

ANGEWANDTE CHEMIE

HERAUSGEGEBEN VON DER GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER

68. Jahrgang · Nr. 17/18 · Seite 533–600 · 15. September 1956

FORTSETZUNG DER ZEITSCHRIFT »DIE CHEMIE«

Zum Ursprung der Oberflächenstruktur des Mondes

Von Prof. Dr. HAROLD C. UREY

Department of Chemistry und Enrico Fermi Institute for Nuclear Studies, University of Chicago, Chicago (Illinois)

Die Oberfläche des Mondes vermittelt einen Eindruck von den Geschehnissen, die sich während eines relativ kurzen Zeitraumes nach seiner Bildung, die etwa mit der Entstehung der Erde zusammenfällt, ereignet haben. Es wird gezeigt, welche Einflüsse — chemische Zusammensetzung, Satellit-Einfälle, Staubbildung usw. — entscheidend waren. Einige Beobachtungen lassen sich bisher noch nicht schlüssig deuten.

Nachdem 1949 das Buch „*The Face of the Moon*“¹⁾ von R. B. Baldwin erschienen ist, braucht man die alte Frage, ob die großen Mondkrater durch Zusammenstöße oder platonische Vorgänge verursacht sind, eigentlich nicht wieder aufzugreifen. Die meisten Beweise für den Zusammenstoß brachte 1893 G. K. Gilbert²⁾ vor. Späteren Forscher beachteten sie aber nicht, oder sie legten sie mit zu oberflächlichen Begründungen beiseite. Die platonische Theorie der Kraterentstehung wurde entwickelt, ehe man wußte, daß Meteorite auf die Erde stürzen, und namhafte Astronomen diskutierten nahezu ein Jahrhundert, um sich darüber zu einigen, daß die Mondoberfläche im wesentlichen durch Zusammenstöße geformt wurde.

Gilbert zeigte, daß die meisten Mondstrukturen denen der Erde unähnlich sind, und daß die Kraterüberschneidungen so aussehen, wie man es bei Zusammenstößen erwarten muß. Baldwin stellte das gesamte Beweismaterial sehr eindrucksvoll und schlüssig zusammen. Hier soll übernommen werden, daß die meisten Charakteristika des Mondes auf den Zusammenstoß mit Körpern zurückzuführen sind, obwohl einige kleine Formationen durch platonische Prozesse vulkanischer Natur bedingt sind; daher muß vor allem geklärt werden, in welchen Gebieten der Mondoberfläche Lava vorhanden ist.

Schlüssel zum Ursprung der Oberflächengestalt des Mondes und darüber hinaus zum Ursprung des Mondes als Ganzes, sind einmal seine unregelmäßige Form und dann sein großer Zusammenstoß im Mare Imbrium. Der Beweis kann auf verschiedene Weise erbracht werden, hier soll aber mit diesen beiden Hauptpunkten begonnen werden.

Bildung des Mondes bei tiefen Temperaturen

Das Problem der Mond-Gestalt wurde schon auf verschiedenen Wegen untersucht³⁾. Direkte Beobachtungen sind schwierig, aber ein genauer Beweis für die unregelmäßige Form des Mondes ist aus seinen Schwerkraftbewegungen zu erhalten.

Das Verhältnis $(\frac{C-A}{C})$ kann aus der Annahme errechnet werden, daß der Mond eine Gleichgewichtsform in seinem eigenen Schwerefeld, in dem der Erde, auf Grund seiner

Bahnbewegung und seiner Eigenrotation und auf Grund des Verhältnisses $5 \frac{M \cdot a^3}{m \cdot c^3}$ besitzt. Dabei sind A und C die Trägheitsmomente über die polare Achse bzw. über eine auf die Erde gerichtete Achse; M und m sind die Massen von Erde und Mond, a der Radius des Mondes, c dessen Abstand von der Erde. Der berechnete Wert von $(\frac{C-A}{A})$ beträgt $3,75 \cdot 10^{-5}$ und entspricht einer Differenz im Radius längs der Achse und gegen die Erde von 65 m. Andererseits läßt sich der Ausdruck $(\frac{C-A}{B}) (\frac{C-A}{C})$ aus den himmelsmechanischen Bewegungen des Mondes zu $6,3 \cdot 10^{-4}$ berechnen, das entspricht einer Differenz im Radius von 1,1 km. Das hängt von gut bekannten Faktoren — dem Winkel zwischen Äquator und Ekliptik, dem Winkel zwischen der Mondbahnebene und der Ekliptik und dem Betrag der Präzessionsgröße des Knotens ab. Der Wert $(\frac{C-B}{C})$ kann aus der longitudinalen Libration gesichert werden. Alle diese Abschätzungen führen zu dem Ergebnis, daß der Mond keine Gleichgewichtsform besitzt. Nach den theoretischen Überlegungen von Sir George Darwin kann man die Druckdifferenz in Richtung der A- und C-Achse im Zentrum mit 20 atm annehmen. Etwas größere Werte erhält man durch andere Abschätzungen. Daraus folgt, daß die Festigkeit der Mondsubstanz im Zentrum etwas geringer als die eines Ziegelsteins ist. Das Mondzentrum kann zur Zeit nicht flüssig sein.

Wichtig ist außerdem, daß ein so großes Objekt wie der Mond nur sehr langsam abkühlen kann, wofür selbst eine so lange Zeit wie die Lebensdauer des Mondes, die man auf $4,5 \cdot 10^9$ Jahre schätzt, gering ist. Dieses Alter scheint für Meteorite durch drei radioaktive Methoden jetzt gut begründet zu sein. Die Abkühlung einer Kugel läßt sich leicht aus der Wärmeleitfähigkeit errechnen, die auch für Gestein bekannt ist. Eine eigene Berechnung dieser Art zeigt, daß das Mondzentrum in $4,5 \cdot 10^9$ Jahren nur wenig von seiner Wärme verlieren kann⁴⁾. In der Originalberechnung wurde ein Alter von $3 \cdot 10^9$ Jahren zugrunde gelegt, und für die Menge an radioaktiven Elementen wurden Werte angenommen, die seither beträchtlich revidiert werden mußten. Wäre der Mond jemals geschmolzen gewesen, müßte die Temperatur des

¹⁾ R. B. Baldwin, *The Face of the Moon*, Chicago, University of Chicago Press, 1949.

²⁾ G. K. Gilbert, Bull. Phil. Soc. Washington 12, 241 [1893].

³⁾ H. C. Urey, *The Planets*, New Haven, Yale University Press, 1952, S. 20 ff.

⁴⁾ H. C. Urey, Geochim. Cosmochim. Acta 1, 207 [1951]. Die Ableitung der Formeln ist von den Aufzeichnungen falsch kopiert, aber die Endformeln sind korrekt, ebenso die abschätzenden Berechnungen.

Zentrums jetzt nahe am Schmelzpunkt sein, und dieses Zentrum hätte dann nicht die Kraft, die erforderlich ist, um eine unregelmäßige Form aufrecht zu erhalten.

