

novela de dos planetas

## EL PLANETA AZULINO TIERRA Y LA LUNA DE TINTES OCRES

por el Dr. GERARD P. KUIPER  
Director del Laboratorio Lunar y Plane-  
tario de la Universidad de Arizona.  
(Nota biográfica y traducción del prof.  
Federico Rutllant).

El doctor Gerard Peter Kuiper es, desde 1961, astrónomo, profesor, investigador y Director del Laboratorio Lunar y Planetario de la Universidad de Arizona. Nació en Holanda en 1905. En la Universidad de Leiden obtuvo el B. Sc. en 1927 y el Ph. D. en 1933. Se radicó en los EE. UU. en esta última fecha y se naturalizó en 1937.

Su dinámico "curriculum vitae" se inicia como investigador asistente en astronomía en la Universidad de Leiden, de 1928 a 1933. Después actúa en los observatorios de Lick, Harvard y Chicago. En esta última Universidad desempeña la dirección del famoso Observatorio de Yerkes en los períodos 1947-1949 y 1957-1960. Perteneció a numerosas sociedades científicas europeas y norteamericanas, entre las cuales cabe destacar la Academia Nacional de Ciencias de los EE. UU., la Unión Astronómica Internacional, la Sociedad Real de Astronomía de Londres, la Sociedad de Ciencias de Holanda y la Academia Real Holandesa de Ciencias.

Sus numerosas obras incluyen el Atlas Fotográfico Lunar, publicado por las Prensas de la Universidad de Chicago y su suplemento el Atlas Ortográfico de la Luna, publicado por las Prensas de la Universidad de Arizona en 1960. Ha sido editor de las series, El Sistema Solar (El Sol, la Tierra como un Planeta, Planetas y Satélites) y Atmósferas de la Tierra y los Planetas. Como editor general está a cargo de la publicación del compendio de astronomía en nueve volúmenes, Estrellas y Sistemas Estelares. Sus investigaciones han visto la luz en la literatura científica mundial y totalizan más de sesenta trabajos. Ha descubierto numerosas estrellas "enanas blancas" e inscribió su nombre en el sistema solar al descubrir el satélite más próximo de Urano, Miranda, en 1948, y el más lejano de Neptuno, Nereid, en 1949. Por estos descubrimientos y otras virtudes profesionales se le han discernido valiosas medallas, citaciones y condecoraciones. Se le considera, hoy en día, como uno de los más connotados especialistas en el vasto campo del sistema planetario.

En 1959 vino a Chile a iniciar una campaña exhaustiva para determinar las condiciones de visibilidad astronómica que prevalecen en nuestro país. Tres años después, su plan inicial se encuentra en desarrollo de ritmo creciente y ahora aún las voluntades de todos los astrónomos estadounidenses. Estos, por intermedio del Kitt Peak National Observatory, esperan erigir en una cumbre, por elegir, a fines de este año, en el Norte Chico, uno de los observatorios más bien dotados del hemisferio terrestre austral.

X. La Luna de unos dos días. Fotografías como ésta son inapreciables para la interpretación de detalles topográficos cerca del limbo lunar

Si se evitan crisis políticas de importancia, la década que comenzó en 1960 puede proporcionar un nuevo capítulo a los anales de la aventura y descubrimiento humanos. La Luna se habrá vuelto accesible a la exploración científica directa y una avalancha de nuevos hechos relativos a nuestra vecina se incorporará a nuestro conocimiento. Los nuevos hechos pueden convulsionar los fundamentos mismos de las ciencias naturales. Ellos incidirán en el problema del origen de la Tierra y mostrarán un conjunto fósil de sucesos acaecidos en las regiones internas del sistema solar, un "currículum" que se ha ido construyendo en el decurso de los últimos cinco mil millones de años, período que cubre toda la vida del sistema solar: una sucesión de hechos que ha permanecido inalterada por los efectos corrosivos y erosivos del viento, el agua y el hielo.

El inmenso vacío entre la Tierra y la Luna habrá sido atravesado. Podremos "hablar" y "escuchar" a nuestra vecina usando sismógrafos, micrófonos y otros auxiliares auditivos. Las vibraciones de su cuerpo nos contarán acerca de sus condiciones internas. La química y la microscopía aplicadas a su superficie y, por sobre todo, su estructura infinitamente compleja, abrirán nuevas páginas en el libro de la historia.

Los astrónomos han estado observando los movimientos de nuestra silenciosa vecina, empleando métodos de alta precisión, acumulando así información valiosísima. Con la ayuda de telescopios se han registrado y explorado sus rasgos faciales y una historia de su vida ha sido bosquejada. ¡Pero qué inadecuado es este bosquejo y cuánto queda todavía por realizar!

El Año Geofísico Internacional demostró que los hombres de ciencia de todo el mundo pueden colaborar efectivamente en objetivos de importancia, aun en los turbulentos tiempos actuales. En realidad, y durante generaciones, los astrónomos han sido propensos a la colaboración internacional y tareas tan sustantivas como el cómputo de los almanaques nacionales y efemé-

rides astronómicas son realizadas dividiéndose el trabajo. Y, hecho extraordinario, esta cooperación continuó durante la mayor parte de la Segunda Guerra Mundial. Informaciones acerca de erupciones solares (que afectan las frecuencias de radio utilizables y pueden aun afectar condiciones meteorológicas en todo el mundo) han sido intercambiadas, día a día, durante medio siglo; trabajos de conjunto en laboriosos catálogos estelares datan aun de épocas más remotas.

