

Buongiorno! Eccoci al secondo numero della Newsletter ISC! Questa Newsletter ha l'intento di offrire uno spazio ai ricercatori e al personale amministrativo per comunicare le proprie idee e progetti, allo scopo di dare massima diffusione a tutte le opportunità che il mondo della ricerca ed il Consiglio Nazionale delle Ricerche, in particolare, offrono. Un saluto dal gruppo comunicazione dell'Istituto dei Sistemi Complessi e dal Direttore. Buona Ricerca!

Come l'adattività migliora la codifica neurale

Simona Olmi, simona.olmi@cnr.it

Uno dei principali obiettivi delle neuroscienze, della fisica statistica e della dinamica non lineare è comprendere come le funzioni del cervello derivino dalla dinamica collettiva dei circuiti corticali. I fenomeni collettivi spesso riportati includono oscillazioni, dinamiche sincrone o ritmi più generali, caratteristici di vari circuiti neurali. Le oscillazioni dell'attività neurale sono onnipresenti nel cervello in molte bande di frequenza e si è sostenuto che svolgano un ruolo funzionale nell'elaborazione corticale. In particolare, l'informazione è codificata nella risposta della popolazione e quindi può essere catturata attraverso misure macroscopiche dell'attività della rete. Il comportamento collettivo è particolarmente rilevante dato che le attuali tecniche di misurazione cerebrale, come l'EEG o la fMRI, forniscono dati mediati sull'attività di un gran numero di neuroni.

Finora l'analisi dei circuiti neurali spiking è stata affrontata principalmente attraverso simulazioni numeriche, con limitazioni nel numero massimo di neuroni accessibili a causa delle risorse numeriche disponibili. In alternativa, i ricercatori hanno formulato una rappresentazione efficace del campo medio della dinamica neurale a livello di popolazioni, in termini di modelli di massa neurale. Tuttavia, metodi esatti sviluppati recentemente consentono di riscrivere la dinamica di reti di oscillatori di fase completamente accoppiati in termini di poche variabili collettive nel limite termodinamico che rappresentano la frequenza di sparo e il potenziale di membrana medio delle popolazioni neuronali o il loro livello di sincronizzazione. Questa metodologia è impiegata per studiare un'attività cerebrale su larga scala biologicamente realistica, come connettomi strutturali di animali o umani. Abbiamo sviluppato modelli biologicamente realistici aggiungendo eterogeneità nella connettività [1], fluttuazioni estrinseche ed endogene [2], plasticità a breve

termine [3] e plasticità dipendente dal tempo di picco [4], per testare ipotesi cliniche di malattie neurodegenerative [5, 6].

Per maggiori informazioni: www.firenze-neuro.org.

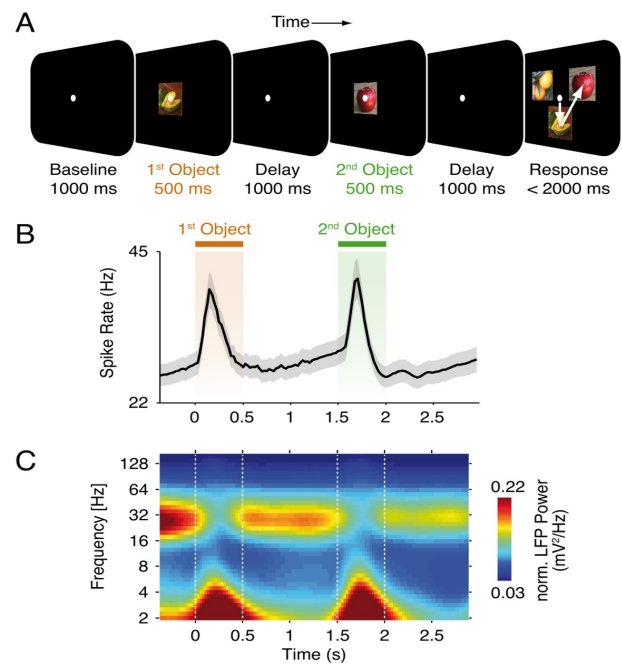


Figura 1: A) Compito visivo di memoria a breve termine con 2 oggetti. B) Corso temporale dei tassi medi di sparo. C) Spettro di potenza del local field potential

Riferimenti bibliografici

- [1] Matteo di Volo and Alessandro Torcini. Transition from asynchronous to oscillatory dynamics in balanced spiking networks with instantaneous synapses. *Phys. Rev. Lett.*, 121:128301, Sep 2018.
- [2] Denis S. Goldobin, Matteo di Volo, and Alessandro Torcini. Reduction methodology for fluctuation driven population dynamics. *Phys. Rev. Lett.*, 127:038301, Jul 2021.
- [3] Halgurd Taher, Alessandro Torcini, and Simona Olmi. Exact neural mass model

for synaptic-based working memory. *PLOS Computational Biology*, 16(12):1–42, 12 2020.

