

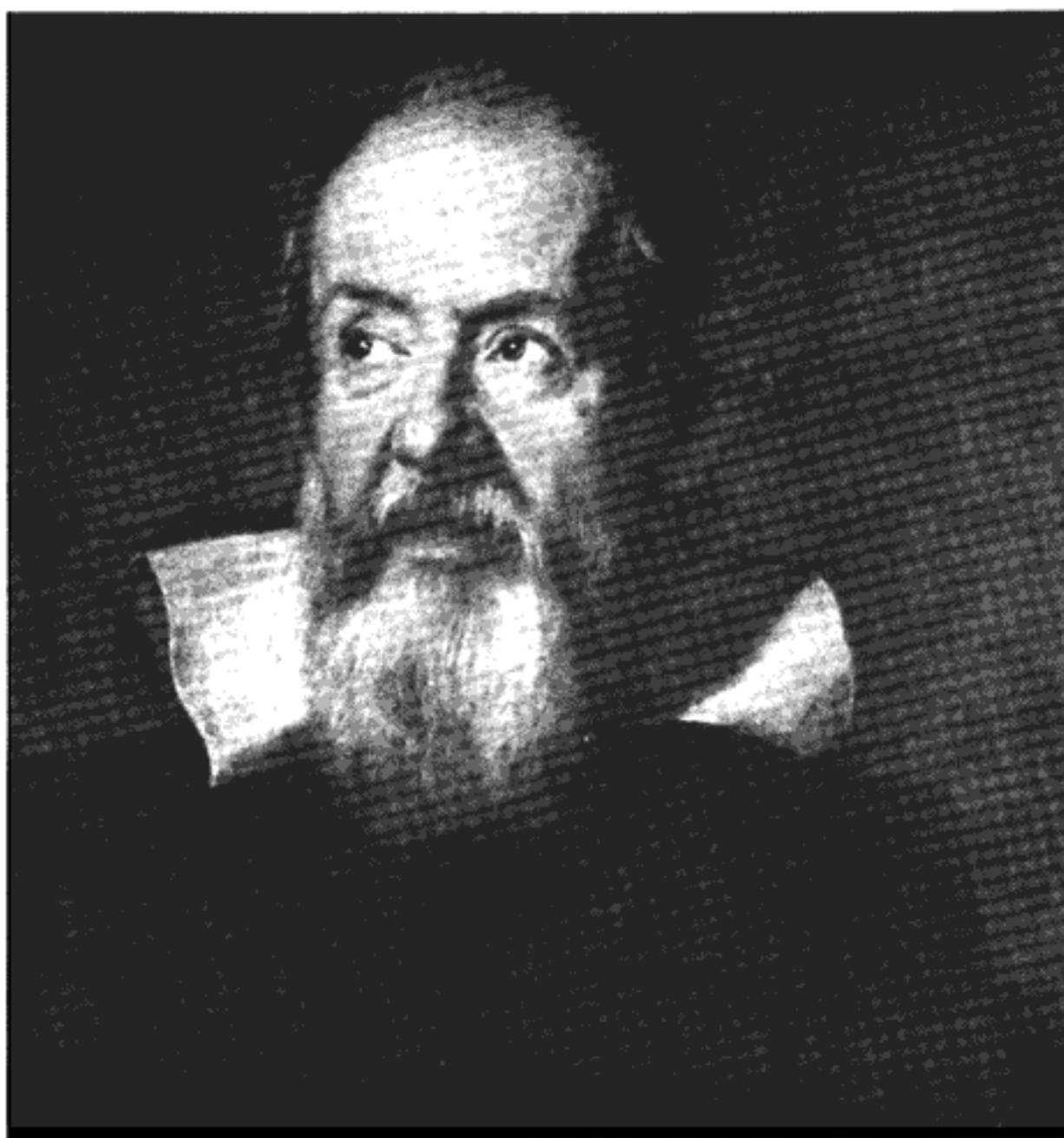
Los experimentos de Galileo

JOSÉ LUIS ÁLVAREZ Y JOSÉ ERNESTO MARQUINA

La cuestión del papel del experimento en la obra de Galileo es mucho más compleja que las usuales mitificaciones carentes de sentido que lo bautizan como el "padre del método experimental". En realidad, el experimento dentro de su obra es sólo un aspecto de un proyecto mucho más amplio, que podríamos denominar de "política de la cultura". El objetivo primordial de este proyecto era que la Iglesia se convirtiera a la causa del copernicanismo; para lograrlo inventó —tal y como lo señala P. K. Feyerabend¹— nuevas nociones que explicaban el fenómeno del movimiento y popularizó el uso del telescopio, convirtiendo los descubrimientos realizados con éste, en argumentos a favor de la teoría copernicana.

Ahora bien, restringiéndonos al aspecto de los experimentos galileanos y considerándolos en forma esquemática, podemos señalar que existen cuatro tipos de experimentos en torno a la figura de Galileo Galilei. James MacLachlan² ha señalado que en los escritos galileanos se mencionan tres tipos de experimentos: reales, pensados e imaginarios. Reales son los que efectivamente hizo; pensados son los que no pueden realizarse por razones lógicas o por falta de equipo adecuado; e imaginarios, los que pudo haber realizado, pero no los hizo, tal vez convencido de lo que iba a ocurrir. El cuarto tipo de experimentos es el que nosotros llamamos "experimentos míticos", que son

José Luis Álvarez y José Ernesto Marquina:
Departamento de Física, Facultad de Ciencias, UNAM



Autor: Justus Sustermans

los que nunca aparecen en sus escritos, pero forman parte de la imagen popular que tenemos de Galileo.

En este trabajo presentamos ejemplos que muestran cada uno de los tipos de experimentos mencionados, con la intención de ayudar a esclarecer el verdadero papel que el experimento tiene en la obra de un personaje tal mal conocido como Galileo.

Experimentos reales

Galileo partió de la física medieval y renacentista, aprendió de sus maestros la teoría del *impetus*³ y seguramente sabía de la marcada actitud empírica y de los sofisticados cálculos matemáticos de los escolásticos del Merton College de Oxford y de la Universidad de París⁴. Desarrolló la física medieval hasta sus

últimas consecuencias, llegando a un callejón sin salida; posteriormente, tomó como modelo la hidrostática arquimediada y sustituyó las cualidades aristotélicas por escalas cuantitativas⁵.

En sus primeras obras (*De Motu* y *La Bilancetta*) nos habla del conocimiento que tenía de la matemática arquimediada y a partir de ahí critica la física aristotélica desde el marco de las teorías físicas medievales. Más adelante, su pensamiento evoluciona y, entre otras cosas, desarrolla, al menos en algún momento de sus investigaciones, una gran actividad empírica. Esto, además, se ve confirmado con el hallazgo de un material manuscrito que no fue publicado.

En este material no-publicado se incluye un grupo de notas en las cuales aparecen datos empíricos precisos que son comparados con valores calculados teóricamente. Aquí, Stillman Drake⁶ señala que los datos están más allá del poder del análisis matemático de la época de Galileo, y cuando son sujetos al análisis moderno resultan ser notablemente precisos. También considera que esto representa un proceso experimental en el sentido moderno, y que de no ser así, es difícil imaginar las suposiciones que hay que hacer para entenderlos. Los experimentos son descritos con todo detalle, y si Galileo no los publicó es porque tenía la certeza de que sus adversarios no se iban a convencer con un desfile de datos, ya que ellos estaban interesados, no en las leyes físicas sino en las causas de las cosas, y éstas no pueden ser reveladas mediante el experimento. En estas notas sorprende el grado de precisión requerido por Galileo para convencerse a sí mismo antes de hacer aseveraciones.

Por otro lado, y respecto a los mismos manuscritos, Ronald Naylor⁷ dice que Galileo no vio ventajas en la referencia a este material. La aceleración de la esfera que bajaba en el plano inclinado, era mucho menor que la sugerida por la teoría y prefiere, en el *Diálogo*, presentar una cinemática simplificada, y lo más probable es que en los *Discorsi*⁸ haya preservado esta actitud. Los experimentos del manuscrito son más ingeniosos y superiores a los que presenta en sus obras formales. Galileo intentaba presentar una teoría del movimiento totalmente nueva y coherente, es retórico e intenta confundir

a sus oponentes y ganar a sus lectores, para lo cual utiliza lo más simple, convincente y dramáticamente efectivo. Si hubiera utilizado las técnicas de los manuscritos no-publicados en el análisis que hace de los movimientos pendulares en los *Discorsi*, no hubiera llegado a las conclusiones que llegó, pues él debió ver que la conducta del péndulo es mucho más compleja y, en cualquier caso, incapaz de confirmar sus tesis. Parece claro que con el experimento formulado era imposible validar la teoría, ya que cuando sus experimentos son examinados, ellos desaprueban sus planteamientos, como en el caso de la caída libre y en el del lanzamiento de proyectiles. Galileo realizó experimentos reales para comprobar su teoría del movimiento en un plano inclinado, pero no pudo obtener los resultados exactos que menciona en sus obras publicadas, y al plantearlos tal y como lo hizo, fue con la intención de convencer a los demás.

