

Una revisión crítica de un experimento mental de Galileo sobre la caída de los cuerpos y el diseño de un experimento alternativo

Leonardo Levinas¹

Recibido: 5 de abril de 2021

Aceptado: 21 de octubre de 2021

Resumen. En el experimento mental que estudiamos en este artículo, Galileo intenta refutar la hipótesis aristotélica según la cual los cuerpos más pesados deben emplear menos tiempo en caer que los más livianos. Luego de señalar algunas inconsistencias en el planteo de Galileo, mostramos, a través del diseño de dos experimentos alternativos pero equivalentes al suyo, que de su experimento imaginario no es posible llegar a la conclusión de que todos los cuerpos caen simultáneamente en el vacío. A su vez, diseñamos un experimento mental del que se infiere que, bajo las mismas condiciones iniciales, todos los cuerpos, independientemente de su peso y composición, deben caer con la misma aceleración. Mostramos por qué, para explicar el resultado de este tipo de experiencias, ya sean reales o imaginarias, es necesario establecer la equivalencia entre las masas inercial y gravitatoria, equivalencia derivada exclusivamente de la experiencia y que dio lugar al llamado Principio de Equivalencia empleado en la teoría de la Relatividad General.

Palabras clave: Galileo y Aristóteles, experimento mental y experimento real, caída de los cuerpos, equivalencia masas inercial y gravitatoria.

Title: A critical review of a Galileo thought experiment on falling bodies and the design of an alternative experiment.

Abstract. In the thought experiment that we study in this article, Galileo attempts to refute the Aristotelian hypothesis that heavier bodies should take less time to fall than lighter ones. After pointing out some inconsistencies in Galileo's approach, we show, through the design of two alternative but equivalent experiments to his, that from his imaginary experiment it is not possible to reach the conclusion that all bodies fall simultaneously into a vacuum. In turn, we design a thought experiment from which it follows that, under the same initial conditions, all bodies, regardless of their weight and composition, must fall with the same acceleration. We show why, to explain the result of this type of experiences, whether real or imaginary, it is necessary to establish the equivalence between inertial and gravitational masses, equivalence derived exclusively from experience and that gave rise to the so-called Equivalence Principle as used in the General Theory of Relativity.

¹ Universidad de Buenos Aires (UBA) – CONICET. Buenos Aires, Argentina.

✉ leolevinas@gmail.com |  [0000-0002-5388-9849](https://orcid.org/0000-0002-5388-9849)

Levinas, Leonardo (2021). Una revisión crítica de un experimento mental de Galileo sobre la caída de los cuerpos y el diseño de un experimento alternativo. *Epistemología e Historia de la Ciencia*, 6(1), 69–87.

<https://revistas.unc.edu.ar/index.php/afjor/article/view/32649>



Keywords: Galileo and Aristotle, thought experiment and real experiment, free falling bodies, equivalence of inertial and gravitational mass.

Introducción

En algunas de sus obras, Galileo trata el problema de la caída de cuerpos en diferentes medios; algunas de sus conclusiones se derivan de datos experimentales que conducen, en el límite de un espacio vacío, a la afirmación de que todos los cuerpos, bajo condiciones iniciales similares, caen de la misma manera, esto es empleando el mismo tiempo. En este sentido, el experimento mental que estudiamos en este trabajo es una excepción. Aquí el punto interesante es el esfuerzo de Galileo por llegar a aquella afirmación sin necesidad de ningún experimento real. El experimento mental de Galileo -que intenta refutar la afirmación aristotélica de que los cuerpos más pesados caen con mayor velocidad que los cuerpos más livianos- puede sintetizarse de la siguiente manera:

Se dejan caer dos cuerpos, por ejemplo, dos bolas de igual tamaño y diferente peso, unidas por una cuerda rígida. Siguiendo a Aristóteles, si la bola más ligera cae más despacio, tenderá a frenar el movimiento de caída de la más pesada, y simultáneamente la bola más pesada tenderá a acelerar a la bola más liviana, de forma tal que el conjunto de las dos esferas unidas caerá a una velocidad mayor a la que caería por sí sola la más liviana y a una velocidad menor respecto de la que caería la más pesada. Por otra parte, el conjunto de las dos bolas pesa más que la bola más pesada, por lo que el conjunto debería caer con una velocidad mayor que la de la bola más pesada cayendo sola. Por lo tanto, concluye Galileo, para salvar la contradicción, la velocidad de caída, tanto de la bola más liviana como de la bola más pesada y del conjunto, deberían ser iguales. En consecuencia, la velocidad de los cuerpos que se dejan caer debe ser la misma independientemente de su peso.

En este artículo realizamos un tratamiento puramente conceptual de la problemática de fondo que plantea el experimento mental de Galileo. Nuestra intención es mostrar por qué el razonamiento de Galileo es inválido, ofrecer un experimento mental alternativo al de Galileo y explicar por qué los cuerpos de diferentes pesos deben (necesariamente) caer con la misma aceleración en el vacío.

En este sentido nuestro trabajo posee cuatro objetivos principales:

Primero, mostrar que el razonamiento subyacente al experimento mental diseñado por Galileo no es válido para refutar la teoría aristotélica referida a la caída de los cuerpos con diferentes pesos.

Segundo, ofrecer dos ejemplos equivalentes al de Galileo en los que *no* se cumplen las supuestas conclusiones contradictorias extraídas por él.

Tercero, proponer un experimento mental que muestra que todos los cuerpos, independientemente de su composición y peso, deben caer con la misma aceleración.

Cuarto, determinar por qué el resultado, de que todos los cuerpos que se mueven en el vacío en un campo gravitatorio uniforme caen con la misma aceleración, posee su explicación en la equivalencia entre la masa inercial de un cuerpo y su masa gravitatoria.

En este sentido, la estructura del artículo es la siguiente:

En la **Parte I** realizamos una revisión crítica del experimento de Galileo, comenzamos presentando algunos antecedentes de dicho experimento en autores anteriores a Galileo (1.1); luego exponemos dicho experimento mental (1.2) y, empleando

los mismos presupuestos y las mismas herramientas empleadas por Galileo, discutimos algunas incongruencias en su formulación (1.3).

En la **Parte II** ofrecemos dos ejemplos alternativos que muestran por qué el experimento mental así diseñado, *no* refuta la hipótesis aristotélica. En primer lugar presentamos un experimento análogo para determinar por qué el argumento utilizado por Galileo para rechazar la hipótesis aristotélica sobre la caída de los cuerpos *no* conduce a dos conclusiones diferentes y contradictorias entre sí (2.1). Luego, en (2.2), hacemos un diseño alternativo al del experimento de Galileo donde se muestra, con mayor claridad, por qué, si se cumpliera la hipótesis aristotélica, se alcanzaría una única conclusión.

En la **Parte III** presentamos un nuevo experimento mental, sin necesidad de formalismo alguno, con el fin de mostrar que todos los cuerpos deben caer en el vacío con la misma aceleración. En primer lugar, (3.1), tomamos el caso menos general de dos cuerpos con *igual* composición y diferentes pesos; luego (3.2), presentamos el caso general de dos cuerpos con *diferente* composición y diferentes pesos para luego discutir una consecuencia interesante en relación con este tratamiento de la caída libre de cuerpos en el vacío (3.3).

En la **Parte IV** intentamos explicar la razón por la que todos los cuerpos, dejados caer desde la misma altura en el vacío, lo hacen con la misma aceleración. Para dar con dicha explicación, invocamos primero, en (4.1), resultados provenientes de determinados experimentos reales, y luego, en (4.2), intentamos reunir los resultados para explicar la caída simultánea de cuerpos con diferente peso en el vacío.

Parte I: Una revisión crítica del experimento mental de Galileo

1.1 Antecedentes del experimento mental de Galileo

Antes de analizar el experimento mental en cuestión, resulta interesante notar que, según Galileo, la aceleración de los cuerpos que caían hacia la Tierra era independiente de la distancia a su superficie, inclusive para distancias tan grandes como las de la Luna, una suposición incorrecta señalada por el propio Newton². En Galileo esto se relacionaba con la creencia de que los cuerpos terrestres debían caer en la Tierra y que los cuerpos selenitas debían hacerlo en la Luna, sus respectivos lugares naturales.

