



Comune di Pertosa



Comune di Auletta

Atti

XXII Congresso Nazionale di Speleologia



Euro Speleo Forum 2015

“Condividere i dati”

30 maggio – 2 giugno 2015, Pertosa – Auletta (SA)

A cura di
De Nitto Laura, Maurano Francesco, Parise Mario

Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia
Serie II, vol. XXIX – 2015



Memorie dell'Istituto italiano di Speleologia, Serie II, vol. XXIX – 2015
Atti XXII Congresso Nazionale di Speleologia – Euro Speleo Forum 2015
“Condividere i dati”
30 maggio – 2 giugno 2015, Pertosa – Auletta (SA)
@ 2015 Società Speleologica Italiana

ISBN: 978-88-89897-11-9

Finito di stampare maggio 2015

In copertina: Inghiottitoio del Cozzetta - Foto: Francesco Maurano
Retro di copertina: Grotta dello Scalandrone - Foto: Francesco Maurano

Il contenuto e la forma degli articoli pubblicati impegnano esclusivamente gli Autori. Nessuna parte della presente pubblicazione può essere riprodotta senza il consenso degli Autori.

I diritti di riproduzione sotto qualsiasi forma intera o parziale sono riservati a:

Società Speleologica Italiana

Via Zamboni 67 - 40126 Bologna

Organizzato da:

Società Speleologica Italiana
Federazione Speleologica Campana
Gruppo Speleo Alpinistico Vallo di Diano
Fondazione MIIdA,
Comune di Pertosa
Comune di Auletta

Coordinamento editoriale e impaginazione:

Francesco Maurano, Laura De Nitto

Comitato organizzatore:

Francesco Maurano, Laura De Nitto, Giuseppe Paladino, Immacolata Nunneri, Antonella Giammarino, Raffaele Fasano, Francesco D'Orilia, Michele Caggiano, Pietro Pessolano, Giampietro Marchesi, Vincenzo Martimucci, Michele Manco, Domenico Barba, Luigi Cavallo, Antonietta Cafaro, Simona Cafaro, Francesca Caggiano, Luca Calzolari, Mario Cancro, Antonio Coronato, Pasquale Curcio, Ada De Matteo, Anna De Mauro, Sossio Del Prete, Pierino Di Blasio, Massimo Goldoni, Alessandra Lanzetta, Gaetano Monaco, Luciano Montefusco, Vittorio Morrone, Vincenzo Soldovieri.

Comitato Scientifico:

Presidente: Mario Parise

Membri: Giovanni Badino, Luca Calzolari, Franco Cucchi, Jo De Waele, Italo Giulivo, Massimo Goldoni, Leonardo Piccini, Antonio Santo.

Con il Patrocinio di:

Università degli Studi della Basilicata, Club Alpino Italiano, Corpo Nazionale Soccorso Alpino e Speleologico, Ordine dei Geologi della Campania, Società Italiana di Geologia Ambientale, Osservatorio Europeo del Paesaggio - Arco Latino, Seconda Università degli Studi di Napoli, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Consiglio Nazionale dei Geologi, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale - Università di Napoli "Federico II", Parco Nazionale del Cilento, Vallo di Diano e Alburni, Federazione Europea di Speleologia, Associazione Grotte Turistiche Italiane, Federazione Italiana Escursionismo, Comunità Montana Vallo di Diano, Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica – CNR, Federazione Nazionale dei Consorzi di Bacino Imbrifero Montano, Provincia di Salerno

Con il contributo di:

Federazione Europea di Speleologia, Uka Pacha, Mercoledisanto, Beal, Climbing Tecnology, G.&G.I.S., Terralab, Scurion, Adventure Vertical, Santo Jacopo salumi, Emme & PI, Amaro Teggiano, Mulino Aquara Alburni, Colline del Tanagro, Pallino shop, Scherzi di Grano

Si consiglia la seguente citazione:

De Nitto L., Maurano F., Parise M. (eds)

Atti XXII Congresso Nazionale di Speleologia – Euro Speleo Forum 2015 “Condividere i dati”

30 maggio – 2 giugno 2015, Pertosa – Auletta (SA)

Memorie dell'Istituto italiano di Speleologia, Serie II, vol. XXIX – 2015

CAVITÀ NATURALI NEL SISTEMA SOLARE: UNA RASSEGNA

SOSSIO DEL PRETE^{1,2}

¹ Federazione Speleologica Campana, via Trinità degli Spagnoli, 41-80123 Napoli

² Planetario di Caserta, P.zza Ungaretti, 1 - 81100 Caserta; dpsossio@gmail.com

Riassunto

Sulla Terra sono note diverse tipologie di grotte naturali in molteplici contesti geologici che riflettono la dinamicità e unicità del nostro pianeta. Gran parte delle grotte terrestri ha origine da fenomeni carsici, pseudocarsici o vulcanici in rocce sedimentarie carsificabili, vulcaniche e ghiaccio. Sugli altri pianeti rocciosi e sulle lune del Sistema Solare non sono al momento noti, o non sono esistiti, bacini sedimentari analoghi a quelli della Terra, o comunque, laddove ipotizzati, non hanno generato potenti successioni di rocce carsificabili paragonabili a quelle terrestri. La scarsa o nulla atmosfera di questi corpi celesti costituisce un ulteriore fattore inibente lo sviluppo di fenomeni carsici. La diffusa presenza di rocce vulcaniche e ghiacci costituiscono, invece, anche per gli altri pianeti potenziali ambienti di formazione di grotte. Per le basse temperature dei pianeti oltre l'orbita terrestre, le grotte nei ghiacci potrebbero essere molto più conservative che sulla Terra. Nel caso delle rocce vulcaniche, le immagini delle sonde hanno mostrato la presenza di tubi di lava su Luna e Marte. Collapsi della volta di alcuni tubi di lava ancora intatti hanno permesso di stimare la profondità e il diametro di queste gallerie. Le grotte extraterrestri sono da alcuni anni fonte di interesse da parte di planetologi ed esobiologi per la possibilità che in esse si preservino ambienti adatti a ospitare forme elementari di vita e per la possibilità di sfruttarle come basi per la permanenza umana poiché naturale difesa contro le severe condizioni ambientali della superficie. Questa nota presenta una rassegna delle conoscenze sulla scoperta, l'origine, le prospettive esplorative, le aspettative scientifiche e il loro potenziale utilizzo come basi per la permanenza umana attese dalla comunità scientifica.

Parole chiave: Pianeti rocciosi, tubi di lava, cratere a fossa, esplorazione spaziale.

Abstract

CAVITY NATURAL IN THE SOLAR SYSTEM: A REVIEW - On Earth various types of caves are known, hosted in various geological settings, that reflect the dynamism and uniqueness of our planet. Most of the caves on Earth derive from karst, volcanic or pseudokarst phenomena that formed caves in sedimentary karstified rocks, volcanic rocks and ice. On the other rocky planets and moons of Solar System, sedimentary basins similar to those of Earth are not known, and there is no evidence of powerful sequences of karstified rocks comparable to those of Earth. The scarce or no atmosphere of rocky planets and moons is another factor inhibiting the development of karst phenomena. On the contrary, the widespread presence of volcanic rocks and ice make the other planets potential environments of caves formation. Due to low temperatures of planet beyond the Earth orbit, the caves in the ices could be much more conservative than on Earth. In the case of volcanic rocks, the spacecraft images allow us to identify the presence of lava tubes on Moon and Mars, and to estimate in some cases their depth and diameter. The increasing interest in caves on other planets by planetary scientists and exobiologists is related to the possibility that traces of past life are preserved in these cavities or they may form an environment suitable to accommodate elementary forms of life; further, exploiting these underground spaces might allow to realize bases for the human habitat. Caves, in fact, are a natural defence against cosmic radiation, impact of meteorites and extreme weather conditions. This paper reviews the up-to-date state of research and knowledge about this new frontier for cave research and planetary scientists.

Key words: rocky planets, lava tubes, skylight, pit crater, space exploration.

Introduzione

Sonde orbitali dotate di strumenti di osservazione a risoluzione sempre più alta ci hanno fornito immagini a vario grado di dettaglio di quasi tutti i principali corpi del Sistema Solare. In questo modo è stato possibile osservare le molteplici morfologie di pianeti e lune, incluso ampie voragini circolari (*skylight* o “finestre” e/o *pit crater*) che potrebbero dare accesso a cavità di origine vulcanica ancora preservate nel sottosuolo.

La localizzazione su Luna e Marte di canali di deflusso lavico e tubi di lava ha aperto importanti prospettive nello sviluppo e nella realizzazione di future basi planetarie per fini scientifici ed esplorativi in quanto potenziali

ambienti protetti che fanno da scudo contro le severe condizioni ambientali della superficie continuamente sottoposta a impatti di meteoriti, esposizioni di alte concentrazioni di radiazioni UV e altre particelle energetiche, estreme escursioni termiche e, nel caso di Marte, violente tempeste di polvere e sabbia (HÖRZ, 1985; COOMBS & HAWKE, 1992; BOSTON et al., 2003; BOSTON, 2010; LÉVEILLE & DATTA, 2010).

La possibilità che i sinuosi canali (*rille*) lunari fossero il frutto di tubi di lava collassati fu proposta per la prima volta da OBERBECK nel 1969. In seguito, lo sviluppo di strumenti di acquisizione con elevata capacità di risoluzione ha permesso l'individuazione e la raccolta di informazioni sempre più precise e dettagliate, aprendo la strada, come spesso accade, a nuovi e intriganti quesiti e prospettive di ricerca (GREELEY, 1971; COOMBS & HAWKE, 1992; CUSHING et al., 2007, 2008; HARUYAMA et al., 2009, 2010; CUSHING, 2012).