Durch die Anwesenheit der radioaktiven Elemente Kalium, Uran und Thorium müßte die Temperatur auf dem Mond überall ansteigen. Wie hoch die Temperaturen durch diese Wärmequelle angestiegen sind, hängt von der Menge und der Verteilung dieser Elemente im Mond ab. Beide Daten lassen sich beim Mond nicht genau bestimmen; es ist sogar noch sehr schwierig, sie für die Erde abzuschätzen. Wenn jedoch der Grad des Wärmeverlustes des Erdinnern ausschließlich von der durch radioaktive Substanzen erzeugten Wärme abhängt, kann man die Menge dieser Elemente als Ganzes abschätzen. Außerdem kann man auch aus analytischen Daten des Gesteins und aus unserer Kenntnis über die Dicke der Erdkruste, die man von seismographischen Daten herleitet, schließen, daß ungefähr ein Drittel bis die Hälfte dieses radioaktiven Materials jetzt in der Erdkruste und der Rest wahrscheinlich über den ganzen Erdmantel verstreut liegt. Nimmt man für den Mond ähnliche Mengen radioaktiven Materials mit gleicher Verteilung an, würde daraus folgen, daß das Innere des Mondes bis zu etwa 80% seines Durchmessers geschmolzen ist, oder die Temperatur doch in der Nähe des Schmelzpunktes liegt. Ein solcher Schluß ist unvereinbar mit der unregelmäßigen Form des Mondes. Der Mond muß sich also bei tiefen Temperaturen gebildet haben und kann nie durch radioaktive Quellen bis an seinen Schmelzpunkt erwärmt worden sein. Außerdem ist der Mond nicht so plastisch wie die Erde und der Partialschmelzprozeß, bei dem sich die Erdkruste gebildet hat, kann beim Mond nicht abgelaufen sein; die radioaktiven Elemente können sich also durch diesen Schmelzprozeß auch nicht an der Oberfläche des Mondes konzentriert haben. *Gilbert* sagte bereits 1893: „Während seines ganzen Entstehungsprozesses war der Mond kalt“. Damals war die Radioaktivität allerdings noch unbekannt und die radioaktive Erwärmung machte es später zeitweise schwierig, *Gilberts* Schluß wieder anzunehmen. Das Problem zeigte sich aber für einige Vorgänge als sehr lehrreich⁵⁾.

Die imbrische Kollision

Der große Zusammenstoß im Mare Imbrium wurde 1893 von *Gilbert* entdeckt. Das zusammengesetzte Bild 1 (Falttafel) zeigt das Gebiet des Zusammenstoßes. Auf einer Photographie des Vollmondes würden sich nur wenige Einzelheiten erkennen lassen; man fügt daher die beiden Hälften zusammen. Bild 2 zeigt das imbrische Gebiet, wie es vor einem Beobachter liegen würde, der sich über dem Mare Imbrium befände und gegen Sinus Iridium blickte. Dieses Bild entstand dadurch, daß man Photographien des Mondes auf eine Kugel projizierte, und dann die Kugel aus einem geeigneten Winkel photographierte. Man sieht so, da die Verkürzung ausgeschieden ist, daß der Krater Plato im Umriß rund und nicht elliptisch ist, wie man gewöhnlich beobachtet. In Bild 2 ist eine Figur überlagert, die die relative Lage des

Sinus Iridium, ein kreisförmiges Gebiet davor und das vollständige Mare Imbrium angibt. Von diesem kreisförmigen Gebiet gehen viele Linien und Grate strahlenförmig aus, besonders in der Nähe des Zentrums der Mondscheibe. *Gilbert* beobachtete alle diese charakteristischen Merkmale

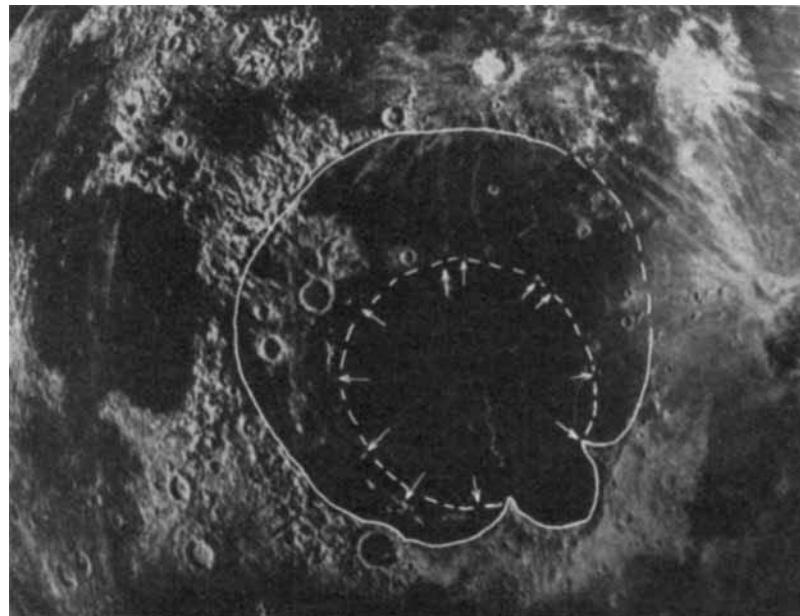


Bild 2

In dieser Photographie sind drei durch Projektion auf eine Halbkugel entstandene Bilder zusammengesetzt. Sie soll die Strukturen zeigen, die durch die imbrische Kollision erzeugt wurden, und soll keine Mondkarte sein. Süden liegt oben. Man sieht das Mare Imbrium – es ist durch die ausgezogene Kurve begrenzt – als ob sich der Standpunkt des Beschauers direkt über dem Mare befände. Copernicus ist der große leuchtende Krater südlich des Mare Imbrium. Sinus Iridium ist die halbkreisförmige Bucht unten rechts (innerhalb der ausgezogenen Kurve), links davon liegt die dunkle runde Fläche des Plato. Innerhalb des gestrichelten Kreises, der das Kollisionsgebiet angibt, befinden sich keine Krater und Berge mehr. Die Pfeile zeigen Bergmassive an, die gerade außerhalb des Kreises liegen; drei Pfeile deuten auf Massive, die auf diesem Bilde nicht sichtbar, auf guten Originalen aber leicht zu finden sind

außer dem, was wir als offensichtlichen Zusammenhang zwischen Sinus Iridium und der übrigen Struktur ansehen.

Sicher ist, daß diese Struktur durch ein Ereignis entstand – nämlich durch den Zusammenstoß eines großen Objektes mit dem Mond. Das Muster der Linien und Grate und das des dunklen Kreises vor dem Sinus Iridium ist unsymmetrisch. Daraus kann man schließen, daß der Körper unter einem großen Winkel gegen die Vertikale von Nordosten her kam, ein tiefes Loch im Mond ausbohrte und Teile seiner eigenen Substanz und der des Mondes weitflächig über die Mondoberfläche verspritzte.

Das Muster ist sehr verwickelt, und man kann daraus viel ablesen. Zuerst soll die Ausdehnung der Erhöhungen und Vertiefungen betrachtet werden. Einige erstrecken sich durch das Juragebirge zum Nordosten von Sinus Iridium. Das Hauptmuster breitete sich in der Art einer halbrunden Schraube von der Nähe des Plato bis zu der östlichen Ecke der Karpaten aus. Die Gebirgsmassive beim Theophilus und ein Graben durch die Capella könnten auch noch diesem System angehören. Andere Täler ziehen sich durch die Hügel des Ptolemäus und Alfonsus bis ungefähr zu Arzachel. In Oceanus Procellarum gibt es eine Menge kleiner Grate mit allgemeiner Orientierung gegen das Kollisionsgebiet. Oftmals ist man sich über die Beziehung einzelner Grate zum System nicht sicher, aber die Gesamtstruktur ist völlig überzeugend.

