

BURIDÁN, EL *IMPETUS* Y LA PRIMERA UNIFICACIÓN DE LA FÍSICA TERRESTRE Y CELESTE*

Leopoldo Prieto López. Ateneo Regina Apostolorum (Roma)

Resumen: El papel desempeñado por el concepto de *impetus* en la evolución de las ideas físicas reviste una indudable relevancia. Por un lado, a mitad de camino entre la noción aristotélica y newtoniana de movimiento, dicho concepto permite mantener la unidad de la historia de la ciencia y, por tanto, comprender los aspectos esenciales de la larga evolución de la misma hasta la magna síntesis realizada por Newton en el siglo XVIII. Por otro lado, a la luz de este concepto se comprende mejor que la revolución científica del siglo XVII tuvo eficaces antecedentes en la física de la baja Edad Media.

Abstract: The role placed by the concept of *impetus* in the evolution of physical ideas is of great relevance. On the one hand, standing on the middle ground between the Aristotelian and Newtonian notions of movement, said concept allows us to maintain the unity of the History of Science and hence, to comprehend the essential aspects of that history up until the great synthesis realized by Newton in the XVIIIth Century. On the other hand, this concept sheds light on the fact that the Scientific Revolution of the XVIIth Century had effective antecedents in the Physics of the Low Middle Ages.

1. Prenotandos

Es bien conocido que la filosofía de la naturaleza estudia el *ente móvil*. De ella nació, en el contexto de la *revolución científica*, la física clásica como ciencia experimental dedicada al estudio del movimiento matemáticamente formalizado. Se puede decir, por tanto, que, dependiendo de las diversas nociones empleadas en la explicación de la naturaleza del movimiento (así como de las conceptualizaciones del espacio, *en* el que aquél tiene lugar), se obtienen diferentes esquemas teóricos en la elaboración de una teoría física. De hecho, las grandes etapas de la historia de la física van unidas a los diversos modos de entender la naturaleza del movimiento (ya sea como movimiento *natural*, como cualidad o *fuerza impresa* o como un *estado inercial* de movimiento) y del espacio (ya sea como *lugar natural* o como *espacio vacío*). De esta manera, la historia del pensamiento físico, desde Aristóteles a Newton, se nos presenta en líneas generales en tres grandes etapas. La primera etapa es la *física aristotélica*, una física carente de formalización matemática, caracterizada por el empleo de tres principios fundamentales: el *lugar natural*, el *movimiento natural* (entendido como el proceso encaminado al reposo) y el *rechazo del vacío*. La segunda etapa está constituida por la *física del impetus*, una física que, a pesar de ser de origen griego, fue elaborada sobre todo

* Publicado en la revista italiana “21^{mo} Secolo: scienza e tecnologia” 2 (2008)

en el siglo XIV en la escuela de París por Juan Buridán, del que nos ocupamos en este estudio. Este segundo tipo de física investiga la *causa* del movimiento por medio del concepto de *fuerza impresa*, al que se da principalmente el nombre de *impetus*. Finalmente, la tercera etapa es la *física matematizada*, fundada en el método de la nueva ciencia experimental, ideado por Galileo, Descartes y Newton. Se trata de una física basada fundamentalmente sobre los conceptos de *movimiento inercial*, *espacio infinito* y *vacío* (a excepción, en este último aspecto, de Descartes y de los sostenedores del *plenum*).

Las características de estas tres etapas muestran la estrecha conexión que existe entre movimiento y espacio. En los *Principios metafísicos de la ciencia de la naturaleza* (1786) Kant describe la *materia* como “aquello que se mueve en el espacio”¹. El concepto de movimiento local implica, por tanto, el de espacio. Pero es claro que tanto el móvil como el espacio en el que éste realiza su trayectoria deben tener la misma entidad ontológica. Más claramente: el móvil real y concreto de naturaleza física, se mueve en un espacio igualmente real y concreto, o sea físico. Del mismo modo se corresponden el móvil matemático (foronómico), que es ideal (dado que es abstracto), y el espacio de la geometría, igualmente ideal y abstracto. Esta indicación no es en modo alguno banal. En la historia del pensamiento científico no faltan ejemplos de confusión de los planos real e ideal en el análisis del movimiento. Un movimiento real no puede tener lugar en un espacio abstracto-matemático; y un movimiento idealizado (como es el estado inercial de movimiento) no se da en un espacio concreto sino por *aproximación*. Por eso, en un espacio abstracto (como es el caso del espacio euclideo de la física galileana) no puede realizarse más que un movimiento abstracto. En tal tipo de espacio no puede realizarse el movimiento necesariamente *imperfecto* (desde un punto de vista matemático) de los cuerpos físicos. Quizás por esto la mayor parte de los experimentos físicos de Galileo son en realidad *experimentos del pensamiento*, es decir, *experimentos matemáticos*, si se puede hablar en estos términos². Es bien conocido el hecho de que Galileo en sus análisis sobre el movimiento adopta a menudo un punto de vista que lo coloca más allá de la realidad física. Este punto de vista no es otro que el *integral matematicismo* de la concepción galileana de la naturaleza. Un plano *de tal modo liso* que debe ser pensado como si fuera incorpóreo; un móvil *pulidísimo*, hecho de una *perfecta* figura esférica; en fin, la suposición de que en la *realización* de esta *experiencia ninguna resistencia* obstaculizará el rodamiento de esta esfera *pulidísima*³; es claro que ninguna de estas cosas se encuentra en la realidad física. Galileo, por tanto, *interpreta* los fenómenos del movimiento según reglas ideales, lo que es perfectamente legítimo y necesario. Pero hay que estar atentos: una cosa es la idealización matemática del movimiento y otra distinta es el movimiento real que describen los cuerpos que se observan en la naturaleza. En otras palabras, en el análisis galileano del movi-

¹ I. KANT, *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*, Ak IV, 480: “Materie ist das Bewegliche im Raume”.

² Cf. E. MEYERSON, *Identité et réalité*, Puf, Paris 1956, 157.

³ Cf. G. GALILEI, *De motu*, en “Le opere di Galileo Galilei”, vol. I, Barbèra, Firenze 1968, 298: “Haec demonstratio intelligenda est *nulla* existente accidentali *resistentia* [...]: supponendum est, *pianura* esse quoddammodo *incorporeum* [...], mobile esse *expolitissimum*, figura *perfecta* sphaerica”. Las cursivas son mías.

miento, la matemática tiende a ocupar el lugar de la física. Para Galileo sólo la razón y sus conceptos *ficticios* permiten comprender y explicar la naturaleza, plantearle preguntas y valorar sus respuestas. Frente al *empirismo* de los peripatéticos, Galileo reivindica el superior derecho de la razón *matemática* de los platónicos.

Entre la *vía aristotélica*, de naturaleza física, de un *lugar natural* y de un *movimiento concreto* y la *vía moderna*, de impronta matemática, que postula un *espacio abstracto* en el que sólo es pensable el *movimiento inercial perfecto*, se coloca transitoriamente en la historia de la física la doctrina del *impetus*, a la que dedicamos este artículo. En realidad, esta doctrina nació como un intento de corrección de la singular explicación aristotélica del movimiento de un proyectil, como veremos a continuación. La innegable presencia de esta doctrina en las obras juveniles de Galileo (debida, sobre todo, al influjo de Giambattista Benedetti, un decidido partidario de la *física parisina*, es decir, la física del *impetus*, y un pertinaz crítico de Aristóteles), nos asegura que la física del *impetus* es un acercamiento todavía físico a la naturaleza del movimiento, pero que, aunque lógicamente muy diverso, apunta ya hacia el concepto de inercia.

* * *

Como más adelante se dirá algo sobre la física de Aristóteles, debemos detenemos aquí brevemente sobre la física de la inercia (como tercera etapa de la historia de la física). El *principio de inercia* es el elemento fundamental de la física clásica. Este principio, desconocido para los antiguos, es la clave implícita en la física galileana y constituye el fundamento explícito de la física de Descartes⁴. Ahora bien, el principio de inercia no habría sido posible de no haberse introducido profundos cambios intelectuales, sin los cuales éste resulta inconcebible. Los presupuestos intelectuales que hicieron posible el surgimiento del concepto de inercia (y, por tanto, de la ciencia moderna) son, como ha dicho acertadamente A. Koyré, fundamentalmente dos: la *geometrización del espacio*, es decir, la idealización o abstracción matemática proyectada sobre el espacio, cuya forma más característica se realiza en la concepción newtoniana del espacio como un infinito vacío; y la *destrucción del cosmos*, esto es, el abandono de la concepción del mundo como un conjunto articulado y limitado de espacios concretos y de lugares naturales, en los cuales tiene lugar el movimiento natural de los cuerpos, tras el cual estos se abandonan al natural reposo. Sólo después de tan profundos cambios intelectuales, el concepto de inercia (un concepto irremediamente paradójico, como ha subrayado agudamente E. Meyerson) pudo constituirse como el verdadero hilo conductor de la revolución científica⁵.

⁴ Cf. R. DESCARTES, *Les principes de la philosophie*, II, 37 (“La première loi de la nature: que chaque chose demeure en l’état qu’elle est, pendant que rien ne le change”) y 39 (“La seconde loi de la nature: que tout corps qui se meut, tend à continuer son mouvement en ligne droite”).

