Zoj 4

Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE CIENCIAS

EL DESARROLLO HISTORICO DE LOS CONCEPTOS DE LA MECANICA CLASICA.

T E S I S

Que para obtener el Título de

FISICO

p r e s e n t a

LUIS FERNANDO AREAN ALVAREZ

México, D. F. 1987

INDICE DE MATERIAS

ADVERTENCIA

> Estamos consagrados històricamente a la historia, a la construcciòn de discursos sobre discursos, a la tarea de oir lo que ya ha sido dicho.
>
> Michel Foucault

Este trabajo se ocupa de los principios de la mecànica clàsica, en el sentido màs lato del tèrmino. Es pues una arqueologia. Se trata de observar como cambia la mirada que contempla el mundo, y màs especificamente, la que contempla el movimiento. Veremos, trataremos de ver a travès de los mismos cristales de colores que cubrieron los ojos de Heràclito y Parmènides, Platòn y Aristòteles, Galileo y Newton, Descartes y Leibniz. Trataremos de ver por què nuestros propios cristales tienen esos colores particulares.

Esta es una historia de las palabras y las cosas, de los significados y los significantes. Los significantes de la fisica tienen una doble cualidad: son a la vez una palabra y un simbolo matemàtico. En las ecuaciones, causas y efectos son intercambiables: estàn separados y unidos por una igualdad, que es conmutativa. Los simbolos pueden transformar su funciòn dentro de la teoria, por una nueva definiciòn o un cambio de signo. Estas manipulaciones matemàticas, aparentemente nimias, tienen profundas consecuencias en los significados.

La correspondencia de doble significante y significado hace de la ciencia una disciplina ùnica. Con frecuencia, se olvida que la ciencia es màs que un conjunto de ecuaciones, que tiene significados aplicados a la realidad. Por otra parte, estos significados no son invariantes: a lo largo de la historia de una teoria, desde su gestaciòn hasta su caducidad, los significados van cambiando.

Encontraremos en esta historia que los conceptos de la fisica clàsica contienen elementos que datan de Aristòteles, si no antes; que la misma palabra ha servido para designar cosas radicalmente distintas, una causa y un efecto, a lo largo del desarrollo de la teoria; que la sintesis newtoniana no fue una reducciòn teòrica de elementos tomados directamente de Galileo: la fisica galileana y la newtoniana, siempre inextricablemente unidas en nuestra concepciòn, son distintas. Encontraremos tambièn que Galileo no era el empirista que los textos preconizan, ni el creador absoluto de la nueva ciencia. Trataremos de vislumbrar las motivaciones epistemològicas y metafisicas que llevaron al principio de minima acciòn; veremos còmo los conceptos de materia, espacio y tiempo oscilan de Aristòteles a Kant, pasando por Descartes, Newton y Leibniz.

Como dice Foucault, comentar es reconocer que el significado rebasa al significante: encontrar lo no hablado, lo que se oculta detràs de los sìmbolos. Este es el trabajo del exègeta: una vuelta eterna a lo que creemos que pensaron otros. No sòlo los conceptos cambian; tambièn los comentarios estàn impresos en una concepciòn del mundo. Vaya pues una interpretaciòn que ha querido ser personal, aunque indudablemente està marcada por mi circunstancia.

Mi motivaciòn principal es filosòsofica: se trata de mostrar que la concepciòn positivista de las teorìas cientìficas es equivocada. Hacer esto desde un punto de vista històrico, analizando el substrato cultural, la concepciòn del mundo que genera los conceptos.

Este trabajo es tambièn una defensa de la filosofìa y la historia de la ciencia: de la necesidad de entender còmo han llegado a nosotros los conceptos, de echar una ojeada al proceso de creaciòn de una teorìa. O màs exactamente, de varias teorìas, pues la mecànica clàsica, aùn despuès de Newton, no es una teorìa unificada. No entrarè sin embargo en polèmicas a cada paso; en la conclusiòn, analizarè brevemente la postura positivista, a la luz de la historia de la mecànica.

Hablarè del problema del movimiento desde su planteamiento original, el eterno debate de Heràclito y Parmènides, hasta la formulaciòn final de la mecànica clàsica. Existe otra intenciòn en detenerse aquì: la mecànica clàsica es vista hoy en dìa por muchos estudiantes de fìsica con una cierta medida de desprecio. A fin de cuentas, es una teorìa equivocada, no? Y sin embargo, la mecànica clàsica es tal vez la màs grande aventura intelectual, el màs majestuoso y bello edificio que ha erigido la razòn humana. Hubo un tiempo en que reinò sobre todas las ciencias, con la seguridad de su propia certeza. Su desarrollo ofrece lecciones ùnicas en la historia de las ideas, lecciones que no se volveràn a repetir jamàs: la incertidumbre no està sòlo en el corazòn de la fìsica cuàntica; tambièn la filosofìa la comparte.

Los perìodos màs estudiados de la historia de la ciencia son sin duda la revoluciòn copernicana, pasando por Galileo hasta llegar a Newton, y la revoluciòn cuàntica y relativista del siglo XX. Sin embargo, es difìcil encontrar una historia de la mecànica que describa, desde un punto de vista filosòfico, el desarrollo de los conceptos. No he querido dejar a un lado ninguna de las ideas que hayan podido contribuir a formar esos conceptos. Por ello, comenzamos desde los griegos, haciendo una exposiciòn màs o menos detallada de la fìsica de Aristòteles, que a su vez se apoya en pensadores màs antiguos. Trataremos la fìsica de la Edad Media, la aristotèlica y la nominalista, que tendrìa una fuerte influencia en el joven Galileo; llegaremos a Newton, donde la mayorìa de las historias se detienen, y pasaremos màs allà: a la mecànica analìtica, tratando de analizar las motivaciones filosòficas que llevaron a su formulaciòn.

Evidentemente es una gran cantidad de material, y esto da a todo el trabajo un tono irremediablemente monogràfico: ante la imposibilidad de ir detalladamente a las fuentes, cada una de las cuales merecería sin duda un trabajo de esta extensión, me he apoyado fuertemente en los historiadores y comentadores. El capítulo sobre Galileo està basado en el invaluable trabajo de Koyrè, y en menor medida, en Koestler; la historia de la fisica medieval, en la obra de Edward Grant y Kuhn; el desarrollo de la mecànica analitica, en Lanczos; el episodio de Newton, en Cohen y Koyrè. Para los griegos, me he basado sobre todo en Guthrie, Cornford y Lloyd, exceptuando a Heràclito, cuya fuente principal es Mondolfo. Leibniz està representado por Russell y Ortega y Gasset. Finalmente, Mach ha sido un contrapunto indispensable en todo momento de la historia de la mecànica. Algunas de las ideas filosòficas son tomadas tambièn de estos autores, sobre todo de Koyrè, de Bachelard y de Kuhn. He tratado de darles crèdito, pero si en algùn lugar se me ha escapado, me confieso culpable de plagio involuntario. En cambio, respecto a la relaciòn de Leibniz con la mecànica analitica, aunque ampliamente reconocida, no he encontrado una exposiciòn suficientemente extensa; las ideas de ese capitulo, al igual que varias de las consideraciones sobre Newton y Descartes, y las reflexiones filosòficas sin crèdito a lo largo de la obra, son de mi autoria.

I. COSMOS Y LOGOS

Ah, Dedalus, los griegos!
Ulises, J. Joyce

1.- Magia y Religiòn.

En el siglo VI antes de nuestra era, Jonia, situada en la costa del Asia Menor, estaba a punto de ser el escenario de una de las màs grandes revoluciones en la historia de las ideas. La invasiòn dòrica de la penìnsula helènica habìa señalado el declive de la civilizaciòn micènica, haciendo que las antiguas tribus griegas buscara refugio en las islas egeas y en el Asia Menor. Los aqueos y eolios de Tesalia se establecieron al Norte, sobre las ruinas de la vieja Troya; gente de Atica y la Argòlide ocuparon, arrebatàndola a los lidios, la regiòn comprendida entre las cuencas del Hermo y el Meandro, fundando las doce ciudades de Jonia: Efeso, Colofòn, Lèbedo, Teos, Clazomene y Focea; Samo, Quio y Eritras; Miunte, Priena y Mileto.

¿Què distinguiò el pensamiento de aquellos milesios que merecieron el nombre de primeros filòsofos del de los pueblos que los habìan precedido? ¿Què fue lo que provocò la primera revoluciòn intelectual de Occidente, en la que està fundada todo el pensamiento europeo posterior?

Es indudable que otros pueblos, antes que los griegos, habìan hecho aportaciones importantes al acerbo intelectual de la Humanidad. La tecnologìa, las matemàticas y la astronomìa mesopotàmicas y egipcias estaban altamente desarrolladas ya alrededor del año 3000 AC: en la metalurgia, se conocìan ya las tècnicas de forjado, fundido y colado y se hacìan aleaciones de metales; el hilado, el tejido y la alfarerìa tenìan ya sus tècnicas bàsicas, que no cambiarìan fundamentalmente hasta la Edad Industrial; la arquitectura permitìa levantar 'sigurats' y piràmides.

El desarrollo tecnològico precientìfico tenìa sin duda sus raìces en dos factores: la observaciòn y la suerte. No es descabellado pensar que el primer experimento de alfarerìa surgiò de la observaciòn casual de una porciòn de arcilla dejada accidentalmente al fuego; asimismo, las primeras aleaciones deben de haber sido obtenidas por impurezas en los metales, no por experimentaciòn con metales puros. Sin embargo, el cuerpo de conocimientos de cada una de estas ramas de la tecnologìa fue enriquecièndose y sistematizàndose mediante la tècnica de ensayo y error. La importancia de estos conocimientos no puede minimizarse: exigìan paciencia y experimentaciòn, asì como la suficiente capacidad imaginativa para extraer conclusiones de los experimentos.

Por otro lado, las matemàticas y la astronomìa conocieron tambièn una evoluciòn importante en este perìodo. Los egipcios, obligados por las inundaciones periòdicas del Nilo, perfeccionaron la agrimensura y desarrollaron un calendario admirable; los babilonios utilizaron el sistema posicional, resolvieron de manera general la ecuaciòn de segundo grado, y observaron cuidadosamente los eclipses, llegando a un cierto grado de predicciòn.

Paralelamente, los egipcios y babilonios desarrollaron una cosmovisiòn coherente y completa, en la que intentaban dar respuesta a aquellas preguntas acuciantes que han preocupado al Hombre en todos los tiempos, desde el origen del mundo, el papel del Hombre sobre la Tierra y la naturaleza humana, hasta la razòn del dìa y la noche, las mareas, las estaciones, los relàmpagos, los terremotos, y en fin, todos los fenòmenos cuyas causas querìan explicarse. Estas explicaciones cumplen un doble cometido: uno teòrico, que intenta fundamentar y legitimar el orden còsmico, el orden social, y el papel del individuo en el mundo, y uno pràctico, que intenta dominar o propiciar los fenòmenos naturales.

La bùsqueda del orden en el caos aparente de la Naturaleza es una necesidad innata en el hombre. Como lo demuestran algunos experimentos de la psicologìa Gestalt, la mente humana es capaz de extraer patrones aùn de los dibujos màs aleatorios. La organizaciòn de las estrellas en constelaciones, sin duda uno de los primeros esfuerzos de sistematizaciòn que emprendiò la Humanidad, es un buen ejemplo de esta tendencia. El desarrollo del principio de causalidad, que se manifiesta a edad muy temprana en los niños, debe haber ocurrido tambièn en los albores de la Humanidad. En su formulaci'on màs primitiva - si hago esto ocurrirà aquello - el principio de causalidad es el hilo rector en el que se asienta implìcitamente el comportamiento racional humano.

El dominio de su entorno inmediato, mediante instrumentos de caza y toda la gama de ingeniosas invenciones que forman la tecnologìa primitiva, debe de haber tenido, como consecuencia lògica, el desarrollo de la magia. En efecto, el hombre primitivo, consciente de su fuerza respecto al resto de la creaciòn, sin duda comenzò a esforzarse en dominar aquèllos fenòmenos que aùn no dominaba, sobre todo cuando èstos tenìan una incidencia fundamental en su propia supervivencia. Asì, el cazador tratò de propiciar la caza, atrayendo a los animales, y el agricultor quiso regular la lluvia. Respecto al primero, abundan ejemplos de ritos màgicos en todas las sociedades, desde el cazador de Africa hasta el moderno pescador deportivo, con sus curiosas manias. El caso del segundo es, definitivamente, màs dramàtico. Si el cazador nòmada no encuentra presas, se muda a otro valle. El agricultor està atado a su tierra, y mucho màs a la merced de los elementos. Asì pues, le era indispensable asegurar su cosecha mediante ritos màgicos.

Frazer, en su notable estudio sobre la magia y la religiòn, apunta un hecho evidente: la magia, al igual que la ciencia moderna, se basa en el principio de causalidad, en la certeza de que a determinada causa corresponderà sin duda un determinado efecto. En este sentido, para el hechicero primitivo està convencido de la inmutabilidad de la Naturaleza, de la existencia, digàmoslo de una vez, de leyes naturales (1).

El mago no rinde pleitesìa a los dioses y a los espìritus. Si acaso cree en su existencia, los obliga y domina mediante sus hechizos y conjuros. Frazer distingue dos tipos de magia, bajo el rubro comùn de magia simpatètica: la magia homeopàtica, que trabaja por semejanza, y la magia contaminante, que trabaja por contagio. Su monumental tratado abunda en sugerentes y curiosos ejemplos de uno y otro tipo, que van desde los aborìgenes australianos hasta los campesinos escoceses. No abundaremos en estos ejemplos, ya que no es èste un trabajo sobre la magia. Sin embargo, aclaremos las ideas que subyacen a la aplicaciòn de los principios màgicos, pues son ilustrativas de los procesos mentales que llevaron al Hombre hasta la ciencia.

La magia homeopàtica se basa en el supuesto de que cosas semejantes actùan de la misma manera, o pueden ser afectadas de la misma manera. Asì, por ejemplo, el cazador que hace una danza propiciatoria se disfraza de venado y efectùa los mismos movimientos de su presa, creyendo asì atraer al animal; el mèdico brujo que toma agua y la esparce alrededor pretende hacer que las nubes lo imiten; el maestro de voodoo haitiano que clava alfileres en la imagen de su enemigo busca que lo mismo que èl hace al muñeco le ocurra a la persona. Por otro lado, la magia contaminante actùa sobre objetos o pertenencias del sujeto al que se quiere encantar: los abundantes ritos concernientes al cordòn umbilical y la placenta pertenecen a este grupo. Si se quiere que un muchacho sea cazador cuando crezca, la placenta serà colgada de un àrbol del bosque; si, por el contrario, se trata de una niña, la placenta serà enterrada junto al hogar. Otros ejemplos incluyen la realizaciòn de conjuros sobre lanzas o flechas que hayan producido heridas, con la intenciòn de que la herida sane. Inclusive los modernos rituales que se llevan a cabo con los dientes de leche tienen origen en la magia contaminante.

Como puede verse, ambos tipos de magia se basan en el principio de que lo semejante produce lo semejante, ya sea por analogìa o por contigüidad (principio que, por cierto, està detràs de la moderna medicina homeopàtica). En un principio, todos los miembros de la tribu tenìan algo de magos, y actuaban por sus propios fines. Sin embargo, algunos ritos eran de importancia fundamental para toda la tribu, por lo que su realizaciòn cayò progresivamente en las manos de una clase especial, los magos profesionales. Es lo que Frazer llama magia pùblica. Estos magos, en virtud de su pretendida importancia, terminaron por tomar el control de la tribu, erigièndose en clase dominante, tal vez la primera clase ociosa. De este ocio surgiò el tiempo para profundizar en el estudio de la Naturaleza, inventando nuevos ritos, investigando, discurriendo supercherìas.

Como hemos dicho antes, no sòlo la tecnologìa sino tambièn las matemàticas y la astronomìa alcanzaron un desarrollo muy importante antes del advenimiento de la cultura griega. Hay que agradacerlo sin duda a estos magos, cuyas observaciones les permitieron hacer descubrimientos reales, mezclados entre las supersticiones y los tabûes. Es claro que, aparte estos descubrimientos, la mayoria de las veces la magia pùblica fallaba en sus objetivos. Esto debe de haber llevado a los magos a inventar no pocas supercherias para ocultar su fracaso. Como apunta Frazer, algunos de los ritos requerian el concurso de toda la tribu, y siempre se podia echar la culpa a una falla en el rito en caso de no llegar al resultado deseado (3). Sin embargo, la casi invariable futilidad de los esfuerzos màgicos por controlar a la Naturaleza deben de haber llevado a la gradual convicciòn de que otros poderes màs fuertes se oponian a los designios del mago. Tal vez en esto se puede encontrar el origen de la religiòn. A diferencia de la magia, la religiòn no supone una Naturaleza sometida a leyes naturales. En cambio, se cree que existen poderes superiores que voluntariosamente rigen los fenòmenos. Estos poderes son personales y conscientes, y pueden ser propiciados o aplacados por una apelaciòn a sus sentimientos. El mago deviene sacerdote; en lugar de dominar y exigir, ruega e implora. Pero a la vez, la religiòn le permite formular una cosmogonia, explicar el orden còsmico y el orden social como una consecuencia de la voluntad de seres màs altos.

La diferencia entre la concepciòn màgica y la concepciòn religiosa salta a la vista. Esta ùltima presupone que la Naturaleza es elàstica: las leyes naturales no existen como tales. Cada terremoto es consecuencia de la ira de un dios, cada lluvia benefactora, cada salida del Sol debe ganarse con sacrificios propiciatorios. La generalidad tambièn se pierde: no existen principios generales, asi sea implicitos, en el pensamiento religioso.

Los ejemplos de pensamiento religioso respecto a los fenòmenos naturales abundan. No nos detendremos màs que en unos pocos ejemplos. Las estaciones eran explicadas por egipcios y griegos de tiempos homèricos con mitos semejantes: la muerte o descenso al infierno de un dios o diosa (Osiris y Persèfone, respectivamente) a quien era dado regresar periòdicamente. Asimismo, para los griegos la ira de Zeus causaba los rayos, y la voluntad de Poseidòn los terremotos.

Desde luego, el proceso que hemos esbozado esquemàticamente, no fue tan radical como pareceria. Por esa proclividad de la mente humana a aceptar contradicciones, durante mucho tiempo convivieron el mago y el sacerdote. Frazer comenta casos contemporàneos en la propia Europa, en que un santo es obligado a cumplir una cierta peticiòn mediante la ejecuciòn de un rito. Desde luego, ciertos ritos màgicos eran, o parecian ser, enormemente efectivos. Nunca, que se sepa, fallò un rito para hacer salir el Sol, o para traer a la primavera. Asi pues, magia y religiòn convivieron en los sacerdotes egipcios y babilonios, pero el antiguo reino determinista se perdiò por muchos siglos.

Esta era, a grandes rasgos, la situaciòn intelectual de la Humanidad hacia el siglo VI antes de nuestra era, y asi habia permanecido por incontables siglos, cuando se operò el cambio de actitud al que nos referìamos al principio. Las razones de este cambio escapan al presente anàlisis. Sin embargo, se pueden adelantar algunas hipòtesis al respecto.

2.- Los Filòsofos Jonios

El Mediterrâneo Oriental era una encrucijada de culturas; los griegos pudieron beneficiarse de los conocimientos de babilonios y egipcios, y sin duda muchos aspectos de su mitologìa fueron heredados de otros pueblos. De la antigüedad de este intercambio existen varias pruebas, tales como el hallazgo de estatuillas egipcias en las ruinas cretenses o micênicas. Por otro lado, como testimonia Herodoto, viajar era casi una obligaciòn curricular en la educaciòn de un joven griego. Mileto era una ciudad rica, gracias al comercio y a sus talleres textiles. Pero tal vez el factor màs importante en el propiciamiento del clima intelectual necesario para el nacimiento de la filosofìa fue màs polìtico que econòmico. En efecto, las ciudades-estado griegas estaban acostumbradas a un clima de libre discusiòn y crìtica polìtica, asì como al cuestionamiento de las formas de gobierno idòneas, (al menos en lo que respecta a los hombres libres) y esta libertad y crìtica pueden haber sido transplantadas de manera màs o menos natural al pensamiento respecto a los fenòmenos materiales. Los griegos, al cuestionar el orden social, resquebrajaban el orden còsmico en el que el rey-dios de, por ejemplo, los egipcios, tenìa forzosamente que apoyarse. Mientras que las cosmovisiones prejònicas habìan sido sancionadas y sacralizadas oficialmente por la clase sacerdotal, las teorìas de Tales y sus sucesores fueron confrontadas en un clima de libertad intelectual, que permitiò la crìtica y la discusiòn. Sin duda, estas discusiones nos parecerìan hoy en dìa bizantinas, pero en aquel momento revestìan una enorme importancia intelectual. La filosofìa griega se expresò casi siempre en completa libertad, sin que el Estado tomara partido por tal o cual cosmovisiòn, si exceptuamos el caso de la escuela pitagòrica en Crotona, o el juicio de Anaxàgoras y Sòcrates por parte de los atenienses.

Pero, ¿què es lo que produjo esta actitud mental? ¿cuàl fue este cambio, esta novedad en el pensamiento jonio? No fue una innovaciòn tecnològica, ni un gran descubrimiento matemàtico. Cierto, Herodoto nos refiere la gran sabidurìa de Tales de Mileto, y afirma que llegò a predecir un eclipse, durante el cual se produjo una de las batallas de Creso contra los persas. Pero esta predicciòn la hizo sin duda basàndose en los càlculos babilonios. No. Lo que distinguiò a Tales de los otros sabios, lo que le valiò el tìtulo, asignado por Aristòteles, de primer filòsofo, no fueron sus conocimientos, sino su actitud ante los preguntas que conciernen al mundo material.

En primer lugar, Tales renunciò a la explicaciòn sobrenatural del mundo; en la frase de Carrington, "dejò a los dioses en la puerta". Tales, y los otros milesios despuès del èl, procuraron encontrar las razones de los fenòmenos naturales en la

Naturaleza misma, sin el concurso de la voluntariosa divinidad. Asì por ejemplo, la teorìa de Tales sobre los terremotos es ilustrativa: èl consideraba que la tierra flotaba sobre agua, y que las agitaciones de èsta provocaban los terremotos. Ciertamente, la idea de que la tierra era una isla flotante no era novedosa en su tiempo, pero mientras la mitologìa hacìa habitar el mar por un Dios que provocaba terremotos, Tales recurre exclusivamente a la explicaciòn natural. En segundo lugar, mientras Homero o Hesìodo hablaban de terremotos particulares, Tales hace una teorìa general de los terremotos. Asì, en lugar de prestar atenciòn a lo particular, Tales trata de generalizar.

Esta actitud, como hemos visto, se aleja radicalmente del pensamiento religioso, y retoma una idea valiosìsima: la Naturaleza se rige por leyes inmutables. Pero lo que en el pensamiento màgico habìa sido una creencia implìcita, en Tales se vuelve casi explìcito -el primero en formular esta idea explìcitamente es, hasta donde sabemos, Heràclito: "todo ocurre según el <<logos>>"-. Por otro lado, Tales reùne todos los fenòmenos naturales y trata de darles coherencia mediante un solo principio rector, cosa que ni el pensamiento màgico ni el religioso habìan hecho.

Las obras de los presocràticos nos han llegado en general en forma fragmentaria, a travès de doxògrafos que vivieron muchas veces varios siglos despuès de aquèllos cuya obra comentaban. Por otro lado, su interpretaciòn -es el caso de Aristòteles- estaba fuertemente influenciada por las propias ideas del doxògrafo, atribuyendo al filòsofo comentado ideas que èl jamàs hubiera soñado. Los presocràticos se enfrentaban a un problema fundamental: la falta de vocabulario. La palabra <<kosmos>>, por ejemplo, originalmente designaba a una unidad organizada del ejèrcito griego; a partir de esto, se abstrajo la idea de orden, y de ahì, la de Orden Universal. Algunas etimologìas actuales, menos pomposas, contienen la raìz <<kosmè>>: asì, por ejemplo, cosmètico. Cuando el oscuro Heràclito hablaba del <<logos>>, debe haber inducido una gran confusiòn en sus oyentes: Logos significaba originalmente palabra (aùn hoy en dìa, se encuentran traducciones de Heràclito que toman sus palabras en un sentido literal). Y, ¿de què otra manera sino como una metàfora puede explicarse el hecho de que a Tales, a quien hemos acusado de desterrar a la divinidad del pensamiento natural, se le atribuya la frase "Todo està lleno de dioses"? El poder evocativo de las metàforas presocràticas fue gradualmente desterrado de la filosofìa, a medida que los conceptos filosòficos fundamentales iban siendo definidas; de aquì que incurrir en el anacronismo aristotèlico de atribuir a los presocràticos preguntas que sòlo tienen sentido en el marco de conceptos posteriores es, en el mejor de los casos, peligroso.

Se ha dicho con frecuencia que la pregunta fundamental que Tales se plantea es cual es la esencia de todas las cosas. Precisamente hablar de "esencia" es arriesgado en el caso de Tales. Es màs plausible pensar que el milesio trataba de encontrar el origen de las cosas. Ya Hesiodo en la Teogonia hablaba del <<kaos>> como origen, asi que el concepto no era ajeno a los jònicos. En todo caso, existe una convicciòn implicita en la pregunta: el hecho de que, a despecho de todas las mutaciones y aparente variabilidad del mundo, existe algo, un principio o identidad subyacente a todas las cosas.

¿Por què Tales pensaba que el principio de todas las cosas era el agua? Se han adelantado muchas hipòtesis al respecto: desde el caràcter portuario de Mileto hasta la importancia biològica del agua. Realmente, la respuesta es lo de menos. Lo importante, como se ha apuntado, es el hecho de plantear la pregunta, y los tèrminos en que es planteada.

Anaximandro, a quien la tradiciòn atribuye el ser discipulo de Tales, parece, en contraste, haberse acercado màs al concepto de esencia. Su filosofia, en comparaciòn con la de Tales, y aùn de algunos pensadores que le siguieron, se nos antoja increiblemente sutil y avanzada. Anaximandro creia que el mundo constaba de cualidades elementales en constante lucha. Distinguia cuatro de estas cualidades: humedad, sequedad, calor y frio. La lucha entre ellas era ciclica, pues a veces dominaba el calor, y a veces el frio. El lenguaje de Anaximandro es revelador, sobre todo si se compara con las ideas posteriores de Heràclito. El consideraba que el calor, por ejemplo, sometia al frio por la violencia, hacièndole una injusticia. La venganza del frio no se hacia esperar; pero esta venganza era a su vez injusta, y el ciclo recomenzaba. Sin embargo, la pregunta fundamental de Anaximandro es la misma que la de Tales, y como èl, se esfuerza en obtener una respuesta ùnica. La esencia u origen de las cosas no puede ser ninguna de estas cualidades individuales, pues lo caliente no puede engendrar lo frio, ni viceversa. Por lo tanto, el principio de las cosas es un todo indiferenciado que contiene a los elementos en potencia. A este principio llamò Anaximandro <<apeiron>> que quiere decir ilimitado o indiferenciado. Recordemos nuevamente el problema fundamental de entender a los pensadores presocràticos: no existe en ellos una diferenciaciòn entre cualidad y substancia, materia y espiritu, acto y potencia. Asi como en la mitologia se emplean seres humanos o divinos u objetos materiales para representar cualidades (Helena es la belleza, el objeto de deseo, Dèmeter la abnegaciòn materna, uno de los caballos de Ares es el miedo), los antiguos filòsofos, cuando se referian al agua, por ejemplo, no distinguian el elemento de la cualidad hùmeda. Hemos planteado las ideas de Anaximandro en lenguaje moderno; èl nunca hubiera usado la palabra "cualidad" o "potencia". Asimismo, es improbable que Anaximandro, al referirse al apeiron, tuviera una idea de infinitud. Màs bien, debe de haber usado la palabra en su segunda acepciòn de indiferenciado.

Para redondear el pensamiento de Anaximandro, digamos que èl consideraba que el <<apeiron>>, por su movimiento intrinseco, se condensò en las cuatro cualidades bàsicas, las cuales tomaron su lugar paulatinamente: el fuego rodeò el mundo, y la tierra hùmeda se colapsò en el centro, siendo rodeada de nubes y vapores.

Algunas ideas explicativas de fenómenos físicos tenían para Anaximandro su explicación en esta organización del cosmos: las estrellas y los planetas no eran más que orificios en la nubes circundantes, a través de los cuales se columbraba el fuego; la vida había nacido del cieno caliente en forma de peces, que luego habían evolucionado recorriendo toda la escala biológica, hasta el hombre (!!!); y finalmente, la tierra era un cilindro situado en el centro de un universo esférico, sin nada que la sostuviera, y no caía porque, al estar en el centro, no tenía dirección preferente hacia donde caer (!!!). La premonición que se manifiesta en estas dos últimas ideas sobre sendos conceptos científicos modernos, a saber, la evolución de las especies y la isotropía del espacio justifica ampliamente los signos de admiración utilizados.

Anaxímenes, en contraste con su maestro Anaximandro, parece un retroceso: en lugar del sutil <<apeiron>>, considera que el principio de todas las cosas es, nuevamente, un elemento: el aire, que por condensación y rarefacción generó los objetos materiales. En particular, el alma es aire, pues el aire más puro es el elemento de la vida.

Como apunta Guthrie, citando a su vez a Cornford, la inexistencia de la dualidad materia-espíritu es aquí manifiesta (4). El alma sigue siendo material, y la identidad entre aliento y alma se encuentra incluso en los pueblos primitivos. Los presocráticos necesitaban que la materia estuviera en sí misma animada -recuérdese el "todo está lleno de dioses" de Tales- para explicar por qué había comenzado el mundo: el problema del devenir. ¿Por qué se convirtió aquella sustancia o cualidad primaria en lo que es ahora el mundo?

Aristóteles observa, de paso, que ninguno de los jonios tomó la tierra como principio. La razón es clara: necesitaban un elemento activo, algo que en sí contuviese vida y movimiento para poder explicar el devenir.

Anaxímenes termina el ciclo de filósofos milesios. A pesar de las diferencias entre sus concepciones, es clara la identidad de la pregunta cosmogónica esencial en los tres pensadores. Sin duda, estos primeros intentos explicativos pueden parecer inocentes y torpes a los ojos modernos, pero el salto cualitativo que tuvieron que efectuar los milesios al renunciar a una explicación sobrenatural del cosmos fue una de las más grandes hazañas intelectuales de todos los tiempos. Tan es así, que ninguna otra gran civilización, ni los chinos, ni los mayas, ni los hindúes, dio el salto jamás.

Hasta ahora, hemos hablado sólo del inicio de la filosofía; sin embargo, es inocultable que muchas de las preguntas que se plantearon los milesios pertenecen actualmente al campo de las ciencias. La ciencia jónica es inseparable en un inicio de la filosofía; de hecho, hasta bien entrado el siglo XVIII, los científicos siguieron recibiendo el nombre de filósofos de la Naturaleza o filósofos naturales. En todo caso, la diferenciación de disciplinas que hoy en dia conocemos como cientificas no se dio hasta algùn tiempo despuès de los primeros filòsofos, y es natural que en ellos convivan explicaciones que, de acuerdo a nosotros pertenecen a la metafisica, con hipòtesis sobre fenòmenos naturales. Estas hipòtesis, màs o menos afortunadas, tenian probablemente una tenue base empirica; Lloyd señala que Anaximandro probablemente conocia la existencia de animales marinos viviparos, que, segùn su teoria, podian establecer el nexo entre el pez y el hombre (5). Sin embargo, las audaces afirmaciones milesias, aunque a veces rozaran la verdad, eran, al fin y al cabo, meras especulaciones. El afàn generalizador de los milesios les llevò a postular principios de los que podian extraer conclusiones, pero cualquiera que fuera la razòn que los llevò a esos principios, no se basaron sino en la observaciòn màs superficial. Es imposible criticarlos por esto, pero el mètodo racionalista que ellos inauguraron, al estratificarse gradualmente en la mente griega, retardò sin duda el albor de la ciencia experimental. Pero la idea de principio, la convicciòn de que una pregunta compleja puede recibir una respuesta sencilla, habia aflorado, y tendria una profunda influencia en la filosofia y en la ciencia hasta nuestros dias.

3.- La Escuela Pitagòrica

Al otro lado del mundo griego se desarrollaba, màs o menos contemporànea de los milesios, otra escuela filosòfica. Su fundador, Pitàgoras de Samos, fue envuelto en tal velo de misterio y leyendas por parte de sus discipulos, que es imposible diferenciar hoy en dia al hombre històrico del semidiòs. Los pitagòricos, a diferencia de las otras escuelas griegas, fundaron una hermandad religiosa. Las ideas de su fundador devinieron dogma; la libertad intelectual que caracterizò a los otros griegos dejò de existir. Aùn màs, los pitagòricos consideraban al menos partes de su doctrina como secretas, no aptas para profanos, y cada nueva idea o descubrimiento era generalmente atribuida al fundador; de ahi la oscuridad que ha rodeado siempre al verdadero pensamiento de Pitàgoras. ¿Por què considerar una hermandad religiosa como parte de la historia de la filosofia? ¿No desmentian los pitagòricos la esencia misma de esta naciente disciplina? La respuesta es que el pensamiento pitagòrico tuvo una influencia muy profunda en los pensadores posteriores, y a èl hay que atribuir un concepto que fue fundamental para el desarrollo de la ciencia fisica: la matematizaciòn de la Naturaleza.

Pitàgoras naciò en Samos, una isla del mar Egeo, y emigrò hacia 530 A.C. hacia Crotona, en la Magna Grecia (sur de la actual Italia), escapando de la tirania de Policrates. Ahi fundò su escuela, que, aunque disuelta por razones politicas (los habitantes de Crotona se rebelaron contra la dictadura moral de la secta), perviviò por toda Grecia durante muchos siglos, y aùn experimentò un renacimiento en Roma, en tiempos de Ciceròn.

La fuente religiosa del pitagorismo se puede adscribir a la influencia de las sectas misticas que pululaban por Grecia. Una en particular, la dedicada al mìtico Orfeo, compartìa muchas de las creencias pitagòricas. Como Anaxìmenes, los pitagòricos consideraban que todas las cosas tenìan alma, y que el universo mismo era una criatura viviente. De aquì dedujeron dos conclusiones: la transmigraciòn de las almas, de donde vienen muchos de los tabùes de la secta, como no comer carne, y que los llevò a la doctrina del parentesco de la Naturaleza (recuèrdense los principios del pensamiento màgico), y la inmortalidad del alma. El alma es eterna, perfecta e incorrupta; la materia es cambiante, fràgil y mortal. El objetivo de la secta era librarse de la corrupciòn material, para participar en el gran espìritu universal. Hasta aquì encontramos poca diferencia entre los pitagòricos y los mitos òrficos o brahmànicos. Los pitagòricos prescribìan complejos rituales y tabùes para alcanzar la purificaciòn, al igual que las otras sectas. Pero Pitàgoras no se detuvo ahì. Con ànimo de filòsofo, consideraba que la purificaciòn no podìa lograrse solamente con ritos, sino que, mediante la observaciòn y estudio de los principios del cosmos, el iniciado ordenaba su alma, haciéndola participar del orden universal.

Ahora bien, ¿cuàles eran esos principios? He aquì la aportaciòn principal de los pitagòricos a la filosofìa. No eran principios materiales, como habìan sido los jonios. El cosmos -y se dice que Pitàgoras fue el primero en llamarlo asì- es bueno, vivo, bello, total y limitado. Obedece a relaciones entre sus partes, es pues ordenado. Al tener lìmites fijos, es capaz de organizarse; todos los organismos tienen un papel -<<organon>> en griego significa trebejo o instrumento- dentro de este universo. Como buena secta religiosa, los pitagòricos poseìan un rìgido dualismo moral. Las cosas buenas eran bellas, limitadas, masculinas, ùnicas; las cosas malas eran feas, infinitas, femeninas y plurales. Esta ètica, transplantada al mundo material, fue la base de la filosofìa pitagòrica. El punto a resaltar es que los pitagòricos cambian el principio material jònico por cualidades formales. En el pitagorismo, el principio no es la cualidad material (v.g. la humedad), sino la armonìa, el orden y la belleza.

Lo que llevò a Pitàgoras a esta glorificaciòn de la forma sobre la materia -o al menos el fundamento racional màs importante de su filosofìa- fue un asombroso descubrimiento matemàtico-musical. Estudiando en una cuerda de lira cuàles eran los sonidos que producìa una armonìa perfecta, encontrò entre ellos una precisa correspondencia aritmètica. La octava se produce al reducir la cuerda a la mitad, està pues en razòn 2:1 con la nota fundamental; la quinta està en razòn 2:3 y la cuarta 3:4. Tomando los nùmeros de estas razones, 1, 2, 3 y 4, Pitàgoras compuso el <<tetraktys>>, figura cuyos puntos suman 10, el nùmero perfecto de los pitagòricos. Pitàgoras habìa pues descubierto que existìa un orden subyacente en la mùsica, una estructura, y que ese orden era cuantificable. Ràpidamente extrapolò su resultado: el principio del cosmos es el nùmero. Dice Cornford: "la infinita variedad cualitativa del sonido es sometida a orden por la ley, exacta y sencilla, de la razòn cuantitativa; ... lo ilimitado no es ya un continuo desordenado: està confinado dentro de un orden, un <<kosmos>>, por la imposiciòn del lìmite o medida" (6).

Asì consideraban los pitagòricos que nacìa el mundo: por la imposiciòn del lìmite -que es bueno, que es bello- sobre lo ilimitado. No cabe duda que el hecho de que fuera precisamente en la mùsica, con su valor estètico, donde Pitàgoras realizò su crucial descubrimiento, reforzò las cualidades estèticas y morales del Universo. Los pitagòricos hablaban de la mùsica de las esferas; creìan realmente que los astros, al girar en sus perfectas y matemàticas òrbitas, producìan mùsica, y era corriente entre ellos la convicciòn de que el maestro era capaz de escucharla.

Hènos aquì ante la primera formulaciòn de lo que, convertido en convicciòn filosòfica, propiciò el nacimiento de la ciencia cuantitativa; heños aquì tambièn ante la primera oposiciòn fundamental de principios filosòficos: la filosofìa de la materia contra la filosofia de la forma.

No se crea que el pensamiento pitagòrico consideraba solamente que el Universo es cuantificable en el sentido moderno: con tìpico apresuramiento de presocràticos, ellos creìan que el Universo en sì està hecho de nùmeros. Por otro lado, aunque sus investigaciones matemàticas fueron de gran provecho, su adoraciòn por los nùmeros les llevò a hacer las asociaciones màs arbitrarias que registra la numerologìa.

Todos los nùmeros, para los pitagòricos, tenìan cualidades mìsticas. El uno era masculino, bello, perfecto. El dos era femenino, malo, abyecto. El cuatro, primer nùmero cuadrado, era la justicia, etc. Los pitagòricos se esforzaron en encontrar todas las cualidades de los nùmeros: nùmeros amigables, perfectos, cuadrados, oblongos; si en sus orìgenes la doctrina tuvo una base experimental, èsta fue ràpidamente abandonada en favor de la especulaciòn. Sin embargo, no es descabellado pensar que debemos a los pitagòricos el desarrollo del mètodo deductivo en matemàticas.

Conocemos de segunda mano varias instancias en que los pitagòricos aplicaron el mètodo deductivo. Aunque el llamado teorema de Pitàgoras era aparentemente conocido desde los babilonios, es probable que los pitagòricos lo hayan demostrado. Asimismo, sobre la irracionalidad de $\sqrt{2}$ corren varias leyendas. La demostraciòn de la "inconmesurabilidad" de raìz de 2 debe de haber sido un rudo golpe para las teorìas pitagòricas. Los nùmeros inconmensurables no eran tenidos como nùmeros, y el hecho de que el triàngulo rectàngulo màs sencillo tuviera una hipotenusa inconmensurable abrìa una seria brecha en los ideales estèticos del pitagorismo. Se cuenta que la secta mantuvo en secreto el descubrimiento, y que cuando uno de los discìpulos, un tal Hippasos, lo divulgò, fue castigado por su impiedad: muriò ahogado accidentalmente. Ciertamente, la irracionalidad de $\sqrt{2}$ era conocida en època de Platòn: el Teeteto contiene una demostraciòn de la misma.

La otra vertiente mística de la matemàtica pitagòrica que ha llegado hasta nosotros se refiere a los cinco poliedros regulares. Los pitagòricos asociaban cada sòlido a uno de los elementos, y el quinto -no el icosaedro, sino el dodecaedro- era considerado como el sòlido perfecto, representando el cielo. La divulgaciòn de su existencia era, se nos dice, castigada con la muerte.

No obstante el misticismo, los matemàticos pitagòricos hicieron importantísimas contribuciones: Hipòcrates de Kios, Arquitas de Tarento, Filolao de Crotona son sòlo algunos nombres entre los grandes matemàticos que dio la escuela.

A Filolao se le atribuye una teoría novedosa: segùn Aristòteles, que no sentía ningùn amor por los pitagòricos, Filolao desplazò a la Tierra del centro del Universo. Lo que puso en su lugar no fue el Sol, sino un fuego primordial invisible, Hestia, que otros pitagòricos adscribían al centro de la Tierra. Para complicar màs las cosas, Filolao discurriò la existencia de una anti-Tierra, que tambièn sería invisible. Las razones que Aristòteles le atribuye no son halagadoras desde el punto de vista la ciencia moderna. Filolao, segùn Aristòteles, consideraba que algo tan bajo como la Tierra no merecía ocupar el centro del Universo; por otro lado, siempre segùn Aristòteles, la invenciòn de la anti-Tierra sirviò a los pitagòricos para dar cuenta de un hecho molesto: no había màs que nueve esferas celestes (a saber, las estrellas fijas, los cinco planetas, el Sol, la Luna y la Tierra), lo que no correspondía con el nùmero perfecto: el diez. Dice Aristòteles en la Metafísica: "Todas las relaciones que podían encontrar entre los las propiedades de los nùmeros y las escalas musicales por una parte y los atributos, partes y orden de los los cielos por la otra, las hacían entrar en su esquema; y si había alguna brecha en algùn lado, se apresuraban a añadir lo que era necesario para dar coherencia al conjunto de su teoría" (7). Palabras igualmente duras dedicaba Aristòteles al misticismo numèrico de los pitagòricos: "Por què hace falta que los nùmeros sean causas? Hay siete vocales, siete notas en la escala, las Plèyades son siete, a los siete años los animales pierden sus dientes (al menos entre nosotros, hay excepciones), y los hèroes que se batieron contra Tebas eran siete. Es pues porque el nùmero es de tal especie particular que los hèroes eran siete, o que la Plèyade se compone de siete estrellas? Seguramente los hèroes eran siete porque siete eran las puertas de Tebas, o por cualquier otra razòn; y en la Plèyade, somos nosotros los que contamos siete astros, como contamos doce en la Osa, mientras que otros pueblos cuentan de otra manera" (8).

4.- El Problema del Cambio y los Gèrmenes de la Epistemología

Como habíamos dejado sentado al hablar de los jonios, el problema del mundo cambiante había reclamado ya la atenciòn de los primeros filòsofos. Aunque no explícitamente formulado, el hecho de que todos los jonios usaran como elemento primordial algo intrínsicamente mutable era sintomático de su preocupación por explicar de alguna manera las eternas mutaciones del cosmos. Sin embargo, el problema del cambio exigía atención especial, y a fines del siglo VI y principios del V A.C., se convirtió en el principal elemento de especulación de la filosofía incipiente, y consecuentemente, en tema de encendidos debates.

Poco sabemos de Heráclito de Efeso, para no variar. Su obra nos llega fragmentada, citada por doxógrafos posteriores. Sin embargo, la personalidad filosófica de Heráclito, la novedad de su pensamiento y su deliberada oscuridad le han hecho objeto de innumerables estudios. Ciertamente, las ideas de Heráclito no prevalecieron en los griegos posteriores; su antagonista, Parménides, resultó el vencedor de la polémica durante innúmeros siglos. No obstante, la resurrección de la dialéctica en el siglo XIX, así como el poder metafórico de sus pensamientos, han revivido en nuestro época a aquel curioso y enigmático pensador. Su oscuridad -él mismo aludía al oráculo de Delfos, que ni dice del todo ni oculta su sentido, manifestándolo por un indicio- ha hecho que la discusión del significado exacto de sus fragmentos sea en ocasiones bastante encendida, lo que no deja de ser un caso de justicia poética.

Heráclito aborda el problema del devenir tomando el toro por los cuernos. Mientras para los pitagóricos la armonía del mundo era un valor fundamental, Heráclito afirma que en la destrucción y la guerra se encontraba la ley de la Naturaleza, y que por consiguiente, la lucha era buena. Todas las cosas estaban en pugna, y sin esta pugna el mundo sería inerte y estancado. Recordemos que Anaximandro manejaba ideas parecidas, pero su conclusión moral era exactamente opuesta. Ciertamente, la idea de la lucha no era nueva: se encuentra en la mitología, en las batallas entre dioses, y tanto aztecas como hindúes entretuvieron conceptos parecidos.

Pero todos los filósofos hasta Heráclito habían buscado lo que permanecía en el cambio. Heráclito invierte los términos: "la guerra (<<polemos>>) es madre de todas las cosas" (9). Es absurdo, según él, el dualismo moral pitagórico. No hay una lucha entre lo bueno y lo malo. Hay sencillamente pugna entre opuestos, a los que no se puede adscribir ningún valor moral. Debido a esta lucha, todo fluye, todo cambia. Los fragmentos heraclitianos que testimonian estas ideas son innumerables: "el Sol es cada día nuevo"; "aún los que se bañan en los mismos ríos se bañan en diversas aguas"; "(...) lo divergente converge consigo mismo; armonía de tensiones opuestas, como el arco, como la lira"; "en la periferia del círculo principio y fin son uno"; "este mundo, el mismo para todos, no lo hizo ninguno de los Dioses ni ninguno de los hombres, sino que fue desde siempre, es y será Fuego que se enciende según medidas, y según medidas se apaga".

Este último fragmento (31, según la enumeración de Diels-Kranz) es revelador. Es más una metáfora material -y como dice Guthrie, la mejor posible, dada la imposibilidad de expresarla de otra manera (10)-, que una cosmogonía al estilo jonio. El Fuego de Heràclito no es lo mismo que el agua de Tales. No existe evoluciòn, como en Anaximandro. Todo fluye y cambia, todo nace de la lucha. ¿Què mejor metàfora que el fuego para resumir todo el pensamiento heraclitiano? Pero existe otra faceta importante en este fragmento. El Fuego se enciende y apaga segùn medidas, es decir, segùn un cierto orden. El significado exacto de este fragmento, asì como de otro en que afirma que las Erinias (diosas de la venganza, servidoras de Dikè, la justicia) perseguirìan al Sol si èste rebasara sus medidas, ha sido objeto de amplias polèmicas. ¿Se referìa Heràclito a medidas espaciales o temporales? ¿Se referia acaso a la alternancia entre el dìa y la noche, o a la òrbita del Sol? En todo caso, existe el reconocimiento de inviolabilidad de la ley natural. Mondolfo sugiere que el fragmento del Sol rebasando sus medidas podrìa referirse a un antiguo mito, tal como el de Faetòn (hijo del Apolo que, al no poder controlar los caballos del carro en que el Sol surcaba el firmamento, desboca en una loca carrera que trae muerte y destrucciòn a la Tierra, hasta que Zeus le abate con sus rayos) (11). La imposibilidad manifiesta de este comportamiento por parte del astro rey seria una reafirmaciòn en la creencia del imperio absoluto de la ley natural. Existen en Heràclito constantes referencias a Dikè, la justicia. Debe interpretarse èsta como una Justicia Còsmica, que vigila que las leyes naturales se cumplan.

Existe otra polèmica respecto al pensamiento heraclitiano. Hay indicios, segùn algunos autores, de un eterno retorno: el cosmos regresarìa al fuego generador (<<ekpyrosis>>), y èste volverìa a crear al mundo. Hay fragmentos -"cuando sobrevenga el Fuego, el mismo Fuego discriminarà y prenderà en todas las cosas"- que parecen afirmar la creencia heraclitiana en un cataclismo universal. Sin embargo, el fragmento 31 parece contradecir esta creencia. La pretendida <<ekpyrosis>> heraclitiana fue retomada por pensadores estoicos, cristianos y gnòsticos en apoyo a sus propias ideas; el mismo Mondolfo se inclina por esta interpretaciòn, aduciendo los comentarios de Platòn y Aristòteles, asì como la dificultad de interpuntuar los fragmentos, especialmente el 31 (12).

La otra vertiente del pensamiento heraclitiano no es menos importante. Podemos afirmar que es que es Heràclito el primer filòsofo que se preocupa por problemas cognoscitivos. Heràclito habla en contra del dudoso testimonio de los sentidos, y critica la erudiciòn como fuente de conocimiento. No me escuches a mì, dice Heràclito, sino al <<logos>>. Este tèrmino, que primitivamente querìa decir palabra, se empleò tambièn para significar razòn, enumeraciòn y relaciòn entre magnitudes o cosas, incluso en el sentido aritmètico de razòn, y muchos autores la traducen precisamente por cuenta-y-razòn. En realidad, el tèrmino es tan rico que es pràcticamente intraducible. Mondolfo apunta que tanto <<logos>> como <<epos>> (de donde èpica) se utilizaban desde tiempos homèricos para designar la palabra humana, la narraciòn y el canto; pero <<logos>> era màs raro que <<epos>>. <<Logos>> adquirirìa para Heràclito una distinciòn especial, diferenciàndolo y contrastàndolo con el

<<epos>> del vulgo (13). Tambièn los pitagòricos habìan empleado, no se sabe si antes o despuès de Heràclito, la palabra <<logos>> como conjunto de doctrinas y preceptos. La palabra humana tenìa, en aquel tiempo, una importancia casi màgica. Los oràculos, los cantos, los rituales eran inseparables de las palabras que se proferìan en ellos; tambièn cabrìa preguntarse si el concepto de orden implìcito en el lenguaje humano no habrà influido para que el tèrmino <<logos>> tuviera un significado especial. A este respecto, recuèrdese el cristiano "en el principio era el Verbo". Hay quien ha tratado de mantener el significado literal de la palabra, argumentando que en el siglo V <<logos>> no querìa decir razòn, y pretendiendo que Heràclito no quiso significar sino el discurso del profeta, la doctrina, el pensamiento expresado por palabras. Segùn esta interpretaciòn, habrìa en Heràclito una incipiente filosofìa del lenguaje. Wundt, citado por Mondolfo, afirma que "el mundo es lògico porque un espìritu lògicamente pensante lo percibe" (14). Pero esta interpretaciòn subjetivista del <<logos>> es insostenible, ya que existen abundantes fragmentos en que la palabra <<logos>> aparece con el sentido de ley universal. Asì, el tèrmino <<logos>> tendrìa en Heràclito el triple sentido de palabra, verdad y realidad. Esta confusiòn es atribuible al hecho de que en tiempos de Heràclito no habìa ni una epistemologìa ni una lògica ni una lingüìstica claramente diferenciadas.

Pero nuevamente la metàfora se eleva a un estadio que a la filosofìa posterior, mas estructurada y con categorìas màs definidas, le serìa muy difìcil alcanzar. El logos es la ley universal, la voz de la verdad (Marcovich), pero es tambièn la percepciòn de esa ley: el logos universal se corresponde con el logos del entendimiento, y las paradojas del cosmos se expresan en el paradòjico y oracular lenguaje heraclitiano. Hay una comuniòn absoluta del ser pensante con la ley universal, ya que esa misma ley le rige y dentro de èl se encuentra. Heràclito no era un fìsico, en el sentido de los milesios, y en esto se equivocaron al juzgarlo Aristòteles y los doxògrafos posteriores: su contribuciòn estriba en poner el ènfasis en la ley universal, que es a un tiempo la ley del ser y la del devenir. Jaeger verìa en Heràclito una incitaciòn a la acciòn: el logos existe desde siempre, pero los ciegos hombres no quieren verlo; los hombres deben comprender el logos, para normar su conducta y fundirse en la ley còsmica (15). Esta serìa la enseñaza ètica de Heràclito. Su ley divina se distingue de las leyes fìsicas en que es normativa: Dikè la preside y la vigila.

Finalmente, digamos que Heràclito es màs lògico y ontològico que fìsico; al igual que Parmènides, su preocupaciòn es la identidad del ser y la contradicciòn de los opuestos.

Saliendo de Efeso, debemos retornar a la Magna Grecia. Elea era una colonia en la costa occidental de Italia, y ahì naciò un pensador que serìa en todo la antìtesis de Heràclito: Parmènides. Guthrie dice de èl que era a la vez poderoso y limitado, y que ambas caracterìsticas formaron una vertiente del pensamiento griego (16). Su influencia fue profundìsima. Platòn retomò sus ideas, y puede decirse sin temor a exagerar que sentò los fundamentos de la lògica clàsica.

Parmènides, exactamente al contrario de Heràclito, negaba el movimiento. La realidad era inmutable, perfecta y ùnica. Como apunta Guthrie, en Parmènides se encuentra la misma confusiòn heraclitiana entre ontologìa, lògica y lingüìstica (17). Parmènides reflexionò largamente sobre el significado de las palabras, y llegò a una conclusiòn asombrosa. "Lo que es, es; lo que no es, no es; lo que es no puede no ser". De esta afirmaciòn, que podemos identificar como un germen de los principios de identidad y de no contradicciòn de la lògica moderna, Parmènides deducìa que el cambio era imposible, pues lo que era no podìa transformarse en lo que no era. Por lo tanto, el cambio no es màs que una ilusiòn de los sentidos. Si atendemos a la Razòn, que es la ùnica maestra confiable, encontraremos la vìa de la Verdad. Parmènides da a su poema una forma de verdad revelada, al estilo de los viejos poetas; no expresa una convicciòn personal, sino una verdad absoluta. Parmènides va màs lejos aùn que Heràclito en atribuir a la Razòn humana la preeminencia absoluta en su epistemologìa; pues si bien Heràclito habìa hablado contra el testimonio de los sentidos, habìa al menos reconocido una existencia real al universo sensible. Parmènides niega por completo ese universo, ya que contradice lo que la Razòn le dicta: el universo aparece mutable y en verdad no lo es.

El problema al interpretar a Parmènides estriba, como siempre, en la falta de un lenguaje filosòsofico. Hay quien traduce "lo que es" por Ser, atribuyendo a Parmènides una percepciòn ontològica casi heideggeriana. Hay al menos cuatro interpretaciones: "lo que es" es el Ser, o la existencia misma; es la totalidad de las cosas que existen; es cada cosa en particular; es aquèllo sobre lo que se puede hablar y pensar. Es claro que Parmènides no podìa tener un concepto claro del Ser; el problema es a la vez lingüìstico y ontològico. El verbo ser se usa, y se usaba en aquel tiempo, en su doble acepciòn existencial y predicativa. Parmènides une ciegamente la esencia y la existencia. Como afirma Guthrie: "toda su concepciòn de la naturaleza de la realidad nace de atribuir esa fuerza sencilla y metafìsica al verbo ser" (18). El devenir implica que lo que es se convierta en lo que no es; pero no ser significa no existir.

La conclusiòn era clara: sòlo una cosa podìa existir, y esa cosa era inmutable, eterna, perfecta. Parmènides, por ilògico que nos parezca, fue el pilar fundamental del pensamiento griego: de ahì en adelante, los griegos renunciarìan al engañoso mundo de las apariencias, y serìan tan sòlo guiados por la razòn abstracta. Es imposible exagerar la importancia de este giro: todo el pètreo y glorioso edificio de la matemàtica griega se asentarìa en este principio; pero a un tiempo, era la herida de muerte a la ciencia experimental. ¿Por què calò tan hondo Parmènides? Simplemente, sus argumentos, asì como las famosas aporìas de su discìpulo Zenòn, eran incontrovertibles en aquel momento. ¿Còmo rehusar la inevitable conclusiòn de Parmènides? ¿No era su razonamiento prìstino y completo? Piènsese ùnicamente en que la confusión sobre el verbo ser llevó desde Alberto Magno a Descartes a pensar que habían demostrado sin lugar a dudas la existencia de Dios. Piénsese que las paradojas de Zenón no obtuvieron una respuesta satisfactoria hasta el siglo pasado. ¿Por qué extrañarse entonces de su influencia?

No que Parménides no tuviera contrincantes, filósofos que intentaron refutar sus teorías. Incluso, Reinhard piensa que Heráclito escribió en respuesta a Parménides, idea rechazada por la mayoría de los estudiosos heraclitianos (19). Cronológicamente hablando, hay un compás de espera entre Parménides y el filósofo que elaboraría sus ideas y las llevaría a su más alta expresión: Platón. Ese compás de espera fue llenado por los pluralistas: Empédocles, Anaxágoras y los atomistas. Su obra se puede entender como una respuesta a Parménides, bien que aceptando su máxima: "nada puede provenir del no ser". El ataque principal contra Parménides estribaba en reivindicar al devenir, y en negar la unicidad del ser que Parménides había postulado.

Empédocles de Agrigento fue una figura curiosa, mitad filósofo y mitad místico a la manera pitagórica. Empédocles distinguía cuatro elementos básicos, que él llamaba raíces: aire, agua, aire y fuego. Así renunciaba al monismo ingenuo de los jonios, que había sido la base de las críticas de Parménides. Los cuatro elementos habían existido siempre, y al combinarse en diversas proporciones, daban origen a todo lo que existe. Estas proporciones eran fijas para cada "compuesto". Con típica audacia griega, Empédocles llegó incluso a dar las proporciones de dos "compuestos": los huesos están hechos de dos partes de tierra, dos de agua y cuatro de fuego, mientras que la sangre tenía los cuatro elementos por partes iguales. Pitagórico al fin, tenía que cuantificar. El cambio se producía pues por la unión y separación de las sustancias primordiales. Sin embargo, y alejándose otra vez del monismo jónico, Empédocles -y este es el aspecto más novedoso de su pensamiento- propone por primera vez un agente externo de cambio, o, para ser más precisos, dos agentes: el Amor y la Lucha. El Amor hace que los elementos se combinen; la Lucha, que se separen. Hasta aquí el físico. Tarde o temprano, como implica el nombre mismo de sus fuerzas, el moralista tenía que entrar en acción, y Empédocles se lanza a hablar de la bondad del Amor y la maldad de la Lucha.

Pero dejando de lado sus tintes éticos, Empédocles había tipificado los elementos y había premonitoriamente enunciaciado el principio de las proporciones fijas. Pero sobre todo, había establecido la diferenciación entre la materia inerte y el agente motor. Ciertamente, según se desprende de algunos fragmentos, Empédocles consideraba estos agentes como casi materiales; sin embargo, esta distinción fundamental perduraría en la física y la filosofía por incontables siglos.

Empédocles reivindica el papel de los sentidos. Aunque reconoce que son engañosos, lo mismo puede decirse del espíritu, y considera que todas las herramientas son necesarias para comprender la realidad.

Debemos también a Empédocles una teoría "evolucionista" de las especies, donde aparece por primera vez la idea de selección natural. No era una teoría sólida y coherente, sino el producto de especulaciones basadas en sus fuerzas motrices y en la mitología griega. En efecto, en lugar de una evolución gradual, Empédocles se adhería a la idea, común entre los griegos, de que la reproducción era posible aún entre las especies más disímbolas (muchos años después Plinio consignaba la hipótesis de que el avestruz era el producto del cruzamiento de un mosquito con una jirafa). Según Empédocles, aquellos animales producto del azar, tales como el Minotauro o la Quimera, que no cumplían con la regla (el logos) habían desaparecido, dejando lugar a los animales "bien" constituidos.

Anaxágoras de Clazomene, radicado en Atenas, amigo de Pericles y Aspasia, tiene un pensamiento similar al de Empédocles. Sin embargo, y a diferencia de éste, era un ateo irredento, y fue procesado por impiedad, por afirmar que el sol no era un dios, sino un pedruzco caliente. El motivo real de su juicio fue, sin embargo, su amistad con Pericles; al igual que todos los miembros del círculo de éste, fue perseguido por los demagogos atenienses a la caída de su protector. Anaxágoras reivindicaba también el papel de los sentidos, con reservas. Consideraba asimismo que nada podía crearse de la nada y negaba la unicidad eleática, pero, a diferencia de Empédocles, no consideraba sustancias elementales. Para él todas las sustancias habían existido siempre, y no habían sustancias puras: todas ellas contenían fragmentos de las otras. Así, una piedra contenía en sí todas las otras sustancias, desde el agua y el oro hasta los cabellos humanos, pasando por el frío, la humedad, el calor y la sequedad, que eran también entes materiales. Así explicaba las transformaciones. El trigo contenía carne, y al ser digerido, soltaba esa carne y la incorporaba al cuerpo. Por otra parte, fue Anaxágoras el primero en hacer una distinción clara entre materia y espíritu. Todo lo que no es materia, decía, es espíritu. Era precisamente el espíritu el motor del mundo, el que había ordenado el caos original de sustancias. Parecería esto una vuelta al teísmo, pero desde un punto de vista racional. Sin embargo, Anaxágoras se limitaba a postular el espíritu como causa primera, y luego buscaba explicaciones materiales para los fenómenos.

