



# El surgimiento de la dinámica galileana: historia e historiografía

Fernando TULA MOLINA



## RESUMEN

En el presente trabajo pretendo identificar los puntos de unión críticos, en tanto pasos creativos, que sirvieron a la nueva síntesis en la que Galileo basó su nueva dinámica. En este sentido aspiro a cumplir con el desafío propuesto por Cohen al observar que “el problema no es explicar cómo llegó a utilizar el legado griego, a pesar de todo lo interesante que esto pueda tener en sí mismo, sino cómo fue posible trascenderlo”. Pretendo mostrar cómo Galileo elabora una nueva síntesis dinámica a partir de cuatro tradiciones diferentes: los *lugares naturales* de la física aristotélica, el concepto de *peso específico* de la estática de Arquímedes, el concepto de *virtus motiva* de Ibn Bayya (Avempace) y el concepto de *velocidad virtual* de la tradición del *corpus de ponderibus* asociada a Jordano Nemorario. Con base en ese análisis elaboraré un argumento general sobre el alcance limitado de las explicaciones sociológicas en la historia de la ciencia.

PALABRAS-CLAVE • Revolución científica. Dinámica galileana. Historiografía de la ciencia. Galileo.

## INTRODUCCIÓN

Al promediar su estudio sobre la historiografía de la revolución científica Cohen observa que

Las que deben investigarse son aquellas características entramadas con la tradición que se constituyen en los puntos de unión críticos, los verdaderos pasos creativos, los cuales, en su conjunto, conforman la plataforma de la ciencia moderna temprana [...] [De este modo, en el caso de Galileo], el problema no es explicar cómo llegó a utilizar el legado griego, a pesar de todo lo interesante que este estudio pueda tener en sí mismo, sino cómo fue posible trascenderlo (Cohen, 1994, p. 305).

Sin embargo, a pesar de reconocer que Galileo es el hombre en quien culmina la tradición entera de la matemática renacentista italiana, Cohen no especifica cómo hizo Galileo para trascender el legado recibido, señalando solamente que

Disfrutando del patronazgo de Guidobaldo, quien le aseguró una cátedra de matemática en Pisa, y adoptando su programa, Galileo rápidamente fue más allá de su purismo rígido y aprendió en última instancia a imbuirlo con las ideas dinámicas que, a pesar de su vaguedad no matemática, probaron ser adecuadas para su matematización en la manera de Arquímedes (Cohen, 1994, p. 276).

Para mí, de todos modos, formular el problema de esta manera, poniendo el énfasis en la manera específica en que Galileo logró marcar una diferencia con el pasado, retiene el interés de la historia de la ciencia en la figura de Galileo y evita, al mismo tiempo, las dicotomías preconcebidas sobre ruptura y continuidad.

Por otra parte, quisiera, desde el comienzo, hacer la siguiente observación historiográfica. Tal como lo he planteado, el problema le otorga un papel significativo a un *individuo* en el avance de la ciencia, lo cual, en nuestros días, se asocia a una historiografía triunfalista y romántica francamente desprestigiada.<sup>1</sup> La tendencia en enfatizar las condiciones socio-culturales de producción del conocimiento, de gran riqueza en muchos aspectos, muchas veces no logra captar la importancia de la reflexión individual que guía la apropiación de los elementos de las diferentes tradiciones que su contexto le ofrece. Espero que el presente artículo también ilustre este punto más general. De todos modos, sea como fuere, considero que la única manera de evaluar la magnitud del aporte de Galileo a la historia de la ciencia consiste en detenerse en los problemas intelectuales y empíricos que efectivamente enfrentó y en la manera en que buscó resolverlos. Sólo allí encontraremos los “puntos de unión críticos, los verdaderos pasos creativos” a los que Cohen hace referencia. En tanto la historia intelectual mantenga su valor, a mi juicio es aquí donde encuentra su mejor medida.

Tanto las explicaciones continuistas como las rupturistas tienden a desmerecer el papel que ocupan las dificultades empíricas en las decisiones que se tomaron para combinar elementos de tradiciones diversas en una nueva síntesis. Las primeras por generalizar, las segundas por negar la continuidad al problema que les otorga, a tales dificultades, su carácter y relevancia.

En lo que sigue trataré de cumplir con el imperativo de Cohen del comienzo. Para ello trataré de poner de manifiesto cuatro elementos que convergen en el surgimiento de la dinámica galileana y *cómo* Galileo los combina en una *nueva síntesis*. Tales elementos pertenecen a tradiciones diferentes:

<sup>1</sup> Me refiero con ello a la amplia aceptación del modelo sociológico de Steven Shapin utilizado en contra de que la historia de la ciencia ponga el énfasis en los avances llevados a cabo por figuras individuales.

- (a) los principios de la balanza de Arquímedes (287-212 a.C.) y su noción de peso específico;
- (b) la dinámica de Aristóteles (384-322 a.C.) basada en lugares naturales;
- (c) la noción de fuerza impresa de Avempace (ca. 1090-1139);
- (d) la noción de velocidad virtual, sugerida en la tradición de Jordanus Nemorarius (1225-1260) y desarrollada en el tratado pseudo aristotélico *Quaestiones mechanicae*, de amplia difusión durante el Renacimiento.

Espero, además, que el énfasis puesto en los esfuerzos de Galileo por dar una nueva *explicación unitaria* para movimientos tanto naturales como violentos explique su abandono de la tradición más *purista* de los matemáticos de Urbino y su recurso a principios menospreciados por tal tradición.

Dado que fundamentalmente mi interés se refiere al momento de *surgimiento* de la dinámica galileana analizaré sus primeras obras científicas hasta 1600: *Theoremata circa centrum gravitatis* (1585), *La bilancetta* (1586), *De motu* (1589-1592) y *Le mecaniche* (1597-1600).

## I LO TEÓRICO Y LO METODOLÓGICO

Para poder llevar adelante esta tarea es necesario, como paso previo, separar ciencia y método, al menos en todo lo que tal unión conduce a alguna de las siguientes dos asociaciones:

- (a) *nuevo método-nueva ciencia*, propia del *metodologismo* con presencia decreciente en nuestros días;
- (b) *ausencia de método-ausencia de ciencia*, en parte ligada al *sociologismo* con presencia creciente en nuestros días.<sup>2</sup>

El sentido de la distinción que quiero revalorizar aquí se encuentra ya contenida en la afirmación clásica del libro II de la *Metafísica*, cuando Aristóteles observa que

[...] es absurdo inquirir por el modo como procede la ciencia en el momento mismo en que se trata de alcanzarla.<sup>3</sup>

<sup>2</sup> En el caso de Galileo me refiero a la tendencia *retoricista* que, aunque con grandes diferencias, abarca a Paul Feyerabend, Maurice Finocchiaro, Marcello Pera, Mario Biagioli y Rivka Feldhay.

<sup>3</sup> La cita completa es: “Hay oyentes que no admiten nada, a no ser que esté expresado de manera matemática: otros, en cambio, si no se echa mano de ejemplos; otros, en fin, desean que se presente como testimonio la palabra de un

En mi opinión no deben perderse de vista estas palabras de Aristóteles a la hora de considerar el problema de la mayor o menor *continuidad* del fundamento de la ciencia galileana con su pasado, es decir, de mantener siempre presente la distinción entre el *contenido de una investigación* y el *modo de llevarla a cabo*. El fin de esta observación es enfatizar que la controversia que condujo al *cambio teórico* (en este caso, la dinámica galileana) responde a problemas, iniciativas y estrategias diferentes a la que culmina en la *innovación metodológica* ocurrida entre los siglos XVI y XVII.

De este modo, por ejemplo, se puede apreciar al mismo tiempo el resultado de investigaciones como las de Neal Gilbert sobre la metodología renacentista, que explicita las innovaciones metodológicas de Giacomo Aconzio (1492-1566?), Giulio Pace (1550-1635) o Girolamo Borro (1512-1592), y aún así considerar que no estuvo allí el *fundamento* de la nueva ciencia. Paralelamente, puede acordarse con Gilbert en ver en tales innovaciones, y no en Galileo, los inicios de la reacción contra los modos escolásticos de argumentación que será completada por Descartes (cf. Gilbert, 1960, p. 180). Efectivamente, si reparamos en los objetivos e intenciones de los autores mencionados por Gilbert, vemos que sus críticas no fueron motivadas por problemas *empíricos*, ni tuvieron la intención de renovar los supuestos que subyacen a la comprensión del mundo natural. Aconzio y Pace pretendieron dar una versión sistemática y *metodológica* del método, que consideraban faltante en la obra de Aristóteles (cf. Mercer, 1993, p. 50; Gilbert, 1960, p. 181); y Borro – si bien con una orientación más empírica que los anteriores (cf. Wallace, 1998, p. 38) – combinó la protesta usual del humanismo contra la lógica medieval y una versión particular de la metodología aristotélica (cf. Gilbert, 1960, p. 191).<sup>4</sup>

poeta. Unos exigen exactitud en todo, mientras que a otros, en cambio, les disgusta la exactitud, o bien porque son incapaces de vincular unas cosas con otras, o bien por el desdén que manifiestan hacia las cosas insignificantes. Pues, tal como ocurre en la vida de los negocios y en la actividad intelectual, algunos opinan que en la exactitud hay algo de innoble. Por esto es menester haber sido educado según el modo como cada caso lo exige. Porque es absurdo inquirir por el modo como procede la ciencia en el momento mismo en que se trata de alcanzarla” (Aristóteles, *Metafísica*, II, 3).

<sup>4</sup> En el caso de Aconzio su trabajo parte de que, si bien tanto Aristóteles como Galeno escribieron sobre el método, ninguno de ellos lo hizo de un modo propiamente *metodológico*, es decir, como un conjunto breve y práctico de preceptos que puedan aplicarse a cualquier investigación con el fin de convertirla en un sistema coherente. Por su parte Pace, gracias a su buen conocimiento del griego – obtenido en parte al traducir el *Organon* – compiló un listado de doce métodos “extraídos de los escritos de Aristóteles” que reconoce como faltantes en el *Organon* aristotélico. La tendencia empirista de Borro responde a su filiación averroísta y antiplatonista a partir de la cual también rechazó la utilización de métodos matemáticos para el estudio de la naturaleza. A pesar de esto Wallace considera que tuvo una influencia en Galileo a partir del MS 71, donde Galileo manifiesta tener conocimiento de uno de sus experimentos. Gilbert agrega a esto que, en el caso de Borro, su aporte implica una reacción contra las sutilezas de las reglas de la lógica terminista; el método debe ser “la manera más breve en la que se llega al conocimiento del modo más rápido posible” (*apud* Gilbert, 1960, p. 71).

Por el contrario, la propuesta humanista debe más a la crítica filológica que cuestiona el significado medieval de “*methodus*” y prefiere la etimología de raíz estoica que liga el término con cierta *techné*. De este modo, el método de cualquier *arte* consistirá en:

ser presentado mediante reglas breves, claras y fácilmente memorizables que permitan que el alumno lo domine en el menor tiempo posible (Gilbert, 1960, p. 65).

La diferencia con el sentido propiamente *epistémico* de “método” se vuelve más patente cuando se percibe que el énfasis en la rapidez responde al deseo común entre los humanistas de “no volverse viejos y canosos estudiando lógica” (Gilbert, 1960, p. 71).

El punto es que esta crítica metodológica, si bien dará lugar a una importante reforma educativa y curricular, no será el fundamento de la ruptura con la filosofía natural tradicional. En tal sentido, esta reforma metodológica podría ser a mi juicio bien descrita con las palabras de Peter Burke sobre las renovaciones humanistas al decir que “hicieron algo nuevo tratando de recuperar la tradición más antigua” (Burke, 1988, p. 130).