⁵ Cf. E. MEYERSON, *Identité et réalité*, o.c., 148. El autor llama acertadamente la atención sobre el carácter paradójico e ideal de este principio. Su carácter paradójico se percibe claramente en la expresión *estado de movimiento*, porque el *estado* se dice del reposo, no del

En realidad, el concepto de movimiento inercial exige una potente capacidad teórica, dispuesta a desafiar los datos de la observación experimental. En él se hace presente uno de los aspectos fundamentales del método de la ciencia experimental, como es la construcción de un *modelo ideal*, al cual se *aproximan más o menos* los fenómenos de la naturaleza. Einstein ha llamado la atención sobre la atrevida idealización que se esconde tras la formulación neutra del concepto de inercia. Lo explica del siguiente modo. “Supongamos que un hombre que conduce un carro en una calle horizontal deje de repente de empujarlo. Sabemos que el carro recorrerá cierto trayecto antes de pararse. Nos preguntamos: ¿será posible aumentar este trayecto, y cómo? La experiencia diaria nos enseña que ello es posible y nos indica varias maneras de realizarlo: por ejemplo, engrasando el eje de las ruedas y haciendo más liso el camino. El carro irá más lejos cuanto más fácilmente giren las ruedas y cuanto más pulido sea el camino. Pero, ¿qué significa engrasar o lubricar los ejes de las ruedas y alisar el camino? Esto: significa que se han disminuido las influencias externas. Se han aminorado los efectos de lo que se llama roce o fricción, tanto en las ruedas como en el camino. En realidad, esto constituye ya una interpretación teórica, hasta cierto punto arbitrario, de lo observado. Un paso adelante más y habremos dado con la clave verdadera del problema. Para ello *imaginemos* un camino *perfectamente* alisado y ruedas *sin roce alguno*. En tal caso no habría causa que se opusiera al movimiento y el carro se movería perpetuamente. A esta conclusión se ha llegado imaginando un *experimento ideal* que jamás podrá verificarse ya que es imposible eliminar toda influencia externa. El experimento ideal dio la clave que constituyó la verdadera fundamentación de la mecánica del movimiento [...] La ley de la *inercia* no puede ser derivada directamente de la experiencia, sino que procede del pensamiento especulativo, compatible con la observación. La *experiencia idealizada* nunca puede ser realizada efectivamente, aunque sea imprescindible para la comprensión profunda de los experimentos reales”⁶.

* * *

Se debe hacer, en honor a la verdad, un breve comentario a la obra de Pierre Duhem (1861-1916), que fue el primero en poner de manifiesto en su obra fundamental *Le système du monde: Histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic* (1913-1959) la importancia de la dinámica del siglo XIV, y en particular la teoría del *impetus*, y el influjo ejercido por esta doctrina en los orígenes de la revolución científica. Ciertamente hay que guardarse del exagerar la importancia de los precursores medievales de la ciencia moderna y no infravalorar la grandeza de las figuras del siglo XVII. Aun así, la obra de Duhem en la historia de la física ha constituido un importante factor en el notable cambio de actitud de los historiadores de la ciencia en su visión del medioevo. Gracias a ella, hoy se acepta que “el mundo moderno es en cierto sentido una continuación del medie-

movimiento. Así, el *estado de movimiento* viene a significar así *el reposo o la quietud del movimiento*. Según el principio de la inercia, el movimiento es un *estado* que perdura indefinidamente mientras no es modificado por una causa externa.

⁶ A. EINSTEIN - L. INFELD, *La evolución de la física*, Salvat Editores, Barcelona 1986, 4-5. Las cursivas son mías.

val” y que, por lo que se refiere a la historia de la ciencia, “desde el siglo XI y XII en adelante, ha habido un continuo desarrollo del pensamiento occidental”⁷. De la misma opinión es también A.C. Crombie, según el cual en el siglo XIV se dieron los primeros pasos para establecer una matemática del movimiento, que, junto a las ideas del infinito y del vacío del espacio, minaban la concepción aristotélica del cosmos y favorecían la idea del movimiento relativo⁸.

* * *

Antes de concluir este proemio es conveniente dar alguna información sobre los datos biográficos más relevantes de Juan Buridán (1300-1358). Nacido en el Artois (Francia), la primera fecha cierta de su vida (1328) se refiere a un documento de la Universidad de París en el que aparece su firma en calidad de rector. Fue maestro en artes de esta facultad, sin pasar nunca a la facultad de teología.

La carrera académica de Buridán fue inusual en dos sentidos. En primer lugar, a lo largo de su prolongada vida académica fue sólo un “maestro en artes”, sin conseguir grado alguno en teología. No hizo, por tanto, ningún comentario al *Libro de las Sentencias* de Pedro Lombardo y sus escritos siguieron como hilo conductor el itinerario académico establecido por la facultad de artes de París. En segundo lugar, permaneció siempre como clérigo secular y no entró a formar parte de orden religiosa alguna. Como dicen los documentos de la época, fue “un clérigo de la diócesis de Arrás, maestro en artes” (*clericus Atrebatensis diocesis, magister in artibus*). Esto lo libró de las disputas doctrinales que a menudo se libraban entre los miembros de las órdenes religiosas, pero confirió a su obra un cierto aire de eclecticismo.

En Juan Buridán, atento lector de Aristóteles y conocedor de los sutiles análisis lógico-lingüísticos de Ockham, predomina el interés por la lógica y la ciencia. Entre sus obras destacan algunas de contenido lógico (*Sophismata, Summulae logicales*) y numerosos comentarios a las obras de Aristóteles (*Quaestiones in tres libros De Anima, Quaestiones super decem libros Ethicorum Aristotelis ad Nichomacum, Quaestiones in libros Metaphysicorum, Quaestiones in libros Physicorum, Expositio et quaestiones in Aristotelis De coelo*). En las cuestiones de naturaleza científica es de mencionar el hecho de que Buridán intentó incluir todos los movimientos, ya fueran celestes o terrestres, en un único sistema mecánico dominado por unas mismas leyes. El concepto fundamental de este sistema unitario fue, como vamos a ver, el *impetus*. Además, refiriéndose a la noción de *omnipotencia divina*, tomada en préstamo de la teología, Buridán admitía la hipótesis de un espacio vacío más allá de la esfera de las estrellas fijas, poniéndose así en abierto contraste con la doctrina de Aristóteles, según el cual más allá de dicha esfera (fuera, por tanto, del cielo, que se encuentra contenido dentro de la esfera de las estrellas fijas) no se puede dar el lugar, ni el vacío ni el tiempo.

Buridán es el autor que presenta del modo más acabado la teoría del *impetus* (o *fuerza impresa* en un móvil). Parece que fue también el inventor de este término.

⁷ H. BUTTERFIELD, *Le origini della scienza moderna*, Il Mulino, Bologna 1988, 23.

⁸ Cf. A.C. CROMBIE, *Historia de la ciencia*, vol. 2, Alianza, Madrid 2006, 102.

El *impetus* es una fuerza motriz transmitida por un motor a un cuerpo, que al recibirla se pone en movimiento. La medida del *impetus* está determinada por la *cantidad de materia* y la *velocidad*. Como puede observarse, se trata de las mismas magnitudes, aunque todavía tratadas cualitativamente, que más tarde servirán para definir numéricamente la *cantidad de movimiento* (o *momento* del movimiento) en la física newtoniana, como son el producto de la *masa* y la *velocidad*, siendo a su vez la masa el producto del *volumen* y la *densidad*. La doctrina buridaniana del *impetus* era, en realidad, un modo de racionalizar la dinámica aristotélica, en cuanto que incorporaba al móvil la fuerza motriz que Aristóteles consideraba exterior al mismo⁹.

2. La reintroducción del vacío a partir de las condenas parisinas de 1277

Hemos dicho que los conceptos de movimiento y de espacio son solidarios entre sí. Así es en Aristóteles, en cuyo pensamiento el *movimiento natural* se define siempre en relación con el *lugar natural*. Así es también en el caso del *movimiento inercial*, que sólo es concebible en el ámbito de un *espacio vacío e infinito*. Descartes demuestra claramente esta relación en sus dos primeras leyes particulares del movimiento: la ley de la inercia y la ley de la linealidad del movimiento exigen lógicamente un espacio infinito. Descartes, sin embargo, se muestra reacio frente a esa conclusión, por temor a las consecuencias teológicas que de ella podían derivarse en su perjuicio. De ahí que afirme que “el mundo es *indefinidamente* extenso”¹⁰.

Aristóteles no admitía el vacío. La hipótesis del vacío, es decir, de una suerte de ser del no-ser, como lo habían descrito los eléatas, constituía el fundamento del atomismo. Sabemos bien que Aristóteles estaba decidido a disminuir el valor de este sistema, que parece haber despreciado por su carácter materialista. Bajo el influjo de la gran autoridad del Estagirita, el vacío fue unánimemente considerado como una entidad ficticia hasta el siglo XIII. Pero en 1277 el obispo de París, Étienne Tempier, condenó entre otras algunas tesis que contribuyeron a la reintroducción en la filosofía de los siglos XIII y XIV de las nociones de *vacío* y de *infinito*. Por esta razón, P. Duhem afirmó que si se hubiera de asignar una fecha precisa al nacimiento de la ciencia moderna, se debería elegir el año 1277, momento en el que el arzobispo de París condenó solemnemente tesis como las siguientes: “La Causa primera no puede crear varios mundos” (34 [27]); “Dios no puede mover el cielo con un movimiento de traslación; la razón de ello es que el cielo dejaría un vacío” (49 [66])¹¹. La primera de estas condenas hacía inútil todo lo que el peripatetismo había enseñado sobre la imposibilidad de las dimensiones infinitas, tanto en acto como en potencia, y obligaba a los autores medievales a

⁹ Cf. E. GRANT, *Gli orighini medievali della scienza moderna*, Einaudi, Torino 2001, 145.