Die Geschwindigkeit eines Objektes auf einer oberflächennahen Bahn um den Mond ist 1,7 km/s, und da diese

⁵⁾ Näheres vgl. H. C. Urey: „The Cosmic Abundances of Potassium, Uranium and Thorium and the Heat Balances of the Earth, the Moon and Mars“, Proc. nat. Acad. Sci. USA 41, 127–144 [1955].

Objekte vor dem Zusammenstoß 1000 oder 1500 km fielen, müßten sie ungefähr diese Geschwindigkeit gehabt haben. Wir können keinen Grund finden, um bedeutend höhere Geschwindigkeiten anzunehmen. Die Verteilung der Gräben und Grate zeigt vielmehr, daß der kollidierende Himmelskörper mit mäßiger Geschwindigkeit auftraf. Wenn die Geschwindigkeit z. B. 30 km/sec betragen hätte, so hätte sich das Objekt wie ein Sprengkörper benehmen müssen und einen symmetrischen Krater erzeugt. Bei einer niederen Aufschlagsgeschwindigkeit jedoch, sagen wir 2,4 km/s — der Entweichgeschwindigkeit des Mondes — läßt sich das Muster verstehen. Diese Geschwindigkeit ist geringer als die Schallgeschwindigkeit im Mondmaterial und beim Zusammenprall dürften einige der vorderen und hinteren Mondteile fast horizontal weggeflogen sein — mit einer Geschwindigkeit von vielleicht 1,7 km/s. Auf andere Gründe, die auf die niedrige Zusammenstoßgeschwindigkeit von 2,4 km/s schließen lassen, werden wir später noch eingehen. Die Benutzung dieses Wertes schließt ein, daß das Objekt ein Satellit des Erd-Mond-Systems war.

Wie groß war das Objekt? Als der Himmelskörper auf den Mond stürzte, schuf er entweder Sinus Iridium, oder er traf auf eine zuvor an dieser Stelle gebirgige Gegend und zerstörte die eine Hälfte ihrer Struktur völlig, so daß der Rest genau das runde Gebiet im Mare Imbrium umschreibt. Nach meiner Ansicht ist sehr wahrscheinlich, daß er Sinus Iridium schuf, und daß die Entfernung zwischen den beiden Vorgebirgen, dem Laplace und Heraclid, von ungefähr 230 km (sie ist wohl etwas größer), den Durchmesser des Planetoids*) darstellt, den Gilbert aus weniger unmittelbaren Gründen auf 160 km schätzt. Es gibt noch andere Möglichkeiten der Schätzung, aber diese beiden sollen genügen.

Wir nehmen einen Durchmesser von 200 km als den wahrscheinlichsten an. Bei einer Dichte von 3,5 würde die Masse des Körpers $1,47 \cdot 10^{22}$ g betragen haben. Legt man die Geschwindigkeit von 2,38 km/s zugrunde, erhält man für die kinetische Energie beim Zusammenstoß $4,15 \cdot 10^{32}$ erg, die $4,6 \cdot 10^{11}$ Atombomben entspricht (für 1 Atombombe wird die Umwandlungsenergie von 1 g Masse in Energie angenommen). Diese Zahl würde genügen, um jeweils 1100 m^2 der Erdoberfläche mit einer solchen Bombe zu belegen.

Ein Zusammenstoß dieses Ausmaßes steht weit außerhalb jeder Erfahrung auf der Erde und es ist dadurch natürlich schwer, von unseren kleinen terrestralen Experimenten auf ein solches Ereignis zu extrapolieren. Wir können selbstverständlich den Zusammenstoß als eine beobachtete Tatsache hinnehmen und aus dem Ergebnis schließen, welche Folgen ein Zusammenstoß solchen Ausmaßes hat. Offenbar stürzte das Objekt auf die feste Oberfläche, fing sich im Gebiet des Zusammenstoßes und schuf eine große Ausbauchung in der Mondoberfläche rund um diese Gegend — aber mehr in der Bewegungsrichtung des Objektes — hauptsächlich gegen das Zentrum der sichtbaren Mondscheibe. Dieses Gebiet wurde stark aufgewühlt, vielleicht sogar zu feinem Sand zerrieben. Nach dem Zusammenstoß setzten sich Teile des losen Materials nieder und ergaben das Schelfgebiet zwischen dem inneren und äußeren Ring des Bildes 2.

Teile der Mondoberfläche wurden emporgesleudert, fielen als grobe Gesteinsbrocken nieder und bildeten die Straight-Range, Piton, Pico, Spitzbergen usw. und innerhalb des Mare Imbrium die Alpen, Apenninen, Karpathen und das Kaukasusgebirge; das Material der Alpen und der

*) „Planetoid“ wird hier für einen Satelliten des Erd-Mond-Systems benutzt.

Karpathen sieht besonders danach aus. Andererseits können die Karpathen und der Apennin Teile des Planetoiden enthalten. Große Massen des Planetoiden bildeten die Haemus-Berge und erzeugten die Gräben. Aber um solche langen Gräben einzuschneiden, bedarf es eines Materials großer Dichte; es muß sich dabei um eine Nickel-Eisen-Legierung handeln. Sehr wahrscheinlich stammt sie von einem Teil des Planetoiden, da die Entfernung der Gräben vom Ursprungsort groß ist. Solche Nickel-Eisen-Objekte erinnern uns an Eisenmeteorite. Vermutlich entstand dieser Himmelskörper auf die gleiche Weise wie diejenigen, aus denen die Meteorite stammen.

Andere runde Mare sind Crisium, Nectaris, Humorum und Serenitatis. Das Alfaiberge bildet im Süden und Osten des Mare Nectaris eine Böschung und man kann in dieser Böschung ungefähr 100 km von der Ecke des Meeres bis $\frac{3}{4}$ seines Umfangs Spuren von einem Sturz sehen. Bei den Alpen-, den Apenninen- und den Karpathen-Böschungen scheinen die Verhältnisse bezogen auf das Mare Imbrium ähnlich zu liegen. Auch von Baldwin wurde es so interpretiert.

Die Rheita- und Borda-Täler und andere Gräben sehen aus, als ob sie durch fliegende Wurfgeschosse eingeschnitten seien. Etwas Sichereres läßt sich aber darüber noch nicht sagen. Baldwin glaubt, daß es rund um andere Mare strahlensförmig angeordnete Berge gibt, aber sie sind sehr wenig augenfällig.

Wir sollten uns immer vor Augen halten, daß der Mond noch eine andere Hemisphäre besitzt, die wir nicht sehen. Könnten wir es, wären vielleicht manche Dinge klarer. Immerhin scheint die Annahme berechtigt, daß der große Planetoid vom Mare Imbrium nicht der einzige war, der auf den Mond stürzte, und ich glaube, daß jedes der runden Mare die Narbe vom Einsturz eines großen Objektes ist. Diese Objekte mögen mehr aus der Vertikalen eingefallen sein und dürften keinen so weitflächigen, unsymmetrischen Fächer von Bergen und Gräben ergeben haben. Auch das Schelf-Gebiet vom Mare Nectaris bis hinaus zum Altaigebirge ist nicht merklich mit dem glatten grauen Material der Mare bedeckt.