Ahora bien; si del hecho de que todas las partes de la Tierra contribuyen acordemente a formar su todo, se sigue que todas esas partes y desde todos los lugares, concurren allí con igual inclinación y que para unirse las máximas que sean posibles se adaptan esféricamente: ¿por qué no debemos creer que la Luna, el Sol y los otros cuerpos mundanos son también de figura redonda, y no por otra razón, sino por un acorde instinto natural de concurrencia de todas sus partes componentes?; de modo que si alguna de las cuales, en algún momento y por cualquier violencia fuese separada de su todo, ¿por qué no habría de retornar a él instintiva y naturalmente?" (Galileo, trad. 1980, Jornada Primera, p. 78)

En este sentido, Galileo se apartaba incluso de Aristóteles quien imaginaba que si la Tierra fuese colocada en la posición que ocupaba la Luna, entonces cada una de sus

² Newton criticó la suposición galileana de que la aceleración de los planetas en caída sería constante; sabía que la aceleración aumentaría constantemente porque la fuerza solar varía inversamente al cuadrado de la distancia. Para mayores detalles sobre el tema ver (Cohen, 1967).

partes no se vería atraída hacia ésta sino hacia el lugar que actualmente ocupa aquélla, ya que el lugar natural del elemento tierra era el centro del universo y no otro:

(...) pues si uno cambiara de sitio la tierra (poniéndola) donde ahora está la luna, no se desplazaría cada una de sus partes hacia ella sino a donde se halla ahora; en general, pues, es forzoso que esto ocurra con las cosas semejantes e indiferenciadas por efecto del mismo movimiento, de modo que allá donde es natural que se traslade una parte cualquiera, allí también (se encuentre) el todo (...), trasladarse hacia el lugar propio es trasladarse hacia lo semejante: pues las cosas contiguas son semejantes entre sí (...) y en cuanto al lugar, los (cuerpos) leves (van) hacia arriba, los graves hacia abajo (Aristóteles, trad. 1996, p. 210).

El propio Aristóteles había afirmado que el crecimiento de la fuerza de atracción que sufrían los cuerpos hacia sus lugares naturales iba en razón inversa a la distancia: “Una prueba de que no es posible desplazarse hasta el infinito es que la tierra, cuanto más cerca está del centro [del universo], más rápido se desplaza, y (lo mismo) el fuego cuanto más arriba” (Aristóteles, 1996, p. 80).³

El problema de la caída libre de los cuerpos y el experimento mental de Galileo que examinaremos aquí, ha sido analizado de manera exhaustiva en la literatura; entre otros trabajos destacamos (Koyré, 1978, 1981), (Norton, 1996), (Gendler, 1998), (Palmieri, 2005); o más recientemente (Grundmann, 2018), (El Skaf, 2018), (Mondragón 2020). Digamos aquí que nuestro enfoque del problema difiere en gran medida de los de todos estos autores.

Una cuestión fundamental en la física aristotélica consiste en que cada uno de los cuatro elementos que componen el mundo sublunar tiende a alcanzar su lugar natural lo más rápidamente posible y por el camino más corto, es decir, en línea recta; tenemos, así, un movimiento de *caída* para los cuerpos pesados (compuestos predominantemente de tierra y/o agua) y de *elevación* para los leves (compuestos predominantemente de aire y/o fuego). Aristóteles consideraba estos movimientos como los únicos naturales en este mundo. En concordancia con esto, sostenía que la velocidad de caída de un cuerpo pesado era proporcional a su peso e inversamente proporcional a la resistencia del medio, e invocaba este hecho como una de las razones por las que el vacío no podía existir: si la resistencia del medio fuera nula (vacío), entonces las velocidades de caída deberían ser infinitas (Aristóteles, trad. 1995, Libro IV, 8).

En contra de esto, encontramos en Filoponus (490-566) el primer antecedente tendiente a establecer la caída simultánea de los cuerpos de distinto peso. En efecto, mientras que Aristóteles sostenía que si un cuerpo pesaba el doble que otro, emplearía la mitad de tiempo para caer:

(...) si tal peso se mueve tal (distancia) en tanto tiempo, tal otro (mayor) lo hará en menor tiempo, y los tiempos estarán en razón inversa a los pesos; v.g.: si un peso mitad (se mueve) en tanto tiempo, un peso doble lo hará en la mitad de ese tiempo. (Aristóteles, trad. 1996, p. 66)

En cambio, Filoponus (en sus *Comentarios a la Física de Aristóteles*, publicado por primera vez en latín en 1539) sostenía que si un cuerpo pesaba el doble que otro, no habría diferencia, o habría una diferencia indetectable en el tiempo de caída de ambos:

³ Ver al respecto: (Aristóteles, trad. 1995, p. 223, 442) y (Aristóteles, trad. 1996, pp. 79, 80).

Si dejas caer desde la misma altura dos pesos de los cuales uno es muchas veces más pesado que el otro, verás que la proporción de los tiempos requeridos para el movimiento no depende de la proporción de los pesos, sino que la diferencia en tiempo es una muy pequeña. Y así, si la diferencia en los pesos no es considerable, esto es, si uno es, digamos, doble que el otro, no habrá diferencia de tiempo, o ésta será imperceptible, a pesar de que la diferencia en peso no es de ningún modo despreciable, con un cuerpo que pesa tanto como el doble que el otro. (Filoponus, 1539, tomado de Crombie, 1976, p. 56)

Este texto de Filoponus fue citado por Galileo en *De motu* cuando éste se refería al movimiento de los cuerpos en el vacío.⁴

A su vez, para Jean Baptiste Benedetti (1585), en un medio denso, la velocidad de caída de cuerpos compuestos de materia diferente será proporcional a sus pesos específicos, mientras que en el vacío los cuerpos con el mismo peso específico caerán de la misma forma, independientemente de su tamaño, es decir, independientemente de su peso. Sin embargo, para Benedetti, cuerpos con diferente composición caerán en un vacío con diferente velocidad⁵, lo mismo que sostiene Galileo en *De motu*:

(...) en el lleno el móvil se mueve según la proporción del exceso sobre la gravedad del medio en el que se mueve, y del mismo modo, en el vacío, según el exceso de su gravedad sobre la gravedad del vacío; y como ésta es nula, el exceso de la gravedad del móvil sobre la gravedad del vacío será [igual a] su gravedad total; por ello se moverá más rápidamente [que en el lleno] en proporción a su gravedad total. (de *De motu*, citado por Koyré, 1978, p. 239)

Esta conclusión, contraria a Aristóteles, se deriva del hecho de que cuando el medio ofrece menor resistencia (por ejemplo, el aire con respecto al agua), la velocidad de cuerpos de diferente composición no solo tiende a ser más significativa, sino que también tiende a diferenciarse, de tal manera que un cuerpo de mayor peso específico (mayor gravedad específica) tenderá a caer más rápido que uno de menor peso específico. Es importante señalar que en ambos casos, tanto el cuerpo con mayor peso específico como el que tiene menor peso específico alcanzan una velocidad final.⁶

1.2 El experimento mental de Galileo

Resulta interesante notar la diferencia fundamental entre el Galileo del *De motu* y el de los *Discorsi*: mientras que el primero supone que el peso específico es el factor causal por el cual la velocidad es proporcional al peso específico, incluso en el vacío, en los *Discorsi* Galileo elimina el peso específico como factor causal y sostiene que en el vacío todos los

⁴ Ver (Koyré, 1978, n. 86, p. 234)

⁵ Benedetti, J. B. (1585), en *Diversarum speculationum mathicarum et physicarum liber* [*Diversas especulaciones matemáticas y físicas*], citado por (Koyré, 1978, pp. 237-8)