Le recenti indagini hanno rinnovato lo slancio nella ricerca di tubi ancora integri da utilizzare come possibili rifugi sotterranei in cui realizzare basi abitabili idonee alla permanenza umana (AA.VV., 2013) tanto più se al loro interno fossero preservate potenziali riserve di preziosi depositi di ghiaccio d'acqua (WILLIAMS et al., 2010; FRIEDERICK et al., 2010). Morfologie analoghe sulla Terra spesso rappresentano ingressi di grotte o grandi reti di gallerie sotterranee. La capacità di rilevare e esplorare queste potenziali cavità è di grande interesse per molte discipline in quanto al loro interno possono essere esposte intere successioni stratigrafiche di grande importanza per la storia geologica di questi corpi celesti. Nel caso di Marte si aggiungono anche aspettative di carattere biologico per la possibilità che nei suoi ambienti ipogei possano essersi preservate tracce di vita organica presente o passata (BOSTON 2010; LÉVEILLE & DATTA, 2010).

Ambienti speleogenetici

I processi vulcanici rappresentano un importante fattore di modellamento geologico per i corpi celesti di tipo roccioso del Sistema Solare. La Terra è l'unico pianeta, al momento, su cui sia nota la presenza di estesi bacini sedimentari in cui si sono formate potenti successioni di rocce carsificabili e su cui esistono le condizioni tettoniche e climatiche adatte affinché si sia sviluppato il fenomeno carsico. Oceani sono ipotizzati sotto le croste ghiacciate di diverse lune del Sistema Solare esterno e, pur ammettendo che in essi si possano formare successioni rocciose carsificabili, non sussistono comunque le condizioni tettoniche e climatico-ambientali idonee allo sviluppo del carsismo. Analogamente accade per i pianeti di tipo terrestre sebbene, almeno per Marte, è ormai accertata la presenza di estesi depositi di gesso e, forse, anche carbonatici in diversi bacini sulla sua superficie e sebbene, almeno nelle prime fasi della sua storia geologica, è probabile che siano sussistite le condizioni ambientali idonee allo sviluppo di fenomeni di dissoluzione carsica (BOSTON, 2010). In generale, diversi Autori ipotizzano la formazione di cavità anche su altri corpi celesti sia secondo processi genetici simili a quelli terrestri, sia secondo altri processi, tuttora da indagare, che in condizioni ambientali differenti sono in grado di generare tipi di cavità dalle proprietà completamente dissimili da quelle terrestri (BOSTON, 2003, 2010; MITCHELL & MALASKA, 2011).

Cavità vulcaniche

La maggior parte dei corpi celesti di tipo roccioso mostra evidenze di un diffuso vulcanismo che ha originato una pletora di morfologie vulcaniche prodotte da eruzioni effusive di lave basaltiche molto fluide, grotte incluse, che quindi sono molto più diffuse delle cavità per dissoluzione. In sintesi, esse si originano solo nell'ambito di colate laviche a bassa viscosità che fuoriescono da una bocca eruttiva (HARTER III, 1972; OLLIER, 1990). Le tipologie di grotte possono essere alquanto varie, in funzione soprattutto del tasso di efflusso, delle caratteristiche chimico-fisiche dei prodotti emessi (in particolare viscosità e composizione), dell'acclività regionale, della gravità e dell'atmosfera che influenzano lunghezza e diametro dei tubi. Si possono formare grotte verticali, in corrispondenza di fratture eruttive con profondità di alcune decine di metri (*volcano-tectonic fractures*), grotte emisferiche (*blister caves*), dovute alla formazione di una grande bolla di gas all'interno della colata lavica, o grotte da scorrimento lavico meglio note come tubi di lava (*lava tube*).

I tubi di lava si formano solo su quei vulcani che danno luogo ad un'attività di tipo effusivo caratterizzata dalla fuoriuscita di un magma basaltico molto fluido che scorre sui fianchi del vulcano stesso formando lingue di lava. Quando la colata fuoriesce da una bocca eruttiva, lateralmente si iniziano a formare, per raffreddamento, argini all'interno dei quali essa, mantenendosi più calda, può continuare a fluire velocemente. Se anche la parte superiore del canale lavico riesce a solidificare e a saldarsi con gli argini, si origina un vero e proprio condotto che inibisce la dispersione del calore verso l'esterno permettendo alla lava al suo interno di mantenere temperature molto elevate (circa 1.000 °C), e raggiungere grandi distanze. La formazione di tunnel in lave tipo *pahoehoe* segue il meccanismo dell'*inflation* in cui i primi livelli raffreddati sono spinti verso l'alto e rigonfiati dall'interno da successive pulsazioni di lava. Nel punto in cui la lava fuoriesce dal tubo e torna a scorrere all'aperto si forma una bocca effimera mentre, al termine dell'eruzione, lo svuotamento totale del condotto può

dare origine a sistemi di gallerie sotterranee. Dopo l'eruzione il tetto del canale può collassare per lunghi tratti, creando in superficie depressioni aperte. I tunnel lavici sulla Terra hanno diametri variabili da meno di 1 m fino più di 30 m, alti 15 m, e con varie diramazioni e anastomizzazioni; possono subire fasi di riattivazione e raggiungere sviluppi di molti km. In Australia sono noti sistemi di tubi di lave quaternarie che si estendono per 160 km (ATKINSON et al., 1975).

Mercurio

In base ai dati forniti dal Mariner 10, ma soprattutto dalla sonda MESSENGER (2011), Mercurio non mostra alcuna evidenza di grandi vulcani a scudo come quelli di Terra, Marte e Venere, ma solo un ridotto numero di piccole morfologie che dubitativamente richiamano quelle tipo vulcano scudo o caldera (HEAD et al., 2012; BYRNE et al., 2013). I dati attuali hanno rivelato anche una scarsa presenza di morfologie vulcaniche come coni, flussi da colata o solchi sinuosi (*rilles*). Al contrario, la superficie presenta estesi espandimenti basaltici a bassa viscosità, talora di origine non vulcanica (bacini da fusione per impatto come il bacino Caloris), associati a elevati volumi di lava eruttata (HURWITZ et al., 2013) che formano ampie pianure a scala regionale o intercrateriche che si sviluppano tra grandi, vecchi crateri da impatto (BYRNE et al., 2013). In altre regioni del pianeta, l'alta densità di impatti ha inibito anche questi processi favorendo locali ristagni di lava. Recentemente HURWITZ et al. (2013) hanno scoperto possibili canali di flusso lavico, larghi fino a 20 km e lunghi qualche decina di km o, in rari casi, oltre il centinaio di km. Essi, tuttavia, non presentano evidenze di formazione di tubi lavici al loro interno quanto, piuttosto, evidenze di erosione del substrato.

Venere

Per dimensioni e struttura interna, Venere è il pianeta più simile alla Terra. È avvolto da una densa copertura nuvolosa stratificata che, oltre a impedire la visione diretta della sua superficie, è responsabile di un intenso effetto serra con temperature fino a 460 °C e pressione al suolo di 90 atm. Solo con la sonda Magellano (1990-1994), si è potuto disporre di una mappa tridimensionale di dettaglio della sua superficie (JET PROPULSION LABORATORY, 1989) che ha permesso di studiare l'enorme varietà di forme vulcaniche presenti (SAUNDERS et al., 1991). Sebbene la risoluzione non consenta di risolvere dettagli dell'ordine di decine di metri, tipici di un collasso, l'interpretazione delle morfologie venusiane ha permesso ai ricercatori di avanzare alcune considerazioni. La superficie di Venere presenta *canali* con lunghezza superiore ai 1000 km, sinuosi, di larghezza costante e relativamente poco ampi (fino a 3 km); duomi a “panettone” con diametro >25 km delimitati da pareti molto ripide e altre particolari strutture come *aracnoidi* e *coronae* (CRUMPLER et al., 1992; GRINDROD et al., 2005; HAMILTON, 2007). Le colate di lava si sviluppano fino a oltre 1.000 km di lunghezza, molto più di quelle terrestri. La formazione dei *canali* può essere dovuta a erosione termica e/o meccanica, o essere il risultato di tubi di lava drenati e crollati, o una combinazione dei due (BAKER et al., 1992; GREGG & SAKIMOTO, 1996). Se sono il frutto di tubi di lava drenati e collassati, potrebbero essere stati generati da lave basaltiche molto fluide (GREGG & SAKIMOTO, 1996).

Luna

Sulla Luna, estrusioni di magmi basaltici a bassa viscosità hanno generato canali stretti e sinuosi (*rille*) e tubi di lava lunghi anche centinaia di chilometri (OBERBECK et al., 1969; GREELEY, 1971, 1991; CRUIKSHANK & WOOD, 1972; HULME, 1973, 1982; MASURSKY et al., 1978; COOMBS & HAWKE, 1992) per lo più ubicati all'interno dei *maria* (crateri colmi di basalto). I numerosi *rille* non risultano riempiti di lava solidificata poiché la bassa viscosità delle lave lunari, ricche in Fe e Ti, ne ha permesso un completo drenaggio. Molti Autori ritengono che quei settori di *rille* che appaiono coperti debbano ritenersi, con tutta probabilità, dei tubi vuoti o parzialmente vuoti ancora preservati. Caratterizzata da assenza di atmosfera e gravità 1/6 quella della Terra, sulla Luna si ipotizzano tubi vuoti larghi da decine a centinaia di metri e lunghi decine di chilometri; dimensioni più che soddisfacenti per ospitare una base abitabile (MASURSKY et al., 1978; WILSON & HEAD, 1981; HÖRZ, 1985; COOMBS et al., 1989; COOMBS & HAWKE, 1992). Le evidenze morfologiche sembrano indicare che i tetti dei tubi siano strutturalmente abbastanza stabili da resistere a un bombardamento meteorico prolungato e anche sufficientemente spessi da fornire una protezione adeguata contro le radiazioni cosmiche. In base all'età delle lave lunari che li contengono, i tubi sono rimasti intatti nel corso di miliardi di anni di bombardamento meteoritico e scuotimenti sismici. Pur non esistendo studi specifici dell'effetto di lunamoti sulla stabilità dei tubi di lava, sulla Terra sono noti tubi rimasti perfettamente integri sebbene costantemente sottoposti a terremoti anche di magnitudo elevata (COOMBS & HAWKE, 1992).

