

Inmensidad del espacio: el Sol y su sistema planetario

JOSÉ ANTONIO GARCÍA BARRETO*

The Immensity of Space: the Sun and the Planetary System

Abstract. *The extension of the Universe is immense. We can perceive it as a mathematical figure, but most of the times it is extremely difficult, if not impossible, to comprehend the relative distances and their meaning. One way to comprehend the sizes involved in the space is to make a comparison with distances we deal with in everyday life. An example would be to make a scale model of our nearest system, the Solar System, so that it can be compared with the relative distances within a city. We have chosen the city of Toluca for our purposes, and a scale for the Solar System such that the diameter of the Sun is one meter.*

Our main purposes in with the article are: a) to appreciate the relative distances involved in the Solar System by means of a scale model superposed on a map of the city of Toluca; b) to call the reader's attention to the fact that the system is a stable system whose main planets have been in elliptical orbits for billions of years, and c) to show that these orbits trace imaginary planes that differ less than 7 degrees from the plane of the Earth's orbit, except in the case of the orbit of Pluto, which has an inclination of 17 degrees. These imaginary planes have also been stable for billions of years.

Introducción

La humanidad ha sido testigo, desde su aparición en la Tierra, de los cambios de luz durante el día y oscuridad durante la noche. Ciertamente pasaron miles de años antes de que el hombre se diese cuenta de que el fenómeno era periódico, es decir, el mismo astro luminoso aparecía durante el día e iluminaba su entorno. A este astro lo conocemos ahora como la estrella más brillante y la denominamos Sol. La luz del Sol es tan intensa que solo permite ver algunos pocos objetos luminosos en el cielo durante el día. Así, al amanecer y al atardecer se pueden observar principalmente planetas

que reflejan la luz del Sol, como Mercurio y Venus. Además, el satélite natural de la Tierra, la Luna, puede ser observado pálidamente durante el día. Los estudios realizados por varias generaciones de astrónomos nos indican que estos objetos luminosos no son todos iguales y que no están a una misma distancia de la Tierra. En una noche oscura, podemos observar otras estrellas como el Sol pero a grandes distancias de nosotros; otros objetos luminosos del cielo no son puntuales sino que son nebulosos y extendidos. Algunas de estas nebulosas reflejan la luz de estrellas cercanas, y otras, a las cuales comúnmente se les denomina nebulosas de gas ionizado emiten su propia luz. Otros objetos extendidos que están a mayores distancias y formados por un conjunto de estrellas y gas, constituyen otras galaxias como la nuestra. Otros objetos extendidos aun a mayores distancias de nosotros, conformados por varias galaxias, se les conoce como grupos (si el número de galaxias es entre 10 y digamos 50) o cúmulos de galaxias (si el número de galaxias es mayor que 100; ver figura 1).

Generación de luz del Sol y otras estrellas

El Sol produce luz propia a través de reacciones termonucleares en su interior. El elemento más abundante en el Universo es el hidrógeno, cuyo átomo se compone de un protón como núcleo y un electrón en órbita a su alrededor. El protón tiene carga eléctrica positiva mientras que el electrón la tiene negativa. El siguiente elemento más abundante del Universo, después del hidrógeno,

* Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México. Email: tony@astroscu.unam.mx.

Deseo expresar mi sincero agradecimiento a los doctores Jesús Galindo, Jorge Cantó y José Franco por sus comentarios y sugerencias que han ayudado para mejorar la presentación y redacción del texto, así como a Alberto García y a Carlos Yustis por su valiosa ayuda en la elaboración de las figuras y el material fotográfico.



es el helio. El átomo de helio tiene dos protones en su núcleo y dos electrones en órbita a su alrededor. Sin embargo, dos partículas con cargas eléctricas del mismo signo se repelen mutuamente; esto quiere decir que en el núcleo del helio deben existir otras partículas que hagan el papel de "pegamento" o el efecto de cancelar la repulsión entre los dos protones. Estas dos partículas no deben de tener carga eléctrica y se les conoce como neutrones. Así, el átomo de helio posee dos protones y dos neutrones en su núcleo, además de dos electrones girando en órbitas diferentes a su alrededor.

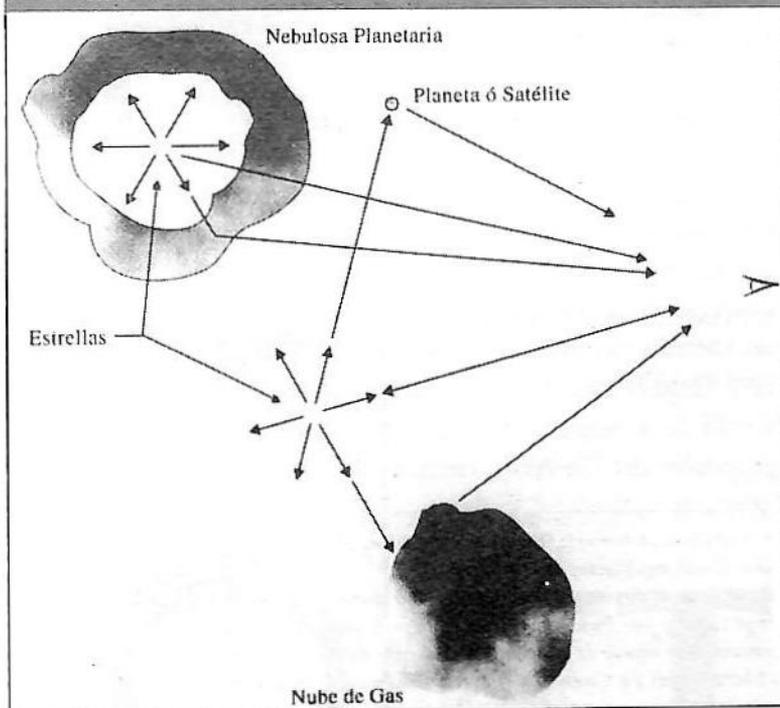
En el interior del Sol sucede una fusión de cuatro átomos de hidrógeno en un átomo de helio. Esta conversión podría ser con masa constante, es decir, la misma masa inicial podría ser la masa final, sin embargo esto no sucede. La masa inicial de cuatro átomos de hidrógeno es mayor que la masa final de un átomo de helio, por un equivalente a veintinueve milésimas de la masa de un átomo de hidrógeno, es decir, $4 m_H - m_{He} \cong 0.029 m_H$, donde m_H es la masa del átomo de hidrógeno y m_{He} es la masa del átomo de helio. La temperatura en el núcleo del Sol es de alrededor de veinte millones de grados centígrados, lo que posibilita que estas reacciones termonucleares se lleven a cabo. El exceso de masa se convierte en energía a través de la ya conocida ley de Einstein: $E = mc^2$.

Esta energía es irradiada por el Sol hacia su exterior, es decir, al espacio interplanetario. Debido a que la Tierra posee una capa atmosférica, como de 200 km de altura, formada por diferentes gases tales como oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, bióxido de carbono, etc., que absorbe la radiación, solo una parte de tal energía llega a la superficie de la Tierra. Las principales radiaciones que llegan a la superficie de la Tierra son: la luz visible, la luz infrarroja y las ondas de radio. Las demás radiaciones, como la luz ultravioleta, los rayos X, y los rayos gamma, son en su mayor parte absorbidos por los átomos y moléculas que forman la atmósfera terrestre.

El mismo proceso de generación de energía lo tienen todas las demás estrellas en nuestra galaxia y en el Universo en general. Algunas estrellas nacen con una masa similar a la del Sol, pero otras poseen mayor o menor masa. Uno puede pensar entonces que las estrellas están convirtiendo continuamente hidrógeno en helio. Finalmente habrá mucho más helio que hidrógeno y en el límite se habrán convertido todos los átomos de hidrógeno en átomos de helio. Esto significa que ya no habrá más reacciones termonucleares y por lo tanto ya no habrá energía que se pueda radiar.