Zeitpunkt des Zusammenstoßes

Einige der gewöhnlichen großen Krater, von denen wir angenommen haben, daß sie durch Zusammenstöße entstanden, gehen der imbrischen Kollision voraus, andere wurden später gebildet. So hat der Ptolemäus Berge, die durch Wurfgeschosse der imbrischen Kollision genarbt sind. Julius Cäsar hat auf der einen Seite seines Kraters ein Gebirgsmassiv, das ein Teil der Trümmer ist. Andererseits sind Aristillus und Autolycus, die mitten im Mare Imbrium liegen, spätere Krater. In manchen Fällen sind wir unsicher. So kann man darüber diskutieren, ob Plato und Archimedes älter oder jünger sind als das Mare Imbrium. Ähnlich liegen die Verhältnisse bei anderen runden Maren. Sicher entstand Theophilus wie andere Krater in der Nachbarschaft nach dem Mare Nectaris. Diese Zusammenstöße sind offenbar alle Teile einer einzigen Serie von Ereignissen: Einige Krater wurden gebildet, dann ein Mare, dann weitere Krater, ein weiteres Mare usw., und diese Krater und Mare bedeckten die ganze Oberfläche des Mondes so dicht, daß sein Oberflächengestein ganz aufgebrochen wurde. Wenn der Mond während dieses Geschehens in der Nähe der Erde war, müßte die Erde intensiver bombardiert worden sein als der Mond, da die Objekte mit größerer Energie auf die Erde stürzen. Darüber hinaus hätte die Erde mit ihrem größeren Gravitationsfeld einen größeren effektiven Kollisionsradius als der Mond, und es

hätten daher in der Zeiteinheit mehr Objekte auf die Erde fallen müssen. Solch ein Bombardement hätte auf der Erde sämtliche sedimentären Gebilde zerstört. Die ältesten sedimentären Gebirge, die zuverlässig datiert werden können, sind ungefähr drei Milliarden Jahre alt. Demnach müßte das Bombardement vor $4\frac{1}{2}$ bis 3 Milliarden Jahren vor sich gegangen sein. Das liegt so lange zurück, daß man gerne wissen möchte, ob das, was wir auf dem Mond sehen, nicht ein Bericht über die letzten Phasen der Bildung von Erde und Mond ist.

Zusammensetzung der Mare

Im allgemeinen wird angenommen, daß die Mare aus erstarrter Lava, die aus dem Mondinneren ausgeflossen ist, bestehen. Es gibt aber Argumente, die zeigen, daß das unmöglich ist. Die Temperatur der Lava der Erde steigt nicht über 1200°C . So hoch schätzt man den Schmelzpunkt von flüssigem Basalt, der mit Silicaten der Erde umgeben ist. Höhere Temperaturen kann die Flüssigkeit nicht erreichen, da sonst die umgebenden Wände kontinuierlich schmelzen müßten. Beim Ausfließen auf eine kalte Oberfläche beginnt die Lava zu erstarren. Auf einer mäßig ebenen Fläche ist der vorrückende Wall ziemlich hoch — auf dem Mond würde er sogar höher werden als auf der Erde wegen der geringeren Schwerkraft —, diese Begrenzungswälle müßten daher sichtbar sein; man hat aber keine beobachtet. Diese Tatsache wurde oft hervorgehoben, unlängst besonders von R. S. Dietz⁶). Wir haben oben gesehen, daß der Mond sich bei tiefen Temperaturen gebildet haben muß. Die hohen Bergketten hätten also einsinken müssen, wenn der Mond jetzt oder früher einmal so plastisch wie die Erde gewesen wäre, darauf deutet aber nichts hin. Man muß also daraus schließen, daß die Lava nicht aus dem Mondinneren stammen kann.

Man hat überlegt, ob der Schmelzprozeß vielleicht durch die Kollisionsenergie der auf den Mond stürzenden Körper entstanden sein könnte. Das ist ein Gesichtspunkt, den wir anerkennen. Die Kollisionsenergie von Körpern, die eine Geschwindigkeit von $2,4 \text{ km/s}$ besitzen, erreicht 2800 Joule/g ; um Silicate bis zum Schmelzpunkt zu erhitzen und zu schmelzen, genügen ungefähr 2000 Joule/g . Natürlich wird Kollisionsenergie auch in Schallennergie verwandelt; ein Schmelzvorgang scheint aber doch möglich zu sein. (Würde sich ein Körper mit Überschallgeschwindigkeit bewegen, sagen wir mit 30 km/s , so würde die Energie — falls sie in Wärme umgewandelt wird — ausreichen, den Körper völlig zu verflüchtigen. Man müßte erwarten, daß er sich dann wie ein Sprengkörper benähme, und daß sein Material völlig aus dem Krater herausgeblasen würde).

Von T. Gold stammt die Überlegung, daß die Mare aus dicken Staubschichten bestehen, die sich in verschiedener Weise über den Mond bewegt haben, und zwar immer von großen Landgebieten zu den Maren hin. Er glaubt, daß das fortwährende Erwärmern und Abkühlen der Oberfläche und das ultraviolette Licht der Sonne diesen Staub gebildet habe, und daß er sich noch jetzt über die Oberfläche bewege. Gold führt weiter aus, daß viele kleine

⁶) R. S. Dietz, J. Geology 54, 359 [1946].

Mondkrater und die Senken zwischen den Bergen mit diesem grauen Material angefüllt sind, daß also weder die Lava aus dem Mondinneren noch die von den Zusammenstoßen herrührende eine ausreichende Erklärung für diese gräuliche Zeichnung sein können. Der Vorschlag ist einleuchtend. Allerdings würden wir einen etwas anderen Ursprung für den Staub vorschlagen.

Der imbrische Planetoid würde — gleichmäßig über die Mondfläche ausgebreitet — eine 110 m dicke Schicht ergeben, und falls er nur zu 1% seines Gewichtes aus Wasser bestanden hätte, genügte das, um den Mond mit einer $3,9 \text{ m}$ hohen Wasser-Schicht zu bedecken. Die anderen größeren Planetoiden könnten ähnliche Mengen geliefert haben. Sie hätten überdies, wenn sie mäßige Mengen an flüchtigem Material enthalten hätten, explodieren müssen, selbst wenn sie mit einer Geschwindigkeit gefallen wären, die ähnlich gering wie die Entweichgeschwindigkeit ist. Hierin ist ein plausibler Mechanismus für die Staub-Verteilung auf dem Mond zu sehen. Vielleicht stieg nach jedem großen Zusammenstoß eine große Wolke aus Staub und Wasserdampf über der Mondoberfläche auf. Der Staub setzte sich fest, das Wasser fiel als Regen, spülte dabei den Staub von den Bergspitzen, sank schließlich in die Spalten, hydratisierte die Silicate und verschwand damit.

