
ATTI ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI
CLASSE SCIENZE FISICHE MATEMATICHE NATURALI
RENDICONTI

PIERO LEONARDI

**Osservazioni preliminari sulle rocce stratificate degli
appennini di Hadley fotografate dagli astronauti
dell'Apollo 15**

*Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Classe di Scienze Fisiche,
Matematiche e Naturali. Rendiconti, Serie 8, Vol. 51 (1971), n.6, p. 519-524.*

Accademia Nazionale dei Lincei

<http://www.bdim.eu/item?id=RLINA_1971_8_51_6_519_0>

L'utilizzo e la stampa di questo documento digitale è consentito liberamente per motivi di ricerca e studio. Non è consentito l'utilizzo dello stesso per motivi commerciali. Tutte le copie di questo documento devono riportare questo avvertimento.

*Articolo digitalizzato nel quadro del programma
bdim (Biblioteca Digitale Italiana di Matematica)
SIMAI & UMI*

<http://www.bdim.eu/>

Selenologia. — *Osservazioni preliminari sulle rocce stratificate degli appennini di Hadley fotografate dagli astronauti dell'Apollo 15* (*).
Nota (**) del Socio PIERO LEONARDI.

SUMMARY. — The magnificent photographs taken by the *Apollo 15* astronauts during their excursions upon lunar soil reveal that the Apennines of Hadley present a very evolved morphology demonstrating intense processes of degradation comparable to those phenomena which acted upon the earth's most ancient mountain chains, those which, for example, can be attributed to the caledonian orogenesis.

The *Apollo 15* photographs bear evidence that at least some of these mountains are formed by stratified rocks, which because of various considerations — being forced to exclude the existence of marine or alluvial sediments — one is inclined to consider pyroclastic.

Gli astronauti dell'*Apollo 15* ci hanno dato le prime fotografie prese dal suolo di una catena di montagne del nostro satellite. A dire il vero, una veduta panoramica di rilievi lunari ci era stata data nel 1966 dal *Surveyor I*, ma, più che di vere montagne, si trattava di colline appartenenti all'Anello di Flamsteed (*Flamsteed P*) nell'*Oceanus Procellarum*, costituenti il vallo di un cratere « fantasma », ed eventualmente dovute a estrusioni vulcaniche del tipo dei *ring dikes* ⁽¹⁾.

Nel caso dell'*Apollo 15* invece si sono ottenute bellissime vedute di una delle maggiori catene montuose lunari, quella degli Appennini, che costituisce il margine sudorientale del *Mare Imbrium* (Tav. I).

Queste fotografie sono particolarmente interessanti sotto vari punti di vista, e innanzitutto da quello morfologico in generale. Si è avuto infatti la conferma più convincente di un fatto che già avevano rivelato le fotografie scattate dai *Rangers* e dai *Lunar Orbiters* ⁽²⁾ e cioè che le montagne lunari — salvo quelle rispondenti a crateri di più recente formazione — presentano una morfologia molto dolce, paragonabile a quella di catene montuose terrestri

(*) Studio condotto nell'Istituto di Geologia dell'Università di Ferrara con il contributo del Consiglio Nazionale delle Ricerche (Contratto n. 109535). Ringrazio i Colleghi prof. Bruno Accordi dell'Università di Roma, prof. Giuseppe Colombo e prof. Armando Norinelli dell'Università di Padova e il prof. Renato Cristofolini dell'Università di Catania per la gentile consulenza, e i collaboratori proff. Giorgio Bartolomei, Alfonso Bosellini, Daniele Rossi, Edoardo Semenza e Elio Sommarivilla dell'Università di Ferrara per la fruttuosa discussione sull'argomento.

(**) Presentata nella seduta dell'11 dicembre 1971.

(1) O'KEEFE J. A., LOWMAN P. D. JR. e CAMERON W. S., *Lunar ring dikes from Lunar Orbiter I*, « Science », 155, 77-78 (1967). P. LEONARDI, *Vulcani e bolidi sulla Luna e su Marte*, Manfrini, Calliano, 1971, pagg. 207, 209, figg. 9-2, 9-3, 9-4.

