ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI

CONVEGNO CENTRO INTERDISCIPLINARE LINCEO GIOVANI

GEOSCIENZE DI FRONTIERA

26-27 OTTOBRE 2026

ABSTRACT

Comitato ordinatore: Alberto VITALE BROVARONE (Centro Interdisciplinare Linceo Giovani – CILG; Università di Bologna), Katinka BELLOMO (CILG; Università di Padova), Omar BARTOLI (CILG; Università di Padova).

PROGRAMMA

Le Geoscienze hanno storicamente svolto un ruolo di primaria importanza nel progresso scientifico, contribuendo in modo determinante alla comprensione della Terra e dei processi che hanno condotto all'origine della vita. Alla luce delle sfide poste dai cambiamenti climatici, della necessità di una transizione energetica sostenibile e dell'emergere di nuove tecnologie a carattere transdisciplinare, le Geoscienze stanno ampliando in maniera significativa i propri ambiti di applicazione. Le competenze geologiche risultano oggi sempre più integrate in settori strategici della società contemporanea, quali le scienze biologiche e biomediche, lo studio dei climi passati, presenti e futuri, la valutazione dell'abitabilità planetaria e la ricerca di fonti energetiche sostenibili. Tali sviluppi rivestono un duplice significato: da un lato, rafforzano il ruolo centrale delle discipline geologiche tradizionali; dall'altro, costituiscono un efficace strumento di rinnovamento comunicativo e di attrattività nei confronti delle nuove generazioni.

Il convegno *Geoscienze di frontiera* si propone di individuare e discutere nuovi ambiti di sviluppo delle Geoscienze nel contesto della società contemporanea. I relatori invitati, prevalentemente appartenenti alle fasce early e mid-career, hanno dimostrato una spiccata capacità di ricerca e innovazione transdisciplinare, con solide connessioni alle Geoscienze tradizionali e con riconoscimenti a livello internazionale.

Metastability of the Earth's Climate: A Multiscale Viewpoint

Valerio LUCARINI (University of Leicester)

The ultralow frequency variability of the Earth's climate features an interplay of typically long periods of stasis accompanied by critical transitions between qualitatively different regimes associated with metastable states. Such transitions have often been accompanied by massive and rapid changes in the biosphere. Multiple transitions between the coexisting warm and snowball climates occurred more than 500 Mya and eventually led to conditions favourable to the development of multicellular life. The coexistence of such states is due to the instability associated with the positive ice-albedo feedback. Yet, this behaviour repeats itself across a wide range of timescales, spatial domains, and physical processes. Building on Hasselmann's program, we propose here to interpret the time-evolution of the Earth system as a trajectory taking place in a dynamical landscape, whose multiscale features describe a hierarchy of metastable states and associated tipping points. We introduce the concept of climatic Melancholia states, saddle embedded in the boundary between the basins of attraction of the stable climates and explain under which conditions they act as gateways of noise-induced transitions. Using a hierarchy of numerical models, we discuss in detail the dichotomy between warm and snowball climate by bringing together the deterministic and stochastic viewpoint on the related global stability properties. We then discuss the paleoclimatically-relevant case where multiple competing climatic states are present and show the relevance of our angle for interpreting proxy data. Finally, if time allows, we will present some very recent results suggesting that our viewpoint might explain some intriguing aspects of the dynamical features of the tipping points of the Atlantic Meridional Overturning Circulation.

Grandi cambiamenti, ritmi diversi: vulcani e clima dal tempo profondo al nostro presente

Sara CALLEGARO (Università di Bologna)

