza** [8 CFU, I semestre]

Meccanica dei Sistemi Continui - Equazioni di Navier-Stokes, tensore degli sforzi viscoso - Fenomeni di Superficie - Equazione di Reynolds - Regime di Turbolenza - Teoria di Kolmogorov - Intermittenza e Fenomenologia Multifrattale - Teoria delle grandi deviazioni ...

FIS/06 **Fisica dei Sistemi Dinamici** [6 CFU, II semestre]

Stabilità e Caos deterministico - Sistemi dinamici discreti e continui - Modello di Lorenz - Punti fissi e stabilità lineare - Esponente di Lyapunov - Misure invarianti e ipotesi ergodica - Proprietà Frattali e processi dissipativi ...

FIS/01 **Machine Learning Methods for Physics** [6 CFU, II semestre]

Neural Networks, Supervised Learning, Stochastic gradient descent, Deep Learning, Convolutional Networks, Generative Adversarial Networks, Recurrent Neural Networks, Graph Neural Networks, Reinforcement Learning

FIS/02 **Complex & Neural Networks** [8 CFU, II semestre]

FIS/02 **Optimization & Statistical Mechanics** [8 CFU, II semestre]



# Physics of Complex Systems & Big Data

## Piano di studi unico

<b>I Anno I Semestre</b>	Mathematical Methods for Physics (FIS/02)	8 CFU	<b>II Anno I Semestre</b>	Advanced Statistics (FIS/01)	10 CFU
	Quantum Mechanics (FIS/02)	8 CFU		Digital Data Analysis (FIS/05)	8 CFU
	Materials Sciences (FIS/03)	8 CFU		Esame a scelta (elenco)	9 CFU
	Esame a scelta libera	6 CFU			
<b>I Anno II Semestre</b>	Optimization & Statistical Mechanics (FIS/02)	8 CFU	<b>II Anno II Semestre</b>	<b>Tesi</b>	<b>39 CFU</b>
	Complex and Neural Networks (FIS/02)	8 CFU			
	Esame a scelta libera	6 CFU			
	Lingua Inglese o Italiana	2 CFU			



## I anno I semestre: le basi di un fisico teorico

*Mathematical Methods for Physics - Quantum Mechanics - Materials Science*

## I anno II semestre: la fisica dei sistemi complessi

*Optimization & Statistical Mechanics:* Teoria dell'informazione - Ottimizzazione vincolata - Teoria delle reti - Processi di crescita e percolazione - Processi ed equazioni stocastiche - Metodi Monte Carlo - Metodi di trasporto ottimale

*Complex & Neural Networks:* Paradigmi computazionali e sistemi fisici - Reti neurali - Fenomeni critici - Leggi di scala - Big Data e Sistemi Complessi

## II anno I semestre: statistica e analisi dati

*Advanced Statistics:* Teoria della probabilità - Funzioni di distribuzioni - Eventi estremi - Analisi statistica parametrica e non - Misure di correlazione

*Digital Data Analysis:* Teorema del campionamento - Convoluzione e correlazione - Trasformata di Fourier - Analisi del rumore - Compressione



## Scelta libera (#2 esami, I anno, 2x6 cfu)

### *Corsi coerenti con il curriculum*

- **Statistical Mechanics** [6 cfu, II semestre] (obbligatorio! se non già sostenuto)
- Statistical Mechanics 2 [6 cfu, I semestre]
- Physics of Dynamical Systems [6 cfu, II semestre]
- Physics of Complex Fluids and Turbulence [8 cfu, I semestre]
- Machine Learning Methods for Physics [6 cfu, II semestre]
- **Attività a scelta/Stage**

## Elenco (#1 esame, II anno, 9 cfu) FIS/01, INF/01, ING-INF/05

- **Computational Physics** [9 cfu, I semestre]
- **Data Modeling & Applications** [6+3 cfu I e II semestre]:  
Calcolo relazionale - Modello concettuale e design di database - Query language - MySQL  
// Database NoSql su MongoDB
- **Machine Learning** (CDL Informatica) [9 cfu, II semestre]:  
Apprendimento e reti Bayesiane - Supervised e unsupervised learning - Language Processing  
- Inferenza approssimata - Deep learning
- **Web Mining and Retrieval** (CDL ICT) [9 cfu, I semestre]:  
Machine and Kernel-based Learning - Language Processing - Metodi di ranking per il Web -  
Q&A Systems - Wikipedia - Sentiment Analysis
- **Internet Services Performance** (CDL ICT) [9 cfu, I semestre]:  
Internet model building - Workload characterization - Model evaluation - QoS management



## Partners di Ricerca



## Ambiti di Ricerca @UToV

- ✓ Meccanica statistica fuori dall'equilibrio
- ✓ Fluidi complessi
- ✓ Sistemi dinamici non lineari
- ✓ Reti complesse
- ✓ Metodi AI per la fisica

