

# EL PRINCIPIO DE INERCIA EN EL SIGLO XVII Ia PARTE

Elia Nathan Bravo\*

## Introducción

El principio de inercia parece ser un tanto trivial y evidente. En efecto, enuncia que un cuerpo mantiene su estado de reposo o movimiento uniforme rectilíneo, a menos que una causa externa lo cambie. Sin embargo, este principio sólo se estableció hasta el siglo XVII, y requirió un gran esfuerzo por parte de varios autores, principalmente Galileo, Descartes y Newton. Lo que intentamos en este artículo es examinar la historia del establecimiento de este principio. Para ello, hay que tomar en cuenta dos aspectos: a) el contenido del principio (al cual nos referimos utilizando los términos "ley de inercia" o "concepto de inercia"); y b) el status, o sea, el hecho de que el principio de inercia es un principio o fundamento de la física clásica. Dado que usualmente en la literatura historiográfica el aspecto b) no se toma en cuenta, lo tomaremos como hilo conductor en el desarrollo de este artículo. También tomaremos en cuenta el aspecto a); consideramos que para desarrollarlo es crucial examinar cómo funciona la ley de inercia dentro de las teorías de Galileo, Descartes y Newton. Las posiciones metodológicas desde las cuales enfocamos los aspectos a) y b) nos llevarán a descubrir que el principio de inercia tuvo diversos sentidos y cuáles fueron éstos, por ejemplo, descubriremos que la historia de este principio no fue lineal o acumulativa.

\* Instituto de Investigaciones Filosóficas, UNAM.

Las referencias bibliográficas aparecen al final del artículo.



Para desarrollar el aspecto a) lo que intentaremos es explicar y justificar dos afirmaciones que frecuentemente se hacen respecto del principio de inercia. La primera es la tesis de que este principio es fundamento de la mecánica clásica ([11], p. 196; [15], p. 2; [19], p. 50; [24], p. 3). La segunda es la tesis —asociada a la primera— de que la obtención del principio de inercia fue uno de los aspectos fundamentales de la Revolución Científica, o sea, de la instauración de la mecánica clásica en sustitución de la física peripatética ([5], p. 125; [10], p. 240; [24], p. 9). Para especificar aún más esta segunda tesis utilizaremos la afirmación de Koyré de que el principio de inercia expresa una nueva concepción del movimiento y de la realidad física ([15], p. 131; y también [28], p. 19).

Koyré considera que la Revolución Científica del siglo XVII no consistió en un mero cambio de teorías, sino en un cambio metafísico, un cambio en la manera de concebir la realidad, y que fue este cambio el que permitió el surgimiento de un nuevo tipo de teorías físicas (matematizadas y mecanicistas); y en particular, lo que permitió el surgimiento del principio de inercia ([15], p. 3). Este cambio metafísico, según Koyré, consistió en la sustitución del cosmos por un universo infinito (o por la geometrización del espacio, es decir, la concepción del espacio de acuerdo con la geometría euclídea).

La idea aristotélica del universo como cosmos es la idea de un sistema ordenado de objetos, donde cada objeto tiene su propia naturaleza, y donde el arreglo espacial de los objetos expresa dicha naturaleza ([15], p. 138). Para la concepción del cosmos hay cuatro ideas claves: (i) hay lugares naturales; (ii) los objetos tienen naturalezas o esencias que corresponden a ciertos lugares naturales (por ejemplo, el lugar natural del elemento tierra es el centro del universo, y estando allí la tierra actualiza o realiza su naturaleza); (iii) el movimiento es o natural (si lleva al cuerpo a su lugar natural y por tanto, es causado por la naturaleza del objeto), o violento (si no lleva al objeto a su lugar natural, o lo saca de éste y por ello mismo, es causado por un motor externo constante); (iv) el movimiento es un proceso que le ocurre a un objeto, mediante el cual llega o no a actualizar su naturaleza, según llegue o no a su lugar natural, y dado que es un proceso, requiere siempre una causa que lo

genere y mantenga. En cambio, para la otra concepción de la realidad, la del universo infinito, el espacio es infinito ([15], p. 140) y vacío ([15], p. 7), por lo cual ya no hay ni lugares espaciales (centro y fuera del centro) ni direcciones (arriba, abajo, etc.). De esta idea clave se siguen otras igualmente importantes: 1) los objetos ya no necesitan ser concebidos como entidades caracterizadas por una esencia o naturaleza, dado que ya no hay lugares especiales y naturales, en los cuales actualicen su esencia, sino que los objetos llegan a ser concebidos como mera materia inerte, como cuerpos; 2) el movimiento ya no puede ser clasificado como natural o violento dado que no hay lugares naturales; y 3) el movimiento deja de ser concebido como un proceso de actualización de la esencia, que afecta al objeto, y pasa a ser concebido como mero cambio de relaciones espaciales, que no afectan al cuerpo, que por ello se puede conservar.

En términos generales, nos suscribi-

para ser aceptable, concebir a la materia como pasiva y al movimiento como mero cambio de relaciones espaciales, (aunque Descartes también tuvo otras razones para desarrollar esta nueva concepción de la realidad material, como en su intento de legitimar la matematización de la ciencia natural). Así pues, el principio de inercia es fundamento de la física, entre otras cosas, porque implica o presupone una concepción de la realidad. Con respecto a la primera, notemos que Koyré considera que Galileo obtuvo parcialmente la ley de inercia, pero que no logró por completo romper con la metafísica del cosmos ([15], p. 157); es decir, históricamente no surgió primero una nueva concepción de la realidad y después la ley de inercia. Por ello, el sostener que la Revolución Científica fue una revolución metafísica, no significa establecer una tesis cronológica, al efecto de que primero hubo un cambio en la filosofía y que después éste generó un cambio en la ciencia; lo que significa



mos a la tesis de Koyré de que primero, la Revolución Científica fue un cambio en la concepción de la realidad y segundo el principio de inercia es la base y la expresión de esta nueva concepción de la realidad (en particular, del movimiento) ([15], p. 131). Aclaremos estas dos tesis. Con respecto a la segunda, lo que sostendremos en este artículo es que, si bien lo que le permitió a Descartes considerar a la ley de inercia como un principio, fue su nueva concepción (mecanicista) de la realidad material; también es verdad que una de las razones por las cuales sostiene esta nueva concepción, es que el principio de inercia requiere,

meramente, es que el cambio más profundo se localiza a nivel de la concepción general de la realidad, que implica una teoría, no a nivel de las teorías específicas, dado que puede haber varias teorías específicas que comparten la misma concepción general de la realidad. Aunque es precisamente porque la revolución se sitúa en el campo metafísico, por lo que en cierto momento histórico (por ejemplo Descartes), una aclaración a nivel metafísico puede servir de guía para una aclaración a nivel de la teoría física.

En esta sección examinaremos la ley de inercia galileana. Nuestro objetivo fundamental será mostrar las razones conceptuales y físicas por las cuales Galileo postuló una ley de inercia. También demostraremos que Galileo no logró postular la ley de inercia como un principio porque no logró romper con el esquema metafísico aristotélico.

