

GALILEO Y LA IDEALIZACION¹

Elia Nathan*

En este trabajo examinaremos la introducción de la idealización a la física que Galileo llevó a cabo. Hemos dividido el trabajo en dos secciones. En la primera estudiaremos qué es y cómo funciona una ley idealizacional; utilizaremos para ello las obras de madurez galileanas. En la segunda intentaremos mostrar muy brevemente la importancia revolucionaria que tuvo la introducción de la idealización a la ciencia.

En esta sección sostendremos que Galileo introduce, por primera vez, leyes idealizaciones a la física (en estática ya habían sido introducidas por Arquímedes, aunque el recurso a la idealización no fue adoptado por las restantes teorías científicas sino hasta que Galileo lo hizo en física). Desde entonces, el uso de leyes, conceptos, o teorías idealizacionales se ha vuelto común y corriente, tanto en la física (pueden encontrarse ejemplos de esto en [1], [10] y [15]**), como en las ciencias sociales (cfr. [1], p. 258; [13]). Nos centraremos aquí solo en el caso de leyes idealizacionales. Destaquemos que la tesis que queremos sostener no es que desde Galileo toda ley es idealizacional, o que toda ley teórica es idealizacional,² sino sólo queremos sostener que algunas leyes son idealizacionales, mientras que otras son no-idealizacionales o factuales.

* Instituto de Investigaciones Filosóficas, I N A M

** Véanse las referencias bibliográficas al final del artículo (N. del E.)

1 Para la elaboración de este artículo me resultaron de suma utilidad los comentarios de los profesores Cesáreo Morales, Mario Otero, Daniel Quesada y Margarita Valdés a una versión anterior a éste.

2 Un ejemplo de ley teórica no idealizacional es el segundo principio de Newton ($F=ma$). Un ejemplo de ley no-teórica (ie. de ley que no es un principio de la teoría) pero idealizacional es la ley galileana de caída. O sea, el problema de la idealización es distinto al de la teoriedad.



Galileo

Para conceptualizar las características y el funcionamiento de las leyes idealizacionales nos centraremos en la ley galileana de caída libre.

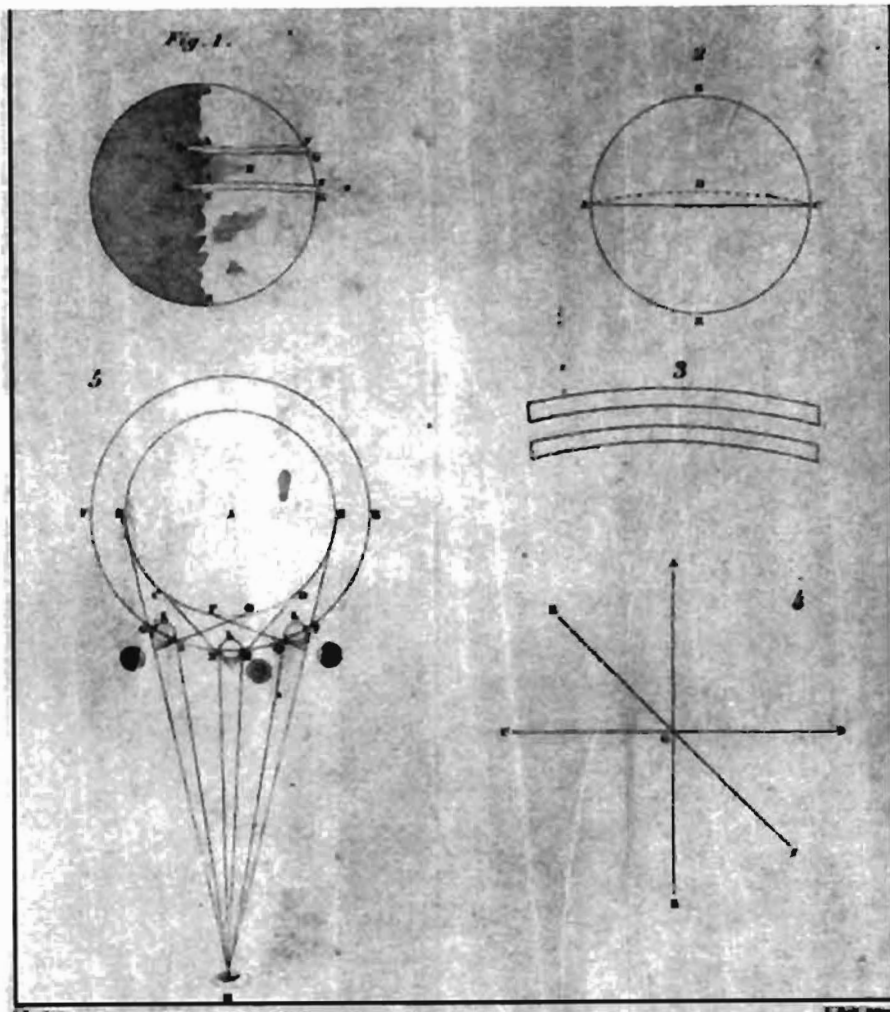
a. La ley de caída libre, como la enunció Galileo, consta de dos aseveraciones:

- 1) La caída de un grave en el vacío (ie. donde la resistencia del medio es nula) es uniformemente acelerada, es decir, la velocidad aumenta proporcionalmente al tiempo ([8], pp. 161, 163, 170; [7], p. 221). A partir de la tesis de que la velocidad es proporcional al tiempo, Galileo demuestra que la distancia es proporcional al cuadrado del tiempo, ie. que los espacios recorridos en cada unidad de tiempo guardan la misma proporción que los números impares comenzando por el uno ([8], pp. 174-176; [7], p. 222), y otras propiedades.
- 2) Todos los cuerpos, independientemente de su peso, dimensiones y naturaleza caen en el vacío con la misma aceleración ([8], p. 72), es decir, la aceleración de la caída libre es una constante universal.

Hablemos ahora sobre las leyes idealizacionales. Consideremos que una ley incluye no sólo una afirmación acerca de ciertas entidades o relaciones entre entidades (o sus propiedades) sino también las condiciones bajo las cuales se cumple dicha afirmación. Tomemos como ejemplo la ley galileana de caída libre:

Dadas cualesquiera x y y , si x y y se mueven en el vacío (ie. en un medio en que la fricción que actúa sobre x o sobre y es igual a cero, y la fuerza ascensional del medio que actúa en x o en y es igual a cero), entonces la velocidad media con la que x cae es igual a la velocidad media con la que y cae.

Usualmente se considera que esta ley es *idealizacional* porque contiene al menos una *condición ideal conocida*, es decir, una condición que no se satisface en situaciones reales (aunque algunas situaciones reales se pueden aproximar a las condiciones ideales). La condición ideal en esta ley es que los cuerpos se muevan en el vacío ([10], pp. 15-17; [1], p. 258). Para el caso de Galileo el carácter ideal de esta condición del vacío es un poco problemático, ya que Galileo argumentó correctamente que es posible



el movimiento en el vacío, y que además se pueden producir vacíos con cierto instrumento ([8], p. 67). Este problema puede ser resuelto de dos maneras: a) Galileo fue consciente de que en las situaciones reales, fuera del laboratorio, la condición del vacío no se cumple y, por ello, con respecto al mundo sensible, "normal", que es el que se pretende explicar, cabe considerarla como ideal. Así, por ejemplo, frente a la objeción del aristotélico Simplicio de que no se puede evitar la resistencia del medio y por ello la ley de caída libre (enunciada para cuerpos que caen en el vacío) no se cumple en la realidad, Galileo no responde sosteniendo que el vacío pueda darse en la realidad sensible, sino hablando sobre ciertos aspectos del método idealizacional ([8], p. 251, cfr. también p. 74). b) Otra solución consiste en considerar que la característica fundamental de las leyes idealizacionales no es que contengan condiciones ideales (aunque en muchas leyes idealizacionales es evidente que

las condiciones son ideales), sino el que algunas de las condiciones establecen que hay ciertas variables cuyo valor es cero, aun cuando se sabe que en las situaciones normales reales el valor de dichas variables no es cero. Así, la ley galileana de caída libre es idealizacional porque considera que el valor de la resistencia del medio es cero, es como si no existiera, aun cuando Galileo sabe, y lo dice repetidas veces, que en las situaciones reales normales (fuera del laboratorio) el valor de la resistencia no es cero; o en otros términos, la ley que describe la caída es idealizacional porque en ella no se toma en cuenta la resistencia que el medio ofrece a la caída de un grave, aun cuando se sabe que la resistencia sí influye en la caída normal de los cuerpos.³

