

# Corso di laurea magistrale in

## FISICA DEI SISTEMI COMPLESSI

---

Corso di Laurea interateneo dell'Università di Torino e  
dell'Università del Piemonte Orientale



Prima attivazione: Anno accademico 2009/10

# Organizzazione del corso di laurea

---

- 4 Corsi fondamentali, comuni a tutti gli indirizzi
- 1 Laboratorio
- 2 Corsi di taglio teorico
- 3 corsi affini e integrativi da 6 CFU (specifici per ogni indirizzo), di cui 2 corsi di tipo non-FIS e 1 di tipo FIS
- 2 corsi a scelta, che consentono di caratterizzare ulteriormente l'indirizzo
- Seminari (1 CFU)
- Tesi di laurea (46 CFU)

1 CFU (Credito Formativo Universitario) =  
8 ore di lezione/laboratorio  
+ 17 ore di attività individuale

---

# Corsi fondamentali (caratterizzanti)

---

1. Sistemi dinamici
  2. Processi stocastici per la fisica
  3. Meccanica statistica
  4. Un corso a scelta tra:
    - Fisica della materia
    - Complementi di struttura della materia
    - Onde non lineari e turbolenza(i corsi che non vengono scelti non sono persi ma possono essere scelti comunque nelle regole successive)
-

# Laboratorio a scelta (regola 5, 6 CFU)

---

- Algoritmi numerici per la fisica
- Tecniche di analisi numerica e simulazione (T.A.N.S.)
- Lab. Tecniche Avanzate di Modellizzazione (MAS)
- Lab. di Geofisica Computazionale

---

1 corso tra quelli elencati deve essere inserito nel piano di studi

# Corsi di tipo teorico (regola 6, 12 CFU)

---

- Complementi di meccanica quantistica
- Complementi di Metodi Matematici per la Fisica
- Complexity Economics
- Fisica della materia condensata
- Fondamenti di Teoria dei Campi
- Introduzione alla Computazione Quantistica
- Introduzione alla Teoria dei Campi
- Introduzione alla teoria dei gruppi
- Meccanica quantistica II
- Metodi matematici per la fisica della complessita'
- Reti neurali
- Sistemi complessi per la biologia

---

2 corsi = 12 CFU

# Corsi affini/integrativi non-FIS (regola 8)

---

- ANALISI E VISUALIZZAZIONI DI RETI COMPLESSE (Informatica)
- ASSET PRICING AND PORTFOLIO CHOICE (Economia)
- BIOFISICA STATISTICA (Polito)
- BIOLOGIA E BIOLOGIA MOLECOLARE
- DERIVATIVES (Economia)
- ECONOMETRICS II (Economia)
- ECONOMIC REAL ANALYSIS
- ELEMENTI DI FISIOLOGIA
- ELEMENTI DI TEORIA DEI GIOCHI E DELLE RETI
- FLUID MECHANICS (Polito)
- GAMES AND DECISIONS (Economia)
- MACROECONOMICS II (Economia)
- MATHEMATICS FOR INSURANCE
- MECCANICA STATISTICA DEL DISEQUILIBRIO: FONDAMENTI E APPLICAZIONI (Polito)
- MICROECONOMIA (Matematica)
- MICROECONOMICS II (Economia)
- MODELLI DI SIMULAZIONE PER L'ECONOMIA
- PROBABILITA' STATISTICA E PROCESSI STOCASTICI (Polito)
- SISTEMI DINAMICI E TEORIA DEL CAOS

---

2 corsi = min 12 CFU, max 20 CFU

# Corsi affini/integrativi FIS (regola 9)

---

- ALGORITMI NUMERICI PER LA FISICA
- COMPLEMENTI DI STRUTTURA DELLA MATERIA
- DATA MINING: MODELIZZAZIONE STATISTICA E APPRENDIMENTO AUTOMATICO
- DEEP LEARNING
- DINAMICA DEI FLUIDI PLANETARI
- DINAMICA DEI SISTEMI ESTESI
- FISICA DELLA MATERIA A
- LABORATORIO DI FISICA DELLA MATERIA
- LABORATORIO DI GEOFISICA COMPUTAZIONALE
- LABORATORIO DI TECNICHE AVANZATE DI MODELIZZAZIONE: MAS
- MACHINE LEARNING
- METODI DI OSSERVAZIONE E MISURA; ELEMENTI DI STATISTICA NON LINEARE
- ONDE NON LINEARI E TURBOLENZA
- SISTEMI COMPLESSI NELLE NEUROSCIENZE
- SISTEMI COMPLESSI PER LA FISICA DEL CLIMA
- TECNICHE DI ANALISI NUMERICA E SIMULAZIONE
- TURBOLENZA E DISPERSIONE

---

1 corso = 6 CFU

# Corsi affini/integrativi di tipo FIS

---

Regola 10: min 12 CFU, max 20 CFU dalle regole 11 e 12

Regola 11: tutti i corsi precedenti (min 1 CFU, max 20 CFU)

Regola 12: un qualsiasi corsi di Ateneo (min 1 CFU, max 20 CFU)

---

# Indirizzi del corso di laurea

---

I 3 corsi affini e integrativi (2 non-FIS e 1 FIS) ed eventualmente i 2 corsi a scelta permettono di definire l'indirizzo

I quattro indirizzi del corso di laurea, corrispondenti alle linee di ricerca attive a Torino ed Alessandria, sono:

- Turbolenza e onde nonlineari (Boffetta + Palazzi)
  - Sistemi complessi per la biologia (Caselle + Osella)
  - Sistemi complessi socioeconomici (Pangallo + Gozzi)
  - Informazione e computazione quantistica (Castellani)
-

# Novità per l'anno 2024/2025

---

- Nuovo corso di Tecnologie Quantistiche (INRIM)
  - Nuovo corso Computational application to cognitive neuroscience
  - Ristrutturazione dei corsi indirizzo economico:
    - Econometrics
    - Microeconomics of consumption, production and uncertainty
    - Financial econometrics
    - Matematica finanziaria e attuariale
  - Corsi in inglese (non obbligatori):
    - Complex system dynamics and modelling
    - Computational application to cognitive neuroscience
    - Deep learning
    - Planetary fluid dynamics
    - Nonlinear wave and turbulence
    - Spatially extended systems
    - Complexity economics
-

---

# Turbolenza e onde nonlineari

---

**Regola 4:** Onde non lineari e turbolenza

**Regola 5:** Algoritmi numerici per la fisica (o altro)

**Regola 6:** Metodi matematici per la fisica della complessita' *oppure*  
(2 corsi) Complementi di metodi matematici per la fisica  
Altro corso teorico

**Regola 8:** Meccanica statistica del disequilibrio  
(2 corsi) Fluid mechanics

**Regola 9:** Dinamica dei fluidi planetari  
(1 corso) **Dinamica dei sistemi estesi**  
Sistemi complessi per il clima  
Turbolenza e dispersione

**Regola 11: Dinamica dei fluidi planetari**  
(1-20 cfu) Dinamica dei sistemi estesi  
Turbolenza e dispersione

**Regola 12:** libero  
(1-20 cfu)

---

# Sistemi complessi per la biologia

---

# *Proposta di piano di studi per l'indirizzo di Sistemi complessi per la biologia*

---

Regola 5: un corso a scelta tra Algoritmi e TANS

Regola 6 - Sistemi complessi per la biologia  
- Reti Neurali

Regola 8: due corsi a scelta tra:

- Biologia e Biologia Molecolare
- Biofisica Statistica (PoliTO)
- Probabilità Statistica e processi stocastici (PoliTO)

---

# *Proposta di piano di studi per l'indirizzo di Sistemi complessi per la biologia*

---

Regola 9: un corso a scelta tra:

- Deep Learning
- Data Mining
- Machine learning
- Complessità nelle scienze sociali

Osservazione importante: per l'organizzazione interna dei corsi di A.I. : data mining, machine learning, reti neurali e deep learning, rivolgersi al prof. Osella

---

## “Core” courses

- *Data Mining (Sanavia, Panisson, Gauvin)*
- *Neural Networks (Osella)*
- *Deep Learning (Osella)*
- *NEW: 12 hours “Tutorato innovativo”*
- *Machine Learning (Fariselli)*

## Combinations

- *FULL MENU: Data Mining + Deep Learning + Machine Learning*
- *HALF MENU: Data Mining + Deep Learning or Machine Learning*
- *THEORY: Neural Networks + Machine Learning*
- *ADVANCED ONLY: Deep Learning + Machine Learning*
- ***NO NEURAL NETWORKS AND DEEP LEARNING!***

## Potentially useful courses...it depends

***Statistics, Probability, Stat Mech, Programming.***

***e.g.,***

- ***Algorithms for optimization, inference and learning (Braunstein)***  
***FIS0116 - PROBABILITA' STATISTICA E PROCESSI STOCASTICI***
- ***Nonequilibrium statistical mechanics: foundations and applications (Rondoni)***  
***INT0374 - MECCANICA STATISTICA DEL DISEQUILIBRIO: FONDAMENTI E APPLICAZIONI***
- ***Analisi e visualizzazioni di reti complesse (Ruffo)***
- ***YOUR FAVORITE FIELD OF APPLICATION (BIO, SOCIAL, CLIMATE, FLUIDS..)***

---

# Sistemi complessi socioeconomici

---

| Track economia   |     |      |          |
|--|-----|------|----------|
| Nome   | CFU | Anno | Semestre |
| <b>M e c c a n i c a s t a t i s t i c a ( r e g o l a 1 )</b>   | 6   | 1    | 1        |
| <b>S i s t e m i d i n a m i c i ( r e g o l a 2 )</b>   | 6   | 1    | 1        |
| <b>M i c r o e c o n o m i c s I I ( S E M 0 1 7 9 )</b>   | 6   | 1    | 1        |
| <b>E c o n o m e t r i c s : e s t i m a t i o n m e t h o d s a n d a p p l i c a t i o n s ( S E M 0 1 8 6 A )</b> | 6   | 1    | 1        |
| <b>P r o c e s s i s t o c a s t i c i ( r e g o l a 3 )</b>   | 6   | 1    | 2        |
| <b>M A S ( o a l t r o r e g o l a 5 a l p r i m o s e m e s t r e )</b>   | 6   | 1    | 2        |
| <b>R e t i n e u r a l i ( r e g o l a 6 )</b>   | 6   | 1    | 2        |
| Elementi di teoria dei giochi e delle reti   | 6   | 1    | 2        |
| <b>C o r s o r e g o l a 9</b>   | 6   | 1    | 2        |
| <b>C o m p l e x i t y e c o n o m i c s</b>   | 6   | 1    | 2        |
| <b>M e t o d i m a t e m a t i c i ( r e g o l a 6 )</b>   | 6   | 2    | 1        |
| <b>O n d e n o n l i n e a r i e t u r b o l e n z a o a l t r o r e g o l a 4</b>                                   | 6   | 2    | 1        |
|  | 72  |      |          |

| Track finanza/assicurazioni  |     |      |          |
|--|-----|------|----------|
| Nome   | CFU | Anno | Semestre |
| <b>M e c c a n i c a s t a t i s t i c a ( r e g o l a 1 )</b>                           | 6   | 1    | 1        |
| <b>S i s t e m i d i n a m i c i ( r e g o l a 2 )</b>                                   | 6   | 1    | 1        |
| <b>M a t e m a t i c a F i n a n z i a r i a e A t t u a r i a l e ( I N T 0 4 1 5 )</b> | 12  | 1    | 1        |
| <b>P r o c e s s i s t o c a s t i c i ( r e g o l a 3 )</b>                             | 6   | 1    | 2        |
| <b>M A S ( o a l t r o r e g o l a 5 a l p r i m o s e m e s t r e )</b>                 | 6   | 1    | 2        |
| <b>R e t i n e u r a l i ( r e g o l a 6 )</b>   | 6   | 1    | 2        |
| <b>C o r s o r e g o l a 9</b>   | 6   | 1    | 2        |
| <b>A s s e t p r i c i n g a n d p o r t f o l i o c h o i c e ( E C O 0 2 6 2 )</b>     | 9   | 1    | 2        |
| <b>C o m p l e x i t y e c o n o m i c s</b>   | 6   | 1    | 2        |
| <b>M e t o d i m a t e m a t i c i ( r e g o l a 6 )</b>                                 | 6   | 2    | 1        |
| <b>O n d e n o n l i n e a r i e t u r b o l e n z a o a l t r o r e g o l a 4</b>       | 6   | 2    | 1        |
|  | 75  |      |          |

