

# Luce dentro il vulcano

Un progetto di perforazione profonda nell'area dei Campi Flegrei punta a trasformare il rischio vulcanico in una grande opportunità di progresso scientifico e tecnologico

## IN SINTESI

- Il progetto CFDDP, che mira a fare dei Campi Flegrei un laboratorio naturale mondiale, permetterà di sviluppare innovativi sistemi di monitoraggio dell'attività vulcanica.
- Oltre a migliorare la gestione del rischio in una delle aree vulcaniche più pericolose del pianeta, il CFDDP mira a rilanciare l'uso dell'energia geotermica in Italia, in particolare nel Meridione.
- La geotermia è una fonte rinnovabile e non inquinante. Le emissioni di anidride carbonica delle centrali geotermiche sono nel peggiore dei casi 20 volte inferiori rispetto a centrali equivalenti alimentate con combustibili fossili.

ROCCE DELLA SOLFATARA nella zona dei Campi Flegrei, a ovest di Napoli, dove si verificano fenomeni di bradisismo, ovvero abbassamenti e innalzamenti del livello del suolo causati da un complesso meccanismo di interazione tra sorgenti magmatiche profonde e sistemi geotermali.

di Giuseppe De Natale, Claudia Troise,  
Paolo De Natale, Enzo Boschi

**R**ichard Fortey, paleontologo del Natural History Museum di Londra, nel suo recente libro *Terra. Una storia intima* (Codice Edizioni, 2005), giustamente afferma che nel Golfo di Napoli ha avuto origine la scienza della geologia. Il famoso libro *Principles of Geology* di Charles Lyell, pubblicato nel 1830, riportava in copertina una veduta delle colonne del Tempio di Serapide a Pozzuoli, nell'area dei Campi Flegrei.

Fin dall'epoca romana i Campi Flegrei, a ovest di Napoli, colpiscono la fantasia di poeti e scrittori; come Goethe, che nel suo *Viaggio in Italia* li descrive come «la regione più meravigliosa del mondo». Ma le colline verdi, i laghi circolari come l'Averno, sono in realtà crateri che testimoniano l'attività vulcanica più esplosiva sulla Terra: quella delle caldere di collasso. Le colline e i laghi che animano la topografia di quest'area sono infatti conici di tufo (per esempio il Gauro, Monte Barbaro, Baia, Fondi di Baia) e anelli di tufo (Astroni, Solfatara, Averno): entrambi i tipi di formazioni sono il risultato di eruzioni freatomagmatiche, generate dal contatto del magma con l'acqua di falda, che al loro estremo includono le eruzioni ignimbritiche. Queste ultime sono responsabili della formazione delle grandi caldere di collasso - come i Campi Flegrei, Santorini in Grecia, Yellowstone negli Stati Uniti - formatesi a causa dello svuotamento parziale delle camere magmatiche sottostanti dovuto alla fuoriuscita di decine o anche centinaia di chilometri cubi di magma.

Le eruzioni che generano i collassi calderici sono le più violente sulla Terra, le uniche che possono generare grandi catastrofi planetarie al pari degli impatti meteoritici di grandi dimensioni. I conici di tufo sono formati da eruzioni freatomagmatiche di moderata esplosività, mentre gli anelli di tufo testimoniano un'esplosività molto maggiore. L'esplosività dipende dal rapporto relativo tra volumi di acqua della falda e di magma che massimizza l'efficienza esplosiva dell'eruzione.

Il lago d'Averno, per esempio, è un particolare tipo di anello di tufo, detto *maar*, in cui la fortissima esplosione ha scavato un cratere più profondo della falda freatica, che ha quindi riempito la cavità. Mentre la varietà dei crateri testimonia la violenza dell'attività vulcanica in quest'area, le incrostazioni marine prodotte da molluschi e altri agenti biologici visibili sulle antiche costruzioni in rovina testimoniano che, almeno negli ultimi 2000 anni, il livello del suolo in quest'area ha avuto variazioni eclatanti, dell'ordine di decine di metri, abbassandosi spesso al di sotto del livello del

mare. Questo fenomeno è chiamato «bradisismo», parola con radice greca coniata in quest'area, ma che oggi sappiamo essere comune a tutte le aree calderiche della Terra.

### I Campi Flegrei e i fenomeni bradisismici

Nei primi anni settanta il bradisismo dei Campi Flegrei ha generato nella popolazione di Pozzuoli – il comune nella parte centrale della caldera – un'apprensione che ha raggiunto il culmine tra il 1982 e il 1984, quando il livello del suolo si è sollevato di quasi due metri nel porto della cittadina. Queste enormi deformazioni, accompagnate da circa 15.000 terremoti con magnitudo Richter massima di 4,5, hanno causato danni alle abitazioni del centro e ingenti problemi alle attività portuali per l'avanzamento della linea d'attracco. Ma la preoccupazione maggiore si è avuta perché i fenomeni di innalzamento e la sismicità sono tipici segnali precursori di eruzioni, sebbene le osservazioni recenti in varie caldere del pianeta suggeriscano che in queste aree il periodo di preparazione delle eruzioni può durare anche decenni o secoli.

