

EL SISTEMA SOLAR EN LA CONSIDERACION DE LOS MAS ACTUALES DESCUBRIMIENTOS CIENTIFICOS

por el prof. ALASTAIR G. W. CAMERON¹

De la Universidad de Saskatchewan, Canadá

¹Ph. D. de la Universidad de Saskatchewan (Canadá) en 1952, el prof. Cameron ha trabajado sucesivamente en la Universidad del Estado de Iowa, en el Instituto de Energía Atómica de Canadá, en el Instituto de Estudios Espaciales de la NASA, y en la Universidad de Yeshiva, donde actualmente ejerce las funciones de profesor de física espacial. Sus trabajos tratan acerca de las propiedades nucleares sistemáticas, la astrofísica nuclear, la evolución estelar y la evolución del sistema solar. El presente artículo es una traducción especial para el *Boletín*, de la revista *Atomes*.

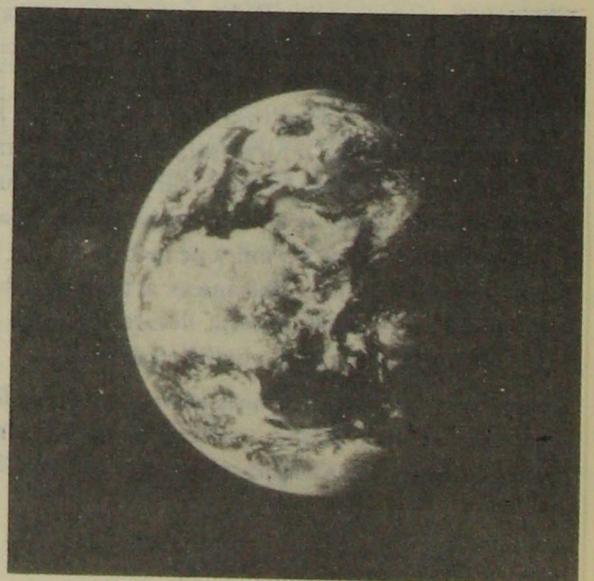
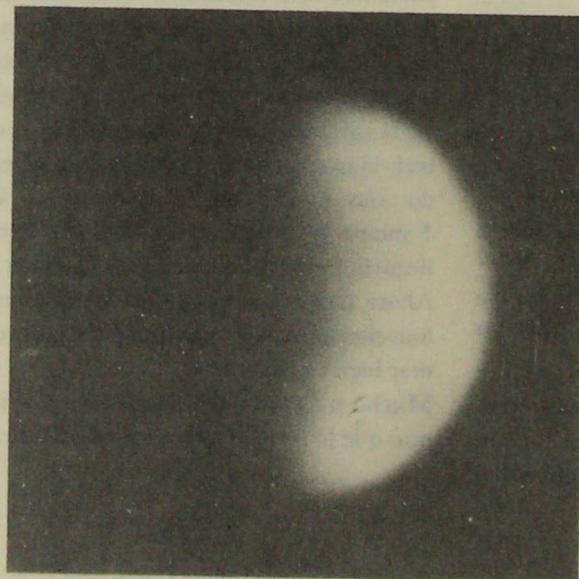
Una de las particularidades del sistema solar que mayor impresión causa es el orden en gran escala que rige su organización interna. Los planetas describen alrededor del sol órbitas casi circulares y la mayor parte de los satélites actúan de igual manera en torno a sus planetas madres.

Los planetas giran alrededor del sol todos en un mismo sentido, y para la mayor parte de ellos la rotación alrededor de su eje se ejecuta en el mismo sentido que su movimiento orbital. Las revoluciones de los satélites alrededor de sus planetas madres, así como las rotaciones de esos satélites mismos, comparten en su mayoría un mismo sentido de movimiento. El físico posee un término para designar este movimiento de rotación. Define el *momento angular* de todo movimiento de rotación como el producto de la velocidad de rotación y la distancia que separa el objeto rotante de su eje de rota-

ción. Caracteriza un tal momento angular por un vector perpendicular a la vez al movimiento de rotación y a la recta que acerca el objeto a su eje de rotación, y le llama vector de momento angular. Es posible resumir todas las comprobaciones precedentes relativas al sentido del movimiento diciendo que, en el sistema solar, todos los vectores de momento angular tienden a estar alineados en la misma dirección.

El vector de momento angular del sol está también alineado con los otros vectores de momento angular que acaban de ser mencionados. Sin embargo, la velocidad de rotación del sol ha parecido anormalmente lenta durante largo tiempo. Por más de tres siglos, los hombres han emitido hipótesis en cuanto al origen del sistema solar, y entre las teorías adelantadas para explicar este origen, comprendidas allí las que están en boga actualmente, hay la idea de que el sol y los planetas se han formado a partir de un disco de gas en rotación. Se supone que el sentido de rotación de ese disco era el mismo que el de las rotaciones y las revoluciones de los planetas actuales. Y resulta como una consecuencia natural de lo anterior el hecho de que no solamente el vector de momento angular del sol deba estar alineado con los otros vectores de momento angular del sistema solar, sino que también deba éste girar

Figuras 1 y 2. Planetas del sistema solar: de izquierda a derecha, Venus, Tierra, Júpiter y Saturno (clichés del Observatorio de Pic du Midi y USIS)



más rápido, con un período de rotación de algunas horas, más bien que con el de alrededor de un mes.

Esta velocidad anormalmente lenta del sol ha sido considerada como la piedra de toque de toda teoría de la formación del sistema solar. En efecto, parece ahora que esta lenta rotación no está probablemente en relación con la formación del sistema solar mismo, ni con los mecanismos invocados más arriba, sino que se trata más bien de una consecuencia natural de la eyección continua del sol de gases ionizados que se expanden en el espacio y constituyen lo que se conoce como *viento solar*. El profesor Evry Schatzman, del Instituto de Astrofísica de París, ha demostrado que el campo magnético extraído del sol por el viento solar debe ejercer una pareja de fuerzas que debió haber hecho gradualmente más lento su movimiento al comienzo de su historia y durante cuatro mil quinientos millones de años. Por eso podemos considerar esta lenta rotación del sol como un vestigio de una rotación mucho más rápida que era la que le animaba cuando era mucho más joven.