# Informazione e computazione quantistica

---

- Corsi affini e integrativi di indirizzo:
  - Introduzione alla computazione quantistica
  - Metodi Mat. per la Fisica della Complessità
  - Meccanica Quantistica II
  
- Corsi a scelta consigliati:
  - Introduzione all'informazione quantistica
  - Laboratorio di tecnologie fisiche avanzate
  - *tutti gli altri corsi*

# Prospetto temporale dei corsi

|            | <i>I semestre</i>  | <i>II semestre</i>  |
|------------|--|---|
| I<br>anno  | <ul style="list-style-type: none"><li>- <i>Meccanica statistica</i></li><li>- <i>Sistemi dinamici</i></li><li>- <i>Metodi mat.</i></li><li>- <i>Laboratorio (*)</i></li><li>- <i>Corso aff. o a scelta</i></li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>- <i>Processi Stocastici</i></li><li>- <i>Laboratorio (*)</i></li><li>- <i>Corso aff. o a scelta</i></li><li>- <i>Corso aff. o a scelta</i></li></ul> |
| II<br>anno | <ul style="list-style-type: none"><li>- <i>Corso aff. o a scelta</i></li><li>- <i>Corso aff. o a scelta</i></li><li>- <i>Corso aff. o a scelta</i></li></ul>   | <i>TESI</i>   |

(\*) corsi in alternativa

# Contatti

---

## Turbolenza e onde nonlineari

Guido Boffetta [guido.boffetta@unito.it](mailto:guido.boffetta@unito.it)

Elisa Palazzi [elisa.palazzi@unito.it](mailto:elisa.palazzi@unito.it)

## Sistemi complessi per la biologia

Michele Caselle [michele.caselle@unito.it](mailto:michele.caselle@unito.it)

Reti Neurali/Machine Learning

Matteo Osella [matteo.osella@unito.it](mailto:matteo.osella@unito.it)

## Sistemi complessi per l'Economia e le Scienze Sociali

Marco Pangallo [marco.pangallo@centai.edu](mailto:marco.pangallo@centai.edu)

Nicolo' Gozzi [nicolo.gozzi@unito.it](mailto:nicolo.gozzi@unito.it)

## Informazione e computazione quantistica

Prof. Leonardo Castellani [leonardo.castellani@uniupo.it](mailto:leonardo.castellani@uniupo.it)

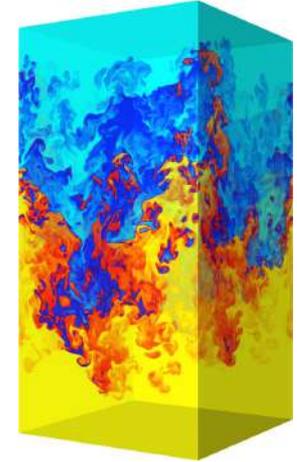
---

# Sistemi dinamici, onde e turbolenza

Docenti di riferimento: Boffetta, Onorato, De Lillo, Musacchio

Tematiche: Interazioni non lineari fra onde  
Flussi ad alti numeri di Reynolds

Metodi: Studio teorico  
Simulazioni numeriche  
Esperimenti di laboratorio (TurLab)

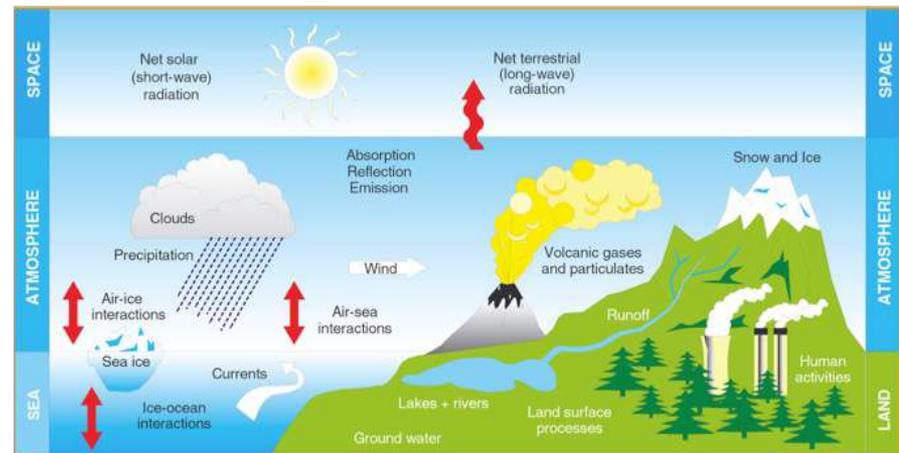


# Sistemi complessi per la fisica del clima

Docente di riferimento: Palazzi

Tematiche: Cambiamento climatico  
Modelli climatici

Metodi: Sviluppo modelli  
Analisi dati



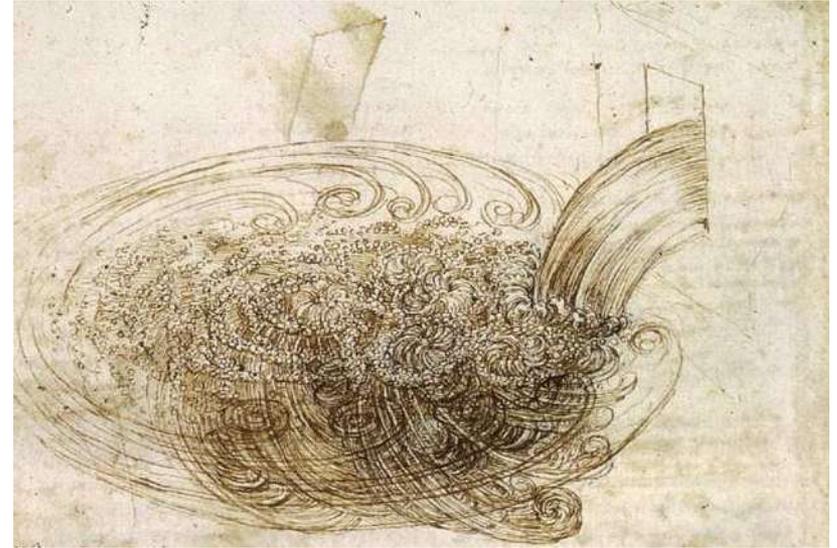
# Onde e Turbolenza



## Interazioni non-lineari fra onde

Teoria perturbativa delle onde  
Statistica degli eventi estremi  
Optica non-lineare  
Metamateriali

(Onorato)



## Flussi ad alti numeri di Reynolds

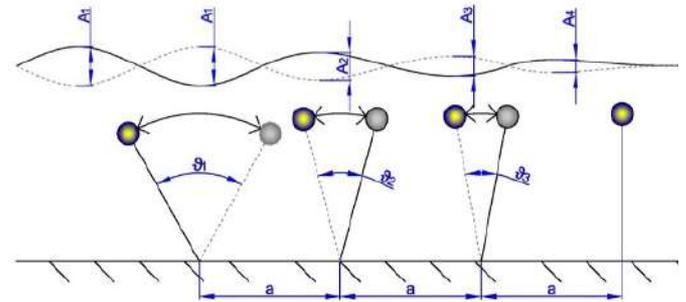
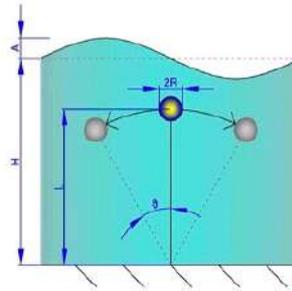
Proprietà dei flussi turbolenti  
Trasporto di particelle e campi nei fluidi  
Convezione turbolenta  
Fluidi complessi (fluidi binari, non-newtoniani)  
Dinamica di microorganismi nei fluidi

(Boffetta, De Lillo, Musacchio)

# Onde & Metamateriali

Meccanismo brevettato per prevenire l'erosione delle coste causata dalle onde

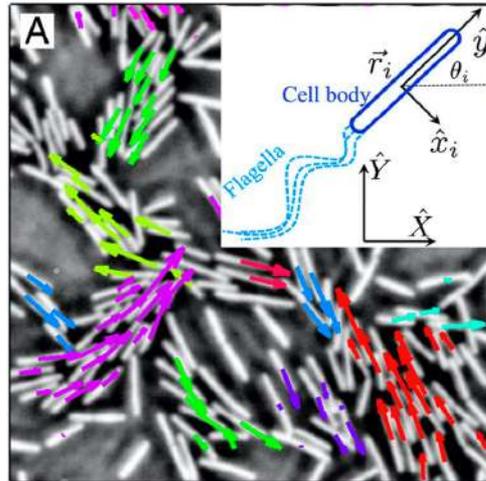
Principio fisico basato sulle proprietà di un metamateriale:  
Reticolo di "pendoli invertiti"  
(cilindri galleggianti ancorati al fondale)



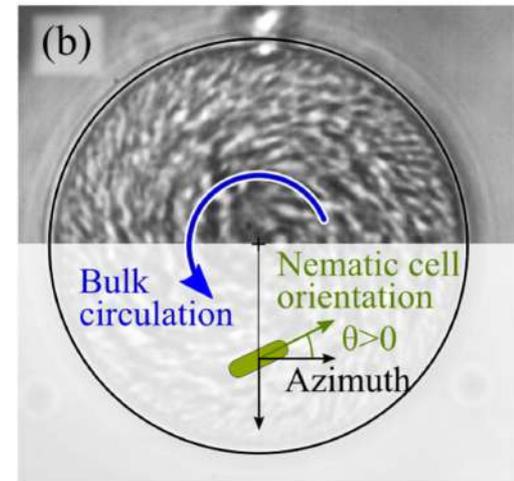
# Nuoto collettivo di microorganismi = Materia attiva

Moto collettivo di soluzioni dense di batteri che nuotano

*Bacillus subtilis*



Picture from Zhang et al., PNAS (2010)

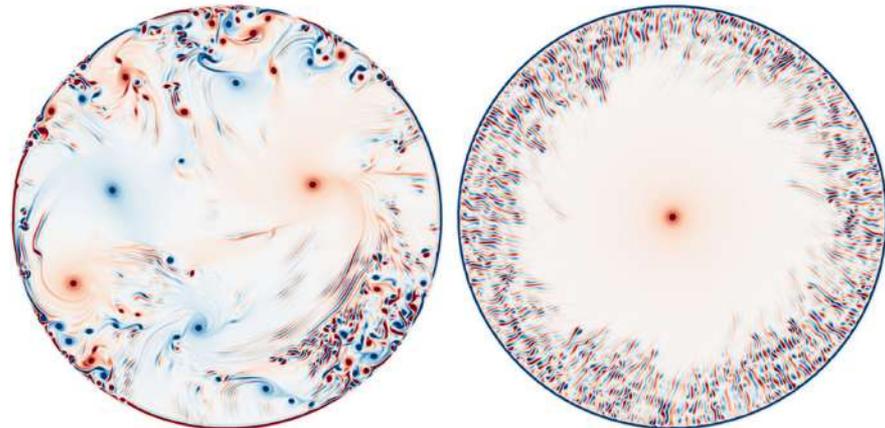


Picture from Woiland et al., PRL (2013)

Simulazioni numeriche di modelli per il campo di velocità medio (es. Toner-Tu-Swift-Hohenberg)

Auto-organizzazione dei nuotatori in vortici giganti

$$\partial_t \mathbf{u} + \lambda \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p - (\alpha + \beta |\mathbf{u}|^2 + \Gamma_2 \nabla^2 + \Gamma_4 \nabla^4) \mathbf{u}.$$

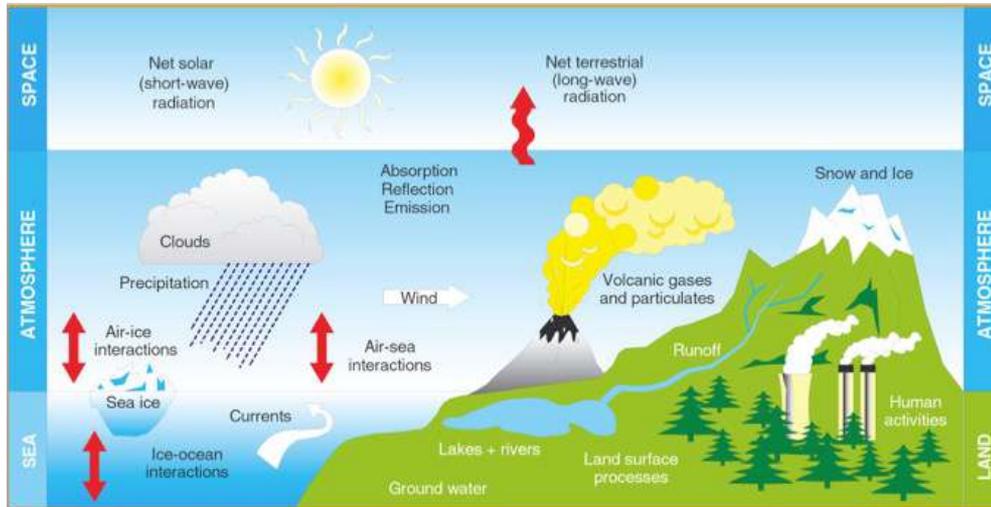


Picture from Puggioni et al., PRE (2022)