¿Cuanto tiempo durara la generación de energía en el Sol o en otras estrellas? Esto depende de la masa inicial y de cuantos átomos de hidrógeno se tienen. En el caso del Sol, su edad estimada es actualmente de 4,500 millones de años y se cree que podrá existir otro tanto más. La vida de otras estrellas depende similarmente de cuantos átomos de hidrógeno tiene inicialmente y de la rapidez con la cual los convierte en átomos de helio. Esta conversión es, como mencionamos con anterioridad, su fuente principal de energía. Sin embargo, en algunas estrellas suceden otras reacciones termonucleares, en las cuales se transforman átomos de helio en átomos de carbono, teniendo con esto una segunda fuente de energía. La temperatura interior de tales estrellas debe ser también muy alta, del orden de quince a veinte millones de grados centígrados, para llevar a cabo esta reacción termonuclear. Otras fuentes secundarias de energía provienen de la conversión de átomos de helio y carbono, en átomos de nitrógeno y de oxígeno. Estas fuentes secundarias de energía son importantes para estrellas de masas mayores que la del Sol y obviamente para la producción de átomos más pesados que el hidrógeno; sin embargo, no son tan importantes para la generación de la ener-

FIGURA 1. LA LUZ QUE SE OBSERVA EN UNA NOCHE CLARA PUEDE PROVENIR DE ESTRELLAS, QUE GENERAN SU PROPIA LUZ; DE LA LUZ REFLEJADA POR NEBULOSAS PLANETARIAS, NEBULOSAS DE GAS IONIZADO; DE LUZ REFLEJADA POR PLANETAS Y SATELITES, Y POR LUZ TENUE DE CONJUNTO DE ESTRELLAS Y GAS CONOCIDOS COMO GALAXIAS EXTERNAS A LA NUESTRA.



gía que la estrella pueda irradiar. Esto es simplemente debido a que el número de tales reacciones es menor que el número de reacciones que convierten hidrógeno en helio.

Ciclos periódicos: el día, la noche y el cielo, en las diferentes estaciones del año

Las observaciones astronómicas en muchas culturas antiguas, como las babilónica y egipcia en el continente euroasiático africano y la zapoteca, maya e inca en el continente americano, ayudaron al avance del conocimiento científico, al hacer notar que el fenómeno que ahora llamamos día y noche era periódico, es decir, repetitivo. No solo se dieron cuenta de que el Sol aparecía iluminando la superficie de la Tierra después de cierto intervalo de tiempo, sino que, en general, la duración de iluminación era similar al periodo de obscuridad. Asimismo notaron los movimientos del Sol en el cielo, moviéndose en forma relativa hacia el norte y después hacia el sur.

Las noches eran algo espectacular para ellos, pues notaron igualmente que en algunas noches podían observar unas estrellas, mientras que en otras noches ya no podían observarlas, pero podían observar otras. Después se dieron cuenta de que este comportamiento era también repetitivo, es decir, que después de un intervalo de tiempo volvían a observar las mismas estrellas. En forma similar, pudieron correlacionar el movimiento aparente del Sol hacia el norte, con el intervalo de tiempo en el cual podían observar ciertas estrellas en las noches y asimismo pudieron correlacionar el movimiento relativo del Sol hacia el sur, con el intervalo de tiempo en el cual podían observar las otras estrellas durante las noches. De las observaciones de Kepler y los estudios de Copérnico y Galileo, sabemos actualmente que no es el Sol el que se mueve sino que es la Tierra la que gira alrededor de su eje. Además, que el día civil dura veinticuatro horas, de las cuales en promedio durante doce, la Tierra es iluminada por la luz del Sol y en doce horas de obscuridad se pueden observar estrellas, planetas y nebulosas. También sabemos que la Tierra gira alrededor del Sol casi a una distancia constante, en una órbita que forma un plano imaginario que actualmente llamamos el plano de la eclíptica. Es decir, la órbita de la Tierra alrededor del Sol no es circular sino elíptica y tampoco gira alrededor del Sol en cualquier inclinación, sino solamente en una trayectoria por la

cual podemos trazar un plano imaginario (ver figura 2). A este plano de la eclíptica podemos asignarle un eje perpendicular a él, para indicar que alrededor de este eje gira la Tierra en torno al Sol. Asimismo podemos asignar un eje imaginario alrededor del cual gira la Tierra diariamente. Sin embargo, el eje de la Tierra no es paralelo al eje del plano de la eclíptica, sino que esta inclinado 23.5° (ver figura 3). El plano imaginario que forma el ecuador de la Tierra no es paralelo al plano de la eclíptica y esa combinación hace que en nuestro hemisferio, en el invierno el Sol aparezca por el lado sur de la Tierra y durante el verano aparezca por el lado norte.

En forma similar podemos entender porque durante una época del año podemos observar unas estrellas en la noche y durante otra época obser-

FIGURA 2. CADA PLANETA SE MUEVE EN TORNO AL SOL, EN UNA TRAYECTORIA DETERMINADA QUE TRAZA UN PLANO. EN PARTICULAR, AL PLANO DE LA ÓRBITA DE LA TIERRA SE LE DENOMINA ECLÍPTICA Y SE CONSIDERA COMO CON CERO INCLINACIÓN. LAS ÓRBITAS DE LOS DEMÁS PLANETAS ESTÁN INCLINADAS CON RESPECTO A LA ECLÍPTICA.

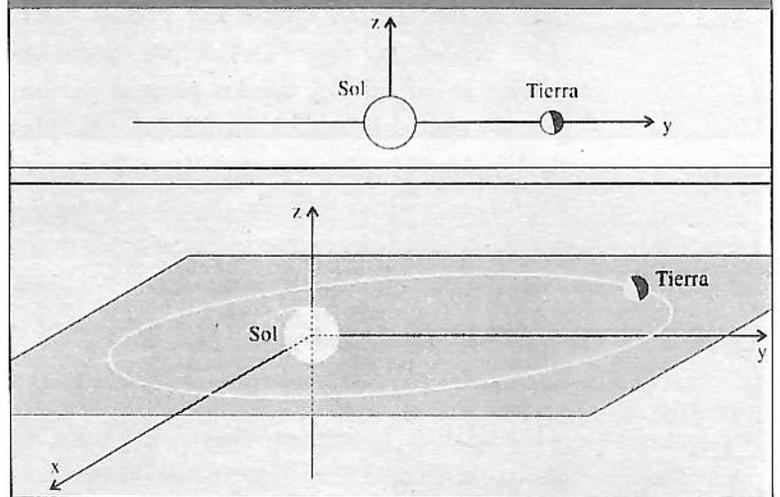
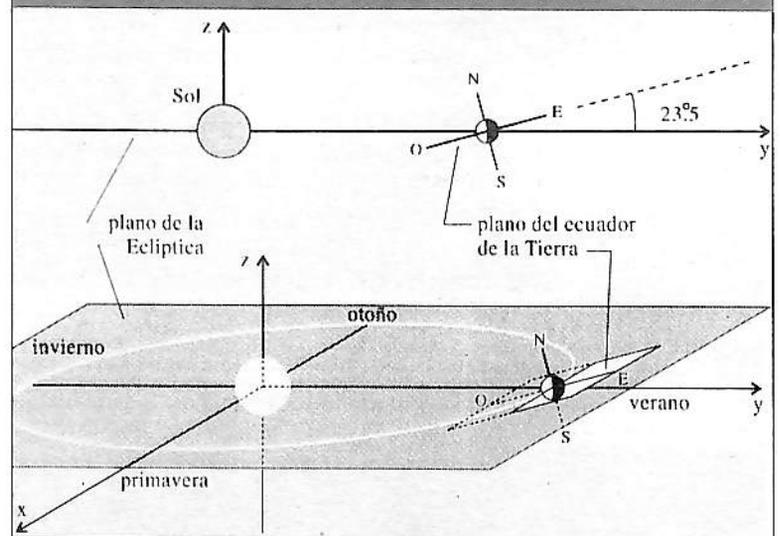


FIGURA 3. LA TIERRA GIRA ALREDEDOR DEL SOL A LO LARGO DE LA ECLÍPTICA. SIN EMBARGO, EL PLANO DEL ECUADOR TERRESTRE NO ES PARALELO AL PLANO DE LA ECLÍPTICA SINO QUE ESTÁ INCLINADO 23.5° . ESTA INCLINACIÓN ES IMPORTANTE EN EL ORIGEN DE LAS ESTACIONES DEL AÑO.



vamos otras estrellas diferentes. Durante las noches podemos observar estrellas hacia la región opuesta del Sol. Considerando el movimiento de la Tierra alrededor del Sol, resulta que en el invierno, las estrellas que podemos observar en las noches de verano se encuentran en la región iluminada por el Sol y de forma similar las estrellas que podemos observar en las noches de invierno no las podemos observar en el verano, por estar en la región iluminada por el Sol (ver figura 4).

