53
24

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

"La conformación del Experimento en Física."

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

Físico

P R E S E N T A :

Yuri Posadas Velázquez

Director de Tesis:

Fís. José Luis Alvarez García

1996

TESIS

COMPLETA

VNIVERSIDAD NACIONAL
AVFNºMA DE
MEXICO

M. en C. Virginia Abrín Batule
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
P r e s e n t e

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo de Tesis: "La conformación del Experimento en Física"

realizado por Yuri Posadas Velázquez

con número de cuenta 8720037-7 , pasante de la carrera de Física

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis Propietario	FIS. JOSE LUIS ALVAREZ GARCIA	AGarcía
Propietario	DR. JUAN MANUEL LOZANO MEJIA	Juan Manuel Lozano
Propietario	FIS. JOSE ERNESTO MARQUINA FABREGA	
Suplente	DR. LUIS ESTRADA MARTINEZ	
Suplente	M EN E.S. FERNANDO FLORES CAMACHO	

Consejo Departamental de Física

DR. ROBERTO ALEJANDRO RUELAS MAYORGA
Coordinador de Licenciatura

" LA CONFORMACIÓN DEL EXPERIMENTO EN FÍSICA."

" LA CONFORMACIÓN DEL EXPERIMENTO EN FÍSICA."

" LA CONFORMACIÓN DEL EXPERIMENTO EN FÍSICA."

A mis padres.
A mis hermanos.

AGRADECIMIENTOS.

Por supuesto, estoy en deuda con todos los profesores de la Facultad de Ciencias que contribuyeron con mi formación académica; sólo espero no haberlos defraudado.

En especial, deseo reconocer al Prof. **LUIS BRISEÑO AGUIRRE**, que sabe enseñar matemáticas con rigor y gran paciencia.

También al Prof. **JOSÉ ERNESTO MARQUINA FÁBREGA,** quien sabe mostrar la historia y filosofía de la ciencia con exactitud, y, sobre todo, amenidad.

A mi director de tesis, Prof. **JOSÉ LUIS ÁLVAREZ GARCÍA,** por la gran paciencia que tuvo conmigo y con mis errores.

AGRADECIMIENTOS.

Por supuesto, estoy en deuda con todos los profesores de la Facultad de Ciencias que contribuyeron con mi formación académica; sólo espero no haberlos defraudado.

En especial, deseo reconocer al Prof. **LUIS BRISEÑO AGUIRRE**, que sabe enseñar matemáticas con rigor y gran paciencia.

También al Prof. **JOSÉ ERNESTO MARQUINA FÁBREGA,** quien sabe mostrar la historia y filosofía de la ciencia con exactitud, y, sobre todo, amenidad.

A mi director de tesis, Prof. **JOSÉ LUIS ÁLVAREZ GARCÍA,** por la gran paciencia que tuvo conmigo y con mis errores.

PROLEGÓMENO

Para un estudiante de física, no es fácil incursionar en los terrenos de la historia y la filosofía de la ciencia, si previamente no existe -por lo menos- un poco de interés en ellas. Pero no basta sólo el interés para aventurarse en este tipo de investigaciones, sobre todo si consideramos uno de los principales obstáculos que le *cierran* el paso al "aventurero": la falta de un concreto apoyo institucional. De este modo, el estudiante debe sufragar la mayor parte de los gastos que origine su investigación. Exceptuando, por supuesto, aquellos casos en los que el estudiante se encuentre dentro de un *proyecto de investigación.*

Lo anterior, junto con la poca familiaridad del estudiante de física respecto a las técnicas de investigación históricas y filosóficas (en su sentido más profundo), son factores que desalientan al futuro físico a emprender una tesis sobre estos temas. Así, a falta de una preparación académica en dicho rubro, el estudiante debe convertirse en autodidacta; supliendo, con lecturas e investigaciones libremente llevadas, sus carencias en materias no muy relacionadas con el perfil de su profesión.

Suponiendo que el estudiante salga avante de los óbices anteriores, y cuando se haya comprometido a realizar una investigación histórica (o filosófica), deberá tener la paciencia de Jonás para no desfallecer en la intrincada región donde coexisten las ideas de los creadores científicos y el mundo de interpretaciones alrededor tanto de aquéllos como de sus obras. Si *el aprendiz de físico* continúa su trabajo -es decir, acepta el hecho de permanecer en el interior de la ballena-, tendrá que resolverse a rastrear el pensamiento de los autores sobre algún tema determinado; tarea ardua porque entre ellos y nosotros se interponen muchas barreras: el lenguaje, el estilo literario, los prejuicios individuales y colectivos, las formas de concebir la ciencia, etc.

Pero ahí no termina el problema. Enseguida viene la valoración de las ideas en el contexto adecuado, la confrontación con autores del pasado y del presente, el *procesamiento* -labor ingrata- de las obras científicas para destacar los aspectos que consideramos importantes, el análisis de los asertos de cada autor...

Cuando Jonás -o nuestro estudiante de física- son finalmente escupidos por la ballena, el primero podrá dar alguna buena nueva, mientras que el segundo tendrá que bajar al *laboratorio del alquimista*, y elaborar, con la *materia prima* que ha acumulado (libros, artículos, notas, ideas, visiones, planteamientos, deseos contenidos) *La Gran Obra* o, en su defecto y en una perspectiva modesta, un Trabajo de Tesis.

Esto es, en apretada síntesis, parte de los periplos que el estudiante de física (no el buen Jonás) debe sortear para cristalizar un trabajo de filosofía o historia de la ciencia, y, de paso, *adquirir un grado* (titularse).

He aquí el trabajo; al lector le corresponde juzgarlo.

> " No basta con saber:
> también hay que aplicar;
> no es suficiente querer:
> también hay que obrar."
>
> Goethe.

Cd. de México, Junio de 1996.

CAPÍTULO PRIMERO

1. INTRODUCCIÓN

La historia del experimento físico, no es la Historia del Experimento Físico; es, en realidad, la historia de varios experimentos que convivieron durante algún tiempo bajo condiciones y objetivos muchas veces distintos. Sin embargo, la separación -y posterior desarrollo- de ciertas características presentes en algunos de ellos conformarían paulatinamente la esencia de lo que podríamos denominar como experimento moderno. Lo anterior no fue fácil, ni instantáneo; representó una verdadera revolución que modificó las formas tradicionales de hacer física y de concebir el conocimiento. Toda revolución se manifiesta principalmente- sin que se reduzca solamente a ello- en la lucha entre lo viejo y lo nuevo, entre los métodos tradicionales y los métodos innovadores; entre lo que se aferra a mantener una visión del mundo determinada y aquello que se empeña en cambiarla. El experimento, dentro de la ciencia física, no es la excepción; su conformación es un proceso donde podemos observar continuidad y ruptura, anquilosamiento y mutación, regresión y avance.

En el siglo XVII, la avanzada de los pensadores comprendió que el método escolástico y la especulación filosófica eran insuficientes para el estudio de la naturaleza. El pensamiento medieval, si bien no estaba agotado, fue incapaz de aportar nuevos elementos y métodos alternativos que permitieran entender el cúmulo de conocimientos nuevos que se abrían ante los pensadores del Renacimiento.Histórica y filosóficamente hablando, nos encontramos ante una profunda crisis que derivaria en un radical cambio epistemológico en el terreno de la física.

Galileo Galilei Ammannati (1564-1642) es una figura central durante este período de transición. Sus trabajos desencadenaron toda una serie de investigaciones -realizadas por algunos de sus contemporáneos- donde el experimento se va afinando y, a su vez, consolídanse algunas de las características más representativas que nos llegan hasta la actualidad. Las obras más conocidas de este pensador, nacido en Pisa, son dos: *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo tolemaico e copernicano* (Florencia, 1632) y *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (Leyden, 1638). 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 sólo hasta cierto punto.

En nuestro siglo XX, a partir de la década de los setentas, varios trabajos de Galilei -hasta entonces inéditos- son sacados a la luz; comenzando, con ello, un estudio que nos obliga a reconsiderar, en particular, dicho tipo de experimentos. Autores como Stillman Drake, Ronald Naylor, David Hill, etc. reconstruyeron las situaciones experimentales *insinuadas* por Galileo en tales folios, obteniendo una alta coincidencia entre los valores obtenidos por éste y aquellos que se derivan de sus reconstrucciones. Las investigaciones reportadas en los susodichos no representan elementos inconexos dentro de la obra galileana; por el contrario, contienen resultados fundamentales que se encuentran, expresados de otra manera, en una obra de gran importancia en la historia de la ciencia: los *Discorsi*. Esta obra influyó, como ya dijimos, en algunos de los experimentos proyectados por los coetáneos del pisano.

Galileo, como la mayoría de los revolucionarios dentro de la ciencia, se topó con dificultades de índole técnica para concatenar cabalmente los principios derivados de sus teorías con la realidad física. Es en este punto donde destaca el trabajo de otros autores que se dedicaron a verificar -y en algunos casos refutar- los asertos galileanos en temas tales como el movimiento de proyectiles, el movimiento pendular y la naturaleza del vacío.

Así, los *continuadores* de la obra galileana (Mersenne, Riccioli, Huygens, Berti, Boyle, Maignan, Torricelli, etc.) 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 eleboradas, que ellos mismos se encargarían de consolidar.

La obra del pensador pisano no es uniforme: mientras en algunos problemas -como el movimiento de proyectiles- llega a resultados que todavía se conservan, con un buen margen de precisión, en la actualidad, en otros, en cambio, -*v. gr.*, el problema del vacío- solamente traza líneas de investigación muy generales cuyo desarrollo y profundización no se deben a él.

Pero el trabajo experimental de aquellos autores es, en sí mismo, una transición hacia el experimento moderno, no su pináculo. Por eso, al encontrarse en conformación el experimento físico, descubriremos en sus obras muchos elementos que en la actualidad no incluiríamos dentro de lo que debe ser científico: las frecuentes divagaciones, la insistencia en "detalles intrascendentes", la obscuridad en la descripción de los dispositivos experimentales, la falta -en ocasiones- de interpretaciones matemáticas adecuadas al fenómeno en estudio, el estilo más literario que lógico y sintético para reportar los resultados de una investigación. Así, a veces, es preciso reconstruir el resultado derivado de sus trabajos para ubicarlo dentro del contexto que nos ocupa.

La física clásica -heredera de Galileo y de los *galileanos*- no tuvo un origen ciento por ciento racional, objetivo, lógico, impoluto... sino que en su gestación coincidieron la filosofía natural, las distintas metafísicas y el espíritu artístico del Renacimiento. En general, podemos afirmar con Alexandré Koyré que la ciencia moderna no surgió perfecta y acabada como Atenea de la cabeza de Zeus. El proceso fue más complicado.

En este trabajo rastreamos la influencia de la obra galileana en la conformación del experimento físico *moderno*.

En razón de lo anterior, nos proponemos mostrar -básicamente- tres cosas:

1) que los trabajos -hasta hace poco inéditos- vertidos en los folios galileanos fundamentan muchos de los asertos físicos vertidos en los *Discorsi*;

2) que su obra, semejante a una veta, despertó el interés de muchos autores por repetir los experimentos ahí descritos o confeccionar otros nuevos;

3) que este proceso llevó a la consolidación de algunas características típicas del experimento actual: búsqueda de precisión numérica, estudio sólo de aquello que sea medible, la proposición de principios (o modelos) que describan matemáticamente un fenómeno,el abandono (parcial) de la especulación metafísica, la creación de los dispositivos necesarios para verificar los resultados derivados de las teorías y (o) ahondar en el estudio de cualquier fenómeno físico, etc.

Intentaremos reconstruir la génesis del experimento físico *moderno* con dos problemas -en gran medida heredados de las culturas helénica y medieval- que para los pensadores del siglo XVII constituyeron un hito. A saber: los cuerpos que se mueven en forma libre o "impulsados" por alguna *causa* externa; y los fenómenos físicos relacionados con todas aquellas manifestaciones atribuidas a la naturaleza del vacío.

Para abordar este proceso histórico y filosófico -que derivó en una nueva actitud en la investigación de la naturaleza por parte de los antiguamente denominados *filósofos naturales*- decidimos dividir el contenido de la siguiente manera:

α) Capítulo Segundo. Revisión y análisis, a la luz de la teoría y de la experimentación modernas, de cinco documentos otrora inéditos (los folios 81r, 107v, 114, 116v y 152r) en los cuales Galilei estudia el movimiento de caída de un cuerpo a través de un plano inclinado, con lo cual llegó a establecer cuatro cosas. Ellas son: 1) la forma parabólica de la trayectoria seguida por los cuerpos que <<han recibido un *impetus*>>; 2) el descubrimiento de la correcta dependencia entre los tiempos y los espacios; 3) la *insinuación* de la misma entre el tiempo y la velocidad; y 4) la proposición de una relación matemática para describir una situación experimental que involucra dos tipos de movimiento. Resultados que, si bien no fueron conocidos en esta forma por sus contemporáneos, se encuentran plasmados en los *Discorsi*; obra en la cual se inspiraron muchos autores para continuar las investigaciones inconclusas de Galileo, o bien, para repetir algunos de los experimentos -o propuestas experimentales- ahí descritos.

β) Capítulo Tercero. Se abordan dos problemas: el movimiento de caída libre y el movimiento pendular. El primero de ellos desde los primeras propuestas teóricas por parte de Galilei hasta la forma de cuantificar uno de los resultados más inmediatos de aquéllas: la existencia de una <<constante de proporcionalidad entre los tiempos y los espacios>> (que ahora denominamos como la *constante de aceleración gravitacional*). Mientras que, en el segundo problema, se parte de las investigaciones de este mismo autor que pretendía demostrar la isocronía de las oscilaciones en un péndulo; abriendo también, en este caso, un nuevo campo de estudio en el cual se detuvieron algunos de sus coetáneos (Mersenne, Riccioli, Huygens, etc.) que emplearon al susodicho, sin más, como un *reloj* para determinar <<el espacio recorrido por los graves al caer en un tiempo determinado.>>

γ) Capítulo Cuarto. Se describen y analizan aquellas investigaciones que, inspiradas en gran parte por el pensador italiano, derivaron en una serie de experimentos cuyo objetivo inicial fue la determinación de la existencia (o inexistencia) del vacío. Experimentos que conducen a sus realizadores -Torricelli, Maignan, Pascal, Boyle, etc.- a la gradual conformación de una nueva *física del vacío*; cada vez más alejada de la metafísica y de la filosofía tradicionales, pero más cercana al moderno espíritu de medición. Espíritu manifestado en la mayor originalidad en el estudio de los fenómenos anteriormente atribuidos al *horror vacui* y en el descubrimiento de otros nuevos problemas que precisaron de un profundo y acuisioso análisis matemático para ser comprendidos a cabalidad. Ello fue resultado de un radical cambio en la epistemología tradicional, así como del refinamiento progresivo en los instrumentos de medición.

Conviene aclarar que abordamos sólo algunos ejemplos representativos de *La Conformación del Experimento en Física*; en ninguna forma pretendemos agotar una veta tan extensa y compleja, con tantas vertientes y posibilidades de interpretación, como es la historia del experimento físico.

Por ejemplo, no atendemos el perfeccionamiento en las ténicas de medición aplicadas a la astronomía, de las cuales se valieron pensadores de la talla de Tycho Brahe para realizar, con rigor y acuidad, investigaciones de carácter experimental que apoyaron las nuevas teorías acerca del Universo. Baste decir que para Johanes Kepler (1571-1630), astrónomo alemán, los resultados obtenidos por su maestro danés fueron un puntal decisivo para sus tres famosas leyes planetarias.

Si bien la confección de nuevos instrumentos de precisión fue determinante, no debemos soslayar la destreza del propio experimentador. Una buena máquina para escudriñar el mundo solamente le sirve a quien la sepa usar...

Tampoco seguimos el desarrollo de los instrumentos ópticos que ampliaron la visión macro y microscópica del ser humano; inaugurando, así, una nueva manera de estudiar el Universo, de *experimentar* el mundo de los fenómenos físicos. Trabajos como los de Hans Lipperhey, Zacharias Jansen, y los propios de Galileo y Kepler en la técnica y la teoría óptica, sin olvidar -por supuesto- las investigaciones sobre la naturaleza de la luz y las características de los rayos luminosos realizadas por René Descartes, Francesco Grimaldi, Olaus Römer, Erasmus Bartholin, Willebrod Snell, Robert Hooke, Christiaan Huygens y el mismo Isaac Newton en su

Óptica (1704), también entran en la historia del experimento físico, aunque no sean abordados en este trabajo.

En un sentido aún más riguroso, una historia *completa* del experimento físico también debería incluir los trabajos de William Gilbert en el terreno del magnetismo, las primeras mediciones sobre la forma y las dimensiones físicas de la Tierra, etc.

Y aún en la aplicación de ciertos principios físicos, algunos años más tarde, en ciencias relativamente lejanas como la química, la medicina, la geología, y lo que más tarde sería la biología. En seguida daremos algunos ejemplos.

El descubrimiento de la variación sufrida, en función de la altitud y de la temperatura, por una columna de mercurio encerrada en una ampolla de vidrio, no tardó mucho tiempo en tener sus aplicaciones prácticas en dos instrumentos de medición: el barómetro (que permitió a los geólogos determinan la altura de valles, montañas, etc) y el termómetro (el cual facilitó a los médicos conocer las variaciones de la temperatura corporal).

Otro caso digno de atención son los estudios sobre la forma de la Tierra que se efectuaron hacia finales del siglo XVII. Se trataba de verificar si, en concordancia con las teorías de Huygens y de Newton, la constante de aceleración gravitacional variaba con la latitud terrestre. Así, aproximadamente de 1670 a 1690, varios investigadores como Picard, Mouton, Richer, De la Hire, Halley, Roemer, Varin, los jesuitas Fontaney y Thomas, se desplazaron a distintos puntos del globo térraqueo para constatarlo. ¿De qué instrumento se valieron? Del mismo que Galileo comenzó a estudiar a principios del referido siglo: del péndulo.

Baste lo anterior para señalar que la física sigue distintos derroteros, y, por lo tanto, se desarrolla de manera desigual. Este proceso también entra, ineluctablemente, en la conformación del experimento físico.

Aún la relación de la ciencia que surge con los individuos que la crean, son parte de esa conformación.

Todo lo anterior nos impele a enfatizar que en *La Conformación del Experimento en Física*, solamente se rastrea una parte de la historia del experimento físico; de ningún modo se intenta caracterizarlo en su totalidad. Es por eso que decidimos abordar aquellos experimentos que, a nuestro juicio, evidencian de una manera más clara el cambio de actitud intelectual que aportó nuevos elementos para el estudio de la naturaleza. Actitud, por otra parte, muy representativa del proceso desencadenado por la Revolución Científica del siglo XVII.

CAPÍTULO SEGUNDO

LA OBRA DE GALILEO GALILEI: ENTRE EL EXPERIMENTO PENSADO Y EL EXPERIMENTO REAL.

" Ni hay ni puede haber más que dos vias para la investigación y descubrimiento de la verdad: una que, partiendo de la experiencia y de los hechos, se remonta en seguida a los principios más generales...que adquieren una autoridad incontestable... y otra, que de la experiencia y de los hechos induce las leyes, elevándose progresivamente... hasta los principios más generales ... Esta es la verdadera via; pero jamás se la ha puesto en práctica."

Francis Bacon, *Novum Organum*, Libro Primero, af. XIX., 1620.

2. 1. EL MOVIMIENTO DE PROYECTILES : BREVE RESEÑA HISTÓRICA

El movimiento de proyectiles siempre fue tema de reflexión para los filósofos de la Antigüedad. Encontrar la causa y la naturaleza del movimiento ocupaban, sobre todo, su atención. Sin embargo, nunca obtuvo una respuesta satisfactoria la relación existente -en caso de haberla- entre el reposo y el movimiento. Uno de los primeros intentos por resolver este problema se debe a Zenón de Elea (490-?) quien, por medio de sus *aporías*, demuestra la imposibilidad del movimiento.[1] No obstante, es en la obra de Aristóteles (384-322 a. n. e.) donde por vez primera se expone la ciencia física de manera lógica, ordenada y con miras a formar un sistema filosófico-natural completo; síntesis de todo conocimiento humano. En su obra titulada *Física*, presenta dos de sus más importantes postulados acerca del movimiento[2] : 1) la velocidad de un cuerpo es directamente proporcional a la fuerza externa que se le aplica, e inversamente a la resistencia del medio sobre el cual se mueve; y 2) para dos cuerpos que caen libremente sobre el mismo medio, la relación entre sus pesos determina la proporción entre sus velocidades.

Alrededor del siglo VI, el neoplatónico Juan Filopón rechazó los argumentos aristotélicos, proponiendo[3] : 1) que el peso del cuerpo no determina la velocidad del proyectil a través del medio sobre el cual se mueve; y 2) que la velocidad de los cuerpos que caen a través del aire no es proporcional a sus pesos, porque cuando un cuerpo pesado y otro ligero se dejan caer desde la misma altura, la diferencia entre sus tiempos de caída es mucho menor a la de sus pesos. Para Filopón, la velocidad de los proyectiles es proporcional a la diferencia entre la fuerza motriz y la resistencia del medio. Su propuesta se dejó sentir en pensadores de la talla de Avicena y Averroes.

Después de un largo bache histórico, en el siglo XIII los pensadores europeos conocieron los trabajos de Aristóteles; comenzándose, de esta manera, el estudio lógico de los fenómenos naturales. Uno de los resultados de ese estudio es que, hacia el año de 1328, Tomas Bradwardine (1290-1349) propuso[4] una variante a la <<ley>> de Aristóteles, que en la actualidad se interpreta de la siguiente manera: la velocidad de un cuerpo que se mueve es proporcional al logaritmo del cociente entre la fuerza externa aplicada y la resistencia del medio sobre el cual se desplaza. Así, cuando aquélla fuese igual a esta última, el cuerpo debería permanecer en reposo.

El estudio del movimiento -y de los procesos de cambio en general- llevó a los filósofos nominalistas de Oxford a deducir una fórmula acerca de la tasa uniforme de cambio: la llamada *regla de Merton*. Atribuida a Willian Heytesbury, sentencia que: "si un cuerpo se mueve con *movimiento uniformemente disforme* (movimiento uniformemente acelerado), la distancia recorrida será la misma que la recorrida por un móvil que se mueve, durante el mismo tiempo, uniformemente a una velocidad igual a la de un cuerpo cuando éste ha dejado pasar la mitad del tiempo."[5] Enunciado de suma importancia porque se columbraba el camino hacia la cuantificación dentro de la física. Además, se postula un concepto -el movimiento uniforme- que prestaría no pocos auxilios a Galileo y sus coetáneos en la formulación de nuevos principios físicos. Pero, a pesar de ello, en este siglo los problemas de índole físico se circunscribieron al ámbito académico, no perseguían un fin práctico, una descripción de lo *real*; eran problemas *secundum imaginationem* (conforme a la imaginación).

La física de la Edad Media tuvo especial interés en dos tipos de movimientos: el de caída libre (o *natural*) y el de los proyectiles disparados *violentamente*. En torno a éstos giraban varias opiniones: unos explicaban la aceleración de los cuerpos no por atracción natural, sino por la existencia de un *impetus* que, a la manera de un motor, acompañaba al cuerpo hasta la terminación de su movimiento (Buridan) -pudiendo llevarlo, también, en línea recta (Leonardo)- ; otros, que no aceptaban la existencia de fuerzas impresas en el móvil, argumentaron que éstos movíanse por sí mismos (Ockham); y algunos más creyeron en la existencia de un *impetus* preexistente -no de uno de carácter adventicio- como responsable de la aceleración sufrida por el cuerpo y del consecuente aumento en la velocidad (Bonamico).

En el siglo XVI, la situación cambia. Por una parte, las discusiones dejan el ámbito estrictamente lógico para ser probadas en el mundo físico. Por otra, la física del *impetus* adquiere su expresión más acabada en Benedetti. Según él, "todo cuerpo grave, ya se mueva natural o violentamente, recibe en sí un *impetus*, una impresión de movimiento, de forma que, separado de la virtud motriz, continúa moviéndose durante cierto tiempo." [6]

Acicateados, además, por la construcción de nuevos y mejores cañones -y por el aumento en la precisión de los disparos-, los físicos y matemáticos de esta centuria empiezan a estudiar las trayectorias de los proyectiles. Las observaciones realizadas por Leonardo Da Vinci, lo llevaron a suponer que aquéllas dividiánse en tres partes: una sección -la primera- donde prevalecía un movimiento rectilíneo por efecto del *impetus* predominante; otra -la central- en la cual mezclábase la acción de la gravedad con aquél; y una más -la culminación- en la que el móvil veíase sometido al movimiento natural, vale decir, de caída libre. El resultado de lo anterior era una trayectoria rectilínea al salir del cañon, redondeada cerca de la cúspide y cuasi-vertical hasta llegar a tierra en su extremo final. No obstante, la explicación más común consistía en suponer que, conforme el *impetus* se agotaba, la trayectoria original combábase por efecto de la gravedad, dando origen a caprichosas curvas. Empero, aunque no llegó a conocerse la forma *real* de la trayectoria, la inquietud de muchos pensadores ahincó otros estudios que tuvieron tal propósito, y de los cuales deriváronse importantes observaciones como las siguientes: el alcance máximo de un proyectil se logra cuando el cañón sustenta 45° sobre la horizontal (Tartaglia); las trayectorias no son del todo rectilíneas al principio o al final de su movimiento

(Lucas Cranach); el alcance aumenta conforme disminuye -hasta cierto límite- el ángulo de inclinación; que, en alguna parte, el móvil parecía sufrir más la influencia de la gravedad que la del *impetus* violento adquirido por aquél (Cardano). Si bien constituían observaciones aisladas, representaron un avance respecto a la actitud de los pensadores medievales. Primeramente, porque se trató de recabar información acerca del comportamiento *realmente observado* en el móvil. En segundo lugar, dejaron ver la amplia brecha existente entre la mera especulación filosófica y la realidad física de un fenómeno tan complicado como el movimiento.

Grosso modo, éste era el panorama con el cual se topó Galileo a finales del siglo XVI. No intentaremos reconstruir la génesis del pensamiento galileano -que ha sido realizado en otras partes y de manera extensa[7] -; nos detendremos en la reconstrucción de algunos experimentos vertidos en cuatro documentos póstumos: los folios 81r, 107v, 114 y 116v. En los cuales -como veremos más abajo- resuelve tres problemas: la forma geométrica de la trayectoria; la proporción entre tiempos y espacios para un cuerpo que se mueve sobre un plano inclinado; y la conservación del movimiento horizontal. Resultados que encontramos -abierta o soterradamente- en la obra madura del pensamiento galileano: los *Discorsi.* Nuestra opinión es que muchos de los principios ahí establecidos adquieren su fundamento empírico a partir de las investigaciones plasmadas en los supradichos folios. Es decir, Galileo *no* construyó su física solamente mediante argumentaciones lógico-matemáticas; también realizó experimentos, mas no del modo en que lo afirmaron (y lo afirman) muchos historiadores o divulgadores de la ciencia. [8]

No obstante, a pesar de la importancia *per se* que los folios tienen, no sintetizan lo que ahora nos sentiríamos tentados a denominar un *experimento moderno*; existen, es verdad, algunos de estos elementos, pero Galileo no puede separarlos porque se halla inmerso en una época de transición donde a veces se impone la continuidad y en otras la ruptura, lo filosófico a lo físico (o viceversa), el discurso a los *hechos* abstraídos de la realidad física (o los *hechos* construidos al discurso), lo viejo (nuevo) sobre lo nuevo (viejo) ...

En este capítulo (y en los siguientes) tendremos ocasión de observar cuáles de los componentes más representativos de lo que podríamos llamar el embrión del *experimento moderno*[9] se encuentran en la obra galileana, y cuáles no. Ejemplos de los primeros: 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 los produjo>> (folios 114 y 116v, en particular); y proposición de los dispositivos adecuados -así como el *modus operandi* - para confirmar la validez de la teoría en la práctica (existencia del vacío, *vid.* cap. 4). Huelga hacer una advertencia: en este trabajo no se pretende definir lo que es *el experimento moderno*; no, simplemente se intentan resaltar aquellos aspectos que de uno u otro modo han pasado a ser elementos inseparables de aquél. Aspectos que, para ser comprendidos, deben observarse dentro del contexto histórico-filosófico desde el cual nacieron y se fueron desarrollando.

En cambio, existen algunos otros que caen fuera de la experimentación moderna: postulación de principios -los cuales no han sido verificados- para construir teorías cuyas consecuencias son de vital importancia en la práctica (isocronía del péndulo, *vid.* cap. 3); 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 aceleración gravitacional, *vid.* cap. 3); mezcla de los discursos físico y filosófico (los *Discorsi*, p. e.); y prejuiciamiento respecto a una hipótesis, sin tener las bases suficientes para hacerlo (*vid. infra* la carta a Paolo Sarpi).

Pasemos en seguida al análisis de los folios antedichos.

2.2. LOS EXPERIMENTOS GALILEANOS SOBRE EL MOVIMIENTO DE PROYECTILES.

Para derivar propiedades acerca del movimiento, y con ello fundamentar su dinámica, Galileo necesitaba conocer la trayectoria seguida por los cuerpos al caer (en forma <<natural>> o <<violenta>>) o bien, demostrar empíricamente algunas proposiciones que le dieran solidez a los principios con los cuales habría de construir su nueva ciencia.

Alrededor del año 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[10]. De este modo

> " ... si uno arroja un balón con una catapulta o con artillería... o por algún otro medio, sobre la línea horizontal y tiene la misma trayectoria [tanto] cayendo como ascendiendo, y su forma es la misma que se obtiene al considerar la línea horizontal, [podremos afirmar que se trata de un movimiento compuesto por] el natural y el [generado por] la fuerza, y éste es una línea la cual tendría forma similar a una parábola o a una hipérbola... El experimento [que propongo realizar para decidir acerca] de este movimiento puede hacerse tomando un balón entintado y arrojarlo sobre el plano [inclinado] de una tabla [,] el cual sea cuasiperpendicular a la horizontal. Aunque si bien el balón rebota [a lo largo del suelo, una vez que cae] produce [marcas] de las cuales pueden verse claramente sus subidas y sus bajadas. "[11]

Traducida a términos modernos, la propuesta de Guidobaldo es: lanzar una bola entintada a lo largo de un canal inclinado OC, fijándose en la proyección horizontal resultante una vez que aquélla abandona el plano y cae al suelo (fig. 1). Este planteamiento experimental tuvo mucha influencia en las investigaciones posteriores de Galileo.

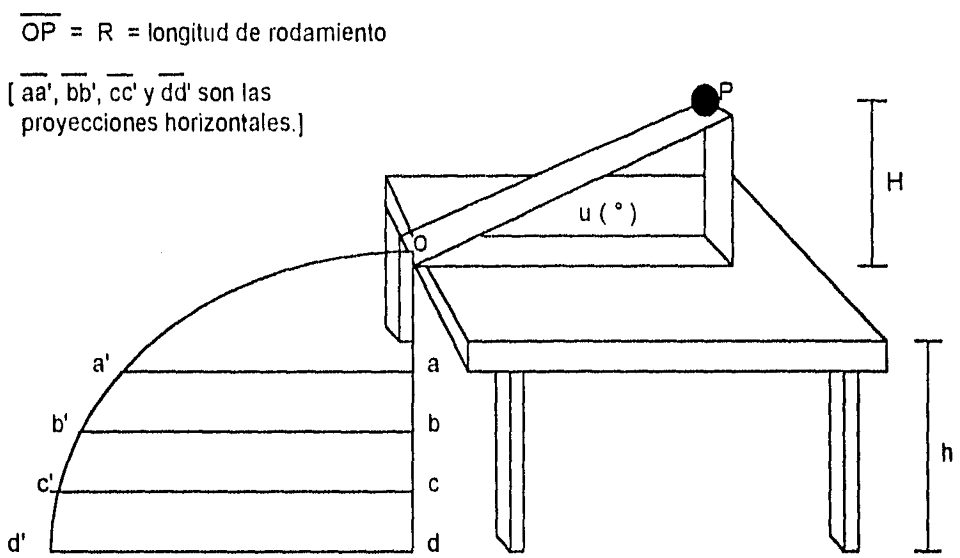


Fig. 1. Reconstrucción del dispositivo experimental sugerido por Guidobaldo a Galileo.

2.2. 1. EL FOLIO 81r : EL ESTABLECIMIENTO DE LA TRAYECTORIA PARABÓLICA PARA LOS GRAVES QUE CAEN.

En el año de 1603, Galileo intenta repetir la experiencia de Guidobaldo. Se supone que aquél utilizó un plano de altura H e inclinación u, emplazado a una distancia h del suelo. El problema 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 (véase fig. 1).

En principio, esto no entraña ninguna dificultad insalvable que Galilei no haya podido resolver con los medios a su alcance; pueden obtenerse mediciones precisas disponiendo de una buena regla o *compás*.[12]

Por otra parte, estimar el alcance de la bola una vez que ésta sepárase del plano inclinado, tampoco presenta mayor complejidad: basta emplazar, perpendicularmente a una de las patas de la mesa, una tabla de madera a distintas alturas respecto a aquélla. Esto es: la primera vez que la bola sea soltada desde el punto P, la tabla se coloca en el punto a; en una segunda oportunidad, se fija la tabla en un punto b; etc. Con esto pueden obtenerse deflexiones horizontales de distinta magnitud dejando rodar la bola desde una misma altura.

Sin embargo, ¿cómo sabemos si en realidad se trata de un experimento real? o ¿fue solamente un experimento pensado? Es difícil responder a estas preguntas, pero puede buscarse una solución realizando (o proponiendo) una reconstrucción experimental (o teórica) del problema y comparando los resultados que se deriven de ésta con aquellos presentados por Galileo en este folio (véase fig. 2).

Es una opinión muy difundida que, en caso de haber realizado experimentos, el pensador pisano 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 comenzábase 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 ruede 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 cumplen 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.

Ahora bien, ¿la existencia de fricción entre la bola y el canal inclinado no fue óbice para que Galilei tuviera éxito en un experimento como el que le planteó su amigo el marqués Guidobaldo del Monte? No; recordemos, por principio de cuentas, que un cuerpo esférico rueda gracias a la existencia de fricción. En segundo lugar, si se cumplen algunas de las condiciones para evitar el deslizamiento (*vid. supra*), se puede realizar un experimento adecuado (históricamente hablando).

Aunque Galilei no era consciente de la influencia *exacta* de los factores antedichos (la fricción y el deslizamiento), sus investigaciones de carácter experimental poseen un margen de error muy pequeño. ¿Intuición de visionario? ¿Suerte? Nosotros no podemos decidir sobre esta cuestión...

Regresando al experimento sugerido por el marqués a Galilei, 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.*[13] De no ser así, tendríamos que considerar otros factores tales como el ancho del canal realmente usado por Galileo, los materiales de su bola y de su plano inclinado, etc. Todo lo cual puede hacerse; mas no es nuestro objetivo.

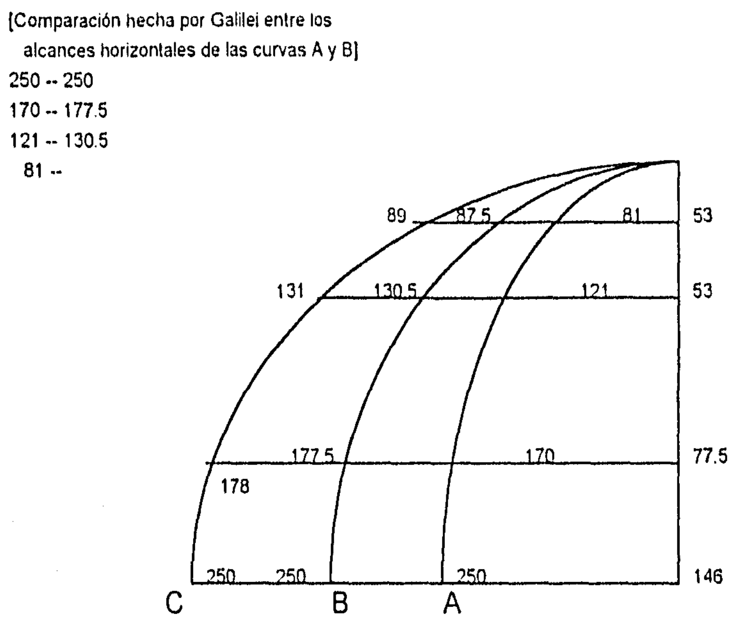


Fig. 2. Transcripción parcial del folio 81r (detalles esenciales).

Tenemos tres razones para ello: 1) por una parte, no conocemos exactamente ni las dimensiones de los aparatos usados por Galilei; 2) no se pretende reproducir el experimento galileanos *tal y como los haríamos 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 es

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

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

$$(V \operatorname{sen} u)\, T_n + (g/2)\, T_n^2 = h_n \quad (n = 1, 2, 3, 4) \qquad \ldots(2)$$

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

$$D_n = (V \cos u)\, T_n \qquad \ldots (3)$$

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[14] y D. H. Kill[15] 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 fig. 1). En seguida presentamos tales reconstrucciones.

TABLA I : RECONSTRUCCIÓN EXPERIMENTAL DE NAYLOR [16]
(FOLIO 81r)

Altura (h_n)	Curva A (R= 307.2 ; u= 20.5°)		Curva B (R= 2341.1 ; u= 10°)		Curva C (R= 10339 ; u= 3.5°)		Curva C (R= 7021.2 ; u= 7°)	
	Galileo	Naylor	Galileo	Naylor	Galileo	Naylor	Galileo	Naylor
329.5	250	250	250	250	250	250	250	250
183.5	170	171	177.5	178	178	179	178	184
106.0	121	124	130.5	130	131	132	131	126
53.0	81	80	87.5	88.5	89	89.5	89	81.5

* Los datos de ésta -y de las tres tablas siguientes- están en *punti* (1 *punto* = 0.0944 cm).

TABLA II : RECONSTRUCCIÓN EXPERIMENTAL DE HILL[17]
(FOLIO 81 r)

Altura (h_n)	Curva A (R= 29 cm ; u= 20.5°)		Curva B (R= 221 cm ; u= 10°)		Curva C *
	Galileo	Hill	Galileo	Hill	Galileo
329.5	250	244	250	250.5	250
183.5	170	173.5	177.5	178	178
106.0	121	124.5	130.5	126	131
53.0	81	79	87.5	81	89

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

En las siguientes tablas -usando las ecuaciones (1), (2) y (3)- hemos calculado los valores teóricos de la proyección horizontal (D_T), comparándolos con los resultados experimentales obtenidos por dichos autores (D_n). Los errores porcentuales entre D_T y D_n también se han consignando.

TABLA III : COMPARACIÓN CON LOS VALORES TEÓRICOS.

Altura (h_n)	Valor Teórico D_T	Naylor D_n	Error (%)	Hill D_n	Error (%)	Galileo D_n	Error (%)
Curva A (R = 307.2 *punti* ; u = 20.5 °)							
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 = 234.1 *punti* ; u = 10 °)							
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 *punti* ; u = 7 °)							
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
Curva C (R = 10338 *punti* ; u = 3.5 °)							
329.5	780.2	750	- 3.9			750	- 3.9
183.5	545.7	528	- 3.2			525.5	- 3.7
106.0	401.8	386	- 3.9			382.5	- 4.8
53.0	269.2	258	- 4.2			257.5	- 4.3

Obsérvese en la tercera tabla que, en ningún caso, el error de las columnas cuarta, sexta y octava rebasa el 6% respecto a los valores numéricos de la segunda. Si bien Galileo no dejó constancia de haber empleado un plano inclinado para generar las trayectorias dibujadas por él en el folio 81r, es conveniente recordar la sugerencia que tres años atrás recibió de Guidobaldo: lanzar una bola entintada a través de un canal inclinado y registrar las marcas producidas por aquélla al abandonar el plano y chocar contra el suelo. Además, tres décadas después nos describe -por conducto de su vocero Salviati- un experimento acerca del plano inclinado.[18] Lo anterior, junto con la idea de Guidobaldo, nos dan bases para 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.[19] 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 aquélla.[20]

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; disponia solamente de una serie de valores que, geométricamente, *se ajustan* a la trayectoria de marras. 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." [21]

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... Con base en lo anterior, una dificultad salta a la vista en la reconstrucción de la curva C: ¿es factible que Galileo haya podido disponer de un canal de siete (o diez) metros? Respondemos afirmativamente. Si bien en esa 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).

Muestra de que el folio 81r no reporta una simple <<experiencia>> aislada, carente de objetivos, es que las investigaciones del pisano -concernientes al movimiento- no quedaron anquilosadas: en los siguientes folios el problema es replanteado, analizado y reelaborado.

Muestra de que el folio 81r no reporta una simple <<experiencia>> aislada, carente de objetivos, es que las investigaciones del pisano -concernientes al movimiento- no quedaron anquilosadas: en los siguientes folios el problema es replanteado, analizado y reelaborado.

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...

Quizá podríamos creer que, en los albores del siglo XVII, experimentos de este tipo no se realizaban con -por lo menos- 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 insalvable 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 rayana en lo artístico.

2.2.2. 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.[22]

Se supone que, para su consecución, empleó un plano inclinado de 60 *punti* de altura por algo más de 2000 *punti* de longitud. Antes de proseguir, señalaremos las tres formas que pudo emplear Galileo al efectuar el experimento (ver figs. 3 y 3a) : 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...); o 3) consignar distancia (tiempo) en unidades de tiempo (distancia) arbitrarias. Es lógico que, en razón a su dificultad, la tercera haya sido rechazada por Galileo. No es la única;

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...[23]

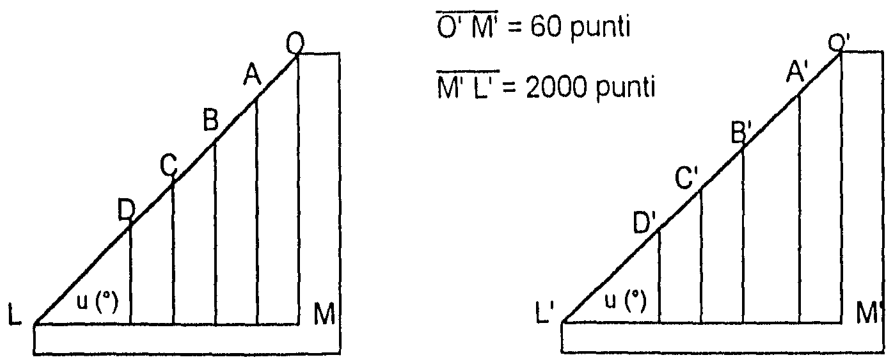


Fig. 3. Se fijan intervalos de distancia iguales entre sí, midiendo el tiempo que el móvil tarda en recorrerlos (ver texto).

Fig. 3a. Medir mediante múltiplos de tiempo los intervalos de distancia recorridos por el móvil (ver texto).

En seguida reconstruiremos este experimento. Disponiendo de un canal inclinado O'L (fig. 3a), 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 Galilei, 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*.[24]

Los resultados alcanzados por Galileo - columnas 1, 2 y 3- se presentan en la siguiente tabla.

TABLA IV : DATOS CONSIGNADOS EN EL FOLIO 107v.[25]

Columna 1 " t^2 "	Columna 2 " t "	Columna 3 D*	Columna 4 D*	[Divergencia entre 3 y 4] (%)
1	1	33	33	--
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 la distancia recorrida sobre el plano -D- están en *punti*.

En la columna 2 se encuentra representada la serie de los números naturales; mientras que, en la primera, la serie correspondiente a los cuadrados de aquéllos. La columna 3 contiene los valores de la proyección horizontal (ab, ac... an). 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 tómanse como iguales *-conceptualmente hablando-*, entonces las propiedades que se descubran para uno de ellos se tornan 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 recorre el móvil por otro conjunto de números, el problema redúcese a buscar una relación matemática (o serie numérica) entre ésta y el tiempo.