¹⁰ R. DESCARTES, *Les principes de la philosophie*, II, 21. Cf. *Carta de Chanut a Descartes*, 11 mayo 1647 (AT, X, 620) e *Carta de Descartes a Chanut*, 6 junio 1647 (AT, V, 50-56).

¹¹ Cf. P. DUHEM, *Études sur Leonard da Vinci*, vol. 2, Hermann, Paris 1913, 411 ss. En los números de las tesis condenadas, el primero indica el lugar que ocupa la proposición respectiva en el decreto de Etienne Tempier; el segundo, puesto entre corchetes, indica el orden de dicha proposición en la clasificación de R.P. Mandonnet.

revisar la *teoría del infinito*. La segunda condena revolucionaba la doctrina aristotélica del lugar y del movimiento local, abriendo las puertas a la *doctrina del vacío*. Como se puede apreciar, se trataba de dos elementos de gran importancia para el nacimiento de la ciencia moderna en el siglo XVII. De hecho el nacimiento de la ciencia moderna, con las aportaciones fundamentales de Galileo, Descartes y Newton, se apoya esencialmente sobre las nociones de espacio infinito (como *spatium extramundanum et vacuum*, aunque en Descartes es algo diverso) y de movimiento inercial. Las condenas de Tempier obligaron a los maestros parisenses en artes a fundar sobre nuevas bases la filosofía del lugar y del movimiento local. Además, posibilitaban un nuevo acercamiento a un concepto de movimiento, más en consonancia con las ideas antiaristotélicas entonces en boga, que conducirá posteriormente al concepto de *impetus* como *cuantidad impresa* en el móvil que perdura en su movimiento de traslación.

Gilson ha hecho valiosas observaciones a este respecto. En su opinión, las razones en general de la intervención del obispo de París, estando fundadas en motivos de naturaleza teológica, no pretendían ocuparse de argumentos de ciencia. El fin de estas condenas era salvaguardar la doctrina teológica y de fe sobre la *omnipotencia divina* contra el *necesitarismo griego y árabe*. Pero su efecto fue obligar a los teólogos y filósofos a estimar como posibles, en virtud de la *omnipotencia divina del Dios cristiano*, posiciones científicas y filosóficas tradicionalmente juzgadas absurdas de acuerdo a la naturaleza misma de las cosas, particularmente la existencia de magnitudes infinitas (actuales o potenciales) y la posibilidad de un movimiento de traslación *sin lugar* (o en el espacio vacío). El problema que se insinuaba tras las famosas condenas de 1277, como se puede ver, era la correcta *relación entre fe y razón* (o entre teología y filosofía), mucho más que la relación entre razón y ciencia. Apelando a la *omnipotencia divina*, los ánimos se sentían liberados del marco de necesidad y de finitud dentro del cual el pensamiento griego (y, en particular, el aristotélico) había considerado las cuestiones cosmológicas. Así, en virtud de este principio teológico, se formularon muchas hipótesis que contrastaban con la doctrina cosmológica tradicional, algunas de las cuales fueron posteriormente retomadas en el momento mismo del nacimiento de la ciencia moderna. Por tanto, si con Gilson se debe considerar exagerada la tesis (sostenida por Duhem) del nacimiento de la ciencia moderna en 1277, hay que salvar dos aspectos verdaderos contenidos en ella: 1) que la *teología cristiana* facilitó la apertura de nuevas perspectivas para la ciencia; 2) y que si en 1277 no nació la ciencia moderna, al menos es la fecha en que se hizo posible en el ámbito cristiano el nacimiento de algunas nuevas cosmologías, más cercanas a la moderna¹².

Una vez admitida la realidad del espacio vacío más allá de la esfera de las estrellas fijas (lo que, bajo la presión de la intervención de Tempier, llegó a convertirse en una *moda* en los escolásticos de entonces), se planteó una nueva pregunta en relación con el tratamiento aristotélico sobre el vacío: si existe un espacio vacío y en él un grave fuera abandonado a sí mismo, ¿caería instantáneamente (es decir, con una velocidad infinita) al lugar más bajo de él, como creía Aristóteles, o bien caería con una velocidad finita? Ante tal pregunta no se alcanzó una

¹² Cf. E. GILSON, *La filosofía nel Medioevo*, La nuova Italia, Firenze 1994, 555-556.

respuesta concorde, semejante a la obtenida en la cuestión del vacío. Independientemente de la respuesta dada, es del mayor interés para nosotros comprender la lógica subyacente que une el tratamiento del espacio vacío a un particular tipo de movimiento. Todo cuerpo se desplaza en un lugar según un particular tipo de movimiento. Ahora bien, algunos autores del siglo XIV sugirieron que, sólo en el vacío, libres de todo influjo perturbador, los cuerpos alcanzarían su movimiento verdaderamente natural o esencial. La razón presentada era que la *resistencia* del medio (que no existe en el vacío) es una perturbación accidental que obstaculizaría este movimiento esencial. De este modo los conceptos aristotélicos de *movimiento natural* y de *lugar natural* venían a ser transformados en beneficio del concepto de *movimiento esencial en el vacío*. Este tipo de *movimiento esencial* de un cuerpo en el vacío será llamado en el siglo XVII *movimiento inercial*. Pero el concepto medieval del *impetus* era un precedente de este *movimiento inercial*.

3. La teoría del *impetus* en general

Según Aristóteles, el movimiento es un efecto que procede de la naturaleza determinada de un cuerpo. La naturaleza de los cuerpos depende, a su vez, de los *elementos* que la componen. Como se sabe, la doctrina griega de los elementos afirma que estos, por orden decreciente de pesadez, son la tierra, el agua, el aire y el fuego. La característica principal del movimiento de un cuerpo formado por cualquiera de estos elementos es la linealidad. En el caso de los cuerpos en los que predomina la tierra, el movimiento lineal es descendente o de caída y en el caso de aquellos en que predomina el fuego, el movimiento lineal es ascendente. El agua y el aire se comportan como elementos medios.

Es interesante hacer notar a este propósito que la razón teórica del *geocentrismo* de Aristóteles no procede de una consideración particular hacia el hombre, como a menudo se dice acriticamente, sino de una relación lógica entre las teorías de los *elementos*, del *lugar natural* y del *movimiento natural*. El cuerpo grave cae. El lugar donde, tras su caída, se reúnen todos los graves es el *centro del mundo*, situado en la tierra por la razón obvia de que ésta se compone de tierra, el más pesado de los elementos. De este modo la tierra, como centro del mundo, es el primer referente absoluto de cualquier movimiento. El otro referente es la *esfera de las estrellas fijas*. No se puede caer más allá del centro del mundo, ni se puede ascender más allá de dicha esfera. El mundo (en torno a su centro) y el cielo (como conjunto de esferas contenidas dentro de la última esfera) son los dos grandes ámbitos de la realidad física. Ambos constituyen el *cosmos*.

Pero no todos los cuerpos están formados por los cuatro *elementos*. Sólo los *cuerpos mundanos* están formados por ellos. Los *cuerpos celestes*, en cambio, los que se encuentran por encima de la órbita lunar (o también cuerpos supralunares) son de una naturaleza distinta. Los cuerpos allí situados, según Aristóteles, se componen de un elemento desconocido en la tierra: el éter, también llamado el *quinto elemento* o la *quinta esencia*. Es propio de los cuerpos compuestos de éter la inalterabilidad e incorruptibilidad. Siendo, pues, los cuerpos celestes de naturaleza diversa de los terrestres, también el tipo de movimiento realizado por ellos será diverso. A diferencia del movimiento de los cuerpos terrestres, cuya naturaleza los dispone a realizar movimientos *lineales* y *transitorios*, el movimiento de

los celestes es *circular y perpetuo*.

La cosmología aristotélica se caracteriza, como puede verse, por la radical antítesis que establece entre el cielo y la tierra. Esta oposición durará hasta que Kepler y Galileo unifiquen la astronomía y la física. Dicha unificación será el primer logro de la *revolución científica*. En realidad, la revolución científica fue, en primer lugar, una *revolución astronómica* (con Copérnico y Kepler), y sólo después una *revolución física* (especialmente con Galileo y Descartes), a la que se aplicaron las nuevas nociones no aristotélicas del espacio y del movimiento celeste. Brevemente dicho, la revolución científica tuvo su prólogo en el cielo, donde se da el *espacio* más apropiado al nuevo concepto de *movimiento* que estaba surgiendo: el *estado de movimiento inercial*. La *Astronomia nova aetio-logotós seu physica coelestis (La astronomía nueva, considerada causalmente, o física celeste)* de Kepler (en cuyo título aparece la expresión “física celeste”, que es un verdadero reto al aristotelismo, al unificar la mecánica celeste y terrestre) es una obra que se distingue sobre todo por subrayar la naturaleza común tanto de los cuerpos celestes y terrestres como del movimiento que los anima sobre o bajo la órbita lunar. Galileo, por su parte, demostró en el *Sidereus nuncius* la naturaleza irregular y física de los cuerpos celestes, y por tanto, la falsedad de la idea aristotélica de la perfección e inmutabilidad de los cuerpos celestes.