## Programmi di Dottorato



STIMULATE  
European Joint Doctorates

AQTIVATE

## Partners Istituzionali



Sony CSL



serco



WORLD BANK



BANK OF ENGLAND



CASSA DI COMPENSAZIONE & GARANZIA



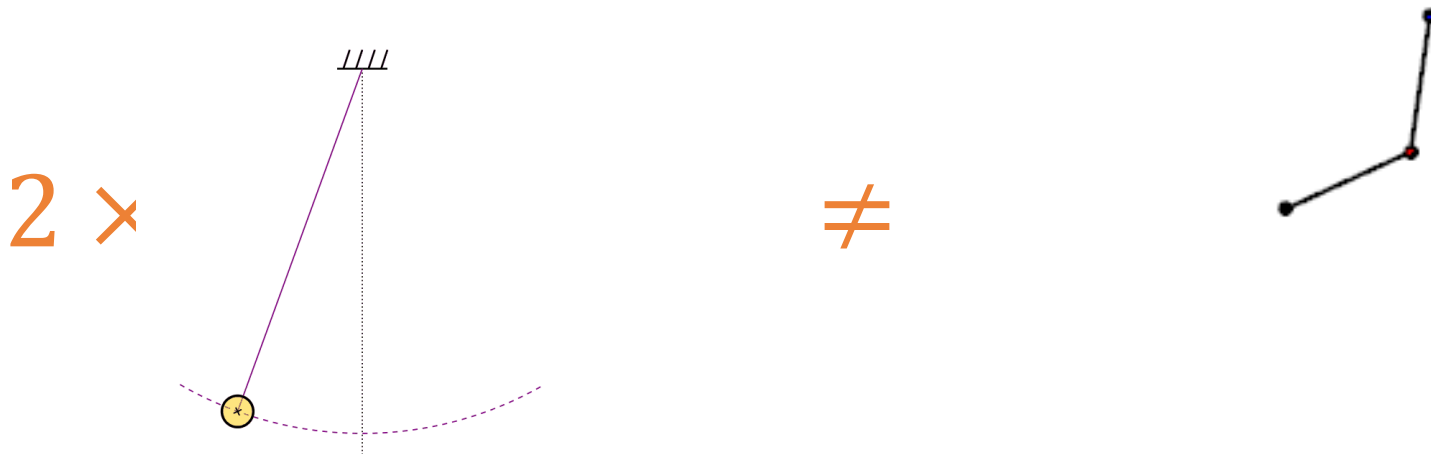
BANCA D'ITALIA  
EUROSISTEMA

## Sbocchi Professionali

- ✓ Carriera Accademica (PhD)
- ✓ Big Data Analyst
- ✓ AI developer
- ✓ Econofisica e Sociofisica
- ✓ Policy Modeling

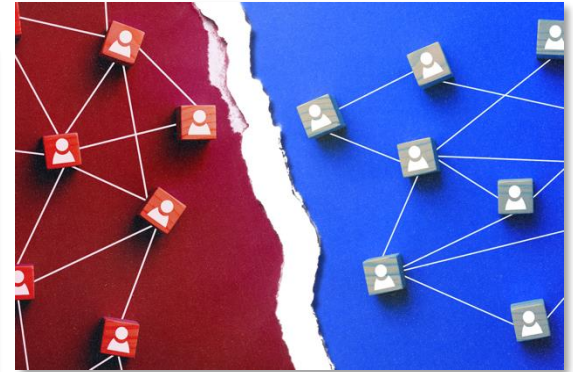
**Cos'è un Sistema Complesso?** Un sistema dinamico formato da componenti interagenti, in cui *il tutto è maggiore della somma delle singole parti*

Si studia tramite approccio olistico ovvero come computazione *in toto* dei comportamenti delle componenti e delle loro interazioni, anziché in maniera *riduzionistica* (scomponendo e analizzando il sistema nei suoi componenti)



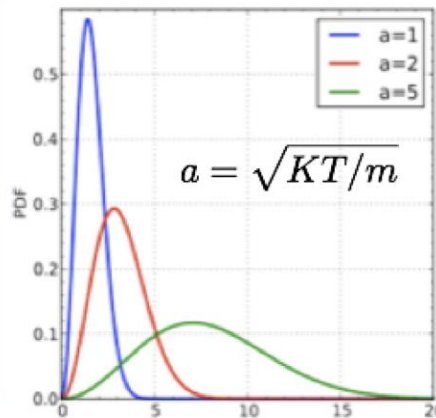
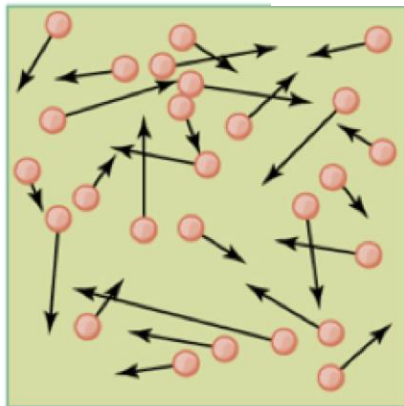
## Caratteristiche

- **Dinamica non-lineare e caotica** (estrema sensibilità alle c.i.)
- **Proprietà emergenti** (non deducibili da quelle dei costituenti)



La Meccanica Statistica è un tool molto potente per studiarli

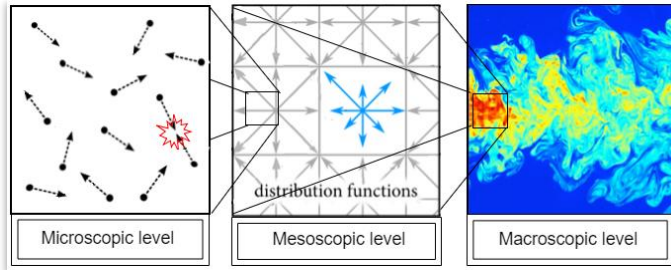
**Es Teoria Cinetica:** da variabili micro ( $\vec{x}, \vec{v}$ ) a caratteristiche macro ( $P, T$ )



$$PV = \frac{1}{3} N m \overline{v^2}$$

$$E = \frac{3}{2} k_B T$$

$$S = k_B \ln W$$



## Flussi Turbolenti

- ✓ Descrizione **Macroscopica** (campo di velocità)
- ✓ Molte Applicazioni in sistemi reali (problema multiscala)
- ✓ Approccio Numerico/**Computazionale**

Che cosa è la turbolenza?? Possiamo prevedirla? E controllarla?