Nel passato geologico, la formazione delle grandi province magmatiche ha perturbato profondamente i cicli biogeochimici e la composizione dell'atmosfera e degli oceani, contribuendo a crisi ambientali globali e ad alcune delle maggiori estinzioni di massa. Questi eventi vulcanici, di portata colossale e anomala, sono stati a lungo studiati soprattutto per il loro ruolo nelle perturbazioni climatiche di lunga durata, gli hyperthermals associati all'immissione di enormi quantità di anidride carbonica, e per la tossicità di alcuni gas e metalli emessi. In questo senso le grandi provincie magmatiche rappresentano analoghi naturali per indagare le conseguenze delle attuali perturbazioni antropiche del ciclo del carbonio e per l'inquinamento e la distruzione degli ecosistemi. Sappiamo però da esempi storici che il vulcanismo può influenzare il clima anche su scale temporali molto più rapide, con un raffreddamento transitorio associato agli aerosol solforici. Simili episodi di raffreddamento rapidi e transitori, sovrapposti alle tendenze climatiche di lungo periodo, potrebbero aver imposto agli ecosistemi stress ripetuti, contribuendo alle crisi biologiche associate ad alcune delle maggiori estinzioni di massa. Riconoscere questi episodi nel passato geologico però è difficile: la loro brevità ne ostacola l'identificazione negli archivi sedimentari, mentre le rocce magmatiche conservano solo tracce dei gas originariamente presenti. In questo contesto, lo zolfo incorporato nel clinopirosseno offre uno strumento per ricostruire il contenuto di zolfo dei magmi prima del degassamento e vincolare il loro potenziale di emissione. Dal tempo profondo al presente, lo studio di questi processi offre una prospettiva sui legami tra dinamica terrestre, clima e biosfera, in cui la velocità e la ripetizione degli eventi diventano cruciali quanto la loro entità, contribuendo al dibattito sulla geoingegneria solare e a una migliore comprensione della vulnerabilità degli ecosistemi alle rapide perturbazioni climatiche.

Oceano, coralli e Intelligenza Artificiale:
nuove prospettive per comprendere e proteggere gli ecosistemi marini

Annalisa BRACCO (CMCC Bologna)

Le barriere coralline ospitano alcuni tra gli ecosistemi più ricchi e produttivi del pianeta, ma oggi sono minacciate dall'aumento della temperatura degli oceani. Comprendere quali barriere siano più vulnerabili e quali possano contribuire alla rigenerazione degli ecosistemi danneggiati rappresenta una sfida scientifica e ambientale.

In questo seminario mostrerò come l'integrazione di osservazioni satellitari, dati raccolti sul campo e tecniche di intelligenza artificiale possa fornire nuove prospettive per lo studio e la protezione dei coralli. Utilizzando anomalie della temperatura superficiale del mare (SSTa)

osservate dai satelliti e algoritmi di machine learning non supervisionato, è possibile identificare ecoregioni marine dinamiche e ricostruire le reti di connettività che collegano tra loro le diverse barriere coralline attraverso il trasporto larvale.

L'approccio combina concetti provenienti dalla fisica degli oceani, dalla teoria delle reti e dalla scienza dei dati per quantificare il ruolo delle singole barriere come sorgenti o aree riceventi di larve, stimarne il potenziale di recupero e individuare le aree a maggior rischio di collasso. Verranno inoltre discussi gli effetti della variabilità climatica, inclusi gli eventi di El Niño e La Niña, e il contributo di nuove tecnologie osservative, dall'acustica subacquea alle immagini ad alta risoluzione.

Il seminario offrirà infine una riflessione più ampia sul ruolo crescente dell'intelligenza artificiale nelle scienze del clima e dell'oceano, mostrando come la sinergia tra osservazioni, modelli fisici e AI stia trasformando il modo in cui comprendiamo e proteggiamo gli ecosistemi marini in un mondo che cambia.

Opportunità e rischi nell'utilizzo del concetto di Antropocene per le scienze geologiche

Massimo BERNARDI (MUSE)

La mancata formalizzazione dell'Antropocene come epoca geologica non sembra aver ridotto la fortuna culturale del concetto; ha piuttosto reso più evidente la distanza tra una possibile definizione stratigrafica e le molte accezioni con cui il termine è entrato nelle scienze umane e sociali, nelle arti, nei musei e nel dibattito pubblico. Proprio questa pluralità, pur comportando rischi di ambiguità e semplificazione, rappresenta una delle ragioni della forza del concetto: l'Antropocene mette in crisi la separazione tra storia umana e storia della Terra e rende evidente quanto i processi geologici, biologici e sociali non possano essere raccontati come domini indipendenti.

Questo dibattito offre alle geoscienze un'opportunità particolare consentendo di riaffermare come la geologia sia prima di tutto scienza dei processi, delle relazioni e delle diverse scale del cambiamento terrestre. In questo senso le geoscienze possono essere valorizzate contemporaneamente nella propria natura di scienze di base e di frontiera, contribuendo al più ampio dibattito culturale sui modi in cui le società comprendono e abitano un mondo in trasformazione.