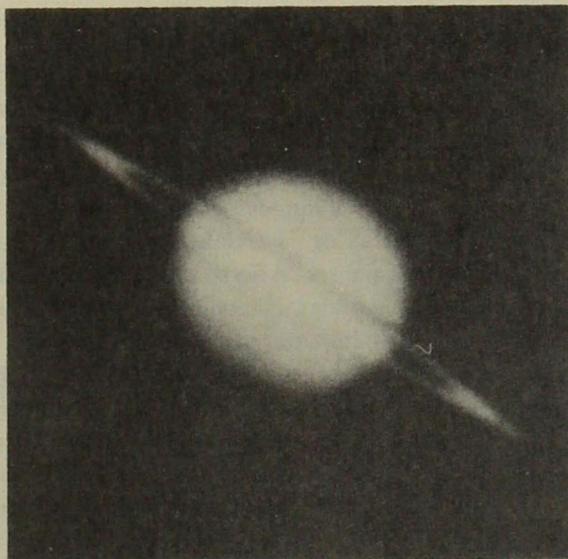
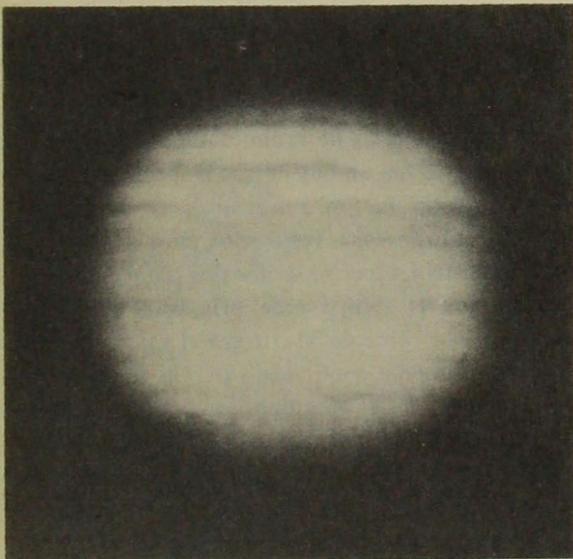
Júpiter, planeta gigante, sol pequeño

Probablemente los más espectaculares objetos planetarios del sistema solar sean los planetas gigantes, en particular Júpiter y Saturno. Estos cuerpos no son sólo los más masivos y más brillantes durante la noche, sino que también poseen amplios sistemas de satélites propios. Existe, en efecto, una impresionante similitud entre la repartición general de los satélites en sus órbitas alrededor de los planetas gigantes, y la repartición de los planetas y sus respectivas órbitas alrededor del sol. En cada caso existe un aumento regular del espaciamiento de las órbitas, relación de tipo general denominada a menudo como *Ley de Bode*.

Esta similitud de estructura se acompaña de una similitud de composición.

En el sol, la mayor parte de la masa está formada por hidrógeno y, en segundo lugar, por helio. La composición de Júpiter se nos aparece sobremanera semejante a la del sol, al estar constituida alrededor de las tres cuartas partes de la masa de éste por helio, y al no contener sino un relativo porcentaje de elementos más pesados. Los análisis cuantitativos no son todavía lo suficientemente precisos como para permitir la determinación de la proporción de los elementos más pesados que, en el caso de Júpiter, se agregan a los constituyentes principales, pero es posible que elementos tales como el carbono, contenido en las moléculas de metano que contribuyen a formar el espectro de los planetas, pudieran encontrarse allí en una proporción cercana a la que en el sol mantienen éstos en relación con el hidrógeno. La mayor parte de los otros elementos están sin duda condensados en compuestos más pesados que no aparecen en las capas de superficie de Júpiter y de Saturno, de modo que no estamos en condiciones de tener una idea respecto de su abundancia. No obstante, es razonable, dado el estado actual de nuestros conocimientos sobre Júpiter, postular que este planeta se condensó a partir de los mismos materiales que el sol, y lo hizo más o menos en las mismas proporciones.

La situación no parece tan clara en el caso de Saturno. Los modelos construidos para representar el interior de este planeta parecen requerir una proporción de helio más grande respecto del hidrógeno que en el caso de Júpiter o del sol. Esta situación es aun más marcada en el caso de Urano o de Neptuno, algunos de los planetas gigantes "más pequeños" que se encuentran entre Júpiter y Saturno. Estos planetas tienen una densidad media suficientemente elevada como para que se pueda suponer razonablemente que una mayor proporción de su masa está formada por elementos comunes como el carbono, el nitrógeno y el oxígeno que la que re-



queriría la simple composición solar. Estos elementos estarían presentes bajo la forma de metano, amoníaco y agua. Si estos planetas un poco menos gigantes se han formado a partir de la misma reserva de gas que el sol, el proceso entonces debió haber sido un poco más selectivo y debió favorecer a las moléculas más pesadas respecto de las ligeras.

Esta selectividad ha jugado un papel manifiestamente más importante en la formación de los planetas interiores, Mercurio, Venus, la Tierra y Marte, así como también en la formación del satélite gigante de la Tierra: la luna. Sabemos que la Tierra se compone esencialmente de fierro en estado libre en su núcleo y de silicatos y magnesio en la capa rocosa que rodea ese núcleo. Entre los elementos no volátiles, son éstos los más abundantes en la naturaleza. Por eso no es sorprendente que sean ellos los materiales fundamentales de los que está hecho un planeta como la Tierra, materiales entre los que los gases más volátiles han sido ampliamente excluidos.

Parece ser que el fierro y los silicatos son los principales componentes de otros planetas del tipo terrestre. Venus es muy parecido a la Tierra por su masa y por su radio, y luego, por su densidad media, y nos asisten todas las razones para creer que en gran medida es Venus un planeta hermano de la Tierra. Marte es un poco menos denso que la Tierra, pero se trata de un cuerpo más pequeño que no posee más que aproximadamente un décimo de la masa de la Tierra. Por eso la presión en su centro es mucho más débil, insuficiente para comprimir los minerales silicados en formas más densas, de alta presión. Los análisis detallados de la estructura de Marte indican igualmente que este planeta contiene un poco menos de fierro libre por unidad de masa que la Tierra.