3 Aún cuando prefiero esta segunda caracterización de ley idealizacional, usaré intercambiamente cualquiera de las dos.

No toda ley es idealizacional, también hay leyes factuales. Estas se caracterizan por el hecho de que las condiciones que enuncian son satisfactibles por situaciones reales. Un ejemplo de ley factual es la siguiente:

Si un cuerpo cae libremente en un medio resistente, entonces

$$v = c \frac{G \cdot G_m}{G}$$

(donde "v" es la velocidad media, "c" una constante de proporcionalidad, probablemente la constante de aceleración en el vacío, "G" es la gravedad o peso específico del cuerpo que cae y "G_m" la gravedad específica del medio)⁴.

Así, la diferencia básica entre las leyes factuales y las idealizacionales es la satisfactibilidad o no de sus condiciones por objetos reales, o en otros términos, el que las variables que influyen en el fenómeno descrito por la ley no tengan, o tengan un valor de cero.

b. Dada la caracterización de las leyes idealizacionales se nos presenta la siguiente perplejidad: ¿cómo se relacionan con, o se aplican a, la realidad leyes que sólo son vigentes para casos ideales? Claramente esta relación tiene que ser indirecta y compleja. Se logra mediante dos procedimientos: la factualización y la experimentación.

Veamos el uso de estos dos procedimientos en Galileo. Para ello es necesario antes examinar la concepción que Galileo tiene del problema de la idealización.

Los términos que Galileo usa son los de "abstracto" y "concreto". Con el término "abstracto" se refiere tanto al aspecto matemático o cuantitativo de una ley, como también al hecho de que una ley contenga condiciones ideales.

4 Esta fórmula o ley no aparece en Galileo. Presumiblemente Dijksterhuis ([5], p. 336) y Koyré ([9], p. 241, nota 102) la formularon a partir de la afirmación galileana de que la velocidad de caída de un cuerpo en un medio resistente está determinada por el exceso de gravedad específica que el cuerpo tiene con respecto a la gravedad específica del medio ([8], p. 76. Esta afirmación implica que $v = G \cdot G_m$; la razón por la cual $G \cdot G_m$ se debe dividir entre G es que si se hace esto, entonces para el caso del vacío $G_m = 0$ con lo que se obtiene $v = c \frac{G}{G} = c$, i.e. la afirmación galileana de que en el vacío todos los cuerpos caen con la misma velocidad media o aceleración.

Así, por ejemplo, consideró el problema de cómo las matemáticas, que son abstractas, pueden decirnos algo de lo concreto o real ([7], pp. 203-208). Por otra parte, sostuvo que las conclusiones que se prueban en lo abstracto acerca del movimiento uniformemente acelerado —vgr. que de la proporción $v \propto t$ se sigue matemáticamente que $dx \propto t^2$ — serán diferentes cuando se apliquen a los casos concretos —o sea, a la caída real de un objeto— dada la resistencia del medio ([8], p. 251). Esta aseveración hace referencia al hecho de que la ley de caída libre es abstracta en el sentido de ser idealizacional, i.e. de contener la condición ideal del vacío. Con "concreto" Galileo se refiere a lo real, i.e. a la realidad sensible aprehendida o descrita de acuerdo con una cierta posición "teórica" o "filosófica" que, en su caso, es el mecanicismo.

Considero que aunque se puede decir que las leyes matematizadas y las idealizacionales son abstractas, lo son en sentidos distintos. Veamos. Un concepto, ley o enunciado es abstracto si es que no toma en cuenta ciertos aspectos de la realidad.⁵ Así, la razón que Galileo pudo

5 Léase con detenimiento esta nota pues es muy importante.

El concepto de abstracción es un tanto confuso. Se dice que toda generalización es abstracta ya que sólo toma en cuenta propiedades o aspectos comunes y deja de lado los no comunes. Por otra parte, también se considera que las leyes (generales) idealizacionales son abstractas, aunque lo son en el sentido de dejar de lado (o más precisamente, considerar que su valor es cero) ciertos factores que se sabe, afectan el fenómeno a que se refieren dichas leyes. Ahora bien, conviene distinguir entre abstracción (como proceso o actividad) y abstracto (como característica). Considero que el procedimiento de abstracción puede dar lugar a leyes o generalizaciones empíricas, y a leyes no-empíricas o abstractas. Por ejemplo, usualmente se considera que se llega a la generalización empírica "todos los cuervos son negros", la cual no es abstracta porque describe directamente algo que está presente ya en el mundo sensible, por medio de un proceso de abstracción en que sólo se toman en cuenta propiedades comunes. En cambio, la ley idealizacional de caída libre es abstracta porque no describe directamente, o no representa, un evento del mundo sensible; para llegar a ella se requirió abstraer, o dejar de lado, un factor que, se sabe, influye en la caída de los cuerpos. Así pues, el que las leyes idealizacionales requieran de un proceso de abstracción no implica el que sean generalizaciones empíricas, en verdad, son leyes abstractas.



CONSTRUCCION DE UN TELESCOPIO GALILEIANO

haber tenido para considerar que las leyes físicas matematizadas son abstractas, es que éstas sólo toman en cuenta relaciones funcionales entre cantidades, dejando de lado toda consideración de cualquier otra característica de objeto u objetos que tienen las cantidades en cuestión —p.j. la ley de caída libre no toma en cuenta el tipo de cosa que es el objeto que cae, el lugar desde donde cae o en dónde cae, etc. Por otra parte, la ley de caída libre sería abstracta por no tomar en cuenta en la correlación funcional un factor, que se sabe, afecta dicha correlación, o sea, la resistencia del medio. Así, pues, aunque las leyes idealizacionales y las leyes matematizadas son abstractas, el carácter de la abstracción que incluyen es distinto. En el caso de las leyes matematizadas se supone que las variables que se dejan de lado no afectan al fenómeno considerado, mientras que en el caso de las leyes idealizacionales se sabe que las variables que se dejan de lado sí influyen en el fenómeno que describen dichas leyes.

Hemos tratado de distinguir entre matematización e idealización. Veamos qué relación guardan. Según Nowak, Galileo pudo introducir la matemática a la física porque su física contenía leyes idealizacionales ([13], p. 7). El que un requisito para la matematización sea la idealización, Nowak lo explica de la siguiente manera:

La aplicación de las matemáticas directamente a la descripción de los fenómenos como nos aparecen en nuestra experiencia es imposible —muchas influencias actúan allí. Algunas de estas influencias —con la ayuda de presupuestos idealizacionales (p. j. la eliminación de la resistencia del medio)— tienen que eliminarse, y sólo entonces se pueden establecer relaciones simples cuantitativas entre entidades físicas ([13], p. 7).

Considero que la tesis de Nowak de que la matematización de la física requiere necesariamente de presupuestos idealizacionales, i. e. que la matematización es dependiente de la idealización, no es correcta. Bástenos recordar la llamada ley peripatética del movimiento. Para esta ley $V = \frac{F}{R}$ (donde V = velocidad,

F = fuerza, y R = resistencia). Esta ley nunca fue considerada como idealizacional por sus sustentadores medievales, ni por Aristóteles,⁶ ya que ellos no establecieron que esta ley contiene condiciones ideales; tampoco los críticos de esta ley consideraron que tuviese vigencia para algún caso ideal.