## 2 TENSION EN LA MECÁNICA RENACENTISTA:

### LA ESCUELA DE URBINO Y LA TRADICIÓN DE JORDANUS NEMORARIUS<sup>5</sup>

En su relevamiento de las categorías socioprofesionales ligadas a la matemática renacentista, Mario Biagioli ha criticado parte de la historiografía tradicional sobre la dinámica galileana por no tener en cuenta el contexto socio-cultural de su producción:

La perspectiva historiográfica del trabajo de Drake y Drabkin sobre la mecánica italiana del siglo xvi pone el énfasis en las dimensiones técnicas de los textos matemáticos del período en lugar del contexto socio-cultural de su producción. Para ellos, los textos mecánicos italianos del siglo xvi caen fácilmente en dos tradiciones intelectuales distintas seguidas en dos regiones diferentes de Italia. Cardano, Benedetti y Tartaglia son representativos de la primera tradición. Todos ellos operaron en el norte de Italia – principalmente entre Venecia y Milan – y comparten una perspectiva práctica similar en mecánica y un interés común en dinámica. Ellos también se apoyaron en el trabajo de Jordanus y los impetistas, y

<sup>5</sup> Parte del contenido de esta sección apareció en Molina (2002).

fueron a menudo críticos de la teoría aristotélica del movimiento. Drake y Drabkin han identificado otra escuela centrada en Urbino constituida por Commandino, Guidobaldo y Baldi. A diferencia de Cardano, Tartaglia y Benedetti, este segundo grupo se centró casi exclusivamente en la restauración de la tradición clásica de la matemática griega a través de traducciones filológicamente precisas a partir de los manuscritos. La estática de Arquímedes en lugar de la dinámica de Jordanus fue el fundamento de sus trabajos en mecánica. De hecho, buscando volver a la ciencia helénica con una perspectiva purista, la escuela de Urbino rechazó todas las contribuciones medievales a la mecánica y en particular el trabajo de Jordanus y la tradición medieval de la ciencia del peso. Para Baldi, las enseñanzas de Jordanus eran bárbaras e involucraban supuestos dinámicos falsos (Biagioli, 1989, p. 57).

Si bien podemos no concordar con Biagioli con respecto a tal distinción, esta cita permite una *facil* ubicación de los textos y permite reconocer dos tendencias diferentes en el abordaje a los problemas en la mecánica renacentista en Italia. Por un lado, una tradición de orientación más humanista y filológica que se propone rescatar la ciencia de Arquímedes en su mayor integridad y pureza, dominada por los principios de la *estática*. Por el otro lado, una tendencia menos académica y más práctica, que se inspira en las ideas de Jordanus Nemorarius, con el interés centrado principalmente en problemas *dinámicos*.

La tradición arquimedea de la Escuela de Urbino puede verse como continuación del cambio de actitud respecto de las primeras traducciones de los textos matemáticos griegos que, según el historiador de la matemática renacentista Paul Rose, habría comenzado con Francesco Maurolico (1494-1575), al abandonar la preocupación principal de los filólogos humanistas de rescatar la integridad literaria de los textos. Hijo de un médico griego, que al igual que el cardenal Bessario (1403-1472) emigró luego del saqueo de Constantinopla, creció en un entorno intelectual dominado por el humanismo griego y fue instruido en matemáticas y letras por el discípulo de Bessario, Constantine Lascaris (1434-1501) y en humanidades por el sacerdote de Messina, Francesco Faraone. En 1532, Maurolico dió lecciones sobre los *Elementos* de Euclides a su patrón Girolamo Baressi en Messina, a partir de las cuales comenzó una versión condensada en la que, según testimonio de Rose, trabajó los siguientes treinta años. Al hacerlo Maurolico se habría sentido disconforme con las traducciones de J. Campanus (1220-1296) y B. Zamberti (ca. 1473-?) rehaciendo completamente los primeros libros, agregando pruebas faltantes, acortando otras y omitiendo las redundantes. Y es aquí donde el objetivo humanista de la *integridad literaria* fue desplazado por los aspectos estrictamente *matemáticos* de los textos tratados. Este princi-

pio de que no hay nada de malo en *corregir* los textos clásicos (dado que incluso los matemáticos griegos podían equivocarse), siempre que se haga por un matemático experto, habría sido fundamental para el pleno resurgimiento de la matemática (cf. Rose, 1975, p. 166-7).

La continuidad entre la concepción de la matemática de Maurolico hasta Galileo puede rastrearse a través de problemas de interés común. Maurolico había señalado que uno de los problemas más importantes de la estática arquimedea se refería al centro de gravedad de los sólidos (lo cual Arquímedes había tratado solamente en relación a las figuras planas rectilíneas).<sup>6</sup> Es este mismo problema, asociado a la concepción de la matemática como la ciencia superior a partir de su certeza, el que retoma el gran restaurador de la matemática y fundador de la Escuela de Urbino, Federico Commandino (1509-1575), a instancias de su patrón Ranuccio Farnese en 1564. Commandino y Maurolico ya habían mantenido correspondencia justamente sobre este punto en 1557.<sup>7</sup> Esto puede verse también en el tratado sobre el centro de gravedad de los sólidos que Commandino agregó a su edición del tratado hidrostático de Arquímedes en 1564 (cf. Rose, 1975, p. 200). Esta contribución fue *sistematizada* por su discípulo, y patrón de Galileo, Guidobaldo del Monte. Y fue justamente a instancia de Guidobaldo que Galileo se interesó por el problema del centro de gravedad de los sólidos, cobrando forma en su primera obra *Theoremata circa centrum gravitatis* (1586).

Al reconocer su deuda con Guidobaldo, Galileo afirma:

Me aboqué al estudio del centro de gravedad de los sólidos a instancias de Guidobaldo del Monte, el mayor matemático de su tiempo como lo muestran sus obras publicadas, con la idea de completarlo con un estudio sobre los sólidos no considerados por Commandino (Galileo *apud* Rose, 1975, p. 226).

Ahora bien, si bien está por consiguiente clara la filiación de Galileo a lo que puede denominarse *tradición de Urbino*, hay cierta confusión sobre el papel que jugaron

<sup>6</sup> Rose nota que Maurolico organizó el tratado *De momentis aequalibus* y sus propias adiciones en cuatro libros. El primero trata de los principios generales referidos al centro de gravedad y al equilibrio. Los restantes tres se refieren a la determinación del centro de gravedad en figuras planas, paraboloides y esferas, pirámides, prismas, conoides y otros sólidos. A pesar de que aparentemente sabía cómo encontrar el centro de gravedad en varios sólidos, ninguna de sus pruebas estuvo disponible en el siglo xvi. Maurolico buscó remediar esta deficiencia aplicando el método arquimedeano del momento estático al problema. Esto lo hizo con considerable éxito. Sin embargo, su intento de aplicar este método mecánico de nuevo a la solución de problemas geométricos, tales como la cuadratura del círculo, fue mucho menos feliz (cf. Rose, 1975, p. 167).

<sup>7</sup> Consultar la página con la correspondencia de Maurolico: <<http://www.dm.unipi.it/pages/maurolic/edizioni/epistola/intro.htm>>.

las ideas provenientes de la tradición de Jordanus Nemorarius en el surgimiento de la dinámica galileana. Pierre Duhem observa que es justamente el principio de velocidad virtual el que permite ver a la escuela de Jordanus Nemorarius como superadora de la estática clásica, y traza la línea hacia Galileo a través de Domingo Soto (cf. Duhem, 1990, p. 189-200). Paul Rose señala cómo Tartaglia también intentó reavivar esta tradición medieval, pero sin lograr nunca el tratamiento dinámico de la estática como lo hizo Galileo (cf. Rose, 1975, p. 153-4). Stillman Drake, si bien reconoce como primer tratado moderno de mecánica el *Liber mechanicorum* (1577) de Guidobaldo del Monte, observa cómo, a diferencia de Galileo, Guidobaldo veía un hiato insalvable entre estática y dinámica, lo que le impidió aceptar la idea de *equilibrio dinámico* en toda su extensión (cf. Drake, 1978, p. 35). De modo general, Rose concluye que los representantes de la escuela de Urbino vieron en la dinámica de Jordanus un “regreso a un sistema aristotélico impreciso superado por Arquímedes hace largo tiempo” (Rose, 1975, p. 242), y aún más

los autores de la tradición arquimedea del siglo xvii rechazarán las pruebas de Tartaglia y en realidad toda la tradición de Jordanus (Rose, 1975, p. 153).<sup>8</sup>

Veremos más adelante la presencia de elementos significativos de la tradición de Jordanus en la dinámica galileana de *De motu*. Por ello será justo preguntarse ¿por qué, a pesar de su filiación a la tradición más purista de Urbino, Galileo recurrió a la tradición menos prestigiosa de Jordanus? Antes de responder esta pregunta debemos tener en cuenta los problemas que Galileo enfrentaba en aquel momento.

### 3 LOS ESTUDIOS SOBRE EL CENTRO DE GRAVEDAD DE LOS SOLIDOS

Según palabras propias de Galileo en su carta a Elia Diodati, la obra *Theoremata circa centrum gravitatis solidorum* fue realizada a los 21 años de edad, luego de dos años de estudios matemáticos, con la intención de superar algunas imperfecciones de la demostración que, sobre tal tema, había escrito Federico Comandino (cf. Favaro, 1929a, p. 181). El teorema estaba dedicado a quien lo alentara en sus estudios matemáticos, Guidobaldo del Monte, y fue leído por el lector matemático del estudio de Padua, Giuseppe Moletti, quien comentó que la demostración era buena y que mostraba que

<sup>8</sup> Rose hace notar cómo el propio discípulo de Tartaglia, Benedetti, encontró que el teorema del plano inclinado de Jordanus no tenía valor, mientras que Guidobaldo prefirió la demostración errónea, pero más elegante, de Pappus en lugar de la correcta de Jordanus.

su autor era un “buen y ejercitado geómetra” (Favaro, 1929a, p. 183).<sup>9</sup> Además, aclara Galileo, que si bien tenía intención de ampliar la demostración para otros sólidos que no habían sido considerados por Comandino, abandonó este proyecto cuando vio que Luca Valerio había resuelto toda esta cuestión “sin dejar nada de lado” (Favaro, 1929a, p. 181).

Un último dato relevante del primer trabajo científico de Galileo es una carta, probablemente de Pietro Antonio Cataldi, lector de matemática del estudio de Bologna, quien no nota una gran diferencia entre la demostración de Galileo y la de Comandino, salvo por la utilización de la definición de centro de gravedad de Pappus (290-350), también utilizada por Guidobaldo Del Monte en su *Liber mechanicorum* (cf. Favaro, 1929a, p. 184). Además, si seguimos a Favaro, la intención de este primer trabajo habría sido la de conseguir una cátedra (cf. Favaro, 1929a, p. 185).

#### 4 LA BALANZA Y LA CORONA DE HIERÓN

En 1586, Galileo ya ha avanzado en sus lecturas de los grandes matemáticos de la antigüedad, ha completado la lectura de los *Elementos* (cf. Favaro, 1929b, p. 211) y ya admira a Arquímedes. Según señala al comienzo de *La bilancetta*, consideró apócrifa la historia acerca de que Arquímedes había recurrido a la diferencia entre el nivel del agua al sumergir la corona de Hierón y al sumergir oro y plata en estado puro, para descubrir el fraude llevado a cabo en su manufactura. Esta explicación se la atribuye a la mala comprensión matemática de quien relatase el acontecimiento por primera vez, Proclo Licio (cf. EN, 1, p. 216).

Esto lo hizo pensar

*de qué manera* mediante el agua se podría encontrar con exactitud la mezcla de dos metales; y finalmente, luego de haber revisado diligentemente las demostraciones de Arquímedes en su libros *Acerca de los cuerpos que están en el agua e Acerca de las cosas del mismo peso*, me vino a la mente un modo que resuelve la cuestión precisamente: creo que este proceder es el mismo utilizado por Arquímedes dado que, además de ser completamente exacto, depende de las demostraciones que encontramos en el mismo Arquímedes (EN, 1, p. 216; énfasis mio).

<sup>9</sup> Debe tenerse en cuenta que Moletti es representativo de los esfuerzos, en el entorno intelectual paduano, de combinar en el procedimiento del silogismo científico premisas físicas y matemáticas (donde los términos matemáticos son sólo términos *medios* entre los términos *mayores* y *menores* que pertenecen a la física). Esta es la base del esquema aristotélico de la *ciencia mixta* (cf. Carugo, 1983; Lennox, 1986; Molina, 2002).