⁶ En condiciones reales, esto es, en un medio denso como el aire, la relación entre el peso, la resistencia del aire y la aceleración del cuerpo que cae, está representada (a primer orden en la velocidad), y en términos de la segunda ley de Newton, por la siguiente ecuación diferencial: $F = ma = mg - kv$, donde k es el coeficiente de resistencia, que conduce a la siguiente solución para la velocidad de caída v [con velocidad inicial $v(t = 0) = 0$]: $v(t) = (mg/k) - (mg/k)e^{(-k/m)t}$. De la solución se desprende que cuando el tiempo t es lo suficientemente grande, el cuerpo alcanza una velocidad final constante, tal como Galileo sugería. Esta velocidad terminal es $v_{term} = mg/k$. Se ve que la velocidad final es proporcional al peso mg y que los cuerpos pesados en un medio como el aire, caen con una mayor velocidad final. Esto significa que en condiciones reales y para tiempos de caída suficientemente grandes, Aristóteles estaba en lo cierto.

cuerpos caen con la misma velocidad independientemente de su peso específico. Veamos cómo opera esta diferencia en su experimento mental:

En los *Discorsi*, Salviati, el personaje que defiende las ideas de Galileo, elige una hipótesis que considera errónea: si un cuerpo pesa más que el segundo, su aceleración hacia el suelo será mayor; su idea es llegar a conclusiones contradictorias. El experimento mental de Galileo consiste en lo siguiente:

Consideremos la hipótesis de Aristóteles referida a la caída libre de los cuerpos: si tenemos un cuerpo A cuyo peso es P_A y un cuerpo B cuyo peso es P_B , siendo $P_A > P_B$, y los dejamos caer simultáneamente desde una misma altura, entonces, A caerá con una velocidad mayor que B; esto es, empleará menos tiempo en llegar al suelo. En términos galileanos, la hipótesis aristotélica indica que A caería con mayor velocidad que B: $v_A > v_B$.

Siguiendo a Salviati, supongamos que ambos cuerpos son unidos por medio de un mecanismo rígido; entonces, de acuerdo con Salviati, de la hipótesis en cuestión podrían desprenderse *dos* conclusiones:

Por un lado, los cuerpos A y B deberían caer juntos con una velocidad intermedia respecto de las velocidades v_A y v_B ; y esto sería así debido a que el cuerpo B tendería a frenar al cuerpo A, mientras que A tendería a acelerar a B. En consecuencia: $v_A > v_{[A+B]} > v_B$.

Por otro lado, el sistema compuesto por A y B debería pesar $P_{[A+B]} = P_A + P_B$, de forma tal que este nuevo cuerpo debería caer más rápido que el cuerpo más pesado A: $v_{[A+B]} > v_A$.

Entonces (para Salviati) la única manera de salvar la contradicción entre (a) y (b) es rechazar la hipótesis aristotélica y admitir que todos los cuerpos deben emplear el mismo tiempo en caer desde una misma altura, esto es, que los tiempos de caída deben ser: $t_{[A+B]} = t_A = t_B$. En palabras de Galileo:

Por consiguiente, si tuviésemos dos móviles de velocidades naturales diferentes, sería de esperar que, uniendo el más tardo con el más veloz, este sería en parte retardado por el más tardo, y el más tardo en parte acelerado por el más veloz. (...) Pero si esto es así, y es también verdad que una piedra grande se mueve, supongamos, con 8 grados de velocidad, y una menor con 4, al unir las dos, el sistema compuesto tendrá que moverse con velocidad menor de 8 grados; sin embargo las dos piedras unidas, hacen una piedra mayor que la primera, que se movía con 8 grados de velocidad. Luego esta más grande [el conjunto] se mueve con menos velocidad que la primera piedra que es menor [en peso]: lo que está en contra de tu suposición. Ya ves, pues, que del suponer que el móvil más pesado se mueve más velozmente que el menos pesado, yo infiero que el más pesado se mueve más lentamente. [Luego Salviati dice:] De esto se deduce, que tanto los móviles grandes como los pequeños, se mueven con igual velocidad y tienen una misma gravedad específica. (Galileo, trad. 2003, pp. 97-99)

Aunque Galileo, en el último de los pasajes citados, habla de una “misma gravedad específica”, no existe, según él, correlación entre el peso específico y el movimiento natural (de caída). De hecho, más adelante en el texto, y basado en la experiencia *real*, expresará que todos los cuerpos sin resistencia caerán con la misma velocidad. Sostiene que, dado que la velocidad final en el aire de cuerpos compuestos de diferentes materiales

tiende a ser la misma, en el límite de un medio no resistente, es decir, en el vacío, la velocidad de todos los cuerpos debería ser la misma:

(...) sin embargo, entre bolas de oro, de plomo, de cobre, de púrpura o de otras materias pesadas, la diferencia de movimiento por el aire será casi del todo imperceptible, pues seguramente que una bola de plomo, al final de un descenso de 100 codos, no se habrá adelantado en cuatro dedos a otra de cobre. Después de ver esto, soy de opinión que si se suprimiese totalmente la resistencia del medio, todas las materias descenderían con la misma velocidad. (Galileo, trad. 2003, p. 108)

Notemos la importancia de que este último presupuesto no surge de un experimento mental, sino de uno real.

1.3 Algunas incongruencias en el razonamiento de Galileo

En primer lugar, como nota destacada que de alguna manera refleja el impacto que el experimento mental de Galileo ha tenido en la historia de la ciencia, digamos que ha sido considerado un experimento mental o imaginario paradigmático, entre otros por Karl Popper. En palabras de este último:

Uno de los experimentos imaginarios más importantes de la historia de la filosofía natural, y uno de los argumentos más simples e ingeniosos en la historia del pensamiento racional sobre nuestro universo, está contenido en la crítica de Galileo a la teoría del movimiento de Aristóteles. (...) Encuentro en el experimento imaginario de Galileo un modelo perfecto del empleo mejor de los experimentos imaginarios, se trata del *empleo crítico*. (Popper, 1967, pp. 412-413)

En esta sección del artículo veremos por qué, a pesar del indudable ingenio de Galileo, su experimento mental no conduce, en verdad, a una refutación de las ideas aristotélicas. Para ello, primero recordemos que una consideración importante que podemos hacer en defensa del punto de vista aristotélico es reconocer que cuando unimos dos cuerpos de diferentes pesos, si acaso uno acelera al otro y el otro tendiese a frenar al primero (situación (a)), entonces el movimiento ya *no sería natural* para ninguno de los cuerpos. Esto, por sí solo, invalidaría la argumentación de Galileo ya que, cuando en la primera situación los dos cuerpos están enlazados, las condiciones ofrecidas para una caída libre no se cumplirían para ninguno de los cuerpos, es decir, ninguno de los dos cuerpos seguiría un movimiento natural sino uno forzado, ya que el cuerpo más liviano ejercería una fuerza de resistencia sobre el más pesado y, a la inversa, el más pesado una acción que forzaría al más liviano a caer con mayor velocidad.⁷

Por otro lado, Galileo supone que en la segunda situación (b), el cuerpo A y el cuerpo B forman un solo cuerpo C, cuyo peso sería la suma de los pesos de cada uno, es decir, tendría el peso de A más el peso de B, por lo que la “parte” A de C y la “parte” B de C caerían con la misma velocidad, como en el caso anterior, pero esta vez sin “interferir” entre sí ya que serían parte de un mismo cuerpo (rígido); situación completamente diferente a la de (a). Esto último, contradice algo indicado por el propio Galileo en páginas

⁷ Debemos hacer notar aquí que las expresiones o nociones tales como “movimiento natural”, “movimiento forzado”, “cuerpo pesado”, “cuerpo liviano”, “masa”, y el “peso” entendido como “fuerza”, son empleados por Galileo con frecuencia en su obra. Ver al respecto: (Galileo, trad. 1980, p. 78), (Galileo, trad. 2003, pp. 48, 97, 110, 118, 121, 213-4).

anteriores de su *Discorsi*, donde sostiene firmemente que en esta última situación, A y B caerían simultáneamente ¡pero sin sumar sus pesos!:

Salviati: Advierte que es necesario distinguir, entre los cuerpos pesados puestos en movimiento, y los mismos en reposo. Una gran piedra puesta en la balanza, no sólo adquiere mayor peso al superponerle otra piedra, sino que hasta la añadidura y un copo de estopa, la hará aumentar de peso las seis o diez onzas que pesará la estopa; mas si tú dejaras caer libremente desde lo alto la piedra envuelta en la estopa ¿crees tú que durante la caída, la estopa habrá de gravitar sobre la piedra acelerando su movimiento, o crees más bien que lo retardará, sosteniéndola en parte? Sentimos peso sobre nuestras espaldas, mientras pretendemos oponernos a la caída que realizaría el cuerpo pesado que llevamos encima; pero si nosotros descendiésemos con la misma velocidad con que descendería naturalmente ese peso, ¿cómo quieres que pese y gravite sobre nosotros? (Galileo, trad. 2003, pp. 98-99)

Para explicar este fenómeno, el propio Galileo da un ejemplo interesante:

Salviati: ¿No ves que esto sería igual que pretender herir con la lanza a uno que corre delante de ti, con más velocidad de la que llevas tú al perseguirlo? Debes, pues, colegir que en la caída libre y natural, la piedra menor no gravita sobre la mayor, y en consecuencia, no le añade peso, como hace en el reposo. (Galileo, trad. 2003, pp. 99)

En otras palabras, antes de exponer su experimento mental, Galileo reconocía que dos cuerpos se comportaban de manera diferente cuando caían juntos que cuando se pesaban juntos en reposo sobre una balanza. Según Galileo, la piedra más pequeña agrega peso a la más grande cuando se encuentran juntas en reposo, lo que no sucede cuando caen, de modo tal que no ocurre que la B frene a la A, y esto se debe a que Galileo ya presupone que todos los cuerpos caen con la misma velocidad, lo que *per se* contradice la hipótesis aristotélica.

Claramente, la caracterización del comportamiento de los cuerpos en las situaciones (a) y (b) es completamente diferente en un caso que en el otro. De todos modos, si la hipótesis aristotélica fuera cierta debería suceder una cosa o la otra. Poniéndonos en el lugar de Aristóteles, podría afirmarse que dos cuerpos *idénticos*, uno producto de la reunión de dos cuerpos A y B “unidos” *hoy* frente a mis ojos (llamémoslo A+B), y el otro, producto de la reunión de dos cuerpos idénticos A y B “unidos” *ayer* sin que uno supiese ese hecho y pensase que siempre se trató de un único cuerpo (llamémoslo C), no caerían de la misma manera...⁸

Sorprendentemente, Galileo presenta su experimento mental independientemente de estas últimas conclusiones. En efecto, en la primera situación (a) asume que los cuerpos interactúan y que además de la fuerza natural de caída, actúan fuerzas antinaturales; mientras que en la segunda situación (b) asume que los cuerpos no interactúan (que hay un solo cuerpo) y que la única fuerza que actúa es natural: el peso, que resulta de pesar C como un cuerpo compuesto (combinado) de A+B, a pesar de haber afirmado que los pesos no se sumarían durante la caída ya que A y B no interactuarían.

⁸ Koyré al respecto también apunta algo interesante y muy gráfico, y es que dos hombres tomados de la mano no caerían más rápido: no lo harían ni siquiera para Aristóteles, a pesar de que pesados juntos en una balanza, pesarían más que uno solo (Koyré, 1978, p. 214).

Parte II: Dos ejemplos alternativos que muestran por qué el experimento mental de Galileo *no* refuta la hipótesis aristotélica

2.1 Un experimento alternativo en el que se cumple una hipótesis análoga a la aristotélica y *no* se cumple una de las conclusiones extraídas por Galileo

Para mostrar por qué el razonamiento de Galileo no es válido –en particular, por qué la conclusión (b) no se deriva de la hipótesis aristotélica–, presentaremos otro experimento mental que también involucra la caída de los cuerpos desde el reposo y desde cierta altura, pero que es esencialmente equivalente y más abarcativo al sugerido por Salviati. La única diferencia es que, en terminología moderna, la caída de los cuerpos no sólo se da en presencia de un campo gravitatorio sino también de un campo eléctrico. Trabajaremos siempre en el vacío.⁹

Sean dos cuerpos, A y B, con el mismo peso $P_A = P_B$, con cargas positivas q_A y q_B , respectivamente, ($q_A > q_B > 0$). Los dejamos caer desde la misma altura r con respecto a la superficie de una esfera con el tamaño de la Tierra, masa M y una gran carga negativa Q . Nuestra pregunta es: ¿cómo caen?

Probemos la siguiente hipótesis (“aristotélica”): si tenemos dos cuerpos A y B, con la misma masa pero con diferentes cargas positivas q_A y q_B ($q_A > q_B > 0$) bajo la influencia de un campo eléctrico uniforme producido por una carga negativa Q grande y cercana, entonces A caerá con más aceleración que B.

Ahora supongamos que ligamos ambos cuerpos empleando una ligadura aislante y rígida. Entonces, siguiendo el razonamiento de Galileo, deberíamos considerar las siguientes dos posibles conclusiones:

(a') El cuerpo A tenderá a acelerar al cuerpo B, mientras que B tenderá a frenar a A. El resultado debería ser una aceleración intermedia para todo el sistema:

$$a_A > a_{A+B} > a_B.$$

(b') Este nuevo sistema posee una carga mayor que el cuerpo A; en consecuencia, siguiendo la hipótesis: $a_{A+B} > a_B$.

Y, nuevamente, la única manera de resolver la contradicción entre ambas conclusiones sería que $a_{[A+B]} = a_A = a_B$. En otras palabras, deberíamos concluir que todos los cuerpos cargados (con idéntico peso) deben moverse con la misma aceleración en presencia de un campo eléctrico.

Teniendo en cuenta lo que muestra la experiencia para el caso de los cuerpos cargados, veríamos que la hipótesis aristotélica aplicada a estos cuerpos sería verdadera, pero también nos mostraría que (a') se cumple y (b') no. La razón de esto es simple: (b') no se sigue de la hipótesis.

⁹ La elección de este experimento y el uso de un formalismo moderno responde a las siguientes consideraciones: a) mostrar su analogía con el experimento mental de Galileo; 2) mostrar, por medio del cálculo directo, por qué el experimento mental diseñado por Galileo no conduciría a resultados o conclusiones contradictorias; 3) todo formalismo resulta fundamental para cuantificar las magnitudes que entran en juego en un experimento sea ideal o real, lo que está a tono con el experimento mental galileano en donde se habla en términos cuantitativos; 4) cuando en la **Parte IV** se exponga por qué los cuerpos *deben* caer simultáneamente en el vacío, será necesario “corporizar” en estas magnitudes (masa, peso, carga, distancia, etc.) la explicación.

Para comprender por qué, estudiemos la explicación de este fenómeno siguiendo la ley de Coulomb, la ley de atracción gravitatoria y la segunda ley de Newton (desconocidas por Galileo y, por supuesto, por Salviati). Usando estas leyes, tenemos que (cargas en unidades gaussianas):^{10,11}

$$a_{[A]} = \frac{q_{[A]} Q}{m (r + R)^2} + \frac{kM}{m (r + R)^2} \quad (1)$$

$$a_{[B]} = \frac{q_{[B]} Q}{m (r + R)^2} + \frac{kM}{m (r + R)^2} \quad (2)$$

donde R es el radio de una “Tierra” cargada ($r \ll R$) y k es la constante gravitacional. De (1) y (2) vemos que en consonancia con la hipótesis: $a_{[A]} > a_{[B]}$. *Este resultado proviene de leyes confirmadas experimentalmente.* Encontremos la aceleración $a_{[A+B]}$ del sistema compuesto A+B, donde el cuerpo cargado A está encima del cuerpo cargado B, ambos ligados por un cable no-conductor rígido de peso despreciable. Con las apropiadas condiciones iniciales, tendremos que ambos cuerpos A y B se moverían desde el reposo con la (misma) aceleración $a_{[A+B]}$ hacia la “Tierra” dado que caerían simultáneamente:

$$ma_{[A+B]} = \frac{q_{[A]} Q}{(r + R)^2} + \frac{kM}{(r + R)^2} - T \quad (3)$$

$$ma_{[A+B]} = \frac{q_{[B]} Q}{(r + R)^2} + \frac{kM}{(r + R)^2} + T \quad (4)$$

donde T es la fuerza de ligadura (T “absorbe” la fuerza de repulsión eléctrica entre ambas cargas positivas $q_{[A]}$ y $q_{[B]}$).