Citaremos extensamente el primer texto "Cartas acerca de las manchas solares" (1613), en que Galileo anuncia la ley de inercia, ya que en él aparecen los principales significados de esta ley, que desarrolló a través de toda su obra. Galileo busca probar aquí que la rotación de las manchas solares alrededor del sol sólo puede deberse a la rotación del sol y no a la rotación del medio que circunda al sol, ya que el medio comunicaría su rotación al sol. Para probar que el medio comunicaría su rotación al sol, Galileo introduce el concepto de inercia de la siguiente manera:

Pues me parece haber observado que los cuerpos físicos tienen una inclinación física para algunos movimientos (como los cuerpos pesados hacia abajo), el cual movimiento lo ejercitan a través de una propiedad intrínseca y sin tener necesidad alguna de un motor externo particular, y siempre y cuando no estén impedidos por algún obstáculo. A algún otro movimiento le tienen repugnancia (como los mismos cuerpos pesados al movimiento hacia arriba), y por tanto nunca se mueven de esa manera, a menos que sean arrojados violentamente por un motor externo. Finalmente, con respecto a ciertos movimientos son indiferentes, como lo son estos mismos cuerpos pesados al movimiento horizontal, para el cual no tienen ninguna inclinación (ya que no es hacia el centro de la tierra) ni repugnancia (ya que no los lleva fuera de ese centro). Y por ende, eliminados todos los impedimentos externos, un cuerpo pesado en una esfera concéntrica con la tierra, será indiferente al descanso y a los movimientos hacia cualquier parte del horizonte. Y se mantendrá en ese estado en el que alguna vez fue puesto; esto es, si fue puesto en el estado de descanso, lo conservará; y si fue puesto en movimiento hacia el oeste (por ejemplo), se mantendrá en ese movimiento. Así por

ejemplo, un barco, habiendo recibido algún ímpetu a través del mar tranquilo se moverá continuamente alrededor de nuestro globo sin pararse jamás; y si fue puesto en descanso permanecerá perpetuamente en descanso, si en el primer caso todos los impedimentos externos pudieran ser eliminados, y en el segundo caso, no se añadiera ninguna causa externa de movimiento ([12], p. 113-4).

Destaquemos varios puntos:

I. Galileo utiliza de distinción aristotélica entre movimiento natural (el de caída de un objeto pesado), y movimiento violento (los cuerpos pesados que se mueven hacia arriba), pero considera que esta distinción no cubre todos los casos. Hay un tercer tipo de movimiento, llámémosle *indiferente* o "inercial", que se caracteriza por el hecho de ser *no-causado*. Por ser los cuerpos indiferentes al movimiento inercial (horizontal) dado que no tienen una esencia o naturaleza que les haga tener una propensión o repugnancia a éste, no se requiere de una causa interna (como en el caso del movimiento natural, el cual es causado por la esencia del cuerpo) ni de una causa externa (como en el movimiento violento, el cual por ir en contra de la esencia del cuerpo, requiere que la causa sea externa) para que ocurra el movimiento. Notemos que la idea de no-causación no se refiere al comienzo del movimiento (ciertamente Galileo sostiene que para que un cuerpo en reposo comience a moverse se requiere de una causa), sino a su conservación: una vez adquirido un movimiento, éste se mantiene sin requerir de ninguna causa. Cabe notar aquí que la afirmación de que hay un tipo de movimiento que es no-causado, de hecho constituye un rompimiento fundamental con la tradición aristotélica (incluyendo la teoría del ímpetu), ya que para ésta tanto el origen como la conservación de cualquier movimiento, requieren necesariamente de una causa, por ser el movimiento un proceso de actualización de la potencia (movimiento natural) o de impedimento de que se actualice la potencia (movimiento violento). Es por ello que la idea de que hay un tipo de movimiento, el inercial, que es *no-causado*, constituye uno de los significados centrales del concepto de inercia (aunque en Galileo esta idea aparece más bien como movimiento al cual el cuerpo

es indiferente, que como movimiento no-causado ([13], p. 147; [14], p. 181). En el *Diálogo* Galileo también introduce al movimiento inercial como un tercer tipo de movimiento, que es no-causado. Apelando a un experimento imaginario con planos inclinados, sostiene que una bola que rueda hacia abajo en un plano inclinado tendrá un movimiento acelerado por la gravedad, y si esa bola sube por un plano inclinado hacia arriba, su movimiento será desacelerado por la gravedad; pero si la bola que baja del plano inclinado continuase por un plano horizontal que circunda a la Tierra, entonces no habría ninguna causa que acelerara o desacelerara su movimiento: la bola sería indiferente a este movimiento, dado que ni la aleja ni la acerca al centro de la Tierra, y por ello la bola conservaría el movimiento uniforme perpetuamente (si el pl no horizontal fuese ilimitado) ([13] pp. 146-8; cf. pp. 25-8).

II. El movimiento inercial es un movimiento *uniforme* (implícito en este texto, pero no en otros como: [13], pp. 31-2, 157, 187; [14], pp. 215, 244) y horizontal, esto es, *circular* (que recorre una circunferencia cuyo centro es el centro de la Tierra) ([13], pp. 31-2, 148; [14], p. 181). La razón por la cual el movimiento inercial tiene que ser circular es porque sólo en un plano que en todos sus puntos es equidistante al centro, un objeto podrá ser indiferente al movimiento: la gravedad o peso, que es la única causa (interna) del movimiento que Galileo toma en cuenta, no es operativa en un plano que no lleva ni hacia el centro ni fuera del centro al objeto. Recordemos que para la física clásica el movimiento inercial es rectilíneo, por lo cual casi todos los historiadores consideran que Galileo no obtuvo el principio de inercia (por ejemplo [15], p. 175; [26], p. 64).

III. El movimiento inercial se *mantiene* "perpetuamente" (cf. también [13], pp. 32, 147; [14], p. 215), siempre y cuando no haya una causa externa que lo altere. Eso se sigue del hecho de que el movimiento inercial (uniforme y horizontal) es no-causado.

IV. El movimiento inercial es un movimiento *idealizado*, o sea, el movimiento uniforme y horizontal continuaría perpetuamente si es que no hubiese ningún impedimento externo (tal como fricción, resistencia del aire, etc.) que lo alterase. En los casos concretos o situaciones reales siempre hay algún impedimento externo, aunque sea menor, por lo cual un movimiento inercial puro es un caso idealizado ([28], p. 21). Sin embargo, como veremos más adelante, a pesar de ser un caso idealizado, puede ser utilizado para describir movimientos concretos o reales en tanto éstos se pueden aproximar al caso idealizado (cuando los "impedimentos externos" son mínimos), o de manera aún más importante por ser la más frecuente, por ser analizables los movimientos concretos en movimientos más simples, uno de los cuales es el movimiento inercial.

V. El movimiento inercial y el reposo tienen el mismo *estatus ontológico* o sea, son equivalentes en tanto: (i) ambos son no-causados, o debidos a la indiferencia del cuerpo a estar en cualquiera de esos dos estados; y (ii) precisamente por ser no-causados, el cuerpo conservará perpetuamente su estado en reposo o movimiento uniforme horizontal, a menos que alguna causa lo altere. Con esta idea, Galileo implícitamente rompe con un presupuesto básico de la física peripatética, con el presupuesto de que el movimiento (de cualquier tipo) tiene un *estatus ontológico* distinto al reposo, dado que el movimiento es un proceso y el descanso es un estado que no requiere de ninguna causa para mantenerse. En cambio, para Galileo, el movimiento uniforme y horizontal deja de ser un proceso y pasa a ser un estado igual que el reposo.