Pasemos finalmente a los atomistas. Típicamente se consideran dentro de esta escuela a Leucipo y Demócrito de Abdera, pero la información que tenemos de aquél es muy fragmentaria, y hay incluso quien niega que haya existido. La teoría atomista era también una reacción contra Parménides, aún sosteniendo, como Empédocles y Anaxágoras, que nada podía provenir de la nada, y que la materia era indestructible. Consideraban, como Empédocles, que existía una sustancia elemental, pero ésta era única, a la manera de Parménides. La materia no se dividía en cuatro elementos, sino que era toda idéntica. La pluralidad se daba en el número. En efecto, los atomistas postularon que toda sustancia está compuesta por pequeñas partículas, indiscernibles a la vista, indivisibles, indestructibles, duras y sòlidas. Estos àtomos era substancialmente idènticos, pero diferían en tamaño y forma. Otra novedad: eran infinitos, y se movían en un vacío igualmente infinito. Las diferencias en las diversas sustancias eran efecto del tamaño y forma de los àtomos, sus posiciones, orientaciòn y movimiento. Todas las cualidades sensibles, el color, la consistencia, el sabor, etc. son consecuencia ùnicamente de los paràmetros citados. Por ejemplo, un cuerpo duro tiene sus àtomos juntos, y no puede comprimirse. En cambio, un cuerpo blando los tiene màs separados por el espacio vacío, y puede comprimirse. El sentido del gusto se explica a partir de la existencia de àtomos romos (las cosas dulces) y àtomos afilados (las cosas agrias). Anàlogamente, los colores se deben a la forma y disposiciòn de los àtomos.

Así como eran infinitos en nùmero, los àtomos tambièn eran infinitos en su variedad de tamaño y forma. Los àtomos no podían ser creados ni destruidos, y eran, cada uno de ellos, inmutables. Tampoco podían ser divididos físicamente (la propia palabra àtomo quiere decir indivisible); sin embargo, no sabemos si los atomistas consideraban que los àtomos podían —y, para ser consecuentes con su teoría, debían— tener estructura. En efecto, si los àtomos son de formas distintas, deben tener partes, aunque èstas no sean separables físicamente, pero es muy poco probable que Leucipo y Demòcrito hayan reparado en este punto.

La teoría atomista, aparte de su obvio interès premonitorio para la física moderna (bien que los verdaderos àtomos de la materia, es decir, las partículas indivisibles, no han sido encontrados), introducía dos novedades: el infinito y el vacío. El vacío había sido descartado por los eleàticos, ya que el vacío no es, y lo que no es no puede ser. Los atomistas afirman la existencia del vacío, estableciendo una rígida dicotomía entre èste y la materia. El vacío atomista era imprescindible para la teoría, pues debía haber espacio para que los àtomos se movieran, pero en su tiempo pareciò una paradoja inextricable, sobre todo por el lenguaje que tuvieron que emplear para expresarla, y los filòsofos posteriores tendieron a negar su existencia. Por otro lado, la infinitud del vacío les parecía razòn suficiente para explicar que los àtomos se movieran continua y azarosamente. Este movimiento provocaba colisiones, que, de acuerdo a las características de los àtomos, podían provocar que èstos se unieran o que se rechazaran. Así, los atomistas explicaban todas las interacciones por contacto material.

Tanto la luz como el alma eran atòmicas, si bien sus àtomos eran sutilísimos. A propòsito de la luz, Demòcrito pensaba que la percepciòn visual era provocada por àtomos expelidos por los cuerpos visibles, los cuales viajaban hasta el ojo conservando la forma del objeto. El propio Demòcrito, al que debemos una explicaciòn detallada de las cualidades sensibles con base en la teoría atomista, colegía de esto que el ùnico sentido real era el del tacto. Siguiendo una tradiciòn ya para entonces bien establecida, Demòcrito consideraba el conocimiento adquirido por los sentidos como "bastardo", mientras el conocimiento adquirido por el espìritu era el legìtimo. Sin embargo, creìa que los sentidos percibìan las cualidades secundarias, alimentando con ellas al espìritu, que debìa discernir en ellas las cualidades reales: la forma y organizaciòn de los àtomos.

Hemos visto que en los pensadores conocidos colectivamente como pluralistas hubo siempre una preocupaciòn por rechazar los argumentos eleàticos, si bien Parmènides les habìa forzado a postular en sus argumentos el principio de conservaciòn de la materia (para decirlo de una manera moderna). Todos ellos se distinguieron como fìsicos, como filòsofos naturales. Sin embargo, la aguda lanza del pensamiento de Parmènides, que habrìa que ubicar màs bien en la lògica y la epistemologìa, habìa calado hondamente en ellos. La fìsica de los albores del siglo V es inseparable de la epistemologìa: todos los pluralistas creyeron necesario incursionar en el problema del conocimiento a fin de refutar a Parmènides.

NOTAS AL CAPITULO I

1) Frazer, 'La Rama Dorada', p. 74 ss.
2) ibid., p. 71 ss.
3) ibid., p. 84.
4) Guthrie, 'Los Filòsofos Griegos', p. 37.
5) Lloyd, 'Les Dèbuts de la Science Grecque', p. 29.
6) Cornford, 'Before and After Socrates'.
7) Aristòteles, 'Metafìsica', 986 a 3 ss, citado por Lloyd, loc. cit., p. 40.
8) ibid., 1093 a 13 ss, citado por Lloyd, loc. cit., p. 38.
9) Todos los fragmentos de Heràclito y Parmènides han sido extraìdos de Garcìa Bacca, 'Los Presocràticos', que a su vez sigue la numeraciòn de Diels-Kranz. Sin embargo, la transcripciòn no es literal; he dejado la palabra logos en lugar de Cuenta-y-Razòn, y he hecho algunos otros cambios.
10) Guthrie, loc. cit., p. 50.
11) Mondolfo, 'Heràclito', p. 245.
12) ibid., p. 273 ss.
13) ibid., p. 156 ss.
14) ibid., p. 158.
15) ibid., p. 163.
16) Guthrie, loc. cit., p. 52 ss.
17) ibid., p. 52.
18) ibid., p. 52.
19) Mondolfo, loc. cit., p. 166.

II.- LA CUEVA Y LAS SOMBRAS

> Amicus Plato, sed magis amica veritas.
> Horacio.

> Nihil tam absurdum dici potest, ut non dicatur a philosopho.
> Cicerón.

1.- El Pensamiento de Platón

A finales del siglo V se dio una gran transformación en el pensamiento filosófico griego. Es la época de los sofistas y de Sócrates, los eternos contrincantes. Sócrates es una figura de poca relevancia en el estudio de los primeros filósofos naturales. La razón es clara: como dijo Cicerón, Sócrates hizo descender la filosofía del cielo a la tierra, dedicándose más bien a la ética y los problemas humanos que a la física. Lo mismo puede decirse de la mayor parte de los sofistas. La filosofía dejó la periferia del mundo griego, estableciéndose en la próspera Atenas. Como dice Guthrie, tal vez los filósofos pensaron que los físicos habían fracasado en dar una imagen coherente del mundo; los problemas humanos eran más acuciantes en la democracia ateniense, y la alternativa entre Parménides y sus oponentes debió parecer lejana y compleja (1). Los sofistas, aunque no formaban propiamente una escuela filosófica, tenían algo en común: su escepticismo radical, la desconfianza en el conocimiento absoluto. Contra este escepticismo dirigió los dardos de la mayéutica Sócrates, aunque sólo en el plano humano. El mismo confiesa que su primer interés fue la filosofía natural, guiado por su maestro Anaxágoras, pero desencantado por "su dogmatismo y su inutilidad" decidió dirigir su mente al problema de la virtud.

Platón siguió a su maestro en sus preocupaciones éticas y políticas, pero, a diferencia de aquél, se interesó también por la ciencia. Su influencia sobre los filósofos naturales fue enorme en los siglos posteriores, y es imprescindible que nos detengamos un poco en sus bien conocidas ideas cosmogónicas, cuya expresión más clara se encuentra en el diálogo Timeo (2). Podremos advertir en estas ideas la influencia de dos corrientes previas: Parménides y los pitagóricos.

Platón dividía al Universo en dos mundos ajenos: el mundo de las ideas y el mundo de las apariencias. Idea significaba en griego modelo o patrón, y en este sentido utilizó Platón la palabra. Sólo las ideas tienen existencia real, pero existen fuera del espacio y el tiempo, fuera de nuesta percepción. Son inmutables y perfectas. Estas ideas son los arquetipos a partir de los cuales se forman los entes de nuestro mundo. ¿Cómo explicar que a dos entes distintos, por ejemplo, dos caballos, se les asigne el mismo nombre? ¿Qué es lo que tienen en común?

Sencillamente, decia Platòn, el que ambos son copias imperfectas del arquetipo de caballo, que existe en el mundo de las ideas. Asi pues, el conocimiento es posible, pero no a travès de los engañosos sentidos, que sòlo nos revelan el mundo ilusorio de las apariencias. Los verdaderos objetos del conocimiento son las ideas, que sòlo pueden ser descubiertas mediante la razòn. Es conocida la metàfora que emplea Platòn para expresar la condiciòn humana respecto al conocimiento: somos, dice Platòn, como esclavos encadenados en una cueva, a quienes nunca ha sido dado conocer el mundo exterior. Tan sòlo percibimos, por la boca de la cueva, las sombras de los seres que pasan.

He aqui la condenaciòn total de toda experiencia empìrica. No sòlo en el Timeo, sino en la Repùblica y en otros lugares, Platòn habla explìcitamente contra la experimentaciòn como mètodo para alcanzar el conocimiento. Los griegos no se habian distinguido por su afàn empìrico; sin embargo, tanto Empèdocles como Anaxàgoras habian llevado a cabo erràticos experimentos; otros griegos de la època de Platòn habian hecho lo propio. Platòn glorifica la geometrìa (la ùnica rama de la matemàtica a la que los griegos clàsicos prestaban atenciòn, y en donde habian logrado importantes progresos, aplicando el mètodo deductivo) como la cumbre de las ciencias. Para Platòn estudiar un triàngulo dibujado midiendo sus lados, y sacando relaciones entre ellos, como habian hecho egipcios y babilonios, era grosero y absurdo. La ùnica manera de llegar al conocimiento matemàtico era mediante el estudio de las Formas arquetìpicas. Salta a la vista la enorme influencia que este pensamiento tuvo en el desarrollo de las matemàticas posteriores, y el profundo retraso que significò para las ciencias empìricas. Sin embargo, hay una salvedad: se puede emprender el estudio del mundo del devenir, pero con la intenciòn de que este estudio ayude a la menta a recobrar la idea original, el arquetipo. Para Platòn, todo conocimiento es un recuerdo.

Al juzgar las ideas platònicas dos mil años despuès, podemos asombrarnos de la irrealidad metafìsica que presentan. Sin embargo, Platòn se acercaba al concepto de esencia, y es difìcil pensar en otra forma de presentarlo originalmente que disociàndolo por completo del ente real. Por otro lado, Platòn habìa heredado de su adorado maestro, el bebedor de la cicuta, la profunda certidumbre en la existencia de verdades morales absolutas. El la extrapolò a todas las cosas existentes, e hizo habitar en aquel callado Olimpo la certeza que los filòsofos anteriores parecian haber arrebatado al mundo.

El pensamiento moral de Sòcrates tuvo otra consecuencia en su discìpulo: el pensar que este mundo, el mejor de los posibles, la imagen màs aproximada al mundo ideal, debìa tener un sentido. El Artesano universal, el Demiurgo, que creò este mundo, es una presencia inteligente, que persigue sus fines. Hay pues una teleologìa en el mundo: nuestra razòn para perseguir el conocimiento es descubrir los fines del Demiurgo. Por cierto, este Demiurgo no es un dios todopoderoso. Lo que ha hecho es modelar la materia preexistente, pero a su designio se opone "el reino de la necesidad", la inercia natural de las cosas.

Una de las ideas màs curiosas de Platòn tiene sus raìces en tres fuentes: los pitagòricos, Empèdocles y los atomistas. Platòn elabora una teorìa de la materia, explicando que no es lo mismo "lo que existe" que "en lo que existe", es decir, el "receptàculo" del devenir. El fuego, el agua y los demàs elementos tal como los conocemos no son objetos definidos y estables. Son los receptàculos de los cuerpos simples. Platòn sigue a Empèdocles en la clasificaciòn de esos cuerpos simples, pero no piensa ya en el fuego real o el agua o tierra reales, sino en una esencia de fuego, tierra o agua. Cada elemento està identificado con un sòlido regular: el fuego con el tetraedro, el aire con el octaedro, el agua con el icosaedro y la tierra con el cubo. Acto seguido, a partir de dos figuras elementales, el triàngulo rectàngulo isòsceles y la mitad de un triàngulo equilàtero, construye los lados de los cuatro sòlidos: dos triàngulos rectàngulos isòsceles se combinan para formar un cuadrado, es decir, un lado del cubo; dos mitades de triàngulo equilàtero forman un equilàtero completo, lado de los tres sòlidos restantes (el quinto sòlido, sagrado para los pitagòricos, tiene por lado un pentàgono) (fig. 2.1). Lloyd aventura la hipòtesis de que, como es posible obtener estos lados a partir de los constitutivos de diversas maneras, y Platòn no usò la construcciòn màs sencilla, tal vez estarìa planteando la posibilidad de tener distintos tipos de, por ejemplo, aire, mediante diversas construcciones (3).

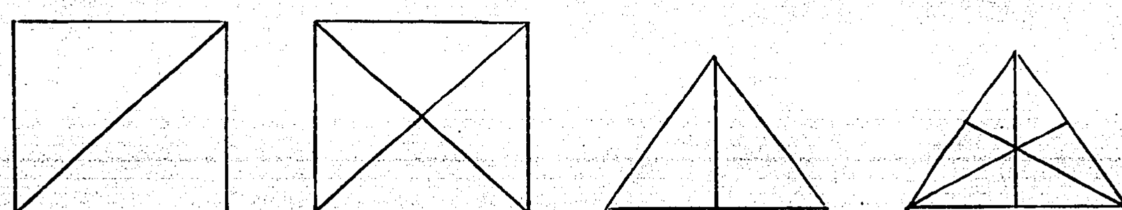

Figura 2.1

A partir de esta curiosa geometrizaciòn de la materia, Platòn da reglas de transformaciòn: el icosaedro acuàtico puede transformarse en dos octaedros de aire y un tetraedro de fuego. Esta geometrizaciòn puede pensarse como un intento de formalizaciòn de un aspecto de la teorìa atomista. Sin embargo, Platòn no comulgaba con los atomistas. En particular, negaba la existencia del vacìo. Para èl, el movimiento se daba instantànea y cìclicamente: A empuja a B, que empuja a C, y asì hasta que Z empuja a A, todo en el mismo instante.

Desde luego, la teorìa platònica no puede ser màs arbitraria; no existe nada que apoye, por ejemplo, la identificaciòn de un sòlido particular con un elemento. Sin embargo, este tipo de razonamiento seguiría recurriendo cada vez que Platón era resucitado (Platón ha muerto y revivido muchas veces), y los neoplatonistas de la Edad Moderna perdieron mucho tiempo tratando de basar sus teorías en el "firme" suelo de los sólidos platónicos. El mismo Kepler intentó inscribir las órbitas de los planetas en los sólidos regulares, cosa a la que la terca Naturaleza se opuso siempre iracundamente.

No obstante, su fe en la matematización del universo, que él tomó de los pitagóricos, pero que fundamentaba también en sus creencias teleológicas, fue llamada a tener una profunda influencia. ¿No hay tal vez en Dalton una especie de neoplatonismo? ¿La tabla periódica de Mendeleev no es en parte la realización, en bases sólidas, de la teoría platónica de la materia?

2.- La Astronomía en el Siglo IV

En todo caso, las ideas platónicas tuvieron una aplicación más inmediata: el desarrollo de las teorías astronómicas cuantitativas. La observación de los cielos estaba sin duda muy adelantada en el siglo IV A.C.; los griegos se habían aprovechado de las observaciones astronómicas babilonias, y las habían complementado con las suyas propias. La oblicuidad de la eclíptica, la identificación del lucero de la mañana con el de la tarde (Venus) y la desigualdad de las estaciones eran bien conocidas al comenzar el siglo IV. Incluso había habido, como hemos visto en el caso de Filolao, intentos de establecer un sistema. En todo caso, tanto en el Timeo como en la República Platón señalaba el método a seguir para el estudio de la astronomía. En efecto, la astronomía debía tomar como ejemplo a la geometría, basándose en la deducción matemática. Esta era una ruptura radical con el método que hasta entonces había seguido la astronomía, fundamentalmente observacional, y postulaba la posibilidad de matematizar -de hecho, de geometrizar- el movimiento de los cuerpos celestes.

Los principales hechos observacionales que había que tener en cuenta para la elaboración de un sistema astronómico eran: El movimiento de las estrellas fijas cada veinticuatro horas; el movimiento del sol y los planetas a través de las constelaciones del Zodíaco; el movimiento retrógrado de los planetas; y, finalmente, el hecho de que Venus y Mercurio no se apartaran nunca de las proximidades del Sol. Los dos últimos problemas no eran triviales; desde el punto de vista de un observador terrestre, el movimiento de los planetas era extremadamente complejo. Como el Sol, los planetas se mueven hacia el Este sobre el fondo del Zodíaco. Este movimiento decrece en velocidad hasta el punto de detenerse por completo durante algunos días; acto seguido, el planeta retrocede hacia el Oeste, deteniéndose de nueva cuenta después de algún tiempo, y retomando su movimiento predominante hacia el Este a continuación.

Eudoxo de Cnido, ligado a la Academia de Platón, fue el primero en proponer un modelo geométrico que se ajustaba, al menos en parte, a los hechos observados. Su propuesta consistía en considerar una serie de esferas concéntricas. En la primera esfera, se encontraban todas las estrellas fijas; esta esfera rotaba una vez cada veinticuatro horas sobre un eje situado en la dirección Norte-Sur. En cuanto al resto de los cuerpos celestes, las órbitas del Sol y de la Luna constaban de tres esferas, y las de los planetas -Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno eran conocidos entonces- constaban de cinco. En todo caso, la primera esfera de cada planeta se movía exactamente igual que la esfera de las estrellas fijas, la segunda daba cuenta del movimiento del planeta sobre el Zodíaco (rotaba alrededor de un eje perpendicular al plano zodiacal, y su velocidad variaba de planeta en planeta), y las esferas tercera y cuarta daban cuenta del movimiento retrógrado y de las posiciones estacionarias de los planetas. Esto último se explicaba de la siguiente manera. Los polos de la tercera esfera se hallaban en el círculo de la eclíptica, y el eje de la cuarta tenía una inclinación con el de la tercera que variaba según el planeta. Ambas se movían a la misma velocidad, pero en direcciones contrarias, produciendo una curva que Eudoxo llamó "hipopedia", es decir, pezuña de caballo. La curva en cuestión es una figura en forma de ocho, que se puede obtener por la intersección de una esfera y un cilindro tangente a ésta interiormente (fig. 2.2). En cuanto a las esferas del Sol y la Luna, las dos primeras cumplían idéntica función que las respectivas de los planetas, y la tercera explicaba las desviaciones respecto a la eclíptica, que, aunque observables en la Luna, Eudoxo atribuía también erróneamente al Sol. Finalmente, la Tierra, esférica, se asentaba en el centro del Universo.

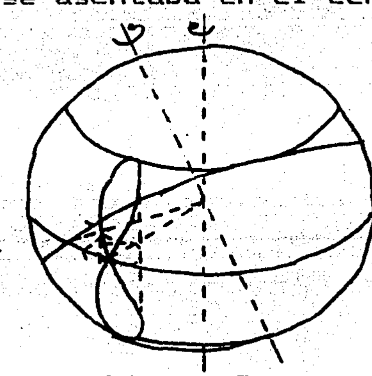

Figura 2.2

El sistema de Eudoxo explicaba casi todos los fenómenos relacionados con el movimiento de los astros, y lo hacía de una manera cuantitativa: las posiciones que estimaba Eudoxo tenían una sorprendente correlación con las observadas. Por primera vez, la astronomía contaba con un modelo completo, que permitía hacer predicciones más o menos precisas. A diferencia de los teóricos anteriores, Eudoxo no se había contentado con esbozar vagamente su teoría: su modelo era total y bastante adecuado. Aún más: Eudoxo había logrado descomponer los complejos movimientos planetarios en movimientos circulares simples, cumpliendo el ideal platònico de que los planetas debian moverse uniforme y ordenadamente, es decir, según el circulo. Sin embargo, aún desde su inicio, la teoria de Eudoxo se topaba con dificultades: sus hipopedias eran siempre constantes, mientras que el movimiento retrògrado varia de duraciòn, longitud y forma; el movimiento retrògrado de Marte no podia ser explicado con base en la teoria (tomando la cifra del periodo sinòdico de Marte, no se obtiene ningun movimiento retrògrado); la desigualdad de las estaciones quedaba sin explicar; y, finalmente, la diferencia de diàmetro aparente de la Luna y de brillo de los planetas, fenòmenos interpretados posteriormente en virtud de la variabilidad de la distancia respecto a la Tierra, no podia ser explicada.

Inmediatamente surgieron las correcciones. En lugar de proponer teorias alternas, durante un tiempo los astrònomos griegos se dedicaron a añadir esferas, con la esperanza de obtener resultados màs precisos. Sin duda, estaban demasiado deslumbrados por el èxito del modelo de Eudoxo como para descartarlo a la ligera, aùn a pesar de las inconsistencias y los problemas. Como diria Kuhn, el paradigma habia sido establecido. El primer astrònomo en meter mano al sistema de Eudoxo fue Càlipo. Este añadiò siete esferas a las veintisiete de Eudoxo, con el fin de explicar la desigualdad de las estaciones y ajustar mejor los movimientos retrògrados a los observados.

Obsèrvese que la teoria de Eudoxo era completamente cinemàtica: no se daban razones para explicar el movimiento, ni se hablaba de la naturaleza de las esferas. Aristòteles abordò estos problemas. El movimiento de cada esfera era completamente independiente de los de las otras; ¿còmo explicar, si las esferas estaban en contacto -supuesto del que partia Aristòteles, sin el cual, según èl, el movimiento no era posible-, que no influyeran unas sobre otras? La explicaciòn de Aristòteles consistia en la existencia de esferas "reactrices", que anulaban el movimiento de algunas esferas. Cada esfera reactriz era adyacente a la esfera cuyo movimiento anulaba, rotando sobre el mismo eje a la misma velocidad, pero en sentido opuesto. Con esto, Aristòteles aumentò el nùmero de esferas a cincuenta y seis. Es interesante anotar que Aristòteles reconocia ser un profano, y daba a su explicaciòn el caràcter de transitoria.

El siguiente astrònomo interesante del siglo IV fue Heràclides de Ponto. Màs que una teoria completa, se dedicò a exponer hipòtesis, algunas veces contradictorias entre si. Al èl debemos la primera sugerencia de que la Tierra rota sobre su eje, asi como -aunque su paternidad no es segura-, la idea de que Venus y Mercurio rotan sobre epiciclos alrededor del Sol. Este fue tal vez el origen de la teoria de los epiciclos, que entraria en boga un siglo màs tarde, introducida por Apolonio de Perga. En cuanto a su primera hipòtesis, los sabios de su època la refutaron ràpidamente, con los mismos argumentos que emplearian los escolàsticos contra Galileo: tanto las nubes como los objetos en caida libre resentirian la rotaciòn terrestre, y este efecto deberia ser perceptible. En todo caso, la razòn probable de que Heràclides haya postulado la rotaciòn terrestre delata una tendencia a economizar: si la Tierra se mueve, una esfera por cada planeta y la esfera de las estrellas fijas son descartadas.

En todo caso, una vez establecida la astronomìa cuantitativa, no habìa marcha atràs. La Naturaleza habìa permitido su geometrizaciòn al menos en un campo, y los astrònomos griegos cesaron de cuestionarse el paradigma fundamental: el Cosmos es racional, y susceptible de ser descrito por leyes matemàticas. Esta convicciòn tuvo sin duda influencia en otros campos de la naciente fìsica, pero los frutos de esa influencia no pudieron ser recogidos hasta la edad helenìstica: mientras los cielos podìan ser observados directamente, con la ayuda de algunos pocos instrumentos, la mecànica terrestre, la hidràulica y las demàs disciplinas de la filosofìa natural requerìan por necesidad de experimentaciòn. El horror a los experimentos por parte de los griegos de la època clàsica les impidiò progresar en esos campos. ¿A què se debìa esa aversiòn? Sin duda, mucho habìa en ella del desprecio del aristòcrata por el artesano. No obstante, esta observaciòn no basta para explicar la mentalidad griega; no es aventurado especular que los èxitos obtenidos por la razòn en la geometrìa y la astronomìa convencieron a los filòsofos que iban por el buen camino.

3.- La Filosofìa de Aristòteles

Llegamos al fin al Estagirita, el filòsofo que mayor influencia tuvo en la historia del pensamiento occidental. El aristotelismo dominò señero sobre Europa hasta el siglo XVII. No obstante, tantos años han oscurecido el verdadero pensamiento del maestro, hacièndole aparecer como un pensador torpe y rìgido, cuyas absurdas teorìas representaron el mayor obstàculo epistemològico al desarrollo de la ciencia moderna. Sin duda, el pesado edificio que erigieron los escolàsticos en torno al Filòsofo con mayùscula hubo de ser derrumbado por Galileo y Copèrnico para poder sentar las bases de la dinàmica moderna, pero hay que tener en cuenta que gran parte de lo abtruso de ese edificio debe ser atribuìdo a los discìpulos, no al preceptor, y que aùn en esa rìgida escolàstica se sembraron las simientes del pensamiento moderno. No es justo que cualquier estudiante imberbe de primer semestre de fìsica se atreva a reìrse de la estupidez aristotèlica; dos mil años de repetir dogmas son demasiados aùn para el màs brillante pensador. Aristòteles definiò algunos de los conceptos fundamentales de la filosofìa; su lògica no tuvo parangòn hasta el siglo XIX; su pensamiento, en fin, abarcò desde la metafìsica -tèrmino que èl involuntariamente inventò-, la lògica y la epistemologìa hasta la ètica y la estètica, pasando por todas las ciencias naturales.

Discìpulo de Platòn, sus inicios en la vida filosòfica estaban en deuda con el maestro; sin embargo, Aristòteles era ante todo un filòsofo del sentido comùn, y terminò por rechazar el mundo de las ideas platònico como absurdo y artificioso. Si Platòn quiso terminar con el problema del movimiento atribuyendo al mundo real una cuasi-existencia, Aristòteles se volviò hacia ese mundo real para buscar las bases de su filosofìa. No obstante, fue marcado por el platonismo: su fe en el conocimiento absoluto, en la preeminencia de la forma sobre la materia y en la teleologìa son herencia de su maestro. Como dice Cornford, Aristòteles heredò de Sòcrates y Platòn "la idea de que la verdadera causa o explicaciòn de las cosas no debe ser buscada en el principio, sino en el fin" (4). No basta contestar còmo; hay que decir tambièn el por què.

Aristòteles llevò hasta sus ùltimas consecuencias una idea que ya Platòn habìa adelantado. El problema con los eleàticos es que confundìan "lo que es" con "aquello en lo que es". Asimismo, los milesios habìan gastado su tiempo filosofando sobre la materia, siendo que èsta no es màs que uno de los componentes de "aquello en lo que es".

Sin embargo, al rechazar el mundo de las ideas platònico, el problema del movimiento volvìa a plantearse con toda su incertidumbre. Ante un mundo cambiante, el deber del filòsofo es ver màs allà hasta encontrar los principios o elementos que no cambian; èstos no tienen una existencia aparte, en un mundo ideal, pero existen realmente en los objetos de este mundo, y el filòsofo debe abstraerlos a partir del mundo sensible.

De esta manera, todo objeto està compuesto por un substrato y una serie de cualidades. He aquì, por primera vez, la distinciòn entre sustancia y atributo. Los eleàticos caen en el error al confundir dos tipos de enunciados: "este objeto caliente se ha vuelto frìo" y "el calor se ha transformado en frìo". Lo segundo es manifiestamente imposible, y de este tipo de afirmaciones Parmènides sacò sus contradicciones. En cambio, la primera afirmaciòn implica la transformaciòn por pèrdida o ganancia de una cualidad por parte del sustrato, lo cual es perfectamente lògico. Nòtese que, como señala Guthrie, Aristòteles seguìa pensando en tèrminos de opuestos: el movimiento se daba siempre entre dos polos contrarios (5). A esta distinciòn entre sustancia y atributo añadiò Aristòteles la discriminaciòn entre potencia (<<dynamis>>) y acto (<<energeia>>).

Lo que deviene, decìa Aristòteles, no puede surgir de lo que no es, ni de lo que es (puesto que esto existe ya, y no puede venir a ser). De aquì, Aristòteles establece la cèlebre distinciòn entre acto y potencia. Algo puede convertirse en otra cosa porque en un sentido es esa cosa, y en otro no lo es. Es decir, es esa cosa en potencia. Un grano de trigo, por ejemplo, es una planta de trigo en potencia, pues si es plantada, regada y cuidada, sin duda se convertirà en planta; pero si es molida para hacer harina, nunca devendrà planta. Aristòteles negaba la existencia del infinito actual (en el sentido de acto), pero reconocìa que habìa un infinito potencial: por ejemplo, al subdividir un segmento de recta a la mitad, el procedimiento, aunque no podìa llevarse a cabo indefinidamente, contenìa la posibilidad de ser infinito. Las demostraciones griegas en que el infinito jugaba un papel —como el teorema de Euclides sobre los nùmeros primos o el mètodo de exhauciòn— tomaron de Aristòteles esta idea: los griegos desarrollaron un <<horror infiniti>>, que probablemente les impidiò, junto con su extremo rigor matemàtico, avanzar en los problemas del càlculo infinitesimal.

En todo caso, su distinciòn entre acto y potencia es completamente teleològica. La misiòn de todo ente es llevar a cabo su potencialidad, tender a un fin, que consiste en imitar lo màs perfectamente posible, dentro de sus limitaciones, al ser perfecto: Dios. Ahora bien, la forma —y dentro de èsta Aristòteles incorporaba el concepto de funciòn— hacia la que tiende la potencialidad debe existir previamente. Es decir, la gallina es anterior al huevo, porque sòlo un ser actual puede producir a un ser que contenga en potencia su esencia. De aquí deducía Aristòteles que el mundo había existido siempre. El padre es pues la causa eficiente del hijo, pues le engendra; pero es tambièn la causa formal y la causa final. Volveremos sobre las causas en un momento. En todo caso, el embriòn no es hombre, es un substrato con la privaciòn de ser hombre; en este tèrmino, privaciòn, se advierte toda la teleología aristotèlica: un ojo està hecho para ver (funciòn como forma); un ojo ciego se caracteriza por la privaciòn de la vista: no està realizando su potencialidad.

Ahora bien, ¿què es la causa para Aristòteles? Comencemos por decir que el Estagirita no concibe un movimiento autoinducido, a la manera de Heràclito. Si bien la potencialidad de la transformaciòn existe, èsta no puede realizarse sin un agente externo; este agente es la causa del devenir. Aristòteles distingue tres tipos de causa: la causa eficiente, que es el agente directo que provoca la transformaciòn (por ejemplo, el carpintero que hace la mesa), la causa final, que es la meta o fin —<<telos>>— al que se dirige la potencialidad (la mesa sirve para escribir o comer) y la causa formal (en nuestro ejemplo, la idea que tiene el carpintero de la forma de la mesa). Aristòteles aplica estas causas al mundo material, y específicamente al biològico. La causa eficiente, formal y final de un embriòn es el padre, pues lo genera y contiene en sí mismo la meta y la forma a que llegarà ese embriòn. Aristòteles extrapola del mundo biològico estas conclusiones, y las aplica a todo el Universo. Esta es la verdadera fuente de su mecànica.

Nuevamente es evidente la teleología aristotèlica; sin embargo, este proceso no podía ser infinito; en la cadena de las causas y los efectos tenía que haber una causa primera, y así, a partir del movimiento, y exclusivamente por deducciòn, llega Aristòteles a la idea de Dios. Dios es el motor inmòvil del Universo. Es inmòvil porque es actualidad pura, no tiene potencialidad. Sin embargo, Dios no se encuentra estàtico. Su actividad, que no requiere <<kinesis>>, es decir desarrollo de potencialidades, es pensar. Pero no pensar de la penosa y silogística manera humana, que es <<kinesis>>. Dios es <<energeia>>, y su pensar tiene la deslumbrante cualidad de la verdad revelada instantàneamente. ¿Y en què piensa Dios? En todo "el dominio del verdadero ser", que no es otra cosa que èl mismo. Si Dios pensase en el mundo, dice Aristòteles, pensaría en objetos sujetos a <<kinesis>>, y tendrìa èl mismo que experimentarla. Dios no piensa en el mundo. Dios no creò al mundo; ni siquiera sabe que existe. Y sin embargo, involuntariamente, Dios es el motor; su sola presencia suscita en la Naturaleza el deseo de tender hacia èl. Todo contiene esa fuerza vital, que corre hacia Dios. Se puede estar en desacuerdo con Aristòteles, pero lo que es imposible es desconocer la enorme fuerza lògica que presenta.

La teorìa epistemològica aristotèlica està contenida en el conjunto de trabajos conocidos globalmente como Organon. Aquì <<episteme>>, el conocimiento, es definido precisamente: "el conocimiento ocurre cuando conocemos la causa de que depende un hecho en tanto que causa de ese hecho, y que ese hecho no podrìa ser de otra manera". Un conocimiento de este gènero se produce mediante la demostraciòn, que es una forma del silogismo. El silogismo aristotèlico constaba de dos premisas y una conclusiòn, en las que habìa tres tèrminos. Aristòteles analizò todas las formas de silogismos, dando reglas de validez para cada uno de ellos. Los miembros de los silogismos, las premisas y la conclusiòn son proposiciones categòricas, las cuales relacionan dos tèrminos en dos formas distintas: la universal y la particular, y sus respectivas negaciones. Ejemplo de la primera es "todos los hombres son mortales"; de la segunda, "algùn perro es tuerto". La importancia de la lògica aristotèlica estriba en que, en vez de atender al valor de verdad o falsedad de proposiciones individuales, Aristòteles analizò la forma del silogismo, con base en la distribuciòn de tèrminos y en la clasificaciòn de proposiciones, y sòlo con base en la forma determinò la validez del razonamiento. La lògica aristotèlica, en suma, sentò las bases sòlidas del razonamiento deductivo, e investigò a fondo la naturaleza de la prueba.

Pero volviendo al problema del conocimiento, Aristòteles continuaba diciendo que, por ser silogìstica la demostraciòn, provenìa de premisas, las cuales a su vez podìan ser premisas primitivas o derivadas, mediante silogismos, de las premisas primitivas. Estas premisas primitivas no pueden ser demostradas, pero su verdad està fuera de duda. Distinguìa tres tipos de premisas primitivas: los axiomas, las hipòtesis y las definiciones. Los axiomas son verdades compartidas por todas las ciencias, tales como "la suma es mayor que cualquiera de las partes", y que Cantor nos perdone; en cambio, las definiciones, mediante las cuales se asume el significado de un tèrmino, y las hipòtesis, mediante las cuales se hacen suposiciones sobre esos tèrminos, son particulares a cada ciencia. Por ejemplo, la geometrìa supone la existencia y significado de puntos y lìneas. Para Aristòteles, como para Platòn, el conocimiento es posible e irrefutable: demuestra relaciones que son eternas, necesarias y universales. El sentido de este ùltimo tèrmino para Aristòteles es especial: hay una relaciòn universal entre un sujeto y un atributo si todos los miembros de la clase del sujeto poseen ese atributo y ningùn miembro fuera de la clase lo posee.

Desde luego, la mayorìa de los ejemplos aristotèlicos de conocimiento provenìan de ciencias deductivas: la geometrìa, la òptica y la astronomìa. No hay un anàlisis del pensamiento inductivo en la lògica de Aristòteles. La ùnica vez que menciona la inducciòn es para hablar de la inducciòn completa, en la que todos los miembros de una clase deben haber sido considerados; la inducciòn completa puede reducirse silogìsticamente, por lo que forma parte màs bien del pensamiento deductivo que del inductivo.

Sin embargo, Aristòteles no desprecia la experiencia: èsta sirve para llegar al conocimiento, pero una vez alcanzado èste con certeza, es menester darle una forma deductiva. En todo caso, Aristòteles postula el primer mètodo de conocimiento coherente y completo. Otros filòsofos antes que èl habìan postulado la importancia de la razòn en el conocimiento; pero ninguno habìa llegado tan lejos en la definiciòn del mètodo.

Como queda dicho, Aristòteles no se conformò con establecer el mètodo, sino que incursionò en todas las ciencias naturales de su tiempo, muy particularmente en biologìa. La fidelidad con la que aplicò su propio mètodo deja a veces que desear; sin embargo, su exposiciòn solìa seguir un orden especìfico: primeramente, se identificaba y definìa el sujeto de estudio. Para esto, formulaba las opiniones de sus antecesores, a fin de examinar las dificultades del problema. En este sentido doxogràfico, Aristòteles es inestimable para estudiar a los incontables filòsofos cuyas obras ardieron en la biblioteca de Alejandrìa, o en alguna otra tragedia del barbarismo humano. Una vez tipificado el problema, y pasada revista a las opiniones antecedentes, Aristòteles procedìa a demoler por <<reductio ad absurdum>> los argumentos de sus adversarios; asimismo, se planteaba diversas alternativas para resolver el problema, y, procediendo por eliminaciòn, llegaba a la conclusiòn màs satisfactoria. Asì, por ejemplo, son conocidos sus argumentos contra el mundo ideal platònico, uno de los cuales se basa en la demostraciòn de la infinitud de las formas platònicas, una manifiesta imposibilidad, segùn Aristòteles. Sus mètodos de definiciòn de los tèrminos claves incluìan un anàlisis de los diferentes sentidos del tèrmino, a fin de resolver las paradojas y dilemas que se le planteaban. Recuèrdese a este respecto su argumentaciòn contra Parmènides.

Aunque parte de la argumentaciòn aristotèlica era dialèctica (<<logoi>>), en el sentido de argumentativa, en gran cantidad de ocasiones Aristòteles invocaba en su auxilio hechos (<<erga>>) y fenòmenos. Estos no sòlo incluìan los hechos empìricos, sino tambièn las ideas admitidas, las apariencias. Oponièndose a su maestro Platòn, Aristòteles pregonaba la necesidad, no sòlo de observar el mundo, sino de meter las manos en èl. Asì pues, en su zoologìa, habla en favor de la vivisecciòn para conocer a los animales. Para Aristòteles la bùsqueda del conocimiento tenìa un valor ètico: la actividad màs alta del hombre es la contemplaciòn, la <<theoria>>, no sòlo de la filosofìa primera -que nosotros llamarìamos metafìsica-, sino de la filosofìa segunda, la fìsica, englobando en èsta todas las ciencias naturales.

El fin de esta investigaciòn, ya lo hemos dicho, era descubrir las causas, y muy particularmente las causas finales y formales. Es indudable que Aristòteles derivò muchas de estas ideas de su observaciòn biològica; en los seres vivos el ideal teleològico parecìa alcanzar su màxima concreciòn. Aristòteles como naturalista desarrollò una labor nada despreciable: su Historia de los Animales consigna màs de 500 especies, entre ellas 120 de peces y 60 de insectos. Aunque cometiò numerosos errores (entre ellos la cuenta del nùmero de costillas humanas y la idea de que el corazòn es el centro de la percepciòn), es indudable que su capacidad de observaciòn y sus experimentos de disecciòn le llevaron a importantes descubrimientos de anatomìa comparada. La pasiòn con la que se abocò al estudio directo de las especies es suficiente refutaciòn del viejo argumento antiaristotèlico, segùn el cual el Estagirita habìa despreciado por completo la observaciòn en favor de la especulaciòn. Ciertamente sus argumentos fisiològicos eran màs bien especulativos, pero ¿còmo podìa ser de otra manera, dadas las herramientas con las que contaba? Se puede afirmar que Aristòteles fundò la ciencia biològica; nadie antes que èl habìa estudiado con tal fervor sistemàtico a los seres vivos. Sus ideas teleològicas le parecìan plenamente justificadas en el campo biològico; el ojo, por ejemplo, se desarrolla para cumplir una funciòn, ver (causa final), mientras su forma viene dada por la causa formal.

Aristòteles combatiò dos ideas biològicas en boga en su tiempo, una acertadamente, la otra erròneamente. Contra la pangènesis democritiana, que afirmaba que un hijo era concebido a partir de todas las partes de los padres (por lo que los caracteres adquiridos eran heredados, al igual que los congènitos) argumentò demoledoramente, encerrando a la teorìa en un dilema irresoluble; contra el evolucionismo de Empèdocles, defendiò la invariabilidad de las especies, basàndose en su teorìa de las causas finales. Todas las especies habìan existido siempre, y sus caracterìsticas esenciales eran invariables. Aunque esta idea es equivocada desde el punto de vista de la biologìa moderna, hay que tener en cuenta que sirviò para afirmar el concepto de especie, y que de todos modos las ideas evolucionistas de Empèdocles eran màs bien fantasmagòricas y desordenadas. Hay ocasiones en el desarrollo de la ciencia en que es necesario definir conceptos sòlidos e inamovibles, a despecho de que estos conceptos sean parcialmente descartados despuès. Asì, por ejemplo, la negaciòn de la generaciòn espontànea por parte de Pasteur dejò sin explicaciòn durante varios decenios la cuestiòn del origen de la vida; sin embargo, las teorìas de Oparin y Haldane probablemente no podrìan haberse dado sin esta negaciòn. La idea de la generaciòn espontànea demostrò ser parcialmente cierta; pero su postulaciòn como teorìa cientìfica, acotada por las condiciones en que realmente podìa tener lugar, requiriò la refutaciòn de las groseras creencias populares al respecto.

Como hemos dicho, Aristòteles como cientìfico era básicamente biólogo; en el estudio de los seres vivos creía haber descubierto la justificación de su teleología, y era ahí donde encontraba los ejemplos más claros y completos de su teoría. Sin embargo, lo que realmente nos importa en este estudio son sus ideas mecánicas. El largo preámbulo que hemos emprendido tiene como coronación la exposición de la dinámica aristotélica, inscribiéndola en el marco de la filosofía que le dio origen. Sólo así esas ideas, que demostraron ser tan equivocadas, pueden entenderse en un contexto lógico.

Fue Aristóteles, con su afán sistematizador, el primer pensador griego en plantearse seriamente una dinámica. Sus teorías, como veremos, eran una mezcla de argumentaciones dialécticas con hechos observados, si bien en estos últimos no demostró nuestro filósofo la misma persistencia y cuidado que en sus estudios biológicos. La dinámica aristotélica se abre con el establecimiento de una dicotomía esencial: el movimiento de los cielos y el que ocurre en la Tierra son radicalmente distintos.

Recordemos que Aristóteles había adoptado el modelo astronómico de Eudoxo, y que lo había convertido de una simple explicación cinemática en una teoría dinámica. El Universo aristotélico estaba pues compuesto de esferas concéntricas que contenían a los cuerpos celestes, con la Tierra esférica en el centro. Las esferas celestes se movían en contacto unas con otras, acotadas por la esfera exterior: la esfera de las estrellas fijas. Abajo de la primera esfera, la lunar, se encontraba el mundo terrestre. Este se hallaba dividido en cuatro capas, que correspondían a los cuatro elementos: la capa más exterior era el fuego, la siguiente el aire, y a continuación venían el agua y la tierra. Estos cuatro elementos, a diferencia de Platón, eran básicos. Aristóteles rechazaba la geometrización platónica, teniéndola por una teoría ficticia y sin fundamentos empíricos. Los elementos compartían las cuatro características opuestas de calor y frío, humedad y sequedad. Toda cualidad tangible era un valor en una gama, de manera que la cualidad podía ser estudiada como una combinación de los extremos opuestos de esa gama. Por otro lado, toda cualidad era reducible a las cuatro cualidades primordiales, y los elementos básicos eran las combinaciones más simples de esas cualidades: el fuego era caliente y seco, el aire caliente y húmedo, el agua fría y húmeda, y la tierra fría y seca. Las complejas transformaciones que llevaba a cabo la materia podían explicarse por una sustitución o predominancia de una cualidad por otra; así, el agua al calentarse por un agente externo sustituía su frío por calor, deviniendo "aire". Esta explicación cualitativa, por sencilla que parezca, apela al sentido común. En lugar de los sutiles átomos de Demócrito y de los intangibles sólidos platónicos, he aquí una teoría con los pies en la tierra. El platonismo exigía la matematización; pero era incapaz de dar una explicación tangible de los fenómenos. Así, la teoría cualitativa de Aristóteles habría de imponerse. En el libro IV de la Meteorología, Aristóteles hace una clasificación de sustancias según sus cualidades: son o no solubles, combustibles, fusibles o solidificables. Estas cualidades son explicadas por el grado de cada constituyente bàsico: asì, las sustancias que pueden fundirse al calor y solidificarse al frìo contienen predominantemente agua, mientras que las que se endurecen al fuego estàn principalmente compuestas de tierra. Fiel a su ènfasis cualitativo, Aristòteles no nos provee de proporciones precisas; en este sentido, procura reducir la especulaciòn a un mìnimo. La teorìa de las transformaciones fìsicas es admitiblemente ingenua. No obstante, es la primera tentativa importante de explicar fenòmenos que aùn en el siglo XX son difìciles de describir en detalle.

Hasta aquì los elementos terrestres, que, como testimonia la observaciòn, son infinitamente mutables y accidentales. Pero ¿què decir de los cielos? En tiempos de Aristòteles la observaciòn astronòmica habìa establecido con bastante certeza la inmutabilidad de las regiones celestes. Aùn los movimientos que pudieran parecer accidentales, como los de los planetas, habìan sido explicados por Eudoxo. Ningùn cambio, ninguna alteraciòn parecìan perturbar el eterno ciclo de las esferas. La conclusiòn parecìa lògica: los cielos estàn hechos de otra materia, distinta a la terrestre. Esta idea tenìa profundas raìces en el pensamiento religioso y mitològico: el cielo era divino e inmutable, la tierra rastrera y cambiante. Aristòteles postula, por lo tanto, un quinto elemento, que segùn èl constituirìa las regiones celestes: el èter. Desde nuestro punto de vista, èste es un inmenso salto hacia atràs; tanto los milesios como Demòcrito habìan establecido la identidad absoluta de toda la materia del Cosmos; pero la dicotomìa aristotèlica, ayudada en la Edad Media por motivos teològicos, dominarìa todo el pensamiento occidental hasta Galileo y Newton.

De todas maneras, hemos tratado de establecer las razones que llevaron al Estagirita a postular el èter; existìan otros argumentos, predominantemente dinàmicos, en su apoyo; notablemente, la naturaleza del movimiento natural de los cielos, en contraposiciòn con el movimiento natural terrestre; describiremos estos argumentos a continuaciòn. Pero habìa una tercera razòn que para Aristòteles justificaba la existencia del èter: los cuatro elementos sublunares, opuestos como eran, estaban en un cierto equilibrio; si las regiones celestes, que Aristòteles consideraba inmensas, estuvieran llenas de aire o fuego, el desequilibrio resultante hubiera destruido a la Tierra. La alternativa, la existencia del vacìo, era descartada por Aristòteles con argumentos parmenidianos: el Universo aristotèlico es un <<plenum>>.

La dicotomìa aristotèlica tenìa una base en el pensamiento pitagòrico-platònico, bien que prescindiendo de los juicios de valor; la otra base la constituìa la dinàmica. Para Aristòteles existen dos tipos de movimiento natural, correspondiendo uno a las regiones sublunares y el otro a las esferas celestes. Estas ùltimas, como hemos visto, se mueven eternamente en cìrculos perfectos; de ahì que sea connatural al èter este movimiento. Las sustancias materiales de la Tierra, sin embargo, tienen un movimiento màs complejo. Recordemos que Aristòteles postulaba la existencia de cuatro capas sublunares: fuego, aire, agua y tierra. Empìricamente, era claro que los cuerpos graves o pesados caìan hacia abajo —valga la redundancia—, mientras que los cuerpos livianos, como el fuego y el aire, se elevaban. Aristòteles explicaba estos fenòmenos mediante una teorìa extremadamente simple, que tenìa ademàs raìces en el pensamiento griego previo, asì como en las ideas màgicas: lo semejante atrae a lo semejante. De esta manera; al ser abajo el lugar natural de la tierra, todo objeto que contenga predominantemente tierra se sentirà atraìdo hacia la gran masa terrosa, es decir, tenderà a caer; mientras los cuerpos que contienen predominante fuego o aire tenderàn a elevarse. El corolario parecìa evidente: entre màs cantidad de un elemento tuviera un cuerpo, con mayor apremio tenderìa a su lugar natural; un objeto màs pesado, que contiene por lo tanto màs tierra, cae màs ràpidamente que uno màs liviano. En esta enunciaciòn de movimiento natural de un cuerpo se manifiesta nuevamente a teleologìa aristotèlica: los cuerpos tienden hacia un fin, que es el reposo en su lugar natural.

Este es el hilo rector de la dinàmica aristotèlica, una de las ideas màs persistentes del pensamiento occidental, uno de los obstàculos epistemològicos màs grandes de la historia de la Ciencia. Quien esto escribe tuvo la oportunidad de contemplar la cara de incredulidad de un estudiante de segundo semestre de la carrera de Fìsica ante la afirmaciòn asombrosa —y la inmediata comprobaciòn experimental— de que una moneda de un peso tardaba el mismo tiempo en caer que una de diez. Nuevamente, discúlpemos a Aristòteles. Antes que èl, no habìa nada que mereciera el nombre de dinàmica. El propio Aristòteles no emprendiò un estudio sistemàtico del movimiento, a despecho de su costumbre. Su dinàmica aparece en el contexto de otras discusiones, como la inexistencia del vacìo y la de un cuerpo de masa infinita. Se ha afirmado muchas veces que la dinàmica aristotèlica no tiene ninguna base empìrica. Esto es falso. No es posible que durante dos mil años los sabios hayan sostenido un absurdo tan grande en contra de toda experiencia.

La observaciòn casual tiende a reforzar las ideas aristotèlicas: una pluma cae màs lentamente que una plomada. Recordemos que para Aristòteles el vacìo no existe: el movimiento real siempre se lleva a cabo a travès de un medio. Este es, por otro lado, el caso en lo que respecta a nuestra experiencia cotidiana. Los mortales no solemos —o al menos no solìamos— estar en contacto diario con el vacìo. Lo que queremos decir es que el movimiento, tal como lo concibieron Galileo y Newton, es una abstracciòn: no ocurre realmente sobre la Tierra. Ciertamente, no es posible para la ciencia moderna dar cuenta de los fenòmenos sin recurrir a estas abstracciones. Sin embargo, contra los que han resaltado el empirismo galileano en detrimento del racionalismo aristotèlico, hemos de afirmar con Bachelard que no es sòlo el experimento, sino el substrato teòrico que conlleva, lo que hace posible el descubrimiento. Aristòteles observa correctamente que un cuerpo hundièndose en el agua tarda màs que un cuerpo en caìda libre en el aire; sus observaciones casuales, cualitativas, son correctas. Hoy sabemos que los fenòmenos cotidianos son de tal complejidad que desafían cualquier tratamiento científico: trátese por ejemplo de describir cuantitativamente la caída de la hoja de un árbol. Los griegos estaban convencidos -paradigmáticamente convencidos- de la racionalidad de la Naturaleza; sin embargo, no podían, como nosotros, sentar ese convencimiento en la confianza de que, aunque no podemos describir correctamente la caída de una hoja, los elementos de su movimiento son reducibles a casos ideales. Esta convicción requiere de un poder de abstracción y una experiencia científica muy superiores a los que podíamos exigirles a los pensadores que fundaron la ciencia. Ciertamente, los griegos, y en particular los pitagóricos y platónicos, abstrajeron. El propio Aristóteles llegó a la conclusión de que la forma de un objeto es irrelevante en lo que respecta a su caída (lo cual, por cierto, es un error si la caída se lleva a cabo a través de un medio). Pero su abstracción era especulativa, balbuceante, tentativa. Sin ella no podemos explicar la ciencia actual; era el inicio, eran los cimientos. Donde falla Aristóteles irremediablemente no es en su descripción cualitativa. Por una vez, el Estagirita formuló una ley cuantitativa: el tiempo que tarda en caer un cuerpo es inversamente proporcional a su peso y directamente proporcional a la "densidad" del medio. Tal vez un día de experimentos le hubiera sacado de su error; el caso es que Aristóteles nunca los hizo.

Tenemos pues una clasificación de los cuerpos de acuerdo a dos cualidades: pesantez y liviandad. El fuego es liviandad absoluta, la tierra pesantez absoluta. He aquí de nuevo la vieja idea de los opuestos. Para Platón y los atomistas no había objeto material que careciera de peso, si bien en distinta medidas, y este concepto se volvía por ende relativo. Aristóteles es en ese sentido un paso atrás. Digamos además que en el concepto aristotélico de movimiento natural existía el agente causal; pero este agente era inherente al objeto, estaba en su naturaleza, es decir, era la propia causa final del objeto; la causa eficiente del movimiento era el peso o la liviandad. El problema de la aceleración no se encuentra en Aristóteles, pero fue explicado por sus discípulos medievales argumentando que, entre más cercano el lugar natural, mayor atracción experimentaba el objeto. Este problema sería la causa de importantes polémicas entre los escolásticos. En todo caso, Aristóteles parece haber tratado al movimiento natural como si fuera uniforme.

La otra faceta de la dinámica aristotélica se refería a todo un conjunto de movimientos que no podían ser explicados sencillamente por la tendencia natural de los cuerpos. Tal es el caso de un proyectil, que en los guerreros tiempos de Aristóteles no era nada difícil de observar, en la forma de lanzas y saetas. Aristóteles estableció una teoría del movimiento "accidental" o violento que no podía resistir a la crítica; fue incansablemente rebatida desde la Antigüedad hasta la baja Edad Media. Sin embargo, el enorme prestigio del pensamiento aristotélico, aunado a la falta de una mejor explicación, hicieron pervivir su teoría. Comencemos diciendo que el vacío, para Aristóteles, no podía existir por dos razones: una era el viejo argumento parmideano, la otra era la imposibilidad de comunicar un movimiento a distancia. El agente del movimiento, que en el caso del movimiento violento era externo al objeto, debìa estar en contacto con èl. En efecto, el agente debìa ejercer "violencia" sobre el objeto para sacarlo de su lugar natural, y cuando esta violencia era agotada, el cuerpo tendìa inmediatamente a regresar a su movimiento natural. Sin embargo, esto presenta un problema: es claro que un proyectil lanzado por ejemplo verticalmente continùa moviêndose hacia arriba durante cierto tiempo. El contacto habìa desaparecido, pero el cuerpo se seguìa moviendo "antinaturalmente". ¿Como podìa ser esto? La ùnica respuesta parecìa estar en el medio a travès del cual se movìa el objeto, en nuestro ejemplo el aire. El impulsor del proyectil activaba tambiên el medio, de manera que la primera porciòn de aire empujaba al proyectil y activaba simultâneamente la porciòn siguiente, que a su vez impulsaba al proyectil y activaba una tercera porciòn. La fuerza impulsora de cada porciòn de aire se debilitaba progresivamente, con lo que el cuerpo adquirìa finalmente su movimiento natural, al ser incapaz la ùltima porciòn de activar a la siguiente. Asì, el medio era para Aristòteles simultâneamente resistivo e impulsor.

Otra vez, Aristòteles postula una relaciòn cuantitativa. La velocidad del movimiento violento, dice, es directamente proporcional a la fuerza impulsora e inversamente proporcional a la resistencia. Ninguno de estos tèrminos es definido, pero el segundo comprendìa tanto una caracterìstica del propio cuerpo cuanto la resistencia del medio. De aquì extraìa Aristòteles su ùltimo argumento en contra del infinito: en un medio infinitamente rarificado, segùn su fòrmula, la velocidad serìa infinita, y por ende, el movimiento instantâneo, lo cual era un absurdo manifiesto. Aristòteles hacìa una salvedad: existìa un umbral de fuerza abajo del cual, dada una resistencia, era imposible mover al objeto. Sus discìpulos escolàsticos parecen haber ignorado este punto, y se perdieron en complejas fòrmulas diseñadas con el propòsito de evitar la conclusiòn de que cualquier fuerza, no importa cuàn pequeña, pudiera mover a un cuerpo con cualquier resistencia, no importa cuàn grande. Terminemos nuestra exposiciòn de la fìsica aristotèlica consignando el hecho, comentado por Lanczos, de que Aristòteles conocìa ya el principio de desplazamientos virtuales, aplicado a la palanca, bien que lo expresa de una manera velada: "las fuerzas se balancean si son inversamente proporcionales a las velocidades". Dado que se trata de un problema de estàtica, Lanczos concluye que Aristòteles se refiere a un desplazamiento virtual (7).

Esta es pues la dinàmica aristotèlica. Como apunta Koyrè, aunque falsa y superada, es una fìsica, una teorìa cualitativa completa, "no una prolongaciòn simple y verbal del sentido comùn, ni una fantasìa infantil" (8). Su Cosmos era un Universo pleno, ordenado. Su espacio estaba dividido en lugares naturales: no era isotròpico ni homogêneo. Era el ordenado Universo del reposo; todo movimiento sublunar era el resultado de un desorden còsmico, de una violencia aplicada por un agente externo y la ulterior tendencia del propio Universo a recobrar el orden perdido. El movimiento es pasajero: <<nihil contra naturam posset esse perpetuum>>. Nuevamente citando a Koyrê, el reposo no requiere explicaciòn, es el estado natural: lo que necesita ser explicado es el movimiento; si la causa del movimiento cesa, cesarà el movimiento (9). Por otro lado, el vacio es imposible en este Universo: en el vacìo no hay lugares ni direcciones privilegiadas.

El enciclopedismo de Aristòteles, la inmensa gama de sus intereses, amên del sentido comûn y la enorme fuerza cohesiva de sus teorìas, tuvieron como resultado la gigantesca influencia que su pensamiento ejerciò durante veinte siglos. El paradigma cualitativo de Aristòteles sustituyò al cuantitativo del platonismo, y aunque las ideas platònicas tuvieron varios resurgimientos, notablemente en la Atenas helenìstica y en los padres fundadores de la Iglesia, Aristôteles reinò señero en el pensamiento occidental hasta el Renacimiento.

El Liceo, escuela fundada por Aristòteles a semejanza de la Academia de Platôn, produjo aûn algunos pensadores de importancia, como Eudemio, Teofrasto y Menòn. El afân sistematizador y la metodologìa aristotèlicas dieron lugar a importantes obras cientìficas y compendios, a tratados de ciencia polìtica y aûn acerbas crìticas contra el pensamiento del maestro. Sin embargo, la filosofìa griega estaba herida de muerte; la entidad polìtica que le habìa dado origen y cabida, la ciudad-estado griega, desaparecìa para siempre. Alejandro Magno, discìpulo del propio Aristòteles, habìa heredado el trono de Filipo de Macedonia, que comprendìa ya todo el mundo helênico. Su corta vida estuvo dedicada a ampliar el Imperio, cobrando la antigua venganza de Hèlade en contra de Oriente. A su muerte extranjera, acaecida en el año 323 A.C., el imperio macedonio habìa llegado hasta la India; su maestro, obligado a dejar Atenas por sus simpatìas macedonias, no le sobrevivirìa màs que un año. El Imperio se dividiò entre los generales, que fundaron fèrreas tiranìas. En Alejandrìa, bajo Ptolomeo y sus descendientes, se gestarìa la ùltima era de gloria de la cultura griega. Pero Grecia ya no era Grecia: Alejandrìa no era Atenas. Inseminada por la doble vertiente del pensamiento clâsico y el saber de Oriente, se fundarìa la civilizaciòn helenìstica. La filosofìa dejaba la estafeta en manos de los cientìficos; los filòsofos que siguieron a Aristòteles ya no aspiraban a los grandes sistemas, ni al estudio de la Naturaleza, ni a la exaltaciòn de la virtud humana. Los màs grandes de ellos, Epicuro y los estoicos, predicaron el desencanto. Sin embargo, desde el punto de vista cientìfico, la època helenìstica fue increìblemente fecunda. Bajo el cobijo de los muros de la Biblioteca de Alejandrìa se escribieron los Elementos de Euclides, el tratado de las secciones cònicas de Apolonio, los estudios de Eratòstenes sobre las geodèsicas.

4.- La Civilizaciòn Helenìstica

Los descubrimientos matemàticos de la època helenìstica son suficientemente conocidos, y no pasaremos de ellos màs que una ràpida revista. Apolonio de Perga introdujo en astronomìa el concepto de epiciclos, mediante el cual podìa explicar, màs sencillamente que con el sistema de Eudoxo, los movimientos planetarios. Consistìan los epiciclos en cìrculos cuyo centro se hallaba en la circunferencia de la òrbita principal del planeta; el movimiento de un punto fijo sobre un epiciclo es en ocasiones retrògrado, presentando semejanza con el movimiento observado de los planetas. Este sistema fue llevado a su màxima expresiòn por el màs grande astrònomo de la Antigüedad, cuyas obras, el Almagesto y el Tetrabiblos, fueron ampliamente conocidas y comentadas en la Edad Media: Ptolomeo. El otro gran matemàtico que nos ocupa es el Sistematizador: Euclides. Su contenido dista mucho de ser original: muchos de los teoremas enunciados por èl habìan sido demostrados hacìa muchos años. Algunos procedìan de Eudoxo; otros de los pitagòricos; otros màs de Hipòcrates de Kios. Pero lo novedoso era la presentaciòn, la estructura del libro: Euclides habìa logrado organizar toda la matemàtica bàsica —no sòlo la geometrìa— de su tiempo en un todo coherente. A partir de cinco postulados y otras tantas nociones comunes, amèn de veintitrès definiciones, se demostraban todos los teoremas, se apilaban los ladrillos, se ataban todos los cabos. El mètodo axiomàtico-deductivo habìa llegado a la mayorìa de edad; cada teorema podìa trazar su àrbol genealògico hasta los postulados. Como observa Boyer, los Elementos no trataban exhaustivamente ningùn campo, sino que se constreñìan a los resultados bàsicos; ausentes estàn, por ejemplo, las cònicas (10). En todo caso, era un brillante monumento a las alturas a las que habìa llegado la matemàtica griega.