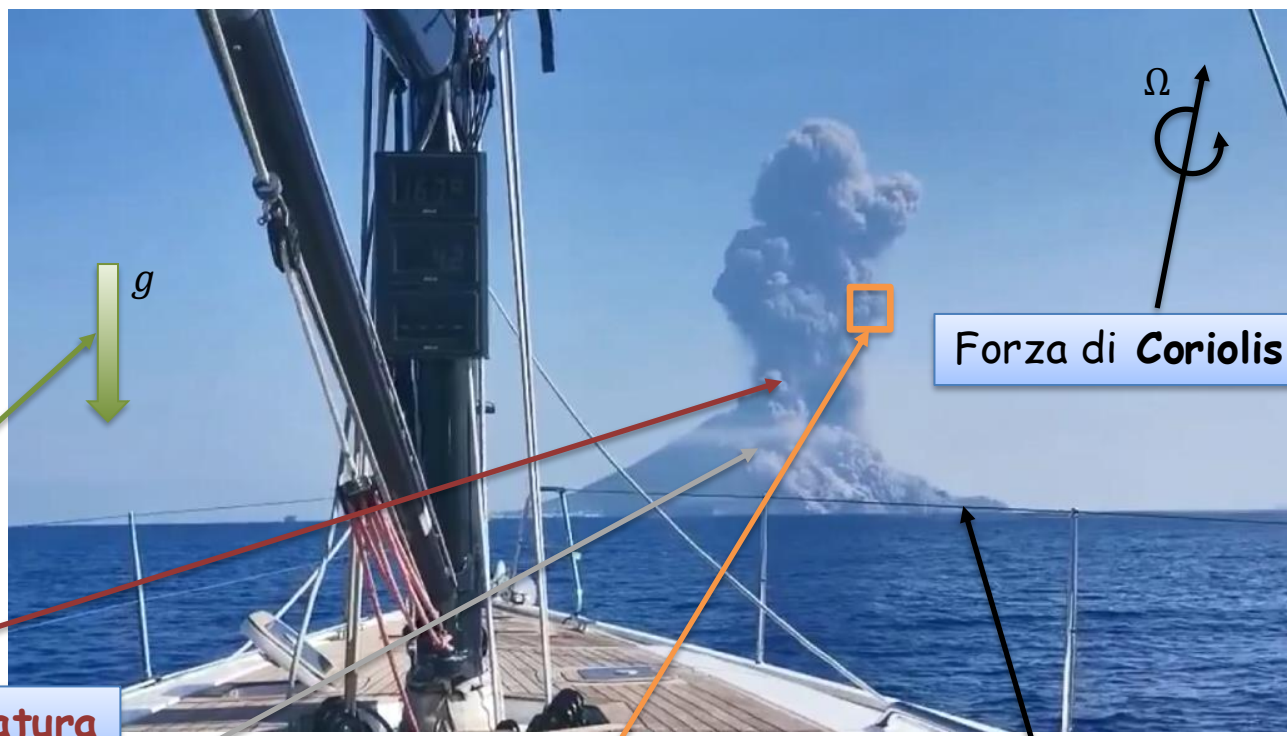


Eruzione dello Stromboli, 4 Luglio 2019

.. Fisica estremamente complessa!

$$\left\{ \begin{aligned} \partial_t v + v \partial v &= -\partial p + \nu \Delta v + F(B, B) + g\theta + \sum_i c_0(\mathbf{u}_i, v) \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) - 2\Omega \times v + f \\ \partial_t \theta + v \cdot \partial \theta &= \chi \partial^2 \theta \\ \partial_t B + v \cdot \partial B &= B \cdot \partial v + \chi \partial^2 B \\ \partial \cdot v &= 0 \\ &+ \text{condizioni al bordo} \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\mathbf{u}_i(\mathbf{r}_i, t)}{dt} &= -\rho_f |\mathbf{u}_i - \mathbf{v}| (\mathbf{u}_i - \mathbf{v}) \\ + \rho_f \left( \frac{D\mathbf{v}}{Dt} - \frac{D\mathbf{u}_i}{Dt} \right) &+ (\mathbf{u}_i - \mathbf{v}) \times \omega \end{aligned} \right.$$



Forza di Coriolis

Effetti di Gravità

Estremi gradienti di Temperatura

Alte variazioni di Pressione

Trasporto di particelle pesanti

Bordi complessi

## .. semplifichiamo il problema:

Anche riducendola all'osso la turbolenza rimane comunque un problema molto complesso!!

**Equazioni di Navier-Stokes: spina dorsale della turbolenza**

$$\begin{cases} \partial_t v + v \partial v = -\partial p + \nu \Delta v + f \\ \partial \cdot v = 0 \end{cases}$$

Entry #: 84174

### Vortices within vortices: hierarchical nature of vortex tubes in turbulence

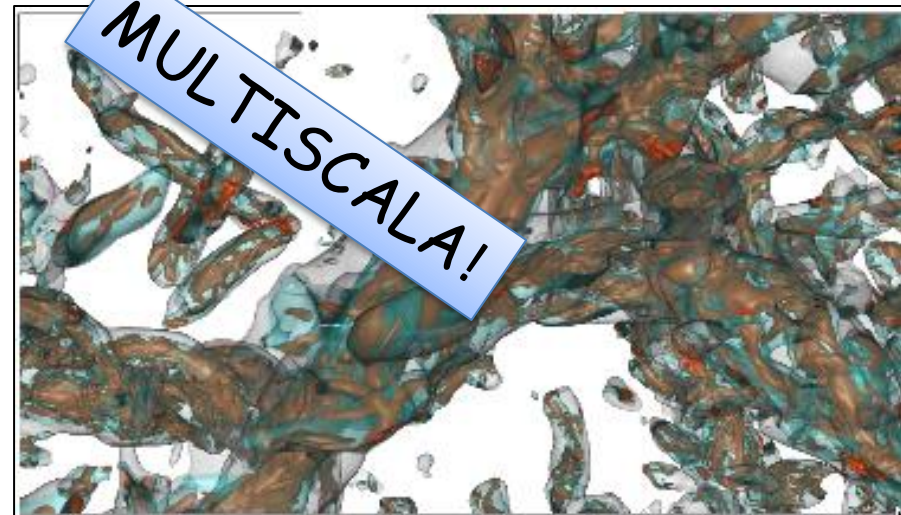
Kai Bürger<sup>1</sup>, Marc Treib<sup>1</sup>, Rüdiger Westermann<sup>1</sup>,  
Suzanne Werner<sup>2</sup>, Cristian C Lalescu<sup>3</sup>,  
Alexander Szalay<sup>2</sup>, Charles Meneveau<sup>4</sup>, Gregory L Eyink<sup>2,3,4</sup>

- <sup>1</sup> Informatik 15 (Computer Graphik & Visualisierung), Technische Universität München
- <sup>2</sup> Department of Physics & Astronomy, The Johns Hopkins University
- <sup>3</sup> Department of Applied Mathematics & Statistics, The Johns Hopkins University
- <sup>4</sup> Department of Mechanical Engineering, The Johns Hopkins University