Lo ingenioso de la estrategia galileana consistió en aplicar el principio de proporcionalidad inversa entre peso y punto de apoyo de la balanza demostrado por Arquímedes, a la diferencia de peso de metales pesados en el aire y en el agua. La referencia a la experiencia por parte de Galileo está en relación al conocimiento de los pesos de los metales pesados en uno y otro medio (EN, 1, p. 218). Antes de utilizar la balanza para descubrir la proporción efectiva en una determinada combinación de metales, es necesario contar con el peso de los metales en “el estado más puro en que los podemos encontrar” (EN, 1, p. 219). Esta es la razón de la *Tavola delle proporzioni delle gravità in speci de i metalli e delle gioie pesate in aria ed in acqua* que encontramos a continuación en la edición de Favaro.<sup>10</sup>

Desde el punto de vista metodológico puede notarse la relación de esta reforma con la importancia fundamental que adquiere la medición. En términos de Stillman Drake:

Fue probablemente en 1588-1589 cuando Galileo comenzó a reflexionar acerca del papel vital que tenía la medición en la ciencia. Una cosa es probar la proporcionalidad matemática con relación a que los cuerpos del mismo peso específico tienen sus pesos proporcionales a sus volúmenes, y otra cosa diferente es verificar esto de hecho (Drake, 1978, p. 15).

Según Alexandre Koyré fue precisamente con *La bilancetta* que Galileo se inició en la vida científica:

En ella Galileo soluciona el problema de la proporcionalidad en la composición de los metales y establece los fundamentos de la balanza hidrostática. Claramente fue una aplicación inspirada de la tradición arquimedea la que permitió a Galileo arribar a este resultado.

Este hecho indiscutido alienta a Koyré a continuación a afirmar que

<sup>10</sup> Namer considera que el rigor matemático con que Galileo expresa los hechos en este trabajo, y la ingeniosidad en la construcción de un dispositivo experimental que elimina las ambigüedades, inaugura un nuevo concepto de experiencia: “[...] siendo anteriormente subjetivo y cualitativo deviene cuantitativo, fundando el modelo que será para nosotros el de la experiencia en física” (Namer, 1971, p. 175). Sin embargo, si damos crédito a Galileo, es decir, si Arquímedes utilizó la diferencia de pesos en el aire y en el agua para descubrir el fraude, debió utilizar los valores de un modo similar a como él lo hizo. No se ve en qué sentido, entonces, la experiencia de Arquímedes haya sido *subjetiva y cualitativa*.

[...] es abrazando la tradición de pensamiento que éste representa a favor de los antiguos y en contra de Aristóteles, como Galileo llega a superar la física de la fuerza impresa y se eleva al nivel de la física matemática, que no es otra cosa que dinámica arquimedea (Koyré, 1986, p. 76).

De todos modos, no debe olvidarse que no se trata simplemente de *matematizar*. Esta afirmación no haría justicia a la exactitud con que Galileo construyó la tabla mencionada, cuya precisión llega a la centésima de *grani*. En sí misma, la resolución del problema de la proporcionalidad en la composición de metales *sólo* es posible en la práctica con la convergencia de dos elementos: (a) el *fundamento teórico* y (b) la *tabla* con los valores de los pesos específicos *concretos* de los diferentes metales.

También es necesario evitar las dicotomías “A *en contra de* B”, por lo que aceptar la filiación arquimedea de Galileo no nos debe impedir reconocer otros elementos que sirvieron de fundamento a la ciencia galileana. Veremos, a continuación, que parte de la cosmología de *De motu* es de inspiración aristotélica.

## 5 LA COSMOLOGÍA EN *De motu*

Es razonable pensar que el éxito obtenido con la balanza hidrostática en *La bilancetta* lo haya alentado a una tarea de mucho mayor envergadura, cual es la de utilizar tales recursos para investigar

*cuáles son las bases* sobre las que podemos decir que un cuerpo es más pesado que otro, y viceversa (EN, 1, p. 251; énfasis mío).

Por otro lado, debe tenerse en cuenta que los primeros esfuerzos para avanzar con este proyecto coinciden con el ofrecimiento que Galileo recibe de la Universidad de Pisa para desempeñarse como profesor de matemáticas. Ello implicaba remplazar al padre Filippo Fantoni y enseñar, además de los *Elementos* de Euclides, la obra de Georg Peurbach (1423-1461), *Theorica planetarum* – exposición mucho más refinada y actualizada de la astronomía geométrica ptolemaica que la *Sphaera* de Sacrobosco (cf. Lattis, 1994, p. 41 ss.). Ese mismo año, el amigo y colaborador de Galileo, Jacopo Mazzoni, fue designado en la misma universidad para enseñar el *De caelo* aristotélico (cf. Wallace, 1992, p. 59).

Por tales motivos, no resulta sorprendente que encontremos la tensión entre los dos principales elementos de la síntesis que Galileo pretende llevar a cabo desde el comienzo mismo de *De motu*.

Primero, el tratado comienza con una afirmación profundamente arquimedea:

En adelante explicaremos que todos los movimientos naturales, sean ascendentes o descendentes, son el resultado de la gravedad o liviandad específica del móvil (EN, 1, p. 251).<sup>11</sup>

Esto se precisa cuando, tratando de evitar las ambigüedades (en las que, a su juicio, se incurre frecuentemente al utilizar las expresiones “más pesado” y “más liviano”) define:

Definimos como [substancias] igualmente pesadas aquellas que, al ser iguales en volumen, tienen también el mismo peso (EN, 1, p. 251).

Segundo, el esquema de tal planteo, dado en la primera afirmación de la sección inmediatamente siguiente, es profundamente aristotélica:

Dado que las cosas que se mueven naturalmente se mueven hacia sus lugares naturales y dado que las cosas que se mueven son o pesadas o livianas, debemos considerar cuáles son los lugares de las pesadas, cuáles los de las livianas y por qué (EN, 1, p. 252).

Para combinar estos dos elementos, Galileo especula bajo la hipótesis atomista de una *materia única* para todos los cuerpos, dando sentido a la afirmación de que cuerpos más pesados contienen más partículas de materia en un espacio menor, por lo que “deben ser aquellos que se encuentran más cerca del centro” (EN, 1, p. 253).<sup>12</sup>

Al mismo tiempo, para no perder el efecto dinámico, otorgado por Aristóteles a los cuatro elementos, Galileo especula sobre la división de tal materia única en el momento de la construcción del universo:

Si, por ejemplo, al momento de la construcción del universo, la naturaleza dividió la totalidad de la materia común a los cuatro elementos en cuatro partes iguales y luego asignó a la forma del elemento tierra su propia materia (tierra), y del

<sup>11</sup> “*Lationem omnem naturalem, sive deorsum sive sursum illa sit, a propria mobilis gravitate vel levitate fieri*”. En la nota 2 de la traducción inglesa, Drabkin aclara que “*propria gravitas*” es definida en sentido amplio como el equivalente a la gravedad específica o densidad relativa (Galilei, 1960a, p. 13, nota 2).

<sup>12</sup> La cita original completa es la siguiente: *ratione profecto consentaneum fuit, ut quae in angustiori loco plus materiae concluderent, angustiora etiam loca, qualia sunt quae centro magis accedunt, occuparent*. Galluzzi indica con precisión que Galileo está pensando, en particular, en Demócrito: 68<sup>a</sup> 135 Diels-Kranz (Galluzzi, 1979, p. 171, nota 65).

mismo modo a la forma del aire su propia materia [es decir, aire] y que la forma del [elemento] tierra causó que su materia deba estar comprimida en un espacio menor, mientras que la forma del aire permitió ubicar su materia en un espacio más amplio ¿no sería más razonable para la naturaleza asignar un mayor espacio al aire, y uno menor a la tierra? Y, en una esfera, los espacios son menores cuando nos aproximamos al centro, y mayores cuando nos alejamos del centro (EN, 1, p. 253).

Con tales elementos, Galileo deriva en una especulación cosmológico-dinámica de inspiración aristotélica que anuncia en la sección siguiente titulada “Que el movimiento natural es causado por la pesantez y la liviandad”.

La naturaleza está organizada de tal modo que los cuerpos pesados permanecen en reposo por debajo de los más livianos; que los cuerpos que se mueven hacia abajo lo hacen en razón de su pesantez mientras que los que lo hacen hacia arriba lo hacen en razón de su liviandad (EN, 1, p. 253).

Sin embargo, a pesar de este esquema basado en los cuatro elementos, para poder *aplicar* la hidrostática arquimedea, la propuesta de Galileo consiste en reducir el problema del movimiento al movimiento *en el agua*:

A pesar de que sin duda hay varios medios a través de los que los movimientos pueden realizarse, por ejemplo, fuego, aire, agua, etc., y de que en todos ellos se aplican los mismos principios, supondremos que el agua es el medio en el que se da el movimiento (EN, 1, p. 254).

## 6 NUEVA SÍNTESIS

Por lo expuesto puede verse que hasta aquí no hay diferencias con la cosmología aristotélica ni en el *orden* de los elementos, ni en la física basada en la dinámica de los *lugares naturales*, pero sí en la concepción del peso y, por consiguiente, en toda explicación dinámica que lo tenga como su *causa*. El fundamento de la nueva síntesis, y su alejamiento de una física cualitativa, puede verse, entonces, en el supuesto de una materia original *única* para todos los cuerpos y en que los cuerpos más pesados son aquellos que contienen el *mayor número de partículas* en un mismo volumen.

Sin embargo, si exageramos el peso de la matemática y la cuantificación en la nueva síntesis que está llevando a cabo Galileo, perderíamos de vista el aspecto estricto-

tamente *físico* de su problema y la naturaleza *dinámica* de la solución que tal problema requiere. Ésta es la razón por la que Galileo es explícito al decir que

Lo establecido en los capítulos anteriores no puede aclararse más de modo matemático, sino que es necesario una explicación física, por lo que propongo en el capítulo siguiente reducir el problema a una consideración de la balanza, y a explicar que los movimientos de los cuerpos naturales son como los pesos en una balanza. Y esto con el fin de lograr una mayor comprensión de lo ya tratado, como un entendimiento más preciso por parte de los lectores (EN, 1, p. 257).

El principal efecto dinámico de esta síntesis es que el movimiento ascendente pierde su carácter de ser intrínsecamente *natural* y es considerado como el efecto de la acción del medio, es decir, movimiento por *extrusión*:

En el caso del movimiento natural de los cuerpos, tanto el movimiento ascendente como el descendente se pueden atribuir solamente al peso, como en los pesos en una balanza, dado que cuando algo se mueve hacia arriba, está al propio tiempo siendo elevado por el peso del medio (EN, 1, p. 259).

Es aquí donde Galileo declara que esta nueva comprensión supera la dinámica aristotélica:

Y por lo expuesto puede comprenderse fácilmente [en contra de Aristóteles *De caelo*, I] que lo que se mueve, se mueve como si fuera por la fuerza y por la acción extrusiva del medio. Dado que cuando la madera es sumergida por la fuerza, el agua violentamente la empuja hacia fuera, mientras que en el movimiento descendente, se mueve hacia su lugar natural, y no tiene la propensión a dejar que lo que es más liviano que sí mismo permanezca en reposo por debajo (EN, 1, p. 258-9).<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Es completamente pertinente la observación realizada por Drabkin en la versión inglesa, es decir, que el movimiento ascendente “así llamado ‘natural’ es una especie de movimiento forzado”. Al rehacer esta sección (ver Apéndice I), Galileo específicamente considera a todos los movimientos ascendentes como movimientos «forzados». Pero continúa considerando los movimientos en caída libre como movimientos «naturales», dado que tienen lugar independientemente del medio, o sea, en el vacío. Comparar a:

Los movimientos descendentes son mucho más naturales que los ascendentes. Dado que los movimientos ascendentes dependen completamente del peso del medio, el que le confiere al móvil una liviandad accidental; pero el movimiento descendente es causado por la gravedad intrínseca

Hasta aquí en cuanto a los movimientos naturales. Ahora bien, la segunda parte de *De motu* está dedicada a aplicar este resultado a los movimientos forzados, con el fin de tratar de arribar a una concepción dinámica general bajo la analogía con la balanza, buscando superar varios puntos insatisfactorios del tratamiento aristotélico. El más importante de estos puntos críticos sea quizás la explicitación de la siguiente contradicción:

Dice [Aristóteles]: “si lo que es movido no es pesado ni liviano, su movimiento será por la fuerza, y lo que es movido por la fuerza, y no ofrece resistencia de gravedad o liviandad, se mueve sin fin”; y en el párrafo siguiente afirma que los proyectiles son movidos por el medio. Pero entonces, dado que el aire no tiene peso ni liviandad, una vez que es movido por el agente se moverá sin fin y siempre con la misma velocidad. Y, en consecuencia, llevará a los proyectiles en un movimiento sin fin, y nunca se debilitará, dado que se mueve siempre con la misma fuerza. Pero la experiencia muestra que lo que sucede es lo contrario (EN, 1, p. 309).

