

El profesor Leopoldo Muzzioli, autor de este estudio, nació en Módena, Italia. Se doctoró en la Universidad de Bolonia, iniciando su carrera académica como jefe de trabajos de Física en la Universidad de Módena. Pasó luego a desempeñarse como profesor de Física Experimental en la Universidad de Siena y, posteriormente, como profesor de Física Superior en la Universidad de su ciudad natal.

Radicado en Chile, fundó el Instituto de Física de la Universidad de Concepción, siendo designado, por su valiosa actividad docente y científica, Socio Honorario de la Sociedad Chilena de Física, Miembro Académico de la Facultad de Ingeniería y, finalmente, Profesor Emérito del Instituto de Física de la Universidad de Concepción.

la “pérdida del peso” en los vuelos espaciales

conveniencia de una nueva definición de peso de un cuerpo

LEOPOLDO MUZZIOLI

1. *La “pérdida de peso”.*

El fenómeno de la “pérdida de peso” que se verifica en los vuelos espaciales no tiene nada que ver con la disminución de la “gravedad” debido al alejamiento de la tierra.

Creo oportuno afirmar inmediatamente y en forma bien explícita este concepto con el objeto de evitar un error bastante común aun a personas no totalmente desprovistas de una cierta cultura científica.

Efectivamente, en una nave espacial que recorre su órbita a una altura de la tierra de pocos centenares de kilómetros, se verificará la pérdida total de peso, no obstante que a dicha altura la “gravedad” tiene un valor que es muy poco inferior al valor que tiene en la superficie de la tierra (NOTA 1).

Según la definición tradicional, el peso de un cuerpo en un punto de la tierra, es la fuerza con la cual el cuerpo, puesto en dicho punto, es atraído por la tierra y es esta fuerza-peso que hace caer al cuerpo si, privado de vínculos, es libre de caer.

Esto es lo que se dice normalmente.

Lo que no se dice normalmente es que la “sensación” de peso de un cuerpo y en particular, la sensación de peso de nuestro cuerpo, se manifiesta solamente cuando, por efecto del suelo, de una silla, etc., el cuerpo o nosotros mismos no podemos caer.

Si efectivamente se suprime el soporte que sostiene a un cuerpo y se deja que el campo gravitacional terrestre actúe libremente de manera de tener la “caída libre”, se puede comprobar que la “sensación” de peso desaparece.

Esta consideración, tan importante, no sólo no se pone generalmente en evidencia sino que a veces no es bien comprendida, porque es muy raro que podamos, en nuestra vida normal, notar la pérdida de peso.

Podríamos percibirla si desafortunadamente nos tocase caer libremente de una gran altura, o en un ascensor que descendiese libremente con velocidad enorme por ruptura de los cables, o bien en el caso de un paracaidista, en el breve lapso de "caída libre" que precede a la abertura del paracaídas.

Sin embargo, en todos estos casos, nuestra preocupación será orientada, por entero, hacia los peligros correspondientes a estas situaciones, de modo que la consideración de que se verifique, o no se verifique, la "pérdida de peso" seguramente no se hace.

En base a estos antecedentes, y antes de explicar el porqué de la pérdida de peso que se verifica durante los vuelos espaciales, creo oportuno explicar sobre el porqué de la pérdida de peso que se verifica durante la caída libre.

Con tal objeto nos parece útil e interesante exponer el siguiente experimento extraño, ideal. Imaginemos que una persona se lance desde una torre de enorme altura con el objeto de verificar lo que sucedería a esa persona y a los cuerpos a ella ligados, durante la caída libre.

Consideremos, por razones de simplicidad, que sea nula la resistencia del aire, o mejor, que la caída se verifique en el vacío.

Imaginemos también que este experimentador ideal "sostenga" sobre la palma de su mano extendida, un objeto, por ejemplo un lápiz.