Razón por la cual, 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, incrementa 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 Galilei -aunque de otra manera- en los *Discorsi*.[26] ¿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 ajustábanse también a la llamada *proporción doble* (*vid. infra* sección 2. 2. 3.) 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 dinámica. 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." 27

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 describiesen la realidad física se iniciaba, preparando el terreno a un espíritu de matematización generalizada que habría de encarnarse tanto en sus seguidores más cercanos como en otros de sus coetáneos.

Finalmente, pasaremos a la reconstrucción experimental del folio 107v. S. Drake[28] y R. H. Naylor[29] realizaron -independientemente- un experimento destinado a verificar si es dable 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 similar al de la fig. 1, llegaron a los resultados que presentamos en la siguiente tabla.

TABLA V : EXPERIMENTOS DE DRAKE Y NAYLOR [30]

(VERIFICACIÓN DEL FOLIO 107v)

	Drake				Naylor		
Distancia* (*punti*)	Tiempo (s)	Distancia (*punti*)	Diferencia (*punti*)	Incertidumbre (*punti*)	Tiempo (s)	Distancia (*punti*)	Diferencia (*punti*)
33.0	0.55	32.9	+ 0.1	1.8	0.55	33	--
130	1.10	131.4	- 1.4	3.7	1.10	133	- 1.5
298	1.65	295.7	+ 2.3	5.6	1.65	296	- 2.0
526	2.20	525.7	+ 0.3	7.4	2.20	530	- 4.0
824	2.75	821.5	+ 2.5	9.3	2.75	828	- 4.0
1192	3.30	1182.4	+ 9.6	11.2	3.30	1190	+ 2.0
1620	3.85	1609.8	+ 10.2	13.1	3.85	1615	+ 5.0
2123	4.40	2103.1	+ 20.1	14.9	4.40	2101	+ 22.0

* Correspondiente al folio 107v.

La cuarta y octava columnas representan las diferencias entre las cantidades experimentales de aquellos autores con las de Galileo. Empero, 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. Porque, 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 dable percibir a un director de orquesta - y, en general, a un músico- es de un octavo de segundo.[31] En la tercera columna se calcula el recorrido horizontal de la bola en dicha fracción de tiempo. Obsérvese que los valores de esta columna -que vienen a ser como <<la incertidumbre asociada>> a las mediciones- son muy pequeños respecto a los valores de las distancias derivadas experimentalmente por Galileo (ver la primera columna). Siendo de mayor magnitud conforme disminuye el intervalo de tiempo (y viceversa).

Ahora bien, el intervalo de tiempo usado por Naylor y Drake -0.55 s- 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 sus objetivos primordiales -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.

2.2.3. 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, Galilei 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 acerca 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 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." [32]

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

$$V_c / V_b = ac / ab \qquad \ldots (4)$$

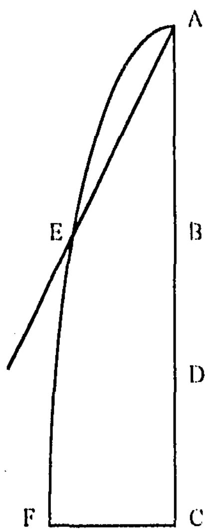
Así, siempre que <<el grado de velocidad>> del cual habla se considere matemáticamente equivalente a la velocidad tal y como se define actualmente, Galileo propone que la velocidad del móvil es proporcional al espacio que ha recorrido.

Es curioso que Galilei nos diga en la carta que su "principio" -la velocidad del móvil aumenta en la misma proporción que la distancia-, al ponerlo como axioma, le haya servido para "demostrar" su primer aserto[33] (los espacios atravesados en tiempos iguales son proporcionales a los números impares). Traducido a términos modernos, el susodicho principio se expresa de la siguiente manera: la velocidad del móvil es proporcional a la distancia. En cambio, su aserto (o corolario) se reduce a lo siguiente: ¡la distancia recorrida por el móvil es proporcional al cuadrado de los tiempos! La pregunta es válida: ¿por qué Galileo pudo deducir un resultado correcto -como el último- 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.

En las subsecuentes líneas intentaremos reconstruir, brevemente, los razonamientos vertidos en el folio 152r.[34] (Véase la figura 4)



[Suponer que] AB es a AD como AD es a AC. Sea BE el grado de velocidad en B [y] CF el grado de velocidad en C. [Si] AB es a AD como BE es a CF, [entonces] AD es a AC como BE es a CF. Se sigue que los cuadrados [de estas últimas cantidades] son iguales entre sí y que □ AD es a □ AC como □ BE es a □ CF. Y siendo esta misma razón [similar a la primera], entonces □ BE es a □ CF como AB es a AC.

Fig. 4. Transcripción del folio 152r (detalles esenciales).

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 fig. 4)

AB : AD :: AD : AC [ó AB / AD = AD / AC] . . . (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 ecuación (4). Mas Galilei 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

$$AB : AD :: BE : CF \qquad [\text{ó } AB / AD = BE / CF] \qquad \ldots (6)$$

pero en virtud de (5)

$$AD : AC :: BE : CF \qquad [\text{ó } AD / AC = BE / CF] \qquad \ldots (7)$$

Redefiniendo a los <<grados de velocidad>> be y cf como V_1 y V_2, es posible demostrar que

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

Relación distinta a la expresada en la ecuación (4) que ya no parece "tan natural y evidente".

Hasta aquí el análisis de Galileo. Preguntémonos: ¿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

$$T_1 / T_2 = AB / AD \qquad \ldots (9)$$

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

$$(T_1^2 / T_2^2) = AB / AC \qquad \ldots (10)$$

significando 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[35] -al caso de la caída libre, seguiríase que la relación (9) es correcta.

Arreglando un poco la ecuación (10), tendremos

$$(T_1 / T_2) = (AB / T_1) \;/\; (AC / T_2) \qquad \ldots (11)$$

Ahora bien, el primer y el segundo términos del lado derecho de la ecuación (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

$$(T_1 / T_2) = (V_1 / V_2) \qquad \ldots (12)$$

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, Galilei no logró demostrar experimentalmente -hasta donde sabemos- la validez del principio involucrado en la ecuación (12), pero ello no fue óbice para que lo incluyera en su obra de madurez: los *Discorsi.* [36]

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.[37] Lo mismo que la relación (9).[38]

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

2 . 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 estas 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.

[Los alcances horizontales están dados en *punti*]

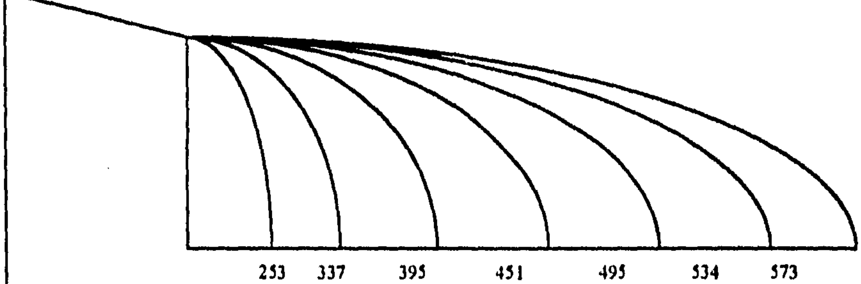


Fig. 5. Transcripción del folio 114. (Detalles esenciales).

En el período 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 (ver 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 OC (ver *idem*). De este modo, para su reconstrucción experimental (o teórica), disponemos de tres variables libres: el ángulo de inclinación (u), la altura del plano (H) y la distancia vertical de la base de éste al suelo (h). Bajo la consideración anterior, no debe parecernos heteróclita la existencia de las tres reconstrucciones efectuadas por S. Drake (1972)[39], Drake & MacLachlan (1973)[40] y D. K. Hill (1988).[41]

TABLA VI : RECONSTRUCCIONES SOBRE EL FOLIO 114.

Drake* (h= 450 *punti* ; u= 26°)		Drake & MacLachlan* (h= 500 *punti* ; u= 30°)		Hill** (h= 329.5 *punti* ; u= 12.5°)			Galileo (folio 114v)
H	D_T	H	D_T	H	D_T	D_E	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 *punto* equivale a 0.0938 cm.
** Aquí un *punto* es igual a 0.0944 cm.
*** Las divergencias se calculan respecto a los valores dados por Galileo.

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 se fue soltando 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 limitáronse a consignar la proyección horizontal (D_T) calculada a partir de las ecuaciones de movimiento (1) a (3).

Dado que el valor teórico de la proyección horizontal (D_T) 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 parecidas -en cuanto a resultados numéricos se refiere-, no descartan la posibilidad de que los resultados vertidos en el folio tengan 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 *no* es proporcional al tiempo, sino al cuadrado de éste (folio 107v).

2. 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 fig. 6). Aparece también un valor denominado expresamente como la *altura de la mesa* (828 *punti*).

Enseguida presentamos la reconstrucción del folio 116v:[42]

[Cálculos realizados por Galilei (en notación moderna)]

[" * " = raiz cuadrada]

1600 x 800 = 1280000, (1280000)* = 1131
828 x 800 = 662400, 66240/ 300 = 2208
2667 x 800 = 2133600, (2133600)* = 1460
2208 x 800 = 1766400, (1766400)* = 1329
1000 x 800 = 800000, 800000/300 = 2666
800 x 800 = 640000, 64000/300 = 2133
2133 x 800 = 1706400, (1706400)* = 1306

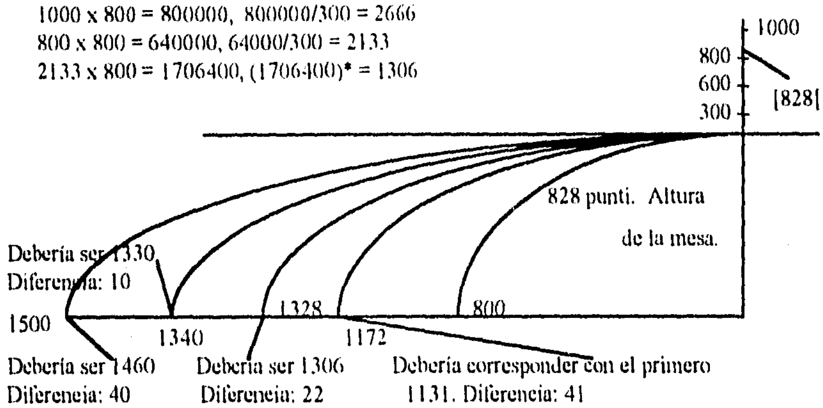


Fig. 6. Transcripción del folio 116v (detalles esenciales).

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), los cuales -según Galileo- *deberían* 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* (en adelante r. m. p.). Partiendo de los cálculos realizados por Galileo en el folio, se ha pensado que los obtuvo aplicando la r. m. p. en la forma

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

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.

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 r. m. p.; 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 redúcese a la verificación de la r. m. p., 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_1ó V_2) por una bola en la supradicha situación. Dejando de lado las dificultades antedichas, he aquí los resultados contenidos en el folio.

TABLA VII : EL FOLIO 116v.*

Altura del plano (H)	Proyección horizontal experimental. (D_E)	Proyección horizontal usando r.m.p (D)	[Error] (%)
300	800	--	--
600	1172	1131	3.6
800	1328	1306	1.7
828	1340	1329	0.8
1000	1500	1460	2.7
			promedio: 2.20 %

* En *punti*

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[43] reconstruyó experimentalmente los resultados del folio.

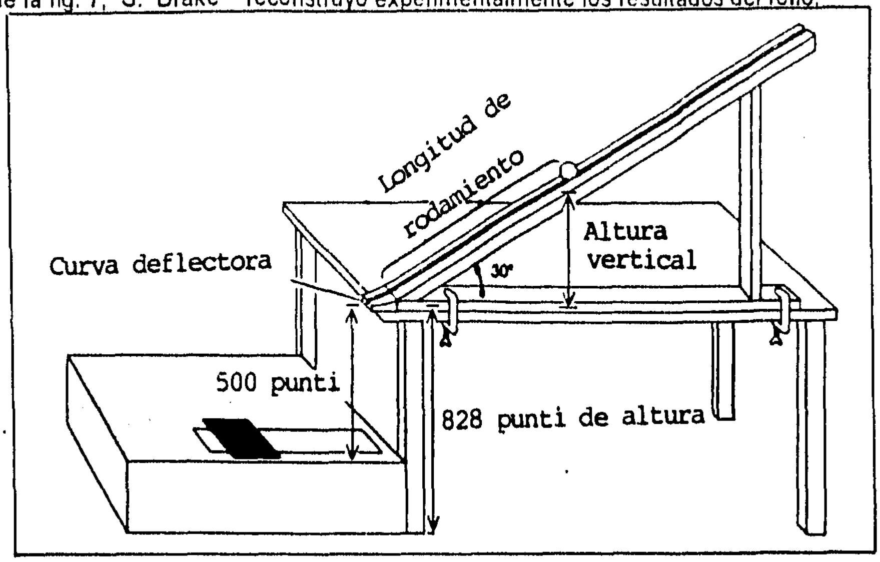


Fig. 7. Dispositivo experimental usado por Drake para comprobar los resultados del folio 116v.

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, en promedio, 4.7 % menor a la que se obtendría usando la ecuación (1). Además, el alcance horizontal D viene dado por

$$D = V_{terminal} \cdot T_h \qquad \ldots(14)$$

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

TABLA VIII : RECONSTRUCCIÓN EXPERIMENTAL DE DRAKE*
(u = 30° ; h = 828 *punti*)

I Altura del plano (H)	II Velocidad terminal	III Proyección horizontal teórica (D_T)	IV Proyección horizontal experimental (D_T)	V Poyección horizontal en f. 116v. (D)	VI 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

* Distancias en *punti*; velocidades en *punti* por segundo.

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.[44] 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.[45]

Finalmente, ¿el folio 116v encarna lo que muchos sentiríanse tentados a denominar un *experimento moderno*? Sólo en forma parcial. Existen elementos que definitivamente 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 seguida por un grave y terminaron por buscar relaciones matemáticas entre los elementos que conforman al fenómeno.

2. 3. LOS FOLIOS EN EL CONTEXTO DE LA OBRA GALILEANA.

Del análisis de los folios 81r, 107v, 152 r, 114 y 116v, consideramos que es importante destacar los siguientes puntos. 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[46] porque sus predicciones son, en gran medida, concordantes con los resultados experimentales, lo cual se observa mejor en el folio postrero. Es decir, si bien <u>no</u> realizó sus experimentos en el vacío (ni con materiales perfectos), las condiciones bajo las que 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 podía fabricarse 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) El movimiento deja de ser tratado como un proceso (potencia-llegar a ser) para convertirse en un *estado* de los cuerpos.(En gran parte, de esto depende la dinámica de Newton).

Por último, en el terreno histórico:

10) 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 (*vid.* Jornada Cuarta de la supradicha obra).

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. No sin razón, suponía A. Koyré que la filosofía galileana

> " ... parte de la idea [preconcebida] de que las leyes de la naturaleza son leyes matemáticas. *Lo real encarna lo matemático.* Por eso no hay en Galileo separación entre la experiencia y la teoría; la teoría, la fórmula, no <<salva>> el fenómeno, expresa su esencia. La naturaleza no responde más que a preguntas formuladas en lenguaje matemático... Y si la experiencia guía... al razonamiento es porque, en la experiencia bien realizada... la naturaleza revela su profunda esencia que, por lo demás, sólo el intelecto es capaz de captar. " [47]

En buena parte, Koyré fundamentó su opinión en un pasaje[48] muy famoso de *Il Saggiatore* (1623), en el cual Galileo expone la esencia de lo que podríamos denominar su <<sistema epistemológico>>.

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*, podíase adecuarlo para un análisis de carácter cuantitativo. Para que, una vez cuantificado, el objeto -tal y como fue concebido en su punto de partida- pudiérase reelaborar, 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.

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 apliqueís una esfera material a un plano también material, estaréis aplicando una esfera imperfecta a un plano imperfecto y, por 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 diferenciación entre una y otra]. " [49]

Así pues, las investigaciones precedentes nos llevan a reformular el 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 en la experiencia sino en el correcto análisis matemático, el cual puede sustituir -dirigiendo- a aquélla, 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.

NOTAS BIBLIOGRÁFICAS DEL CAPÍTULO 2.

1. En el tema que nos ocupa, existen tres aporías muy importantes mediante las cuales Zenón niega la realidad del movimiento. Ellas son: la del corredor en el estadio, Aquiles corriendo tras la tortuga y la flecha que vuela. En ese orden, las enunciamos a continuación: 1) si existiera el movimiento, el corredor debería recorrer *todo* el espacio entre él y el estadio, por lo tanto, nunca llegaría a éste porque antes de alcanzarlo debe llegar a su mitad, y todavía antes, a la mitad de su mitad, etc.; 2) de igual forma, si Aquiles le da ventaja a la tortuga, nunca le dará alcance, porque antes de alcanzar el sitio en el que estaba la tortuga, ésta habrá avanzado, y cuando aquél quiera llegar a la última posición de la tortuga, el animal ya se habrá trasladado nuevamente...; y 3) la flecha que vuela no se mueve porque, en cada instante de tiempo, ocupa un sitio exacto en el espacio, y en el momento inmediato posterior, continúa ocupando otro sitio exacto, etc. Las primeras dos aporías son muy interesantes porque en ellas podemos columbrar el concepto del *continuum* espacial que aparece en la geometría euclidiana. En cambio, la última arroja un resultado significativo: la imposibilidad de separar el *espacio ocupado por un cuerpo* del *instante preciso en el cual lo ocupa*. Con lo anterior, Zenón de Elea -quizá sin saberlo- dejó el camino de la especulación abierta: ¿es que el espacio y el tiempo están interconectados de tal modo que no se puede hablar de uno sin presuponer al otro? ¿o son dos conceptos que no pueden percibirse simultáneamente durante el movimiento de un cuerpo? Para mayores referencias, en cuanto a las aporías se refiere, ver: G. S. Kirk y J. E. Raven, *The Presocratic Philosopher*, Cambridge, University Press, 1957, pp. 295 ss.

2. Aristóteles, *The works of Aristotle translated into English*. 12 vols (vol. I). Ed. J. A. Smith & W. D. Ross, Oxford, Oxford University, 1967-8, pp. 215a 24- 215b 20. Dice Aristóteles en su *Física*, (libro IV, cap.8) : << Vemos que un mismo cuerpo muévese más deprisa que otro por dos razones: o porque hay una diferencia en aquello a través de lo cual ellos se mueven... o porque, siendo otras cosas iguales, los cuerpos se mueven diferentemente unos de otros por exceso de peso o de ligereza (...) Un medio causa una diferencia porque impide el movimiento de la cosa -principalmente a moverse en dirección opuesta, mas en un grado menor a si él mismo estuviese parado.[Suponer que un cuerpo] A se mueve a través [del medio] B... en un tiempo C [y que] atraviese D, que es más rarificado, en un tiempo E, proporcional a la densidad del cuerpo resistente, siendo la extensión de D y B igual [C/E = B/D ó $t_1/t_2 = d_1/d_2$]. Sea B agua y D aire. En tanto, así como el aire es más rarificado y más incorpóreo... el cuerpo A se moverá a través de D más rápidamente que a través de B. Suponemos entonces que *la velocidad de una respecto a la otra es la misma razón que la del* [peso] *del agua* [con el peso] *del aire* [$v_1/v_2 = d_2/d_1$]. En tanto, si el aire fuese dos veces más rarificado, el cuerpo atravesaría B en el doble de tiempo en que atravesara D, y el tiempo C sería el doble de tiempo que E. Y siempre, cuanto más sea un medio incorpóreo, menos resistente, es más fácilmente dividido, más rápido será su movimiento.>> (La traducción y la cursiva son nuestras). Para facilitar la lectura hemos puesto entre corchetes el equivalente moderno de las afirmaciones aristotélicas.

3. *Cit. pos.* C. Crombie, *Historia de la Ciencia: de San Agustín a Galileo*, 2 vols.(vol. II), Madrid, Alianza Editorial, 1976, p. 56.

4. Si F es la fuerza aplicada, R la resistencia del medio y k una constante de proporcionalidad la velocidad, en la propuesta de Bradwardine, se expresa así: $v = k \log (F/ R)$; *apud.* R. A. Uritam, " Medieval science, the Copernican revolution and physics teaching", *American Journal of Physics*, 1974, Vol. 42: 809-19. (pp. 811-2).

5. *Ibid.*, p. 811.

6. G. B. Benedetti, *Diversarum speculationum mathematicarum et physicarum liber*, 1585, p. 286; *cit. pos.* A. Koyré, *Estudios Galileanos*, México, Siglo XXI, 1988, p. 40.

7. Algunos de los estudios monográficos (y ensayos) sobre la obra de Galileo son los siguientes: A. Koyré, *Etudes galiéenes* (Paris, 1939); M. Clavelin, *La philosophie naturelle de Galilée* (Paris, 1968); Stillman Drake, *Galileo Studies* (Michigan,1970); J. J. Langford, *Galileo, Science, and the Church* (Michigan,1971); William R. Shea, *Galileo's Intellectual Revolution* (N. Y.,1972); Dudley

Shapere, *Galileo: A philosophical Study* (Chicago,1974); Stillman. Drake, *Galileo at Works* (Chicago,1978); etc. Además, existen infinidad de artículos sobre diversos aspectos de la obra galileana.

8. 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 sobre 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 del mismo no pertenece a él, sino a Simon Stevin (*vid.* cap. 3 , n. 26). 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, aquellas se realizaban en un mismo tiempo', es simplemente falsa; las oscilaciones dependen de la amplitud inicial desde la cual se suelta la péndola (descubierto por Mersenne, *vid.* Cap. 3, parte II). En cuanto al tercero, en efecto, llega a dicha relación pero no de la manera en la cual lo haríamos actualmente -midiendo tiempos y espacios en intervalos arbitrarios-, sino determinando el segundo de éstos a intervalos iguales del primero (*vid.* folio 107v). Así pues, Galileo sí realizó experimentos; mas la forma de efectuarlos no es la de un científico actual que habla de variables, incertidumbres, intervalos de validez, desviación estándar...

9. Por *experimento moderno* vamos a entender un experimento que cumple -pero que no necesariamente definen- los siguientes puntos: 1) que sea *reproducible* por cualquier individuo, siempre y cuando lo realice en las condiciones y circunstancias adecuadas; 2) que puedan derivarse resultados numéricos, *cuantitativos*; 3) que involucra un *proceso de medición* en el cual se cuantifican las variables definidas por el propio experimentador; 4) que la mayoría de las veces parte de resultados previos para ahondar, revalidar, ampliar o refutar alguna teoría, o concepción epistemológica, en lo general o en lo particular; 5) que su desarrollo no es lineal, mas se encuentra muy influido por los cambios de la propia ciencia; y 6) que pueden coexistir varias concepciones acerca del experimento que marquen su dinámica, evolución, muerte y transformación.

10. Guiudobaldo del Monte fue amigo y patrón de Galileo hasta su muerte ocurrida en 1607. Aquél decidió patrocinar a Galilei debido a que éste, hacia 1587, había descubierto un método práctico para determinar el centro de gravedad de algunos sólidos no considerados por los griegos. Gracias a Guidobaldo, Galileo conoció a Cristóforo Clavius, matemático y astrónomo del *Collegio* de los jesuitas en Roma. Cuando en 1589 Galileo obtuvo la cátedra de matemáticas en la Universidad de Pisa, aquellos personajes -convertidos en sus patronos- aprovecharon la circunstancia para promoverlo a una cátedra más distinguida (y mejor pagada) en la Universidad de Padua. En cuanto a los detalles del experimento sugerido por el marqués a Galileo, véase: R. H. Naylor, "The Evolution of An Experiment: Guidobaldo del Monte and Galileo's *Discorsi* Demonstration of the Parabolic Trajectory", *Physis*, 1974, *16*: 323-346.

11. G. Libri, *Histoire des sciences mathématiques en Italie*, 4 vols (París, 1838-1841), vol. IV, pp. 387ss.; *cit. pos.* R. H. Naylor, " Galileo's Theory of Projectile Motion", *Isis*, 1980, 71: 550-70 (No. 259), p. 551. (La traducción del inglés es mía).

12. 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. En aquél instruye sobre su uso en la resolución de los problemas geométricos que surgen en la práctica de los ingenieros (y de los militares) : extracción de raíces cuadradas, división de un segmento en partes iguales, cálculo de las distintas proporciones de una línea, triangulaciones, etc. Por lo que determinar la inclinación correcta de sus planos, así como medir la distancia respecto a la base del plano a la cual caía la esfera, no debió representar mayor dificultad para un excelente conocedor de las técnicas geométricas de medición. Véase al respecto: G. Galilei, *Le Operazioni del Compasso Geometrico et Militare*, Padua (1606); consúltese la edición (y traducción al inglés) realizada por S. Drake (Washington, D.C., Dibner Library, 1978, 95 págs.)

13. 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*, vol. 97, núm.2, abril de 1953, p. 224 (nota 13). (La cursiva es original). Es curioso que tuvieran que transcurrir poco más de veinte años para que los científicos consideraran en serio la observación de Koyré, y se detuvieran a realizar un experimento para contradecir la opinión del historiador francés, pues éste sostenía que los experimentos de Galilei eran *experimentos pensados*. Es interesante observar cómo los investigadores de otras áreas del conocimiento pueden realizar observaciones de interés en el ámbito de las ciencias exactas. Para el experimento del que hacemos mención líneas arriba, véase: Thomas B. Settle, "An Experiment in the History of Science ", *Science*, vol. 133, 1961. pp. 19-23
14. R. H. Naylor, " Galileo's Theory of ... ", pp. 551-3.
15. D. K. Hill, " Dissecting Trajectories. Galileo's Early Experiments on Projectile Motion and the Law of Fall ", *Isis*, 1988, 79: 646-668. (véanse págs. 646-57 para la reconstrucción del folio 81r).
16." Galileo's Theory of...", p. 553.
17." Dissecting Trajectories..., p. 649
18. Dice Galileo en la Jornada Tercera de los *Discorsi*: << Por lo que se refiere a los experimentos... con el fin de dejar bien probado que la aceleración de los graves que caen de modo natural se da [en cierta] proporción, [lo he realizado] de la siguiente manera(...) En un tablón de una longitud aproximada de doce codos, de medio codo de anchura... y un espesor de tres dedos, hicimos una cavidad o pequeño canal a lo largo de la cara menor, [de un dedo de anchura]. 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...*>>(la cursiva es mía) Tomado de G. Galilei, *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias* (Discorsi), 2 da. ed., Madrid, Editora Nacional, 1981 (traducción de J. Sadaba), p.299.
19. Usando la ecuación (1) del texto, las velocidades de rodamiento a través de planos cuyas inclinaciones sean 20.5, 10 y 7° son, en ese orden, 119.3, 231.9 y 335.0 cm/s. En caso de no emplear la expresión anterior sino la fórmula para la velocidad de un objeto ideal cayendo sobre el plano - $V = (2gH)^{1/2}$ -, las velocidades serían, en la misma secuencia, 141.1, 274.4 y 420.1 cm/s; las cuales son mayores en más del 18 % respecto a las antedichas. Si los datos contenidos en el folio fuesen valores calculados en forma teórica, las discrepancias que observáramos deberían ser de este orden, pues Galileo no conocía la ecuación (1).
20. G. Galilei, *Discorsi*, Jornada Cuarta, pp. 394-5: << Por lo que se refiere al movimiento en el plano horizontal, [el movimiento de la bola que rueda] debería ser uniforme y constante si no se le ofreciera resistencia alguna, [pero] es alterado *por la oposición del aire* [, llegando ésta] a dejar quieto el móvil de que se trate; y una vez más: tanto más rápidamente ocurrirá esto cuanto más ligero sea el móvil.>> (La cursiva es mía). Al parecer, Galileo no sospechó la influencia de la fricción en sus construcciones.
21. *Ibid.* (Teorema I, Proposición I), p. 384.
22. Para la reconstrucción de este folio, véase : Stillman Drake," The Role of Music in Galileo's Experiments ", *Scientific American*, 1975 , vol. 233: 98-104
23. El padre de Galileo " ...Vincenzio 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*, Chicago, The University of Chicago Press,1978, pp. 41 y 44). No es extraño que siendo músico su padre, Galilei heredase el gusto y la aptitud musicales.
24. A pesar de la originalidad del procedimiento para medir el tiempo, ello no fue óbice para que, en los *Discorsi* (Jornada Tercera, p. 300) propusiera otro: << En cuanto a la medida del tiempo se refiere, empleamos una vasija grande llena de agua, sostenida a buena altura y que, a través de un canal pequeño y fino, iba vertiendo un hilillo de agua, siendo recogido en un vaso

pequeño durante todo el tiempo en el 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 [partes] de agua recogidas... con lo que las diferencias y proporciones de los pesos nos iban dando las diferencias y las proporciones de los tiempos.>>. Sobre la factibilidad de este procedimiento, véase Thomas B. Settle, " An Experiment... ", pp.19-23.

25. Tomado -con modificaciones- de: R. H. Naylor, " Galileo's Theory...", p. 555.

26. Según Galileo (*Discorsi*, p. 302): << (...) respecto a las caídas verticales, se cumple [lo mismo que] en los movimientos que se realizan sobre planos inclinados, sea cual fuere su inclinación. Se ha supuesto... que en estos últimos los grados de velocidad [...] aumentan siempre según la misma proporción, es decir, según el aumento del tiempo, o... según la serie de los números naturales.>>. Un ejemplo muy sugerente de como el movimiento a través del plano trócase a un movimiento de caída libre, es el siguiente (ver fig. 8). En el cual, al decir de este autor (*Ibid.*, p. 303): << ...las intensidades [*momento*] o las velocidades de un mismo móvil son diversas si tienen lugar sobre planos de distinta inclinación... >> Así, sobre la línea BA, el *momento* es máximo; y mínimo (nulo) sobre CA. Dado que el movimiento sobre la primera de estas líneas es un caso límite resultado del aumento en la pendiente del plano, es fácil dar un paso más e identificar el movimiento a través de la perpendicular BA como el movimiento de caída libre. Si esto es correcto, podemos afirmar que la visión geometrizadora de Galilei le ayudó a simplificar el estudio de dos movimientos que en la Edad Media considerábanse totalmente distintos.

27. G. Galilei, *Discorsi*, Jornada Tercera (Teorema II, Proposición II), p. 294.

28. S. Drake, "The Role of Music...", p. 101.

29. R. H. Naylor, "Galileo's Theory...", pp. 554-57.

30. Los datos de Drake y Naylor han sido tomados, en ese orden, de: " The Role of Music...", op. cit., p. 101; y " Galileo's Theory...", op. cit., p. 555.

31. *Apud.* S. Drake, *" The Role of Music..."*, p. 98.

32. G. Galilei, *Opere*, vol. X, p. 115; *cit. pos.* A. Koyré, *Estudios galileanos*, op. cit., p. 76 (n. 8).

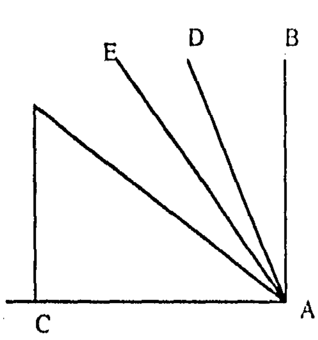


Fig. 8. La "equivalencia" plano-caída libre.

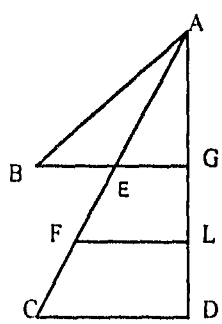


Fig. 9. Un resultado del folio 152r incluido en los *Discorsi*.

33. *Ibid.*: <<Reflexionando sobre los problemas del movimiento... y a fin de demostrar los accidentes por mí observados, me faltaba un principio totalmente indudable que pudiera poner como axioma he llegado a una proposición [que la velocidad es proporcional al espacio recorrido]; y, supuesta ésta, demuestro que [los espacios son proporcionales al cuadrado de los tiempos empleados en recorrerlos]>>

34. Para una reconstrucción (y discusión) más amplia del folio 152r, véanse: S. Drake, *Galileo at Works*, op. cit., cap. VI, pp. 91-116; y R. H. Naylor, "Galileo and the Problem of Free Fall", *British Journal for the History of Science*, 1974, 7: 107-113.

35. Dice Galileo en un corolario de su apartado *Sobre el Movimiento Naturalmente Acelerado* de la Jornada Tercera (*Discorsi*, p. 302): << Tengamos presente que *lo demostrado... con respecto a las caídas verticales, se cumple del mismo modo también en los movimientos que se realizan sobre planos inclinados*, sea cual fuere su inclinación (...) En estos últimos los grados de velocidad aumentan siempre en la misma proporción [,o sea,] según la serie de los números naturales.>> (la cursiva es mía).
36. En la Jornada Tercera de los *Discorsi* (Sobre el Movimiento Naturalmente Acelerado), Galileo corrige la suposición de 1604 -de que la velocidad es proporcional a la distancia recorrida- por otra. Nos dice en boca de Salviati (pp. 276-8): <<Cuando observo... una piedra que cae desde cierta altura, partiendo de una situación de reposo, que va adquiriendo poco a poco, cada vez más velocidad, *¿por qué no he de creer que tales aumentos de velocidad no tengan lugar según la más simple y evidente proporción?* Ahora bien, si observamos con cierta atención el problema, no encontramos ningún aumento o adición más simple que aquel que va aumentando siempre de la misma manera. Esto lo entenderemos fácilmente si consideramos la relación tan estrecha que se da entre tiempo y movimiento: del mismo modo que la igualdad y uniformidad del movimiento se define y se concibe sobre la igualdad de los tiempos y los espacios (*en efecto, llamamos movimiento uniforme al movimiento que en tiempos iguales recorre espacios iguales*), así también, mediante una subdivisión uniforme del tiempo, podemos imaginar que los aumentos de velocidad tengan lugar [con la misma] simplicidad (...) Por eso, *creo que no nos apartamos en absoluto de la recta razón si admitimos que la intensidad de velocidad crece según el incremento del tiempo* [-la velocidad es proporcional al tiempo].>> (La cursiva es nuestra). Tácitamente, Galilei está proponiendo la existencia de una constante que "propicia" el aumento en la velocidad de los cuerpos, que los *acelera*. Cfr. la carta a Paolo Sarpi (*vid.* sección *1.2.3*), en la cual Galileo habla de un principio "simple y evidente", con la cita anterior: tal parece que el pensador italiano cambia de principios para fundamentar de mejor manera su física, pero no hace lo mismo respecto a sus estrategias de convencimiento.
37. *Ibid.* (Teorema V, Proposición V, p. 313) Galileo sentencia que <<La proporción entre los tiempos de las caídas por planos de diversa inclinación, longitud y altura es [igual al] producto de las respectivas longitudes por la raíz cuadrada del inverso de las alturas.>>. Veamos. Sean los triángulos ABG y ACD dos planos diversamente inclinados (ver fig. 9). Llamando T_{AC} y T_{AB} a los tiempos que tardaría una bola puesta a rodar desde el punto A las distancias AC y AB. Según el aserto anterior de Galileo, tendríamos que

$$T_{AC} / T_{AB} = (AC / AB) . (AG / AD)^{1/2}$$

al reagrupar un poco la expresión anterior

$$(T_{AC} / AC) . (AB / T_{AB}) = (AG / AD)^{1/2}$$

Finalmente, recordando la definición de velocidad

$$(V_{AB} / V_{AC}) = (AG / AD)^{1/2}$$

que es la relación propuesta por Galileo en el folio 152r. Como puede apreciarse, en ocasiones nuestro autor incorporó principios físicos no demostrados experimentalmente.
38. *ibid.* (Teorema II, Proposición II, Corolario II, p. 301): << ... si se toman, a partir del comienzo del movimiento, dos espacios cualesquiera [ab y ac como en el texto], recorridos en tiempos cualesquiera, los tiempos respectivos [T_1 y T_2] estarán entre sí como cualquiera de los dos espacios está con respecto a la media proporcional entre los dos espacios dados [T_1/T_2=ab/ad].>> (Recuérdese que ad es la media proporcional de ab y ac).
39. Stillman Drake & James MacLachlan, "Galileo's Experimental Confirmation of Horizontal Inertia: Unpublished Manuscripts (Galileo Gleanings XXII)", *Isis*, 1973, 64: 291-305.(Para la reconstrucción del folio que nos ocupa, véanse págs. 300-3)
40. *Ibid*, "Galileo's Discovery of the Parabolic Trajectory", *Scientific American*, May 1975, vol. 232: 102-110 (ver págs. 106-10).
41. David K. Hill, " Dissecting Trajectories. Galileo's Early Experiments on Projectile Motion and the Law of Fall ", *Isis* 79: 646-668, 1988 (ver pp. 658-62).
42. Para la reconstrucción de este folio, véanse los siguientes trabajos: Drake, "Galileo's Experimental Confirmation...", p. 298; Drake & MacLachlan, "Galileo's Discovery...", pp. 105-6;

R. H. Naylor: "Galileo: Real Experiment and Didactic Demonstration." *Isis* 67, p. 406; D. K. Hill: "Dissecting Trajectories...", p. 663 y "Galileo's Work On 116v: A New Analysis", *Isis*, 1986, 77: pp. 285 y 287; y W. L. Wisan, "Galileo and the Process of Scientific Creation", *Isis*, 1984, 75., p. 279.

43. Stillman Drake, " Galileo's Discovery... ", pp. 104-109.

44. La única referencia explícita de Galileo, en los *Discorsi*, sobre este principio de conservación del movimiento, es la siguiente (Jornada Tercera, Escolio de la Proposición XXIII, p. 346): << ... se puede suponer con razón que, *sea el grado de velocidad que se dé en un móvil, queda por naturaleza indeleblemente impreso en él con tal de que no intervengan causas externas que lo aceleren o retarden; tal estado constante sólo ocurre en el plano horizontal.* En efecto, en los planos inclinados descendentes se encuentra presente una causa de aceleración, mientras que cuando la inclinación se considera hacia arriba, lo que está presente es una causa de desaceleración. *El movimiento sobre el plano horizontal tiene también la propiedad de ser eterno, ya que si es uniforme no aumenta ni disminuye, ni mucho menos cesa.*>> (La cursiva es mía). 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, el aserto galileano parece gratuito o resultado de una feliz especulación filosófico-matemática. Como la bola, al rodar sobre el canal, no altera su movimiento descendente hasta que no abandona aquél, y una vez abandonado no continúa con su trayectoria rectilínea sino que se ve sometido a la gravedad terminando por adquirir una trayectoria semiparabólica, Galileo quizá supuso que el movimiento queda *impreso* en la bola mientras no intervengan *causas externas* (abandono del canal sobre el que se movía) que la *aceleren* o la *retarden* (al abandonar el canal la bola se *convierte* también en un <<grave>>). Aunque Galilei estuvo a un paso de formular el *principio* de inercia, quizá optó por dejarlo en forma soterrada porque no encontró el modo de fundamentarlo matemática o experimentalmente. La última frase de Galileo es, por supuesto, imposible de demostrar -de manera *absoluta*- en un mundo *real* donde la fricción y las *causas externas* de ningún modo pueden ser *totalmente* soslayadas. El principio de inercia es una muestra del pragmatismo de los actuales físicos: si bien no existe una región *ideal* donde se cumpla a cabalidad, en el mundo *real* puede demostrarse "con un buen orden de aproximación". Este argumento guarda, además, un fondo metafísico: no puede ser falseada la validez del principio de inercia precisamente porque no existen las condiciones en las cuales la adquiere.

45. Comentando el famoso 'experimento del navío' -que consiste en soltar una piedra desde el mástil de un navío en movimiento, observando la trayectoria descrita por aquélla desde el navío en y desde un punto inmóvil fuera de éste-, Gassendi llega a la formulación del principio de inercia mediante el siguiente razonamiento: << ... si se tratara del movimiento de la Tierra -que supondremos móvil sobre su eje-... podría decirse que la piedra [arrojada desde el mástil] se mueve uniformemente porque de modo espontáneo se ajusta al movimiento uniforme del todo... pero sin duda es sorprendente [cuando se trata del movimiento] impreso por la marcha del navío... pues la piedra no posee una relación similar [en] sus movimientos.*De donde es justo deducir que el movimiento horizontal*, [cualquiera que sea su procedencia], es *por naturaleza perpetuo, a menos que intervenga una causa que desvíe al móvil y turbe su movimiento.*>> (Pierre Gassendi, *De motu impreso a motore translato*, París, 1642, cap. X, pp. 38; *cit. pos.* A. Koyré, *Estudios galileanos*, op. cit., p. 296 (La cursiva de la cita es mía).

46. No obstante, Galileo es consciente de la influencia que puede presentar la resistencia del aire. Dice en los *Discorsi* (Jornada Cuarta, Proposición I, pp. 394-5) : <<Por lo que se refiere a las perturbaciones procedentes del medio, es ésta una dificultad considerable y difícil, dada su multiplicidad de variedades, de someterla a reglas fijas y a una descripción rigurosa. Así... la resistencia que ofrece el aire a los movimientos [sobre el plano, de caída libre y de proyectiles], vemos que... los perturba a todos en una variedad infinita de modos, como infinitos son los modos en que varían las figuras, los pesos y las velocidades de los móviles. Por lo que atañe a la velocidad, a medida que ésta sea mayor, mayor también será la resistencia ofrecida por el aire (...) Con todo, si queremos [estudiar el movimiento], *no tenemos más remedio que abstraer tales aspectos y una vez que* [hayamos] *encontrado y demostrado dichas conclusiones que prescinden de las resistencias, servirnos de aquéllas, aplicándolas a la experiencia con las limitaciones que ésta nos imponga.*>> (La cursiva es mía).

47. A. Koyré, *Estudios*..., p. 147 (cursiva original).
48. El pasaje referido se encuentra en *Opere*, vol. VI, p. 232: << La filosofía está escrita en este vasto libro que continuamente se abre ante nuestros ojos (me refiero al universo), el cual sin embargo no se puede entender si antes no se ha aprendido a entender su lenguaje y a conocer el alfabeto en el que está escrito. [Éste es] el lenguaje de las matemáticas, siendo sus caracteres triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin las cuales es humanamente imposible comprender una sola palabra.>> Para consultar la obra original del pensador pisano, véase: G. Galilei, *Le Opere di Galileo Galilei.* Ed. A. Favaro & G. Vassura. 20 vols. Firenze, Barbera, 1929-39.
49. G. Galilei, *Opere*, vol. VII, pp. 233-4.

CAPÍTULO TERCERO

EL TRABAJO EXPERIMENTAL DE LOS « GALILEANOS ».

" Fue entonces cuando vi el péndulo.
La esfera, móvil en el extremo de un
largo hilo sujeto a la bóveda del coro,
describía sus amplias oscilaciones
con isócrona majestad. "

Umberto Eco, *El Péndulo de Foucault.*

PARTE I : *EL MOVIMIENTO DE CAÍDA LIBRE (DE GALILEO A HUYGENS) : AFINANDO EL VALOR DE UNA CONSTANTE.*

3 . *1.* DE LA *CAUSA NATURAL* A LA TEORÍA DEL *IMPETUS.*

Las primeras explicaciones lógicas y sistemáticas acerca del movimiento, las encontramos en la obra de Aristóteles. Según él, el movimiento es un proceso que parte de lo potencial y se concreta en un acto. Para los cuerpos situados en la región terrestre, el movimiento es solamente una transición que los cambia hacia lugares acordes a su *naturaleza.* Así, las moles de roca abandonadas en el espacio se precipitan hacia la Tierra porque la materia que las compone es densa y de poca movilidad. En cambio, el fuego "sube" porque éste se encuentra constituido por partículas livianas y de mayor movilidad. Sin embargo, algo distinto sucede en las regiones ultraterrenas (los cielos): ahí los cuerpos celestes (Sol, planetas y estrellas) son de naturaleza inmutable -porque están formados de la llamada *quintaesencia-* y se mueven en círculos perfectos alrededor de la Tierra.