(2) P. LEONARDI, *On the origin of the lunar craters*, « Mem. Geopal. Univ. Ferrara », 2, fasc. 1, pag. 75, fig. 132, pag. 101, fig. 171.

molto antiche ed evolute, come per esempio di quelle caledoniane (Tav. II, fig. 1, 2; Tav. III, fig. 1, 2) ⁽³⁾. Il che dimostra che, contrariamente a quanto si credeva un tempo – prima delle imprese astronomiche – la mancanza sulla Luna dell'azione erosiva degli agenti atmosferici, cui sono dovute in buona parte le caratteristiche morfologiche dei rilievi terrestri (per l'assenza sulla Luna, secondo l'opinione della quasi totalità dei selenologi, di una atmosfera, non soltanto attualmente, ma anche in passato ⁽⁴⁾) non ha impedito ai rilievi lunari di subire un intenso processo di degradazione.

Degradazione che – esclusi i suddetti agenti atmosferici – può essere dovuta a fenomeni vari, tra cui l'azione del « vento solare », il « bombardamento » meteoritico, e anche, probabilmente, fenomeni termoclastici dovuti al passaggio dalla temperatura diurna a quella notturna, fenomeni tutti che evidentemente si sono manifestati nel corso di lunghissimi periodi di tempo.

Ma più interessanti fra tutte le fotografie scattate dagli astronauti dell'*Apollo 15* sono quelle che mostrano chiaramente che alcune delle montagne che fanno parte della catena degli Appennini lunari, e più precisamente qualcuna degli Appennini di Hadley, sono costituite da rocce regolarmente stratificate (Tavv. IV–VI).

Accenni di stratificazione erano stati intravisti anche nelle fotografie prese dai *Lunar Orbiters* e dagli *Apollo*, nel loro volo orbitale, sui fianchi della *Rima Hadley*. Ma nelle fotografie dell'*Apollo 15* prese dal suolo lunare questa stratificazione risulta particolarmente evidente.

E qui si presentano due interessanti problemi: l'origine di questa regolare stratificazione e la causa della inclinazione degli strati.

Come si è detto sopra, la catena dei *Montes Apenninus* è situata al margine sudorientale del *Mare Imbrium* e presenta due versanti con caratteri assai diversi nel loro complesso. Quello verso il « mare » suddetto è assai ripido, mentre quello opposto è assai dolcemente inclinato. E cioè questa catena, come altre che circondano il *Mare Imbrium* (*Montes Carpathus*, *Alpes* e *Montes Jura*), presenta caratteristiche analoghe a quelle dei valli dei circhi e crateri lunari. E difatti il *Mare Imbrium* è uno di quelli che vengono chiamati « mari craterici », appunto perché presenta in proporzioni molto maggiori le caratteristiche morfologiche dei circhi e crateri suddetti.

Ora in alcune fotografie dell'*Apollo 15*, che qui riproduciamo, è chiaramente visibile che le rocce che costituiscono uno sperone degli Appennini con asse in direzione NNW–SSE ed apice a contatto con la *Rima Hadley*, sono stratificate con inclinazione di circa 20° e immersione all'incirca verso SSE, ossia in direzione opposta a quella del bacino del *Mare Imbrium* (Tavv. IV, V; Tav. VI, fig. 1).

(3) Anzi ci sono in Scozia e Norvegia montagne risalenti alla orogenesi caledoniana la cui morfologia è meno matura di quella della parte degli Appennini di Hadley visibili nelle fotografie dell'*Apollo 15*.

(4) Questa convinzione è valida nella supposizione che anche in passato si siano avute sulla Luna le temperature attuali; non lo sarebbe più nel caso che in epoche lontane queste temperature fossero state – come ritiene possibile qualcuno – sensibilmente inferiori.

Anche in un'altra montagna circostante al punto di atterraggio del modulo lunare e appartenente al Gruppo del M. Hadley le rocce che la costituiscono si mostrano nettamente e regolarmente stratificate, in questo caso con inclinazione più pronunciata, attorno ai 45° (Tav. VI, fig. 2). In questo caso non abbiamo potuto determinare l'immersione.

Ci occuperemo innanzitutto del primo dei due problemi suaccennati, e cioè dell'origine della stratificazione delle rocce in questione.