Il futuro nel passato: biogeodinamica, clima e abitabilità della Terra

Pietro STERNAI (Università di Milano Bicocca)

La storia geologica della Terra costituisce un laboratorio naturale per comprendere le interazioni tra geodinamica, ciclo del carbonio, clima e biosfera. In una prospettiva biogeodinamica, i processi profondi influenzano l'ambiente superficiale attraverso il degassamento magmatico di CO_2, la costruzione e l'erosione della topografia e i conseguenti effetti sulla circolazione atmosferica e oceanica.

Il Cenozoico documenta in modo particolarmente chiaro queste interazioni, dalla transizione da condizioni greenhouse all'attuale icehouse alle variazioni delle sorgenti e dei sink geologici di CO_2. Il confronto con l'attuale perturbazione antropica evidenzia inoltre l'importanza non solo dell'entità, ma anche della velocità dei cambiamenti imposti al sistema Terra.

La prospettiva geologica permette così di valutare le conseguenze delle nostre decisioni su scale temporali molto più lunghe di quelle normalmente considerate nella pianificazione sociale ed economica, contribuendo a definire condizioni di sviluppo compatibili con l'abitabilità futura della Terra.

Petrologia e vulcanologia nell'era dell'intelligenza artificiale: opportunità, limiti e prospettive

Maurizio PETRELLI (Università di Perugia)

I sistemi di alimentazione degli apparati vulcanici non possono essere osservati in modo diretto: il loro stato deve essere dedotto dalle informazioni vulcanologiche e petrologiche racchiuse nelle rocce eruttate, dai segnali di monitoraggio, da esperimenti e modelli analogici o numerici. Le tecniche di machine learning stanno entrando rapidamente in questa catena inferenziale. Il presente contributo ripercorre dapprima le applicazioni consolidate in petrologia ignea e vulcanologia, per poi esplorare le opportunità che stanno emergendo. Tali opportunità pongono tuttavia sfide non semplici da affrontare, tra cui la rappresentazione della complessità dei processi

magmatici, l'ancoraggio degli algoritmi a vincoli fisici e termodinamici e la comprensione di ciò che i modelli apprendono realmente. Trasparenza, riproducibilità e interpretabilità diventano cruciali quando i risultati possono orientare la valutazione della pericolosità e la gestione delle crisi. Infine, il contributo si interroga sul perché l'intelligenza artificiale non abbia ancora trasformato in modo sostanziale lo studio dei sistemi magmatici come è avvenuto in altri campi scientifici.

Caratterizzazione e monitoraggio dello stato di sforzo di ambienti vulcanici e sismogenetici

Manuele FACCENDA (Università di Padova)

Lo stato di sforzo della crosta terrestre e la circolazione di magma e geofluidi controllano l'evoluzione dei sistemi vulcanici e sismogenetici e rappresentano fattori chiave per la previsione di eruzioni ed eventi sismici. L'intervento presenterà lo sviluppo di nuove metodologie di imaging sismico e modeling geodinamico 3D e 4D in grado di caratterizzare e monitorare nel tempo le variazioni delle proprietà elastiche isotrope e anisotrope della crosta, dalle quali è possibile inferire l'evoluzione dello stato di sforzo, della fratturazione e della distribuzione dei geofluidi. Verranno illustrati i principali risultati ottenuti nell'ambito dei progetti ERC STG NEWTON e ERC POC MODEM, con applicazioni all'Etna, ai Campi Flegrei e all'Appennino, evidenziando le potenzialità di questi approcci per il monitoraggio dei processi geodinamici, la mitigazione del rischio naturale e la caratterizzazione di sistemi geotermici e di altri serbatoi del sottosuolo.

Geoscienze 2.0: ripensare la comunicazione di una disciplina che cambia

Chiara ANZOLINI (Università di Padova)

Le Geoscienze rivestono oggi un ruolo fondamentale nell'affrontare alcune delle principali sfide globali, dalla crisi climatica e ambientale alla transizione energetica, dalla gestione delle risorse naturali alla mitigazione dei rischi. Eppure, a questa crescente centralità scientifica e sociale non sembra corrispondere un'adeguata riconoscibilità pubblica della disciplina, che continua a confrontarsi con stereotipi, difficoltà di attrazione delle nuove generazioni e una distanza persistente tra ricerca e società.

