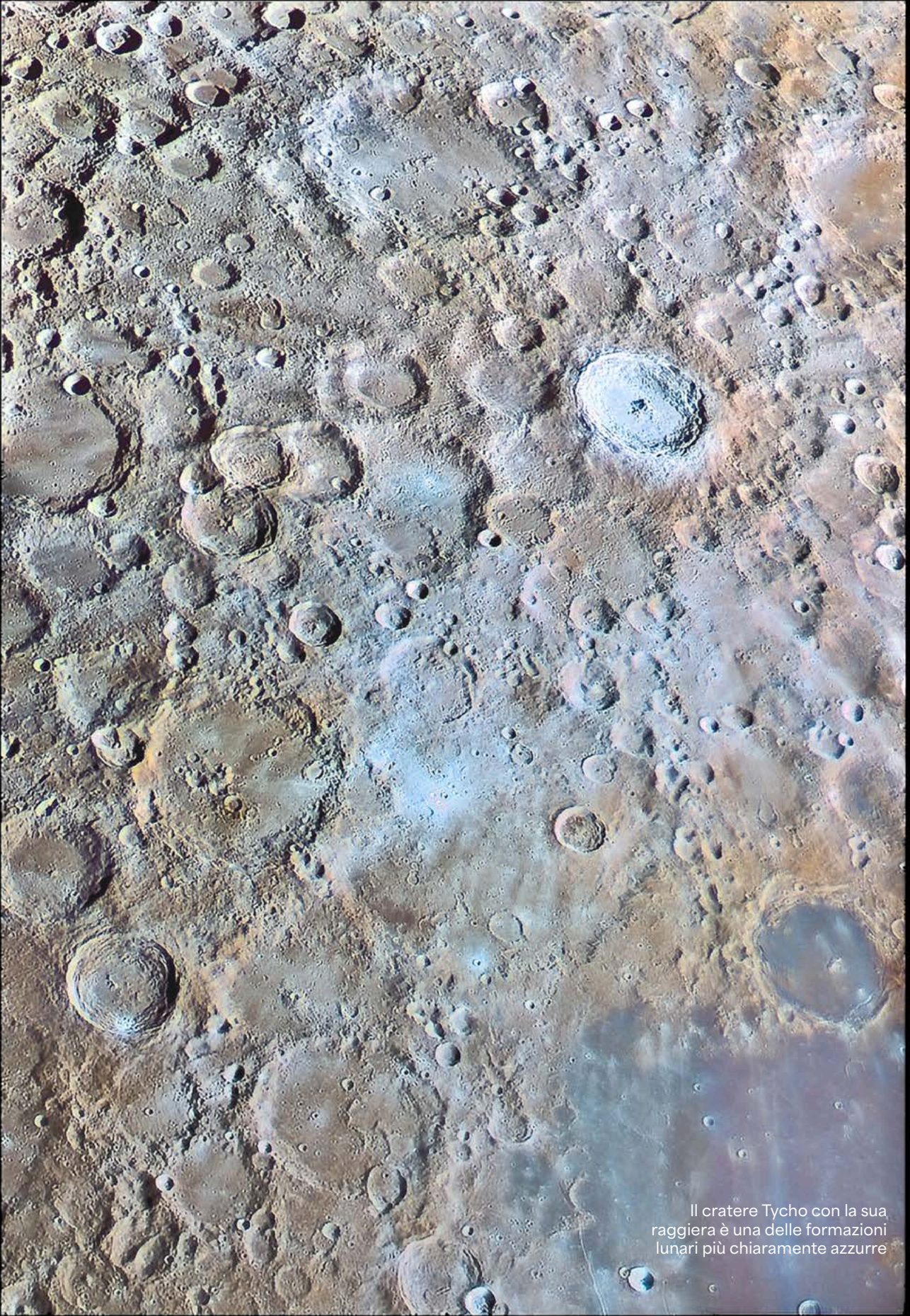


SI 28
Alto Fregata SS 2010
10 P 5 2010 61 30 P 5 2010
1 - (B) CHANNEL1 - CIVIL - RICUT - O - Zetta 2003-2010



Il cratere Tycho con la sua raggiera è una delle formazioni lunari più chiaramente azzurre

AZZURRO DI LUNA

Le sfumature di alcuni crateri non sono un'illusione ottica: rivelano frammenti della crosta primordiale. Miliardi di anni fa il nostro satellite brillava di un candore celeste?