Sin embargo el primer intento de unificar física y astronomía fue realizado en la baja Edad media por Juan Buridán, quien aplicó la teoría del *impetus* no sólo al movimiento (natural y violento) de los cuerpos terrestres, sino también al movimiento de los cuerpos celestes. Según Buridán, Dios, en el momento de la creación del mundo, imprimió en estos últimos un *impetus* que duraría ya perpetuamente. Careciendo allí de rozamiento, no habría ninguna otra causa que opusiera resistencia al primer empuje divino conferido a estos cuerpos. De este modo, anticipándose a Kepler y a Galileo, Buridán incluía por primera vez el movimiento terrestre y celeste en un mismo sistema mecánico¹³.

La teoría del *impetus* permitía explicar un cierto número de propiedades del movimiento como efectos del *impetus* sobre el móvil. Así, la aceleración o deceleración constante del movimiento eran explicadas por medio de la ganancia o pérdida del *impetus*. La trayectoria curva del proyectil era entendida asimismo como la composición del *impetus* decreciente con la *gravitas* constante. Buridán explicaba la naturaleza de este *impetus* en analogía con el calor impreso por el fuego sobre un metal o con el sonido producido por la percusión del badajo en una campana. En ambos casos ni el calor ni el sonido desaparecen instantáneamente, sino que decrecen progresivamente hasta extinguirse. En continuidad con la tradición de los llamados *calculatores* del *Merton College* (movimiento al que perteneció Walter Burleigh, maestro de Buridán), los filósofos parisienses comenzaron a introducir el uso de las matemáticas en el cálculo del movimiento. Este fue un mérito particular de Nicolás de Oresme, un discípulo de Buridán. La afirmación del carácter constante del *impetus* (a falta de obstáculos externos) puede ser vista como una anticipación del principio de la conservación del movimiento lineal.

La doctrina del *impetus*, por tanto, hacía posible una cierta unificación del

¹³ Cf. A. UDÍAS, *Historia de la física: de Arquímedes a Einstein*, Síntesis, Madrid 2004, 102.

estudio del movimiento. El movimiento de los *cuerpos terrestres* era, según la doctrina aristotélica, *natural* o *violento*. En el caso del movimiento *violento*, como el de los proyectiles, el *impetus* conferido al cuerpo debía *decrecer continuamente*, puesto que el proyectil, movido violentamente, perdía fuerza y se debilitaba en su lucha contra la gravedad y la resistencia del aire, que son constantes. En el caso del movimiento *natural*, como el de caída, el *impetus* venía, en cambio, a añadirse al movimiento natural de un modo creciente, de donde nacería la *aceleración constante* de los cuerpos durante la caída. Finalmente, en el caso de los cuerpos celestes, el *impetus* debía ser perpetuo, ya que una vez *impreso* en el cuerpo celeste, éste no encontraba ni la tendencia contraria de la gravedad (los cuerpos celestes se creían entonces libres de la gravedad, que en cambio afecta a los terrestres) ni la resistencia del aire. Por eso, tal estado de movimiento perpetuo y constante en los cuerpos celestes, aunque no lineal (como Descartes y Newton reivindicarán después para la ley de la inercia), representa en el siglo XIV un momento de importancia considerable en el paso de la segunda a la tercera etapa de la física, es decir, en el acercamiento a la teoría del movimiento inercial, que solamente en el siglo XVII aparecerá en su forma típica¹⁴.

La dinámica de Juan Buridán, que nos disponemos a estudiar, tiene fundamentalmente tres partes: la doctrina del *impetus* en el movimiento violento, en el movimiento natural y en el movimiento de los cuerpos celestes. Los dos primeros tipos forman su física terrestre; el último, su *física celeste*. Bajo este aspecto, el antiaristotelismo de Buridán es evidente.

4. El *impetus* y el movimiento violento: la teoría de los proyectiles (proyecta)

El sistema de la dinámica de Juan Buridán se impuso en la escuela nominalista de París. Los maestros de esta escuela lo aceptaron sin añadir nada esencial. Pero su difusión trascendió los límites de la Universidad de París en la primera mitad del siglo XIV. Acogido –no sin cierta resistencia– por los maestros italianos del Renacimiento, que estaban en pugna con el aristotelismo, se desarrollará bajo la influencia de la matemática renacentista hasta llegar a Galileo y sus discípulos. La mecánica de Galileo, en realidad, no es sino una forma madura, matemáticamente desarrollada, de aquella misma ciencia que en Buridán se hallaba todavía en germen y que era tratada sólo de un modo conceptual¹⁵.

En las *Cuestiones sobre los libros de la Física*, que constituyen un comentario pormenorizado de la *Física* de Aristóteles, se pregunta Buridán “si el proyectil, después de haber dejado la mano de quien lo ha lanzado, es movido por el aire o bien por alguna otra entidad”¹⁶. Es evidente que con este enunciado Bu-

¹⁴ Cf. I. NEWTON, *Principia mathematica philosophiae naturalis*, Definiciones, definición 3ª: “Materiae vis insita est potentia resistendi, qua corpus unumquodque, quantum in se est, perseverat in statu suo vel quiescendi vel movendi uniformiter in directum”.

¹⁵ Cf. P. DUHEM, *Études sur Leonard de Vinci*, vol. 3, o.c., especialmente el capítulo XIV (*La tradition de Buridan et la science italienne au XVI^e siècle*). Cf. S. DRAKE - I. E. DRABKIN, *Mechanics in Sixteenth-Century Italy. Selections from Tartaglia, Benedetti, Guido Ubaldo & Galileo*, The University of Wisconsin Press, Madison-Milwaukee-London 1969.

¹⁶ IOANNIS BURIDANI, *Quaestiones in libros physicorum*, lib. VIII, q. 12: “Utrum projectum post exitum a manu projicientis moveatur ab aere vel a quo moveatur”.

ridán pretende retornar críticamente sobre la teoría aristotélica del movimiento del proyectil. La pregunta crucial que Buridán replantea es cuál es la causa que mantiene en movimiento al proyectil. En definitiva, tomando una expresión común utilizada por otros autores de su tiempo, que se encuentra formulada *expressis verbis* en los *Juvenilia* de Galileo, la cuestión planteada por Buridán es ésta: “*A quo moveantur projecta?*”¹⁷. Aristóteles, desafiando el sentido común, explicaba el movimiento del proyectil recurriendo a la insólita doctrina según la cual el medio, es decir el aire, en lugar de oponer resistencia, es la causa impulsora que mantiene en movimiento al proyectil.

a) La doctrina aristotélica del movimiento del proyectil

El atomismo griego postulaba el *movimiento perpetuo* de los *átomos*. Por esta razón, no veía la necesidad de explicar la causa del movimiento. La física aristotélica, en cambio, estaba fuertemente anclada en el principio metafísico de que todo movimiento (*motus*) de un cuerpo cualquiera (*mobile*) presupone un motor (*motor*). “Todo lo que se mueve es movido necesariamente por otro”¹⁸. Esta doctrina no era otra cosa que la coherente aplicación de la causalidad al movimiento. Así, como es inconcebible un efecto sin causa, es igualmente inconcebible un movimiento sin un motor. Por tanto, el motor debe estar siempre junto y en contacto con el móvil. Una *acción a distancia* (*actio in distans*) del motor sobre el móvil es metafísicamente imposible según Aristóteles, porque supondría una negación del principio de causalidad. El motor debe estar siempre junto al móvil. En otras palabras, en relación con el *móvil* debe ser siempre un *motor conjunctus*.

Ahora bien, toda la dificultad de la explicación de la causa del movimiento local radica en la necesidad de mantener juntos “dos principios imprescindibles”, cuya conciliación no resulta sencilla. Primero, tratándose de movimiento de translación, el móvil debe alejarse del lugar en que ha comenzado su trayectoria; segundo, el motor, como *motor conjunctus*, debe estar siempre junto al móvil y, por tanto, debe disponer él mismo de movilidad. El problema –la *aporía*, si se quiere– no es de fácil solución. La original solución excogitada por Aristóteles es muestra palpable de su genio especulativo. Dado que la única realidad física que

¹⁷ Cf. G. GALILEI, *De motu*, o.c., 306: “A quo moveantur quae non naturaliter moventur”. *Ibid.* 307-308: “A quo moveantur projecta.- Aristoteles, sicut fere in omnibus quae de motu locali scripsit, in hac etiam quaestione, vero contrarium scripsit: et profecto non mirum hoc est; quis enim ex falsis vera colliget? Non poterat Aristoteles tueri, motorem debere esse coniunctum mobili, nisi diceret, projecta ab aëre moveri. De hac itaque sua opinione multis in locis testimonium fecit, quam, quia a nobis confutanda est, in medium afferemus; eamque (fusius enim ab expositoribus declaratur) sic breviter perstringemus.- Vult igitur Aristoteles, motorem, ut, verbigratia, proicientem lapidem, priusquam lapidem relinquat, pellere etiam partes aëris contiguas, quas, inquit, similiter movere alias partes, has alias, et sic successive; lapidem autem, a proiciente relictum, deinde ferri a partibus illis aëris; et sic fieri motum quendam lapidis discontinuum, et non esse unicum motum sed plures. Huc conatus est aufugere Aristoteles et eius sectatores, qui sibi suadere non potuerunt quomodo posset mobile a *virtute impressa* moveri, aut quid ista esset virtus. Verum, ut altera opinio verissima innotescat, hanc prius Aristotelis funditus evertere conabimur; alteram vero de virtute impressa, quoad licuerit, declarabimus et exemplis illustrabimus”.

