

LOS COMETAS Y GALILEO

John Beckman,
Instituto de Astrofísica de Canarias

La historia de Galileo y los cometas muestra la relativa dificultad para el desarrollo de la investigación científica en un mundo dominado por la superstición y la ceguera ideológica. La idea que voy a desarrollar en este artículo es que la naturaleza de los cometas frustró a Galileo, en el sentido de que él sabía que no entendía ni su composición ni la forma de sus órbitas, y por tanto, no supo incorporarlos a su modelo del Universo: el de Copérnico.

Sin embargo, sus observaciones de los planetas le habían convencido de que el modelo copernicano explicaba la fenomenología del cielo de una forma mucho más coherente que las teorías rivales.



Figura 1. Dibujos de una clasificación de diferentes formas de colas cometarias encontrados en la tumba de un emperador chino de la dinastía Han, circa 168 a.C.



Así, hizo lo posible para sostener el copernicanismo dentro de las limitaciones de su conocimiento. Tanto en este aspecto como en varios de sus ensayos teóricos, cometió lo que para nosotros son errores importantes, pero en sus ideas sobre los cometas sabía bien que no tenía una historia coherente, y se defendió atacando las teorías de sus rivales.

I. LA HISTORIA NATURAL DE LOS COMETAS

Antes de poder comprender sus dificultades, debemos tener en la mente un resumen de la física de los cometas. Empezaré con la formación de un sistema solar como el nuestro. Una nube de gas interestelar, esencialmente de hidrógeno y helio, se condensa por la acción de la gravedad y forma una estrella. Los restos de la nube van a constituir los miembros menores de un sistema solar, según su tamaño y distancia de la estrella. La rotación juega un papel importante en el proceso. La nube original gira lentamente antes de su colapso, pero al condensarse adquiere una velocidad de rotación rápida, como un patinador que recoge sus brazos hacia el cuerpo. El resultado es que la concentración que va a formar la estrella (la llamaremos “el Sol” de aquí en adelante) termina por girar sobre su eje con rapidez. La condensación central forma el Sol, y finalmente la materia restante se convierte en planetas, asteroides, cometas y meteoritos. Los planetas son los trozos más grandes de la nube original (salvo el del Sol mismo). Los que se formaron más cerca del Sol –Mercurio, Venus, la Tierra y Marte– perdieron por evaporación sus gases ligeros, el hidrógeno y el helio, debido al calor solar, mientras los más alejados –Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno– han retenido los suyos, con lo cual son más grandes pero menos densos.

Las leyes de la dinámica, la de la gravedad y la del movimiento cuasi-circular, implican que la velocidad de un planeta en su órbita decrece sistemáticamente con su distancia al Sol, expresada numéricamente por Kepler en su tercera ley del movimiento planetario.

Detengámonos por un instante en el momento angular de los cuerpos del Sistema Solar, para ver una paradoja muy del gusto de Galileo. Mientras el Sol contiene el 99% de la masa del Sistema Solar, posee menos del 1% de su momento angular; el otro 99% está en los planetas. Esto sucede porque el Sol está muy cerca del centro de gravedad del Sistema, y el momento angular de un cuerpo es el producto de su masa, la velocidad de giro alrededor del eje de rotación relevante y la distancia del cuerpo al eje. Los planetas están muy lejos del eje central y así su momento angular colectivo es mucho mayor que el del Sol, aunque sus masas sean tan pequeñas en comparación. La nube de la cual se formó el sistema tenía que haber compartido su momento angular de forma homogénea y entonces cada cuerpo formado a partir de ella tendría un momento angular proporcional a su



masa. Según esta idea el Sol debe tener el 99% del momento angular y no el 1%. La explicación de esta discrepancia es que el Sol tenía (y tiene) un viento de partículas que se escapan de su superficie con alta velocidad y que interactuaron con el gas que formó los planetas, transfiriendo casi todo el momento angular del Sol original a los planetas.

La razón de describir este proceso, que parece tener poco que ver con los cometas, es que refleja una conocida idea de Galileo que ha sido muy criticada por inverosímil. En su carta a Castelli (1), donde interpreta la famosa escena bíblica de Josué con el Sol parado en el cielo, Galileo ofrece la hipótesis de que no era el movimiento orbital sino la rotación del Sol la que se paró por el milagro, y que este parón podía causar el cese temporal de la rotación de cada planeta sobre su eje, deteniendo así la secuencia de día y noche en la Tierra, dentro de un marco copernicano del Sistema Solar. La idea subyacente era que la rotación de los planetas se controla de forma más o menos directa por la rotación del Sol mediante un mecanismo no conocido. Si aceptamos que la única forma de interacción entre el Sol y los planetas es y ha sido la

de la gravedad, esta idea nos parece absurda y pone en cuestión el sentido de la física de Galileo. Sin embargo, el viento solar, descubierto hace sólo medio siglo, y ahora conocido como una propiedad de cualquier estrella en mayor o menor grado, es exactamente un efecto que emana del Sol y que ha afectado fuertemente a la rotación de los planetas en sus órbitas y en sus ejes. Ironías de la Ciencia y de los juicios históricos que se hacen sobre ella. De todos modos, la teoría de Galileo era obviamente errónea y la mejor manera de considerar la historia bíblica original sería, como en cualquier buena historia de ciencia ficción, la de una en la que las leyes de la física se pueden abolir para crear una narración atractiva.

Además de los planetas, el Sistema Solar contiene cuerpos menores: asteroides, meteoritos, y cometas. Los asteroides son planetas menores, con órbitas casi circulares, pero los cometas tienen órbitas muy alargadas con los perihelios muy cerca del Sol y los afelios mucho más alejados que Neptuno y Plutón. Todos los que observamos tienen órbitas elípticas: son miembros del Sistema Solar, pero éstas son tan grandes que, salvo cuando están muy cerca del Sol, parecen moverse en línea recta.

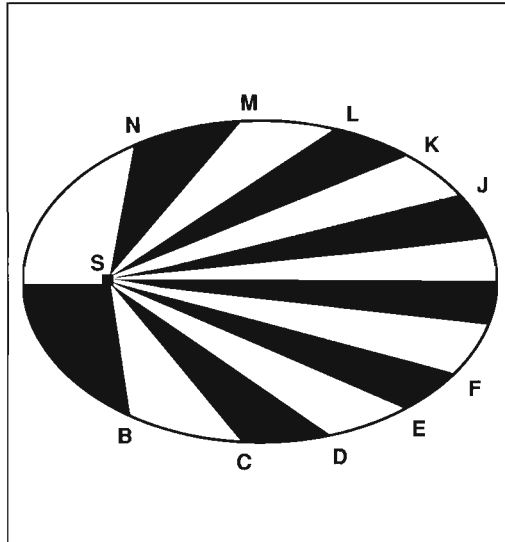


Figura 2. Esquema de la segunda ley de movimiento planetario de Kepler. Para que un objeto barra áreas iguales en tiempos iguales, tiene que moverse mucho más rápidamente en el arco AB que en el arco GH



En el marco de nuestro modelo actual del Sistema Solar, ¿cómo podemos entender los cometas? Las leyes que gobiernan el comportamiento orbital de todos los cuerpos del Sistema Solar son las tres enunciadas por Kepler, basadas en las observaciones de Tycho Brahe. Las dos primeras se publicaron en su *Comentario sobre el movimiento de Marte* del año 1609 (2). La primera dice que los planetas describen órbitas de forma elíptica, con el Sol en uno de sus focos, y la segunda dice que una línea construida entre un planeta y el Sol (el “radio vector” entre ellos) barre áreas iguales en períodos de tiempo iguales. (La tercera dice que la razón de los períodos cuadrados de dos planetas en sus órbitas es proporcional a la razón de los radios cúbicos de ellas. La tercera ley es una muy buena aproximación para órbitas que son casi circulares –el “radio” es un valor promedio de la distancia entre el planeta y el Sol– pero no se puede aplicar directamente a las órbitas muy alargadas, como las de los cometas). Sabemos bien que uno de los triunfos de Newton fue el de inferir estas leyes a partir de su ley universal de la gravedad, combinada con las leyes generales del movimiento, y así comprobar que la mecánica de los cuerpos celestes es la misma que la mecánica de los cuerpos terrestres (entre otras muchas implicaciones). Las primeras dos leyes son válidas para cualquier sistema de dos cuerpos en órbita sometidos a la gravedad, sin que el hecho de ser planetas o cuerpos menores afecte a esa situación. Basándonos en las leyes de Kepler podemos conocer el comportamiento dinámico de un cometa, incluso antes de tener una teoría completa de su origen y naturaleza.

Cualquier objeto en órbita alrededor del Sol, cumple las dos primeras leyes de Kepler, esto es, sigue un camino elíptico, con el Sol en un foco, y tiene que moverse mucho más rápidamente cerca del Sol que en la parte lejana de la órbita para que el radio vector barra áreas iguales en períodos iguales. Imaginemos un experimento en el cual se deja caer una piedra hacia el Sol desde una distancia grande, diez o más veces mayor que el radio orbital de Neptuno; esta caerá con una velocidad creciente, atraída por la gravedad del Sol. Si tuviese un poco de velocidad inicial perpendicular a su dirección de caída, no terminaría en el Sol, sino que pasaría a su lado, pero la enorme fuerza de la gravedad cambiaría su dirección drásticamente, dando una vuelta rápida al Sol, volviendo hacia su lugar de origen. Tendríamos entonces una órbita muy alargada, casi lineal, una elipse con el sol en un foco, y su movimiento cerca del perihelio sería mucho más rápido que en el resto de la órbita.