Resolviendo el sistema de ecuaciones (3)-(4), encontramos que:

$$a_{[A+B]} = \frac{(q_{[A]} + q_{[B]}) Q}{2m (r + R)^2} + \frac{kM}{(r + R)^2} \quad (5)$$

Teniendo en cuenta que $r \ll R$, que $\frac{kM}{R} = g$ donde g es el valor de la aceleración de la gravedad en la superficie de la “Tierra”, y que $\frac{Q}{(r+R)^2} = E$ donde E es el valor del campo eléctrico creado por la carga Q en la superficie de la “Tierra”, obtenemos:

$$a_{[A+B]} = \frac{(q_A + q_B) \cdot E}{2m} + g \quad (5')$$

Como vemos, esto es equivalente a hacer uso de la eq. (1) para un cuerpo con carga $q_{[A]} + q_{[B]}$ y masa $2m$. Dado que $2q_{[A]} > q_{[A+B]} > 2q_{[B]}$ observamos que, efectivamente, el cuerpo B frena al cuerpo A mientras que el A acelera al B.¹²

¹⁰ La ley de Coulomb, formulada en 1785, que establece que el valor de la fuerza de atracción entre cargas de signo opuesto (o de repulsión en el caso de cargas de igual signo), es *análoga* a la ley de atracción gravitatoria, la que en el caso de los cuerpos cayendo en la superficie de Tierra, expresa la fuerza con la que la Tierra atrae a los cuerpos en caída libre, esto es, expresa su peso.

¹¹ Cabe destacar que Newton emplea en sus *Principia* la ley de caída de los cuerpos del propio Galileo, quien había descubierto –a partir de sus experiencias con planos inclinados– que la distancia recorrida en la caída no era proporcional al tiempo t sino al tiempo al cuadrado t^2 ; esto es, en caída libre (sin velocidad inicial: $v_0 = 0$) en el vacío, un cuerpo debería responder a la ley de la distancia: $d = \frac{1}{2}gt^2$.

¹² La aceleración (5') también sería válida para el caso de que el cable fuese conductor y hubiera una nueva distribución de las cargas tal que la carga total del cuerpo en caída fuese $q_{(tot)} = q_{[A]} + q_{[B]}$.

En conclusión: (a') es verdadera y (b') es falsa. La conclusión (b') sería válida si el sistema $A + B$ actuara como un cuerpo de masa m , y no como de masa $2m$. Pero el sistema $A + B$ no solo tiene más carga que A, también tiene más masa, y la proporción entre ambas cantidades es menor que en A. En este cuerpo combinado, como en cualquier cuerpo, la aceleración debida a la atracción eléctrica es proporcional a su carga total, mientras que la resistencia a ser acelerada (para cambiar su estado de movimiento) es proporcional a la masa inercial total.¹³ Se cumpliría una hipótesis similar a la de Aristóteles donde simplemente los términos “peso”, “pesado”, “más pesado”, etc., fueron reemplazados por los términos “carga”, “cargado”, “más cargado”, etc. La hipótesis sería: “si dos cuerpos que solo difieren en sus cargas se dejan caer, entonces aquel que posee mayor carga caerá con mayor aceleración”; a la vez que se cumpliría sólo la primera de las conclusiones sugeridas por Galileo en su experimento mental, esto es la conclusión (a'): “los cuerpos combinados caerían con una aceleración intermedia a las correspondientes a los dos cuerpos cayendo por separado”, y *no* se cumpliría la conclusión (b').

2.2 Un nuevo diseño del experimento mental de Galileo con una única conclusión

Modifiquemos un tanto el experimento mental sugerido por Galileo en los *Discorsi*. Supongamos que tenemos una esfera hueca y pesada de hierro, y una esfera de hierro más pequeña y ligera. En el estado inicial tenemos la situación que se muestra en la Figura 1a.¹⁴

Ahora dejémoslas caer. De acuerdo con la hipótesis aristotélica –y sin necesidad de emplear ningún formalismo–, habría que convenir que en cierto momento debería tenerse la situación mostrada en la Figura 1b.

Aún tenemos dos cuerpos: el cuerpo A de hierro y el cuerpo B de madera. Si la hipótesis de Aristóteles fuera correcta, en el momento en que A y B estén en contacto, comenzarán a caer juntos: B tendería a desacelerar a A mientras que A tendería a acelerar a B y la velocidad del conjunto sería intermedia con respecto a las de A y B cayendo por separado: se cumpliría (a) (ver 1.2). Sin embargo, y lo importante en este punto, es que tanto para A como para B no se cumplirían las condiciones indicadas por Aristóteles ya que la velocidad de caída de cada uno atribuida exclusivamente a su respectivo peso, se

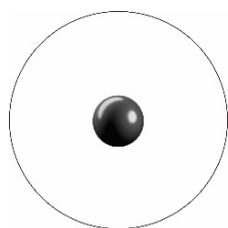


Figura 1a: Una pequeña esfera B en el centro de una esfera hueca A más pesada.

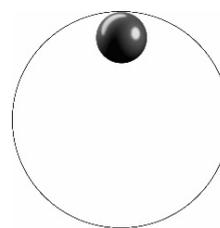


Figura 1b: La esfera B en contacto con la esfera hueca y más pesada A.

¹³ Como dato interesante, nótese que si las cargas $q_{[A]}$ y $q_{[A]}$ fuesen iguales pero de signo contrario, el campo eléctrico creado por Q no tendría ningún efecto sobre el sistema y su aceleración $a_{[A+B]}$ sería igual a g .

¹⁴ La descripción de este experimento mental no requiere de ningún formalismo.

vería afectada por la interacción con el otro cuerpo; esto es, los movimientos de A y de B serían en parte naturales y en parte forzados. Sin embargo, si pesáramos a A y B por separado, o incluso juntos, en una balanza obtendríamos un peso $P_{[A]} + P_{[B]}$.

Ahora bien, si partimos de una situación diferente en la que ambos cuerpos ya están unidos desde el principio formando, de hecho, un solo cuerpo cuyo peso fuese el peso de A más el peso de B, entonces, de acuerdo con la hipótesis aristotélica, el resultado debería ser que este “nuevo” cuerpo caería más rápido que el cuerpo A cayendo solo. Pero en este caso, sería la caída de un (único) cuerpo C y se cumpliría (b).

Si bien sabemos que la experiencia mostraría que en todos los casos los cuerpos caerían con la misma aceleración, esto no se sigue de una contradicción entre las dos conclusiones (a) y (b) derivadas del experimento mental de los *Discorsi*. Como veremos en la **Parte III**, si queremos mostrar que todos los cuerpos caen con la misma velocidad debemos referirnos a cuerpos (o partes de cuerpos) que no interactúan con otros cuerpos o con las demás partes del mismo cuerpo.

Parte III: Experimentos mentales que muestran que en el vacío todos los cuerpos deben caer con la misma aceleración

3.1 El caso de dos cuerpos con *igual* composición y *diferentes* pesos

Para nuestro experimento mental tendremos en cuenta las siguientes consideraciones:

i) Un cuerpo compuesto por una sola sustancia puede pensarse como compuesto por diferentes fragmentos, todos ellos de igual tamaño, los que al poseer igual peso deberían caer, cada uno, con la misma velocidad que el resto de los fragmentos.

ii) También podemos entender este cuerpo de composición homogénea como un conjunto de fragmentos no necesariamente del mismo tamaño ni forma, y, por tanto, con diferente peso, conformando un solo cuerpo, cayendo, todos, con la misma velocidad habida cuenta de que se trataría de un cuerpo rígido.¹⁵

iii) En el caso de dos cuerpos, uno más pesado que el otro pero de la misma composición, es evidente que ambos deben caer simultáneamente, si se razona de la siguiente manera: cada cuerpo está compuesto por un cierto número de partículas;¹⁶ estas partículas, por ser idénticas, caerán, cada una, simultáneamente con las otras (y resulta trivial afirmar que el cuerpo en cuestión, caerá como las partículas que lo componen). En consecuencia, dos cuerpos de *igual composición deben caer simultáneamente independientemente del número de partículas que los compongan*, y, por lo tanto, independientemente de su peso.