Durante la caída libre el experimentador, con certeza, no tendrá la "sensación" del peso del lápiz. Durante dicha caída el lápiz que cae junto al experimentador, ya no carga sobre la palma de su mano, llevándolo por lo tanto, a la conclusión que su lápiz no tiene peso. Aún más, si el experimentador, siempre durante la caída, levanta con la otra mano un poco su lápiz, nota que éste no vuelve a caer en su palma abierta, sino que en cualquier posición que lo ponga verá que el lápiz queda en dicha posición, sin moverse con respecto a él.

El experimentador confirmará su conclusión de que el lápiz no tiene peso.

Sensaciones todavía más extrañas y fuera de la normalidad diaria podrían sucederle a nuestro experimentador si, por ejemplo, tuviese en su mano un vaso lleno de agua y quisiese beber durante la caída.

Al tratar de verter el agua en su boca, observaría que ésta no se cae. Aún más, si da vuelta completamente al vaso verá que el agua queda "pegada" y no caerá porque tampoco tiene peso.

Si el experimentador quisiese beber debería dar pequeños golpes sucesivos al fondo del vaso, que tendrán como efecto una caída "forzada del agua".

Un cohete, un satélite o una nave interplanetaria, que se mueven libremente en el espacio se encuentran en las mismas condiciones que nuestro experimentador.

En efecto, cuando los motores han cesado de funcionar el movimiento no es forzado, sino que natural y no sólo el cohete o el vehículo y sus ocupantes no resisten a la gravedad del campo gravitacional debido a un cuerpo celeste cualquiera en las cercanías, sino que tampoco resisten a la inercia de su movimiento; por el contrario, tanto el campo gravitacional como la inercia pueden actuar libremente.

He dicho que el movimiento de nuestro experimentador puede llamarse de "caída libre"; aquél de un cohete o de la nave interplanetaria, siempre que no funcionen sus motores, es un movimiento natural que puede definirse gravito-inercial y puede llamarse de "trayectoria libre".

En ambos casos, se produce exactamente el mismo fenómeno: la "pérdida completa del peso".

En el primer caso, "caída libre", el peso renace, y solamente, cuando se modifica o se obstaculiza con agentes externos la caída libre y en el segundo caso, "trayectoria libre" el peso vuelve a aparecer solamente cuando se modifica, por la acción de los motores a reacción, el movimiento de trayectoria libre.

Es conveniente hacer notar que, en el caso de la nave interplanetaria, su pérdida de peso, así como la pérdida de peso de sus ocupantes y de los cuerpos que ella contiene, permanece (siempre que no funcionen los motores) también durante la entrada y permanencia eventual en otro campo gravitacional debido a otro cuerpo celeste hacia el cual la nave se dirige.

Por ejemplo, se podría pensar que los ocupantes de la nave espacial dirigida, por ejemplo, a la luna, tengan la sensación de un aumento de peso continuo y creciente durante la caída de la astronave a nuestro satélite, lo que es un grave error.

Evidentemente existirá una aceleración de caída cada vez mayor y creciente fuerza gravitacional, pero los pasajeros de la nave en caída libre sobre la luna u otro planeta no sentirán

absolutamente nada y permanecerán con la misma sensación de falta absoluta de peso, al igual que en el caso de nuestro experimentador en "caída libre".

Regresará la sensación de peso y podrá ser muy grande solamente cuando funcionen nuevamente los motores a reacción con el objeto de disminuir la velocidad de caída de la astronave sobre el cuerpo celeste.

Lo anteriormente expuesto puede sintetizarse en las tres afirmaciones siguientes:

1. Una nave espacial con su contenido no tiene absolutamente peso cuando sus motores a reacción no funcionan para acelerar o frenar el vehículo, siempre que dicho vehículo se encuentre fuera de la atmósfera terrestre o de otro medio resistente que pueda alterar el movimiento libre.

2. Cuando los motores no funcionan, la falta de peso de la nave y de su contenido es siempre total, tanto si el vehículo se encuentra en el campo gravitacional de un planeta, por intenso que sea, como completamente fuera de cualquier campo.