Por otra parte, Mercurio y la Luna parecen representar casos extremos de composición, interesantes en relación a los ejemplos precedentes. Mercurio es aun menos masivo que Marte, pero su densidad media se acerca más bien a la de la Tierra, a pesar del hecho de que su presión interna debe ser relativamente baja. Se puede deducir de ello que, por lo esencial de su constitución, Mercurio contiene más fierro y menos silicatos que la Tierra. La Luna es de constitución menos densa que Marte y aun menos que los meteoritos pétreos. La interpretación más simple de esta característica estriba en que la Luna contiene por unidad de masa menos fierro libre que la Tierra o que Marte, y que se acerca mucho más a un cuerpo formado casi completamente por silicatos. En el hecho, los recientes análisis químicos de tres puntos de la superficie lunar, realizados gracias a las sondas estadounidenses Surveyor, han demostrado que las muestras de materiales recogidos de la superficie de la Luna eran pobres en fierro libre. Demostraron igualmente que los materiales componentes de la Luna debieron haber sufrido una importante diferenciación química como resultado de algún proceso de fusión a alta temperatura. Resulta así que la superficie de la Luna es pobre en fierro, y que en su conjunto lo es también en forma relativa.

Uno de los dominios más fascinantes del estudio de los planetas interiores, del cual hemos aprendido mucho gracias a los re-

cientes sondeos espaciales, es el de la estructura de las atmósferas planetarias. Sabemos desde hace mucho que la atmósfera de la Tierra, lo mismo que los océanos, han sido productos de un proceso general de desgasificación del interior del planeta. Los principales constituyentes de la atmósfera de la Tierra, nitrógeno y oxígeno, son mucho más abundantes que los gases raros tales como el neón, argón, kriptón, xenón. El nitrógeno y el oxígeno pueden formar compuestos químicos fácilmente ligados a los materiales rocosos que probablemente se han unido en el espacio para formar la Tierra. Pero los gases raros no están necesariamente ligados a estos materiales, por lo que han debido ser absorbidos por ellos sólo en muy pequeñas cantidades al unirse para formar la Tierra. Es posible, además, que en una cierta época la atmósfera terrestre haya podido contener una gran cantidad de carbono bajo la forma de gas carbónico. Durante un largo período de tiempo, y en presencia de agua, el gas carbónico se combinó con óxidos metálicos como el óxido de calcio, para formar los carbonatos que constituyen una parte de las rocas de nuestro planeta. Una de las particularidades interesantes de los recientes programas de exploración espacial ha sido la de investigar si en los otros planetas tuvieron lugar procesos similares.

No es del todo evidente que las atmósferas planetarias se hayan formado siempre por desgasificación del interior de los planetas. Si, como hemos sugerido más arriba, se formó un disco gigante de gas durante la historia primitiva del sistema solar, precediendo a la existencia del sol y de los planetas, se puede esperar de ello que el crecimiento de los planetas a partir de materiales químicamente condensados de ese disco haya dado como resultado el capturar de allí el gas necesario para formar las atmósferas de los planetas. Tales atmósferas deberían contener gases raros en cantidades muchas veces superiores a las que contiene la atmósfera de la Tierra. De igual modo, tales atmósferas deberían haber contenido, en el origen, muy grandes cantidades de hidrógeno y de helio, principales componentes del disco gaseoso primitivo.

Venus y Marte, dos destinos diferentes

Las sondas espaciales Mariner IV y Mariner V enviadas hacia Marte y Venus, fueron equipadas con vista a experiencias de ocultación de las ondas de radio. Cuando estas naves desaparecieron detrás de los limbos de sus respectivos planetas, las ondas de radio fueron refractadas en la atmósfera, y fue posible utilizar estos resultados para analizar la estructura de la atmósfera superior de los dos planetas. Estos análisis indicaron que el componente primario de las atmósferas tanto de Venus como de Marte era el gas carbónico. Este hecho fue directamente confirmado por la sonda espacial Venera IV, que lanzó un aparataje en la atmósfera venusiana y que descendió a través de ella suspendido de un paracaídas, lo cual permitió determinar que lo más amplio de la atmósfera de Venus estaba compuesto por gas carbónico, asociado a pequeñas cantidades de vapor de agua.

Estos resultados están en pleno acuerdo con un origen de las atmósferas planetarias por desprendimiento gaseoso. En el caso de Venus, puede esperarse de igual modo, en este sentido, que de este mismo modo se desprendieran las mayores cantidades de agua. La atmósfera de Venus es muy masiva, alcanza una presión de hasta 100 atmósferas en su base. La atmósfera de la Tierra sería igualmente masiva si todo el gas carbónico contenido en las rocas carbonatadas fuera inyectado en ella. Hasta aquí ambos planetas son parecidos, pero la Tierra posee en sus océanos una enorme cantidad de agua, mientras que Venus no tiene sino huellas de agua en su atmósfera. ¿A qué se debe una diferencia tal? La respuesta a esta cuestión puede encontrarse en el resultado de otra experiencia llevada a cabo a bordo de la nave espacial Mariner v, que pasó muy cerca de Venus. Se trató de una experiencia con la radiación ultravioleta, destinada a medir la cantidad de luz solar difundida por el hidrógeno en la alta atmósfera. Pero esta experiencia provocó sorpresa en cuanto pareció indicar que en la atmósfera de Venus había mucho más deuterio, isótopo pesado de hidrógeno, que hidrógeno solo.

El predominio del deuterio en la alta atmósfera de Venus, se debe sin lugar a dudas a que el hidrógeno, que es la mitad más liviano, se escapa de ella muy rápidamente. Si tal es el caso, no hay necesidad de que el deuterio sea tanto o más superabundante en relación con el hidrógeno en las capas profundas de Venus de lo que lo es en las capas superiores, pero en cambio es muy probable que la relación del deuterio con el hidrógeno sea cientos de miles de veces mayor en la atmósfera de Venus que en los océanos de la Tierra. Esto concuerda con la idea de que Venus haya desprendido de su masa planetaria el equivalente de un océano terrestre y que lo haya perdido a raíz de una combinación de procesos.

Esos procesos deben implicar la desintegración de las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno por absorción de la luz ultravioleta del sol. El hidrógeno tiende entonces a escaparse de la atmósfera y el oxígeno a ser extraído de ella por reacciones químicas con la superficie del planeta. Los tipos de reacción más probables consisten en la oxidación del hierro libre en las rocas de la superficie del planeta. Pero en este caso, para que estos procesos de oxidación absorban una cantidad de oxígeno como la que puede contener un océano terrestre, es preciso que las capas superficiales de Venus hayan sido revertidas muchas veces a fin de exponer una cantidad suficiente de hierro libre a la atmósfera para extraer de ella aquellas cantidades de oxígeno necesariamente grandes.