Proprio studiando i fenomeni di bradisismo dei Campi Flegrei, negli ultimi vent'anni sono stati fatti enormi passi avanti nella vulcanologia delle caldere. In particolare, grazie a diverse osservazioni sperimentali si è ipotizzato che il fenomeno alla base degli spettacolari sollevamenti sia il risultato di un complesso meccanismo di interazione tra le sorgenti magmatiche profonde e i sistemi geotermali. Ma per una vera comprensione del comportamento di queste aree, le più esplosive del pianeta, resta aperta una serie di importanti interrogativi. Aree che nel caso dei Campi Flegrei sono anche a più alto rischio per la presenza di un'altissima densità di popolazione, attività produttive e gran parte dell'area metropolitana di una città come Napoli.

Per una comprensione del fenomeno è necessario localizzare gli enormi volumi di magma (centinaia di chilometri cubi) rimasti nella camera magmatica come residui delle enormi eruzioni che generano le caldere di collasso. I metodi geofisici di indagine indiretta, per esempio la tomografia sismica, hanno dato risultati negativi, non riuscendo a evidenziare questi grandi serbatoi magmatici praticamente in nessun'area calderica della Terra. Inoltre i dettagli dei meccanismi di interazione tra i gas disciolti nei magmi, i magmi stessi e i sistemi geotermali alla base dell'attività eruttiva e degli episodi di bradisismo sono ancora in gran parte ignoti. La scarsa conoscenza di questi fenomeni dipende principalmente dall'uso di metodi indiretti di prospezione geofisica che presentano molteplici

## UN INFERNO IN CAMPANIA

Il Lago d'Averno deve il suo nome alla parola latina *avernus*, mutuata dal termine greco *aornos*, che significa «senza uccelli». Si narra infatti che nell'antichità le esalazioni gassose presenti ancora oggi fossero tanto intense da allontanare gli uccelli. Per i Greci prima e per Romani poi, il lago fu la porta per l'oltretomba. Ed è qui che Virgilio nel VI libro dell'*Eneide* colloca l'ingresso agli inferi che Enea dovette attraversare.



ci problemi di calibrazione e interpretazione, e dall'uso di apparecchiature commerciali, non ottimizzate per queste specifiche applicazioni. Tutto questo ha ostacolato lo sviluppo di tecnologie di osservazione comparabile con gli enormi progressi ottenuti invece con i modelli teorici in vulcanologia. Da diversi anni gli autori di questo articolo lavorano per coniugare alla ricerca teorica e all'interpretazione anche lo sviluppo di tecnologie innovative per ottimizzare i sistemi di monitoraggio.

Le metodologie ottiche, basate cioè sull'uso di radiazione, in particolare generata da sorgenti laser, si sono rivelate particolarmente adeguate co-

me «sonda» per lo studio di fenomeni geofisici. Questa caratteristica è dovuta principalmente alla grande sensibilità e selettività dei sensori laser e al loro uso «remoto», reso possibile dalle fibre ottiche. Fino a oggi abbiamo sviluppato diverse configurazioni innovative di sensori, basati su tecniche spettroscopiche, che consentono sia l'analisi continua sul posto dei gas vulcanici sia la misura di deformazioni e accelerazioni del suolo a frequenze che vanno da alcune decine di chilohertz a valori prossimi a zero. Abbiamo anche studiato l'integrazione di questi sensori in grandi sistemi multiparametrici di monitoraggio vulcanico e ambientale, in grado di controllare vaste aree con una rete di fibre ottiche che trasportano la radiazione laser con bassissime perdite (si veda il box a fronte).

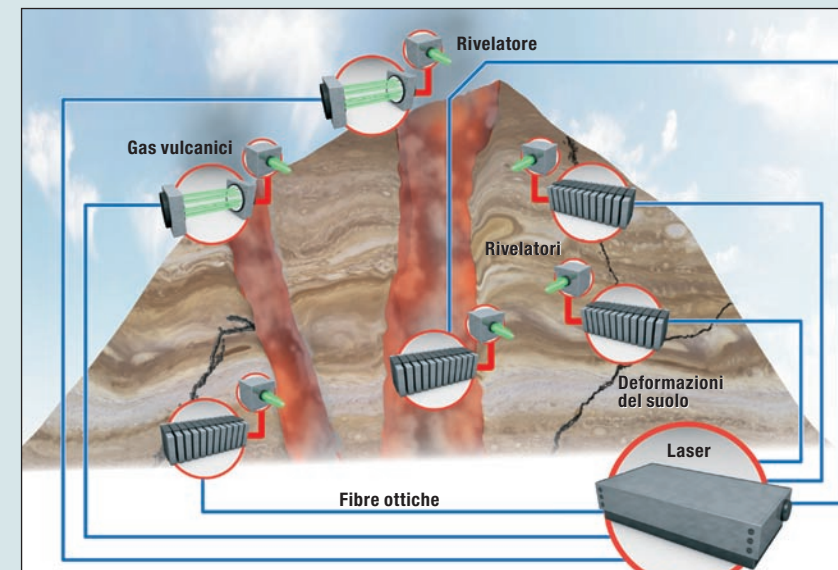
Ma la soluzione del problema principale, cioè la conoscenza diretta della struttura profonda, fino a pochi anni fa sembrava impossibile. È stato a questo punto che alcuni di noi hanno avuto un'idea