Esta es una descripción de un cometa en términos puramente dinámicos: un objeto que por una razón u otra cae hacia el Sol desde muy lejos, describiendo una órbita elíptica, pero tan alargada que parece lineal sobre gran parte de su trayectoria. Cerca del Sol se mueve rápidamente, y más lejos se mueve con relativa lentitud. ¿Pero qué son los cometas y de dónde vienen? La teoría aceptada del origen de los cometas se debe a uno de los astrónomos más creativos del siglo XX, uno de los padres de la radioastronomía, y un gran experto en la dinámica galáctica, el holandés Jan Oort (3). Oort postuló que una parte de la nube inicial



que formó el Sistema Solar se encuentra en las afueras del Sistema, a casi la mitad de la distancia de la estrella más cercana. Esta nube tiene la forma de un enjambre de pequeños cuerpos, rodeados por un gas tenue, que contiene desde partículas muy pequeñas de polvo hasta objetos del tamaño de un asteroide (unas decenas de kilómetros de diámetro). Un nódulo de los grandes consiste en una mezcla de materiales a los que llamamos piedra, con materiales a los que llamamos hielo. Hay una tendencia secular y lenta de los trozos más grandes de este material a crecer debida a la incorporación de las partículas de su entorno bajo la acción de su gravedad. La nube, antes de la formación del Sol y de los planetas, llega a tener la forma de un disco porque la fricción interna de cualquier nube en rotación alrededor de un eje adopta esta forma, que se repite en todas las escalas de los cuerpos gravitatorios en rotación del Universo, tales como las galaxias, o los discos alrededor de los agujeros negros. La forma característica de disco se impone con relativa rapidez en un gas en el espacio, más rápidamente que los procesos que dan lugar a cuerpos del tamaño de una estrella o un planeta. Así, cuando el material del Sistema Solar estaba tan comprimido como para que se formasen el Sol y los planetas, su estructura era la de un disco, con un eje común de rotación. Ésta es la razón física por la que los planetas giran en sus órbitas en un plano, el plano de la eclíptica, y por la que tanto el Sol como los planetas tienen sus ejes de rotación no muy lejos de la perpendicular a ese plano.

La parte más externa de la nube del Sistema Solar contiene muchos cometas. Son de un tamaño similar al del Teide y están formados por una mezcla de piedra y hielo. Esa nube se llama “la nube de Oort”; su existencia la propuso Jan Oort para explicar un aspecto llamativo de la fenomenología de los cometas. El cometa más conocido es el Cometa Halley, que se acercó al Sol y a la Tierra por última vez en el año 1986, y vuelve cada 76 años. Hay un buen número de cometas con periodos de no muchos años, los cometas de periodo corto. En los años 60 las observaciones de la cantidad de material que se perdía de un cometa cada vez que hacía una pasada alrededor del Sol, permitieron a Oort calcular que un cometa del tamaño del Halley debía tener una vida de unos 10 millones de años antes de disiparse por completo. Pero mediante observaciones espectroscópicas de las razones isotópicas de oxígeno y carbono en los cometas, ya se sabía que tenían una composición similar a la del Sistema Solar en la época de su formación. Es decir, un cometa debe tener una vida efectiva de unos 5 mil millones de años. La aparente incompatibilidad entre estas dos mediciones fue resuelta por Oort. Su teoría, ahora considerada como la única capaz de explicar las observaciones cuantitativas, es que hay una nube de cometas –resto de la parte exterior de la nube que dio lugar al Sistema Solar– permanentemente in situ a una distancia entre 50.000 y 150.000 unidades astronómicas del Sol (el límite exterior está aproximadamente a la mitad de la distancia de la estrella más cercana). En su estado de equilibrio, estos cuerpos tienen órbitas casi circulares, con velocidades orbitales muy bajas alrededor del Sol, de acuerdo con la tercera ley de Kepler.



La forma original del modelo de Oort predice que, con intervalos de unos 10 millones de años, el Sol y alguna estrella se acercan durante sus órbitas alrededor de la Galaxia de tal forma que la estrella se encuentra dentro de la nube de los cometas, la “nube de Oort”. Su presencia perturba de forma más o menos fuerte las órbitas de los protocometas. En la gran mayoría de los casos, esos protocometas son expulsados del Sistema Solar y capturados por la estrella, o bien se encuentran en una órbita libre dentro de la galaxia. Pero en un pequeño número de casos, la perturbación de la estrella envía el cuerpo cometario casi directamente hacia el Sol. Entonces, el cuerpo adquiere una órbita muy alargada, y en su acercamiento al Sol la combinación de la radiación y el viento solar liberan la materia congelada de la parte más superficial. Eso da lugar a la imagen clásica de un cometa, con el núcleo, la parte sólida formada por piedra y hielo, una “coma” brillante donde se concentra la parte más importante de los gases liberados por los efectos de la proximidad del Sol, y una cola más o menos larga, formada por una nube muy larga y tenue de gas expulsado del cometa y que es empujado hacia afuera por la presión de la radiación solar y de su viento. Aunque el cuerpo sólido del cometa, el núcleo, puede tener el tamaño de una montaña terrestre, la coma puede tener un diámetro mas grande que un planeta, y la cola puede llegar a una longitud comparable a la distancia Tierra-Sol. La cola es tan tenue que si pasara por la atmósfera de la Tierra, sus efectos serían totalmente despreciables y así, los antiguos temores por la integridad del planeta Tierra como consecuencia de los cometas no tienen fundamento (El impacto del núcleo de un cometa sobre la Tierra, que sería similar al de un asteroide pequeño podría causar gran daño, sobre todo climático. Pero las probabilidades no son muy altas por unidad de tiempo). El empuje de la radiación y del viento solar hacen que la cola de un cometa siempre salga del núcleo en una dirección básicamente opuesta al Sol.

Hay un par de detalles más que merecen ser explicados. En general hay dos tipos de colas que suelen aparecer simultáneamente: colas del llamado tipo



Figura 3. El cometa Halley en su aparición de 1532, dibujado por P. Apian, mostrando la cola siempre apuntando en la dirección opuesta.



I y de tipo II. Una cola de tipo II se compone de partículas finas de polvo (5), que responden a la presión de la radiación solar, mientras la cola de tipo I se compone de iones (6), átomos cargados, que responden al flujo de partículas en el viento solar. A menudo las dos colas del mismo cometa se pueden observar por separadas, porque la cola de polvo va directamente a lo largo del radio Sol-cometa, mientras la de plasma (de los iones), adopta una dirección que es la resultante de la velocidad del viento solar y la del cometa, y las dos direcciones no son idénticas, aunque no se separan mucho entre sí.

Las investigaciones sobre los cometas siguen muy activas. Ahora se sabe que hay una parte de la nube de Oort, la “nube interna de Oort” (7), efectivamente ligada al Sol, de donde provienen los cometas que pueden llegar cerca de la Tierra, y donde residen entre 1 y 10 millones de ellos (8). Pueden parecer muy numerosos, pero la masa total de ellos es entre diez y cien veces la masa de la tierra, mucho menor que la masa del Sol.

Hay una cuestión clave para explicar el porqué algunos cometas tienen periodos cortos. Un cometa que inicia una órbita desde dentro de la nube de Oort tarda unos cinco millones de años en llegar cerca del Sol, lo que implica un período orbital de alrededor de diez millones de años. Tal cometa pasará casi toda su órbita en movimiento muy lento, con un aspecto totalmente sólido y congelado, sin coma ni cola. Tiene solamente un breve periodo de gloria, su cita con el Sol, de unas semanas, cuando se viste de gala para el ojo humano. Una órbita así no se distingue de la de un objeto que llega desde fuera del Sistema Solar; así, hasta hace poco tiempo, se suponía que muchos cometas eran cuerpos con origen fuera de nuestro Sistema, claramente distintos a los miembros del mismo, como el cometa Halley, con periodos de decenas de años. Ahora sabemos que los cometas con periodo corto no son diferentes en su origen, sino que viajan así porque en un pasado no muy distante fueron perturbados al pasar cerca de un planeta, el más influyente de los cuales es Júpiter, debido a que su masa excede a la suma de las masas de los demás planetas. Todos los cometas empezaron en la nube de Oort, pero algunos reciben un impulso de la gravedad de Júpiter que afecta a sus órbitas y que puede reducir sus periodos drásticamente. Estos cometas son realmente de la familia Sol-Júpiter, más que del Sol solamente. Un ejemplo de ellos es el cometa Shoemaker-Levy, de triste memoria, que terminó su vida violentamente chocando contra la atmósfera joviana.