Sulla Terra, il rapporto tra lo spessore delle lave in volta e l'ampiezza del tubo di lava varia tra 0,25 e 0,125 (OBERBECK et al., 1969). Considerando l'effetto arco, comune nei tubi di lava terrestri, e che le lave lunari potrebbero essere molto più vescicolari di quelle terrestri, e basandosi sulle osservazioni morfologiche dei tubi

identificati, si stima che sulla Luna vi siano tubi ampi fino a 500 m o più, con spessori in volta dai 40/60 ai 100/200 m (OBERBECK et al., 1969; HÖRZ, 1985; COOMBS & HAWKE, 1992). Queste stime sarebbero in accordo con le osservazioni condotte su crateri da impatto nei pressi dei tubi di lava ancora integri. In base al rapporto profondità/diametro dei crateri, è stato stimato che lo spessore della volta di un tubo in grado di resistere alla distruzione provocata dalla penetrazione di un bolide, debba essere almeno il doppio della profondità del cratere d’impatto da esso generato (HÖRZ, 1985).

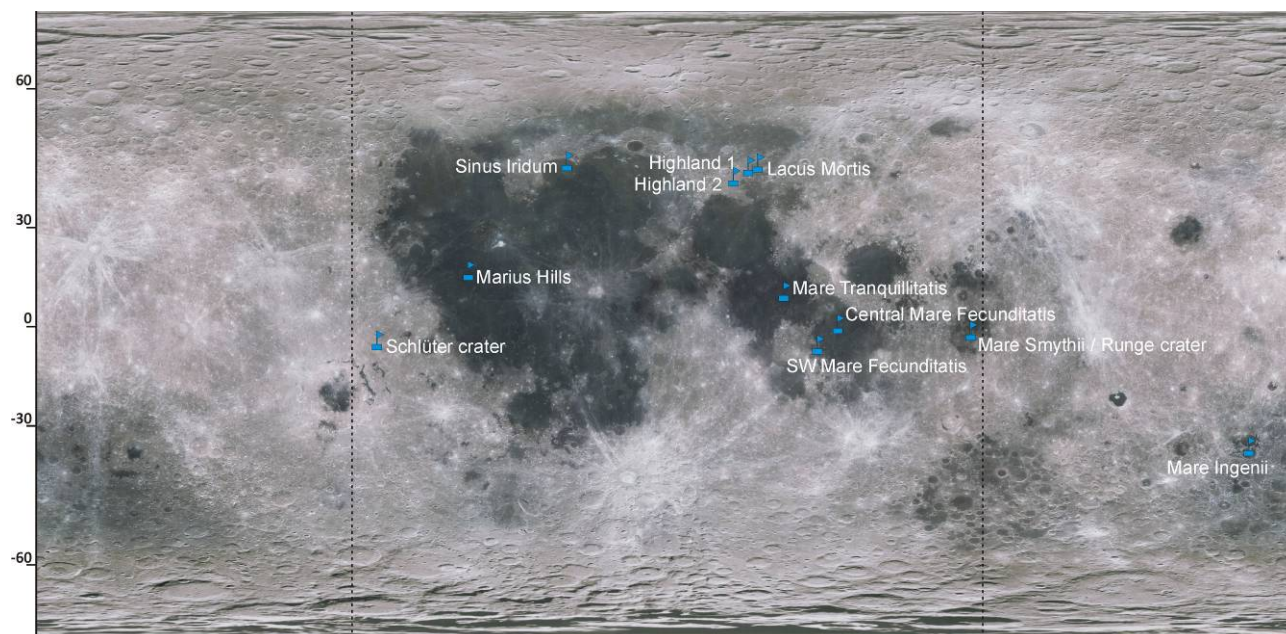


Figura 1. Mappa della Luna con l’ubicazione dei possibili skylight e collassi individuati.

Figure 1. Location of possible skylights and pit craters on the Moon.

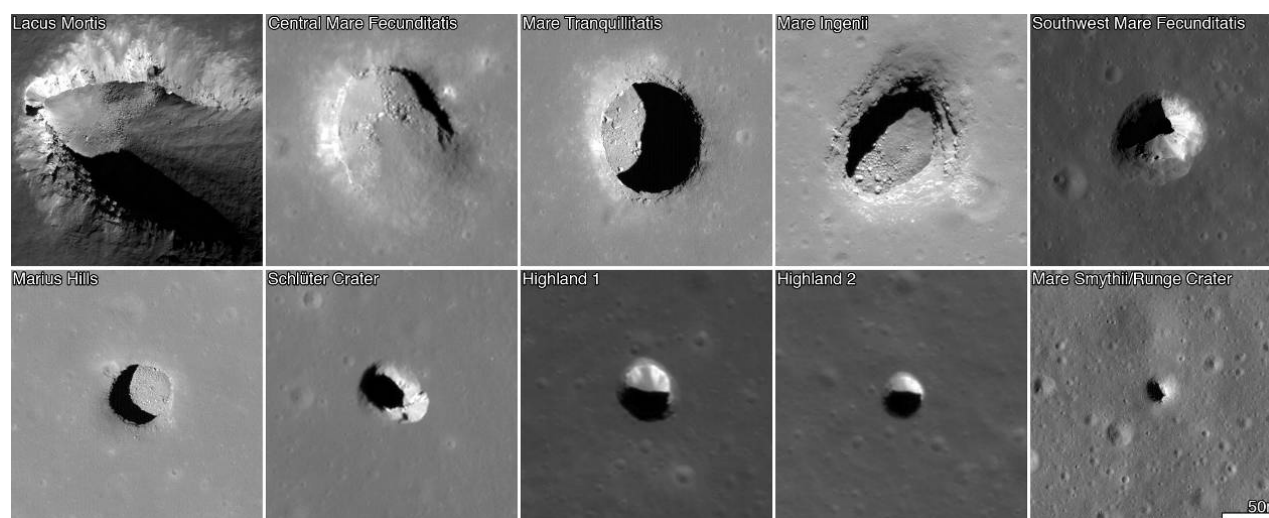


Figura 2. Collage di possibili skylight e pit crater lunari (NASA/JPL).

Figure 2. View of possible skylights and pit craters on the Moon (NASA/JPL).

La sonda giapponese SELENE/Kaguya (2007-2009), insieme al team del Lunar Reconnaissance Orbiter, attraverso immagini ad alta risoluzione nella provincia vulcanica delle *Marius Hills*, una regione del più vasto *Oceanum Procellarum*, ha individuato il primo *skylight* lunare di un tubo di lava ancora integro risalente a 3,7 miliardi di anni fa (HARUYAMA et al., 2009, 2011; Figg. 1 e 2). Lo *skylight* si è formato su un tubo dell’ampiezza stimata di 370 m localizzato in un *rille* meandriforme di 48 km di lunghezza (“Rille A”). Ha forma grossomodo circolare con diametro di 65 m e profondità stimata di 80-88 m. L’area a contorno è coperta da uno spessore di 20-25 m di lave che hanno protetto il tubo da collassi della volta causati da ulteriore bombardamento meteorico (HARUYAMA et al., 2009). Il collasso stesso potrebbe, però, essere stato causato proprio dall’impatto di un meteorite. Lo stesso team nel 2010 identifica altri 2 possibili *skylights* (HARUYAMA et

al., 2010, 2011) nel *Mare Tranquillitatis*, 350 km dal sito di atterraggio dell'Apollo 11, e nel *Mare Ingenii* (questo è il primo scoperto sulla faccia nascosta della Luna; Figg. 1 e 2). I due nuovi *skylights* non si trovano all'interno di canali e sono molto più larghi e profondi di quelli precedentemente scoperti. Quello del *Mare Tranquillitatis* ha perimetro circolare irregolare con assi lunghi 110 m e 120 m per una profondità stimata di 180 m, mentre quello del *Mare Ingenii* ha forma sub-triagonale con assi di 140 m e 110 m, margini irregolari e profondità stimata di 90 m (HARUYAMA et al., 2010; NASA, 2010). Al loro contorno non sono presenti prodotti di eiezione e, quindi, non sono stati generati da espulsione di magma o gas dal sottosuolo. Le pareti presentano strati lavici spessi dai 4 ai 12m (ASHLEY et al., 2011a, b), mentre la base è occupata da un cumulo di sabbia sottile con decine di grossi massi. L'età stimata è di 3,6 miliardi di anni, periodo a cui viene fatto risalire il picco dell'attività vulcanica sulla Luna (HIESINGER et al., 2003).

Marte

Marte ha una massa 10 volte più piccola della Terra; freddo e arido, ha una tenue ma molto dinamica atmosfera e, attualmente, non presenta un campo magnetico apprezzabile né attività tettonica. Tuttavia, 3,5 miliardi di anni fa su Marte esistevano movimenti tettonici, la superficie era coperta da fiumi, laghi e oceani, la temperatura era più elevata e l'atmosfera più densa di quella odierna (BAKER, 2006). Più della metà della superficie è coperta da rocce vulcaniche prevalentemente basaltiche, ma di recente sono state scoperte anche successioni sedimentarie di varia natura e origine. Carbonati derivati dall'alterazione ad opera di fluidi idrotermali o acqua in prossimità della superficie sono stati trovati nella *Nili Fossae* (EHLMAN et al., 2008) e nel cratere *Gusev* (MORRIS et al., 2010), e bacini evaporitici sono stati scoperti in altre aree (GENDRIN et al., 2005). Tuttavia, nonostante la presenza di depositi tipicamente carsificabili e di più favorevoli condizioni ambientali nel passato, ad oggi su Marte è ancora azzardato ipotizzare la presenza di grotte carsiche. Al contrario, l'attività vulcanica del pianeta, per la bassa forza di gravità e gli elevati volumi eruttati ha generato, per sovrapposizione di flussi lavici, i grandi vulcani a scudo della regione di Tharsis (CARR et al., 1977; CRUMPLER & AUBELE, 1978; GREELEY & SPUDIS, 1981; WERNER, 2009; Fig. 3) con canali e tubi di lava molto grandi (GREELEY, 1991).

