

# La obra de Galileo y la conformación del experimento en la física

J.L. Álvarez G. y Y. Posadas V.

*Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México  
Ciudad Universitaria, Circuito Exterior,  
C. P. 04510, México, D. F., México*

Recibido el 20 de junio de 2001; aceptado el 6 de septiembre de 2002

Es muy frecuente encontrar comentarios y referencias a la obra de Galileo que sugieren que éste basaba sus afirmaciones más en un pensamiento lógico que en observaciones. En este trabajo presentamos un análisis de algunos "experimentos" que realizó y que permanecieron inéditos en los siglos XVI y XVII; en ellos encontramos una descripción clara de la metodología que siguió el científico italiano para alcanzar los resultados que presenta en sus obras formales, en particular en los *Discorsi*. A diferencia de la filosofía aristotélica, en estos folios Galileo adopta una metodología con la cual logra grandes contribuciones para la conformación moderna del método experimental, fundando una metodología para el estudio del movimiento. Utilizamos este análisis como ejemplo de las dificultades que se presentan en la conformación de la experimentación moderna y señalamos la necesidad de resaltar la importancia de la metodología científica en la enseñanza de la física.

*Descriptor:* Folios galileanos; conformación del experimento; Galileo; epistemología galileana.

It is very frequent to find comments and references to Galileo's work suggesting that he based his affirmations on a logic thought and not on observations. In this paper we present an analysis of some experiments that he realized and were unknown in the XVI and XVII centuries; in them we find a clear description of the methodology that Galileo follows in order to reach the results that he presents in his formal work, particularly in *Discorsi*. In contrast with the Aristotelian philosophy, in these manuscripts Galileo adopts a methodology with which he obtains great contributions for the modern conformation of the experimental method, founding so a methodology for the study of the movement. We use this analysis as an example of the difficulties that are present in the conformation of the modern experimentation and we point out the necessity to stress the importance of the scientific methodology in the teaching of physics.

*Keywords:* Galilean manuscripts; conformation of the experiment; Galileo; Galilean epistemology.

PACS: 01.70.+w; 01.65.+g

## 1.. Introducción

La conformación del experimento en la física presenta múltiples y muy variadas vertientes. Una es la obra de Galileo y todos los trabajos que se derivan directamente de ella y que fueron realizados por sus seguidores. Otra es la obra realizada por Tycho Brahe y Kepler en el campo de la astronomía. También habría que considerar el desarrollo de técnicas e instrumentos en óptica que ampliaron la visión macro y microscópica del ser humano para contar con una nueva forma de interrogar a la naturaleza. Todo lo anterior dentro de la nueva concepción científica que se estaba construyendo con la Revolución Científica de los siglos XVI y XVII.

Una historia *completa* de la conformación experimental debería incluir la obra de William Gilbert sobre el magnetismo y las primeras mediciones sobre la forma y dimensiones de la Tierra. También habría que considerar trabajos en áreas como son la medicina, la geofísica y la biología, que se beneficiaron y al mismo tiempo contribuyeron en este proceso. Por ejemplo, podríamos mencionar la invención del barómetro, que permitió a los geólogos determinar la altura de valles y montañas; así también, la invención del termómetro, que facilitó a los médicos conocer las variaciones de la temperatura corporal.

Por todo lo anterior cabe señalar que la conformación del experimento en la física fue un proceso que siguió muchos y muy diversos caminos y se desarrolló de una manera muy desigual. En este trabajo nos restringiremos a los estudios de Galileo sobre el fenómeno del movimiento. Aun así,

limitándonos a esta vertiente, tendríamos que considerar la importancia de estos estudios en la elaboración de la nueva cosmología que surgió como resultado de la Revolución Científica. Así de rica y compleja es la obra del pensador italiano y aquí sólo abordaremos el estudio de los "experimentos" directamente realizados por Galileo y su influencia en la conformación del experimento.

Galileo funda la ciencia de la cinemática y con ello *inicia* la construcción de la metodología experimental en la física actual. La popularización científica señala a Galileo como "el padre del método experimental". Sin embargo, como la mayoría de los revolucionarios dentro de la ciencia, se topó con dificultades de índole técnica para encadenar cabalmente los principios derivados de sus teorías con la realidad física. No obstante, establece las bases de la física actual y marca el camino a seguir para que otros autores verificaran, y en algunos casos refutaran, las afirmaciones galileanas en temas tales como el movimiento de proyectiles, la caída libre, los movimientos pendulares y la naturaleza del vacío. Así, podemos mencionar a algunos de los continuadores de la obra galileana (Mersenne, Riccioli, Huygens, Berti, Boyle, Maignan, Torricelli, etc.), quienes afinarán el *corpus* de la naciente física con el fin de lograr, entre otros objetivos, la correspondencia entre la teoría y el fenómeno, valiéndose para ello, por supuesto, de formas de experimentación nuevas y más elaboradas, que ellos mismos se encargarían de consolidar.

En la obra galileana aparecen los fundamentos de la nueva física: el movimiento en el vacío, el movimiento como un

estado, el principio de inercia, la matematización del mundo físico, la geometrización del espacio, la concordancia entre la teoría y la observación, etc.

En la actualidad en nuestras escuelas y libros de texto se nos enseña 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. Esta visión simplista de la obra de Galileo ha sido una fuente inagotable de malos entendidos. Bernard Cohen [1] señala que se nos presentan en nuestros laboratorios los experimentos decisivos del pasado tal y como los *realizamos ahora* y no como *fueron realizados entonces*. Es el propósito de este trabajo ayudar a comprender mejor la obra de un personaje tan mal conocido como Galileo.

Galileo Galilei Ammannati (1564-1642) es una figura central durante el periodo de transición representado por la Revolución Científica de los siglos XVI y XVII. Sus obras más representativas son *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico e copernicano* y *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*. En ellas encontramos demostraciones puramente matemáticas y “experimentos pensados”, de estos últimos se cree que no siempre responden a condiciones físicas concretas. Esto es, sin embargo, correcto hasta cierto punto.

En el siglo XX, a partir de la década de los setentas, varios trabajos de Galileo –hasta entonces inéditos– son sacados a la luz; comenzando con ello un estudio que nos obliga a reconsiderar dicho tipo de experimentos. Autores como Stillman Drake, Ronald Naylor, David Hill y otros, reconstruyeron las situaciones experimentales *insinuadas* por Galileo en tales trabajos, obteniendo una alta coincidencia entre los valores obtenidos por éste y aquellos que se derivan de sus reconstrucciones. Las investigaciones reportadas en estos folios no representan elementos inconexos dentro de la obra galileana; por el contrario, contienen resultados fundamentales que se encuentran expresados de otra manera en los *Discorsi*. Esta obra influyó en muchos de los experimentos proyectados por los coetáneos de Galileo. Analizaremos aquí la reconstrucción de algunos experimentos realizados por Galileo en cinco documentos póstumos: los folios 81r, 107v, 114, 116v y 152r [2]. En éstos resuelve tres problemas: la forma geométrica de la trayectoria de un cuerpo que cae después de recorrer un plano inclinado, la proporción entre los tiempos y los espacios para un cuerpo que se mueve sobre el mismo y la conservación del movimiento horizontal del cuerpo después de abandonar dicho plano. En este sentido podemos afirmar que muchos de los principios establecidos en los *Discorsi* adquieren su fundamento empírico a partir de las investigaciones plasmadas en los folios mencionados. Es decir, Galileo no construyó su física solamente por medio de argumentaciones lógico-matemáticas; también realizó experimentos, mas no del modo en que lo afirmaron (y afirman) muchos historiadores o divulgadores de la ciencia [3].

No obstante, a pesar de la importancia que estos folios tienen por sí mismos, no sintetizan lo que ahora estaríamos tentados a denominar un *experimento moderno*, pero podemos

ver en ellos, y en la obra galileana en general, cómo se hallan algunos de sus elementos más representativos, así como la ausencia de algunos otros. Ejemplos de los primeros son: verificación de algún resultado teórico por medio de un dispositivo construido, al parecer, *ex professo* (folio 116v); uso de los resultados de experiencias precedentes como puntales para construir, total o parcialmente, nuevas hipótesis (folio 114); formulación soterrada de un *principio de inercia*, responsable de que los cuerpos “continúen moviéndose” pese a separarse de la “causa que produjo el movimiento” (folios 114 y 116v); y proposición de los dispositivos adecuados y del *modus operandi* para confirmar la validez de la teoría en la práctica (existencia del vacío). Huelga advertir que en este trabajo no pretendemos definir lo que es el experimento moderno, sino simplemente resaltar aquellos aspectos que de una u otra manera han pasado a ser algunos de sus elementos inseparables; aspectos que, para ser comprendidos, deben observarse dentro del contexto histórico-filosófico desde el cual nacieron y se fueron desarrollando. Al mismo tiempo, existen otros aspectos que caen fuera de la experimentación moderna: postulación de principios, que no han sido verificados, para construir teorías cuyas consecuencias son de vital importancia en la práctica (isocronía del péndulo); prueba “insuficiente”, en cuanto al número de *datos* se refiere, de alguna afirmación (folios 81r, 107v, 114 y 116v); insinuación (no confirmación experimental) del valor numérico de ciertas cantidades que son importantes en la extracción de resultados cuantitativos de la teoría (constante de la aceleración gravitacional); mezcla de los discursos físico y filosófico (los *Discorsi*); y prejuiciamiento respecto a una hipótesis, sin tener las bases suficientes para hacerlo (carta a Paolo Sarpi).