Si tratta evidentemente di rocce in strati o banchi abbastanza regolari, non molto spessi e, per quanto si può giudicare da una delle fotografie (Tav. V), di tessitura clastica, contenendo essi chiaramente grossi banchi arrotondati. Ora se – d'accordo con la quasi totalità dei selenologi – non si vuole ammettere che sulla Luna si sia avuta sedimentazione marina o alluvionale, dato che si pensa che sulla Luna non ci sia stata un'idrosfera nemmeno in epoche passate, si è propensi a ritenere le rocce stratificate in questione di origine vulcanica: si tratta cioè probabilmente di rocce piroclastiche.

Abbiamo detto che si tratta di rocce stratificate, apparentemente clastiche. Ora rocce del genere – esclusi i sedimenti marini e alluvionali – sulla Terra potrebbero essere originate da proiezioni vulcaniche o da detrito gravitativo come quello che si forma frequentemente al piede di pareti rocciose ⁽⁵⁾.

Nel caso degli Appennini di Hadley – a parte che è piuttosto raro un deposito detritico gravitativo di così ingente spessore – sembra si possa escludere questa seconda possibilità, perché la stratificazione del detrito gravitativo è dovuta sulla Terra a sensibili variazioni climatiche stagionali, che sulla Luna, mancando l'atmosfera, non si hanno, e quindi un deposito detritico lunare dovrebbe essersi prodotto continuativamente senza stratificazione.

Né d'altra parte sembra ammissibile che rocce regolarmente stratificate come quelle visibili nelle unite fotografie dell'*Apollo 15* possano essere originate da deposizione di materiali provenienti da esplosioni connesse con impatti meteoritici.

È noto che attualmente il campo dei selenologi è diviso tra quelli che ammettono che i cerchi e crateri lunari siano almeno in parte dovuti a fenomeni vulcanici (paragonabili a quelli che sulla Terra hanno dato origine ai *Maare* e alle cosiddette caldere di subsidenza) e quelli che invece sostengono che, se non tutte, almeno la maggior parte di quelle strutture anulari siano dovute a impatti di meteoriti o altri corpi celesti.

Ora da esplosioni dovute a impatto possono certo derivare depositi di materiali clastici più o meno fini o più o meno grossolani e in maggiori o minori quantità a seconda delle proporzioni del fenomeno, ma i depositi rispondenti a una singola esplosione *non saranno mai stratificati*. Perché si possa avere una

(5) È stata affacciata da qualcuno la possibilità che si tratti di ignimbriti, ma a noi sembra che essa vada esclusa. A parte il fatto che formazioni ignimbritiche sono proprie di magmi più acidi di quelli finora riscontrati sulla Luna, le rocce in esame sono troppo fittamente e regolarmente stratificate e contengono blocchi di dimensioni troppo rilevanti per poter essere paragonate alle ignimbriti terrestri.

stratificazione come quella chiaramente visibile nelle fotografie dell'*Apollo 15* bisogna che il fenomeno che le ha dato origine abbia avuto una certa ritmicità, e quindi, nel caso in esame, bisognerebbe ammettere che in questa zona degli Appennini lunari si sia avuta tutta una successione di impatti e conseguenti proiezioni di materiale all'incirca nello stesso luogo e più o meno della stessa entità per un periodo molto lungo, cosa a nostro avviso del tutto improbabile.

Se invece si ammette che le rocce di cui stiamo parlando siano dovute a fenomeni vulcanici, la loro regolare stratificazione non ha nulla di strano, trattandosi, come dicevamo, con molta probabilità di *rocce piroclastiche*, ossia di depositi tufacei dovuti a proiezione di ceneri, lapilli, bombe vulcaniche e

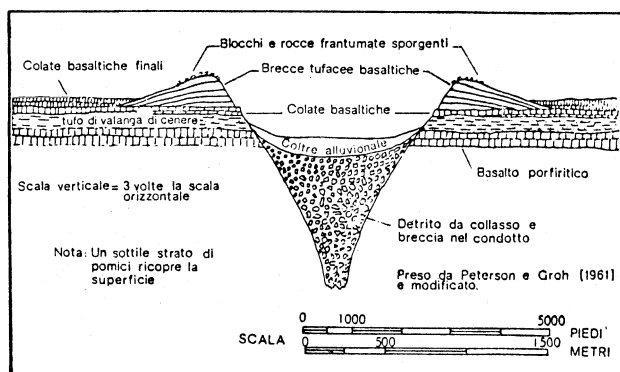


Fig. 1. - Sezione geologica del neck Hole-in-the-Ground nell'Oregon (U.S.A.).