# Sistemi complessi per la fisica del clima

Tesi (anche) in collaborazione con ISAC-CNR e IRPI-CNR

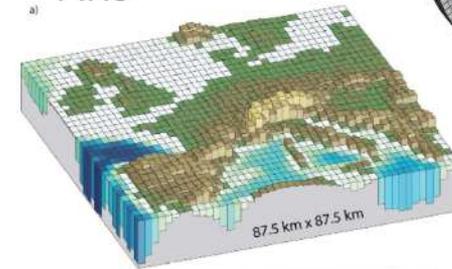
(Elisa Palazzi)



Studio e sviluppo di modelli climatici



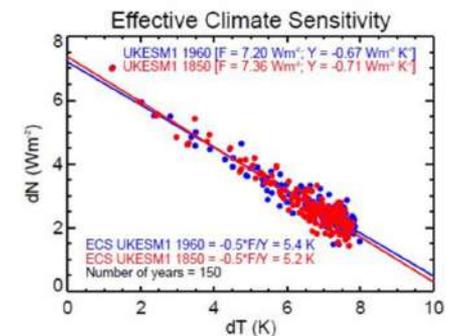
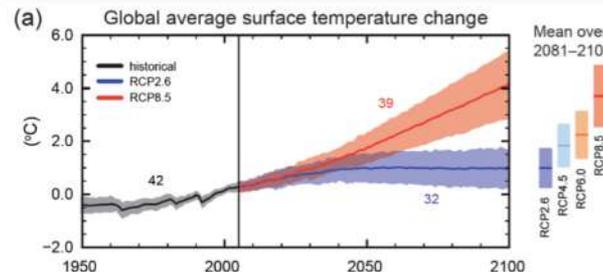
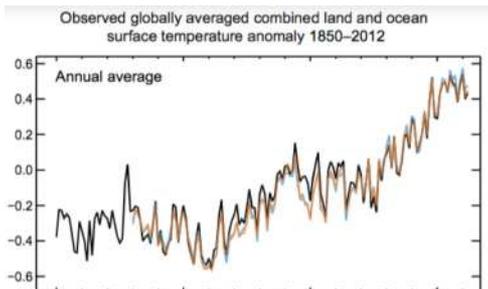
AR5



Cambiamento climatico

Proiezioni climatiche future

Variabilità climatica, forzanti, feedbacks, climate sensitivity



# ***BioPhys***

*Statistical Physics, Complex Systems,  
Biological Physics, Precision Medicine*



# BioPhys collaboration

## **Staff UNITO:**

*Michele Caselle*

*Matteo Osella*

## **Postdoc:**

*Filippo Valle*

## ***PhD Students in Complex Systems for Life Sciences:***

*Silvia Lazzardi (III year)*

*Letizia Pizzini (II year)*

*Federico Milanesio (I year)*

*Leonardo Agasso (I year)*

## ***PhD Student National Program in Artificial Intelligence:***

*Davide Pirovano (II year)*

*Niccolò Cirone (I year)*

# Several collaborators (wet labs, bioinformatics..)



*Laura Cantini*  
*ENS Paris*

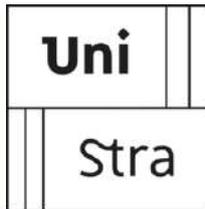


*Enzo Medico*  
*IRCCS Candiolo*



*Daniela Taverna*  
*Francesca Orso*  
*Mol Biotech Center, Torino*

*Marco Cosentino Lagomarsino*  
*IFOM; UniMi*



*Andrea Riba*



*Antonio Scialdone*

**HelmholtzZentrum münchen**  
Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt



*Matteo Cereda*  
*Hugef, Torino*



*Mattia Pelizzola*

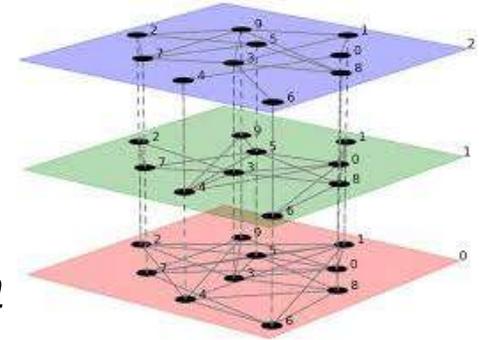


# Research topics

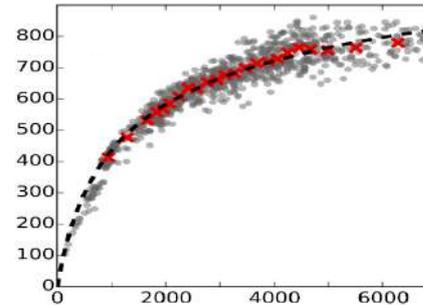
*Different research topics:*

## **Gene regulatory networks**

*Structure and function of recurrent regulatory circuits;  
Integration of different layers of regulation to identify  
disease markers;  
Tissue/cell-type/disease-type from RNA sequencing data*

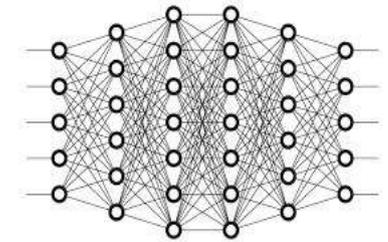


## **Universal Statistical laws in Molecular Biology**



## **Machine Learning**

*Role of data structure and neural network architecture  
for performance*

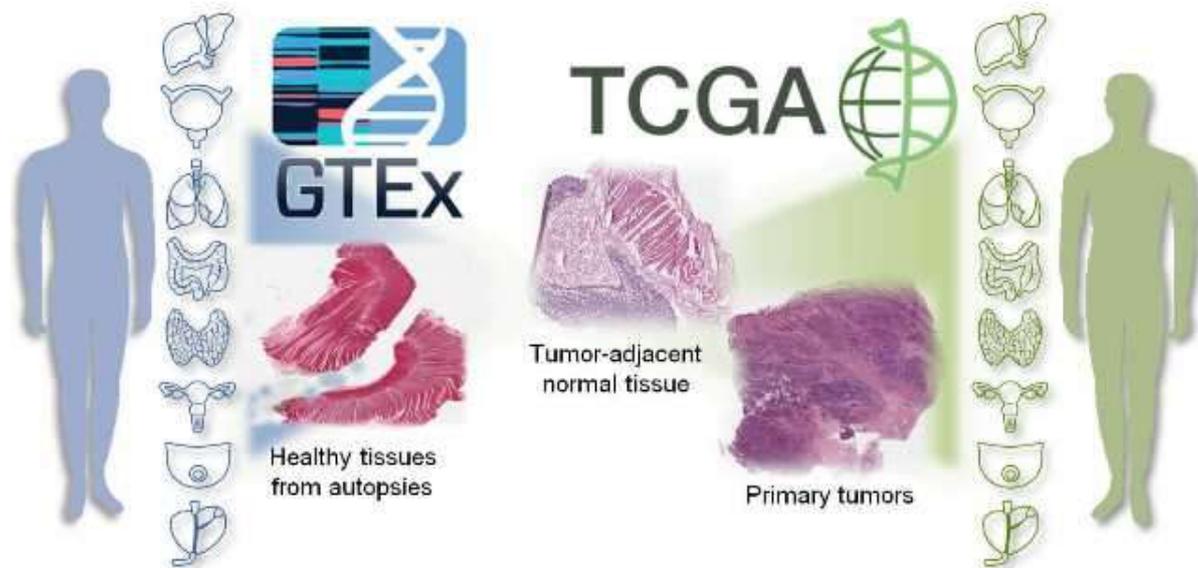


*Common denominator is the application of tools from stat phys and  
stoch process theory to large-scale (Big?) data analysis.*

*Main keyword: “Personalized Medicine”*

*Use of molecular data to fine tune therapeutic protocols*

# ML approach to the classification of expression patterns

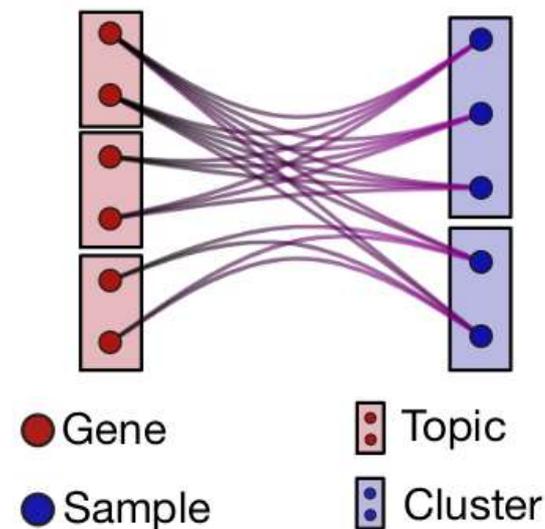


|       |   | samples |    |    |     |    |
|-------|---|---------|----|----|-----|----|
|       |   | P1      | P2 | P3 | P4  | P5 |
| genes | ■ | 100     | 10 | 0  | 36  | 21 |
|       | ■ | 45      | 0  | 6  | 124 | 0  |
|       | ■ | 163     | 6  | 0  | 72  | 0  |
|       | ■ | 43      | 32 | 12 | 0   | 2  |
|       | ■ | 0       | 0  | 0  | 0   | 80 |

Classical questions:

Classify samples (e.g., healthy vs cancer)

Identify marker genes for classification



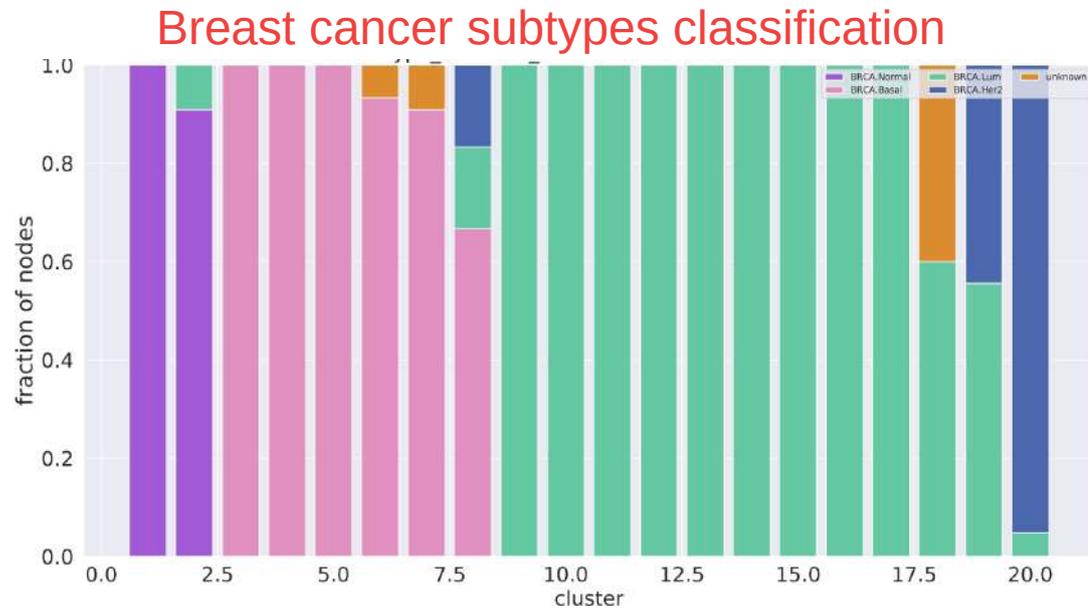
F. Valle, M. Osella and M.Caselle *Cancers* 2020, 12, 3799.