RIGUARDO LA FISICA DI 1CM CUBO DI ACQUA, POSSIAMO CERTAMENTE DIRE DI CONOSCERE MOLTO MEGLIO IL FUNZIONAMENTO DELLE INTERAZIONI FONDAMENTALI CHE AVVENGONO TRA LE SUE COMPONENTI SUBATOMICHE RISPETTO ALLE SUE PROPRIETA' IDRODINAMICHE (E MOLECOLARI) (U. FRISCH, PHYSICS TODAY 2001)



Con l'aiuto delle **simulazioni numeriche**





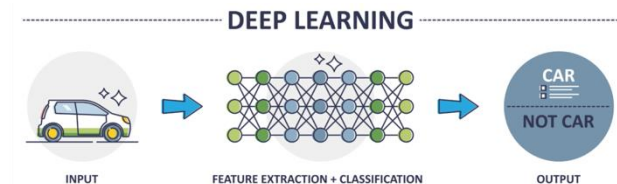
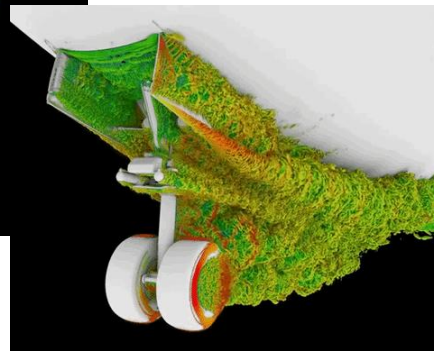
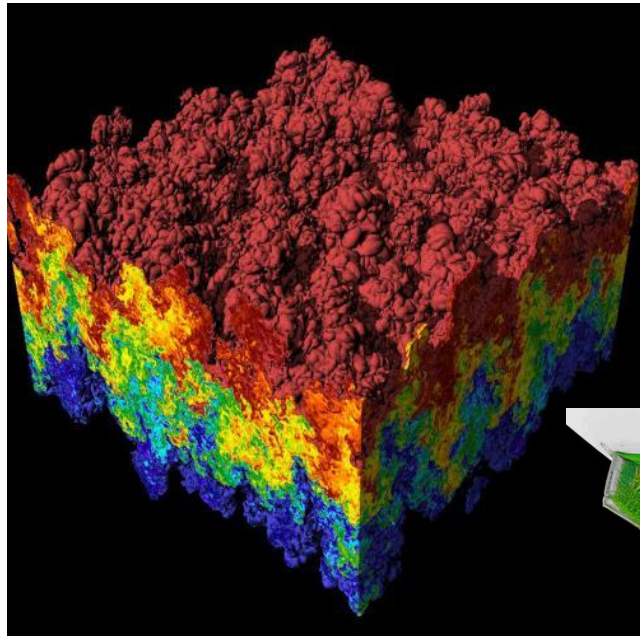
Metodi e tecnologie per generare/processare/analizzare grandi volumi di dati

- Simulazioni numeriche o misure sperimentali
  - Variegati e prodotti in tempo continuo
- Database Strutturati e non (immagini, email, dati GPS, dati social, ecc.)
  - Richiedono una potenza di calcolo parallelo e massivo
  - **Machine learning**: algoritmi che identificano patterns nei dati

## CLUSTER in-house (@Uni. TorVegata)

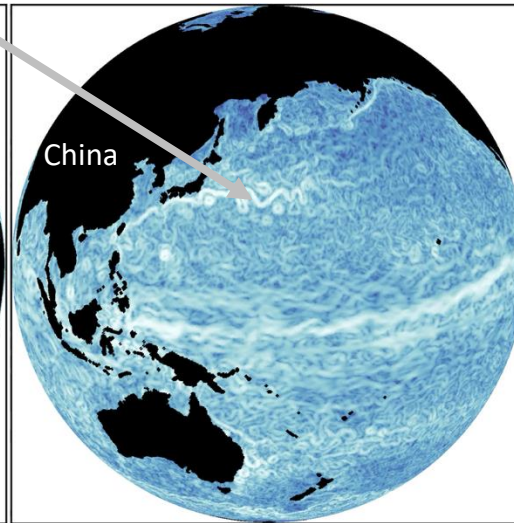
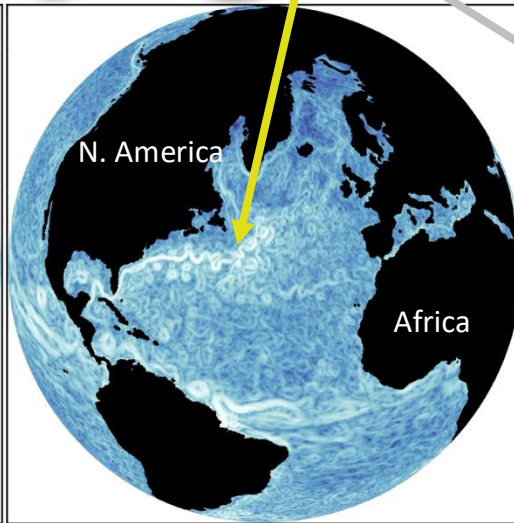
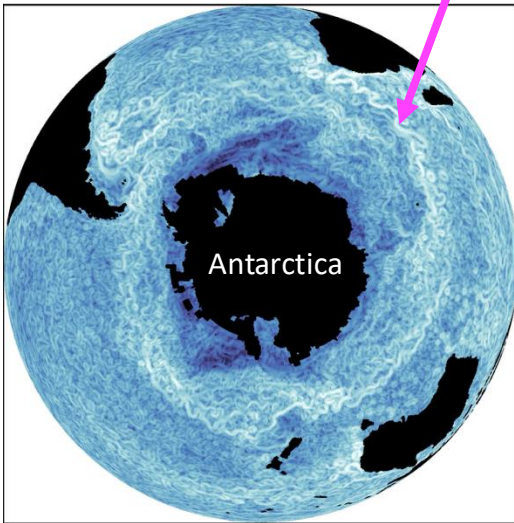
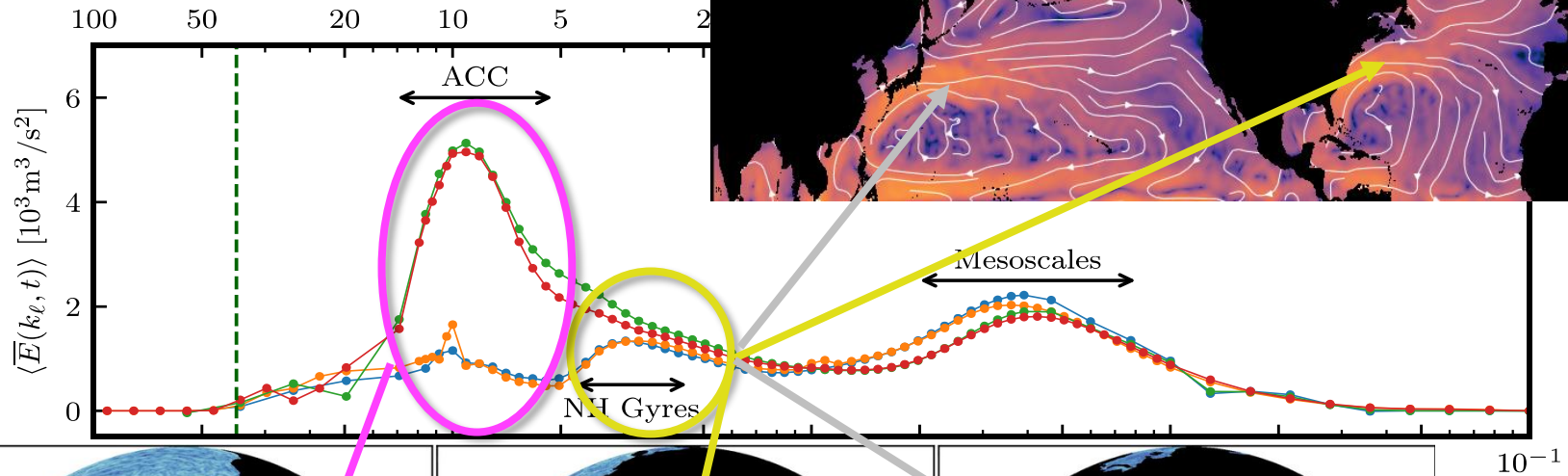


