

PASO A PASO (Segunda parte)

En busca del reposo absoluto: de Herschel a Oort

El gran poeta italiano Giacomo Leopardi, que conocía bien la astronomía de su tiempo, llegando incluso a escribir en su juventud una «Historia de la Astronomía», tiene entre sus «Obritas morales» un breve y gracioso diálogo titulado «Copérnico». En este diálogo, el Sol declara que está harto de girar continuamente alrededor de la Tierra y decide pararse por «amor al reposo o, para decirlo mejor, a la pereza» y llama a Copérnico para que anuncie su decisión a la gente. De ahora en adelante, el Sol se estará tumbado a la bartola, como, corresponde aun personaje de su rango y que sea la Tierra la quedé vueltas a su alrededor. Esto preocupa a Copérnico que no quiere meterse en problemas y que teme además «ser quemado vivo por esto». Y, para convencer al Sol de que cambie de opinión, entre los argumentos que Leopardi, con fino humor, pone en su boca, está el de que «...sospecho que

al final, dentro de un tiempo más o menos largo, os convendrá volver a andar; yo no digo que alrededor de la Tierra...». Dicho en otras palabras, una vez reconocido que la Tierra se mueve, sin que se altere el buen ordenamiento del mundo, ¿por qué debería ser el Sol el centro inmóvil del Universo?

Entonces, respecto a un sistema de referencia cualquiera, ¿deberemos describir el movimiento del Sol? No

hay que confundir este problema con el del movimiento absoluto. Newton había supuesto la existencia de un sistema de referencia absoluto

Para explicar la diferencia entre sistemas galileanos y no galileanos. Aquí se trata de una cosa distinta. Mientras el tren corra por una vía rectilínea sin frenar ni acelerar, el tren y la Tierra son ambos sistemas



Sir William Herschel

galileanos, con gran aproximación; las leyes físicas del movimiento son idénticas en el sentido de que no son necesarias las fuerzas de inercia para representar el movimiento de los cuerpos. No obstante, para describir el movimiento, se emplea, según los casos, un sistema u otro. Por ejemplo, si le digo a mi hijo «Estate quieto de una vez», le digo que se esté quieto

Rafael González de Vega
to en la silla y no le pido que pare el tren. Mientras que si le muestro un coche que vaya por la carretera, paralelamente al tren, no le digo «Mira, un coche parado» sino «Mira ese coche; parece que está parado». Lo cual demuestra que pensamos en el movimiento respecto a la Tierra como real y respecto al tren como *aparente* porque en la mayoría de los casos, indudablemente, debemos fijar nuestra atención en el primero y, más raramente, en el segundo.

Así, la frase que Leopardi hace decir a Copérnico, significa que podría haber, para estudiar el Universo, sistemas de referencia más generales que aquél en el que el Sol está en reposo, sin por eso contradecir el principio de la relatividad del movimiento. Puede que en el subconsciente de un astrónomo que emprenda la búsqueda del sistema más *general posible* quede un residuo de la fe de Newton en un movimiento y en un reposo absoluto; desgraciadamente, es una cuestión psicológica. Es un hecho que esta búsqueda es perfectamente legítima y no uno de esos problemas como la búsqueda del movimiento perpetuo y otros parecidos.

Igual que Copérnico, Leopardi preveía que, una vez puesta en marcha la máquina del pensamiento científico, el progreso sería muy rápido después de tantos años de inmovilismo. En 1543 Galileo recibió en su lecho de muerte el primer ejemplar de su libro «*De Revolutionibus*