3. El peso aparece nuevamente cuando los motores de la astronave vuelven a funcionar, con el objeto de disminuir su velocidad para un planetaje. El peso y la sensación de peso podrá iniciarse suavemente hasta transformarse en una presión enorme y que durará hasta que sea necesario hacer funcionar los cohetes de freno.

2. *Una nueva definición de "peso de un cuerpo".*

De lo expuesto anteriormente, resulta clara la conveniencia, aún más, la necesidad, de modificar la definición de peso de un cuerpo.

La definición y el concepto tradicionales de peso de un cuerpo tienen el defecto de tantas otras definiciones y conceptos tradicionales de la física que desgraciadamente es, muy a menudo, una física del hombre y para el hombre de nuestra tierra.

Ahora que los viajes espaciales son una realidad es urgente modificar, mediante una crítica inexorable, muchas definiciones y conceptos, especialmente en el campo de la mecánica.

Se vio al principio que, según la definición tradicional, el peso de un cuerpo en un punto de la tierra es la fuerza con la cual el cuerpo, puesto en ese punto, es atraído por la tierra.

También se ha expresado que la sensación de peso de un cuerpo y en particular la sensación de peso de nuestro cuerpo

se tiene solamente cuando por efecto del suelo, de una silla, etc., el cuerpo o nosotros no podemos caer.

Se demostró que si el soporte se suprime y se deja que actúe libremente el campo gravitacional terrestre de manera de tener la caída libre, la sensación de peso desaparece.

¿Es conveniente, en base a lo anterior, definir el peso de un cuerpo sin tomar en consideración el vínculo que lo sostiene, no obstante que solamente si existe dicho vínculo tiene sentido hablar de peso?

Ante todo, en lugar de llamar, como es tradicional, peso de un cuerpo a la fuerza con la cual el cuerpo es atraído por la tierra, parece más oportuno y racional llamar a esta fuerza "fuerza gravitacional".

Esta denominación relativa al campo gravitacional, estaría en más armonía con las denominaciones que se adoptan para los otros campos, es decir el eléctrico y el magnético.

En efecto, si un cuerpo cargado de una cierta cantidad de electricidad se pone en un campo eléctrico, donde la intensidad del campo tiene un cierto valor, sobre dicho cuerpo se produce y actúa una fuerza mecánica igual a la intensidad del campo por la carga del cuerpo y que se llama "fuerza eléctrica".

Nadie ha pensado jamás llamar a esta fuerza, "peso eléctrico" del cuerpo.

Una especie de "peso eléctrico" se pondría en evidencia solamente si, mediante un obstáculo, se impidiese al cuerpo electrizado moverse libremente en el campo.

Ahora que hemos estimado oportuno sustituir a la denominación tradicional de "peso de un cuerpo" por aquella más racional de "fuerza gravitacional", tratemos de definir la magnitud física "peso de un cuerpo" en modo diferente al tradicional, a fin de que la nueva definición represente este concepto de manera más afin con la realidad física, es decir, tome en cuenta el vínculo sobre el cual el cuerpo se apoya.

En base a las consideraciones anteriores, el peso de un cuerpo podría definirse de la siguiente forma:

"El peso de un cuerpo que se encuentra en un campo gravitacional, por ejemplo el terrestre, y que está 'apoyado' en un obstáculo, es la fuerza igual y contraria a aquella que el obstáculo produce en el cuerpo".

Si el cuerpo se encuentra en la tierra y está "apoyado" sobre un obstáculo detenido con respecto a la tierra, entonces el peso del cuerpo, definido de esta manera, es evidentemente igual al peso del cuerpo en su definición tradicional; efectiva-

mente, la fuerza que el obstáculo produce sobre el cuerpo para sostenerlo es igual y contraria a la fuerza gravitacional, que es el peso del cuerpo según la definición tradicional.

Si en cambio, el cuerpo, siempre sobre la tierra, está apoyado sobre un obstáculo en movimiento "acelerado", por ejemplo un ascensor, su peso variará: aumentará si el ascensor sube y disminuirá si el ascensor desciende.