El texto de Galileo arriba citado continúa de la siguiente manera:

Y el sol, un cuerpo de forma esférica, que se encuentra suspendido y balanceado sobre su propio centro, no puede evitar seguir el movimiento de su medio circundante, ya que no tiene ninguna repugnancia intrínseca o impedimento externo a la rotación. No puede tener una repugnancia interna, porque por medio de dicha rotación no es transportado fuera de su lugar, ni sus partes se permutan entre ellas. Su or-

den o arreglo natural no se cambia de ninguna manera, de forma tal que por lo que respecta a la constitución de sus partes, tal movimiento es como si no existiese. Con respecto a los impedimentos externos, no parece ser el caso que un obstáculo pueda impedir sin estar en contacto, excepto tal vez el poder magnético; y en este caso, todo lo que está en contacto con el sol es su medio, el cual no sólo no impide el movimiento que buscamos atribuirle, sino que él mismo tiene este movimiento ([12], p. 114).

Respecto a este texto, que tiene por objeto probar que el movimiento de las manchas solares se debe a la rotación del sol y no a la del medio circundante, destaquemos los siguientes puntos:

VI. Galileo va a aplicar la idea de movimiento inercial, que desarrolló en la primera parte del texto citado, al caso del sol mediante dos pasos: (i) el sol es indiferente a la rotación, y por tanto, podría conservar perpetuamente un movimiento uniforme y circular, y (ii) la nueva idea de que en un *sistema físico* en que los objetos que lo componen son indiferentes al movimiento inercial, si una parte tiene movimiento inercial (el medio circundante) entonces las otras partes (el sol y sus partes) compartirán o *participarán* de este movimiento. Como veremos Galileo aplicó básicamente el concepto de inercia a sistemas o conjuntos de cuerpos, y no tanto, a un cuerpo aislado.

VII. El movimiento inercial no es un proceso (como sostenía Aristóteles), sino que es "como si existiese", esto es, es como el reposo, elado que *no afecta al cuerpo*. El movimiento inercial no es un proceso, sino un estado. Un sistema de cuerpos o partes no es afectado por el movimiento inercial en el sentido de que las relaciones espaciales que guardan entre sí las partes no se alteran, y esto se debe a que todas las partes comparten el movimiento inercial. Un cuerpo sólo, según Galileo, tampoco es afectado por el movimiento inercial porque este movimiento no lo lleva ni hacia el centro ni hacia afuera del centro (éstos últimos movimientos sí afectan al cuerpo porque el lugar natural de los cuer-

pos pesados —y todos los cuerpos son pesados— es el centro, y estando allí, en el centro, los cuerpos realizan o actualizan su naturaleza, como hemos visto).

Si relacionamos el punto (VII) con el (V), podemos ver una de las implicaciones metafísicas de la ley de inercia: hay un tipo de movimiento que no es un proceso, sino que es un estado, esto es, es como el reposo, algo no-causado, que conserva perpetuamente, a menos que ocurra algún impedimento externo, que no afecta al cuerpo.

En Galileo hay dos motivaciones por las cuales se introduce el concepto de inercia. Una motivación es la crítica interna a la física aristotélica. La otra es una motivación externa al aristotelismo: el intento de dar cuenta de ciertos fenómenos terrestres bajo la asunción del copernicanismo, o sea, de que la tierra se mueve. Esta segunda motivación es obvia en sus obras de madurez, el *Diálogo acerca de los dos sistemas principales del mundo* y el *Discurso acerca de dos nuevas ciencias*, y pronto las examinaremos. La primera motivación aparece claramente en su *De Motu* (1589); y parecería ser que es la que está tras su afirmación de la existencia de un movimiento inercial en sus "Cartas sobre las manchas solares", ya que la cuestión del copernicanismo no es relevante para resolver la cuestión de qué causa el movimiento de las manchas solares.<sup>1</sup> En su *De Motu*, Galileo emprendió una refutación de varias tesis aristotélicas, ([10], pp. 4-5, 262) entre ellas, la clasificación de todo movimiento en natural o violento. Galileo

<sup>1</sup> Si se sostuviera que sólo aparece en Galileo la motivación "externa" entonces se estaría sosteniendo que la revolución que Galileo inició en física sólo fue una consecuencia lógica del copernicanismo: en cambio, al reconocer la existencia de una motivación "interna" en Galileo, se reconoce que hubo varias razones teóricas para el surgimiento de la revolución en la física. Por otra parte, también es importante destacar la existencia de esta motivación "interna" para entender por qué el copernicanismo pudo ser utilizado por Galileo para comenzar a romper con la teoría física aristotélica: sin esta motivación, Galileo bien pudo apelar a la idea de un movimiento natural circular a todo objeto terrestre para resolver los problemas físicos terrestres que presentaba el copernicanismo (como lo intentó Copérnico), o apelar a la idea de un *ímpetu no-perecedero*, alternativas que no hubiesen significado el comienzo de una ruptura radical con el aristotelismo.



leo trabajó con las siguientes definiciones: el movimiento natural ocurre cuando los cuerpos se aproximan a sus lugares naturales, y el violento cuando se alejan de sus lugares naturales ([10], p. 248). A partir de éstas, resulta claro que la rotación de una esfera no puede ser un movimiento natural dado que este movimiento no la aproxima a su centro, ni violento, porque no la aleja de su centro. Galileo sostuvo que este movimiento era de un tercer tipo, y, por tanto, la clasificación aristotélica era incompleta. ([10], p. 249; [26], p. 168; [15], p. 155). Esta misma crítica interna, consistente en mostrar la incompletitud de la clasificación aristotélica es la que aparece en las "Cartas. . .", sólo que ahí se sostiene que es el movimiento horizontal el que no es natural ni violento, sino inercial.

Koyré sostiene que el problema que Galileo trataba de resolver en *De Motu*, con la introducción de este tercer tipo de movimiento (el inercial) es el de la persistencia o conservación del movimiento ([15], p. 154; y también [20], p. 119, para quien el principio de inercia es básicamente un principio de conservación). Si lo que Koyré quiere decir es que Galileo busca introducir a la física, con su concepto de movimiento inercial, un principio de conservación del movimiento, es falsa su afirmación, dado que no es sino hasta Descartes que los "científicos" se comienzan a plantear la necesidad de introducir principios de conservación. El que el movimiento inercial se conserve perpetuamente no es un dato o postulado primario para Galileo, sino consecuencia de

la indiferencia del cuerpo al movimiento. (cfr. el texto de las "Cartas. . ." citado arriba, o bien, [13], p. 147). Por otra parte, si a lo que Koyré se refiere es al problema de cómo conserva un proyectil su movimiento una vez que se separa del motor externo que originó el movimiento, de nuevo la respuesta es que Galileo no estaba preocupado por el problema de la conservación o persistencia del movimiento en *De Motu* o en las "Cartas. . .", ya que el problema de los proyectiles nunca aparece ahí (cuando aparece en el *Diálogo* y en el *Discurso*, la relación entre inercia e ímpetu es muy ambigua, como veremos). En fin, en Galileo el significado básico de "inercia" no es el de conservación del movimiento, sino el movimiento no-causado, es decir, que continúa dada la indiferencia del cuerpo.