Ahora bien, el *Primum movens* (El Primer Móvil) es, en opinión del Filósofo, la *causa causorum* de todo movimiento.[1] Éste transmítese de manera continua y sucesiva a través de las distintas esferas celestes que constituyen el mundo hasta llegar a la región sublunar donde, por ser la última, los cuerpos hallan en el reposo -no en el movimiento- su estado natural. En dicha región tienen lugar dos tipos de movimientos: el <<natural>> (o de caída libre) y el <<violento>> (como el de los proyectiles). El primero ocupará nuestra atención.

Al estudiar el movimiento de un cuerpo que cae, Aristóteles hace primeramente la distinción de si es <<leve>> o <<grave>>; porque, dependiendo de su grado de levedad o pesantez, será la velocidad que desarrolle para llegar a su estado natural. Así, si un cuerpo A pesa diez veces más que un cuerpo B, aquél caerá diez veces más rápido que éste. Por lo tanto, la velocidad de un grave depende de su peso en forma proporcional.

En el siglo XII las concepciones sobre el movimiento cambian debido al estudio efectuado por muchos pensadores árabes. Abu'l Barakat -discípulo de Avicena y seguidor de Juan Filopón- propone que los graves al caer se aceleran debido a la acumulación de incrementos sucesivos tanto en la fuerza que se le aplica como en la velocidad que van desarrollando.

Las especulaciones acerca de la naturaleza del movimiento continuaron, pero no todos los autores trataron de manera particular el movimiento de caída libre. Roger Bacon sí lo hizo. Para él, este movimiento debíase a la interferencia recíproca sufrida por las partículas del cuerpo (que tendían a caer por la línea más corta) y por las partículas laterales que encontraban aquéllas a su paso (responsables de desviarlo de su trayectoria rectilínea original).

Hacia el siglo XIV, existían al menos tres propuestas para definir el movimiento como: 1) un flujo incesante en el cual no tenía sentido tratar de dividirlo o de aislar uno de sus estados (Scoto, Buridán y Alberto de Sajonia); 2) una serie continua de estados divisibles (Gregorio de Rimini); y 3) una identidad continua existente en distintos lugares, en la que no existía el reposo (Guillermo de Ockham). Esta última opinión es relevante porque implica que el movimiento es un concepto sin realidad; excepto al considerar cuerpos concretos en movimiento.

Con Juan Buridán, la explicación del movimiento de caída libre se modifica: el cuerpo cae no sólo por gravedad natural sino también debido a la incorporación de un *impetus* que lo hace moverse de manera más rauda.[2]

En los siglos XV y XVI, un mayor número de pensadores se dedica al estudio del movimiento, pero sin salir del ámbito estrictamente filosófico, especulativo. Por ejemplo, el incremento de velocidad sufrido por un grave al caer era explicado, en esencia, de dos maneras: 1) por una disminución en la resistencia del aire ligada a factores de forma y de naturaleza que modificaban su comportamiento; ó 2) por la variación del *impetus* (fuerza motriz) que se adicionaba al *impetus* natural del grave. Esta última concepción fue desarrollada ampliamente por los pensadores de la escuela de París. La llamada *física del impetus*, encontró su cumbre en los trabajos de Bonamico y Benedetti.

Benedetti rechaza la simultánea virtud motriz y resistiva del medio; el *impetus* -no el medio- es la causa del movimiento. Ahora bien, ¿era el *impetus* una cualidad, potencia, virtud o ente material (o inmaterial) independiente del cuerpo y aun del medio? El anterior representó un problema prácticamente insoluble para los físicos parisinos porque no pudieron definir con exactitud las posibles *causas* del movimiento. En este punto, Galileo comienza sus primeras investigaciones.

A finales del siglo XVI, Galileo publica -siendo profesor de la Universidad de Pisa- una obra titulada *De Motu*. En ella intenta, entre otras cosas, desarrollar el concepto de *impetus*; el cual es la base de su primer sistema de dinámica. Una de las consecuencias más interesantes de esta concepción es el suponer que la rapidez con la que se mueve el cuerpo es indistinguible de su movimiento.

Además, para él, la celeridad (o lentitud) del movimiento de caída libre -que Galilei llama <<natural>>- tiene una sola *causa*: la levedad (o pesantez) del cuerpo que cae.[3] Existe otro resultado importante: todo cuerpo cayendo en forma <<natural>>, no violenta, a través de un medio cuaquiera, lo hace a *velocidad constante y proporcional a su peso relativo*. Así, creía Galileo, el movimiento de los cuerpos a través de un medio resistente -como lo es el aire- podía ser tratado siguiendo los principios de la hidrostática arquimediana. Es probable que intentara fundamentar la dinámica sobre bases sólidas que, hasta su época, no fueron -a diferencia de las aristotélicas- conmovidas por las escuelas medievales de física. Quizá Galilei intentó estudiar el movimiento de caída de los graves como si éstos se desplazaran a través de un fluido. Lo anterior es muy interesante, pues en la actualidad sabemos que el aire es un fluido. No obstante, el pensador italiano abandonó el tratamiento hidrostático para abordar el movimiento de los graves desde otra perspectiva.

Mas la hidrostática -herencia helénica- seguiría ejerciendo fascinación entre los pensadores de los siglos venideros. Un ejemplo de esto lo tenemos en Descartes, quien, en pleno siglo XVII, trató de establecer una analogía entre el movimiento de caída libre y el movimiento de un cuerpo que atraviesa un fluido como el agua.[4]

Siguiendo las consecuencias lógicas de la teoría del *impetus*, existía un resultado muy peculiar: los cuerpos <<ligeros>> caerían, en los primeros instantes del movimiento, más rápido que los cuerpos <<pesados>>; y, sólo después de mucho tiempo, éstos alcanzarían -y rebasarían- a los primeros. Los físicos nominalistas de París atribuían tal comportamiento a la mayor o menor <<adquisición>> de *impetus* por parte de los cuerpos. A saber: mientras más <<pesado>> fuera el cuerpo, mayor sería el *impetus* impreso en el grave; mientras más <<ligero>>, menor *impetus* adquiría.

El resultado precedente chocaba con la <<experiencia>> más inmediata: todos los cuerpos, pesados o ligeros, parecen caer -en el primer instante del movimiento- a la misma velocidad (siempre y cuando pudiera soslayarse la resistencia del aire en los últimos).

Probablemente todo este cúmulo de dificultades fueron un buen ápice para que Galileo no se detuviera en la teoría del *impetus*; tratando de descubrir, por el contrario, las relaciones matemáticas que rigen al movimiento de caída libre.

3 . 2. GALILEO Y EL VALOR DE LA CONSTANTE DE ACELERACIÓN GRAVITACIONAL.

En el folio 107v, Galilei demuestra que -en un plano inclinado- los espacios recorridos por el móvil son proporcionales al cuadrado de los tiempos empleados en recorrerlos (*vid. supra*, sección 2. 2. 2). Gracias a sus investigaciones del folio 152r (*idem*, 2. 2. 3), considera posible extender esta relación al movimiento de caída libre. Sin embargo, aunque le es dable conocer la proporción entre los tiempos y los espacios, no dice nada acerca de la **constante de proporcionalidad** que rige entre ellos. Regresando a la reconstrucción del folio 107v (ver tablas V y VI del cap. anterior), dicha constante resulta ser -en promedio- de 21.0 cms^{-2}. (Recuérdese: para un plano cuya inclinación es de 1.72°). Ahora bien, sin considerar el momento de inercia de la esfera, el valor de la "gravedad reducida" - o sea, empleando la ecuación $g' = g \text{ sen } u$ en vez de $g' = (5\ g\ \mathrm{sen}\ u) / 7$ - es simplemente de 29.4 cms^{-2} ; es decir, mayor a la cifra arriba señalada.

Pues bien, aunque el experimento de Galileo, en aquel folio, pueda considerarse bastante preciso, no se tiene noticia de que haya tratado de calcular la constante g (ni en *De Motu*, ni en otras obras, aparece un valor definitivo que él acepte; solamente hace suposiciones acerca del mismo).

No obstante, es difícil creer que no lo intentase. De hecho, poseyó -gracias a los resultados derivados de los folios- los elementos teóricos suficientes para calcular el valor numérico de g, ¡y no lo hizo!

Suponemos que Galileo *sí* trató de estimar g a partir de g', pero empleando una versión equivalente a la primera ecuación[5] - la que no considera el factor debido al momento de inercia. De las cantidades registradas en el folio 107v, podemos calcular un valor para g, el cual resulta de 696.3 cm^{-2} . En cambio, si se toma en cuenta el momento de inercia, de 974.8 cm^{-2} ; cantidad muy buena respecto al valor aceptado en la actualidad. Así, aunque Galileo se hubiese servido de las investigaciones consignadas en los folios, le era virtualmente imposible llegar a un valor *exacto* de g sin conocer la influencia del factor supradicho.

Determinar la constante de proporcionalidad entre los tiempos y las distancias, ocupó la atención de muchos contemporáneos de Galileo. La mayor parte de ellos, por influencia de él, dedicáronse a calcularla en forma directa; otros, por el contrario, continuaron con la especulación filosófica y preguntándose todavía por las causas del movimiento... En este sentido, puede afirmarse que el espíritu pragmático -hasta cierto límite- del pensador pisano inyectó dinamismo en la nueva investigación de la naturaleza que se estaba gestando. Ahora, más que argumentos, buscaríanse tanto los mejores dispositivos para *medir* con la mayor precisión posible, así como las mejores estrategias experimentales para concretar tal fin.

Conocer cuantitativamente el valor de *g* era el complemento de la teoría galileana sobre el movimiento de los cuerpos, porque permitiría extraer resultados concretos (cuánto tiempo tarda en caer un cuerpo emplazado a cualquier altura) y hacer predicciones en algunos fenómenos físicos de aplicación inmediata (como el cálculo de los alcances horizontales y verticales de una pieza de artillería dado su ángulo de inclinación). Aparte, por supuesto, de la importancia que revestía, *per se*, dicha teoría en la consolidación de la nueva física.

Antes de proseguir, debemos aclarar algo. Galileo y sus contemporáneos, al saber que las distancias de recorrido son proporcionales al cuadrado de los tiempos, estaban conscientes de la existencia de una constante que los relacionaba. No obstante, al emprender sus experimentos, no todos los autores reportaron el valor de la susodicha; para ellos tenía más sentido dar a conocer la magnitud del recorrido en un tiempo dado. Actualmente podría parecernos un problema intrascendente; producto de una interpretación incompleta. Pero no en el siglo XVII:

era difícil concebir que un solo número resumiera -en forma simultánea- dos *variables* como el tiempo y el espacio. Por esto, muchos optaron por medir el tiempo de recorrido del grave para un intervalo de distancia determinado.

El problema es, en apariencia, muy sencillo: determinar qué distancia recorre un móvil cayendo libremente en un lapso de tiempo previamente fijado. Una de las primeras dificultades que enfrentaron fue la carencia de buenos relojes de precisión. Cada autor lo solucionó de manera distinta: unos, sirviéndose de las oscilaciones del péndulo; otros, usando los latidos de su corazón (o de su presión arterial); los más, tratando de sincronizar el ruido producido por la caída del cuerpo con uno generado por ellos mismos; y los menos, con sencillas observaciones a *ojo desnudo*... En síntesis: no se trata de buscar subterfugios para, mediante inferencia indirecta, estimar el valor de g, sino de **medir en forma directa.** Veamos.

3. 3 . EL CÁLCULO *INDIRECTO* DEL VALOR DE LA ACELERACIÓN GRAVITACIONAL.

3. 3 . 1. MERSENNE Y HARRIOT: DOS ESTILOS DIFERENTES EN BUSCA DE LO MISMO.

A principios del siglo XVII - tres años antes, por lo menos, de las investigaciones plasmadas en los folios galileanos-, el inglés Tomas Harriot (1560-1621) emprende una serie de experimentos encaminados a estimar el tiempo de caída de los cuerpos *a través del aire*. Primeramente, mencionaremos los dos problemas que se planteó a sí mismo [6] - llevándolo, por consiguiente, a tratar de resolver la cuestión de los *corpus gravis cadentis* - :

1) ¿Se puede decir que un cuerpo tiene *velocidad cero* al principio de su caída?

2) ¿Debe considerarse que el grado de movimiento (*gradus motus*) del cuerpo es proporcional al espacio atravesado o es proporcional al tiempo transcurrido?

La última es, si se recuerda, la misma que Galileo abordó tanto en la carta a Sarpi como en el folio 107v. Contra lo que pudiera pensarse, no se conoce la influencia directa de Harriot sobre Galileo (ni viceversa); obligándonos a pensar que la segunda cuestión encarnaba una dificultad esencial dentro del ambiente en el cual se discutía la física.

Sin embargo, en lo referente al descenso de los cuerpos, Harriot niega el efecto de la resistencia del aire en la desaceleración sufrida por los cuerpos de peso distinto. Para él, exclusivamente los cuerpos graves, *pesados*, son objeto de su análisis; no así los cuerpos *ligeros* cuya naturaleza es, en su opinión, distinta a la de aquéllos -no entrando, por ello, en el análisis que realizará.

Lo anterior no es óbice para que reconozca la existencia de una desaceleración en la componente no-gravitacional (horizontal) del movimiento. Esto es, la velocidad de los cuerpos que *caen libremente* es constante, pero no lo es si se les imprime un impulso violento o si se les deja caer desde una posición desviada respecto a la vertical. Entre paréntesis, es con un análisis de este tipo como Harriot explica la trayectoria de las piezas de artillería. Al decir de este autor, dicha trayectoria no es totalmente parabólica.

En los *Manuscritos Añadidos* -una obra que contiene algunos de sus trabajos más importantes-, intenta determinar si existe una velocidad inicial al comienzo del movimiento. Respecto a esto, dice (ver fig. 10) :

> " Algunas cosas permanecen quietas cuando comienzan a moverse por una causa, que en un principio no [representa] un grado, pero la fuerza (*vis*) sea material o no, debe tener algún grado, y el móvil tiene que principiar en el mismo grado, el cual puede ser de diversas cantidades, en este diagrama [fig. 10] lo nombro *ab*. " [7]

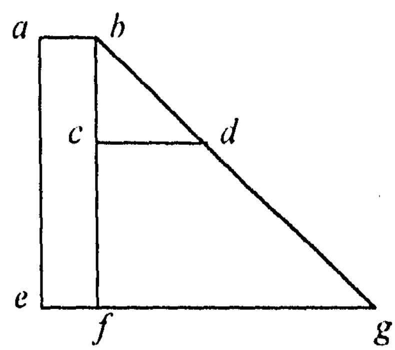


Fig. 10. Diagrama de tiempo-velocidad.
La velocidad inicial es *ab*.

Según este autor, sí hay una velocidad inicial al principio de todo movimiento pero, en el caso de la caída libre, ella permanece inalterada. Algo que también llama la atención es su representación gráfica del tiempo y de la velocidad. Si bien en la Edad Media comenzaron a formularse estos esquemas, no hubo uno que se le pareciera al anterior (la regla de Merton representa a la velocidad como la hipotenusa del triángulo y a los catetos como los recorridos espaciales, pero el tiempo no queda, geométricamente, expresado; hay que imaginarlo).

Harriot desecha una relación del tipo lineal entre el espacio y la velocidad, pero no dice porqué. Ahora bien, su experimento consistió en lanzar una bala muy pesada desde una altura de 55 1/2 pies, calculando el tiempo -por medio de las pulsaciones de su muñeca- que tardaba en llegar al suelo. Consignándolo de una manera sobria y un poco obscura:

> " La bola cae de 55 1/2 pies [de altura en] 2 1/2 [pulsaciones]. El tiempo mayor [calculado] es de 2 pulsos, el tiempo menor de 3 pulsos. [El experimento] fue ensayado con 20 balas, una [cayendo] después de la otra." [8]

Lo que en realidad hizo Harriot fue un promedio de los tiempos empleados por veinte balas del mismo peso liberadas simultáneamente para que, según él, no se perdiera continuidad. Se valió de un ayudante, situado en lo alto de una torre, al cual le indicaba -ignoramos si con una seña o algo parecido- el momento preciso para soltar la bala; entonces iniciaba a contar el número de pulsaciones de su muñeca hasta el momento en que aquélla hiciese contacto con el suelo. Cuando esto sucedía, su colaborador soltaba otra, al tiempo que Harriot se aprestaba a contar una nueva serie de pulsaciones desde el instante de impacto con el suelo de la bola anterior. Así es como pretendía sincronizar Harriot su improvisado *reloj.* El método es, en principio, bueno porque permite establecer, de una manera aproximada, un criterio válido para definir una *duración igual de tiempo.* Sin embargo, exige mucha concentración iniciar (o finalizar) el conteo en los *instantes precisos.* Por otra parte, el método no es muy confiable en cuanto a la duración de las pulsaciones se refiere.

Es lógico que el *reloj* de Harriot no fuese lo suficientemente preciso, logrando contar solamente pulsaciones enteras. Pese a ello, este autor es consecuente: estima el tiempo de caída del grave efectuando un promedio entre los extremos superior e inferior. Concluye que la distancia a la cual desciende la bala en 2 1/2 pulsos oscila entre 10.4 y 16.3 pies . Como su *pulso* equivale a 0.74 s [9], los valores extremos de g que podemos calcular resultan ser de 634.4 y 994.3 cms^{-2}; y, en promedio, de 814.35 cms^{-2}. Aun tomando el primero de los valores antedichos, éste supera definitivamente un valor que Mersenne acusará como perteneciente a Galileo (*vid. infra*).

Los intentos por estimar <<la proporción entre los espacios y los tiempos>>, continuaron. En 1636 el fraile Marin Mersenne (1588-1648), perteneciente a la orden de los mínimos de París, da a conocer sus experimentos al respecto en una obra titulada *Harmonie universelle.* Una de las novedades es la introducción del péndulo como reloj; sugerencia, seguramente, debida a Galileo. Se sabe que Mersenne empleó un péndulo cuya longitud era de 3 1/2 pies de Rey (o pies reales), con un semiperíodo de oscilación ligeramente superior a un segundo.

El *modi procedendi* de Mersenne para medir el tiempo es interesante (ver figs. 11 y 12). Ordenaba que uno de sus asistentes, colocando una bola en el punto A, la soltase tan pronto el fraile hiciera lo mismo con una péndola *b* que tenía sujeta en una de sus manos. Cuando aquélla llegase al suelo (punto B), fijábase si la péndola había chocado con una bola fija *b'* colocada simétricamente respecto a aquélla; si no era así, volvía a repetir todo el procedimiento, modificando únicamente la altura inicial AB. Es obvio que, en un primer intento, no consiguiera establecer sincronía entre la llegada de la bola al suelo y el tiempo correspondiente al semiperíodo de oscilación del péndulo. Pero, repitiéndolo varias veces, pudo conseguirlo.

Debemos insistir en que no se trata de un experimento fácil, a pesar de su aparente sencillez. En primer lugar, determinar la simultaneidad entre los ruidos producidos por la bola emplazada en A y la péndola estrellándose sobre la bola fija, precisa de una percepción auditiva bastante sensible y muy bien educada (musicalmente hablando). En segundo lugar, es muy probable que Mersenne haya tenido que probar con distintos materiales antes de llevar a cabo el experimento. Esto seguramente con el fin de evitar -por ejemplo- que el impacto generado por la bola que cae al suelo no opacase el ruido resultante del choque entre la bola fija y la péndola.

No es, pues, un experimento que precisa actitudes de concentación y precisión mecánicas por parte del experimentador; más bien éste requiere de integrar sus sentidos (vista y oído) para tener una visión integral y precisa del conjunto.

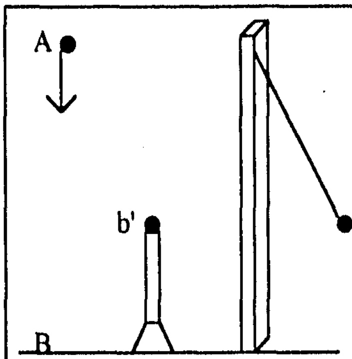


Fig. 11. Posición inicial: la bola se encuentra en reposo, al igual que la péndola y la bola b'.

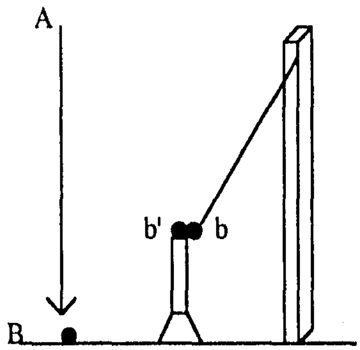


Fig. 12. La bola cae al suelo y la péndola b choca con la bola b', completando un se - miciclo.

La forma de lograr lo anterior era tratando de que el ruido producido por la bola abandonada desde el punto A coincidiera con el generado por el choque entre la péndola *b* y la bola inmóvil *b'.* Si después de innumerables ensayos, los sonidos percibíanse -auditivamente- como *simultáneos*, entonces Mersenne podía afirmar que la bola *a* completaba la distancia AB en un semiperíodo t_{AB} de su péndulo.

Si observamos detenidamente, la parte más difícil de este experimento no consiste en la detección de la simultaneidad a la manera indicada -un oído agudo puede percibir diferencias mínimas de tiempo-, sino en buscar la altura adecuada que la produzca. Son tan numerosos sus ensayos que incluso se siente obligado a refutar el valor supuestamente manejado por Galileo:

> " [Si suponemos] que las cien brazas de Galileo son 166 2/3 de nuestros pies, [aún así] nuestras experiencias *repetidas más de 50 veces*... nos apremian a decir que la bola cae 300 pies en cinco segundos, es decir 180 brazas, o casi dos veces más que lo propuesto por [aquél]: de suerte que [la bola] debe caer las cien brazas... en 3

> 18/25 [segundos]... y no en 5. Porque hemos probado muy exactamente que un globo de plomo cuyo peso es cerca de una libra... cae de 48 pies en 2 [segundos], de 108 pies en 3 y de 147 pies en 3 1/2..." [10]

Al atribuir Mersenne a Galileo la <<caída de un grave desde una altura de 166 2/3 pies en cinco segundos>>, podemos obtener un valor para g de 438.3 cms^{-2}. Por el contrario, el valor reportado por el clérigo -<<48 pies en 2 s>>- es superior al de aquél: 788.8 cms^{-2} ; superando además el valor inferido del folio 107v: 696.3 cm^{-2} (*vid. supra*).

En seguida presenta una tabla - que hemos abreviado- donde ordena sus resultados para compararlos con los de Galileo.

[TABLA IX : MERSENNE *VERSUS* GALILEO [11]]

A	B	C	D
1	3	1	1
2	12	6 2/3	4
3	27	15	9
4	48	26 2/3	16
5	75	41 2/3	25
6	108	60	36
. . .	. . .	. . .	. . .
10	300	166 2/3	100

La columna A representa el tiempo (en unidades de medio segundo). La columna B, las distancias -en pies reales- recorridas por el grave en un tiempo determinado (las cuales son denominadas por Mersenne como los *espacios atravesados* por el móvil). Mientras que las columnas C y D representan las distancias derivadas de la suposición galileana en, siguiendo el mismo orden, pies reales y brazas florentinas.

Si aplicamos a los *datos* anteriores la llamada *regla de la proporción doble* (*i. e.*, suponer que los espacios recorridos son proporcionales al cuadrado de los tiempos) notaremos una correspondencia exacta, tanto en los resultados de Galileo como en los de Mersenne, que más bien parecen -y en realidad son- cálculos efectuados a partir de un solo resultado experimental. Desde la perspectiva actual, esto no se consideraría como un experimento; si acaso como una predicción sin el suficiente fundamento (en cuanto al número de *datos* se refiere). Sin embargo, en el siglo XVII era un experimento completo, pues pretendía obtener solamente *una proporción de carácter constante*: cuál es la distancia efectiva recorrida por un móvil en una unidad de tiempo previamente establecida (y como corolario: conociendo la proporción entre los tiempos y los espacios, podíase determinar la constante que los relacionara numéricamente). Obtenido dicho valor, ¿qué caso tenía hacerlo para distintos valores del tiempo y el espacio, si se había procedido de la mejor manera verificando infinidad de veces si a un espacio dado recorrido por el grave le correspondía siempre el mismo tiempo? Obsérvese la diferencia respecto al trabajo practicado en los laboratorios actuales de enseñanza: Mersenne fija una *variable* para inferir experimentalmente la otra; no infiere una serie de valores -susceptibles de análisis porque no resultan ser siempre iguales entre sí- capaces de alterar el valor de aquélla.

Igualmente, para el científico -que en ocasiones debe medir una misma cosa infinidad de veces (y en distintas circunstancias) con objeto de <<comprobar si los datos experimentales se ajustan al modelo teórico>>-, es sumamente difícil comprender la actitud asumida por Mersenne. Por supuesto, el trabajo científico no se reduce a lo dicho con antelación; nos referimos sólo a uno de los aspectos más socorridos cuando se trata de verificar hipótesis o de *probar* modelos teóricos.

De la misma forma que Galileo, este autor supone que la proporción que ha encontrado entre los tiempos y los espacios es invariable respecto a la distancia sobre la superficie terrestre; y, extrapolando, termina incluso por calcular el tiempo que tardaría en caer hasta la Tierra un cuerpo situado cerca de la luna. [12]

A pesar de la importancia que tenía dentro de una física galileana la constante de aceleración gravitacional, lo cierto es que Mersenne no reportó su valor de manera expresa.

Tanto Galileo como Mersenne, suponían que la magnitud de la constante de marras era invariable con la altura. No es difícil descubrir la consecuencia inmediata de este razonamiento: la Tierra atraería con la misma fuerza un cuerpo colocado a escasos metros de la superficie y otro situado en las inmediaciones de la Luna. Tendrían que transcurrir varios años antes de que la invariabilidad de la constante *g* fuera refutada. A raíz de la publicación de la obra cumbre del pensamiento newtoniano (los *Principia*) en el verano de 1687, otros científicos continuaron estudiando la influencia de factores como la distancia, la latitud, etc. en la constante de aceleración gravitacional. Uno de ellos fue el matemático y físico holandés C. Huygens, quien a finales del siglo XVII demostró que el valor de aquélla varía con la latitud.[13]

El mismo año de la aparición del *Harmonie* de Mersenne, el jesuita Honoré Fabri publica cuatro volúmenes que conformaron su *Tractatus Physicus de Motu Locali.* Aunque la obra analiza problemas de artillería, contiene una observación tocante al problema que nos ocupa. Al decir de Fabri, "en el primer segundo de caída vertical, un grave recorre 12 pies [ingleses]."[14] Desafortunadamente, no informa con claridad cómo lo obtuvo. Pero es interesante notar lo siguiente: el valor de la constante de aceleración gravitacional, que se desprende de su aserto, es muy próximo al de Mersenne: 732.0 cms^{-2}.

Es importante señalarlo porque el análisis de Fabri es muy diferente al de aquél. Por ejemplo, su estudio acerca del movimiento de proyectiles lo obliga a decir que la parábola galileana es <<una falsa trayectoria>>. No entraremos en más detalles al respecto.

3.3.2. RICCIOLI Y HUYGENS: EL PERFECCIONAMIENTO DE UNA TÉCNICA DE MEDICIÓN.

Entre 1640 y 1650, un profesor boloñés de filosofía, el P. Juan Bautista Riccioli, decidió emprender -junto con otros clérigos- una serie de experimentos destinados a "encontrar por medio del movimiento perpendicular... la proporción entre la velocidad de los Graves descendiendo con rapidez creciente hasta el final de su movimiento."[15] En su *Almagestum Novum* (1651), consignó los resultados de 10 años de investigación.

Riccioli y sus colabradores emplearon -como Mersenne- un péndulo de período conocido para estimar los tiempos de caída de varios glóbulos de plomo arrojados desde diferentes alturas.

Es probable que, mientras uno de sus ayudantes soltaba un glóbulo, otro dejaba libre la péndola, contando él las *vibraciones* de esta última hasta el momento en el cual aquélla tocara tierra.

Riccioli designa con el nombre de *vibración perpendicular simple* a la mitad del recorrido de la péndola desde el punto B hasta la recta vertical OD (véase fig. 13). De este modo, en lo que nosotros denominamos como un *semiperíodo de oscilación*, existirían dos *vibraciones perpendiculares simples.*

Riccioli debió pensar en este tipo de división por ser relativamente fácil de contar al momento de soltar la péndola. Si, p. e., la péndola soltada inicialmente desde B no completara un número entero de *vibraciones* -alcanzando solamente el punto H- cuando una bola abandonada desde un punto G llegase al suelo (J), se buscaría acortar (o alargar) un poco la distancia GJ para que la péndola terminase su recorrido en el punto D.

Son dos las circunstancias que diferencian su experimento respecto al de Mersenne: 1) no se conforma con medir el tiempo de caída del grave con una sola *oscilación* efectuada por su péndulo. Riccioli lo emplea, sin más, como un reloj cuyo número de *vibraciones* es independiente de la amplitud inicial; y 2) determina el tiempo de recorrido del grave para diferentes alturas (sin extrapolar).

Y dos, a su vez, aquellas que lo igualan: 1) la aplicación del mismo criterio de sincronicidad para estimar la llegada de los graves hasta el suelo; y 2) el uso de alturas que se adecúen a un número entero de *vibraciones*.

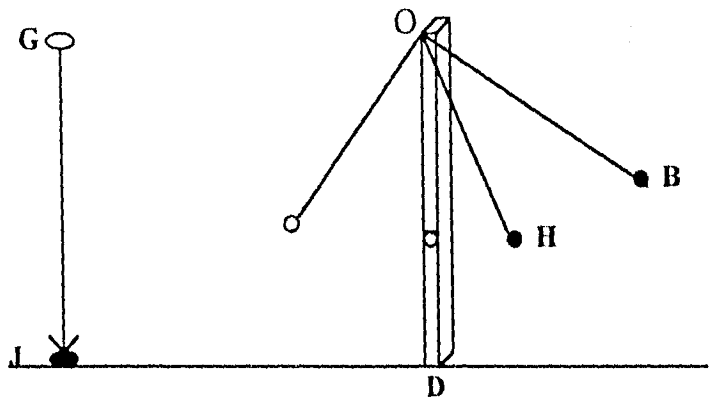


Fig. 13. Dos *vibraciones* equivalen a un semiperíodo de oscilación.

Dejemos, empero, que sea el propio Riccioli quien nos informe acerca de sus experiencias y de los resultados que obtuvo:

> " (...) Grimaldi y yo hemos preparado muchísimas bolas coloreadas del mismo peso, y cada una de 8/12 [de libra], las cuales arrojamos desde distintos torreones, o más bien ventanas... de alturas previamente medidas... la primera [fue arrojada] desde la más alta torre boloñesa, a saber la Torre degli Asinelli cuya altura es de 312 pies romanos, [luego en] San Pedro con 208 pies de altura, la de San Petronio con 200 pies, la de San Jacobo con 189 pies y la de San Francisco con 150 pies de altura. Nos es lícito no [registrar] todos los sitios en los que [experimentamos], los cuales... se ajustan [, no obstante, a la *regla de la proporción doble*]. " [16]

Muchos de los detalles anteriores pueden parecernos intrascendentes, mas ése era el estilo de los *filósofos naturales* encargados de construir un conocimiento que, cada vez más alejado de la mera especulación, pretendía ser exacto, matemático; con el menor número de elementos subjetivos, prejuicios u opiniones sin fundamento físico. Además, para que un experimento fuera digno de confianza, debía detallar no sólo las condiciones de experimentación, sino también las circunstancias que confluyeron en su realización, los testigos que lo hubiesen presenciado, su factibilidad, etc. En seguida, Riccioli construye una tabla donde vierte los mejores resultados de su ingente trabajo.

[TABLA X : EXPERIMENTO DE RICCIOLI [17]]

Vibraciones perpendiculares simples.	Tiempos correspondientes a las vibraciones. ''	'''	Espacio preparado a la esfera coloreada hasta el final de su caída. Pies Romanos	[Espacio recorrido por cada bola entre dos tiempos sucesivos]* Pies Romanos	Proporción del incremento de velocidad [...] Como los números impares.
			[Primer Experimento]		
5	0	50	10	10	1
10	1	40	40	30	3
15	2	30	90	50	5
20	3	20	160	70	7
25	4	10	250	90	9
			[Segundo Experimento]		
6	1	0	15	15	1
12	2	0	60	45	3
18	3	0	135	75	5
24	4	0	240	105	7
casi 26	4	casi 20	280	**	**

* En el original: << Spatium ergo seorsim confectum singulis temporibus aequalibus >>.

** Estos espacios, en el original, aparecen vacíos.

La primera columna contiene el número de *vibraciones perpendiculares simples* efectuadas por el <<reloj>> de Riccioli.

La segunda y tercera columnas registran el número de *vibraciones simples* efectuadas por el péndulo -en sexagésimos de minuto ('') y en sexagésimos de segundo ('''), respectivamente- hasta el instante preciso en el cual la bola, arrojada desde las distintas alturas del torreón, se estrella contra el suelo.

Al parecer, el péndulo usado por Riccioli en estos dos experimentos tenía una longitud de 1 pie romano y 5 1/2 pulgadas (cerca de 43.5 cm); siendo, por lo tanto, su semiperíodo de oscilación aproximadamente de 0.66 segundos. Suponemos que las amplitudes iniciales desde las cuales el profesor boloñés soltaba la péndola no fueron muy grandes. De otra manera, no podríamos explicar porqué sus resultados son -para su época- muy buenos.

En la cuarta columna se encuentran agrupadas cada una de las alturas que sirvieron para arrojar las bolas. La quinta, en cambio, consigna las diferencias que se obtienen de restar dos valores consecutivos de la columna precedente. Finalmente, la sexta es una comparación de los valores anteriores con la serie de los números impares. En esta columna, el padre Riccioli seguramente trataba de encontrar alguna regularidad matemática entre las diferencias espaciales y los tiempos de recorrido.

Tomando el valor más representativo (o simple) de la columna anterior, Riccioli no duda en afirmar que, en un segundo, la bola recorre un espacio equivalente a 15 pies romanos.

En su segundo experimento, se puede apreciar con mayor facilidad el cumplimiento de la *proporción doble* entre los valores de las columnas tercera y cuarta. Ante este hecho, Riccioli propone una sencilla ecuación que relaciona los tiempos y las distancias en *el movimiento perpendicular no-violento* [18]:

$$h = 15\, t^2 \qquad \ldots (15)$$

donde h es la altura de lanzamiento, t el tiempo de recorrido y 15 el valor de la constante de proporcionalidad. (Recuérdese que, al decir de Riccioli, el cuerpo recorre <<15 pies en un segundo>>. Así, la mentada constante quedaría expresada, en términos modernos, de la siguiente manera: 15 pies/s^2). Ahora bien, obsérvese a su vez que la quinta columna es proporcional a la sexta. Razón por la cual no implica mayor dificultad darse cuenta de que

$$h_2 - h_1 = 15\,(t_2 - t_1)(t_2 + t_1) = 15\, C_n \qquad \ldots (16)$$

siendo h_1 y h_2 dos alturas distintas -pero consecutivas- de lanzamiento y C_n la serie de los números impares ($C_1 = 1$, $C_2 = 3$, etc). Riccioli y su colaborador, el padre Grimaldi, suponen que, al ser proporcionales las diferencias de los espacios a los *numeri impari ab unitate* (pues $t_2 - t_1 = 1$ segundo), estos números representan **la proporción del incremento en la velocidad.** Desde la perspectiva moderna, no andaban errados: ahora sabemos que si derivamos la expresión (15) con respecto al tiempo, la velocidad resultante (dh / dT) es proporcional a $h_2 - h_1$. Pero aún no aparecía en la escena matemática del siglo XVII el concepto de *derivada*, el cual habría prestado no poco auxilio en la comprensión (y justificación) de los asertos precedentes.

Así, lo último no deja de ser más que una feliz intuición del profesor boloñés, debida a la fuerte influencia que los *Discorsi* habían ejercido sobre él.

Por otra parte, la correspondencia demasiado exacta observada en la tabla IX, pudiera hacernos pensar que se trata -parafraseando a Alexandre Koyré- de un *experimento prejuiciado.* Pero tenemos razones para afirmar que lo anterior no es del todo cierto. La primera: no es fácil sincronizar el movimiento oscilatorio de un péndulo con el tiempo que tarda en caer la bola; siendo indispensable, al menos, buscar las alturas adecuadas que se *ajusten* al período de aquél (lo cual implica numerosos ensayos no siempre exitosos). En segundo lugar, si no se dispone de medios lo suficientemente precisos para determinar el valor numérico de una cantidad, es válido -aun en la actualidad- tratar de controlar la llamada variable independiente (la distancia en este caso), con objeto de medir la otra variable (el tiempo) en las circunstancias más convenientes.

De este modo, Riccioli y colaboradores debieron buscar -entre sus múltiples experiencias- aquellas alturas desde las que, al lanzar las bolas, no fuese demasiado complicado contabilizar un número entero de vibraciones. Detengámonos en esto. Puesto que los cenobitas arrojaban las <<bolas coloreadas>> de plomo desde diferentes alturas, ¿cómo solucionaban el hecho de que las *alturas adecuadas* no coincidían *exactamente* con las ventanas existentes en los torreones? Como aquéllos no lo informan, nos vemos en la necesidad de proponer un mecanismo. Veamos. Supongamos que los religiosos buscaran una altura de doscientos cuarenta o doscientos noventa pies romanos para lanzar la bola. Pues bien, podían subirse a un torreón -por ejemplo- de doscientos cincuenta o trescientos pies (o lo que midiese el susodicho) y, desde ahí, bajar la bola de plomo, amarrada por uno de sus extremos a una cadena de unos diez pies de longitud (o la que fuese necesaria), hasta la altura deseada. Así, bastaría sólo una indicación de alguien que estuviese al pie del torreón para que el individuo que sostenía la bola de plomo dotada de su cadena la abandonase a su suerte.

Finalmente, calcularemos el valor de la aceleración gravitacional a partir de los tiempos y los espacios reportados por el jesuita en la tabla anterior.

TABLA XI: ANÁLISIS DEL EXPERIMENTO DE RICCIOLI.

Experimento	Tiempo registrado mediante el péndulo. T (s)	Distancia recorrida por la bola. D (cm)	Valor derivado para *g*. (cm / s^2)
	0.83	295.7	858.5
	1.66	1182.8	858.5
I	2.50	2661.3	851.6
	3.33	4731.2	851.6
	4.17	7392.0	850.2
			promedio : 854.08
	1.0	443.6	887.1
	2.0	1774.2	887.1
II	3.0	3992.0	887.1
	4.0	7096.8	887.1
	4.3	8279.6	895.6
			promedio : 880.80

Nótese que todos los datos de la segunda columna -con excepción del postrero- representan intervalos iguales de tiempo. Esto es muy significativo porque si, por ejemplo, arrojaban una bola y cronometraban un tiempo *t*, al arrojarla nuevamente desde una altura cuatro veces mayor, el tiempo esperado -en concordancia con la regla de la *proporción doble- debería* ser $2t$. De esta forma podían confirmar si, a una altura cualquiera, el tiempo *medido* coincidía con el tiempo *esperado.*

Si bien el error en g fluctúa entre el 10 y el 13% respecto al valor que hemos tomado como base (980.7 cm/s^{-2}), existe una mejoría significativa en relación al dado por Mersenne (788.8 cm/s^{-2}). Nótese que la <<tecnología>> empleada por ambos -un péndulo, globos de plomo y torres altas- es prácticamente la misma; el único cambio es la actitud de refinamiento del experimentador.

De modo que, sin existir una revolución profunda de los medios tecnológicos, fue posible un aumento en la precisión experimental. Cristian Huygens (1629-1695), última figura que trataremos, ilustra con mayor profundidad dicha actitud.

En 1659 Christiaan Huygens (1629-1695), matemático y físico holandés, vuelve a repetir (y mejora) los experimentos realizados por Mersenne. Habían transcurrido más de veinte años desde entoces, pero el problema de calcular la constante de proporcionalidad entre los tiempos y los espacios seguía vigente (en particular porque empezábase a dudar que dicha constante fuese independiente de otros factores como la altitud, la distancia al centro de la Tierra, etc.)

Huygens se vale del mismo criterio de simultaneidad concebido por el fraile parisino para estimar el tiempo de caída de una bola colocada en el punto C. Según el consabido autor (ver fig. 14):

> " [Si tomamos una] cuerda [AB] con la plomada en B y [otra] bola de plomo colocada [a una altura dada en] C, [ambas] detenidas al comienzo, [procedamos a] articular el [movimiento] de la esfera C con el comienzo del movimiento del péndulo [a través de] su plomada en B, hasta que ésta se impregne con [varios] palimpsestos [perfectamente apilados pegados a una tabla] y se produzca un claro sonido [debido al choque]. La simultaneidad entre los sonidos [de la plomada que se estrella contra los palimpsestos así dispuestos y de la esfera que cae desde C] la decidirá [esta última] cayendo [sobre] una caja GH... " [19]

Este experimento no es fácil porque requiere que el experimentador coordine la destreza manual (soltar la plomada al momento de abandonar la bola en C) con la agudeza visual (determinar el *instante preciso* en el cual aquélla cae) y con la agudeza auditiva (percibir si el choque de la plomada B en los palimpsestos apilados ocurrió *al mismo tiempo* en el que la bola golpea la superficie de la caja GH). Cualidades más de un músico que de un científico... En efecto, Huygens poseía un gran conocimiento y sentido musicales,[20] lo cual le ayudó sobremanera en la estimación de la mentada constante.

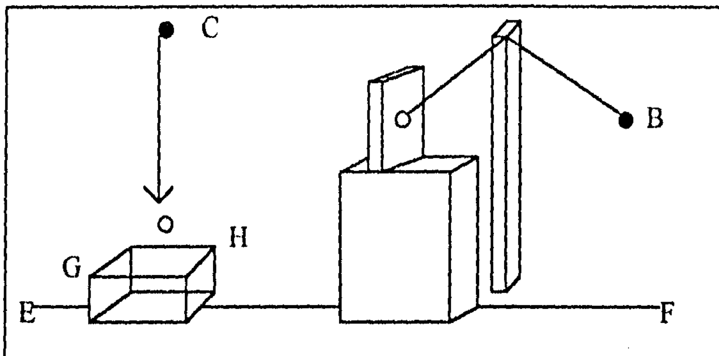


Fig. 14. Dispositivo experimental de Huygens.

El 21 de octubre de ese año, efectúa sus primeras experiencias -según comenta- más depuradas respecto a las que venía haciendo. Razón por la cual

> " [usando un péndulo con período] de medio segundo y 3 pies y medio de longitud [determinamos que un cuerpo al caer] recorre un espacio de 14 pies de altura en un segundo (...) Experimentamos de nuevo el día 23... con un segundo péndulo cuya vibración simple [la realizaba] en 3/2 unidades de segundo... La longitud de este péndulo era cerca de 6 pies y 11 doceavos. Pero aquí el registro de las vibraciones lo llevábamos con nuestro *horologium*, y colegíamos. Y así, contando al mismo tiempo las semivibraciones con la caída... de la bola de plomo [resultó] una altura de 7 pies y 8 doceavos [en 3/4 de segundo] .Por consiguiente [al realizarlo por segunda vez], la altura de caída fue de 7 1/2 pies [atravesados en 3/4 de segundo] " [21]

Es decir, empleó un péndulo cuya longitud era de 6 11/12 pies; mientras que su *vibración simple* (semiperíodo de oscilación) la completaba en 3/2 segundos. Sin embargo, reporta sus resultados no en base a la unidad de tiempo anterior, sino en *semivibraciones*, o sea, duraciones equivalentes a la cuarta parte de un período de oscilación completo. Por lo que observamos, comunica el fruto de sus investigaciones en un estilo más coloquial (a modo de diario personal) que lógico y sintético; no como un científico moderno, preocupado por hacerlo de la manera más clara y sencilla posible.