## 7 LA ACELERACIÓN COMO DIFICULTAD EMPÍRICA

Dado el espíritu inicialmente arquimedeano con el que Galileo aborda su proyecto, la aceleración es la principal dificultad empírica que enfrenta y tiene clara conciencia de ello. Al promediar su tratamiento hidrostático del problema afirma:

Éstas, entonces, son las leyes generales que gobiernan la proporción de las velocidades de los movimientos de los cuerpos hechos del mismo material o de materiales diferentes, en el mismo medio o en medios diferentes, y moviéndose hacia arriba o hacia abajo (EN, 1, p. 273).

Pero inmediatamente a continuación, observa:

Pero debe notarse la gran dificultad que surge en este punto, dado que tales proporciones no serán observadas por quien haga la experiencia (EN, 1, p. 273).

del móvil. En ausencia de un medio todo se movería hacia abajo. El movimiento ascendente es causado por la acción extrusiva de un medio pesado; del mismo modo que, en el caso de la balanza, el peso más liviano es forzado a moverse hacia arriba por el más pesado, por lo que el móvil es empujado por la fuerza por el medio más denso (Galilei, 1960a, p. 22, nota 4).

Luego, en la segunda parte donde procura generalizar este resultado para el movimiento de proyectiles, y criticando a los escritores recientes (aristotélicos) que atribuyen la causa de la aceleración al efecto del medio, argumenta:

Cuarto, ellos no están buscando la razón esencial para el movimiento acelerado, sino sólo una razón accidental. Dado que es por accidente que un cuerpo se mueve en un *plenum*, y que su velocidad es aumentada o disminuida por la acción del medio. Pero lo que nosotros preguntamos es por qué un cuerpo en movimiento natural, como si se moviera naturalmente por efecto de su propio peso, sin tener en cuenta el medio, se mueve más velozmente en el fin que en la mitad del movimiento, y más velozmente en la mitad que en el comienzo; y cómo una consideración del movimiento muestra que, al comienzo, el movimiento debe ser más lento (EN, 1, p. 317).

Si bien esta discrepancia ha sido ampliamente señalada en la historiografía galileana,<sup>14</sup> rescato los planteos de Noretta Koertge y Klaus Fisher por observar, a mi juicio correctamente, que Galileo se encuentra frente a un dilema, aunque ambos difieren sobre su naturaleza y sobre cómo Galileo buscó superarlo.

Según Koertge,

El dilema debe ser enfrentado: Galileo desea criticar a Aristóteles por el hecho de ser inconsistente con la experiencia, pero las predicciones de su propia teoría no se confirman en la experiencia (Koertge, 1977, p. 395).

La solución de Galileo, según Koertge, a la que denomina platónica, consiste en “*listar los accidentes e imaginar que pasaría si tales accidentes estuviesen ausentes*” (1977, p. 394). La posición de Koertge se basa en la licencia geométrica contenida en la afirmación de Galileo de que

Nuestras demostraciones, como ya dijimos, deben entenderse en cuerpos libres de toda resistencia externa. Quien realice la experiencia no debe sorprenderse de que no se confirmen estas conclusiones, dado que es imposible encontrar tales cuerpos en el dominio de la materia (EN, 1, p. 300-1).

<sup>14</sup> Para las referencias más amplias y recientes, cf. Fredette, 1972; Damerow *et. al.*, 2004.

Lo que resulta insatisfactorio del análisis de Koertge es que a esta afirmación de Galileo no se le puede otorgar más que un alcance *limitado*. De hecho, Galileo aclara que con ello sólo está adelantándose a objeciones posibles de los peripatéticos en contra de la aplicación del principio de la balanza, pero es consciente de que esto no es suficiente para explicar el verdadero problema impuesto por la experiencia: la aceleración como dato empírico. Según Fischer,

A primera vista eran dos las posibilidades que se le abrían para solucionar dicha dificultad: podía intentar acercarse a una ley cuantitativa que defina el incremento o disminución de una cualidad en dependencia de su propia naturaleza y de la materia a la que se adhiere [...]. La segunda vía era el *cambio de los axiomas teóricos* de manera que pudiera recuperarse su demostrabilidad (Fischer, 1986, p. 52; énfasis mío).

En su opinión, Galileo sondeó los dos caminos por él señalados (cf. Fischer, 1986, p. 52). Sin embargo, Fischer deja este problema sin resolver. En realidad, como trataré de mostrar en la sección siguiente – en gran medida siguiendo los análisis de Drabkin y Galluzzi – Galileo redefinió sus principios, pero con un objetivo previo y más profundo que el de recuperar la demostrabilidad. Su intención fue la de superar las tensiones conceptuales antes mencionadas: modelo hidrostático vs. modelo del plano inclinado, carácter natural o accidental de la fuerza impresa (es decir, *levitas*). Es esta última tensión la que conducirá a W. Wallace a afirmar que las dificultades metodológicas de *De motu* se refieren al reconocimiento de las causas *esenciales* y *accidentales* (cf. Wallace, 1986, p. 18).

Sea como fuere, lo cierto es que:

Galileo no puede ignorar ni la cuestión de la aceleración, ni sustraerse a la obligación de justificar la incongruencia entre la propia teoría de los movimientos naturales uniformes y el dato experimental de la aceleración. Dado que Galileo enfatiza que en el movimiento natural no hay variación ni en la gravedad del móvil, ni en la del medio, la aceleración debe depender de factores externos que operan sobre la gravedad del móvil. La solución viene dada – como hemos anticipado – por la *virtus motiva* [*nempe levitas*] empleada para justificar los movimientos violentos. Este es el motivo por el que el análisis de la aceleración en *De motu* es propuesta en relación a los movimientos violentos (Galluzzi, 1979, p. 183).

## 8 EL TERCER ELEMENTO DE LA SÍNTESIS: LA FUERZA IMPRESA

La *virtus motiva* (fuerza impresa), tomada seguramente del comentarista de Aristóteles Ibn Bayya (Avempace) (ca. 1090-1139), a través de su profesor de física en Pisa, Girolamo Borro (ca. 1538):

Nuestra respuesta entonces es que cuando el cuerpo es arrojado hacia arriba se da una privación de gravedad, y cuando lo es hacia abajo se da una privación de su liviandad (EN, 1, p. 309-10).

Inmediatamente a continuación, con el fin de aclarar cómo se debe entender su propuesta, proporciona una analogía con el aumento o disminución del calor en el hierro:

Si una persona no se sorprende de que el fuego pueda quitar al hierro su frialdad introduciéndole calor, no se sorprenderá de que el agente, al arrojar un cuerpo pesado hacia arriba, pueda quitarle su gravedad y volverlo liviano. El cuerpo, entonces, es movido hacia arriba por el agente mientras está en su mano y es privado de su peso; del mismo modo que el hierro es movido, con un movimiento diferente, hacia el calor, mientras el hierro está en el fuego y es privado por él de su frialdad. La fuerza motiva, es decir su liviandad, se preserva en la piedra, cuando el agente motor deja de estar en contacto; el calor se preserva en el hierro luego de que es removido del fuego. La fuerza impresa disminuye gradualmente en el proyectil cuando deja de estar en contacto con la causa motora; el calor disminuye en el hierro, cuando el fuego deja de estar presente. La piedra finalmente llega al reposo; de modo similar el hierro regresa a su frialdad natural (EN, 1, p. 310-1).

Dos puntualizaciones deben hacerse sobre esta propuesta de Galileo para comprender los movimientos forzados. La primera se refiere al problema ampliamente debatido sobre el origen de la noción galileana de *fuerza impresa*,<sup>15</sup> atribuido a partir de Wohlwill y Koyré a Benedetti (1530-1590). Sin embargo, como bien observa Galluzzi, esta atribución fue previa a los trabajos de Maier y Clagett que permitieron despejar la confusión en la que se basa, es decir, la distinción entre la *virtus impressa* (autoextinguible) y el *ímpetus* (protoinercial) de Buridan y Benedetti (cf. Galluzzi, 1979, p. 177, nota 93). Por la cita anterior de *De motu*, vemos que Galileo está ligado al primero de

<sup>15</sup> Referencias precisas a este debate pueden encontrarse en Galluzzi, 1979, p. 177-8, nota 94.

estos dos conceptos. La identificación de Avempace como fuente a través de su exposición en Pisa por parte de Girolamo Borro se la debemos a los trabajos de Moody en 1951. Esta identificación encuentra respaldo en las dos citas del trabajo de Borro (*De motu gravium et levium*) que encontramos en *De motu* (cf. EN, 1, p. 333, 367).

La segunda observación se refiere a no pasar por alto el carácter gradual con que actúa la fuerza impresa, tanto en su incremento como en su disminución. Si bien este punto se ha señalado muchas veces, esto representa una concepción completamente alternativa a la teoría aristotélica que postula un cambio *cualitativo* entre el movimiento ascendente del proyectil y el momento en que comienza su descenso. Por el contrario, la acción gradual de la fuerza impresa, entendida como privación progresiva de la gravedad, encuentra en ese momento un *equilibrio* con su contrapeso, que no es otro que la *gravitas* propia del cuerpo.

Ahora bien, de este modo Galileo parece haber alcanzado su objetivo de elaborar una concepción dinámica general aplicable a movimientos tanto naturales como forzados, bajo la analogía con la balanza. Sin embargo, hubiese resultado curioso que una síntesis realizada con elementos tan heterogéneos (lugares naturales, peso específico y fuerza impresa) tenga un éxito perdurable. Por el contrario, no resulta nada extraño que *De motu* no haya llegado a la imprenta en su momento, y que la maduración de tales ideas haya encontrado un lugar recién como anexo en la última obra publicada por Galileo en 1638.

## 9 DIFICULTADES CONCEPTUALES

Si bien las tensiones de la dinámica de Galileo en su período pisano (1589-1591) han sido ampliamente estudiadas creo que es Galluzzi, una vez más, quien las ha expuesto como mayor profundidad y detalle. Menciono a continuación las dos principales.

La primera es la tensión entre el tratamiento inicial bajo el *modelo hidrostático* y su tratamiento a través de *planos inclinados*, donde Galileo establece con qué proporción varía la gravedad de un mismo móvil con la inclinación del plano de descenso: (a) si de hecho la *gravitas* va desde un máximo (perpendicular en el plano inclinado) a cero (plano del horizonte), en un cierto punto llegará a ser *menor* que la *gravitas* de un volumen equivalente del medio; (b) los cuerpos no descienden en el agua sólo cuando hay una cierta inclinación; (c) el análisis del movimiento sobre planos inclinados prescinde de la acción del medio, y de hecho sólo tiene valor en el vacío (cf. Galluzzi, 1979, p. 187).

La segunda es la tensión entre, por un lado, la idea de que la *liviandad* es sólo *relativa* (y que la única causa de movimiento es la *gravitas*) y, por el otro, el hecho de

conferirle a la *levitas* una realidad autónoma bajo la idea de fuerza impresa:<sup>16</sup> (a) la *levitas* no puede concebirse de modo relativo, sino que es lo contrario de la *gravitas* y empuja por su propia naturaleza al proyectil hacia arriba (dado que sería imposible explicar el movimiento *ascendente* por la *gravitas*); (b) por el contrario, si no se concibe de modo relativo, no puede explicarse en términos de “menor gravedad” el retardo inicial del movimiento de caída libre (aceleración) (cf. Galluzzi, 1979, p. 187-8).