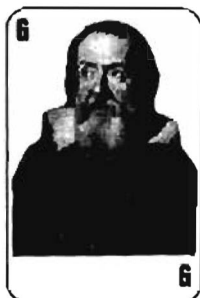
Examinemos ahora la motivación externa que Galileo tuvo para introducir la ley de inercia. Pensamos, al igual que algunos historiadores de la ciencia ([5], p. 125; [9], pp. 337, 353; [28], pp. 17, 22) que Galileo postuló la existencia del movimiento inercial para resolver los problemas físicos que planteaba el copernicanismo, o sea, la afirmación de que la Tierra se mueve. Para la tradición tolemaico-aristotélica, la Tierra no se puede mover porque su movimiento ocasionaría que una serie de fenómenos terrestres ocurriesen de manera distinta a como de hecho suceden. Por ejemplo, si la Tierra se moviese (rotase), los objetos, al caer verticalmente, caerían fuera de lugar; así, si dejásemos caer una piedra desde una torre, ésta no caería al pie de la torre, sino algunos metros hacia

el oeste, dado que mientras que la piedra caía verticalmente, la Tierra y junto con ella la torre, se desplazaron (rotaron) algunos metros hacia el este. O bien, si la Tierra rotase rápidamente, deberíamos sentir el viento (así como cuando galopamos sentimos que el viento nos golpea). También, si la Tierra se moviese, los objetos saldrían disparados, como cuando cualquier objeto sobre una rueda que rota rápidamente sale volando. ([13], pp. 126-132). Es para resolver estos problemas físicos que Galileo introdujo el concepto de inercia.

Tomemos el caso de la caída de los cuerpos, que Galileo considera el contra-argumento más fuerte al heliocentrismo ([13], p. 126). La solución intuitiva de este problema es bastante sencilla: postulamos que la piedra (para continuar con el ejemplo) no cae verticalmente, sino que la trayectoria que sigue es el resultado de combinar o componer dos movimientos, uno de caída vertical y otro movimiento mediante el cual *sigue* a la torre (y por tanto a la Tierra): dado este último movimiento componente, la piedra caerá al pie de la torre ([13], p. 139). Esta idea intuitiva ya había sido enunciada, entre otros, por Copérnico ([15], p. 134). Lo que es original en Galileo es que él precisó que el movimiento por el cual la piedra sigue a la torre, es un movimiento inercial (y no natural, como sostuvo con poca plausibilidad Copérnico; decimos con poca plausibilidad porque suponer que los cuerpos terrestres pueden tener dos movimientos naturales —de caída, y el circular consistente en seguir a la Tierra— implica que un cuerpo puede tener dos naturalezas o esencias distintas). Galileo precisó también el principio de la relatividad contenido en el concepto de inercia, y finalmente, determinó con precisión en qué consiste la composición de movimientos.

Examinemos con detalle la solución galileana a los problemas físicos que representaba el copernicanismo. Para resolverlos, Galileo afirma en primer lugar un principio de relatividad del movimiento. El llamado principio de relatividad del movimiento tiene (por lo menos) tres sentidos: hay un principio óptico, uno mecánico o cinemático y uno dinámico, clásico o newtoniano.

El principio óptico de relatividad, conocido desde la Antigüedad, afirma que el movimiento sólo se puede establecer en *relación con* un objeto (o mar-



co de referencia) que se considera estacionario, y que las apariencias visuales permanecerán las mismas, ya sea que se considere que *a* se mueve respecto de *b* (el cual se tomará como estando en reposo), o que *b* se mueve respecto de *a* (y *a* está estacionaria). ([13], p. 162). Así, Galileo afirmó que las mismas apariencias visuales ocurrirán si se considera que la Tierra está estacionaria y el sol se mueve, que si se considera que el sol se mueve, que si se considera que el sol está en reposo y la Tierra se mueve ([13], p. 96). Dado que este principio óptico se conocía desde la antigüedad, Tolomeo y Aristóteles introdujeron las pruebas o argumentos físicos que enumeramos anteriormente para sostener la inmovilidad de la Tierra.

En contra de estos argumentos físicos, Galileo introdujo el principio cinemático de relatividad del movimiento. El cual tiene por objeto explicar por qué no aparecen los efectos físicos que, según la tradición aristotélica, deberían aparecer si es que la Tierra se moviese. ([24], p. 102). En términos galileanos, lo que dice el principio cinemático, es que para un conjunto de objetos ("sistema físico") que tienen un movimiento en común, éste movimiento no es operativo, no actúa, es como si no existiese, no es perceptible con respecto a los objetos que participan en él; en cambio, un movimiento que no se tiene en común con otros objetos, sí es operativo y perceptible ([13], pp. 163, 171). Citemos a Galileo:

El movimiento en tanto que es y actúa como movimiento, en esa medida existe en relación a cosas que no

lo tienen; y entre las cosas que comparten igualmente cualquier movimiento, éste no actúa, es como si no existiese. ([13], p. 116).

Para entender qué dice este principio tomemos el ejemplo de Galileo, de un barco cargado de bienes que va de Venecia a Siria. Las cajas, paquetes y demás objetos que van en el barco comparten el movimiento del barco, y por tanto, este movimiento en relación con el barco y sus bienes, no es operativo, no actúa, en el sentido de que *no altera las relaciones espaciales* que hay entre las cajas, paquetes, etc. ([13], p. 116). Por tanto, dado que el movimiento común no es operativo, es como si no existiese, es equivalente al descanso. En cambio, si un hombre caminase en ese barco, su movimiento no sería común con el resto de las cosas en el barco, y por tanto ese movimiento sí actuaría, es decir, cambiaría las relaciones espaciales entre el hombre y los objetos en el barco, o entre el hombre y el barco, y sería perceptible para los habitantes del barco. Lo mismo sucede si sustituimos al barco en movimiento por la Tierra en movimiento. Dado que todos los objetos terrestres comparten el movimiento de la Tierra, éste no es operativo y, por tanto, no es perceptible para los habitantes de la Tierra. Por ejemplo, en la caída de una piedra desde una torre (movimiento compuesto por un movimiento vertical de caída y un movimiento circular inercial), sólo vemos el movimiento simple hacia abajo dado que el circular: por ser común a la Tierra, la torre y nosotros, no es perceptible; y si percibimos el movimiento hacia abajo porque no participamos de él. ([13], p. 163).

Otra manera de enunciar el principio cinemático es, como lo hace Galileo, que ningún fenómeno dentro del sistema puede servir para distinguir si el sistema o conjunto de cosas tiene un movimiento en común o está estacionario ([13], pp. 144-5, 187), dado que el movimiento es común, no es operativo, así como el reposo tampoco lo es. A partir de esto, y en contra de la tradición tolemaico-aristotélica, Galileo sostiene que ningún fenómeno terrestre (como el de caída vertical) puede servir para establecer si la Tierra se mueve o no ([13], pp. 144, 139-40) (aunque inconscientemente, en el cuarto día del *Diálogo* sostuvo que la prueba más convincente del movimiento terrestre son las mareas ([24], p.

102).

