

## TSUNAMI E TERREMOTI, COSÌ RISUONANO NELLO SPAZIO

*È possibile analizzare e misurare da satellite fenomeni innescati da eventi sismici? La risposta è sì, e la “smoking gun” è ora descritta in uno studio, condotto da un team multidisciplinare di ricercatori italiani su dati acquisiti dal progetto Limadou con il satellite Cses, sulle perturbazioni delle frequenze di risonanza delle linee del campo geomagnetico. Da MEDIA INAF del 20 settembre 2021 riprendiamo, con autorizzazione, un articolo di Marco Malaspina con un'intervista ad uno degli autori, il fisico Roberto Battiston.*

Da quando c'è il Covid, gli italiani lo conoscono soprattutto per le sue analisi sull'andamento della pandemia. Ma il suo ambito di studi è anzitutto quello delle astroparticelle, fino al 2018 è stato presidente dell'Agenzia spaziale italiana e da allora è tornato a tempo pieno alla sua passione di sempre: la fisica sperimentale. Parliamo di **Roberto Battiston**, oggi professore all'Università di Trento, nonché coordinatore della ricerca sui fenomeni sismici visti dallo spazio nella collaborazione Limadou del satellite sino-italiano Cses. Insomma, uno scienziato a tutto campo. Quando gli chiediamo se c'è un filo conduttore, a tenere insieme questa girandola di interessi, non mostra alcuna esitazione, certo che c'è: «Si chiama matematica. Tutto ciò che avviene nel mondo, se lo vuoi capire, devi vestirlo di matematica».

Ed è con l'obiettivo di “vestire di matematica” lo studio dallo spazio dei fenomeni sismici, di mettere a punto modelli utili a dare credibilità alla scienza dell'osservare i terremoti da lontano, che Battiston – insieme a colleghi fisici matematici, esperti di plasmi, esperti di particelle “intrappolate” e particelle elementari e astrofisici – ha da qualche tempo messo insieme un gruppo di studio quanto mai multidisciplinare. Gruppo che ha firmato nell'ultimo anno una trilogia di articoli, l'ultimo dei quali – che ha come primo autore Guido Piersanti dell'Istituto nazionale di astrofisica – pubblicato lo scorso luglio su *Remote Sensing*.

**Battiston, perché osservare i terremoti e i maremoti da lontano, dall'alto? Abbiamo già tanti sismografi, tante boe... Non è più semplice, più veloce e più accurato monitorare questi fenomeni dal basso, con le reti già esistenti qui sulla terra?**

«La storia dell'osservazione della Terra ha mostrato come una capacità regolare di osservare un fenomeno dallo spazio – che sia la temperatura degli oceani, l'altezza dei ghiacci o altro – dà un risultato enormemente migliore di tutte le reti possibili. Per motivi molto semplici: certi strumenti che puoi mettere sulla terra non li puoi mettere nel mare, altri che puoi mettere solo in luoghi molto abitati non li puoi mettere in luoghi più sfortunati, per esempio sulle montagne... Lo spazio, da questo punto di vista, può invece fornire regolarmente l'informazione. Tanto per dare un esempio, a Parigi, nel 2015, in occasione di Cop21, si è riconosciuto che il passo avanti sostanziale sulla modellizzazione del clima è quello dei dati satellitari, perché sono globali, costanti, garantiti e di buona qualità. La rete dei sismografi, al contrario, è distribuita in modo assai poco uniforme. Consente comunque di ricostruire dove si è avuto un terremoto, certo, ma il dettaglio dell'informazione molto spesso non è disponibile. Quanto ai maremoti, sappiamo che dopo il disastro dell'Oceano Indiano ci siamo trovati totalmente scoperti. Ci sono varie iniziative per cercare di equipaggiare opportune zone del mare per avere le informazioni, ma è ovvio che per vedere un'onda larga 100 km e lunga 300 metri, nell'insieme del mare che si muove, servono i satelliti: si mettono dei sensori che poi vengono osservati».