- [4] Alberto Ferrara, David Angulo-Garcia, Alessandro Torcini, and Simona Olmi. Population spiking and bursting in next-generation neural masses with spike-frequency adaptation. *Phys. Rev. E*, 107:024311, Feb 2023.
- [5] Moritz Gerster, Halgurd Taher, AntonÅn Å koch, Jaroslav Hlinka, Maxime Guye, Fabrice Bartolomei, Viktor Jirsa, Anna Zakharova, and Simona Olmi. Patient-specific network connectivity combined with a next generation neural mass model to test clinical hypothesis of seizure propagation. *Frontiers in Systems Neuroscience*, Volume 15 - 2021, 2021.
- [6] Simona Olmi, Spase Petkoski, Maxime Guye, Fabrice Bartolomei, and Viktor Jirsa. Controlling seizure propagation in large-scale brain networks. *PLOS Computational Biology*, 15(2):1–23, 02 2019.

Dinamiche interne riproducibili

Stefano Iubini, stefano.iubini@cnr.it

La risposta di un sistema dinamico nonlineare a un segnale forzante caotico è tipicamente anch'essa una dinamica caotica. Tuttavia si possono incontrare due situazioni distinte: i) il sistema segue fedelmente (in modo riproducibile) la forzante esterna, pur essendo la forzante e la risposta entrambe irregolari; ii) il sistema produce una risposta irregolare ma irripoducibile: una replica del sistema anche solo impercettibilmente perturbata e sottoposta al medesimo segnale evolve in maniera completamente diversa.

In un sistema complesso, ciascun costituente microscopico evolve sottoposto all'influenza di tutti gli altri costituenti, molto spesso schematizzabile come un segnale altamente irregolare o addirittura caotico. Tale evoluzione è riproducibile o non riproducibile? In modelli di reti di oscillatori nonlineari si sono recentemente individuate alcune condizioni per osservare dinamiche riproducibili o non riproducibili di singoli costituenti o gruppi di essi. A differenza dell'esempio iniziale, riconducibile ad un fenomeno di sincronizzazione tra oscillatore e forzante esterna, in questo caso non vi è nessuna forzante esterna.

Gruppi sufficientemente numerosi di costituenti con dinamiche individuali riproducibili generano irrimediabilmente delle dinamiche collettive non riproducibili. [1]

Riferimenti bibliografici

- [1] Tommaso Matteuzzi, Franco Bagnoli, Michele Baia, Stefano Iubini, and Arkady Pikovsky. Internal reliability and antireliability in dynamical networks. *Physical Review E*, 112(4):044216, October 2025.

Dinamica di Lax: quasi-integrabilità, solitoni, termalizzazione

Stefano Lepri, stefano.lepri@cnr.it

La soluzione di un problema fisico procede identificando una parte risolvibile e studiando gli effetti delle perturbazioni. Per sistemi non lineari dove la parte risolvibile è descritta da un'Hamiltoniana integrabile classica o quantistica, si può, con vari gradi di difficoltà matematica, separare i gradi di libertà indipendenti (le quasiparticelle) e analizzare le loro interazioni usando, per esempio, la teoria delle perturbazioni. Nei