Es un error y una fuente de malos entendidos cuando, en la actualidad, se nos enseña en nuestras escuelas y libros de texto a *repetir* los experimentos realizados por Galileo y a *deducir* de ellos las leyes correspondientes, planteándose, implícita o explícitamente, que en esto consiste la revolución galileana. Bernard Cohen⁹ señala que en

nuestros laboratorios se nos presentan los experimentos decisivos del pasado, tal y como los *realizamos ahora* y no como *fueron realizados entonces*. El carácter cuantitativo de la ciencia moderna y la búsqueda de los datos numéricos con que está construido el mundo, exigen precisión en los experimentos; precisión que requiere de la disponibilidad de técnicas en ocasiones altamente elaboradas y que no existían en los siglos XVI y XVII.

Por ejemplo, la ley de la caída de los cuerpos enunciada por Galileo, que señala que la aceleración de la gravedad es constante y que "los espacios recorridos por el grave están en proporción del cuadrado de los tiempos", no era posible deducirla de sus experimentos reales. Descartes y Torricelli discutían la posibilidad de que los espacios estuvieran en proporción cúbica y no cuadrada con el tiempo. En la física newtoniana el valor de la aceleración no es constante, sino que depende de la distancia al centro de la Tierra. Así que la ley de la caída de los cuerpos no era la única posible. Galileo opta por la más sencilla, ya que él creía que el valor de la aceleración de la gravedad no variaba con la distancia a la Tierra, creía que tenía el mismo valor si el cuerpo caía desde la Luna o apenas desde unos metros de la superficie terrestre, pero esta elección no puede estar determinada di-



Padua durante la época en que vivió Galileo. Tomado de: *Protagonistas de la civilización*.

rectamente por sus experimentos, tal y como lo hacemos hoy en nuestros laboratorios de enseñanza. Galileo señala en los *Discorsi* que de todos los tipos de movimiento "que es lícito estudiar", confía en haber dado con la esencia del movimiento naturalmente acelerado "después de largas reflexiones"¹⁰.

El análisis de la notas manuscritas muestra una gran actividad empírica, realizada con sumo cuidado y precisión (de acuerdo a las posibilidades de la época), pero Galileo se dio cuenta —y no olvidemos que lo importante para él es su proyecto de "política de la cultura"— de que los resultados que obtuvo no le permitieran sostener sus teorías acerca del movimiento, de tal manera que prefiere presentar en el *Diálogo* y en los *Discorsi* una cinemática simplificada, no admitiendo las discrepancias desafortunadas para no dar armas a sus oponentes.

Es sumamente interesante ver cómo procede para la obtención de sus resultados. El siguiente texto nos ilustra al respecto:

"Hemos visto ya que las diferencias de velocidad de los móviles con pesos distintos son cada vez mayores, a medida que los medios atravesados ofrecen más resistencia. Más aún, en el mercurio, el oro no solamente cae hasta el fondo a más velocidad que el plomo, sino que es él solo el que desciende, mientras que los otros metales y las piedras todas permanecen en la superficie flotando. En las bolas de oro, de plomo, de cobre, de púrpura y de otras materias pesadas, sin embargo, será casi insensible la diferencia de sus velocidades en el aire, ya que una bola de oro, al cabo de una caída desde una altura de cien brazas, no aventajará, con toda seguridad, a una bola de cobre en cuatro dedos. Habiendo visto, repito, todo esto, yo llegaría a la conclusión de que si se eliminara absolutamente la resistencia del medio, todos los cuerpos descenderían a la misma velocidad"¹¹.

Se tiene, por lo tanto, que a mayor resistencia del medio, la diferencia de las velocidades de los graves aumenta; a menor resistencia del medio, la diferencia disminuye. Galileo da entonces el salto: suprimamos la resistencia del

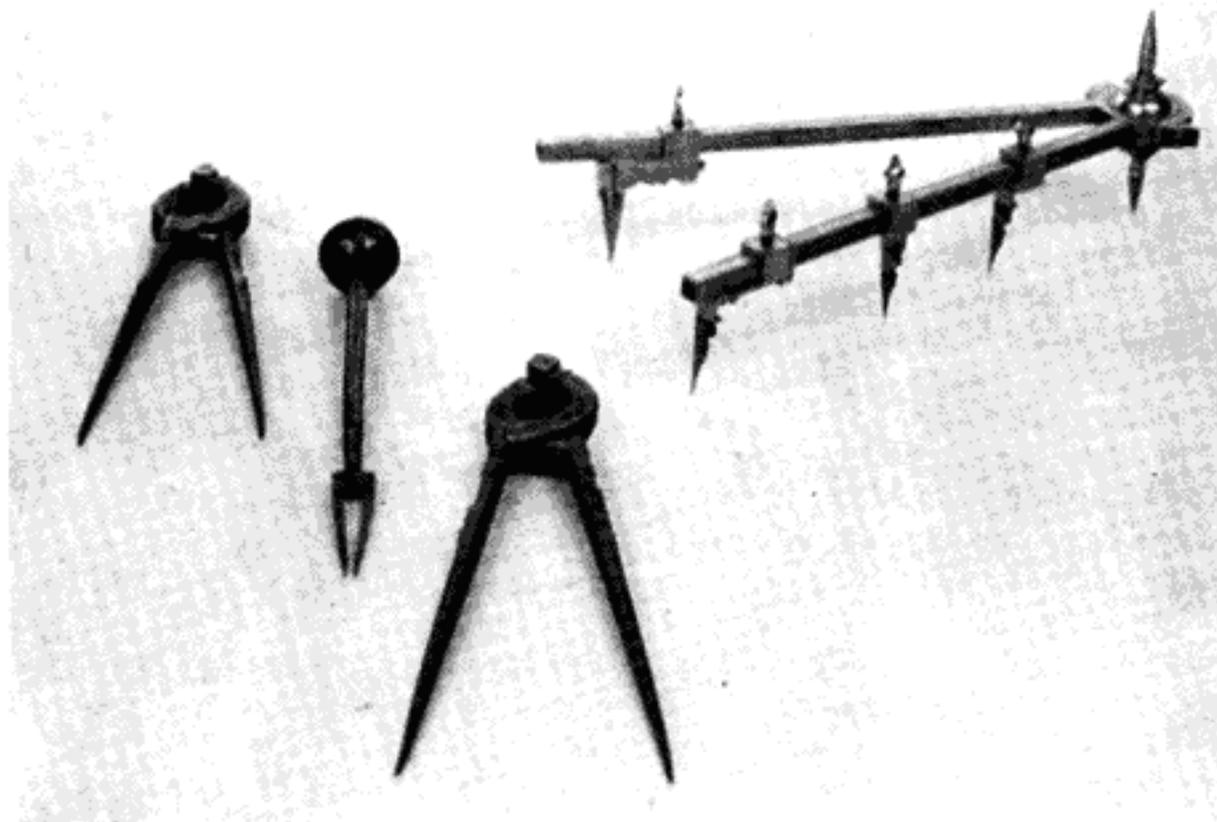


Imagen mítica de Galileo observando las oscilaciones de las lámparas de la catedral de Pisa. Luigi Sabatelli

medio y la diferencia de las velocidades desaparecerá. Aquí, Galileo muestra lo que probablemente sea el aspecto más revolucionario de su obra: señalar esa misteriosa concordancia que existe entre lo que se puede deducir en abstracto y lo que se observa. Galileo poseía una enorme fe en las posibilidades de la ciencia y en el poder de la razón para explicar la naturaleza. Y es esta actitud iluminista, la que lo lleva a escribir en *Il Saggiatore*, que el universo está escrito en lenguaje matemático.

Tenemos, entonces, que Galileo obtu-

vo una gran cantidad de datos empíricos, los cuales organizó teóricamente. En esta organización intervinieron múltiples elementos, como, por ejemplo, una nueva actitud metafísica para entender a la naturaleza, aunada a su fe copernicana y al convencimiento de que lo real encarna lo matemático. Todo esto quedó plasmado en sus obras de madurez, el *Diálogo* y los *Discorsi*, que más que libros de ciencia son propaganda cultural, planteada en forma no de experimentos que prueben (experimentos reales) sino de demostraciones didácticas (experimentos pensados).



Semejantes a estos compases de la época eran los usados por Galileo. Tomado: de *Protagonistas de la civilización*.