## 2.. Los experimentos galileanos sobre el movimiento de proyectiles

Para fundamentar su cinemática, Galileo necesitaba demostrar empíricamente algunas proposiciones que sirvieran de base a los principios con los cuales habría de construir la nueva ciencia.

Alrededor de 1600, el marqués Guidobaldo del Monte sugirió a Galileo un experimento capaz de revelar la forma de la trayectoria seguida por los graves al caer después de rodar a través de un plano inclinado [4]. La propuesta de Guidobaldo, traducida a términos modernos, es como sigue: se lanza una bola entintada a lo largo de un canal inclinado OP, fijándose en la proyección horizontal resultante una vez que la bola abandona el plano y cae al suelo (véase la Fig. 1). Este planteamiento tuvo mucha influencia en las investigaciones posteriores de Galileo.

### 2.1.. El folio 81r: el establecimiento de la trayectoria parabólica para los graves que caen

En 1603, Galileo intenta repetir la experiencia de Guidobaldo. Se supone que el primero utilizó un plano de altura H e inclinación  $u$ , emplazado a una distancia h del suelo. El pro-

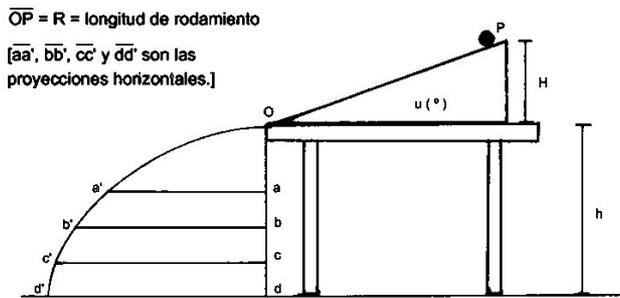


FIGURA 1. Reconstrucción del dispositivo experimental sugerido por Guidobaldo a Galileo

blema consistió en soltar, desde el punto P del plano, una esfera de metal, y medir, para cada una de las alturas consideradas (oa, ob, oc y od), las deflexiones originadas respecto a la horizontal (Fig. 1). (Nótese que la bola deja el plano no sólo con velocidad horizontal.)

En principio, esto no entraña ninguna dificultad que Galileo no haya podido resolver con los medios a su alcance; pueden obtenerse mediciones precisas disponiendo de una buena regla y compás [5].

Estimar el alcance de una bola una vez que ésta abandona el plano inclinado tampoco representa mayor dificultad, pudiéndose sin problema obtenerse deflexiones horizontales de distintas magnitudes dejando rodar la bola desde la misma altura.

Sin embargo, ¿cómo sabemos si fue un experimento real o se trata de uno pensado? Puede buscarse una solución a esta pregunta realizando una reconstrucción experimental del problema y comparar los resultados que se deriven de ésta con aquéllos presentados por Galileo en este folio.

Es una opinión muy difundida que, en caso de haber realizado experimentos, el científico italiano aplicó, en muchos casos, un análisis matemático ideal (plano liso sin fricción, bola perfectamente esférica) a una situación real (plano rugoso con fricción, bola cuasi-esférica) como en el dispositivo de la Fig. 1. Pensamos que lo anterior es cierto, pues era la única forma de proceder en una época donde apenas se comenzaba a reconocer la importancia de la abstracción matemática en la descripción de los fenómenos naturales.

Ahora bien, en la actualidad no resulta difícil darse cuenta de que, a pesar de no contemplar el deslizamiento existente de todo cuerpo que rueda a través de un canal inclinado, Galileo pudo sortear esta dificultad y llevar a buen término sus investigaciones de carácter experimental. ¿La razón?: el deslizamiento influye, pero puede soslayarse –hasta cierto punto– si se cumple con ciertas condiciones, entre las cuales destacan que la bola y el canal no tengan imperfecciones muy notorias, que el plano no esté muy inclinado, que los materiales sean los adecuados, etc. Además, aquí habría que señalar, una vez más, el genio especulativo de Galileo que le permite hacer abstracción de las condiciones materiales presentes.

La existencia de fricción entre la bola y el canal no presentó ningún problema para que Galileo tuviera éxito en un experimento como el que le fue sugerido por su amigo,

pues recordemos que un cuerpo esférico rueda gracias a la existencia de la fricción y las condiciones señaladas anteriormente se pueden cumplir fácilmente y de esta manera se puede realizar un experimento adecuado (históricamente hablando).

Aunque Galileo no era consciente de la influencia de estos factores, sus investigaciones de carácter experimental resultaron con un margen de error muy pequeño. En este punto no podemos decidir si fue suerte o intuición de visionario.

Regresando al experimento sugerido por el marqués a Galileo, debemos señalar que, si se pretende efectuar a cabo una reconstrucción experimental con medios similares a los que disponían los individuos del siglo XVII, sería necesario considerar, una vez que se hubieran obtenido los datos, que la bola o esfera *rueda sin resbalar* [6]. De no ser así, tendríamos que considerar otros factores tales como el ancho del canal que utilizó realmente Galileo, los materiales de su bola y de su plano inclinado, etc. Todo lo cual puede hacerse, pero no es nuestro objetivo, ya que: 1) por una parte, no conocemos exactamente las dimensiones de los aparatos usados por Galileo; 2) no se pretende reproducir los experimentos galileanos *tal y como los realizáramos en la actualidad*; y 3) creemos que comparar los resultados experimentales de Galileo con otros que obtuviéramos con técnicas más complejas, sería sacar tales experimentos de su contexto histórico-filosófico.

Por otra parte, puede demostrarse que la velocidad de una esfera que rueda a través de un plano inclinado cayendo una altura H es

$$V = (10gH/7)^{1/2}. \tag{1}$$

Mientras que el tiempo de caída  $T_n$  de la esfera desde el extremo inferior del plano hasta el suelo, debe resolverse de la ecuación

$$(V \text{ sen } u)T_n + (g/2)T_n^2 = h_n \quad (n = 1, 2, 3, 4). \tag{2}$$

Por último, la proyección horizontal  $D_n$ , se calcula con la siguiente expresión:

$$D_n = (V \text{ cos } u)T_n. \tag{3}$$

De manera que la reconstrucción se reduce a proponer los valores del ángulo de inclinación (u) y el valor de la altura del plano (H). R. H. Naylor [7] y D. H. Hill [8] realizaron –en forma independiente– un experimento consistente en dejar que una bola de bronce rodara a lo largo de un canal inclinado hasta abandonarlo, y, una vez libre, esperar su llegada para medir su amplitud sobre la horizontal (véase la Fig. 1). Enseguida presentamos los resultados de tales reconstrucciones.

Galileo, en el folio 81r, varió la altura  $h_n$  desde la cual caía la bola al piso después de abandonar el plano, y para distintos valores del plano inclinado R y del ángulo u del mismo (véanse las Figs. 1 y 2) registró los valores correspondientes de la proyección horizontal  $D_n$ .

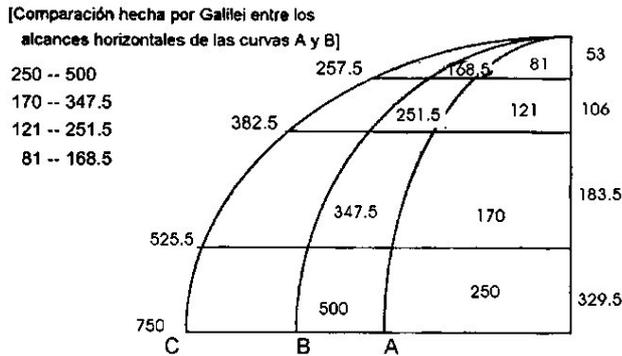


FIGURA 2. Esquema con los alcances horizontales para las curvas A, B, C mostrando los valores obtenidos por Galileo en el folio 81r. Las distancias están medidas en *punti*

Utilizando las Ecs. (1), (2) y (3) se han calculado los valores teóricos de la proyección horizontal ( $D_T$ ) y se compararon con los obtenidos por Galileo en el folio 81r y con los obtenidos por Naylor y Hill en sus reconstrucciones. El error entre todos estos valores jamás rebasa el 6% (véase la Tabla I). Aquí conviene hacer notar que Galileo dedicó mucho de su esfuerzo a mejorar los patrones de medición y a proponer y utilizar nuevos, de ahí el grado de precisión en sus resultados.