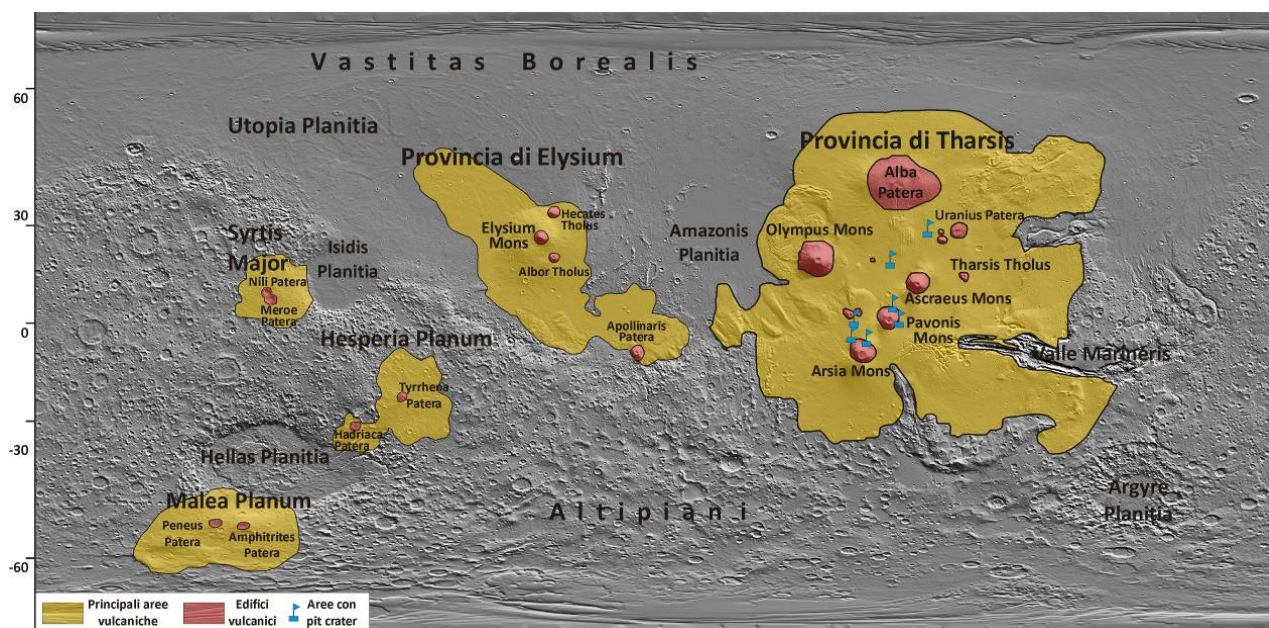


Figura 3. Province ed edifici vulcanici di Marte con ubicazione dei siti ove ad oggi sono noti *skylight* e/o collassi.

Figure 3. Volcanic provinces of Mars and vents with location of *skylight* and pit crater area.

Numerosi canali e tubi di lava sono stati rilevati da immagini ad alta risoluzione in un transetto del Mons Olympus (PUPYSHEVA et al., 2006; BLEACHER et al., 2007b; DE BERNARDINIS, 2012) e della dorsale di Tharsis (BLEACHER et al., 2007a; DE BERNARDINIS, 2012). L'indagine non ha rivelato *skylight* ma solo la presenza di tubi collassati che hanno originato depressioni chiuse singole o multiple (*pit chains*) longitudinalmente al tubo stesso. Lungo il versante settentrionale e in prossimità dell'apron basale dell'Arsia Mons, sono state individuate dal Mars Odyssey sette cavità che si aprono in una regione con diffusa presenza di depressioni prodotte da vuoti sotterranei collassati (CUSHING et al., 2007; Figg. 3 e 4). Indagate con le due camere THEMIS nel visibile (risoluzione 18 m/pixel) e nell'infrarosso (risoluzione 100 m/pixel) esse non presentano caratteristiche di crateri da impatto o da bocche eruttive: sono profondi pozzi cilindrici a pareti verticali che con molta probabilità danno accesso a caverne sotterranee. Le osservazioni all'infrarosso hanno mostrato che essi risultano più freddi

rispetto alla superficie durante il pomeriggio e più caldi prima dell'alba. Informalmente denominati “le sette sorelle dell'Arsia Mons” (Fig. 4a-f), queste voragini da crollo hanno diametri dai 100 ai 260 m e profondità minima tra i 68 e i 172 m (CUSHING et al., 2007, 2008). Nuove osservazioni con camere ad alta risoluzione (CTX, 6m/pixel, e HiRISE, 0,3m/pixel) del Mars Reconnaissance Orbiter hanno fornito altri dettagli morfologici e individuato altri due profondi pozzi dalle pareti verticali (CUSHING et al., 2008), del diametro di 125 m e profondi 68 m, molto vicini tra loro e allineati lungo una successione di altre depressioni. Molti altri *skylight* (73) vengono individuati a N dell'Arsia Mons e sul fianco SE del Pavonis Mons (Fig. 4m e 5a; CUSHING E TITUS, 2010; CUSHING, 2012).

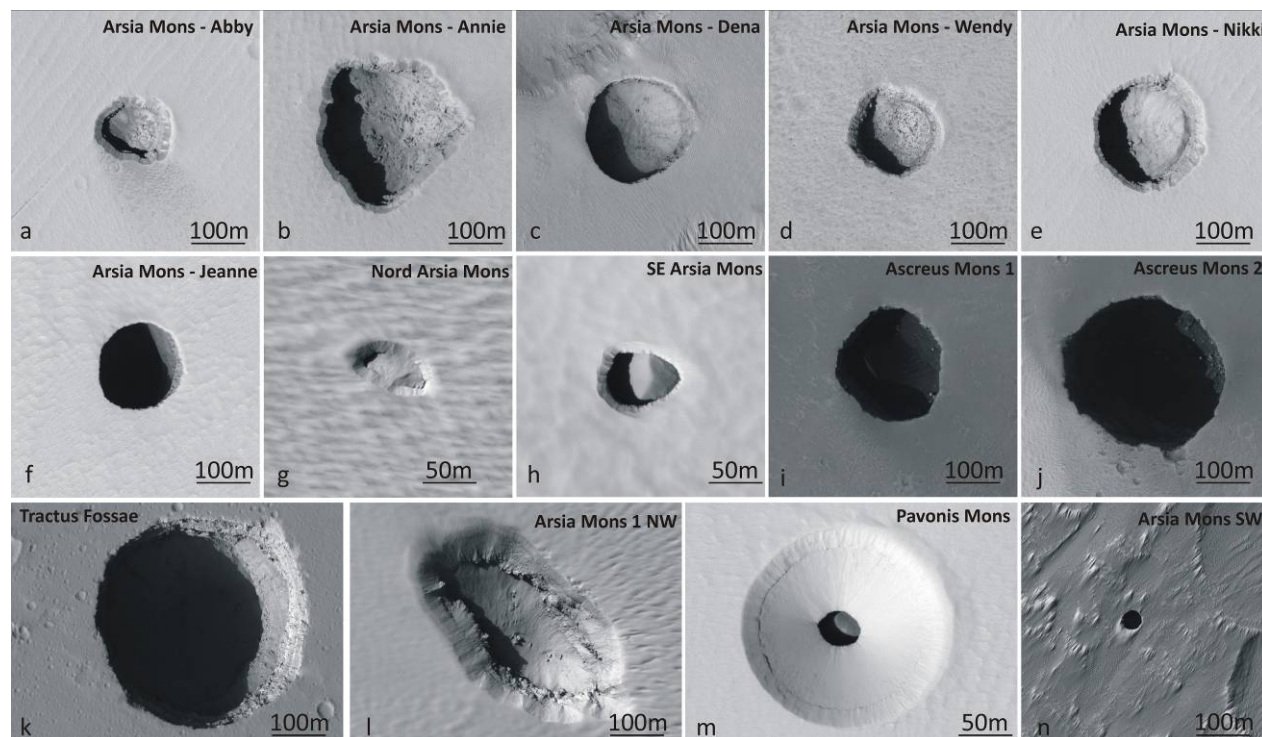


Figura 4. Collage di pit crater marziani (HiRISE: NASA / JPL /University of Arizona) nella dorsale di Tharsis.

Figure 4. Martian pit craters in the Tharsis-ridge shield volcanoes (HiRISE: NASA/JPL/University of Arizona).

Cavità nel ghiaccio

Fenomeni criovulcanici con eruzioni di liquidi o gas supergelidi composti di acqua, ammoniaca o composti del metano (criomagma) sono noti su Encelado, Tritone, Titano, Europa e Cerere. L'origine dell'energia che sostiene questi processi è ancora incerta (interazione mareale, effetto serra sotterraneo o sorgenti idrotermali). Fenomeni tipo geyser sono stati osservati anche al polo sud di Marte durante il disgelo primaverile la cui attività genera macchie di materiale scuro sulla superficie (*dark spot dune*) e una rete di canali nello strato di ghiaccio (*spider*; KIEFFER, 2000; PIQUERX et al., 2003). Pur trattandosi di fenomeni ancora poco conosciuti, essi evidenziano la possibile esistenza di fenomeni speleogenetici alternativi.