In questo scenario, ripensare la comunicazione delle Geoscienze diventa una necessità strategica. La crescente popolarità della divulgazione scientifica, soprattutto attraverso i media digitali, rappresenta un'opportunità importante, ma non è sufficiente a colmare tale distanza. La comunicazione della scienza non può limitarsi alla trasmissione di conoscenze: deve favorire il dialogo, l'ascolto e la partecipazione degli attori sociali, contribuendo a rendere la ricerca più rilevante e accessibile nei processi decisionali.

L'intervento propone una riflessione sulla necessità di integrare stabilmente competenze professionali di comunicazione della scienza e approcci interdisciplinari nella formazione e nelle attività di ricerca, promuovendo una maggiore collaborazione tra Geoscienze, scienze della vita, scienze sociali e discipline umanistiche. Investire nella comunicazione e nel public engagement significa rafforzare la reputazione e la fiducia nelle istituzioni scientifiche, favorire nuove collaborazioni e opportunità di finanziamento e, soprattutto, valorizzare il contributo delle Geoscienze nell'affrontare le sfide del nostro tempo.

Cristalli senza frontiere: l'architettura cristallina come pilastro della società moderna

Matteo ARDIT (Università di Padova)

Nell'ambito delle "*Geoscienze di Frontiera*", l'applicazione di tecniche di indagine, che da sempre accompagnano la ricerca mineralogica e cristallografica di materiali inorganici, consente oggi di affrontare problemi che si estendono ben oltre lo studio dei minerali in senso stretto. La microscopia ottica ed elettronica, le spettroscopie nucleari, elettroniche e vibrazionali e la diffrazione di raggi X, neutroni ed elettroni sono infatti funzionali alla descrizione e all'interpretazione di fenomeni legati alla materia a diverse scale.

Ambiti delle geoscienze quali la cristallochimica, la mineralogia applicata, la *mineral physics* e la mineralogia planetaria, per citarne alcuni, condividono metodi e spesso problematiche con altri settori scientifici, tra cui le scienze dei materiali, in un'interazione che può incidere sullo sviluppo di tecnologie per l'energia e l'ambiente. In tutti questi campi è in corso un progressivo cambiamento di scala e di paradigma: inclusioni, difetti, interfacce e deformazioni a livello atomico possono diventare preziose fonti di informazione, oppure conferire ai materiali specifiche proprietà funzionali, che aiutano a descrivere processi alla macroscala.

Il contributo presenta una serie di casi studio, organizzati come tappe di un viaggio scientifico che inizia nel mantello profondo, attraversa il mondo dei materiali di sintesi sviluppati per le tecnologie energetiche e ambientali (l'*antroposfera* / *tecnosfera*) e si estende, infine, allo spazio. Questo percorso consente di mostrare come le tecniche di indagine comunemente impiegate nella mineralogia e nella cristallografia possano essere applicate a materiali e problemi apparentemente lontani tra loro, facendo emergere un comune livello di indagine: quello dell'architettura della materia e delle relazioni tra struttura, proprietà e processi.

La diffrazione elettronica, ad esempio, ha contribuito a una comprensione più approfondita di fasi cristalline nanometriche incluse in diamanti fibrosi, fornendo nuove indicazioni sulle dinamiche del mantello profondo [1]. La diffrazione a raggi X ha permesso di indagare le relazioni tra struttura e proprietà in membrane ceramiche sviluppate per la separazione dell'idrogeno [2, 3] e di caratterizzare ossidi misti funzionalizzati e quantum dot nanometrici con struttura core-shell utilizzati nella sensoristica dei gas [4–6]. Su una scala ancora più ampia, l'analisi delle deformazioni reticolari (*strain*) conservate in (o all'interfaccia di) fasi di origine extraterrestre hanno fornito l'evidenza di metamorfismo da shock confermando l'origine da impatto di tali fasi [7, 8]. Tali deformazioni potrebbero inoltre fornire elementi discriminanti per riconoscere i processi fisici subiti da questi materiali. La decodifica di questa impronta strutturale e la sua relazione con le condizioni di sollecitazione (*stress*) possono contribuire a ricostruire la storia dei corpi genitori da cui tali materiali provengono e, più in generale, a comprendere alcuni aspetti della loro storia evolutiva.