Experimentos pensados

Los experimentos pensados, llamados por E. Mach, "experimentos de pensamiento" (*Gedankenexperimente*), juegan un importante papel en el desarrollo de algunas ideas fundamentales de las teorías científicas; aparecen en la obra de Galileo, así como en las de Einstein, Heisenberg, etcétera.

Es importante señalar que la denominación de "experimentos pensados" está condicionada históricamente. Por ejemplo, un experimento consistente en soltar pesas en la Luna, en la época de Galileo era un genuino experimento pensado. De la misma manera, que lo era el hacer medidas en el vacío, tanto por la falta del equipo adecuado como por la imposibilidad teórica que representaba, ya que debemos recordar que la doctrina aristotélica consideraba que el vacío era imposible, no sólo de hecho, sino como un principio fundamental de la naturaleza. Y si bien es cierto que para Galileo no había tal imposibilidad teórica, para sus lectores sí representaba un verdadero obstáculo concebir el movimiento en el vacío.

La importancia de los experimentos pensados se comprende inmediatamente. Los experimentos reales son con frecuencia muy difíciles de realizar; llevan, necesariamente, un grado de imprecisión. No existen las superficies ab-

solutamente planas, tampoco las superficies absolutamente esféricas, ni los cuerpos perfectamente rígidos, ni los absolutamente elásticos. No podemos realizar una medición absolutamente exacta; la perfección no pertenece a este mundo. Seguramente nos podemos aproximar a ella, pero nunca la podremos alcanzar. Existe siempre una diferencia entre el dato empírico y el objeto teórico, y allí es donde interviene el pensamiento, salvando esta separación. La ciencia moderna opera con objetos teóricamente perfectos, y es con estos objetos con los que trabajan los experimentos pensados. Tal y como lo señala A. Koyré¹²: "el experimento pensado desempeña así el papel de intermediario entre lo matemático y lo real". La ciencia moderna hace rodar esferas perfectas en planos perfectamente lisos y perfectamente duros; utiliza palancas y cuerdas perfectamente rígidas y que no pesan absolutamente nada; lanza cuerpos que se mueven en el espacio infinito y fuera de toda interacción con otros cuerpos, etc. Como resultado, obtiene la precisión perfecta que sustenta las leyes fundamentales de los grandes sistemas científicos.

Sabemos del increíble ingenio mostrado por Galileo al sustituir la caída libre por el movimiento en el plano inclinado y por el péndulo, máximo si tomamos en cuenta la extrema pobreza

de los medios experimentales que tenía a su disposición. Es interesante ver la descripción de sus experimentos, relatada por él mismo:

"En un listón o, lo que es lo mismo, en un tablón de una longitud aproximada de doce codos, de medio codo de anchura más o menos y un espesor de tres dedos, hicimos una cavidad o pequeño canal a lo largo de la cara menor, de una anchura de poco más de un dedo. Este canal, tallado lo más recto posible, se había hecho enormemente suave y liso, colocando dentro un papel de pergamino lustrado al máximo. Después, hacíamos descender por él una bola de bronce muy dura, bien redonda y pulida.

"Habiendo colocado dicho listón de forma inclinada, se elevaba sobre la horizontal una de sus extremidades, hasta la altura de uno o dos codos, según pareciera, y se dejaba caer (como he dicho) la bola por dicho canal, tomando nota como ensiguenda he de decir del tiempo que tardaba en recorrerlo todo. Repetimos el mismo experimento muchas veces para asegurarnos bien de la cantidad de tiempo y pudimos constatar que no se hallaba nunca una diferencia ni siquiera de la décima parte de una pulsación. Establecida exactamente esta operación, hicimos que esa misma bola descendiese solamente por una cuarta parte de la longitud del canal en cuestión. Medido el tiempo de la caída, resulta ser siempre, del modo más exacto, precisamente la mitad del otro.

"Haciendo después el experimento con otras partes, bien el tiempo de la longitud completa con el tiempo de la mitad, con el de dos tercios, con el de 3/4 o con cualquier otra fracción, llegábamos a la conclusión, después de repetir tales pruebas una y mil veces, que los espacios recorridos estaban entre sí como los cuadrados de sus tiempos. Esto se podía aplicar a todas las inclinaciones del plano, es decir, del canal a través del cual se hacía descender la bola. Observamos también que los tiempos de las caídas por diversas inclinaciones del plano guardan entre sí, de modo riguroso, una proporción que es, como veremos

después, la que les asignó y demostró el autor.

"En lo que a la medida del tiempo se refiere, empleamos una vasija grande llena de agua, sostenida a una buena altura y que, a través de un pequeño canal muy fino, iba vertiendo un hilillo de agua, que se recogía en un vaso pequeño, durante todo el tiempo en que la bola descendía, bien por todo el canal o sólo por alguna de sus partes. Se iban pesando después en una balanza muy precisa aquellas partículas de agua recogidas del modo descrito, con lo que las diferencias y proporciones de los pesos nos iban dando las diferencias y las proporciones de los tiempos. Ocurría esto con tal exactitud que, como he indicado, tales operaciones, repetidas muchísi-

mas veces, jamás diferían de una manera sensible"¹³.

Repasemos las condiciones del experimento: una bola de bronce, un canal "suave y liso", un recipiente con un agujero por el cual pasa el agua para medir los tiempos de caída. El experimento de Galileo está lleno de fuentes de error y de inexactitud. Además, supone que el movimiento de la bola *rodando* a lo largo del plano inclinado es equivalente al de un cuerpo *deslizándose sin fricción* sobre el mismo plano.

De acuerdo a las condiciones en las que se realizaban estos experimentos era imposible *deducir de ellos*¹⁴ la ley de la caída de los cuerpos en lo que corresponde a la relación matemática entre la velocidad y el tiempo; relación que permite calcular los "accidentes"

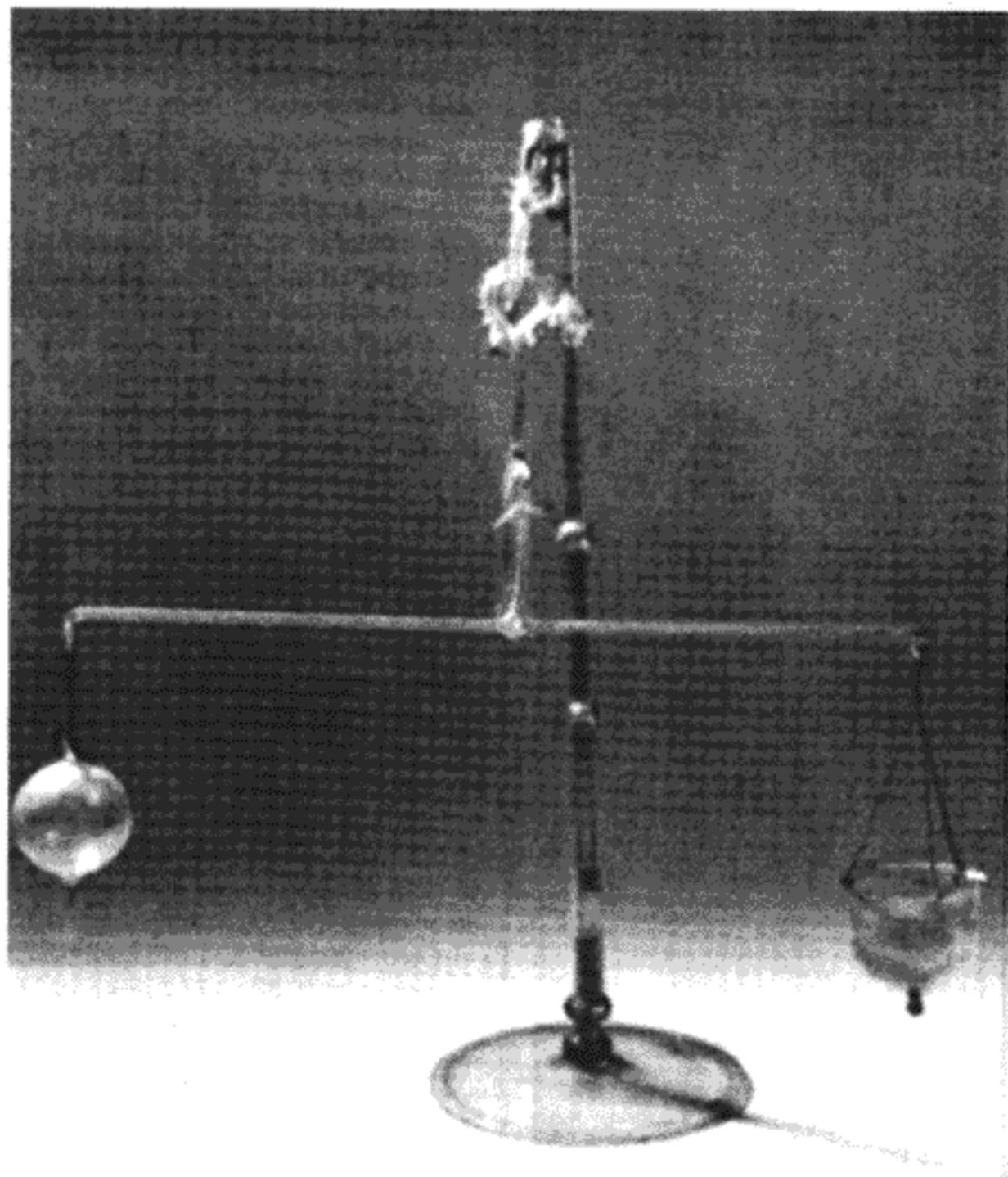
de la caída ("que los espacios recorridos por el grave, están en proporción del cuadrado de los tiempos"). Galileo se refiere a que su ley de la caída de los cuerpos se cumple solamente en el caso en que se ha quitado toda resistencia del medio. También se refiere al movimiento rectilíneo sobre un plano horizontal en el cual se ha eliminado todo impedimento externo. Y es con estos experimentos —que son genuinos experimentos pensados para la época— con lo que Galileo *inicia*¹⁵ la sustitución de los cuerpos materiales por los cuerpos geométricos, el espacio real por el espacio euclidiano, y se pone en el camino que conduce al principio de inercia. Principio que, por cierto, no logrará enunciar explícitamente; sin embargo, su física está tan impregnada de tal principio que sus discípulos y seguidores (Torricelli, Cavalieri, Gassendi) podrán extraerlo sin ninguna dificultad.