- CPUs: ~ 1000 cores
- GPUs: 16A100 + 2P100
- GPUs: 8B200
- Storage: ~ 1.5PetaByte

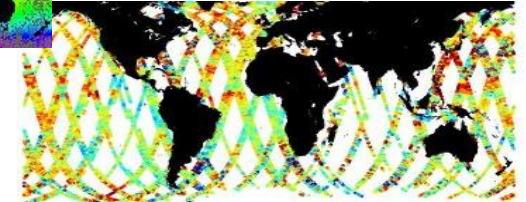
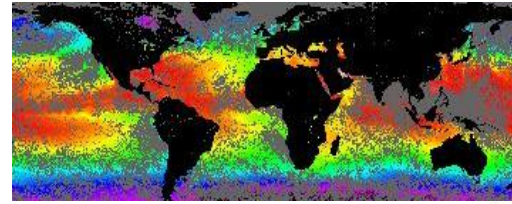
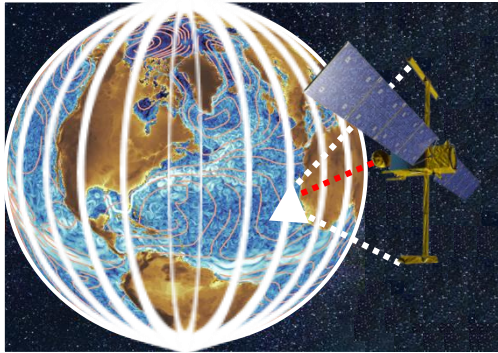