Con esta definición que proponemos, a diferencia de aquella clásica, se tiene el valor de la magnitud "peso de un cuerpo", en todos los casos posibles y siempre en rigurosa concordancia con la realidad física.

Además la definición propuesta para el "peso de un cuerpo", no sólo es más general que la tradicional, sino que tiene también la característica sobremanera importante y fundamental de ser una definición operativa.

En efecto, el "peso de un cuerpo" según nuestra definición se puede medir siempre, así que satisface plenamente aquella condición que, como se sabe, debe tener toda magnitud física para que sea utilizable en la física, es decir la de poder medirse.

Efectivamente, este "nuevo peso" se puede medir siempre, en todos los casos y con la máxima simplicidad, mediante el "dinamómetro", es decir, con aquel instrumento que, como se sabe, sirve para medir fuerzas y el peso de un cuerpo era una fuerza y sigue siéndolo en la nueva definición.

Es conveniente hacer notar que no se puede utilizar la balanza, que sirve para comparar y medir "masas" y no fuerzas o pesos.

Por ejemplo, para medir el peso de nuestro cuerpo es suficiente colocar bajo nuestros pies una balanza de resortes y observar la indicación de este instrumento físico.

Si nos encontramos en un ascensor que sube o baja con movimiento acelerado, la fuerza gravitacional que corresponde a la fuerza peso en la definición tradicional es prácticamente constante; en cambio, nuestro peso según la definición propuesta, varía.

En efecto, las indicaciones experimentales del dinamómetro serán diferentes. El instrumento indicará pesos mayores cuando el ascensor sube, pesos menores cuando el ascensor baja y puede indicar peso cero si el ascensor cae bruscamente.

El instrumento físico dinamómetro indica, por consiguiente, en forma experimental y operativa el peso de nuestro cuerpo

conforme con nuestra definición y estas indicaciones están también de acuerdo con la sensación que, caso por caso, nosotros tenemos de nuestro peso.

Por ejemplo, si la persona que se encuentra dentro del ascensor pesa 70 Kg-peso, el dinamómetro indicará 70 Kg-peso si el ascensor está detenido, o también si se mueve hacia abajo o hacia arriba con movimiento uniforme.

Pero si el ascensor sube con un movimiento uniformemente acelerado, por ejemplo, con una aceleración de $1,4 \text{ m} \times \text{s}^{-2}$ entonces el dinamómetro indicará un peso mayor y precisamente un peso de 80 Kg-peso.

Si en cambio, el ascensor desciende con un movimiento uniformemente acelerado, con la misma aceleración de $1,4 \text{ m} \times \text{s}^{-2}$, el dinamómetro indicará un peso menor y precisamente un peso de 60 Kg-peso.

Estas dos indicaciones están perfectamente de acuerdo con las dos diferentes "sensaciones" que, la persona dentro del ascensor tendría en ambos casos, ya que en la subida se sentiría 10 Kg-peso más pesada y en la bajada 10 Kg-peso más liviana (NOTA 2).

Deseamos insistir en el hecho que la definición propuesta, no sólo está de acuerdo con la sensación de peso, sino que principalmente establece un método operativo adecuado para determinar, siempre y en cada caso, efectivamente el "peso" por cuanto toma en consideración el vínculo y sin vínculo, hablar de peso no tiene ningún sentido.

NOTAS EXPLICATIVAS

En estas dos notas explicativas se utilizan algunos cálculos sobremanera elementales y sencillos y que son de muy fácil comprensión; sin embargo, puedo señalar que la lectura de estas dos notas, a pesar de que podría ser bastante útil, no es, de ninguna manera, indispensable.

NOTA 1. El módulo de la aceleración de gravedad g , expresado en $\text{m} \times \text{s}^{-2}$, en función de la latitud ϕ , y de la altura h , expresada en m, puede calcularse mediante la fórmula siguiente.

$$g = 9,806056 - 0,025028 \cos 2\phi - 0,000003 h$$

Como ejemplo, calculemos para varias altitudes el módulo de la aceleración de gravedad g , en el ecuador y en los polos.