Creo que justamente lo fructífero del análisis de Galluzzi se debe a que su perspectiva explora la génesis de las alteraciones sufridas por los conceptos dinámicos clásicos hasta establecerse el concepto de *momento mecánico*, dado que “las nuevas ideas no podían ser expuestas satisfactoriamente haciendo recurso a la terminología tradicional” (Galluzzi, 1979, p. 188).

## 10 LA REDEFINICIÓN DE *De motu*

En su *Appendix* a la versión inglesa de *De motu*, Drabkin muestra con detalle las modificaciones realizadas a la primera parte, dedicada al movimiento natural, con el fin de compatibilizarlo con las conclusiones a las que arribó su tratamiento de los movimientos violentos. El principal resultado fue:

Un mayor énfasis en el carácter relativo de “abajo” y “arriba”, y la propuesta de utilizar los términos “más cerca del centro” y “más lejos del centro”. Y la última versión también evita la palabra “liviano”, sustituyéndola por “menos pesado”. Se enfatiza (aún más que en la versión I) el sinsentido de las expresiones “absolutamente pesado” y “absolutamente liviano”, y remarca la idea de que todo movimiento ascendente es forzado (Drabkin, 1960, p. 115).

El punto central se refiere a la transición entre “liviano” (*levitas*) y “menos pesado” (*minus gravis*). La afirmación con la que Galileo había iniciado *De motu*:

En adelante explicaremos que todos los movimientos naturales, sean ascendentes o descendentes, son el resultado de la gravedad o liviandad específica del móvil [...] [y] por qué decimos que un cuerpo es más liviano o pesado que otro, o igualmente pesado (EN, 1, p. 251)

<sup>16</sup> Bajo la expresión “*Virtus motiva* (impresa), *nempe levitas*”.

se convierte en:

En adelante explicaremos que todos los movimientos naturales son el resultado de su mayor o menor gravedad [...] [y] por qué decimos que un cuerpo es más pesado, o menos pesado, o igualmente pesado (EN, 1, p. 342).

Esta reforma basada, entonces, en que todos los graves están dotados de una *naturalis inclinatio* única, siempre hacia el centro, explica la ascensión de los cuerpos más livianos que el medio a través de una causa externa, la extrusión del cuerpo por parte del medio (cf. EN, 1, p. 363). Y como bien observa Galluzzi, “con un capítulo dedicado a la explicación del mecanismo decisivo de la extrusión culmina el intento de Galileo de reformar el Libro I” (1979, p. 192).

Ahora bien, Galluzzi tampoco deja de notar las consecuencias no deseadas, y destructivas, que esta reforma trae, a su vez, para su análisis de los movimientos violentos: (a) se *niega la propia existencia de una levitas* capaz de llevar el grave hacia arriba, y con ello se elimina la analogía entre movimientos violentos y naturales que permitía una transición *gradual* entre ambos al equilibrarse la fuerza impresa (*levitas*) con la *gravitas* del cuerpo; (b) la aceleración no puede continuar considerándose como un efecto *accidental* producido por la permanencia en el cuerpo de la *levitas*, progresivamente *auto-extinguible* (cf. Galluzzi, 1979, p. 193).

Por estos motivos Galluzzi concluye,

Galileo debe reconocer ahora que de su ambicioso proyecto sólo quedaba un cúmulo de ruinas. Habiendo partido con la intención de elaborar principios unitarios, capaces de dar cuenta de los diversos tipos de movimiento, debió haber concluido amargamente que había fracasado.

Pero también observa por dónde podía encontrarse una vía de avance,

Se debía, por otra parte, retomar, para profundizarlo y desarrollarlo algunos puntos interesantes de *De Motu*. Particularmente el capítulo dedicado a los movimientos sobre planos de diversas inclinaciones merecía una reflexión atenta, prometiendo resultados alentadores (Galluzzi, 1979, p. 193-4).

## II EL CUARTO ELEMENTO DE LA SÍNTESIS: EL *corpus de ponderibus*

A continuación presento, a través de Galluzzi, los principales elementos de la cuarta tradición de la nueva síntesis que Galileo pretende realizar.

Las investigaciones de Duhem y Vailati, durante el cambio de siglo, integradas más recientemente, sobre todo por Maier, Moody y Claggett han contribuido a iluminar – no sin cierta exageración – la influencia ejercida sobre la cultura tardo medieval y renacentista de este *corpus* de escritos de estática que, a pesar de numerosas y legítimas dudas, puede asignarse al nombre de Jordanus Nemorarius [...]

En los escritos *De ponderibus* atribuidos a Jordanus se distinguía con precisión el *pondus* de la eficacia variable que tal peso ejercita según diversas inclinaciones (Galluzzi, 1979, p. 68-9).<sup>17</sup>

Para el autor de los *Elementa* [Jordanus], la *gravitas secundum situm* del mismo grave a través de diversas inclinaciones era medida a través de la relación entre el largo de la distancia oblicua y el del descenso vertical correspondiente. En el caso de la balanza, la “gravedad de posición” del peso era a su vez determinada, en relación a la del contrapeso, por la relación entre los segmentos intersectados de los arcos descriptos por la extremidad de los brazos, en el caso en que la balanza fuese puesta en movimiento. Jordanus hacía observar que la mayor *gravitas secundum situm* del mismo peso dependía, en sustancia, de la tendencia a moverse con velocidad mayor al contrapeso (determinada por la posición) en el caso de que el sistema se ponga en movimiento. En este procedimiento demostrativo era sugerido el método de la así llamada “velocidad virtual”, expuesto luego en el pseudo aristotélico *Quaestiones mechanicae*, más que el rigurosamente estático adoptado por Arquímedes (Galluzzi, 1979, p. 70).

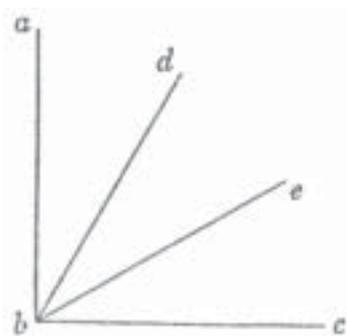
Es recurriendo a tales elementos conceptuales que Galileo escribirá la sección “en la cual, en oposición a Aristóteles y Temistio, se prueba que sólo en el vacío pueden determinarse las diferencias de pesos y de velocidades”. La prueba de que el verdadero peso natural no puede obtenerse en un *plenum* viene dada por el hecho de que “cuanto más pesado es el medio, el intervalo de la proporción entre ambos es mayor” (EN, 1, p. 294).

<sup>17</sup> Esto se ve en los *Elementa Jordani*: “*Secundum situm gravius esse, quando in eodem situ minus obliquus est descensus. Obliquiorem autem descensum, in eadem quantitate minus capere de directo*” (cf. Claggett, 1972, p. 231).

La influencia de la tradición del *corpus de ponderibus* la registra la sección siguiente titulada: “conteniendo una discusión de las proporciones de [las velocidades de] los movimientos del mismo cuerpo sobre planos de diversas inclinaciones”:

El problema es por qué el mismo cuerpo, al descender naturalmente sobre planos con diversas inclinaciones respecto del horizonte, se mueve más velozmente en los planos que tienen un ángulo más cercano al ángulo recto con el horizonte; y, además, el problema requiere [determinar] las proporciones [de las velocidades de] los movimientos que tienen lugar en varias inclinaciones (EN, 1, p. 296).

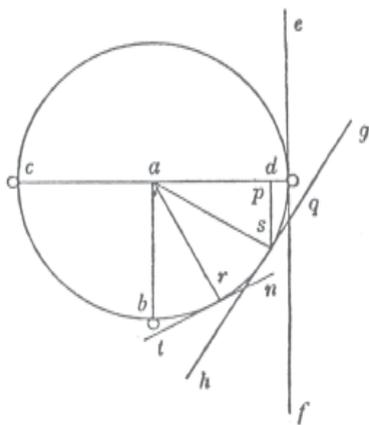
El planteo de la demostración pide recordar el supuesto:



Que un cuerpo grave tiende a descender con la misma fuerza que es necesaria para elevarlo [...] por lo que si podemos encontrar con cuánta menos fuerza el cuerpo grave puede ser elevado por la línea *bd* que por la línea *ba*, habremos descubierto con cuánta mayor fuerza el mismo cuerpo grave descende sobre la línea *ab* que sobre la línea *bd* [...] y sabremos cuánta menos fuerza se requiere para elevar el cuerpo

sobre *bd* que sobre *be* tan pronto como encontremos cuánto mayor será el peso de tal cuerpo en el plano sobre *bd* que en el plano sobre *be* (EN, 1, p. 297).

La construcción es la siguiente:



Consideremos una balanza *cd*, centrada en *a*, teniendo en el punto *c* un peso igual a otro peso en el punto *d*. Si ahora suponemos que la línea *ad* se mueve hacia *b*, pivoteando sobre el punto fijo *a*, entonces el descenso del cuerpo en el punto inicial *d*, será como si fuera sobre la línea *ef*. Por lo tanto, el descenso del cuerpo en la línea *ef* será una consecuencia del peso del cuerpo en el punto *d*. Nuevamente, cuando el cuerpo se encuentra en *s*, su descenso en el punto inicial *s* será como si fuera en la línea *gh*; y por consiguiente el movimiento del cuerpo

en  $gh$  será una consecuencia del peso en el punto  $s$ . Y, nuevamente, en el momento en que el cuerpo esté en el punto  $r$ , su descenso en el punto inicial  $r$  será como en la línea  $tn$ ; por ello el cuerpo se moverá en la línea  $tn$  como consecuencia de su peso en el punto  $r$  [...] (EN, 1, p. 297).

Y con cuánta más fuerza se mueve en  $ef$  que en  $gh$  se aclarará del modo siguiente, es decir, proyectando la línea  $ad$  fuera del círculo, hasta intersectar la línea  $gh$  en el punto  $q$ . Así, dado que el cuerpo desciende en la línea  $ef$  más rápidamente que en la línea  $gh$  en la misma proporción que el cuerpo es más pesado en el punto  $d$  que en el punto  $s$ , y dado que es más pesado en  $d$  que en  $s$  según la proporción en que la línea  $da$  es más larga que  $ap$ , se sigue que el cuerpo descenderá en la línea  $ef$  más rápidamente que en  $gh$  en la proporción en que la línea  $da$  es mayor que  $pa$ . Así, la velocidad en  $ef$  tendrá, respecto de la velocidad en  $gh$ , la misma proporción que la línea  $da$  respecto de  $pa$  (EN, 1, p. 298).

La aplicación de las leyes de la balanza al análisis del movimiento sobre planos inclinados proviene de la tradición *De ratione ponderis* de Jordanus, junto con la especulación de imaginar la balanza *en movimiento*.

La demostración es la siguiente:

Si podemos entonces mostrar que el cuerpo es menos pesado en el punto  $s$  que el punto  $d$ , claramente su movimiento en la línea  $gh$  será más lento que en  $ef$ . Y si, nuevamente, podemos mostrar que el cuerpo en  $r$  es menos pesado que en el punto  $s$ , claramente el movimiento en la línea  $nt$  será más lento que en la línea  $gh$ . Ahora es claro que el cuerpo ejerce menos fuerza en el punto  $r$  que en el punto  $s$ , y menos en  $s$  que en  $d$ . Dado que el peso en el punto  $d$  sólo equilibra el peso en el punto  $c$ , dado que las distancias  $ca$  y  $ad$  son iguales. Pero el peso en el punto  $s$  no equilibra aquel en  $c$ . Dado que si trazamos una línea desde  $s$  perpendicular a  $cd$ , el peso en  $s$ , comparado con el peso en  $c$ , es como si estuviera suspendido desde  $p$ . Pero un peso en  $p$  ejerce menos fuerza que un peso en  $c$ , dado que la distancia  $pa$  es menor a la distancia  $ac$ . Del mismo modo, un peso en  $r$  ejerce menos fuerza que uno en  $s$  [...]. Es obvio, entonces, que el movil descenderá en la línea  $ef$  con mayor fuerza que en la línea  $gh$ , y en  $gh$  con mayor fuerza que en  $nt$  (EN, 1, p. 298).