Questi esempi mostrano come l'approccio mineralogico e cristallografico non costituisca soltanto uno strumento per descrivere la materia, ma rappresenti un linguaggio comune capace di collegare fenomeni naturali, materiali di sintesi e tecnologie emergenti. Leggere l'architettura della materia a differenti livelli di approfondimento significa quindi non solo ricostruire il passato della Terra e degli altri corpi planetari, ma anche comprendere e progettare le proprietà dei materiali sui quali si fondano molte delle tecnologie della società contemporanea.

Letteratura citata

[1] Wang, Y., Nestola, F., Cámara, F., Day, M. C., Innocenzi, F., Ardit, M., ... & Hou, Z. (2026). Nanometric mineral inclusions from a fluid-rich diamond: identification, structure, and implications for deep Earth. *Nature Communications*, *17*, 7915.

[2] Mercadelli, E., Gondolini, A., Ardit, M., Cruciani, G., Melandri, C., Escolastico, S., ... & Sanson, A. (2022). Chemical and mechanical stability of BCZY-GDC membranes for hydrogen separation. *Separation and Purification Technology*, *289*, 120795.

[3] Cordero, F., Craciun, F., Brigliadori, A., Bartoletti, A., Ardit, M., Galizia, P., ... & Sanson, A. (2026). Proton and O vacancy hopping, dopant clustering, and octahedral tilt transitions in exsolved $BaCe_{0.7}Zr_{0.1}Y_{0.15}Ni_{0.05}O_{3-\delta}$. *Journal of Alloys and Compounds*, *1067*, 188309.

[4] Spagnoli, E., Gaiardo, A., Fabbri, B., Valt, M., Krik, S., Ardit, M., ... & Guidi, V. (2022). Design of a metal-oxide solid solution for sub-ppm H_2 detection. *ACS sensors*, *7*, 573.

[5] Feng, Z., Giubertoni, D., Cian, A., Valt, M., Ardit, M., Pedrielli, A., ... & Gaiardo, A. (2023). Fabrication of a highly NO_2-sensitive gas sensor based on a defective ZnO nanofilm and using electron beam lithography. *Micromachines*, *14*, 1908.

[6] Rossi, A., Ghedini, E., Signoretto, M., Gaiardo, A., Ferroni, M., Ardit, M., ... & Fabbri, B. (2026). Behind the transduction mechanism of a nanostructured functional material for environmental CO_2 monitoring. *Journal of Materials Chemistry A*, *14*, 6457.

[7] Barbaro, A., Nestola, F., Singerling, S. A., Nava, J., & Brenker, F. E. (2025). Nano-scale impact shock features of diamond and graphite in ureilites. *Carbon*, *243*, 120583.

[8] Barbaro, A., Nestola, F., Németh, P., Singerling, S. A., Wang, Y., & Brenker, F. E. (2026). Diaphite nanostructures, stacking faults, and twins in Almahata Sitta ureilitic diamonds. *Carbon*, 122098.

Lithium in the critical zone: the lessons we learned (and keep learning) from volcano-sedimentary deposits

Francesco PUTZOLU (Università di Napoli Federico II)

Il litio (Li) è una materia prima strategica per via del suo impiego nella produzione di batterie elettriche ad alta densità energetica, utilizzate per lo stoccaggio di energia derivante da fonti rinnovabili. Storicamente, la produzione di litio si è basata sulla coltivazione di brine presenti nei sistemi evaporitici di tipo *salar*, e di minerali silicatici (spodumene) da rocce ignee altamente frazionate, in particolare pegmatiti peralluminose. In considerazione dello previsto aumento della domanda di litio, la ricerca scientifica e i programmi di esplorazione mineraria si stanno attualmente concentrando sullo studio e sull'individuazione di risorse litifere in contesti geologici finora non riconosciuti o non adeguatamente caratterizzati, tra cui le mineralizzazioni a minerali argillosi litiferi associate a depositi vulcano-sedimentari.

