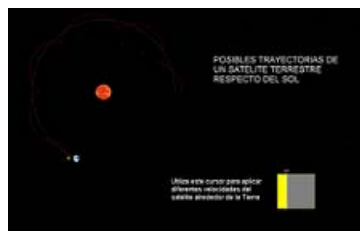


# EL PROBLEMA DE LOS SISTEMAS DE REFERENCIA

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE LOS SISTEMAS DE REFERENCIA

Para estudiar cualquier movimiento necesitamos adoptar un sistema de referencia (SR), desde el que escribimos y aplicamos las leyes de la mecánica. Generalmente, al hacer esto en cada caso concreto, no entramos a valorar si la aplicabilidad de esas leyes podría verse afectada por el SR escogido. Sin embargo, el estado y el tipo de movimiento de cualquier objeto depende



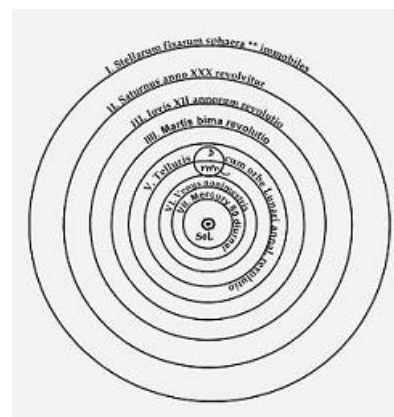
del SR adoptado. Por ejemplo, la Luna tiene un movimiento circular y uniforme para un SR con origen en el centro de la Tierra, pero bastante más complicado respecto de otro SR con origen en el centro del Sol, tal como se puede comprobar manipulando una animación Modellus elaborada por el Departamento. Entonces, puesto que el estado y el tipo de movimiento de cada cuerpo depende del SR adoptado:

*¿Da lo mismo adoptar cualquier SR? ¿Se pueden construir unas leyes únicas para el estudio de los movimientos, pero al mismo tiempo, capaces de proporcionar descripciones diferentes de cualquier movimiento según cual sea el SR que se adopte?*

## SOLUCIÓN EN LA ANTIGÜEDAD

Desde la génesis de la astronomía antigua hasta los albores de la primera gran revolución científica que se consolidó en el siglo XVII con el establecimiento de la mecánica de Newton, prevaleció una visión del mundo que supuso que la Tierra permanecía en reposo en el centro del Universo y que el resto de cuerpos celestes giraban a su alrededor. Como consecuencia de esto, para el desarrollo de la física en la antigüedad el carácter relativo de los movimientos no tuvo relevancia. Aceptando este modelo geocéntrico del mundo, lo más sencillo y "natural" fue elaborar una teoría que interpretó los movimientos de los objetos tomando como SR privilegiado a nuestro planeta.

En el siglo XVI se removió a la Tierra del lugar privilegiado que se le había asignado. Sucedió en gran medida gracias a la contribución del astrónomo polaco Nicolás Copérnico (1473 a 1543), quien defendió que no era la Tierra sino el Sol el objeto que estaba en reposo en el centro fijo del Universo. Sin embargo, en aquel tiempo el problema de los SR no se planteó de un modo explícito. La aceptación del movimiento de nuestro planeta afectó a concepciones muy importantes para la Humanidad, pero, en lo que se refiere a este problema, únicamente provocó entonces el traslado a otro objeto del Universo (el Sol) de la presunción de encontrarse en reposo absoluto.



Una vez abierta definitivamente la brecha que rompió con la idea de estaticidad de la Tierra, hubo que admitir, no mucho después, que el Sol también se mueve alrededor del centro de nuestra Galaxia, que ésta se mueve a su vez respecto de otras galaxias y así indefinidamente.

## SOLUCIÓN DE LA MECÁNICA DE NEWTON. SISTEMAS DE REFERENCIA INERCIALES

La solución que dio la mecánica de Newton al problema de los sistemas de referencia (SR) se basa en el descubrimiento que había hecho antes Galileo, de que no es posible distinguir entre los acontecimientos físicos que ocurren en un SR el reposo o en cualquier otro SR con movimiento rectilíneo y uniforme (MRU). Tales SR (en reposo o con movimiento rectilíneo y uniforme respecto de un SR en reposo) se llaman sistemas de referencia inerciales (SRI).