Así como la matematización no requiere en principio de presupuestos idealizacionales (o condiciones ideales), claramente la idealización no requiere de la matematización —por ejemplo, la teoría marxista contiene conceptos idealizacionales (el concepto de modo de producción capitalista es uno de ellos) pero no está matematizada. Por ende, podemos decir que los procedimientos científicos de idealización y matematización son, en principio, diferentes.

Sin embargo, en el caso de Galileo ambos procedimientos se encuentran relacionados de manera bastante íntima. El tratamiento matemático de la caída libre y del movimiento de los proyectiles lo realizó Galileo bajo el presupuesto idealizacional de que estos movimientos ocurrían en el vacío, sin la intervención de un medio resistente. Esto se debe al hecho que señala Nowak: la matematización de una ley requiere de la eliminación de gran cantidad de influencias presentes en un fenómeno real, y una

manera de lograr esta eliminación es vía supuestos idealizacionales.

En síntesis, los procedimientos de matematización e idealización son, en principio, distintos. En Galileo están íntimamente relacionados —es gracias a asunciones idealizantes que logra darnos leyes matematizadas; esto lo lleva a confundir o identificar estos dos procedimientos, y considerar que ambos no son más que casos de abstracción (en el mismo sentido). A pesar de esta confusión, su respuesta al problema de la aplicabilidad de los enunciados abstractos a los casos concretos es interesante y correcta, por lo cual la examinaremos.

De acuerdo con Galileo hay dos maneras en que los enunciados abstractos se relacionan con los casos concretos. La primera es por medio de un proceso de factualización (cfr. [10], pp. 23-25), o manipulación teórica, que nos permite



Newton

aplicar los enunciados abstractos a los casos concretos (i. e. a las situaciones reales normales). La segunda es por medio de la experimentación, la cual nos permite aplicar los enunciados abstractos directamente (i. e. sin un proceso de manipulación teórica) a casos concretos (i. e. a situaciones reales, artificiales o de laboratorio); y esto posibilitaría alguna verificación del enunciado abstracto. Examinaremos cada uno de estos procedimientos.

En los *Dos sistemas del mundo*, Simplicio le objeta a Salviati la introducción de las matemáticas a la física sosteniendo que, dada la imperfección de la materia, las conclusiones a las que se llega en lo abstracto no se pueden aplicar a lo

concreto —así, por ejemplo, una línea tangente a la superficie de la Tierra de hecho no la toca en un sólo punto como se afirma en la geometría. A esto responde Salviati-Galileo que no es el caso de que lo concreto sea distinto de lo abstracto ya que, para retomar el ejemplo, una tangente no toca a la esfera terrestre en un sólo punto porque dicha esfera no es perfecta. Y continúa:

Pero te digo que aun en lo abstracto una esfera inmaterial, que no es una esfera perfecta, puede tocar un plano inmaterial, que no es perfectamente aplanado, no en un punto, sino en una parte de su superficie, de tal forma que lo que sucede en lo concreto hasta este punto sucede también de la misma manera en lo abstracto. (...) Así como el computista que desea que sus cálculos versen sobre el azúcar, la seda y la lana, debe descontar las cajas, fardos, y otros envoltorios, así también el científico matemático (filósofo geométrico) cuando quiere reconocer en lo concreto los efectos que ha probado en lo abstracto debe restar los impedimentos materiales, y si es capaz de hacer esto, te aseguro que las cosas no estarán menos en acuerdo que los cálculos aritméticos. ([7], p. 207; cfr. también [8], p. 170).

La idea de Galileo es que no hay una diferencia tajante entre matemáticas, i. e. lo abstracto, y el mundo real, i. e. lo concreto;⁷ éstas se adecúan perfectamente si se toman en cuenta los factores que las matemáticas han abstraído, o viceversa, si se dejan de lado los factores que las matemáticas abstrayeron. Esta tesis, así enunciada, es interesante pero demasiado general como para ayudarnos en casos particulares.

En *Dos nuevas ciencias*, Galileo especifica más cómo se relacionan los enunciados abstractos —abstractos por ser idealizaciones— con situaciones concretas: por medio de la reintroducción de los factores abstraídos. Veamos:

Concedo el que estas conclusiones probadas en lo abstracto serán dife-

7 Es precisamente porque lo abstracto se obtiene a partir de lo concreto (p. j. el círculo ideal que estudia la geometría no es más que un círculo concreto perfeccionado, o bien, las condiciones ideales no son más que condiciones reales que se les lleva a un límite y se les da valor de 0 por lo que, en principio, es posible aplicar lo abstracto a lo concreto.

6 Aristóteles nunca enunció esta ley en la forma matemática de correlación funcional que damos aquí. Para Aristóteles era un enunciado cualitativo de proporcionalidad, y por ello un tanto vago ([9], p. 217).

rentes cuando se apliquen a lo concreto, y serán falaces en esta medida, que ni el movimiento horizontal será uniforme, ni la aceleración natural se dará en la proporción asumida, ni la trayectoria de un proyectil será una parábola, etc. (. . .) Cuando deseamos aplicar nuestras conclusiones probadas a distancias que, aunque finitas, son muy grandes, es necesario que *infirmos, a partir de la verdad demostrada, qué corrección debe hacerse* por el hecho de que nuestra distancia de del centro de la Tierra no es realmente infinita [condición ideal del enunciado abstracto] (. . .) y una vez descubiertos y demostrados los teoremas [sobre caída libre, movimiento de un proyectil, etc.] para el caso de no resistencia, usarlos y aplicarlos con aquellas limitaciones que la *experiencia* nos enseñara. ([8], pp. 251-253; subrayado mío).

Así, Galileo sostiene que para aplicar leyes idealizaciones a situaciones reales hay que corregirlas, es decir, hay que sustituir las condiciones ideales por condiciones reales o fácticas (proceso de factualización). Esta corrección se da en base a principios teóricos o a principios que nos enseña la experiencia.

La ley de caída libre — todos los cuerpos caen con la misma aceleración en el vacío — se corrige introduciendo la resistencia del medio. Aunque Galileo no es totalmente preciso acerca del modo como se hace esta corrección, hace anotaciones bastante específicas.

Nuestro autor afirma que la *experiencia* nos enseña que la resistencia del aire se presenta de dos maneras: por una parte, ofrece mayor resistencia a los cuerpos menos densos que a los más densos, y por otra parte, ofrece mayor resistencia a un cuerpo que se mueve más rápido que al mismo cuerpo si se mueve más lento ([8], p. 253). Este principio experiencial, si bien nos ayuda a comprender cualitativamente por qué en el aire los cuerpos no caen con la misma aceleración, no nos ayuda a determinar cuantitativamente (ie. numéricamente) cuál es su velocidad.