Si bien Galileo no dejó constancia de haber empleado un plano inclinado para generar las trayectorias dibujadas por él

TABLA I. Comparación con los valores teóricos de los resultados obtenidos por Galileo y por Naylor y Hill en sus reconstrucciones.

| Altura $h_n$   | Valor teor. $D_T$ | Naylor $D_n$ | Error % | Hill $D_n$ | Error % | Galileo $D_n$ | Error % |
|--|-------------------|--------------|---------|------------|---------|---------------|---------|
| Curva A ( $R=307.2 \text{ punti}^*$ ; $u = 20,5^\circ$ ) |                   |              |         |            |         |               |         |
| 329.5  | 252.0             | 250          | -0.8    | 244        | -3.2    | 250           | -0.8    |
| 183.5  | 177.7             | 171          | -3.8    | 173.5      | -2.4    | 170           | -4.3    |
| 106.0  | 126.0             | 124          | -1.6    | 124.5      | -1.2    | 121           | -4.0    |
| 53.0   | 79.4              | 80           | +0.8    | 79.0       | -0.5    | 81            | +2.0    |
| Curva B ( $R=2341 \text{ punti}$ ; $u=10^\circ$ )        |                   |              |         |            |         |               |         |
| 329.5  | 518.0             | 500          | -3.5    | 494.5      | -4.5    | 500           | -3.5    |
| 183.5  | 366.0             | 349          | -4.6    | 351.5      | -4.0    | 347.5         | -5.0    |
| 106.0  | 260.2             | 254          | -2.4    | 250.5      | -3.7    | 251.5         | -3.3    |
| 53.0   | 164.4             | 168.5        | +2.5    | 160.0      | -2.5    | 168.5         | +2.5    |
| Curva C** ( $R=7021.2 \text{ punti}$ ; $u=7^\circ$ )     |                   |              |         |            |         |               |         |
| 329.5  | 790.1             | 750          | -5.4    |            |         | 750           | -5.4    |
| 183.5  | 556.2             | 533          | -4.2    |            |         | 525.5         | -5.5    |
| 106.0  | 393.6             | 380          | -3.4    |            |         | 382.5         | -2.8    |
| 53.0   | 246.9             | 250          | +1.2    |            |         | 257.5         | +2.9    |

\*1 *punti*=0.0944 cm

\*\*Hill se abstiene de realizar la reconstrucción de la curva C argumentando, principalmente, que la longitud de rodamiento R es demasiado grande.

en el folio 81r, es conveniente recordar la sugerencia que recibió de Guidobaldo tres años atrás. Además, tres décadas después nos describe en los *Discorsi* [9], a través de su vocero Salviati, un experimento acerca del plano inclinado. Todo lo anterior nos lleva a pensar que no se trata de un “experimento pensado”, sino de un experimento realmente hecho.

Otra razón que apoya la opinión anterior es la inclusión del momento de inercia para calcular la velocidad de la bola rodando a través del plano. En todo caso, si Galileo hubiese derivado estos resultados en forma estrictamente matemática, las discrepancias observadas deberían ser mucho mayores, ya que en caso de no emplear la Ec. (1), que considera el momento de inercia, sino la fórmula para la velocidad de un objeto ideal cayendo sobre el plano [ $V=(2gH)^{1/2}$ ] las velocidades obtenidas con esta última serían mayores en más de un 18% que las obtenidas con la Ec. (1). Si los datos contenidos en este folio hubieran sido calculados en forma teórica, las discrepancias que obtendríamos serían de ese orden, pues Galileo no conocía la Ec. (1). Además, si bien Galileo no era consciente de la existencia de fricción entre la bola que rueda sobre el plano y éste, sí se percató de otros factores que podían alterar el movimiento de aquella [10].

Antes de seguir, hay algo que debe señalarse. Nótese que (2) y (3) son las ecuaciones paramétricas de una parábola (cuya variable dependiente es  $D_n$ ); de aquí que podamos afirmar, *a posteriori*, que el experimento contenido en el folio 81r sí demuestra la realidad de la trayectoria parabólica –la cual Guidobaldo le había insinuado-. Ahora bien, en el año de 1603, Galileo no poseía los elementos suficientes para afirmar que la bola, al abandonar el plano, se mueve siguiendo una curva parabólica; disponía solamente de una serie de valores que, geoméricamente, se *ajustan* a la trayectoria mencionada. Pero en el transcurso de los años fue reelaborando las concepciones prevalecientes respecto a la trayectoria de los móviles; pudiendo reconocer que el movimiento *parabólico* de la bola, al componerse de un movimiento “natural” de caída y otro “horizontal” debido al plano, era equivalente al de los proyectiles arrojados, por ejemplo, desde la boca de un cañón. Por ello, en los *Discorsi* no dudará en afirmar que:

“Un proyectil que se desliza con un movimiento compuesto por un movimiento horizontal y uniforme y por un movimiento descendente, naturalmente acelerado, describe, con dicho movimiento, una línea semiparabólica.”[11]

De igual forma, para un experto en geometría y técnicas de medición como lo era Galileo, construir planos de 10 ó 20° no era una tarea imposible; como tampoco elaborar canales de algunos centímetros o, probablemente, algunos cuantos metros. Si bien en esta época era muy difícil –pero no imposible– construir un canal *liso* y *pulido* de tales dimensiones, tiene una gran ventaja en cuanto al movimiento de la bola se refiere: debido a la poca pendiente del plano, la fricción puede ser suficiente para producir *rodamiento puro*; es decir, en estas circunstancias los efectos de deslizamiento son muy pequeños (aunque nunca nulos).

Si bien es real el experimento, su forma se encuentra en desarrollo: se reportan resultados pero no se analizan matemáticamente (no excluimos la posibilidad de que Galileo lo haya hecho en otra parte); no se mencionan los dispositivos empleados que permitieron al arribo de tales resultados, pero éstos no contradicen el análisis de la teoría moderna.

De manera equivalente a las dificultades en la experimentación moderna podríamos aceptar que, en los albores del siglo XVII, experimentos de este tipo no se realizaban con aceptables instrumentos de precisión y con la minuciosidad a la cual estamos acostumbrados actualmente, pero no es así. Para los artesanos –influidos por el perfeccionismo renacentista- fabricar un plano *liso y pulido* (o una bola cuasi-esférica) no era una tarea imposible de llevar a cabo, a pesar de la relativa sencillez de sus medios de trabajo; era, más bien, un verdadero arte donde demostraban su ingenio y delicadeza. Además, los individuos dedicados a la naciente experimentación lo hacían no sólo por tener una habilidad especial para manipular los dispositivos que se precisaran, sino también debido a su gran espíritu emprendedor y su anhelante deseo de conocer el nuevo universo de fenómenos que se abría ante ellos. Así, aunque existió cierta pobreza en el diseño de dispositivos experimentales lo suficientemente precisos, ello fue compensado con esa actitud renacentista que rayaba en lo artístico.

**2.2.. El folio 107v: en busca de la relación existente entre los tiempos y los espacios**

Entre los años de 1603 y 1604, Galileo retoma –bajo algunas modificaciones- el esquema experimental del folio 81r con el fin de averiguar, para un móvil rodando sobre un plano inclinado, la dependencia del tiempo transcurrido con la distancia recorrida por el mismo. Éste parece ser el objetivo del folio 107v.

Se supone que para su consecución, empleó un plano inclinado de 60 *punti* de altura por algo más de 2000 *punti* de longitud (1 *punti*=0.0944 cm). Antes de proseguir, señalaremos las tres formas que pudo emplear Galileo al efectuar el experimento (ver Figs. 3a y 3b): 1) pueden marcarse segmentos iguales (OA, AB, BC...) sobre la pendiente, midiendo los tiempos empleados por la esfera ( $t'$ ,  $t''$ ,  $t'''$ ...) para recorrerlos; 2) también es posible registrar las distancias avanzadas (OA', OB', OC'...) a través del plano por medio de múltiplos de alguna unidad de tiempo previamente establecida ( $t$ ,  $2t$ ,  $3t$ ...); ó 3) consignar distancia (tiempo) en unidades de tiempo (distancia) arbitrarias. Es lógico que, debido a su dificultad, la tercera haya sido rechazada por Galileo. No es la única, la primera entrañaba un serio problema a principios del siglo XVII: la falta de un reloj de precisión. Así, la segunda se presentaba como la más adecuada. Ahora bien, ¿es factible sin disponer de un cronómetro? Sí, sabiendo generar dicha unidad y reproducirla cuando sea necesario. Tarea nada complicada para un individuo con sentido musical, como Galileo [12].

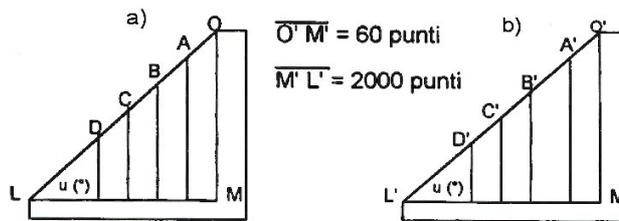


FIGURA 3. a) Se fijan intervalos de distancia iguales entre sí, midiendo el tiempo que el móvil tarda en recorrerlos(ver texto); b) Medir mediante múltiplos de tiempo los intervalos de distancia recorridos por el móvil(ver texto).

Enseguida reconstruiremos este experimento. Disponiendo de un canal inclinado O'L' (Fig. 3b), es conveniente darle poca pendiente con objeto de que el movimiento de la esfera, una vez puesta a rodar, no sea demasiado rápido y puedan detectarse sus distintas posiciones a lo largo del plano. Una precaución adicional se refiere a la unidad de tiempo a utilizar: su duración debe ser relativamente pequeña si lo que se pretende es obtener un número razonable de mediciones, pues la pendiente del canal tiene una extensión limitada. La *unidad de tiempo* más sencilla de manejar (y reproducir) es la duración de una nota musical; bastando, por lo tanto, ejecutar siete “Fa” de un tiempo durante el movimiento de la esfera sobre el canal de pendiente  $u$  para poder registrar un número igual de distancias. Es decir, ya sea que se cante una nota o se reproduzca ésta con algún instrumento musical, hay que asegurarse de dos cosas: 1) que la duración de todas las notas sea la misma; y 2) que la nota generada pueda ser reproducida *inmediatamente después* de terminada la anterior. Si la anterior fue la manera de proceder de Galileo, éste dispuso de un buen *reloj* capaz de registrar un par de duraciones iguales entre sí. Teniendo aquí una muestra muy clara del ingenio galileano: eliminó la necesidad de un reloj mecánico sustituyéndolo por un *cronómetro musical* [13].