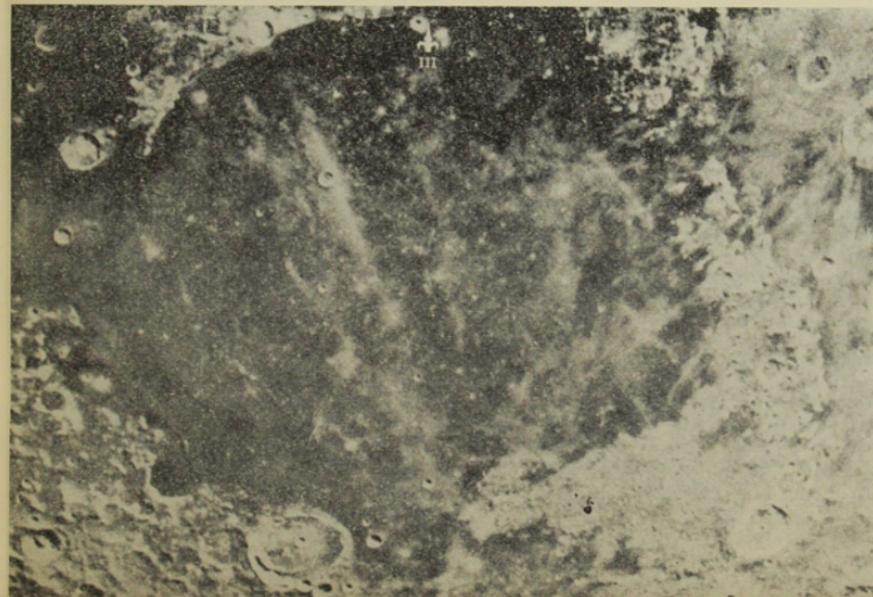
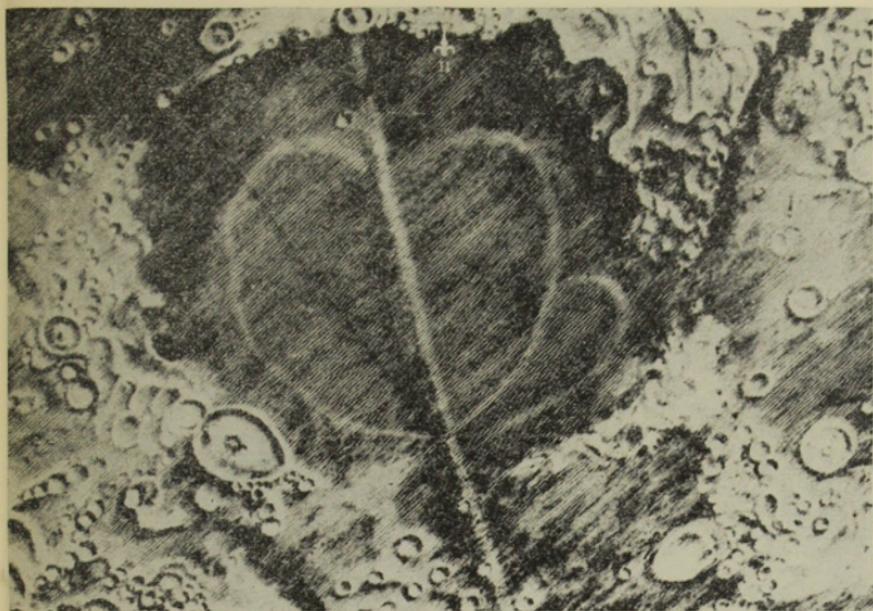
Por razones comprensibles, la Luna no muestra cambios tan rápidos como los que se observan en la superficie del Sol y tal vez por ello es que no se ha formado un programa internacional de observadores lunares. No obstante, el estudio de su superficie representa un gran desafío, porque los resultados obtenidos son directamente proporcionales a la potencia de los instrumentos de investigación empleados. De esta manera, la colaboración internacional se exterioriza por intercomparación de los resultados más importantes, tal como en realidad ocurre en cualquier parte entre instituciones rivales. Es comparable al espíritu deportivo que predomina en las competencias entre universidades o en los juegos olímpicos.

Invitada por la Academia de Ciencias de la URSS, la Unión Astronómica Internacional auspició un symposium sobre estudios lunares, en Leningrado, durante la semana comprendida entre el 6 y el 11 de diciembre de 1960. Esta reunión ilustró el valor de esta clase de competencias. No cabe duda de que los orgullos nacionales estaban presentes; pero el espíritu que prevaleció durante las reuniones fue científico y deportivo a la vez, otorgándose el mérito al que lo merecía. Los efectos que derivaron para las relaciones internacionales en esta área limitada fueron altamente favorables.

Para los participantes estadounidenses el interés en el symposium estaba realzado por dos pedimentos rusos. Uno se refería a la fotografía de la otra cara de la Luna, por el Lunik III, el 7 de octubre de 1959. Revistas norteamericanas habían reproducido tres foto-

II. Porción de un mapa lunar hecho en el Observatorio de París en 1680 por Jean Dominique Cassini. La notable exactitud de este mapa se hace patente cuando se le compara con III. Cassini es conocido por su enunciado de las tres leyes de la rotación lunar

III. Una fotografía moderna del Mar de la Serenidad. El rayo brillante que cruza la región central (probablemente causado por el cráter brillante Menelaus en la línea costera superior) también figura en II. Nótese que las lavas del adyacente Mar de la Tranquilidad (a la izquierda) son más oscuras, incluyendo las lavas costeras del Mar de la Serenidad. Una comparación con la lámina II pone en evidencia algunas limitaciones de las observaciones e interpretaciones visuales. La situación es equivalente a la observación de los "canales" de Marte, muchos de los cuales aparecen como algo más que las fronteras entre regiones de diferentes tonalidades. El cráter en la línea de la costa interior es Posidonius. Este cráter es notable por su piso solevantado, lo que produce el efecto de una cuenca de lava en forma de creciente y que ocupa aproximadamente 1/3 del área total, la mayor parte en el lado derecho. Esta corteza levantada está quebrada en dos por una grieta que va de este a oeste y que pasa por el centro, visible en la fotografía justo debajo del cráter de impacto reciente (no dañado) que se ve en el piso. El cráter prominente en la puerta de los mares de la Serenidad y de la Tranquilidad es Plinio. Plinio es notable porque muestra una abertura central volcánica casi completamente obturada; se ve de un blanco brillante en la fotografía. Plinio se parece a cuatro cráteres de estructura y edad aparente similares en el Mar Imbrium; el más grande de ellos es Timocharis. Los puntos blancos numerosos en el Mar de la Serenidad son pequeños cráteres meteoríticos. El más grande de los puntos blancos, a la derecha del centro, es el cráter Linneo, que fue considerado a menudo durante el siglo pasado como de tamaño variable y se pensó aun que representaba un depósito de nieve. Estas suposiciones no han sido confirmadas por las observaciones modernas que muestran simplemente un cráter del tamaño del Cráter Meteorico en Arizona, rodeado de un halo blanquecino y de casi cinco kilómetros de diámetro