Adam Eastland/Alamy, Andrea Pistolesi/Getty Images (pagine precedenti)

## Sistemi laser per il monitoraggio dei vulcani

L'analisi combinata dei gas emessi in aree vulcaniche e delle deformazioni del suolo, sia statiche (cioè lente) che dinamiche (ovvero legate per esempio alle accelerazioni indotte da onde sismiche) genera un insieme di dati indispensabili per una conoscenza più approfondita dei fenomeni vulcanici e per la previsione delle eruzioni. La radiazione laser propagata in fibra ottica consente la creazione di vere reti di monitoraggio nelle aree di interesse usando tecnologie già largamente sperimentate nelle telecomunicazioni, quindi estremamente affidabili e con un costo relativamente basso.

I sensori che misurano le concentrazioni relative e assolute di gas emessi si basano su tecniche di spettroscopia di assorbimento. Inoltre il «cammino ottico» della radiazione laser può variare da pochi centimetri ad alcune decine di metri (con l'impiego delle cosiddette celle «multipasso») in funzione del livello di sensibilità richiesto. Quest'ultimo dipende principalmente dalla specie molecolare da rivelare e dalla lunghezza d'onda della sorgente laser usata. Lo *strain*, definito come  $\Delta L/L$  ovvero la variazione relativa ( $\Delta L$ ) della lunghezza della fibra ( $L$ ), si misura con sensori «a reticolo di Bragg». Prima di tutto, infatti, la fibra è illuminata trasversalmente da una sorgente laser con una potenza modulata



spazialmente con il periodo richiesto, in modo da creare una variazione periodica e permanente dell'indice di rifrazione, che per la radiazione che viaggia nella fibra ottica equivale a uno specchio. Questo reticolo, quindi, trasmetterà alcune lunghezze d'onda e ne rifletterà altre in funzione del periodo. Tuttavia il periodo varia in funzione delle condizioni di pressione e di temperatura cui è sottoposta la fibra, costituendo così uno «specchio variabile» molto sensibile allo strain

e alle variazioni di temperatura. Per anni questi sensori sono stati usati, per esempio, nel monitoraggio di strutture come ponti, dighe ed edifici, ma le ricerche svolte presso l'INOA, in collaborazione con l'INGV e il Centro regionale di analisi e di monitoraggio del rischio ambientale (AMRA), hanno aumentato di alcuni ordini di grandezza la sensibilità, mutuando tecniche di spettroscopia ad altissima sensibilità e usando laser ad altissima stabilità in frequenza.

innovativa, al di fuori delle «normali» metodologie: perforare la crosta superficiale per alcuni chilometri, studiare direttamente il sistema geotermale per tutta la sua estensione in profondità e, una volta oltrepassata la massima profondità dove l'acqua è allo stato liquido, misurare il gradiente conduttivo che è teoricamente costante. In questo modo, estraendo il gradiente conduttivo fino a ottenere circa 1000 gradi Celsius, la temperatura di fusione della roccia, si determinerà la profondità del magma. L'idea è semplice, ma le difficoltà pratiche, organizzative, politiche ed economiche ne fanno una grande sfida scientifica e tecnologica. Per fortuna, diverse perforazioni nell'area fatte precedentemente a minori profondità forniscono informazioni sulla profondità massima degli acquiferi e sulle condizioni che si possono verosimilmente incontrare alle diverse profondità.

Le precedenti perforazioni dell'AGIP hanno raggiunto in alcuni casi il limite inferiore dell'acqui-

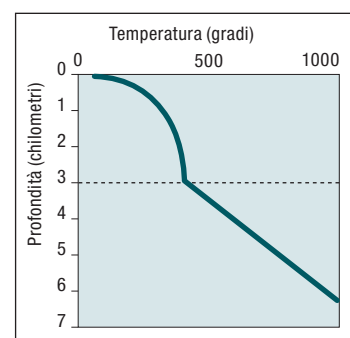
ifero a poco meno di tre chilometri di profondità e hanno trovato alla profondità massima di tre chilometri temperature che superano i 400 gradi Celsius. Queste ricerche hanno indicato che per oltrepassare la profondità degli acquiferi a sufficienza per misurare con buona precisione il gradiente geotermico conduttivo (ossia il tasso di variazione della temperatura con la profondità in assenza di acqua) si deve arrivare a circa quattro chilometri di profondità, con temperature massime fino a 600 gradi Celsius. Il primato della perforazione della crosta terrestre è di 12 chilometri, ma è stato ottenuto nella penisola di Kola, in Russia, un'area geologicamente «fredda», ovvero con basso gradiente geotermico. Perforare a temperature di oltre 500 gradi Celsius in mezzi saturi d'acqua e con gas in pressione sembrava una sfida ai limiti della tecnologia.