3.2 Un experimento mental para el caso de dos cuerpos con *diferente* composición y *diferentes* pesos

Para el diseño de este experimento mental, primero supongamos tener dos cuerpos A y B compuestos de *diferentes* materiales que caen libremente en el vacío, donde A pesa el *doble* que B, y supongamos, por ejemplo, al cuerpo A compuesto de plomo y al B compuesto de madera.

¹⁵ Entendemos por “cuerpo rígido” un cuerpo no deformable, esto es, compuesto por partículas cuyas posiciones entre sí no cambian aun cuando se las someta a fuerzas externas.

¹⁶ Denotamos con “partícula” una porción o cantidad “macroscópica” de un cuerpo que posee masa y un volumen relativamente pequeño.

Hagamos el siguiente razonamiento:

Si dividimos a A en dos partes iguales, cada una de esas mitades debería caer como la otra mitad. Ahora bien, debido a que cada mitad de A debe pesar lo mismo que la otra mitad, y dado que medio A pesa lo mismo que (todo) el cuerpo B, el cuerpo A deberá caer tal como cae B. En consecuencia, A y B caen con la misma aceleración.

La dos hipótesis auxiliares que estamos empleando en nuestro planteo –absolutamente razonables– son 1) que cada cuerpo puede considerarse divisible (en potencia) en cuerpos más pequeños que no interactúan entre sí; 2) que todos los cuerpos son (en acto) la suma de fragmentos más pequeños que no interactúan entre sí. En términos modernos diríamos que la interacción gravitatoria entre las partículas es despreciable frente a la interacción gravitatoria con la Tierra.¹⁷

En el caso de A y B, hemos pensado que A está compuesto por dos mitades y B compuesto por una sola pieza. Podríamos haber pensado, por ejemplo, a A como compuesto por cuatro cuartos (de A) cayendo simultáneamente, y a B como compuesto por dos partes (de B); en este caso, cada una de las “nuevas” piezas de A pesaría lo mismo que cada una de las “nuevas” partes en las que hemos “dividido” a B, por lo que B –que pesa la mitad que A– caería igual que A. Y así podríamos seguir “subdividiendo” sucesivamente.

Generalizando el razonamiento: Tómense dos cuerpos A y B cualesquiera. Se puede suponer que B es divisible en un número arbitrario de componentes, entonces podemos pensar que A se divide en un número de componentes de modo tal que cada uno pesa lo mismo que los componentes con los que suponemos que hemos dividido a B. Como todos los componentes de A y B así “seleccionados” pesan lo mismo, y cada uno cae independientemente respecto de los demás, los cuerpos A y B deben caer con la misma aceleración.

El razonamiento es válido también para dos cuerpos heterogéneos, es decir, cada uno compuesto por diferentes materiales ya que cada uno puede dividirse en diferentes fragmentos que pesen lo mismo. A este experimento mental lo podemos considerar como alternativo al propuesto por Galileo en sus *Discorsi*.

3.3 Una consecuencia interesante de este tratamiento de la caída libre de los cuerpos en el vacío

Supongamos, por un momento, que un mismo tipo de partícula es la que conforma todos los cuerpos existentes. Supongamos, ahora, dos cuerpos A y B de igual forma y tamaño que difieren en su peso en una cantidad doble, es decir: si A pesa el doble que B sería porque A tiene el doble de partículas por unidad de volumen; esto es, A tendría un peso específico que sería el doble del de B. Debido a que cada una de las partículas debería caer como las demás, esto explicaría por qué los cuerpos A y B deberían caer a la misma velocidad. En otras palabras, si “todos los cuerpos estuvieran compuestos por el mismo tipo de partículas (p), entonces caerían simultáneamente (q): $p \rightarrow q$. La condición “igual tipo de partícula” sería *suficiente* para que todos los cuerpos en el vacío cayeran con igual

¹⁷ A nivel *microscópico*, en el estado sólido las partículas se encuentran ligadas por grandes fuerzas que las mantienen unidas a distancias relativamente pequeñas. Se trata de fuerzas atómicas o moleculares y/o eléctricas.

aceleración, lo cual está experimentalmente comprobado. Sin embargo, no sería *necesario*; es decir, la recíproca no sería necesariamente cierta ya que el hecho de que todos los cuerpos caigan con igual aceleración no implica que estén compuestos del mismo tipo de partícula, en otras palabras, no implica que estén compuestos por la misma sustancia.

Sin embargo, este hecho –que todos los cuerpos caen con igual aceleración– podría haber sido considerado como evidencia a favor de la hipótesis de que todos los cuerpos estaban compuestos por una misma sustancia material o elemento. Podría haber servido de argumento para quienes asumían que toda la naturaleza estaba compuesta, por ejemplo, por “agua”. El hielo tiene la misma composición que el agua y, sin embargo, es menos denso: un pequeñísimo cubo de agua pesa más que un cubo del mismo tamaño compuesto por hielo, pero caerían igual.

Parte IV: ¿Por qué todos los cuerpos, en caída libre en el vacío, lo hacen con la misma aceleración?

4.1 La palabra de la experiencia

Todos los cuerpos cargados caerían de la misma manera independientemente de su cantidad de carga si:

$$q_i = a \cdot m_{iI} \quad (6a)$$

$$m_{iI} = b \cdot m_{iG} = m_i \quad (6b)$$

siendo a y b dos constantes (a con unidades = $[q]/[m]$) que no dependen del cuerpo. Las magnitudes m_I y m_G son la *masa inercial* y la *masa gravitatoria* respectivamente (en nuestras ecuaciones hemos tomado $b=1$). Sin embargo, sabemos a través de la experimentación que este no es el caso en la naturaleza: a pesar de que (6b) es verdadera, (6a) *no* lo es. A diferencia de lo que ocurre con la masa gravitatoria, la carga no es proporcional a la masa inercial: es decir, la carga y la masa son propiedades de los cuerpos mutuamente independientes.¹⁸ Tal es así que cuando unimos dos cuerpos cargados, acoplamos en la misma proporción sus masas inerciales y gravitatorias:

$$\frac{m_{[A]I} + m_{[B]I}}{m_{[A]G} + m_{[B]G}} = \frac{m_{[A]I}}{m_{[A]G}} = \frac{m_{[B]I}}{m_{[B]G}} \quad (7)$$

pero no acoplamos en idéntica proporción sus masas inerciales y sus cargas. En el caso de nuestro ejemplo de la **Parte II**:

$$\left(q_{[A]} > q_{[B]}, m_{[A]} = m_{[B]} \right): \frac{q_{[A]}}{m_{[A]}} > \frac{q_{[A]} + q_{[B]}}{m_{[A]} + m_{[B]}} > \frac{q_{[B]}}{m_{[B]}} \quad (8)$$

Dado que el peso es proporcional a la masa inercial, la aceleración de los cuerpos en caída libre en el vacío es independiente de esta cantidad, mientras que la ley de

¹⁸ Es importante notar que *no* existe una “partícula de carga”, esto es, la cantidad de carga de un cuerpo es independiente de su masa y su volumen, como consecuencia de lo cual la carga total de un cuerpo con un volumen determinado no es divisible en “partículas de cargas”, como sí lo es en partículas masivas, de cuya suma obtendríamos la masa total del cuerpo.

Coulomb nos dice que la fuerza eléctrica no depende de la masa y, por tanto, la aceleración de un cuerpo cargado en presencia de un campo eléctrico, sí.¹⁹

4.2 ¿Por qué los cuerpos en el vacío caen con igual aceleración?

Tanto Aristóteles como Galileo reconocieron el hecho de que en la superficie de la Tierra era más difícil mover un cuerpo más grande que uno más pequeño de la misma composición, ya fuese para elevarlo o para transportarlo. Hoy aceptamos que la "variable oculta" que interviene cuando se aplica una fuerza a un cuerpo es la masa inercial, que se opone a un cambio en su estado de movimiento.