Es esta tradición, sugerida en Jordanus (y luego desarrollada en las *Quaestiones mechanicae* bajo la idea de *velocidad virtual*, la que sugiere la variación de la *tendencia al movimiento secundum situm*. Y es por su intermedio que Galileo puede comenzar a explotar la riqueza de la analogía con la balanza de brazos *desiguales* (un peso en  $p$  ejerce menos fuerza que un peso en  $c$ , dado que la distancia  $pa$  es menor a la distancia  $ac$ ), en

su aplicación para explicar la aceleración, a través del análisis de la tendencia al movimiento en planos de diversa inclinación.

También la regla de equivalencia de las *virtutes descendendi* de los cuerpos sobre diversos planos inclinados había sido elaborada por Jordanus.<sup>18</sup> A este respecto, Galluzzi observa que:

Este concepto, que Galileo en un cierto punto indicará con la expresión “momento de descenso”, tiene notable importancia, dado que parece abrir la puerta a la posibilidad de una derivación de la dinámica a partir de los propios principios de la estática (Galluzzi, 1979, p. 71).

Y en otro punto también agrega,

Fue probablemente justamente reeditando sobre esta página que Galileo debió advertir la urgencia impostergable de una reforma del propio léxico (1979, p. 195).

Creo que aquí hay una explicación que cumple con el requisito historiográfico señalado por Cohen en el inicio, es decir, explicar cómo hizo Galileo para *superar* el legado recibido. También explica porqué Galileo recurre a elementos de una tradición no considerada legítima por los propios miembros de la tradición de Urbino a la que él mismo pertenecía. Sin embargo, dos observaciones más deben hacerse al respecto. La primera es que Galileo no *cambia de tradición*, sino que recurre a ideas de una tradición diferente a la propia con el fin de superar tensiones internas a su propio pensamiento. Esto puede verse en la diferencia que mantiene con Tartaglia (1599-1557), quien también había recurrido a la tradición de Jordanus, pero sin vincularla a la concepción arquimedea de *peso* (*per unit volume*), sino manteniendo una idea *cualitativa* de la *gravedad*:

Un cuerpo se dice ser más grave que otro según la especie, cuando la sustancia material de aquel sea más pesada que la sustancia material del otro, como en el caso del hierro y el plomo, y otros similares (Tartaglia, 1544, Deffinitione XII *apud* Galluzzi, 1979, p. 72).

<sup>18</sup> “Si per diversarum obliquitatum vias duo pondera descendant, fueritque declinationum et ponderum una proportio eodem ordine sumpta, una erit utriusque virtus in descendendo” (Jordanus Nemorarius, *Liber de ratione ponderis*, Propositio x, *apud* Galluzzi, 1979, p. 71).

Por otro lado, debe notarse que este recurso es todavía insuficiente y permanecen tensiones conceptuales sin superar, fundamentalmente en la conceptualización del movimiento *ascendente* (es decir, la tensión entre una *virtus impressa – levitas* – y la *extrusión* por parte del medio más pesado). De todas maneras, estas tensiones ya son superadoras de su primer intento de aplicar los principios de Arquímedes para explicar los movimientos violentos. Así, puedo acordar con Drake al decir que:

Su *De motu* implicó un avance sobre la discusiones académicas contemporáneas sobre el movimiento por parte de los filósofos, como la de los libros publicados por sus anteriores profesores Girolamo Borro y Francesco Buonamico. Por el otro lado no fue un análisis suficientemente convincente para sí mismo como para publicarlo. Comprobaciones efectivas de las proporciones de las velocidades deducidas de los cuerpos en planos inclinados no las respaldaban (Drake 1978, p. 31).

Sin embargo, creo que también nos quedaríamos con una imagen disminuida de Galileo si *reducimos* sus preocupaciones a las *discrepancias empíricas*. Como bien observa Wisan al examinar los manuscritos galileanos posteriores a la redacción de *De motu* denominados *Memoranda*, Galileo oscila entre distintos intentos de distinguir entre el carácter violento del movimiento de un proyectil y el carácter de un movimiento causado por un *medio natural* con el fin de salvar la teoría aristotélica de la extrusión, mediante el concepto de *movimiento praeternatural*. La conclusión a la que arriba Wisan es que “nuestro joven revolucionario se resiste a abandonar el orden y la coherencia del cosmos aristotélico” (Wisan, 1981, p. 42).

## 12 CONSECUENCIAS COSMOLÓGICAS

El proyecto de Galileo era de carácter general y suponía “explicar todos los movimientos naturales” (EN, 1, p. 251), buscando causas “que no podemos encontrar en la experiencia”, y “su confirmación implicará el colapso del punto de vista aristotélico” (EN, 1, p. 263). Efectivamente, implicaba dejar de lado la proporcionalidad inversa de Aristóteles entre peso y tiempo de caída, y el carácter ilimitado de la velocidad en el vacío. En particular, en todo lo que su propuesta depende del modelo hidrostático, el factor tiempo desaparece en la consideración de la velocidad. Dado que los pesos específicos de los cuerpos no varían, el resultado de la diferencia entre pesos específicos da una velocidad *constante*. Tampoco cuenta el peso absoluto o *tamaño* dado que “los cuerpos del mismo material caerán todos con la misma velocidad sin importar su ta-

maño” (EN, 1, p. 264). Y, en el caso del vacío, el movimiento no será instantáneo sino que “cuando el medio pesa 0, el movimiento será igual al producido por su propio peso” (EN, 1, p. 281).

Se vio también que de la hidrostática arquimedea surge otra consecuencia cosmológica de importancia. Dado que los cuerpos livianos ubicados en un medio más pesado ascienden por *extrusión* y no en razón de una propiedad natural que les sea propia, no habrá movimientos ascendentes *naturales*, el único movimiento rectilíneo *natural* será el movimiento *descendente* hacia el centro de la Tierra.

Por otro lado, se avanza en el abandono de una cosmología y una mecánica *doble*, dado que *todos* los cuerpos son considerados como compuestos de una *misma materia*, por lo que pueden ser tratados con la *misma dinámica*. Y, como bien observó Clavelin, se puede volver a pensar en los cuerpos celestes como *graves*. En su opinión, esto enfrentó a Galileo con un nuevo problema:

¿cómo es posible que la Tierra sea el centro, siendo que el Sol claramente debe tener un peso muy superior al de la Tierra? (Clavelin, 1981, p. 235).

Paralelamente, siguiendo los mismos motivos, se puede aventurar la dirección de la resolución de este conflicto, al ser posible considerar a la Tierra como un cuerpo celeste, y por ende con movimiento circular. Por tal motivo, Drake afirma que

sin presentar ni disponer de pruebas, Galileo ya puede especular sobre el movimiento circular de la Tierra, en tanto que esfera, aunque al mismo tiempo la ubique en el centro del universo (Drake, 1987, p. 96).

### 13 ¿*De motu* COMO PARADIGMA?

Quisiera detenerme aquí un momento para discutir la afirmación de Westfall al analizar *De motu* y observar que

el peso funciona exactamente como la fuerza en la segunda ley de Newton. Así, su análisis establece el paradigma para el tratamiento de la fuerza en la mecánica clásica, el caso más simple, en el cual una fuerza constante produce una aceleración uniforme (Westfall, 1971, p. 7).

Estoy de acuerdo con Westfall en que la novedad de *De motu* no reside ni en la sugerencia de que el medio no *divide* sino que *resta* sobre la velocidad máxima de caída

del grave (ya hecha por Philoponus), ni en la aplicación de la hidrostática arquimedea a tal tradición. Pero el acuerdo no se mantiene acerca de cuál es la *novedad fundamental* de *De motu*.

Para Westfall, “el movimiento principal de *De motu* es el intento de *cuantificar* el concepto de fuerza impresa” (Westfall, 1971, p. 16; énfasis mio). En tal sentido, considera que “la balanza provee el fundamento último para la medición de la fuerza por el peso”, lo cual

[...] en el caso de los movimientos naturales, esto es, los movimientos de cuerpos pesados a través de medios que también son pesados, el peso del cuerpo se corresponde con un lado de la balanza y el peso de un volumen igual del medio con el otro (Westfall, 1971, p. 17).

Considerando los movimientos *naturales* como un caso, Westfall identifica el corazón mismo de *De motu* con el establecimiento de un principio derivado del análisis del movimiento *forzado* que se aplica, como caso particular, a los movimientos naturales. Sin embargo, si resumimos lo que llevamos dicho hasta aquí, puede decirse que:

- (a) Galileo explícitamente declara su intención de dar una *nueva explicación física* de todos los movimientos naturales (diferencias de las velocidades de caída en medios diferentes);
- (b) esta explicación se basa en la aplicación de los principios arquimedeanos en un marco cosmológico casi aristotélico;
- (c) para aprovechar la hidrostática arquimedea, reduce el tratamiento del problema general al de los cuerpos que se mueven en el agua;
- (d) enfrenta el problema de la aceleración como dificultad empírica;
- (e) recurre a la idea de *fuerza impresa (levitas)* para extender sus conclusiones a los movimientos violentos y de allí deriva su explicación de la aceleración como efecto accidental (no natural);
- (f) como consecuencia de las tensiones conceptuales que ello genera reescribe la primera parte dedicada a los movimientos naturales reemplazando *levitas* por *minus gravis*;
- (g) reconsidera el capítulo del movimiento de un cuerpo sobre planos de distintas inclinaciones en términos de la tradición *De ponderibus*, abriendo la posibilidad de una explicación dinámica a partir de los principios de la estática;
- (h) persisten tensiones que impiden ver la aceleración como movimiento *accidental*.

Si esto es así, y contrariamente a lo afirmado por Westfall, la intención primaria de *De motu* no reside en dar un nuevo fundamento para su explicación del movimiento de los proyectiles, sino en explicar los *naturales*. En realidad, Westfall está más preocupado por encontrar el origen de la segunda ley de la mecánica de Newton que en seguir la evolución de las ideas de Galileo.<sup>19</sup>

#### 14 *Le mecaniche*: CONSOLIDACIÓN DE LA NUEVA SÍNTESIS

En 1592, Galileo obtuvo la cátedra de matemática en la Universidad de Padua. Favaro indica el registro de dicha Universidad donde figura que el tema de sus lecciones durante el año escolar 1597-98 fueron justamente las *Quaestiones mechanicæ*<sup>20</sup> de inspiración aristotélica, y sugiere que *Le mecaniche* fue el texto del cual se sirvió Galileo para enseñar mecánica, si no dentro del ámbito público “al menos para sus lecciones privadas” (Favaro, 1932, p. 149).

El tratado está destinado a mostrar cuáles son las verdaderas “ventajas de la ciencia mecánica, y de sus instrumentos”, por el hecho de que al respecto “se encuentran engañados de modo universal los mecánicos” (EN, 2, p. 155).<sup>21</sup> Específicamente desea, mediante demostraciones ciertas, combatir este engaño

causado por la creencia de que tales instrumentos han podido y podrán siempre con una fuerza pequeña mover y alzar pesos grandísimos (p. 155).

Así, quienes quisieron de esta manera engañar con sus máquinas a la naturaleza, se vieron a su vez engañados por

<sup>19</sup> “Dado que la mecánica galileana traspasa el problema de la fuerza al ubicarlo en un nuevo contexto, la historia de la segunda ley del movimiento efectivamente comienza con él” (Westfall, 1971, p. 3); y “con la negativa de Galileo a aceptar que todo cuerpo en movimiento requiere la acción continua de un motor, el concepto de fuerza comienza una nueva carrera que culmina en la segunda ley de Newton” (1971, p. 4).

<sup>20</sup> Si bien el tratado pseudo aristotélico *Quaestiones mechanicæ* fue casi desconocido en la Edad Media, fue traducido en el siglo XVI a varias lenguas, tuvo gran circulación y fue discutido por varios autores, entre ellos, además de Galileo, Alessandro Piccolomini, Giovan Battista Benedetti, Francesco Maurolico, Francesco Buonamici, Niccolò Tartaglia, Bernardino Baldi, Henry de Monantheuil, Giuseppe Biancani, y Giovanni Guevara (cf. Helbing, 2001).