Tuttavia, cominciando a documentarci, scoprimmo che dal 2003 era partito un progetto di perforazione in Islanda per scopi geotermici con

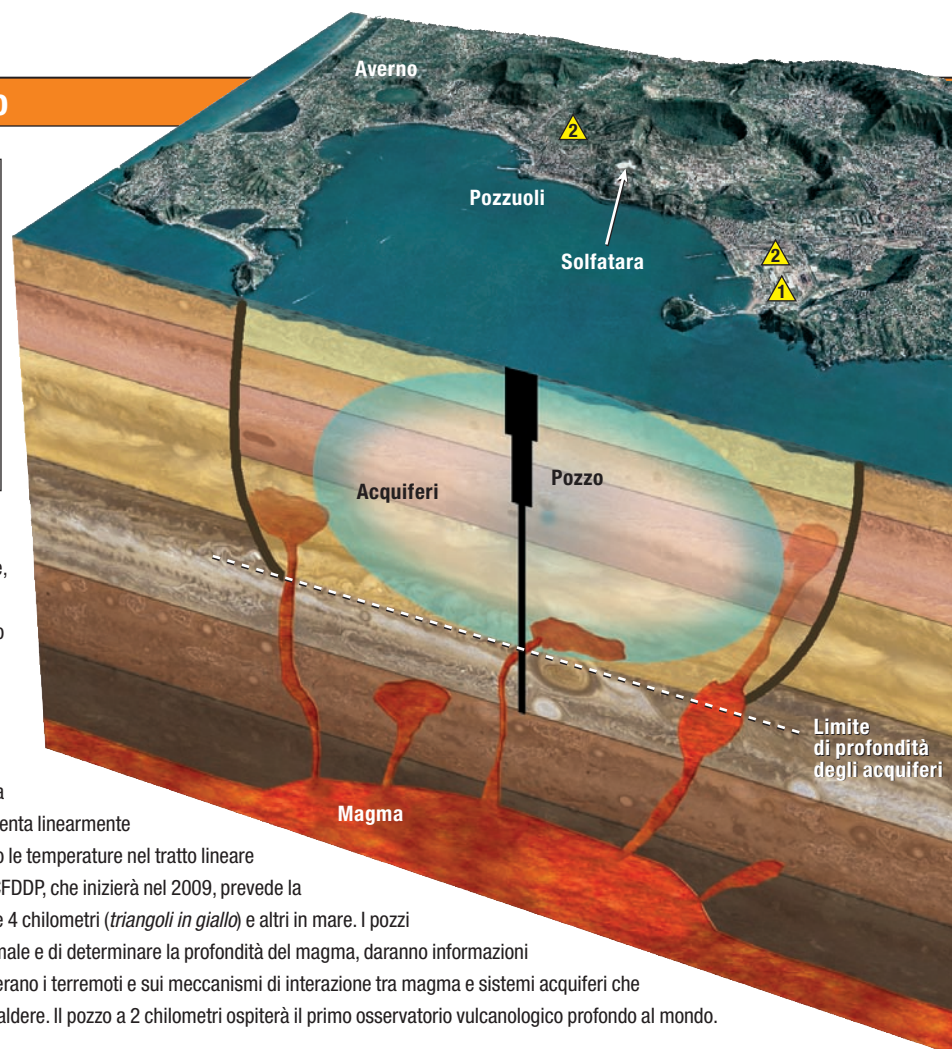
### GLI AUTORI

**GIUSEPPE DE NATALE**, fisico e coordinatore del progetto CFDDP, è dirigente di ricerca dell'INGV e membro dell'Accademia Europaea. **CLAUDIA TROISE**, fisico, co-leader del progetto CFDDP, è ricercatore dell'INGV. Entrambi si occupano di sismologia, geodesia e fisica del vulcanismo, e hanno sviluppato i più recenti modelli sui fenomeni vulcanici nelle caldere. **ENZO BOSCHI**, professore ordinario di sismologia all'Università di Bologna, è presidente dell'INGV e membro dell'Accademia Europaea. Si occupa di geofisica globale, sismologia e vulcanologia. **PAOLO DE NATALE** lavora da oltre dieci anni allo sviluppo di sensori ottici basati su tecniche di spettroscopia laser. Dirige l'INOA-CNR e svolge attività di ricerca presso il LENS a Firenze.