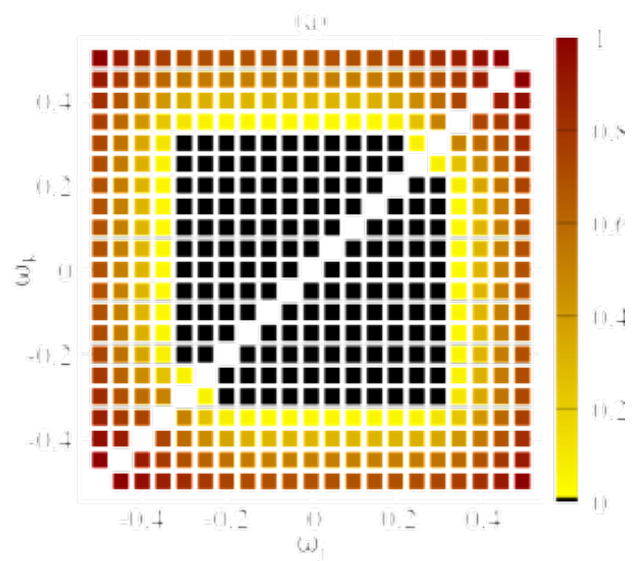


Figura 2: Dinamiche riproducibili (in nero) per una coppia di oscillatori con frequenze nel modello di Kuramoto. Le combinazioni con dinamica non riproducibile sono colorate dal giallo al marrone in relazione al grado di irripoducibilità.

problemi a molti corpi, una perturbazione tipicamente distrugge l'integrabilità, lasciando solo poche quantità conservate residue; è importante valutare se e come avvengono la termalizzazione, la dinamica caotica e il comportamento idrodinamico convenzionale. Considerando che una

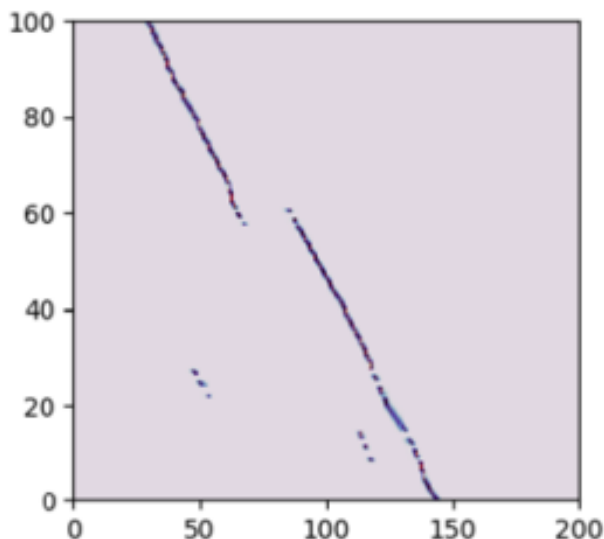


Figura 3: Gli autovettori della matrice di Lax per la catena di Toda perturbata si comportano come quasi-particelle solitoniche soggette a scattering shifts

questioni sono di ampio interesse in molti contesti. Si è proposto un nuovo approccio al problema [1]. Concentrandosi sul caso emblematico della catena di Toda soggetta a perturbazioni hamiltoniane non integrabili, si analizza l'evoluzione temporale degli autovalori di Lax, $\lambda(\alpha)$, come indicatori delle velocità delle quasi-particelle e delle azioni di Toda perturbate. Essi soddisfano delle equazioni del moto esatte formalmente analoghe a quelle dei livelli di energia di un problema quantistico caotico (noto anche come gas di Pechukas-Yukawa). Simulazioni numeriche suggeriscono che la misura invariante di tale sistema dinamico coincida con la densità di stati termica del reticolo di Toda, indipendentemente dalla forma della perturbazione.

Riferimenti bibliografici

- [1] Stefano Lepri. Lax dynamics. *EPL (Europhysics Letters)*, 152(3):33002, November 2025.

Simulazioni ed esperimenti smentiscono la struttura disordinata dei microgels copolimerici termoresponsivi

Letizia Tavagnacco, tavagnacco.letizia@gmail.com

La struttura interna dei colloidi polimerici è una proprietà fondamentale che ha attirato crescente attenzione nella ricerca sulla materia soffice. La morfologia interna di questi sistemi influenza in modo critico il loro comportamento di