Sistemi Geofisici

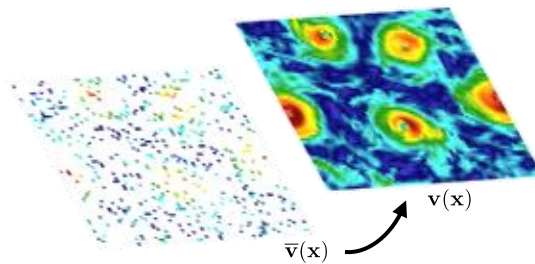


$10^{-1}$

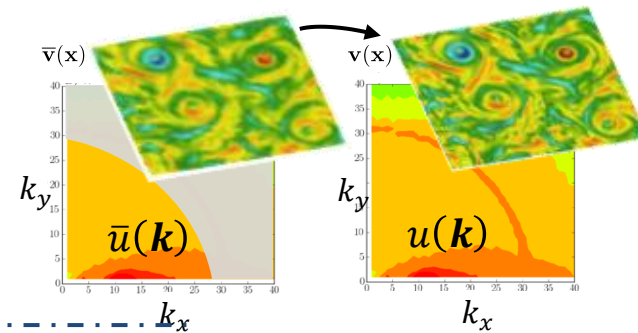


Osservazioni Parziali  
e rumorose

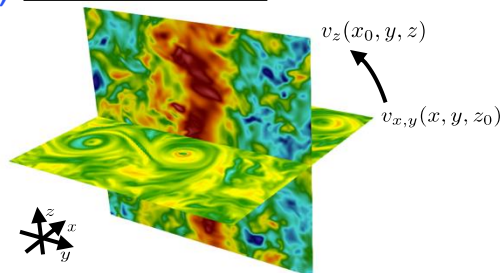
(i) Ricostruzione



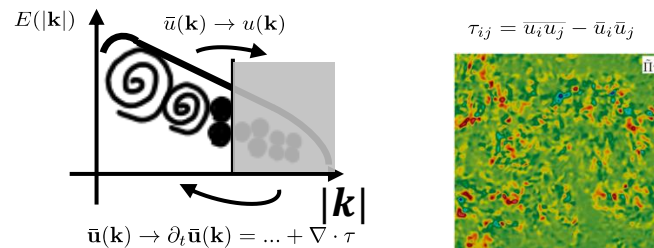
(iii) Super Risoluzione



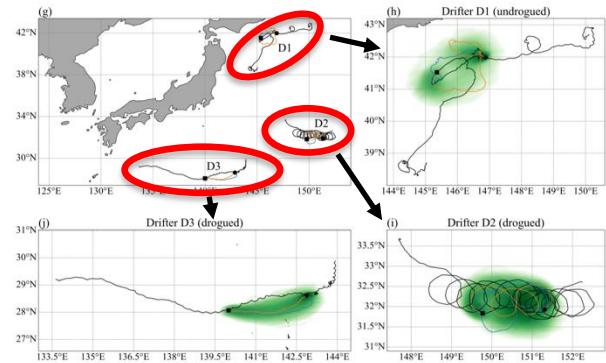
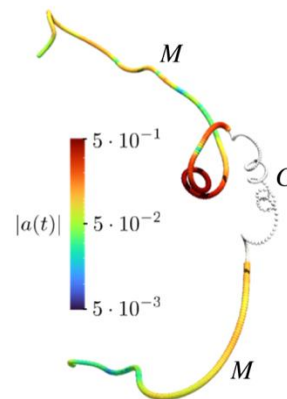
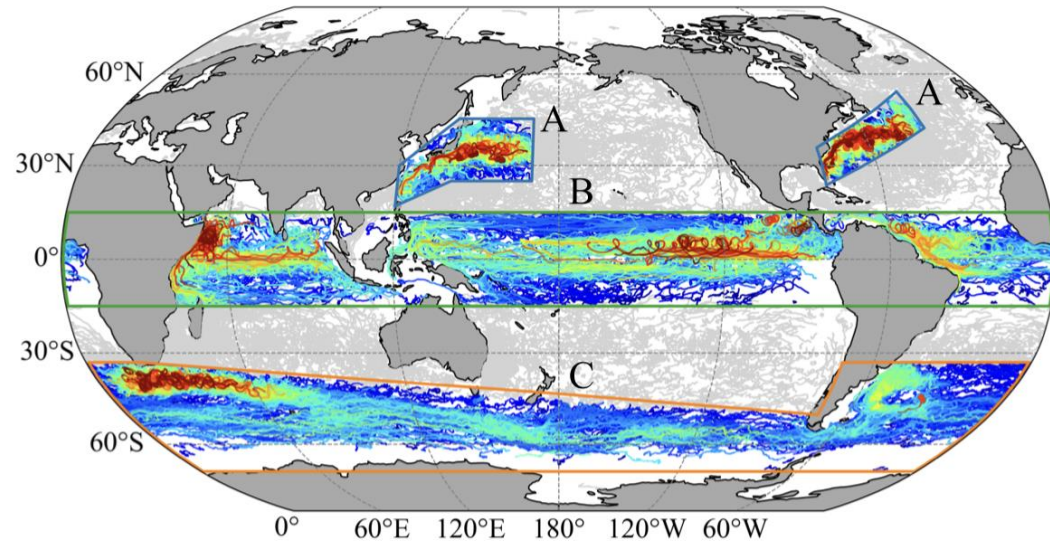
(ii) Problemi inversi

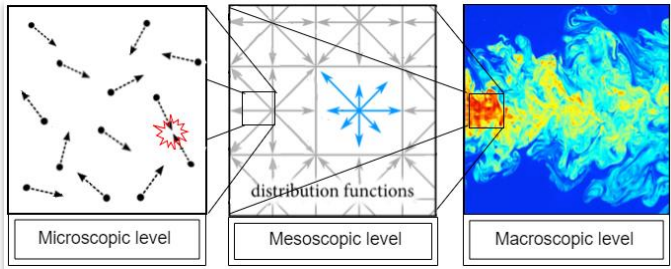


(iv) Modellizzazione sotto griglia



## Può aiutarci l'Intelligenza Artificiale?





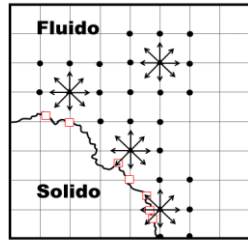
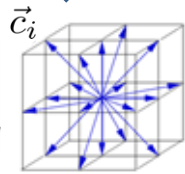
## Teoria Cinetica

- ✓ Descrizione **Mesoscopica** (funzioni di distribuzioni)
- ✓ Limiti **idrodinamici** (problemi multiscala)
- ✓ Base per **Modelli Computazionali**

Equazione di Boltzmann  
 $f(\vec{x}, \vec{c}, t)$

### Metodi Reticolari di Boltzmann

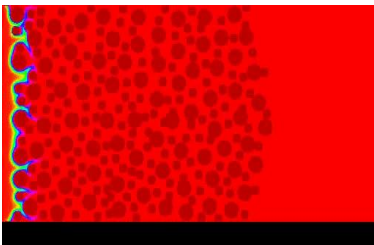
Equazione di Navier-Stokes  
 $\rho(\vec{x}, t) \quad \vec{u}(\vec{x}, t)$



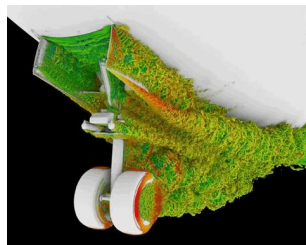
Recenti progetti di ricerca



Esempi di Problemi "tradizionali"