**La tecnica che voi usate però è diversa...**

«Sì, quello che noi stiamo proponendo è che si può anche vedere l'impronta dell'onda lunga del mare nella ionosfera. Già per il terremoto del Giappone è stato dimostrato che si può fare: si vede l'impronta come se avessi buttato un sasso in uno stagno. Ma è l'impronta *riflessa sulla ionosfera*, sopra il Giappone e sopra la

Cina. Quindi ci sono delle buone ragioni per fare queste cose dallo spazio, perché esistono enormi zone – nel mare e sulla terra – poco equipaggiate, o equipaggiate in modo parziale. Questo tipo di osservazione può essere vantaggioso anche per fenomeni – come gli tsunami – che impiegano molte ore per spostarsi dal punto del terremoto alle zone abitate. Quindi, fermo restando che la nostra è una prima osservazione che apre un nuovo settore, l'idea che nello spazio ci possano essere costellazioni che, congiunte a quelle sulla terra, offrano un vantaggio osservativo ci viene da tutto quello che abbiamo imparato in 30-40 anni di *Earth observation*».



Rappresentazione artistica del satellite italo-cinese Cses-01. Crediti: Cses collaboration

### **Il progetto Limadou come si colloca, in queste osservazioni?**

«Limadou è il nome della strumentazione italiana del primo satellite Cses – con un rivelatore di particelle di energia basse e medie, parliamo dei MeV e decine di MeV. Questi satelliti – ce n'è già un secondo in preparazione che avrà anche un rivelatore per la misura del campo elettrico, altra variabile importante – si inseriscono nella tradizione di strumenti che misurano quantità fisiche dell'alta magnetosfera: densità e temperatura cinetica del plasma, quantità di elettroni, campi magnetici, campi elettrici, particelle che sono intrappolate nelle fasce di Van Allen ma che sono disturbate da fenomeni sia esterni, dal Sole, che interni alla Terra. Strumenti che permettono dunque l'osservazione di parametri fisici caratteristici della magnetosfera».

### **Strumenti come quelli per lo studio dello *space weather*?**

«Sì, oppure per gli studi sulla complessità della magnetosfera terrestre, che ha una parte interna chiusa in sé stessa e una parte esterna in contatto con l'eliosfera – c'è tutto un settore che si occupa di queste tematiche dei plasmici circumterrestri. Il satellite Cses, in particolare, nella collaborazione sino-italiana è stato ottimizzato per cercare fenomeni legati ai sismi».

### **Fenomeni precursori?**

«Eventualmente anche fenomeni precursori, sì, ma quello di cui ci stiamo occupando attualmente è invece ciò che è *co-sismico*: cioè quello che avviene nell'immediatezza del terremoto. Il nostro interesse è infatti comprendere a fondo come la Terra possa “comunicare” alla fascia alta della ionosfera i segnali collegati a un fenomeno sismico. Tsunami, terremoti ed eruzioni vulcaniche: tutti fenomeni che scuotono la superficie terrestre e la deformano. Perché non è mai stato dimostrata con efficacia e precisione la correlazione fra ciò che accade a livello della superficie e ciò che accade negli strati superiori. Il modello di accoppiamento – che abbiamo pubblicato – fra litosfera, atmosfera, ionosfera e magnetosfera si basa su formule che descrivono in dettaglio i vari fenomeni all'interno di questi vari strati con equazioni molto precise. Formule complesse da risolvere, non lineari, richiedono un approccio basato sul calcolo, ma è stato anche importante impostarle correttamente e gestire le interfacce di questi calcoli fra un *layer* e l'altro. Quindi è un modello verificabile con grande precisione – con precisione arbitraria, in un certo senso: dipende da quanto sono buoni gli

strumenti e il calcolo che facciamo – ma soprattutto è fortemente causale, nel senso che da *a* segue *b* segue *c* segue *d*... in una sequenza ben precisa».

### Quale sequenza?

«In parte l'abbiamo già mostrata con il primo articolo della serie di tre che abbiamo pubblicato, in cui abbiamo preso un terremoto specifico, quello di Bayan, e si è vista una sequenza ben precisa. Quando la superficie terrestre si muove, nel caso di un maremoto – per esempio – ci sono onde che modificano in altezza il livello del mare. In mare aperto hanno lunghezze d'onda molto grandi – decine, centinaia di metri – ma arrivando sulla spiaggia danno origine a fenomeni assai complicati, come quello del mare che si ritrae prima tornare violentemente sul territorio. A noi comunque interessa quello che accade in mare aperto: grandi onde – magari d'altezza contenuta, anche meno di un metro – che si estendono su superfici immense. Ecco allora che l'atmosfera al di sopra di queste onde viene *modulata* da questa sorta di movimento oscillatorio che agisce su di essa. Una cosa analoga avviene quando c'è un terremoto – dunque sulla fase solida, anche se in questo caso tipicamente domina la componente longitudinale, quindi non la parte sussultoria ma la parte oscillatoria. Questa vibra su chilometri quadrati a contatto con l'atmosfera e mette in moto, anche in questo caso, un fenomeno atmosferico. Questi fenomeni atmosferici, che sono il punto di partenza del nostro modello, si chiamano *onde gravito-acustiche*, perché sono onde di fenomeni “acustici” – nel senso che muovono la pressione dell'aria – ma con lunghezze d'onda molto diverse da quelle tipiche del suono e, soprattutto, su grandi volumi all'interno della gravità».