Aldo Ferruggia

Qualcuno particolarmente sensibile ai colori giura di vedere sfumature azzurre quando punta il telescopio su Tycho o Aristarchus. Altri fotografano la Luna e, senza particolare post-processo, ottengono sfumature celesti dalle loro immagini. E proprio il celeste/azzurro di alcuni crateri e delle loro raggere è uno dei colori che più attirano l'attenzione di chi osserva un'immagine selenocromatica (Si). Intendiamoci, però, da subito: il colore azzurro, seppur reale, deriva da una esaltazione cromatica e non sarebbe quindi rilevabile in tale misura durante una passeggiata lunare. All'interno di un cratere azzurro selenocromaticamente un astronauta rilevarebbe solo una superficie bianchissima e, avvicinandosi a qualche roccia vedrebbe forse alcuni cristalli con riflessi azzurri (fig. 2). Ma come si genera tale nuance, qual è il suo significato e che implicazioni ha con l'evoluzione della crosta lunare? Dato che il fenomeno che studiamo non è isolato alla Luna ma interessa anche crateri marziani, il modello proposto per rispondere a tali domande potrebbe essere lo stesso in corpi solidi che condividono i medesimi meccanismi di formazione crostale.

Un oceano di magma

Per capire l'origine di queste nuance saremo costretti a partire da lontano e a risalire ai meccanismi che hanno portato alla formazione della crosta stessa. Si pensa che la Luna sia vecchia di $4,527 \pm 0,01$ miliardi di anni (Ga) e che sia nata da un impatto tra un corpo celeste della grandezza di Marte, chiamato Theia, e la proto-Terra. Al momento della sua nascita la proto-Luna era completamente fluida, date le temperature di più di 2000C° anche alla sua superficie: circa 4,5 Ga fa era una bella palla rossa di lava fusa ricoperta da un "oceano di magma" (LMO model, fig.3). Molto più vicina di quanto non lo sia ora, ruotava placidamente attorno a una poco meno infuocata proto-Terra. Quasi subito, dopo qualche decina di milioni di anni, iniziò a formarsi la crosta con i suoi specifici minerali. La gravità aveva fatto il suo: si era già addensato un piccolo nucleo metallico quando iniziò a cristallizzare l'olivina, seguita a ruota dal pirossene, dando luogo alla prima stratificazione di accumuli minerali del mantello. Al 70% di tale cristallizzazione i magmi si differenziarono ancora in feldspato che, più leggero, guadagnò la superficie generando la crosta anortositica (FAN), mentre pesanti

accumuli ricchi di ferro e titanio (pirosseni, olivina e ilmenite) sprofondarono nel mantello. In buona sostanza, i materiali pesanti e scuri vennero spinti in profondità mentre quelli più chiari e leggeri galleggiavano solidificandosi sopra di essi.

Intorno a 4 miliardi e 500 milioni di anni fa la solidificazione della superficie lunare era completata quasi dappertutto, per uno spessore di alcune decine di chilometri. Tornando all'attuale crosta, il suo colore grigio è il risultato della sedimentazione di frammenti accumulatisi nel corso di miliardi di anni di impatti meteoritici, quindi il risultato di una crosta fortemente rimaneggiata: nondimeno, la superficie delle terrae, o highlands, rappresenta la parte più simile alla crosta primordiale. Analizzando i crateri fortemente albedici - che riflettono cioè molta luce - si nota che sono dislocati per la maggior parte proprio sulle highlands, e che rappresentano il 12% del totale dei crateri lunari. Agli inizi del Novecento le raggere di questi crateri erano considerate depositi di sale proveniente dall'acqua evaporata e cenere vulcanica, e ancora alla fine degli anni Quaranta si pensava che fossero accumuli di polvere. Solo negli anni Sessanta Eugene Shoema- ▶