1º En el "ecuador" se tiene:

$$\phi = 0^\circ, \text{ es decir, } \cos 2\phi = +1$$

Aplicando la fórmula anterior para varias altitudes, se tiene:

- (1) Para $h = 0 \text{ m} = 0 \text{ Km}$
 $g = 9,806056 - 0,025028 = 9,781 \text{ m} \times \text{s}^{-2}$
- (2) para $h = 1000 \text{ m} = 1 \text{ Km}$
 $g = 9,781 - 0,003 = 9,778 \text{ m} \times \text{s}^{-2}$
- (3) para $h = 10000 \text{ m} = 10 \text{ Km}$
 $g = 9,781 - 0,030 = 9,751 \text{ m} \times \text{s}^{-2}$
- (4) para $h = 100000 \text{ m} = 100 \text{ Km}$
 $g = 9,781 - 0,300 = 9,481 \text{ m} \times \text{s}^{-2}$
- (5) para $h = 300000 \text{ m} = 300 \text{ Km}$
 $g = 9,781 - 0,900 = 8,881 \text{ m} \times \text{s}^{-2}$

2º En los "polos" se tiene:

$$\phi = 90^\circ, \text{ es decir, } \cos 2\phi = -1$$

Aplicando la fórmula anterior para varias altitudes, se tiene:

- (1) para $h = 0 \text{ m} = 0 \text{ Km}$
 $g = 9,806056 + 0,025028 = 9,831 \text{ m} \times \text{s}^{-2}$
- (2) para $h = 1000 \text{ m} = 1 \text{ Km}$
 $g = 9,831 - 0,003 = 9,828 \text{ m} \times \text{s}^{-2}$
- (3) para $h = 10000 \text{ m} = 10 \text{ Km}$
 $g = 9,831 - 0,030 = 9,801 \text{ m} \times \text{s}^{-2}$
- (4) para $h = 100000 \text{ m} = 100 \text{ Km}$
 $g = 9,831 - 0,300 = 9,531 \text{ m} \times \text{s}^{-2}$
- (5) para $h = 300000 \text{ m} = 300 \text{ Km}$
 $g = 9,831 - 0,900 = 8,931 \text{ m} \times \text{s}^{-2}$

Todos estos datos, se pueden resumir en la siguiente tabla:

Altitud h	Aceleración gravedad g , ecuador	Aceleración gravedad g , polos
0 Km	9,781 $\text{m} \times \text{s}^{-2}$	9,831 $\text{m} \times \text{s}^{-2}$
1 Km	9,778 $\text{m} \times \text{s}^{-2}$	9,828 $\text{m} \times \text{s}^{-2}$
10 Km	9,751 $\text{m} \times \text{s}^{-2}$	9,801 $\text{m} \times \text{s}^{-2}$
100 Km	9,481 $\text{m} \times \text{s}^{-2}$	9,531 $\text{m} \times \text{s}^{-2}$
300 Km	8,881 $\text{m} \times \text{s}^{-2}$	8,931 $\text{m} \times \text{s}^{-2}$

Estos datos demuestran claramente que la "pérdida de peso", que se verifica totalmente en una nave espacial que recorre su órbita en "trayectoria libre", a una altura de la tierra de pocos centenares de kilómetros, no tiene nada que ver con la disminución de la "gravedad" debida al alejamiento de la tierra.

En efecto se observa que, a una altura de 300 Km, la disminución de la "gravedad" es inferior al 10% de su valor al nivel del mar.

NOTA 2. El cálculo, mediante el cual se puede determinar el peso durante la subida (P_s) y el peso durante la bajada (P_b) de una persona que se encuentra en un ascensor que sube o baja con una aceleración determinada, es muy simple.

