

Faglie e terremoti

La crosta terrestre come sistema complesso

di Lucilla de Arcangelis ed Eugenio Lippiello



a.
Visione aerea della faglia di San Andreas in California, lunga più di 1200 km e profonda fino a 15 km. Essa rappresenta il confine tettonico tra la placca nordamericana e quella pacifica.

Accadono improvvisamente, spesso senza alcun preavviso, causando talvolta danni enormi. Anche i terremoti possono essere annoverati tra i fenomeni da studiare nell'ambito della complessità.

La crosta terrestre è un mezzo elastico in continua ma lenta deformazione, pochi centimetri in un anno. In prossimità delle faglie sismiche (vd. fig. a), ovvero all'interfaccia di due placche tettoniche, la deformazione è inibita dalle forze perpendicolari all'interfaccia che causano una forza di attrito che tiene la faglia bloccata. Lo stress accumulato in zone bloccate viene poi rilasciato in un tempo

brevissimo (pochi secondi), dando origine a un terremoto. La "taglia" dei terremoti dipende dalla lunghezza del segmento di faglia che si sblocca e che quasi sempre è così piccolo (minore di qualche metro) da essere impercettibile ai sensi e identificabile solo attraverso apposita strumentazione. In rari casi, però, il segmento può essere anche di qualche decina di chilometri, dando luogo a terremoti con magnitudo superiore a 6, che possono produrre effetti distruttivi in ampie aree.

Nella prima metà del '900 si pensava che una faglia potesse essere trattata

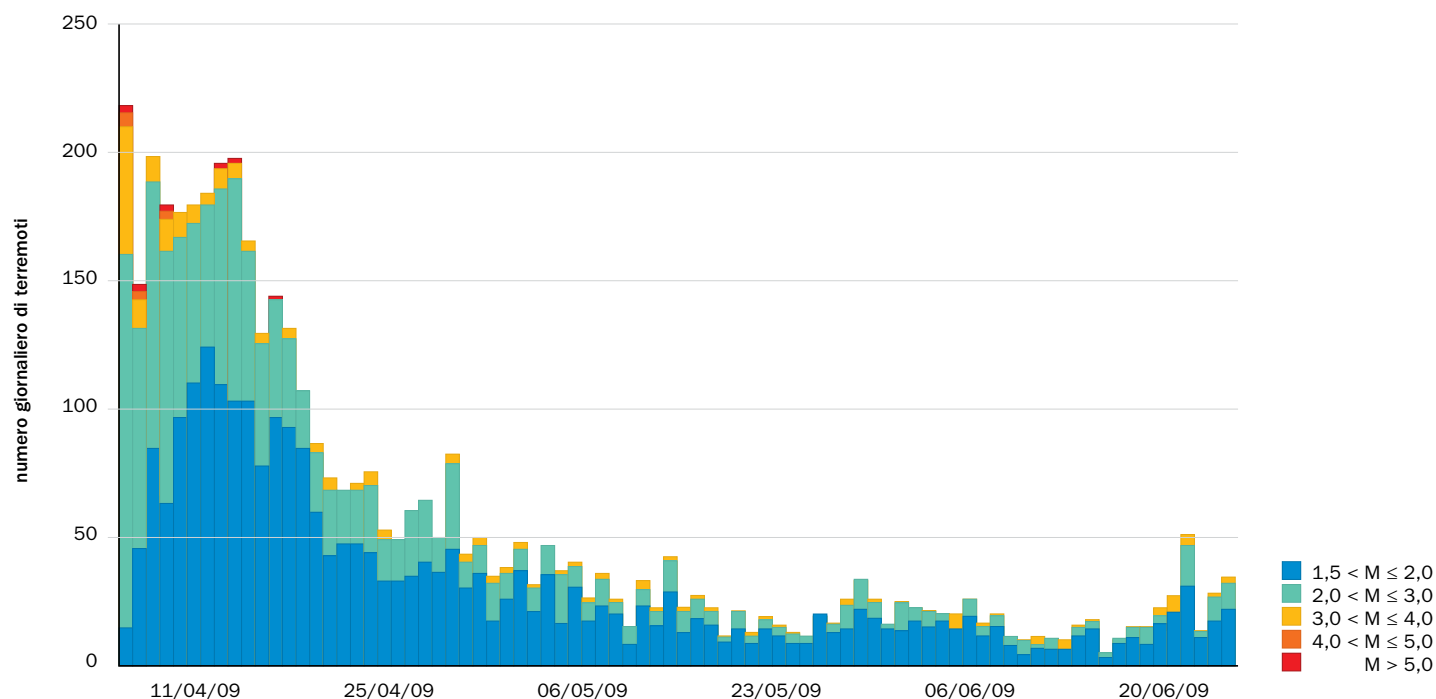
come un corpo rigido bloccato da una forza di attrito e soggetto a una forza crescente. Questo sistema può essere descritto come una massa, su un piano scabro, tirata da una molla, che si allunga a velocità costante molto bassa (pochi centimetri all'anno). Quando la forza elastica supera quella di attrito si ha un terremoto, con la molla che si accorcia quasi istantaneamente e la massa che viene nuovamente bloccata dall'attrito. Secondo questo modello, una faglia produce terremoti della stessa taglia caratteristica ed equidistanti nel tempo, di conseguenza prevedibili.

