

ATTIVITA' VULCANICA SU IO

M. FULCHIGNONI - Osservatorio Astrofisico del C.N.R., Frascati, Roma

Riassunto

Nel suo volo verso gli spazi siderali, la sonda americana Voyager ha incontrato e fotografato diversi corpi celesti del sistema solare; particolarmente interessanti sono le immagini ad alta risoluzione (inferiore ad 1 Km.) della superficie di Io, satellite galileiano di Giove.

Queste immagini hanno consentito di verificare l'esistenza, sul satellite, di un vulcanismo molto attivo (già ipotizzato con breve anticipo da alcuni scienziati), con continua emissione di colate di zolfo di grandi dimensioni. La superficie di Io é incessantemente modificata e ringiovanita da questa attività.

Viene data una descrizione del satellite, della sua morfologia e delle sue manifestazioni vulcaniche, e vengono formulate ipotesi sulla sua dinamica e sulla sua composizione interna.

Summary

The American space probe Voyager met and photographed several heavenly bodies in the solar system; the high resolution (less than 1 Km.) images of Io (galileian satellite of Jupiter) are of high interest.

It was possible to ascertain, through these images, that this satellite hosts a very active volcanism (already argued by some scientist a short while before), with recurrent emission of large sulphur flows. Io's surface is endlessly modified and rejuvenated by such activity.

The satellite, its morphology and its volcanic activity are described, and hypotheses are presented on its inner composition and dynamics.

Nelle immagini ravvicinate trasmesse dai Voyagers il piú spettacolare fra i quattro satelliti galileiani é Io: anche in quelle a minore risoluzione, i vivaci colori della sua superficie, rosso, arancione, giallo e bianco, lo rendono nettamente diverso da tutti gli altri corpi planetari noti. Le immagini hanno inoltre rivelato la presenza di un gran numero di centri vulcanici, otto dei quali in attività contemporanea nel breve lasso di tempo in cui sono stati effettuati i rilievi fotografici durante il sorvolo dei Voyagers.

Si tratta di un corpo planetario peculiare in tutti i sensi poiché é il corpo piú attivo dell'intero sistema solare.

Il diametro del satellite é di 3640 Km e la sua densità di $3,5 \text{ g/cm}^3$, valori praticamente identici a quelli della Luna e, se non fosse per la prossimità con Giove, si tratterebbe anche in questo caso di un corpo roccioso ed inattivo, morto come il satellite della Terra. Sulla sua superficie non é stato trovato un solo cratere da impatto; neppure nelle fotografie a migliore risoluzione, che

permettono di individuare strutture di dimensioni inferiori al chilometro. Ciò non può dipendere dalla mancanza di "proiettili", infatti i meteoriti dovrebbero essere più numerosi all'altezza dell'orbita di Io che nel resto del sistema gioviano, proprio per l'effetto della maggiore attrazione determinata dalla vicinanza del pianeta, che agisce come una lente gravitazionale e ingrandisce quindi l'effetto di focheggiamento delle particelle di materia solida nelle immediate vicinanze della sua superficie. L'assenza totale di strutture da impatto meteoritico implica che Io ha una superficie estremamente "giovane" e dinamica, capace cioè di rinnovarsi in tempi brevissimi: si è calcolato che i crateri possano essersi cancellati dalla superficie di Io se si suppone che ogni mille anni vengano depositati materiali per uno spessore di 1 metro.

La struttura dominante della superficie di questo satellite è rappresentata dai centri vulcanici, che sono in generale individuati da macchie nere con dimensioni di qualche decina di chilometri; nelle immagini ad alta risoluzione risultano essere simili alle caldere dei vulcani terrestri o marziani (crateri collassati, formati per sprofondamento o esplosione di una bocca vulcanica preesistente).

Il 5% della superficie totale del satellite è occupato da tali strutture scure, che riflettono appena il 5% della luce solare, e che spesso sono circondate da un alone di materiali scuri quasi come il cratere centrale. La similitudine con i vulcani terrestri è più stretta se si pensa alle bocche capaci di eruttare grandi quantità di cenere, caratteristiche ad esempio dei vulcani messicani. Da questi centri vulcanici si vedono partire vari tipi di colate, che possono assumere forme disperate, da quelle a ventaglio, (estese per un centinaio di chilometri) a quelle a serpente, che si snodano in percorsi lunghi e sinuosi. Le colate possono essere sia più chiare che più scure dei terreni su cui scorrono, hanno colorazioni variabili dal rosso all'arancio e spesso i bordi hanno albedo diversa, tanto da risultare in contrasto con la colata stessa mettendola così in risalto.

Le regioni equatoriali non presentano rilievi notevoli, qualche collina arriva ai 1000 metri di altezza rispetto ai terreni circostanti e non è stata notata alcuna relazione dei vulcani con i rilievi. Sono presenti numerose scarpate e valli profonde qualche centinaio di metri, indici di tensioni che hanno spaccato la crosta, come le faglie o i graben terrestri.