### Di che lunghezze d'onda parliamo?

«Vanno dalle centinaia di metri alle centinaia di chilometri, quindi le frequenze sono dai secondi alle frazioni di secondo: parliamo di infrasuoni a tutti gli effetti. Queste onde gravito-acustiche, descritte da equazioni non lineari, non sono fenomeni esotici: tutte le volte che c'è un temporale, per esempio, lo scontro fra diversi fronti d'onda – come i colpi di vento che inaugurano l'arrivo di un temporale – è una *acustic-gravity wave*. Cioè un fenomeno a bassissima frequenza che però ti muove gli alberi, perché è un fronte che sta arrivando orizzontale. Tipicamente i fenomeni meteorologici sono fronti d'onda che si scontrano più o meno orizzontalmente. Nel nostro caso, invece, il fenomeno che ci interessa è un'onda gravito-acustica che si propaga *verticalmente*, dal basso verso l'alto. Il tempo scala che impiega la perturbazione per arrivare da terra agli strati alti dell'atmosfera – diciamo circa 100 km – si misura in *minuti*. Una volta che si è messa in moto questa massa d'aria, il fenomeno dura 20, 30, 40 minuti, ma il fronte d'onda è arrivato in cima in pochi minuti. È un po' come aver dato una rimescolata a un paiolo di aria: l'aria ha uno scarso attrito, non è come l'acqua, si ferma più lentamente, quindi continua rimescolarsi e muoversi per delle buone mezzore. Ma intanto il fronte di disturbo è arrivato sulla ionosfera».

### E lì cosa accade?

«Lì c'è un'interfaccia: non più un tenue gas neutro bensì un tenue gas ionizzato, carico – perché tutto quanto è ionizzato, nella ionosfera. L'effetto di spostamento meccanico si trasmette dunque dal neutro al carico, e oltre a far nascere un'onda di plasma – plasma carico – vengono anche emesse onde elettromagnetiche, associate alla frequenza caratteristica di quest'onda che continua a propagarsi passando dal neutro al carico. Poiché le onde di cui parlavamo prima sono molto lunghe, e hanno quindi frequenze molto basse, vengono emesse onde elettromagnetiche di bassissima frequenza: dalle decine alle poche centinaia di hertz. Sono onde caratteristiche, molto lunghe, e assieme all'onda di plasma influenzano la magnetosfera – questa zona del campo magnetico terrestre di tipo dipolare, diciamo, immerso nella ionosfera ma che comunque intrappola le particelle di Van Allen. Questo disturbo delle onde che si infilano nelle linee magnetiche, modificando il campo magnetico, dà origine al fenomeno dell'instabilità delle fasce di Van Allen, e in particolare a quel fenomeno curioso, divertentissimo, che è l'oggetto del nostro articolo».

### Quello dal complicatissimo titolo “Sulle variazioni della frequenza propria di risonanza della linea del campo geomagnetico durante un fenomeno sismico”, sperando d'aver tradotto bene. Si riesce a spiegarlo in modo comprensibile?

«La Terra, con le sue linee del campo magnetico, intrappolando il plasma – tipicamente quello di Van Allen – è un sistema congelato particella-campo. È un po' come il vento solare, che arriva portandosi dietro il suo campo. Nel nostro caso abbiamo queste linee di campo magnetico dipolare che hanno “congelato” intorno a sé il plasma degli elettroni e dei protoni delle fasce di Van Allen. Una cosa come questa si comporta



esattamente come una corda risonante. Abbiamo cioè questi archi di campo magnetico, congelato assieme al suo plasma, che hanno frequenze proprie di vibrazione: più è denso il plasma, più basse sono queste frequenze. Più è lunga la “linea”, più basse sono queste frequenze. Il fenomeno si chiama *frequency line resonance*, è noto dai tempi dello studio della ionosfera, e la cosa divertente è che queste linee continuano a vibrare. Un po’ come le corde di un violino: sottoposte al vento solare, sottoposte a onde elettromagnetiche, disturbi di tipo stocastico, loro oscillano sulle proprie frequenze proprie. Frequenze che dipendono dalla lunghezza: a latitudini più basse o intermedie – intorno ai 30-35 gradi – hanno frequenza di risonanza di 100 millihertz».