Lejos de Alejandrìa, en Siracusa, viviò uno de los màs grandes genios de la Antigüedad: Arquìmedes. Aunque no propiamente alejandrino, mantuvo una correspondencia constante con los sabios de la metròpolis, y estaba al corriente de todos los adelantos de su època. Sus contribuciones fueron capitales en todas las ramas de la matemàtica: perfeccionò el sistema de numeraciòn griego, hizo trabajos de geometrìa infinitesimal, estudiò numerosos problemas geomètricos, creò la hidrostàtica, y finalmente, en el campo que nos ocupa, fue el fundador de la ciencia de la estàtica. Las anècdotas que se cuentan sobre èl son innumerables; todos sabemos que descubriò el principio de flotaciòn de los barcos mientras discurrìa la manera de determinar si la corona del rey Heròn era de oro autèntico. Su muestra de entusiasmo cientìfico fue sin duda la comidilla de los ciudadanos de Siracusa durante mucho tiempo. Tambièn se cuenta que Arquìmedes incendiò mediante espejos parabòlicos la flota romana que asediaba Siracusa. Cuando al fin cayò la ciudad en manos romanas, el general Marcelo ordenò que su vida fuera respetada. No obstante, el sabio sucumbiò a manos de un soldado que lo conminò a seguirlo: se dice que Arquìmedes estaba tan absorto resolviendo un problema que no escuchò la orden del soldado.

Los griegos hacìan una distinciòn fundamental entre logìstica, el arte de calcular, y aritmètica, la ciencia de las propiedades de los nùmeros. La primera se consideraba una profesiòn vil, apta para esclavos, mientras la segunda era una disciplina filosòfica respetable. No obstante, Arquìmedes no tuvo empacho en hacer contribuciones importantes a la logìstica, y en emplear una cantidad tremenda de càlculos en la resoluciòn de problemas. La evaluaciòn que hizo de la razòn entre la circunferencia de un cìrculo y su diàmetro mediante polìgonos inscritos es un ejemplo asombroso de su capacidad y persistencia. Quien no lo crea que intente calcular el àrea de un polìgono de noventa y seis lados sin la ayuda de una calculadora. Aquì aplicò Arquìmedes el cèlebre mètodo de exhauciòn, propuesto por Eudoxo como una alternativa contra el uso de infinitesimales. Por otro lado, obtuvo volùmenes de sòlidos de revoluciòn mediante figuras inscritas y circunscritas, y logrò deducir el àrea bajo una paràbola, nuevamente mediante el mètodo de exhauciòn. Por cierto que èste mètodo no era constructivo, y sòlo podìa emplearse cuando se conocìa previamente el resultado. Para encontrar èste, Arquìmedes se alejò por completo de la racionalista tradiciòn griega: pesò —no se sabe si imaginaria o realmente— un dibujo de paràbola, mètodo que le hubiera producido urticaria al bueno de Platòn.

Finalmente, tambièn incursionò en los clàsicos problemas griegos: la cuadratura del cìrculo, la duplicaciòn del cubo y la trisecciòn del àngulo. Su estudio de espirales lo emprendiò con este fin, logrando resolver el primer y tercer problemas mediante la que lleva su nombre. Desde luego, no le fue posible construir su espiral con sòlo regla y compàs. Lo interesante es que, aparte de calcular el àrea dentro de la espiral, obtuvo tangentes de manera general, empleando argumentos cinemàticos como los que estarìan en boga en el siglo XVII: considerò a la espiral como el lugar geomètrico de un punto que se aleja del origen con dos movimientos distintos: uno radial uniforme y otro circular.

Arquìmedes fue quizà el màs grande ingeniero griego. Al contrario que muchos de sus predecesores, no temìa ensuciarse las manos con la investigaciòn experimental. Por otro lado, retomò la tradiciòn cuantitativa pitagòrica en sus dos tratados de fìsica: Sobre los Cuerpos Flotantes y Del equilibrio de Planos (<<De Aequiponderantibus>>). Su mètodo de exposiciòn era deductivo; partiendo de axiomas, demostraba propiedades fìsicas de los objetos de estudio, de la misma manera que Newton lo harìa siglos despuès.

Su trabajo sobre la ley de la palanca puede considerarse como el fundador de la estàtica. Arquìmedes postula dos proposiciones "evidentes en sì mismas": magnitudes de peso igual a igual distancia del punto de apoyo estàn en equilibrio; magnitudes de igual peso actuando a distancias distintas del punto de apoyo no estàn en equilibrio, y la màs lejana desciende. A partir de esto, Arquìmedes deduce la ley general de la palanca. Trataremos de reproducir a continuaciòn su deducciòn.

En primera instancia, imaginemos el caso "evidente": dos cuerpos de igual peso p suspendidos de una barra a distancias iguales del centro de rotaciòn c en los puntos a y b respectivamente (fig. 2.3). Por hipòtesis, la configuraciòn està en equilibrio. Si todo el conjunto fuera suspendido mediante una cuerda de una polea, un peso 2p lo equilibrarìa, despreciando el peso de la barra y la cuerda. Es decir, los dos pesos suspendidos de la barra son iguales a un peso 2p en el punto c.

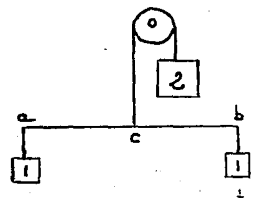

Figura 2.3

Si ahora tomamos una barra cuyos brazos estèn en proporciòn de 1 a 2, siendo el brazo màs corto el correspondiente a a, suspendemos dos pesos en proporciòn 2 a 1: el peso 2p en a y el peso p en b (fig. 2.4). El conjunto es equilibrado por un peso 3p. Suspendamos ahora dos pesos en lugar de 2p, uno de ellos situado en el centro de rotaciòn c y otro situado a la distancia ac en el punto d. La configuraciòn està en completa simetrìa, y consecuentemente debe haber equilibrio. Este proceso puede ser fàcilmente generalizado, con lo que obtenemos que la condiciòn de equilibrio es

$$P_a \, l_a = P_b \, l_b$$

donde P_a es el peso suspendido de a y l_a la distancia al centro de rotaciòn, y los subìndices representan el punto a y el b respectivamente.

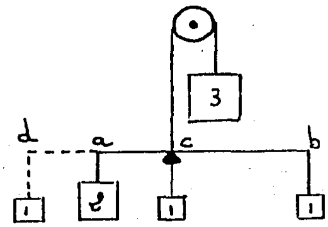

Figura 2.4

Como apunta Mach, el argumento de Arquimedes, asi como los posteriormente propuestos por Galileo y Huygens, hacen uso de la misma conclusión que quieren probar: la suposición de que la cantidad relevante en la ley de la palanca es el producto del peso por el brazo de palanca 1, además de suponer que la acción de dos pesos iguales es la misma que la suma de ellos en el punto medio (11). Sin embargo, el ejemplo es ilustrativo del método deductivo seguido por Arquimedes: la estática también podía matematizarse, y el método de Euclides podía ser aplicado a ella.

A diferencia de los Elementos de Euclides, que gozaron de amplia notoriedad durante todo el bajo Medioevo, Arquimedes se mantuvo en la oscuridad durante siglos, hasta que el Renacimiento vino a rescatarlo. Muchos de los trabajos de Arquimedes se perdieron, pero comparativamente a otros pensadores, nuestro personaje corrió con suerte: sus más importantes escritos han llegado hasta nosotros. Increíblemente, apenas en 1906 fue descubierto uno de sus tratados, el llamado Método, al revisar un antiguo palimpsesto medieval.

Así pues, las bases del posterior desarrollo de la mecánica han sido sentadas. La ciencia griega había sido capaz de desarrollar una geometría y una astronomía completa, y había establecido una estática y una hidrostática germinales. Pero aún más importante, había desarrollado los paradigmas filosóficos que tendrían tanta influencia en el posterior desarrollo de la ciencia: la convicción de la racionalidad -y de la posibilidad de matematizarla- de la Naturaleza; la dicotomía entre materia y espíritu; una doctrina de las causas y una teleología; un mecanicismo atomista y un método deductivo. Sin duda, estas ideas estaban muchas veces en oposición unas con otras, pero la herencia griega las abarcaría todas: la ciencia posterior desde el Medioevo en adelante tomaría alternativamente una postura u otra, resucitaría tal idea o tal otra, pero siempre orbitaría alrededor de estos paradigmas.

NOTAS AL CAPITULO II

1) Guthrie, 'Los Filòsofos Griegos', p. 67 ss.
2) Platòn, 'Timeo'.
3) Lloyd, 'Les Dèbuts de la Science Grecque', p. 93
4) Cornford, 'Before and After Socrates'.
5) Guthrie, loc. cit., p. 129.
6) Aristòteles, 'Organon', citado por Lloyd, loc. cit., p. 119.
7) Lanczos, 'The Variational Principles of Mechanics', p. 342.
8) Koyrè, 'Estudios Galileanos', p. 8.
9) Koyrè, loc. cit., p. 9 ss.
10) Boyer, 'History of Mathematics'.
11) Mach, 'The Science of Mechanics', p. 14 ss.

III. MUERTE Y TRANSFIGURACION

> La Historia, dijo Stephen, es una pesadilla de la que trato de despertar.
> Ulises, J. Joyce.

> Timeo danaos et dona ferentes.
> Virgilio.

1.- Roma, Islam y Cristianismo

La caìda de Siracusa en manos romanas en la segunda guerra pùnica es un presagio de lo que ocurrirìa con la ciencia griega en general conforme la civilizaciòn helenìstica declinaba. Todavìa algùn tiempo, incluso bajo la dominaciòn romana, brillò Alejandrìa, en los nombres de Apolonio de Perga, asociado al estudio de las cònicas, de Aristarco, que propuso el primer sistema heliocèntrico, de Ptolomeo, autor del Tetrabiblos y el Almagesto, de Hiparco, el padre de la trigonometrìa, de Heròn, Eratòstenes, y finalmente Diofanto, Pappus e Hipatia, cuya muerte a manos de una turba de cristianos fanàticos en el año 415 d. C. marca el fin de la Alejandrìa de la Biblioteca y el pensamiento. Durante este largo periodo, desde la toma de Alejandrìa por Julio Cèsar en el ùltimo siglo antes de nuestra era hasta la muerte de Hipatia, se vio marcado por una creciente preocupaciòn por la astronomìa, la aritmètica y la trigonometrìa, en detrimento de los problemas geomètricos clàsicos.

Asì como un romano dio muerte a Arquìmedes, la ciencia griega sucumbiò ante la embestida romana. Boyer hace notar sarcàsticamente que la contribuciòn màs importante de un romano a la historia de las matemàticas fue la restauraciòn por parte de Ciceròn de la tumba de Arquìmedes en Siracusa, sobre cuya làpida estaba grabado su teorema favorito (1). En efecto, fuera de Alejandrìa, cuya civilizaciòn griega se mantenìa, no hubo en todo el Imperio un sòlo cientìfico importante. Los romanos, espìritus pràcticos al fin y al cabo, sòlo se preocuparon por problemas matemàticos de aplicabilidad inmediata, tales como los problemas de agrimensura, arquitectura, comercio, etc. Su sistema de numeraciòn no les ayudò en nada. Comparada con el sistema jònico de los griegos era ciertamente un paso atràs. A veces la gente se pregunta còmo es posible multiplicar MDCXLVII por CDXXXIV. La respuesta es sencilla: el àbaco. En efecto, la numeraciòn romana sòlo servìa para anotar los datos y el resultado. Todas las operaciones se llevaban a cabo mediante un àbaco.

A la muerte de Hipatia, Atenas conociò un renacimiento a travès de la escuela neoplatònica, que funcionò hasta el 529, en que el emperador bizantino Justiniano mandò cerrarla. Entonces los sabios griegos se dispersaron por Siria y Persia, de donde su conocimiento pasò a los àrabes, cuyos eruditos tuvieron tambièn la oportunidad de escarbar en lo que quedaba en las ruinas de Alejandría, una vez que el santo celo destructor de Alí, que mandó incendiar la Biblioteca con el argumento de que si un libro estaba de acuerdo con el Corán era superfluo y si no lo estaba era peor que superfluo, se había apagado. Si este punto de vista hubiera sido respetado por los científicos árabes, probablemente la civilización mahometana hubiera pasado a la historia como la más estúpida de todos los tiempos. El Corán no es precisamente un libro extenso, y miles de árabes tienen bien memorizados todos los suras o versículos de que consta. Afortunadamente, los árabes recogieron y salvaron buena parte del rico legado clásico, enriqueciéndolo con nuevas contribuciones. Y si ellos no lo hubieran hecho, quién sabe que destino hubieran tenido esas obras a manos de los simpáticos bárbaros germánicos que se abatieron sobre el Imperio Romano. Pronto, la ciudad de Baghdad se convirtió en un nuevo centro intelectual. Se tradujeron las obras de Ptolemeo, Euclides y Aristóteles, aunque las de otros autores, particularmente Platón y Arquimedes, cayeron en el olvido. Después del fanático despertar del Islam, la civilización árabe se volvió increíblemente tolerante. Todos los perseguidos políticos y religiosos de Occidente, cristianos nestorianos, paganos neoplatónicos, arrianos, judíos y maniqueos, hallaban refugio en Baghdad. El pensamiento árabe se enriqueció con este eclecticismo. De Oriente, de la India, tomaron el sistema de numeración; de Occidente, la astronomía y la geometría. Y posteriormente, ellos mismos desarrollaron la alquimia. El maridaje del sistema de numeración hindú y el método deductivo y los resultados geométricos griegos dieron como resultado el algebra simbólica, cuya primera exposición se encuentra en el libro llamado precisamente Algebra de Mohammed ibn Musa al Khowarizmi.

Mientras tanto, la ciencia en el Imperio Bizantino había muerto. Aunque todavía existían los manuscritos, los eruditos bizantinos se limitaban a hacer de copistas en el mejor de los casos, o a borrar los manuscritos para hacer libros de oración. Esta práctica de reciclaje fue muy común durante toda la Edad Media, y muchas obras se perdieron ante la falta de criterio del copista. A veces, el manuscrito original había sido imperfectamente borrado, y aún se podía leer. Esto es lo que se llama un palimpsesto, y sus líneas borrosas se convirtieron muchas veces en preciosos tesoros que los eruditos modernos trataban de rescatar. Es el caso del Método de Arquímedes, ya citado.

Ciento cincuenta años antes del surgimiento del Islam, Roma cayó en manos del godo Odoacro. En aquel tiempo vivía en Roma el más grande de los matemáticos romanos, un patricio llamado Beocio, cuya contribución se limitó a fungir como una especie de Reader's Digest de la época, resumiendo el Almagesto de Ptolomeo los Elementos de Euclides (los cuatro primeros libros para ser precisos, y sin demostraciones), la Aritmética de Nicómaco y un potpourri llamado Música. El afán enciclopédico romano no conocía límites: Séneca, Beda el Venerable, Calcido, Macrobio, Isidoro de Sevilla y Plinio escribieron sendos compendios; la Historia

Natural de este último consistía de treinta y siete tomos, pero en lugar de estudiar a la Naturaleza, estudió más de dos mil volúmenes de unos cien autores. Desgraciadamente, estos manuales fueron todo lo que quedó a Europa Occidental de la ciencia de la Antigüedad, y fue con ellos que incontables generaciones de estudiosos medievales aprendieron. El fárrago contradictorio, carente de todo sistema, que representaban estos compendios era asombroso: con frecuencia dos teorías astronómicas contradictorias plácidamente convivían en el mismo párrafo.

Aún así, todo el saber grecolatino se hubiera probablemente perdido, si no hubiera surgido la unificadora figura de Carlomagno. Durante toda la época que lo precedió, la Edad más oscura que ha conocido Europa, tan sólo los monjes irlandeses, relativamente a salvo de la conquista sajona y de los normandos, preservaban fragmentos del antiguo conocimiento. Conforme la situación en las islas Británicas se estabilizó, los manuscritos atesorados por los irlandeses comenzaron a filtrarse en Inglaterra. Aunque bárbaro, Carlomagno aprendió a leer, y tenía un respeto desmedido por el mundo clásico. Trató de revitalizar el viejo imperio romano, y se rodeó de eruditos, de los cuales el más importante fue sin duda Alcuino de York. Este había conocido en Inglaterra los manuscritos irlandeses, y fue por medio de él que éstos llegaron al reino de los francos. Pero el imperio carolingio fue efímero, y de todos modos el clima intelectual en Europa no propiciaba un renacimiento. La actitud de la Iglesia hacia la ciencia pagana había sido, desde su ascenso como religión oficial del Imperio Romano, dudosa en el mejor de los casos y con frecuencia abiertamente hostil. San Agustín, que en su juventud hablada de la necesidad del estudio de las ciencias naturales, se desdijo en la vejez (Agustín de Hipona era especialista en desdecirse, recuérdese que antes que católico fue arriano); Tertuliano, uno de los Padres Fundadores, veía en los filósofos paganos agentes de condenación y herejía, y en verdad la opinión de este santo varón sobre lo que había de hacerse con sus obras no difería en mucho de la del incendiario de la Biblioteca de Alejandría, habida cuenta que sustituyamos la palabra Corán por Santos Evangelios. En cambio, Justino Mártir y Clemente de Alejandría sustentaban que la filosofía y la ciencia podían ser aliadas de la teología.

Los perseguidos se habían convertido en perseguidores; para la mayor parte de ellos, era imposible discernir a los dioses paganos de los tratados de Aristóteles. Era el tiempo en que la nueva religión luchaba por consolidarse; ni siquiera su doctrina había sido totalmente definida, y las herejías surgían por todos lados. Sin embargo, Agustín había vivido en una época de resurgimiento neoplatónico, y la teoría de las formas ideales marcó su pensamiento, y por consiguiente, la doctrina de la Iglesia. Finalmente la Iglesia terminó por llegar a un intranquilo acomodo con la ciencia pagana. Ya hacia el siglo V de nuestra Era, algunos cristianos manifestaban un cierto interés por la ciencia.

2.- El Renacimiento Escolástico

El efecto combinado de los acríticos textos romanos y la permanentemente preocupada actitud de la Iglesia hicieron de la alta Edad Media una època de nulo avance científico. Sin embargo, algo se cocinaba en España, y no era precisamente paella. La Reconquista había ido expulsando a los àrabes gradualmente del territorio que ocupaban, pero las muestras de civilizaciòn islâmica quedaban atràs. La caída de Toledo en 1085 dejò a los castellanos en posesiòn de uno de los grandes centros de erudiciòn aràbiga. En el siglo XII, un monarca castellano, Alfonso X, apodado el Sabio, decidiò reunir todo el conocimiento de su tiempo. Para ello, convocò a todos los sabios y traductores que pudo reunir a Toledo, donde se dieron cita judíos y cristianos de toda Europa, e incluso àrabes, en un gigantesco esfuerzo de traducciòn y recopilaciòn. Ya siglo y medio antes, Gerberto de Aurillac, despuès papa Silvestre II, se había preocupado por recopilar tratados àrabes traducidos al latín tal vez en Santa María de Ripoll, pueblo catalàn de los Pirineos. Su influencia como maestro en la escuela catedral de Reims llevò a muchos de sus discípulos a fundar escuelas parecidas por toda Europa: Colonia, Utrecht, Chartres, Ruan... Pero el esfuerzo emprendido por Alfonso el Sabio no tenía precedente. Un verdadero alud de traducciones se llevò a cabo entre 1125 y 1200. Los traductores venían de todo el mundo medieval: Gerardo de Cremona, Roberto de Chester, Juan de Sevilla, Rodolfo de Brujas y Platòn de Tivoli. Fue a travès de estos hombres, y en menor medida a travès de los tratados abandonados por los àrabes en Sicilia, que los manuscritos islâmicos comenzaron a filtrarse en Europa. Tambièn se realizaron algunas traducciones directas del griego, especialmente en Italia, donde el nexo con el Imperio Bizantino no se llegò a interrumpir nunca del todo.

El interès por la ciencia clàsica comenzò a crecer entre los eruditos; sin embargo, el bajo nivel matemâtico de aquellos estudiosos lo testimonia la polèmica surgida entre Ragimboldo de Colonia y Radolfo de Lieja: puestos a calcular el lado de un cuadrado cuya àrea es el doble de otro cuadrado dado, llegaban a razones como 17/12 y 7/5, respectivamente, ignorando la inconmesurabilidad del lado resultante respecto al lado del cuadrado original.

Sin embargo, el efecto de las traducciones se dejò sentir cada vez màs; sus consecuencias fueron enormes. La baja Edad Media e incluso el Renacimiento y la revoluciòn científica del siglo XVII son inconcebibles sin estas traducciones. Se leyò a Aristòteles, pràcticamente el ùnico filòsofo de la Antigüedad preservado por los àrabes, a Ptolomeo, a Euclides y a al Khowarizmi. Se introdujo la notaciòn posicional aràbiga, que despuès de una larga lucha se impuso sobre los numerales romanos. En esta lucha, que durò hasta bien entrado el siglo XIII, se destacaron los nombres de Villedieu, Sacrobosco y principalmente Fibonacci, que tal vez sea el primer matemàtico importante del Medioevo. Era fundamentalmente un algebrista en la tradiciòn de al Khowarizmi y Diofanto, pero introdujo problemas geomètricos, usando àlgebra para resolverlos. Esta aparente innovaciòn debía mucho a los àrabes, que habían logrado un relativo maridaje del àlgebra y la geometría.

El antiguo currículum de la escuela catedralicia, basado en el <<quadrivium>> (aritmètica, astronomía, geometría y mùsica) fue revolucionado. En las incipientes universidades de París, Boloña y Oxford, la obra lògica, filosòfica y física de Aristòteles fue àvidamente estudiada: la Física, la Meteorología, el Organon y el tratado <<De Caelo et Mundo>> se convirtieron en el centro del currículum. El siglo XIII bien podría llamarse Renacimiento, si la palabra no hubiera sido usurpada por los humanistas de dos siglos despuès. Las universidades sustituyeron a las escuelas catedralicias, y una plèyade de filòsofos que incluyò a Alberto Magno, Roger Bacon y Tomàs de Aquino escribieron sus trabajos. Precisamente Aquino es el responsable intelectual de la direcciòn que tomaría el pensamiento hasta el fin de la Edad Media. Como afirma Kuhn, la influencia de pensadores paganos, especialmente Aristòteles, era un elemento potencialmente explosivo para la larga hegemonía de la Iglesia en el mundo intelectual (2). Aquino tomò lo que era "rescatable" de Aristòteles, que era mucho ,y recortando por aquí, alargando por allà, explicando y glosando la obra aristotèlica, logrò que cuadrara en una visiòn coherente del mundo, compatible con las enseñanzas cristianas. La lògica aristotèlica fue tomada al pie de la letra, y durante mucho tiempo, los escolàsticos pensaron y escribieron en tèrminos de silogismos. Aristòteles se convirtiò en el Filòsofo, con mayùscula.

El procedimiento escolàstico típico consistía en el planteamiento de preguntas (<<questiones>>) que eran luego argumentadas tanto en el sentido afirmativo como en el negativo. Si un autor tomaba al principio el partido afirmativo, era seguro que terminaría por inclinarse por la conclusiòn negativa; conversamente, si la discusiòn negativa era argumentada primero, el autor terminaría adoptando la posiciòn afirmativa. Las opiniones iniciales, denominadas <<rationes principalis>>, eran seguidas por una clarificaciòn de tèrminos o un replantamiento de la pregunta, despuès del cual se planteban las conclusiones del autor. Acto seguido, se refutaban una por una las <<rationes principalis>>, y ocasionalmente se planteaban objeciones a las propias conclusiones, con el objeto de adelantarse a las críticas, y se resolvían aquèllas. Este rígido discurrir es ilustrado por Eco en el Nombre de la Rosa, donde el joven Adso se queja de que su maestro Guillermo no usa la ironía de manera correcta, precedièndola de las adecuadas figuras retòricas (3).

Indudablemente, es un error considerar a toda la Edad Media como un período de oscuridad e ignorancia. A partir del siglo XII, Europa bullía intelectualmente. No se crea sin embargo que el estudio de la filosofía estaba exento de obstàculos. Progresivamente, la teología y la filosofía se iban separando. A pesar de los esfuerzos de Aquino y otros pensadores para hacer cuadrar a Aristòteles dentro de la teología cristiana, era inocultable que el Filòsofo se oponía a ella en varios puntos claves. Su concepciòn de Dios y la eternidad del mundo eran inadmisibles; su teoría de la sustancia entraba en contradicción con el Dogma de la Eucaristía, la transustanciación; los milagros no podían existir, pues las leyes naturales eran inalterables; y, finalmente, el alma no sobrevivía al cuerpo. La Iglesia no podía cruzarse de brazos, y a partir de 1210, poco tiempo después de la primera traducción, comenzó a decretar una cadena de prohibiciones contra la lectura de la obra física de Aristóteles, bajo pena de excomunión. La mayoría de estas prohibiciones estaban dirigidas contra la Universidad de París, donde funcionaba el centro aristotélico más importante de Europa. La accidentada historia de represión y tolerancia osciló durante sesenta años. Aunque la lectura privada de Aristóteles probablemente nunca se interrumpió, hacia 1255 volvió a ser posible discutir al Filósofo en público.

Los discípulos de Aristóteles se defendían de las condenas de los teólogos afirmando que, desde el punto de vista de la razón natural, sus ideas eran demostrables, o al menos no eran refutables. Sin embargo, se detenían al borde de la excomunión: reconocían que cuando el Filósofo o su Comentarista (Averroes) entraban en contradicción con la verdad revelada, ésta debía prevalecer. Así comenzó a establecerse un estándar doble; por ejemplo Boecio de Dacia y Siger de Brabante afirmaban que como filósofos debían seguir a Aristóteles hasta donde los llevara; como cristianos, se plegaban a la fe. Los propios teólogos que habían empleado a Aristóteles en sus argumentaciones se revolvieron inquietos; Aquino y Bonaventura criticaron acremente a los filósofos que sustentaban puntos de vista en los que supuestamente no creían. Finalmente, en 1277, la situación llegó a un punto crítico. Juan XXI ordenó al obispo de París una investigación, que desembocó en la condenación de 219 errores extraídos de Aristóteles, Maimónides, Averroes, Avicena y el propio Tomás de Aquino, que había muerto tres años antes. La doctrina de la doble verdad era explícitamente condenada; se abominaba de la descalificación de la teología y su sustitución por la filosofía; el determinismo, que imponía límites al poder divino, se consideraba nefando. El efecto de la condena fue inmediato y duradero. Nadie se arriesgaba en el siglo XIII a ser excomulgado. Por otro lado, la condena de 1277 puso en marcha un movimiento epistemológico: la venganza de los teólogos, que probablemente dio origen al empirismo y al nominalismo del siglo siguiente.

3.- El Nominalismo.

William de Occam es un exponente fundamental de esta tendencia. Llevado por argumentos teológicos, como el poder infinito de Dios, que le permitía, si El quisiera, crear una sustancia sin accidentes o un accidente sin sustancia, una materia sin forma o una forma sin materia, en fin, lo que le pluguiera, Occam llegaba a un empirismo radical. Según él, todo objeto era inmediata y directamente aprehensible; ninguna prueba ni razonamiento eran necesarios para demostrar su existencia. Incluso objetos inaccesibles podían ser aprehendidos de esta manera, pues Dios podía inducir ese conocimiento directamente en nuestra mente. Aún más, Dios podía hacernos creer en la existencia de algo inexistente. Así, todo conocimiento se deriva de la experiencia, a través de un mecanismo que Occam denominó cogninición intuitiva. Dios podía actuar indirectamente, a través de medios naturales, o directamente, pero no era dado a la mente distinguir entre ambos medios.

Las consecuencias de su teoría eran asombrosas. En primer lugar, Occam no daba criterios para discernir la verdad o falsedad de una percepción, lo cual podía llevar a un escepticismo radical. En segundo lugar, abominaba de todo conocimiento racional, por lo que incluso la prueba de la existencia de Dios argumentada por Aquino era rechazada por él. Aún más importante, su empirismo le llevaba a atacar el concepto mismo de causalidad. Sólo la observación directa podía dictaminar que algo era causa de un efecto; sólo si se daba ese efecto en presencia de la causa, y no se producía en su ausencia, era dable establecer un nexo causal. La razón a priori quedaba descartada como modo de conocer las causas, pero como Dios podía intervenir directamente, y su intervención era indiscernible, ni siquiera las causas naturales "evidentes" eran seguras. Así pues, ninguna relación entre las cosas contingentes era formulable, y sólo se podían enunciar relaciones condicionales observables, en las que, si la hipótesis se cumple, debe cumplirse la conclusión. Esta es una implicación lógica, no causal. Esta idea tendría profunda influencia en el movimiento predominante del siglo XIV, el nominalismo. Occam enunció también un principio de la economía: entre una explicación simple y una compleja, debe escogerse la primera. En esto estriba la famosa navaja. Sin embargo, como afirma Grant, es imposible en su extremo sistema determinar si el mundo es simple o complejo, ya que Occam prohibe conclusiones racionales de este tipo.

Es fácil darse cuenta cuán lejos estaban estas conclusiones del pensamiento de Aristóteles. Los discípulos de Occam se dedicaron a ampliar el empirismo del maestro, y uno de ellos, Nicolás de Autrecourt, llegó a proponer que el conocimiento absoluto no era posible, y sólo existía una probabilidad de la verdad. Nicolás rechazaba todo Aristóteles, y trataba de sustituirlo por el atomismo griego. El nominalismo rechazó la existencia misma de todo lo que no fuera observable, adelantándose cinco siglos al positivismo de Mach.

Los físicos nominalistas fueron menos radicales que los teólogos. Aunque aceptaban el empirismo, no estaban tan dispuestos a negar la certidumbre de las correlaciones causales. Su crítica a Aristóteles era calificada; no querían derruir las sólidas bases de la única física que existía entonces. Buridan, uno de los nominalistas más prestigiosos, confiaba en la observación como mecanismo inductivo, a partir del cual se podían extraer conclusiones generales. Los principios obtenidos a partir de la inducción debían ser la base de la investigación científica, pero una vez establecido que la experiencia no podía refutarlos, debían ser adoptados sin demostración. Frente al escepticismo de los teólogos, que habían empleado el empirismo para socavar el fundamento mismo de la ciencia, los científicos nominalistas formularon un nuevo mètodo científico, antiapriorístico y empirista.

Sin embargo, la adopciòn de la doctrina de Occam tenía conclusiones curiosas. Un aspecto interesante del nominalismo fue la tendencia de "salvar las apariencias", o, como diríamos hoy, de formular un modelo, aûn sin creer en la realidad de ese modelo. Este mètodo había ya sido utilizado en la astronomía alejandrina: en efecto, en èsta no se postulaba la existencia de epiciclos, excèntricas y ecuantes, que estaban en abierta contradicciòn con la teoría de Eudoxo y Aristòteles, sino que se tomaban como un modelo para explicar los movimientos celestes. Esta tendencia fue reforzada por los nominalistas del siglo XIV, y a la luz de ella se puede entender la acogida que tuvo, siglos despuès, el <<De Revolutionibus>> de Copèrnico. Su influencia en el posterior desarrollo de la física es impresionante. De aquí derivaron los nominalistas la tendencia a los experimentos pensados, y a la proposiciòn hipotètica de explicaciones. Como ya no estaban obligados a afirmar, perentoriamente, que el mundo se comportaba de tal o cual manera, la doctrina de los modelos abriò el campo a la especulaciòn. Todos los tratados nominalistas se cuidaban de no establecer relaciones causales, sino implicaciones lògicas. Si esto ocurriera <<secundum imaginationem>>, ocurriría esto otro. Buridan, al comentar a Aristòteles, aûn refutando sus hipòtesis, observaba: "Sin embargo estas reglas son condicionales y verdaderas, pues si las condiciones establecidas en las reglas fueran observadas, todo sucedería segûn lo enunciado por las reglas". O en otras palabras, si mi abuelita tuviera ruedas...

En todo caso, pareciera que la condena de 1277, destinada a acabar con la ciencia como disciplina independiente, hubiera tenido irònicamente el efecto contrario. La física aristotèlica había dominado todo el siglo XIII. Los problemas que presentaba su teoría del movimiento, en particular la aceleraciòn de los cuerpos en caída libre y el movimiento del proyectil habían preocupado a los científicos de ese siglo, que habían propuesto diversas alternativas, aunque siempre en el espíritu del maestro. Sin embargo, las cosas iban a cambiar: Occam y el Papa habían abierto un boquete en la perfecta teoría de Aristòteles.

Ciertamente, ya desde el siglo VI Filopòn había criticado la teoría del proyectil, y sus críticas habían sido adoptadas por muchos pensadores àrabes, entre ellos el famoso Avempace, comentado por Averroes. La crítica de Avempace se basaba en el movimiento de las esferas celestes. Aristòteles afirmaba que èstas se movían sin resistencia, y sin embargo, no se manifestaba en ellas el movimiento instantàneo que predecía la fòrmula de Aristòteles. Avempace concluía que el movimiento era posible aûn sin un medio, es decir, que el movimiento era posible en el vacío, y que la ûnica misiòn del medio era retardarlo. Con esto, caía por los suelos la teoría del proyectil. Tomàs de Aquino, con todo su prestigio intelectual, tomò partido por Avempace, repitiendo el mismo argumento. A partir de esto, el movimiento en el vacío se convirtiò en un tema polèmico. ¿Era posible ese movimiento? ¿Còmo se manifestarìan los movimientos naturales y violentos en el vacìo?

Los aristotèlicos trataron de contestar estas preguntas en el marco teòrico del maestro, y asì se desarrollò el concepto de resistencia interna. Dado que todo cuerpo estaba formado por los cuatro elementos bàsicos, que en sì mismos no eran observables por separado, todo cuerpo tenìa a la vez tendencia a la pesantez y a la liviandad. Sin embargo, una de èstas predominaba, haciendo que el cuerpo se moviera "naturalmente", mientras que la otra se oponìa a ese movimiento. Asì, en el caso de un grave, la pesantez era la fuerza dominante, y la liviandad la resistencia. De aquì se deducìa que el movimiento en el vacìo era posible, aunque los cuerpos elementales se transladarìan en el vacìo a velocidades infinitas. La introducciòn del vacìo en la discusiòn es un grado de abstracciòn fundamental; aunque se negara la existencia real de èste, el sòlo hecho de pensar en el vacìo llevaba la fìsica al terreno del espacio euclidiano; dar el siguiente salto, es decir, despojar al espacio de sus lugares y direcciones preferentes, era difìcil, pero el primer paso estaba dado.

En todo caso, ya en el siglo XIV Thomas Bradwardine y Alberto de Sajonia habìan llegado a una conclusiòn asombrosa: si el cuerpo es homogèneo, argumentaban, la misma relaciòn entre fuerza motriz y resistencia se da para todas sus partes; el tiempo de caìda serìa el mismo para cuerpos de distinto peso, siempre que estèn hechos de la misma sustancia. La conclusiòn dependìa pues de sustituir una cualidad extensiva, el peso, por una intensiva, la densidad. Galileo emplearìa un argumento semejante tres siglos màs tarde.

Pero el verdadero problema del movimiento a travès del vacìo no era el natural, sino el violento. Al no existir una fuerza impulsora, podìa continuar el movimiento? Nuevamente Filopòn habìa abordado el problema, y habìa llegado a la conclusiòn de que el impulsor inicial debìa impartir una fuerza incorpòrea al proyectil, rechazando el papel del medio. La argumentaciòn de Filopòn era muy sencilla: si el aire tuviera un papel en el movimiento, se podrìa lanzar un proyectil agitando el aire debajo de èl. Esto era evidentemente absurdo, y la necesidad de la fuerza impresa al cuerpo se seguìa inmediatamente.

Los àrabes desarrollaron esta teorìa. Para Avicena, la fuerza impresa (<<mail>> en àrabe) podìa ser de tres tipos: psìquico, natural y violento. Los dos ùltimos se correspondìan con los movimientos aristotèlicos del mismo nombre. En particular el <<mail>> violento era proporcional al peso, por lo que una bola de plomo podìa ser impulsada màs lejos que una pluma. El <<mail>> era una cualidad permanente, que era tan sòlo neutralizada por la resistencia externa. De aquì deducìa Avicena la imposibilidad de un vacìo, donde el movimiento seguirìa indefinidamente. En cambio, Abul Barakat propuso un <<mail>> transitorio, que se disipaba por sì mismo. Estas ideas se desarrollaron tambièn en Occidente, no sabemos si separadamente o como consecuencia de la lectura de los àrabes. En todo caso, Bacon y Aquino rechazaron la fuerza impresa, muestra de que la idea ya estaba en boga en el siglo XIII.

La fìsica del <<ìmpetus>>, como se llamò a esta fuerza incorpòrea impresa, se desarrollò sobre todo en Parìs en el siglo XIV. Jean Buridan creìa que el <<ìmpetus>> era una fuerza transmitida al objeto por el agente impulsor inicial. La cantidad de materia de un cuerpo determinaba la cantidad de <<ìmpetus>> que el cuerpo podìa recibir: a mayor cantidad de materia, màs <<ìmpetus>> recibìa el cuerpo, atesoràndolo en sì. Tanto la velocidad como la cantidad de materia se tomaban como paràmetros para determinar el <<ìmpetus>> recibido; la coincidencia con el concepto moderno de ìmpetu es asombrosa, pero recuèrdese que los nominalistas creìan que el <<ìmpetus>> era una fuerza, es decir, el responsable del movimiento, no un efecto o una medida del efecto. Asì, la fuerza externa de Aristòteles pasaba a habitar dentro del cuerpo. Por otro lado, Buridan coincidìa con Avicena en afirmar que el <<ìmpetus>> impartido era permanente, y que sòlo la resistencia externa o la tendencia al movimiento natural podìan agotarlo. En ausencia de otras causas, sòlo causas externas podìan cambiar el estado de movimiento del cuerpo. Buridan no extrajo la conclusiòn que nos parece hoy en dìa evidente: la ley de la inercia. Ciertamente, sabìa que si toda otra resistencia era removida, el cuerpo se moverìa indefinidamente en una lìnea recta. Pero tal movimiento no era concebible en el acotado Universo medieval.

Otro problema que Aristòteles no habìa resuelto satisfactoriamente era el de la rueda: por què una rueda se mantenìa girando aùn despuès del impulso inicial? Buridan aplicò su teorìa del <<ìmpetus>> a la rueda, y afirmò que los movimientos celestes se debìan a una causa parecida: Dios habìa impartido un <<ìmpetus>> inicial a las esferas, que en ausencia de fricciòn, seguirìa eternamente. Nòtese como Buridan no encontrò ninguna contradicciòn en ese eterno movimiento rotatorio. Al ser acotado, era posible, bien que entraba en contradicciòn con la idea teològica que asignaba un àngel a cada esfera, para que la moviera eternamente.

Finalmente, Buridan se lanzò a resolver el problema de la aceleraciòn en la caìda, que, como hemos dicho, Aristòteles habìa ignorado casi por completo. La teorìa aristotèlica no podìa dar cuenta de la aceleraciòn, pues la causa del movimiento, el peso, se mantenìa constante durante todo el movimiento. Buridan descartò las explicaciones tradicionales, que iban desde la proximidad del lugar natural hasta la rarefacciòn del aire por fricciòn, y argumentò que la causa que pone al cuerpo en movimiento seguìa actuando durante toda la extensiòn de èste, por lo que al <<ìmpetus>> inicial se iban agregando incrementos de <<ìmpetus>>. La velocidad aumentaba en forma proporcional al <<ìmpetus>>, de manera que la ley derivada no era correcta; sin embargo, la idea germinal era importante, y sin duda manifestò su influencia sobre Galileo. En un trabajo de juventud, <<De Motu>>, Galileo se manifiesta como un proponente de la teorìa del <<ìmpetus>>, sòlo que en su caso èste es autodisipante, idea que ya Boneto había propuesto en la Edad Media. En todo caso, el concepto de velocidad y el de aceleración no habían sido claramente formulados todavía. Tanto Buridan como Alberto de Sajonia como Leonardo da Vinci hacían el aumento de velocidad simultàneamente proporcional a la distancia y al tiempo. El mismo Galileo adoptò originalmente la primera relación, antes de caer en la cuenta de su error.

Aristòteles había clasificado el cambio en cuatro tipos: movimiento, cambio de cualidad (v.g. la combustión), intensificación o disminución de cualidad e intensificación o disminución de materia. Los eruditos del Colegio Merton de la Universidad de Oxford consideraban a los cambios de velocidad como una intensificación o disminución de cualidad, y adscribían el mismo tratamiento cualitativo a esos cambios que si hubieran hablado de cambios en la intensidad de un color. Gradualmente, esta concepción fue dejada de lado, en favor de una descripción cuantitativa. Las definiciones a las que llegaron los mertonianos fueron empleadas tal cual por Galileo, y no pudieron ser mejoradas hasta el advenimiento del càlculo. Los mertonianos habían formulado una definición de movimiento uniforme: el recorrido de distancias iguales en cualquier intervalo de tiempo tomado en cuenta. La palabra cualquiera era importante: el intervalo de tiempo era arbitrario. Ampliando su definición, llegaron al concepto de movimiento uniformemente acelerado, en el cual se adquiere un incremento de velocidad igual para todos los intervalos de tiempo de la misma longitud, siendo èsta arbitraria. Aùn màs, trataron, aunque evidentemente sin èxito, de definir el concepto de velocidad instantànea. Aunque no hayan llegado a la definición, el sòlo hecho de plantear el concepto es importante: la definición tendría que esperar al desarrollo del càlculo. Sin embargo, los mertonianos, a partir de estas definiciones, demostraron un teorema fundamental: el teorema de la velocidad media para el movimiento uniformemente acelerado: $S = 1/2\ Vt$. De aquí, como $V = at$, $S = 1/2\ at^2$.

Desde luego, los matemàticos medievales carecían de símbolos algebraicos, y llevaron a cabo una demostración geomètrica. Nicolàs de Oresme, uno de los científicos màs brillantes del siglo XIV empleò, tal vez por primera vez, una gràfica para demostrarlo. La gràfica de lo que hoy llamaríamos una función, que èl denominò "latitud de formas" representaba el movimiento de un cuerpo en aceleración constante, en un diagrama de velocidad contra tiempo. Era por tanto una línea recta de pendiente distinta de cero, y de ella podía extraerse sin dificultad la ley del movimiento de Galileo. En efecto, Oresme marcò puntos equidistantes sobre una recta horizontal, y trazò perpendiculares a èsta que pasaran por los puntos e intersectaran la diagonal. El àrea comprendida entre dos subdivisiones, la diagonal y la horizontal es la distancia cubierta entre los intervalos de tiempo correspondientes (fig. 3.1). Si se subdivide la horizontal en tres partes, la razòn entre las àreas va como 1:3:5; es decir, si el àrea màs pequeña es de 1 unidad, la siguiente es de 3, y la siguiente de 5. Si se subdivide en cuatro, la razòn va como 1:3:5:7, y en general, como observò Galileo, las distancias tienen razones como los números impares. Por lo tanto, la suma de todas las áreas, la distancia total recorrida, es la suma de los impares (suponiendo nuevamente un área inicial igual a la unidad), pero la suma de los primeros n impares es n cuadrada, de donde surge la ley de movimiento de Galileo.

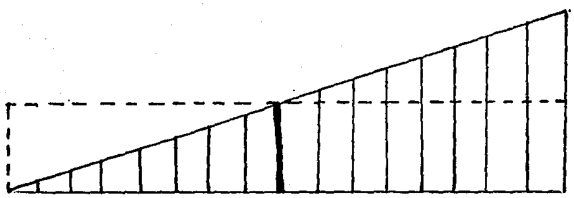

Figura 3.1

Oresme entendió que toda ecuación puede traducirse en una gráfica, y como vemos, usó un primitivo sistema de coordenadas. Esto no era nuevo, ya que Apolonio había empleado sistemas de coordenadas, pero la idea de representar una ecuación por una curva era verdaderamente revolucionaria. Desgraciadamente, Oresme no vio el inverso: toda curva es expresable mediante una ecuación. Sin embargo, interpretó correctamente las áreas como distancias, y al evaluarlas, llevó a cabo una sencilla integración, y notó que la pendiente constante significaba la variación uniforme de la función. Por qué no aplicó Oresme esta ley a la caída de los cuerpos, adelantándose con ello a Galileo? Bien, sencillamente faltaba el reconocimiento de que los cuerpos caen según un movimiento uniformemente acelerado.

Hablemos finalmente de la astronomía medieval. Como ya hemos visto, el Universo aristotélico fue adoptado plenamente en el siglo XIII. Ptolomeo añadió su autoridad al esquema aristotélico, y éste no fue seriamente impugnado hasta que Copérnico publicó <<De Revolutionibus>>. Ciertamente, había habido especulaciones antiguas, notablemente por Hiparco, que proponían un modelo heliocéntrico; pero estas explicaciones habían sido refutadas y descartadas, y el lugar de la Tierra inmóvil en el centro del Universo no parecía sufrir ningún peligro. Las teorías de Aristóteles y Ptolomeo sufrieron algunas modificaciones a manos de los escolásticos, pero éstas consistían casi siempre en cambiar el orden de las esferas o añadir esferas nuevas, y colocar un ángel en cada una para que la moviera. La esfericidad de la Tierra era universalmente aceptada en el siglo XIII, y los argumentos aristotélicos en favor de esta postura, desde la forma como desaparecían los barcos alejándose de puerto hasta la sombra curva de la Tierra en los eclipses de luna, eran repetidos con convencimiento. Desde luego, la leyenda de que Colón postuló la esfericidad de la Tierra no es más que un cuento de primaria. Lo que hizo Colón fue apoyarse en la estimación más errada de la circunferencia terrestre para justificar su viaje, y los sabios de Salamanca que lo acogieron tan desfavorablemente tenían, después de todo, la razón total: el cálculo de Eratóstenes, y no el que citaba Colòn, era el màs correcto. Si su extraordinaria suerte no le lleva a toparse con un continente mucho antes de la mitad de su viaje, Colòn no figuraria en los libros de historia. En todo caso, era tan cabezotas que nunca reconociò haberse equivocado.

Sin embargo, si el lugar de la Tierra en el centro del Universo no era discutido, los escolàsticos sì se plantearon otra pregunta, que ya Ptolomeo habìa tratado de refutar: ¿Rota la Tierra sobre su eje? Hemos visto que ya en la Antigüedad Heràclides y Aristarco habìan adelantado esta hipòtesis, y que la misma era refutada siempre por argumentos fìsicos: la caìda de los cuerpos y el movimiento de las nubes. En la baja Edad Media, tanto Buridan como Oresme plantearon la cuestiòn e intentaron resolverla. Fieles a su tradiciòn de "guardar las apariencias", los nominalistas argumentaban que, desde el punto de vista estrictamente astronòmico era indistinguible si la Tierra rotaba o lo hacìan los cielos. Buridan ponìa como ejemplo el caso de dos barcos que se cruzaban, donde uno estaba anclado y el otro no. Desde el punto de vista del observador en movimiento, èl pareceria estacionario, y el otro barco pareceria moverse. Por otro lado, congruentemente con la concepciòn aristotèlica segùn la cual el reposo era un estado màs noble que el movimiento, era màs apropiado que la corrupta Tierra se moviera, y no los divinos cielos. Finalmente, Buridan aplicaba la navaja de Occam: habìa que optar siempre por la explicaciòn màs simple. Era màs sencillo suponer que la Tierra, relativamente pequeña en comparaciòn con los cielos, se movìa. Pero a pesar de todos estos argumentos, el movimiento vertical de los proyectiles pareciò bastar a Buridan para optar por la explicaciòn tradicional: en tìpico estilo nominalista, sin rechazar por completo la hipòtesis alternativa, Buridan concluìa que la Tierra no rotaba.

Oresme hacìa una exposiciòn aùn màs completa: empleaba el mismo argumento de la relatividad del movimiento para explicar que los proyectiles lanzados verticalmente parecieran caer en el mismo lugar, y argumentaba que el aire se movìa con la Tierra a la misma velocidad, por lo que las nubes no podìan quedar atràs. Citaba la economìa del movimiento, al igual que Buridan, y la armonìa resultante en el hecho de que todos los cuerpos celestes se movieran de Oeste a Este. Pero Oresme se declaraba incapaz de decidirse por una de las alternativas: sòlo la fe podìa dar la respuesta.

Esta misma mezcla de argumentos filosòficos con astronomìa y fìsica se verìa repetida siglos màs tarde en las obras de Copèrnico y Galileo, aunque con un sentido màs positivo: Copèrnico alegò razones casi idènticas a las de Buridan y Oresme, incluyendo la mayor nobleza del Sol, la armonìa celeste y la economìa divina, para demostrar la rotaciòn de la Tierra.

No obstante, la Tierra no era considerada completamente inmòvil; al ser un cuerpo heterogèneo, se suponìa que hacìa esfuerzos constantes para rectificar su centro con el centro del Universo. El efecto de estos movimientos quedaba manifiesto en los accidentes geològicos.

Como ya hemos dicho, el Universo aristotèlico habia sido adoptado sin discusiòn; sin embargo, sus cincuenta y seis esferas fueron simplificadas a ocho, con el ocasional agregado de la esfera del <<primum mobile>> y la esfera empireana, que se situaban màs allà del firmamento (fig. 3.2). En todo caso, el modelo aristotèlico convivia con los epiciclos de Ptolomeo, que, aunque no se consideraban reales (pues todo movimiento debia ser circular alrededor de la Tierra), se aceptaban como un modelo de explicaciòn del movimiento planetario.

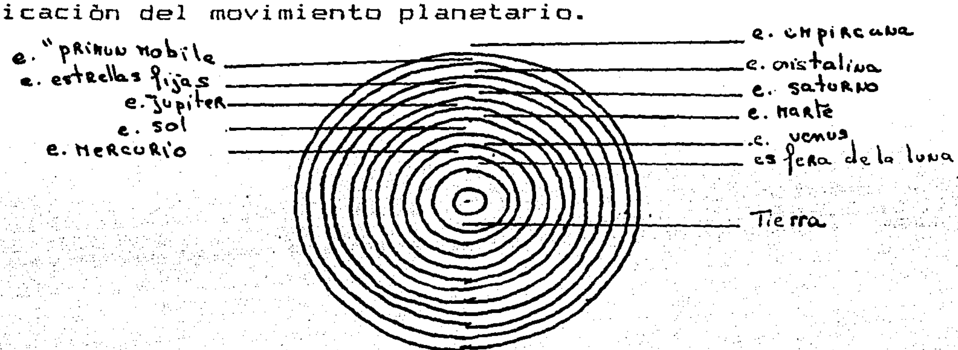

Figura 3.2

Finalmente, existia la cuestiòn de lo que habia fuera del Universo. ¿Existia un vacio? ¿Habia acaso otros mundos? El nominalismo estaba forzado a aceptar que Dios podia haber creado otros mundos, pues en la prohibiciòn de 1277 se hacia explicita esa opiniòn, en contra de Aristòteles. En todo caso, la polèmica de la existencia del vacio fue muy pronunciada en el siglo XIV. Los estoicos ya habian adelantado la idea de que el Universo acotado estaba rodeado por un vacio infinito; la infinitud del vacio se demostraba por el principio de razòn suficiente: no habia nada que acotara al vacio, pues toda materia estaba contenida en el Universo, y el vacio no tenia por què terminar en un punto con preferencia a otro. Simplicio habia citado un argumento en favor de la existencia del vacio: si un hombre se parara sobre la ùltima esfera y extendiera su brazo, què encontraria? O bien nada, o bien materia; pero si existia esta materia, podia llegar al borde de ella y repetir el experimento. Recordemos que el mundo era finito: en un nùmero finito de pasos debia llegarse a su frontera. Existia sin embargo otro argumento: en el diàlogo Asclepio, uno de los textos hermèticos de principios de la Era Cristiana, Hermes Trismegistos hacia saber a Asclepio que el vacio, si existiera, estaria lleno de espiritu. Este argumento, retomado por Thomas Bradwardine, situaba a Dios en todos y cada uno de los lugares del mundo y del espacio vacio; pero este espacio no tenia extensiòn ni dimensiones: era una infinitud metafisica, ya que Dios no podia tener atributos como la extensiòn o la dimensionalidad.

Oresme replanteó el argumento de Bradwardine, pero adscribiendo al espacio vacío una existencia concreta. De hecho, el movimiento del cosmos entero en línea recta era posible en este espacio, si Dios así lo quisiera. Sin embargo, este espacio vacío seguía sin ser euclidiano: no tenía dimensiones. Esta idea fue reiterada por varios pensadores a lo largo de la baja Edad Media: el espacio carece de atributos positivos, es irreal e "imaginario". Dios llena todo el espacio, pero lo llena trascendentemente, no realmente. Sin duda, estas ideas estaban lejos del espacio euclidiano; pero el sólo hecho de ser planteadas llevaban a las mentes a pensar sobre el espacio. Ya en 1350 Juan de Ripa había afirmado que el espacio vacío era tridimensional; pero esta opinión no se convirtió en lugar común hasta el siglo XVII. Tanto los atomistas como algunos estoicos habían afirmado la existencia de un espacio tridimensional vacío de todo, hasta del espíritu; los experimentos de Pascal, Torricelli y von Guericke demostraron la falsedad de la doctrina del <<horror vacuii>>. Había allí, en esferas cerradas, un vacío perfectamente real y tridimensional. En todo caso, las mentes teológicas no renunciaron a llenar de Dios el espacio, y terminaron como Newton y Spinoza, adscribiendo extensión a Dios. Así se daba la vuelta de campana: el espacio vacío había sido concebido en la Edad Media como coextendido con Dios, y poseedor por lo tanto de los atributos de la Divinidad; el siglo XVII devolvería el favor.

Existe una polémica sobre la influencia que tuvo realmente el antiaristotelismo del siglo XIV sobre Copérnico y Galileo. ¿Por qué no se produjo la revolución científica en tiempos de Buridan y de Oresme? Fue el pensamiento galileano consecuencia directa y heredera de la escuela nominalista de París? Duhem se adhiere a esta posición, asignando a la condena de 1277 el verdadero mérito de haber estimulado la imaginación científica, abriendo las puertas a la especulación, mientras que Koyré tiende a restarle importancia al antiaristotelismo papal, relegándolo a mero factor irritante (5). En todo caso, no es aventurado suponer que, a pesar de la libre especulación, el lenguaje hipotético en que fueron planteadas las cuestiones por la escuela nominalista y la actitud escéptica de estos discípulos de Occam impidieron a la física medieval ir más allá. La falta de herramientas matemáticas no sería muy relevante en este sentido. Aunque aún faltaban por venir Cardano, Tartaglia y Vieta, el lenguaje matemático de Galileo no estaba muy por encima del de sus predecesores medievales. Hemos visto que muchas veces Oresme y Buridan estuvieron a punto de plantear una revolución; y sin embargo, no lo hicieron. Les faltó ese último paso, que Copérnico y Galileo dieron decididamente: afirmar que su teoría representaba realmente al mundo, no era una simple hipótesis de trabajo. La influencia teológica tal vez pudo más que su íntima convicción de estar describiendo al mundo real, pues ¿quién puede negar que Buridan y Oresme, muy en su fuero interno, estaban convencidos de la verdad de sus teorías?

La peste bubónica y las guerras de los Cien Años y de las Rosas en el siglo XIV acabaron pronto con el renacimiento cultural en las universidades escolàsticas de Parìs y Oxford. Europa no conociò una hora màs tràgica. Entre la cuarta y la tercera parte de la poblaciòn europea sucumbieron en el corto perìodo de dos años. El fin del mundo parecìa haber llegado, y no habìa mucho tiempo para dedicarse a ociosos problemas matemàticos. Mientras las ratas cubiertas de chinches portadoras de la peste pululaban en las calles y los cadàveres yacìan sin nadie que los enterrara, los europeos se volvieron locos. Hubo quienes tomaron la situaciòn a la ligera, y celebraron y festejaron esperando la inevitable apariciòn de las bubas, abandonada toda esperanza; hubo otros, los flagelantes, que interpretaron la horrenda plaga como un castigo divino, y peregrinaban de ciudad en ciudad, orando y flagelàndose, y propagando de paso la peste. Avignon, sede del papado, era el centro donde confluìan las peregrinaciones. Curiosamente, el papa se salvò de la peste por que sus mèdicos, como medida terapèutica y sin saber muy bien lo que hacìan, ya que el vector de la plaga era desconocido, lo rodearon de cuatro braseros que ardìan incesantemente, con lo que las chinches no pudieron obtener audiencia con Su Santidad.

NOTAS AL CAPITULO III

1) Boyer, 'History of Mathematics'.
2) Kuhn, 'The Copernican Revolution'.
3) Eco, 'El Nombre de la Rosa'.
4) Grant, 'La Ciencia Física en la Edad Media'.
5) Citados, tanto Duhem como Koyrè por Grant, loc. cit., p. 75.

IV. EL TRONO DE DIOS

O hark, o hear,
how thin and clear!
Tennyson

1.- El Renacimiento y Copèrnico

La caìda de Constantinopla en 1453 suele marcar convencionalmente el fin de la Edad Media. Este evento propiciò probablemente que los eruditos bizantinos se refugiaran en Europa Occidental, llevando con ellos los viejos manuscritos griegos (el griego era la lengua oficial de Bizancio). Ciertamente, la interacciòn entre Occidente y el Imperio Bizantino no se interrumpiò del todo durante la Edad Media, y es probable que los manuscritos bizantinos fueran accesibles de todos modos antes de la caìda del Imperio. Inclusive, el peor saqueo a que fue sometida Constantinopla antes de su caìda fue labor de los soldados de la Primera Cruzada, que trataron a los bizantinos peor que a los infieles. Por ello, algunos autores prefieren pensar que lo que realmente impulsò el desarrollo de las ciencias durante el Renacimiento fue la invenciòn de la imprenta. En todo caso, el clima cultural habìa cambiado. La ciencia saliò de las universidades y monasterios, para convertirse en patrimonio de particulares que eran mantenidos por las cortes de los prìncipes, especialmente los italianos. El ènfasis medieval en la religiòn como rectora del pensamiento, que tendìa a menospreciar al hombre individual y sus actos, supeditàndolo al concepto de una comunidad al servicio de Dios, dio paso al culto del hombre en intelecto y figura, al viejo estilo grecolatino. Este movimiento, llamado Humanismo, abominò de la cultura medieval y se lanzò con furia a la recuperaciòn de la herencia grecolatina, al estudio del griego, a la arquitectura clàsica y a los libros antiguos. A la figura de Aristòteles, encumbrada por Aquino y los escolàsticos, opusieron la recièn descubierta de Platòn. El humanista idealizò al màximo la antigua Edad Clàsica, y buscò una educaciòn integral, apartada de los rìgidos curricula de la Iglesia. Sin embargo, su ènfasis estaba en las artes, no en las ciencias. En matemàticas, los problemas clàsicos fueron revividos, y asì Nicolàs de Cusa se volviò un ardiente cuadrador de cìrculos, aunque su pensamiento adolecìa de toda la carga escolàstica que aùn era corriente en la època.

La figura matemàtica màs importante de esta època es sin duda Johann Müller de Königsberg, a quien se conoce como Regiomontanus. Confrontado ante la multitud de manuscritos antiguos, su principal ambiciòn era traducir y difundir estas obras. Consideraba inadecuadas las traducciones de Euclides y Ptolomeo que databan del siglo XII, que habìan pasado del griego al àrabe y de ahì al latìn, y ya que tenìa acceso a los originales griegos, decidiò emprender la magna tarea. Tenìa una imprenta en Nüremberg, en la cual planeaba imprimir miles de copias de los libros antiguos; pero desgraciadamente muriò antes de llevar a cabo su sueño. Aún así, nos legó lo que constituye el primer tratado moderno de trigonometría.

Los matemáticos del Renacimiento, fieles a la tradición neoplatónica, se ocuparon de buscar relaciones entre poliedros regulares, secciones áureas y la Naturaleza, como ilustra el célebre boceto de Leonardo en que intenta encuadrar a un hombre de acuerdo a las proporciones perfectas de la sección áurea. El desarrollo en geometría iba más encaminado hacia su aplicación a las leyes de perspectiva en pintura, a la arquitectura y las artes en general. A pesar de lo que se cree en contrario, ni da Vinci ni Miguel Angel ni después Albrecht Dürer tuvieron gran incidencia en el desarrollo matemático de la época. Los intereses de los humanistas eran más prácticos que teóricos en el campo de la ciencia, y en particular Leonardo, ingeniero genial, era un intelecto demasiado inquieto: a pesar de hacer importantes observaciones, Leonardo nunca sistematizó su obra.

La contribución más importante del Renacimiento a la matemática fue desde luego el desarrollo del álgebra tal como la conocemos, así como el descubrimiento de la solución de las ecuaciones de tercer y cuarto grado, debidas a Tartaglia y Cardano, con toda su historia de plagios y juramentos rotos.

Platón y Arquímedes, que era considerado neoplatónico, eran las figuras de la época. Este último apenas se estaba dando a conocer, a pesar de haber sido traducido ya desde el siglo XII. Su obra tuvo la fuerza de la verdad revelada para los nuevos científicos naturales. El cálculo infinitesimal volvió a surgir, a partir de las obras de Arquímedes, Apolonio, Diofanto y otros alejandrinos; a los viejos problemas de cuadraturas y áreas que habían preocupado a los griegos se añadieron problemas de tangencia y velocidad. Aristóteles era atacado y destruido por todos lados, con viejos argumentos nominalistas y nueva dialéctica neoplatónica. El ataque definitivo comenzó en la astronomía, con la publicación de la teoría heliocéntrica de Copérnico.