I depositi vulcano-sedimentari litiferi si formano attraverso l'alterazione di rocce ignee estrusive geochimicamente fertili in contesti superficiali (zona critica). Tale processo è associato alla mobilizzazione e alla successiva ritenzione del Li nei bacini lacustri, con conseguente deposizione sotto forma di minerali argillosi e/o borosilicati. Tuttavia, i meccanismi che regolano la mobilizzazione del Li dalle rocce sorgenti e la sua efficace immobilizzazione nelle fasi mineralogiche secondarie sono ancora oggetto di dibattito scientifico. Ciò è dovuto alla generalmente riconosciuta mobilità degli ioni di litio (Li^+) nella zona critica; un comportamento geochimico che sfavorirebbe la concentrazione del Li fino a raggiungere tenori economicamente sfruttabili.

Questa presentazione offre una panoramica dei principali processi che regolano il trasferimento del Li dall'ambiente magmatico a quello superficiale e illustra come lo sviluppo di specifiche condizioni geologiche (regime tettono-magmatico; pH, flusso termico), spesso transitorie, possa favorirne l'arricchimento nella zona critica. Inoltre, attraverso l'applicazione del "*Mineral System Approach*", vengono approfondite le modalità con cui la comprensione del comportamento del Li nella zona critica possa orientare le strategie di esplorazione e l'individuazione di risorse litifere non convenzionali.

Faglie e terremoti: studiare il passato per comprendere il futuro

Luca SMERAGLIA (CNR-GEO)

I terremoti dell'Aquila del 2009 e di Amatrice-Norcia del 2016–2017 hanno mostrato ancora una volta la fragilità del territorio italiano e l'importanza di comprendere i processi che governano l'attivazione delle faglie sismogenetiche. Sebbene la rottura sismica avvenga a diversi chilometri di profondità, oggi possiamo ricostruirne i meccanismi combinando sismologia, geodesia satellitare, il monitoraggio idrogeologico e idrogeochimico dei pozzi e delle sorgenti ed osservazioni geologiche sulle rocce di faglia affioranti in superficie. Queste ultime conservano infatti la memoria di terremoti passati e dei processi che ne hanno accompagnato l'evoluzione. Lo studio delle faglie attive dell'Appennino permette così di collegare le osservazioni dei terremoti recenti alla loro storia geologica, estendendo la nostra conoscenza ben oltre il breve periodo della registrazione strumentale. L'integrazione di questi approcci rappresenta oggi una delle strade più promettenti per comprendere il comportamento delle faglie, migliorare la valutazione della pericolosità sismica e individuare, in futuro, eventuali segnali associati alla preparazione dei terremoti.

La vita come forza geologica: quattro miliardi di anni di coevoluzione tra geosfera e biosfera

Donato GIOVANELLI (Università di Napoli Federico II)

La vita ha trasformato profondamente il nostro pianeta. Nel corso di quasi quattro miliardi di anni, i metabolismi microbici hanno modificato la composizione dell'atmosfera e degli oceani, alterato i cicli biogeochimici degli elementi e contribuito a determinare le condizioni di abitabilità della Terra. Questi processi non sono limitati alla superficie: la scoperta di una biosfera profonda, estesa per chilometri all'interno della crosta terrestre, ha rivelato una nuova dimensione delle interazioni tra vita e geologia, nella quale l'attività biologica può influenzare i flussi di materia ed energia tra l'interno del pianeta e la superficie. Questa relazione è profondamente bidirezionale. La disponibilità geologica di energia e di elementi chimici ha condizionato l'origine, l'evoluzione e la distribuzione dei metabolismi microbici, mentre l'attività biologica ha progressivamente modificato le condizioni geochimiche nelle quali questi stessi metabolismi si sono evoluti. Geosfera e biosfera hanno così attraversato una storia di continua coevoluzione, caratterizzata da interazioni e feedback su scale spaziali e temporali molto diverse. Attraverso esempi che spaziano dalla trasformazione biologica dei volatili nei sistemi di subduzione al ruolo dei metalli nell'evoluzione del metabolismo, fino alle possibili implicazioni del ciclo biologico dell'idrogeno per il bilancio idrico planetario, discuterò come questa prospettiva stia aprendo nuove direzioni di ricerca. Oggi disponiamo degli strumenti per iniziare a quantificare dove, quanto e attraverso quali meccanismi la vita contribuisce ai processi geologici. Integrare questi contributi nella comprensione dell'evoluzione del nostro pianeta rappresenta una delle sfide fondamentali delle Geoscienze di frontiera.