Los resultados alcanzados por Galileo (columnas 1, 2 y 3) se presentan en la Tabla II. En la columna 2 se encuentra representada la serie de los números naturales; mientras que en la primera la serie corresponde a los cuadrados de aquéllos. La columna 3 contiene los valores de la distancia recorrida sobre el plano. Finalmente, la cuarta –que no aparece en el folio- encierra los valores de la columna 1 multiplicados por una constante: 33. Detengámonos en esto. Galileo midió el tiempo mediante unidades iguales; de manera que, en su opinión, el transcurso del mismo pudiera simularse mediante la sucesión de los números naturales. Este paso es una abstracción: el tiempo *real*, físico, se representa con una serie determinada de números sin dimensión física alguna. Ahora bien, si en un fenómeno como es el movimiento, el tiempo y el número se toman como iguales (conceptualmente hablando), entonces las propiedades que se descubran para uno de ellos se toman igualmente válidas para el otro. Así, manipulando matemáticamente la *representación* del tiempo, resulta, bajo esta igualación, equivalente a realizarlo en el tiempo mismo. Trocando igualmente el cuadrado de la distancia *real* que

TABLA II. Datos consignados en el folio 107v.

| t <sup>2</sup> | t | d*   | D*   | Divergencia entre d y D |
|----------------|---|------|------|-------------------------|
| 1              | 1 | 33   | 33   | 0                       |
| 4              | 2 | 130  | 132  | -1.5                    |
| 9              | 3 | 298  | 297  | +0.3                    |
| 16             | 4 | 526  | 528  | -0.4                    |
| 25             | 5 | 824  | 825  | -0.1                    |
| 36             | 6 | 1192 | 1188 | +0.4                    |
| 49             | 7 | 1620 | 1617 | +0.2                    |
| 64             | 8 | 2123 | 2112 | -0.5                    |

\*Los valores de d y D están en *punti*.

recorre el móvil por otro conjunto de números, el problema se reduce a buscar una relación matemática (o serie numérica) entre ésta y el tiempo.

Es por esta razón que, al descubrir que la tercera columna es proporcional a la primera, Galileo tiene justificado derecho al afirmar que las distancias recorridas por el móvil a través de un plano inclinado son como la *segunda proporcional* de los tiempos. Dado que la bola puesta inicialmente en un punto del canal parte del reposo y, al abandonársele, incrementará paulatinamente su velocidad, se *acelera*, pudo ocurrírsele que el movimiento sobre el plano inclinado y el movimiento de caída libre son, en cuanto a sus propiedades dinámicas se refiere, equivalentes. Lo anterior lo expresa Galileo, aunque de otra manera, en los *Discorsi* [14]. ¿Es válido hacer tal extensión? Sí; pero Galileo se encontraba a un año de demostrar, para el caso de la caída libre, que la distancia y el tiempo se ajustaban también a la llamada *proporción doble*. Ello precisaría el estudio de la dependencia entre el tiempo y la velocidad. El reconocimiento de la equivalencia de ambos movimientos y el aumento de velocidad experimentado por la bola a través del plano inclinado, le permitieron a Galileo establecer un principio muy importante dentro de su cinemática. Es el siguiente:

*“Si un móvil cae, partiendo del reposo, con un movimiento uniformemente acelerado, los espacios por él recorridos en cualquier tiempo que sea están entre sí como el cuadrado de la proporción de los tiempos, o lo que es lo mismo, como los cuadrados de los tiempos.”* [15]

Es decir, ahora no sólo conoce la forma de la trayectoria (folio 81r), sino además la proporción entre los tiempos y los espacios.

La búsqueda galileana de *principios* matemáticos que describieran la realidad física se iniciaba, preparando el terreno a un espíritu de matematización generalizada que habría de adquirir forma tanto en sus seguidores más cercanos como en otros de sus coetáneos.

Finalmente, pasaremos a la reconstrucción del folio 107v. Stillman Drake y Ronald Naylor [2] realizaron, independientemente, un experimento destinado a verificar si era posible el

procedimiento galileano para estimar el tiempo y la distancia de un móvil cayendo a través de un plano cuya inclinación era de 1.7°. La forma de medir las cantidades anteriores fue muy similar a la descrita líneas arriba. Usando un dispositivo parecido al de la Fig. 1, llegaron a los resultados de la Tabla III.

La cuarta y séptima columnas representan las diferencias experimentales de aquellos autores con las de Galileo. Aunque en ningún caso ellas son mayores a 3 cm, la validez de su precisión se encuentra en función del intervalo de tiempo mínimo que puede ser percibido por el experimentador. Esto significa que debe calcularse la distancia recorrida por la bola en dicho intervalo para tener una idea de la incertidumbre asociada a las columnas antes mencionadas, ya que, a diferencia del folio 81r, no es suficiente disponer de una buena regla con la cual se midan las distancias atravesadas; es también imprescindible conocer la precisión del *cronómetro musical*.

Según S. Drake, la diferencia mínima en tiempo que le es posible percibir a un director de orquesta –y en general a un músico– es de un octavo de segundo [16]. En la tercera y sexta columnas se calcula el recorrido de la bola por el plano conforme transcurre el tiempo. El intervalo de tiempo usado por Drake y Naylor (0.55 s, medido en forma exacta con un cronómetro actual) no ofrece complicación alguna; incluso una persona sin facultades musicales sería capaz de reaccionar cada medio segundo para marcar las distintas posiciones de la bola sobre el plano. El factor que más debería cuidarse se refiere a la destreza al momento de realizar los señalamientos sobre el canal inclinado. Pero tampoco es difícil: basta realizar varios ensayos con el objeto de afinar la precisión.

¿Estamos en presencia de un experimento formal? Aún no; el dispositivo experimental y el *modus operandi* no se encuentran señalados en forma expresa en el folio (pues en otros lugares de la obra galileana –los *Discorsi*– sí tenemos insinuaciones de cómo pudo concretarse un experimento de esta índole). Pero la esencia de uno de los objetivos primor-

TABLA III. Experimentos de Drake y Naylor . (Verificación del folio 107v).

| Folio 107v | Drake     |        | Naylor    |            |        |           |
|------------|-----------|--------|-----------|------------|--------|-----------|
|            | Distancia | Tiempo | Distancia | Diferencia | Tiempo | Distancia |
| 33         | 0.55      | 32.9   | +0.1      | 0.55       | 33     | 0         |
| 130        | 1.10      | 131.4  | -1.4      | 1.10       | 133    | -3.0      |
| 298        | 1.65      | 295.7  | +2.3      | 1.65       | 296    | +2.0      |
| 526        | 2.20      | 525.7  | +0.3      | 2.20       | 530    | -4.0      |
| 824        | 2.75      | 821.5  | +2.5      | 2.75       | 828    | -4.0      |
| 1192       | 3.30      | 1182.4 | +9.6      | 3.30       | 1190   | +2.0      |
| 1620       | 3.85      | 1609.8 | +10.2     | 3.85       | 1615   | +5.0      |
| 2123       | 4.40      | 2103.1 | +20.1     | 4.40       | 2101   | +22.0     |

Las distancias están en *punti*; los tiempos están en segundos.

diales –la obtención de *datos* para proceder a su análisis matemático y observar su correspondencia con algún modelo o hipótesis– está presente en la confrontación que hace Galileo de sus resultados experimentales con sus predicciones teóricas.

### 2.3.. La carta a Paolo Sarpi (1604) versus el folio 152r (¿1606?): buscando la relación entre los espacios y las velocidades

En los albores del siglo XVII, Galileo abandona la teoría del *impetus* –que estaba en boga– para explicar desde otra perspectiva las relaciones existentes entre los distintos factores (la distancia y la velocidad) que conforman el movimiento; cambio reflejado en una carta dirigida a su amigo Paolo Sarpi en donde le comunica haber encontrado (no dice nada del medio de que se valió para ello) un “principio totalmente indudable”, del cual deriva un resultado interesante. . .

“( . . . ) que tiene mucho de natural y evidente, [el cual es] que los espacios atravesados por el movimiento natural están en proporción doble del tiempo y que . . . los espacios atravesados en tiempos iguales son como los números impares [por unidad]. Y el principio es el siguiente: que el móvil natural va aumentando de velocidad en la misma proporción en que se aleja de su punto de partida, p.e., si un grave cae desde el punto *a* por la línea *abcd*, supongo que el grado de velocidad que tiene en *c* es al grado de velocidad que tenía en *b* como la distancia *ac* es a la distancia *ab*, y así . . . tendrá en *d* un grado de velocidad mayor que en *c* en la medida en que la distancia *ad* es mayor que la distancia *ac*.”[17]

Conviene aquí señalar que el concepto de velocidad que está manejando Galileo es aquel que tiene lugar en el movimiento natural, como es el de la caída libre, esto es, se trata de velocidad variando uniformemente; en términos modernos, es un movimiento uniformemente acelerado. De esta manera entonces, si identificamos al “grado de velocidad en *c*” como a una velocidad  $V_c$ , y al “grado de velocidad en *b*” como  $V_b$ , la propuesta galileana se reduce a la siguiente relación:

$$V_c/V_b = ac/ab. \quad (4)$$

Y tal como señala en la carta que envía a Sarpi, Galileo propone que la velocidad del móvil es proporcional al espacio que ha recorrido, y de esta proposición deduce que la distancia recorrida es proporcional al cuadrado de los tiempos.