Por ejemplo, las experiencias vividas al montar en cualquier tipo de vehículo nos enseñan que mientras éste no cambie su velocidad, dentro todo ocurre igual que si el vehículo estuviera parado. El pasajero de un vehículo con MRU puede, por ejemplo, lanzar al aire una pelota. Respecto del vehículo (SRI) la pelota realiza un movimiento vertical y acelerado. El pasajero se considera legítimamente en reposo (respecto de su suelo, el suelo de su vehículo) y plantea que es el suelo exterior lo que se mueve. Ayuda a entender por qué ocurre esto analizar el movimiento de la pelota desde el punto de vista de un sistema de referencia exterior, ligado al suelo. Según este punto de vista (también es un SRI), la pelota inicia su movimiento con una velocidad igual a la suma de la velocidad vertical que le comunica la mano y la velocidad horizontal del vehículo. En consecuencia, la pelota describe un movimiento parabólico con la misma velocidad horizontal que el vehículo y, tal como muestra la animación adjunta, está siempre encima de la mano que la lanzó.



Para practicar estos conceptos hemos elaborado dos animaciones *Modellus* interactivas, en las que el usuario puede modificar la velocidad de un vehículo inercial desde donde se lanza una pelota y ver cómo afecta a su movimiento en el SR exterior y el SR ligado al vehículo.

Como consecuencia de estos hechos, la Mecánica Clásica formuló el siguiente principio:

**Principio de relatividad de Galileo:** *Las leyes fundamentales de la mecánica clásica (concretamente los postulados de la mecánica de Newton) se escriben igual en cualquier sistema de referencia inercial (SRI) y su aplicación conduce a descripciones de cada movimiento diferentes y ajustadas al movimiento real en cada SRI.*

El principio de relatividad de Galileo da una respuesta al problema de los SR, al afirmar que se pueden aplicar las leyes de la mecánica de Newton en cualquier SRI.

¿Qué ocurre, en el ejemplo anterior, si el vehículo acelera? Desde el SRI exterior las leyes de Newton prevén para la pelota el mismo movimiento parabólico, mientras el vehículo, acelerado, la adelantará o quedará retrasado respecto de ella. En cambio, en el SR interior, ligado al vehículo (acelerado y, por tanto, no inercial), las leyes prevén que la pelota, lanzada en dirección vertical y ascendente (y sometida a una fuerza de atracción de la Tierra, vertical y descendente)



tenga un movimiento rectilíneo, vertical y acelerado. Pero, lo que realmente ocurre es que la pelota describe una trayectoria curva.

Hemos simulado ambas situaciones en dos animaciones *Modellus* interactivas.

Estos hechos confirman que en el vehículo (no inercial) no son aplicables las leyes de la mecánica de Newton. El principio de relatividad de Galileo y, por tanto, la solución que dio la mecánica de Newton al problema de los sistemas de referencia, únicamente es aplicable en SRI.

### TRES PROBLEMAS QUE MUESTRAN LA NECESIDAD DE ADOPTAR SISTEMAS DE REFERENCIA INERCIALES

Vamos a comentar tres problemas típicos en los que se pone en evidencia la necesidad de adoptar convenientemente el SR, con objeto de garantizar que sea inercial y se puedan aplicar las leyes de la mecánica de Newton.

**Problema 1:** *La mujer del dibujo adjunto se encuentra en el interior de un ascensor encima de una balanza. Estudia lo que puede marcar la balanza cuando el ascensor: a) Tiene velocidad constante. b) Acelera. Analiza la situación desde dos SR: interior (ligado al ascensor) y exterior (ligado al edificio en el que funciona el ascensor)*



La balanza indica siempre la fuerza de apoyo  $N$  entre dicha balanza y la propia mujer. Cuando el ascensor tiene un movimiento uniforme, esta fuerza de apoyo es igual al peso de la mujer, pues, la fuerza resultante que se ejerce sobre la mujer tiene que ser nula, independientemente del SR escogido. Sobre ella, se ejercen dos fuerzas iguales y opuestas (el peso y la fuerza normal) y, al sumarlas, se compensan. Esto es compatible con el hecho de que en el SRI exterior el movimiento de la mujer es rectilíneo y uniforme y en el SRI interior, ligado al suelo, la mujer está en reposo.