Orbium Coelestium»; en 1630, la Curia dio permiso, que retiró en seguida, para que se imprimiera el Diálogo de Galileo «Sobre los dos máximos sistemas del mundo» y en 1687 se publicaban los «Principios matemáticos de la filosofía natural» de Isaac Newton. En este intervalo de tiempo, además, Kepler descubre las leyes que rigen el movimiento de los planetas y el propio Galileo, dirigiendo su catalejo hacia el cielo, advierte «un rebaño tan numeroso de estrellas que escapan a la vista natural, que apenas se puede creer». Durante la vida de Newton tuvieron lugar, entre otros, dos grandes descubrimientos que tendrían una importancia enorme para el conocimiento del mundo físico. Las numerosas observaciones de los satélites de Júpiter, descubiertos por Galileo, habían puesto de manifiesto una curiosa circunstancia: los períodos de sus movimientos se hacían más cortos a medida que la Tierra y Júpiter se aproximaban la una al otro, en su movimiento alrededor del Sol y más largos cuando se alejaban. Fue un astrónomo danés. Ole Rómer el que dio, en 1675, la explicación correcta a este hecho: la velocidad con la que se propaga la luz es infinitamente grande, grandísima. Por eso, si de un cuerpo que se está aproximando parten señales luminosas a intervalos iguales, estos intervalos le parecerán, al que lo observe, más breves de lo que son en realidad, porque en el intervalo entre dos señales consecutivas ha disminuido la distancia del cuerpo, dado que se aproximan, y, por lo tanto, la luz de la segunda señal emplea menos tiempo que la de la primera para llegar hasta nosotros. Y sucede lo contrario cuando el cuerpo se aleja. De la observación de este fenómeno, Rómer obtuvo la primera medida de la velocidad de la luz. En el mismo principio se basa el *efecto Doppler*, cuya importancia para el estudio de

los movimientos es vital. El hecho de que la velocidad de la luz no sea infinitamente grande, es esencial para la teoría de la relatividad.

El otro descubrimiento, lo hizo a principios del siglo XVIII Edmond Halley, conocido sobre todo por haber pronosticado el retorno del cometa que lleva su nombre. Comparando las posiciones relativas de las estrellas que había observado con las determinadas por los antiguos, se dio cuenta de que estas posiciones no permanecían invariables sino que cambiaban cantidades pequeñas pero mesurables. Entre otras, Arturo (Alfa Bootis) desde los tiempos de Hiparco, que vivió un siglo y medio antes de Cristo, hasta 1700 se había desplazado sobre la esfera celeste unas dos veces y media el diámetro aparente de la Luna; como hoy conocemos la distancia de Arturo, podemos calcular que este desplazamiento corresponde a una velocidad de cientos de kilómetros por segundo.

Con este descubrimiento, el cielo adquiriría un aspecto totalmente nuevo. Sin duda, los antiguos conocían el movimiento de algunos cuerpos celestes, como los planetas y los cometas, aunque estos últimos se reconoció que eran cuerpos celestes sólo en los tiempos de Halley. Pero éstos eran objetos excepcionales y su número era limitado. Las estrellas se habían considerado siempre como «fijas», es decir, inmóviles, salvo la rotación diurna de la «esfera» celeste que, después de Copérnico, por lo menos los hombres cultos, estaban de acuerdo en atribuir a la rotación de la Tierra. Ahora, por el contrario, todo el Universo o, si se prefiere, todos los objetos que lo componían, aparecían animados por movimientos propios e individuales.

Al mismo tiempo, parecía que era más razonable que las estrellas fueran cuerpos sustancialmente idénticos al Sol, con la única diferencia de que las estrellas están muchísimo más lejos, tanto que hasta entonces nadie había podido medir la distancia. Esto era evidente para Newton, que dio una valoración correcta de las distancias estelares—tanto había progresado el pensamiento científico desde la época de Copérnico— suponiendo que las estrellas tuvieran la misma intensidad intrínseca que el Sol (hoy diríamos la misma magnitud absoluta). Por lo tanto, se guarda bien de atribuir, en la frase citada en el párrafo anterior, el reposo «absoluto» al Sol sino que dice que, tal vez, se podría encontrar un cuerpo en reposo absoluto entre las estrellas o «más lejos».

Por otro lado, ¿por qué decimos que la Tierra gira alrededor del Sol y no el Sol alrededor de la Tierra? Porque el Sol es un sistema de referencia galileano con una aproximación mucho mayor que la Tierra cuando queremos describir el movimiento de todos los planetas y esto deriva de una razón muy profunda: la *masa* solar es más de 300.000 veces mayor que la de la Tierra y casi 750 veces mayor que la de todos los planetas juntos.

El concepto de masa, intuitivo más o menos claramente en especial por Galileo, adquiere un significado más preciso sólo con Newton. Sobre esto, volveremos más adelante, por ahora nos basta con repetir que el tren es un buen sistema de referencia. Para el movimiento del niño porque su masa es muchísimo más grande y, por lo tanto, el movimiento del niño no produce un desplazamiento de un *centro de gravedad*. Así, la masa de la Tierra es mucho mayor que

la masa de un cuerpo cualquiera que se mueva en su superficie. De otra manera, el movimiento de estas masas la haría oscilar, igual que hacemos oscilar una barquita al movernos, pero a bordo de un trasatlántico podemos saltar todo lo que queramos sin que éste se mueva.