► Immagine selenocromatica (Si) centrata sul Cratere Parrot con alcuni reperti selenocromatici: 1) Jaws of Hell; 2) The Parrot's Veil; 3) Arzachel's Lipstick; "il Velo di Parrot" è una delle formazioni che indaghiamo

ker riconobbe nei raggi il materiale frammentario espulso dai crateri primari e secondari dopo l'impatto. Nel 1971 Verne Oberek sostenne che le raggere riflettono solo l'escavazione locale del materiale del substrato da parte di miriadi di piccoli crateri da impatto secondari o terziari, e di conseguenza i raggi non possono contenere quantità consistenti di materiale espulso dal cratere centrale o da grandi crateri secondari. Nel 2004, infine, Bernard Ray Hawke suggerì che la loro forte albedo provenisse dal «contrasto di composizione con il terreno circostante, dalla presenza di materiale immaturo, o da una qualche combinazione dei due». In questo caso il terreno circostante è identificato dalle pianure e dai rilievi delle highlands ricoperti da metri di breccia "matura" che ricopre tutta la Luna. La regolite lunare è "matura" se inscurita dalla prolungata esposizione all'ambiente spaziale e al mixing da micro-impatti (*space weathering*). Breccia regolitica e strutture geologiche lunari hanno composizione diversa dal materiale di maggiore albedo dei crateri giovani che, per non essere mai stato esposto è quindi definito "immaturo".

Veniamo a noi. In selenocromatica, oltre all'elevata riflettanza delle raggere, apprezziamo anche il particolare colore azzurro (riflettività intorno ai 500-530 nm), un colore presente - fatta eccezione di alcune rare formazioni piroclastiche e alcuni tratti di mare particolarmente giovane, oppure contaminato da adiacenti terrae - solo in queste formazioni lunari (*Azure Haloed Craters*). Il modello proposto si fonda su meccanismi che discendono dalle ipotesi di Hawke, vista la sovrapposizione pressoché completa tra il fenomeno dell'albedo e del colore azzurro.

Se accettiamo che l'impatto craterico riporta alla luce materiali freschi, "immaturi", del colore originario della crosta, dovremmo immaginarci una crosta primordiale dominata da un candore leggermente tendente al celeste, qua e là interrotto da variopinte degassazioni e magmi vulcanici. Per effetto della "maturazione", tale colore sarebbe poi decaduto fino a diventare quello che noi troviamo nelle highlands: un grigio che diventa ocre nelle sue varie sfumature della selenocromatica. Insomma, oggi i crateri più giovani esporrebbero rocce albediche immature che, sebbene mai esposte, sarebbero pure le più antiche della Luna (4,4-4,5 Ga). Ma perché le rocce immature della proto-crosta prima e quelle