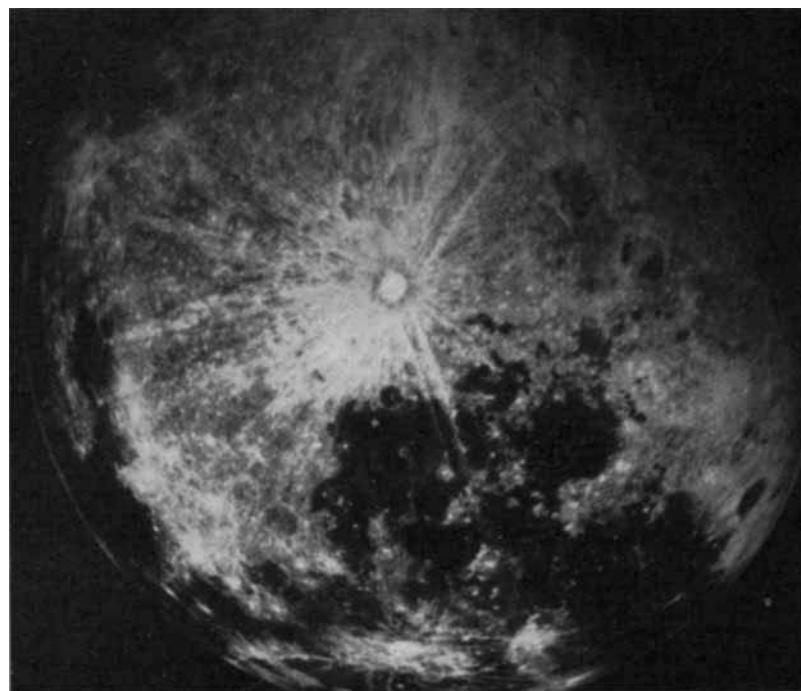


Bild 3

Das Bild wurde wie Bild 2 hergestellt. Hier wird das Gebiet des Kraters Tycho direkt von oben gezeigt. Die beiden Strahlen am östlichen Rand gehen nicht durch das Zentrum des Kraters

Wie können wir nun die Frage entscheiden, ob es sich um flüssige Lava oder Staub handelt? Lava ist eine dichte, schwerflüssige Masse, die auf ihrem Wege über die Kraterwände quellen und die Formen der verborgenen Krater verzerrn würde. Dafür läßt sich aber beim Ozean Procellarum und beim Mare Nubrium kein Anhalt finden. Der nahezu verborgene Krater bei Flamsteed ist, wenn man die Verkürzung beachtet, in seinem Umriß rund. Wir sehen auch keinen Hinweis auf andere verzerrte Krater in diesem Gebiet. Aber Lava fließt nach unten, Staub dagegen kann aus der Atmosphäre überall hinfallen. Es scheint, als ob man einen glatten Staubhügel über dem östlichen Teil des Kraters Prinz und über einem Teil der Krater Hippalus und Weiß sehen könnte. Andere Fälle sind allerdings weniger klar.

Wie läßt sich aber nun die unregelmäßige Form und die schwarze Farbe des Mare Tranquillitatis begründen? Man müßte erwarten, daß der Staub den Mond mit einer einheitlichen Farbe bedeckt, oder zumindest, daß verschiedene Farben allmählich ineinander übergehen; die Grenzen dieses dunklen Gebietes dagegen sind scharf und unregelmäßig. Das Mare Tranquillitatis sieht tatsächlich aus, als ob es mit Lava bedeckt wäre. Einige Krater scheinen verzerrt, z. B. Ross, außerdem findet man im westlichen Teil des Mondes Kraterfragmente.

Vielleicht sind beides, Lava und Staub, eine Folge der Energie des Zusammenstoßes. Wir wollen versuchen, uns den Verlauf der Ereignisse vorzustellen: Ein großer Planetoid fiel nahezu vertikal in das Mare Serenitatis. Er enthielt wenig flüchtige Stoffe und seine Bestandteile wurden nicht weit über den Mond verstreut. Er schmolz und eine schwarze Lava floß über das angrenzende Gebiet des Mare Tranquillitatis. Dann stürzte der imbrische Planetoid mit merklichem Gehalt an flüchtiger Substanz ein, über den Mond wurde weithin Staub geschleudert und die heiße Lava des Mare Tranquillitatis lagerte Wasser und Schwefelwasserstoff an, die nun die Oberfläche schwärzten. Oder waren es andere Ereignisse? Die Staubhypothese von Gold ist, wenn sie sich gegen kritische Studien behauptet, für uns der wichtigste Vorschlag, der seit der hervorragenden Arbeit von Gilbert 1893 bezüglich der Mondoberfläche gemacht wurde. Dennoch teilen wir Golds Ansicht über den Ursprung des Staues – durch Lufterosion – nicht, ebensowenig seine Annahme, daß die kollidierenden Objekte sich mit hoher Geschwindigkeit bewegten.

Dauer des Bombardements

Es ist einer der bemerkenswertesten Züge des Mondes, daß größere post-Mare-Krater in den Kollisionsmare fehlen (im Falle des Mare Imbrium bezieht sich das nur auf das Kollisionsgebiet innerhalb des kleinen gestrichelten Kreises von Bild 2). Beim Mare Nectaris finden wir Theophilus und Piccolomini, die sicherlich nach dem Mare Nectaris entstanden sind.

Diese runden Kollisionsmare müssen „flüssig“ gewesen sein, d. h. zu der Zeit, als das Bombardement aufhörte, entweder aus Staub oder Flüssigkeit bestanden haben. Eine ähnliche Betrachtungsweise gilt für die Tatsache, daß Gebirgsmassive im Mare Serenitatis fehlen. Wenn diese nach dem Mare Imbrium gebildet worden wären, hätte die gewaltige Kollision die strahlenförmige Struktur der imbrischen Kollision im Hämangebirge und im Gebiet zwischen den beiden Maren bemerkenswert unversehrt gelassen. Aus diesem Grunde glauben wir, daß das Mare Serenitatis vor dem Mare Imbrium entstand. Das bedeutet aber – da bei Mare Serenitatis Gebirgsmassive wie das Hämangebirge fehlen –, daß es zur Zeit des imbrischen Zusammenstoßes „flüssig“ war. Die Flüssigkeit muß sehr schnell erstarrt sein, etwa in 100000 Jahren; der Staub koagulierte wie die Asche von Pompeji oder der Schlamm, der Herculaneum bedeckte. Die kleinen, sicher neuen Krater im Mare wurden während der letzten $4\frac{1}{2}$ Milliarden Jahre gebildet und zeigen, daß sich der Staub, wenn es sich um Staub handelt, zusammenballte und fest wurde. Der „Straight Wall“, eine Verwerfung im Mare Nubium, zeigt dies ebenfalls.

Alle diese Argumente lassen den Schluß zu, daß der größte Teil der Mondoberfläche erstaunlich schnell gebildet wurde. Die Strahlungskrater und viele kleine Krater mögen die Folge von Meteoreinfällen in geologischen Zeiten sein. Aber die Mare und die meisten Krater wurden in einer Million Jahren oder noch kürzerer Zeit gebildet. Zwei Erklärungen sind möglich, entweder wurde das Bombarde-

ment durch einen Schwarm von Himmelskörpern, der das Sonnensystem passierte und wieder verließ, hervorgerufen, oder aber das Bombardement war ein Teil des Endstadiums von Erd- und Mondbildung. Wir neigen zur zweiten Möglichkeit. Unserer Überzeugung nach wurde die Mondoberfläche damals gebildet, und seither nur durch Meteorite, die mit großer Geschwindigkeit einstürzten, und durch das Ausstoßen von Gasen aus dem Inneren geändert.