Para decir la verdad, la masa del Sol no es tan superior a la de los planetas como para que el movimiento de éstos no le haga «oscilar» un poco. Por eso, un sistema de referencia fijo respecto del centro del Sol no es un sistema «bueno» para describir el movimiento de los planetas; es más, no es ni siquiera un sistema galileano. El referencial justo es el centro de gravedad del conjunto de todas las masas del sistema solar. Como Júpiter es, con mucha diferencia, el planeta que pesa más y su masa es unas mil veces menor que la del Sol, la distancia entre el centro geométrico del Sol y el centro de gravedad general es aproximadamente igual a una milésima de la distancia entre el Sol y Júpiter, es decir, menos de 800.000 kilómetros o un poco más que el radio solar. Puede hacerse un poco más grande si Saturno, que es el segundo planeta por orden de masa, se encuentra en la misma parte que Júpiter y un poco más pequeña si se encuentra en la parte opuesta. Por eso, no es exacto decir que la Tierra y los otros planetas giran alrededor del Sol, sino que se debería decir que todos los planetas y el Sol giran alrededor del centro de gravedad general. Pero, el centro de gravedad, ¿acaso está inmóvil? Ya saben todos los lectores que no se puede responder a esta pregunta simplemente porque la pregunta, planteada así, no tiene sentido. Podemos, por el contrario, preguntarnos (y entonces la pregunta tiene sentido) si un sistema de referen-

cia fijo respecto al centro de gravedad del sistema solar es un sistema galileano.

Ahora, no existen observaciones astronómicas *directas* suficientemente precisas como para permitir una respuesta pero nosotros podemos responder negativamente sin más, lo mismo que hemos podido responder negativamente a la pregunta de si el centro del Sol define un sistema de referencia rigurosamente galileano, sabiendo que el centro del Sol y el centro de gravedad del conjunto del sistema solar no pueden coincidir. Análogamente, podemos considerar que una aproximación todavía mejor hacia un sistema galileano, sería un sistema de referencia fijo respecto al *centro de gravedad del conjunto de todas las estrellas*.

Se plantea así un nuevo problema para la astronomía: el de identificar de alguna forma este centro de gravedad. Naturalmente, nadie piensa en descubrir así el referencial absoluto newtoniano, por lo menos hoy, sino que el motivo de esta búsqueda es comprender mejor la estructura y la dinámica (es decir, las leyes del movimiento) de lo que en los tiempos de Newton se llamaba la «esfera» o, más propiamente, la «región» de las estrellas (ya nunca fijas) que nosotros llamamos hoy la Galaxia. Kepler no habría descubierto nunca las leyes del movimiento planetario si, siguiendo a Copérnico, no hubiese tomado al Sol como sistema de referencia en vez de a la Tierra.

El primero que aceptó el movimiento del Sol respecto de las estrellas fue Wilhelm Herschel. Por su formación cultural, no era un gran matemático como lo eran sus contemporáneos Lagrange y Laplace, pero tenía una extraordinaria habilidad experimentando y una clara intuición física. En el caso del movimiento del

Sol, sin ponerse a calcular masas y baricentros, pensó que las estrellas que están en la dirección hacia la que se mueve el Sol, deberían aparecer como si se separasen las unas de las otras mientras que en la dirección opuesta, se debía observar el efecto contrario. Esto es un efecto de perspectiva que todos habrán visto seguramente en muchas filmaciones cinematográficas o televisivas de una cámara en movimiento. Por otro lado, no se podía excluir que el efecto lo produjera un movimiento real de las estrellas, las cuales podrían separarse realmente en una cierta región celeste y adensarse en la región opuesta. Pero Herschel pensó, con razón, que esta organización de los movimientos estelares era bastante poco probable y bastante difícil de explicar.