Los cuerpos caen con igual aceleración porque, por un lado, i) la fuerza de atracción gravitacional que ejerce la Tierra sobre un cuerpo más pesado es mayor que la que ejerce la Tierra sobre uno más ligero, dado que la masa gravitatoria del primero es mayor que la del segundo; pero, a su vez, ii) esto ocurre en la misma proporción en que la Tierra tiene más "dificultad" para mover el cuerpo más pesado que el más liviano dado que el primero tiene más masa inercial -lo que se traduce en una mayor resistencia a cambiar su estado de movimiento- que el segundo. Esto equivale a asumir que la masa inercial y la gravitatoria son iguales (en realidad, proporcionales).

Precisamente, la experiencia muestra la equivalencia entre masas inerciales y gravitatorias. Esto se manifiesta en la igualdad $Fuerza = masa \times aceleración$; en nuestro caso: $m_G \cdot g = m_I \cdot a$. Si tomamos $m_I = m_G = m$, entonces $a = g$ para todos los cuerpos en caída libre en el vacío. Por un lado, se ejerce una fuerza proporcional a la magnitud m_G , y, por otro lado, el cuerpo ofrece una resistencia proporcional a m_I , como si el cuerpo tuviera dos masas que se "activaran" simultáneamente. El punto importante es que la evidencia de que la masa inercial m_I y la masa gravitatoria m_G son proporcionales fue provista por experimentos reales como los diseñados por Galileo usando péndulos o planos inclinados, o los más sofisticados de Eötvös o Dicke (Eötvös, Pekar, & Fekete, 1922; Roll, Krotkov, & Dicke, 1967) que constituyen la base para establecer el Principio de Equivalencia Débil (PED), uno de los fundamentos de la teoría de la Relatividad General de Einstein. El PED afirma que la línea de universo de una partícula de prueba en caída libre (libremente gravitante) es independiente de su composición y estructura" (Misner, Thorne, & Wheeler, 1973, p. 1050).^{20,21}

¹⁹ Todos los cuerpos –cargados o no– caerían de la misma manera si siempre fuera cierto que: $q_{[1]} \cdot q_{[2]} / r \ll km_{[1]} \cdot m_{[2]} / r$, pero, nuevamente, este no es el caso en la naturaleza: la constante gravitacional es tan pequeña que, por ejemplo, dos electrones en reposo se repelen (eléctricamente) con una fuerza que es 4×10^{42} veces la fuerza gravitacional que los atrae.

²⁰ El Principio de Equivalencia (débil) empleado por la Relatividad General –para comparar *localmente* “los sistemas inerciales” con “los libremente gravitantes” y los “sistemas uniformemente acelerados” con aquellos “sistemas en caída libre”, respectivamente– sostiene que todos los cuerpos en un campo gravitatorio uniforme caen con igual aceleración independientemente de su composición ¡tal cual lo descubierto por Galileo!, lo que da lugar a que se considere que la masa inercial y la gravitatoria de un cuerpo sean equivalentes.

²¹ En principio, es posible distinguir *tres* tipos de masas que pueden actuar en cada interacción gravitacional relacionadas con ciertos parámetros denominados post-newtonianos: una masa inercial, una masa gravitacional activa y una masa gravitacional pasiva. Aunque en algunas teorías alternativas a la Relatividad General se asume que estas masas son diferentes, la equivalencia entre la masa inercial y las masas gravitacionales activa y pasiva es sumamente exacta, obtenida con una muy alta precisión (ver Will, 1993, p. 154).

La mejor forma de interpretar por qué el comportamiento de los cuerpos en caída libre no depende de su peso es pensar que cuando un cuerpo cae, ¡no pesa! Claramente, m_G actúa cuando el cuerpo “descansa”, por ejemplo sobre un plano horizontal. Entonces, la Tierra ejerce una fuerza sobre él que es el peso $P = m_G \cdot g$, donde g es la aceleración de la gravedad, y está equilibrada por la reacción, que no es otra que la “fuerza normal” $N = m_G \cdot g$; aquí el fenómeno es estático. Cuando movemos un cuerpo horizontalmente (en un plano horizontal sin fricción), la fuerza necesaria para acelerarlo con una aceleración a es $m_I \cdot a$, y el fenómeno se torna dinámico. En el caso combinado de un plano inclinado sin fricción por el que caería el cuerpo, la fuerza aplicada en la dirección del movimiento es $m_I \cdot g \cdot \sin \alpha$ (donde α es el ángulo de inclinación del plano), mientras que la fuerza perpendicular al movimiento es $m_I \cdot g \cdot \cos \alpha$ en la dirección en la que no hay movimiento, es decir: esta última fuerza no interviene dinámicamente y representa el peso del cuerpo en el plano inclinado.

Supongamos, ahora, que el plano inclinado es, en realidad, una balanza (“inclinada”). Si fuese $\alpha = 0$ entonces el plano sería horizontal y la balanza registraría un peso $m_I \cdot g$, mayor cuanto mayor fuese m_I y no habría movimiento (horizontal); si, en cambio, $\alpha = 90^\circ$, entonces, el plano sería vertical y habría un movimiento vertical de caída libre, pero la balanza no registraría peso alguno.

Los cuerpos caen de forma acelerada debido a la fuerza de atracción gravitacional de la Tierra y lo hacen con la misma aceleración porque en una balanza “solidaria” con dichos cuerpos (es decir, también en caída libre) no se registraría nada: *los cuerpos en caída libre no pesan*. Esto es lo que subyace en los pasajes de los *Discorsi* que citamos anteriormente en la **Parte I**.

En este punto es importante señalar que para el propio Newton la inercia era activada solo cuando una fuerza era aplicada al cuerpo:

Debido a la inercia de la materia, un cuerpo no abandona sin dificultad su estado de reposo o movimiento. Por lo cual esa *vis insita* puede llamarse muy significativamente *vis inertiae*, fuerza de inactividad. Pero un cuerpo sólo ejerce esa fuerza cuando otra fuerza impresa en él trata de alterar su estado. (Newton, trad., 1993, p. 28)

Algo análogo ocurre con la fuerza del peso en el sentido de que el peso no se manifiesta cuando el cuerpo cae y se activa cuando tiene una resistencia, por ejemplo, en una balanza. De ahí que el PED nos indique que el movimiento de los cuerpos en caída libre en un sistema libremente gravitante es equivalente a su movimiento en un sistema inercial; ninguna balanza evitaría que cayera ya que la balanza misma caería con la misma aceleración. Dicho de otro modo: mientras algo cae no se encontraría en acto de pesar, así como algo a lo que no se le aplicó ninguna fuerza no estaría en acto de resistir para cambiar su estado de movimiento.

Conclusiones

Podemos reunir las conclusiones en los siguientes 7 puntos:

1) El experimento mental de Galileo que discutimos en este trabajo tuvo sus antecedentes en Filoponus, Benedetti y en el propio Galileo, sobre todo en su obra *De motu*. Pero mientras que según *De motu* los cuerpos en caída libre en el vacío alcanzarían

una velocidad final, según los *Discorsi*, en el vacío, permanecerían acelerados con aceleración constante, independientemente de su peso. Galileo alcanza esta última conclusión como paso al límite en relación con los resultados obtenidos *experimentalmente* con cuerpos cayendo en medios cada vez menos densos. Ahora bien, el experimento mental expuesto en los *Discorsi* intenta demostrar que no es necesario apelar a la experiencia para establecer que todos los cuerpos independientemente de su peso deben caer empleando la misma aceleración, en contra de la hipótesis aristotélica que enunciaba que, en condiciones reales, esto es, en medios densos, los cuerpos más pesados emplearían menos tiempo en caer que los más livianos.