En otra sección de *Dos nuevas ciencias*, Galileo apela a un principio teórico hidrostático para calcular las velocidades de los cuerpos que caen en un medio resistente, ie. para hacer la corrección necesaria. Dicho principio reza así: “el medio disminuye el peso de cualquier sustancia inmersa en él en una cantidad

igual al peso medio desplazado; de tal forma que el aire en el aire pierde todo su peso” ([8], p. 81). Basándose en este principio Galileo afirma que la velocidad real de un cuerpo que cae en algún medio resistente se calcula “Observando qué tanto el peso del medio sustrae [*deducts*] del peso del cuerpo que se mueve” ([8], p. 75).⁸ En otros términos, la fórmula para calcular la velocidad media de un cuerpo que cae en un medio resistente sería la que mencionamos anteriormente:

$$c = \frac{G \cdot G_m}{G}$$

Veamos ahora la segunda forma en que los enunciados abstractos (ie. idealizaciones) se relacionan con el mundo concreto o real, a saber, la experimentación. Tomemos como ejemplo la ley de que los cuerpos caen con movimiento

8 Lo que Galileo literalmente dice es que este método para calcular las velocidades reales se sigue del principio de que todos los cuerpos caen con la misma velocidad en el vacío ([8], p. 75). Esta derivación no es muy clara, principalmente porque Galileo no explica como interviene el peso de un cuerpo que cae en el vacío, y por ello resulta un tanto extraña la introducción del peso en el cálculo de velocidades reales. De acuerdo con algunos comentaristas contemporáneos, el peso o gravedad específicos de un cuerpo sí interviene en (y más específicamente, es la causa de) su caída en el vacío; y la razón por la cual a pesar de que los cuerpos de distinto material, o sea, de distinto peso específico, caen a la misma velocidad es que las diferencias de peso (que está en función de la cantidad de materia o masa) se encuentran contrabalanceadas por diferencias iguales de masa (ie. resistencia interna a la aceleración) ([4], p. 140; [9], p. 229). Estos autores reconocen que Galileo no tenía el concepto de masa; sin embargo hay al menos un pasaje en que Galileo parece vislumbrar este concepto de masa o resistencia a la aceleración ([7], pp. 213-215).

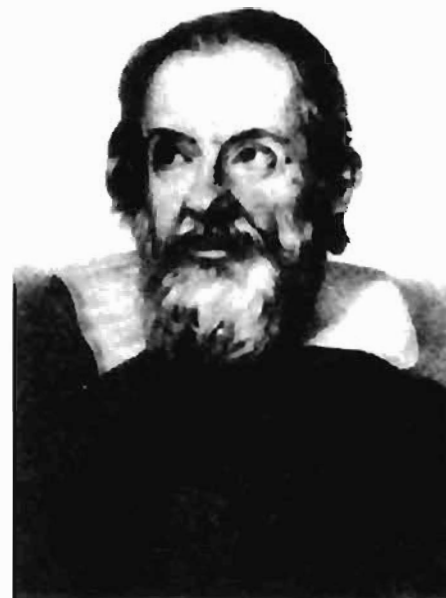
En general, las tesis de Galileo acerca de la influencia del medio resistente no son muy claras. A veces parece confundir la resistencia que el medio presenta a su penetrado por un cuerpo que cae (acción mecánica) y el empuje hacia arriba que el medio ejerce sobre el cuerpo que cae (principio hidrostático). Así, por ejemplo, Galileo sostiene que “el hecho de que cualquier medio fluido disminuye el peso de una masa sumergida en él, se debe, Simplicio, a la resistencia que este medio presenta a ser abierto, empujado de lado y finalmente levantado”. ([8], p. 81). Por otra parte, también habla de la fricción que se produce al moverse por un medio, pero su discusión es bastante inconclusa ([8], pp. 88-90).

uniformemente acelerado en el vacío. A partir del principio de que en dicho tipo de movimiento la velocidad es proporcional al tiempo, Galileo deriva el teorema de que en el movimiento uniformemente acelerado la distancia recorrida es proporcional al cuadrado del tiempo. Después confronta este teorema con la experiencia sensible, y dado que encuentra que están en acuerdo concluye que el principio $V \propto t$ es verdadero y por tanto, que la caída libre es un caso de movimiento uniformemente acelerado (método hoy día llamado hipotético-deductivo) ([8], p. 160).

La manera como se confronta el teorema $d \propto t^2$ con la experiencia sensible es a través de la experimentación.

El experimento que Galileo dio o sugirió es el de trabajar con planos inclinados por los cuales ruedan pelotas. Escogió trabajar con pelotas que ruedan por planos inclinados en vez de objetos que caen libremente porque en el primer caso la caída es más lenta, y dado que no tenía relojes muy finos, había mayor posibilidad de determinar con precisión el tiempo de caída ([8], p. 84; [7], p. 28). La situación experimental es la siguiente:

Un pedazo de moldura de madera, de unos 12 codos de largo, medio codo de ancho y tres dedos de grosor, se tomó; en su orilla se cortó un canal de un poco más de un dedo de am-



plitud; una vez hecho este canal muy derecho, liso y pulido, lo forramos con pergamino, también tan liso y pulido como fue posible, y rodamos en él una bola de bronce muy dura, lisa y redonda. Colocamos esta tabla en una posición inclinada, elevando un extremo uno o dos codos arriba del otro, y rodamos la pelota, como decía, por el canal, midiendo, de la manera que lo describimos abajo, el tiempo requerido para el descenso. Repetimos este experimento más de una vez con el fin de medir el tiempo con una precisión tal que la diferencia entre dos observaciones nunca excediese una décima de un latido del pulso. (. . .) en dichos experimentos, repetidos unas cien veces, siempre encontramos que los espacios recorridos eran unos a otros como los cuadrados de los tiempos, y esto fue verdad para todas las inclinaciones del plano. ([8], pp. 178-179).

Destaquemos los puntos centrales de este experimento.

1) Llama la atención el énfasis que Galileo hace en el hecho de que el canal es muy derecho, liso y pulido, y la pelota es muy redonda, pulida y lisa. En los *Dos sistemas del mundo* también usa el experimento (imaginario) del plano inclinado para probar el principio de inercia, y dice lo siguiente: "Recuerda que

dije una bola perfectamente redonda y una superficie altamente pulida, con el fin de eliminar todos los impedimentos accidentales y externos. Igualmente, quiero que retires cualquier impedimento que el aire cause por su resistencia a ser separado" ([7], p. 146, subrayado mío; cfr. [8], p. 253). Recordemos que para Galileo la ley de caída libre ($V \propto t$) es idealizacional por cumplirse bajo la condición ideal del vacío ([8], p. 170), al igual que el principio de inercia. Por tanto, esta ley, o sus consecuencias ($d \propto t^2$) no se pueden confrontar directamente con la experiencia sensible, sino que esta experiencia debe darse bajo condiciones (ie. reales) que sean lo más similar posible a las condiciones ideales. Como la condición ideal es que no haya resistencia del medio, la condición real en que se da la caída de bolas por planos inclinados tiene características tales que reducen al máximo posible la resistencia del aire. Este, me parece, es un punto fundamental. La experimentación es una situación en que las condiciones en que ocurre un fenómeno están controladas. Y una razón por la cual puede requerirse el control de las condiciones es la necesidad de adecuar los fenómenos a la teoría, y más precisamente, de aproximar las condiciones reales del fenómeno a las condiciones ideales de la ley. A partir de

estas consideraciones podemos concluir que una razón fundamental por la cual se puede recurrir a la *experimentación*, a la creación de situaciones artificiales, y no a la mera experiencia sensible, es la necesidad de adecuar o poner en relación leyes *abstractas* (ie. idealizaciones) con fenómenos *concretos*.⁹

El que el experimento tiene la función de conectar leyes abstractas con fenómenos concretos ha sido notado por algunos historiadores de la ciencia. I.B. Cohen sostiene que "Galileo fue el primero en poner a prueba experimental las leyes escolásticas del movimiento [en particular la ley o definición de movimiento uniformemente acelerado], probando que se podían aplicar al mundo real de la experiencia. (. . .) nadie más en ese intervalo de trescientos años había tenido la intuición de ver cómo se relacionaban dichas abstracciones con el mundo de la naturaleza". ([3], p. 112).