La pregunta es válida: ¿porqué Galileo pudo deducir un resultado correcto de un principio incorrecto? Es posible que nuestro autor, en alguna de sus tantas investigaciones sobre el movimiento, haya llegado a esta conclusión por un camino distinto. Siendo así, el principio “natural y evidente” sería más una estrategia de convencimiento que una hipótesis fundamental en su demostración. La carta a Paolo Sarpi no es un documento único, ni definitivo, en la comprensión de la génesis del pensamiento galileano en este tópico.

Dos años después, el pensador italiano retoma el mismo problema desde una perspectiva diferente; plasmando parte

de sus investigaciones en el folio 152r. Cabe aclarar que, tanto en éste como en la carta, Galileo ya no se pregunta (como en su obra *De Motu*) acerca de las *causas* del movimiento; su objetivo es encontrar proporciones matemáticas *verdaderas* entre la velocidad y la distancia recorrida por el móvil. Deja, pues, la mera especulación para centrarse en el análisis físico del fenómeno.

A continuación reconstruiremos, brevemente, los razonamientos vertidos en el folio 152r (véase la Fig. 4).

Galileo analiza el movimiento de un cuerpo que cae en forma libre a través de la recta AD. Además, supone que los segmentos de línea AB y AC representan, en ese orden, las distancias recorridas por el móvil en dos tiempos diferentes ( $T_1$  y  $T_2$ , respectivamente).

Pero también construye un tercer segmento, AD, que es igual a la *media proporcional* (media geométrica) de los anteriores. Algebraicamente, la media proporcional es equivalente a la raíz cuadrada del producto de dos cantidades cualesquiera mayores que cero.

De manera que, por construcción, es válida la siguiente relación (véase la Fig.4):

$$AB : AD :: AD : AC \quad (\text{ó } AB/AD = AD/AC) \quad (5)$$

Notemos que Galileo traza otra recta que intersecta a la trayectoria AEF en el punto E, pudiéndose ahora formar dos segmentos perpendiculares a la recta AC: BE y CF. Éstos representan, en su opinión, el “grado de velocidad” en los puntos B y C. Ahora bien, ¿cómo son entre sí los grados de velocidad en los puntos anteriores? Si seguimos el principio “natural y evidente” expresado en la carta a Sarpi, diríamos que son como el segmento AB es al segmento BC; llegando a una variante de la Ec. (4). Mas Galileo decide probar con otro principio: los “grados de velocidad” BE y CF son como el segmento AB es a la *media proporcional* de AB y AC. O sea,

$$AB : AD :: BE : CF \quad (\text{ó } AB/AD = BE/CF). \quad (6)$$

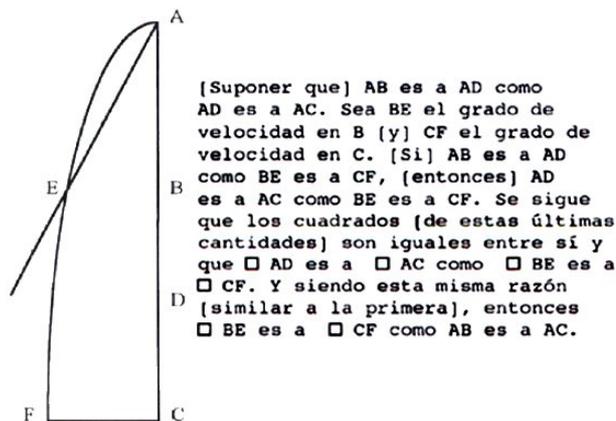


FIGURA 4. Detalles esenciales del folio 152r, en donde Galileo busca la relación entre los espacios y las velocidades

Pero en virtud de la Ec. (5),

$$AD : AC :: BE : CF \quad (\text{ó } AD/AC = BE/CF). \quad (7)$$

Redefiniendo a los “grados de velocidad” BE y CF como  $V_1$  y  $V_2$ , es posible demostrar que

$$(AB/AC)^{1/2} = V_1/V_2. \quad (8)$$

Relación distinta a la expresada en la Ec. (4) que ya no parece “tan natural y evidente”.

Hasta aquí el análisis de Galileo. Preguntémosnos: ¿qué sucede si los tiempos de recorrido ( $T_1$  y  $T_2$ ) del móvil son como el segmento AB es a la media proporcional AD? Es decir, si

$$T_1/T_2 = AB/AD. \quad (9)$$

Entonces, como  $AD = (AB \cdot AC)^{1/2}$ ,

$$(T_1^2/T_2^2) = AB/AC, \quad (10)$$

lo cual significa que *los espacios atravesados por un móvil están en proporción al cuadrado de los tiempos empleados en recorrerlos*; principio que ha probado en el folio 107v para el caso de un plano inclinado. Mas extendiendo este principio –como lo hizo Galileo [18]- al caso de la caída libre, se sigue que la relación (9) es correcta.

Arreglando un poco la Ec. (10), tendremos que

$$(T_1/T_2) = (AB/T_1)/(AC/T_2). \quad (11)$$

Ahora bien, el primero y el segundo términos del lado derecho de la Ec. (11) son en realidad las velocidades medias (las cuales Galileo denomina como los “grados de velocidad”) que el cuerpo tiene en los segmentos AB y AC. Por lo tanto,

$$(T_1/T_2) = (V_1/V_2). \quad (12)$$

Siendo así, tenemos que *la velocidad del móvil es proporcional al tiempo transcurrido*. Principio relativamente simple de obtener cuando ya se ha demostrado la expresión (10). A diferencia del folio 107v, Galileo no logró demostrar experimentalmente –hasta donde sabemos- la validez del principio involucrado en la Ec. (12), pero no fue obstáculo para que lo incluyera en su obra de madurez: los *Discorsi* [19].

Una muestra más del espíritu especulativo que afloró en la obra de Galileo, la tenemos en la expresión (8), la cual se encuentra –aunque algo embozada- en la antedicha. Lo mismo que la relación (9).

Galileo Galilei, nombrado miembro de la *Accademia dei Lincei* el 14 de abril de 1611, académico linceo por extensión, nos muestra que tuvo altos destellos de genialidad tanto al experimentar como al especular; era, pues, un auténtico *lince*...

**2.4.. El folio 114: la relación entre la altura del plano inclinado y el alcance horizontal de la esfera, una vez establecida la forma de la trayectoria**

A partir de los folios 81r y 107v, Galileo tuvo elementos suficientes para suponer que la trayectoria descrita por los cuerpos no era una curva de caprichosas características por el efecto combinado del *impetus* y la gravedad, sino de una forma geométrica definida. Sin embargo, aún no estaba claro si el *impetus* suministrado al grave permanecía durante todo su movimiento, o bien, se “agotaba” al llegar a cierta altura y lo hacía declinar. Pero los experimentos de Galileo no apoyaban esas opiniones. Son dos las razones: 1) cuando la esfera abandona el plano inclinado no se detiene y reproduce la trayectoria de un grave cayendo en forma libre, y 2) tampoco aquélla continúa con un movimiento rectilíneo como una prolongación del que tenía sobre el canal.

En el periodo 1606-8, Galileo regresa al experimento del folio 81r con la intención de medir las proyecciones horizontales de la esfera hasta el suelo (D). De manera que le sea posible conocer la dependencia entre ésta y la altura respecto al plano (H) desde la cual se suelta el móvil (véase la Fig. 1). No obstante, el folio no ofrece mayores detalles que las amplitudes de las semiparábolas, siendo éstas posiblemente generadas por un móvil cayendo sobre un canal inclinado (véase la Fig. 1). De este modo, para su reconstrucción experimental (o teórica), disponemos de tres variables libres: el ángulo de inclinación ( $\alpha$ ), la altura del plano (H) y la distancia vertical de la base de éste al suelo (h). Bajo la consideración anterior, no debe parecernos extraña la existencia de las tres reconstrucciones efectuadas por S. Drake (1972), Drake y MacLachlan (1973) y D. K. Hill (1988) (véanse la Fig.5 y la Tabla IV) [2].

El experimento efectuado por estos autores es en realidad una variante del abordado en el folio 81r; la diferencia entre ambos estriba en la medición de una sola proyección horizontal para cada una de las alturas desde la cual fue soltada la bola.

Debemos aclarar que, a pesar de llevar a cabo el experimento, sólo el último de ellos ha reportado sus resultados experimentales ( $D_E$ ); los otros dos se limitaron a consignar la proyección horizontal ( $D_T$ ) calculada a partir de las ecuaciones de movimiento (1) a (3).

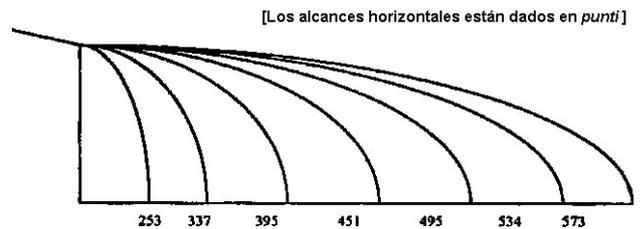


FIGURA 5. Detalles esenciales de los resultados del folio 114, en donde Galileo busca la relación entre la altura del plano inclinado y alcance horizontal de la esfera.