Objetos que se observan en el cielo

La palabra planeta proviene del griego *planetes* que significa cuerpo errante, vagabundo. En la antigüedad, se pensaba que los planetas eran objetos luminosos y que generaban su propia luz. Ahora sabemos que eso no es cierto. Los planetas son cuerpos opacos, con diferente constitución física y química, que reflejan la luz del Sol. Asimismo sabemos que las lunas o satélites de cada planeta también son cuerpos opacos que pueden reflejar la luz del Sol (ver figura 1). Cuerpos opacos que reflejan la luz del Sol son los planetas menores (por ser diámetros mucho menores que los principales planetas) y los cometas. Estos últimos, reflejan la luz del Sol y en su viaje al acercarse a grandes velocidades, van dejando una estela luminosa siempre en dirección opuesta a la orientación con respecto al Sol y va desapareciendo en cuanto más alejado se encuentre el cometa.

Existen además otros objetos extendidos, denominados en general nebulosas. Son nubes de gas que emiten su propia luz. Todas las estrellas y nebulosas de gas, que podemos observar en una noche oscura, forman parte de lo que llamamos nuestra galaxia. Asimismo existen otros sistemas

fuera de nuestra galaxia con estrellas y nebulosas a las que se les denomina en general galaxias externas u objetos extragalácticos. En una noche oscura una galaxia (externa a la nuestra) aparece al ojo humano como un objeto extendido con tenue luz propia. Con la ayuda de modernos telescopios se puede observar que estos objetos contienen miles de millones de estrellas y nubes de gas formando una estructura similar a nuestra galaxia.

I. El Sistema Solar

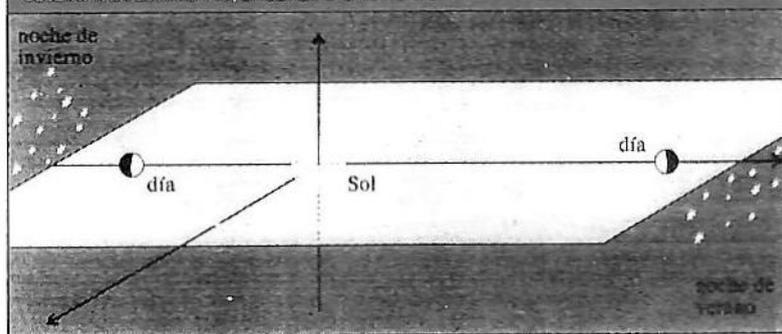
Los habitantes de la Tierra siempre han dedicado especial interés en observar al sistema Solar. La razón es sencilla: el sistema Solar con sus nueve planetas y el Sol son los objetos astronómicos más cercanos a la Tierra. La estrella más cercana a la Tierra es el Sol y varios de los objetos más brillantes en el cielo después de la Luna, son los planetas interiores: Mercurio Venus y Marte. La Luna como el resto de los objetos del sistema planetario no produce su luz propia sino que solamente refleja la luz del Sol. La humanidad ha observado el movimiento de los planetas y del Sol desde tiempos inmemoriales. El mayor avance observacional fue en el Renacimiento cuando Galileo utilizó el telescopio para observar Júpiter y otros planetas. En la actualidad con las imágenes enviadas por las sondas espaciales se sabe que el sistema planetario es complejo con muchos más elementos que nueve planetas y el Sol. Muchos planetas tienen a su vez satélites, existen cometas, asteroides, meteoritos, los así llamados planetas menores y la banda de asteroides entre Marte y Júpiter. Las naves espaciales de los Estados Unidos de América han transmitido imágenes de muchos de los planetas externos: Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno y de sus satélites las cuales han ilustrado mejor la naturaleza de esos objetos.

El propósito de este artículo es transmitir a la comunidad en general, el concepto de las distancias involucradas en el Sistema Solar y que se percate de la inmensidad del espacio que existe entre un objeto celeste y otro.

1. Órbitas de los planetas alrededor del Sol

En el Sistema Solar el objeto central es el Sol; el cual posee una masa que da lugar a un campo gravitacional y a una fuerza de atracción sobre todos los demás elementos del Sistema Planetario. A la trayectoria que sigue cada planeta en su mo-

FIGURA 4. EL SOL ES TAN BRILLANTE QUE SÓLO SE PUEDEN OBSERVAR CON FACILIDAD LAS ESTRELLAS EN EL PERIODO DE OSCURIDAD. SIN EMBARGO, DEBIDO AL MÓVIMIENTO DE TRASLACIÓN DE LA TIERRA ALREDEDOR DEL SOL, LAS ESTRELLAS QUE SE PUEDEN OBSERVAR EN LAS NOCHES DE INVIERNO, EN EL HEMISFERIO NORTE, NO SE PUEDEN OBSERVAR EN EL VERANO. LAS ESTRELLAS QUE SE PUEDEN OBSERVAR EN LAS NOCHES DE VERANO NO SE PUEDEN OBSERVAR EN EL INVIERNO, EN EL HEMISFERIO NORTE.



vimiento alrededor del Sol, se le conoce como *órbita*. Las observaciones de J. Kepler demostraron que las *órbitas* no son completamente circulares, sino más bien elípticas, es decir, son un poco alargadas. ¿Que tan alargadas son las órbitas? Para expresar que una órbita es más alargada que otra se utiliza el parámetro ϵ , llamado excentricidad. Si $\epsilon = 0$ indica que la órbita es circular y si por ejemplo, $\epsilon \approx 0.95$ significa que la órbita es muy alargada (ver figura 5a). El valor de ϵ en la tabla 1 indica el grado de excentricidad de la órbita de cada planeta. Como se puede observar, casi todos los planetas tienen un valor de ϵ muy pequeño, es decir, sus órbitas son casi circulares; las únicas excepciones son Mercurio y Plutón que tienen órbitas más alargadas. Los cometas, como el Halley, tienen órbitas muy alargadas (con una $\epsilon \approx 0.97$). El que Plutón tenga una órbita un poco más elíptica que Neptuno, hace que en algunas ocasiones Plutón se encuentre a una distancia menor del Sol que Neptuno, aunque el plano de la órbita de Plutón está mucho más inclinado que el plano de la de Neptuno (ver figura 5b). El Sistema Planetario Solar es un sistema en equilibrio dinámico. En el apéndice se da una breve descripción de las fuerzas involucradas y de las órbitas de cada planeta alrededor del Sol.

2. Dimensiones y distancias reales del Sistema Planetario Solar

En la actualidad se conoce con buena exactitud el diámetro de cada planeta, así como sus distancias *promedio* al Sol. En la tabla 1 se dan los diámetros de los planetas, su distancia promedio al Sol, su inclinación relativa con respecto al plano de la eclíptica y la excentricidad de su órbita. Se usa la distancia promedio al Sol debido a que las *órbitas* son elípticas y por lo tanto, su distancia al Sol es menor en ciertos puntos de su órbita y es mayor en otros puntos de ella. En particular, la distancia de la Tierra al Sol es menor durante el intervalo de tiempo correspondiente al invierno y es mayor durante el verano. Esto puede sonar paradójico, pues es en el invierno cuando en el hemisferio norte la temperatura es menor que en el verano. La razón es que en el invierno, la Tierra está inclinada en la dirección opuesta del Sol, de tal forma que el hemisferio norte está más alejado del Sol que el hemisferio sur, es decir, los rayos solares llegan con mayor inclinación en el hemisferio norte que en el sur.