Quien lea hoy en día este libro con la idea de encontrar un riguroso tratado científico a la manera moderna se llevará sin duda una gran desilusión. Copérnico estaba todavía muy cerca del pasado escolástico, y toda la primera parte de su libro se dedica a argumentos filosóficos para justificar el doble movimiento de la Tierra. Como hemos dicho, sus argumentos sobre la rotación no eran muy disímbolos de los que Oresme y Buridan habían adelantado en su tiempo. Sin embargo, había un nuevo sabor neoplatónico, que se traducía entre otras cosas en la divinización del Sol, como fuente de luz real y metafórica: el Sol, verdadero Astro Rey, debía ocupar el centro del Universo.

Vale la pena apuntar que el sistema copernicano, aunque más económico que el ptolemaico, era complejísimo. Los epiciclos habían sido reducidos en número, y sus resultados eran más precisos; pero la vieja creencia de que este sistema superaba ampliamente al geocéntrico es insostenible, como afirma Kuhn (1).

Las consecuencias ontològicas del sistema, sin embargo, eran màs importantes que sus iniciales consecuencias astronòmicas: Copèrnico habìa desplazado el trono de Dios en un Universo concèntrico, y habìa rebajado a la Tierra de su categorìa de centro de la Creaciòn a simplemente otro cuerpo celeste. Esto rompìa radicalmente la dicotomìa aristotèlica entre cielo y tierra: al ser la Tierra un planeta màs, la consecuencia lògica era que la fìsica terrestre no debìa ser muy distinta de la celestial. Por otro lado, las direcciones y lugares preferentes, connaturales a una concepciòn concèntrica y acordes con el sentido comùn, habìan recibido tambièn un golpe mortal. La fìsica aristotèlica se veìa seriamente comprometida. Aùn màs, Copèrnico habìa tenido que formular una hipòtesis <<ad hoc>> para lanzar a la Tierra a girar a travès del Cosmos: en efecto, si la Tierra giraba alrededor del Sol, su distancia a un punto determinado de la esfera celeste variaba considerablemente, con lo que un fenòmeno de paralaje parecìa inevitable; Copèrnico audazmente se anticipò a esta objeciòn, replicando que la esfera celeste era mucho mayor en diàmetro a lo que Aristòteles y los escolàsticos habìan imaginado: las fronteras del mundo habìan sido empujadas hacia atràs, y no tardarìan en desaparecer.

Aunque Copèrnico habìa afirmado valientemente la concordancia de su teorìa con el mundo real, el paradigma hipotètico de los nominalistas resurgirìa en su obra. Como es sabido, la primera ediciòn de <<De Revolutionibus>> fue recibida por Copèrnico en su lecho de muerte, lo que le impidiò, como es natural, participar en la polèmica subsecuente. Sin embargo, Andreas Osiander, un teòlogo luterano, prologò el libro, afirmando que las ideas de Copèrnico debìan tomarse como meras especulaciones al estilo nominalista. Por lo menos en una instancia se siguiò esta recomendaciòn. Los astrònomos del papa Gregorio, que se habìan impuesto la tarea de reformar el calendario, adoptaron el modelo copernicano por ser màs econòmico que el ptolemaico, a pesar de la condena que pesaba contra su enseñanza.

La larga historia de persecuciòn e intolerancia que se desatò contra el sistema copernicano ha sido bien documentada, y no nos detendremos en ella. Baste decir que tanto tirios como troyanos, el Papa y Lutero, se lanzaron a condenar, quemar, excomulgar y perseguir en todas sus formas a los copernicanos, tanto màs cuanto que èstos afirmaban que el mundo se comportaba en realidad de acuerdo al molesto libro de Copèrnico, haciendo caso omiso de Osiander.

2.- La Fìsica Galileana

El papel de Galileo en la polèmica copernicana es bien conocido; aparte de haber publicado un diàlogo en su defensa y haberle dado una de las màs importantes comprobaciones experimentales, el descubrimiento de los satèlites de Jùpiter -ya que, ademàs de echar por tierra la vieja doctrina de los cielos, en la que los planetas eran siete, habìa descubierto un sistema solar en miniatura-, fue juzgado por la Inquisiciòn por hacer profesiòn de fe copernicana. Galileo se ha convertido, a partir de entonces, en una especie de hèroe de la libertad de expresiòn, ensalzado por dramaturgos y poetas. Las verdaderas razones de su juicio son tal vez màs terrenas de lo que Brecht hubiera querido; la soberbia intelectual no iba bien con su concepto del teatro èpico. Galileo se malquistò gratuitamente con el papa, ridiculizando sus opiniones en el diàlogo sobre los sistemas del mundo en la boca de Simplicio. Tambièn se ha adelantado la hipòtesis de que Galileo fue injustamente confundido como discìpulo del malogrado Giordano Bruno. No obstante, su juicio no se debiò exclusivamente a una venganza personal; los sentimientos anticopernicanos de la Iglesia no admiten duda. Ademàs, se fijò una posiciòn eclesiàstica que cubriò de ridìculo a la Iglesia y ayudò en gran medida a la propia destrucciòn del ascendiente intelectual de Roma. En todo caso, pràcticamente destruyò a la ciencia italiana, tan pujante hasta entonces, y cambiò el eje de la creaciòn cientìfica hacia el Norte.

La dislocaciòn del cosmos producida por el copernicanismo dio pie, como decìamos, a la sustituciòn de la fìsica de Aristòteles por una nueva fìsica. La teorìa del <<ìmpetus>> era bien conocida en tiempos de Galileo. Tanto Bonamico como Benedetti la habìan defendido, atacando ferozmente las posiciones aristotèlicas. El propio Galileo, en su juventud, se convirtiò en un ardiente proponente de la teorìa del <<ìmpetus>>. En su obra juvenil, De Motu, Galileo reproducìa los argumentos de la escuela parisiense. ¿Còmo explicar que una honda lance un objeto màs lejos entre màs vueltas se le dè? ¿Por què razòn un cuerpo màs pesado es proyectado màs lejos? Què hace que una rueda gire persistentemente? Desde luego, la respuesta es la fuerza impresa, el <<ìmpetus>>. Galileo considera que èste se va debilitando gradualmente por sì mismo: el movimiento eterno es imposible y absurdo. Estamos todavìa lejos de la ley de inercia, por màs que <<a posteriori>> nos parezca inevitable, una vez alcanzado el concepto de <<ìmpetus>>.

Galileo aportaba dos conclusiones a la teorìa: en primera instancia, la velocidad de un proyectil siempre decrece. Esto era nuevo: incluso los artilleros creìan que el proyectil se aceleraba inmediatamente despuès de dejar la boca del cañòn. En segundo lugar, y màs ilustrativamente, Galileo negò en <<De Motu>> que un cuerpo en caìda libre se acelerara (!!!). El movimiento de caìda, segùn Galileo, no dependìa màs que de la pesantez, que es evidentemente constante. La velocidad era una cualidad inherente al objeto, independiente del medio. Por lo tanto, concluìa que la velocidad era proporcional a la pesantez. Sin embargo, no podìa negar lo evidente: segùn èl los cuerpos se aceleraban sòlo al principio, antes de alcanzar su velocidad "natural". En todo caso, la pesantez a la que se referìa Galileo era el peso especìfico, una cualidad intensiva, a diferencia del peso real, que es extensivo. Esto le llevaba a concluir que dos objetos del mismo material caìan a igual velocidad, sin importar su peso o forma. Aùn màs, el peso de Galileo era relativo: era la diferencia entre el peso real del objeto y el del medio. La levedad no era una caracterìstica natural del cuerpo; todos los cuerpos eran pesados, y la levedad era impresa <<praeter naturam>> al lanzar un objeto hacia arriba. Esta levedad se agotaba por su propia acciòn, hasta igualar a la pesantez, en cuyo momento el cuerpo alcanzaba el punto màximo de su trayectoria, y seguìa disminuyendo hasta agotarse por completo. Durante este tiempo, el movimiento era acelerado, pues el factor de retardo, la levedad, se iba agotando. Finalmente, el cuerpo alcanzaba el movimiento uniforme, al desaparecer por completo la levedad. Esta teorìa llevaba a Galileo a la increìble conclusiòn de que un cuerpo ligero, al haber absorbido menos levedad, caìa màs ràpido en un principio que uno pesado, conclusiòn "fundamentada en la experiencia". En todo caso, Galileo afirmaba que la levedad se almacenaba; en efecto, si colocamos un objeto en una torre alta, impidiendo que caiga, conservarà su levedad hasta el momento que lo soltemos. He aquì un lejano germen de la idea de energìa potencial.

Como afirma Koyrè, a primera vista la teorìa de Galileo no se diferencia gran cosa de las anteriores (2). Pero no es asì. La levedad y la gravedad no son ya las categorìas absolutas de los aristotèlicos. Ya Benedetti habìa puesto el ejemplo del trozo de madera que cae en el aire, pero se eleva en el agua, citando la autoridad del principio de Arquìmedes. Pues bien, esta relatividad, adoptada por Galileo, le permite definir cualidades relativas, y en tanto son cuantificables por el efecto que producen, la descripciòn cualitativa aristotèlica es sustituida por una descripciòn cuantitativa. No hay cuerpos leves: todos los como creìan "los antiguos", es decir, los atomistas, Platòn y Arquìmedes, son pesados. La levedad no es una caracterìstica del cuerpo; es algo impreso desde afuera, un <<ìmpetus>>, una resultante, y puede ser cuantificado por medio de la mediciòn de la velocidad. Por otro lado, para Galileo velocidad y movimiento son inseparables. No existe la lentitud, sòlo una velocidad menor. En la Edad Media, velocidad y movimiento habìan sido separados, y se decìa que la velocidad determinaba al movimiento.

Al ser todos los cuerpos pesados, el ùnico movimiento natural es el de caìda. Ademàs, si los cuerpos caen segùn su peso relativo, sòlo en el vacìo caeràn de acuerdo a su peso real. El movimiento no es ya un proceso, un cambio de un estado a otro; todavìa no es un estado, pero va en camino de serlo. La causa del movimiento reside enteramente en el objeto, y por tanto èste puede abstraerse, aislarse del resto del Universo. Pero aùn perviven en la mente de Galileo restos del Universo aristotèlico: todavìa hay un movimiento natural. Citando a Koyrè: bajo la influencia de Copèrnico, "el centro del Universo continùa ahì, pero el Cosmos se amplìa, deviene indefinido, pierde, por decirlo asì, su circunferencia. Serìa suficiente que deviniera infinita para que en el espacio, en lo sucesivo homogèneo, desapareciera todo "lugar" y toda direcciòn privilegiados (...) Galileo no traspasò el lìmite. Sòlo Bruno -que no era astrònomo ni fìsico- pudo dar el paso decisivo" (3).

El cambio de paradigma se manifiesta en toda su fuerza. Galileo adopta conscientemente la filosofìa arquimedeana frente al aristotelismo y al empirismo de Occam. Ambos eran producto del sentido comùn, de la observaciòn directa. Galileo retoma a Platòn, las esencias matemàticas puras, la abstracciòn; retoma a Arquìmedes el cuantificador, el deductivo. Galileo estudiarà el movimiento en el vacio; al hablar del plano inclinado, èste serà absolutamente liso, el cuerpo absolutamente esfèrico, el rozamiento con el aire inexistente: todos conceptos abstractos, todos irreales. Ciertamente, Galileo no funda la fìsica clàsica de manera tan radical como se habìa supuesto antes de conocer a los nominalistas; tampoco la funda en el empirismo, que ya aquèllos habìan practicado. La experimentaciòn, como afirma Bachelard, requiere un bagaje teòrico, una manera de plantear las preguntas. Este bagaje no se adquiere empìricamente. Es producto de una decisiòn ontològica y epistemològica, aunque sea inconsciente. Observar una aguja moverse y relacionarla con el flujo de electrones en un cable o tomar un tubo con lentes y persuadirse de que lo que vemos a travès de èl son objetos reales no son actitudes casuales. La observaciòn casual lleva a Aristòteles y a los nominalistas: al sentido comùn. Los positivistas han querido ver en Galileo a su primer representante, al padre de la ciencia empìrica; pero se equivocan. Galileo retoma la fìsica donde Arquìmedes la habìa dejado. Este se limitò a la estàtica; aquèl fundò la nueva dinàmica.

Como hemos visto, el primer Galileo estaba todavìa lejos del descubrimiento que le darìa la gloria: la ley de la caìda de los cuerpos, la primera ley de la fìsica clàsica. Fue hasta 1609 que Galileo pudo publicar su versiòn de la ley, y como apunta Koyrè, cometiò un error significativo, mismo que se repitiò en Descartes quince años despuès (4). En efecto, Galileo trata de derivar la ley de la caìda, que ya conoce, de un principio fìsico incontrovertible, a la manera como Arquìmedes habìa tratado de deducir la ley de la palanca de dos axiomas. La ley es expresada como Oresme habìa expresado el movimiento uniformemente acelerado: espacios recorridos en tiempos iguales son entre sì como los nùmeros impares, es decir, la distancia es proporcional al cuadrado del tiempo. La ley es correcta; no obstante, Galileo trata de derivarla de un principio que le parece evidente: la velocidad es proporcional a la distancia. Este principio habìa sido ya empleado por Benedetti, Leonardo, Piccolimini, Scaligero y Cardano, intercambiàndolo a veces libremente por otro principio, que creìan equivalente: la velocidad es proporcional al tiempo. Es difìcil distinguir entre ambos principios: Duhem hace notar que no podìa discernirse entre ambos enunciados sino mediante el concepto de velocidad instantànea, que conlleva la nociòn de derivada (5).

Sin embargo, el principio correcto, la proporcionalidad de la velocidad respecto al tiempo, era usado de manera abrumadoramente menos frecuente que su "equivalente". Por què era esto? Sin duda, es màs sencillo pensar en el espacio que en el tiempo. La trayectoria es directamente representable por una lìnea, mientras que el tiempo no encuentra representaciòn evidente, no al menos antes de la geometrìa analìtica de

Descartes. El espacio de Galileo se habìa geometrizado: era casi el espacio euclidiano, y si decimos casi es por que aûn era anisotròpico: como el Universo de Epicuro, tenìa arriba y abajo. Pero el tiempo no tiene cabida en la geometrìa; en el mundo ideal de las formas platònicas el tiempo no transcurrìa. El tiempo, dice Koyrè, es dialèctico, mientras que el espacio es racional (6).

Por otro lado, tanto Benedetti y Leonardo como Galileo habìan prescindido de la teleologìa aristotèlica: los cuerpos no caìan hacia, caìan desde. Entre màs alto se soltaba un grave, màs ràpida era su caìda al final. ¿No era màs normal pensar en la distancia que en el tiempo? ¿No era el tiempo una inûtil complicaciòn? Y sin embargo, ¿por què la proporcionalidad directa?

En todo caso, todos los esfuerzos previos a Galileo, y los mismos trabajos galileanos de juventud se habìan basado en la teorìa del <<ìmpetus>>: de una causa del movimiento impresa al cuerpo, que, en el caso de la caìda, se multiplicaba a cada instante. Esta idea del añadido de <<ìmpetus>> habìa sido atacada por los aristotèlicos como ilògica con un argumento bastante sòlido: una causa invariante (la pesantez) no podìa producir efectos acumulativos. El error de la teorìa del <<ìmpetus>> salta a la vista del lector moderno: el ènfasis estaba en una relaciòn directa entre la causa del movimiento y el efecto màs visible, la velocidad, no entre la causa y la aceleraciòn. Por otro lado, es difìcil pensar que la segunda ley de Newton podrìa haber sido postulada antes del descubrimiento de la primera.

Pero Galileo, en 1609, ya habìa abandonado la teorìa del <<ìmpetus>>, por una sencilla razòn. El <<ìmpetus>> no era cuantificable, y Galileo buscaba con pasiòn la ley matemàtica, la relaciòn numèrica. Los aumentos de <<ìmpetus>> y su agotamiento progresivo eran descripciones cualitativas, no aptas para ser cuantificadas. Galileo, bien a su pesar, abandona la bûsqueda de la causa, del por què, y se concentra en el còmo. Nuevamente sigue los pasos de su maestro Arquimedes, que habìa establecido la ley de la palanca sin ulteriores explicaciones causales. Este es un paso revolucionario: tanto Aristòteles como los nominalistas pensaban en tèrminos de causas: Galileo deja de lado la causa de que los cuerpos caigan, sea èsta externa o interna, y se concentra en el problema de còmo caen los cuerpos. Asì, a la remociòn de la causa final, de la teleologìa, sigue la remociòn, al menos temporal, de la causa eficiente.

No cabe duda que a Galileo esta transformaciòn le costò trabajo: prescindir de las causas implicaba, desde el punto de vista filosòfico predominante, una teorìa incompleta, y el mismo Descartes asì se lo reprochò a la fìsica galileana; pero el salto era necesario: aquì estaba el movimiento en su estado màs puro, el movimiento abstracto, sin intermediarios causales. Es el movimiento que podemos representar sin trabajo en un espacio geomètrico. Asì Galileo salva la paradoja de la causa constante que produce un efecto variable. El <<ìmpetus>> se agotaba, de eso

Galileo estaba seguro desde su juventud; sin embargo, el movimiento se conserva, y por ende, la velocidad se mantiene. He aquí el movimiento elevado a la categoría de un ente independiente, he aquí el abandono progresivo del movimiento como proceso para llegar al movimiento como estado. Ciertamente Galileo conserva el têrmino <<împetus>>; pero no como causa, sino como efecto. La persistencia de terminología, que llegaría hasta Newton, se presta a confusiones; pero el <<împetus>> del Galileo del Diàlogo y los Discorsi no es el mismo que el <<împetus>> del <<De Motu>>; en aquèllos, se presenta como un concepto equivalente o casi equivalente al de movimiento. Los aristotèlicos alegaban que un accidente, el <<împetus>>, no podía transmitirse de un objeto al otro. Galileo elude la polèmica: para èl, el movimiento sí que se transmite. En el Diàlogo invoca el ejemplo de un jinete que suelta una bola: "Cuando la lanzàis con el brazo, ¿què queda en la bola, sino el 'movimiento' engendrado por vuestro brazo, movimiento que conservado en ella la continùa llevando màs lejos? Ahora bien, ¿no importa si ¿este <<împetus>> sea conferido a la bola por vusetro brazo o por el caballo: o es que la mano, y por consiguiente la bola, no corre tan deprisa como el mismo caballo? Sin duda alguna. Así pues, cuando se abre la mano, la bola parte de ella con un movimiento ya engendrado no por vuestro brazo, sino por el movimiento del caballo..." (7).

Pero la geometrizaciòn del movimiento y la eliminaciòn de las causas llevaron a Galileo a una demostraciòn incorrecta de la ley de caída; tal vez, como supone Koyrè, debido a que el factor causal està întimamente ligado al tiempo, y no al espacio (8). En todo caso, Galileo terminò por reconocer su error. En los Discorsi afirma: "es falso que la velocidad se incremente como el espacio" (9). Al librarse del espacio y asociar el movimiento con el tiempo, había llegado ya a la posesiòn de un concepto que ni Leonardo, ni Oresme ni Benedetti habían tenido: la nociòn de velocidad instantànea. Despuès de pasar revista al movimiento uniforme, Galileo introduce el concepto de un continuo de velocidades, desde la lentitud infinita, que ha de recorrer el cuerpo en un tiempo finito, y así postula la siguiente definiciòn: el movimiento uniformemente acelerado es aquèl en el que los grados de velocidad aumentan, a partir del reposo, con el incremento mismo del tiempo, a partir del primer instante de tiempo.

El concepto require evidentemente de un grado de abstracciòn asombroso: Galileo ha arribado a una idea casi inimaginable, el movimiento inmòvil, el movimiento congelado en un instante: la diferencial de velocidad. Haciendo uso de argumentos infinitesimales, Galileo argumenta la validez de una velocidad continua y uniformemente variable; el ejemplo que escoge es el de la desaceleraciòn: "Pero, objeta el aristotèlico, si los grados de lentitud cada vez mayor son infinitos, jamàs se agotaràn por completo. De esta manera, este grave ascendente no llegarà jamàs al reposo, sino que se moverà indefinidamente, disminuyendo de velocidad sin cesar, lo que no se ve que suceda. Esto sucedería si el mòvil permaneciera durante algùn tiempo en cada uno de los grados; pero no hace màs que pasar, sin permanecer en ellos màs que un instante; y puesto que en cada quantum de tiempo, por pequeño que sea, hay una infinidad de instantes, existen pues en nhero suficiente para corresponder a la infinidad de grados de la velocidad descendente" (10).

El movimiento de los graves al caer es un movimiento uniformemente acelerado; la aceleraciòn se define con base en el tiempo, no en el espacio; la ley de caìda puede al fin ser deducida sin errores, a partir de una base sòlida. El acuerdo es total; la distancia puede ser calculada en funciòn del tiempo, y la verdadera relaciòn entre distancia y velocidad queda al descubierto. La formulaciòn de la ley por Galileo tiene ademàs la belleza que exigirìa Platòn: las velocidades aumentan segùn los nùmeros simples, y los espacios recorridos en los mismos tiempos segùn los nùmeros impares <<ab unitate>>: el nùmero entero controla el movimiento.

Sin embargo, recordèmoslo, estamos hablando del movimiento abstracto de un cuerpo en un espacio abstracto. Què tiene que ver, se pregunta el aristotèlico Simplicio del diàlogo, la matemàtica con la realidad, con la experiencia? Pregunta vàlida, sin duda. El aristotèlico exige una experiencia en que fundar la teorìa; lo que le ofrece Galileo es un experimento que confirma la teorìa, cuyo fundamento està en otra parte. Es el famoso experimento del plano inclinado, uno de los pocos que Galileo llevò a cabo realmente. No habìa en aquel tiempo, desde luego, una teorìa del error experimental, y Galileo afirma que "esas operaciones, muchas veces repetidas, no arrojaron una notable diferencia" (11). El aristotèlico, junto con Descartes, que negò la validez de los experimentos galileanos, tiene razòn en un punto: la Naturaleza es compleja; lo ùnico que Galileo puede ofrecer son concordancias aproximadas. El paradigma de la matematizaciòn y del experimento dirigido no està aùn bien establecido.

Hemos dicho que Galileo habìa renunciado a explicar la causa de la caìa de los graves; no por completo, sin embargo. Conocedor de las investigaciones de Gilbert sobre magnetismo, Galileo se inclinaba a creer que la causa de la gravedad era una fuerza atractiva del mismo tipo que la de un imàn; sin embargo, esa fuerza no era matematizable, y Galileo la sacò de sus demostraciones. La idea de la atracciòn se encontrarìa tambièn en Kepler, que hablaba de un <<anima motrix>>, una especie de lazo invisible que unìa a los planetas con el Sol; esta fuerza no era un campo, sino que estaba siempre dirigida por la lìnea que definìan el planeta y el Sol. Serìa hasta Newton que esta idea cobrara forma y certeza matemàticas, si bien la polèmica filosòfica que causò no terminò sino con el abandono de la gravitaciòn newtoniana a principios de este siglo.

La ley de la caìda de los cuerpos es la primera ley fìsica de la dinàmica clàsica; su importancia es enorme: permitiò advertir la justeza de la interpretaciòn matemàtica de la realidad, y encaminò los esfuerzos de los filòsofos naturales por la senda que Galileo, siguiendo a Arquimedes, habìa trazado. Sin embargo, esta ley terminò por ser un simple corolario de la mecànica newtoniana, extraìda a partir de principios que Galileo no pudo encontrar. Aunque el problema de la gravedad habìa sido el màs importante de la fìsica desde Aristòteles, y habìa tomado la fuerza de un principio en la mecànica aristotèlica, por su definiciòn de movimiento natural, no estaba destinado a ser uno de los principios de la dinàmica clàsica; èstos habrìan de ser buscados en otro lado. El primer principio <<sensu stricto>> de la mecànica clàsica estaba llamado a ser la ley de la inercia. Se ha atribuido alternativamente a Galileo, Leonardo y los nominalistas, encontrando en tal o cual afirmaciòn de estos autores una velada formulaciòn de dicho principio. Sin duda, la idea de Buridan de que el <<ìmpetus>> impartido era constante se puede pensar como una prefiguraciòn de la ley de la inercia; pero identificar este tipo de enunciados con la verdadera ley, tal como fue finalmente enunciada en la mecànica de Newton, es caer en un tìpico error retroactivo. La ley de inercia requiere varios conceptos previos que, ya unos, ya los otros, los nominalistas y Galileo no estaban en condiciones de aceptar: un espacio totalmente geometrizado, una concepciòn del movimiento como estado y la aceptaciòn del infinito, al menos como potencialidad.

En su formulaciòn clàsica, la ley de inercia afirma que, en ausencia de fuerzas, todo cuerpo tiende a conservar su estado de reposo o movimiento rectilìneo uniforme. Como hemos dicho, la palabra estado es clave: los aristotèlicos consideraban al movimiento como un proceso; los galileanos lo consideran como un estado. Aùn màs, el movimiento rectilìneo uniforme lo es respecto a otro cuerpo en reposo, que se toma como referencia, pero en el marco de la relatividad galileana, ambos cuerpos son intercambiables. Por otro lado, ambos cuerpos pueden estarse moviendo respecto a un tercero: en el mòvil, dos movimientos distintos no se estorban entre sì: cada uno produce su efecto independientemente del otro, o dicho de manera matemàtica, el movimiento total es la suma vectorial de los movimientos componentes. Esto en contradicciòn con la fìsica aristotèlica y la del <<ìmpetus>>, donde dos movimientos se estorban siempre. Es casi una perogrullada para un fìsico afirmarlo, pero la ley de la inercia no se aplica a movimientos circulares, que son acelerados. Sin embargo, como la concepciòn aristotèlica era exactamente contraria, es importante recordar este punto. Es decir, la fìsica clàsica invierte los tèrminos: el "violento" es ahora el movimiento circular, y el "natural" el movimiento rectilìneo uniforme.

Ya Copèrnico habìa trazado en lìneas generales una incipiente fìsica, supeditada a su astronomìa. El problema de Copèrnico era al fin y al cabo un problema de movimiento relativo, y al igual que Oresme, sòlo que tomàndoselo màs en serio, llegò a la conclusiòn de que era indistinguible la rotaciòn de la Tierra y la inmovilidad de los astros de la hipòtesis contraria. Pero su relatividad era òptica, no mecànica; su pensamiento estaba todavìa viciado por las ideas aristotèlicas de lugares y direcciones naturales. Entendamos la distinciòn: la planteaba también el problema de un cuerpo perfectamente esférico que rodaba sobre un plano horizontal perfectamente liso, sin resistencia del aire. El movimiento de esta esfera no era, al decir de Galileo, ni natural ni violento, pues no levantaba ni bajaba pesos; de esto concluía que ese movimiento podría prolongarse indefinidamente. Eureka! No es ésta la ley de la inercia? Desgraciadamente no. El plano horizontal estaba sobre la Tierra: si se suponía un plano tangente, tarde o temprano el cuerpo debía alejarse de la Tierra, elevándose y perdiendo su movimiento como una esfera subiendo por un plano inclinado. La única respuesta posible para Galileo era que el plano no era tal, sino una superficie esférica concéntrica a la Tierra. En el Diálogo sobre los Dos Máximos Sistemas de Mundo, después de plantear el problema del movimiento de una esfera perfecta y dura sobre una superficie perfectamente lisa, y haber analizado el caso de la superficie inclinada, Salviati y Simplicio discuten el caso de la superficie horizontal:

SIMPLICIO: No veo ninguna causa de aceleración ni deceleración, ya que no hay ni declive ni elevación.
SALVIATI: Sin duda, pero si no existe causa de retardo, mucho menos la habrá de inmovilidad; ¿cuánto tiempo estimáis, pues, que continuará moviéndose el móvil?
SIMPLICIO: Tanto tiempo como dure la longitud de esa superficie que ni baja ni se eleva.
SALVIATI: Por consiguiente, si ¿ese espacio no tuviera fin, también el movimiento sería sin fin, es decir, eterno?
SIMPLICIO: Así lo creo, a condición de que el móvil esté hecho de una materia capaz de durar.
SALVIATI: (...) Decidme, pues: ¿cuál creéis que es la causa de que la bola se mueva espontáneamente en el plano inclinado, y no lo haga sin violencia en el que sube?
SIMPLICIO: El hecho de la propensión que tienen los cuerpos graves a moverse hacia el centro de la Tierra y a no moverse hacia la circunferencia de no ser por la violencia...
SALVIATI: De ese modo, para que una superficie no fuera ni inclinada ni elevada sería preciso que en todas sus partes estuviera igualmente alejada del centro. Pero ¿existen en el mundo semejantes superficies?
SIMPLICIO: No faltan. Por ejemplo, la de nuestro globo, siempre que esté bien pulida y no tal como es, rugosa y cubierta de montañas (13).

Galileo lo afirma explícitamente: el movimiento rectilíneo natural no se encuentra en el mundo. No puede existir un movimiento rectilíneo natural, ya que la línea recta es infinita, y un cuerpo no puede moverse hacia donde es imposible llegar. Aristóteles nuevamente: la teleología, la causa final. El Universo de Galileo todavía tiene un arriba y un abajo: los cuerpos tienen peso y caen, el mundo es anisotrópico. Galileo no llevó hasta sus últimas consecuencias, mal que le pese a Mach y a Cassirer, su geometrización del espacio. Sus cuerpos son geométricos, pero tienen una cualidad física, la pesantez, que Galileo no sabe explicar, y que acepta resignadamente, bien que no la acepta como cualidad. Para Galileo, Salviati se lo dice a

Simplicio en el Diàlogo sobre los Dos Màximos Sistemas del Mundo, decir que la gravedad es la causa de la caìda es decir nada: nombres, señor Simplicio, sòlo nombres. La esencia del cuerpo galileano, al igual que la del cuerpo arquimedeano, està en los nùmeros, en la geometrìa, no en las cualidades aristotèlicas. Pero la gravedad existe, y èsta impide a Galileo formular la ley de la inercia. El mundo sigue siendo circular, y tiene un centro. Sòlo en las esferas concèntricas, y no en los planos horizontales superpuestos a este mundo, se puede tener un movimiento eterno. La fìsica de Galileo està atravesada por ese dualismo: la circunferencia y la trayectoria rectilìnea de la caìda.

El Diàlogo es una larga y apasionada argumentaciòn a favor del sistema copernicano. Al igual que Copèrnico, Galileo tenìa que responder a las ancestrales crìticas contra el movimiento de la Tierra, tenìa que convencer al lector de buena fe a pensar de otra manera, a no confiar en el sentido comùn, a aceptar las consecuencias de la teorìa matemàtica y el experimento pensado. El Diàlogo abunda en reiteraciones y ejemplos, en apariencia excesivos para el lector moderno, ya acostumbrado a pensar en tèrminos galileanos; es una obra de divulgaciòn, no un tratado cientìfico: muchas demostraciones, que en los Discorsi hallarìan una exposiciòn màs formal, son tratadas por encima. Es, sobre todo, una obra filosòfica: la filiaciòn platònica de Galileo no deja lugar a dudas. Aparte de ser explìcitamente declarada por boca de Salviati, el <<alter ego>> de Galileo, la misma estructura del Diàlogo y la invocaciòn del mètodo mayèutico delatan al platonista: en un momento, Salviati afirma: "Pero soy tan buen partero de cerebros que os lo harè confesar a la fuerza" (14). Quièn, sino Sòcrates en el Teeteto, habìa pronunciado una frase parecida, al hacer demostrar a un esclavo ignorante un teorema matemàtico?

Pero el pasaje es interesante por màs de una razòn: justo antes de la baladronada socràtica, Simplicio dice: "Y yo, sin experimento, estoy seguro de que el efecto se seguirà como he dicho, pues es necesario que ocurra de esta forma". El experimento està de màs: su conclusiòn se da por sentada.¿Es èste el mismo empìrico Galileo que Mach nos habìa presentado? La fìsica para Salviati es una actividad <<a priori>>. En efecto, Galileo experimentò: la ley del pèndulo, el plano inclinado... Pero la mayorìa de los experimentos que plantea son, al igual que los de Einstein, experimentos pensados, elucubraciones de las consecuencias de un marco axiomàtico en un mundo ideado. En todo caso, Galileo se presenta en su laboratorio no con la mente abierta y sin prejuicios que exige el empirismo, sino con una teorìa en la mano, como quiere Gaston Bachelard.

Ahora bien, Galileo no ha postulado la ley de la inercia, tal como la conocemos; no obstante, es definitivo que cree en un principio de conservaciòn del movimiento impreso, siempre que èste sea circular, lo cual es una confusa prefiguraciòn de la ley de conservaciòn del momento angular, mezclada con la incapacidad de reconocer que el movimiento circular es acelerado. Sin duda, Galileo habla en varios pasajes del movimiento en general, postulando su conservación por el sòlo hecho de ser movimiento. El pasaje del jinete, que citàbamos <<supra>> y el ejemplo de la torre y la piedra -que dio pie a la leyenda de Galileo arrojando piedras desde lo alto de la torre de Pisa, a los pies de los augustos aristotèlicos- son ejemplos de movimiento rectilìneo, y en ellos Galileo afirma que el movimiento debe conservarse de manera indeleble; sin embargo, la idea de un movimiento rectilìneo indefinido està ausente de Galileo: los graves no pueden moverse, como ya hemos dicho, en un plano indefinido. El lector moderno puede advertir en què consiste el problema galileano: no hay distinciòn entre masa y peso. Los cuerpos son pesados, y un cuerpo que no lo fuera no podrìa siquiera moverse. No exijamos demasiado; Galileo llegò bastante lejos, pero no pudo caminar todo el trecho.

Como hemos dicho, todos estos argumentos del Diàlogo tienen la intenciòn de demostrar la factibilidad del movimiento de la Tierra. Aparte de responder, con idènticos argumentos que Oresme y Copèrnico a las objeciones aristotèlicas, Galileo debìa responder tambièn a las màs modernas de Tycho Brahe. Este habìa retomado el viejo argumento de la piedra y el màstil, pero con conceptos "modernos": en efecto, hablaba del movimiento de una bala de cañòn. Segùn Tycho, esta bala, al ser disparada, poseìa tres movimientos, si aceptàbamos la hipòtesis de la Tierra mòvil: el natural hacia abajo, el violento de la pòlvora, y el de la Tierra. Copèrnico consideraba este movimiento natural: las cosas que se movìan junto con la Tierra, lo hacìan por comunidad de naturaleza con èsta. La relatividad era òptica, no fìsica. Tycho considera imposible que dos movimientos, uno natural y otro violento, no se estorben entre sì; la idea de los movimientos opuestos estaba demasiado firmemente arraigada en la mente aristotèlica. Como el movimiento de la Tierra es màs ràpido incluso que el violento de la bala, aquèl deberìa predominar, y todas las balas debìan volar en la misma direcciòn. Galileo da dos pasos definitivos al rebatir este argumento: por un lado, afirma la independencia de las velocidades; por el otro, establece la relatividad fìsica del movimiento. Estos dos principios estàn ìntimamente ligados entre sì, y son una precondiciòn al establecimiento de la ley de la inercia. En efecto, la relatividad fìsica implica la negaciòn del reposo como categorìa absoluta: todo movimiento es relativo, y no existe diferencia fìsica alguna entre un conjunto de cuerpos que se mueven a la misma velocidad y el mismo conjunto en .reposo. Es decir, los cuerpos son indiferentes al movimiento: èste no se ve reflejado, de ninguna manera, en la actuaciòn o los efectos sufridos por los cuerpos. Galileo pone el ejemplo del barco veneciano que se dirige a Alepo, en Siria: pasa por Corfù, Creta y Chipre, y las mercancìas que lleva el barco se mueven con èl: "Pero con los fardos, cajas y otros bultos de que està cargado y lleno el navìo, y con relaciòn al navìo en sì, el movimiento de Venecia a Siria es como inexistente y no cambia en nada sus relaciones mutuas; y esto ocurre porque el movimiento es comùn a todos ellos y porque todos participan de èl por igual; y si entre las mercancìas que se encuentran en el navìo uno de los fardos se separara una pulgada de una caja, para el fardo respecto a la caja sería un movimiento mayor que el viaje de dos mil millas que juntos hicieron" (15). No hay una comunidad de naturaleza entre los fardos, las cajas y el navío. Al poner el ejemplo, terreno y cotidiano, de un barco, Galileo echa por la borda —valga la expresión— la dicotomía aristotélica, la diferencia ontológica entre el movimiento de un cuerpo celeste, la Tierra, y un simple navío. La relatividad física está establecida. Sin embargo, la relatividad galileana vale para todo movimiento, sea éste acelerado o no. Todos los movimientos, en lenguaje moderno, son inerciales.

En el pasaje del jinete Galileo expondría claramente el principio de independencia y adición de velocidades: "Por eso os diré que si el jinete lanzara esa bola con su brazo en la dirección opuesta a la de su carrera, la bola, al llegar a tierra, aunque hubiese sido lanzada en la dirección opuesta, seguirá unas veces la carrera del caballo, y otras quedará inmóvil, y sólo se moverá en la dirección opuesta a la de su carrera si el movimiento que ha recibido del brazo posee una velocidad superior a la de la carrera. Y lo que algunos dicen de que el jinete podría arrojar una lanza al aire en la dirección de su carrera, seguirla a caballo y finalmente atraparla, es una tontería, pues para que el proyectil os caiga de nuevo en las manos hay que lanzarlo hacia arriba, de la misma manera que si estuviera inmóvil" (16). Los movimientos no se estorban; se añaden sus efectos, ya sea en la misma dirección o en direcciones distintas: se suman vectorialmente.

Galileo, como hemos visto, se libró de muchos de los prejuicios aristotélicos; pero aún quedaba uno, que nunca podría salvar, y tal vez porque también Platón lo compartía: la obsesión por el círculo, la figura perfecta. Obsesión explicable, pues fue común a todos los pensadores hasta Kepler. La experiencia no le ayudaba: donde quiera que volviera la cabeza, encontraría círculos, esferas, movimiento curvo. Así, cometió el error, luego enmendado por él mismo, de suponer que el movimiento de un proyectil arrojado con un ángulo respecto a la vertical era un círculo, no una parábola —ni, incidentalmente, dos rectas unidas, como pensaban los aristotélicos—. La fuerza centrífuga, al no ser natural, no era radial sino dirigida a lo largo de la tangente. Error explicable, pues ésa es la dirección en que el cuerpo es proyectado al faltar la fuerza centrípeta, y no era fácil de concebir una fuerza que provocara un movimiento perpendicular a ella. Obviamente, el problema de la fuerza centrífuga, que era además uno de los argumentos en contra de la Tierra móvil, no es resoluble sin la ley de inercia: la salida por la tangente no es provocada por una fuerza, sino por la súbita falta de ella.

3.- La Secuela de la Física Galileana.

Lo curioso de la ley de inercia es que los discípulos de Galileo la hayan postulado sin trabajo, basándose en sus escritos. El mismo Newton la atribuyó al toscano, sin pensarlo dos veces, y Cavalieri y Torricelli lo emplearon despreocupadamente. En las obras de ambos se encuentran enunciados de la ley, pero simplemente <<en passant>>, sin darle la categoría de principio. Como dice Koyré, la ley de la inercia se encuentra objetivamente en sus trabajos, pero es de dudar que se encuentre subjetivamente, es decir, que hayan tenido plena conciencia de ella (17). Para Cavalieri y Torricelli, la polémica platónico-arquimedeana contra Aristóteles estaba cerrada. No tenían que defender como su maestro la concepción matemática de la Naturaleza: la batalla estaba ganada.

Cavalieri iría más allá de Galileo: ya puede pensar en un cuerpo privado de pesantez, puede hacer la abstracción de la gravedad. Esta es una fuerza, como cualquier otra, y puede por tanto ser imaginariamente eliminada, como eliminamos ya la resistencia del aire. Galileo requería un plano para que sus cuerpos no cayeran; Cavalieri elimina el plano, y habla de un proyectil que se dirige en línea recta a su blanco: un cuerpo, en ausencia de fuerzas, puede moverse en el espacio en cualquier dirección que le imprimamos. Pero Cavalieri no habla de la continuación indefinida del movimiento: hay un blanco al que el proyectil se dirige. Torricelli daría otro paso en la geometrización del mundo: él reduce por completo la mecánica a la geometría. Su espacio era infinito, homogéneo e isotrópico; el peso no era más que una magnitud, y como tal podía ser removida de un cuerpo e incluso asignada a una línea o a un punto. Desgraciadamente, llevó esta independencia geométrica demasiado lejos: a Torricelli no le importa la incidencia de la mecánica en la realidad; se contenta con desarrollar una teoría matemática, con estudiar las ideales formas platónicas. De ahí que, aunque enunció también la ley de la inercia, precediéndola de las palabras "está claro que", su física excesivamente matematizada, dejada al arbitrio y antojo de los sueños del geómetra, no tenga incidencia alguna en el mundo real. Torricelli inventa teoremas, no descubre a la Naturaleza.

Correspondería a Gassendi publicar una enunciación clara de la ley de la inercia. Más empírico que Galileo, Gassendi efectuó el experimento que aquél consideraba innecesario: soltar una piedra desde lo alto del mástil de un barco en movimiento. A partir de la confirmación experimental, Gassendi postula con confianza el principio de la relatividad. Gracias a Kepler y a Gilbert, puede concebir a la gravedad como una fuerza, una atracción análoga a la del imán, y así como puede retirarse un imán, puede retirarse la gravedad. Seguidor de Demócrito, para Gassendi el Universo es infinito; ya están pues dados los elementos. Su mundo es real, a diferencia de Torricelli, y es infinito, a diferencia de Cavalieri y Galileo. Por otra parte, Gassendi se halla en posesión de la idea de atracción gravitacional, y de la relatividad del movimiento. Gassendi lo dice claramente: todo movimiento, en ausencia de influencias externas, debería ser rectilíneo y uniforme, y durar indefinidamente. Por otra parte, el <<ímpetus>> ha muerto: "el motor no imprime al móvil más que el movimiento". Finalmente, Gassendi revivió el atomismo de Demócrito y Epicuro: su pensamiento en este sentido tendría profunda influencia en Descartes, Huygens y Newton.

La ley de la inercia serìa elevada a la categorìa de principio fundamental de la fìsica por Descartes y Newton, si bien con varia suerte. La mecànica de Descartes era fantasiosa e inefectiva; la de Newton...

Mientras tanto, Johannes Kepler, otro platònico convencido, ademàs de astròlogo y mìstico fiel de la armonìa de las esferas, se debatìa desesperadamente con las òrbitas planetarias. El esfuerzo mental que tuvo que hacer para desprenderse del viejo paradigma circular y de su nueva y platònica idea de que las òrbitas de los planetas estaban inscritas en los sòlidos regulares, y al haber fallado esto, que sus distancias iban como la escala armònica pitagòrica, fue comparable al esfuerzo galileano por librar a la fìsica terrestre del aristotelismo. A Kepler su platonismo no lo ayudaba: tenìa que enfrentarse a un cielo imperfecto, a la asombrosa idea de que las òrbitas -ya no las esferas- planetarias eran elipses. Kepler tenìa un mundo de datos a su disposiciòn: Tycho Brahe le habìa heredado sus observaciones, las màs precisas y extensas desde la Antigüedad. Por cierto, no fue sin problemas que el gran Brahe, aristòcrata y grande de Dinamarca, se avino a compartir sus secretos con el joven pobre y ambicioso que se presentò un dìa en su observatorio de Benatek. Tycho habìa propuesto una teorìa alterna a la copernicana, en la que todos los planetas girarìan alrededor del Sol, y èste alrededor de la Tierra. Sin duda, hubiera querido que Kepler adoptara su sistema; pero èste se decidiò por Copèrnico.

Marte era la clave del movimiento de los planetas: desde la Antigüedad, era el planeta màs reacio a conformarse a los epiciclos, las excèntricas y las ecuantes. Gradualmente, apoyàndose en los datos de Tycho, Kepler fue destrozando los axiomas: primero el del movimiento uniforme, luego el del movimiento circular. El abandono del primero dio lugar a la segunda ley de Kepler: un planeta se mueve de manera que el radio vector de su òrbita barra àreas iguales en tiempos iguales; el de la segunda, despuès de imaginar la trayectoria como un òvalo, originò al fin la respuesta correcta, la primera ley: los planetas se mueven en òrbitas elìpticas con el Sol en uno de los focos. La hipòtesis kepleriana que le condujo a la segunda ley era de naturaleza màs bien fìsica que astronòmica: Kepler suponìa que el Sol poseìa un movimiento de rotaciòn sobre su eje, y que del propio Sol emanaba la fuerza de atracciòn que hacìa girar a los planetas, como la piedra en la honda giraba por estar ligada al eje por la misma honda. El Sol "barrìa" al girar los cielos, como un vòrtice invisible, y los sutiles hilos que formaban el vòrtice, y que unìan -aunque no rìgidamente, no en lìnea recta- al Sol con cada planeta eran los que mantenìan a los planetas en òrbita. Ahora bien, los planetas tenìan una "inercia" o resistencia a moverse. Esta fuerza actuaba en contra de la atracciòn solar, dando cuenta de la velocidad no uniforme de los planetas. Por otro lado, la fuerza del Sol se iba debilitando con la distancia, y por tanto màs le costaba al Sol vencer la pereza natural del planeta y arrastrarlo, con lo que su movimiento serìa màs lento. Todavìa, como puede apreciarse, estamos lejos de la gravitación newtoniana; la inercia es concebida como una fuerza, la línea de acción de la gravitación no es la línea recta que une a ambos cuerpos... Pero ya estamos hablando de una causa de la gravitación: una atracción por parte del Sol hacia los planetas.

La manera como Kepler llegó a sus leyes, según el relato de Koestler, son una extraña muestra de "serendipity": errores que se cancelan entre sí para dar el resultado correcto, hallazgo de la ecuación de una elipse sin reconocerla como tal, para abandonarla después y plantear como hipótesis una trayectoria elíptica, creyéndola distinta a su ecuación... (18). Pero al fin, el intelecto de Kepler venció, desentrañando un misterio que había preocupado a los más grandes astrónomos. En lugar de decenas de epiciclos, una curva sencilla, estudiada extensivamente desde los tiempos de Apolonio de Perga, que si bien rompía el ideal de la perfección circular a los ojos platónicos de Kepler, explicaba por sí misma, sin necesidad de artificios de curvas superpuestas, el movimiento de los planetas. El hallazgo kepleriano era enorme: así como Galileo había reducido el movimiento natural aristotélico a una sencilla ecuación, Kepler había reducido el complejo movimiento de los astros a dos simples leyes. Newton no hubiera podido postular la ley de la gravitación universal sin las leyes de Kepler: éstas fueron capitales en el desarrollo de la mecánica celeste newtoniana. Desentrañado el complejo movimiento marciano, Kepler aplicó con éxito su teoría a los demás planetas: todos concordaban. Sin embargo, la armonía platónico-pitagórica parecía haberse roto: el Universo era un lugar horrible lleno de curvas imperfectas y velocidades no uniformes.

El platónico volvió a la carga años después, y logró establecer la tercera ley, la más bella según su autor, y la que parecía confirmar la armonía de las esferas: el período de la órbita y la distancia media del planeta al Sol estaban relacionados: el cuadrado del período es proporcional al cubo de la distancia. Kepler había buscado esta relación desde su juventud, cuando trataba inútilmente de hacer coincidir las órbitas con los sólidos pitagóricos, o, fallando esto, con la escala armónica descubierta por Pitágoras; la Naturaleza reveló ser más sutil, pero al fin develó su secreto. El éxtasis místico que embargó a Kepler es abundantemente testimoniado por Koestler. Kepler el mago, el astrólogo; Kepler el irremediable pitagórico había descubierto al fin la verdadera música de las esferas.

NOTAS AL CAPITULO IV

1) Kuhn, 'The Copernican Revolution'.
2) Koyrè, 'Estudios Galileanos', p. 52 ss.
3) ibid., p. 68.
4) ibid., p. 72 ss.
5) Citado por Koyrè, loc. cit.
6) Koyrè, loc. cit.
7) Galileo, 'Dialogo', citado por Koyrè, loc. cit., p. 221.
8) ibid., p. 147 ss y p. 86 ss.
9) Galileo, 'Discorsi', citado por Koyrè, loc. cit., p. 128.
10) Galileo, 'Dialogo', citado por Koyrè, loc. cit., p. 135.
11) ibid.
12) Koyrè, loc. cit.
13) Galileo, loc. cit., citado por Koyrè, loc. cit., p. 214.
14) ibid.
15) ibid, p. 210.
16) Galileo, loc. cit., citado por Koyrè, loc. cit., p. 135.
17) Koyrè, loc. cit., p. 280 ss.
18) Koestler, 'Los Sonàmbulos'.

V. DUDA Y CERTEZA

Qui non cogitat non dubitat
Locución Latina

1.- El Racionalismo Cartesiano

La nueva física estaba pues establecida con bastante firmeza; sin embargo, su correlato filosófico no existía aún. La física aristotélica había sido demolida; pero la filosofía no había experimentado todavía una revolución semejante. Sin duda, Galileo y sus discípulos habían puesto las bases de una nueva epistemología, y habían negado las categorías aristotélicas: la teleología, la doctrina de las causas, el Cosmos pleno, finito y ordenado, la dicotomía tierra-cielo. Epistemológicamente, la nueva física se inclinaba por el apriorismo; ontológicamente, por las formas ideales de Platón. Pero ni Galileo y sus discípulos ni Kepler eran filósofos.

El Renacimiento se había limitado, en el campo filosófico, a la crítica, no al sistema, un poco a la manera de los viejos sofistas y de Sócrates; pero esta crítica, aunada a los descubrimientos físicos, astronómicos y geográficos, abonaba el terreno. Sería René Descartes el que resumiera y coronara el pensamiento renacentista, dando origen a una nueva corriente filosófica, a un nuevo sistema: el racionalismo.

El principio cartesiano fundamental, la duda metódica, tenía una doble fuente: por un lado, la física y la astronomía habían desmentido al sentido común; por otro, la matemática había acudido al auxilio de los científicos, transformando lo que podía haber degenerado en un escepticismo humista en certeza, sustituyendo las antiguas verdades por otras nuevas.

Ante esta situación, Descartes tenía que abandonar las concepciones escolásticas, que se habían revelado como inadecuadas; pero en lugar de incurrir en un escepticismo postoccamiano a ultranza, su duda desembocaría en una epistemología constructiva, en la formulación de un nuevo método del conocimiento. Como es bien sabido, uno de sus trabajos capitales recibe precisamente el nombre del Discurso del Método para Conducir a la Razón y Buscar la Verdad en las Ciencias. ¿Suena pretensioso? Lo es. Pero en aquel momento, en que una nueva certeza se abría paso a través de la tiniebla, Descartes prefiguraba toda la soberbia de la nueva ciencia, soberbia que parecería verse confirmada por los espectaculares progresos de los dos siglos siguientes.

Así pues, Descartes tenía que empezar de nuevo. Para ello, debía poner todo en duda, absolutamente todo. El mundo sensible, el sentido común, los conocimientos adquiridos por la experiencia o la razón parecían mentir, así como la filosofía jonia le había parecido mentirosa y paradójica tanto a los sofistas como a Sócrates; había pues que dudar de ellos. Dudar de la realidad, pero dudar tambièn de la certeza matemàtica y de la existencia de Dios. Descartes se pregunta lo que Calderòn afirma: ¿es la vida sueño? Pero, ¿còmo dudar de todo? ¿Por què razòn no hay certezas? Descartes nos enfrenta a una hipòtesis aterradora: "Supondrè, pues, que Dios ... es un genio astuto y maligno que ha empleado su poder en engañarme; creerè que el cielo, el aire, la tierra, los colores, las figuras, los sonidos y todas las cosas exteriores son ilusiones de que se sirve para tender lazos a mi credulidad..." (1). Pero, como hemos dicho, Descartes no duda para desembocar en la imposibilidad del conocimiento; su propòsito, declarado <<expressis verbis>> es llegar a la verdad.

Y asì, hundièndose en la duda, toca fondo al fin en una certeza: "Soy una cosa que piensa, es decir, una cosa que duda, afirma, niega, conoce poco, ignora mucho, ama, odia, quiere, no quiere, imagina y siente. ... Dudo, luego soy" (2). Esto en las Meditaciones Metafìsicas; en el Discurso encontramos un pàrrafo parecido: "Pero en seguida notè que si yo pensaba que todo era falso, yo, que pensaba, debìa ser alguna cosa, debìa tener alguna realidad; viendo que esta verdad: pienso, luego existo era tan firme y tan segura que nadie podrìa quebrantar su evidencia, la recibì sin escrùpulo alguno como el primer principio de la filosofìa que buscaba. Examinè atentamente lo que era yo, y viendo que podìa imaginar que carecìa de cuerpo y que no existìa nada en que mi ser estuviera, pero que no podìa concebir mi no existencia, ... comprendì que yo era una sustancia, cuya naturaleza o esencia era a su vez el pensamiento, sustancia que no necesita ningùn lugar para ser ni depende de cosa alguna material; de suerte que este yo -o lo que es lo mismo, el alma- por el cual soy lo que soy, es enteramente distinto del cuerpo y màs fàcil de conocer que èl" (3).

De este principio, <<cogito ergo sum>>, extraerà Descartes toda su filosofìa. Al fin cree haber llegado a algo indudable, el ser una <<res cogitans>>, y de aquì se siente con derecho a extraer conclusiones. Nòtese la manera como Descartes llega al principio: no por un silogismo, sino a partir de la experiencia inmediata, por la "luz natural de la razòn", por "une perception claire et distincte". A partir de este axioma tan elemental, Descartes se lanza de inmediato a probar la existencia de algo màs que èl: Dios. Para esto, usa el viejo argumento de San Anselmo, repetido hasta el cansancio por los escolàsticos, si bien Descartes le añade razones de su cosecha. El argumento reza màs o menos asì: Tengo la idea de lo perfecto e infinito, pero yo mismo soy finito e imperfecto; por tanto -y aquì Descartes no salta a la conclusiòn tan ràpidamente, sino a travès de razones y pasos intermedios- esta idea no puede proceder de mì mismo, y me ha sido inculcada desde fuera. Y sòlo me ha podido ser impresa por un ser infinito y perfecto. "Aùn en el caso de que pudièramos imaginar que tal ser no existe, no podemos hacer que su idea no nos represente nada real" (4). Este es el argumento ontològico, que puede resumirse diciendo que la esencia implica la existencia, al menos en el caso del ser perfecto, cuya inexistencia darìa una nota de imperfecciòn a su esencia. De aquì, Descartes sigue construyendo: su pròximo objetivo es investigar la naturaleza de la verdad y el error. Dios es la fuente de verdad, incapaz de inducir errores: queda negada la supuesta naturaleza maligna que Descartes habìa planteado al principio. Asì pues, el error reside en el hombre, en su voluntad que excede en mucho al entendimiento, apresurândose a sacar conclusiones. Es pues necesario fundar un criterio de verdad, y èste se halla en el pasaje del Discurso citado màs arriba: la verdad debe ser clara y distinta, tan clara y distinta como aparece a la mente el principio del <<cogito ergo sum>>. "Claro es un conocimiento que està presente y patente al alma atenta... Llamo, empero, distinto, a un conocimiento que en su claridad se distingue y se deslinda de los demàs, y en el cual, ademàs, las partes o elementos del objeto estàn diferenciadas, como, por ejemplo, ocurre en los nûmeros" (5).

Pero, ¿cômo llegar a este conocimiento claro y distinto? Es aquì donde entra el mètodo. Cuatro reglas existen para llegar a la verdad. Primeramente, la evidencia: No aceptar como verdadero lo que con toda evidencia no se reconozca como tal: no debe ser admisible ni la màs mìnima duda. En segundo lugar, el anàlisis: dividir el problema en tantas partes como sea posible. En tercer puesto, la sìntesis: ordenar los conocimientos, empezando por los màs sencillos hasta elevarse a los màs complejos, estableciendo cierto orden. Finalmente, la prueba: Enumerar y revisar todo, para tener la seguridad de no haber omitido nada.

Este es el mètodo cartesiano. Como puede verse, el conocimiento sòlo tiene una fuente: la razôn. El empirismo de los nominalistas ha sido descartado; sòlo en la razôn podemos confiar. ¿Platòn de nuevo? Sì y no. El conocimiento platônico es pasivo, es un recuerdo. Descartes piensa que existen ideas innatas, como lo demuestra el pasaje sobre la existencia de Dios. Estas ideas innatas son los ûnicos fundamentos posibles del conocimiento, pero a partir de ellas se pueden lograr conocimientos nuevos, tales como los teoremas de la geometrìa. Son pocas estas ideas innatas, a diferencia de la multitud de formas de Platòn: Dios, los principios lògicos, el concepto de sustancia y el de causa, y el de extensiòn y nûmero. Habiendo sido implantadas por Dios, es imposible que estas ideas sean falsas. Tambièn existen desde luego otro tipo de ideas: las ficticias, producto de la imaginaciòn desenfrenada, y las adventicias, producto de nuestro contacto con el mundo exterior. Ni unas ni otras pueden llevarnos al conocimiento verdadero. Ni què decir tiene que el modelo del conocimiento es la matemàtica: el propio Descartes, todos lo sabemos, era un matemàtico de primera lìnea. Pero la ciencia, dice Descartes, ha adolecido de la falta de mètodo: todos los conocimientos logrados hasta ahora se mezclan lamentablemente con los errores; el mètodo silogìstico escolàstico y el axiomàtico-deductivo de la matemàtica antigua no bastan: deben ser sustituidos por un nuevo mètodo, formulado en las cuatro reglas precedentes.

Descartes aplica su mètodo con admirable constancia: su filosofìa es como un àrbol -la analogìa es de èl-: la raìz es la metafìsica, el tronco la fìsica, y las ramas las demàs ciencias.

En efecto, Descartes hace conscientemente y antes que nada metafîsica, y, como podemos ver, aplica su propio mètodo a su duda inicial. Una vez establecidas las verdades precedentes, se dedica a formular una ontologîa.

No cabe duda de que Descartes debe mucho a la escolàstica; pero al mismo tiempo se aparta radicalmente de ella. Por ejemplo, su concepto de sustancia: sustancia es todo lo que existe de tal manera que no necesita otra cosa para su existencia. <<Sensu stricto>>, sòlo Dios es sustancia, pero màs ampliamente existen, aparte de Dios, la sustancia extensa y la sustancia pensante, que sòlo necesitan de Dios, y son finitas, en contraposiciòn a aquèl. Las sustancias se conocen por sus propiedades. Una de ellas, el atributo, define completamente la esencia de la sustancia, y puede concebirse haciendo abstracciòn del resto de las propiedades: asî, el atributo de la <<res cogitans>> es el pensamiento, y el de la <<res extensa>> la extensiòn, pues sin èsta no es posible concebir ningûn cuerpo. Las otras propiedades son modos o accidentes: son prescindibles para imaginar la sustancia. Los modos de la <<res cogitans>> son el sentir, el querer, el imaginar; los modos de la <<res extensa>> son la figura, el movimiento, la posiciòn.

He aquî un dualismo total: materia y espîritu son sustancias separadas, pero que se comunican al conocer el espîritu a la materia. Asî, el conocimiento del mundo real es posible, pero supeditado a las leyes de la razòn. El mundo es tan sòlo extensiòn y movimiento, y por lo tanto es enteramente geometrizable: la fîsica es una parte de la geometrîa. Por otro lado, el mundo funciona de manera mecànica: todos los entes corpòreos son màquinas, que se comportan de acuerdo a reglas deterministas. Sòlo el hombre escapa a èsto, bièn que no del todo: combinaciòn de materia y espîritu —el cual reside, por cierto, en la glàndula pituitaria (!!!)— el hombre posee voluntad, pero debe obedecer tambièn a la mecànica del cuerpo: asî, la condiciòn humana se debate entre la libertad y la necesidad.

Como podemos ver, el mecanicismo cartesiano y su concepto de sustancia se alejan del concepto aristotèlico. Donde Aristòteles ve causas finales, Descartes sòlo ve el determinismo de las condiciones iniciales; donde aquèl define la forma como esencia, èste ve sòlo extensiòn y movimiento. Las leyes de la Naturaleza son leyes para la Naturaleza: reglas a las que no tiene otro remedio que ajustarse. La materia es ûnicamente extensiòn: todo lo demàs es accidental; pero la extensiòn, para Descartes el geòmetra, es el espacio de Euclides. Platòn ha descendido a la Tierra: el espacio real es el espacio imaginario.

Como dice Koyrè, la ley suprema del espacio cartesiano es la permanencia: tanto el espacio como el movimiento, una vez creados, no pueden destruirse (6). Ciertamente, Descartes requiere a Dios, pero sòlo al principio. Una vez creado el mundo y establecidas sus reglas, descansa Dios el sèptimo dîa, y todos los dîas siguientes. No requerimos un motor constante: el movimiento se conserva por sì sòlo. Sin duda, puede pasar de un cuerpo a otro, pero no necesita la presencia del motor para mantenerse. Descartes se burla de los filòsofos, que definen al movimiento como el acto de un ser en potencia en tanto que està en potencia; reconoce que esto es ininteligible, y en cambio pregunta què puede haber màs sencillo que imaginar el paso de un punto a otro: el movimiento reducido a la geometrìa. El movimiento es un accidente, un modo, digàmoslo de una vez, un estado. Es absolutamente equivalente al reposo en ese sentido.

Descartes reconoce la imposibilidad de un cambio de estado espontàneo: "cada parte de la materia, en particular, continùa siempre estando en el mismo estado, mientras el encuentro con las otras no le obligue a cambiarlo. Es decir, que si esta parte tiene cierto grosor, jamàs se harà màs pequeña si las otras no la dividen; si es redonda o cuadrada jamàs cambiarà de figura si las otras no la obligan a hacerlo; si està quieta en algùn lugar jamàs partirà de allì a menos que las otras la expulsen; y, una vez que ha comenzado a moverse, continuarà siempre, con igual fuerza, hasta que las otras la detengan o retarden". Asì pues, todo cambio requiere una causa exterior.