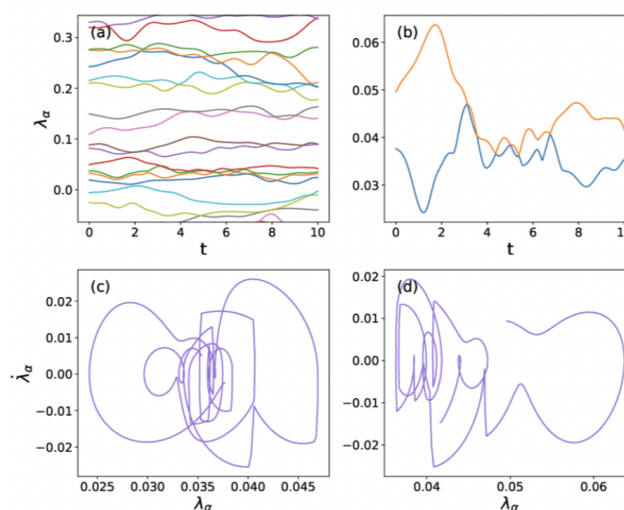


Figura 4: Gli autovalori si comportano come un gas di particelle unidimensionale con collisioni elastiche che inducono la termalizzazione

varietà di sistemi fisici come i gas atomici ultrafreddi, i magneti unidimensionali o i fasci ottici sono prossimi a limiti integrabili non lineari, tali

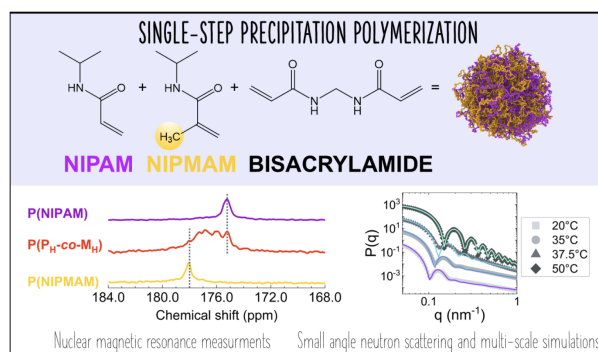


Figura 5: In alto un'illustrazione schematica del processo di polimerizzazione a singolo passo. In basso a sinistra alcune analisi delle misure di risonanza nucleare magnetica, mentre a destra un confronto tra fattori di forma sperimentali e numerici.

fase e le loro funzionalità, determinandone le proprietà meccaniche e le interazioni fisiche e chimiche. Tra le varie classi di sistemi colloidali, i microgel termoresponsivi — morbide reti polimeriche reticolate che subiscono transizioni di volume reversibili in risposta a variazioni di temperatura — rivestono un interesse particolare. Questa responsività è stata ampiamente studiata per il suo potenziale utilizzo in un'ampia gamma di applicazioni, dai settori tecnologici a quelli biomedici. Riuscire a controllare con precisione la loro struttura interna è quindi essenziale per modulare la risposta del materiale ed ampliare le possibili applicazioni.

Sebbene studi recenti abbiano migliorato la nostra comprensione della struttura interna dei microgel omopolimerici, come il PNIPAM, indagini analoghe su sistemi copolimerici sono rimaste rare. Attraverso un'estesa indagine multi-tecnica, che combina esperimenti di scattering e misure spettroscopiche con simulazioni all'avanguardia di microgel realistici, un gruppo di ricercatori del CNR ISC e della Sapienza, in collaborazione con l'Università di Ferrara, l'Università di Firenze, l'Università di Roma Tor Vergata, il Jülich Centre for Neutron Science (JCNS) e l'Australian Centre for Neutron Scattering (ACNS), ha evidenziato una disposizione a blocchi dei comonomeri all'interno della rete del microgel. Si tratta di un risultato inaspettato, dato l'impiego di una copolimerizzazione in un singolo passaggio, che mette in discussione la consolidata ipotesi di una distribuzione casuale dei monomeri. Questi risultati, pubblicati recentemente su *Small*, aprono nuove direzioni per la progettazione razionale dei microgel, con un forte impatto sulle applicazioni che dipendono da un controllo fine del rigonfiamento e del comportamento di fase. Questo lavoro è stato finanziato dal Progetto Co-MGELS, sostenuto dall'Unione Europea – NextGeneration EU nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) “Fondo PRIN”, e da ICSC – Centro Nazionale di Ricerca in High-Performance Computing, Big Data e Quantum Computing. [1]

Riferimenti bibliografici

- [1] Letizia Tavagnacco, Elena Buratti, Jacopo Vialetto, Francesco Brasili, *et int.*, Marco Laurati, and Emanuela Zaccarelli. Thermoresponsive copolymer microgels synthesized via single-step precipitation polymeriza-

tion: Random or block structure? *Small*, 21(47):e09795, 2025.