TABLA 1

PARÁMETROS PRINCIPALES DEL SISTEMA SOLAR

PLANETA	DIÁMETRO EN KM.	DISTANCIA AL SOL EN MILLONES DE KM.	INCLINACIÓN DE LA ÓRBITA	EXCENTRICIDAD ϵ
SOL	1391994	—	—	—
MERCURIO	4850	57.9	7° 10'	0.206
VENUS	12140	108.2	3° 24'	0.007
TIERRA	12756	149.6	0° 00'	0.017
MARTE	6790	227.9	1° 51'	0.093
JÚPITER	142600	778.3	1° 18'	0.048
SATURNO	120200	1427.0	2° 29'	0.055
URANO	49000	2869.6	0° 46'	0.051
NEPTUNO	50200	4496.6	1° 46'	0.007
PLUTÓN	6400	5900.0	17° 10'	0.252

FIGURA 5A. LAS ÓRBITAS DE LOS PLANETAS ALREDEDOR DEL SOL NO SON CIRCULARES SINO ELÍPTICAS. EL PARÁMETRO ϵ SE UTILIZA PARA DENOTAR EL GRADO DE ALARGAMIENTO DE ESAS ÓRBITAS. POR EJEMPLO, UN VALOR DE $\epsilon = 0$ DENOTA UNA ÓRBITA CIRCULAR, PERO UN VALOR DE $\epsilon = 0.9$ DENOTA UNA ÓRBITA MUY ALARGADA. EN EL SISTEMA PLANETARIO, LAS ÓRBITAS SON POCO ALARGADAS CON EXCEPCIÓN DE LA DE PLUTÓN.

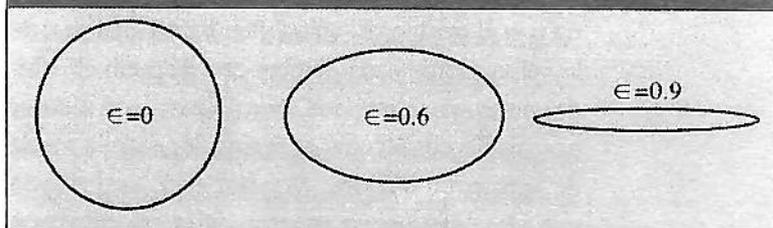
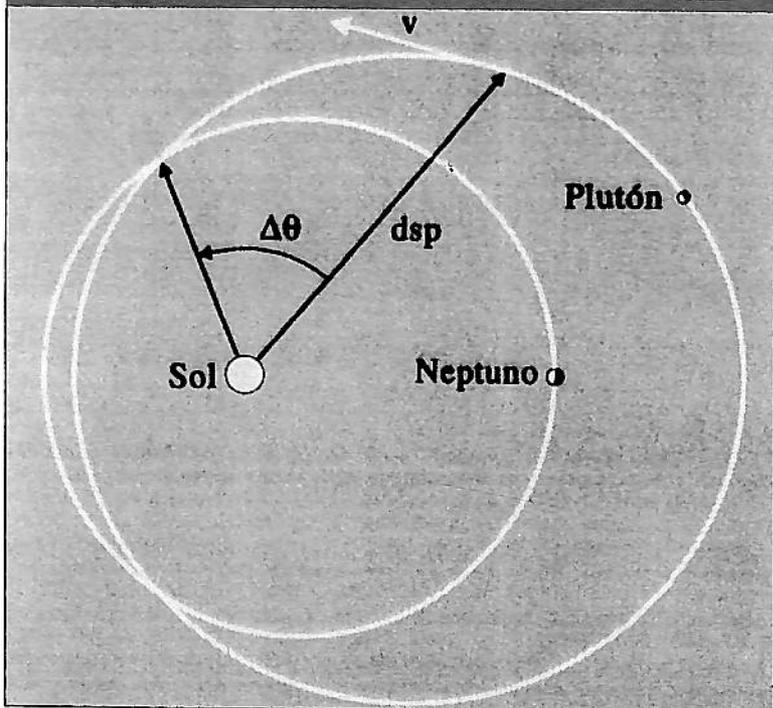


FIGURA 5B. LAS ÓRBITAS DE ALGUNOS PLANETAS EXTERIORES COMO LA DE PLUTÓN SON MUY ALARGADAS Y EN ALGUNOS MOMENTOS, SU DISTANCIA AL SOL ES MENOR QUE LA DISTANCIA DE NEPTUNO AL SOL. SIN EMBARGO, LA ÓRBITA DE PLUTÓN ESTÁ MÁS INCLINADA QUE LA DE NEPTUNO CON RESPECTO A LA DE LA TIERRA. COMO SE PUEDE OBSERVAR EN LA FIGURA, LA DISTANCIA DEL PLANETA AL SOL VARIA CON EL TIEMPO, ES DECIR, CON RESPECTO AL ÁNGULO θ . LA TAREA DEL ASTRÓNOMO ES HACER UN MODELO PARA PREDECIR LAS POSICIÓN DE CADA PLANETA CON RESPECTO AL ÁNGULO O TIEMPO Y COMPARARLA CON LAS OBSERVACIONES. SI COINCIDE, SE DICE QUE EL MODELO ES LA MEJOR REPRESENTACIÓN DE LA REALIDAD. SI NO COINCIDE, ENTONCES SE DEBE CAMBIAR EL MODELO HASTA TENER EL MENOR ERROR POSIBLE.



Las distancias e inclinaciones dadas en la tabla 1 son, para el lector común, muy abstractas y no se tiene una idea de lo que significan. ¿Cómo podemos darnos cuenta de la magnitud de estas distancias? ¿Cómo podemos darnos una idea de la inclinación de las órbitas de los planetas? Una forma de hacerlo es tener el sistema planetario a una escala menor, algo similar a los planos de una casa o de una ciudad, claro, guardando la proporción para cada objeto. La idea del presente trabajo sería presentar el Sistema Planetario a una escala relativa a distancias comunes en nuestra vida diaria; sin embargo, no es una tarea fácil dada la inmensidad del espacio.

3. Velocidades relativas de los planetas alrededor del Sol

Hemos mencionado que debido a que las órbitas de los planetas no son circulares, su distancia varía con el tiempo. El cálculo en forma analítica, de la velocidad de cada planeta con respecto al tiempo, no es una tarea fácil, pero sí se puede obtener por medio de cálculos aproximados, con la ayuda de una computadora. Sin embargo, se presenta una idea, aunque sea relativa, de la velocidad con la que viaja cada planeta alrededor del Sol. Para este propósito, calcularemos la velocidad de cada planeta, suponiendo que cada uno de ellos viaja alrededor del Sol con una órbita circular y tomando como su distancia al Sol, la distancia *promedio* que se presenta en la tabla 1.

La tabla 2 muestra los periodos de traslación de cada planeta alrededor del Sol, la velocidad lineal expresada en km por segundo, la velocidad lineal en km por hora y en la última columna se da la velocidad relativa de cada planeta, con relación a su diámetro; es decir, de acuerdo a las dimensiones de cada planeta, cuanto avanza en cada hora.