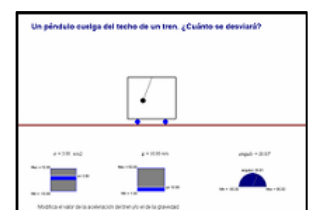
En cambio, cuando el ascensor acelera (en el momento de arrancar o mientras se detiene) la indicación de la balanza cambia, mostrando un incremento o una disminución de la fuerza de apoyo sobre el suelo. No existe dificultad en interpretar este hecho adoptando el punto de vista de un SRI exterior: La modificación de la fuerza de apoyo se debe a que la fuerza resultante sobre la mujer no es cero, puesto que el ascensor (y la mujer) tiene aceleración.

En cambio, este mismo hecho no se puede explicar de forma satisfactoria si tratamos de usar las leyes de Newton en el SR ligado al ascensor (acelerado). En este SR, ligado al ascensor, la mujer está en reposo, pero el hecho de que se modifique la medición de la balanza, indica que la fuerza peso y la fuerza normal no se compensan. La fuerza resultante sobre la mujer no es cero y ella, sin embargo, estaría en reposo.

**Problema 2:** *Del techo de un vagón de tren cuelga un péndulo. El vagón arranca con aceleración constante. ¿Cuánto se desvía el péndulo respecto de la vertical?*

Cuando el tren tiene velocidad constante es adecuado estudiar el problema según el punto de vista del SRI exterior y también desde el SRI interior, ligado al tren. La fuerza resultante sobre la bolita del péndulo es cero (se equilibran la fuerza peso y la tensión de la cuerda) y la bolita cuelga en reposo (SRI interior) o mantiene un MRU (SRI exterior) En cambio, cuando el tren acelera debemos adoptar obligatoriamente un SRI exterior para interpretar el movimiento con las leyes de Newton. En dicho SRI el tren tira de la cuerda y ésta, a su vez, tira de la bola. La bola se "retrasa" en su movimiento respecto del vagón, lo que se traduce en una desviación del péndulo respecto de la dirección vertical. Esta desviación aumenta al arrancar hasta alcanzar un valor que permanece constante mientras el vagón mantenga una aceleración constante.

En un documento disponible en nuestra web, resolvemos este problema a modo de investigación. También hemos elaborado una animación *Modellus* que proporciona una solución animada al problema en la que se pueden modificar las variables que afectan al ángulo que indica la desviación del péndulo.



Otra vez resulta insatisfactorio cualquier intento de interpretar la situación adoptando un SR no inercial, ligado al vagón. Según este punto de vista, la suma de las fuerzas que se ejercen sobre la bolita desviada de la vertical (el peso, vertical, y la tensión de la cuerda, oblicua) produciría una fuerza resultante horizontal, y esto, a los ojos del observador interior, es incompatible con un péndulo desviado, pero en reposo (respecto del vagón).

**Problema 3:** *Describid el movimiento de un objeto que se coloca encima de una plataforma circular giratoria, suponiendo que gira con una velocidad angular,  $w$ , constante.*

Para garantizar la aplicabilidad de las leyes de Newton, adoptamos un SRI exterior a la plataforma. Según este punto de vista, la fuerza de rozamiento que hace la plataforma sobre el objeto, le comunica la velocidad de la plataforma. Si el objeto gira solidariamente con la plataforma, su aceleración coincide con la de ésta en ese punto, es decir, es igual a la aceleración centrípeta del movimiento circular y uniforme:  $F_N = m \cdot a_N = m \cdot w^2 \cdot R$ . Esta expresión indica que cuanto más rápido gire la plataforma, mayor sea la masa del objeto o más al exterior se coloque, mayor es la fuerza requerida para que el objeto gire solidariamente con la plataforma.

¿Qué ocurre cuando la fuerza de rozamiento no es suficiente para mantener el movimiento circular? En ese caso, la fuerza modifica la velocidad del movimiento del objeto, pero no es suficiente para mantener la distancia al centro. En el caso extremo de que de repente desapareciera el rozamiento, el objeto seguiría con un movimiento rectilíneo y uniforme a esa velocidad. El resultado visible desde un SRI exterior es que el objeto sale despedido hacia el exterior de la plataforma giratoria.