<sup>21</sup> Drake anota en este punto, en la correspondiente versión inglesa, la historia que narran los dos biógrafos vivientes de Galileo, según la cual el motivo de Galileo para mudarse a Padua habría sido “[...] en parte el resultado de haber ofendido a un ‘personaje importante’ de la Toscana (probablemente Giovanni de Medici) al dar una opinión desfavorable de algunos artificios mecánicos diseñados por tal persona y aprobado por otros que habían sido consultados. Si tal evento tuvo lugar, el incidente estaba fresco en la cabeza de Galileo cuando compuso el *Trattato delle mecaniche* durante sus primeros años en Padua (cf. Drake, 1978, p. 147).

la constitución misma de la naturaleza, cual es que ninguna resistencia puede ser superada por una fuerza que no sea más potente que ella (p. 155).<sup>22</sup>

Por supuesto, esto supone que no utilicemos más tiempo o disminuyamos la distancia; es decir como dice Galileo, “que mantengamos la velocidad” (p. 156).

Este es un resultado general en el que se encuentra de modo incipiente el principio de conservación del trabajo y que, según indica Drake, no fue alcanzado por Guidobaldo, a pesar de que

había dedicado cincuenta y cinco folios de su *Liber mechanicorum* al análisis de la balanza, y al hacerlo había atacado muchos problemas de interés no tratados por autores anteriores (Drake, 1978, p. 159, nota 16).

Es ésta la idea que a lo largo de todo el tratado se aplica a cada una de las máquinas simples. Así, por ejemplo, dirá luego del análisis de la palanca, que el eje y el torno no son sino “palancas perpetuas” (EN, 2, p. 167).

La introducción comienza señalando que son cuatro los elementos que están en juego:

el peso a transferir de un lugar a otro; la fuerza o potencia que debe moverlo; la distancia entre ambos términos del movimiento; y el tiempo en el cual la transformación debe realizarse (EN, 2, p. 156).

En la sección siguiente aclara que, como es necesario en toda ciencia demostrativa, va a definir los términos propios y las suposiciones fundamentales; y luego observa que, “dado que los instrumentos mecánicos sirven principalmente para el movimiento de las cosas graves, debemos definir primariamente qué es el peso (*gravità*)” (EN, 2, p. 159).<sup>23</sup> Inmediatamente lo define como

la propensión a moverse naturalmente hacia abajo, la cual, en los cuerpos sólidos, se encuentra causada por la *mayor o menor cantidad de materia*, de la cual se constituyen” (p. 159; énfasis mio).

<sup>22</sup> Cf. también p. 166, específicamente referido a la palanca.

<sup>23</sup> “*Gravità*” como un concepto que no se reduce al de “peso” ni es completamente medido por el peso (cf. Galilei, 1960b, p. 151, nota 4).

Aquí la *tendencia* o *propensión* del movimiento se introduce desde la propia *definición* de peso, como un modo de evitar los conflictos presentes en *De motu*. Otra definición es la de “momento”, definido como

la propensión al movimiento descendente, causada no tanto por el peso (*gravità*) del móvil, sino por la disposición que existe entre los diversos cuerpos graves; mediante tal momento se verá muchas veces que un cuerpo grave contrapesa otro de mayor peso: como en la balanza de brazos desiguales se ve que un pequeño contrapeso eleva uno grandísimo, no por exceso de peso, sino por el alejamiento del punto donde se encuentra sostenida la balanza; la cual, en conjunto con la *gravità* del peso menor, hace aumentar el momento y la propensión al descenso, con lo cual puede exceder el momento del grave mayor. Es por consiguiente, el momento de tal propensión (*impeto*) al descenso, compuesto de peso (*gravità*), posición y otro factor (*e di altro*),<sup>24</sup> del que puede ser tal propensión causada (EN, 2, p. 159).

Esta “propensión al movimiento descendente” es la contenida en las *Quaestiones mechanicae* bajo la idea de velocidad *virtual*. A continuación define “centro de gravedad” de todo grave como “aquel punto en torno al cual se encuentran las partes de iguales momentos” (p. 159).

Por otro lado, los supuestos cosmológicos siguen siendo aristotélicos:

Todo grave desciende siguiendo una línea recta entre su centro de gravedad y el centro universal de las cosas graves. Este supuesto es muy razonable, dado que debiendo tal centro ir al encuentro del centro común, es necesario que si no se ve impedido, lo haga siguiendo la línea más breve, es decir la recta (EN, 2, p. 160).

El segundo supuesto afirma que:

Todo cuerpo grave gravita en torno a su centro de gravedad al cual están referidos todo ímpeto, toda gravedad y en general todo momento (p. 160).

El último supuesto consiste en que:

El centro de gravedad de dos cuerpos igualmente graves se encuentra en el medio de aquella línea recta que une tales centros; o en verdad, dos pesos iguales, pesados en distancias iguales tienen un punto de equilibrio en el punto de encuentro de tales distancias iguales (p. 160).

<sup>24</sup> El otro factor que tiene Galileo en mente es la velocidad (cf. Galilei, 1960b, p. 151).

Con tales elementos, Galileo explica el principio fundamental para la mayor parte de los instrumentos mecánicos, demostrando cómo

pesos desiguales, que penden de distancias desiguales, están en equilibrio toda vez que tales distancias se encuentren en una proporción contraria a la de sus pesos (EN, 2, p. 161).

En realidad este principio ya había sido demostrado por Galileo al final de *La bilancetta*, pero mientras allí tenía el objetivo específico de determinar la proporción de diferentes metales en un compuesto, aquí lo generaliza como uno de los principios fundamentales de la mecánica.

Así, la idea de *gravitas secundum situm* – velocidad virtual – se consolida en el *Le mecaniche* al ser sintetizada como la *propensión* al descenso según la posición en la noción de momento de descenso. Esto tendrá un papel decisivo en las investigaciones hidrostáticas ulteriores. Aunque no es parte de este trabajo puede tenerse en cuenta cómo en el *Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua o che in quella si muovono* (1612) Galileo afirma que tratará el problema hidrostático de manera diferente a la de Arquímedes:

Con métodos y medios diferentes trataré de concluir lo mismo, reduciendo la causa de tales efectos a principios más intrínsecos e inmediatos, en los que se encuentra la causa de ciertos accidentes casi increíbles [...] que una pequeñísima cantidad de agua pueda con su leve peso sostener un cuerpo sólido, cientos y miles de veces más grave (EN, 4, p. 67).

La decisión de abandonar los principios estrictamente arquimedeanos se justifica finalmente en lo que Galluzzi ha denominado la paradoja hidrostática

Entre el primer boceto del *Discorso* y su redacción definitiva, Galileo ha descubierto que el volumen de agua desplazado por un cuerpo que se sumerge es siempre menor al volumen de la parte sumergida del sólido. Esto significó que el procedimiento de Arquímedes [...] no resultaba ya adecuado para explicar tal fenómeno (Galluzzi, 1979, p. 232).

Efectivamente, para enfrentar esta paradoja, Galileo utilizará el concepto de *momento de descenso*, sintetizado a partir de dos tradiciones diferentes entre 1585 y 1600, y fundamento de su ciencia posterior: el volumen de agua desplazado es *menor* que el del sólido, pero su desplazamiento es *mayor*, esto es, con una mayor velocidad.

## CONCLUSIÓN: DINÁMICA, EXPERIENCIA, MATEMATIZACIÓN E HISTORIOGRAFÍA

Clavelin se siente muy entusiasmado con esta generalización y afirma:

Matematizar, como lo muestra *Le mecaniche*, es sobre todo reemplazar los conceptos cualitativos por conceptos definibles cuantitativamente y trasladar a la física el orden deductivo de la geometría. Pero es también romper de modo inequívoco con la experiencia sensible, abandonar la complejidad y la contingencia de las situaciones concretas para los casos típicos, igualmente generales que posibles, analizables con la ayuda de un pequeño número de factores y susceptibles de aplicarse de modo inmediato, por simple particularización, a los fenómenos físicos; brevemente, matematizar es idealizar (Clavelin, 1968, p. 177).

Para Clavelin, la nota distintiva del proyecto de Galileo consiste en la construcción “a partir de variables juzgadas significativas de un modelo matemático” (1968, p. 97). En ello hace residir la característica revolucionaria del pensamiento de Galileo, respecto a los físicos del siglo xiv cuya preocupación se habría centrado en

evaluar el orden de magnitud de los efectos de una cualidad sometida a variación [por ejemplo, velocidad], por referencia a una intensidad uniforme (1968, p. 97).

Esta tesis es también la que lo lleva a aplaudir todo intento galileano de alcanzar una mayor generalidad en sus principios, y toda vez que Galileo presenta sus resultados de modo deductivo. En realidad, tal tesis de Clavelin sólo evidencia su adhesión a la interpretación de Koyré acerca de que Galileo debe renunciar a la física del ímpetus hasta que se haga posible una genuina matematización de la naturaleza, y que tal proceso de matematización fue la *esencia* de la revolución científica. En palabras de Cohen, esta tesis de Koyré consiste en ver en la matematización

el marco para el mundo abstracto e ideal de la caída en el vacío, de los planos perfectamente pulidos y libres de fricción que Galileo ha comenzado a considerar en *De motu*, y el cual constituirá su marca distintiva por el resto de su vida (Cohen, 1989, p. 21).

No hace falta adherir a esta tesis para advertir los méritos de la interpretación arquimedea cuantitativa de Galileo frente a, por ejemplo, la interpretación más cualitativa de Tartaglia, según lo notado más arriba. Pero ver en la matematización un

elemento que se opone a las características del mundo físico, e incluso también a las intuiciones físicas asociadas a la teoría de la fuerza impresa, por lo que ya vimos, traiciona también el pensamiento de Galileo.

En mi opinión, la interpretación que concibe la nueva ciencia galileana como el resultado de la aplicación de un *nuevo método*, consistente primordialmente en matematizar, surge más de tomar posición en un debate historiográfico sobre la naturaleza de la Revolución Científica (y por su intermedio de la ciencia en su conjunto), que sobre el carácter distintivo y *superior* que, por principio, la matemática agrega a todo conocimiento. Hemos visto cómo Galileo *amalgama elementos de tradiciones diferentes* en una *nueva síntesis* partiendo de la necesidad de una *explicación física* y no matemática. Así, en definitiva, puede verse que, mientras la obra de Galileo no sea más que el terreno para una contienda epistemológica, difícilmente se logre hacer justicia a su habilidad para encontrar explicaciones mensurables donde antes había dificultades empírico-conceptuales o, en otras palabras, a su talla como científico.

Si bien no están en discusión los esfuerzos de Galileo por sistematizar sus resultados de un modo deductivo, esto a mi juicio no conduce necesariamente a ver una ruptura con la experiencia sensible. Por el contrario, podemos encontrar la clave de esta relación en una afirmación que Galileo hará muchos años más tarde, en la Segunda Jornada del *Dialogo* mediante la analogía con la matemática utilizada por un mercader:

Sería realmente algo nuevo si los cálculos realizados en números abstractos no se correspondiesen luego con las mercancías y con las monedas de oro y plata concretas. ¿Sabes qué es lo que en realidad sucede Simplicio? Así como quien desea que sus cálculos se refieran al azúcar, la seda y la lana debe descontar las cajas, envoltorios y otros embalajes, de la misma manera el filósofo geómetra que desea reconocer, en lo concreto, los efectos demostrados en abstracto, debe descontar los impedimentos de la materia; quien lo sepa hacer encontrará que las cosas se corresponden perfectamente con los cálculos aritméticos. Los errores no residen ni en lo abstracto, ni en lo concreto, ni en la geometría, ni en la física, sino en quien calcula, que no sabe hacer las cuentas exactas (EN, 7, p. 234).

Quiero hacer notar que, si bien es necesario descontar los impedimentos materiales para lograr generalidad en los principios, y que esta misma circunstancia pueda explicar variaciones menores en las predicciones, no quiere decir, como afirma Clavelin, que esto supone “romper de modo inequívoco con la experiencia sensible”. Dicho brevemente, es necesario idealizar, pero no es el objetivo principal del proyecto galileano, si por ello se entiende romper con la referencia empírica. Por el contrario, hemos visto que las dificultades empíricas (aceleración, paradoja hidrostática) fueron

un acicate permanente en la articulación de la teoría, y fueron ellas las que condujeron a abandonar la adhesión estricta a la tradición arquimedea más *purista* de Urbino, y guiaron la nueva síntesis con elementos cosmológicos aristotélicos y elementos conceptuales propios de la tradición de Jordanus.