F. Valle, M. Osella and M.Caselle *Cancers* 2022, 14, 1150.

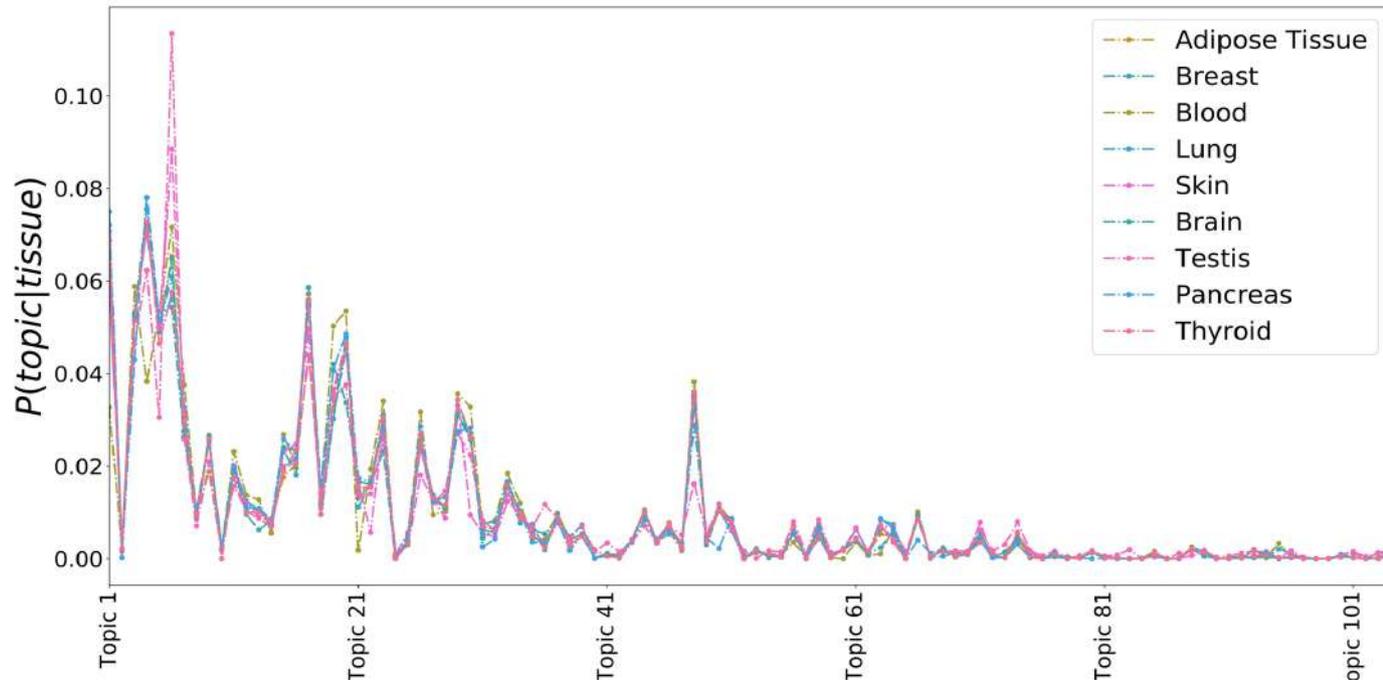




# Application: classification of breast cancer samples

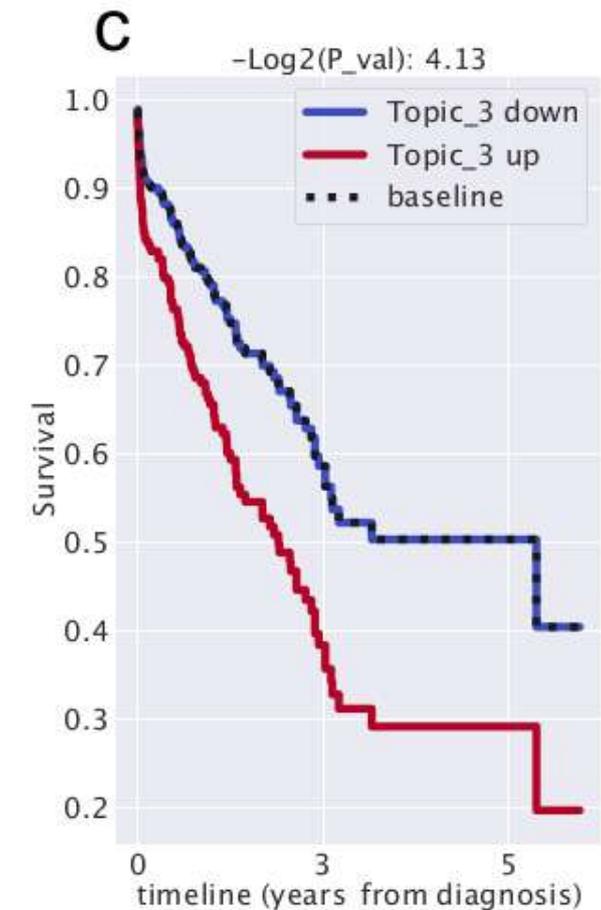
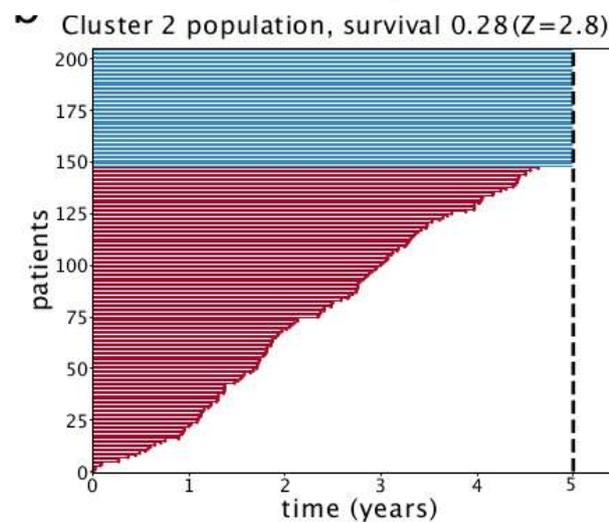
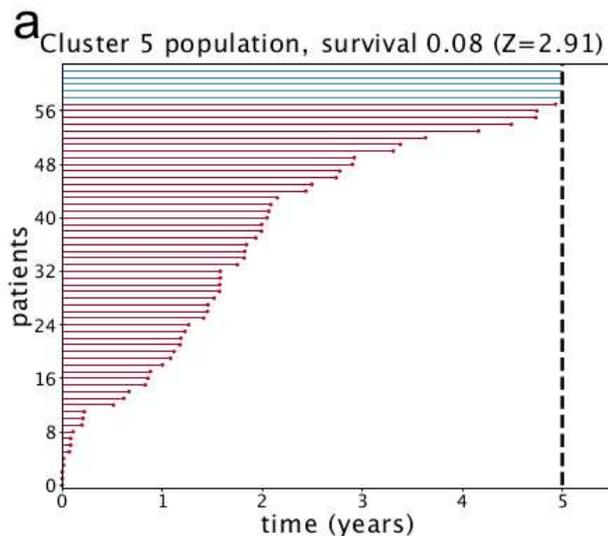
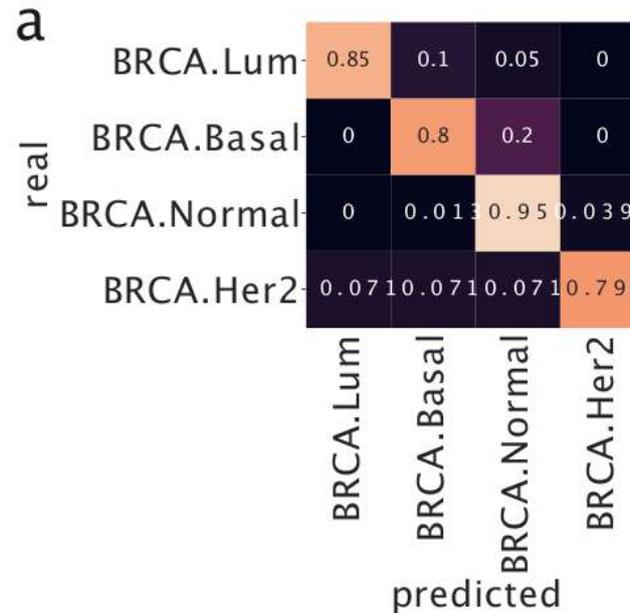


Classification based on global patterns rather than few markers...

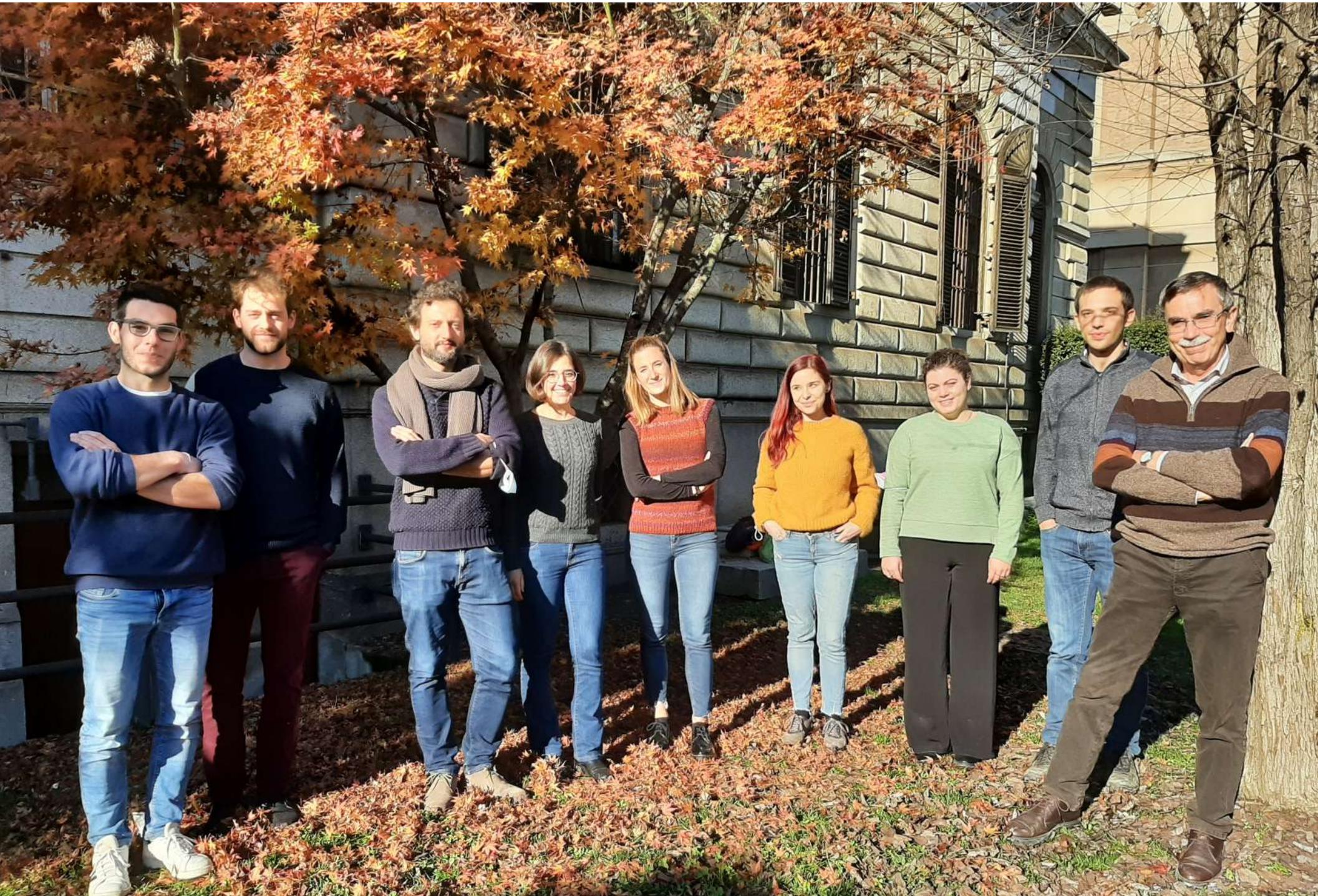


# How can we use these results? Classify new samples, Identify clusters of patients with enhanced survival probability. Select group of marker genes

Framework: a “Precision Medicine” approach to Cancer. From the gene expression pattern of a given patient we may try to predict the survival probability, the risk of cancer insurgence or relapse and then fine tune the therapy .