En algunos museos de ciencias hay plataformas en las que se pueden realizar estos experimentos. La fotografía adjunta corresponde a una visita al museo de las artes y las ciencias de Valencia realizada en 2006 por un grupo de alumnos de nuestro instituto.

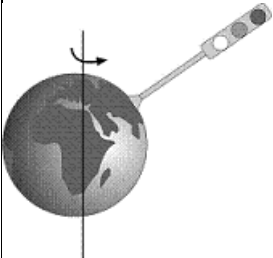


También en este ejemplo, si tratamos de describir lo que sucede desde un SR no inercial, ligado a un punto de la plataforma, las predicciones de la mecánica de Newton no concuerdan con el movimiento real. Si el objeto colocado ahí dentro es una persona y quiere permanecer quieto deberá agarrarse a algún asidero para evitar ser desplazado hacia el exterior.

### ¿POR QUÉ SE ADOPTAN SISTEMAS DE REFERENCIA LIGADOS AL SUELO TERRESTRE COMO SI FUERAN INERCIALES?

Hemos visto que es necesario adoptar SRI para poder aplicar las leyes de la mecánica de Newton. Sin embargo, cuando se estudian movimientos de objetos en la proximidades de la superficie terrestre (por ejemplo, movimientos de proyectiles, balones en eventos deportivos, vehículos,..) es costumbre adoptar SR ligados a un cierto lugar fijo del suelo, que tiene aceleración centrípeta (la Tierra gira respecto de un eje propio a razón de una vuelta cada 24 horas)

Dicha aceleración tiene un valor muy pequeño (aproximadamente  $0,034m/s^2$ ) y cuando estudiamos problemas sobre movimientos de objetos en las proximidades de la superficie terrestre (lanzamientos, movimientos de vehículos,..), la consideramos despreciable. Por esta razón, se adopta en muchos casos un SR ligado a la superficie terrestre para aplicar las leyes de Newton. Pero lo cierto es que no es un verdadero SRI y los resultados experimentales sobre movimientos reales difieren de las predicciones teóricas. Por ejemplo, los proyectiles realmente impactan en un lugar ligeramente desviado del que predicen las leyes de Newton. Cuando se buscan resultados más precisos que se realizan, por ejemplo, en ingenierías, se tiene en cuenta la aceleración de la Tierra.



**Cálculo de la aceleración centrípeta en un punto de la superficie terrestre.**

Para calcular la aceleración centrípeta de un punto de la superficie terrestre, vamos a suponer que en ese lugar se ha colocado un objeto fijo, como, por ejemplo, un semáforo. Al equilibrarse el peso y la normal la fuerza resultante que se ejerce sobre dicho semáforo es la fuerza que ejerce el suelo sobre el objeto llevándole encima. Esta fuerza consigue que el semáforo realice un movimiento circular y uniforme como el del suelo sobre el que se apoya. Es decir:

$$F = m \frac{v^2}{R} \quad v = \frac{2\pi R}{T}$$

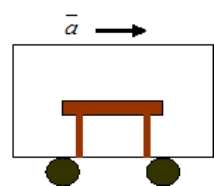
Por tanto, la aceleración es:  $a = \frac{\left(\frac{2\pi R}{T}\right)^2}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = \frac{4\pi^2 6370000}{(24 \cdot 3600)^2} = 0.034 m/s^2$

El hecho de que la aceleración centrípeta de la superficie terrestre sea pequeña no significa que no resulte visible, por ejemplo, a cualquier persona que preste atención a la forma como se vacía un depósito de agua, como el lavabo de nuestra casa (¿se vacía de la misma forma un lavabo en un lugar del hemisferio sur?)

**FUERZAS DE INERCIA. UNA ESTRATEGIA PARA TRATAR PROBLEMAS EN SISTEMAS DE REFERENCIA NO INERCIALES.**

Acabamos de ver que ningún lugar en la superficie de la Tierra puede ser origen de un SRI. Tampoco lo puede ser el centro de la Tierra, porque la Tierra en su conjunto se desplaza describiendo una elipse alrededor del Sol. En realidad, todos los objetos del Universo, como estrellas, planetas, cometas, etc., interaccionan gravitatoriamente con el resto, de modo que se ejercen fuerzas sobre ellos. Por lo tanto, ningún objeto del Universo puede ser origen de un verdadero SRI.