Scaffold multifunzionali per applicazioni biomediche

Valentina Palmieri, valentina.palmieri@cnr.it

Scaffold multifunzionali-ossido di grafene. Questo studio si focalizza sullo sviluppo di un materiale multifunzionale innovativo per applicazioni mediche, capace di rispondere alle esigenze di rigenerazione tissutale e prevenzione delle infezioni post-operatorie. Una delle principali sfide cliniche è infatti la contaminazione batterica (biofouling) nei contesti chirurgici, che può compromettere l'efficacia degli scaffold impiantati.

Lo studio ha previsto lo sviluppo di un composto a base di policaprolattone (PCL) e ossido di grafene (GO), adatto alla stampa 3D di scaffold con proprietà antibatteriche e antiadesive a rilascio temporale. Il materiale ottenuto mostra un effetto idrofobico locale che riduce significativamente l'adesione biologica, limitando quella dei batteriofagi e abbattendo l'adesione di *E. coli* e *S. aureus*.

La possibilità di stampare in 3D scaffold con altezze variabili permette di controllare la distri-

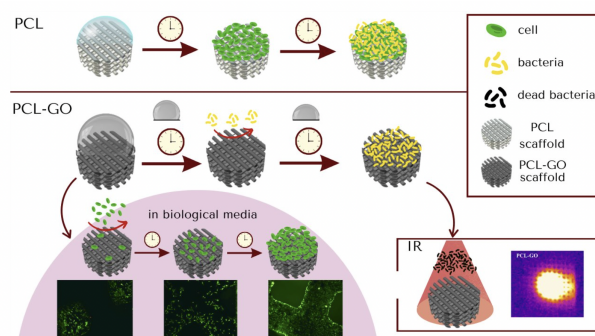


Figura 6: Schema illustrativo del comportamento biologico di scaffold in policaprolattone (PCL) e policaprolattone-ossido di grafene (PCL-GO). Gli scaffold in PCL consentono una buona adesione e proliferazione cellulare nel tempo, ma non impediscono la colonizzazione batterica. L'introduzione del GO conferisce allo scaffold PCL-GO proprietà antibatteriche, grazie alla possibilità di irradiazione infrarossa (IR). L'IR induce un effetto fototermico locale che potenzia l'azione antibatterica, come confermato dall'aumento di temperatura mostrato dall'immagine termografica.

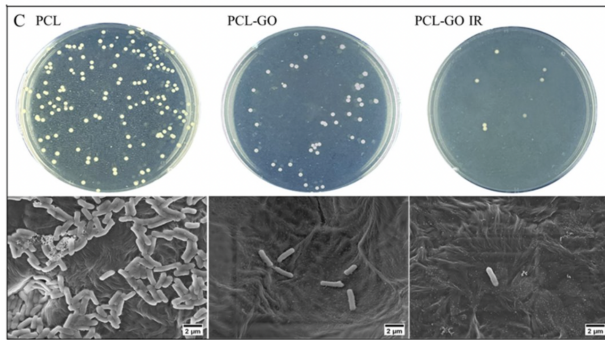


Figura 7: Effetti antibatterici degli scaffold in PCL e PCL-GO su cellule di *E. coli* o *S. aureus* seminate sugli scaffold. Dopo il lavaggio degli scaffold, le unità formanti colonia (CFU) sono state misurate. Immagini rappresentative delle piastre CFU e immagini SEM per *E. coli* (c).

buzione e l'adesione cellulare, utile anche in applicazioni come la microfluidica o la guarigione delle ferite. Con il passare del tempo, la superficie diventa più idrofila, favorendo la colonizzazione da parte delle cellule per la rigenerazione tissutale.

Infine, l'ossido di grafene conferisce al materiale la capacità di essere sterilizzato tramite luce infrarossa, utile per eliminare eventuali batteri aderenti alla superficie.

I risultati evidenziano quindi l'elevato potenziale del composito PCL-GO come materiale medico multifunzionale e adattabile a diversi scenari clinici. [1]

Riferimenti bibliografici

- [1] G. Friggeri, I. Moretti, F. Amato, A. G. Mariani, F. Sciandra, S. G. Colombaroli, A. Vitali, S. Viscuso, A. Augello, L. Cui, G. Perini, M. De Spirito, M. Papi, and V. Palmieri. Multifunctional scaffolds for biomedical applications: Crafting versatile solutions with polycaprolactone enriched by graphene oxide. *APL Bioengineering*, 8(1):016115, 03 2024.