Pero ademàs el movimiento es una cantidad, y esta cantidad es invariable en el Universo. El movimiento puede comunicarse de un cuerpo a otro, pero su suma total serà siempre constante. La fìsica de Descartes es una fìsica de colisiones: la ùnica manera de comunicar movimiento es por contacto. Un cuerpo se frena en tanto comunica su movimiento a un obstàculo; de donde se sigue que, en ausencia de obstàculos o resistencia del aire, el movimiento es perpetuo. Pero ademàs el movimiento perdido por el cuerpo serà mayor o menor en la proporciòn no de "la resistencia" del obstàculo, sino en la proporciòn en que la resistencia es superada y recibe el obstàculo la fuerza para moverse que el otro le deja. Descartes no tiene claro el concepto de momento lineal, ni siquiera el de masa. Ignora por completo la elasticidad, aùn observando que un cuerpo blando de menor resistencia amortigua màs a otro cuerpo que uno duro de mayor resistencia. Pero he aquì una profunda observaciòn. Las leyes que da Descartes para la comunicaciòn del movimiento son falsas en su mayorìa: la fìsica cartesiana no es màs que una cinemàtica, y bien sabemos ahora que es imposible reducir la mecànica a la cinemàtica. Descartes asocia la resistencia de un cuerpo a su cantidad de reposo, correlato de la cantidad de movimiento; su cuantificaciòn es, curiosamente, relativa, tan relativa como la misma cantidad de movimiento: un cuerpo tiene la misma cantidad de reposo que un cuerpo de idènticas proporciones movièndose respecto a èl tiene de cantidad de movimiento. Es decir, la cantidad de reposo es variable. La pregunta es inevitable: si dos cuerpos idènticos se mueven respecto a un tercero igual a ellos a distintas velocidades, cuàl es la cantidad de reposo del tercero? Como puede verse, la fìsica cartesiana tenìa un vicio de principio. Ya hemos dicho cuàl es ese vicio: la falta de una dinàmica.

La cantidad de movimiento cartesiana era constante, pero lo era como un escalar: no habiendo reconocido el caràcter vectorial de la cantidad de movimiento, a Descartes le era imposible explicar el problema de la colisiòn de cuerpos inelàsticos: de ahì la artificiosa cantidad de reposo. Sin embargo, el pensamiento cartesiano establecìa un precedente, que Newton seguirìa y Leibniz atacarìa: siendo la cantidad de movimiento una constante en un cuerpo dado, la ùnica manera de cambiarla es por interacciòn. En otras palabras, la fuerza es proporcional a la cantidad de movimiento, o, si se quiere, a la primera potencia de la velocidad. El problema de la cantidad de movimiento tendrìa dos secuelas: en una, Newton reconocìa el caràcter vectorial de la misma, y sostenìa que el producto mv era la verdadera medida del efecto de una fuerza; en la otra, Leibniz y sus seguidores negarìan que la cantidad de movimiento fuera la medida real, y postularìan la <<vis viva>>, proporcional al cuadrado de la velocidad, como el efecto real de una fuerza.

Sin embargo, Descartes habìa formulado un problema nuevo en mecànica, el problema de varios cuerpos interactuando entre sì; aunque incapaz de resolverlo satisfactoriamente, èste era un salto cualitativo respecto a la fìsica de Galileo, que habìa sido siempre la fìsica de un sòlo cuerpo.

Queriendo abscribir todo fenòmeno fìsico al movimiento, Descartes es incapaz de formular conceptos como masa y fuerza, momento lineal y momento angular; por otro lado, su plenum no le ayudaba: habìa regresado a un mundo semejante al aristotèlico, lleno de materia. Este era un paso atràs: como hemos visto, ese mundo es difìcilmente matematizable. Sin embargo, la fìsica cartesiana requerìa el <<plenum>>: todo movimiento debìa transmitirse por contacto, inclusive la caìda de graves. Las causas aristotèlicas debìan ser negadas, lo mismo que la acciòn a distancia, la ininteligible atracciòn kepleriana; por otra parte, le negaba a Galileo haber llegado a la ley de la caìda: su movimiento era <<in vacuo>>, es decir, no era real, y hacìa abstracciòn del problema de què era la pesantez. Descartes no considera a èsta como una cualidad del cuerpo, sino como un empuje externo: la Tierra està rodeada de una materia sutil formada de millones de partìculas, las cuales se mueven en un torbellino, que al girar, empujan hacia la Tierra a los graves. Nuevamente, la explicaciòn cinemàtica; nuevamente la necesidad del plenum. Descartes afirma que si su torbellino no girara, los cuerpos dejarìan de tener pesantez. La acciòn a distancia le repugna: por eso no acepta el vacìo, donde no existe medio de transmitir el movimiento por contacto. De aquì que, a pesar de su convencimiento filosòfico, por la misma razòn que Aristòteles, Descartes no puede expresar leyes fìsicas matemàticas: su Universo vuelve a ser cualitativo, ignorando la obra de Galileo. Y no es por falta de talento matemàtico, ni por no creer en la matematizaciòn; Descartes cuantifica el movimiento, pero es incapaz de obtener reglas cuantitativas que lo rijan; la ùnica ley que puede enunciar es la ley de inercia, que es en esencia una ley cualitativa.

Descartes aprendiò la ley de conservaciòn del movimiento del fìsico Beeckman, que le propuso el mismo problema de Galileo: la ley de caida de los cuerpos en el vacio. Descartes abordò el problema desde el punto de vista matemàtico, tomando como hipotèticos los principios de Beeckman: ley de conservaciòn y caida en el vacio. En todo caso, cometiò el mismo error inicial de Galileo, y por cierto, nunca lo enmendò. Pero ya le habia sido llamada la atenciòn sobre la ley de conservaciòn del movimiento; Beeckman creia que dos movimientos se conservaban: el rectilineo y el circular; y sòlo en el vacio. Curiosamente, Descartes se convencia de que el mundo era un <<plenum>> casi en el mismo momento que limitaba la conservaciòn del movimiento al rectilineo uniforme en el vacio, ùnico medio que admite tal movimiento. Es decir, Descartes postula la ley de la inercia, pero en su mundo es radicalmente imposible: no puede tener existencia rea. Dàndose cuenta de la contradicciòn, Descartes no habla de movimiento real, sino de "tendencia". Pero el hecho està ahi: en Le Monde, libro no publicado por miedo a la condena eclesiàstica, y màs tarde en Les Principes, Descartes eleva la ley de la inercia a la categoria de principio de la Naturaleza: en Les Principes, es la segunda ley de la Naturaleza: "Todo cuerpo que se mueve tiende a continuar su movimiento en linea recta" (8). La primera ley es que cada cosa perdura es su estado si nada la cambia. El movimiento circular desaparece por completo de la escena. Y, còmo podia ser de otra manera? El Universo cartesiano es infinito, homogèneo e isotròpico; Los cuerpos de Descartes, por otro lado, son distintos a los galileanos: no tienen peso; son cuerpos geomètricos, dotados sòlo de extensiòn y movimiento.

Finalmente, Descartes no reconoce otro movimiento que el geomètrico: la translaciòn. Pero en el movimiento geomètrico, y esto quizà explica el error mencionado arriba, no existe el tiempo. Recuèrdese que para Descartes la extensiòn es atributo, es decir, esencia, y el tiempo un simple modo. Los movimientos que efectùa un geòmetra son intemporales, no se realizan a ninguna velocidad; lo ùnico que queda es la trayectoria. Descartes el inventor de la geometria analitica sabe que la ecuaciòn màs sencilla es la de la recta: la del circulo es de segundo grado. ¿No tenderàn los cuerpos a moverse segùn la trayectoria màs sencilla imaginable?

La ley de la inercia le permite resolver a Descartes en un santiamèn un problema que a Galileo le habia tenido devanàndose los sesos: el problema de la fuerza centrifuga, de la piedra arrojada por la honda. En efecto, Descartes reconoce que lo que hace a la piedra moverse en circulos no es otra cosa que la honda misma, que la liga al eje de rotaciòn; al faltar esta liga, el cuerpo sale inmediatamente despedido con el movimiento "natural": el rectilineo.

Hablemos finalmente de las contribuciones matemàticas de Descartes, muy superiores a sus contribuciones fisicas. Ya Vieta habia introducido en Occidente el àlgebra, presentàndola como un todo coherente, en la mejor tradiciòn griega; sin embargo, la matemàtica seguia siendo predominantemente geometria: toda demostraciòn debia hacerse geomètricamente. La relaciòn entre el àlgebra y la geometria no era del todo desconocida ni para los helenísticos ni para los árabes; pero tal vez problemas como el de la inconmensurabilidad de ciertos segmentos les impidió llegar a un aprovechamiento mayor de esa relación.

Originalmente, el Discurso del Método era un prólogo a tres libros científicos, uno de los cuales era la Geometría. Aquí Descartes formula su famosa geometría analítica, estableciendo una correspondencia total entre ecuaciones algebraicas y curvas geométricas: toda ecuación en dos incógnitas representa una curva, y toda curva se puede considerar como el lugar geométrico de los puntos que cumplen una cierta ecuación.

La manera de llegar a este resultado parece casi infantil: simplemente, se asignan a cada punto del plano dos coordenadas, que representan respectivamente las dos incógnitas. Descartes no fue, como hemos visto, el primero en usar sistemas de coordenadas: Oresme y Apolonio lo precedieron; no usó coordenadas negativas, ni se dedicó sistemáticamente a graficar ecuaciones; pero fue el primero en enunciar el principio fundamental de la geometría analítica. La importancia de éste no podía ser mayor: en primer lugar, las ecuaciones de segundo grado se consideraban antiguamente como superficies, y las de tercero un sólido, por lo que el tratamiento de ecuaciones de grado superior en un ámbito geométrico era imposible. Descartes lo redujo todo a curvas: lo importante no es el grado, sino el número de incógnitas, para determinar la dimensionalidad del espacio. Y así, cualquier polinomio era fácilmente representable en el plano. Ciertamente, Descartes dejó de lado como incognoscibles toda una serie de curvas, que él llamaba "mecánicas", por obtenerse a partir de argumentos cinemáticos. Hoy sabemos que estas curvas son fácilmente representables en coordenadas polares, pero al no estar en posesión de éstas Descartes, prefirió descartar -valga- esas curvas. Observemos finalmente que Descartes no redujo la geometría a álgebra, como suelen hacer los textos modernos sobre el tema; por el contrario, inmerso como estaba en una era geométrica, Descartes empleó la geometría para explicar el álgebra. A partir de Descartes, se desarrollan dos escuelas, una geometrizante, la otra algebrizante. Como sabemos, esta última tendría la última palabra; sin embargo, las viejas demostraciones geométricas no murieron fácilmente. Aún Newton las empleó en los Principia.

2.- La Física y el Cálculo antes de Newton

La historia del cálculo, que ya ha sido contada en innumerables ocasiones, toca tangencialmente nuestro tema. En efecto, la mecánica newtoniana es inconcebible sin el cálculo; pasemos pues revista a vuelapluma a los predecesores de Newton y Leibniz. Después de Galileo, que había revivido algunos de los argumentos infinitesimales de su maestro Arquímedes, los problemas de lo que hoy llamamos cálculo, es decir, la rectificación de curvas, el cálculo de áreas y la búsqueda de tangentes eran los problemas matemáticos más acuciantes de la época. Tanto Cavalieri como Torricelli y Roberval los abordaron con brío, dando origen el primero al principio que lleva su nombre, y los dos últimos a encontrar el área bajo una cicloide, la tangente a la parábola, la elipse y la cicloide, y, en el caso de Torricelli, a rectificar la espiral logarítmica, primera rectificación que se hacía después de Arquímedes, y que de paso rectificó a Descartes, que creía que no podía rectificarse.

Kepler utilizó argumentos infinitesimales para calcular las áreas en su segunda ley. El propio Kepler hizo la observación de que una curva varía más lentamente en la cercanía de un máximo, y calculó volúmenes de sólidos de revolución. Los argumentos usados por todos ellos caían en tres grupos: utilización de infinitesimales —método que a los mismos griegos repugnaba por poco formal, pero que en los informales tiempos que nos ocupan no le daban asco a nadie—, argumentos cinemáticos y método de exhaución. Este último era el único aceptado por los griegos, pero desgraciadamente era demostrativo, y no constructivo: había que saber el resultado de antemano. En todo caso, el argumento cinemático es el más interesante para nosotros, pues llevó al concepto de trayectoria, y de la tangente como velocidad. Por otro lado, la nueva herramienta de Descartes fue valiosísima en el desarrollo del cálculo; él mismo la aplicó para encontrar en general la normal a una curva en un punto dado, que desde luego es equivalente a encontrar la tangente.

Fermat, Pascal, Huygens, Barrow, Wallis, Gregory, Wren, Desargues. La lista de matemáticos se extiende casi indefinidamente. La mayoría de ellos abordaba tanto problemas físicos como cuestiones matemáticas; cada uno tuvo su papel, cada uno llevó a cabo un adelanto. Fermat, enemigo jurado de Descartes, creó su propia geometría analítica, y un método para encontrar máximos y mínimos; Pascal hizo importantes contribuciones a la hidrostática; Barrow, Gregory y Wallis se interesaron por el cálculo y las series. También Wallis y Wren encontraron las leyes de las colisiones.

Detengámonos sin embargo en Pierre Fermat y en Cristiaan Huygens, cuyas contribuciones físicas fueron fundamentales para el desarrollo posterior de las formulaciones alternas de la mecánica.

Fermat era un abogado que se dedicaba a la matemática en sus tiempos libres; vista la magnitud de su obra, uno no puede menos que preguntarse que hubiera sido si Fermat se hubiese dedicado a la abogacía en sus ratos libres. Extremadamente tímido para publicar, como Newton, gran parte de su obra fue publicada póstumamente, o dada a conocer en forma privada por medio de cartas, de las que Mersenne era el destinatario más común. Este Mersenne era el correo de la época: cualquier matemático que se preciara mantenía correspondencia con él. Sus contribuciones matemáticas propias fueron escasas, limitándose a una fórmula para generar números primos que no siempre —mejor dicho, casi nunca— genera un primo. Sin embargo, dada la rivalidad entre Fermat y Descartes y la timidez de aquél, la contribución de Mersenne como puente fue fundamental. Volviendo a Fermat, aunque sus contribuciones matemáticas en la teoría de máximos y mínimos fueron muy relevantes, lo que nos interesa ahora es su formulación de un principio físico: el principio de Fermat.

Este no se aplicaba a la mecánica, sino a la óptica; pero el precedente que estableció, así como su posterior identidad con semejantes principios en la mecánica, que Hamilton demostró, lo revisten de interés para nosotros. El principio de Fermat se considera el primer principio variacional de la física, aunque ya Herón de Alejandría había postulado un principio semejante, aplicado solamente a casos de reflexión. El principio de Herón decía que un rayo de luz que iba de un punto P a un punto S por vía de una superficie reflejante, lo haría en la trayectoria más corta posible. Este principio era evidentemente falso para casos de refracción, y Fermat lo reformuló consecuentemente.

En su forma original, reza así: un rayo de luz seguirá la trayectoria recorrida en el menor tiempo posible. En términos modernos, el principio sólo requiere la existencia de un valor estacionario, en el que la suma

$$l = \int_P^S n \, ds$$

conocida como la longitud de trayectoria óptica, tenga un máximo, un mínimo o un punto de inflexión. Evidentemente, la longitud dividida entre la velocidad de la luz resulta en el tiempo de recorrido: $t = l/c$.

Este principio tuvo una profunda influencia en Leibniz, Maupertius y Euler, que intentaron formular un principio semejante para la dinámica.

Huygens, por su lado, fue uno de los talentos más preclaros de la época. Elaboró la teoría oscilatoria de la luz, y preocupado por problemas de horología, trató de encontrar una curva isócrona, para construir péndulos. Ya Galileo había demostrado que las oscilaciones de un péndulo simple son casi isócronas si la amplitud es pequeña, per Huygens quería para sus relojes la curva exacta. Su conclusión fue que la cicloide era la curva que buscaba, y aunque no le ayudó en sus relojes, le permitió formular toda la teoría de centros de curvatura, evolutas y centros de oscilación; en el curso de estas investigaciones, formuló la ley de la fuerza centrípeta, $a = v^2/r$. Por otro lado, Huygens corrigió a Descartes: logró establecer una teoría de la colisión de cuerpos, y, aunque se adhirió a la teoría vortical de la gravitación de Descartes, reconoció sus fallas y la corrigió.

La capacidad de enunciar la ley de la fuerza centrípeta es una consecuencia de la ley de la inercia: una vez reconocido que un cuerpo tiende a moverse de manera rectilínea, el movimiento circular uniforme deja de tener su papel preeminente y natural: es necesaria una aceleración para mantenerlo. Sin embargo, esto parece paradójico, pues en el movimiento circular uniforme no cambia de magnitud la velocidad. Huygens descubrió el quid del problema: aunque la velocidad se mantenga constante en magnitud, cambia de direcciòn, y este cambio implica una aceleraciòn. El reconocimiento de la naturaleza vectorial de la velocidad, ya en germen en el principio galileano de independencia de velocidades, cobraba aquì nueva importancia.

Por otra parte, el trabajo sobre pèndulos de Huygens fue fundamental. En primera instancia, fue el primero en determinar "g" a partir de la ley del pèndulo simple; en segundo lugar, utilizò momentos de inercia para determinar el movimiento de un pèndulo fìsico; finalmente, y aùn màs importante, su deducciòn general del centro de oscilaciòn de un pèndulo compuesto le llevò al principio de conservaciòn de la energìa cinètica. Volveremos sobre este punto màs adelante.

Aparte de todo, Huygens fue el maestro de Leibniz: el nexo entre Descartes y el pensador alemàn. Mientras tanto, en Inglaterra, Barrow, otro matemàtico de genio, hacìa sus contribuciones al càlculo. Era profesor lucasiano en Cambridge, y al abandonar el puesto para convertirse en capellàn de Carlos II, recomendò a un amigo y discìpulo suyo para su antiguo puesto. Ese amigo respondìa al nombre de Isaac Newton.

NOTAS AL CAPITULO V

1) Descartes, 'Meditaciones Metafìsicas', p. 58.
2) ibid., p. 63.
3) Descartes, 'Discurso del Mètodo', p. 62 ss.
4) Descartes, 'Meditaciones Metafìsicas', p. 69.
5) ibid.
6) Koyrè, 'Estudios Galileanos', p. 320 ss.

VI. EL UNIVERSO REINVENTADO

Nature and Nature's laws
Lay hidden in the night;
Then God said: "Let Newton be!"
And all was light.
Alexander Pope

1.- El Monumento Newtoniano

Pero la luz tambièn tiene su lado oscuro. Sir Isaac Newton, cuya obra demolio los postreros resabios de la magia e inagurò la ciencia moderna, lejos de la imagen racionalista que han propagado los siglos, lejos de la pètrea visiòn que Voltaire creyò ver el dia de su sepelio en Westminster, cuando se dijo a sì mismo que aquel hombre habìa desterrado las impertinencias metafìsicas del mundo del pensamiento, Newton, decìamos, fue, en la frase de Keynes, "el ùltimo de los magos, el ùltimo de los babilonios y los sumerios, la ùltima de las grandes mentes que contemplò al mundo visible e intelectual con los mismos ojos de aquellos que empezaron a construir nuestra heredad, hace casi diez mil años" (1).

Newton naciò el dìa de Navidad de 1648, prematuro y pòstumo: su padre habìa muerto meses antes, y su madre lo abandonò al cuidado de su abuela, para casarse con el dìacono Barnabas Smith, hecho que resintiò profundamente el joven Isaac. Años màs tarde, Newton confesarìa su compulsiòn infantil de quemar la rectorìa con Smith y su madre adentro.

En efecto, Newton dio muestras de su desequilibrio en multiples ocasiones, ora riñendo con sus contemporàneos, ora encerràndose obsesivamente en un mundo propio, solitario y huraño. Nunca se casò. Introvertido, tìmido y temeroso de la crìtica, desconfiado y suspicaz, cayò al fin en una profunda depresiòn nerviosa de la que nunca se recuperarìa cabalmente. Sòlo la fuerte presiòn de sus amigos, especialmente de Halley, le forzò a publicar sus obras cientìficas, y aun asì, muchas pàginas quedaron inèditas.

Pero fue quizà su mismo temperamento el que lo orillò a refugiarse en las matemàticas y la filosofìa, en un mundo de orden y callados misterios, y su soledad le permitiò dedicarse a sus estudios con un tesòn y una resistencia inigualables. Newton poseìa una intuiciòn extraordinaria; sus pruebas fueron siempre elaboradas <<a posteriori>>, y podìan pasar años antes de que se decidiera a dar una prueba de afirmaciones en las que creìa con profunda certeza. Asì, la acabada estructura de los <<Principia>>, modelo de razonamiento y exposiciòn durante varios siglos, es sin duda muy distinta al proceso mental que siguìo Newton para llegar a sus conclusiones. Esto no obsta para afirmar que Newton era admirablemente sistemàtico y cuidadoso en sus demostraciones; pero èstas eran tal vez tan sòlo un medio para convencer a sus contemporàneos, màs que una prueba para sì mismo.

Newton contemplaba al Universo como un extenso enigma susceptible de ser descifrado aplicando el pensamiento puro a los indicios que el Creador habìa sembrado con ese fin; pero su bùsqueda no se limitaba al campo de la filosofìa natural, es decir, la ciencia fìsica. En gran parte de su obra, sus esfuerzos iban encaminados al descubrimiento de los secretos del tabernàculo y el Tetragràmmaton, la alquimia y las ciencias hermèticas, como lo demuestran las cartas y manuscritos que de èl se conservan. Newton aplicò su poderosa mente tanto a los problemas fìsicos y matemàticos como a los esotèricos con el mismo mètodo y cuidado, tratando de hacer surgir un todo coherente, una imagen del mundo que la razòn pudiera aprehender y justificar, una comprensiòn global que revelara la esencia misma de Dios y del Universo. No fueron los suyos destellos de senilidad o locura, aunque no es claro por què ocultò tan celosamente sus escritos esotèricos. Tal vez fue el miedo a revelar su herejìa, tal vez por entender que tales secretos sòlo pertenecìan a los iniciados; el caso es que, a diferencia de sus obras matemàticas, Newton no mostrò a nadie esos escritos.

Hacia el final de su vida, el sabio fue erigido en una especie de dios de la razòn, de explicador universal muy lejos de la antigua magia. Newton desempeñò bien su papel, mientras guardaba en un baùl sus hermèticos documentos.

El Dios de Newton no era el metafìsico e impalpable Dios de la Edad de la Razòn; era la divinidad de Abraham, Yahvè, el despòtico y caprichoso numen del Antiguo Testamento, mezclado con herejìas arranianas y unitarias. Asì, el concierto universal, la "mùsica de las esferas", no era para Newton sino el reflejo de la voluntad divina, creado y sostenido por ella, y expuesto a los ojos de los hombres para que èstos buscaran en èl la clave de su Gloria. "Cuando escribì mi tratado sobre nuestro sistema, tenìa la mirada puesta en aquellos principios que pudiesen llevar a la gente a creer en Dios, y nada me causa mayor satisfacciòn que comprobar su utilidad para dicho fin" (2).

La mecànica newtoniana es la coronaciòn de siglos de esfuerzos: de tres simples leyes y algunas definiciones, Newton deduce todas las leyes mecànicas conocidas, y resuelve problemas inèditos. No en balde Pope estaba admirado. En efecto, Newton era la luz, una luz cegadora. El acertijo de las mareas, la explicaciòn de las leyes de Kepler y de la caìda de graves, los secretos de la colisiòn de cuerpos, todo està contenido en los <<Philosophiae Naturalis Principia Mathematica>>. Y lo que no està explìcitamente demostrado, los problemas mecànicos màs exòticos que puedan imaginarse, son solucionables en principio aplicando las leyes de Newton. Este, al igual que Euclides con la Geometrìa, habìa logrado sistematizar todo el saber mecànico de su tiempo; pero habìa hecho màs, mucho màs. Toda la mecànica hasta principios del siglo XX llevarìa la marca de Newton. Todas las formulaciones "equivalentes" posteriores no añadìan ni una iota a la soluciòn de problemas mecànicos, si bien es cierto que podían resolver muchos problemas con mayor facilidad que la aplicación directa de las leyes de Newton, ésta era una dificultad matemática, nunca de principio. Newton había definido el problema fundamental de la mecánica: dada una ley de fuerzas y la posición y velocidad inicial de un cuerpo, determinar su posición y velocidad en cada instante subsecuente. Era asombroso, porque era posible. Toda la arrogancia científica, toda la confianza ciega de los siglos posteriores, toda la filosofía del progreso estaban férreamente asentada en las tres leyes de Newton.

La mecánica newtoniana es inseparable del cálculo: nacieron gemelos, y la una es imposible sin el otro. El cálculo de Newton estaba planteado desde un punto de vista dinámico. Al igual que Roverbal y Torricelli, pensaba que una curva representa la trayectoria de un punto en movimiento. Su misma elección de lenguaje (fluyentes y fluxiones) dan idea de ese dinamismo: sus fluxiones eran siempre derivadas respecto al tiempo. Pero, a la vez que indispensable, el cálculo newtoniano fue durante mucho tiempo un secreto celosamente guardado. Newton creía con razón que su cálculo era una herramienta secreta y poderosa, que le daba una enorme ventaja sobre sus contemporáneos. La costumbre de la época renacentista, que ocultaba escrupulosamente los resultados y métodos para obtenerlos, era aún poderosa en tiempos de Newton. Esto explica en parte que Newton no haya publicado su "método de fluxiones" sino mucho tiempo después de los Principia, y entonces solamente como un apéndice al Opticks. En efecto, aunque sabemos a ciencia cierta que muchos de los resultados de los Principia fueron obtenidos mediante el cálculo, Newton los presentó bajo un manto geométrico: el hermetismo del alquimista. Sus contemporáneos deben de haberse quedado de una pieza. ¿Cómo era posible que Newton supiera tanto?

Newton construye su monumental edificio de una manera axiomático-deductiva (2). Al igual que Euclides, se encuentra ante la dificultad de las definiciones. ¿Cómo definir conceptos elementales, tales como masa o espacio, o punto o línea? La "definición" newtoniana de masa, la primera de los Principia, es sintomática: La cantidad de materia es una medida de la misma, originada conjuntamente de su densidad y su volumen. Desde luego, esta definición es circular, pues, ¿cómo puede definirse la densidad sino en términos de la masa? No obstante, Newton ha llegado a la distinción fundamental, que ni Galileo ni Descartes ni Huygens pudieron hacer: masa y peso. En la explicación de la definición, Newton aporta una manera de medir la masa: la masa, dice, es proporcional al peso, y yo mismo he hecho el experimento mediante péndulos. Cómo llegó Newton a esta distinción fundamental? La respuesta está en la otra gran aportación newtoniana, la ley de la gravitación.

La idea de que había una fuerza atractiva entre el Sol y los planetas no era nueva: ya Kepler había postulado su <<anima motrix>>, Gilbert había comparado a la gravedad con el magnetismo, y Huygens, aunque sin aceptar la acción a distancia, había encontrado la ley de la aceleración causada por una fuerza centrípeta. Hooke pensaba que la gravedad podía decrecer con la distancia, y trató de probarlo. Por otro lado, tanto Copérnico como Galileo y Descartes habían destruido la dicotomía aristotélica de tierra y cielo: la convicción de que las leyes de la física eran las mismas en todas partes se había ido reafirmando gradualmente. Newton dio el paso final: la misma fuerza que mantiene a la luna en su órbita es la que hace caer a los graves. La dicotomía estaba rota: las leyes celestes y las leyes terrestres eran idénticas. Por otro lado, tanto la luna alrededor de la Tierra como los planetas alrededor del Sol y los satélites de Júpiter manifestaban el mismo comportamiento: la gravitación era una fuerza fundamental, presente entre cualesquiera dos objetos.

El mundo había caído de golpe en un esquema universal; los movimientos de los astros diferían en un sólo aspecto de la caída de graves: su velocidad tangencial. Las mareas, cuya relación con la luna había sido observado desde antiguo, quedaban explicadas: eran el resultado de la atracción de la luna sobre la móvil masa de agua. Finalmente, las leyes de Kepler daban la expresión de la ley de la gravitación universal: por un lado, la segunda ley era equivalente a la ley de la aceleración centrípeta descubierta por Huygens, y determinaba la dirección de la fuerza; por el otro, la tercera ley de Kepler implicaba la dependencia de la fuerza con la distancia: era inversamente proporcional al cuadrado de ésta.

De aquí, era evidente que, si el peso no era más que la expresión de la fuerza de gravedad, este peso decrecería con la distancia. Y sin embargo, existía algo que no variaba en el cuerpo: ese algo podía identificarse intuitivamente con "la cantidad de materia". Ese algo era la masa. Por otro lado, varios experimentos habían establecido ya que la inercia, o resistencia del cuerpo a cambiar de estado, parecía ser distinta al peso: Baliani había distinguido entre peso como <<agens>> y peso como <<patiens>>, y Kepler había enunciado la existencia de una fuerza de inercia. Newton retoma la fuerza de inercia, pero la equipara a la masa; en la práctica, la fuerza de inercia en el sistema newtoniano no es más que una manera de hablar; esta pseudo-fuerza es indistinguible de la masa: en la tercera definición, Newton nos habla de la inercia: la inercia, o <<vis insita>>, es el poder de resistir a un cambio de estado de reposo o movimiento rectilíneo uniforme. Pero esta inercia, nos explica, es en todo equivalente a la masa, salvo en nuestra percepción de ella. Es decir, la inercia la percibimos como una "fuerza", mientras la masa es la cantidad de materia.

Como hemos dicho, el término inercia fue introducido por Kepler, que hablaba de una pereza o resistencia de los cuerpos al movimiento. Ciertamente, Kepler no poseía la ley de la inercia: no creía en el movimiento como estado. Sin embargo, esto le diferencia de Galileo: Kepler postuló su <<anima motrix>> por necesidad, ya que cualquier movimiento, incluso el circular, requería según él de una fuerza. Otra observación viene a cuento: estamos igualando aquí los dos conceptos de masa: la inercial y la gravitacional, pero es que Newton no distinguía entre ellos.

De esta manera, Newton continùa dando definiciones, hasta un total de ocho. La segunda se refiere a la cantidad de movimiento, definida como el producto de la masa por la velocidad. Al fin, el <<impetus>> nominalista, convertido por Galileo en un efecto, se ha transformado en un concepto nuevo y mensurable: el efecto de una fuerza serà cuantificable por la cantidad de movimiento impresa en un cuerpo. Newton descarta, al igual que Galileo, la teorìa nominalista del <<impetus>>: no existen fuerzas intrìnsecas, no hay causas del movimiento impregnadas en el cuerpo; sòlo el efecto de una fuerza externa traducida en movimiento. Ese efecto es la cantidad de movimiento, ìmpetu, o momento lineal.

Finalmente, la cuarta definiciòn nos dice lo que es la fuerza: una acciòn ejercida sobre un cuerpo para cambiar su estado de reposo o movimiento rectilìneo uniforme. Es decir, la fuerza es la causa del cambio de estado. El viejo aforismo aristotèlico, <<causa cessante cessat effectus>> cobra un nuevo sentido. El medio ambiente no es responsable del movimiento de un cuerpo; sòlo es responsable del cambio de estado de reposo o movimiento rectilìneo uniforme. Newton habìa reducido todas las causas de movimiento a una sola: la fuerza. Por otro lado, habìa establecido la identidad esencial de todas las fuerzas: ya fuera la gravitaciòn, la fuerza de presiòn o la de tensiòn, todas actuaban de idèntica manera. Al irse estableciendo nuevas leyes de fuerza, esta afirmaciòn cobrarìa el rango de una certeza: era posible sustituir, por ejemplo, la fuerza gravitatoria por la fuerza de Coulomb, y las ecuaciones predecìan exactamente el movimiento. Aùn màs: la estàtica se reducìa a un caso particular de la dinàmica, en que todas las fuerzas que actuaban sobre un cuerpo se sumaban para dar una resultante igual a cero, y todas las torcas eran tambièn iguales a cero. En un problema estàtico se podìan sumar libremente las acciones debidas a fuerzas de naturalezas completamente distintas: la tensiòn, el peso...

Las definiciones restantes tienen que ver con la fuerza centrìpeta; en ellas Newton establece una distinciòn entre tres tipos de fuerza: fuerza absoluta, fuerza acelerativa y fuerza motriz. La fuerza absoluta es la medida absoluta de la fuerza; la fuerza acelerativa, es una medida de la fuerza proporcional a la velocidad que genera en un tiempo dado; la fuerza motriz es una medida de la fuerza proporcional a la cantidad de movimiento generada en un tiempo dado. Ciertamente, estas dos ùltimas sòlo se distinguen por la masa: el mismo Newton dice: "la fuerza aceleradora es a la fuerza motriz como la velocidad es a la cantidad de movimiento" (3). Por lo tanto, podemos distinguir solamente entre dos tipos de fuerza: motriz y absoluta. La fuerza absoluta es una fuerza instantànea, tal como un golpe seco; la fuerza motriz es una fuerza que actùa continuamente en el tiempo, como la gravitaciòn. Newton mezcla libremente estos dos tipos de fuerza, bien que la segunda, tal como èl la plantea, es màs bien lo que hoy en dìa conocemos como impulso: $\int Fdt$.

A continuaciòn, Newton introduce un escolio, que serìa fuente de polèmicas desde Leibniz hasta Mach. En este cèlebre escolio, Newton da sus conceptos de espacio y tiempo. En primera instancia, Newton distingue entre el espacio absoluto y el espacio relativo, entre el tiempo absoluto y el relativo, y por consiguiente entre el movimiento absoluto y el relativo. Comencemos por el tiempo. Newton postula la existencia de un tiempo absoluto, matemàtico y real. Es decir, el tiempo es una categorìa ontològica fundamental, y existe <<per se>>. Por el contrario, el tiempo relativo es una medida del absoluto por medio de algùn movimiento, ya sea el de la Tierra o el de un pèndulo. El tiempo absoluto es homogèneo: todas sus partes son iguales. El espacio absoluto, igualmente, es inamovible y similar. El espacio relativo es una medida movible del espacio absoluto: si la Tierra se mueve a travès del espacio absoluto, el aire que lleva se mueve tambièn, pero respecto a la Tierra el aire està en reposo: asì, ambos espacios son iguales en figura y magnitud, pero no necesariamente iguales numèricamente. Finalmente, el movimiento absoluto es el que se realiza en el espacio absoluto, y el movimiento relativo el que se lleva a cabo en el espacio relativo. En todo caso, he aquì la realizaciòn absoluta de la geometrizaciòn del espacio: el paso que Galileo no pudo dar, el paso que Descartes dio, pero sin consecuencias en su propia teorìa. El Universo es enteramente geomètrico: es homogèneo e isotròpico.

Como decìamos, la distinciòn newtoniana ha llevado a interminables polèmicas, al menos antes de la teorìa de la relatividad. Estas polèmicas tendieron a dejar de lado la distinciòn de tiempo absoluto o relativo, y a fijarse en el espacio y el movimiento. Despuès de todo, el concepto de tiempo es una categorìa màs compleja. Los filòsofos, con Leibniz a la cabeza, fueron los primeros en refutar a Newton; sin embargo, muchos cientìficos, especialmente los empiristas, abandonaron gradualmente la nociòn de espacio absoluto, dado que era imposible observarlo. La introducciòn del èter en el siglo pasado, sin embargo, reviviò la polèmica. ¿Era posible que el èter fuera el espacio absoluto? Como sabemos, sòlo con Einstein terminò el problema; sin embargo, valdrìa la pena, dentro del marco de la mecànica clàsica, preguntarse què objeto tenìa el espacio absoluto. ¿por què hace Newton la distinciòn? ¿Es por un capricho metafìsico, o porque su teorìa la requiere? Newton se extiende en su distinciòn por varias pàginas, muchas màs de las que dedica a cada una de las definiciones precedentes.

El espacio y el tiempo medidos son relativos, pero a estos intuitivos conceptos de la experiencia, Newton opone la realidad ontològica de espacio y tiempo absolutos. Evidentemente, en un espacio absoluto el movimiento es absoluto: aùn si existiera una sola partìcula en el Universo, y no tuvièramos ninguna referencia con que compararla, serìa posible discernir si la partìcula se mueve o no. Por otro lado, el tiempo transcurre, aunque no haya movimiento que lo cuantifique.

Pero, ¿còmo distinguir entre espacio absoluto y relativo?

Newton nos dice que una fuerza puede alterar el movimiento absoluto sin alterar el relativo, y viceversa, y da el cèlebre ejemplo de la cubeta: la fuerza centrîfuga que experimenta el agua en la cubeta se da sòlo cuando el movimiento relativo entre cubeta y agua es mînimo, pero el movimiento absoluto de la cubeta es màximo. Asî, lo que Newton està tratando, si bien algo confusamente, es de definir un marco de referencia inercial. Los ùnicos marcos de referencia -espacios- inerciales serîan aquèllos que estuvieran en reposo o movimiento rectilîneo uniforme respecto al espacio absoluto. Newton reconoce que tal vez ningùn cuerpo del universo estè en reposo absoluto -o, lo que serîa equivalente, en movimiento rectilîneo uniforme absoluto-, pero, ante el problema de las fuerzas ficticias, trata de establecer su teorîa en una base sòlida. En efecto, como todos sabemos, un observador en un marco de referencia acelerado experimenta fuerzas que no son observables desde un marco en reposo. Dado que la fuerza es la interacciòn del medio con el cuerpo, se hace necesario distinguir, al menos en la mecànica clàsica, las fuerzas reales, es decir, las que son originadas por algùn fenòmeno fîsico, de las "ficticias". El problema no es trivial: està en juego la objetividad de la mecànica. Si no somos capaces de distinguir una fuerza "real", por ejemplo la centrîpeta de la gravitaciòn, de una fuerza "ficticia", por ejemplo la fuerza centrîfuga, còmo podemos describir adecuadamente a la Naturaleza?

Einstein tomò al toro por los cuernos, postulando la indistinguibilidad de la fuerza gravitatoria de una fuerza ficticia generada por la aceleraciòn del marco de referencia; pero, de alguna manera, lo que hace Einstein es ficcionalizar la fuerza gravitatoria. Esto en la mecànica newtoniana no es posible. La fuerza de gravedad era real, muy real. Todo la explicaciòn newtoniana del mundo està basada en ella.

La demostraciòn de la cubeta es bastante convincente: al parecer, es posible distinguir entre un marco de referencia que rota y uno que no rota. Sin embargo, Newton no extiende la discusiòn a marcos de referencia que se transladen de manera acelerada, aunque vagamente implica que se puede hacer. Esta distinciòn fundamental llevò a algunos fîsicos a la espeluznante conclusiòn de que el espacio serîa absoluto frente a un movimiento rotacional, pero relativo frente a translaciones.

En principio, Newton cree que es posible distinguir entre marcos de referencia acelerados e inerciales; postula la existencia de estos ùltimos, pero no se atreve a identificar el sistema de referencia absoluto: èl mismo ha expresado dudas de que las estrellas fijas lo sean realmente. Independientemente de que hubiera sido posible distinguir o no ese marco de referencia -hablamos hoy en dîa con el beneficio de la teorîa de la relatividad, pero hay que ponerse un momento los zapatos de Newton-, la teorîa parecîa requerirlo. No olvidemos el caràcter apriorîstico de la nueva fîsica: Galileo habîa comenzado la abstracciòn, y Newton la llevarîa a su punto culminante. Los cuerpos no caen realmente en el vacîo, y el espacio absoluto, aunque no existiera, era una abstracciòn necesaria. Los marcos de referencia reales serìan por necesidad relativos; pero, como bien sabemos, incluso la giratoria Tierra puede considerarse en muchos casos un marco de referencia inercial. El movimiento de los cuerpos en el espacio newtoniano era ideal. ¿Por quê no habìa tambièn de ser ideal su espacio?

Newton destruìa de esta manera todas las fuerzas ficticias: sòlo las fuerzas con una causa real podìan entrar en su discusiòn. La distinciòn es realmente admirable; el proceso lògico por el cual se llega a ella es la consecuencia necesaria de la abstracciòn. El espacio newtoniano tiene que ser absoluto; todo esfuerzo por eliminarlo de la teorìa conduce a la circularidad. Recordemos que Newton no estaba obsesionado, como los empiristas del siglo pasado, por categorìas observacionales. Su fìsica, aunque firmemente asentada en la experiencia, es apriorìstica, como la de Galileo. Si alguien le hubiera dicho a Newton que nada existe a menos que pueda observàrsele, se hubiera encogido de hombros. Aùn en el supuesto, que Newton no creìa, que no hubiera distinciòn posible entre el espacio absoluto y el relativo, Newton hubiera continuado afirmando la existencia ontològica de aquêl. Metafìsica, dirìa Mach. Tal vez; pero una teorìa no es conjunto de sìmbolos matemàticos; es tambièn una interpretaciòn.

Las leyes que està a punto de enunciar Newton sòlo son vàlidas en marcos de referencia inerciales, es decir, no acelerados. Terminada —segùn Newton— la discusiòn, pasa inmediatamente a formular las leyes o axiomas del movimiento. Desde luego, la primera ley es nuestra vieja conocida, la ley de la inercia, elevada aquì, como en Descartes, a principio fundamental de la Naturaleza. No es difìcil que Newton la haya copiado de Descartes: Bernard Cohen lo cree asì (4). En todo caso, el principio ya no es metafìsico, sino fìsico, y la inercia, por virtud de la definiciòn antes citada, se iguala a la masa. "Todo cuerpo conserva su estado de reposo o movimiento uniforme en una recta, a menos que fuerzas impresas lo haga cambiar de estado" (5).

La segunda ley dice literalmente: "el cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa; y se lleva a cabo en la direcciòn en que la fuerza es impresa" (6). Recordemos que fuerza motriz es lo que hoy llamamos impulso. La segunda ley està pues formulada en tèrminos del impulso, y no de la fuerza; por otro lado, el cambio es en la cantidad de movimiento mv, no sòlo en la velocidad.

Newton expresa en su comentario que si el cuerpo estaba ya en movimiento, el cambio de movimiento —realmente el cambio en la cantidad de movimiento— deben tomarse en el espacio relativo, es decir, debe sumarse a èl. Esto es vàlido incluso para incrementos diferenciales de impulso. En otras palabras, tres impulsos I_1, I_2, I_3 cuya suma vectorial es I, y que produce cada uno un cambio en la cantidad de movimiento Δp_1, Δp_2, Δp_3, respectivamente, producen el mismo cambio de movimiento p que I, donde

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3$$

Lo que Newton està exponiendo es el principio de la suma vectorial de fuerzas, que pasa inmediatamente a enunciar y demostrar en un corolario. Tanto el impulso como su efecto, el cambio en la cantidad de movimiento, son cantidades vectoriales. Esto, que parece obvio a un lector moderno, es de capital importancia. Nadie antes de Newton habìa enunciado explìcitamente el principio de composiciòn de fuerzas, aunque Varignon, contemporàneo suyo, llegò al mismo resultado independientemente. La superposiciòn lineal de las fuerzas es un nuevo principio de la Naturaleza: nada la obliga a portarse asì. Por otro lado, el principio de adiciòn de velocidades, que ya Galileo conocìa, se sigue a partir de la segunda ley y del principio de superposiciòn lineal de fuerzas. La importancia de este principio no puede exagerarse: es èl quien nos permite igualar la infinidad de interacciones que puede tener una partìcula con una sola interacciòn resultante. Se ha dicho que la significaciòn real del paralelogramo de fuerzas està, no en una realidad, sino en una apariencia: el cuerpo se mueve "como si" estuviera sujeto a una ùnica fuerza resultante, pero es indemostrable que las fuerzas aisladas se sigan comportando de la misma manera cuando estàn solas que cuando estàn en compañìa de otras fuerzas. Como quiera que esto sea, la distinciòn es filosòfica: la superposiciòn lineal de fuerzas funciona.

Por otro lado, Newton iguala implìcitamente el impulso a la fuerza, y los usa alternativamente sin distinciòn. Esto se explica por su concepciòn del tiempo: todas las fluxiones son tomadas respecto al tiempo, y èste es homogèneo, fluye uniformemente, o por decirlo de otra manera, todas sus diferenciales son iguales. De aquì que a veces Newton las introduzca en su exposiciòn y en otras ocasiones las deje de lado. De alguna manera, las està "cancelando". El impulso continuo produce una serie infinita de incrementos diferenciales de la cantidad de movimiento; una fuerza instantànea produce un incremento finito. Newton, sin ninguna idea del anàlisis dimensional, iguala ambas formulaciones de la segunda ley. En ese sentido, las siguientes formulaciones de la ley son equivalentes para Newton, como se manifiesta en la proposiciòn I del libro I (7).

$$I = d(mv)$$

$$F = d(mv)$$

$$F = d(mv)/dt$$

Desde luego, la ùltima es la formulaciòn moderna; sin embargo, aunque estrictamente la equivalencia es incorrecta, los resultados numèricos son iguales, debido a la constancia de las diferenciales de tiempo.

La segunda ley de Newton no es sòlo una fòrmula; en ella está implícito un concepto de causalidad. Como hemos dicho, Galileo demolió la teleología aristotélica, acabando así con el concepto de causa final. Descartes hizo lo propio con la causa formal, al excluir de su ontología el concepto de forma como esencial a la sustancia. Sólo quedaba la causa eficiente, y la causalidad newtoniana se basa manifiestamente en ella. Nuevamente, los empiristas y los logicistas trataron, en el siglo pasado, de destruir el concepto de causalidad, como un fósil pasado de moda. La culpa en buena parte es de la física newtoniana: al establecer relaciones matemáticas, en la formulación de la mecánica desaparece el concepto de causa. En efecto, en una ecuación no se especifica agente causal y efecto; en $F = ma$, tan la fuerza puede ser una causa como un efecto de la aceleración. Esto llevó naturalmente a Mach y Hertz a prescindir de la causalidad. Ciertamente, ésta no era la intención de Newton; su teoría era causal. Las fuerzas eran causas del movimiento, y la mecánica no era meramente descriptiva, como pensaba Mach. Sin embargo, Newton heredó a la posteridad una teoría que contenía varias lecturas. Sin cambiar un ápice su formulación matemática, es posible darle múltiples interpretaciones.

La matemática newtoniana fue respetada a lo largo de los siglos; su interpretación, como es lógico, cambió. La física clásica que se hacía a mediados del siglo pasado no era la de Newton: el énfasis en la definición operativa de conceptos y el descarte de categorías ontológicas hubieran sido nuevas para él. Volveremos sobre este problema más tarde; baste indicar aquí cuál es la intención original de la mecánica newtoniana. Digamos finalmente que la segunda ley de Newton es para él una ley de la Naturaleza, no una definición de fuerza. El concepto de fuerza como acción o causa del movimiento se refleja en un cambio de velocidad. Si tomamos el concepto de fuerza como dado, podemos ver la profundidad de la segunda ley; nuevamente, nada obliga a la Naturaleza a comportarse así; la fuerza podría ser proporcional a la primera o a la tercera derivada de la distancia respecto al tiempo.

Finalmente, viene la célebre ley de acción y reacción: "a cada acción corresponde una reacción opuesta; o, las acciones mutuas de dos cuerpos respectivamente son siempre iguales y dirigidas a partes contrarias" (8). Esta ley es también una innovación newtoniana, aunque parezca tan intuitivamente clara. En efecto, una consecuencia directa de esta ley, y de la primera, es que ningún cuerpo en reposo puede moverse espontáneamente por la acción de fuerzas internas: su centro de masa no puede cambiar de posición. Es esta ley la que convierte a la física newtoniana en una física de varios cuerpos, a diferencia de la de Galileo; la acción mutua entre todos los cuerpos ha sido perfectamente determinada. También es esta ley la que Newton se ve obligado a explicar e ilustrar con más detalle, consignando los experimentos que hizo para comprobarla. Newton da crédito a Wren, Wallis y Huygens como sus predecesores en la formulación de la ley, dados sus trabajos en la física de colisiones; sin embargo, es nuevamente Newton el que extiende su operatividad a todo tipo de fuerza, entre cualesquiera cuerpos.

Ciertamente, hay mucho de intuitivo en la tercera ley; cualquiera que haya dado una patada a una puerta sabe que la propia puerta puede hacerle daño; ya Wren había presentado a la Royal Society un experimento con péndulos que chocan entre sí, demostrando las propiedades del choque elástico. Sin embargo, Newton profundizó este experimento, para incluir cuerpos blandos, y postuló, como hemos dicho, la tercera ley para todo tipo de interacciones, incluidas las atracciones. Que nosotros atraigamos a la Tierra con la misma fuerza que ella a nosotros no es en nada obvio. Finalmente, a Newton debe darse crédito por elevar la tercera ley a la categoría de principio fundamental de la Naturaleza. La importancia de la tercera ley no puede ser exagerada. Aún Mach, que tanto criticó otros conceptos newtonianos, la consideraba fundamental. En efecto, esta ley nos permite convertir la física de un cuerpo en física de un sistema de cuerpos; nos permite demostrar que el movimiento translacional de un cuerpo rígido es reducible al movimiento de su centro de masa; nos permite pues hacer abstracción de los cuerpos rígidos complejos, y considerlos, para efectos translacionales, como masas puntuales; nos permite, en fin, postular la ley de conservación del momento lineal y del momento angular.

De estos principios surge toda la mecánica newtoniana. En efecto, el problema de encontrar la trayectoria y la velocidad de un cuerpo dada la fuerza que actúa sobre él y las condiciones iniciales de velocidad y posición se reduce a resolver la ecuación diferencial de la segunda ley. La mecánica newtoniana es completamente determinista, tan determinista como única la solución de la ecuación diferencial: el movimiento de un cuerpo está determinado por una fuerza y por las condiciones iniciales. El poder de estos pocos enunciados es realmente asombroso.

Sabido es que Newton comparó al mundo con un gran mecanismo de relojería, cuyo invisible relojero sería Dios. No obstante la idea teológica, el principio fundamental del mecanicismo había sido formulado. Ya Descartes había comparado a toda la materia con una máquina; pero Descartes no había podido cumplir su programa; Newton lo llevaría a cabo, y establecería el reino del mecanicismo. Nadie mejor que Laplace expresaría el credo del determinismo mecanicista:

"Debemos (...) entrever el estado presente del universo como el efecto de su estado anterior y como la causa del estado que vendrá después. Una inteligencia que en un instante dado conociera todas las fuerzas de que está animada la Naturaleza, y la situación respectiva de las entidades que la componen, si por otra parte tal inteligencia fuera lo suficientemente poderosa para someter todos estos datos al análisis, abarcaría en la misma forma los movimientos de los mayores cuerpos del universo y los del más ligero átomo; nada permanecería incierto para ella y tanto lo venidero como lo pasado estarían presentes ante sus ojos." (9).

El determinismo laplaciano exigía el conocimiento absoluto; Newton era más modesto. Aislando y abstrayendo problemas concretos, podía circunscribir su universo causal. El mecanicismo extremo de Laplace no era corriente en tiempos de Newton; sobrevendría un siglo después, pero su causa directa fue la propia mecánica newtoniana y sus ulteriores extensiones. En todo caso, hay en la frase de Laplace un punto interesante: el tiempo es invertible en las leyes de Newton, bien que el propio Newton no parece haberse dado cuenta. En efecto, un sistema mecánico quedaba determinado no sólo para el futuro, sino también para el pasado.

Como bien sabemos, el descubrimiento de dos planetas más el siglo pasado, con la ayuda de la mecánica celeste laplaciana, fue la más dramática demostración del poder predictivo de la mecánica clásica; nada parecía oponérsele, y se convirtió en el modelo científico a seguir. Todas las demás ciencias trataban de parecerse a la mecánica; todas creían tener su principio en ella. En efecto, el problema del movimiento, que había sido el fundamental desde los tiempos de Aristóteles, debía explicar todos los demás fenómenos: la electricidad, el magnetismo, el calor. Boltzmann fundó la mecánica estadística con esa convicción; Maxwell buscó una explicación mecanicista a los fenómenos eléctricos, explicación reforzada por la similitud de sus propias ecuaciones con las de la hidrodinámica, y así nació el éter luminífero, que a su vez apoyaba la concepción newtoniana de un espacio absoluto.

Por otra parte, la mecánica newtoniana establecía una dicotomía muy clara, que ya se hallaba en Empédocles y Anaxágoras, y luego en Descartes. Recordemos que, al contrario de los jonios, Heráclito y los atomistas, que consideraban el movimiento como algo intrínseco a la materia, estos pensadores habían hecho una clara distinción entre la materia, el móvil, y el espíritu, el motor. Sin duda esta dicotomía fue mantenida por Aristóteles, pero con otra intención, más bien teleológica; la concepción mecanicista invierte los términos, y busca principios (condiciones iniciales), no finales. La dicotomía era manifiesta en la mecánica de Newton: por un lado, la materia inerte; por el otro, la fuerza, el motor, la causa. Si bien la fuerza es un concepto antropocéntrico, al que difícilmente se le pueden adscribir las cualidades del espíritu, la dualidad móvil-motor se mantiene en lo fundamental. El motor ha descendido a la tierra, pero sigue siendo un agente externo, un impulsor imprescindible para poner en movimiento a la inerte materia. Se argumentará que la materia puede conservar su movimiento rectilíneo uniforme; sin duda, pero ese movimiento es ontológicamente equivalente al reposo: se concibe como un estado natural de la materia. En todo caso, el mismo nombre de la <<vis insita>> de Newton, la inercia, describe la característica fundamental de la materia: es inerte.

En esto se encuentra el rasgo filosófico fundamental de la mecánica newtoniana: es siempre la interacción de una partícula o un conjunto de partículas con el medio ambiente. La interacción, en la forma de la fuerza, debe ser conocida en sus últimos detalles, para poder calcular la resultante. Es necesario, por ejemplo, determinar que en un cuerpo absolutamente rìgido todas las interacciones internas se anulan entre sì, antes de poder reducir su movimiento translacional al del centro de masa.

La fìsica newtoniana era una fìsica de partìculas: Newton retomaba el atomismo de Gassendi, y en <<Opticks>> se declaraba convencido de la existencia de partìculas indivisibles y absolutamente duras, de las que toda materia estaba formada.

Hablemos finalmente de la epistemologìa newtoniana. Al igual que Galileo, Newton fue convertido en empirista <<a posteriori>>, muchas veces por sus propios traductores. El cèlebre <<hypotheses non fingo>> fue tomado por Mach como la demostraciòn del empirismo newtoniano. Sin embargo, las investigaciones de Koyrè y los Hall han demostrado hasta què punto es falso ese pretendido empirismo (10). En el libro III de los Principia, Newton enuncia las famosas <<Regulae Philosophandi>>, las reglas del razonamiento en filosofìa. Estas cuatro reglas postulan la sencillez de la Naturaleza, el conocido <<dictum>> de que a causas similares deben asignarse efectos similares, la generalizaciòn a partir de ejemplos particulares y la fundamentaciòn de las proposiciones cientìficas en los fenòmenos y sòlo en los fenòmenos, es decir, la imposibilidad de refutar una proposiciòn sòlo mediante hipòtesis contrarias. Esta ùltima regla, añadida en la tercera ediciòn de los Principia, iba sin duda dirigida contra leibnizianos y cartesianos.

Y sin embargo, existìa una quinta regla, que Newton nunca se atreviò a publicar: "Lo que no se deriva de las cosas mismas, sea por los sentidos externos o por cogitaciòn interna, debe ser tomado por hipòtesis (...) Y lo que no puede ser demostrado por los fenòmenos ni se sigue de ellos por argumentos basados en la inducciòn, lo considero como hipòtesis" (11).

Sin duda, habìa hecho hipòtesis: su <<hypothesis non fingo>>, traducido tramposamente por "no hago hipòtesis", no querìa decir màs que su significado literal: no finjo hipòtesis, no hago hipòtesis falsas. Su teorìa del espacio y el tiempo era hipotètica, y detràs de toda su obra habìa una hipòtesis no declarada, que hemos mencionado al principio de este capìtulo.

Para Newton, la ùnica causa final de todas las fuerzas era Dios, y la gravedad no era un excepciòn. Sin embargo, se cuidò mucho de publicar explìcitamente esta opiniòn: los Principia evitarìan hablar de la causa de la gravitaciòn, lo cual le atraerìa innumerables crìticas. En una versiòn no publicada del Escolio General, Newton afirma: "No he revelado aùn la causa de la gravedad, ni he decidido explicarla, ya que no puedo comprenderla a partir de los fenòmenos. Y es que no surge del centro de algùn vòrtice, pues no tiende al eje del vòrtice, sino al centro del planeta" (12). La causa oculta era Dios, pero el hermètico Newton, no teniendo la demostraciòn a la mano, no se atreviò a decirlo. Newton pensaba que el espacio y el tiempo eran el "sensorio" de Dios, una especie de escenario donde la invisible Deidad reflejaba su pensamiento; toda su física estaba orientada a desentrañar el misterio del sensorio, para aprehender al Dios que movía los hilos de los títeres.

2.- Las Críticas a Newton

A pesar del éxito indudable de su sistema dinámico, Newton fue sometido a duras críticas en su propia época, tanto por el empirismo representado por Berkeley, como por el racionalismo leibniziano. Los ataques de aquella época se centraron en el concepto del espacio absoluto y en la naturaleza de la gravitación. Aunque no forma parte de los fundamentos de la mecánica, la ley de gravitación era fundamental para la explicación de los movimientos celestes y terrestres, así como para la teoría de la mareas. Newton dudó mucho de su concepto de gravitación. En efecto, la gravedad parecía ser una característica intrínseca de la materia: en tanto hay materia, hay masa, y la masa implica gravedad. Esto era intolerable para muchos, incluido el propio Newton: no se había desnudado a la materia de sus cualidades aristotélicas para tener que aceptar una nueva cualidad, al parecer más extraña aún que las de Aristóteles. Para la mayoría de los filósofos, la masa o la extensión eran la única esencia de la materia; por otro lado, ésta era inerte: imbuirla de una fuerza intrínseca era inaceptable.

El otro problema de la gravedad era la acción a distancia. El propio Newton no suscribió, contra lo que se cree normalmente, esta hipótesis: fue Motte, en su prólogo a la traducción inglesa de los Principia, el que primeramente habló de acción a distancia. Newton se inclinaba más bien por un éter transmisor; pero, sin tener a la mano la demostración de su existencia, prefirió evitar la discusión.

La fuerza gravitatoria de Newton no depende del medio: es universal, y su alcance es infinito. Descartes, y después de él Huygens y Leibniz, abominaron del concepto de acción a distancia. La gravedad se transmitía de un cuerpo a otro, sin intermediario, de una manera instantánea; cómo conciliar esto con el principio de causalidad, tan caro a Newton y a sus contemporáneos? No había manera de hacerlo; y sin embargo, la gravitación newtoniana explicaba perfectamente los fenómenos conocidos. Por ello, y a pesar de las objeciones de los filósofos, su concepción fue gradualmente aceptada por todos los científicos.

Pero la crítica filosófica a la mecánica newtoniana era más fundamental: estaba en juego la esencia misma de la ciencia.

George Berkeley, obispo irlandés, constituía la reacción al apriorismo racionalista y el innatismo de las ideas. Ya Locke, en su Ensayo sobre el Conocimiento Humano, había atacado al racionalismo. Según Locke, padre del empirismo inglés, el mundo sensible ha sido creado por Dios para ser percibido; de él obtenemos ideas de sensación, que a su vez dan pie a las ideas de reflexión. Las ideas no son innatas: proceden de la experiencia, ya directamente, ya a travès de la reflexiòn. Aùn asì, Locke no termina de alejarse del racionalismo cartesiano: las cualidades sensibles pueden ser primarias o secundarias. Aquèllas son reales, tales como la solidez, la extensiòn o el movimiento. Estas no estàn en las cosas, sino en nuestro modo de percibirlas. El papel de la ciencia es identificar y estudiar las cualidades primarias.

Berkeley es mucho màs radical: "Ser es ser percibido", escribe (13). Nada existe fuera de la percepciòn: la materia, el espacio, la realidad no son sino haces de percepciones. El problema para Berkeley es que el entendimiento humano tiende a proceder por abstracciones, y a considerar èstas como reales. El tiempo abstracto, el espacio absoluto tal como los concebìa Newton no existen. En <<The Analyst>>, Berkeley criticarìa a Newton sin piedad. El càlculo era para èl una aberraciòn sin lìmites: "Y, ¿què son estas fluxiones? Las velocidades de incrementos evanescentes. Y ¿què son estos mismos incremenentos evanescentes? No son cantidades finitas, ni infinitamente pequeñas, ni tampoco son nada (es decir, cero. N. de A.). No podrìamos acaso llamarlas fantasmas de cantidades desaparecidas?" (14). Toda la fìsica newtoniana, que èl contempla como una intolerable abstracciòn aprioristica, debe ser derribada. La motivaciòn de Berkeley era teològica; temìa, y con razòn, que la mecànica newtoniana conducìa al materialismo. Sin embargo, Berkeley se detiene en la puerta del solipsismo: el mundo existe, pero como realidad espiritual, no material. Su concepto de Dios le impide caer en la negaciòn del mundo; sin embargo, no deja de ser una contradicciòn con su empirismo, y la diferencia es muy tenue para nosotros.