### Come le misurate?

«Per esempio, usando opportune stazioni di misura del campo magnetico a terra, poste nelle vicinanze della longitudine del terremoto e scelte in modo da formare una coppia distante circa un grado, un grado e mezzo, in latitudine. Con una tecnica di calcolo classica si riesce a estrarre il termine oscillante, così da poter misurare – con un po’ di pazienza, cercando le opportune stazioni magnetiche – la frequenza propria risonante di ogni singola linea magnetica che arrivi col suo piede sulla terra. Queste sono frequenze stabili, ma se arriva qualche cosa che le disturba, allungando la linea la frequenza si abbassa – o al contrario, se per esempio il Sole manda un colpo di vento solare, che comprime, la linea si raccorcia e la frequenza si alza».

### E se c’è un terremoto?

«Quello che abbiamo visto è che – circa nel 75 per cento dei casi, forse qualcosa di più – quando si verifica un terremoto a una determinata longitudine, qualche minuto dopo – il tempo perché si propaghi verso l’alto il segnale della linea gravito-acustica – la frequenza propria di risonanza della linea cambia nettamente, abbassandosi di 10, 15, 20 millihertz. Un classico fenomeno di qualche cosa che dall’interno va verso l’esterno. Il risultato è che la linea fa un salto, si alza, il periodo diventa più lungo e la frequenza di conseguenza più bassa. E rimane in quella condizione per tutta la durata dell’*acoustic-gravity wave*, quindi per 15-20 minuti. Nel nostro articolo presentiamo la distribuzione per 20-30 minuti di un’ottantina di casi che mostrano un intervallo di valori di frequenza attorno ai 20-30 millihertz, partendo dal riferimento e andando sul nuovo stato eccitato. Quando il segnale gravito-acustico finisce torna alla frequenza originale. È un fenomeno classico, noto, ma non era mai stato correlato prima a un fenomeno sismico. È questa la cosa interessante».

### Perché?

«Perché è la *smoking gun* che ci dice che lassù, nella gran parte dei terremoti di magnitudo 5, o superiore, pochi minuti dopo il segnale sulla terra vediamo un chiarissimo segnale d’un netto cambio di frequenza nelle corrispondenti linee di campo magnetico. Abbiamo dunque la prova provata che dallo spazio questo particolare elemento è osservabile. Certo, va detto che questo fenomeno non funziona di notte, perché di notte la ionosfera ha dei comportamenti diversi rispetto al giorno, dunque occorre scegliere un intervallo in cui tutto funzioni a regola d’arte. Ma apre la strada, in modo molto convincente, al fatto che esiste un modo per fare *remote sensing* geofisico. Dunque la possibilità di monitorare dallo spazio fenomeni che modificano grandi superfici liquide e solide».

**Questi che osservate, lo sottolineava anche prima, sono fenomeni *co-sismici*. Per un eventuale passaggio alla rilevazione di fenomeni *precursori*, invece, cosa occorrerebbe?**

«È un aspetto che stiamo ancora studiando. Siamo convinti che una volta capito il ruolo importantissimo dell’atmosfera, nonché la sequenza di eventi che portano agli osservabili di alta quota, potremo scoprire se viene eccitata dalle onde gravito-acustiche anche in altro modo: possono essere fenomeni termici, possono essere radiazioni, possono essere variazioni di pressione indotte da altri fenomeni non necessariamente meccanici. Ma prima di avventurarci nello studio del *prima* ci interessava capire bene cosa accade nel *durante*. Perché potrà sorprendere ma nessuno aveva mai dimostrato con chiarezza che c’è un fenomeno analizzabile, misurabile e causalmente ben giustificato che lega il terremoto – o il maremoto – allo spazio».

**Marco Malaspina**

<https://www.media.inaf.it/2021/09/20/remote-sensing-geofisico/>

Mirko Piersanti, William Jerome Burger, Vincenzo Carbone, Roberto Battiston, Roberto Iuppa e Pietro Ubertini, “On the Geomagnetic Field Line Resonance Eigenfrequency Variations during Seismic Event”, *Remote Sensing* 2021, 13(14), 2839 <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/14/2839/htm>