## Campi Flegrei: il profilo



Uno schema ipotetico della struttura profonda dei Campi Flegrei. La zona centrale, dove gli strati di rocce interne sono ribassati rispetto alla posizione originale, è dovuta allo svuotamento di grandi volumi di magma dal sottosuolo durante eruzioni fortemente esplosive. Il grafico mostra la variazione di temperatura in funzione della profondità: tra 0 e 3 chilometri la presenza di acqua tende a omogeneizzare la temperatura, che poi aumenta linearmente fino alla temperatura magmatica; misurando le temperature nel tratto lineare si può risalire alla profondità del magma. Il CFDDP, che inizierà nel 2009, prevede la perforazione di due pozzi a terra profondi 2 e 4 chilometri (*triangoli in giallo*) e altri in mare. I pozzi permetteranno di studiare il sistema geotermale e di determinare la profondità del magma, daranno informazioni sul comportamento delle rocce in cui si generano i terremoti e sui meccanismi di interazione tra magma e sistemi acquiferi che producono il bradisismo e le eruzioni nelle caldere. Il pozzo a 2 chilometri ospiterà il primo osservatorio vulcanologico profondo al mondo.



profondità, temperature e condizioni estremamente simili a quelle dei Campi Flegrei. Il progetto islandese dimostrava che anche il nostro progetto era fattibile: così è nata l'idea del Campi Flegrei Deep Drilling Project (CFDDP). Questo progetto mira a fare dei Campi Flegrei un grande laboratorio naturale in cui scienziati di tutto il mondo possano studiare in maniera diretta i meccanismi che generano il vulcanismo più catastrofico del pianeta, e allo stesso tempo imparare a mitigare l'altissimo rischio vulcanico in quest'area e in altre simili.

Inoltre il CFDDP mira a sviluppare tecnologie all'avanguardia per il monitoraggio ambientale e per il rilancio dei processi di estrazione e sfruttamento dell'energia geotermica, di cui il nostro paese, specialmente il Meridione, è ricchissimo. L'obiettivo è, insomma, trasformare il rischio vulcanico in una grande opportunità di progresso scientifico e tecnologico, per contribuire a risolvere i problemi fondamentali del sistema Italia: l'ambiente, con i rischi associati, l'innovazione tecnologica e la questione energetica.

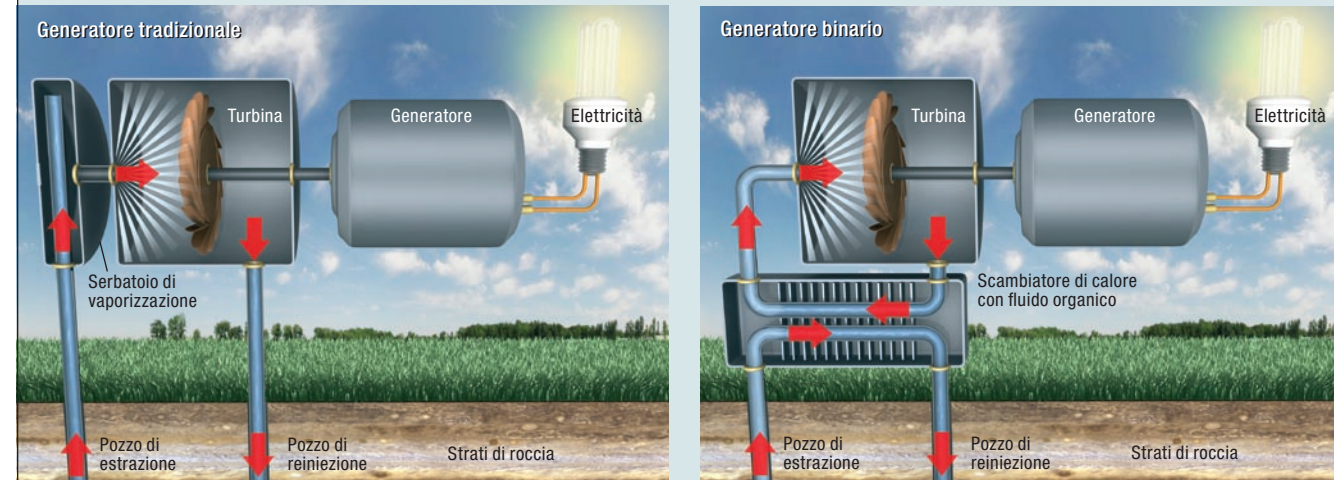
## Tecnologie innovative e controllo dei vulcani

Uno degli scopi del CFDDP è sviluppare e collaudare sistemi efficaci per il monitoraggio dell'attività vulcanica, con due obiettivi a carattere innovativo: il monitoraggio in pozzi profondi, con il primo osservatorio vulcanologico al mondo installato in profondità, il Campi Flegrei Deep Observatory (CFDO), e il monitoraggio del fondale marino del Golfo di Pozzuoli che costituisce la parte sommersa della caldera flegrea. In entrambi i progetti le tecnologie selezionate faranno uso di dispositivi opto-elettronici basati su fibre ottiche.