TABLA IV. Reconstrucciones sobre el folio 114.

| Drake*                        |                | Drake y MacLachlan*           |                | Hill**                            |                |                | Galileo    |
|-------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|----------------|------------|
| (h=450 <i>punti</i> ; u=26 °) |                | (h=500 <i>punti</i> ; u=30 °) |                | (h=329.5 <i>punti</i> ; u=12.5 °) |                |                | folio 114v |
| H                             | D <sub>T</sub> | H                             | D <sub>T</sub> | H                                 | D <sub>T</sub> | D <sub>E</sub> | D          |
| 100                           | 256            | 100                           | 261            | 87                                | 254            | 253            | 253        |
| 200                           | 339            | 200                           | 344            | 173                               | 345            | 340            | 337        |
| 300                           | 395            | 300                           | 398            | 260                               | 411            | 405            | 395        |
| 450                           | 454            | 450                           | 456            | 346                               | 463            | 453            | 451        |
| 600                           | 499            | 600                           | 499            | 433                               | 506            | 495            | 495        |
| 800                           | 543            | 800                           | 542            | 519                               | 544            | 533            | 534        |
| 1000                          | 579            | 1000                          | 574            | 606                               | 577            | 564            | 573        |
| Divergencia promedio: 0.9 %   |                | Divergencia promedio: 1.6 %   |                | Divergencia promedio: 0.8 %***    |                |                |            |

\*Para este autor un *punti* equivale a 0.0938 cm.

\*\*Aquí un *punti* es igual a 0.0944 cm.

\*\*\*Las divergencias se calculan respecto a los valores dados por Galileo.

Dado que el valor teórico de la proyección horizontal (D<sub>T</sub>) resulta de haber incluido el momento de inercia de la esfera, nuevamente es altamente improbable que Galileo se haya servido de un procedimiento meramente deductivo para arribar a las cifras de la última columna. Al carecer de una formulación clara de cómo y en qué condiciones fue llevado a cabo el experimento, no nos es posible decidir sobre alguna reconstrucción en particular. Pero, al ser muy similares –en cuanto a valores numéricos se refiere–, parece muy claro que los resultados vertidos en este folio tienen un origen de carácter experimental.

A pesar de su alta correspondencia numérica, al no reportar ni las alturas ni los ángulos de inclinación, el experimento de Galileo aún es incompleto; no ofrece una relación detallada, como actualmente se haría, de los factores esenciales involucrados en la investigación experimental. Pero se advierte su gestación: la búsqueda de una relación entre dos variables como la altura y la proyección horizontal; y la “prueba” para distintos valores (que muy pocos, de los escasos “experimentalistas” medievales habían intentado; muchas veces se conformaban con obtener uno o dos valores). El experimento es una sombra cuyos contornos empiezan a manifestarse.

Hasta este punto, Galileo había probado dos cosas: 1) la trayectoria que siguen los graves al caer –¿previa “adquisición de un *impetus*?”– es una línea parabólica (folio 81r); y 2) la distancia recorrida por el móvil a lo largo de un plano inclinado *no* es proporcional al tiempo, sino al cuadrado de éste (folio 107v).

**2.5.. El folio 116v: experiencia versus hipótesis**

En este folio, a diferencia del 114, se reporta un experimento más completo porque, además de las proyecciones horizontales (800, 1172, 1328, 1340 y 1500), está señalada otra serie de valores (300, 600, 800, 828 y 1000) que probablemente correspondan a las alturas desde las cuales fueron generadas las cinco trayectorias dibujadas (véase la Fig. 6). Aparece

también un valor denominado expresamente como la *altura de la mesa* (828 *punti*). Enseguida presentamos la reconstrucción del folio 116v [2].

Algo digno de atención es el hecho de que junto a los valores de las proyecciones horizontales se interponen otros (1131, 1306, 1329 y 1460) (véase la Fig. 6), los cuales –según Galileo– *debertan* de haberse obtenido en vez de aquéllos. ¿Qué significa esto? Una cosa: la confrontación de los resultados de carácter empírico con otros derivados de un análisis estrictamente matemático. Esta afirmación no es gratuita: los últimos valores se obtienen de aplicar la llamada *regla de la media proporcional* (RMP). Partiendo de los cálculos realizados por Galileo en este folio, se ha pensado que los obtuvo aplicando la RMP en la forma

$$D = 800(H/300)^{1/2}, \tag{13}$$

donde D es la proyección horizontal y H es la altura del plano. Mientras que 800 y 300 son, en el orden anterior, los valores de referencia (o iniciales) de las mismas variables.

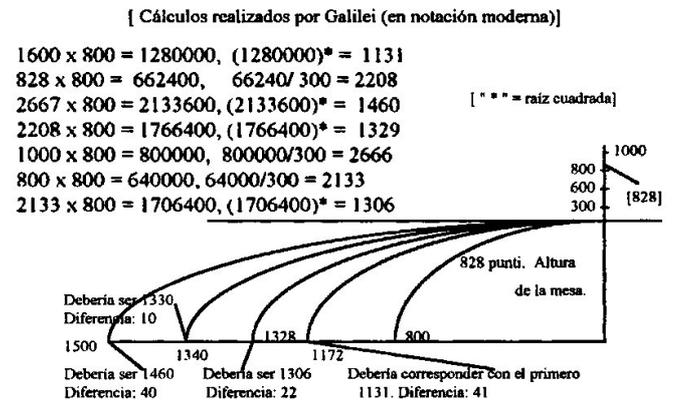


FIGURA 6. Detalles esenciales del folio 116v, en donde Galileo confronta los valores de las proyecciones horizontales obtenidas empíricamente con otros derivados de un análisis matemático.

Obsérvese que (13) permite conocer, en este caso, la variable independiente  $D$  no sólo en función de  $H$  sino también de dos valores que deben determinarse previamente. Siendo así, Galileo tuvo necesariamente que efectuar al menos una medición sin tener el respaldo de la RMP; debiendo hacerla con mucho cuidado, pues la precisión con la cual fuera calculada repercutiría en la estimación de las proyecciones horizontales subsecuentes. Por lo tanto, no se trata simplemente de un “experimento” cuyo objetivo se reduce a la verificación de la RMP, sino en ponerla a prueba y extender sus consecuencias dentro del esquema de la naciente física galileana.

No se sabe con certeza porqué Galileo partió de esta “hipótesis” (existiendo otras más simples que él pudo haber descubierto). Nosotros *suponemos* que fue una extensión de la relación (8) bajo las siguientes transformaciones: 1) tomar las alturas del plano ( $H$ ) desde las cuales rueda la bola a través del plano inclinado como si fuesen las distancias (ab ó ac) desde las que se aceleraría una bola cayendo en forma libre; y 2) considerar que las proyecciones horizontales ( $D$ ) son proporcionales a las velocidades alcanzadas ( $V_1$  ó  $V_2$ ) por una bola en la situación descrita anteriormente. Dejando de lado las dificultades antedichas, los resultados contenidos en el folio aparecen en la Tabla V. No existiendo discrepancia mayor al 4 % entre la teoría de Galileo y sus valores experimentales.

Si intentásemos reconstruir los resultados de la segunda columna proponiendo los valores de  $h$  y  $u$ , no lograríamos una concordancia más o menos aproximada como en los casos anteriores. Existen dos razones para suponer que lo descrito en el folio 116v no corresponde del todo a la situación mostrada en la Fig. 1. La primera se encuentra en el mismo: hay una línea paralela al nivel del suelo que sirve de acotamiento a las curvas; como si indicase que el movimiento terminal procede de un segmento no-inclinado, horizontal. La segunda se refiere al carácter de la hipótesis sometida a comprobación: no depende del ángulo de inclinación. Vale decir, como si la componente vertical de la esfera que viene rodando fuese *eliminada* al finalizar su recorrido a través del plano. Lo cual sólo se lograría agregando una pequeña cuña CB que convirtiera el movimiento inclinado de la esfera en un movimiento cuasi-horizontal. Con un dispositivo como el de la Fig. 7, S. Drake [2] reconstruyó experimentalmente los resultados del folio.

Debido al cambio de trayectoria –que provoca un movimiento de deslizamiento en la esfera que rueda sobre el segmento AB- la velocidad terminal en la cuña es, promedio, 4.7 % menor a la que se obtendría usando la Ec. (1). Además, el alcance horizontal  $D$  viene dado por

$$D = V_{terminal} T_h, \tag{14}$$

donde  $T_h$  es el tiempo de caída de la esfera desde que abandona el plano hasta su llegada al suelo. Bajo las condiciones mencionadas, presentamos los resultados de este autor en la Tabla VI.

TABLA V. El folio 116v.

| Altura del plano (H) | Proyección horizontal experimental ( $D_E$ ) | Proyección horizontal usando la RMP (D) | Error (%) |
|----------------------|--|---|-----------|
| 300                  | 800  | —                                       | —         |
| 600                  | 1172   | 1131                                    | 3.6       |
| 800                  | 1328   | 1306                                    | 1.7       |
| 828                  | 1340   | 1329                                    | 0.8       |
| 1000                 | 1500   | 1460                                    | 2.7       |

Los datos están en *punti*. El error promedio es de 2.20 %.