(Da N. V. PETERSON e E. A. GROH, *Hole-in-the-Ground central Oregon - meteorite crater or volcanic explosion?* The Ore.-Bin, vol. 23, n. 10, 1961).

blocchi provenienti da successive fasi esplosive, sempre di origine vulcanica (cfr. fig. 1), e comunque con ogni probabilità, data la regolarità della stratificazione, riferibili ad uno stesso centro o gruppo di centri eruttivi prossimi a questa zona ⁽⁶⁾.

Con quest'ultima supposizione - e con l'origine del *Mare Imbrium* - è legato il secondo problema suaccennato, quello della inclinazione degli strati di queste montagne, i quali come si è già detto - nel caso delle montagne riprodotte nelle Tavv. IV, V e VI, fig. 1 - si immergono verso SSE, ossia in direzione opposta a quella del bacino del « mare » suddetto.

L'origine del *Mare Imbrium* è tuttora in discussione, ed è tutt'altro che facilmente individuabile.

(6) Sarebbe molto interessante, in una prossima spedizione, poter stabilire se questi depositi stratificati, supposti piroclastici, siano o no *gradati*. Ciò permetterebbe di stabilire incontrovertibilmente se al tempo della loro deposizione la Luna possedeva o meno un'atmosfera. È noto infatti che, per il principio di Galileo della caduta libera, nel vuoto tutti i corpi cadono con la medesima accelerazione indipendentemente dal loro peso e dalla loro forma, mentre nell'aria i corpi più grossi cadono più rapidamente dei piccoli e, conseguentemente, nel caso di materiali proiettati in aria, dalla loro deposizione derivano sedimenti *gradati*, ossia con la frazione più grossolana in basso e quella più fine in alto.

È noto che secondo E. M. Shoemaker ⁽⁷⁾ questo bacino avrebbe avuto origine da una terribile esplosione, dovuta ad impatto di un corpo celeste, e si sarebbe poi esteso fino all'attuale catena degli Appennini e alle altre succitate per successivi fenomeni di collasso. Su questa sequenza di fenomeni — esplosione (unitaria o plurima) e successivi collassi — anche noi concordiamo pienamente. Infatti tutt'attorno al *Mare Imbrium* i rilievi delle « terre » circostanti e in particolare quelli compresi tra il *Mare Vaporum* e il *Mare Serenitatis* ⁽⁸⁾ mostrano un orientamento radiale che fa ritenere che essi siano costituiti da *ieictamenta* provenienti appunto da una potente esplosione che ebbe luogo nell'area del mare in discorso.

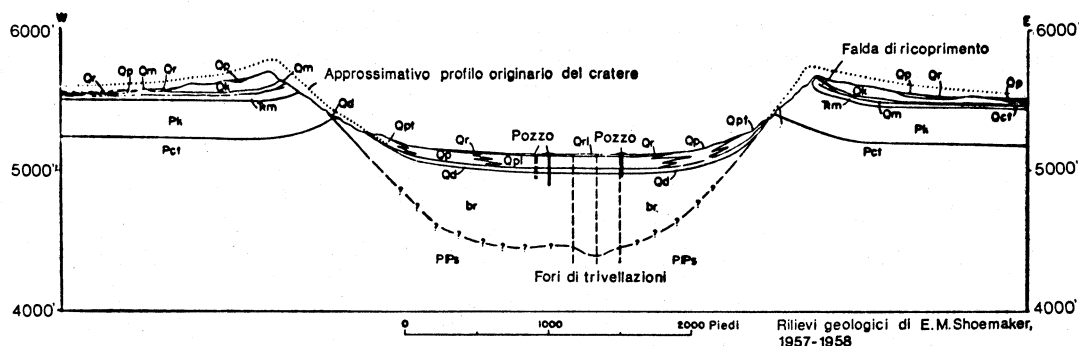


Fig. 2. - Sezione trasversale del Meteor Crater, Arizona (U.S.A.).