I circuiti quantistici e il Nobel per la Fisica 2025

La meccanica quantistica si è dimostrata straordinariamente efficace nella descrizione dei fenomeni microscopici e di numerosi effetti e dispositivi macroscopici. Senza di essa non sarebbe possibile spiegare il comportamento dei soli-

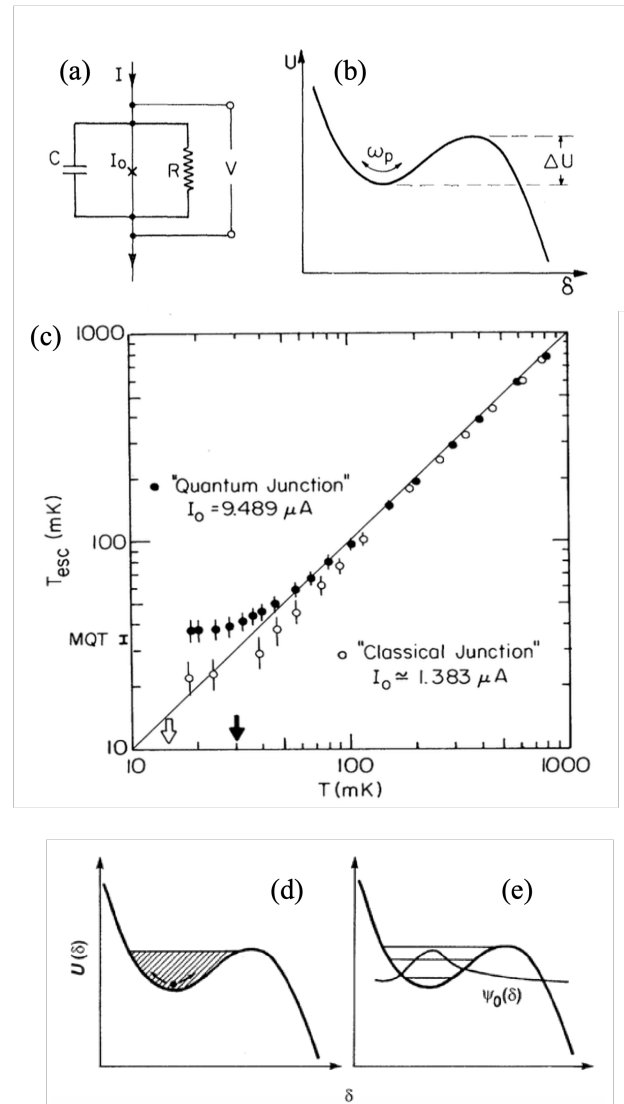


Figura 8: (a) Schema del circuito utilizzato negli esperimenti di MQT da Devoret Clarke e Martinis. (b) Potenziale Josephson per la fase superconduttiva. (c) Temperatura efficace che darebbe l'escape rate misurata in funzione della temperatura reale. La previsione teorica per l'escape rate dovuta al MQT è indicata sull'asse verticale. La freccia nera indica la temperatura di crossover tra regime termico e quantistico. Quesito sperimentale: la fase obbedisce ad una dinamica classica rappresentata in (d) o quantistica con livelli energetici discreti e MQT come mostrato in (e).

di, il funzionamento dei laser o la superconduttività. Eppure, una teoria che sembra descrivere con grande precisione tutto ciò che possiamo misurare è ancora considerata da alcuni incompleta o, per certi aspetti, misteriosa.

Il disagio ha origine nel conflitto tra alcune predizioni della meccanica quantistica e la

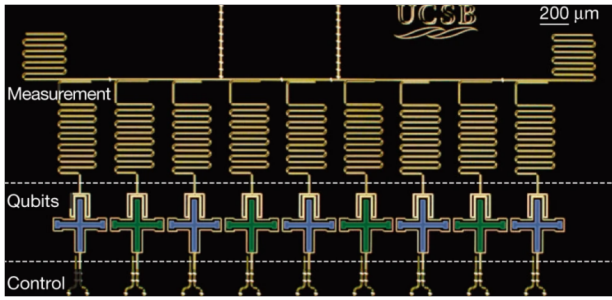


Figura 9: Immagine al microscopio di un dispositivo a 9 qubits per la correzione dell'errore realizzato in [2]