Esta primera serie de experimentos arroja tres valores diferentes que nosotros podemos analizar -pues Huygens reporta la longitud del péndulo y su período de oscilación- para calcular la constante *g*: 14 pies atravesados en el primer segundo, 7.66 pies recorridos en 0.75 segundos y 7.5 pies de trayecto en 0.75 segundos. En ese orden, calculemos los tres valores que se desprenden para la constante de aceleración gravitacional : 853.4, 830.9 y 812.8 cm/s^{-2}. En lo que a precisión se refiere, son mejores a los que Mersenne reporta; pero quedan debajo de las cantidades obtenidas por Riccioli.

Huygens menciona la existencia de un *horologium* (reloj) con el cual verifica que las oscilaciones de su péndulo sean precisas y midan siempre el mismo período de tiempo. En seguida explicaremos el funcionamiento de tal <<dispositivo>>.

Una vez que abandonaba a su peso la bola situada en C, esperaba el regreso de la plomada B a su lugar inicial; de no coincidir éste con la llegada de aquélla, volvía a repetirlo cuantas veces fuera necesario. Pero una vez que tenía una estimación preliminar, fijábase en el tiempo obtenido con el péndulo; buscando la manera, finalmente, de igualar este registro con la duración, previamente determinada, de una nota musical cantada o reproducida mediante algún instrumento. De no lograrse lo anterior, tenía dos opciones: 1) modificar la altura C para acortar (o alargar) la magnitud del tiempo de caída; o 2) buscar otra nota cuya duración fuese más adecuada. Huygens optó por la primera. Sin embargo, existía una limitante en ella, porque, al proseguir con sus ensayos, notó que registraba el mismo período de tiempo con su péndulo (0.75 segundos) cuando la bola era lanzada desde una altura de 8 pies y 9 1/2 doceavos. Viéndose obligado a reconocer que

> " ...*aunque aumentemos o disminuyamos en tres catorceavos* [de pie] *solamente* [dicha] *altura, los sonidos* [de la bola chocando con la caja y el de la péndola contra la tabla] *parecerán simultáneos y no habrá diferencia... no pudiendo convenir una medida exacta.* Sin embargo... en un segundo la bola habrá caído 15 pies 7 1/2 [doceavos] aproximadamente (...) Antes de explorar las cantidades temporales con las oscilaciones de [nuestro péndulo] empleamos nuestro horologium. [Estos] Experimentos fueron muy frecuentemente repetidos. " [22]

De la estimación precedente -<<15 pies y 7 1/2 doceavos de recorrido de la bola en un segundo>>-, surge un nuevo resultado: g = 867.0 cm/s^{-2} ; cantidad que mejora un poco sus estimaciones anteriores. Al llegar a este punto, Huygens reconoce que no podrá alcanzar mayor precisión experimental porque ha rebasado los límites de la técnica ideada por Mersenne; el experimento se encuentra agotado, insuficiente para nuevas aproximaciones: el *horologium* debe ser sustituido por un mecanismo de relojería capaz de registrar el tiempo con independencia de las circunstancias y de los lugares; por un auténtico cronómetro de precisión.

En 1657, Huygens había construido un reloj de péndulo cuya precisión era aceptable (pero sólo si efectuaba oscilaciones pequeñas y en número no muy grande). Al tratar de fabricar péndulos que registraran períodos de tiempo más largos, le pareció encontrar cierta dependencia entre el número de oscilaciones efectuadas por la péndola y la amplitud inicial. Prosiguió sus investigaciones de manera teórica, llegando a un resultado inquietante: es imposible fabricar un **reloj isócrono** partiendo de un péndulo galileano -o, como diríamos ahora, de un <<péndulo simple>>.

3. 3. 3. LAS DISTINTAS FORMULACIONES PARA UN MISMO MOVIMIENTO.

Es importante señalar que Huygens no se conforma con cuantificar la experiencia y extraer cantidades numéricas; le preocupa -como a todo teórico- encontrar los principios que rigen algún fenómeno en particular. En una carta a Mersenne [23], fechada el 28 de octubre de 1646, siendo aún muy joven, aborda el mismo problema que Harriot (*vid. supra* 3. 3. *1*): si al comienzo de su caída un grave, que en principio debería pasar por todos los grados de celeridad, posee una cierta velocidad. En términos modernos, el problema se reduce a responder lo siguiente: ¿desde el primer *instante* en el que un grave comienza a caer adquiere, por este sólo hecho, una velocidad distinta de cero? En la actualidad respondemos afirmativamente porque conocemos el concepto de *velocidad instantánea.* Pero los científicos del siglo XVII, cuando aún el cálculo diferencial no estaba maduro, no podían zanjar fácilmente dicha cuestión; sobretodo porque sus análisis sobre la división del tiempo tomaban la vertiente de la filosofía (los infinitesimales, la posibilidad de dividir el espacio *ad infinitum*, etc.)

Sin embargo, Para Huygens es un hecho que los graves poseen una velocidad distinta de cero en el primer instante de su caída; Mersenne, en cambio, supone que, al pasar el grave por todas las velocidades posibles hasta alcanzar una en especial, al principio tendría solamente una velocidad demasiado pequeña -mucho menor a la que pudiera imaginarse- de la que no tendría mucho sentido hablar. Esta razón no impide que C. Huygens siga profundizando en el tema y, después de algunas reflexiones, acepta que la diferencia entre los espacios recorridos por el grave, en dos instantes sucesivos de tiempo, siguen una relación fija expresada por [24]

$$[\, f(2t) - f(t)\,] \,/\, f(t) = \text{cte.} \qquad \text{ó} \qquad f(2t) = Kf(t), \qquad \ldots \quad (17)$$

donde $f(t)$ y $f(2t)$ representan, respectivamente, los espacios recorridos por el grave en el primero y en el segundo instante de su movimiento. Al quedar relacionados de esta manera el tiempo y el espacio, era claro que en el primer instante de caída el móvil ya habría recorrido una distancia, por muy pequeña que ésta fuese; así, aun en un instante infinitesimal, el cuerpo grave tiene ya una velocidad (de otro modo permanecería inmóvil).

Comparemos las expresiones (16) y (17). Su similitud: son expresiones matemáticas que predicen la relación existente entre los tiempos y los espacios. Su diferencia: el lenguaje de representación es diferente. De esta manera, la primera sintetiza un problema particular donde la constante de proporcionalidad entre aquéllos es igual a un número: 15. La segunda, en cambio, lo generaliza: para dos tiempos consecutivos, la diferencia entre sus espacios correspondientes se mantiene constante.

A nosotros la diferencia anterior pudiera parecernos intrascendente, pero no lo era para los pensadores del siglo XVII. Recordemos, en primer término, que la explicación de los fenómenos físicos por medio de ecuaciones no era una práctica común. En segundo lugar, los pocos autores que combinaban la matemática con la naciente experimentación física, muchas veces se limitaban simplemente a encontrar la expresión que resolviera un problema especial, sin buscar otras consecuencias o variaciones que pudiera contener aquélla. Finalmente, aun los autores -como Galileo- que buscaban principios para explicar el fenómeno y hacer predicciones sobre el mismo, daban por hecho que la representación del resultado experimental era única.

Al proponer la relación supradicha, Huygens cambió el lenguaje de los investigadores que continuaron realizando experimentos: ya no se buscaría relacionar mediante una *serie* los valores de las cantidades medidas, sino mediante una *función* que relacionara las *variables* involucradas en el proceso de medición.

Con base en lo anterior, si regresamos a la tabla IX de esta sección, veremos que las cantidades contenidas en las columnas A y D cumplen la relación (17); por supuesto, siempre que representen, en ese orden, las variables del tiempo (t) y las funciones de éste $f(t)$. Ahora bien, lo que se desea resaltar es el cambio operado de Mersenne a Huygens: mientras el primero considera a <<la columna D como el *cuadrado* de la columna A>>, para el segundo <<la columna D está en *función* de la columna A>>. Esta transformación de conceptos no es intrascendente; nos muestra que, a pesar de proceder de un mismo experimento, los datos extraídos no derivan necesariamente en las mismas formulaciones teóricas. Si para un "galileano" -como Mersenne- el tiempo puede simularse mediante la serie de los números naturales, Huygens lo interpreta más como una *variable* que, en principio, es continua.

Por ejemplo cuando Galileo considera que **los tiempos pueden representarse como segmentos de línea** (*vid.* Teoremas I y II, Jornada Tercera, de los *Discorsi*), implícitamente está suponiendo que el tiempo puede <<manejarse>> como un objeto geométrico.

En síntesis, Galilei empleó la geometría para abstraer el movimiento. Esto significa que si el tiempo es representado como la hipotenusa de un triángulo, y el incremento en la velocidad como los segmentos de línea paralelos al cateto adyacente del mismo triángulo, el análisis matemático que se les aplique a esas figuras geométricas, equivale a realizarlo en la velocidad y el tiempo *reales*. La abstracción matemática, como representación *fiel* de una parte de la realidad, se identifica, previo proceso analítico-interpretativo, con lo *real*. Abstracción que muchos pensadores medievales -aunque incipientemente- habían podido realizar. Pero Galileo da un paso más: una vez resuelto el problema, *intenta* confrontar la experiencia y los principios derivados de sus abstracciones. Decimos *intenta* porque, si recordamos el problema de la caída libre, no tuvo en ocasiones los medios adecuados para llevarlo a cabo. Mas, como las líneas precedentes muestran, ese paso sí fue dado por los pensadores influidos por los experimentos planteados por Galileo Galilei en sus obras (principalmente en los *Discorsi*).

Ahora bien, Huygens llegó más lejos: investigó, de igual forma que los demás, hasta topar con dificultades técnicas que amenazaban con anquilosar el reciente camino experimental abierto por Galileo; volvió entonces a la teoría y encontró no sólo la resolución de dichas dificultades, sino además un dispositivo cuyo funcionamiento estaba indisolublemente ligado al valor de la constante que deseaban calcular: un reloj isócrono.

Como se vio en el capítulo anterior, aunque Galileo pudo resolver el problema de la caída libre bajo algunas hipótesis estrictamente geométricas y otras suposiciones prestadas del movimiento sobre el plano inclinado, precisaba de dos cosas. Primeramente, verificar que aquéllas tenían un sólido fundamento físico; apoyándose para ello en los experimentos descritos en los folios. La otra tocaba un asunto de corte totalmente experimental: calcular una constante. No siéndole posible responder a este último por medio de subterfugios o tratamientos experimentales indirectos. Aun el caso del folio 107v -donde los valores reportados son muy cercanos a los que se obtienen con las ecuaciones actuales- el correcto análisis geométrico (y también experimental) no le garantizaron la resolución completa del problema de la caída libre. Por la cual, en parte, la equivalencia que él suponía para los dos tipos de movimientos, no quedó lo suficientemente demostrada. Así, resolver el segundo no significó terminar con el primero; y los resultados derivados de uno no pudieron extenderse, automáticamente, al otro. Si en el *movimiento natural* de los graves es válido tomar a las esferas como puntos, no sucede lo mismo cuando la esfera rueda a través de un plano. Lo dicho muestra que un análisis *ideal* presenta, en la práctica, una serie de limitaciones de naturaleza diferente en problemas -que parezcan o sean- teóricamente equivalentes.

En cierta medida -insistimos- fue la necesidad de *completar* la teoría uno de los motivos que impulsaron a Galileo y sus coetáneos a tratar de encontrar la relación entre la distancia recorrida por un grave en un intervalo dado de tiempo. Sin embargo, a pesar de ser esta constante de importancia vital dentro de la dinámica galileana, muy pocos pensadores siguieron el ejemplo de Riccioli de calcular explícitamente el valor de aquélla, constante que en la actualidad simplemente escribimos como g. La mayoría de ellos no pudieron sintetizar el concepto de *aceleración* -o <<grado de aumento de velocidad>>, como algunos llegaron a denominarlo- en la constante g, porque lo concibieron como una categoría en la cual medir el *transcurso del tiempo* de un grave que cae involucra, de manera ineluctable, la medición del *espacio recorrido*.

Aunque la precisión en el valor de *g que podemos inferir* mejoró en forma significativa conforme se afinaban las técnicas de medición, este proceso no fue lineal, ni concretado necesariamente bajo los mismos objetivos. No obstante, y en buena parte de los casos, uno de dichos objetivos destacó sobre los demás y se mantuvo enhiesto: la cuantificación de las experiencias que sirvieran de fundamento -directa o indirectamente- a la nueva física inaugurada por el científico italiano. Como en toda época, la filosofía del experimentador y los medios de experimentación realmente existente[25] (o disponibles) influyeron de manera significativa en esta búsqueda. Finalmente, conviene resumir en la siguiente tabla algo que podríamos denominar <<un proceso en busca de la precisión>>.

TABLA XII : SÍNTESIS DE LOS EXPERIMENTOS

Autor	Lugar y año (s) de experimentación.	Valor **inferido** para *g*. (cm/s^{-2})	Porcentaje de error respecto al valor actual* (%)
Harriot	Inglaterra, 1600	814.35 **	18.3
Galilei	___	438.3 ***	55.3
Galilei	Padua, 1603-4	696.3	29.0
Mersenne	París, 1636	788.8	19.6
Fabri	¿Inglaterra?, 1636	732.0	25.4
Riccioli	Bolonia, 1640-50	877.05 **	10.56
Huygens	Holanda. 1659	839.90 ***	10.60

* Se ha tomado como referencia el valor de *g* en Padua: 980.7 cm/s^{-2} **

** Representan valores promedio.

*** Derivado del folio 107v.

3. 4. LAS DIFICULTADES INHERENTES AL EXPERIMENTO DE CAÍDA LIBRE.

Un factor, muy importante dentro de la dinámica aristotélica, reveló su irremediable influencia en el esquema de la nueva ciencia: **la resistencia del aire**. Vimos (cap. 2) que la correspondencia teoría-experimento, en los trabajos galileanos acerca del movimiento de una esfera a través de un plano inclinado, es satisfactoria.

Galileo, además, se dio cuenta de la influencia ejercida por el aire sobre los cuerpos en movimiento y de las dificultades involucradas en su estudio. Si aquéllas pudieran minimizarse, quedaría demostrada una de sus tesis más importantes: que todos los graves, sometidos al movimiento <<natural>>, tardan el mismo tiempo en caer -independienlemente de su forma y peso- si han sido abandonados desde una misma altura.

Tesis que, en la práctica, no parecía ser del todo cierta porque: 1) en ocasiones los graves más pesados tocaban tierra antes que los ligeros; y 2) si lanzaban desde una misma altura dos graves de igual peso, pero de distinta forma, muchas veces llegaba antes el que tuviese un menor volumen o tuviese partes puntiagudas.

De este modo, si en realidad deseaban sustituir la teoría aristotélica, los experimentadores de este siglo tenían la absoluta necesidad de demostrar que todos los cuerpos al caer quedan regidos por un mismo principio, fuesen <<pesados>> o <<ligeros>>.

Si a esto le agregamos la falta de expresiones matemáticas capaces de cuantificar un factor tan poco manejable como lo es la resistencia del aire, nos encontraremos con una física parcialmente inconclusa.

Asimismo, la igualdad entre los tiempos de caída de dos graves de distinto peso soltados desde la misma altura, no fue fácil de probar. Este hecho dividió a los pensadores de aquel tiempo: mientras que algunos -quizá los más conservadores- no concebían que un *principio* extraído de consideraciones geométricas fuese aplicable en *todos* los casos, olvidándose con ello de la naturaleza intrínseca del cuerpo, los que lo creían posible, sorprendíanse de que los asertos matemáticos, tan rigurosamente obtenidos y condensados en un *principio*, no resultasen *totalmente* ciertos.

Por otra parte, cuando Galileo (o alguno de sus seguidores) postula la existencia de un *vacío* en el cual la resistencia del aire no existe, y en el cual todos los cuerpos <<pesados>> o <<ligeros>> caen a la misma velocidad, los peripatéticos reciben su propuesta con una retahíla de argumentos que apoyan la existencia del *plenum*.

Uno de los primeros experimentos de que se tiene noticia en contra de la teoría aristotélica del movimiento natural, se debe a Simon Stevin (1548-1620). En su opinión, si tomamos

> " ...dos balas de plomo, una de ellas diez veces mayor en peso que la otra, [y las dejamos] caer juntas [desde] treinta pies sobre una plancha u otra cosa que suene con claridad, [veremos] que la más ligera no emplea diez veces más tiempo para caer que la más pesada, sino que *caen con tanta igualdad sobre la plancha que ambos ruidos parecen una única sensación de sonido*." [26]

Este experimento, realizado en el año de 1586, socavó una de las conclusiones más importantes en la obra del Estagirita: la dependencia peso-velocidad entre los cuerpos que caen. Mas, en el esquema de la nueva ciencia, el resultado obtenido por Stevin fue un puntal de mucha importancia; el propio Galileo lo incluyó en los *Discorsi*.[27]

Hacia 1645, Riccioli se propuso determinar si los cuerpos de distinto peso arrojados <<a través del aire>>, alcanzaban el suelo en forma simultánea. Desde una torre alta que frisaba los 92 m, dejó caer dos bolas -una de arcilla y la otra de papel apelmazado- recubiertas de argamasa blanca para distinguirlas fácilmente mientras duraba su caída. La bola de arcilla pesaba diez veces más que la de papel. Según Riccioli, al arrojarlas simultáneamente

> " ... la bola de arcilla [aventaja] a la de papel... en 12 pies algunas veces; en cerca de 40 [pies] en otras... Hemos repetido estos experimentos más de 15 veces... sin encontrar dos veces un mismo resultado. [Pero sí deducimos que] estas experiencias falsean a Aristóteles... " [28]

De ser correcta la opinión del Filósofo, la bola de arcilla debería haber caído diez veces más rápido que la de papel.

Por otra parte, discrepancias registradas por Riccioli, a lo largo de sus varios experimentos, oscilan entre 3.5 y 12 metros. Al decir de Riccioli, Galileo tenía razón al suponer que el aire sí contrarresta velocidad al grave. Mas, para evitar en lo posible la resistencia del aire, prefirió el uso de <<glóbulos gravísimos>> en sus futuros experimentos. Téngase en cuenta lo siguiente: si bien reconoce que la resistencia del aire retrasa el movimiento de cuerpos con distinta constitución, Riccioli no pudo estimar el grado en el cual sucede esto. Ello muestra que, en ocasiones, las tesis galileanas quedaron sustentadas por experimentos de carácter cualitativo; prestándose, por ello, a interpretaciones erróneas o sin la suficiente solidez experimental.

A pesar de la creación de nuevos y mejores dispositivos experimentales, fruto de la Revolución Científica del siglo XVII, el problema de la caída de los graves *en el vacío* no terminó. En cierto sentido, cuando el investigador dispuso de técnicas más refinadas, se topó con nuevas dificultades, las cuales -dicho sea de paso- tampoco fueron del todo resueltas. Un ejemplo de que no bastan medios de experimentación superiores para llegar a resultados incontrovertibles, lo tenemos en seguida.

Transcurría el año de 1668 cuando Robert Hooke, físico inglés y antiguo ayudante de Robert Boyle, se interesó en este tipo de experimentos. Los puso en práctica y sus resultados fueron similares a los de Stevin y Riccioli.[29] La novedad introducida por Hooke es el intento de experimentar *in vacuus*. A finales de octubre de este mismo año reporta un experimento consistente

> "... en [arrojar varios] cuerpos a lo largo de una caña de vidrio de alrededor de 4 pies de longitud, [siendo] agotado el aire dentro de ella. Se dejó caer [a través de la caña] una pluma... viniéndose hasta el fondo en cuatro segundos: pero cuando el aire fue readministrado, en 6 segundos... "[30]

Una semana después vuelve a repetirlo. Usó ahora una caña de siete pies de longitud: la pluma llegó al fondo de aquélla en alrededor de tres segundos. Según Hooke, el experimento fue repetido muchas veces y los resultados obtenidos fueron muy similares.

Ahora bien, un cuerpo cayendo en el vacío -sea una ligera pluma o una pesada bala de cañon- a una distancia menor a dos metros, emplea menos de un segundo en completarla; en ninguna forma cuatro segundos... Huelga señalar la explicación de esta discrepancia: en el interior de la caña el vacío no era total (*Vacuus non omnis*).

Existe una circunstancia que puede llevarnos a cuestionar los resultados obtenidos por Hooke: ¿en realidad la pluma tardó en caer cuatro segundos en un tubo que no alcanzaba los dos metros? No podemos contestar lo anterior porque Hooke no nos da más detalles acerca de las condiciones prevalecientes en su experimento. Pudo suceder que la pluma, momentos antes de caer, se atorara con las paredes del tubo. O bien que, al extraer o readministrar el aire, la corriente de éste haya amortiguado aún más la caída de la pluma. Así, pues, aunque no sabemos los problemas colaterales que este experimento haya podido tener, su importancia radica en la demostración de que los cuerpos tardan mayor tiempo en caer en un espacio *lleno* de aire que en uno *vacío* de este mismo fluido.

Siendo así, la comprobación *total* del problema que nos ocupa, tendría que esperar la creación de mejores cámaras de vacío. En el siglo XVII no se logró esto; y ni siquiera fue resuelto, de manera satisfactoria, el problema del vacío. Los intentos que se hicieron por establecerlo en forma experimental se desviaron de su objetivo inicial -demostrar que en aquél todos los cuerpos caen con la misma velocidad-, mas su horizonte se amplió al crear nuevos campos de investigación que conducirían al desarrollo de la pneumática, la construcción del barómetro, la formulación de las leyes de los gases, etc.

PARTE II : *LAS OSCILACIONES DEL PÉNDULO: ¿ISÓCRONAS O ANISÓCRONAS?*

3. 5. LA ISOCRONÍA DEL PÉNDULO GALILEANO: SU POSTULACIÓN EN LOS *DISCORSI.*

Anteriormente observamos como Mersenne, Riccioli y Huygens -influenciados por Galileo- hicieron uso del péndulo para medir intervalos de tiempo. Cabe preguntarse si sus estimaciones son -bajo el inevitable error experimental- lo suficientemente precisas. En parte, la tabla XII responde a esto; quedando por analizar las dimensiones reales de sus -diríamos ahora- <<improvisados relojes>>. Es prácticamente imposible esta parte porque los autores citados no señalan, *expresis verbi*, los materiales empleados para construir sus péndulos, ni la disposición de los mismos.

Como en el siglo XVII no existían relojes de péndulo lo suficientemente precisos, quizá estaríamos tentados a pensar que aquéllos estaban constituidos por gruesas cadenas -o hilos torcidos- mal engarzados a una péndola informe; todo esto colgando de un clavo mal puesto, el cual provocaba vibraciones irregulares en la caricatura de cuerda.

Nosotros, sin embargo, no pensamos que tal imagen sea válida. No debemos olvidar que estamos en presencia de individuos muy a tono con su época; una época caracterizada por el refinamiento artesanal, el perfeccionismo en las formas de hacer arte o ciencia, y con un alto sentido de la estética y la simetría... Por ello, es altamente improbable que, gente imbuida por este espíritu, fuese descuidada al efectuar sus experimentos.

Por una parte, el deseo de construir relojes de precisión había llevado a muchos pensadores a la búsqueda de un mecanismo capaz de reproducir los períodos convencionales de tiempo (horas, minutos y segundos) en forma independiente de circunstancias externas y con la mayor simplicidad posible. Existían algunos dispositivos de este tipo: clepsidras, relojes de sol, de arena y otros de complicados mecanismos que precisaban de constantes correcciones...

En contraparte, el estudio de los movimientos que presentaran alguna regularidad, *armonía*, era importante para una generación impregnada del gusto por la cultura helénica. El propio Leonardo estudió el mecanismo pendular sin -al parecer- percatarse de su utilidad práctica.

Independientemente del tipo de influencia que haya recibido Galileo, lo cierto es que se interesó por el movimiento pendular.

Si recordamos, en el folio 107v demuestra -para un plano inclinado- que *la distancia recorrida por un móvil es proporcional al cuadrado de los tiempos.* Mientras que las consideraciones vertidas en el folio 152r, lo llevan a suponer la validez de la relación anterior para el movimiento de caída libre. Suposición comprobada por los continuadores de la obra galileana (*vid. supra,* parte I), pero no por Galileo. (Recuérdese: los *Discorsi* fueron publicados en 1632, año en el cual algunos de los autores referidos aún no comenzaban sus experimentos).

Para Galilei, la semejanza (y equivalencia) entre ambos movimientos no es casual. Al estudiar el péndulo, tres preguntas debieron de llamar su atención: 1) ¿cuánto tiempo duran sus oscilaciones?; 2) ¿presentan *regularidad*?; y 3) ¿influye en el número de oscilaciones la longitud de aquél? Preguntas que Galileo estaba en posibilidades de hacerse -si bien no necesariamente en la forma en que las hemos planteado- debido a su gran visión abstractiva fuertemente apoyada en la geometría.

Lo anterior, de alguna manera, le permitió ver en un arco circular el movimiento oscilatorio de la péndola, un radio barriendo un círculo en el brazo del péndulo y un tiempo de duración en las oscilaciones de aquélla.

En las siguientes líneas mostraremos la utilidad de estas transformaciones.

Dado que la péndola se mueve a través de un arcos circular, hagamos -como Galileo- la siguiente aproximación: que se mueva sobre las cuerdas AB en un tiempo t_{AB} y sobre la cuerda AC en un tiempo t_{AC} (ver fig. 15).

En esta situación, dichas cuerdas pueden representar planos inclinados tendidos a través del cuadrante de la semicircunferencia mostrada.

Bajo la suposición antedicha, coloquemos un péndulo (cuya longitud está representada por el radio EF) en el centro de aquélla (punto E), traslademos la imaginaria péndola al punto F, y dejémosla oscilar.

Una pregunta que puede surgir de todo lo dicho con antelación es la siguiente: ¿cómo es el tiempo que tarda la péndola al recorrer la cuerda AB en relación al que emplea en AC? Según Galileo, igual. Afirma que si

> " ... desde el punto más alto o más bajo de un círculo levantado verticalmente sobre la horizontal se trazan planos inclinados... hasta [que toquen a una] circunferencia, los tiempos de caída a lo largo de tales planos serán iguales." [31]

Conviene detenernos en la argumentación realizada por Galileo para probar su aserto (ver fig. 15). En las líneas que siguen nos ocupamos de este asunto.

Sean AB y AC segmentos de recta inscritos dentro de un círculo, y AD y AE las alturas de los triángulos formados con esas cuerdas; mientras que t_{AB} y t_{AC} los tiempos de caída para las cuerdas AB y AC, en ese orden. Además, siguiendo a Galilei, "la proporción entre los tiempos de las caídas por planos de diversa inclinación, longitud y altura es el producto de la proporción de las respectivas longitudes por la raíz cuadrada de la inversa de sus alturas" [32], entonces

$$(t_{AC} / t_{AB}) = (AC / AB) . (AD / AE)^{1/2} \qquad \ldots (18)$$

Mas nuestro autor hace una suposición adicional: que el cuadrado de la razón entre las cuerdas es como la razón de las alturas de los planos.[33] O sea,

$$(AC / AB)^2 = (AE / AD) \qquad \ldots (19)$$

Por lo tanto,

$$(t_{AC} / t_{AB}) = 1 \qquad \ldots (20)$$

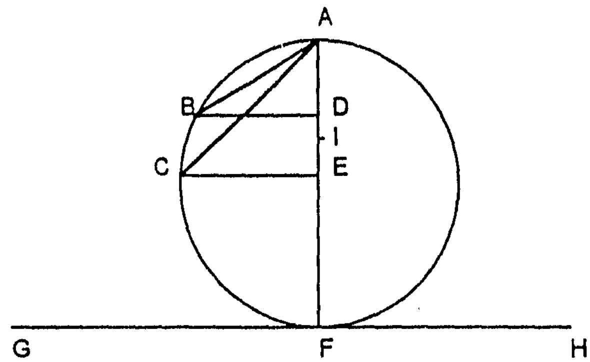


Fig. 15. Construcción geométrica de la que se sirvió Galilei para "demostrar" la isocronía en las oscilaciones del péndulo.

Siendo este la manera con la Galileo demuestra que los tiempos de caída, a lo largo de cualquier plano inclinado -o cuerda-, son iguales (siempre que éstas no sean mayores a la cuarta parte del circulo). Pero él no duda en extender lo que se cumple sólo para las cuerdas, sino también supone que el descenso a través de los arcos de semicircunferencia se realiza en tiempos iguales. Lo cual significa que las oscilaciones de una péndola son efectuadas en un mismo período de tiempo; independientemente de la amplitud inicial desde la que haya sido abandonada para ser puesta en movimiento. Actualmente sabemos que esto es cierto sólo si las oscilaciones no son demasiado grandes. Mas Galileo no duda en asegurar que

> " (...) un mismo péndulo realiza todas sus oscilaciones con absoluta exactitud y rigor, sean ellas muy grandes, medianas o muy pequeñas en tiempos completamente iguales, [o sea] que el móvil que desciende según las cuerdas que se encuentran bajo cualquier arco, las recorrerá todas... en tiempos iguales, tanto la cuerda subtendida por ciento ochenta grados... como la subtendida por cien, sesenta, diez, medio grado o cuatro minutos (...) *En cuanto a la relación entre los tiempos de las oscilaciones de los móviles que cuelgan de hilos de longitud diferente, dichos tiempos se encuentran en razón subdupla de las longitudes de los hilos.* [Es decir, los tiempos de oscilación son proporcionales a la raíz cuadrada de las longitudes de los hilos]." [34]

Esta última propuesta -la relación entre los tiempos y las longitudes de los hilos- se deriva de la identificación que él ha efectuado entre el movimiento de la péndola y el que tiene lugar en un plano inclinado.

Hemos insistido en el hecho de que, al hacer abstracción de la realidad física, Galilei necesariamente incurre en la identificación de lo abstraído con lo *real*. Así, al ser identificada la trayectoria de la péndola como una cuerda, las propiedades geométricas -en este caso- que posean éstas las poseen, por extensión, aquéllas. Pero si uno de los factores (las cuerdas) es a su vez identificado con otro (plano inclinado) cuyas propiedades (relación de tiempos y espacios) sean conocidas, las propiedades del nuevo receptáculo de identificación (plano inclinado) son transferidas al fenómeno abstraído original (la péndola en movimiento). Por lo tanto, siguiendo a Galileo, tendremos que los tiempos de recorrido son proporcionales a la raíz cuadrada (razón subdupla) de las longitudes.

Sin embargo, Galilei no se conforma con la propiedad de tautocronía de su péndulo, le añade otra: la braquistocronía. Es decir, supone que el movimiento semicircular descrito por la péndola es el que efectúa sus oscilaciones de manera más rápida. Dice Galilei, miembro de la *Accademia di Lincei* desde 1611, lo siguiente respecto a este tema:

> "... [también] se puede inferir que el movimiento más veloz de un extremo a otro, no tiene lugar a lo largo de la línea más corta, sino a lo largo de un arco de círculo." [35]

No queda, pues, duda que Galileo supuso al círculo como la curva por la cual el movimiento de un cuerpo -que recorriese su periferia- se realizaría de la manera más rauda posible.

Ahora bien, esta propiedad de tautocronía es válida solamente si las cuerdas son parecidas a los arcos de circunferencia. (En la práctica, esto significa que la amplitud inicial desde la cual se abandone la péndola sea pequeña).

En cuanto a la de braquistocronía, permanece incólume siempre y cuando no se descubra una curva en donde el descenso se verifique con mayor rapidez respecto a la circunferencia.

Un punto neurálgico, para nosotros, es que Galileo formula -independientemente de si sus extrapolaciones son o no correctas- una afirmación de mucha importancia en la física (la isocronía del péndulo simple), mas no lo demuestra experimentalmente; a pesar de que, con las técnicas experimentales existentes en el siglo XVII, podía llevarse a cabo sin dificultad alguna, si bien precisara de un ingenioso experimentalista (y de la construcción del dispositivo adecuado).

3. 6. LA ANISOCRONÍA DEL PÉNDULO GALILEANO: MARÍN MERSENNE Y LOS *COGITATA*.

Mersenne fue otro investigador que estudió el movimiento del péndulo, sirviéndose de sus oscilaciones como si se tratara de un reloj.[36] Su objetivo principal era la estimación del tiempo empleado por un grave cayendo en forma libre (o <<bajo la perpendicular>>). Mas, ¿pueden considerarse precisas sus mediciones? Sí; dentro, por supuesto, del propio error experimental.

En el Libro Tercero ("Des mouvemens & du fondes chordes") de su *Harmonie universelle*, aclara la forma en la cual realizó sus experimentos. El objetivo de éstos se dirigió a encontrar una longitud para su péndulo tal que sus *vueltas* (equivalentes a un semiperíodo de oscilación) las completara en un segundo. Siendo, para ello, necesario

> " ... [una] cuerda de 3 pies & medio [porque ella] marca los segundos en sus vueltas y revueltas, [y no hay] ningún impedimento [en] acudir a una cuerda... demasiado larga, [de modo que] cada una de sus vueltas dure poco más de un segundo, como [algunas veces obtuve]. Fijando un mismo *horologium* común... medí por completo... 3600 vueltas [en una hora] para [dicha cuerda]. Pero habiendo hecho la cuerda de solamente de 3 pies [,] para 900 vueltas [solamente emplea] un cuarto de hora." [37]

Mersenne nos habla de un reloj (*horologium*) empleado para contar <<las vueltas y revueltas del reloj>>. El *horologium* funcionaba de la siguiente manera. Al momento en que él (o uno de sus asistentes) soltaba la péndola desde el punto A (fig. 16), el fraile cantaba una nota de aproximadamente un segundo de duración, verificando que a su término la péndola hubiese llegado al punto B; de suceder esto, tendría la seguridad de que el péndulo había completado una *vuelta* en cerca de un segundo. Si no ocurría lo anterior, Mersenne veíase obligado a iniciar nuevamente con un péndulo cuyo brazo fuese más largo (o corto) hasta lograr que la duración de su nota fuera igual al tiempo de oscilación de A a B. Una vez logrado esto, repetía toda la operación anterior llevando registro del número de *vueltas* efectuadas por el péndulo.

Como Mersenne seguramente requería de mucha concentración para *cantar* las notas, debió pedir a un ayudante que contara las *vueltas* al término de aquéllas; así, al final de un cierto número de notas *cantadas*, tendrían también otro tanto de *vueltas* registradas. Dependiendo de la precisión puesta al reproducir las notas, sería la precisión en el intervalo de tiempo registrado (que a su vez podía ser confrontado con el obtenido gracias a un dispositivo externo como el reloj de arena, la clepsidra, etc).

Aparentemente Mersenne complicábase el problema: bastaría contar simplemente el número de *vueltas* en un período determinado de tiempo, sin tener que preocuparse por registrar éste de manera simultánea con aquél. Sin embargo, no debemos olvidar que en el siglo XVII no existían buenos relojes de precisión. Así, Mersenne tuvo que contar el número de oscilaciones de su péndulo en el mismo instante en el cual generaba su propia *unidad de tiempo.*

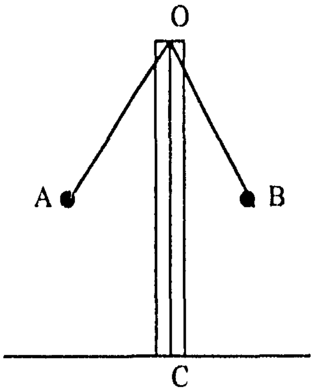


Fig. 16. Una nota *cantada* corresponde a la oscilación de A hasta B.

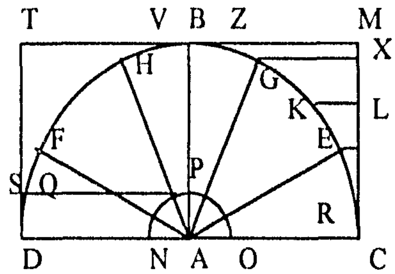


Fig. 17. Construcción de Mersenne. .

Existe otro hecho interesante en lo que dice Mersenne: dos péndulos de diferente longitud (3 y 3.5 pies) completan una *vuelta* en el mismo período de tiempo (un segundo). La pregunta que surge es: ¿medio pie en la longitud de la cuerda no reporta mucha incertidumbre? Veamos.

Supondremos por simplicidad, pues Mersenne no nos informa sobre cómo estaba realmente construido su péndulo, que éste puede simularse como un péndulo matemático, cuyo período viene dado por la siguiente expresión: [38]

$$T = 2\pi \,(L / g)^{1/2} \,(1 + 0.25 \text{ sen}^2 (u/2) + (9/64) \text{ sen}^4 (u/4) + \ldots) \qquad \ldots \quad (21)$$

donde L es la longitud del péndulo, g la constante de aceleración gravitacional y u es el ángulo inicial respecto a la vertical (OBC en la fig. 16) con el cual el péndulo comienza a oscilar. Suponiendo que la amplitud desde la cual Mersenne dejaba oscilar la péndola haya sido pequeña, podremos emplear solamente el primer término de la ecuación anterior al evaluar el período de oscilación de cada uno de los péndulos. Así, los semiperíodos para los péndulos de 3 y 3 1/2 pies son -en ese orden- de 1.0 y 1.08 segundos. Siendo la diferencia porcentual (máxima) entre ellas del 8 %, lo cual nos da un primer indicio del error cometido por Mersenne al determinar el período de oscilación del péndulo correspondiente a dos *vueltas.*

Ocho años después -en 1644- reelabora sus investigaciones sobre el péndulo, virtiendo las mejores en una obra de muy largo título conocida como *Cogitata physico-mathematica.* Los resultados de mayor interés -en el tópico que nos ocupa- son fundamentalmentre tres[39] (refiérase a la fig. 17):

1) la péndola gasta el mismo tiempo en ir de C a D que de D a C (el movimiento es simétrico);

2) después de <<muchas *vueltas*>> -Mersenne no especifica cuántas-, el péndulo ya no barre el arco CBD sino el GBH (o sea, después de un gran número de oscilaciones existe una especie de *amortiguamiento*); y

3) las últimas vibraciones del péndulo -de B a V- son prácticamente indetectables (existe dificultad al decidir el momento en el cual el péndulo deja de oscilar).

Resumiendo los dos últimos puntos: sea por la resistencia del aire, sea por el agotamiento del *impulso natural*, la péndola termina recorriendo un arco mucho menor que al comienzo. Por supuesto, al mínimo parisino le faltó añadir la causa de mayor importancia en lo que atañe al amortiguamiento de las oscilaciones de su péndulo: la fricción existente en el soporte (punto A, fig. 17)

Sin embargo, y a diferencia de Galileo, Mersenne no ofrece ninguna explicación concreta del fenómeno. Pues, según el fraile, no existe dificultad alguna: mientras las amplitudes se efectúen en prácticamente el mismo tiempo, el péndulo sirve como un reloj (limitado, no obstante, a unos cuantos segundos).

Esto no es todo. En la obra referida, el mínimo francés realiza un descubrimiento que asesta un golpe mortal a la propiedad de tautocronía del péndulo galileano. Al contar el número de *vibraciones* para dos amplitudes iniciales distintas (ver fig. 17)

> " [Nos dimos cuenta de que] la esfera de C a B [emplea] algo más de tiempo que [cayendo desde] de E. [Si colocamos dos péndolas] la una desde C, la otra desde G, para que comiencen sus vibraciones... iniciadas desde G, hay casi **36** vibraciones, mientras que iniciando de C [hay] exactamente **35** vibraciones... una vibración ganada cayendo desde G, [y las vibraciones desde G y desde C empezaron al mismo tiempo]. " [40]

Como a partir de G existen cerca de 22.5°, y desde C hay 90°, usando la expresión (21) hasta el segundo orden, resultan

$$T_{1(u=22.5^\circ)} = 2.01 \text{ segundos}$$
$$T_{2(u=90^\circ)} = 2.35 \text{ segundos.}$$

Existe, nos dice, <u>casi</u> una *vibración*[41] de diferencia; es decir, aproximadamente la cuarta parte del tiempo correspondiente a una oscilación de un segundo.[42] (Recuérdese que hace sus mediciones con péndulos de 3 y 3 1/2 pies).

Pero $T_2 - T_1 = 0.34$ segundos; con lo cual resulta que la estimación de Mersenne, relativa a la anisocronía del péndulo, posee una precisión poco mayor al 27% (Cfr. con el 20% alcanzado por el pensador parisino al calcular la constante *g*; *vid.* Tabla XII). Es un buen margen de aproximación si consideramos que es, probablemente, la primera medición de este tipo en la historia del péndulo. De esta manera, la observación del religioso es la primera evidencia de la dependencia entre el número de oscilaciones efectuadas por la péndola y la amplitud desde la cual se suelta ésta. Sin embargo, aquel pensador se circunscribió a reportar sus investigaciones; no se dio cuenta exacta de las implicaciones de su descubrimiento en el contexto de la naciente física galileana.

Viendo el asunto en forma retrospectiva, Mersenne tuvo entre sus manos un resultado que modificó el rumbo de la teoría y de la experimentación físicas. Algunos años más tarde, el holandés Cristian Huygens -gran conocedor de las obras de Galileo, de Riccioli y de Mersenne-, reconsidera el problema del péndulo y, tomando como punto de partida las investigaciones del último autor, inicia una serie de investigaciones (tanto de carácter teórico como experimental) que culminan con la construcción de un reloj de péndulo isócrono. Dando a conocer los pormenores de su construcción en una obra escrita en latín, y publicada en el año de 1673, titulada *Horologium oscillatorium.* En ésta comunica haber descubierto -de manera teórica primeramente- una curva en la cual las oscilaciones se realizan en forma independiente de la amplitud inicial; curva que no es -como suponía Galileo- el círculo sino la cicloide. Lo anterior es muy curioso porque la palabra *cicloide* fue acuñada por el propio Galilei...

Ahora bien, una vez que Huygens encuentra la curva isócrona, procede a fabricar un reloj de tales características[43]. Sin embargo, por tratarse de un desarrollo más técnico (y teórico) que experimental, no lo trataremos aquí.

Lo abordado en este capítulo muestra cómo las investigaciones que empezaron por tratar de medir una constante de proporcionalidad entre los tiempos y los espacios, solamente alcanzaron la cúspide cuando el dispositivo de medición fue reelaborado. Es decir, esta búsqueda experimental contenía, en sus formas de medición, el germen cuyo desarrollo permitiría conocer con precisión la constante de marras.