2) En nuestra crítica al experimento mental de Galileo mostramos, ante todo, que en su interpretación y en el uso de la hipótesis aristotélica, Galileo incurre en dos “omisiones”. En cuanto a la primera conclusión que hemos denominado (a) –“el sistema compuesto por un cuerpo A más pesado que el cuerpo B caería con una aceleración intermedia con respecto a las de A y B respectivamente”– contradice la idea aristotélica de caída natural ya que si los cuerpos interactúan, según Aristóteles, su caída sería forzada y por lo tanto antinatural.

En cuanto a la segunda conclusión que hemos denominado (b) –“el sistema compuesto sería un cuerpo más pesado que el A por lo que debería caer más rápido que éste”– sería contradictoria con la propia afirmación de Galileo de que los cuerpos A y B en la situación sugerida en (a) no caerían de manera independiente ni con la misma aceleración, esto es, sin afectarse mutuamente, ya que conformarían un único cuerpo que en una balanza pesaría la suma de los pesos de A y B. Hemos visto en el análisis de su experimento mental, que Galileo “omite” el hecho de haber descubierto que, como paso al límite de los experimentos de caída en diferentes medios (esto es sin resistencia del medio), los cuerpos en el vacío caerían con la misma aceleración, por lo que un cuerpo B ligado a un cuerpo A más pesado no influiría en su caída ya que ambas caídas serían independientes, lo que contradice (a). El sistema $A + B$ pesa la suma del valor de los pesos de A y B cuando se los pesa en una balanza. Cuando el cuerpo cae, no pesa, algo que en los *Discorsi* es admitido por el propio Galileo. En otras palabras, algunas suposiciones asumidas por Galileo acerca de lo que debería suceder como consecuencia de la hipótesis aristotélica, contradicen los propios resultados obtenidos experimentalmente por el propio Galileo.

3) Utilizando leyes empíricas como la de Coulomb para dos cuerpos con cargas del mismo signo y ligados, se observa que en una caída libre hacia una “Tierra” con una carga grande y de signo opuesto, solo la primera de las conclusiones (a’) se extraería de una hipótesis de tipo aristotélico, esto es: los cuerpos con una carga (positiva) mayor, caerían más rápido hacia una “Tierra” cargada (negativamente), y el cuerpo “compuesto” caería con una velocidad intermedia.

4) En un experimento con un diseño equivalente al de los *Discorsi*, que consiste en imaginar qué sucedería en el caso de una pequeña esfera compacta ubicada inicialmente en el centro de otra esfera hueca, se muestra que toda vez que la hipótesis aristotélica fuera correcta, obtendríamos i) que la esfera interior debería ponerse en contacto con la esfera hueca, y ii) que la más ligera (la pequeña) frenaría a la esfera grande y hueca; y a la inversa, que la esfera más grande tendería a acelerar a la más pequeña, de forma tal

que el conjunto caería con una aceleración intermedia respecto de las que llevarían ambas esferas antes del contacto.

5) Hemos diseñado dos experimentos mentales para mostrar cómo, a partir de suponer que los cuerpos (sólidos) –se trate de cuerpos con el mismo o diferente peso específico, con una composición homogénea o no– son susceptibles de ser descompuestos en cuerpos más pequeños, se puede establecer que su aceleración de caída será la misma independientemente de su composición y peso, y sin necesidad de ningún experimento real. Las dos hipótesis auxiliares que hemos aceptado son: i) que cada cuerpo puede considerarse divisible (en potencia) en cuerpos más pequeños, algo que hemos considerado tan o tan poco arbitrario como suponer ii) que todos los cuerpos son (en acto) la suma de fragmentos más pequeños que, en el nivel *macroscópico*, no interactúan entre sí.

6) En relación con lo anterior, hemos mostrado que si todos los cuerpos estuvieran formados por la misma sustancia –es decir, por un mismo tipo de partícula–, independientemente de su densidad, deberían caer simultáneamente. Y cómo, si bien lo recíproco no es cierto, la caída simultánea de cuerpos en el vacío podría haber favorecido (históricamente) la hipótesis de que todos los cuerpos estaban compuestos de la misma sustancia (hipótesis sostenida por muchos filósofos naturales, sobre todo en la Antigüedad).

7) La razón que explica la caída simultánea de los cuerpos es la equivalencia entre la *masa inercial* y la *masa gravitatoria* que se traduce en lo siguiente: mientras que la fuerza que ejerce la Tierra sobre un cuerpo más pesado (esto es, que dispone de una mayor masa gravitatoria) es mayor que sobre un cuerpo más ligero, la resistencia (debida a la masa inercial) ofrecida por un cuerpo más pesado es mayor *en la misma proporción* que para un cuerpo más liviano. Esta equivalencia de las masas solo puede corroborarse *experimentalmente* y constituye la base del llamado Principio de Equivalencia Débil.

Agradecimientos

A Nathalie Deruelle y Alejandro Cassini por sus respectivas lecturas críticas del manuscrito y por sus invalorable aportes para una mejor exposición de las ideas y de los resultados. El presente trabajo fue posible gracias al financiamiento del Proyecto UBACyT 20020170100124BA de la Universidad de Buenos Aires, y del Proyecto PIP 586 del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Referencias

- Aristóteles. (1995). *Física* (G. R. de Echandía, Trad.). Gredos.
- Aristóteles. (1996). *Acerca del cielo; Meteorológicos* (M. Candel, Trad.). Gredos.
- Benedetti, G. B. (1585). *Diversarum speculationum mathematicarum & physicarum liber* [*Diversas especulaciones matemáticas y físicas*]. Apud Haeredem Nicolai Bevilaquae.
- Brown, J. (1991). *The laboratory of the mind: Thought experiments in the natural sciences*. Routledge.
- Cohen, I. B. (1967). Galileo, Newton, and the Divine Order of the Solar System. En E. McMullin (Ed.), *Galileo, Man of Science* (pp. 207-231). Basic Books.

- Crombie, A. C. (1976). *Historia de la Ciencia de San Agustín a Galileo. Vol II*. Alianza.
- El Skaf, R. (2018). The function and limit of Galileo's falling bodies thought experiment: Absolute weight, Specific weight and the Medium's resistance. *Croatian Journal of Philosophy*, 18(52), 37-58.
- Eötvös, R., Pekár, D., & Fekete, E. (1922). Beiträge zum gesetze der proportionalität von trägheit und gravität. *Annalen der Physik*, 373(9), 11-66.
- Galilei, G. (1980). *Dialogo sobre los sistemas máximos [Dialogo sopra i due Massimi sistema del mondo]*. Aguilar. (Obra original publicada en 1632)
- Galilei, G. (2003). *Diálogo acerca de dos nuevas ciencias [Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze.]*. Losada. (Obra original publicada en 1638)
- Gendler, T. S. (1998). Galileo and the indispensability of scientific thought experiment. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 49(3), 397-424.
- Grundmann, T. (2017). Platonism and the a priori in thought experiments. En M. T. Stuart, Y. Fehige, & J. Brown (Eds.), *The Routledge companion to thought experiments* (pp. 293-308). Routledge.
- Koyré, A. (1978). El *De motu Gravium* de Galileo. En *Estudios de historia del pensamiento científico. Siglo XXI*.
- Koyré, A. (1981). *Estudios galileanos (2.ª ed.)*. Siglo XXI.
- Misner, C. W., Thorne, K. S., & Wheeler, J. A. (1973). *Gravitation*. Freeman.
- Mondragón, D. (2020). *Experimentos mentales en ciencias naturales*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Newton, I. (1993). *Principios matemáticos de la filosofía natural [Philosophiæ naturalis principia mathematica]*. Altaya. (Obra original publicada en 1687)
- Norton, J. D. (1996). Are thought experiments just what you thought? *Canadian Journal of Philosophy*, 26(3), 333-366.
- Palmieri, P. (2005). 'Spuntar lo scoglio più duro': Did Galileo ever think the most beautiful thought experiment in the history of science? *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 36(2), 223-240.
- Popper, K. (1967). *La lógica del descubrimiento científico*. Tecnos.
- Roll, P. G., Krotkov, R., & Dicke, R. H. (1964). The equivalence of inertial and passive gravitational mass. *Annals of Physics*, 26(3), 442-517.
- Will, C. M. (1993). *Theory and Experiment in Gravitational Physics*. Cambridge University Press.