Vemos entonces lo importantes que son en su obra los experimentos pensados. No obstante, Galileo abusó de este recurso y en su obra también encontramos experimentos que, por los resultados cualitativamente erróneos que presenta, seguramente jamás realizó, probablemente porque estaba convencido de lo que iba a obtener.

Experimentos imaginarios

Existen muchas dudas respecto a que haya realizado algunos de los experimentos que aparecen en la obra galileana. Tales dudas no descansan en la precisión experimental, sino en la fidelidad de los resultados que presenta, ya que éstos son cualitativamente erróneos; también lo hace poco creíble la poca o nula información que da, en algunos casos, de los complicados (aunque posibles) dispositivos experimentales. Por ejemplo, en lo que respecta a los experimentos con péndulos tenemos el siguiente texto en el cual los resultados que presenta son erróneos:

"Cuélguense de dos hilos de la misma longitud, de cuatro o cinco codos, pongamos por caso, dos bolas que sean iguales también. Una vez suspendidos dichos hilos a cierta altura, empujemos los pesos desviándolos de la perpendicular, pero de forma tal que uno se aleje en una distancia de ochenta o más grados,



Balanza hidrostática redescubierta por Galileo. Tomado: de *Protagonistas de la civilización*.

mientras que el otro no se aleje más de cuatro o cinco. De esta forma, si se los deja caer libremente, uno cae y, tras atravesar la perpendicular, describe arcos muy grandes de 160, 150, 140 grados, etc., disminuyéndolos poco a poco; el otro, por su parte, recorrerá arcos pequeños de diez, ocho, seis, etc., grados, disminuyéndolos también poco a poco.

“He de decir, ante todo, que en el tiempo en que uno de los péndulos pasa sus grados respectivos, 180, 160, etc., el otro pasará los 10, 8,

etc., suyos. De todo lo cual se infiere con claridad que la velocidad de la primera bola será dieciséis o dieciocho veces mayor que la velocidad de la segunda; de modo que si el aire ofrece a la velocidad más grande una resistencia superior a la que ofrece a la menor, la frecuencia de vibración será menor en los grandes arcos de 180, 160 grados, etc., que en los pequeños arcos de diez, ocho, cuatro e incluso dos y un grados. Ahora bien, *esto contradice a la experiencia*, ya que si dos personas se

ponen a contar las vibraciones, una las más largas y la otra las más cortas, se encontrarán con que contarán no sólo decenas sino *centenas de tales vibraciones sin que difieran lo más mínimo en una sola o en parte de una*”¹⁶

Es fácil demostrar que su afirmación del isocronismo es falsa, y que Galileo no pudo dejar de apreciar —en caso de haberlos realizado— la notable diferencia entre las pequeñas y las amplias oscilaciones. (Para ángulos de oscilación hasta de 15 grados la diferencia en los periodos es de menos del 1%).

Otro hecho, que hace dudar de que haya realizado algunos de los experimentos que describe, son las cantidades y magnitudes que menciona. Por ejemplo, tenemos los siguientes textos:

“Pesaremos después esta agua y veremos cuántas veces contiene su peso al de la arena conservada, pudiendo establecer, sin error, las veces que es más pesada el agua que el aire. Aquella no será *diez veces* solamente, como parece que creía Aristóteles, sino casi más de *cuatrocientas veces*, como lo muestra nuestra experiencia”¹⁷.

“Habiendo separado, luego, las dos bolas de la perpendicular, las he dejado que se pusieran en marcha al mismo tiempo;... para volver, después, atrás por el mismo lugar. Y repitiendo... que ni en cien vibraciones *ni tampoco en mil* tomaría aquella la más mínima delantera ...”¹⁸

“Supongamos, por ejemplo, que el plomo sea *diez mil veces* más pesado que el aire, mientras que la madera de ébano es *solamente mil veces* más pesada”¹⁹.

En todos estos textos es clara la naturaleza no-empírica de las magnitudes mencionadas.

Otro ejemplo de un experimento imaginario que él mismo reconoce no haber realizado, es el relativo a la idea que él tenía de que los graves al caer adquieren una “velocidad natural”, independientemente de dónde caigan y con la velocidad que fuese. He aquí el texto:

“Yo no he realizado tal experimen-



Portada del *Diálogo* en una edición de 1638. Tomado de: *Protagonistas de la civilización*.

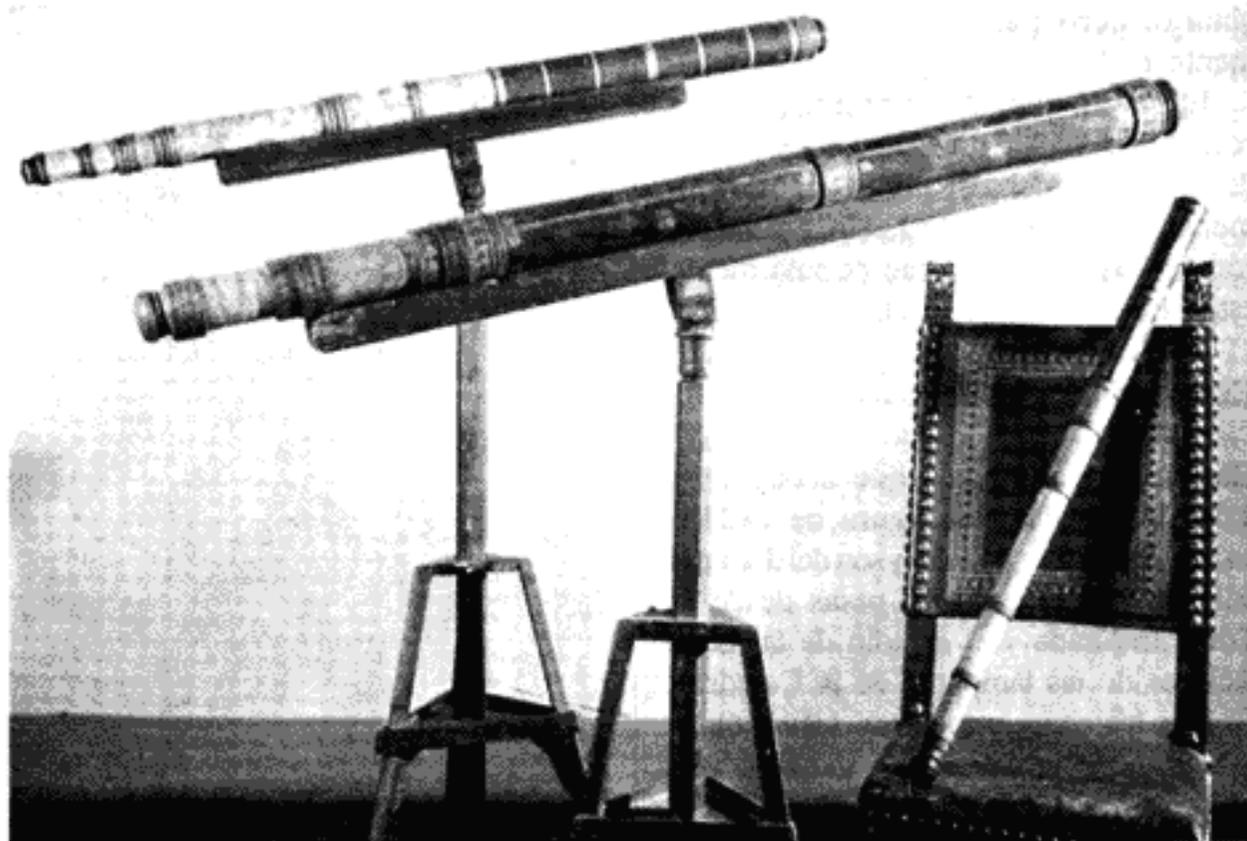
to, pero estoy convencido de que una bala de arcabuz o de artillería, cayendo de una altura todo lo elevada que se quiera, no producirá un golpe tan fuerte como el que produciría si se disparara contra una pared desde una distancia de pocos codos; es decir, desde una distancia tan corta que la pequeña hendidura, o mejor, la división que se hace en el aire no sea lo suficientemente grande como para quitar el exceso de la violencia supranatural que el fuego de la artillería le hubiera imprimido²⁰.