Qr = depositi alluvionali recenti; Qrl = terreni recenti salati; Qp = depositi alluvionali del Pleistocene; Qpl = sedimenti lacustri del Pleistocene; Qpt = detrito di falda pleistocenica; Qd = detrito misto derivato dalle formazioni Coconino, Toroweap, Kaibab e Moenkopi che contiene lechatierite e materiale meteoritico; Qet = detrito derivante dalle formazioni Coconino e Toroweap; Qk = detrito dal calcare di Kaibab; Qm = detrito dalla formazione di Moenkopi; br = breccia che contiene lechatierite e materiale meteoritico; Pm = formazione di Moenkopi (Triassico); Pk = calcare di Kaibab (Permiano); Pct = formazioni di Coconino e Toroweap (Permiano); PPs = formazione di Supai (Permiano e Pennsylvaniano).

(Da E. M. SHOEMAKER, 1963).

E d'altra parte non c'è dubbio che il ripido versante settentrionale degli Appennini e dei Carpazi risponda a un fascio di linee di frattura, le quali appunto possono rispondere in tutto o in parte a fenomeni di collasso interessanti la parte periferica del *Mare Imbrium* ⁽⁹⁾.

Quella invece che resta dubbia è la causa di tutto ciò, se cioè questi fenomeni siano dovuti come pensa Shoemaker a impatto di un enorme bolide, oppure a manifestazioni vulcaniche, in ambedue i casi con susseguenti assestamenti tettonici.

A questo problema non sembra che la constatata stratificazione delle rocce degli Appennini di Hadley possa contribuire a dare una risposta precisa. Infatti una immersione degli strati verso SSE come quella indicata dalle foto-

(7) E. M. SHOEMAKER, *The geology of the Moon*, «Scient. Amer.», 211 (1964).

(8) P. LEONARDI, *On the origin of the Lunar craters*, *Op. cit.*, pag. 13, fig. 21.

(9) Ad una di queste linee di frattura e in questo caso ad una faglia con sprofondamento della zolla settentrionale (a destra nella Tav. IV) risponde con ogni probabilità la parete sulla quale è visibile parte delle stratificazioni oggetto del presente studio (Tavv. IV-V).

grafie dell'*Apollo 15* può essere originata tanto da fenomeni di impatto, quanto da fenomeni vulcanici.

Per poter stabilire la causa bisognerebbe sapere se l'inclinazione degli strati è originaria o dovuta a fenomeni tettonici. In questo ultimo caso essa potrebbe anche eventualmente venire collegata con un'origine del *Mare Imbrium* da impatto, poiché un'analoga inclinazione presentano, come risulta dall'unito profilo di E. M. Shoemaker (fig. 2) ⁽¹⁰⁾, le rocce sollevate tutto attorno al Meteor Crater dell'Arizona (U.S.A.), dovuto appunto, secondo la quasi totalità degli Autori, ad impatto meteoritico. Ma se l'inclinazione degli strati fosse invece originaria, allora bisognerebbe ammettere - tanto più data la probabile natura piroclastica delle rocce in questione - che gli Appennini lunari (come le altre catene più sopra ricordate che circondano il *Mare Imbrium*) rispondano alla parte periferica di una enorme struttura vulcanica.



Fig. 3. - Sezione della caldera vulcanica dell'isola di Ninafo'ou nell'Oceano Pacifico.

(Da T. A. JAGGAR in G. FIELDER, *Lunar Geology*, Ediz. Dufour, 1965)

Può esser utile in questa ultima ipotesi un confronto della giacitura degli strati degli Appennini di Hadley riprodotti nelle fotografie dell'*Apollo 15* con quella delle formazioni eruttive della caldera eruttiva terrestre dell'isola di Ninafo'ou nell'Oceano Pacifico quali risultano in un profilo di T. A. Jaggar (fig. 3) ⁽¹¹⁾.