Si estas conclusiones son correctas, es probable que la Tierra y Venus sean verdaderos planetas hermanos, en cuanto a que su composición original y su tamaño resultan similares, aunque las evoluciones de las respectivas atmósferas han seguido vías muy diferentes en cada caso, quizás a causa de la distancia menor entre Venus y el Sol. En el caso de Venus, la atmósfera se mantuvo en una temperatura elevada, y el equivalente de un océano terrestre le fue quitado a la atmósfera, en parte por el espacio y en parte por las reacciones químicas de sus componentes con las rocas. En el caso de la Tierra, por el contrario, la atmósfera se enfrió, el gas carbónico de ella fue extraído de las reacciones químicas con las rocas y todavía el agua recubre la mayor parte del planeta.

La atmósfera marciana, constituida por una gran parte de gas carbónico, fue formada sin lugar a dudas por procesos de desgasificación. Sin embargo, la masa total desprendida para formar la atmósfera de Marte representa una fracción mucho más pequeña de la masa total del planeta que en el caso de Venus o de la Tierra. Las experiencias de ocultación

Figura 3. Nuevos universos se abren al estudio del sistema solar gracias al progreso de la ciencia y de la técnica espaciales. En el grabado, el Mar de la Tranquilidad, tal como apareció ante los astronautas estadounidenses instantes después del alunizaje de julio de 1969. (Foto USIS)



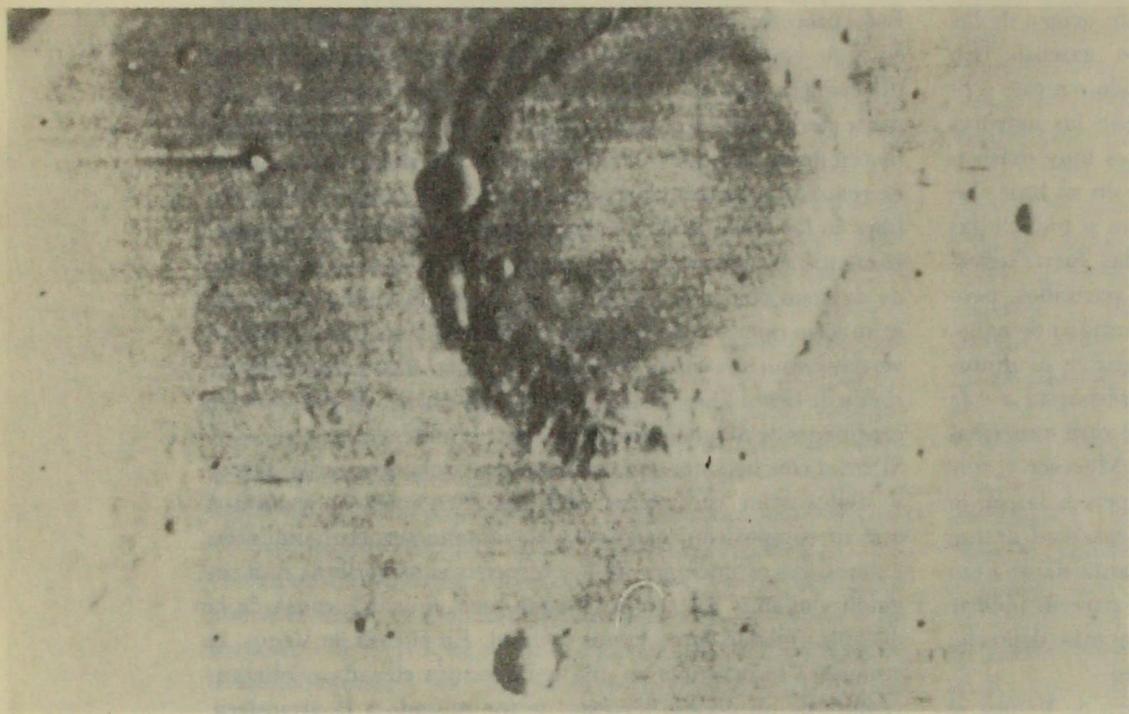


Fig. 4. Desde 1965 se sabe que la superficie de Marte se parece mucho a la de la Luna. Conocimientos aún más numerosos y detallados sobre la topografía de este planeta y sobre la composición de su atmósfera se han obtenido gracias a las recientes misiones Mariner 6 y 7. En la foto aparece un cráter de 38 Km. de diámetro que presenta muchas analogías con algunos cráteres lunares (Foto U.S.S.R.)

del Mariner IV han demostrado que la estructura de la atmósfera superior de Marte manifiesta una temperatura suficientemente baja como para que actualmente no exista allí ninguna evaporación térmica apreciable de gases atmosféricos. Por eso resulta verosímil el hecho de que la mayoría del gas que haya podido reunirse en el interior de Marte en la época de su formación esté encerrado ahí todavía y no haya podido ser llevado a la superficie. Lo cual podría sugerir que Marte tenga muy poca actividad volcánica. ¿Existe una observación tendiente a confirmar este hecho?

El principal resultado científico de la misión de Mariner IV hacia Marte apareció en las fotografías de la superficie del planeta que fueron transmitidas a la Tierra. Ellas muestran que la superficie de Marte está cubierta de un gran número de cráteres, que la hacen muy semejante a la superficie de la Luna. A la vista de ellos, se han hecho muchas estimaciones respecto del espacio de duración por el cual la superficie de Marte ha permanecido imperturbable. Cráteres tales como aquellos serían rápidamente borrados por los procesos geológicos de erosión que se producen en la superficie de la Tierra. Parece que durante por lo menos unos dos mil millones de años, y sin duda muchos más, la superficie de Marte ha sido poco perturbada, ya sea por erosión, por actividad orogénica o por otros procesos de alteración de la superficie. Lo que está en perfecto acuerdo con la ausencia de actividad volcánica en cantidad apreciable sobre ese planeta, con la gran estabilidad de su superficie y con la ausencia de actividad de desgasificación en gran escala.

Estrella y planetas nacidos por desintegración de nubes
Las diversas conclusiones que acaban de ser expuestas forman un conjunto de condiciones en las que se debe tener en

cuenta toda la teoría del origen del sistema solar, conjunto de condiciones más generales que el de aquellas de las cuales disponían los teóricos durante los tres últimos siglos. Pero estas condiciones no se refieren sino al sistema solar mismo. Otras condiciones más surgen de nuestras continuas investigaciones acerca de las propiedades de las estrellas y del medio gaseoso que se halla entre ellas. En ciertas regiones del espacio, como la nebulosa de Orión, puede observarse en la actualidad la formación de estrellas, donde se cuenta además con numerosas estrellas jóvenes formadas durante los últimos millones de años. Al mismo tiempo, los fechados radiactivos han demostrado que el sistema solar no es mayor de cuatro mil quinientos millones de años, pero los estudios de la evolución solar han manifestado que la galaxia en la cual este sistema se encuentra es, sin lugar a dudas, dos veces más antigua que éste. Como la mayor parte de las estrellas debieron haberse formado tempranamente en la vida de la galaxia, se concluye de ello que las condiciones en el espacio interestelar en la época de la formación del sistema solar no deben ser radicalmente diferentes de las de hoy día. Por consecuencia lógica, es de consideración el hecho de que las condiciones que observamos en las regiones donde actualmente se forman estrellas, sean del mismo tipo que los que prevalecían en el momento de la formación del sistema solar.