NOTAS BIBLIOGRÁFICAS DEL CAPÍTULO 3

(PARTE I)

1. Dice Aristóteles en su *Física*, op. cit., (libro 8, capítulo 4): << ... el movimiento de todas las cosas es natural o violento, y todas las cosas cuyo movimiento es [violento] son movidas por algo, y algo distinto de ellas mismas, y si todas las cosas cuyo movimiento es natural son movidas por algo -ambas, las movidas por sí mismas y las que no son movidas por sí mismas (p.e., las cosas ligeras y las cosas pesadas, que son movidas o por la que los produjo como tales y las hizo ligeras y pesadas, o por la que suprimió lo que estaba impidiéndolo o deteniéndolo); *entonces todas las cosas que se mueven deben ser movidas por algo.*>> (La cursiva y la traducción [del inglés] son mías).
2. Juan Buridán explica lo siguiente acerca de los cuerpos que caen libremente (*Quaestiones de Caelo et Mundo*, libro 2, cuestión 12) : <<Debe pensarse que un cuerpo pesado no adquiere movimiento solamente de su motor primario, a saber, de su gravedad, sino que también adquiere en él mismo un cierto *impetus* junto con ese movimiento, que tiene el poder de mover al mismo cuerpo, junto con la gravedad natural constante. Y porque este *impetus* es adquirido proporcionalmente al movimiento, tanto mayor y fuerte será el *impetus*. Así, en consecuencia, el cuerpo pesado es movido inicialmente sólo por su gravedad natural, y por tanto lentamente, pero luego es movido más rápidamente, y así es siempre continuamente acelerado hasta el fin>> *Cit. pos.* E. Grant, *A source book in medieval science*, op. cit., pp. 325 ss.
3. G. Galilei, *Le Opere di Galileo Galilei* ("De Motu"), op. cit., vol. 1, pp. 260-1:<<La rapidez o la lentitud del movimiento natural [de caída libre] depende de una sola causa... el peso mayor o menor del cuerpo que cae (...) Esta rapidez no puede diferenciarse del movimiento; [porque] quien supone un movimiento, supone, necesariamente, una rapidez: y la lentitud no es más que una menor rapidez.>> (traducido directamente del italiano).
4. Hacia 1643, Descartes insiste en "sustituir" el movimiento de caída libre en el aire por el movimiento de caída a través de un fluido. Pone el siguiente ejemplo: << Para los cilindros de madera los cuales sean cuatro veces más grandes que otros, no puedo creer que desciendan [al mismo tiempo,] pero [se puede] mejorar la experiencia con dos bolas de madera, la una... gruesa... y la otra... pequeña, donde el diámetro de [la primera] no sea más que la cuarta parte de la otra, y la pesantez sea [1/64 avo.] de la más gruesa; porque creo que la pequeña empleará dos veces más de tiempo en descender que la más gruesa...>> Carta a Mersenne del 23 de marzo de 1643, tomada de *Oeuvres de Descartes*. Ed. Charles Adam & Paul Tenery, 11 vols.(vol. 3) París, Libraire Philosophique J. Vrin, 1964-72, pp. 643-4. (trad. directa del francés). Como puede observarse, bastaría conocer el <<peso relativo>> de dos graves en el aire para saber la proporción que guardarían entre sí sus tiempos de caída.
5. Si bien es probable que Galileo no haya conocido la expresión $g' = g \operatorname{sen} u$, al menos un principio similar se encuentra en la Jornada Tercera de los *Discorsi* (Teorema III, Proposición III): <<Si uno y el mismo móvil se mueve, partiendo del reposo, sobre un plano inclinado y a lo largo de uno vertical, teniendo ambos la misma altura, *los tiempos de los movimientos estarán entre sí como las longitudes [respectivas] del plano y la vertical.*>> (La cursiva es mía). Y continúa (p. 311): << [Sea] AC el plano inclinado y AB la perpendicular (fig. 18), teniendo ambas la misma altura... BA; digo entonces, que el tiempo de caída de uno y el mismo móvil a lo largo del plano AC [T_{AC}] está en una proporción, con respecto al tiempo de caída a través de la perpendicular AB [T_{AB}], que es la misma que se da entre la longitud de AC y la de AB. [Es decir, $T_{AC} / T_{AB} = AC / AB$ ó $T_{AB} / T_{AC} = \operatorname{sen} u$]. Supongamos, ahora, que DG, EI y LF sean unas líneas paralelas a la horizontal; se sigue, entonces... que un móvil que parta de A adquirirá la misma velocidad en el punto G que en D, ya que en los dos casos la vertical de la caída es la misma (...) En general, podremos decir que las velocidades en los puntos extremos de cualquiera de las paralelas, trazadas desde cualquier punto de AB al punto correspondiente de AC, serán iguales (...) *Por lo tanto, los dos espacios AC y AB serán recorridos con los mismos*

grados de velocidad [es decir, $V_{AB} = V_{AC}$] >>.(La cursiva es nuestra). Dado que las velocidades pueden definirse como $V_{AB} = g_{AB} T_{AB}$ y $V_{AC} = g_{AC} T_{AC}$ (recordemos que en el folio 152r Galileo propone que V y T son proporcionales), con base en éstas y las relaciones anteriores, tendremos que se cumple lo siguiente: g_{AC} / g_{AB} = sen u. Por lo tanto, la constante *g* será menor para el móvil *cayendo* a lo largo de un plano inclinado que si cayera en forma libre. Todo lo anterior es una reconstrucción de cómo Galileo tuvo los elementos suficientes que le permitían calcular el valor de *g* en un plano.

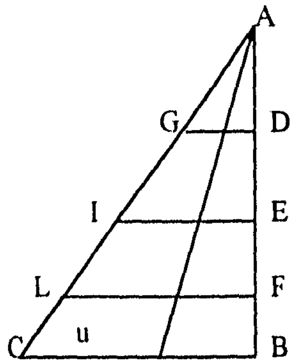


Fig. 18. Construcción de Galilei.

6. Thomas Harriot, *Projectile and Rectilinear Motions of Bodies* ("Manuscritos Añadidos", 6789, folio 30v.) ; *apud.* J. A. Lohne, " II. Ballistic Parabolas", *Archive for history of Exact Sciences*, Vol. 20, Nomber 3/4,1979, pp. 242-4. El pie empleado por Harriot era equivalente a 30.5 cm.
7. *Ibid.*
8. *Ibid.*, Man. Añad. 6789, folio 76.
9. *Apud.* J. A. Lohne, " II. Ballistic...", p. 243
Ibid., Man. Añad. 6789, folio 78.
10. M. Mersenne, *Harmonie universelle* (Libro Segundo: "Des Mouvemens de Toutes Sortes de Corps"), 3 vols (vol. II), París, CNRS, 1975, pp. 87 ss. (Traducido directamente del francés antiguo). Además, agrega un poco más adelante: << Pero en cuanto a la experiencia de Galileo, no me puedo imaginar de dónde viene la gran diferencia que se encuentra aquí en París [en cuanto a los tiempos de caída], que siempre nos ha parecido menor que el suyo: no es que yo quiera achacar a tan gran hombre poco cuidado en sus experiencias: pero yo las he realizado varias veces desde diferentes alturas en presencia de varias personas juiciosas y ellas han visto que siempre sucede de la misma [manera]... *es seguro que la bola desciende más de 100 brazas* en 5 segundos*>> (Subrayado nuestro). * *Braffes* en el original, *brasses* en francés moderno; algunos traducen este término como <<codo>>. Por otra parte, el pie empleado por Mersenne es el *Pied du Roy*, equivalente a 32.87 cm.
11. *Ibid.* La equivalencia señalada por Mersenne - 166 2/3 pies de Rey = 100 brazas florentinas- arroja el siguiente resultado: 1 braza florentina = 54.78 cm. Esta parece ser la equivalencia correcta, pues en la Jornada Primera de los *Discorsi* (p. 88) dice Galileo -refiriéndose al vacío- que << ... la altura de 18 brazas resulta ser el límite de la altura a la cual puede mantenerse cualquier cantidad de agua...>> De este modo, 18 x 54.78 = 986.04 cm que es, aproximadamente, la altura a la que asciende una columna de agua a través de un tubo en sitios de poca altitud. Thomas B. Settle ("An Experiment in the History of Science", 1961. v. 133: 19-23) propone que una *braccia* equivale a 57.66 cm.
12. *Ibid.* He aquí su razonamiento: << Ahora bien, nuestra experiencia muestra que la bola debe caer desde la Luna, a saber 588000000 brazas [322,106,000 m], o 980000000 pies, en 2 horas, 30 [minutos], 36 [segundos], 57 [décimas], 36 [centésimas], es decir, menos de una hora de lo

dicho por Galileo.>> Como podemos observar, tanto Mersenne como este último suponen que la constante de aceleración gravitacional g es independiente de la altura respecto al centro de la Tierra . Nótese que el fraile parisino pudo calcular el tiempo que tarda en caer la <<bola desde la Luna>> porque conocía no sólo la distancia de ésta a la Tierra, sino también *el valor numérico de la constante g*. Esto significa que, aunque normalmente reportaba dicho valor en términos de distancia y tiempo, estuvo en posibilidades de obtener una magnitud que sintetizara matemáticamente el <<grado de aumento en la velocidad>>. Recuérdese, además, que Mersenne conoce la expresión que relaciona los tiempos empleados por el grave al caer con sus distancias recorridas.

13. Partiendo de una Tierra esférica en rotación, Huygens calculó la reducción de la constante de gravedad debido a la fuerza centrífuga. El resultado al que llegó es, en notación moderna, el siguiente: $g = g_0 (1 - A \cos^2 u)$, donde u es la latitud, g_0 la aceleración gravitacional en los polos y $A = w^2R / g_0$ (w y R son, respectivamente, la velocidad angular de la Tierra y el radio de ésta). Por lo tanto, no se obtendría el mismo valor de g en las latitudes boreales -o australes- que cerca del ecuador. Huygens prosigue su estudio y, a finales del siglo XVII, publica una obra titulada *Discours de la cause de la pesanteur* (Leide, Pierre van der Aa, 1690) en donde extiende la situación al caso del péndulo. A una latitud u un péndulo de longitud L_0 -en los polos- que posea un semiperíodo de oscilación determinado, deberá tener una longitud de $L = L_0 (1 - A \cos^2 u)$, si se desea que conserve aquél. Como podremos observar (*vid. infra* en el texto), Huygens no se conforma simplemente con realizar experimentos a la manera de Mersenne o de Riccioli. Su actitud científica está comprometida en la búsqueda de leyes matemáticas que describan *completamente* a los fenómenos estudiados. En este sentido, Huygens es como el "puente" que comunica la obra de Galileo y sus seguidores con la gran síntesis realizada por Newton. Sobre los estudios de la forma de la Tierra y de la variación de g con la latitud, véase: I. Todhunter. *A history of the mathematical theories of attraction and the figure of the Earth -from the time of Newton to that of Laplace*. New York, Dover, 1962.

14. Honoré Fabry, *Tractatus Physicus de Motu Locali*, Lyon 1646; *apud.* J. A. Lohne, "II. Balistic Parabolas" , p. 250.

15. Riccioli, *Almagestum Novum* (1651), 1 (1), libro II. Cap. XXI (De Velocitate Gravium Naturali motu descendentium, & Proportine incrementi velocitatis eorum), p. 89 (traducción directa del latín).

16. *Ibid.*

17. *Ibid.*, p. 90.

18. *Ibid.*, p. 91.

19. C. Huygens, *Oeuvres Completes de Christiaan Huygens*, 21 vols (vol.17), La Haye, Martinus Nijhoff ed., 1888-1950, p. 278 (todas las citas de este autor han sido traducidas directamente del latín).

20. Se sabe que el oído de una persona normal puede apreciar diferencias en tiempo de un dieciseisavo. de segundo. Galileo, Mersenne, Riccioli y Huygens estaban muy vinculados con el conocimiento musical: el primero, por herencia paterna; el segundo lo demuestra en los vols. II y III de su *Harmonie universelle* (que tratan sobre todo tipo de instrumentos musicales y de su estructura); el tercero, por ser un eclesiástico encargado de la preparación del *Chorus*; y el último, aunque seglar, lo demuestra en un ensayo de musicología denominado *Novus Cyclus Harmonicus*, donde analiza la división de las notas musicales, los instrumentos, las relaciones entre los tonos, etc.

21. Huygens, *Oeuvres*, vol. 1, p. 278. En este pasaje encontramos la prueba de que una *vibración simple* es equivalente a un semiperíodo de oscilación. Como la longitud del péndulo es (ver texto) igual a 6 11/12 pies (210.8 cm), su semiperíodo es -empleando el primer término de la expresión (8) con $g = 980.7\ cm/s^2$ - de 1.46 segundos; y Huygens dice que la *vibración simple* de este péndulo dura 3.5 segundos. Por otra parte, el pie empleado por Huygens equivale a 30.48 cm (aprox.), y su pulgada a 12 *líneas francesas* ó 2.70 cm; *apud.* Roberto de Andrade Martins,"Huygens E A Gravitação Newtoniana", *Cadernos de História E Filosofia Da Ciência*, Campinas, Série 2, v. 1, n. 2, jul./dez.1989, pp. 166-7. Aunque en realidad la *línea francesa* es ligeramente superior al valor dado por este autor: es un doceavo del *Pie de Rey* usado por

Mersenne; esto es, 2.74 cm. Por lo tanto, el *pie* empleado por Huygens equivale a cerca de once pulgadas y un tercio.
22. *Oeuvres*, p. 281. Y continúa diciendo: << El hecho es *que la experiencia no se opone a las medidas* [derivadas de la teoría]; *sólo sirve para comprobarlas.* Si la bola de plomo C y la péndola B [ver fig. 14 del texto] que se dirigen, y que llegan simultáneamente [al suelo], estuviesen distanciadas [de su caída] por varias pulgadas de separación, de ningún modo se seguiría que tal experimento no es de confiar... [porque] para mí siempre [ha sido] mínima la diferencia que encuentro en el espacio CE, así como también [los pies de diferencia obtenidos]. Sin embargo, *el error de ninguna manera puede ser debido al rozamiento de la cuerda, con tal de que antes hayamos estado seguros de que no tuvo cambios.*>> (En ambos casos la cursiva es mía). Esto nos revela la gran confianza que Huygens sentía por las teorías capaces de dirigir un experimento.
23. *Carta a Mersenne del 28 de octubre de 1646, Oeuvres Completes*, pp. 24-28.
24. *Apud.* Pierre Costabel, *Huygens et la France*. París, J. Vrin, 1981. p. 140.
25. Al respecto es ilustrativo lo señalado por T. Kuhn: << Los modernos aparatos de laboratorio con los que se ayuda al estudiante a comprender la ley galileana de la caída libre, son un buen ejemplo de la manera como la pedagogía desvirtúa la imagen histórica... entre ciencia creativa y medición. Lo más probable es que ninguno de los aparatos que están hoy en uso podrían haberse construido en el siglo XVII.>>; " The Function of Measurement in Modern Physis ", *Isis*, 1966, p. 214 (n. 18). Sin embargo, no es sólo la pedagogía quien desvirtúa la imagen histórica sino también la aplicación de criterios cientificistas (recuérdese que la mayoría de autores de libros de texto serios y avanzados -los cuales son consultados por los pedagogos y por los divulgadores- son científicos especializados, del *establishment*). Dichos criterios sustituyen la creatividad y la imagen histórica en aras de una presentación <<adecuada>> de los principios científicos, es decir, no como fueron conformándose éstos sino en función de los auxilios que presten a la teoría de vanguardia (p. e. las leyes de Maxwell). Si bien en cierto que la pedagogía no tiene porqué seguir fielmente la genésis de los descubrimientos científicos, sería bueno que los encargados de enseñar ciencia lo dejaran claro; de otro modo, el educando se lleva una visión parcial y, en el peor de los casos, distorsionada de la realidad científica. Un punto de vista similar al de T. Kuhn, en Koyré, " Une expérience de la mesure", *Etudes d' histoire de la pensée scientifique*, París,1973, pp. 294-95 (n. 13): <<Los historiadores modernos, acostumbrados a ver cómo hacen los experimentos de Galileo para los estudiantes en nuestros laboratorios modernos, aceptan [su experimento sobre el plano inclinado] como verdadero... y felicitan a Galileo por haber establecido no sólo la validez empírica de la ley de caída, sino también esta última.>> Para el experimento del que habla Koyré, ver Jornada Tercera, Corolario I, de los *Discorsi.*
26. *Cit. pos.* Stephen F. Mason, *Historia de las Ciencias*, op. cit., vol. II, p. 40.
27.*Discorsi* (Jornada Cuarta), op. cit., p. 396: << [Si consideramos] el caso de dos bolas que tengan la misma dimensión, siendo el peso de una diez o doce veces mayor que el de la otra; tal sería el caso... de una bola de plomo y otra de madera, ambas descendiendo desde una altura de 150 ó 200 codos. *Puesto que las dos llegan a tocar tierra con una diferencia de velocidad pequeñísima, tal experimento nos confirma que la resistencia y el retraso causado por el aire es mínimo.*>>(El subrayado es nuestro). Según Galileo, el aire ejerce su oposición de dos maneras (pp. 395-6): << ... la una consiste en ofrecer mayor resistencia a los móviles menos densos (*gravi*), mientras que la otra estriba en ofrecer mayor resistencia a la velocidad mayor que a la menor de un mismo móvil.>>
28. Riccioli, *Almagestum Novum*, op. cit., pp. 387-8 (traducido directamente del latín).
29. R. T. Gunther, *The Life and Work of Robert Hooke*, Parte I y II; en *Early Science in Oxford*, vol. VI, Oxford, 1930, pp. 530-1. Al respecto, dice Hooke: << [una] bala pesada descendió más rápido que una del mismo tamaño [pero] de madera. No sucede igual cuando dos bolas de la misma materia son arrojadas, la mayor puede exceder a la menor en su descenso (...) En los medios rarificados, lo dicho por [Galileo, Mersenne y Gassendi] no es verdadero *porque en todo medio* [hay] *un cierto grado de velocidad que el mismo cuerpo no puede exceder...* Pero si el progreso de la caída de los cuerpos siempre se hace en espacios iguales por tiempos iguales, se [desprende] que la potencia gravitatoria es la misma.>> (La traducción y la cursiva son mías).

Aunque el científico inglés no lo diga, en sus reflexiones aparece soterradamente una afirmación la cual, actualmente, suele asociarse con el concepto de *velocidad terminal*: "en todo medio hay un cierto grado de velocidad... que el cuerpo no puede exceder." Una idea que en adelante mantendría el interés de muchos físicos, principalmente cuando comenzaron a estudiar el movimiento de los cuerpos en medios -como los fluidos- donde la resistencia en absoluto puede ser desdeñada.
30. *Ibid.*, p. 531.

NOTAS BIBLIOGRÁFICAS DEL CAPÍTULO 3
(PARTE II)

31. *Discorsi*, Jornada Tercera, p. 314.
32. *Ibid.* (Teorema V, Proposición V). La demostración galileana es la siguiente (pp. 314-5), [refiérase a la fig. 19]: << [Sean] los planos AB y AC con diferentes inclinaciones, longitudes y alturas (...) [Sobre la perpendicular] AD [tracemos] las líneas horizontales BG y CD, mientras que AL es la media proporcional de las alturas AG y AD [AL = (AG. AD)$^{1/2}$]. Desde el punto L, tracemos una línea horizontal que encuentre a AC en F;[siendo AF = (AC. AE)$^{1/2}$]. Ahora bien, puesto que *el tiempo de caída* a *lo largo de AC es al tiempo de caída* a *través de AE como la longitud de AF es a la de AE* [t_{AC} / t_{AE} = AF / AE], *y dado que el tiempo para atravesar AE es al que se necesita para recorrer AB como AE es a AB* [t_{AE}/ t_{AB} = AE / AB], *es evidente* que el tiempo para pasar AB como AF es a AB [t_{AB} = t_{AF}] (...) [Pero] si consideramos la línea AC en conexión con AF y AB, la proporción de AF a AC es la misma que la de AL a AD [AF / AC = AL / AD], o de AG a AD [AF / AC = AG / AD], la cual es la raíz cuadrada de la proporción de las alturas AG y AD; pero la proporción de AC a AB es la proporción de las alturas mismas, [quedando, así, demostrado pues: t_{AC} / t_{AB} = AF / AB = (AC (AL / AD)).(1 / AB) = (AC / AB).((AG. AD)$^{1/2}$ / AD) = (AC/AB).(AG / AD)$^{1/2}$].>> La cursiva es mía. Nótese que el razonamiento y la inclusión de la *media proporcional* son muy similares a los del folio 152r (*vid. supra* sección 2. 2. 3.)

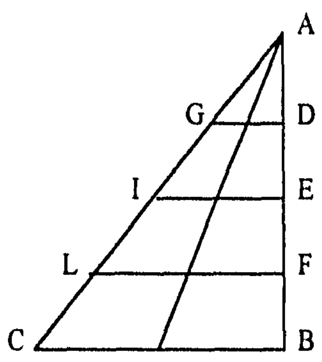


Fig. 19. Demostración en la que Galileo, al parecer, incorpora un resultado del f. 152r.

33. *Ibid.* (Teorema VI, Proposición VI). La demostración galileana no es muy clara (pp. 314-5, ver fig. 15): << [Desde el punto más alto del círculo, A, levantado perpendicularmente sobre la línea GFH,] tracemos planos inclinados a B y C... puntos cualesquiera de la circunferencia... Tracemos, ahora, BD y CE, que son perpendiculares al diámetro, siendo AI la media proporcional ... de AE y AD. *Puesto que... FAE y FAD son respectivamente iguales a los cuadrados de AC y AB, mientras que... FAE es a... FAD como AE es a AD, se sigue que el*

cuadrado de AC es al cuadrado de AB como la longitud AE es a la longitud AD [$(AC)^2 / (AB)^2 = (AE) / (AD)$]>>. Como se puede observar, sus argumentos son un poco obscuros.
34. *Discorsi*, Jornada Segunda, pp. 189-90. Y continúa: << Si queremos... que el período de oscilación de un péndulo sea el doble del otro, es necesario que el hilo del primero sea, en lo que a longitud se refiere, cuatro veces mayor que el segundo>>.
35. *Ibid.*, Jornada Tercera (Escolio del Teorema XXII, Proposición XXXVI), pp. 374. Aunque se ha dudado de que en realidad Galileo haya planteado el problema de la braquistócrona, es muy significativo saber que de algún modo intuyó la importancia de éste. A finales del siglo XVII, los grandes matemáticos -Newton, Leibniz, Jakob Bernoulli y L' Hospital- encontraron que la curva de descenso más rápido no es el círculo sino la cicloide. En el siglo XVIII, Leonard Euler generalizó el problema de la braquistócrona al tratarlo en términos de *mínimos*. Sobre la interesante historia de la curva braquistócrona, recomendamos ver los siguientes trabajos de carácter general: Boyer, Carl B. *The history of the calculus and its conceptual development*, Nueva York, Dover, 1959, pp. 224-246; Daumais, Maurice (comp.) *Histoire de la science*, París, N. R. F., 1957, pp. 586-594; Tatón, René. *Histoire générale des sciences*, vol. II, *La science moderne*, París, P. U. F., 1969, pp. 56-92, 435-454; Schrader, Dorothy V. "The Newton-Leibniz controversy concerning the discovery of the calculus", *The Mathematics Teacher*, 55, 1962, pp. 385-396; y Struik, Dirk J. (comp.) *A source book in mathematics 1200-1800*. Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1969, pp. 178-183
36. Mersenne es consciente de la utilidad que un reloj puede reportar en distintas esferas de la actividad humana (no sólo la científica). Dice en *Harmonie*, Libro Segundo, v. 1, p. 136: << ... el [*horologium*] puede servir en las observaciones de los Eclipses de Sol, y de Luna, porque se pueden contar los [segundos] por las vueltas [del péndulo], mientras... otro hace las observaciones, y marca cuántos segundos hay, de la primera a la segunda y la tercera observación (...) Los médicos pueden usar igualmente este método para reconocer cuántos pulsos [presentan sus] enfermos... y también las pulsaciones del corazón, y otras [pulsaciones que manifiesten] adelantamiento o retardo.>> (Traducido. directamente del francés).
37. *Ibid.*, p. 220.
38. Véase la demostración en R. Courant y F. John, *Introducción al Cálculo y al Análisis Matemático*, 2 vols. (vol. I), México, Limusa, 1971, pp. 428-29.
39. Mersenne, *Cogitata physico-mathematica* (Phenomena ballistica), Parisii, Propositio XV, 1644. pp. 38-9.
40. *Ibid.*, p. 41(traducción directa del latín).
41. *Vibración* es un término con el cual designa al tiempo empleado por la péndola en ir desde el punto donde se le abandona hasta la perpendicular AB. Esto significa que Mersenne cuenta en realidad cuatro *vibraciones* en lo que nosotros entendemos como un <<período de oscilación>>.
42. Mersenne, *Harmonie*, t. I, vol. 2, p. 220: << Sé que no [hay] ningún impedimento [para establecer] la verdad de nuestras observaciones, en razón... de saber *que los segundos de los cuales hablo son iguales a la duración de la vuelta de mi cuerda de tres pies y medio: de suerte que si alguien puede dividir el día en 24 partes* [y la hora en 60 partes], *verá con facilidad si mi segundo dura más, & cuánto es él más largo.*>> (La cursiva y la traducción son mías). A partir de lo anterior, no queda duda acerca de que los *segundos* empleados por aquél son equivalentes a nuestros segundos actuales.
43. Desde 1658, C. Huygens había comenzado a estudiar una curva para la cual el período de oscilación fuese independiente de la amplitud; tal curva *isócrona* le permitiría construir un reloj de precisión. Huygens descubrió no solamente que la *cicloide* cumple con dicha propiedad, sino también otro hecho interesante: la evoluta de dicha curva es la misma, pero desplazada. De este modo, imaginó que si ponía a oscilar una varilla de longitud L (fig. 19a) sujeta a la cúspide de la evoluta, parte de la cuerda coincidirá con aquella curva, y, el resto, con una de las tangentes. Así -según Huygens- si la varilla comienza a oscilar, debido al efecto de la gravedad, será forzada a caer sobre la involuta (cicloide original); realizando, por lo tanto, un movimiento isócrono -por lo menos en algún segmento de la curva- con un período que *no* depende de la amplitud inicial. Llevando estas ideas a la práctica, construyó un reloj como el que se muestra en la fig.19b (correspondiente a la Placa XXVIII del *Horologium Oscillatorium*).

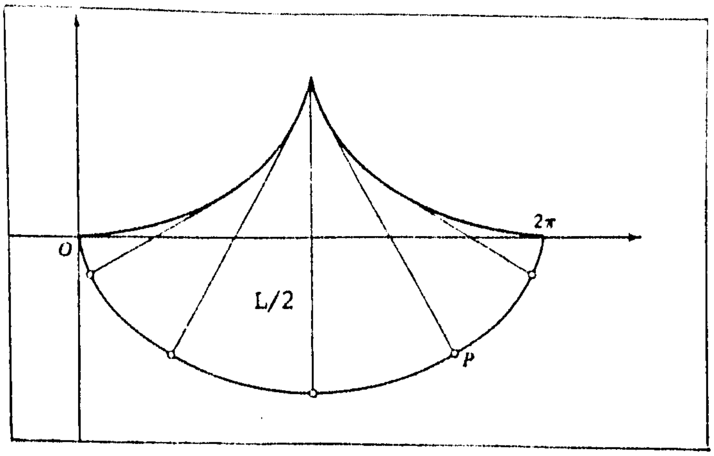


Fig. 19a. Diagrama del péndulo cicloidal.

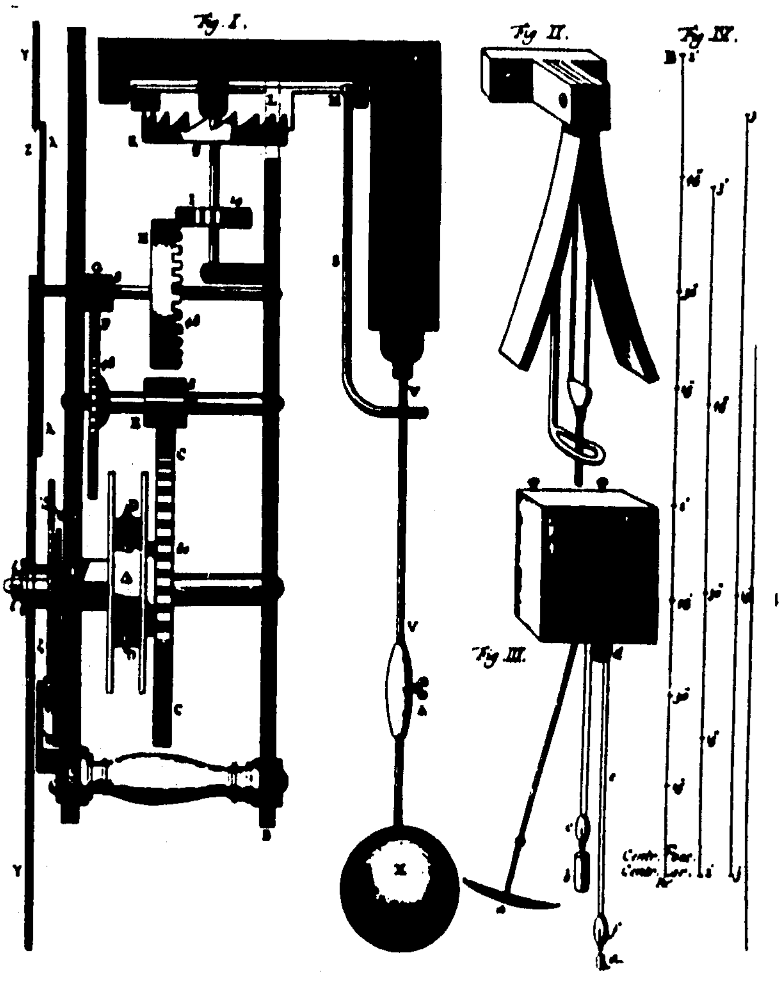


Fig. 19b. El reloj de péndulo cicloidal construido por Christian Huygens (1673).

CAPÍTULO CUARTO

EXPERIMENTOS Y EXPERIMENTADORES EN TORNO AL VACÍO: DEL « HORROR VACUI » A LA PRESIÓN DE LA COLUMNA DE MERCURIO.

" *Después de haber demostrado que ninguna de las materias perceptibles por nuestros sentidos, y de las cuales tenemos conocimiento, llenan el espacio aparentemente vacío, mi opinión será -hasta que se me demuestre la existencia de una materia que lo llene- que está realmente vacío y desprovisto de toda materia.*"

Blaise Pascal. *Nuevos Experimentos sobre el vacío*, 1647.

4. 1. EL VACÍO : UNA BREVE RESEÑA HISTÓRICA.

Definir, concebir y aceptar la existencia del vacío representó un problema de dimensiones muy profundas en la filosofía tanto en la filosofía antigua como en la ciencia moderna.

A mediados del siglo I a.n.e., el poeta latino Tito Lucrecio Caro expone en su *De rerum natura* el sistema de Epicuro. En su largo poema encontramos la doctrina filosófica sobre la existencia del vacío de la cual partían las distintas escuelas -hasta el siglo XVII- para refutar (o para justificar) dicha opinión. Según Lucrecio, el espacio está en sí mismo desocupado, vacío, y es el receptáculo sin el cual el movimiento no podría darse.[1]

Por otra parte, la existencia del vacío es inherente a la concepción atomista sostenida por los griegos Demócrito de Abdera (siglo V a.n.e.) y Leucipo (¿460?-370 a.n.e.) Para estos autores, los átomos y el vacío infinito forman el Universo en todas sus manifestaciones.[2] A pesar de la profundidad filosófica de esta doctrina, la obra de Demócrito es prácticamente desconocida. Lo cual, sin embargo, no fue óbice para que las opiniones de los atomistas perduraran a lo largo del tiempo, suscitando discusiones entre los filósofos que especulaban acerca de la posible existencia del vacío.

Las discusiones acerca del *Kénon* (Vacío, en griego) continuaron. Mientras que el filósofo Melissos (*c. ca.* 443 A. C.) niega la existencia del vacío[3], su coterráneo Epicuro (341-270 a. de J. C.), discípulo ateniense de Jenócrates, sostenía que "si no existiese aquello que llamamos vacío o espacio de naturaleza intangible, los cuerpos no tendrían donde estar ni a través de qué moverse, como se ve que ellos se mueven."[4] Argumento desarrollado de manera más amplia en el siglo III por el filósofo escéptico Sextus Empiricus.[5]

Un planteamiento interesante fue el de Herón de Alejandría (siglo I d.n.e.) En opinión del inventor de la *dioptra* -el primer elemento universal de medición- y autor de varios tratados de mecánica y óptica, el vacío "... puede ser encontrado distribuido en minúsculas porciones en el agua, aire, fuego y todas las demás sustancias."[6]

A finales del Medievo, y posteriormente en el Renacimiento, la autoridad del filósofo Aristóteles predomina no sólo como la doctrina oficial, sino también como el eje de la mayoría de los <<experimentos>> imaginados para demostrar la imposibilidad (o la posibilidad) del vacío.[7]

La negación del vacío no es gratuita dentro de la dinámica aristotélica. Para el Estagirita la velocidad alcanzada por un cuerpo depende, en principio, de dos cosas: 1) de la resistencia ofrecida por el medio a través del cual se mueve; y 2) de la proporción existente entre el peso del cuerpo y el peso del *elemento* que forma el medio.

Ahora bien, si el vacío existiese -continúa el Filósofo- al no contener materia, no ofrecería resistencia a los cuerpos que sobre él se desplazasen. Y dado que -en su teoría- la velocidad es inversamente proporcional a la resistencia del medio, un cuerpo moviéndose *a través del vacío* debería presentar <<una velocidad alejada de cualquier magnitud>>.

Debido a la estrecha interconexión del movimiento con el *plenum*, las demostraciones que falsearan las propiedades atribuidas a cualquiera de ellos, repercutirían en el desplazamiento (y virtual abandono) de la física del Estagirita por otra capaz de explicar los hechos de mejor manera.

Durante la Edad Media, autores como Avicena, Buridán[8] y Marsilio de Inghen niegan -a pesar de pertenecer a distintas escuelas filosóficas- la existencia del vacío. Nos detendremos en el primero porque sus interpretaciones sobre ciertas experiencias contra el vacío son típicas de esta época. Según Avicena[9] :1) una columna de agua retenida en un tubo con dos orificios -uno de los cuales ha sido tapado- se mantiene en él porque el espacio interior del recipiente no puede permanecer sin ningún cuerpo en su superficie; 2) si a un recipiente cerrado lleno de agua se le practica un orificio en uno de sus extremos, el agua no fluirá porque no encuentra camino por donde conducirse; y 3) en una ventosa, la piel se dilata porque *hay algo* que penetró, saturando el espacio, permitiendo el movimiento. Con ejemplos de este tipo se desarrollaban las discusiones en el Medioevo.

En el siglo XVII - y como resultado del proceso desencadenado por la Revolución Científica- la autoridad de Aristóteles se muestra francamente insuficiente para decidir sobre ésta y otras cuestiones de capital importancia para la nueva visión del mundo que se estaba construyendo. Reflejo de ello es que incluso Francis Bacon -fundador del inductivismo moderno- a pesar de negar el vacío, se muestra cauteloso en sus conclusiones.[10]

Pero la expresión filosófica más refinada sobre la defensa del *plenum* es de René Descartes. Según este autor, la extensión del espacio es equivalente a la extensión del cuerpo.[11] Así, al ser el movimiento un fenómeno que involucra a la materia, el vacío simplemente pierde su razón de ser porque no puede identificarse con ningún cuerpo -o ente- material.

A pesar de lo anterior, en el siglo antes referido, las teorías acerca del vacío comienzan a ser investigadas desde una forma nueva y diferente: la experimental. Se prepararon innumerables dispositivos -rebosantes en ingenio y fuerza demostrativa- con el fin de obtener resultados ciertos sobre la naturaleza del vacío (o para negar su realidad). Por extraño que parezca, la cuestión no fue zanjada -ni lo sería en los siglos XVIII, XIX (y aún en nuestro siglo XX)-, pero sirvió como ápice para emprender investigaciones sobre la presión del aire, la presión de una columna de mercurio, la compresión (y dilatación) de los gases. Esto muestra que no siempre los intentos por resolver un problema culminan con la desaparición -solucionándolo- de éste, sino también pueden derivar en la creación de otros nuevos con (o sin) respuesta.

4. 2. PRIMEROS INTENTOS DE EXPERIMENTACION: DE LA *FUERZA DEL VACÍO* A LA DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN EN UNA COLUMNA DE AIRE.

4. 2. 1. BALIANI, BERTI, GALILEO Y TORRICELLI: BUSCANDO *GENERAR* EL VACÍO.

En 1614, el genovés Giovanni Batista Baliani (1582-1666), propuso a Galileo una serie de experimentos para <<pesar>> el aire. Pero no es sino hasta el año de 1630, cuando urge al científico pisano una explicación acerca de un experimento muy perturbador que el propio Baliani había realizado. Aquél consistía en disponer los extremos de un sifón en dos baldes henchidos de agua; uno al pie de una colina de veinte metros, el otro en la cima de ésta. El tubo se encontraba lleno de agua y los extremos habíanse cerrado herméticamente. Mas, al abrir ambos extremos en forma simultánea, el agua contenida en el sifón -contrariamente a lo esperado- salía por ambos lados , y no por el de menor altura respecto al suelo (ver fig. 20a).

El experimento volvió a repetirse, abriendo solamente el extremo que se encontraba situado en la colina (fig. 20b). El resultado fue el descenso del agua hasta la mitad del tubo, quedando suspendida en el extremo más largo el resto de la columna. En un principio, Baliani se opuso a la idea de la existencia del vacío en el espacio ausente de agua.[12] Mas, en octubre de ese año, rectifica: **el vacío no es imposible de generar, pero no puede producirse fácilmente.** En efecto, para que el vacío <<aparezca>> en el interior de un dispositivo, la condición *sine quan non* es que se extraiga el aire con una fuerza equivalente al peso del aire ahí contenido.

Según Baliani

> ".. lo mismo ocurre en el aire, pues... no sentimos su peso ni su compresión que hay por todos lados (...) El peso del aire es muy grande, mas no infinito. [Así,] *con una fuerza proporcional a aquél, sería posible superarlo y así causar el vacío. Quien quisiera encontrar esa proporción precisaría saber la altura del aire y su peso en cada altura.*"[13]

Esperaba, además, que para causar el vacío fuese necesaria una fuerza mayor a la producida por una columna de agua de unos 80 pies de altura. El concepto desarrollado por este autor es interesante porque significa que el vacío deja de ser un ente inasible, abstracto, para convertise en un objeto medible, cuantificable. De esta forma, siempre que se haya vencido la <<resistencia del aire>> en el interior de cualquier receptáculo, aparecerá el vacío; dejando de ser éste, por lo tanto, un fenómeno inextricable que no se prestaba a medición alguna. Resumiendo: mientras la *presión* del aire lo impida, el vacío no se manifestará.

El pensamiento de Baliani encontró eco en los trabajos de Galileo, quien, ocho años después, discute un problema muy similar en los *Discorsi*: la imposibilidad de subir el agua por aspiración a una altura mayor de 18 brazas florentinas.[14] Al decir de este autor, el agua contenida por aquella columna representa **la medida de la resistencia del vacío** (independientemente de la forma del tubo empleado para subir el agua). Obsérvese que este concepto se parece mucho al manejado por Baliani.

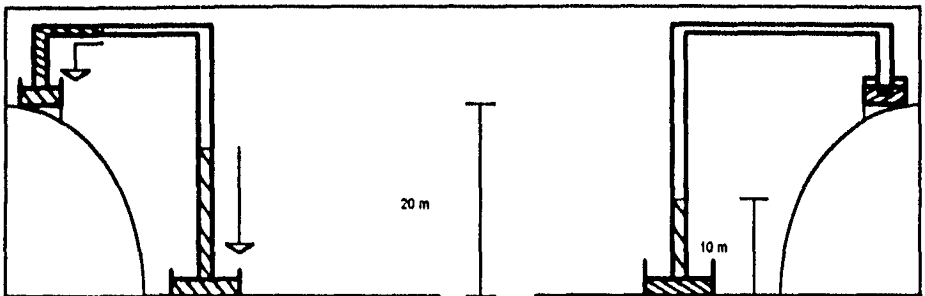


Fig. 20a. El agua sale por por ambos extremos.

Fig. 20b. La columna de agua queda suspendida; se forma un vacío.

Galileo, sin embargo, no se conforma con señalar dicho problema; sugiere, en cambio, un experimento. Se trata de colocar un émbolo perfectamente ajustado en el interior de un cilindro cóncavo de metal ABCD, llenando de agua el espacio situado encima del tapón EFGH (fig. 21) Disponiendo así las cosas, en seguida se cuelga en el extremo K del émbolo un peso capaz de hacer descender el tubo IK hasta la posición ocupada por el segmento CD. El resultado será

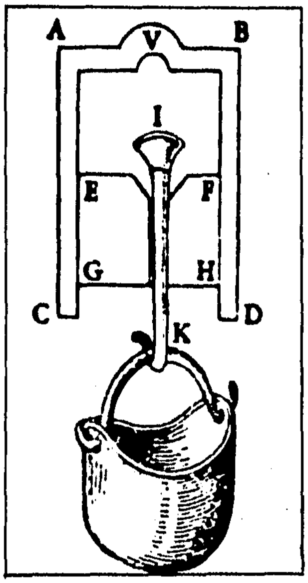


Fig. 21. El dispositivo de Galilei.

"... [que el] recipiente se lastrará de modo que, finalmente, la superficie... EF del tapón se [separará] de la superficie del agua, a la cual lo único que la mantenía unida era la repugnancia al vacío. Después de todo esto, basta con pesar [lo que se ha colgado], para calcular la fuerza del vacío." [15]

La postura de Galileo es clara: el tapón EF y el agua se encuentran unidos por la *repugnancia al vacío*. Es decir, no elimina el horror al vacío, pero sí lo limita tratando de cuantificarlo. En 1641, tres años después de la publicación de los *Discorsi*, Berti realizó un experimento -cuya idea se atribuye a Raffaello Magiotti- similar al insinuado por Galileo.[16] Para aumentar la credibilidad en su experimento, Berti invitó a dos jesuitas de la escuela peripatética a presenciarlo: los padres Nicolo Zucchi y Athanasius Kircher.

No se tienen noticias de este experimento sino hasta 1651, año en el cual Emmanuel Maignan lo describe en su *Cursus philosophicus* (en la fig. 22 se aprecia el montaje externo; en la fig. 23 la nomenclatura). En el primer experimento se prescinde del recipiente conectado al tubo mayor que se encuentra en el ángulo superior izquierdo). Según Maignan, Berti

> " [irguió] un tubo de plomo AB bastante largo fuera de la torre de su casa... prendido por medio de cuerdas amarradas a clavos de fierro... su longitud... debe de haber sido de 40 palmos. La extremidad inferior B del tubo [encontrábase obturada por medio de] un tornillo R de latón, que estaba dentro del tonel EF... lleno de agua. En la extremidad superior A, era adaptado... un recipiente de vidrio en forma de frasco [con] dos gargantas [: en la más larga era insertado el extremo A del tubo; en la más corta -hecha de plomo- se le adaptaba un tornillo de latón D] (...) Con el tornillo R echado en el tonel EF [lleno con agua hasta la mitad], el tubo todo, así como un recipiente de vidrio, eran llenados por encima, a través de la abertura C, [hasta el tope]. En tanto, la abertura C era cerrada con el tornillo D, para sellar todo el aparejo.[17]

Fig. 22. El dispositivo experimental de Berti (según Maignan).

Además, dentro del frasco C existía una campanilla sujeta a los extremos del cristal (sugerencia del fraile francés Maignan). Su objetivo era detectar si, al realizarse el presunto vacío, escuchábase el ruido de la campanilla metálica M una vez que ésta fuese accionada desde el exterior por medio de un poderoso imán (para lo cual no había más que acercar el imán a la parte externa del frasco).

Ahora bien, cuando el tornillo R fue liberado, el agua fluyó del tubo hacia el tonel EF hasta la altura L; permaneciendo el agua en esa marca durante todo un día, aunque el extremo inferior B permaneciera abierto. No satisfechos con este resultado, volvieron a repetir el experimento ahora con la intención específica de medir a qué altura el agua había permanecido dentro del tubo (ver fig. 23). Descubrieron que, desde el fondo del tonel (B) hasta la marca L, frisaba las 18 brazas (10.5 m).[18] Restaba el espacio comprendido por encima de aquélla (LA y el interior del frasco C) que, al parecer, no contenía aire. ¿Se encontraba realmente vacío? Según los jesuitas antes mencionados, no; el aire había entrado a través de los poros del tubo (o por entre el líquido). Aparte de esto, existían dos razones adicionales para negar la posible formación de un vacío: 1) cuando acercaron el imán al frasco C, el <<fluido magnético>> penetró el tubo y pudo accionar la campanilla, que fue escuchada por todos; y 2) se podía mirar de un extremo a otro del frasco C sin dificultad. Recordemos que los pensadores del Medievo -y algunos otros del Renacimiento- consideraban al *vacío* en el sentido más amplio de este término, es decir, como una ausencia *total* de cualquier clase de sustancia. De manera que, si la luz y el <<fluido magnético>> eran capaces de atravesar el tubo, *necesariamente* debería existir materia que lo permitiese. En virtud de lo anterior, *el vacío no podía existir dentro del tubo* -tal y como era definido por Aristóteles.