W. R. Shea²¹ nos da el ejemplo de un experimento que Galileo da como real, pero parece que es imaginario. Este se refiere a la "demostración" de que la Tierra, contrariamente a la opinión generalizada de la época, reflejaba los rayos del Sol tanto como la Luna. En el texto, publicado en la *Tercera Carta* de su polémica con Christopher Scheiner sobre las manchas solares, se lee lo siguiente:

"Además, nosotros deberíamos estar convencidos de la reflexión terrestre efectuada cuando vemos cuánta luz se refleja en un cuarto oscuro desde una pared situada enfrente que es bañada por los rayos del Sol. Aun si *la luz reflejada entra por una abertura tan pequeña que desde el lugar donde éstos caen su diámetro visual no es mayor que el de la Luna*, no obstante esta luz secundaria es tan fuerte que cuando es reflejada desde el primer cuarto en una segunda habitación, será más potente que la luz de la Luna. De esto nosotros tenemos un claro y sencillo experimento, ya que es más fácil leer un libro por la segunda reflexión proveniente de la pared que por la reflexión directa viniendo de la Luna"²².

Las indicaciones precisas en el pasaje que está en cursivas, sugieren, de manera casi inequívoca, que el experimento fue llevado a cabo. Pero de la carta que Galileo escribe al príncipe Cesi, el 25 de enero de 1613, en la cual él contesta a las objeciones emitidas por su amigo Luca Valerio, se desprende una impresión diferente:

"El punto que el Señor Valerio



Telescopios del siglo XVII.
Tomado de: *Protagonistas de la civilización*.

plantea es verdadero: el mismo cuerpo brillante ilumina más de cerca que de lejos. Pero también es verdad que cuerpos brillantes de tamaños diferentes pero de la misma luminosidad no iluminan igual: desde la misma distancia, un cuerpo grande dará más luz que uno pequeño, y desde una distancia más grande dará menos luz. Por lo tanto, cuando yo considero la reflexión proveniente de una pared y la comparo con la de la Luna, es verdad que la de la pared es más cercana, pero la Luna está incomparablemente más lejos, y yo siempre intenté comparar la reflexión de la Luna con la de una pared cuyo tamaño es proporcional a la distancia de la Luna, así que el cuarto oscuro, donde la reflexión desde la Luna y la pared se les permite entrar, recibe más luz desde la pared a través de una abertura que no exceda aparentemente el diámetro visual de la Luna. Así, que para explicar mi propósito más claramente, las siguientes palabras pueden ser añadidas al pasaje referido: *Aun si la luz reflejada entra por una abertura tan pequeña que desde el lugar donde éstos caen su diámetro visual no es mayor que el de la Luna.*"²³

Las palabras añadidas son las que están en cursivas en la cita precedente

de la *Tercera Carta*. Galileo nunca realizó el experimento, ya que en caso de haberlo efectuado, él debería haber resuelto y mencionado, como es de esperarse, la dificultad que representaba permitir solamente la reflexión de la pared en el cuarto oscuro. Suponiendo que algún lector —y tal lector debió haber sido raro en el siglo XVII— hubiera querido repetir el experimento, debió haberse preguntado sobre la forma en que se podía aislar la luz de una pared bañada por el Sol de mediodía, para asegurar que sólo su luz reflejada penetrara dentro de un cuarto oscuro, a través de una abertura delgada.

Otro experimento galileano²⁴, mejor conocido por la controversia respecto a si es imaginario o no, es el de la mezcla del agua y del vino. Este experimento consiste en poner un globo de cristal lleno de agua con un pequeño orificio en la parte inferior, en contacto con el vino contenido en un recipiente. Según Galileo, el agua desciende lentamente, de la misma manera que el vino asciende hacia el interior del globo, sin mezclarse los líquidos entre sí, hasta que el vino llene completamente el globo y el agua haya descendido hasta el fondo del recipiente. A. Koyré²⁵ concluye que Galileo jamás realizó este experimento porque el agua y el vino se mezclan fácilmente; sin embargo, J. MacLachlan²⁶ afirma que para Koyré pudo ser un experimento ima-

ginario, pero para Galileo fue ciertamente real.

El cuarto tipo de experimentos que se asocian a la figura de Galileo es el de los experimentos que ni siquiera se mencionan en su obra, sin embargo, son los experimentos que popularmente están más vinculados a él.

Experimentos míticos

Hay dos experimentos que acompañan indisolublemente a la figura de Galileo en las guías y los manuales y son del dominio público: lanzamiento de pesas desde la Torre Inclinada y el estudio de las oscilaciones de las lámparas de la Catedral.

Las historias populares sobre Galileo, y sobre la ciencia en general, ven en los experimentos de la Torre Inclinada un momento decisivo y de gran importancia. Ven en ellos el momento en que se pronuncia *abiertamente* contra el aristotelismo e inicia su ataque *público* a la escolástica. Así también, consideran que es un momento crucial en el que se derrumba a la física aristotélica y se sientan los fundamentos de la nueva física.

Presentemos un par de citas, entre muchísimas que se han escrito, sobre la narración del experimento:

"...es en Pisa donde Galileo debía empezar su campaña científica contra Aristóteles, con gran indignación por parte de sus colegas de la Universidad, especialmente porque como cuenta Nessi (Nessi, *Vita e commercio letterario di G. Galilei*, Losanna, 1793), decidió hacer públicamente experimentos sobre la caída de los cuerpos y la bajada de los graves, que repitió varias veces en presencia de profesores y estudiantes en el campanario de Pisa."²⁷

"Debemos decir aquí algo referente a sus famosos experimentos sobre la caída de los cuerpos, ya que están estrechamente asociados a la torre inclinada de Pisa, uno de los más curiosos monumentos de Italia. Dos mil años antes aproximadamente, Aristóteles había afirmado que si dos pesos diferentes de la misma materia caían de la misma altura, el más pesado llegaría a la tierra antes que el más ligero, y esto en proporción a sus pesos. El experimento no es ciertamente difícil;



Manual *Sulla Sfera* redactado por Galileo. Tomado de: *Protagonistas de la civilización*.

nadie, sin embargo, tuvo la idea de argumentar así, y en consecuencia, esta aserción fue acogida entre los axiomas de la ciencia del movimiento, en virtud del *ipse dixit*²⁸ de Aristóteles. Galileo, sin embargo, sustituyó ahora la autoridad de Aristóteles por la de sus propios sentidos y pretendía que, salvo una diferencia insignificante, debida a la desproporción de la resistencia del aire, caerían al mismo tiempo. Los aristotélicos ridiculizaron esta idea, y se negaron a escucharle. Pero Galileo no se dejó intimidar y decidió forzar a sus adversarios a ver el hecho como él mismo lo veía. Así, una mañana, delante de la universidad reunida —profesores y estudiantes— subió a la torre inclinada llevando consigo una bola de diez libras y otra de una. Las colocó en el reborde de la torre y las dejó caer juntas. Juntas cayeron y juntas chocaron contra el suelo"²⁹.