¹⁸ ARISTÓTELES, *Física*, VII, 1, 241 b 24.

acompaña continuamente al móvil durante su trayectoria es el *medio* en el que tiene lugar el movimiento, Aristóteles concluyó que el *motor conjunctus* del móvil debe ser el medio mismo. En el caso del proyectil (y, en general, de todo movimiento violento), el motor es un *projector*. Así, inmediatamente después de lanzado el proyectil, el *projector* pierde el contacto físico con él... y, sin embargo, el móvil se mantiene en movimiento durante un cierto tiempo. ¿Cuál es, entonces, el motor durante ese tiempo? ¿Cómo se salva el principio de causalidad, sin contradecir la experiencia de todos los días de que las cosas lanzadas se mantienen todavía en movimiento por unos instantes? Se ha dicho que el genio de un pensador se manifiesta no sólo en sus aciertos, sino también en sus errores. Pues bien, Aristóteles demuestra su agudeza especulativa con su rebuscada (y falaz) explicación del hecho de que un móvil (*projectum*) continúe en movimiento después de perder todo contacto con el motor (*projector*). ¿Qué es entonces lo que continúa moviendo el cuerpo, una vez perdido el contacto con el motor y convertido en móvil separado?

La respuesta de Aristóteles a esta pregunta constituye uno de los elementos más curiosos de su física. En lo esencial, el pensamiento aristotélico sobre este particular se puede explicar así. Mientras que un cuerpo es lanzado, el motor (es decir el *projector*) está todavía en contacto con él. Pero en ese momento, el *projector* pone en movimiento no sólo el *projectum*, sino también la parte adyacente del medio, que, de ahora en adelante, una vez abandonado el *projector*, se comportará como único motor del móvil. Después, la misma porción adyacente del medio repite la acción del *projector* originario, confiriendo a la parte sucesiva del medio la capacidad de mover al *projectum*. De este modo, en todos los puntos de su recorrido, el *projectum* encuentra en el medio su *projector*. Sabemos ya que para Aristóteles únicamente la presencia constante del *motor conjunctus* junto al móvil era capaz de asegurar la continuación del movimiento. La potencia motriz del medio, sin embargo, se debilita poco a poco tras cada paso, hasta que la última parte del medio en la transmisión del movimiento es todavía movida por la anterior, pero no es ya capaz de mover al *projectum*. A partir de este momento el *projectum* pierde el *movimiento violento* y retorna a un *movimiento puramente natural*.

El mismo Aristóteles en diversos pasajes de la *Física* propone esta original teoría. Dice, por ejemplo, en el libro IV de la *Física*: “Por lo demás, los proyectiles se mueven, aunque no los toque ya quien los ha lanzado, y se mueven [...] porque el aire, que es movido, mueve a su vez”¹⁹. Más adelante, al final de esta obra (en el libro VIII) insiste, detallando más aún esta explicación. “Pero a propósito del movimiento de traslación de los cuerpos, hay que discutir antes una dificultad. Si es verdad que *todo lo que se mueve, es movido por alguna otra cosa*, ¿cómo es posible que, entre todas las cosas que no se muevan a sí mismas, haya algunas que continúan en movimiento, aunque, como es el caso de los proyectiles, el motor no esté ya en contacto en ellas? [Tal cosa es posible] sólo si el motor [originario] mueve simultáneamente alguna otra cosa, como por ejemplo el aire, el cual, una vez movido, mueve a su vez [...] Pero es necesario afirmar que es el motor originario el que hace que también mueva el aire o el agua o cualquier otra cosa que por naturaleza pueda mover a otra o ser movida por otra. Ello es debido a que [el

¹⁹ *Ibid.*, IV, 8, 215 a 15.

aire y el agua] no dejan de mover y ser movidas al mismo tiempo, porque aunque dejan de ser movidas cuando el motor deja de moverlas, pueden todavía seguir moviendo; y por eso puede ser movida otra cosa que esté en contigüidad con ellas, y de ésta se puede decir lo mismo. Pero comienza a dejar de mover cuando disminuye la fuerza motriz transmitida a las cosas que están en contigüidad, y cesa finalmente de mover cuando el motor anterior ya no hace que sea moviente, sino sólo movido. Y entonces el movimiento de ambos, el del último motor y el de la cosa movida, tiene que cesar simultáneamente, y con ello el movimiento total”²⁰.

b) La teoría de Buridán del movimiento del proyectil

Pero el intento de solución de Aristóteles de la aporía del movimiento del proyectil no “salvaba los fenómenos”. Podemos decir con seguridad que esta explicación del movimiento violento es el *punctum dolens* de toda la física aristotélica, cuyo intento de superación llevará a otros a abrir una brecha (y al posterior resquebrajamiento) en la física y cosmología del Estagirita. En este preciso contexto debe colocarse la doctrina del *impetus*, cuya formulación se hace con el explícito propósito de corregir la teoría aristotélica del movimiento del proyectil. El mérito fundamental de la teoría del *impetus* es que resuelve de un modo indudablemente más satisfactorio que Aristóteles el dilema de lo que hemos llamado los “dos principios imprescindibles” del movimiento local: el hecho del desplazamiento (y consiguiente alejamiento) del móvil del lugar en que se halla el motor y la necesidad de que el motor acompañe al móvil a lo largo de su trayectoria. La solución propuesta a esta problemática por la doctrina del *impetus* consiste esencialmente en la incorporación del motor al móvil; una solución más razonable y más económica, como se ve, que la de otorgar al medio –en abierta contradicción con la experiencia cotidiana– la función de motor.

La doctrina del *impetus* no es una invención de Buridán. Ya Juan Filopón (490-570) la había introducido, dándole el nombre de *fuera motriz impresa*, como alternativa a la doctrina aristotélica²¹. Siguiendo los pasos de Filopón, Buridán concibe el *impetus* como una *calidad impresa* en el móvil por la acción del motor. La impresión del *impetus* en el móvil explica la prosecución del movimiento mejor que –sugiere el mismo Buridán– la acción motriz del medio. En realidad, como todos saben bien, lo propio del medio es realizar una función contraria a la del motor: no impulsa, sino que opone resistencia. Una vez impresa, la *fuera motriz* (o *impetus*) se debilita progresivamente, tanto por la gravedad que debe vencer como por la resistencia que le opone el medio.

La teoría de Buridán es la siguiente. Cuando se imparte un movimiento violento a un cuerpo, se le comunica un *impetus* que hace que el movimiento continúe durante un cierto tiempo después que el proyectil ha dejado el *projector*.

²⁰ *Ibid.*, VIII, 10, 266 b 27 - 267 a 13.

²¹ Cf. JOHN PHILOPONUS, *On Aristotle's Physics*, en “Commentaria in Aristotelem Graeca” (vols. XVI-XVII) (a cargo de H. Vitelli), Reimer, Berlin 1887-1888. Hay traducciones al inglés del comentario a la física aristotélica de Filopón: A.R. LACEY, *Philoponus, On Aristotle's Physics 2*, Duckworth, London 1993; M. EDWARDS, *Philoponus, On Aristotle's Physics 3*, Duckworth, London 1994; P. LETTINCK, *Philoponus, On Aristotle's Physics 5-8*, Duckworth, London 1994.

Las causas de la disminución de la intensidad del *impetus* y de su extinción son la gravedad del propio *projectum* y el rozamiento producido por el medio. Una importante propiedad del *impetus* es que guarda una proporción directa con la cantidad de materia (*massa*) y la velocidad del *móvil*.

Pero veamos más en detalle esta teoría de Buridán en su *Comentario a la Física* (de Aristóteles). Con la técnica característica de la argumentación medieval comienza nuestro autor diciendo: “Parece que el proyectil, después de haber dejado la mano del lanzador, no puede ser movido por el aire. Debiendo atravesar el aire, el proyectil encuentra en éste más bien una resistencia a su movimiento”. Luego pasa Buridán a exponer las razones que, a su parecer, contradicen la teoría de Aristóteles. Después de una extensa relación de argumentos contra la *explicación* de Aristóteles, expone Buridán el núcleo esencial de su pensamiento sobre este asunto. “Esto es lo que me parece que se debe decir al respecto. Al mismo tiempo que el motor mueve el *móvil*, le imprime un cierto *impetus*, es decir le confiere una cierta potencia por la que es capaz de moverse en la misma dirección en la que el motor lo ha movido, ya sea hacia arriba, hacia abajo, hacia un lado o circularmente. Así, cuanto mayor es la velocidad con la que el motor mueve el *móvil*, tanto más intenso será el *impetus* que imprime en éste. *Es este impetus lo que mueve la piedra después que aquél que la ha lanzado cesa de moverla*. Pero por la resistencia del aire, como también por la pesadez que la inclina a moverse en un sentido contrario al que le ha sido impreso, este *impetus* se debilita continuamente [...] hasta ser vencido y destruido por la gravedad, que a partir de entonces moverá la piedra con su movimiento natural [...] Es ésta la explicación a la que hay que atenerse, porque las demás se han demostrado falsas, pero también porque los fenómenos concuerdan con ella”²².