Le regioni prossime ai poli sono più irregolari; ci sono meno centri vulcanici ma si ergono numerose montagne, alte qualche chilometro; si sono inoltre individuati terreni stratificati in cui è possibile distinguere livelli diversi di materiali, laddove l'erosione li ha tagliati, esponendoli. Il più ampio fra questi altopiani ha un'estensione pari a circa un terzo dell'Italia. L'erosione cui abbiamo fatto cenno è quella determinata dagli sforzi di tensione capaci di generare le faglie e le fratture che spesso appaiono intersecate; il sovrapporsi di sistemi diversi è un indice di una notevole complessità nei fenomeni di deposizione, di frattura e di erosione di quelle zone.

Il vulcanismo su Io era in qualche modo stato predetto in un articolo, apparso qualche giorno prima che il Voyager inviasse le prime immagini del satellite, di Stanton J. Peale, Patrick M. Cassen e Ray T. Reynolds (vi si raccontano storie divertenti sui salti mortali che i tre ricercatori avrebbero fatto per rendere possibile la pubblicazione del loro articolo in anticipo rispetto ai dati inviati dal Voyager). Il loro modello indicava nelle forze mareali la sorgente di energia capace di fondere grandi quantità di materiali all'interno di Io e di provocare le tensioni che potevano fratturare la sua crosta. Io, nel suo moto intorno a Giove è soggetto periodicamente all'attrazione gravitazionale esercitata dagli altri satelliti galileiani, e di Europa in particolare, viene quindi leggermente "strattonato" ogni qualvolta si trova in opposizione con uno dei satelliti esterni. La sua orbita oscilla rispetto a quella circolare che gli imporrebbe il forte campo gravitazionale di Giove: insorgono quindi forze di marea che producono al suo interno un'enorme quantità di calore per attrito. Tale calore dovrebbe essere dissipato attraverso la superficie del satellite; Peale e compagni ipotizzarono perciò che su Io "dovrebbe verificarsi un diffuso e ricorrente vulcanismo superficiale".

Ma nessuno pensava di trovarsi di fronte a vulcani attivi nell'arco ristretto di tempo in cui il Voyager I avrebbe sorvolato il satellite.

La scoperta del primo vulcano attivo su Io è stata fatta da Lina A. Morabito, un ingegnere del JPL che aveva l'incarico di verificare l'andamento della sonda lungo la sua traiettoria.

Ai fini della navigazione spaziale, erano state riprese un certo numero di immagini dei satelliti sovraesposte, in cui comparivano fuori fuoco il bordo di Io ed evidenziate le stelle di fondo, necessarie per fare il punto. Nell'esaminare una foto la Morabito si accorse che al di fuori del bordo di Io, nell'emisfero australe, compariva una forma luminosa ad ombrello: verificato che non si poteva trattare di segnali spuri, si utilizzarono tutti i procedimenti delle tecniche di elaborazione elettronica delle immagini per determinare l'altezza e la densità di quella nuvola. A 270 Km al di sopra della superficie del satellite c'era un pennacchio di materiali la cui densità era variabile, ciò rivelava la presenza di un vulcano in attività. Un esame di tutte le altre immagini disponibili portò in breve ad accertare la presenza di altri otto centri vulcanici in eruzione, che lanciavano "fumate" ad altezze variabili fra i 70 ed i 300 Km, a velocità che potevano raggiungere 1 Km/sec. Nella seguente tabella sono riportate alcune caratteristiche delle bocche attive, con i nomi loro attribuiti dai ricercatori che facevano parte dell'imaging team della missione Voyager.

Vulcano n.	Nome	Dislocazione lat./long.	Altezza (Km.) Voyager 1	Attività durante Voyager 2
1	Pele	-20°/255°	280	cessata
2	Loki	20°/300°	100	aumentata
3	Prometheus	-5°/155°	70	aumentata
4	Volund	20°/175°	95	mancano dati
5	Amirani	25°/120°	80	simile
6	Maui	20°/120°	80	simile
7	Marduk	-25°/210°	120	simile
8	Masubi	-40°/50°	70	simile

E' interessante notare come non siano state rilevate "fumate" di altezza inferiore ai 70 Km, malgrado il limite di risoluzione raggiungibile fosse di 40 Km: sembra che su Io non possano esserci eruzioni più modeste. Attorno ai vulcani si distinguono degli anelli circolari od ovali di materiali più chiari: il primo ad essere individuato è stato quello a forma di ciambella che circonda il vulcano Prometheus, l'anello ha il diametro di 300 Km; piccolo a confronto con il ferro di cavallo (700 x 1000Km) che circonda la bocca di Pele, la cui forma è apparsa ellittica nelle immagini del Voyager 2, indicando così un'intensa attività del vulcano nel periodo di tempo che separava le due missioni. Questi anelli simmetrici indicano che l'eruzione avviene come un getto d'acqua di una fontana: i materiali, lanciati verso l'alto, ricadono attorno al punto di uscita coprendo una porzione anulare della superficie circostante. I materiali che possono produrre simili effetti su Io sono zolfo condensato e l'anidride solforosa che piovono dalla fontana vulcanica.