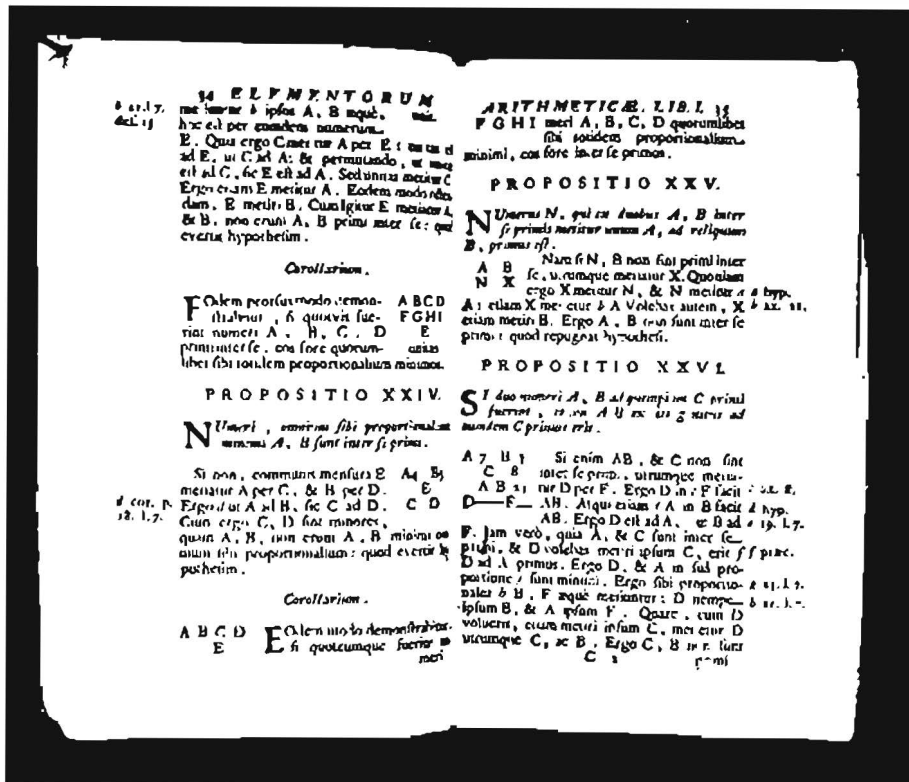
2) Galileo enfatiza que repitió muchas veces el experimento con el fin de obtener resultados precisos o exactos. El que se exija que los resultados sean precisos se debe al hecho de que la ley que se trata de relacionar con el mundo concreto es abstracta, o sea, está matematizada, por lo que se trata de relacionar números que se obtienen teóricamente con números que se obtienen experimentalmente.

3) Una característica notoria de la experimentación que se realiza en relación con teorías matematizadas es el uso que hace de instrumentos que permiten la generación de situaciones artificiales o que permiten mediciones cada vez más precisas.

Para concluir, la manera en que las leyes abstractas se ponen en relación con, o se aplican a, el mundo concreto es a través de dos procedimientos: 1) un procedimiento de manipulación teórica en que las condiciones ideales se sustituyen por condiciones reales; y/o 2) un procedimiento de manipulación experimental que busca aproximar las condiciones reales a las condiciones ideales.

c. Ahora bien, si la aplicación de las leyes idealizacionales generalmente requiere de la factualización, ¿por qué

9 Es posible una prueba experimental de las leyes idealizacionales porque éstas se aproximan más o menos a algunos datos experienciales; más concretamente, esta aproximación se da cuando en las situaciones reales el valor de las variables que se han idealizado es cercano a 0.



la teoría contiene leyes idealizaciones, y no dichas leyes factualizadas (y por lo cual su aplicación a la realidad sería más inmediata)? La respuesta a esta pregunta es compleja. Parte de esta respuesta, como veremos, también nos informa qué función teórica cumplen las leyes idealizaciones.

A partir del ejemplo de factualización de la ley de caída libre resulta claro que la sustitución de condiciones ideales por condiciones reales, o en otros términos, la sustitución de variables cuyo valor es cero por variables con valores numéricos reales, altera la relación funcional que se enuncia en el consecuente de la ley. Ahora bien, no siempre es posible o conveniente la sustitución de condiciones ideales por reales por dos razones. a) Es posible que no se logre descubrir una relación funcional tal que incluya las variables con valores reales. Esto le sucedió a Galileo: "Con respecto a la perturbación que surge de la resistencia del medio, ésta es más notoria, y dadas sus múltiples formas, no está sujeta a leyes físicas ni a una descripción exacta" ([8], p. 252). b) Es posible que la ley factualizada resulte muy complicada, por lo cual puede ser conveniente conservar en la teoría una ley idealizacional simple. Así pues, es en parte por razones pragmáticas que una teoría física contiene leyes idealizaciones.

En segundo lugar, el uso de leyes idealizaciones (especialmente cuando éstas no se pueden sustituir por leyes factualizadas) cumple una función teórico-heurística ya que permite organizar, aunque sea de manera burda, los datos empíricos con que se cuenta. Esta organización de datos puede permitir ya sea el refinamiento futuro de la teoría o el refinamiento de los instrumentos o de las técnicas manipulativas que intervienen en la situación experimental ([2], p. 55; [11], p. 194). Recordamos que la aplicación de leyes idealizaciones a la realidad puede darse por un proceso de manipulación teórica o experimental. El refinamiento futuro de la teoría se dará en la medida en que se especifiquen de manera más precisa cómo se pueden sustituir las condiciones ideales por condiciones reales, con lo cual se logrará una mayor aproximación de la ley a las situaciones reales. Por otra parte, las leyes idealizaciones cuantificadas permiten el mejoramiento de los instrumentos o las técnicas manipulativas de las situa-

ciones experimentales dado que actúan como criterio para juzgar la confiabilidad de éstos —por ejemplo, se puede juzgar que *x* instrumento productor de vacío es mejor que otro, porque en el vacío que produce el primero la velocidad media que tienen dos cuerpos que caen es la misma, mientras que la velocidad de estos cuerpos al caer en el vacío producido por el segundo instrumento no es la misma.

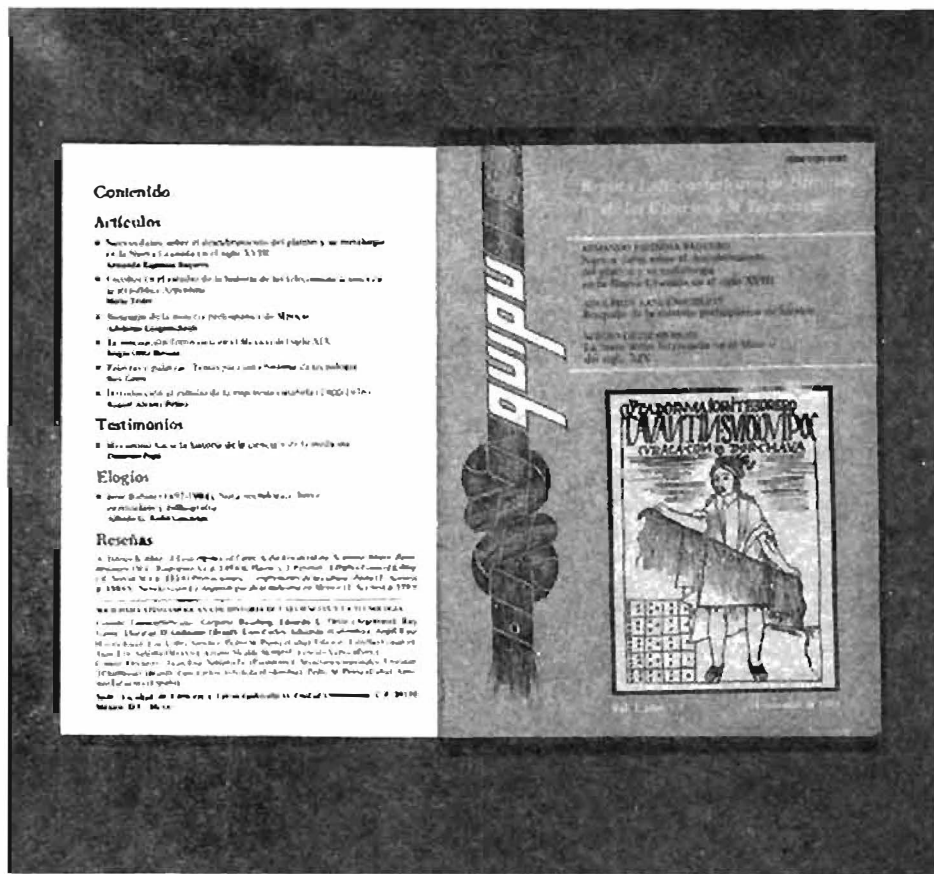
En tercer lugar, es conveniente que una teoría contenga leyes idealizaciones porque éstas, dada su mayor simplicidad (debida al uso de pocas variables), aclaran el campo teórico, y nos permiten una mejor comprensión intelectual de la realidad.