El gas y el polvo del espacio interestelar no poseen una distribución y una densidad muy uniforme. Esta materia se agrupa en unidades discretas que llamaremos nubes. Estas nubes tienen gran diversidad de tamaños y de densidades, pero una nube típica puede tener una masa de alrededor de un millar de veces la del Sol y una densidad de unos diez átomos por centímetro cúbico, lo que es alrededor de diez veces la densi-



Figura 5. Tanto estrellas como sistemas planetarios pueden nacer en las regiones H_{11} que rodean a las estrellas excitadoras. Los frentes de ionización (no confundir con el halo), verdaderas ondas de choque interestelares, son perfectamente distinguibles en el límite de las nubes de materia interestelar absorbente, cuya naturaleza aún es un misterio.

dad del gas interestelar. Entre estas nubes la densidad no es probablemente más que un céntimo de la densidad de las nubes mismas, pero la temperatura del gas debe ser alrededor de cien veces más grande que la de las nubes, así, se establece un equilibrio aproximativo de presiones entre el interior y el exterior de las nubes.

Al parecer, la formación de estrellas debe comenzar por la expansión gravitacional de una de estas nubes interestelares, lo que debe producirse muy a menudo porque, en una nube ordinaria, las fuerzas de compresión gravitacional son muy débiles respecto de las fuerzas de expansión asociadas al calor interno. Para que las fuerzas compresivas gravitacionales

puedan sobrepasar las fuerzas de expansión térmicas, la densidad de una nube interestelar típica debe alcanzar por lo menos cien veces el valor corriente. Aunque raramente, esto debe producirse de tiempo en tiempo, puesto que se observan algunas nubes cuya densidad de gas alcanza a varias decenas de átomos por centímetro cúbico. Una vez que una de estas nubes comienza a expandirse, el proceso de condensación y de formación de estrellas no tomará sino dos o tres millones de años. De hecho, las nubes no continúan contrayéndose en tanto que unidades simples. Tienen poca tendencia a ser perfectamente esféricas en su origen, como también a tener una distribución de densidad perfectamente regular

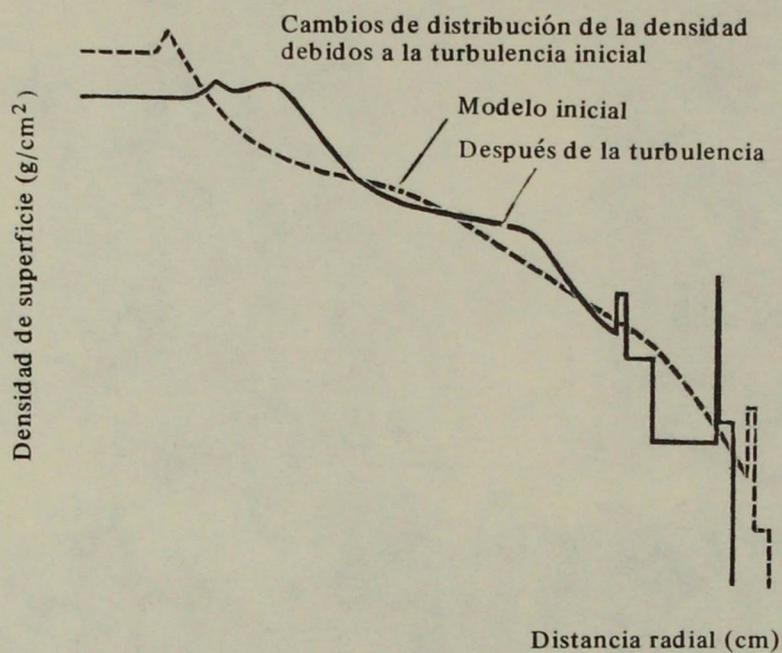


Figura 6. Cambios de distribución de la densidad debidos a la turbulencia inicial

desde el inicio de su contracción. Por consecuencia, durante la duración de la expansión, porciones individuales de nube pueden comenzar a expandirse independientemente las unas de las otras, según un proceso llamado fragmentación. Un fragmento puede a su vez dividirse en fragmentos aun más pequeños, en tanto la fragmentación sigue su curso. Finalmente, la nube puede subdividirse en fragmentos cuya masa difiere poco de la del Sol.

Consideremos la historia de uno de estos fragmentos. Cuando formaba parte de la nube original, giraba muy lentamente sobre sí mismo, quizá sólo una vez por cada revolución de la nube alrededor del centro galáctico. Sin embargo, al condensarse, el fragmento conserva su momento angular. En ello reside la comprobación de una ley fundamental de la física. Recordemos que el momento angular es el producto de la velocidad de rotación por la distancia en el punto alrededor del cual esta rotación se efectúa. Como el fragmento se estrecha, la distancia al centro de rotación decrece continuamente, lo que implica un aumento continuo de la velocidad de rotación de la materia en dicho fragmento.

Simples consideraciones de este tipo nos permiten afirmar que un fragmento no puede expandirse indefinidamente hasta el tamaño de una estrella, sino que debe aplanarse en un disco giratorio de dimensiones mayores, dimensiones comparables a las del sistema solar.

La formación del sistema solar

Recientemente he realizado un estudio acerca de los referidos discos en rotación. La distribución de densidad de uno de los modelos estudiados se muestra en la figura 6. En ella, la línea de guiones muestra la distribución de densidad que tendría el disco inmediatamente después de haberse expandido a partir del espacio. Pero este disco formado nuevamente, posee una gran turbulencia interna debida a la tenden-

cia de los gases en condensación a romper su posición de equilibrio. Esta turbulencia no puede durar mucho, pero en tanto que actúa, puede producir en el interior del disco una determinada redistribución del momento angular que tiende a concentrarse en parte hacia la periferia. La distribución de densidad del disco al final de esta fase turbulenta está indicada en la figura 6 con una línea continua.