Tipologie

Collassi (*pit crater*) e *skylight* sono spesso allineati a depressioni con fondo chiuso talora in coalescenza, a formare una catena (*pit chain*); non presentano bordi rilevati, depositi da eiezione o flussi di lava, tipici di crateri da impatto, eruzioni vulcaniche o caldere (WYRICK et al., 2004; CUSHING et al., 2007; BLEACHER et al., 2007a, b; CUSHING, 2012). Si tratta di morfologie note anche sulla Terra (FERRIL et al., 2004) che si generano per collasso di materiale all'interno di vuoti nel sottosuolo. Hanno tipica forma conica con o senza un fondo piatto, pareti interne acclivi tra 30° e 65°, stratificate e interessate da fenomeni di erosione differenziata. *Pit chain* su Marte sono associati al drenaggio di depositi superficiali poco consolidati all'interno di vuoti del sottosuolo generati dall'ampliamento di fratture nel basamento in corrispondenza di graben o lungo faglie estensionali profonde fino a 5 km (FERRIL et al., 2003; WYRICK et al., 2004). In questi casi le *pit chain* sono allineate alle strutture tettoniche su cui si impostano, presentano andamenti più lineari, ma soprattutto da sole non costituiscono indizio certo della presenza di un tubo di lava nel sottosuolo. Se associate a tubi di lava seguono l'acclività del pendio secondo una direzione più sinuosa.

I collassi individuati su Luna e Marte presentano forme da circolari a sub-circolari, pareti verticali stratificate

interessate da erosione differenziata e sono profondi da alcune decine a oltre 100 m. In alcuni casi pareti a sbalzo lasciano intuire la presenza di spazio vuoto che prosegue lateralmente nel sottosuolo. In relazione a diversi ambiti morfologici e strutturali, sono state distinte (CUSHING et al., 2007; CUSHING & TITUS, 2010; CUSHING, 2012): cavità associate a tubi di lava, a strutture vulcano tettoniche e cavità atipiche (Fig. 5).

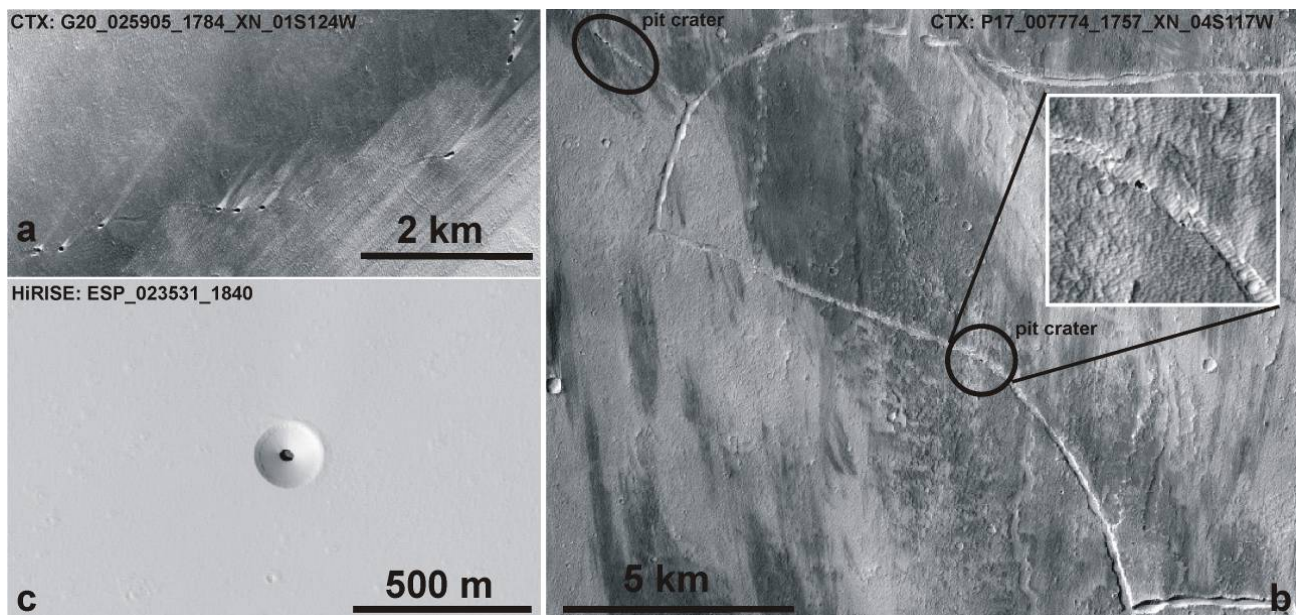


Figura 5. Ingressi di cavità su Marte su tubo di lava (a); strutture vulcano tettoniche (b); e cavità atipiche (c); NASA/JPL.

Figure 5. Martian cave entrances on lava-tube rille (a); volcano-tectonic fractures (b); atypical pit crater (c); NASA/JPL.

Cavità associate a tubi di lava (*lava tube caves*) si formano per collasso della volta o perché essa non si è del tutto chiusa per effetto di fratturazione estensionale della crosta causata dall'*inflation*. La presenza di ingressi allineati lungo *rille* sinuosi è indicatore dell'esistenza di un tubo singolo, vuoto e i loro diametri possono essere indicativi delle dimensioni del tubo sottostante (Fig. 5a).

Cavità associate a strutture vulcano tettoniche (*volcano-tectonic caves*) sono depressioni che si rinvencono in zone distali rispetto ad un edificio vulcanico. Gli ingressi sono allineati all'interno di strutture tipo graben dal fondo piatto che si sviluppano per 10-20 km in linea retta o anche curvilinea ma non sinuosa (Fig. 5b). Queste strutture tettoniche di tipo estensionale sono state ampliate dall'intrusione di magma dal sottosuolo che ha favorito la formazione di collassi in superficie. Le cavità tendono a svilupparsi in profondità nelle fratture ospitanti, non presentano tumuli o bocche effimere associate e i loro ingressi possono essere mascherati da depositi eolici.

Le cavità atipiche (*atypical pit crater*) non si associano a strutture e morfologie superficiali. Hanno forma cilindrica con diametro da 80 a 300 m e pareti verticali molto profonde, che però in alcuni casi fanno intuire la presenza di cavità. Si ipotizza che siano legati a tubi di lava profondi o a strutture tettoniche sepolte e si ritiene che il materiale incoerente della superficie venga drenato attraverso queste cavità nel sottosuolo, o che il tetto della cavità si allarghi progressivamente verso l'esterno per crollo (Figg. 4m e 5c).

Metodi di indagine

La prospettiva di utilizzare tubi di lava vuoti come basi sotterranee per la permanenza umana o per fini di ricerca pone il problema di sviluppare metodi e tecnologie innovative per una preliminare esplorazione.

Rilevamento da satellite

Lo studio attraverso immagini satellitari è limitato dalla risoluzione degli strumenti, dalla copertura areale, ma soprattutto dal disporre di un punto di vista solo dall'alto che non permette di ispezionare la cavità nel sottosuolo. Le immagini da satellite consentono di indagare aspetti morfologici come la profondità sfruttando le condizioni di illuminazione delle pareti del pozzo e l'altezza del Sole durante la ripresa fotografica (Fig. 6).

Il georadar (GPR) ha invece l'obiettivo di indagare in maniera indiretta l'andamento ipogeo di un tubo di lava (MIYAMOTO et al., 2002, 2005; ROWELL et al., 2010) ed è stato testato su tubi di lava terrestri con risultati positivi (OLHOEFT et al., 2000; MIYAMOTO et al., 2002, 2005; MEGLICH, 2003; ROWELL et al., 2010). Il metodo, non richiedendo un diretto contatto tra strumentazione e suolo e non avendo necessità di lunghi tempi

di acquisizione, può essere utilizzato per svolgere le attività di rilevamento anche da aereo o satellite.

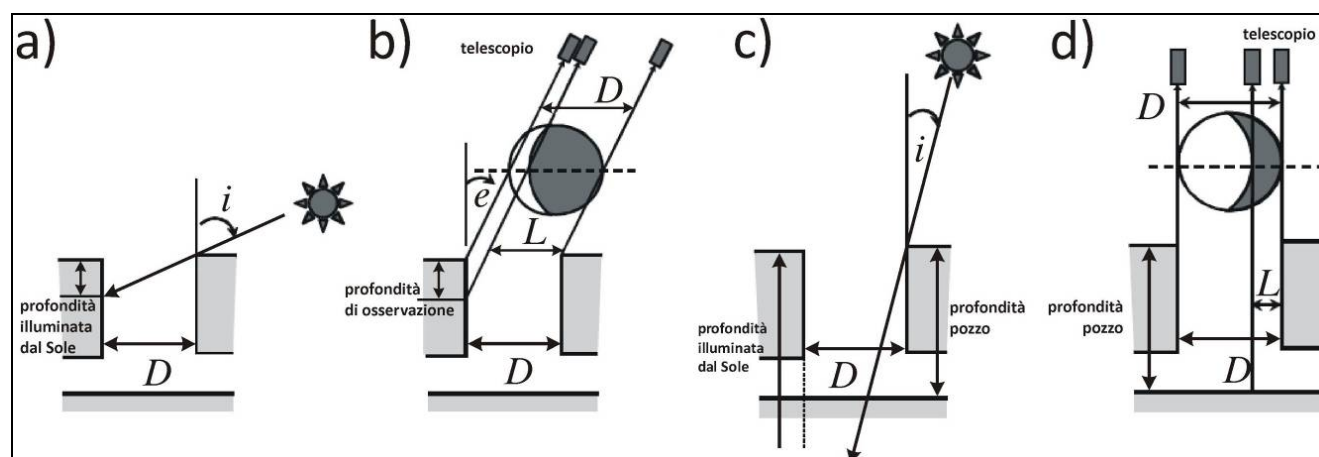


Figura 6. Stima della profondità di un pozzo dalle condizioni di illuminazione (da HARUYAMA et al., 2009, modificato). Il Sole illumina la parete del pozzo, la profondità minima è $d_{\text{sunlight}} = D / \tan(i)$, con D diametro del pozzo ed i angolo di incidenza del Sole (a) oppure (b) $d_{\text{obs}} = (D - L) / \tan(e)$ con L lunghezza della porzione in ombra del pozzo, ed e angolo sotto cui viene osservato dalla camera satellitare. Se il Sole illumina il pavimento del pozzo (c e d), $d_{\text{sunlight}} \neq d_{\text{obs}}$. La profondità può essere stimata solo in base alla porzione in ombra e all'angolo di incidenza del Sole, $d_{\text{bottom}} = L / \tan(i)$.