Así también, tenemos el relato de un historiador más reciente, E. Namer, quien nos da un relato más elaborado y vívido: "Con increíble osadía, Galileo enviaba a Aristóteles a los polvorientos

estantes de las bibliotecas. Proponía abrir el gran libro de la naturaleza y leer sus leyes con mirada fresca...". Después de haber expuesto los ataques de Galileo contra Aristóteles y sus nuevas doctrinas *fundadas en la experiencia*, Namer continúa:

"Cuando Galileo supo que todos los otros profesores expresaban dudas referentes a las conclusiones del insolente innovador, aceptó el reto. Solemnemente invitó a estos graves doctores y a todo el cuerpo de estudiantes, en otros términos, a la Universidad entera, a asistir a uno de sus experimentos. Pero no en su marco habitual. No, éste no era suficientemente grande para él. Fuera, bajo el cielo abierto, en la ancha plaza de la catedral. Y la cátedra indicada claramente para estos experimentos era el Campanile, la famosa torre inclinada.

"Los profesores de Pisa, como los de otras ciudades, habían sostenido siempre, conforme a la enseñanza de Aristóteles, que la velocidad de caída de un objeto dado era proporcional a su peso.

"Por ejemplo, una bola de hierro que pese cien libras y otra que sólo pese una, lanzadas en el mismo momento, desde una misma altura, deben evidentemente tocar tierra en momentos diferentes y con toda seguridad la que pesa cien libras tocará tierra primero, puesto que justamente es más pesada que la otra.

"Galileo, al contrario, pretendía que el peso no tenía nada que ver y que las dos tocarían tierra en el mismo momento.

"Escuchar semejantes aserciones hechas en el corazón de una ciudad tan vieja y tan sabia era intolerable; y se pensó que era necesario y urgente afrentar públicamente a este joven profesor que tenía una opinión tan elevada de sí mismo y darle una lección de modestia de la que se acordase hasta el final de su vida.

"Doctores con largos trajes de terciopelo y magistrados que parecían ir a una especie de feria de pueblo, abandonaron sus diversas ocupaciones y se mezclaron con los representantes de la Facultad dispuestos a burlarse del espectáculo, fuera cual fuera el final.

"Lo más extraño quizás de toda esta historia es que no se le ocurrió a nadie

hacer el experimento por sí mismo antes de llegar a la plaza. Atreverse a poner en duda algo que Aristóteles había dicho, era nada menos que una herejía a los ojos de los estudiantes de esta época. Era un insulto a sus maestros y a ellos mismos, una desgracia que podría excluirlos de la élite. Es indispensable tener presente constantemente esta actitud para apreciar claramente el genio de Galileo, su libertad de pensamiento y su valor, y estimar en su justo mérito el sueño profundo del que la conciencia humana debía despertarse. ¡Qué esfuerzo, qué luchas eran necesarias para dar nacimiento a una ciencia exacta!

“Galileo subió las escaleras de la torre inclinada, con calma y tranquilidad a pesar de las risas y gritos de la multitud. Comprendía bien la importancia del momento. En lo alto de la torre, formuló una vez más el problema en toda su exactitud. Si los cuerpos al caer llegaban a tierra al mismo tiempo, había conseguido la victoria, pero si llegaban en momentos diferentes, serían sus adversarios quienes tendrían razón.

“Todo el mundo aceptó los términos del debate. Gritaban: ‘Haced la prueba’.

“Había llegado el momento. Galileo lanzó las dos bolas de hierro. Todos los ojos miraban arriba.

“Un silencio. Y se vio salir juntas las dos bolas, caer juntas y juntas tocar tierra junto a la torre.”³⁶

Se pueden extender largamente las citas y los ejemplos, pero en todos siempre aparecen los mismos elementos: *ataque público* al aristotelismo, *experimento público* en la Torre Inclinada, *éxito del experimento* al caer los dos cuerpos simultáneamente y la consternación y persistencia de los adversarios tradicionalistas. Todo ello enmarcado según la imaginación del autor. Sin embargo, estos elementos adicionales son inventados por los autores, pues la única fuente auténtica de la que se dispone es el *Racconto istorico* de Vincenzo Viviani³¹. Todos los relatos que existen en torno al suceso están, directa o indirectamente, basados en él.

Este es el relato de Viviani:

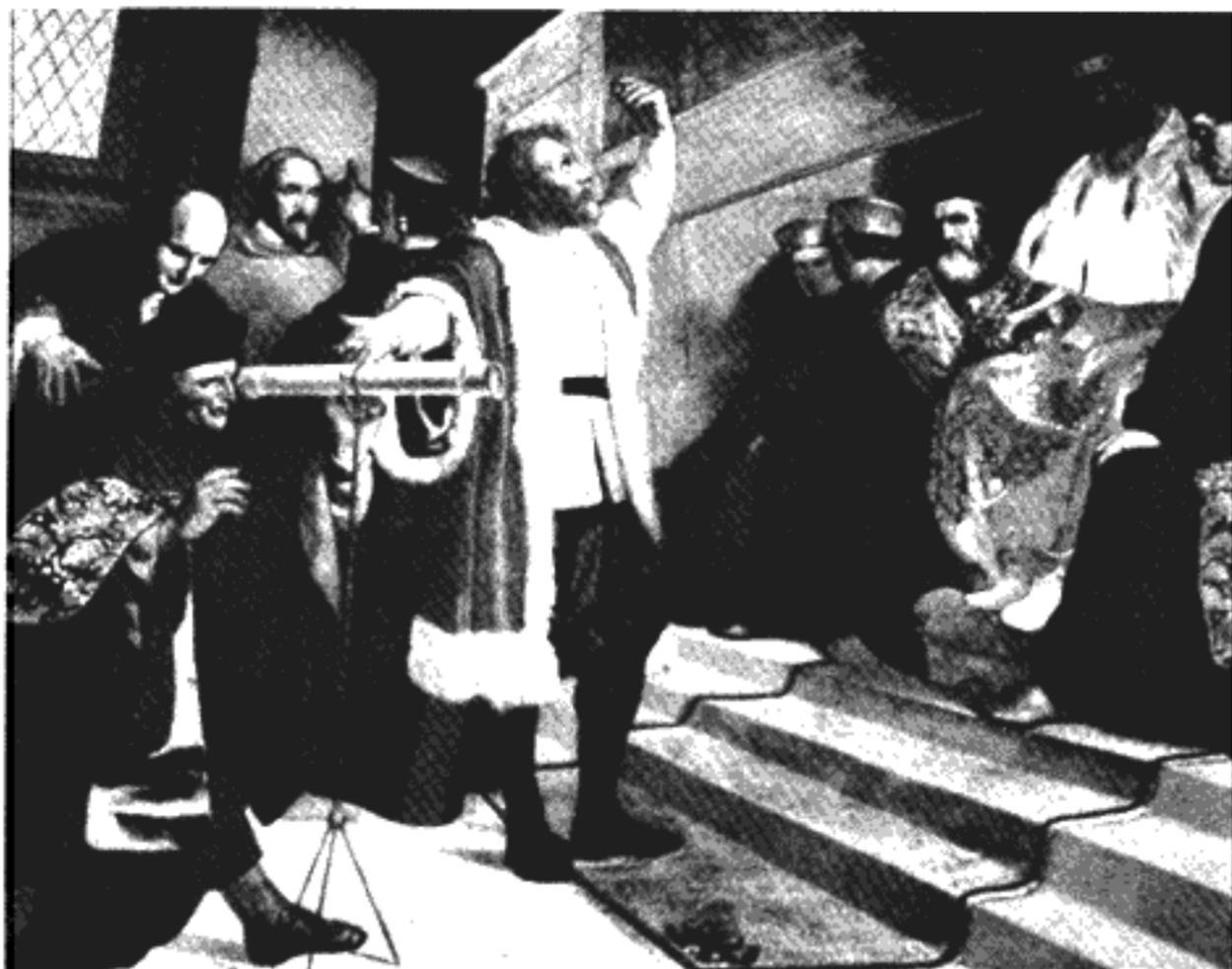
“En esta época (1589-1590) se convenció de que la investigación de los

efectos de la naturaleza exige necesariamente un verdadero conocimiento de la naturaleza del movimiento, conforme al axioma a la vez filosófico y vulgar *ignoratu motu ignoratur natura*³²; fue entonces cuando, ante la gran indignación de todos los filósofos, demostró — con la ayuda de experimentos, pruebas y razonamientos exactos — la falsedad de numerosas conclusiones de Aristóteles sobre la naturaleza del movimiento; conclusiones que hasta entonces eran tenidas por claras e indudables. Así, entre otras, la de que las velocidades de móviles *de la misma materia*, pero de pesos diferentes y que se mueven a través del mismo medio, no siguen en modo alguno la proporción de su gravedad, tal como dice Aristóteles, sino que se mueven todos con la misma velocidad. *Lo que demostró por repetidos experimentos hechos desde lo alto del campanario de Pisa en presencia de todos los demás profesores y filósofos y de toda la Universidad.*

Es evidente la ampliación hecha al relato original por los historiadores más modernos. Además parece ser que nadie comprendió que se trataba de graves de la *misma materia*. Y esto es bien importante,

porque en la época en que Galileo enseñó en Pisa, aún creía que los graves de materia y peso específico diferentes caían con una velocidad diferente. Y si hubieran hecho el experimento públicamente habrían podido ver que tal apreciación era correcta. Esta y otras razones indican que los experimentos de la Torre Inclinada de Pisa son un mito.