Sea 70 Kg-peso, el peso de la persona, según la definición tradicional, es decir, sea 70 Kg-peso la "fuerza gravitacional" aplicada a dicha persona, según nuestro nuevo punto de vista, y sea $1,4 \text{ m} \times \text{s}^{-2}$ la aceleración de subida y de bajada del ascensor.

En base a la definición propuesta, el peso de la persona es la fuerza igual y contraria a aquella que el vínculo (piso del ascensor) produce sobre la persona misma; tal peso será, por lo tanto, igual a la fuerza total que, en cada caso, es aplicada a la persona y actúa sobre el vínculo.

En el caso en examen, podemos considerar los módulos, dado que el peso, es un vector cuya dirección es siempre vertical y cuyo sentido es siempre hacia abajo.

Ahora bien, para calcular (P_s), bastará "agregar" a la "fuerza gravitacional" ($F_g = 70 \text{ Kg-peso}$) la reacción a la fuerza de inercia" (F_i), que nace por efecto del movimiento uniformemente acelerado de subida con aceleración $a = 1,4 \text{ m} \times \text{s}^{-2}$; para calcular (P_b) bastará, en cambio, "restar" a la "fuerza gravitacional" ($F_g = 70 \text{ Kg-peso}$) la "reacción a la fuerza de inercia" (F_i), que nace por efecto del movimiento uniformemente acelerado de bajada con aceleración $a = 1,4 \text{ m} \times \text{s}^{-2}$.

En otros términos, debemos agregar, en el caso de la subida, y restar, en el caso de la bajada, a la fuerza gravitacional ($F_g = 70 \text{ Kg-peso}$), aquella fuerza (F_i) que nace y actúa sobre el cuerpo por efecto de su inercia natural, de su propia "pereza", caracterizada y medida por la masa del cuerpo y reacia a variar su velocidad, o sea, a moverse con movimiento acelerado.

Esta fuerza, debiendo oponerse al movimiento, será un vector cuyo sentido será siempre contrario a aquel del movimiento mismo. Por lo tanto, el sentido en subida será hacia abajo (mismo sentido que la fuerza gravitacional), por consiguiente el módulo de la fuerza resultante será la "suma" de los módulos; en cambio, el sentido en bajada será hacia el alto (contrario a la fuerza gravitacional), por lo tanto, el módulo de la fuerza resultante será la "diferencia" de los módulos.

A pesar que el "Sistema Internacional de Unidades (SI)", sea el sistema de medidas más racional, aquel que, especialmente en la física, debería siempre utilizarse, creemos oportuno realizar nuestro cálculo utilizando, en cambio, el "Sistema gravitacional de unidades" con el objeto de que las fuerzas calculadas resulten en "Kg-peso".

Si se utilizara el "Sistema internacional de unidades (SI)", las fuerzas calculadas resultarían en "newton", y esta unidad de medida de las fuerzas no es, en general, bien conocida por las personas no especializadas.

Calculemos, ante todo, la fuerza de inercia F_i .

$$F_i = ma$$

Puesto que, como hemos dicho, vamos a utilizar el "Sistema gravitacional de unidades", se tiene:

$$m \cong \frac{70 \text{ Kg-peso}}{9,8 \text{ m} \times \text{s}^{-2}} \cong 7,14 \text{ u.g.m.}$$

y

$$a = 1,4 \text{ m} \times \text{s}^{-2}$$

luego:

$$F_i \cong 7,14 \text{ u.g.m.} \times 1,4 \text{ m} \times \text{s}^{-2} \cong 10 \text{ kg-peso}$$

Por consiguiente, en base a las consideraciones hechas antes, tenemos que: el peso de la persona en el ascensor en la subida es: $P_s = F_g + F_i = 70 \text{ Kg-peso} + 10 \text{ Kg-peso} = 80 \text{ Kg-peso}$ y el peso de la persona en el ascensor en la bajada es: $P_b = F_g - F_i = 70 \text{ Kg-peso} - 10 \text{ Kg-peso} = 60 \text{ Kg-peso}$.