

6 BUSCANDO UN SISTEMA DE REFERENCIA INERCIAL.- La ley de la inercia afirma que un cuerpo no sometido a fuerza alguna tiene una velocidad constante y hemos visto que este enunciado sólo es válido en un sistema de referencia que definimos como inercial. Nuestro problema es el de hallar un sistema de referencia que tenga la propiedad de ser inercial. Pero, ¿es eso posible?

El enunciado de la ley de la inercia puede parecerse ambiguo: ¿Cómo podemos saber si sobre un cuerpo actúa o no una fuerza? No podemos estar seguros de que sobre un cuerpo no actúen fuerzas sólo porque no existan otros cuerpos próximos a él, ya que las fuerzas pueden actuar sobre el cuerpo no sólo por contacto directo con otros cuerpos sino también mediante una acción a distancia. Este es el caso de las fuerzas gravitatorias y electromagnéticas que pueden ser importantes incluso para distancias considerables entre los cuerpos. Así pues sólo podemos saber si actúa una fuerza sobre el cuerpo si medimos su aceleración; pero tal medida exige que hayamos establecido previamente un sistema de referencia y, además, que ese sistema sea inercial para poder aplicar la ley de la inercia. Pero, ¿cómo saber si dicho sistema de referencia es inercial?. A poco que reflexionemos comprenderemos que nos encontramos en un círculo vicioso.

Sin embargo, la situación no carece de esperanza porque sabemos que las fuerzas ejercidas sobre dos cuerpos decrecen muy rápidamente cuando aumenta la distancia entre ellos. Si no fuera así sería imposible aislar un cuerpo de las interacciones debidas a los demás cuerpos del Universo. Todas las fuerzas conocidas entre las partículas decrecen con la distancia al menos de manera inversamente proporcional al cuadrado de la misma. En una descripción razonable, un cuerpo muy alejado de cualquier otro no estará prácticamente sometido a ninguna fuerza y por tanto su aceleración será nula. Una estrella típica está separada por unos 10^{16} m de su vecina más próxima, lo que supone sólo una pequeña aceleración. Por consiguiente, podemos esperar que las estrellas "fijas" definan un sistema de referencia no acelerado, esto es, un sistema inercial, dentro de una buena aproximación.

Ciertamente, para muchos problemas prácticos, resulta mucho más útil considerar un sistema de referencia sujeto a la superficie de la Tierra. Tal sistema recibe el nombre de *sistema del laboratorio* (S.L.). En la mayoría de los casos este sistema es una aproximación suficientemente buena de un sistema inercial, aunque no lo es en un sentido estricto. En efecto, debido a la rotación diaria de la Tierra, el sistema del laboratorio presenta una aceleración dirigida hacia el eje de rotación que es pequeña pero no despreciable en todos los casos. Un punto en reposo en el Ecuador experimenta una aceleración centrípeta dada por

$$a = \frac{v^2}{R_T} = \omega^2 R_T \quad (3)$$

siendo $\omega = 2\pi/T$ la velocidad angular de la Tierra y R_T el radio de la misma. Como el periodo de revolución es $T = 86\ 160$ s (un día sidéreo) la velocidad angular es

$$\omega = \frac{2\pi}{86\ 160} = 7.29 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \quad (4)$$

y como $R_T = 6\ 400$ Km, la aceleración resulta ser

$$a = (7.29 \times 10^{-5})^2 \cdot 6.4 \times 10^6 = 0.034 \text{ m/s}^2 \quad (5)$$

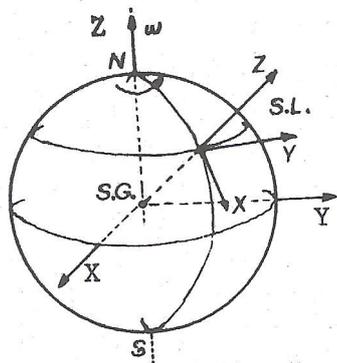


fig. 4

Este valor explica parte del exceso observado en el valor de la aceleración gravitatoria aparente en el Polo sobre la del Ecuador. La aceleración gravitatoria medida en el Polo es de 9.832 m/s^2 y la medida en el Ecuador es de 9.780 m/s^2 , lo que representa una diferencia de 0.052 m/s^2 . El resto de la variación apreciable en el valor de la aceleración gravitatoria se debe principalmente a la forma del geoide, que corresponde a la de un esferoide achatado por los polos, de modo que, aún en la ausencia del efecto de la rotación terrestre, el valor de la aceleración gravitatoria es mayor en los polos que en el Ecuador.

Así pues, el sistema del laboratorio está acelerado y no constituye un sistema de referencia inercial.