grafías; pero ellas mostraban rasgos de pincel y otras huellas de retoque. Y mientras los astrónomos concordaban en que la fotografía básica era genuina, su autenticidad era puesta en tela de juicio por una revista fotográfica de amplia circulación.

La otra demanda fue la erupción señalada en el cráter lunar Alphonsus, el 3 de noviembre de 1958. Nunca antes una erupción tal había sido vista por observadores visuales competentes en muchos países que totalizan tal vez 100.000 horas de observación efectiva; y, más importante aún, la observación fue hecha en la ranura de un espectrógrafo que comprende una pequeñísima fracción del disco Lunar. Además, los resultados relatados eran de difícil interpretación física.

Sin embargo, antes de discutir algunos puntos de interés científico activo, como los indicados más arriba, es necesario revisar en la perspectiva de la interpretación moderna, algunos hechos notorios acerca de la Luna y su órbita.

La Luna es habitualmente considerada como un "satélite" de la Tierra, en el mismo grupo de otros treinta satélites de planetas, conocidos en el sistema solar. No obstante sería más apropiado considerar a la Luna como formando un planeta doble con la Tierra, ya que la razón de masas de ambos cuerpos, alrededor de 80 a 1, es mucho menos extrema que la razón encontrada para cualquiera otra de los treinta satélites. Esta razón de masa es significativa porque incide en la génesis de ambos cuerpos. En el caso de las razones de masa extremas es racional suponer que los cuerpos más pequeños se originaron en la nebulosa primitiva en torno a los más grandes. Tal es el caso para los satélites de Marte, Júpiter, Saturno, Urano y probablemente Neptuno; se supone también que tal fue el proceso de formación de los planetas en la envoltura primitiva del Sol. Por contraste, el sistema Tierra-Luna presenta analogías no en el sistema solar, pero sí entre las estrellas. Las estrellas binarias se presentan con mucha frecuencia y sus razones de masa van desde casi la igualdad hasta valores que exceden ampliamente la razón 100 es a 1, incluyendo así el caso de la razón encontrada para la Tierra y la Luna. La abundancia de sistemas dobles estelares parece ser el resultado de pequeños movimientos irregulares en el gas prestelar, agregada a la contracción lineal de millones de veces que precede a la formación de las estrellas. Este proceso muestra en escala gigantesca, lo que podemos observar a escala reducida en nuestra experiencia cotidiana. Lo llamamos el "efecto de la tina de baño": independientemente de cuán pequeña sea la circulación del agua antes que la tina sea desaguada, el agua se escurre finalmente en violento remolino. Otra analogía es el "demonio de polvo" en el desierto, una corriente local y en espiral

ascendente que succiona el aire vecino con apenas discernibles movimientos sistemáticos.

La estimación del sistema Tierra-Luna como un planeta doble se haría más obvia si lo pudiéramos observar desde cierta distancia, por ejemplo desde el planeta Venus. El planeta azulino Tierra y la Luna de tintes ocres, constituirían el espectáculo más brillante y más hermoso del firmamento de Venus. La órbita relativa se vería de canto y cuando los planetas estuvieran en oposición (vistos a la medianoche), la separación sería de medio grado a lo sumo y la Luna oscilaría rítmicamente a uno y otro lado de la coincidencia con la Tierra, cada dos semanas. Careciendo Venus de satélite propio, sus hipotéticos habitantes podrían así sentirse inclinados a adoptar el mes lunar para la medida del tiempo.

La distancia Tierra-Luna tiene un valor medio de 30 diámetros terrestres o 384.000 kilómetros. Varía algo a causa de la elipticidad de la órbita, cuya excentricidad es de 0,055, lo que hace que la distancia en el apogeo sea 11 por ciento mayor que en el perigeo. Las fases lunares dependen de la posición relativa del Sol y de la Luna y, por consiguiente, del mes "sinódico" de 29,5 días. El hecho de que el año no contenga exactamente 12 o 13 de estos meses sino 12,37... ha sido uno de los dos obstáculos principales para desarrollar un calendario racional. El otro es, naturalmente, el número de días que tiene el año, 365,24220... Varias civilizaciones han demostrado gran habilidad para habérselas con estas fracciones extrañas.

De acuerdo con la tercera ley de Newton, que establece que "la acción es igual a la reacción", la atracción en el sistema Tierra-Luna es mutua, de igual valor, pero de sentidos contrarios. El centro de la Tierra se mueve de tal manera que la atracción lunar y la fuerza centrífuga se compensan exactamente. Pero para las partes más próximas a la Luna y las que están más alejadas, la compensación no es exacta, siendo la atracción mayor en el punto más próximo a la Luna y la fuerza centrífuga mayor en el punto terrestre diametralmente opuesto. En ambos casos resultan fuerzas hacia afuera que deforman la Tierra donde ella es sólida y levantan las aguas de los océanos dando origen a las mareas. La amplitud de la deformación de la Tierra sólida es el 31 por ciento de la que corresponde a una Tierra fluida con el resultado de que las aguas aparecen más altas que las tierras vecinas dos veces al día. La deformación elástica que las mareas producen en la Tierra sólida da una medida de la rigidez terrestre. Su valor es parecido al del acero.