Dann muß allerdings eine Erklärung für das plötzliche Ende des Bombardements gefunden werden. Wenn die Objekte, die auf den Mond stürzten, Satelliten des Erde-Mond-Systems waren, die innerhalb kurzer Zeit von der Erde eingefangen wurden, oder wenn sich nur wenige auf Bahnen bewegten, die sich bis zur Mondbahn erstreckten, dann läßt sich das nur kurze Zeit dauernde Bombardement verstehen. Es ist aber schwierig, das plötzliche Ende zu erklären, wenn sich die Körper auf Bahnen um die Sonne bewegten. (Dies stimmt mit der Annahme überein, daß die Körper mit der ungefähren Entweichgeschwindigkeit des Mondes von $2,4 \text{ km/s}$ auf dem Mond ankamen).

Über die Meteoriten

Die Meteorite werden in Eisen-, Stein/Eisen- und Steinmeteorite unterteilt. Die Eisenmeteorite bestehen aus Eisen-Nickel-Legierungen, dem raumzentrierten Camacit und dem flächenzentrierten Taenit. Man unterscheidet die beiden Legierungen, von denen die erste 6–7%, die zweite 15–48% Nickel enthält, durch die Widmanstättischen Figuren, die für bestimmtes Meteor-Eisen charakteristisch sind. Die Chondrite sind Steinmeteorite, die runde Körper (Chondrule genannt) enthalten. Es sind Konglomerate aus diesen Chondrulen, Kristallen vieler Mineralien und Bruchstücken der Eisen-Nickel-Legierungen⁷⁾. Die Achondrite sind keine Konglomerate, enthalten nur wenig Eisen und gleichen mehr feurigem Gestein als die Chondrite, obwohl die Differenzen offensichtlich sind. Sehr wahrscheinlich ist es so, daß die Chondrite durch Kollisionsprozesse entstanden, in deren Verlauf die damalige Struktur zerstört, die Bruchstücke gemischt und dann zu chondritischen Meteoriten fest verbunden wurden. Einen solchen Kollisionsprozeß könnten wir uns auch beim Mond vorstellen.

Das Alter der Meteorite wurde nach drei Methoden bestimmt⁸⁾: $^{206}\text{Pb} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$; $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$; $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$

Diese Methoden geben innerhalb der Fehlergrenze übereinstimmende Werte. Beim ersten Verfahren wird die Zeit bestimmt, die seit Abtrennung des Materials der Eisen- und Steinmeteorite – vermutlich durch einen Schmelzprozeß – verflossen ist. Mit dem zweiten läßt sich der Zeitpunkt ermitteln, bei dem Argon durch Erwärmung ausgetrieben wurde. Diese Methode liefert ein Mindestalter, daher sind auf das obige nur Maximalwerte bezogen. Die letzte Methode schließlich gibt die Zeit an, seit der Pasamonte-Achondrit fast sein gesamtes Rubidium – wahrscheinlich ebenfalls durch einen Schmelzvorgang – verloren hat. Die gute Übereinstimmung der auf diese Weise erhaltenen Werte für das Alter der Meteorite – innerhalb einiger 100 Millionen Jahre, der wahrscheinlichen Fehlergrenze dieser Messungen – zeigt, daß die ganzen physikalischen und chemischen Prozesse, durch die sie entstanden, vor etwa $4,5 \cdot 10^9$ Jahren in einer kurzen Zeitspanne abgelaufen sind. Dieses Ergebnis

⁷⁾ C. W. Beck, R. G. Stevenson u. I. La Paz., Contr. Meteoritical Soc., 5, 11 (1951), berichten dies für den LaLande-Meteoriten. Der Autor veranlaßte eine Prüfung des Beardsley- und Holbrook-Chondriten, die beide nach der $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$ -Methode datiert wurden. A. Pletenger und B. Nielson zeigten durch Röntgenstrahlbrechungen und mikroskopische Methoden, daß Camacit und Taenit in diesen Meteoriten vorliegen.

⁸⁾ C. C. Patterson, Geochim. Cosmochim. Acta, im Druck.

interessiert für unsere Studien über die Mondoberfläche. Im allgemeinen nimmt man an, daß Meteorite durch das Aufbrechen asteroidaler Körper bei Zusammenstößen innerhalb geologischer Zeiten entstanden. Wenn also intensive Kollisionsprozesse in der Zone der kleinen Planeten zwischen Mars und Jupiter stattfanden, dann wird in dieser Abhandlung bewiesen, daß um die gleiche Zeit Zusammenstöße mit dem Mond stattfanden, und daß die Mondoberfläche für uns eine physikalische, fossile Urkunde dieser Geschehnisse ist.

Chemische, mit der Mondstruktur zusammenhängende Probleme

Die Dichte des Mondes ist mit 3,34 genau bekannt, obwohl wir die Durchschnittstemperatur des Mondes und damit seine Dichte bei einer bestimmten Temperatur nicht kennen. Einige Befunde, wie sie oben erwähnt wurden, weisen darauf hin, daß die Durchschnittstemperatur etwa 1200 °C betragen muß. Korrigiert man Druck und Temperatur, so erhält man 3,47 für die Dichte, bei Drucken und Temperaturen, wie sie auf der Erde herrschen. Das stimmt genau überein mit Ureys und Craigs Schätzungen⁹⁾ über die Dichte der Silicate und Eisen-Bestandteile des Sonnenmaterials, wenn das Eisen völlig oxydiert ist. Ob hier genau das gleiche vorliegt, ist nicht sicher, aber die Beziehung wäre einleuchtend. Während der Bildung der Planeten änderte sich die Dichte. Das wird am Verlauf der Dichten von Merkur über Erde, Venus, Mars zum Mond¹⁰⁾ offensichtlich. Es scheint, als ob sich der Mond mit dem kleinsten und Merkur mit dem größten Anteil an Eisen gebildet haben. Aus astronomischen Beobachtungen weiß man jetzt, daß die Monddichte mit der Dichte der nicht-flüchtigen Sonnenbestandteile übereinstimmt, also mit der der Silicate und Eisen-Bestandteile.

Der einzige andere Hinweis auf die chemische Zusammensetzung des Mondes stammt aus Untersuchungen über seine Farbe und seine Albedo (Reflektionsvermögen). Wood¹¹⁾ photographierte den Mond mit langwelligem und ultraviolettem Licht und fand in der Nähe des Aristarchus ein Gebiet, das im nahen Infrarot weiß und im Ultravioletten schwarz aussah. Er prüfte ungefähr 25 Substanzen und bei Schwefel fand er die gleichen Erscheinungen. Bei den Temperaturen, denen Aristarchus ausgesetzt ist, ist der Schwefel allerdings gut flüchtig, und es ist ausgeschlossen, daß er längere Zeit lokalisiert bleibt. Sharonow¹²⁾ hat die frühere Literatur genau auf diesen Punkt hin durchsucht und hat dabei weitere Daten gefunden. Er schließt daraus, daß das vom Mond reflektierte Licht am besten zu erklären ist, wenn man annimmt, daß das Licht von einer Schicht — durch den Anprall der Meteore feingepulverten — Gesteins herrührt. Man findet sehr deutliche Unterschiede der Schwarzung mit scharfen Grenzen; der Staub muß also zum Teil auch für die Mondsubstanz charakteristisch sein und nicht nur für die Meteorsubstanz. Whipple führte aus, daß beim Zusammenstoß von Körpern hoher Geschwindigkeit mit dem Mond ein Teil des Materials völlig weggeschleudert wird; wir können also verstehen, warum die Mondoberfläche nicht mit Meteortrümmern bedeckt wurde.