Figure 6. Estimation of the vertical hole depth using solar lighting condition and image data (after HARUYAMA et al., 2009, modified). Sun illuminate the wall of the hole. a) The minimum depth is $d_{\text{sunlight}} = D / \tan(i)$, with D diameter of hole and i incidence angle; b) alternately, $d_{\text{obs}} = (D - L) / \tan(e)$ can be independently estimated from the dark portion L of the hole ($D - L$) and the emission angle e . c-d) If the Sun illuminate the hole bottom $d_{\text{sunlight}} \neq d_{\text{obs}}$. The hole depth can be estimated by $d_{\text{bottom}} = L / \tan(i)$.

Microbots vs. Rover

Lo sviluppo di tecnologie robotiche ha come obiettivo l'esplorazione diretta del sottosuolo per mezzo di rover, ma anche di micro robot (*microbots*). Ma mentre i rover sono limitati allo studio di piccole aree e necessitano di complesse tecniche di *landing*, centinaia o migliaia di microbots delle dimensioni di una palla da baseball, potrebbero essere distribuiti su ampie superfici direttamente dall'orbita. Seguendo questa linea di pensiero, DUBOWSKY et al. (2005) stanno sviluppando un prototipo formato da una piccola sfera di polycarbonato trasparente (10 cm di diametro e 100 g di peso) al cui interno sono presenti vari sensori miniaturizzati, diversi dei quali ancora in fase di sviluppo, oltre ai sub sistemi relativi alla mobilità, l'alimentazione, le comunicazioni, il controllo e le elaborazioni (Fig. 7).

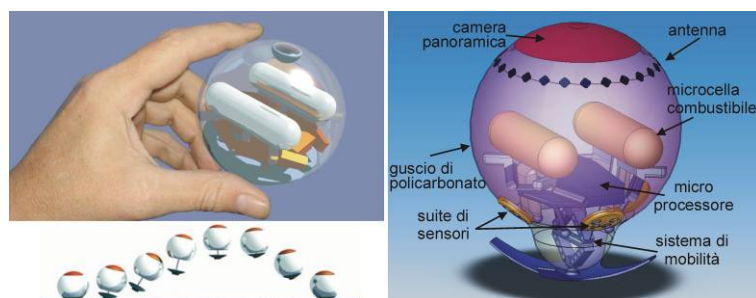


Figura 7. Modello concettuale del microbot (da DUBOWSKY et al., 2005).

Figure 7. Conceptual model of microbots (after DUBOWSKY et al., 2005).

Le sfere si muovono per saltelli, seguiti da rimbalzi e rotolamenti in fase di caduta, attivati da elastomeri dielettrici. Il prototipo è in grado di muoversi su diversi tipi di terreno. Da prove sul campo in alcune cavità laviche del New Mexico, i microbot si sono incastrati tra i blocchi, ma le simulazioni condotte indicano che utilizzando almeno 50-100 microbot ne sopravviverebbero abbastanza da riuscire a penetrare per almeno 1 km all'interno di una cavità. Per un efficiente esplorazione il folto gruppo di microbots da impiegare richiede un coordinamento dei loro movimenti, la condivisione delle informazioni, l'elaborazione dei dati e delle comunicazioni. Si tratta di un aspetto tecnico di non poco conto e anche di notevole complessità da affrontare e risolvere nel campo della robotica (DUBOWSKY et al., 2005).

Il team della SELENE/Kaguya sta ideando la missione "Smart Lander for Investigating Moon" che prevede l'atterraggio di precisione di un lander da cui sbarcano 2 piccoli rover di 1,5 kg di peso totale dotati di fotocamere stereoscopiche ad alta risoluzione per acquisire dettagliate immagini delle pareti e del fondo dello

skylight delle *Marius Hills* sulla Luna (HARUYAMA et al., 2011). Missione più complessa è quella proposta dall’*Astrobotic Technology* (WHITTAKER, 2012) e denominata “*Spelunker*” (Fig. 8). Un *lander*, esegue una scansione tridimensionale di uno *skylight* in fase di discesa e valuta il sito più opportuno per l’atterraggio per calare un cavo al suo interno. Dopo lo sbarco, dal *lander* escono 3 robots “*cavehopper*” mentre un quarto viene sospeso nello *skylight* con lo scopo di completarne la scansione, mantenere una connessione radio tra *cavehopper* nel sottosuolo e *lander*, e assisterli nell’esplorazione. All’interno del tubo, i robot possono usare le ruote, quando incontrano un pavimento liscio, o saltare tramite levette azionate da pistoni che forniscono un impulso per un salto direzionato. Durante la progressione, i *cavehoppers* teleguidati da Terra eseguono indagini geologiche e un rilevamento LIDAR dell’ipogeo.

Problema comune nell’utilizzo sia dei microbots che dei rover è quello della trasmissione dei dati in superficie e poi alla Terra. In entrambi i casi bisogna stabilire una rete LAN tra le varie unità per poi trasferire dati e informazioni a un *lander* in superficie, da qui a un *orbiter* e poi alla Terra. Per fare ciò alcuni microbot dovranno essere programmati per fermarsi a varie distanze all’interno della cavità e agire da nodi della rete di comunicazioni (DUBOWSKY et al., 2005); nel caso dei rover essi devono ritornare entro il raggio d’azione del *lander* oppure, tramite onde radio a bassa frequenza, trasmettere i dati a un robot “*follower*” che lo segue in superficie e funge da nodo di comunicazione con gli operatori sulla Terra.

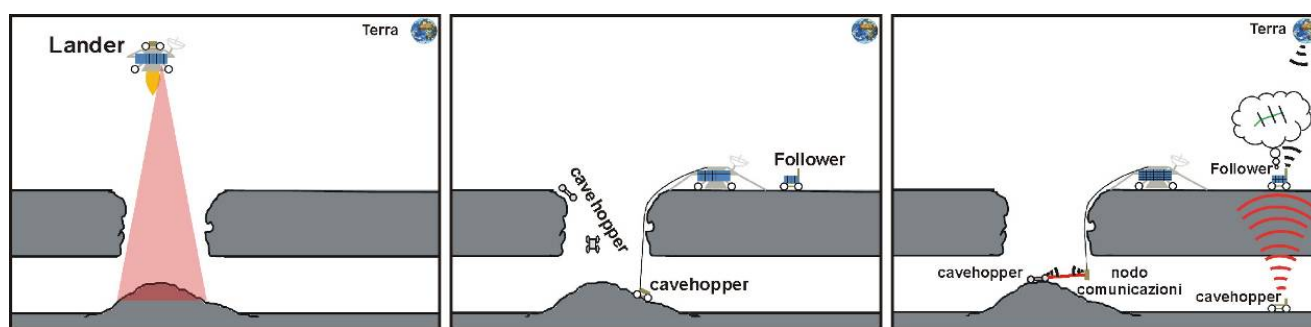


Figura 8. Modello concettuale della missione “*Spelunker*” (da WHITTAKER, 2012, modificato).

Figure 8. Conceptual model of “*Spelunker*” mission (after WHITTAKER, 2012, modified).

Astrobiologia

Una delle più importanti questioni della scienza planetaria è se la vita si sia sviluppata altrove nel Sistema Solare. Se alcuni corpi celesti come la Luna ci consentono di affermare con ragionevole certezza che non sono mai esistite le condizioni per lo sviluppo di forme di vita, su altri corpi rocciosi del Sistema Solare tali condizioni potrebbero esistere tuttora o essere esistite in un passato più o meno recente. Quando si parla di esobiologia, inoltre, potrebbe non essere scontato che eventuali forme di vita presenti su altri mondi si basino sulla chimica del carbonio e usino l’acqua come solvente. In tal senso, quindi, pur non sapendo come cercare forme di vita alternative, non si può negare la possibile esistenza di biologie alternative su altri pianeti o in ambienti molto particolari. Certamente la vita tende a colonizzare gli ambienti più vari come confermano le scoperte sulla Terra di forme di vita batteriche o anche più complesse all’interno di fonti idrotermali abissali ad alta temperatura, nelle carote di ghiaccio dell’Antartide o nel sottosuolo a grandi profondità. Ecosistemi chemio-autotrofi sono ben noti in alcune grotte terrestri dove sono state scoperte comunità di organismi che si sostentano attraverso l’ossidazione di sostanze chimiche inorganiche come il solfuro di idrogeno. Queste particolari forme di vita estremofile spingono diversi ricercatori a ipotizzare l’esistenza di forme simili anche all’interno di isolati ambienti ipogei marziani in presenza di specifici depositi minerali. Lo studio della vita nelle grotte terrestri è un punto di riferimento anche per l’esobiologia e ci informa sulla diversità e la resilienza della vita microbica e di come le tracce di tale vita siano registrate sotto forma di firme biologiche (chimiche, molecolari, isotopiche, morfogeniche) all’interno di depositi di minerali. Attualmente la superficie di Marte è sottoposta a molti fattori di rischio per la vita e si ritiene che, se vita microbica sia mai esistita sul pianeta, essa non può che essersi rifugiata nel sottosuolo s.l. dove godrebbe di una efficace protezione a lungo termine. Le grotte, in quanto ambienti molto conservativi, rappresentano alcuni di questi luoghi. Tuttavia, le formazioni rocciose in cui si trovano gli accessi ai possibili ipogei finora noti sono molto giovani (intorno ai 300 milioni di anni) rispetto al periodo che si ritiene sia stato più favorevole allo sviluppo della vita sul pianeta (3,5-3 miliardi di anni fa). Perciò, secondo altri Autori (GRIN et al., 1998; CABROL et al., 2009), le maggiori probabilità di trovare prove della vita passata o esistente su Marte sarebbero solo in quelle regioni dove si sono formate cavità per dissoluzione, quindi associate alla presenza di acqua, ma di cui, però, attualmente non si hanno evidenze, o nel permafrost del sottosuolo. Tuttavia, è anche possibile che le grotte laviche su Marte possano intercettare

acque di falda sotterranee e favorire lo sviluppo di ambienti protetti contenenti firme biologiche o indicatori paleoambientali riferibili a diversi periodi della storia marziana (BOSTON et al., 1992, 2001; GRIN et al., 1998; SCHULZE-MAKUCH et al., 2005; RASMUSSEN et al., 2009).