Se puede observar que al nivel del eje de rotación central del disco se produce una gran concentración de masa. Este se adelgaza hacia el exterior, pero sus partes exteriores tienen tendencia a dividirse en anillos finos. Un anillo de estos se pone en evidencia en la distribución inicial expresada por la línea de segmentos de la figura 6, y en la distribución final representada por la línea continua aparecen dos de estos anillos. Estos anillos no son sino indicaciones de lo que es sin duda la situación real, puesto que el método utilizado en los análisis resulta demasiado tosco como para indicar el número exacto de anillos que deberían existir.

El disco en rotación debe estar inicialmente compuesto de gases de muy alta temperatura por la liberación de energía gravitacional que acompaña a la formación del disco. En seguida, estos gases deben enfriarse por radiación a partir de las dos fases del disco. Una vez enfriados lo suficiente como para formar compuestos químicamente condensados, que comprenden fierro, silicatos, agua, amoníaco y gas carbónico, deben volverse opacos al infrarrojo, forma bajo la cual la mayor parte de las radiaciones tienden a escaparse. La turbulencia interna reaparece entonces con el fin de transportar calor hacia las superficies frías del disco de donde puede ser radiada hacia el exterior. Una tal turbulencia interna, o convección, desempeña un gran papel en el transporte del movimiento angular hacia las partes externas del disco. Al mismo tiempo debe aparecer una neta corriente de masa hacia el interior del disco, que lleva a la desaparición de éste. Detallados cálculos indican que la turbulencia debe extenderse hacia el exterior casi hasta el anillo más interno señalado por la línea continua de la figura 6.

Esta situación resulta muy sugestiva en cuanto a la formación del sistema solar. Si el sistema solar ha sido engendrado bajo la forma de un disco de gas en rotación como el descrito, resulta verosímil entonces que se haya formado en sus proporciones exteriores en determinado número de anillos. Estos anillos no han podido permanecer estables, y su materia ha debido condensarse para formar discos rotativos separados que gravitan alrededor de la masa central del sistema. En alguna medida, se obtienen modelos en miniatura del disco central, de modo que no debería sorprender el hecho de que una cantidad considerable de la masa de esos subdiscos se hayan reunido al centro para formar planetas gigantes, y que los compuestos químicamente condensados que comprenden agua bajo la forma de hielo se hayan reunido para formar vastos sistemas de satélites que gravitan alrededor de esos planetas gigantes. Esto concuerda con las diversas propiedades de los planetas gigantes y de sus sistemas de satélites, propiedades de las que hablamos más arriba.

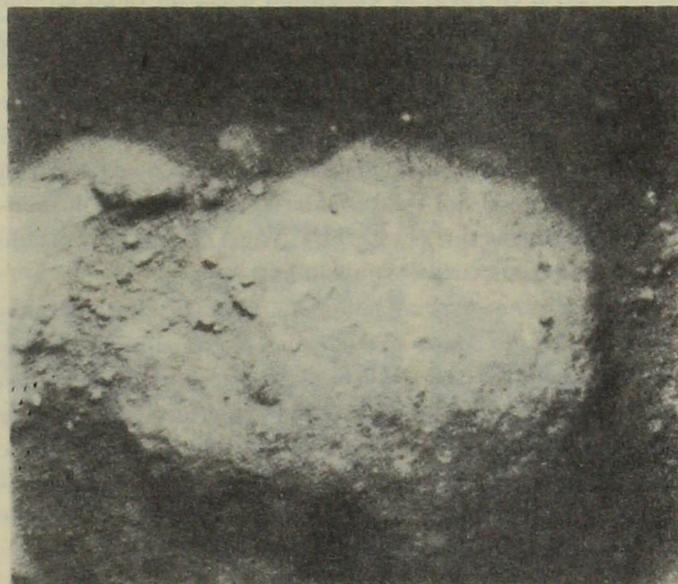
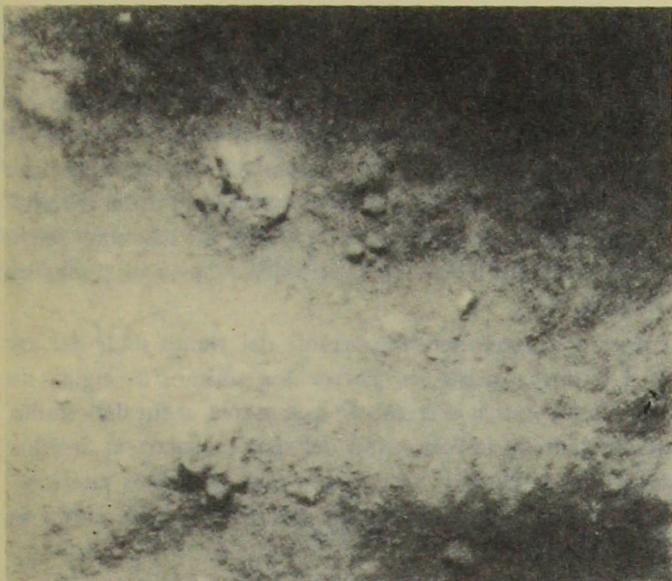


Figura 7. Fotografías de tamaño ligeramente menor al real, tomadas por los astronautas de Apolo 11 (Fotos U.S.S.). a) un pequeño bloque sumido en el polvo y recubierto de un material de aspecto vidrioso, podría tratarse de una gota de materia fundida fijada al caer. b) Estos fragmentos de suelo revelan la presencia de numerosas partículas esféricas pequeñas y brillantes. c) Trozo de roca que contiene una inclusión de materia más clara. La roca misma se muestra cribada de numerosos cráteres minúsculos, cuyo interior parece vitrificado. d) Los pequeños fragmentos que rodean este trozo de roca parcialmente enterrado en el polvo, sugieren que ha sufrido una cierta forma de erosión. Los minúsculos cráteres que lo cubren, parecidos a los de la figura precedente, poseen un borde sobre-elevado, característico de los impactos de micrometeoritos de gran velocidad

En el interior de la porción principal y central del disco, la acumulación química también tiene cambios que producir. Las temperaturas ahí serán más elevadas y por consiguiente las principales fases condensadas las constituirán el hierro y los silicatos. Ellos pueden formar cuerpos de tamaños muy diversos, pero las relativamente ligeras colisiones entre estos cuerpos, favorecidas por la presencia de grandes cantidades de gas, tenderán a la formación de planetas del tipo terrestre. Como se trata aquí de un proceso relevante de la mecánica de los fluidos, para el cual la escala de tiempo puede ser bastante corta, (quizá no más de cien años), se deduce que los planetas terrestres deben formarse muy rápidamente

te en el curso de estos procesos. En el hecho, el proceso de formación de los planetas terrestres por acrecentamiento de materiales rocosos no debe ser muy eficaz, ya que el disco original debe contener alrededor de 100 veces más material rocoso que el que se llega a encontrar en esos planetas. El movimiento de la mayor parte del gas hacia el interior para formar el Sol debe también llevar consigo la mayor parte de ese material rocoso. Podemos concluir de ello que si la formación de los planetas terrestres es un proceso muy rápido, como lo sugieren las observaciones precedentes, los planetas mayores como Venus y la Tierra deben tener en un comienzo un muy alto calor por la liberación de energía gravitacional.