II. LAS IDEAS SOBRE LOS COMETAS ANTES DE LA ÉPOCA DE TYCHO, KEPLER Y GALILEO

a) Las dos teorías clásicas

Ahora que sabemos a grandes rasgos las propiedades de los cometas podemos intentar meternos en la piel de los astrónomos de los siglos XVI y XVII para ver como hicieron sus hipótesis. Se podía elegir entre dos ideas básicas; la pri-



mera, debida a Aristóteles (9), consideraba a los cometas como objetos meteorológicos, y la segunda, cuyo defensor principal en la época clásica fue Séneca, era la de la naturaleza planetaria de los cometas. La razón por la cual Aristóteles consideró a los cometas como fenómenos terrestres fue su evidente cambio de forma, que era incompatible con su pertenencia a las inmutables esferas translunares. Su explicación de los mismos es que ciertos vapores telúricos suben por la atmósfera terrestre hacia la esfera lunar donde, por roce giratorio, se calientan y se encienden, dando lugar a una emisión de luz de forma más o menos alargada. Esta idea estaba en contradicción con otras teorías que defendían la idea de que un cometa es una unión de planetas conocidos (Anaxágoras y Demócrito) o simplemente un tipo de planeta que se deja ver a intervalos largos (Hipócrates de Quíos, y Esquilo). Según los últimos, la cola es una reflexión de la luz del Sol en la humedad cercana al planeta, y que se ve en ciertas orientaciones. La teoría de Aristóteles es coherente con su cosmología, y explica no solamente la fenomenología de un cometa, sino sus supuestos efectos en la Tierra. Así, si hay una aparición de cometas con cierta frecuencia, a ésta siguen vientos calurosos y sequías debido a la abundancia del elemento fuego en ese momento. La teoría de los cometas está descrita en el primer libro de la “Meteorología” de Aristóteles, de acuerdo a su distinción fundamental entre la zona supralunar, donde el movimiento es eterno y circular, y el cambio y la corrupción no son posibles, y la zona sublunar en la que el movimiento es transitorio y rectilíneo hacia el centro, con materia corruptible. Para derrocar esta teoría de los cometas había que derrocar toda una cosmología, lo que explica la longevidad histórica de la teoría de cometas de Aristóteles.

La otra teoría sobre la naturaleza de los cometas en la época de la ciencia greco-romana proviene de Séneca (10), casi tres siglos después de Aristóteles. Séneca era un estoico y una figura más literaria que científica, pero su estilo ameno y al mismo tiempo riguroso sobre temas de filosofía natural hizo de su obra un punto de referencia hasta el siglo XV. Las *Cuestiones Naturales* es una obra de siete volúmenes sobre fenómenos de la naturaleza, muchos de ellos de meteorología y de geografía física. En ella Séneca trata los cometas en el primer tomo, y sobre todo en el séptimo dedicado enteramente a ellos. Séneca compara y contrasta los cometas y los planetas. Su punto de vista sobre los cometas ilustra una mentalidad muy diferente a la de Aristóteles. El estudio de los cometas es para él un elemento más en la búsqueda de una respuesta a la cuestión de la naturaleza de los objetos en el Universo, sin hacer ninguna distinción entre lo supralunar y lo sublunar, entre lo permanente y lo temporal. Su actitud es humilde ante los hechos observacionales, y este aspecto lo asemeja a un científico experimentalista moderno; considera varias teorías sobre la naturaleza de los cometas y las desestima, como la de que un cometa es la unión de dos o más planetas, incluso de muchos que no son normalmente visibles pero que se hacen visibles al agruparse. Su argumento en contra es que un planeta muestra una secuencia de intensidades de más a menos luminosas, y después de menos a más, según su órbita



circular, mientras que un cometa aparece con un máximo brillo, que disminuye sistemáticamente. También descarta Séneca la teoría según la cual los cometas se componen de estrellas débiles, o son brotes de fuego repentinos en la atmósfera. Él defiende que un cometa es un objeto lejano, como un planeta, pero con una órbita diferente y admite que no se encuentran solamente en el zodíaco, como los planetas, pero no sabiendo suficiente sobre las órbitas de los astros en general, no podemos excluir la pertenencia de los cometas a la familia de los planetas. Séneca argumenta que el hecho de que los cometas no tengan la misma apariencia que las estrellas o los planetas no elimina la posibilidad de que pertenezcan a la zona supralunar y dice que hay una gran variedad de tipos de objetos en el cielo, e insiste en lo importante de las observaciones para entender el fenómeno de los cometas, que son difíciles en este aspecto. Tanto la teoría de Séneca como su actitud son sorprendentemente modernas; se podría pensar que no tenía base para su teoría (como Demócrito no tenía base para ser atomista) pero eso sería descartar lo que es la intuición científica moderada por la razón (lo que hoy día se llamaría una infraestructura teórica). Aunque hay bastante escrito sobre los cometas hasta la época de Ptolomeo, en el siglo II d.C., podemos seleccionar el modelo aristotélico y el modelo de Séneca como paradigmas de teorías terrestres y celestes respectivamente. Ptolomeo adoptó esencialmente el modelo de Aristóteles, tanto para los cometas como para su cosmología en general.

b) Las distancias a los cometas: la metodología de Regiomontano, aplicada por él y sus sucesores, incluyendo a Tycho Brahe

En este artículo no puedo pretender ni siquiera resumir todas las observaciones o las especulaciones teóricas sobre los cometas en el período medieval. He seleccionado la obra de Regiomontano porque tiene relevancia directa con las discusiones que involucraron a Galileo un siglo y medio más tarde. Uno de los datos decisivos a la hora de decidir la naturaleza de los cometas es el de su distancia a nosotros. El método universal para medir distancias grandes en la superficie de la Tierra y distancias cortas en el espacio exterior es el del paralaje, esto es, medir el ángulo subtendido por el objeto distante visto desde dos sitios cuya separación se conoce.

En el caso de un objeto astronómico esta separación tiene que ser grande, a ser posible el diámetro de la Tierra, y el ángulo se mide suponiendo fijas las posiciones de las estrellas. La Luna, vista desde puntos opuestos del diámetro de la tierra tiene posiciones angulares separadas por algo menos de dos grados, que son cuatro veces su propio diámetro. El paralaje lunar es medible así con relativa facilidad con instrumentos sin lentes, desde dos ciudades cuya separación puede ser la de unos pocos miles de kilómetros; de esta manera la distancia a la Luna se pudo estimar con errores de menos del 10% antes de la época de Tycho. Un dato importante para averiguar la naturaleza de un cometa era estimar su paralaje para ver si estaba situado más o menos distante que la Luna. La Luna es, con mucho,



el objeto astronómico más cercano a la Tierra (salvo unos pocos e infrecuentes asteroides), con lo cual los paralajes de los objetos astronómicos en general son menores (bastante menores). Si un cometa en su paso cerca de la órbita de la Tierra tuviera una distancia de perigeo de 2 millones de kilómetros (valor no típico sino pequeño para un cometa) su paralaje diametral desde la Tierra sería algo mayor que 20 minutos de arco. Desde dos observatorios separados por la mayor distancia posible en una zona que comprendiese a Europa y al Oriente Medio, el paralaje sería de unos 6 minutos de arco, es decir la quinta parte del diámetro de la Luna. Incluso con instrumentos sin lentes, este paralaje es medible si hay estrellas más o menos brillantes cerca del núcleo del cometa y con condiciones cercanas a las ideales. Sin embargo, un cometa que viaja en una órbita con dirección al Sol o que sale de su perihelio cruzará la órbita de la Tierra, en una dirección casi perpendicular a ella, a una velocidad del orden de 40 Km/sg. que es equivalente a 3.5 millones de Kms en un día. Su cambio de posición en el cielo ocasionado por ese movimiento es suficiente para impedir cualquier intento de medir su distancia a través de su paralaje, si las medidas no se hacen de forma simultánea. El cometa se mueve, perpendicularmente a la línea de visión, a lo largo de un espacio de 4.000 Kms en 100 segundos. Esos 4.000 Kms pueden representar la misma distancia, en la Tierra, entre los dos puestos de observación. De esto se infiere que, si las medidas de la posición del cometa

de los dos observatorios se hacen con un intervalo de tiempo superior a 100 segundos, la medida no es válida. De hecho, para asegurar una medida correcta, la diferencia debe ser del orden de 10 segundos o menor. Poder sincronizar dos observaciones a través de un continente en el siglo XV o XIV con una precisión de 10 segundos es imaginar lo imposible. Esta cifra sobre los intervalos de tiempo es válida independientemente de la distancia del cometa, pero a una mayor distancia la medida del ángulo es intrínsecamente más difícil. Solamente con el invento del cronómetro marino en el siglo XVIII hubiera sido posible imaginar tal observación.

Un método alternativo al del uso de dos sitios fijos, consiste en usar la rotación de la Tierra para obtener una línea de base. Durante un día el observador gira del extremo oeste al extremo este de la Tierra, lo que evita la necesidad de usar dos observatorios. Este método se conocía en el siglo XV (y sus detalles fueron elaborados matemáticamente por Regiomontano), pero adolece de dos dificultades básicas: la primera es que necesita resolver unos problemas más o menos complejos de geometría esférica y requiere un entendimiento conceptual sobre cómo gira la tierra; la segunda es la misma que se plantea con dos observatorios:

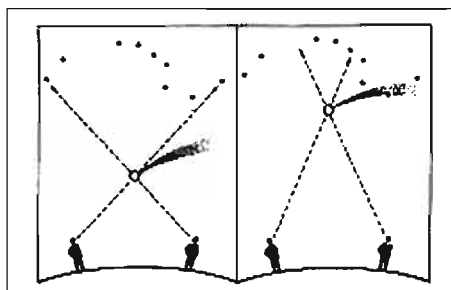


Figura 4. Ilustración esquemática del método de paralaje: triangulación directa para determinar distancias a objetos no muy distantes de la tierra.



si hay movimiento propio significativo del objeto el método es muy difícil de aplicar.