Per quanto riguarda il CFDO, il problema principale degli attuali sistemi di misura di deformazioni e sismicità è la temperatura massima tollerata dai sensori, generalmente sotto i 200 gradi Celsius. In molte zone dell'area dei Campi Flegrei questo limite si trova anche a profondità minori di 500 metri. D'altra parte, le fibre ottiche più moderne resistono anche a 800 gradi. In questo modo potremo avvicinarci notevolmente alle profondità dove ci si aspetta di trovare il magma, e grazie ai senso-

Stefano Carrara su indicazione degli autori

## Dalla geotermia all'elettricità



Le figure qui sopra schematizzano i principali meccanismi per la produzione di energia elettrica da fonte geotermica. A sinistra è mostrato un classico impianto che sfrutta direttamente l'acqua termale prelevata da pozzi ad alta temperatura (almeno 180-200 gradi Celsius) che, una volta portata in superficie, viene fatta vaporizzare. Il vapore fa girare le turbine di un generatore, e successivamente è fatto ricondensare in modo che l'acqua sia immessa nuovamente nel sottosuolo. Il principio è di fatto identico a quello dei comuni impianti termoelettrici; la differenza sostanziale è l'assenza di una caldaia per bruciare combustibile e riscaldare l'acqua, visto che quest'ultima è prelevata già calda dal sottosuolo. La figura a destra mostra invece il funzionamento schematico di un

generatore «binario», ovvero un generatore in cui il fluido che viene vaporizzato per azionare le turbine non è direttamente l'acqua ma un fluido organico a basso punto di ebollizione (per esempio idrocarburi come n-pentano e isobutano, oppure idrocarburi alogenati come tetrafluoruro di etano). In questo tipo di impianto l'acqua è usata solo per riscaldare il fluido organico al di sopra del suo punto di ebollizione. Questi impianti sono ideali per il funzionamento a temperature relativamente basse delle acque di falda (80-180 gradi Celsius) e per impianti di piccola potenza (0,1-10 megawatt). Nel peggiore dei casi, le centrali geotermoelettriche hanno emissioni ridottissime di anidride carbonica (20 volte inferiori rispetto alle centrali termoelettriche convenzionali), mentre le centrali binarie hanno emissioni nulle.

Stefano Carrara su indicazione degli autori

ri di deformazione e temperatura rileveremo anche i più deboli segnali generati dal movimento del magma o dalle variazioni di condizioni nei sistemi geotermali e ricaveremo informazioni impossibili da ottenere in superficie. Probabilmente l'uso sistematico di queste tecnologie innovative rivoluzionerà le nostre conoscenze, fornendo dati molto accurati, indispensabili per fare progressi nella previsione delle eruzioni.

I sensori di deformazione in fibra ottica si basano sul fenomeno ottico dell'interferenza, che sfrutta la variazione periodica dell'indice di rifrazione realizzata in tratti di fibra lunghi qualche centimetro in modo da avere «filtri» estremamente selettivi e sensibili alla frequenza della radiazione che li raggiunge, ovvero i «reticoli di Bragg». Qualsiasi perturbazione della fibra causata dall'applicazione di forze (dovute per esempio alle deformazioni del suolo a cui la fibra è ancorata) o da variazioni di temperatura si traduce in una variazione delle lunghezze d'onda che il filtro trasmette, o riflette per interferenza distruttiva. Sistemi commerciali basati su questo principio raggiungono una sensi-

bilità – definita *strain* ed espressa come variazione relativa della lunghezza della fibra – generalmente non superiore a  $10^{-6}$ .

I ricercatori della sezione di Napoli dell'Istituto nazionale di ottica applicata (INOA) hanno invece introdotto metodi che hanno rivoluzionato le caratteristiche di sensibilità per questo tipo di sensori, adattando tecniche proprie di una disciplina completamente diversa – la spettroscopia ad altissima sensibilità e risoluzione – alla «lettura» delle minime variazioni nelle lunghezze d'onda trasmesse o riflesse dai reticoli di Bragg. In questo modo la sensibilità dei sensori è stata migliorata di circa cinque ordini di grandezza e il limite ultimo non è ancora stato raggiunto. Una sensibilità di  $10^{-9}$  è ottimale per l'impiego geofisico, e prototipi con queste caratteristiche sono già stati sviluppati dai ricercatori dell'INOA in collaborazione con l'Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia (INGV) nell'ambito delle attività del Centro regionale di competenza sull'analisi e il monitoraggio del rischio ambientale (AMRA), istituito e finanziato dalla Regione Campania nel 2001.