Protezione Planetaria

Quando nel novembre 1969 gli astronauti dell'Apollo 12 riportarono sulla Terra la telecamera montata sulla sonda Surveyor 3 (1967), si scoprì che era contaminata dal batterio *Streptococcus mitis*, vivo e vegeto dopo ben 31 mesi di permanenza sulla Luna. Sebbene dopo più di 40 anni ancora non sia chiaro se la contaminazione sia avvenuta prima del lancio o in seguito al ritorno sulla Terra, questo episodio è significativo dei possibili rischi di contaminazione collegati a una missione spaziale tanto più se essa ha come obiettivo la ricerca di forme di vita.

Come sulla Terra grande attenzione si pone alla protezione degli ambienti ipogei o a regioni speciali come l'Antartide per evitare forme di contaminazione chimica, fisica e biologica, anche nel campo dell'esplorazione spaziale la problematica è molto sentita. Organizzazioni scientifiche come MEPAG (2006) e COSPAR (2008) già da diversi anni hanno redatto linee guida per limitare o contenere il problema della contaminazione biologica da parte di future missioni spaziali. Nonostante ogni possibile accorgimento, tuttavia, è da ritenere inevitabile che future esplorazioni umane di Marte comportino qualche forma sia pur minima e controllata di contaminazione (CONLEY & RUMMEL, 2010). Per questo motivo si cerca di privilegiare siti di atterraggio tali che le eventuali contaminazioni siano localizzate nello spazio e si ritiene che gli habitat ipogei non siano coerenti con queste raccomandazioni. In tal senso, le grotte terrestri con contenuti biologici (soprattutto microbiologico) possono servire come convincente banco di prova per lo sviluppo di metodologie e protocolli impatto minimo o non-impatto anche per l'uso extraterrestre.

Conclusioni

La diversità geologico-evolutiva dei corpi celesti di tipo roccioso nel Sistema Solare suggerisce l'esistenza di cavità che per processi di formazione, tipologia e dimensioni possono essere molto differenti da quelle terrestri. L'uomo ipertecnologico tornerà di nuovo nelle caverne? HÖRZ già nel 1985 evidenziò come il potenziale utilizzo di un tubo di lava come rifugio sotterraneo in cui collocare una base lunare aveva il vantaggio di richiedere pochi materiali da costruzione per renderli abitabili, favorire un controllo naturale delle condizioni ambientali generalmente costanti all'interno di una cavità sotterranea, fornire una protezione naturale contro le severe condizioni ambientali superficiali continuamente sottoposte a radiazioni cosmiche, impatti di meteoriti o anche al materiale di eiezione derivante da un impatto, fornire un ideale luogo di ricovero per veicoli e macchinari o stoccaggio di materiali. Considerazioni che insieme alla necessità di acqua e fonti di energia per sopravvivere, restano tuttora valide. Al momento, tuttavia, molto resta da sviluppare in termini di tecnologie e metodologie per il rilevamento e l'esplorazione di queste cavità, verso le quali non sono ancora previste missioni dedicate sebbene presentino i requisiti scientifici che sono tra gli obiettivi prioritari della NASA (esplorazione umana, ricerca di acqua e forme di vita). Le prime esplorazioni dovranno essere di natura robotica e ciò necessita lo sviluppo di tecnologie per atterraggi di precisione nei pressi degli ingressi, lo sviluppo di robot in grado di scendere e spostarsi all'interno di queste grotte nonché di sensori e strumenti di monitoraggio e analisi ambientali, scientifiche, per il rilievo topografico e la trasmissione dati a Terra. Anche dal punto di vista infrastrutturale, l'uso di cavità come tubi di lava per realizzare insediamenti abitabili sarebbe molto vantaggioso in termini di trasporto e consumo di risorse. La stabilità tettonica di un'area con cavità sotterranee è strettamente connessa alla stabilità geologica della cavità stessa, ma anche alla impermeabilità e al grado di tenuta in caso di perdite di gas dalla stazione ipogea. Le grotte rappresentano obiettivi eccellenti anche per la ricerca di tracce di vita antica, ma le soluzioni esplorative devono tener conto della necessità di svolgere indagini senza rischi di contaminazione ambientale nel rispetto delle politiche di protezione planetaria concordate a livello internazionale.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Prof. LUIGI A. SMALDONE dell'Università “Federico II” di Napoli e direttore scientifico del Planetario di Caserta per gli utili suggerimenti e l'incoraggiamento.

Bibliografia

- AA.VV., 2013. *Moon Miners' Manifesto*. On-line www.MMM-MoonMinersManifesto.com
- ASHLEY J.W., BOYD A.K., HIESINGER H., ROBINSON M.S., TRAN T., VAN DER BOGERT C.H., WAGNER R.V., & LROC SCIENCE TEAM, 2011a. *Lunar pits: sublunarean voids and the nature of Mare emplacement*. 42nd Lunar and Planetary Science Conference, March 7–11, 2011, at The Woodlands in Texas, abs. 2771.

- ASHLEY J.W., ROBINSON M.S., RAY HAWKE B., BOYD A.K., WAGNER R.V., SPEYERER E.J., HIESINGER H., VAN DER BOGERT C.H., 2011b. *Lunar caves in mare deposits imaged by the LROC narrow angle cameras*. 1st Inter. Planetary Cave Research Workshop, October 25-28, 2011, Carlsbad – New Mexico, abs. 8008.
- ATKINSON A., GRIFFIN T.J., STEPHENSON P.J., 1975. *A major lava tube system from Undara Volcano, North Queensland*. Bull. of Volcanology, **39**, 266-293.
- BAKER V.R., 2006. *Water and the evolutionary geological history of Mars*. Boll. Soc. Geol. It., **125**, 357-369.
- BLEACHER J.E., GREELEY R., WILLIAMS D.A., CAVE S.R., NEUKUM G., 2007a. *Trends in effusive style at the Tharsis Montes, Mars, and implications for the development of the Tharsis province*. Jour. of Geoph. Res., **112**, E09005.
- BLEACHER J.E., GREELEY R., WILLIAMS D.A., WERNER S.C., HAUBER E., NEUKUM G., 2007b. *Olympus Mons, Mars: Inferred changes in late Amazonian aged effusive activity from lava flow mapping of Mars Express High Resolution Stereo Camera data*. Journal of Geophysical Research, **112**, E04003.
- BOSTON P.J., 2003. *Extraterrestrial caves*. In J. GUNN (ed.), *Encyclopedia of caves and karst science*, Fitzroy-dearborn, New York-London, 735-741.
- BOSTON P.J., 2010. *Location, location, location! Lava caves on Mars for habitat, resources, and the search for life*. Journal of Cosmology, **12**, 3957-3979.
- BYRNE P.K., KLIMCZAK C., WILLIAMS D.A., HURWITZ D.M., SOLOMON S.C., HEAD J.W., PREUSKER F., OBERST J., 2013. *An assemblage of lava flow features on Mercury*. Jour. Geophys. Res. Planets, **118**, 1-20.
- CABROL N.A., GRIN E.A., WYNNE J.J., 2009. *Detection of caves and cave-bearing geology on Mars*. 40th Lunar and Planetary Science Conference, abs. no. 1040.
- COOMBS C.R., HAWKE B.R., 1992. *A search for intact lava tubes on the Moon: Possible lunar base habitats*. Second Conf. on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century, NASA Conf. Publ., NASA CP-3166, **1**, 219– 229.
- CRUIKSHANK D.P., WOOD C.A., 1972. *Lunar rilles and Hawaiian volcanic features: Possible analogues*. Moon, **3**, 412–447.
- CRUMPLER L.S., HEAD J.W., AUBELE J.C., GUEST J., SAUNDERS R.S., 1992. *Venus Volcanism: Global Distribution and Classification from Magellan Data*. 23th Lunar and Planetary Science Conference, 277-278.
- CUSHING G.E., 2012. *Candidate cave entrance on Mars*. Journal of Cave and Karst Studies, **74**, 33-47.
- CUSHING G.E., TITUS T.N., WYNNE J.J., CHRISTENSEN P.R., 2007. *THEMIS observes possible cave skylights on Mars*. Geophys. Res. Lett., **34**, L17201.
- CUSHING G.E., TITUS T.N., JAEGER W.L., KESZTHELEYI L.P., McEWEN A.S., CHRISTENSEN P.R., 2008. *Continuing study of anomalous pit craters in the Tharsis region of Mars: new observation from HiRISE and THEMIS*. 39th Lunar and Planetary Science Conference, abs. no. 2447.
- CUSHING G.E., TITUS T.N., 2010. *Caves on Mars: Candidate sites for astrobiological exploration*. Astrobiology Science Conference 2010, abs. no. 5414.
- DE BERARDINIS P., 2012. *Confronto morfometrico dei collassi di lava tube sulla Terra e su Marte*. Tesi di Laurea in Scienze Geologiche, sessione III, anno accademico 2011-2012, Università di Bologna.
- DUBOWSKY S., IAGNEMMA K., LIBERATORE S., LAMBETH D.M., PLANTE J.S., BOSTON P.J., 2005. *A concept mission: Microbots for large-scale planetary surface and subsurface exploration*. Space Technology and Applic. Int. Forum – STAIF, 13-17 February, 2005, Albuquerque, New Mexico (USA), M.S. El-Genk ed., **746**, 1449-1458.
- EHLMANN B.L., MUSTARD J.F., MURCHIE S.L., POULET F., BISHOP J.L., BROWN A.J., CALVIN W.M., CLARK R.N., DES MARAIS D.J., MILLIKEN R.E., ROACH L.H., ROUSH T.L., SWAYZE G.A., WRAY J.J., 2008. *Orbital identification of carbonate bearing rocks on Mars*. Science, **322**, 1828-1832.
- FREDERICK R., BILLINGS T.L., MCGOWN R.D., WALDEN B.E., 2000. *Martian ice caves*. Concepts and Applications for Mars Exploration, Lunar and Planet. Inst., Houston, Texas, 18– 20 July.
- GENDRIN A., MANGOLD N., BIBRING J.P., LANGEVIN Y., GONDET B., POULET F., BONELLO G., QUANTIN C., MUSTARD J., ARVIDSON R., LEMOUELIC S., 2005. *Sulfates in Martian layered terrains: the OMEGA/Mars Express view*. Science, **307** (5715), 1587-1591.
- GORNITZ V., 1973. *The origin of sinuous rilles*, Moon, **6**, 337 – 356.
- GREELEY R., 1971. *Lava tubes and channels in the lunar Marius Hills*. Moon, **3**, 289–314.
- GREGG T. K. P., SAKIMOTO S., 1996, *Venusian lava flow morphologies variation on basaltic theme*. Lunar and Planetary Science, **27**, 459-460.