La coexistencia de la rotación terrestre y de las mareas produce fricción. Esta disipa energía —convirtiendo energía de rotación en calor—, pero conserva el momento angular. Consecuencialmente, el período de la rotación terrestre se reduce y la distancia Tierra-Luna



VIII. Cráteres prominentes en el límite de iluminación suroriental. Schickard ocupa la mitad inferior; parte de su piso está compuesta de lavas oscuras. Nótese que el piso del cráter es convexo, no cóncavo, aparentemente a causa de un ajuste isostático posterior a la formación del cráter. La mitad superior muestra un cráter compuesto que asemeja a la buella de una pizada. La "planta" se llama Phocylides y el "taco" Nasmyth



XII. La Luna casi llena. El borde de la sombra está ahora muy próximo al limbo derecho y las sombras están muy distorsionadas. El resto del disco lunar no tiene sombras, de tal modo que la conformación de manchas claras y oscuras y de rayos de luz representa diferencias intrínsecas de reflectividad en la superficie. Nótese que algunos cráteres son los centros de los sistemas de rayos brillantes o rayos de luz

crece. Que el día alarga lentamente su duración está confirmado por las épocas en que los eclipses ocurrían hace 25 siglos cuando las más remotas observaciones precisas de estos fenómenos fueron hechas por los griegos clásicos. Las épocas de estos eclipses se desvían de 3 a 4 horas de las calculadas en base a los elementos presentes del movimiento lunar. Esta diferencia es equivalente a un aumento en la duración del día de alrededor de 0,001 segundos cada siglo.

Cuando se consideran lapsos mucho mayores que 25 siglos, los efectos se vuelven sobrecogedores. Así se encuentra que al comenzar la historia de la Tierra, hace unos cuatro mil millones de años, la Luna debe haber estado mucho más cerca de nuestro planeta de lo que está hoy día, y la Tierra misma debe haber girado mucho más ligero. Sin embargo, se pierde toda precisión cuando se quiere determinar cuánto más próxima

y cuánto más rápida, basándose sólo en los datos que proporcionan las marcas, y ello debido, en parte, a nuestra ignorancia acerca de la evolución del contorno de la línea de las aguas en las playas. Una segunda fuente de información es la elongación de la Luna en dirección de la Tierra. Esta elongación todavía no puede ser determinada por mediciones directas; pero puede ser deducida de las propiedades dinámicas de la Luna (sus momentos de inercia). Estos datos fluyen de los parámetros de la rotación lunar con el auxilio de una compleja teoría desarrollada por los grandes astrónomos-matemáticos franceses, Lagrange, Laplace y Poisson. La interpretación más plausible de estos datos permite atribuir al diámetro dirigido hacia la Tierra una longitud superior en 2,13 kilómetros al diámetro polar. Esta diferencia es unas 17 veces mayor que la deformación causada por las marcas terrestres

a su distancia actual; de aquí que la podamos considerar como una protuberancia congelada de la marea causada en la Luna cuando estaba mucho más próxima. Se sabe que la altura de las mareas es inversamente proporcional al cubo de la distancia de la Tierra, luego la protuberancia presente acusa una distancia de  $17\frac{1}{4}$ , es decir, 0,39 de la distancia actual. Debido a que la Luna se presenta como que ha estado, por lo menos parcialmente, derretida en su temprana historia, antes que ocurriera una solidificación general, la protuberancia congelada no puede haberse generado en las primeras fases de la historia lunar sino que debe haberse materializado varios cientos de millones de años más tarde, ya que necesitó bastante tiempo la Luna para calentarse hasta su punto de fusión. De aquí que la distancia de la Luna al nacer debe haber sido mucho menor que el 39 por ciento de su valor actual. Pero aun a esa distancia la rotación terrestre debe haber sido mucho más rápida que la presente. La velocidad de la rotación se determina por el hecho de que el momento angular del sistema Tierra-Luna se conserva. Se determinó así un período de rotación de  $8\frac{1}{2}$  horas con un período inicial aun menor. Esta sorprendente determinación plantea un interrogante: si la Tierra giraba al principio tan rápidamente, ¿no habrá dejado esta rotación huellas visibles? Existe evidencia de una respuesta afirmativa.

La atmósfera terrestre aparece casi totalmente compuesta de gases que fueron incorporados, directa o indirectamente, por emanaciones volcánicas durante la historia geológica. Pero existen excepciones: los gases nobles o inertes, helio, neón, argón, krypton y xenón. El helio tiene origen radiogénico, es decir, producido por la transformación de los elementos radiactivos que se hallan en la corteza y las subsiguientes pérdidas de gas. Lo propio ocurre con el isótopo más abundante del argón,  $A^{40}$ . Sin embargo,  $A^{39}$  y  $A^{38}$  no son radiogénicos como tampoco lo son el neón, el krypton y el xenón. Se supone que éstos son preciosos residuos de la nube primitiva, de la cual emergió el sistema Tierra-Luna. La abundancia de estos gases comparada con la de aquellos elementos formadores de fierro y silicatos no corresponde a las proporciones observadas en la atmósfera solar o a los gases cósmicos en general. Existe una alta deficiencia de ellos en la Tierra que excede las  $10^7$  veces para los gases más pesados, krypton y xenón y las  $10^{10}$  veces para el argón y el neón. Este déficit puede ser comprendido si se supone que la Tierra original tenía un movimiento de rotación muy rápido que impedía que los gases de las capas exteriores se combinaran con el propio planeta Tierra. (Los gases inertes no se combinan químicamente con otros elementos. Por consiguiente, siempre deben haber formado parte de la envoltura gaseosa.)