**La geotermia è una fonte energetica di cui l'Italia è ricca, in particolare il Centro e il Sud della penisola**

I sensori di deformazione in fibra ottica, inoltre, si possono impiegare come termometri di altissima precisione, poiché anche le variazioni di temperatura producono deformazioni nella fibra. L'impiego di questo tipo di tecnologia, associata all'uso di fibre ottiche di ultima generazione, può aprire nuovi orizzonti nel campo delle perforazioni della crosta in campi geotermali ad altissime temperature. Oggi l'unico modo per misurare temperature superiori a circa 250 gradi in pozzi profondi è calare nei pozzi stessi leghe metalliche con punto di fusione noto e osservare se fondono. Ma questa tecnica è imprecisa, anche perché spesso è difficile distinguere l'inizio di una fusione da una corrosione dovuta a fluidi particolarmente aggressivi.

Le tecnologie optoelettroniche aprono anche nuovi orizzonti nella possibilità di monitorare in continuo le emissioni di gas vulcanici e in generale di gas di interesse ambientale con sistemi spettroscopici ad altissima risoluzione. Ricercatori dell'INOA, in collaborazione con colleghi dell'INGV, del Laboratorio europeo di spettroscopia non lineare (LENS) e della Seconda Università degli studi di Napoli, hanno già dimostrato che è possibile impiegare questi spettrometri in alcune delle aree vulcaniche di maggiore interesse: i Campi Flegrei, i Colli Albani, nel Lazio, e l'isola di Vulcano, nelle Eolie.

Inoltre con queste tecnologie si possono monitorare i fondali marini, obiettivo di primario interesse per l'area dei Campi Flegrei. La caldera flegrea è infatti sommersa per oltre il 50 per cento della sua superficie, e attualmente non esistono sistemi commerciali per il monitoraggio delle deformazioni sul fondale marino, dunque la maggior parte della deformazione che avviene durante gli episodi di bradisismo non è monitorata. I modelli per questo tipo di fenomeni si basano tutti sulle osservazioni a terra, ma le deformazioni più significative hanno luogo verosimilmente in mare, al centro del Golfo.

Per colmare questa lacuna, l'AMRA S.c.ar.l., consorzio che raccoglie le Università e gli enti di ricerca della Regione attivi nel settore ambientale, sta elaborando il progetto MARINET, coordinato da Aldo Zollo dell'Università «Federico II» di Napoli. Obiettivo di MARINET è il monitoraggio multiparametrico dei golfi di Napoli e di Pozzuoli, che affiancherà il CFDDP al fine di favorire lo sviluppo tecnologico e lo *spin-off* industriale legato ai problemi vulcanologici e ambientali dei Campi Flegrei.

### Una risorsa per l'Italia

Uno degli obiettivi principali del CFDDP è il rilancio dell'energia geotermica, una fonte di cui la nostra penisola è ricchissima, in particolare al Centro-Sud e soprattutto nell'area flegrea e napoletana.



## LA GEOTERMIA NEL MONDO

■ L'Italia è stata il primo paese a sfruttare l'energia geotermica per produrre elettricità. Nel 1904 a Larderello è stato dimostrato che si può ottenere energia elettrica sfruttando la vaporizzazione dell'acqua ad alta temperatura proveniente dal sottosuolo.

■ Oggi la centrale di Larderello, con le vicine centrali di Travale, Montiero e Monte Amiata, grazie a 810 megawatt installati produce circa il 10 per cento dell'energia geotermoelettrica globale, e copre il 25 per cento del fabbisogno elettrico della Toscana.

■ Gli Stati Uniti hanno il primato mondiale di produzione di elettricità da fonte geotermica (2600 megawatt), seguiti dalle Filippine, dal Messico e dall'Indonesia.

■ In Islanda un progetto di perforazione analogo a quello proposto dagli autori per i Campi Flegrei sperimenta con successo la geotermia con acqua supercritica prelevata a 4-5 chilometri di profondità. Ogni pozzo genera fino a 50 megawatt. In questo modo campi geotermici di modeste dimensioni possono generare quantità di energia paragonabili alle centrali nucleari.

na. La geotermia è nata in Italia, precisamente nell'area di Larderello, frazione del comune di Pomarance, in provincia di Pisa, ma il suo sfruttamento, diffusosi a livello globale, non ha avuto ulteriori sviluppi nel nostro paese. Eppure la sola area di Larderello, con una potenza installata di oltre 750 megawatt, è vicina alla potenza prodotta da una centrale nucleare.

Negli ultimi anni, sotto la spinta dell'aumento dei costi economici e politici dei combustibili fossili e dei problemi ambientali alla base del Protocollo di Kyoto, in molti paesi – sia sviluppati come gli Stati Uniti sia in via di sviluppo, come Indonesia e alcuni Stati dell'America Latina – lo sfruttamento dell'energia geotermica è in enorme crescita, grazie a tecnologie innovative. In Italia, al contrario, quando si parla di energie rinnovabili ed ecocompatibili ci si riferisce esclusivamente al solare, all'eolico e alle biomasse, dimenticandosi sistematicamente la geotermia. Eppure l'Italia è ancora in una posizione estremamente avanzata nelle conoscenze tecnologiche riguardo a questa fonte energetica.