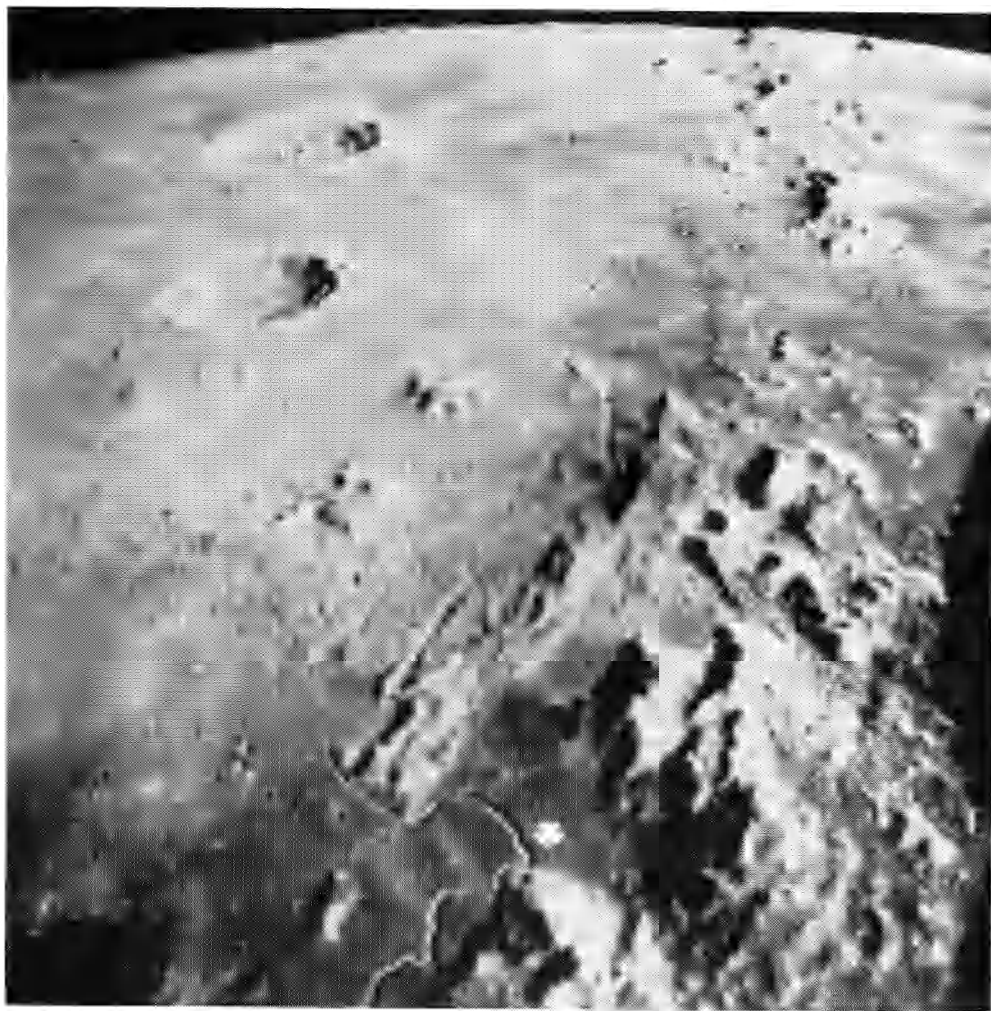
È da rilevare però che l'inclinazione degli strati visibili sul fianco della montagna riprodotta dalla Tav. VI, fig. 2 presentano una inclinazione che ci sembra un po' troppo pronunciata per non essere dovuta almeno in parte a cause tettoniche, anche nel caso che si tratti, come supponiamo, di rocce di origine eruttiva.

Comunque, crediamo che anche in questo caso per avere una risposta soddisfacente al problema dell'origine della inclinazione degli strati, cui abbiamo qui accennato in via preliminare, occorra attendere che sia possibile compiere sulla Luna sistematici rilevamenti geologici. Allo stato attuale delle nostre conoscenze riteniamo impossibile stabilire quale delle due ipotesi suaccennate risponda a verità.

Ad ogni modo, la presenza negli Appennini lunari di rocce stratificate probabilmente piroclastiche sembra costituire un altro argomento in favore dell'esistenza sul nostro satellite in epoche passate di fenomeni vulcanici analoghi a quelli terrestri e quantitativamente di notevole entità.

(10) E. M. SHOEMAKER, *Impact mechanics at Meteor Crater, Arizona*, «The Solar System», 4, The Moon, Meteorites and Comets. Edit. by B. M. Middlehurst a. G. P. Kuiper, University of Chicago Press, 1963.

(11) In G. FIELDER, *Lunar Geology*. Ediz. Dufour, 1965.