Destaquemos algunos puntos importantes relativos a este principio galileano de relatividad. En primer lugar, el principio cinemático de Galileo no es el principio dinámico de relatividad de la física clásica o newtoniana ([9], p. 355; [24], p. 100). Lo que dice el principio dinámico es que sólo el movimiento *inercial* es relativo a un marco de referencia material, esto es, sólo el movimiento inercial es no operativo y equivalente al descanso. En cambio, el movimiento acelerado y de rotación no es relativo, sino *absoluto* (como lo destacó Newton): es un movimiento que sí tiene efectos dinámicos (da lugar a fuerzas centrífugas, a fuerzas de Coriolis, etc.), y que por tanto, si un sistema físico se mueve aceleradamente o rota, este movimiento se puede establecer desde dentro del sistema, notando los efectos que genera dicho sistema ([6], p. 104). Ahora bien, aunque como veremos, Galileo introduce el concepto de inercia para respaldar el principio de relatividad, siempre que enuncia este principio sostiene que el movimiento en general es relativo, y no solamente el movimiento inercial. Por otra parte, Galileo nunca sostuvo que el movimiento no inercial era absoluto porque produce efectos dinámicos, puesto que él no hizo estudios dinámicos. Por estas razones, se considera que el principio de relatividad galileano no es el principio clásico de relatividad.<sup>2</sup>

En segundo lugar notemos que al

<sup>2</sup> A partir de esto podemos ver que un principio físico de relatividad no es trivial: no afirma meramente que el movimiento se considera siempre como una relación entre algo que se mueve y algo en reposo. Lo que el principio newtoniano de relatividad establece es que si bien el movimiento inercial, y el acelerado y de rotación, son relativos en el sentido anterior de ser relaciones, en el caso del inercial, éste es relativo a un marco de referencia material, y por ende, varía (tanto su celeridad como su dirección) según con cuál marco de referencia material se compare, mientras que el movimiento absoluto es relativo al espacio absoluto, y no hay que ponerlo en relación con ningún marco de referencia material para establecer su existencia ([11], p. 112). En el caso de Galileo, lo que él quiere afirmar con la relatividad del movimiento es que el movimiento *solo es operativo* en relación con objetos que no comparten dicho movimiento: es decir, es posible que un cuerpo se mueva, y a pesar de ello que no se alteren sus relaciones espaciales con otro cuerpo, si es que ese otro cuerpo participa del mismo movimiento que el primero.

proponer el principio (cinemático) de relatividad del movimiento con el fin de explicar por qué el movimiento de la Tierra no tiene efectos visibles. Galileo de hecho está también proponiendo una nueva concepción del movimiento. Recordemos lo que dice la última cita (p. 13) de Galileo: el movimiento sólo actúa en relación a cosas que no tienen ese movimiento. Para que esto pueda ser así, el movimiento tiene que concebirse como mero cambio de relaciones espaciales, como *locinoción* o *transportación*.

El movimiento deja de ser, como lo era para Aristóteles, primariamente un proceso que le ocurre a un cuerpo (alejarse o acercarse a su lugar natural, es decir, al lugar donde actualizará su esencia) y secundariamente, como consecuencia de este proceso, un cambio de relación espacial. El movimiento *no afecta* al cuerpo mismo que se mueve ([15], pp. 130, 162; [28], p. 19). Y es porque el movimiento no afecta al cuerpo, sino sólo a las relaciones espaciales de ese cuerpo con otros, por lo que Galileo puede sostener (i) que el movimiento es necesariamente relativo a otro cuerpo que no tiene ese movimiento, y que se puede atribuir indiferentemente el movimiento a uno y otro cuerpo (principio óptico y cinético de relatividad), y que (ii) si un conjunto de cuerpos tiene un movimiento en común, entonces ese movimiento es como si no existiese, no es perceptible (dentro del conjunto de cuerpos), precisamente porque el movimiento común no afecta las relaciones espaciales entre los cuerpos del conjunto (principio cinético de relatividad). En otros términos, lo que se dice en (ii) es que el movimiento compartido es equivalente al descanso (dado que en ambos no hay cambio de relación espacial). Sostener esta equivalencia entre movimiento y descanso sólo es posible porque el movimiento se concibe como algo que no afecta al cuerpo o conjunto de cuerpos que lo tienen; recordemos que para Aristóteles, descanso y movimiento son ontológicamente distintos (ya que el reposo no requiere de causa ni para comenzar ni para continuar, mientras que el movimiento sí), o no equivalentes, precisamente porque el reposo no es un proceso (sino un estado) mientras que el movimiento sí lo es.

Es importante destacar que la razón que tiene Galileo para proponer (un tanto implícitamente) este nuevo concepto de movimiento como transportación es

física o "empírica": si queremos explicar cómo es posible que en una Tierra en movimiento (lo cual no es un dato empírico, sino una hipótesis) los fenómenos terrestres tales como la caída vertical, la permanencia de los objetos sobre la Tierra, etc. (que son datos empíricos) ocurran de la manera en que de hecho ocurren, entonces es necesario postular que el movimiento es mera transportación que no afecta al cuerpo al que se le atribuye el movimiento.

Una consecuencia muy importante de esta nueva concepción del movimiento, y que Galileo logra entrever, aunque nunca lo afirma con total claridad, es que si los objetos no son afectados por el movimiento, son indiferentes a él, entonces cualquier objeto puede tener cualquier tipo de movimiento, y por ende, ya no se pueden caracterizar los objetos por medio de esencias específicas. En verdad, para la física aristotélica, las esencias son principios de movimiento: el movimiento (natural) hacia abajo se explica apelando a la esencia o naturaleza que tienen los elementos tierra y agua; en cambio, el aire y el fuego, que tienen por esencia la levedad, se mueven (naturalmente) hacia arriba; los cuerpos celestes, por estar formados por el éter, que tiene otra esencia, correspondientemente, se mueven circularmente. En Galileo nos encontramos explícita esta idea de que los objetos no tienen esencias que los distinguen, sino que son mero cuerpo, mera materia, pero sí encontramos que Galileo usa esta idea. Así por ejemplo, Galileo habla de conjuntos de cuerpos que participan en el mismo movimiento sin considerar la esencia de los cuerpos en cuestión: Galileo compara lo que sucede en un barco con lo que sucede en la Tierra en movimiento (cf. el texto después de la cita de Galileo en p. 13), o compara la indiferencia de un barco al movimiento con la indiferencia del sol al movimiento (p. 5). Galileo también traza la distinción entre cualidades primarias y secundarias ([12], p. 274), lo cual implica dejar de lado el esquema esencialista aristotélico: y por otra parte, considera que absolutamente todos los objetos terrestres tienen la "esencia" del peso o gravedad ([15], p. 143, [15], p. 176), la cual, por ser general a todos los cuerpos, deja de ser la esencia aristotélica o principio de clasificación.