Regiomontano nació en Königsberg, Baviera, en 1436 y obtuvo su licenciatura por la Universidad de Viena con solo 15 años de edad. Estableció un observatorio de su propiedad con la ayuda de un mecenas y también una editorial para la producción de obras de matemáticas y astronomía, tanto antiguas como modernas (entre ellas, tablas astronómicas y matemáticas). En 1475 el Papa Sixto IV le invitó a Roma para colaborar en la reforma del calendario. Murió allí, menos de un año después de su llegada. Regiomontano publicó dos trabajos sobre cometas. Uno era teórico y bastante amplio, *Dieciséis problemas sobre la magnitud, longitud y situación verdadera de los cometas*, publicado finalmente en 1531 (se produjo una larga historia de lucha legal sobre sus manuscritos, lo que impidió la publicación hasta casi un siglo después de su muerte). El segundo, una observación del cometa de 1475, no fue publicado hasta 1544 (11). Su trabajo sobre los elementos físicos de los cometas pretendía resolver el problema del paralaje diurno, es decir, el paralaje estimado aprovechando la rotación de la Tierra. Era una obra puramente matemática, en la que explicaba cómo, desde una serie de posiciones en la superficie de la Tierra y diferentes posiciones del cometa en el cielo, se podía estimar la distancia al cometa usando su paralaje.

Regiomontano trata el problema desde un punto de vista geométrico, suponiendo que el radio de la esfera de las estrellas fijas (el *primum mobile*) es mucho más grande que el de la Tierra. Explica cómo determinar la razón de la distancia del cometa al radio de la Tierra, mediante una serie de medidas de la posición angular del cometa con respecto a una muestra de estrellas y al polo norte del cielo. Trata un caso totalmente general, donde las medidas se hacen en momentos arbitrarios de la noche, y también casos más sencillos de calcular, como aquel en el que una de las medidas se hace con el cometa en el meridiano. El único parámetro que se necesita para computar la distancia del cometa usando dos medidas de su posición en el cielo (tanto con respecto a tres estrellas fijas, como con respecto al horizonte y al polo norte) y conociendo la latitud del observador, es el radio de la Tierra. Una vez determinada su distancia y con el uso de un instrumento simple para medir su radio (el radio de la coma) se puede determinar su tamaño absoluto y su volumen. Regiomontano estaba perfectamente al tanto del problema de un eventual movimiento propio del cometa. Sugirió estimarlo midiendo este movimiento durante un tiempo largo de, como mínimo, varios días y sustraer el valor medio diurno del paralaje modificado para obtener el paralaje verdadero.

La metodología de Regiomontano es correcta y rigurosa. Su uso permitiría establecer las distancias a los cometas de forma precisa. Es una obra matemática que impresiona por su percepción y elegancia. Sin embargo, este método nunca hubiera servido a los astrónomos de su época, por lo pequeños que son los paralajes de los cometas y sus relativamente grandes (y no constantes) movimientos



propios. En un tratado de la época también atribuido a Regiomontano (pero de muy dudosa autenticidad) la aplicación de su metodología de forma bastante burda a las observaciones del cometa de 1472 lleva a la conclusión de que el paralaje de aquel cometa era de 6 grados, un valor tremendamente alto que hubiera puesto el cometa a una distancia de 12.000 kilómetros de la Tierra. Esta medición dice más sobre lo rudimentario de las medidas usadas que sobre los conceptos de los cometas durante el siglo XV. El método de Regiomontano, aplicado con el máximo rigor posible en la práctica de entonces, habría podido fijar la posición de un cometa típico a una distancia mayor que la de la Tierra a la Luna, y habría derribado la teoría de Aristóteles. Pero sólo era posible aplicarlo con grandes errores. Por ejemplo, Johannes Voegelin, profesor de matemáticas de la Universidad de Viena, usó la metodología de Regiomontano para estimar el paralaje del cometa de 1532, que fue muy brillante. Observando la altitud y el azimut del cometa dos veces, con un intervalo de 42 minutos, Voegelin obtuvo valores del paralaje de alrededor de 35 grados (12), lo que implica una distancia desde el centro de la Tierra de menos de 4.000 km. No es de extrañar que con resultados tan defectuosos el propio Copérnico en su tratado sobre el cometa de 1533 ni siquiera considerara a un cometa como un fenómeno realmente celeste.

El paso siguiente, importante en cuanto a la calidad de las observaciones, lo dio Tycho Brahe, que consiguió hacerlas con el mismo rigor que las de los planetas. Midió las distancias angulares de los cometas con precisión respecto a las estrellas fijas, y de allí, con los tiempos de observación anotados, obtuvo las posiciones en ascensión recta y declinación en el cielo y en altitud y azimut. Aplicó el método de Regiomontano para la estimación de las distancias, no aceptando la suposición de que un cometa tiene nulo o poco movimiento propio y afirmando que sí tienen movimientos propios grandes. Su inferencia de que el importante cometa de 1577 no tenía paralaje medible es bastante rigurosa y determinaba que el cometa en el perihelio debía estar mucho más distante que la Luna. Escribió un libro completo sobre este cometa, publicado en 1588, que contenía la primera versión del sistema "ticónico" del Universo, en el cual el Sol y la Luna giran alrededor de la Tierra, mientras los planetas giran alrededor del Sol. En este sistema el cometa de 1577 tenía una órbita alrededor del Sol, con un radio más grande que la órbita de Venus. Es importante percatarse de que este sistema era incompatible con la existencia de las esferas cristalinas de Aristóteles, porque las órbitas de los planetas cruzaban la órbita del Sol. Aunque el sistema de Tycho nunca se elaboró de forma cuantitativa y solo existía conceptualmente, tenía elementos (entre los que destaca la supresión de las esferas cristalinas) que dieron lugar a conceptos más modernos. Es interesante notar que este aspecto del modelo de Tycho permitía a un cometa tener una órbita no circular, y ni siquiera con epiciclos, en contraste con los dos modelos alternativos: el heliocéntrico de Copérnico y el geocéntrico. Pero también aquí se ve la dificultad para obtener modelos válidos en ausencia de una física



subyacente. Tycho creía, en consonancia con su modelo del Sistema Solar, que los cuerpos celestes ocupan sus trayectorias impulsados por un impulso propio, una idea que chocaba con una visión más unificadora, como la esencialmente matemática de Kepler o la esencialmente empírica de Galileo. Tycho era un gran observador astronómico y sus mediciones sirvieron decisivamente para los avances de Kepler y de Newton, pero como físico no tenía conceptos claros. Fue una casualidad que su idea de quitar las esferas cristalinas se combinara con un modelo geoheliocéntrico pobremente apoyado por medidas cuantitativas, a pesar de que Tycho era un importante y no menos riguroso observacionalista.

III. GALILEO Y LOS COMETAS DE 1618

a) El contexto histórico-científico

En el año 1618, la teoría heliocéntrica de Copérnico había sido prohibida recientemente por el Papa, y eso a pesar de los esfuerzos del propio Galileo para que fuera aceptada por la Iglesia. Galileo había recibido una orden personal del cardenal Bellarmino para que no apoyase el copernicanismo en público, y tenía que ser cauto. Sabía muy bien que los fenómenos que él mismo había descubierto, esto es, los satélites de Júpiter, las fases de Venus, y los cambios periódicos y fuertes de magnitud de Venus y Marte no podían explicarse en un modelo geocéntrico, ni tampoco el hecho de la circulación de las manchas alrededor del Sol, de las cuales también Galileo era uno

de los observadores más asiduos. Galileo estaba profundamente convencido de la veracidad de un modelo heliocéntrico del Sistema Solar, y como se vería después del acceso al Papado de su amigo Barberini (Urbano VIII), Galileo esperó en todo momento la oportunidad de divulgar la teoría de Copérnico.

Pero los enemigos del copernicanismo (dentro de ellos destacaban algunos jesuitas del Colegio Romano, la sede del academicismo jesuita en Roma), no descansaban buscando oportunidades para machacar la teoría de Copérnico. Algunos de ellos tenían una enemistad intelectual con Galileo, y uno en concreto, el Padre Christof Scheiner, tenía una enemistad no solamente intelectual, sino también personal, motivada por la discusión sobre la prioridad de las observaciones de las manchas solares. Es necesario situarse en este marco

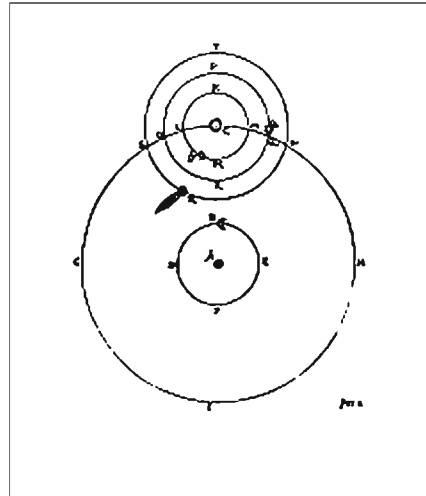


Figura 5. El "Sistema del mundo" de Tycho Brahe, donde se señala un cometa en su órbita alrededor de la de Venus. La Tierra está en el centro del sistema, pero los planetas orbitan alrededor del sol.