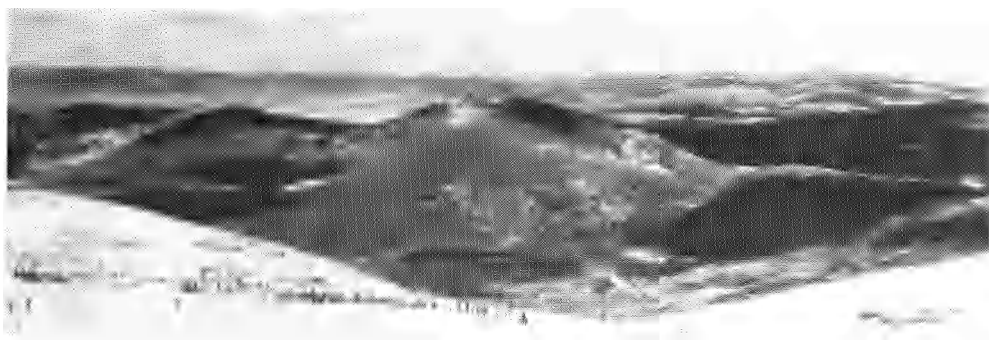
(Fotogr. N.A.S.A. gentilmente favorita dall'U.S.I.S.)

L'estremità nordorientale dei *Montes Apenninus*, la *Palus Putredinis* e la *Rima Hadley*, viste dall'*Apollo 15* orbitante attorno alla Luna. A queste montagne si riferiscono le vedute delle Tavv. II-VI. A sinistra in alto si vedono i crateri *Autolycus* (più in basso), del diametro di 40 Km e *Aristillus*, del diametro di 55 Km. A destra in alto si vedono i *Montes Caucasus*. Il punto di atterraggio del modulo lunare è indicato con una stella.



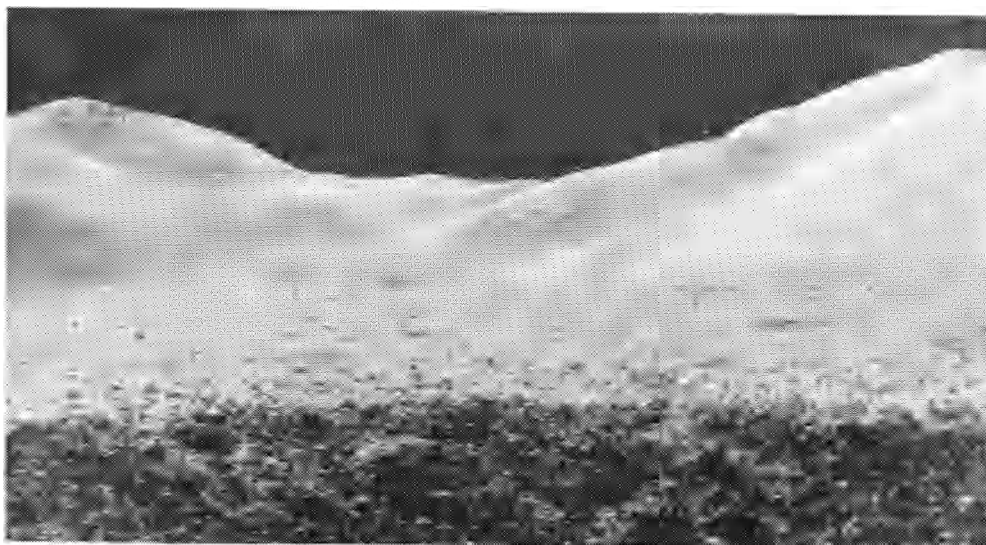
(Fotogr. N.A.S.A. gentilmente favorita dall'U.S.I.S.)

Fig. 1. – Un tratto della catena degli Appennini lunari a Est del punto di atterraggio del modulo lunare dell'*Apollo 15*. Si noti la dolcezza della morfologia, che fa assomigliare questi rilievi, evidentemente assai degradati, a quelli di catene terrestri assai antiche ed evolute (cfr. fig. 2).



(Fotogr. Jarrold & Sons, Norwich)

Fig. 2. – Si confronti la morfologia di queste montagne dei Cairngorms in Scozia, risalenti all'orogenesi caledoniana, con quella degli Appennini di Hadley.



(Fotogr. N.A.S.A. gentilmente favorita dall'U.S.I.S.)