Existen más razones por las cuales se piensa que este experimento nunca fue realizado por Galileo. Por un lado, es difícil imaginar a todos los graves profesores de una universidad tan antigua y tradicional, como lo era en aquella época la de Pisa, así como a todos sus estudiantes, que debieron haber sido igualmente tradicionalistas, convocados por el más modesto y el peor pagado de sus profesores, para realizar un experimento que pondría en evidencia las enseñanzas de Aristóteles, que era la máxima autoridad en estos recintos. Sobre todo si tomamos en cuenta que desde hacía cien años sólo se hacía eso, como una práctica común de la escolástica, que consideraba teorías alternativas a la aristotélica para luego refutarlas y desecharlas como lógicamente imposibles. Así se hacía en Pisa, en particular un profesor de Galileo, Buonamici, aristotélico de la más estricta observancia, quien presentaba a sus oyentes las objeciones a



Galileo describe las leyes del movimiento acelerado ante el príncipe Giovanni de Médicis. Tomado de: *Protagonistas de la civilización*.

las enseñanzas de Aristóteles para refutarlas enseguida.

Nadie, a excepción hecha de Viviani, sesenta años después, habla del suceso, ni los partidarios ni los adversarios de Galileo. Esto resulta muy significativo, si tomamos en cuenta el carácter de Galileo, orgulloso y siempre dispuesto a la polémica, y que no se ha detenido en contarnos experimentos que nunca realizó. Es, pues, muy extraño que un experimento glorioso para él no lo mencione en ninguna de sus obras.

Si bien es falso que Galileo realizó el experimento de la Torre Inclinada, también es verdad que después de la publicación del *Diálogo* y los *Discorsi*, varios de sus contemporáneos se dedicaron a comprobar sus afirmaciones³³. En particular, a realizar experimentos sobre la caída de los graves de distinto peso y materia. Algunos, como el jesuita Nicolás Cabeo, llegaron a la conclusión de que "todos los cuerpos caen con la misma velocidad", lo que provocó en Vincenzo Renieri, profesor de matemáticas de la Universidad de Pisa, el deseo de proceder a un control. Y lo hizo utilizando, precisamente, la Torre Inclinada de Pisa. Renieri escribe a Galileo el siguiente texto:

"Tuvimos ocasión de hacer un experimento con dos graves de materias

diferentes, que caen desde una misma altura; uno de madera y el otro de plomo, pero de tamaño parecido; porque un cierto jesuita ha escrito que caen en el mismo tiempo y llegan a tierra con la misma velocidad, y porque un cierto inglés ha afirmado que Liceti ha compuesto a propósito un problema que lo explica. Pero, finalmente, nosotros hemos encontrado que esto no era así; efectivamente, de lo alto del campanario de la catedral [a la tierra] hubo entre la bola de plomo y la de madera casi tres varas de diferencia. Se hizo también el experimento con dos bolas de plomo, una del tamaño de las bolas ordinarias de artillería, la otra del de una bala de mosquete, y se vio que cuando la más gorda y la más pequeña caen desde la altura de este mismo campanario, la mayor precede a la pequeña con mucho"³⁴.

Cabeo continúa con sus experimentos y reafirma que los graves de pesos diferentes y de la misma materia caen siempre con la misma velocidad, lo cual estableció por "numerosos y frecuentes experimentos"³⁵, añadiendo que el aire no tiene nada que ver ni en favor ni en contra de la velocidad.

Estas afirmaciones hicieron que otro jesuita, Gianbattista Riccioli, se encargara de hacer experimentos para refutarlas. Riccioli, en su *Almagestum Novum*³⁶, describe una serie de experimentos realizados en Bolonia, en una torre similar a la de Pisa. Realizó estos experimentos en cuatro ocasiones, en mayo de 1640, en agosto de 1645, en octubre de 1648 y, finalmente, en enero de 1650. Preparó dos globos de arcilla, de las mismas dimensiones, de los cuales uno era hueco y sólo pesaba diez onzas, y el otro, lleno, pesaba veinte. Ambos globos salían simultáneamente de lo alto de la torre y el más ligero se quedaba quince pies atrás.

Galileo, sin embargo, no necesitaba esperar estos resultados. Él sabía que dos cuerpos "de la misma materia pero de dimensiones distintas" no podían descender a la misma velocidad. La afirmación de que "todos los cuerpos caen con igual velocidad" —y que nadie, al parecer, había comprendido— valía para el caso *abstracto* del movimiento en el vacío. Y ésta es la razón principal por la que Galileo nunca rea-

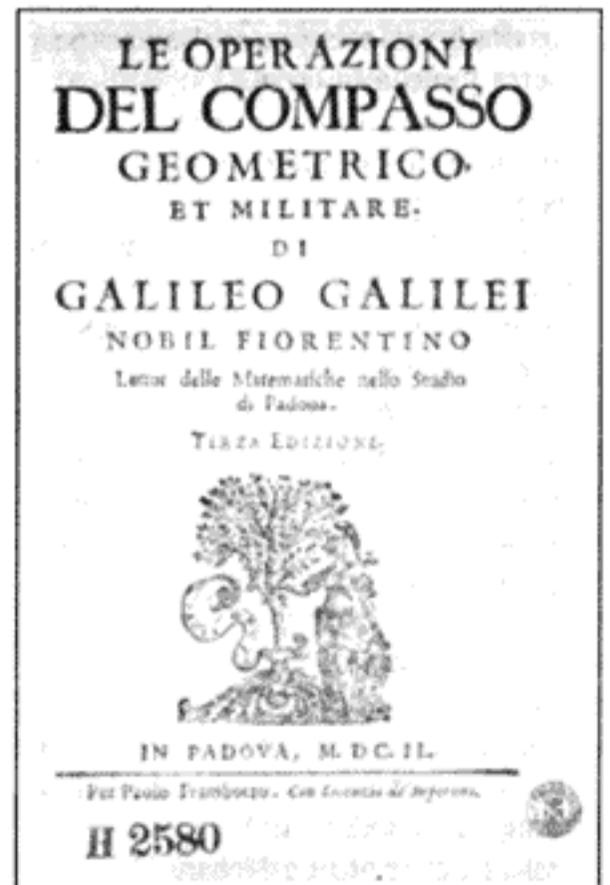
lizó el experimento de la Torre Inclinada de Pisa.

El otro experimento mítico de Galileo es el de las lámparas de la Catedral de Pisa.

Fue en el movimiento pendular donde Galileo encontró un proceso que permitía medir el tiempo. Un péndulo, si se eliminan todos los obstáculos interiores y exteriores para su movimiento, repetiría sus oscilaciones perpetuamente. Además, incluso en presencia de la fricción y de la resistencia del aire, el movimiento resulta continuamente retardado, y dos oscilaciones no pueden ser estrictamente idénticas, pero el período de estas oscilaciones sigue siendo constante (o, para ser más precisos, prácticamente constante si la amplitud de oscilación es pequeña). Sin embargo, la diferencia para oscilaciones pequeñas no podía ser detectada sin la ayuda de relojes de precisión. (Ya mencionamos que para oscilaciones de hasta 15 grados la diferencia en el período de las mismas es menor al 1%). Para amplitudes grandes, la diferencia entre el período de las oscilaciones es notable. Por lo tanto, la ley del isocronismo de los péndulos, que nos dice que el período de oscilación no depende ni del peso de la masa ni de la amplitud, sino únicamente de la longitud del hilo de suspensión, es válida sólo para las amplitudes pequeñas. Pero



Portada del *Sidereus nuncius* (1610). Tomado de Galileo, 1988.



Portada del libro *Operaciones del Compás geométrico y militar* (1611). Tomado de: *Protagonistas de la civilización*.

Galileo hizo este descubrimiento no como dicen los manuales, observando las oscilaciones de las lámparas de la Catedral de Pisa y estableciendo su isocronía por comparación con los latidos de su pulso, sino mediante experimentos extremadamente ingeniosos en los que compara las oscilaciones de dos péndulos de la misma longitud pero de masa diferentes, y sobre todo mediante una intensa reflexión matemática.