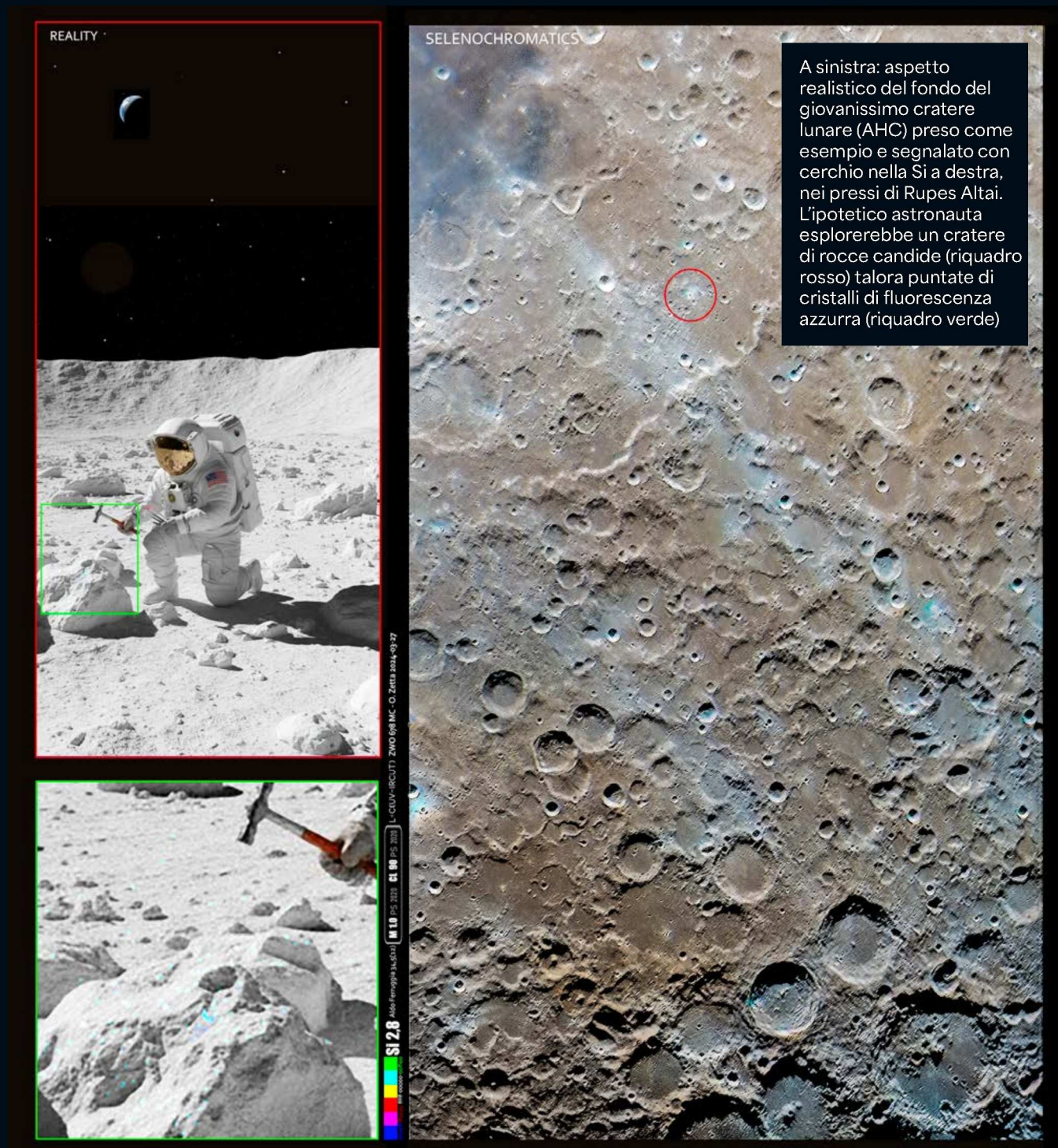


dell'attuale nei pressi dei crateri giovani hanno sfumature azzurre se la roccia anortositica non è azzurra?

Tale roccia è formata da tectosilicati chiamati "feldspati", che sono normalmente chiari, ma grigio/ocra. Di conseguenza sarebbe questo il colore prevalente della crosta originaria della Luna, anche se in breve tempo i numerosi impatti con i numerosissimi corpi vaganti nell'antico Sistema solare devono averla ricoperta di crateri di sfumatura azzurra. Ma quale meccanismo espone materiali che diventano di colore diverso da quello del substrato? Pressione e alte temperature d'impatto favorirebbero la polverizzazione della crosta e la manifestazione di un colore solamente latente nei feldspati anortositici, colore questo divenuto manifesto grazie al meccanismo che potremmo chiamare appunto "slatentizzazione dell'azzurro d'impatto".