En términos galileanos, el uso de leyes idealizaciones aclararía el campo conceptual porque en dichas leyes se distingue entre factores esenciales o primarios —como el peso o gravedad para la caída— y factores accidentales o secundarios (aunque siempre presentes) —como la resistencia del medio (cfr. [10], p. 26; en Galileo, [8], p. 74).¹⁰

Algunos autores consideran que hay una relación estrecha entre leyes idealizaciones y fundamentos teóricos. Por ejemplo: "gracias a esas situaciones idea-

lizadas, Galileo y Newton realizaron su gran contribución a la mecánica. De igual modo debemos estudiar con gran interés los movimientos simples e ideales para obtener una comprensión real de los fundamentos de la dinámica" ([6], p. 342). Considero que el que Galileo haya enunciado la ley de caída libre bajo la condición ideal de no-resistencia del medio contribuyó a fundamentar la mecánica clásica en la medida en que en dicha ley se establece el verdadero papel que juega

10 La distinción entre factores primarios y secundarios, o entre factores que se toman en cuenta en la ley y factores que no se toman en cuenta (i.e. se considera que su valor es cero), se hace en términos de razones empíricas y razones no-empíricas, o teóricas, o sólo en términos de éstas últimas. Como sugiere la frase de Galileo, "el medio resistente es un impedimento accidental y externo" ([7], p. 146), una de las razones por la cual él deja de lado el medio en la ley de caída es la idea filosófica (aristotélica) de que la caída es un movimiento natural y por ello causada por la propia naturaleza del cuerpo que cae, o sea, por su peso, mientras que la influencia del medio es externa, por ello accidental, y, por tanto, secundaria. En otros términos, el proceso de abstracción requiere de algunas razones que no sean empíricas.



la resistencia del medio en el movimiento de los cuerpos. Lo que esta ley implica es que la resistencia del medio no es una condición necesaria para que ocurra el movimiento. Y esta afirmación fue fundamental para el surgimiento de una nueva mecánica, una mecánica no-arisotélica.¹¹ Notemos que aquí sólo sostenemos que algunos principios o fundamentos teóricos son idealizacionales. En verdad, no todo principio es idealizacional (vgr., el segundo principio newtoniano, $F=ma$, no es idealizacional porque no se enuncia bajo condiciones ideales), ni toda ley idealizacional es un principio (vgr. la ley de Boyle-Mariotte).

Así pues, las leyes idealizacionales cumplen una función teórica básica y que aclaran el campo teórico al distinguir entre factores esenciales o primarios y factores accidentales. Además, algunas de ellas, precisamente por llevar a cabo esta distinción, pueden servir de fundamentos o principios de una teoría.

En cuarto lugar, podemos destacar que las teorías científicas tienen necesidades o requisitos propiamente teóricos. Uno de éstos es el de la sistematización, o en el caso de las teorías cuantificadas, el de la deducibilidad. Las leyes idealizacionales pueden ser teóricamente aceptables porque son deducibles de otras leyes.

Galileo consideró que su ley de caída libre (la caída es uniformemente acelerada) era teóricamente aceptable, aunque

11 Para la mecánica aristotélica el medio es necesario para la ocurrencia del movimiento por dos razones: (a) El medio contribuye a mantener el movimiento cuando el motor externo que origina el movimiento no acompaña al objeto movido (y dado el principio de que todo movimiento debe estar causado por un motor que tanto origina como lo mantiene) —p. en el caso del movimiento de un proyectil. (b) El medio actúa como resistencia necesaria ya que $V = \frac{F}{R}$ por lo que si $R = 0$, entonces

$V = \infty$, lo cual, dice Aristóteles, es absurdo. Frente a esto Galileo afirma que 1) (a) y (b) son contradictorias, ya que el medio no puede a la vez conferir el movimiento e impedirlo; ii) la experiencia contradice la tesis de que el medio confiere movimiento ([7], pp. 151-153); iii) la experiencia contradice el que la velocidad sea directamente proporcional a la fuerza o peso, y el que sea inversamente proporcional a la resistencia o densidad del medio, y iv) si se rechaza la ley peripatética del movimiento, como debe hacerse por las razones anteriores, entonces es posible (lógica o teóricamente, por lo menos) el movimiento en el vacío ([8], pp. 61-67).

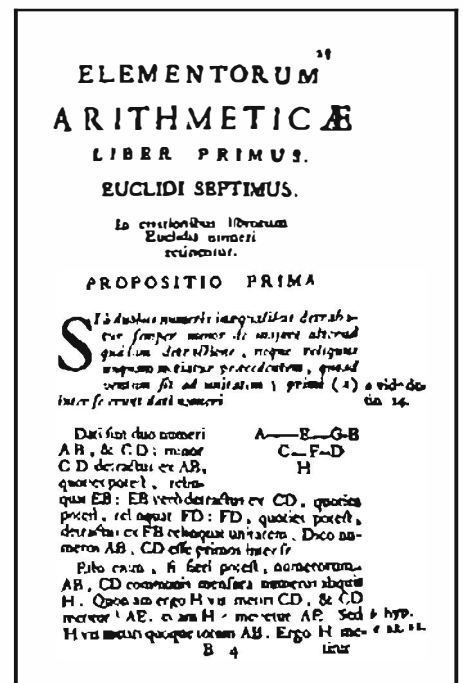
fuese idealizacional porque podía ser aprobada teóricamente (ie. era deducible matemáticamente de ciertas asunciones que eran aceptables racionalmente, en particular, de la asunción de que la velocidad es proporcional al tiempo) ([8], pp. 161-176). En otros términos, Galileo no sintió la necesidad de buscar otra ley de caída libre que fuese factual porque su ley idealizacional cumplía con los dos requisitos básicos de aceptabilidad de una ley: a) podía demostrarse teóricamente y b) a través de la experimentación (y/o de un proceso de factualización) se adecuaba con los datos empíricos.

En este punto hemos tratado de abogar por la idea de que las teorías científicas son relativamente independientes de su adecuación con el sector de realidad que buscan conocer, o en otros términos, los valores que rigen la aceptabilidad a la realidad, sino también otros que son netamente teóricos. Para Galileo, por ejemplo, estos valores son los de demostrabilidad matemática y de simplicidad ([8], p. 161). Además, él consideró que estos valores son tan básicos que, aun cuando no pudo especificar con detalle el proceso de factualización que permitiría aplicar con una aproximación aceptable su ley de caída libre a la caída de objetos reales, sostuvo que su ley era aceptable porque satisfacía los valores netamente teóricos de demostrabilidad matemática y de simplicidad.

Con respecto a la evidencia que se tiene para las leyes idealizacionales podemos decir lo siguiente.

Hemos visto ya que un tipo de evidencia con que cuentan estas leyes es que son demostrables teóricamente.