Para explicar y justificar el principio cinemático de relatividad, es decir, que el movimiento compartido es equivalen-

te al reposo en tanto que en un conjunto de cuerpos que están en uno u otro estado sucede lo mismo, Galileo introduce el concepto de inercia ([13], p. 145). En efecto, Galileo sostiene que un cuerpo colocado en un plano horizontal (que todos los puntos de su superficie son equidistantes del centro de la Tierra, como lo sería la superficie del globo terráqueo si fuese lisa) sería indiferente al movimiento, no habría causa que lo acelerara o lo desacelerara ya que el plano no está inclinado ni hacia arriba ni hacia abajo. Por tanto, si este cuerpo fuese puesto en movimiento, se movería uniforme y perpetuamente; esto le sucedería a un barco en el mar (si es que el mar no tuviese límites) ([13], pp. 145-8). Este movimiento uniforme, horizontal y perpetuo (no causado) es el movimiento inercial. Veamos cómo suceden los fenómenos, como el de caída, en un barco que se mueve inercialmente: una piedra que se encuentra en la punta del mástil, se moverá como el barco, uniforme y horizontalmente. Si se deja caer esta piedra, ella tendrá dos movimientos, uno uniforme y horizontal por el cual *sigue* al barco, y otro de caída vertical. El movimiento que resulta de la composición de estos dos movimientos hace que la piedra caiga al pie del mástil, exactamente como caería si el barco estuviera en reposo (en el caso del reposo sólo uno de los movimientos componentes existe, el de caída vertical) ([13], pp. 148-9). Lo mismo sucede en el caso de la Tierra que se mueve; la razón por la que una piedra soltada desde la punta de una torre cae al pie de ésta, es que su trayectoria es el resultado de la composición de dos movimientos, uno de caída vertical y el otro, de movimiento uniforme y horizontal, por el cual sigue a la tierra y a la torre que se mueven uniforme y horizontalmente, ([13], pp. 139, 165).<sup>3</sup> En el *Diálogo* ([13], p. 165) Galileo sostuvo (incorrectamente) que la trayectoria de la piedra es un arco de una media circunferencia que va desde la punta de la torre al centro de la Tierra;

<sup>3</sup> Aunque para la física newtoniana el movimiento de la Tierra no es inercial (uniforme rectilíneo) por ser de rotación (o sea circular). Sin embargo, para considerar el caso de la caída de un cuerpo, evento que ocurre en unos cuantos segundos, se puede considerar a la Tierra como un sistema inercial dado que el movimiento de un punto de la superficie terrestre durante esos pocos segundos es casi en línea recta ([21], p. 94; [20], p. 133).

en el *Discurso* ([14], pp. 244-249) sostuvo (correctamente) que la trayectoria es una semi-parábola, y mostró matemáticamente cómo la composición de los dos movimientos, el uniforme horizontal y el acelerado vertical, dan lugar a un movimiento cuya trayectoria es una semiparábola (aunque Galileo demostró esto respecto a los proyectiles, es claro que un objeto que cae es como un proyectil, no disparado por un cañón o una mano, sino por la Tierra que se mueve).

Ahora bien, si introducimos la idea de movimiento inercial, se explica el principio de relatividad, según el cual sucede lo mismo en un conjunto de objetos que se mueven (inercialmente) que si ese mismo conjunto estuviera en reposo. Para un habitante de la Tierra en movimiento, la piedra cae verticalmente (al pie de la torre) porque uno de sus movimientos componentes es idéntico al de la Tierra y al del observador terrestre, pero éste no percibe dicho movimiento porque lo comparte (recuérdese que el movimiento sólo es perceptible si el observador no comparte dicho movimiento); en cambio, sí percibe el de caída vertical, porque no comparte dicho movimiento ([13], p. 163).

Debemos destacar aquí que el principio de inercia no es un enunciado descriptivo simple, no describe un movimiento que observamos típicamente en la naturaleza, sino que fundamentalmente se refiere a un movimiento componente. En general, se reconoce que no hay casos reales de movimiento inercial dado que, por la ley de gravitación universal, todos los cuerpos son atraídos por otros: sobre todo cuerpo se ejerce una fuerza ([1], pp. 13-4; [17], p. 549; [20], p. 141). Aunque si la ley de inercia se entiende como  $\sum f = 0 \rightarrow u = k$ , entonces sí hay casos reales de movimiento inercial: por ejemplo, como señaló Galileo, la velocidad terminal de un cuerpo que cae es uniforme (inercial) cuando el peso es contrarrestado por la resistencia del medio ([14], p. 252), o sea cuando la suma de las fuerzas de gravitación y resistencia es igual a cero. Ahora bien, independientemente de cómo se entienda el carácter "empírico" o "físico" que tiene el principio de inercia, en virtud de que se refiere a movimientos componentes, el punto es que, el concepto de inercia, en tanto que es un concepto que sirve para dar una explicación física del mundo, se refiere fundamentalmente a un movimiento

componente ([20], p. 141). Este sentido del concepto de inercia lo captó Galileo muy claramente, y ésta es una de sus grandes contribuciones al desarrollo de la física inercial. En verdad, Galileo fue el primero en mostrar cómo se pueden descomponer los movimientos complejos en sus movimientos componentes simples ([2], p. 112; [28], p. 20). Aunque la composición de movimientos era práctica corriente en la astronomía tolemaica ([9], p. 354), pero por ello, entre otras razones, se le daba una interpretación instrumentalista. Galileo fue el primero, porque para la tradición aristotélica, la composición de movimientos no era posible dado que el movimiento era concebido como expresión de la naturaleza del cuerpo, por lo cual un cuerpo no podía tener varios movimientos (o tendencias al movimiento) a la vez ([13], pp. 121, 133, 148; [15], p. 164). En cambio, para Galileo es posible que un cuerpo tenga varios movimientos (o tendencias) ya que, como hemos visto, para él el movimiento no afecta al cuerpo, es decir, el cuerpo es indiferente al movimiento. Pero además, como dice Galileo, "los movimientos y velocidades como éstos (los movimientos componentes uniforme, horizontal y acelerado vertical) se combinan sin alterarse, molestarse o impedirse el uno al otro" ([14], p. 250), es decir, los movimientos no sólo no afectan al cuerpo, tampoco se afectan entre sí. El significado de que los movimientos se combinan o componen, dando lugar como resultante a la trayectoria real, pero sin alterarse, es lo siguiente: la distancia (con respecto a las coordenadas cartesianas) que un cuerpo de hecho recorre en cierto intervalo de tiempo, de acuerdo con el movimiento resultante, es la misma que hubiera recorrido en el mismo intervalo de tiempo si es que sólo hubiese tenido uno de los movimientos componentes ([12], p. 112).

Podemos ahora preguntarnos qué relación conceptual hay entre el principio de inercia y el principio cinemático de relatividad del movimiento (entendido éste como limitado al movimiento inercial). Considero que el principio cinemático explicita una idea contenida implícitamente en el principio de inercia. El principio de inercia establece una equivalencia entre los estados de reposo y de movimiento uniforme horizontal (o rectilíneo para la física newtoniana, véase V en pp. 7-8), mientras que el principio

cinemático explicita que esta equivalencia quiere decir (entre otras cosas) que los fenómenos suceden igual, ya sea que el sistema al que pertenecen se encuentre en reposo o tenga un movimiento uniforme horizontal (que los cuerpos del sistema tengan un movimiento compartido). Y darlo que, como hemos visto (pp. 15-16), el principio cinemático implica (porque presupone) una concepción particular del movimiento, como translación que no afecta al cuerpo, esta concepción también está implicada o presupuesta en el principio de inercia (véase también VII, p. 9).

Sinteticemos los sentidos básicos que el concepto de inercia tiene en Galileo:

1) el movimiento inercial —uniforme y horizontal— es un movimiento que no requiere de ninguna causa para mantenerse, al igual que el reposo.

2) no requiere de causas porque el cuerpo es indiferente a este movimiento y al reposo, el cuerpo no es afectado por ellos.