# BioPhys Group







# Machine Learning & Data Science

## “Core” courses

- *Data Mining (Sanavia, Panisson, Gauvin)*
- *Neural Networks (Osella)*
- *Deep Learning (Osella)*
- *NEW: 12 hours “Tutorato innovativo”*
- *Machine Learning (Fariselli)*

## Combinations

- *FULL MENU: Data Mining + Deep Learning + Machine Learning*
- *HALF MENU: Data Mining + Deep Learning or Machine Learning*
- *THEORY: Neural Networks + Machine Learning*
- *ADVANCED ONLY: Deep Learning + Machine Learning*
- ***NO NEURAL NETWORKS AND DEEP LEARNING!***

# Potentially useful courses...it depends

*Statistics, Probability, Stat Mech, Programming.*

*e.g.,*

- *Algorithms for optimization, inference and learning (Braunstein)*  
**FIS0116 – PROBABILITA' STATISTICA E PROCESSI STOCASTICI**
- *Nonequilibrium statistical mechanics: foundations and applications (Rondoni)*  
**INT0374 – MECCANICA STATISTICA DEL DISEQUILIBRIO: FONDAMENTI E APPLICAZIONI**
- **YOUR FAVORITE FIELD OF APPLICATION (BIO, SOCIAL, CLIMATE, FLUIDS..)**

Laurea magistrale in  
Fisica dei Sistemi Complessi  
Curriculum economico-finanziario

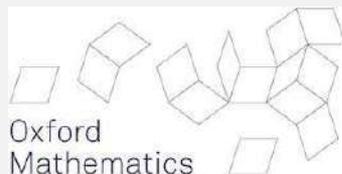
Marco Pangallo

[marco.pangallo@centai.eu](mailto:marco.pangallo@centai.eu)



# Who am I?

Complex systems



JSMF

EMbeDS

Economics and Management  
in the era of Data Science

Bachelor, Master

PhD

Postdoc

2010-2015

2015-2019

2020-2022



CENTAI

Economics



Institute for  
New Economic Thinking  
AT THE OXFORD MARTIN SCHOOL



# Course: complexity economics

- 48 hours, 6 CFU, FIS/02 TAF/B (regola 6)
- Introduction (2h). What is economics? What is complexity economics?
- Microeconomics (24h). Microeconomic behavior, markets, games, heavy-tailed distributions, financial markets, financial networks
- Macroeconomics (22h). National accounting, growth, business cycles, input-output, macroeconomic agent-based models

In general: introduce economic concepts without any prior knowledge, introduce traditional treatment, then complex systems approach

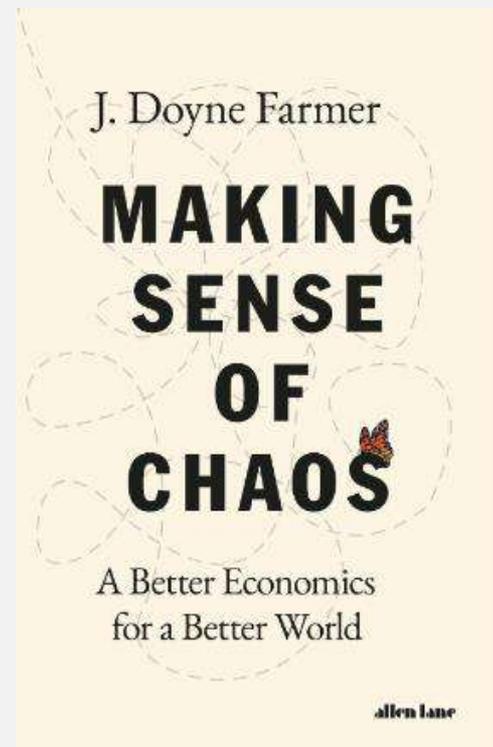
Techniques: dynamical systems, networks, stochastic processes, statistical mechanics

| Track economia  |     |      |          |
|---|-----|------|----------|
| Nome  | CFU | Anno | Semestre |
| <b>Meccanica statistica (regola 1)</b>                                | 6   | 1    | 1        |
| <b>Sistemi dinamici (regola 2)</b>                                    | 6   | 1    | 1        |
| Microeconomics II (SEM0179)   | 6   | 1    | 1        |
| Econometrics: estimation methods and applications (SEM0186A)          | 6   | 1    | 1        |
| <b>Processi stocastici (regola 3)</b>                                 | 6   | 1    | 2        |
| <b>MAS (o altro regola 5 al primo semestre)</b>                       | 6   | 1    | 2        |
| Complessità nei sistemi sociali                                       | 6   | 1    | 2        |
| Elementi di teoria dei giochi e delle reti                            | 6   | 1    | 2        |
| <b>Deep learning (o altro regola 9)</b>                               | 6   | 1    | 2        |
| <b>Complexity economics (regola 6)</b>                                | 6   | 1    | 2        |
| <b>Metodi matematici (regola 6)</b>                                   | 6   | 2    | 1        |
| <b>Onde non lineari e turbolenza o altro regola 4</b>                 | 6   | 2    | 1        |
| Uno a scelta tra (se si sono fatti 5 corsi nel sem II del primo anno) | 6   |      |          |
| Macroeconomics: business cycles                                       |     | 2    | 1        |
| Global economic scenarios   |     | 2    | 1        |
| Topics in applied econ  |     | 2    | 1        |
| Labor econ II   |     | 2    | 1        |
|   | 78  |      |          |

| Track finanza/assicurazioni   |     |      |          |
|---|-----|------|----------|
| Nome  | CFU | Anno | Semestre |
| <b>Meccanica statistica (regola 1)</b>                                | 6   | 1    | 1        |
| <b>Sistemi dinamici (regola 2)</b>                                    | 6   | 1    | 1        |
| Matematica Finanziaria e Attuariale                                   | 12  | 1    | 1        |
| <b>Processi stocastici (regola 3)</b>                                 | 6   | 1    | 2        |
| <b>MAS (o altro regola 5 al primo semestre)</b>                       | 6   | 1    | 2        |
| <b>Deep learning (o altro regola 9)</b>                               | 6   | 1    | 2        |
| Uno tra:  | 6   |      |          |
| Elementi di teoria dei giochi e delle reti                            |     | 1    | 2        |
| Complessità nei sistemi sociali                                       |     | 1    | 2        |
| Asset pricing and portfolio choice                                    | 9   | 1    | 2        |
| <b>Complexity economics (regola 6)</b>                                | 6   | 1    | 2        |
| <b>Metodi matematici (regola 6)</b>                                   | 6   | 2    | 1        |
| <b>Onde non lineari e turbolenza o altro regola 4</b>                 | 6   | 2    | 1        |
| Uno a scelta tra (se si sono fatti 5 corsi nel sem II del primo anno) | 6   |      |          |
| Financial econometrics  |     | 2    | 1        |
| Derivatives   |     | 2    | 1        |
| Sustainable finance   |     | 2    | 1        |
| Fixed income  |     | 2    | 1        |
|   | 81  |      |          |

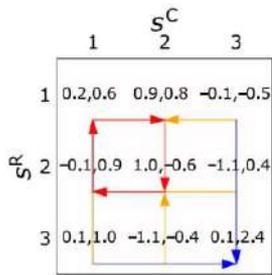
# Why should I study complexity in economics/finance?

- Economics is at the core of some of the key challenges of the 21st century: e.g. automation, inequality, climate change. Need better models to address them.
- Economics is an incredibly interesting complex system that still requires lots of theory to understand how macro patterns emerge from micro behavior

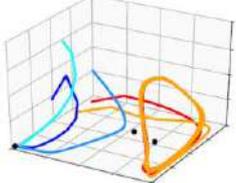


# Some examples of my research

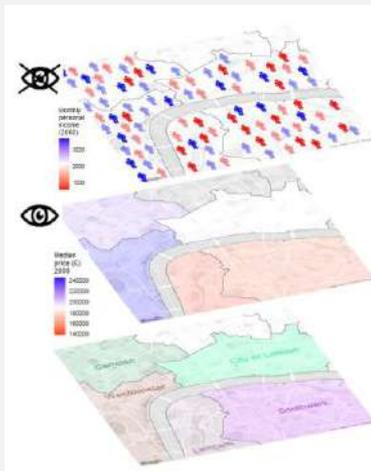
## Theory of complexity economics



### Reinforcement learning

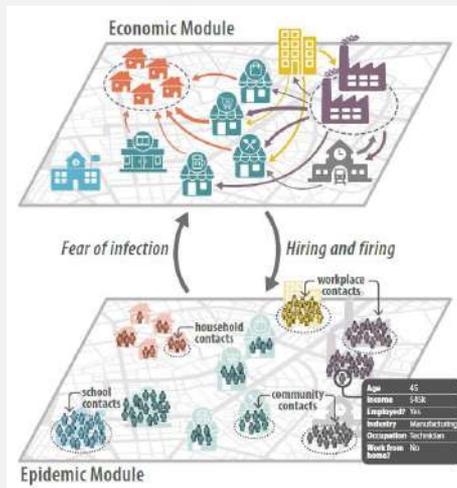


"Best reply structure and equilibrium convergence in generic games." *Science Advances* 5.2 (2019): eaat1328.

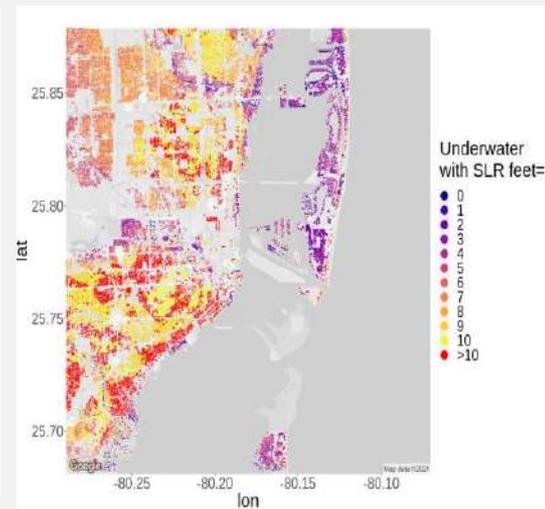


"On learning agent-based models from data." *Scientific Reports* (2023)

## Applications of complexity economics

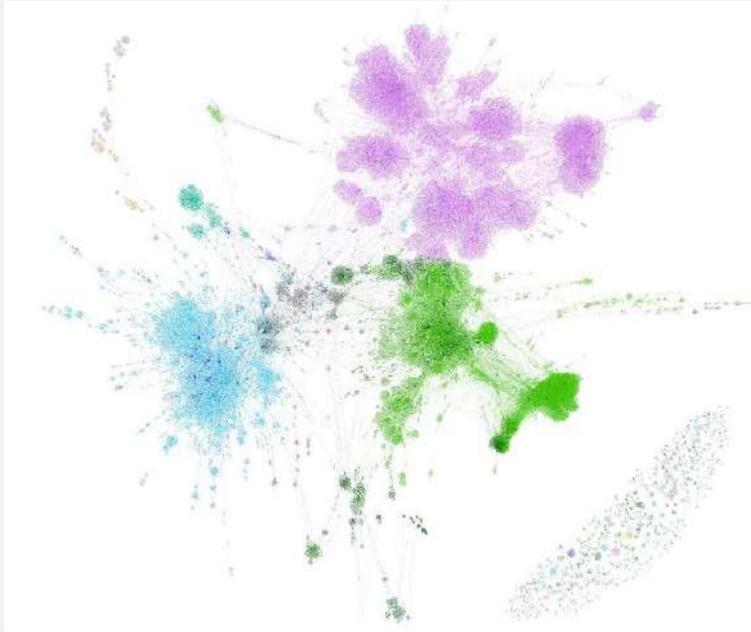


"The unequal effects of the health-economy tradeoff during the COVID-19 pandemic." *Nature Human Behavior* (2023)

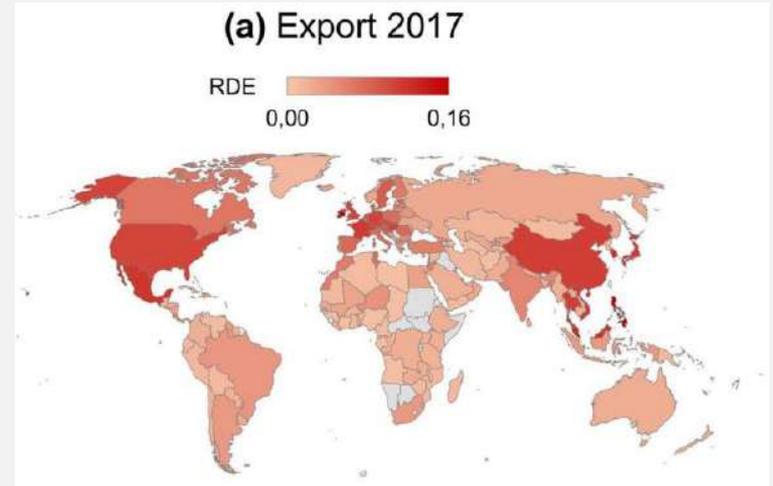


"Climate change attitudes in a data-driven Agent-Based Model of the housing market." *In preparation* (2023).