Se conocen todavía otras condiciones que acotan las

separaciones iniciales de la Tierra y la Luna. 1) El período de la revolución de la Luna en torno a la Tierra (el "mes") tiene que haber sido siempre de mayor duración que el período de la rotación de la Tierra (el "día"). Si no se hubiera cumplido esta condición inicial la Luna habría descrito una espiral descendente hacia la Tierra en vez de alejarse de ella. 2) La Luna no se puede haber formado a menos de unos 2,9 radios terrestres; debido a la fuerza de las mareas terrestres el material más próximo no habría podido aglutinarse para formar un solo cuerpo. Estas dos condiciones implican que la Luna no se formó a menos de  $1/20$  de su distancia actual y que la duración inicial del día no puede haber sido menos de cinco horas. Así, considerados todos los hechos, la duración del día estuvo presumiblemente entre las 5 y las 6 horas y la Luna debe haberse formado a una distancia de la Tierra comprendida entre  $1/20$  y  $1/10$  de su distancia actual.

El futuro del sistema Tierra-Luna no es menos intrigante que su pasado. El crecimiento de la distancia lunar así como el de la duración del día debe continuar hasta que la fricción producida por las mareas de la Luna se haga insignificante. Sin embargo, este límite no se va a alcanzar como un resultado de la distancia creciente de nuestro satélite. Toda la historia del Sol entra en juego. El Sol crece lentamente de brillo y este proceso continuará acelerándose hasta que —en unos dos mil millones de años— su luminosidad habrá crecido a tal punto que la temperatura en la superficie de la Tierra habrá excedido fácilmente el punto de ebullición del agua. Los océanos se evaporarán y formarán una atmósfera de vapor de agua cuya presión alcanzará a unas 300 atmósferas. Después de alcanzar su brillo máximo el Sol se debilitará erráticamente hasta alcanzar un brillo equivalente a la 10.000 avas parte del actual. En cierto instante, en este proceso de decrecimiento, el vapor de agua acumulado en la atmósfera terrestre se condensará formando nuevos océanos; pero su vida no será muy larga. Con el Sol apagándose cada vez más la temperatura en la Tierra seguirá bajando hasta que los océanos, eventualmente, se congelarán. Entonces la obscuridad y los hielos prevalecerán en la superficie de nuestro planeta para siempre. La fricción de las mareas se hará insignificante y la distancia de la Luna, así como la rotación de la Tierra se habrán estabilizado. Este futuro estéril, primero de vapor de agua y después de hielos eternos, será indiferente a la raza humana que, con sus características explosivas, hará tiempo que habrá dejado de existir.

Esta breve reseña ilustra cuán entrelazadas están las historias de la Tierra y de la Luna. Es la Novela de Dos Planetas. Si se quiere avanzar más en la narra-

ción la ciencia deberá integrar estudios de carácter geofísico y lunar so pena de perder capítulos importantes. Más aún, las conexiones con la geofísica no están limitadas a la selenología. En las próximas décadas la planetología, en general, buscará la ayuda de las ciencias geofísicas por la muy efectiva razón de que cada rama sustantiva de la geofísica tiene su análoga en planetología. Y así las universidades tendrán que reactualizar sus programas de estudios.

La Novela de Dos Planetas no termina con su nacimiento y primeros balbuceos o con sus postreros destinos, tal como se deduce de la historia de las mareas del sistema. Los dos planetas no son gemelos idénticos —muy por el contrario— y sus masas harto diferentes los han conducido a desarrollos muy distintos. Por esta razón el estudio de la Luna es algo más que una experiencia científica interesante. Arroja tanta luz en el estudio de la Tierra como el estudio de un idioma ayuda en el conocimiento profundo de otro. De aquí que nuestro objetivo principal debe consistir en el descubrimiento de los procesos capitales que formaron la Luna contemporánea y reflexionar en los resultados hasta donde ellos pueden iluminar el desarrollo de la Tierra. La búsqueda de este objetivo implica la adquisición de miles de datos precisos, tales como la rotación de la Luna, sus libraciones (los movimientos de balanceo de la cara lunar, vistos desde la Tierra), la determinación del ecuador lunar y la construcción de una red de coordenadas precisas, datos exactos de las dimensiones de la Luna, su masa, su densidad, la distribución de esta densidad y las mejores conclusiones teóricas de la composición lunar basadas en la variedad de datos recolectados. Y uno debe pensar en lo que ocurre a la superficie lunar, desprovista de algo que se parezca a la atmósfera terrestre, cuando conoce las radiaciones y las corrientes de partículas que cruzan las inmediaciones de la Luna. Este tema es, por supuesto, de particular interés para los astronautas.

Las capas exteriores de una atmósfera planetaria están ionizadas y deformarán las señales de una fuente radial lejana que se observe a través de ella. El límite superior de la atmósfera lunar ha sido determinado

mediante observaciones radioastronómicas de una brillante fuente de energía radial, la nebulosa del Cangrejo, en el momento de ser ocultada por la Luna. El límite superior es de  $10^{12}$  de la atmósfera terrestre. Esto representa un tan alto grado de vacío que en las partículas provenientes del espacio exterior no perduran los efectos aerodinámicos, ni pueden existir tales efectos en ninguna de las importantes radiaciones provenientes del Sol.