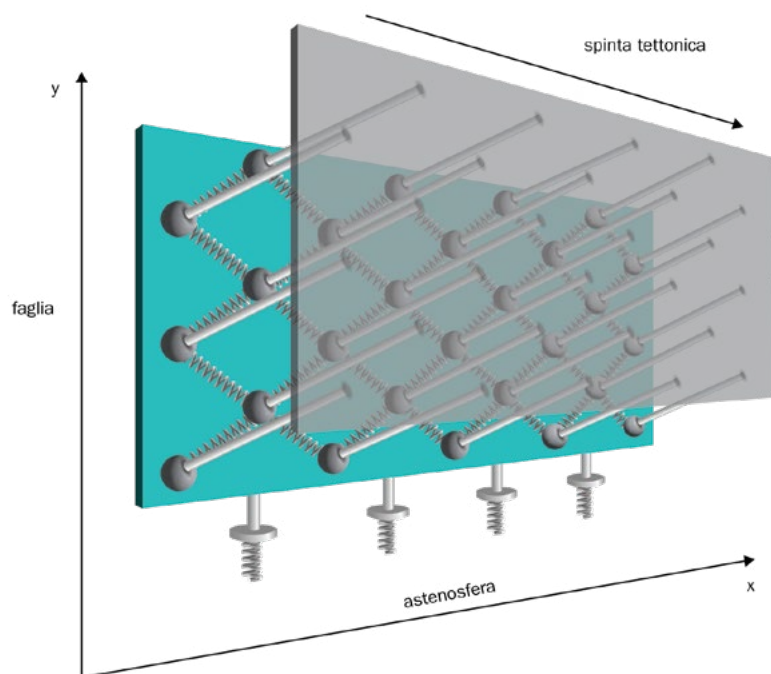
Questo semplice modello purtroppo non è in accordo con l'osservazione che la stessa faglia può produrre terremoti molto diversi tra di loro e organizzati nel tempo in modo irregolare. Ciò ha favorito l'ipotesi che la genesi di un terremoto sia un processo caotico, intrinsecamente imprevedibile, per cui un terremoto distruttivo e uno impercettibile nascono praticamente allo stesso modo. Allo stesso tempo, quando si considerano le proprietà statistiche di un insieme di molti terremoti, si trova che esse seguono leggi empiriche ben determinate. Queste leggi hanno un carattere "universale", nel senso che, nonostante il tasso sismico cambi molto da area ad area, si ritrovano le stesse leggi nelle diverse aree geografiche e in diversi periodi temporali. Ad esempio, il numero di terremoti di una certa magnitudo segue una legge di potenza decrescente con l'energia rilasciata dal terremoto (legge di Gutenberg-Richter), con un esponente universale. Si osservano, quindi, ovunque, pochi grandi terremoti e un gran numero di piccoli eventi. Inoltre, un grande terremoto è seguito da un'improvvisa crescita del tasso sismico, dovuta a terremoti secondari detti "aftershock"

(vd. fig. b). Il loro numero decresce come una legge di potenza in funzione del tempo trascorso dal terremoto che li ha innescati. Questa è una legge empirica nota da più di un secolo, la legge di Omori. L'insieme delle osservazioni sperimentali, con comportamenti a legge di potenza, implica l'assenza di grandezze caratteristiche, come energia o distanze spazio-temporali. Questo è un chiaro segno che la crosta terrestre è un sistema complesso, dove molti gradi di libertà interagiscono tra loro, in base a leggi anche semplici e ben note su scala microscopica, dando però origine a comportamenti macroscopici inattesi sulla base della conoscenza di tali leggi. Come è possibile conciliare l'irregolarità del singolo terremoto con la regolarità osservata nelle proprietà statistiche dell'accadimento sismico? Una risposta a questa domanda si ha sostituendo la descrizione della faglia come un blocco rigido con quella più realistica, in cui una faglia è un insieme di tanti blocchi elementari collegati tra di loro da molle (vd. fig. c). Il problema semplice del moto deterministico di una singola massa va sostituito con la dinamica complessa di tante masse interagenti tra loro, in

b. Numero di *aftershock* registrati giornalmente dopo il terremoto dell'Aquila del 6 aprile 2009. I diversi colori indicano diversi intervalli di magnitudo (adattamento da dati INGV).

andamento della sequenza dal 6 aprile 2009





c.
Rappresentazione schematica del modello di faglia sismica.