# Other complexity economics research @CENTAI



Mattsson, C. E., Criscione, T., & Takes, F. W. (2023). Circulation of a digital community currency. *Scientific Reports*, 13(1), 5864.

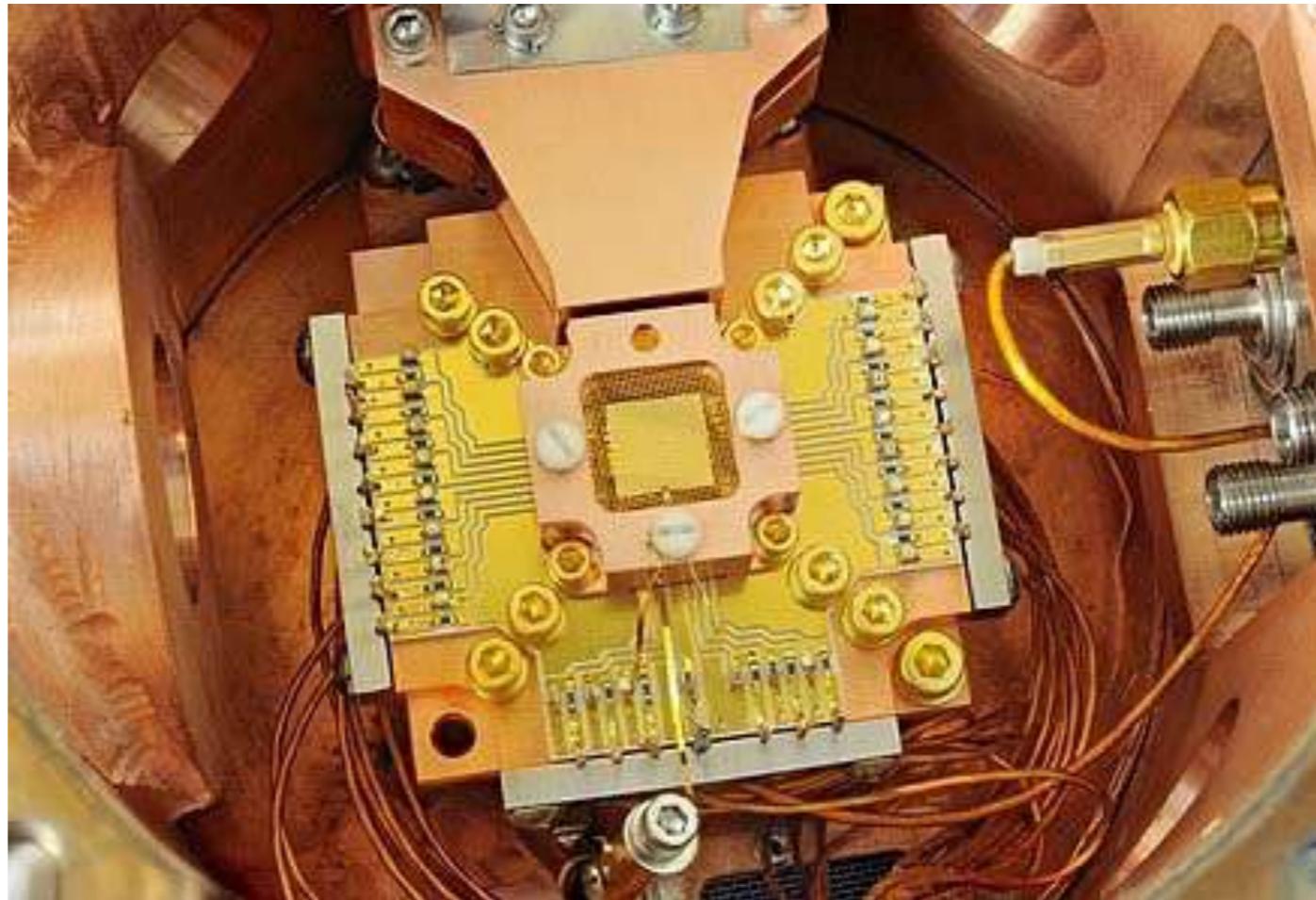


Costantini, L., Laio, F., Ridolfi, L., & Sciarra, C. (2023). An R&D perspective on international trade and sustainable development. *Scientific Reports*, 13(1), 8038.

# What do complexity economists do?

- Economist with the quantitative skills of a physicist! Very attractive for private sector
- Jobs in institutions such as central banks, OECD, EU, IMF, World Bank etc.
- Jobs in academia: exciting research field, with the usual challenges of interdisciplinarity but more and more opportunities ahead

# Dal bit al quantum bit



*Indirizzo di computazione e informazione quantistica*  
Laurea interateneo in Fisica dei sistemi complessi

Dagli anni 1950 in poi, la **velocità** dei calcolatori **raddoppia** e le **dimensioni** dei loro componenti **si dimezzano** circa ogni due anni.

Le **dimensioni** medie del sistema fisico impiegato per immagazzinare un' unità di informazione sono passate:

dai **centimetri** delle valvole usate nei primi calcolatori  
ai ~~**micrometri** ( $10^{-6}$  metri)~~ dei moderni componenti circuitali.  
**nanometri** ( $10^{-9}$  m) !



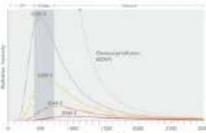
*Ci si aspetta che questa progressione termini intorno al 2020*, a causa degli *effetti quantistici* che cominciano a farsi sentire su microcomponenti di dimensioni appena superiori a quelle atomiche, cioè dell'ordine del *nanometro* ( $10^{-9}$  metri).

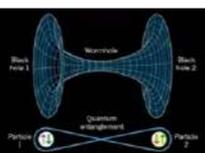
D'altra parte proprio gli *effetti quantistici* possono essere sfruttati per lo sviluppo di *algoritmi esponenzialmente più efficienti* di quelli realizzabili su calcolatori ordinari.

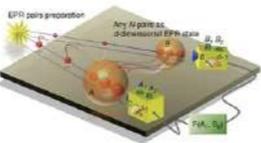
I *calcolatori quantistici* implementano questi algoritmi, controllando e manipolando gli stati quantistici delle microcomponenti.

Attualmente ne esistono ~~solo alcuni~~ *prototipi*, con un piccolo numero di componenti (**quantum bits**)

## Theoretical Foundations

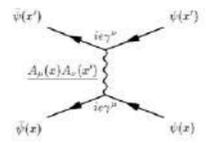
1900 **Planck's Quantum Hypothesis**  


1935 **The EPR Paradox**  


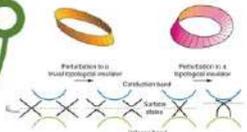
1964 **Bell's Inequality**  


1970 **Birth of Quantum Information Theory**  

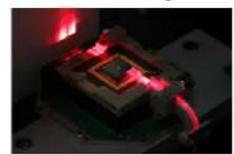

1980 **First Conference on Physics and Computation**  


1981 **Feynman's Quantum Computer Proposal**  


## Emergence

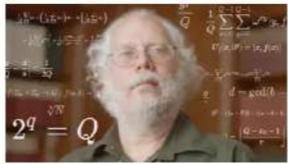
1982 **Discovery of Topological Quantum order**  


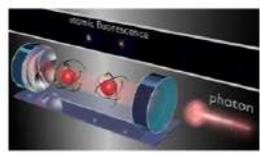
## Development

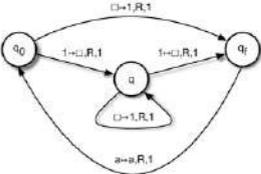
2000 **First Trap Ion Quantum Computer**  