Mi dificultad con la defensa que en general Biagioli hace de la importancia de las explicaciones basadas en diferentes grupos sociales y los diferentes contextos socio-culturales de su producción (ver supra sec. 2) es la *generalidad* de tales categorías. En mi opinión tal generalidad dificulta ver una obra como síntesis de elementos provenientes de grupos y contextos diferentes. ¿Cómo explicar la síntesis arriba expuesta con categorías socio-culturales, y con tradiciones entendidas como clausuradas la una para la otra?

Este problema se agrava si, además, coincidimos con Rose en cuanto a que

sin el tratamiento dinámico de la estática contenida en la mecánica de Jordanus, no hubiera sido posible el surgimiento de ninguna verdadera ciencia de la mecánica o física matemática (Rose, 1975, p. 292).

Si esto es así, sólo mediante un análisis de las dimensiones técnicas de los textos matemáticos parece posible explicar cómo Galileo logró *transcender* el legado recibido, dando cumplimiento al imperativo de Cohen del inicio. ☞

Agradezco al evaluador de *Scientia Studia* por sus observaciones que han permitido mejorar la versión inicial de este artículo. Este artículo fue finalizado en el Departamento de Filosofía da Universidade de São Paulo, entre febrero e junio de 2005, gracias a una beca posdoctoral concedida por CNPq en el marco del Acuerdo CNPq/Conicet entre Brasil e Argentina.

*Fernando* TULA MOLINA

Profesor de la Universidad Nacional de Quilmes,

Investigador de CONICET, Argentina.

*ftulamolina@gmail.com*

ABSTRACT

I'll try to identify the basis of the new Galilean dynamics in few critical and creative turning points. This way I pretend to undertake the challenge posit by H. F. Cohen remarking that "the problem is not to explain the way in which Galileo became aware of Greek legacy, but to explain the way he managed to transcend this legacy". The main points here considered are: the idea of *natural places* of Aristotle's physics, the concept of *specific weight* of Archimedes' static, Avempace's concept of *virtus motiva* and Nemorarius' notion of *virtual velocity*. In basis of this analysis I'll propose a general argument on the limited scope of sociological explanations in history of science.

KEYWORDS • Scientific revolution. Galilean dynamics. Historiography of science. Galileo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARISTÓTELES. *Metafísica*. Buenos Aires: Sudamericana, 1978.
- BIAGIOLI, M. The social status of italian mathematicians, 1450-1600. *History of Science*, 27, 2, p. 41-95, 1989.
- BURKE, P. *The european Renaissance: centres and peripheries*. Oxford: Blackwell, 1988.
- CARUGO, A. Mathematics and theory of science. In: OLIVIERI, L. (Ed.). *Aristotelismo veneto e scienza moderna*. Padova: Antenore, 1983. p. 509-18.
- CLAGETT, M. *La scienza della meccanica nel Medioevo*. Milano: Feltrinelli, 1972.
- CLAVELIN, M. *La philosophie naturelle de Galilée: essai sur les origines et la formation de la mécanique classique*. Paris: Armand Colin, 1968.
- \_\_\_\_\_. Galilée et la mécanisation du système du monde. In: HINTIKKA, J. et al. (Ed.). *Theory change, ancient axiomatics, and Galileo's methodology*. Dordrecht: Reidel, 1981. p. 229-51.
- COHEN, H. F. *The scientific revolution: a historiographical inquiry*. Chicago: University of Chicago Press, 1994.
- COHEN, H. F. Galileo's ups and downs in the historiography of the scientific revolution. In: MAFFIOLI, C. S. & PALM, L. C. (Ed.). *Italian scientists in the Low Countries in the XVIIth and XVIIIth centuries*. Amsterdam: Rodopi, 1989. p. 9-30.
- DAMEROW, P. et al. *Exploring the limits of preclassical mechanics: a study of conceptual development in early modern science. Free fall and compounded motion in the work of Descartes, Galileo and Beeckman*. New York: Springer, 2004.
- DRABKIN, I. E. Appendix. In: GALILEI, G. *On motion and On mechanics*. Madison: The University of Wisconsin Press, 1960. p. 115-31.
- DRAKE, S. *Galileo at work: his scientific biography*. Chicago: University of Chicago Press, 1978.
- \_\_\_\_\_. Galileo's steps to full copernicanism and back. *Studies in History and Philosophy of Science*, 18, 1, 1987. p. 93-105.
- DUHEM, P. Logical examination of physical theory. *Synthese*, 83, p. 183-8, 1990.
- FAVARO, A. (Ed.). *Edizione nazionale delle opere di Galileo Galilei*. Firenze: Barbèra Editore, 1929-1939. 20 v. (EN)
- \_\_\_\_\_. Avvertimento a Theoremata circa centrum gravitatis solidorum. In: \_\_\_\_\_. (Ed.). *Edizione nazionale delle opere di Galileo Galilei*. Firenze: Barbèra Editore, 1929a. v. 1, p. 181-5.
- \_\_\_\_\_. Avvertimento a *La bilancetta*. In: \_\_\_\_\_. (Ed.). *Edizione nazionale delle opere di Galileo Galilei*. Firenze: Barbèra Editore, 1929b. v. 1, p. 211-4.
- \_\_\_\_\_. Avvertimento a *Le mecaniche*. In: \_\_\_\_\_. (Ed.). *Edizione nazionale delle opere di Galileo Galilei*. Firenze: Barbèra Editore, 1932. v. 2, p. 149-54.

- FISCHER, K. *Galileo Galilei*. Trad. de C. Gancho. Barcelona: Herder, 1986.
- FREDETTE, F. Galileo's *De motu antiquiora*. *Physis*, 14, 4, p. 321-48, 1972.
- GALILEI, G. Theoremata circa centrum gravitatis solidorum. In: FAVARO, A. (Ed.). *Edizione nazionale delle opere di Galileo Galilei*. Firenze: Barbèra Editore, 1929. v. 1, p. 187-208.
- \_\_\_\_\_. La bilancetta. In: FAVARO, A. (Ed.). *Edizione nazionale delle opere di Galileo Galilei*. Firenze: Barbèra Editore, 1929. v. 1, p. 215-20.
- \_\_\_\_\_. Tavola delle proporzioni delle gravità in specie de i metalli e delle gioie pesate in aria ed in acqua. In: FAVARO, A. (Ed.). *Edizione nazionale delle opere di Galileo Galilei*. Firenze: Barbèra Editore, 1929. v. 1, p. 221-8.
- \_\_\_\_\_. *De motu*. In: FAVARO, A. (Ed.). *Edizione nazionale delle opere di Galileo Galilei*. Firenze: Barbèra Editore, 1929. v. 1, p. 251-419.
- \_\_\_\_\_. Le mecaniche. In: FAVARO, A. (Ed.). *Edizione nazionale delle opere di Galileo Galilei*. Firenze: Barbèra Editore, 1932. v. 2, p. 155-90.
- \_\_\_\_\_. Discorso intorno alle cose che stanno in sull'acqua. In: FAVARO, A. (Ed.). *Edizione nazionale delle opere di Galileo Galilei*. Firenze: Barbèra Editore, 1933. v. 4, p. 63-140.
- \_\_\_\_\_. Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo. In: FAVARO, A. (Ed.). *Edizione nazionale delle opere di Galileo Galilei*. Firenze: Barbèra Editore, 1933. v. 6, p. 11-520.
- \_\_\_\_\_. *On motion and On mechanics*. Madison: The University of Wisconsin Press, 1960.
- \_\_\_\_\_. *On motion*. Trad., introd. y notas de I. E. Drabkin. In: \_\_\_\_\_. *On motion and On mechanics*. Madison: The University of Wisconsin Press, 1960a. p. 3-131.
- \_\_\_\_\_. *On mechanics*. Trad., introd. y notas de S. Drake. In: \_\_\_\_\_. *On motion and On mechanics*. Madison: The University of Wisconsin Press, 1960b. p. 135-86.
- GALLUZZI, P. *Momento: studi galileiani*. Roma: Edizioni dell'Ateneo/Bizzarri, 1979. (Lessico Intellettuale Europeo, v. 19).
- \_\_\_\_\_. (Ed.). *Novità celesti e crisi del sapere*. Firenze: Giunti Barbèra, 1981. (Atti del Convegno Internazionale di Studi Galileiani).
- GILBERT, N. W. *Renaissance concepts of method*. New York/London: Librairie Droz, 1960.
- HELBING, M. O. Galileo e le *Questione meccaniche* attribuite ad Aristotele. Alcune indicazioni. In: MONTESINOS, J. & SOLÍS, C. (Ed.). *Largo campo di filosofare*. Orotava: Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, 2001.
- HINTIKKA, J. et al. (Ed.). *Theory change, ancient axiomatics, and Galileo's methodology*. Dordrecht: Reidel, 1981.
- KOERTGE, N. Galileo and the problem of accidents. *Journal of the History of Ideas*, 38, p. 389-408, 1977.
- KOYRÉ, A. *Etudes galiléennes*. Paris: Hermann, 1986.
- LATTIS, J. *Between Copernicus and Galileo: Christopher Clavius and the collapse of ptolemaic cosmology*. Chicago/London: The University of Chicago Press, 1994.
- LENNOX, J. Aristotle, Galileo, and "mixed sciences". In: WALLACE, W. (Ed.). *Reinterpreting Galileo*. Washington: The Catholic University of America Press, 1986. p. 29-51.
- MAFFIOLI, C. S. & PALM, L.C. (Ed.). *Italian scientists in the Low Countries in the XVIIth and XVIIIth centuries*. Amsterdam: Rodopi, 1989.
- MACHAMER, P. (Ed.). *The Cambridge companion to Galileo*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- MERCER, C. The vitality and importance of early modern aristotelism. In: SORELL, T. (Ed.). *The rise of modern philosophy: the tension between the new and traditional philosophies from Machiavelli to Leibniz*. Oxford: Oxford University Press, 1993. p. 33-67.
- MOLINA, F. T. Microsociología y cambio teórico: en la corte de Mario Biagioli. *Llull: Revista de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas*, 25, p. 485-501, 2002.

- MONTESINOS, J. & SOLÍS, C. (Ed.). *Largo campo di filosofare*. Orotava: Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, 2001. (Proceedings Eurosymposium Galileo).
- NAMER, E. La signification de l'oeuvre de Galilée: l'hypothèse et sa vérification à la naissance de la physique mathématique. *Études Philosophiques*, 2, p.175-89, 1971.
- OLIVIERI, L. (Ed.). *Aristotelismo veneto e scienza moderna*. Padova: Antenore, 1983.
- ROSE, P. L. *The italian Renaissance of mathematics: studies on humanism and mathematicians from Petrarc to Galileo*. Genève: Droz, 1975.
- SORELL, T. (Ed.). *The rise of modern philosophy: the tension between the new and traditional philosophies from Machiavelli to Leibniz*. Oxford: Oxford University Press, 1993.
- WALLACE, W. A. (Ed.). *Reinterpreting Galileo*. Washington: The Catholic University of America Press, 1986. (Studies in Philosophy and the History of Philosophy, v. 15).
- WALLACE, W. A. *Galileo's logical treatises: a translation, with notes and commentary, of his appropriated latin questions on Aristotle's "Posterior analytics"*. Dordrecht: Kluwer, 1992.
- \_\_\_\_\_. Galileo's Pisan studies in science and philosophy. In: MACHAMER, P. (Ed.). *The Cambridge companion to Galileo*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. p. 27-52.
- WESTFALL, R. *Force in Newton's physics: the science of dynamics in the seventeenth century*. New York: Elsevier Publishing Company, 1971.
- WISAN, W. L. Galileo's "De systemate mundi" and the new mechanics. In: GALLUZZI, P. (Ed.). *Novità celesti e crisi del sapere*. Firenze: Giunti Barbèra, 1981. p. 41-9.