Se cree que esta situación no es de origen reciente. A causa de la pequeña masa lunar y el implacable bombardeo de la Luna por radiaciones solares y cósmicas debe haberse generado pronto en la historia de la Luna un estado de equilibrio que todavía persiste. Ocasionalmente algunos gases lunares pueden escaparse de su superficie tal como lo sugiere la reciente observación rusa a la que se aludió más arriba. Pero estas exhalaciones son de corta duración y los gases se diluirán rápidamente en el vacío ilimitado. Gases solares ionizados soplando la Tierra y la Luna como parte de un "viento solar" permanente, evidenciado



1. Región oriental del Mare Imbrium mostrando serranías, arroyuelos, así como cráteres formados por impactos recientes (no deformados) y cráteres producidos por impactos "fósiles", parcialmente sumergidos

por los raudos movimientos impartidos a las colas cometarias, puede esperarse que barran con los más pequeños residuos de una atmósfera lunar. Si la Luna tuviera un campo magnético poderoso atraparía tales partículas ionizadas y formaría un tenue "cinturón de Van Allen". Pero las medidas realizadas por el satélite ruso Lunik II indicaron que no existe un campo magnético lunar más intenso que 0.001 del campo terrestre, valor totalmente insuficiente para retener una nube de partículas cargadas y sometidas al viento solar. La superficie lunar está así expuesta a la furia incontenida de la totalidad del espectro de las radiaciones solares, así como a los rápidos protones y electrones solares expulsados de la corona y a los rayos cósmicos primarios. Además, una lluvia de partículas mínimas, cuyos tamaños van presumiblemente desde alrededor de 0.1 milímetro hasta el micrón o aun el submicrón, choca con la superficie lunar. En el espacio interplanetario estas partículas producen la Luz Zodiacal. Ellas son primordialmente de origen cometario, residuos de cometas evaporados y desintegrados que estaban constituidos originalmente por masas libres de nieve salpicadas de silicatos y granos metálicos. El bombardeo de estos granos ha formado la superficie lunar finamente picada tal como lo han revelado los estudios fotométricos de la Luna, cuya superficie parece estar formada por escoria.

Pero esto no es todo. El espacio comprendido entre los planetas terrestres está atravesado por millones de meteoritos que describen órbitas elípticas alrededor del Sol. Estos son fragmentos del anillo de asteroides, los cuales se subdividen gradualmente a causa de frecuentes colisiones. El peso total de los meteoritos que caen sobre la Tierra ha sido estimado en 200 toneladas por año, cuenta habida del desgaste producido por fricción con la atmósfera. Los tamaños de estos cuerpos varían desde masas comparables a montañas capaces de producir cráteres meteorícos de muchas millas de diámetro hasta fragmentos menores de medio kilogramo. A la Luna debe llegar una parte proporcional de estos impactos y verdaderamente la superficie lunar con sus decenas de miles de cráteres visibles de todos tamaños acusa la severidad del bombardeo soportado durante su larga historia.

La temperatura de la superficie lunar resulta del saldo de las radiaciones incidente y emergente. Al mediodía, cerca del centro del disco lunar, la temperatura alcanza un valor ligeramente superior a los 100°C, el punto de ebullición del agua. Durante la noche lunar de dos semanas, la temperatura superficial cae a valores tan bajos como -150°C. La superficie lunar tiene una aislación térmica extremadamente efectiva; está formada por una delgada capa de polvo compuesta de partículas microscópicas que tocándose apenas en las aristas están suspendidas en el vacío. La aislación es

mejor que la que puede proporcionar cualquier material terrestre. A causa de esta aislación el calor conducido de las capas más profundas de la corteza lunar que se mantienen a una temperatura media de unos -25°C no puede compensar la pérdida por radiación experimentada en la superficie.

En años recientes ha sido posible suplementar los datos térmicos por medidas en las frecuencias de las microondas. Las longitudes de onda cubren ahora una gama que va desde alrededor de un milímetro a unos 70 centímetros. Los resultados obtenidos han permitido encontrar que bajo la capa superficial de polvo fino, de unos 5 milímetros de espesor, se presenta una capa formada en parte por material meteorítico de algunos centímetros de grosor, bajo la cual se encuentra roca ordinaria. Existen, sin embargo, regiones excepcionales alrededor de Tycho y otros cráteres radiales que han sido recientemente investigados en los observatorios de Monte Wilson y Lowell. Estas regiones tienen una capa de polvo de unos 0.25 mm. Esta observación sugiere que los cráteres radiales en la Luna son de origen comparativamente reciente; el proceso de bombardeo por material cometario no ha tenido tiempo suficiente para formar una capa substancial de material pulverizado.

Ahora pueden discutirse los grandes rasgos visibles de la superficie lunar. Aquí será ventajoso contar con la ayuda de un atlas de fotografías lunares. Una primera impresión muestra dos clases de textura superficial, áreas oscuras o "mares" y alturas o "terrae".

Los mares aparecen esencialmente como campos de lava. En ninguna parte se presentan enteramente planos o nivelados, mostrando en cambio un modelo complejo que asemeja torrentes de lava, colinas bajas, grietas generadas por la tensión o arroyuelos, fallas (líneas de fractura a lo largo de las cuales un lado se ha deslizado hacia un nivel más bajo), presas (fajas deprimidas limitadas por dos grietas aproximadamente paralelas), volcanes extinguidos, "calderas" y numerosos otros detalles reminiscentes de campos de lava terrestre. Una región típica la constituye el lado oriental del Mare Imbrium.