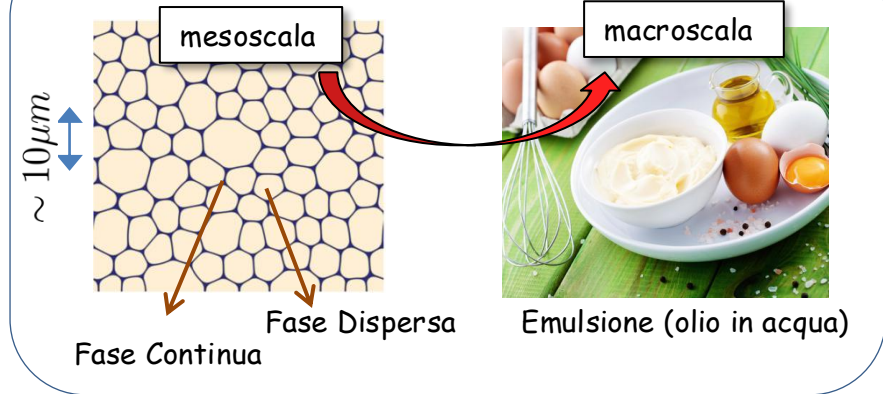


Fluidi in mezzo poroso

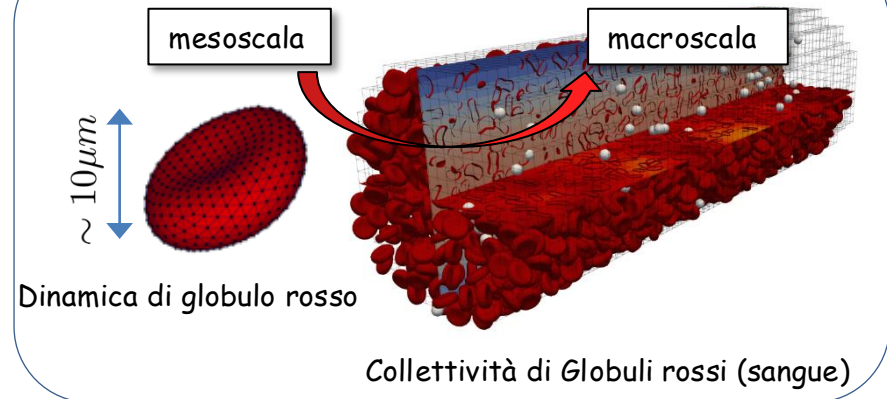


Aerodinamica

## Fluidi Complessi Bifasici

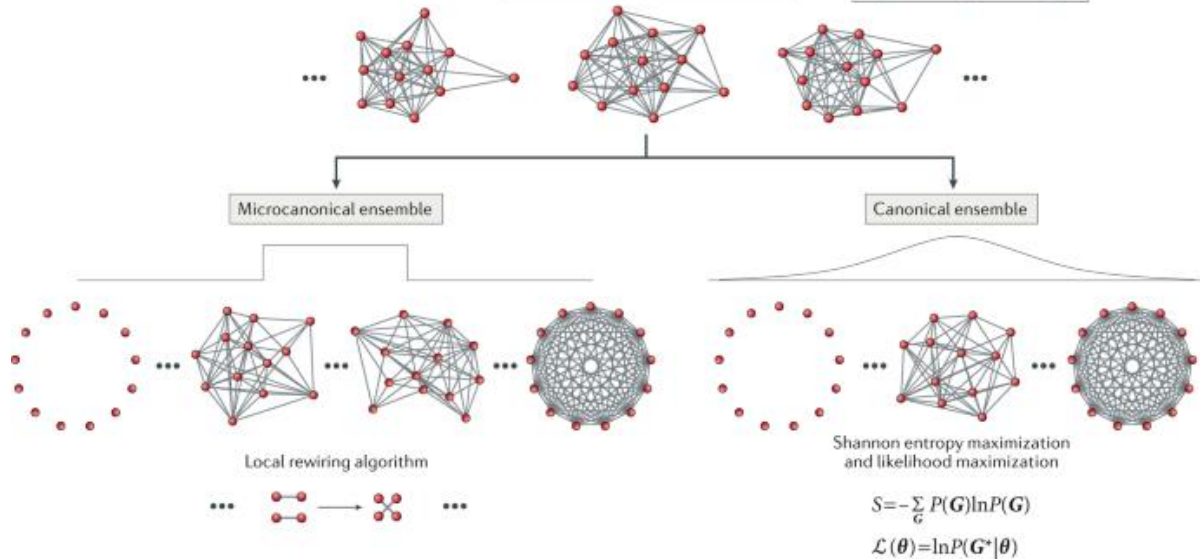
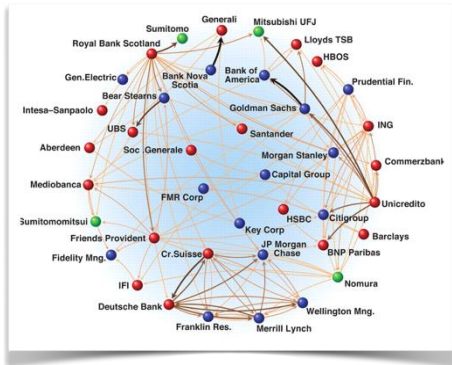
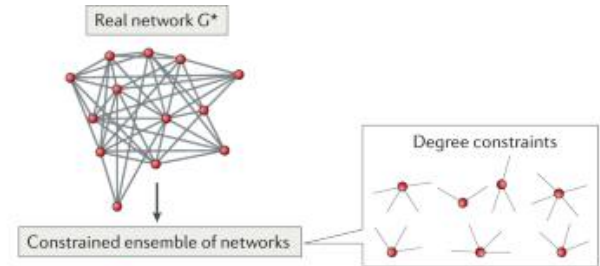
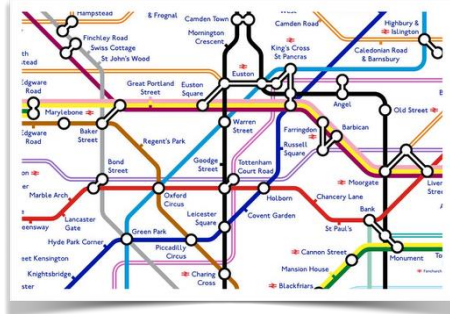
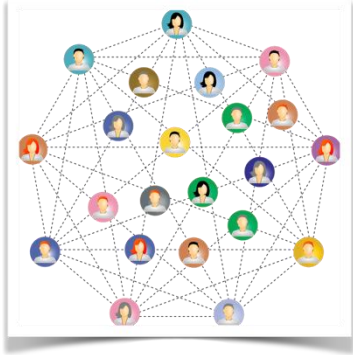