Fig. 1. – Altra veduta della catena degli Appennini lunari ad Est del punto di atterraggio. In primo piano l'orlo di un craterino probabilmente di origine meteoritica e di formazione relativamente recente.



(Fotogr. Piero Leonardi)

Fig. 2. – Montagne circostanti al Nordfjord in Norvegia, risalenti all'orogenesi caledoniana.

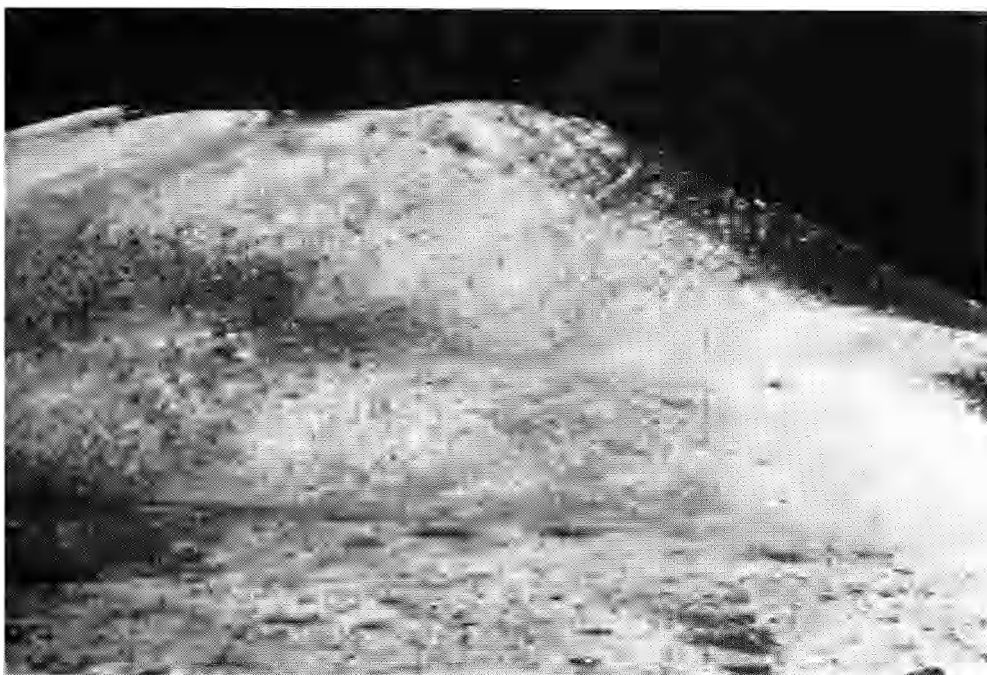


(Fotogr. N.A.S.A. gentilmente fornita dall'U.S.I.S.)

Veduta di una parte degli Appennini lunari (Silver Spur) a SE del punto di atterraggio del modulo lunare dell'*Apollo 15*. Si noti la evidente stratificazione del rilievo al centro della fotografia, di cui è data un'immagine ingrandita nella Tavola seguente. La relativa asprezza della morfologia della parete stratificata rispetto a quella dei rilievi circostanti è probabilmente dovuta alla presenza di un piano di faglia. Si noti il gruppo di craterini meteoritici sul fianco della montagna verso destra, che permette di coordinare questa veduta con quella della Tav. VI, fig. 1. In primo piano un piccolo cratere di origine meteoritica, più antico di quello della Tav. III, fig. 1.



(Fotogr. N.A.S.A. gentilmente fornita dall'U.S.I.S.)
Veduta ravvicinata delle rocce stratificate della montagna riprodotta nella Tavola precedente.



(Fotogr. N.A.S.A.)

Fig. 1. – Anche questa montagna, facente parte degli Appennini lunari e fotografata nella prima escursione degli astronauti dell'*Apollo 15* è evidentemente costituita da rocce stratificate. Essa rappresenta la prosecuzione verso NE della montagna visibile a destra nella figura. Si noti a sinistra, sul fianco della montagna, un gruppo di craterini meteoritici che permette di coordinare questa veduta con quella della fig. 1, Tav. IV.



(Fotogr. N.A.S.A.)

Fig. 2. – Anche sul fianco di quest'altra montagna appartenente agli Appennini di Hadley, fotografata dagli astronauti dell'*Apollo 15*, è ben visibile la regolare stratificazione delle rocce.