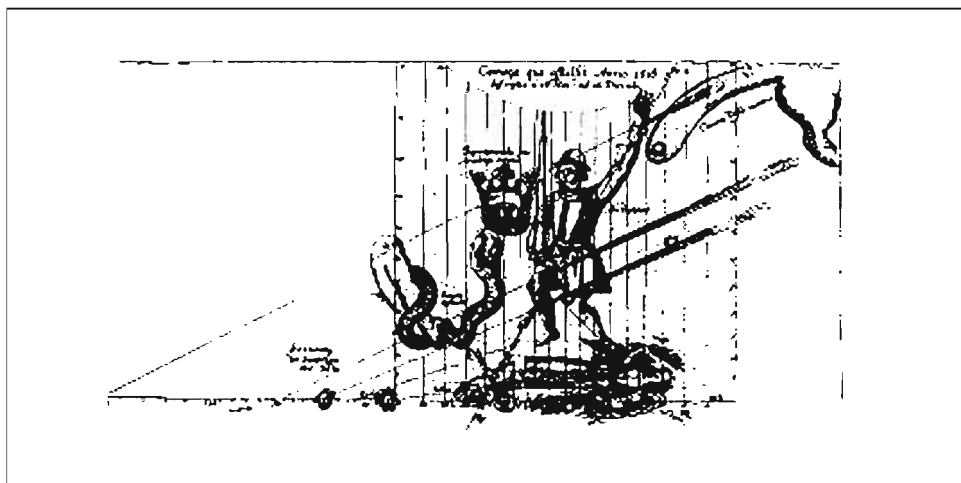


Figura 6. Dibujo del gran cometa de diciembre de 1618, por John Beinbridge (Londres, 1619).

a la hora de evaluar las opiniones de Galileo, en las discusiones que surgieron después de la aparición de tres cometas en el año 1618. En este artículo, dado que el aspecto religioso-político del tema se trató anteriormente en esta misma serie de conferencias por Carlos Solís, me concentraré en la parte científica, es decir, en ver hasta qué punto las ideas de Galileo son defendibles en el marco de lo conocido y entendido en su día sobre la física y sobre los cometas mismos.

b) La *Disputatio* de Grassi (15)

Galileo se involucró en esta controversia al responder a un artículo publicado por el jesuita Orazio Grassi, profesor de matemáticas en el Colegio Romano (publicado sin nombrar al autor, a causa de la política de los jesuitas de no publicar sobre temas controvertidos salvo con nombre colectivo), llamado *Una Disputa Astronómica sobre los tres cometas de 1618*. Nos referiremos a esta obra como la *Disputatio*. Grassi opinaba que los cometas se encuentran más distantes de la Tierra que la Luna, y probablemente entre la Luna y el Sol, de acuerdo con las teorías de Séneca y de Tycho Brahe, y en contra de la opinión de Aristóteles. Sin embargo, Grassi pone la Tierra en el centro de todas las órbitas y en este punto difiere de Tycho. Uno de los argumentos de Grassi en favor de la situación supralunar de los cometas era que sus tamaños no muestran una magnificación fuerte en el telescopio y que la magnificación de un objeto es mayor cuanto más cerca se encuentra. Galileo (16) mostró sobre este punto, no solamente su desdén, por la falta de conocimientos ópticos de Grassi, sino su genio, al emplear el elegante argumento de que si la ley de magnificación fuera así, un dedo extendido y casi



cubriendo un objeto más distante debe cubrirlo por completo cuando los dos se observen por un telescopio, cosa que en la práctica no ocurre. Para zanjar el argumento citó en el mismo contexto el caso de un eclipse anular del Sol, que según la “ley de Grassi” debería convertirse en un eclipse total visto por un telescopio.

Las noticias sobre la publicación de la obra de Grassi y sobre todo, de la reacción de la sociedad intelectual romana a esa obra, llegaron a Galileo, entonces enfermo y casi obligado a estar en cama, a través de unos amigos de Roma. En una de las cartas que le escribiera Giovanni Batista Rinuccini, se puede leer estas frases “*Los Jesuitas han presentado en público un “problema” sobre la distancia del cometa, que se ha editado, y mantienen con firmeza que está en el cielo (es decir mas allá que la Luna). Y algunos otros (no solamente los Jesuitas) han diseminado que esa idea derriba el sistema copernicano, contra el cual no hay argumento más seguro que este*” (17). De hecho los filósofos que hicieron circular estas ideas eran mayoritariamente laicos, porque, a pesar de los destacados enemigos ligados a la Iglesia y ya referidos, Galileo tenía bastante apoyo dentro de los Jesuitas y en la Iglesia en general. Un ejemplo de esas opiniones viene de Francesco Ingoli, destacado anticopernicano, quien en una obra inédita, pero bien conocida entre los intelectuales de la época, escribió: “*Podemos inferir del movimiento del cometa que nos parece posible no solamente refutar la teoría copernicana, sino también sacar argumentos, cuya eficacia no se puede desdeñar, en favor de la estabilidad (es decir la no movilidad) de la Tierra*”.

Es interesante observar que el situar a los cometas más lejos que la Luna no favorece la teoría de Tycho frente a la de Copérnico. Podríamos pensar que la reacción de Galileo, que examinaré con cierto detalle abajo, se extremase por razones políticas y diese lugar a un modelo suyo poco defendible. Sin embargo, sus ideas tienen mucho que ver con su propio pensamiento físico aplicado al sistema de los planetas. En ausencia de una ley unificadora como la ley de la gravedad, capaz de dar cuenta de los movimientos arbitrarios de un cuerpo celeste, las ideas sobre el movimiento de los planetas tenían un sentido que se llamaría hoy puramente cinemático. Es cierto que Kepler ya había usado las precisas observaciones de Tycho y su propio genio matemático para enunciar sus leyes del movimiento planetario, que serían uno de los pilares de la ley de la gravedad newtoniana. Pero todavía no se sabía cómo funcionaba la potencia motriz de un planeta, y el propio Galileo pensaba que las órbitas circulares eran inerciales, es decir, que los planetas circulaban alrededor del Sol en órbitas circulares porque un cuerpo dejado libre en el espacio debía moverse así. En la carta a Castelli (1) ya mencionada en la sección I, donde Galileo intentaba dar una interpretación copernicana a la supuesta parada del Sol narrada en el libro bíblico de Josué, Galileo juega con la hipótesis de que, de una forma u otra, la rotación del Sol sobre su eje impulsa directamente la rotación de los planetas en sus órbitas y sobre sus ejes. Para nosotros, las ideas de inercia de los movimientos circulares y de su impulso por otro movimiento circular, nos parecen poco verosímiles, pero no lo son del



todo en ausencia de un concepto claro de fuerza. Por ejemplo, sabemos que el hecho de que un cuerpo se mueva en línea recta en ausencia de cualquier fuerza no impide que se mueva en línea recta acelerado por una fuerza que actúa también en línea recta. Así, no es la rectilinealidad lo que distingue la inercia, sino la ausencia de aceleración. De todos modos está claro que Galileo, al igual que sus contemporáneos más brillantes, tenía una idea confusa sobre la interacción gravitatoria de los cuerpos (pero él mismo era consciente de sus carencias). Del hecho de considerar el movimiento circular como inercial, Galileo dedujo que el movimiento “natural” cerca de la Tierra era rectilíneo. En esto no consiguió romper con el dualismo aristotélico que diferenciaba los movimientos sublunares y supralunares; pero aunque Galileo no era un genio de la física teórica sí era un genio de la física experimental. Reconoció la primacía de los resultados experimentales (en la tierra) y observacionales (en el cielo) a la hora de acotar modelos físicos, y fue suficientemente hábil matemático para saber traducir esos resultados a sus modelos. Para Galileo, lo difícil en el tema de los cometas era reconciliar su paralaje (que él reconocía que podía situar a los cometas más allá de la Luna) con sus órbitas, que parecían mucho más líneas rectas que circulares. Tenemos que considerar el *Discurso sobre los Cometas* a la luz de estas dificultades. Veremos que su respuesta no satisfizo del todo ni a él mismo, a pesar de los esfuerzos por darle la máxima coherencia.

c) El *Discurso de Guiducci* (16)

Dadas las obvias limitaciones que tenía tras la prohibición de 1616, Galileo optó por dar la respuesta a Grassi a través de su amigo Mario Guiducci, que presentó un discurso sobre los cometas en la Academia Florentina en junio de 1619. Ese *Discurso sobre los cometas* se publicó después y ha sido fácil determinar, examinando la letra del documento, que solamente una pequeña parte inicial fue escrita por Guiducci y el resto por Galileo, quien además corrigió la parte de Guiducci. El *Discurso* comenzaba criticando una de las ideas de Aristóteles: que el material del cometa, al ser vapor que sale de la Tierra, se prende fuego por roce con la esfera cristalina de la Luna. Básicamente, el argumento es que los movimientos planetarios no son consistentes con la existencia real de las esferas cristalinas, y en este punto Galileo-Guiducci (GG) estaban de acuerdo con Tycho Brahe.

Sin embargo, el segundo argumento era que, aunque las medidas del paralaje, especialmente las de Tycho, aparentemente situaban a los cometas más allá de la Luna, esto no era concluyente. Citaba el caso del arco iris como ejemplo de una entidad que muestra paralaje nulo, aun estando situado bastante cerca del observador, y opina que un cometa puede engañarnos sobre su distancia paraláctica de la misma manera. Este argumento de Galileo se basa en una observación per-



tinente y correcta, pero sin base física adecuada. Sabemos hoy que la ausencia de paralaje en un arco iris se debe a la constancia de los ángulos de refracción de las gotas de agua en una nube grande. Aunque el arco iris siempre parece situarse en la misma dirección, lo hace solamente cuando la nube es suficientemente grande para permitir que el ángulo sol-gota-ojo se mantenga constante, es decir que si viajamos por el campo en un coche, y mantenemos un arco iris a la vista durante bastante tiempo, aquella tiene que ser extensa y cercana. Un cometa ni consiste en nubes de gotas de agua, ni llena un ángulo suficiente para satisfacer remotamente esta condición. No es cuestión de una naturaleza etérea y no bien definida lo que hace que el arco iris (u otros halos similares alrededor de la Luna) no muestren paralaje, sino que depende de un fenómeno óptico bien medido y explicado, y de una nube que tiene que estar cerca, o subtender un ángulo grande. De todos modos, ni Galileo ni sus contrincantes estaban en condiciones de saber eso, y por lo tanto su argumento en contra de la posición supralunar de los cometas no era fácilmente descartable.