David Hume coronarìa la escuela empirista inglesa, que tanta influencia tendrìa en los positivistas empiristas. Hume distingue entre pensamientos e impresiones. Las primeros son vagos e indefinidos; las segundas, precisas e intensas. El pensamiento es una "copia" de la impresiòn, y es tan vago como la memoria. Evidentemente, Hume sigue a Locke: las ideas vienen de la experiencia; pero no se limita a esta afirmaciòn: trata de descubrir el mecanismo por el cual se genera una idea. Ese mecanismo es la asociaciòn de ideas, o màs bien, de impresiones. Por ejemplo, la idea de triàngulo proviene de asociar los triàngulos reales que hemos visto. Esta asociaciòn se lleva a cabo por medio de tres procedimientos: la semejanza, el contraste y la pretendida relaciòn de causa y efecto. A partir de aquì, Hume procede a negar la metafìsica, y, de hecho, todo el pensamiento abstracto. Una vez adquiridas las ideas, creemos en su realidad, pero esta creencia es falsa. La elaboraciòn de esas ideas no se encuentra en el original, que es la impresiòn. La idea de Dios, la de alma, en fin, cualquier idea abstracta que no procede directamente de la experiencia debe ser negada. Hume no niega la existencia de Dios; sencillamente, dice que es incomprobable por la experiencia. Al no asignar al pensamiento abstracto ninguna validez, Hume echa por tierra todas las demostraciones de la existencia de Dios.

Hume niega la causalidad, tal como la concebimos: ésta no es una sucesión de hechos reales, sino de hechos mentales. La única causalidad que Hume acepta es una sucesión de impresiones: existe "un objeto seguido de otro, cuya aparición siempre trae consigo el pensamiento de ese otro" (15). La causalidad es una sucesión de ideas; hasta allí puede aceptarse como uno de los procedimientos de la asociación: por ejemplo, un padre y su hijo. Pero la causalidad no está en la Naturaleza: las cualidades ocultas de las cosas no pueden ser descubiertas. "La primera vez que un hombre vio la comunicación del movimiento mediante el impulso, como por el choque de dos bolas de billar, no podía decir que el acontecimiento estuviera conectado con el otro, sino tan sólo que estaba conjuntado. Después de haber observado varios casos de esta naturaleza dice que están conectados. Qué alteración ha sobrevenido para que nazca esta nueva idea de conexión? Nada sino que ahora siente que estos hechos están conectados en su imaginación, y puede fácilmente predecir la existencia de uno de ellos a partir de la aparición del otro" (16).

Hume es pues la cumbre del escepticismo, el hijo de aquélla escuela que Occam había iniciado. Su pensamiento tendría una profunda influencia en el positivismo del siglo pasado: el empirismo había revivido, y lucharía contra el racionalismo hasta arrebatarle el dominio de las ciencias.

Finalmente, Kirchhoff, Mach, Poincaré, Hertz y Russell criticaron los cimientos básicos de la ciencia newtoniana. La mayor parte de estas críticas se hicieron con base en el movimiento filosófico que había pervadido la ciencia desde su postulación por Comte: el positivismo empirista. La exigencia de definiciones operativas de los conceptos no era satisfecha por las definiciones newtonianas. No cabe duda de que los conceptos newtonianos básicos, la fuerza y la masa, son perfectamente intuitivos. La fuerza es un concepto antropocéntrico; todos la experimentamos día con día. Y sin embargo, la definición newtoniana de fuerza es particularmente oscura, desde un punto de vista formal. Ciertamente, es posible definir las fuerzas independientemente: la ley de Hooke, la ley de la gravitación universal, la ley de Coulomb... Pero ¿qué garantiza que esas definiciones cuadren entre sí, es decir, que todas ellas sean fuerzas, y por consiguiente sustituibles en la segunda ley? Estas consideraciones llevaron a Kirchhoff, Mach y Russell a adoptar la segunda ley no como una ley natural, sino como una definición de fuerza: fuerza es aquéllo que ocasiona un cambio en la cantidad de movimiento de un cuerpo, respecto al tiempo. Pero, como bien hace notar Eisenbud, una definición no expresa nada sobre la Naturaleza; aún aceptando que el concepto de causalidad sea removido de la segunda ley, no es posible pensar que sea una definición: la segunda ley es el corazón de la mecánica newtoniana; si es una definición, toda la mecánica es una tautología. Por otro lado, Hertz sencillamente prescindió del concepto de fuerza: su formulación es radicalmente distinta a la de Newton, y a la de principios variacionales, en los que veía una sospechosa teleología; pero esto es materia de otro capítulo.

En cuanto al concepto de masa, ha sufrido semejantes ataques. Mach tratò de definir la masa en tèrminos de la tercera ley: dos cuerpos tienen igual masa si ejercen las mismas aceleraciones uno en otro. Para Mach, la tercera ley era inseparable del concepto de masa; èste era inentendible sin aquèlla (17).

Por otro lado, se ha dicho con frecuencia -el mismo Mach lo afirma- que la primera y segunda leyes son tautològicas: la segunda ley implica a la primera como caso particular, simplemente igualando la fuerza a cero. En cambio, otros fìsicos consideran que la tautologìa no existe: al ser imposible diferenciar el espacio relativo del absoluto independientemente, la primera ley definirìa los marcos de referencia inerciales; la segunda y tercera leyes de Newton son vàlidas tan sòlo en esos marcos.

Mach critica especialmente los conceptos de espacio y tiempo de Newton: el tiempo, dice, es inseparable del movimiento. El ùnico tiempo que percibimos està en relaciòn directa con el movimiento de un cuerpo, y es una abstracciòn de la experiencia; el tiempo absoluto es una necedad metafìsica. Por otro lado, el espacio absoluto es igualmente refutado: todo movimiento es relativo a un cuerpo que se presume en reposo. El Universo, dice Mach, no es dado dos veces, una copernicana y la otra ptolemaica. Los movimientos son los mismos en ambos sistemas, ambas concepciones son igualmente correctas. El experimento de la cubeta, dice Mach, no prueba nada: las fuerzas aparentes pueden ser generadas por la presencia de los demàs cuerpos celestes: el Sol, la Luna, los planetas, las estrellas. Nadie es capaz de afirmar lo que ocurrirìa en un espacio completamente vacìo, que contuviera tan sòlo a la cubeta.

Finalmente, Mach postula los que para èl son los verdaderos principios -empìricos, desde luego- de la mecànica (18).

1.- Proposiciòn experimental. Los cuerpos opuestos uno a otro inducen uno al otro, bajo ciertas circunstancias que deben ser especificadas por la fìsica experimental, aceleraciones contrarias en la direcciòn de la lìnea que los une (El principio de inercia està contenido en esto).

2.- Definiciòn. La razòn de masas de cualesquiera dos cuerpos es la razòn inversa negativa de sus aceleraciones mutuamente inducidas. Es decir, $m_1/m_2 = -a_2/a_1$.

3.- Proposiciòn experimental. Las razones de masas de los cuerpos son independientes del caràcter de los estados fìsicos que condicionan sus aceleraciones mutuas producidas, sean estos estados elèctricos, magnèticos o los que sean; y permanecen las mismas independientemente de que se llegue mediata o inmediatamente a ellos.

4.- Proposiciòn experimental. Las aceleraciones que cualquier nùmero de cuerpos A, B, C, ... induce en un cuerpo K son independientes unas de otras. (El principio del paralelogramo de fuerzas se sigue inmediatamente de esto).

5.- Definiciòn. La fuerza motriz es el producto del valor-masa del cuerpo por la aceleraciòn inducida en tal cuerpo.

Como puede verse, toda relaciòn causal ha sido desterrada de la mecànica machiana. Como èl mismo afirma, la causalidad es sustituida por una funciòn. La primera ley desaparece, la segunda se convierte en una definiciòn, y la tercera sobrevive, pero modificada. Su ultrarrelativismo le lleva a borra la distinciòn entre marcos de referencia inerciales y no inerciales. Todas las demàs definiciones, dice Mach, tales como ìmpetu o energìa, son derivables de las anteriores. Mach argumentaba que sus principios eran una base sòlida para toda la mecànica. Y sin embargo, desde el punto de vista epistemològico, Mach habìa destruido la mecànica clàsica. La masa no es màs que una relaciòn numèrica; la fuerza, una definiciòn. Para el positivismo empirista, la materia, el espacio y el tiempo desaparecen como categorìa ontològica; la realidad no es màs que la percepciòn. Mach afirmaba: "el mundo no està hecho màs que de mis percepciones", siguiendo en esto a Hume, que a su vez repetìa a Occam. Tambièn en su negaciòn de la causalidad se encuentran rastros del agnòstico inglès: "No hay causa ni efecto en la Naturaleza. La Naturaleza no tiene sino una existencia individual; la Naturaleza simplemente es. Estamos de parte de Hume; No existe por ejemplo una necesidad fìsica distinta de la necesidad lògica" (19). Esta nueva interpretaciòn, que cobrarìa fuerza a finales del siglo XIX, es la negaciòn del racionalismo mecànico newtoniano: la realidad ha desaparecido.

La polèmica sobre los principios de la mecànica fue cortada de cuajo por el advenimiento de la relatividad y la mecànica cuàntica: problemas màs acuciantes asaltaron a los filòsofos de la ciencia. Sin embargo, en fecha tan tardìa como 1957, Leonard Eisenbud proponìa una reformulaciòn de las leyes de Newton, basadas en lìneas generales en los argumentos machianos, pero con especial atenciòn a los marcos de referencia inerciales. Enunciaremos aquì, sin la argumentaciòn correspondiente, las leyes de Eisenbud (20):

A. Es posible encontrar un sistema de referencia tal que los movimientos sean repetibles.

B. La aceleraciòn de una partìcula puede ser correlacionada con propiedades observables del medio ambiente y la partìcula junto con la posiciòn, la velocidad y el tiempo relativos al sistema de referencia escogido.

B1. Existe un conjunto de sistemas de referencia, los sistemas de referencia newtonianos, en los que las aceleraciones pueden ser expresadas como funciones de propiedades intrìnsecas al sistema.

C. Nùmeros fijos de masa pueden ser asociados con los elementos materiales del sistema, de manera que las razones totales de cambio del momento lineal y el momento angular sean iguales, respectivamente, a las funciones de fuerza impresa y de torca.

Terminemos aquì esta breve digresiòn sobre los principios de la mecànica newtoniana: su època està aùn en el futuro de nuestra historia; tendremos la oportunidad de volver a ella. Baste decir que los principios de la teorìa newtoniana entraron en crisis antes incluso que la propia mecànica clàsica. La argumentaciòn contra tales principios era fundamentalmente filosòsofica, y los principios propuestos como alternativa no son, a nuestro juicio, adecuados. Sin embargo, la mecànica sufrirìa otras transformaciones de principios antes de que Mach y los positivistas atacaran los postulados newtonianos. La motivaciòn filosòfica de estos ataques era radicalmente distinta.

NOTAS AL CAPITULO VI

1) Keynes, 'Newton, el hombre', p. 1.
2) Newton, citado por Keynes, loc. cit.
3) Newton, 'Principia', p. 5.
4) Cohen, 'La Historia y el Filòsofo de la Ciencia', en 'La Estructura de las Revoluciones Cientificas', p. 369.
5) Newton, loc. cit., p. 13.
6) ibid., p. 13.
7) Cohen, loc. cit., p. 369 ss.
8) Newton, loc. cit., p. 13.
9) Laplace, 'Essai Philosophique sur les Probabilitès', citado por Bitsakis, 'Fisica Contemporànea y Materialismo Dialèctico', p. 150.
10) Holton, 'La Imaginaciòn Cientifica', p. 20 ss.
11) ibid., p. 21.
12) ibid., p. 22.
13) Berkeley, citado por Xirau, 'Introducciòn a la Historia de la Filosofia', p. 235.
14) Berkeley, 'The Analyst', citado por Boyer, 'A History of Mathematics', p. 470.
15) Hume, 'Investigaciòn acerca del Entendimiento Humano', citado por Xirau, loc. cit., p. 242.
16) ibid, p. 242.
17) Todas las criticas de Mach estàn tomadas de 'The Principles of Mechanics', especialmente de la pàgina 271 hasta la 305.
18) Mach, loc. cit., p. 303 ss.
19) Mach, citado por Bitsakis, loc. cit.
20) Eisenbud, 'On the Classical Laws of Motion'.

VII. EN BUSCA DE OTRO CAMINO

Dios es sutil, pero no malicioso.
Einstein

1.- Los Trabajos de Huygens

Voltaire, a quien dejamos observando el sepelio de Newton en Westminster a principio del capìtulo pasado, fue el principal responsable de la divulgaciòn de las obras newtonianas en el continente. En el siglo XVIII, la ciencia europea estaba ferozmente dividida por paìses: los franceses defendìan a Descartes, los alemanes a Leibniz y los ingleses a Newton. Los alemanes tardaron cincuenta años en aceptar a Lavoisier, pues la teorìa del flogisto era alemana. Claro que habìa matices; el propio Voltaire es un ejemplo. Descartes fue gradualmente abandonado, vista la incapacidad absoluta de su fìsica de vòrtices para producir resultados positivos. Sin embargo, la crìtica a las ideas del càlculo de Newton y la infausta polèmica sobre su paternidad hicieron a los ingleses aislarse de la matemàtica continental, en una reacciòn tìpicamente britànica: el mismo espìritu insular que los llevò a negarse rotundamente a adoptar el sistema mètrico decimal, a conducir por la izquierda y a beber cerveza tibià.

Mientras los ingleses seguìan empeñados con sus fluxiones, la formulaciòn geomètrica de la mecànica newtoniana fue abandonada en beneficio de una formulaciòn analìtica, es decir, algebraica. El siglo XVIII muestra una definitiva tendencia a alejarse de la geometrizaciòn, que habìa dominado las exposiciones matemàticas por màs de dos milenios.

Pero al mismo tiempo, en Europa continental se investigaba una formulaciòn alternativa de la mecànica, basada en los trabajos de Huygens, Leibniz y Bernoulli. La formulaciòn de la que hablamos està basada en los llamados principios variacionales. La mecànica newtoniana, como hemos visto, requiere reconocer todas las fuerzas que actùan sobre un cuerpo, combinàndolas en una resultante; estas fuerzas incluyen aquèllas que mantienen una relaciòn definida entre las coordenadas del sistema; por ejemplo, la fuerza normal en un plano inclinado, que impide que el cuerpo se mueva màs que sobre el plano. Por otro lado, la mecànica newtoniana aìsla y considera a cada partìcula individualmente. En cambio, la mecànica analìtica, como se ha dado en llamar a la formulaciòn alternativa, considera un sistema como un todo; maneja todas las fuerzas como una sola funciòn escalar, la energìa potencial, y hace abstracciòn de las fuerzas que constriñen al sistema, como la fuerza normal antes citada. Por otro lado, las ecuaciones de movimiento son extraìdas de un sòlo principio general, que es independiente de un sistema de coordenadas particular, lo que permite ajustar las coordenadas de manera idònea para cada problema.

La motivaciòn de esta formulaciòn era filosòsofica, como veremos enseguida. Sin embargo, su historia viene de atràs, y es necesario atrasar un poco el reloj.

El primer principio variacional de la mecànica pertenece al campo de la estàtica: es el principio de trabajo virtual. Como ya hemos dicho al hablar de Aristòteles, Lanczos piensa que el principio era ya conocido por el Estagirita, que lo aplicò a la ley de la palanca; a reserva de que esto sea cierto, el principio ya se haya en germen en los trabajos de Stevinus y Galileo.

Stevinus estudiò las màquinas simples, sobre todo el plano inclinado y las poleas. Su trabajo sobre el plano inclinado le impresionò de tal manera que lo grabò en su escudo de armas. Stevinus concibiò un prisma triangular con una cadena alrededor. Partiendo de que la cadena no podìa moverse, ya que si lo hiciera su movimiento serìa perpetuo, Stevinus removiò imaginariamente la parte inferior, simètrica, de la cadena (ADC en la figura 7.1), y concluyò que AB balancea a BC, por lo que en un plano inclinado de alturas iguales, pesos iguales actùan en la proporciòn inversa de las longitudes de los planos. Recordemos que ya Arquìmedes habìa estudiado la ley de la palanca; en ambos casos, palanca y plano, parecìa haber una relaciòn entre distancias y pesos.

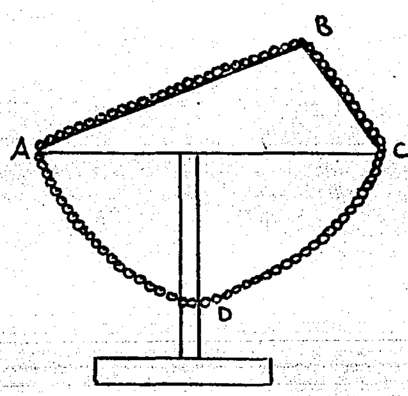

Figura 7.1

Su trabajo sobre poleas avanzò estas ideas: observò que en una polea simple, si se hace descender un peso P una distancia h, el contrapeso P sube tambièn una distancia h; en un sistema de dos poleas el contrapeso P/2 asciende 2h, y asì sucesivamente: el producto de los pesos por los desplazamientos es igual en todos los casos.

Galileo, recordemos el fragmento citado <<supra>> del Diàlogo, dice que una esfera que se translada sobre un plano horizontal no tiene la capacidad de "subir ni bajar pesos". La misma idea se encuentra en su tratamiento del plano inclinado. Tomando como plano inclinado un triàngulo rectàngulo donde la altura BC es la mitad de la longitud del plano AB, por la ley encontrada por Stevinus un peso Q sobre el plano es balanceado por un peso $P = Q/2$, actuando sobre la altura del plano. Si la màquina se pone en movimiento, y P desciende una distancia h, Q ascenderà la misma distancia h sobre el plano. Galileo observa, sin embargo, que Q asciende verticalmente h/2: el producto de peso por desplazamiento es igual para ambos pesos. Torricelli llega al mismo resultado empleando centros de gravedad: postula que el centro de gravedad de un sistema de graves no puede descender. El principio està claro: en lugar de fijarse en los momentos estàticos o torcas, el ènfasis es puesto en el producto del peso por el desplazamiento, es decir, en el trabajo realizado: una màquina no puede ahorrar trabajo. Reconozcamos ademàs que los desplazamientos deben ser compatibles con las constricciones de la màquina, y hagamos infinitesimales los desplazamientos, y tendremos el principio de trabajo virtual. Pero esto no serìa llevado a cabo sino hasta 1717, treinta años despuès de la publicaciòn de los Principia, por Jean Bernoulli.

Sin embargo, estamos todavìa en la època de Newton; hemos de pasar revista, antes de hablar de Bernoulli y D'Alambert, a las contribuciones de Huygens y Leibniz.

Huygens, ya lo hemos dicho, habìa estudiado el movimiento de diversos tipos de pèndulos. Desde luego, el pèndulo simple habìa sido ya estudiado por Galileo, y su isocronìa aproximada para pequeñas oscilaciones establecida. Pero Huygens no querìa isocronìa aproximada: intentaba descubrir la curva verdaderamente isòcrona; èsta resultò ser la cicloide. El pèndulo de Huygens oscilaba entre dos quijadas cicloidales, lo que lo hacìa perfectamente isòcrono. Aunque esto no tuvo en la realidad una connsecuencia pràctica (los relojeros se conformaron con la cuasi-isocronìa circular), el estudio de la cicloide permitiò a Huygens establecer la teorìa de las evolutas, y el importante descubrimiento del centro instantàneo de curvatura. La evoluta de una cicloide es otra cicloide: este resultado le permitiò a Huygens rectificar la cicloide, y abrir la puerta a la rectificaciòn de otras curvas mediante el mètodo de evolutas. Por otro lado, Huygens introdujo el concepto de momento de inercia. Esto le permitiò estudiar el pèndulo fìsico, y abriò el camino al anàlisis de cualquier movimiento circular. Es de hacer notar que Huygens, al no poseer el concepto de masa, empleaba en su lugar el del peso; por ello, su definiciòn de momento de inercia, mr , no es la contemporànea. Aùn màs, como hemos dicho, Huygens encontrò la ley de la fuerza -o la aceleraciòn, si se prefiere- centrìpeta, y descubriò la relaciòn que existe entre un pèndulo simple y el movimiento circular.

Pero el trabajo que màs nos interesa de Huygens fue su determinaciòn del movimiento del pèndulo compuesto, problema que ya Mersenne habìa planteado a Descartes, y que èste habìa sido incapaz de resolver. Un pèndulo compuesto se alejaba radicalmente del tipo de problemas estudiados hasta ese momento: en efecto, implicaba el anàlisis de varios cuerpos interactuando entre sì, mientras que la fìsica galileana era una fìsica de un sòlo cuerpo. El pèndulo compuesto lineal, un caso particular del pèndulo físico, consta de varias masas unidas por hilos sin masa. El conjunto se hace oscilar alrededor de un eje. Si se considera cada masa por separado, como pèndulo simple, pero respetando su distancia al eje, es evidente que las oscilaciones seràn màs ràpidas entre menor sea la longitud del hilo; entonces, en el pèndulo compuesto, debe existir un pèndulo simple intermedio entre el màs pequeño y el màs grande, que tenga el mismo periodo que el propio pèndulo compuesto.

Huygens postulò un principio trascendental: como quiera que sea la interacciòn entre las masas, es imposible que el centro de gravedad del conjunto se eleve màs allà del punto del que originalmente cayò. Esto es independiente de que las masas estèn conectadas o no, es decir, si tomamos el pèndulo compuesto o un conjunto de pèndulos simples.

A partir de esto Huygens considera un pèndulo compuesto (figura 7.2) soltado en la posiciòn OA. Con seguridad, el pèndulo oscilarà hasta OA', donde A'B = AB. Sin en OB se perdieran las conexiones entre las masas, obteniendo sendos pèndulos simples, los pèndulos màs largos llegarían màs arriba que OA', los màs cortos no alcanzarían OA', pero el centro de gravedad estaría exactamente en OA'. Finalmente, nòtese que las velocidades son proporcionales a la longitud del radio; de aquí que si una es determinada, todas las demàs lo seràn, y el ascenso del centro de gravedad serà dado. De igual manera, dado este ùltimo es posible encontrar todas las velocidades.

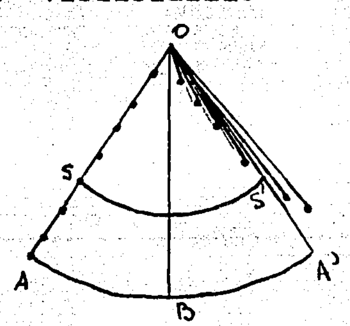

Figura 7.2

Habida cuenta de estas consideraciones, tòmese una longitud arbitraria l. Esta caerà desde el punto inicial hasta el punto de equilibrio una altura k. Las masas en r, r', r'', ..., caeràn una distancia kr, kr', kr'', ..., y la distancia de descenso del centro de gravedad serà:

$$\frac{mrk + m'r'k + m''r''k + \dots}{m + m' + m'' + \dots} = k\,\frac{\sum mr}{\sum m}$$

El punto a la distancia l adquirirá, al pasar por la posición de equilibrio, una velocidad v. La altura de su ascenso, después de cortar las conexiones, será $v^2/2g$. Las alturas correspondientes de ascenso de las demás particulas serán $(rv)^2/2g$, $(r'v)^2/2g$, $(r''v)^2/2g$,... La altura del ascenso del centro de gravedad de las masas liberadas será

$$\frac{m\frac{(rv)^2}{2g}+m'\frac{(r'v)^2}{2g}+m''\frac{(r''v)^2}{2g}+\cdots}{m+m'+m''+\cdots}=\frac{v^2}{2g}\frac{\sum mr^2}{\sum m}$$

Del principio enunciado por Huygens,

$$k\frac{\sum mr}{\sum m}=\frac{v^2}{2g}\frac{\sum mr^2}{\sum m} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (7.1)$$

El pèndulo simple de igual periodo tendrá una longitud y. Reduciendo 7.1 al caso de un pèndulo simple,

$$\frac{(vy)^2}{2g}=ky \quad \text{ó} \quad y\cdot\frac{v^2}{2g}=k$$

Finalmente, sustituyendo la ecuación anterior en 7.1,

$$y=\frac{\sum mr^2}{\sum mr}$$

de donde

$$v=\sqrt{2gk}\sqrt{\frac{\sum mr}{\sum mr^2}}$$

Es decir, la velocidad està determinada por la altura.

Reconocemos en el principio de Huygens una identidad con el principio de conservaciòn de la <<vis viva>>; en efecto, aquèl iguala la altura de ascenso con la de descenso, por lo que

$$\sum mgh = \sum \frac{mv^2}{2}$$

La otra gran contribuciòn de Huygens fue su trabajo sobre las colisiones. Este fue entregado a la Royal Society a principio de 1669, por invitaciòn de la misma. Con meses de diferencia, Wallis y Wren habian enviado sus respectivos trabajos. Finalmente, Mariotte desarrollò posteriormente estas ideas en un tratado completo. Newton cita los cuatro trabajos en los Principia, haciendo ènfasis en los experimentos de Wren. El problema que habia escapado a Descartes estaba finalmente resuelto. Wallis asignaba al producto peso por velocidad, el momentum, el ser el factor decisivo en el impacto; si dos cuerpos completamente inelàsticos con iguales momenta chocaban, ambos quedaban en reposo; si los momenta eran distintos, la diferencia entre ellos seria el momentum relativo despuès del impacto. Este momentum dividido entre la suma de masas nos daria la velocidad despuès del impacto. En pocas palabras, u = (mv + m'v')/(m + m'), donde m y m' son las masas de los cuerpos que chocan, v y v' sus velocidades respectivas antes del impacto, y u la velocidad relativa posterior al impacto. Recuèrdese sin embargo que Wallis no conocia el concepto de masa, y asignaba en su lugar el peso (<<pondus>>). Esto es vàlido para todos los otros investigadores, Wren, Huygens e incluso Leibniz. Por lo tanto, en lo que sigue hablaremos de pesos, en el entendido de que modernamente donde dice peso deberia decir masa.

El trabajo de Huygens parte de cinco postulados: la ley de la inercia; que dos cuerpos elàsticos de igual peso chocando con velocidades iguales y opuestas se separan despuès del impacto con las mismas velocidades; que todas las velocidades deben estimarse relativamente; que un cuerpo mayor que choca con uno menor en reposo le imparte una velocidad a èste, perdiendo una parte de la suya; que cuando uno de los cuerpos conserva su velocidad, lo propio ocurre al otro.

Huygens, partiendo del segundo principio, imagina que ambos cuerpos de igual peso y elšticos estàn en una barca movièndose a velocidad v. Los dos cuerpos se dirigen uno hacia el otra tambièn a velocidad v, desde el punto de vista de un observador en la barca; èste ve cumplirse el segundo postulado tal cual; sin embargo, un observador en la orilla ve un cuerpo en reposo y el otro movièndose a velocidad 2v, y despuès del impacto ve al primero moviéndose a 2v y al segundo en reposo; de aquí concluye Huygens que pesos elàsticos iguales intercambian velocidades.

Generalizando su argumento a velocidades distintas y pesos tambièn distintos, Huygens imagina un cuerpo con peso m con una velocidad v que choca con uno de peso mayor M en reposo. Aquèl le imparte a èste una velocidad indeterminada w. Volviendo a la barca, si èsta se mueve con una velocidad w/2 de M hacia m, las velocidades iniciales desde la orilla son v - w/2 y -w/2 para m y M, respectivamente, y las velocidades finales son -(v - w/2) y w/2, suponiendo que los cuerpos sean elàsticos. En otras palabras, la velocidad relativa inicial de acercamiento antes del impacto es igual a la velocidad relativa de separaciòn despuès del impacto.

Desde luego, esto no es otra cosa que el principio de conservaciòn del momento lineal en el caso de colisiones. La mecànica newtoniana seria capaz de resolver todo el problema de colisiones, y de extender el principio de conservaciòn del momento lineal a todo caso imaginable. Si los cuerpos son inelàsticos, el momento lineal sigue conservàndose; Descartes, que no concebìa los signos del momento lineal, y que creìa que el momento lineal de un cuerpo era disminuido en la misma proporciòn en la que el del otro era aumentado, no pudo nunca llegar a la verdadera ley de las colisiones; su introducciòn de la cantidad de reposo viciaba todo su argumento.

Hemos dicho que la mecànica newtoniana, dieciocho años despuès que Huygens, Wren y Wallis, habìa podido explicar todos los problemas de las colisiones. Con una salvedad: la distinciòn entre cuerpos elàsticos e inelàsticos. En el enfoque de fuerzas newtoniano, es necesario añadir un elemento a la discusiòn, para poder distinguir entre cuerpos elàsticos e inelàsticos: la fuerza de restituciòn, que depende de la deformaciòn del cuerpo. En el momento de la colisiòn de dos cuerpos, M y m, con velocidades distintas C y c respectivamente, fuerzas en los dos cuerpos tienden a igualar las velocidades: la deformaciòn producida no cesa hasta que las velocidades sean igualadas. En el instante que esto ocurre, el momento total del centro de masa permanece sin cambio, por lo que

$$u = \frac{MC + mc}{M + m}$$

es la velocidad comùn igualada. Consecuentemente, hasta este momento, M ha experimentado un descenso de velocidad C - u, y m un aumento u - c. Pero si los cuerpos son perfectamente elàsticos, las mismas fuerzas que producen la deformaciòn volveràn a actuar para restituir la forma, en igual tiempo y espacio, sòlo que en el sentido contrario. Consecuentemente, M sufre otro descenso C - u, y m otro aumento u - c. De lo que las velocidades finales son $V = 2u - C$ y $v = 2u - c$. Sustituyendo u por su expresiòn, llegamos finalmente a que

$$MV^2 + mv^2 = MC^2 + mc^2$$

que es desde luego la ley de conservaciòn de la energìa cinètica.

El principio de conservaciòn de la energìa cinètica, o <<vis viva>>, como era llamada por Huygens, fue enunciado por èste para el caso de una colisiòn elàstica, de una manera directa, es decir, sin recurso a las fuerzas de restituciòn. Huygens no parece haberse dado cuenta de la identidad de este principio con el que habìa obtenido para el caso del pèndulo; sus formas, como hemos visto, eran distintas. Sin embargo el trabajo de Huygens abrìa el camino para una formulaciòn distinta de las leyes de la dinàmica, no basada en fuerzas, sino en el concepto de energìa.

2.- El Dios de la Razòn

El Minotauro yace muerto a los pies de Teseo; la broncìnea espada, cumplida su misiòn, pende inùtil del brazo de su dueño. Salir del laberinto, elegir entre la infinidad de pasadizos idènticos, desentrañar la geometrìa oscura de las encrucijadas bajo el cielo de Creta no està ya en la mano armada de Teseo. Pero en la otra, lleva un fino ovillo, un hilo casi invisible que se extiende detràs de èl, por inumerables recodos, hasta la entrada. He aquì el regalo que Ariadna obtuvo del arquitecto.

Encontrar el hilo de Ariadna, el mètodo infalible para salir de cualquier laberinto, el lenguaje universal que guiase al pensamiento a razonamientos correctos: èsa fue una de las motivaciones principales de la vida de Leibniz.

Nacido en Leipzig en 1646, pasado ya el Renacimiento, Gottfried Wilhelm Leibniz tuvo una formaciòn tan completa como requerìa el ideal renacentista. Sus intereses le llevaron a explorar todas las ramas del conocimiento de la època: jurisprudencia, teologìa, fìsica, historia, geologìa, y desde luego, filosofìa y matemàticas. Leibniz tuvo una vida tranquila, aunque en ocasiones se vio envuelto en los problemas polìticos de la època, en su calidad de consejero de la casa de Hannover, y viajò por todo el mundo civilizado de su tiempo. A diferencia de los filòsofos del siglo XVII, trabajò casi toda su vida para la realeza, donde se revelò como un gran diplomàtico y estadista, ayudando a su protector, el elector de Hannover, a ocupar el trono de Inglaterra.

Leibniz es digno hijo de la Edad de la Razòn: convencido de la capacidad de èsta para resolver todos los problemas que se le plantearan, empeñado en descubrir el mètodo del raciocinio infalible, de sujetar todo a las reglas de la lògica. Para Leibniz, el mundo es racional y susceptible de ser explicado, producto de la voluntad de un Dios benèvolo que eligiò para nosotros "el mejor de los mundos posibles".

La preocupaciòn de Leibniz por el lenguaje como mètodo se debe en parte a la potencia que habian demostrado los mètodos que en aquel tiempo eran relativamente recientes, el Algebra de Vieta y sobretodo, la Geometria de Descartes. Estos nuevos lenguajes, aplicados a viejos problemas, pareciànle a Leibniz los primeros pasos del camino que èl habìa trazado. Pero a su vez, el interès de Leibniz por un lenguaje universal lo llevò irremediablemente al terreno de la lògica. Primero Leibniz concibiò la idea de crear un alfabeto de conceptos primitivos, que se obtendrian al descomponer todos los conceptos humanos en sus componentes màs simples y que se combinarian casi automàticamente para generar conceptos complejos. En su primera teorìa estos conceptos primitivos tenian asociados un nùmero primo, y todo concepto complejo se expresarìa como producto de primos. Es curioso señalar que esta idea fue llevada a tèrmino por Kurt Gödel en el campo de la teorìa de los nùmeros, expresando los axiomas como primos y los teoremas como nùmeros no primos, compuestos por aquèllos de una manera unìvoca. En una segunda aproximaciòn Leibniz introduce una notaciòn simbòlica para expresar operaciones lògicas elementales de una manera algebraica: asì, AB indica la conjunciòn de dos conceptos y A + B la disyunciòn. Mediante esta notaciòn, enuncia la ley de idempotencia (A = AA) y hace observaciones como "si A = AB entonces A implica B". Leibniz es pues el originador de la lògica simbòlica, predecesor de Boole y de Morgan. Sin embargo, su lògica es una callejòn sin salida: està encerrada en la deficiencia de la lògica de proposiciones categòricas aristotèlica.

Desde luego, Leibniz pretendìa aplicar su lenguaje universal a todos los conceptos humanos, no sòlo a los de las matemàticas, pero era este campo, lògicamente, el màs susceptible de formalizaciòn y fue aquì donde Leibniz pudo cosechar algunos èxitos derivados de su mètodo. Por otro lado, las condiciones de las matemàticas en el siglo XVIII no estaban aùn dadas para el proceso de formalizaciòn, de aquì que los intentos de Leibniz fueran ràpidamente olvidados y no fueran rescatados sino hasta principios del siglo XX, cuando su sueño, al menos en el campo de las matemàticas, parecìa haberse realizado. Leibniz fue considerado entonces como una especie de abuelo del logicismo: Frege, y sobre todo Rusell, le dedicaron su atenciòn y admiraciòn.

En todo caso, no fue Leibniz el ùnico en manifestar su optimismo racionalista; desde Descartes hasta John Stuart Mill, los esfuerzos por descubrir el mètodo que llevarìa al conocimiento ocuparon a los filòsofos y matemàticos; sin embargo, en pocos pensadores se unen el quehacer matemàtico y la filosofìa con tanta fuerza y armonìa.

Visto en retrospectiva, el mayor èxito cosechado por Leibniz con su hilo de Ariadna, el lenguaje del Càlculo Infinitesimal, es sencillamente asombroso. Pocas veces en la historia de las matemàticas se ha manifestado tal comuniòn entre concepto y lenguaje, contenido y continente.

Leibniz postula los diferenciales como una diferencia de tèrminos consecutivos de ordenadas, cantidades infinitesimales: menores que cualquier cantidad finita pero distintas de cero. El cociente de dos infinitesimales es generalmente una cantidad finita y, si los diferenciales son estas cantidades, indicados por una letra d, las integrales no son otra cosa que las sumas de un nùmero infinito de diferenciales, que generalmente suelen ser finitas. Leibniz introdujo la notaciòn actual para estas sumas, una s estilizada.

¡Què natural e intuitivo resulta entonces el teorema fundamental del Càlculo! Sumas y diferencias son operaciones reciprocas. Pero la notaciòn de Leibniz va màs allà; compàrese la Regla de la Cadena escrita en la notaciòn desarrollada posteriormente por Lagrange:

Sea $z = g(y)$ y $y = f(x)$

entonces $(g \circ f)'(z) = g'(f(x))f'(x)$

en notaciòn de Lagrange. Por el contrario, la Regla de la Cadena se expresa mediante

$$\frac{dz}{dx} = \frac{dz}{dy}\,\frac{dy}{dz}$$

en notaciòn de Leibniz.

En esta ùltima, si "cancelamos" los dy's del lado derecho, obtenemos la expresiòn de la izquierda. El resultado parece saltar a la vista: el lenguaje obliga casi a la conclusiòn. Leibniz envolviò toda su obra de esta simple y callada belleza, como su Dios y el mundo que concibiò, llena de armonìa y racionalidad.

Toda la filosofìa de Leibniz gira alrededor de la lògica: es un sistema deductivo, que parte de principios fundamentales. Al decir de Ortega y Gasset, los principios de Leibniz son los siguientes (1):

1.- Principio de los principios (evidentemente).
2.- Principio de identidad
3.- Principio de no contradicciòn
4.- Principio de la razòn suficiente
5.- Principio de uniformidad
6.- Principio de diferenciaciòn o de identidad de indiscernibles
7.- Principio de continuidad
8.- Principio de lo mejor o de la conveniencia
9.- Principio del equilibrio o ley de la justicia
10.- Principio del mìnimo esfuerzo o de las formas òptimas.

Como apunta Ortega, sòlo los principios 2 y 3 habìan sido enunciados con anterioridad; el principio de los principios es la convicción de que toda la filosofía puede basarse completamente en principios.

Por otra parte, su aceptación de las proposiciones categóricas a la manera de Aristóteles tendría profunda influencia en su teoría de la sustancia y en sus conceptos de tiempo y espacio. Leibniz sólo aceptaba como válidas lógicamente las proposiciones de la forma sujeto-predicado; el sujeto había de ser un ente, y el predicado un accidente de ese ente. Leibniz pensaba que toda proposición podía expresarse en ultimadas cuentas en forma categórica, es decir, como sujeto-predicado; las proposiciones matemáticas como la razón entre dos segmentos, sin especificar sujeto y objeto, podían reformularse utilizando uno de los segmentos como sujeto, y el otro como predicado: en lugar de decir la razón entre L y M, se diría: la razón de L a M, o de M a L. La diferencia, aunque parece baladí, tiene su miga; en la primera forma ni L ni M son el sujeto; en la segunda, existe un sujeto y un predicado. Como dice Russell, toda filosofía que emplea la noción de sustancia, y la de Leibniz lo hacía, distingue entre sujeto y predicado, entre sustancia y accidente. Los juicios relativos, es decir, aquéllos que no tienen forma categórica, eran aceptados por Leibniz; pero sólo como ayudas mentales, como algo "meramente ideal, que, sin embargo, resulta útil" (2).

Leibniz establecería la distinción entre lo que luego Kant llamaría juicios sintéticos y analíticos: los primeros no contienen al sujeto en el predicado, mientras que los segundos sí lo contienen. Por ejemplo, "un triángulo rectángulo es un triángulo" es un caso trivial de juicio analítico, mientras que "Juan es delgado" es un juicio sintético. Leibniz no empleaba estos términos: para él, todos los juicios analíticos eran necesariamente verdaderos, mientras que los sintéticos eran contingentes; por lo tanto, usaba respectivamente las palabras necesario y contingente. Sin embargo, a partir de Kant, que postuló la existencia de juicios sintéticos necesarios, es imprescindible cambiar el vocabulario.

Para Leibniz, toda proposición que implicara la afirmación de una existencia -salvo la de Dios, que es necesaria- es contingente; los juicios sintéticos sólo son verdaderos en tanto ocurren en el mundo: decir que Juan es delgado es una afirmación que puede ser cierta o falsa, según la verdadera constitución de Juan; aún más, los juicios sintéticos ocurren en el tiempo; es posible que Juan sea delgado ahora, pero que engorde después. En suma, los juicios sintéticos son contingentes porque tanto su afirmación como su negación son posibles, si bien sólo una de ellas corresponde a la realidad en un momento determinado. En cambio, los juicios analíticos son verdaderos siempre: su negación es siempre falsa.

Desde luego, los juicios analíticos parecen tautologías; si el predicado está contenido en el sujeto, la validez del juicio se sigue tautológicamente: $A \wedge B \Rightarrow A$. Sin embargo, la situación no era tan fàcil para Leibniz. Los sujetos de los juicios analìticos eran ideas complejas, que aunque contenìan su predicado, no lo hacìan de manera obvia. El anàlisis consistirìa entonces en reducir al sujeto, la idea compleja, a sus constituyentes màs simples. Desde luego, este proceso debìa tener un fin, y Leibniz se ve obligado a postular la existencia de ideas simples, que no son reducibles mediante juicios analìticos. Se puede argumentar que aùn asì los juicios analìticos son tautològicos, en tanto que no afirman nada nuevo sobre el sujeto. Es verdad, y en esto basò Kant su argumentaciòn contra Leibniz: la teorìa de las proposiciones analìticas, <<per se>>, no podìa ser la base de la filosofìa; como demuestra Russell, aùn en Leibniz hay, disfrazadas, proposiciones sintèticas en donde èl sòlo creìa ver analìticas (3). Pero volvamos a Leibniz. Como puede observarse, las proposiciones sintèticas se refieren siempre a individuos, mientras que las analìticas son genèricas. Leibniz consideraba que la matemàtica era completamente analìtica, mientras que las ciencias causales son sintèticas. Asì, en la aritmètica, 3 es definido como 2 + 1; el nùmero 3 contiene al predicado, y el juicio es verdadero, y no puede ser falso. Por el contrario, las leyes de la fìsica son contingentes, y en otros mundos concebibles podrìan ser distintas.

Pero evidentemente existen juicios analìticos falsos, como por ejemplo "un cuadrado redondo tiene sus lados iguales". Còmo distinguir entre los juicios analìticos verdaderos y aquèllos que no lo son? La afirmaciòn anterior da la respuesta: los ùnicos juicios analìticos vàlidos son aquèllos que no son contradictorios. Sobre la ley de la no contradicciòn erigirìa Leibniz toda su teorìa de juicios analìticos: sòlo lo que es no contradictorio es posible: 3 = 2 + 1 puede probarse como posible; 4 = 2 + 1 no. Entonces, el conjunto de proposiciones analìticas o, como dirìa Leibniz, necesarias, està restringido a aquèllas que son posibles, es decir, no autocontradictorias. Por otra parte, Leibniz establece una distinciòn fundamental entre esencia como posibilidad y existencia como actualidad, afirmando que la existencia no es implicada por la esencia, y rebatiendo asì el viejo argumento ontològico de la existencia de Dios, que habìa sido empleado desde San Anselmo hasta Descartes. Como las proposiciones analìticas no afirman la existencia de su sujeto, todas ellas deben ponerse en forma hipotètica: si tal cosa, entonces tal otra.

Por otro lado las proposiciones contingentes sì implican la existencia de su sujeto; la nociòn de individuo implica la posibilidad de existencia en un cierto tiempo, pero la existencia verdadera, aunque posible, es contingente: puede ocurrir o no. De esto se sigue que existen una infinidad de mundos posibles, en los cuales puede o no ocurrir realmente cada juicio sintètico, siempre que no sea autocontradictorio. No sòlo esto: la conexiòn entre dos predicados referidos al mismo sujeto en dos instantes distintos de tiempo tambièn es contingente: puede no ocurrir realmente. Un sujeto contingente queda definido por sus predicados: si èstos cambian, el sujeto no serà el mismo. Pero, còmo y por què, de todos las contingencias posibles, ocurren solamente las que existen en el mundo real? Aquì Leibniz introduce su otro principio fundamental: el principio de razòn suficiente.

Para Leibniz tiene que ser posible determinar por què algo existe o no: hay una razòn de que las cosas existan, y de que existan de cierta manera, y no de otra. Aùn Dios debe tener una razòn para actuar de tal o cual manera: esa razòn es la bùsqueda del bien, de algo mejor. Asì, para Leibniz el mundo real es el mejor de los mundos posibles, y todo tiende a mejorar. El cambio no tiene otro objetivo que èste. Hènos aquì, finalmente, en el quid de la cuestiòn: la teleologìa aristotèlica, descartada por Descartes -valga-, vuelve por sus fueros: las causas, las razones suficientes de Leibniz, son causas finales: la causa es un deseo hacia el efecto. Si soy un ente dotado de libre albedrìo, soy yo quien busca el efecto; en el caso de los entes inanimados, es Dios, a travès de las leyes que ha creado. Las conexiones causales son sintèticas: el mundo actual no existe necesariamente, y las causas no producen sus efectos de manera necesaria. Hume habìa negado la causalidad por contingente; Kant, tiempo despuès de Leibniz, se vio obligado a reconocer lo sintètico como necesario, para no negar la causalidad. La posiciòn de Leibniz era intermedia: la conexiòn causal es invariable, mas no necesaria. El mundo podìa portarse de otra manera, y si no lo hace, es por el principio de la razòn suficiente. Eso sì, la causalidad como ley es necesaria, pues es implicada por la razòn suficiente. Son las conexiones causales particulares las que son contingentes. Dios creò al mundo por un acto de su voluntad: sus buenas acciones no son necesarias. Esta ùltima doctrina iba claramente dirigida contra Spinoza, que habìa afirmado la necesidad de todas las acciones de Dios, y de ahì el determinismo completo del mundo, y la negaciòn del libre albedrìo. En todo caso, el principio de razòn suficiente leibniziano implica una distinciòn cualitativa respecto del principio de causalidad: èste afirma lo que va a suceder, aquèl el por què esto sucede. El principio no es tan extraño a nuestro pensamiento como a primera vista parece: el equilibrio en una situaciòn completamente simètrica, tal como la imaginò Stevinus en el plano inclinado o Arquìmedes en su primer axioma de la palanca es una consecuencia de ese principio.

El concepto de sustancia de Leibniz era una respuesta a tres escuelas: Descartes, Spinoza y Locke. Recordemos que la sustancia cartesiana solo requerìa para su existencia de Dios; Spinoza habìa llevado esta idea a sus ùltimas consecuencias, afirmando que sòlo Dios era sustancia: el Dios de Spinoza, a diferencia del Dios nominalista, poseìa extensiòn, cosa que a Leibniz le causaba urticaria. Por otro lado, Locke habìa negado la realidad de la sustancia.

Para Leibniz la sustancia no es màs que el sujeto por excelencia en una proposiciòn, algo que no puede ser predicado, y que persiste a travès del cambio. De aquì, Leibniz niega la realidad del espacio: o es una sustancia, pues no es predicado de nada y persiste en el tiempo, o no tiene existencia real; Leibniz opta por la segunda alternativa. Esta, desde luego, era una de sus principales objeciones a la mecànica newtoniana: el concepto de espacio absoluto. Por otra parte, como ya hemos dicho, el sujeto queda definido por la suma de todos sus predicados, que cambian en el tiempo, mientras la sustancia-sujeto permanece invariable. Sin embargo, esa suma es invariable: si cambiara, el sujeto ya no serìa el mismo. Por lo tanto, aunque se sucede temporalmente, la suma de los predicados es eterna, està de alguna manera inscrita en el propio ser de cada sustancia individual: pasado, presente y futuro. Ahora bien, la sustancia està dotada de una actividad, que le es esencial: esa actividad es el agente del cambio, la causa del devenir. Leibniz identificarìa esta actividad con la fuerza dinàmica; pero volveremos a esto màs tarde.

El principio de continuidad y el de identidad de indiscernibles se relacionan directamente con la teorìa leibniziana de los juicios contingentes. El primero afirma que todas las sustancias creadas forman una serie en la que toda posiciòn posible intermedia està llenada; el segundo, que esta posiciòn ocurre una sola vez: "No hay dos sustancias completamente semejantes, que difieran sòlo en nùmero" (4). Todo sujeto tiene una infinidad de predicados. Esto no implica, como hemos visto, que todas las formas posibles existan actualmente; Leibniz concebìa la posible existencia de otros mundos, con otras leyes de movimiento. Sòlo la causalidad misma, el espacio y el tiempo son necesarios en cuanto a sus propiedades, es decir, en cuanto a la geometrìa y la cinemàtica.

Claramente, estos dos principios deben mucho a Leibniz el matemàtico, especialmente el Leibniz de los infinitèsimos; el espacio y el tiempo son un continuo, y en ellos se puede dar un continuo de predicados.

Los fundamentos de la dinàmica de Leibniz estaban en una consciente oposiciòn a Descartes. La dinàmica newtoniana llegò tarde para Leibniz: su pensamiento filosòfico estaba ya bien determinado para entonces, y si Newton ejerciò una influencia sobre èl, fue generalmente para negarlo. Asì, la dinàmica de Leibniz se alejaba tanto de Descartes como de Newton. Como hemos visto, Descartes afirmaba que la esencia de la materia era la extensiòn, a la vez que afirmaba que la fuerza, entendida como causa, era proporcional a la cantidad de movimiento. Leibniz, discìpulo de Huygens, estaba en posesiòn de las leyes correctas de la colisiòn; el caràcter vectorial de la cantidad de movimiento, que habìa escapado a Descartes, era evidente para èl. Toda su dinàmica tenìa en mente las leyes de Huygens. Sin embargo, no podìa aceptar que la fuerza en tanto que causa fuera proporcional a la cantidad de movimiento; por el contrario, afirmò que era proporcional a mv , la cantidad que Huygens habìa identificado con el nombre de <<vis viva>>. Esta era la verdadera medida de la fuerza para Leibniz, y cartesianos y leibnizianos sostuvieron furiosas polèmicas sobre este punto. Hoy en dìa la discusiòn parece baladì: ambos tenìan razòn. Los cartesianos integraban la fuerza inconscientemente respecto al tiempo, mientras que Leibniz integraba respecto al espacio.

No obstante, la polèmica era de la mayor trascendencia: se trataba de identificar cuàl cantidad era la verdadera medida de la interacciòn de un sistema con su medio ambiente. Leibniz postulaba la constancia de la <<vis viva>>, y èsta era para èl fundamental: su materia se comportaba de dos maneras, que èl llamaba materia primaria o prima y materia secundaria. La primera era pasiva, y la inercia estaba identificada con ella; la segunda era activa, con esa actividad que Leibniz adscribìa a toda sustancia, y la fuerza era su atributo. Asì como la masa se mantenìa constante (paradigma que los filòsofos mantenìan años antes que Lavoisier), la fuerza, la <<vis viva>>, tambièn debìa ser constante.

Pero, què hizo a Leibniz adoptar este punto de vista? Por què la <<vis viva>> y no la cantidad de movimiento? El quid està en la naturaleza vectorial de la cantidad de movimiento. Descartes habìa creìdo que èsta se conservaba escalarmente, postulando incluso la capacidad de cambiar de direcciòn por una acciòn de la mente sobre la materia; Leibniz era consciente de que la cantidad de movimiento no se conservaba como magnitud, sino, como èl decia, individualmente en cada direcciòn dada. Sin un àlgebra vectorial, que no existìa entonces, esto era demasiado complejo. Leibniz querìa un nùmero, una magnitud escalar que se conservara en cualquier sistema, independientemente de la direcciòn. Desde luego, el cuadrado de la velocidad hace abstracciòn tanto de la direcciòn como del sentido: èsa era la cantidad que Leibniz necesitaba.

Leibniz reconocìa que en ocasiones el producto mv podìa ser importante; pero no era la medida correcta de la fuerza. En las màquinas en equilibrio, las cargas son inversamente proporcionales a las velocidades de desplazamiento; a este fenòneno atribuìa Leibniz la adopciòn de mv como la verdadera medida de la fuerza; sin embargo, esto era accidental: la verdadera medida habìa que encontrarla en los trabajos de Huygens. A este respecto Leibniz hace la observaciòn de que un cuerpo se eleva a la misma altura de la que originalmente cayò. Si, por lo tanto, suponemos que la misma fuerza es necesaria para elevar un cuerpo de peso m a una altura 4h que para elevar un cuerpo de masa 4m a una altura h, notamos que la velocidad de descenso del primero es el doble que la del segundo: la fuerza es proporcional al cuadrado de la velocidad.

En otra parte Leibniz hacìa la misma deducciòn basàndola en el principio de que la causa debe ser igual al efecto, y haciendo notar de paso que sòlo su medida de la fuerza evitaba la posibilidad de un <<perpetuum mobile>>.

La cuestiòn de la constancia de la energìa era reconocida como un problema de causas y efectos: la <<vis viva>> serà constante siempre que no se aplique "trabajo". Leibniz no usò este ùltimo tèrmino, pero, como hemos visto, su discusiòn anterior y los trabajos de Huygens le hacìan ya tener un concepto claro del mismo.

Detengàmonos un momento en la terminologìa, que se està volviendo confusa. Leibniz usaba el tèrmino <<vis>>, que normalmente es traducido por fuerza. Esta fuerza no tenìa nada que ver con la fuerza newtoniana, ni en Leibniz ni en Descartes; sin embargo, al igual que la fuerza newtoniana, era una causa, no un efecto. En efecto, Leibniz pensaba, como veremos màs adelante, que toda la materia contenìa su propia fuerza, la cual a su vez era la causa del movimiento.

La materia prima estaba, como hemos dicho, identificada por el hecho de la resistencia. Esta no era la extensiòn, aunque era su principio. En virtud de la resistencia, los cuerpos ocupan un espacio, y son ademàs impenetrables. Pero tambièn la resistencia implica la inercia a cambiar de estado: es pues una fuerza pasiva. La sola extensiòn no podìa explicar la inercia: de ahì que Leibniz la rechazara como esencia de la materia; el cinematismo cartesiano daba paso a una dinàmica. La falta de la fuerza de inercia o <<vis pasiva>> llevaba a contradicciones, como la ausencia de reacciòn y el hecho de que un cuerpo pusiera en movimiento a otro màs grande sin perder velocidad.

Comparado con la pseudo-fuerza newtoniana, la <<vis pasiva>> de Leibniz parece una concepto superado, semejante a la cantidad de reposo de Descartes; sin embargo, Leibniz no se perdìa al grado de Descartes en la interacciòn entre inercia y fuerza. Sin duda, su dinàmica se habìa beneficiado de las teorìas de Huygens; pero aùn asì nunca serìa exitosa. Tal como èl la planteò, era terriblemente confusa: su importancia està en la premoniciòn de los principios variacionales de la mecànica y en el ènfasis en la conservaciòn de la energìa, no en sus èxitos <<per se>>, que fueron casi inexistentes.

La teorìa de la fuerza de Leibniz es aùn màs interesante: en lugar de la dicotomìa mòvil-motor que se encuentra en Descartes y Newton, Leibniz postulaba que la propia materia tenìa intrìnseca una fuerza, una fuente del cambio. Leibniz afirma que la causa debe ser igual al efecto: en el campo de la estàtica, ambas fuerzas, la activa y la pasiva, son indiscernibles: dan el mismo resultado. Pero el mismo postulado actùa tambièn en dinàmica: "Como en Geometrìa y en Aritmètica, a travès del principio de que el todo es igual a la suma de las partes, la Geometrìa se ve sometida a un càlculo analìtico, asì en la Mecànica, a travès de la igualdad del efecto con todas sus causas, o de la causa a todos sus efectos, obtenemos ciertas ecuaciones, y cierto tipo de àlgebra mecànica mediante el empleo de este axioma" (5). La ley de conservaciòn de la energìa està implìcita en esta igualdad de la causa y el efecto dinàmicos. Pero este concepto de la fuerza le acercaba a un concepto anàlogo al <<impetus>> nominalista: la causa eficiente del movimiento residirìa en el mòvil; pero, a diferencia de los nominalistas, Leibniz piensa que la fuerza no es impartida, sino innata: "cada bola, repelida por la que la acomete, es puesta en movimiento por su propia fuerza, es decir, por su elasticidad" (6).

Asì, cada cuerpo tiene una cantidad de fuerza primitiva, que es constante. Esta fuerza primitiva perdura a travès del movimiento, y es como la ley que rige cada estadio del mismo; pero se modifica en una fuerza derivada, que resulta del conflicto de dos cuerpos entre sì. La fuerza derivada, en cambio, no se conserva idèntica en un cuerpo, sino que se reparte de acuerdo a las interacciones, pero se reparte de manera que la suma total de fuerzas relativas sea constante: la <<vis viva>>. La interacciòn se da en tèrminos de lo que hoy llamarìamos trabajo, concepto que ya Huygens prefiguraba. En efecto, es confuso; pero tratemos de aclarar los tèrminos.

La fuerza derivada corresponde a lo que hoy llamamos energìa cinètica, si bien se mide por el doble de èsta, mv^2. La fuerza primitiva no tiene papel dinàmico: su introducciòn se debe a razones metafìsicas, al rechazo de la posibilidad de que un accidente, el movimiento, pase de un cuerpo a otro. La comunicaciòn de movimiento sòlo se da en funciòn de una fuerza inmanente, que es "despertada" por la interacciòn con otro cuerpo. Leibniz rechaza pues la dicotomìa motor-mòvil, en tanto que èsta implica la comunicaciòn de un accidente de un cuerpo a otro. Ademàs, la teleologìa leibniziana no puede adscribir una causa al exterior: la causa es final, y debe encontrarse en el propio deseo. Leibniz se encontraba ante otra dificultad, que no pudo resolver enteramente: sus ideas del espacio implicaban que èste, a diferencia del newtoniano, era relativo, y sin embargo, creìa firmemente en la idea de que la fuerza era absoluta: a partir de la fuerza, creìa èl, podemos diferenciar què cuerpo es el que se mueve realmente. Asì, el movimiento serìa absoluto en un espacio relativo (!!!). Pero, ¿còmo conocer la fuerza, sino por el efecto que produce, es decir, el movimiento? Leibniz caìa en un cìrculo vicioso, del que trataba confusamente de escapar afirmando que la fuerza es un atributo del sujeto, y no una relaciòn.

Finalmente, la ley de conservaciòn de la <<vis viva>> le llevaba a otra consecuencia importante: todos los cuerpos tenìan que ser elàsticos, pues de no ser asì la <<vis viva>> no se conserva. La contradicciòn con la realidad es manifiesta, y Huygens se lo señalò. Pero Leibniz tuvo una premoniciòn asombrosa: la <<vis viva>> que aparentemente desaparecìa era absorbida por las partes màs pequeñas de los cuerpos, que se moverìan en consecuencia, aunque este movimiento no fuera observable. La confianza en un principio metafìsico habìa llevado a Leibniz a afirmar la conservaciòn de la energìa màs allà de la mecànica.

Recordemos que la dinàmica de Leibniz es, como en Descartes y Huygens, una dinàmica de la colisiòn: Leibniz negò el concepto newtoniano de acciòn a distancia; pero por otra parte, tambièn negò la realidad de los àtomos. La fìsica de colisiones lleva naturalmente a pensar en àtomos movièndose en un vacìo: Huygens y Gassendi habìan resucitado al viejo Demòcrito, y creìan firmemente en ellos. Leibniz el matemàtico confiaba en el continuo, como su propio principio de continuidad lo demuestra: una nueva propiedad, la indivisibilidad absoluta, no podía emerger de la subdivisión. Por otro lado, Leibniz también negaba el vacío, después de Pascal, Torricelli y von Guericke. Su argumentación contra el vacío era débil, pero parece haber sido provocada por su propio rechazo de los átomos. En efecto, Leibniz consideraba que el vacío violaba el principio de razón suficiente: cuanto más existencia, mejor. Así, su física era una física del <<plenum>>: existía una materia sutil que envolvía todas las cosas; esto le llevaba a pensar, como Descartes y Platón, que toda interacción era infinita: toda la materia estaba relacionada entre sí.

La filosofía de Leibniz osciló entre lo discreto y lo continuo, lo finito y lo infinito. Su monadología parecía inclinarle por lo discreto; su principio de continuidad por el contrario. No existen átomos materiales, pero sí existen átomos metafísicos: las mónadas. Una mónada no es sino una sustancia simple, es decir, sin partes, que forma agregados. Pero no es un punto material, que tiene extensión: para Leibniz la extensión resulta del agregado, de la repetición continua. Siendo que el continuo es infinitamente divisible, no pueden existir unidades materiales; sin embargo, debe existir una unidad. Esa unidad no es material, sino metafísica. Ya que la sustancia debe ser una unidad, la extensión, que es repetición, no puede ser su esencia. Leibniz distingue entre extensión y espacio, entre duración y tiempo. La extensión y la duración son atributos de la sustancia, mientras que el espacio y el tiempo no son más que una abstracción: el conjunto de las posibles relaciones de distancia o duración. El espacio no puede ser ni sujeto ni predicado: es una relación de distancia, "el orden de las coexistencias posibles" y como Leibniz niega la realidad de las relaciones, no existe realmente. No existe la posición absoluta: toda posición se da en términos de otra cosa. Leibniz defendió este punto contra Newton, en su célebre correspondencia con Clarke. Por otro lado, las relaciones espaciales son subjetivas: dependen del punto de vista de cada mónada, y hay tantos puntos de vista como posiciones.

La teoría de las mónadas es la cumbre de la filosofía de Leibniz, a la vez que el aspecto aparentemente más esotérico. Detengámonos un momento en esa teoría, ya que en ella está la justificación del <<calculus ratiocinator>> leibniziano. Leibniz era un atomista, pero no un atomista material a la manera de Gassendi, Epicuro o Demócrito. Los elementos existen: hay sustancias simples, que son a la materia lo que las notas a la música y los puntos a la geometría. Leibniz establece un sistema ordenado de las sustancias, una axiomática de la Naturaleza. Como afirma Mahnke: el sistema de Leibniz es una síntesis entre la metafísica del individuo y la matemática universal (7). Dios es el calculista universal: ha impreso en las sustancias simples un algoritmo indeleble. La creación es matemática: los cuerpos se dan por agregación de las mónadas. El cuerpo es una colección de mónadas cambiantes, que están sujetas a una mónada dominante: el alma. La materia inerte sería así una colección de mónadas sin dominante.

Todos los entes estàn formados de mònadas, pero el grado de conciencia de cada mònada varìa, con los hombres en el punto màs alto. Para Leibniz los seres inanimados, las mònadas màs primitivas, llamadas formas o entelequias, son "espìritu instantàneo": a cada instante el ser inanimado olvida el instante anterior. Sin memoria no puede existir el pensamiento. En seguida vienen los seres animados: tienen alma, y por tanto sentimiento, memoria y atenciòn. Finalmente, viene el hombre, que tiene un alma racional.