Origine dell'azzurro

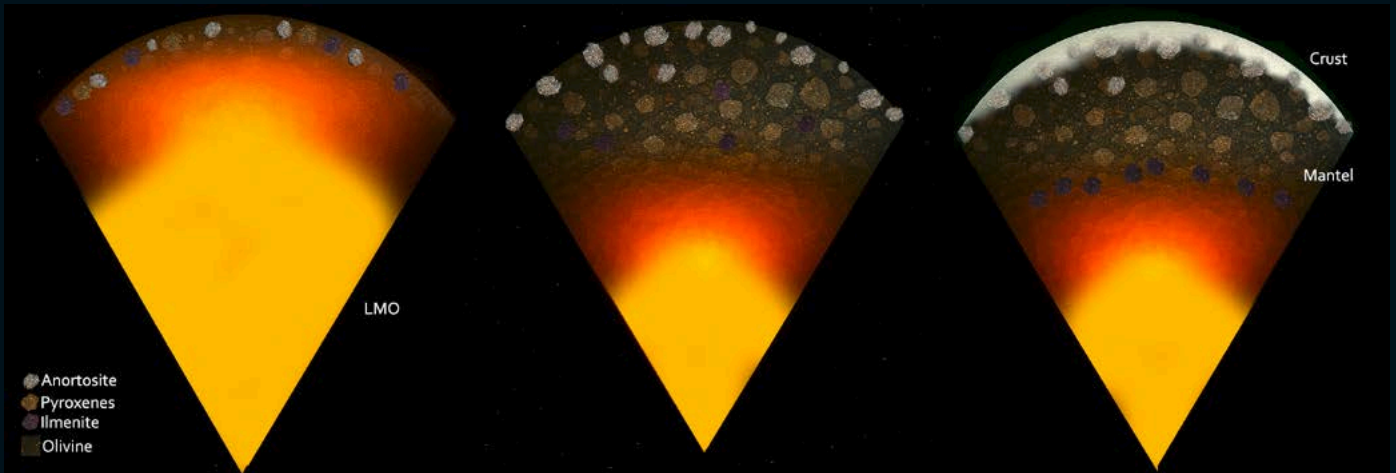
I feldspati sono un gruppo di minerali che si caratterizzano in base al contenuto di potassio, sodio e calcio. Alcuni di essi presentano, con particolari condizioni di pressione e temperatura, disposizione di cristalli che generano l'effetto di fluorescenza fredda che spicca rispetto a tutti gli altri colori lunari, anche perché associata immancabilmente alle più alte albedo lunari. Difficile stabilire quali della serie



ricoprivano in maggioranza la superficie della Luna quando l'oceano di magma cristallizzò. L'ipotesi è che nei primi chilometri di crosta più superficiale la serie ricca di sodio e calcio abbiano avuto la meglio per temperatura di cristallizzazione e densità.

Infatti è sul bordo inferiore sinistro del diagramma ternario del feldspato (fig.4) che si assiste a fenomeni di particolare riflettività nella serie del feldspato plagioclasio: a partire dalla concentrazione tra albite/anortoclasio ($\text{Na} [\text{AlSi}_3\text{O}_8]$) e anortite ($\text{Ca} [\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$) 90%-10% fino a 40%-60%, assistiamo a fluorescenze come l'adularescenza e la labradorescenza, luminosi

riflessi azzurro/celesti causati dalla diffusione della luce all'interno della struttura cristallina tra strati microscopici alternati di albite e ortoclasio. Sulla Terra tali feldspati sono utilizzati come gemme e sono conosciuti come "moonstones", cioè "pietre di Luna". Di più, l'adularescenza, tipica dell'ortoclasio e più netta nella sua sfumatura azzurra presenta importante attenuazione quando la roccia viene esposta, il che la rende via via meno brillante una volta colta dalla roccia originaria, proprio come prevede il modello con il decadimento dell'azzurro mano a mano che il cratere invecchia. Ma l'attenuazione dell'azzurro, poi, è dovuta anche ►



al fenomeno della micro-craterizzazione, che rimescolando rocce fresche e mature alla luna rende uniforme il colore della crosta lunare, facendolo coincidere al grigiastro a cui siamo soliti associare la regolite.