El tercer punto sobre la naturaleza de los cometas era que se mueven en líneas rectas y no en círculos, con lo cual no pueden pertenecer a la parte del universo donde giran los planetas, y donde el movimiento natural es circular. Sobre este punto podemos decir que está claro que la órbita alargada de un cometa se aproxima mucho más a una línea recta que a un círculo, aunque en la vecindad del sol es precisamente donde ocurre su giro mas rápido en términos angulares. Está claro también que la mayoría de las observaciones de los cometas en épocas anteriores a Galileo ocurrieron cuando el objeto ya había hecho este giro alrededor del Sol, pues sin telescopios y sin un ejército de miles de aficionados dedicados a buscar cometas cuando todavía están en las afueras del Sistema Solar, no era normal detectarlos hasta que llegaban cerca, y a menudo hasta haber completado su paso por el perihelio, dirigiéndose hacia afuera. Es decir, cuando su órbita ya era más lineal que circular. Sin embargo hubo también observaciones de cometas antes del perihelio, y no era posible pensar que todos sus movimientos fuesen rectilíneos. Por otra parte, los mismos GG reconocen que un objeto cuyo origen es la Tierra y que se mueve en línea recta hacia el cielo nunca cruza el cenit del observador, mientras que los cometas siguen sus caminos más hacia el norte.

Esta parte de su teoría era poco consistente; así fue advertido por ellos y apelaron a la humildad expresada por Séneca en relación a las observaciones. Es decir, admitían no entender muy bien este aspecto, pero como no estaban de acuerdo con la teoría de Tycho, prefirieron suspender su opinión. Para GG, un cometa consiste en un vapor, de origen terrestre, que ha conseguido llegar a distancias relativamente grandes, incluso mas allá de la Luna. Desde allí refleja los rayos del Sol, dando una apariencia de un punto de luz, con una cola larga. Pero la forma se debería más a efectos ópticos que a la realidad de la forma del vapor y para justificarlo citan dos efectos terrestres análogos: la estela del Sol o de la Luna



sobre la superficie del mar casi en calma, que parece lineal, y que se ve como tal desde cualquier punto de vista, y al efecto producido por el agua en una botella, que puede parecer (hasta cierto punto) la forma de un cometa debido a la reflexión (y a la refracción, no bien conocida en la época de GG). La mayor parte de este modelo se apoya en efectos físicos reales, y en observaciones, pero hoy sabemos que no son estrictamente relevantes en cuanto a la naturaleza de un cometa. No se podían rebatir fácilmente en la época de Galileo, precisamente porque no existían las bases físicas para distinguir entre efectos realmente relevantes y otros que no lo eran. El modelo era ingenioso, ya que gran parte del volumen de un cometa es de gas y polvo muy tenue (reconocido por Galileo y por Tycho, y por otros buenos observadores, porque se notaba que las estrellas se podían ver a través de la cola, que ocupa mucho más volumen que el pequeño núcleo y que la coma de gas más densa a su alrededor); atribuirlo a un vapor no está tan lejos de la realidad. Su órbita es en gran parte lineal, por eso tenía cierto sentido pensar que no compartía la naturaleza de los movimientos de los planetas.

Otro punto en el cual GG (16) disputan con Tycho a través de Grassi es la forma de la cola de los cometas. Curiosamente, en aquella época, a ésta se la llamaba “la barba”, y dado que, durante la mitad de su paso alrededor del Sol la cola va por delante del cometa y no por detrás, la descripción como barba no parece tan fuera de lugar. Las colas de los cometas no son del todo rectilíneas, como podemos ver en cualquier foto. Para explicar la curvatura, Tycho había usado la idea de la perspectiva, pero GG advirtieron que una línea recta no se curva bajo ningún efecto de mera perspectiva. El argumento de GG de una jarra de agua y sus efectos sobre una fuente puntual de luz para demostrar que la forma de la luz que nos llega puede parecer similar a la forma de la cola de un cometa, muestra a la vez la fuerza y debilidad del tipo de argumentos usados por Galileo. Su principio de fundar cualquier conclusión “filosófica” en la experiencia directa era correcto; sin embargo, sin la infraestructura teórica adecuada tendía a usar argumentos basados en experimentos, aunque a veces eran sólo experiencias analógicas e incluso metafóricas. Sus experimentos sobre la caída de los cuerpos le permitían derivar leyes cinemáticas básicas con acierto, porque se podían relacionar directamente con la teoría, pero sus ideas sobre las mareas se basaron en experimentos que no admitían el cambio de escala requerido para llegar al fenómeno real y así su conclusión distaba de la explicación real. En el caso de los cometas Galileo tenía suficientes dudas sobre la aplicabilidad de argumentos analógicos y no se engañó. De hecho GG nunca propusieron su teoría sin ambigüedades. Galileo(16) comprendió las limitaciones de su teoría para explicar todos los aspectos de las observaciones de los cometas. Su objetivo era más bien hacer dudar de la cosmología de Tycho, que los Jesuitas habían abrazado, una vez convencidos de que el simple modelo geocéntrico de Ptolomeo no podía explicar las nuevas observaciones. La postura de los Jesuitas era comprensible dado el peligro teológico que suponía el modelo de Copérnico. Es un hecho conocido que



muchos de ellos apoyaron el copernicanismo antes de su prohibición en el año 1616; sin embargo, entre los jesuitas académicos del Colegio Romano había dos que no querían dejar sin respuesta el desafío de GG sobre los cometas. Uno era Grassi, sin duda un seguidor genuino del modelo de Tycho, y el otro Scheiner, que odiaba a Galileo visceralmente por la disputa sobre la primacía en el descubrimiento de las manchas solares. La respuesta a GG salió en el *Libra Astronómica* o “Balanza Astronómica” bajo el seudónimo de Lothario Sarsi, escondiendo la autoría de Grassi.

d) *La Libra de ‘Sarsi’* (18) y el *Saggiatore de Galileo* (19)

No puedo tratar con detalle la controversia entre Grassi y Galileo tal y como se desarrolló en dos obras: la *Libra astronómica* de Grassi y el *Saggiatore*, la respuesta de Galileo que es una obra polémica muy divertida, cuyo efecto final fue acentuar la enemistad de algunos jesuitas y que cooperó a provocar el juicio de 1633, con resultados personales tan nefastos para Galileo. Solamente destacaré algunas cuestiones relevantes a la física. En la *Libra*, Grassi (18) ofrece poderosos argumentos contra la hipótesis del origen telúrico de los cometas contenida en el *Discurso*. La teoría de GG intenta combinar el origen telúrico de los cometas, al estilo de Aristóteles, con su ubicación supralunar, al estilo de Copérnico, y esto era inconsistente. También Grassi atacaba la debilidad de los argumentos de GG sobre el movimiento rectilíneo y la tendencia de los cometas a no parar en el cénit; esta vez en plan irónico, y aprovechando el hecho de que GG no se atreven a usar abiertamente una solución copernicana para la parte más distante de este movimiento. Aquí se nota que el “*Discurso*” de GG, escrito después del edicto anticopernicano de 1616, pero antes del acceso al papado de Barberini, estaba mediatizado por razones teológicas, y no podía sostener la hipótesis que Galileo consideraba conforme a las observaciones. El *Saggiatore*, publicado en 1623 después de un cierto tiempo, a causa de la reticencia de Galileo a enfrentarse más con los Jesuitas (superada finalmente por la presión de sus amigos y por la llegada de Barberini al papado), es más una obra polémica que científica. Como explica Carlos Solís en el artículo incluido en este libro, a esas alturas Aristóteles no era el enemigo intelectual, sino Tycho, ya que su modelo, aunque cualitativo, era el último refugio de los geocentristas. Pero con su afán de polémica, Galileo ataca a Tycho de forma exagerada. Por ejemplo, critica ciertos aspectos técnicos usados por éste en su método de paralaje. Galileo analiza las aproximaciones del método geométrico de Tycho, y muestra que no son exactas, acusándolo de errores elementales en su planteamiento de la medición de los paralajes. Esto es casi insultar a Tycho, y hacerlo gratuitamente, porque como he dicho arriba, implícitamente la teoría de la distancia en el “*Discurso*” de GG se basa en el cálculo, realizado por Tycho, del paralaje del cometa de 1577.



En general, los argumentos en el *Saggiatore* se expresan de una forma tan rotunda que Kepler, que nunca fue un enemigo del copernicanismo, pero sí un pupilo de Tycho, se vio en la obligación de defender a su antiguo maestro de los ataques de Galileo, en el *Apéndice al Hiperaspistes* publicado en 1625 (20), (21). Una de las críticas de Galileo era que el sistema de Tycho era más conceptual que cuantitativo. Galileo tenía razón en esa crítica; una teoría sin parámetros numéricos explícitos es capaz de modificarse para explicar muchas cosas, pero siempre de una forma “ad hoc”. Kepler argumenta que Tycho pensaba que no era necesario cuantificar sus ideas, porque admitía libremente que su modelo era una modificación del sistema ptolemaico, o del sistema copernicano, y que todos los parámetros podrían obtenerse por modificaciones de los usados en estos sistemas.