En el siglo XVIII, D'Alembert desarrolló una teoría de mecánica aplicada que resultó bastante útil para tratar problemas de movimientos en SR acelerados. Para entender su propuesta, podemos pensar en un vehículo acelerado que porta un objeto fijo, como una mesa. Respecto del SRI exterior la mesa tiene el mismo movimiento que el vehículo y la fuerza resultante,  $F_{res}$ , que se ejerce sobre dicha mesa es igual a la fuerza que le hace el suelo, es decir:



$$F_{res} = F_{horizontal\ suelo-mesa} = m \cdot a$$

Con objeto de adoptar el punto de vista un observador interior (no inercial) planteamos que este observador "olvide" que tiene aceleración (se trata de un olvido voluntario, porque dentro de un vehículo acelerado tiene sensaciones que delatan la aceleración) y definimos el concepto de "fuerzas de inercia" del siguiente modo:

*Las fuerzas de inercia son "fuerzas falsas" (no corresponden a interacciones) que actuarían en sentido contrario a la aceleración y cuyo valor sería igual al producto de la masa del cuerpo sobre el que se ejerce esa fuerza de inercia por la aceleración del SR.*

Usando esta definición, sobre la mesa se ejercería una fuerza de inercia  $F_i = - m \cdot a$ , lo que nos permite re-escribir la ecuación anterior del siguiente modo:

$$F_{horizontal\ suelo-mesa} + F_i = 0$$

Un observador en el SR acelerado podría suponer que está aplicando una nueva versión de la ley  $F_{res} = m \cdot a$  al estudio del movimiento de la mesa en el interior de su SR (que él considera en reposo) Esta versión incluye la falsa fuerza de inercia sobre la mesa en el cómputo de las fuerzas que contribuyen a la  $F_{res}$ . Así, la suma de la fuerza real que se ejerce sobre la

mesa y la fuerza falsa de inercia da resultado nulo, mientras el observador no inercial considera a la mesa en reposo (respecto de él)

La adopción de SR no inerciales como referenciales para el estudio de movimientos incorporando las falsas fuerzas de inercia puede resultar una estrategia bastante útil para escribir las ecuaciones diferenciales de algunos movimientos, adoptando ese punto de vista "subjetivo" (referido al observador del SR acelerado) No obstante, conviene tener mucho cuidado cuando se utilizan estas definiciones y ser siempre conscientes de que: a) El SR adoptado no es inercial. b) Las "fuerzas de inercia" no son interacciones. c) En definitiva, no se trabaja en el contexto de la mecánica newtoniana. Por todo ello, como norma general, consideramos mas adecuado adoptar un SR inercial y usar las leyes de Newton

## LOS GRANDES AVANCES DE LA RELATIVIDAD: EL PRINCIPIO DE RELATIVIDAD ESPECIAL Y EL PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA

La mecánica de Newton se aplicó con gran éxito a una gran variedad de problemas y durante mucho tiempo no importó demasiado que en el mundo real no se puedan identificar verdaderos SRI. Los resultados aproximados que obtienen las leyes de Newton se pueden corregir una vez se adopta otro SR exterior más próximo a un SRI y también es posible introducir falsas fuerzas de inercia cuando trabajamos en SR acelerados. Por todo ello, después del establecimiento de la mecánica de Newton, el problema de los SR permaneció latente durante siglos.

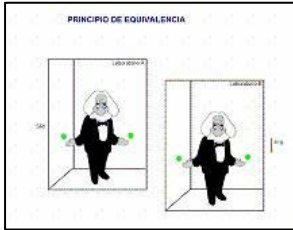
A principios del siglo XX se produjo la segunda gran revolución en la historia de la física, iniciada por el advenimiento de la teoría de la relatividad de Einstein. El problema de los SR se hizo explícito a los ojos de la comunidad científica y emergió una nueva teoría que puso el énfasis en conseguir que, no solo las leyes de la mecánica, sino las de toda la física, se puedan aplicar, sin ser modificadas, en cualquier SRI. Esto es lo que afirma un postulado fundamental de la teoría de la relatividad especial de Einstein, llamado principio de relatividad:

**Principio de relatividad:** *Las leyes fundamentales de toda la física se escriben igual en cualquier SRI.*

Este principio de relatividad trajo un gran avance a la física y, en concreto, al problema de los SR. La teoría de la relatividad especial se fundamenta en este principio y ha supuesto uno de los mayores logros científicos de la Historia. Sin embargo, tanto la teoría de la relatividad especial, como antes la mecánica de Newton, tienen un problema: se han de aplicar en SRI y en el mundo real no es posible encontrar verdaderos SRI. Albert Einstein no quedó contento con esta dificultad de su primera teoría relativista y dedicó 10 años de duro trabajo a elaborar una nueva teoría de relatividad: La Relatividad General. Como preámbulo a la teoría de relatividad general, Einstein formuló el llamado principio de equivalencia, del que deriva la siguiente afirmación:

*Un SR ligado a un objeto que cae libremente en un campo gravitatorio (es decir, con aceleración  $a=g$ ) es localmente equivalente a un verdadero SRI. Los experimentos que se realicen dentro de ese SR equivalente darán resultados idénticos a los que se obtendrían en un SRI.*

Para apoyar esta afirmación, Einstein sacó partido del problema del ascensor acelerado que ya hemos comentado. Cuando dicho ascensor tiene una aceleración descendente, la balanza sobre la que se coloca la mujer en nuestro ejemplo anterior indica una fuerza de apoyo menor y si el ascensor se desplomara para caer libremente (en este caso la aceleración del sistema sería la de la gravedad), la lectura de la balanza sería la correspondiente a un campo gravitatorio de valor  $g' = g - a$



$= g - g = 0$ . No sólo ocurriría esto: veríamos además que todos los objetos colocados en el ascensor "flotar" (respecto de un SR interior), puesto que, tal como muestra la animación adjunta, esos objetos también caen con la misma aceleración  $a=g$  (para entender bien por qué, conviene consultar el documento los conceptos de masa inercial y masa gravitatoria) Hemos elaborado una animación *Modellus* para mostrar este concepto.

No faltan hoy experiencias que muestran el comportamiento de objetos en ascensores que caen. Cualquier nave tripulada que describe una órbita estable alrededor de la Tierra está "cayendo" continuamente con una aceleración centrípeta igual a la aceleración de la gravedad en ese punto. Dentro de la nave que cae, también caen con la misma aceleración los astronautas y todos los objetos. Por esta razón, cuando colocamos allí una cámara (que también cae igual), todos parecen flotar. Las sensaciones que tienen los astronautas son similares a las que tendrían en un verdadero SRI en ausencia de gravedad.

Abusando del lenguaje se dice coloquialmente que los astronautas en estas condiciones están en estado de "ingravidez", aunque lo cierto es que a la altura a la que suelen orbitar estas naves, el valor del campo gravitatorio es sólo un poco inferior al existente en la superficie terrestre.

La Agencia Espacial Europea, ESA (European Space Agency), organiza en Burdeos los llamados vuelos parabólicos (Zero g) en los que durante unos 20 segundos se pueden realizar experimentos en esta situación de aparente ausencia de gravedad. Uno de los viajeros más ilustres de estos viajes será el físico Stephen Hawking. En la página web se proporcionan vínculos a estas referencias.

La invención de Einstein del concepto de SR equivalentes a verdaderos SRI dio a la Física uno de los mayores impulsos que ha tenido a lo largo de la historia. La teoría actual (la Relatividad General) se basa en poder aplicar las leyes de la relatividad especial en los SR equivalentes y después trasladar la descripción de los movimientos a SR no inerciales que se pueden adoptar en el mundo real, por ejemplo, con origen en un determinado punto de la superficie terrestre. Ésta es la mejor solución actual al problema de los sistemas de referencia.

**Nota:** Para elaborar esta página contamos con la colaboración de Luís Ignacio García, profesor del "IES Suanzes" de Avilés

---

Los experimentos, materiales y referencias citadas en este documento están disponibles en la página dedicada al estudio del problema de los sistemas de referencia (<http://intercentros.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/Sistemas-referencia/sistemas-referencia.htm>) dentro de la web del Departamento de Física y Química del IES "Leonardo Da Vinci" de Alicante (<http://intercentros.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/fisica.htm>)