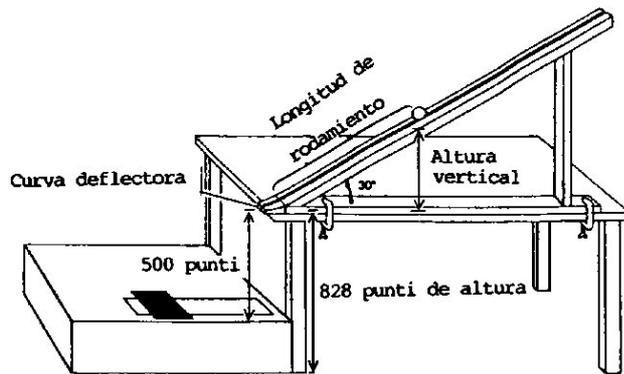


FIGURA 7. Dispositivo experimental utilizado por S. Drake para comprobar los resultados del folio 116v. En éste se utiliza una cuña para hacer que la bola abandone el plano inclinado con movimiento sólo horizontal.

La correspondencia entre las columnas IV y V es buena; el mayor error porcentual no rebasa el 3 %. En modo alguno, la colocación de un segmento casi horizontal al final del plano inclinado modifica la forma de la trayectoria. Así, la componente horizontal del movimiento no “se pierde” si se cambia su dirección. Resultado importante –que Galileo intuyó pero no desarrolló- porque fue la primera aproximación de la nueva física en el problema de la conservación del movimiento [20]. No abordaremos este problema. Sólo diremos que se debe a Pierre Gassendi la formulación, de manera explícita aunque no exclusiva, del moderno principio de inercia [21].

Finalmente, ¿el folio 116v encarna lo que muchos estaríamos tentados a denominar un *experimento moderno*? Sólo en forma parcial. Existen elementos que sí posee, tales como: 1) la alta coincidencia numérica entre los *datos* de Galileo y los resultados derivados de las reconstrucciones contemporáneas; 2) un señalamiento más preciso tanto de las variables obtenidas como de aquellas que concurrieron en el experimento; y 3) la confrontación de una hipótesis con los valores empíricos. Y otros que no forman parte de aquél, como la falta de una formulación inequívoca que reduzca el espectro de interpretaciones al momento de reconstruir los resultados. Pero su importancia radica, sobre todo, en que representa la culminación de una serie de experimentos que empezaron tratando de establecer la forma de la trayectoria

TABLA VI. Reconstrucción experimental de Drake del folio 116v.

| I                    | II                 | III                                     | IV                                   | V                                       | VI                     |
|----------------------|--------------------|---|--------------------------------------|---|------------------------|
| Altura del plano (H) | Velocidad terminal | Proyección horizontal teórica ( $D_T$ ) | Proyección horizontal exp. ( $D_E$ ) | Proyección horizontal en el f. 116v (D) | Error entre IV y V (%) |
| 300                  | 2022               | 805                                     | 808.8                                | 800                                     | -0.7                   |
| 600                  | 2860               | 1139                                    | 1144.0                               | 1172                                    | +2.8                   |
| 800                  | 3303               | 1315                                    | 1321.2                               | 1328                                    | +1.0                   |
| 828                  | 3360               | 1338                                    | 1344.0                               | 1340                                    | +0.2                   |
| 1000                 | 3692               | 1470                                    | 1476.8                               | 1500                                    | +2.0                   |

Las distancias están en *punti*; las velocidades en *punti/seg.*

seguida por un grave y terminaron por buscar relaciones matemáticas entre los elementos que conforman al fenómeno.

### 3.. Conclusiones

Del análisis de los folios y de las obras formales de Galileo, en particular de los *Discorsi*, podemos tener una mejor y más precisa imagen de su obra en lo que respecta a la conformación experimental en la física. Sin tener el respaldo de los folios, muchos de los principios vertidos en los *Discorsi* aparecen como demostraciones de carácter lógico-geométrico: lo matemático se impone y desplaza a lo real. Vemos cómo a través de la epistemología galileana, trata de establecer la correspondencia entre la teoría y las observaciones. Galileo está iniciando la construcción del experimento moderno, cuyas bases son la sustitución del espacio físico por el espacio euclidiano y de los cuerpos reales por los objetos geométricos, cuyas consecuencias son, entre otras, el movimiento en el vacío y el movimiento como un estado. Como siempre habrá una distancia entre el experimento y la teoría –y más si consideramos las posibilidades técnicas y materiales de la época-, Galileo especula de acuerdo con su convicción de que el movimiento se rige siguiendo proporciones geométricas, tal y como lo hace ver en los *Discorsi*. Pero, además, vemos cómo aparecen algunas deficiencias y omisiones en sus experimentos, como son el no considerar el momento de inercia de la bola rodando por el plano inclinado y hacer este experimento equivalente al de un bloque deslizándose sin fricción por el mismo, así como tampoco no considerar el efecto de la fricción, etc.

A pesar del idealismo platónico que algunos autores le achacan a Galileo, éste fue, de algún modo, consciente de que sólo abstrayendo las propiedades (matemáticamente hablando) de un *objeto real*, a fin de transformarlo en un *objeto geométrico*, se podía adecuarlo para un análisis de carácter cuantitativo. Para que, una vez cuantificado, el objeto –tal y como fue concebido en su punto de partida- se pudiera re-

elaborar, reflejando así tanto los elementos abstraídos como también aquéllos capaces de aportar nuevos elementos que, en primera aproximación, no se “encontraban” en el objeto *real*. Mas, una vez agotada la aportación de propiedades a éste, el nuevo modo de abstracción (y de ordenación) se consolidó, constituyendo así el lenguaje de la ciencia física.

Aquí cabe señalar que otra gran aportación de Galileo fue dar un gran valor a los datos de la observación y con ello haber roto con los prejuicios de la ortodoxia académica de la época que, apelando a la filosofía aristotélica, negaba el valor de la observación para la obtención del conocimiento.

Galileo se percató de la diferencia entre lo abstracto y lo concreto, pero supo igualmente reconocer las similitudes entre uno y otro. Atribuyendo su falta de correspondencia a la incapacidad para distinguirlos dentro del terreno que le es propio a cada uno de ellos. Porque...

“... siempre que aplicuéis una esfera material a un plano también material, estaréis aplicando una esfera imperfecta a un plano imperfecto y, por lo tanto, habréis de decir que no se tocan en un solo punto. Pero yo os digo que incluso en abstracto una esfera inmaterial –que no sea una esfera perfecta- puede tocar a un plano inmaterial –que no sea perfecto- no en un punto, sino en parte de su superficie, hasta aquí, pues, todo lo que sucede en concreto acontece igualmente en abstracto (...). Los errores no residen ... ni en la abstracción ni en la concreción ... sino en el hecho de que [el experimentador] no sepa hacer bien [la diferencia entre una y otra].”[22]

Del estudio de los folios se debe destacar lo siguiente:

En cuanto a la nueva física que estaba gestándose:

1. El móvil que parte de un plano inclinado conserva la “componente horizontal” de su movimiento; siguiendo, al abandonar aquél, una línea semiparabólica.
2. Aunque la fricción y la resistencia del aire están presentes en este tipo de movimiento, Galileo pudo soslayarlos [23] porque sus predicciones son, en gran medida, concordantes con los resultados experimentales, lo cual se observa mejor en el último folio. Es decir, si bien *no* realizó sus experimentos en el vacío (ni con materiales perfectos), las condiciones bajo las cuales trabajó se acercan a la categoría de *ideales*.
3. La equivalencia –en cuanto al tratamiento matemático se refiere- entre dos movimientos otrora distintos en esencia: el de caída libre y el que tiene lugar a lo largo de un plano inclinado.
4. El establecimiento de la proporción seguida, tanto en un movimiento “natural” como en uno “violento”, entre los tiempos y los espacios.
5. El esbozamiento –resultado del punto anterior- de la proporción que siguen los tiempos y las velocidades.

En cuanto al terreno epistemológico:

6. Contienen experimentos reproducibles, pues sólo precisan de planos *bien pulidos*, bolas *casi* esféricas y reglas para medir (todo lo cual se podía fabricar en los albores del siglo XVII).
7. Reconocimiento pleno de la importancia del análisis matemático en la comprensión física de uno de los fenómenos más complicados como lo fue el movimiento de los cuerpos.
8. Equilibrio en el naciente discurso científico: la especulación filosófica se vio limitada por el pensamiento matemático, que a su vez debería circunscribirse —ya no imponerse— a la descripción de la realidad física.
9. Planteamiento de hipótesis sobre la *realidad física*; ya no era sólo “salvar los fenómenos” como señalaba la tradición instrumentalista.
10. El movimiento deja de ser tratado como un *proceso* (potencia-llegar a ser) para convertirse en un *estado* de los cuerpos.

Por último, en el terreno histórico:

11. Fueron un puntal decisivo en la confección de una de las obras más representativas del pensamiento galileano: los *Discorsi*. Ejemplo de esto es que Galileo pudo resolver el problema del tiro de proyectiles —en un medio no-resistente— de manera estrictamente geométrica (véase Jornada Cuarta de esta obra).