- GRIN E.A., CABROL N.A., MCKAY C.P., 1998. *Caves in the Martian regolith and their significance for exobiology exploration*. 29th Lunar and Planetary Science Conference, abs. no. 1012.
- GRINDROD P.M., NIMMO F., STOFAN E.R., GUEST J.E., 2005, *Strain at radially fractured centers on Venus*. Journal of Geophysical Research, **110**, no. E12.
- HAMILTON W.B., 2007. *An alternative Venus*. In: G.R. FOULGER, D.M. JURDY (eds.): *Plates, plumes, and planetary processes*, Geol. Society of America Special Paper 430, 879–911.
- HARTER III J.W., 1972. *Morphological Classification of Lava Tubes*. Int. Symp. on Vulcanospeleology and its Extraterrestrial Applications: 29th Annual Conv. Nat. Speleol. Society, White Salmon, 74-85.
- HARUYAMA J., HIOKI K., SHIRAO M., MOROTA T., HIESINGER H., VAN DER BOGERT C., MIYAMOTO H., IWASAKI A., YOKOTA Y., OTHAKE M., MATSUNAGA T., HARA S., NAKANOTANI S., PIETERS C. M., 2009. *Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras*. Geophysical Res. Lett., **36**, L21206.
- HARUYAMA J., et al., 2010. *New Discoveries of Lunar Holes in Mare Tranquillitatis and Mare Ingenii*. 41th Lunar Planet. Sci. Conf., abs. no.1285.
- HARUYAMA J., SAWAI S., NIZUNO T., YOSHIMITSU T., FUKUDA S., NAKTANI I., 2011. *Exploration of lunar holes, possible skylights of underlying lava tubes, by Smart Lander for Investigating Moon (SLIM)*. Jour. of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2011-k-08, 1-4.
- HIESINGER H., HEAD III J.W., WOLF U., JAUMANN R., NEUKUM G., 2003, *Ages and stratigraphy of mare basalts in Oceanus Procellarum, Mare Nubium, Mare Cognitum, and Mare Insularum*. Jour. Geoph. Res., **108** (E7), 5065, 1-27.
- HÖRZ F., 1985. *Lava tubes: Potential shelters for habitats, in Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century*. In: W.W. MENDELL (ed.): *Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century*. Lunar and Planet. Inst., 405–412.
- HULME G., 1973. *Turbulent lava flow and the formation of lunar sinuous rilles*. Mod. Geol., **4**, 107– 117.
- HURWITZ D.M., HEAD J.W., BYRNE P.K., XIAO Z., SOLOMON S.C., ZUBER M.T., SMITH D.E., NEUMANN G.A., 2013. *Investigating the origin of candidate lava channels on Mercury with MESSENGER data: Theory and observations*. Jour. Geophys. Res. Planets, **118**, 471–486.
- JET PROPULSION LABORATORY, 1989, *Magellan: The Unveiling of Venus*. NASA, marzo 1989. JPL 400-345 3/89, <http://history.nasa.gov/JPL-400-345/magellan.htm>
- KIEFFER H.H., 2000. *Annual punctuated CO₂ slab-ice and jets on Mars*. 2nd International Conference on Mars Polar Science and Exploration, Univ. of Iceland, Reykjavik, 21– 25 August 2000.
- KIEFFER H.H., TITUS T.N., MULLINS K.F., CHRISTENSEN P.R., 2000. *Mars south polar spring and summer behavior observed by TES: Seasonal cap evolution controlled by frost grain size*. Jour. Geophys. Res., **105**, 9653–9699.
- LÉVEILLÉ R.J., DATTA S., 2010. *Lava tubes and basaltic caves as astrobiological targets on Earth and Mars: A review*. Planetary and Space Science, **58**, 592–598.
- MASURSKY H., COLTON G.W., EL-BAZ F. (eds.), 1978. *Apollo over the moon: a view from orbit*. NASA SP-362, 255pp.
- MEGLICH T.M., WILLIAMS M.C., HODGES S.M., DEMARCO M.J., 2003, *Subsurface Geophysical Imaging of Lava Tubes, Lava Beds National Monument*, CA. Geophysics, December 2003, Orlando, FL.
- MEPAG SR-SAG (2006). *Findings of the Mars Special Regions Science Analysis Group*. Unpublished white paper, 76 p, June 2006, Mars Exploration Program Analysis Group (MEPAG) at <http://mepag.jpl.nasa.gov/reports/index.html>.
- MITCHELL K.L., MALASKA M., 2011. *Karst on Titan*. 1st Inter. Planetary Cave Research Workshop, October 25-28, 2011, Carlsbad – New Mexico, abs. 8021.
- MORRIS R.V., RUFF S.W., GELLERT R., MING D.W., ARVIDSON R.E., CLARK B.C., GOLDEN D.C., SIEBACH K., KLINGELHOFFER G., SCHRODER C., FLEISCHER I., YEN A.S., SQUYRES S.W., 2010. *Identification of carbonate-rich outcrops on Mars by the Spirit Rover*. Science, **329** (5990), 421-424.
- NASA, 2010, *New Views of Lunar Pits*. NASA Portal, http://www.nasa.gov/mission_pages/LRO/multimedia/lroimages/lroc-20100914_lunarpits_prt.htm
- OBERBECK V. R., WILLAM L. Q., GREELEY R., 1969. *On the origin of lunar sinuous rilles*. Mod. Geol., **1**, 75–80.
- OLHOEFT G.R., SINEX D.B., SANDER K.A., LAGMANSON M.M., STILLMAN D.E., LEWIS S., CLARK B.T., WALLIN E.L., KAUAHIKAUA J.P., 2000. *Hot and cold lava tube characterization with ground penetrating radar*. Proc. 8th International Conference on Ground Penetrating Radar, **4084**.
- OLLIER C., 1990. *Vulcani. Attività, geografia, morfologia*. Zanichelli, 230 pp.

- PIQUEUX S., BYRNE S., RICHARDSON M.I., 2003. *Sublimation of Mars's southern seasonal CO₂ ice cap formation of spiders*. Jour. of Geophysical Research, **108**, E8, 5084.
- PUPYSHEVA N.V., BASILEVSKY A.T., IVANOV B.A., 2006. *Lava tubes on the summit part of Olympus Mons volcano, Mars, and channel network at its south-east foot: morphology, depths, widths, lengths, and coefficients of sinuosity*. 44th Vernadsky-Brown Microsymp. on Comparative Planet., Moscow, Russia, 9– 11 October 2006, abs. m44_71.
- ROWELL C.R., PIDLISECKY A., IRVING J.D., FERGUSON R.J., 2010. *Characterization of lava tubes using ground penetrating radar at Craters of the Moon National Monument, USA*. CREWES Research Report, **22**, 1-18.
- WERNER S.C., 2009. *The global martians volcanic evolutionary history*. Icarus, **201**, 44-68.
- WILLIAMS K.E., MCKAY C.P., TOON O.B., HEAD J.W., 2010. *Do ice caves exist on Mars?* Icarus, **209**, p. 358–368.
- WYRICK D., FERRILL D.A., MORRIS A.P., COLTON S.L., SIMS D.W., 2004. *Distribution, morphology, and origins of Martian pit crater chains*. Jour. Geophys. Res., **109**, E06005.
- WHITTAKER W., 2012. *Technologies Enabling Exploration of Skylights, Lava Tubes and Caves*. Final report for Office of the Chief Technologist National Aeronautics and Space Administration, 51 p.