## Emodinamica



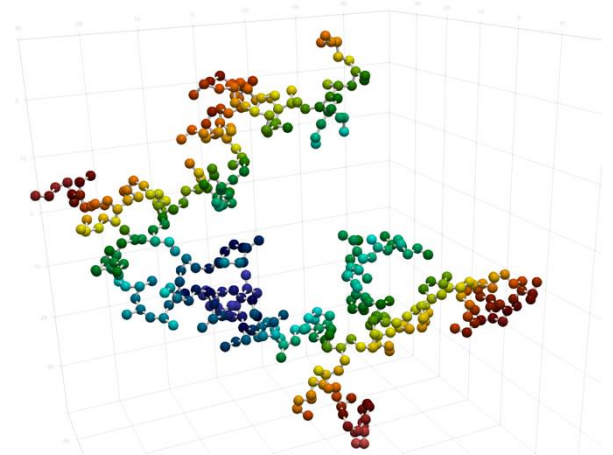
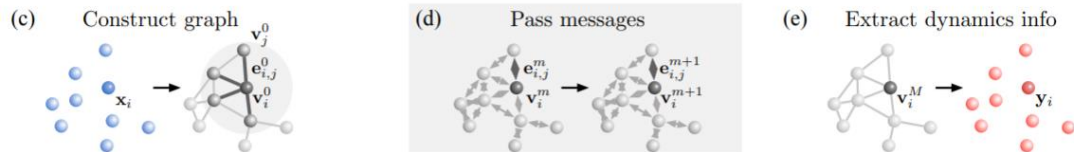
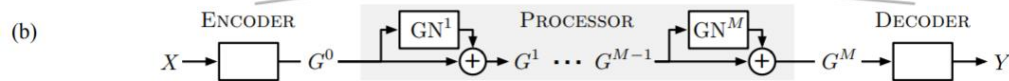
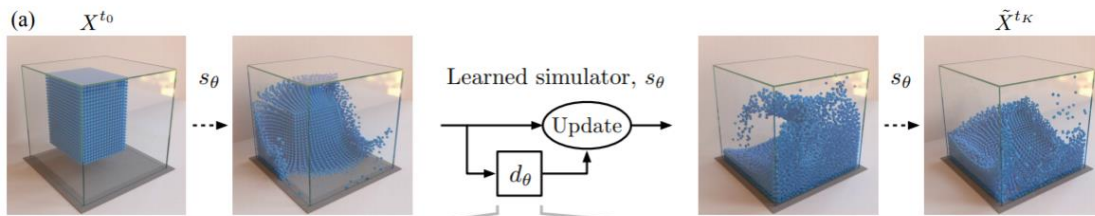
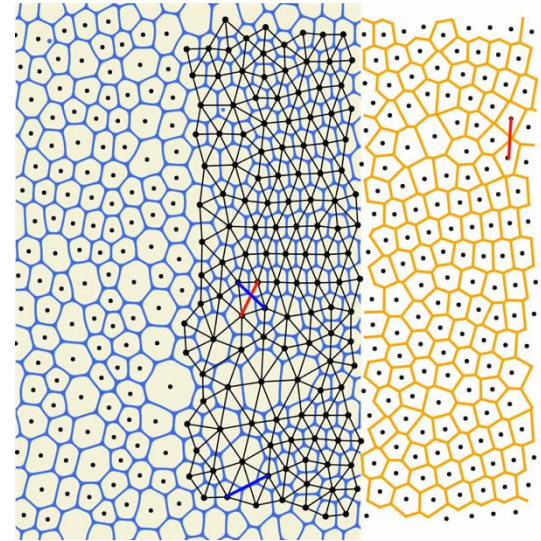
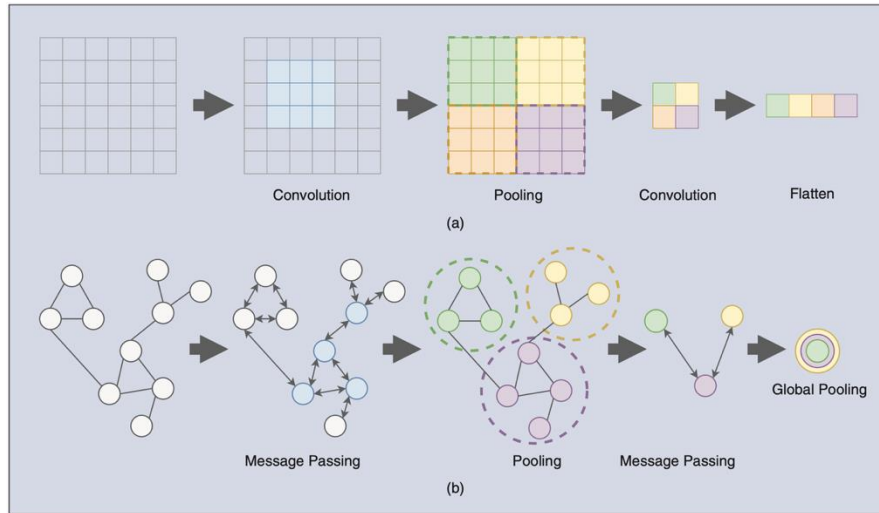


## Rete: descrizione di un sistema complesso in termini di unità interagenti



**Meccanica Statistica delle Reti**  
le connessioni sono i gradi di libertà del sistema!

Imparare e predire la fisica di un sistema complesso con interazioni arbitrarie





Prof. Luca Biferale

[Luca.Biferale@roma2.infn.it](mailto:Luca.Biferale@roma2.infn.it)



Prof. Giulio Cimini

[Giulio.Cimini@roma2.infn.it](mailto:Giulio.Cimini@roma2.infn.it)



Prof. Mauro Sbragaglia

[Mauro.Sbragaglia@roma2.infn.it](mailto:Mauro.Sbragaglia@roma2.infn.it)



Dr. Michele Buzzicotti

[Michele.Buzzicotti@roma2.infn.it](mailto:Michele.Buzzicotti@roma2.infn.it)



Prof. Roberto Benzi

[Roberto.Benzi@roma2.infn.it](mailto:Roberto.Benzi@roma2.infn.it)

<https://www.fisica.uniroma2.it/sezioni/ricerca/aree-di-ricerca/fisica-teorica-delle-interazioni-fondamentali/fisica-teorica-meccanica-statistica/>