3) los fenómenos suceden de la misma manera ya sea que ocurran en un sistema en reposo o en movimiento uniforme y horizontal;

4) el movimiento inercial es fundamentalmente un movimiento componente.

Ahora bien, el concepto de inercia no se enuncia (en la física clásica) como mera ley física, sino como un *principio*. Considero que en Galileo encontramos parcialmente dos ideas que son esenciales al *principio* de inercia: (i) una nueva concepción del movimiento como *transportación* que no afecta al cuerpo, y (ii) que el movimiento uniforme y horizontal, que se mantiene sin requerir de causa alguna es un movimiento componente. Es decir, el principio de inercia desempeña dos funciones en una teoría física: por una parte, tiene una función "metafísica" en tanto que define qué es el movimiento (es *transportación*), y por la otra, tiene una función "empírica" en tanto nos habla de un movimiento componente. Podemos entender que un mismo enunciado científico tenga estas dos funciones aparentemente dispares, si notamos que la posibilidad de considerar al movimiento inercial como un movimiento no-causado y componente (función física) requiere necesariamente que el movimiento se conciba como mera *transportación* a la cual el cuerpo es indiferente (función metafísica).

Tratemos ahora de precisar exacta-

mente en qué medida Galileo obtuvo el principio de inercia. Por lo que hemos expuesto en el curso de este artículo, es claro que Galileo desarrolló en su totalidad el concepto de inercia como concepto físico: utilizó la idea de un movimiento inercial componente para hacer físicamente posible una Tierra en movimiento. En cambio, Galileo no desarrolló por completo el sentido metafísico de este concepto, y por ello Galileo no obtuvo la ley de inercia entendida como un principio.

Aunque como hemos visto, hay ciertas alusiones de Galileo a un nuevo concepto del movimiento como *transportación*, que no afecta al cuerpo: al cual el cuerpo es indiferente, sin embargo, Galileo no desarrolla explícitamente este concepto, ni se logra dar cuenta de que este nuevo concepto del movimiento es incompatible con la física aristotélica, que es aquéllo que puede servir para sustituirla. En verdad, trabaja a la vez con el esquema conceptual aristotélico y el concepto de inercia, lo cual lleva a caer en una serie de confusiones notorias sobre todo en el *Diálogo*. Veamos.

Recordemos que en las "Cartas. . ." y en el *Diálogo* ([13], p. 147) Galileo sostiene que el movimiento inercial se mantiene debido a la indiferencia del cuerpo a dicho movimiento. Sin embargo, no siempre mantiene esta idea, es decir, no siempre mantiene que el movimiento inercial es un tercer tipo, diferente al natural y al violento. Podemos pensar que esto se debe a que hay ciertas similitudes entre el movimiento inercial y el natural, o el inercial y el violento, y a que en el fondo, la idea de un movimiento inercial no es compatible con el aparato conceptual aristotélico; ya que para este aparato, todo movimiento, por ser un proceso, requiere de una causa interna o externa y el movimiento, por tanto, es ontológicamente distinto al reposo, mientras que el movimiento inercial es no-causado y, por ello, ontológicamente igual al reposo. A veces, Galileo parece sostener que el movimiento inercial, que es circular: horizontal o de rotación, es natural, ([13], pp. 178, 242) dado que el movimiento circular es siempre natural. Galileo estaba muy interesado en sostener la naturalidad del movimiento circular para todo el universo, ya que pensaba que esto le permitiría unificar al cielo y a la tierra, como lo requería una defensa exitosa del copernicanismo ([24], p. 119; [26], p. 118).

Sin embargo, Galileo también se dio cuenta que no se puede sostener que el movimiento inercial es natural, puesto que los objetos terrestres no pueden tener a la vez dos movimientos naturales (los objetos no pueden tener dos naturalezas) ([13], pp. 121, 133).<sup>4</sup> Por otra parte, otras veces Galileo parece sostener que el movimiento inercial se mantiene, no porque sea un movimiento no-causado, sino porque la fuerza o ímpetu, que le imprime el motor que pone en movimiento al cuerpo mantiene al movimiento ([13], p. 149); en este caso, el movimiento inercial sería violento. Sin embargo, Galileo no parece considerar definitivamente que el movimiento inercial sea violento, en parte porque, como hemos visto varias veces, Galileo lo propone como un tercer tipo de movimiento, no-causado, que es equivalente al reposo (equivalencia que no es posible en el caso del movimiento violento precisamente por ser éste *causado* por el ímpetu o fuerza internalizada). En parte también, Galileo no afirma conclusivamente que el movimiento inercial sea violento, porque a veces le parece que no hay un concepto claro de movimiento violento (como distinto al natural). En efecto, él sostuvo en algún momento que el principio de movimiento natural es el mismo que ocasiona el movimiento violento, por ejemplo, una bola de plomo que cuelga de un hilo y que se la mueve de su posición vertical, descenderá espontáneamente debido a su tendencia interna (se moverá naturalmente), y al llegar al punto más bajo, sin que intervenga ningún motor externo o adicional, comenzará a moverse hacia arriba (movimiento que según los aristotélicos debería ser violento, pero que en verdad

<sup>4</sup> Cabe notar aquí que durante una discusión respecto de la naturalidad o no del movimiento inercial, Galileo sostiene que éste no es natural a los objetos terrestres sino que lo tienen porque *participan* en un sistema que tiene dicho movimiento inercial; al igual que, si aceptásemos la teoría aristotélica, el fuego y el aire en la bóveda celeste participarían del movimiento diurno del cielo, no tendrían un movimiento circular, no porque éste les fuese natural, sino porque *participarían* del sistema en el cual se encuentran ([13], p. 141). Es decir, Galileo logró intuir, aunque no lo sostuvo consistentemente, que un conjunto de objetos se mueven inercialmente no por naturaleza sino porque son parte de un *sistema físico*; o sea que logró intuir que dicho movimiento compartido se explica no apelando a una comunidad de esencias sino que se explica mecánicamente ([15], p. 135).

está causado por el mismo principio que causó el movimiento natural hacia abajo) ([13], p. 236).

Podemos preguntarnos por qué Galileo mantuvo el aparato conceptual aristotélico, si éste es incompatible con el principio de inercia. Ya que el movimiento inercial es no-causado, equivalente al reposo y presupone que el movimiento se concibe como mera *transportación*; mientras que para dicho aparato, el movimiento es siempre causado, ontológicamente distinto al reposo y se entiende como proceso. Una razón obvia es que los nuevos conceptos que se desarrollan históricamente, nunca se proponen con total claridad, sino que es a través de su uso, a veces inconsciente, que se llegan a definir y establecer con claridad sus relaciones con otros conceptos. Otra razón, menos obvia, es que Galileo necesitaba mantener la distinción entre movimiento natural y violento, porque en ella se encuentra la teoría dinámica aristotélica; como Galileo no quería desarrollar una dinámica,<sup>5</sup> mantuvo la dinámica aristotélica —y sobre todo la idea del movimiento natural] de caída—.