Los planetas más pequeños como Marte tienen oportunidad de sufrir menos calentamiento.

El viento solar primitivo

La concentración de gas hacia el interior del disco en rotación finalmente debe concluir en la formación de ese cuerpo autoluminoso que nosotros llamamos Sol. En su origen, el Sol debió ser mucho más grande de lo que resulta hoy día, puesto que no ha podido alcanzar su tamaño actual sino que por contracción, al liberar una gran cantidad de energía potencial gravitacional y radiar mucha de esta energía en el espacio. Existen algunos índices en cuanto al comportamiento del Sol en este estadio, gracias a las observaciones modernas de la evolución estelar.

Las regiones que contienen estrellas recientemente formadas poseen un gran número de estrellas muy especiales denominadas "T-Tauri". Se trata de estrellas que se hallan todavía en curso de expansión hacia un radio tal que permita que su interior sea lo suficientemente cálido como para desprender energía por conversión termonuclear del hidrógeno en helio, como sucede hoy día con nuestro Sol. Se comprueba que estas estrellas emiten materia en una tasa prodigiosa, de alrededor de diez millones de veces la tasa con que actualmente el Sol eyecta materia bajo la forma de viento solar. Se supone que el estadio T-Tauri del Sol haya tenido determinadas consecuencias muy importantes.

Una de estas consecuencias ha debido ser la de desembarazar a todo planeta terrestre, recientemente formado, de la atmósfera primitiva que pudiera haber capturado del disco rotativo inicial. Se había anotado anteriormente que la captura de dicha atmósfera primitiva debería considerarse como una posible consecuencia lógica del acrecentamiento de los planetas terrestres a partir de un semejante disco gaseoso. Sin embargo, las enormes presiones asociadas con la eyección de materia durante el estadio T-Tauri debieron haber barrido tales atmósferas primitivas, dejando a los planetas despojados, susceptibles posteriormente de desprender de su interior su propia atmósfera, y en condiciones de permanecer estables sólo una vez terminado el desprendimiento de materia del estadio T-Tauri.

La segunda consecuencia importante pudo haber sido el calentamiento de determinados cuerpos celestes pequeños. Entre Marte y Júpiter se encuentra un enjambre de pequeños objetos llamados asteroides, cuyo radio es en su mayoría inferior a los 100 km. Ocasionalmente estos objetos se chocan unos a otros, en la cintura de los asteroides, y se piensa que este es el origen de los fragmentos meteóricos que suelen caer a la Tierra donde han podido ser analizados. El mecanismo que permite la formación de los meteoritos ferrosos ha sido por mucho tiempo un misterio. Debido a que se necesita una enorme cantidad de energía para calentar el interior de esos pequeños objetos hasta el punto de fusión del hierro, ha sido muy difícil identificar una fuente de energía capaz de lograr ese calor. No obstante, Charles Sonet y algunos co-

legas del Ames Research Center de la NASA recientemente han hecho notar que el viento solar, durante la fase T-Tauri, debe transportar consigo un campo magnético "congelado". Tal campo magnético fluctuante, llevado más allá de los pequeños asteroides cuyas conductividades eléctricas pueden ser significativas, debe haber inducido a las corrientes de Foucault potencialmente capaces de calentar selectivamente algunas partes de esos objetos hasta el punto de fusión del hierro.

Una tercera consecuencia importante del viento solar del estadio T-Tauri consiste en barrer los últimos vestigios de gas del disco rotativo original, lo que marca el fin del estadio "disco estelar" de la formación del sistema solar: el Sol, los planetas, los satélites y los cuerpos más pequeños en el espacio, se hallan ahora libres para evolucionar cada uno a su modo.

El espacio debe contener muchos otros sistemas planetarios

Como se puede apreciar, las consideraciones teóricas precedentes parecen determinar la arquitectura general del sistema solar. Resulta lógico que se forme un sistema exterior de planetas gigantes, acompañado de sistemas extendidos de satélites, y que sus composiciones gaseosas se aproximen a la del Sol. También resulta lógico el hecho de que deba existir un sistema de planetas internos constituidos por materiales rocosos y rodeados de atmósferas secundarias desprendidas del exterior. Hay razones para preguntarse cómo pueden ser encontrados en nuestra galaxia sistemas arquitecturales semejantes.

Nuestra discusión en cuanto a la formación del sistema solar fue muy general; por otra parte, existe una indicación de la existencia en gran escala de procesos similares en otros lugares que en nuestra galaxia. Las observaciones de estrellas indican que a menudo, quizás en una mayoría de casos, el resultado es ligeramente diferente, y lleva a la formación de un sistema de estrellas binarias que poseen una órbita mutua muy elíptica, lo cual excluiría la posibilidad de la existencia de un sistema planetario conveniente alrededor de cualquiera de esas dos estrellas. La galaxia contiene sin embargo un gran número de estrellas y muchas de ellas deben haberse formado solas en el espacio de un modo parecido al del Sol. En tales circunstancias es muy posible que sus sistemas planetarios contengan a la vez un conjunto exterior de planetas gigantes y un conjunto interno de planetas rocosos del tipo terrestre.