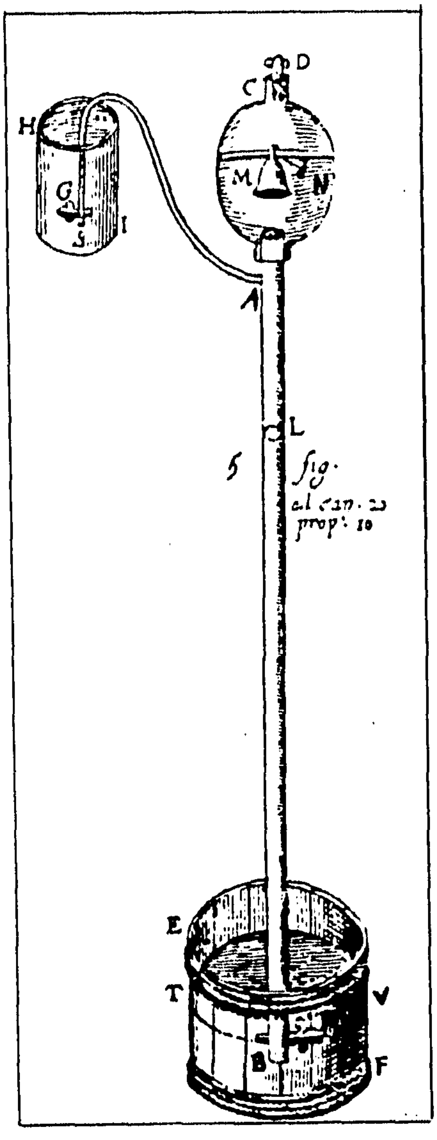


Fig. 23. Esquema del dispositivo experimental de Berti.

Ahora bien, ¿por qué pudo ser accionada la campanilla y producir un sonido que fue escuchado desde el exterior? Respondamos a la usanza de un defensor de las doctrinas vacuístas de aquel tiempo: dentro del frasco C, *el vacío formado no fue total.*

Berti -al decir de Maignan- volvió a realizar el experimento bajo una nueva variante: soldar con estaño un tubo de plomo AS bloqueado en su otro extremo por un tornillo G (ver lado izquierdo de la fig. 23). Dicho extremo se encontraba parcialmente hundido en un recipiente (H) semilleno de agua, situado a mayor altura que C (para evitar la posible introducción de aire a través del extremo inferior del tubo de plomo). Cuando se abrió el tubo AB por su extremidad inferior, liberando el tornillo R, el agua se elevó nuevamente hasta la marca L. Pero al cerrar el orificio B, apretando el tornillo R, y abrir simultáneamente el tubo delgado de plomo, liberando el tornillo G, el agua del recipiente H penetró a través del orificio S y anegó todo: el tubo AB, el frasco donde se encontraba emplazada la campanilla y también el tubo de plomo; todo excepto un pequeño espacio debajo del punto C. En opinión de los testigos, este nuevo experimento también confirmó la teoría del *plenum* falseando la del *vacuuo*: el agua quedaba suspendida en la marca L debido a la fuerza cohesiva del aire que era preciso vencer para permitir su descenso. Nótese que basta sustituir la llamada <<fuerza cohesiva del aire>> por la <<resistencia del vacío>> para explicar el mismo fenómeno desde la perspectiva de la escuela vacuísta.

Pese a todo, el problema del vacío empezaba a desarrollarse en términos más físicos que filosóficos -a pesar de que los autores utilizaran su propia filosofía para *interpretar* los resultados de sus experimentos-: postulábanse mecanismos físicos para su generación; especulábase sobre la existencia de *fuerzas* -ya no de *virtudes* o de *naturalezas*- responsables de algunos fenómenos antaño atribuidos al *horror al vacío*...

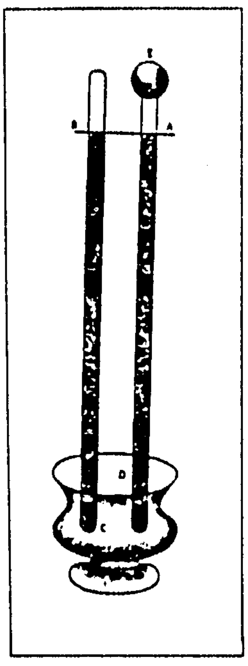
No se sabe con certeza hasta qué punto el experimento de Berti influyó en los que más tarde efectuaría Torricelli. Existe una carta de Magiotti a Mersenne,[19] fechada el 25 de mayo de 1648, en la cual le informa sobre los pormenores del experimento anterior. Dado que Mersenne mantuvo correspondencia con los principales científicos de la época, no es extraño que haya comunicado a Torricelli sobre este particular (y éste le haya, a su vez, realizado algunas modificaciones).

Por otra parte, la pregunta seguía en pie: ¿existe el vacío?, o ¿ los efectos observados son consecuencias exclusivas del peso que posee el aire? En el siglo XVII no había consenso al respecto.

El 11 de junio de 1644, algunos años después de pasar sus últimos momentos con Galileo discutiendo varias cuestiones de los *Discorsi*, Evangelista Torricelli (1608-1647) escribe una carta dirigida a Michelangenlo Ricci[20] -discípulo éste de Benedetto Castelli, gran conocedor de la obra galileana- en la cual da una relación detallada de un experimento físico sobre el vacío: "no simplemente para hacer el vacío, sino para construir un instrumento que mostrase los cambios en el aire- ahora más pesado y grueso, ahora más leve y sútil." [21]

Antes que nada, Torricelli comienza por definir su postura: **la naturaleza no contribuye a la repugnancia al vacío; es el peso del aire (y no el vacío en sí) el responsable de la resistencia presentada para producirlo.** Sugiere que nos encontramos, *de facto*, sumergidos en un <<océano de aire elemental>>; aire cuyo peso es -a volúmenes iguales- 1/400 del peso del agua,[22] en las regiones más bajas (porque en las cumbres de las montañas más altas la proporción anterior es, según Torricelli, mucho menor). Esta última observación es importante, pues supone que la atmósfera no posee una estructura homogénea. Indirectamente, además, es una crítica a la teoría aristotélica sobre la *naturaleza del aire*: las propiedades del aire se deben al concurso de factores externos -como la presión y la temperatura-; no son consecuencia de su *physis* como <<elemento>>.

En seguida, Torricelli describe su experimento (ver fig. 24). Sus tubos eran de vidrio, abiertos por un extremo y cerrados por el otro; además, de diferente forma



" (...) como los [dos que se muestran], gruesos y con [una longitud] de dos brazas de largo [1.08 m]; fueron llenados de mercurio, [y] después se taparon sus aberturas con un dedo y se invirtieron en una jofaina C, en la cual había también mercurio: pudo verse cómo [-después de que se les retiró el dedo y se les dejó reposar sobre el mercurio de la vasija-] se iban vaciando sin que nada sucediera en el tubo que se vaciaba; en tanto, el [segmento del tubo] AD quedaba siempre lleno hasta una altura de una braza y un cuarto y más una pulgada [*c. ca.* 700 mm]. Para mostrar que el tubo estaba completamente vacío, llenábase la jofaina con agua sobrepuesta (al mercurio) hasta D; a medida que se levantaba ... el tubo y su abertura alcanzaban la zona del agua, el mercurio descendía y el agua se precipitaba dentro de aquél... llenándolo por completo hasta E. El experimento se realizó cuando el tubo AE estaba vacío y el mercurio, aunque muy pesado, permaneció suspendido entre A y [la aljofaina]." [23]

Fig. 24. Dispositivo experimental de Torricelli.

Tratemos de aclarar lo que nos quiere decir Torricelli. Primeramente, tomó dos tubos de vidrio de diferente forma repletos de mercurio que invirtió -tapando con un dedo cada uno de los extremos abiertos-, depositándolos sobre una vasija con mercurio. Realizado lo anterior, liberó ambos extremos dejando que los tubos descansaran sobre el mercurio (se entiende que los tubos deben ser sostenidos desde fuera para que no se caigan). Los tubos se vaciaron parcialmente, llegando a un mismo nivel AB (fig. 24); quedando, por lo tanto, una columna de mercurio de altura L por debajo de aquél. Dicha columna tenía una altura de 700 mm.

Posteriormente, como tenía duda de si el espacio AE estaba en realidad vacío, virtió agua en la jofaina encima del mercurio inicial, llegando a un nivel D (que no especifica) respecto al fondo de aquélla. Entonces, levantó uno de los tubos desde la base de la jofaina hasta la región donde se encontraba el agua; al llegar aquí, el mercurio abandonó el interior del tubo, permitiendo que el agua ocupara el espacio desalojado. El agua ocupó la totalidad del tubo.

De esto último, Torricelli extrae una consecuencia interesante: si el espacio AE del tubo no estuviese *vacío*, la materia contenida en AE se opondría al ascenso del agua y la columna de mercurio no se desplomaría. Pero sucede lo contrario; de modo que el espacio AE se encuentra -al menos- *vacío de aire*. No era, pues, el *vacío total de materia* que asustaba a los peripatéticos, sino un simple *vacío sin aire*...

En los *Discorsi*, Galileo había supuesto que la fuerza responsable de sostener una columna de agua -y, por extensión, de mercurio-, a pesar de su tendencia natural a caer, era interna al tubo AE, y que se debía al vacío o al propio aire rarificado; es decir, surgía una *forza del vuoto* cada vez que se trataba de extraer aire de un recipiente en forma violenta. Sin embargo, Torricelli no comparte la opinión de su maestro: **la fuerza que produce al vacío es externa.**[24] Supone que, al existir una gran masa de aire por encima de la superficie terrestre, no es extraño que el mercurio entre al tubo CE y ascienda *hasta equilibrarse con el peso del aire.* El problema tomaba un nuevo matiz: el hidrostático. Según Torricelli, este resultado fue confirmado por un experimento realizado de manera simultánea: en los tubos A y B -a pesar de que extremo superior del primero terminaba en una burbuja de vidrio-,el mercurio siempre se mantenía al mismo nivel: indudablemente no se trataba de una fuerza intrínseca al tubo.

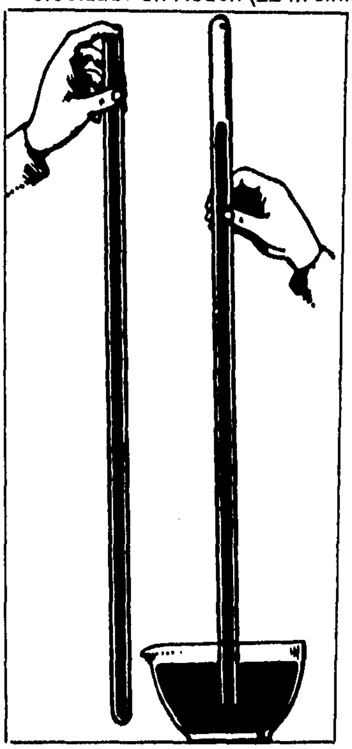
Torricelli realizó su experimento en Florencia (a 49 m s. n. m.) y en verano. Esta circunstancia influyó definitivamente en el valor de la altura de mercurio obtenida por él, bastante alejada de la llamada *atmósfera de presión* (760 mm de Hg a 15° C y 0 m s. n. m.) Sin olvidar el hecho de que en su experimento no reporta la temperatura bajo la cual fue realizado.

A pesar de no observar variación en el nivel AB de mercurio para distintos tubos, sí las registró debido "al... frío y al calor, que producen alteraciones considerables, exactamente igual que si el vaso AE estuviese repleto de aire." [25]

En su época, el experimento de Torricelli permitió: 1) demostrar la equivalencia, en razón al peso, de una columna de mercurio y una columna de aire (o sea, a pesar de sus *naturalezas* distintas, los efectos que podían producir eran los mismos); 2) proponer un mecanismo para la <<generación>> del vacío; y 3) esbozar la construcción de un dispositivo (el barómetro) capaz de registrar variaciones en el peso del aire atmosférico.

4. 2. 2. PASCAL, PÉRIER, MERSENNE Y ROBERVAL: EXPERIMENTANDO *CON* EL VACÍO.

Torricelli no fue el único -aunque, al parecer por sugerencia de Galileo, sí el primero - en utilizar mercurio, en vez de agua, en el experimento antes descrito. En octubre de 1646, Florin Périer (1605-1672), lo repite en presencia de Blaise Pascal (1623-1662). Un año más tarde, en Varsovia, el capuchino Valeriano Magni -inspirado en los trabajos galileanos- lo realiza y publica un opúsculo titulado *Demostratio ocularis loci sine locato: corpories sucessive moti in vacuo: luminis nulli inhaerentis*, en el cual defiende las tesis vacuístas. Nos detendremos, sin embargo, en el trabajo de Périer y Pascal. En una carta dirigida a Charut en Suecia,[26] Périer describe -con muchos detalles y frecuentes divagaciones- el experimento de la columna de mercurio efectuado en Rouen (22 m s.n.m), donde



"... fue fabricado un tubo [de vidrio] de cuatro pies de altura [122.5 cm] y con un grosor... de un dedo y fue cerrado en una extremidad con mercurio... llenando totalmente nuestro tubo, cuya extremidad inferior... estaba dentro de una pequeña vasija de madera bastante profunda (...) Teniendo así el tubo... colocamos dentro de la vasija a una altura de tres dedos... la misma cantidad de agua... Hecho esto, erguí mi brazo colocando el dedo medio sobre el fondo del tubo, [suavemente, con objeto de no romperlo con el peso del mercurio] Convenimos en [investigar] si había alguna cantidad de aire en la tapa (del tubo); no lo vimos [viendo, en cambio,] al mercurio descender y abandonar lo alto del tubo [descendiendo] más de 18 pulgadas [45.72 cm] ." [27]

Aunque obtiene un resultado no muy distinto al de Torricelli (767.8* mm de hg) -a pesar de que las alturas s.n.m. fueron similares-, el de Périer es un experimento más completo porque especifica las condiciones de experimentación y da cuenta de muchas de las contingencias que se presentaron durante su desarrollo. La primera precaución consistió en mantener seco el tubo, descartando así la posible introducción de agua al tubo.

Fig. 25. Una ilustración del experimento de Périer.

* Se obtiene restando los 4 pies de altura del tubo (122.5 cm) de las 18 pulgadas (45.72 cm) que descendió el mercurio.

También vigiló que no se formaran cavidades de aire en el interior del tubo capaces de romper la uniformidad del mercurio. Finalmente, se dio cuenta de la necesidad de utilizar un tubo suficientemente largo (el de dos pies, dispuesto inicialmente, no fue útil), así como de una buena cantidad de mercurio (40 lbs.).

Périer se preguntó si el espacio ausente de mercurio, localizado en la parte superior del tubo, estaba realmente vacío o contenía aire, aunque fuese en cantidades mínimas. Para resolver la disyuntiva, agregó -como Torricelli- agua encima del mercurio contenido en la vasija, subiendo en seguida el tubo hasta que el orificio interior estuviera *cerca* de la interfase formada (pero sin contacto con el agua). El resultado fue una disminución en la altura inicial de la columna de mercurio (no especifica la cantidad); un aumento -en opinión de Périer- en la <<cantidad de vacío>> o de aire rarificado. De lo anterior, concluye lo mismo que Torricelli: **la magnitud del *espacio vacío* depende de la fuerza externa aplicada al tubo.**

Para este autor, quedaba claro que no era el *horror vacui* el responsable de estos fenómenos. Argumentando de la siguiente manera en contra de los peripatéticos: si fuese el aire quien, entrando por los poros del vidrio o por debajo del tubo, ocupase el espacio aparentemente vacío, ¿por qué en algunas ocasiones sólo hacía descender al mercurio dieciocho pulgadas y a veces más? Recuérdese que, al existir agua y mercurio bloqueando la parte sumergida del tubo, era prácticamente imposible suponer la existencia de aire "escondido" en ellos; haberlo aceptado equivalía a reconocer la existencia de *vacíos* dentro del *plenum* de un elemento. Además, si el aire se encontraba presente en el espacio superior, no era razonable que al llevar posteriormente el extremo inferior del tubo hasta la región del agua, ésta haya subido con mucho esfuerzo.

Tanto Périer como Pascal, quedaron convencidos de que el espacio no ocupado por el mercurio estaba, al menos, vacío de aire o, de encontrarse éste en el interior del tubo, sería tan exigüa su cantidad que en ningún caso podrían atribuírsele los fenómenos anteriores. De alguna forma aceptan la tesis vacuísta.[28]

El trabajo de Torricelli tuvo resonancia en la mayor parte de Europa -en parte, gracias a Mersenne-, yendo algunos autores más allá de su simple repetición. Entre septiembre y octubre de 1647, el mínimo francés proyecta un experimento que, de llevarse a cabo, podría verificar la hipótesis torricelliana. Como la columna de mercurio es equilibrada por una de aire, ésta debería -según aquel autor- tener cerca de dos leguas de altura (unos 10,000 m). De manera que, a una gran altura, la columna de mercurio tendría que disminuir apenas en unos dos órdenes de magnitud; es decir, en un cincuentavo de pie[29] (0.6 mm) . El cálculo anterior lo efectuó en los *Cogitata*. Esto hace creer al Reverendo que la altura de los cilindros de mercurio es casi la misma en todos los lugares del mundo, pues los cambios de altitud no provocarían una variación perceptible en su magnitud. Además, al ser la columna de aire muy grande, no descarta que los límites de la atmósfera -en la cual ella está contenida- lleguen hasta la Luna.

Pero Mersenne no es del todo consecuente: no descarta que la variación en la altura de la columna tenga causas desconocidas... Esto lo afirmó ¡a pesar de haber sugerido un experimento que probablemente las aclararía! (Desprendiéndose de esto lo siguiente: aunque el susodicho pueda aparecer como <<crucial>> en una época determinada, no siempre se encuentra libre de los prejuicios de su diseñador). A pesar de ello, en el prefacio de la citada obra, sugiere que si el cilindro de aire

> "... es la causa del vacío contenido en el tubo, o de la suspensión del mercurio al cual se equilibra, parece que ese cilindro de aire será más corto y... el cilindro de mercurio... de menor altura, cuando sea observado en lo alto de una torre o de una montaña (...) Si hiciésemos [en la cima de ésta] la experiencia... el cilindro [quizá] debería medir apenas un pie y media pulgada [342.39 mm] (...) contra los 2 pies, 3 pulgadas y 2/3 [757.83 mm] que [alcanza] en Nancy." [30]

Mersenne insinuó subirse a una montaña con el fin de realizar el experimento, y no haber observado variación alguna en la columna de mercurio. Así, llegaba a la conclusión siguiente: <<el cilindro de aire no es la explicación de ese vacío>>. Paradójica situación: proponer un experimento interesante y negarlo con una sola observación.

Ahora sabemos de las variaciones que puede presentar una columna de mercurio en función de la humedad, la temperatura y la altitud de una región determinada. Cuando Mersenne volvió a medir la altura de la susodicha, en la ciudad de Nancy (212 m s.n.m.), encontró dos resultados: 749 y 758 mm de Hg. Así, al menos los resultados de Mersenne, mínimo francés, tienen la virtud de ser muy cercanos entre sí.

Un año antes, Périer había escrito una carta[31] a Pascal, fechada el 22 de septiembre de 1646, donde relata los famosos experimentos efectuados en la cima del Puy-de-Dôme -macizo volcánico central situado en la provincia de Auvernia, Francia, cuya altura s.n.m. es de 1465 m. Los infaltables testigos fueron: Bannier, La Ville, Begon, Le Porte y el canónigo de la catedral enclavada en la villa de Clermont.

Périer vertió, primeramente, 16 libras de mercurio -previamente destilado- en un recipiente. Introdujo en éste dos tubos de vidrio, de cuatro pies de longitud y del mismo grosor, a través de sus extremos abiertos. Los dejó un rato sumergidos en el mercurio hasta constatar que ambos alcanzaban la misma altura, siendo ésta de 26 pulgadas y 3 1/2 líneas francesas (*ca.* 710 mm). Repitió lo anterior dos veces más y pidió al Reverendo Chastin -en su opinión "hombre tan piadoso como competente"- que vigilara el tubo que habría de quedarse en el convento de los mínimos. Mientras tanto, Périer caminaría con rumbo a la cúspide del Puy-de-Dôme, en la cual

> " [constaté] que el mercurio sólo se elevaba en el tubo hasta una altura de 23 pulgadas y dos líneas [634.7 mm]... habiendo una diferencia de 3 pulgadas y una línea y media [respecto a la de los Mínimos]. En consecuencia, lo hice otras cinco veces más, siempre con la máxima precisión (...) Después, [en cierto camino ya de bajada] comprobé que la altura del cilindro era entonces de 25 pulgadas. [Esto demuestra] *que la altura del mercurio disminuye proporcionalmente a la altura de los distintos lugares.*" [32]

Sin embargo, no nos dice a qué altura la columna alcanzó las 25 pulgadas. Es muy probable que Périer esperara una variación de la altura de la columna proporcional a la altitud.

Su prejuicio no fue impedimento para que, en la cima de la montaña, obtuviera una variación significativa en la altura de la columna: 626 mm a 1465 m (a 1000 m s.n.m. y 8.5° C, la columna alcanza 675 mm); cifra aceptable si tenemos en cuenta lo difícil que debió ser transportar el dispositivo a más de 1000 m sobre el nivel del valle. Sin duda, lo más importante es que -a diferencia de Mersenne- este autor sí detecta una franca disminución en la altura de la columna. Sus mediciones más importantes las resumiremos en la siguiente tabla construida por nosotros con los resultados de Périer.[33]

TABLA XIII : VARIACIÓN DE LA COLUMNA DE MERCURIO

I Altura respecto a Clermont* (m)	II Altura de la columna de mercurio (mm)	III Altitud s. n. m. (m)
0	720.0	460
13.0	719.2	473
53.0	714.7	513
300.0	685.0	760
1000.0	634.7	1465

* Según Périer

Como puede observarse, no existe una relación de proporcionalidad directa entre los valores de las columnas II y III. Pudiendo, no obstante, dar una cifra *aproximada*: por cada 13 metros, la altura de la columna de mercurio disminuye 0.8 mm. Estimación que Périer, cuñado de Pascal, no hizo. Así, a pesar de figurar en la historia como un experimento de medición, de sus resultados no fue dable establecer un *principio* que rigiera el comportamiento del fenómeno; solamente se deriva una conclusión de carácter cualitativo: **el tamaño de la columna de**

mercurio sí varía con la altitud. Es decir, se da por hecho que el aire, con su peso, es capaz de ejercer una *fuerza* sobre la columna de mercurio; de ejercer una *presión*.

En un comentario a la carta de Périer, Pascal intuye las consecuencias prácticas de estos experimentos[34]:

1) la posibilidad *real* de emplear el dispositivo con el fin de conocer la altura relativa de un sitio respecto a otro;

2) como resultado de las variaciones de la columna con los <<grados de calor>> (leáse temperatura), la posible dependencia entre ésta y la presión ejercida por el aire; y

3) el replanteamiento del problema de los termómetros, pues no se podía garantizar que la altura alcanzada por la columna en distintos lugares del mundo representara <<el mismo grado de calor>>.

Consecuencias que tuvieron influencia indirecta en la historia de la ciencia. Por ejemplo, el primer punto planteado por Pascal se cristalizó cuando en 1657 la Academia del Cimento construyó dicho dispositivo con tal fin. Desde entonces el barómetro dejó de ser una mera curiosidad, pasando a ser parte del mundo académico. El segundo punto también fue importante, aunque tuvo que esperar el estudio de las propiedades de los gases emprendido formalmente por Boyle, Mariotte y Charles.

Los experimentos de Périer, Berti, Torricelli, etc. influyeron en la conformación de la obra *Tratados sobre el equilibrio de los líquidos y sobre el peso de la masa del aire*, escrita por Pascal. Si bien no contiene experimentos nuevos (ni originales), hay un aspecto que la distingue incluso de las obras de los experimentadores más sagaces: la interpretación sistemática de los resultados de cada experimento con el fin de erigir *principios*.

Pascal es una figura de transición en el experimento moderno, a pesar de no ser un experimentador consagrado. Por una parte, describe, y sintetiza con perfecto análisis lógico, la esencia tanto del experimento como del fenómeno que lo ocupa -a diferencia del estilo farragoso y disperso de sus coetáneos. Sin embargo, su interpretación sigue siendo la de un filósofo natural: los experimentos ilustran y fundamentan el discurso, mas no determinan -por sí mismos- su valor; la teoría tiene esa función. Por otra parte, este filósofo francés solía extraer muchas conclusiones de un hecho aparentemente tan simple como el hinchamiento de una vejiga desinflada al subir una montaña:

> " Si se coge un globo semilleno de aire... y del extremo de un hilo lo subimos a una montaña de 500 toesas de altura, constataremos cómo a medida que ascendemos va inflándose por sí mismo y que al llegar a arriba [estará completamente inflado] Observemos, pues: 1° Que la masa del aire tiene peso; 2° Que su peso es limitado; 3° Que pesa más con un tiempo [climático] que con otro; 4° Que pesa más en unos lugares que en otros, como en los valles; 5° Que por efecto de su peso ejerce presión sobre todos los cuerpos que rodea..." [35]

Téngase en cuenta lo siguiente: Pascal es un gran sintetizador que incorpora otros resultados -propios o ajenos- que no se desprenden en forma directa del fenómeno en estudio; incorporación ordenada, *lógica*, que puede parecer sin fundamento por la gran cantidad de inferencias y deducciones existente en el *corpus* de su densa (pero concisa) obra.

Así, pues, su papel dentro de la conformación del experimento físico no radica en su originalidad, ni en su ingenio experimental, menos aún en su destreza y precisión al momento de ejecutar algún experimento; sino en su forma precisa de comunicar los experimentos y de saber interpretarlos. Recúerdense, por ejemplo, las características de los autores analizados a lo largo de todo nuestro trabajo: algunos, aunque sus resultados experimentales fueron buenos, no tuvieron idea clara de la importancia de sus resultados (Mersenne, Riccioli); y los profundamente originales, por su estilo, es difícil seguirlos (Galileo, Huygens, Maignan, Torricelli.)

En particular, en el problema del vacío, Pascal sintetizó los resultados dispersos que se tenían con la intención de construir una teoría que los explicase a cabalidad. Pero no pudo concretar esto último.

Volviendo a los *Tratados*, Pascal reconoce que es el peso del aire el responsable de muchos de los fenómenos otrora atribuidos al *horror vacui*. De este modo, el peso del aire es la causa de que:

I) resulte difícil abrir un fuelle cuyas aberturas se encuentren herméticamente cerradas;

II) no sea fácil separar dos cuerpos lisos aplicados el uno sobre el otro;

III) al introducir una jeringa en el agua y tirar del émbolo, el agua lo siga y ascienda como si estuviera adherido al mismo;

IV) al meter boca abajo una botella de agua dentro de un recipiente igualmente lleno, la que se encuentra en la botella se mantenga suspendida; y

V) en un recipiente inicialmente cerrado que contenga agua, ésta fluya fuera de aquél solamente si se practican dos orificios (no uno) en la base del mismo.

Experimentos que se encuentran comentados en dicha obra.[36]

Más adelante llega a un aserto interesante: si el peso de la masa del aire es finito, limitados serán sus efectos. Lo cual, siguiendo a Pascal, se manifiesta al tirar del émbolo de una bomba de succión: el agua sube y continúa haciéndolo hasta una altura de 31 pies (poco más de 10 m); pero nunca más allá de este nivel. En cambio, si es mercurio lo que se emplea, subirá 2 pies, 3 pulgadas y 5 líneas (730.1 mm). Con esto, Pascal tácitamente muestra que en este fenómeno no es relevante el material que forme la columna; es decir, el peso del aire afecta a *todos* los cuerpos sin distinción.

Hay, en lo precedente, un cambio implícito en la actitud epistemológica: se puede prescindir de la *naturaleza* de los factores que conforman un fenómeno, si éstos pueden ser caracterizados y descritos por un mínimo de propiedades -diferentes en cada caso- capaces de resumir la esencia del mismo. Actitud que también cambia el lenguaje y la manera de ver al fenómeno. Podemos observarlo con el problema artesanal planteado por Galileo: la imposibilidad de subir agua por aspiración después de cierta altura. Mientras que para Galileo ello se explica por <<la resistencia que presenta el vacío>>, para Pascal significa que <<el peso de las columnas de aire y de agua se han equilibrado>>

Pero dicho cambio equivale igualmente a simplificar el fenómeno, a *mecanizar* el mundo; iniciando una nueva visión que -por extensión- ya no se interesará por la explicación teleológica de los fenómenos, sino por las características de éstos que sean -de algún modo- medibles.

Si bien en la obra de Pascal no existe una mejora significativa en los dispositivos y resultados experimentales, la descripción de aquéllos y la interpretación de éstos, suplen esta falta.

Experimentando -como Berti- con una columna de agua en lugar de mercurio, le pareció descubrir una regularidad: por cada 10 toesas (unos 20 metros) de altura, la columna disminuía en una pulgada (un doceavo de pie) su longitud.[37] En su opinión, dicha reducción es proporcional a la altura: si a 20 toesas el agua se eleva a 31 pies, a 500 sólo lo hará a 27 (siempre que no varíen las condiciones atmosféricas). No es difícil observar en esto la proposición de un *modelo matemático* para explicar el fenómeno. Por supuesto, la verificación experimental de tal aserto no se llevó a cabo; hacerlo hubiera requerido subir un tubo de vidrio de más de 15m (como el de la fig. 23) a una montaña de 1000 m de altura sobre el nivel del valle, teniendo que emplazar el dispositivo -suponiendo que fuera posible trasladarlo hasta la cima- con mucho cuidado para no dañarlo. Además, si Pascal hubiera analizado los resultados de Périer para la columna de mercurio (*vid. supra* tabla XIII), probablemente habría abandonado su *modelo*. A pesar de esto, Pascal -probablemente sin proponérselo- refuerza el nuevo objetivo de la física: matematizar todo fenómeno natural.

Otra muestra del ingenio experimental pascaliano es el llamado *experimento del vacío en el vacío*. Aunque no existe consenso entre los historiadores -algunos lo atribuyen a Roberval, otros a Auzout-, Pascal supo plantearlo adecuadamente. El problema que condujo a este experimento es el siguiente: si nos encontráramos en una región desprovista de aire con nuestra columna de mercurio, ¿se desplomaría ésta al faltarle el contrapeso de aquél? Una pregunta de solución aparentemente sencilla, pero no en el siglo XVII. Para responder a lo anterior, según Pascal (ver fig. 26)

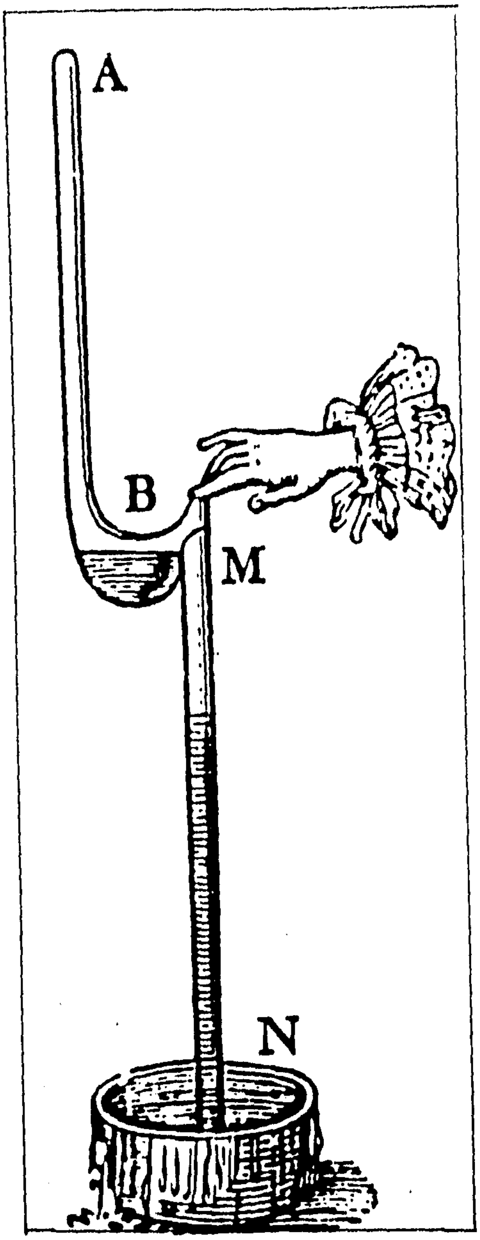


Fig. 26. *Experimento del vacío en el vacío* (Pascal).

"... se requiere un tubo curvado por su parte inferior, tapado por el extremo A y abierto por B, así como otro, recto, abierto por los extremos M y N, aunque inserto y soldado por M al extremo curvo del otro. La abertura [resultante de la unión] debe taparse con el dedo...[En seguida deben invertirse y llenarse los tubos] con mercurio. [Hecho esto, se debe volver a poner hacia] arriba el extremo A, sumergiéndolo... en una escudilla de mercurio N: el mercurio del tubo superior descenderá totalmente y quedará alojado en la encorvadura... por el contrario, el mercurio del tubo inferior tan sólo caerá parcialmente, quedando suspendido a una altura de 26 ó 27 pulgadas (...) Al quitar el dedo de la abertura, el mercurio de la encorvadura ascenderá... puesto que al caer de golpe el aire sobre el mercurio le forzará [de algún modo] a subir bruscamente hasta una altura capaz de contrapesarle..." [38]

Ahora bien, al retirar el dedo del punto de unión, el mercurio del tubo recto cae; mientras que, el alojado en la encorvadura, asciende y forma una columna casi con la misma altura que la anterior.

De este modo, Pascal mostró a sus coetáneos que es el aire el responsable de mantener suspendida la columna de mercurio. Probablemente su obra conocida con el título de los *Tratados*, donde Pascal describe éste y otros experimentos, fue escrita en el año de 1647. Sin embargo, no es el único pensador que reporta un experimento así.

Como el clima científico se encontaba en efervescencia, la repetición del experimento *del vacío en el vacío*, no esperó mucho tiempo: año después sería realizado por el matemático francés, inventor del sistema de balanzas, Gilles Personne Roberval (1602-1675).

En las siguientes líneas describiremos su ingenioso experimento.[39]

El dispositivo *-barómetro*, según Roberval- está formado por dos tubos largos y delgados, además de un recipiente en forma de jarra; todo lo anterior descansando sobre una aljofaina (M) con mercurio (figs. 27a y 27b).

El extremo superior del tubo KG permanece bloqueado por un trozo de tela impermeable fuertemente amarrado mediante un hilo que bordea la superficie exterior del cilindro cristalino. Mientras que la parte baja del tubo penetra a través de la cúspide del recipiente, de manera que su extremo libre K' (fig. 27c) casi llega a la base BC.

En cuanto al recipiente, éste consiste de un vaso de cristal transparente, cerrado por una tapa de metal que se angosta en uno de sus extremos, formando con ello un delgado tubo curvado hacia arriba. Roberval también selló con tela impermeable el extremo I del recipiente.

En la base del recipiente (BC), cerca del centro, existe un orificio que da entrada a un tubo de cristal, largo y delgado, cuyo extremo superior E' (fig. 27c) queda alojado en el interior del recipiente y a poca altura respecto al fondo del vaso de cristal. En cambio, el otro extremo del tubo (E), alcanza la pate más baja de la aljofaina.

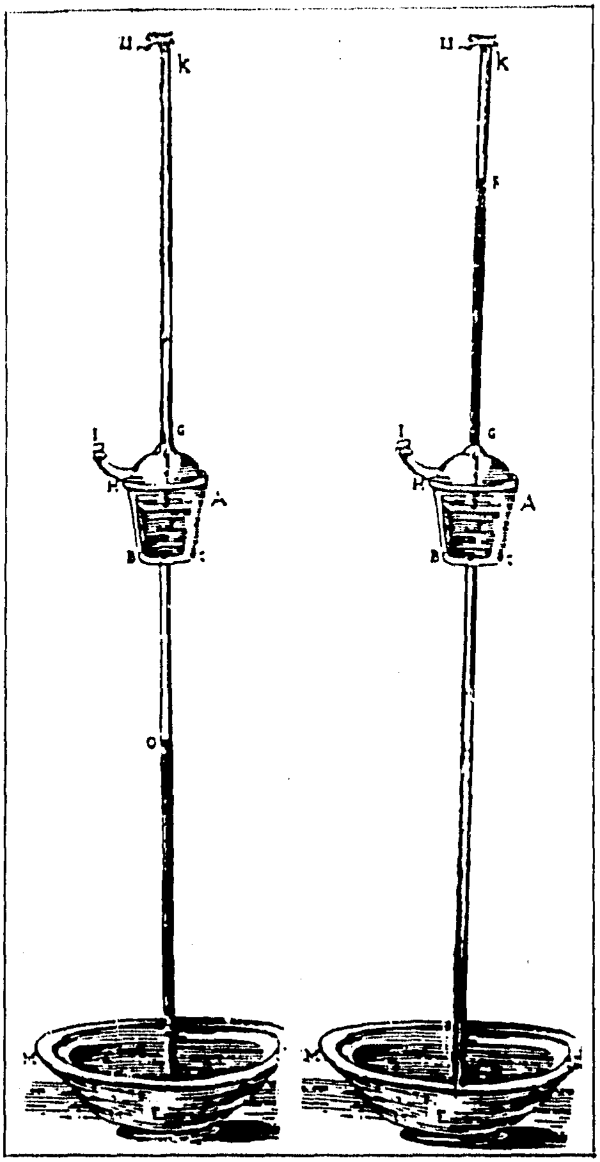


Fig. 27a. Fig. 27b.

Volteando totalmente el aparejo, Roberval le agregó mercurio a través del orificio E hasta que la jarra y los dos tubos quedaron anegados. En seguida, tapó con un dedo dicha abertura y, regresando su dispositivo a la posición original, lo depositó en la jofaina. Poco después retiró su dedo de E y entibó el dispositivo para que no se cayera. El resultado no se hizo esperar: la columna de mercurio situada en el extremo inferior del tubo desplomóse hasta alcanzar una altura (EO) superior a los 700 mm (fig. 27a); mientras que el resto del mercurio permaneció alojado en la región H'BCA' del recipiente. (fig. 27d). Hasta aquí, Personier de Roberval no se ha alejado mucho del experimento de Torricelli.

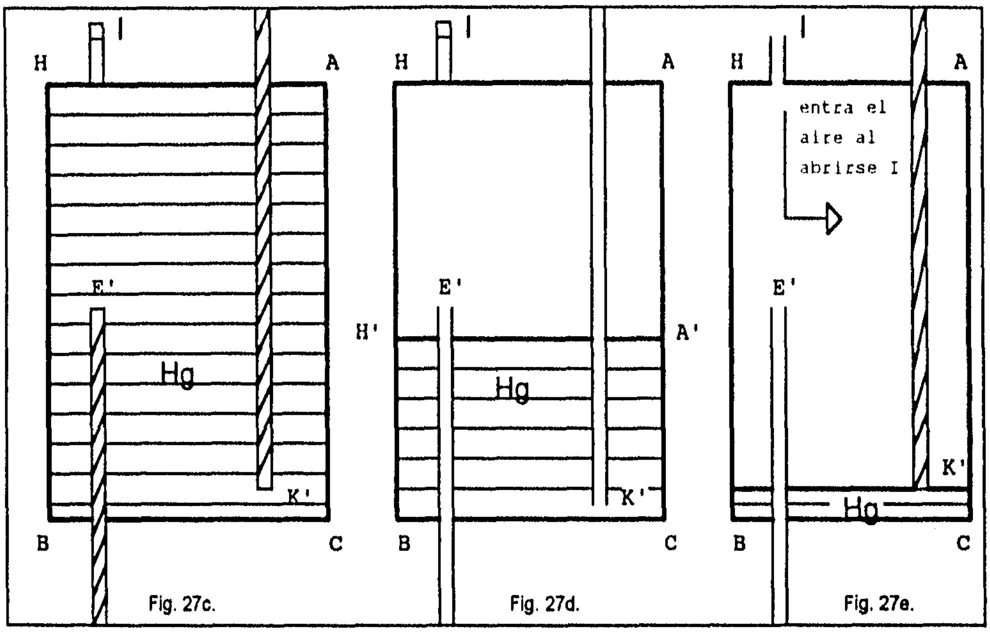


Fig. 27c. Fig. 27d. Fig. 27e.

Existe, no obstante, una diferencia: no hay solamente un vacío, sino dos: 1) el formado desde el punto O hasta la base (AB) del recipiente; y 2) el que se presenta desde el nivel superior del recipiente (HA) hasta el extremo K del tubo. Se tiene, *un vacío* separado de *otro vacío*; por eso, quizá, fue denominado como el experimento *del vacío en el vacío...*

Sin embargo, Roberval no se detuvo aquí. Procedió a pinchar la tela que impedía el paso del aire a través del orificio I. La consecuencia de esto fue el desplome total de la columna EO y el ascenso del mercurio alojado en el interior del recipiente hacia el extremo superior del tubo, formando una columna de altura GR (fig. 27b) casi igual a la altura de la columna inicial EO. Esto es, el mercurio otrora alojado en la región H'BCA', al ser empujado por el aire que entró por el extremo perforado I, subió a través del extremo libre K' hacia el tubo superior. (fig. 27e).

Si, como sostenían los peripatéticos, *Natura ab horret vacum* (la Naturaleza aborrece al vacío), la penetración de aire a través de I hubiera provocado el ascenso de ambas columnas hasta llenar completamente el aparejo -para no dejar ningún espacio vacío-; tomando para esto parte del mercurio depositado en la escudilla.

Igualmente, si el vacío es generado por la *forza del vuoto* galileana, ¿por qué se forman dos vacíos en espacios separados por un *plenum* -el mercurio del recipiente- en distintas regiones del tubo cuando el aparejo se deposita en la escudilla? ¿Es que la *forza del vuoto* puede atravesar la materia y producir dos vacíos de manera simultánea?

Para Roberval, la interpretación del experimento es indudable: **un barómetro, en un espacio sin aire, no funciona porque la altura de la columna de mercurio depende de la presión del aire existente en los alrededores.**

Ahora bien, si es verdad que el aire ejerce presión, una vejiga desinflada en nuestra atmósfera debería dilatarse en el espacio vacío del tubo de Torricelli. Roberval hizo este sencillo experimento y verificó lo anterior.[40]

Tanto el experimento de este autor, como el de Pascal, demostraron inequívocamente que ni el *horror vacui*, ni la *forza del vuoto*, tenían cabida en la nueva física del vacío.

Si bien las investigaciones no arrojaron mayor luz sobre este concepto, sí representaron un avance muy grande a nivel epistemológico. Puesto que no era dable obtener medición alguna de la naturaleza intrínseca del vacío, en cambio sí lo era medir los factores involucrados en este fenómeno. Configurando, así, una nueva relación entre discurso científico y fenómeno: sólo podría comprenderse aquello que, de algún modo fidedigno y reproducible, no resultase imposible de medir. Por ejemplo, de nada serviría decir que se ha formado un *vacío* o un *espacio con aire enrarecido*, si no se determinaba nada en concreto respecto a ellos (como la altura de la columna de mercurio antes y después de ser observado el supuesto *vacío*).

Los experimentos de Berti, Maignan, Torricelli, Roberval... marcaron una transición dentro de la ciencia de la pneumática: el paso del *experimento cualitativo* al *experimento cuantitativo*. Aún aquellos autores se detuvieron en la observación de propiedades fenoménicas, *insinuando* solamente la relación seguida por las *variables* (altura de la columna y altitud).

Por otra parte, elementos otrora inconexos entrarían en la conformación de la física del vacío: la temperatura, parte de la hidrostática antigua, las propiedades del aire, etc. Conviene que nos detengamos en lo último. El aire -importante desde el punto de vista de la dinámica antigua, ya que se le atribuían la mayor parte de las discrepancias observadas en el movimiento de los cuerpos- volvió a la escena de la física revestida ahora con dos nuevas propiedades susceptibles de ser cuantificadas: las de dilatación y compresión.