Es ist interessant, sich über die hellen und dunklen Stellen des Mondes Gedanken zu machen. Man muß sich dabei vergegenwärtigen, daß das Oberflächenmaterial dem vollen Sonnenlicht vom Ultraroten bis zum Ultravioletten ungefähr $4,5 \cdot 10^9$ Jahre lang ohne Absorption durch eine Atmosphäre ausgesetzt war. Es ist schwer, die Wirkung

des Lichtes abzuschätzen, denn es ist zu intensiv, als daß man es mit irdischen Lichtquellen vergleichen könnte. Die Temperatur in der Äquatorgegend steigt an Mondmittagen auf 134 °C und fällt in der Nacht auf -153 °C ab. In den polaren Gebieten sind die Temperaturen etwas niedriger, aber eine reale Temperatur gibt es nicht: hohe und tiefe Temperaturen können nebeneinander existieren. Außerdem ist der Mond seit langer Zeit kosmischer Strahlung ausgesetzt. Licht- und kosmische Strahlung sollten die Farbe des Oberflächenmaterials im allgemeinen in die Richtung höherer Lichtabsorption verschieben.

Wir können annehmen, daß die Oberfläche aus Meteoritenmaterial besteht. Die Meteoriten bestehen aus Eisen und Nickel sowie vielen gewöhnlichen Mineralien glühender Gesteine mit beträchtlich mehr Eisensulfid, als man im Gebiet der Erdoberfläche findet. Dabei liegt alles oder fast alles oxydierte Eisen in der niedrigen Oxydationsstufe vor. Eine Gruppe von Meteoriten, als Carbonat-chondrite bekannt, enthält merkliche Mengen an Wasser und Kohlenstoff-Verbindungen. Es sind nur 20 kleine Meteorite dieser Klasse bekannt, aber da sie sehr zerbrechlich sind und unter irdischen Bedingungen rasch zerfallen, läßt sich zwar ihr Einsturz auf die Erde beobachten, aber sie lassen sich nachher nicht finden. Da sie flüchtige Substanzen enthalten, die bei tiefen Temperaturen ungebunden sind, müssen sie sich während ihres Falles durch die Atmosphäre auflösen. Somit repräsentieren die wenigen bekannten kleinen Objekte eine große, wichtige Gruppe, und deshalb sind auch Kohlenstoff-Verbindungen und Graphit durchaus als Bestandteile der Mondoberfläche möglich.

Vielelleicht werden jetzt, oder wurden doch früher, Gase aus dem Mondinnern ausgestoßen. Wahrscheinlich wurden Wasser, Schwefelwasserstoff und Kohlenstoff-Verbindungen aus dem Mondinnern durch Erwärmung — entweder infolge der Radioaktivität oder durch den offensichtlichen Kollisionsprozeß — ausgetrieben; obwohl gerade Vulkane auf der Mondoberfläche nicht evident sind. Solche Gase dürften durch ultraviolettes Licht zerfallen sein und damit Oberflächenreaktionen mit Sauerstoff oder Schwefel ermöglicht haben. Wahrscheinlich verdanken die dunkleren Gebiete ihre Farbe dem Eisensulfid oder dem Kohlenstoff, die auf Grund der Wirkung ultravioletten Lichtes oder kosmischer Strahlen schwerlich hell gefärbt würden. Im Westen von Copernicus gibt es Gebirge, die vom Ort der imbrischen Kollision ausstrahlen, und die so schwarz sind, daß sie kaum gesehen werden können, wenn nicht die Schattengrenze benachbart ist. Sie müssen durch ein sehr dauerhaftes Material gefärbt sein, wahrscheinlich durch Kohlenstoff oder Eisensulfid.

Die Mondgebirge sind im allgemeinen heller als die Mare, obwohl ihre Albedo kleiner ist (ungefähr 0,15). Soweit eine Schätzung möglich ist, scheinen sich Silicate mit zweiwertigem Eisen genau so zu verhalten. Die am stärksten leuchtenden Gebiete verdanken ihre Reflektionskraft wohl dem Effekt, daß eine intensive Lichtreflektion an kleinen sphärischen Glaskörpern stattfindet.

Es ist sehr schwer, die chemische Zusammensetzung der Mondoberfläche aus dem reflektierten Licht abzuleiten. Das Licht wird lediglich von einer Oberflächenschicht reflektiert, und jede dünne Schicht verbirgt sich schon darunter. Auch werden schon leichte Änderungen der Zusammensetzung oder des physikalischen Zustandes der Silicate die Farbe merklich ändern. So haben z. B. die schwarzen und weißen Chondrite fast dieselbe Zusammensetzung, aber ihre Lichtabsorption ist völlig verschieden. Der ganze Unterschied 'der hellen' und dunklen Gebiete

⁹⁾ H. C. Urey u. H. Craig, ebenda 4, 36 [1953].

¹⁰⁾ H. C. Urey, ebenda 7, 207 [1951].

¹¹⁾ R. W. Wood, Popular Astron. 18, 67 [1910].

¹²⁾ V. V. Sharonow, Astr. J. USSR 31, 445-453 [1954].

des Mondes kann auf einem Unterschied im physikalischen Zustand des Eisensulfids beruhen; es ist möglich, daß das Eisensulfid geschmolzen war und sich über die Silicat-Kristalle ausbreitete; in diesem Falle ist der Farbtön dunkel; wenn es in größeren Kristallen vorliegt, dagegen hell. Obgleich die Astronomen in ihren Versuchen, die Zusammensetzung des Mondes aus dem reflektierten Licht abzuleiten, unentmutigt fortfahren werden, sind die Chemiker wahrscheinlich nicht zu überzeugen, bis echte Proben für chemische Analysen vorhanden sind.

Andere Merkmale der Mondoberfläche

Gewisse Merkmale der Mondoberfläche, die sehr ausführlich diskutiert wurden, scheinen mir zweitrangig und nur von geringerer Wichtigkeit zu sein. Die hellen Strahlen gehen von bestimmten Kratern aus, sie kreuzen alle charakteristischen Erhöhungen und Vertiefungen. Im allgemeinen hat man sie als Staub von Kraterexplosionen gedeutet. Im Vakuum würde jede einzelne Partikel sich auf einer elliptischen Bahn bewegen. Wenn sich nun eine große Zahl von Partikeln, die alle aus einem Krater stammen, auf ähnlichen, aber nicht identischen Bahnen bewegten, so würden sie derart niederfallen, daß sich eine Art Muster ergibt. Wenn sich eine solche Partikel mit einer Geschwindigkeit von 1,7 km/s oder mehr bewegt und ihre Bahn anfangs tangential zum Mond verläuft, ist sie in der Lage, um den ganzen Mond zu kreisen. Partikeln auf anderen Bahnen würden auf die Mondoberfläche fallen. So können also die Strahlen des Tycho, die nicht im Krater zentriert sind, durch Staub entstanden sein, der um den Mond kreiste, und den Krater wegen der Eigenrotation des Mondes während der fast zweistündigen Umlaufszeit verfehlt hat. Die Strahlen von Copernicus sind sehr unregelmäßig, so als ob während ihrer Entstehungszeit etwas Atmosphäre vorhanden gewesen wäre (Bild 4).