De la larga lista de razones aducidas, una es especialmente convincente. Se trata del caso de la carrera que precede al salto. “Quien quiere saltar lejos retrocede y corre con rapidez para adquirir por medio de la carrera un *impetus* que, durante el salto, lo transporte a una cierta distancia. Por otro lado, mientras corre y salta, aquella persona no siente de ningún modo que el aire lo transporta, sino, bien al contrario, que le ofrece resistencia”²³.

Según Buridán, como hemos mencionado, el *impetus* está en función de dos elementos: la cantidad de materia (*massa*) y la velocidad que el motor imprime en el *móvil*. “De hecho se dice que se puede lanzar más lejos una piedra que una pluma, o también que un trozo de hierro o de plomo llega más lejos que un trozo de madera del mismo tamaño. Digo que la causa de ello es que todas las formas y disposiciones naturales son recibidas en la materia en proporción a la [cantidad de] materia. Por lo tanto, cuanto más materia contiene un cuerpo, tanto mayor será el *impetus* que recibe”²⁴.

En su *Comentario al De coelo et mundo* de Aristóteles, Buridán hace interesantes consideraciones sobre el *impetus*. También aquí propone en síntesis una corrección sustancial de la doctrina aristotélica del movimiento violento, argumentando que la causa del movimiento del proyectil no puede ser el aire, porque existen abundantes datos de experiencia que contradicen tal hipótesis. En con-

²² IOANNIS BURIDANI, *Quaestiones in libros physicorum*, lib. VIII, q. 12.

²³ *Ibid.*

²⁴ *Ibid.*

formidad con la experiencia resulta más lógico proponer la doctrina del *impetus* como una cualidad transitoria impresa en el móvil, proporcional a la masa y a la velocidad del mismo. En esta ocasión, después de exponer por extenso la opinión de Aristóteles, que critica duramente, propone Buridán su propia teoría. “Así como estos y otros fenómenos no se explican con aquella [de Aristóteles] opinión, prefiero considerar que el motor imprime en el móvil no sólo el movimiento, sino también un *impulso*, o una *fuerza*, o una *cualidad* –no importa cómo se le quiera llamar–, y este *impulso* tiene la fuerza de mover aquel cuerpo en que es impreso, como el imán imprime en el hierro una potencia que lo mueve hacia sí. Así, cuanto más rápido es este movimiento, tanto más intenso se hace el *impulso*. Ahora bien, este *impulso* en el proyectil o en la flecha disminuye continuamente por la resistencia contraria, hasta que no puede ya mover más al proyectil. Si encontráis una explicación diferente que salve al mismo tiempo la opinión de Aristóteles y los fenómenos, la aceptaré de grado”²⁵.

Con respecto a la cuestión del carácter natural (intrínseco) o violento (extrínseco) de este *impetus*, Buridán responde: “Este impulso ha sido impreso en el grave con *violencia*. Por eso lo mueve en sentido contrario a su inclinación natural. Por tanto, ese impulso es impreso por un principio extrínseco [...], por lo que se considera violento tanto el *impetus* como el movimiento que éste produce. Por lo que se refiere a las *autoridades* [es una mención indirecta de Aristóteles] supero el obstáculo negándolas. Y así la cuestión queda resuelta”²⁶.

Antes de concluir este capítulo debemos preguntarnos qué entiende Buridán por aquella *materia*, cuya cantidad es un factor determinante del *impetus*. Buridán se refiere a ella llamándola *materia prima*. Pero es claro que la *materia prima* de Buridán no coincide con la de Aristóteles, según el cual ésta es un principio metafísico absolutamente indeterminado, y por consecuencia no cuantificable. La *materia prima* de Buridán, por tanto, es la *materia* que, señalada por la cantidad, es principio de individuación, por lo que se ve afectada por las dimensiones y es cuantificable²⁷.

Si se quisiera traducir al lenguaje moderno el pensamiento de Buridán sobre el *impetus* comunicado a un proyectil debería decirse que la intensidad de éste es igual al producto de tres factores: una función creciente de la velocidad, el volumen del cuerpo y la densidad proporcional al peso específico. Al producto de la densidad por el volumen se le puede dar el nombre de *masa*. Newton pondrá una definición de masa semejante a la de Buridán. De hecho en la primera definición de los *Principia mathematica* se trata de la *cantidad de materia* o *masa*, que es definida como “la medida de la misma [materia] obtenida del producto de su densidad por el volumen”²⁸. Para Buridán como para Newton la *masa* es la *materia prima*, determinada ya por el accidente *cantidad*. Podemos así

²⁵ IOANNIS BURIDANI, *Quaestiones in Aristotelis De coelo et mundo*, lib. III, q. 2: “Utrum lapis proiectus vel sagitta emessa ab arcu, et sic de consimilibus, post exitum a proiiciente moveatur a principio intrinseco vel a principio extrinseco”.

²⁶ *Ibid.*

²⁷ Cf. P. DUHEM, *Le système du monde*, vol. 8, Hermann, Paris 1958, 211.

²⁸ Cf. I. Newton, *PRINCIPIA MATHEMATICA PHILOSOPHIAE NATURALIS, DEFINITIONES, DEFINITIO I: “QUANTITAS MATERIAE EST MENSURA EJUSDEM ORTA EX ILLIUS DENSITATE ET MAGNITUDE CONJUNCTIM”*.

afirmar que en la mecánica de Buridán la proposición central es ésta: para lanzar con velocidad igual cuerpos diversos, es necesario comunicar a estos unos *impetus* proporcionales a sus respectivas masas²⁹.

Pero Buridán no ha hecho explícita la relación matemática que une el *impetus* y la velocidad. De esta forma pensaba y se expresaba como es propio de una dinámica todavía puramente *cualitativa*. Pero, aunque no haya dado una formulación matemática a sus proposiciones, su dinámica tiene una precisión conceptual tal que la hace válida todavía hoy. Si se le hubiera exigido una fórmula matemática para determinar la relación entre el *impetus* y la velocidad, habría escogido sin duda la forma que se presenta como la más sencilla y natural, que es la proporcionalidad. Así lo hicieron Galileo y Descartes. Lo que Galileo llamará *impeto*, lo que Descartes denominará *quantité de mouvement*, no es sino el *impetus* de Buridán, un concepto familiar a estos dos autores, que lo habían conocido en su juventud a través de los tratados de autores escolásticos formados en el ambiente de los *terministas* de París. Ahora bien, esta determinación era inexacta. Solamente Leibniz fue capaz de determinar con precisión (contra Galileo, Descartes y sus respectivos discípulos) el valor de la proporción entre el *impetus* (llamado por él *fuera viva*) y la velocidad. La *fuera viva* es proporcional al cuadrado de la velocidad, no a la simple velocidad. Con todo, esta corrección de Leibniz, que modificaba los enunciados cuantitativos propuestos por Galileo y Descartes, dejaba intacta la relación conceptual entre *impetus* y velocidad, determinada precedentemente por Juan Buridán.

5. El *impetus* y el movimiento natural: la caída acelerada de los graves

La explicación más ampliamente aceptada entre los filósofos del siglo XIII sobre la caída acelerada de los graves era la teoría de Themistius, quien, interpretando la doctrina de Aristóteles, afirmaba que en su caída un grave desciende cada vez más rápidamente, porque su peso aumenta a medida que se acerca a su *lugar natural*, que es el *centro del mundo*. Una teoría alternativa a esta creía que el factor causante de la aceleración de la caída de los graves era la diferente presión del aire, menor al inicio y progresivamente mayor en el curso de la caída.

Juan Buridán, en cambio, afronta el problema de la caída acelerada de los graves empleando el concepto de *impetus*. Ya Walter Burleigh (1275-1344) había hecho referencia a algunos filósofos según los cuales la aceleración del movimiento natural se debía al progresivo aumento de una *gravedad accidental*. Sabemos bien que en la Edad media el nombre de *gravedad accidental* es un sinónimo de *impetus*. Según Gaetano de Tiana, “algunos dan el nombre de *gravedad* o *ligereza accidental* a esta virtud comunicada por el motor al móvil, pero de ordinario esta característica es llamada *impetus*”. Gaetano de Tiana fue un lector de Burleigh y éste fue, como ya se ha apuntado, maestro de Buridán.

¿Cuál es, pues, la causa de la aceleración en la caída de un grave? Buridán lo explica de un modo convincente. “Por tanto, es manifiesto que si un grave se mueve más velozmente o más lentamente, no se debe al hecho de que esté más o menos cercano de su lugar natural, sino, como diremos más adelante, porque adquiere por sí mismo un cierto *impetus* que se añade a su gravedad. El movi-

²⁹ Cf. P. DUHEM, *Le système du monde*, vol. 8, o.c., 214.

miento se hace así más rápido que cuando el grave es movido solamente por su gravedad. De manera que cuanto mayor [en velocidad] es el movimiento, más vigoroso se hace el *impetus*. Así, en la medida en que el cuerpo continúa descendiendo, su movimiento se hace cada vez más rápido”³⁰.