Es claro que sin relojes de precisión, los periodos de pequeñas oscilaciones (que son los que podría haber observado en las lámparas) son prácticamente constantes. Suena lógico, entonces, que Galileo sí pudo haber hecho su descubrimiento tal y como lo señala la tradición. Sin embargo, dichas lámparas no existían en los años en que Galileo radicaba en Pisa. Las famosas lámparas se colocaron en la catedral de Pisa, tres años después de la partida de Galileo de aquella ciudad; en la época en que Viviani sitúa el descubrimiento, la cúpula de la catedral de Pisa se encontraba aún desnuda y vacía³⁷.

Conclusiones

La obra de Galileo es de naturaleza muy compleja, pero en lo que respecta al papel que tiene el experimento dentro de ella, es totalmente erróneo bautizarlo como "padre del método experimental". En su obra aparecen, más que experimentos reales, demostraciones didácticas, pues no debemos olvidar que para él lo más importante es su proyecto de "política cultural". Por lo tanto, no admite resultados que contradigan su teoría, para no dar armas a sus oponentes. Aquí, podemos afirmar que Galileo es el inventor del experimento pensado, tan importante en la ciencia moderna.

Uno de los aspectos más revolucionarios de su obra fue percatarse de la asombrosa concordancia que hay entre la teoría y lo observado. Sin embargo —y tal como lo señala L. Geymonat³⁸— Galileo nunca alcanzó una conciencia plena y exhaustiva de la naturaleza del método experimental, ni consiguió esclarecer de manera satisfactoria la relación existente entre experimento y razonamiento. Así lo prueban sus evidentes oscilaciones entre el recurso al más puro método deductivo y el recurso, igual de frecuente, a la observación empírica.



Frontispicio del *Diálogo*, impreso en Leyden. Tomado de: *Protagonistas de la civilización*.

No obstante esto último, la influencia de sus experimentos (pensados, reales o imaginarios) es fundamental en el trabajo de hombres como Mersenne, Huygens y Hooke, entre otros, quienes, siguiéndolo, realizaron experimentos de gran precisión y conformaron el trabajo experimental en el sentido moderno. Es por esto que Galileo —en palabras de S. Drake³⁹— puede ser mejor bautizado como "abuelo del método experimental". ♦

Notas y referencias

1. Cf. P. K. Feyerabend, 1981, *Tratado contra el método*, Edit. Tecnos, S. A., Madrid p. 147.
2. Cf. J. MacLachlan, 1973, "A Test of an 'Imaginary' Experiment of Galileo's", *Isis*, Vol. 64, No. 233-374.
3. La explicación que Aristóteles daba al movimiento de proyectiles jamás fue satisfactoria. Los escolásticos consideraban, en su crítica a la física aristotélica, que al lanzar un proyectil, el motor (la causa del movimiento), imprimía una fuerza al móvil, lo cual hacía que éste se moviera. Esta fuerza impresa es el *impetus*, y era de naturaleza perecedera. La teoría del *impetus* tiene su origen en Hiparco de Rodas (siglo II a.n.e.), fue manejada por el comentarista cristiano Juan Filopón (siglo VI) y adoptada por Jean Buridan y Nicolás de Oresme, miembros de la escuela nominalista de la Universidad de París, durante el siglo XIV.
4. Cf. R. A. Uritam, 1974, "Medieval science, the Copernican revolution, and physics teaching", *American Journal of Physics* 42:(10)809.
5. Ver, por ejemplo, el libro de A. Koyré, 1981, *Estudios galileanos*, 2a. edición, Siglo XXI Editores, México.



Cuadro de Van Hove que muestra a Galileo explicando su teoría a un prelado.

6. Cf. S. Drake, 1973, "Galileo's Experimental Confirmation of Horizontal Inertia: Unpublished Manuscripts", *Isis*, 64: 291.
 7. Cf. R. Naylor, 1976 "Galileo: Real Experiment and Didactic Demonstration", *Isis* 67:398.
 8. Las dos principales obras de Galileo llevan los títulos originales de *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo tolemaico e copernicano* y *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, y usualmente se traducen al español como *Diálogo sobre los sistemas máximos del mundo, el ptolemaico y el copernicano* y *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*. Es frecuente referirse a ellas como el *Diálogo* y los *Discorsi*.
 9. Cf. I. B. Cohen, 1950, "A sense of history in science", *American Journal of Physics*, t.18 (6a.s) p. 143.
 10. G. Galilei, 1981, *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nue-*

vas ciencias, 2a. edición, Editora Nacional, Madrid p. 276.
 11. *Ibid.*, p.161.
 12. A. Koyré, 1982, *Estudios de historia del pensamiento científico*, 4a. edición, Siglo XXI Editores, México p.208.
 13. G. Galilei, *Discorsi*, *op. cit.*, p.299.
 14. Thomas Settle demuestra que Galileo sí pudo haber obtenido los resultados que declara con el equipo descrito en sus obras, pero esto no es suficiente para demostrar que efectivamente realizó el experimento con planos inclinados con la precisión que señala en los *Discorsi*. (Cf. T. B. Settle, 1961, "An Experiment in the History of Science", *Science*. 133:19).
 15. Decimos *inicia* porque Galileo nunca logra hacer la sustitución completa entre cuerpos reales y cuerpos geométricos; nunca logra deshacerse de la noción de pesantéz. Para él, el peso de un cuerpo es lo que para nosotros la masa.
 16. G. Galilei, *Discorsi*, *op. cit.*, p. 397. (Las

cursivas en la cita son nuestras).
 17. *Ibid.*, p. 172. (Las cursivas en la cita son nuestras).
 18. *Ibid.*, p. 177. (Las cursivas en la cita son nuestras).
 19. *Ibid.*, p.166. (Las cursivas en la cita son nuestras).
 20. *Ibid.*, p.400.
 21. Cf. W. R. Shea, 1970, "Galileo, Scheiner, and Interpretations of Sunspots", *Isis* 61(209)512.
 22. G. Galilei, *Third Letter, Ed Naz.*, V., 187-188. (Citado en W. R. Shea, *op. cit.*, p. 512). (Las cursivas en la cita son de Shea).
 23. *Ibid.*, p.512. (Las cursivas en la cita son de Shea).
 24. G. Galilei, *Discorsi*, *op.cit.*, p.160.
 25. Cf. A. Koyré, *Estudios de historia ...*, *op. cit.*, p.251.
 26. Cf. J. MacLachlan, *op. cit.*, p.375.
 27. A. de Gubernatis, *Galileo Galilei*, Florencia (1909) p.9. (Citado en A. Koyré, *Estudios de historia...*, *op. cit.*, p.196).
 28. *Ipse dixit*: "Él mismo lo dijo". En este caso, la expresión "en virtud del *ipse dixit* de Aristóteles" significa "tal y como el mismo Aristóteles lo dijo".
 29. J. J. Fahie, *Galileo, his life and work*, Londres (1903) p. 24. (Citado en *ibid.*, p.197).
 30. E. Namer, *Galileo, searcher of the Heavens*, New York (1931) p.28. (Citado en *ibid.*, p. 198).
 31. V. Viviani, *Racconto storico della vita di Galilei, Opere, Ed. Naz.*, Vol.XIX, p.606. (Citado en *ibid.*, p.200) (Las cursivas en la cita son de Koyré).
 32. Ignoratu motu ignoratur natura: "Ignorar el movimiento es ignorar la naturaleza". Esta expresión se refiere a un viejo principio de la filosofía natural que establece que toda doctrina que aspire a ser considerada como válida, debe explicar el fenómeno del movimiento.
 33. Ver, por ejemplo, el libro de A. Koyré, *Estudios de historia...*, *op. cit.*, p. 203).
 34. V. Renieri, *Carta a Galileo, 13 de marzo de 1641, Opere, Vol.XVII*, p.305. (Citado en *ibid.*, p. 203).
 35. N. Cabeo, *In libros meteorologicos Aristotelis*, Roma (1646) Vol.I, p.97. (Citado en *ibid.*, p.203).
 36. G. B. Riccioli, *Almagestum novum*, Boloña (1651) Vol.II, p.387. (Citado en *Ibid.*, p. 204).
 37. Ver las siguientes referencias: E. Wohlwill, "Ueber einen Grundfehler aller neuren Galilei-Biographien", *Münchener medizinische Wochenschrift* (1903), y *Galilei und sein Kampf für die Copernicanische Lehre*, t.1, Hamburgo y Leipzig. L. Voos (1909); R. Giacomelli, "Galileo Galilei giovane e il suo 'De Motu' ", *Quaderni di storia e critica della scienza*, t.1, Pisa (1949). (Citados en *ibid.*, p. 282).
 38. Cf. L. Geymonat, 1986, *Galileo Galilei*, Edit. Nexos, Barcelona p.212.
 39. Cf. S. Drake, 1973, "Galileo's Experimental Confirmation of Horizontal Inertia: Unpublished Manuscripts", *Isis*. 64: 291