Parece, no obstante, poco verosímil que todos esos sistemas sean copias exactas de nuestro propio sistema solar. Uno de los parámetros implicados en la formación de los sistemas planetarios puede tener un gran número de valores. Se trata de la cuantía del momento angular por unidad de masa de un fragmento de nube interestelar. Podemos suponer que los procesos de turbulencia producen grandes variaciones de esta cuantía y, por consecuencia, grandes variaciones

del radio de los discos de gas rotativos que resultan de la expansión del fragmento. Esto conducirá entonces a escalas de tiempos diferentes para la disipación hidrodinámica del disco y para la acumulación de los cuerpos planetarios. Así, en tanto que los sistemas planetarios son extremadamente comunes, existen también grandes variaciones en sus detalles internos. En el mejor de los casos, algún día nos pondremos en comunicación radial con habitantes inteli-

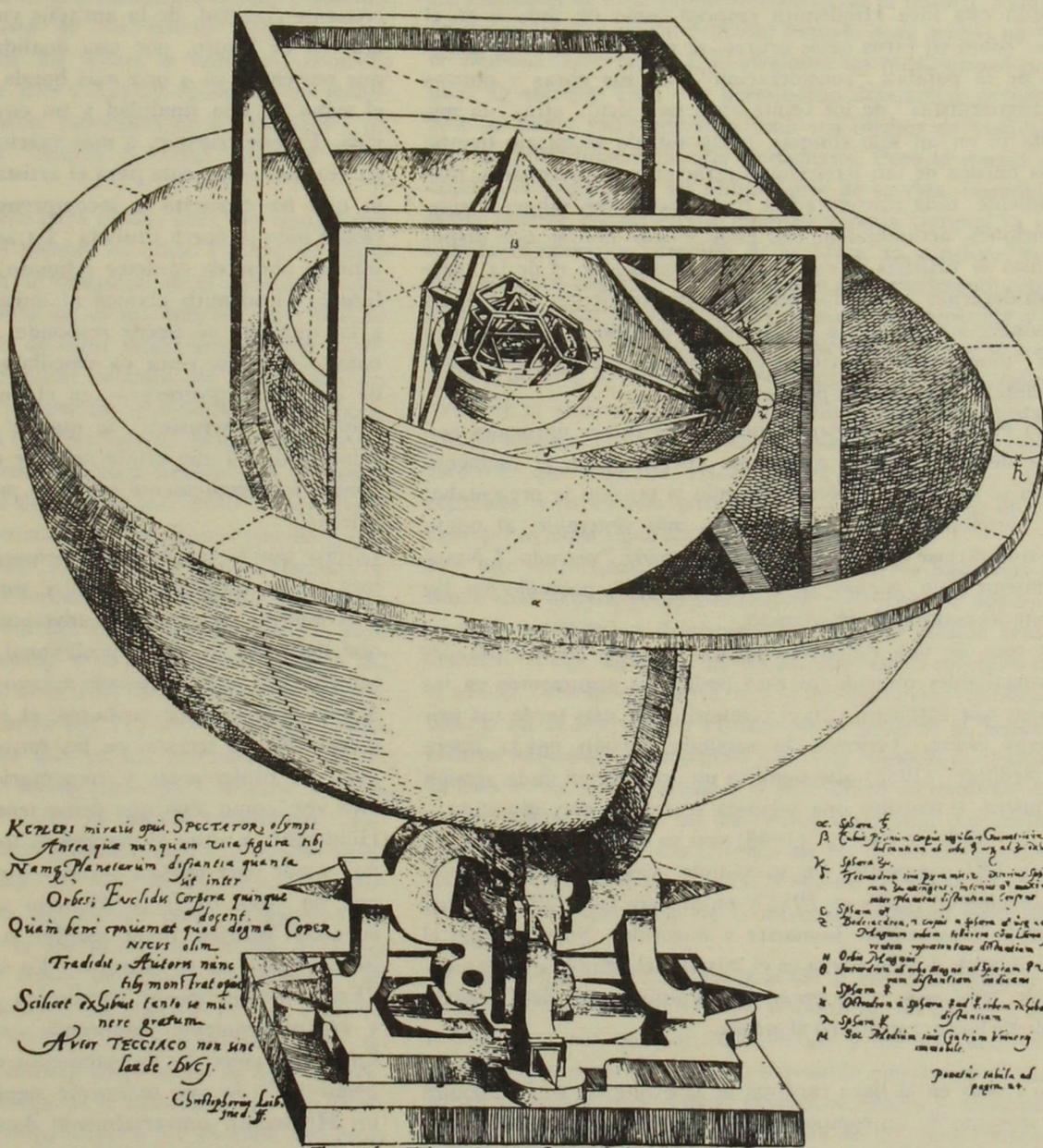
gentes de muchos de estos sistemas planetarios, y podremos saber entonces cuáles son esas variaciones de detalles.

(De la revista *Atomes*, trad. de W. R.)

BIBLIOGRAFIA

- ¹ Robert Jastrow y A. G. W. Cameron. *Origin of the Solar System*, Academic Press, New York, 1963.
- ² A. G. Cameron. *Fundamental problems of the Solar System*. EOS, Transactions, American Geophysical Union, 50, 424 (1969).
- ³ A. G. W. Cameron. *Physical conditions in the primitive Solar Nebula*, *meteorite Research*, P. M. Millman (Ed.), D. Reidel Publ. Co., Dordrecht (Hollande), 1969.

TABVLA III. ORBIVM PLANETARVM DIMENSIONES, ET DISTANTIAS PER QVINQVE
REGVLARIA CORPORA GEOMETRICA EXHIBENS.
ILLVSTRISS: PRINCIPI, AC DÑO, DÑO FRIDERICO, DVCI WIR-
TENBERGICO, ET TECCIO, COMITI MONTIS BELGARVM, ETC. CONSECRATA.



KEPLERIS mirari opus. SPECTATOR, olimpi
Antea quæ nunquam tua figura tibi
Namq; Planetarum distantia quanta
sit inter
Orbes, Euclidis Corpora quinque
docent.
Quam bene epuemat quod dogma COPER
NVCIS olim
Tradidit, Autors nunc
tibi monstrat opus
Scilicet exhibit lento se mu-
nere gradum
AVIO TECCIO non sine
laude BVG.

Christophorus Leib.
ined. ff.

Excudebat Tübingæ Georgius Gröppenbachianus M. D. L. xxvii.

ae Sphæra f
P. Cubus p. in corp. reglar. Geometrico
situatione ab orb. f. reg. al. de. distant
X. Sphæra g.
S. Tricostro in pyramide. dicitur sphe
ram in angulo. interius q. multiman
nari planetar. distantiam corpore
C. Sphæra h.
E. Dodecaedron, r. capis a sphæra ut in q. d.
M. Orbis Mercurij
O. Iovis r. ad orb. Martis ad sp. Iovis p. r.
nam distantiam inducat
I. Sphæra f.
K. Dodecaedron a sphæra h. r. orbem debeat
distanciam
N. Sphæra h.
M. Sphæra h. r. orbem debeat
distanciam

ponatur tabula ad
pagin. 20.