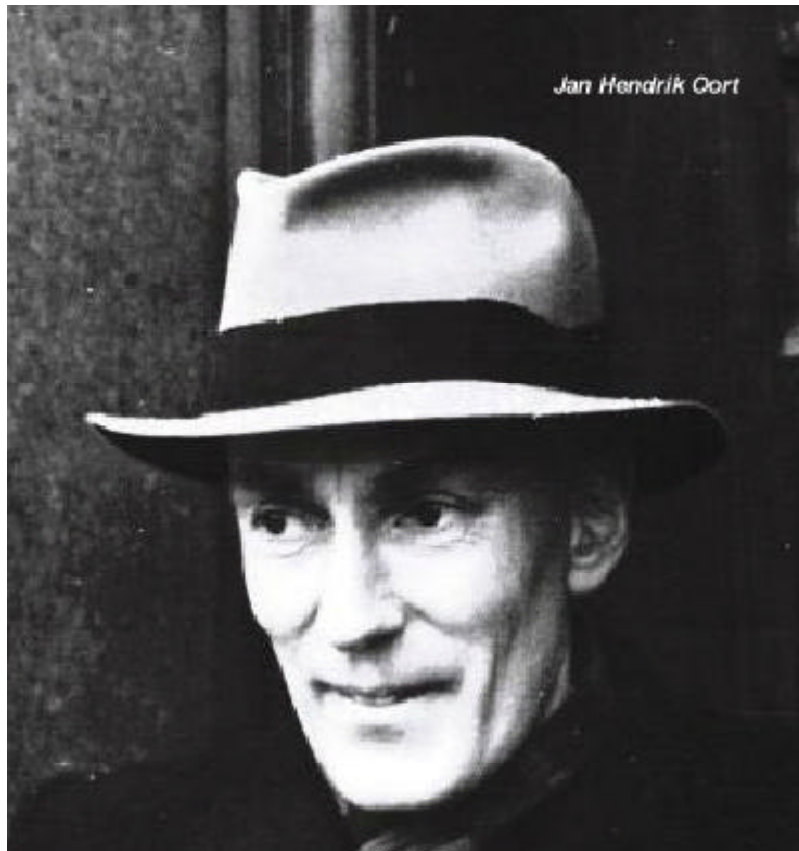
En los tiempos de Herschel, sólo se habían medido los movimientos de unas cincuenta estrellas, comparando sus posiciones medidas en épocas diferentes con la precisión que se podía alcanzar entonces. Sin embargo, él pensó que no había ninguna razón para que estas cincuenta estrellas se comportaran de forma diferente que las otras. Así, en 1783, pudo asegurar que, respecto a las estrellas, el Sol se mueve hacia un punto que él llamó ápice y se encuentra aproximadamente en la dirección de la estrella Lambda Herculis. Además, Herschel estimó que la velocidad del movimiento solar era casi igual a la de la Tierra en su órbita alrededor del Sol; en realidad, es un poco menor: unos 20 Km. /s.

Hoy conocemos los movimientos de decenas de miles de estrellas medidos con una precisión mucho mayor que la que se podía alcanzar en tiempos de Herschel y además, para algunos miles de estrellas, se han medido también las distancias y las velocidades radiales, es decir, la com-

ponente de la velocidad relativa al Sol en la dirección Sol-estrella. Sin embargo, sustancialmente, el resultado es el mismo que halló Herschel hace unos 200 años. ¿Se puede, entonces, decir que éste es el movimiento del Sol respecto de toda la Galaxia? No, porque todas las estrellas de las que se conocen los datos necesarios están relativamente próximas al Sol, a no más de 100 ó 200 parsec de distancia y, la mayoría, a mucho menos. (el *parsec* corresponde a unos 30 billones de kilómetros o a 3,26 años-luz). Pero en la Galaxia hay miles de estrellas que están a distancias cientos de veces mayores. Por eso, el referencial descubierto por Herschel no podía resolver el problema «estructural-dinámico», era solo el primer paso, indispensable, hacia la solución. Obviamente, el movimiento solar en la dirección Hércules-Lira es el relativo a un sistema de referencia

particular en el que *la medida de las estrellas próximas al Sol se encuentra en reposo* y ésta no puede coincidir con el centro de gravedad de todas las estrellas de la Galaxia. Es un referencial «local» que interesa sólo a una pequeña parte del conjunto, exactamente igual que el centro de gravedad del sistema Tierra-Luna que es un buen referencia! para describir los movimientos «locales» como los de las sondas lunares, pero que no interesa para el estudio de todo el sistema planetario.