Las mònadas no pueden comunicarse entre sì: en efecto, si una mònada lo hiciera, dejarìa de ser ella misma, para convertirse en ella màs la otra mònada con la que se comunica. Leibniz piensa que aunque la comunicaciòn entre mònadas no existe, esto no es un problema para la percepciòn del mundo: èsta se logra a travès de la "armonìa preestablecida". Asì como los relojes en una relojerìa estan sincronizados, dando todos la misma hora, sin que nadie pretenda que un reloj sincroniza a otro, sino que una mano humana les da cuerda y los pone a todos en una misma hora, asì mismo Dios Creador del Universo, lo sincronizò desde un principio. Cuando percibo otra mònada, sea èsta un ser humano, un animal o un objeto, lo hago porque la idea de esta mònada està dentro de mì y la entiendo. La comunicaciòn entre mi espìritu y el suyo es imposible, pero mi microcosmos interno, el reflejo del universo entero en mì, me hace comprenderla. Mi perspectiva es distinta de las otras mònadas, pero lo engloba todo. Este algoritmo es idòneo y racional. Asì, volvemos al innatismo platònico, y el cìrculo se cierra: Leibniz matemàtico implantò en las mònadas de Leibniz filòsofo el algoritmo perfecto. Ese algoritmo fue lo que Leibniz buscò formalizar a travès de su lenguaje simbòlico: era el principio y el fin de todo conocimiento.

La creencia leibniziana en las formas òptimas, en la teleologìa, en el fin hacia lo mejor, le llevò a postular otro principio fundamental: todo fenòmeno dinàmico ocurre de manera òptima, es decir, de manera que los cuerpos sufran el mìnimo esfuerzo. Este era un principio totalmente metafìsico: Leibniz no encontrò su aplicaciòn real a la mecànica. Y sin embargo, prefiguraba el principio de mìnima acciòn. La Naturaleza no presentaba desperdicio: debìa actuar de la manera màs sencilla. Cuando Maupertius enunciò su principio, Koenig reclamò para Leibniz la paternidad del mismo, alegando la existencia de una carta privada, que nunca pudo mostrar. No obstante, aunque Leibniz no haya llegado màs allà, es indudable su influencia filosòfica y matemàtica en, por ejemplo, Jean Bernoulli, acreditado con haber formulado el primer principio variacional de la mecànica.

La dinàmica de Leibniz adolecìa de graves fallas; comparada con la de su contemporàneo, Newton, no era màs que una confusa mezcla de metafìsica y resultados parciales. Sus intuiciones palidecìan ante el gigantesco edificio de los Principia; pero esas intuiciones serían seguidas por algunos de los más importantes científicos del continente, que habían tomado partido por Leibniz en su polémica contra Newton. Es paradójico que el hombre que llevó a cabo en su forma más acabada el ideal dinámico leibniziano haya sido precisamente un inglés, Hamilton; sin embargo, las contribuciones de éste, al igual que los grandes desarrollos de los matemáticos franceses, no fueron reconocidos en su justo valor por sus contemporáneos. La mecánica se dividió en dos: la que hacían los físicos, que era dogmáticamente newtoniana, y la que hacían los matemáticos, que se basaba en principios variacionales.

Leibniz es el origen filosófico de esta última; sus discípulos inmediatos, los hermanos Bernoulli, fueron los primeros en formular el cálculo variacional, y, en el caso de Jean, en postular el primer principio variacional de la mecánica. La polémica Leibniz-Newton era más profunda que la simple cuestión de la paternidad del cálculo: generó dos escuelas opuestas, tanto matemáticas como físicas, que dividirían a los científicos hasta bien entrado el siglo XIX. Los infinitésimos de Leibniz contra las fluxiones de Newton; la mecánica analítica contra la mecánica vectorial. El mago y el iluminista: la diferencia entre Leibniz y Newton no se limitaba a las pocas leguas del Mar del Norte.

Voltaire se encargó en el continente de propalar la mecánica newtoniana, y de atacar sin piedad a todo el que se le oponía, llamárase Leibniz, Euler o Maupertius. El gran apóstol de la tolerancia consideraba intolerables los excesos metafísicos de los leibnizianos; y sin embargo, la teleología y la racionalidad divina se impondrían finalmente a la causalidad mecanicista: los exóticos principios variacionales serían la fuente de la nueva mecánica.

Leibniz nos asombra ahora por sus grandes intuiciones. El Teorema Fundamental del Cálculo no es para Newton más que un corolario de su definición de integral; para Leibniz, la analogía entre sumas y restas por un lado e integrales y diferenciales por otro fue la base de su descubrimiento. La conciencia marginal de Leibniz, que opone a la percepción clara y a las ideas innatas, prefiguraba el subconsciente freudiano; su principio variacional tuvo más fuerza que las leyes de Newton. Leibniz hizo todos los diagramas de Euler para los silogismos, además de descubrir una de las leyes de De Morgan. Ciertamente, un metafísico. Pero un metafísico vidente, un hombre de inigualables percepciones y un sistematizador asombroso. Dejemos que Russell, pensador antimetafísico si los hay, cierre este capítulo con su opinión sobre la filosofía leibniziana: "Consideré —al igual que otros muchos— que la Monadología era una especie de cuento de hadas fantástico quizá coherente, pero completamente arbitrario. En ese punto, leí el <<Discours de Métaphysique>>" y las cartas a Arnauld. Repentinamente, un chorro de luz cayó sobre los más íntimos rincones de todo el edificio filosófico de Leibniz. Vi como habían sido echados sus cimientos y como su superestructura se levantó sobre ellos. Se veía claro que este sistema en apariencia fantàstico podìa deducirse de unas cuantas premisas que, a no ser por las conclusiones que Leibniz habìa extraìdo de ellas, muchos filòsofos, si no todos, habrìan admitido de buen grado" (8).

3.- La Conservaciòn de la Energìa Mecànica

Los nuevos conceptos de <<vis viva>> y trabajo -tèrmino introducido por Coriolis- no son ajenos a la mecànica newtoniana. Como hemos visto, Newton prefiriò centrarse en la dicotomìa cantidad de movimiento-impulso, pero la mecànica newtoniana contiene los elementos para deducir las mismas relaciones que Huygens habìa encontrado para la <<vis viva>>. En efecto, si definimos el trabajo por:

$$W = \int_{\Gamma} \vec{F} \cdot d\vec{s}$$

sustituyendo la fuerza por su expresiòn de la segunda ley, y haciendo un cambio de variable, obtenemos

$$\int m \frac{d\vec{v}}{dt} \cdot d\vec{s} = \int m \vec{v} \cdot d\vec{v} = \frac{1}{2} m v^2 = T$$

que desde luego es la energìa cinètica. El factor 1/2 proviene pues de la integraciòn, y es una cuestiòn de definiciòn què cantidad queremos usar, si la <<vis viva>> o la mitad, la energìa cinètica.

Como hemos visto, el concepto de trabajo se habìa originado en el estudio de màquinas simples; luego, Huygens y Leibniz lo habìan extendido. Distinguir a alguien con el enunciado de la ley de conservaciòn de la energìa mecànica en su forma màs general es aventurado. Huygens habìa encontrado que la <<vis viva>> de un sistema de masas depende de las alturas verticales de las masas; Leibniz habìa postulado la ley de conservaciòn de la energìa cinètica; Euler observò que si un cuerpo es atraìdo hacia un centro de fuerza de acuerdo a cierta ley, el incremento en la <<vis viva>> en el caso del acercamiento rectilìneo es calculable con sòlo conocer la posiciòn inicial y la final, y que este incremento es el mismo independientemente de la trayectoria. Daniel Bernoulli extendiò esta idea a cualquier atracciòn mutua entre dos cuerpos que se mueven; el tratamiento analìtico fue completado por Lagrange, al introducir la energìa potencial. Por otra parte, Daniel Bernoulli, Euler y Lagrange encontraron tambièn casos en que el cambio en la energìa cinètica dependìa de la trayectoria. La ley de conservación de la energía se fue instalando en la mente de los científicos gradualmente; a diferencia de los principios variacionales, no hubo un gran salto en su generalización. Posiblemente la misma existencia de sistemas no conservativos hacía de la conservación de la energía algo menos que un paradigma; la audaz concepción de Leibniz no sería plenamente reconocida hasta que Helmholtz la formulara en el contexto de la termodinámica.

El análisis de un sistema mecánico por medio del teorema anterior, $W = T$, presenta varias ventajas sobre el análisis vectorial newtoniano en la mayoría de los casos dinámicos, bien que en los estáticos el método vectorial suele prevalecer. En primera instancia, estamos trabajando con cantidades escalares; en segunda, si la diferencial de trabajo $dW = \vec{F} \cdot d\vec{s}$ es una diferencial completa, o alternativamente, si la integral de línea W es independiente de la trayectoria, y sólo depende de los puntos extremos, podemos definir una función de potencial V como el negativo de W, que sólo depende de la posición. Esta función, la energía potencial, sustituye a la fuerza como descripción del efecto del medio ambiente sobre el sistema, y en todo caso la fuerza es fácilmente obtenible por diferenciación:

$$\vec{F} = -\nabla V$$

Las ventajas de manejar una función escalar en lugar de una vectorial son evidentes; si la función depende sólo de la posición, muchas veces un problema mecánico puede ser determinado con sólo echarle un vistazo: por ejemplo, si sabemos que un cuerpo sobre una superficie comenzó a moverse con una velocidad v a una altura h en un campo gravitacional paralelo, no importa qué tantas vueltas dé, qué tantas subidas y bajadas; no importa la complejidad de la superficie en que se mueve, sabemos que al llegar a una altura $h/2$ tendrá una velocidad $\sqrt{v^2 + gh}$. En el análisis newtoniano, tendríamos que enfrentarnos a una aceleración variable en cada punto de la superficie; el análisis, aunque posible, sería prohibitivo. La superficie más compleja es equiparable al caso más sencillo, la ley de la caída de los cuerpos galileana. La velocidad es trivialmente obtenible a partir de la expresión de la energía potencial gravitacional, mgh.

Y sin embargo, este aparente artificio matemático va más allá: la suma de la energía potencial y la energía cinética es constante. El principio de conservación de la energía mecánica sería, como sabemos, extendido más tarde a toda la física. Su origen está aquí, en la colisión de cuerpos elásticos y en las máquinas simples. Por ello, detengámonos un poco a pensar qué es lo que estamos haciendo al sustituir W por V.

En primera instancia, estamos integrando el medio ambiente al sistema: ya no hablamos de partículas, sino de un sistema gravitacional, que determina una energía potencial en cada punto. La acción de fuerzas pasa a un segundo plano: el sistema se puede describir completamente por una conversiòn de energìa potencial en cinètica y viceversa; causa y efecto son, de alguna manera, intercambiables. El trabajo es aùn algo externo, un motor; la energìa potencial es debida al medio ambiente, pero està integrada al cuerpo que se mueve: es poseìda por el cuerpo, si bien en virtud de su posiciòn. Nos alejamos del concepto antropocèntrico de fuerza, para sustituirlo por algo mucho màs sutil, simple y general: la energìa.

Recordemos que <<energeia>> querìa decir acto, en la filosofìa de Aristòteles; en ese sentido, el tèrmino energìa potencial no deja de ser una paradoja. Sin embargo, he aquì al viejo Estagirita: la potencia y el acto, la energìa potencial y la energìa cinètica. Ambas poseìdas por el cuerpo, intercambiables bajo ciertas leyes que dependen de la velocidad y la posiciòn: geometrizaciòn. La causa eficiente del movimiento transferida al cuerpo por el simple expediente de cambiar un signo y definir a la cantidad resultante con otro nombre! Volveremos a ver este artificio preñado de significado en el principio de D'Alambert: los inocentes y frìos sìmbolos de la teorìa no han cambiado; la matemàtica es la misma, y sin embargo, què transformacion del significado!

En segunda instancia, el alejamiento de la mecànica del antropocentrismo newtoniano define, como hemos dicho, un concepto màs sutil y universal que el de fuerza: la energìa. Asì como Newton proclamò la identidad esencial de todas las fuerzas, los fìsicos se daràn progresivamente cuenta de la identidad de todas las formas de energìa. No olvidemos la "actividad" de Leibniz, que en los seres superiores es identificable con el espìritu: la energìa. En efecto, sigue existiendo una dicotomìa entre materia y energìa, entre cuerpo y alma, mòvil y motor; pero no es ya la rìgida diferenciaciòn cartesiana: la energìa està subsumida en la materia; para Leibniz, <<vis muorta>> y <<vis viva>> no son sino dos caras de la misma moneda, caracterìsticas inseparables de la materia. A pesar de lo que se ha dicho, la mecànica de la energìa no conservò la rìgida dicotomìa entre materia inerte y motor: los tèrminos eran intercambiables, las distinciones se borraban. Veremos màs adelante que en la mecànica de Lagrange es posible —y de hecho se hace— asimilar tèrminos del lagrangiano que originalmente corresponden a la energìa cinètica como parte de la energìa potencial, y viceversa. No obstante, no llevemos esta idea demasiado lejos: aunque inseparablemente ligadas, materia y energìa en la mecànica clàsica no son idènticas.

Volvamos sin embargo a nuestra ley. La funciòn W puede depender del tiempo, y aùn de las velocidades de las partìculas; en este caso hablamos de una funciòn trabajo no conservativa, y la fuerza es obtenible a partir de la ecuaciòn de Euler-Lagrange:

$$F_i = \frac{\partial U}{\partial q_i} - \frac{d}{dt}\frac{\partial U}{\partial \dot{q}_i}$$

Como vemos, aùn en este caso es posible manejar cantidades escalares y deducir a partir de ellas la fuerza; ya no existe la energìa potencial como una medida que compensa la pèrdida o ganancia de la energìa cinètica, pero el anàlisis es todavìa posible a partir de la funciòn trabajo.

Estos conceptos son bàsicos en el tratamiento alternativo de la mecànica; sin embargo, para completarlos, para pasar de la dinàmica de partìculas a la dinàmica de sistemas, son necesarias otras consideraciones.

El ejemplo que ponìamos antes revela otra caracterìstica del tratamiento analìtico de la mecànica: en el anàlisis newtoniano, ademàs de calcular la aceleraciòn en cada momento a partir de la componente tangencial a la superficie de la fuerza, es necesario asegurarse que el movimiento va a ser tangencial: el peso del cuerpo debe ser equilibrado por una fuerza normal a la superficie. Desde luego, sabemos que va a ser asì, pero un riguroso anàlisis newtoniano no puede obviar este punto. En cambio, en la mecànica analìtica es posible introducir constricciones, condiciones cinemàticas, que impiden a un cuerpo moverse en tal o cual direcciòn. Sin duda, estas condiciones son mantenidas por fuerzas; asì, en un cuerpo rìgido las partes no pueden moverse, y un pistòn no tiene màs que un movimiento posible; pero el tratamiento analìtico permite hacer abstracciòn de estas fuerzas, eliminando las direcciones imposibles de movimiento del anàlisis, y conservando tan sòlo las correspondientes a los "grados de libertad" del movimiento. Lo cual nos lleva al ùltimo punto: la introducciòn de coordenadas generalizadas.

El empleo alternativo de coordenadas no rectangulares fue introducido por Jacques Bernoulli, aunque Newton ya las habìa empleado sin publicar. Especìficamente, Bernoulli y Newton introdujeron las coordenadas polares. Sin embargo, el concepto de coordenadas generalizadas es aùn màs amplio: en lugar de hablar del espacio fìsico de tres dimensiones, hablamos de un espacio de configuraciòn de 3N dimensiones, donde N es el nùmero de partìculas. Asì, las coordenadas individuales espaciales de cada partìcula pierden significaciòn individual, y cualquier transformaciòn de coordenadas en este espacio es vàlida. Las funciones de mapeo del espacio en sì mismo deben, desde luego, ser finitas, continuas y diferenciables, con un jacobiano distinto de cero. Pero las nuevas coordenadas no tienen necesariamente un significado geomètrico espacial. Por otro lado, si existen m constricciones, el problema puede reducirse a un subespacio del espacio de configuraciòn, con 3N − m coordenadas, que son precisamente los grados de libertad. En ocasiones, las constricciones no son todas eliminadas, y se emplea un tratamiento alternativo en un subespacio màs grande, con un conjunto de ecuaciones de la forma $f_k(q_1, q_2, \ldots q_m) = 0$, llamadas ecuaciones de constricciòn, ademàs de las funciones de transformaciòn. Como dice Oyarzàbal, las fuerzas constrictivas quedan asì definidas parcialmente: a diferencia de las fuerzas aplicadas, que tienen una definiciòn en tèrminos de otras variables, tal como la ley de Hooke o la de la gravitaciòn universal, las fuerzas constrictivas se definen sòlo en tèrminos del movimiento que impiden (9).

Desde el punto de vista geomètrico, el elemento de distancia en el espacio de configuraciòn puede expresarse en coordenadas rectangulares como

$$\overline{ds^2} = 2T\,dt^2 = \sum_{i=1}^{N} m_i v_i^2 dt^2$$
$$= \sum_{i=1}^{N} m_i (dx_i^2 + dy_i^2 + dz_i^2)$$

La energìa cinètica total del sistema completo puede entonces escribirse como

$$T = \frac{1}{2} \left(\overline{\frac{ds}{dt}} \right)^2$$

Es decir, la energìa cinètica de una sola partìcula de masa unitaria. Esta partìcula es un punto C del espacio de 3N dimensiones que simboliza la posiciòn del sistema mecànico. El tensor mètrico correspondiente està definido por

$$a_{ii} = \sqrt{m_i}$$
$$a_{ij} = 0 \quad si\ i \neq j$$

y, como vemos, representa un espacio euclidiano. Una transformaciòn de coordenadas sigue conservando una geometrìa euclidiana, aunque el tensor mètrico adquiere una forma màs general:

$$\overline{ds^2} = \sum_{i,k=1}^{n} a_{ik}\, dq_i\, dq_k$$

Ahora bien, las constricciones pueden ser consideradas como hipersuperficies en general curvas en el espacio de configuraciòn. La intersecciòn de èstas determina un subespacio, en el que el punto debe mantenerse. Este subespacio ya no es en general euclidiano, sino un espacio riemanniano curvo.

Desde luego, este anàlisis <<a posteriori>> de la geometrìa del espacio de configuraciòn no fue llevado a cabo por los fundadores de la mecànica analitica: en su tiempo, la geometrìa riemanniana estaba en el futuro.

Estas ideas son el germen de la mecànica analìtica. Como decìamos, es posible integrarlas en la mecànica vectorial newtoniana; pero su verdadero significado y potencia no son aparentes mas que en el formalismo de la mecànica analìtica. Asì como Newton basò su mecànica en la fuerza y el momento lineal, la mecànica analitica tiene como conceptos bàsicos la funciòn trabajo y la energìa cinètica. Sin embargo, aùn nos falta un elemento, tal vez el màs importante: un principio general, del que puedan deducirse las ecuaciones del movimiento. El planteamiento de los varios principios que han sido formulados es el siguiente tema de nuestra historia.

NOTAS AL CAPITULO VII

1) Ortega y Gasset, 'La Idea de Principio en Leibniz', p. 17.
2) Russell, 'La Filosofía de Leibniz', p. 177.
3) ibid.
4) Leibniz, citado por Russell, loc. cit., p. 204.
5) ibid., p. 223..
6) ibid., p. 232.
7) Serres, 'Leibniz' en 'La Filosofía Alemana de Leibniz a Hegel', p. 49.
8) Russell, loc. cit., p. 166.
9) Oyarzàbal, 'Mecànica Clàsica', p. 375 ss.

VIII. DEUS EX MACHINA

> Si yo hubiera estado al lado de Dios cuando creò el universo, le hubiera aconsejado mejor el orden de las cosas.
>
> Alfonso X el Sabio

> Lo admirable no es la extensiòn donde campean las estrellas; lo admirable es que el hombre haya podido medirla.
>
> Anatole France

1.- Los Principios Variacionales y la Mecànica Lagrangiana

Como hemos visto màs arriba, Stevinus y Galileo habìan reconocido los gèrmenes del principio de trabajo virtual. Su formulaciòn general, aplicado a todas las condiciones de equilibrio, corresponderìa a Jean Bernoulli, que lo enuncia en una carta a Varignon en 1717.

La familia Bernoulli, natural de Suiza, reinò señera en la matemàtica continental por cinco generaciones. Los originarios de esta prole genial, Jacques y Jean (o Jakob y Johann) fueron sin duda, junto con Daniel, hijo de Jean, sus miembros màs destacados.

Jacques, el mayor, fue el primero en obtener notoriedad. Ademàs de ser el primero que sugiriò el moderno nombre de integral para el proceso inverso de la diferenciaciòn, se dedicò al estudio de problemas relacionados con rectificaciòn y cuadratura de curvas, e introdujo el uso de coordenadas polares Esto permitiò simplificar enormemente el estudio de ciertas curvas, notablemente las espirales, la cicloide, la catenaria y la braquistocrona. Sus principales contribuciones fueron el estudio de una nueva curva, llamada precisamente lemniscata de Bernoulli, y el de la espiral logarìtmica propuesta por Descartes.

Jean Bernoulli tuvo que vivir a la sombra de su cèlebre hermano, con quien mantuvo frecuentes polèmicas, y no fue sino hasta la muerte de èste que pudo conquistar el lugar que le correspondìa en la sociedad matemàtica de su època. Aunque destinado por su padre a ser mèdico, Bernoulli se interesò profundamente por el càlculo, y a falta de mejor empleo, se dedicò a instruir en la nueva disciplina a un marquès francès, M. de L'Hòpital. Este le arrancò la increìble promesa de que Bernoulli le enviarìa sus nuevos descubrimientos solamente a èl, a cambio de un salario. Parece ser que L'Hòpital no era muy religioso en sus pagos, pero aùn asì, Bernoulli respetò su promesa. El marquès, habiendo "comprado los derechos" del trabajo de Bernoulli, se dedicò a escribir un libro sobre càlculo,

<<Analyse des Infiniment Petits>>, virtualmente plagiando al infortunado suizo. La famosa regla de L'Hôpital, que iguala el límite del cociente de dos funciones al límite del cociente de sus derivadas, es debida realmente a Jean Bernoulli. Este guardó silencio sobre el plagio hasta después de la muerte del marqués, probablemente para mantener la irregular renta que L'Hôpital le pasaba. En todo caso, el libro de L'Hôpital fue fundamental en su tiempo, ya que era el primer texto de cálculo infinitesimal que se daba a la imprenta. Tanto los Bernoulli como Leibniz habían publicado sus resultados en una revista especializada, el <<Acta Eruditorum>>. A Jean Bernoulli no lo acompañaba la suerte. Su propio libro de cálculo integral fue publicado cincuenta años después de ser escrito, y el de cálculo diferencial no fue publicado sino hasta 1924. Sin embargo, Bernoulli hizo importantes descubrimientos en el tratamiento de varias curvas, particularmente la braquistocrona.

Jean Bernoulli fue el campeón del cálculo leibniziano, defendiendo los métodos de su amigo y maestro contra viento y marea, específicamente contra el viento y marea ingleses. Gran amante de la controversia, Jean peleó contra su hermano Jacques, contra su hijo Daniel (el del principio hidrodinámico), contra Taylor por la autoría de las series que llevan el nombre de este último, y como queda dicho, contra L'Hôpital, a título póstumo.

Antes de pasar a enunciar el principio de trabajo virtual, detengámonos un poco en el concepto de desplazamiento virtual. La distinción entre desplazamientos reales y virtuales -o, como se decía el siglo pasado, velocidades virtuales- es fundamental. Un cuerpo, a lo largo de su movimiento, tiene un desplazamiento real; la diferencial de ese desplazamiento, ds, es un vector con magnitud y dirección definidas en cualquier instante. Evidentemente, el cuerpo se mueve de una sola manera; sin embargo, dadas las constricciones, el cuerpo puede moverse de muchas maneras distintas. Podemos imaginar que el cuerpo se mueve infinitesimalmente en esas direcciones, y observar lo que le ocurre a las funciones que dependen del desplazamiento en el sistema. Estas cambiarán en general, y ese cambio recibe el nombre de variación o cambio virtual.

En su forma más general, el principio de trabajo virtual dice así:

Aplíquense a los puntos A, B, C,... las fuerzas $\vec{F_1}$, $\vec{F_2}$, $\vec{F_3}$, pequeños compatibles con las constricciones cinemáticas del sistema -desplazamientos virtuales- $\delta\vec{r_1}$, $\delta\vec{r_2}$, $\delta\vec{r_3}$,..., los cuales deben ser reversibles, y tómese el producto escalar de cada desplazamiento virtual por la fuerza correspondiente. Entonces,

$$\delta W = \vec{F_1}\cdot\delta\vec{r_1} + \vec{F_2}\cdot\delta\vec{r_2} + \vec{F_3}\cdot\delta\vec{r_3} + \cdots = 0$$

δW es conocido como el trabajo virtual. Nòtese que el trabajo virtual es el producto escalar de la fuerza resultante y el desplazamiento virtual resultante: el principio afirma que la fuerza resultante es perpendicular a cualquier desplazamiento virtual posible, o, si se quiere, al subespacio formado por los desplazamientos virtuales posibles.

Si no hay constricciones, los desplazamientos virtuales pueden ser en cualquier direcciòn del espacio, y entonces el principio requiere que la fuerza sea cero, ya que debe ser perpendicular a todo el espacio.

Ahora sustituyamos las fuerzas impresas por las fuerzas de reacciòn, con lo que todos los signos se invierten. De aquì el principio puede enunciarse asì:

El trabajo virtual de las fuerzas de reacciòn es siempre cero para todo desplazamiento virtual consistente con las constricciones cinemàticas dadas.

Este es, històricamente, el primer principio variacional de la mecànica. Su validez fue restringida por Bernoulli a la estàtica, pero como veremos màs adelante, es fàcilmente extendible a la dinàmica, en la que toma el nombre de principio de D'Alambert.

El càlculo de variaciones habìa preocupado a todos los matemàticos desde que el càlculo infinitesimal comenzò a desarrollarse; ya en la Antigüedad helenìstica, se habìa planteado el problema de Dido, que consistìa en encontrar la figura de màxima àrea en un perìmetro dado; de aquì recibieron los problemas variacionales el nombre, en boga en el siglo XVIII, de problemas isoperimètricos. Fermat habìa desarrollado mètodos de màximos y mìnimos; Newton y Leibniz habìan atacado estas cuestiones. Pero el primer problema del càlculo de variaciones propiamente fue propuesto por Jean Bernoulli, y resuelto por èl mismo gracias al principio de Fermat. Este problema consistìa en encontrar la ecuaciòn de la braquistocrona, es decir, la curva de màs ràpido descenso. Newton, Leibniz, l'Hòpital y Jacques Bernoulli lo resolvieron tambièn, pero la soluciòn màs imaginativa correspondiò al propio Jean. Bernoulli sabìa que el principio de Fermat se aplicaba a fenòmenos òpticos, pero formalmente el problema era el mismo.

Bernoulli imaginò que, en lugar de un cuerpo mòvil, estaba considerando el movimiento de un rayo de luz cuya velocidad crecà continuamente de acuerdo a la conocida ley de caìda en un campo gravitacional: $v = \sqrt{2gh}$. Esta velocidad corresponderìa en òptica a un nùmero infinito de capas horizontales cuya densidad decrecerìa continuamente.

Para cualquier àngulo θ de un elemento de curva ds con la perpendicular, tenemos que

$$\frac{\operatorname{Sen}\theta}{v} = k = \text{const.}$$

o, de otra manera,

$$\frac{\frac{dx}{ds}}{v} = k$$

De esto se sigue que

$$dx^2 = k^2 v^2 ds^2 = k^2 v^2 (dx^2 + dy^2)$$

y como $v = \sqrt{2gy}$,

$$dy = dx \text{ raiz}(x/(a-x)) \text{ donde } a = 1/2gk^2$$

Esta es la ecuaciòn diferencial de una cicloide, por lo que la braquistocrona es en realidad esta curva.

Por otro lado, el principio de trabajo virtual permitiò a Maupertius establecer la diferencia entre el equilibrio estable, el inestable y el indiferente, algo completamente imposible desde consideraciones newtonianas. El càlculo de variaciones no llegarìa a su mayorìa de edad hasta el trabajo de Lagrange, pero sus cimientos estaban establecidos.

Como hemos dicho, el principio es vàlido para desplazamientos virtuales reversibles; Fourier extendiò el principio a desplazamientos no reversibles, observando que en este ùltimo caso la igualdad a cero debìa ser remplazada por una desigualdad: $\delta w \geqslant 0$.

Finalmente, observemos que el principio de trabajo virtual implica un resultado conocido: en sistemas conservativos, todo cuerpo tiende a minimizar su energìa potencial.

D'Alambert, el responsable cientìfico de la Enciclopedia Francesa, retomò, como hemos dicho, el principio de trabajo virtual y lo extendiò a la dinàmica. D'Alambert tomò la segunda ley de Newton, F = ma, y la escribiò como F − ma = 0. Acto seguido, definiò I = −ma como la fuerza de inercia, con lo que F + I = 0. Hasta ahora, parecerìa que D'Alambert se estaba divirtiendo con àlgebra de escolar; pero su idea, aunque aparentemente trivial, era asombrosa: la inercia podìa ser considerada como una fuerza, tal como Leibniz habìa pensado su <<vis muorta>>. La resistencia de un cuerpo a moverse era producida por una fuerza, anàloga en todo a la fuerza aplicada. D'Alambert habìa reducido la dinàmica a la estàtica, considerando todo cuerpo mòvil como un cuerpo en equilibrio, en virtud de su propia inercia: los mètodos de la estàtica podìan ser aplicados, y en particular el principio de trabajo virtual. En este caso, la distinción entre desplazamientos virtuales y reales cobraba su verdadera significación: el cuerpo seguiría desplazándose, pero matemáticamente podían aplicársele desplazamientos virtuales instantáneos. El movimiento era el resultado de un deseo natural por el equilibrio de fuerzas: el cuerpo se movería de tal manera que la fuerza de inercia equilibrara a las fuerzas aplicadas; en este caso, el trabajo virtual total de fuerzas aplicadas más fuerzas de inercia debe ser cero (para desplazamientos reversibles).

Por otro lado, cualquier fuerza aparente podía tomarse desde este punto de vista: en la rotación uniforme, la fuerza centrífuga y la fuerza de Coriolis; en la rotación acelerada, la nueva fuerza que Lanczos llama fuerza de Euler; en la translación acelerada, la correspondiente fuerza aparente. Todas estas fuerzas entran en la definición de fuerza de inercia. El principio de D'Alambert prefigura bellamente el principio de equivalencia de Einstein: no hay distinción entre una fuerza aparente por translación acelerada y la fuerza de un campo gravitacional. D'Alambert tampoco puede distinguir entre fuerzas aplicadas y fuerzas inerciales, y su aplicación se extiende a todos los sistemas de referencia, no sólo a los inerciales. El principio rescataba pues la idea de la fuerza intrínseca, que Leibniz había propugnado y los nominalistas habían aplicado sin éxito.

Finalmente, el principio de D'Alambert se aplica a cualquier punto de la trayectoria, a cualquier instante de tiempo: como dice Sommerfeld, compara el estado de un sistema en un momento arbitrario con un estado vecino obtenido por desplazamientos virtuales (1). Esto en contraposición con el resto de los principios que veremos más adelante, que son principios integrales, en los que el tiempo juega un papel fundamental.

La ley de conservación de la energía es fácilmente deducible a partir de este principio, siempre que las fuerzas sean conservativas: en efecto, si los desplazamientos virtuales se hacen coincidir con los reales, obtenemos la ley de conservación de la energía mecánica:

$$\sum m_k \ddot{\vec{R}}_k \cdot d\vec{R}_k = \sum m_k \ddot{\vec{R}}_k \cdot \dot{\vec{R}}_k \, dt = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}\sum m_k \dot{\vec{R}}_k^2\right)dt = \dot{T} .$$

El principio de D'Alambert permite analizar cualquier problema dinámico: es una solución completa. El resto de los principios variacionales es equivalente al principio de D'Alambert en su ámbito de aplicación; es más, el principio es más general que, por ejemplo, el de Hamilton: permite el uso de variables no holonómicas, a diferencia de éste. Una variable no holonómica es aquélla cuya función de transformación de coordenadas en términos de las coordenadas originales no puede ser expresada más que con una diferencial, la cual no es la derivada de coordenadas reales. Por ejemplo, la velocidad angular de rotación de un trompo se define como $d\overline{\varphi}/dt$, pero $d\overline{\varphi}$ es un àngulo infinitesimal de rotaciòn, y no la diferencial de un àngulo, ya que este àngulo no existe si el eje està constantemente cambiando, como es el caso del trompo.

Es realmente asombroso: D'Alambert habìa sido capaz de fundar la dinàmica en un sòlo principio. Desgraciadamente, las fuerzas inerciales no admiten representaciòn escalar mediante un potencial, lo que hace al principio difìcil de usar. En efecto, el trabajo virtual no es en general la variaciòn de una funciòn. Esto llevarìa a la bùsqueda de principios nuevos, cuya forma matemàtica fuese màs adecuada. Por otra parte, los nuevos principios serìan filosòficamente màs provocativos, acercando a la mecànica al ideal teleològico de Leibniz. En efecto, la huella filosòfica de èste pervade la mecànica analìtica: la convicciòn de que existe un principio bàsico de la Naturaleza, el que este principio tienda a minimizar el esfuerzo, a hacer economìa; los conceptos bàsicos de energìa como la medida relevante del movimiento y la conservaciòn de èsta: todo apunta hacia Leibniz.

El principio de mìnima acciòn, històricamente el siguiente principio variacional de la mecànica, formulado por Maupertius en 1747, no es ya, como hemos dicho, una generalizaciòn de otros principios. Si Bernoulli y D'Alambert habìan propuesto los suyos basàndose respectivamente en las màquinas simples y en la estratificaciòn del movimiento, el principio de mìnima acciòn era una especulaciòn filosòfica de altos vuelos, una generalizaciòn <<a priori>> que no tenìa al parecer una base firme en la experiencia. Audazmente, Maupertius postulaba que existìa una cantidad en todos los eventos de la Naturaleza que siempre es un mìnimo. Esta cantidad, la acciòn, estaba en ìntima relaciòn con la energìa. Lanczos apunta que el "espìritu còsmico" del siglo XVIII, un espìritu que no se veìa desde los griegos, estaba en perfecta consonancia con esta suposiciòn (2).

Desgraciadamente, Maupertius, aunque presidente de la Academia de Berlìn, no tenìa el genio matemàtico para desarrollar su principio, y lo aplicò de manera completamente equivocada. Su principio no es igual al que conocemos hoy en dìa, pues la acciòn era una suma, no una integral, y contenìa el momento lineal, no la energìa. Pero esto no era grave: el problema con la manera en que Maupertius utilizò su principio fue que ignorò por completo consideraciones de energìa: sin la ley de conservaciòn de la energìa, su principio pierde todo sentido.

Maupertius fue mejor teòlogo que matemàtico: para horror de Mach, el tratado en el que postula el principio se lanza inmediatamente a una justificaciòn teològica y teleològica del principio de mìnima acciòn, como aquèl que màs se acordaba con la sabidurìa del Creador. Maupertius estaba en plena posesiòn del principio de Fermat, y no cabe duda que le impresionò como habìa impresionado a Leibniz: si la luz se comportaba de esta manera, no cabìa duda que en mecànica se podrìa formular un principio semejante. De hecho, Maupertius reformulò el principio de Fermat, haciÈndolo caber en su propio principio de mìnima acciòn, y llamando la atenciòn sobre la aparente identidad de los fenòmenos mecânicos y los ôpticos.

La teleologia, ya en germen en los principios de Jean Bernoulli y D'Alambert, surgia ahora plenamente: se trataba de introducir las posibilidades tentativas del movimiento y elegir entre ellas la que minimiza la acciòn. Esto parecia indicar una intenciòn, una finalidad en la Naturaleza: la consonancia leibniziana entre Razòn y Mundo, la armonia prestablecida, parecia revelarse en todo su esplendor.

El principio de minima acciòn, en su forma definitiva enunciada por Lagrange, postula que la acciòn, definida como

$$A = 2 \int_{t_1}^{t_2} T\, dt$$

donde T es la energia cinètica, es siempre minima. Es decir,

$$\delta A = 0$$

Como podemos ver, a diferencia del principio de D'Alambert, èste es un principio variacional integral: la variaciòn se toma sobre un intervalo finito de tiempo, sobre un segmento finito de la trayectoria. Esto acentùa el caràcter teleològico del principio: el movimiento parece no estar determinado sòlo por el estado actual del sistema, sino tambièn por estados pasados -lo cual no seria grave- y por estados futuros. En todo caso, digamos que Maupertius fue demasiado lejos; en efecto, la formulaciòn del principio era demasiado restrictiva; tal como la hemos planteado aquì, en el lenguaje del càlculo de variaciones, se requiere sòlo que la acciòn sea un extremal, ya sea un minimo o un màximo. En otras palabras, la acciòn podria ser màxima sin violar el principio de "minima" acciòn, tal como lo conocemos hoy en dia.

El principio de Fermat, como hemos dicho, fue derivado por Maupertius a partir de su propio principio. En efecto, tanto aquèl como el principio de minima trayectoria, que se aplica a una particula en ausencia de fuerzas en una superficie curva, son directamente deducibles del principio de Maupertius (3).

Una observaciòn màs viene a cuento: Maupertius habia tomado partido por Descartes, considerando que mv es la verdadera medida de la fuerza; de aqui, su definiciòn de acciòn contenia mvds, en lugar de Tdt. En el caso de una sola particula, las dos definiciones son equivalentes, pero la definiciòn en tèrminos de la energia cinètica es la que fue adoptada por Euler y Lagrange, y es la que manejamos hoy en dia.

Como hemos dicho, la autoria del principio fue puesta en duda por Koenig, que afirmò que Leibniz lo habia postulado en una carta de 1707; Maupertius defendiò su prioridad ferozmente, y fue ayudado en esta pugna por Euler.

Leonhard Euler era discípulo de Jean Bernoulli, y compartía con Maupertius, Voltaire y Carl Philip Emmanuel Bach los favores del rey ilustrado, Federico el Grande de Prusia. Sus contribuciones en todos los campos de la matemática llenarían libros: análisis, teoría de funciones, topología, ecuaciones diferenciales... Pero lo que nos interesa aquí son sus contribuciones mecánicas, que no fueron menores a las matemáticas. Euler fue el primero en estudiar los problemas isoperimétricos de manera sistemática, encontrando una ecuación diferencial que daba solución implícita a una gran clase de esos problemas; por otro lado, llevò a cabo un análisis completo de la rotación de cuerpo rígido, empleando por primera vez variables no holonómicas. Finalmente, Euler llegò independientemente de Maupertius al principio de mínima acción, al menos un año antes que aquél, y de manera totalmente correcta. En efecto, Euler estaba consciente de que la energía debe conservarse tanto para el movimiento real como para el virtual, condición auxiliar sin la cual el principio pierde toda validez. En suma, Euler formulò por primera vez el principio de mínima acción en una forma utilizable, y lo empleò para resolver multitud de problemas mecánicos. A pesar de esto, Euler defendiò a capa y espada la prioridad de Maupertius, poniendo de lado sus propias contribuciones. Como dice Lanczos, es un caso único de la historia de la ciencia, que abunda en ejemplo de lo contrario (4).

Filosóficamente, Euler se distanciò del ocasionalismo postcartesiano, defendido sobre todo por Malebranche, y de la armonía prestablecida de Leibniz; sin embargo, mantuvo la teleología leibniziana: "Como la construcción del universo es la más perfecta posible, siendo el trabajo de un Hacedor infinitamente sabio, nada puede ser encontrado en el mundo en que alguna propiedad máxima o mínima no sea manifiesta. No hay, consecuentemente, ninguna duda de que los efectos del mundo pueden ser derivados por el método de máximos y mínimos a partir de sus causas finales, de la misma manera que de las causas eficientes" (5).

Euler fue capaz de fundar toda la mecánica en un principio variacional integral: a más de utilizar explícitamente el principio de Maupertius con la condición adicional de la constancia de la energía, descubriò las ecuaciones que deben cumplirse como condición necesaria y suficiente para que la integral de acción sea mínima. Su contribución es pues fundamental; sin embargo, el trabajo de Lagrange, que es paralelo al de Euler en muchos aspectos, ha sido considerado la primera formulación explícita y completa de la mecánica analítica. Tal vez por su propia modestia, por haber defendido la prioridad de Maupertius, tal vez porque el tratamiento de Lagrange es más completo, tal vez por desmemoria, el nombre de Euler aparece apenas cuando se habla de mecánica; por ejemplo, las ecuaciones de Lagrange deberían llamarse de Euler-Lagrange, como las llama Lanczos, ya que ambos llegaron al mismo resultado de manera independiente. En todo caso, la aportación de Euler no desmerece en nada, ni aún comparada con la del genio francés.

Lagrange, como hemos dicho, persiguiò los mismos problemas que Euler, llegando a muchos resultados en forma paralela. En primera instancia, dio la soluciòn de problemas variacionales, con mètodos distintos a los de Euler: para ello, fundò un nuevo càlculo, el càlculo variacional. Lagrange dio la formulaciòn explìcita del principio de mìnima acciòn que enunciamos <<supra>>, y derivò de èl las mismas ecuaciones que Euler:

$$\frac{\partial L}{\partial q_K} - \frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_K} = 0 \qquad (t_1 \leq t \leq t_2)$$

donde L = T − V es la llamada funciòn lagrangiana, o lagrangiano, y las q son las coordenadas generalizadas del sistema. Estas son las cèlebres ecuaciones de Euler-Lagrange. Como hemos dicho màs arriba, estas ecuaciones son condiciòn necesaria y suficiente para la minimizaciòn de la integral de acciòn, y la soluciòn de las mismas resuelve completamente el problema del movimiento, es decir, dan la posiciòn y velocidad del sistema en funciòn del tiempo.

Lagrange reconociò la importancia de las coordenadas generalizadas, demostrando que las ecuaciones de Euler-Lagrange son invariantes ante un cambio de coordenadas: el valor del lagrangiano y el de la integral de acciòn es igual, independientemente de las coordenadas. Como vimos màs arriba, estas coordenadas no son las del espacio fìsico, sino las de un espacio de 3N dimensiones, donde N es el nùmero de partìculas, llamado espacio de configuraciòn. Las coordenadas generalizadas no tienen necesariamente una interpretaciòn en el espacio fìsico: su importancia estriba en la simplificaciòn de las ecuaciones. Otro paso màs en la geometrizaciòn -o si se prefiere, en la abstracciòn- del problema del movimiento: las ecuaciones de Euler-Lagrange tienen su soluciòn no en el espacio fìsico, sino en un espacio de configuraciòn. Desde luego, la transformaciòn inversa de coordenadas puede regresar la soluciòn al espacio fìsico, pero muchas veces basta con la soluciòn en coordenadas generalizadas. Cada partìcula pierde su identidad: sus coordenadas pueden ser libremente mezcladas con las de otra partìcula. En efecto, una partìcula no es matemàtiamente màs que proyecciòn dentro del espacio de configuraciòn màs un tèrmino en el lagrangiano. No sòlo esto: la tranformaciòn de coordenadas tambièn implica que las ecuaciones de Euler-Lagrange son vàlidas en cualquier marco de referencia.

El lagrangiano es la cantidad fundamental: el exceso de la energìa cinètica respecto a la potencial determina completamente la dinàmica del sistema. La ventaja respecto al principio de D'Alambert es evidente: en lugar de cantidades vectoriales, una sola funciòn escalar, que depende en general de las coordenadas generalizadas, las velocidades generalizadas (las derivadas de aquèllas con respecto al tiempo) y el propio tiempo.

Recordemos que Euler y Lagrange emplearon como condiciòn auxiliar en la deducciòn de las ecuaciones la constancia de la energía. En el caso de Lagrange, esto se llevó a cabo mediante el uso de sus multiplicadores indeterminados (ver apéndice). Por lo tanto, el método de Lagrange y Euler es válido tan sólo para sistemas conservativos; Jacobi emplearía una deducción alternativa, válida para los mismos sistemas conservativos, criticando el método de Lagrange, que implicaba necesariamente variar el límite superior de integración. El quid para Jacobi estaba en la condición auxiliar y en el uso del tiempo como variable independiente. En efecto, este último implica tener que variar el límite superior de integración de manera que la condición de conservación de energía se cumpla. Jacobi usaría en lugar del tiempo un parámetro τ, en función del cual están todas las coordenadas, incluido el tiempo. Esto permite a Jacobi no variar los límites de integración, introduciendo la condición de que ambos sean constantes. El principio de Jacobi es pues ligeramente distinto del de Lagrange y Euler: sigue siendo el principio de mínima acción, pero con un parámetro implícito distinto al tiempo. El principio de Jacobi es enunciado en términos del elemento de distancia del espacio de configuración, por lo que excluye explícitamente tanto al tiempo como al parámetro τ (ver apéndice):

$$A = \int \sqrt{2(E-V)}\,\overline{ds}$$

Sin embargo, $\overline{ds}$ no es una diferencial completa; para integrar la expresión anterior, es necesario introducir el parámetro τ, que puede ser una de las q_K. A partir de esto, el tiempo es obtenible por la relación

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{\sqrt{2(E-V)}}\frac{\overline{ds}}{d\tau}$$

que no es otra cosa que la ley de conservación de la energía, expresada en términos de τ (ver apéndice). Esta da el movimiento respecto al tiempo, que no se halla en el principio original.

Por otro lado, hagamos la observación de que ya Lagrange había tenido la idea de incorporar el tiempo como coordenada al espacio de configuración, con lo cual el problema adquiere otra dimensión u otro grado de libertad. Esto, que en la mecánica clásica es una conveniencia, se convierte en una necesidad en la mecánica relativista.

El principio de Jacobi determina pues la trayectoria en el espacio de configuración. Si se restringe al caso de una sola particula, ds es idèntico al elemento de distancia del espacio ordinario en tres dimensiones. En este caso, el principio de Jacobi tiene una semejanza impresionante con el de Fermat:

$$\lambda = \int n\, \overline{ds}$$

donde n es el ìndice de refracciòn, que cumple un papel parecido al de $\sqrt{2(E - V)}$ en Jacobi. El principio de Jacobi apunta directamente a la geometrìa del espacio de configuraciòn: si se define un nuevo elemento de distancia

$$\overline{d\sigma}^2 = 2(E-V)\,\overline{ds}^2$$

la integral de Jacobi se reduce a

$$\delta \int \overline{d\sigma} = 0$$

El principio de Jacobi es entonces equivalente a encontrar la mìnima trayectorìa entre dos puntos definidos de un cierto espacio riemanniano. Esta trayectorìa es desde luego una geodèsica del espacio cuyo tensor mètrico hemos definido arriba. Por otra parte, en ausencia de fuerzas, y por lo tanto de energìa potencial, el punto se mueve sobre la geodèsica a velocidad constante, en virtud del principio de conservaciòn de la energìa:

$$\frac{1}{2}\left(\frac{\overline{ds}}{dt}\right)^2 = E$$

Es imposible no ver aquì una bellìsima generalizaciòn de la ley de la inercia, transportada a un sistema completo movièndose en un espacio riemanniano.

El mètodo de imponer la condiciòn no a la energìa, sino a los lìmites de integraciòn, no era nuevo; ya Hamilton lo habìa empleado, y con una proyecciòn mayor que el de Jacobi, pues su deducciòn es vàlida incluso para sistemas no conservativos. El principio de Hamilton es equivalente al principio de mìnima acciòn formulado por Euler y Lagrange, y tambièn al principio de Jacobi, siempre que el sistema sea conservativo; por otro lado, es deducible del principio de D'Alambert, y equivalente a èste en sistemas holonòmicos. El nombre de principio de mìnima acciòn, tal como se usa hoy en dìa, abarca comùnmente a todos estos principios: el de Maupertius, el de Euler—Lagrange, el de Hamilton y el de Jacobi, y aunque el orden cronològico es èste que acabamos de dar, es el principio de Hamilton el que se usa con mayor frecuencia como fundamento de la mecànica analìtica, dada su generalidad. Enunciemos pues este principio:

La integral A, definida como

$$A = \int_{t_1}^{t_2} L\,dt$$

se vuelve estacionaria para variaciones arbitrarias posibles de la configuraciòn del sistema, siempre que las configuraciones inicial y final del sistema sean prescritas. (ver apèndice).

Al independizar su principio de la condiciòn de conservaciòn de la energìa, Hamilton puede deducir èsta del mismo, siempre que la funciòn trabajo sea independiente del tiempo y de las velocidades generalizadas, y que la energìa cinètica sea cuadràtica en las velocidades. Sin embargo, es posible enunciar que la cantidad

$$\Lambda = \sum p_i \dot{q}_i - L \; \ldots\ldots \quad (8.1)$$

es constante si el lagrangiano no depende del tiempo, una condiciòn evidentemente menos fuerte. De esta manera, todo sistema escleronòmico, es decir, cuyo lagrangiano no depende del tiempo, cumple una ley de conservaciòn; si, por el contrario, el sistema es reonòmico, es decir, el lagrangiano depende del tiempo, es aùn posible encontrar la variaciòn de Λ:

$$\Delta \Lambda = -\int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial L}{\partial t}\,dt$$

De esta manera, el concepto de energìa se generaliza, y Λ se dice que define la energìa total del sistema.

Volvamos sin embargo a Lagrange. El problema de la dinàmica se reduce, como hemos visto, a integrar las ecuaciones de Euler-Lagrange; sin embargo, èstas no tienen un mètodo de integraciòn general. Asì, es necesario desarrollar metodos matemàticos para simplificar las ecuaciones y llevarlas a una forma integrable. Es aquì donde entra la transformaciòn de coordenadas: se trata de encontrar aquellas coordenadas donde sea màs sencilla la integraciòn. El procedimiento es auxiliado por la existencia de variables ignorables. El lagrangiano es una funciòn de las coordenadas, las velocidades y el tiempo; sin embargo, si una coordenada està ausente de èl, aunque su velocidad correspondiente sì se encuentre, decimos que esa coordenada es ignorable. Si definimos el momento de la coordenada q_K como:

$$p_K = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_K} \; \ldots\ldots\ldots \; (Y.2)$$

podemos ver de inmediato, a partir de las ecuaciones de Euler-Lagrange, que èste es una constante si la derivada parcial de L respecto a q_K es cero, es decir, si L no depende de q_K: el momento asociado a una variable ignorable es una constante durante el movimiento. Desde luego, el momento corresponde a la variable: si hablamos de coordenadas rectangulares, se trata de la componente del momento lineal en esa direcciòn; si, por el contrario, la coordenada es esfèrica, hablamos del momento angular. Asì, la independencia del lagrangiano de una variable implica la conservaciòn del momento asociado. Estas constantes, llamadas precisamente constantes de movimiento, sirven a guisa de constantes de integraciòn, definiendo un nuevo lagrangiano $L' = L - p_K\dot{q}_K$, donde q_K se puede encontrar por la ecuaciòn diferencial

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_K} = c_K$$

lo cual reduce el problema de n grados de libertad a n - 1 grados. Sin embargo, la introducciòn del nuevo lagrangiano tiene consecuencias interesantes: la cantidad restada es independiente de cualquier velocidad, y puede asimilarse a la energìa potencial V, dando $V' = V + p_K\dot{q}_K$. Es decir, la energìa potencial se ve modificada por un nuevo tèrmino, una energìa potencial aparente. Por ejemplo, en el problema kepleriano, la eliminaciòn del àngulo θ, producto de la conservaciòn del momento angular, produce una energìa potencial aparente proporcional a $1/r^2$, que se traduce en una fuerza repulsiva proporcional al inverso del cubo de la distancia. Volvemos al conocido problema de la fuerza aparente, y las consideraciones enunciadas màs arriba son aplicables. Pero la historia no acaba aquì: es posible obtener tèrminos extra lineales en las velocidades, que se asimilan a la energìa cinètica: son los cèlebres tèrminos giroscòpicos, tales como la fuerza de Coriolis y la fuerza magnètica debida a una corriente elèctrica. Nuevamente, estamos relativizando: lo que antes eran fuerzas -si bien sin expresiòn potencial- son ahora tèrminos de la energìa cinètica. Por ùltimo, tambièn el tiempo puede ser tratado como una variable ignorable: su momento asociado es la energìa.

Hablemos finalmente de las condiciones auxiliares: como hemos dicho, las constricciones pueden ser removidas del lagrangiano empleando las ecuaciones de constricciòn, con lo que se obtiene un subespacio del espacio original de configuraciòn; si tenemos m constricciones, el subespacio tendrà 3N - m dimensiones. Sin embargo, se puede aplicar una tècnica alternativa, en la que las constricciones son incorporadas al problema. Esta tècnica fue desarrollada por Lagrange, que para ella inventò sus famosos multiplicadores indeterminados. El lagrangiano se escribe de la siguiente manera:

$$\bar{L} = L - (\lambda_1 f_1 + \cdots + \lambda_m f_m)$$

donde λ_i son los multiplicadores. Los nuevos tèrminos son asimilados a la energìa potencial, lo cual les da una interpretaciòn fìsica: se trata del potencial de las fuerzas de reacciòn que mantienen las constricciones fìsicas. Aùn màs: el multiplicador es una medida de la violaciòn microscòpica de la constricciòn, que ademàs puede depender del tiempo. En efecto, sòlo fuerzas infinitas podrìan mantener la constricciòn absolutamente; èsta se viola a cada instante, pero de manera microscòpica.

Esta es, en suma, la mecànica lagrangiana. Hagamos un ràpido sumario de sus procedimientos. En primera instancia, debemos conocer los puntos extremos de la trayectoria, P_1 y P_2, y los tiempos en los que estos puntos son alcanzados, t_1 y t_2. En segunda instancia, debemos conocer una expresiòn para la energìa cinètica y potencial en todo momento.

Para Euler y Lagrange, el problema de conocer la trayectoria real se aborda imaginando matemàticamente todas las trayectorias posibles que cumplan la conservaciòn de la energìa, es decir, en las cuales la energìa total del sistema sea igual a la que era en t_1. Acto seguido, pasamos a calcular la acciòn, definida como la integral de la <<vis viva>> en el tiempo transcurrido desde t_1 hasta t_2. El valor de esta integral es distinto para cada trayectoria, pero matemàticamente es posible determinar la trayectoria para la cual la acciòn toma un valor mìnimo: esta es la trayectoria escogida por la Naturaleza como trayectoria real.

Lagrange dejò de lado toda explicaciòn teleològica en su <<Mècanique Analitique>>: aunque el principio habìa sido establecido en un marco filosòfico definido, Lagrange tratò de disociarlo de èste, y se negò a entrar en discusiones filosòficas. Este precedente tendria profunda influencia en los trabajos posteriores, que olvidaron gradualmente las explicaciones teleològicas, concentràndose màs bien en los aspectos matemàticos. Lagrange tenìa a orgullo que su libro no incluìa una sola figura: "Los mètodos que aquì describo no requieren ni construcciones geomètricas ni razonamientos mecànicos: sòlo operaciones algebraicas, sujetas a una regla de procedimiento regular y uniforme" (6).

La formulaciòn de Hamilton, como hemos visto, dispensa la conservaciòn de la energìa como requisito, y minimiza otra cantidad: la integral del laplaciano sobre el tiempo. Pero Hamilton no se limitò a esto; aunque la mecànica de Lagrange es un sistema completo, la dificultad de encontrar las transformaciones de coordenadas idòneas llevò a Hamilton, y posteriormente a Jacobi, a formular una nueva y deslumbrante teorìa mecànica.

2.- La Teorìa de Hamilton-Jacobi

Hamilton transformò las ecuaciones de Euler-Lagrange, que son de segundo orden, en ecuaciones de primer orden, lineales y separadas en las derivadas. Para llegar a esto, hizo el descubrimiento fundamental de que los momentos generalizados, definidos <<supra>> en 8.2, pueden tratarse como variables independientes de las coordenadas. Las ecuaciones canònicas, como las llamò Jacobi, son obtenibles a partir de las de Euler-Lagrange mediante una transformaciòn dual de Legendre. En primera instancia, se definen los momentos en tèrminos de las coordenadas; en segunda, se define el hamiltoniano por la expresiòn 8.1 con que habìamos designado a la energìa total. Finalmente, se expresa el hamiltoniano H en tèrminos de las nuevas variables, con lo que obtenemos las ecuaciones canònicas:

$$\dot{p}_i + \frac{\partial H}{\partial q_i} = 0$$

$$\frac{\partial H}{\partial p_i} = \dot{q}_i$$

Debido a la naturaleza dual de la transformaciòn de Legendre, es posible regresar de un problema hamiltoniano a un problema lagrangiano, expresando las velocidades generalizadas en tèrminos de los momentos.

La mecànica hamiltoniana tiene un escenario distinto al de la lagrangiana: el espacio de fase. Este espacio està compuesto por las coordenadas y los momentos, y no tiene, a diferencia del de configuraciòn, una estructura mètrica definida. Por ello puede tomarse como un espacio euclidiano. La geometrizaciòn del problema lleva a un descubrimiento fascinante: hay una analogìa total entre la descripciòn de un movimiento en el espacio de fase y el movimiento de un fluìdo incompresible, el fluìdo de fase. Si el sistema es conservativo -el hamiltoniano es independiente del tiempo- el fluìdo tiene un flujo xxxx, y cada partìcula se mantiene en una superficie de energìa, en la que H = E, la energìa total del sistema. El fluìdo es incompresible: puede cambiar de forma, pero no de volumen, como lo demuestra el teorema de Louiville. Por otro lado, el teorema de circulaciòn de Helmholtz es tambièn vàlido: los vòrtices son indestructibles.

Si el tiempo es incorporado como una coordenada màs del espacio de fase, formando el espacio de estados, se pueden parametrizar las ecuaciones canònicas respecto a un paràmetro ; la consecuencia de esta parametrizaciòn es volver conservativos todos los sistemas: la energìa es el momento del tiempo, es decir, es tan sòlo un momento màs; y el hamiltoniano generalizado K obtenido a partir de la parametrizaciòn, y definido por

$$A = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \left(\sum_{i=1}^{m+1} p_i q_i' - \lambda K \right) d\tau$$

es independiente de τ, con lo que el sistema se vuelve conservativo respecto a τ.

En todo caso, el problema continùa: las ecuaciones canònicas tampoco tienen un mètodo de integraciòn directo. Sin embargo, existe un mètodo sistemàtico que reduce el problema de integraciòn a la simple diferenciaciòn y sustituciòn de variables. Este mètodo de transformaciòn de coordenadas fue desarrollado sobre todo por Jacobi, aunque Hamilton y otros contribuyeron algunos resultados.

Jacobi formulò la teorìa general de transformaciones canònicas, definiendo èstas como las transformaciones de coordenadas en el espacio de fase que preservan las ecuaciones canònicas. La teorìa es completamente matemàtica: el problema del movimiento queda ignorado, el tiempo no aparece por ningùn lado como variable independiente de la cual las coordenadas y momentos son funciòn, y todo transcurre en el espacio de fase. Sin meternos en honduras, trataremos de dar una idea de esta teorìa a vuelapluma, ya que sus resultados son interesantes desde el punto de vista del movimiento del fluìdo en el espacio de fase.

Las transformaciones canònicas pueden ser obtenidas a partir de una funciòn generadora; sin embargo, las fòrmulas obtenidas a partir de èsta no dan las nuevas coordenadas en funciòn de las antiguas, ni viceversa; en lugar de ello, obtenemos una representaciòn implìcita: los momentos nuevos y antiguos se expresan en tèrminos de las coordenadas nuevas y viejas:

$$\left.\begin{aligned} p_i &= \frac{\partial S}{\partial q_i} \\ P_i &= -\frac{\partial S}{\partial Q_i} \end{aligned}\right\} \ldots\ldots\ldots \quad (8.3)$$

Se puede demostrar que una transformaciòn canònica deja los parèntesis de Poisson o los de Lagrange -ambas formulaciones son equivalentes- invariantes. Alternativamente, una transformaciòn canònica tiene la propiedad de que la circulaciòn alrededor de cualquier curva cerrada en el espacio de fase es invariante. La forma implìcita de la transformaciòn impide su identificaciòn directa como canònica, sustituyendo las nuevas coordenadas en lugar de las viejas en las ecuaciones canònicas: de ahì que la prueba mediante los parèntesis de Poisson o Laplace sea fundamental.

Las transformaciones canònicas forman un grupo, por lo que su suma es tambièn una transformaciòn canònica. De esta manera, podemos imaginar transformaciones canònicas infinitesimales aplicadas continuamente para obtener una transformaciòn canònica finita: estas transformaciones canònicas infinitesimales tienen la propiedad de poder ser obtenidas de manera explìcita a partir de la funciòn generadora. Finalmente, si la funciòn generadora S depende del tiempo, se pueden obtener a partir de ella una infinidad de transformaciones canònicas infinitesimales, variando t; si S es continua, a un incremento dt del tiempo corresponden incrementos dq y dp en las coordenadas y momentos. Podemos definir a partir de $S(q_1, \ldots, q_m; Q_1, \ldots, Q_m; t)$, donde las q_i son las coordenadas originales y las Q_i las transformadas, una nueva funciòn: las ecuaciones determinativas de S citadas <<supra>> permiten escribir las Q_i en funciòn de las p_i y las q_i. Sustituyendo 8.3 en S y diferenciando respecto al tiempo obtenemos una funciòn que llamamos -B:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -B$$

Esta función B cumple las ecuaciones canónicas, donde hace el papel del hamiltoniano. En pocas palabras: los desplazamientos infinitesimales del fluído de fase representan una transformación canónica; el movimiento entero del fluído de fase puede considerarse como una sucesión continua de transformaciones canónicas. Todo el problema del movimiento del sistema mecánico se convierte en un problema de transformación; el movimiento del fluído de fase no es otra cosa que la evolución de una transformación canónica dependiente del tiempo. Así, identificando B con el hamiltoniano, obtenemos la ecuación de Hamilton-Jacobi:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + H = 0$$

Hamilton, aún sin la teoría de transformaciones canónicas, se dio cuenta de este importante resultado: si se encuentra la función generadora S, todo el problema del movimiento queda reducido a diferenciar y sustituir. Hamilton probó la existencia de una función, que él llamó función principal, que es en realidad la función generadora de una transformación canónica que convierte un estado del fluído de fase en un estado posterior; por otro lado, en el espacio de configuración la función principal de Hamilton representa la longitud de arco de la geodésica que conecta dos puntos dados.