Es ist verwunderlich, daß viele wohlgeformte Krater — wie etwa Theophilus — kein auffälliges Strahlensystem haben. Entstanden sie, als der Mond vielleicht eine zeitweilige Atmosphäre besaß, die die Staubpartikel gehindert hat, sich mehr als einige Meter auf unabhängigen Bahnen zu bewegen? Proclus hat Strahlen nach allen Richtungen, außer hinüber zu Palus Somnii. Das ist sehr verwirrend, aber des Nachdenkens wert. Die Lava vom Mare Tranquillitatis (wenn es Lava war!) breitete sich über die Oberfläche aus — das zeigt, daß ihre Dichte geringer war, als die des Materials, über das sie ausfloß — vielleicht schwamm auch das Gebiet von Palus Somnii auf der Lava. Die Strahlen, die man auf der Oberfläche von Proclus erwarten sollte, sind vielleicht durch Erwärmung von unten und durch Einwirkung von Schwefelwasserstoff ausgelöscht worden.

Oder ist das Mare Tranquillitatis Lava aus dem Mondinnern, die unter einer Staubschicht floß, so daß Berggipfel nicht zu sehen sind? Wenn es so ist, warum gibt es dann so viele Beweise für die große Härte des Mondes?

Es gibt manche vulkanischen Merkmale, wenn sie auch irdischen Vulkanen nicht gleichen. In dem glatten Gebiet westlich von Copernicus ist ein unregelmäßiger Riß zu sehen, und entlang dieses Risses finden sich eine Menge kleiner Krater. Es ist sehr unwahrscheinlich, daß Objekte genau in dieser Anordnung in den Mond stürzten. Diese kleinen Krater haben aber, verglichen mit ihrer Höhe, sehr weite Öffnungen, so daß sie in dieser Beziehung den irdischen Vulkanen sehr unähnlich sind. Krater, die diesen sehr wahrscheinlich analog sind, finden sich in vielen anderen Gebieten des Mondes, sie sind aber von Kollisionskratern nicht leicht zu unterscheiden. Die großen Falten in den Maren -- hunderte von Kilometern lang -- sind viel-

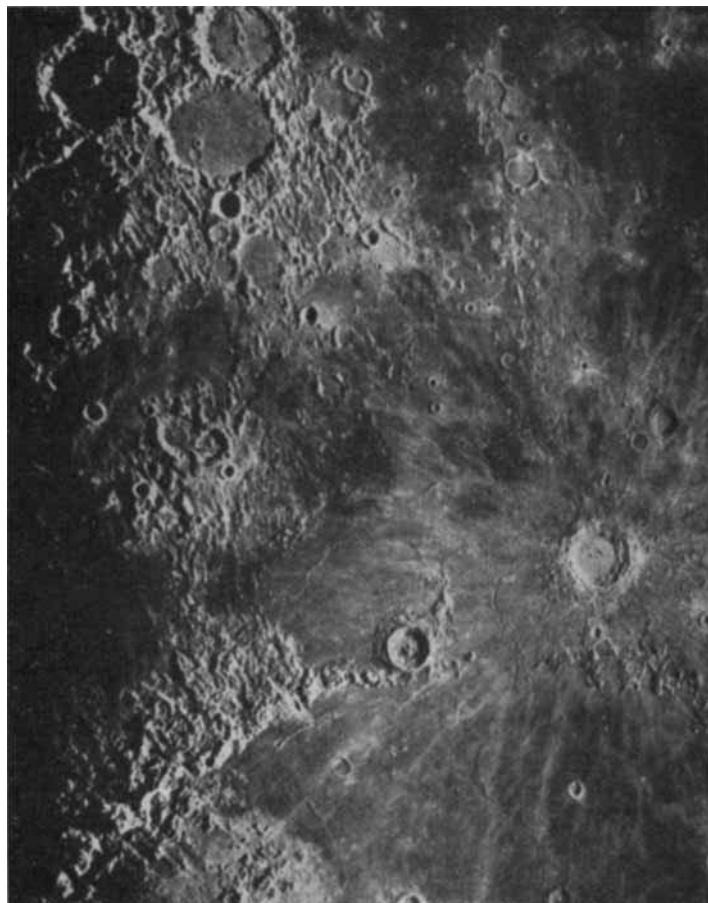


Bild 4

Diese kontrastreiche Photographie zeigt den inneren Teil des Strahlen- und Streifensystems, das vom Krater Copernicus ausgeht. Süden liegt in diesem Bild, für das der Maßstab durch den Durchmesser des Copernicus mit 56 Meilen festgesetzt ist, oben. Der Krater Eratosthenes ist links sichtbar, besitzt aber offenbar kein eigenes Strahlensystem. Er liegt am Rande des Mare Imbrium und zwar am Rande des Kreises in Bild 2. Man vergleiche das Strahlensystem des Copernicus mit dem des Tycho in Bild 3.

leicht Lava-Wellen oder wahrscheinlicher Staubhaufen, die durch große Verschiebungen lockeren Staubs oder Schlamms über der Mondoberfläche hervorgerufen wurden, ähnlich den Schlammflüssen am Grund irdischer Meere.

Die Rheita- und Borda-Täler sind hunderte von Kilometern lang, und das Alpen-Tal erstreckt sich fast ebenso weit. Wir neigen zur Ansicht, daß sie durch Eisen-Nickel-Körper hoher Geschwindigkeit entstanden sind, die ihren Ursprung innerhalb der Planetoiden hatten, die auch die Kollisionsmare hervorriefen. Andere, wie G. P. Kuiper¹³⁾ glauben, daß es Risse sind, die durch die großen Zusammenstöße hervorgerufen wurden. Vielleicht ist das die richtige Erklärung. Sie sind für Risse bemerkenswert gerade; das Rheita-Tal hat dagegen eine scharfe und auffallende Krümmung, die schwer zu erklären ist, wenn man annimmt, daß sie von einem Geschoß herührt. Aber unabhängig davon, welche Deutung nun richtig ist, die Gesamtgeschichte der Mondoberfläche wird davon nicht entscheidend beeinflußt. (Der Verfasser schließt sich der Kuiperschen Theorie, daß der Mond völlig geschmolzen war, nicht an).

Man könnte die Mondoberfläche weiter in ihren Einzelheiten diskutieren, denn sie ist ein faszinierendes Objekt; es wäre herrlich, wenn man die andere Hemisphäre sehen und einige Proben des Oberflächenmaterials besitzen könnte.

Herrn Dr. W. Auer möchte ich für die Übersetzung, Herrn Dr. Hans Geiss für das Lesen der Korrekturen danken.

Eingegangen am 3. April 1956 [A 744]

¹³⁾ G. P. Kuiper, Proc. nat. Acad. Sci. USA 40, 1096 [1954].