realtà quotidiana, nella quale tali predizioni non sembrano essere verificate. Il premio Nobel per la Fisica 2025 [1], assegnato a John Clarke, Michel H. Devoret e John M. Martinis, riconosce il lavoro volto a esplorare il confine tra dinamica classica e quantistica, e in particolare “la scoperta del tunneling quantistico macroscopico e della quantizzazione dell'energia in un circuito elettrico”. Un circuito elettrico è un oggetto macroscopico: grandezze come il flusso magnetico o la differenza di potenziale ai suoi capi sono variabili che siamo abituati a trattare classicamente. In alcuni casi, la dinamica del circuito ha un equivalente meccanico semplice, come nel caso del circuito LC, che descrive un oscillatore armonico. Martinis, Clarke e Devoret in diversi esperimenti realizzati negli anni '80 [5, 6, 7] dimostrarono che queste variabili macroscopiche si comportano, sotto opportune condizioni, quantisticamente. Per limitare al

massimo effetti dissipativi considerarono circuiti superconduttori e per costruire una dinamica non banale integrarono nel circuito delle giunzioni Josephson.

Dal punto di vista meccanico, il circuito studiato da Martinis, Clarke e Devoret è molto vicino al pendolo. Una giunzione Josephson [8] introduce infatti una struttura non lineare ed oscillatoria nel profilo energetico dando luogo a molteplici minimi di energia che corrispondono a diverse configurazioni metastabili dello stato macroscopico del circuito. Martinis, Clarke e Devoret hanno mostrato come sia possibile sfruttare queste configurazioni distinte per osservare fenomeni quantistici — ad esempio sovrapposizioni macroscopiche di due stati diversi, il tunneling quantistico tra minimi, “*macroscopic quantum tunneling*” (MQT o la quantizzazione dei livelli energetici nell'intorno di un minimo).

La portata rivoluzionaria del loro lavoro emerge chiaramente se si considera che lo stato del circuito rappresenta in realtà lo stato collettivo di un numero enorme di particelle. La dinamica quantistica e i meccanismi dissipativi risultano quindi dall'interazione tra gradi di libertà microscopici e macroscopici [9, 10]. I dispositivi sviluppati successivamente a partire dai risultati di Devoret, Martinis e Clarke sono circuiti che si comportano come veri e propri *atomi artificiali*, integrabili e controllabili tramite microonde [11, 2]. Il loro enorme potenziale tecnologico, sia come sensori sia per la realizzazione di computer e simulatori quantistici, costituisce oggi uno degli obiettivi principali di numerosi gruppi di ricerca a livello internazionale.

I ricercatori dell'ISC sono attivamente impegnati in questo campo su temi di rilevanza sia fondamentale che applicativa. Tra questi rientrano, ad esempio, lo sfruttamento del comportamento critico di tali sistemi per la realizzazione di sensori quantistici [12, 3], l'implementazione di stati topologici [13] e di modelli di rilevanza fondamentale [14]. Ulteriori attività riguardano la comprensione di come proprietà microscopiche non banali dei materiali o della superconduttività [4] emergano nella dinamica quantistica macroscopica e di come possano essere investigate o sfruttate attraverso l'integrazione di nuovi materiali in circuiti e dispositivi.

Gli autori, Francesco De Stefano, Alessandro Coppo, Simone Felicetti e Valentina Brosco la-

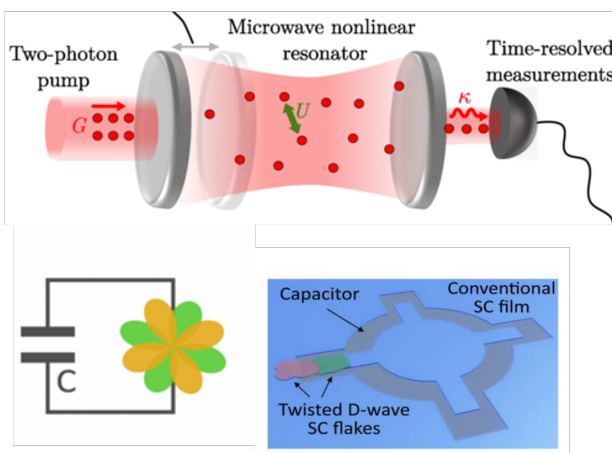


Figura 10: In alto: schema di sensing con risonatore non-lineare [3]. In basso: Disegno del qubit proposto in [4] che integra un'eterostruttura di van der Waals *d-wave*.



vorano in ISC alla modellizzazione di circuiti e dispositivi quantistici.