En cuanto a la evidencia empírica, ésta puede ser al menos de dos clases. 1) En muchos casos la evidencia empírica puede ser directa, ie. es posible aplicar a la realidad —usualmente vía la experimentación— una ley idealizacional. Esto sucede cuando el valor real o concreto de las variables es pequeño (o sea, cercano a cero), por lo cual el resultado que se obtiene a partir de la ley idealizacional se aproxima bastante al resultado experimental (o experiencial). En este caso se encuentra, por ejemplo, la ley de caída libre (caída uniformemente acelerada) ([10], p. 28). Conviene destacar aquí que para algunos autores contemporáneos, una característica fundamental de las leyes idealizacionales es que éstas son aproximadas por algunos fenómenos o enti-



dades concretas ([1], p. 266; Galileo a veces parece tener esta idea, cfr. [8], p. 253 y 256). 2) En otros casos, la evidencia empírica es algo más indirecta. El procedimiento consiste en considerar que la ley idealizacional queda probada en la medida en que los valores reales que se obtienen experimentalmente, al ser llevados a un límite o valor extremo (usualmente cero) dan el resultado que la ley idealizacional predice ([1], p. 269 y [10], p. 23). Por ejemplo, Galileo prueba que en el vacío (condición ideal) todos los cuerpos caen a la misma velocidad argumentando que en el caso de medios muy tenues y poco resistentes (condición real) los cuerpos caen casi a la misma velocidad, por lo que si se lleva la condición real (ie. el medio poco resistente) a un valor extremo (ie. a una resistencia nula), los cuerpos caerán con la misma velocidad ([8], pp. 71-72). Este tipo de procedimiento está justificado por el hecho de que las condiciones ideales de las leyes idealizacionales, no son más que idealizaciones de las condiciones reales (ie. valores reales llevados a un límite) ([10], p. 23).

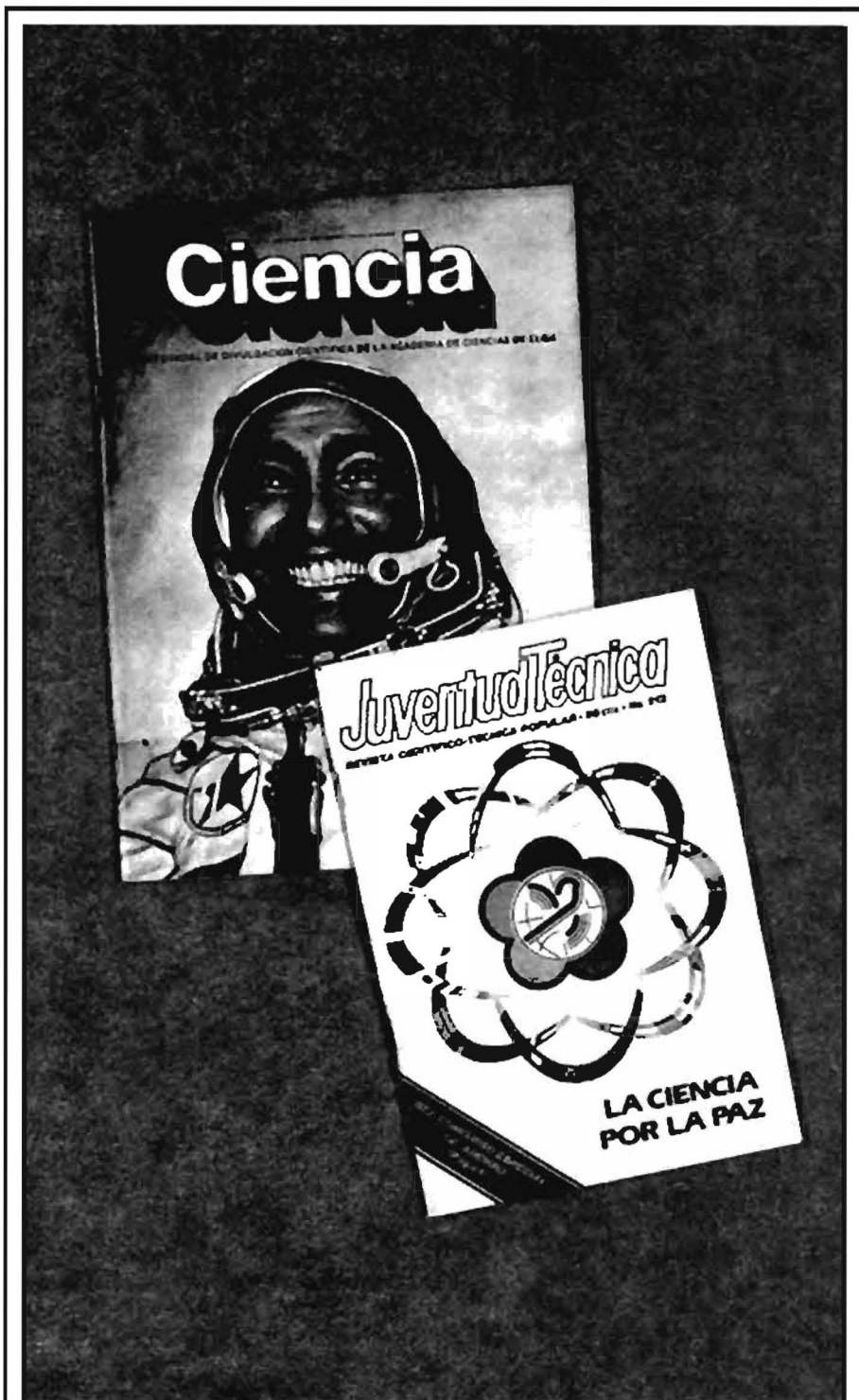
II

En esta sección intentaré desarrollar (muy esquemática y tentativamente) algunas ideas presupuestas en la sección anterior. Para ello defenderé la siguiente tesis: gracias a la obra física galileana se legitimó el desarrollo de teorías abstrac-

tas en todos (o casi todos) los campos científicos. Anteriormente, dada la dominación de la visión aristotélica, el conocimiento en sentido estricto, o ciencia, tenía que desarrollarse por medio de teorías concretas o empíricas. En términos muy generales, podemos decir que una de las contribuciones más *revolucionarias* de Galileo fue precisamente el mostrar *cómo* se podía desarrollar una teoría abstracta del mundo sensible. Para defender esta tesis expondré primero qué es una teoría abstracta y por qué la galileana lo es, y en segundo lugar por qué la teoría aristotélica no lo es.

a. Como se sugiere en la nota 4, (convenirá releer también para esta sección las notas 6 y 9), un concepto, ley o teoría es *abstracta* si no corresponde o se adecúa *directamente* con la realidad *sensible*. Ejemplos de teorías abstractas son las físicas mecanicistas de Galileo, Descartes y Newton. Estas son abstractas porque su objeto de estudio, la materia con o sin movimiento, y con o sin fuerzas que actúan a distancia, no representa directamente el mundo *sensible*; nuestro mundo perceptual tiene perros, piedras; movimientos lentos y rápidos, etc.¹² Esta idea Dijkstra la expresa así: "Al idealizar radicalmente los fenómenos mediante la eliminación de todas las influencias obstaculizadoras y esquematizando todo en forma igualmente cabal por medio de abstracciones simplifica-

12 Nótese que la cuestión del carácter abstracto de una teoría es distinta a la cuestión de la interpretación realista de una teoría. Las teorías mecanicistas usualmente han sido interpretadas realístamente por sus autores (piénsese por ejemplo en Descartes), es decir, a partir de dichas teorías ellos construyeron una ontología de acuerdo con la cual el mundo físico consistía sólo en materia en movimiento (con o sin fuerzas), y por lo cual la teoría describía directamente el mundo *físico*. Sin embargo, aun cuando aceptemos esta interpretación realista, podemos continuar sosteniendo que cualquier mecanicismo es una teoría abstracta dado que no describe directamente el mundo *sensible*, que es el mundo que no sólo importa explicar sino también interactuar prácticamente con él (i.e. manipular o controlar). (Téngase en cuenta que el mecanicismo no es abstracto porque deje de lado las llamadas cualidades secundarias como colores, etc., ya que, programáticamente al menos, se trata de reducir las cualidades secundarias a las primarias —como tamaño, forma, etc., o sea, propiedades cuantificables, i.e., explicar las secundarias en términos de las primarias).