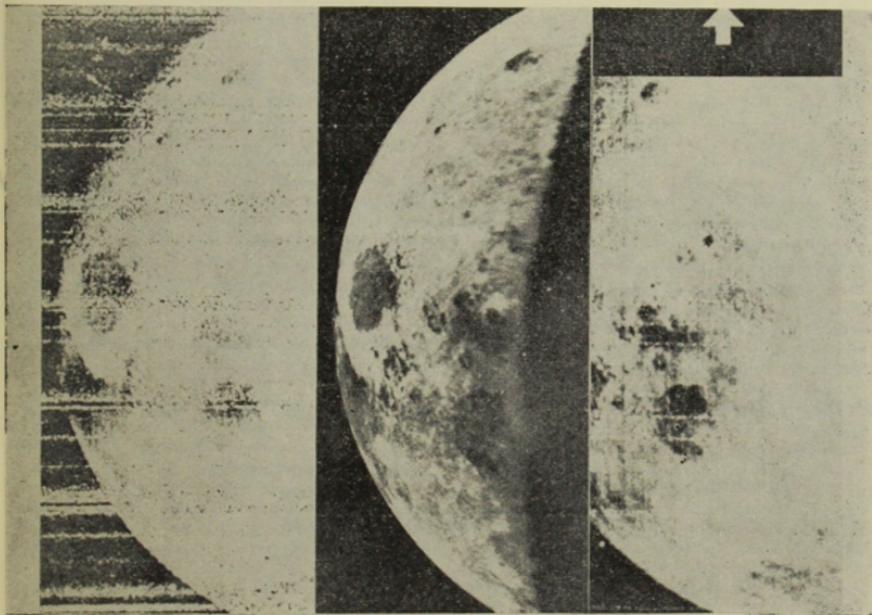
Las áreas más brillantes o "terrae" están usualmente en un nivel más elevado y por este motivo a menudo se designan como "tierras altas". No deben confundirse con los continentes terrestres cuya composición es distinta de la que constituye las hoyas oceánicas de la Tierra y las cortezas que están bajo ellas y que pueden considerarse como planchas livianas flotando isotáticamente en la corteza terrestre. Las "terrae" lunares son de dos clases: 1) áreas que tienen una apariencia muy desordenada y que están cubiertas por masas de material eyectado y que se habría originado en centros de explosión próximos y 2) áreas que consistirían básicamente de una vieja corteza lunar

modificadas posteriormente por impactos (que formaron cráteres muy variados) pero que todavía muestran, entre cráteres, su carácter original. Estas áreas son probablemente las más viejas del sistema solar, accesibles a la observación y a la experimentación y deberían mirarse con respeto y expectación por la información que ellas contienen.

Las teorías actuales acerca del origen de los mares lunares, los cráteres, los arroyuelos, colinas, fallas, presas, volcanes, calderas y cicatrices están lejos de poder ser consideradas como finales. Esto no debe sorprendernos ya que discusiones geofísicas acerca del origen de los sistemas de montañas o continentes de la Tierra muestran que, a pesar de toda la información disponible para el geólogo y el geofísico, muchas cuestiones básicas estructurales siguen sin respuesta. En realidad, muchos de los problemas estructurales de la Luna pueden resultar más simples que los confronta-

dos por los geofísicos, porque muchísimas de las complicaciones geofísicas no están presentes en la Luna.

La superficie lunar muestra fenómenos que probablemente existieron en la Tierra en épocas pretéritas pero que hace tiempo fueron obliteradas por fusión, superposición de corrientes de lava, erosión y formación de continentes enteros. ¿Por qué tendría que ser la Luna tan diferente de la Tierra? ¿Se trata solamente de una cuestión de masa? Esta parece ser en realidad la diferencia principal; posiblemente la Luna no habría podido retener océanos o una atmósfera y su menor capacidad gravitacional la habría conducido a un menor calor y diferenciación internos. Pero las variadas densidades medias acusan también una composición diferente, cuyo origen nos deja perplejos. El cuadro general de la evolución lunar, tal como aparece al autor, es éste: La Luna se habría formado, más o menos simultáneamente con la Tierra y los otros



Comparación entre dos fotos obtenidas en el Lunik III con una cámara de 50 cm. de distancia focal con una fotografía lunar re proyectada, obtenida desde la Tierra. La región mostrada entre el Mar de las Crisis (cerca del limbo izquierdo), el Mar de la Fecundidad (debajo), el Mar Smythii (a la derecha del Mar de la Fecundidad) y el Mare Marginis (arriba del Mare Smythii)

planetas del sistema solar, hace unos 4.8 mil millones de años, a una distancia de la Tierra entre el 5 y el 10 por ciento de su valor presente. La Luna se formó por el acrecentamiento de partículas relativamente pequeñas que dejaron muy pocos o tal vez ningún cráter visible. Gradualmente, por la radiactividad del material acumulado la Luna se calentó a tal punto que un proceso de fusión se generalizó en su interior. Esto condujo a una diferenciación gradual con una cierta cantidad de materiales ferrosos, tal vez de un 5 a un 10 por ciento de la masa total, acumulándose en las inmediaciones del centro. Y habiendo avanzado la solidificación desde el centro hacia afuera, similarmente a lo que habría ocurrido con la corteza terrestre y por las mismas razones. El período de fusión máxima habría ocurrido aproximadamente hace 4.5 o 4.6 miles de millones de años, lapso que en última instancia está basado en los estudios comparativos de los meteoritos (y por consiguiente de los asteroides). Entretanto las fricciones ocasionadas en la Tierra por las mareas aumentaron la distancia Tierra-Luna. El valor inicial de este roce debe haber sido extremadamente grande a causa de la proximidad de la Luna. Puede que los océanos no existieran durante estos primeros pocos centenares de millones de años de vida de nuestro planeta. Hay signos de evidencia que indican esto, porque si los océanos hubieran estado presentes la fricción habría sido tan grande que la distancia de nuestro satélite habría crecido muy rápidamente, tan rápidamente que la Luna no habría tenido tiempo para acumular energía térmica, fundirse, solidificarse y ponerse rígida, todo esto dentro del 39 por ciento de la distancia límite a que nos referimos antes.