En la misma obra, algunas cuestiones más adelante, retorna Buridán sobre el mismo argumento. “La causa por la que la caída natural de los graves va acelerando progresivamente parece ser ésta. Al inicio de la caída, sólo la gravedad mueve el cuerpo. Por eso la caída es más lenta al inicio. Pero conforme esta gravedad va imprimiendo un cierto *impetus* al grave (*impetus* que mueve al cuerpo al mismo tiempo que la gravedad), el movimiento se hace más rápido. La caída se hace entonces progresivamente más rápida, porque el *impetus* se va haciendo al mismo tiempo más intenso. Se ve así cuál es la causa de que este movimiento sea cada vez más acelerado”³¹.

Esta doctrina, sumariamente expuesta en el *Comentario a la Física*, es desarrollada con más amplitud en la cuestión 12 del libro II del *Comentario al De Coelo et mundo*. En primer lugar, Buridán hace notar que sobre el hecho de la aceleración progresiva no hay dudas. Pero es difícil determinar cuál es su causa. “Al final del segundo libro del *Tratado De Coelo et mundo*, el Comentador [es decir, Averroes] admite, en términos oscuros, que el grave se mueve más velozmente al final [de la caída] a causa del deseo de alcanzar el término [...] Pero yo concluyo que la causa que hace más rápidos los movimientos de los cuerpos graves o ligeros no es la mayor cercanía del lugar natural. El incremento de la velocidad proviene de alguna otra cosa que se añade o detrae en razón de la longitud del movimiento realizado”³².

Descartadas esta y otras razones, nuestro autor llega a la conclusión de cuál es la causa de la aceleración de este movimiento. “Rechazadas estas diversas explicaciones, nos queda una *imaginación*³³, que, me parece, es necesario seguir. Supongo, en primer lugar, que la gravedad natural es siempre la misma, antes, durante y después del movimiento. De hecho, después del movimiento una piedra es de igual peso al que tenía antes del mismo. Supongo, en segundo lugar, que la resistencia ofrecida por el medio es siempre la misma. Como he dicho antes, no me parece que el aire inferior, que se encuentra cercano al suelo, deba ofrecer menor resistencia que el superior; probablemente ocurre al contrario: que el aire superior, siendo más rarefacto, ofrece una resistencia menor a la caída del grave.

³⁰ IOANNIS BURIDANI, *Quaestiones in libros physicorum*, lib. VIII, q. 9.

³¹ *Ibid.*, lib. VIII, q. 12.

³² IOANNIS BURIDANI, *Quaestiones in Aristotelis de Coelo et mundo*, lib. II, q. 12: “Utrum motus naturalis debet esse velocior in fine quam in principio”: “De ista quaestione non est conclusio dubitata quantum ad quia est, sicut dictum est, omnes percipiunt quod motus ipsius gravis deorsum continue magis ac magis velocitatur, posito quod per uniforme medium cadat, quia omnes percipiunt quod quanto lapis a longiore distantia descendens cadit super hominem, tanto fortius laedit ipsum. Sed magna dubitatio est quare ita sit. Et de hoc fuerunt multae diversae opiniones. Et Commentator in II huius ponit de hoc verba obscura quod grave appropinquans fini velocius movetur propter magnum desiderium ad finem [...] Igitur ego concludo quod non ex maiore propinquitate ad locum naturalem sunt motus naturales gravium et levium velociore, sed ex aliquo alio, vel apposito vel remoto vel variato, ratione longitudini motus”.

³³ En los escritos de Buridán el término *imaginación* es equivalente a *hipótesis*.

En tercer lugar, supongo que siendo el móvil el mismo, siendo el motor total el mismo y siendo la resistencia siempre la misma o semejante, el movimiento será de igual velocidad, porque la relación entre motor, móvil y resistencia del medio es siempre la misma. Pero añado ahora que, en la caída de un grave, el movimiento no es siempre igualmente veloz, sino que se produce un incremento progresivo de la velocidad. Por lo que es necesario concluir que a este movimiento concurre *algún otro motor diverso de la gravedad natural*, que desde el inicio permanece constante. Digo, además, que este motor no es el lugar que atrae (el móvil) [...] [ni la diferente presión del aire] [...] De todas estas proposiciones resulta necesario *imaginar* cuanto sigue. De su motor principal, que es su natural pesadez, un grave no adquiere más que un movimiento. Pero con este movimiento, el grave adquiere un cierto *ímpetus*, como un poder *añadido* de mover al cuerpo, permaneciendo invariada la gravedad natural. Este *ímpetus* es adquirido como consecuencia del movimiento. Así, cuanto más veloz es el movimiento, más fuerte e intenso llega a ser el *ímpetus*. De manera que el grave es movido, al mismo tiempo, sea por la gravedad, sea por este *ímpetus* creciente, por lo que su movimiento debe ser continuamente acelerado hasta alcanzar su término [...] Hay que decir que algunos han dado a este *ímpetus* el nombre de *gravedad accidental*³⁴.

Este texto es un ejemplo de razonamiento bien conducido sobre cuestiones naturales. Salta a la vista el buen sentido de Buridán en su análisis físico. Por esa razón, la teoría de Buridán del *ímpetus* se impuso a las doctrinas de los peripatéticos tanto sobre el movimiento violento (o de los proyectiles) como natural (de caída de los cuerpos graves). Pero además la teoría del *ímpetus* contenía en potencia, hechos los necesarios ajustes, el núcleo fundamental de las nociones de la mecánica moderna (a la que hemos llamado la tercera etapa de la historia del pensamiento físico), como se ve particularmente en el caso del *ímpetus* de los cuerpos celestes.

6. El ímpetus en los cuerpos supralunares: en camino hacia la inercia moderna

En sus *Quaestiones in libros Physicorum* dice Buridán: “Hay una *imaginación* que yo no sabría refutar de modo demostrativo. Según esta imaginación, Dios, desde la creación del mundo, movió los cielos con [una cantidad de] movimiento idéntica a aquélla con la que se mueven actualmente, imprimiéndoles un *ímpetus* con el que han continuado moviéndose uniformemente hasta el día de hoy. Este *ímpetus*, no encontrando ninguna resistencia contraria, no se extingue ni se debilita. Del mismo modo decimos que una piedra es movida (una vez abandonada la mano que la ha lanzado) por un *ímpetus* que ha sido impreso en ella; pero la gran resistencia que encuentra tanto en el medio como en su inclinación hacia otro lugar, hace que el *ímpetus* de la piedra disminuya continuamente hasta desaparecer. Por tanto, según esta *imaginación*, no es necesario admitir que las *inteligencias* sean los motores de los cuerpos celestes [...]; ni siquiera es necesario que sea Dios quien los mueva, excepto bajo la forma de aquel influjo gene-

³⁴ *Ibid.*

ral, por el cual decimos que Dios coopera en todo aquello que es”³⁵.

Más adelante, hacia el final de la misma obra, se repite nuevamente esta explicación del movimiento perpetuo de las esferas celestes. “En la Biblia no se dice que existan las *inteligencias* encargadas de comunicar a las órbitas celestes el movimiento que les es propio. Es lícito, por tanto, pensar que no hay alguna necesidad de suponer [de acuerdo con la fe] la existencia de tales inteligencias. De hecho, se podría decir que Dios, cuando creó el mundo, movió como le plugo cada una de las órbitas celestes, imprimiendo en ellas un *impetus*, que desde entonces las mantiene en movimiento; de suerte que no hay necesidad de que Dios las mueva ulteriormente, sino por medio del influjo general, semejante al que Él, por medio de su concurso, proporciona a todas las acciones que se producen. De este modo Dios pudo descansar el *día séptimo* de la obra que había realizado, confiando a las cosas creadas sus respectivas acciones y pasiones. Este *impetus*, impreso por Él en los cuerpos celestes, no se ha debilitado ni destruido con el paso del tiempo, porque en estos cuerpos no hay inclinación hacia otros movimientos ni resistencia que haya podido corromper o disminuir tal *impetus*. Con todo, yo no tengo esta explicación como segura. Solamente pediría a los maestros en teología que me indicasen cómo pueden realizarse estas cosas”.