La velocidad de cada planeta, expresada en kilómetros por hora, puede parecernos muy alta si las comparamos con las velocidades a las que estamos familiarizados aquí en la Tierra. Por ejemplo, la velocidad de un automóvil en una carretera, digamos 100 km por hora. Sin embargo, las velocidades relativas en términos de las dimensiones de los objetos son interesantes: considérese por ejemplo la velocidad del planeta Mercurio alrededor del Sol, de 172,080 km por hora, la cual equivale a que el planeta recorra 35 veces su diámetro en cada hora. Un automóvil de 4m de largo, con una velocidad de 100 km por hora, equivale a que recorre su tamaño alrededor de ¡25,000 veces por hora! Ahora parece como si el planeta viajara mucho más lentamente que el automóvil. ¿Qué sucede? En forma simplificada, lo que sucede es que debemos de analizar no solamente la velocidad sino el producto de la velocidad del objeto por su masa (o su peso en el caso del automóvil en la Tierra), lo que se conoce en física como el momento lineal. En otras palabras ¿cuánto cuesta mover un objeto de 500 kg a una velocidad de 100 km por hora, comparado con lo que cuesta mover un objeto de 3×10^{20} toneladas a una velocidad de 172,080 km por hora? Es obvio que cuesta más mover al planeta a esa velocidad, es decir, los planetas viajan verdaderamente con un gran momento lineal.

Como se aprecia en la tabla 2, los planetas más cercanos al Sol viajan más rápido que los planetas exteriores, aunque sus velocidades relativas en términos de sus diámetros sean comparables. Este fenómeno se puede comparar con la velocidad constante con la que gira un disco de música. Un tornadiscos a treinta y tres revoluciones por minuto, equivale a que cada lugar del disco tenga una velocidad lineal de alrededor de 1,000 km por hora *constante*, es decir, las partes más cercanas al centro se mueven a la misma velocidad que las partes exteriores. Este movimiento del disco se denomina en física como *rotación de un cuerpo sólido*, mientras que en el caso del Sistema Solar, en donde los planetas más cercanos se mueven más

TABLA 2

PERIODOS Y VELOCIDADES DE LOS PLANETAS EN EL SISTEMA SOLAR

PLANETA	PERIODO	VELOCIDAD ¹	VELOCIDAD ¹	VELOCIDAD ²
	TRASLACIÓN	EN KM. POR SEG.	EN KM. POR HORA	RELATIVA
MERCURIO	88.00 días	47.8	172,080	35.48
VENUS	224.60d	35.0	126,000	10.37
TIERRA	365.25d ³	29.8	107,280	8.41
MARTE	1.881 años ³	24.1	86,760	12.77
JÚPITER	11.860 a	13.1	47,160	0.33
SATURNO	29.460 a	9.6	34,560	0.28
URANO	84.020 a	6.8	24,480	0.50
NEPTUNO	164.800 a	5.4	19,440	0.39
PLUTÓN	248.600 a	4.7	16,920	2.64

1. VELOCIDAD LINEAL DEL PLANETA SUPONIENDO QUE LA ÓRBITA FUERA CIRCULAR. EN REALIDAD, LAS ÓRBITAS NO SON CIRCULARES, PERO ESTOS VALORES NOS DAN UNA MUY BUENA IDEA DE LAS VELOCIDADES RELATIVAS ENTRE LOS PLANETAS. NÓTESE QUE LAS VELOCIDADES SON MENORES PARA PLANETAS MÁS ALEJADOS DEL SOL.

2. VELOCIDAD RELATIVA DE CADA PLANETA EN TÉRMINOS DE SU DIÁMETRO, ES DECIR, ¿CUÁNTAS VECES RECORRE SU DIÁMETRO POR HORA?

3. UN AÑO CIVIL TERRESTRE LO DEFINIMOS COMO EL TIEMPO QUE LE TOMA A LA TIERRA EN RECORRER LA DISTANCIA ALREDEDOR DEL SOL, PARA REGRESAR AL MISMO PUNTO DE PARTIDA EN SU ÓRBITA. ESE AÑO CONSTA DE APROXIMADAMENTE 365.25 DÍAS.

rápido que los planetas más lejanos, se conoce como *rotación diferencial*.

Las altas velocidades de los planetas alrededor del Sol no son velocidades al azar, sino que son las velocidades justamente *necesarias* para conservar el equilibrio dinámico al que nos referimos con anterioridad.

4. Dimensiones y distancias del Sistema Solar con escala "Diámetro del Sol = 1 m"

Para cumplir con el objetivo planteado, se ha pensado en tener una escala del sistema planetario, equivalente a distancias usadas en la vida diaria, tomando como referencia la zona metropolitana de la ciudad de Toluca y sus municipios aledaños, Zinacantepec y Metepec, en el Estado de México. La escala permite apreciar el diámetro del Sol y el de los planetas, así como su distancia al Sol. La escala escogida es tal, que el diámetro del Sol es de 1 m y con esa escala se calculan tanto los diámetros equivalentes de los planetas, sus distancias al Sol y la distancia vertical que indica (describe) la inclinación de la órbita de cada planeta, con respecto al plano de traslación de la Tierra alrededor del Sol (ver tabla 3).

Tomaremos como referencia la avenida Morelos y colocaremos al Sol, de 1m de diámetro, en la esquina de la avenida Morelos con paseo Vicente Guerrero (antes paseo Xinantécatl o Circunvalación). La posición de los planetas estará sobre la avenida Morelos en la dirección hacia el este, es decir, hacia el centro de la ciudad (ver figura 6).

Mercurio, el planeta más cercano al Sol, tendrá un diámetro de 3.5 mm y se encontrará a una distancia de 41.6m de distancia del Sol, es decir, frente al parque Vicente Guerrero (antes de la primera puerta) y a una altura de 5.1 m, equivalente a la inclinación de su órbita.

Venus tendrá un diámetro de 8.7 mm y se ubicará a una distancia de 77.7 m del Sol, es decir, aproximadamente a la mitad del parque Vicente Guerrero (frente a la parada de autobuses y a una altura de 4.6 m equivalente a la inclinación de su órbita.

La Tierra tendrá un diámetro de 9.2 mm y se encontrará a una distancia de 107.5 m del Sol, es decir, a la mitad del parque Vicente Guerrero y a la misma altura que el ecuador del Sol, ya que su órbita por definición la tomamos con inclinación 0°.

Marte tendrá un diámetro de 4.9 mm y se localizará a 163.7 m del Sol, es decir, aproximadamente al final del parque Vicente Guerrero y a

una altura de 5.3 m, equivalente a la inclinación de su órbita.

Júpiter tendrá un diámetro de 102.4 mm y se encontrará a una distancia de 559.13 m del Sol, es decir, aproximadamente entre las calles de Fray Bartolomé de las Casas y Motolinia y a una altura de 12.7 m, equivalente a la inclinación de su órbita.

Saturno tendrá un diámetro de 86.3 mm y se encontrará a una distancia de 1025.1 m del Sol, es decir, aproximadamente en la esquina de la avenida Morelos y la calle Fray Andrés de Castro, (casi en frente de la entrada de palcos, en el estadio de fútbol, conocido como la Bombonera), a una altura de 44.4 m, equivalente a la inclinación de su órbita.

Urano tendrá un diámetro de 35.2 mm y se encontrará a una distancia de 2061.5 m del Sol, es decir, aproximadamente en la esquina de la avenida Morelos y la calle de Galeana, a una altura de 27.6 m, equivalente a la inclinación de su órbita.

El diámetro de Neptuno será de 36.1 mm y se localizará a una distancia de 3230.3 m del Sol, es decir, sobre la avenida Morelos, aproximadamente después de la calle de Leona Vicario, a una altura de 99.6 m, equivalente a la inclinación de su órbita.

Finalmente, Plutón tendrá un diámetro de 4.6 mm y se encontrará a una distancia de 4238.5 m del Sol, es decir, aproximadamente entre las calles de paseo Fidel Velázquez y Rafael Alducín (antes del panteón general), a una altura de 1309.3 m, equivalente a la inclinación de su órbita.