Il piano di faglia è modellizzato come un'interfaccia elastica costituita da masse collegate tramite molle e tirate da una forza nella direzione x che cresce con velocità costante nel tempo (spinta tettonica). Il piano interagisce in modo visco-elastico (pistoncini) con la parte sottostante della crosta terrestre (l'astenosfera).

cui una massa tende a trasportare con sé le masse a cui è elasticamente connessa. Esse possono spostarsi a loro volta, coinvolgendo altre masse in un processo a cascata che può essere imprevedibile e caotico.

Tuttavia, la dinamica di un'interfaccia elastica soggetta a una forza esterna, descrizione comune a molti sistemi fisici, dà origine a comportamenti universali, come mostrato da Giorgio Parisi insieme a Mehran Kardar e Yi-Cheng Zhang per interfacce con accoppiamenti anche di tipo non elastico. Questi sistemi sono usualmente studiati nell'ipotesi di una forza costante applicata a ciascuna massa, il cui valore deve superare una soglia critica affinché l'interfaccia si muova. Per una forza applicata pari al valore di soglia, l'interfaccia evolve in modo intermittente, con segmenti che restano bloccati e altri che si spostano insieme, come tanti terremoti. A differenza dei modelli di interfaccia, nella dinamica dei terremoti la forza applicata a una faglia, tramite una molla, non è costante: la molla si allunga quando la singola massa è bloccata e si accorcia quando slitta. In questo modo il sistema si auto-organizza per mantenersi sempre vicino al valore critico della forza applicata. Questo approccio può spiegare alcune leggi universali come la legge di Gutenberg-Richter, ma non è in grado di riprodurre l'accadimento degli *aftershock*.

Negli ultimi 15 anni, grazie alla capacità di apprezzare piccole deformazioni della crosta terrestre mediante GPS, si è capito che gli *aftershock* possono essere legati alle deformazioni lente che un terremoto induce nella parte più profonda della crosta terrestre. Questa zona, che si trova a temperatura più alta, ha un comportamento di tipo duttile, come una molla che non si deforma tutta istantaneamente ma con un ritardo temporale. Il meccanismo può essere modellizzato assumendo un accoppiamento tra le masse non solo mediante le classiche molle elastiche, ma anche con elementi più complessi, di tipo visco-elastico. In questo modo si riesce a spiegare l'origine degli *aftershock* e si è in grado di riprodurre il loro accadimento nel tempo. Il successo di questi modelli indica che la fisica dei sistemi complessi applicati ai terremoti diventa fondamentale nell'identificare i limiti intrinseci della previsione sismica e nell'individuare le grandezze fisiche rilevanti da monitorare a tal fine. Tale approccio non si limita solo all'accadimento sismico. Infatti, esistono in natura altri processi che presentano leggi statistiche simili a quelle dei terremoti. Ad esempio, le eruzioni solari seguono leggi come la legge di Gutenberg-Richter o la legge di Omori, con un comportamento universale. Ciò suggerisce che altri fenomeni naturali, anche molto diversi dai terremoti, possano condividere con essi una modellizzazione ispirata alla dinamica di interfaccia.

Biografia

Lucilla de Arcangelis è professore di fisica teorica presso l'Università della Campania "L. Vanvitelli". I suoi interessi di ricerca spaziano dalla percolazione ai frattali, dagli automi cellulari agli *spin glass* e ai modelli per frattura e gelificazione. Recentemente, ha concentrato la sua ricerca sulle proprietà statistiche dell'accadimento di terremoti ed eruzioni solari e sulle proprietà critiche dell'attività cerebrale spontanea.

Eugenio Lippiello è professore di fisica teorica presso l'Università della Campania "L. Vanvitelli". I suoi interessi di ricerca sono nell'ambito della meccanica statistica del non equilibrio, con applicazioni a sistemi complessi, mezzi granulari e valutazione della pericolosità sismica.