Riferimenti bibliografici

- [1] Press release Nobel Prize Outreach and Scientific Background to the Nobel Prize in Physics 2025 at www.nobelprize.org.
- [2] J. Kelly, *et int.*, A. N. Cleland, and John M. Martinis. State preservation by repetitive error detection in a superconducting quantum circuit. *Nature*, 519(7541):66–69, 2015.
- [3] Guillaume Beaulieu, *et int.*, Simone Felicetti, Roberto Di Candia, and Pasquale Scarlino. Criticality-enhanced quantum sensing with a parametric superconducting resonator. *PRX Quantum*, 6:020301, Apr 2025.
- [4] Valentina Brosco, Giuseppe Serpico, Valerii Vinokur, Nicola Poccia, and Uri Vool. Superconducting qubit based on twisted cuprate van der waals heterostructures. 132(1):017003.
- [5] Michel H. Devoret, John M. Martinis, Daniel Esteve, and John Clarke. Resonant activation from the zero-voltage state of a current-biased josephson junction. *Phys. Rev. Lett.*, 53:1260–1263, Sep 1984.
- [6] M. H. Devoret, J. M. Martinis, and J. Clarke. Measurements of macroscopic quantum tunneling out of the zero-voltage state of a current-biased josephson junction. *Physical Review Letters*, 55(18):1908–1911, 1985.
- [7] John M. Martinis, Michel H. Devoret, and John Clarke. Energy-level quantization in the zero-voltage state of a current-biased josephson junction. *Phys. Rev. Lett.*, 55:1543–1546, Oct 1985.
- [8] Michael Tinkham. *Introduction to superconductivity*. Courier Corporation, 2004.
- [9] Anthony J. Leggett. Macroscopic quantum systems and the quantum theory of measurement. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 69:80–100, 1980.
- [10] Vinay Ambegaokar, Ulrich Eckern, and Gerd Schön. Quantum dynamics of tunneling between superconductors. *Phys. Rev. Lett.*, 48:1745–1748, Jun 1982.
- [11] M. H. Devoret and R. J. Schoelkopf. Superconducting circuits for quantum information: An outlook. *Science*, 339(6124):1169–1174, mar 2013.
- [12] Guillaume Beaulieu, Fabrizio Minganti, Simone Frasca, Vincenzo Savona, Simone Felicetti, Roberto Di Candia, and Pasquale Scarlino. Observation of first- and second-order dissipative phase transitions in a two-photon driven kerr resonator. *Nature Communications*, 16(1):1954, 2025.
- [13] Alessandro Coppo, Alexandre Le Boité, Simone Felicetti, and Valentina Brosco. Nonlinearity-driven topology via spontaneous symmetry breaking, 2025.
- [14] Alessandro Coppo, Luca Chirolli, Nicola Poccia, Uri Vool, and Valentina Brosco. Flux-tunable regimes and supersymmetry in twisted cuprate heterostructures. *Applied Physics Letters*, 125(5):054001, 07 2024.

Miscellanea

• STATPHYS29:

La IUPAP International Conference on Statistical Physics, anche nota come StatPhys, è l'evento più importante per la comunità globale di fisica statistica. La ventinovesima edizione Statphys29 è tornata a Firenze dal 13 al 18 Luglio 2025, dopo 76 anni dalla sua prima edizione del 1949. (Per una prospettiva storica segnaliamo l'interessante intervista a Paolo Politi qui: www.youtube.com/watch?v=pF28BnSFncI)

Diversi ricercatori ISC hanno lavorato per l'organizzazione e il successo dell'evento. Lo testimoniano il plenary talk di Massimo Cencini e gli invited talk di Tommaso Rizzo e Antonio Politi, del quale siamo lieti di festeggiare i 70 anni!

I video di tutti gli interventi a StatPhys29, inclusi quelli dei Boltzmann medalists Mehran Kardar e Yoshiki Kuramoto, sono ora disponibili online al link: www.statphys-florence.com



Uno "special issue" del *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* dedicato alla conferenza è disponibile al link: iopscience.iop.org/collections/jstat-250926-01