La estrella más cercana al Sol es Rigil Kent o mejor conocida como la estrella α de la constelación del Centauro (α Cen) a una distancia real de 4.4 años luz, (un año luz es la distancia que recorre la luz en un año, a una velocidad de 299792.5 km/s, es decir, aproximadamente 9,460,530,000,000

TABLA 3

DIÁMETROS Y DISTANCIAS CON ESCALA "DIÁMETRO DEL SOL = 1 M"				
PLANETA	DIÁMETRO EN MM	DISTANCIA AL SOL EN MM	ALTURA EQUIV.(M) A LA INCLINACIÓN	POSICIÓN RELATIVA AV. MORELOS DE PONIENTE A ORIENTE
SOL	1000.0	-	-	ESQ. MORELOS Y V. GUERRERO
MERCURIO	3.5	41.59	5.1	ANTES 1A. PTA. PARQUE V. GUERRERO
VENUS	8.7	77.73	4.6	CASI 1/2 PARQUE V. GUERRERO
TIERRA	9.2	107.47	0.0	A LA MITAD PARQUE V. GUERRERO
MARTE	4.9	163.72	5.3	CASI FIN PARQUE V. GUERRERO
JÚPITER	102.4	559.13	12.7	+ FRAY B. DE LAS CASAS Y MOTOLINIA
SATURNO	86.3	1025.14	44.4	CASI ESQ. FRAY ANDRÉS DE CASTRO
URANO	35.2	2061.50	27.6	ESQ. GALEANA
NEPTUNO	36.1	3230.33	99.6	CASI ESQ. L. VICARIO
PLUTÓN	4.6	4238.52	1309.3	+ P. FIDEL VELÁZQUEZ Y R. ALDUCÍN

km). Con la escala que considera al diámetro del Sol = 1 m, α Cen estaría a una distancia de $r \sim 29,382$ km!. Para darnos una idea de esta distancia, recordemos que el diámetro de la Tierra es de 12,756 km, y que equivale únicamente a 9.2 mm en nuestra escala, y la circunferencia ecuatorial es de 40,074 km. Es decir, la estrella más cercana al Sol tendría un diámetro de 1.23 m y se encontraría, si nos continuamos moviendo hacia el Este, aproximadamente a la misma longitud (pero un poco al sur) de las islas Midway en el Océano Pacífico, antes de las islas de Hawaii.

II. Modelo a escala en la ciudad de Toluca

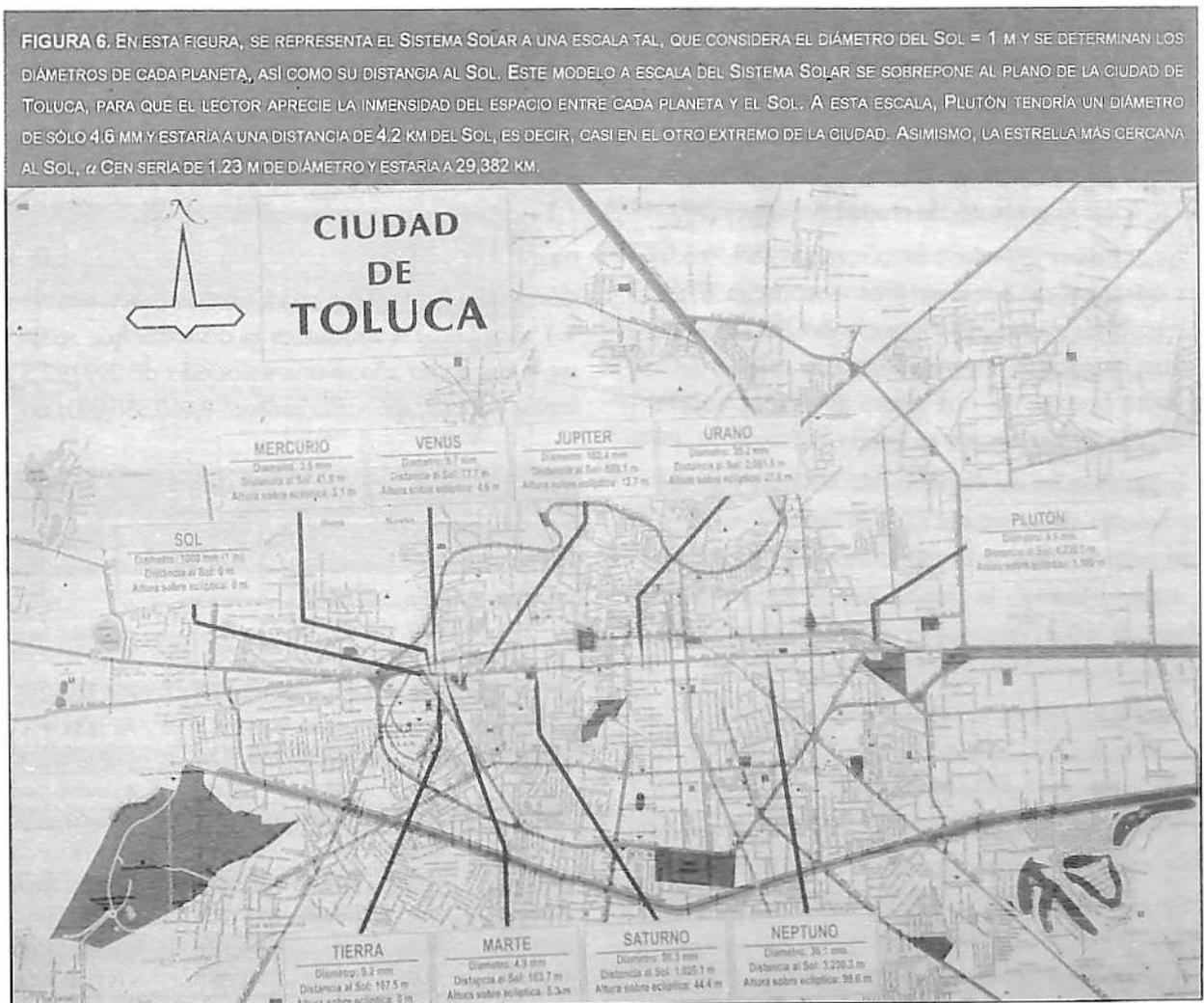
Finalmente, el autor desea proponer la implementación del modelo a escala del Sistema Solar en la ciudad de Toluca. De llevarse a cabo, Toluca sería la primera ciudad en el mundo que contase con tal modelo.

Para la implementación del modelo, lo que se necesitaría sería simplemente tener placas de metal, sostenidas por un pedestal de un tamaño de ~ 30 cm². En la primera placa, se explicaría las dimensiones reales del Sistema Solar con sus

componentes: Sol, planetas principales, órbitas, inclinación de las órbitas y distancias. En la misma placa se explicaría la escala del modelo y la posición del Sol. La posición de cada planeta puede señalarse sobre la avenida Morelos con una placa de metal, de las mismas dimensiones, indicando el nombre del planeta, su diámetro en la escala usada y la altura equivalente a su inclinación sobre el plano de la eclíptica, en forma similar a las marcas de la posición de cada planeta en la figura 6. La placa de cada planeta estaría montada también sobre un pedestal, a una altura conveniente para su lectura, por el público en general. El costo de este proyecto sería muy bajo, comparado con la difusión cultural de la astronomía y de la ciencia básica en Toluca, en el Estado de México y en México en general.

Conclusión

En el desarrollo del artículo se ha realizado una descripción de los elementos del Universo, que pueden observarse en noches claras. Existen objetos extendidos a los que en general se les denomina nebulosas, dependiendo de si están dentro



de nuestra galaxia. Si están fuera de nuestra galaxia, son galaxias externas. Hemos descrito que los planetas siguen trayectorias alrededor del Sol, con diferentes velocidades, y que a aquéllas se les denomina órbitas. Las órbitas son en general elípticas y cada una genera un plano imaginario. A la órbita de la Tierra alrededor del Sol se le denomina la eclíptica. El plano de la órbita de cada planeta se encuentra inclinado con respecto al plano de la órbita de la Tierra.

El Sistema Planetario Solar, con el Sol en su centro y los planetas girando a su alrededor, forman un sistema dinámico estable, es decir, el sistema ha permanecido y permanecerá así

por miles de millones de años.