Es importante notar aquí que el peso de la argumentación que enfrentaba las teorías de Copérnico y Tycho no descansó sobre la controversia de los cometas, sino en las medidas de Galileo sobre las variaciones de las magnitudes aparentes y de las formas de Venus y de Marte. Un modelo copernicano podía explicar con elegancia y facilidad no solamente las fases de Venus, sino los cambios cuantitativos en las magnitudes de Venus y de Marte en sus órbitas. Quizás el modelo de Tycho era también capaz de explicar estos fenómenos, pero el hecho de no poseer una base cuantitativa hacía todo impreciso y difícil de criticar mediante un contraste de medidas, (ejemplo del dictum Popperiano de que una buena teoría científica tiene que ser falsable). Aquí se nota que a Kepler le hubiera gustado mostrar su acuerdo con Galileo, pero a causa de la actitud demasiado hostil de éste para con Tycho, se sintió en la obligación de defender a éste y atacar por tanto a Galileo.

Finalmente, el argumento usado por Galileo para criticar la idea de Tycho sobre las órbitas de los cometas (es decir, que se ubican cerca de la órbita de Venus alrededor del Sol) es bastante válido. En él se sostiene que los cometas no son periódicos, o por lo menos no tienen períodos cortos. Había estimaciones de los movimientos propios de cometas con respecto a las constelaciones que mostraban que eran bastante rápidos. Galileo pensó que si un cometa viaja en una órbita casi circular, volvería al mismo punto en un periodo de meses, fenómeno nunca observado. Esto convenció a Galileo de que un cometa debe moverse en línea recta, y no en círculo o en una elipse casi circular.

IV. CONCLUSIÓN: LA FÍSICA DE GALILEO Y LA FÍSICA DE LOS COMETA

Para completar la historia voy a comparar directamente el modelo de Galileo de los cometas con los otros disponibles en su época. Haré uso de una lista de los fenómenos observados por los astrónomos hasta la época de Galileo, y resúmenes de las explicaciones en las teorías de (a) Aristóteles/Ptolomeo (A-P), (b) Tycho



(T), (c) Copérnico (C), (d) Guiducci/Galileo (GG), y (e) bajo nuestro conocimiento actual (M).

1. Un cometa aparece brillante, su brillo aumenta un poco, y disminuye progresivamente después.

- a) Vapores que suben de la Tierra, rozan contra la esfera lunar, se encienden y se extinguen (A-P).
- b) Cometa en órbita alrededor del Sol, más o menos en la órbita de Venus. Aparece brillante porque se ve mejor cerca de su perigeo (T).
- c) Similar a b) pero sin especificar la órbita precisa, y de todos modos alrededor del Sol (C).
- d) Vapores que suben de la Tierra y pasan al lado de la Luna donde desvían los rayos del Sol antes de disiparse (GG).
- e) Hielos del cometa que se evaporan y brillan por la energía solar, cuando se encuentra cerca del Sol. El cometa pasa rápidamente cerca del Sol antes de alejarse con brillo decreciente (M).

2. Un cometa viaja en línea recta durante gran parte de su movimiento visible.

- a) El vapor asciende en línea recta puesto que es el movimiento natural en la esfera sublunar (A-P).
- b) La proyección de la órbita en el cielo nos parece recta. Dado que el cometa viaja alrededor del Sol, que a su vez viaja alrededor de la Tierra, el efecto neto es una órbita que no es circular. Las esferas de Aristóteles no existen, por lo que no impiden estas órbitas (T).
- c) Aceptando, según el copernicanismo, la presencia de las esferas cristalinas, el modelo no puede explicar bien un movimiento que nos parece rectilíneo. Era ésta la versión que los Jesuitas atacaron. Sin embargo quitando las esferas, una órbita epicíclica de un tipo específico alrededor del Sol puede proyectarse en línea recta. La única diferencia significativa entre los modelos de Tycho y de Copérnico, en este aspecto, es la ausencia de las esferas cristalinas en el modelo de Tycho, pero en cuanto a la disposición de las órbitas el modelo copernicano podía dar una descripción igualmente válida (o inválida) de las órbitas de los cometas. Galileo habría podido decir esto con claridad si no hubiera sido por la presión del Vaticano después del año 1616 (C).
- d) Vapores que ascienden en línea recta de la Tierra, y desaparecen finalmente en el espacio (GG).
- e) La órbita de un cometa es kepleriana y cerrada, pero dado su punto inicial tan lejano al Sol la órbita es un elipse muy alargada que durante su mayor parte se observa casi como una línea recta (M).



3. Hay épocas, en las que el cometa está cerca del Sol, durante las cuales tiene un movimiento propio muy rápido, pasando por arcos del cielo muy grandes en unos pocos días.
 - a) Dado el origen del cometa tan cercano al observador, los movimientos angulares rápidos pueden ser muy naturales durante las fases iniciales de su existencia (A-P).
 - b) La órbita de un cometa alrededor del Sol, que a su vez orbita sobre la Tierra, implica que hay épocas en las que el cometa se acerca mucho más que otras, y en las que su movimiento angular aumenta. Esta explicación se cuantificó por Galileo en GG, quienes mostraron su falta de conformidad cuantitativa con los movimientos reales de los cometas, suponiendo como Tycho que la órbita se aproxima a la órbita de Venus (T).
 - c) Con las esferas cristalinas *in situ* era muy difícil explicar un movimiento tan rápido de un cometa, sometido a proseguir una órbita cuasi-circular, obediendo las leyes de Kepler aplicadas a los planetas. Razón para dudar de la naturaleza “planetaria” de los cometas (C).
 - d) La proximidad de los vapores del cometa en la fase inicial de su ascenso da lugar a movimientos angulares rápidos (GG).
 - e) En su giro alrededor del Sol el cometa se acerca mucho a él, y por la segunda ley de Kepler su velocidad angular tiene que aumentar también mucho. Claro está que su órbita dista mucho de ser circular (M).

4. La cola de un cometa aparece a menudo curvada.
 - a) Al toparse con la esfera lunar, los vapores que suben en línea recta de la superficie de la Tierra no solamente se encienden por roce, sino empiezan a moverse en una dirección diferente, con lo cual uno puede predecir una forma curva y no recta del fuego resultante (A-P).
 - b) La perspectiva óptica da una forma curvada de la cola del cometa, aunque en realidad tiene una forma recta (T).
 - c) No hay una teoría de la naturaleza de los cometas en la obra de Copérnico, que se ocupa básicamente de los planetas y de sus movimientos, por ello no debemos buscar un modelo de la curvatura de la cola allí (C).
 - d) Por analogía con el efecto de un rayo de luz que se refleja en la superficie de una botella de forma de tubo, y que vista desde un cierto ángulo puede parecer curvado (de hecho este efecto es una mezcla de reflexión y refracción), la cola de un cometa, que se debe a un efecto similar de la reflexión del Sol sobre un tipo de nube de vapor, tiende a una forma curva (GG).
 - e) La cola se debe al impacto de la radiación solar y del viento solar en la parte volátil (hielos) del cometa. Hay dos componentes básicos: la cola de polvo, siempre recta, y la cola iónica, que se forma en curva, debida a la combinación de las fuerzas electromagnéticas que actúan sobre ella (M).



5. La cola de un cometa siempre apunta en la dirección opuesta al Sol, vista desde el cometa.
- a) La dirección de rotación de la esfera lunar imprime una dirección uniforme en la cola del cometa, que resulta ser contraria a la del Sol (explicación obviamente no válida) (A-P).
 - b) No hay razón específica para este fenómeno en el modelo de Tycho. Su idea de la física incluía el concepto de que los astros se mueven más o menos por sus propias voluntades (es decir una vez abandonadas las esferas, Tycho no concebía un principio unificador para la dinámica de los planetas, y pensó que el cometa tenía una “personalidad” distinta). Así no sorprende nada, por ejemplo, la dirección radial de la cola de un cometa con respecto al Sol. Por supuesto, esta idea carece del todo de poder predictivo. No sorprende que Galileo, que siempre buscaba explicaciones causales, menosprecie este aspecto del trabajo de Tycho (aunque esto no le da razón a Galileo cuando critica a Tycho por sus observaciones específicas, que siempre eran muy precisas) (T).
 - c) El comentario aquí es el mismo que en el apartado 3c): Copérnico no presta atención a la fenomenología de los cometas (C).
 - d) Aunque GG no ofrecen una explicación muy completa en cuanto a la dirección de las colas de los cometas, si el vapor telúrico que sube hasta la altitud de la Luna empieza a dispersarse en dirección contraria al Sol, la reflexión de los rayos solares podría dar lugar a la cola en esa dirección. Aunque hay implícito un modelo en el cual eso ocurre, no hay explicación física subyacente (GG).
 - e) La presión de la radiación y del viento solar siempre actúan en la dirección radial Sol-cometa, y propulsan las partículas de la cola en esa dirección. Hay una fenomenología más compleja, sobre todo cerca de la cabeza del cometa, pero aquí no la discutiremos (M).