Gli scienziati, con in testa Hawke, sono alla ricerca di un metodo alternativo a quello che utilizza il parametro di maturità (in buona sostanza

l'albedo) per distinguere i crateri giovanissimi (copernicani) da quelli giovani (eratosteniani), perché non si conosce con precisione il tempo necessario affinché una superficie raggiunga la piena maturità ottica. In selenocromatica "il dado è tratto": la presenza di azzurro in una delle parti di un cratere è il cut-off per definirlo sicuramente copernicano.

▲ La Luna ancestrale era costituita da un profondo oceano di magma (Lunar Magma Ocean, Lmo). Quando questo si cristallizzò, i minerali più densi affondarono e i minerali meno densi vennero a galla. I minerali più leggeri erano di plagioclasio feldspato (anortosite ferrosa, Fan) e formarono la crosta originaria della Luna. I minerali densi pyrossene, olivina e ilmenite si sciolsero parzialmente in profondità, generando la fonte dei basalti che compongono i maria (www.psr.d.hawaii.edu/Oct15/age-rules.html)



◀ Diagramma ternario del feldspato con ai vertici le variabili Na, Ca e K



▲ Era questo il volto primordiale della Luna? L'immagine deriva dalla modifica di una ripresa della Nasa con oggetto la luna gioviana Io



Aldo Ferruggia

Medico, appassionato di sperimentazione amatoriale, collabora con varie riviste di divulgazione astronomica

Conseguenze sulla proto-Luna

In ogni caso, la slatentizzazione delle nuance fluorescenti della serie del feldspato plagioclasio non rende necessario che la proto-crosta fosse azzurra *ab initio* (fig. 5) per spiegare il fenomeno dell'azzurro d'impatto: l'impatto sull'anortosite sarebbe capace di rompere una grande quantità di cristalli generando raggiera il cui colore prevalente deriverà non tanto dalla media del colore dei minerali costituenti il substrato, scarsamente percepibile in quanto più chiaro ma omogeneo al substrato stesso, quanto da quei cristalli che più si allontanano albedicamente e cromaticamente da tale mixing: i cristalli capaci di fluorescenza come albite, ortoclasio, andesina e labradorite, segregati in frammenti "spezzati" di roccia detti "clasti", verranno polverizzati in tutta la raggiera con il risultato finale di strutture di albedo maggiore a sfumatura celeste.

La crosta lunare nacque probabilmente altamente albedica con sfumature d'azzurro, oppure lo divenne molto presto per effetto del bombardamento meteoritico. L'azzurro d'impatto deriverebbe dall'esposizione di anortosite immatura per comparsa di cristalli fluorescenti con preva-

lenza cromatica azzurra, i soli capaci di differenziarsi albedicamente e cromaticamente dal contesto (fig. 1). Come mai allora oggi osserviamo una Luna senza la prevalenza dell'azzurro come era agli albori della sua storia? Presto comparvero i maria, poco dopo la solidificazione della crosta, grazie all'assottigliamento e alla fratturazione locale di quest'ultima dovuti a grandi impatti. Gli scuri basalti marini iniziarono a "macchiare" il candore della proto-Luna: la superficie anortositica idonea a generare aloni e raggiera azzurri iniziò così a diminuire e gli impatti su aree scure, ormai più probabili, producevano sempre maggiori quantità di detriti che inscurivano la crosta nel suo complesso.

Il processo fu graduale e inesorabile, fino a che, alla fine del periodo Imbriano, la faccia visibile acquisì grossomodo l'aspetto che conosciamo. Da allora in poi uno strato sempre maggiore di breccia mista (e quindi dal colore neutro e scuro) ricoprì la Luna, e la riduzione complessiva di grossi meteoriti circolanti nel Sistema solare finì per rendere statisticamente perdenti gli impatti in grado di generare le nostre nuance. 🌕