Se ha enfatizado en la inmensidad del espacio, al describir los diámetros del Sol y los planetas y la distancia a cada planeta, de acuerdo a una escala que la persona común use frecuentemente. Para esto se presento al sistema solar referido a la ciudad de Toluca. La distancia vertical a la cual estaría cada planeta, indica la inclinación de su órbita alrededor del Sol. A esta escala, la estrella más cercana al Sol, α Cen tendría un diámetro de 1.23 m y se encontraría (siguiendo hacia el Este) a la misma longitud que las islas Midway en el Océano Pacífico antes de las islas de Hawaii. ♦

APÉNDICE

EQUILIBRIO DINÁMICO DEL SISTEMA SOLAR

La fuerza de atracción del Sol, depende inversamente del cuadrado de la distancia y por lo tanto es menor para planetas más alejados pero directamente proporcional al producto de la masa del Sol por la masa del planeta, es decir, $F_G = GM_s M_p / d_p^2$, en donde G es la constante de gravitación, M_s es la masa del Sol, M_p es la masa del planeta y d_p es la distancia del planeta al Sol. Los planetas, satélites, planetas menores, meteoritos, asteroides y cometas caerían directamente al Sol debido a esta fuerza de atracción si no fuese porque todos esos cuerpos se encuentran en un movimiento de traslación, es decir, se mueven a su alrededor en trayectorias elípticas. Dado que las órbitas son elípticas, pero con muy poca excentricidad, se pueden aplicar los conocimientos del movimiento de cuerpos cuando siguen una trayectoria circular. El tener una trayectoria circular significa que la distancia al Sol no cambia y lo único que cambia con el tiempo es su posición angular con respecto a éste (θ es función del tiempo, es decir, su expresión matemática sería $\theta(t)$). Recordando las ecuaciones de Newton, la fuerza centrípeta (es decir la fuerza que origina el movimiento circular) es directamente proporcional a la masa del planeta por la aceleración del planeta en un movimiento circular, es decir, $F_T = M_p a$, donde a se puede expresar como $a = \frac{v^2}{d_p}$, siendo v la velocidad lineal que tiene el planeta en su órbita alrededor del Sol. Recordemos que velocidad lineal es el intervalo de distancia recorrido en un cierto intervalo de tiempo, o $v = \frac{\Delta l}{\Delta t}$. La

velocidad angular es el intervalo angular entre el intervalo de tiempo o $\Omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$.

El Sistema Planetario es un sistema que está en equilibrio dinámico: los planetas y demás cuerpos celestes se mueven alrededor del Sol y no caen hacia él. Es decir, las fuerzas de atracción y centrípeta son y han sido iguales por muchos miles de millones de años. Así, en un sistema donde la distancia es constante, (movimiento circular), el equilibrio de fuerzas, $F_G = F_T$, se puede expresar como:

$$\frac{GM_s M_p}{d_p^2} = \frac{M_p v^2}{d_p}$$

Las velocidades lineal y angular en un movimiento circular están relacionadas por la igualdad $v = \Omega d_p$, y podemos concluir de la igualdad de fuerzas, que la velocidad angular es inversamente proporcional a la distancia del planeta al Sol, elevada a la potencia 3/2, es decir:

$$\Omega = \sqrt{\frac{GM_s}{d_p^3}}$$

Cada planeta se mueve alrededor del Sol con velocidad diferente. Así, Mercurio se mueve alrededor del Sol más rápidamente que Venus, Venus a su vez más rápidamente que la Tierra, la Tierra más rápidamente que Marte y así sucesivamente. Cada planeta traza su órbita en un plano, estos planos planetarios no son todos paralelos al plano de la órbita de la Tierra sino que están inclinados solo unos grados con respecto a él (ver tabla 1) con excepción de la órbita de Plutón que tiene una inclinación de 17°. Las órbitas de los cometas

sí tienen una inclinación mucho mayor y diferente para cada uno de ellos, en algunos casos de hasta 90°.

Esta combinación de velocidades angulares e inclinaciones de los planos de las trayectorias, de cada planeta, hacen que la comúnmente llamada conjunción de los planetas sea muy rara. A este fenómeno algunas veces se le denomina erróneamente *alineación* de los planetas. *Conjunción* de planetas se refiere a que dos o más planetas estén en la misma dirección de nuestra visual, en un mismo tiempo (ver figura 7a). Dado que los planos de la órbita de cada planeta muestran diferente inclinación, por mucho los planetas aparecerán muy cercanos unos de otros pero nunca en un solo punto, uno detrás de otro (ver figura 7b). Las

conjunciones más comunes son entre los planetas Venus y Júpiter y entre Venus, Marte, Júpiter y la Luna. *Alineación* de los planetas se refiere a la misma posición relativa en la dirección radial, es decir, que todos los planetas formasen un ángulo θ con respecto a una dirección de referencia, de tal forma que una línea imaginaria podría trazarse entre el Sol y todos los planetas.

En la realidad, las órbitas de los planetas no son circulares sino elípticas, la distancia del Sol al planeta varía al mismo tiempo que varía el ángulo, o dicho de otra manera, la distancia del Sol al planeta es función del ángulo, es decir, la expresión matemática sería $d_p(\theta)$. A la expresión $d_p(\theta)$ se le conoce como la *órbita* de la partícula. El trabajo del astrónomo profesional es determinar cómo varía la distancia de cada planeta al Sol, en función de un cambio angular (ver figura 5b). En general, podemos decir que esta variación de la distancia con respecto a la variación angular, es función de las energías involucradas, la energía cinética y la energía potencial, o en términos matemáticos, la expresión puede escribirse como:

$$\frac{\Delta d_p}{\Delta \theta} \propto C_1 d_p^2 \sqrt{C_2 (E_c - E_p)}$$

donde C_1 y C_2 son constantes y E_c y E_p son las energías cinética y potencial respectivamente. Esta expresión nos da la predicción de la órbita de un planeta bajo la fuerza de gravedad del Sol. Sin embargo, el Sistema Planetario Solar es mucho más complejo que eso. Todos los planetas ejercen una fuerza de atracción sobre los demás planetas; en unos casos esa fuerza es mayor que en otros. Predecir las órbitas para todos los planetas y miembros del Sistema Planetario Solar *al mismo tiempo* resulta un trabajo ¡casi imposible! El trabajo del astrónomo es predecir lo mejor posible la órbita de cada planeta y corroborarla con observaciones. Las observaciones son muy importantes porque describen la realidad. En el momento en el que las órbitas calculadas matemáticamente predicen las posiciones de los planetas en función del tiempo, se dice que el modelo matemático es la mejor representación de la realidad. Si acaso existe una discrepancia, el modelo deberá cambiarse hasta que ésta desaparezca. La consideración de este efecto combinado de fuerzas, llevo al descubrimiento de los planetas Neptuno y Plutón. Teóricamente se había calculado la órbita de Urano, solo bajo la influencia gravitacional del Sol, Júpiter y Saturno, pero las observaciones indica-

FIGURA 7A. LOS PLANETAS MÁS CERCANOS AL SOL GIRAN CON UNA MAYOR VELOCIDAD ANGULAR QUE LOS PLANETAS MÁS LEJANOS, POR LO TANTO, HABRÁ OCASIONES EN LAS QUE EXISTA UNA CONJUNCIÓN, ES DECIR, QUE DESDE LA TIERRA, VARIOS PLANETAS APAREZCAN CASI EN EL MISMO LUGAR DEL CIELO. SIN EMBARGO, DEBIDO A LAS DIFERENTES INCLINACIONES DE LAS ÓRBITAS DE CADA PLANETA, NUNCA APARECERÁN EN UN MISMO PUNTO SINO MUY CERCANOS UNOS DE OTROS.