Exterior a la órbita lunar primitiva se formó un anillo de pequeñas condensaciones (similar al anillo de asteroides comprendidos entre Marte y Júpiter) que giraban en torno a la Tierra. La Luna proyectándose en espiral hacia el exterior, a través de este anillo, virtualmente, capturó por colisión a todos estos cuerpos. Este bombardeo fue responsable de la rápida acumulación de numerosísimos cráteres, algunos previos a la formación de los "mares" y otros posteriores. Estos mares (que esencialmente son cráteres creados por impactos gigantes) se formaron durante este período de bombardeo intenso, más bien hacia su fase final. Esto fluye del hecho de que el número de grandes cráteres posteriores es pequeño comparado con el de los previos; la evidencia de esta conclusión deriva de la comparación entre "mares" y "terrae". Sin duda, el período de bombardeo pesado duró sólo una breve fracción de la vida lunar, tal vez uno o dos cientos de millones de años. La estadística de los cráteres de los mares muestra que los 4.5 miles de millones de años transcurridos desde que ocurrió este bombardeo pesado han sido comparativamente tranquilos. La mayoría de

los cráteres producidos durante este período quieto son pequeños, de unos 2 kilómetros o menos de diámetro y su abundancia es compatible con la velocidad de formación de cráteres similares en nuestro planeta. Estos cráteres son debidos a meteoritos y pequeños asteroides.

Los mares son en realidad de dos clases, aquellos que se asemejan a los cráteres producidos por los más grandes impactos, salvo que son todavía de dimensiones mayores, y que se supone que han sido formados también por impactos y aquellos que se presentan como si hubieran sido generados por inundaciones. El Mar Imbrium es el ejemplo clásico del primer grupo, con los imponentes anillos de montañas que circunscriben el mar y con muchos rasgos radiales asociados a él, todo lo cual admite explicación en términos de un singular impacto masivo. Los mares de la Crisis, de la Serenidad, de los Néctares y de los Humores se presentan como otros ejemplos producidos por impactos. Ejemplos de mares causados por inundaciones son el Nubium, el de la Tranquilidad y el Océano Procellarum. El Mar Frigorius parece haber sido formado como una estructura periférica generada por el impacto del Imbrium. Se estima que la formación de los mares ocurrió coincidiendo aproximadamente con el período de licuación máxima. Los cráteres con grandes rayos, tales como Tycho, Copérnico y Aristarco, habrían sido formados por tardíos impactos posteriores a la aparición de los mares, muy probablemente originados no por los residuos del anillo satelitario en torno a la Tierra sino por cuerpos de pequeños planetas, tales como los que han formado grandes cráteres meteoríticos en nuestro planeta; los rayos de los cráteres parecen haber sido causados por chorros de material finamente dividido (presumiblemente roca pulverizada) eyectados por las violentas explosiones que produjeron los cráteres mismos. Pruebas de ello pueden encontrarse en las muelas y los cráteres poco profundos que estas masas blanquizcas han hecho al posarse en la superficie lunar.

Desplegadas contra este telón de fondo de "ciencia lunar" volvamos de nuevo a las dos demandas rusas. Una comparación entre un segmento de la fotografía soviética, una porción del lado visible de la Luna, y una observación de la misma área hecha con un telescopio ubicado en la superficie terrestre y reproyectada para simular la dirección de observación utilizada por el instrumento embarcado en el cohete ruso y que ostentan cuatro áreas oscuras que son los mares de la Crisis, de la Fecundidad, Smythii y Marginis, muestra, salvo pequeñas diferencias de proyección, una correspondencia notablemente buena. Si esta comparación es válida, parece claro que obtener fotografías desde un cohete y retransmitirlas es tarea que ha sido realizada con resultados verdaderamente ex-

traordinarios. El grupo de Moscú, encabezado por el Profesor Lipskii, que estudió las fotografías desde el cohete, contó unos 250 rasgos conspicuos en la espalda de la Luna como razonablemente aceptables y un número similar de rasgos clasificados como probables o dudosos. Evaluaciones independientes de estos gráficos se están haciendo en los observatorios de Pulkovo y Kiev. La fotografía de la espalda de la Luna por el Lunik III es una extraordinaria realización técnica. Este autor ha inspeccionado los espectrogramas originales de las observaciones de la erupción en el cráter Alphonsus y no le ha cabido duda alguna de la presencia de la característica espectral descubierta; pero recibe con considerable incertidumbre su significado atribuido al  $C_2$ . Parece probable que la erupción consistiera en gases fríos que se hicieron luminiscentes bajo la influencia de radiaciones originadas por partículas y la luz ultravioleta solar. Esta singular observación sugiere la conveniencia de realizar un reconocimiento

especial de patrullaje dirigido hacia la determinación de la frecuencia de tales erupciones. La erupción no prueba que el interior de la Luna esté caliente o fundido; más bien probaría la existencia de bolsillos radiactivos que todavía estarían activos, produciendo una vaga semejanza de volcanismo, en forma de fumarolas.

Con el advenimiento de cohetes poderosos esta generación tiene la oportunidad y la responsabilidad de dar los primeros pasos capitales en el desciframiento de los rasgos estampados en la superficie de la Luna durante todo el lapso de vida del sistema planetario y con ello investigar la historia remota pretérita de la Tierra.

\*Publicado en THE GRADUATE JOURNAL, Volumen IV, N° 2, 1961, órgano del Decano de la Escuela de Graduados de la Universidad de Texas, Dr. W. Gordon Whaley, (Traducido y publicado en nuestro BOLETIN con la gentil autorización del autor y del editor).

## noticias universitarias del interior

### *Nuevo Rector de la Universidad Austral*

Sucesor del Dr. Eduardo Morales, en la rectoría de la Universidad Austral de Valdivia, ha sido designado el catedrático de la Facultad de Filosofía y Educación de la Universidad de Chile, prof. Félix Martínez Bonatti. La elección del nuevo Rector se efectuó en Valdivia, durante la reunión citada para el efecto por el Claustro Pleno de la mencionada Universidad.

### *La Universidad Técnica en Punta Arenas*

La Universidad Técnica del Estado inició los estudios para la construcción en Punta Arenas de edificios para instalar las escuelas que mantiene desde 1961 en esa ciudad. Los terrenos han sido donados por la Municipalidad y comprenden unos 10 mil metros cuadrados; la inversión será de unos 500 mil escudos, según cálculos estimativos realizados para la primera etapa de edificación con 4 mil metros cuadrados.

(Sigue en la página 27)