La idea del *movimiento perpetuo de los cuerpos celestes* es tan apreciada por nuestro filósofo que en otro escrito aparece expuesta por tercera vez. El *Comentario a la Metafísica* de Aristóteles le proporciona la ocasión de discutir la doctrina del Estarigita, según la cual cada órbita celeste es movida por una inteligencia especial. En este orden de cosas es necesario distinguir —piensa Buridán— las suposiciones de la *sabiduría pagana* de las enseñanzas de la *fe católica*. Así, después de haber analizado las opiniones de Aristóteles y de sus comentaristas, continúa en los siguientes términos: “Se puede todavía *imaginar* otra hipótesis, pero yo no sé si es o no extravagante [*nescio an sit fatua*]. Muchos físicos, como se sabe, suponen que el proyectil, después de ser lanzado por el motor, es movido por un *impetus* que le comunica el motor. El proyectil se mueve entonces mientras el *impetus* es más fuerte que la resistencia. Este *impetus* duraría indefinidamente [*in infinitum*] si no fuese disminuido ni destruido por algo contrario que le opone resistencia o por alguna otra cosa que inclina el móvil a un movimiento contrario. Ahora bien, *en los movimientos celestes no hay nada contrario que ofrezca resistencia*. Por eso, en la creación del mundo Dios movió cada esfera con la velocidad que determinó según su voluntad y después dejó de moverlas. Estos movimientos han persistido a lo largo de los siglos en virtud del *impetus* impreso a las esferas [celestes]. Se dice, por eso, que Dios descansó el *séptimo día* de todo el trabajo que había hecho. No digo que Él cesara de actuar hasta el punto de no continuar obrando por medio de aquel influjo general fuera del cual un hombre, como por ejemplo Sócrates, no podría caminar. Se cometería un error si se creyese que algo puede moverse, o incluso existir, fuera de este influjo general”. Buridán concluye

³⁵ IOANNIS BURIDANI, *Quaestiones in libros Physicorum*, lib. IV, q. 4: “Utrum in motibus gravium et levium ad sua loca naturalia tota successio proveniat ex resistantia medii”.

este razonamiento con las siguientes palabras: “Ved, pues, qué diferentes son las opiniones de los filósofos, precedentemente referidas, de las verdades de la fe católica”³⁶. La conclusión no puede ser más interesante: la teoría del movimiento perpetuo de las esferas celestes, germen de donde brotará el *principio de la inercia*, es presentada por Buridán como el epílogo mecánico del descanso divino en el séptimo día de la Creación.

Finalmente, en sus *Cuestiones sobre el Tratado del Cielo y el Mundo* Buridán hace un breve resumen sobre la misma cuestión. Después de afirmar que la causa de la aceleración de la caída de los graves es el *impetus* creciente, añade: “Del mismo modo que este *impetus* aumenta como consecuencia del movimiento, así también disminuye o desaparece si se produce un debilitamiento o disminución del movimiento. Se puede hacer la siguiente experiencia: moved vivamente, con un movimiento de rotación, una rueda de hierro muy pesada y después cesad de moverla. Mucho tiempo después, continuará todavía moviéndose por causa del *impetus* adquirido y no podréis detenerla inmediatamente. Pero, poco a poco, por causa de la resistencia opuesta, este *impetus* irá debilitándose progresivamente. Ahora bien, si esta rueda durase siempre y ninguna resistencia alterase su *impetus*, recibiría entonces un *movimiento perpetuo*. Por tanto, no hay por qué *imaginar* que las inteligencias motrices de las órbitas celestes son necesarias. Se puede decir que en el momento en que Dios creó las esferas celestes, les comunicó el movimiento que quiso; y que éstas se mueven todavía hoy en virtud del *impetus* entonces comunicado, ya que este *impetus*, no encontrando ninguna resistencia, no es destruido ni disminuido”³⁷.

Tenemos aquí una cierta formulación del principio de movimiento inercial en el modo imperfecto en que Buridán lo concebía. El movimiento perpetuo de las esferas celestes, tratado por Buridán, no es todavía el *principio de la inercia*, tal como será formulado por la mecánica moderna. Para llegar a su formulación moderna es necesario que el principio del movimiento perpetuo de Buridán adquiera dos características que aún no tiene. Al carácter de *perpetuidad*, el movi-

³⁶ IOANNIS BURIDANI, *Questiones in libros metaphysicorum*, lib. XII, q. 9: “Utrum quot sint motus coelestes, tot sint intelligentiae et e converso”.

³⁷ IOANNIS BURIDANI, *Quaestiones in Aristotelis de Coelo et mundo*, lib. II, q. 12: “Et experimentum habetis quod, si mola fabri magna et valde gravis velociter moveretur a te motu reversionis, et cessares eam movere, adhuc ab impetu acquisito ipsa diu moveretur; immo tu non posses eam statim quietare, sed propter resistantiam ex gravitate illius molae, ille impetus continue diminueretur donec mola cessaret; et forte, si mola semper duraret sine aliqua eius diminutione vel alteratione, et non esset aliqua resistantia corrumpens impetum, mola ab illo impetu perpetuo moveretur. Et sic aliquis posset imaginari quod non oporteat ponere intelligentias moventes corpora caelestia, quia nec habemus ex Sacra Scriptura quod debeant poni. Posset enim dici quod, quando Deus creavit sphaeras caelestes, ipse incepit movere unamquamque earum sicut voluit; et tunc ab impetu quem dedit eis, moventur adhuc, quia ille impetus non corrumpitur nec diminuitur, cum non habeat resistantiam”.

miento inercial debe añadir las notas de *uniformidad* (en relación con la velocidad) y de *carácter rectilíneo* (en relación con la dirección). La teoría del *impetus* no ha recorrido todo el camino que la separa de la concepción moderna de la inercia (que en su forma perfecta se encuentra en Newton), según la cual un cuerpo continua en su movimiento uniforme y rectilíneo, mientras no intervenga algún factor externo que lo acelere o frene en su velocidad o lo desvíe de su trayectoria. La definición newtoniana del principio de la inercia dice así: “Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme, salvo que sea obligado a cambiar dicho estado por fuerzas impresas”³⁸. Para llegar a la formulación de esta ley se requería un poderoso esfuerzo de *abstracción científica*, que, dejando de lado la observación de los cuerpos físicos, así como el modo en que estos se mueven en el mundo físico y real de la experiencia, fuese capaz de concebir unos *cuerpos matemáticos* (es decir, ideales) que se desplazan en el *vacío* del *espacio geométrico* (igualmente ideal). Sólo en este tipo de espacio, en el que no existen perturbadoras *influencias externas* que limiten la perfección ideal de una regla de razón (no de experiencia), encuentra su validez perfecta el tipo de movimiento expresado por la ley de la inercia.

El principio de la inercia no fue formulado en el siglo XIV. Pero la cosmología de ese siglo estaba dando pasos decisivos en esa dirección. El nuevo contexto intelectual en el que se encontraban los *maestros en artes* después de las condenas de 1277 facilitaba en gran medida la nueva orientación. En un espacio que se ha dilatado sin confines más allá de la esfera de las estrellas fijas, sin interferencias ni resistencia al movimiento (como corresponde al concepto de *vacío*), habrá que añadir a la *perpetuidad* del movimiento de los cuerpos celestes las propiedades de *rectilinearidad* y *uniformidad*. Posteriormente habrá que aplicar esas mismas propiedades al movimiento de los cuerpos terrestres (sea éste natural o violento), lo que en cierta manera había sido ya anticipado en el tratamiento uniforme dispensado por Buridán al movimiento de los proyectiles y de la caída de los graves. Cuando, finalmente, se haya admitido la esencial identidad de los cuerpos terrestres y los celestes y se haya verificado la asimilación de astronomía

³⁸ I. NEWTON, *Principia mathematica philosophiae naturalis, Axiomata, sive leges motus*: Lex I: “Corpus omne perseverare in statu quiescendi vel movendi uniformiter in directo, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum illum mutare”. Llama poderosamente la atención que la breve explicación añadida por Newton a esta definición se detenga en tres tipos de cuerpos con sus respectivos movimientos, que son exactamente los mismos que Buridán ha estudiado ampliamente en sus obras: los *proyectiles* (*projectilia*), la *rueda metálica* (*trochus*) que gira sobre sí misma (movimiento de rotación) y los *planetas* (moviendo circular de translación), estos últimos con la salvedad que impone el estado de la astronomía del siglo XIV. El texto de Newton dice así: “*Projectilia* perseverant in motibus suis, nisi quatenus a resistentia aeris retardantur, et vi gravitatis impelluntur deorsum. *Trochus*, cujus partes coherendo perpetuo retrahunt sese a motibus rectilineis, non cessat rotari, nisi quatenus ab aere retardatus. Majora autem *Planetarum* et *Cometarum* corpora motus suos et progressivos et circulares in spatiis minus resistentibus factos conservant diutius”.

y física, estaremos ya a las puertas de la revolución científica del siglo XVII.

El razonamiento de Buridán sobre el *impetus perpetuo* de los cuerpos celestes invita a pensar en el desarrollo que, siglos después, experimentará el *meccanicismo* hacia la concepción *deísta* de Dios. Se ha caracterizado este proceso diciendo que el potente Artífice divino de otro tiempo viene a convertirse en el “Dios perezoso” del siglo XVIII. No se trata únicamente del divino reposo del séptimo día de la creación, aludido por Buridán. Es algo más comprometedor. El divino Artífice tenía cada vez menos que hacer en el mundo. Al final se termina por no sentir ni siquiera la necesidad de conservarlo, porque el mundo podía prescindir ya de sus servicios. Así, el potente y activo Dios de Newton, que todavía hacía marchar el Universo según su libre voluntad, se convirtió en una rápida sucesión en un poder conservador, en una *inteligencia supramundana* y, finalmente, en un *Dieu fainéant*³⁹.

Leopoldo Prieto López, LC
Ateneo pontificio *Regina Apostolorum*
Via degli Aldobrandeschi 190
00163 Roma
lprieto@legionaries.org

³⁹ Cf. A. KOYRÉ, *Del mundo cerrado al universo infinito*, Siglo XXI, Madrid 1999, 253-255.