Si bien la discusión sobre *la naturaleza del vacío* había perdido parte de su importancia, el interés de los pensadores se dirigió a la realización de experimentos que permitieran conocer al vacío *considerado como un fenómeno*. Pero, como en el estudio del movimiento, aquéllos no se conformaron con la simple obtención de resultados; no, una vez establecido el fenómeno del vacío, dedicáronse a medir todo factor que entrara en la conformación de ese vacío: las columnas de aire y de mercurio, la altitud, la *presión*, etc.

El medir se convirtió en la columna vertebral del experimento físico. El objetivo de la medición no se circunscribió a la obtención de simples resultados; buscó, además, la relación matemática entre los factores medidos. La utilidad de esto fue doble porque permitió: 1) variar las condiciones (o los mismos factores) de experimentación y confrontar con las predicciones derivadas del experimento anterior; 2) programar nuevos experimentos para verificar dichas predicciones; y 3) confeccionar experimentos destinados a estudiar un aspecto nuevo del fenómeno, imposible de ser derivado del resultado experimental anterior o de la mera especulación teórica.

Los experimentos, pues, no buscarían ser un simple puntal de la teoría en la confección de *principios*; por el contrario, estarían permanentemente sometidos a prueba y aportando nuevos elementos para su permanencia, modificación o total reemplazo.

4. 3 . BOYLE, HOOKE Y TOWNELEY : DE LA PRESIÓN EN LA COLUMNA DE AIRE A LAS PRIMERAS FORMULACIONES SOBRE LA *LEY* DE LOS GASES.

En 1660, el inglés Robert Boyle (1627-1691) publica[41] -entre otros trabajos- dos experimentos: una nueva variante *del vacío en el vacío* y otro referente a la variación del *resorte de la fuerza del aire* en la columna de mercurio. El postrero es novedoso pues permite el control externo -mediante una bomba de vacío- de la presión ejercida sobre aquélla. También lo es el primero, pues supera técnicamente a los de Pascal y Roberval. Según Boyle, este experimento fue realizado

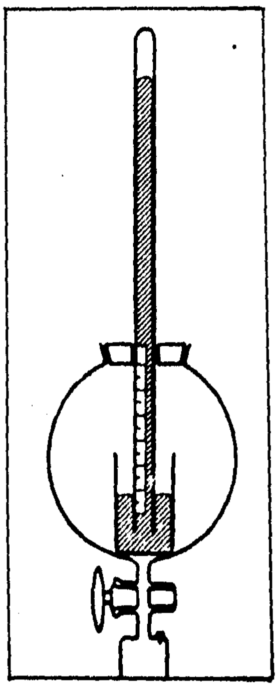


Fig. 28. Dispositivo de Boyle para el experimento del *vacío en el vacío*.

> "(...) del siguiente modo: tomamos un cilindro de vidrio estrecho... de casi tres pies de longitud [91.5 cm], cuyo agujero... tenía un cuarto de pulgada [0.63 m]. Habiendo sellado herméticamente un extremo de dicho tubo, se llenó por el otro de mercurio... Habiendo tapado el tubo con el dedo, se invirtió y se abrió... en una caja cilíndrica... llena de mercurio hasta la mitad. [Después la caja y el tubo se introdujeron] en una campana. A continuación, [la tapadera de ésta se deslizó] a lo largo de toda la porción del tubo [y la parte superior fue sellada con soldadura] (...) Estando así dispuestas las cosas, se hizo descender el émbolo e inmediatamente, tras la salida de... aire fuera de la campana, el mercurio descendió como era de esperar." [42]

Es decir, Boyle -al igual que Pascal y Roberval- colocó en el seno de un recipiente con mercurio un tubo delgado igualmente lleno para observar, primeramente, la caída parcial de la columna. Esto es, en esencia, la repetición del experimento de Torricelli, pero con una mejoría importante en los medios tecnológicos.

Ahora bien, una vez formado el vacío en el extremo superior del tubo delgado, introduce el dispositivo torricelliano en una campana de cristal conectada a un émbolo que regulaba la entrada del aire (fig. 28). Al quedar así depositados, fijó el tubo por medio de dos corchos y selló los intersticios que quedaban entre éstos, la boca de la campana y el tubo con diaquilón líquido.

Cuando cerró el émbolo, cierta cantidad de aire fue extraída y la columna de mercurio volvió a descender. Lo anterior demostraba, con mayor claridad, que no existía una *forza del vuoto* que

<<produjera>> una determinada "cantidad de vacío"; es el aire quien provoca la disminución en la altura de la columna.

Pero Boyle no se conforma con esta nueva demostración del experimento del vacío en el vacío, continúa sus investigaciones. Prosigue con la intención de extraer la mayor cantidad de aire dentro de la campana, controlando externamente el descenso de la columna de mercurio.

En un primer intento, logra un descenso de 495 mm -más de la mitad de su altura original. Para su segundo ensayo, permite la entrada de aire en la campana hasta que la columna recupera su altura original. En seguida, cierra el émbolo y se fija en la nueva altura de aquélla: 610 mm de mercurio. Otra extracción de aire y la columna frisa los 230 mm.

Al permitir nuevamente el acceso de aire a la campana, la altura inicial de la columna de mercurio - 750 mm [43] - es restaurada.

Con base en esto, Boyle no tuvo duda de que **podía aumentar (disminuir) la altura de la columna regulando la entrada (salida) del aire.** Este hecho pudo sugerirle, de manera tácita, algún tipo de dependencia entre la presión *provocada* por el aire en la columna de mercurio con el espacio *ocupado* por ésta. No se sabe con certeza si esto fue así, pero sus trabajos le permitieron hallarla.

Por otra parte, reconoce que las partículas sutiles de aire *pueden* penetrar al interior *casi* vacío del recipiente a través de la soldadura (diaquilón). Dicha explicación sorprende por su semejanza con los argumentos actuales. Además, para que la campana extractora no sufra la intrusión del aire, aconseja: 1) que el lugar donde se practique la soldadura quede lo más compacto y liso posible; y 2) llenar -y agitar- previamemente el tubo con mercurio, evitando así la formación de bolsas de aire que degraden la calidad del vacío existente.

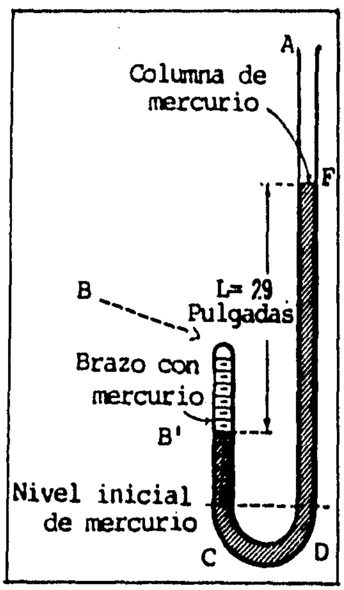


Fig. 29. Segundo experimento de Boyle.

Nótese que, aparte del adelanto tecnológico manifiesto en sus dispositivos experimentales, reconoce la importancia de comunicar las condiciones concretas de experimentación; no se trata ya de tomar los materiales que se encuentren a la mano -vasijas, tubos o jarras- sino, si las circunstancias lo precisan, de **construir mejores dispositivos.**

En su segundo experimento, Boyle estudia la compresión sufrida por el aire al ser sometido a distintas presiones. Su dispositivo experimental consistía de un largo y delgado tubo de vidrio (AB) doblado en su parte inferior, a manera de gancho o de anzuelo. Sus dos extremos -A y B- se encontraban abiertos. A través de la abertura A, Boyle vierte un poco de mercurio para que se asiente en el codo DC. De inmediato, cierra el extremo B aplicando el calor de una flama. Con esto, garantiza la existencia de aire en el espacio CB del tubo.

Posteriormente, continúa agregando mercurio de manera que, conforme aumentaba su cantidad, el espacio CB disminuía por efecto de la compresión. Cuando la columna de mercurio alcanzó una altura L, dicho espacio se redujo a la mitad. Pero dejemos al propio Boyle la explicación de esto:

> " Tomando esto en cuenta, se verá que concuerda extraordinariamente bien con la hipótesis [que postula la existencia de un cierto peso y resorte del aire, pues] el aire que tiene el grado de densidad y la consiguiente medida de resistencia [determinado por] el peso de la atmósfera que descansa sobre él, [es] capaz de equilibrar y resistir la presión de un cilindro de mercurio de [una altura L de] 29 pulgadas; tal y como nos enseña el experimento de Torricelli, [pero si] *el mismo aire es puesto en un grado de densidad unas dos veces mayor que el que presentaba antes, adquiere un resorte dos veces más fuerte...* " [44]

No es difícil percatarse de la interpretación de Boyle: el aumento de la columna de mercurio al doble provoca la reducción, a la mitad, de la columna de aire presente en el interior del tubo. Así, el espacio inicialmente ocupado por el aire, disminuye -aumentando con ello su densidad- conforme mayor sea el peso, *el resorte*, que le sea aplicado mediante la columna de mercurio. En términos modemos, lo expresaríamos de una manera simple: la presión ejercida sobre el aire es *inversamente proporcional* al volumen que ocupa.

Es digno de señalar que Boyle identifica al *resorte* generado por el aire como un efecto directo de la mayor o menor cantidad de mercurio agregado. Por ello, no se equivoca al suponer que la columna de mercurio representa la *presión* ejercida sobre la columna de aire CB; ni tampoco al identificar las variaciones de ésta con *expansiones o contracciones* en el volumen (*vid. infra* tablas XIV y XV).

Debido a la rotura del tubo mayor, tiene que reelaborar su experimento; para lo cual construye otro dispositivo idéntico, excepto por la longitud del tubo menor: 12 pulgadas (30.5 cm). Colocando ahora, en la parte extema, minúsculas divisiones de un cuarto de pulgada -confeccionadas en papel- para facilitar la medición del espacio comprimido al momento de acrecentar la cantidad de mercurio en el otro brazo. Una vez que alojó un poco de mercurio en la encorvadura, procedió a cerrar el extremo B del tubo pequeño. Continuó agregando mercurio a través de A, fijándose en cuánto disminuía la columna de aire en el espacio CB conforme aquélla columna crecía. Inicialmente, la columna de aire tenía 12 pulgadas de altura; mientras la columna de mercurio (equivalente a la presión atmosférica) frisaba los 745 mm.

Es importante aclarar lo siguiente: en ninguna parte del segundo experimento, Boyle reporta la temperatura a la cual mediría las compresiones y las dilataciones de su *resorte de aire*; mucho menos si aquélla se mantuvo constante todo el tiempo.

Finalmente, Boyle confecciona la siguiente tabla[45] :

[TABLA XIV : EXPERIMENTO DE COMPRESIÓN DE BOYLE
(volumen inicial = 12 ; presión atmosférica = 29.25 pulg.de Hg)]

A [V]	B [P_{HG}]	D [$P_{HG} + P_{atm.}$]	E [$P_{teo.}$]
12	0	29.12	29.12
11.	1.44	30.56	33.38
11.0	2.81	31.94	31.75
10.5	4.38	33.19	33.14
10.0	6.19	33.31	35.00
9.50	7.88	37.00	36.79
9.00	10.12	39.31	38.88
8.50	12.50	41.62	41.12
8.00	15.06	44.19	43.69
7.50	17.81	47.12	46.60
7.00	21.19	50.31	50.00
6.50	25.19	54.31	53.77
6.00	29.69	58.81	58.25
5.75	32.19	61.31	60.78
5.50	34.94	64.19	63.54
5.25	37.94	67.17	66.57
5.00	41.56	70.69	70.00
4.75	45.00	74.12	73.58
4.50	48.75	77.88	77.66
4.25	53.69	82.75	82.24
4.00	58.12	87.88	87.38
3.75	63.94	93.06	93.20
3.50	71.31	100.43	99.85
3.25	78.69	107.81	107.54
3.00	88.44	117.56	116.50

[Explicación de las columnas anteriores]

A. El número de espacios iguales del brazo más corto que contenía la misma cantidad de aire diversamente extendido.

B. La altura del cilindro de mercurio del brazo más largo que comprimía el aire a esas dimensiones.

[La altura del cilindro de mercurio que equilibra la presión de la atmósfera es de 29.12 pulgadas]

D. La suma de la columna B [con la presión anterior] muestra la presión soportada por el aire encerrado.

E. Cuál habría de ser esa presión *según la hipótesis que supone que las presiones y expansiones son inversamente proporcionales.*

En un segundo ensayo, procede a la inversa: partiendo de un espacio inicial de una pulgada, mide la dilatación sufrida por el aire al disminuir la columna de mercurio.

Para llevar a cabo su experimento, utilizó dos tubos de vidrio: el uno, abierto en ambos extremos y -al decir de Boyle- "del tamaño de la pluma de un cisne" (sic); el otro, más ancho que aquél, con un extremo cerrado y seis pies de altura (182.8 cm). Al primero le colocó, por fuera, una *escala de graduación* dividida en octavos de pulgada con objeto de facilitar sus mediciones. En seguida, acopló los tubos por sus extremos libres y agregó mercurio hasta cubrir la región B'CDF del aparejo (ver fig. 29).

Cuando el mercurio estuvo asentado, comenzó a sellar la juntura con lacre fundido y a cerrar el extremo libre del tubo pequeño. Tras esta operación, se da cuenta de un hecho muy importante que en la actualidad tampoco sería soslayado: debido al calentamiento generado por la soldadura, el aire encerrado se dilata; haciéndose necesario esperar el enfriamiento de todo el aparejo para que el aire encerrado retorne a su densidad normal. Boyle cuidó, así, que el aire inicialmente contenido se mantuviese sin alteración. Terminado lo anterior, fue extrayendo mercurio del tubo mayor y registrando las expansiones alcanzadas por el espacio BB'.

Los resultados obtenidos por Boyle se muestran en seguida.[46]

[TABLA XV : EXPERIMENTO DE DILATACIÓN DE BOYLE
(volumen inicial = 1 ; presión atmosférica = 29.75 pulgs. de Hg)]

A [V]	B [P_{hg}]	D [$P_{hg} - P_{atm.}$]	E [P_{teo}]
1.0	0.0	29.75	29.75
1.5	10.62	19.12	19.83
2.0	15.38	14.38	14.88
3.0	20.25	9.50	10.25
4.0	22.62	7.12	7.43
5.0	24.12	5.62	5.73
6.0	24.88	4.88	5.04
7.0	25.50	4.25	4.25
8.0	26.00	3.75	3.72
9.0	26.38	3.38	3.31
10.0	26.75	3.00	2.98
12.0	27.12	2.62	2.58
14.0	27.50	2.25	2.48
16.0	27.75	2.00	2.12
18.0	27.88	1.88	1.86
20.0	28.00	1.75	1.30
24.0	28.25	1.50	1.24
28.0	28.38	1.38	1.06
32.0	28.50	1.25	0.98

[Explicación de las columnas anteriores]

A. El número de espacios iguales del brazo más corto que contenía la misma cantidad de aire diversamente extendido.

B. La altura de la columna del cilindro mercurial que, junto con el resorte del aire encerrado, equilibra la presión de la atmósfera.

[Restando a la columna anterior la presión atmosférica, se obtiene la columna D]

D. El complemento de B [respecto a la presión de la atmósfera], que muestra la presión sostenida por el aire encerrado.

E. Cuál habría de ser esa presión según la hipótesis [anterior].

En ambas tablas, las columnas D y E representan, respectivamente, la presión obtenida experimentalmente y la presión calculada. La postrera se calcula suponiendo que la presión y el volumen guardan una relación de proporcionalidad inversa. Boyle es uno de los primeros autores que compara *explícitamente* la teoría con el experimento (y que lo reporta). Ahora bien, no era nada sencillo percatarse de que la presión total soportada por el aire encerrado en el tubo se compone de la presión debida al cilindro de mercurio responsable de la compresión (dilatación) más (menos) la presión *inicial*, atmosférica.

Pese a ello, Boyle pudo interpretar de manera correcta el primero de estos experimentos; pues comprimir puede verse como un efecto de sumar una nueva presión -debida al incremento en la altura de la columna de mercurio- a la existente desde un principio (la atmosférica)

No así en el segundo caso: tanto la columna A como la columna B, numéricamente, *crecen*; razón por la cual Boyle, al estudiar la dilatación del aire, no pudo obtener la relación matemática guardada entre el volumen y la presión.

Al parecer, fue un coterráneo de Boyle -el filósofo natural Richard Towneley (1629-1707)- quien le habría sugerido, algunos meses antes la interpretación correcta del segundo experimento: bastaba con restar, en cada caso, las presiones consignadas en la columna B de la presión atmosférica medida inicialmente. Sea como haya sido, lo cierto es que no quedó escondida dicha dependencia para Boyle, quien no era matemático.

Otro hecho digno de atención es que Boyle abstrae el hecho experimental observado -la altura de la columna de mercurio- y lo convierte en un nuevo *hecho* físico: la presión. Aparentemente es sencillo tal trocamiento; pero no en una época en la cual aún no se tenía certidumbre de que los efectos mecánicos observados fuesen suficientes para describir (y comprender) un fenómeno. De no tener Boyle la herramienta teórica adecuada, sus experimentos no habrían sido interpretados correctamente.

Lo anterior evidencia la insuficiencia del resultado experimental *per se*, si no existe una teoría capaz no sólo de extraer *cantidades numéricas* a partir de la medición, sino también de refinar el producto bruto derivado de aquélla; configurando, de esta manera, la visión del fenómeno físico, ya sea para mantenerla, ampliarla... o cambiarla.

Regresando a los experimentos, si llamamos V_0 al volumen inicial, V al volumen final, P_0 a la presión atmosférica y P_{hg} la presión de la columna de mercurio, y empleando la hipótesis de Boyle, tendremos que la siguiente relación es válida para el caso de la compresión

$$P_0 V_0 = (P_0 + P_{hg}) V \qquad \ldots (22)$$

pero, en el caso de dilatación

$$P_0 V_0 = (P_0 - P_{hg})\, V \qquad \ldots (23)$$

Para tener una idea de la exactitud de la hipótesis de Boyle, conviene comparar -con excepción de los primeros renglones- las cifras vertidas en las columnas D y E de ambas tablas.

TABLA XVI : ERRORES PORCENTUALES.

I) Experimento de dilatación (pulgadas de mercurio) (%)	II) Experimento de compresión (pulgadas de mercurio) (%)
3.58	8.45
2.52	0.60
7.32	0.15
4.17	4.82
1.92	0.60
3.17	2.39
0.00	1.21
0.81	1.14
2.11	1.11
0.67	0.62
1.55	0.85
9.27	0.96
0.06	0.87
1.08	1.02
15.38	0.90
20.96	0.98
30.19	0.73
27.55	0.32
	0.62
	0.57
	0.15
	0.58
	0.25
	0.91
1) Error promedio : 7.351 % Desviación : 9.340	2) Error promedio : 1.283 % Desviación : 1.7

Como puede observarse, en el primer caso, solamente cinco valores -de un total de dieciocho- presentan errores porcentuales superiores al 5%. En el segundo, en cambio, sólo un valor rebasa dicha cifra. Por lo tanto, el experimento de Boyle, también es bueno en sus resultados experimentales.

Además, en el trabajo de Boyle están presentes algunos de los elementos del experimento actual: 1) la comparación entre los resultados derivados de las mediciones y los que se desprenden de una *hipótesis* (término empleado por Boyle); y 2) la descripción de los dispositivos experimentales *realmente* empleados, así como de las condiciones concretas de trabajo y de las dificultades acaecidas -con el consecuente reconocimiento de las posibles fuentes de error- acaecidas durante su realización. Faltándole, no obstante, la proposición *explícita* de un *modelo matemático* que sintetice su trabajo (en la actualidad, por el contrario, nadie dejaría de reportar -al descubrir algo *nuevo*- la relación matemática, la *fórmula*, que rige el comportamiento de las variables).

Pero, junto con los elementos anteriores, también encontramos otros que no pertenecen al experimento actual: 1) la prodigalidad en detalles y descripciones que en la actualidad se considerarían como intrascendentes y "poco científicos"; 2) las continuas digresiones y un estilo personal de reportar los resultados más literario que lógico; 3) la imbricación de hipótesis con fundamento físico -dependencia de proporcionalidad inversa de la presión y el volumen, con otras de carácter físico -existencia de un *resorte* en el aire.

Así, las antiguas formas de discurrir acerca de la *physica* -herencia tanto helénica como medioeval- no han muerto; siguen vivas y se manifiestan aún cuando ya se efectúen experimentos cuantitativos.

Sir Robert Boyle no fue el único en realizar experimentos sobre la compresión y la dilatación del aire. Power y Towneley (1660-1), reportaron cinco experiencias cuyo objetivo era encontrar la dependencia entre la presión y el volumen: cuatro en el fenómeno de dilatación y sólo una en el de compresión.

La primera, la tercera y la cuarta experiencias se llevaron a cabo en un valle, situado a 800 pies de altitud. La segunda y la quinta en una montaña, situada a poca distancia, que frisaba los 1800 pies de altitud. Los dispositivos empleados por ellos y sus procedimientos no se diferencian mucho de los de Torricelli, aunque introducen ingeniosas variantes para suplir la falta de una bomba de vacío. En las líneas que siguen describiremos solamente la médula de sus experimentos.[47]

Utilizan tubos de vidrio de alturas variables, pero todos con el mismo grosor: 0.66 pulgadas. En la parte externa de cada tubo colocaban distintas escalas de graduación. Una de ellas estaba construida de la siguiente manera: tenía 42 pulgadas de alto y se encontraba dividida en 102 partes iguales; resultando con ello una *unidad* equivalente, en forma aproximada, a 0.412 pulgadas. Las llamaremos en adelante UG, por <<unidades de graduación>>. Son estas unidades las que emplearon Power y Towneley para reportar los valores del volumen de aire en sus primeros dos experimentos.

Antes que nada, Power y Towneley repiten, en la cima de la montaña, la experiencia de Torricelli con el fin de poseer una estimación de la altura alcanzada la columna de mercurio, es decir, para conocer la presión atmosférica. Al sumergir el tubo de vidrio repleto de mercurio en una aljofaina rebosante de mercurio, descubrieron que éste formó una columna de 27.42 pulgadas de altura; por lo tanto, el valor obtenido para la presión de marras en la cima de la montaña de poco más de trescientos metros fue el siguiente: 696.65 mm de Hg. En tanto, el volumen de aire encerrado por el resto del tubo, que se encontraba libre de mercurio, resultó ser de 50.15 UG. Con esto, obtuvieron los valores de la presión y el volumen iniciales, a saber: 27.42 pulgadas de Hg y 50.15 UG.

Enseguida cogieron el tubo y lo elevaron cerca de tres pulgadas respecto al nivel superior del mercurio contenido en la aljofaina. Lo anterior se hizo con la intención de provocar un desplome parcial de la columna; cayendo ésta, en efecto, hasta alcanzar una altura de 16.16 pulgadas. Mientras tanto, el espacio libre de mercurio llegó a 84.75 UG. No resulta difícil reconocer al volumen final (84.75 UG) y a la presión final (16.16 pulgadas de Hg).

En lo que hemos descrito en los dos párrafos anteriores, consistió el primero de sus cinco experimentos.

De esta manera, con tan sólo levantar un poco más el tubo que contenía el mercurio, Power y Towneley pudieron simular una <<bomba de vacío>> que regulaba la entrada de aire, con el consecuente decremento en la presión. En sus cuatro ensayos restantes, aplicaron el mismo procedimiento.

La segunda experiencia fue realizada en el valle. La columna de mercurio, formada al introducir el tubo repleto de este elemento en la aljofaina, alcanzó una altura de 28.42 pulgadas. El volumen libre (o inicial) de mercurio en la parte superior del tubo era de 50.15 UG.

Cuando levantaron el tubo, como en el caso anterior, pero en algo más de 4.5 UG (1.87 pulgadas), desplómose la columna de mercurio hasta alcanzar una altura de 16.64 pulgadas (presión final). Mientras que el volumen final llegó a 83.80 UG.

En su tercer experiencia regresaron a la montaña, pero utilizaron un tubo más corto con otra escala cuya <<unidad de graduación>> -UG' en adelante- era equivalente a 26/31 pulgadas. Cuando el extremo abierto del tubo reposo en el fondo de la aljofaina, la altura de la columna de mercurio resultó ser de 27.39 pulgadas. Mientras que el volumen vacío era de 9.00 UG'.

A continuación, Power y Towneley levantaron el tubo cerca de 3.5 pulgadas por encima del nivel de mercurio, y el resultado no tardó en manifestarse: la columna descendió hasta quedar con una altura de 13.53 pulgadas. En cambio, el espacio vacío creció, alcanzando 17.80 UG'.

La cuarta experiencia se llevó a cabo en el valle. Fue empleado el mismo tubo que en el caso anterior, pero los dos experimentadores ingleses hicieron dos modificaciones a su experimento.

La primera: en vez de levantar el tubo introducido en la aljofaina, sumergieron un poco más el extremo abierto de aquél en el mercurio. De este modo, medirían la compresión del aire encerrado en el tubo. La segunda: decidieron fijar una presión inicial distinta a la atmosférica, la cual quedó en 13.53 pulgadas de mercurio. Asimismo, el volumen inicial en la parte superior del tuvo resultó ser de 17.80 UG'.

Cuando el tubo fue hundido aún más en el mercurio contenido en la aljofaina, Power y Towneley encontraron los siguientes resultados: 14.09 pulgadas de Hg (presión final) y 17.35 UG' (volumen final).

Finalmente, en la quinta experiencia midieron la dilatación del aire. Como repitieron el mismo procedimiento descrito líneas arriba, nos limitaremos a presentar los resultados obtenidos por ellos. Presiones inicial y final (en ese orden): 28.40 y 14.09 pulgadas de mercurio; volúmenes: 9.00 y 17.35 UG'.

Power y Towneley propusieron -como Boyle- que la presión y el volumen guardan una relación de proporcionalidad inversa. Pero, a diferencia de él, no dieron una interpretación concreta a sus resultados experimentales; se conformaron con reportar a la manera de los *filósofos naturales.*

Procederemos a efectuar el análisis de las experiencias de Towneley y Power. Como el volumen y la presión iniciales son variables independientes, podemos fijar la presión final (o el volumen final) y, aplicando la ecuación (23) -o la (22) en el caso de compresión-, obtener el valor teórico del volumen final (o de la presión final) en la experiencia de dilatación. El objeto de esto es tener un punto de comparación para darnos idea de la precisión existente en el trabajo de los autores citados. Eligiendo la segunda opción, lo presentamos en la siguiente tabla.

TABLA XVII: EXPERIMENTOS DE DILATACIÓN Y COMPRESIÓN DE POWER Y TOWNELEY.
(Presión en pulgadas de Hg; volumen en unidades UG y UG')

Parámetro	Primero*	Segundo*	Tercero**	Cuarto	Quinto
Presión inicial	27.42	28.42	27.39	13.53	28.40
Presión final	16.16	16.64	13.53	14.09	14.09
Volumen inicial	50.15	50.15	9.00	17.80	9.00
Volumen final	84.75	83.80	17.80	17.58	17.35
Volumen final***	85.09	85.65	18.22	17.35	18.54
Error porcentual	0.40	2.16	2.30	-1.32	6.42

* Los valores del volumen en estos experimentos se encuentran en unidades UG ; el resto en unidades UG'.
** Este es el único experimento de compresión.
*** Estos valores son calculados en forma teórica.

A diferencia del experimento de Boyle, ellos no se valieron de un dispositivo externo para controlar la presión; más bien, cambiaron -subiendo a la montaña o bajando al valle- las condiciones de presión atmosférica; produciendo, así, la caída parcial de la columna de mercurio.

Conviene resaltar los valores que obtuvieron en el valle: 712.19, 721.14 y 721.14 mm de mercurio. De igual manera, los correspondientes a la montaña: 696.65 y 695.71. Obsérvese que, entre ellos mismos, no difieren mucho entre sí.

Si bien el número de datos presentados por Towneley y Power es pequeño, sus cinco experimentos *sí* entrañan un avance. Notemos que, a pesar de ser sólo ligeramente más precisos -en promedio- que los datos de Boyle, los dispositivos experimentales de los cuales se valieron *no* son superiores a los de aquél. Recordemos que los efectúan a la manera de Torricelli: con largos tubos, aljofainas y mercurio; no emplean, como aquél, bombas mecánicas para regular la entrada del aire al tubo. En síntesis: no tuvieron un control directo sobre la presión que les permitiese manipularla a su arbitrio para verificar, en caso de necesidad, algunas cifras que les parecieran dudosas.

En dichos autores descubrimos que la destreza y perspicacia del experimentador pueden suplir de manera satisfactoria -hasta cierto punto- medios tecnológicamente más avanzados.

Finalmente, analizaremos un experimento[48] atribuido a Robert Hooke (1635-1703), quien -al decir de muchos historiadores- lo llevó a cabo en el año de 1662 (cuatro años después de renunciar al puesto de ayudante que desempeñaba con Boyle). No se sabe bajo qué condiciones emprendió sus experimentos, pero es probable que hayan sido muy parecidas a las de su antiguo jefe. Un argumento que apoya esta hipótesis es que, hacia el año de 1658, estuvo a cargo de la bomba de vacío que más tarde Boyle habría de utilizar. Además, en su ***Micrographia*** (1665), informa acerca de algunos experimentos -muy similares a los de aquél- ***hacia el año de 1660***. Sin entrar en más discusiones históricas, presentaremos los resultados numéricos de sus experimentos de dilatación y de compresión del aire. Conviene aclarar que éstos se verificaron bajo presiones iniciales (atmosféricas) distintas. El primero de ellos lo efectuó utilizando mercurio.

TABLA XVIII : EXPERIMENTO DE DILATACIÓN DE HOOKE
(Altura inicial de la columna de aire: V_0 = 4 pulg.)

Altura final de la columna de aire encerrado (pulg.) [V]	Altura del cilindro de **mercurio** que equilibra a la de aire cuando éste se expande (pulg.) [P_{hg}]
6	10.12
8	15.25
12	20.25
16	23.12
20	24.62
24	25.62
32	26.50

Por otra parte, para el fenómeno de la compresión, empleó agua -no mercurio- y efectuó tres experimentos que resumimos en la siguiente tabla.

TABLA XIX : EXPERIMENTOS DE COMPRESIÓN DE HOOKE
(Altura inicial del cilindro de aire: V_0 = 12 pulg.)

Altura final de la columna de aire encerrado (pulg.)	Altura del cilindro de **agua** que equilibra a la del aire cuando éste se dilata (pulg.)		
	Primero	Segundo	Tercero
[V]		[P_{agua}]	
11.75		8.50	
11.50	20.00	17.00	15.00
11.25		27.00	
11.00	37.00	36.00	31.00
10.75		45.50	
10.50	58.00	58.00	52.00
10.25		68.75	
10.00	79.00	80.00	76.00
9.75		91.50	
9.50		105.25	101.00
9.25		117.00	
9.00		130.50	127.00
8.75			142.00

Sin embargo, Hooke no dio el valor de la presión atmosférica, P_0, con la cual inició cada uno de sus experimentos. Esto nos lleva a proceder de una manera distinta respecto a los casos anteriores. Como reportó los valores de la presión generada por la columna de mercurio (P_{hg}) y los correspondientes a los volúmenes inicial (V_0) y final (V) usaremos las ecuaciones (22) y (23), respectivamente, para calcular dicha presión en ambos experimentos. En la siguiente tabla se hace esto. (Recuérdese: Hooke realizó tres experimentos de compresión y solamente uno de dilatación).

TABLA XX : CÁLCULO DE P_0 A PARTIR DE LOS EXPERIMENTOS DE HOOKE

DILATACIÓN (en pulgadas de mercurio)	COMPRESIÓN (en pulgadas de agua)		
	I	II	III
30.36	460	399.5	345.0
30.50	407	391.0	341.0
30.38	406	405.0	364.0
30.83	395	396.0	380.0
30.78		391.3	383.8
30.75		406.0	381.0
30.29		402.7	382.3
		400.0	
		396.5	
		400.0	
		393.5	
		391.5	
promedio: 30.556	promedio:417	promedio: 397.75	promedio: 368.16

Las mayores desviaciones respecto al valor promedio son, en el orden de la tabla, las siguientes: 0.9, 10.3, 1.7 y 7.3 %.

El experimento de dilatación es significativamente mejor que el de Boyle. No así los de compresión , pero ello debido a la mayor dificultad que debió haber tenido al usar agua en vez de mercurio -con el consecuente aumento en la longitud de los tubos y en la propia columna líquida.

Los valores correspondientes a la presión atmosférica (P_0), en el experimento de dilatación, son muy parecidos entre sí; dando un valor promedio de 776.12 mm de longitud para la columna de mercurio. No obstante, en el experimento de compresión, dichos valores presentan una mayor variación, incluso en los promedios: 1059.18, 1010. 29 y 935.13 mm de longitud para la columna de agua. Esto nos indica que la sugerencia galileana resultó cierta: es mejor emplear mercurio que agua en este tipo de experimentos.

Algo que debemos señalar es lo siguiente. Los experimentos de dilatación y de compresión, realizados por estos autores, representan el primer intento por buscar una *ley* para describir el comportamiento del aire (más tarde se extendería a los gases en general) en condiciones *isotérmicas*. El estudio de los gases, la conducción del calor y los rudimentos de la termodinámica tendría que esperar aún hasta finales del siglo XVII, y principios del XIX, con los trabajos de Laplace Gay- Lussac, Dulong, Petit, etc.

Por último, agruparemos en una tabla los valores reportados por los distintos autores -aquí tratados- para las columnas de agua y de mercurio (solamente incluimos aquellos valores de carácter experimental).

TABLA XXI: ALGUNAS DE LAS ALTURAS MÁS REPRESENTATIVAS DE LAS COLUMNAS DE MERCURIO (O DE AGUA) OBTENIDAS DURANTE EL SIGLO XVII.

Autor y año	Lugar de experimentación	Altitud (m s.n.m)	Altura de la columna (mm)
Galileo, 1632	Florencia	22	10378.80* (agua)
Berti, 1641	?	?	10510.00 (agua)
Torricelli, 1644	Florencia	49	700.00 (Hg)
Périer, 1646	Rouen	22	762.80 (Hg)
" " "	Clermont	460	710.00 (Hg)
Mersenne, 1647	Nancy	212	753.50** (Hg)
Boyle, 1660	Oxford	72	749.30** (Hg)
Power y Towneley, 1660-1	Inglaterra	***	718.16** (Hg)

* Reportado en los *Discorsi*. No sabemos si Galileo lo midió o tomó de otras fuentes; lo cierto es que este valor numérico era muy conocido por los artesanos de aquel tiempo.

** Representan valores promedio.

*** Estos autores no reportaron el lugar exacto de experimentación.

Así, lo que empezó tratando de medir la fuerza del vacío (o del aire enrarecido), terminó en la medición de las alturas de mercurio (o de agua) resultantes de someter al aire a fuerzas de carácter mecánico, a *resortes*, que lo comprimen o lo dilatan.

Los experimentos cuyo principal objetivo centróse demostrar el vacío, de *medirlo*, se toparon con un *plenum* de propiedades complejas que, a diferencia de aquél, no resultaban tan yermas de contenido físico como las meras especulaciones filosóficas acerca de una materia que resultó *más llena* de lo que se esperaba: el vacío.

Después de todo, quizá solamente fueron algunos autores -no la naturaleza- quienes le tenían *horror al vacío*...

NOTAS BIBLIOGRÁFICAS AL CAPÍTULO 4.

1. Dice Tito Lucrecio Caro en su poema *De rerum natura* (versículos 450-530) acerca del vacío: << No está ocupado todo por los cuerpos / porque se da vacío entre las cosas / (...) / [Sin el vacío] el movimiento... no concebirías; / porque propiedad siendo de los cuerpos / la resistencia, nunca cesarían / de andar entrechocándose unos y otros: / *imposible sería el movimiento,/ pues ningún cuerpo se separaría /* >>. (Tomado de Lucrecio Caro, *De la naturaleza de las cosas*, México, Ed. Iberoamericana,1era. edición, 1983, pp.105-7). Obsérvese que el vacío es una necesidad dentro de esta concepción porque representa el fundamento físico del movimiento. Esto es solamente una observación pues, históricamente, esta doctrina no tuvo un desarrollo similar a la aristotélica (la cursiva es mía).
2. La doctrina de Demócrito se reduce, en esencia, a cuatro postulados: 1) la pluralidad de los elementos que conforman el Universo; 2) la infinitud del espacio, con la consecuente infinidad de mundos; 3) la indestructibilidad de los átomos; y 4) la infinita existencia y variedad de éstos. Así, en apretada síntesis, la génesis de todo lo existente puede ser descrita de la siguiente manera. Los *átomos*, elementos sólidos e indivisibles de poca extensión, y que se encuentran separados entre sí en el espacio infinito, pueden ser atrapados por remolinos -los cuales obedecen, para su organización, más al azar que a un principio inteligente- que paulatinamente van formando grandes conglomerados caracterizados por su gran diversidad en formas, texturas, funciones y propiedades. A su vez, si estos conglomerados se unen a otros que circunden el espacio, los nuevos conglomerados serán de mayor complejidad. Ahora bien, con el tiempo, los átomos se dispersan, acabando con ello un agrupamiento muy particular de materia; pero aquéllos retornan a su estado primigenio, moviéndose a través del vacío espacio infinito por toda la eternidad. Por el carácter indivisible del *átomo*, éste no puede moverse sino por un espacio que no contenga materia, que esté *vacío*... No resulta, pues, extraño que el vacío haya sido tan importante para los atomistas griegos. Para un análisis más detallado de lo anterior, ver: G. Bailey, *The Greek Atomists and Epicurus*, Oxford, Oxford University Press, 1928; y G. Vlastos, "Ethics and Physics in Democritus", *Philosophical Review*, 54, 1945.
3. Según Melissos: <<... aquello que es vacío [no] es nada... aquello que nada es no puede existir. [Además] el vacío no se mueve. Pues no puede [permanecer] en ningún punto, ya que ... llena [un lugar en el espacio]... el vacío [, pues,] es una cosa que no existe, [porque] él no tiene donde [permanecer].>> Tomado de Kirk, *The presocratic philosophers.* 2 da. ed. Cambridge, Cambridge University, 1983. p. 397.
4. Epicuro, *La lettre d' Epicure.* París, Minuit, 1971. p. 79.
5. Al decir de Sextus Empiricus: << ... cuando Epicuro dice que el vacío existe... se basa en un hecho obvio, a saber: el movimiento; pues si el vacío no existiese, el movimiento [tampoco] debería existir, pues el móvil no tendría un lugar por donde pasar, si todas las cosas estuviesen llenas y compactas...>> Véase: Sextus Empiricus, *Oeuvres choisies de Sextus Empiricus.* París, Montaigne, 1948. pp. 213-4.
6. Herón de Alejandría, *Pneumatica*, libro I, Introducción; *cit. pos.* Cohen & Drabkin, *Souce book in Greek science.* Cambridge, MA, Harvard University, 1969. p. 248ss. Sigue diciendo Herón: (...) Por lo tanto, no se debe suponer que existe en la naturaleza un vacío distinto y continuo porque él está distribuido en pequeñas medidas a través del aire, del agua o de otros cuerpos (...) podemos percibir que existen espacios vacíos por las siguientes consideraciones: si no existieran esos espacios, ni en la luz, ni en el calor...[ninguna] fuerza material podría penetrar a través del agua, del aire o de otros cuerpos. ¿Cómo podrían los rayos del sol, por ejemplo, penetrar a través del agua hasta el fondo de un recipiente? (...) También es claro que existen espacios vacíos en el agua a partir de esto: cuando se derrama vino en agua, se ve que aquél se esparce por todas las partes del agua, lo que no pasaría si no hubiese vacíos dentro del agua.>> (La traducción del inglés es mía). Es interesante notar que este pensador alejandrino acepta la coexistencia del vacío con el *plenum* de los elementos; los vacíos se encuentran en el

interior de los propios cuerpos, haciendo posible que éstos puedan mezclarse y combinarse con otros de distinta forma, peso y naturaleza. Herón es de los pocos autores que vieron en el vacío un receptáculo en el cual podían llevarse a cabo cambios en los propios objetos materiales; *transformaciones de la materia.*

7. Según el Estagirita: << ... no existe una razón [de carácter matemático] en que el vacío sea excedido por un cuerpo, así como no existe una razón entre cero y un número... De la misma forma, el vacío no puede mantener una razón con el *plenum*, y por lo tanto, [no puede existir una razón entre] el movimiento de uno hacia el otro... mas si una cosa se dislocara en un medio más denso [en alguna distancia y en algún tiempo], ella se movería a través del vacío con una velocidad alejada de cualquier razón.>> Aristóteles, *Física*, op. cit., libro IV, cap. 8, 215a 1- 215b 23. A través de esto no es difícil comprender la importancia que la negación del vacío representó en la doctrina aristotélica del movimiento: si en un <<medio>> como el vacío se desplazara un cuerpo, al no encontrar resistencia de ninguna materia, se movería con una velocidad prácticamente infinita. Recordemos que, según la interpretación moderna del aserto aristotélico (ver nota 2, cap. 2) la velocidad de un cuerpo es directamente proporcional a su peso e inversamente proporcional a la resistencia del medio. Sin embargo, en el siglo XVI, Benedetti habíase dado cuenta de la falacia que entrañaba el razonamiento aristotélico: << Puesto que la velocidad es proporcional al peso relativo del cuerpo, es decir a su peso absoluto, disminuido -y no dividido- por la resistencia del medio, se desprende que la velocidad no aumenta indefinidamente y, al anularse la resistencia, la velocidad no deviene en modo alguna infinita.>> *De Mechanics*, cap. XIX, p. 179 ; *cit. pos.* A. Koyré, *Estudios galileanos*, p. 50 (n. 86).

8. En el siglo XIV, Jean Buridan afirmó en sus *Questiones super octo Physicorum libros Aristotelis*, libro IV, folio 8, verso 1: << A través de la inducción experimental, parécenos que ningún lugar es un vacío, pues en todos los lugares encontramos algún cuerpo natural, como aire, o agua... Mas la experiencia nos muestra que no podemos separar un cuerpo de otro a menos que surja entre ellos otro cuerpo [ya que un cuerpo totalmente cerrado no podría ser separado] >>. *Cit. pos.* E. Grant, *A Source book in medieval science*, Cambridge, MA, Harvard University Press, 1974, p.326.

9. Avicenne, *Le livre de Science* (Dânesh-nâmè), París, Belles Lettres, 1958, 2 vols (vol. II), pp. 26 ss.

10. Apunta Bacon en su *Novum Organum*, Libro II, af. XLVIIII: << [Hay un] segundo tipo de conexión y de continuidad, por el cual los cuerpos se relacionan y encadenan unos con otros, de tal suerte, que no puede romperse en parte alguna el contacto de las partes de la materia. Esto es lo que la escuela llama horror al vacío (*ne detux vacuum*). Así es como se eleva el agua... por las bombas; la carne mediante las ventosas; por ello es por lo que un vaso agujereado por su parte inferior y lleno de agua, la contiene inmóvil y no comienza a gotear sino cuando se destapa por su parte superior para dar acceso al aire>>.(Tomado de R. Bacon, *Novum Organum*, México, Ed. Porrúa, 1991, p. 156) Este tipo de argumentos esgrimían las escuelas contra la existencia del vacío. Pero Bacon, en esta época, es más cauteloso al reconocer que (p.168): << ... no sabemos de un modo cierto si el vacío existe o no, ya sea en zonas de alguna extensión, ya en el interior de los cuerpos. Lo que sabemos es que, la razón aducida por Leucipo y Demócrito... es falsa (...) La diferencia de volumen [al comprimir un cuerpo] se explica... con la suposición de pliegues propios de la materia, que alternativamente se despliega en el espacio, sin necesidad del vacío.>> Así, la discusión acerca del vacío con todas sus consecuencias se negaba -en los inicios del siglo XVII- a dejar el terreno filosófico para abordarlo en el físico.