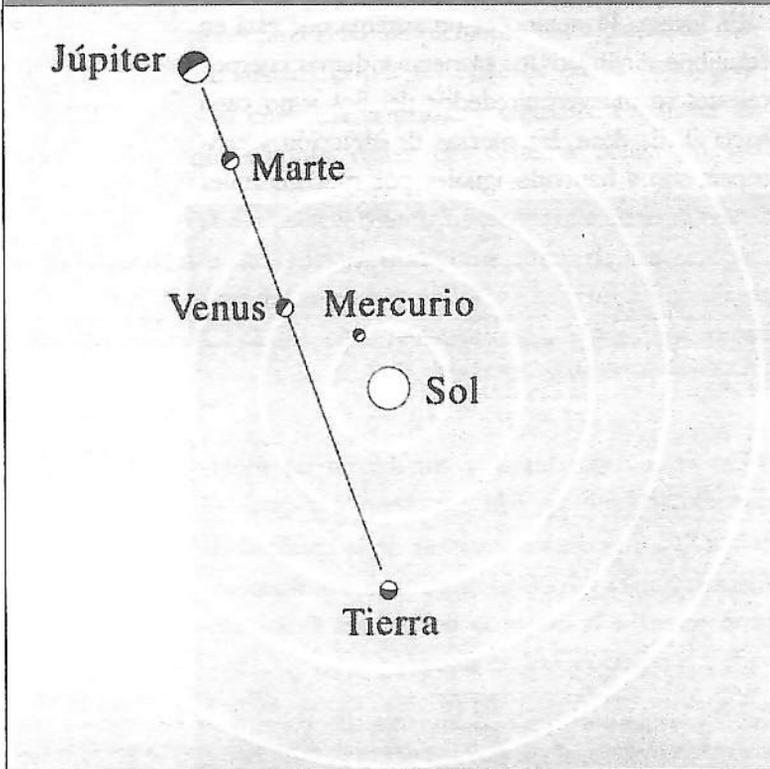
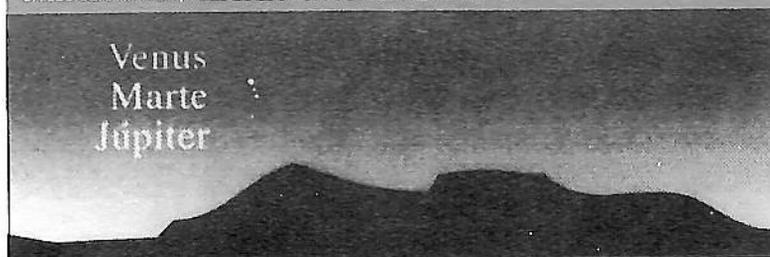


FIGURA 7B. CONJUNCIÓN DE LOS PLANETAS VENUS, MARTE Y JÚPITER. DEBIDO A LA DIFERENTE INCLINACIÓN DE SUS ÓRBITAS Y SU DIFERENTE DISTANCIA AL SOL, LOS TRES PLANETAS APARECERÁN MUY CERCANOS UNO DE OTRO PERO NUNCA EN EL MISMO PUNTO ECLIPSÁNDOSE. EL BRILLO SERÁ MAYOR, PUES ES EL BRILLO DE LOS TRES PLANETAS.



ban que Urano no aparecía donde se había predicho sino en otro lugar. Estas desviaciones de Urano en su órbita, sólo podrían deberse a la fuerza de atracción de otro planeta cercano a él, pero más alejado del Sol que Urano. Se calculó la posición de ese nuevo planeta y ¡oh sorpresa!: las observaciones en septiembre de 1843 corroboraban la existencia de ese nuevo planeta al que se le denominó Neptuno. Similarmente sucedió con las anomalías en la órbita calculada para Neptuno y se llegó a la conclusión de que esas desviaciones deberían ser producto de la fuerza de atracción de otro planeta exterior. Finalmente, observaciones en marzo de 1930 confirmaron la existencia del planeta al que se le denominó Plutón.

La ecuación que relaciona el cambio de distancia con el cambio angular, también puede usarse para predecir las órbitas de las miles de millones de estrellas que giran alrededor del centro de una galaxia, y similarmente al ejemplo del Sistema Planetario Solar, son las observaciones las que ratifican o en su caso descalifican el modelo empleado. Así los modelos galácticos se van perfeccionando hasta tener la mejor representación matemática de la realidad, en lo referente a los movimientos de las estrellas alrededor del centro de una galaxia, lo que constituye una rama de la astronomía conocida como *dinámica galáctica*.

BIBLIOGRAFÍA

Allen, C. (1973). *Astrophysical quantities*. The Athlone Press, University of London, Londres.

Binney, J. y Tremaine, S. (1987). *Galactic dynamics*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.

Bravo, S. (1987). *Encuentro con una estrella*. Fondo de Cultura Económica, México, D.F.

Fierro, J. y Herrera, M. (1988). *La familia del Sol*. Fondo de Cultura Económica, México, D.F.

Flores, D., editor (1995). *Anuario del Observatorio Astronómico Nacional*. Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Harwit, M. (1988). *Astrophysical concepts*. Springer-Verlag, Nueva York

Kleppner, D. y Kolenkow, R. (1973). *An introduction to mechanics*. McGraw Hill Co., Nueva York.

Malacara, D. y Malacara, J. (1988). *Telescopios y estrellas*. Fondo de Cultura Económica, México, D.F.

Rodríguez, L. (1985). *Un Universo en expansión*. Fondo de Cultura Económica, México, D.F.

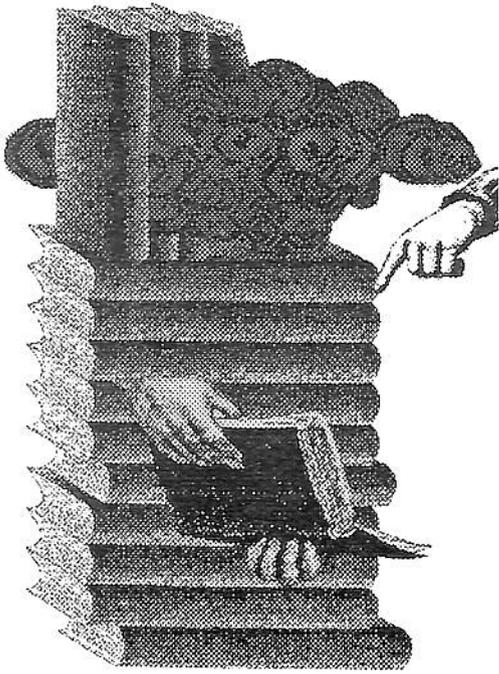
Schwarzschild, M. (1965). *Structure and evolution of the stars*. Dover Publ. Inc., Nueva York.

Whyte, A. (1980). *The planet Pluto*. Pergamon Press, Toronto.



LIBROS UNAM





El Centro de Información de Libros UNAM tiene como objetivo resguardar las obras impresas que a lo largo de su historia ha producido la comunidad universitaria bajo el sello editorial de la UNAM. Ofrece los servicios de consulta e información bibliográfica sobre los 13 000 volúmenes que conforman su acervo.

Av. del IMAN No. 5, C. U.
04510, México, D. F.
Tels. 622 65 84 y 622 65 91

RED DE LIBRERÍAS

CENTRAL C. U.
Corredor Zona Comercial,
Ciudad Universitaria
C. P. 04510, México, D. F.
Tel. 622 02 71

CASA UNIVERSITARIA DEL LIBRO
Orizaba y Puebla,
Col. Roma
C. P. 06700, México, D. F.
Tel. 207 93 90

JULIO TORRI C. U.
Centro Cultural Universitario,
Ciudad Universitaria,
C. P. 04510, México, D. F.
Tel. 622 71 35

PALACIO DE MINERÍA
Tacuba No. 5, Col. Centro
C. P. 06000, México, D. F.
Tel. 518 13 15

JUSTO SIERRA
San Idelfonso No. 43,
Col. Centro,
C. P. 06000, México, D. F.
Tel. 702 44 54

Informes y Ventas
Dirección General de Fomento Editorial UNAM
Av. Del IMAN No. 5, C. U.,
C. P. 04510, México, D. F.
Tel. 622 65 90
Tel. y Fax 622 65 82

WWW:<http://bibliounam.unam.mx/libros>
E-mail:libros@bibliounam.unam.mx