Lo spettrometro infrarosso imbarcato sulla sonda ha fornito anche una mappa delle temperature superficiali del satellite, che ha mostrato come vi fossero numerosi punti caldi; la temperatura massima (17 °C, la temperatura ambiente terrestre) è stata misurata in prossimità del vulcano Loki, in corrispondenza di una struttura di colore scuro a forma di U. Il violento contrasto tra il valore della temperatura in quei punti e nelle zone vicine, che si trovano alla normale temperatura superficiale di Io (-146°C), ha fatto avanzare l'ipotesi che la struttura scura sia una specie di lago di lava, un luogo cioè dove materiali fusi (rocce o zolfo) sono in prossimità della superficie. Se si trattasse di zolfo, che ha un punto di fusione a 112°C, si potrebbe pensare che la superficie del lago fosse ricoperta da una pellicola di zolfo solidificatosi.

I colori brillanti, che hanno fatto dire che Io ha l'aspetto di una pizza, suggeriscono la presenza dello zolfo; infatti, quando si porta questo elemento a valori diversi di temperatura e lo si raffredda rapidamente esso può assumere colorazioni molto diverse, che vanno dal nero al normale giallo chiaro, attraverso tutta una gamma di rossi ed arancioni, che sono proprio le sfumature che caratterizzano i paesaggi di Io.

Studi di laboratorio ed osservazioni telescopiche sia pre- che post- Voyagers indicano che lo zolfo ed i suoi composti hanno caratteristiche chimiche e spettrali che ben si accordano con quanto misurato sul satellite di Giove. L'anidride solforosa, che sulla Terra viene prodotta dall'attività vulcanica e, combinandosi con l'acqua forma acido solforico, nelle condizioni ambientali di Io può condensare direttamente in un solido bianco, che potrebbe perciò essere

la "neve" che copre le vaste aree bianche osservate nelle immagini dei Voyagers. Tale composto é stato osservato da Terra e dalla strumentazione di bordo, quando lo spettrometro infrarosso é stato puntato sulla bocca in attivitá del vulcano Loki.

Tutte queste osservazioni sembrano dunque confermare i calcoli di Peale e colleghi, che su base dinamica avevano previsto l'esistenza di possibile attivitá vulcanica su Io. La sorgente di calore rappresentata dall'azione mareale ha agito probabilmente per tutto il periodo di vita del satellite, cioé per oltre 4 miliardi di anni, mantenendo allo stato fuso il suo interno ed alimentando in continuazione l'attivitá vulcanica. Ciò ha portato ad un completo rimescolamento dei componenti, con perdita di tutte le sostanze volatili, come l'acqua e l'anidride carbonica, che sono totalmente assenti al momento; la maggior parte dello zolfo é salito in superficie, dove é continuamente riciclato dall'attivitá vulcanica. Un possibile modello di interno, che puó spiegare anche la massiccia presenza di vulcani attivi, prevede che al di sotto della crosta di Io, composta da zolfo solido, si estenda un oceano di zolfo liquido profondo parecchi chilometri; la regione di transizione fra superficie solida e strato di zolfo liquido sarebbe occupata da uno strato in cui si trovano miscelati zolfo solido ed anidride solforosa liquida, la cui espansione durante fasi di attivitá sarebbe in grado di spiegare le velocitá di eiezione dei materiali eruttati.

Delle 100.000 tonnellate di materiale che viene eruttato ogni secondo dai vulcani di Io, solo una parte infinitesima, 10 tonnellate, non ricade sulla superficie del satellite e viene catturata dalla magnetosfera di Giove. L'iniezione di parecchie tonnellate al secondo di materiale in tale ambiente produce degli effetti che sono visibili anche da Terra.

Lungo l'orbita di Io é presente una nuvola di sodio, rilevata da osservazioni telescopiche nel 1973; i Voyagers hanno permesso di individuare un toro di plasma (una ciambella di particelle cariche) che avvolge tutta l'orbita del satellite. Gli atomi ionizzati (carichi cioé perché hanno perso un elettrone) presenti in tale plasma provengono sia dalle eruzioni vulcaniche che dall'interazione delle particelle ad alta energia trasportate dalla magnetosfera del pianeta con i materiali superficiali. Con lo spettrometro ultravioletto dei Voyager si é misurata la composizione del plasma presente nel toro di Io giá da distanze di 150 milioni di Km: gli atomi piú abbondanti erano quelli dello zolfo, ionizzati una, due o tre volte (che cioé avevano perso uno, due o tre elettroni, strappati per l'interazione con la radiazione solare ultravioletta), dell'ossigeno ionizzato, del sodio neutro e ionizzato. Con particolari tecniche, lo zolfo ionizzato é stato fotografato da Carl Pilcher, dell'Universitá delle Hawaii, nell'aprile del 1979 da Terra.

Io si comporta come un conduttore nel muoversi all'interno del campo magnetico di Giove: ciò genera una corrente, di intensitá pari a 10 milioni di Ampere ed una potenza di un milione di milioni di Watt, che scorre fra Io e Giove: la regione di spazio interessata da questa corrente si indica come tubo di flusso. Il tubo di flusso é concatenato al moto delle linee di forza del campo gioviano.