Pero la interpretación geométrica va más allá: una solución particular S de la ecuación de Hamilton-Jacobi con un hamiltoniano conservativo tiene propiedades asombrosas. Considerada en coordenadas rectangulares, la conservación de la energía se puede escribir así:

$$\frac{1}{2m}(p_1^2 + p_2^2 + p_3^2) + V(x, y, z) = E$$

Introduciendo la función S de acuerdo a su ecuación determinativa,

$$\left(\frac{\partial S}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial z}\right)^2 = 2m\,(E - V) \dots \quad (8.4)$$

Suponemos que S es una funciòn de x, y y z, y no contiene constantes de integraciòn, por lo que es una soluciòn particular. Nuevamente, en virtud de las ecuaciones determinativas, podemos escribir

$$\vec{P} = \nabla S$$

y ya que el momento $\vec{P}$ es tangente en todo momento a la trayectoria, obtenemos que las trayectorias mecànicas son normales a superficies S = constante. A partir de esto y de 8.4, es posible construir geomètricamente las superficies S = cte, con lo que el movimiento queda determinado. Dada una superficie S = 0, la familia de trayectorias mecànicas con igual energìa total E que comienzan perpendiculares a S = 0 definen una familia infinita de superficies S = cte, a las cuales se mantienen perpendiculares.Esta propiedad es similar a la de los rayos de luz, que son perpendiculares a las superficies de onda.

Por otra parte, el principio de Huygens de la òptica geomètrica se puede escribir en forma infinitesimal por la ecuaciòn

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)^2 = \frac{n^2}{c^2}$$

La semejanza con la ecuaciòn 8.4 es asombrosa, si hacemos

$$\frac{n}{c} = \sqrt{2m\,(E-V)}$$

La funciòn ϕ corresponde completamente a la funciòn S. En òptica, representa el tiempo necesario para que la luz viaje de una superficie $\phi = 0$ al punto dado por $\phi\,(x, y, z) = C$.

Recordemos que ya Jean Bernoulli habìa comparado los fenòmenos òpticos y los mecànicos en su soluciòn del problema de la braquistocrona; la semejanza es aparente ahora en toda su magnitud. El principio de Fermat es equivalente al principio de Huygens, y de la ecuaciòn 8.4 podemos obtener el principio de Jacobi: Fermat y Jacobi son absolutamente paralelos, si hacemos la sustituciòn 8.5.

Por otro lado, recordemos que la integral de Jacobi define la acciòn; minimizar esta integral o construir las superficies S = cte. a partir de 8.4 son dos mètodos equivalentes para resolver el problema del movimiento. Si la acciòn se escribe como una funciòn del punto final x, y, z de la trayectoria, obtenemos la funciòn S. Por lo tanto, las superficies S = cte son superficies de igual acciòn: el movimiento del sistema mecànico se lleva a cabo de manera ortogonal a superficies de acciòn igual, medidas a partir de una superficie arbitraria S = 0. En òptica, el correlato està dado por superficies de igual tiempo de propagaciòn de la luz.

El principio de Huygens està basado en una teorìa oscilatoria de la luz; de la misma manera, se puede dar una interpretaciòn oscilatoria de los fenòmenos mecànicos. Sin embargo, el principio de Huygens supone longitudes de onda infinitamente pequeñas: es sòlo una aproximaciòn. En un caso màs general, aunque escalar, se debe usar la ecuaciòn de onda de Fresnel:

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\phi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} - \frac{n^2}{c^2}\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}=0$$

Fue la analogìa establecida por Hamilton y la idea de de Broglie de asociar una longitud de onda finita a toda partìcula material lo que llevò a Schrörindger, por una sencilla transformaciòn, a convertir la ecuaciòn de Fresnel en su propia ecuaciòn. Asì como la òptica geomètrica es vàlida para longitudes de onda infinitamente pequeñas, la mecànica clàsica se comporta exactamente como si la materia tuviera una longitud de onda infinitamente pequeña; los fenòmenos dinàmicos corresponden exactamente a la propagaciòn geomètrica de la luz en un medio òptico homogèneo. En el caso màs general, la funciòn ϕ representa superficies de igual fase; Schrödinger sustituyò esta funciòn de fase por la funciòn de amplitud, dada por

$$\psi = e^{-2\pi i\phi}$$

Esta transformaciòn logarîtmica genera la ecuaciòn de Schrödinger.

La geometrizaciòn de la dinàmica iniciada por Galileo se ha llevado hasta sus màximas consecuencias: el problema de resolver un sistema dinàmico es equivalente al de encontrar una geodèsica, o linea de minima longitud, en el espacio de configuraciòn. Ciertamente, estamos ya muy lejos del principio; la teorìa de Hamilton-Jacobi ha descubierto una similitud asombrosa y ha inventado un formalismo que hace abstracciòn de los problemas dinàmicos, olvidàndose de la teleologìa y la causalidad, del motor y el mòvil: el movimiento es simplemente un problema geomètrico.

La teorìa de Hamilton-Jacobi no fue sino una curiosidad matemàtica para la mayorìa de los fìsicos, hasta que Schrödinger se dio cuenta de que la analogìa mecànico-òptica iba màs lejos de lo que se habìa supuesto. El aspecto tècnico de encontrar una soluciòn de la ecuaciòn de Hamilton-Jacobi sigue sin ser trivial, por lo que la teorìa no tiene una utilidad pràctica inmediata. Pocos fueron los que se ocuparon de la teorìa despuès de Jacobi; entre ellos podemos citar a Sophus Lie, que introdujo el punto de vista de la teorìa de grupos, y Poincarè, que estudiò el problema de las invariantes integrales en relaciòn con las ecuaciones canònicas y estudiò la topologìa del espacio de configuraciòn.

Sin embargo, la teorìa de Hamilton-Jacobi sentò las bases analìticas de la moderna mecànica cuàntica; a pesar del caràcter esencialmente distinto de las coordenadas y momentos, que no son ya variables sencillas sino operadores, la mecànica cuàntica es derivable de principios variacionales. La otra gran revoluciòn fìsica del siglo XX, la relatividad, tambièn encontrò en la mecànica analìtica su formalismo. Si bien se ve obligada a modificar el lagrangiano, el principio de mìnima acciòn sigue siendo vàlido en su contexto. En particular, su independencia de los marcos de referencia y la posibilidad de parametrizar el lagrangiano en tèrminos no del tiempo, sino de una variable , hicieron que el principio de mìnima acciòn se revelara como la forma idònea de formalizar la mecànica relativista. Como dijo Planck, el mayor mèrito de Hamilton es haber resistido a las transformaciones que hicieron estremecerse el edificio de la ciencia a principios de este siglo.

Nos queda hablar de la teorìa de Noether, que revelò un aspecto màs de la riqueza del tratamiento analìticò. Noether estudiò problemas variacionales en los cuales la integral de acciòn permanece invariante respecto a un conjunto de transformaciones, aplicadas ya a las variables independientes, ya a las dependientes. Todo paramètro asociado con esa transformaciòn conduce a una ley de conservaciòn: transformar al tiempo conduce a la ley de conservaciòn de energìa, siempre que el lagrangiano sea independiente del tiempo; transformar las coordenadas rectangulares lleva a la conservaciòn del momento lineal, y transformar las coordenadas esfèricas a la conservaciòn del momento angular. En tèrminos no formales, la transformaciòn implica que es posible desplazarnos, ya sea en el tiempo o en el espacio, sin que la integral de acciòn cambie; en otras palabras, el espacio es homogèneo e isotròpico, y eso conduce a la ley de conservaciòn del momento lineal y angular; y el tiempo es tambièn homogèneo, lo que conduce a la ley de conservaciòn de la energìa. Asì, las leyes de conservaciòn de la mecànica no son sino consecuencias de la estructura del espacio y el tiempo, de las simetrìas de la Naturaleza.

3.- La Mecànica de Hertz

Gradualmente, el cosmos ordenado y acotado de Aristòteles ha ido desapareciendo ante nuestros ojos: en su lugar se encuentra un universo geomètrico, un universo homogèneo e isotròpico, donde los cuerpos no tienen un lugar natural, pero hallan su movimiento determinado por la geometrìa.

Sin embargo, hemos conservado aùn la dicotomìa entre la energìa cinètica y la potencial. Veremos ahora una tentativa por parte de Hertz de eliminar esa dicotomìa.

Aunque no tuvo consecuencias directas en el desarrollo de la mecànica, Gauss enunciò tambièn un principio, que llamò el principio de la mìnima constricciòn. Gauss derivò èste directamente del principio de D'Alambert, expresando el desplazamiento virtual como una serie de Taylor, y eliminando todos los tèrminos salvo el de segundo orden, es decir, la aceleraciòn. El principio de Gauss afirma que la variaciòn de la constricciòn de un sistema es cero, donde la constricciòn està definida por:

$$Z = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2m_i} \left(F_i - m_i A_i \right)^2$$

El principio de minimizar Z es completamante anàlogo al mètodo de mìnimos cuadrados, que el propio Gauss descubriò, analogìa de la que estaba particularmente orgulloso. En efecto, si se considera como un error la desviaciòn de la fuerza de inercia respecto de la fuerza aplicada, se puede afirmar que el sistema intenta minimizar este error a cada instante de su movimiento. Hertz reinterpretò este resultado geomètricamente en un espacio de configuraciòn euclidiano de dimensiòn 3N, donde las coordenadas estàn multiplicadas por la raìz de la masa. El punto que representa el movimiento està limitado a un subespacio, debido a las constricciones cinemàticas. Hertz afirma que la minimizaciòn de Z es equivalente al intento por parte de ese punto de reducir al màximo la curvatura de su trayectoria, de manera compatible con las constricciones cinemàticas dadas. Este es el movimiento que Hertz llamaba natural. Se puede ver en la mecànica hertziana una generalizaciòn de la ley de la inercia: el cuerpo no se mueve en lìnea recta, sino en la trayectoria màs recta posible, es decir, en la trayectoria màs semejante a la de un cuerpo libre de fuerzas.

Para Hertz, el hecho de que el cuerpo no se moviera de manera totalmente libre no habìa que buscarlo en las fuerzas, sino en la conexiòn de unas masas con otras. Hertz eliminaba por completo el concepto de fuerza de los fundamentos de su mecànica, empleàndolo si acaso solamente de manera auxiliar, como una cantidad derivada. La idea de D'Alambert da asì una vuelta de campana: en lugar de considerar la inercia como una fuerza, se consideran todas las fuerzas como resultantes de la interacciòn entre masas.

En efecto, Hertz habìa observado que los movimientos microscòpicos de la materia se pueden traducir en efectos macroscòpicos, tales como la fricciòn. La fuerza de fricciòn no es derivable de un potencial, pero concebiblemente los movimientos microscòpicos expresables en variables ignorables podrìan producir tèrminos extra en el potencial, tal como hemos visto màs arriba. Esta consideraciòn lo llevò a especular si la energìa potencial completa no serìa resultado de movimientos microscòpicos expresables en variables ignorables: toda la energìa serìa entonces realmente cinètica, y la energìa potencial no serìa màs que una convenciòn. Evidentemente, tambièn el concepto de fuerza, estrechamente ligado con la energìa potencial, desaparecerìa. En pocas palabras, Hertz tratò de llevar a cabo el programa de Descartes: una dinàmica basada ùnicamente en el espacio, la masa y el tiempo.

Este programa se quedò en esbozo; a pesar de su curiosa novedad, las matemàticas asociadas eran demasiado complejas, comparadas con las de la teorìa lagrangiana o la hamiltoniana. Sin embargo, Einstein logrò en cierta medida aplicar las ideas de Hertz a la gravitaciòn, aunque partiendo de puntos de vista completamente diferentes.

4.- La Intenciòn en la Naturaleza: una Recapitulaciòn.

Hemos analizado brevemente la mayor parte de las ideas fundamentales de la mecànica clàsica en el siglo XIX. Los principios variacionales, que estàn en la raìz de todas estas teorìas, las proveen de un asombroso punto de partida, que la mecànica newtoniana no habìa tenido. Se afirma con frecuencia que ambas formulaciones, la newtoniana y la analìtica, son equivalentes. Para serlo, cualquiera de los principios deberìa ser deducible de las leyes de Newton; esto es algo que, hasta donde sabemos, no se ha llevado a cabo satisfactoriamente. La dificultad estriba en parte en que, como hemos visto, las propias leyes de Newton estàn sujetas a diferentes interpretaciones, y la fundamentaciòn newtoniana no se acerca ni de lejos al perfecto formalismo de Lagrange o Hamilton. Por otro lado, hemos visto que los principios de Lagrange y Hamilton son vàlidos para la mecànica cuàntica y la relativista, a diferencia de las leyes de Newton. Esto nos lleva a pensar que los principios variacionales expresan una verdad màs fundamental sobre la Naturaleza que las leyes de Newton. Esta verdad, como hemos visto, fue deducida de principios metafìsicos, de la causa final y la teleologìa.

Sin embargo, la filosofía fue gradualmente desterrada del campo de la ciencia, y la mayoría de los textos de mecànica evitan ahora hablar de la famosa teleología natural. Si lo hacen, como en el caso de Sommerfeld, es ùnicamente para negar su existencia. En efecto, Sommerfeld hace notar que los principios "mínimos" bien pueden resultar en un màximo, ya que no se impone ningùn requisito en ninguno de ellos sobre la segunda variaciòn. Es decir, los principios variacionales no definen màs que una extremal, sin especificar si es màxima o mínima. La analogía mecànico-òptica tiene una consecuencia que no hemos mencionado: en la òptica, a cada fuente puntual de rayos de luz puede corresponder una imagen en la que la superficie de onda degenera en un punto o una línea. A partir de èste, no es posible hablar de un mínimo, pues no hay superficies de onda que intersectar. Anàlogamente, en una trayectoria mecànica dada puede existir un "foco cinètico", pasado el cual el principio de mínima acciòn pierde validez.

Sin embargo, no podemos estar de acuerdo con el argumento de Sommerfeld. A lo mucho, èste implica que la manera de formular los principios variacionales es incorrecta, debido a un juicio de valor; pero si reformulamos los principios hablando de extremales y no de mínimos, aunque ciertamente se pierde algo de la intuiciòn original, podemos seguir creyendo que existe una intenciòn en la Naturaleza.

En realidad, la respuesta cae fuera del àmbito de la ciencia; es, en efecto, una pregunta ontològica la que hay que responder, y la ciencia no puede proveer la respuesta. Hemos visto a lo largo de este trabajo como la filosofía ilumina, pero no determina, a la ciencia. Los conceptos fundamentales de èsta hay que buscarlos en la filosofía, y no cabe duda que en las èpocas en que los conceptos se vuelven fluídos, las èpocas de revoluciòn científica, son dadas a filosofar. Einstein, Borg, Heisenberg y Born s ensarzaron en profundas discusiones de principio; Leibniz y Newton hicieron lo propio. Sin embargo, como hemos dicho, la filosofía no determina a la ciencia. Una vez establecidos los paradigmas, la ciencia transcurre por su propio cauce, e incluso puede cambiar por sí misma el significado de sus tèrminos: Hamilton y Lagrange no eran personalidades particularmente inclinadas a la filosofía, y sin embargo cambiaron el concepto que la mecànica tenía de sí misma.

Por otra parte, la ciencia tambièn ilumina a la filosofía. El pensamiento de Descartes es inentendible sin la revoluciòn copernicana, y el de Kant pierde sentido si no lo vemos a la luz de la mecànica de Newton. Los ejemplos de inseminaciòn mutua son inacabables.

Tratemos pues, si no de dar soluciòn al problema, de iluminarlo desde el punto de vista de la física. Si bien el principio de mínima acciòn tiene un fuerte sabor teleològico, los principios diferenciales màs elementales, como el de D'Alambert y el de Gauss, no suponen màs que una tendencia inmediata, local en el tiempo. En ambos casos podemos pensar en una "correcciòn" del movimiento para compensar las fuerzas impresas. Esta intenciòn local dificilmente puede llamarse teleològica, ya que se realiza a cada instante: la finalidad es inmediata; debido a la equivalencia de estos principios con los de Maupertius, Euler y Lagrange, Hamilton y Jacobi, podemos pensar que estos ùltimos no son màs que un reflejo finito de la situaciòn infinitesimal, y que toda apariencia de teleologìa es casual. Encontramos en esto una similitud con la evoluciòn biològica: la teoria de Darwin puede concebirse como una lucha contra la intenciòn en biologìa. El reino del azar provoca la dispersiòn de caracterìsticas, y la selecciòn natural se encarga de escoger, entre todas las fortuitas posibilidades, la màs adecuada. Nuevamente, pasamos al nivel local: no hay un plan global de la Naturaleza, pero cada selecciòn implica una "decisiòn" màs o menos inmediata.

Hagamos una ùltima observaciòn: la teleologìa, tanto la leibniziana como la aristotèlica como la hegeliana, supone un juicio de valor: la tendencia es hacia algo mejor, el progreso es positivo. Pocos pensadores del siglo XX comulgarìan con esta idea: la muerte de Dios anunciada por Nietzche quitò peso filosòfico a la teleologìa, y la propia mecànica, con su explicaciòn determinista del mundo, propugnò el ascenso del materialismo. Sin duda, la materia imbuida de movimiento podrìa tener intenciòn <<per se>>, y la evoluciòn no tiene que ser calificada mediante un juicio axiològico; pero la certeza filosòfica de los pensadores de la Edad de la Razòn se ha perdido, y tendemos màs a ver las causas en el origen que en el final.

NOTAS AL CAPITULO VIII

1) Sommerfeld, 'Mechanics'.
2) Lanczos, 'The Variational Principles of Mechanics'.
3) Sommerfeld, loc. cit., p. 208.
4) Lanczos, loc. cit., p. 344.
5) Euler, citado por Mach, 'The Science of Mechanics', p. 550.
6) Lanczos, loc. cit., p. 347.

CONCLUSION

Si, como afirma el griego en el Cratilo,
el nombre es arquetipo de la cosa,
en las letras de rosa està la rosa
y todo el Nilo en la palabra Nilo.
Jorge Luis Borges

What's in a name? That what we call a rose by any other name would smell as sweet...
Shakespeare

A lo largo de este trabajo, hemos tratado de mostrar como se desarrollaron los principales conceptos de la mecànica clàsica. Estos conceptos han demostrado una sorprendente permanencia: aùn en la fìsica moderna, hablamos de momentos y energìa, de masas y de fuerzas. Bohr decia que el lenguaje de la fìsica serìa siempre irremdiablemente el lenguaje de Newton y Maxwell. Sin embargo, es inocultable que su sentido ha sufrido varias transformaciones epistemològicas durante los siglos que median entre su introducciòn y nuestros dìas. Hemos visto como la causa eficiente de Aristòteles ha oscilado, entrando al cuerpo con los nominalistas, saliendo con Descartes y Newton, entrando de nuevo con Leibniz. Hemos visto cambiar el concepto de ìmpetu, el de inercia, el de espacio y tiempo; hemos visto, en fin, cambiar el concepto de fuerza y el de energìa.

Por otra parte, nos hemos detenido con algùn detalle en la matematizaciòn de la fìsica, desde Arquìmedes hasta Hamilton y Jacobi, cuya teorìa sin duda hubiera merecido la aprobaciòn de Platòn. Esta matematizaciòn es un arma de doble filo. Su èxito en la descripciòn de los fenòmenos del movimiento està fuera de duda; sin embargo, las ecuaciones estàn ahì, con sus frìos sìmbolos, esperando que alguien las interprete. La fìsica no puede reducirse a la matemàtica, como querìa Russell: los sìmbolos que maneja estàn preñados de significados, son un continente que debe ser llenado. Parafraseando a Ortega, el tèrmino es èl y su circunstancia.

Newton nos heredò una serie de leyes y fòrmulas; pero tambièn nos heredò un significado. Ese significado es lìquido, ha ido cambiando con el tiempo. No es necesario esperar al siglo XX para revolucionar los conceptos: como una vasija que cambia su contenido, las leyes newtonianas han sufrido mùltiples transformaciones. El gran fallo de la doctrina positivista, y particularmente del positivismo lògico es no reconocer el significado, tratar los conceptos como una definiciòn operativa. Los conceptos fundamentales de la fìsica no son reducibles a nùmeros; su poder evocativo es demasiado grande. Las partìculas elementales no son matrices, como decìa Heisenberg; son algo muy real.

He aquì el valor de la metàfora. La fìsica contemporànea tal vez requiere conceptos distintos, pero es incapaz de nombrar las cosas màs que con sus nombres antiguos. El spin del electròn es un ejemplo; los colores, encantos y sabores de los quarks son otro, radicalmente distinto: en su esfuerzo por atribuir cualidades ajenas, los fìsicos se han visto obligados a asignar nombres huecos a caracterìsticas extrañas. Pero la metàfora pervive: es imposible no pensar en la realidad.

La historia de los conceptos nos da alguna luz sobre lo que supuestamente entendemos: las palabras y las cosas. Pero esta historia està indiscerniblemente ligada a la filosofìa, a una <<Weltschaaung>>, un concepciòn del mundo. A veces, las teorìas son màs inteligentes que nosotros: la analogìa òptico-mecànica de Hamilton es un ejemplo. A veces en cambio, los filòsofos son màs inteligentes: sus intuiciones pueden darnos una clave.

Newton inaugurò el mètodo axiomàtico-deductivo, a la manera de Euclides, en la fìsica: su teorìa se basaba en unos cuantos postulados y definiciones, a partir de los cuales se podìan deducir leyes que presumiblemente se aplicaban al mundo real. El mètodo newtoniano tuvo un èxito singular: no sòlo permitiò englobar los resultados ya conocidos, como la ley de caìda de los cuerpos, las leyes de las colisiones y las del movimiento planetario, sino que proveyò de explicaciòn a fenòmenos hasta entonces no explicados, y realizò predicciones que se cumplieron puntualmente: Halley pudo prever el regreso de su cometa, y la mecànica celeste, enriquecida con la teorìa de las perturbaciones de Laplace, fue capaz de predecir la existencia de tres planetas.

La formulaciòn alternativa, debida sobre todo a Euler, Lagrange, Hamilton y Jacobi, partiendo de postulados distintos, parecìa llegar a los mismos resultados. La mecànica, en sus dos formulaciones bàsicas, se convirtiò en el modelo de la ciencia, en la <<regina scientorum>>, a decir de Ortega y Gasset. Todas las ciencias fìsicas, desde la termodinàmica hasta el electromagnetismo, pasando por la hidrodinàmica y la òptica, intentaron emular la estructura teòrica de la mecànica, y buscar su justificaciòn ùltima en una explicaciòn mecànica. Este afàn reduccionista se reflejò en la obra de Boltzmann y en la de Maxwell: la mecànica estadìstica y la electrodinàmica del èter. Estas explicaciones tenìan mucho de apriorìstico: la existencia de los àtomos no estaba ni con mucho probada en tiempos de Boltzmann, y la ficciòn del èter luminìfero como un medio mecànico en el que se desplazaban las ondas de luz no tenìa ninguna base experimental. La confianza en el paradigma mecanicista habìa llevado a los cientìficos a proponer conceptos inobservables. No otro espìritu iluminò a Fermi cuando propuso la existencia del neutrino para que las leyes de conservaciòn fueran respetadas.

La influencia filosòfica de la mecànica clàsica es incalculable. Por un lado, parecìa confirmar plenamente el viejo ideal pitagòrico-platònico de la matematizaciòn; por el otro, su absoluto determinismo fue extrapolado a toda la filosofìa. El mecanicismo cartesiano exigía la existencia del espíritu; su heredero, el mecanicismo del siglo XIX, era decididamente materialista. "Majestè, je n'avais pas besoin de cette hypothese-la" contestò Laplace a Napoleòn, que le reclamaba no haber encontrado referencia alguna a Dios en su <<Mecanique Celeste>>.

En efecto, Dios no era necesario en la explicaciòn del mundo: los fenòmenos dinàmicos, y por extrapolaciòn todos los fenòmenos, ocurrían de acuerdo a leyes inmutables. Si acaso, los teístas tenían que relegar a Dios al papel de creador de las leyes; despuès de esto, Dios tenía que salir de la escena. La contribuciòn que la mecànica hizo a la doctrina materialista es pues enorme; "No hay fuerza sin materia, ni materia sin fuerza", proclamaba Ludwig Büchner. El idealismo de los padres filosòficos de la mecànica había sido olvidado. La teleología fue tambièn relegada, siendo sustituida por una confianza absoluta en el principio de la causalidad. Hagamos una salvedad: la causalidad no niega necesariamente a la teleología; recordemos la dualidad de causas en Aristòteles. Sin embargo, la causalidad mecanicista del siglo XIX era una cadena ciega y total: no había finalidades en la Naturaleza, sòlo condiciones iniciales. La cita de Laplace que mencionamos màs arriba, respecto a que una inteligencia que conociera en un momento dado todas las condiciones iniciales de todas las partículas y tuviera el suficiente poder de còmputo podría predecir completamente todo el devenir del universo, es ilustrativa de la confianza en el mecanicismo.

Causalidad y determinismo se complementaban y reforzaban mutuamente. Sin embargo, aunque las ecuaciones de la mecànica son deterministas, el elemento causal no està contenido en ellas: es sòlo una lectura. Una ecuaciòn matemàtica hace abstracciòn de la causalidad, como hemos visto. Si escribimos $F = ma$, o $T + V =$ cte, no tenemos una manera matemàtica de discernir quièn es la causa y quièn el efecto. La posibilidad de otras lecturas sería manifiesta a finales del siglo XIX, cuando Mach y los positivistas empiristas retomaron las críticas de Hume a la causalidad, sustituyèndola por una definiciòn funcional. Recalquemos este punto: para los positivistas la mecànica clàsica seguía siendo determinista, en el sentido de que una ecuaciòn diferencial de segundo orden màs dos condiciones iniciales determinan completamente el movimiento.

El materialismo mecanicista sobreviviò sin màcula hasta la dècada de los 70 del siglo pasado. Producto de la Edad de la Razòn, el materialismo mecanicista es apriorístico y racional, no empírico. La confianza del Salviati galileano en sus experimentos pensados es la prefiguraciòn de esta filosofía: el laboratorio es pràcticamente innecesario. Sin duda, lo hemos requerido al principio; pero una vez establecidas las leyes del mundo, èstas se bastan para describirlo completamente.

El caso es que el empirismo comenzò a ganar adeptos hacia 1870, en parte por las investigaciones fisiològicas y psicològicas sobre las sensaciones, en parte por el estado fluído de otras disciplinas científicas, que no participaban todavía del estado de gracia de la mecànica. El materialismo mecanicista no asignaba papel alguno al observador: su conocimiento era inmediato, debido a la razòn. De ahì que algunos pensadores, guiados por el empirismo inglès, atacaran la postura aprioristica y trataran de basar toda la ciencia en la experiencia. Mach y Avenarius son los màs acabados representantes de esta escuela. Y sin embargo, no eran los ùnicos opositores al materialismo mecanicista: Helmholtz, basàndose en sus propias investigaciones sobre la fisiologìa de los sentidos, introducirìa a la ciencia la posiciòn kantiana, que seria retomada en Magburgo por Hermann Cohen y posteriormente revisada por Ernst Cassirer.

Ni el empirismo positivista ni el neokantismo influyeron en el desarrollo de la mecànica clàsica; las formulaciones de Mach y Hertz corresponden al final de la historia de esta ciencia, y si alguna influencia tuvieron, fue màs en las teorìas que vendrìan despuès. Eso sì, ambas posturas contribuyeron una interpretaciòn distinta de la mecànica. Por ello, y porque son un resultado directo de la influencia de la mecànica newtoniana en el pensamiento filosòfico, es necesario que nos detengamos aùn un poco en ellas. Comenzaremos cronològicamente por Kant, tal vez el filòsofo que màs aprovechò los entonces recientes descubrimientos de Newton.

Kant se iniciò en la vida intelectual como cientìfico. Su preceptor, Martin Knutzen, era un newtoniano convencido, e introdujo a Kant a las ciencias exactas. En 1755, publicò una <<Theorie des Himmels>>, en donde, entre otras cosas, adelantaba la hipòtesis de la existencia de "islas" galàcticas, que fuera desarrollada despuès por Laplace. A partir de entonces, abandonò la fìsica por la filosofìa. Kant iniciò su filosofìa como una crìtica al pensamiento de Wolff, un leibniziano de formaciòn matemàtica. En efecto, Kant analizaba los juicios analìticos, y llegaba a la conclusiòn de que, siendo tautològicos, no podìan ampliar nuestro conocimiento. Por otra parte, negaba el viejo argumento cartesiano de la existencia de Dios, afirmando que la existencia no puede ser un predicado de un sujeto en un juicio analìtico. Kant atacaba los principios de Leibniz: la causalidad no se daba por el principio de razòn suficiente, ya que en un juicio sintètico sòlo la experiencia, y no el principio de identidad o el de no contradicciòn puede dar valor de verdad o falsedad al juicio. La causalidad igualmente no podìa provenir de ningùn principio: sòlo de la experiencia.

Respecto al espacio, Kant tomò originalmente partido por Leibniz, pero al fin se decidiò por el espacio absoluto newtoniano: el espacio es un ente real, no una construcciòn ideal, que si no es un objeto de experiencia, sì lo es de la sensibilidad: es decir, es intuitivo, pero no empìrico.

Kant se enfrentò al problema del conocimiento con mayor claridad que ningùn filòsofo hasta entonces. La pregunta fundamental de Kant se refiere a la posibilidad de hacer una metafìsica, y que caracterìsticas debìa tener èsta. En efecto, la cuestiòn de la filosofìa natural parecìa zanjada; pero, a juicio de Kant, faltaba una metafìsica igualmente "cientìfica". Kant se compara a sì mismo metafòricamente con Copèrnico: la epistemologìa ha sido una rama satèlite de la filosofìa; se trata ahora de poner al en el centro, para derivar de ella todos los otros problemas. La novedad del pensamiento kantiano se encuentra en la superaciòn de la vieja polèmica entre empiristas y racionalistas. Independientemente del origen del conocimiento, es un hecho incontrovertible, como lo demuestra la fìsica de Newton, que èste existe. Sin embargo el conocimiento tiene lìmites: en metafìsica es imposible acceder al conocimiento verdadero. Pero, còmo conocemos? Tal es el problema que Kant se plantea en la Crìtica de la Razòn Pura.

En este trabajo, Kant establece la cèlebre clasificaciòn de juicios, que son los componentes de nuestro pensamiento. Estos juicios se dividen en analìticos y sintèticos, <<a priori>> y <<a posteriori>>. Los juicios <<a priori>> no dependen de la experiencia, aunque pueden haber sido adquiridos mediante ella. Kant no se pregunta pues sobre el origen del conocimiento: sean innatos o provenientes de la experiencia, los juicios <<a priori>> son universales y necesarios, tales como las proposiciones matemàticas y los principios fìsicos. En cambio, el juicio <<a posteriori>> es privado, subjetivo y contingente: depende de quièn lo pronuncia. La divisiòn entre juicios analìticos y sintèticos ya ha sido analizada cuando hablamos de Leibniz. En todo caso, Kant desprecia los juicios analìticos por tautològicos: no pueden enseñarnos nada nuevo; por otro lado, los juicios sintèticos <<a posteriori>> son subjetivos, como la afirmaciòn "este cuadro es bello". De ahì que los ùnicos juicios que forman el verdadero conocimiento sean los juicios sintèticos <<a priori>>.

A diferencia de Leibniz y a semejanza de Descartes, Kant piensa que las matemàticas son sintèticas <<a priori>>. Recordemos que Leibniz habìa identificado completamente los juicios analìticos con el apriorismo, y los sintèticos con lo contingente. Kant establece una segunda distinciòn, y se aleja asì de la idea de que las matemàticas son tautològicas, una idea que serìa resucitada por los logicistas de principios de siglo.

Una vez establecida su clasificaciòn, Kant se dedica a tres problemas: investigar còmo son posibles los juicios sintèticos <<a priori>> en las matemàticas, còmo son posibles tambièn en la fìsica, y còmo dejan de ser posibles en la metafìsica.

En la parte llamada Estètica Trascendental, Kant analiza el primer problema. La estètica se ocupa para Kant del anàlisis de las sensaciones; la filosofìa trascendental tiene como objeto los principios <<a priori>> de nuestro modo de conocimiento. No es una psicologìa, que se ocupa de la conciencia subjetiva de cada individuo; su objeto de estudio es la conciencia en general.

Para Kant, el espacio y el tiempo son condiciones <<sine qua non>> del conocimiento sensible; ambos son intuiciones: se presentan inmediatamente a nuestra conciencia. En todas las sensaciones se hallan presentes el espacio y el tiempo. Por otro lado, son <<a priori>>: no podemos concebir objetos fuera del espacio, pero podemos concebir un espacio sin objetos. Anàlogamente, el devenir requiere de una nociòn previa de tiempo, pero esta nociòn no depende del devenir. Asì, Kant toma partido decidido por las ideas de Newton respecto al espacio y al tiempo. No le preocupa la existencia real de èstos; sòlo la manera como se presentan a nuestra conciencia. Las esencias, los noùmenos como dice Kant, las cosas en sì, son incognoscibles. No quiere decir que no existan; simplemente, estàn fuera de nuestra experiencia, y son por tanto imposibles de conocer. Ahora bien, como la metafìsica se ocupa precisamente de las cosas en sì, la metafìsica es imposible. Desgraciadamente, añadirìa Kant. Entre varios ejemplos de esta imposibilidad, Kant muestra la insuficiencia del Cogito cartesiano, el argumento ontològico de San Anselmo y Descartes, y la antinomia de la eternidad del mundo.

La imposibilidad de la metafìsica està en el corazòn de la dualidad kantiana: Kant no es ni totalmente idealista ni totalmente materialista. Ha llegado a una sìntesis asombrosa, conjugando escuelas filosòficas aparentemente imposibles de conjugar: el materialismo y el idealismo, el empirismo y el racionalismo. La razòn pura està limitada a emitir juicios de lo que conoce sensorialmente: està limitada a los fenòmenos, las realidades sensibles, las experiencias percibidas. No conocemos las cosas en sì, sino lo que percibimos de las cosas.

En lugar de partir de la duda absoluta, que segùn Kant no conduce a nada, nuestro pensador sienta su filosofìa en varios supuestos; el mètodo trascendental no exige un conocimiento absoluto primero, sino cuatro axiomas evidentes: la existencia de conocimientos universales y objetivos, la existencia de ciencias universales y objetivas, la convicciòn de que el apriorismo implica la necesidad, y el hecho de que la experiencia no es un montòn desordenado de sensaciones, sino que implica la actividad ordenada de la sensibilidad y la razòn.

En efecto, la sensibilidad no basta: hay que aunar la razòn a ella. En primer lugar, recibimos representaciones, que la estètica estudia; en segundo, formulamos juicios respecto a las representaciones, a los conceptos: estos juicios son estudiados en toda su pureza por la lògica trascendental.

Todos los juicios -y no se olvide que seguimos hablando, al igual que en Leibniz, de proposiciones sujeto-predicado-, son clasificados por Kant segùn su cantidad, su cualidad, su relaciòn y su modalidad. En la cantidad, tenemos juicios universales (todo S es P), particulares (algùn S es P) y singulares (este S es P). En la cualidad, afirmativos (todo S es P), negativos (ningùn S es P) e infinitos (todo S es no P). Por relaciòn, tenemos categòricos (todo S debe ser P), hipotèticos (si S, entonces P) y disyuntivos (S es o P o Q). Por modalidad, existen juicios problemàticos (S puede ser P), asertòricos (S es probablemente P) y apodìcticos (S es necesariamente P).

A cada uno de estos juicios corresponde una categoria, o concepto puro, que subyace al juicio y es <<a priori>>. Por ejemplo, en el juicio hipotètico tenemos la categoria de causalidad. Para completar nuestra enumeraciòn, en el orden dado anteriormente corresponden a cada juicio las siguientes categorìas: unidad, pluralidad y totalidad; realidad o esencia, negaciòn y limitaciòn; posibilidad, existencia y necesidad, con sus respectivas negaciones; sustancia y accidente, causalidad y reciprocidad entre agente y paciente.

Segùn Kant, para poder emitir un juicio es necesaria la categorìa correspondiente. Cuàl es el origen de estas categorìas? A Kant no le preocupa; pueden ser innatas o adquiridas. Pero la conjunciòn de las intuiciones de espacio y tiempo y las categorias aplicadas a los fenòmenos producen el conocimiento: la razòn sin fenòmenos serìa vacìa, como lo es en metafìsica; la experiencia sin razòn serìa caòtica.

Kant establece una correspondencia absoluta, que Hume habìa negado, entre la idea y la cosa. Esta relaciòn se establece en el tiempo: la existencia se da en un momento determinado, la sustancia es permanencia en el tiempo, la causalidad es la "sucesiòn de la diversidad".

El apriorismo del espacio implica la verdad universal de la geometrìa; el del tiempo, la verdad universal de la mecànica. Asì, Kant pone al mismo nivel la fìsica newtoniana y la hasta entonces reina de las ciencias: la geometrìa. Por otra parte, para Kant el tiempo tiene preeminencia sobre el espacio: èste se refiere a un subconjunto de fenòmenos, mientras que aquèl se aplica a todos los fenòmenos. Kant està pensando en los fenòmenos de la conciencia, que no se dan en el espacio, pero sì en el tiempo.

Pero hay otra conclusiòn kantiana atingente a nuestro trabajo: el problema de la teleologìa. En efecto, Kant deja fuera de sus categorìas a la teleologìa, incluyendo sin embargo la causalidad. La teleologìa es un fenòmeno psicològico: como nuestras acciones tienden a un fin, nos es natural transplantar esta finalidad a la Naturaleza. Kant, siguiendo su estilo, no afirma que los fines no existan en la Naturaleza; sencillamente, cree que la teleologia es, independientemente de la realidad, un fenòmeno de la razòn, sin el cual no podemos explicar satisfactoriamente el mundo. La ciencia concibe a la Naturaleza como un ser que se sirve de la causalidad mecànica para realizar sus fines: teleologia y causalidad no son pues, como no lo eran para Liebniz, irreconciliables.

Los neokantianos comandados por Cohen retomaron la teorìa de las sensaciones, afirmando que la ciencia tiene como misiòn descubrir las estructuras de las sensaciones: el conocimiento que la ciencia ofrece del "mundo externo" es visto como una red de relaciones lògicas que no son dadas sino ejemplificadas en la experiencia sensorial; las estructuras no corresponden a la cosa en sí, sino a los fenómenos. Estas estructuras tenían el absolutismo de las formas de Platón: el conocimiento científico es absoluto.

En cambio, Mach refutó el apriorismo, afirmando con Hume que toda la ciencia no es más que una reflexión conceptual acerca de hechos, cuyos elementos son contenidos de conciencia que se nos dan por la sensación. Todos los enunciados científicos deben ser verificables empíricamente, y no hay lugar para conceptos <<a priori>>. Como hemos visto, esta posición hizo a Mach rechazar los conceptos de materia, espacio y tiempo newtonianos, abominar del atomismo y del éter, y negar la causalidad.

Paralelamente, Mach consideraba que la ciencia era únicamente un lenguaje "económico": una manera simple de referirse a la realidad, una lengua compartida. El mismo hecho puede describirse de varias maneras, y diversos hechos pueden ser descritos de maneras distintas; el valor de la síntesis newtoniana era para Mach su economía: la posibilidad de aplicar el mismo mecanismo a diversas situaciones. No de otra manera valoraba Mach la mecánica lagrangiana: su economía era mayor que la newtoniana, pero no añadía a ésta nada nuevo. La posición de Mach fue adoptada por varios prominentes científicos. Henri Poincaré, entre otros, la hizo suya, observando entre otras cosas que leyes como la de conservación de la energía no eran más que convenciones.

A finales del siglo pasado en las universidades alemanas, el mecanicismo materialista había perdido terreno de manera notable frente al neokantismo, que era la postura predominante, y frente al neopositivismo de Mach. La estructura piramidal de las universidades, donde un departamento científico estaba organizado alrededor de un solo catedrático, que dominaba a sus subalternos con puño de hierro, hacía que cada escuela tomase un partido filosófico definido. Al sobrevenir la revolución científica de principios de siglo, ésta fue recibida fervorosamente por los machianos, concentrados sobre todo en Götingen, Berlín y el Instituto del Kaiser Wilhelm, como prueba de su epistemología. Por el contrario, las escuelas neokantianas y mecanicistas, Heidelberg, Würzberg, Jena y Munich, se opusieron ferozmente a las nuevas teorías. Y sin embargo, el neopositivismo de Mach era insuficiente para enfrentarse a la revolución: el empirismo había fallado, al confirmar una y otra vez a Newton. De esta manera, la crisis científica produjo una crisis filosófica. La nueva filosofía de la ciencia descartó el mecanicismo, y se centró por un lado en el neokantismo de Cassirer, y por el otro, con mucha mayor influencia, en el positivismo lógico del círculo de Viena de Moritz Schlick y la escuela de Berlín de Hans Reichenbach.

El positivismo lógico se alimentaba por un lado de Mach, por el otro de los desarrollos lógicos de Frege y Russell. En ambos grupos, el círculo de Viena y la escuela de Berlín, se hizo hincapié en la posición antimetafísica y en la verificabilidad experimental; sin embargo, concedieron que Mach había ido demasiado lejos al no asignar un papel a las matemáticas. Esto fue subsanado por los positivistas lògicos mediante la introducción de convenciones y definiciones: la regularidad fenomènica debe estar caracterizada por medio de tèrminos teòricos, que son definidos explicitamente en tèrminos de fenòmenos, y no son sino abreviaciones de los mismos. Por ejemplo, el tèrmino teòrico masa no es sino una cantidad numèrica obtenida al realizar una cierta medida en ciertos fenòmenos. La definiciòn de tèrminos teòricos capacita a la teorìa a ser expresada en forma matemàtica. Por otro lado, influidos por Russell, estaban convencidos de la posibilidad de formular toda la teoria en tèrminos lògicos. Esta postura llevò finalmente a lo que Toumlin llama la Concepciòn Heredada: una doctrina segùn la cual toda teoria cientifica debe ser axiomatizada por medio de leyes que especifican relaciones entre tèrminos teòricos. La teoria tiene ademàs tèrminos lògico-matemàticos y tèrminos observacionales. La primera versiòn de esta postura fue dada a conocer por Carnap en 1923.

El cientismo del circulo de Viena llevò a pensadores como Wittgenstein a extrapolar la Concepciòn Heredada a todo el discurso, incluida la filosofìa: en efecto, la Concepciòn Heredada se convertirìa en una doctrina general de la significaciòn cognitiva. El ùnico discurso significativo es el hecho en tèrminos de lenguaje fenomènico o en tèrminos teòricos. En pocas palabras, "el significado de un tèrmino estriba en su mètodo de verificaciòn".

La Concepciòn Heredada se topò casi desde un principio con problemas de fondo: su formulaciòn lògica adolecìa de graves fallas, sobre todo en lo correspondiente a la definiciòn de tèrminos teòricos y en el uso del condicional lògico. En efecto, este ùltimo no es equivalente al condicional contrafàctico, que es el que realmente se emplea en las ciencias. En el primero, P => Q, el condicional es verdadero siempre que P sea falso, independientemente de Q; pero esto no ocurre con el condicional contrafàctico. Por ejemplo, si se afirma "si este cristal fràgil se cayera, se romperìa" la implicaciòn lògica es vàlida para todo cristal que no se caiga, y "si este cristal fràgil se cayera, no se romperìa" es igualmente vàlido para cualquier cristal que no se caiga. Desde luego, desde el punto de vista de la ciencia natural esto es intolerable.

Por otro lado, la interpretaciòn instrumentalista de la Concepciòn Heredada implicaba que los tèrminos teòricos son prescindibles, pues no son màs que convenciones. Y sin embargo, no era posible formular la teorìa sin ellos. Esto se debe a que el significado de esos tèrminos, como hemos dicho <<supra>>, no es completamente observacional.

Este tipo de problemas llevaron a los preconizadores de la Concepciòn Heredada a modificar gradualmente su posiciòn, hasta llegar a una versiòn un tanto atenuada, que fue formulada por Carnap y Hempel a finales de los cincuentas. Entrar en detalle en la crìtica de esta concepciòn està fuera del alcance de este trabajo; sin embargo, la inadecuaciòn del marco axiomàtico de la

Concepción Heredada a teorías científicas reconocidas, tales como la evolución de Darwin, llevó a varios filósofos a oponerse a ella. El positivismo lógico fue atacado desde varios bandos, pero muy especialmente desde las ciencias sociales, que quedaban reducidas a una categoría subcientífica de acuerdo a las interpretaciones del mismo. Por otra parte, la quiebra del proyecto logicista a manos de Gödel restó credibilidad al positivismo lógico, y varios pensadores atacaron a la Concepción Heredada a partir de sus inconsistencias lógicas. Finalmente, los historiadores de la ciencia se opusieron a la posición de Reichenbach, sintomática de los positivistas, según la cual la filosofía no debía preocuparse por el contexto de descubrimiento, sino sólo del contexto de justificación.

Esto último dio lugar a los llamados análisis <<weltschauung>>, en los que la historia de la ciencia es una herramienta fundamental para la filosofía de la misma. En estos análisis, es imposible desligar la teoría del substrato intelectual de la época, de la concepción del mundo. Algunos exponentes de esta posición son Toulmin, Kuhn, Hanson y Feyerabend. El positivismo lógico también fue atacado desde una concepción realista, racionalista y lógica por Karl Popper. Finalmente, se encuentran las críticas de la escuela epistemológica francesa, representada por Gaston Bachelard, Georges Canguilhem y Alexandre Koyrè.

El análisis respectivo de todas sus posiciones llevaría indudablemente otro tomo como éste, si no es que más. En todo caso, esta breve síntesis viene a cuento para coronar este trabajo.

Evidentemente, he tomado una posición <<weltschauung>> a lo largo de este trabajo, tratando de desenredar el hilo de los conceptos como han ido ocurriendo en la Historia, en la medida en que esto es posible. No he asumido un partido particular, como no sea el antipositivista: he tomado prestados conceptos de Kuhn, Bachelard, Foucault y Feyerabend.

El positivismo, a pesar de su quiebra como filosofía totalizadora, sigue influyendo poderosamente en la mente de los físicos actuales. La mayor parte de ellos aceptan las tesis positivistas de buen grado, sin dedicarles siquiera una reflexión. La Concepción Heredada está viva, si bien se encuentra matizada por una interpretación realista en la mayoría de los científicos: los excesos de Schlick, Wittgenstein o Heisenberg han sido atenuados, pero de todas maneras el positivismo reina señero.

Se nos ha convencido de que la filosofía es un oficio de vagabundos: una extraña y mística disciplina, sin ningún valor real. Metafísica es una mala palabra, y la ciencia moderna está llena de preguntas "que no tienen sentido". Pero no es cierto. Lo que no tiene sentido es decir que una pregunta no tiene sentido.

No podemos dejar que la belleza formal de las teorías nos deslumbre, olvidando los contenidos; y en tanto pensamos en èstos, estamos filosofando. Es nuestro destino: estamos condenados a interpretar. Estamos condenados a filosofar.

APENDICE

LA EQUIVALENCIA DE LOS PRINCIPIOS VARIACIONALES

1.- Deducciòn del principio de Hamilton a partir del principio de D'Alambert.

El principio de D'Alambert trabaja con una diferencial no integrable; el trabajo realizado por las fuerzas inerciales no es monogênico, es decir, derivable de una sola funciòn. Hamilton encontrò la manera de transformar el principio a una forma monogênica.

Primero multiplicamos w por dt e integramos entre $t = t_1$ y $t = t_2$:

$$\int_{t_1}^{t_2} \overline{\delta w}\, dt = \int_{t_1}^{t_2} \sum \left[\vec{F_i} - \frac{d}{dt}(m_i \vec{v_i}) \right] \cdot \delta \vec{R_i}\, dt$$

Separamos el lado derecho en dos partes. La primera parte se puede escribir como

$$\int_{t_1}^{t_2} \sum \vec{F_i} \cdot \delta \vec{R_i}\, dt = - \int_{t_1}^{t_2} \delta V\, dt = - \delta \int_{t_1}^{t_2} V\, dt$$

siempre que la funciòn trabajo sea independiente de las velocidades. En la segunda parte, se lleva a cabo una integraciòn por partes:

$$- \int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dt}(m_i \vec{v_i}) \cdot \delta \vec{R_i}\, dt = - \int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dt}(m_i \vec{v_i} \cdot \delta \vec{R_i})\, dt + \int_{t_1}^{t_2} m_i \vec{v_i} \cdot \frac{d}{dt}(\delta \vec{R_i})\, dt$$

El primer tèrmino de esta parte es integrable y obtenemos el tèrmino de frontera:

$$- \left[m_i \vec{v_i} \cdot \delta \vec{R_i} \right]_{t_1}^{t_2}$$

mientras que la segunda parte se puede escribir

$$\int_{t_1}^{t_2} m_i \vec{v_i} \cdot \frac{d}{dt} \delta \vec{R_i}\, dt = \int_{t_1}^{t_2} m_i \vec{v_i} \cdot \delta \vec{v_i}\, dt$$

$$= \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} m_i \ \delta (\vec{v_i} \cdot \vec{v_i})\, dt = \frac{1}{2} \ \delta \int_{t_1}^{t_2} m_i \vec{v_i}^{\,2}\, dt$$

Sumando sobre todas las partìculas, obtenemos:

$$\int_{t_1}^{t_2} \overline{\delta w}\, dt = \delta \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2} \sum m_i v_i^2\, dt - \delta \int_{t_1}^{t_2} V dt - \left[\sum m_i \vec{v_i} \cdot \delta \vec{R_i} \right]_{t_1}^{t_2}$$

Introducimos la energìa cinètica de acuerdo a su definiciòn, y hacemos L = T − V. Con esto, y con la condiciòn auxiliar de que δR_i se anule en los lìmites, obtenemos finalmente

$$\int_{t_1}^{t_2} \overline{\delta w}\, dt = \delta \int_{t_1}^{t_2} L\, dt = \delta A$$

Aplicando el principio de D'Alambert, tenemos

$$\delta A = 0 \cdot$$

que es el principio de Hamilton.

El quid del principio, como hemos visto, es la condición de que los desplamientos virtuales se anulen en los límites: la posición del sistema mecànico debe estar determinada en los límites, y no se admiten variaciones en ellos.

La otra condición que hemos impuesto es que la energía potencial no dependa de las velocidades; en este àmbito de aplicación, ambos principios son equivalentes: en efecto, el razonamiento es fàcilmente invertible. Sin embargo, el principio de D'Alambert es màs general: no requiere ninguna condición sobre las fuerzas aplicadas o inerciales.

A partir del principio de Hamilton es posible obtener las ecuaciones diferenciales que minimizan la integral. Considerando un sòlo grado de libertad, tomamos la variación de A:

$$\delta A = \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{\partial L}{\partial q} \delta q + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q} \right) dt = 0 \cdot$$

Integrando por partes el segundo tèrmino, obtenemos:

$$\delta A = \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta q \right]_{t_1}^{t_2} + \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) \delta q \, dt = 0$$

El primer tèrmino se anula en virtud de las condiciones sobre los límites de integración del principio de Hamilton. Para que el segundo término se anule para todo valor de q, es necesario que el integrando se anule. Por lo tanto, obtenemos la ecuaciòn de Euler-Lagrange:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial L}{\partial q} = 0$$

Este razonamiento es fàcilmente generalizable a N grados de libertad.

2.- La equivalencia del principio de Hamilton y el de Jacobi para sistemas conservativos

Considerando un sistema conservativo, imaginamos que todas las coordenadas q_k y t estàn dadas en tèrminos de un paràmetro τ. El sistema tiene pues n + 1 grados de libertad. Denotando la derivaciòn respecto a τ con una prima, la integral de Hamilton se escribe entonces:

$$A = \int_{\tau_1}^{\tau_2} L\left(q_1, \ldots, q_m ; \frac{q_1'}{t'}, \ldots, \frac{q_m'}{t'}\right) t' \, d\tau$$

El lagrangiano es independiente del tiempo, pues el sistema es conservativo: t es una variable ignorable. A partir de esto, podemos obtener el momento asociado con t, el cual debe ser constante:

$$\begin{aligned} p_t &= \frac{\partial (L t')}{\partial t'} = L - \left(\sum_{i=1}^{m} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \frac{q_i'}{t'^2}\right) t' \\ &= L - \sum_{i=1}^{m} p_i \dot{q}_i \\ &= -\left(\sum_{i=1}^{m} p_i \dot{q}_i - L\right) \end{aligned}$$

La expresiòn final entre parèntesis es la energia total del sistema Λ, con lo que llegamos a que el momento asociado al tiempo es el negativo de la energia. Si el sistema es conservativo, $p_t = -E = cte$. Modificamos el lagrangiano para reducir el problema:

$$\bar{L} = Lt' - p_t t' = \sum_{i=1}^{m} p_i \dot{q}_i t'$$

La integral de Hamilton se convierte en

$$\bar{A} = \int_{\tau_2}^{\tau_1} \sum_{i=1}^{m} p_i \dot{q}_i t' \, d\tau$$

Pero la sumatoria no es otra cosa que 2T, por lo que

$$\bar{A} = 2 \int_{\tau_1}^{\tau_2} t' T \, d\tau \qquad (1)$$

Recordemos que el punto C en el espacio de configuraciòn representa a todo el sistema, y que la energia cinètica del sistema puede escribirse como la energia cinètica de una sola particula de masa 1 en el espacio de configuraciòn:

$$T = \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{d}s}{dt} \right)^2$$

donde ds es el elemento de distancia en el espacio de configuraciòn. Escribiendo esta expresiòn en tèrminos de τ:

$$T = \frac{1}{2} \left(\frac{ds}{d\tau} \right)^2 \Big/ t'^2$$

Por lo que, a partir del principio de conservaciòn de la energìa,

$$t' = \frac{1}{\sqrt{2(E-V)}} \; \overline{\frac{ds}{d\tau}}$$

Si sustituimos t' en el integrando de (1), y ademàs hacemos T = E − V, obtenemos finalmente

$$\overline{A} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \sqrt{2(E-V)} \; \overline{\frac{ds}{d\tau}} \, d\tau$$

$$= \int_{\tau_1}^{\tau_2} \sqrt{2(E-V)} \, \overline{ds}$$

que es el principio de Jacobi.

El principio de mìnima acciòn usado por Euler y Lagrange es igual a (1), pero usando el tiempo en lugar de τ:

$$\overline{A} = 2 \int_{t_1}^{t_2} T \, dt$$

Tanto Euler como Lagrange emplearon la conservaciòn de la energìa como condiciòn auxiliar, en lugar de eliminar la energìa como momento asociado con el tiempo. En particular, Lagrange usò su mètodo de multiplicadores indeterminados:

$$\overline{\overline{A}} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \left[2\frac{T'}{t'} + \lambda \left(\frac{T'}{t'^2} + V \right) \right] d\tau$$

Minimizando respecto a t',

$$-\frac{2T'}{t'^2} - \frac{2\lambda T'}{t'^3} = 0$$

con lo que $\lambda = -t'$. Por lo tanto,

$$\bar{\bar{A}} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \left(\frac{T'}{t'^2} - V \right) t' \, d\tau = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (T - V)\, t' \, d\tau$$

que no es otra cosa que el principio de Hamilton.

BIBLIOGRAFIA

ARISTOTELES, "Obras Filosòficas", en la colecciòn Los Clàsicos, Jackson, Mèxico 1973.

BACHELARD, Gaston. "El Nuevo Espìritu Cientìfico", Nueva Imagen, Mèxico 1981.

BELAVAL, Yvon. "La Filosofìa Alemana de Leibniz a Hegel" en Historia de la Filosofìa, Siglo XXI, Mèxico 1977.

BERKELEY, George. "Tres Diàlogos entre Hilas y Filonus", Aguilar, Buenos Aires 1978.

BITSAKIS, Eftichios. "Fìsica Contemporànea y Materialismo Dialèctico", Ediciones de Cultura Popular, Mèxico 1975.

BOYER, Carl B. "A History of Mathematics", Wiley, New York 1968.

BUNGE, Mario. "Causalidad", EUDEBA, Buenos Aires 1978.

COPI, Irving. "Lògica", EUDEBA, Buenos Aires 1972.

CORNFORD, F. M. "Before and After Socrates", Cambridge University Press, New York 1932.

DESCARTES, Renè. "Discurso del Mètodo + Meditaciones Metafìsicas", Porrùa, Mèxico 1977.

EISENBUD, Leonard. "On the Classical Laws of Motion", Fotocopia.

FEYNMAN, Richard. "El Caràcter de la Ley Fìsica", Antoni Bosch, Barcelona 1980.

FOUCAULT, Michel. "El Nacimiento de la Clìnica", Siglo XXI, Mèxico 1986.

FOUCAULT, Michel. "Las Palabras y las Cosas", Siglo XXI, Mèxico 1981.

FRAZER, James. "La Rama Dorada", Fondo de Cultura Econòmica, Mèxico 1982.

GARCIA BACCA, Juan. "Los Presocràticos", Fondo de Cultura Econòmica, Mèxico 1980.

GOLDSTEIN, A. "Mecànica", UTEHA, Mèxico 1970.

GRANT, Edward. "La Ciencia en la Edad Media", Fondo de Cultura Econòmica, Mèxico 1971.

GUTHRIE, William K. C. "Los Filòsofos Griegos", Fondo de Cultura Econòmica, Mèxico 1980.

HECHT, E. y ZAJAC, A. "Optics", Addison-Wesley, Reading 1974.

HEMPEL, Carl G. "Filosofìa de la Ciencia Natural", Alianza Universidad, Madrid 1984.

HOLTON, Gerald. "Isaac Newton visto por Frank E. Manuel", en Ciencia y Desarrollo, Mèxico, no. 37 (marzo-abril 1981).

HOLTON, Gerald. "La Imaginaciòn Cientìfica", Fondo de Cultura Econòmica-CONACYT, Mèxico 1985.

HUME, David. "Investigaciòn sobre el Conocimiento Humano", Alianza Editorial, Madrid 1981.

KANT, Inmanuel. "Prolegòmenos", Aguilar, Buenos Aires 1980.

KEYNES, John M. "Newton, el Hombre". En Ciencia y Desarrollo, Mèxico, no. 38 (mayo-junio 1981).

KOESTLER, Arthur. "Los Sonàmbulos", CONACYT, Mèxico 1981.

KOYRE, Alexandre. "Estudios Galileanos", Siglo XXI, Mèxico 1985.

KOYRE, Alexandre. "From the Closed World to the Infinite Universe", Harper, New York 1958.

KUHN, Thomas S. "La Tensiòn Esencial", Fondo de Cultura Econòmica, Mèxico 1982.

KUHN Thomas S. "The Copernican Revolution", Harvard University Press, Cambridge 1957.

KUHN, Thomas S. "La Estructura de las Revoluciones Cientìficas", Fondo de Cultura Econòmica, Mèxico 1971.

LANCZOS, Cornelius. "The Variational Principles of Mechanics", University of Toronto Press, Toronto 1974.

LANDAU, L.D. y LIFSHITZ, E. M. "Mecànica", Revertè, Barcelona 1978.

LEIBNIZ, Gottfried Wilhelm, "Discurso de Metafìsica", Alianza Editorial, Madrid 1982.

LLOYD, Geoffrey. "Les Dèbuts de la Science Grecque", Francois Maspero, Paris 1974.

MACH, Ernst. "The Science of Mechanics", Open Court, La Salle 1960.

MONDOLFO, Rodolfo. "Heràclito", Siglo XXI, Mèxico 1981.

NEWTON, Isaac, "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica", traducciòn al inglès de Andrew Motte, University of California Press, Berkeley 1962.

ORTEGA Y GASSET, Josè. "La Idea de Principio en Leibniz", Revista de Occidente, Madrid 1967.

OYARZABAL, Juan de. "Mecànica Clàsica", Versiòn Manuscrita, Mèxico 1979.

POINCARE, Henri, "Filosofìa de la Ciencia", CONACYT, Mèxico 1981.

POPPER, Karl. "La Lògica de la Investigaciòn Cientìfica", Tecnos, Madrid 1980.

REICHENBACH, Hans. "La Filosofìa Cientìfica", Fondo de Cultura Econòmica, Mèxico 1981.

RUSSELL, Bertrand. "Exposiciòn Crìtica de la Filosofìa de Leibniz", en Obras Completas, tomo II, Aguilar, Madrid 1973.

SCHRODINGER, Erwin. " Què es una Ley de la Naturaleza?", Fondo de Cultura Econòmica, Mèxico 1975.

SOLIS, Carlos. "El Lado Oscuro de la Luz", en Quimera, Barcelona, no. 17. (marzo 1982).

SOMMERFELD, Arnold. "Mechanics", Academic Press, New York.

SUPPE, Frederick. "La Estructura de las Teorìas Cientìficas", Editora Nacional, Madrid 1979.

SYMON, Keith. "Mecànica", Aguilar, Mèxico 1968.

XIRAU, Ramòn. "Introducciòn a la Historia de la Filosofìa", UNAM, Mèxico 1976.