Es interesante observar que, en muchos aspectos, la teoría de GG da una explicación muy razonable de lo observado en términos físicos aunque es claramente falsa según nuestros conocimientos actuales: los vapores que constituyen la cola de un cometa nunca provienen de la Tierra; no obstante, la teoría tiene aspectos bastante verosímiles: la luz de un cometa, sobre todo la de su cola debe su origen a efectos solares sobre su sustancia vaporosa, y durante gran parte de su órbita, un cometa se mueve casi en línea recta. La teoría de Copérnico no podía dar una explicación de la fenomenología de los cometas, suponiéndolos en órbitas planetarias, con la pretendida impenetrabilidad de las esferas cristalinas. Tampoco la teoría de Tycho daba una explicación adecuada; tenía la ventaja de la abolición de las esferas, pero no tenía ningún modelo físico de un cometa, y al igual que en la teoría de Copérnico, con la suposición de órbitas circulares, Tycho no podía explicar los movimientos observados de un cometa: línea recta durante la mayor parte de su recorrido visible, pero



con movimientos angulares rápidos cerca de su perigeo /perihelio. En términos puramente cinemáticos, tanto los copernicanos como los ticónicos hubieran hecho bien en adoptar algo de la humildad de Séneca ante los hechos, cuando declaró que la órbita de un cuerpo celeste no tenía que ser necesariamente circular.

Está claro que Galileo no creía en la necesidad del sistema de las esferas como principio dinámico para impulsar el movimiento de los planetas. Pero tenía unas ideas de la dinámica bastante ancladas en el pasado, destacando notablemente la idea de que los movimientos de los astros son circulares sin necesidad de una fuerza. Para Galileo el principio de inercia (enunciado con tanta claridad por Newton) existía en el cielo pero de forma circular y no lineal. Un impulso mínimo sería suficiente para mantener el movimiento circular de un planeta. Vapores con origen en la Tierra, por tanto, pueden pasar por una altitud como la de la Luna, sin topar con ninguna esfera cristalina. Sin embargo, Galileo no extendió esta idea a los cometas, con órbitas no circulares, presumiblemente porque pensaba que tal órbita no era natural. Era más natural la subida de vapores de la Tierra en línea recta, que un movimiento no circular de un astro. Esta cuestión marca un límite a la capacidad de Galileo de unificar la física local y telúrica y la física del Universo. Pero ella no fue superada ni por Kepler, a pesar de ser mejor teórico que Galileo, y a pesar del avance que supuso el obtener las leyes empíricas de los movimientos de los planetas, que terminaba de una vez con la creencia en la circularidad de sus órbitas. Kepler pensaba en unas leyes geométricas válidas para los espacios supralunares, aunque en un modelo abiertamente copernicano. Fue Newton el que unificó estas leyes para las regiones sublunar y supralunar y es irónico, entonces, que Newton, durante gran parte de su vida científica, pensara que los cometas viajaban en órbitas esencialmente rectilíneas. Solamente cuando su amigo Halley demostró que uno de los cometas tenía una órbita periódica, usando buenas observaciones de una de las apariciones de “su” cometa, junto a una aplicación diligente de las leyes de Kepler, supo Newton mostrar que esa órbita era perfectamente cuantificable en términos de su ley de gravitación universal.

Como científico, y no como historiador, caigo fácilmente en la trampa de criticar a Galileo porque no tenía las ideas correctas sobre los cometas. También es fácil criticar las deficiencias en sus esquemas dinámicos en general. Hay evidencia interna en GG de que Galileo mismo no estaba muy satisfecho con las ideas que propuso para criticar a los seguidores del modelo de Tycho Brahe, y hay evidencia abundante de que nadie en su época tenía ideas realmente válidas sobre las órbitas de los cometas (sin hablar de su naturaleza). El ejercicio de intentar meterme en la piel de los científicos de aquella época me ha ofrecido la útil lección de poder limitar voluntariamente mis conocimientos y comparar lo que hubiera podido inferir.

Estoy convencido de que solamente un gran científico hubiera podido usar los elementos mixtos de los modelos de Aristóteles y Copérnico para modelar las propiedades observadas de los cometas con el mismo grado de éxito relativo que Galileo. Solamente con descubrimientos posteriores, muchos de ellos muy recién-



tes (como el efecto del viento solar) hemos podido elaborar teorías de cometas con aplicaciones realmente predictivas.

REFERENCIAS

1. Favaro, A. 1890-1899 (in the reprinted edition of 1968, Florence, Giunti Barbera), "The National Edition of the Works of Galileo Galilei", ("The National Edition") Vol. 5, p. 281. Translation by S. Drake in "Galileo at Work, His Scientific Biography" (U. Chicago Press, 1978), p. 224.
2. Kepler, J., 1609 in "Astronomía nova... de motibus stellae Martis" (Prague), in: Kepler J., *Gesammelte Werke*, (eds. M. Caspar, F. Hammer), Munich, 1937-1993, (Beck'sche Verlagsbuchhandlung).
3. Oort, J. H., 1950. "The structure of the cloud of comets surrounding the solar system, and a hypothesis concerning its origin". *Bull. Astr. Soc. Netherlands*. Vol. 11, p. 91.
4. Apian, P., 1540. *Astronomicum Caesareum*. Ingoldstadt.
5. Finson M. L. & Probst R. F., 1968. "A theory of dust comets I. Model and equations". *Astrophys. Journal*. Vol. 154, p. 327. and "A theory of dust comets II. Results for Comet Arend-Roland". *Astrophys. Journal*. Vol. 154, p. 353.
6. Biermann, L., 1951. "Kometenschweife und solar korpuskularstrahlung". *Zeits. fur Astrophysik*. Vol. 29, p. 274.
7. Duncan M., Quinn T. & Tremaine S., 1987 "The formation and extent of the solar system comet cloud". *Astron. Journal*. Vol. 94, p. 1330.
8. Fernandez, J., 1980, "On the existence of a comet belt beyond Neptune" *Mon. Notices Roy. Astr. Soc.* Vol. 192, p. 481.
9. Aristotle "Meteorology" (traducción al inglés de H. P. Lee), Harvard University Press, 1952).
10. Séneca, "Naturales Quaestiones"(traducción al inglés de T. H. Corcoran, Harvard University Press, 1971).
11. Schoener, J. (editor). 1544, "Scripta clarissimi mathematici m. Ioannis Regiomontani... Ioannis Schoneri Carolostadij additionibus". J. Montanus & U. Neuber, Nuremberg.
12. Jervis, J., 1980, "Voegelin on the Comet of 1532:Error analysis in the 16th Century", *Centaurus*, p. 216.
13. Brahe, T., 1588, "De mundi Aetherei recentioribus pheanominis" in Dreher, J. L. E., "Tychonis Brahe Dani Opera omnia" Vol. 4., Copenhagen, 1918.
14. Bainbridge, J., "An astronomical description of the late comet from 18 of Novemb. 1618 to the 16th of December following"(London, 1619).
15. Grassi O., 1619 "On the Three Comets of the Year MDCXVIII, an astronomical disputation presented publicly in the COLLEGIO ROMANO" of the Society of Jesus, by One of the Fathers of that Same Society". Rome, Jacobus Mascardus. Translation by C. D. O'Malley in "The Controversy of the Comets of 1618", 1960, U. Pennsylvania Press, p. 3 ("The Controversy").
16. Guiducci, M. 1619. "Discourse on the Comets", Florence. Translation by S. Drake in "The Controversy" p. 21, (1960). (GG).
17. Favaro, A. 1890-1899 "The National Edition ", Vol. XII, p. 443, Translation by S. Drake in "Galileo at Work" (U. Chicago Press, 1978).
18. Sarsi, L. (Grassi, O) 1619. "The Astronomical and Philosophical Balance, "Perugia, Marco Naccarini, MDCXIX. Translation by C. D. O'Malley in "The Controversy", p. 67.
19. Galileo G., 1623, "The Assayer" (Rome/Florence), Translation by S. Drake in "The Controversy" p. 151, (1960).
20. Kepler J., *Gesammelte Werke*, (eds. M. Caspar, F. Hammer), Munich, 1937-1993, (Beck'sche Verlagsbuchhandlung).
21. Kepler J., "Appendix to the Hyperaspistes, or Gleanings from the Assayer of Galileo", 1625. Translation by C. D. O'Malley. in "The Controversy", p. 337, (1960).



BIBLIOGRAFÍA GENERAL

A continuación paso a reseñar algunos de los libros que he consultado, que estimo pueden ser interesantes para el lector.

Sobre la ciencia de los cometas:

“Rendez vous in Space; The Science of Comets”, Brandt J. C. and Chapman R. D., W. H. Freeman Co., 1992. (ISBN 0-7167-2175-9).

Sobre la historia científica de los cometas:

“Cometas”, Yeomans D. K., John Wiley Inc. 1991. (ISBN 0-471-61011-9).

Sobre las ideas y trabajos científicos en el siglo antes de Galileo:

“Cometary Theory in Fifteenth Century Europe”, Jervis, J. L., Kluwer, 1985, (ISBN 90-277-1911-X).

Sobre la documentación de la controversia de los cometas de 1618:

“The Controversy on the Comets of 1618” Drake, S. and O’Malley, C. D., (traductores), University of Pennsylvania Press/Oxford University Press, 1960. (Library of Congress Card Number, 59-10458).

Sobre la relación de Galileo con la Iglesia, con un capítulo específico sobre los cometas:

“Galileo, for Copernicanism, and for the Church”, Fantoli A., Vatican Observatory Foundation, 1994. (ISBN 0-268-01032-3).

Sobre Galileo y su obra científica:

“Galileo at Work”, Drake, S., U. Chicago Press, 1978. (ISBN 0-226-16226-5/16227-3).

“The Cambridge Companion to Galileo”, ed. P. Machamer, Cambridge U. Press, 1998. (ISBN 0-521-58178-8/58841-3).