Tendría que pasar un siglo y medio después de Herschel para que se consiguiera identificar el centro de gravedad del conjunto de estrellas y otro material cósmico que hemos llamado Galaxia. Este descubrimiento se debe a la intuición genial de un astrónomo holandés Jan Oort, quizá el astrónomo más grande del siglo XX. Los estudios anteriores, entre los que destacan los del americano Harlow Shapley, habían mostrado que la



Galaxia tiene cierta simetría, lo que significa que las estrellas que la componen están distribuidas en el espacio según una ley estadística y no al azar. La posición del centro de esta simetría se les escapaba a los astrónomos del siglo pasado, principalmente a causa de la existencia en el espacio, entre las estrellas, de *nubes oscuras*, formadas por polvo, las cuales cubren totalmente algunas partes del sistema galáctico y, en particular, su centro. Pero hacia los años 20 se hizo evidente que este centro debe-

ría encontrarse bastante alejado del Sol —unos 10.000 parsec— en la dirección de la constelación Sagitario. Además, el espacio ocupado por la mayor parte de las estrellas tenía la forma de una lente gigantesca con el Sol casi en el plano de simetría. Oort dedujo de todo esto que el centro de gravedad general debía coincidir con el centro de la lente y que, para que la estructura fuera estable, las es-

trellas debían describir órbitas inmensas, casi circulares, alrededor del centro. Así, la Galaxia se presenta como una réplica del sistema solar con la diferencia de que no existe una masa central predominante, como la del Sol respecto de los planetas, y que el número de los cuerpos orbitantes es enorme. Una consecuencia es que la velocidad media del movimiento orbital de las estrellas que se encuentran a una cierta distancia del centro varía, disminuyendo, según va-

ría esta distancia. Y es esta velocidad orbital media diferente, lo que permite demostrar la *rotación diferencial general de la Galaxia* y determinar la masa, además de confirmar la posición del centro de gravedad del conjunto.

En particular, también la media de las estrellas próximas al Sol, es decir, el referencial local del reposo, participa en este movimiento general de rotación; la velocidad correspondiente es mucho más alta

que la del Sol con respecto a las estrellas próximas: unos 250 Km. por segundo, y está dirigida hacia un punto situado en la constelación del Cisne. De esta manera, cuatro siglos después de Copérnico tenía lugar un nuevo cambio de perspectiva de nuestro modo de ver el Universo. El movimiento de los cuerpos es, indiscutiblemente, relativo pero también es verdad que, según las circunstancias, hay sistemas de referencia más convenientes que otros; si nos tenemos que mover en un tren o en un barco, el referencial natural será el tren o el barco; si nos desplazamos sobre la superficie de la Tierra, serán las montañas, los ríos, los mares y las ciudades lo que nos proporcionará los puntos de referencia. Pero la Tierra gira alrededor del Sol con una velocidad de más de 30 kilómetros por segundo, arrastrando consigo a todo lo que la cubre y a nosotros mismos. Y el Sol a su vez, con la Tierra y los planetas, se mueve respecto de un

referencial local definido por el centro de gravedad de las estrellas vecinas.

El referencial local del reposo, no es fijo; es más, no es ni siquiera galileano ya que se mueve con un movimiento aproximadamente circular, describiendo una órbita inmensa alrededor del centro de gravedad de la Galaxia, con una velocidad de 250 kilómetros por segundo; el radio de la órbita es de 10.000 parsec y el periodo orbital (el año galáctico) dura 240 millones de años. Esta multiplicidad de sistemas de referencia recuerda un poco a las construcciones, que a nosotros nos parecen tan extrañas, de ciertas antiguas cosmologías orientales: el cielo apuntalado, para que no se caiga, o sostenido por gigantes o por otras divinidades; a continuación, la Tierra apoyada encima de pilastras o de elefantes que, a su vez, se apoyan sobre una enorme tortuga que nada en un mar de leche y, a continuación... Parece como si esta búsqueda de un

punto de apoyo a través del mito, se hubiera transformado en la búsqueda científica de un punto de referencia a través de las observaciones astronómicas, para conseguir tener una visión racional en vez de mítica, del Universo. Pero aquí nace espontánea la pregunta: «¿y después?». ¿Por qué habría que preferir el centro de nuestra Galaxia al de las innumerables galaxias que pueblan el Universo?

Los cambios de perspectiva de nuestro modo de ver el Universo, cuya historia desde Galileo y Newton hasta Einstein y nuestros días estoy intentando trazar en estas páginas, deben prepararse para una nueva modificación. De hecho, mientras Oort descubría la rotación galáctica, nuevos fenómenos revelados mediante métodos de observación cada vez más sofisticados, sugerían horizontes más amplios. Pero, antes de hablar de ellos, debemos volver a la época de Newton para examinar otro concepto físico que ya hemos utilizado sin profundizar en él: el de masa de un cuerpo.