1996 **DiVincenzo Criteria For Quantum Computer**  


1994 **Grover's Algorithm**  


1994 **Shor's Algorithm**  


1985 **Deutsch's Universal Quantum Computer**  


1984 **Quantum Cryptography (BB84 Protocol) By IBM**  


## Race

2004 **Circuit QED Demo.**



2007 **The Transmon Superconducting Qubit**  


2007 **D-Wave One Quantum Annealer**  


2013 **Rigetti Computing**  


2016 **Microsoft Station Q**  

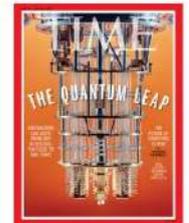

2019 **Google Quantum Supremacy**  

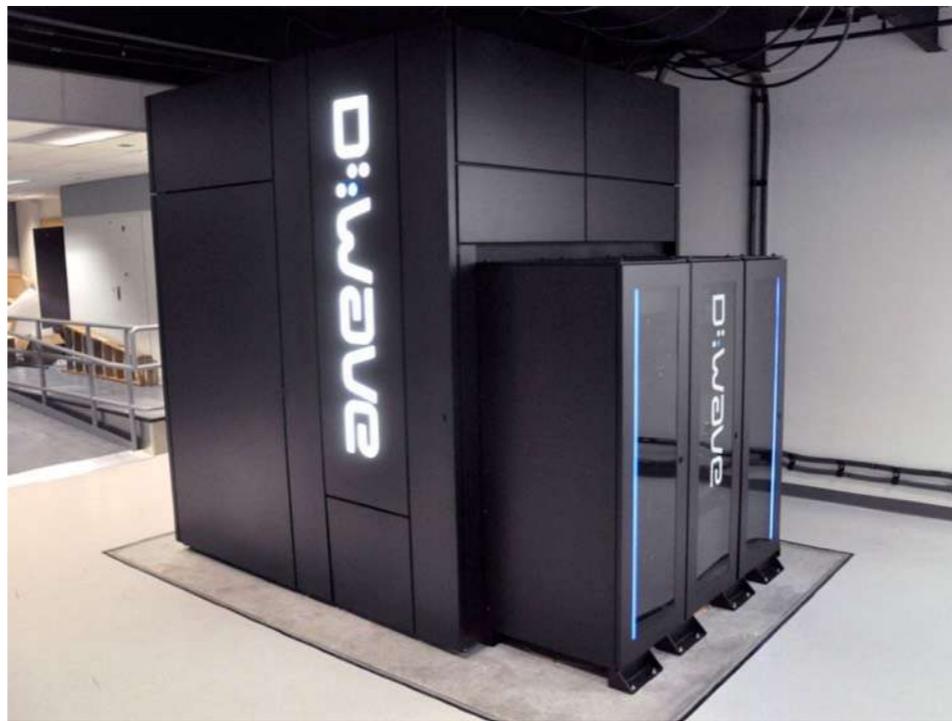

2020 **IBM Quantum Roadmap**  


2021 **Company Booming**  


2022 **Quantumpedia's Founding**  

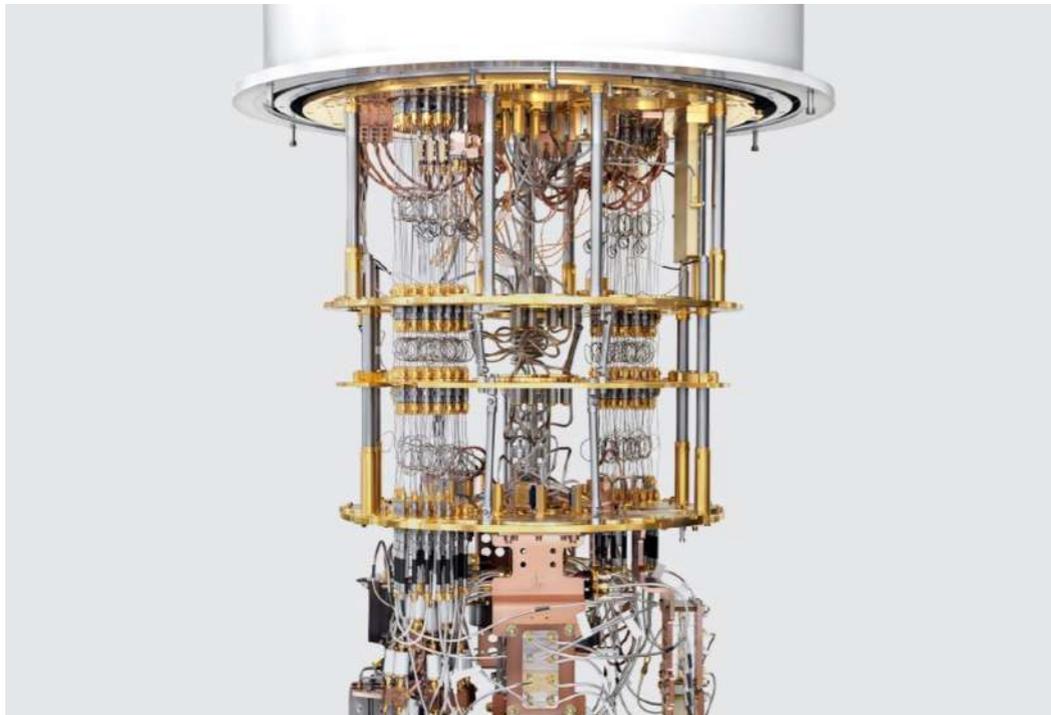

## Ongoing Advancements



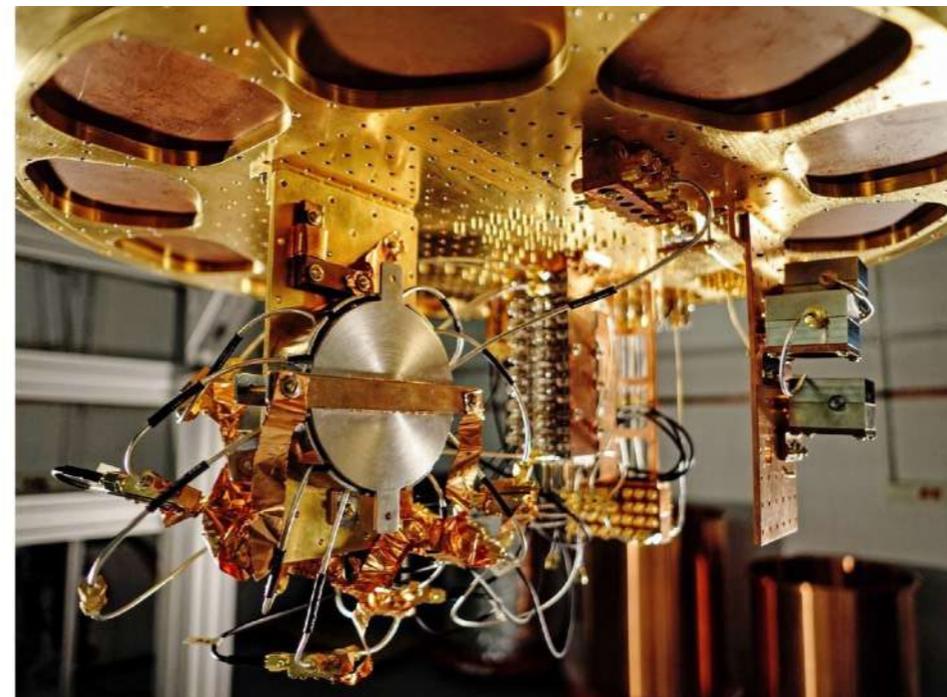


microcorrenti in  
anelli superconduttori

D-WAVE\*



Rigetti

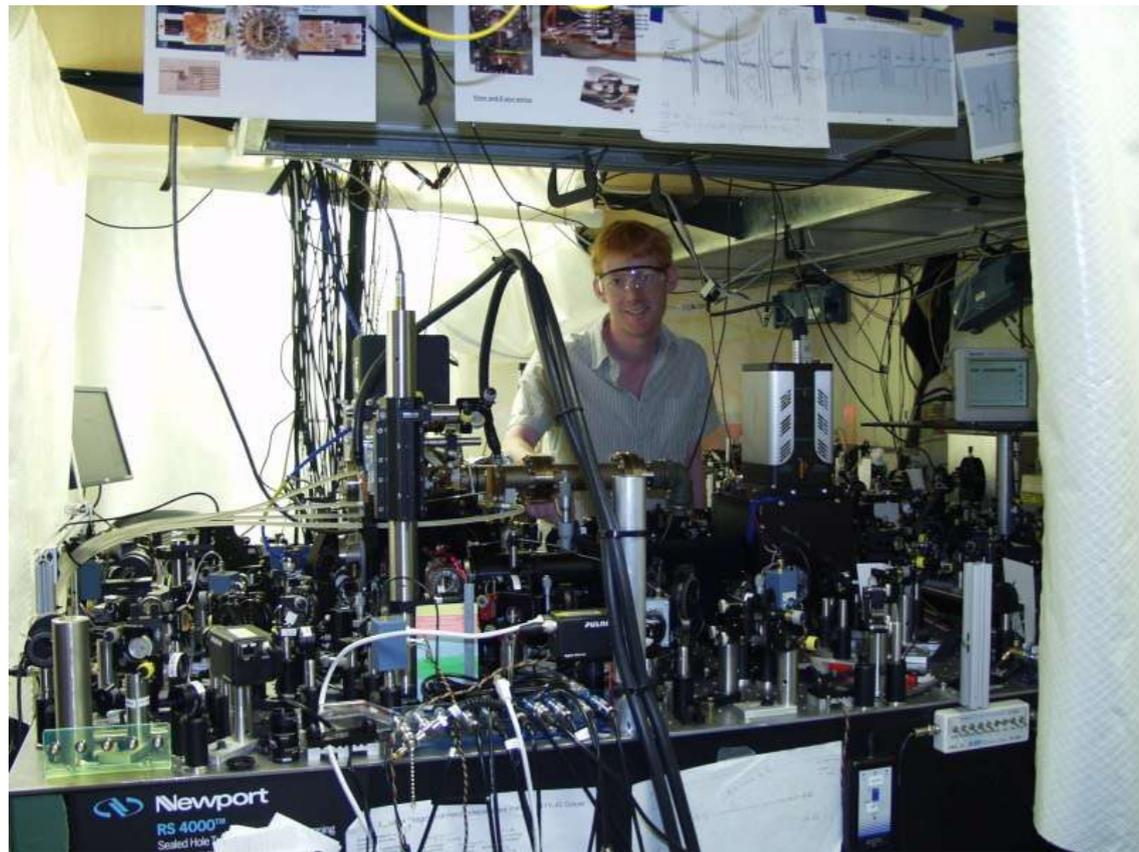


Google

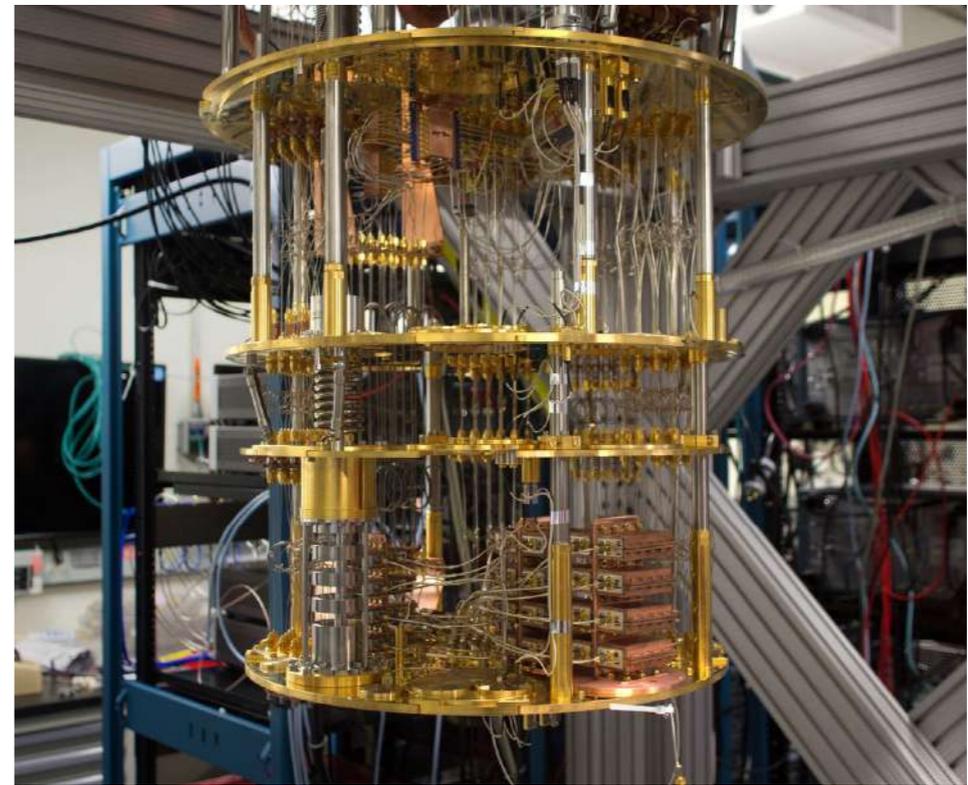
Applicazioni: medicina (diagnostica)  
chimica      finanza  
energia      meteorologia  
logistica    reti neurali, AI

simulazione sistemi complessi  
crittografia quantistica  
comunicazione quantistica (quantum internet)  
metrologia