Revista *Ciencia*: Información a: Depto. de Divulgación de la Academia de Ciencias de Cuba, Industria y Dragones, Zona Postal 2, Habana Vieja, Ciudad de La Habana, Cuba.

Revista *Juventud Técnica*: suscripción anual desde el extranjero: Empresa de comercio Exterior de Publicaciones, O'Reilly No. 407, Habana 1. Apartado Postal 605 \$ 20.00 dólares U.S.A. América del Norte \$ 25.00 dólares U.S.A. América del Sur \$ 27.00 dólares U.S.A. Europa y el resto del mundo.

doras (por ejemplo, al imaginar que todas las verticales son paralelas y al considerar que los cuerpos son puntos materiales), la mecánica se desarrolló en una ciencia autónoma bastante remota de la realidad física" ([5], p. 346).

Hay al menos dos procedimientos de abstracción que permiten la construcción de teorías abstractas: la matematización (ie. la introducción de las matemáticas a una teoría "no-formal") o la idealización.¹³

Es precisamente porque los procesos de abstracción como la matematización y la idealización no llevan a generalizaciones empíricas (cfr. nota 4), por lo que las teorías abstractas son *relativamente autónomas o independientes* de la experiencia, ie. pueden rebasar la experiencia. Así, por ejemplo, el que en la teoría galileana se analiza teóricamente el movimiento de un proyectil en dos movimientos simples, el horizontal uniforme y el vertical acelerado, nos muestra que esta teoría va más allá de la experiencia sensible. Por otra parte, las teorías abstractas son relativamente independientes de la experiencia en el sentido en que en ellas se pueden establecer leyes o principios sobre la base de consideraciones teóricas y no necesariamente empíricas; ie. no toda justificación de una ley o principio consiste sólo en su verificación. Así, por ejemplo, hemos visto que criterios intrateóricos de la aceptabilidad de las leyes para Galileo son los de demostrabilidad matemática y simplicidad.

13 Conviene que ya aclaremos una idea implícita en este trabajo. Considero que es una hipótesis plausible la aseveración de que en su origen algunas ramas de la matemática se desarrollaron por procesos de abstracción similares a los de la idealización; es decir, considero que algunas ramas de la matemática no siempre han sido ciencias formales, constituidas por verdades analíticas, sino ciencias empíricas —p.ej. la geometría euclídea fue concebida por muchos autores (Platón, Descartes, Kant) como la ciencia del espacio. Por otra parte, si bien originalmente muchos conceptos matemáticos (p.ej. el de círculo, o el de "dos"), o algunos enunciados matemáticos, pudieron haber sido abstraídos de la experiencia sensible, esto no impidió que las ramas matemáticas en cuestión adquiriesen posteriormente una independencia tan fuerte que se convirtiesen en autónomas (en dos sentidos: 1) que la justificación de sus enunciados es totalmente intrateórica, por lo cual son inmunes a contraejemplos empíricos y 2) que pueden remontarse tan lejos de la realidad que no tienen aplicabilidad empírica alguna por largo tiempo).

Dada nuestra esquemática caracterización de las teorías abstractas resulta claro que éstas guardan una relación *indirecta* con el mundo sensible. En el caso de teorías matematizadas se requiere el uso de un instrumental de medición para correlacionar sus leyes con el mundo sensible, muy probablemente sea necesario algún proceso de factualización (ya que, por ejemplo, la tierra se concibe como un círculo perfecto tocada en un sólo punto por una tangente), y seguramente, lo que se pone en relación no es sólo una ley sino un conjunto, dada la fuerte interrelación que implica la derivabilidad matemática. En el caso de que la teoría sea abstracta por idealizacional, su aplicabilidad a la realidad requerirá de un proceso de factualización. En verdad, Galileo mostró cómo se podía desarrollar una teoría abstracta mostrando cómo ésta se puede aplicar a la realidad (principalmente a través de la factualización y el uso de instrumentos).

b. La física aristotélica es una teoría concreta por las siguientes razones.

En primer lugar, el objetivo de la física aristotélica es captar teórica o intelectualmente el mundo sensible, en toda su complejidad y diversidad, en su concreción. Así, por ejemplo, la ley peripatética del movimiento toma en cuenta todos los factores que se consideraba que intervenían en el movimiento. Por otra parte, se habla de movimientos naturales y violentos, gravedad y liviandad, etc. En segundo lugar, su aplicación al mundo sensible es muy directa. La ley peripatética nos dice que a mayor fuerza, o peso, más rápido se moverá el objeto, y a mayor resistencia, menos rápido el movimiento, afirmación que cotidianamente comprobamos experiencialmente.

En tercer lugar, la teoría física aristotélica no tiene elementos idealizacionales ni es matematizada. En particular, Aristóteles sostuvo precisamente que no se podía matematizar la física porque las matemáticas son una teoría en la que se hace abstracción del cambio y las cualidades, mientras que la física tiene por objeto explicar el cambio en un mundo cualitativamente diverso.

BIBLIOGRAFIA

- 1 Barr, William F. "A syntactic and semantic analysis of idealizations in science". *Philosophy of Science*, vol. 38, no. 2, 1971.
- 2 Barr, William F. "A pragmatic analysis of idealizations in physics". *Philosophy of Science*, vol. 41, no. 1, 1974.
- 3 Cohen, I. Bernard. *The Birth of a New Physics*. New York: Doubleday tuchor Books, 1960.
- 4 Crombie, A. C. *Historia de la ciencia: de San Agustín a Galileo*. Vol. II. Madrid: Alianza Editorial, 1974.
- 5 Dijksterhuis, E.J. *The mechanization of the world picture*. Oxford: Clarendon Press, 1961.
- 6 Física. Elaborado por el Physical Science Study Committee. 2a ed. Vol. II. México: Editorial Reverté, S.A. 1966.
- 7 Galileo, Galilei. *Dialogue concerning the two chief world systems*. Translated, with revised notes, by Stillman Drake. 2a. ed. Berkeley, University of California Press, 1974.
- 8 Galileo, Galilei. *Dialogue concerning two new sciences*. Translated by Henry Crew and Alfonso de Salvio. New York: Dover Publications, 1954.
- 9 Koyré, Alexandre. *Estudios de historia del pensamiento científico*. 2a. edición. México: Siglo XXI, 1978.
- 10 Krajewski, Wladystaw. *Correspondence principle and growth of science*. Dordrecht and Boston: D. Reidel Publishing Company. Series Episteme. 1977.
- 11 Kuhn, Thomas. "The function of measurement in modern physical sciences". *The Essential Tension*. Chicago: University of Chicago Press, 1977.
- 12 Moody, Ernest. "Galileo and his precursors". *Studies in medieval philosophy, science and logic*. Berkeley: University of California.
- 13 Nowak, Leszek. "Galileo of the social sciences". *Revolutionary world*. Vol. VIII, 1974; Gruner Publishing Co.
- 14 Shapere, Dudley. *Galileo. A philosophical study*. Chicago: The University of Chicago Press, 1974.
- 15 Shapere, Dudley. "Notes towards a post-positivistic interpretation of science". In Achinstein, P. and S. F. Barker (eds) *The legacy of logical positivism*. Baltimore: The John Hopkins Press, 1969.
- 16 Weisheipl, J. A. *The development of physical theory in the middle ages*. Michigan: University of Michigan Press, 1971.