Es interesante notar aquí, que si bien se puede afirmar que el principio clásico de inercia constituye una discontinuidad revolucionaria respecto a la física aristotélica, sin embargo el principio de inercia se generó dentro de la tradición aristotélica: Galileo lo propuso (en una versión) como un tercer tipo de movimiento, que junto con el natural y el violento, constituían una clasificación completa de los movimientos. Es importante destacar que la afirmación de que dos paradigmas o dos teorías son discontinuos —que hay un cambio revolucionario entre ellos— no implica que, en el plano histórico, no hayan sido continuos en sentido fuerte; es decir no una mera continuidad temporal, sino en el sentido de que en cierto momento las ideas claves de la nueva teoría se generan dentro de la vieja.<sup>6</sup> El caso del enunciado galileano de inercia no es el único; la teoría

<sup>5</sup> En general, Galileo trató de limitarse a cuestiones cinemáticas (meramente a describir el movimiento) sin considerar las cuestiones dinámicas (las fuerzas o causas del movimiento). Así, él sostuvo que no sabía en qué consistía la gravedad (o causa de la caída) ([13], p. 234); también sostuvo que él sólo investigaría las propiedades de la aceleración uniforme pero no su causa ([14], p. 166).

copernicana es otro ejemplo ([18], p. 186). Parecería que la explicación de esto radica en el hecho de que los conceptos son “fluidos”, no tienen siempre un sentido único, determinado y bien delimitado, por lo cual, cuando son propuestos, pueden verse como compatibles con otros conceptos, pero al cabo de un cierto desarrollo histórico, pueden llegar a ser precisados de forma tal, que resultan ya claramente incompatibles con los otros conceptos. En cambio, cuando se habla de un cambio revolucionario, lo que se hace es comparar teorías más o menos bien desarrolladas, con conceptos bien definidos, sin tomar en cuenta los pasos intermedios (con conceptos no bien determinados) que dieron lugar a ellos.

Ahora bien, considero que Galileo no obtuvo el principio de inercia, fundamentalmente porque no desarrolló el sentido “metafísico” del concepto de inercia, no desarrolló la nueva concepción del movimiento que presupone el concepto de inercia. Es por ello que la afirmación de la existencia del movimiento inercial no la encontramos en la obra de Galileo, categorizada como la afirmación clave de una nueva física, sino como una afirmación que se hace un tanto lateralmente, Galileo no obtuvo el sentido metafísico del concepto de inercia porque no logró deshacerse de la distinción aristotélica entre movimiento natural y violento.

Usualmente los historiadores, siguiendo a Koyré, han considerado que Galileo no obtuvo el concepto de inercia porque afirmó que la inercia era esencialmente circular y no rectilínea (como nos dice la física clásica) ([15], p. 175).

6 Algunos historiadores confunden el plano teórico de comparación de teorías y el plano histórico. Por ejemplo, A. Maier sostiene que la ley de inercia no pudo ser un desarrollo histórico de la teoría del ímpetu (vs. Duhem) porque estos dos conceptos son contradictorios (cf. [10], p. 246). Si bien, a partir del concepto más o menos claro de inercia que Galileo desarrolló, es claro que es incompatible con el de ímpetu, no es necesario que el concepto de inercia galileana sea incompatible con el de ímpetu. Es por razones a posteriori, históricas, y no a priori, por lo que se puede afirmar que el concepto inercial galileano no se desarrolló a partir del ímpetu: Galileo no trabajaba con el mismo problema (conservación del movimiento en el caso de proyectiles) que los teóricos del ímpetu ([10], p. 4); y Galileo afirmó explícitamente en repetidas ocasiones que el movimiento inercial era un movimiento distinto al natural y al violento ([10], p. 4).

Se dice que sostuvo que el movimiento inercial era circular, porque se encontraba dominado por el dogma circularista: el movimiento circular es el más perfecto ([2], p. 126; [9], p. 349). Frente a esta idea, Drake ha sostenido que Galileo sí obtuvo lo esencial del concepto de inercia, a saber, las ideas de indiferencia al movimiento o reposo y de permanencia en el estado de reposo o movimiento ([10], p. 251). Además, aunque Galileo generalmente sostuvo que el movimiento inercial es circular, también sostuvo que es rectilíneo (ver [13], p. 193; ejemplo del proyectil lanzado por la honda: [14], p. 216; ejemplo del movimiento compuesto de la bola que sube por un plano inclinado; etcétera). Por ende, Galileo no sostuvo la circularidad del movimiento inercial porque estuviese dominado por un dogma circularista, sino porque en los casos en que habla de movimiento circular, la circularidad tiene por función eliminar las fuerzas, es decir, poner al cuerpo en un estado de indiferencia (por ejemplo, en el plano horizontal, la horizontalidad lo que elimina es la acción del peso, permitiéndole al cuerpo ser indiferente al movimiento uniforme). Lo que en esta posición de Drake se rechaza es la idea de que Galileo pensó que el movimiento inercial era esencialmente circular ([1], pp. 10, 15).

Con respecto a esta discusión acerca de la circularidad podemos decir lo siguiente: 1) Es verdad que Galileo considera muchas veces que el movimiento inercial es circular, y otras veces sostiene que es rectilíneo: probablemente para él el problema de la dirección del movimiento no era tan fundamental, como después llegó a ser en la física clásica (en verdad, aun en Descartes encontramos el manejo de un concepto de velocidad escalar y no vectorial). 2) Con respecto a las motivaciones galileanas, podemos decir que es verdad que Galileo maneja una motivación física para sostener que el movimiento inercial es circular: motivación consistente en encontrar la situación —plano horizontal— en que el cuerpo se encuentre en estado de indiferencia al movimiento. Pero también es verdad que hay un cierto dogma circularista, según el cual el movimiento circular es más perfecto, porque sólo él puede ser uniforme, perpetuo y capaz de preservar el orden: la misma situación espacial. Este dogma se establece a través del primer y segundo día del *Diálogo*: es por ello que cuando él establece que

el movimiento inercial es circular (horizontal), resulta obvio por qué dicho movimiento inercial es uniforme, perpetuo, y capaz de preservar el orden. 3) Considero que la manera apropiada para determinar si Galileo contaba o no con el principio de inercia, no puede consistir en determinar si Galileo enunció o no el principio newtoniano de inercia.

Para evaluar una obra científica no podemos quedarnos sólo a nivel de lo que enunció, debemos también considerar la función que juega aquello que se enuncia. Desde esta perspectiva, podemos afirmar que Galileo logró acentuar algo crucial: el papel que juega el concepto de movimiento inercial en las explicaciones físicas, a saber, que es un movimiento componente, que es equivalente al reposo y por tanto ningún fenómeno puede servir para determinar si un sistema —como por ejemplo la Tierra— está en movimiento o en reposo. Sin embargo, Galileo no logró percatarse de algo que es condición necesaria para que la idea de la existencia del movimiento inercial se constituya en un principio: este algo consiste en el hecho de que el concepto de movimiento inercial no sólo es incompatible con la física aristotélica (con su oposición entre reposo y movimiento y la división en movimientos naturales y violentos), sino que también es punto de partida de una nueva física (para la cual la oposición fundamental es entre reposo y movimiento inercial, por una parte, y aceleración, por la otra). Considero que la razón crucial por la cual se puede decir que Galileo no obtuvo el principio de inercia y no logró romper por completo con la tradición aristotélica, no es su afirmación de que la inercia es circular y que haya sostenido un dogma circularista, sino que logró usar el concepto de inercia como un fundamento o principio sobre el cual se construye una nueva física.