ioni intrappolati



ION-Q



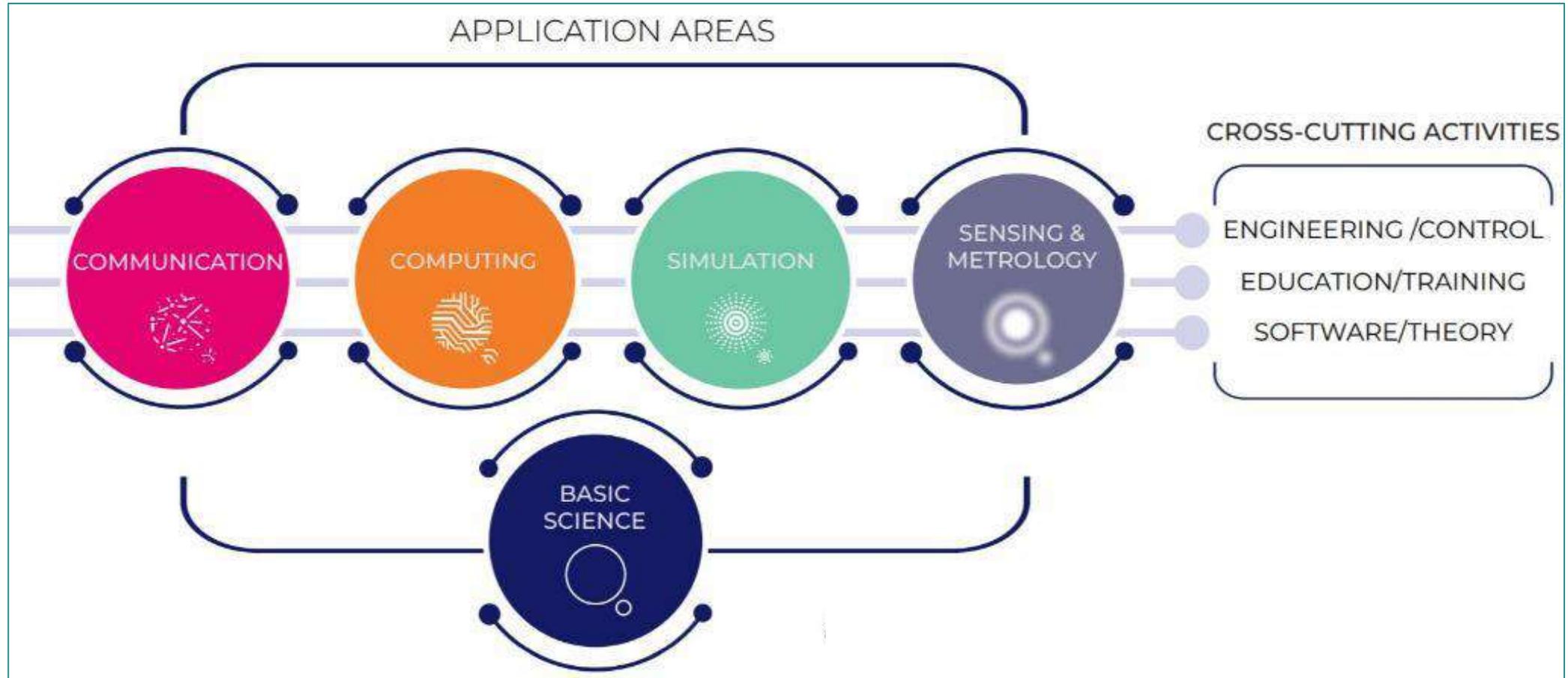
IBM quantum experience\*

\* Accessibili in rete

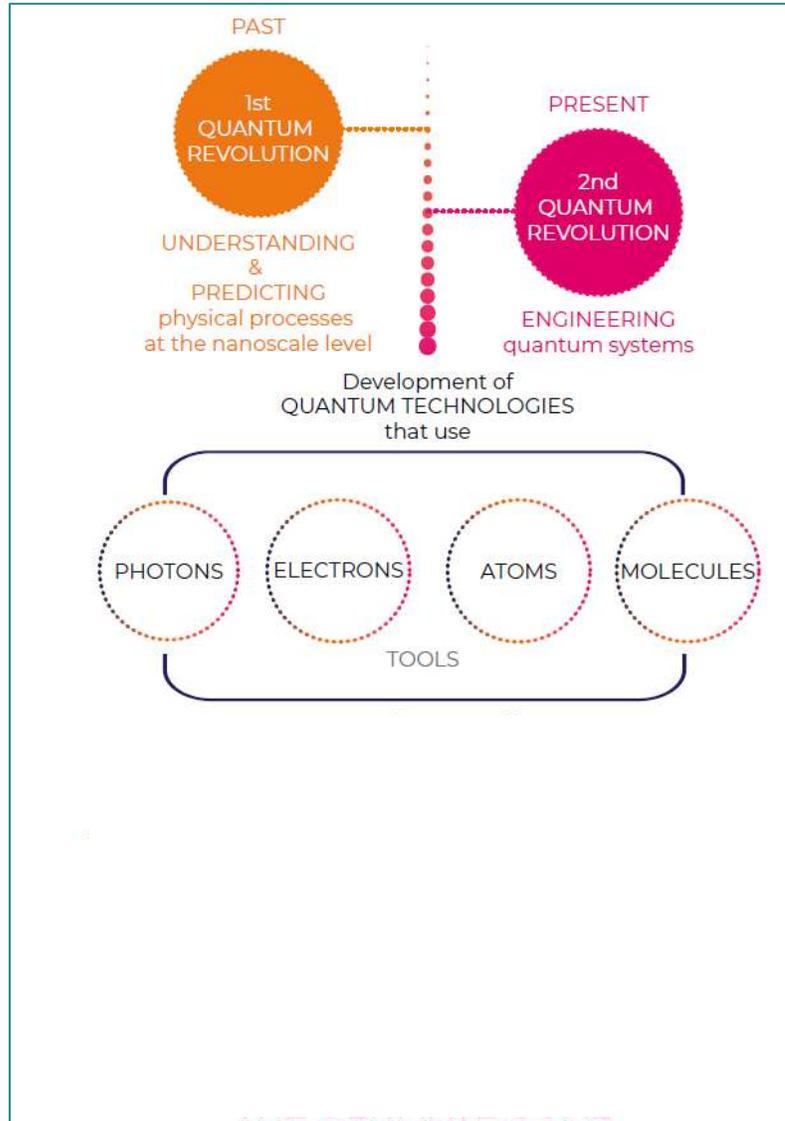
atomi di Itterbio  
160 qubit fisici  
79 qubit logici  
gate fidelity 98%

| Qubit Type                       | Pros/Cons  | Select Players  |
|----------------------------------|--|---|
| <b>Superconducting</b>           | <b>Pros:</b> High gate speeds and fidelities. Can leverage standard lithographic processes. Among first qubit modalities so has a head start.                                  |    |
|                                  | <b>Cons:</b> Requires cryogenic cooling; short coherence times; microwave interconnect frequencies still not well understood.  |   |
| <b>Trapped Ions</b>              | <b>Pros:</b> Extremely high gate fidelities and long coherence times. Extreme cryogenic cooling not required. Ions are perfect and consistent.                                 |    |
|                                  | <b>Cons:</b> Slow gate times/operations and low connectivity between qubits. Lasers hard to align and scale. Ultra-high vacuum required. Ion charges may restrict scalability. |   |
| <b>Photonics</b>                 | <b>Pros:</b> Extremely fast gate speeds and promising fidelities. No cryogenics or vacuums required. Small overall footprint. Can leverage existing CMOS fabs.                 |   |
|                                  | <b>Cons:</b> Noise from photon loss; each program requires its own chip. Photons don't naturally interact so 2Q gate challenges.   |   |
| <b>Neutral Atoms</b>             | <b>Pros:</b> Long coherence times. Atoms are perfect and consistent. Strong connectivity, including more than 2Q. External cryogenics not required.                            |  |
|                                  | <b>Cons:</b> Requires ultra-high vacuums. Laser scaling challenging.   |   |
| <b>Silicon Spin/Quantum Dots</b> | <b>Pros:</b> Leverages existing semiconductor technology. Strong gate fidelities and speeds.   |  |
|                                  | <b>Cons:</b> Requires cryogenics. Only a few entangled gates to-date with low coherence times. Interference/cross-talk challenges.   |   |

# The Quantum Technologies Flagship



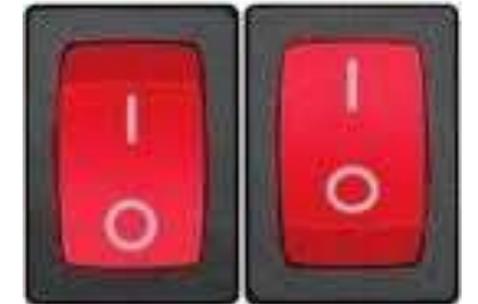
# The second quantum revolution



*The second quantum revolution is all about **controlling individual quantum systems**, such as charged molecules, to a greater extent than before, enabling even more powerful applications of quantum information.* (NIST)

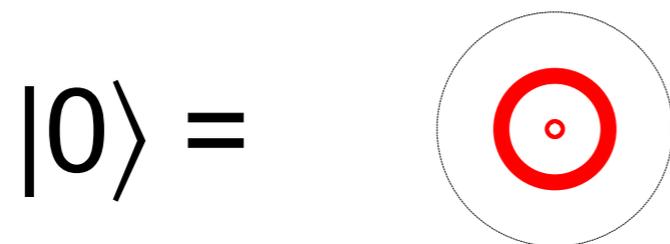
# SISTEMA CLASSICO A DUE STATI = BIT

Esempio: un **interruttore**  
può trovarsi in uno di *2 possibili stati*



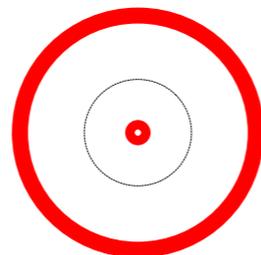
# SISTEMA MICROSCOPICO A DUE STATI DI BASE: QUANTUM BIT (QUBIT)

Esempio: un **atomo**. Può trovarsi negli stati



elettrone nell' orbita bassa:  
STATO FONDAMENTALE

oppure  
 $|1\rangle =$



elettrone nell' orbita alta:  
STATO ECCITATO

# STATI SOVRAPPOSTI

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$$

Potendo assumere tutti gli stati  $|\psi\rangle$ , intermedi tra  $|0\rangle$  e  $|1\rangle$ , il *qubit* è molto più ricco di informazione di un registro binario classico (che può solo assumere gli stati 0 e 1).

# STATI INTRECCIATI (ENTANGLED)

- NON possono scriversi come **PRODOTTO**:

$$|0,0\rangle = |0\rangle |0\rangle \quad \text{STATO SEPARABILE}$$

- Esempio:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0,0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1,1\rangle \quad \text{STATO INTRECCIATO}$$



Correlazioni tra le misure di Alice e Bob !

# Introduzione alla computazione quantistica

## L. Castellani (UNIUPO)

(6 CFU, anno 1, semestre 1)

### Introduzione

- Quantum bits, sfera di Bloch, qubits multipli
- Porte a singolo qubit e porte a qubits multipli
- Circuiti quantistici
- Stati di Bell
- Algoritmi quantistici

### Fondamenti di Meccanica Quantistica

- Esperimenti e postulati della teoria
- Formalismo: algebra lineare
- Operatore densità
- Sistemi composti e traccia parziale
- EPR e stati intrecciati
- Disuguaglianza di Bell

### Crittografia a chiave pubblica

- il protocollo RSA
- Crittografia quantistica
- Teletrasporto

### Circuiti quantistici

- Porte universali per la computazione quantistica

### Algoritmi quantistici

- Algoritmo di Deutsch-Josza
- Trasformata di Fourier Quantistica
- Algoritmo di Shor per la fattorizzazione di numeri interi
- Algoritmo di Grover per la ricerca/conteggio di stati quantistici

# Introduzione all'informazione quantistica

## A. Carlini (UNITO)

(6 CFU, anno 1, semestre 2)

### Rumore nelle operazioni quantistiche

- sistemi aperti, operazioni quantistiche e rappresentazione di Kraus
- canali di qubit flip, phase flip, depolarizzazione, smorzamento di ampiezza e fase
- "master equations" per sistemi aperti

### Distanze per stati ed operatori quantistici

- fedelta' e fedelta' di intreccio

### Correzione degli errori quantistici

- discretizzazione degli errori (indipendenti)
- codici di Shor, codici stabilizzatori, teorema di Gottesman-Knill
- circuiti quantistici per la codifica, decodifica e correzione degli errori
- computazione quantistica "fault tolerant"

### Informazione classica e quantistica

- entropia di Shannon, entropia relativa e condizionale e proprieta' fondamentali
- entropia di von Neumann, entropia relativa quantistica e proprieta' fondamentali
- informazione accessibile e limite di Holevo
- compressione dell'informazione classica (Shannon) e quantistica (Schumacher)
- canali di comunicazione classici e quantistici con rumore classico o quantistico

### Evoluzione ottimale di sistemi quantistici

- principi variazionali, metodo di Pontryagin
- algoritmo di Grover come geodetica nello spazio di Hilbert degli stati quantistici

# Tecnologie Quantistiche

## M.Genovese (INRIM)

(6 CFU, anno 1, semestre 2)

### Introduzione all'ottica quantistica

- Quantizzazione del campo elettromagnetico
- Fotorivelazione
- Stati coerenti
- Stati squeezed
- Entanglement
- Fenomeni di ottica non-lineare, PDC
- Misura disequaglianze di Bell

### Comunicazione quantistica

- Nuovi protocolli di misura: dense coding, teletrasporto
- Introduzione alla QKD sperimentale
- QKD in fibra ottica
- Open space QKD
- Nuovi protocolli e prospettive

### Metrologia quantistica

- Cramer Rao bound, classico e quantistico
- Helstrom bound
- Interferometria quantistica
- Protocolli di metrologia quantistica

### Imaging quantistico

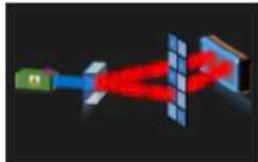
- Introduzione all'imaging quantistico
- Ghost imaging
- Sub shot noise imaging (in assorbimento e in fase)
- Quantum radar/lidar
- "Undetected photon imaging"
- Metodi di super-risoluzione

# Quantum Optics



## Color Centers in Diamond

We study and exploit the properties of color centers in diamond for single-photon metrology & sensing.



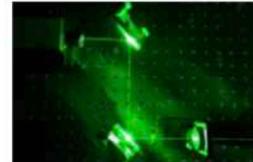
## Quantum Imaging and Sensing

Quantum imaging and sensing aim at exploiting entanglement and quantum correlation to step over classical limitation in sensitivity and resolution.



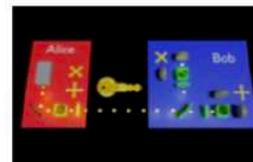
## Measurement Paradigms in Quantum Mechanics

Development and application of new paradigms of measurement beyond the fundamental limits of standard quantum measurements.



## Foundations of Quantum Mechanics

An understanding of the deep meaning of reality as basic stage for designing new technologies.



## Quantum Cryptography

A strategic technology that allows two distant parties to share encryption keys with an unprecedented level of security based on the laws of quantum mechanics.



## Quantum Photonics Metrology

Dedicated metrological techniques should be developed to support the standardisation and the market success of quantum technologies.

# Collaborazioni (M.S. thesis - past and present):