Una mejor aproximación a lo que es un sistema de referencia inercial nos la proporciona un sistema cuyo origen está fijo en la Tierra (mejor en su centro) en su órbita alrededor del Sol y que mantiene fijas, con respecto a las estrellas lejanas, las direcciones de sus ejes. Tal sistema recibe el nombre de *sistema geocéntrico*. La aceleración de la Tierra en su órbita

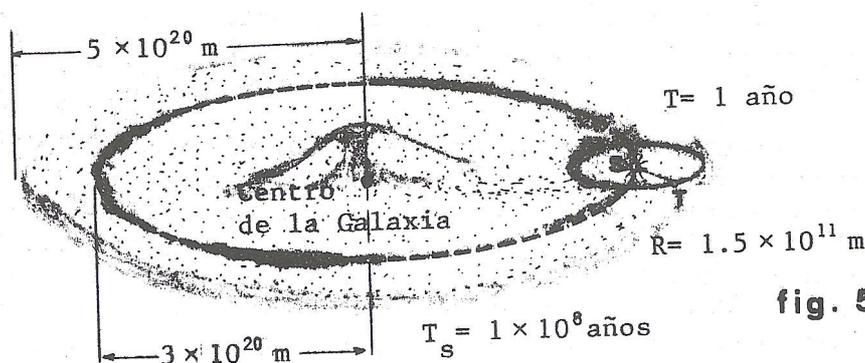


fig. 5

resulta ser un orden de magnitud menor que la aceleración debida a la rotación terrestre. Como $1 \text{ año} = 3.15 \times 10^7 \text{ s}$, la velocidad angular de la Tierra alrededor del Sol es

$$\omega = \frac{2\pi}{3.15 \times 10^7} = 1.995 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \quad (6)$$

y como el radio de la órbita terrestre es $R = 150 \times 10^6 \text{ Km}$ la aceleración de la Tierra en su órbita resulta ser

$$a = (2 \times 10^{-7})^2 \times 150 \times 10^9 = 0.006 \text{ m/s}^2 \quad (7)$$

de modo que el sistema geocéntrico también presenta una aceleración, aunque pequeña, y no constituye un sistema de referencia inercial.

Es obvio que conseguiremos una gran mejora si adoptamos un sistema de referencia cuyo origen está cerca del centro del Sol (en el centro de masas del sistema solar) y cuyos ejes no giran con respecto a las estrellas

lejanas. Llamaremos *sistema heliocéntrico* a un tal sistema. Pero el sistema solar participa en el movimiento de rotación de la Galaxia de modo que el sistema heliocéntrico presenta también una determinada aceleración. La Galaxia (formada por unas 10^{10} estrellas) presenta una estructura de disco con brazos espirales, en el centro de uno de los cuales y hacia el borde de la Galaxia se encuentra el sistema solar (fig. 5). La aceleración del Sol hacia el centro de la Galaxia no se conoce experimentalmente pero, a partir de los estudios realizados sobre los corrimientos por efecto Doppler de las líneas espectrales, se estima que la velocidad del Sol respecto al centro de la Galaxia es de 300 Km/s. Si el Sol describe una órbita circular alrededor del centro de la Galaxia, que se encuentra a una distancia aproximada de 3×10^{20} m del Sol (lo que representa un periodo de 2×10^8 años = 6.3×10^{15} s), entonces la aceleración de éste con respecto al centro de la Galaxia es

$$a = \omega^2 R = \frac{v^2}{R} \approx \frac{9 \times 10^{10}}{3 \times 10^{20}} = 3 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2 \quad (8)$$

que es una aceleración muy pequeña, de modo que el sistema heliocéntrico es satisfactorio para describir la gran mayoría de los fenómenos.

Sin embargo, con todo rigor sería necesario escoger un nuevo sistema de referencia con origen en el centro de nuestra Galaxia y que probablemente sería inercial. Este sería el *sistema galáctico*. Pero incluso las mismas galaxias no están completamente distribuidas al azar sino que tienen una marcada tendencia a formar racimos. Nuestra Galaxia pertenece a un grupo de unos 19 miembros conocido como Grupo Local, que forma un sistema físico ligado gravitatoriamente. Nuestra Galaxia experimenta una aceleración con respecto al centro de masas del Grupo Local.

Aparentemente no existe ningún sistema físico sencillo que nos pueda servir como sistema de referencia inercial. Sin embargo, puede tomarse el sistema heliocéntrico como inercial para los efectos prácticos de los problemas de la Mecánica dentro del sistema solar. Incluso el sistema del laboratorio constituye una aproximación suficiente para un gran número de problemas, como ya descubrió Galileo y como se utiliza hoy día en numerosas aplicaciones científicas y de ingeniería.

De todos modos es muy interesante, al menos desde un punto de vista puramente formal, el definir un patrón de sistema de referencia inercial. Es un convenio establecido el considerar las estrellas llamadas "fijas" como un sistema de referencia inercial patrón. Este modo de hablar es algo metafísico, ya que asegurar que las *estrellas fijas* no están aceleradas rebasa nuestro conocimiento experimental actual. Es imposible que nuestros instrumentos puedan detectar una aceleración de una estrella lejana, o grupo de estrellas, menor que 10^{-6} m/s^2 , aun cuando se realizaran rigurosas medidas durante un centenar de años. Con fines prácticos es conveniente referir a las estrellas las direcciones en el espacio.

7 TRANSFORMACION DE GALILEO.- La ley de la inercia establece la equivalencia de todos los sistemas de referencia inerciales, es decir de aquellos marcos en los que la partícula libre no presenta aceleración. Puesto que esos marcos se mueven unos con respecto a otros con velocidad constante, los distintos observadores ligados a cada uno de esos sistemas de referencia describirán de distinto modo el movimiento de un cuerpo y estamos interesados en encontrar unas ecuaciones que nos permitan comparar esas distintas