Il concetto alla base della geotermia è molto semplice, ancor più di quelli alla base del solare e dell'eolico. La crosta terrestre in profondità è significativamente più calda rispetto alla superficie, quindi si possono impiegare le stesse tecniche alla base della produzione di energia elettrica con combustibili fossili: basta sostituire la caldaia con un pozzo di profondità appropriata per raggiungere la temperatura richiesta. Inoltre l'energia geotermica può fornire direttamente calore per i sistemi di riscaldamento di complessi residenziali.

L'energia geotermica, quindi, si può sfruttare



esattamente per gli stessi fini dell'energia ricavata da combustibili fossili. Per esempio è possibile costruire centrali con grandi potenze installate (centinaia di megawatt) in spazi limitati. Inoltre l'energia elettrica prodotta dalla geotermia è continua e costante, al contrario del solare e dell'eolico in cui la produzione dipende fortemente dalle condizioni meteorologiche, stagionali e, nel caso del solare, dal ciclo giorno-notte. Questa caratteristica fa sì che l'energia prodotta dalle centrali geotermiche si possa immettere direttamente nelle linee di erogazione elettrica di base, mentre il solare e l'eolico per ora possono soltanto compensare i picchi di assorbimento.

Grazie alle nuove tecnologie di estrazione, l'energia geotermica è realmente una fonte rinnovabile ed ecocompatibile, ed è l'unica con queste caratteristiche che può realmente rappresentare nel breve-medio termine una possibile alternativa al nucleare. Questo perché le moderne tecnologie consentono di mantenere quasi inalterati i livelli di falda, visto che l'acqua che si estrae dai pozzi è reimpressa nel sottosuolo. Inoltre, con le attuali tecnologie binarie, ottimali per impianti di dimensioni medio-piccole (tra 1 e 10 megawatt di potenza), l'acqua ad alta temperatura è usata solo per riscaldare un fluido secondario a basso punto di ebollizione che poi è fatto vaporizzare per alimentare le turbine del generatore e infine è ricondensato in un ciclo chiuso (*si veda il box a p. 83*).

Le emissioni in aria di gas presenti nella falda freatica si possono ridurre praticamente a zero in molti tipi di impianti, e l'emissione di CO<sub>2</sub> presente nel vapore, anche nel caso di immissione totale in aria, è comunque circa 20 volte inferiore a quel-

la di centrali equivalenti alimentate con combustibili fossili. L'Islanda usa l'energia geotermica come fonte primaria per tutte le sue necessità, dal riscaldamento alla produzione di energia elettrica; gli Stati Uniti, dopo una stasi di quasi dieci anni, stanno incrementando notevolmente l'uso di questa fonte, con molti nuovi impianti medio-piccoli in Nevada, a causa di un forte incremento demografico registrato in quello Stato; la Francia, la Germania e la Svizzera stanno costruendo centrali geotermiche binarie anche in aree con basso gradiente geotermico e basso contenuto d'acqua (come le Alpi), scavando fino a 4-5 chilometri di profondità per raggiungere temperature di poco maggiori di 200 gradi Celsius.

Sembra una beffa il fatto che l'Italia, paese dove la geotermia è nata e dove il problema dell'approvvigionamento energetico è tra i più drammatici dei paesi sviluppati, pur avendo condizioni ottimali di alto gradiente geotermico almeno in tutta l'area tirrenica centro-meridionale, abbia completamente dimenticato questa fonte. Il CFDDP vuole stimolare una discussione per il rilancio di questa fondamentale risorsa del paese, e per farlo sceglie un'area dove le condizioni sono ottimali: alto gradiente geotermico e presenza di un'importante falda freatica con temperature altissime anche a profondità di decine o centinaia di metri.

Questo progetto internazionale, se avrà l'attenzione e il successo che merita, sarà un fattore trainante per cambiare la nostra cultura ambientale ed energetica. E dimostrerà che grazie alla tecnologia e alla ricerca anche un problema drammatico come il rischio vulcanico si può parzialmente trasformare in una risorsa importante per la società. ■

DALLA TOSCANA ALLA CAMPANIA. Nella pagina a fronte, l'impianto geotermico di Larderello, il primo al mondo a essere costruito. Qui sopra la Solfatarata di Pozzuoli, nell'area dei Campi Flegrei.

## Letture

Remote sensing of volcanic gases with a DFB-laser based fiber spectrometer. Gianfrani L., De Natale P. e De Natale G., in «Applied Physics B - Rapid Communications», Vol. 70, pp.467-470, 2000.

Mechanisms of Activity and Unrest at Large Calderas. Troise C., De Natale G. e Kilburn C., Geological Society, Londra, Volume speciale, 269, 2006.

Renewed round uplift at Campi Flegrei caldera (Italy): New insight on magmatic processes and forecast. Troise C., De Natale G., Boschi E. e altri, in «Geophysical Research Letters», Vol. 34, 2007.