11. Descartes, *Principes de la philosophie*, parte 2, ap. 18: << En cuanto al vacío, en el sentido que los Filósofos dan a esa palabra, o sea, un espacio donde no existe ninguna sustancia, es evidente que no existe ningún otro punto del espacio en el universo que sea así, pues *una extensión del espacio o del lugar interno no difiere de la extensión de un cuerpo.* Y como, apenas por ser extenso en longitud, anchura y profundidad, podemos concluir que un cuerpo es una sustancia... [Asimismo], en relación al espacio que se supone vacío: ya que existe extensión en él, ahí existe también necesariamente sustancia.>> (Tomado de *Oeuvres de Descartes*. Ed. Charles Adam & Paul Tenery, 11 vols. (vol. IX-2), Paris, J. Vrin, 1964-72). La traducción del francés y la cursiva son mías.

12. "Carta de Baliani a Galileo del 27 de julio de 1630"; *cit. pos.* Govi, "Intomo al primo scopritore della presione atmosferica", *Atti della reale Accademia delle Scienze di Torino* 2: 562-81,1967. Dice Baliani (pp. 565-6): << Anduve pensando si podría ocurrir que el canal o sifón posea... poros por los cuales no pueda pasar el agua ni el mismo aire, a no ser con gran violencia; por eso, cuando el tubo está lleno, el agua presiona tanto que hace tanta fuerza que el aire entra por los poros que están en la parte superior, de modo que el agua pueda descender... sin que surja un vacío (...) [Pero el agua que llena sólo la mitad del tubo] no tiene la fuerza para hacer tanta violencia al aire que pasa forzándolo a entrar por los poros arriba indicados. El tubo [empleado] es de cobre [y] pesa 15 onzas por palmo y por más esfuerzo que se haga, no se puede ver que posea agujeros sensibles.>> (La traducción del italiano es mía). Como puede observarse, la negación a ultranza del vacío conducía frecuentemente a especulaciones que se desviaban del problema, derivando a menudo en la postulación de hipótesis más filosóficas que físicas. Fue necesario aceptar -hasta cierto punto- la existencia del vacío, pues la experimentación arrojó resultados prácticamente imposibles de explicar para los seguidores de la escuela peripatética.
13. *Ibid.*, pp. 569-70 (la cursiva del texto es mía).
14. Galilei, *Discorsi* (Jornada Primera). Sagredo se muestra sorprendido cuando, al observar el vaciado de una cisterna mediante una bomba de agua, ésta deja de funcionar a una altura determinada. Señala que (véase pág. 86) << ... la primera vez que observé tal cosa, creí que el aparato estaba averiado, pero el maestro que encontré para que lo arreglara me dijo que *el único defecto era del agua*... Añadió también que no era posible hacerla subir un pelo más arriba de 18 brazas...>> (la cursiva es mía). Este problema que tanto preocupó a Galileo sería desarrollado por otros autores.
15. *Ibid.*, p. 85.
16. Maignan, *Cursus philosophicus*; *cit. pos.* W. E. Knowles Middleton, *The history of barometer*, Baltimore, Johns Hopkins, 1964, pp. 11-28.
17. *Ibid.*, pp.11-2 (la traducción del italiano es mía).
18. *Ibid.*, p. 12.
19. "Carta de Magiotti a Mersenne del 25 de mayo de 1648" ; *apud.* Middleton, op. cit., p.17.
20. E. Torricelli, *Opere*. Ed. Gino Loria & Giuseppe Vassura. 3 vols. (vol. III), Faenza, Montanari, 1919, pp. 186-8.
21. *Ibid.*, p.186 (todas las traducciones son directas del italiano).
22. *Ibid.*
23. *Ibid.*, pp.186-7. La figura 24 que se anexa no apareció en la carta de Torricelli a Ricci, sino en el prefacio de Tomás Buonaventuri en sus *Lecciones Académicas de Evangelista Torricelli* (1715) ; *apud.* Loria & Vassura Ed. Por otra parte, sabemos que la braza florentina usada por Torricelli tenía una longitud equivalente a 0.54m. En cambio, no sabemos la equivalencia exacta de su pulgada, pero creemos que debió encontrarse entre los valores de las pulgadas más comunes empleadas en el siglo XVII: francesa (2.51 cm), inglesa (2.54 cm) y holandesa (2.74 cm)
24. Del siguiente pasaje resulta claro que Torricelli rechaza la *forza del vuoto* galileana (*Opere*, vol. 3, pp. 187-8) : << Hasta ahora se ha creído que la fuerza que sostiene al mercurio a pesar de su tendencia natural a caer era interna al tubo y que *se debía al vacío* o a la propia materia sumamente rarificada; pero a mí me parece, por el contrario, que la fuerza es externa y proviene de fuera (...) También el agua en un tubo similar pero mucho más largo, se elevará casi 18 brazas, es decir, tanto más que el mercurio cuanto menos pesada que éste es, a fin de equilibrarse con aquella misma fuerza, que actúa por igual sobre ambos.>> (La Cursiva y la traducción mías).
25. *Ibid.*, p.188.
26. "Carta escrita al señor Charut, Residente de su Majestad en Suecia, sobre la experiencia del vacío, en noviembre de 1646 por el señor Périer, Superintendente de las Fortificaciones" ; en *Oeuvres de Pascal.* Ed. León Bruschvicg & Pierre Boutroux. 14 vols.(vol. I), París, Hachette, 1904-14, pp. 325-45.
27. *Ibid.*, pp. 330-1. (Las traducciones del francés son mías).
28. *Ibid.*, pp. 336-7.

29. Mersenne, *Cogitata physico-mathematica*, p. 204 ; *apud.* Duhem, "Le P. Marin Mersenne et la pesanteur del' air", *Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées*, 17: 769-82, 809-16, 1906. (p. 814). La reconstrucción que hacemos de los trabajos de Mersenne, en esta sección, está basado por entero en los supradichos artículos de Duhem.
30. *Ibid.*, p. 814-5 (la traducción del francés es mía). Debemos recordar que la pulgada usada por Mersenne equivale a 2.51 cm; mientras que su pie es igual a 32.87 cm.
31. "Carta del señor Périer al Señor Pascal, Hijo, del 22 de septiembre de 1648", incluida en la <<Relación del gran experimento del equilibrio de los líquidos>>, *Oeuvres*, op. cit., vol.II, pp. 439-46.
32. *Ibid.*, pp. 441-2 (traducción directa del francés). La *línea* empleada por Périer es la *línea francesa* equivalente a 0.225 cm (*vid.* n. 21, cap. 2); mientras que su pulgada es igual a un doceavo de *Pie de Rey* francés, o sea, 2. 74 cm. Estas unidades también fueron empleadas por Pascal.
33. *Ibid.*, p. 442.
34. *Ibid.*, p. 448 ss.
35. Pascal, *Oeuvres*, vol. 3, p. 144.
36. *Ibid.*, cap. II, pp. 145-53.
37. *Ibid.*, cap. V, p. 228.
38. *Ibid.*, cap. VI, pp. 220-1.
39. *Apud.* W. E. Knowles Middleton, *The experimenters. A study of the Academia del Cimento*, Baltimore, Johns Hopkins, 1971, pp. 109-10.
40. El experimento de Roberval fue llevado a cabo de la siguiente manera. En un tubo AB de vidrio de largo cuello vertical, cuya parte inferior se ensancha hasta formar una especie de ampolla, se deposita una vejiga de carpa desinflada. El extremo A encuéntrase abierto, mientras que el extremo B está sellado herméticamente gracias a una tela impermeable firmemente amarrada a la boca del orificio (ver fig. 30). Con la vejiga en el fondo del tubo, y tapando el orificio con el dedo, Roberval procedió a depositar el tubo sobre una cuba rebosante de mercurio, quedando el extremo A en el fondo de aquélla. La consecuencia de lo anterior es la formación de una columna de mercurio, DE, y un vacío desde el punto E hasta el extremo B. Aparte del vacío torricelliano generado, existe otro efecto interesante: la vejiga de carpa -otrora desinflada- se hincha como si hubiésele insuflado aire. Como Roberval no había detectado la presencia de aire en el espacio vacío, explicó este hecho suponiendo que la presión disminuía en la región ausente de mercurio; así, al existir una presión inferior a la atmosférica sobre la superficie externa de la vejiga, ésta sufriría una dilatación. Si bien en tal experimento no hay nada cuantitativo, su importancia histórica reside en la insinuación de que la presión y el volumen podrían estar relacionadas de algún modo.
41. Robert Boyle, *New experiments physico-mechanical touching the spring of the air and its effects* ,Oxford, 1660 ; en *The Works of the Honourable Robert Boyle*, Ed. T. Birch, 2da. ed., 6 vols. (vol. I), London, 1772 : 33-9 y 156-63.
42. *Ibid.*, p. 33.
43. *Ibid.*
44. *Ibid.*, p. 156.
45. *Ibid.*, p. 157 (la cursiva en el texto es mía).
46. *Ibid.*, p. 160.
47. *Apud.* C. Webster, " Richard Towneley and Boyle law ", *Nature*, 197: 226-228, 1963.
48. Birch, *History of the Royal Society*, vol. I (London, 1756); *apud.* I. Bernard Cohen, "Newton, Hooke and << Boyle law >>", *Nature*, 204: 618-621,1964.

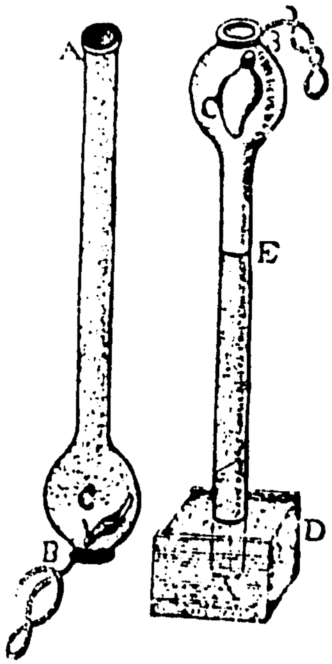


Fig. 30. Experimento de la vejiga de carpa. (Roberval).

CAPÍTULO QUINTO

" Admito que las conclusiones demostradas en abstracto se ven alteradas en concreto..., pero si en las tareas prácticas hubiese que tomar en consideración tales minucias deberíamos comenzar por reprender a los arquitectos, que -sirviéndose únicamente de la plomada- creen poder levantar altísimas torres con líneas paralelas (aunque converjan en el centro de la Tierra)."

Galileo Galilei, *Opere*, VII, p. 274

5. CONCLUSIONES

Podemos considerar que el moderno espíritu de experimentación nació con Galileo; mas su consolidación y encumbramiento dentro de la ciencia física precisó del concurso de varios pensadores con métodos y objetivos afines a los de aquél. Muchos de sus contemporáneos involucrados en ese ambiente científico, supieron aprehender la esencia de lo que podríamos denominar *la esencia de la epistemología galileana*, y, mediante un adecuado proceso de abstracción, tener mayores posibilidades de distinguir la parte medular de un fenómeno físico determinado.

Pero también aprendieron de la supradicha esencia. Prueba de ello es el diseño, por parte de pensadores como Mersenne, Torricelli, Riccioli, Huygens, etc., de experimentos capaces de aportar pruebas tangibles, reproducibles, acerca de los principios de una ciencia naciente que algún tiempo después se constituiría en una parte cardinal de lo que actualmente conocemos como *física clásica.*

Si bien Galileo Galilei no es el primero en realizar experimentos en el terreno de la física -se sabe, por ejemplo, que los griegos estudiaban los efectos de la presión del vapor mediante ingeniosos dispositivos-, sí es uno de los primeros en reconocer el papel interactivo que tienen con respecto a las teorías. Esto significa lo siguiente: el experimento deja de ser mera *ilustración* del fenómeno físico, simple reproducción de un aspecto de la realidad, para trocarse en una herramienta que, además de reflejar la esencia del fenómeno, es útil tanto en la comprobación de paradigmas, como en la aportación de nuevos elementos que permitan crear otros (o simplemente reformular los anteriores).

Una de las primeras cosas que vale la pena destacar es la actitud visionaria de Galilei al abordar desde una nueva perspectiva, aquellos problemas -el movimiento y el vacío- heredados de la Antigüedad. Actitud que siempre aportó algo a la nueva visión del mundo y, por ende, transformó radicalmente la física del siglo XVII.

Según hemos visto en las líneas precedentes, la construcción del nuevo rostro de la física se topó con dificultades de índole técnica (determinación de la constante *g*), filosófica (negación de la existencia del vacío) y teórica (justificación de la isocronía del péndulo). Aunque en un principio esas dificultades no permitieron la concatenación de los resultados experimentales con las predicciones teóricas, tuvieron gran importancia porque impelleron a *los galileanos* a construir (o crear) mejores dispositivos y a refinar (o inventar) las técnicas de medición.

Ahora bien, vale la pena destacar que muchos de los experimentos de mayor trascendencia en el siglo XVII, se llevaron a cabo gracias a la influencia -directa o indirecta- ejercida por las obras de Galileo, en particular de los *Discorsi*. Recapitulemos algunos de ellos.

En la Jornada Primera de la supradicha obra, Galilei esboza un experimento (*vid.* sección 4.2.1) para determinar la fuerza ejercida por el vacío, la cual -en su opinión- se manifiesta como una <<resistencia>> presentada por un espacio vacío a ser <<jalado>> o <<succionado>>. Aunque para algunos de sus contemporáneos -y aún a nosotros en la actualidad- les pareció erróneo el concepto, este problema que involucraba al vacío, tuvo que haber sido planteado por Galileo para que fuera <<digno de atención>> por la avanzada de los pensadores del siglo XVII.

Innegable es la influencia que generó la propuesta galileana en el terreno de la experimentación; individuos como Baliani, Berti, Torricelli, Maignan, otros como Mersenne y Périer, y aún pensadores de la talla de Roberval y de Pascal, comenzaron a estudiar el hasta entonces *misterioso* vacío. El progreso en el estudio no fue solamente conceptual, sino también instrumental.

Conceptual porque las investigaciones acerca de la naturaleza del vacío, mostraron mayor riqueza, tanto en resultados experimentales como en comprensión física, conforme se abandonaban ideas fijas como la del *horror vacui*, la del vacio como una región desprovista de *todo* tipo de materia, etc.

E instrumental debido a las mejoras de los dispositivos experimentales. Lo anterior se nota con claridad en los experimentos de Roberval y de Boyle, que logran reproducir el experimento clásico de Torricelli, pero a su vez van más allá porque pueden observar otros efectos. A saber: mientras Torricelli tiene sólo un *vacío*, Roberval puede crear *un vacío dentro de otro vacío*, mas Boyle es capaz de regular la entrada o la salida del aire y medir las propiedades elásticas de éste.

Otros dos ejemplos de la influencia ejercida por Galileo entre sus coetáneos, son el péndulo y el movimiento de caída libre. Si bien se tienen indicios de que el primero había sido estudiado por Leonardo, el pisano fue el primero en analizarlo desde la perspectiva de la nueva física y encontrarle una función práctica como mecanismo de relojería. Huelga insistir en el revuelo creado -en ciertos círculos, por supuesto- por el estudio realizado por Galilei sobre el movimiento pendular. Mersenne, Riccioli y Huygens, principalmente, abordaron el problema desde el punto de vista práctico, experimental. Siendo el último de estos pensadores, quien, viendo en perspectiva su propio trabajo experimental y el de los dos religiosos, optó también por estudiar el movimiento del péndulo a la luz de las nuevas teorías matemáticas. Un corolario importante de ello fue, en el terreno que nos ocupa, la construcción de un reloj isócrono, el sueño de Galileo.

En cuanto al movimiento de caída libre, y al estudio del movimiento en general, la aportación de Galilei fue muy valiosa en el desarrollo de la ciencia física. Aunque -como él mismo lo reconocía- el estudio del movimiento de los cuerpos era muy antiguo, el tratamiento que Galilei le dio en los *Discorsi*, hizo posible la concatenación entre el riguroso estilo de demostración geométrica de los griegos y el espíritu pragmático y paradigmático de la época renacentista. No en balde esa obra es considerada como una de las primeras muestras del pensamiento científico moderno.

En este caso, como en el anterior, el mundo intelectual no soslayó la nueva visión galileana del movimiento, ya fuera para aceptarla o para rechazarla. Mas buena parte de los pensadores eligieron el camino de la comprobación experimental. Recordemos a Riccioli y a sus monjes, quienes, aupados en los altos torreones de la ciudad boloñesa, soltaban sendas bolas de plomo para verificar la llamada *proporción doble*; a Mersenne ingeniándoselas para que el choque de la bola coincidiera con el impacto de una péndola y una esfera inmóvil...; al propio Huygens perfeccionando el método de Mersenne, y reconociendo los límites de esta propuesta experimental.

En síntesis, creemos haber mostrado: 1) que la obra galileana despertó el interés de muchos de sus contemporáneos por repetir los experimentos ahí descritos o crear otros nuevos; y 2) que la concreción de lo anterior representó un avance al incrementar la precisión de los propios resultados experimentales, mejorar las propias técnicas e instrumentos de medición y revolucionar la concepción del mundo.

Pese a muchos resultados incompletos o francamente desconcertantes obtenidos de algunos experimentos (*vid.*, *e. g.*, los de Huygens sobre el péndulo y los de Riccioli respecto a la caída libre), aumentó la confianza de los científicos en los nuevos métodos de investigación. De esta manera, el experimento pasó a ser una pieza muy importante -aunque muchos siguieron atribuyéndole un papel secundario respecto a la teoría- en el conocimiento de los fenómenos físicos.

En el proceso histórico-filosófico que tratamos líneas arriba encontramos, más que un *Experimento Físico* perfectamente acabado e inamovible, una colección heterogénea de sistemas filosóficos y actitudes epistemológicas (a veces contradictorias) que, no obstante, tuvieron algunos objetivos en común. Algunos de éstos que podemos identificar con relativa facilidad son: 1) la búsqueda preferente de resultados cuantitativos (numéricos) que permitieran de algún modo caracterizar -vía las técnicas matemáticas o geométricas- la mecánica de un fenómeno, no su *esencia* o su *totalidad*; 2) un cierto abandono de las *demostraciones empíricas* (las que sólo se limitan a mostrar algo en forma cualitativa) y de la especulación filosófica apoyada (o no) en la autoridad de las escuelas; 3) cuando la información acerca de un fenómeno es escasa y un aspecto de éste es difícil de medir, la *especulación filosófica* es sustituida por la *hipótesis física*; y 4) el empleo de dispositivos y la creación de circunstancias experimentales independientes del entorno y del propio experimentador.

No es difícil descubrir estos objetivos en la obra galileana. Pero cabe señalar que no todos se encontraban en el mismo grado de desarrollo. Por ejemplo, mientras en algunos problemas asume actitudes que reflejan un claro distanciamiento de la especulación filosófica en favor de la investigación física (como en el análisis del movimiento de los cuerpos a través de un plano), en otros se limita a insinuar cómo podría llevarse a cabo un experimento (como al tratar de medir la supuesta *forza del vuoto*).

Otra consecuencia que conviene resaltar se refiere a la cuestión de los llamados *experimentos pensados* en la obra de Galilei. Muchos autores han sostenido que él sirvióse de dicho tipo de experimentos para salvar problemas francamente insolubles en aquel siglo. En parte tienen razón. Cuando fue necesario, el pensador italiano recurrió a varios artificios para justificar algunos de los principios más importantes derivados de sus construcciones teóricas (como en la isocronía del péndulo), o bien, para sugerir posibles relaciones de dependencia entre ciertas variables (como en el folio 152r).

Además, algunos asertos galileanos que parecen derivarse de experimentos pensados, poseen un fuerte fundamento experimental que nuestro autor no presentó de una manera explícita. Si recordamos, en los *Discorsi* (Jornada Tercera, Corolario I) describe un experimento muy parecido al del folio 107v. Lo anterior nos mueve a suponer que los trabajos de Galileo están compuestos por resultados de distinto origen temporal y, por lo tanto, en estado de desarrollo, de *maduración*, desigual. Siendo así, no debemos extrañamos al no encontrar, en su obra, un sistema experimental completo y perfectamente delineado.

En síntesis, lo precedente nos conduce a creer que una buena parte de los trabajos de Galileo -en especial los folios 81r, 107v, 114 y 116v- sí representan un claro fundamento de carácter experimental en cuanto a los principios de mayor relevancia referentes al problema del movimiento. Estos principios que logró establecer son los siguientes: α) que las distancias recorridas por un móvil son proporcionales al cuadrado de los tiempos; β) que la velocidad del mismo es proporcional al tiempo, no al espacio; y γ) que los cuerpos sometidos tanto a la acción de la gravedad como también a un *impulso externo*, describen una segmento de parábola por trayectoria.

Ahora bien, a pesar de que los coetáneos de Galilei no conocieron muchas de sus investigaciones, ello no fue impedimento para que reprodujeran -con o sin modificaciones- muchos de los experimentos diseñados (o esbozados) por aquél. Lo anterior pudimos constatarlo en los intentos destinados a determinar, en el movimiento de caída libre, la <<*proporción entre los tiempos y los espacios*>>; encontrarla significó refinar las técnicas de medición y, al reconocer los límites de la percepción del experimentador, crear dispositivos más idóneos para tener mediciones no sólo a*proximadas*, sino *precisas.*

La búsqueda de la citada proporción condujo a los investigadores (Mersenne, Riccioli y Huygens) a explotar todos los recursos a su alcance con el fin de encontrarla. En este proceso, de igual manera, podemos descubrir la gestación del moderno espíritu de precisión del que hemos venido hablando. Son dos, principalmente, los frutos que se derivan de los trabajos de los citados autores: 1) la mejoría en la estimación del valor de la constante *g*; y 2) la profundización en el estudio de un mecanismo como el péndulo que, en un principio, auguraba buenos resultados si se empleaba como reloj. El fruto postrero, a su vez, desembocó en una serie de estudios cuyo objetivo fue erigir al péndulo simple como un sistema confiable de medición. No obstante de su relativa precisión al medir intervalos pequeños de tiempo, mostró sus deficiencias conforme aumentaban los períodos de tiempo que deseaban medirse. En esta ocasión correspondió a Mersenne descubrir que las oscilaciones del susodicho péndulo no son totalmente isócronas. Observación trascendente porque condujo a Huygens -indirectamente- a la construcción de un mecanismo de relojería basado en la teoría de las curvas desarrollada por él mismo en su obra *Horologium Oscillatorium.* Así, la misma línea de esmero experimental que permitió conocer el valor de *g*, quizá estimuló -indirectamente- el desarrollo de nuevas teorías matemáticas.

Como mostramos a lo largo del trabajo, el terreno del análisis del movimiento no fue el único abordado por los seguidores de Galileo. El antiguo problema de la existencia del vacío surgió como un terreno virgen, digno de ser explorado por investigadores equipados con tubos, mercurio, barómetros (algunos); cuya habilidad es cercana a la de un artista y su paciencia rayana a la de un santo... (¿o de un científico?)

Hasta principios del siglo XVII, eran muy pocos los autores que habían podido ir más allá de la mera especulación filosófica acerca de la existencia del vacío. Galilei fue uno de ellos y su propuesta -comunicada a Torricelli y esbozada en los *Discorsi*- brindó una alternativa real para estudiar al vacío desde una nueva perspectiva. No es extraño, entonces, que muchos de sus continuadores (Mersenne, Baliani, Périer, Boyle, etc.) partieran de los trabajos inconclusos de Galileo para diseñar experimentos más sutiles y elaborados. En este sentido, podemos decir que la nueva forma de estudiar al vacío propuesta por nuestro autor, representó el elemento abluente que derruyó el vetusto edificio anquilosado y decadente en que se habían convertido las doctrinas acerca del *vacuus.*

Aunque en un principio, debido al peso de la tradición filosófica imperante, los experimentos limitáronse a demostrar si en realidad podía generarse un *espacio vacío*, más tarde la atención se enfocó en otros factores -presión atmosférica, compresión o dilatación de la columna de mercurio, etc.- que, contrariamente al *vacío*, sí podían ser perfectamente medidos y, por esta razón, también cuantificados. Al intuir esto que hemos expresado, algunos investigadores prefirieron abandonar las yermas conjeturas -que no conducían a nada- en favor de una actitud de medición a ultranza; si de algo podrían hablar los físicos era de aquello que de alguna forma ya había pasado por el tamiz de la medición. A pesar de esto, muchos de los llamados *filósofos naturales* optaron simplemente por sustituir, como ya mencionamos, la simple especulación por *hipótesis* fundamentadas en la realidad física. En adelante, las conjeturas deberían dirigirse a los aspectos del fenómeno que fuesen ponderables. Transición que, huelga decir, fue impulsada de manera directa por la mejoría en los dispositivos experimentales y el refinamiento en las técnicas de medición.

Por más que el estudio del vacío tuvo sus peculiaridades y sus diferencias, aportó elementos cardinales en la conformación del experimento físico. Cuatro de ellos son: α) el reconocimiento implícito de los *experimentos cualitativos*, en los cuales no se buscan resultados numéricos sino una primera aproximación al problema que más tarde auxilie en la comprensión de fenómenos de mayor complejidad (*e. g.*, una variación del *experimento del vacío en el vacío* sugirió a Boyle la posible dependencia entre la presión del aire y la altura de la columna de mercurio); β) el uso de *hipótesis* para verificar si, al medir, los factores supuestamente más importantes -que configuran la esencia del fenómeno- pueden ser descritos por una expresión matemática; γ) la creación de dispositivos diseñados *ex professo* con el fin de medir un efecto particular que puede ser muy difícil de estudiar en conjunto; y δ) la búsqueda de enfoques alternativos -teóricos o experimentales- cuando un problema en particular no dé visos de solución o se encuentre virtualmente estancado.

Galileo Galilei Ammannati y *los galileanos*, no partieron de una actitud experimental establecida, inalterable y totalmente terminada; por el contrario, tuvieron que construirla y en el proceso incorporaron tanto actitudes vanguardistas como otras un tanto tradicionales. Siendo así, el experimento habría de nutrirse de varios *experimentos* cuya directriz era resultado de una combinación de arte, física y filosofía especulativa.

Además, la naciente experimentación se vio felizmente auxiliada por la ciencia matemática, la cual le dio un camino fructífero e independiente, alejándolo paulatinamente -aunque no del todo- de los elementos originales que le otorgaron vida. Fue un proceso de síntesis donde la *filosofía natural* se forjó un nuevo lenguaje que ganó precisión, pero perdió riqueza expresiva; la matemática, como lenguaje abstracto y *objetivo*, se constituyó en la columna vertebral de la experimentación porque no sólo auxiliaba en la interpretación de los resultados numéricos, sino que también permitía predecir, *modelar*, algún aspecto en particular de un determinado fenómeno físico. La filosofía, en cambio, queda relegada -pero no por ello dejó de estar presente en el desarrollo de la física- porque su *lenguaje* no tiene la capacidad de sintetizar en expresiones inequívocas (como las ecuaciones) el comportamiento del nuevo universo de fenómenos descubierto por la física.

El distanciamiento entre la filosofía y la matemática se hizo manifiesto; pero el acercamiento de ésta con el mundo de los fenómenos le otorgó -si se nos perdona la expresión- *espíritu* al experimento físico.

En cambio, el *corpus* del experimento físico tuvo un origen doble. Nació en la búsqueda de alternativas para investigar el mundo; como una forma premeditada de actuar sobre el fenómeno y extraer de él sólo la información que se crea conveniente en un momento dado. Pero también, en el tratar de reproducir las formulaciones teóricas -generadas por la mente- en el mundo cotidiano, tiene su origen el experimento. De este modo, por su *doble origen* y por el *espíritu* que lo anima, el experimento adquirió la relevancia que hoy posee dentro de la investigación científica. A saber: 1) como medio (y norma) que permite obtener la mayor parte de la información *objetiva* del mundo físico; y 2) como *juez* máximo al decidir qué teorías acerca de un fenómeno determinado son las más adecuadas en función de su correspondencia con la información experimental derivada de un cuidadoso proceso de medición.

Mas el experimento no es un ente fijo, anquilosado; evoluciona (y revoluciona) porque se encuentra estrechamente vinculado a las transformaciones -manifiestas o no- de la teorías científicas (o que aspiran a serlo). Aunque no existe un sólo Experimento Físico, ni una sola e inalterable Ciencia Física, aceptamos que los distintos tipos de experimentos físicos son inseparables de las teorías físicas -<<teoría encarnada>>, como decía Koyré-, prácticamente indistinguibles entre sí, que, sin embargo, pueden parecernos como dos entes separados en un momento dado, debido al desarrollo desigual entre *lo que se ha investigado* acerca de la realidad y *lo que se supone* -mediante conjeturas u otros medios- sobre la misma. Así, pues, podemos afirmar también que la actitud experimental es hija del modelo de experimento realmente existente (o preponderante) en un período histórico determinado.

Y sin embargo... aunque Galileo Galilei y todos los individuos que continuaron su obra fincaron las bases del moderno experimento científico, éste no nos ha llegado tal cual porque posee su propia dinámica, además de que interacciona con la teoría; en ocasiones, incorpora nuevos metódos y rechaza los anteriores; propone concepciones nuevas y desecha, por insuficientes, las vigentes; avanza y retrocede; a veces regresa al pasado para, interpretando desde el presente, proyectarse al futuro; rompe con la tradición y revoluciona las formas tradicionales de investigación; se encarga de mantener el *establishment* científico o de precipitarlo al abismo; es capaz de cambiar, de mutar; está vivo... *se mueve.*

CAPÍTULO SEXTO

EPÍLOGO

Sé muy bien que esta no es la forma usual de terminar, pero en vez de mis palabras, he preferido que el lector saque provecho del siguiente cuento del legendario Mulá Nasrudin, titulado <<El Sermón de Nasrudín.[1]>>

"Un día los aldeanos decidieron hacerle una broma a Nasrudín.

"Puesto que se suponía que era hombre santo de alguna clase indefinible, fueron a verlo y le pidieron que pronunciara un sermón en la mezquita, a lo que accedió.

"Cuando llegó el día, Nasrudín subió al púlpito y dijo:

"__ ¡Oh, pueblo! ¿Saben ustedes lo que voy a decirles?

"__ No, no lo sabemos -gritaron.

"__ Mientras no lo sepan, no podré hablarles. Son demasiado ignorantes para poder iniciar algo con ustedes -dijo el Mulá, lleno de indignación porque gente tan ignorante le hiciera perder el tiempo. Descendió del púlpito y se fue a casa.

"Algo mortificados, fueron nuevamente a la casa del Mulá y le rogaron que el viernes siguiente, día de oración, predicara.

"Nasrudín comenzó repitiendo la misma pregunta.

"Esta vez la congregación contestó al unísono:

"__ Sí, sabemos.

"__ En tal caso -dijo el Mulá-, no es necesario que los demore. Pueden retirarse.

"Y regresó a casa.

"Fue convencido por tercera vez para que predicara. Ese viernes, comenzó preguntando como antes:

"__¿Saben o no saben?

" La congregación estaba preparada.

"__ Algunos sabemos y otros no.

"Perfecto -dijo Nasrudín-. Entonces los que saben que transmitan su conocimiento a los que no saben.

"Y se fue a su casa."

[1] Idries Shah (comp.) *Las Hazañas del Incomparable Mulá Nasrudin.* Ed. Paidós, Barcelona, España, 1990. p. 44

EPÍLOGO AL EPÍLOGO

Sirva como tal, la siguiente historia -<<El Filósofo y el remendón[2]>>de Khalil Gibran:

"Un filósofo llegó un día al taller del zapatero remendón con unos zapatos gastados. Y el filósofo dijo al remendón:

"__ Por favor, remienda mis zapatos.

"__ Ahora estoy remendando zapatos de otros hombres -respondió éste-, y hay todavía más para reparar antes de que yo pueda ocuparme de los tuyos. Pero deja tus zapatos aquí, y usa este otro par por hoy, y ven mañana a buscar los tuyos.

"__ No uso zapatos que no son los míos -protestó indignado el filósofo.

"Pues bien -dijo el remendón-, ¿en verdad eres tú un filósofo y no puedes calzarte con zapatos de otro hombre? Al final de esta calle hay otro remendón que comprende a los filósofos mejor que yo. Recurre a él para remiendos."

[2] Tomada de: Khalil Gibrán, *Obras completas* (3 vols.), vol. II. Edicomunicación, Barcelona, España, 1988. p. 658.

CAPÍTULO SÉPTIMO

BIBLIOGRAFÍA GENERAL.

__ ARISTÓTELES. *The works of Aristotle translated into English.* 12 vols. Ed. J. A. Smith & W. D. Ross. Oxford, Oxford University, 1967-8.

__ AVICENA. *Le livre de sciences (Dânesh-nâmè).* 2 vols. Trad. Mohammad Achena, Henri Massé. París, Belles Lettres, 1958.

__ BACON, Francisco. *Novum Organum.* México, Porrúa, 1991.

__ BAILEY, G. *The Greek Atomists and Epicurus,* Oxford, Oxford University Press, 1928.

__ BOYLE, Robert. *The works of the Honourable Robert Boyle.* Ed. T. Birch, 2da. edición, 6 vols. London, 1772.

__ BOYER, Carl B. *The history of calculus and its conceptual development.* New York, Dover, 1959.

__ COHEN, Bernard. "Richard Towneley and Boyle law." *Nature* 204: 618-621, 1964.

__ COHEN, Morris R. & DRABKIN, I. E. *A source book in Greek science.* Cambridge, MA, Harvard University, 1969.

__ COSTABEL, Pierre. *Huygens et la France.* París, J. Vrin, 1981.

__ COURANT, R., JOHN, F. *Introducción al Cálculo y al Análisis Matemático.* 2 vols. México, Limusa, 1988.

__ CROMBIE, A. C. *Historia de la Ciencia: de San Agustín a Galileo.* 2 vols. Trad. L. García Ballester. Madrid, Alianza Universidad, 1974.

__ DESCARTES, René. *Oeuvres de Descartes.* Ed. Charles Adam & Paul Tannery, 11 vols. París, J. Vrin, 1964-72.

__ DRAKE, Stillman., 1973. "Galileo's Experimental Confirmation of Horizontal Inertia: Unpublished Manuscripts (Galileo Gleanings XXII)." *Isis* 64: 291-305.

__, 1973. " Galileo's Discovery of the Law of Free Fall." *Scientific American,* 228: 85-92. May.

__, & J. MACLACHAN., 1975. "Galile'os Discovery of the Parabolic Trajectory." *Scientific American,* 232: 102-110. March.

__, 1975. "The Role of Music in Galileo's Experiments." *Scientific American,* 233: 98-104. May.

__, 1978. *Galileo at Works.* Chicago, The University of Chicago Press.

__, 1980. *Galileo.* Oxford, Oxford University Press.

__ DUHEM, Pierre. " Le P. Marin Mersenne et la pesanteur de l'air." *Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées* 17: 769-82, 809-17, 1906.

__ EPICURO, *Le lettre d' Épicure.* Paris, Minut, 1971.

__ GALILEI, Galileo. *Operations of the Geometric and Military Compass* (1606). Trad. Stillman Drake. Washigton, Dibner Library, 1978.

__, *Le opere di Galileo Galilei.* Ed. A. Favaro & G. Vassura. 20 vols. Firenze, Barbera, 1929-39.

__, *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias...* (Discorsi). Trad. J. Sadaba. Madrid, Editora Nacional, 1981.

__ GRANT, Edward. *A source book in medieval science.* Cambridge, MA, Harvard University, 1974.

__ HILL, David K. "Galileo's Work on 116v: A New Analysis." *Isis*, 77: 283-291., 1986

__, 1988. HILL, David K. "Dissecting Trajectories. Galileo's Early Experiments on Projectile Motion and the Law of Fall." *Isis* 79: 646-668.

__ KIRK, G. S., RAVEN, J. E. & SCHOFIELD, M. *The presocratic philosophers. A critical history with a selection of text.* 2da. ed. Cambridge, Cambridge University, 1983.

__ KOYRÉ, Alexandre. *Estudios Galileanos.* México, Siglo XXI Editores, 1988.

__, "An Experiment in measurement." *Proceedings of the American Philosophical Society.* vol. 97 (2), april 1953.

__ KUHN, Thomas B. "The function of measurement in modern physical science." *Isis* 52: 16 y ss., 1961.

__ LOHNE, J. A. "II. Ballistic Parabolas." *Archive for history of Exact Sciences.* vol. 20, Nomber 3/4, 1979.

__ LUCRECIO, Tito. *De la naturaleza de las cosas.* 1era. ed. México, Editorial Iberoamericana, 1983.

__ MARTINS, Roberto de A. "Huygens E A Gravitação Newtoniana." *Cad. Hist. Fil. Ci.*, Campinas, Série 2, 1(2): 151-184, jul-dez. 1989.

__ MASON, Stephen F. *Historia de las ciencias.* 3 vols. Trad. Carlos Solís Santos. México, Alianza Editorial Mexicana, 1988.

__ MERSENNE, Marin. *Harmonie universelle*, 3 vols, París, CNRS, 1975.

__ *Cogitata physico-mathematica, phenomena ballistica...* Parisii, 1644.

__ MIDDLETON, W. E. Knowles., 1963. "The place of Torricelli in the history of barometer." *Isis* 54: 11-28.

__, 1964. *The history of barometer.* Baltimore, Johns Hopkins.

__ NAYLOR, Ronald H. "Galileo and the Problem of Free Fall." *British Journal for the History of Science."* v. 7: 107-113.

__, 1974. "The Evolution of An Experiment: Guidobaldo del Monte and Galileo's *Discorsi* Demonstration of the Parabolic Trajectory." *Physis*, 16: 323-346.

__, 1976. " Galileo: Real Experiment and Didactic Demonstration." *Isis* 67: 398-419.

__, 1980. " Galileo's Theory of Projectile Motion." *Isis* 71: 550-570.

__, 1988. "Dissecting Trajectories. Galileo's Early Experiments on Projectile Motion and the Law of Fall." *Isis* 79: 646-668.

__, 1990. "Galileo's Method of Analysis and Synthesis." *Isis* 81: 695-707.

__ PASCAL, Blaise. *Oeuvres de Pascal.* Ed. León Bruschvicg & A. G. Spier. 14 vols. París, Hachette, 1904-14.

__ SETTLE, Thomas B. "An Experiment in the History of Science." *Science* v. 133: 19-23, 1961.

__ SEXTO EMPÍRICO, *Oeuvres choisies de Sextus Empiricus.* Trad. Jean Martin & Geniève Goron. París, Montaigne, 1948.

__ TORRICELLI, Evangelista. *Opere.* Ed. Gino Loria & Giuseppe Vassura. 3 vols. Faenza, Montanari, 1919.

__ TODHUNTER, I. *A history of mathematical theories of attraction and the figure of the Earth - from the time of Newton to that of Laplace.* New York, Dover, 1962.

__ URITAM, R. A. "Medieval science, the Copernican revolution, and physics teaching." *American Journal of Physics.* vol. 42, No. 10, pp. 809-815, October 1974.

__ VLASTOS, G. "Ethics and Physics in Democritus." *Philosophical Review*, 54, 1945.

__ WEBSTER, C. "Richard Towneley and Boyle's law." *Nature,* 197: 226-228, 1963.

__ WISAN, W. L. "Galileo and the Process of Scientific Creation."*Isis*, 75: 269- 286., 1984.

ÍNDICE

DEDICATORIA.. 5

AGRADECIMIENTOS.. 6

PROLEGNÓMENO.. 7

CAPÍTULO PRIMERO

1. INTRODUCCIÓN 9-13

CAPÍTULO SEGUNDO

LA OBRA DE GALILEO GALILEI: ENTRE EL EXPERIMENTO PENSADO Y EL EXPERIMENTO REAL.

2. 1. EL MOVIMIENTO DE PROYECTILES: BREVE RESEÑA HISTÓRICA 15-18

2. 2. LOS EXPERIMENTOS GALILEANOS SOBRE EL MOVIMIENTO DE PROYECTILES 18-19

2. 2. 1. EL FOLIO 81r: EL ESTABLECIMIENTO DE LA TRAYECTORIA PARABÓLICA PARA LOS GRAVES QUE CAEN.. 19-25

2. 2. 2. EL FOLIO 107V: EN BUSCA DE LA RELACIÓN EXISTENTE ENTRE LOS TIEMPOS Y LOS ESPACIOS.. 25-29

2. 2. 3. LA CARTA DE GALILEO A PAOLO SARPI (1604) *VERSUS* EL FOLIO 152r (¿1606?) : BUSCANDO LA RELACIÓN ENTRE LOS ESPACIOS Y LAS VELOCIDADES.. 30-33

2. 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.. 33-35

2. 2. 5. EL FOLIO 116v: EXPERIENCIA *VERSUS* HIPÓTESIS.. 36-39

2. 3. LOS FOLIOS EN EL CONTEXTO DE LA OBRA GALILEANA.. 39-41

NOTAS BIBLIOGRÁFICAS DEL CAPÍTULO 2.. 42-48

CAPÍTULO TERCERO

EL TRABAJO EXPERIMENTAL DE LOS << GALILEANOS >>.

PARTE I : *EL MOVIMIENTO DE CAÍDA LIBRE (DE GALILEO A HUYGENS): AFINANDO EL VALOR DE UNA CONSTANTE.*

3. 1. DE LA *CAUSA NATURAL* A LA TEORÍA DEL *IMPETUS*........................ 50-52

3. 2. GALILEO Y EL VALOR DE LA CONSTANTE DE ACELERACIÓN GRAVITACIONAL........................ 52-54

3. 3. EL CÁLCULO *INDIRECTO* DEL VALOR DE LA ACELERACIÓN GRAVITACIONAL.

3. 3. 1. MERSENNE Y HARRIOT: DOS ESTILOS DIFERENTES EN BUSCA DE LO MISMO........................ 54-60

3. 3. 2. RICCIOLI Y HUYGENS: EL PERFECCIONAMIENTO DE UNA TÉCNICA DE MEDICIÓN........................ 60-68

3. 3. 3. LAS DISTINTAS FORMULACIONES PARA UN MISMO MOVIMIENTO........................ 68-71

3. 4. LAS DIFICULTADES INHERENTES AL EXPERIMENTO DE CAÍDA LIBRE........................ 72-74

PARTE II: *LAS OSCILACIONES DEL PÉNDULO: ¿ISÓCRONAS O ANISÓCRONAS?*

3. 5. LA ISOCRONÍA DEL PÉNDULO GALILEANO: SU POSTULACIÓN EN LOS *DISCORSI*........................ 75-78

3. 6. LA ANISOCRONÍA DEL PÉNDULO GALILEANO: MARÍN MERSENNE Y LOS *COGITATA*........................ 79-82

NOTAS BIBLIOGRÁFICAS DEL CAPÍTULO 3........................ 83-89

CAPÍTULO CUARTO

EXPERIMENTOS Y EXPERIMENTADORES EN TORNO AL VACÍO : DEL *HORROR VACUI* A LA PRESIÓN DE LA COLUMNA DE MERCURIO.

4. 1. EL VACÍO: UNA BREVE RESEÑA HISTÓRICA.. 91-92

4. 2. PRIMEROS INTENTOS DE EXPERIMENTACIÓN: DE LA *FUERZA DEL VACÍO* A LA DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN EN UNA COLUMNA DE AIRE.

4. 2. 1. BALIANI, BERTI, GALILEO Y TORRICELLI: BUSCANDO *GENERAR* EL VACÍO.. 93-100

4. 2. 2. PASCAL, PÉRIER, MERSENNE Y ROBERVAL: EXPERIMENTANDO *CON* EL VACÍO.. 100-111

4. 3. BOYLE, HOOKE Y TOWNELEY: DE LA PRESIÓN EN LA COLUMNA DE AIRE A LAS PRIMERAS FORMULACIONES SOBRE LA *LEY* DE LOS GASES.. 112-125

NOTAS BIBLIOGRÁFICAS AL CAPÍTULO 4........................ 126-130

CAPÍTULO QUINTO

5. CONCLUSIONES.. 132-138

CAPÍTULO SEXTO

EPÍLOGO... Y *EPÍLOGO AL EPÍLOGO*.................................... 140

CAPÍTULO SÉPTIMO

BIBLIOGRAFÍA GENERAL 142-144