Así pues, las investigaciones precedentes nos llevan a reformular la raigambre de las dos opiniones más difundidas sobre la obra de Galileo. Éstas son: 1) que en efecto

realizó experimentos y no tuvo mayor dificultad en concretarlos, apoyándose en ellos para construir —y eventualmente justificar— sus asertos físicos; y 2) que la base de su física no se encuentra sólo en la experiencia sino en el correcto análisis matemático, el cual puede sustituir —dirigiendo— a aquella, o bien, relegándola como simple puntal. Opiniones que, de alguna manera, reflejan la interminable lucha entre la teoría y la práctica, entre la razón y la experiencia, entre la investigación pura y la investigación aplicada. Los resultados de los folios antes presentados parecerían favorecer a la primera opinión. Sin embargo, creemos que lo anterior no es del todo correcto. Galileo —como buen estratega— supo adelantarse al experimento cuando no le era dable efectuarlo: haciendo similitudes para estudiar un fenómeno (p. e., entre la caída libre y el movimiento sobre el plano inclinado), sugiriendo experimentos y proponiendo mecanismos que dilucidaran un problema determinado (como en el caso del vacío); y especulando —con cautela— cuando el fenómeno rebasaba sus posibilidades experimentales (medición de la constante de gravedad).

En el siglo XVII los contemporáneos de Galileo no conocieron las investigaciones de los folios. No obstante, los *Discorsi* (1638) iniciarían, en las siguientes décadas, un profundo movimiento en el ámbito académico que derivó en la repetición (o perfeccionamiento) de muchos de los experimentos sugeridos en esa obra.

## Agradecimientos

Agradecemos a José R. Dorantes su valiosa ayuda en la preparación tipográfica de este trabajo, y al maestro Miguel Núñez Cabrera y al doctor Marco Antonio Martínez Negrete la revisión del manuscrito.

1. Véase I. B. Cohen, “A sense of history in science”, *American Journal of Physics* **18** (1950) 143.
2. Para la reconstrucción del folio 81r véanse: R.H. Naylor, “Galileo’s Theory of Projectile Motion”, *Isis* **71** (1980) 550; D.K. Hill, “Dissecting Trajectories. Galileo’s Early Experiments on Projectile Motion and the Law of Fall”, *Isis* **79** (1988) 646. Para la reconstrucción del folio 107v véase: S. Drake, “The Role of Music in Galileo’s Experiments”, *Scientific American* **233** (1975) 98. Para la reconstrucción del folio 114 véanse: S. Drake and J. MacLachlan, “Galileo’s Experimental Confirmation of Horizontal Inertia: Unpublished Manuscripts (Galileo Gleanings XXII)”, *Isis* **64** (1973) 291; S. Drake and J. MacLachlan, “Galileo’s Discovery of the Parabolic Trajectory”, *Scientific American* **232** (May, 1975) 102; D.K. Hill, “Dissecting Trajectories Galileo’s Early Experiments on Projectile Motion and the Law of Fall”, *Isis* **79** (1988) 646. Para la reconstrucción del folio 116v véanse: S. Drake and J. MacLachlan, “Galileo’s Experimental Confirmation...”, *op. cit.*, p.298; S. Drake and J. MacLachlan, “Galileo’s Discovery...”, *op. cit.*, p. 105; R.H. Naylor, “Galileo: Real Experiment and Didactic Demonstration”, *Isis* **67** 406; D.K. Hill, “Dissecting Trajectories...”, *op. cit.*, p. 663 y “Galileo’s Work on 116v: A New Analysis”, *Isis* **77** (1986) 285; W.L. Wisan, “Galileo and the Process of Scientific Creation”, *Isis* **75** (1984) 279. Para la reconstrucción del folio 152r véanse: S. Drake, *Galileo at Works* (The University of Chicago Press, Chicago, 1978) p.91; R.H. Naylor, “Galileo and the Problem of Free Fall”, *British for the History of Science*, **7** (1974) 107.

3. A Galileo se le atribuyen algunos experimentos que, según la opinión más generalizada, le sirvieron de sólido fundamento a su física. Ellos son, entre los de mayor importancia: 1) el lanzamiento de objetos pesados desde una torre para contradecir la opinión aristotélica de que éstos caen más rápido que los ligeros; 2) la deducción de la isocronía del péndulo con base en sus observaciones de las oscilaciones de un candelabro; y 3) el del plano inclinado que le permitió formular la relación entre los espacios y los tiempos. Respecto al primero, es muy difícil que Galileo lo haya repetido por no ser muy acorde con su posición de académico pisano; además, la formulación de este experimento no pertenece a él sino a Simón Stevin. En el segundo

- se pierde de vista una propiedad importante de las oscilaciones del péndulo: su anisocronía. De manera que la imagen popular de que con “observar las oscilaciones de un candelabro, Galileo dedujo que, independientemente de la amplitud, aquéllas se realizaban en un mismo tiempo”, es simplemente falsa. (La anisocronía fue descubierta por M. Mersenne). En cuanto al tercero, en efecto, llega a dicha relación pero no de la manera como lo haríamos actualmente (midiendo tiempos y espacios en intervalos arbitrarios), sino determinando los espacios a intervalos iguales del tiempo. Véase al respecto: A. Koyré, *Estudios de historia del pensamiento científico*, 4<sup>a</sup>. Edición (Siglo XXI Editores, México, 1982) p. 196.
4. Para los detalles del experimento sugerido a Galileo por el marqués véase: R.H. Naylor, “The Evolution of an Experiment: Guidobaldo del Monte and Galileo’s *Discorsi* Demonstration of the Parabolic Trajectory”, *Physics* **16** (1974) 323.
  5. Galileo no sólo disponía de un compás, él mismo diseñó uno y lo dio a conocer, gracias a la publicación de un manual en el año de 1606. Véase al respecto: G. Galilei, *Le Operazione del Compasso Geométrico et Militare*, Padua (1606).
  6. Koyré fue uno de los primeros historiadores en reconocer que “. . . el movimiento de una bola que rueda a lo largo de un plano inclinado, [Galileo lo hace] equivalente al de un cuerpo que se desliza (sin fricción) sobre el mismo plano. . .”. Tomado de A. Koyré, “An Experiment in Measurement”, *Proceeding of the American Philosophical Society*, **97** (2) (1953) 224.
  7. R.H. Naylor, “Galileo’s Theory of Projectile Motion”, *Isis* **71** (1980) 551.
  8. D.K. Hill, “Dissecting Trajectories. Galileo’s Early Experiments on Projectile Motion and the Law of Fall”, *Isis* **79** (1988) *op. cit.*, p. 646.
  9. Galileo Galilei, *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, (los *Discorsi*), Tercera Jornada, 2<sup>a</sup>. Edición (Edit. Nacional Madrid, 1981) p. 299.
  10. Galileo no sospechó la influencia de la fricción en sus construcciones, pero sí de otros factores como la resistencia del aire. Véase la Jornada cuarta de los *Discorsi*, *op. cit.* p.394.
  11. G. Galilei, *Consideraciones y demostraciones. . .*, *op. cit.* (Teorema I, Proposición I) p.384.
  12. El padre de Galileo “. . . Vincenzo Galilei, era un músico cuya originalidad y capacidad polémica fomentaron una revolución en la música al conjugar la práctica y la teoría (. . .). Experimentando con las longitudes y las tensiones de las cuerdas musicales, había descubierto una ley matemática que contradecía el supuesto fundamental de la teoría musical tradicional. Es muy probable que Galileo fuese testigo de esos experimentos y los tuviese luego presentes cuando buscaba una regla para las velocidades variables de los graves.” (Tomado de S. Drake, *Galileo at Works*, The University of Chicago Press (1978) p. 41). No es extraño que siendo músico su padre, Galileo heredase el gusto y la aptitud musicales.
  13. A pesar de la originalidad del procedimiento para medir el tiempo, en la Jornada tercera de los *Discorsi* (*op. cit.* p. 300) propuso otro método. Sobre la factibilidad de este último procedimiento véase Thomas B. Settle, “An Experiment in the History of Science”, *Science* **133** (1961) 19.
  14. G. Galilei, *Discorsi*, *op. cit.*, p.302.
  15. *Ibid.* Jornada tercera (Teorema II, Proposición II) p. 294.
  16. S. Drake, “The Role of Music in Galileo’s Experiments”, *Scientific American* **233** (1975) 98.
  17. G. Galilei, *Opere*, vol.X, p.115. Citado en A. Koyré, *Estudios galileanos*, *op. cit.*, p.76.
  18. G. Galilei, *Discorsi*, *op. cit.*, Jornada tercera, p. 302.
  19. *Ibid.* Jornada tercera, p. 276.
  20. La única referencia explícita de Galileo, en los *Discorsi*, sobre este principio de conservación del movimiento aparece en al Jornada tercera, Escolio de la Proposición XXIII, p.346. En esta formulación Galileo se aproxima al moderno principio de inercia. Sin tomar en cuenta los experimentos de los folios 81r, 107v, 114 y 116v, la afirmación galileana parece gratuita o resultado de una feliz especulación filosófica-matemática.
  21. P. Gassendi, *De motu impresso a motore translato*, París (1642), cap. X, p.38. Citado en A. Koyré, *Estudios galileanos*, *op. cit.*, p.296.
  22. G. Galilei, *Le Opere di Galileo Galilei*, Ed. a. Favaro & G. Vassura, Firenze, vol. VII, p.233.
  23. Galileo es consciente de la influencia que puede presentar la resistencia del aire. Véase *Discorsi*, *op. cit.*, Jornada cuarta, Proposición I, p.394.